

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών



Αυτόνομο Σύστημα Θέρμανσης – Ψύξης
Κτηρίου Γραφείων με χρήση
Γεωθερμικής και Ηλιακής Ενέργειας

Παναγιώτης Παπαγεωργίου

Τομέας Θερμότητας

Επιβλέπων: Τζιβανίδης Χρήστος, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Θερμότητας της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Τζιβανίδη Χρήστο για την πρόσβαση στο λογισμικό TRNSYS στο οποίο βασίζεται η παρούσα εργασία καθώς και για την πολύτιμη αρωγή και καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια εκπόνησής της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και κυρίως τους γονείς μου για την πολύτιμή στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου καθώς και για το ήθος, τις αρχές και τις αξίες που μου έχουν μεταλαμπαδέσει, τα οποία θα με συνοδεύουν σε όλη την καριέρα και τη ζωή μου γενικότερα.

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.

Παναγιώτης Παπαγεωργίου

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	3
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	7
ABSTRACT	8
ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ	11
1. Εισαγωγή.....	14
1.1 Ενέργεια στον 21 ^ο αιώνα	14
1.2: Τωρινή κατάσταση των ΑΠΕ	18
1.3: ΑΠΕ στην ΕΕ και στην Ελλάδα	23
1.4: Κατανάλωση ενέργειας στον κτηριακό τομέα	28
2. Γεωθερμική Ενέργεια.....	31
2.1: Εισαγωγή.....	31
2.2: Δομή του εσωτερικού της Γης.....	32
2.3: Γεωθερμικά πεδία	34
2.4: Γεωθερμική Ενέργεια στην Ελλάδα	39
2.5: Εκμετάλλευση γεωθερμικής ενέργειας	41
3. Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας	44
3.1: Εισαγωγή	44
3.2: Βασικές συνιστώσες συστημάτων εκμετάλλευσης αβαθούς γεωθερμίας.....	46
3.2.1: Εδαφικά συνδεδεμένες αντλίες θερμότητας (GCHP).....	46
3.2.2: Αντλίες θερμότητας υπόγειου νερού (GWHP).....	47
3.2.3: Αντλίες θερμότητας επιφανειακού νερού (SWHP)	48
3.3: Σύγκριση των συστημάτων GCHP και GWHP	49
4. Ηλιακή Ενέργεια.....	51
4.1: Ηλιακή ακτινοβολία	51
4.2 Βασικά μεγέθη ηλιακής ακτινοβολίας.....	53
4.2.1: Ηλιακή Σταθερά – Ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας.....	53
4.2.2: Ηλιακή απόκλιση	53
4.2.3: Ηλιακός χρόνος.....	53
4.2.4: Γωνίες Ηλίου.....	54
4.2.5: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας	56
4.3 Εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας	58
4.4 Ανασκόπηση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της ηλιακής ενέργειας.....	60
5. Φωτοβολταϊκά	61

5.1: Εισαγωγή	61
5.2: Αρχή λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Στοιχείων	62
5.3: Τύποι φωτοβολταϊκών κελιών	67
5.4: Ηλεκτρική ανάλυση Φ/Β κελιών και πλαισίων	68
5.5: Βαθμός απόδοσης Φ/Β	71
6. Το Πρόγραμμα Προσομοίωσης TRNSYS	72
6.1: Εισαγωγή στο TRNSYS	72
6.2: Στούντιο Προσομοίωσης (Simulation Studio)	74
6.3: Περιβάλλον επεξεργασίας πολυζωνικού κτηρίου (TRNBuild)	81
6.4: Εφαρμογές TRNEdit και TRNSED	84
7. Προσομοίωση του κτηρίου γραφείων στο TRNSYS	85
7.1: Εισαγωγή	85
7.2: Ορισμός του κτηρίου γραφείων στο TRNSYS	86
7.2.1: Δημιουργία κτηρίου με το Building Wizard του TRNSYS	86
7.2.2: Ορισμός επιφανειών (διάφανων και μη) βάσει των ορίων του KENAK	94
7.2.3: Καθορισμός συνθηκών στους χώρους του κτηρίου	97
7.2.4: Υπολογισμός φορτίων	98
8. Διαμόρφωση συστημάτων κτηρίου	108
8.1: Σύστημα Θέρμανσης - Ψύξης	108
8.1.1: Πρωτεύων κύκλωμα	109
8.1.2: Δευτερεύων κύκλωμα	118
8.1.3: Η/Μ χώρος	133
8.2: Φωτοβολταϊκά	135
8.3: Inverter και μπαταρία	139
9. Αποτελέσματα – Εκτίμηση οικονομικού κόστους	145
9.1: Αποτελέσματα	145
9.1.1: Θερμοκρασίες χώρων	145
9.1.2: Κατανάλωση και αποθήκευση ενέργειας	154
9.1.3: Μεταβολή θερμοκρασίας εδάφους σε βάθος χρόνου	165
9.2: Οικονομικό κόστος	169
9.2.1: Οικονομικά μεγέθη διάταξης	169
9.2.2: Βασικά συμπεράσματα από την οικονομική ανάλυση	175
10. Ενδεχόμενο ενεργειακής αυτονομίας όλου του κτηρίου	177
10.1: Αναγκαίες τροποποιήσεις για την επίτευξη αυτονομίας όλου του κτηρίου	177
10.2: Διερεύνηση οικονομικής βιωσιμότητας	185
11. Σύνοψη αποτελεσμάτων – Βασικά συμπεράσματα	190

11.1: Ανασκόπηση βασικών σημείων	190
11.1.1: Ανακεφαλαίωση.....	190
11.1.2: Ανασκόπηση βασικών αριθμητικών αποτελεσμάτων	191
11.1.3: Βασικά συμπεράσματα	192
11.2: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα επί του θέματος	194
12. Κατάλογος Σχημάτων	195
13. Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	196
14. Κατάλογος Πινάκων.....	198
15. Κατάλογος Εικόνων	199
16. Αναφορές – Βιβλιογραφία.....	203
Αναφορές	203

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής γίνονται πλέον ολοένα και πιο εμφανείς, με τα ακραία καιρικά φαινόμενα να τείνουν να αποτελέσουν τον κανόνα και όχι την εξαίρεση. Στα πλαίσια των παγκόσμιων πρωτοβουλιών για την αντιμετώπιση των αρνητικών συνεπειών αυτού του φαινομένου συναντάται η προσπάθεια αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων, κινητήριων μοχλών της οικονομίας του προηγούμενου αιώνα, με νέες, φιλικότερες προς το περιβάλλον πηγές ενέργειας. Το συγκεκριμένο εγχείρημα επαφίεται κατά κύριο λόγο στους ώμους των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η προσπάθεια μετατόπισης του βάρους της παραγωγής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο προς τις ΑΠΕ έχει δώσει τεράστια ώθηση στην ανάπτυξή τους και την βελτίωση της τεχνολογίας τους. Με την πλέον υπάρχουσα τεχνολογία παρέχεται η δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ενός κτηρίου τοπικά, μειώνοντας κατά αυτό τον τρόπο τη ζήτηση ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο της χώρας, ελαχιστοποιώντας παράλληλα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κτηρίου. Σύμφωνα με στοιχεία της Κομισιόν, η μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας σε ένα κτήριο, περί τα δύο τρίτα (2/3), αφορά την ψύξη και τη θέρμανσή του, με τον κτηριακό τομέα στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) να είναι υπεύθυνος σχεδόν για το 40% της κατανάλωσης ενέργειας και το ένα τρίτο (1/3) των εκπομπών CO₂. Αυτονόμηση των ενεργοβόρων συστημάτων των κτηρίων, με παραγωγή θέρμανσης και ψύξης αποκλειστικά από φιλικές προς το περιβάλλον διεργασίες, το οποίο αποτελεί και το στόχο της παρούσας εργασίας, θα συμβάλλει θετικά στην προσπάθεια εξοικονόμησης ενέργειας και αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετάται ένα κτήριο γραφείων με στόχο την πλήρη αυτονομία του συστήματος θέρμανσης και ψύξης του. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται φωτοβολταϊκά (Φ/Β) στοιχεία τα οποία παρέχουν την απαιτούμενη ενέργεια σε γεωθερμικές αντλίες θερμότητας οι οποίες αξιοποιούν τη θερμότητα του υπεδάφους. Επειδή τα Φ/Β παράγουν ενέργεια μόνο τις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια, για να υπάρχει αυτονομία του συστήματος, συνδυάζονται με συστοιχία μπαταριών. Με αυτόν τον τρόπο αποθηκεύεται η περίσσεια ενέργειας των μεσημβρινών ωρών και αποδίδεται από τις μπαταρίες τις ώρες όπου δεν επαρκεί η παραγωγή των φωτοβολταϊκών.

Η μελέτη και προσομοίωση των συστημάτων του κτηρίου γίνεται μέσω του λογισμικού TRNSYS 18. Σε πρώτο στάδιο παρουσιάζεται η διαδικασία ορισμού του κτηρίου και των παραμέτρων του οι οποίες είναι εναρμονισμένες με τα όρια του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων (KENAK). Έπειτα, μέσω των προσομοιώσεων στο TRNSYS, επιλέγονται το μέγεθος του συστήματος θέρμανσης-ψύξης, η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών καθώς και η χωρητικότητα των μπαταριών. Αξιοποιώντας τιμές τις αγοράς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, εξετάζεται μέσω οικονομικής ανάλυσης η βιωσιμότητα της επένδυσης για έναν χρονικό ορίζοντα 30 ετών. Στο τελευταίο κομμάτι της εργασίας πραγματοποιείται μια διερεύνηση του ενδεχομένου ενεργειακής αυτονόμησης όλου του κτηρίου, συγκρινόμενο με όρους ενέργειας και οικονομικών, με την αυτονόμηση μόνο του συστήματος θέρμανσης-ψύξης.

ABSTRACT

The repercussions of climate change are becoming ever more prominent, with extreme weather phenomena Tending to become the norm rather than the exception. At the forefront of the worldwide attempts to combat the negative impacts of climate change is the transition away from fossil fuels ,which were the driving forces of the economy in the last century, towards new and environmentally friendlier energy sources. This transition attempt falls on the shoulders of the Renewable Energy Sources (RES). The global shift of energy production towards RES has given a huge boost to their development and the optimization of their technologies. With the technology currently available, the energy needs of a building can be met in a large extent at a local level, limiting the amount of energy required from the central power grid while at the same time reducing the building's carbon footprint. According to data from the European Commission, almost two thirds (2/3) of a building's total energy consumption concern its space heating and cooling needs, with the building sector in the European Union (EU) being responsible for 40% of the total energy consumption and a third (1/3) of the total CO₂ emissions. Autonomy from the power grid of the energy intensive systems in a building, by generating heating and cooling locally from RES, which is the goal of this project, will have a positive impact in the effort to save energy and combat climate change.

In this project an office building is modeled with the goal of total autonomy of its heating and cooling system. For this purpose, Solar Photovoltaic panels (PVs) are used, providing the necessary energy to geothermal heat pumps which utilize the energy of the subterranean. Since PVs provide energy only during the day, in order for autonomy to be possible, they are coupled with a battery system. In this way the energy excess of the noon hours can be stored and allocated for use during the time periods that the PVs production is not sufficient.

The study and simulation of the systems of this building were performed with the TRNSYS 18 software. First of all, the process of defining, within the software, of the building and its parameters is explained, parameters which are in agreement with the limits set forth by the Regulation for Energy Efficiency in Buildings. After this, through the TRNSYS simulations, the required capacity of the heating and cooling system is determined and the number of PVs and the storage capacity of the batteries are chosen. By using typical market values and the simulations' results the economics of this investment are examined for the expected lifespan of 30 years. At the last part of this project the possibility of complete building energy autonomy is discussed and compared in energy and economics terms to the main project.

ΣΥΝΤΟΜΕΥΣΕΙΣ

Αγγλικά

AC: Alternating Current (Εναλλασσόμενο ρεύμα)

ACH: Air Change per hour (Εναλλαγές αέρα ανά ώρα)

Ah: Ampere-hours (Μονάδα μέτρησης της ενεργειακής χωρητικότητας μιας μπαταρίας)

BP: British Petroleum

COP: Coefficient of Performance (Συντελεστής λειτουργίας)

CSP: Concentrated Solar Power (Συγκεντρωτική Ηλιακή Ισχύς)

GCHP: Ground Coupled Heat Pumps (Εδαφικά συνδεδεμένες αντλίες θερμότητας)

GWHP: Ground-Water Heat Pumps (αντλίες θερμότητας υπόγειου νερού)

DC: Direct Current (Συνεχές Ρεύμα)

HVAC: Heating Ventilation and Air Conditioning (Θέρμανση Αερισμός και Κλιματισμός)

IRR: Internal Rate of Return (Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης)

LCC: Life Cycle Cost (Ανάλυση κόστους κύκλου ζωής)

NPV (Net present Value – Καθαρή Παρούσα Αξία)

OPEC: Organization of the Petroleum Exporting Countries – Οργανισμός Εξαγωγών Πετρελαιοπαραγωγών Χωρών)

PBP: Pay Back Period (Περίοδος Αποπληρωμής)

RES: Renewable Energy Sources (Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας)

SWHP: Surface-Water Heat Pumps (Αντλίες θερμότητας επιφανειακού νερού)

Ελληνικά

ΑΘ: Αντλία Θερμότητας

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΓΑΘ: Γεωθερμική Αντλία Θερμότητας

ΔΕΗ: Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση

ΕΣΑ: Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης

ZNX: Ζεστό Νερό Χρήσης

ΗΠΑ: Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής

Η/Μ: Ηλεκτρομηχανολογικός

ΙΟΒΕ: Ίδρυμα Οικονομικών και Βιομηχανικών Ερευνών

ΚΠΑ: Καθαρή Παρούσα Αξία

μ.μ.: μετά μεσημβρία

ΠΟΕ: Παγκόσμιος Οργανισμός Ενέργειας

ΦΑ: Φυσικό Αέριο

Φ/Β: Φωτοβολταϊκά

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

Αγγλικά

Ah: Ampere-hours (Αμπερώρες)

°C: Θερμοκρασία σε βαθμούς Κελσίου

c: Ταχύτητα φωτός

CO₂: Διοξείδιο του άνθρακα

EJ: Exajoule (Εξατζούλ)

E_g: Ενεργειακό χάσμα

E_{ph}: Ενέργεια φωτονίου

eV: Ηλεκτρονιοβόλτ

G_{on}: Κάθετη ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας

G_{sc}: Ηλιακή σταθερά

GW: Gigawatt (Γιγαβάτ)

h: Σταθερά Planck

hr: Ωρα

i: Επιτόκιο αναγωγής

I: Ολική ωριαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

I_b: Ωριαία άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

I_d: Ωριαία διάχυτη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

I_r: Ωριαία ανακλώμενη ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

I_T: Ωριαία ολική ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου

J: Joule (Τζάουλ)

K: Kelvin (Θερμοκρασία σε βαθμούς Κέλβιν)

kg: Κιλά

km: Χιλιόμετρο

km³: Κυβικά χιλιόμετρα

kTOE: Χιλιάδες τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου

kW: Kilowatt (Κιλοβάτ)

kWh: Kilowatt-hours (Κιλοβατώρες)

l: Λίτρο

L_{loc} : Γεωγραφικό μήκος παρατηρητή

L_{st} : Γεωγραφικό μήκος μεσημβρινού αναφοράς

m: Μέτρο

m^2 : Τετραγωνικό μέτρο

m^3 : Κυβικό μέτρο

min: λεπτά

mm: Χιλιοστά

MPa: Μεγαπασκάλ

mW: Milliwatt (Μιλιβάτ)

MW: Megawatt (Μεγαβάτ)

MWe: Megawatt electrical (Μεγαβάτ ηλεκτρικής ισχύος)

n: Ημέρα του έτους

nm: Nanometers (Νανόμετρα)

p: Πληθωρισμός

R_b : Λόγος ολικής ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς ολική ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

R_s : Σειριακή αντίσταση Φ/B στοιχείου

R_{sh} : Αντίσταση διαρροής Φ/B στοιχείου

t_{solar} : Ηλιακή ώρα

t_{clock} : Τοπική ώρα

Ελληνικά

α : Ηλιακό ύψος

β : Κλίση επιπέδου

γ : Αζιμούθιο επιφάνειας

γ_s : Αζιμούθιο Ηλίου

δ : Ηλιακή απόκλιση

E: Εξίσωση χρόνου

η_l : Βαθμός απόδοσης Φ/B κελιού σε συγκεκριμένη ένταση φωτός

θ : Γωνία πρόσπτωσης

θ_z : Γωνία ζενίθ

I_λ : Ένταση φωτός

ΚΕΝΑΚ: Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων

λ : Μήκος κύματος

N : Διάρκεια ημέρας σε ώρες

ρ : Ανακλαστικότητα εδάφους

φ : Γεωγραφικό πλάτος

Ω : Ω_m (Μονάδα ηλεκτρικής αντίστασης)

ω : Ωριαία γωνία ή γωνιακή μετατόπιση

1. Εισαγωγή

1.1 Ενέργεια στον 21^ο αιώνα

Καθώς η τρίτη δεκαετία του 21^{ου} αιώνα πλησιάζει στο μέσον της, οι έννοιες της εξοικονόμησης ενέργειας και της στροφής προς φιλικές για το περιβάλλον μορφές ενέργειας διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην καθημερινή ζωή παγκοσμίως. Η αύξηση του πληθυσμού σε συνδυασμό με τη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου στις περισσότερες χώρες έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της ζήτησης ενέργειας. Ειδικότερα για τον κτηριακό τομέα, η ταυτόχρονη αξιοποίηση πληθώρας συστημάτων για επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών άνεσης οδήγησε τις προηγούμενες δεκαετίες στην κατασκευή κτηρίων με υπέρμετρες καταναλώσεις ενέργειας.

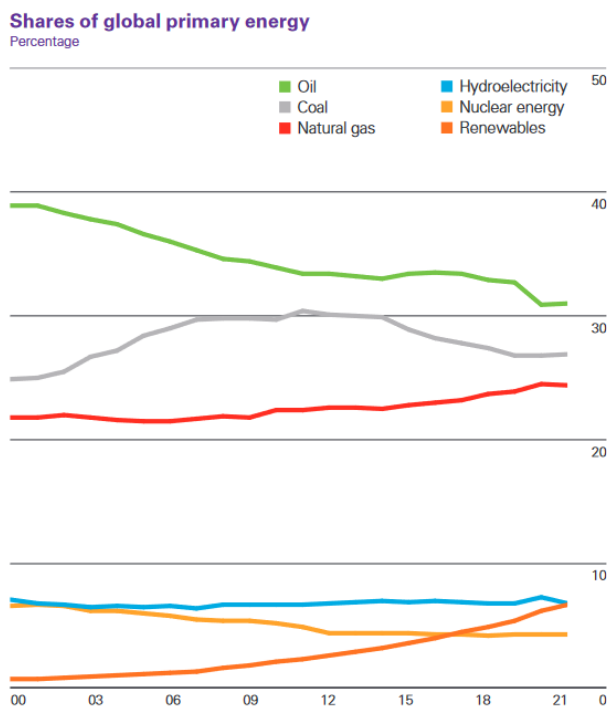
Αυτή η λογική έχει ήδη αρχίσει να αλλάζει καθώς έγινε αντιληπτό πως τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων, στα οποία βασίστηκε η ανάπτυξη στον 20^ο αιώνα, δεν είναι ανεξάντλητα αλλά αντίθετα καταναλώνονται με ολοένα και αυξανόμενους ρυθμούς. Παράλληλα, άρχισαν να φαίνονται τα πρώτα σημάδια της επίδρασης της ανθρώπινης δραστηριότητας στο περιβάλλον, με ακραία καιρικά φαινόμενα να εμφανίζονται ολοένα και πιο συχνά. Συνειδητοποιώντας το γεγονός πως ο πλανήτης αντιμετωπίζει κίνδυνο εκτροχιασμού και ανεπανόρθωτων καταστροφών, οι προσπάθειες περιορισμού της ζημιάς εντείνονται, με τις ΑΠΕ να αναδεικνύονται σε πρωταγωνιστές αυτής της προσπάθειας.

Σύμφωνα με την Στατιστική Έκθεση για την Παγκόσμια Ενέργεια της BP για το 2022, η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας¹ από πηγές χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) για το 2021 φτάνει το 17,72%, αντιστοιχώντας σε 105,48 EJ (Exajoules) από τα 595,15 EJ που είναι η συνολική παγκόσμια κατανάλωση. Η ποσοστιαία συμμετοχή κάθε πηγής ενέργειας στο παγκόσμιο μείγμα είναι [1]:

- Πετρέλαιο: 30,95%
- Φυσικό Αέριο: 24,42%
- Άνθρακας: 26,90%
- Υδροηλεκτρική Ενέργεια: 6,76%
- Λοιπές ανανεώσιμες πηγές: 6,71%
- Πυρηνική Ενέργεια: 4,25%

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μεταβολή του μεριδίου των επιμέρους πηγών πρωτογενούς ενέργειας στην Εικόνα 1.1 όπου διαφαίνεται η διαρκώς μειούμενη εξάρτηση του πλανήτη από το πετρέλαιο και η άνοδος φιλικότερων μορφών ενέργειας.

¹ Πρωτογενής ονομάζεται η ενέργεια η οποία υπάρχει αυτούσια στη φύση χωρίς να έχει υποστεί ανθρώπινη επεξεργασία ή μετατροπή. Το αργό πετρέλαιο και η αιολική ενέργεια είναι παραδείγματα πρωτογενούς ενέργειας, κάτι που δεν είναι ο ηλεκτρισμός ο οποίος θεωρείται δευτερογενής μορφή.



Εικόνα 1.1: Μεταβολή της συμμετοχής διάφορων πηγών ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα από το 2000 [1]

Η αλματώδης αύξηση του μεριδίου της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ είναι απόδειξη πως πραγματοποιούνται βήματα για τη μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων και κατ'έπекταση για τη μείωση των εκπομπών CO₂. Ωστόσο, τα υψηλά ποσοστά των ορυκτών καυσίμων, ακόμα υπεύθυνα για πάνω από το 80% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, δείχνουν πως υπάρχει αρκετός δρόμος ακόμα για την επίτευξη των στόχων της απανθρακοποίησης. Επιπλέον, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, είτε μέσω βελτίωσης των υποδομών είτε μέσω προγραμμάτων εξοικονόμησης ενέργειας, ιδίως στην ΕΕ, έχει περιορισμένο αντίκτυπο καθώς η Ευρώπη δεν αποτελεί στον 21^ο αιώνα παρά μια μέτρια συνιστώσα της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας.

Η ταχύτατη ανάπτυξη οικονομιών σε ηπείρους όπως η Ασία και η Αφρική αποτελεί παγκόσμια πρόκληση καθώς βασίζεται κυρίως σε μη-ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω μικρότερου κόστους και της αμεσότερης πρόσβασης σε αυτές. Η αύξηση του μεριδίου παραγωγής των ΑΠΕ πρέπει να συνδυαστεί και με διευκόλυνση της πρόσβασης σε αυτές, με ανταγωνιστικές τιμές και οφέλη, ώστε αφενός να συνεχίσουν να εκτοπίζουν την παραγωγή των ορυκτών καυσίμων και αφετέρου να αποτελούν την ελκυστικότερη επιλογή για αναπτυσσόμενες χώρες που αυξάνουν την εγκατεστημένη ισχύ τους. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζεται η ποσοστιαία κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά περιοχή του πλανήτη και η μεταβολή αυτής κατά τη δεκαετία 2011-2021 όπου αποτυπώνονται οι παραπάνω παρατηρήσεις.

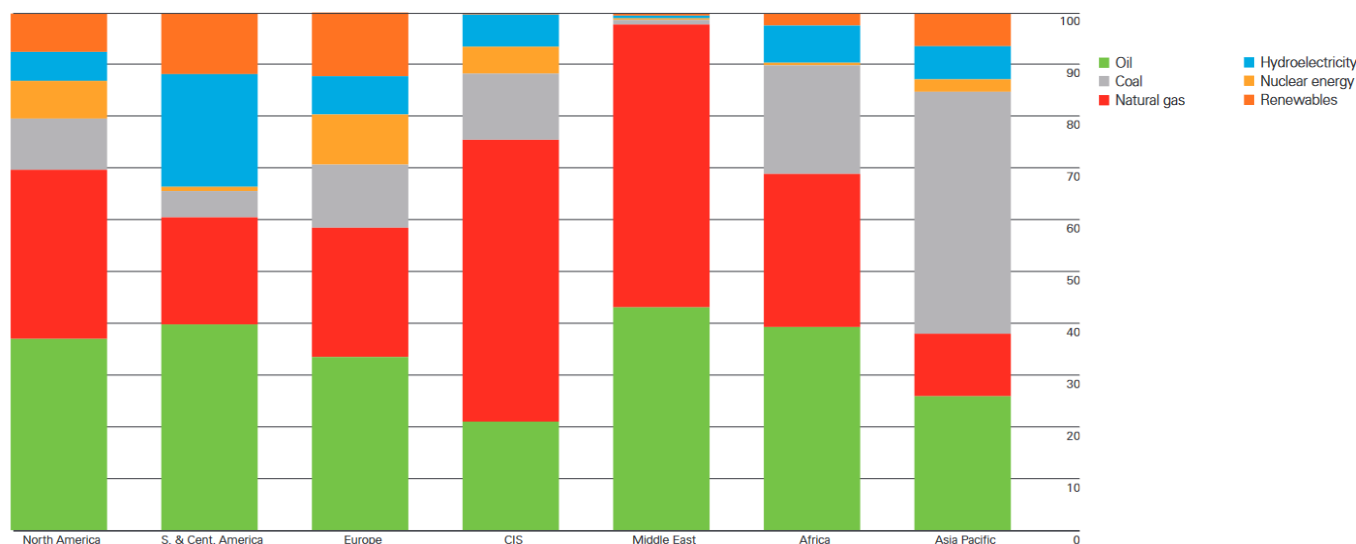
Πίνακας 1.1: Ποσοστό κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά περιοχή του πλανήτη και μεταβολή αυτής στο διάστημα 2011-2021

Περιοχή	Ποσοστό κατανάλωσης ανά περιοχή	Μεταβολή στο διάστημα 2011 – 2021 (%)
Βόρεια Αμερική	19,1%	-0,1%
Νότια και Κεντρική Αμερική	4,8%	0,3%
Ευρώπη	13,8%	-0,6%
Κοινοπολιτεία Ανεξάρτητων Κρατών	6,8%	0,9%
Μέση Ανατολή	6,4%	2,2%
Αφρική	3,4%	2,1%
Ασία/ Ωκεανία και Ειρηνικός	45,8%	2,8%
Συνολικά	100%	1,3%

Πηγή: bp Statistical Review of World Energy 2022

Όπως φαίνεται από τα στοιχεία του Πίνακα 1.1, η αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας οφείλεται κυρίως στις αναπτυσσόμενες περιοχές του πλανήτη όπου η βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης συνεπάγεται και αύξηση της ζήτησης ενέργειας. Να σημειωθεί πως οι μεταβολές την τελευταία δεκαετία θα μπορούσαν να είναι ακόμα πιο έντονες χωρίς την πρόσφατη πανδημία, η οποία οδήγησε σε μια πτώση της κατανάλωσης ενέργειας το 2022 λόγω των περιοριστικών μέτρων και της μείωσης των μετακινήσεων. Στην Εικόνα 1.2 παρουσιάζεται το ενεργειακό μείγμα σε κάθε περιοχή του πλανήτη.

Regional consumption pattern 2021
Percentage



Εικόνα 1.2: Συμμετοχή κάθε πηγής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα των διαφόρων περιοχών του πλανήτη [1]

Η κυριαρχία των ορυκτών καυσίμων είναι εμφανής, με το πετρέλαιο συγκεκριμένα να μην έχει ακόμα ανταγωνισμό στον τομέα των μετακινήσεων, δικαιολογώντας τα υψηλά ποσοστά χρήσης του σε όλο τον κόσμο. Το Φυσικό Αέριο είναι η βασική πηγή ενέργειας στη Μέση Ανατολή και την Κοινοπολιτεία Ανεξάρτητων Κρατών, μέρος της οποίας είναι η Ρωσική Ομοσπονδία, εξαιτίας της αφθονίας του, με τον άνθρακα να κυριαρχεί στην Ασία και τον Ειρηνικό λόγω της ταχύτητας με την οποία μπορούν να τεθούν σε λειτουργία νέες εγκαταστάσεις. Από την Εικόνα 2 φαίνεται πως η Ευρώπη πράγματι πρωτοστατεί στην αξιοποίηση καθαρών μορφών ενέργειας μιας και αποτελεί την περιοχή του πλανήτη με τη μεγαλύτερη διείσδυση μη-ορυκτών καυσίμων μετά τη Νότια και Κεντρική Αμερική, η κατανάλωση της οποίας ωστόσο είναι σημαντικά μικρότερη της Ευρώπης βάσει των στοιχείων του Πίνακα 1.1.

1.2: Τωρινή κατάσταση των ΑΠΕ

Σε διεθνές επίπεδο οι ΑΠΕ, σύμφωνα με στοιχεία της BP και του Παγκόσμιου Οργανισμού Ενέργειας (ΠΟΕ), είναι υπεύθυνες περίπου για το 13,5% της παγκόσμιας παραγωγής ενέργειας. Ο τομέας με τη μεγαλύτερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η ηλεκτροπαραγωγή όπου βάσει του ΠΟΕ το 28,7% της παραγωγής οφείλεται σε ΑΠΕ ενώ ο τομέας με τη μικρότερη διείσδυση είναι οι μεταφορές όπου από ΑΠΕ προέρχεται μόλις το 3,8% της καταναλισκόμενης ενέργειας.

Όπως δείχνει και η Εικόνα 1.1, το μερίδιο των ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή ενέργειας έχει μια καθαρά αυξητική τάση, με τη βασική αιτία της ανοδικής τους πορείας να είναι φυσικά οι διεθνείς συμφωνίες (πχ Κιότο 1997, Παρίσι 2014) που στοχεύουν στην αντιμετώπιση της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η χρήση των ΑΠΕ δεν συνοδεύεται από έκλυση CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, επομένως παραγωγή ενέργειας από αυτές είναι ένας βασικός τρόπος περιορισμού της επίδρασης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στο περιβάλλον και καταπολέμησης της κλιματικής αλλαγής. Άλλοι λόγοι που καθιστούν τις ΑΠΕ ελκυστικές είναι:

- Αποτελούν ανεξάντλητες πηγές ενέργειας
- Πρόκειται για εγχώριες πηγές ενέργειας και άρα συνεισφέρουν στην ενεργειακή ανεξαρτησία ενός κράτους
- Συνεισφέρουν στην τοπική ανάπτυξη και την αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος καθώς είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες
- Τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας τους είναι συγκριτικά αρκετά μικρά και ειδικά όσον αφορά το λειτουργικό τους κόστος αυτό δεν επηρεάζεται έντονα από διεθνείς καταστάσεις (πχ η τιμή του πετρελαίου επηρεάζεται έντονα από τις αποφάσεις του ΟΡΕΚ² ο οποίος ελέγχει την πλειοψηφία των επιβεβαιωμένων αποθεμάτων πετρελαίου)
- Οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ είναι γενικά μικρές και γρήγορα κατασκευάσιμες επομένως μπορούν να συμβάλλουν στην άμεση ανταπόκριση σε περίπτωση αύξησης της εγχώριας ζήτησης
- Η «αποξήλωση» των εγκαταστάσεων ΑΠΕ είναι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων πιο απλή και λιγότερο ρυπογόνα σε σχέση με συμβατικούς σταθμούς και ειδικά σε σχέση με πυρηνικούς σταθμούς
- Οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ, ανάλογα την εκμεταλλεύσιμη μορφή ενέργειας, μπορούν να σχεδιαστούν για κάλυψη μικρών ή μεγάλων αναγκών των καταναλωτών (πχ Φ/Β στη στέγη ενός σπιτιού ισχύος μερικών kW για οικιακή χρήση σε αντιδιαστολή με Φ/Β πάρκα πολλών GW που εντάσσονται στο εθνικό δίκτυο)

² Ο Οργανισμός Εξαγωγών Πετρελαιοπαραγωγών Χωρών αποτελεί ένα διεθνή οικονομικό οργανισμό 13 κρατών. Τα κράτη-μέλη του, μεταξύ των οποίων είναι χώρες όπως η Βενεζουέλα, η Σαουδική Αραβία και η Αλγερία, έχουν ως στόχο την προάσπιση των οικονομικών τους συμφερόντων από τις εξαγωγές πετρελαίου

Φυσικά, ένα νόμισμα έχει δύο όψεις και στην περίπτωση των ΑΠΕ κάποια από τα βασικά τους μειονεκτήματα είναι:

- Οι εγκαταστάσεις ΑΠΕ χαρακτηρίζονται από μικρή πυκνότητα ισχύος σε σχέση με σταθμούς συμβατικών καυσίμων και επομένως απαιτούν πολύ μεγαλύτερες εκτάσεις για να τοποθετηθούν
- Έχουν περιορισμένη διαθεσιμότητα (πχ τα Φ/Β μπορούν να παράγουν ενέργεια μόνο κατά τη διάρκεια της μέρας) με αποτέλεσμα αρκετά μικρότερο συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας σε σχέση με συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας
- Οι ΑΠΕ δεν έχουν την απαραίτητη ευελιξία και άμεση ανταπόκριση που χαρακτηρίζει τις συμβατικές μονάδες και άρα ένα ηλεκτρικό δίκτυο που βασίζεται αποκλειστικά ή σε μεγάλο ποσοστό σε αυτές είναι σχεδόν αδύνατο να λειτουργήσει
- Σε αρκετές περιπτώσεις ικανοποιητικές συγκεντρώσεις ενέργειας βρίσκονται μακριά από την κατανάλωση με αποτέλεσμα σημαντικές απώλειες κατά τη μεταφορά της ενέργειας και δυσκολία κατασκευής (πχ καλό αιολικό δυναμικό σε απόκρημνες κορυφές)

Οι βασικότερες μορφές ΑΠΕ που χρησιμοποιούνται είναι:

- Υδροηλεκτρική Ενέργεια
- Αιολική Ενέργεια
- Ηλιακή Ενέργεια
- Γεωθερμική Ενέργεια
- Βιομάζα/Βιοενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια παραδοσιακά αφορά την ενέργεια που παράγεται από μεγάλα και μικρά υδροηλεκτρικά έργα στην οποία τα τελευταία χρόνια προστίθεται η κυματική ενέργεια και η ενέργεια παλίρροιας. Από όλες τις ανανεώσιμες μορφές ενέργειας αποτελεί την παλαιότερα ευρέως χρησιμοποιούμενη, με την υδροηλεκτρική παραγωγή ενέργειας να ισούται με το άθροισμα της παραγωγής όλων των υπόλοιπων ΑΠΕ μαζί. Το 2021 η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς υδροηλεκτρικής ενέργειας έφτασε τα 1.360 GW, με την προσθήκη 26 GW από το 2020, με την Κίνα³ να πρωτοστατεί, προσθέτοντας 20,8 GW στο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής της [2]. Η αποθήκευση ενέργειας μέσω αντλησιοταμίευσης αποτελεί μια κλασική πλέον μέθοδο αποθήκευσης ενέργειας με την εγκατεστημένη ισχύ να ανέρχεται σε 165 GW παγκοσμίως με συνεχή αύξηση της δυναμικότητας [2]. Στην προσπάθεια για ένα μέλλον όπου η παραγωγή ενέργειας στηρίζεται στις ΑΠΕ, η αποθήκευση ενέργειας διαδραματίζει πρωταγωνιστικό ρόλο για την ισορροπία του δικτύου και την αντιμετώπιση του ετεροχρονισμού μεταξύ παραγωγής και ζήτησης. Η εμπειρία που πλέον υπάρχει στο κομμάτι της αντλησιοταμίευσης την καθιστά μια από τις κινητήριες δυνάμεις στον τομέα της αποθήκευσης ενέργειας μαζί με την ταχύτατα εξελισσόμενη τεχνολογία των μπαταριών. Παρά την σπουδαία θέση της υδροηλεκτρικής ενέργειας στην παγκόσμια παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, σύμφωνα

³ Η Κίνα αποτελεί και το μεγαλύτερο χρήστη υδροηλεκτρικής ενέργειας στον κόσμο με 391 GW εγκατεστημένης ισχύος το 2021, πάνω από τρεις φορές την εγκατεστημένη ισχύ της Βραζιλίας (109,4 GW) που είναι στη δεύτερη θέση

με τον ΠΟΕ, προκειμένου να επιτευχθεί το σενάριο για μηδενικές εκπομπές το 2050 η ανάπτυξή της πρέπει να κυμαίνεται στο 3% ετησίως, τρεις φορές πάνω από τον τωρινό ρυθμό παρατηρούμενης ανάπτυξης.

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μια μορφή ενέργειας η οποία χρησιμοποιείται από τα προϊστορικά χρόνια, χρησιμεύοντας αρχικά στις θαλάσσιες μετακινήσεις και έπειτα, μέχρι και τα μέσα του 20^{ου} αιώνα, για την κίνηση των ανεμόμυλων. Οφείλεται στην κινητική ενέργεια του ανέμου εξαιτίας της ανομοιόμορφης θέρμανσης της Γης από την ηλιακή ακτινοβολία και αποτελεί μια από τις κυριότερες μορφές ΑΠΕ. Η πετρελαϊκή κρίση τη δεκαετία του 1970 έδωσε το έναυσμα για μια αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας αξιοποίησης της αιολικής ενέργειας με αποτέλεσμα να αποτελεί σήμερα μια ώριμη τεχνολογία και με ιδιαίτερα ανταγωνιστικές τιμές. Το 2021 η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς ανερχόταν στα 823 GW από τα οποία 769 GW αφορούν ανεμογεννήτριες στη στεριά (on-shore) και 54 GW ανεμογεννήτριες στη θάλασσα (off-shore) [3].

Η ηλιακή ενέργεια είναι στην πραγματικότητα η βασική πηγή ενέργειας για τον πλανήτη με σχεδόν όλες τις υπόλοιπες να προέρχονται από αυτή. Οι άνεμοι προκαλούνται από την ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της Γης, ενώ η βιομάζα και τα ορυκτά καύσιμα αποδίδουν κατά την καύση τους την ηλιακή ενέργεια που είχαν απορροφήσει για τις βιολογικές τους λειτουργίες οι οργανισμοί από τους οποίους προέρχονται. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί είτε για απευθείας παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων, είτε για παραγωγή θερμότητας μέσω συγκεντρωτικών συλλεκτών και θερμικών ηλιακών συστημάτων. Μια πιο εκτενής περιγραφή της ηλιακής ενέργειας και των τεχνολογιών της παρατίθεται στα κεφάλαια 4 και 5. Το 2021 η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ηλιακής ενέργειας έφτασε τα 854 GW από τα οποία 848 GW αφορούν Φ/Β και μόλις 6 GW συγκεντρωτικές εφαρμογές [3]. Βασική αιτία της μικρής παραγωγής συγκεντρωτικών σταθμών ήταν η απουσία πολιτικών ενίσχυσης και η έλλειψη έρευνας στο τέλος του 20^{ου} αιώνα, με την τεχνολογία ωστόσο να φαίνεται πως επανέρχεται δυναμικά, μια τάση που ενισχύεται από τις δυνατότητες αποθήκευσης της παραγόμενης θερμικής ενέργειας τέτοιων συστημάτων [4].

Ως γεωθερμική ενέργεια ορίζεται η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης και εμφανίζεται με τη μορφή θερμού νερού ή ατμού [5]. Γεωθερμική ενέργεια υπάρχει παντού στον πλανήτη καθώς οφείλεται στις διεργασίες στο εσωτερικό του οι οποίες θερμαίνουν υπόγεια ρευστά (κυρίως νερό) και τα οποία, ανάλογα την περιοχή και τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες, εμφανίζονται είτε με υγρή είτε με αέρια μορφή σε κοιλάτητες του υπεδάφους. Τα γεωθερμικά πεδία διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες [6]:

- Χαμηλής ενθαλπίας με θερμοκρασίες 25-100 °C που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για θέρμανση
- Μέσης ενθαλπίας με θερμοκρασίες 100-150 °C που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ηλεκτροπαραγωγή πέρα από θέρμανση
- Υψηλής ενθαλπίας με θερμοκρασίες > 150 °C τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν για ηλεκτροπαραγωγή

Η ύπαρξη γεωθερμικής ενέργειας ικανής να υποστηρίξει ηλεκτροπαραγωγή εντοπίζεται σε περιοχές στα όρια λιθοσφαιρικών πλακών όπου τα γεωλογικά φαινόμενα στο υπέδαφος είναι εντονότερα και για αυτό λίγες χώρες έχουν αξιόλογη γεωθερμική ηλεκτροπαραγωγή. Το μεγάλο πλεονέκτημα της γεωθερμίας είναι πως εκτός από τα γεωθερμικά πεδία, συναντάται πολλές φορές και με τη μορφή αβαθούς γεωθερμίας, κάτι που αναφέρεται στη διατήρηση της σταθερής θερμοκρασίας του εδάφους όλο το χρόνο [6]. Με αυτόν τον τρόπο η αβαθής γεωθερμία λειτουργεί ως ένα θερμοδοχείο σταθερής θερμοκρασίας το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για απόρριψη ή άντληση θερμότητας ανάλογα την εποχή. Σε παγκόσμιο επίπεδο η παραγωγή ενέργειας από γεωθερμικά πεδία έχει περιορισμένη εφαρμογή με μόλις 16 GW εγκατεστημένης ισχύος [3] ωστόσο υπάρχει η εκτίμηση πως σύντομα θα αναπτυχθεί περαιτέρω.

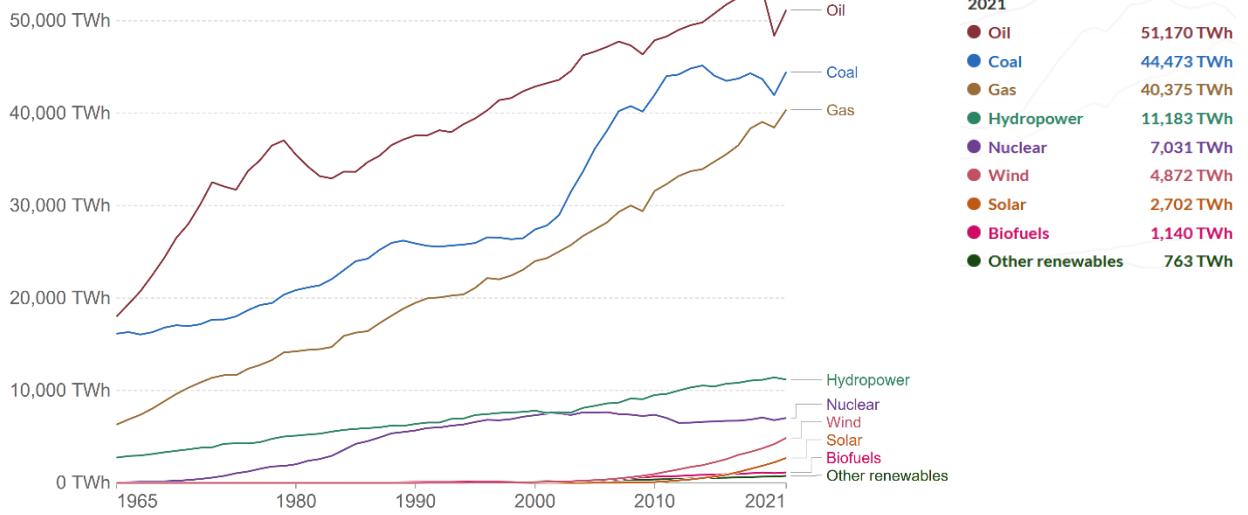
Με τον όρο βιομάζα ορίζεται κάθε μη απολιθωμένο, βιοδιασπώμενο οργανικό υλικό που προέρχεται από φυτά, ζώα ή μικροοργανισμούς. Σε αυτό τον ορισμό περιλαμβάνονται προϊόντα, παραπροϊόντα, υπολείμματα και απορρίμματα της γεωργίας, δασοκομίας και των σχετικών βιομηχανιών, καθώς και το μη απολιθωμένο και βιοδιασπώμενο οργανικό κλάσμα των βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων [7]. Η βιομάζα αποτελεί μια καθαρή μορφή ενέργειας καθώς το CO₂ που απελευθερώνεται κατά την καύση της ισούται με αυτό που δεσμεύτηκε κατά το σχηματισμό της, με αποτέλεσμα οι μόνες εκπομπές που σχετίζονται με τη βιομάζα να αφορούν τη μεταφορά της και τυχόν επεξεργασία της. Η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς που αφορά τη χρήση είτε της βιομάζας απευθείας είτε προϊόντων της όπως τα βιοκαύσιμα ανέρχεται σε 143 GW με προοπτικές περαιτέρω αύξησης καθώς τα βιοκαύσιμα για παράδειγμα είναι ιδανικό υποκατάστατο για την κίνηση οχημάτων (φυσικά με κάποιες απαραίτητες τροποποιήσεις στους κινητήρες). Δεν είναι τυχαίο πως οι Ευρωπαϊκοί κανονισμοί αυξάνουν συνεχώς το απαιτούμενο ποσοστό βιοκαυσίμων στο μείγμα των καυσίμων που είναι διαθέσιμο στα πρατήρια με την προοπτική τα βιοκαύσιμα να αντικαταστήσουν πλήρως την κλασική βενζίνη στο μέλλον.

Στις Εικόνες 1.3 και 1.4 αποτυπώνεται η τωρινή παγκόσμια ενεργειακή κατάσταση σχετικά με τις πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται:

Primary energy consumption by source, World

Primary energy is shown based on the 'substitution' method which takes account of inefficiencies in energy production from fossil fuels.

Our World in Data



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy

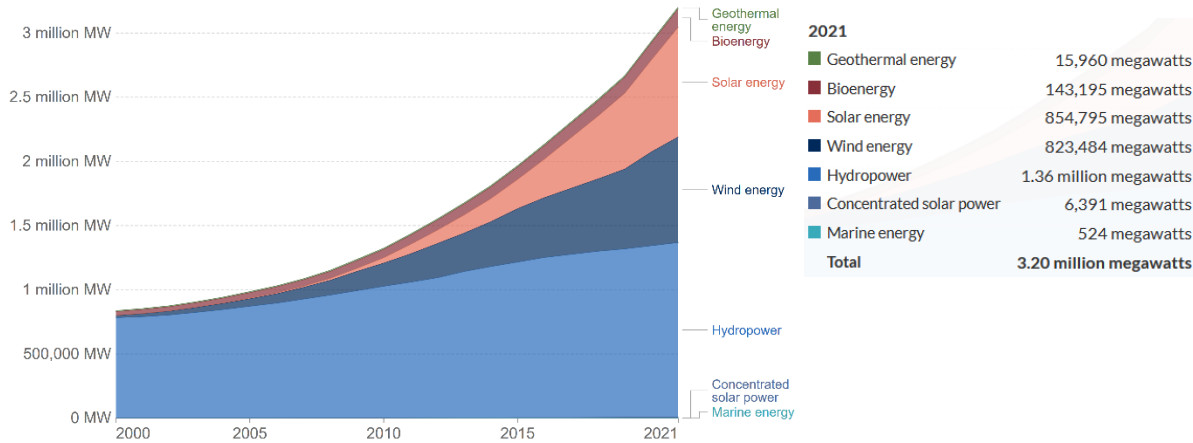
OurWorldInData.org/energy • CC BY

Εικόνα 1.3: Παγκόσμια πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας ανά «καύσιμο» για το 2021 [14]

Installed global renewable energy capacity by technology

Installed global renewable energy capacity in megawatts (MW) by energy technology (hydropower, solar, wind, biomass, marine and geothermal)

Our World in Data



Source: International Renewable Energy Agency (IRENA)

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Εικόνα 1.4: Εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ παγκοσμίως για το 2021 [14]

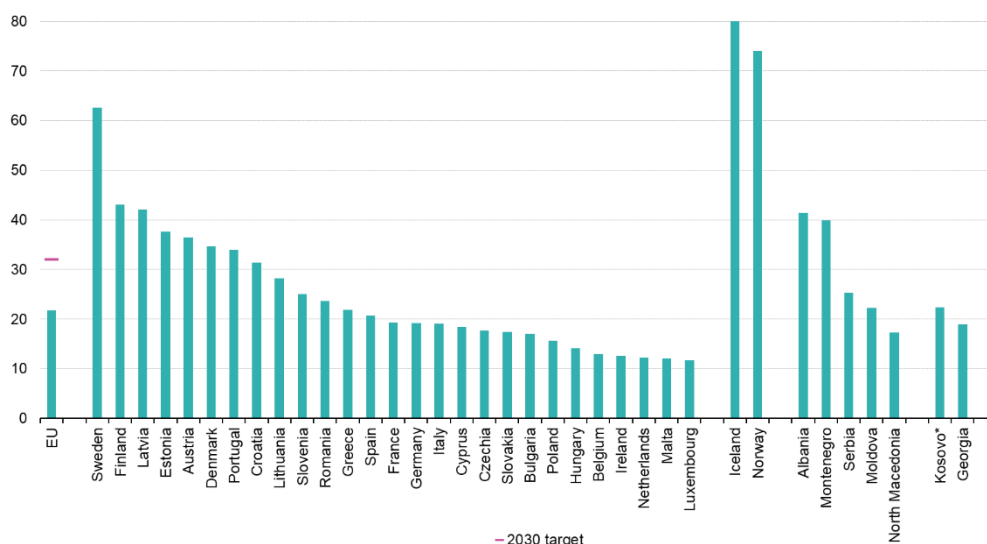
1.3: ΑΠΕ στην ΕΕ και στην Ελλάδα

Η Ευρώπη αποτελεί τον πρωτοστάτη στην παγκόσμια προσπάθεια αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής. Συνεπώς δεν είναι τυχαίο πως με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal) η γηραιά ήπειρος στοχεύει να αποτελέσει μέχρι το 2050 την πρώτη ουδέτερη ως προς το κλίμα (climate neutral) περιοχή του πλανήτη. Για το πιο άμεσο μέλλον, οι τωρινοί στόχοι της ΕΕ μέχρι το 2030 συνοψίζονται σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Κομισιόν στους εξής:

1. Τουλάχιστον 40% μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Αυτός ο στόχος έχει προταθεί να αναθεωρηθεί στο 55% ώστε να επιταχυνθεί η πράσινη μετάβαση της ΕΕ
2. Συμμετοχή των ΑΠΕ τουλάχιστον κατά 32% στην παραγωγή ενέργειας
3. Βελτίωση της αποδοτικότητας της ενέργειας κατά τουλάχιστον 32,5%

Ο στόχος της ΕΕ είναι τριπλός, κάτι το οποίο έχει ως στόχο την προώθηση των ΑΠΕ έναντι άλλων μορφών ενέργειας καθώς για παράδειγμα η υποκατάσταση εργοστασίων άνθρακα από εγκαταστάσεις ΦΑ θα συνέβαλαν στο κομμάτι της μείωσης των ρύπων αλλά όχι στα υπόλοιπα δύο. Οι στόχοι του 2030 έρχονται ως φυσική συνέχεια των στόχων του 2020 (στους οποίους όλα τα παραπάνω ήταν στο 20%) τους οποίους η ΕΕ πέτυχε, με τις ΑΠΕ να συνεισφέρουν κατά 22,1% το 2020 στην παραγωγή ενέργειας. Η διείσδυση των ΑΠΕ το 2021 στην Ευρώπη μειώθηκε στο 21,8% της συνολικής παραγωγής ενέργειας το οποίο οφείλεται κατά κύριο λόγο στην πανδημία του COVID 19. Για κάθε χώρα το αντίστοιχο ποσοστό φαίνεται στην Εικόνα 1.5:

Share of energy from renewable sources, 2021
(% of gross final energy consumption)



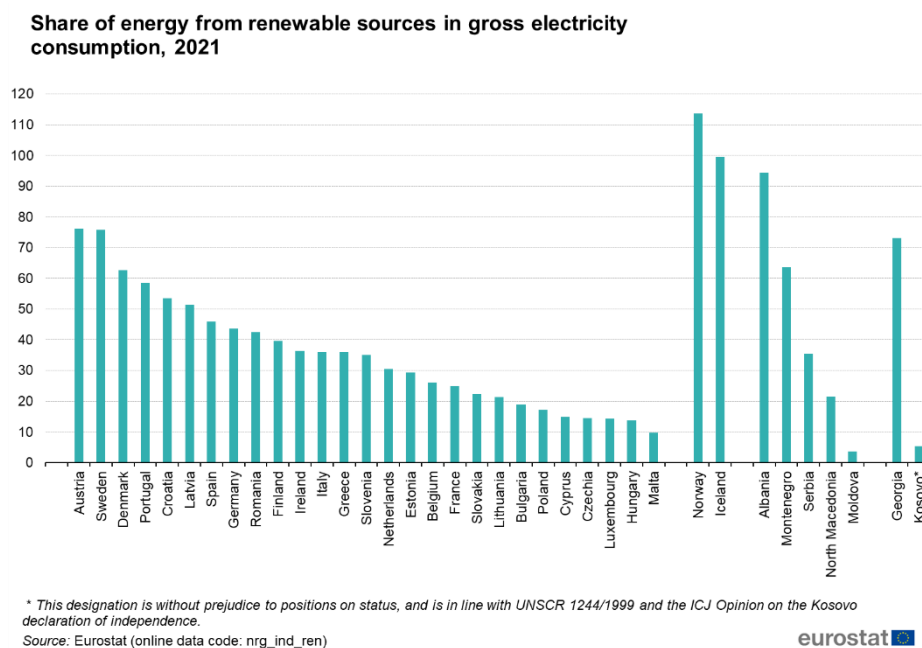
* This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo declaration of independence.

Source: Eurostat (online data code: nrg_ind_ren)

eurostat

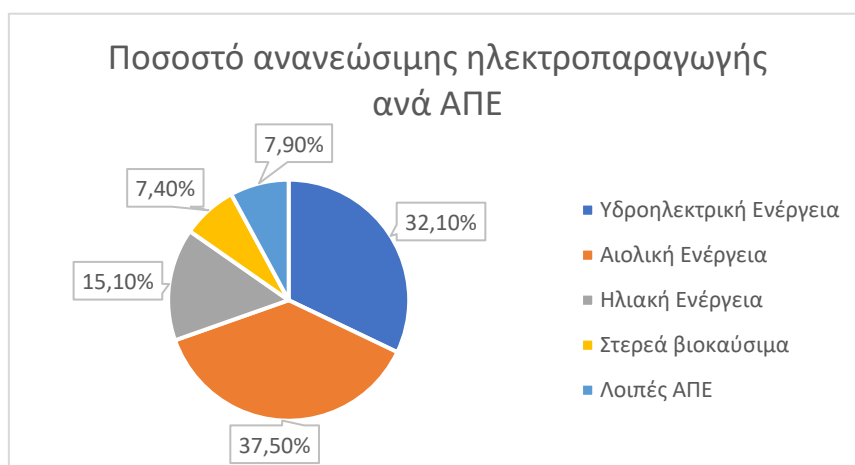
Εικόνα 1.5: Ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή ενέργειας στην Ευρώπη [13]

Η μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ, τόσο παγκοσμίως όσο και στην ΕΕ, παρατηρείται στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής όπου το 37,5 % της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη παράγεται από ΑΠΕ⁴. Για το 2021 το μερίδιο ανά χώρα παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.6:



Εικόνα 1.6: Μερίδιο των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή ανά χώρα για το 2021 [13]

Στην Εικόνα 1.6, η Νορβηγία φαίνεται να έχει συμμετοχή ΑΠΕ πάνω από 100% καθώς παράγανε περισσότερη ενέργεια από αυτή που κατανάλωσε με την περίσσεια είτε να αποθηκεύεται είτε να παρέχεται σε άλλες χώρες. Στην Ευρώπη η ανανεώσιμη ηλεκτροπαραγωγή κατανέμεται σύμφωνα με το Διάγραμμα 1.1:

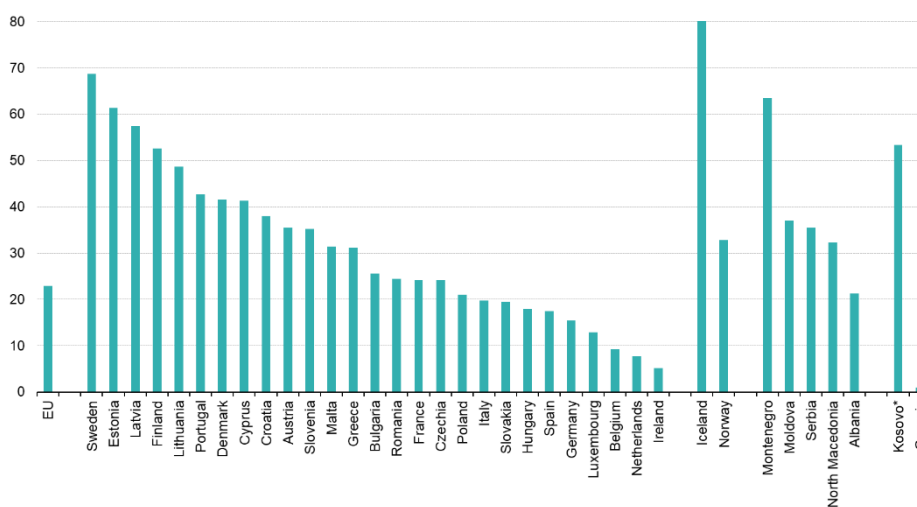


Διάγραμμα 1.1: Συμμετοχή κάθε ΑΠΕ στην ανανεώσιμη ηλεκτροπαραγωγή στην Ευρώπη για το 2021 [13]

⁴ Σε παγκόσμιο επίπεδο το αντίστοιχο ποσοστό είναι της τάξης του 28% (ΠΟΕ, BP)

Στον τομέα της θέρμανσης και ψύξης, οι ΑΠΕ καταλαμβάνουν ένα σημαντικό μερίδιο στην Ευρώπη, με το 22,9% της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε το 2021 να προέρχεται από αυτές. Τα στοιχεία ανά χώρα παρουσιάζονται στην Εικόνα 1.7:

Share of energy from renewable sources for heating and cooling, 2021



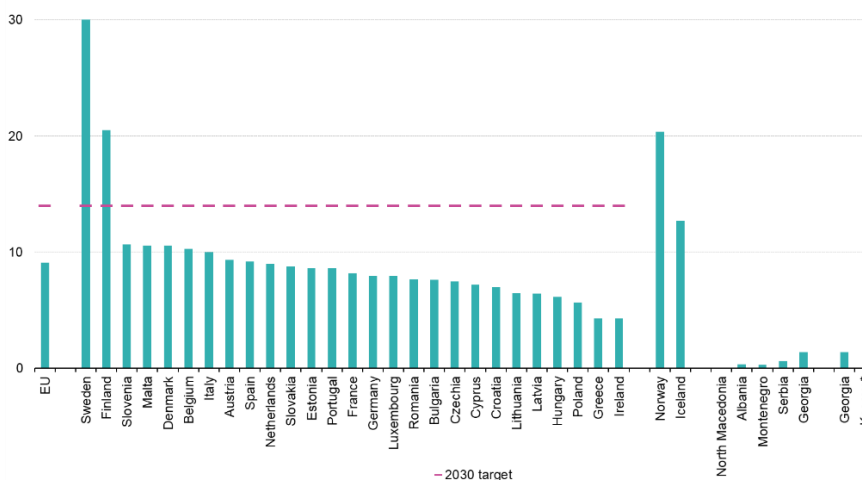
* This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo declaration of independence.

Source: Eurostat (online data code: nrg_ind_ren)

Εικόνα 1.7: Συμμετοχή των ΑΠΕ στις παραγωγή ενέργειας για ψύξη και θέρμανση στην Ευρώπη για το 2021 [13]

Ο τομέας στον οποίο παρατηρείται η μικρότερη συμμετοχή των ΑΠΕ είναι αυτός των μεταφορών όπου μόλις το 9,1% της ενέργειας προήλθε από ανανεώσιμες πηγές. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.8, σχεδόν όλες οι χώρες στην ΕΕ είναι κάτω από το στόχο του 14% ενέργειας από ΑΠΕ στις μεταφορές που έχει ως χρονικό ορίζοντα το 2030.

Share of energy from renewable sources in transport, 2021 (% of gross final energy consumption)



* This designation is without prejudice to positions on status, and is in line with UNSCR 1244/1999 and the ICJ Opinion on the Kosovo declaration of independence.

Source: Eurostat (online data code: nrg_ind_ren)

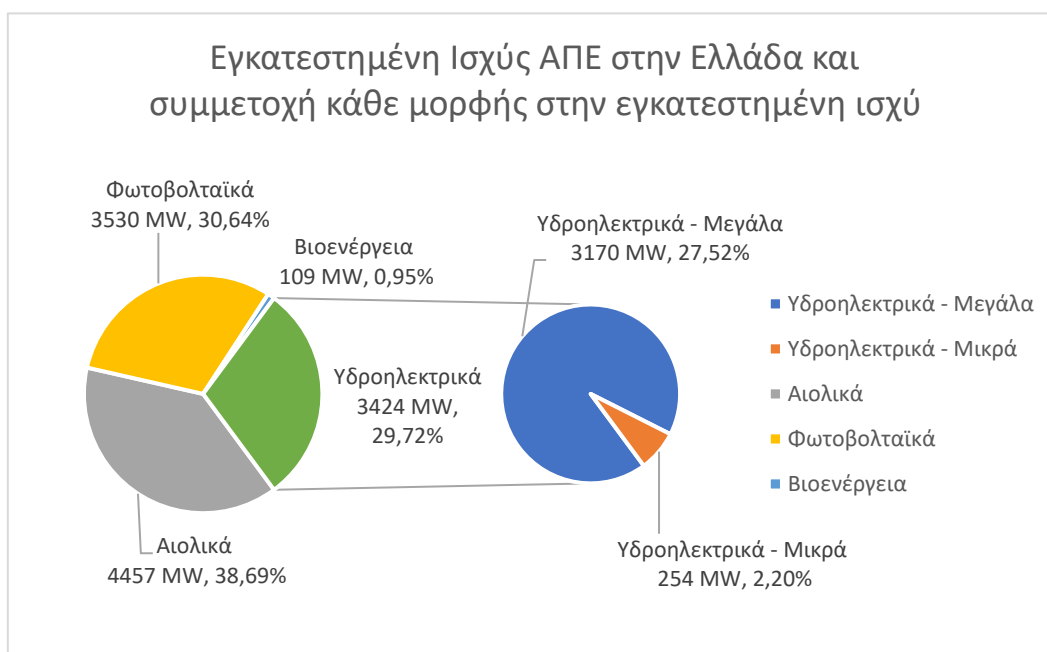
Εικόνα 1.8: Μερίδιο των ΑΠΕ στην ενέργεια για μεταφορές στην Ευρώπη το 2021 [13]

Στην ΕΕ υπάρχουν συνολικά 513 GW εγκατεστημένων ΑΠΕ τα οποία κατανέμονται ανά πηγή ως εξής [3]:

- Υδροηλεκτρική Ενέργεια: 128,5 GW
- Αιολική Ενέργεια: 187,6 GW
- Ηλιακή Ενέργεια: 162,0 GW
- Γεωθερμική Ενέργεια: 0,9 GW
- Βιοενέργεια: 33,9 GW

Οι στόχοι που έχει θέσει η Κομισιόν αναμένεται να οδηγήσουν σε περαιτέρω αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος στα κράτη-μέλη της Ένωσης, ειδικά στις τεχνολογίες της αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Η τελευταία είναι αυτή τη στιγμή η ταχύτερα αναπτυσσόμενη με 21,8 GW να τοποθετούνται το 2021 και 41,4 GW το 2022.

Η Ελλάδα αποτελεί μία ταχύτατα αναπτυσσόμενη αγορά για τις ΑΠΕ εξαιτίας και των αναγγελιών για την πράσινη μετάβαση της χώρας, με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το κλίμα να θέτει ακόμα υψηλότερους στόχους για το 2030 από τους κεντρικούς Ευρωπαϊκούς. Η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα ανέρχεται σε 11.520 MW για το 2021 και κατανέμεται όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 1.2 [3]:



Διάγραμμα 1.2: Εγκατεστημένη Ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα

Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία της Eurostat για το 2021 η συνεισφορά των ΑΠΕ στην Ελλάδα φτάνει ανά τομέα:

- Ποσοστό ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή ενέργειας: 21,93% (12^η στην ΕΕ, μέσος όρος ΕΕ: 21,78%)
- Ποσοστό ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή: 35,93% (13^η στην ΕΕ, μέσος όρος ΕΕ: 37,51%)

- Ποσοστό ΑΠΕ στη θέρμανση και την ψύξη: 31,15% (13^η στην ΕΕ, μέσος όρος ΕΕ: 22,89%)
- Ποσοστό ΑΠΕ στις μεταφορές: 4,31% (26^η στην ΕΕ, μέσος όρος ΕΕ: 9,09%)

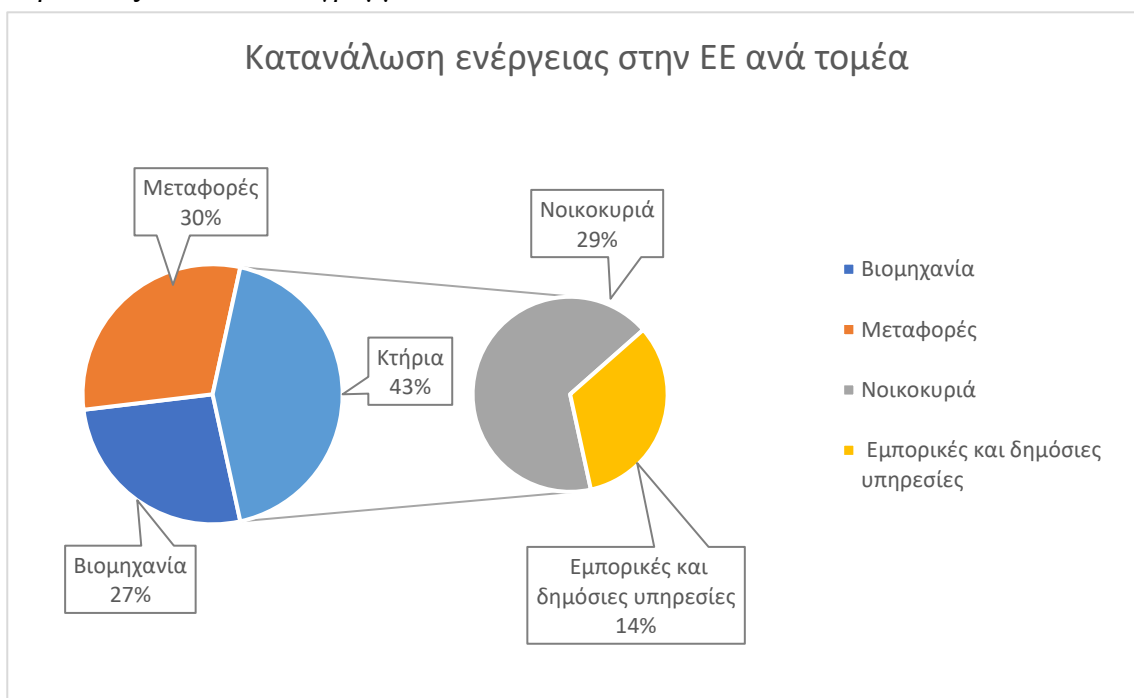
Η πανδημία του COVID 19 μείωσε τον ρυθμό ανάπτυξης των ΑΠΕ που παρατηρούνταν τα προηγούμενα χρόνια, ωστόσο η άρση των περιορισμών και οι τρέχουσες καταστάσεις στην Ανατολική Ευρώπη αναμένεται να δώσουν νέα μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη των ΑΠΕ τόσο σε Ευρωπαϊκό όσο και σε εγχώριο επίπεδο.

1.4: Κατανάλωση ενέργειας στον κτηριακό τομέα

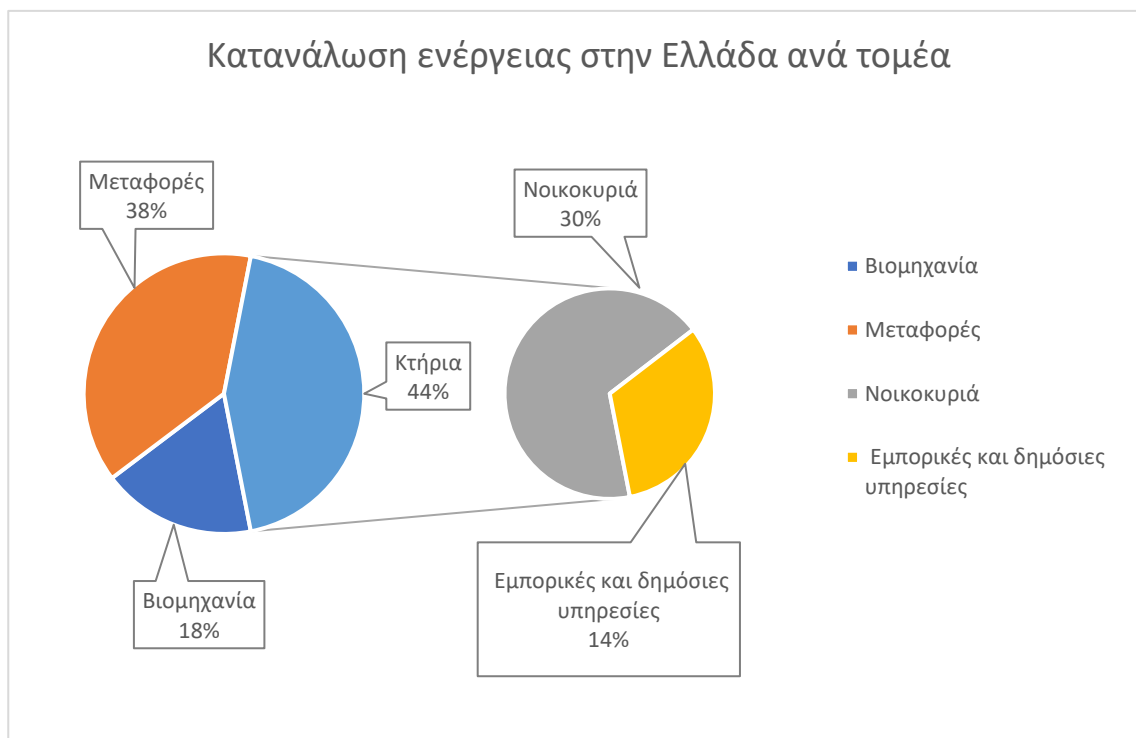
Ο κτηριακός τομέας, στον οποίο περιλαμβάνονται τόσο οι ιδιωτικές κατοικίες όσο και οι υπηρεσίες (εμπορικές και δημόσιες), αποτελεί μαζί με τη βιομηχανία και τις μεταφορές τους τρεις βασικούς τομείς ενεργειακής κατανάλωσης. Σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat για το 2021, η συνολική κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται σε:

- ΕΕ: 939.907,649 κΤΟΕ
- Ελλάδα: 14.912,249 κΤΟΕ

Οι καταναλώσεις ανά τομέα τόσο για την ΕΕ όσο και για την Ελλάδα παρουσιάζονται στα Διαγράμματα 1.3 και 1.4:



Διάγραμμα 1.3: Ποσοστιαία συμμετοχή κάθε τομέα στην τελική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ [13]



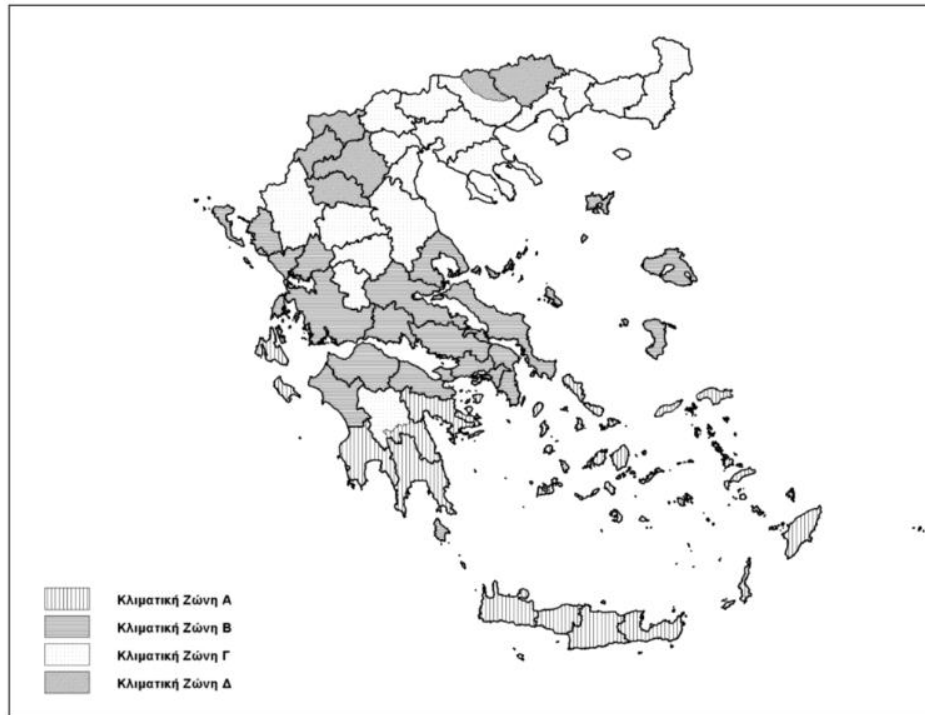
Διάγραμμα 1.4: Ποσοστιαία συμμετοχή κάθε τομέα στην τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα [13]

Το προφίλ της κατανάλωσης στην Ελλάδα είναι πολύ κοντινό με αυτό της ΕΕ με βασική διαφορά το μικρότερο ποσοστό συμμετοχής του βιομηχανικού τομέα στην Ελλάδα λόγω απουσίας βαριάς βιομηχανίας στη χώρα. Ο κτηριακός τομέας αντιστοιχεί στο 43% της κατανάλωσης σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, με το 1/3 αυτής να οφείλεται στο κομμάτι των υπηρεσιών. Σε πανευρωπαϊκό επίπεδο, μέσω κοινοτικών οδηγιών για την επίτευξη των στόχων του 2030 και του 2050, πραγματοποιούνται σημαντικές προσπάθειες για εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση της συνολικής κατανάλωσης, με τη συνεισφορά του κτηριακού τομέα στην τελική κατανάλωση να τον καθιστά πρωταγωνιστή αυτών των προσπαθειών.

Στην Ελλάδα οι κανονισμοί για το ενεργειακό κομμάτι των κτηρίων συνοψίζονται στον ΚΕΝΑΚ, τον Κανονισμό Ενεργειακής Απόδοσης Κτηρίων. Σκοπός του ΚΕΝΑΚ σύμφωνα με το Άρθρο 1, Παράγραφος 2 είναι: «Ειδικότερα, σκοπό της παρούσας αποτελεί η μείωση της κατανάλωσης συμβατικής ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, κλιματισμό (ΘΨΚ), φωτισμό και παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ΖΧΝ) με την ταυτόχρονη διασφάλιση συνθηκών άνεσης στους εσωτερικούς χώρους των κτηρίων».

Η πιο πρόσφατη επίσημη έκδοση του ΚΕΝΑΚ είναι αυτή του 2017 (ΦΕΚ Β 2367/12-7-2017) όπου βασική προσθήκη (σε σχέση με την παλαιότερη έκδοση του 2010) είναι η αναγωγή της κατανάλωσης ενέργειας σε μεγέθη πρωτογενούς ενέργειας για καλύτερη σύγκριση των κτηρίων μεταξύ τους. Επιπλέον, ο ΚΕΝΑΚ πλέον διαθέτει πολύ αναλυτικές απαιτήσεις για τα δομικά υλικά και τους συντελεστές θερμικής

διαπερατότητάς τους, καταδεικνύοντας την προσπάθεια ελάττωσης της κτηριακής κατανάλωσης. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, το κτήριο γραφείων που θα μελετηθεί θα είναι στην Αθήνα η οποία ανήκει στην Κλιματική Ζώνη Β σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του ΚΕΝΑΚ όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.9:



Εικόνα 1.9: Κλιματικές ζώνες Ελλάδας

2. Γεωθερμική Ενέργεια

2.1: Εισαγωγή

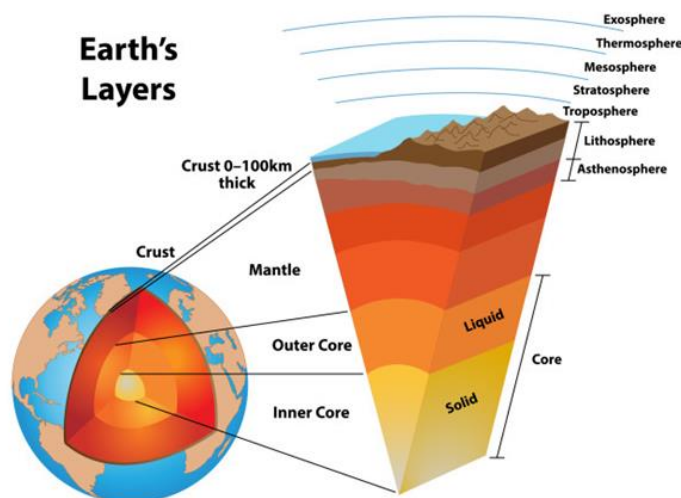
Η γεωθερμική ενέργεια, όπως μαρτυρά και η ίδια η λέξη, αναφέρεται στη θερμική ενέργεια της Γης και συγκεκριμένα του εσωτερικού της. Η ενέργεια αυτή εκδηλώνεται στην επιφάνεια του πλανήτη με τη μορφή γεωθερμικών ρευστών τα οποία βρίσκουν διόδους από τα εσωτερικά στρώματα του γήινου φλοιού φτάνοντας στην επιφάνεια, είτε αρκετά κοντά σε αυτήν. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009/28/EK, ως γεωθερμική ενέργεια ορίζεται η ενέργεια που αποθηκεύεται υπό μορφή θερμότητας κάτω από τη στερεή επιφάνεια της Γης, ενώ βάσει της ελληνικής νομοθεσίας, κάθε ρευστό που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης και έχει θερμοκρασία μεγαλύτερη των 25 °C χαρακτηρίζεται ως γεωθερμικό ρευστό [5]. Η γεωθερμική ενέργεια δηλαδή συμπεριλαμβάνει και την ικανότητα του εδάφους να αποθηκεύει θερμότητα η οποία με τη σύγχρονη τεχνολογία μπορεί να αξιοποιηθεί για την κάλυψη διαφόρων αναγκών, από θέρμανση χώρων και αγροτικές χρήσεις, μέχρι βιομηχανικές χρήσεις και ηλεκτροπαραγωγή. Οι χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας έχουν τοπικό χαρακτήρα καθώς ανάλογα τη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών οι δυνατότητες αξιοποίησης διαφέρουν. Σε γεωθερμικά πεδία με θερμοκρασίες μικρότερες των 150-160 °C η αξιοποίηση αφορά κυρίως εφαρμογές θέρμανσης και κάποιες πιο ειδικές όπως αφαλάτωση, με τα πεδία των οποίων η θερμοκρασία υπερβαίνει τους 160 °C να είναι καταλληλότερα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η βασικότερη ίσως διαφορά της γεωθερμικής ενέργειας από τις υπόλοιπες ΑΠΕ είναι ο σταθερός της χαρακτήρας, καθώς η εκμετάλλευσή της είναι δυνατή όλο το εικοσιτετράωρο και καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Επιπλέον, είναι σχεδόν πάντοτε διαθέσιμη στο 100%, δεν παρουσιάζει δηλαδή τη διακύμανση της αιολικής και της ηλιακής ενέργειας για παράδειγμα.

Σε παγκόσμιο επίπεδο η γεωθερμία έχει περιορισμένη χρήση στο κομμάτι της παραγωγής ενέργειας με μόλις 16 GW εγκατεστημένης ισχύος [3]. Καθώς τα πεδία υψηλής ενθαλπίας είναι τα πιο σπάνια και σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, δεν αναμένεται η εγκατεστημένη ισχύς να ανέβει κατακόρυφα. Αντίθετα, η ανάπτυξη της γεωθερμίας για εφαρμογές όπου απαιτούνται μικρότερης θερμοκρασίας γεωθερμικά ρευστά προβλέπεται σημαντική καθώς αυτά τα πεδία απαντώνται σε πολλές περιοχές του πλανήτη και έχουν γενικά καλές προοπτικές εκμετάλλευσης. Δεν αποκλείεται συνεπώς, ειδικά σε χώρες όπως η Ελλάδα που έχουν υπολογίσιμο γεωθερμικό δυναμικό, η κάλυψη σημαντικού μέρους των αναγκών θέρμανσης και ψύξης να γίνεται μέσω γεωθερμίας τις επόμενες δεκαετίες.

2.2: Δομή του εσωτερικού της Γης

Η Γη όπως και όλοι οι πλανήτες του ηλιακού συστήματος δημιουργήθηκαν μετά το σχηματισμό του ήλιου από το εναπομείναν διαστημικό υλικό μέσω βαρυτικών δυνάμεων. Αυτές οι δυνάμεις ώθησαν βαρύτερα στοιχεία όπως ο σίδηρος και το νικέλιο στο εσωτερικό του πλανήτη, με ελαφρύτερα υλικά όπως το οξυγόνο και το πυρίτιο να μένουν πιο κοντά στην επιφάνεια. Η Γη έχει σχήμα πεπλατυσμένης σφαίρας (διογκώνεται στον Ισημερινό λόγω της μεγάλης ταχύτητας περιστροφής της) και ακτίνα στον Ισημερινό περίπου 6.380 χιλιόμετρα. Η εσωτερική δομή του πλανήτη φαίνεται στην Εικόνα 2.1 και απαρτίζεται από τέσσερα (4) στρώματα τα οποία από μέσα προς τα έξω είναι:

- Εσωτερικός Πυρήνας
- Εξωτερικός Πυρήνας
- Μανδύας
- Φλοιός



Εικόνα 2.1: Εσωτερική δομή του πλανήτη

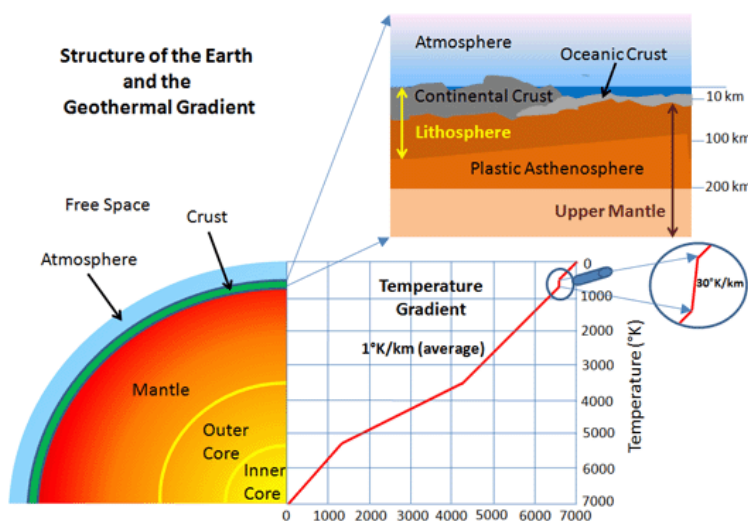
Ο εσωτερικός πυρήνας είναι το θερμότερο κομμάτι της Γης με θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 5.000 °C. Παρότι η ακριβής του σύνθεση είναι πολύ δύσκολο να καθοριστεί, σύμφωνα με μελέτες που έχουν γίνει αποτελείται από μια σφαίρα σιδήρου και νικελίου με μικρές προσμίξεις άλλων σιδηρόφιλων υλικών όπως χρυσός και πλατίνα [8]. Λόγω των ακραίων πιέσεων που επικρατούν, ο εσωτερικός πυρήνας, ακτίνας περίπου 1.200 χιλιομέτρων, είναι στερεός και μάλιστα περιστρέφεται λίγο ταχύτερα από τα υπόλοιπα στρώματα το οποίο οφείλεται στον εξωτερικό πυρήνα ο οποίος δρα σαν διαχωριστικό του εσωτερικού πυρήνα από τον υπόλοιπο πλανήτη.

Ο εξωτερικός πυρήνας έχει πάχος περίπου 2.200 χιλιομέτρων και σε αντίθεση με τον εσωτερικό πυρήνα είναι σε υγρή κατάσταση με θερμοκρασίες λίγο χαμηλότερες από αυτές του εσωτερικού πυρήνα. Αποτελείται κυρίως από σίδηρο και νικέλιο και λόγω της υγρής του κατάστασης αποτελεί την πηγή του μαγνητικού πεδίου του πλανήτη, το οποίο προστατεύει τη ζωή στη Γη από ηλιακές καταιγίδες. Η βασική πηγή θερμότητας στον

πυρήνα και κατ'επέκταση η γενεσιουργός δύναμη της γεωθερμίας είναι η ραδιενεργός διάσπαση στοιχείων που βρίσκονται σε αυτόν.

Ο μανδύας αποτελεί το τρίτο κατά σειρά στρώμα του εσωτερικού της Γης. Έχει πάχος γύρω στα 2.900 χιλιόμετρα και είναι μια περιοχή μεγάλων διακυμάνσεων της θερμοκρασίας καθώς στην «επαφή» με τον εξωτερικό πυρήνα τα πετρώματα του μανδύα έχουν θερμοκρασία πάνω από 3.000 °C η οποία μειώνεται σταδιακά στους 1.000 °C στα όρια με το φλοιό. Ο μανδύας είναι ως επί το πλείστον στερεός λόγω των συνθηκών που επικρατούν, με τα ανώτερα στρώματά του να είναι σε μια ημίρρευστη κατάσταση ειδικά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών. Η έντονη δραστηριότητα του μανδύα είναι αυτή που προκαλεί την κίνηση των πλακών και κατά συνέπεια την τεκτονική δραστηριότητα του πλανήτη (σεισμοί, ηφαιστειακή δραστηριότητα, ορογένεση κτλ). Η μεταφορά θερμότητας από τον πυρήνα του πλανήτη προς την επιφάνεια εξαρτάται πάρα πολύ από το μανδύα, χωρίς ωστόσο να είναι επακριβώς γνωστό πως πραγματοποιείται. Σε κάθε περίπτωση, η γεωθερμική βαθμίδα στο μανδύα, δηλαδή η μεταβολή της θερμοκρασίας με το βάθος είναι σχετικά σταθερή στους 25 °C/χιλιόμετρο στις περισσότερες περιοχές του.

