ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Διπλωματική Εργασία

Ενεργειακή προσομοίωση της επίδρασης της σκίασης με ηλεκτροχρωμικά παράθυρα και συμβατικές μεθόδους στην ενεργειακή κατανάλωση κτιρίου

Αγάθη Γεωργή

Επιβλέπουσα καθηγήτρια: Μαρία Φούντη

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2020

Περίληψη

Οι ενεργειακές καταναλώσεις στον κτιριακό τομέα αντιπροσωπεύουν πάνω από το 40% της παγκόσμιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας, καθιστώντας την εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια ως επιτακτικό ζήτημα της σημερινής εποχής. Τα τελευταία χρόνια ο σωστός σχεδιασμός και η κατασκευή των κτιρίων, του οικιακού ή του τριτογενούς τομέα, εγγυώνται υψηλές ενεργειακές επιδόσεις που παράλληλα δεν επιβαρύνουν σε μεγάλο βαθμό την ατμόσφαιρα. Στην κατεύθυνση της βιώσιμης ανάπτυξης σχεδιάζονται κτιριακά κελύφη που αξιοποιούν στο μέγιστο την ηλιακή ακτινοβολία, εξασφαλίζοντας οπτική άνεση και ευνοϊκές συνθήκες στο εσωτερικό των κτιρίων. Ανάλογα με τις λειτουργικές κτιριακές ανάγκες ζητούμενο μπορεί να είναι είτε η προστασία από τον ήλιο μέσω της σκίασης σε περιόδους ψύξης, είτε η εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας σε περιόδους θέρμανσης προς ενίσχυση των εσωτερικών θερμικών κερδών. Στο πλαίσιο αυτό διαγράφεται τις τελευταίες δεκαετίες μια διαρκής τεχνολογική εξέλιξη στα συστήματα των υαλοπινάκων σε συνδυασμό με τα συστήματα σκίασης. Πλέον τα παράθυρα αναλαμβάνουν δυναμικό ρόλο, διαθέτοντας μεταβλητές οπτικές ιδιότητες και αναδεικνύοντας την προσαρμοστικότητά τους στις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η επίδραση της σκίασης με ηλεκτροχρωμικά παράθυρα και συμβατικές μεθόδους σε κτίριο μεγάλης γυάλινης επιφάνειας που βρίσκεται στο κέντρο της Αθήνας. Ύστερα από τη σχεδιαστική απεικόνιση του κτιρίου στο λογισμικό του SketchUp 2016 με τη βοήθεια των εργαλείων του OpenStudio, πραγματοποιήθηκε η ενεργειακή προσομοίωσή του στο λογισμικό του EnergyPlus. Με αναφορά το πραγματικό κτιριακό μοντέλο που διαθέτει για εξωτερική σκίαση προβόλους στη νότια όψη και διπλούς υαλοπίνακες χαμηλής θερμομόνωσης, έγιναν προσπάθειες βελτίωσης της ενεργειακής του απόδοσης. Εξετάστηκαν συνδυαστικά σενάρια, διαφορετικά ως προς τον τρόπο ελέγχου των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων και ως προς το είδος της σκίασης (εξωτερική ή εσωτερική). Για κάθε σενάριο εξήχθησαν αποτελέσματα σχετικά με τις ενεργειακές απαιτήσεις του κτιρίου για ψύξη, θέρμανση και τεχνητό φωτισμό σε ετήσια και μηνιαία βάση, ενώ ελέγχθηκε και η μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας, τα θερμικά κέρδη και οι απώλειες μέσω ενός αντιπροσωπευτικού υαλοπίνακα της νότιας πρόσοψης του κτιρίου. Η σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων οδήγησε στην επιλογή του βέλτιστου από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας σεναρίου. Για αυτό το σενάριο υπολογίστηκε στη συνέχεια η κατανομή των σημαντικότερων φορτίων για δύο τριήμερα του έτους διαφορετικών κλιματικών συνθηκών. Τέλος μέσω της δυνατότητας του illuminance map που προσφέρει το EnergyPlus αποτυπώθηκε και η κατανομή του φυσικού φωτός σε μια θερμική ζώνη του κτιρίου, προκειμένου να εντοπιστεί η διαφορά της εξωτερικής σκίασης σε σχέση με την σκίαση που προσφέρουν τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα.

Abstract

Building energy consumption accounts for over 40% of the global primary energy consumption, making energy savings in buildings an urgent issue today. In recent years, the proper design and construction of buildings, in the residential or tertiary sector, guarantee high energy performance without at the same time affecting the atmosphere. In the direction of sustainable development, building envelopes are designed in order to make maximum use of solar radiation, ensuring visual comfort and favorable conditions inside the buildings. Depending on the functional building needs, the issue is either the protection from the sun through shading in cooling periods, or the use of solar radiation in heating periods to enhance the internal thermal gains. In this context, a continuous technological development in the glass systems in combination with the shading systems is taking place in the last decades. Windows now take on a dynamic role, having variable visual properties and highlighting their adaptability to environmental conditions.

The present study examines the effect of shading with electrochromic windows and conventional methods in a large glass building located in the center of Athens. After designing the building in the software SketchUp 2016 with the helping tools of OpenStudio, its energy simulation was performed with the software EnergyPlus. Having as a reference the actual building model that has overhangs on the south side for external shading and double glazing of low thermal insulation, efforts were made to improve its energy efficiency. Different combined scenarios were examined, that varied in terms of controlling the electrochromic windows and the types of shading (external or internal). For each scenario, results were extracted on the energy requirements of the building for cooling, heating and artificial lighting on an annual and monthly basis, while the transmission of solar radiation, thermal gains and losses through a representative window of its southern facade were also checked. The comparison of these results led to the selection of the best scenario in terms of energy savings. For this scenario the load distribution was then calculated for two three-day periods of the year in different climatic conditions. Finally, through the illuminance map, a feature offered by EnergyPlus, the distribution of natural light in a thermal zone of the building was depicted, in order to identify the difference between the external shading and the shading offered by the electrochromic windows.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια κα Μαρία Φούντη για τη δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω τη διπλωματική εργασία και να ασχοληθώ με το αντικείμενο της ενεργειακής μελέτης κτιρίων. Ευχαριστώ επίσης θερμά τον Δρ. Ιωάννη Ατσόνιο για τις χρήσιμες συμβουλές και την καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την υπ. Διδάκτορα Μιχαέλα-Παναγιώτα Δέτση για την καταλυτική της βοήθεια από την αρχή έως το τέλος της εργασίας, το χρόνο που αφιέρωσε και τη συνεχή της υποστήριξη σε όλα τα ζητήματα που προέκυπταν.

Πίνακας περιεχομένων

Κατάλογος σχημάτων vii

Κατάλογος Πινάκων ix

1 Εισαγωγή 1

1.1 Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο 1

1.2 Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων στην Ελλάδα 3

1.3 Ευρωπαϊκή νομοθεσία στον κτιριακό τομέα 5

1.4 Ελληνική νομοθεσία στον κτιριακό τομέα (Κ.Εν.Α.Κ.) 6

1.4.1 Ο ελληνικός νόμος (Ν.3661) 6

1.4.2 Ο ελληνικός κανονισμός (Κ.Εν.Α.Κ.) 7

1.5 Επίδραση υαλοπινάκων και σκίασης στην ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων 7

2 Τρόποι μεταφοράς θερμότητας 9

2.1 Μεταφορά θερμότητας σε κτιριακό κέλυφος 9

2.1.1 Μεταφορά θερμότητας σε κτιριακό κέλυφος με συναγωγή 10

2.1.2 Μεταφορά θερμότητας σε κτιριακό κέλυφος με αγωγή 11

2.1.3 Μεταφορά θερμότητας σε κτιριακό κέλυφος με ακτινοβολία 11

3 Υαλοπίνακες 12

3.1 Ηλιακές-οπτικές και θερμικές ιδιότητες υαλοπινάκων 12

3.1.1 Διαπερατότητα τ και διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (Visible Transmittance) 12

3.1.2 Ανακλαστικότητα (Reflectance) 13

3.1.3 Απορροφητικότητα (Absorptance) 14

3.1.4 Εκπομπή (Emittance) 15

3.1.5 Συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους (Solar Heat Gain Coefficient – SHGC) 16

3.1.6 Συντελεστής θερμοπερατότητας (U factor) 16

3.2 Είδη υαλοπινάκων 17

3.2.1 Απλοί μονοί υαλοπίνακες 18

3.2.2 Διπλοί υαλοπίνακες 18

3.2.3 Τριπλοί υαλοπίνακες 20

3.2.4 Επιστρώσεις υαλοπινάκων 20

3.2.5 Υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (Low-emittance glazing) 21

4 Συμβατικές μέθοδοι σκίασης 23

4.1 Σταθερά συστήματα σκίασης 24
4.2 Κινητά-δυναμικά συστήματα σκίασης 25
4.3 Σύγκριση εξωτερικής και εσωτερικής σκίασης 27
5 Ηλεκτροχρωμικά παράθυρα 28
5.1 Αρχή λειτουργίας 28
5.2 Περιγραφή διαδικασίας 29
5.3 Ιδιότητες 31
5.4 Οπτική διαπερατότητα και απόδοση χρωματισμού 32
5.5 Προσθήκη CeO_2 στο V_2O_5 33
5.6 Τρόποι ελέγχου των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων 33
6 Λογισμικά για ενεργειακή μοντελοποίηση και προσομοίωση κτιρίων 35
6.1 Λογισμικό SketchUp 35
6.2 Λογισμικό EnergyPlus 36
6.3 Λογισμικό WINDOW 39
7 Διαδικασία κατασκευής κτιριακού μοντέλου 41
7.1 Παρουσίαση του κτιριακού μοντέλου 41
7.2 Μοντελοποίηση του κτιριακού μοντέλου 42
7.2.1 Ορισμός θερμικών ζωνών 42
7.2.2 Ορισμός συνοριακών συνθηκών 43
7.3 Ορισμός παραμέτρων προσομοίωσης στο EnergyPlus 44
7.4 Σενάρια προς Εξέταση 55
7.4.1 Πραγματικό σενάριο κτιριακού μοντέλου με εξωτερική σκίαση 55
7.4.2 Σενάριο κτιριακού μοντέλου με εσωτερική σκίαση 56
7.4.3 Σενάριο κτιριακού μοντέλου με ηλεκτροχρωμικά παράθυρα 56
8 Αποτελέσματα προσομοίωσης και σχολιασμός 58
8.1 Ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις 58
8.2 Μηνιαίες ενεργειακές καταναλώσεις 68
8.3 Μεταδιδόμενη ηλιακή ακτινοβολία, θερμικά κέρδη και απώλειες μέσω των υαλοπινάκων 73
8.4 Κατανομή σημαντικότερων φορτίων κτιριακού μοντέλου 78
8.5 Κατανομή φυσικού φωτισμού σε θερμικές ζώνες του κτιριακού μοντέλου 81
9 Συμπεράσματα 85
9.1 Συμπεράσματα της ενεργειακής προσομοίωσης 85

9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....87
10 Βιβλιογραφία.....89

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1.1: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από το 1990 έως το 2019 (2) 1
Σχήμα 1.2: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά τύπο καυσίμου (2) 2
Σχήμα 1.3: Ανάλυση ενεργειακών κτιριακών καταναλώσεων σε ΗΠΑ, Κίνα, Ευρώπη το 2010 (3) 2
Σχήμα 1.4: Ετήσια ειδική τελική κατανάλωση ενέργειας για κτίρια κατοικιών για τα ευρωπαϊκά κράτη μέλη 3
Σχήμα 1.5: Μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά κατοικία 4
Σχήμα 1.6: Εξέλιξη των ενεργειακών αναγκών ανά τομέα στην Ελλάδα (1990-2015).4
Σχήμα 1.7: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο για τον οικιακό τομέα στην Ελλάδα το 2007-2015 5
Σχήμα 1.8: Επισκόπηση των κύριων νομοθετικών διατάξεων για την εφαρμογή του πλαισίου EPBD στην Ελλάδα 7
Σχήμα 3.1: Οι οπτικές ιδιότητες του υαλοπίνακα 12
Σχήμα 3.2: Διάταξη διπλού υαλοπίνακα 19
Σχήμα 4.1: Διάφοροι τύποι συστημάτων σκίασης 23
Σχήμα 4.2: Εξωτερικά σταθερά συστήματα σκίασης 24
Σχήμα 4.3: Σταθερό σκίαστρο σε νότια όψη στις 21 Ιουνίου (πάνω) και στις 21 Δεκεμβρίου (κάτω) 25
Σχήμα 4.4: Διάταξη περσίδων σκίασης 27
Σχήμα 5.1: Ηλεκτροχρωμικά παράθυρα σε διάφορες φάσεις από διαυγή (αριστερά) μέχρι την πλήρως χρωματισμένη κατάσταση (δεξιά) 28
Σχήμα 5.2: Ηλεκτροχρωμική διάταξη 30
Σχήμα 5.3: Διαφορετικές φάσεις ηλεκτροχρωμικής διάταξης.....31
Σχήμα 5.4: Μεταβολή της διαπερατότητας κατά τη διάρκεια χρωματισμού μιας ηλεκτροχρωμικής διάταξης 32
Σχήμα 6.1: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας μέχρι εξαγωγής αποτελεσμάτων.....35
Σχήμα 6.2: Περιβάλλον SketchUp 2016 με εργαλεία Open Studio 1.13.0.....36
Σχήμα 6.3: Αρχεία εισόδου του EnergyPlus 39
Σχήμα 6.4: Παράδειγμα συστήματος υαλοπίνακα στο περιβάλλον του WINDOW ...40
Σχήμα 7.1: Πρόσοψη BCA College 41
Σχήμα 7.2: Σχέδια BCA College (πρόσοψη αριστερά και κάτοψη 1ου ορόφου δεξιά) 42
Σχήμα 7.3: Απλοποιημένα σχέδια του SketchUp 42
Σχήμα 7.4: Θερμικές ζώνες ισογείου (πάνω) και 4ου ορόφου (κάτω).....43
Σχήμα 7.5: Οριακές συνθήκες κτιριακού μοντέλου 44
Σχήμα 7.6: Προγράμματα λειτουργίας (από ASHRAE 90.1) (42).....45
Σχήμα 7.7: Μηνιαία φορτία ατόμων 51
Σχήμα 7.8: Μηνιαία φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού 51
Σχήμα 7.9: Κάτοψη 4ου ορόφου με σημεία ελέγχου κοντά στο φυσικό φωτισμό.....52
Σχήμα 7.10: Κάτοψη 4ου ορόφου με σημεία ελέγχου μακριά από το φυσικό φωτισμό 53
Σχήμα 7.11: Κάτοψη 4ου ορόφου με περισσότερα σημεία ελέγχου 53
Σχήμα 7.12: Διπλός υαλοπίνακας με αέρα στο διάκενο 55

Σχήμα 7.13: Ηλεκτροχρωμικό παράθυρο, Τριπλός υαλοπίνακας με αργό στα διάκενα και επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής 57
Σχήμα 8.1: Ετήσια φορτία ψύξης πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια 59
Σχήμα 8.2: Ετήσια φορτία φωτισμού πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια 62
Σχήμα 8.3: Ετήσια φορτία θέρμανσης πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια 63
Σχήμα 8.4: Ετήσια συνολικά φορτία πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια 65
Σχήμα 8.5: Ετήσιες εκλυόμενες εκπομπές CO_2 για τα εξεταζόμενα σενάρια 67
Σχήμα 8.6: Μηνιαία φορτία θέρμανσης πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια 69
Σχήμα 8.7: Μηνιαία φορτία ψύξης πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια 70
Σχήμα 8.8: Μηνιαία φορτία φωτισμού πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια 71
Σχήμα 8.9: Μηνιαία συνολικά φορτία πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια 72
Σχήμα 8.10: Παράθυρο νότιας όψης 73
Σχήμα 8.11: Συνολική μεταδιδόμενη ακτινοβολία από παράθυρο της νότιας όψης κατά τη χειμερινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια 74
Σχήμα 8.12: Συνολική μεταδιδόμενη ακτινοβολία από παράθυρο της νότιας όψης κατά την καλοκαιρινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια 74
Σχήμα 8.13: Συνολικά θερμικά κέρδη από παράθυρο νότιας όψης κατά τη χειμερινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια 75
Σχήμα 8.14: Συνολικά θερμικά κέρδη από παράθυρο νότιας όψης κατά την καλοκαιρινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια 76
Σχήμα 8.15: Συνολικές θερμικές απώλειες από παράθυρο νότιας όψης κατά τη χειμερινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια 77
Σχήμα 8.16: Συνολικές θερμικές απώλειες από παράθυρο νότιας όψης κατά την καλοκαιρινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια 78
Σχήμα 8.17: Κατανομή φορτίων χειμερινού τριημέρου για κύρια θερμική ζώνη-γραφεία 79
Σχήμα 8.18: Κατανομή φορτίων καλοκαιρινού τριημέρου για κύρια θερμική ζώνη-γραφεία 80
Σχήμα 8.19: Κατανομή φυσικού φωτισμού καλοκαιρινής μέρας για την κύρια θερμική ζώνη του 4^{ου} ορόφου για το πραγματικό σενάριο 82
Σχήμα 8.20: Κατανομή φυσικού φωτισμού καλοκαιρινής μέρας για την κύρια θερμική ζώνη του 4ου ορόφου για τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα 82
Σχήμα 8.21: Κατανομή φυσικού φωτισμού χειμερινής μέρας για την κύρια θερμική ζώνη του 4ου ορόφου για το πραγματικό σενάριο 83
Σχήμα 8.22: Κατανομή φυσικού φωτισμού χειμερινής μέρας για την κύρια θερμική ζώνη του 4ου ορόφου για τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα 83

Κατάλογος Πινάκων

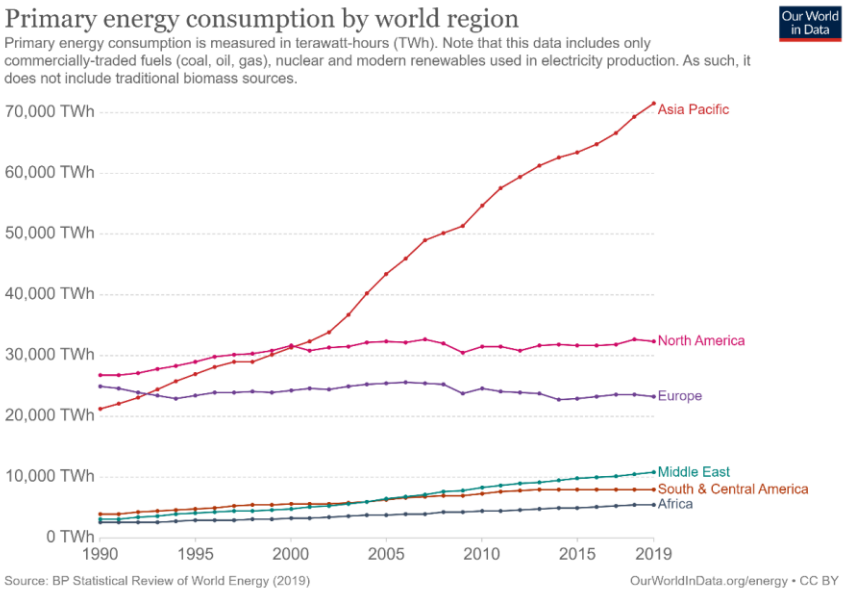
Πίνακας 7.1: Υλικά δομικών στοιχείων κτιρίου 46
Πίνακας 7.2: Τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων 47
Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικά δομικών στοιχείων 48
Πίνακας 7.4: Μεγέθη για φορτία τεχνητού φωτισμού 49
Πίνακας 7.5: Μεγέθη για φορτία ατόμων 50
Πίνακας 7.6: Μεγέθη για φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού 50
Πίνακας 7.7: Μεγέθη για φορτία ανανέωσης αέρα 54
Πίνακας 7.8: Ιδιότητες για τους διπλούς υαλοπίνακες 55
Πίνακας 7.9: Ιδιότητες για τα στόρια 56
Πίνακας 7.10: Βασικές θερμικές και οπτικές ιδιότητες των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων στις δύο τους καταστάσεις (διαυγής και πλήρως χρωματισμένη) 57
Πίνακας 8.1: Ετήσιες καταναλώσεις και εκλυόμενες εκπομπές CO_2 για τα εξεταζόμενα σενάρια 68

1 Εισαγωγή

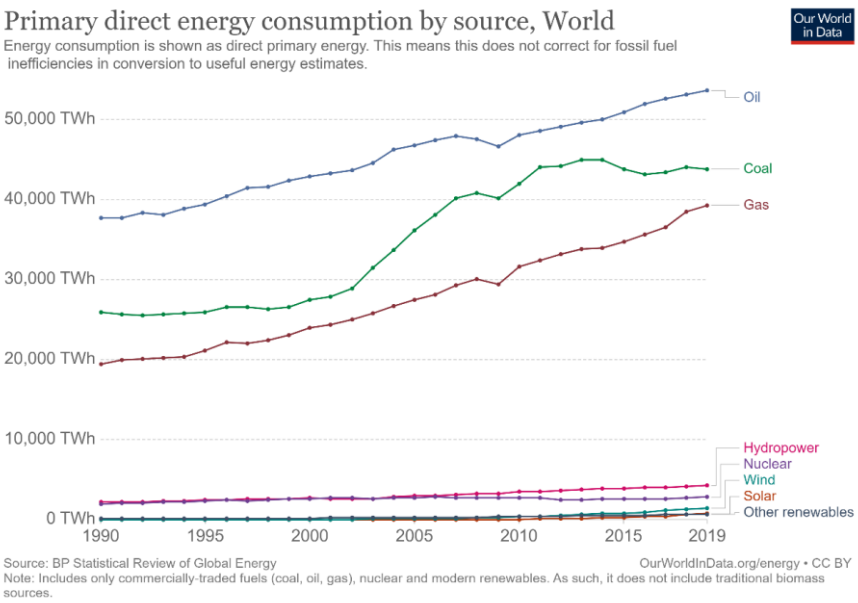
1.1 Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο

Η κατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα έχει αυξηθεί δραματικά την τελευταία δεκαετία λόγω της αύξησης του πληθυσμού, του περισσότερου χρόνου που αφιερώνεται σε εσωτερικούς χώρους, των αυξημένων αναγκών για λειτουργίες των κτιρίων και για την ποιότητα του εσωτερικού τους περιβάλλοντος και λόγω της παγκόσμιας κλιματικής αλλαγής. Η ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων αντιπροσωπεύει επί του παρόντος πάνω από το 40% της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας στις ΗΠΑ και στην ΕΕ. Ωστόσο, μπορεί να επιτευχθεί σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια εάν σχεδιαστούν και κατασκευαστούν σωστά. Για αυτόν το λόγο, η καλύτερη ενεργειακή απόδοση των κτιρίων μπορεί να παρέχει βασικές λύσεις για το έλλειμμα ενέργειας, τις εκπομπές άνθρακα και τη σοβαρή απειλή τους για το περιβάλλον.

Σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Πληροφοριών Ενέργειας (EIA), η παγκόσμια συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας και οι εκπομπές CO_2 έχουν αυξηθεί κατά 85% και 75% από το 1980 έως το 2012, με μέσες ετήσιες αυξήσεις 2% και 1,7%, αντίστοιχα. Ο άνθρακας αντιπροσωπεύει περίπου το 25% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας τα περισσότερα από αυτά τα χρόνια, οδηγώντας έτσι σε σημαντικές εκπομπές CO_2. Το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO_2 προέρχεται από τις αναπτυσσόμενες χώρες. Μέχρι το 2010, η Κίνα είχε ξεπεράσει τις ΗΠΑ ως ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας στον κόσμο, με μερίδιο 20% της συνολικής παγκόσμιας καταναλισκόμενης ενέργειας (1).

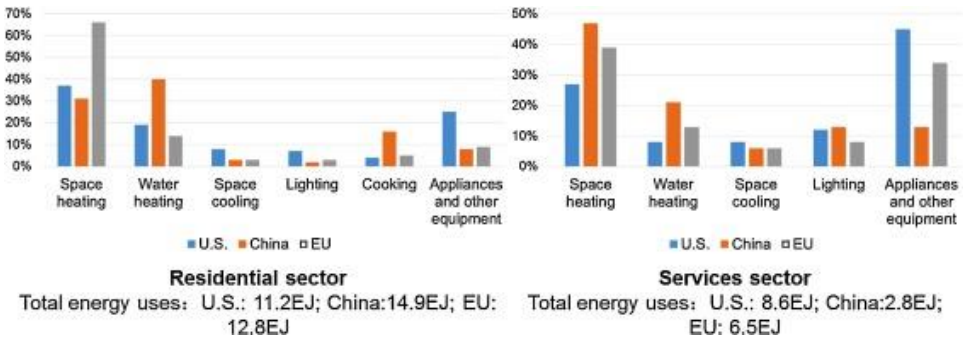


Σχήμα 1.1: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας από το 1990 έως το 2019 (2)



Σχήμα 1.2: Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας ανά τύπο καυσίμου (2)

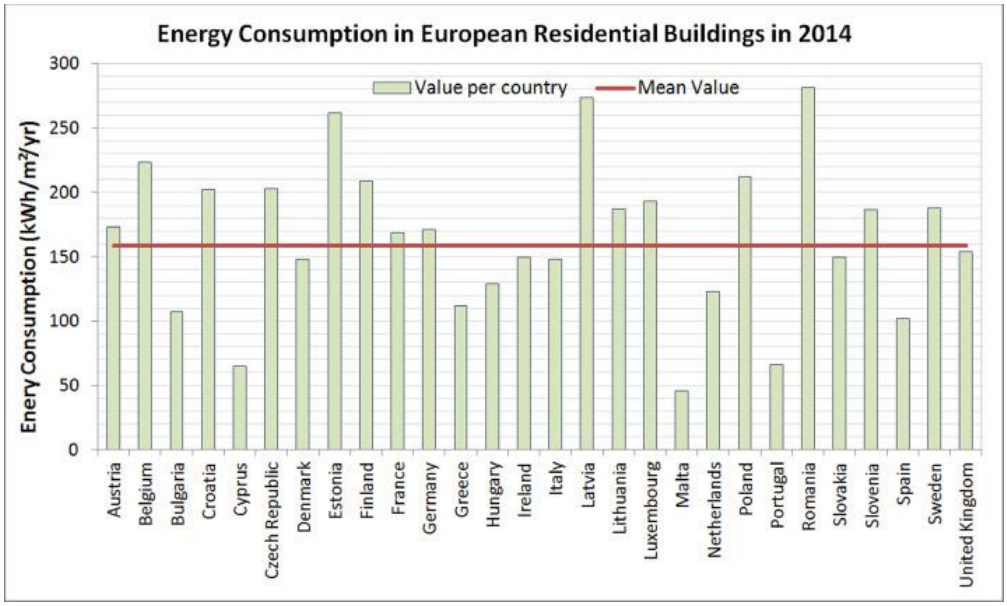
Το Σχήμα 1.3 δείχνει τις ενεργειακές κτιριακές καταναλώσεις για τις ΗΠΑ, την Κίνα και την ΕΕ το 2010. Όπως φαίνεται, τα φορτία της θέρμανσης (θέρμανση χώρου και θέρμανση νερού) αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας σε αυτές τις περιοχές. Στον οικιακό τομέα, η θέρμανση του χώρου και η θέρμανση του νερού αποτελούν τις κύριες καταναλώσεις, ακολουθούμενες από τις διάφορες ηλεκτρικές συσκευές, το μαγείρεμα και το φωτισμό. Η ψύξη του χώρου καταλαμβάνει το μικρότερο τμήμα της ενεργειακής κατανάλωσης. Στον τομέα των υπηρεσιών, η θέρμανση, οι συσκευές και άλλος εξοπλισμός αποτελούν τις κύριες ενεργειακές καταναλώσεις, ακολουθούμενες από τη θέρμανση νερού, το φωτισμό και τέλος την ψύξη (1).



Σχήμα 1.3: Ανάλυση ενεργειακών κτιριακών καταναλώσεων σε ΗΠΑ, Κίνα, Ευρώπη το 2010 (3)

Σύμφωνα με την Eurostat, η μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ενέργειας για όλους τους τύπους κτιρίων κατοικιών στην ΕΕ ήταν περίπου 158,8 KWh/m^2/έτος το 2014 (Σχήμα 1.4), 10,5% χαμηλότερη από την καταγεγραμμένη ετήσια ειδική μέση

κατανάλωση ενέργειας το 2011, που ήταν περίπου 184,0 KWh/m^2/έτος. Ωστόσο, η τελική κατανάλωση ενέργειας διαφέρει μεταξύ των χωρών (4).



Σχήμα 1.4: Ετήσια ειδική τελική κατανάλωση ενέργειας για κτίρια κατοικιών για τα ευρωπαϊκά κράτη μέλη

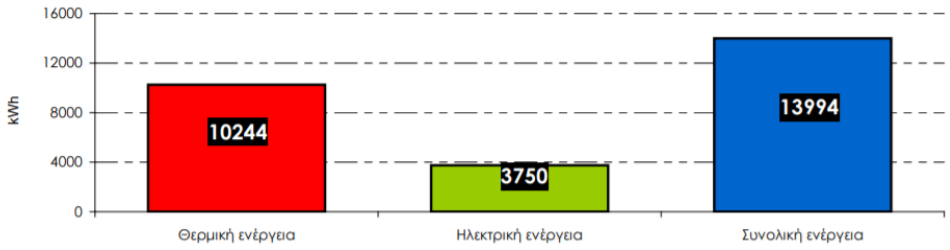
Το κύριο μέλημα ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας για την ΕΕ είναι η καλύτερη απόδοση της θέρμανσης εσωτερικών χώρων μέσω ανακαινίσεων σε κτιριακά κελύφη και ο καλύτερος εξοπλισμός θέρμανσης σε υπάρχοντα κτίρια. Σύγχρονες συσκευές και εξοπλισμός είναι επίσης ζωτικής σημασίας για τη μείωση των αναγκών ηλεκτρικού ρεύματος σε κτίρια, ειδικά στον οικιακό τομέα. Για παράδειγμα, είναι χρήσιμη η αντικατάσταση σταδιακά της συμβατικής ηλεκτρικής θερμάστρας με την αντλία θερμότητας για τη θέρμανση του χώρου και του νερού (1).

1.2 Ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων στην Ελλάδα

Το ελληνικό κτιριακό απόθεμα εκτιμάται σε περίπου 4,1 εκατομμύρια κτίρια, εκ των οποίων το 79% είναι κτίρια κατοικιών σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία απογραφής κτιρίων. Τα κτίρια κατοικιών στην Ελλάδα καταναλώνουν πάνω από το ήμισυ του συνολικού καταναλισκόμενου ηλεκτρικού ρεύματος και πάνω από το 90% της θερμικής ενέργειας που απαιτείται για τον ελληνικό κτιριακό τομέα, φτάνοντας τα 3,8 Mtoe ή το 24,8% της συνολικής καταναλισκόμενης ενέργειας το 2013, σε σύγκριση με τα 4,5 Mtoe ή το 24,1% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του 2000 (5).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της έρευνας που διενήργησε η Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία με τη συμβολή του ΚΑΠΕ (Κέντρο Ανανεώσιμων Πηγών και Εξοικονόμησης

Ενέργειας) για το χρονικό διάστημα Οκτώβριος 2011-Σεπτέμβριος 2012, κατά μέσο όρο κάθε νοικοκυριό της χώρας καταναλώνει 13.994 KWh ετησίως για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του (Σχήμα 1.5) (6).

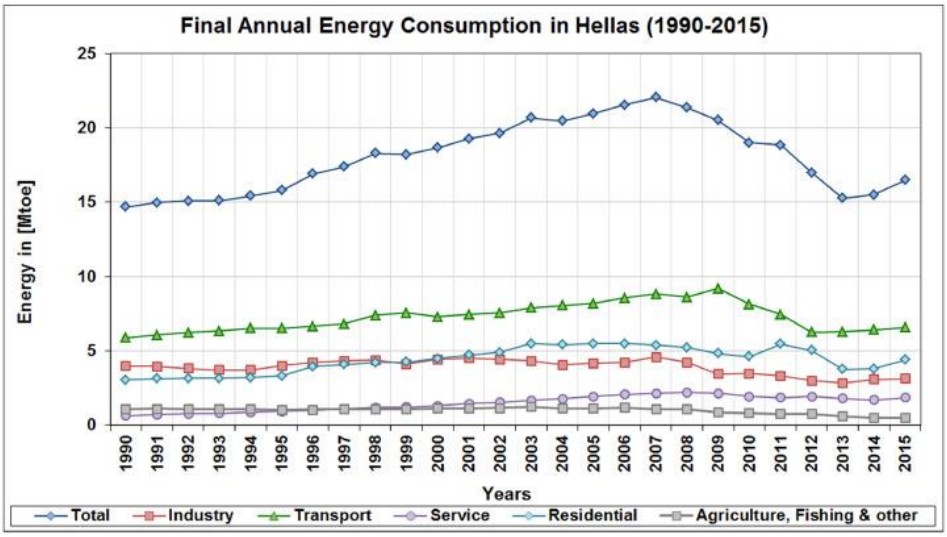


Σχήμα 1.5: Μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά κατοικία

Η μέση ετήσια ειδική κατανάλωση ενέργειας κτιρίων κατοικιών στην Ελλάδα ήταν 112 KWh/m^2/έτος το 2014, η 6^η χαμηλότερη κατανάλωση μεταξύ των 28 ευρωπαϊκών κρατών μελών (ΕΕ-28) στα οποία η μέση κατανάλωση ενέργειας κτιρίων κατοικιών είναι περίπου 158,8 KWh/m^2/έτος.

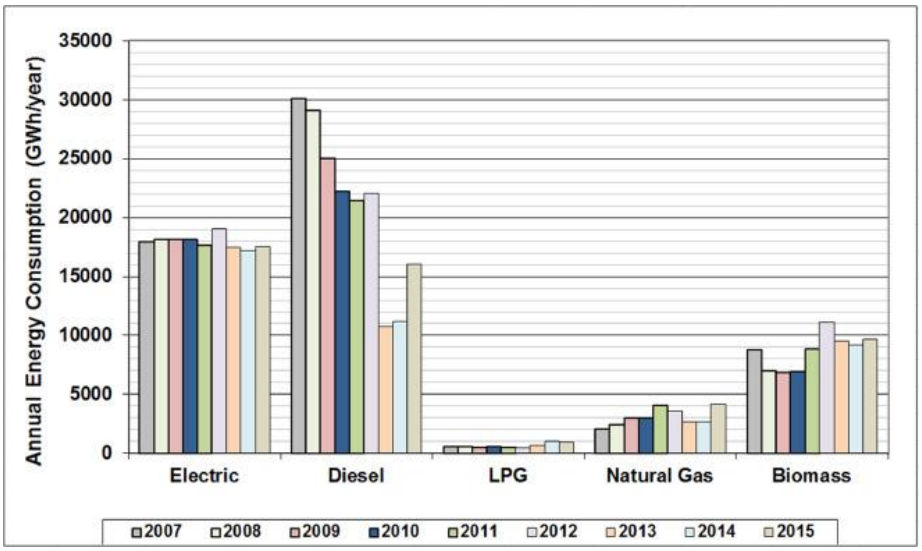
Σχεδόν το 45% αυτών των κτιρίων κατασκευάστηκαν πριν από το 1980, χωρίς θερμομόνωση ή διπλά τζάμια. Η συμμόρφωση αυτών των κτιρίων στις προδιαγραφές του Κ.Εν.Α.Κ. (κανονισμός που αναλύεται στη συνέχεια) σχετικά με τη θερμομόνωση και την απόδοση των ηλεκτρομηχανολογικών τους συστημάτων, θα μπορούσε να οδηγήσει σε εξοικονόμηση ενέργειας περίπου 24,4 TWh ετησίως, δηλαδή περίπου 32–175 KWh/m^2/έτος.

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα το 2015 ήταν 16,44 Mtoe (191.162 GWh), 25% χαμηλότερη από τη μέγιστη κατανάλωση ενέργειας του 2007 που ήταν 21,96 Mtoe (255.380 GWh). Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου (2007-2015), η συνολική κατανάλωση ενέργειας μειωνόταν συνεχώς (Σχήμα 1.6) σε όλους τους τομείς (βιομηχανία, μεταφορές, κτίρια κ.λπ.).



Σχήμα 1.6: Εξέλιξη των ενεργειακών αναγκών ανά τομέα στην Ελλάδα (1990-2015)

Οι κύριες πηγές ενέργειας στα ελληνικά νοικοκυριά είναι το πετρέλαιο και η ηλεκτρική ενέργεια (Σχήμα 1.7). Το 2007 η κατανάλωση πετρελαίου ντίζελ αντιπροσώπευε το 50,5% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, δηλαδή περίπου το διπλάσιο της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η εικόνα άλλαξε δραματικά το 2013 για πρώτη φορά, όταν η κατανάλωση πετρελαίου ντίζελ αντιστοιχούσε μόνο στο 26,2% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, ενώ το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε στο 42,2%. Ωστόσο, η πραγματική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στα ελληνικά νοικοκυριά δεν άλλαξε σημαντικά με την πάροδο του χρόνου και είναι περίπου 17.800 GWh ετησίως. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) στα ελληνικά νοικοκυριά αυξήθηκε μεταξύ των ετών 2011 και 2013 με τη βιομάζα να κατέχει το μεγαλύτερο μερίδιο, που ξεπέρασε τα 10.000 GWh το 2012 (4).



Σχήμα 1.7: Ετήσια κατανάλωση ενέργειας ανά καύσιμο για τον οικιακό τομέα στην Ελλάδα το 2007-2015

1.3 Ευρωπαϊκή νομοθεσία στον κτιριακό τομέα

Το κύριο νομοθετικό πλαίσιο για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του ευρωπαϊκού κτιριακού αποθέματος είναι η ευρωπαϊκή οδηγία 2002/91/ΕΚ (EPBD) για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, καθώς και η αναδιατύπωσή της (οδηγία 2010/31/ΕΚ). Με τις οδηγίες αυτές το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της ΕΕ προέβλεπε έως το 2006 για όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ να θέσουν σε ισχύ εθνικές νομοθεσίες και διοικητικές διατάξεις σχετικά με την ενεργειακή απόδοση νέων και υπαρχόντων κτιρίων άνω των 1000 m^2, ενώ επίσης προέβλεπε και την έκδοση πιστοποιητικών ενεργειακής απόδοσης. Οι οδηγίες αυτές περιλάμβαναν και την τακτική επιθεώρηση κτιριακών συστημάτων και εγκαταστάσεων και την παροχή συμβουλών για πιθανές βελτιώσεις και εναλλακτικές λύσεις.

Τα βασικά σημεία της αναδιατυπωμένης οδηγίας 2010/31/ΕΚ είναι τα εξής:

- Όλα τα νέα κτίρια πρέπει να είναι κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης (nearly Zero Energy Buildings-nZEB) μετά τις 31 Δεκεμβρίου 2020, ενώ τα νέα κτίρια των δημοσίων αρχών πρέπει να είναι κτίρια σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης μετά τις 31 Δεκεμβρίου 2018.
- Όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ πρέπει να εφαρμόζουν μια κοινή μεθοδολογία για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων χρησιμοποιώντας κοινά σημεία αναφοράς.
- Όλα τα υπάρχοντα κτίρια (όχι μόνο εκείνα άνω των 1000 m^2 που προβλέπονται από την οδηγία) που υφίστανται ριζική ανακαίνιση (25% της επιφάνειας ή της αξίας του κτιρίου) πρέπει να πληρούν τα ελάχιστα πρότυπα ενεργειακής απόδοσης, ενώ εθνικές πολιτικές και ειδικά μέτρα θα πρέπει να ενθαρρύνουν τη μετατροπή ανακαινισμένων κτιρίων σε σχεδόν μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης κτίρια.
- Το πιστοποιητικό ενεργειακής απόδοσης εκδίδεται για κτίρια ή κτιριακές μονάδες που ενοικιάζονται σε νέο ενοικιαστή και κτίρια όπου μια συνολική επιφάνεια άνω των 500 m^2 ανήκει σε μια δημόσια αρχή και επισκέπτεται συχνά από το κοινό.
- Όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ οφείλουν να έχουν ελάχιστες ενεργειακές απαιτήσεις για όλα τα τεχνικά συστήματα κτιρίων HVAC (7).

1.4 Ελληνική νομοθεσία στον κτιριακό τομέα (Κ.Εν.Α.Κ.)

1.4.1 Ο ελληνικός νόμος (Ν.3661)

Για την εναρμόνιση με την Οδηγία 2002/91/ΕΚ της ΕΕ (EPBD) εκδόθηκε στην Ελλάδα ο νόμος Ν.3661/2008 σχετικά με τα «Μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια και άλλες διατάξεις» που δημοσιεύθηκε το Μάιο του 2008 (ΦΕΚ 89/Α 19.5.2008). Ο νόμος αυτός είναι ουσιαστικά μια μετάφραση της ευρωπαϊκής οδηγίας με όλες τις σημαντικές διατάξεις που επιβάλλει.

Πολλές αναθεωρήσεις έγιναν και σε διάφορους άλλους νόμους που σχετίζονται άμεσα με το περιεχόμενο του Ν.3661/2008. Συγκεκριμένα, ο εθνικός νόμος για τις ΑΠΕ (Ν.3851/2010) επέκτεινε την υποχρέωση διεξαγωγής μελέτης ενεργειακού σχεδιασμού σε όλα τα νέα κτίρια, ανεξάρτητα από το μέγεθός τους, ενώ και ο εθνικός νόμος Ν.3889/2010 για το Πράσινο Ταμείο (ΦΕΚ 182/Α/14.10.2010) προβλέπει πλέον ότι οι κατοικίες με ετήσια χρήση κάτω των τεσσάρων μηνών (π.χ. καλοκαιρινές κατοικίες) θα πρέπει επίσης να συμμορφώνονται με το Ν.3661/2008.