Ο φλοιός αποτελεί το εξωτερικό κομμάτι του πλανήτη και είναι το λεπτότερο, με μέσο πάχος 35 χιλιόμετρα κάτω από τις ηπείρους και μόλις 6 χιλιόμετρα κάτω από τους ωκεανούς. Είναι στερεός με τον ηπειρωτικό φλοιό να αποτελείται κυρίως από γρανιτοειδή πετρώματα και τον ωκεάνιο από βασαλτικά πετρώματα και πάνω σε αυτόν αναπτύσσεται όλη η ζωή στη Γη [9]. Στην πραγματικότητα, ο φλοιός και το άνω τμήμα του μανδύα αποτελούν μια ενιαία γεωλογική οντότητα, τη λιθόσφαιρα που φτάνει σε βάθος μέχρι 100 χιλιομέτρων. Κάτω από τη λιθόσφαιρα εντοπίζεται η ασθενόσφαιρα, στην οποία η θερμοκρασία και η πίεση προκαλούν σε μεγάλο βαθμό λιώσιμο και μαγματοποίηση των πετρωμάτων, δημιουργώντας μια ημίρρευστη «λίμνη» μάγματος στην οποία «επιπλέει» η λιθόσφαιρα (η κίνηση της λιθόσφαιρας πάνω στην ασθενόσφαιρα είναι αυτή που προκαλεί την τεκτονική δραστηριότητα). Στο φλοιό η γεωθερμική βαθμίδα είναι περίπου ίση με 30 °C/χιλιόμετρο και γενικά σταθερή αφού η μετάδοση θερμότητας γίνεται μέσω αγωγής, με τη μέση γεωθερμική ροή θερμότητας στην επιφάνεια της Γης να είναι ίση προς 60 mW/m² [5]. Στην Εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στο εσωτερικό της Γης:



Εικόνα 2.2: Δομή του εσωτερικού της Γης και γεωθερμική βαθμίδα

2.3: Γεωθερμικά πεδία

2.3.1: Σχηματισμός γεωθερμικών πεδίων

Ενέργεια από το εσωτερικό της Γης απελευθερώνεται σε κάθε σημείο της επιφάνειας με σχετικά αργούς ρυθμούς βέβαια. Υπάρχουν ωστόσο περιοχές όπου αυτή η έκλυση ενέργειας είναι εντονότερη, με αυτές τις τοποθεσίες να ονομάζονται γεωθερμικά πεδία. Ένα γεωθερμικό πεδίο περιλαμβάνει μια πηγή θερμότητας όπως μια μαγματική ροή και ένα γεωλογικό σχηματισμό (πέτρωμα) ο οποίος δύναται να είναι πορώδης, συμπαγής ή τεμαχισμένος [5]. Μέσα σε αυτούς τους γεωλογικούς σχηματισμούς κυκλοφορεί είτε νερό (με προσμίξεις αλάτων και άλλων υλικών) είτε ατμός τα οποία αποκτούν υψηλή θερμοκρασία λόγω της επαφής με τα ζεστά πετρώματα τα οποία θερμαίνονται από μάγμα το οποίο ρέει κοντά τους. Με τον όρο μάγμα ορίζονται τα μερικώς λιωμένα πετρώματα που υπάρχουν στο μανδύα και το φλοιό στα οποία διεισδύουν αέρια και φυσαλίδες. Το μάγμα απελευθερώνεται στην επιφάνεια με τη μορφή λάβας. Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των γεωθερμικών πεδίων είναι:

- Το μέγεθος του πεδίου
- Η παροχή του και οι ιδιότητες του γεωθερμικού ρευστού
- Η διαπερατότητα του πεδίου
- Το «κάλυμμα» του πεδίου

Λόγω της ανάγκης ύπαρξης πηγής θερμότητας, τα γεωθερμικά πεδία εντοπίζονται κυρίως στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών όπου ο φλοιός δεν είναι τόσο συμπαγής και το μάγμα μπορεί να φτάσει πιο κοντά στην επιφάνεια. Στα όρια των πλακών οι ροές μάγματος διευκολύνονται και για αυτό τα σημαντικότερα γεωθερμικά πεδία βρίσκονται σε περιοχές έντονης τεκτονικής δραστηριότητας.

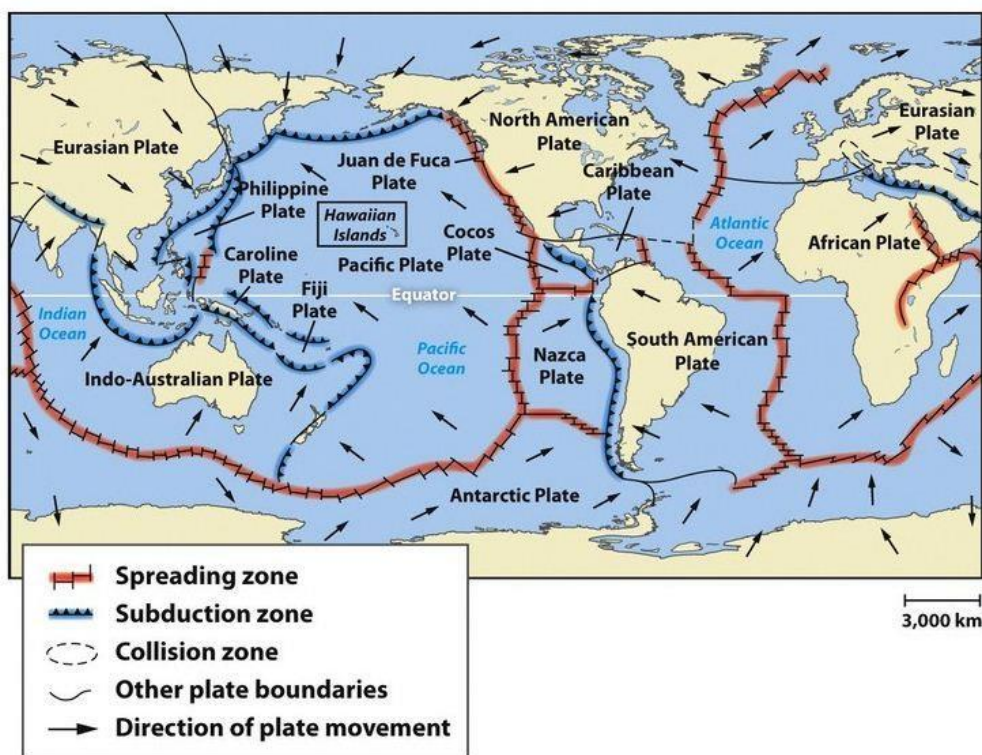
Οι λιθοσφαιρικές πλάκες δεν είναι ακίνητες αλλά αντίθετα κινούνται με ρυθμό μερικών εκατοστών το χρόνο πάνω στην ασθενόσφαιρα. Οι σχετικές κινήσεις των λιθοσφαιρικών πλακών είναι τριών ειδών:

1. Οι δύο πλάκες αποκλίνουν η μία από την άλλη. Ο κενός χώρος που δημιουργείται δίνει την ευκαιρία σε μάγμα να ανέβει στην επιφάνεια το οποίο στερεοποιείται δημιουργώντας νέα λιθόσφαιρα. Η πλέον χαρακτηριστική τέτοια περίπτωση είναι η μεσοωκεάνια ράχη του Ατλαντικού όπου η Βορειοαμερικανική πλάκα απομακρύνεται από την Ευρασιατική, διαπλατώνοντας συνεχώς τον Ατλαντικό ωκεανό. Η Ισλανδία είναι δημιούργημα της μεσοωκεάνιας ράχης του Ατλαντικού στην οποία οφείλει και την έντονη ηφαιστειακή της δραστηριότητα
2. Οι δύο πλάκες συγκλίνουν με το αποτέλεσμα να εξαρτάται από το είδος των πλακών που συγκλίνουν. Οι ωκεάνιες πλάκες βυθίζονται κάτω από τις ηπειρωτικές (ο ωκεάνιος φλοιός είναι πιο πυκνός από τον ηπειρωτικό) δημιουργώντας τάφρους ενώ σε περίπτωση σύγκλισης δύο ηπειρωτικών πλακών αυτές συμπιέζονται μεταξύ τους δημιουργώντας νέα όρη. Η συμπίεση

πετρωμάτων σε αυτές τις περιοχές δημιουργεί πολύ θερμότητα η οποία απελευθερώνεται στην επιφάνεια μέσω της τεκτονικής δραστηριότητας. Τα δύο ακραία σημεία του πλανήτη βρίσκονται πάνω σε τέτοια όρια, με το όρος Έβερεστ να είναι στο σημείο όπου η Ινδική πλάκα συναντά την Ευρασιατική, ενώ η τάφος των Μαριανών δημιουργείται από την υποχώρηση της πλάκας του Ειρηνικού κάτω από την πλάκα των Φιλιππίνων.

3. Οι δύο πλάκες κινούνται παράλληλα η μία στην άλλη. Το πιο γνωστό ίσως τέτοιο παράδειγμα είναι το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ όπου η πλάκα του Ειρηνικού κινείται παράλληλα με τη Βορειοαμερικανική πλάκα.

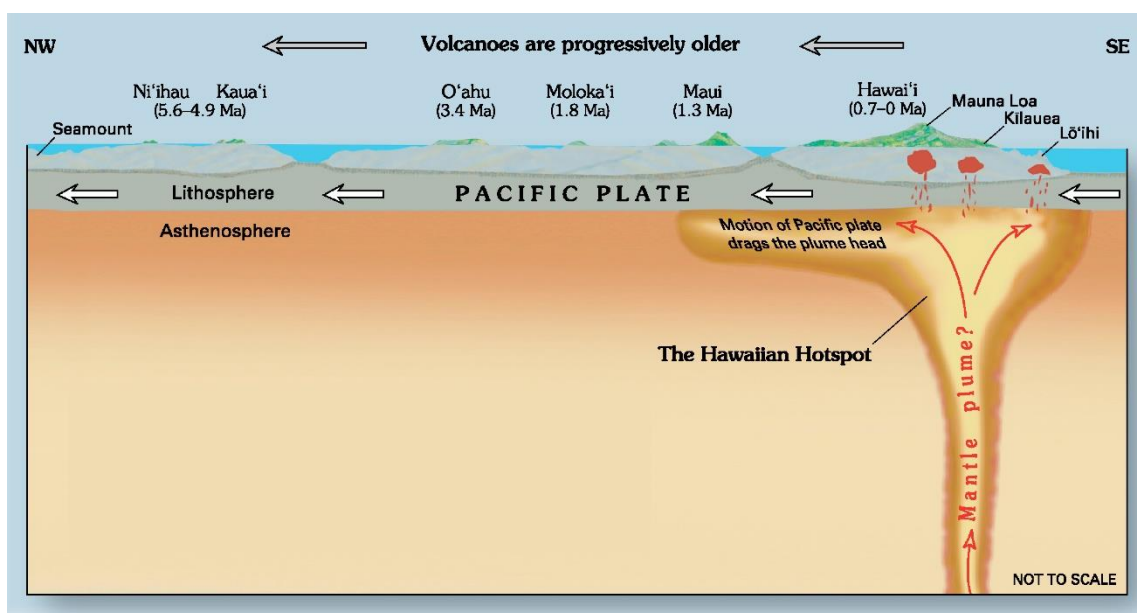
Στην Εικόνα 2.3 φαίνονται τα όρια των λιθосφαιρικών πλακών της Γης καθώς και οι κύριες κινήσεις τους. Περιοχές παράλληλης κίνησης και απομάκρυνσης των πλακών είναι με κόκκινο χρώμα και περιοχές βύθισης κάποιας πλάκας με μπλε χρώμα.



Εικόνα 2.3: Κύριες λιθосφαιρικές πλάκες και σχετικές κινήσεις τους

Στην Εικόνα 2.3 διακρίνεται εμφανώς και το λεγόμενο «Δαχτυλίδι της Φωτιάς» (Ring of Fire) στα όρια του Ειρηνικού ωκεανού στο οποίο απαντώνται τα σημαντικότερα γεωθερμικά πεδία παγκοσμίως. Το Δαχτυλίδι της Φωτιάς είναι ίσως η πιο δραστήρια τεκτονικά περιοχή του πλανήτη, με πάνω από το 75% των ενεργών ηφαιστειών και παράλληλα τα ρήγματά του είναι υπεύθυνα σχεδόν για το σύνολο των σεισμών άνω των 8,5 Ρίχτερ που έχουν καταγραφεί. Η τόσο έντονη τεκτονική δραστηριότητα είναι και ο λόγος που υπάρχει τόσο σημαντικό γεωθερμικό δυναμικό σε αυτές τις περιοχές, με τις ΗΠΑ να είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμία, αντιστοιχώντας περίπου στο 50% της παγκόσμιας παραγωγής.

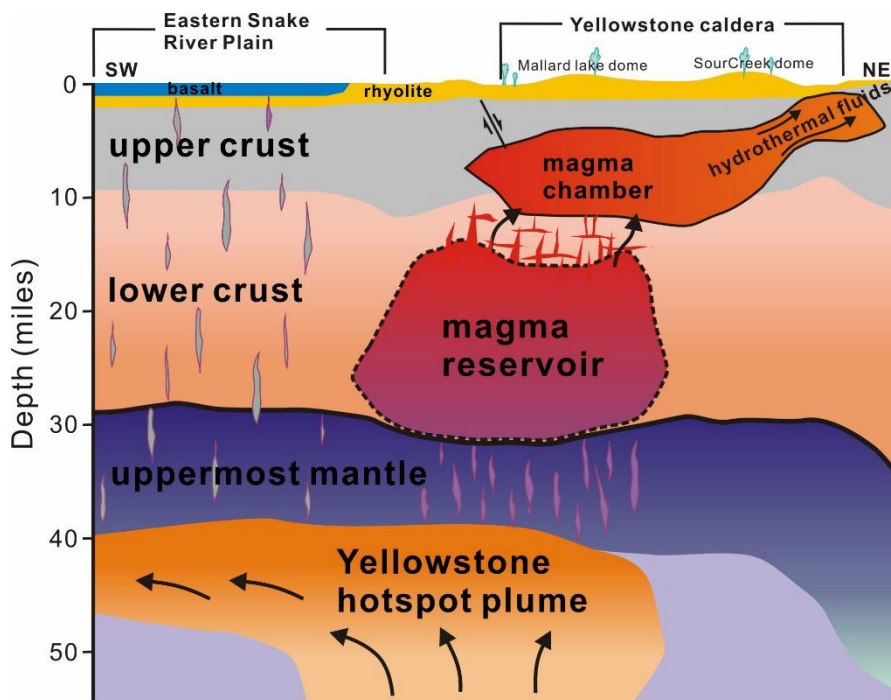
Εκτός από τα όρια των λιθосφαιρικών πλάκων, η γεωθερμία μπορεί να εκδηλωθεί και σε σημεία με τοπικά υψηλές ροές θερμότητας που δεν οφείλονται στις κινήσεις των πλακών. Τέτοια παραδείγματα είναι τα νησιά της Χαβάης στο μέσον του Ειρηνικού Ωκεανού και το Εθνικό Πάρκο Γέλουστοουν στις ΗΠΑ (Yellowstone National Park, το πρώτο εθνικό πάρκο στον κόσμο). Η γεωθερμία στα δύο αυτά μέρη είναι ηφαιστειακής προέλευσης με το αρχιπέλαγος της Χαβάης να αποτελείται από νησιά-ηφαιστεια τα οποία έχουν προκύψει από στήλες μάγματος που προέρχονται από τα βάθη του φλοιού και τροφοδοτούν όλο το σύστημα. Μάλιστα η γένεση των νησιών οφείλεται στην κίνηση της πλάκας του Ειρηνικού πάνω από το κύριο θερμό σημείο του συστήματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Τα πιο παλαιά νησιά με την πάροδο του χρόνου διαβρώνονται και λόγω της αποσύνδεσης από την πηγή μάγματος που τα δημιούργησε μειώνονται σε μέγεθος μέχρι να βυθιστούν τελείως.



Εικόνα 2.4: Προέλευση ηφαιστειακής δραστηριότητας στη Χαβάη

Το Γέλουστοουν, διάσημο για την εντυπωσιακή του γεωθερμία πρόκειται για ένα υπερηφαιστειο (super-volcano), του οποίου ο θάλαμος μάγματος είναι κάτω από το πάρκο και τροφοδοτεί τα γεωθερμικά του χαρακτηριστικά. Στην Εικόνα 2.5 φαίνεται το γεωλογικό σύστημα της περιοχής η οποία έχει έναν από τους μεγαλύτερους θαλάμους μάγματος στον κόσμο, ικανό να παράξει ισχυρότατες ηφαιστειακές εκρήξεις⁵ (υπερ-εκρήξεις, super-eruption). Στην Εικόνα 2.6 φαίνεται η Μεγάλη Πρισματική Πηγή (Grand Prismatic Spring), ένα από τα πιο αναγνωρίσιμα γεωθερμικά χαρακτηριστικά του πάρκου η οποία απελευθερώνει περίπου 2 m³ νερού ανά λεπτό σε θερμοκρασίες που φτάνουν τους 70 °C.

⁵ Η ισχύς της έκρηξης ενός ηφαιστείου μετριέται στην κλίμακα VEI (Volcanic Explosivity Index) η οποία είναι σχετική και βασίζεται σε παράγοντες όπως η ποσότητα του εκλυόμενου υλικού από την έκρηξη. Οι υπερ-εκρήξεις έχουν τη μέγιστη τιμή της κλίμακας, ίση με 8, η οποία αντιστοιχεί σε έκλυση πάνω από 1000 km³ υλικού. Η έκρηξη του Βεζούβιου το 79 μΧ συγκριτικά ήταν μόλις κατηγορίας VEI 5, με < 10 km³ εκλυόμενου υλικού και του Κρακατόα το 1883 κατηγορίας VEI 6 με < 100 km³ εκλυόμενου υλικού στην ατμόσφαιρα



Εικόνα 2.5: Προέλευση γεωθερμικής δραστηριότητας στο Εθνικό Πάρκο Γέλουστροου



Εικόνα 2.6: Μεγάλη Πρισματική Πηγή, ένα από τα πιο αναγνωρίσιμα σημεία του Γέλουστροου

Παρότι υπάρχουν αρκετά θερμά σημεία (hot spots) και σε άλλα μέρη του κόσμου, εντούτοις οι κύριες περιοχές γεωθερμικών πεδίων είναι τα όρια των λιθσφαιρικών πλακών. Φυσικά, η πηγή θερμότητας δεν αποτελεί τη μοναδική προϋπόθεση για τη δημιουργία ενός γεωθερμικού πεδίου. Εξίσου σημαντικές προϋποθέσεις είναι οι εξής:

- Συνεχής τροφοδοσία ρευστών ώστε το σύστημα να είναι πράγματι ανανεώσιμο και να μην κινδυνεύει να εξαντληθεί

- Δίοδοι προς το εσωτερικό του εδάφους ώστε το ρευστό να μπορεί να φτάνει σε μεγάλα βάθη ώστε να θερμαίνεται⁶
- Πέτρωμα κατάλληλο ώστε να μην επιτρέπει την άμεση διαφυγή των γεωθερμικών ρευστών παρά μόνο μετά από μεγάλα χρονικά διαστήματα. Επιπλέον είναι σημαντικό το «κάλυμμα» του υπόγειου γεωθερμικού ταμιευτήρα να είναι αδιαπερατό ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος ψύξης του γεωθερμικού ρευστού από ψυχρά επιφανειακά ύδατα [5]

2.3.2: Είδη γεωθερμικών πεδίων

Με βάση τη θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών, τα γεωθερμικά πεδία χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Πολύ χαμηλής ενθαλπίας στα οποία η θερμοκρασία των γεωθερμικών ρευστών δεν ξεπερνά τους 30 °C. Η συγκεκριμένη περίπτωση ονομάζεται αβαθής γεωθερμία και παρότι η θερμοκρασία είναι φαινομενικά χαμηλή, εντούτοις είναι κατάλληλη για εφαρμογές με αντλίες θερμότητας.
- Χαμηλής ενθαλπίας στα οποία τα γεωθερμικά ρευστά έχουν θερμοκρασίες της τάξης των 30-90 °C, κυρίως για εφαρμογές θέρμανσης
- Μέσης ενθαλπίας στα οποία τα γεωθερμικά ρευστά φτάνουν μέχρι τους 150-160 °C και είναι κατάλληλα για βιομηχανικές χρήσεις, ψύξη με απορρόφηση αλλά και για περιορισμένη ηλεκτροπαραγωγή
- Υψηλής ενθαλπίας, με θερμοκρασίες των γεωθερμικών ρευστών που ξεπερνούν τους 150-160 °C και τα οποία ενδείκνυνται για ηλεκτροπαραγωγή

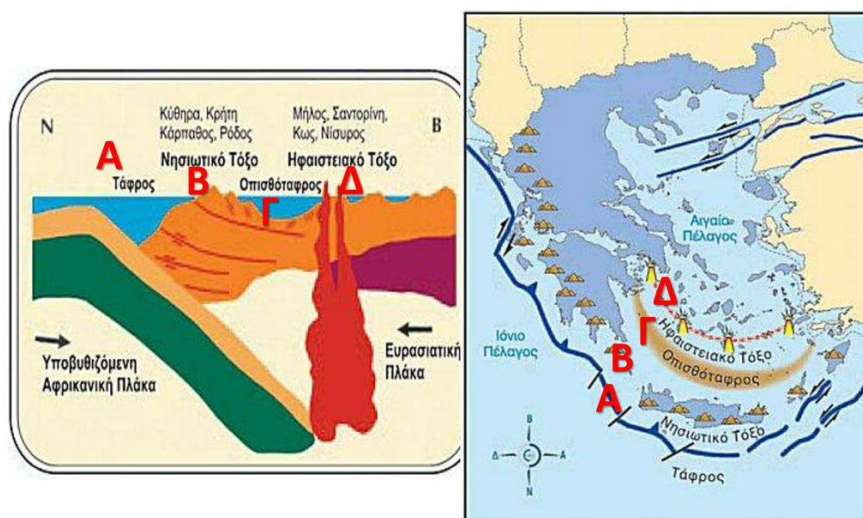
Μια δεύτερη κατηγοριοποίηση έχει να κάνει με την κυρίαρχη μορφή του γεωθερμικού ρευστού στον ταμιευτήρα. Οι τρεις βασικές περιπτώσεις είναι:

1. Πεδία άνυδρου ατμού. Είναι η προτιμότερη περίπτωση (λόγω απουσίας νερού που μπορεί να φέρει διαβρωτικά άλατα και άλλες ουσίες καθώς και επειδή ο άνυδρος ατμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας) αλλά και η σπανιότερη. Η πρώτη εγκατάσταση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη, το 1904 στο Lardarello της Ιταλίας πραγματοποιήθηκε σε τέτοιου τύπου γεωθερμικό πεδίο [5]
2. Πεδία υγρού ατμού. Είναι πιο συχνά από τα πεδία άνυδρου ατμού, αλλά η παρουσία υγρασίας καθιστά την αξιοποίησή τους για παραγωγή ηλεκτρισμού πολύ πιο προβληματική
3. Πεδία θερμού νερού. Είναι τα πιο διαδεδομένα και κατάλληλα για εφαρμογές θέρμανσης, όπως στο Ρέικιαβικ της Ισλανδίας όπου ζεστό νερό από γεωθερμικές πηγές ζεσταίνει το μεγαλύτερο μέρος της πόλης

⁶ Η πορεία του προς την επιφάνεια αφού ζεσταθεί γίνεται μέσω του φαινομένου του θερμοσιφωνισμού

2.4: Γεωθερμική Ενέργεια στην Ελλάδα

Η θέση της Ελλάδας στα όρια μεταξύ της Ευρασιατικής και της Αφρικανικής πλάκας έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός σημαντικού γεωθερμικού δυναμικού το οποίο είναι σε πολλές περιπτώσεις και σε οικονομικά αξιοποιήσιμο βάθος. Στην Ελλάδα τα περισσότερα γεωθερμικά πεδία είναι χαμηλής ενθαλπίας, με τα πεδία υψηλής ενθαλπίας να είναι πάνω στο λεγόμενο «Ηφαιστειακό Τόξο του Αιγαίου» το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 2.7:



Εικόνα 2.7: Ηφαιστειακό τόξο Αιγαίου

Η Μήλος και η Νίσυρος είναι τα δύο νησιά στα οποία εντοπίζονται τα σημαντικότερα γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας. Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, επειδή η θερμοκρασία αυτών των πεδίων είναι πάνω από 90 °C έχουν χαρακτηριστεί ως πεδία εθνικού ενδιαφέροντος. Οι συνθήκες που επικρατούν στους γεωθερμικούς ταμειυτήρες αυτών των δύο νησιών είναι κατάλληλες για ηλεκτροπαραγωγή, με το εκτιμώμενο δυναμικό τους να ανέρχεται περίπου στα 250 MWe (200 στη Μήλο και 50 στη Νίσυρο). Στη Μήλο είχε δημιουργηθεί μια πιλοτική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού ισχύος 2 MWe τη δεκαετία του '80 η οποία ωστόσο αντιμετώπισε σοβαρά προβλήματα λόγω αστοχιών στο σχεδιασμό και μετά από έντονη αντίδραση των κατοίκων του νησιού σταμάτησε τη λειτουργία της⁷. Η αντίδραση αυτή έβαλε φρένο στο ενδιαφέρον για τις θέσεις υψηλής ενθαλπίας και μέχρι σήμερα δεν έχει δημιουργηθεί κάποια αντίστοιχη εγκατάσταση, ωστόσο η ΔΕΗ Ανανεώσιμες έχει εκδηλώσει ενδιαφέρον για την εκμετάλλευσή τους..

⁷ Η βασική αιτία που οδήγησε σε αντιδράσεις ήταν οι έντονες οσμές από την έκλυση υδρόθειου το οποίο δεν είχε προβλεφθεί να δεσμεύεται από τη μονάδα

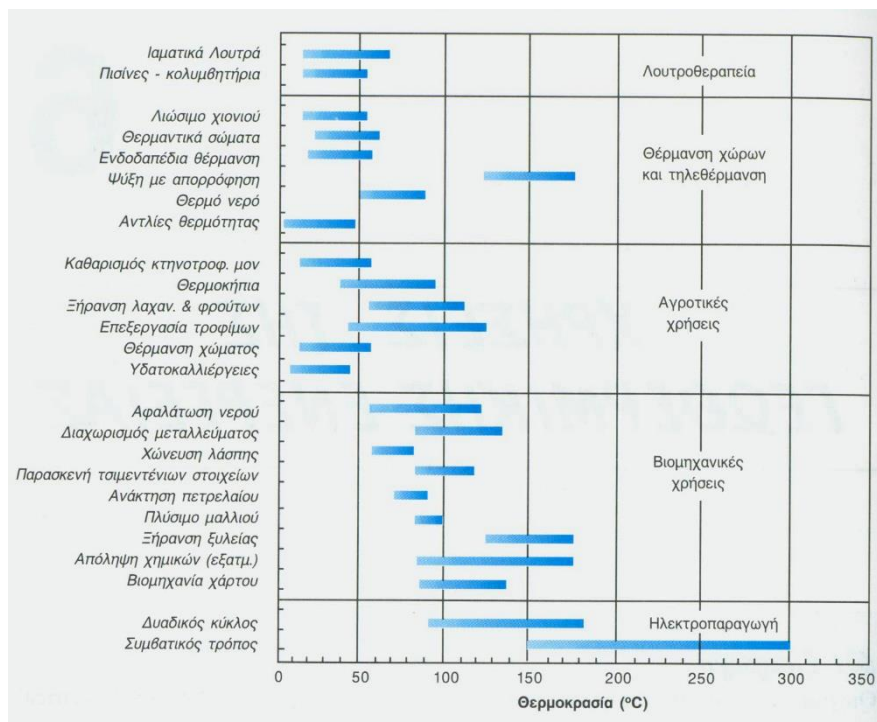
Πέρα από αυτά τα δύο πεδία, θέσεις με θερμοκρασίες 30-90 °C που χαρακτηρίζονται ως πεδία τοπικού ενδιαφέροντος υπάρχουν σε 30 τοποθεσίες στην ελληνική επικράτεια (κάποιες δεν είναι πλήρως επιβεβαιωμένες), κυρίως στην Ανατολική Μακεδονία και Θράκη και το Βόρειο Αιγαίο. Αυτές οι τοποθεσίες δεν είναι κατάλληλες για ηλεκτροπαραγωγή αλλά έχουν σημαντικές προοπτικές ανάπτυξης με στόχο τη θέρμανση των γύρω πόλεων και χωριών. Χαρακτηριστικά αναφέρονται:

1. Γεωθερμικό πεδίο Αρίστινου, ανατολικά της Αλεξανδρούπολης το οποίο λόγω μεγάλου μεγέθους και γειτνίασης με την πόλη θα μπορούσε να καλύπτει μερικώς ή ενδεχομένως πλήρως τις ανάγκες θέρμανσης
2. Γεωθερμικό πεδίο Ερατεινού Καβάλας, λίγο δυτικά της Χρυσούπολης. Τα χαρακτηριστικά του πεδίου το καθιστούν ικανό να καλύπτει τις ανάγκες θέρμανσης της κωμόπολης ενώ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για αγροτικές χρήσεις στη γύρω περιοχή.
3. Γεωθερμικό πεδίο Πολυχίτου Λέσβου. Η κωμόπολη αποτελεί κέντρο ιαματικού τουρισμού και το πεδίο εκτιμάται πως θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης του χωριού.

Η βασική χρήση της γεωθερμίας στην Ελλάδα είναι μέχρι στιγμής οι γεωθερμικές αντλίες θερμότητας οι οποίες συγκεντρώνουν το ενδιαφέρον λόγω της συνέργειάς τους με τον κτηριακό τομέα. Όσον αφορά άλλες εφαρμογές, στη χώρα υπάρχουν αρκετές τοποθεσίες ιαματικών πηγών που αξιοποιούνται ενώ υπάρχουν και μερικές εγκαταστάσεις αξιοποίησης γεωθερμικής ενέργειας κυρίως σε θερμοκήπια. Στην Κίμωλο είχε κατασκευαστεί δοκιμαστική εγκατάσταση αφαλάτωσης η οποία λειτούργησε πιλοτικά για μερικά χρόνια ωστόσο εγκαταλείφθηκε στη συνέχεια.

2.5: Εκμετάλλευση γεωθερμικής ενέργειας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η γεωθερμική ενέργεια μπορεί να αξιοποιηθεί σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και σε μεγέθη από μερικά kW μέχρι εκατοντάδες MW. Στο διάγραμμα Lindal που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 φαίνονται οι τυπικές απαιτήσεις θερμοκρασίας των γεωθερμικών ρευστών ανάλογα την εφαρμογή:



Σχήμα 2.1: Διάγραμμα Lindal

Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως σε κάθε γεωθερμική εφαρμογή είναι σημαντικό το γεωθερμικό ρευστό αφού χρησιμοποιηθεί, να επιστρέφεται με ξεχωριστή γεώτρηση (αν φυσικά ο ταμιευτήρας είναι σε βάθος που να χρειάζεται γεώτρηση) στο γεωθερμικό ταμιευτήρα ώστε η γεωθερμία να είναι πράγματι ανανεώσιμη. Εάν δεν πραγματοποιείται επανεισαγωγή τότε ο ταμιευτήρας θα αρχίσει να χάνει πολύ πιο γρήγορα από το φυσικό ρυθμό την δυνατότητα να παρέχει ενέργεια, αχρηστεύοντας την όποια εγκατάσταση εκμετάλλευσης είναι δηλαδή πολύ βασικό να δίνεται ειδική μέριμνα στη διαχείριση του γεωθερμικού ταμιευτήρα ώστε να μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά για αρκετό χρονικό διάστημα χωρίς παράλληλα να επιφέρει σημαντικές αλλαγές στο γύρω περιβάλλον.

Σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεωθερμική ενέργεια, οι βασικότερες διατάξεις που έχουν αναπτυχθεί είναι οι εξής:

- Συστήματα Ξηρού ατμού. Σε περιοχές όπου το κύριο γεωθερμικό ρευστό είναι ο ατμός είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρισμού με έναν συμβατικό κύκλο με αμοστρόβιλο. Μετά τον αμοστρόβιλο μπορεί ο ατμός να απελευθερώνεται

απευθείας στην ατμόσφαιρα ή να συμπυκνώνεται και να επανεισέρχεται στο γεωθερμικό ταμιευτήρα. Φυσικά καλύτερη απόδοση έχει το δεύτερο σύστημα το οποίο όμως είναι πιο πολύπλοκο και έχει μεγαλύτερους χρόνους κατασκευής. Παρότι αυτή η περίπτωση είναι η ιδανικότερη για ηλεκτροπαραγωγή, τα πεδία στον κόσμο όπου ο ατμός είναι το κυρίαρχο ρευστό είναι πολύ λίγα.

- Συστήματα υγρού – διαχωριζόμενου ατμού. Είναι η πιο συχνή περίπτωση μιας και τα περισσότερα γεωθερμικά πεδία δεν έχουν καθαρό ατμό. Διακρίνονται οι εξής δύο βασικές περιπτώσεις:
 - Σύστημα στιγμιαίας ατμοποίησης. Είναι η πιο κοινή διάταξη σε γεωθερμικούς σταθμούς παραγωγής [6]. Το γεωθερμικό ρευστό καθώς ανεβαίνει προς την επιφάνεια διοχετεύεται στο διαχωριστή στον οποίο λόγω απότομης πτώσης πίεσης ένα μέρος του ρευστού ατμοποιείται στιγμιαία. Ο ατμός που προκύπτει κατευθύνεται προς τον ατμοστρόβιλο ενώ το υπόλοιπο ρευστό επανεισέρχεται στον ταμιευτήρα από ένα φρεάτιο επανέγχυσης ή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κάποια άλλη θερμική διεργασία λόγω της υψηλής του ακόμα θερμοκρασίας. Μετά τον ατμοστρόβιλο, ο ατμός συμπυκνώνεται και εντέλει επανεγχύεται στον ταμιευτήρα. Τέτοιες διατάξεις μπορούν να έχουν ισχύ μέχρι και 100 MW με τον ατμό να προτιμάται να έχει θερμοκρασία γύρω στους 160 °C και πίεση 0,5-0,6 MPa [5].
 - Σύστημα δυαδικού κύκλου (Binary Cycle): Σε αυτά τα συστήματα το γεωθερμικό ρευστό θερμαίνει μέσω εναλλάκτη θερμότητας ένα δεύτερο ρευστό το οποίο αποτελεί και το εργαζόμενο μέσο. Το εργαζόμενο μέσο είναι συνήθως οργανικό ρευστό με σημείο βρασμού κάτω των 100 °C ώστε να μπορεί να ατμοποιηθεί και να παράξει ενέργεια σε ένα στρόβιλο. Το εργαζόμενο μέσο εκτελεί ένα κλειστό κύκλο σε αντίθεση με το γεωθερμικό ρευστό το οποίο αφού αποδώσει μέρος της ενέργειάς του στο οργανικό ρευστό επιστρέφει στον ταμιευτήρα [6]. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των διατάξεων είναι πως δεν υπάρχει θέμα επικαθίσεων στο στρόβιλο ή το συμπυκνωτή μιας και το οργανικό ρευστό είναι «καθαρό» ωστόσο οι ιδιοκαταναλώσεις τέτοιων σταθμών είναι σημαντικές και μειώνουν την απόδοση.

2.6: Ανασκόπηση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της γεωθερμικής ενέργειας

Στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της γεωθερμικής ενέργειας:

Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα γεωθερμικής ενέργειας

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Είναι ανανεώσιμη και φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας	Ειδικά για τα πεδία υψηλή θερμοκρασίας, ο χώρος εκμετάλλευσης μπορεί να είναι αρκετά απομακρυσμένος από την κατανάλωση
Είναι η πιο αξιόπιστη ΑΠΕ καθώς είναι διαθέσιμη συνεχώς και στο 100%, με πολύ υψηλούς συντελεστές εκμεταλλευσιμότητας	Απαιτείται επανέγχυση των γεωθερμικών ρευστών ώστε να είναι δυνατή η λειτουργία σε βάθος χρόνου χωρίς τον κίνδυνο εξάντλησης του ταμειυτήρα
Παρότι είναι ίδιας φιλοσοφίας, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας από γεωθερμία είναι αρκετά απλούστεροι των σταθμών ορυκτών καυσίμων	Οι γεωθερμικές εγκαταστάσεις απαιτούν προσεχτική μελέτη καθώς διαρροή αερίων από το υπέδαφος μπορεί να έχει αρνητικά αποτελέσματα (οσμές, θόρυβος, αλλαγές στο τοπικό περιβάλλον)
Μπορεί να αξιοποιηθεί σε πάρα πολλές εφαρμογές και σε πολλά μεγέθη ισχύος	Σχετικά υψηλό αρχικό κόστος που δυσκολεύει την ανάπτυξη της τεχνολογίας

3. Γεωθερμικές αντλίες θερμότητας

3.1: Εισαγωγή

Τα άνω στρώματα του εδάφους που είναι σε επαφή με τον περιβαλλοντικό αέρα παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή θερμοκρασίας στη διάρκεια του έτους. Μόλις μερικά μέτρα κάτω από την επιφάνεια ωστόσο η κατάσταση αλλάζει. Τόσο λόγω αποθήκευσης της προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας όσο και εξαιτίας της ροής θερμότητας από το εσωτερικό του πλανήτη, το υπέδαφος έχει την ιδιότητα να διατηρεί μια σχεδόν ομοιόμορφη θερμοκρασία όλο το χρόνο αγνοώντας τυχόν ακραίες μεταβολές στην επιφάνεια. Αυτή η πρακτικά σταθερή θερμοκρασία φυσικά διαφέρει ανάλογα την περιοχή με τη μέση ετήσια τιμή να κυμαίνεται συνήθως στο διάστημα 15-25 °C.

Η προαναφερθείσα δυνατότητα έχει ως αποτέλεσμα το έδαφος να μπορεί να λειτουργήσει ως ένα θερμοδοχείο σταθερής θερμοκρασίας καθιστώντας το έτσι ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές ψύξης και θέρμανσης. Έστω για παράδειγμα πως ένας χώρος ψύχεται το καλοκαίρι με το κλασικό σύστημα διαιρούμενου τύπου (split unit). Τις πρώτες εβδομάδες του καλοκαιριού η λειτουργία του είναι ικανοποιητική καθώς αποβάλλει θερμότητα σε ένα περιβάλλον γύρω στους 30 °C το οποίο είναι στα πλαίσια εύρυθμης λειτουργίας του. Ωστόσο, όταν υπάρχουν περίοδοι καύσωνα με τις θερμοκρασίες να ξεπερνούν τους 35 °C η απόδοσή του πέφτει αισθητά αδυνατώντας να παρέχει την απαιτούμενη ψύξη όπως γρήγορα συνειδητοποιεί κανείς. Η αιτία της ανεπαρκούς λειτουργίας του είναι το γεγονός πως η συμπύκνωση του εργαζόμενου μέσου γίνεται απορρίπτοντας θερμότητα στο περιβάλλον το οποίο ωστόσο στις περιόδους καύσωνα είναι από μόνο του πάρα πολύ ζεστό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το μηχάνημα να φτάνει στα όριά του, εκτοξεύοντας παράλληλα στα ύψη την κατανάλωση ενέργειας στο συμπιεστή του ψυκτικού κύκλου, χωρίς όπως να έχει ουσιαστικό αντίκτυπο στο χώρο που προσπαθεί να κλιματίσει.

Η προβληματική λειτουργία ενός κλασικού κλιματιστικού σε περιπτώσεις ακραίων θερμοκρασιών έγκειται στην αδυναμία απόρριψης θερμότητας. Το ζήτημα θα μπορούσε να λυθεί εάν η θερμότητα απορριπτόταν σε ένα μέσο χαμηλότερης από το περιβάλλον θερμοκρασίας και εδώ ακριβώς κουμπώνει ιδανικά η δυνατότητα του εδάφους να διατηρεί τη θερμοκρασία του. Ακόμα και στον πιο ακραίο καύσωνα η θερμοκρασία του εδάφους δε θα ξεπεράσει τους 27-28 °C, καθιστώντας το ιδανικό μέσο για να απορριφθεί η θερμότητα του χώρου καθόσον τα μηχανήματα ψύξης θα πρέπει να διώξουν τη θερμότητα σε ένα περιβάλλον 27-28 °C και όχι 40 °C που είναι ο εξωτερικός αέρας. Αντίστοιχα το χειμώνα, αντί να πρέπει το κλιματιστικό να «τραβήξει» θερμότητα από αέρα 10 °C, μια γεωθερμική αντλία θερμότητας «αντλεί» θερμότητα από το έδαφος θερμοκρασίας πχ 15-20 °C με σημαντικά οφέλη για την απόδοση και κατά συνέπεια την κατανάλωση ενέργειας της όλης διαδικασίας.

Σε περιπτώσεις που στο υπέδαφος υπάρχει ένας υπόγειος ταμιευτήρας νερού του οποίου ο όγκος δε μεταβάλλεται σημαντικά, ακόμα και αυτός θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί. Όμοια με το έδαφος, το υπόγειο νερό διατηρεί τη θερμοκρασία του σχετικά σταθερή σε σχέση με τον περιβαλλοντικό αέρα επομένως και αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί ως θερμοδοχείο. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το νερό αντλείται μέσω γεωτρήσεων και είτε απευθείας αποτελεί την πηγή θερμότητας μιας αντλία θερμότητας (ΑΘ) είτε μέσω εναλλακτών θερμότητας αποδίδει μέρος της ενέργειάς του σε ένα δευτερεύον κύκλωμα νερού, κυρίως ώστε τα άλατα που πιθανώς περιέχει να μην έρθουν σε επαφή με τις αντλίες θερμότητας και τις διαβρώσουν. Οι τρεις βασικοί τύποι συστημάτων εκμετάλλευσης αβαθούς γεωθερμικής ενέργειας είναι οι εξής:

- Εδαφικά συνδεδεμένες αντλίες θερμότητας. Στην αγγλική ορολογία εμφανίζονται ως Ground-Coupled Heat Pumps (GCHP). Αποτελούν συστήματα κλειστού κύκλου (closed-loop piping systems) τα οποία εναλλάσσουν θερμότητα με το υπέδαφος
- Αντλίες θερμότητας υπόγειου νερού. Στην αγγλική ορολογία αναφέρονται ως Ground-Water Heat Pumps (GWHP). Είναι συστήματα ανοικτού κύκλου (open-loop piping systems) τα οποία εκμεταλλεύονται το νερό που υπάρχει στο υπέδαφος.
- Αντλίες θερμότητας επιφανειακού νερού (SWHP: Surface Water Heat Pumps) οι οποίες εκμεταλλεύονται τη θερμότητα ενός επιφανειακού όγκου νερού, όπως πχ μια λίμνη

Ο «βαθμός απόδοσης» της όλης διαδικασίας εκφράζεται μέσω του λεγόμενου συντελεστή λειτουργίας COP (Coefficient of Performance). Ο συντελεστής λειτουργίας εκφράζεται μέσω της Σχέσης 3.1.

$$\text{COP} = \frac{|Q|}{|W_{\text{in}}|} \quad (3.1)$$

Στη Σχέση 3.1:

- Q: Το ωφέλιμο ποσό θερμότητας που συναλλάσσεται. Ανάλογα το αν η ΓΑΘ λειτουργεί για ψύξη ή θέρμανση ορίζεται COP_c για τη λειτουργία ψύξης και COP_h για τη λειτουργία θέρμανσης καθώς η απόδοση στη γενική περίπτωση δεν είναι ίδια στις δύο διεργασίες
- W_{in}: Το απαιτούμενο έργο για την πραγματοποίηση του κύκλου. Η πιο συχνή περίπτωση είναι το απαιτούμενο έργο να δίνεται μέσω ενός συμπιεστή ο οποίος τροφοδοτείται από ηλεκτρική ενέργεια

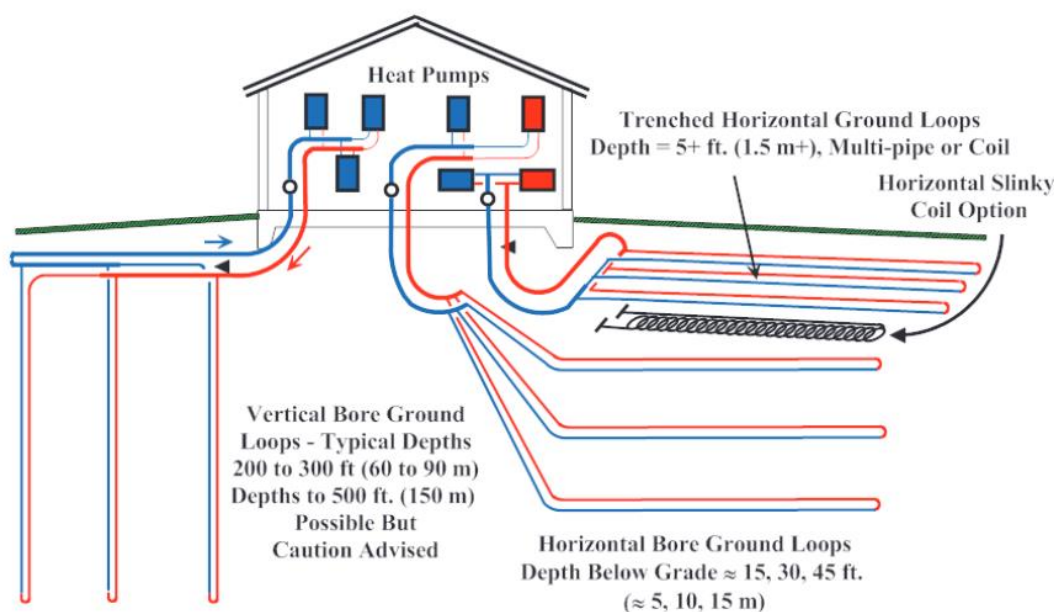
3.2: Βασικές συνιστώσες συστημάτων εκμετάλλευσης αβαθούς γεωθερμίας

Για την εκμετάλλευση της αβαθούς γεωθερμίας έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες αξιοποίησης οι οποίες βασίζονται είτε στην απευθείας εναλλαγή θερμότητας με το έδαφος είτε στην αξιοποίηση θερμών ρευστών (κατά κύριο λόγο νερού με προσμίξεις αλάτων ή/και άλλων ουσιών). Τα επιμέρους κομμάτια αυτών των συστημάτων, ανεξάρτητα από την ακριβή διάταξη, διακρίνονται σε:

- Εναλλάκτης θερμότητας
- Γεωθερμική αντλία θερμότητας (ΓΑΘ)
- Σύστημα διανομής

3.2.1: Εδαφικά συνδεδεμένες αντλίες θερμότητας (GCHP)

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ένα δίκτυο αντλιών θερμότητας συνδεδεμένων με έναν κλειστού τύπου εναλλάκτη θερμότητας θαμμένο στο έδαφος [10]. Ο εναλλάκτης θερμότητας αποτελείται συνήθως από σωληνώσεις υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE: High-Density Polyethylene) τοποθετημένες είτε κατακόρυφα είτε οριζόντια. Μέσα σε αυτές τις σωληνώσεις κυκλοφορεί νερό (πολλές φορές έχει προστεθεί και κάποιος αντιπηκτικός παράγοντας, πχ κάποια γλυκόλη) το οποίο μέσω των τοιχωμάτων των σωληνώσεων συναλλάσσει την απαραίτητη θερμότητα με το υπέδαφος. Το νερό που επιστρέφει από τον εναλλάκτη, ανάλογα την εποχή, είτε παρέχει είτε απάγει θερμότητα από τη ΓΑΘ (ή και από πολλές ΓΑΘ) η οποία με τη σειρά της φροντίζει για την επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών στο χώρο ή χώρους που κλιματίζει. Τυπικές διαμορφώσεις τέτοιων συστημάτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.1:



Εικόνα 3.1: Σύστημα κλειστού κύκλου με τις διάφορες εκδοχές της διάταξης των εναλλακτών θερμότητας [10]

Όπως φαίνεται και από την Εικόνα 3.1, τέτοιες διατάξεις μπορούν να έχουν κατακόρυφο ή οριζόντιο εναλλάκτη θερμότητας. Η επιλογή ενός κατακόρυφου εναλλάκτη είναι κατάλληλη όταν ο διαθέσιμος χώρος στην επιφάνεια είναι περιορισμένος. Κύρια χαρακτηριστικά των κατακόρυφων διατάξεων είναι η μικρή κατανάλωση ενέργειας στους κυκλοφορητές του δικτύου, το χαμηλό λειτουργικό κόστος και η υψηλή απόδοση. Το τυπικό βάθος των γεωτρήσεων στις οποίες τοποθετούνται οι εναλλάκτες είναι 60-90 m, ωστόσο μπορεί να ξεπεράσει και τα 150 m υπό προϋποθέσεις⁸. Ανάλογα τις απαιτήσεις του κτηρίου μπορεί να είναι αναγκαία πάνω από μια γεώτρηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων πρέπει να πληροί κάποιες ελάχιστες προδιαγραφές ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος θερμικής αλληλεπίδρασης μεταξύ γειτονικών γεωτρήσεων κάτι που θα επηρέαζε σημαντικά την αποδοτικότητα του συστήματος. Το βασικό τους μειονέκτημα είναι πως η αρχική επένδυση είναι μεγαλύτερη και δεν υπάρχει έμπειρο προσωπικό στο βαθμό που υπάρχει για τους οριζόντιους εναλλάκτες. Οριζόντιοι εναλλάκτες τοποθετούνται σε περιπτώσεις όπου ο διαθέσιμος χώρος είναι εκτενής. Η πιο τυπική διάταξη είναι αυτή που φαίνεται πάνω δεξιά στην Εικόνα 3.1, με τον εναλλάκτη να είναι τοποθετημένος σε ένα σκάμα βάθους 1,5 – 2,0 m. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι το χαμηλό κόστος και η ευκολία τοποθέτησης ενώ στον αντίποδα, βασικό τους μειονέκτημα είναι ότι απαιτούν μεγάλες εκτάσεις, η μικρότερη απόδοση σε ψύξη και η αδυναμία φύτευσης πάνω από τον εναλλάκτη [5].

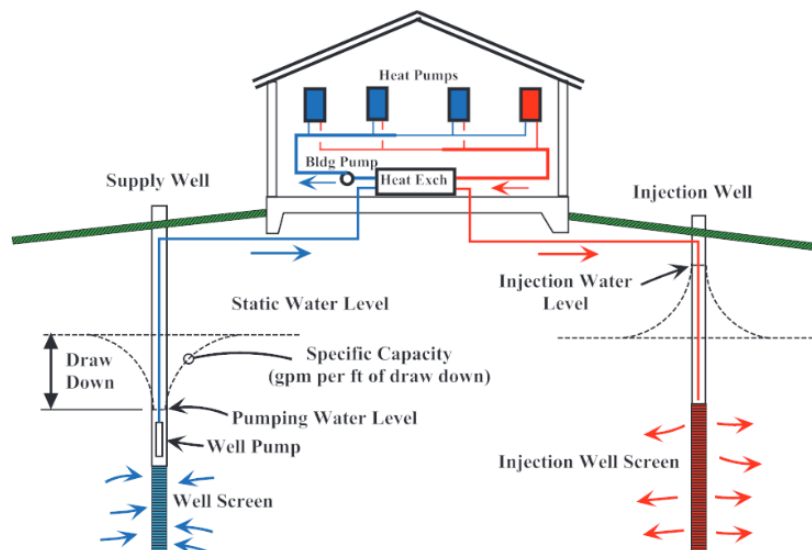
3.2.2: Αντλίες θερμότητας υπόγειου νερού (GWHP)

Σε αυτού του τύπου τις εφαρμογές αντί για εναλλαγή θερμότητας με το έδαφος χρησιμοποιείται νερό που συγκεντρώνεται σε κοιλοότητες στο υπέδαφος. Μέχρι και την πρόσφατη εμφάνιση και ανάπτυξη των GCHP, οι GWHP ήταν ο πιο διαδεδομένος τύπος συστημάτων γεωθερμικών αντλιών [10]. Για την εκμετάλλευση του νερού διανοίγονται πηγάδια πρόσληψης αλλά και επανεισαγωγής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς πρέπει να διαταράσσεται όσο το δυνατόν λιγότερο η ποσότητα του νερού που υπάρχει ώστε και να είναι δυνατή η εκμετάλλευση του για σημαντικό χρονικό διάστημα αλλά και ώστε να μην αλλοιωθούν τα χαρακτηριστικά του υπεδάφους στη συγκεκριμένη περιοχή το οποίο θα μπορούσε να δημιουργήσει σοβαρά ζητήματα. Επειδή το νερό στο υπέδαφος περιέχει συνήθως διαβρωτικούς παράγοντες και χαρακτηρίζεται γενικά από χαμηλή ποιότητα, στην πλειοψηφία των μη οικιακών εφαρμογών χρησιμοποιείται ένας ενδιάμεσος πλακοειδής εναλλάκτης. Ο εναλλάκτης αυτός συνδέει το κύκλωμα του υπόγειου νερού με το νερό του κυκλώματος του κτηρίου χωρίς τα δύο να έρχονται σε άμεση επαφή. Μια τέτοια διάταξη παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2. Ο πλακοειδής εναλλάκτης που χρησιμοποιείται είναι κατασκευασμένος από κράμα τιτανίου και προτιμάται για τους εξής λόγους:

- Ανθεκτικός στη διάβρωση
- Η αποσυναρμολόγηση είναι πολύ απλή και η ισχύς μπορεί να μεταβληθεί με την προσθήκη ή αφαίρεση πλακών
- Δύσκολα παρουσιάζονται επικαθίσεις λόγω υψηλών σχετικά ταχυτήτων ροής

⁸ Τοποθέτηση σωλήνων σε τέτοια βάθη απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή και όσο το βάθος αυξάνεται τα πιθανά προβλήματα πολλαπλασιάζονται. Επιπλέον οι υδραυλικές απώλειες και άρα η απαιτούμενη ισχύς στις αντλίες μεγαλώνει το οποίο μπορεί να καθιστά μια τόσο βαθιά γεώτρηση μη συμφέρουσα

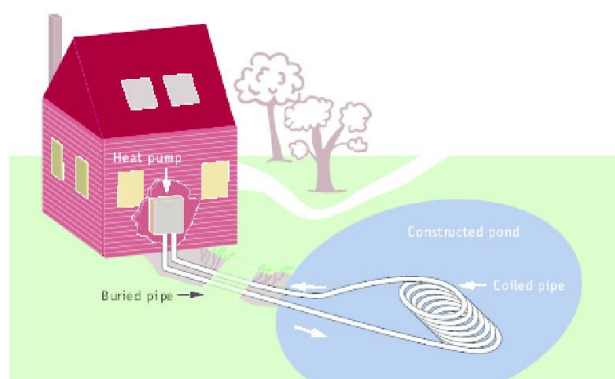
- Καλή θερμική συμπεριφορά



Εικόνα 3.2: Σύστημα αντλιών θερμότητας υπόγειου νερού με ενδιάμεσο εναλλάκτη θερμότητας σε λειτουργία ψύξης [10]

3.2.3: Αντλίες θερμότητας επιφανειακού νερού (SWHP)

Τέτοιες εφαρμογές προϋποθέτουν φυσικά την ύπαρξη ενός επιφανειακού σώματος νερού σε σχετικά μικρή απόσταση από το κτήριο. Μπορούν να είναι κλειστού τύπου όπως μια διάταξη GCHP ή και ανοικτού τύπου, όμοια με μια διάταξη GSHP [10]. Η εκμετάλλευση γίνεται με σωλήνες κατασκευασμένους από HDPE οι οποίοι πρέπει να έχουν και επίστρωση προστασίας από την ηλιακή ακτινοβολία ώστε να μην αλλοιωθούν. Κλειστού τύπου συστήματα επιφανειακού νερού χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος και μικρή κατανάλωση ενέργειας στους κυκλοφορητές ωστόσο η απόδοσή τους μπορεί να μειωθεί αν ο όγκος του νερού είναι σχετικά μικρός και άρα δε διατηρεί ικανοποιητικά τη θερμοκρασία του στη διάρκεια του χρόνου. Ανοικτού τύπου συστήματα μπορούν να χρησιμοποιούν είτε απευθείας το επιφανειακό νερό ή έμμεσα, με έναν εναλλάκτη θερμότητας να παρεμβάλλεται (όμοια με την Εικόνα 3.2). Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται ένα τυπικό κλειστό σύστημα (closed-loop system) επιφανειακού νερού.



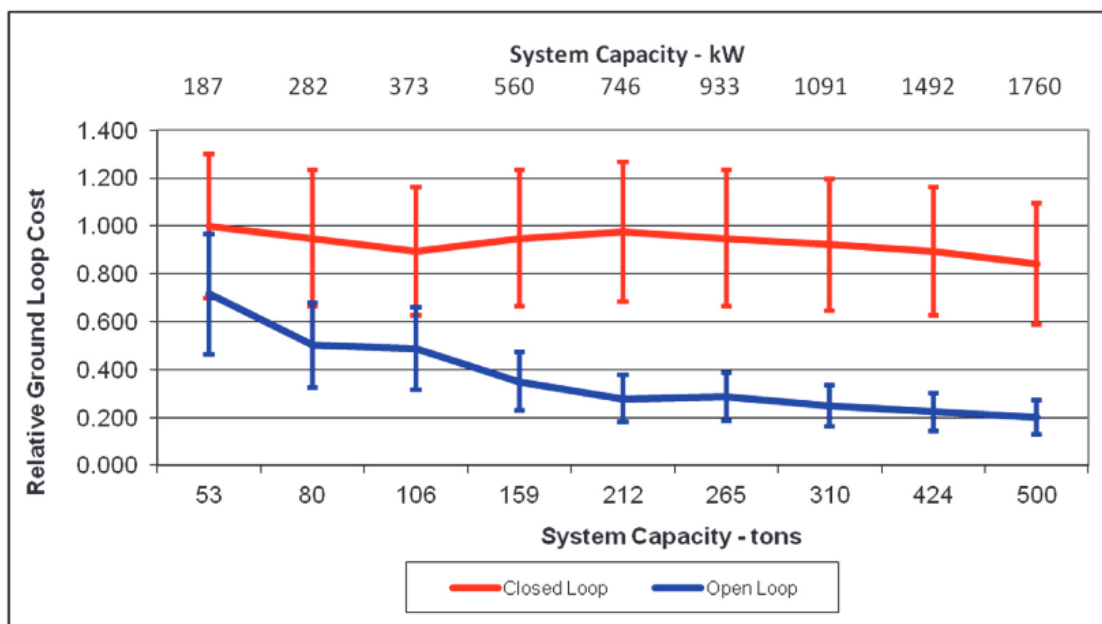
Εικόνα 3.3: Τυπική διάταξη κλειστού συστήματος επιφανειακού νερού

3.3: Σύγκριση των συστημάτων GCHP και GWHP

Η θεμελιώδης διαφορά των δύο συστημάτων είναι φυσικά το μέσο με το οποίο γίνεται η συναλλαγή θερμότητας. Η ανάγκη ύπαρξης ενός σταθερού όγκου υπόγειου νερού περιορίζει σημαντικά τις πιθανές τοποθεσίες όπου είναι δυνατή η χρήση συστημάτων GWHP. Επιπλέον, περιβαλλοντικές διατάξεις που αφορούν την αξιοποίηση του υδροφόρου ορίζοντα ενδέχεται να απαγορεύουν την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων σε κάποιες περιοχές με υπόγεια νερά, μειώνοντας ακόμα περισσότερο τις πιθανές τοποθεσίες αξιοποίησης. Η τοποθέτηση δηλαδή ΓΑΘ που συναλλάσσουν θερμότητα με το έδαφος είναι πολύ πιο ευέλικτη όσον αφορά το που μπορεί να πραγματοποιηθεί και με ποιες νομοθετικές προϋποθέσεις.

Η χρήση νερού στα συστήματα GWHP φέρνει στο τραπέζι και προβλήματα συντήρησης και διάβρωσης που δεν συναντώνται στα GCHP συστήματα. Ειδικά σε περιπτώσεις που το υπόγειο νερό έχει πολλά άλατα η προστασία έναντι διάβρωσης είναι πολύ βασική ώστε να μην αυξηθεί υπέρογκα το κόστος συντήρησης του εξοπλισμού. Ωστόσο, η αξιοποίηση του νερού απαιτεί πολύ μικρότερη έκταση γης σε σχέση ακόμα και με κατακόρυφες διατάξεις GCHP. Ο μόνος περιορισμός που ενδέχεται να αλλάξει αυτή τη σχέση απαιτούμενης γης είναι η ελάχιστη απαραίτητη απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων προσαγωγής και επανεισαγωγής στα συστήματα GWHP.

Πολύ βασική παράμετρος κάθε συστήματος είναι το κόστος του. Η τεχνολογία αξιοποίησης υπόγειου νερού είναι παλαιότερη (οι πρώτες εφαρμογές ξεκίνησαν τη δεκαετία του '60 στις ΗΠΑ) και έτσι υπάρχουν στην αγορά περισσότεροι εργολάβοι που μπορούν να αναλάβουν τις απαραίτητες γεωτρήσεις, προσφέροντας κατά αυτόν τον τρόπο εναλλακτικές που μπορούν να μειώσουν το συγκεκριμένο κόστος [10]. Από την άλλη, η τεχνογνωσία για συστήματα GCHP είναι ακόμα σε πιο πρώιμο στάδιο και ειδικά για κατακόρυφες διατάξεις είναι πιο δυσεύρετοι έμπειροι εργολάβοι. Σχετικά με τις καταναλώσεις, ανοικτού τύπου συστήματα σαν τα GWHP χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη αντλητική ισχύ αλλά από την άλλη συνήθως λειτουργούν σε θερμοκρασίες πιο ευνοϊκές για τις αντλίες θερμότητας με αποτέλεσμα η συνολική απόδοση των δύο συστημάτων να είναι συγκρίσιμη. Γενικά πάντως, όσο μεγαλύτερη η απαιτούμενη ισχύς του συστήματος τόσο τα οικονομικά μεγέθη των GWHP συστημάτων βελτιώνονται όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.4. Ο λόγος είναι πως μεγαλύτερη ροή νερού συνεπάγεται μικρότερη διαφορά θερμοκρασίας στο νερό στην ΑΘ (πχ σε λειτουργία ψύξης, η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού θα μικραίνει όσο η παροχή μεγαλώνει) το οποίο οδηγεί σε καλύτερη ενεργειακή απόδοση στην ΑΘ.



Εικόνα 3.4: Συγκριτικά κόστη συστημάτων (κόκκινο χρώμα) και GWHP (μπλε χρώμα) [10]

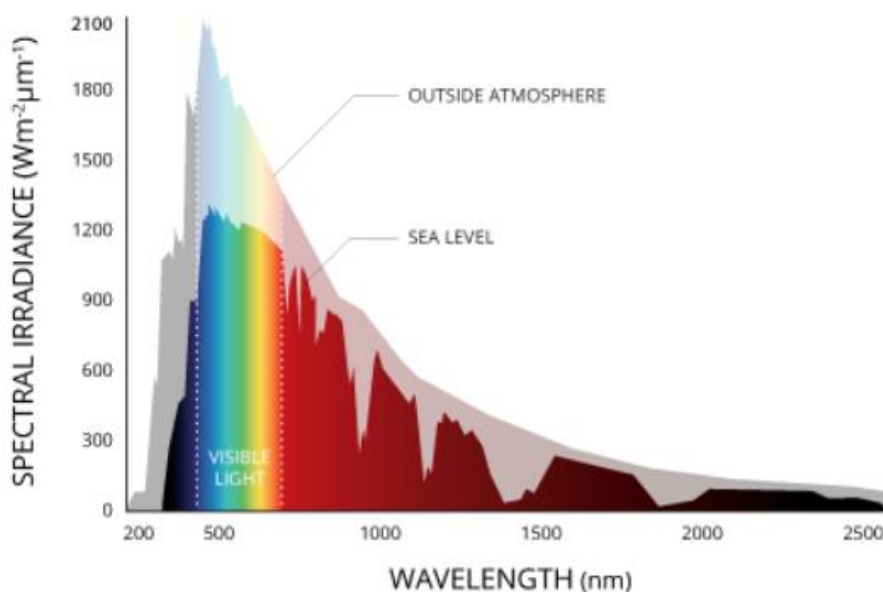
Σε κάθε περίπτωση η πιο ανταγωνιστική λύση δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή, με τυχόν υπερδιαστασιολογήσεις σε συστήματα νερού να αυξάνουν υπέρμετρα το κόστος της εγκατάστασης, ωστόσο γενικά, όσο μεγαλύτερη η ισχύς, τόσο πιο οικονομικά είναι τα συστήματα GWHP. Οι περιορισμένες τοποθεσίες στις οποίες μπορούν να εγκατασταθούν συστήματα GWHP είναι ο βασικός λόγος που δεν χρησιμοποιούνται ευρέως και δεν αναμένεται να αξιοποιηθούν πιο μαζικά.

4. Ηλιακή Ενέργεια

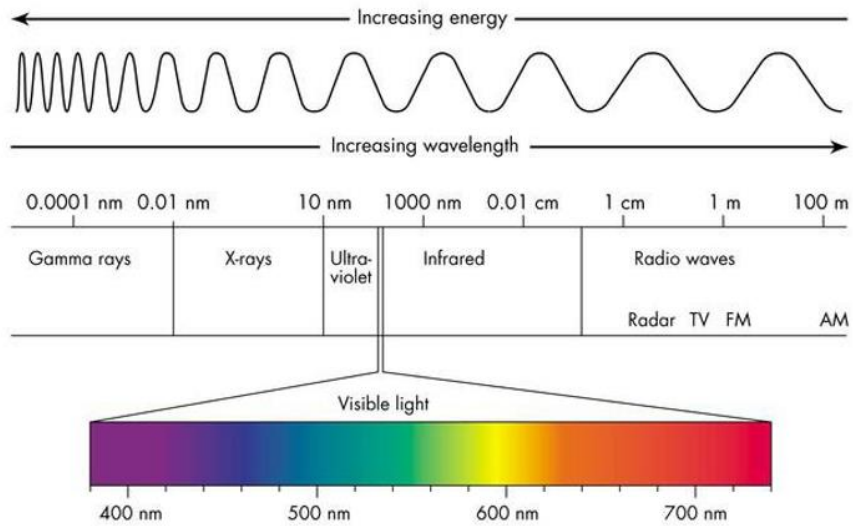
4.1: Ηλιακή ακτινοβολία

Η ενέργεια που φτάνει στην επιφάνεια της γης δεν είναι παρά ένα απειροελάχιστο κλάσμα της συνολικά εκπεμπόμενης ενέργειας, υπό μορφή ακτινοβολίας, από τον ήλιο. Οι θερμοπυρηνικές αντιδράσεις σύντηξης κατά τις οποίες υδρογόνο (Hydrogen) μετατρέπεται σε ήλιο (Helium) με ρυθμό εκατομμυρίων τόνων το δευτερόλεπτο αποτελούν την τεράστια πηγή ενέργειας στο κέντρο του ηλιακού μας συστήματος. Οι θερμοκρασίες στο κέντρο του ήλιου υπολογίζεται πως ξεπερνούν τους δέκα (10) εκατομμύρια βαθμούς Κέλβιν ενώ η ακτινοβολία από την επιφάνεια του Ήλιου, θερμοκρασίας περίπου 5.600 Κέλβιν, είναι ικανές να διατηρούν τη μέση θερμοκρασία της Γης κοντά στους 15 °C, σε απόσταση περίπου εκατόν πενήντα εκατομμυρίων χιλιομέτρων από τον ίδιο τον ήλιο. Η ύπαρξη και διατήρηση της ζωής στη Γη οφείλεται πρακτικά εξ'ολοκλήρου σε αυτή την ενέργεια καθώς είναι 5.000 φορές μεγαλύτερη από το άθροισμα των υπόλοιπων πηγών ενέργειας (πυρηνική από διασπάσεις πυρήνων στο εσωτερικό του πλανήτη, γεωθερμική ενέργεια και βαρυτική ενέργεια) [4].

Η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στη Γη στο φάσμα των 250-2500 nm, το οποίο περιλαμβάνει περιοχές υπεριώδους (100-400 nm), ορατής (400-750 nm) και υπέρυθρης ακτινοβολίας (750 nm – 1 mm). Η υπέρυθρη (Infrared) ακτινοβολία αντιστοιχεί στο 49,4% της προσπίπτουσας ενέργειας, η ορατή (Visible) ακτινοβολία στο 42,3% και η υπεριώδης (Ultraviolet) ακτινοβολία στο υπόλοιπο 8,3% [11]. Στο Σχήμα 4.1 στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και στο Σχήμα 4.2 οι βασικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.



Σχήμα 4.1: Ενεργειακή κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο [11]



Σχήμα 4.2: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

4.2 Βασικά μεγέθη ηλιακής ακτινοβολίας

4.2.1: Ηλιακή Σταθερά – Ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας

Η ηλιακή σταθερά (G_{sc}) είναι ένα από τα βασικότερα μεγέθη καθώς πρόκειται για τη μέση ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα χρόνου που προσπίπτει σε μια επιφάνεια εκτός ατμόσφαιρας κάθετη προς τις ακτίνες του ήλιου. Η ηλιακή σταθερά αναφέρεται στη μέση απόσταση Ήλιου-Γης που ισούται με $149 \cdot 10^6$ χιλιόμετρα. Η τιμή της ηλιακής σταθεράς δεν είναι πάντοτε σταθερή στη βιβλιογραφία, με κάποιες παλαιότερες πηγές να την αναφέρουν ίση με 1.353 W/m^2 , τιμή η οποία σε πιο σύγχρονη βιβλιογραφία έχει αναθεωρηθεί στα 1.367 W/m^2 [4].

Καθώς η τροχιά της Γης γύρω από τον ήλιο είναι ελλειπτική, η απόσταση μεταξύ των δύο μεταβάλλεται μέσα στο χρόνο και άρα αλλάζει και η ακτινοβολία που φτάνει στη Γη εκτός ατμόσφαιρας. Η κάθετη ακτινοβολία εκτός ατμόσφαιρας G_{on} υπολογίζεται από τη Σχέση 4.1 όπου n είναι η ημέρα του έτους.

$$G_{on} = G_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)\right) \quad (4.1)$$

Να σημειωθεί πως η απόσταση Ήλιου-Γης είναι ελάχιστη στις 2 Ιανουαρίου (περιήλιο) και μέγιστη στις 2 Ιουλίου (αφήλιο), εξηγώντας γιατί στο Βόρειο Ημισφαίριο οι χειμώνες και τα καλοκαίρια είναι πιο ήπια σε σχέση με το Νότιο Ημισφαίριο.

4.2.2: Ηλιακή απόκλιση

Ο άξονας περιστροφής της Γης δεν είναι κάθετος με το επίπεδο του ισημερινού αλλά σχηματίζει με αυτό γωνία $23,45^\circ$. Σε αυτή τη γωνία οφείλονται οι εποχές, αφού κατά τη διάρκεια του χρόνου μεταβάλλεται η κατά τόπους προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία προκαλώντας τις θερμοκρασιακές μεταβολές που παρατηρούνται. Ως ηλιακή απόκλιση (solar declination) δ , ορίζεται η γωνία μεταξύ της ευθείας που διέρχεται από τα κέντρα Ήλιου-Γης και του επιπέδου που διέρχεται από τον Ισημερινό. Μέγιστη (αριθμητικά) τιμή λαμβάνει την $21^{\text{η}}$ Ιουνίου και ελάχιστη την $21^{\text{η}}$ Δεκεμβρίου (θερινό και χειμερινό ηλιοστάσιο αντίστοιχα). Για κάθε ημέρα του έτους η ηλιακή απόκλιση υπολογίζεται από τη Σχέση 4.2.

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left[\frac{360 \cdot (284+n)}{365}\right] \quad (4.2)$$

4.2.3: Ηλιακός χρόνος

Ηλιακός χρόνος ονομάζεται ο χρόνος που μετράται βάσει της φαινόμενης κίνησης του ήλιου στον ουρανό με βάση τον οποίο ως ηλιακό μεσημέρι νοείται η χρονική στιγμή που ο ήλιος τέμνει τον μεσημβρινό του παρατηρητή. Όπως είναι φυσικό, ο ηλιακός χρόνος δεν ταυτίζεται με τον τοπικό χρόνο καθώς για τον τοπικό χρόνο η ώρα ορίζεται θέτοντας στην ισημερία ως 12 το μεσημέρι την ώρα που ο ήλιος είναι στο ψηλότερο σημείο του ουράνιου θόλου [5].

Αυτή η κίνηση δημιουργεί αποκλίσεις - λόγω της ελλειπτικής τροχιάς της Γης – μεταξύ ηλιακού και τοπικού χρόνου οι οποίες υπολογίζονται βάσει της εξίσωσης χρόνου, του γεωγραφικού μήκους του παρατηρητή και του μεσημβρινού αναφοράς. Η εξίσωση χρόνου, E (σε λεπτά) δίνεται από τη Σχέση 4.3 και η διαφορά ηλιακού και τοπικού χρόνου από τη Σχέση 4.4.

$$E(\text{λεπτά}) = 9,87 \cdot \sin 2B - 7,53 \cdot \cos B - 1,5 \cdot \sin B, B = \frac{360 \cdot (n-81)}{365} \quad (4.3)$$

$$t_{\text{solar}} = t_{\text{clock}} \pm 4 \cdot (L_{\text{st}} - L_{\text{loc}}) + E \quad (4.4)$$

Στη Σχέση 4.4:

- L_{st} : Γεωγραφικό μήκος μεσημβρινού αναφοράς (πχ 30° για Ελλάδα)
- L_{loc} : Γεωγραφικό μήκος παρατηρητή
- ± 4 : Συντελεστής με μονάδες $\frac{\text{min}}{\text{μοίρες}}$, με + για δυτικά γεωγραφικά μήκη και – για ανατολικά γεωγραφικά μήκη

4.2.4: Γωνίες Ηλίου

Ωριαία γωνία ή γωνιακή μετατόπιση, ω : Πρόκειται για τη μετατόπιση του ήλιου δυτικά η ανατολικά του τοπικού μεσημβρινού λόγω της περιστροφής της Γης γύρω από τον άξονά της. Η περιστροφή αυτή έχει ρυθμό $\frac{0,25^\circ}{\text{min}}$ και η ωριαία γωνία δίνεται από τη Σχέση 4.5.

$$\omega (^{\circ}) = 0.25 \cdot (\text{min από ηλ. μεσημέρι}), \text{ θετικές τιμές για ώρες μ. μ.} \quad (4.5)$$

Γωνία ζενίθ, θ_z : Γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και τη γωνία θέασης του ήλιου.

Ηλιακό ύψος, $\alpha = 90 - \theta_z$: Γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ήλιου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο (Συμπληρωματική της γωνίας ζενίθ).

Αζιμούθιο επιφάνειας, γ : Γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της καθέτου στην επιφάνεια πάνω στο οριζόντιο επίπεδο και τη νότια κατεύθυνση. Λαμβάνει τιμές από -180° έως $+180^\circ$ με $\gamma = 0^\circ$ στο νότο και 90° στη δύση.

Αζιμούθιο ηλίου, γ_s : Γωνία που σχηματίζεται από την προβολή της ευθείας όρασης του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

Κλίση επιπέδου, β : Γωνία που σχηματίζεται μεταξύ μιας επίπεδης επιφάνειας με το οριζόντιο επίπεδο. Λαμβάνει τιμές από 0° έως 180° , με 0° να είναι το οριζόντιο επίπεδο και 90° το κατακόρυφο. ($\beta > 90^\circ$ σημαίνει πως το επίπεδο κοιτάει προς το έδαφος).

Γωνία πρόσπτωσης, θ : Γωνία που σχηματίζεται μεταξύ των προσπιπτουσών ακτινών του ήλιου σε επιφάνεια κεκλιμένου επιπέδου (γωνίας β) σε γεωγραφικό πλάτος φ και της καθέτου στην επιφάνεια. Η γωνία πρόσπτωσης στη γενική περίπτωση δίνεται από τη Σχέση 4.6:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta + \cos \delta \cdot \cos \omega \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega \\ &+ \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin \beta \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (4.6)$$

Για οριζόντιες επιφάνειες ($\beta = 0^\circ$) η γωνία πρόσπτωσης ταυτίζεται με τη γωνία ζενίθ και υπολογίζεται από τη Σχέση 4.7.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \quad (4.7)$$

Ωριαία γωνία δύσης ηλίου, ω_s : Υπολογίζεται από τη γωνία ζενίθ θέτοντας $\theta_z = 90^\circ$ στη Σχέση 4.7 και βρίσκεται μέσω της Σχέσης 4.8.

$$\cos \omega_s = - \frac{\sin \delta \cdot \sin \varphi}{\cos \delta \cdot \cos \varphi} \quad (4.8)$$

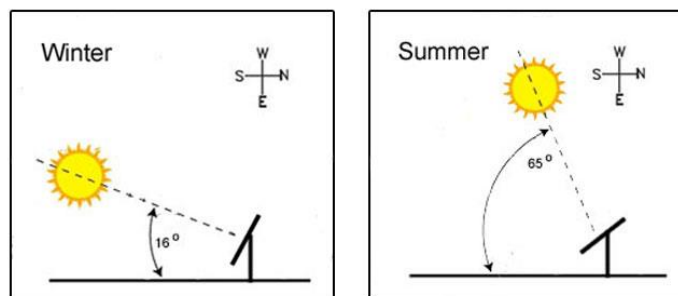
Διάρκεια ημέρας σε ώρες, N: Η ωριαία γωνία δύσης του ηλίου αποτελεί την γωνία που έχει ο ήλιος σε σχέση με τη νότια κατεύθυνση όταν δύει. Θεωρώντας πως η κίνηση του ήλιου στον ουράνιο θόλο είναι συμμετρική ως προς το νότο, και λαμβάνοντας υπόψη πως η Γη περιστρέφεται με ρυθμό 15° ανά ώρα, η διάρκεια της ημέρας μπορεί να υπολογιστεί σύμφωνα με τη Σχέση 4.9.

$$N = \frac{2}{15} \cdot \cos^{-1}(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (4.9)$$

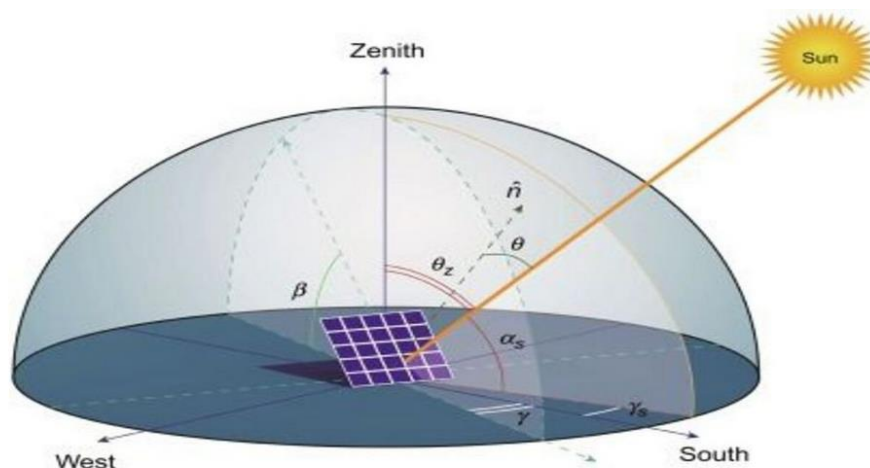
Βέλτιστος προσανατολισμός επιφάνειας: Ο βέλτιστος προσανατολισμός μιας επιφάνειας για μεγιστοποίηση της πρόσδοσης ενέργειας εξαρτάται από την τοποθεσία και την επιθυμητή χρήση. Όσον αφορά τα αζιμούθια επιφάνειας και ηλίου, το βέλτιστο σενάριο είναι να ισχύει $\gamma = \gamma_s$ ώστε η επιφάνεια να είναι προσανατολισμένη προς τον ήλιο. Αν δεν υπάρχει η δυνατότητα παρακολούθησης της πορείας του ήλιου (tracking system) ώστε $\gamma = \gamma_s$, για βόρειο ημισφαίριο προτιμάται $\gamma = 0^\circ$ καθώς ο ήλιος είναι πάντοτε νότια. Για την κλίση του συλλέκτη ειδικότερα:

- Για μέγιστη πρόσδοση ενέργειας όλο το χρόνο, η βέλτιστη κλίση ενός συλλέκτη πρέπει να είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος, δηλαδή $\beta \cong \varphi$
- Για χειμερινή λειτουργία η βέλτιστη κλίση είναι $\beta \cong \varphi + 15^\circ$. Το χειμώνα ο ήλιος είναι χαμηλότερα στον ουράνιο θόλο, επομένως μεγαλύτερη κλίση σημαίνει πως η επιφάνεια θα είναι πιο «όρθια» και άρα θα μπορεί να απορροφήσει περισσότερη ενέργεια
- Για καλοκαιρινή λειτουργία η βέλτιστη κλίση είναι $\beta \cong \varphi - 15^\circ$ καθώς το καλοκαίρι ο ήλιος είναι ψηλότερα στον ουράνιο θόλο και άρα μια πιο οριζόντια επιφάνεια θα απορροφά περισσότερη ενέργεια

Τα παραπάνω αποτελούν τα βέλτιστα, αλλά φυσικά μικρές αποκλίσεις από αυτά δεν επηρεάζουν σημαντικά την πρόσδοση ενέργειας. Στο Σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η σημασία της κλίσης του συλλέκτη ανάλογα την εποχή, και στο Σχήμα 4.4 φαίνονται ταυτόχρονα οι βασικές γωνίες που έχουν να κάνουν με τη θέση του ήλιου στον ουράνιο θόλο:



Σχήμα 4.3: Κλίση επιφάνεια ανάλογα την εποχή για μέγιστη πρόσδοση ενέργειας



Σχήμα 4.4: Ηλιακές γωνίες

4.2.5: Συνιστώσες ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία στα όρια της γήινης ατμόσφαιρας δεν φτάνει αυτούσια στα μάτια ενός παρατηρητή στο έδαφος. Ένα μέρος της ανακλάται κατευθείαν στο διάστημα και από αυτό που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα, ένα σημαντικό μέρος αλληλεπιδρά - σκεδάζεται στην πραγματικότητα- με σωματίδια που υπάρχουν στην ατμόσφαιρα. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στο έδαφος αποτελείται από τρεις συνιστώσες:

1. Άμεση ακτινοβολία, δηλαδή αυτή που προσπίπτει χωρίς να αλλάξει η διεύθυνσή της
2. Διάχυτη ακτινοβολία, δηλαδή αυτή που φτάνει στο έδαφος λόγω σκεδάσεων στην ατμόσφαιρα
3. Ανακλώμενη ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολία που προσπίπτει σε ένα άλλο σημείο του εδάφους και ανακλάται προς το σημείο ενδιαφέροντος

Η ολική ακτινοβολία σε ένα οριζόντιο επίπεδο (σε J/m^2) μπορεί να υπολογιστεί από το άθροισμα των επιμέρους συνιστωσών σύμφωνα με τη Σχέση 4.10.

$$I = I_b + I_d + I_r \quad (4.10)$$

Στη Σχέση 4.10:

- I_b : Άμεση ωριαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου
- I_d : Διάχυτη ωριαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου
- I_T : Ανακλώμενη ωριαία ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου

Η μετατροπή της ακτινοβολίας οριζοντίου επιπέδου σε ακτινοβολία κεκλιμένου επιπέδου για ωριαίες τιμές πραγματοποιείται μέσω της Σχέσης 4.11.

$$I_T = I \cdot R \quad (4.11)$$

Στη Σχέση 4.11 με R συμβολίζεται ο λόγος ολικής ακτινοβολίας ο οποίος υπολογίζεται βάσει της Σχέσης 4.12.

$$R = \frac{I_b}{I} \cdot R_b + \frac{I_d}{I} \cdot \frac{1+\cos\beta}{2} + \rho \cdot \frac{1-\cos\beta}{2} \quad (4.12)$$

Στη Σχέση 4.12:

- $R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z}$: Λόγος άμεσης ακτινοβολίας κεκλιμένου επιπέδου προς άμεση ακτινοβολία οριζοντίου επιπέδου
- ρ : Ανακλαστικότητα του εδάφους

Η ανακλαστικότητα του εδάφους εξαρτάται από παράγοντες όπως η μορφολογία του, το χρώμα του καθώς και από την πυκνότητα των νεφών. Τυπικές τιμές δίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Τυπικές τιμές ανακλαστικότητας εδάφους

Είδος επιφάνειας	Ανακλαστικότητα, ρ
Χιόνι	0,6 - 0,8
Χώμα	0,15
Άσφαλτος	0,05 - 0,15
Τσιμέντο	0,2 - 0,7
Νερό	0,07
Έρημος	0,3 - 0,4
Γρασίδι	0,2 - 0,3

(Σημείωση: Οι σχέσεις του υποκεφαλαίου 4.2.5 μπορούν να γραφούν συναρτήσεως στιγμιαίων τιμών (σε W/m^2) αντί ωριαίων τιμών αλλάζοντας μόνο τα σύμβολα από I (ωριαίες τιμές) σε G που δηλώνουν στιγμιαίες τιμές.)

4.3 Εκμετάλλευση ηλιακής ενέργειας

Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την παραγωγή θερμότητας ή ψύξης όσο και την παραγωγή ηλεκτρισμού. Μερικοί από τους βασικότερους τρόπους εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας είναι οι εξής:

1. Παραγωγή ζεστού νερού χρήσης (ZNX) για οικιακές ή βιομηχανικές εφαρμογές, χρησιμοποιώντας ηλιακούς συλλέκτες (επίπεδους η συγκεντρωτικούς). Οι συλλέκτες αυτοί απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και την αποδίδουν σε ένα κύκλωμα νερού ζεσταίνοντάς το χωρίς να χρειάζεται ηλεκτρική αντίσταση, συνεισφέροντας έτσι σημαντικά στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικά για τους επίπεδους συλλέκτες, στην Ελλάδα σύμφωνα με τον IOBE, περίπου ένα στα τέσσερα νοικοκυριά διαθέτει ηλιακό θερμοσίφωνα κατατάσσοντας την χώρα στις κορυφαίες θέσεις παγκοσμίως και δείχνοντας έμπρακτα την διείσδυση αυτών των συστημάτων στην κουλτούρα της χώρας
2. Θέρμανση χώρων μέσω ενεργητικών ή παθητικών ηλιακών συστημάτων. Τέτοια συστήματα χρησιμοποιούν ως εργαζόμενο μέσο είτε αέρα είτε νερό τα οποία αφού θερμανθούν από την ηλιακή ακτινοβολία μπορούν να τροφοδοτούν τερματικές μονάδες στους χώρους ενός κτηρίου θερμαίνοντάς το
3. Παραγωγή ψύξης μέσω απορρόφησης. Ηλιακοί συλλέκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για ψύξη, αποτελώντας την πηγή ενέργειας στη γεννήτρια ενός ψυκτικού κύκλου με απορρόφηση. Σε τέτοια συστήματα η πηγή ενέργειας πρέπει να κυμαίνεται κοντά στους 90 °C, θερμοκρασίες που μπορούν να επιτευχθούν από ηλιακούς συλλέκτες κενού για παράδειγμα
4. Μέσω συγκεντρωτικών διατάξεων, παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος (είτε και θερμότητας όπως έχει αναφερθεί παραπάνω). Οι διατάξεις αυτές, που ονομάζονται ηλιοθερμικοί σταθμοί (CSP) αποτελούν την πρώτη μεγάλης κλίμακας ηλεκτρική εφαρμογή ηλιακής ενέργειας [4]. Η λειτουργία των σταθμών CSP βασίζεται στην παραγωγή θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας συγκεντρώνοντας το ηλιακό φως σε μια μικρή σχετικά επιφάνεια, θερμαίνοντας έτσι το εργαζόμενο μέσο το οποίο χρησιμοποιείται έπειτα σε έναν κλασικό θερμοδυναμικό κύκλο. Ο κύκλος που χρησιμοποιείται στους περισσότερους συγκεντρωτικούς σταθμούς στον κόσμο είναι ο κύκλος Rankine με συνηθέστερο εργαζόμενο μέσο το ζεύγος νερού - ατμού. Το ενδιαφέρον για αυτή την εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας έχει αναζωπυρωθεί τα τελευταία χρόνια λόγω μείωσης του κόστους αλλά και των δυνατοτήτων αποθήκευσης θερμότητας που έχουν τα εν λόγω συστήματα
5. Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από φωτοβολταϊκά στοιχεία στα οποία η ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς να μεσολαβεί κάποιο άλλο σύστημα, μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η λειτουργία τους βασίζεται σε ημιαγώγιμα υλικά στα οποία η προσπίπτουσα ακτινοβολία δημιουργεί κίνηση φορτισμένων σωματιδίων μέσα στο υλικό παράγοντας έτσι ηλεκτρικό ρεύμα. Σχεδόν το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος για παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από τον ήλιο αφορά Φ/Β συστήματα αποτελώντας

παράλληλα και την ταχύτερα αναπτυσσόμενη μορφή ΑΠΕ ειδικά σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Η λειτουργία των Φ/Β στοιχείων αναλύεται στο κεφάλαιο 5.

4.4 Ανασκόπηση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της ηλιακής ενέργειας

Στον Πίνακα 4.2 παρατίθενται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ηλιακής ενέργειας:

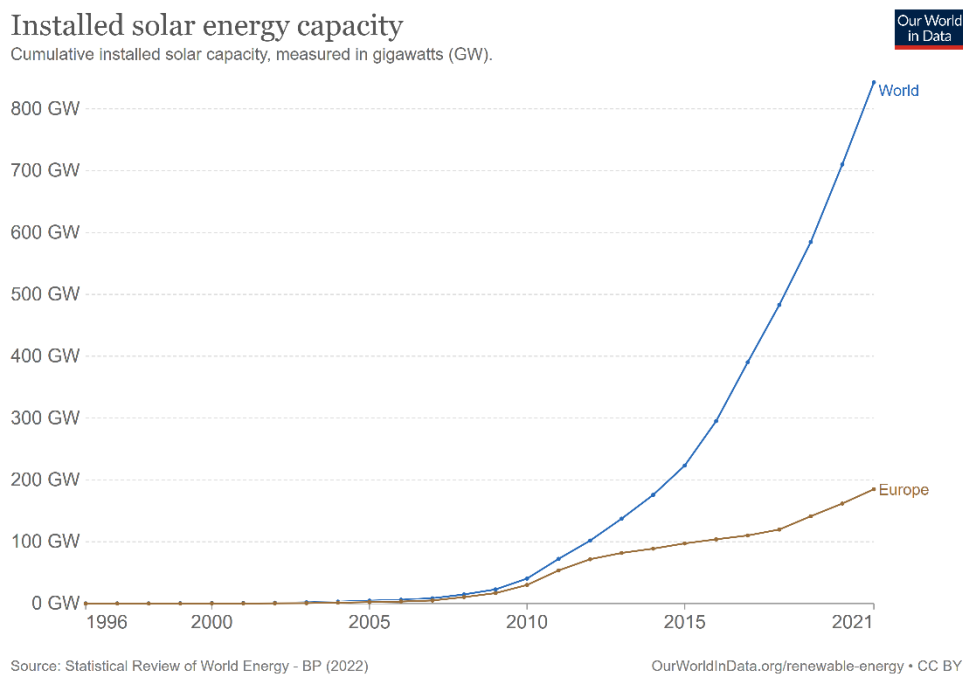
Πίνακας 4.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ανεξάντλητη μορφή ενέργειας	Μεγάλη διακύμανση σε επίπεδο ημέρας και έτους
Διαθέσιμη πρακτικά παντού στη Γη	Χαμηλός βαθμός απόδοσης σε σχέση και με άλλες ΑΠΕ
Δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με αέρια του θερμοκηπίου και άλλους ρύπους	Αραιή μορφή ενέργειας, με μικρή ισχύ ανά τετραγωνικό μέτρο σε σχέση με συμβατικούς σταθμούς παραγωγής
Χαμηλού πλέον κόστους (ενδεικτικά, από το 2000 μέχρι σήμερα οι τιμές των Φ/Β έχουν πέσει από 5,7 \$/Watt στα 0,27 \$/Watt)	Έντονη διακύμανση ανάλογα την περιοχή του πλανήτη με τις περιοχές στον ισημερινό να δέχονται πολλαπλάσια ακτινοβολία από περιοχές κοντά στους πόλους
Οι ηλιακές εφαρμογές έχουν μεγάλο εύρος ισχύος, από μερικά mW για κομπιουτεράκια μέχρι εκατοντάδες MW	Η παραγωγή ενέργειας εξαρτάται έντονα από τις καιρικές συνθήκες

5. Φωτοβολταϊκά

5.1: Εισαγωγή

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία αποτελούν μια τεχνολογία που αναπτύχθηκε μετά τα μέσα του 20^{ου} αιώνα και η οποία βασίζεται στην απευθείας μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα. Όπως θα εξηγηθεί και στη συνέχεια, προκειμένου η απόδοση των Φ/Β στοιχείων να είναι ικανοποιητική απαιτείται η ύπαρξη πολύ λεπτών επιφανειών. Η τεχνολογία ωστόσο δεν είχε προχωρήσει σε βαθμό ώστε αυτό να μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με αποτέλεσμα το κόστος τους να είναι υπέρογκο. Επιπλέον, η ενέργεια που παρήγαγε το Φ/Β στη διάρκεια ζωής του (περίπου 30 έτη) ήταν μικρότερη από την ενέργεια που καταναλώνονταν για τη δημιουργία του. Από τις αρχές του 21^{ου} αιώνα με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και των μεθόδων κατεργασίας τα προβλήματα άρχισαν να αντιμετωπίζονται και το κόστος αυτό μειώθηκε δραματικά φτάνοντας στο σημείο πλέον να είναι άκρως ανταγωνιστικό. Είναι χαρακτηριστικό πως σήμερα, το κόστος ενός Φ/Β έχει μειωθεί περίπου στο 4% της τιμής που είχε στις αρχές του 2000. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, το 2022 μόνο στην ΕΕ τοποθετήθηκαν 44 GW Φ/Β στοιχείων, δηλαδή τέσσερις φορές το συνολικό δυναμικό ΑΠΕ στην Ελλάδα! Η ραγδαία αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β αποτυπώνεται στην Εικόνα 5.1. Είναι σαφές συνεπώς πως η ηλιακή ενέργεια γενικότερα και τα Φ/Β συστήματα ειδικότερα θα είναι πρωταγωνιστές τα επόμενα χρόνια στην προσπάθεια της πράσινης ενεργειακής μετάβασης.



Εικόνα 5.1: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στον κόσμο και την Ευρώπη [14]

5.2: Αρχή λειτουργίας Φωτοβολταϊκών Στοιχείων

Η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά τον 19^ο αιώνα από τον Alexandre Becquerel. Το 1954, κάτι παραπάνω από έναν αιώνα από όταν παρατηρήθηκε το φαινόμενο, ερευνητές της RCA και των Bell Laboratories ανέφεραν την επίτευξη βαθμού απόδοσης 6% χρησιμοποιώντας συσκευές από ημιαγωγούς p και n [4]. Ημιαγωγία υλικά, όπως για παράδειγμα το πυρίτιο (^{14}Si) αποτελούν τη βάση των σύγχρονων Φ/Β στοιχείων. Σε ένα στοιχείο που διαθέτει πολλές «στοιβάδες» ηλεκτρονίων, αυτά που είναι πιο κοντά στον πυρήνα συγκρατούνται έντονα από αυτόν και πολύ δύσκολα μπορούν να ξεφύγουν της έλξης του. Τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στοιβάδων ωστόσο συγκρατούνται πολύ πιο χαλαρά και επομένως μπορούν να αλληλεπιδράσουν με άλλα στοιχεία σχηματίζοντας ομοιοπολικούς ή ετεροπολικούς δεσμούς.

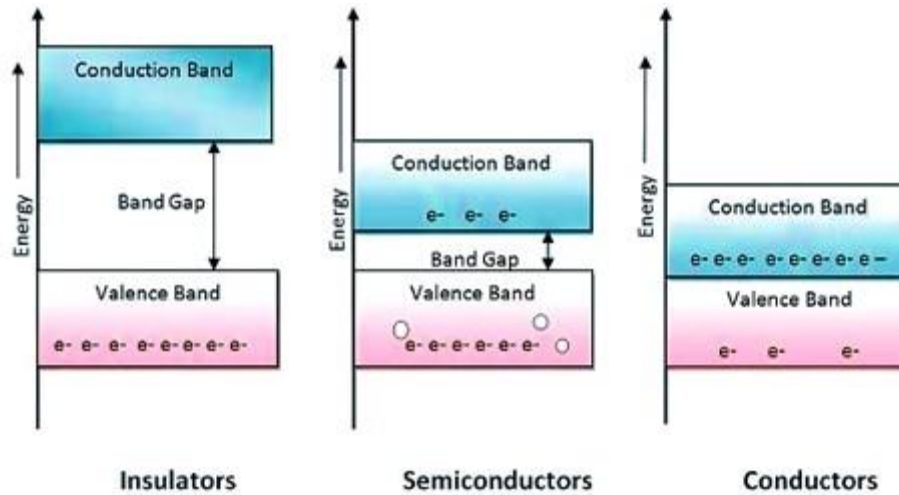
Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία σε ένα άτομο τα ηλεκτρόνια μπορούν να υπάρξουν μόνο σε συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες, τις στοιβάδες. Η εξωτερική στοιβάδα ενός ατόμου ονομάζεται στοιβάδα σθένους (valence band) και περιέχει τα πιο ελαφρά συγκρατούμενα από τον πυρήνα ηλεκτρόνια καθορίζοντας παράλληλα τις αλληλεπιδράσεις αυτού του ατόμου με τα γειτονικά. Η αμέσως επόμενη ενεργειακά στοιβάδα ονομάζεται στοιβάδα αγωγιμότητας (conduction band). Η διαφορά ενέργειας αυτών των δύο στοιβάδων ονομάζεται ενεργειακό χάσμα E_g (band gap) και είναι χαρακτηριστική για κάθε άτομο. Η συμπεριφορά των ηλεκτρονίων της στοιβάδας σθένους και το ενεργειακό χάσμα είναι και τα στοιχεία που χαρακτηρίζουν ένα υλικό ως μονωτή, αγωγό ή ημιαγωγό.

Οι μονωτές (insulators) είναι υλικά με πλήρεις στοιβάδες σθένους και μεγάλο ενεργειακό χάσμα το οποίο καθιστά τη μεταπήδηση ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας πρακτικά αδύνατη. Οι αγωγοί (conductors) αντίθετα χαρακτηρίζονται από πολλά ελεύθερα ηλεκτρόνια και πολύ μικρό ενεργειακό χάσμα (πρακτικά μηδενικό) με αποτέλεσμα να επιτρέπουν την κίνηση ηλεκτρονίων από τη μια στοιβάδα στην άλλη. Υλικά με πλήρεις ή μερικώς πλήρεις στοιβάδες σθένους αλλά μικρό ενεργειακό χάσμα χαρακτηρίζονται ως ημιαγωγοί (semiconductors). Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται μια συγκριτική αναπαράσταση των δομών των διαφορετικών τύπων υλικών. Οι καθαροί ημιαγωγοί συμπεριφέρονται ως μονωτές καθώς έχουν πλήρη στοιβάδα σθένους και κενή ζώνη αγωγιμότητας και προκειμένου να μπορούν να άγουν ηλεκτρικό ρεύμα, να επιτρέπουν δηλαδή κίνηση ηλεκτρονίων, εμπλουτίζονται με μικρές ποσότητες άλλων υλικών. Το πυρίτιο, που αποτελεί και τον συνηθέστερο ημιαγωγό, έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους του τα οποία σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς με γειτονικά άτομα και έτσι το πυρίτιο έχει σταθερή δομή χωρίς περίσσεια ηλεκτρονίων. Ο εμπλουτισμός της δομής του πυριτίου μπορεί να γίνει με δύο τρόπους:

1. Με αντικατάσταση κάποιων ατόμων πυριτίου από άτομα στοιχείου με παραπάνω ηλεκτρόνια σθένους, όπως πχ ο φωσφόρος (^{15}P) που έχει πέντε. Σε αυτή την περίπτωση το εμπλουτισμένο υλικό ονομάζεται ημιαγωγός

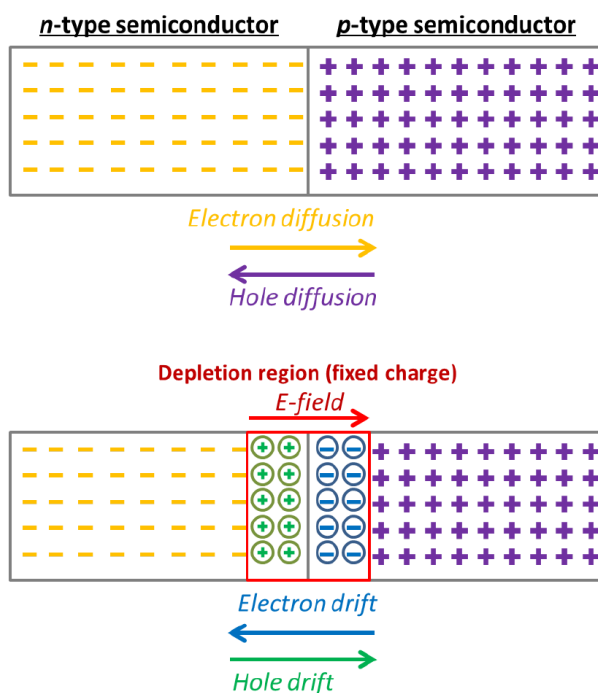
τύπου n (n από το negative) αφού φαινομενικά έχει περίσσεια ηλεκτρονίων διαθέσιμων για αγωγή [4].

2. Με αντικατάσταση κάποιων ατόμων πυριτίου από άτομα στοιχείου με λιγότερα ηλεκτρόνια σθένους, όπως πχ το βόριο (${}^5\text{B}$) που έχει τρία. Αντίστοιχα με την πρώτη περίπτωση, το εμπλουτισμένο υλικό ονομάζεται ημιαγωγός τύπου p (p από το positive) αφού έχει φαινομενικό έλλειμμα ηλεκτρονίων. Σε αυτά τα υλικά το «έλλειμμα» ηλεκτρονίων ονομάζεται οπή.



Σχήμα 5.1: Σύγκριση δομής μονωτικών, ημιαγωγικών και αγώγιμων υλικών

Εάν δύο διαφορετικοί ημιαγωγοί έρθουν σε επαφή μεταξύ τους, η περίσσεια ηλεκτρονίων του ημιαγωγού n τείνει να κινηθεί προς τις οπές του ημιαγωγού p. Έτσι, κοντά στην επαφή, από τη μεριά του ημιαγωγού n δημιουργείται ένα θετικό φορτίο και από τη μεριά του ημιαγωγού p ένα αρνητικό φορτίο. Εάν η επαφή διατηρηθεί, εντέλει η συσσώρευση αυτών των φορτίων εκατέρωθεν της επαφής θα εμποδίσει την περαιτέρω ανταλλαγή ηλεκτρονίων και οπών, δημιουργώντας μια περιοχή απογύμνωσης γύρω από την διεπιφάνεια, ενώ παράλληλα αναπτύσσεται και μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δύο πλευρές της επαφής. Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται μια επαφή p-n.



Σχήμα 5.2: Επαφή p-n και δημιουργία ζώνης απογύμνωσης

Στην συμπεριφορά της επαφής p-n βασίζεται η λειτουργία των Φ/Β κελιών. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια των Φ/Β κελιών με τη μορφή φωτονίων. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, η ηλιακή ακτινοβολία έχει ένα ευρύ φάσμα μήκους κύματος και άρα τα φωτόνια που περιέχει έχουν διαφορετικές ενέργειες. Εάν ένα φωτόνιο έχει ενέργεια ίση με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού και απορροφηθεί από ένα ηλεκτρόνιο του, τότε θα το διεγείρει και το ηλεκτρόνιο θα μεταπηδήσει από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Στην περίπτωση που ένα ηλεκτρόνιο απορροφήσει φωτόνιο ενέργειας $> E_g$, τότε θα μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας και η έξτρα ενέργεια θα αυξήσει την κινητική του ενέργεια. Αντίθετα, εάν το απορροφηθέν φωτόνιο έχει ενέργεια $< E_g$ τότε το ηλεκτρόνιο δε θα μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας ενώ η ενέργεια του φωτονίου θα αυξήσει απλά την κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου. Ένα Φ/Β στοιχείο αποτελείται από μια επαφή p-n συνδεδεμένη με ένα εξωτερικό κύκλωμα. Όταν η επαφή p-n ακτινοβολείται, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που παράγονται στον ημιαγωγό n έχουν τις εξής δυνατότητες:

- Να απορροφηθούν από οπές του ημιαγωγού n
- Να κινηθούν προς τον ημιαγωγό p
- Να διέλθουν από το εξωτερικό κύκλωμα

Η απορρόφηση από τις οπές του αγωγού n μπορεί να περιοριστεί κάνοντας τη στρώση του ημιαγωγού n πολύ λεπτή [4]. Η κίνηση προς τον αγωγό p περιορίζεται λόγω της ύπαρξης αρνητικών φορτίων στην ουδέτερη ζώνη και έτσι τα ηλεκτρόνια μπορούν να διέλθουν από το εξωτερικό κύκλωμα. Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως άσχετα από την ενέργεια που έχει, ένα φωτόνιο μπορεί να διεγείρει ένα μόνο ηλεκτρόνιο το οποίο θα

απορροφήσει συγκεκριμένο ποσό ενέργειας για να πάει στη ζώνη αγωγιμότητας. Οποιαδήποτε περίσσεια ενέργειας δεν μπορεί να αξιοποιηθεί ηλεκτρικά με αυτή τη συνθήκη να είναι ένας βασικός λόγος που τα Φ/Β στοιχεία έχουν σχετικά χαμηλούς βαθμούς απόδοσης.

Η ενέργεια ενός φωτονίου δίνεται μέσω της θεμελιώδους Σχέσης 5.1.

$$E_{ph} = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (5.1)$$

Στη Σχέση 5.1:

- h : Σταθερά Planck, $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- c : Ταχύτητα φωτός στο κενό, $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- λ : Μήκος κύματος

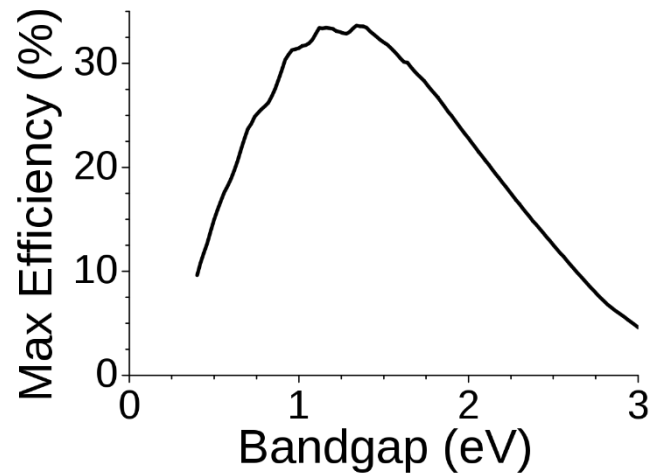
Το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου είναι $E_g = 1,11 \text{ eV}$, το οποίο σημαίνει πως για να μεταπηδήσουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας μπορούν να αξιοποιηθούν μόνο φωτόνια ενέργειας μεγαλύτερης από $1,11 \text{ eV}$. Επιλύοντας τη Σχέση 5.1 ως προς λ , προκύπτει πως μόνο φως με μήκος κύματος μικρότερο ή ίσο των $1,12 \mu\text{m}$ μπορεί να σχηματίσει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής (το ηλεκτρόνιο θα μεταπηδήσει στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω του μια οπή). Συνεπώς, ένα φωτόνιο με $\lambda = 1,12 \mu\text{m}$ μπορεί να μετατραπεί 100% σε ηλεκτρική ενέργεια ενώ φωτόνια μικρότερου μήκους κύματος μετατρέπονται σε μικρότερο ποσοστό [4]. Ο συνολικός μέγιστος βαθμός απόδοσης ενός Φ/Β κελιού μπορεί να υπολογιστεί από τη Σχέση 5.2:

$$\eta_{cell} = \frac{\int \eta_{\lambda} \cdot I_{\lambda} d\lambda}{\int I_{\lambda} d\lambda} \quad (5.2)$$

Στη Σχέση 5.2:

- I_{λ} : Ένταση φωτός
- η_{λ} : Βαθμός απόδοσης κελιού σε συγκεκριμένη ένταση φωτός

Ανάλογα το ενεργειακό χάσμα του ημιαγώγιμου υλικού (ή και του συνδυασμού υλικών που χρησιμοποιείται) ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του Φ/Β κελιού διαφοροποιείται. Η οριακή απόδοση Shockley-Queisser (SQ efficiency) είναι αυτή που αντιστοιχεί στις συνθήκες όπου τεστάρεται η λειτουργία των Φ/Β κελιών, δηλαδή για ηλιακό φάσμα αερίου μάζας 1,5, ένταση ηλιακής ακτινοβολίας 1000 W/m^2 και θερμοκρασία πλαισίου $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Στο Σχήμα 5.3 φαίνεται η οριακή απόδοση Shockley-Queisser συναρτήσει του ενεργειακού χάσματος.



Σχήμα 5.3: Οριακή απόδοση Shockley-Queisser (SQ) συναρτήσει του ενεργειακού χάσματος

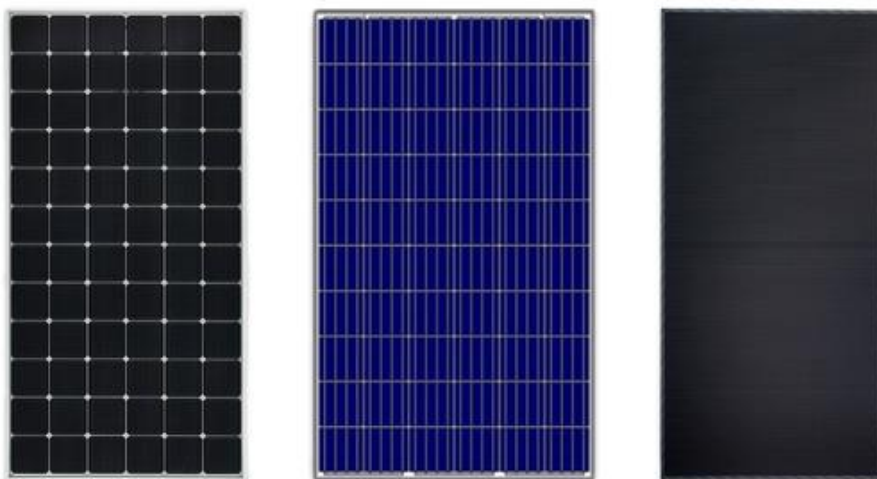
Το συγκεκριμένο «όριο» αφορά μόνο Φ/Β κελιά μιας επαφής. Τρόποι αύξησης του ορίου είναι η ύπαρξη πολλαπλών επαφών p-n, η συγκέντρωση του ηλιακού φωτός και η φωτονιακή επαύξηση μεταξύ άλλων, με νέες μεθόδους να βρίσκονται στο στάδιο ανάπτυξης και υλοποίησης.

5.3: Τύποι φωτοβολταϊκών κελιών

Η πλειοψηφία των Φ/Β στοιχείων που υπάρχουν στην αγορά έχουν ως βάση το πυρίτιο, με τρεις (3) βασικές κατηγορίες:

1. Στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Ο βαθμός απόδοσης τους είναι λίγο πάνω από 20% ωστόσο η διαδικασία παραγωγής τους είναι περίπλοκη με σημαντική ποσότητα παραγόμενων αποβλήτων. Έχουν ομοιόμορφο χρώμα, είτε μπλε σκούρο είτε μαύρο και τετραγωνικό σχήμα, με ή χωρίς κομμένες τις άκρες.
2. Στοιχεία πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Ο βαθμός απόδοσής τους είναι μικρότερος του 20% αλλά αποτελούν τον πιο κοινό τύπο Φ/Β στοιχείων λόγω της πιο απλής τους κατασκευής από τα στοιχεία μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Χαρακτηρίζονται από ανομοιόμορφο μπλε χρώμα στην επιφάνεια του στοιχείου και σχήμα τετραγωνικό [5].
3. Λεπτού φιλμ στοιχεία άμορφου πυριτίου. Έχουν το χαμηλότερο βαθμό απόδοσης (περίπου 10%) αλλά είναι και τα πιο φθηνά να κατασκευαστούν. Το χρώμα τους είναι ομοιόμορφο και το σχήμα τους τετράγωνο

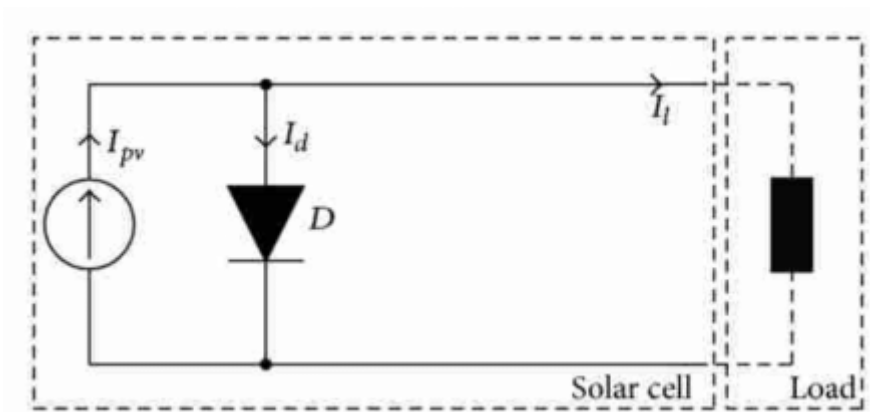
Εκτός από το πυρίτιο υπάρχουν και άλλα υλικά και συνδυασμοί υλικών που χρησιμοποιούνται, σε μικρότερη φυσικά κλίμακα, για Φ/Β στοιχεία. Οι πιο συνηθισμένοι συνδυασμοί είναι τα στοιχεία καδμίου-τελούριου (CdTe) και τα στοιχεία χαλκού-ίνδιου-γαλλίου τα οποία μπορεί να περιέχουν και προσμίξεις σεληνίου. Μια συγκριτική απεικόνιση των κατηγοριών Φ/Β πάνελ από πυρίτιο παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2: Φ/Β πάνελ από πυρίτιο. Από αριστερά προς δεξιά: Μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και λεπτού φιλμ

5.4: Ηλεκτρική ανάλυση Φ/Β κελιών και πλαισίων

Για την ηλεκτρική ανάλυση ενός Φ/Β κελιού το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα περιλαμβάνει αρχικά μια πηγή ρεύματος η οποία αποτελεί το στοιχείο του κυκλώματος που συνδέεται με την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η επαφή p-n που αποτελεί και την καρδιά του κυκλώματος, μιας και εκεί απορροφούνται τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας, μοντελοποιείται ως μια διόδος. Μελετώντας την ιδανική περίπτωση όπου στο Φ/Β κελί δεν υπάρχουν άλλες αντιστάσεις, η μόνη σύνδεση θα είναι αυτή με ένα εξωτερικό φορτίο. Το στοιχειώδες κύκλωμα που περιγράφεται παραπάνω φαίνεται στο Σχήμα 5.4:



Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου με φορτίο

Στο κύκλωμα του σχήματος 5.4, το ρεύμα I_d της διόδου υπολογίζεται σύμφωνα με τη Σχέση 5.3 που ονομάζεται σχέση του Shockley:

$$I_d = I_o \cdot \left[e^{\frac{q_e \cdot V_d}{k \cdot T}} - 1 \right] \quad (5.3)$$

Στη σχέση 5.3:

- I_o : Ρεύμα κόρου
- q_e : Φορτίο ηλεκτρονίου
- V_d : Τάση στα άκρα της διόδου
- k : σταθερά Boltzmann
- T : Θερμοκρασία

Σύμφωνα με το νόμο του Kirchhoff, στο κύκλωμα του σχήματος 9 θα ισχύει η Σχέση 5.4:

$$I_L = I_{pv} - I_d \quad (5.4)$$

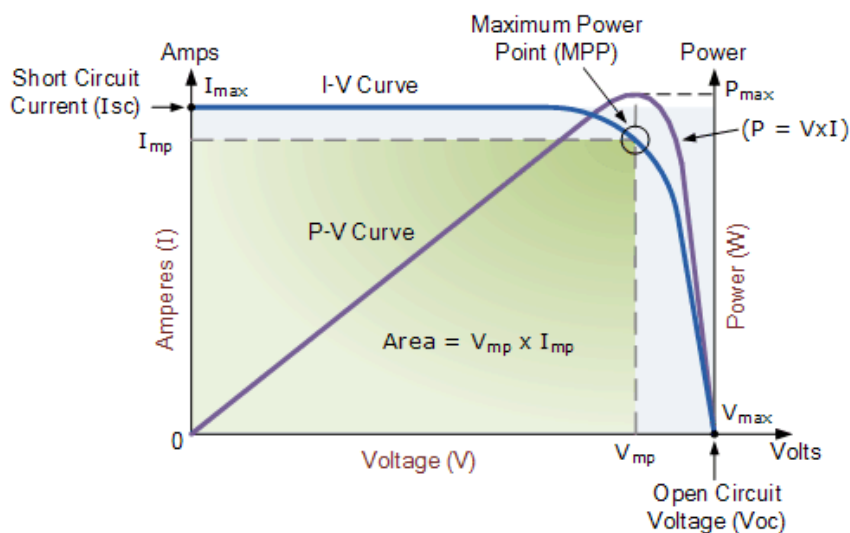
Στη Σχέση 5.4, το I_{pv} ονομάζεται ρεύμα βραχυκυκλώματος (short circuit current) και συνηθίζεται να συμβολίζεται ως I_{sc} . Το ρεύμα βραχυκυκλώματος είναι το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να αναπτυχθεί και πρακτικά ανταποκρίνεται σε συνθήκες μηδενισμού της

αντίστασης. Υπολογίζεται στην περίπτωση που η τάση V_d είναι μηδενική και άρα ισχύει $I_{sc} = I_L$. Στην περίπτωση ανοικτού κυκλώματος, το ρεύμα $I_L = 0$ με την τάση V_{oc} που δημιουργείται (τάση ανοικτού κυκλώματος, open circuit voltage) να είναι η μέγιστη δυνατή. Η τάση ανοικτού κυκλώματος υπολογίζεται από το συνδυασμό των σχέσεων 5.3 και 5.4 θέτοντας $I_L = 0$ και αντιστοιχεί σε συνθήκες απειρισμού της αντίστασης.

Η Σχέση 5.4 αποτελεί την χαρακτηριστική εξίσωση I-V ενός Φ/Β κελιού. Η ισχύς ενός Φ/Β στοιχείου, σε αντίθεση με άλλες ηλεκτρικές συσκευές, εξαρτάται από το φορτίο που συναντά ακόμα και αν η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι σταθερή. Σε ένα Φ/Β στοιχείο η παραγόμενη ισχύς υπολογίζεται ως το γινόμενο του ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει το φορτίο και της τάσης που αναπτύσσεται. Επειδή η τάση σε ένα ηλεκτρικό στοιχείο ισούται με το γινόμενο του ρεύματος που το διαρρέει και της αντίστασής του, η ισχύς ενός Φ/Β στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί με τους δύο τρόπους που φαίνονται στη Σχέση 5.5:

$$P_L = I_L \cdot V = I_L^2 \cdot R_L \quad (5.5)$$

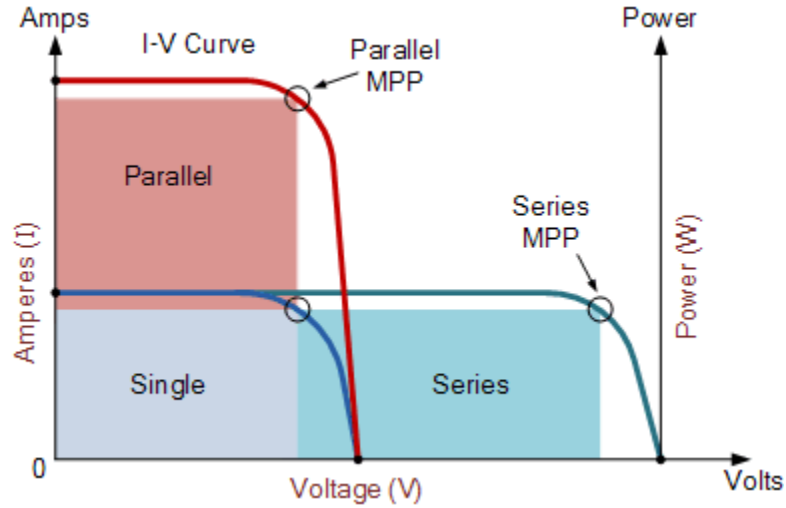
Το σημείο της μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point) υπολογίζεται παραγωγίζοντας την ισχύ ως προς την τάση και αντιστοιχεί στο γόνατο της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V. Στο Σχήμα 5.5 παρατίθεται μια τυπική συμπεριφορά της χαρακτηριστικής καμπύλης I-V ενός Φ/Β κελιού και της παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 5.5: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και παραγόμενη ισχύς Φ/Β στοιχείου

Γενικά η τάση ανοικτού κυκλώματος ενός Φ/Β στοιχείου είναι αρκετά μικρή, συνήθως γύρω στα 0,5-0,6 Volts. Επομένως είναι προφανές πως δεν μπορεί ένα μεμονωμένο Φ/Β στοιχείο να έχει πρακτικές εφαρμογές. Για αυτό η βασική μονάδα μιας Φ/Β εγκατάστασης είναι τα Φ/Β πλαίσια (Panels) τα οποία αποτελούνται από πολλά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους. Πολλά πλαίσια μαζί ορίζουν μια συστοιχία (array). Συγκεκριμένα, μια Φ/Β συστοιχία αποτελείται από ένα συνδυασμό πλαισίων σε σύνδεση

σε σειρά και παράλληλα ώστε να αυξηθεί όσο το δυνατόν η ισχύς [5]. Όταν δύο Φ/Β όμοια πλαίσια συνδέονται σε σειρά, το ρεύμα παραμένει ίδιο και αυξάνεται η τάση, ενώ εάν η σύνδεση είναι παράλληλη η τάση είναι ίδια και αυξάνει το ρεύμα. Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζονται οι δύο περιπτώσεις συνδέσεων και πως επηρεάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη I-V.



Σχήμα 5.6: Μεταβολή χαρακτηριστικής καμπύλης I-V σε παράλληλη και εν σειρά σύνδεση

5.5: Βαθμός απόδοσης Φ/Β

Ο βαθμός απόδοσης ενός Φ/Β κελιού επηρεάζεται από αρκετές παραμέτρους, μερικές από τις οποίες είναι:

- Ένταση ηλιακής ακτινοβολίας. Συνδέεται άμεσα με το ρεύμα που παράγεται και άρα με την ενεργειακή συμπεριφορά του στοιχείου
- Ένα ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να ανακλαστεί από την επιφάνεια του Φ/Β στοιχείου (Οπτικές απώλειες)
- Θερμοκρασία της επιφάνειας του Φ/Β στοιχείου. Απόκλιση από τη συνήθη θερμοκρασία των 25 °C οδηγεί σε αλλαγές των χαρακτηριστικών του στοιχείου και διαφορετική απόδοση. Αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την απόδοση ενώ μείωσή της έχει το αντίθετο αποτέλεσμα
- Εσωτερικές αντιστάσεις στο στοιχείο. Το Σχήμα 5.4 αποτελεί μια ιδανική περίπτωση και απέχει από την πραγματικότητα όπου παρατηρούνται διαρροές ρεύματος από τη δίοδο και αντιστάσεις στις επαφές του στοιχείου
- Σκίαση μέρους ενός πλαισίου ή μιας συστοιχίας. Επειδή ένα σκιασμένο στοιχείο λειτουργεί σαν μια αντίσταση, παρατεταμένη σκίαση μπορεί να το καταστρέψει και κατά συνέπεια όλο το πλαίσιο στο οποίο ανήκει
- Γήρανση. Με την πάροδο του χρόνου το φωτοβολταϊκό σύστημα αντιμετωπίζει πτώση της απόδοσης που κυμαίνεται περίπου στο 1-2% κάθε χρόνο.

6. Το Πρόγραμμα Προσομοίωσης TRNSYS

6.1: Εισαγωγή στο TRNSYS

Το TRNSYS, από τα αρχικά Transient System Simulation πρόκειται για ένα λογισμικό με ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον προσομοίωσης συστημάτων και κτηρίων. Όπως φανερώνει και το όνομά του, το TRNSYS μελετά συστήματα στη μεταβατική κατάσταση και είναι κατάλληλο για εφαρμογές που κυμαίνονται από ένα απλό σύστημα ζεστού νερού μέχρι ένα ολόκληρο κτήριο πολλών θερμικών ζωνών. Το λογισμικό αναπτύχθηκε πριν από περίπου 40 χρόνια από το πανεπιστήμιο του Wisconsin στις ΗΠΑ και έκτοτε συνεχώς ανανεώνεται έχοντας μεγάλη απήχηση από ερευνητές παγκοσμίως που το χρησιμοποιούν για μελέτη και βελτιστοποίηση συστημάτων.

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του TRNSYS είναι ο αρθρωτός του σχεδιασμός (modular structure) που βασίζεται σε επιμέρους κομμάτια. Οι προσομοιώσεις του TRNSYS βασίζονται στη σύνδεση των επιμέρους κομματιών -γνωστά ως Types- μεταξύ τους και συγκεκριμένα τον ορισμό των εξόδων (outputs) ενός Type ως εισόδους (inputs) σε ένα άλλο Type. Τα Types μπορεί να είναι για παράδειγμα συσκευές όπως αντλίες, Φ/Β στοιχεία και δοχεία αποθήκευσης τα οποία ενώνονται μεταξύ τους όπως ακριβώς και στην πραγματικότητα αποτυπώνοντας έτσι ακριβώς τη μελετώμενη διάταξη. Η ευελιξία του προγράμματος TRNSYS έγκειται στο ότι τόσο ο πυρήνας (kernel) του προγράμματος όσο και τα διαθέσιμα Types είναι άμεσα επεξεργάσιμα από το χρήστη και μπορούν έτσι να προσαρμοστούν στις εκάστοτε ανάγκες του.

Μεγάλο πλεονέκτημα του προγράμματος είναι επίσης η δυνατότητα καθορισμού καινούργιων στοιχείων πέραν από αυτών που είναι ήδη διαθέσιμα εκ των προτέρων. Ο ορισμός νέων στοιχείων μπορεί να γίνει μέσω γλωσσών προγραμματισμού όπως FORTRAN και MATLAB και είναι σημαντικό πως το TRNSYS λειτουργεί με DLL αρχεία. Παράλληλα, υπάρχουν βιβλιοθήκες έτοιμων στοιχείων (πχ TESS Libraries) οι οποίες μπορούν να εισαχθούν στο πρόγραμμα αυξάνοντας έτσι τον αριθμό των by default διαθέσιμων στοιχείων. Μερικές από τις βασικές κατηγορίες προσομοιώσεων που μπορεί να διαχειριστεί το TRNSYS είναι οι εξής:

- Ηλιακά συστήματα (Θερμικά και Φ/Β)
- Συστήματα με ΑΠΕ
- Συμπαγωγή
- Κυψέλες καυσίμου
- Κτήρια χαμηλής ενέργειας
- Περίπλοκα και καινοτόμα συστήματα HVAC

Τα θεμελιώδη προγράμματα από τα οποία αποτελείται το πακέτο του TRNSYS είναι τα παρακάτω:

- Στούντιο Προσομοίωσης (Simulation Studio) το οποίο αποτελεί το κύριο περιβάλλον διεπαφής (interface) με το χρήστη
- Το TRNBuild στο οποίο γίνεται η επεξεργασία ενός πολυζωνικού κτηρίου (multi-zone building)
- Οι εφαρμογές TRNEdit και TRNSED που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επεξεργασία των αρχείων του TRNSYS

6.2: Στούντιο Προσομοίωσης (Simulation Studio)

Το Στούντιο Προσομοίωσης του TRNSYS είναι το κύριο στοιχείο οπτικής διεπαφής του χρήστη με το πρόγραμμα και ίσως το πρώτο πράγμα που συναντά ένας νέος χρήστης του λογισμικού. Στο Στούντιο Προσομοίωσης ο χρήστης δημιουργεί βήμα-βήμα τις προσομοιώσεις του προσθέτοντας components (μέσω drag and drop) και ενώνοντάς τα μεταξύ τους έχοντας παράλληλα τη δυνατότητα ρύθμισης και κάποιων γενικών παραμέτρων όπως το χρονικό βήμα και τη χρονική διάρκεια της προσομοίωσης. Εκτός των παραπάνω, στο στούντιο προσομοίωσης περιλαμβάνεται και ένας διαχειριστής των εξόδων του προγράμματος (output manager) όπου μπορεί να καθοριστεί ποια μεγέθη θα εκτυπωθούν ή/και θα χαραχθούν σε διαγράμματα. Τέλος, το Στούντιο Προσομοίωσης διαθέτει και έναν διαχειριστή γεγονότων-σφαλμάτων (log/error manager) όπου ο χρήστης μπορεί να ανατρέξει σε περίπτωση ειδοποιήσεων ή σφαλμάτων κατά την προσομοίωση. Κατά την εκκίνησή του, το Στούντιο Προσομοίωσης εμφανίζεται με τη μορφή που φαίνεται στην Εικόνα 6.1:

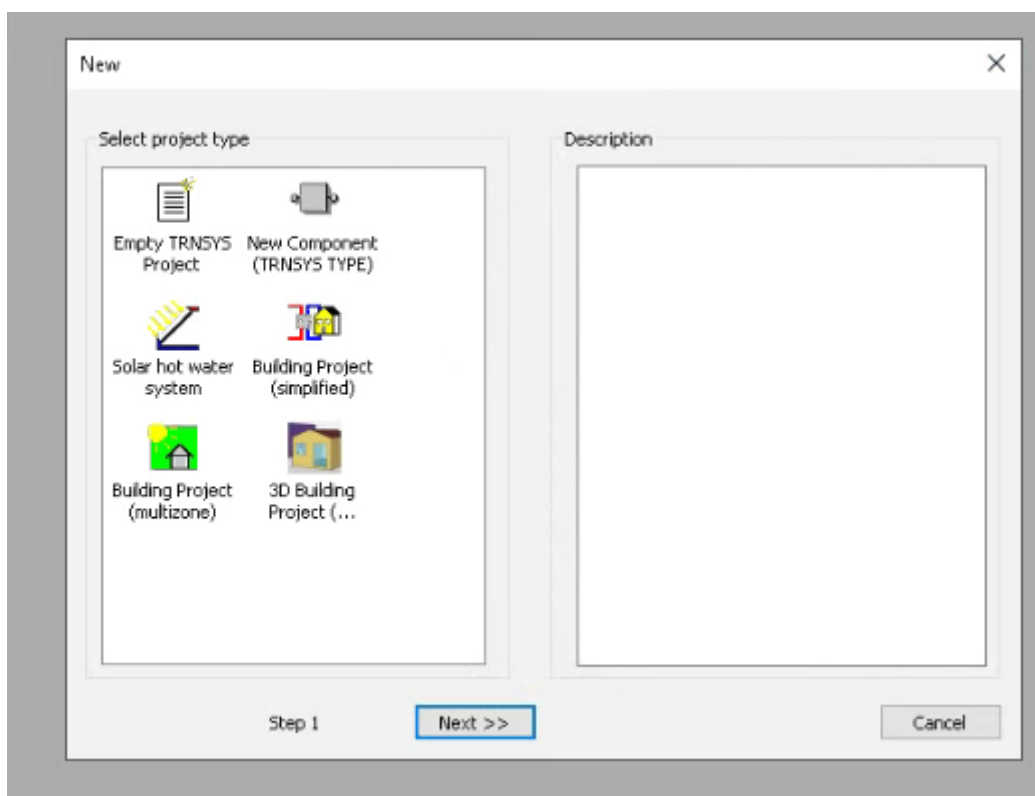


Εικόνα 6.1: Αρχικό περιβάλλον Simulation Studio

Για την έναρξη ενός νέου πρότζεκτ, επιλέγεται η επιλογή File και έπειτα New (Ένα νέο πρότζεκτ μπορεί να δημιουργηθεί και απευθείας με τη συντόμευση Ctrl + N). Οι βασικές επιλογές που διαθέτει ο χρήστης κατά το ξεκίνημα ενός νέου πρότζεκτ φαίνονται στην Εικόνα 6.2 και πιο συγκεκριμένα:

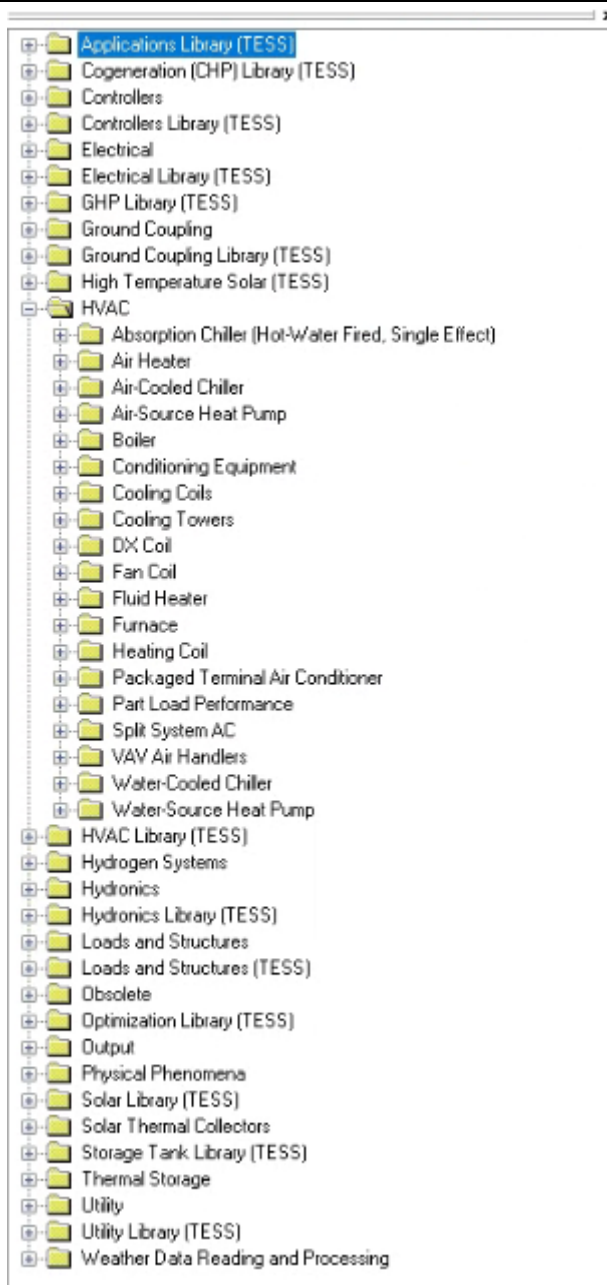
- **Empty TRNSYS Project:** Ανοίγει ένα νέο κενό παράθυρο εργασίας στο οποίο ο χρήστης μπορεί να κατασκευάσει από την αρχή μια νέα προσομοίωση

- New Component: Με αυτή την επιλογή ο χρήστης μπορεί να δημιουργήσει ένα νέο στοιχείο στο TRNSYS το οποίο μπορεί έπειτα να χρησιμοποιήσει στις προσομοιώσεις του
- Solar Hot Water System: Με αυτή την επιλογή ο χρήστης μπορεί να ανοίξει ένα έτοιμο σύστημα ζεστού νερού το οποίο μπορεί να τροποποιήσει σύμφωνα με τις ανάγκες του
- Building Project (simplified): Το TRNSYS δημιουργεί ένα απλοποιημένο κτηριακό μοντέλο
- Building Project (multizone): Με αυτή την επιλογή ο χρήστης μπορεί να ορίσει βασικά χαρακτηριστικά ενός πολυζωνικού κτηρίου το οποίο μπορεί να επεξεργαστεί περαιτέρω στη συνέχεια
- 3D Building Project (multizone): Παρόμοια επιλογή με την ακριβώς προηγούμενη, με τη διαφορά ότι ο χρήστης σε αυτή την περίπτωση καλείται να δημιουργήσει το σχέδιο του κτηρίου μέσω Google Sketchup το οποίο έπειτα με το Trnsys3d plug-in μπορεί να «διαβαστεί» από το TRNSYS και να επεξεργαστεί.



Εικόνα 6.2: Βασικές επιλογές ενός νέου project

Στα δεξιά του προγράμματος υπάρχει η πλήρης βιβλιοθήκη των στοιχείων του TRNSYS που είναι διαθέσιμα στο χρήστη, κατηγοριοποιημένα ανάλογα με τη λειτουργία τους σε μεγάλες «οικογένειες» με υποκατηγορίες ανάλογα τον ακριβή τύπο των στοιχείων. Στις Εικόνα 6.3 φαίνεται η διαθέσιμη βιβλιοθήκη του TRNSYS και ένα παράδειγμα υποκατηγοριών που υπάρχουν σε μια «οικογένεια» στοιχείων.



Εικόνα 6.3: Βιβλιοθήκη στοιχείων του TRNSYS

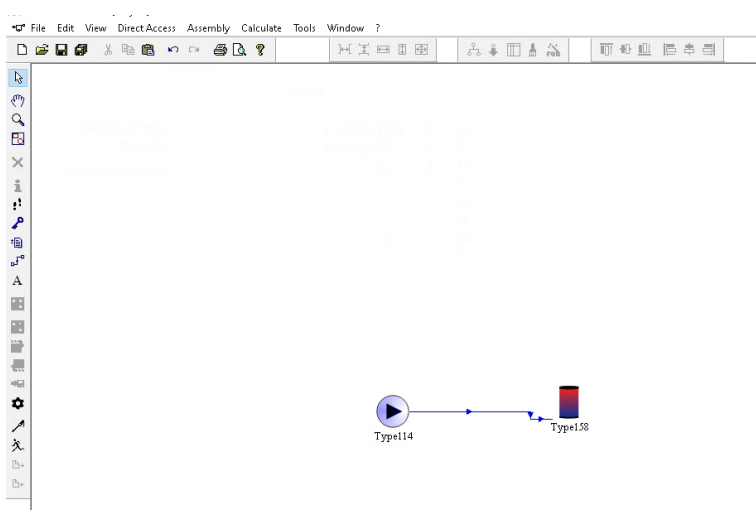
Μερικές από τις κυριότερες κατηγορίες στοιχείων είναι:

1. Controllers: Στοιχεία με δυνατότητες ελέγχου και θερμοστάτες
2. Electrical: Ηλεκτρικά στοιχεία όπως Φ/Β και μπαταρίες
3. Ground coupling: Στοιχεία εναλλαγής θερμότητας με το υπέδαφος
4. HVAC: Στοιχεία κλιματισμού, θέρμανσης/ψύξης και αερισμού
5. Hydronics: Στοιχεία υδραυλικής φύσεων όπως αντλίες και ανεμιστήρες
6. Output: Στοιχεία για παραγωγή διαγραμμάτων και αρχείων εξόδου
7. Solar Thermal Collectors: Στοιχεία σχετικά με θερμικά ηλιακά συστήματα
8. Utility: Βοηθητικά στοιχεία όπως μετατροπείς μονάδων και χρονικά προγράμματα (schedule)
9. Weather Data Reading and processing: Στοιχεία σχετικά με τον καιρό (διαθέσιμα για πλήθος τοποθεσιών ανά τον κόσμο)

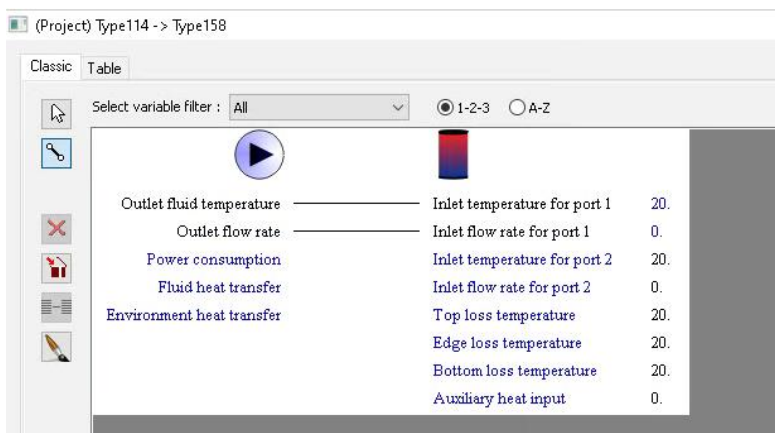
Η μοντελοποίηση (documentation) των στοιχείων γίνεται μέσω της μεθόδου Proforma. Κάθε στοιχείο, ήδη υπάρχον ή καινούργιο, πρέπει να έχει ένα ολοκληρωμένο αρχείο Proforma προκειμένου να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το Στούντιο Προσομοίωσης. Το αντίστοιχο αρχείο κάθε στοιχείου μπορεί να ανοιχτεί είτε απευθείας από το ίδιο το στοιχείο, είτε πατώντας δεξί κλικ και διαλέγοντας την αντίστοιχη επιλογή, είτε από το άνω μέρος της οθόνης και την επιλογή Assembly → Proforma. Τα αρχεία Proforma κάθε στοιχείου αποτελούνται από τέσσερις (4) καρτέλες:

- Στην πρώτη καρτέλα (General Tab) περιέχονται γενικές πληροφορίες για το στοιχείο όπως το όνομά του και η ημερομηνία δημιουργίας του
- Στη δεύτερη καρτέλα (Description) υπάρχει η αναλυτική περιγραφή του στοιχείου καθώς και η επιλογή ορισμού ενός plug-in path για μια άλλη, εξωτερική εφαρμογή επεξεργασίας του στοιχείου που έχει αναπτυχθεί από τον ίδιο το χρήστη
- Στην τρίτη καρτέλα (Variables) καθορίζονται οι παράμετροι λειτουργίας του στοιχείου καθώς και οι εισοδοί/έξοδοι που μπορεί αυτό να διαθέτει
- Στην τέταρτη καρτέλα (Files) περιέχονται πληροφορίες για τα αρχεία που σχετίζονται με το εν λόγω στοιχείο

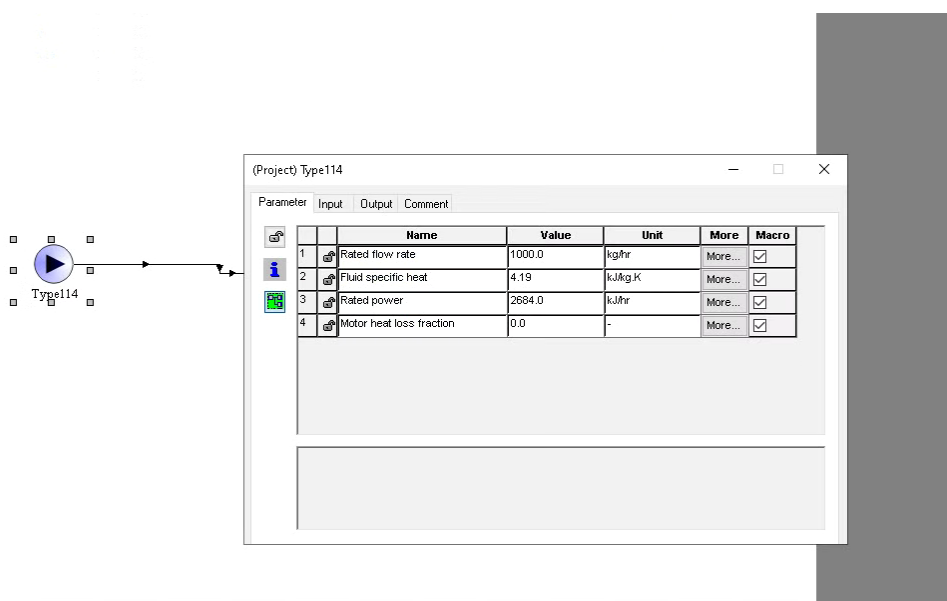
Οι προσομοιώσεις με τα διάφορα στοιχεία που περιέχουν αποτυπώνονται στον Πίνακα/Παράθυρο Σύνταξης (Assembly Panel). Τα επιθυμητά στοιχεία τοποθετούνται στο Assembly Panel με drag and drop από τη βιβλιοθήκη στα δεξιά σε οποιοδήποτε σημείο επιθυμεί ο χρήστης. Η σύνδεση των στοιχείων γίνεται με γραμμές οι οποίες έχουν μπλε χρώμα εάν καμία έξοδος του ενός στοιχείου δεν αντιστοιχεί σε είσοδο του άλλου στοιχείου όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.4. Εάν υπάρξει έστω και μια αντιστοίχιση μεταξύ των μεταβλητών των δύο στοιχείων όπως στην Εικόνα 6.5, η γραμμή γίνεται μαύρη σηματοδοτώντας ότι τα στοιχεία έχουν ενωθεί. Οι παράμετροι λειτουργίας του κάθε στοιχείου μπορούν να οριστούν ανάλογα τις απαιτήσεις του χρήστη, από το παράθυρο επεξεργασίας που εμφανίζεται κάνοντας διπλό κλικ πάνω στο εν λόγω στοιχείο όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.6.



Εικόνα 6.4: Σύνδεση δύο στοιχείων στο Assembly Panel

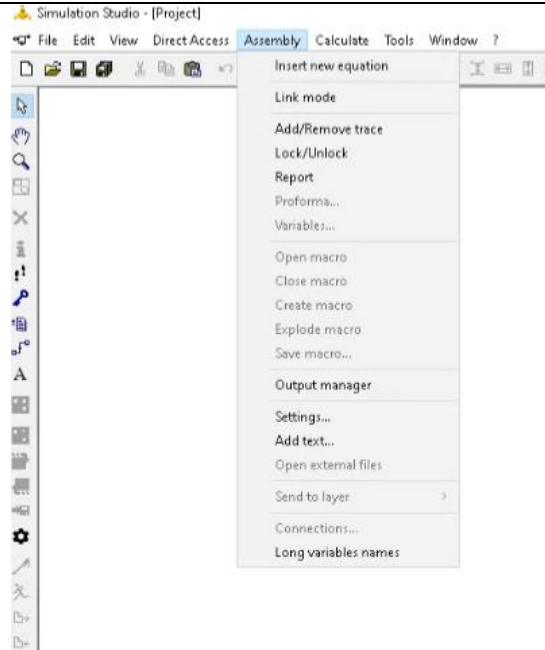


Εικόνα 6.5: Συσχέτιση μεταβλητών δύο διαφορετικών στοιχείων

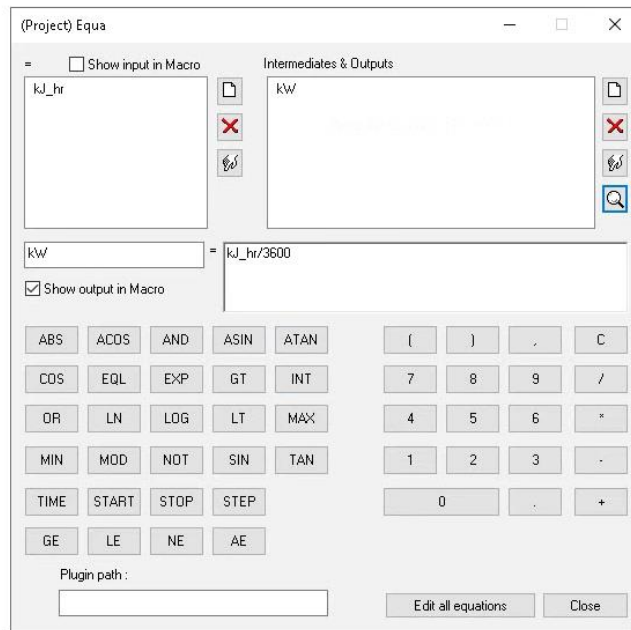


Εικόνα 6.6: Παράθυρο επεξεργασίας μεταβλητών στοιχείου

Πέραν από τη δυνατότητα εισαγωγής στοιχείων, στο Στούντιο Προσομοίωσης μπορούν να εισαχθούν και εξισώσεις οι οποίες δεν περιέχονται μέσα σε κάποιο από τα στοιχεία της βιβλιοθήκης του TRNSYS. Αυτές οι εξισώσεις μπορούν να είναι για παράδειγμα μετατροπές μονάδων ή παράμετροι που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι σε κάποιο στοιχείο. Η προσθήκη μιας εξίσωσης μπορεί να γίνει μέσω της επιλογής Assembly → Insert new equation όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.7 με τη μορφή της να είναι όπως στην Εικόνα 6.8 όπου γίνεται μια απλή μετατροπή μονάδων ισχύος. Σε κάθε τέτοιο «στοιχείο» μπορούν φυσικά να οριστούν πολλές διαφορετικές εξισώσεις που συνδέονται με άλλα στοιχεία η κάθε μια.

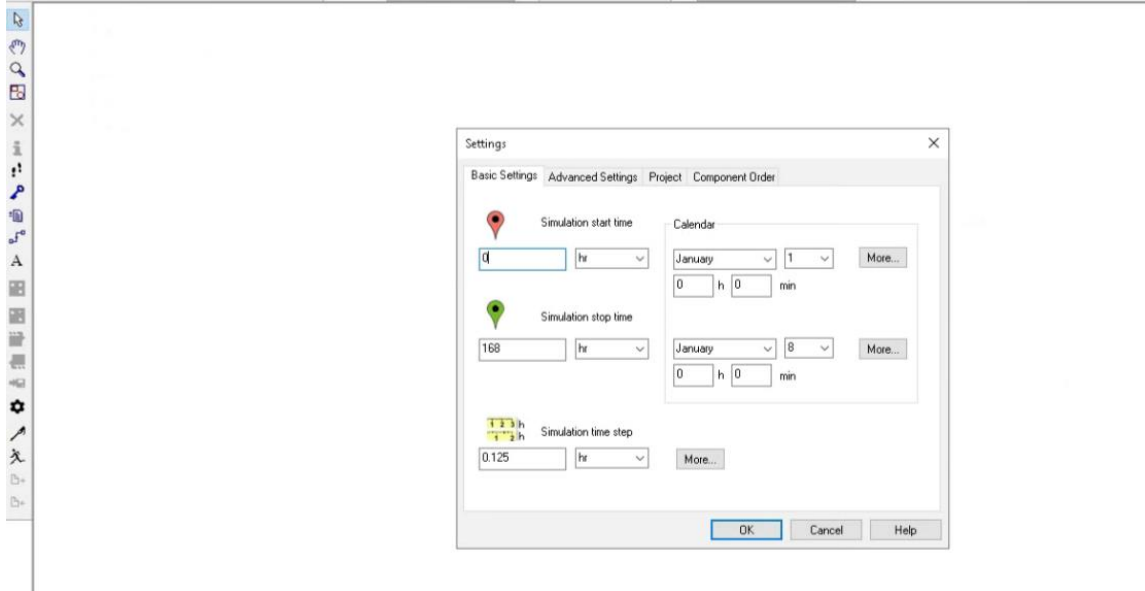


Εικόνα 6.7: Εισαγωγή εξίσωσης στο Simulation Studio



Εικόνα 6.8: Παράδειγμα ορισμού εξίσωσης

Τέλος, από το Στούντιο Προσομοίωσης μπορούν να καθοριστούν ορισμένα γενικά μεγέθη που αφορούν την προσομοίωση όπως η στιγμή έναρξης και λήξης της και το χρονικό βήμα επίλυσης. Ο καθορισμός των παραπάνω καθώς και πιο ειδικών παραμέτρων μπορεί να γίνει στην καρτέλα Settings η οποία είναι προσβάσιμη από το εικονίδιο με το γρανάζι στα αριστερά της Εικόνας 6.9.

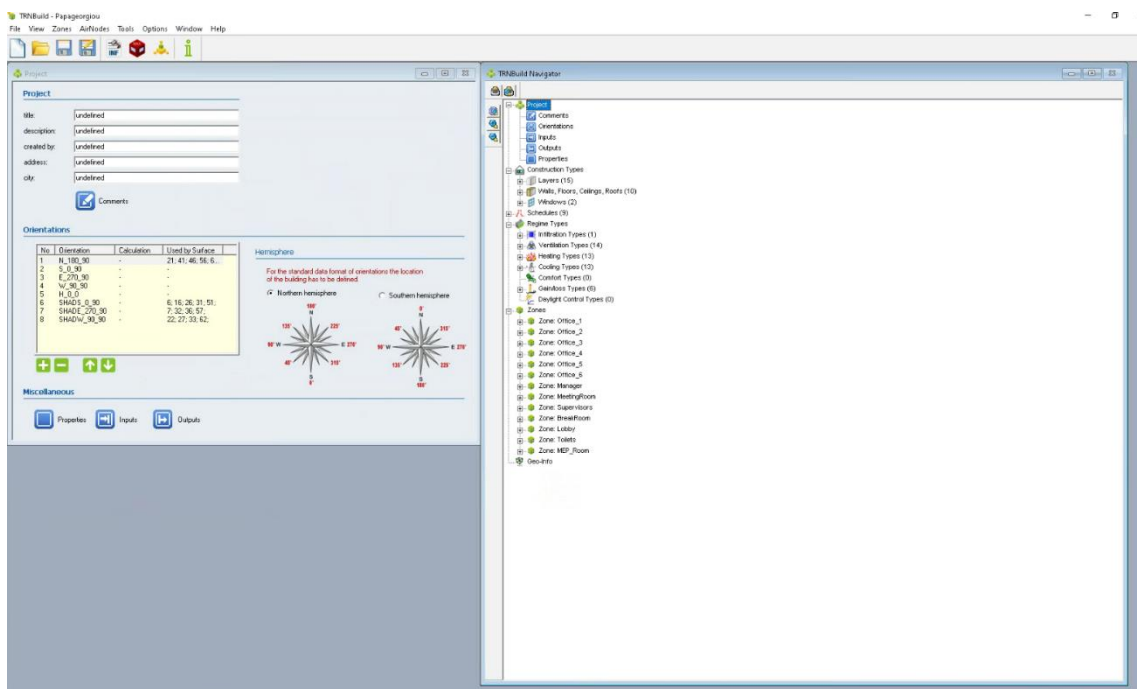


Εικόνα 6.9: Καθορισμός γενικών συνθηκών της προσομοίωσης

6.3: Περιβάλλον επεξεργασίας πολυζωνικού κτηρίου (TRNBuild)

Το περιβάλλον TRNBuild αφορά την επεξεργασία επιμέρους κομματιών ενός πολυζωνικού κτηρίου και έχει ένα ξεχωριστό μενού διεπαφής σε σχέση με το Στούντιο Προσομοίωσης. Η πρόσβαση στο TRNBuild μπορεί να γίνει επιλέγοντας “Edit Building” από το μενού που εμφανίζεται πατώντας διπλό κλικ στο στοιχείο του πολυζωνικού κτηρίου στο Assembly Panel. Στο αρχικό μενού του TRNBuild, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 6.10, διακρίνονται δύο περιοχές

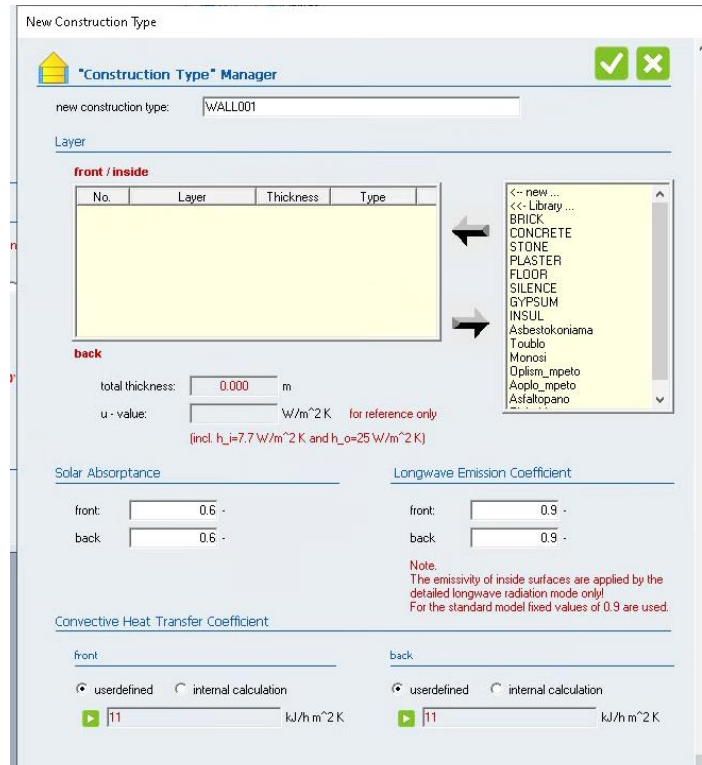
- Στα αριστερά υπάρχουν επιλογές σχετικά με γενικά χαρακτηριστικά του κτηρίου, όπως το ημισφαίριο στο οποίο βρίσκεται καθώς και μενού επεξεργασίας των εισόδων (inputs) στο κτήριο και των επιθυμητών εξόδων (outputs) από αυτό. Τέλος, από την επιλογή Properties ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί μεγέθη και παραμέτρους που αφορούν τους υπολογισμούς του TRNSYS
- Στα δεξιά βρίσκονται τα μενού επεξεργασίας των δομικών χαρακτηριστικών του κτηρίου (τοίχοι και παράθυρα), των προγραμμάτων λειτουργίας του (schedules) και των συστημάτων θέρμανσης, ψύξης και αερισμού του. Επιπλέον, στο κάτω μέρος αναγράφονται οι ζώνες του κτηρίου τις οποίες μπορεί να επεξεργαστεί μια προς μια ο χρήστης



Εικόνα 6.10: Αρχικό μενού TRNBuild

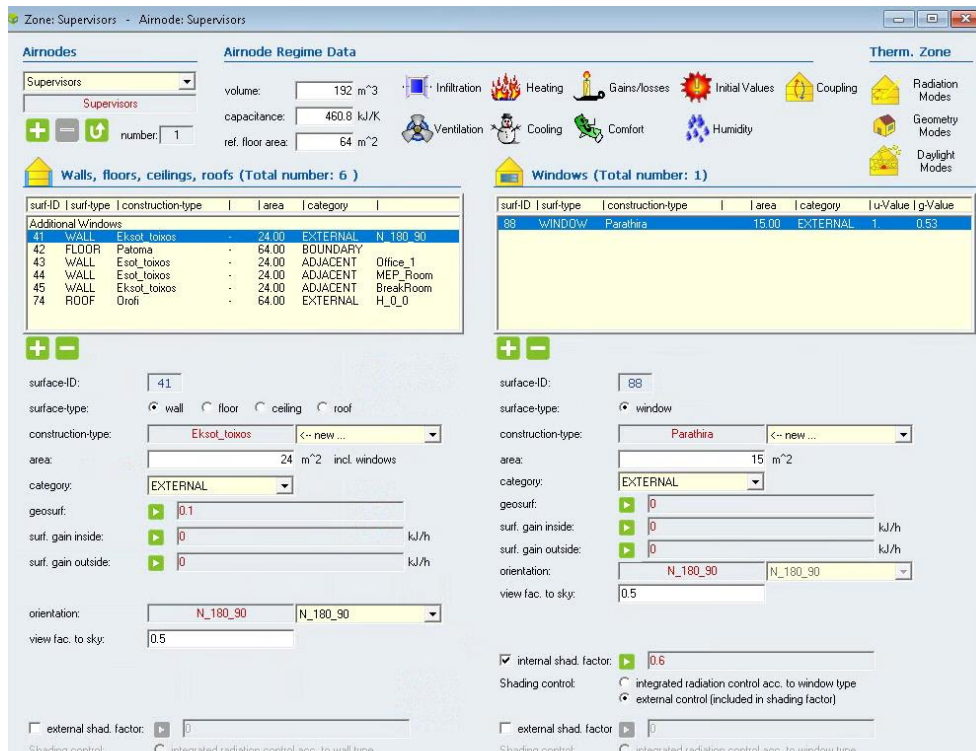
Για κάθε κατηγορία στα δεξιά της οθόνης υπάρχουν δυνατότητες δημιουργίας νέων αντικειμένων (πχ νέα δομή τοίχου), διαγραφής ενός αντικειμένου καθώς και επεξεργασίας ενός ήδη υπάρχοντος. Στην Εικόνα 6.11 φαίνεται το μενού δημιουργίας ενός νέου τοίχου. Στο δεξί μέρος βρίσκονται τα ήδη υπάρχοντα στρώματα (layers) που

μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον τοίχο και στο κάτω μέρος μπορούν να οριστούν ιδιότητες και συντελεστές του τοίχου, όπως για παράδειγμα η απορροφητικότητα του και οι συντελεστές συναγωγής με τον εσωτερικό και τον εξωτερικό αέρα.



Εικόνα 6.11: Μενού επεξεργασίας τοίχου

Στο μενού επεξεργασίας μιας ζώνης ο χρήστης αποκτά πρόσβαση με διπλό κλικ στη ζώνη που θέλει να επεξεργαστεί και εμφανίζεται το παράθυρο της Εικόνας 6.12.



Εικόνα 6.12: Μενού επεξεργασίας θερμικής ζώνης

Στο πάνω αριστερά μέρος αναφέρεται το όνομα του «κόμβου αέρα» (airnode) ο οποίος επεξεργάζεται (μια ζώνη μπορεί να αποτελείται από πολλά airnodes στο TRNSYS). Ακριβώς δίπλα μπορεί να γίνει η επεξεργασία των συνθηκών που θα επικρατούν στη ζώνη όπως και δεδομένων σαν τα εσωτερικά κέρδη, τον αερισμό και τις αρχικές συνθήκες της προσομοίωσης.

Οι τοιχοποιίες που περικλείουν τον κόμβο αναφέρονται μια προς μια με τα βασικά τους χαρακτηριστικά να είναι:

- Surface-ID: Ένας αριθμός διαφορετικός για κάθε τοίχο (στην ίδια αρίθμηση υπόκεινται και τα παράθυρα) που χρησιμεύει στην ταυτοποίησή του
- Surface Type: Καθορισμός του τύπου της επιφάνειας, αν πρόκειται δηλαδή για τοίχο, οροφή ή πάτωμα
- Construction Type: Καθορισμός του τύπου της κατασκευής, δηλαδή ποια είναι η ακριβής διαμόρφωση της (μπορεί να επιλεγεί μια από τις ήδη καθορισμένες ή να δημιουργηθεί επιτόπου μια επιθυμητή διαρρύθμιση)
- Category: Κατηγορία της κατασκευής, αν είναι δηλαδή εξωτερική ή ακουμπάει με κάποιον άλλον κόμβο
- Προσανατολισμός της επιφάνειας ο οποίος είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια. Οι διαθέσιμοι προσανατολισμοί αναγράφονται στο αρχικό μενού του TRNBuild δίπλα από την επιλογή καθορισμού του ημισφαιρίου που βρίσκεται το κτήριο

Ακριβώς κάτω από τη λίστα των επιφανειών που περικλείουν τον κόμβο μπορεί να γίνει μια ακόμα πιο λεπτομερής επεξεργασία τους καθορίζοντας συντελεστές που έπειτα χρησιμοποιούνται από το TRNSYS για τη θερμική ανάλυση του κτηρίου. Σε κάθε επιφάνεια μπορούν να προστεθούν παράθυρα τα οποία τοποθετούνται σε λίστα ανάλογα την επιφάνεια στην οποία ανήκουν, δεν εμφανίζονται όλα μαζί δηλαδή, αλλά κάθε φορά μόνο τα παράθυρα του επιλεγμένου τοίχου. Η επεξεργασία τους γίνεται με αντίστοιχο τρόπο όπως και των αδιαφανών επιφανειών. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τις θερμικές ζώνες και γενικά τη ρύθμιση των συνθηκών σε ένα κτήριο θα αναπτυχθούν στο Κεφάλαιο 7 όπου αναλύεται η διαμόρφωση του υπό μελέτη κτηρίου γραφείων.

6.4: Εφαρμογές TRNEdit και TRNSED

Το TRNEdit είναι ένα πρόγραμμα, ένα εξειδικευμένος επεξεργαστής για ακρίβεια, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τροποποίηση των αρχείων εισόδου (input files) του TRNSYS ή για τη δημιουργία αυτόνομων εφαρμογών γνωστών ως TRNSED. Το TRNEdit εγκαθίσταται μαζί με το TRNSYS σε ξεχωριστή συντόμευση (shortcut) από την οποία και είναι προσβάσιμο. Μερικές από τις δυνατότητες του είναι:

- Μετατροπή σταθερών ποσοτήτων της βασικής προσομοίωσης σε μεταβλητές και «τρέξιμο» παραμετρικών προσομοιώσεων
- Ορισμός εξωτερικών αρχείων, όπως για παράδειγμα μετεωρολογικά δεδομένα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τις προσομοιώσεις
- Ρύθμιση των εφαρμογών TRNSED

Καθώς στα πλαίσια της παρούσας εργασίας δε χρησιμοποιήθηκε το TRNEdit ή κάποια εφαρμογή TRNSED δεν θα γίνει περαιτέρω αναφορά σε αυτά.

7. Προσομοίωση του κτηρίου γραφείων στο TRNSYS

7.1: Εισαγωγή

Η προσομοίωση της εγκατάστασης αρχικά απαιτεί τον ορισμό του κτηρίου γραφείων που θα μελετηθεί. Η επιλογή των παραθύρων όπως και της διαμόρφωσης των αδιαφανών επιφανειών έγινε με βάση τυπικές διατάξεις οι οποίες εναρμονίζονται με τα όρια των συντελεστών θερμοπερατότητας που θέτει ο ΚΕΝΑΚ. Το κτήριο γραφείων θεωρείται πως θα είναι στην περιοχή της Αθήνας η οποία ανήκει στην Κλιματική ζώνη Β. Έχοντας ορίσει πλήρως τις επιφάνειες του κτηρίου και καθορίσει τις επιθυμητές συνθήκες υπολογίστηκαν τα φορτία θέρμανσης και ψύξης και στη συνέχεια ξεκίνησε η διαστασιολόγηση των επιμέρους κομματιών των συστημάτων θέρμανσης/ψύξης του κτηρίου.

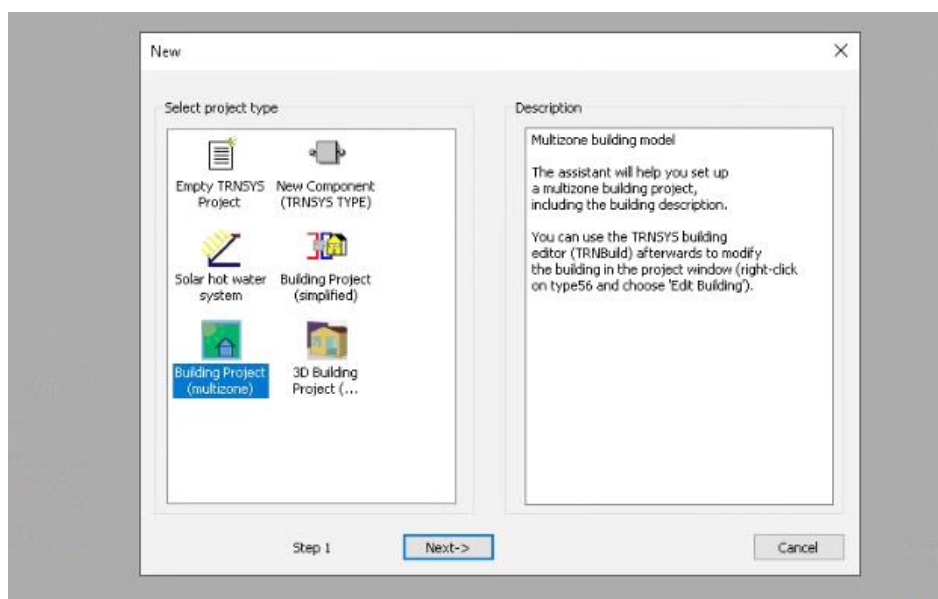
7.2: Ορισμός του κτηρίου γραφείων στο TRNSYS

7.2.1: Δημιουργία κτηρίου με το Building Wizard του TRNSYS

Τα βήματα που ακολουθούνται για τη δημιουργία του κτηρίου γραφείων έχουν ως εξής:

Βήμα 1^ο: Επιλογή τύπου νέου πρότζεκτ

Ο τύπος του νέου πρότζεκτ που επιλέγεται είναι αυτός του πολυζωνικού κτηρίου όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.1.



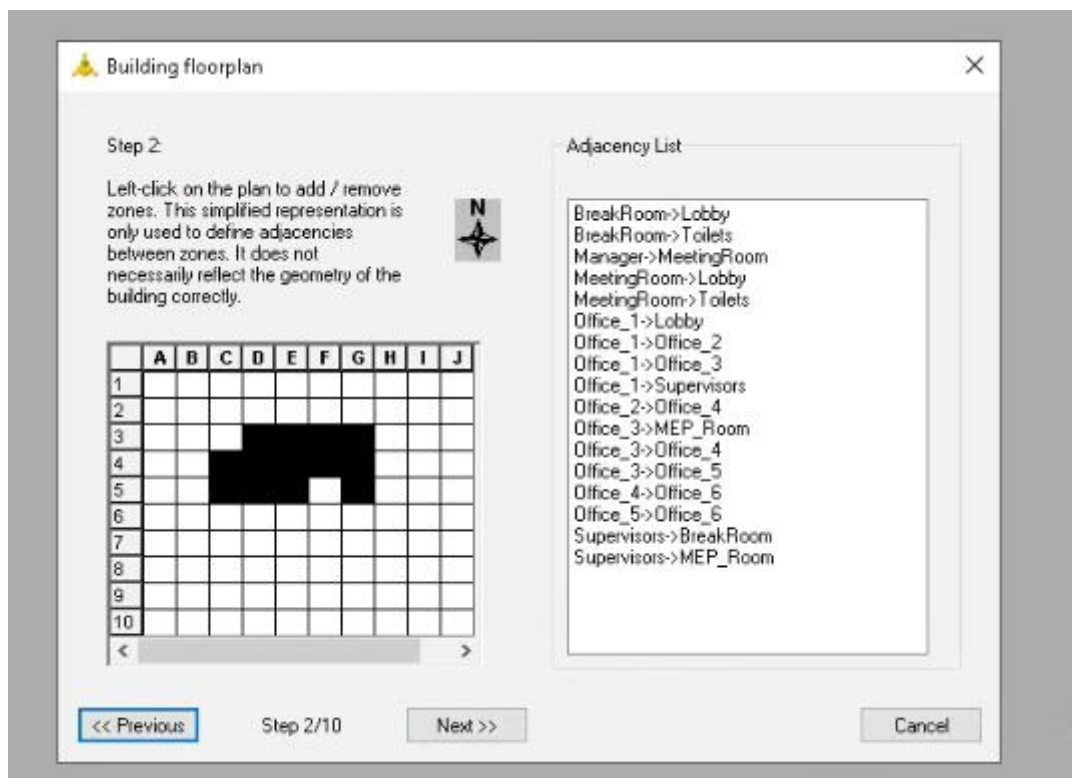
Εικόνα 7.1: Ορισμός τύπου νέου πρότζεκτ

Βήμα 2^ο: Καθορισμός γεωμετρίας του κτηρίου

Στο ταμπλό της Εικόνας 7.2 γίνεται η τοποθέτηση των χώρων του κτηρίου σε σχέση με τους υπόλοιπους. Στην πραγματικότητα δεν απαιτείται η γεωμετρία του κτηρίου να ταυτίζεται με τη μορφή που φαίνεται στα αριστερά η οποία χρησιμεύει μόνο για τον καθορισμό του ποιοι χώροι συνορεύουν με ποιους. Εντούτοις, στα πλαίσια της παρούσας εργασία θεωρείται πως η Εικόνα 7.2 ανταποκρίνεται και στην πραγματική γεωμετρία του κτηρίου. Στο παρόν κτήριο πέραν του χώρου των γραφείων που θεωρείται πως είναι τύπου open-space υπάρχουν:

- Γραφείο Διευθυντή (Manager, στη ζώνη G5)
- Αίθουσα συσκέψεων (Meeting Room), στη ζώνη G4)
- Γραφείο Προϊσταμένων (Supervisors, στη ζώνη E3)
- Χώρος διαλείμματος (Break Room, στη ζώνη F3)
- Είσοδος (Lobby, στη ζώνη F4)
- Τουαλέτες (Toilets, στη ζώνη G3)

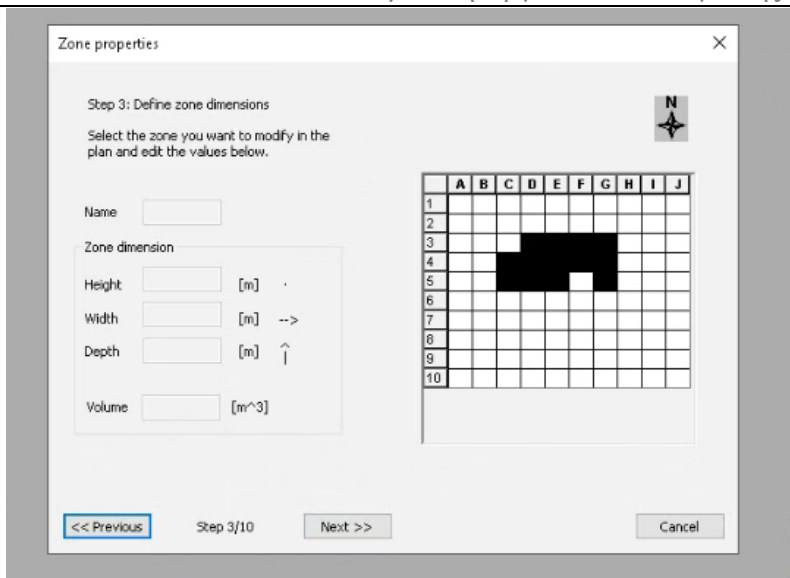
- Η/Μ χώρος (MEP Room, στη ζώνη D3)



Εικόνα 7.2: Γεωμετρία του κτηρίου

Βήμα 3^ο: Ορισμός διαστάσεων κάθε χώρου

Αφού καθοριστεί η τοποθέτηση των χώρων επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των διαστάσεων του καθενός. Στην απλοϊκή αναπαράσταση του TRNSYS ωστόσο υπάρχει ο εξής περιορισμός: Ζώνες οι οποίες συνορεύουν στον άξονα Βορρά-Νότου πρέπει να έχουν το ίδιο πλάτος (width) και ζώνες που συνορεύουν στον άξονα Ανατολής-Δύσης το ίδιο βάθος (depth). Συνεπώς, ο ορισμός ενός μεγάλου ενιαίου χώρου γραφείων δεν ήταν δυνατός καθώς σε μια τέτοια περίπτωση οι γειτονικοί χώροι θα είχαν μη ρεαλιστικές διαστάσεις. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το εμπόδιο, ο χώρος γραφείων χωρίστηκε σε έξι (6) κομμάτια τα οποία αντιστοιχούν στα κουτιά E4,E5,D4,D5,C4,C5. Στην Εικόνα 7.3 φαίνεται το 3^ο παράθυρο του Building Wizard όπου γίνεται ο καθορισμός των διαστάσεων των ζωνών. Προκειμένου να περιοριστεί ο αριθμός των εικόνων, οι διαστάσεις του κάθε χώρου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.1 αντί για ξεχωριστές εικόνες.. Όλοι οι χώροι θεωρείται πως έχουν κοινό ύψος 3 m.