Σχήμα 1.8: Επισκόπηση των κύριων νομοθετικών διατάξεων για την εφαρμογή του πλαισίου EPBD στην Ελλάδα

1.4.2 Ο ελληνικός κανονισμός (Κ.Εν.Α.Κ.)

Ύστερα από δύο χρόνια διαβουλεύσεων και καθοριστικού ρόλου του Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος (ΤΕΕ), ο «Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων-Κ.Εν.Α.Κ.» εκδόθηκε τελικά από το ΥΠΕΚΑ. Ο Κ.Εν.Α.Κ. προσδιορίζει τις ελάχιστες προδιαγραφές και απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης των νέων και των ριζικώς ανακαινιζόμενων κτιρίων, καθώς περιγράφει και τη γενική μέθοδο υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων που είναι σύμφωνη με τα ευρωπαϊκά πρότυπα. Εισάγει τη χρήση ενός κτιρίου αναφοράς, τις προδιαγραφές για τα πιστοποιητικά ενεργειακής απόδοσης, τις ελάχιστες απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης και τους περιορισμούς απώλειας θερμότητας του θερμικού περιβλήματος του κτιρίου. Τέλος, αναλύονται εν συντομία οι ενεργειακοί έλεγχοι επιθεωρήσεων κτιρίων, λεβήτων, συστημάτων θέρμανσης και επιθεωρήσεων κλιματισμού.

Οι ελάχιστες προδιαγραφές για το θερμικό περίβλημα του κτιρίου συμμορφώνονται με τις νέες τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας (U). Ο Κ.Εν.Α.Κ. εισήγαγε χαμηλότερες τιμές U που αντικαθιστούν τον προηγούμενο Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΦΕΚ 362/ 4.7.1979), ο οποίος ήταν σε χρήση για 30 χρόνια χωρίς καμία προσαρμογή. Οι νέες τιμές U σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. παρέχονται για τέσσερις κλιματικές ζώνες. Σύμφωνα με τον προηγούμενο κανονισμό υπήρχαν τρεις κλιματικές ζώνες (Α – Γ) και ο ΚΕΝΑΚ εισήγαγε μια επιπλέον κλιματική ζώνη (Δ) στις βόρειες περιοχές της χώρας (7).

1.5 Επίδραση υαλοπινάκων και σκίασης στην ενεργειακή κατανάλωση κτιρίων

Τα παράθυρα συνιστούν αναπόσπαστο στοιχείο κάθε κτιρίου και η διαρκής τους τεχνολογική εξέλιξη έχει καταφέρει να εκμεταλλεύεται ολοένα και περισσότερο την ηλιακή ενέργεια, δημιουργώντας ευνοϊκές συνθήκες και προσφέροντας την

κατάλληλη θερμική άνεση στο εσωτερικό των κτιρίων. Τα τελευταία χρόνια η εξοικονόμηση ενέργειας και εκπομπών άνθρακα αποτελεί βασική προτεραιότητα για τον κτιριακό τομέα. Με έως και 60% των συνολικών ενεργειακών απωλειών ενός κτιρίου να προέρχονται από τα παράθυρά του, είναι σημαντική η αξιοποίηση μέσω των υαλοστασίων των συνθηκών του φυσικού περιβάλλοντος σε βέλτιστο επίπεδο, με στόχο τις καλύτερες ενεργειακές επιδόσεις (8).

Πέρα από τους υαλοπίνακες και τα συστήματα σκίασης με τη σειρά τους αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι στο σχεδιασμό των κτιρίων, αποτρέποντας τη διείσδυση έντονης ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό τους και διαμορφώνοντας κατάλληλες συνθήκες για τα άτομα που βρίσκονται σε αυτά (9).

Η σωστή επιλογή και ο σχεδιασμός ενός βελτιστοποιημένου συστήματος παραθύρων, καθώς και βελτιστοποιημένων συστημάτων σκίασης είναι απαραίτητες προϋποθέσεις για τη μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και τελικά και για τη μεγαλύτερη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας.

2 Τρόποι μεταφοράς θερμότητας

Στον κτιριακό τομέα το ενεργειακό ισοζύγιο υπολογίζεται από τα θερμικά κέρδη και τις απώλειες θερμότητας. Μέρος των θερμικών κερδών συνιστά η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, ενώ και οι απώλειες θερμότητας οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στα φαινόμενα μεταφοράς μάζας και θερμότητας. Για αυτό είναι σκόπιμο να αναφερθεί το κατάλληλο θεωρητικό υπόβαθρο σε σχέση με τη μετάδοση θερμότητας.

Η μεταφορά θερμότητας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τρεις τρόπους:

- αγωγή (conduction)
- συναγωγή (convection)
- ακτινοβολία (radiation)

Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή λαμβάνει χώρα εξαιτίας της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα σε δύο περιοχές. Η θερμότητα μεταφέρεται από την περιοχή υψηλής θερμοκρασίας στην περιοχή χαμηλότερης θερμοκρασίας, μέσω ενός υλικού μέσου (στερεού, υγρού ή αέριου σε ηρεμία) λόγω της φυσικής επαφής. Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται είτε με μοριακή αλληλεπίδραση, δηλαδή μεταφορά ενέργειας από τα περισσότερο ενεργητικά μόρια στα γειτονικά τους, που παρουσιάζουν χαμηλότερο ενεργειακό επίπεδο, είτε μέσω της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων στα καθαρώς μεταλλικά στερεά (10).

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι απόρροια των μεγαλύτερης κλίμακας κινήσεων ενός ρευστού, είτε αυτό είναι υγρό είτε αέριο. Όσο υψηλότερη είναι η ταχύτητα της ροής του ρευστού, τόσο υψηλότερος είναι και ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.

Τέλος, η μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία είναι η μεταφορά ενέργειας με ηλεκτρομαγνητικά κύματα, κατά την οποία δεν απαιτείται κανένα υλικό μέσο, παρά μόνο δύο επιφάνειες σε διαφορετική θερμοκρασία. Όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία προς όλες τις κατευθύνσεις, η ποσότητα της οποίας αυξάνεται όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του σώματος. Στην περίπτωση δύο σωμάτων με διαφορετικές θερμοκρασίες, παρότι και τα δύο σώματα εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία, η καθαρή ροή ακτινοβολίας μεταξύ τους κατευθύνεται πάντα από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μεταφοράς θερμότητας με ακτινοβολία συνιστά η ενέργεια που μεταφέρει ο ήλιος στη γη (10).

2.1 Μεταφορά θερμότητας σε κτιριακό κέλυφος

Ως κτιριακό κέλυφος ορίζεται το σύνολο των επιφανειών και των δομικών στοιχείων που συνθέτουν και συναποτελούν το σύνορο μεταξύ του εξωτερικού και του εσωτερικού περιβάλλοντος ενός κτιρίου. Η διαμόρφωση και διατήρηση ευνοϊκών συνθηκών στο εσωτερικό του κτιρίου αποτελεί το βασικό λειτουργικό σκοπό του κελύφους (11).

Όπως προαναφέρθηκε, τα θερμικά κέρδη και οι απώλειες θερμότητας είναι αποτέλεσμα των φαινομένων μεταφοράς μάζας και θερμότητας που για τα κτιριακά κελύφη εντοπίζονται στα ακόλουθα:

- Συναγωγή θερμότητας μέσω των εσωτερικών και εξωτερικών επιφανειών του κτιρίου (εξωτερικοί τοίχοι, οροφή, δάπεδα, εσωτερικά χωρίσματα).
- Μεταφορά θερμότητας μέσω ηλιακής ακτινοβολίας και συναγωγής μέσω των υαλοπινάκων.
- Διείσδυση εξωτερικού αέρα ή αέρα από συνορεύοντες εσωτερικούς χώρους με διαφορετική μέση θερμοκρασία.
- Διασπορά θερμότητας και υγρασίας μέσα από τον φωτισμό, τις ηλεκτρικές συσκευές και τα άτομα που βρίσκονται στο χώρο.
- Θέρμανση, ψύξη, ύγρανση, αφύγρανση μέσω των ηλεκτρομηχανικών συστημάτων και εγκαταστάσεων του χώρου

2.1.1 Μεταφορά θερμότητας σε κτιριακό κέλυφος με συναγωγή

Η μεταφορά θερμότητας μέσω μιας αδιαφανούς συμπαγούς επιφάνειας, όπως είναι η εξωτερική τοιχοποιία στα κτίρια, πραγματοποιείται εν μέρει με συναγωγή. Η συναγωγή θερμότητας συντελείται ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας και το εξωτερικό ρεύμα αέρα του περιβάλλοντος και αντίστοιχα ανάμεσα στην εσωτερική επιφάνεια της τοιχοποιίας και το εσωτερικό ρεύμα αέρα που υπάρχει στο κτίριο. Αυτή η μέθοδος μετάδοσης θερμότητας προϋποθέτει την κίνηση του ρευστού (αέρα).

Το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή παρατηρείται και στις διαφανείς ή ημιδιαφανείς επιφάνειες του κτιριακού κελύφους, όπως οι υαλοπίνακες, με τη διαφορά ότι σε αυτήν την περίπτωση μέρος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας διέρχεται στον εσωτερικό χώρο. Η συναγωγή συμμετέχει στη μεταφορά θερμότητας ανάμεσα στην επιφάνεια του γυαλιού και τον εσωτερικό χώρο ή το εξωτερικό περιβάλλον, καθώς και ανάμεσα στα διάκενα αέρα (ή οποιουδήποτε άλλου υλικού πλήρωσης χρησιμοποιείται) στο εσωτερικό των παραθύρων και στις επιφάνειες του γυαλιού που συνορεύουν με αυτά τα διάκενα (12).

Πιο συγκεκριμένα, έστω ότι η επιφάνεια του υαλοπίνακα που συνορεύει με τον εσωτερικό χώρο έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από τα γειτονικά στρώματα αέρα. Τότε μεταφέρεται θερμότητα από τα στρώματα αέρα προς την επιφάνεια του υαλοπίνακα, με αποτέλεσμα αυτά να ψύχονται και να αυξηθεί η πυκνότητά τους. Στη συνέχεια, τα στρώματα αέρα κινούνται προς το πάτωμα, δίνοντας τη θέση τους σε θερμότερα στρώματα αέρα μικρότερης πυκνότητας. Έτσι δημιουργείται ένα ρεύμα θερμότητας. Αυτό το φαινόμενο δεν είναι πάντα επιθυμητό και για να αποφευχθεί μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράθυρο με μεγαλύτερη μόνωση που θα εξασφαλίζει υψηλότερη θερμοκρασία στην επιφάνεια του γυαλιού.

Έστω τώρα η περίπτωση επιφάνειας του υαλοπίνακα από την εξωτερική πλευρά του παραθύρου που συνορεύει δηλαδή με τον αέρα του περιβάλλοντος. Καθώς ο άνεμος φυσά κατά μήκος της επιφάνειας του παραθύρου, προκαλεί μεταφορά

θερμότητας με συναγωγή, ενώ ταυτόχρονα η μονωτική ικανότητά του μειώνεται, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερους ρυθμούς απώλειας θερμότητας.

Στην περίπτωση που υπάρχει διάκενο με υλικό πλήρωσης στο σύστημα του παραθύρου, παρατηρείται μεταφορά θερμότητας με συναγωγή ανάμεσα στο αέριο ρεύμα που υπάρχει στο διάκενο και τις γυάλινες επιφάνειες. Ρυθμίζοντας κατάλληλα την απόσταση μεταξύ των υαλοπινάκων και επιλέγοντας ένα αέριο με καλές μονωτικές ιδιότητες, είναι δυνατή η ελαχιστοποίηση των θερμικών απωλειών (13).

2.1.2 Μεταφορά θερμότητας σε κτιριακό κέλυφος με αγωγή

Όπως προαναφέρθηκε η μεταφορά θερμότητας με αγωγή είναι αποτέλεσμα της διαφορετικής θερμοκρασίας δύο σωμάτων (σε ηρεμία) που βρίσκονται σε επαφή. Έτσι στο κτιριακό κέλυφος η μεταφορά θερμότητας με αγωγή εντοπίζεται για παράδειγμα στα διάφορα στρώματα από τα οποία αποτελούνται οι εξωτερικοί τοίχοι (τούβλο, μόνωση, επίχρισμα ασβεστοκονιάματος). Η μεταφορά θερμότητας με αυτόν τον τρόπο δεν είναι τόσο αισθητή στο κτιριακό κέλυφος, μιας και κατά κύριο λόγο εντοπίζεται σε κινούμενα σωματίδια αέρα, που αντιστοιχούν στο φαινόμενο της συναγωγής.

2.1.3 Μεταφορά θερμότητας σε κτιριακό κέλυφος με ακτινοβολία

Η μεταφορά θερμότητας μέσω μιας αδιαφανούς συμπαγούς επιφάνειας, όπως είναι η εξωτερική τοιχοποιία στα κτίρια, αλλά και μέσω μιας διαφανούς ή ημιδιαφανούς επιφάνειας, όπως είναι ο υαλοπίνακας, πραγματοποιείται και μέσω της ακτινοβολίας (άμεση και διαθλώμενη).

Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στην επιφάνεια των κτιρίων και μέσω των ανοιγμάτων του κτιριακού κελύφους περνά στους εσωτερικούς χώρους. Η ποσότητά της εξαρτάται κυρίως από τη θέση, το μέγεθος, το σχήμα και το είδος των υαλοπινάκων. Οι τοίχοι, το δάπεδο, τα έπιπλα των εσωτερικών χώρων και οι άνθρωποι που βρίσκονται μέσα σε αυτούς θερμαίνονται, καθώς απορροφούν μέρος της ακτινοβολίας αυτής. Στη συνέχεια αποβάλλουν τη θερμότητα αυτή με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Οι υαλοπίνακες δεν επιτρέπουν σε αυτή τη θερμική ακτινοβολία –και σε οποιαδήποτε με μήκη κύματος μεγαλύτερα των 3 μm- να τους διαπεράσει, με αποτέλεσμα αυτή να εγκλωβίζεται στο εσωτερικό του κτιρίου. Η θερμότητα αυτή απορροφάται τελικά και από τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία και μεταφέρεται στον εσωτερικό αέρα με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, επηρεάζοντας τη θερμοκρασία του χώρου. Η κατάσταση αυτή είναι επιθυμητή κατά τη χειμερινή περίοδο, ωστόσο δημιουργεί προβλήματα τους καλοκαιρινούς μήνες, αλλά και σε περιπτώσεις κοινόχρηστων κτιρίων στα οποία ο μεγάλος αριθμός εργαζομένων, ο ηλεκτρικός εξοπλισμός και τα φώτα σε συνδυασμό με την ηλιακή ακτινοβολία προκαλούν υπερθέρμανση των χώρων (13).

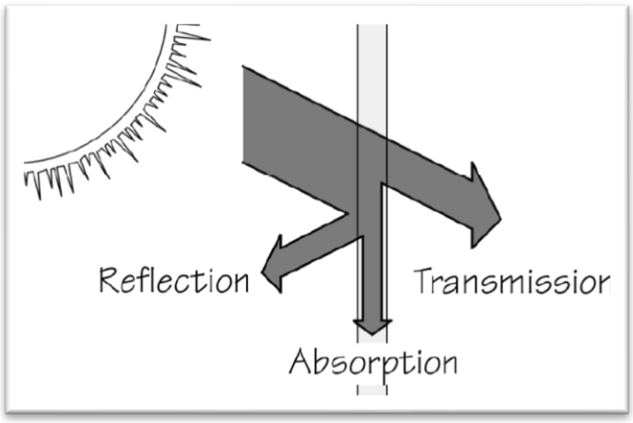
3 Υαλοπίνακες

3.1 Ηλιακές-οπτικές και θερμικές ιδιότητες υαλοπινάκων

Η ενεργειακή συμπεριφορά των υαλοπινάκων χαρακτηρίζεται από τις ηλιακές-οπτικές και τις θερμικές ιδιότητές τους. Οι τιμές αυτών αποτελούν και τα βασικότερα κριτήρια προκειμένου να επιλεχθεί ο κατάλληλος τύπος υαλοπίνακα στην κάθε περίσταση. Με βάση αυτές τις ιδιότητες δηλαδή, επιτυγχάνεται η εξασφάλιση των απαιτούμενων συνθηκών θερμικής άνεσης και εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια.

Στις οπτικές ιδιότητες των υαλοπινάκων συγκαταλέγονται τα εξής:

- η διαπερατότητα του υαλοπίνακα (τ) που αναφέρεται στο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που διέρχεται από αυτόν
- η ανακλαστικότητα του υαλοπίνακα (ρ) που αναφέρεται στο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται από αυτόν
- η απορροφητικότητα του υαλοπίνακα (α) που αναφέρεται στο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από αυτόν (14)



Σχήμα 3.1: Οι οπτικές ιδιότητες του υαλοπίνακα

3.1.1 Διαπερατότητα τ και διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (Visible Transmittance)

Το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που καταφέρνει να διαδοθεί διαμέσου της μάζας ενός σώματος και να περάσει στην απέναντι πλευρά του εκφράζεται μέσω της διαπερατότητας τ, για την οποία ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\tau = \frac{I_\tau}{I_t}$$

Όπου με I_τ συμβολίζεται η ακτινοβολία που διαδίδεται μέσα από τη μάζα του σώματος και με I_t η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία (15).

Στους υαλοπίνακες η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (VT) καθορίζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που διέρχεται στον εσωτερικό χώρο ενός κτιρίου. Η τιμή της συνηθίζεται να υπολογίζεται με βάση την κάθετη γωνία πρόσπτωσης, όμως γενικά είναι δυνατόν να υπολογιστεί με βάση οποιαδήποτε γωνία (όπου ως γωνία πρόσπτωσης ορίζεται η γωνία που σχηματίζεται ως προς την κάθετο στην επιφάνεια του γυαλιού). Εξαρτάται από το είδος του γυαλιού, τον αριθμό των υαλοπινάκων και πιθανές επιστρώσεις που μπορεί να έχουν προστεθεί σε αυτούς, ενώ κυμαίνεται από τιμές μεγαλύτερες του 90% σε περιπτώσεις διαφανούς γυαλιού έως και τιμές μικρότερες από 10% για ιδιαιτέρως ανακλαστικές επιστρώσεις ή χρωματισμένο γυαλί.

Η διαπερατότητα των υαλοπινάκων είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς ρυθμίζει την ποσότητα του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό των κτιρίων, τη δυνατότητα οπτικής επαφής με το εξωτερικό περιβάλλον, καθώς και τη θάμβωση. Πολύ υψηλές τιμές της διαπερατότητας από τη μία εξασφαλίζουν τα επιθυμητά επίπεδα φωτισμού στο χώρο, όμως από την άλλη είναι πιθανό να προκαλείται θάμβωση. Προκειμένου να αποφευχθεί το φαινόμενο αυτό επιλέγονται υαλοπίνακες με υψηλή τιμή διαπερατότητας, αλλά ταυτόχρονα επιλέγεται και κάποια μέθοδος σκίασης (εξωτερική σκίαση με προβόλους ή εσωτερική σκίαση με στόρια ή περσίδες).

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των υαλοπινάκων έχει προχωρήσει, με αποτέλεσμα να είναι εφικτός πλέον ο έλεγχος της συμπεριφοράς των υλικών τους σε διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Έτσι έχουν κατασκευαστεί σήμερα βελτιστοποιημένα συστήματα υαλοπινάκων που εξασφαλίζουν τον επιθυμητό φυσικό φωτισμό στους εσωτερικούς χώρους και παράλληλα μειώνουν τα θερμικά κέρδη. Επιτρέπουν δηλαδή τη διέλευση ενός επαρκούς ποσού ορατής ακτινοβολίας, ενώ ταυτόχρονα παρεμποδίζουν τη διέλευση ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο που προκαλεί ανεπιθύμητα θερμικά κέρδη. Ακόμη, έχουν κατασκευαστεί και συστήματα υαλοπινάκων που μεγιστοποιούν τα ηλιακά θερμικά κέρδη το χειμώνα. Επιτρέπουν δηλαδή τη διέλευση της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας ορατής ηλιακής ακτινοβολίας, αλλά και υπέρυθρης ακτινοβολίας, ενώ παρεμποδίζουν την ακτινοβολία στο άπω υπέρυθρο που είναι χαμηλής ενέργειας και οδηγεί σε θερμικές απώλειες.

3.1.2 Ανακλαστικότητα (Reflectance)

Το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ένα σώμα που ανακλάται πίσω στο εξωτερικό περιβάλλον εκφράζεται μέσω της ανακλαστικότητας ρ, για την οποία ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\rho = \frac{I_\rho}{I_t}$$

Όπου με I_ρ συμβολίζεται η ακτινοβολία που ανακλάται από τη μάζα του σώματος και με I_t η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία (15).