Εικόνα 7.3: Παράθυρο καθορισμού διαστάσεων κάθε χώρου

Πίνακας 7.1: Διαστάσεις κάθε χώρου

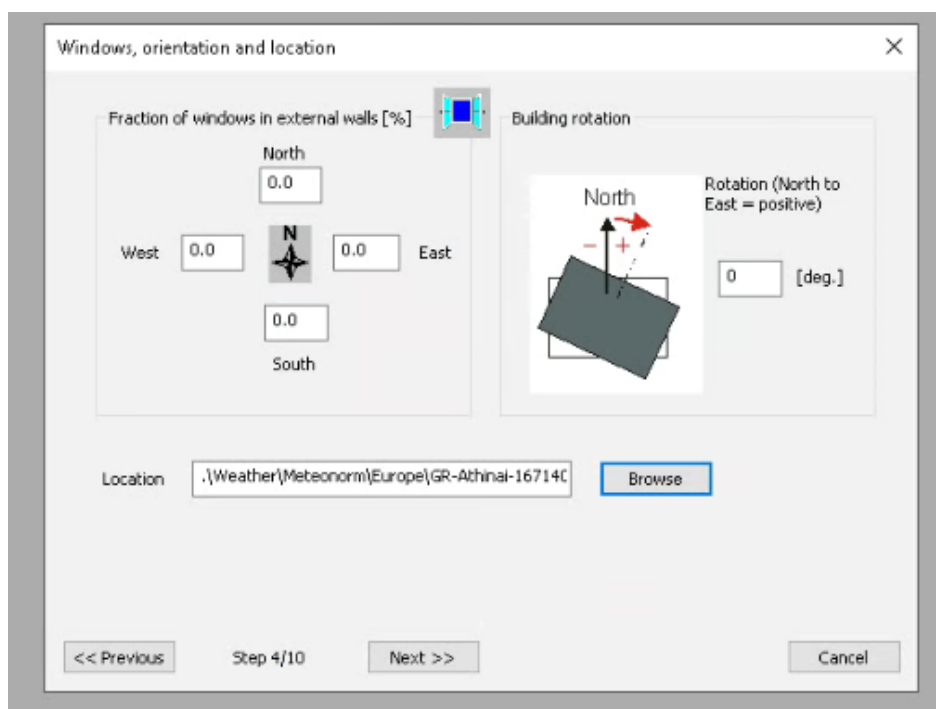
Χώροι	Πλάτος (width)	Βάθος (Depth)
Office 1 (ζώνη E4)/ Office 2 (ζώνη E5)/ Manager / Meeting Room / Supervisors / Toilets	8	8
Office 3 (ζώνη D4) / Office 4 (ζώνη D5) / Break Room / Lobby / MEP Room	6	8
Office 5 (ζώνη C4) / Office 6 (ζώνη C5)	15	8

(Σημείωση: Στο Building Wizard του TRNSYS δεν γίνεται να οριστούν διάδρομοι οπότε αναγκαστικά το εμβαδόν των διαφόρων χώρων θεωρείται πως περιλαμβάνει και διάδρομο πρόσβασης σε αυτόν. Επιπλέον στον χώρο των τουαλετών ένα μέρος του εμβαδού αντιστοιχεί σε αποθηκευτικό χώρο που χρησιμοποιείται από το προσωπικό καθαριότητας του κτηρίου κάτι που επίσης δεν μπορεί να αποτυπωθεί. Για τους ενεργειακούς υπολογισμούς τα παραπάνω δεν έχουν ληφθεί υπόψιν καθώς η διαφορά θα ήταν σε κάθε περίπτωση πολύ μικρή ωστόσο κρίθηκε σκόπιμο να γίνει μια αναφορά για λόγους πληρότητας.)

Βήμα 4^ο:

Στο επόμενο βήμα καθορίζεται η τοποθεσία του κτηρίου και το αντίστοιχο αρχείο καιρού όπως φαίνεται στο κάτω μέρος της Εικόνας 7.4. Σε αυτό το σημείο θα μπορούσε να οριστεί το ποσοστό της κάθε πλευράς του κτηρίου το οποίο αποτελείται από υαλοπίνακες, ωστόσο είναι προτιμότερο να οριστούν χειροκίνητα τα παράθυρα στους επιμέρους χώρους από το TRNBuild. Όσον αφορά τον προσανατολισμό του κτηρίου, δεν

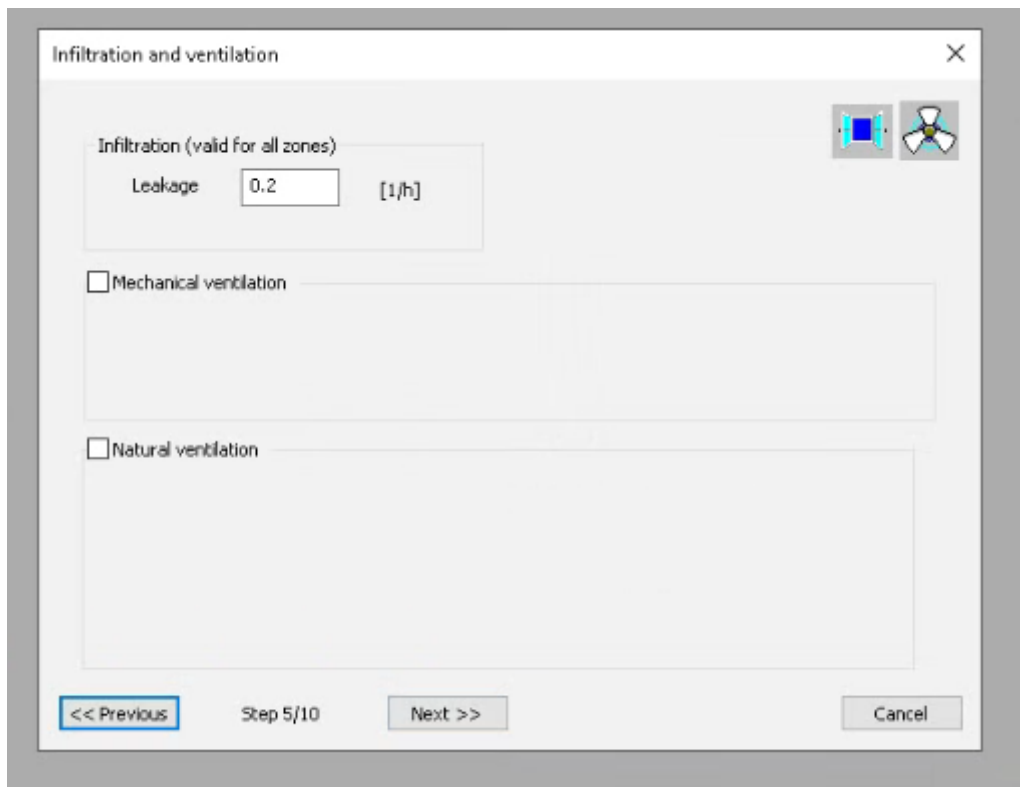
θεωρείται πως παρεκκλίνει από τον άξονα Βορρά-Νότου και έτσι διατηρείται η προεπιλεγμένη (default) τιμή των 0 μοιρών.



Εικόνα 7.4: Καθορισμός ανοιγμάτων, περιστροφής και μετεωρολογικών δεδομένων για το κτήριο

Βήμα 5^ο:

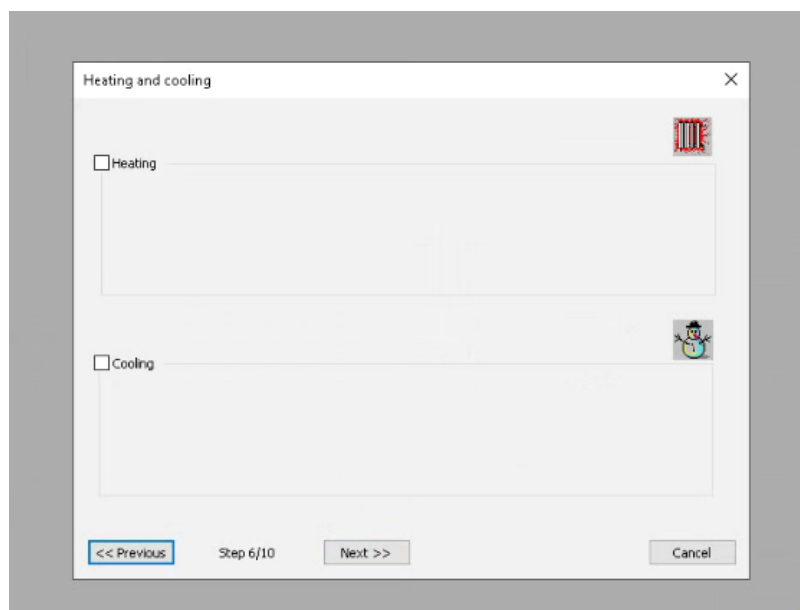
Στο 5^ο βήμα μπορεί να καθοριστεί για όλες τις ζώνες ένας κοινός ρυθμός διείσδυσης αέρα (infiltration) ο οποίος μετράται σε εναλλαγές αέρα ανά ώρα (ACH: Air Change per Hour). Σε καινούργια κτήρια καταβάλλεται σημαντική προσπάθεια να είναι κατά το δυνατόν αεροστεγή, περιορίζοντας την ανεξέλεγκτη είσοδο του αέρα, τόσο επειδή ο εξωτερικός μη κλιματισμένος αέρας αυξάνει τα φορτία όσο και για να υπάρχει καλύτερος έλεγχος των συνθηκών του χώρου. Ένα κτήριο θεωρείται αεροστεγές άμα η διείσδυση αέρα είναι μικρότερη από 0,5 ACH και άρα επιλέγεται να διατηρηθεί η default τιμή των 0,2 ACH που υπάρχει στην Εικόνα 7.5 για όλο το κτήριο. Ο αερισμός (ventilation) δεν ενεργοποιείται σε αυτό το στάδιο καθώς είναι αρκετά πιθανό για την κάλυψη των θερμικών φορτίων του κτηρίου ο νωπός αέρας που απαιτείται να υπερκαλύπτει τις ανάγκες αερισμού. Σε περίπτωση που αυτό δεν ισχύει υπάρχει πάντα η δυνατότητα στο TRNBuild της προσθήκης αερισμού σε ένα χώρο.



Εικόνα 7.5: Ορισμός εναλλαγών αέρα και αερισμού

Βήμα 6^ο:

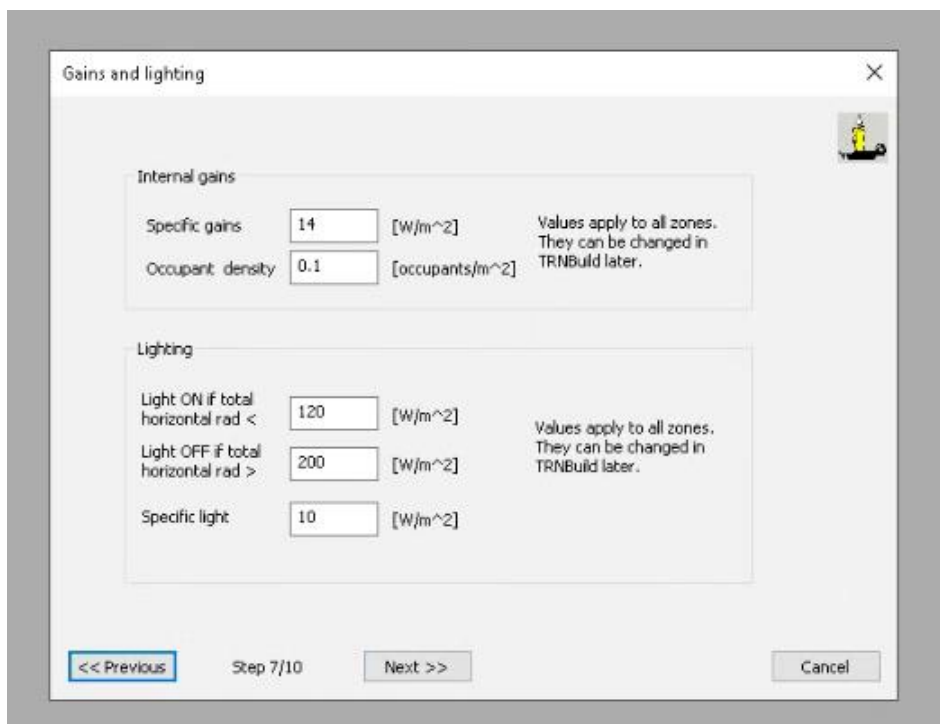
Οι επιθυμητές συνθήκες θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου μπορούν να επιλεγούν στη συνέχεια. Επειδή όλοι οι χώροι του κτηρίου δεν έχουν τις ίδιες συνθήκες λειτουργίας και καθώς το σύστημα θέρμανσης-ψύξης θα αναπτυχθεί λεπτομερώς, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7.6, δεν ενεργοποιήθηκε κάποια επιλογή.



Εικόνα 7.6: Ορισμός θέρμανσης-ψύξης του κτηρίου

Βήμα 7°:

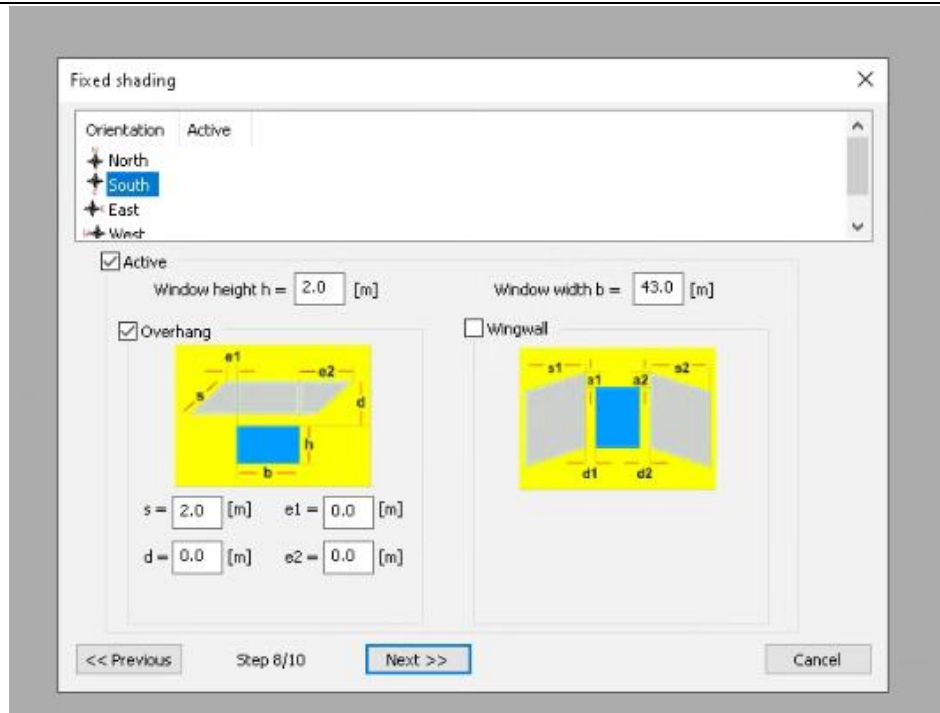
Τα εσωτερικά κέρδη και ο φωτισμός ορίζονται στο 7° Βήμα. Καθώς ανάλογα το χώρο αυτά θα είναι διαφορετικά, επιλέγεται να κρατηθούν οι default τιμές τις Εικόνας 7.7 και να γίνει επεξεργασία τους στο TRNBuild. Επιπλέον από το TRNSYS καθορίζονται όρια ενεργοποίησης και απενεργοποίησης του τεχνητού φωτισμού με στόχο τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτηρίου.



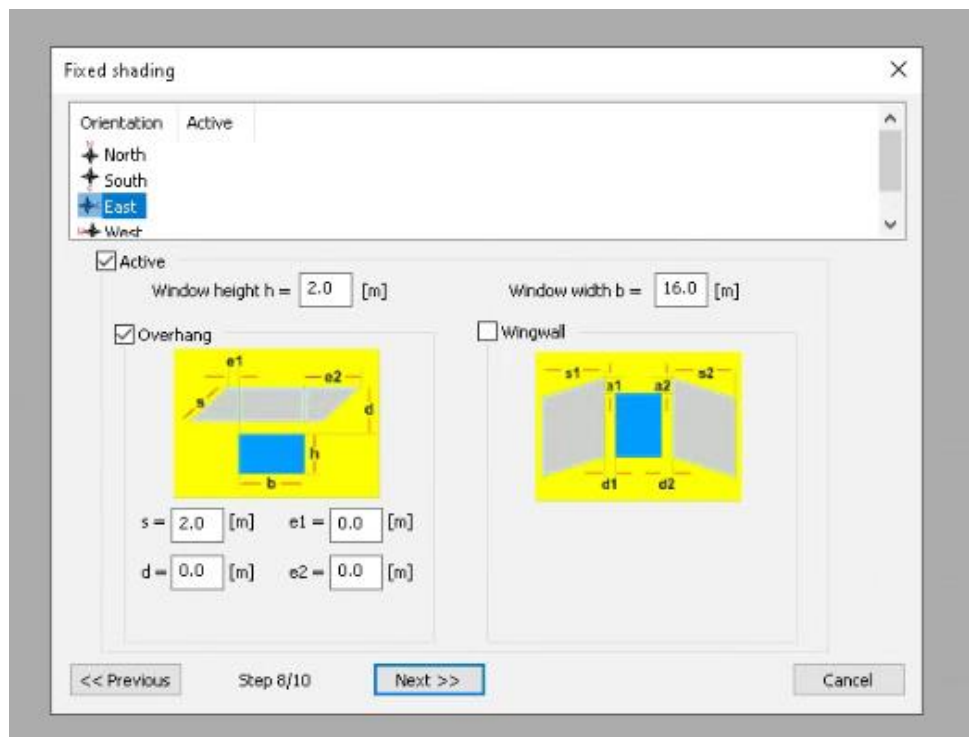
Εικόνα 7.7: Εσωτερικά κέρδη και φωτισμός του κτηρίου

Βήμα 8°:

Όσον αφορά τη σκίαση των εξωτερικών επιφανειών του κτηρίου υπάρχουν δύο επιλογές: Σταθερή ή κινούμενη σκίαση. Στο 8° βήμα μπορεί να καθοριστεί η σταθερή σκίαση σε κάθε κατεύθυνση. Για την μείωση των φορτίων τοποθετείται σταθερή σκίαση στη νότια, την ανατολική και τη δυτική πλευρά του κτηρίου. Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 7.7 και 7.8 πρέπει να οριστούν οι διαστάσεις του σκιάστρου. Αρχικά επιλέγεται το σκιάστρο να έχει πλάτος 2 m και μήκος στο νότο όσο όλη η πρόσοψη του κτηρίου. Στα ανατολικά και τα δυτικά το μήκος περιορίζεται στα 16 m, καλύπτοντας δηλαδή τους δύο χώρους γραφείων, το γραφείο του διευθυντή και το χώρο συσκέψεων. Όπως και με όλες τις επιλογές υπάρχει η δυνατότητα επεξεργασίας της σκίασης στη συνέχεια.



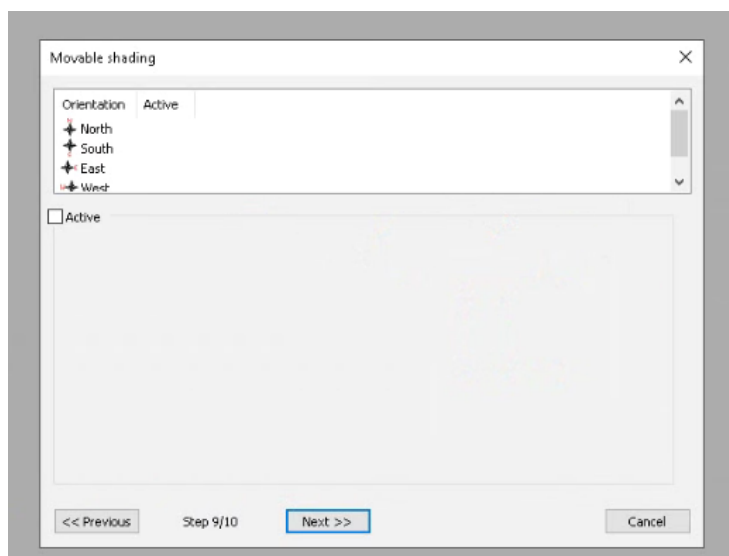
Εικόνα 7.8: Ορισμός σκίασης στη νότια πλευρά του κτηρίου



Εικόνα 7.9: Ορισμός σκίασης στην ανατολική πλευρά του κτηρίου (ακριβώς τα ίδια νοόμερα είναι και στη δυτική πλευρά)

Βήμα 9^ο:

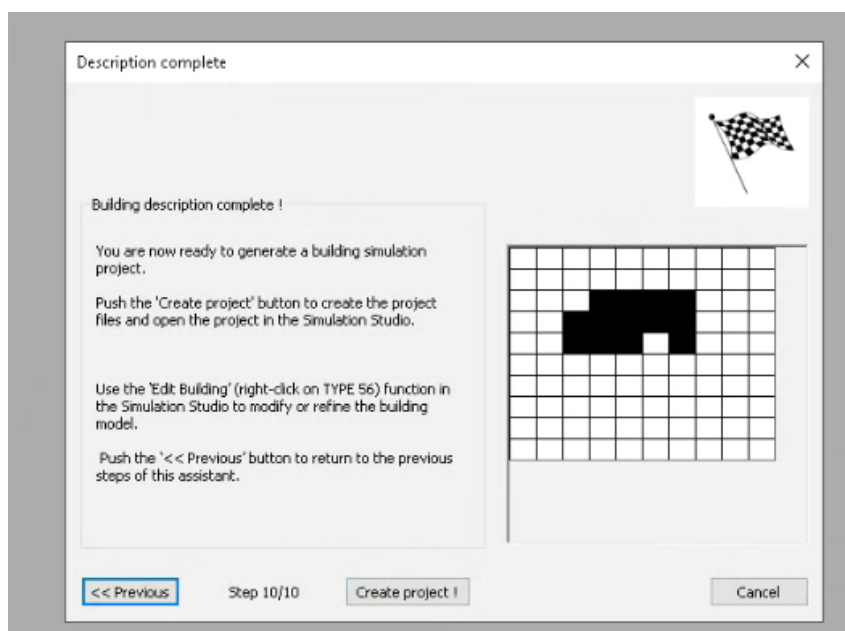
Στο ουσιαστικά τελευταίο βήμα μπορεί να οριστεί η κινητή σκίαση του κτηρίου. Επειδή όμως στο προηγούμενο βήμα έχουν καθοριστεί σταθερά σκίαστρα δεν προστίθεται κινητή σκίαση όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.10.



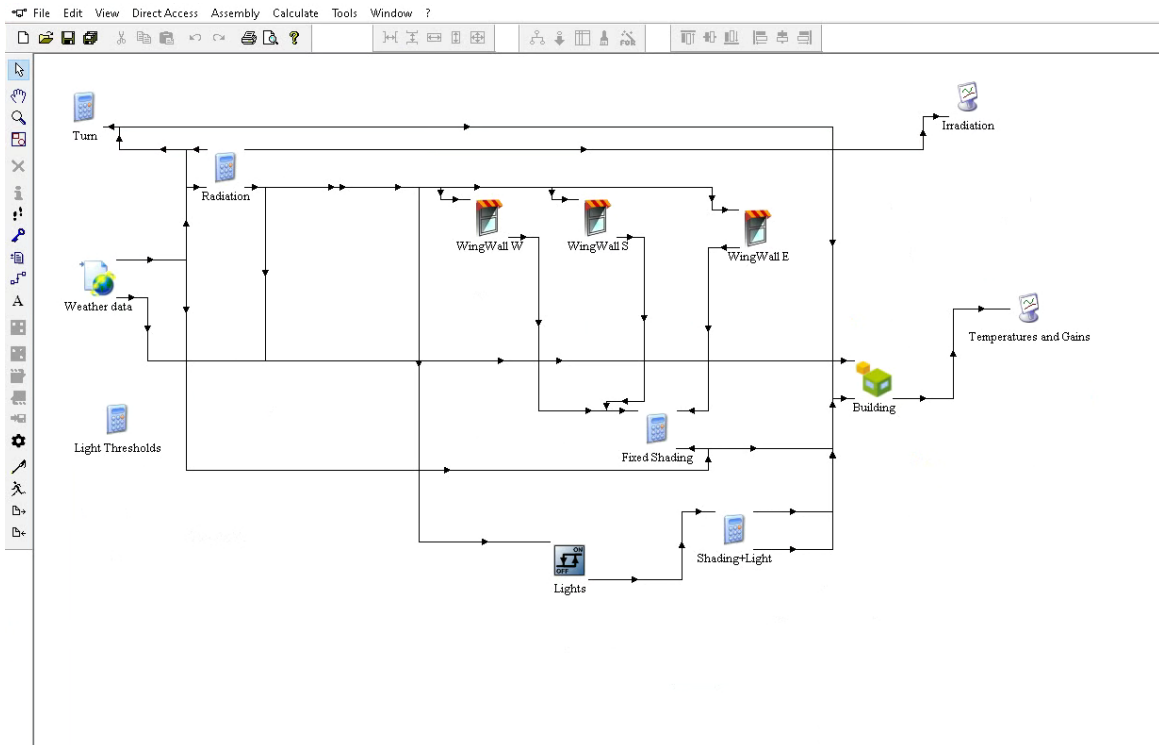
Εικόνα 7.10: Κινητή σκίαση

Βήμα 10^ο:

Στο τυπικά τελευταίο βήμα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.11 γίνεται μια επικύρωση της παραπάνω διαδικασίας και δίνεται στο χρήστη μια ευκαιρία τροποποίησης κάποιων βημάτων από τα προηγούμενα. Με την επιλογή Create Project το TRNSYS δημιουργεί αυτόματα τη συνδεσμολογία της Εικόνας 7.12 που αποτελεί ουσιαστικά την αρχική εκδοχή του κτηρίου.



Εικόνα 7.11: Τελικό στάδιο σχεδιασμού του κτηρίου με το Building Wizard

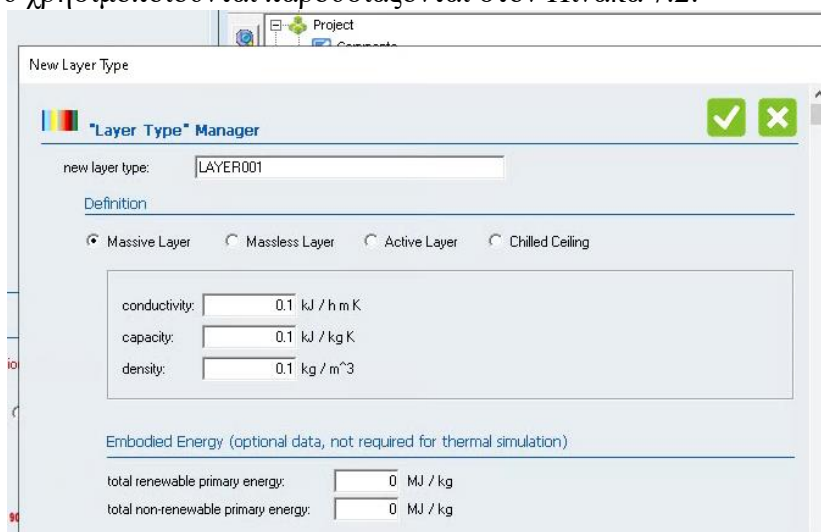


Εικόνα 7.12: Αρχική συνδεσμολογία κτηρίου

Σε αυτό το σημείο αρχίζει η επεξεργασία του ίδιου του κτηρίου με το TRNBuild η οποία αναλύεται στις επόμενες παραγράφους.

7.2.2: Ορισμός επιφανειών (διάφανων και μη) βάσει των ορίων του KENAK

Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο, η είσοδος στο TRNBuild πραγματοποιείται με δεξί κλικ στο εικονίδιο του κτηρίου επιλέγοντας στη συνέχεια Edit Building. Αρχικά θα οριστούν οι διαμορφώσεις των αδιαφανών επιφανειών του κτηρίου και έπειτα τα παράθυρα που θα χρησιμοποιηθούν. Για τις αδιαφανείς επιφάνειες ορίζονται νέα στρώματα (Layers) από το μενού που φαίνεται στην Εικόνα 7.13. Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.2.



Εικόνα 7.13: Μενού δημιουργίας νέου υλικού/στρώματος

Πίνακας 7.2: Υλικά για τις αδιαφανείς επιφάνειες του κτηρίου

Υλικό	Αγωγιμότητα, W/m·K (Conductivity)	Θερμική διαπερατότητα J/kg·K (Capacity)	Πυκνότητα kg/m ³ (Density)
Ασβεστοκονίαμα	0,87	1.000	1.800
Οπτοπλινθοδομή με διάτρητες οπτοπλίνθους	0,51	1.000	1.500
Εξηλασμένη πολυστερίνη (μόνωση)	0,035	1.450	35
Οπλισμένο σκυρόδεμα	2,3	1.000	2.300
Σκυρόδεμα άοπλο ή ελαφρώς οπλισμένο	1,35	1.000	2.000
Ασφαλτικά φύλλα (ασφαλτόπανα)	0,23	1.000	1.100
Κεραμικά πλακάκια δαπέδου	1,84	840	2.000

Πηγή: TOTEE 20701-2/2017

Αφού οριστούν όλα τα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, μπορούν να δημιουργηθούν οι διάφορες επιφάνειες από την αντίστοιχη επιλογή του μενού του TRNBuild. Οι διαμορφώσεις των αδιαφανών επιφανειών (από το εσωτερικό προς το εξωτερικό) που υπάρχουν στο κτήριο είναι οι εξής:

Εξωτερικοί τοίχοι:

- Ασβεστοκονίαμα 2 cm
- Οπτοπλινθοδομή 12 cm
- Μόνωση 10 cm
- Οπτοπλινθοδομή 12 cm
- Ασβεστοκονίαμα 2 cm

Εσωτερικοί τοίχοι σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο:

- Ασβεστοκονίαμα 2 cm
- Οπτοπλινθοδομή 12 cm
- Μόνωση 10 cm
- Οπτοπλινθοδομή 12 cm
- Ασβεστοκονίαμα 2 cm

Εσωτερικοί τοίχοι (μεταξύ θερμαινόμενων χώρων):

- Ασβεστοκονίαμα 2 cm
- Οπτοπλινθοδομή 12 cm
- Ασβεστοκονίαμα 2 cm

Οροφή:

- Ασβεστοκονίαμα 2 cm
- Οπλισμένο σκυρόδεμα 20 cm
- Μόνωση 15 cm
- Ασφαλτόπανο 3 cm
- Άοπλο μπετόν 10 cm
- Ασβεστοκονίαμα 2 cm

Πάτωμα:

- Πλακάκια 2 cm
- Οπλισμένο σκυρόδεμα 20 cm
- Μόνωση 10 cm
- Ασφαλτόπανο 3 cm
- Άοπλο μπετόν 10 cm

Κατά τη δημιουργία ενός νέου τύπου κατασκευής (Construction Type) υπάρχει η δυνατότητα ορισμού συντελεστών απορροφητικότητας και συναγωγής τόσο για την εσωτερική όσο και την εξωτερική επιφάνεια της κατασκευής. Για τους εξωτερικούς τοίχους και την οροφή γίνεται η υπόθεση πως η εξωτερική τους επιφάνεια είναι ανοικτόχρωμης απόχρωσης με συντελεστή απορροφητικότητας 0,4. Στις υπόλοιπες επιφάνειες διατηρείται η default τιμή 0,6 που αντιστοιχεί σε μέτρια απόχρωση. Οι συντελεστές συναγωγής με τον εσωτερικό και τον εξωτερικό αέρα επιλέχθηκε να είναι ίσοι με $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ που αποτελούν τυπικές τιμές.

Σχετικά με τους υαλοπίνακες του κτηρίου επιλέχθηκε μια «έτοιμη» διαμόρφωση από τη γερμανική βιβλιοθήκη υαλοπινάκων του TRNSYS (το αναγνωριστικό (ID number) του υαλοπίνακα είναι 3209) η οποία αποτελείται από διπλό τζάμι 4 mm και κενό 16 mm με Αργό. Η τιμή διαπερατότητας (U-value) του τζαμιού είναι ίση με $1 \text{ W/m}^2\text{K}$ ενώ μαζί με το πλαίσιο η συνολική τιμή ανέρχεται στα $1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Όλοι οι χώροι του κτηρίου έχουν παράθυρα πέραν του Η/Μ δωματίου. Τα παράθυρα σε κάθε χώρο έχουν ύψος 2 m και πλάτος 0,5 m λιγότερο από τη διάσταση του τοίχου που βρίσκονται. Για παράδειγμα, στην αίθουσα συσκέψεων η οποία έχει έναν εξωτερικό τοίχο 8 m, το παράθυρο θα έχει επιφάνεια 15 m^2 [$2 \times (8-0,5) \text{ m}$]. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι τουαλέτες όπου στους εξωτερικούς τοίχους η επιφάνεια των παραθύρων είναι 4 m^2 τόσο στο Βορρά όσο και την Ανατολή. Επιπλέον, ο δυτικός τοίχος του δωματίου του Διευθυντή και ο ανατολικός τοίχος του χώρου Office_2 (είναι ο ένας απέναντι από τον άλλον) δεν διαθέτουν παράθυρα. Στον Πίνακα 7.3 παρουσιάζονται οι τιμές θερμικής διαπερατότητας των επιλεγμένων διαμορφώσεων και τα αντίστοιχα όρια του KENAK για την Κλιματική Ζώνη Β που βρίσκεται η Αθήνα. Εσωτερικοί τοίχοι σε επαφή με μη θερμαινόμενους χώρους

θεωρείται πως είναι οι εσωτερικοί τοίχοι του Η/Μ χώρου και των τουαλετών. Αυτή η κίνηση γίνεται καθώς δεν είναι επιθυμητό τα φορτία αυτών των χώρων να περάσουν σε διπλανούς χώρους το οποίο θα αύξανε κατά πολύ την απαιτούμενη ισχύ των δικών τους συσκευών θέρμανσης/ψύξης.

Πίνακας 7.3: Σύγκριση τιμών θερμικής διαπερατότητας των στοιχείων του κελύφους με τα αντίστοιχα όρια του KENAK

Στοιχείο κελύφους	Τιμή U (W/m ² K)	Όριο KENAK (W/m ² K)
Εξωτερικός τοίχος	0,28	0,45
Εσωτερικός τοίχος σε επαφή με μη θερμαινόμενο χώρο	0,80	0,9
Εσωτερικός τοίχος	2,22	-
Οροφή	0,21	0,4
Πάτωμα	0,31	0,8
Υαλοπίνακας (μαζί με πλαίσιο)	1,2	1,9

7.2.3: Καθορισμός συνθηκών στους χώρους του κτηρίου

Οι συνθήκες που επικρατούν στους χώρους του κτηρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.4. Όσον αφορά τον Η/Μ χώρο οι συνθήκες επιλέχθηκαν βάσει τυπικών τιμών της βιβλιογραφίας. Η θερμοκρασία των 22 °C είναι σημαντικό να μην αυξάνεται πολύ καθώς υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 35-40 °C) μπορούν να βλάψουν τον ηλεκτρικό εξοπλισμό του χώρου. Παράλληλα και η υγρασία διατηρείται σε μέτρια επίπεδα ώστε να μην παρεμβαίνει στη λειτουργία του εξοπλισμού. Για τους χώρους εκτός του Η/Μ δωματίου επιλέχθηκε η θερμοκρασία να μεταβάλλεται κατά ± 4 °C για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας. Καθώς το κτήριο θα είναι κατειλημμένο για μερικές ώρες μόνο της ημέρας, δεν υπάρχει λόγος το βράδυ που το προσωπικό έχει αποχωρήσει να διατηρούνται οι συνθήκες άνεσης στο κτήριο. Μια πιο αναλυτική δικαιολόγηση αυτής της επιλογής παρουσιάζεται στην επόμενη παράγραφο όπου υπολογίζονται τα θερμικά και ψυκτικά φορτία του κτηρίου.

Πίνακας 7.4: Συνθήκες λειτουργίας στους χώρους του κτηρίου

	Θερμοκρασία (°C)			Σχετική υγρασία
	Χώρος	Ώρες εργασίας	Υπόλοιπες ώρες	
Χειμώνας	Γραφεία, Αίθουσα Συσκέψεων, Υποδοχή, Χώρος διαλείμματος	20	16	35%
	Τουαλέτες	22	18	40
	H/M	22	22	40
Καλοκαίρι	Γραφεία, Αίθουσα Συσκέψεων, Υποδοχή, Χώρος διαλείμματος	26	30	45
	Τουαλέτες	26	30	50
	H/M	22	22	40

7.2.4: Υπολογισμός φορτίων

Προκειμένου να υπολογιστούν τα φορτία του κτηρίου πρώτα πρέπει να οριστούν τα εσωτερικά κέρδη κάθε χώρου καθώς και τα ωράρια των εργαζομένων. Τα εσωτερικά κέρδη σε κάθε χώρο είναι τριών κατηγοριών:

- Κέρδη από ανθρώπους
- Κέρδη από φωτισμό
- Κέρδη από εξοπλισμό

Στην TOTEE 20701-1/2017 ορίζονται τυπικές τιμές για τα παραπάνω μεγέθη ανηγμένα στη μονάδα επιφάνειας. Στον Πίνακα 7.5 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες τιμές.

Πίνακας 7.5: Τιμές TOTEE για εσωτερικά κέρδη

Χώρος	Θερμική ισχύς ατόμων (W/άτομο)	Ισχύς φωτισμού για απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης (W/m ²)	Ισχύς εξοπλισμού (W/m ²)
Γραφεία	80	14	15
Αίθουσα συσκέψεων	75	14	2

Χώρος	Θερμική ισχύς ατόμων (W/άτομο)	Ισχύς φωτισμού για απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης (W/m ²)	Ισχύς εξοπλισμού (W/m ²)
Τουαλέτες	0	5,6	0

Πηγή: TOTEE 20701-1/2017

Στο μενού Gain/Loss Type Manager του TRNSYS είναι δυνατός ο ορισμός των παραπάνω. Στην Εικόνα 7.14 ορίζεται το κέρδος από τους εργαζομένους. Η μοντελοποίησή τους γίνεται από το έτοιμο στοιχείο της βιβλιοθήκης του TRNSYS που φαίνεται στο πάνω μέρος της εικόνας και αντιστοιχεί στις τιμές της TOTEE. Στον Πίνακα 7.6 παρουσιάζεται ο μέγιστος αριθμός των ατόμων που λαμβάνονται υπόψη σε κάθε χώρο για τους ενεργειακούς υπολογισμούς. Να σημειωθεί πως ο συνολικός αριθμός των εργαζομένων έχει θεωρηθεί ίσος με 65 (Διευθυντής, Γραμματεία, 3 Supervisors, 2 Lobby και 58 εργαζόμενοι).

Πίνακας 7.6: Μέγιστος αριθμός ατόμων (ταυτόχρονα) σε κάθε χώρο

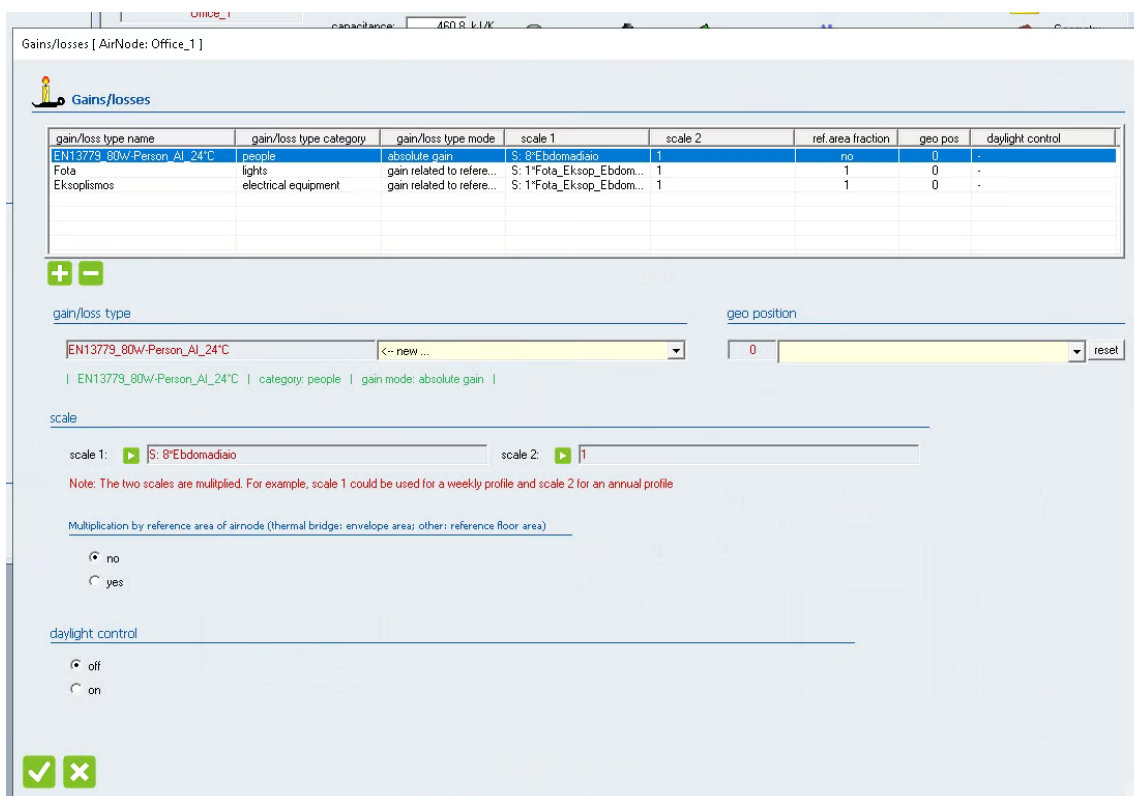
Χώρος	Αριθμός ατόμων
Γραφείο Διευθυντή	3 (Διευθυντής, Γραμματεία και προγραμματισμένα ραντεβού)
Γραφείο Προϊσταμένων	5 (3 Προϊστάμενοι και 2 επιπλέον ταυτόχρονα ραντεβού)
Υποδοχή	2
Χώρος Γραφείων	58 (1 εργαζόμενος ανά 8 m ²)
Αίθουσα συσκέψεων	10
Χώρος Διαλείμματος	3

Εικόνα 7.14: Ορισμός εσωτερικού κέρδους από ανθρώπους

Ο τεχνητός φωτισμός θα επιτυγχάνεται με λάμπες LED οι οποίες καταναλώνουν πολύ λίγη ενέργεια σε σχέση με μια συμβατική λάμπα ίδιας φωτεινότητας. Φωτιστικά LED με ισχύ 5 W/m^2 μπορούν να καλύψουν τις απαιτήσεις της TOTEE τόσο σε θέμα ισχύος όσο και στάθμης φωτισμού (lux) στο χώρο. Σε ένα LED περίπου το 40% της ενέργειας μετατρέπεται σε φως και το υπόλοιπο 60% σε θερμότητα, δηλαδή αναμένεται η θερμική ισχύς από τα φώτα να ανέρχεται συνολικά στα 3 W/m^2 . Από αυτή την ισχύ περίπου το 80% αποδίδεται στο χώρο μέσω ακτινοβολίας (radiation) και το υπόλοιπο 20% μέσω συναγωγής (convection) στον αέρα γύρω από το φωτιστικό και με βάσει αυτές τις τιμές ορίζεται το εσωτερικό κέρδος από τα φώτα στο TRNSYS (το μενού ορισμού είναι ακριβώς ίδιο με αυτό της Εικόνας 7.14 όπου ορίζεται το κέρδος από τους ανθρώπους).

Για τον εξοπλισμό που υπάρχει στους διάφορους χώρους γίνεται η υπόθεση πως το 1/6 της θερμότητας αποδίδεται με ακτινοβολία και τα υπόλοιπα 5/6 μέσω συναγωγής. Στον ορισμό των κερδών από τα φώτα και τον εξοπλισμό, η μόνη διαφορά σε σχέση με τους ανθρώπους είναι πως ορίζονται βάσει της επιφάνειας του κάθε χώρου (μέσω της επιλογής gain/loss related to reference floor area στην Εικόνα 7.14). Αυτή η κίνηση έχει ως σκοπό να γίνεται αυτόματα ο υπολογισμός της ισχύος σε Watt σε κάθε χώρο χωρίς την ανάγκη ξεχωριστών «απόλυτων τιμών» (δηλαδή απευθείας Watt) ανάλογα το εμβαδόν του κάθε χώρου. Για τον Η/Μ χώρο έγινε μια εκτίμηση του φορτίου του βάσει του τύπου του κτηρίου και του μεγέθους του, με το φορτίο από τον υπάρχον εξοπλισμό να εκτιμάται σε 10 kW (θεωρήθηκε η ίδια αναλογία μεταξύ της θερμότητας από ακτινοβολία και

συναγωγή). Στην Εικόνα 7.15 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του παραθύρου εσωτερικών κερδών ενός χώρου.

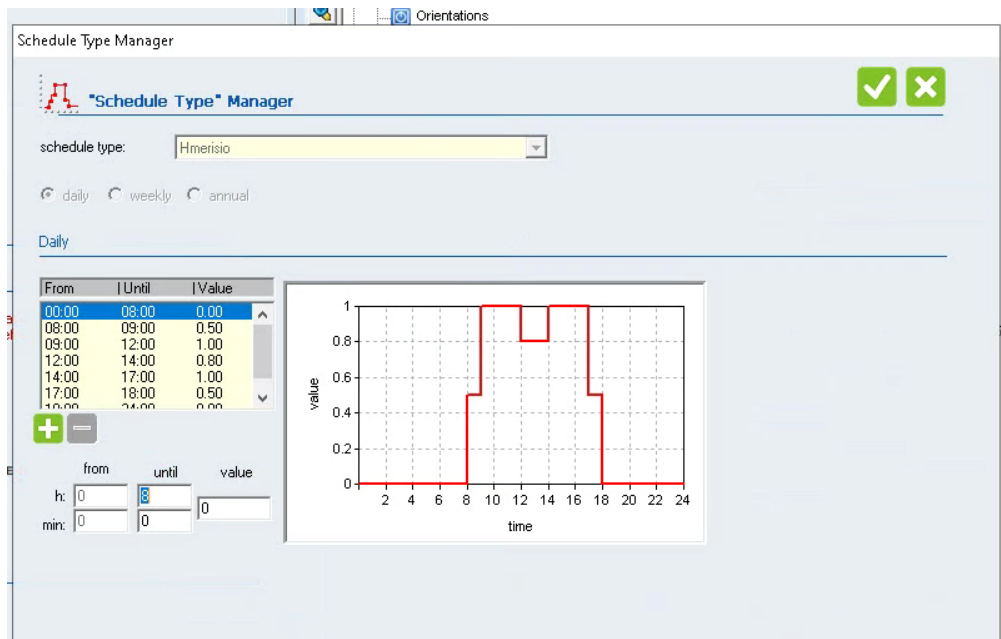


Εικόνα 7.15: Παράθυρο εσωτερικών κερδών χώρου

Στο συγκεκριμένο χώρο υπάρχουν φυσικά και οι τρεις κατηγορίες θερμικών κερδών όπως φαίνεται στο πάνω μέρος της Εικόνας 7.15. Τα άτομα στο χώρο ορίζονται ως απόλυτες μονάδες και για αυτό η επιλογή “Multiplication by reference area of airnode” είναι απενεργοποιημένη. Αντίθετα, για το φωτισμό και τον εξοπλισμό είναι ενεργοποιημένη η συγκεκριμένη επιλογή και ο πολλαπλασιασμός γίνεται με ολόκληρη την επιφάνεια του χώρου. Σε περίπτωση που δεν ισχύει αυτό (πχ θεωρείται πως ο εξοπλισμός είναι σε ένα κομμάτι μόνο του χώρου), μπορεί να οριστεί το ποσοστό του χώρου στο οποίο γίνεται η αναγωγή της πυκνότητας ισχύος. Στην Εικόνα 7.15 δεν ισχύει κάτι τέτοιο και για αυτό το ref.rea fraction στο πάνω μέρος της εικόνας ισούται με τη μονάδα (δηλαδή 100%) για τα φώτα και τον εξοπλισμό.

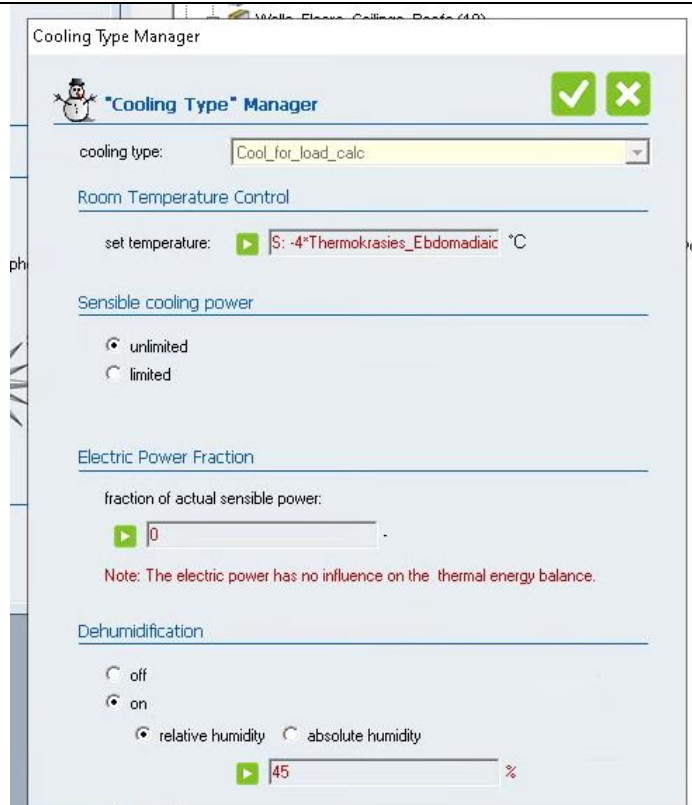
Όσον αφορά τα ωράρια του προσωπικού, έχει θεωρηθεί ένα τυπικό δωρο με μια ώρα διάλειμμα για τις καθημερινές, ενώ τα Σαββατοκύριακα το κτήριο λογίζεται ως άδειο. Επιπλέον, για λόγους ρεαλισμού, έχει γίνει η υπόθεση πως δεν καταφθάνουν όλοι οι εργαζόμενοι ταυτόχρονα αλλά σε δύο «δόσεις». Το καθημερινό πρόγραμμα παρουσιάζεται στην Εικόνα 7.16. Η πτώση κατά τις μεσημεριανές ώρες αντικατοπτρίζει τις τυπικές ώρες διαλείμματος των εργαζομένων όπου ενδέχεται να αποχωρήσουν για κάποια ώρα από το κτήριο (πχ να βγουν στον προαύλιο χώρο). Επειδή έχει γίνει η υπόθεση

πως το πρωί δεν καταφθάνουν όλοι οι εργαζόμενοι μαζί έτσι και το απόγευμα θεωρείται πως δεν φεύγουν ταυτόχρονα όλοι αλλά πάλι σε δύο «δόσεις».



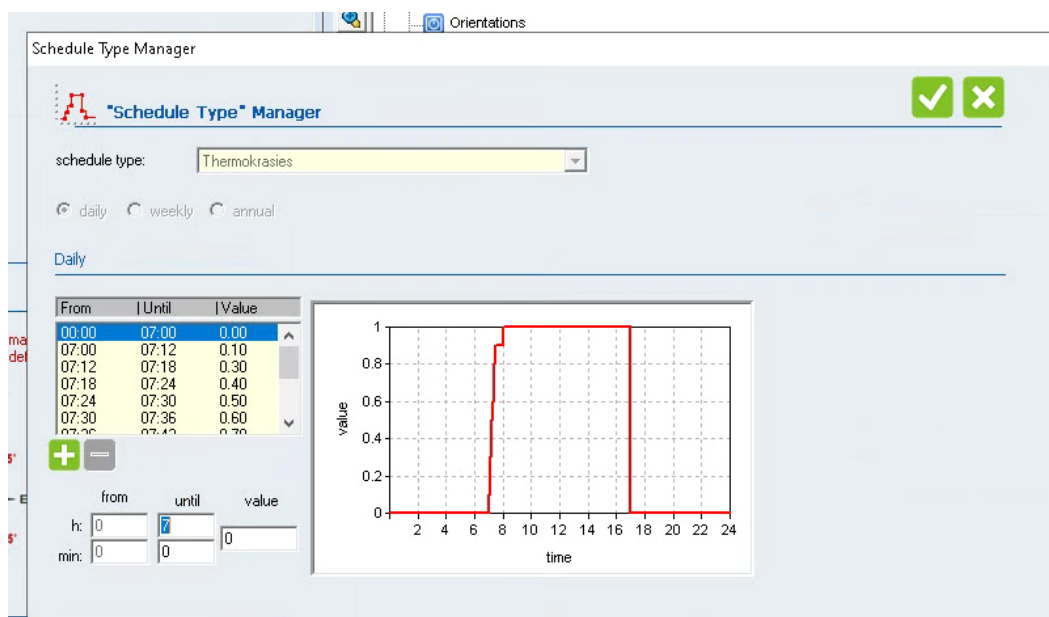
Εικόνα 7.16: Ωράριο εργαζομένων

Στην αίθουσα συσκέψεων δεν ακολουθείται το ίδιο ωράριο με αυτό της Εικόνας 7.16. Αντίθετα ορίζονται δύο διακριτά διαστήματα, το πρώτο 10:00-12:00 και το δεύτερο 15:00-17:00, όπου λαμβάνουν χώρα οι συναντήσεις. Ο φωτισμός και ο εξοπλισμός των χώρων, όπως είναι φυσικό, θα αντιστοιχεί με το ωράριο των εργαζομένων. Η μόνη διαφορά είναι πως θα είναι συνέχεια στο 100% το οποίο γίνεται για λόγους εξασφάλισης της λειτουργίας του συστήματος και στο χειρότερο σενάριο. Ο υπολογισμός των φορτίων του κτηρίου στο TRNSYS γίνεται με «έμμεσο» τρόπο. Αφού οριστεί πλήρως το κέλυφος και τα εσωτερικά κέρδη του κτηρίου, σε κάθε χώρο θα πρέπει να ενεργοποιηθούν οι επιλογές θέρμανσης και ψύξης και να δημιουργηθούν αντίστοιχα Heating/Cooling Types, όπως της Εικόνας 7.17 στην οποία αποτυπώνεται το Cooling Type.



Εικόνα 7.17: Ορισμός ψύξης για υπολογισμό φορτίων

Για να υπολογιστούν τα φορτία, η αισθητή ισχύς του συστήματος λογίζεται άπειρη. Η σχετική υγρασία ορίζεται στα επιθυμητά επίπεδα και η θερμοκρασία βάσει των συνθηκών του Πίνακα 7.4. Ο ορισμός της θερμοκρασίας γίνεται με χρονικό πρόγραμμα (schedule) καθώς δεν είναι σταθερή. Τα προγράμματα θέρμανσης και ψύξης των χώρων του κτηρίου ακολουθούν τη λογική του φωτισμού και του εξοπλισμού με μια βασική διαφορά. Επειδή τις κενές ώρες του κτηρίου η θερμοκρασία είναι ± 4 °C (ανάλογα την εποχή) σε σχέση με την επιθυμητή θερμοκρασία όταν οι εργαζόμενοι είναι μέσα, μια ξαφνική απαίτηση από το σύστημα να καλύψει αυτή την αλλαγή θα οδηγούσε σε μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Για αυτό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.18, μια ώρα πριν την αρχική προσέλευση των εργαζομένων το σύστημα τίθεται σε λειτουργία ώστε στις 08:00 που καταφθάνουν οι πρώτοι εργαζόμενοι να επικρατεί η επιθυμητή θερμοκρασία.

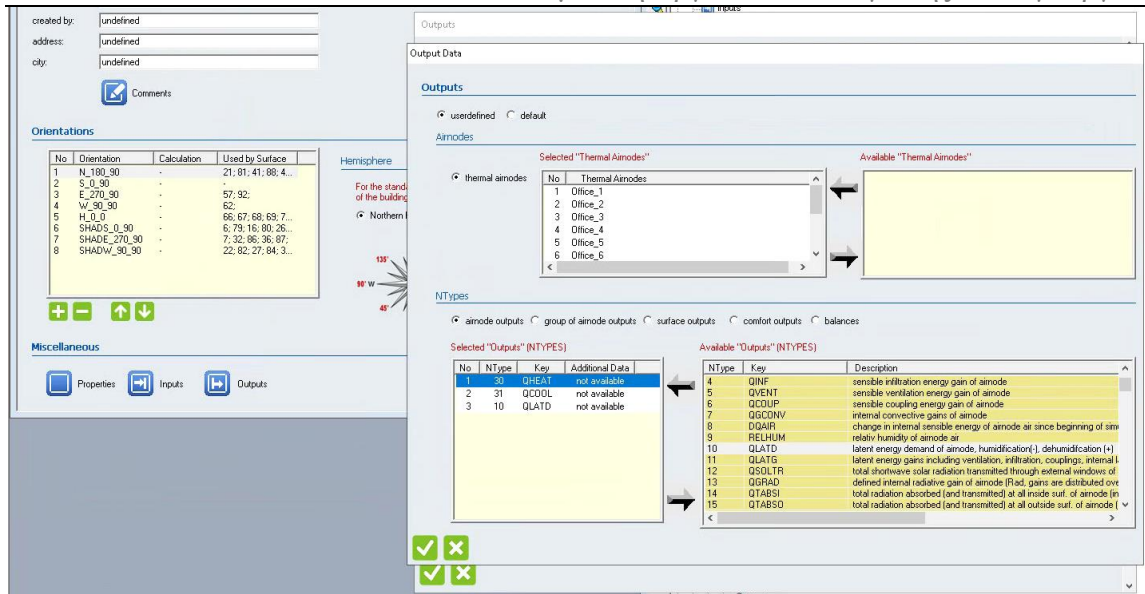


Εικόνα 7.18: Ημερήσιο πρόγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας

Το ημερήσιο πρόγραμμα της Εικόνας 7.18 δεν ισχύει φυσικά τα Σαββατοκύριακα όπου δεν υπάρχουν εργαζόμενοι και άρα η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στις τιμές των μη κατειλημμένων ωρών. Στη ρύθμιση της θερμοκρασίας (επιλογή set temperature στην Εικόνα 7.17), προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το ίδιο πρόγραμμα για θέρμανση και ψύξη, η επιθυμητή θερμοκρασία ορίστηκε ως (Thermokrasies_Ebdomadiaio είναι το όνομα του εβδομαδιαίου προγράμματος της μεταβολής θερμοκρασίας το οποίο τα Σαββατοκύριακα ισούται με 0):

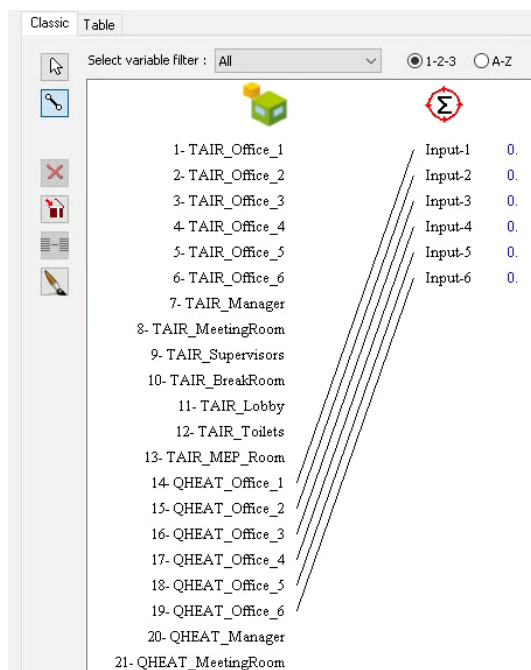
- $4 \cdot \text{Thermokrasies_Ebdomadiaio} + 16$ στη θέρμανση
- $-4 \cdot \text{Thermokrasies_Ebdomadiaio} + 30$ στην ψύξη

Οι δυο παραπάνω εξισώσεις αντιστοιχούν στους χώρους πλην των τουαλετών και του Η/Μ. Στην περίπτωση των τουαλετών ο σταθερός όρος στη θέρμανση είναι 18 αντί για 16 και στον Η/Μ χώρο το πρόγραμμα είναι σταθερό στους 22 °C σε κάθε περίπτωση. Αφού αποθηκευτούν όλες οι παραπάνω αλλαγές μπορεί να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός των φορτίων. Αρχικά ορίζονται ως έξοδοι (outputs) κάθε ζώνης του κτηρίου οι επιλογές QHEAT, QCOOL και QLATD όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.19. Οι πρώτες δυο επιλογές είναι τα αισθητά φορτία θέρμανσης και ψύξης αντίστοιχα και η τρίτη είναι τα λανθάνοντα φορτία.

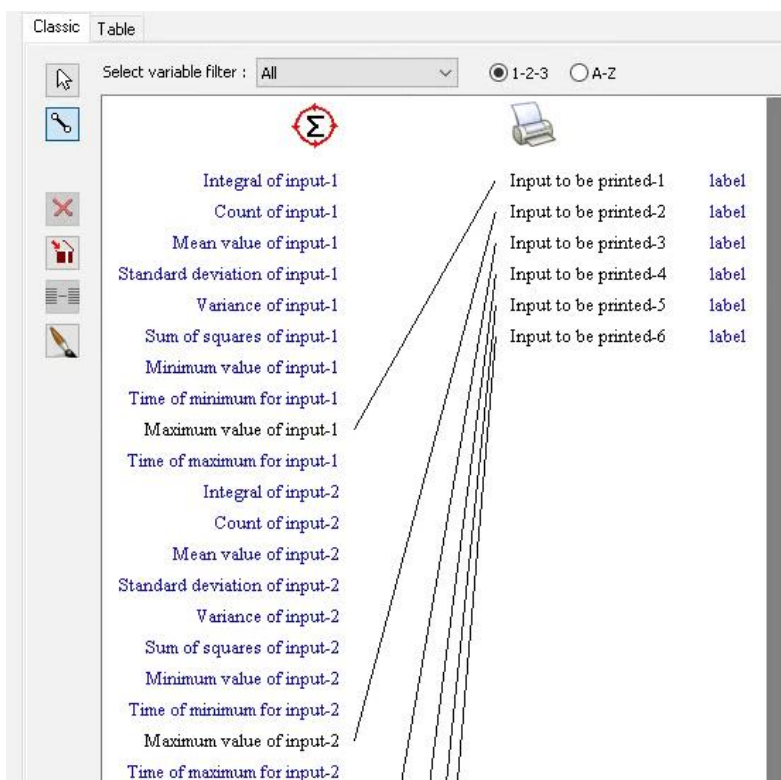


Εικόνα 7.19: Ορισμός εξόδων από το TRNBuild για υπολογισμό των φορτίων

Πηγαίνοντας στο Στούντιο Προσομοίωσης, το κτήριο πρέπει να συνδεθεί με έναν περιοδικό ολοκληρωτή (Periodic Integrator) ο οποίος βρίσκεται στην καρτέλα Utility → Integrators του καταλόγου στοιχείων του TRNSYS. Το συγκεκριμένο στοιχείο του TRNSYS (Type 55) μπορεί να υπολογίζει διάφορες παραμέτρους των εισόδων του, όπως μέγιστη/ελάχιστη τιμή, μέση τιμή, τυπική απόκλιση κτλ. Ο περιοδικός ολοκληρωτής συνδέεται με έναν εκτυπωτή (Printer) ο οποίος καταγράφει το επιθυμητό μέγεθος (εδώ τις μέγιστες τιμές των φορτίων των χώρων) σε ένα εξωτερικό αρχείο. Ο Printer που χρησιμοποιείται είναι συγκεκριμένα ο Type 25c ο οποίος είναι προσβάσιμος από την καρτέλα Outputs → Printer → Unformatted → No units. Οι απαραίτητες συνδέσεις (για την περίπτωση υπολογισμού των φορτίων θέρμανσης των 6 χώρων γραφείων) φαίνονται στις Εικόνες 7.20 και 7.21.



Εικόνα 7.20: Σύνδεση κτηρίου - περιοδικού ολοκληρωτή (Type 55)



Εικόνα 7.21: Σύνδεση περιοδικού ολοκληρωτή (Type 55) με εκτυπωτή (Type 25c)

Τρέχοντας για έναν χρόνο την προσομοίωση δημιουργείται το αρχείο που περιέχει τα αποτελέσματα των φορτίων του κτηρίου. Στα αισθητά φορτία θέρμανσης και ψύξης προστίθενται τα λανθάνοντα ανάλογα το πρόσημο τους (θετικό πρόσημο στα λανθάνοντα φορτία σηματοδοτεί φορτίο ψύξης) και έτσι προκύπτουν τα συνολικά φορτία θέρμανσης και ψύξης τα οποία παρατίθενται στον Πίνακα 7.7.

Πίνακας 7.7: Φορτία θέρμανσης και ψύξης των διαφόρων χώρων του κτηρίου

Χώρος	Φορτίο θέρμανσης (kW)	Φορτίο ψύξης (kW)
Office 1	3,29	3,13
Office 2	3,09	4,32
Office 3	1,87	1,83
Office 4	1,94	3,10
Office 5	5,08	10,39
Office 6	5,13	9,64
Manager	4,63	5,70
Meeting Room	5,12	5,60
Supervisors	3,88	4,25

Χώρος	Φορτίο θέρμανσης (kW)	Φορτίο ψύξης (kW)
Break Room	3,67	3,89
Lobby	3,72	2,86
Toilets	5,36	3,64
MEP Room	0,00	10,75

Όπως ήταν αναμενόμενο τα φορτία ψύξης είναι γενικά μεγαλύτερα από τα φορτία θέρμανσης ιδίως λόγω των σημαντικών ανοιγμάτων. Οι χώροι Office 1 και Office 3 που δεν έχουν εξωτερικό τοίχο έχουν σχεδόν ίσα φορτία θέρμανσης και ψύξης γεγονός το οποίο οφείλεται στο ότι δεν δέχονται άμεσα ηλιακή ακτινοβολία. Σε σχέση με τους υπόλοιπους χώρους δηλαδή έχουν μεγαλύτερο φορτίο θέρμανσης κατά τη χειμερινή περίοδο και μικρότερο ψυκτικό φορτίο κατά τη θερινή περίοδο. Στον περιορισμό των ψυκτικών φορτίων γενικά στο κτήριο, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει τόσο η υπάρχουσα σκίαση όσο και η καλή κατασκευή του κελύφους.

8. Διαμόρφωση συστημάτων κτηρίου

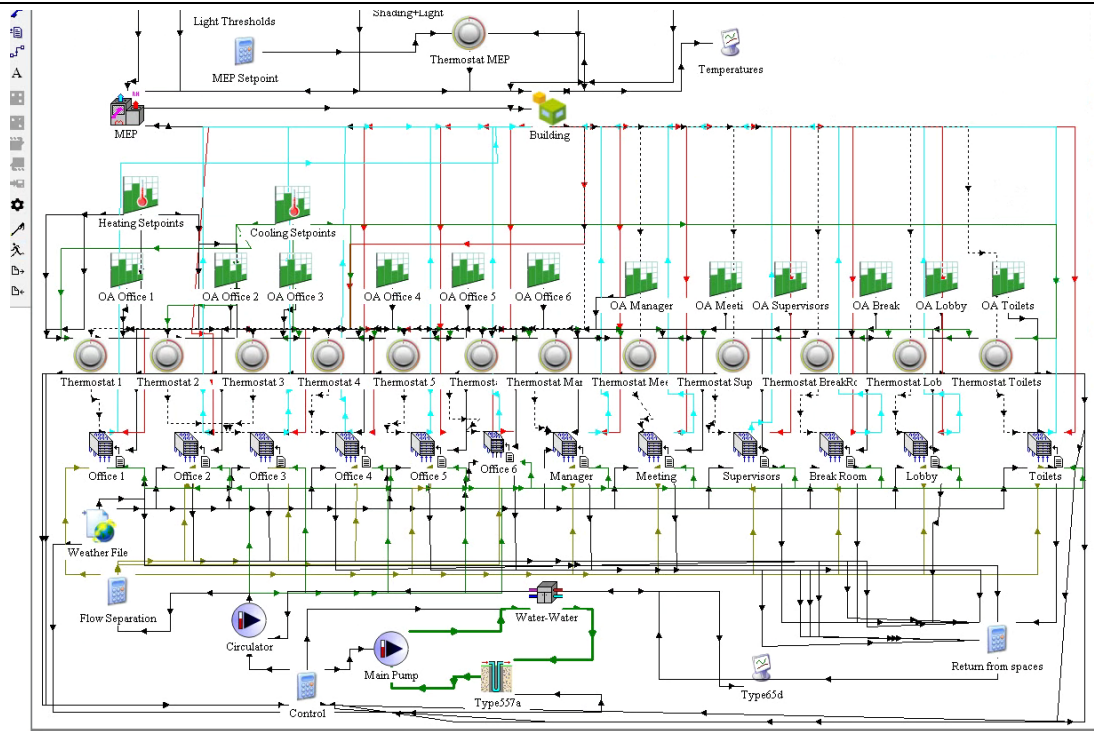
8.1: Σύστημα Θέρμανσης - Ψύξης

Για την κάλυψη των αναγκών του κτηρίου γραφείων που μελετάται, επιλέχθηκε το γεωθερμικό σύστημα να είναι εδαφικά συνδεδεμένο, δηλαδή GCHP. Ο βασικός λόγος είναι πως τέτοια συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πολύ περισσότερες τοποθεσίες σε σχέση με τα συστήματα GWHP τα οποία απαιτούν την ύπαρξη ικανής ποσότητας υπόγειων υδάτων.

Από το γεωθερμικό σύστημα θα καλύπτονται οι ανάγκες θέρμανσης και ψύξης όλων των χώρων του κτηρίου εκτός του Η/Μ μιας και ο συγκεκριμένος χώρος έχει μόνο ανάγκες ψύξης (λόγω των υψηλών εσωτερικών φορτίων). Στην περίπτωση που και αυτός ο χώρος εξυπηρετούνταν από το γεωθερμικό σύστημα θα δημιουργούνταν η εξής κατάσταση: Τη χειμερινή περίοδο όλοι οι υπόλοιποι χώροι του κτηρίου έχουν ανάγκες θέρμανσης, δηλαδή ο γεωθερμικός εναλλάκτης θα έπρεπε να ικανοποιήσει ταυτόχρονα ανάγκες και θέρμανσης και ψύξης, κάτι που φυσικά είναι αδύνατο. Προκειμένου το σύστημα να αντιμετωπίσει αυτή την κατάσταση θα έπρεπε να προστεθεί ένα δοχείο αδρανείας με ζεστό νερό ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του υπόλοιπου κτηρίου, με το γεωθερμικό σύστημα να αναλαμβάνει την ψύξη του Η/Μ χώρου. Κάτι τέτοιο θα αύξανε την περιπλοκότητα της εγκατάστασης στο TRNSYS όπως και το συνολικό κόστος εξαιτίας του δοχείου και των απαραίτητων σωληνώσεων και αντλιών που θα εξασφάλιζαν την ομαλή λειτουργία του. Για αυτό επιλέχθηκε ο Η/Μ χώρος να εξυπηρετείται από ένα ξεχωριστό σύστημα και να μην είναι συνδεδεμένος με τη γεωθερμία. Το γεωθερμικό σύστημα θέρμανσης-ψύξης αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Γεωθερμικός εναλλάκτης
- Αντλία θερμότητας νερού-νερού η οποία παραλαμβάνει τα φορτία του κτηρίου και τα αποδίδει στον γεωθερμικό εναλλάκτη
- 12 μονάδες Fan Coil οι οποίες εξυπηρετούν τους διάφορους χώρους του κτηρίου
- 2 αντλίες (κυκλοφορητές) νερού, μια που κυκλοφορεί το νερό στο πρωτεύον κύκλωμα γεωθερμικού εναλλάκτη – ΑΘ νερού-νερού και μια στο δευτερεύων κύκλωμα ΑΘ νερού-νερού – Fan Coil

Στην Εικόνα 8.1 παρουσιάζεται συνολικά η εγκατάσταση θέρμανσης-ψύξης όπως έχει διαμορφωθεί στο TRNSYS.



Εικόνα 8.1: Εγκατάσταση θέρμανσης-ψύξης στο TRNSYS

Στο κάτω μέρος της εικόνας 8.1 φαίνεται το πρωτεύων κύκλωμα όπου πραγματοποιείται η μεταφορά των φορτίων από το κτήριο προς το υπέδαφος μέσω του γεωθερμικού εναλλάκτη (Type 557a). Ο εν λόγω γεωθερμικός εναλλάκτης είναι κατακόρυφου τύπου με U-tubes, μια τυπική επιλογή για τέτοιες εφαρμογές.

Ο ορισμός των απαραίτητων παραμέτρων καθώς και η συνδεσμολογία του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κυκλώματος παρουσιάζονται στη συνέχεια λεπτομερώς. Καθώς για κάθε επιμέρους χώρο η συνδεσμολογία των διαφόρων στοιχείων του δευτερεύοντος κυκλώματος είναι η ίδια, θα παρουσιαστεί μόνο για τον χώρο Office 1 για λόγους συντομίας.

8.1.1: Πρωτεύων κύκλωμα

Το κύριο στοιχείο του πρωτεύοντος κυκλώματος είναι φυσικά ο γεωθερμικός εναλλάκτης⁹. Η διαστασιολόγησή του είναι σημαντική ώστε η λειτουργία του όλου συστήματος να είναι αποδοτική και να μην υπάρχουν περιόδοι όπου τα φορτία του κτηρίου δεν μπορούν να καλυφθούν. Για την καρτέλα των παραμέτρων του γεωθερμικού εναλλάκτη έχουν οριστεί/υποθεθεί τα εξής:

- Διάστημα μεταξύ δύο γεωτρήσεων (boreholes) ίσο με 8 m
- Αριθμός γεωτρήσεων ίσος με 20. Για εφαρμογές GCHP είναι συνήθης πρακτική να διανοίγεται 1 γεώτρηση για κάθε 3,51 kW (1 ψυκτικός τόνος) φορτίου [10]. Όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια, το συνολικό φορτίο ψύξης ανέρχεται τελικά στα 64,19 kW και έτσι προκύπτει πως απαιτούνται 18,21 γεωτρήσεις. Ο αριθμός

⁹ Το στοιχείο που χρησιμοποιείται είναι το Type 557a και βρίσκεται ως εξής: GHP Library (TESS) → Ground Heat Exchangers → Vertical → U-Tube → Standard → Type 557a

των γεωτρήσεων προτιμάται να είναι άρτιος [10], οπότε για αυτό οι γεωτρήσεις θα είναι τελικά 20.

- Βάθος κάθε γεώτρησης ίσο με 80 m που είναι μια τυπική τιμή για εφαρμογές GCHP
- Διάμετρος κάθε γεώτρησης ίσο με 127 mm (5 ίντσες). Για το φορτίο του κτηρίου ένα τυπικό εύρος είναι 100-150 mm (4-6 ίντσες) οπότε επιλέχθηκε η μέση τιμή του εν λόγω διαστήματος
- Διάμετρος κάθε σωλήνα U (U-tube) ίση με 32 mm, επίσης τυπική τιμή για GCHP εφαρμογή και το φορτίο του κτηρίου. Οι προεπιλεγμένες τιμές στο συγκεκριμένο στοιχείο είχαν την εξωτερική διάμετρο ίση με 16,64 mm και την εσωτερική ίση με 13,72 mm για να συμπεριλαμβάνουν και τυχόν ανομοιομορφίες, οπότε οι εν λόγω τιμές διπλασιάστηκαν για τις ανάγκες της παρούσας εφαρμογής
- Οι τιμές της αγωγιμότητας του εδάφους και των υπόλοιπων συναφών μεγεθών διατηρήθηκαν στις προεπιλεγμένες τους τιμές καθώς ανταποκρίνονται ικανοποιητικά στα ασβεστολιθικού τύπου πετρώματα που συναντώνται στην Αττική. Ομοίως, και οι σχετικές παράμετροι των σωληνώσεων δεν αλλάχθηκαν καθώς είναι τυπικές τιμές για σωλήνες HDPE
- Η ροή ανά γεώτρηση υπολογίζεται ίση με 585 kg/hr (εξηγείται στη συνέχεια)
- Οι λοιπές παράμετροι του στοιχείου δεν μεταβλήθηκαν από τις προεπιλεγμένες τιμές τους

Στις Εικόνες 8.2-8.4 παρουσιάζονται οι παραπάνω παράμετροι όπως έχουν ορισθεί στο TRNSYS. Ο όγκος αποθήκευσης (storage volume) υπολογίστηκε σύμφωνα με την σχέση που προτείνει το TRNSYS (από την επιλογή More.. δίπλα στην αντίστοιχη παράμετρο) ώστε να μην υπάρξει περίπτωση η προσομοίωση να «κολλήσει» εξαιτίας κάποιας αναντιστοιχίας.

(Papageorgiou) Type557a

	Name	Value	Unit	More	Macro
1	Storage Volume	88700	m ³	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Borehole Depth	80	m	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Header Depth	1.0	m	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Number of Boreholes	20	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Borehole Radius	63.5	mm	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Number of Boreholes in Series	10	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Number of Radial Regions	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Number of Vertical Regions	10	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 8.2: Καθορισμός όγκου αποθήκευσης, αριθμού, βάθους και ακτίνας των γεωτρήσεων του γεωθερμικού εναλλάκτη

(Papageorgiou) Type557a

Parameter Input Output Derivative Special Cards External Files Comment

		Name	Value	Unit	More	Macro
8		Number of Vertical Regions	10	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
9		Storage Thermal Conductivity	4.68	kJ/hr.m.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
10		Storage Heat Capacity	2016	kJ/m ³ K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
11		Negative of U-Tubes/Bore	-1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
12		Outer Radius of U-Tube Pipe	33.28	mm	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
13		Inner Radius of U-Tube Pipe	27.44	mm	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
14		Center-to-Center Half Distance	0.0254	m	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
15		Fill Thermal Conductivity	4.68	kJ/hr.m.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 8.3: Καθορισμός διαμέτρων σωληνώσεων HDPE

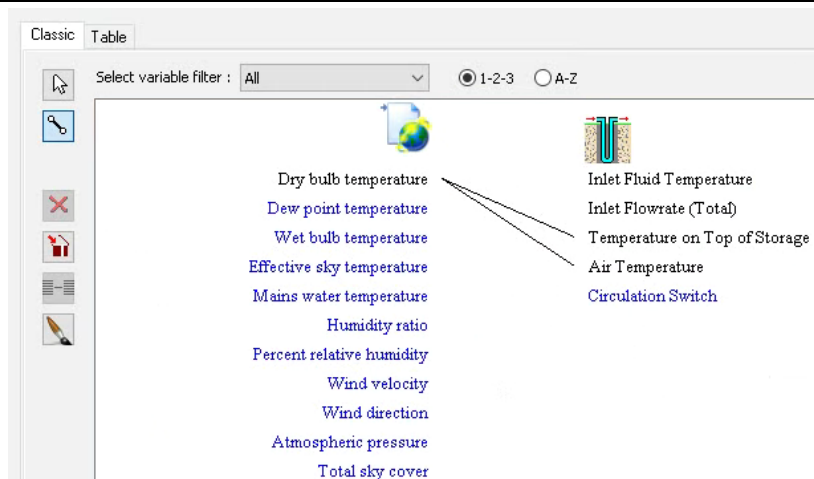
(Papageorgiou) Type557a

Parameter Input Output Derivative Special Cards External Files Comment

		Name	Value	Unit	More	Macro
15		Fill Thermal Conductivity	4.68	kJ/hr.m.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
16		Pipe Thermal Conductivity	1.5122	kJ/hr.m.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
17		Gap Thermal Conductivity	5.040	kJ/hr.m.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
18		Gap Thickness	0.0	m	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
19		Reference Borehole Flowrate	585	kg/hr	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
20		Reference Temperature	30.0	C	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
21		Pipe-to-Pipe Heat Transfer	-1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
22		Fluid Specific Heat	4.190	kJ/kg.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

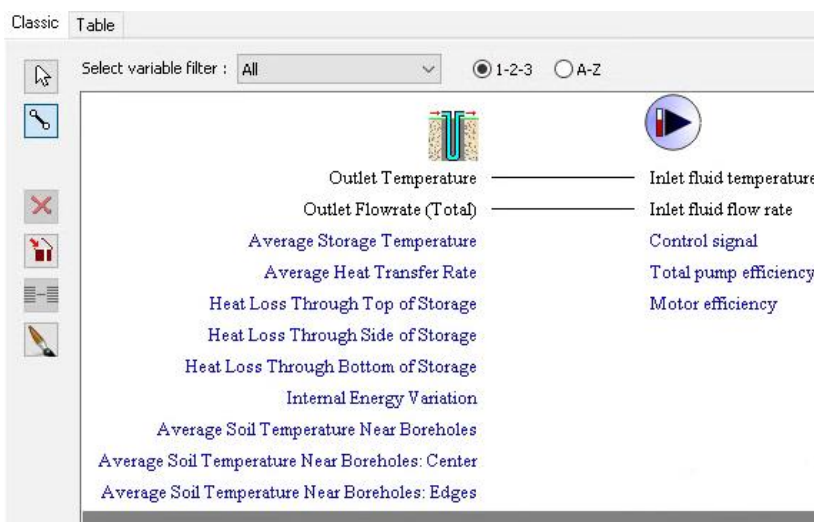
Εικόνα 8.4: Καθορισμός παροχής νερού ανά γεώτρηση

Η σύνδεση του γεωθερμικού εναλλάκτη με τα καιρικά δεδομένα παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.5.



Εικόνα 8.5: Σύνδεση γεωθερμικού εναλλάκτη με καιρικά δεδομένα

Η έξοδος του γεωθερμικού εναλλάκτη συνδέεται με τον κυκλοφορητή του πρωτεύοντος κυκλώματος όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.6.

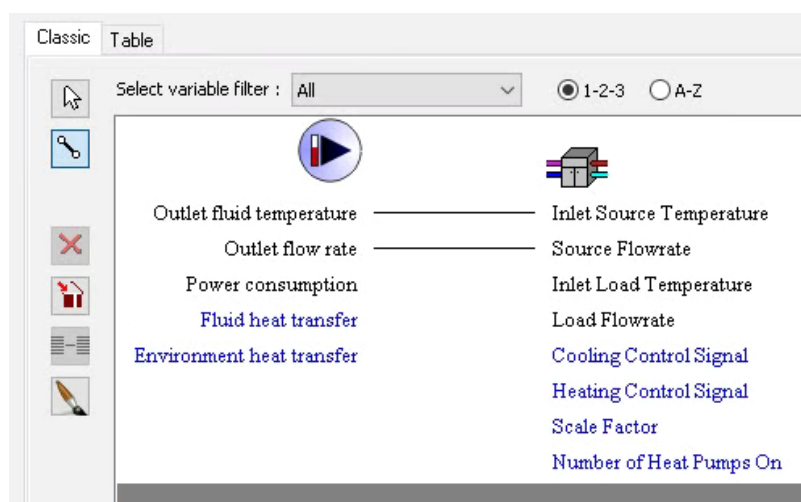


Εικόνα 8.6: Σύνδεση γεωθερμικού εναλλάκτη - κυκλοφορητή πρωτεύοντος κυκλώματος

Ο κυκλοφορητής μεταβλητών στροφών¹⁰ του πρωτεύοντος κυκλώματος είναι υπεύθυνος για την διακίνηση του νερού από το γεωθερμικό εναλλάκτη προς την ΑΘ νερού-νερού και πάλι πίσω σε αυτόν. Η έξοδος του κυκλοφορητή του πρωτεύοντος συνδέεται με την ΑΘ νερού-νερού σύμφωνα με την Εικόνα 8.7. Να σημειωθεί πως το πρωτεύον κύκλωμα είναι η «πηγή» της ΑΘ ενώ τα Fan Coil είναι το «φορτίο» της, εξ' ου

¹⁰ Το στοιχείο που χρησιμοποιείται είναι το Type 110 και βρίσκεται ως εξής: Hydronics → Pumps → Variable Speed → Type 110

και η έξοδος του κυκλοφορητή του πρωτεύοντος ενώνεται με τις επιλογές Source της ΑΘ νερού-νερού.



Εικόνα 8.7: Σύνδεση κυκλοφορητή πρωτεύοντος κυκλώματος με ΑΘ νερού-νερού

Η ΑΘ νερού-νερού¹¹ αποτελεί το συνδετικό κρίκο μεταξύ των δύο κυκλωμάτων νερού. Ο ρόλος της είναι να παραλαμβάνει τα φορτία του κτηρίου (είτε θέρμανσης είτε ψύξης) και να τα αποδίδει στο πρωτεύον κύκλωμα το οποίο στη συνέχεια συναλλάσσει την απαραίτητη θερμότητα με το έδαφος μέσω του γεωθερμικού εναλλάκτη. Συνεπώς, πρέπει να είναι σε θέση να διαχειριστεί τα μέγιστα φορτία θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου. Σε σχέση με τις τιμές του Πίνακα 7.7, πραγματοποιείται τυπική προσαύξηση 10% στα φορτία ψύξης και 15% στα φορτία θέρμανσης σαν συντελεστής ασφαλείας. Η τελική δυναμικότητα (capacity) των Fan Coil κάθε χώρου βάσει της παραπάνω προσαύξησης παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1: Ολική δυναμικότητα των Fan Coil σε κάθε χώρο του κτηρίου

Χώρος	Ολική θερμαντική ισχύς Fan Coil (kW)	Ολική ψυκτική ισχύς Fan Coil (kW)
Office 1	3,79	3,44
Office 2	3,56	4,75
Office 3	2,15	2,01
Office 4	2,23	3,41
Office 5	5,85	11,43
Office 6	5,89	10,61
Manager	5,32	6,26

¹¹ Το στοιχείο που χρησιμοποιείται είναι το Type 927 και βρίσκεται ως εξής: GHP Library (TESS) → Water – Water Heat Pump → Type 927

Χώρος	Ολική θερμαντική ισχύς Fan Coil (kW)	Ολική ψυκτική ισχύς Fan Coil (kW)
Meeting Room	5,89	6,16
Supervisors	4,46	4,68
Break Room	4,22	4,28
Lobby	4,28	3,15
Toilets	6,17	4,00
Σύνολο	53,81	64,19

Η ΑΘ νερού-νερού συνεπώς θα πρέπει να έχει θερμαντική ισχύ 56,15 kW και ψυκτική ισχύ 64,19 kW. Ο υπολογισμός της παροχής του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος κυκλώματος γίνεται με διαφορετικό τρόπο για τα δύο κυκλώματα.

Για το πρωτεύον κύκλωμα χρησιμοποιείται ένα χαρακτηριστικό μέγεθος γεωθερμικών συστημάτων που είναι ο λόγος της παροχής προς το συνολικό φορτίο. Τυπικές τιμές αυτού του λόγου κυμαίνονται στα 2,7 – 3,2 L/min·kW [10]. Θεωρώντας πως αυτός ο λόγος θα ισούται με 3 L/min·kW, η συνολική παροχή του πρωτεύοντος κυκλώματος ανέρχεται στα 192,57 l/min, δηλαδή 11.554 l/hr η οποία διαμοιράζεται εξίσου στις 20 γεωτρήσεις (585 l/hr στην κάθε μια).

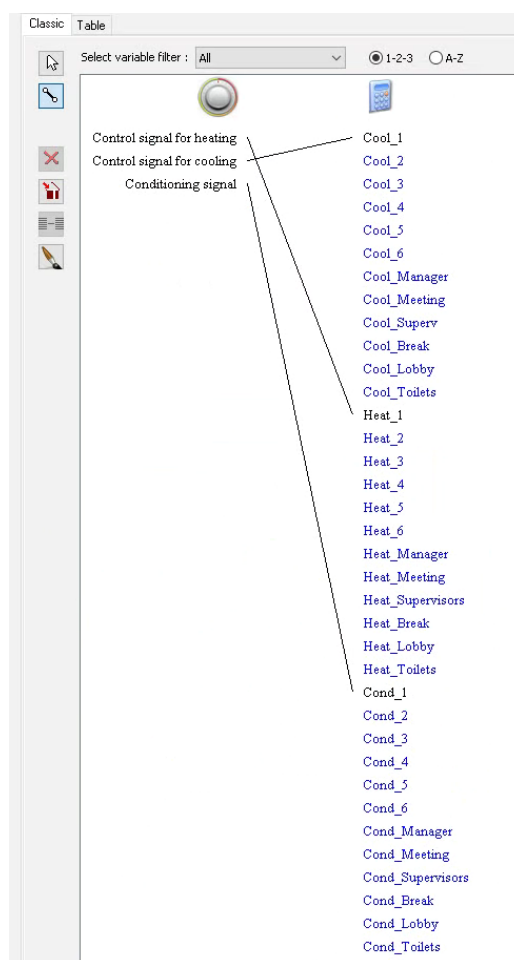
Ο υπολογισμός της απαιτούμενης παροχής νερού προς τα Fan Coil γίνεται με βάση την εξής διαδικασία:

- Για τη θέρμανση λαμβάνεται μια τυπική διαφορά θερμοκρασίας 10 °C στην ΑΘ και για την ψύξη 5 °C
- Από τη σχέση $\frac{Q}{\eta} = \dot{m} \cdot C_{p,νερού} \cdot \Delta T$, με Q το φορτίο, $C_{p,νερού} = 4,187 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$, ΔT τη διαφορά θερμοκρασίας και υποθέτοντας έναν συντελεστή απόδοσης της μεταφοράς θερμότητας $\eta = 80\%$ υπολογίζεται η αναγκαία παροχή νερού \dot{m} σε kg/s (η τιμή είναι η ίδια και σε l/s αφού η πυκνότητα του νερού είναι 1000 kg/m³ και ένα κυβικό μέτρο ισούται με 1000 l, δηλαδή 1 kg νερού = 1 l νερού)

Εφαρμόζοντας την παραπάνω διαδικασία, η συνολικά απαιτούμενη παροχή νερού στο δευτερεύον κύκλωμα ανέρχεται σε 3,9 l/s, δηλαδή 14.040 l/hr.

Για τη μοντελοποίηση της ΑΘ νερού-νερού στο TRNSYS ήταν αναγκαία η εξής ενέργεια: Εάν η συνολική της ισχύς οριζόταν ίση με αυτή του Πίνακα 8.1, τότε όταν «έτρεχε» η προσομοίωση η καταναλισκόμενη ισχύς ήταν συνεχώς στη μέγιστη τιμή της (τις ώρες λειτουργίας φυσικά), κάτι που είναι μη ρεαλιστικό. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, στο Type 927 οι παροχές του νερού και η ισχύς της ΑΘ διαχωρίστηκαν σε 13 πανομοιότυπες ΑΘ, με την κάθε μια να αναλαμβάνει το 1/13 των συνολικών μεγεθών.

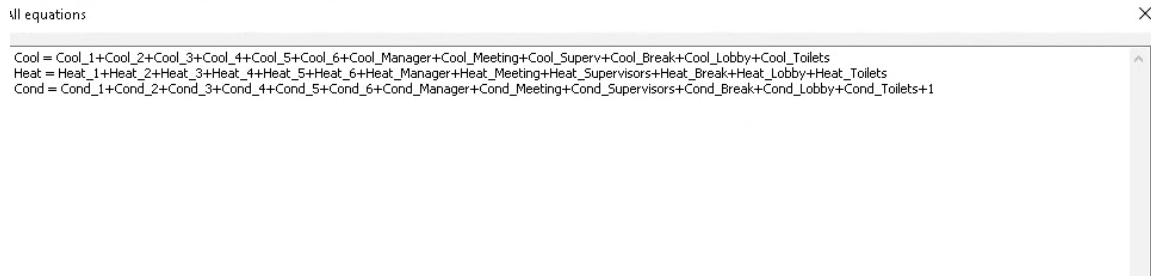
Ο έλεγχος του πόσες από αυτές τις μικρές εικονικές ΑΘ λειτουργούν γίνεται από το μπλοκ εξισώσεων Control. Σε αυτό έχουν συνδεθεί οι θερμοστάτες όλων των χώρων όπως φαίνεται στο παράδειγμα του χώρου Office 1 στην Εικόνα 8.8. Το «σήμα συνθήκης» (conditioning signal) του θερμοστάτη ενεργοποιείται όταν είναι αναγκαία στον χώρο είτε θέρμανση είτε ψύξη και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που η ίδια συσκευή καλείται να διαχειριστεί και των δύο ειδών φορτία. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας η ΑΘ νερού είναι μια τέτοια συσκευή όπως αντίστοιχα και οι κυκλοφορητές αλλά και τα Fan Coil. Τα σήματα συνθήκης των χώρων αθροίζονται και αυτό το άθροισμα καθορίζει τον αριθμό των μικρών ΑΘ που λειτουργούν.



Εικόνα 8.8: Σύνδεση θερμοστάτη με μπλοκ εξισώσεων Control

Οι 13 ΑΘ ορίστηκαν για λόγους καλύτερου ελέγχου λόγω της μεγάλης διαφοράς στα φορτία των χώρων. Από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε πως τα μέγιστα φορτία των χώρων εμφανίζονταν σχεδόν ταυτόχρονα και πάντοτε το άθροισμα των σημάτων καθόριζε τη λειτουργία της ΑΘ στο 100%. Σε περιπτώσεις όπου στους χώρους παρατηρούνταν μερικά φορτία όμως, πάλι σύμφωνα με δοκιμές, υπήρχε περίπτωση με ορισμό 12 μικρών ΑΘ να μην καλύπτονταν όλα τα φορτία. Η αιτία είναι πως με 12 όμοιες ΑΘ (περίπου 5,5 kW η κάθε μία) υπήρχαν στιγμές όπου το φορτίο κάποιων χώρων ξεπερνούσε την ισχύ της μιας ΑΘ (με 12 ΑΘ είναι σαν να ήταν μια ΑΘ για κάθε χώρο) και έτσι υπολειπούνταν το σύστημα σε εκείνο το κομμάτι του κτηρίου.

Για αυτό το λόγο, στο άθροισμα των σημάτων από τους θερμοστάτες, το οποίο μπορεί να έχει μέγιστη τιμή 12 (όσοι οι χώροι που εξυπηρετούνται από το γεωθερμικό σύστημα), προστίθεται μια μονάδα σύμφωνα με την Εικόνα 8.9 ώστε να αντιμετωπίζεται το προαναφερθέν πρόβλημα. Η λειτουργία ψύξης και θέρμανσης ορίζεται και αυτή από το μπλοκ εξισώσεων Control. Τα επιμέρους σήματα ψύξης και θέρμανσης αθροίζονται όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.9 και το σήμα εξόδου ελέγχει την ΑΘ. Κανονικά το σήμα που ελέγχει την ΑΘ νερού-νερού έχει τιμή 0 ή 1 ωστόσο όταν το σήμα που έρχεται έχει τιμή πάνω από τη μονάδα δεν δημιουργείται πρόβλημα και η ΑΘ λειτουργεί κανονικά.

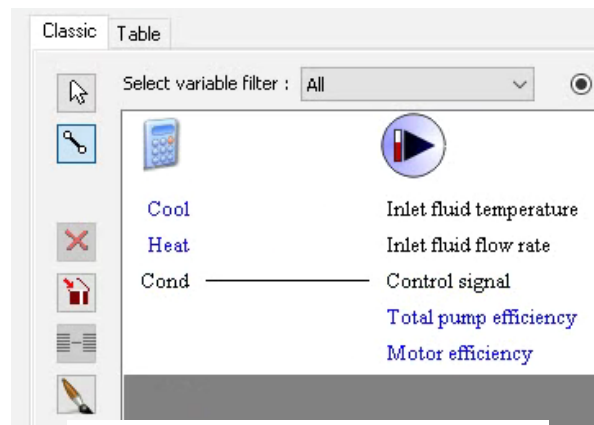


Εικόνα 8.9: Μπλοκ εξισώσεων Control

Για τον κυκλοφορητή του πρωτεύοντος κυκλώματος, βάσει της εφαρμογής και της διακινούμενης παροχής, ισχύς 2 kW είναι επαρκής¹² για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Ο ορισμός του κυκλοφορητή του πρωτεύοντος κυκλώματος παρατίθεται στην Εικόνα 8.10. Ο έλεγχος του κυκλοφορητή γίνεται με το μπλοκ εξισώσεων Control, με τη σύνδεση των δύο στοιχείων να είναι όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.11.

Parameter	Input	Output	Comment
1	Rated flow rate	11600	kg/hr
2	Fluid specific heat	4.19	kJ/kg.K
3	Rated power	2	kW
4	Motor heat loss fraction	0.0	-
5	Number of power coefficients	2	-
6	Power coefficient-1	0.8	-
7	Power coefficient-2	0.8	-

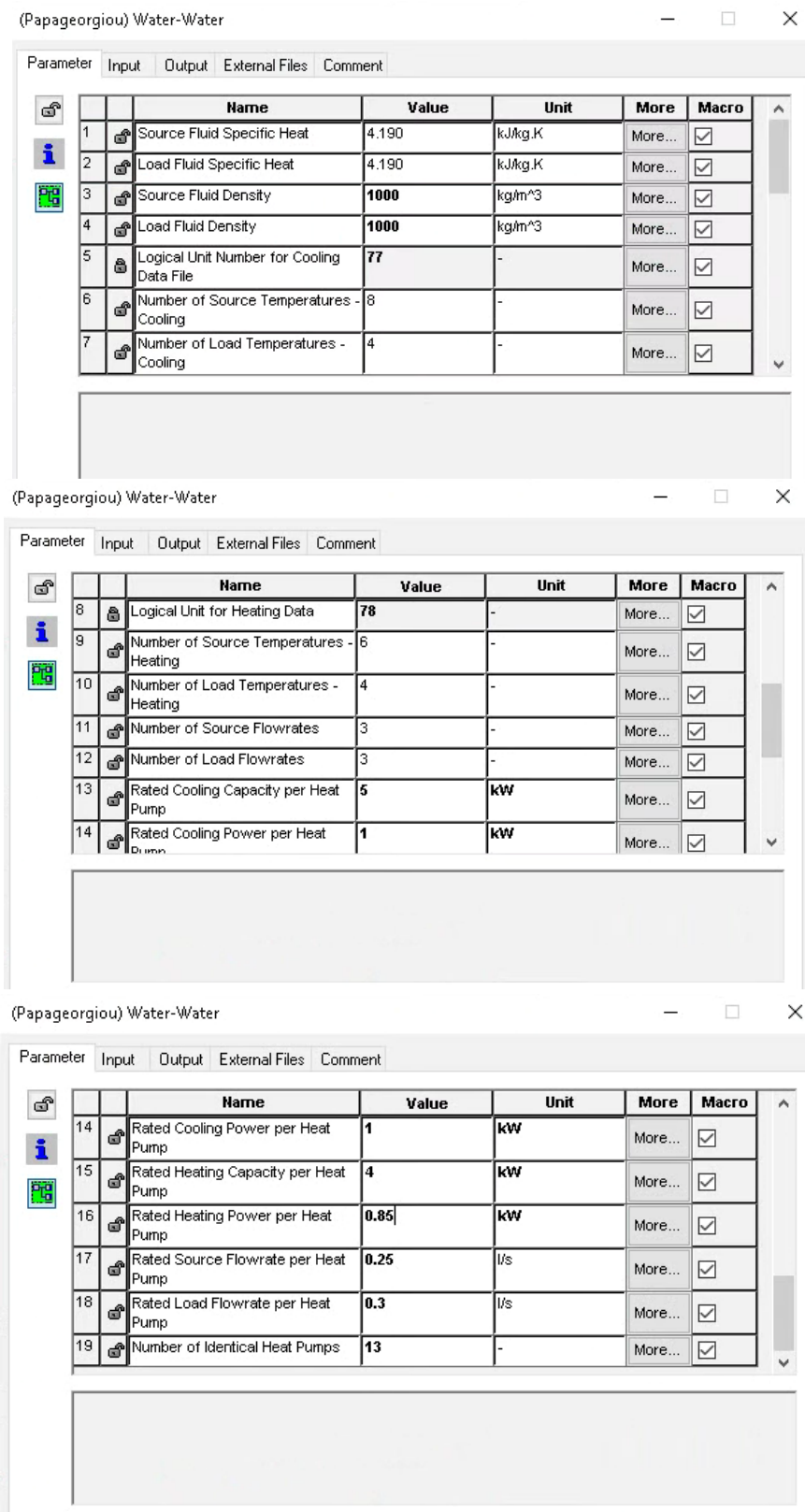
Εικόνα 8.10: Κυκλοφορητής πρωτεύοντος



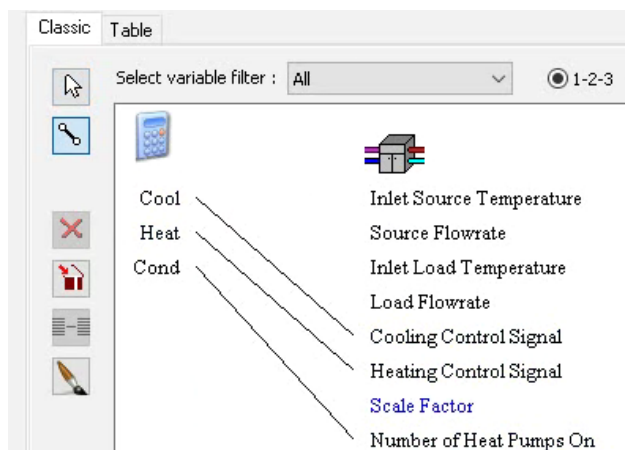
Εικόνα 8.11: Έλεγχος κυκλοφορητή

¹² Σύμφωνα με υπάρχοντα προϊόντα σε καταλόγους κατασκευαστών

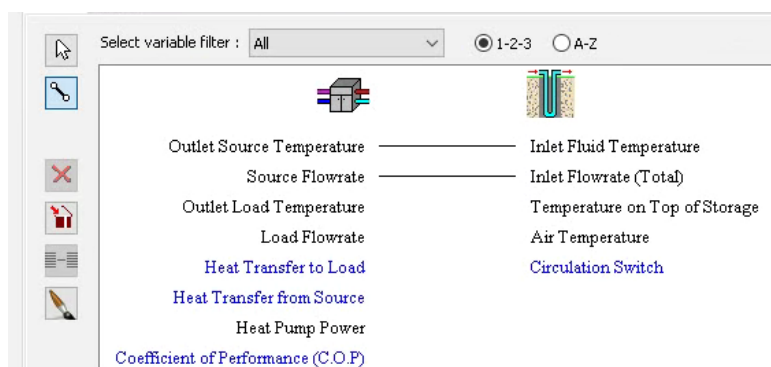
Στις Εικόνες 8.12 και 8.13 παρουσιάζονται οι παράμετροι του Type 927 της ΑΘ νερού-νερού και η σύνδεσή της με το μπλοκ εξισώσεων Control αντίστοιχα. Ολοκληρώνοντας το πρωτεύον κύκλωμα, η σύνδεση της ΑΘ νερού-νερού με τον γεωθερμικό εναλλάκτη παρατίθεται στην Εικόνα 8.14.



Εικόνα 8.12: Ορισμός ΑΘ νερού-νερού



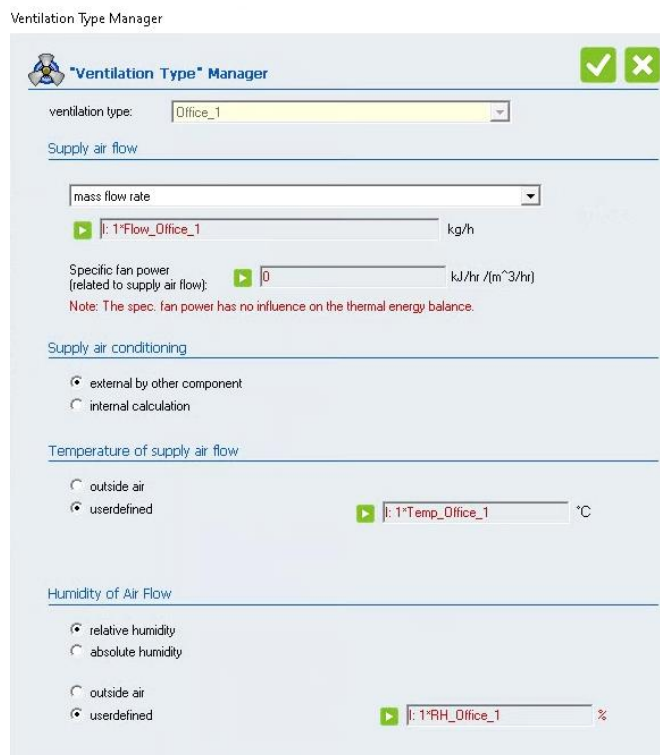
Εικόνα 8.13: Έλεγχος ΑΘ νερού-νερού



Εικόνα 8.14: Σύνδεση ΑΘ νερού-νερού με γεωθερμικό εναλλάκτη

8.1.2: Δευτερέων κύκλωμα

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η συνδεσμολογία των Fan Coil είναι η ίδια σε κάθε χώρο και για λόγους συντομίας θα παρουσιαστεί μόνο για τον χώρο Office 1. Προκειμένου να μπορούν να ελεγχθούν οι συνθήκες στους χώρους του κτηρίου ορίζονται στο TRNBuild οι απαραίτητες εισόδους (Inputs) που είναι η θερμοκρασία (Temp), η παροχή (Flow) και η σχετική υγρασία (RH) του εισερχόμενου αέρα. Με αυτές τις εισόδους ορίζεται στη συνέχεια ένα πρόγραμμα αερισμού (ventilation) όπως αυτό της Εικόνας 8.15 που τις χρησιμοποιεί, επιτρέποντας έτσι τον έλεγχο του κάθε χώρου.



Εικόνα 8.15: Δημιουργία προγράμματος αερισμού με τις εισόδους από τα Fan Coil

Η μοντελοποίηση των Fan Coil πραγματοποιήθηκε με το Type 996¹³ το οποίο είναι ένα δισωλήνιο σύστημα. Το συγκεκριμένο Type επιλέχθηκε έναντι των υπόλοιπων δισωλήνιων Fan Coil της βιβλιοθήκης Tess καθώς σε δοκιμές που έγιναν είχε καλύτερη απόκριση. Για τον καθορισμό των παραμέτρων των Fan Coil ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

- Από τα φορτία του Πίνακα 8.1 και τη σχέση $Q = \dot{m} \cdot C_{p,αέρα} \cdot \Delta T$, με επιθυμητό $\Delta T = 8 \text{ } ^\circ\text{C}$ (και για θέρμανση και για ψύξη) και $C_{p,αέρα} = 1,005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ υπολογίζεται η παροχή μάζας του αέρα. Με την πυκνότητα του αέρα να θεωρείται ίση με $\rho_{αέρα} = 1,2 \text{ kg/m}^3$, υπολογίζεται η παροχή όγκου του αέρα η οποία εισάγεται σαν παράμετρος στην καρτέλα του Fan Coil. Φυσικά η τιμή που εισάγεται είναι η μεγαλύτερη μεταξύ των υπολογισμένων για θέρμανση και ψύξη ώστε να καλύπτεται η χειρότερη περίπτωση.
- Η απαραίτητη παροχή νερού στο κάθε Fan Coil υπολογίζεται όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα (βλέπε σελίδα 114)
- Η θερμαντική και η συνολική ψυκτική ισχύς ορίζονται σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 8.1. Στις παραμέτρους του στοιχείου πρέπει να οριστεί και η αισθητή ψυκτική ικανότητα του Fan Coil η οποία λαμβάνεται απευθείας από τη διαδικασία υπολογισμού των φορτίων όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Φυσικά

¹³ Το στοιχείο Type 996 βρίσκεται ως εξής: HVAC Library (TESS) → 2-Pipe Fan Coil → Performance Map → Type 996

και αυτή η τιμή είναι αυξημένη κατά τον ίδιο συντελεστή 10% που έχει μεταβληθεί η συνολική ψυκτική ισχύς.

- Για τις τιμές της ισχύος του ανεμιστήρα των Fan Coil επιλέχθηκαν τυπικές τιμές βάσει της ψυκτικής ικανότητας και της διακινούμενης παροχής από έρευνα σε μονάδες της αγοράς. Στον Πίνακα 8.2 παρατίθενται η ψυκτική ικανότητα των Fan Coil κάθε χώρου μαζί με την επιλεγμένη ισχύ του ανεμιστήρα τους

Πίνακας 8.2: Ψυκτική ικανότητα κάθε Fan Coil και ισχύς του ανεμιστήρα του

Χώρος	Συνολική ψυκτική ισχύς Fan Coil (kW)	Αισθητή ψυκτική ισχύς Fan Coil (kW)	Ισχύς ανεμιστήρα Fan Coil (W)
Office 1	3,44	3,06	230
Office 2	4,75	4,34	190
Office 3	2,01	1,72	56
Office 4	3,41	3,09	100
Office 5	11,43	10,43	700
Office 6	10,61	9,64	700
Manager	6,26	5,82	300
Meeting Room	6,16	5,77	300
Supervisors	4,68	4,34	190
Break Room	4,28	3,98	180
Lobby	3,15	2,94	100
Toilets	4,00	3,75	190

Ο ορισμός των παραπάνω στο Fan Coil που εξυπηρετεί τον χώρο Office 1 φαίνονται στην Εικόνα 8.16 (Οι υπόλοιποι παράμετροι δεν έχουν αλλαχθεί).

(Papageorgiou) Office 1

Parameter Input Output External Files Comment

	Name	Value	Unit	More	Macro
1	Humidity Mode	2	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Fluid Specific Heat	4.190	kJ/kg.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Rated Volumetric Air Flowrate	392.64	l/s	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Rated Liquid Flowrate	740	kg/hr	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Logical Unit - Cooling Performance	147	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Number of Dry-Bulb Temperatures - Cooling	7	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Number of Wet-Bulb Temperatures - Cooling	7	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Number of Air Flows - Cooling	6	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

(Papageorgiou) Office 1

Parameter Input Output External Files Comment

	Name	Value	Unit	More	Macro
9	Number of Liquid Temperatures - Cooling	8	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
10	Number of Liquid Flowrates - Cooling	2	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Rated Total Cooling Capacity	3.44	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Rated Sensible Cooling Capacity	3.06	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Logical Unit - Heating Performance	148	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Number of Air Temperatures - Heating	7	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
15	Number of Air Flows - Heating	6	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

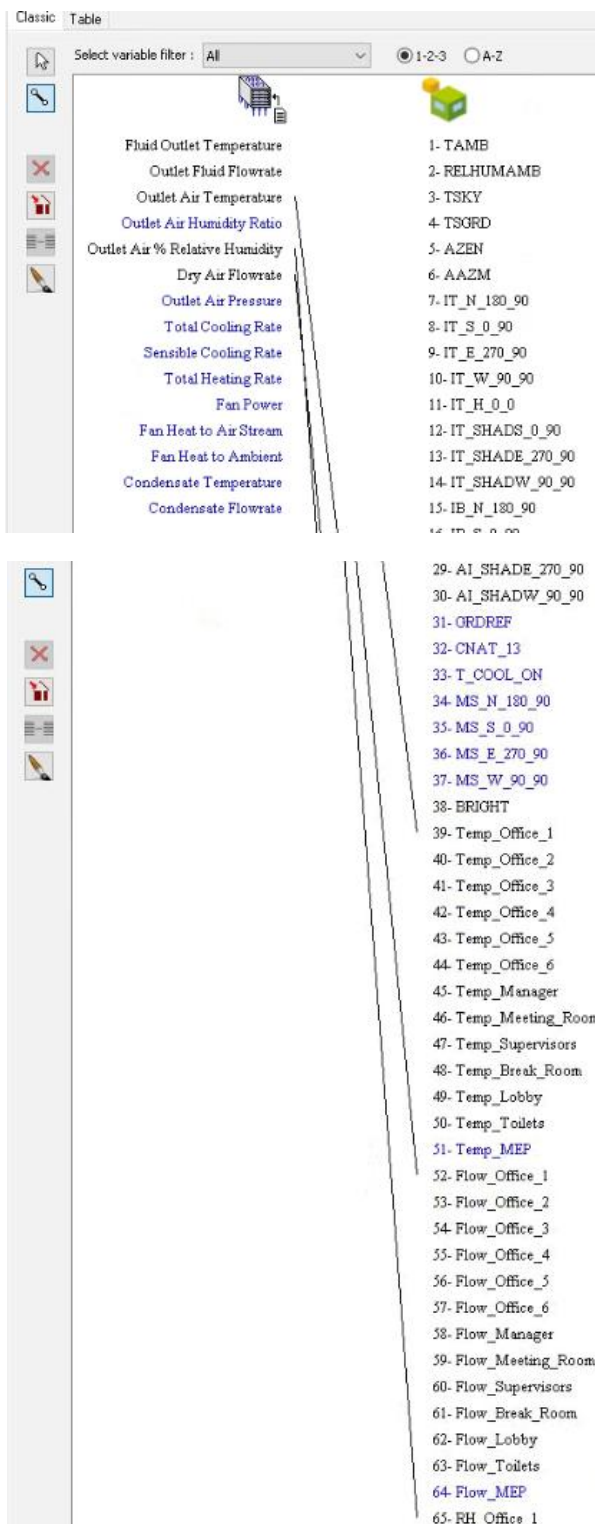
(Papageorgiou) Office 1

Parameter Input Output External Files Comment

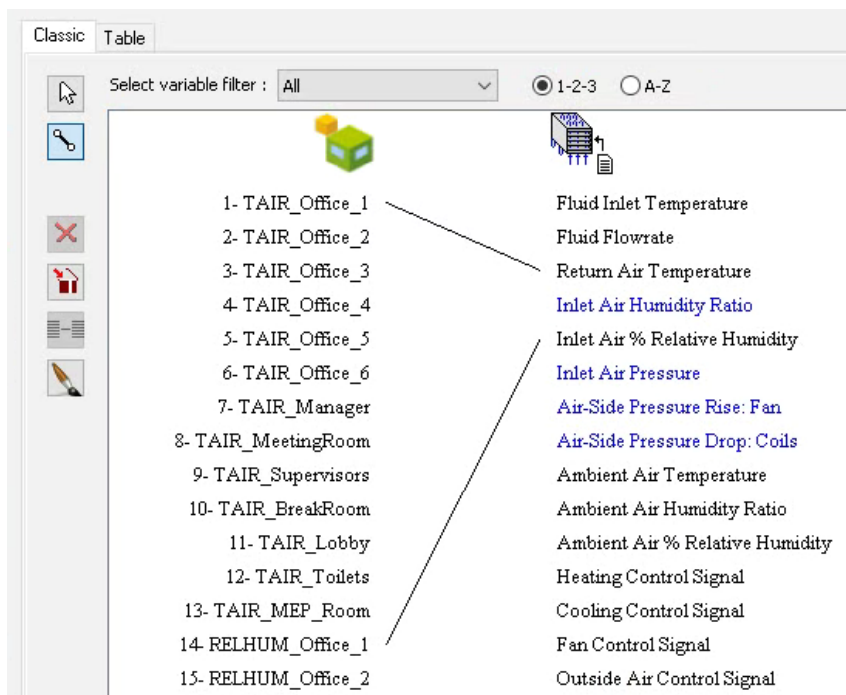
	Name	Value	Unit	More	Macro
16	Number of Liquid Temperatures - Heating	11	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
17	Number of Liquid Flowrates - Heating	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
18	Rated Total Heating Capacity	3.79	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
19	Logical Unit - Fan Corrections	149	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
20	Number of Fan Speeds	11	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
21	Rated Fan Power	230	W	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
22	Efficiency of Fan Motor	0.9	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
23	Fraction of Fan Heat to Air	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 8.16: Ορισμός παραμέτρων Fan Coil

Η σύνδεση των Fan Coil με κάθε χώρο είναι διπλή καθώς η έξοδος του Fan Coil ορίζει τις συνθήκες εισόδου του αέρα στο χώρο, ενώ η έξοδος του χώρου ορίζει τις συνθήκες επιστροφής στο Fan Coil (φυσικά γίνεται και ανάμειξη με νωπό αέρα για λόγους υγιεινής το οποίο αναλύεται περαιτέρω στη συνέχεια). Οι δύο αυτές συνδέσεις φαίνονται στις Εικόνες 8.17 και 8.18 αντίστοιχα.



Εικόνα 8.17: Σύνδεση εξόδου Fan Coil με εισόδους χώρου



Εικόνα 8.18: Σύνδεση εξόδου χώρου με είσοδο Fan Coil

Οι ανάγκες σε νωπό αέρα των χώρων του κτηρίου παρατίθενται στον Πίνακα 8.3 που ακολουθεί (Ο H/M χώρος δεν περιλαμβάνεται στις τιμές του πίνακα καθώς αντιμετωπίζεται ξεχωριστά στην αντίστοιχη ενότητα).

Πίνακας 8.3: Ανάγκες σε νωπό αέρα κάθε χώρου

Χώρος	Ανάγκες αερισμού ανά άτομο (m ³ /h/άτομο)	Ανάγκες αερισμού ανά μονάδα επιφάνειας (m ³ /h/m ²)
Τουαλέτες	-	6
Υπόλοιποι χώροι	30	3

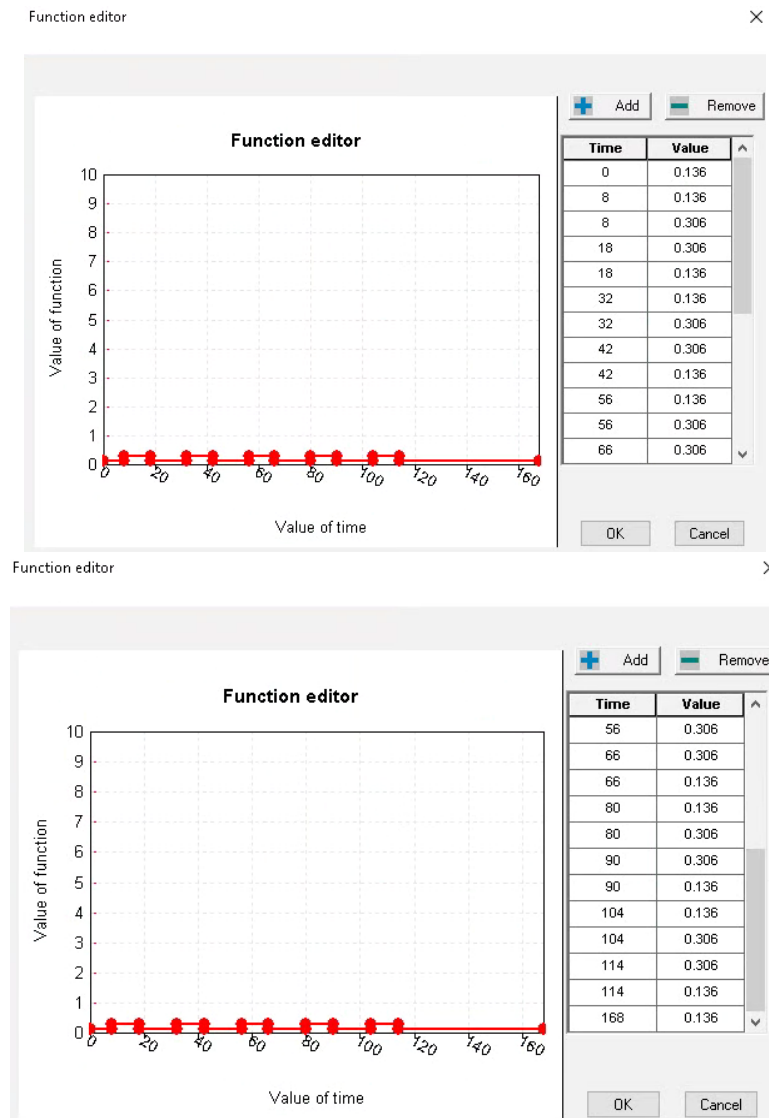
Πηγή: TOTEE 20701-1/2017

Επειδή δεν υπήρχε τρόπος απευθείας ορισμού της ποσότητας νωπού αέρα σε έναν χώρο βάσει του κάθε στιγμής αριθμού των ατόμων σε αυτόν εφαρμόστηκε η εξής λογική:

- Αρχικά υπολογίζονται οι ανάγκες σε νωπό αέρα για κάθε χώρο τόσο τις ώρες που το κτήριο είναι κατειλημμένο όσο και κατά τις κενές ώρες
- Γνωρίζοντας τις μέγιστες τιμές της συνολικά απαιτούμενης ποσότητας αέρα για τις θερμικές ανάγκες του χώρου, υπολογίζεται το ποσοστό νωπού αέρα που αντιστοιχεί σε αυτές τις συνθήκες
- Για τις ώρες που δεν υπάρχουν άτομα στους χώρους, υπολογίζεται η απαίτηση σε νωπό αέρα και το ποσοστό σε σχέση με την μέγιστη απαίτηση σε αέρα για τις θερμικές ανάγκες

- Δημιουργείται ένα πρόγραμμα νωπού αέρα με βάση τα δυο υπολογισμένα ποσοστά το οποίο αντιστοιχίζεται στην είσοδο ελέγχου εξωτερικού αέρα (Outside Air Control Signal)

Στην Εικόνα 8.19 παρουσιάζεται ο τρόπος ορισμού του «προγράμματος» νωπού αέρα για το χώρο Office 1 όπου φαίνεται η εναλλαγή μεταξύ των δυο ποσοστών νωπού αέρα. Τα ποσοστά αυτά για κάθε χώρο παρατίθενται στον Πίνακα 8.4 μαζί με τις μέγιστες απαιτήσεις σε αέρα κάθε χώρου. Να σημειωθεί πως το πρόγραμμα νωπού αέρα για όλους τους χώρους ορίζεται σε εβδομαδιαία βάση ώστε τα Σαββατοκύριακα που το κτήριο είναι τελείως άδειο ώστε να μην χρησιμοποιούνται οι τιμές των ωρών που υπάρχουν άτομα στο κτήριο.



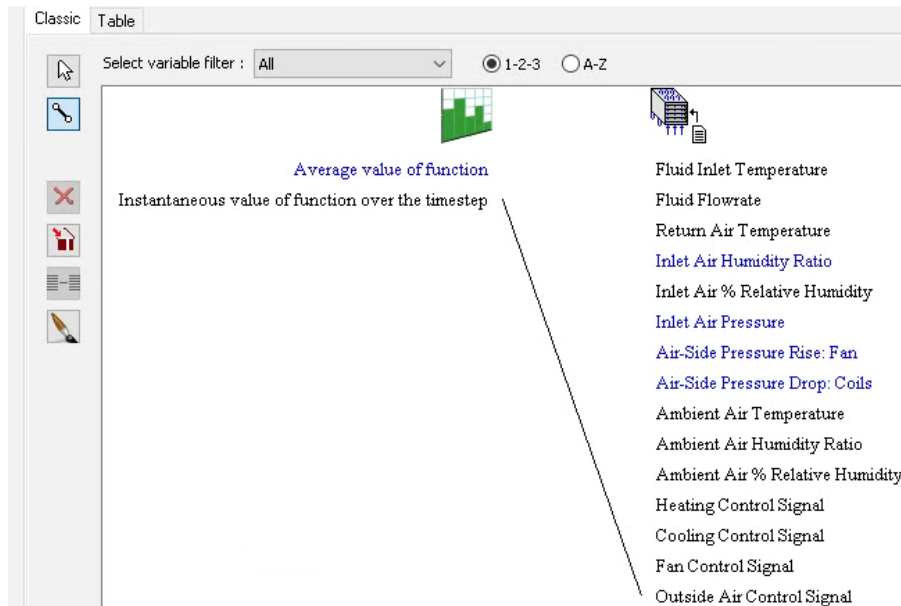
Εικόνα 8.19: Πρόγραμμα νωπού αέρα για το χώρο Office 1

Πίνακας 8.4: Μέγιστες απαιτήσεις σε κλιματισμένο αέρα και στοιχεία νωπού αέρα

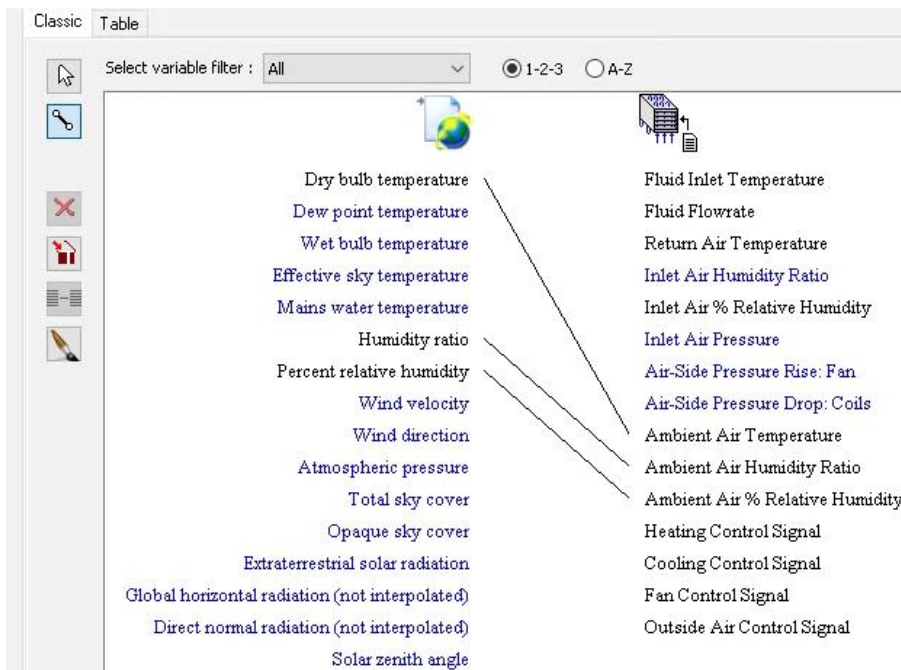
Χώρος	Μέγιστη απαίτηση σε αέρα (L/s)	Νωπός αέρας ωρών λειτουργίας		Νωπός αέρας κενών ωρών	
		L/s	Ποσοστό	L/s	Ποσοστό
Office 1	392,64	120,00	30,6%	53,33	13,6%
Office 2	492,54	120,00	24,4%	53,33	10,8%
Office 3	223,09	90,00	40,3%	40,00	17,9%
Office 4	353,47	90,00	25,5%	40,00	11,3%
Office 5	1184,84	225,00	19,0%	100,00	8,4%
Office 6	1099,27	225,00	20,5%	100,00	9,1%
Manager	649,34	78,33	12,1%	53,33	8,2%
Meeting Room	638,64	136,67	21,4%	53,33	8,4%
Supervisors	485,06	95,00	19,6%	53,33	11,0%
Break Room	443,48	65,00	14,7%	40,00	9,0%
Lobby	443,64	56,67	12,8%	40,00	9,0%
Toilets	639,16	106,67	16,7%	106,67	16,7%

Όπως είναι προφανές, η εφαρμοζόμενη λογική είναι σχετικά ανακριβής. Ωστόσο, ήταν αναγκαίο να εφαρμοστεί καθώς η ανάμειξη νωπού και ανακυκλοφορούμενου αέρα παίζει ρόλο στην κατανάλωση των Fan Coil και επιπλέον ο νωπός αέρας ορίζεται σαν ποσοστό στα Fan Coil. Το ιδανικό θα ήταν να μπορούσε να οριστεί απευθείας η κάθε στιγμή επιθυμητή παροχή νωπού αέρα στη μονάδα αλλά κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό στη συγκεκριμένη έκδοση του TRNSYS. Επιπλέον, η διείσδυση αέρα που ανέρχεται σε 0,2 ACH βοηθάει ώστε να υπάρχει επαρκής ποσότητα φρέσκου αέρα τις περισσότερες ώρες ακόμα και με αυτή την προσεγγιστική λογική. Στις Εικόνες 8.20 και 8.21 φαίνεται η σύνδεση του προγράμματος νωπού αέρα¹⁴ με τη μονάδα Fan Coil καθώς και η σύνδεση των καιρικών δεδομένων με το Fan Coil (χρειάζεται για τις ιδιότητες του νωπού).

¹⁴ Το στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε για τον ορισμό του προγράμματος νωπού αέρα είναι το Type 14h το οποίο βρίσκεται ως εξής: Utility → Forcing Functions → General → Type 14h

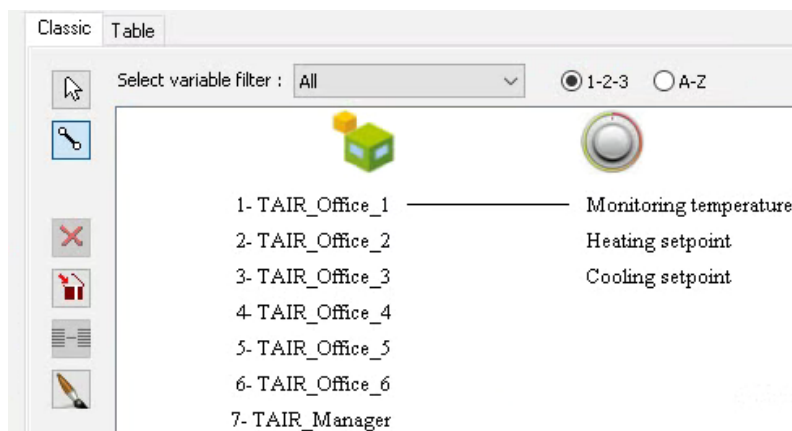


Εικόνα 8.20: Σύνδεση προγράμματος νοπού με Fan Coil

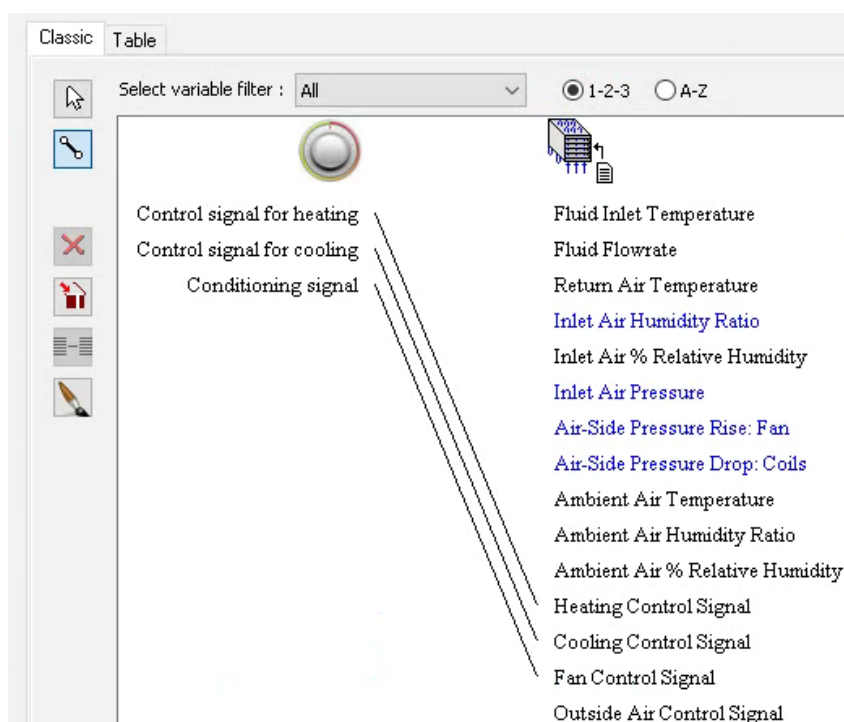


Εικόνα 8.21: Σύνδεση καιρικών δεδομένων με Fan Coil

Ο έλεγχος της λειτουργίας των Fan Coil κάθε χώρου γίνεται με θερμοστάτη ο οποίος «παρακολουθεί» τη θερμοκρασία του χώρου σε σχέση με τις καθορισμένες επιθυμητές θερμοκρασίες και αναλόγως στέλνει τα κατάλληλα σήματα στη μονάδα Fan Coil. Η σύνδεση ενός θερμοστάτη με το κτήριο και το Fan Coil παρατίθεται στις Εικόνες 8.22 και 8.23 αντίστοιχα.



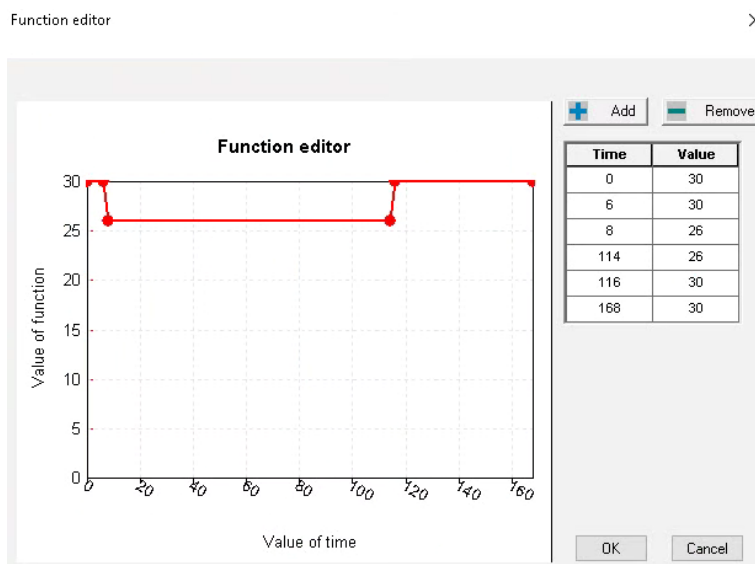
Εικόνα 8.22: Σύνδεση χώρου με θερμοστάτη



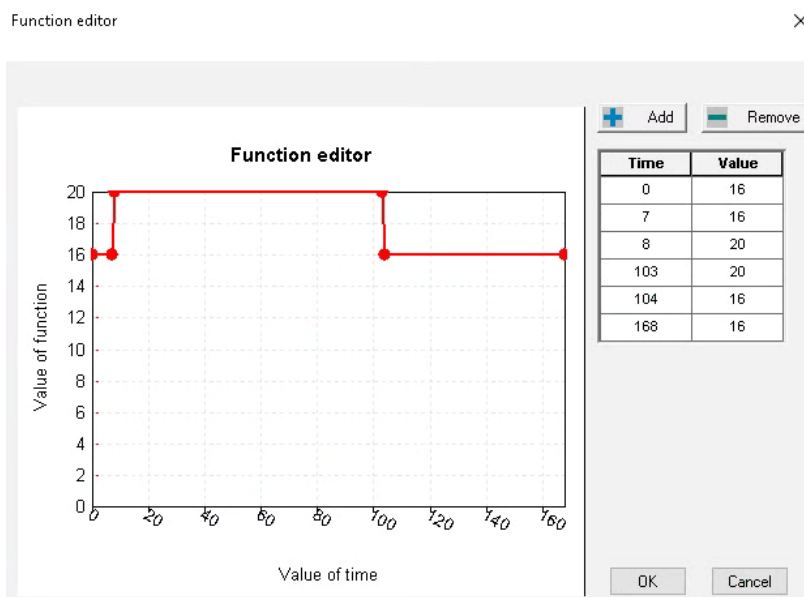
Εικόνα 8.23: Σύνδεση θερμοστάτη με Fan Coil

Ο έλεγχος του Fan Coil από το θερμοστάτη καθορίζεται από τις επιθυμητές, κάθε στιγμή, συνθήκες στο χώρο. Οι επιθυμητές θερμοκρασίες (temperature setpoints) ορίζονται με πρόγραμμα, διαφορετικό για θέρμανση και ψύξη, το οποίο φαίνεται στις Εικόνες 8.24 και 8.25. Στον Κεφάλαιο 7 έχει αναφερθεί πως για λόγους εξοικονόμησης

ενέργειας, κάθε βραδύ τα θερμοκρασιακά setpoints¹⁵ θα μεταβάλλονταν ώστε να μειώνεται η κατανάλωση του κτηρίου. Ωστόσο, όταν αυτή η κίνηση γινόταν σε καθημερινή βάση, παρατηρούνταν αφύσικες μεταβολές στα διαγράμματα των θερμοκρασιών οι οποίες δεν διορθώνονταν. Αντί του παραπάνω, για τη θερινή περίοδο για παράδειγμα, το θερμοκρασιακό setpoint επιλέχθηκε σταθερό και ίσο με 26 °C τις καθημερινές και ίσο με 30 °C τα Σαββατοκύριακα (όπως και με το πρόγραμμα νωπού αέρα, η μεταβολή των setpoint ορίζεται σε εβδομαδιαία βάση). Με αυτή την κίνηση επιλύθηκε το προαναφερθέν ζήτημα και τα διαγράμματα θερμοκρασιών απέκτησαν πιο λογική μορφή και για αυτό οι Εικόνες 8.24 και 8.25 έχουν την απεικονιζόμενη μορφή.



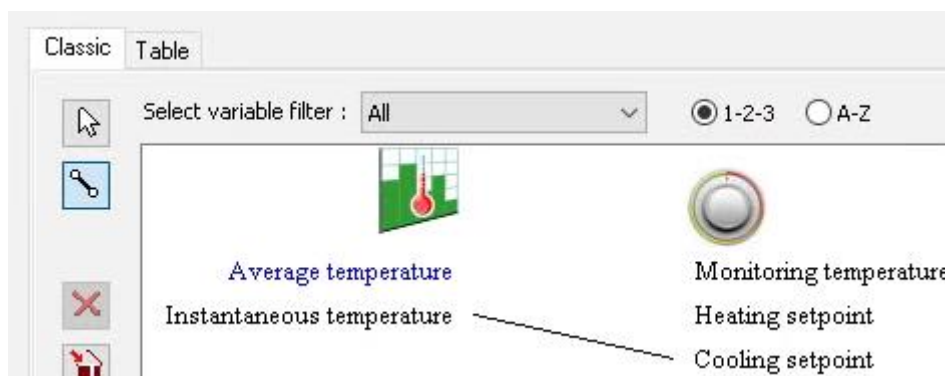
Εικόνα 8.24: Μεταβολή setpoint ψύξης



Εικόνα 8.25: Μεταβολή setpoint θέρμανσης

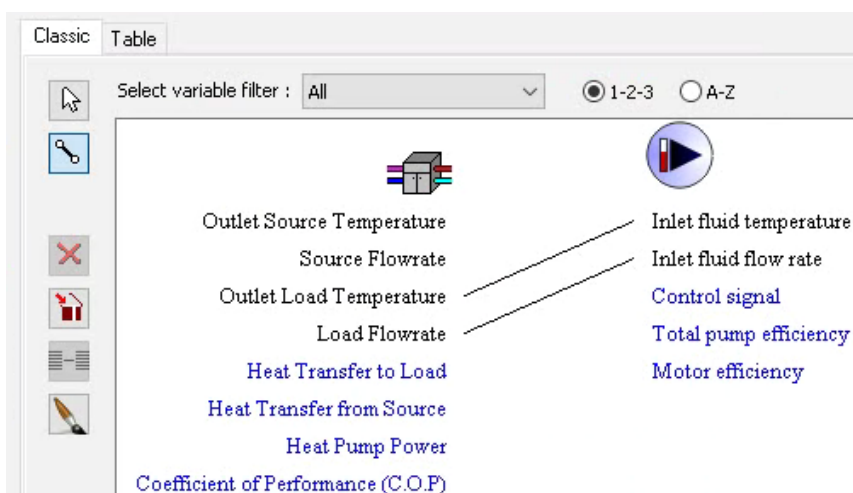
¹⁵ Ο ορισμός του προγράμματος θερμοκρασιακών setpoints έγινε με το Type 14e το οποίο βρίσκεται ως εξής: Utility → Forcing Functions → Temperatures → Type 14e

Η σύνδεση του προγράμματος του setpoint ψύξης με το θερμοστάτη παρατίθεται στην Εικόνα 8.26 (Η σύνδεση με το πρόγραμμα θέρμανσης είναι η ίδια και για αυτό έχει παραλειφθεί).



Εικόνα 8.26: σύνδεση setpoint ψύξης με θερμοστάτη

Το τελευταίο κομμάτι του δευτερεύοντος κυκλώματος αφορά τη σύνδεση κάθε Fan Coil με την ΑΘ νερού-νερού. Αρχικά, η έξοδος του φορτίου (Load) της ΑΘ νερού-νερού συνδέεται με τον κυκλοφορητή του δευτερεύοντος κυκλώματος όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.27. Ο συγκεκριμένος κυκλοφορητής έχει μέγιστη διακινούμενη παροχή 14.040 kg/hr. Παρότι η μέγιστη παροχή του είναι μεγαλύτερη από αυτή του πρωτεύοντος κυκλώματος, οι υδραυλικές απώλειες αναμένονται μικρότερες (λόγω μικρότερης διαφοράς ύψους) με αποτέλεσμα ισχύς ίση με 1,5 kW να είναι επαρκής. Ο κυκλοφορητής του δευτερεύοντος κυκλώματος μοντελοποιείται με το ίδιο στοιχείο όπως και ο κυκλοφορητής του πρωτεύοντος σύμφωνα με την Εικόνα 8.28.



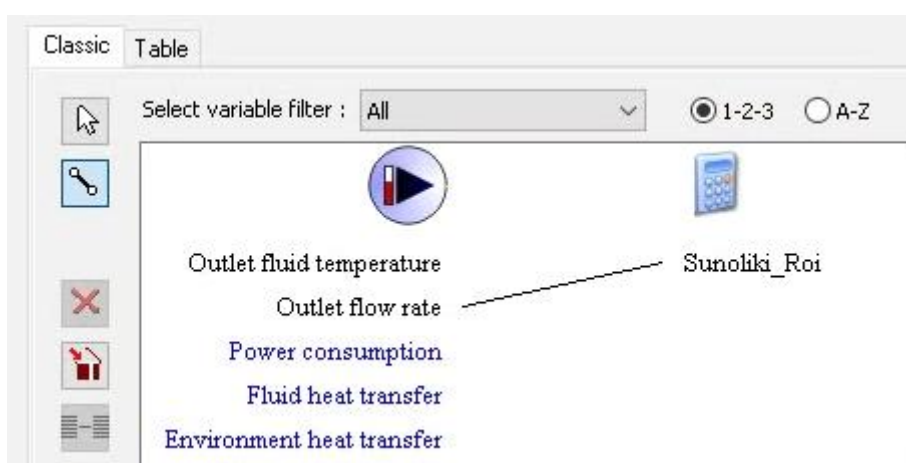
Εικόνα 8.27: Σύνδεση ΑΘ νερού-νερού με κυκλοφορητή δευτερεύοντος κυκλώματος

(Papageorgiou) Circulator

Parameter	Input	Output	Comment	
Name	Value	Unit	More	Macro
1 Rated flow rate	14040	kg/hr	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2 Fluid specific heat	4.19	kJ/kg.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3 Rated power	1.5	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4 Motor heat loss fraction	0.0	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5 Number of power coefficients	2	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6 Power coefficient-1	0.8	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
7 Power coefficient-2	0.8	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 8.28: Ορισμός παραμέτρων κυκλοφορητή δευτερεύοντος κυκλώματος

Από τον κυκλοφορητή η παροχή του νερού διαχωρίζεται και κατευθύνεται προς τα Fan Coil. Η λειτουργία του κυκλοφορητή καθορίζεται όπως και του κυκλοφορητή του πρωτεύοντος κυκλώματος (βλέπε Εικόνα 8.11). Κανονικά, ανάλογα το φορτίο κάθε χρονική στιγμή, κάθε Fan Coil θα «ζήτηγε» συγκεκριμένη ποσότητα νερού για να λειτουργήσει, με τον κυκλοφορητή να αναλαμβάνει να διακινήσει τη συνολικά ζητούμενη παροχή. Ωστόσο κάτι τέτοιο δεν μπορεί να οριστεί στο TRNSYS καθώς η αντλία στην έξοδό της, αν συνδεόταν απευθείας με όλα τα Fan Coil, παρατηρήθηκε πως στέλνει την ίδια παροχή σε όλα το οποίο είναι μη ρεαλιστικό. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το ζήτημα ορίζεται το μπλοκ εξισώσεων “Flow Separation”. Η συνολικά διακινούμενη παροχή του κυκλοφορητή ορίζεται σαν είσοδος στο Flow Separation όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.29, το οποίο αναλαμβάνει να τη διαχωρίσει προς κάθε Fan Coil. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με αναλογικό τρόπο λόγω του πως διαμορφώνεται ένα μπλοκ εξισώσεων στο TRNSYS. Δηλαδή, κάθε στιγμή, σε κάθε Fan Coil πηγαίνει προκαθορισμένο ποσοστό της συνολικής παροχής του κυκλοφορητή. Τα ποσοστά αυτά ορίστηκαν σε συνθήκες μέγιστου φορτίου και παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.30. Για παράδειγμα, κάθε στιγμή στον χώρο Office 1 πηγαίνει το 5,4% της διακινούμενης παροχής του κυκλοφορητή.



Εικόνα 8.29: Σύνδεση κυκλοφορητή δευτερεύοντος με μπλοκ εξισώσεων Flow Separation

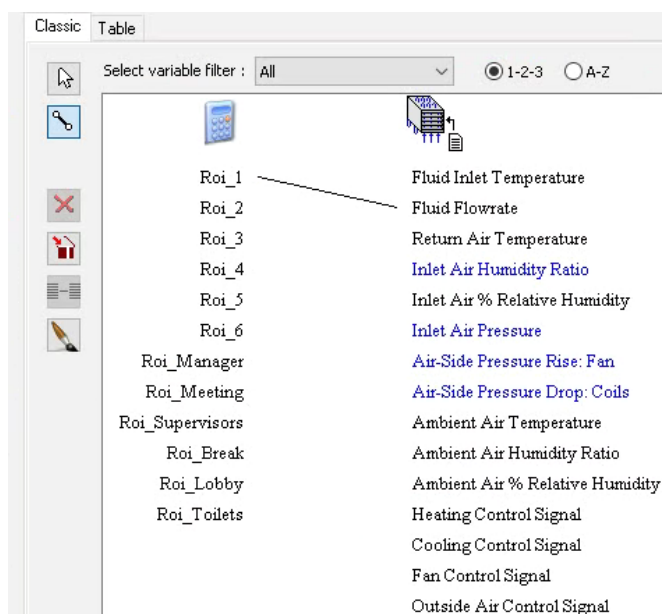
All equations

```

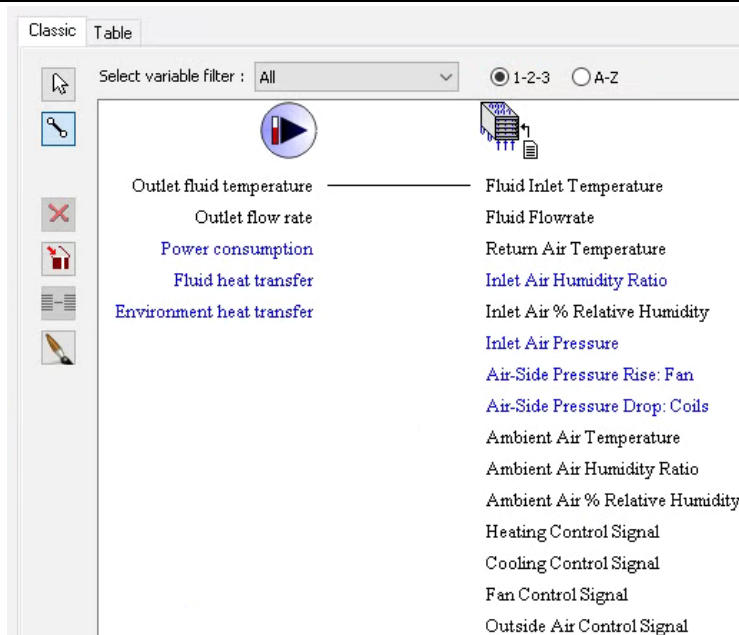
Roi_1 = Sunoliki_Roi*0.054
Roi_2 = Sunoliki_Roi*0.074
Roi_3 = Sunoliki_Roi*0.031
Roi_4 = Sunoliki_Roi*0.053
Roi_5 = Sunoliki_Roi*0.178
Roi_6 = Sunoliki_Roi*0.165
Roi_Manager = Sunoliki_Roi*0.098
Roi_Meeting = Sunoliki_Roi*0.096
Roi_Supervisors = Sunoliki_Roi*0.073
Roi_Break = Sunoliki_Roi*0.067
Roi_Lobby = Sunoliki_Roi*0.049
Roi_Toilets = Sunoliki_Roi*0.062
    
```

Εικόνα 8.30: Ορισμός ποσοστού συνολικά διακινούμενης παροχής που πάει σε κάθε Fan Coil

Φυσικά μια τέτοια αντιμετώπιση έχει αρκετά προσεγγιστικό χαρακτήρα το οποίο επηρεάζει τα διαγράμματα θερμοκρασίας (εξηγείται περαιτέρω σε εκείνο το σημείο) ωστόσο είναι δυνατός ο έλεγχος της θερμοκρασίας των χώρων επομένως η συγκεκριμένη ενέργεια είναι αποδεκτή. Σε αντίθεση με την παροχή του νερού η οποία ορίζεται σαν είσοδος στο Fan Coil από το μπλοκ εξισώσεων όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.31, η θερμοκρασία του νερού που εισέρχεται στο Fan Coil συνδέεται απευθείας με την έξοδο του κυκλοφορητή όπως στην Εικόνα 8.32.

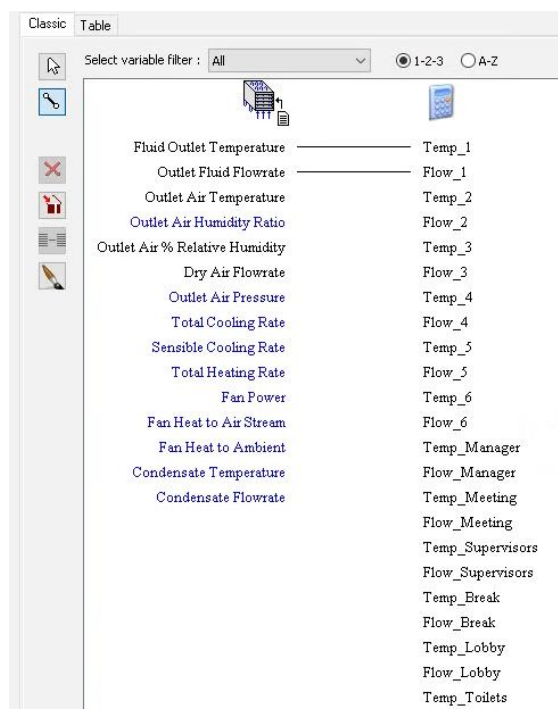


Εικόνα 8.31: Σύνδεση Flow Separation με Fan Coil

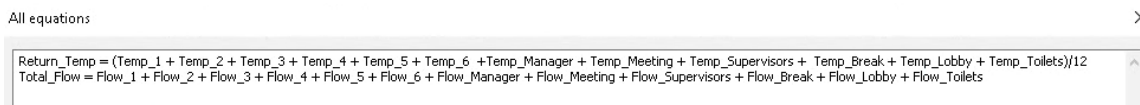


Εικόνα 8.32: Σύνδεση κυκλοφορητή δευτερεύοντος με Fan Coil

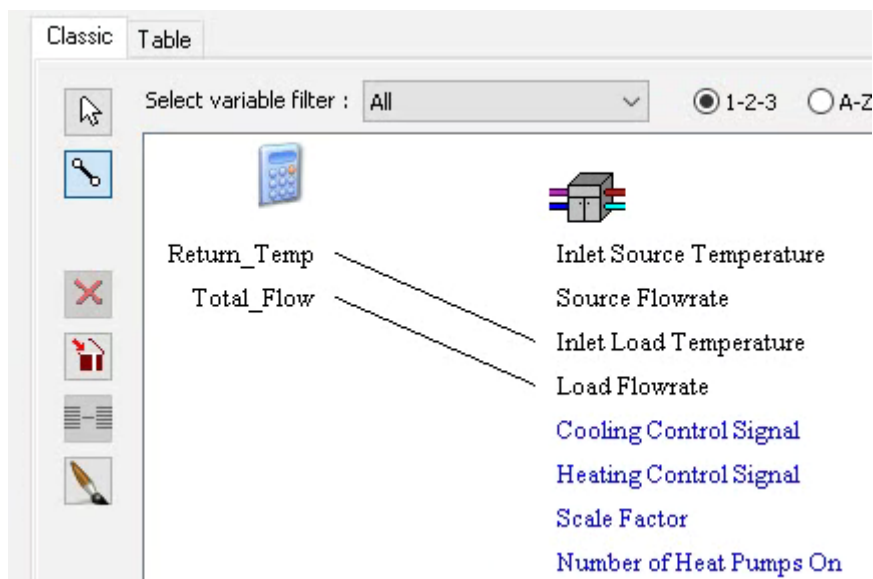
Για την επιστροφή του νερού από τα Fan Coil προς την ΑΘ νερού-νερού ορίζεται το μπλοκ εξισώσεων “Return from Spaces” το οποίο σαν είσοδο λαμβάνει τη θερμοκρασία και την παροχή νερού από κάθε Fan Coil όπως στην Εικόνα 8.33. Στην έξοδο η παροχή από τα Fan Coil αθροίζεται ενώ για τη θερμοκρασία βρίσκεται ο μέσος όρος των θερμοκρασιών από τα Fan Coil ώστε να προσομοιαστεί η ανάμειξη όλων των ροών επιστροφής. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στην Εικόνα 8.34 ενώ η σύνδεση και τελική επιστροφή στην ΑΘ νερού-νερού φαίνεται στην Εικόνα 8.35, ολοκληρώνοντας έτσι τις συνδέσεις και στο δευτερεύον κύκλωμα νερού.



Εικόνα 8.33: Σύνδεση εξόδου Fan Coil με Return from Spaces



Εικόνα 8.34: Εξισώσεις στο Return from Spaces



Εικόνα 8.35: Σύνδεση Return from Spaces με ΑΘ νερού-νερού

8.1.3: Η/Μ χώρος

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, η σύνδεση του Η/Μ χώρου με το γεωθερμικό εναλλάκτη θα έκανε πρακτικά αδύνατη τη λειτουργία του συστήματος το χειμώνα καθώς ο συγκεκριμένος χώρος θα απαιτούσε ψύξη όταν όλο το υπόλοιπο κτήριο θα είχε φορτία θέρμανσης. Για αυτό και ο Η/Μ χώρος εξυπηρετείται από δικό του, ξεχωριστό σύστημα το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για μια ΑΘ αέρα¹⁶.

Οι συνδέσεις της ΑΘ αέρα με το κτήριο γίνονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο όπως και με τα Fan Coil των υπόλοιπων χώρων και για αυτό δεν κρίνεται σκόπιμο να απεικονιστούν ξεχωριστά. Ομοίως, η σύνδεση των εξωτερικών συνθηκών με την ΑΘ γίνεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στα Fan Coil. Το μέγιστο φορτίο του Η/Μ χώρου είναι περίπου 11 kW, ωστόσο, προκειμένου να επιτυγχάνεται έλεγχος της θερμοκρασίας, η

¹⁶ Το στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε είναι το Type 954c το οποίο βρίσκεται ως εξής: HVAC Library (TESS) → Air Source Heat Pump → Catalog Data Look-Up Approach → No Supplemental Heat → Type 954c

ισχύς είναι απαραίτητο να αυξηθεί στα 15 kW. Η καρτέλα με τις παραμέτρους της ΑΘ αέρα φαίνεται στην Εικόνα 8.36 (Η θερμαντική ισχύς δεν αλλάχθηκε καθώς δεν υπάρχει ποτέ ανάγκη θέρμανσης και άρα δεν επηρεάζει τη λειτουργία της ΑΘ).

(Papageorgiou) MEP

Parameter Input Output External Files Comment

	Name	Value	Unit	More	Macro
10	Total air flow rate	2000	l/s	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
11	Rated indoor fan power	0.5	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
12	Rated outdoor fan power	0.6	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
13	Rated total cooling capacity	15	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
14	Rated sensible cooling capacity	14.8	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
15	Rated cooling power	3.5	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
16	Rated heating capacity	7380	kJ/hr	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
17	Rated heating power	4824	kJ/hr	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

(Papageorgiou) MEP

Parameter Input Output External Files Comment

	Name	Value	Unit	More	Macro
14	Rated sensible cooling capacity	14.8	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
15	Rated cooling power	3.5	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
16	Rated heating capacity	7380	kJ/hr	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
17	Rated heating power	4824	kJ/hr	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
18	Rated air flow rate	2000	l/s	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
19	Specific heat of DHW fluid	4.190	kJ/kg.K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
20	Minimum relative humidity	30	%(base 100)	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
21	Auxiliary heat mode	0	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 8.36: Καθορισμός παραμέτρων ΑΘ αέρα στον Η/Μ χώρο

8.2: Φωτοβολταϊκά

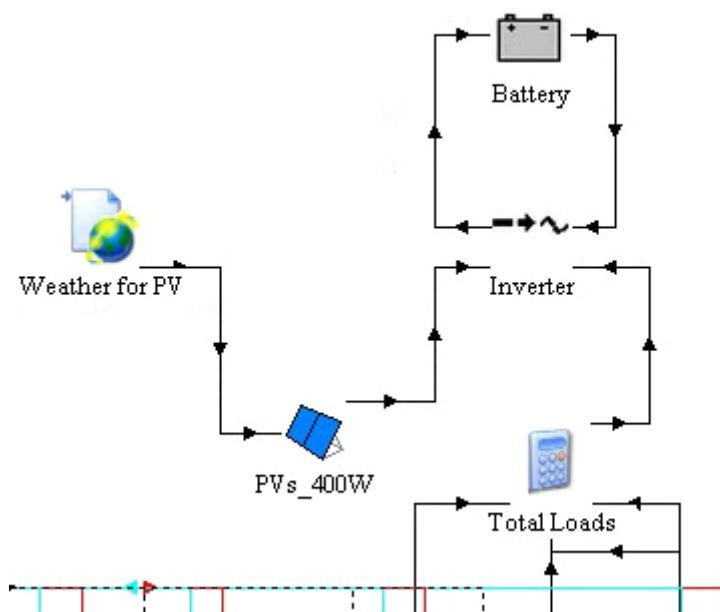
Για τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου είναι απαραίτητη η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας για τις εξής καταναλώσεις:

- Ανεμιστήρες στα Fan Coil κάθε χώρου
- Ανεμιστήρας και συμπιεστής στο σύστημα του Η/Μ χώρου
- Ηλεκτροκινητήρες των κυκλοφορητών νερού
- Ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία του συμπιεστή στην ΑΘ νερού-νερού

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετάται η πλήρης αυτονόμηση του συστήματος από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κάτι που φυσικά συνεπάγεται πως η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ενέργεια θα πρέπει να παράγεται τοπικά. Η καλύτερη λύση είναι η τοποθέτηση συστοιχίας Φ/Β πάνελ τα οποία θα παρέχουν την απαραίτητη ενέργεια για τη λειτουργία των επιμέρους συστημάτων. Μια τέτοια επιλογή βέβαια προϋποθέτει την σύζευξη των Φ/Β με ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας ώστε η ενεργειακή περίσσεια να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τις βραδινές ώρες που δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας αλλά και σε περιπτώσεις παρατεταμένης κακοκαιρίας όπου πάλι η παραγωγή είναι μηδαμινή αν όχι τελείως ανύπαρκτη. Οι μπαταρίες, λόγω της πολύ καλής συνέργειας με ηλεκτρικά συστήματα είναι η καλύτερη επιλογή για το σύστημα αποθήκευσης του κτηρίου. Η διάταξη που θα εξυπηρετεί τις ηλεκτρικές ανάγκες του συστήματος θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου θα αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Φ/Β πάνελ
- Αντιστροφέας (Inverter) ο οποίος θα μετατρέπει το συνεχές (DC) ρεύμα των Φ/Β σε εναλλασσόμενο (AC) για τα συστήματα του κτηρίου
- Συστοιχία μπαταριών η οποία θα αποθηκεύει την περίσσεια ενέργειας από τα Φ/Β ώστε να επιτυγχάνεται η αυτονομία του συστήματος θέρμανσης-ψύξης

Στην Εικόνα 8.37 αποτυπώνεται η διάταξη των παραπάνω στοιχείων.



Εικόνα 8.37: Διάταξη Φ/Β – Inverter- μπαταρίας

Επειδή τα Φ/Β θα πρέπει να εξυπηρετούν τις ανάγκες του συστήματος σε ηλεκτρική ενέργεια τόσο για θέρμανση όσο και ψύξη θα πρέπει να τοποθετηθούν με κλίση η οποία θα μεγιστοποιήσει την ετήσια παραγωγή ενέργειας. Η μέγιστη ετήσια παραγωγή ενέργειας επιτυγχάνεται όταν η κλίση του συλλέκτη είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 4. Επειδή το κτήριο είναι στην περιοχή των Αθηνών η οποία έχει γεωγραφικό πλάτος περίπου 38° , η κλίση των φωτοβολταϊκών στοιχείων επιλέγεται και αυτή ίση με 38° . Παράλληλα, πάλι για λόγους μεγιστοποίησης της παραγωγής ενέργειας, ο προσανατολισμός τους θα είναι Νότιος (δηλαδή αζιμούθιο επιφάνειας ίσο με 0°). Στο αρχείο καιρού «Weather for PV» έχει οριστεί η επιθυμητή κλίση και οι παράμετροι της επιφάνειας στην οποία υπολογίζεται η ηλιακή ακτινοβολία. Στην Εικόνα 8.38 φαίνεται η καρτέλα του αρχείου καιρού και στην Εικόνα 8.39 η σύνδεση με το Φ/Β στοιχείο.

(Papageorgiou) Weather for PV

Parameter Output External Files Comment

	Name	Value	Unit	More	Macro
2	Logical unit	190	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3	Tilted Surface Radiation Mode	5	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4	Ground reflectance - no snow	0.2	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5	Ground reflectance - snow cover	0.7	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6	Number of surfaces	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
7	Tracking mode	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
8	Slope of surface	38	degrees	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
9	Azimuth of surface	0	degrees	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 8.38: Παράμετροι αρχείου καιρού σε σύνδεση με τα Φ/Β

Classic Table

Select variable filter : All 1-2-3 A-Z

Dry bulb temperature	Ambient temperature
Dew point temperature	Beam radiation
Wet bulb temperature	Sky diffuse radiation
Effective sky temperature	Ground reflected diffuse radiation
Mains water temperature	Array slope
Humidity ratio	Incidence angle of beam radiation
Percent relative humidity	
Wind velocity	
Wind direction	
Atmospheric pressure	
Total sky cover	
Opaque sky cover	
Extraterrestrial solar radiation	
Global horizontal radiation (not interpolated)	
Direct normal radiation (not interpolated)	
Solar zenith angle	
Solar azimuth angle	
Total horizontal radiation	
Horizontal beam radiation	
Sky diffuse radiation on the horizontal	
Ground diffuse radiation on the horizontal	
Total diffuse radiation on the horizontal	
Angle of incidence for horizontal	
Total tilted surface radiation for surface	
Beam radiation for surface	
Sky diffuse radiation for surface	
Ground reflected diffuse radiation for surface	
Total diffuse radiation for surface	
Angle of incidence for surface	
Slope of surface	

Εικόνα 8.39: Σύνδεση καιρού με Φ/Β

Η μοντελοποίηση των Φ/Β γίνεται μέσω του στοιχείου Type 103b¹⁷, το οποίο λειτουργεί με παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracking, MPPT). Ο ορισμός των παραμέτρων των Φ/Β πάνελ είναι ιδιαίτερα σημαντικός μιας και επηρεάζουν άμεσα την απόδοσή τους και άρα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβή και να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα, ο ορισμός των παραμέτρων των Φ/Β πάνελ έγινε σύμφωνα με φυλλάδια κατασκευαστών από πραγματικά πάνελ. Ο ορισμός των παραμέτρων των Φ/Β πάνελ στο TRNSYS παρατίθεται στις Εικόνες 8.40 και 8.41.

(Papageorgiou) PVs_400W

Parameter	Input	Output	Comment	
Name	Value	Unit	More	Macro
1 MPPT mode	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2 Module short-circuit current at reference conditions	10.26	amperes	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3 Module open-circuit voltage at reference conditions	49.8	V	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4 Reference cell temperature	25	C	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5 Reference insolation	1000	W/m ²	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6 Module voltage at max power point and reference conditions	41.5	V	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
7 Module current at max power point and reference conditions	9.65	amperes	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 8.40: Μέγιστες και ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος Φ/Β

(Papageorgiou) PVs_400W

Parameter	Input	Output	Comment	
Name	Value	Unit	More	Macro
8 Temperature coefficient of Isc (ref. cond)	0.003	A/K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
9 Temperature coefficient of Voc (ref. cond.)	-0.1342	V/K	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
10 Number of cells wired in series	72	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
11 Module temperature at NOCT	42	C	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
12 Module area	1.88	m ²	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
13 Number of modules in series	28	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
14 Number of modules in parallel	5	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 8.41: Θερμοκρασιακοί συντελεστές, επιφάνεια και αριθμός Φ/Β πάνελ

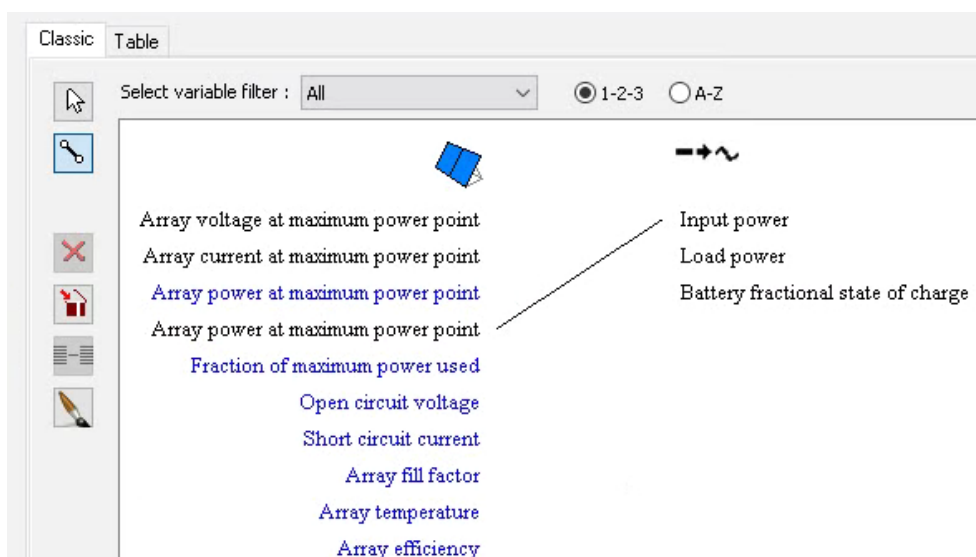
¹⁷ Το στοιχείο Type 103b βρίσκεται ως εξής: Electrical → Photovoltaic Models → Basic Model → with MPPT → Type 103b

8.3: Inverter και μπαταρία

Τα Φ/Β πάνελ παράγουν συνεχές ρεύμα το οποίο ωστόσο δεν μπορεί να αξιοποιηθεί απευθείας από το κτήριο. Προκειμένου να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα χρησιμοποιείται ένας αντιστροφέας (Inverter). Ο Inverter¹⁸ έχει τρεις εισόδους:

1. Την ισχύ εξόδου των Φ/Β
2. Την απαιτούμενη ισχύ από την κατανάλωση (κτήριο)
3. Την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (Fractional State of Charge, FSOC)

Η σύνδεση των Φ/Β με τον Inverter φαίνεται στην Εικόνα 8.42. Για τον Inverter θεωρείται ισχύς 60 kW. Η ισχύς του Inverter είναι τέτοια ώστε να καλύπτει την αιχμή του φορτίου, λαμβάνοντας υπόψιν και την αυξημένη ισχύ που τραβάνε τόσο οι ΑΘ όσο και οι κυκλοφορητές κατά την εκκίνηση τους και από την άλλη τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας από τα Φ/Β (εξηγείται στο επόμενο κεφάλαιο πιο αναλυτικά). Η καρτέλα παραμέτρων του Inverter παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.43.



Εικόνα 8.42: Σύνδεση Φ/Β με Inverter

¹⁸ Ο Inverter μοντελοποιείται με το στοιχείο Type 48b το οποίο βρίσκεται ως εξής: Electrical→ Regulators and Inverters → System w_battery storage→ MPP Tracking → SOC monitoring only → Type 48b

(Papageorgiou) Inverter

Parameter Input Output Comment

		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Mode	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2		Regulator efficiency	0.9	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3		Inverter efficiency	0.96	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4		High limit on fractional state of charge (FSOC)	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5		Low limit on FSOC	0	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
6		Charge to discharge limit on FSOC	0	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
7		Inverter output power capacity	60	kW	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 8.43: Καθορισμός παραμέτρων Inverter

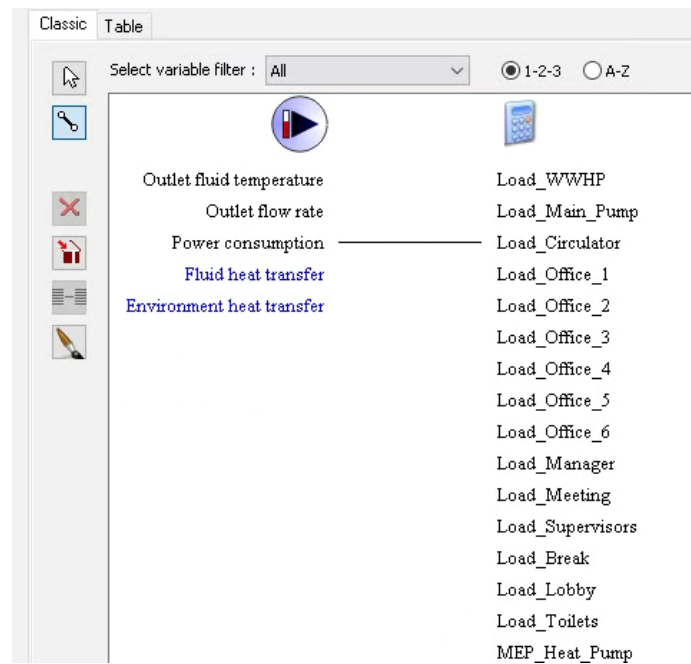
Η κάθε στιγμή απαιτούμενη ισχύς από τα συστήματα του κτηρίου προκύπτει από το άθροισμα των καταναλώσεων των επιμέρους συστημάτων του κτηρίου. Η άθροιση αυτών γίνεται στο μπλοκ εξισώσεων “Total Loads”. Από τα Fan Coil λαμβάνεται η ισχύς του ανεμιστήρα, από το σύστημα του Η/Μ χώρου η ισχύς του ανεμιστήρα και του συμπιεστή, από τους κυκλοφορητές η καταναλισκομένη ισχύς του ηλεκτροκινητήρα τους και από την ΑΘ νερού-νερού η ηλεκτρική ισχύς του συμπιεστή. Τα παραπάνω φαίνονται στις Εικόνες 8.44, 8.45, 8.46 και 8.47 αντίστοιχα.