Στους υαλοπίνακες η φυσική ανακλαστικότητα εξαρτάται από την ποιότητα της επιφάνειας του γυαλιού, τις πιθανές επιστρώσεις που μπορεί να έχουν προστεθεί και τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη γωνία πρόσπτωσης του φωτός στην επιφάνεια του γυαλιού συνεπάγεται μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας που ανακλάται.

Η ανακλαστικότητα του γυαλιού αυξάνεται σημαντικά με την τοποθέτηση μεταλλικών επιστρώσεων στην επιφάνειά του που μπορεί να του προσδώσει ιδιότητες καθρέφτη. Παλαιότερα αυτές οι επιστρώσεις περιλάμβαναν ένα κράμα υδραργύρου και κασσίτερου που αντικαταστάθηκε αργότερα από άργυρο. Σήμερα οι επιστρώσεις αυτές πραγματοποιούνται με εναπόθεση εν κενώ αλουμινίου ή αργύρου ή με μια ανθεκτική πυρολυτική επίστρωση που τοποθετείται κατά τη διάρκεια κατασκευής του γυαλιού.

Η ανακλαστικότητα επίσης επηρεάζεται και από το πάχος των επιστρώσεων. Πιο παχιές-αδιαφανείς επιστρώσεις μπορούν να συνεπάγουν πλήρη ανακλαστικότητα, ενώ λεπτότερες επιστρώσεις επιτρέπουν ένα μέρος της ακτινοβολίας να τις διαπεράσει.

Οι απλές επιστρώσεις ανακλούν την ακτινοβολία όλου του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Όμως, τα τελευταία χρόνια η ανακλαστικότητα έχει δυναμικό ρόλο, καθώς έχουν κατασκευαστεί επιστρώσεις που πάνω σε γυαλί ή πλαστικό ανακλούν μόνο σε συγκεκριμένα εύρη μήκους κύματος. Η ικανότητα μεταβολής της ανακλαστικότητας στο άπω και εγγύς υπέρυθρο αποτέλεσε τη βάση για τη δημιουργία επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής (low-e) που είναι κατάλληλες για ψυχρότερα κλίματα, καθώς και για τον σχεδιασμό επιστρώσεων χαμηλής εκπομπής με επιλεκτική συμπεριφορά που είναι πιο κατάλληλες για θερμότερα κλίματα.

3.1.3 Απορροφητικότητα (Absorptance)

Το υπόλοιπο ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από τη μάζα ενός σώματος, μετατρέπεται σε θερμότητα, αυξάνοντας τη θερμοκρασία του. Αυτό το ποσοστό εκφράζεται μέσω της απορροφητικότητας α, για την οποία ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$\alpha = \frac{I_\alpha}{I_t}$$

Όπου με I_α συμβολίζεται η ακτινοβολία που απορροφάται από τη μάζα του σώματος και με I_t η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία (15).

Η απορροφητικότητα εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, τη γωνία πρόσπτωσης στο σώμα, τη φύση της απορροφούσας επιφάνειας και τη θερμοκρασία του σώματος που εκπέμπει την ακτινοβολία, ενώ δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος που δέχεται την ακτινοβολία.

Το κοινό διαφανές γυαλί πάχους 3mm απορροφά μόλις το 4% της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η απορροφητικότητά του αυξάνεται με την προσθήκη χημικών που απορροφούν την ηλιακή ενέργεια. Τα υλικά που απορροφούν ορατή ακτινοβολία είναι υπεύθυνα για τη σκουρόχρωμη εμφάνιση του γυαλιού, ενώ αυτά που απορροφούν υπεριώδη ή εγγύς υπέρυθρη δεν επηρεάζουν έως και καθόλου την οπτική εμφάνιση του γυαλιού.

Συγκεκριμένα, το διαφανές γυαλί απορροφά πολύ μικρή ποσότητα ορατού φωτός, ενώ το σκουρόχρωμο γυαλί απορροφά ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό, με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη θερμοκρασία του, καθώς όπως προαναφέρθηκε η απορρόφηση της ακτινοβολίας οδηγεί σε μετατροπή της σε θερμότητα στο σώμα-δέκτη. Οι απορροφητικοί υαλοπίνακες συνήθως έχουν γκρι, χάλκινο ή μπλε-πράσινο χρώμα και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μείωση του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (αναλύεται στη συνέχεια) και για τον έλεγχο της θάμβωσης.

Αυτά τα τρία μεγέθη συνεισφέρουν στην ολική ηλιακή ακτινοβολία I_t, που προσπίπτει σε έναν υαλοπίνακα για την οποία ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$I_t = \tau \cdot I_t + \rho \cdot I_t + \alpha \cdot I_t$$

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία είναι δηλαδή το άθροισμα της διερχόμενης, της ανακλώμενης και της απορροφόμενης ακτινοβολίας και ισχύει:

$$\tau + \rho + \alpha = 1$$

Οι οπτικές ιδιότητες που προαναφέρθηκαν εξαρτώνται συμπερασματικά από το πάχος και τις φυσικές ιδιότητες του υλικού, από το είδος της επιφανειακής επίστρωσης που ενδέχεται να υπάρχει και από τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας. Οι τιμές τους εξαρτώνται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, δηλαδή σε κάθε μήκος κύματος διαφοροποιούνται –οπότε προκύπτουν σταθμισμένες τιμές (δηλαδή μέσες τιμές - ολικοί συντελεστές) για το συνολικό φάσμα της εκάστοτε προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

3.1.4 Εκπομπή (Emittance)

Όπως προαναφέρθηκε, το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα σώμα, μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία στη συνέχεια μεταδίδεται στο περιβάλλον (στο εξωτερικό ή εσωτερικό) μέσω συναγωγής ή μέσω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Η ικανότητα ενός σώματος να εκπέμπει αυτήν την ακτινοβολία (άπω υπέρυθρη) εκφράζεται μέσω του συντελεστή εκπομπής του ε,

που ουσιαστικά πρόκειται για μια άλλη προσέγγιση της απορροφητικότητας. Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής εκπομπής (δηλαδή η απορροφητικότητα), τόσο μεγαλύτερη είναι και η ανακλαστικότητα ενός υλικού. Με άλλα λόγια δηλαδή η μείωση της ικανότητας εκπομπής στους υαλοπίνακες βελτιώνει τις μονωτικές τους ικανότητες.

3.1.5 Συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους (Solar Heat Gain Coefficient – SHGC)

Το ποσοστό της προσπίπτουσας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στον υαλοπίνακα που γίνεται ηλιακό θερμικό κέρδος χώρου εκφράζεται μέσω του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC) και ισούται με το άθροισμα της διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία (άμεσο κέρδος) και του ποσοστού της ενέργειας που απορροφάται από τον υαλοπίνακα και εκπέμπεται στον εσωτερικό χώρο (έμμεσο κέρδος). Ο συντελεστής αυτός συγκαταλέγεται μεταξύ των κύριων δεικτών ενεργειακής απόδοσης ολόκληρου του υαλοστασίου και εξαρτάται από τον τύπο του υαλοπίνακα, από τη γωνία πρόσπτωσης και τη φασματική κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Μπορεί να προσδιοριστεί για οποιαδήποτε γωνία πρόσπτωσης, αλλά για απλοποίηση οι κατασκευαστές συνήθως απλώς παρέχουν μία φασματικά σταθμισμένη τιμή του SHGC για κάθετο πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους είναι ένας αδιάστατος αριθμός που λαμβάνει δηλαδή τιμές από 0 έως 1 και όσο μικρότερη η τιμή του, τόσο μικρότερο το θερμικό κέρδος και άρα τόσο μεγαλύτερη και η ικανότητα σκίασής του (16).

3.1.6 Συντελεστής θερμοπερατότητας (U factor)

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικός στον κτιριακό τομέα, καθώς είναι ένα μέτρο που δηλώνει την απώλεια θερμότητας ενός δομικού στοιχείου όπως ένας τοίχος, ένα δάπεδο, μια στέγη ή ένα παράθυρο. Ο συντελεστής U αναφέρεται επίσης ως "συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας" και μετρά ουσιαστικά πόσο καλά τα στοιχεία ενός κτιρίου μεταφέρουν θερμότητα. Με άλλα λόγια, αυτό σημαίνει ότι όσο υψηλότερες είναι οι τιμές του U, τόσο χειρότερη είναι η θερμική απόδοση των δομικών στοιχείων. Η χαμηλή τιμή U συνήθως υποδηλώνει υψηλά επίπεδα μόνωσης, και επομένως χαμηλά επίπεδα θερμικής μετάδοσης. Η αξιολόγηση αυτής της τιμής είναι πολύ χρήσιμη, δεδομένου ότι επιτρέπει την πρόβλεψη της σύνθετης συμπεριφοράς ενός ολόκληρου δομικού στοιχείου αντί να βασίζεται στις ιδιότητες μεμονωμένων υλικών (17).

Εκφράζεται σε $W/(m^2K)$ και περιλαμβάνει τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία για ένα δεδομένο σύνολο περιβαλλοντικών συνθηκών. Αντιπροσωπεύει δηλαδή τη θερμορροή ανάμεσα στο εσωτερικό και το

εξωτερικό περιβάλλον εκφρασμένη σε W, μέσω ενός τετραγωνικού μέτρου επιφάνειας για θερμοκρασιακή διαφορά 1°C. Επίσης, ορίζεται και ως η αντίστροφη τιμή της θερμικής αντίστασης R ενός υλικού ως εξής:

$$U = \frac{1}{R}$$

Σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα υαλοπινάκων η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας εξαρτάται από τις θερμικές ιδιότητες των υλικών του παραθύρου, από την κλίση της κατασκευής του (υπολογίζεται με τα υαλοστάσια σε κατακόρυφη θέση), αλλά και από τις καιρικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του εσωτερικού και του εξωτερικού περιβάλλοντος και η ταχύτητα του ανέμου. Το National Fenestration Rating Council (NFRC) έχει τυποποιήσει τις συνθήκες περιβάλλοντος για τις οποίες γίνεται ο υπολογισμός του συντελεστή θερμοπερατότητας για την αξιολόγηση των εμπορικά διαθέσιμων υαλοστασίων. Οι συνθήκες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Ταχύτητα ανέμου 5,5 m/s
- Εσωτερική θερμοκρασία αέρα 21°C
- Εξωτερική θερμοκρασία αέρα -18°C

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας που αναφέρεται μόνο στους υαλοπίνακες επηρεάζεται κυρίως από το συνολικό αριθμό υαλοπινάκων στο σύστημα, τις αποστάσεις μεταξύ τους, το είδος του αερίου στα διάκενα και τα χαρακτηριστικά των επιστρώσεων που πιθανόν να υπάρχουν στις διάφορες επιφάνειες. Από την άλλη, ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας που αφορά δηλαδή ολόκληρο το σύστημα του παραθύρου, επηρεάζεται πέρα από τους ίδιους τους υαλοπίνακες και από τα φαινόμενα που παρουσιάζονται στην περιφέρεια του συστήματος του παραθύρου, από το πλαίσιό του και από τα παραθυρόφυλλα. Για αυτό είναι χρήσιμη η έννοια του συντελεστή θερμοπερατότητας ως ενός συνολικού συντελεστή που περιλαμβάνει τα παραπάνω. Για τον υπολογισμό του μέσω της μεθόδου του NFRC απαιτείται ένα σύνολο από παραδοχές και διαδικασίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η τιμή του συνολικού συντελεστή θερμοπερατότητας είναι μεγαλύτερη από αυτή που αναφέρεται μόνο στους υαλοπίνακες, καθώς οι υαλοπίνακες παρουσιάζουν μεγαλύτερες μονωτικές ικανότητες σε σχέση με το πλαίσιο (13).

3.2 Είδη υαλοπινάκων

Η επιλογή των καταλληλότερων για την κάθε περίπτωση υαλοπινάκων γίνεται ανάλογα με τις κτιριακές ανάγκες, τα κλιματικά δεδομένα και τις απαιτήσεις των ατόμων που βρίσκονται σε ένα κτίριο. Η διαρκώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία των υαλοπινάκων έχει καταφέρει να κατασκευάσει στη σημερινή εποχή συστήματα παραθύρων με μεταβλητές οπτικές ιδιότητες που προσαρμόζονται δηλαδή στις

συνθήκες του περιβάλλοντος επιτυγχάνοντας σημαντικά ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας.

Μια πρώτη βασική διάκριση ανάμεσα στα είδη των υαλοπινάκων γίνεται με βάση τον αριθμό των στρωμάτων τους που ξεκινούν από απλούς μονούς υαλοπίνακες και μπορεί να φτάσουν σε πενταπλά ή και εξαπλά συστήματα παραθύρων, τα οποία βέβαια χρησιμοποιούνται σπάνια και σε ειδικές περιπτώσεις. Στην παρούσα εργασία δεν αποτελούν αντικείμενο ενδιαφέροντος αυτοί οι εξεζητημένοι τύποι υαλοπινάκων και για αυτό αναλύονται οι πιο διαδεδομένοι.

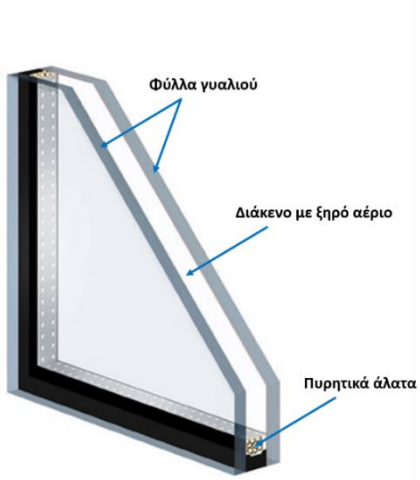
3.2.1 Απλοί μονοί υαλοπίνακες

Πρόκειται για την πιο απλή και παλαιότερη μορφή υαλοπίνακα που στα σύγχρονα κτίρια έχει αντικατασταθεί πλήρως από πιο σύνθετες μορφές παραθύρων με καλύτερη ενεργειακή απόδοση. Σε σύγκριση με τους άλλους τύπους παρουσιάζει την υψηλότερη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ εσωτερικού και εξωτερικού περιβάλλοντος, ενώ επιτρέπει τη μέγιστη εισχώρηση σε φυσικό φως. Το πάχος των υαλοπινάκων αυτής της κατηγορίας είναι συνήθως από 4 mm έως 12 mm και έχουν το μεγαλύτερο συντελεστή θερμοπερατότητας, ο οποίος μειώνεται με την αύξηση του πάχους του γυαλιού (18).

Σύμφωνα με το λογισμικό WINDOW (περιγράφεται η λειτουργία του σε επόμενη ενότητα της εργασίας) τυπική τιμή του συντελεστή αυτού για έναν απλό μονό υαλοπίνακα πάχους 6 mm είναι 5,8 $W/(m^2K)$, ενώ τυπικές τιμές για τον SHGC και τη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία είναι 0,81 και 0,88 αντίστοιχα.

3.2.2 Διπλοί υαλοπίνακες

Πρόκειται για υαλοπίνακες που αποτελούνται από δύο φύλλα γυαλιού που ανάμεσά τους έχουν αέρα ή κάποιο ευγενές αέριο ή ακόμα και κενό ατμοσφαιρικού αέρα σε ορισμένες περιπτώσεις. Το αέριο που επιλέγεται ως υλικό πλήρωσης στο διάκενο ανάμεσα στα δύο φύλλα, λειτουργεί ως μονωτικό στοιχείο και πρέπει να είναι ξηρό για αποφυγή υγροποίησης των υδρατμών που αλλιώς θα υπήρχαν στο εσωτερικό των υαλοπινάκων.



Σχήμα 3.2: Διάταξη διπλού υαλοπίνακα

Σε σύγκριση με έναν απλό μονό υαλοπίνακα, η ύπαρξη αυτού του στρώματος αερίου στο διάκενο αυξάνει τη θερμική αντίσταση του συστήματος του παραθύρου εξαιτίας της θερμομονωτικής ικανότητας του αερίου. Θα πρέπει λοιπόν αυτό το αέριο να μη διαφύγει και για αυτό σφραγίζεται περιμετρικά με αεροστεγή υλικά. Στο εσωτερικό του αποστάτη που συγκρατεί τα φύλλα του γυαλιού τοποθετούνται πυρητικά άλατα, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, με σκοπό τη μείωση της υγρασίας που πιθανόν να εισέλθει στο εσωτερικό των υαλοπινάκων (19).

Στους διπλούς υαλοπίνακες το εσωτερικό φύλλο απορροφά και ανακλά μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που διέρχεται από το εξωτερικό φύλλο. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U του υαλοπίνακα που ως τιμή εκφράζει πόσο καλή μόνωση έχει το σύστημα του παραθύρου, μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του διακένου μέχρι μια οριακή τιμή (πάνω από την οριακή τιμή ο συντελεστής θερμοπερατότητας αυξάνεται), ενώ κυρίως επηρεάζεται από αυτό και όχι από το πάχος των φύλλων του γυαλιού.

Το πάχος διακένου που προσφέρει καλά επίπεδα θερμομόνωσης και άρα μειώνει και τις θερμικές απώλειες, επιλέγεται συνήθως να είναι από 15 έως 17 mm. Περαιτέρω αύξηση του πάχους του οδηγεί σε κίνηση του αερίου ανάμεσα στα δύο φύλλα του γυαλιού και συνεπώς και σε πιο έντονα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή που είναι ανεπιθύμητα (18).

Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η σημασία του πάχους του διακένου για τη θερμομόνωση, κατασκευάζονται στο λογισμικό WINDOW 7.6 ενδεικτικά δύο διπλοί υαλοπίνακες που διαφέρουν ως προς αυτό. Ένα υαλοστάσιο με διπλό υαλοπίνακα αποτελούμενο από δύο απλά φύλλα γυαλιού 6 mm και διάκενο με αέρα πάχους 6 mm έχει συντελεστή θερμοπερατότητας ίσο με 3,1 $W/(m^2K)$, ενώ το ίδιο υαλοστάσιο με πάχος διακένου 12 mm έχει συντελεστή θερμοπερατότητας ίσο με 2,7 $W/(m^2K)$. Επίσης, οι τιμές για αυτόν το διπλό υαλοπίνακα διακένου 12 mm για

τα μεγέθη SHGC και διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία είναι 0,7 και 0,8 αντίστοιχα.

3.2.3 Τριπλοί υαλοπίνακες

Πρόκειται για υαλοπίνακες που αποτελούνται από τρία φύλλα γυαλιού που ανάμεσά τους έχουν αέρα ή κάποιο ευγενές αέριο ή ακόμα και κενό ατμοσφαιρικού αέρα σε ορισμένες περιπτώσεις, όπως αντίστοιχα δηλαδή και οι διπλοί υαλοπίνακες. Σε σύγκριση με αυτούς οι τριπλοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν κατά βάση μεγαλύτερη θερμομόνωση.

Βέβαια στην περίπτωση που ένας τριπλός υαλοπίνακας έχει ίδιο πάχος φύλλων γυαλιού με έναν διπλό υαλοπίνακα και συνολικά το πάχος τους μαζί με τα διάκενα είναι επίσης ίδιο, τότε ο συντελεστής θερμοπερατότητας του διπλού υαλοπίνακα είναι χαμηλότερος από εκείνον του τριπλού. Αυτό οφείλεται στο ότι το αέριο στο διάκενο του διπλού υαλοπίνακα καταλαμβάνει περισσότερο χώρο από ότι το αέριο στα διάκενα του τριπλού, το οποίο σε σχέση με το γυαλί έχει μικρότερη θερμική αγωγιμότητα. Γενικά πάντως το συνολικό πάχος των τριπλών υαλοπινάκων είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με εκείνο των διπλών.

Ένα αρνητικό στοιχείο των τριπλών υαλοπινάκων είναι το αυξημένο βάρος τους, που επιτρέπει τη χρήση τους σε ειδικές κατηγορίες κουφωμάτων και με ειδικούς μηχανισμούς ανθεκτικούς σε μεγάλα βάρη (19).

Ενδεικτικά με τη βοήθεια πάλι του λογισμικού WINDOW 7.6 ένας τριπλός υαλοπίνακας φύλλων πάχους 6 mm το καθένα και διακένων με αέρα πάχους 12 mm το καθένα έχει συντελεστή θερμοπερατότητας 1,8 W/(m^2K), συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους 0,6 και διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία 0,7.

3.2.4 Επιστρώσεις υαλοπινάκων

Η προσθήκη επιστρώσεων στα τζάμια μπορεί να ελέγξει τη διείσδυση του φωτός και της θερμότητας και να φιλτράρει το υπεριώδες φως (UV). Οι επιστρώσεις αποτελούνται συνήθως από πολλά στρώματα επικαλυμμένου ή χημικά επεξεργασμένου πολυεστέρα ή από ένα στρώμα μεταλλικό που μπορεί να βελτιώσει τη συμπεριφορά των υαλοπινάκων ως προς την ηλιακή ακτινοβολία.