Classic Table

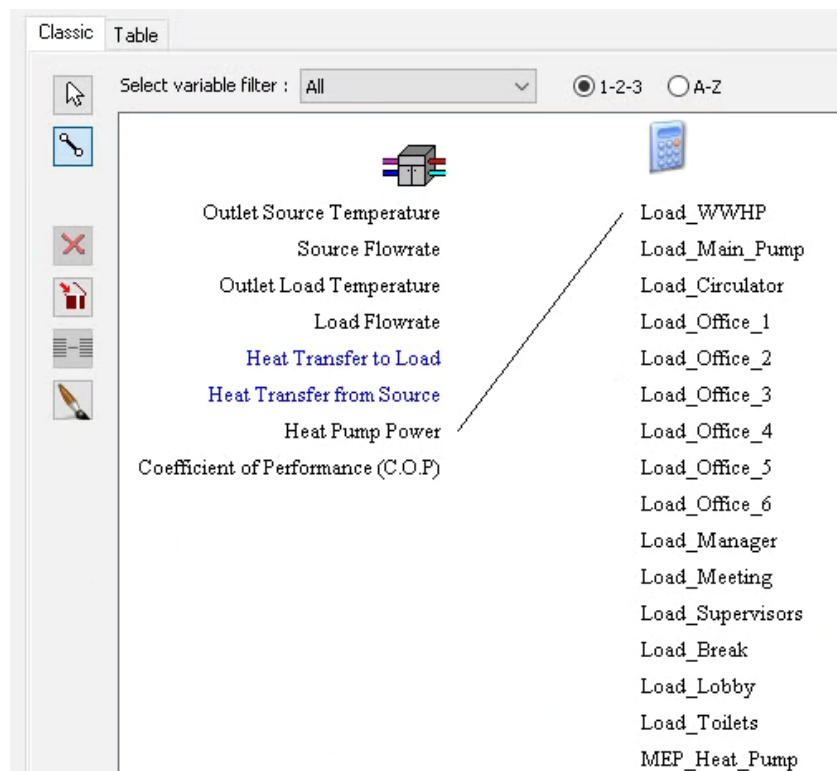
Select variable filter : All 1-2-3 A-Z

Fluid Outlet Temperature	Load_WWHP
Outlet Fluid Flowrate	Load_Main_Pump
Outlet Air Temperature	Load_Circulator
Outlet Air Humidity Ratio	Load_Office_1
Outlet Air % Relative Humidity	Load_Office_2
Dry Air Flowrate	Load_Office_3
Outlet Air Pressure	Load_Office_4
Total Cooling Rate	Load_Office_5
Sensible Cooling Rate	Load_Office_6
Total Heating Rate	Load_Manager
Fan Power	Load_Meeting
Fan Heat to Air Stream	Load_Supervisors
Fan Heat to Ambient	Load_Break
Condensate Temperature	Load_Lobby
Condensate Flowrate	Load_Toilets
	MEP_Heat_Pump

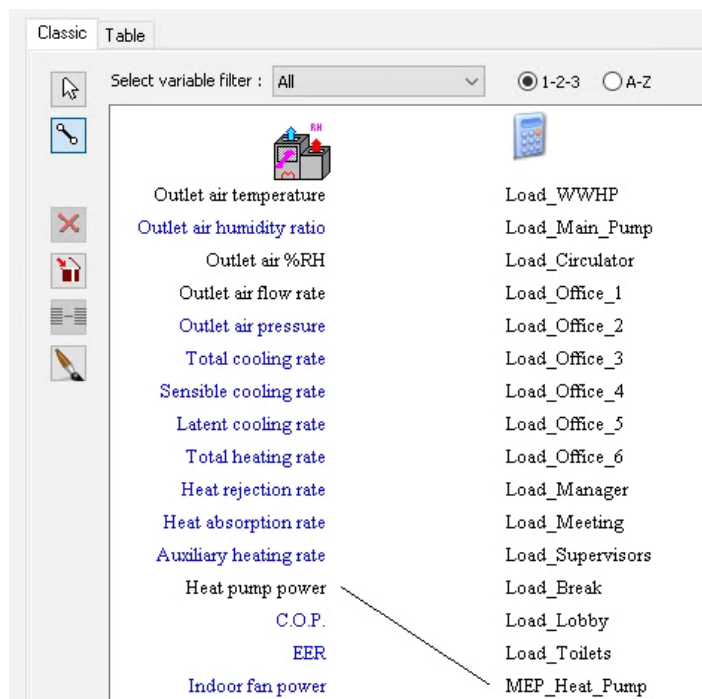
Εικόνα 8.44: Σύνδεση ανεμιστήρα Fan Coil με τον αθροιστή καταναλώσεων



Εικόνα 8.45: Σύνδεση κυκλοφορητή με τον αθροιστή καταναλώσεων

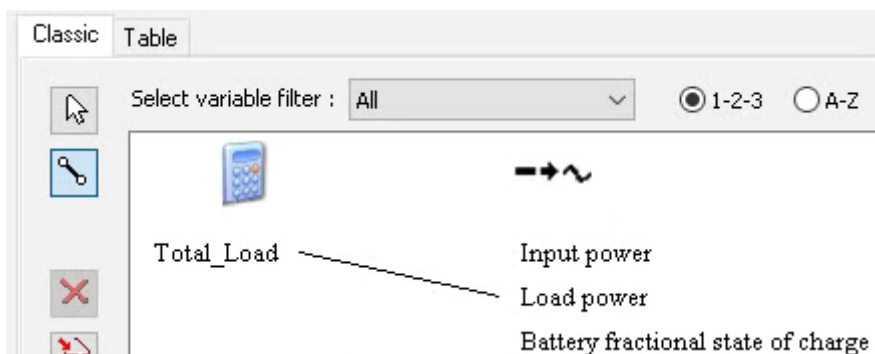


Εικόνα 8.46: Σύνδεση ΑΘ νερού-νερού με τον αθροιστή καταναλώσεων



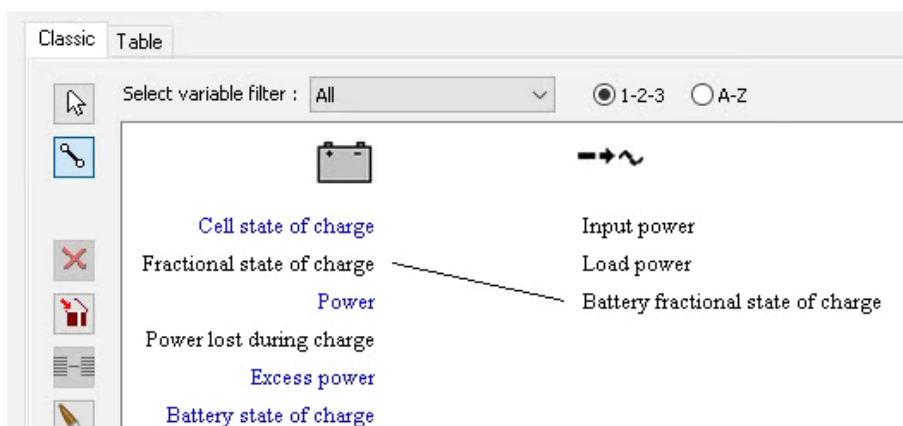
Εικόνα 8.47: Σύνδεση ΑΘ αέρα με τον αθροιστή καταναλώσεων

Η συνολική απαίτηση που προκύπτει από το άθροισμα των παραπάνω συνδέεται στην είσοδο του Inverter σύμφωνα με την Εικόνα 8.48.

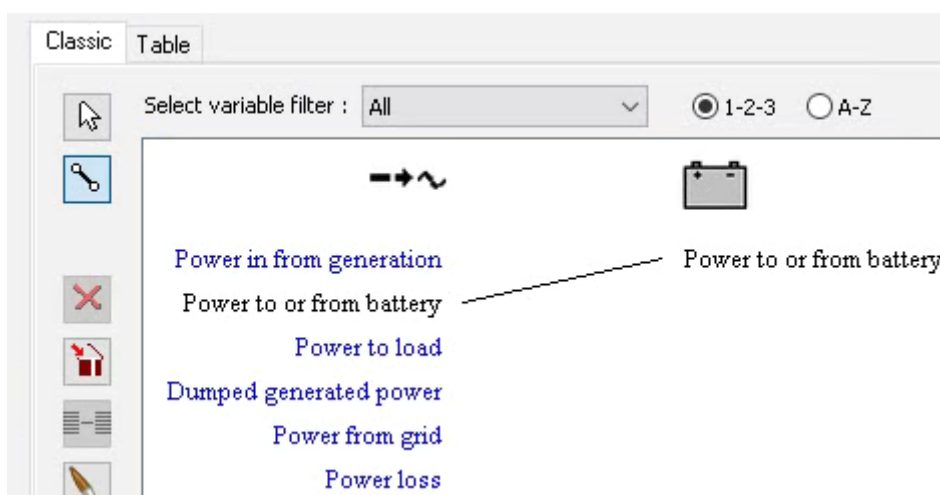


Εικόνα 8.48: Σύνδεση καταναλώσεων με τον Inverter

Η σύνδεση του Inverter με την μπαταρία είναι αμφίδρομη μιας και η μπαταρία δέχεται ως είσοδο την απαιτούμενη ισχύ από ή προς αυτή και στέλνει ως σήμα στον Inverter το ποσοστό φόρτισής της. Οι συνδέσεις μεταξύ τους φαίνονται στις Εικόνες 8.49 και 8.50 αντίστοιχα.



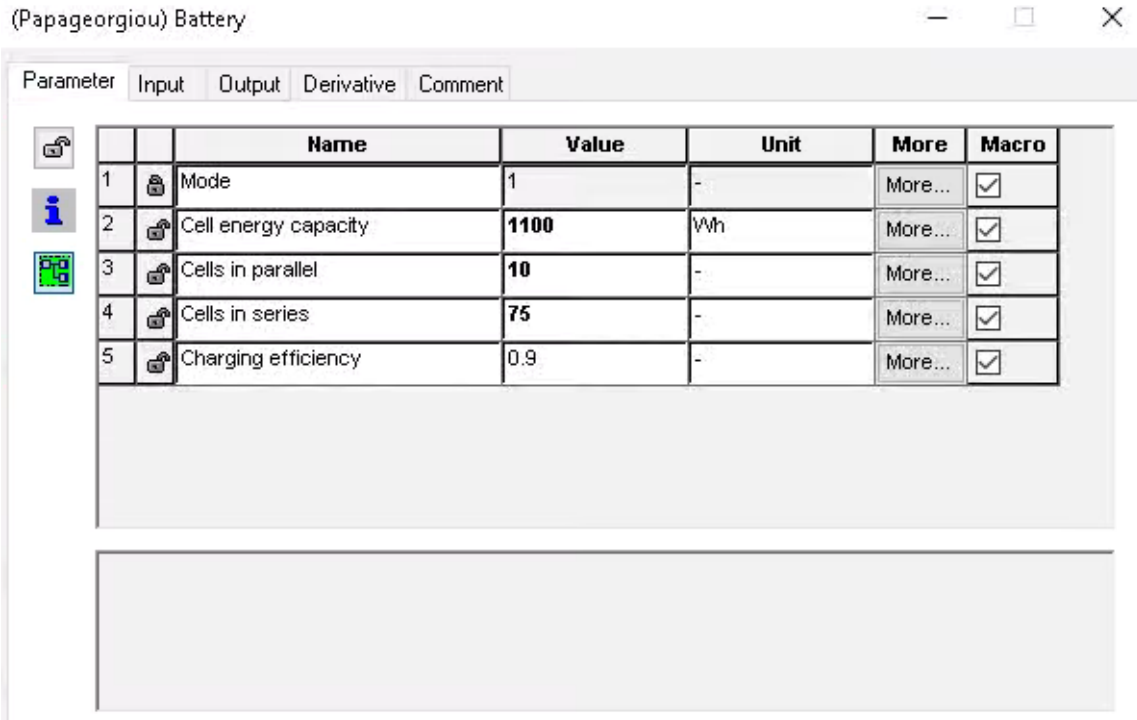
Εικόνα 8.49: Σύνδεση εξόδου μπαταρίας με τον Inventor



Εικόνα 8.50: Σύνδεση εξόδου Inventor με μπαταρία

Το τελευταίο στοιχείο του συστήματος είναι η μπαταρία¹⁹ στην οποία αποθηκεύεται η περίσσεια παραγωγή των Φ/Β. Η χωρητικότητα της μπαταρίας επιλέγεται να είναι ίση με 825 kWh. Η επιλογή του μεγέθους της μπαταρίας έγινε έπειτα από δοκιμές με στόχο η στάθμη της να μην πέφτει ποτέ κάτω από 20% για λόγους ασφαλείας. Στην Εικόνα 8.51 παρουσιάζεται η καρτέλα με τις παραμέτρους της μπαταρίας.

¹⁹ Η μπαταρία μοντελοποιείται με το στοιχείο Type 47 το οποίο βρίσκεται ως εξής: Electrical→ Batteries→ Power as Input → dQ_dt = P elf → Type 47a



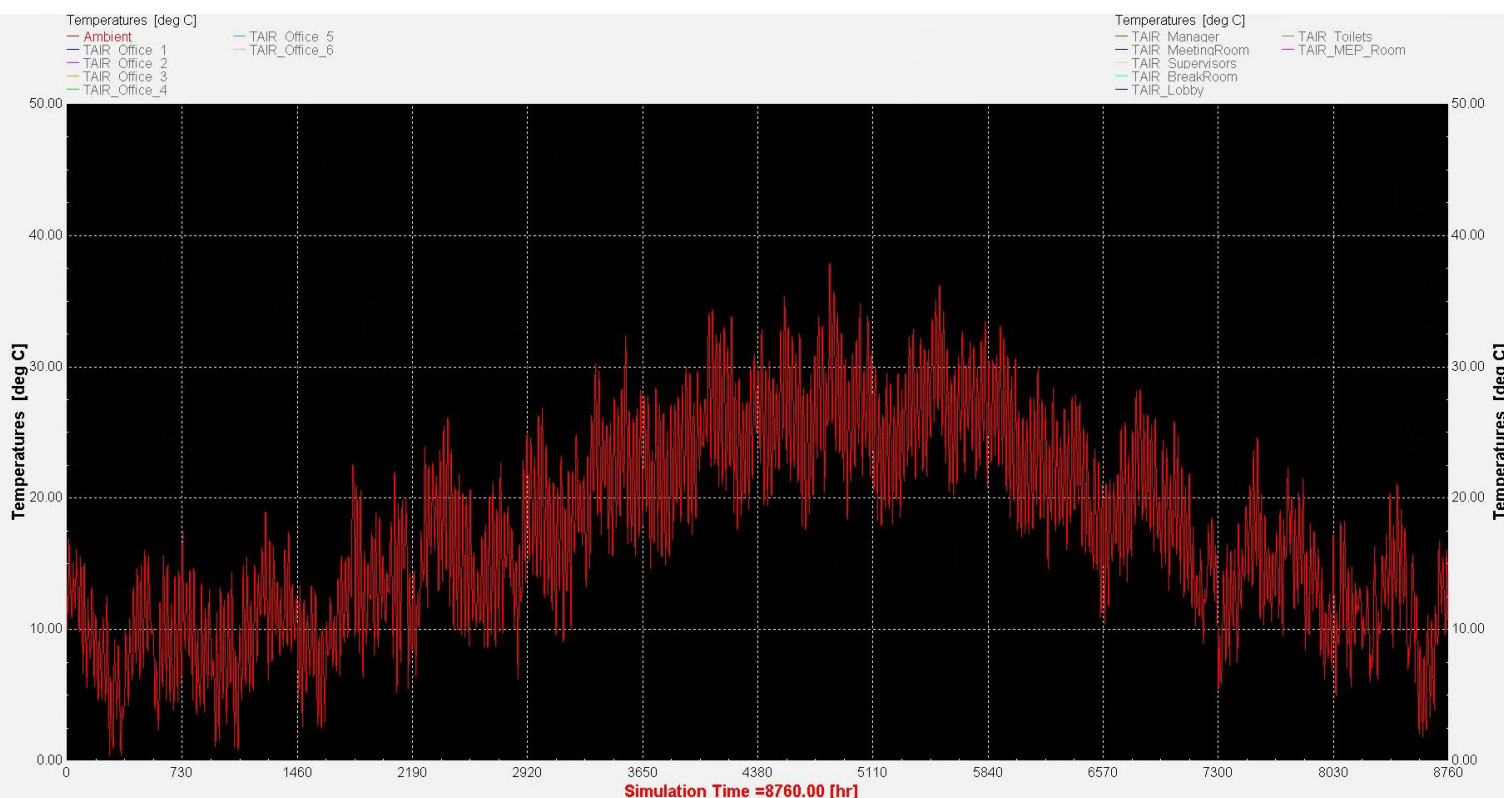
Εικόνα 8.51: Ορισμός παραμέτρων μπαταρίας

9. Αποτελέσματα – Εκτίμηση οικονομικού κόστους

9.1: Αποτελέσματα

9.1.1: Θερμοκρασίες χώρων

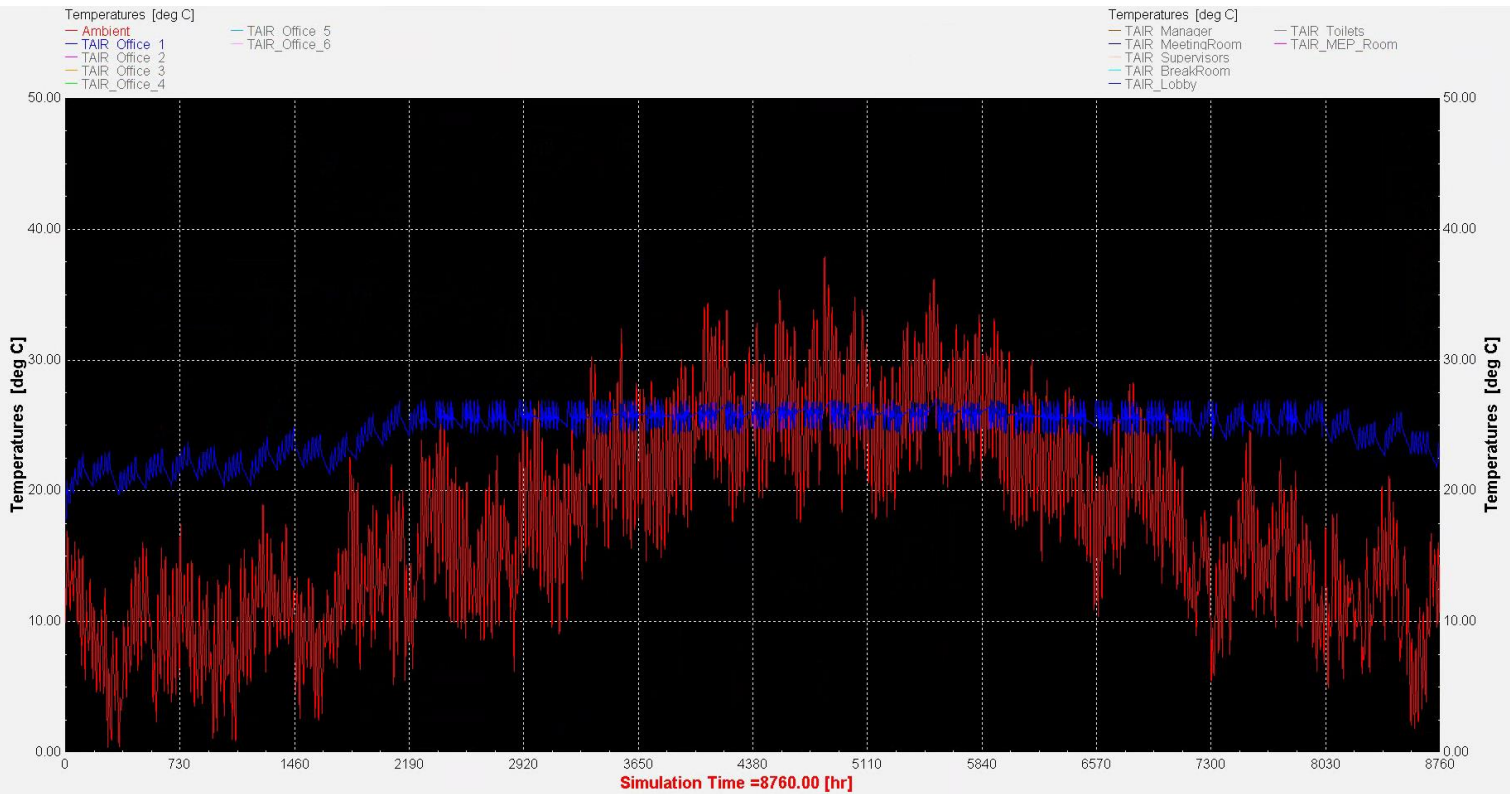
Ο βασικός στόχος του όλου συστήματος είναι η επίτευξη συνθηκών άνεσης που διευκολύνουν την εργασιακή δραστηριότητα στους χώρους του κτηρίου όλο το χρόνο. Στο Διάγραμμα 9.1 παρατίθεται η ετήσια μεταβολή της θερμοκρασίας του εξωτερικού αέρα στην περιοχή των Αθηνών με την οποία θα συγκριθούν οι θερμοκρασίες των χώρων του κτηρίου.. Στα Διαγράμματα 9.2 – 9.14²⁰ παρουσιάζονται μια προς μια οι μεταβολές στη θερμοκρασία όλων των χώρων του κτηρίου και συγκρίνονται με τη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα.



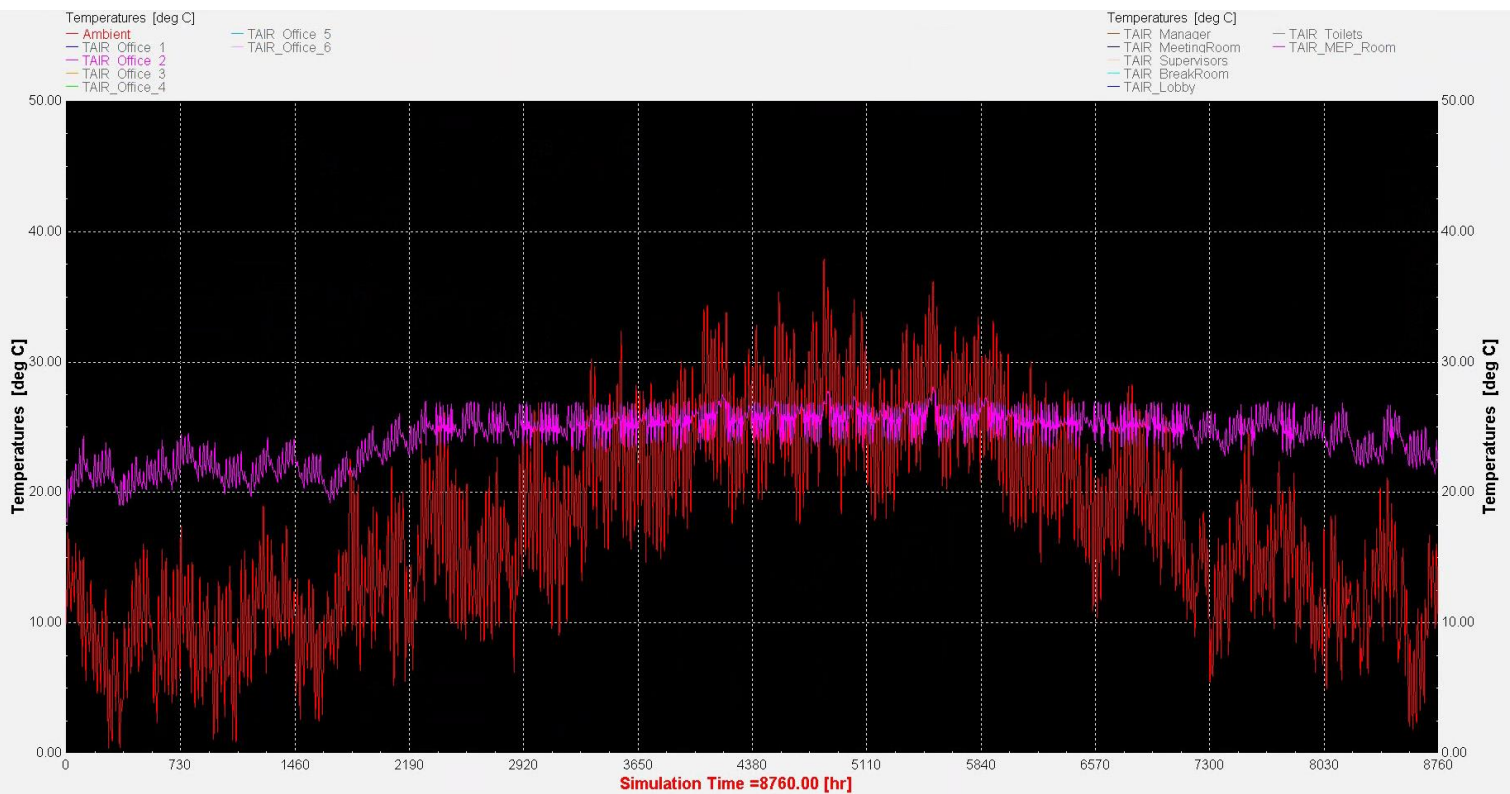
Διάγραμμα 9.1: Μεταβολή θερμοκρασίας εξωτερικού (περιβαλλοντικού) αέρα

²⁰ Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως όλα τα διαγράμματα στο TRNSYS έγιναν με το στοιχείο Type 65d που πρόκειται για online plotter. Το Type 65d βρίσκεται ως εξής: Output→ Online plotter→ Online plotter without file→ Type 65d

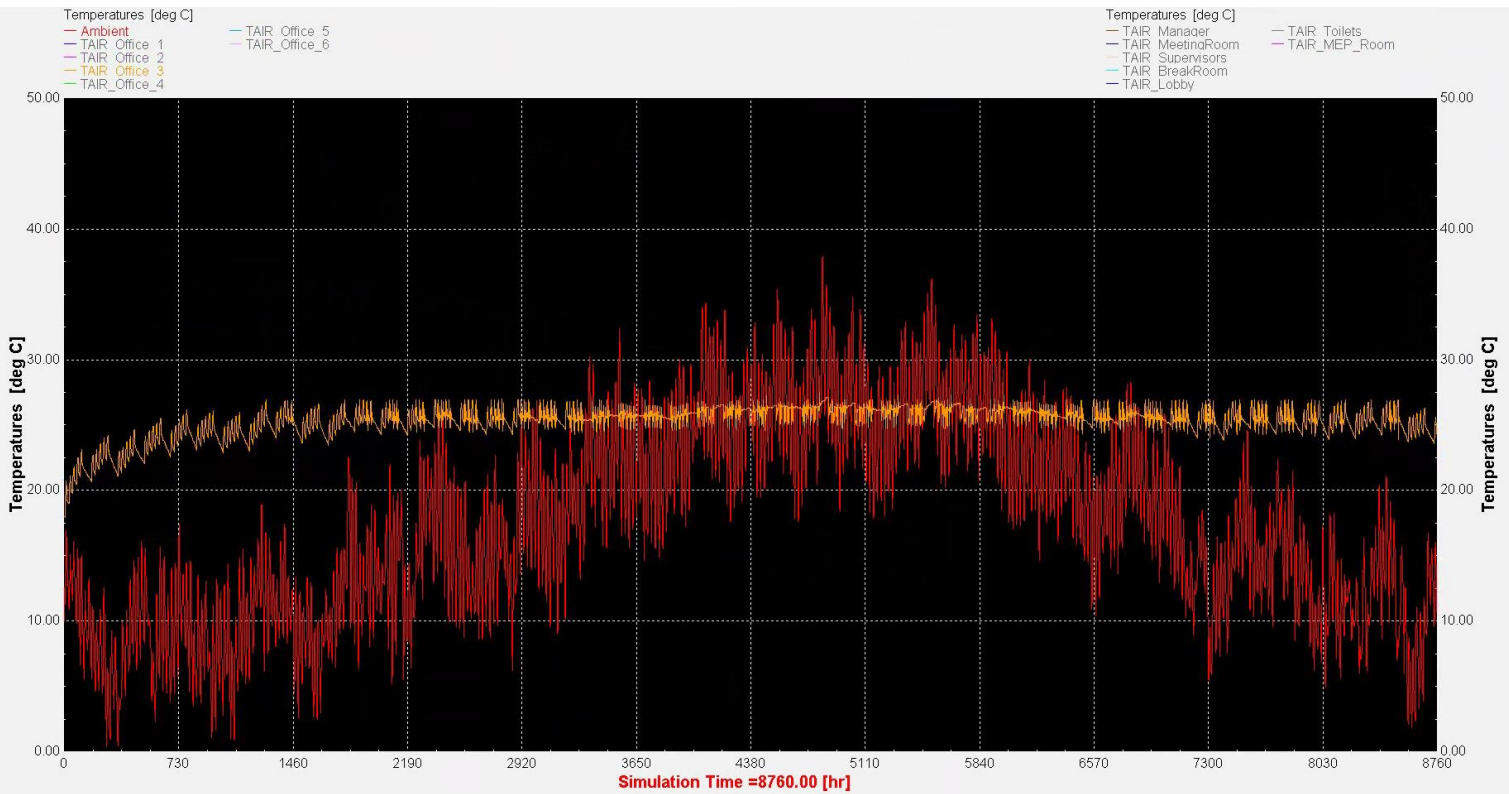
Ανάλογα το επιθυμητό διάγραμμα (εκτός των θερμοκρασιών όπου δημιουργείται αυτόματα από το Building Wizard) οριζόταν ένα νέο Type 65d στο οποίο αποτυπώνονταν οι κάθε φορά επιθυμητές ποσότητες.



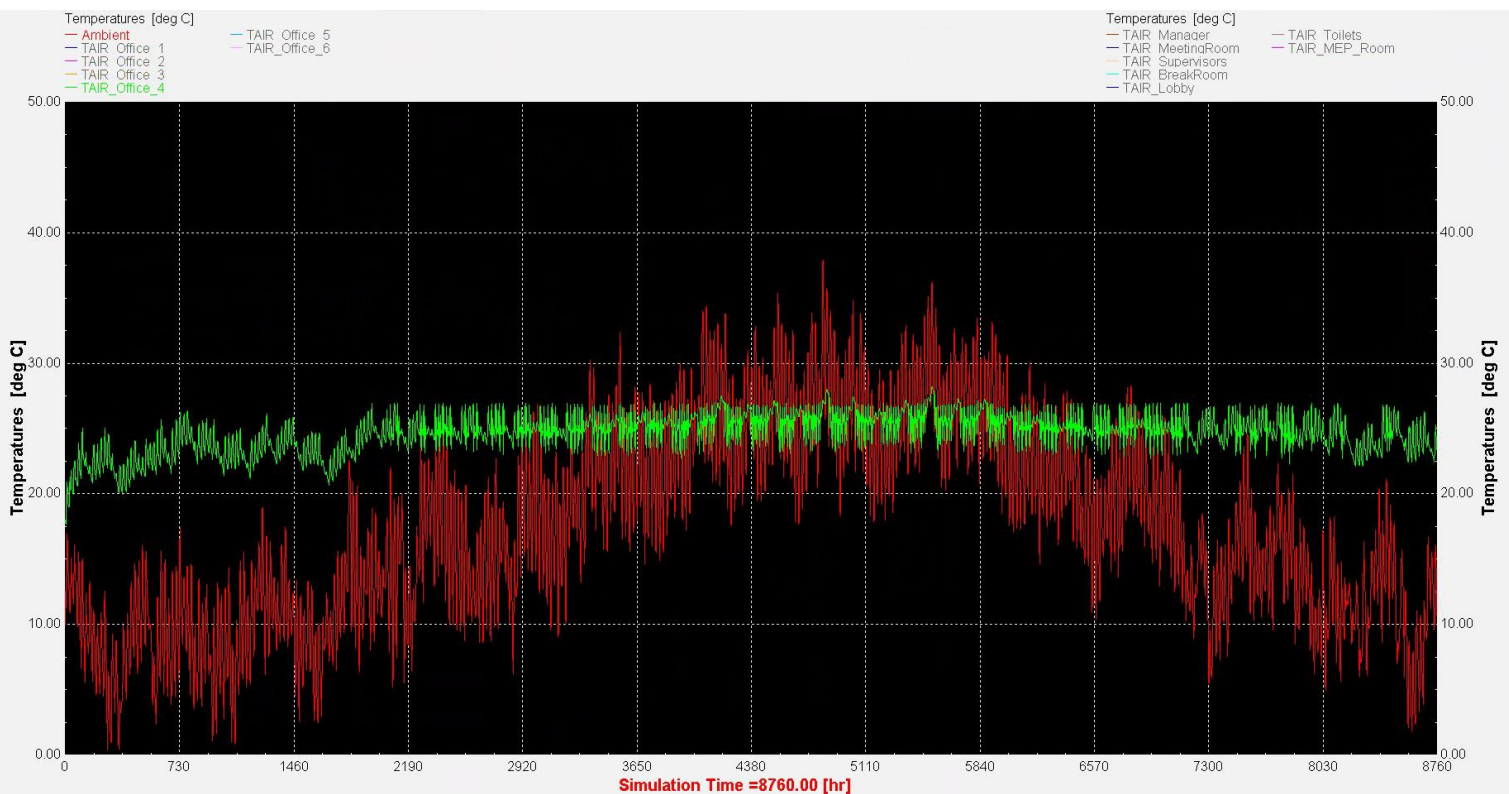
Διάγραμμα 9.2: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 1 με του εξωτερικό αέρα



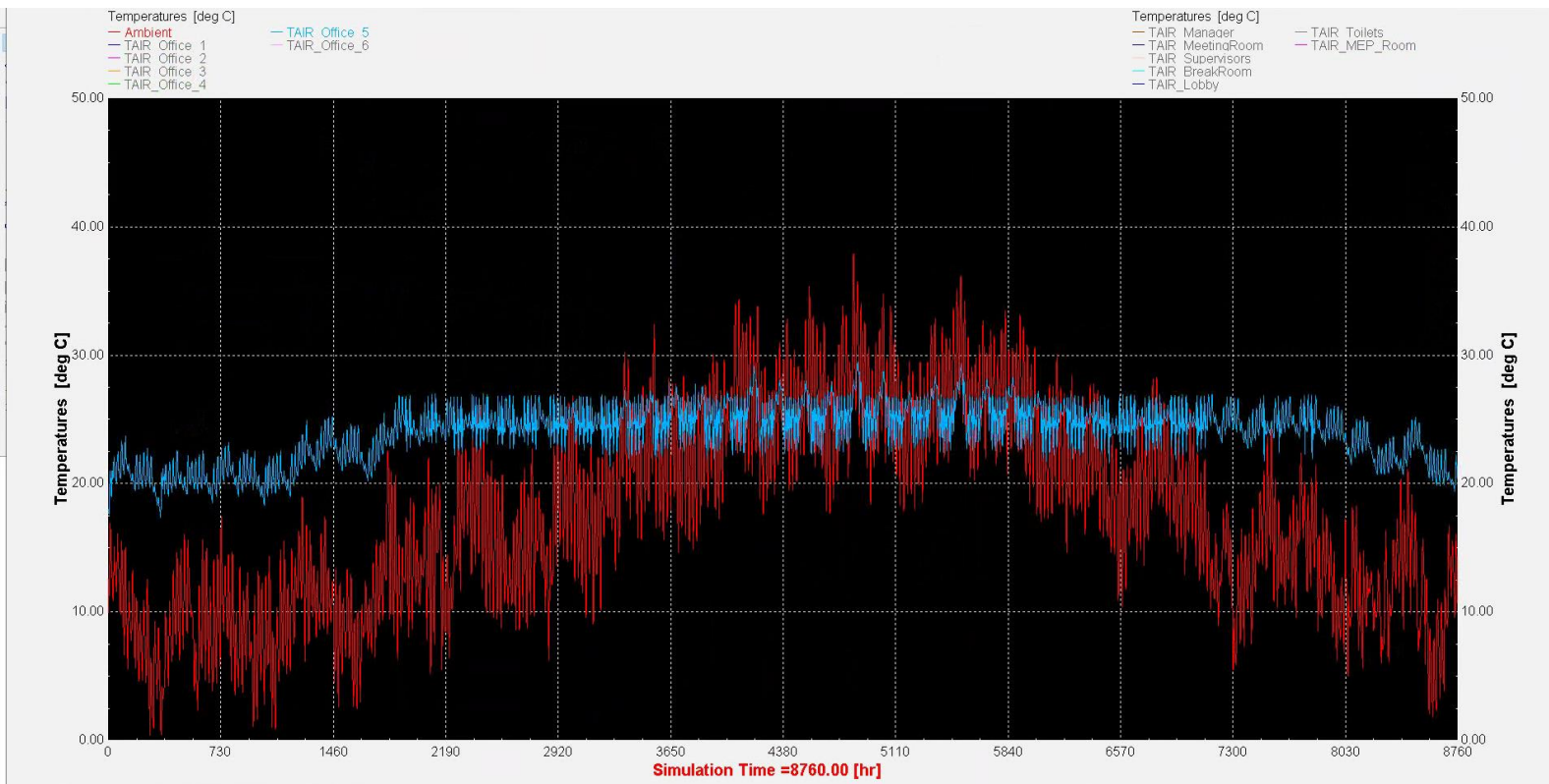
Διάγραμμα 9.3: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 2 με του εξωτερικού αέρα



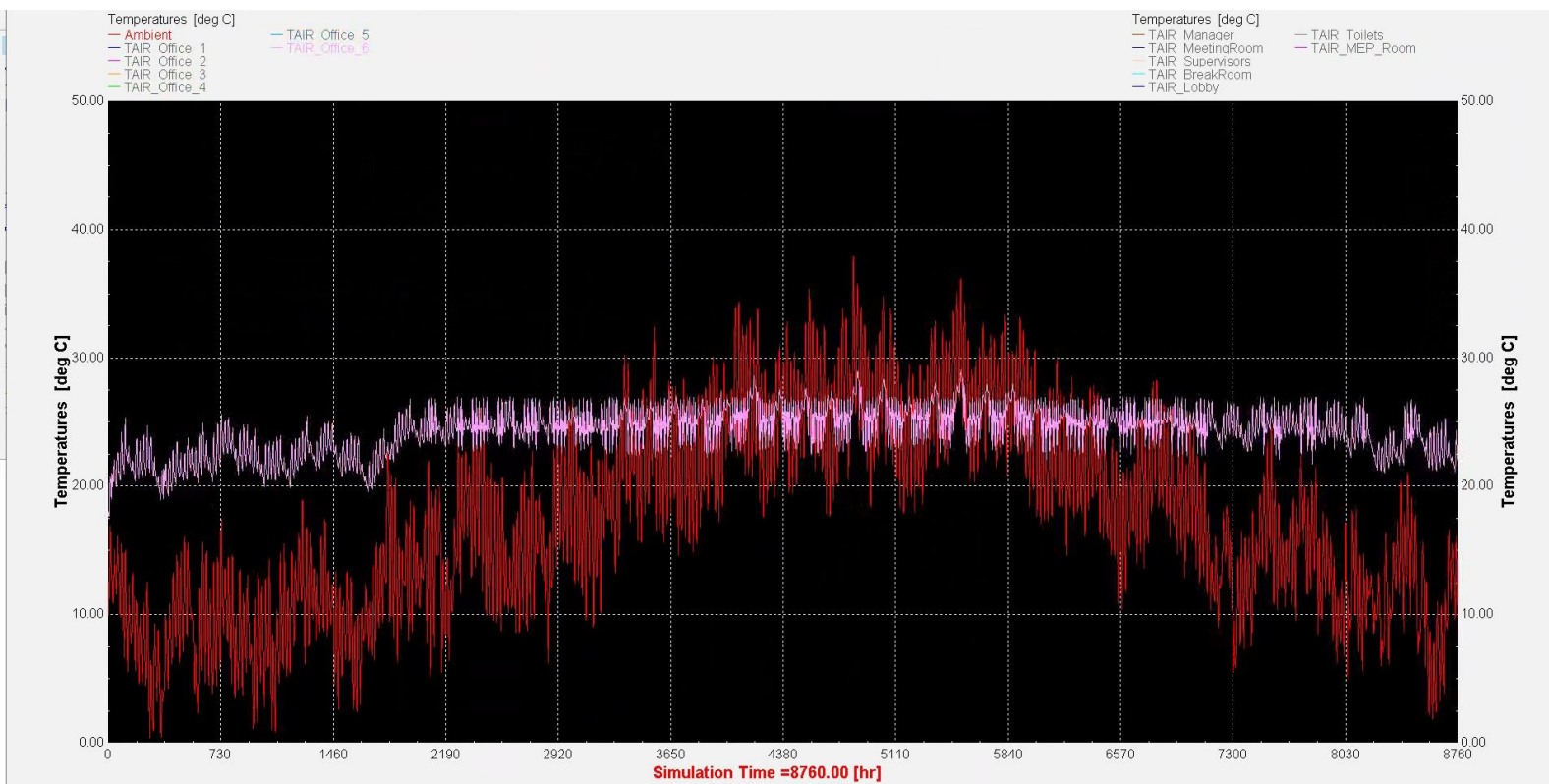
Διάγραμμα 9.4: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 3 με του εξωτερικού αέρα



Διάγραμμα 9.5: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 4 με του εξωτερικού αέρα



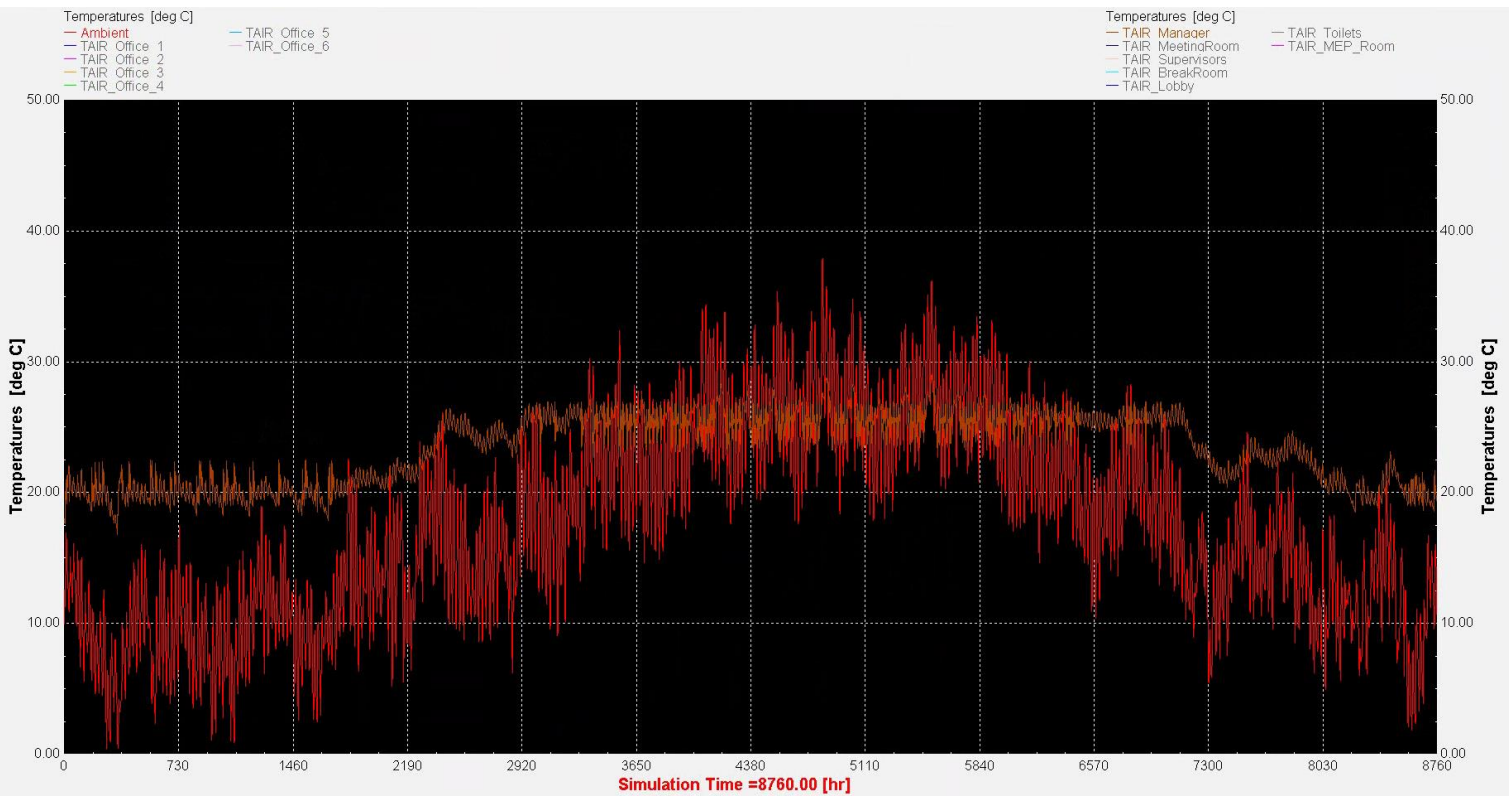
Διάγραμμα 9.6: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 5 με του εξωτερικού αέρα



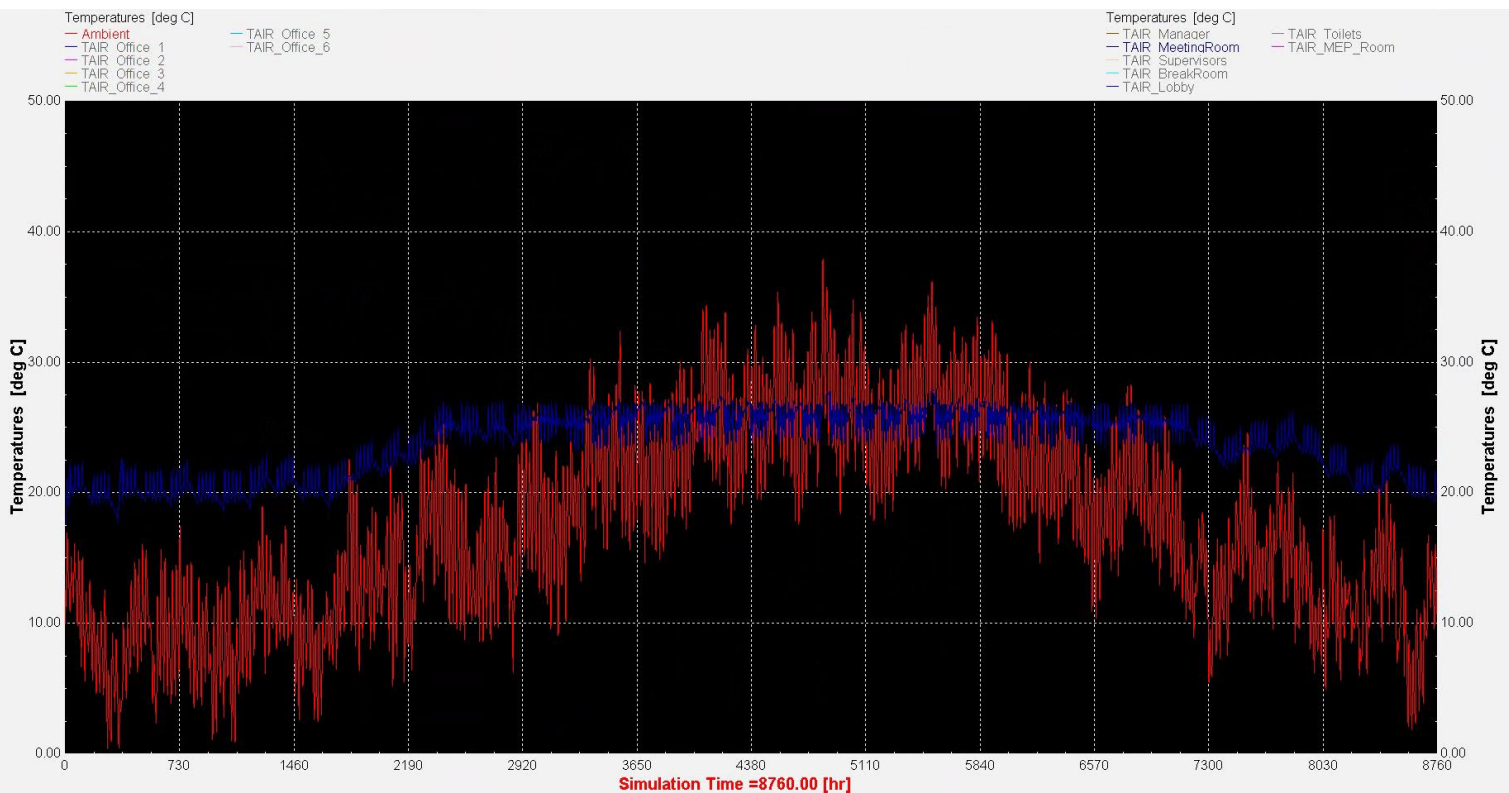
Διάγραμμα 9.7: Σύγκριση θερμοκρασιών του χώρου Office 6 με του εξωτερικού αέρα

Τα παραπάνω διαγράμματα καταδεικνύουν τη δυνατότητα του συστήματος να διατηρεί τη θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα στους χώρους των γραφείων όλο το χρόνο. Επιπλέον γίνεται σαφές από τα διαγράμματα 8.2 - 8.7 ότι σε αυτούς τους χώρους τα κυρίαρχα φορτία είναι τα ψυκτικά τα οποία εμφανίζονται το μεγαλύτερο διάστημα του χρόνου. Παρότι δηλαδή σε κάποιες περιπτώσεις (Office 1 και Office 3) τα μέγιστα θερμαντικά φορτία είναι σχεδόν ίσα με τα μέγιστα ψυκτικά, τα πρώτα εμφανίζονται πολύ λίγες ώρες το χρόνο και δεν «ζορίζουν» το σύστημα τόσο. Τα βασικά συμπεράσματα για τους χώρους γραφείων συνοψίζονται στα εξής:

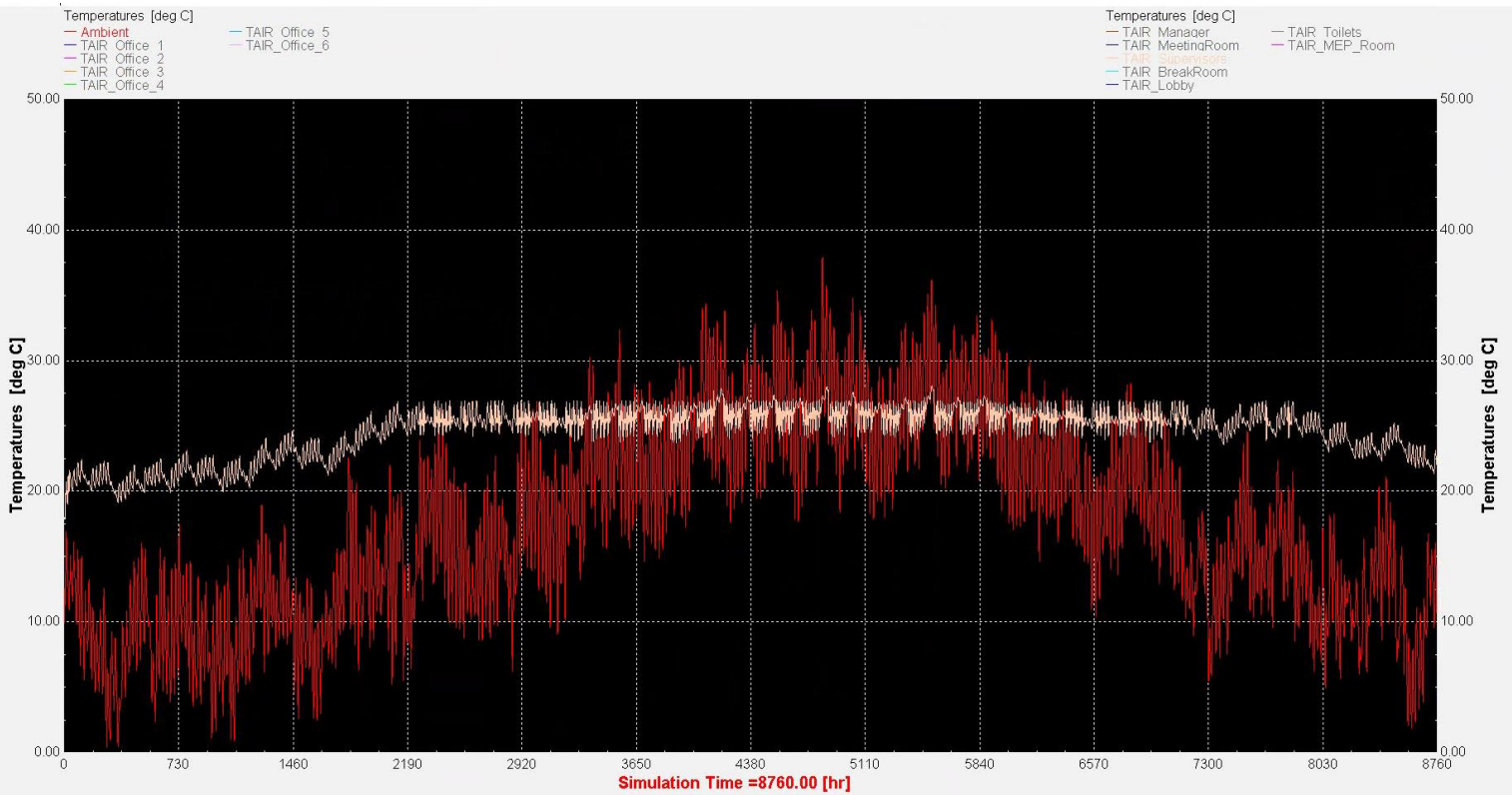
- Η επιθυμητές θερμοκρασίες επιτυγχάνονται όλο το χρόνο με μικρές μόνο αποκλίσεις κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες. Η θερμοκρασία τις κατελημμένες ώρες ξεπερνάει τους 27°C ελάχιστες φορές και όποτε συμβαίνει αυτό την επόμενη ώρα έχει επανέλθει στα επιθυμητά επίπεδα.
- Σε κάθε διάγραμμα είναι εμφανής η διαφορά ανάμεσα στις καθημερινές και τα Σαββατοκύριακα (ειδικά τη θερινή περίοδο) στα οποία το κτήριο είναι κενό και η απουσία εσωτερικών φορτίων δεν προκαλεί τόσο έντονη μεταβολή θερμοκρασίας. Παρότι κάποιος θα περίμενε να αυξάνεται η θερμοκρασία καθώς το Setpoint είναι στους 30 °C, η καλή κατασκευή του κελύφους (όρια διαπερατότητας αρκετά κάτω από τα όρια της νομοθεσίας) και η ύπαρξη σκίασης περιορίζουν αισθητά την συναλλαγή θερμότητας του κτηρίου με το περιβάλλον.
- Στους χώρους Office 5 και Office 6 κατά τους καλοκαιρινούς μήνες εμφανίζονται κάποιες πιο έντονες κορυφές στα διαγράμματά τους σε σχέση με τους υπόλοιπους χώρους. Αυτές οι κορυφές εμφανίζονται τα Σαββατοκύριακα (το Setpoint είναι στους 30 °C) και οφείλονται στο ότι αυτοί οι δυο χώροι έχουν ανοίγματα σε δυο μεριές τους. Οι υπόλοιποι τέσσερις χώροι είτε δεν έχουν καθόλου ανοίγματα (Office 1 και Office 3) είτε διαθέτουν ένα μόνο άνοιγμα (Office 2 και Office 4). Η ύπαρξη υαλοπινάκων σε δυο μεριές αυξάνει την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται σε αυτούς τους χώρους και για αυτό η θερμοκρασία τους αυξάνεται περισσότερο από αυτή των υπόλοιπων χώρων. Για τον ίδιο λόγο η μεταβολή της θερμοκρασίας των χώρων Office 2 και Office 4 είναι πιο έντονη από αυτή των χώρων Office 1 και Office 3.



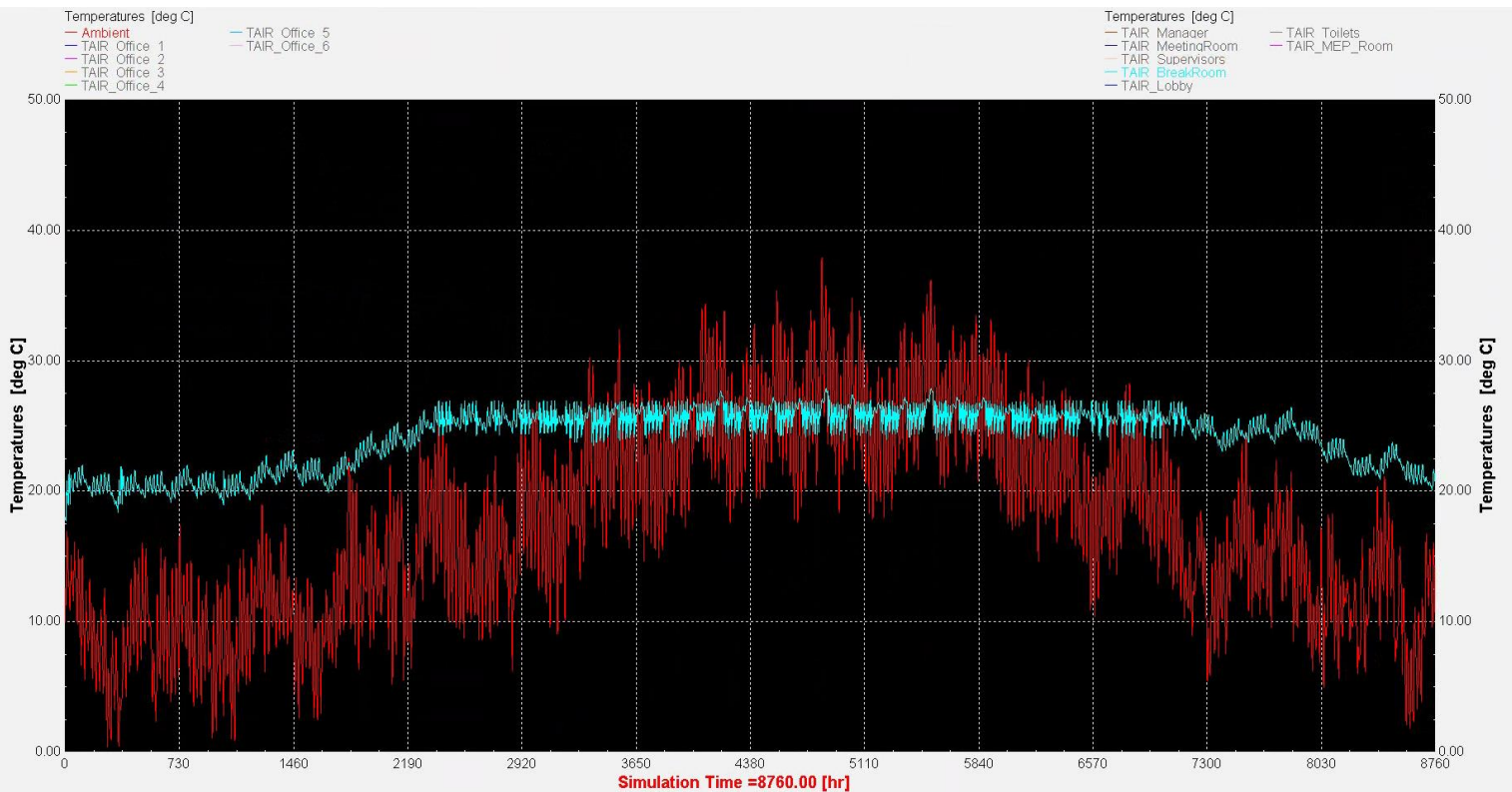
Διάγραμμα 9.8: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Manager με του εξωτερικού αέρα



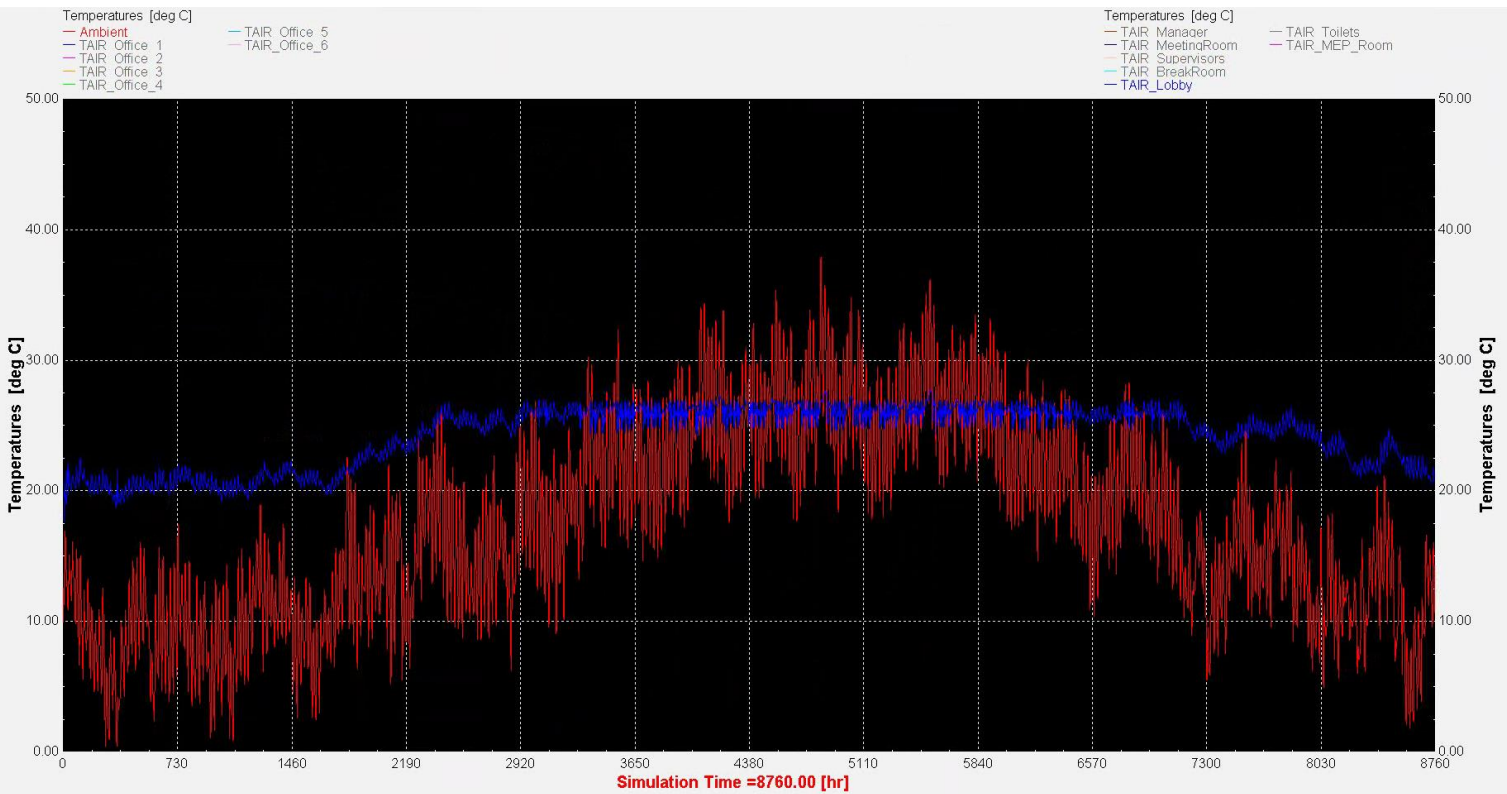
Διάγραμμα 9.9: Σύγκριση θερμοκρασιών του χώρου Meeting Room με του εξωτερικού αέρα



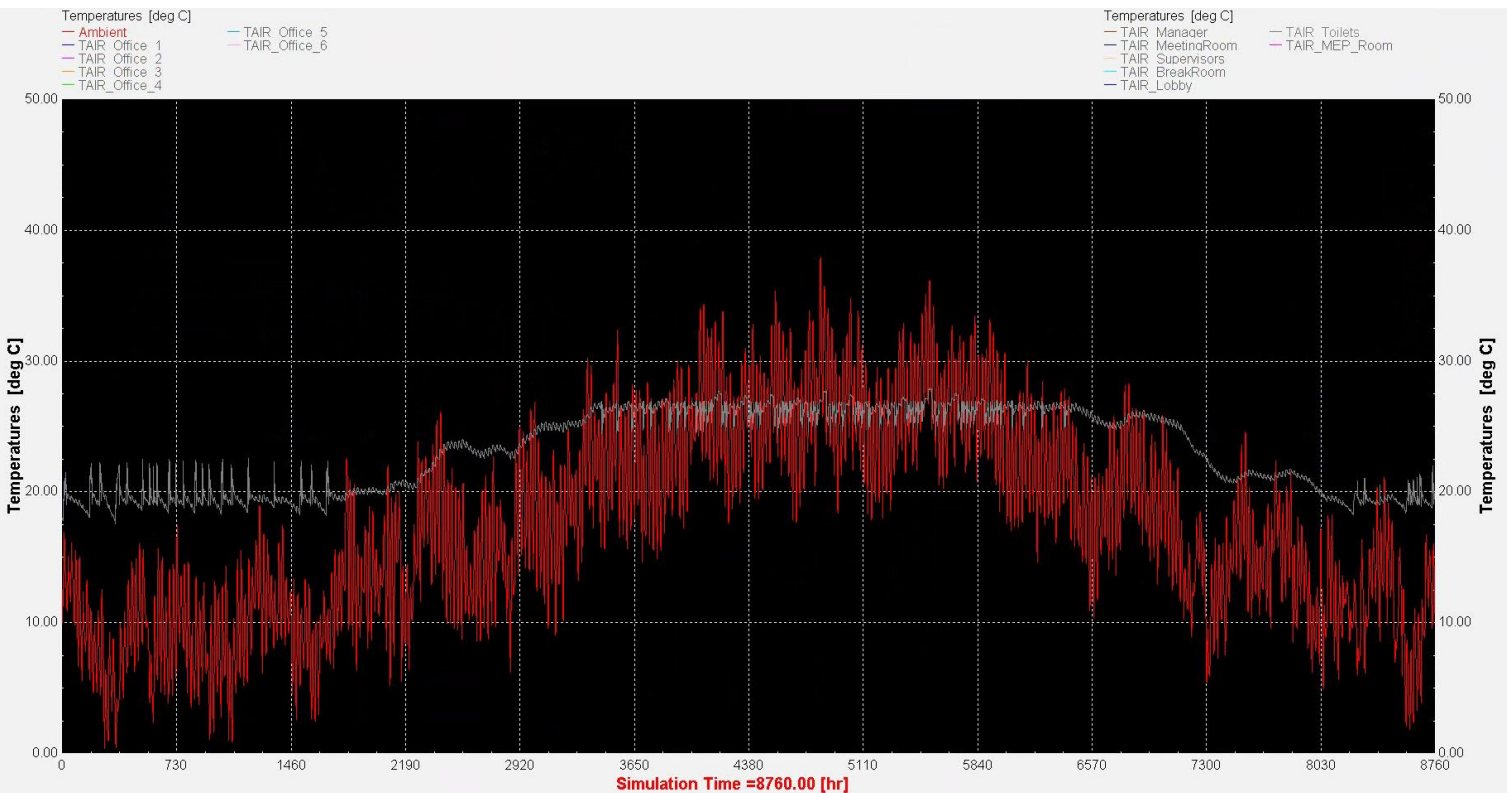
Διάγραμμα 9.10: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Supervisors με του εξωτερικού αέρα



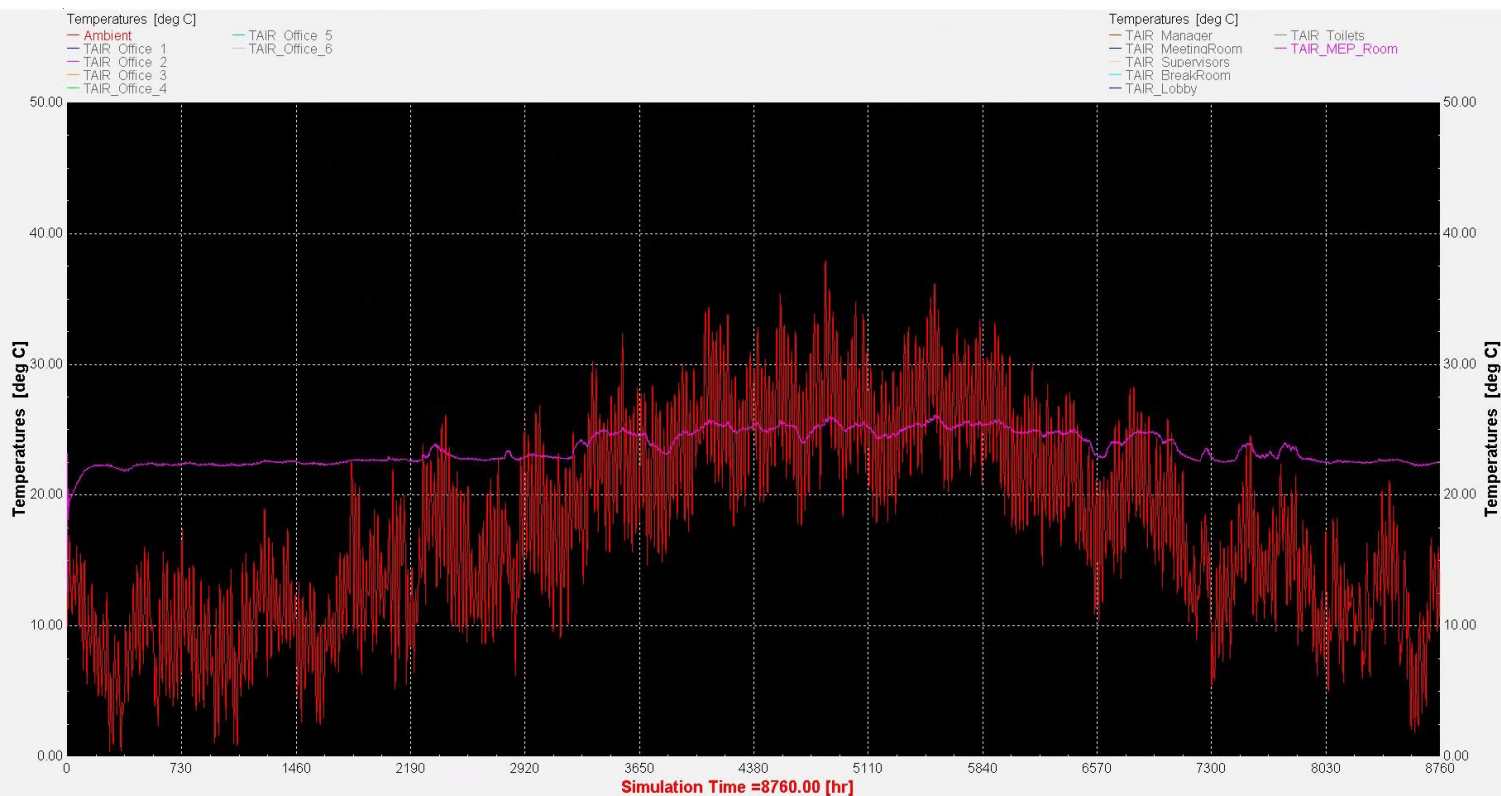
Διάγραμμα 9.11: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Break Room με του εξωτερικού αέρα



Διάγραμμα 9.12: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Lobby με του εξωτερικού αέρα



Διάγραμμα 9.13: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Toilets και του εξωτερικού αέρα



Διάγραμμα 9.14: Σύγκριση θερμοκρασίας του Η/Μ χώρου και του εξωτερικού αέρα

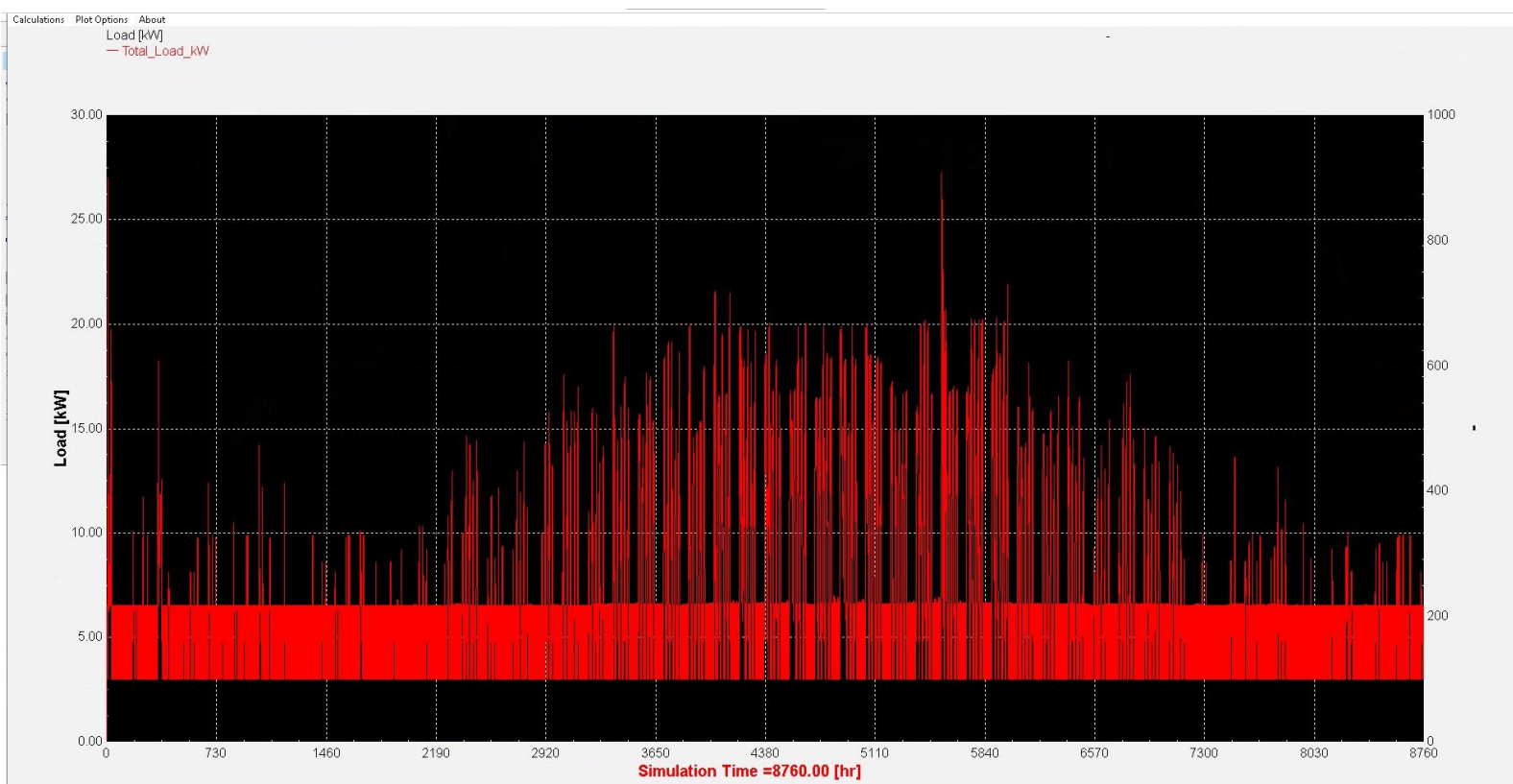
Όπως και στις περιπτώσεις των χώρων γραφείου, το σύστημα μπορεί να ανταποκριθεί επαρκώς στις απαιτήσεις και των υπόλοιπων χώρων όπως φαίνεται στα διαγράμματα 8.8 – 8.14. Τα βασικά συμπεράσματα συνοψίζονται στα εξής:

- Ο χώρος Manager μοιάζει στη συμπεριφορά του με τους χώρους Office 5 και Office 6 το οποίο δικαιολογείται από την ύπαρξη παραθύρων σε δύο μεριές. Οι μεταβολές της θερμοκρασίας είναι πιο έντονες σε σχέση με τους υπόλοιπους χώρους για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως
- Στις τουαλέτες του κτηρίου η θερμοκρασία πέφτει κάτω από τους 20 °C αρκετές φορές κατά τους χειμερινούς μήνες ωστόσο η απόκλιση δεν είναι μεγάλη για να προκαλεί πρόβλημα και να επιβάλλει την αύξηση της θερμαντικής ισχύος και κατ'επέκταση της κατανάλωσης ενέργειας.
- Ο Η/Μ χώρος διατηρεί τους χειμερινούς μήνες την επιθυμητή θερμοκρασία των 22 °C σε αντίθεση με τους καλοκαιρινούς όπου παρατηρείται εντονότερη μεταβολή όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8.14. Η θερμοκρασία του χώρου ωστόσο δεν ξεπερνάει ποτέ τους 26 °C και για αυτό δεν κρίνεται αναγκαία η αύξηση της ψυκτικής ισχύος του συστήματος που εξυπηρετεί το συγκεκριμένο χώρο. Γενικά τα ηλεκτρικά συστήματα αντιμετωπίζουν προβλήματα όταν η θερμοκρασία αρχίσει να ξεπερνά τους 35 – 40 °C, με τους 22 °C να αποτελούν μια καλή θερμοκρασία για την εύρυθμη λειτουργία τους. Ωστόσο και στους 26 °C η λειτουργία των μηχανημάτων εντός του χώρου δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα και καθώς αυτή η θερμοκρασία είναι σχεδόν 10 °C από τη θερμοκρασία που αρχίζουν

τα προβλήματα, δεν κρίνεται σκόπιμο να αυξηθεί η ψυκτική ισχύς στο χώρο και κατ'έπекταση η κατανάλωση ενέργειας.

9.1.2: Κατανάλωση και αποθήκευση ενέργειας

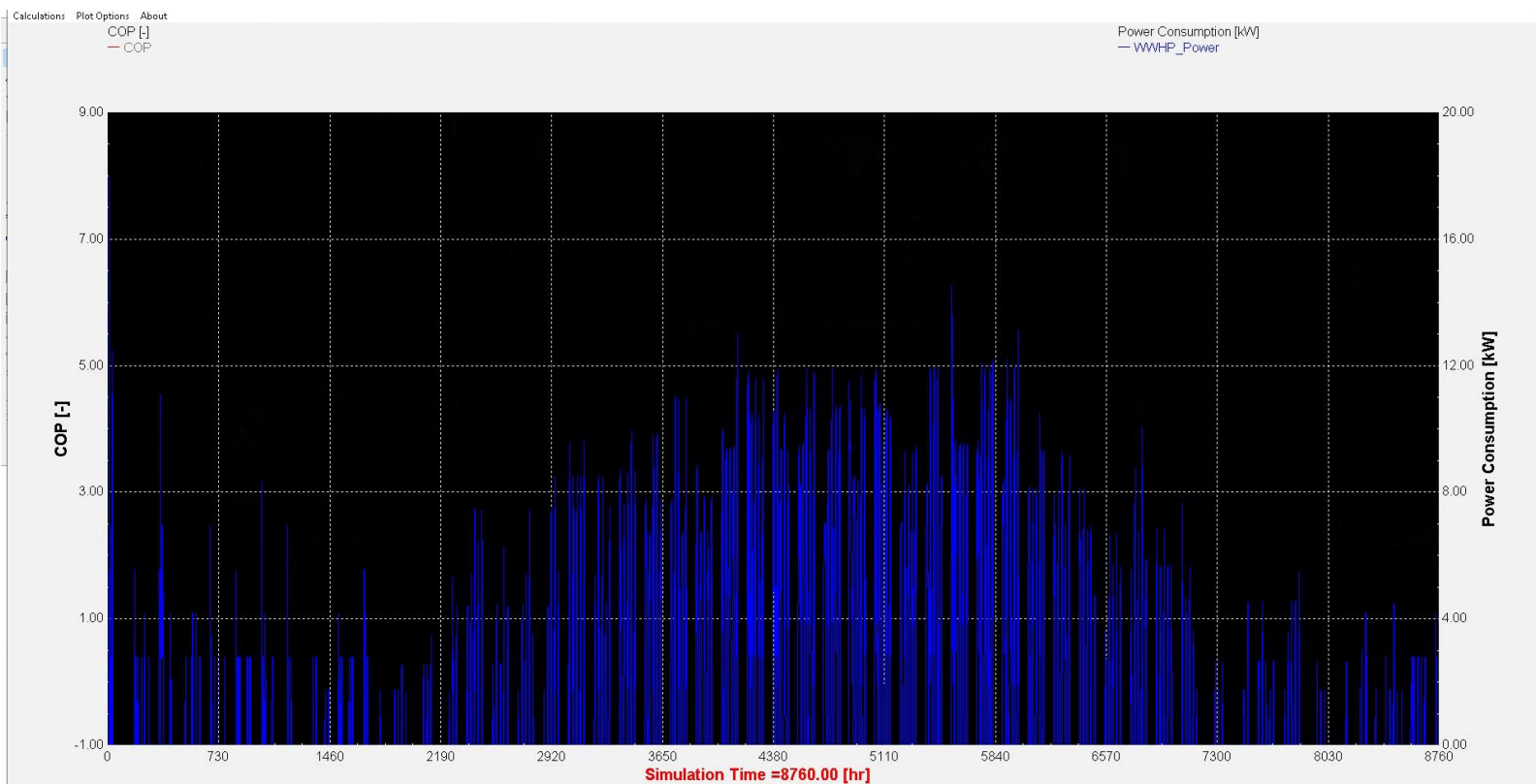
Η κατανάλωση ενέργειας του συστήματος είναι ένα από τα πιο σημαντικά μεγέθη που μπορούν να εξαχθούν από τις προσομοιώσεις του TRNSYS. Ο υπολογισμός της ενεργειακής κατανάλωσης (σε αυτή την περίπτωση ταυτίζεται με την ηλεκτρική κατανάλωση μιας και δεν υπάρχει κάποια άλλη πηγή ενέργειας όπως πχ ορυκτά καύσιμα) πραγματοποιείται ολοκληρώνοντας την καταναλισκόμενη ισχύ ως προς το χρόνο. Η συνολική ισχύς κάθε στιγμή είναι και αυτή ένα σημαντικό μέγεθος αφού δείχνει πότε το σύστημα λειτουργεί με υψηλά φορτία. Στο Διάγραμμα 9.15 παρουσιάζεται η συνολική ισχύς που καταναλώνεται από τα συστήματα θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου.



Διάγραμμα 9.15: Συνολική καταναλισκόμενη ισχύς (σε kW) στη διάρκεια του χρόνου

Από το Διάγραμμα 9.15 επικυρώνεται εκ νέου η παρατήρηση πως τα ψυκτικά φορτία είναι τα κυρίαρχα. Η μορφή του διαγράμματος οφείλεται στο γεγονός πως η ΑΘ αέρα του Η/Μ χώρου είναι σχεδόν συνεχώς σε λειτουργία εξ ου και υπάρχει αυτή η συνεχής μορφή στο κάτω μέρος του διαγράμματος, ειδικά τους πιο ήπιους μήνες όπου η περιορισμένη λειτουργία των Fan Coil συνεπάγεται και μικρή χρήση της ΑΘ νερού-νερού και των κυκλοφορητών. Στο Διάγραμμα 9.16 παρουσιάζεται η κατανάλωση ενέργειας της ΑΘ νερού-νερού στην οποία οφείλονται κατά κύριο λόγο οι κορυφές του Διαγράμματος 9.15 εξαιτίας της μεγάλης ονομαστικής ισχύος της. Η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς

του Διαγράμματος 9.16 συνδέεται με την θερμική ισχύ της ΑΘ νερού-νερού μέσω του συντελεστή λειτουργίας (COP) της ο οποίος παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 9.17.



Διάγραμμα 9.16: Καταναλισκόμενη ισχύς (σε kW) της ΑΘ νερού-νερού

Στο Διάγραμμα 9.16 είναι εμφανή δύο κύρια στοιχεία:

1. Τα ψυκτικά φορτία κυριαρχούν και είναι σημαντικά για μεγάλο μέρος του χρόνου, χωρίς να περιορίζονται μόνο στους τρεις καλοκαιρινούς μήνες. Από την άλλη, τα θερμικά φορτία είναι πιο περιορισμένα και εντοπίζονται κυρίως στην αρχή και το τέλος του χρόνου. Η συγκεκριμένη παρατήρηση προκύπτει συνδυάζοντας το Διάγραμμα 9.16 με τα διαγράμματα θερμοκρασίας των χώρων, καταδεικνύοντας έτσι τη συσχέτιση των δύο
2. Η ΑΘ νερού-νερού δεν λειτουργεί συνεχώς, αλλά υπάρχουν αρκετές περιόδους στη διάρκεια του χρόνου όπου είναι ανενεργή. Ειδικότερα, τους πιο ήπιους μήνες, όπως πχ είναι ο Απρίλιος και ο Οκτώβριος η ΑΘ παραμένει ανενεργή για σημαντικές χρονικές περιόδους. Αυτό οφείλεται στην καλή κατασκευή του κελύφους και των υαλοπινάκων, στοιχεία που βοηθούν σημαντικά στη διατήρηση των επιθυμητών συνθηκών στους χώρους του κτηρίου. Επιπλέον, η επιλογή αύξησης των θερμοκρασιακών Setpoints σε συνδυασμό με την κατασκευή του κελύφους, δημιουργούν τα «κενά» λειτουργίας της ΑΘ τους καλοκαιρινούς μήνες, βοηθώντας σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας. Φαίνεται χωρίς αμφιβολία συνεπώς η αξία της επένδυσης στο κέλυφος του κτηρίου ακόμα και από τον πρώτο χρόνο, με την εξοικονόμηση ενέργειας και άρα χρημάτων να είναι σημαντικότερη στη διάρκεια ζωής του κτηρίου



Διάγραμμα 9.17: COP ΑΘ νερού-νερού

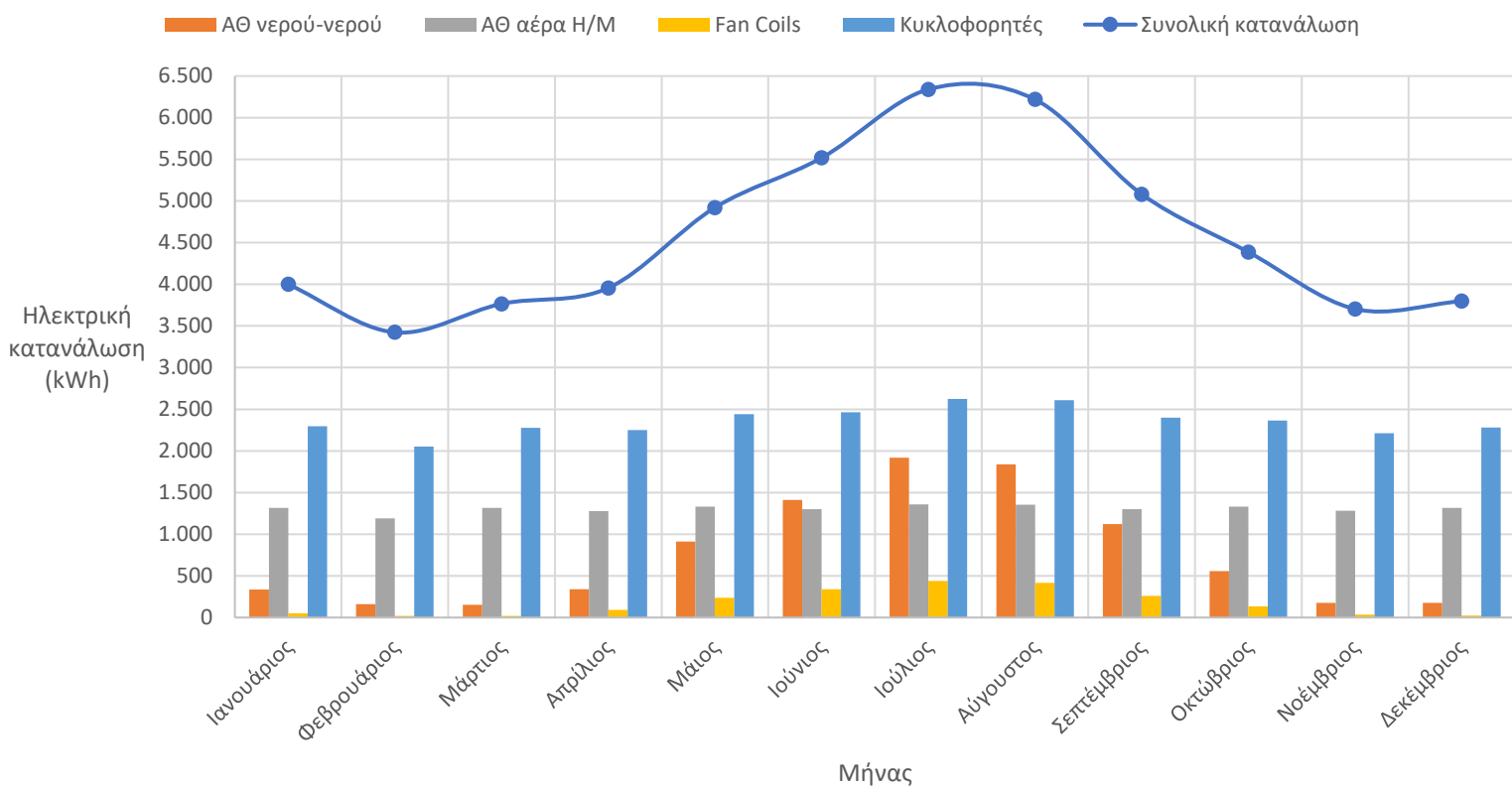
Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως ο COP δεν εκφράζει βαθμό απόδοσης αλλά το πόση θερμική ενέργεια «μεταφέρεται» καταναλώνοντας 1 μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Για αυτόν τον λόγο μπορεί ο COP να πάρει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας. Αντίστοιχα, ο COP της ΑΘ αέρα του Η/Μ χώρου κυμαίνεται γύρω στο 4,5 αλλά επειδή λειτουργεί συνέχεια και μόνο σε ψύξη μεταβάλλεται ελάχιστα και για αυτό δεν κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί.

Όπως έχει αναφερθεί, η κατανάλωση των συστημάτων θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου οφείλεται στα ακόλουθα:

- ΑΘ νερού-νερού
- ΑΘ αέρα του Η/Μ χώρου
- Fan Coils
- Κυκλοφορητές νερού

Η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση των συστημάτων του κτηρίου ανέρχεται σε 55.114 kWh, δηλαδή 63,8 kWh/m². Στο Διάγραμμα 9.18 αποτυπώνεται η ανά μήνα ενεργειακή κατανάλωση χωρισμένη στις τέσσερις παραπάνω κατηγορίες. Από το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι εμφανής η επίπτωση των υψηλών και για μεγάλη διάρκεια ψυκτικών φορτίων τους καλοκαιρινούς μήνες με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας τη συγκεκριμένη περίοδο.