Η μείωση της θερμότητας που εισέρχεται στο εσωτερικό των κτιρίων εξαιτίας των επιστρώσεων οδηγεί σε μείωση των ψυκτικών φορτίων και άρα και σε μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα ένα άνετο περιβάλλον για τα άτομα που βρίσκονται στο κτίριο. Το φιλτράρισμα της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι σε θέση να προστατεύει τις κουρτίνες, τα έπιπλα, τα χαλιά και τα έργα τέχνης από το ξεθώριασμα, επεκτείνοντας τη διάρκεια ζωής τους και την αντοχή τους. Επίσης, οι επιστρώσεις μπορούν να παρέχουν σημαντική

μείωση της θάμβωσης και ταυτόχρονα επαρκή διείσδυση ορατού φωτός για ελαχιστοποίηση της χρήσης ηλεκτρικού φωτισμού (20).

3.2.5 Υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής (Low-emittance glazing)

Οι επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής (low-e) χρησιμοποιούνται συνήθως σε διπλούς ή τριπλούς υαλοπίνακες. Πρόκειται για λεπτές, διαφανείς επιστρώσεις μετάλλου ή οξειδίου μετάλλου που η χρήση τους σε μία ή δύο γυάλινες επιφάνειες μπορεί να μειώσει σημαντικά τη μεταφορά θερμότητας μέσω ακτινοβολίας κατά μήκος της επιφάνειας των υαλοπινάκων, επιτρέποντας όμως τη διέλευση της ορατής ακτινοβολίας. Μια επίστρωση χαμηλής εκπομπής αυξάνει επίσης τη θερμική αντίσταση και άρα βελτιώνει τις μονωτικές ικανότητες του παραθύρου πολύ περισσότερο από ότι μειώνει το ηλιακό θερμικό του κέρδος. Εκτιμάται μάλιστα ότι η προσθήκη μίας επίστρωσης low-e είναι περίπου ισοδύναμη με την προσθήκη ενός επιπλέον υαλοπίνακα (21).

Όπως έχει αναφερθεί και στην υποενότητα των υαλοπινάκων 3.1.4, χαμηλός συντελεστής εκπομπής σημαίνει χαμηλός συντελεστής απορροφητικότητας και από τη στιγμή που η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία δε μεταβάλλεται, συνεπάγεται και υψηλό συντελεστή ανάκλασης για τα αντίστοιχα μήκη κύματος. Με κατάλληλη επικάλυψη μίας από τις επιφάνειες των υαλοπινάκων (από την εσωτερική μεριά που έρχεται σε επαφή με το διάκενο), η ανακλαστικότητα μπορεί να αυξηθεί. Η επίστρωση μειώνει τις απώλειες ακτινοβολίας μέσω του παραθύρου, ενώ περαιτέρω μείωση των απωλειών επιτυγχάνεται με αντικατάσταση του αέρα στο διάκενο με ένα αέριο χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας (22).

Η επίστρωση χαμηλής εκπομπής αλλάζει λίγο την οπτική ποιότητα του γυαλιού ανακλώντας την υπέρυθρη ακτινοβολία προς το εσωτερικό του κτιρίου ή προς το εξωτερικό περιβάλλον ανάλογα με τη θέση που βρίσκεται. Η θέση της επίστρωσης δεν επηρεάζει ιδιαίτερα το συντελεστή θερμοπερατότητας του παραθύρου, αλλά επηρεάζει σημαντικά το συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους. Όταν σκοπός του συστήματος του παραθύρου είναι η εξασφάλιση θέρμανσης, τότε επιλέγεται να τοποθετηθεί η επίστρωση στις στρώσεις που βρίσκονται πιο κοντά στο εσωτερικό του κτιρίου, έτσι ώστε η υπέρυθρη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από τις εσωτερικές θερμές επιφάνειες να ανακλάται προς τα μέσα. Αντίθετα, όταν σκοπός του συστήματος του παραθύρου είναι η μείωση των αναγκών ψύξης, τότε επιλέγεται να τοποθετηθεί η επίστρωση στις στρώσεις που βρίσκονται πλησιέστερα στον ήλιο. Με αυτόν τον τρόπο ανακλάται η υπέρυθρη ακτινοβολία προς τα έξω, μειώνοντας το ηλιακό θερμικό κέρδος (23).

Κατά τους χειμερινούς μήνες με τις επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής είναι εφικτή η μείωση των απωλειών θερμότητας προς το περιβάλλον, καθώς ανακλούν την ακτινοβολία στο εσωτερικό του κτιρίου κι εκπέμπουν μικρό ποσοστό ακτινοβολίας προς το περιβάλλον. Κατά τους θερινούς μήνες πραγματοποιείται η αντίστροφη διαδικασία, με σκοπό την αποφυγή υπερθέρμανσης των εσωτερικών χώρων του κτιρίου που μπορεί να προκαλέσει δυσφορία. Οι ιδιότητες των επιστρώσεων low-e ως προς την ανάκλαση είναι εφικτό να τροποποιηθούν, ώστε να περιλαμβάνουν

συγκεκριμένα μέρη του ορατού και του υπέρυθρου φάσματος. Έτσι, κατασκευάζονται υαλοπίνακες με βελτιστοποιημένες ροές ενέργειας ως προς την ηλιακή θέρμανση, το φυσικό φωτισμό και την ψύξη (24).

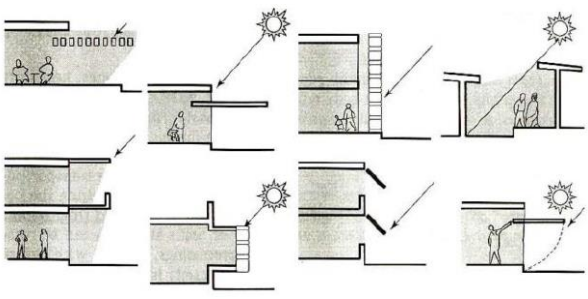
4 Συμβατικές μέθοδοι σκίασης

Τα συστήματα σκίασης αποτελούν κυρίαρχο κομμάτι στο σχεδιασμό των κτιρίων, αποτρέποντας τη διείσδυση έντονης ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό τους και διαμορφώνοντας κατάλληλες συνθήκες για τα άτομα που βρίσκονται σε αυτά. Η σωστή επιλογή και τοποθέτηση των συστημάτων σκίασης στα κτίρια ρυθμίζει το φυσικό φωτισμό που εισέρχεται χωρίς να εμποδίζει το φυσικό αερισμό, συντελώντας στην εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση αναγκών θέρμανσης, ψύξης και τεχνητού φωτισμού. Επίσης, ρυθμίζεται και η εισροή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων, που είτε αποκόπτεται, όταν δεν είναι επιθυμητή, είτε ανακατανέμεται σε μεγαλύτερο βάθος χώρου, ενώ τέλος ελέγχονται και τα φαινόμενα θάμβωσης (25). Κατά τους θερινούς μήνες είναι επιθυμητή η προστασία ενός κτιρίου από την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες το ζητούμενο είναι η είσοδός της στους εσωτερικούς χώρους (26).

Η θέση του εκάστοτε κτιρίου και ο προσανατολισμός του συνιστούν τα βασικότερα κριτήρια με βάση τα οποία επιλέγονται τα καταλληλότερα για την κάθε περίπτωση συστήματα σκίασης. Η κάθε όψη του κτιρίου έχει διαφορετικές απαιτήσεις ανάλογα με τον προσανατολισμό της (25).

Η σκίαση ελέγχει την ηλιακή ακτινοβολία με τους εξής τρόπους:

- Σκίαση που παρέχεται από αρχιτεκτονικά στοιχεία του ίδιου του κτιριακού κελύφους (π.χ. εσοχές)
- Σκίαση που παρέχεται από στατικές ή κινητές εξωτερικές και εσωτερικές περσίδες ή από εσωτερικά στόρια
- Προσωρινή σκίαση που παρέχεται από τον προσανατολισμό του κτιρίου σε έναν ή περισσότερους εξωτερικούς τοίχους
- Μόνιμη ή προσωρινή σκίαση που παρέχεται από τα περιβάλλοντα κτίρια, ή τη βλάστηση
- Σκίαση οροφών με ρόλερ, γλάστρες, βλάστηση κ.λπ.
- Σκίαση από προεξοχές ή τέντες (27)
- Σκίαση από χρωματισμένους υαλοπίνακες σταθερών οπτικών ιδιοτήτων
- Σκίαση από υαλοπίνακες μεταβλητών ιδιοτήτων-ηλεκτροχρωμικά παράθυρα



Σχήμα 4.1: Διάφοροι τύποι συστημάτων σκίασης

4.1 Σταθερά συστήματα σκίασης

Στα σταθερά συστήματα σκίασης συγκαταλέγεται συνήθως η εξωτερική σκίαση που αποτελεί και κυρίαρχο αρχιτεκτονικό στοιχείο και μπορεί να είναι οριζόντιες ή κατακόρυφες περσίδες, σκίαστρα, ή ακόμα και συνδυασμός τους. Αυτά τα είδη σκιάστρων είναι μια συνηθισμένη πρακτική και οικονομική λύση που καταφέρνει να αποκλείσει την άμεση ηλιακή ακτινοβολία, όχι όμως και τη διάχυτη.

Σχήμα 4.2: Εξωτερικά σταθερά συστήματα σκίασης

Ο προσανατολισμός, το γεωγραφικό πλάτος, το ύψος του παραθύρου και η κατακόρυφη απόσταση ανάμεσα στο πρέκι του παραθύρου και το σκίαστρο καθορίζουν το πλάτος του σκιάστρου, ενώ το μήκος του παραθύρου και το γεωγραφικό πλάτος καθορίζουν το μήκος του σκιάστρου (25).

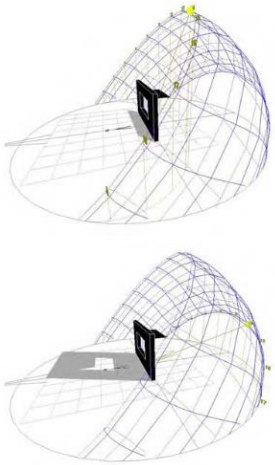
Το μήκος των εξωτερικών σκιάστρων για παράδειγμα, πρέπει να επιλέγεται, ώστε κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο να εισέρχεται επαρκής ακτινοβολία και κατά το θερινό ηλιοστάσιο να παρέχεται επαρκής σκίαση. Για την επιλογή του μήκους των σκιάστρων είναι πρώτα αναγκαία η εύρεση της θέσης του ηλίου για δεδομένο γεωγραφικό πλάτος και για δεδομένη ώρα της ημέρας συγκεκριμένου μήνα. Ένας εμπειρικός κανόνας για τον υπολογισμό του μήκους του προβόλου είναι ότι σε γεωγραφικό πλάτος 36°, το μήκος του πρέπει να είναι το 1/4 του ύψους του από το δάπεδο, ενώ σε γεωγραφικό πλάτος 46° το 1/2 (26).

Αυτοί οι τύποι σκιάστρων τοποθετημένοι στις νότιες προσόψεις των κτιρίων κατορθώνουν να αποκόψουν την ηλιακή ακτινοβολία τους θερινούς μήνες, ενώ τους χειμερινούς μήνες επιτρέπουν την εισχώρησή της στο εσωτερικό των κτιρίων.

Για την πιο εύκολη κυκλοφορία του αέρα επιλέγεται συχνά ως σκέπαστρο πέργκολα.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα των σταθερών συστημάτων σκίασης είναι η μη επαρκής σκίαση κατά τις πρωινές και απογευματινές ώρες που ο ήλιος βρίσκεται χαμηλά. Μια λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η φύτευση ή η τοποθέτηση κινητών στοιχείων σκίασης.

Στο παράδειγμα των επόμενων σχημάτων φαίνεται η λειτουργία του σταθερού σκιάστρου σε δωμάτιο με νότιο προσανατολισμό στις 21 Ιουνίου, όπου αποκόπτει πλήρως τον ήλιο και στις 21 Δεκεμβρίου όπου ο ήλιος εισέρχεται στο δωμάτιο λόγω του χαμηλού του ύψους (25).



Σχήμα 4.3: Σταθερό σκίαστρο σε νότια όψη στις 21 Ιουνίου (πάνω) και στις 21 Δεκεμβρίου (κάτω)

4.2 Κινητά-δυναμικά συστήματα σκίασης

Οι δυνατότητες δυναμικής λειτουργίας των συσκευών σκίασης μέσω ενός συστήματος αυτοματισμού παραμελούνται γενικά στα κτίρια. Ο αντίκτυπος του σχεδιασμού και του ελέγχου σκίασης στην απόδοση του κτιρίου δε λαμβάνεται τις περισσότερες φορές υπόψιν στο στάδιο του σχεδιασμού, παρόλο μπορεί να προσδιοριστεί και να χρησιμοποιηθεί για τη βέλτιστη ενεργειακή ισορροπία ψύξης και φωτισμού. Πρόσφατες μελέτες έχουν δείξει ότι ο κατάλληλος σχεδιασμός και έλεγχος σκίασης, όταν συνδέεται με τον ταυτόχρονο έλεγχο ηλεκτρικού φωτισμού και συστημάτων HVAC, θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά το μέγιστο φορτίο ψύξης και την κατανάλωση ενέργειας για τεχνητό φωτισμό και ψύξη, διατηρώντας παράλληλα καλές εσωτερικές συνθήκες από άποψη θερμότητας και φωτισμού. Ωστόσο, αυτό είναι εφικτό μόνο επιλέγοντας προσεκτικά τις ιδιότητες και τον έλεγχο των παραθύρων και της σκίασης, λαμβάνοντας υπόψιν τις συνδυασμένες επιπτώσεις τους στο φωτισμό και τη θερμική απόδοση στους εσωτερικούς χώρους και στη συνέχεια βελτιστοποιώντας τη λειτουργία τους (28).

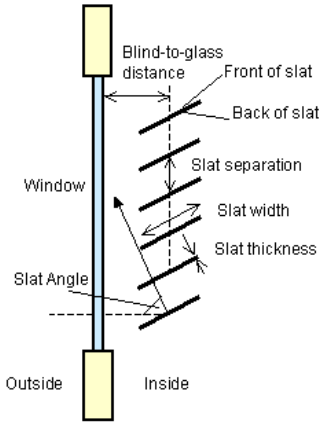
Τα κινητά-δυναμικά συστήματα σκίασης μπορούν να τοποθετηθούν εξωτερικά ή εσωτερικά. Στα εσωτερικά συστήματα σκίασης περιλαμβάνεται και η σκίαση που προσφέρουν τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα, τα οποία αναλύονται στην επόμενη υποενότητα. Ο χειροκίνητος χειρισμός των κινητών συστημάτων είναι πιο εύκολος και φθηνός και συνήθως τα συστήματα τοποθετούνται εσωτερικά. Με τον αυτόματο χειρισμό από την άλλη πρέπει να εξετάζεται κάθε φορά μια παράμετρος με βάση την οποία αξίζει να εφαρμοστεί ή όχι η σκίαση (για παράδειγμα με βάση την τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στους υαλοπίνακες). Ο αυτόματος χειρισμός έχει ένα μεγαλύτερο αρχικό κόστος εγκατάστασης, ενώ χρειάζεται συντήρηση και ορισμένες φορές και αντικατάσταση, όμως συνιστάται για μεγάλα κτίρια (25).

Οι περσίδες σκίασης και τα κινητά στόρια αποτελούν κλασσικούς τρόπους αποφυγής της διείσδυσης της ηλιακής ακτινοβολίας και της θάμβωσης. Οι διατάξεις αυτές σε αρκετές περιπτώσεις ανακατευθύνουν ουσιαστικά το φως, συμβάλλοντας στον ομοιόμορφο φωτισμό. Οι περσίδες σκίασης τοποθετούνται κυρίως εξωτερικά των ανοιγμάτων, σε αντίθεση με τα κινητά στόρια που τοποθετούνται εσωτερικά ή και ανάμεσα στα υαλοπετάσματα. Επίσης, οι περσίδες μπορούν να είναι οριζόντιες ή κάθετες, ανάλογα και με τον προσανατολισμό του ανοίγματος, ενώ προσφέρουν και τη δυνατότητα παροχής νυχτερινών συνθηκών (σκοτάδι). Οι βενετικές περσίδες προσαρμόζονται από 90°, εντελώς κλειστές στη μια κατεύθυνση, μέχρι 0° ανοιχτές και οριζόντιες, μέχρι τελικά −90° εντελώς κλειστές στην αντίθετη κατεύθυνση.

Τόσο ο έλεγχος της κατακόρυφης θέσης της περσίδας όσο και η γωνία που σχηματίζει η κάθετος με το οριζόντιο επίπεδο (slat angle) ελέγχουν τη μετάδοση ακτινοβολίας μέσω του συστήματος παραθύρου. Οι βενετικές περσίδες καθιστούν το δωμάτιο φωτεινό και ο έλεγχος της slat angle υπερτερεί από τον κατακόρυφο έλεγχο θέσης όσο αφορά την οπτική άνεση, επιτυγχάνοντας υψηλή ομοιομορφία.

Μια κατάλληλη μέθοδος ελέγχου είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική λειτουργία των βενετικών περσίδων, ώστε να ρυθμίζουν σωστά τις συνθήκες στο εσωτερικό περιβάλλον. Η μέθοδος ελέγχου μπορεί να αλλάξει το εσωτερικό περιβάλλον και μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τα κλιματικά δεδομένα και το σκοπό που έχει ο έλεγχος (29).

Μία από τις πολλές δημοσιεύσεις που σχετίζονται με τον έλεγχο των συστημάτων σκίασης παρουσιάζει την ανάπτυξη νέων στρατηγικών ελέγχου των βενετικών περσίδων, λαμβάνοντας υπόψιν τη χρήση του φυσικού φωτισμού και την προστασία από φαινόμενα θάμβωσης. Σύμφωνα με αυτήν τη μελέτη, η σταθερή γωνία-slat angle- των 60° ή μεγαλύτερη παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στις περισσότερες περιπτώσεις (30).



Σχήμα 4.4: Διάταξη περσίδων σκίασης

4.3 Σύγκριση εξωτερικής και εσωτερικής σκίασης

Οι περισσότεροι επαγγελματίες στον κτιριακό τομέα εκμεταλλεύονται την ευκολία της χρήσης και του ελέγχου της εσωτερικής σκίασης, ανεξάρτητα από τα πλεονεκτήματα που παρέχει η εξωτερική σκίαση. Εάν οι συσκευές σκίασης είναι εγκατεστημένες στο εξωτερικό του κτιρίου, είναι σε θέση να μπλοκάρουν αποτελεσματικά την ηλιακή ακτινοβολία, προτού περάσει από τον υαλοπίνακα. Από την άλλη πλευρά, όταν χρησιμοποιούνται συσκευές σκίασης εσωτερικού χώρου, οι ηλιακές ακτίνες διέρχονται από το τζάμι κι ένα τμήμα της θερμικής ακτινοβολίας εγκλωβίζεται μεταξύ τζαμιού και διατάξεων σκίασης, ενώ ακόμη η ακτινοβολία στην περιοχή του άπω υπέρυθρου που επανεκπέμπεται από τις εσωτερικές επιφάνειες δεν προλαβαίνει να περάσει από το γυαλί, διότι έχει ήδη απορροφηθεί. Αυτά οδηγούν σε αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη κατά την περίοδο θέρμανσης (31).

Μέχρι τώρα έχουν πραγματοποιηθεί πολλές προσομοιώσεις που συμπεραίνουν ότι η εξωτερική σκίαση υπόσχεται πιο αποτελεσματική απόδοση σε σύγκριση με τις εσωτερικές συσκευές σκίασης. Η εξωτερική σκίαση των όψεων του κτιρίου και ειδικά η εξωτερική σκίαση των παραθύρων είναι μια από τις πιο κατάλληλες στρατηγικές για τον έλεγχο της ανεπιθύμητης εισόδου θερμότητας για ένα κτίριο, καθώς τα παράθυρα είναι υπεύθυνα σε μεγάλο βαθμό για τα ηλιακά θερμικά του κέρδη (32).

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τα εσωτερικά συστήματα σκίασης εξυπηρετούν μόνο για λόγους ιδιωτικότητας και για περιορισμό της φωτεινής έντασης ή της θάμβωσης, ενώ δε συμβάλλουν στο φυσικό δροσισμό, εφόσον επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει στο χώρο χωρίς να την περιορίζουν (25).

5 Ηλεκτροχρωμικά παράθυρα

Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα είναι συσκευές δυναμικού ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας και παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με παθητικές και συμβατικές συσκευές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα παραθύρων. Ελέγχουν την οπτική όχληση από τις διάχυτες ηλιακές ακτίνες και διαμορφώνουν ευνοϊκές συνθήκες στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων, χωρίς να εμποδίζουν την ορατότητα, γεγονός που συμβαίνει με συστήματα εσωτερικής σκίασης όπως οι περσίδες ή τα στόρια. Για τη λειτουργία τους που είναι εφικτή και με τη χρήση φωτοβολταϊκών, απαιτείται μικρή κατανάλωση ενέργειας, ενώ ο έλεγχος της λειτουργίας μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του συστήματος κεντρικής διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου. Η είσοδος τόσο της άμεσης όσο και της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας περιορίζεται, ενώ ταυτόχρονα γίνεται καλύτερη χρήση του φυσικού φωτισμού χωρίς να χρειάζονται παραπάνω κόστη για τεχνητό φωτισμό.