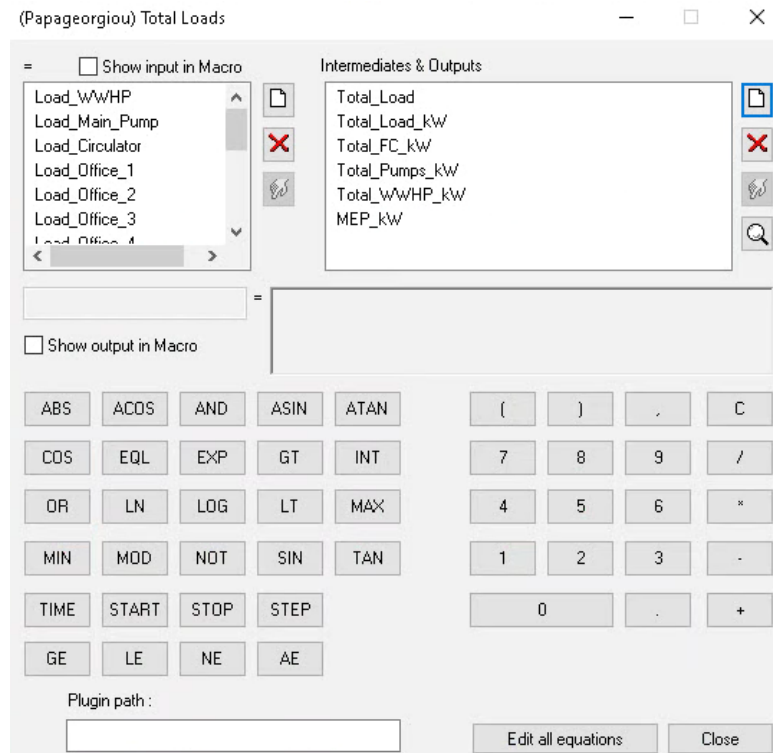
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα και πηγή



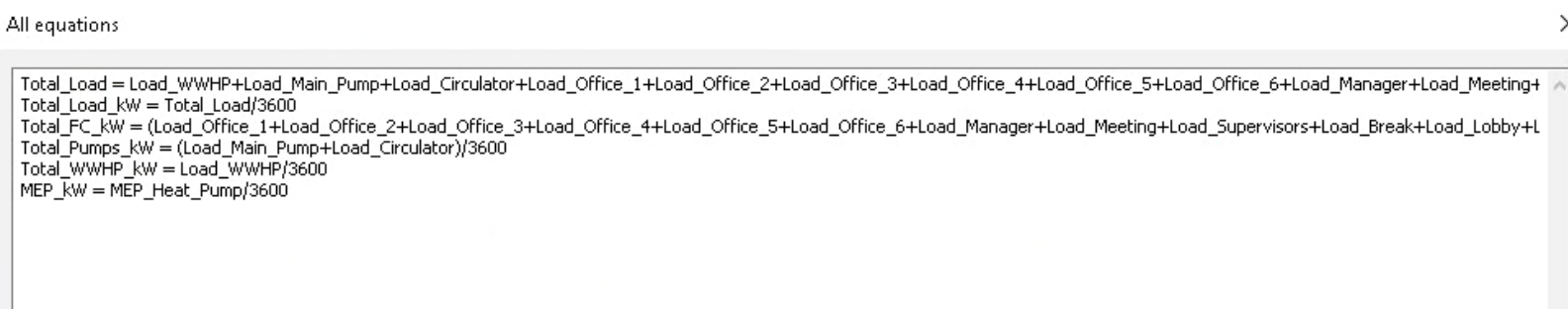
Διάγραμμα 9.18: Μηνιαία διακύμανση της ηλεκτρικής κατανάλωσης ανά πηγή

Για την εύρεση των τιμών του Διαγράμματος 9.18 στο μπλοκ εξισώσεων Total Loads προστέθηκαν και μεταβλητές για τις τιμές των καταναλώσεων των τεσσάρων κατηγοριών του παραπάνω διαγράμματος, όπως φαίνεται στις Εικόνες 9.1 και 9.2. Οι τιμές των καταναλώσεων (μετατρέπονται από kJ/hr σε kW, εξ ‘ου και η διαίρεση με 3.600 που φαίνεται στην Εικόνα 9.2) ενώνονται με έναν Printegrator²¹ ο οποίος ολοκληρώνοντας την ισχύ υπολογίζει την ηλεκτρική κατανάλωση την οποία καταγράφει σε ένα εξωτερικό αρχείο. Το συγκεκριμένο στοιχείο του TRNSYS μπορεί να καταγράφει το ζητούμενο μέγεθος (την ενεργειακή κατανάλωση σε αυτή την περίπτωση) σε χρονικό βήμα το οποίο καθορίζεται από το χρήστη. Προκειμένου τα αποτελέσματα στο εξωτερικό αρχείο να είναι ανά μήνα, η αντίστοιχη παράμετρος (Printing & integrating interval) ορίζεται ίση με -1 όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.3 Η επεξεργασία των τιμών που καταγράφονται στο εξωτερικό αρχείο έγινε στο Excel.

²¹ Το στοιχείο που χρησιμοποιείται είναι το Type 46a το οποίο βρίσκεται ως εξής: Output → Printegrator → Unformatted → User-Defined Period → Type 46a



Εικόνα 9.1: Ορισμός των μεταβλητών εξόδου στο μπλοκ εξισώσεων Total Loads



Εικόνα 9.2: Ορισμός εξισώσεων για τον υπολογισμό των καταναλώσεων (σε kW)

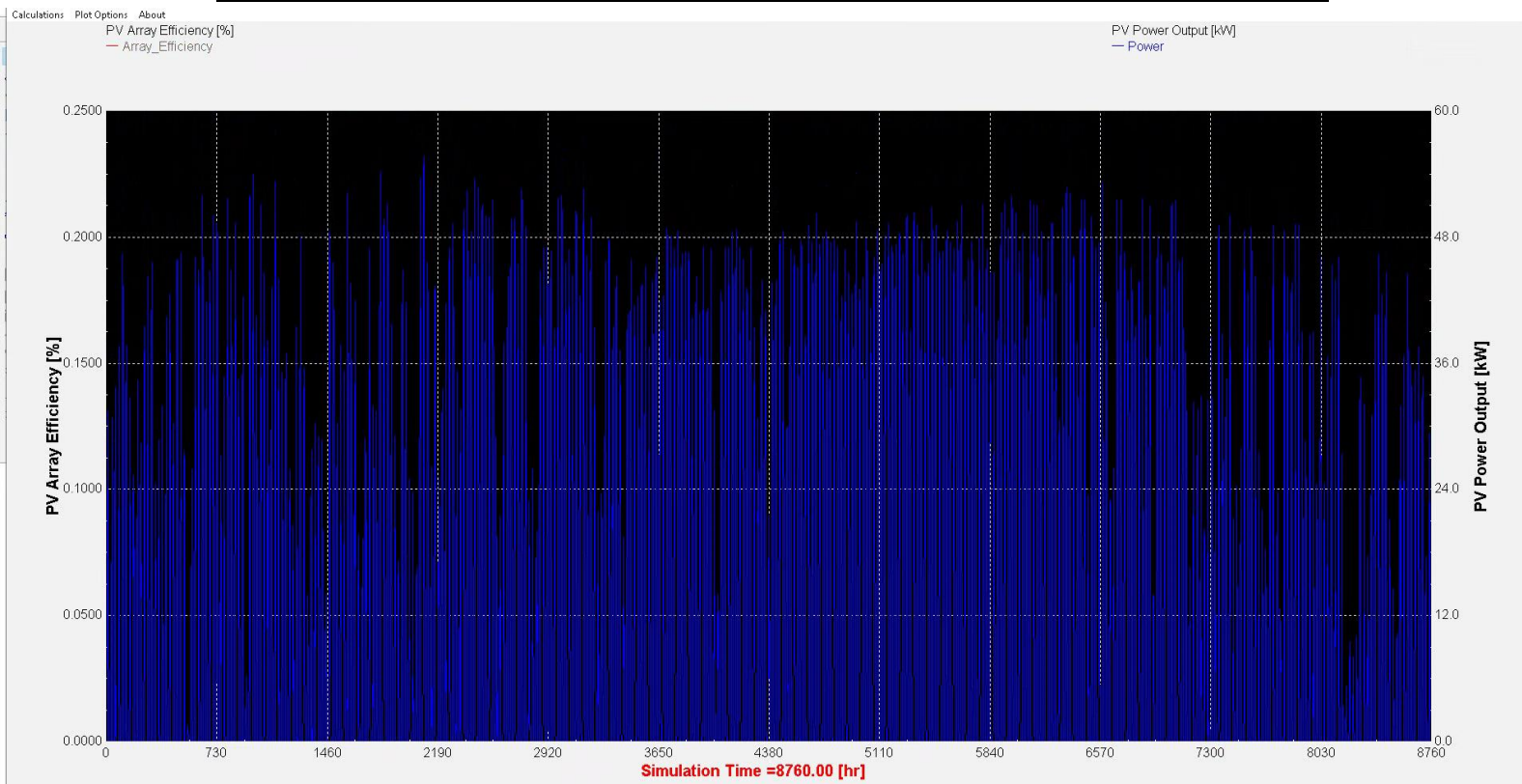
(Papageorgiou) Type46a

Parameter Input Special Cards External Files Comment

		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Logical unit	238	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2		Logical unit for monthly summaries	-1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3		Relative or absolute start time	0	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4		Printing & integrating interval	-1	hr	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5		Number of inputs to avoid integration	0	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

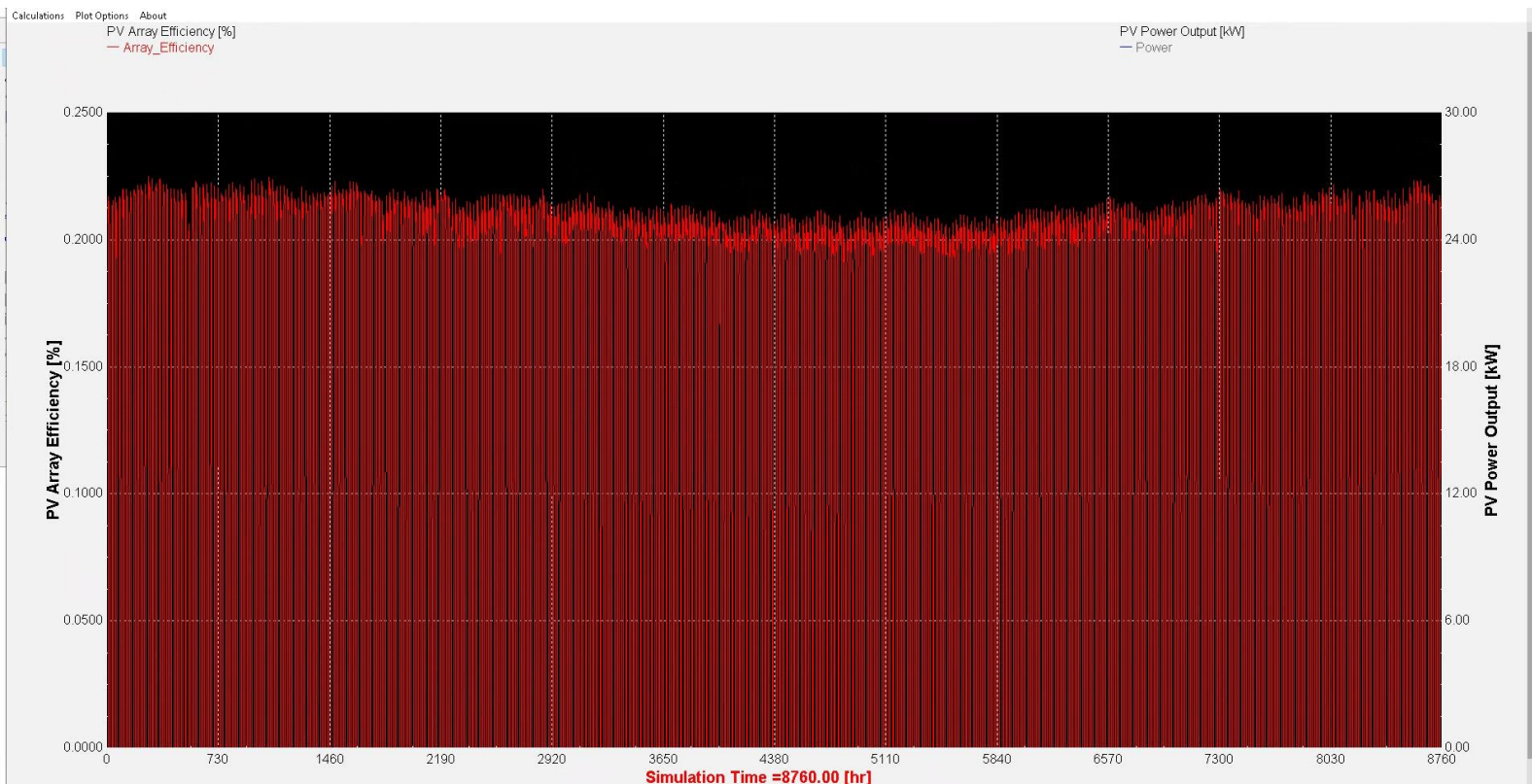
Εικόνα 9.3: Καρτέλα παραμέτρων του Type 46a (Printegrator)

Η παραγωγή της ενέργειας για τη λειτουργία των παραπάνω συστημάτων γίνεται μέσω των Φ/Β που είναι τοποθετημένα στην οροφή του κτηρίου. Για την εύρυθμη λειτουργία της όλης διάταξης είναι αναγκαία η τοποθέτηση 140 πάνελ, συνολικής ονομαστικής ισχύος 56 kW (υπενθυμίζεται ότι η ονομαστική ισχύς ενός πάνελ είναι 400 Watt) που καλύπτουν επιφάνεια περίπου 280 m² στην οροφή του κτηρίου. Στα Διαγράμματα 9.19 και 9.20 παρουσιάζονται η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς από τα Φ/Β και ο βαθμός απόδοσής τους αντίστοιχα.



Διάγραμμα 9.19: Παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β

Η ονομαστική ισχύς των Φ/Β επιτυγχάνεται σε συγκεκριμένες συνθήκες και επομένως είναι λογικό να μην είναι επιτεύξιμη συνέχεια. Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 9.19 λίγες ώρες του χρόνου η παραγόμενη ισχύς ξεπερνά τα 55 kW και μάλιστα ποτέ τους καλοκαιρινούς μήνες. Αυτό φυσικά οφείλεται στο γεγονός πως η απόδοση των Φ/Β αυξάνεται ελαφρώς όταν η θερμοκρασία είναι μικρότερη και για αυτό οι μεγαλύτερες κορυφές παρατηρούνται στους πιο κρύους και ήπιους μήνες. Από την άλλη βέβαια, τους καλοκαιρινούς μήνες σπάνια υπάρχουν μέρες με περιορισμένη ηλιοφάνεια και για αυτό η παραγωγή ενέργειας πιο σταθερή.



Διάγραμμα 9.20: Βαθμός απόδοσης συστοιχίας Φ/Β στη διάρκεια του έτους

Στο Διάγραμμα 9.20 είναι αρχικά εμφανής η υψηλή απόδοση των Φ/Β όλο το χρόνο, με τον μέγιστο παρατηρούμενο βαθμό απόδοσης να φτάνει το 22,5%, τιμή που θεωρείται εξαιρετική. Επιπλέον, στο παραπάνω διάγραμμα είναι εμφανής και η συμπεριφορά των Φ/Β συναρτήσει της θερμοκρασίας, με την απόδοση να μειώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Για αυτό και τους καλοκαιρινούς μήνες η απόδοση των Φ/Β είναι κατά μέσο όρο χαμηλότερη σε σχέση με τον υπόλοιπο χρόνο.

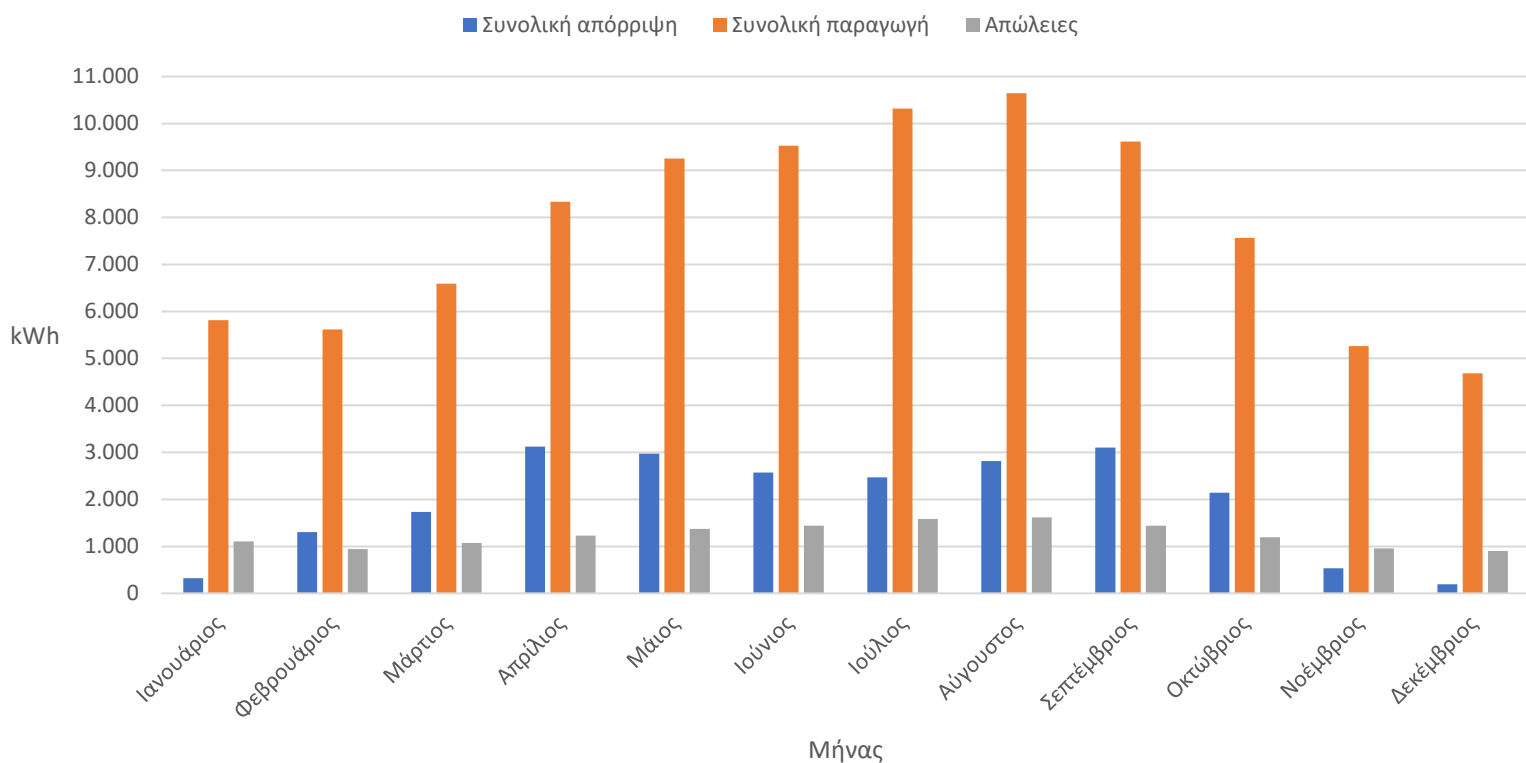
Η παραγόμενη ενέργεια από τα Φ/Β προτού καταναλωθεί ή αποθηκευτεί περνάει από τον Inverter. Μέσω του Inverter το συνεχές ρεύμα που παράγεται από τα Φ/Β μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις διάφορες διατάξεις. Η μέγιστη ισχύς των συστημάτων του κτηρίου ανέρχεται περίπου στα 27 kW, από τα οποία τα 14,5 kW αντιστοιχούν στη μέγιστη ισχύ της ΑΘ νερού-νερού.

Ο Inverter του συστήματος θα πρέπει να έχει ισχύ που να μπορεί να υπερκαλύψει το μέγιστο φορτίο και παράλληλα η ισχύς του να είναι τέτοια ώστε να μπορεί να αντιμετωπίσει την αυξημένη ζήτηση ισχύος των μηχανημάτων κατά την εκκίνηση τους. Κατά την εκκίνηση ενός ηλεκτροκινητήρα το ρεύμα που τραβάει μπορεί να είναι μέχρι και διπλάσιο της ονομαστικής του τιμής, άρα και η καταναλισκόμενη ισχύς του σχεδόν διπλάσια της ονομαστικής. Οι πιο καινούργιες διατάξεις έχουν ηλεκτρονικά συστήματα ομαλής εκκίνησης τα οποία μετριάζουν αυτό το φαινόμενο και έτσι δεν χρειάζεται ο Inverter να έχει ισχύ πολύ μεγαλύτερη της μέγιστης κατανάλωσης. Φυσικά ο Inverter πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί και τη μέγιστη ισχύ των Φ/Β η οποία ανέρχεται σε 56

kW. Αφήνοντας ένα μικρό περιθώριο έξτρα ασφάλειας, η ισχύς του Inverter επιλέχθηκε να είναι 60 kW.

Ένα σημαντικό στοιχείο ενδιαφέροντος για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση είναι το ποσό της παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β το οποίο δεν μπορεί να αποθηκευτεί επειδή η μπαταρία είναι φορτισμένη 100% όπως και οι απώλειες του ηλεκτρικού συστήματος (μπαταρίας και Inverter πρακτικά). Επειδή φυσικά η ενέργεια αν παραχθεί πρέπει είτε να χρησιμοποιηθεί είτε να αποθηκευτεί, η μη απορροφούμενη ενέργεια αντιπροσωπεύει πρακτικά την ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί από τα Φ/Β αλλά δεν παράγεται ώστε να μην χαλάσει η ενεργειακή ισορροπία του συστήματος (Ένα μέρος των Φ/Β θα τεθεί εκτός συστήματος πρακτικά). Για να υπολογιστούν τα παραπάνω ορίζεται ένας νέος Printegrator (Type 46a πάλι) στον οποίο ενώνονται η παραγόμενη ενέργεια από τα Φ/Β, η έξοδος «Απορριπτόμενη Ισχύς» (“Dumped Power”) του Inverter και οι έξοδοι απωλειών τόσο από την μπαταρία όσο και από τον Inverter. Όπως και πριν η ολοκλήρωση για να βρεθεί η ενέργεια γίνεται σε μηνιαία βάση και τα αποτελέσματα φαίνονται στο Διάγραμμα 9.21.

Παραγόμενη και μη απορροφούμενη ενέργεια από το ηλεκτρικό σύστημα



Διάγραμμα 9.21: Παραγόμενη και μη απορροφούμενη ενέργεια από το ηλεκτρικό σύστημα (Φ/Β-Inverter-μπαταρία) του κτηρίου

Τους χειμερινούς μήνες η παραγωγή ενέργειας είναι μικρότερη εξαιτίας των αντίξοων καιρικών συνθηκών που συναντώνται οι οποίες μειώνουν ή και σε ορισμένες περιπτώσεις καθιστούν αδύνατη την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα Φ/Β. Για αυτό το λόγο η απορριπτόμενη ενέργεια είναι πολύ λίγη αυτούς τους μήνες όπως φαίνεται

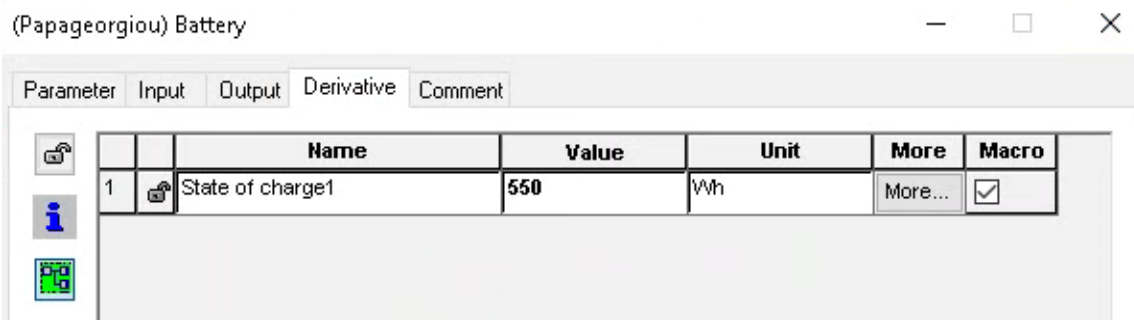
και στο Διάγραμμα 9.21. Μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα παρατήρηση έχει να κάνει με την απόρριψη ενέργειας τους θεωρητικά πιο ήπιους μήνες, όπως ο Απρίλιος και ο Σεπτέμβριος. Αυτούς τους μήνες οι καιρικές συνθήκες είναι ως επι το πλείστων ευνοϊκές για παραγωγή ενέργειας και παράλληλα δεν υπάρχει μεγάλη ανάγκη για θέρμανση η ψύξη του κτηρίου. Έτσι εξηγείται γιατί η απόρριψη ενέργειας είναι μέγιστη αυτούς τους μήνες όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 9.21. Τη θερινή περίοδο η παραγωγή είναι μέγιστη αλλά υπάρχει και πολύ μεγάλη κατανάλωση και για αυτό η απόρριψη ενέργειας είναι πιο περιορισμένη. Στον Πίνακα 9.1 παρατίθενται τα ακριβή μεγέθη της παραγωγής και των απωλειών του συστήματος.

Πίνακας 9.1: Παραγωγή, απόρριψη και απώλειες ηλεκτρικού συστήματος

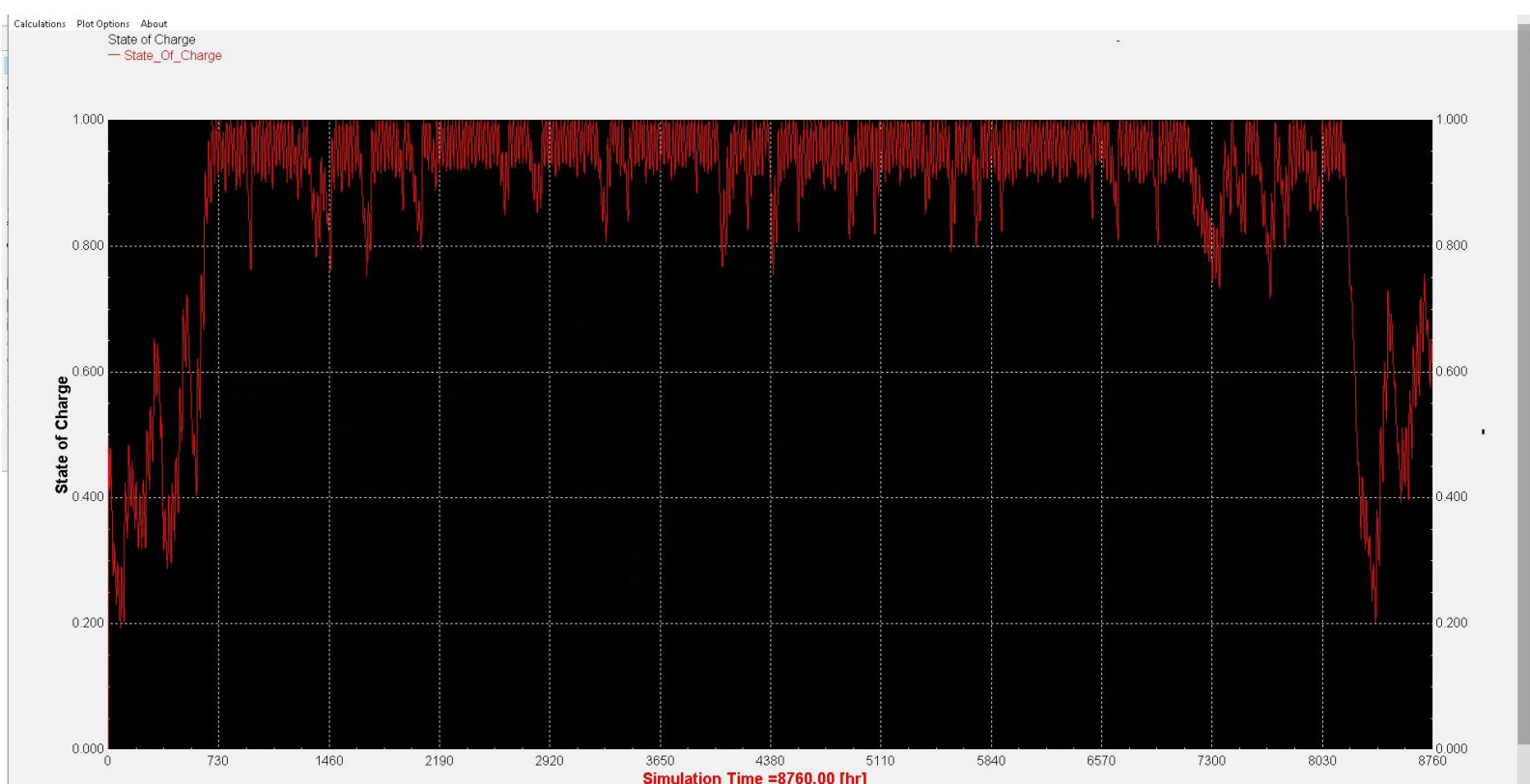
	Παραγωγή Ενέργειας	Μη απορροφούμενη ενέργεια	Απώλειες
kWh	93.227	23.279	14.853
Ποσοστό (%)	-	25 %	15,9 %

Η ενέργεια που δεν μπορεί να απορροφηθεί αποτελεί ένα αρκετά σημαντικό ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας ωστόσο είναι αναγκαία ώστε να επιτευχθεί η αυτονομία του συστήματος. Οι μπαταρίες είναι αρκετά ακριβές και έτσι αύξηση της χωρητικότητας τους ώστε να αυξηθεί η απορρόφηση ενέργειας από τα Φ/Β θα κόστιζε παραπάνω από την αγορά περισσότερων Φ/Β. Αυτή η παρατήρηση θα φανεί και στην ενότητα του οικονομικού κόστους στη συνέχεια.

Η διακύμανση του ποσοστού φόρτισης της μπαταρίας μέσα στο χρόνο παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 9.22. Να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως για την μπαταρία έχει γίνει η θεώρηση πως είναι φορτισμένη κατά 50% στην αρχή του χρόνου. Σε περίπτωση που η αρχική στάθμη ήταν στο 0% δεν θα μπορούσε να καλυφθεί η ζήτηση τον Ιανουάριο (υπάρχει μια πτώση σχεδόν 30% από την αρχική στάθμη όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα) και θα έπρεπε να αυξηθεί κατά πολύ ο αριθμός των ΦΒ προκειμένου να αντιμετωπιστεί το συγκεκριμένο ζήτημα. Κάτι τέτοιο ωστόσο είναι προφανές πως είναι ασύμφορο καθώς θα αύξανε υπέρμετρα το κόστος ενώ η μη απορροφούμενη ενέργεια λόγω 100% φόρτισης της μπαταρίας επίσης θα ανέβαινε σημαντικά. Εξάλλου το να θεωρηθεί πως η μπαταρία παραδίδεται με ένα αρχικό ποσοστό φόρτισης δεν είναι παράλογο οπότε δεν δημιουργείται κάποιο περαιτέρω θέμα. Ο ορισμός της αρχικής στάθμης του κάθε κελιού της μπαταρίας γίνεται από την καρτέλα “Derivative” του στοιχείου όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.4.



Εικόνα 9.4: Ορισμός αρχικής ενεργειακής στάθμης κάθε κελιού της μπαταρίας



Διάγραμμα 9.22: Μεταβολή ενεργειακής στάθμης της μπαταρίας

Ο επιλεγμένος αριθμός Φ/Β σε συνδυασμό με την χωρητικότητα της μπαταρίας διατηρούν την στάθμη της πάνω από το 20% το οποίο θεωρείται ένα καλό όριο ασφαλείας. Μια πολύ σημαντική παρατήρηση έχει να κάνει με την τελική στάθμη της μπαταρίας. Στην αρχή της προσομοίωσης η στάθμη της μπαταρίας ορίστηκε στο 50% και περίπου στις 80 ώρες πήρε την ελάχιστη τιμή της, στο 20% της χωρητικότητάς της. Τον Ιανουάριο δηλαδή παρατηρείται μια πτώση 30% (σε σχέση με την πλήρη χωρητικότητα) στη στάθμη της μπαταρίας. Στο τέλος του χρόνου η στάθμη της μπαταρίας είναι περίπου στο 60%. Συνεπώς, στον Ιανουάριο του δεύτερου χρόνου, όπου αναμένεται πάλι η ίδια πτώση, η

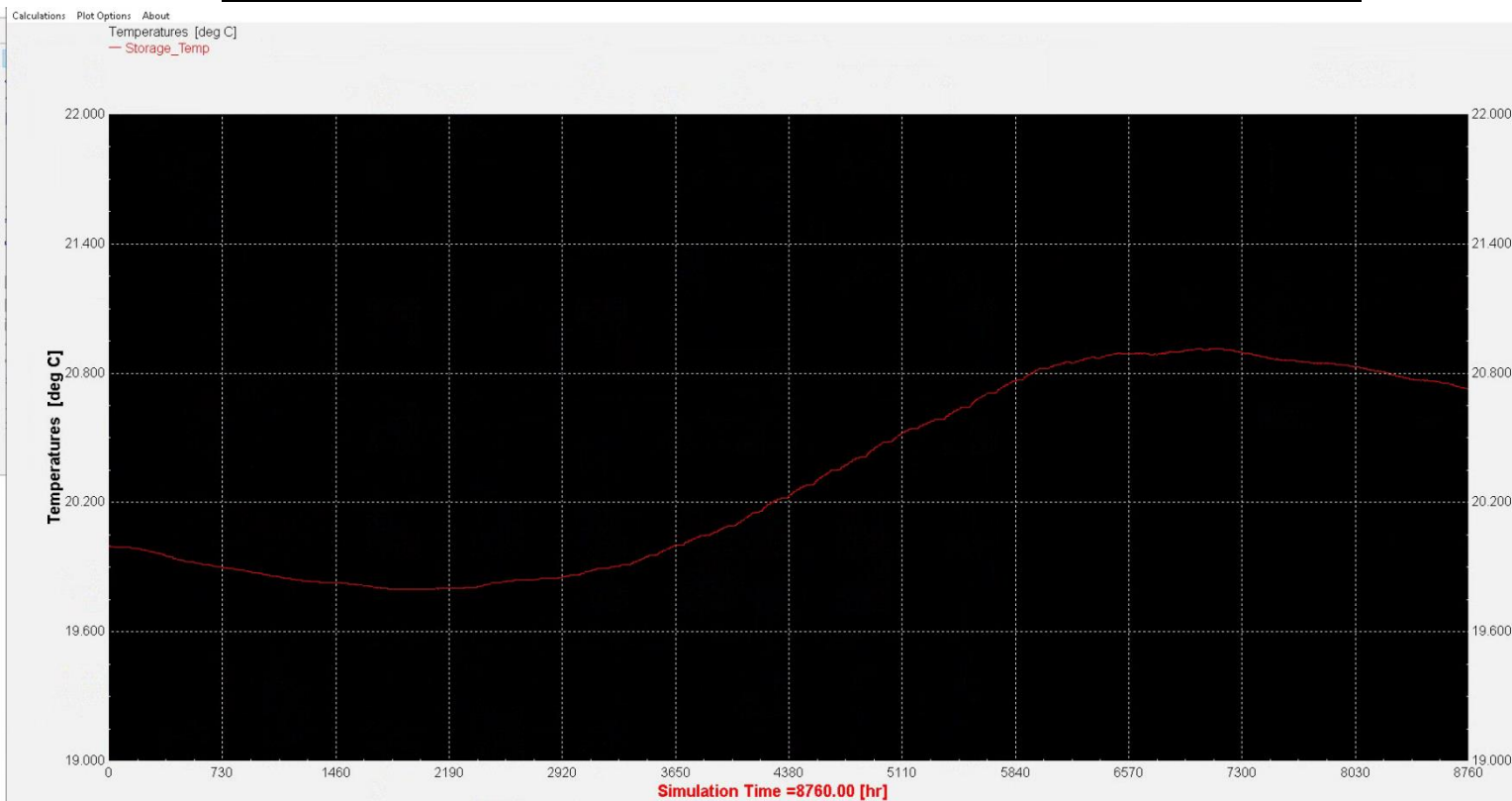
στάθμη της μπαταρίας θα πέσει στο 30%. Δηλαδή δεν υπάρχει κίνδυνος να πέσει η στάθμη της μπαταρίας κάτω από το 20% της χωρητικότητάς της σε κανένα έτος λειτουργίας της.

Σε αυτό το σημείο να σημειωθεί πως με την καθορισμένη ισχύ της μπαταρίας και το επιλεγμένο όριο ασφαλείας υπάρχουν κατ' ελάχιστο 165 kWh (το 20% των 825 kWh που είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας) αποθηκευμένης ενέργειας. Αυτή η ενέργεια είναι ικανή να καλύψει ακόμα και το μέγιστο φορτίο του συστήματος για 6 ώρες, διάστημα που θεωρείται ικανοποιητικό. Η μέγιστη ισχύς των 27 kW εμφανίζεται το καλοκαίρι και πέραν αυτού η καταναλισκόμενη ισχύς λίγες μόνο ώρες το χρόνο ξεπερνά τα 20 kW (βλέπε Διάγραμμα 9.15), με όλες αυτές τις ώρες να αντιστοιχούν στη θερινή περίοδο. Εκείνη την περίοδο όμως παρατηρείται σημαντική, εκούσια, μη παραγωγή ενέργειας (λόγω 100% φόρτισης της μπαταρίας). Δηλαδή, ακόμα και αν προκύψει κάποια έκτακτη ανάγκη, είναι αρκετά απίθανο να μπορέσει το σύστημα να ανταποκριθεί στην κατανάλωση. Η μόνη περίπτωση αδυναμίας είναι αν όλα τα Φ/Β αστοχήσουν ταυτόχρονα και άρα δεν υπάρχει καθόλου παραγωγή ενέργειας το οποίο όμως κρίνεται πρακτικά αδύνατο.

Πηγαίνοντας ένα βήμα παραπέρα, ακόμα και έντονη κακοκαιρία να υπάρξει κάποια στιγμή τη θερινή περίοδο που θα μειώσει δραστικά την παραγωγή, είναι φυσικό επακόλουθο πως θα μειωθεί και η απαιτούμενη ισχύς (δεν θα υπάρχει τόσο έντονη ανάγκη ψύξης). Το καλοκαίρι η μπαταρία είναι συνεχώς σε πολύ υψηλά επίπεδα φόρτισης (πάνω από 80% συνέχεια) το οποίο σημαίνει πως ακόμα και με κακοκαιρία, η αποθηκευμένη ενέργεια των περίπου 650 kWh μπορεί να ανταποκριθεί σε ανάγκες 15-20 kW για πάνω από μιάμιση μέρα το οποίο κρίνεται άκρως ικανοποιητικό. Τη θερινή περίοδο εξάλλου, λόγω του γενικά ήπιου κλίματος της Αθήνας, οι όποιες κακοκαιρίες σπάνια διαρκούν για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα (δεν είναι καθόλου απίθανο να υπάρξουν ώρες όπου μπορεί να γίνει έστω και περιορισμένη παραγωγή ενέργειας), ενισχύοντας το αίσθημα ασφάλειας της αυτονομίας του συστήματος.

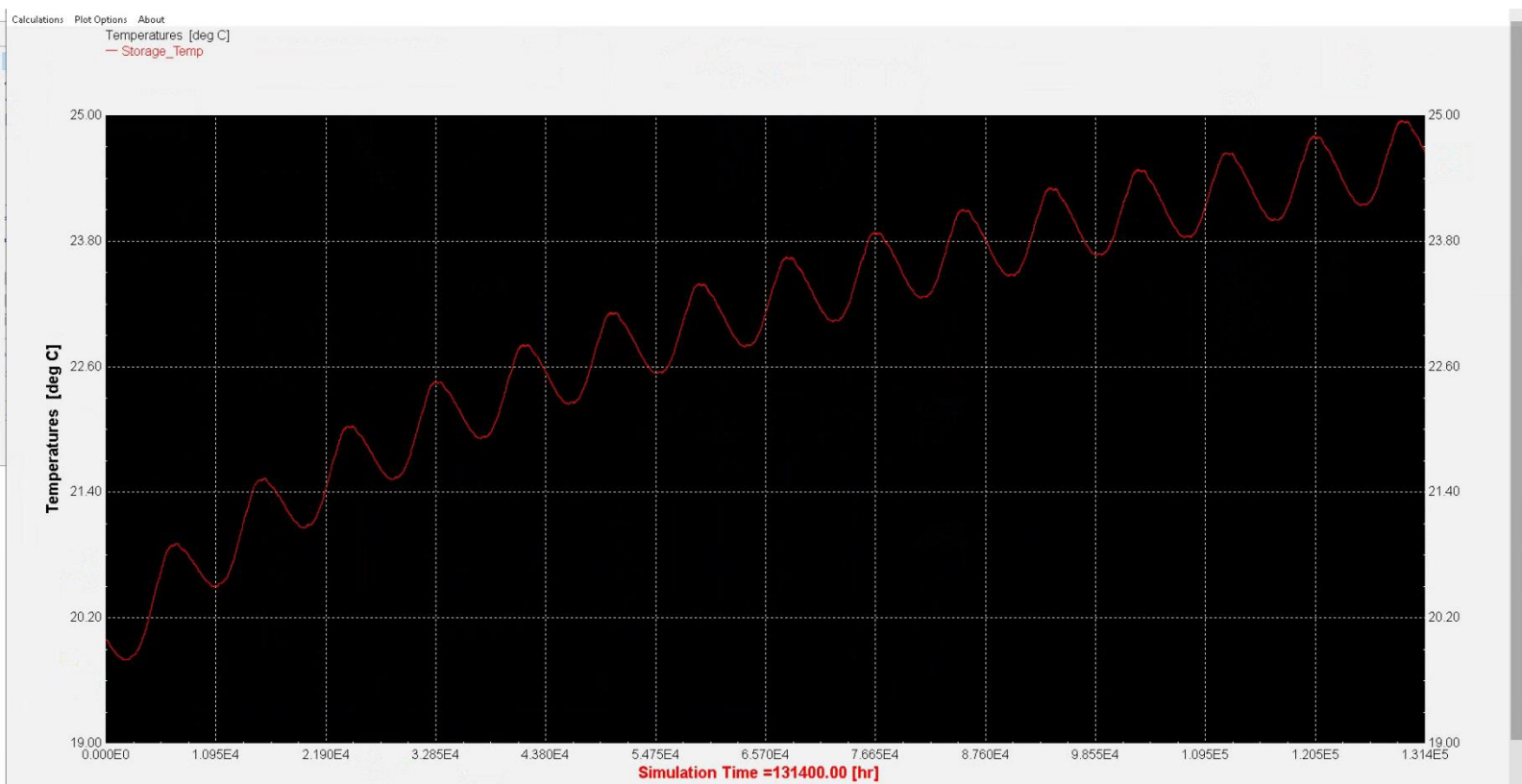
9.1.3: Μεταβολή θερμοκρασίας εδάφους σε βάθος χρόνου

Σε εφαρμογές γεωθερμίας είναι πολύ σημαντικό να μην αμελείται η επίδραση του συστήματος στο έδαφος. Μια μεγάλη αλλοίωση κάποιας ιδιότητας του εδάφους (πχ θερμοκρασία) ενδέχεται να έχει εν δυνάμει πολύ σοβαρές συνέπειες που μπορεί να καταστήσουν το όλο σύστημα υπολειτουργικό. Για παράδειγμα, αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους θα έχει αρνητικές συνέπειες στην ψυκτική απόδοση του συστήματος αφού η θερμότητα από το κτήριο θα μεταφέρεται πιο δύσκολα στο έδαφος με αντίστοιχες αρνητικές συνέπειες και στην κατανάλωση των διαφόρων συσκευών. Στο Διάγραμμα 9.23 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας στον όγκο αποθήκευσης που ορίζεται από το στοιχείο του γεωθερμικού εναλλάκτη.



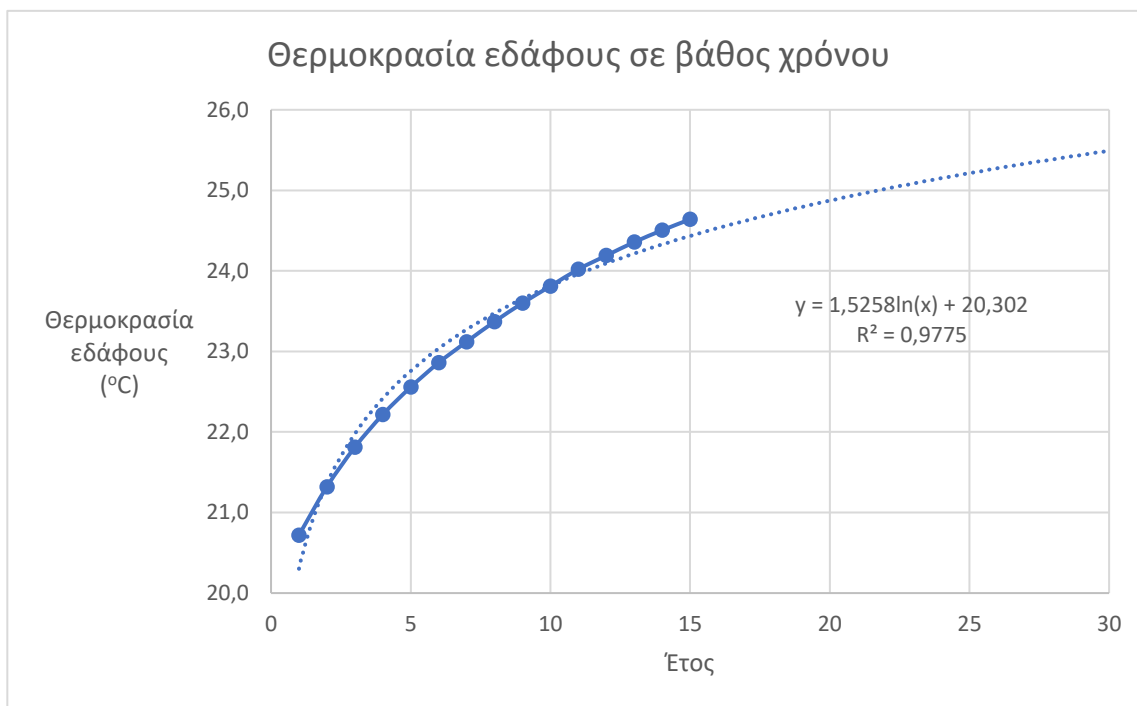
Διάγραμμα 9.23: Μεταβολή θερμοκρασίας του εδάφους στο 1^ο έτος

Η παρατηρούμενη αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του όγκου αποθήκευσης είναι $0,72\text{ }^{\circ}\text{C}$ για τον πρώτο χρόνο λειτουργίας. Μια τέτοια αύξηση, σε περίπτωση που ήταν η ίδια κάθε χρόνο, θα οδηγούσε σε μια πάρα πολύ μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους σε μια περίοδο 30 ετών που είναι μια τυπική τιμή του ορίζοντα χρήσης των συστημάτων του κτηρίου. Ωστόσο, τρέχοντας την προσομοίωση για περιόδους μεγαλύτερες του ενός έτους διαπιστώθηκε πως η ετήσια αύξηση της θερμοκρασίας του όγκου αποθήκευσης συνεχώς μειώνεται. Χαρακτηριστικά, στο τέλος του 5^{ου} έτους η αύξηση της θερμοκρασίας είναι $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, δηλαδή κατά $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ μικρότερη από την περίπτωση που η θερμοκρασία του εδάφους αυξανόταν με σταθερό ρυθμό $0,72\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{έτος}$. Μάλιστα, όσο αυξάνεται ο χρόνος της προσομοίωσης τόσο η αύξηση τείνει να ισορροπήσει. Στο Διάγραμμα 9.24 παρουσιάζεται η μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους σε διάστημα 15 ετών. Η αύξηση της θερμοκρασίας στα 15 έτη είναι $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, με την αύξηση από το ακριβώς προηγούμενο έτος να είναι μόλις $0,14\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Διάγραμμα 9.24: Μεταβολή θερμοκρασίας εδάφους στα 15 έτη

Η τελική θερμοκρασία κάθε έτους παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 9.25. Στο Excel υπάρχει η δυνατότητα πρόβλεψης των μελλοντικών τιμών ενός μεγέθους μέσω των γραμμών τάσης. Η διακεκομμένη γραμμή αποτυπώνει τη συνάρτηση που ταιριάζει καλύτερα στα δεδομένα (best fit). Η καλύτερη συσχέτιση επιτυγχάνεται με τη συνάρτηση που φαίνεται στο γράφημα η οποία είναι αρκετά ακριβής όπως καταδεικνύει και η υψηλή τιμή του συντελεστή R^2 .



Διάγραμμα 9.25: Μεταβολή θερμοκρασίας εδάφους και πρόβλεψη μελλοντικής εξέλιξης

Στα 30 χρόνια η αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους αναμένεται να είναι μικρότερη από 6 °C και με τάσεις σταθεροποίησης, αποτέλεσμα που κρίνεται αποδεκτό. Αν η αύξηση της θερμοκρασίας ήταν πολύ μεγάλη θα έπρεπε να αναζητηθούν λύσεις είτε για τον απευθείας περιορισμό των ψυκτικών φορτίων είτε για την ανακατεύθυνση μέρους της ενέργειας που πάει στο έδαφος προς κάπου αλλού. Ωστόσο επειδή η αναμενόμενη αύξηση είναι σε αποδεκτά πλαίσια δεν θα γίνει κάποια παραπάνω αναφορά σε αυτό το θέμα.

9.2: Οικονομικό κόστος

9.2.1: Οικονομικά μεγέθη διάταξης

Κάθε σύστημα πρέπει να συμφέρει οικονομικά πέρα από ενεργειακά ώστε να έχει νόημα η λειτουργία του. Ανατρέχοντας στο διαδίκτυο σε καταλόγους κατασκευαστών έγινε μια εκτίμηση του κόστους των διαφόρων εξαρτημάτων του όλου συστήματος. Κάποιες βασικές παρατηρήσεις είναι οι εξής:

- Το κόστος ενός Inverter κυμαίνεται γύρω στα 100 €/kW και έτσι προκύπτει το κόστος των 6.000 €
- Το κόστος για Φ/Β πάνελ των 400 W είναι στο διάστημα 260-340 €/πάνελ, με τη μέση τιμή, βάσει τις οποίας εκτιμήθηκε το κόστος των Φ/Β, να είναι 300 €/πάνελ
- Η ταχύτατη εξέλιξη της τεχνολογίας των μπαταριών τα τελευταία χρόνια έχει μειώσει σημαντικά το κόστος τους. Πλέον το κόστος ενός συστήματος μπαταριών κυμαίνεται περίπου στα 110 €/kWh ή κοντά στα 10 €/Ah. Σύμφωνα με την εικόνα των παραμέτρων της μπαταρίας, η χωρητικότητάς της είναι 825 kWh η οποία με τάση 150 V αντιστοιχεί σε περίπου 5.500 Ah. Δηλαδή το εκτιμώμενο κόστος της μπαταρίας αναμένεται στο εύρος 55.000 – 90.700 €.
- Το κόστος της ΑΘ νερού-νερού υπολογίζεται στα 25.000 – 30.000 €
- Το εκτιμώμενο κόστος για τους δύο κυκλοφορητές ανέρχεται στα 1.000 – 1.500 € για τον κυκλοφορητή του δευτερεύοντος και στα 2.000 – 2.500 € για τον κυκλοφορητή του πρωτεύοντος
- Η ΑΘ αέρα-αέρα έχει εκτιμώμενο κόστος στο εύρος των 3.000 – 4.000 €
- Το εκτιμώμενο κόστος των Fan Coil σε κάθε χώρο παρατίθεται στον Πίνακα 9.2

Πίνακας 9.2: Εκτιμώμενο κόστος αγοράς μονάδων Fan Coil

Χώρος	Εκτιμώμενο κόστος Fan Coil (€)
Office 1	350 - 500
Office 2	450 - 650
Office 3	300 - 400
Office 4	350 - 500
Office 5	1.200 - 1.300
Office 6	1.200 - 1.300
Manager	750 - 850
Meeting Room	750 - 850

Χώρος	Εκτιμώμενο κόστος Fan Coil (€)
Supervisors	450 - 650
Break Room	450 - 650
Lobby	350 - 500
Toilets	500 - 700

Το κόστος του γεωθερμικού εναλλάκτη μπορεί να εκφραστεί με τρεις βασικούς τρόπους. Μια καλή εκτίμηση του μέσου κόστους κάθε περίπτωσης παρατίθεται στη συνέχεια [10]:

- Κόστος ανά m² επιφάνειας που εξυπηρετεί το σύστημα: 57 \$/m² (~ 53.2 €/m²)
- Κόστος ανά kW μέγιστου φορτίου: 706 \$/kW (~ 650 €/kW)
- Κόστος ανά m γεώτρησης: 38,62 \$/m (~ 36 €/m)

Το συνολικό κόστος του γεωθερμικού εναλλάκτη αναμένεται στο εύρος των 41.500 – 57.600 €. Για το τελικό συνολικό κόστος του συστήματος έχει προστεθεί και μια προσαύξηση 5% για να συμπεριληφθεί το κόστος των συστημάτων ελέγχου των διατάξεων. Τα τελικά νούμερα παρατίθενται στον Πίνακα 9.3.

Πίνακας 9.3: Αναμενόμενο εύρος και μέση τιμή του κόστους των διαφόρων τμημάτων του συστήματος

Εξάρτημα/ Διάταξη	Αναμενόμενο εύρος κόστους (€)	Μέση τιμή κόστους (€)
Inverter	5.500 - 6.500	6.000
Φ/Β	36.400 – 47.600	42.000
Μπαταρία	55.000 – 90.700	72.850
Κυκλοφορητές	3.000 – 4.000	3.500
ΑΘ αέρα-αέρα	3.000 – 4.000	3.500
ΑΘ νερού-νερού	25.000 – 30.000	27.500
Fan Coil	7.100 – 8.850	7.975
Γεωθερμικός εναλλάκτης	41.500 – 57.600	49.550
Τελικό Σύνολο (με προσαύξηση 5%)		233.519

Για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης θα πρέπει να συγκριθεί το συνολικό κόστος με τις εισροές χρημάτων στα 30 έτη που αναμένεται να είναι ο χρονικός ορίζοντας ζωής της επένδυσης. Κάθε έτος οι χρηματοροές είναι οι εξής:

1. Κόστος συντήρησης. Υπολογίζεται στο 1-2% του αρχικού κόστους επένδυσης
2. Κόστος ηλεκτρικού ρεύματος. Επειδή η ενέργεια για τη λειτουργία των συστημάτων παράγεται από τα Φ/Β, αυτό το κόστος στην πραγματικότητα είναι όφελος για το κτήριο αφού δεν το πληρώνει στον πάροχο. Η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος εκτιμάται σε 0,2-0,26 €/kWh σύμφωνα με τις πραγματικές τάσεις της αγοράς

Η οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης γίνεται μέσω της αναγωγής όλων των χρηματοροών των 30 ετών σε τρέχουσες αξίες, υπολογίζοντας έτσι την Καθαρή Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) της επένδυσης. Μια επένδυση συμφέρει σε περίπτωση που η ΚΠΑ > 0, το οποίο σηματοδοτεί ότι τα έσοδα στον χρονικό ορίζοντα της επένδυσης υπερκαλύπτουν το αρχικό κόστος καθώς και τα λειτουργικά κόστη. Η σχέση υπολογισμού της ΚΠΑ, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον πληθωρισμό όσο και το επιτόκιο αναγωγής δίνεται στην εξίσωση 9.1:

$$ΚΠΑ = [Έσοδα - Συντήρηση] \cdot \frac{1-(1+io)^{-n}}{(1+\rho) \cdot io} - Επένδυση \quad (9.1)$$

Στη σχέση (9.1), ο συντελεστής io δίνεται από την σχέση 9.2:

$$io = \frac{i-\rho}{1+\rho} \quad (9.2)$$

όπου:

- i (%) είναι το επιτόκιο αναγωγής
- ρ (%) είναι ο ετήσιος πληθωρισμός

Για το επιτόκιο αναγωγής και τον πληθωρισμό, λόγω της υπάρχουσας οικονομικής αβεβαιότητας, μπορούν να γίνουν μόνο εκτιμήσεις για μια μέση τιμή στα 30 έτη ζωής της επένδυσης. Μια ασφαλής εκτίμηση κρίνεται το επιτόκιο αναγωγής να θεωρηθεί ίσο με 4% και ο πληθωρισμός ίσος με 7%. Σε αυτό το σενάριο, εφαρμόζοντας τις σχέσεις 9.1, 9.2, θεωρώντας κόστος συντήρησης ίσο με το 1,5% της αρχικής επένδυσης και κόστος ηλεκτρισμού 0,23 €/kWh, η ΚΠΑ υπολογίζεται ίση με 195.105 €. Η τιμή είναι αρκετά υψηλή και παρότι αποτελεί μια μέση εκτίμηση, αποδεικνύει την οικονομική βιωσιμότητα της συγκεκριμένης επένδυσης. Στον Πίνακα 9.4 παρουσιάζεται η ΚΠΑ της επένδυσης ανάλογα το επιτόκιο αναγωγής και τον πληθωρισμό (θεωρώντας ετήσιο κόστος συντήρησης 1,5% και τιμή ρεύματος 0,23 €/kWh). Όπως φαίνεται, στις περισσότερες περιπτώσεις η επένδυση συμφέρει οικονομικά, ενώ καθίσταται οικονομικά ασύμφορη σε πιο ακραίες περιπτώσεις που θεωρείται σχεδόν απίθανο να παρουσιαστούν. Αντίθετα, πιο πιθανό κρίνεται να πραγματοποιηθούν σενάρια ακόμα καλύτερης οικονομικής βιωσιμότητας.

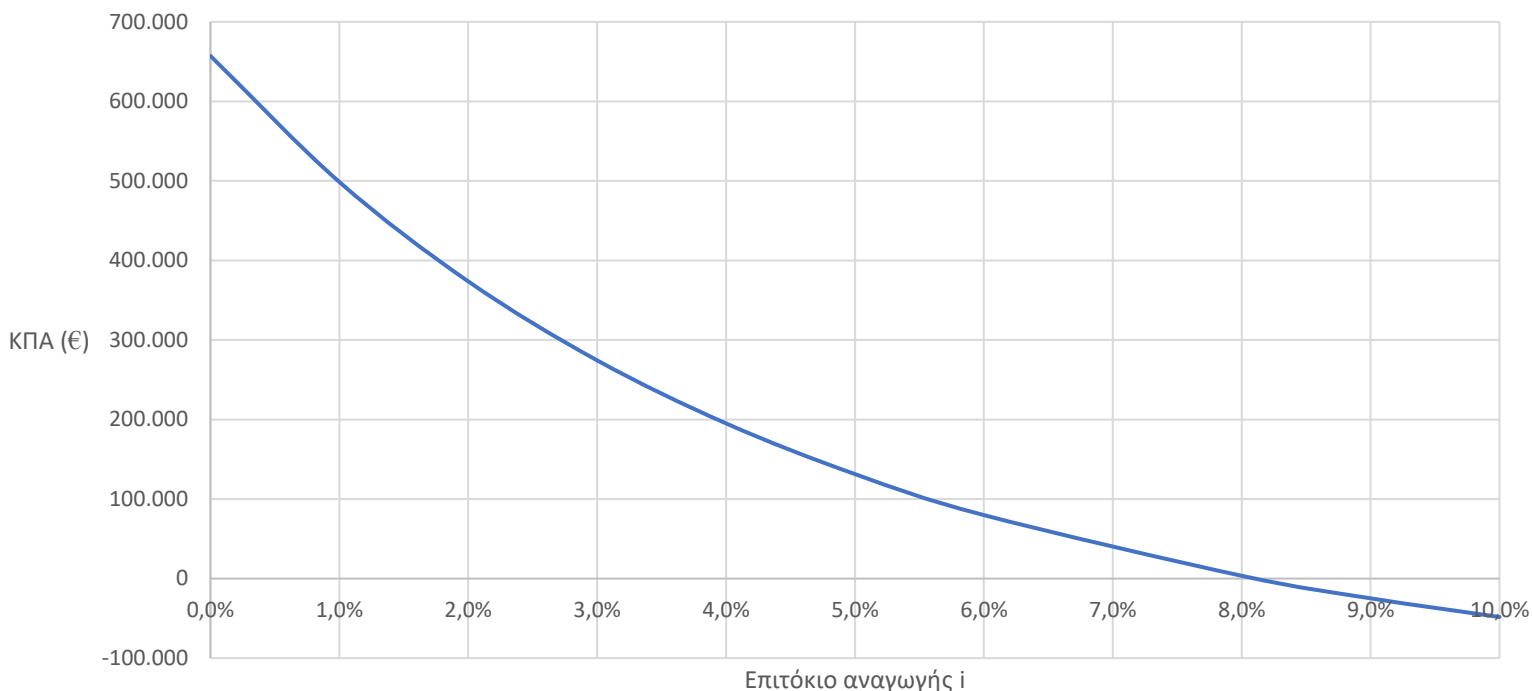
Πίνακας 9.4: ΚΠΑ (σε εκατοντάδες χιλιάδες €) ανάλογα το επιτόκιο αναγωγής και τον πληθωρισμό

Επιτόκιο αναγωγής								
Πληθωρισμός	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
1%	-	0,15	-0,16	-0,42	-0,63	-0,81	-0,96	-1,08
2%	0,97	-	0,13	-0,18	-0,43	-0,64	-0,81	-0,96
3%	1,50	0,93	-	0,11	-0,19	-0,44	-0,65	-0,82
4%	2,14	1,45	0,90	-	0,09	-0,21	-0,45	-0,66
5%	2,91	2,07	1,40	0,87	-	0,07	-0,22	-0,46
6%	4,39	3,26	2,36	1,64	1,06	-	0,21	-0,11
7%	4,99	3,74	2,74	1,95	1,31	0,80	-	0,04
8%	6,38	4,84	3,63	2,67	1,89	1,27	0,77	-
9%	8,07	6,19	4,70	3,53	2,59	1,84	1,23	0,73
10%	10,14	7,83	6,01	4,57	3,43	2,52	1,78	1,19

Για το θεωρούμενο ως βασικό σενάριο ($i = 4\%$ και $p = 7\%$) η μεταβολή της ΚΠΑ συναρτήσκει μόνο του επιτοκίου αναγωγής και μόνο του πληθωρισμού παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 9.26 και 9.27 αντίστοιχα. Η τιμή του επιτοκίου αναγωγής για την οποία η ΚΠΑ μηδενίζεται ονομάζεται Εσωτερικός Συντελεστής Απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR) και αποτελεί έναν ακόμα σημαντικό οικονομικό δείκτη καθώς πρόκειται για την οριακή τιμή ανάμεσα στην οικονομική βιωσιμότητα ή μη της επένδυσης. Ο IRR στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ίσος με 8,11% με την τιμή να κρίνεται πολύ ικανοποιητική μιας και είναι διπλάσια του επιτοκίου αναγωγής.

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 9.4 είναι γενικά προτιμότερο για τα οικονομικά της επένδυσης ο πληθωρισμός να είναι μεγαλύτερος του επιτοκίου αναγωγής. Αυτό ισχύει σχεδόν πάντοτε και για αυτό θεωρείται σχεδόν απίθανο η επένδυση να αποτύχει οικονομικά.

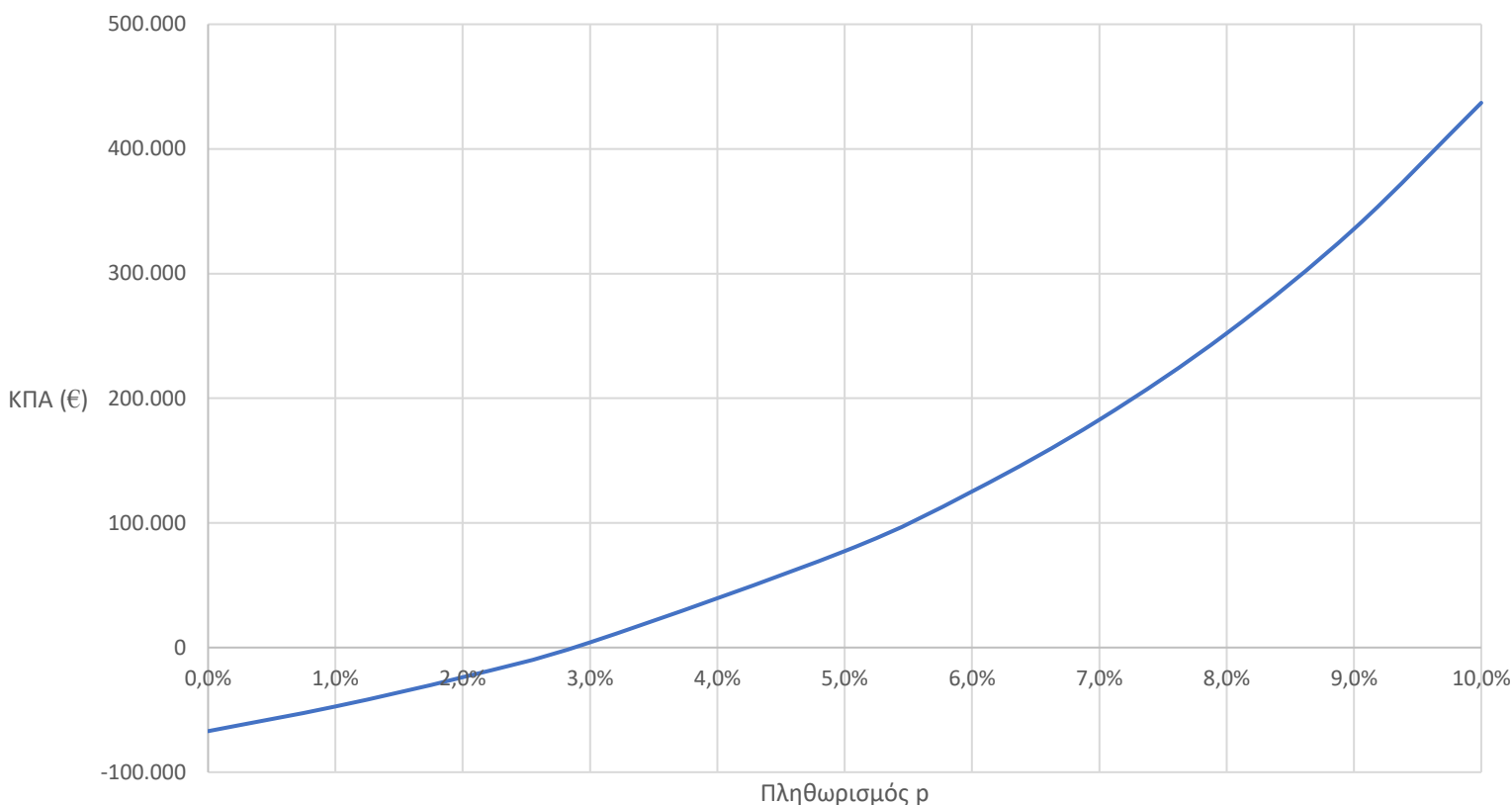
Μεταβολή ΚΠΑ συναρτήσει μόνο του επιτοκίου αναγωγής



Διάγραμμα 9.26: Μεταβολή της ΚΠΑ συναρτήσει του επιτοκίου αναγωγής i για σταθερό πληθωρισμό (7%)

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 9.26 αύξηση του επιτοκίου αναγωγής επηρεάζει αρνητικά την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Λόγω ωστόσο του μεγέθους της συγκεκριμένης επένδυσης (<250.000 €), αύξηση του επιτοκίου σε επίπεδα πάνω από το 5-6% θεωρείται σχεδόν απίθανη. Ένας άλλος λόγος που δεν αναμένεται γενικά αύξηση των επιτοκίων είναι η οικονομική αβεβαιότητα που υπάρχει παγκοσμίως καθώς, παρότι φαίνεται να υπάρχουν σημάδια ανάκαμψης, εντούτοις υπάρχει μεγάλος δισταγμός στην παροχή υψηλών επιτοκίων υπό το φόβο ξαφνικών αλλαγών. Η πρόσφατη πανδημία απέδειξε το πόσο γρήγορα μπορούν να μεταβληθούν οι ισορροπίες σε διεθνές επίπεδο, ενισχύοντας ακόμα περισσότερο το αίσθημα ανασφάλειας και συμβάλλοντας καταλυτικά στην απροθυμία παροχής υψηλών επιτοκίων στην αγορά.

Μεταβολή ΚΠΑ συναρτήσει μόνο του πληθωρισμού



Διάγραμμα 9.27: Μεταβολή της ΚΠΑ συναρτήσει του πληθωρισμού p για σταθερό επιτόκιο αναγωγής (4%)

Σε αντίθεση με την μεταβολή που παρατηρείται στο Διάγραμμα 9.26, αύξηση του πληθωρισμού βελτιώνει την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Με σταθερό επιτόκιο η οριακή τιμή του πληθωρισμού είναι περίπου στο 2,8%, τιμή αρκετά χαμηλότερη από την βασική θεώρηση του 7%. Εξαιτίας και όσον αναφέρθηκαν παραπάνω, η οικονομική αβεβαιότητα των τελευταίων ετών έχει οδηγήσει σε ξαφνική αύξηση του πληθωρισμού η οποία ξεπέρασε σε πολλές χώρες της Ευρώπης το 10% για κάποιους μήνες. Παρότι αυτή η αύξηση έχει υποχωρήσει, η οικονομική αβεβαιότητα δημιουργεί μια πολύ ρευστή κατάσταση όπου πολύ εύκολα μπορεί να ανατραπεί το σκηνικό και ο πληθωρισμός να ξανά αυξηθεί. Επιπλέον, η τάση των τελευταίων δεκαετιών είναι ο πληθωρισμός να αυξάνεται με την πάροδο των χρόνων, για αυτό και αναφέρθηκε πως θεωρείται πιο πιθανό η εκτίμηση που έχει γίνει να υποτιμά την ΚΠΑ.

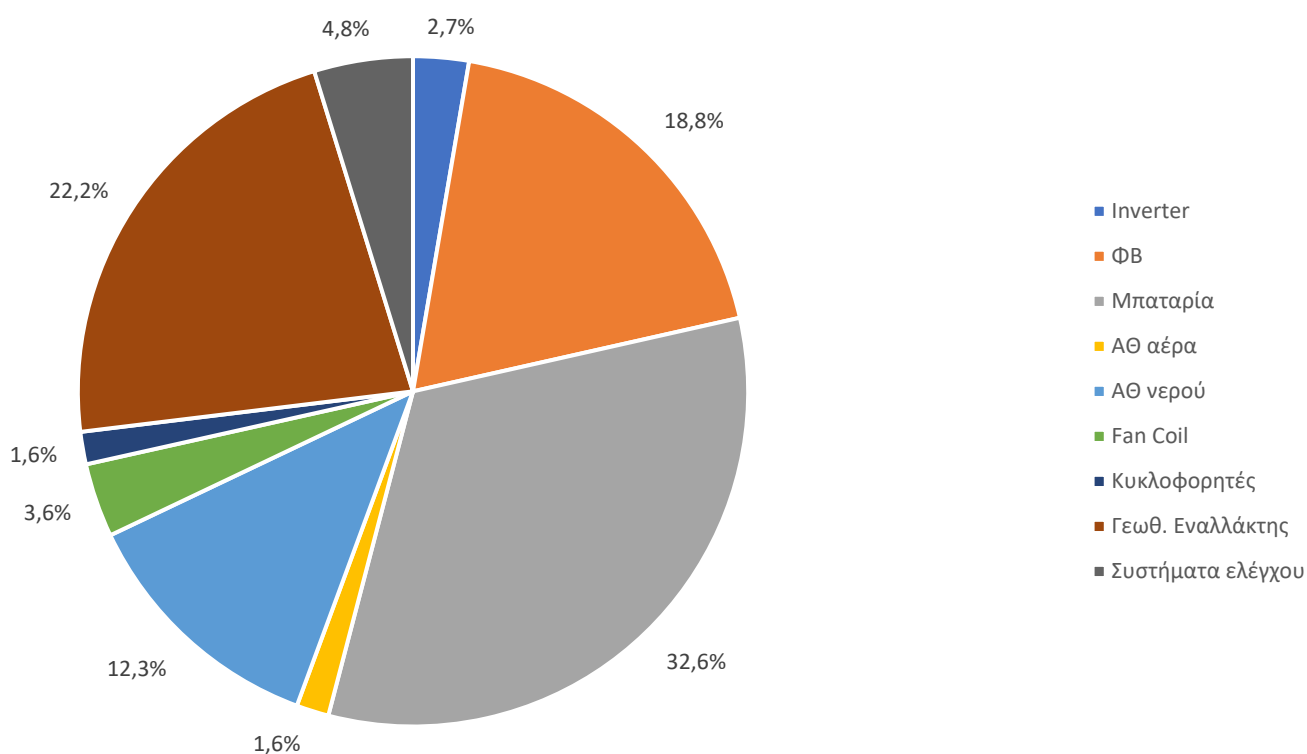
Το τελευταίο βασικό μέγεθος της οικονομικής ανάλυσης είναι η περίοδος αποπληρωμής (Pay Back Period, PBP). Πρόκειται για το χρονικό διάστημα στο οποίο η επένδυση αρχίζει να είναι κερδοφόρα, έχοντας αποπληρώσει το αρχικό κόστος και τα μέχρι τότε έξοδα λειτουργίας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η περίοδος αποπληρωμής ισούται με 19 έτη. Η περίοδος αυτή είναι σημαντική (πάνω από το μισό της εκτιμωμένης διάρκειας ζωής της επένδυσης), ωστόσο τα υπολειπόμενα 11 χρόνια είναι αρκετά ώστε να καθιστούν την επένδυση βιώσιμη.

9.2.2: Βασικά συμπεράσματα από την οικονομική ανάλυση

Από την οικονομική ανάλυση της προηγούμενης ενότητας καθίσταται σαφές πως, εκτός ακραίων περιπτώσεων, η λειτουργία ενός αυτόνομου συστήματος θέρμανσης-ψύξης είναι μια εφικτή και οικονομικά βιώσιμη επιλογή. Το αρχικό κόστος της επένδυσης είναι σημαντικό καθώς απαιτούνται αρκετά μηχανήματα και διατάξεις. Ωστόσο δεν θα πρέπει να αποθαρρύνει μια τέτοια επένδυση καθώς είναι βιώσιμη και με ένα εύλογο περιθώριο ασφαλείας όσον αφορά τους οικονομικούς συντελεστές.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η συσχέτιση του κόστους των διαφόρων εξαρτημάτων και η επίδραση που έχουν στο συνολικό κόστος του συστήματος. Στο Διάγραμμα 9.28 παρατίθενται τα ποσοστά κάθε επιμέρους εξαρτήματος ως προς το συνολικό κόστος.

Ποσοστιαία ανάλυση του συνολικού κόστους της εγκατάστασης



Διάγραμμα 9.28: Ποσοστιαία ανάλυση του (εκτιμώμενου) συνολικού κόστους του συστήματος

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 9.28 το κόστος του ηλεκτρικού μέρους του συστήματος (Inverter, Φ/Β και μπαταρία) κατέχει τη μερίδα του λέοντος με το 54,1% του συνολικού κόστους. Το 4,8% αφορά την εκτίμηση για το κόστος των συστημάτων ελέγχου, με το υπολειπόμενο 41,1% να αφορά το ίδιο το σύστημα θέρμανσης-ψύξης. Με δεδομένη την ακρίβεια των μπαταριών και καθώς στόχος είναι η αυτονομία του συστήματος, το οποίο σημαίνει πως πρέπει να υπάρχει πάντα ένα κατώτερο όριο ασφαλείας στη στάθμη της μπαταρίας, ήταν αναμενόμενο η μπαταρία να είναι το πιο ακριβό κομμάτι του συστήματος.

Η επιθυμία αυτονομίας, πέραν από την αύξηση της χωρητικότητας και άρα του κόστους της μπαταρίας, έχει και αντίστοιχες συνέπειες στο κόστος αγοράς των Φ/Β πάνελ. Ειδικότερα, η πολύ περιορισμένη παραγόμενη ισχύς στις αρχές του Δεκεμβρίου (όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 9.19 που παρατίθεται η ισχύς των Φ/Β) που προφανώς οφείλεται σε κακοκαιρίες, αποτελεί τη σημαντικότερη περίοδο για τη στάθμη της μπαταρίας καθώς εκεί φτάνει στο όριο ασφαλείας του 20%. Ο αριθμός των Φ/Β δηλαδή πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να μπορεί να κρατήσει, έστω και οριακά, τη στάθμη της μπαταρίας πάνω από την ελάχιστη επιτρεπτή τιμή. Αν δεν υπήρχε αυτή η συγκυρία είναι αρκετά πιθανό να μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν λιγότερα πάνελ και η χωρητικότητα της μπαταρίας να ήταν μικρότερη, ωστόσο ο στόχος της αυτονομίας επιβάλλει το υψηλό κόστος που παρουσιάζεται.

Σχετικά με το σύστημα θέρμανσης-ψύξης ο γεωθερμικός εναλλάκτης έχει τα πρωτεία του κόστους το οποίο ωστόσο είναι κάτι αναμενόμενο. Σε αυτό το κόστος περιλαμβάνεται τόσο η διάνοιξη των γεωτρήσεων όσο και οι ίδιοι οι σωλήνες και τα λοιπά απαραίτητα εξαρτήματα. Το βάθος των γεωτρήσεων είναι σε συνήθη επίπεδα ενώ και ο αριθμός των γεωτρήσεων ακολουθεί την κλασική λογική της 1 γεώτρησης/ψυκτικό τόνο, με τα δύο αυτά στοιχεία να συμβάλλουν στο να μην αυξηθεί περαιτέρω το κόστος. Τυχόν ανάγκη διάνοιξης βαθύτερων γεωτρήσεων θα έπρεπε να συνοδευτεί από προσαύξηση του εκτιμώμενου κόστους, τόσο λόγω του μη τυπικού βάθους το οποίο θα απαιτούσε διαφορετικό -πιο ακριβό- εξοπλισμό αλλά και λόγω της σπανιότητας τόσο εξειδικευμένων εργολάβων.

Μετά το γεωθερμικό εναλλάκτη το πιο ακριβό κομμάτι του συστήματος είναι η ΑΘ νερού-νερού το κόστος της οποίας οφείλεται στην απαιτούμενη ισχύ της. Το κόστος της είναι ενδεικτικό για τη σημασία του περιορισμού των φορτίων ενός κτηρίου. Τα μέγιστα φορτία που καλείται να διαχειριστεί στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν είναι ιδιαίτερα υψηλά αλλά το κόστος της είναι ένα σημαντικό μέρος του συστήματος θέρμανσης-ψύξης. Όχι μόνο αυτό, αλλά είναι αξιοσημείωτο κομμάτι και του κόστους του συνολικού συστήματος στο οποίο έχει ήδη γίνει αναφορά για το ότι το μεγαλύτερο μερίδιο αφορά το ηλεκτρικό μέρος του. Συνεπώς, σε αντίστοιχες εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας, με κτήρια αρκετών στρεμμάτων όπου τα μέγιστα φορτία θα φτάσουν τα εκατοντάδες kW, το κόστος της ΑΘ νερού-νερού μπορεί να διαδραματίσει ακόμα μεγαλύτερο ρόλο, ειδικά στην περίπτωση που δεν ληφθούν μέτρα περιορισμού των φορτίων. Τα παρελκόμενα του συστήματος, όπως οι κυκλοφορητές και οι τερματικές μονάδες, είναι σαφώς πιο φθηνά επομένως η προσοχή πρέπει να δοθεί στην ΑΘ νερού-νερού. Φυσικά, όπως και σε κάθε αντίστοιχη περίπτωση, ο προμηθευτής όλων ή κάποιων εξαρτημάτων μπορεί να είναι ο ίδιος ώστε να υπάρχει το ενδεχόμενο καλύτερης τελικής τιμής αγοράς το οποίο θα βοηθούσε ακόμα περαιτέρω τα οικονομικά της επένδυσης.

10. Ενδεχόμενο ενεργειακής αυτονομίας όλου του κτηρίου

10.1: Αναγκαίες τροποποιήσεις για την επίτευξη αυτονομίας όλου του κτηρίου

Η διερεύνηση του ενδεχομένου ενεργειακής αυτονομίας όλου του κτηρίου, πέραν του ήδη υπάρχοντος συστήματος θέρμανσης-ψύξης, αφορά και τις καταναλώσεις του φωτισμού και των συσκευών που υπάρχουν στους διάφορους χώρους. Για να συμπεριληφθούν και αυτά τα δύο στοιχεία στον υπολογισμό των ηλεκτρικών καταναλώσεων πρέπει αρχικά να εκτιμηθεί η καταναλισκόμενη ισχύς τους. Για τον φωτισμό έχει αναφερθεί στα αρχικά κεφάλαια της παρούσας εργασίας πως η ηλεκτρική κατανάλωση υπολογίζεται στα 5 W/m². Όσον αφορά τις ηλεκτρικές συσκευές, η εκτιμωμένη ηλεκτρική ισχύς αυτών των συσκευών καθώς και ο αριθμός τους παρατίθενται στον Πίνακα 10.1.

Πίνακας 10.1: Ηλεκτρική ισχύς και αριθμός συσκευών του κτηρίου

Τύπος συσκευής	Ηλεκτρική Ισχύς (W)	Αριθμός συσκευών
Τηλέφωνο	10	65
Υπολογιστής (σταθερός)	200	65
Εκτυπωτής	700	4
Φούρνος μικροκυμάτων	750	1
Μηχανή Καφέ	800	2
Τοστιέρα	1.200	1
Μικρό Ψυγείο	150	1

Να σημειωθεί πως έχει θεωρηθεί πως σε κάθε έναν εργαζόμενο (65 το σύνολο) αντιστοιχεί ένα τηλέφωνο και ένας υπολογιστής. Η ηλεκτρική κατανάλωση των συσκευών και του φωτισμού θα προστεθεί σε αυτή του συστήματος θέρμανσης-ψύξης μέσω του μπλοκ εξισώσεων Total Loads. Προκειμένου να γίνει αυτό ορίζονται δυο νέα προγράμματα²² στο TRNSYS, ένα που θα αφορά τον φωτισμό και ένα τις συσκευές με ονομασίες Fota και Syskeves . Τα δυο αυτά προγράμματα θα καθορίζουν την

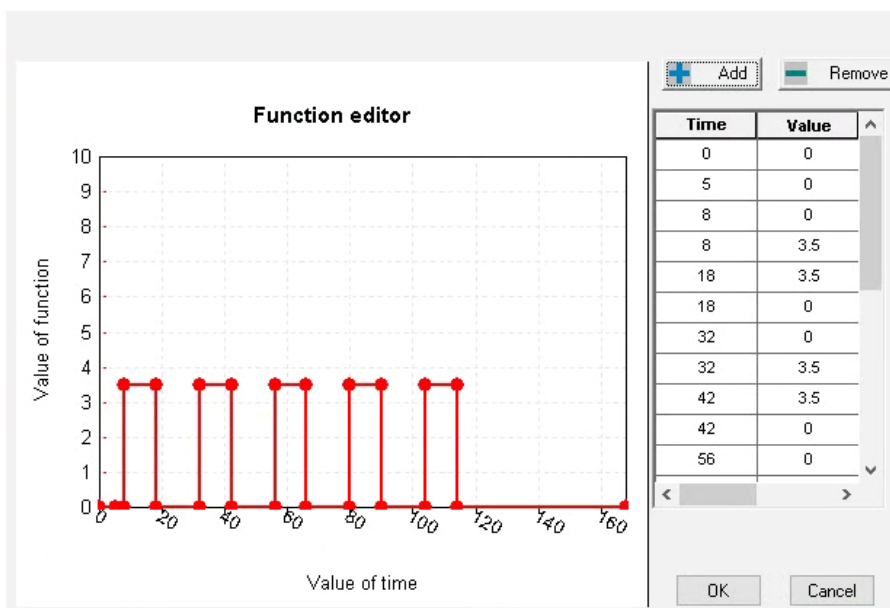
²² Τα προγράμματα αυτά ορίζονται μέσω του στοιχείου Type 14h, το ίδιο στοιχείο με το οποίο ορίστηκαν τα προγράμματα νωπού αέρα.

καταναλισκόμενη ισχύ των παραπάνω σε εβδομαδιαία βάση και φαίνονται στις Εικόνες 10.1 και 10.2 αντίστοιχα.

Για το φωτισμό η μέγιστη ισχύς θα ισούται με 4,32 kW (5 W/m², με το εμβαδόν του κτηρίου να είναι 864 m²). Επειδή υπάρχουν αρκετά ανοίγματα στο κτήριο και άρα αναμένεται να υπάρχει αρκετή ποσότητα φυσικού φωτός, προκειμένου να είναι πιο ρεαλιστική η ηλεκτρική κατανάλωση του φωτισμού έχει θεωρηθεί πως τις ώρες λειτουργίας (08:00 – 18:00) ο φωτισμός καταναλώνει το 80% της μέγιστης ισχύος, δηλαδή τα προαναφερθέντα 4,32 kW. Επειδή η ποσότητα φυσικού φωτός διαφέρει όχι μόνο από εποχή σε εποχή αλλά και από μέρα σε μέρα, αυτή η θεώρηση έχει ως σκοπό να προσεγγίσει τη μέση ετήσια κατάσταση (Δηλαδή να «ισοφαρίσει» το γεγονός πως τους χειμερινούς μήνες είναι πιθανό να είναι όλα τα φώτα του κτηρίου ανοικτά ενώ τους καλοκαιρινούς μήνες να μην χρειάζεται σε κάποιες μέρες καθόλου τεχνητός φωτισμός).

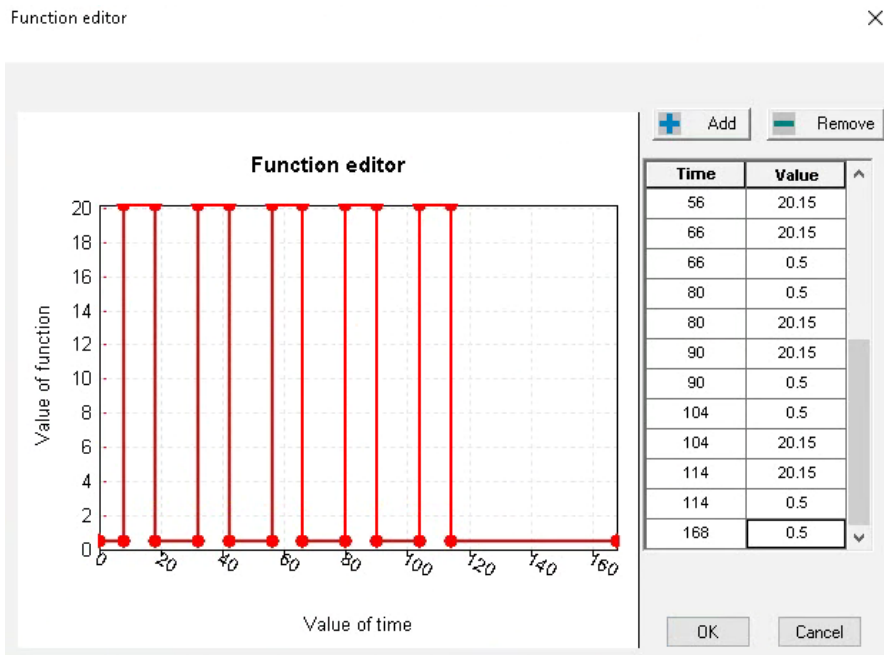
Function editor

×



Εικόνα 10.1: Εβδομαδιαία ισχύς (σε kW) φωτισμού (Fota)

Για τις ηλεκτρικές συσκευές του κτηρίου έχει θεωρηθεί πως τις ώρες λειτουργίας η καταναλισκόμενη ισχύς είναι στο 100% (δηλαδή το άθροισμα των τιμών του Πίνακα 10.1) και τις κενές ώρες έχει θεωρηθεί μια συνολική ισχύς αναμονής (stand-by mode) της τάξης των 500 W. Σύμφωνα με την TOTEE 20701-1/2017 ο μέσος συντελεστής λειτουργίας του εξοπλισμού για ένα γραφείο είναι ίσος με 0,3. Η λογική αυτού του συντελεστή είναι αντίστοιχη με το 80% της μέγιστης ισχύος που έχει θεωρηθεί για το φωτισμό. Για την εύρεση της συνολικής κατανάλωσης του κτηρίου προστίθεται άλλη μια εξίσωση στο μπλοκ εξισώσεων Total Loads όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.3.