Με την κατάλληλη μεταβολή των οπτικών ιδιοτήτων των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων επιτυγχάνονται καλύτερα αποτελέσματα στα πρωτογενή ενεργειακά κέρδη που εντοπίζονται δηλαδή σε μειωμένα ενεργειακά φορτία για ψύξη, θέρμανση και αερισμό. Ένα τελευταίο πλεονέκτημα αυτών των παραθύρων είναι η αισθητική που προσφέρουν στο κτιριακό κέλυφος χάρη στη δυναμική μεταβολή τους που σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση ενέργειας συνιστούν μια πολύ καλή επιλογή για την ανέγερση σύγχρονων κτιρίων (33).

Σχήμα 5.1: Ηλεκτροχρωμικά παράθυρα σε διάφορες φάσεις από διαυγή (αριστερά) μέχρι την πλήρως χρωματισμένη κατάσταση (δεξιά)

5.1 Αρχή λειτουργίας

Το φαινόμενο του ηλεκτροχρωμισμού παρατηρείται σε οξείδια μετάλλων με βάση τα W, V, Ni, Mo, Ti, Ir κ.ά. και σε πολυάριθμες οργανικές ουσίες. Σε αυτά τα υλικά είναι δυνατή η αλλαγή των οπτικών τους ιδιοτήτων που συμβαίνει εξαιτίας της εισαγωγής και εξαγωγής κινούμενων ιόντων υπό την επίδραση εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Τα υλικά που χρωματίζονται κάτω από έγχυση ιόντων ονομάζονται καθοδικά και τα υλικά που χρωματίζονται υπό εξαγωγή ιόντων ανοδικά. Το ηλεκτροχρωμικό φαινόμενο εμφανίζεται ιδιαίτερα έντονο στα οξείδια

των μετάλλων μεταπτώσεως και κυρίως στα οξείδια του βολφραμίου (WO_3), του μολυβδενίου (MoO_3), του νικελίου (NiO) και του βαναδίου (V_2O_5). Μελέτες για τον ηλεκτροχρωμισμό έχουν γίνει από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 για εφαρμογές απεικόνισης υψηλής αντίθεσης, ενώ από τα μέσα της δεκαετίας του 1980 η έρευνα και η ανάπτυξη των ηλεκτροχρωμικών υλικών σε εφαρμογές παραθύρων έφτασε στα ύψη σε πανεπιστημιακό αλλά και βιομηχανικό επίπεδο (34).

Τα ηλεκτροχρωμικά υλικά ανήκουν στην κατηγορία των έξυπνων υλικών που αλλάζουν ιδιότητες και μπορούν να αλλάξουν αυτόνομα και αντιστρέψιμα το χρώμα τους (από διαπερατά μετατρέπονται σε απορροφητικά-ανακλαστικά και αντίστροφα) λόγω αντιδράσεων οξειδοαναγωγής ως απόκριση σε εξωτερικό ηλεκτρικό ερέθισμα (εφαρμογή μιας μικρής συνεχούς τάσης 1-3 V). Οι υαλοπίνακες που χρησιμοποιούν αυτά τα υλικά μπορούν έτσι να αλλάξουν τα οπτικά χαρακτηριστικά τους όσο αφορά τη διαφάνειά τους και την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών, μειώνοντας ταυτόχρονα το ορατό φως και τη μετάδοση στο κοντινό υπέρυθρο μέσω του παραθύρου. Στη διαφανή της κατάσταση η ηλεκτροχρωμική διάταξη είναι οπτικά καθαρή και διαθέτει υψηλή διαπερατότητα, ενώ ύστερα από την εφαρμογή τάσης χρωματίζεται και η διαπερατότητά της στο ορατό και το κοντινό υπέρυθρο ελαττώνεται σημαντικά. Για να επανέλθει στην αρχική της διαυγή κατάσταση πρέπει να εφαρμοστεί αντίστροφη τάση (35).

5.2 Περιγραφή διαδικασίας

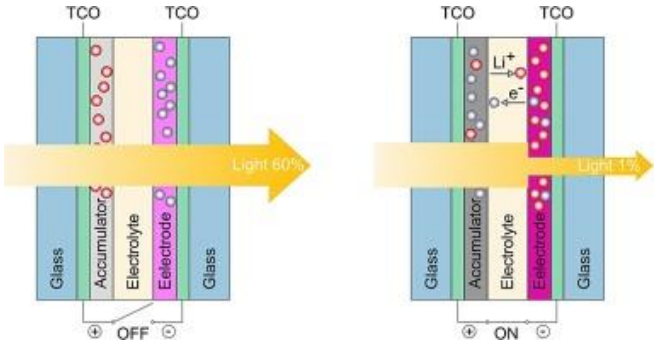
Οι ηλεκτροχρωμικές συσκευές είναι διατάξεις που αποτελούνται από επάλληλα στρώματα λεπτών υμενίων κατάλληλων υλικών που εναποτίθενται σε γυαλί. Ολόκληρη η ηλεκτροχρωμική διάταξη αποτελείται από πέντε διαφορετικά στρώματα (Σχήμα 5.2):

- ένα στρώμα αγωγού ιόντων (ή ηλεκτρολύτη, συνήθως $LiAlF_4$)
- ένα στρώμα ηλεκτροχρωμικού υλικού (συνήθως τριοξείδιο βολφραμίου WO_3 ή πεντοξείδιο νιοβίου Nb_2O_5, αν και πολλά περισσότερα μεταλλικά οξείδια εμφανίζουν ηλεκτροχρωμισμό)
- ένα στρώμα αποθήκης ιόντων (συνήθως V_2O_5 ή NiO, λειτουργεί ως αποθήκη ιόντων ή έχει ηλεκτροχρωμικές ιδιότητες αντίθετες από αυτές του WO_3)
- δύο εξωτερικές στιβάδες από διαφανή και ηλεκτρικά αγώγιμα υμένια-οξείδια- (Transparent Conductive Oxides-TCO)
- δύο εξωτερικές στιβάδες γυάλινων επιφανειών

Ο ηλεκτρολύτης βρίσκεται στο κέντρο της διάταξης και εκατέρωθέν του τοποθετούνται το ηλεκτροχρωμικό φιλμ και το στρώμα αποθήκευσης ιόντων. Εξωτερικά των δύο τελευταίων βρίσκονται τα διαφανή και ηλεκτρικά αγώγιμα

υμένια που τελικά και αυτά με τη σειρά τους πλαισιώνονται από τις γυάλινες επιφάνειες.

Το κεντρικό στρώμα της διάταξης, ο ηλεκτρολύτης, μπορεί να είναι οργανικός ή ανόργανος. Μέσω του ηλεκτρολύτη ή από αυτόν μπορούν να μετακινηθούν ιόντα, συνήθως πρωτόνια (H^+) ή ιόντα λιθίου (Li^+), τα οποία είναι ευκίνητα λόγω του μικρού τους μεγέθους. Ο χρωματισμός της διάταξης τελικά οφείλεται στη μεταβολή των οπτικών χαρακτηριστικών του ενεργού ηλεκτροχρωμικού υμενίου, που συμβαίνει κατά τη διάρκεια εφαρμογής συνεχούς τάσης στα άκρα της διάταξης (35), (36).



Σχήμα 5.2: Ηλεκτροχρωμική διάταξη

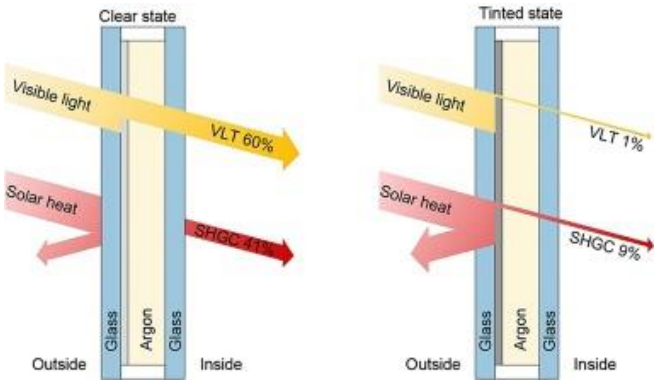
Όταν εφαρμόζεται τάση, δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο μέσα στον ηλεκτρολύτη, το ηλεκτροχρωμικό υμένιο από WO_3 πολώνεται αρνητικά και τα ιόντα Li^+ από τον ηλεκτρολύτη σε συνδυασμό με ιόντα από το εξωτερικό κύκλωμα περνούν από το στρώμα αποθήκης ιόντων στο ηλεκτροχρωμικό υλικό αλλάζοντας το χρώμα από διαφανές σε σκούρο. Το βαθύ μπλε χρώμα που προκύπτει οφείλεται στην ένωση Li_xWO_3. Για την ισοστάθμιση του φορτίου απαιτείται παράλληλη εισαγωγή ηλεκτρονίων από ένα εξωτερικό κύκλωμα στο WO_3 μέσω του διαφανούς και αγώγιμου υμενίου (διάφανα ηλεκτρόδια που τοποθετούνται ως εξωτερικές στιβάδες του ηλεκτρολύτη, του ηλεκτροχρωμικού υμενίου και του στρώματος αποθήκης ιόντων). Η συσκευή καθίσταται πάλι διαφανής αντιστρέφοντας την πολικότητα του ηλεκτρικού δυναμικού που ενεργοποιεί την επιστροφή ιόντων από το ηλεκτροχρωμικό υμένιο στο στρώμα αποθήκης ιόντων. Συνεπώς, η μεταβολή στην ηλεκτρονική πυκνότητα του ηλεκτροχρωμικού υμενίου είναι υπεύθυνη για τη μεταβολή των οπτικών του ιδιοτήτων (35).

Αυτή η αντιστρεπτή διαδικασία περιγράφεται από την παρακάτω αντίδραση οξειδοαναγωγής για την περίπτωση του οξειδίου του βολφραμίου:

$$xLi^+ + xe^- + WO_3 \leftrightarrow Li_xWO_3$$

5.3 Ιδιότητες

Το χρώμα των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων στην αγορά είναι συνήθως μπλε, λόγω του WO_3 που χρησιμοποιείται κατά βάση ως ηλεκτροχρωμικό υλικό με δυνατότητα μετατροπής από διαυγές έως πλήρως σκουρόχρωμο και με ενδιάμεσες καταστάσεις ελέγχου (συνήθως τέσσερεις). Ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC) κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 0,41 σε πλήρη διαφανή κατάσταση και 0,09 όταν είναι πλήρως χρωματισμένος ο υαλοπίνακας, με τιμές διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία (VT) από 60% έως 1% σε διαυγή και σκουρόχρωμη κατάσταση αντίστοιχα (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Διαφορετικές φάσεις ηλεκτροχρωμικής διάταξης

Η εναλλαγή μεταξύ των διαφορετικών καταστάσεων απαιτεί ελάχιστη ποσότητα ηλεκτρικού ρεύματος (2,5 Wp/m^2) και ακόμη λιγότερη απαιτείται για τη διατήρηση της επιθυμητής απόχρωσης (λιγότερο από 0,4 W/m^2).

Η διάρκεια της μετάβασης στις διάφορες καταστάσεις του υαλοπίνακα είναι αρκετά αργή. Για παράδειγμα, η μετάβαση στην πλήρως χρωματισμένη κατάσταση σε ένα γυαλί 10×30 cm διαρκεί περίπου 5 λεπτά, ενώ σε ένα γυάλινο τζάμι 1,2×0,8 m απαιτεί περίπου 12 λεπτά μέχρι τη σκουρόχρωμη κατάστασή του και 8 λεπτά για την επιστροφή στη διαφανή του κατάσταση. Εκτός από το ότι εξαρτάται από το μέγεθος του υαλοπίνακα, οι χρόνοι μετάβασης διαφέρουν και μεταξύ τους όταν χρωματίζονται ή αποχρωματίζονται (ο τελευταίος είναι συνήθως ταχύτερος), ενώ αυξάνονται με τη μείωση της θερμοκρασίας του γυαλιού. Αυτή η αργή ταχύτητα εναλλαγής δεν είναι εντελώς ανεπιθύμητη, διότι επιτρέπει στους χρήστες να αντιμετωπίζουν φυσικά τις αλλαγές στο φυσικό φωτισμό που εισέρχεται στο χώρο, ωστόσο καθιστά δύσκολο για τους ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες να ανταπεξέλθουν σε αλλαγές μικρής διάρκειας της φωτεινότητας, όπως σύννεφα που καλύπτουν και αποκαλύπτουν τον ήλιο σε διαστήματα λεπτών.

Σύμφωνα με έρευνες σε πειραματικά περιβάλλοντα, καθώς και αριθμητικές αξιολογήσεις, ο έλεγχος της θάμβωσης από τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα

θεωρείται γενικά καλός. Παρουσιάζει αξιοσημείωτη απόδοση σε νότιους προσανατολισμούς, ενώ λειτουργεί και σε πιο απαιτητικά παράθυρα που βλέπουν στην Ανατολή και τη Δύση, το τελευταίο με το μειονέκτημα μιας μείωσης της μετάδοσης ορατής ακτινοβολίας. Στα ανατολικά και δυτικά ανοίγματα η ενσωμάτωση κατακόρυφων συστημάτων σκίασης θα μπορούσε να είναι απαραίτητη.

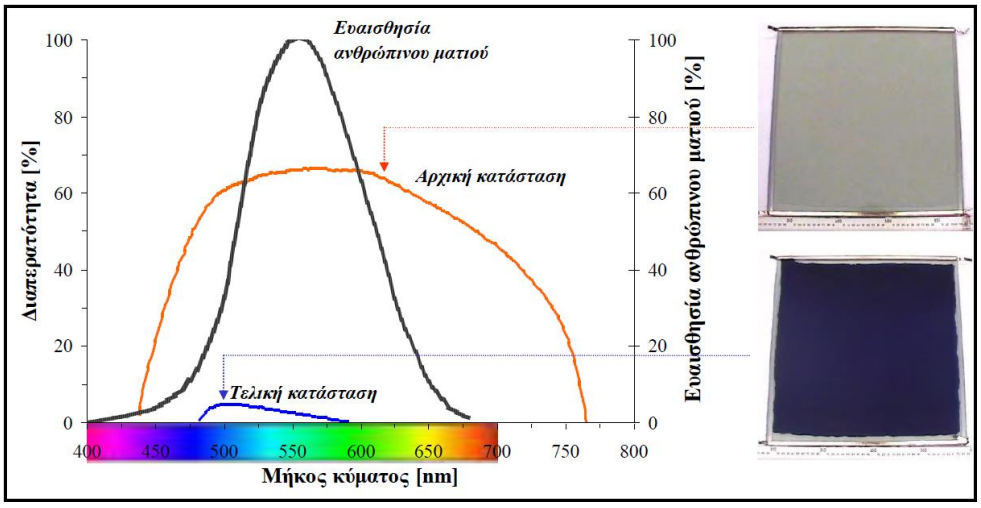
Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα είναι ενεργά δυναμικά τζάμια με την καλύτερη αποδεδειγμένα ανθεκτικότητα, με εγκατεστημένα συστήματα που εξακολουθούν να λειτουργούν πλήρως από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 και εμπορικά προϊόντα που προσφέρουν εγγύηση 10 ετών και διαθέτουν θεωρητική διάρκεια ζωής από 30 έως 50 χρόνια σύμφωνα με το αμερικανικό πρότυπο ASTM E2141-14 (35).

5.4 Οπτική διαπερατότητα και απόδοση χρωματισμού

Η διαπερατότητα στο ορατό ή οπτική διαπερατότητα T_{lum} ορίζεται με βάση την παρακάτω έκφραση:

$$T_{lum} = \frac{\int f(\lambda) \cdot T(\lambda)\, d\lambda}{\int f(\lambda)\, d\lambda}$$

Όπου f(λ) η σχετική ευαισθησία του ανθρώπινου οφθαλμού και Τ(λ) το φάσμα της διαπερατότητας.



Σχήμα 5.4: Μεταβολή της διαπερατότητας κατά τη διάρκεια χρωματισμού μιας ηλεκτροχρωμικής διάταξης

Παρατηρείται από τη γραφική παράσταση πως η ηλεκτροχρωμική διάταξη στη διαυγή κατάσταση έχει αυξημένη τιμή οπτικής διαπερατότητας, η οποία με την

εφαρμογή συνεχούς δυναμικού μειώνεται. Παράλληλα μεταβάλλεται και το χρώμα της διάταξης από σχεδόν διαφανές σε σκούρο μπλε. Αλλάζοντας την πολικότητα του εφαρμοζόμενου δυναμικού η διάταξη αποχρωματίζεται πλήρως.

Η απόδοση χρωματισμού (CE) ορίζεται ως η μεταβολή στην οπτική πυκνότητα του υμενίου προς το εισαγόμενο σε αυτό φορτίο κατά τη διάρκεια χρωματισμού και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$CE = \frac{\Delta(OD)}{\Delta Q} = \log_{10} \frac{(T_b/T_c)}{\Delta Q}$$

Όπου T_b και T_c οι τιμές της διαπερατότητας στη διαυγή και τη χρωματισμένη κατάσταση αντίστοιχα, ΔQ το εισαγόμενο στο υμένιο φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας που προκαλεί μεταβολή στην οπτική πυκνότητα κατά Δ(OD). Όσο μεγαλύτερη η τιμή της CE τόσο πιο έντονη η οπτική τροποποίηση του υλικού κατά τη διάρκεια εισαγωγής-εξαγωγής μικρού αριθμού ιόντων (36).

5.5 Προσθήκη CeO_2 στο V_2O_5

Το οξείδιο του βαναδίου (V_2O_5) είναι γνωστό ότι είναι ένα πολύ καλό υλικό με κύριο μειονέκτημα, όταν χρησιμοποιείται ως αντιηλεκτρόδιο σε μια ηλεκτροχρωμική συσκευή, τον υπολειπόμενο χρωματισμό του. Το CeO_2 έχει μελετηθεί τα τελευταία χρόνια για τη χρήση του ως παθητικού αντιηλεκτροδίου, επειδή διατηρεί την υψηλή του διαφάνεια τόσο στην οξειδωμένη όσο και στην ενδιάμεση κατάσταση. Επιπλέον, παρέχει μια αποτελεσματική ασπίδα UV που σχετίζεται με την ισχυρή απορρόφηση μηκών κύματος κάτω από 380 nm. Ωστόσο, η ταχύτητα της αντίδρασης είναι μικρή και η χωρητικότητα φόρτισης δεν είναι ικανοποιητική για πρακτικές ηλεκτροχρωμικές εφαρμογές. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες προκειμένου να βελτιωθούν οι ηλεκτροχημικές του ιδιότητες μέσω ανάμειξης του οξειδίου με άλλα υλικά όπως τα οξείδια Sn, Ti και Zr. Πρόσφατα (Απρίλιος 2020), θεωρήθηκε ότι η προσθήκη CeO_2 στο V_2O_5 θα μπορούσε να εξαλείψει τον ανεπιθύμητο εναπομένοντα χρωματισμό του οξειδίου του βαναδίου στην αποχρωματισμένη του κατάσταση (37).

5.6 Τρόποι ελέγχου των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων

Οι φυσικές παράμετροι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον έλεγχο των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η εξωτερική θερμοκρασία, η εσωτερική θερμοκρασία, το επίπεδο φωτισμού του εσωτερικού χώρου, το είδος της απασχόλησης των ανθρώπων που βρίσκονται μέσα στο κτίριο, η ώρα της ημέρας και η εποχή. Σε καθεμία από αυτές τις παραμέτρους αντιστοιχούν διαφορετικές ρυθμίσεις και αλγόριθμοι ελέγχου. Επιπλέον, το σύστημα θα πρέπει

να μην αντιδρά σε αλλαγές μικρής διάρκειας, όπως ένα σύννεφο που καλύπτει τον ήλιο για μικρό χρονικό διάστημα. Δεδομένου ότι ο χρόνος αλλαγής του χρωματισμού διαρκεί αρκετά λεπτά, ο έλεγχος θα πρέπει να γίνεται με μικρή συχνότητα μετάβασης, προκειμένου να αποφεύγονται οι συχνές αλλαγές σε προσωρινά εξωτερικά ερεθίσματα (38).

Έλεγχος με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία

Όταν η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στο κτίριο μέσω του παραθύρου υπερβαίνει ένα καθορισμένο όριο, τότε το παράθυρο μεταβαίνει στη χρωματισμένη του κατάσταση (39).

Σύμφωνα με προσομοιώσεις κτιρίων στην περιοχή της Μεσογείου προέκυψε ότι η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας επιτυγχάνεται για αλλαγή του χρωματισμού τού παραθύρου, όταν η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι 150 W/m^2 (38).