Εικόνα 10.2: Εβδομαδιαία ισχύς (σε kW) συσκευών κτηρίου (Syskeves)

(Papageorgiou) Total Loads

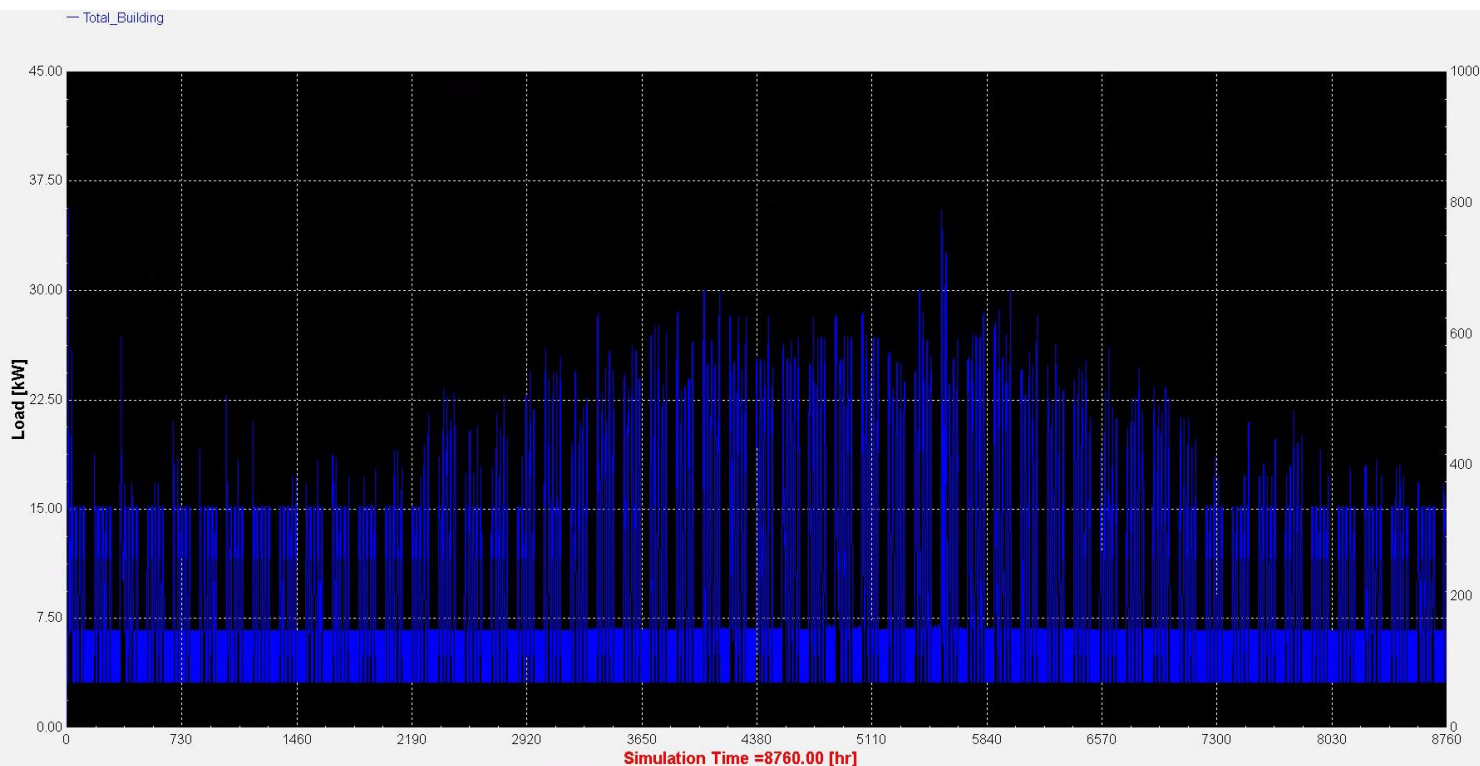
Intermediates & Outputs

- Total_Load
- Total_Load_kw
- Total_FC_kw
- Total_Pumps_kw
- Total_WWHP_kw
- MEP_kw
- Total_Building_kw

Equation: Total_Building_kw = Total_Load_kw + Fotismos + Eksoplismos * 0.3

Εικόνα 10.3: Αθροιση όλων των ηλεκτρικών καταναλώσεων του κτηρίου

Η συνολική καταναλισκόμενη ισχύς του κτηρίου φαίνεται στο Διάγραμμα 10.1 που ακολουθεί. Η μέγιστη τιμή ανέρχεται στα περίπου 36 kW με την κατανάλωση να ακολουθεί την ίδια μορφή που είχε και μόνο του το σύστημα θέρμανσης-ψύξης όπως και είναι λογικό.



Διάγραμμα 10.1: Μεταβολή καταναλισκόμενης ισχύος όλου του κτηρίου

Το υπάρχον σύστημα Φ/Β και μπαταρίας δεν είναι σε θέση να ανταποκριθεί στη συνολικές ενεργειακές απαιτήσεις του κτηρίου. Για την ικανοποίησή τους οι αλλαγές που πραγματοποιούνται είναι οι εξής:

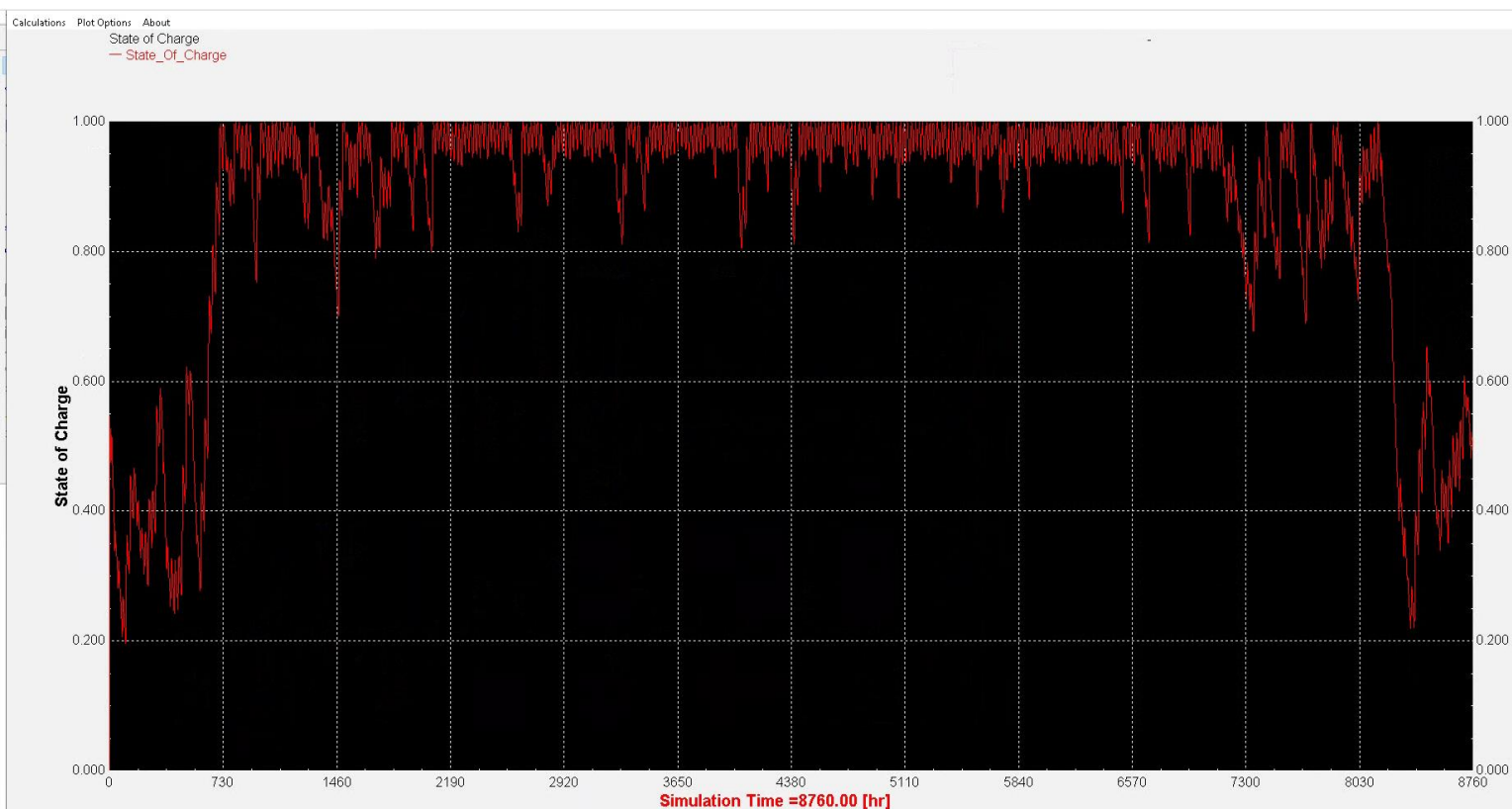
- Αύξηση της χωρητικότητας της μπαταρίας στις 1.260 kWh με 55% αρχική φόρτιση. Η νέα καρτέλα ορισμού των παραμέτρων της μπαταρίας φαίνεται στην Εικόνα 10.4 και η νέα μεταβολή της στάθμης της στο Διάγραμμα 10.2
- Αύξηση του αριθμού των Φ/Β πάνελ στα 200 (η μόνη διαφορά με την Εικόνα 8.41 Είναι πως τώρα τοποθετούνται 40 πάνελ σε σειρά και 5 σε παράλληλη σύνδεση)
- Αύξηση της ισχύος του Inverter στα 82 kW (καμία άλλη αλλαγή σε αυτόν)

(Papageorgiou) Battery

Parameter Input Output Derivative Comment

		Name	Value	Unit	More	Macro
1		Mode	1	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
2		Cell energy capacity	1400	Wh	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
3		Cells in parallel	12	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
4		Cells in series	75	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>
5		Charging efficiency	0.9	-	More...	<input checked="" type="checkbox"/>

Εικόνα 10.4: Νέα καρτέλα ορισμού των παραμέτρων της μπαταρίας για εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών αναγκών όλου του κτηρίου



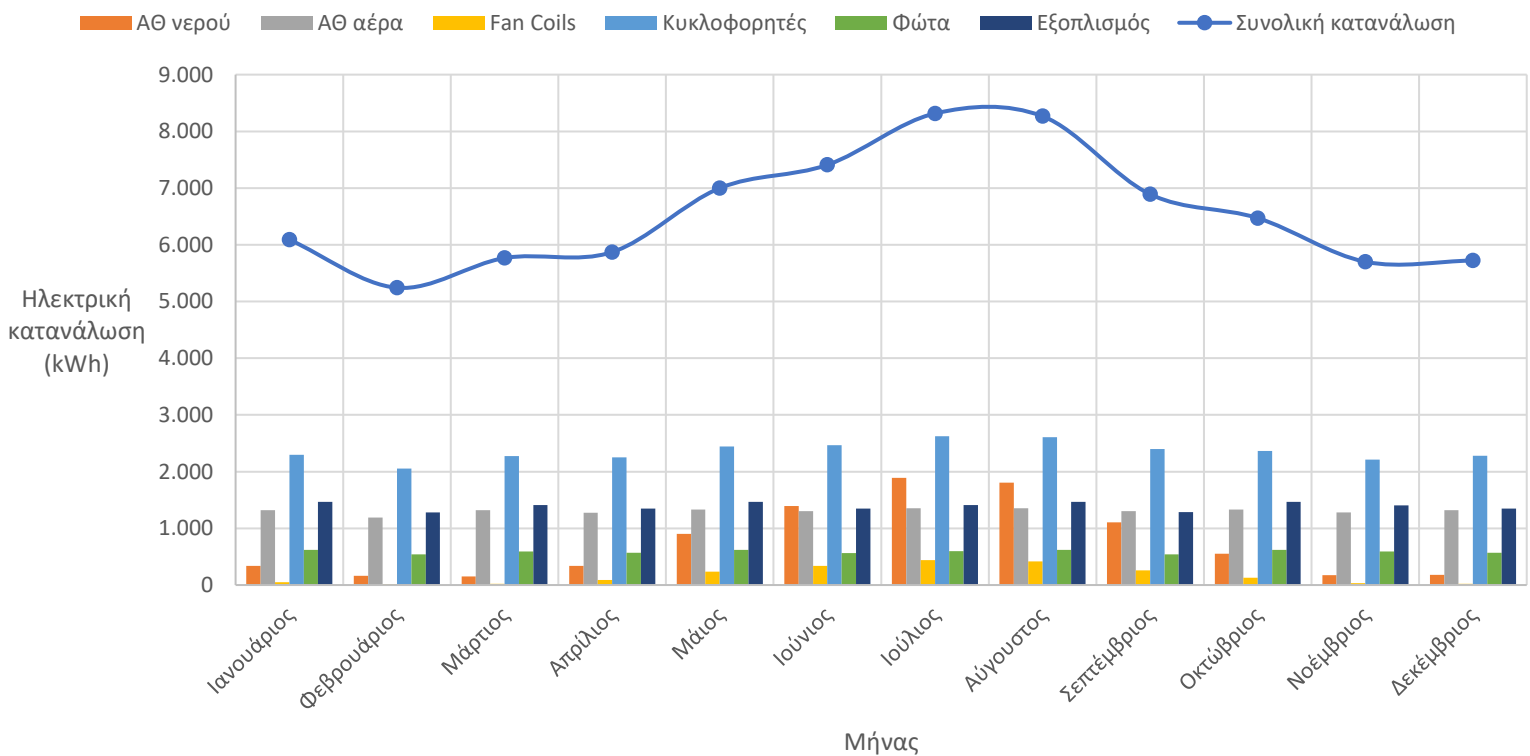
Διάγραμμα 10.2: Μεταβολή ενεργειακής στάθμης της μπαταρίας για την εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών αναγκών όλου του κτηρίου

Μια σημαντική παρατήρηση από το Διάγραμμα 10.2 είναι πως στο τέλος του χρόνου η στάθμη της μπαταρίας φτάνει εκ νέου στο 55%. Δηλαδή, στην αρχή του επόμενου έτους, όπου αναμένεται πάλι η ίδια πτώση, η στάθμη της μπαταρίας θα πέσει στο 20% χωρίς όμως να περάσει αυτό το όριο ασφαλείας. Δηλαδή δεν υπάρχει κίνδυνος να πέσει η στάθμη της μπαταρίας κάτω από το 20% της χωρητικότητάς της σε κανένα έτος λειτουργίας της, όπως ακριβώς και στην περίπτωση που εξεταζόταν μόνο το σύστημα θέρμανσης-ψύξης.

Η συνολική ετήσια ενεργειακή κατανάλωση όλου του κτηρίου ανέρχεται σε 78.743 kWh το οποίο ισοδυναμεί με 91,14 kWh/m². Ο φωτισμός και ο εξοπλισμός του κτηρίου έχουν μια συνολική κατανάλωση περίπου 24.000 kWh, δηλαδή 2.000 kWh/μήνα κατά μέσο όρο. Το μεγαλύτερο κομμάτι αυτής της κατανάλωσης (σχεδόν 70%) οφείλεται στην κατανάλωση των ηλεκτρικών συσκευών.

Από τη συνολική αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας επιβεβαιώνεται η ιδιαίτερη σημασία του μέσου συντελεστή λειτουργίας. Σε περίπτωση που δεν χρησιμοποιούταν αυτός ο συντελεστής και γινόταν η θεώρηση πως οι συσκευές δουλεύουν στη μέγιστη ισχύ συνεχώς, η κατανάλωση των ηλεκτρικών συσκευών θα έφτανε από μόνη της την αρχική κατανάλωση του συστήματος θέρμανσης-ψύξης στις 55.000 kWh. Μαζί με το φωτισμό θα υπερδιπλασίαζαν την τελική κατανάλωση η οποία θα έφτανε στα επίπεδα των 110.000-120.000 kWh. Όπως εύκολα καταλαβαίνει κανείς, μια τέτοια διαφορά (40.000 kWh περίπου από την νέα συνολική κατανάλωση) θα είχε και αντίστοιχες συνέπειες στο κόστος της εγκατάστασης καθώς θα απαιτούνταν ακόμα περισσότερα Φ/Β και μπαταρία μεγαλύτερης χωρητικότητας επηρεάζοντας σημαντικά την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης. Η κατανάλωση ανά μήνα και ανά πηγή όλου του κτηρίου παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 10.3.

Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του κτηρίου



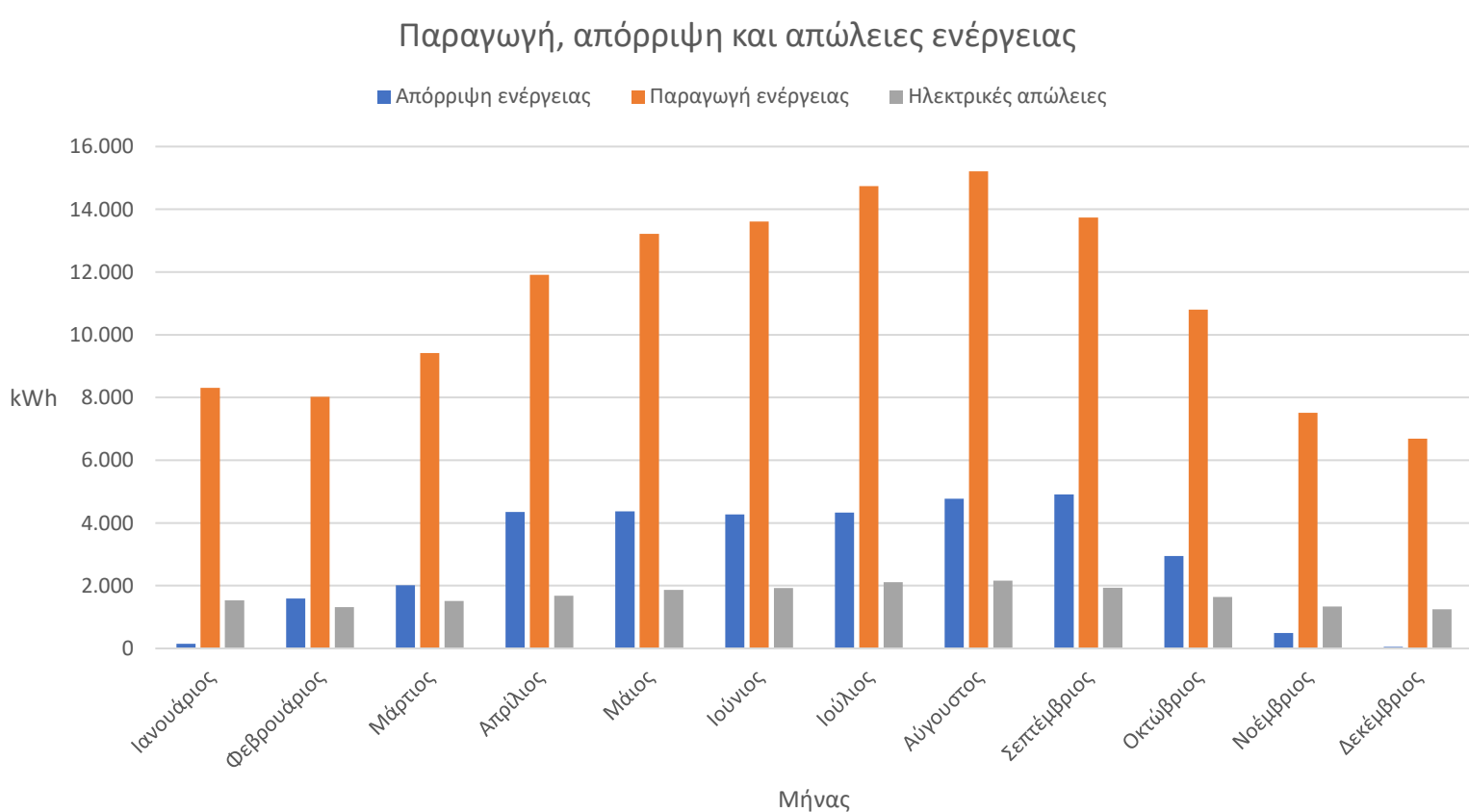
Διάγραμμα 10.3: Ηλεκτρική κατανάλωση ανά μήνα και ανά πηγή όλου του κτηρίου

Όπως και στο Κεφάλαιο 9, κρίνεται σημαντικό να γίνει μια αναφορά στην ενέργεια που αν παραγόταν δε θα μπορούσε ούτε να αποθηκευτεί ούτε να καταλωθεί και άρα για να υπάρχει ευστάθεια στο σύστημα δεν θα παραχθεί καθόλου (Αυτό μπορεί να γίνει πχ αποσυνδέοντας κάποια Φ/Β από τη γραμμή παραγωγής). Παρότι οι αντίστοιχες ποσότητες θα είναι αυξημένες, το οποίο είναι λογικό λόγω περισσότερων Φ/Β, εντούτοις σε επίπεδο ποσοστού είναι σχεδόν το ίδιο με μικρές αποκλίσεις της τάξης του 0,7%. Οι αντίστοιχες τιμές παρατίθενται στον Πίνακα 10.2.

Πίνακας 10.2: Παραγωγή, απόρριψη και απώλειες ενέργειας στην περίπτωση αυτονομησης όλου του κτηρίου

	Παραγωγή Ενέργειας	Μη απορροφούμενη ενέργεια	Απώλειες
kWh	133.182	34.248	20.253
Ποσοστό (%)	-	25,7 %	15,2 %

Η αντίστοιχη μηνιαία μεταβολή αυτών των μεγεθών παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 10.4.



Διάγραμμα 10.4: Παραγόμενη, μη απορροφούμενη ενέργεια και ηλεκτρικές απώλειες στην περίπτωση αυτονομησης όλου του κτηρίου

Το Διάγραμμα 10.4 έχει πανομοιότυπη συμπεριφορά με το Διάγραμμα 9.21 το οποίο είναι αναμενόμενο από τη στιγμή που οι σχέσεις των μεγεθών δεν αλλάζουν σημαντικά. Σε γενικές γραμμές οι ίδιες παρατηρήσεις που ισχύουν εκεί ισχύουν και σε αυτή την περίπτωση. Η βασικότερη ίσως διαφορά είναι πως η απόρριψη ενέργειας είναι λίγο πιο έντονη τους πρώτους καλοκαιρινούς μήνες (Ιούνιο-Ιούλιο) και μικρότερη κατά τον Ιανουάριο και το Φεβρουάριο (πάντα σε σχέση με το Διάγραμμα 9.21).

10.2: Διερεύνηση οικονομικής βιωσιμότητας

Καθώς σε αυτό το σενάριο εξετάζεται η κάλυψη των συνολικών ηλεκτρικών αναγκών του κτηρίου κρίνεται πιο ορθό στο κόστος της επένδυσης (και γενικά την οικονομική ανάλυση) να προτεθεί και ένα εκτιμώμενο κόστος του φωτισμού και των ηλεκτρικών συσκευών που αναφέρονται στον Πίνακα 10.1 στην αρχή του κεφαλαίου. Συγκεκριμένα:

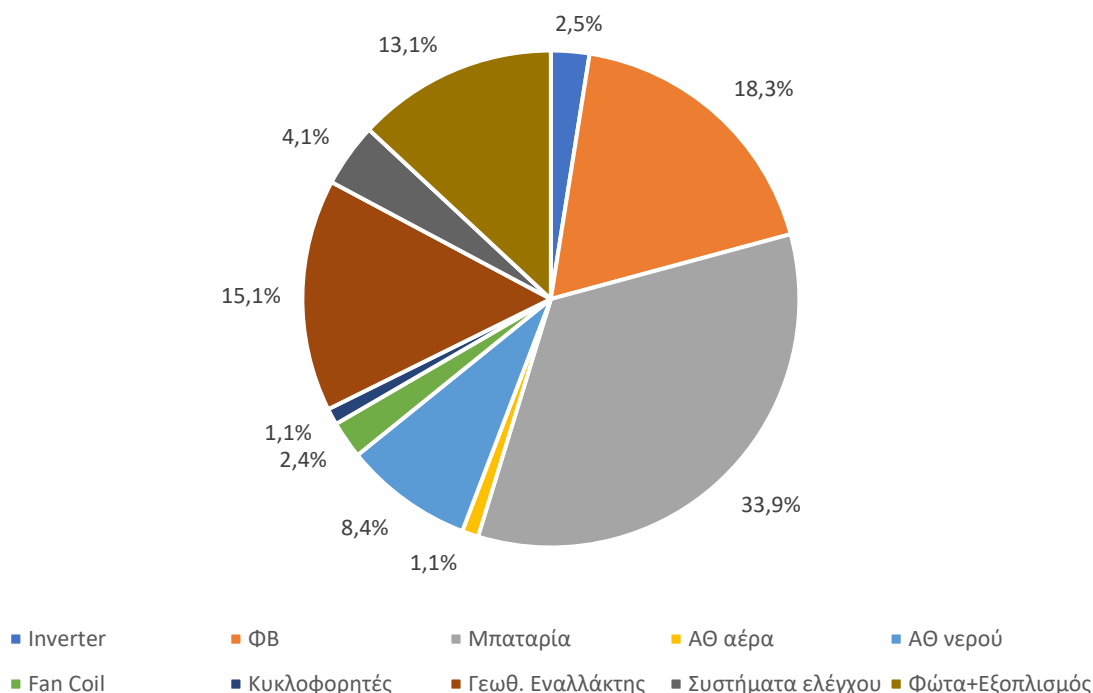
- Για το φωτισμό εκτιμάται ότι θα χρειαστούν 120-130 φωτιστικά οροφής με ένα εκτιμώμενο κόστος της τάξης των 50 € το καθένα. Το κόστος του φωτισμού υπολογίζεται στα 6.000 – 6.500 € με μια μέση τιμή στα 6.250 €
- Για τις ηλεκτρικές συσκευές, βάσει τυπικών τιμών της αγοράς, το συνολικό κόστος εκτιμάται στα 36.600 €. Πιο συγκεκριμένα τα κόστη των συσκευών έχουν υπολογιστεί ως εξής:
 - Τηλέφωνο + υπολογιστής: 520 €/τεμάχιο (Συνολικά 65 όσοι και οι εργαζόμενοι)
 - Εκτυπωτές: 500 €/τεμάχιο (4 εκτυπωτές σύνολο)
 - Λοιπές συσκευές: 800 €

Για το σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας ισχύουν οι ίδιες παραδοχές όπως αναφέρθηκαν στην παράγραφο του οικονομικού κόστους στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι νέες εκτιμώμενες τιμές τους είναι οι εξής:

- Το κόστος ενός Inverter κυμαίνεται γύρω στα 100 €/kW άρα η νέα τιμή του υπολογίζεται ίση με 8.200 €
- Η μέση τιμή των Φ/Β πάνελ είναι 300 €/πάνελ άρα για 200 πάνελ το εκτιμώμενο κόστος είναι 60.000 €
- Το κόστος ενός συστήματος μπαταριών κυμαίνεται περίπου στα 110 €/kWh ή κοντά στα 10 €/Ah. Η νέα χωρητικότητα της μπαταρίας είναι 1.260 kWh η οποία με τάση 150 V αντιστοιχεί σε περίπου 8.400 Ah. Δηλαδή το εκτιμώμενο κόστος της μπαταρίας αναμένεται στο εύρος 84.000 – 138.600 €.

Το νέο συνολικό κόστος της επένδυσης ανέρχεται στα 327.951 €, ποσό στο οποίο έχει προβλεφθεί και η ίδια ποσοστιαία αύξηση με πριν για το κόστος των συστημάτων ελέγχου. Φυσικά αυτή η αύξηση έχει υπολογιστεί χωρίς να ληφθεί υπόψη το κόστος των συσκευών των οποίων η λειτουργία εξαρτάται καθαρά από τους εργαζομένους. Στο Διάγραμμα 10.5 παρουσιάζεται η νέα κατανομή του αρχικού κόστους ανά κατηγορία.

Ποσοστιαία ανάλυση του συνολικού κόστους



Διάγραμμα 10.5: Ποσοστιαία ανάλυση του (εκτιμώμενου) αρχικού κόστους για τη νέα περίπτωση μελέτης

Όπως ήταν αναμενόμενο το μερίδιο των συσκευών του συστήματος θέρμανσης-ψύξης μειώθηκε καθώς το κόστος τους δεν μεταβλήθηκε. Η πιο ενδιαφέρουσα παρατήρηση αφορά την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής της μπαταρίας στο αρχικό κόστος έναντι των Φ/Β και του Inverter παρά τον συνυπολογισμό του φωτισμού και των συσκευών. Αυτή η παρατήρηση καταδεικνύει τη βαραινουσα σημασία του κόστους της μπαταρίας το οποίο αποτελεί σε κάθε περίπτωση βαρόμετρο για την οικονομική βιωσιμότητα της επένδυσης.

Ο υπολογισμός της ΚΠΑ γίνεται με την ίδια διαδικασία όπως και στο Κεφάλαιο 9 με μια μικρή τροποποίηση. Ο εσωτερικός εξοπλισμός του κτηρίου όπως και ο φωτισμός δεν είναι λογικό να θεωρηθεί πως θα έχουν διάρκεια ζωής ίση με 30 έτη. Αντίθετα είναι πολύ πιο λογικό και ρεαλιστικό να θεωρηθεί πως ανά δεκαετία θα υπάρξει ανανέωση των παραπάνω. Για την αναγωγή του κόστους των δύο ανανεώσεων σε τωρινές τιμές εφαρμόζεται η εξής απλουστευτική προσέγγιση:

- Το κόστος της ανανέωσης θεωρείται πως θα είναι το ίδιο με το τωρινό αλλά σε τιμές 10 και 20 ετών στο μέλλον
- Για την αναγωγή του κόστους (42.850 €) από το μέλλον στο τώρα χρησιμοποιείται ο πληθωρισμός. Το κόστος των αγαθών συνδέεται πιο άμεσα με τον πληθωρισμό παρά με το επιτόκιο αναγωγής και για αυτό χρησιμοποιείται ο πρώτος για την αναγωγή σε τωρινές τιμές

- Η αναγωγή σε τωρινές τιμές γίνεται εφαρμόζοντας τον εξής τύπο: Παρούσα αξία = Μελλοντική Αξία $\cdot (1+p)^{-n}$ όπου η μελλοντική αξία ισούται με 42.850 €, ο πληθωρισμός p με 7% και $n = 10$ ή 20 , τα έτη της αλλαγής του εξοπλισμού.

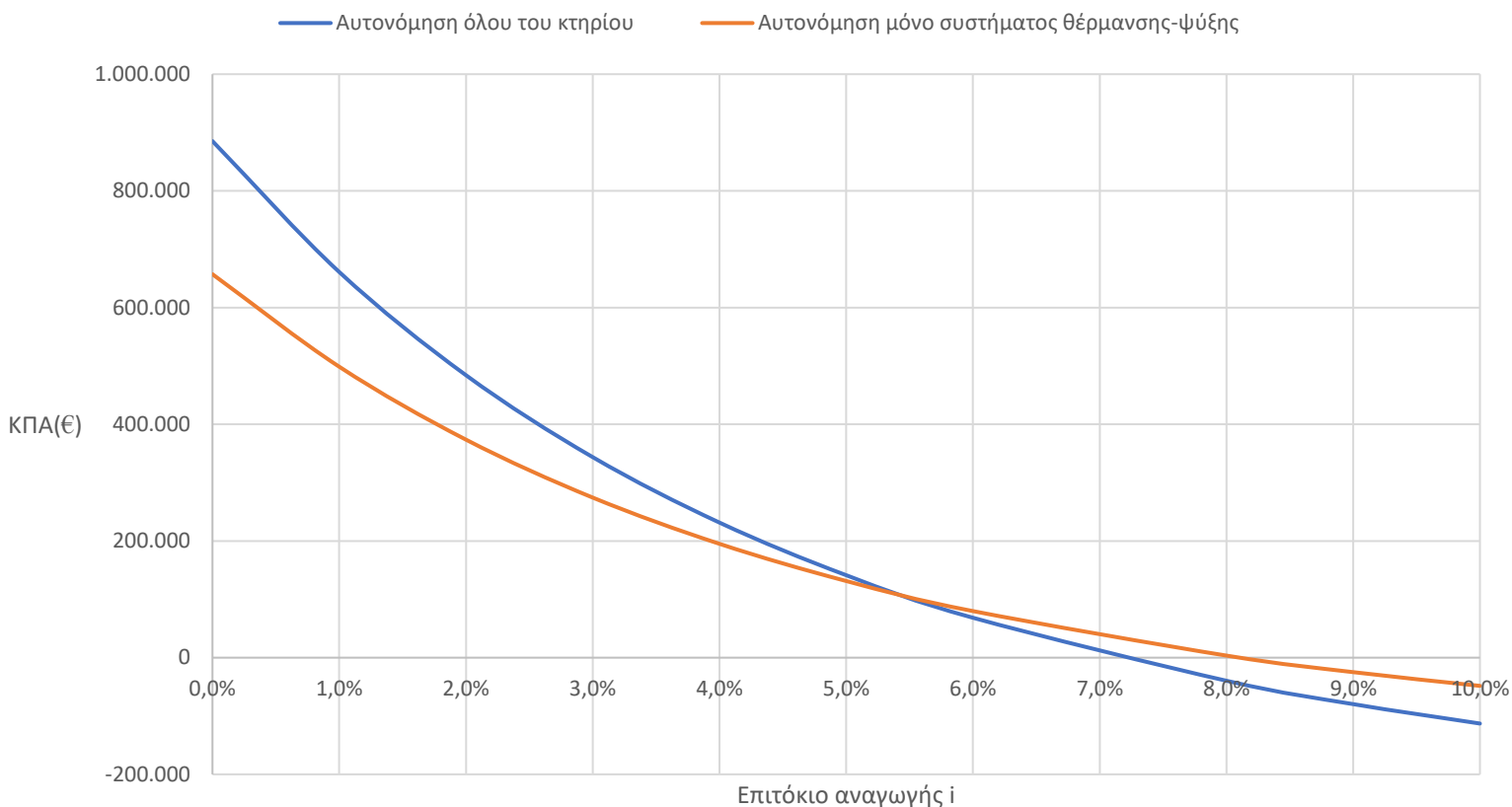
Η τιμή της ΚΠΑ υπολογίζεται με τη σχέση 9.1 αφαιρώντας παράλληλα τις δύο τιμές που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία. Θεωρώντας το ίδιο επιτόκιο αναγωγής ($i = 4\%$), το ίδιο κόστος ενέργειας ($0,23 \text{ €/kWh}$) και το ίδιο ετήσιο ποσοστό ($1,5\%$) του αρχικού κόστους επένδυσης για έξοδα συντήρησης και λειτουργίας, η νέα τιμή της ΚΠΑ βρίσκεται ίση με 231.501 € .

Το γεγονός πως η νέα ΚΠΑ είναι μεγαλύτερη της προηγούμενης συγκεντρώνει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον. Πρακτικά σημαίνει πως η επιπλέον παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη όλων των ηλεκτρικών αναγκών του κτηρίου υπερκαλύπτει το αυξημένο κόστος της μπαταρίας και των Φ/Β αλλά και το κόστος του φωτισμού και των εσωτερικών συσκευών. Το βασικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως είναι πιο συμφέρον οικονομικά να αυτονομηθεί όλο το κτήριο. Φυσικά κάτι που πρέπει να συνυπολογιστεί είναι το αυξημένο κόστος της επένδυσης. Παρότι το κόστος του φωτισμού και των συσκευών υπάρχει και στην πρώτη περίπτωση²³, οι αλλαγές στη χωρητικότητα της μπαταρίας και στον αριθμό των Φ/Β από μόνες τους αυξάνουν το κόστος κατά σχεδόν 60.000 € . Αυτή η αύξηση δεν είναι καθόλου αμελητέα και φυσικά μπορεί να οδηγήσει σε απόρριψη αυτής της επιλογής λόγω απουσίας κεφαλαίου (ή και απροθυμίας για μεγαλύτερο δάνειο) παρά τα διαφαινόμενα οικονομικά πλεονεκτήματα.

Στα Διαγράμματα 10.6 και 10.7 παρουσιάζεται η μεταβολή της ΚΠΑ της επένδυσης συναρτήσει μόνο του επιτοκίου αναγωγής i στην πρώτη περίπτωση και του πληθωρισμού p στη δεύτερη. Για τη δεύτερη περίπτωση έχει προβλεφθεί να αλλάξει το αναγόμενο κόστος του φωτισμού και του εξοπλισμού λαμβάνοντας υπόψιν την αντίστοιχη τιμή του πληθωρισμού. Η ΚΠΑ παρουσιάζεται και στα δύο διαγράμματα συγκριτικά με την αντίστοιχη μεταβολή της αρχικής περίπτωσης.

²³ Το συγκεκριμένο κόστος δεν συνυπολογίζεται στους υπολογισμούς στο Κεφάλαιο 9 καθώς δεν θεωρείται πως υπάρχει κάποια παρέμβαση σε αυτά. Σε εκείνη την περίπτωση εξετάζεται μόνο το σύστημα θέρμανσης-ψύξης και τα σχετικά με αυτό, οπότε συνιστώσες όπως το κόστος του κελύφους και το κόστος του φωτισμού και των συσκευών δεν αφορούν την οικονομική βιωσιμότητα του. Στη δεύτερη περίπτωση όμως έχουν σημασία καθώς η ενέργεια για τη λειτουργία τους θα παράγεται από τα Φ/Β του κτηρίου και άρα είναι πιο σωστό να ληφθεί υπόψιν. Αν δεν λαμβάνονταν υπόψιν, η ΚΠΑ θα αυξανόταν σημαντικά και δεν θα ήταν ιδιαίτερα αξιόπιστη η εκτίμηση των οικονομικών μεγεθών.

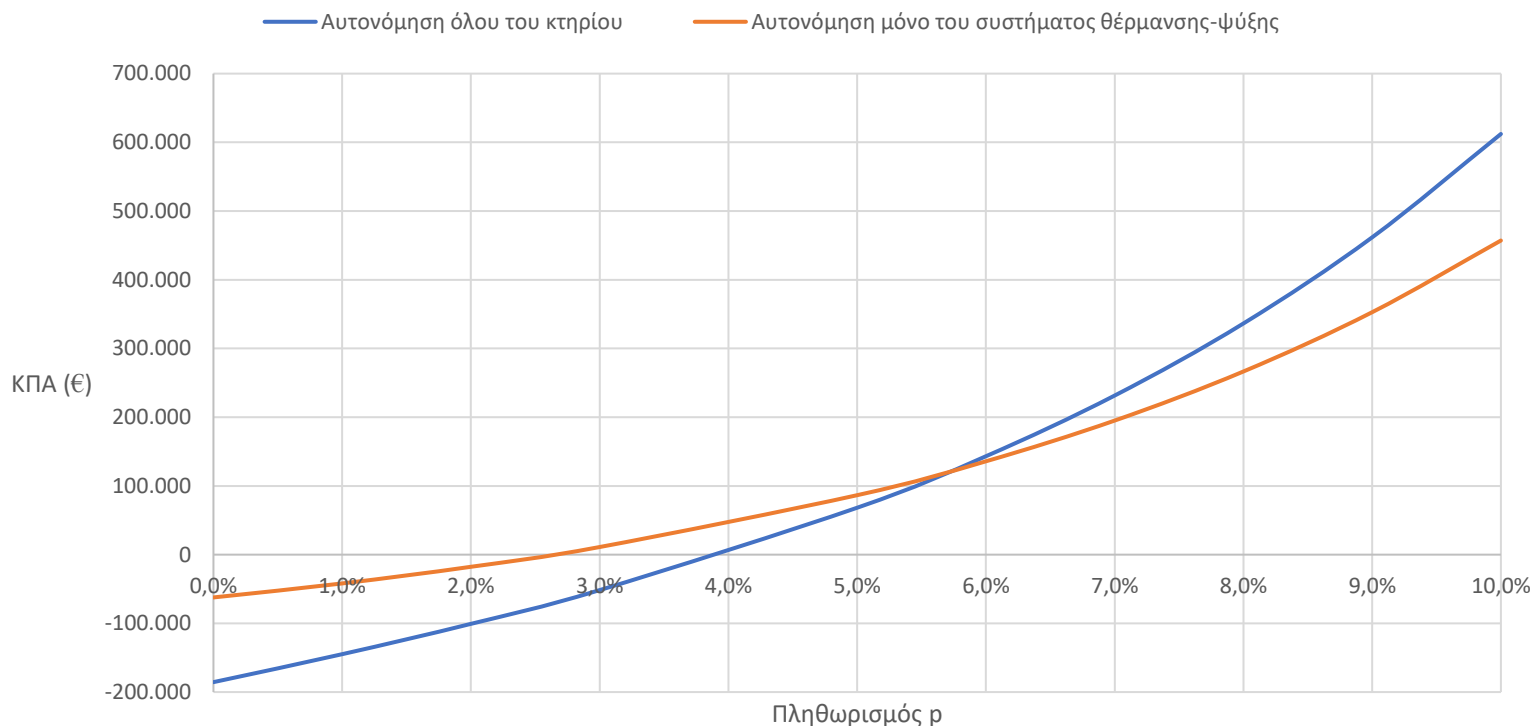
Μεταβολή ΚΠΑ συναρτήσει μόνο του επιτοκίου αναγωγής



Διάγραμμα 10.6: Σύγκριση ΚΠΑ στην περίπτωση ενεργειακής αυτονόμησης μόνο του συστήματος θέρμανσης-ψύξης και της περίπτωσης αυτονόμησης όλου του κτηρίου με σταθερό επιτόκιο αναγωγής 4%

Η καμπύλη μεταβολής της ΚΠΑ στη δεύτερη περίπτωση είναι πιο απότομη με αποτέλεσμα το οριακό επιτόκιο αναγωγής (IRR) να είναι μικρότερο από την προηγούμενη περίπτωση. Υπάρχει δηλαδή μικρότερο περιθώριο (με σταθερό εννοείται τον πληθωρισμό) για κέρδος από ότι προηγουμένως, μια παράμετρος που είναι σημαντική για έναν επενδυτή. Επιπλέον, παρότι η ΚΠΑ της δεύτερης περίπτωσης ξεκινάει από υψηλότερα επίπεδα, η καμπύλη μεταβολής είναι πιο απότομη με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα επιτόκιο αναγωγής από το οποίο και έπειτα η αυτονόμηση μόνο του συστήματος θέρμανσης-ψύξης είναι πιο συμφέρουσα οικονομικά. Συγκεκριμένα, αυτή η τιμή είναι περίπου σε $i = 5,3\%$ στην οποία η ΚΠΑ ισούται σχεδόν με 120.000 €. Αυτό που φαίνεται δηλαδή είναι πως η σωστή εκτίμηση ενός μέσου επιτοκίου αναγωγής είναι πολύ σημαντική για τον υποψήφιο επενδυτή καθώς μια μικρή αύξηση μπορεί να αλλάξει τις οικονομικές ισορροπίες καθιστώντας μια αρχική ,φαινομενικά λιγότερο ανταγωνιστική κίνηση, πιο συμφέρουσα.

Μεταβολή ΚΠΑ συναρτήσει μόνο του πληθωρισμού



Διάγραμμα 10.7: Σύγκριση ΚΠΑ στην περίπτωση ενεργειακής αυτονόμησης μόνο του συστήματος θέρμανσης-ψύξης και της περίπτωσης αυτονόμησης όλου του κτηρίου με σταθερό πληθωρισμό 7%

Σχετικά με τον πληθωρισμό τα συμπεράσματα είναι ανάλογα με αυτά που προκύπτουν από το επιτόκιο αναγωγής. Εκ νέου η καμπύλη μεταβολής είναι πιο απότομη στην περίπτωση ολικής αυτονόμησης, το οποίο σημαίνει πως σε αυτή την περίπτωση αύξηση του πληθωρισμού πάνω από τα εκτιμώμενα επίπεδα θα αυξήσει σημαντικά τα κέρδη. Υπερεκτίμηση του πληθωρισμού ωστόσο θα οδηγήσει σε χειρότερη οικονομική βιωσιμότητα και με μικρότερο περιθώριο κέρδους (η οριακή τιμή του πληθωρισμού για θετική ΚΠΑ είναι λίγο μικρότερη από 4% έναντι περίπου 2,7% στην πρώτη περίπτωση). Το σημείο συνάντησης των δύο καμπυλών είναι περίπου στο 5,7% το οποίο είναι αρκετά κοντά στο βασικό σενάριο (7%) για το μέσο πληθωρισμό. Αναδεικνύεται δηλαδή για άλλη μια φορά η σημασία της σωστής εκτίμησης των συγκεκριμένων οικονομικών συντελεστών ώστε να αποφασίσει ο υποψήφιος επενδυτής ποια επιλογή τον συμφέρει περισσότερο, τόσο από καθαρά οικονομική άποψη αλλά και από την άποψη της ασφάλειας της βιωσιμότητας της επένδυσης.

Στο σενάριο αυτονόμησης όλου του κτηρίου ο νέος IRR ισούται με 7,11%, μικρότερος κατά περίπου 1 μονάδα έναντι του αρχικού. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα εξηγείται γραφικά καθώς η καμπύλη μεταβολής της ΚΠΑ είναι πιο απότομη και άρα με αύξηση του επιτοκίου η επένδυση χάνει αξία πιο γρήγορα. Τέλος, ο χρόνος αποπληρωμής σε αυτή την περίπτωση υπολογίζεται ίσος με 21 έτη.

11. Σύνοψη αποτελεσμάτων – Βασικά συμπεράσματα

11.1: Ανασκόπηση βασικών σημείων

11.1.1: Ανακεφαλαίωση

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η δημιουργία και η προσομοίωση λειτουργίας, μέσω του λογισμικού TRNSYS 18, ενός αυτονόμου συστήματος θέρμανσης-ψύξης για ένα θεωρητικό κτήριο γραφείων. Το εν λόγω κτήριο γραφείων θα λειτουργήσει στην περιοχή των Αθηνών, έχει συνολικά 65 εργαζομένους και επιφάνεια 864 m². Το κτήριο έχει 8 κύριους χώρους με τα γραφεία να διαχωρίζεται σε 6 επιμέρους τμήματα για λόγους που επιβάλλονται από το TRNSYS. Η θερμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων του κελύφους και ο ορισμός των επιθυμητών συνθηκών στους επιμέρους χώρους ακολουθεί σε κάθε περίπτωση τις απαιτήσεις και τις υποδείξεις του KENAK και των αντίστοιχων TOTEE.

Η κάλυψη των αναγκών θέρμανσης και ψύξης επιλέχθηκε να γίνει μέσω συστήματος αξιοποίησης γεωθερμικής ενέργειας με τερματικές μονάδες Fan Coil για ολόκληρο το κτήριο εκτός του Η/Μ χώρου. Ο συγκεκριμένος χώρος έχει μόνο φορτία ψύξης και προκειμένου να μην δημιουργεί κολλήματα στη θέρμανση των υπόλοιπων χώρων τη χειμερινή περίοδο επιλέχθηκε στο συγκεκριμένο χώρο να λειτουργήσει μια ΑΘ αέρα ανεξάρτητα της γεωθερμίας. Το γεωθερμικό σύστημα αποτελείται από μια κλασική διάταξη γεωτρήσεων με U-tubes οι οποίες παρέχουν νερό στην ΑΘ νερού-νερού του συστήματος. Το νερό που κυκλοφορεί σε αυτό το κύκλωμα, ανάλογα την εποχή και το εξυπηρετούμενο φορτίο, παρέχει ή απομακρύνει θερμότητα, με τη βοήθεια της ΑΘ, από το κύκλωμα νερού του κτηρίου το οποίο τροφοδοτεί τα Fan Coils. Στα Fan Coils συναλλάσσεται θερμότητα μεταξύ αυτού του δεύτερου κυκλώματος νερού και του αέρα των χώρων, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο τις επιθυμητές συνθήκες θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας.

Η ενέργεια για τη λειτουργία όλων των παραπάνω παράγεται από συστοιχία Φ/Β τοποθετημένη στην οροφή του κτηρίου. Τα Φ/Β παράγουν ενέργεια μόνο στη διάρκεια της ημέρας επομένως για την αυτονόμηση του συστήματος ήταν απαραίτητο να συμπεριληφθεί και ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας για τις ώρες που υπάρχει κατανάλωση αλλά η παραγωγή είναι μηδενική. Το σύστημα αποθήκευσης που εξετάστηκε είναι ένα τυπικό σύστημα μπαταριών οι οποίες έχουν πολύ καλή συνέργεια με τα Φ/Β. Το DC ρεύμα που παράγεται από τα Φ/Β μετατρέπεται μέσω Inverter σε AC και είτε καταναλώνεται από τα συστήματα του κτηρίου είτε αποθηκεύεται στη μπαταρία για μελλοντική χρήση επιτυγχάνοντας έτσι την επιθυμητή αυτονομία. Η οικονομική ανάλυση που ακολούθησε δείχνει πως η δημιουργία ενός αυτόνομου συστήματος θέρμανσης-ψύξης είναι -πέραν από εφικτή- και μια οικονομικά βιώσιμη επιλογή, με σημαντικό περιθώριο ασφαλείας στην εκτίμηση των οικονομικών συντελεστών.

Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων παρατηρήθηκε ότι η αυτονόμηση του συστήματος ήταν δυνατή αφήνοντας μάλιστα αρκετό κενό χώρο στην οροφή. Για αυτό τον λόγο επιλέχθηκε να εξεταστεί η ενεργειακή αυτονόμηση όλου του κτηρίου με αντίστοιχη αύξηση στον αριθμό των Φ/Β και στην χωρητικότητα της μπαταρίας. Δηλαδή, πέραν της ηλεκτρικής κατανάλωσης του συστήματος θέρμανσης-ψύξης έγιναν δοκιμές του κατά πόσο μπορεί να καλυφθεί και η κατανάλωση του φωτισμού και των συσκευών που υπάρχουν στους διάφορους εσωτερικούς χώρους. Οι προσομοιώσεις και η επακόλουθη οικονομική ανάλυση δείχνουν πως και αυτή η κίνηση είναι οικονομικά βιώσιμη. Μάλιστα, σε αρκετές περιπτώσεις η αυτονόμηση ολόκληρου το κτηρίου είναι ακόμα πιο οικονομικά συμφέρουσα, ωστόσο με μικρότερα περιθώρια ασφαλείας από την αυτονόμηση μόνο του συστήματος θέρμανσης-ψύξης.

11.1.2: Ανασκόπηση βασικών αριθμητικών αποτελεσμάτων

Τα βασικά αριθμητικά αποτελέσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να συνοψιστούν στα εξής:

- Η μέγιστη ισχύς των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων που καλείται να διαχειριστεί το γεωθερμικό σύστημα ισούται με 54 kW και 64 kW αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι σε λογικά πλαίσια και οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στην καλή κατασκευή του κελύφους και την ύπαρξη σκίασης σε τρεις μεριές του κτηρίου
- Το μέγιστο φορτίο του Η/Μ χώρου ανέρχεται σε σχεδόν 11 kW το οποίο μάλιστα είναι σχεδόν σταθερό εξαιτίας της θεώρησης πως σε αυτό το χώρο υπάρχουν οι σέρβερ (servers) και οι ηλεκτρικοί πίνακες του κτηρίου οι οποίοι παράγουν συνεχώς μεγάλα ποσά θερμότητας
- Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς του συστήματος θέρμανσης-ψύξης του κτηρίου ανέρχεται σε περίπου 27 kW και παρατηρείται τη θερινή περίοδο. Από αυτά τα 27 kW τα 14,5 kW αφορούν την κατανάλωση της ΑΘ νερού-νερού
- Η συναλλαγή θερμότητας με το έδαφος οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του κατά 0,72 °C τον πρώτο χρόνο λειτουργίας. Τα επόμενα έτη αυτή η αύξηση μειώνεται σημαντικά και στα 30 έτη η εκτιμώμενη αύξηση της θερμοκρασίας του εδάφους είναι μόλις 5,5 °C (25,5 °C από τους 20 °C που θεωρείται ως η αρχική θερμοκρασία εδάφους)
- Η συνολική ετήσια κατανάλωση ενέργειας του συστήματος θέρμανσης-ψύξης ανέρχεται σε 55.114 kWh ή 63,79 kWh/m²
- Για την αυτονόμηση του συστήματος θέρμανσης-ψύξης απαιτούνται συνολικά 140 Φ/Β πάνελ ονομαστικής ισχύος 56 kW, Inverter ισχύος 60 kW και σύστημα μπαταριών χωρητικότητας 825 kWh. Με αυτά τα μεγέθη επιτυγχάνεται η επιθυμητή αυτονόμηση σε συνδυασμό με ένα όριο ασφαλείας 20% στη στάθμη της μπαταρίας
- Το κόστος της αρχικής επένδυσης εκτιμάται σε 223.519 € με χρονικό ορίζοντα ζωής ίσο με 30 έτη
- Θεωρώντας τυπικές τιμές για τον πληθωρισμό (7%), το επιτόκιο αναγωγής (4%), το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας (1,5% της αρχικής

επένδυσης) και τέλος για την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (0,23 €/kWh), η ΚΠΑ της επένδυσης υπολογίζεται ίση με 195.105 €

- Ο IRR της συγκεκριμένης επένδυσης ισούται με 8,1% και ο χρόνος αποπληρωμής της με 19 έτη
- Η ετήσια ηλεκτρική κατανάλωση ολόκληρου του κτηρίου ανέρχεται σε 78.743 kWh ή 91,14 kWh/m². Σε αυτές περιλαμβάνονται οι 55.114 kWh του συστήματος θέρμανσης-ψύξης στις οποίες προστίθενται οι περίπου 23.690 kWh που καταναλώνονται από τον φωτισμό και τις ηλεκτρικές συσκευές εντός του κτηρίου
- Για την εξυπηρέτηση της συνολικής κατανάλωσης είναι απαραίτητο ο αριθμός των Φ/Β να αυξηθεί στα 200, η ισχύς του Inverter στα 82 kW και η χωρητικότητα των μπαταριών στις 1.260 kWh
- Το νέο κόστος επένδυσης εκτιμάται σε 327.951 € στο οποίο συμπεριλαμβάνεται ο φωτισμός και οι ηλεκτρικές συσκευές
- Με τις ίδιες υποθέσεις για τους οικονομικούς συντελεστές η ΚΠΑ της συνολικής επένδυσης εκτιμάται σε 231.501 €. Σε αυτό το ποσό έχει ληφθεί υπόψιν και ένα κόστος ανανέωσης του φωτισμού και των ηλεκτρικών συσκευών στα 10 και τα 20 έτη λειτουργίας του κτηρίου
- Ο IRR στη δεύτερη περίπτωση υπολογίζεται ίσος με 7,2% και ο χρόνος αποπληρωμής ίσος με 21 έτη

11.1.3: Βασικά συμπεράσματα

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

- Η κατασκευή ενός κτηρίου έχει πολύ μεγάλη σημασία για την ενεργειακή του κατανάλωση και κατ'έκταση την οικονομική του βιωσιμότητα. Περιορισμός των θερμικών και των ψυκτικών φορτίων οδηγεί σε μικρότερα μέγιστα φορτία άρα και μικρότερου μεγέθους μηχανήματα με πιο περιορισμένη κατανάλωση ενέργειας τα οποία παράλληλα κοστίζουν και λιγότερο
- Μεγάλη σημασία για τη μεταβολή της θερμοκρασίας του εδάφους δεν έχει τόσο η διαφορά των μέγιστων φορτίων όσο η διάρκεια εμφάνισης θερμικών ή ψυκτικών φορτίων μέσα στο χρόνο. Η βασική αιτία της αύξησης της θερμοκρασίας του εδάφους ήταν το γεγονός πως σχεδόν ολόκληρη τη θερινή περίοδο υπάρχουν υψηλά ψυκτικά φορτία και άρα μεγάλη απόδοση ενέργειας στο έδαφος. Από την άλλη, παρότι το μέγιστο θερμικό φορτίο είναι υψηλό, εντούτοις τα θερμικά φορτία εμφανίζονται για πολύ λιγότερο και με μικρότερη ένταση εντός του έτους και έτσι δεν προλαβαίνουν να «ισορροπήσουν» με τα ψυκτικά
- Για το σύστημα θέρμανσης-ψύξης ο γεωθερμικός εναλλάκτης αποτελεί το πιο ακριβό εξάρτημα με κόστος που εξαρτάται από το μέγεθος των απαιτούμενων γεωτρήσεων και την ισχύ που καλείται να αντιμετωπίσει. Το δεύτερο ακριβότερο εξάρτημα είναι η ΑΘ νερού-νερού της οποίας το κόστος επίσης εξαρτάται έντονα από το μέγιστο φορτίο. Φαίνεται δηλαδή

για άλλη μια φορά η σημασία που πρέπει να δίνεται στον περιορισμό των φορτίων

- Παρότι το κόστος των Φ/Β πάνελ έχει μειωθεί αρκετά τα τελευταία έτη δεν έχει συμβεί το ίδιο (ακόμα) με τις μπαταρίες. Το κόστος τους είναι ακόμα αρκετά υψηλό και κατέχει τη μερίδα του λέοντος συνολικά. Επομένως η σωστή της διαστασιολόγηση είναι σημαντική καθώς ακόμα και μικρή αύξηση της χωρητικότητας μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα οικονομικά της επένδυσης
- Η επίτευξη αυτονομίας του συστήματος θέρμανσης-ψύξης είναι μια εφικτή και οικονομικά βιώσιμη επιλογή. Παρότι η αποπληρωμή της αρχικής επένδυσης καθυστερεί κάπως (πραγματοποιείται στο 60% του χρόνου ζωής της επένδυσης) το τελικό όφελος είναι σημαντικό
- Η αυτονόμηση ολόκληρου του κτηρίου είναι και αυτή μια ελκυστική οικονομικά επιλογή. Παρότι το κόστος επένδυσης μεγαλώνει και ο χρόνος αποπληρωμής πάει πίσω μερικά ακόμα χρόνια η τελική αποπληρωμή συμφέρει ακόμα περισσότερο από την αυτονόμηση μόνο του συστήματος θέρμανσης-ψύξης. Βέβαια για αυτό απαιτούνται συγκεκριμένες οικονομικές συνθήκες με τη δεύτερη επένδυση να είναι πιο ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές των οικονομικών συντελεστών. Η επιλογή του τι συμφέρει περισσότερο εξαρτάται δηλαδή και από το ρίσκο που είναι διατεθειμένος να αναλάβει ο υποψήφιος επενδυτής. Η αυτονόμηση μόνο του συστήματος θέρμανσης-ψύξης έχει μικρότερο ρίσκο σαν επιλογή ωστόσο η αυτονόμηση όλου του κτηρίου μπορεί να έχει δυνητικά καλύτερη οικονομική απόδοση.
- Το ιδανικότερο σενάριο θα ήταν να μπορούσε το κτήριο να είναι αυτόνομο και παράλληλα η τυχόν ενέργεια των Φ/Β να μπορεί να αποδοθεί στο δίκτυο για επιπλέον οικονομικό όφελος. Κάτι τέτοιο ωστόσο δεν υποστηρίζεται από την αγορά και έτσι αναπόφευκτα, μια σημαντική ποσότητα ενέργειας που θα μπορούσε να παραχθεί και να πουληθεί εντέλει δεν παράγεται καθόλου μειώνοντας τη χρήση των Φ/Β πάνελ.

11.2: Προτάσεις για μελλοντική έρευνα επί του θέματος

Όπως αναγράφεται στην προηγούμενη παράγραφο, ο περιορισμός των φορτίων του κτηρίου είναι πολύ σημαντικός. Συνεπώς θα είχε νόημα να εξεταστεί σε μελλοντική εργασία η ενσωμάτωση παθητικών ηλιακών συστημάτων όπως πχ οι τοίχοι Trombe και στοιχείων βιοκλιματικού σχεδιασμού όπως πχ οι πράσινες στέγες. Τέτοιες κινήσεις θα μπορούσαν να μειώσουν περαιτέρω τα φορτία και το ενεργειακό αποτύπωμα του κτηρίου με ενδεχόμενη επίτευξη ακόμα καλύτερων οικονομικών αποτελεσμάτων, κάτι φυσικά που θα πρέπει να αποδειχθεί. Επιπλέον, περιορισμός των φορτίων θα είχε ως αποτέλεσμα και τον περιορισμό της επίδρασης του συστήματος στη θερμοκρασία του εδάφους.

Σχετικά με την αξιοποίηση της χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμίας θα μπορούσαν να εξεταστούν δύο τροποποιήσεις όσων αναφέρονται στην παρούσα εργασία:

1. Η πρώτη είναι η χρήση συστημάτων ενδοδαπέδιας θέρμανσης και ενδοτοιχίας ψύξης (ή ψύξης από την οροφή). Τέτοιου τύπου συστήματα είναι αρκετά αποδοτικά επομένως ενδέχεται να έχουν μικρότερη κατανάλωση και καλύτερη συμπεριφορά από το σύστημα Fan Coil που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.
2. Η δεύτερη είναι μια συγκριτική μελέτη της περίπτωσης αξιοποίησης Αντλιών θερμότητας υπόγειου νερού (GWHP) φυσικά θεωρώντας πως υπάρχει ο απαραίτητος υδροφόρος ορίζοντας και είναι αξιοποιήσιμος. Παρότι οι περιοχές εφαρμογής τέτοιων συστημάτων είναι λιγότερες, εντούτοις δεν είναι απίθανο υπό συγκεκριμένες συνθήκες σε μια περιοχή που μπορεί να υποστηρίξει ένα τέτοιο έργο να συμφέρει περισσότερο από την εγκατάσταση μιας εδαφικά συνδεδεμένης αντλίας θερμότητας (GCHP) όπως στην παρούσα εργασία. Επιπλέον, αυτή η περίπτωση αποκτά ακόμα μεγαλύτερο ενδιαφέρον στην περίπτωση συνδυασμού με την ενδοδαπέδια θέρμανση καθώς θα μπορούσε ενδεχομένως να αξιοποιηθεί απευθείας το υπόγειο νερό

Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να εφαρμόζεται συστηματικά ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής (Life Cycle Cost) τόσο στις κατασκευές όσο και στα μηχανολογικά συστήματα. Αναλύσεις LCC έχουν ως στόχο να αποτυπώσουν τη συνολική επίδραση ενός συστήματος στο περιβάλλον του καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του επομένως είναι ένα στοιχείο που θα μπορούσε να εξεταστεί για να φανεί και η περιβαλλοντική-πέραν της οικονομικής- βιωσιμότητας του κτηρίου και των συστημάτων του.

Μια τελευταία πτυχή του θέματος στην οποία θα μπορούσε να γίνει μια μεγαλύτερη εμβάθυνση είναι η σύγκριση με το κτήριο αναφοράς του KENAK ώστε να προκύψει η ενεργειακή κλάση του κτηρίου. Φυσικά κάτι τέτοιο απαιτεί τον επανυπολογισμό σχεδόν όλου του κτηρίου (βάσει της ακριβής μεθοδολογίας υπολογισμού της κατανάλωσης ενέργειας του κτηρίου αναφοράς) ωστόσο θα μπορούσε να δώσει μια καλή ιδέα του που μπορούν να γίνουν οι πιο ουσιαστικές παρεμβάσεις.

12. Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Διάγραμμα Lindal	41
Σχήμα 4.1: Ενεργειακή κατανομή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο [11].....	51
Σχήμα 4.2: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα	52
Σχήμα 4.3: Κλίση επιφάνεια ανάλογα την εποχή για μέγιστη πρόσδοση ενέργειας	56
Σχήμα 4.4: Ηλιακές γωνίες.....	56
Σχήμα 5.1: Σύγκριση δομής μονωτικών, ημιαγωγικών και αγωγικών υλικών.....	63
Σχήμα 5.2: Επαφή p-n και δημιουργία ζώνης απογύμνωσης.....	64
Σχήμα 5.3: Οριακή απόδοση Shockley-Queisser (SQ) συναρτήσει του ενεργειακού χάσματος.....	66
Σχήμα 5.4: Ισοδύναμο κύκλωμα Φ/Β στοιχείου με φορτίο	68
Σχήμα 5.5: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και παραγόμενη ισχύς Φ/Β στοιχείου	69
Σχήμα 5.6: Μεταβολή χαρακτηριστικής καμπύλης I-V σε παράλληλη και εν σειρά σύνδεση	70

13. Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1.1: Συμμετοχή κάθε ΑΠΕ στην ανανεώσιμη ηλεκτροπαραγωγή στην Ευρώπη για το 2021 [13].....	24
Διάγραμμα 1.2: Εγκατεστημένη Ισχύς ΑΠΕ στην Ελλάδα.....	26
Διάγραμμα 1.3: Ποσοστιαία συμμετοχή κάθε τομέα στην τελική κατανάλωση ενέργειας στην ΕΕ [13].....	28
Διάγραμμα 1.4: Ποσοστιαία συμμετοχή κάθε τομέα στην τελική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα [13]	29
Διάγραμμα 9.1: Μεταβολή θερμοκρασίας εξωτερικού (περιβαλλοντικού) αέρα.....	145
Διάγραμμα 9.2: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 1 με του εξωτερικό αέρα.	146
Διάγραμμα 9.3: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 2 με του εξωτερικού αέρα	146
Διάγραμμα 9.4: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 3 με του εξωτερικού αέρα	147
Διάγραμμα 9.5: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 4 με του εξωτερικού αέρα	147
Διάγραμμα 9.6: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Office 5 με του εξωτερικού αέρα	148
Διάγραμμα 9.7: Σύγκριση θερμοκρασιών του χώρου Office 6 με του εξωτερικού αέρα	148
Διάγραμμα 9.8: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Manager με του εξωτερικού αέρα	150
Διάγραμμα 9.9: Σύγκριση θερμοκρασιών του χώρου Meeting Room με του εξωτερικού αέρα	150
Διάγραμμα 9.10: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Supervisors με του εξωτερικού αέρα	151
Διάγραμμα 9.11: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Break Room με του εξωτερικού αέρα	151
Διάγραμμα 9.12: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Lobby με του εξωτερικού αέρα	152
Διάγραμμα 9.13: Σύγκριση θερμοκρασίας του χώρου Toilets και του εξωτερικού αέρα	152
Διάγραμμα 9.14: Σύγκριση θερμοκρασίας του Η/Μ χώρου και του εξωτερικού αέρα .	153
Διάγραμμα 9.15: Συνολική καταναλισκόμενη ισχύς (σε kW) στη διάρκεια του χρόνου	154
Διάγραμμα 9.16: Καταναλισκόμενη ισχύς (σε kW) της ΑΘ νερού-νερού	155
Διάγραμμα 9.17: COP ΑΘ νερού-νερού	156
Διάγραμμα 9.18: Μηνιαία διακύμανση της ηλεκτρικής κατανάλωσης ανά πηγή	157
Διάγραμμα 9.19: Παραγόμενη ισχύς από τα Φ/Β	160
Διάγραμμα 9.20: Βαθμός απόδοσης συστοιχίας Φ/Β στη διάρκεια του έτους	161
Διάγραμμα 9.21: Παραγόμενη και μη απορροφούμενη ενέργεια από το ηλεκτρικό σύστημα (Φ/Β-Inverter-μπαταρία) του κτηρίου.....	162
Διάγραμμα 9.22: Μεταβολή ενεργειακής στάθμης της μπαταρίας.....	164

Διάγραμμα 9.23: Μεταβολή θερμοκρασίας του εδάφους στο 1 ^ο έτος.....	166
Διάγραμμα 9.24: Μεταβολή θερμοκρασίας εδάφους στα 15 έτη	167
Διάγραμμα 9.25: Μεταβολή θερμοκρασίας εδάφους και πρόβλεψη μελλοντικής εξέλιξης	168
Διάγραμμα 9.26: Μεταβολή της ΚΠΑ συναρτήσεως του επιτοκίου αναγωγής i για σταθερό πληθωρισμό (7%).....	173
Διάγραμμα 9.27: Μεταβολή της ΚΠΑ συναρτήσεως του πληθωρισμού p για σταθερό επιτόκιο αναγωγής (4%).....	174
Διάγραμμα 9.28: Ποσοστιαία ανάλυση του (εκτιμώμενου) συνολικού κόστους του συστήματος.....	175
Διάγραμμα 10.1: Μεταβολή καταναλισκόμενης ισχύος όλου του κτηρίου.....	180
Διάγραμμα 10.2: Μεταβολή ενεργειακής στάθμης της μπαταρίας για την εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών αναγκών όλου του κτηρίου.....	181
Διάγραμμα 10.3: Ηλεκτρική κατανάλωση ανά μήνα και ανά πηγή όλου του κτηρίου .	182
Διάγραμμα 10.4: Παραγόμενη, μη απορροφούμενη ενέργεια και ηλεκτρικές απώλειες στην περίπτωση αυτονομίας όλου του κτηρίου	183
Διάγραμμα 10.5: Ποσοστιαία ανάλυση του (εκτιμώμενου) αρχικού κόστους για τη νέα περίπτωση μελέτης.....	186
Διάγραμμα 10.6: Σύγκριση ΚΠΑ στην περίπτωση ενεργειακής αυτονομίας μόνο του συστήματος θέρμανσης-ψύξης και της περίπτωσης αυτονομίας όλου του κτηρίου με σταθερό επιτόκιο αναγωγής 4%.....	188
Διάγραμμα 10.7: Σύγκριση ΚΠΑ στην περίπτωση ενεργειακής αυτονομίας μόνο του συστήματος θέρμανσης-ψύξης και της περίπτωσης αυτονομίας όλου του κτηρίου με σταθερό πληθωρισμό 7%	189

14. Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Ποσοστό κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας ανά περιοχή του πλανήτη και μεταβολή αυτής στο διάστημα 2011-2021.....	16
Πίνακας 2.1: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα γεωθερμικής ενέργειας	43
Πίνακας 4.1: Τυπικές τιμές ανακλαστικότητας εδάφους.....	57
Πίνακας 4.2: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλιακής ενέργειας	60
Πίνακας 7.1: Διαστάσεις κάθε χώρου	88
Πίνακας 7.2: Υλικά για τις αδιαφανείς επιφάνειες του κτηρίου	95
Πίνακας 7.3: Σύγκριση τιμών θερμικής διαπερατότητας των στοιχείων του κελύφους με τα αντίστοιχα όρια του ΚΕΝΑΚ	97
Πίνακας 7.4: Συνθήκες λειτουργίας στους χώρους του κτηρίου	98
Πίνακας 7.5: Τιμές TOTEE για εσωτερικά κέρδη	98
Πίνακας 7.6: Μέγιστος αριθμός ατόμων (ταυτόχρονα) σε κάθε χώρο	99
Πίνακας 7.7: Φορτία θέρμανσης και ψύξης των διαφόρων χώρων του κτηρίου	106
Πίνακας 8.1: Ολική δυναμικότητα των Fan Coil σε κάθε χώρο του κτηρίου.....	113
Πίνακας 8.2: Ψυκτική ικανότητα κάθε Fan Coil και ισχύς του ανεμιστήρα του	120
Πίνακας 8.3: Ανάγκες σε νωπό αέρα κάθε χώρο	123
Πίνακας 8.4: Μέγιστες απαιτήσεις σε κλιματισμένο αέρα και στοιχεία νωπού αέρα ...	125
Πίνακας 9.1: Παραγωγή, απόρριψη και απώλειες ηλεκτρικού συστήματος	163
Πίνακας 9.2: Εκτιμώμενο κόστος αγοράς μονάδων Fan Coil.....	169
Πίνακας 9.3: Αναμενόμενο εύρος και μέση τιμή του κόστους των διαφόρων τμημάτων του συστήματος.....	170
Πίνακας 9.4: ΚΠΑ (σε εκατοντάδες χιλιάδες €) ανάλογα το επιτόκιο αναγωγής και τον πληθωρισμό.....	172
Πίνακας 10.1: Ηλεκτρική ισχύς και αριθμός συσκευών του κτηρίου.....	177
Πίνακας 10.2: Παραγωγή, απόρριψη και απώλειες ενέργειας στην περίπτωση αυτονόμησης όλου του κτηρίου	183

15. Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Μεταβολή της συμμετοχής διάφορων πηγών ενέργειας στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα από το 2000 [1].....	15
Εικόνα 1.2: Συμμετοχή κάθε πηγής ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα των διαφόρων περιοχών του πλανήτη [1].....	17
Εικόνα 1.3: Παγκόσμια πρωτογενής κατανάλωση ενέργειας ανά «καύσιμο» για το 2021 [14].....	22
Εικόνα 1.4: Εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ παγκοσμίως για το 2021 [14].....	22
Εικόνα 1.5: Ποσοστό συμμετοχής των ΑΠΕ στη συνολική παραγωγή ενέργειας στην Ευρώπη [13].....	23
Εικόνα 1.6: Μερίδιο των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή ανά χώρα για το 2021 [13].....	24
Εικόνα 1.7: Συμμετοχή των ΑΠΕ στις παραγωγή ενέργειας για ψύξη και θέρμανση στην Ευρώπη για το 2021 [13].....	25
Εικόνα 1.8: Μερίδιο των ΑΠΕ στην ενέργεια για μεταφορές στην Ευρώπη το 2021 [13].....	25
Εικόνα 1.9: Κλιματικές ζώνες Ελλάδας.....	30
Εικόνα 2.1: Εσωτερική δομή του πλανήτη.....	32
Εικόνα 2.2: Δομή του εσωτερικού της Γης και γεωθερμική βαθμίδα.....	33
Εικόνα 2.3: Κύριες λιθοσφαιρικές πλάκες και σχετικές κινήσεις τους.....	35
Εικόνα 2.4: Προέλευση ηφαιστειακής δραστηριότητας στη Χαβάη.....	36
Εικόνα 2.5: Προέλευση γεωθερμικής δραστηριότητας στο Εθνικό Πάρκο Γέλουουστοουν.....	37
Εικόνα 2.6: Μεγάλη Πρισματική Πηγή, ένα από τα πιο αναγνωρίσιμα σημεία του Γέλουουστοουν.....	37
Εικόνα 2.7: Ηφαιστειακό τόξο Αιγαίου.....	39
Εικόνα 3.1: Σύστημα κλειστού κύκλου με τις διάφορες εκδοχές της διάταξης των εναλλακτών θερμότητας [10].....	46
Εικόνα 3.2: Σύστημα αντλιών θερμότητας υπόγειου νερού με ενδιάμεσο εναλλάκτη θερμότητας σε λειτουργία ψύξης [10].....	48
Εικόνα 3.3: Τυπική διάταξη κλειστού συστήματος επιφανειακού νερού.....	48
Εικόνα 3.4: Συγκριτικά κόστη συστημάτων (κόκκινο χρώμα) και GWHP (μπλε χρώμα) [10].....	50
Εικόνα 5.1: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς Φ/Β στον κόσμο και την Ευρώπη [14].....	61
Εικόνα 5.2: Φ/Β πάνελ από πυρίτιο. Από αριστερά προς δεξιά: Μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και λεπτού φιλμ.....	67
Εικόνα 6.1: Αρχικό περιβάλλον Simulation Studio.....	74
Εικόνα 6.2: Βασικές επιλογές ενός νέου project.....	75
Εικόνα 6.3: Βιβλιοθήκη στοιχείων του TRNSYS.....	76
Εικόνα 6.4: Σύνδεση δύο στοιχείων στο Assembly Panel.....	77
Εικόνα 6.5: Συσχέτιση μεταβλητών δύο διαφορετικών στοιχείων.....	78
Εικόνα 6.6: Παράθυρο επεξεργασίας μεταβλητών στοιχείου.....	78

Εικόνα 6.7: Εισαγωγή εξίσωσης στο Simulation Studio	79
Εικόνα 6.8: Παράδειγμα ορισμού εξίσωσης	79
Εικόνα 6.9: Καθορισμός γενικών συνθηκών της προσομοίωσης	80
Εικόνα 6.10: Αρχικό μενού TRNBuild	81
Εικόνα 6.11: Μενού επεξεργασίας τοίχου	82
Εικόνα 6.12: Μενού επεξεργασίας θερμικής ζώνης.....	82
Εικόνα 7.1: Ορισμός τύπου νέου πρότζεκτ	86
Εικόνα 7.2: Γεωμετρία του κτηρίου	87
Εικόνα 7.3: Παράθυρο καθορισμού διαστάσεων κάθε χώρου	88
Εικόνα 7.4: Καθορισμός ανοιγμάτων, περιστροφής και μετεωρολογικών δεδομένων για το κτήριο.....	89
Εικόνα 7.5: Ορισμός εναλλαγών αέρα και αερισμού.....	90
Εικόνα 7.6: Ορισμός θέρμανσης-ψύξης του κτηρίου	90
Εικόνα 7.7: Εσωτερικά κέρδη και φωτισμός του κτηρίου	91
Εικόνα 7.8: Ορισμός σκίασης στη νότια πλευρά του κτηρίου	92
Εικόνα 7.9: Ορισμός σκίασης στην ανατολική πλευρά του κτηρίου (ακριβώς τα ίδια νούμερα είναι και στη δυτική πλευρά).....	92
Εικόνα 7.10: Κινητή σκίαση	93
Εικόνα 7.11: Τελικό στάδιο σχεδιασμού του κτηρίου με το Building Wizard.....	93
Εικόνα 7.12: Αρχική συνδεσμολογία κτηρίου	94
Εικόνα 7.13: Μενού δημιουργίας νέου υλικού/στρώματος	94
Εικόνα 7.14: Ορισμός εσωτερικού κέρδους από ανθρώπους	100
Εικόνα 7.15: Παράθυρο εσωτερικών κερδών χώρου	101
Εικόνα 7.16: Ωράριο εργαζομένων	102
Εικόνα 7.17: Ορισμός ψύξης για υπολογισμό φορτίων	103
Εικόνα 7.18: Ημερήσιο πρόγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας	104
Εικόνα 7.19: Ορισμός εξόδων από το TRNBuild για υπολογισμό των φορτίων.....	105
Εικόνα 7.20: Σύνδεση κτηρίου - περιοδικού ολοκληρωτή (Type 55)	105
Εικόνα 7.21: Σύνδεση περιοδικού ολοκληρωτή (Type 55) με εκτυπωτή (Type 25c) ...	106
Εικόνα 8.1: Εγκατάσταση θέρμανσης-ψύξης στο TRNSYS	109
Εικόνα 8.2: Καθορισμός όγκου αποθήκευσης, αριθμού, βάθους και ακτίνας των γεωτρήσεων του γεωθερμικού εναλλάκτη	110
Εικόνα 8.3: Καθορισμός διαμέτρων σωληνώσεων HDPE.....	111
Εικόνα 8.4: Καθορισμός παροχής νερού ανά γεώτρηση.....	111
Εικόνα 8.5: Σύνδεση γεωθερμικού εναλλάκτη με καιρικά δεδομένα	112
Εικόνα 8.6: Σύνδεση γεωθερμικού εναλλάκτη - κυκλοφορητή πρωτεύοντος κυκλώματος	112
Εικόνα 8.7: Σύνδεση κυκλοφορητή πρωτεύοντος κυκλώματος με ΑΘ νερού-νερού....	113
Εικόνα 8.8: Σύνδεση θερμοστάτη με μπλοκ εξισώσεων Control	115
Εικόνα 8.9: Μπλοκ εξισώσεων Control	116
Εικόνα 8.10: Κυκλοφορητής πρωτεύοντος	116
Εικόνα 8.11: Έλεγχος κυκλοφορητή	116
Εικόνα 8.12: Ορισμός ΑΘ νερού-νερού.....	117
Εικόνα 8.13: Έλεγχος ΑΘ νερού-νερού	118
Εικόνα 8.14: Σύνδεση ΑΘ νερού-νερού με γεωθερμικό εναλλάκτη	118

Εικόνα 8.15: Δημιουργία προγράμματος αερισμού με τις εισόδους από τα Fan Coil...	119
Εικόνα 8.16: Ορισμός παραμέτρων Fan Coil.....	121
Εικόνα 8.17: Σύνδεση εξόδου Fan Coil με εισόδους χώρου.....	122
Εικόνα 8.18: Σύνδεση εξόδου χώρου με είσοδο Fan Coil	123
Εικόνα 8.19: Πρόγραμμα ναπού αέρα για το χώρο Office 1	124
Εικόνα 8.20: Σύνδεση προγράμματος ναπού με Fan Coil.....	126
Εικόνα 8.21: Σύνδεση καιρικών δεδομένων με Fan Coil.....	126
Εικόνα 8.22: Σύνδεση χώρου με θερμοστάτη	127
Εικόνα 8.23: Σύνδεση θερμοστάτη με Fan Coil.....	127
Εικόνα 8.24: Μεταβολή setpoint ψύξης.....	128
Εικόνα 8.25: Μεταβολή setpoint θέρμανσης	128
Εικόνα 8.26: σύνδεση setpoint ψύξης με θερμοστάτη	129
Εικόνα 8.27: Σύνδεση ΑΘ νερού-νερού με κυκλοφορητή δευτερεύοντος κυκλώματος	129
Εικόνα 8.28: Ορισμός παραμέτρων κυκλοφορητή δευτερεύοντος κυκλώματος.....	130
Εικόνα 8.29: Σύνδεση κυκλοφορητή δευτερεύοντος με μπλοκ εξισώσεων Flow Separation	130
Εικόνα 8.30: Ορισμός ποσοστού συνολικά διακινούμενης παροχής που πάει σε κάθε Fan Coil	131
Εικόνα 8.31: Σύνδεση Flow Separation με Fan Coil	131
Εικόνα 8.32: Σύνδεση κυκλοφορητή δευτερεύοντος με Fan Coil	132
Εικόνα 8.33: Σύνδεση εξόδου Fan Coil με Return from Spaces.....	132
Εικόνα 8.34: Εξισώσεις στο Return from Spaces	133
Εικόνα 8.35: Σύνδεση Return from Spaces με ΑΘ νερού-νερού.....	133
Εικόνα 8.36: Καθορισμός παραμέτρων ΑΘ αέρα στον Η/Μ χώρο	134
Εικόνα 8.37: Διάταξη Φ/Β – Inverter- μπαταρίας.....	136
Εικόνα 8.38: Παράμετροι αρχείου καιρού σε σύνδεση με τα Φ/Β	137
Εικόνα 8.39: Σύνδεση καιρού με Φ/Β.....	137
Εικόνα 8.40: Μέγιστες και ονομαστικές τιμές τάσης και ρεύματος Φ/Β	138
Εικόνα 8.41: Θερμοκρασιακοί συντελεστές, επιφάνεια και αριθμός Φ/Β πάνελ	138
Εικόνα 8.42: Σύνδεση Φ/Β με Inverter	139
Εικόνα 8.43: Καθορισμός παραμέτρων Inverter	140
Εικόνα 8.44: Σύνδεση ανεμιστήρα Fan Coil με τον αθροιστή καταναλώσεων	140
Εικόνα 8.45: Σύνδεση κυκλοφορητή με τον αθροιστή καταναλώσεων.....	141
Εικόνα 8.46: Σύνδεση ΑΘ νερού-νερού με τον αθροιστή καταναλώσεων.....	141
Εικόνα 8.47: Σύνδεση ΑΘ αέρα με τον αθροιστή καταναλώσεων	142
Εικόνα 8.48: Σύνδεση καταναλώσεων με τον Inverter	142
Εικόνα 8.49: Σύνδεση εξόδου μπαταρίας με τον Inverter.....	143
Εικόνα 8.50: Σύνδεση εξόδου Inverter με μπαταρία.....	143
Εικόνα 8.51: Ορισμός παραμέτρων μπαταρίας.....	144
Εικόνα 9.1: Ορισμός των μεταβλητών εξόδου στο μπλοκ εξισώσεων Total Loads.....	158
Εικόνα 9.2: Ορισμός εξισώσεων για τον υπολογισμό των καταναλώσεων (σε kW).....	158
Εικόνα 9.3: Καρτέλα παραμέτρων του Type 46a (Printegrator).....	159
Εικόνα 9.4: Ορισμός αρχικής ενεργειακής στάθμης κάθε κελιού της μπαταρίας	164
Εικόνα 10.1: Εβδομαδιαία ισχύς (σε kW) φωτισμού (Fota)	178

Εικόνα 10.2: Εβδομαδιαία ισχύς (σε kW) συσκευών κτηρίου (Syskeves).....	179
Εικόνα 10.3: Άθροιση όλων των ηλεκτρικών καταναλώσεων του κτηρίου	179
Εικόνα 10.4: Νέα καρτέλα ορισμού των παραμέτρων της μπαταρίας για εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών αναγκών όλου του κτηρίου.....	181

16. Αναφορές – Βιβλιογραφία

Αναφορές

- [1] BP, «bp Statistical Review of World Energy 2022 | 71st edition,» 2022.
- [2] International Hydropower Association, «2022 Hydropower Status Report» International Hydropower Association, 2022.
- [3] IRENA, «Renewable Energy Statistics 2022,» International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2022.
- [4] G. Yogi, ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥΣ, 3η Έκδοση επιμ., Εκδόσεις Τζιόλα, 2020.
- [5] Α. Πολυζάκης, Ενέργεια, Περιβάλλον και Αειφόρος Ανάπτυξη (Θεωρία-Λυμένες Ασκήσεις), 1η επιμ., Πτολεμαΐδα: Εκδόσεις Power Heat Cool, 2019.
- [6] Α. Ζέρβος, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Ρευστών, 2018.
- [7] Ε. Κακαράς και Σ. Καρέλλας, Αποκεντρωμένα Θερμικά Συστήματα, Αθήνα: Εκδόσεις Τσότρας, 2015.
- [8] J. Evers, «National Geographic,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://education.nationalgeographic.org/resource/core/>. [Πρόσβαση March 2023].
- [9] J. Evers, «National Geographic,» 2023. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://education.nationalgeographic.org/resource/crust/>. [Πρόσβαση March 2023].
- [10] S. Kavanaugh και K. Rafferty, Geothermal Heating and Cooling: Design of Ground-Source Heat Pump Systems, Atlanta: ASHRAE, 2014.
- [11] Fondriest Environmental Inc, «Solar Radiation & Photosynthetically Active Radiation,» 21 March 2014. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/weather/photosynthetically-active-radiation/>. [Πρόσβαση 14 March 2023].
- [12] Κ. Αντωνόπουλος, ΘΕΡΜΙΚΑ - ΗΛΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΕΡΟΣ ΠΡΩΤΟ, Αθήνα: Εκδόσεις ΕΜΠ, 2015.

- [13] Eurostat, «eurostat - Statistics Explained,» European Commission, [Ηλεκτρονικό]. Available:<https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy>.
- [14] H. Richie, M. Roser και P. Rosado, «Our World in Data - Energy,» Our World in Data, 2022. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://ourworldindata.org/renewable-energy>.