Έλεγχος με βάση τη θερμοκρασία

Ο έλεγχος του χρωματισμού του ηλεκτροχρωμικού παραθύρου πραγματοποιείται λαμβάνοντας μετρήσεις της εσωτερικής θερμοκρασίας στη ζώνη που μελετάται και συγκρίνοντάς τες με μια καθορισμένη τιμή. Όταν η μετρούμενη θερμοκρασία υπερβαίνει αυτήν την τιμή, τότε το παράθυρο μεταβαίνει στη χρωματισμένη του κατάσταση (39).

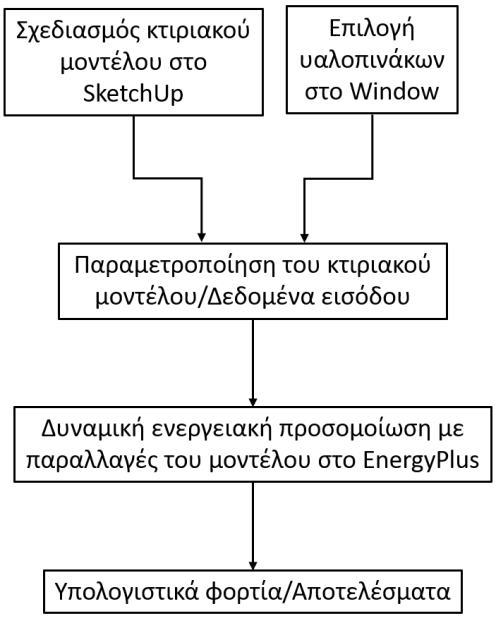
Οι υαλοπίνακες που ελέγχονται από τη θερμοκρασία του εσωτερικού χώρου δεν είναι αποτελεσματικοί σε κλιματιζόμενους χώρους, παρά μόνο σε κτίρια με παθητική λειτουργία (38).

Έλεγχος με βάση το επίπεδο του φωτισμού

Σε αυτήν την περίπτωση ο χρωματισμός του ηλεκτροχρωμικού παραθύρου ρυθμίζεται λαμβάνοντας μετρήσεις του φωτισμού (σε lux) σε ένα καθορισμένο από το δάπεδο ύψος εντός της ζώνης που μελετάται και συγκρίνοντάς τες με μια συγκεκριμένη τιμή. Όταν το μετρούμενο επίπεδο φωτισμού υπερβαίνει αυτήν την τιμή, τότε το παράθυρο μεταβαίνει στη χρωματισμένη του κατάσταση. Το όριο που επιλέγεται εξαρτάται από τη χρήση του χώρου. Για τα γραφεία το επιθυμητό επίπεδο φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους είναι τα 500 lux, ενώ για τους βοηθητικούς-κοινόχρηστους χώρους είναι τα 100 lux (39).

6 Λογισμικά για ενεργειακή μοντελοποίηση και προσομοίωση κτιρίων

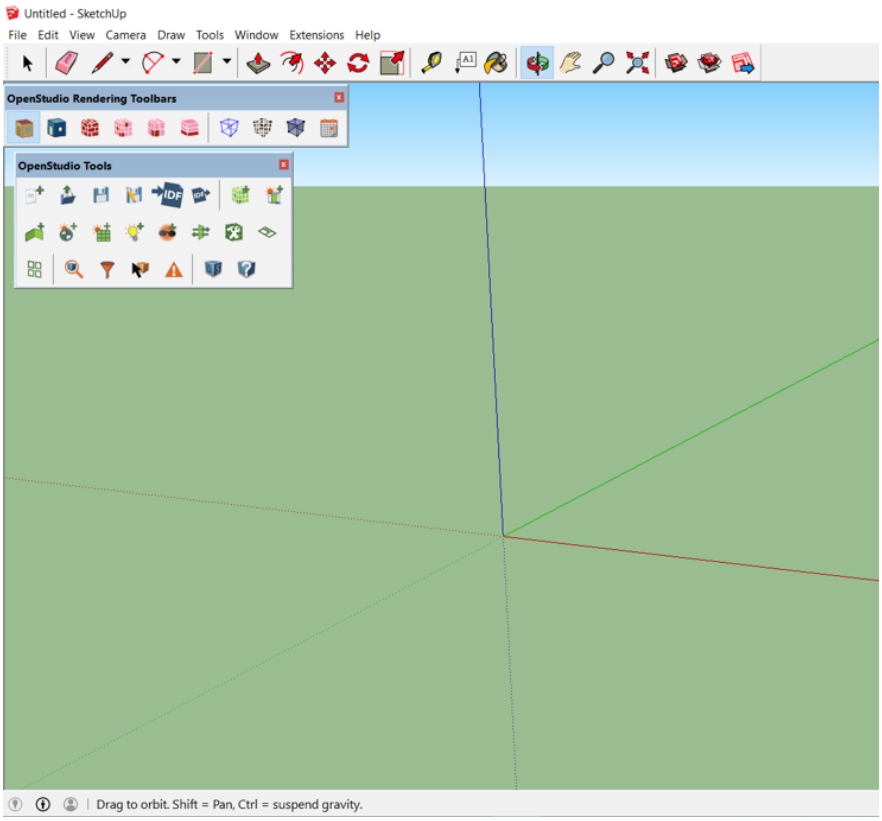
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα εργασία για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση του κτιρίου είναι σχηματικά η εξής:



Σχήμα 6.1: Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας μέχρι εξαγωγής αποτελεσμάτων

6.1 Λογισμικό SketchUp

Για τη σχεδίαση του κτιριακού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SketchUp 2016 με το plug-in Openstudio 1.13.0. Το SketchUp αποτελεί ένα απλό στην εκμάθηση λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης μοντέλων με ευρύ πεδίο εφαρμογών. Είναι κατάλληλο στην αρχιτεκτονική, την εσωτερική διακόσμηση και συνεργάζεται με το EnergyPlus μέσω της προσθήκης plug-in που καθιστά εφικτή την εξαγωγή του αρχείου του κτιρίου σε μορφή αρχείου IDF. Αυτό στη συνέχεια εισάγεται ως βασικό αρχείο στο EnergyPlus.



Σχήμα 6.2: Περιβάλλον SketchUp 2016 με εργαλεία Open Studio 1.13.0

6.2 Λογισμικό EnergyPlus

Το EnergyPlus είναι ένα ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό ενεργειακής ανάλυσης, προσομοίωσης και υπολογισμού θερμικών φορτίων, αλλά και άλλων ενεργειακών καταναλώσεων μίας θερμικής εγκατάστασης ή ενός κτιρίου. Έχει τις ρίζες του στα προγενέστερα προγράμματα BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) και DOE-2, τα οποία αναπτύχθηκαν και παρουσιάστηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ως εργαλεία ενεργειακής προσομοίωσης. Τα προγράμματα αυτά δημιουργήθηκαν με σκοπό τη χρήση τους από μηχανικούς σχεδιασμού ή αρχιτέκτονες που επιθυμούν να διαστασιολογήσουν κατάλληλα τον εξοπλισμό HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) του κτιρίου, να εκπονήσουν μελέτες κόστους κύκλου ζωής, βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης κλπ.

Η λειτουργία του EnergyPlus βασίζεται στην ταυτόχρονη λειτουργία πολλών υποπρογραμμάτων, τα οποία έχουν ως σκοπό να υπολογίσουν μια πληθώρα μεταβλητών όπως τα απαιτούμενα φορτία θέρμανσης και ψύξης για τη θερμική ισορροπία του κτιρίου, οι θερμοκρασίες των θερμικών ζωνών και των επιφανειών, η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου κλπ. Σε αντίθεση με τα προγενέστερα προγράμματά του, στο EnergyPlus το μοντέλο προσομοιώνεται αρκετά ρεαλιστικά, αφού τα αποτελέσματα των υποπρογραμμάτων συνδέονται με αναδράσεις, καταλήγοντας σε μία λειτουργία ταυτόχρονης λύσης με αλληλεπίδραση μεταξύ

θερμικών ζωνών και συστημάτων HVAC. Το σύνολο του προγράμματος, μπορεί να αναπαρασταθεί ως μια σειρά από λειτουργικά στοιχεία που ενώνονται με βρόχους. Η διαδικασία επίλυσης είναι μια επαναληπτική δομή διαδοχικών αντικαταστάσεων τύπου Gauß-Seidel. Όλα τα στοιχεία ενσωματώνονται και ελέγχονται από το διαχειριστή της προσομοίωσης. Η προσομοίωση όπως επίσης και οι υπολογισμοί στηρίζονται στις θεμελιώδεις αρχές της μεταφοράς θερμότητας.

Για την εκκίνηση της προσομοίωσης εισάγονται από το χρήστη πληροφορίες σε σχέση με τη γεωμετρία του κτιρίου, τα χαρακτηριστικά του κελύφους του, των μηχανικών συστημάτων και των συστημάτων φωτισμού, καθώς και τα χρονοδιαγράμματα ρύθμισης της συμπεριφοράς των ενοίκων και των συστημάτων HVAC. Αυτές, καθώς και πολλές άλλες λεπτομέρειες προσομοίωσης επιτρέπουν στο χρήστη να επαληθεύσει ότι η προσομοίωση συμπεριφέρεται όπως τα πραγματικά κτίρια.

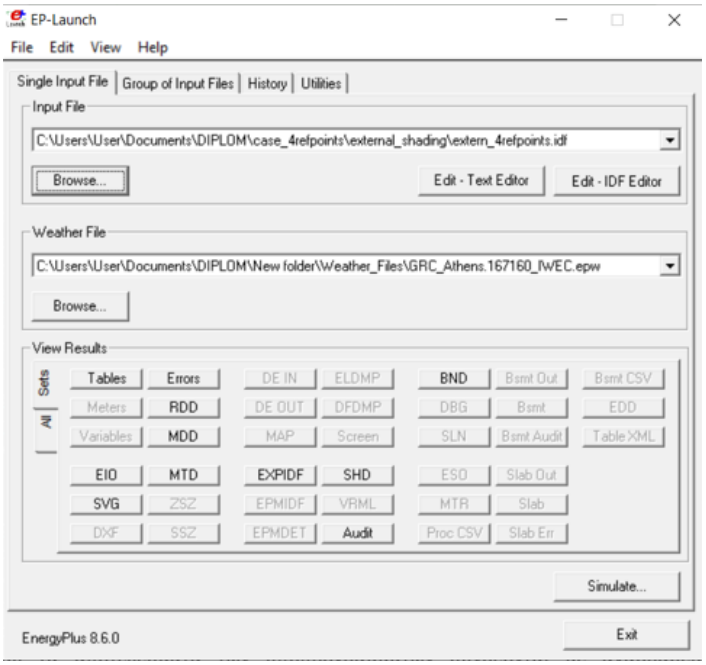
Ορισμένες από τις δυνατότητες που προσφέρει το EnergyPlus είναι οι ακόλουθες:

- Ολοκληρωμένη, ταυτόχρονη επίλυση κατά την οποία η απόκριση του κτιρίου και τα κύρια και δευτερεύοντα συστήματα είναι συζευγμένα. Όταν είναι αναγκαίο, πραγματοποιούνται επαναλήψεις.
- Χρονικά βήματα, υποπολλαπλάσια της ώρας, που καθορίζονται από το χρήστη (με προεπιλεγμένη τιμή τα 15 λεπτά) για την αλληλεπίδραση μεταξύ των θερμικών ζωνών και του περιβάλλοντος. Μεταβλητά χρονικά βήματα για αλληλεπιδράσεις μεταξύ των θερμικών ζωνών και των συστημάτων HVAC, τα οποία μεταβάλλονται αυτόματα για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα της λύσης.
- Χρήση αρχείων καιρού, εισόδου και εξόδου σε μορφή κειμένου ASCII που περιλαμβάνουν σε ωριαία ή συχνότερη βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τις τυποποιημένες και προσδιορισμένες από το χρήστη αναφορές αντίστοιχα.
- Μέθοδος επίλυσης βασισμένη στον ισολογισμό θερμότητας του κτιρίου που επιτρέπει ταυτόχρονα υπολογισμό των επιδράσεων της ακτινοβολίας και της συναγωγής, τόσο στις εσωτερικές όσο και στις εξωτερικές επιφάνειες σε κάθε χρονικό βήμα.
- Αγωγή θερμότητας σε μεταβατική κατάσταση μέσω των δομικών στοιχείων, όπως τοίχοι, οροφές, δάπεδα κλπ. χρησιμοποιώντας κατάλληλες συναρτήσεις μεταφοράς θερμότητας.
- Βελτιωμένη μοντελοποίηση μεταφοράς θερμότητας στο έδαφος μέσω συνδέσεων με τρισδιάστατα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και απλουστευμένες αναλυτικές τεχνικές.
- Συνδυασμένο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας και μάζας που υπολογίζει την απορρόφηση/εκρόφηση είτε μέσω της ενσωμάτωσης κάθε στρώματος στις συναρτήσεις μεταφοράς θερμότητας με αγωγή είτε μέσω ενός αποτελεσματικού μοντέλου βάθους διείσδυσης υγρασίας (Effective Moisture Penetration Depth Model-EMPD).
- Μοντέλα θερμικής άνεσης που βασίζονται στη δραστηριότητα, την εσωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού, την υγρασία κλπ.

- Προηγμένοι υπολογισμοί υαλοπινάκων, συμπεριλαμβανομένων ελεγχόμενων περσίδων παραθύρων, ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων, ισολογισμών θερμότητας σε κάθε διαδοχικό στρώμα που επιτρέπουν το σωστό υπολογισμό της ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από τους υαλοπίνακες.
- Έλεγχος φωτισμού ημέρας (daylight control), συμπεριλαμβανομένων υπολογισμών φωτισμού εσωτερικού χώρου, προσομοίωσης και ελέγχου θάμβωσης, ελέγχου φωτιστικών και υπολογισμού της επίδρασης του μειωμένου τεχνητού φωτισμού στη θέρμανση και την ψύξη.
- Συστήματα HVAC (συμβατικά και λαμβάνοντας υπόψιν την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας) που βασίζονται σε αναλυτικό υπολογισμό και επιτρέπουν στους χρήστες να μοντελοποιούν τυπικά και ελαφρώς τροποποιημένα συστήματα χωρίς να ανασυνθέτουν τον πηγαίο κώδικα του προγράμματος.
- Υπολογισμοί ατμοσφαιρικής ρύπανσης με ικανότητα πρόβλεψης των σωματιδίων CO_2, SO_x, NO_x, CO και της παραγωγής υδρογονανθράκων τόσο για την επιτόπια όσο και για την απομακρυσμένη μετατροπή ενέργειας.
- Δυνατότητα σύνδεσης με άλλα δημοφιλή περιβάλλοντα προσομοίωσης και εργαλεία όπως το WINDOW και το DElight με σκοπό τη λεπτομερέστερη ανάλυση των στοιχείων του κτιρίου (40).

Τα βήματα για τη δημιουργία και χρήση ενός μοντέλου EnergyPlus είναι περιληπτικά τα ακόλουθα:

1. Απόκτηση των δεδομένων που αφορούν το σχεδιασμό του κτιρίου (διαστάσεις, μορφή, προσανατολισμός κλπ.)
2. Σχεδιασμός του κτιρίου με τη βοήθεια κατάλληλου σχεδιαστικού προγράμματος που να είναι συμβατό με το EnergyPlus και εξαγωγή του αντίστοιχου αρχείου IDF
3. Απόκτηση των δεδομένων που αφορούν την κατασκευή του κτιρίου (υλικά κατασκευής, θερμοφυσικές και οπτικές ιδιότητες) και ενσωμάτωσή τους μέσω του EnergyPlus
4. Απόκτηση των αρχείων κλιματικών δεδομένων που αφορούν την περιοχή που βρίσκεται το υπό μελέτη κτίριο και των γεωγραφικών χαρακτηριστικών της περιοχής (γεωγραφικό μήκος και πλάτος, ζώνη ώρας και υψόμετρο) και ενσωμάτωσή τους στο αρχείο
5. Επιλογή του τύπου και των χαρακτηριστικών του συστήματος HVAC και καθορισμός των απαραίτητων ρυθμίσεων λειτουργίας του
6. Καθορισμός των διαφόρων προγραμμάτων λειτουργίας του κτιρίου που μπορεί να αφορούν τη συμπεριφορά των ενοίκων, τη λειτουργία των συστημάτων φωτισμού και του ηλεκτρικού εξοπλισμού κ.ά.
7. Επιλογή των επιθυμητών μεταβλητών εξόδου και του χρονικού βήματος υπολογισμού
8. Εκτέλεση της ενεργειακής προσομοίωσης για την επιθυμητή χρονική περίοδο
9. Επεξεργασία των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας

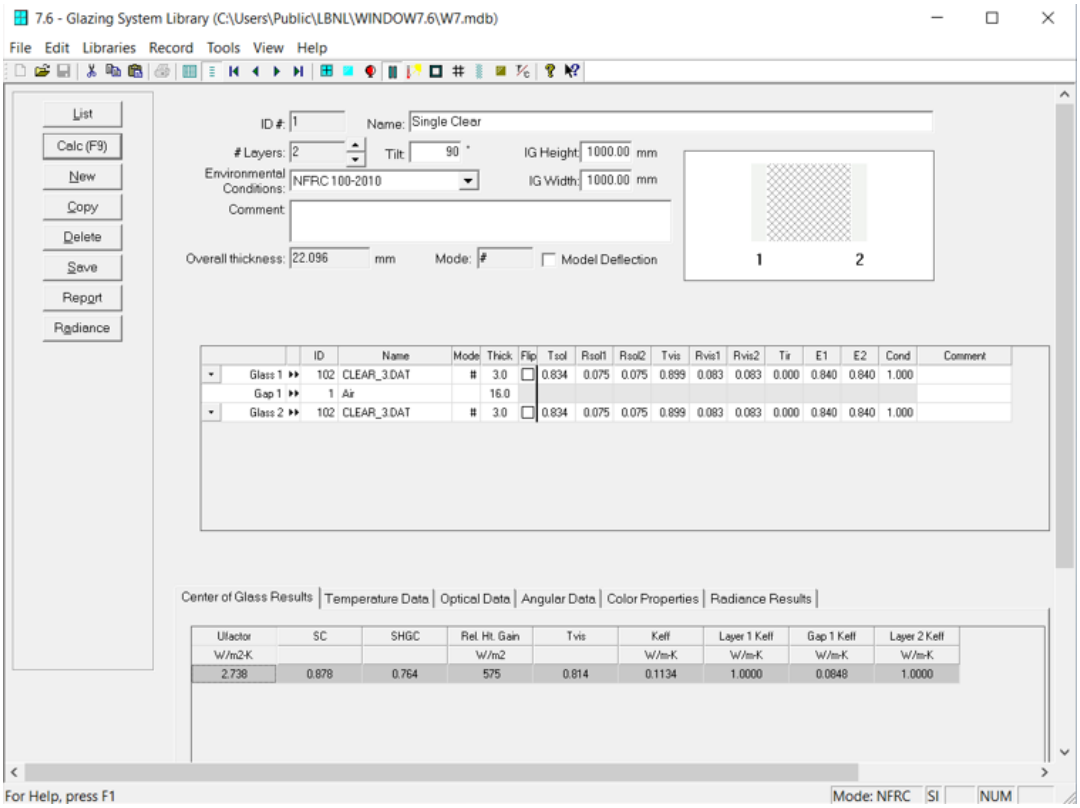


Σχήμα 6.3: Αρχεία εισόδου του EnergyPlus

6.3 Λογισμικό WINDOW

Για το σενάριο που εξετάστηκε στην παρούσα εργασία με τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα ως μέθοδος σκίασης στο κτιριακό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό WINDOW 7.6 προκειμένου να επιλεχθούν τα υλικά του υαλοπίνακα. Το WINDOW διαθέτει βιβλιοθήκες μεμονωμένων στρώσεων γυαλιού, καθώς και συστημάτων παραθύρων, αναφέροντας τις οπτικές ιδιότητες κάθε επιφάνειας. Οι βιβλιοθήκες του WINDOW έχουν δημιουργηθεί με βάση την Παγκόσμια Βάση Δεδομένων Υαλοπινάκων (International Glazing Database) περιλαμβάνοντας προϊόντα από διάφορους κατασκευαστές, αλλά και γενικότερες καταχωρήσεις προϊόντων.

Με το υπολογιστικό αυτό εργαλείο γίνεται δυνατός ο σχεδιασμός ενός ολοκληρωμένου συστήματος παραθύρου με την επιλογή υαλοπινάκων, υλικών πλήρωσης, καθώς και πλαισίων από τις βιβλιοθήκες που διαθέτει το πρόγραμμα ή από ορισμό καινούργιων. Μεταξύ των δυνατοτήτων που προσφέρει στο χρήστη είναι και ο υπολογισμός του ισοδύναμου συντελεστή θερμοπερατότητας, του συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους και της διαπερατότητας σε ορατή ακτινοβολία ενός απλού ή σύνθετου συστήματος υαλοπινάκων. Επίσης το WINDOW συνεργάζεται και με το EnergyPlus, καθιστώντας δυνατή την αυτόματη μεταφορά των δεδομένων των παραθύρων (13).



Σχήμα 6.4: Παράδειγμα συστήματος υαλοπίνακα στο περιβάλλον του WINDOW

7 Διαδικασία κατασκευής κτιριακού μοντέλου

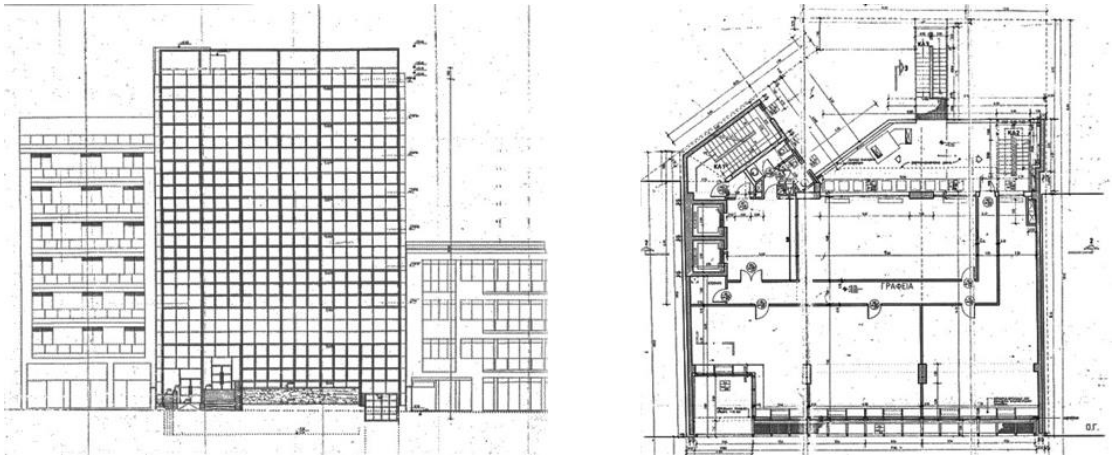
7.1 Παρουσίαση του κτιριακού μοντέλου

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε το κτίριο που σήμερα στεγάζει το ιδιωτικό εκπαιδευτικό ίδρυμα του BCA College στη Λεωφόρο Αλεξάνδρας. Το κτίριο κατασκευάστηκε κατά το διάστημα 1991-1993 και επιλέχθηκε λόγω της μεγάλης γυάλινης επιφάνειας που διαθέτει κυρίως στη νότια όψη (επί της Λεωφόρου), αλλά και στη βόρεια όψη, καθώς και λόγω των εξωτερικών προβόλων που υπάρχουν στη νότια όψη και λειτουργούν ως εξωτερική σκίαση. Στην ανατολική και στη δυτική του πλευρά εφάπτεται με όμορα κτίρια και συνεπώς δε διαθέτει παράθυρα.

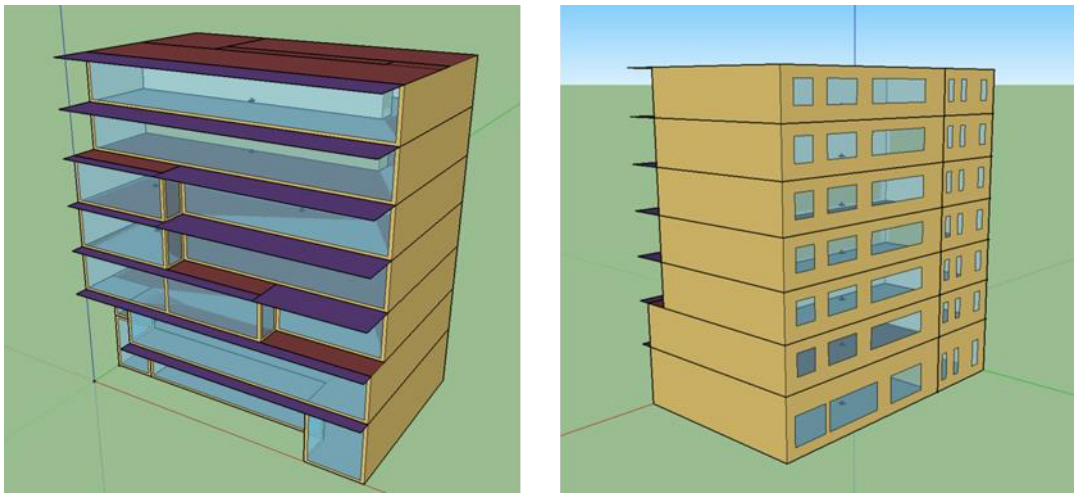
Αφού ελήφθησαν τα σχέδια του κτιρίου από την Πολεοδομία Αθηνών, έγινε η απλούστευσή τους και διάφορες παραδοχές που καθιστούν εφικτή την ενεργειακή του προσομοίωση στο EnergyPlus. Έτσι, θεωρήθηκε ότι το κτίριο διαθέτει 7 ορόφους μαζί με αυτόν του ισογείου, ενώ έγινε παράλειψη των υπόγειων χώρων που κανονικά διαθέτει. Μια ακόμη βασική απλούστευση που έγινε, αφορά τη βόρεια-οπίσθια όψη του κτιρίου, η οποία διαθέτει μια τριγωνική διαμόρφωση και η οποία τελικά παραλείφθηκε.

Παρακάτω παρατίθενται μια φωτογραφία της πρόσοψης του κτιρίου, δύο βασικές όψεις από τα σχέδια του και το τελικό απλουστευμένο τρισδιάστατο σχέδιο που προέκυψε με το SketchUp 2016 και τα εργαλεία του Open Studio 1.13.0 και χρησιμοποιήθηκε για την ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου.

Σχήμα 7.1: Πρόσοψη BCA College



Σχήμα 7.2: Σχέδια BCA College (πρόσοψη αριστερά και κάτοψη 1ου ορόφου δεξιά)



Σχήμα 7.3: Απλοποιημένα σχέδια του SketchUp

7.2 Μοντελοποίηση του κτιριακού μοντέλου

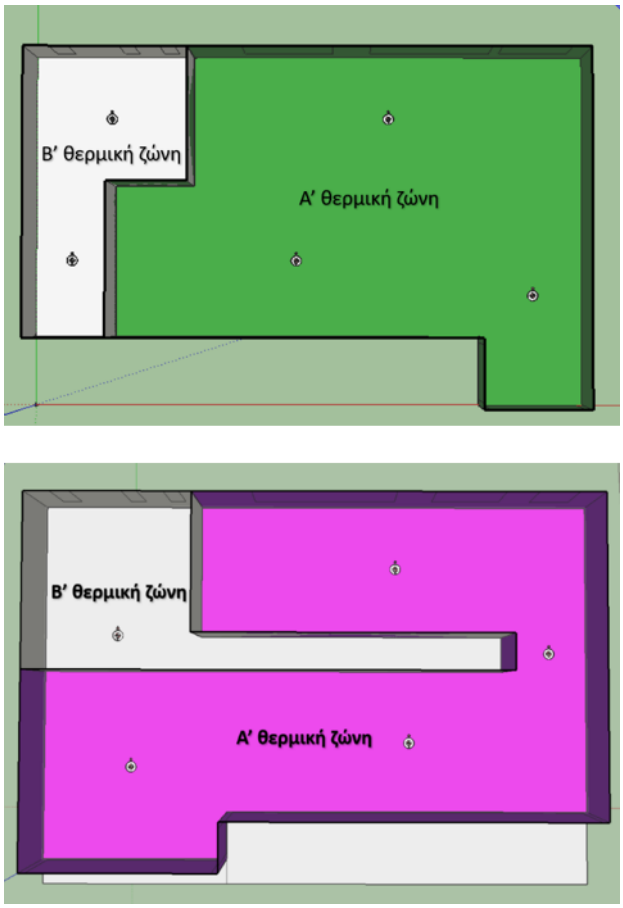
7.2.1 Ορισμός θερμικών ζωνών

Συνήθως στα κτιριακά μοντέλα συνιστάται ο διαχωρισμός του κτιρίου σε όσο το δυνατόν λιγότερες θερμικές ζώνες για εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου και συμπλήρωση λιγότερων δεδομένων εισόδου (41). Ωστόσο, η μεγάλη κλίμακα της κατασκευής και η πολυπλοκότητα την οποία εισάγει η ύπαρξη διαφορετικών οριακών συνθηκών ανά όροφο, συνεπάγεται τη μοντελοποίηση του κτιρίου με περισσότερες θερμικές ζώνες.

Στην παρούσα εργασία σε κάθε όροφο του κτιρίου ορίστηκαν δύο θερμικές ζώνες, μία που αντιστοιχεί στους χώρους διδασκαλίας-γραφεία και μία για τους

βοηθητικούς χώρους (διάδρομοι, λουτρά, κλιμακοστάσιο), οπότε συνολικά προέκυψαν 14 θερμικές ζώνες.

Παρακάτω παρατίθενται οι κατόψεις από το ισόγειο του κτιρίου και του 4ου ορόφου ενδεικτικά, όπου φαίνονται οι θερμικές ζώνες:



Σχήμα 7.4: Θερμικές ζώνες ισογείου (πάνω) και 4ου ορόφου (κάτω)

7.2.2 Ορισμός συνοριακών συνθηκών

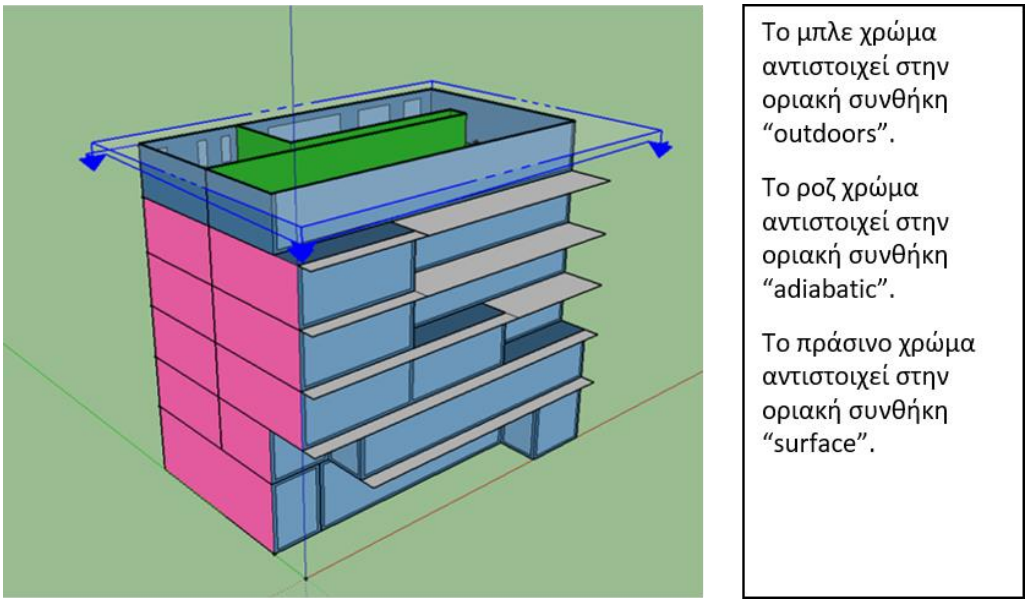
Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας σχεδιασμού του κτιριακού κελύφους είναι έπειτα αναγκαίος ο καθορισμός των χαρακτηριστικών της κάθε επιφάνειας και των οριακών συνθηκών. Συγκεκριμένα με τα εργαλεία του Open Studio 1.13.0 ορίζονται οι ονομασίες και οι τύποι (παράθυρα, τοίχοι, δάπεδα, οροφές) όλων των επιφανειών.

Για τις επιφάνειες που έρχονται σε επαφή με το φυσικό περιβάλλον και άρα δέχονται προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία επιλέγεται η οριακή συνθήκη “outdoors”, ενώ για τις επιφάνειες που εφάπτονται με άλλες του κτιριακού κελύφους επιλέγεται η οριακή συνθήκη “surface” ορίζοντας και την ονομασία της

αντίστοιχης εφαπτόμενης επιφάνειας ως οριακή τους συνθήκη. Για τις επιφάνειες που συνορεύουν στην ανατολική και τη δυτική πλευρά με τα όμορα κτίρια επιλέγεται η οριακή συνθήκη “adiabatic“, ενώ για τις επιφάνειες του δαπέδου που εφάπτονται με το έδαφος επιλέγεται η οριακή συνθήκη “ground”.

Η χρήση του λογισμικού SketchUp ολοκληρώνεται διαδοχικά με τα εργαλεία “Surface Matching” και “Match in Entire Model” που ρυθμίζουν τις κατάλληλες οριακές συνθήκες κάθε επιφάνειας και ταιριάζουν τις οριακές συνθήκες των επιφανειών αντίστοιχα. Έπειτα εξάγεται ένα αρχείο IDF που διαθέτει τα χαρακτηριστικά του κτιρίου που σχεδιάστηκε και πλέον μπορεί να εισαχθεί για επεξεργασία στο EnergyPlus.

Στο σχήμα που ακολουθεί αναπαρίστανται στο περιβάλλον του SketchUp οι οριακές συνθήκες που αναλύθηκαν παραπάνω, κάθε μία με διαφορετικό χρώμα:



Σχήμα 7.5: Οριακές συνθήκες κτιριακού μοντέλου

7.3 Ορισμός παραμέτρων προσομοίωσης στο EnergyPlus

Προκειμένου να γίνει η διεξαγωγή της προσομοίωσης στο EnergyPlus πρέπει πρώτα να ορισθούν ως δεδομένα εισόδου διάφορες παράμετροι στον IDF Editor και να εισαχθεί κατάλληλο αρχείο καιρού (weather file) με τα κλιματικά δεδομένα της Αθήνας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι σημαντικότερες ρυθμίσεις.

Ως χρονικό βήμα με βάση το οποίο γίνονται οι υπολογισμοί που ζητούνται από το πρόγραμμα επιλέγονται τα 10 λεπτά, ως τοποθεσία η Αθήνα με γεωγραφικό μήκος 23,73°, γεωγραφικό πλάτος 37,9°, ζώνη ώρας +2 h και υψόμετρο 15 m.

Στη συνέχεια στην καρτέλα Schedule:Compact, ορίζονται τα προγράμματα λειτουργίας που αφορούν τη δραστηριότητα των ατόμων στο κτίριο, το φωτισμό, τον ηλεκτρικό εξοπλισμό και τη θέρμανση και την ψύξη, με τα δύο τελευταία να διαχωρίζονται ανάλογα με τη χρήση του εκάστοτε χώρου (γραφεία, κοινόχρηστοι βοηθητικοί χώροι).

Table 10: Recommended schedules for occupancy, lighting and HVAC system for baseline building according to ASHRAE 90.1

Hour of Day (Time)	Schedule for Occupancy			Schedule for Lighting			Schedule for HVAC System		
	Percent of Maximum Load			Percent of Maximum Load					
	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun	Wk	Sat	Sun
1 (12-1 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off
2 (1-2 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off
3 (2-3 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off
4 (3-4 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off
5 (4-5 am)	0	0	0	5	5	5	Off	Off	Off
6 (5-6 am)	0	0	0	10	5	5	Off	Off	Off
7 (6-7 am)	10	10	5	10	10	5	On	On	Off
8 (7-8 am)	20	10	5	30	10	5	On	On	Off
9 (8-9 am)	95	30	5	90	30	5	On	On	Off
10 (9-10 am)	95	30	5	90	30	5	On	On	Off
11 (10-11 am)	95	30	5	90	30	5	On	On	Off
12 (11-12 pm)	95	30	5	90	30	5	On	On	Off
13 (12-1 pm)	50	10	5	80	15	5	On	On	Off
14 (1-2 pm)	95	10	5	90	15	5	On	On	Off
15 (2-3 pm)	95	10	5	90	15	5	On	On	Off
16 (3-4 pm)	95	10	5	90	15	5	On	On	Off
17 (4-5 pm)	95	10	5	90	15	5	On	On	Off
18 (5-6 pm)	30	5	5	50	5	5	On	On	Off
19 (6-7 pm)	10	5	0	30	5	5	On	Off	Off
20 (7-8 pm)	10	0	0	30	5	5	On	Off	Off
21 (8-9 pm)	10	0	0	20	5	5	On	Off	Off
22 (9-10 pm)	10	0	0	20	5	5	On	Off	Off
23 (10-11 pm)	5	0	0	10	5	5	Off	Off	Off
24 (11-12 am)	5	0	0	5	5	5	Off	Off	Off

Table 3: ASHRAE Equipment Schedule from Standard 90.1

ASHRAE Equipment Schedule			
Hour of Day	% Usage Weekday	% Usage Saturday	% Usage Sunday
0	5	5	5
1	5	5	5
2	5	5	5
3	5	5	5
4	5	5	5
5	10	5	5
6	10	10	5
7	30	10	5
8	90	30	5
9	90	30	5
10	90	30	5
11	90	30	5
12	80	15	5
13	90	15	5
14	90	15	5
15	90	15	5
16	90	15	5
17	50	5	5
18	30	5	5
19	30	5	5
20	20	5	5
21	20	5	5
22	10	5	5
23	5	5	5
Total	1040	280	120
Average % Usage	43%	12%	5%

Σχήμα 7.6: Προγράμματα λειτουργίας (από ASHRAE 90.1) (42)

Σύμφωνα με την αναθεώρηση του Κ.Εν.Α.Κ. (2017) για την κλιματική ζώνη Β, στην οποία υπάγεται η Αθήνα, ως περίοδος θέρμανσης λαμβάνεται η περίοδος από την 1 Νοεμβρίου έως και 15 Απριλίου, ενώ η περίοδος ψύξης ξεκινά στις 15 Μαΐου και ολοκληρώνεται στις 15 Σεπτεμβρίου. Για τη χειμερινή περίοδο η επιθυμητή τιμή της θερμοκρασίας στα γραφεία είναι 20°C και στους βοηθητικούς χώρους είναι 18°C, ενώ για τη θερινή περίοδο είναι 26°C (41). Τα συστήματα ψύξης και θέρμανσης του κτιρίου λειτουργούν προκειμένου να εξασφαλίζουν τις παραπάνω επιθυμητές θερμοκρασίες σε κάθε χώρο. Με βάση αυτές τις θερμοκρασίες δημιουργήθηκαν τα απαραίτητα προγράμματα λειτουργίας, στα οποία με τη σειρά τους βασίζεται και η λειτουργία του θερμοστάτη του κτιρίου.

Υλικά δομικών στοιχείων του κτιρίου

Κάθε δομικό στοιχείο του κτιριακού κελύφους αποτελείται από στρώματα υλικών, τα οποία ορίζονται λεπτομερώς στην καρτέλα Material του EnergyPlus. Για κάθε στρώμα υλικού συμπληρώνεται η τραχύτητα, το πάχος, η ειδική θερμική

αγωγιμότητα, η πυκνότητα και η ειδική θερμοχωρητικότητά του. Επίσης, μπορούν να προσδιοριστούν οι συντελεστές απορρόφησης θερμότητας, απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας και απορρόφησης ορατής ακτινοβολίας. Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τα δομικά στοιχεία του κτιρίου είναι τα εξής:

	Τραχύτητα	**Πάχος [m]**	**Ειδ. Θερμ. αγωγ. [W/mK]**	**Πυκνότητα [kg/m^3]**	**Ειδ. Θερμοχωρητ. [J/kgK]**
Φύλλο αλουμινίου	Medium smooth	0,01	205	2700	910
Τούβλο	Medium rough	0,09	0,51	1500	840
Κεραμικά πλακίδια	Medium smooth	0,01	1,84	2000	1090
Σκυρόδεμα	Rough	0,2	2,5	2400	653
Μόνωση εξωτ. τοίχων	Medium rough	*	0,035	30	1500
Μόνωση δαπέδου	Medium rough	*	0,035	30	1500
Εσωτ. επίχρισμα ασβεστοκονιάματος οροφής και δαπέδου	Medium smooth	0,02	0,87	1900	1000
Μόνωση οροφής	Medium rough	*	0,035	30	1500
Εξωτ. επίχρισμα ασβεστοκονιάματος οροφής και δαπέδου	Medium smooth	0,1	0,87	1900	1000
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος τοίχων	Medium smooth	0,025	0,87	1900	1000

Οι τιμές με (*) υπολογίζονται στη συνέχεια.

Πίνακας 7.1: Υλικά δομικών στοιχείων κτιρίου

Υλικά υαλοπινάκων

Κάθε παράθυρο συνίσταται από στρώματα γυαλιού και διακένων με κατάλληλο αέριο. Στην κατάλληλη καρτέλα συμπληρώνονται λεπτομερώς οι θερμικές και οπτικές ιδιότητες των επιμέρους στρώσεων γυαλιού, καθώς και το πάχος τους. Αυτές οι πληροφορίες εισάγονται στο EnergyPlus με τη βοήθεια του WINDOW. Σε αντίστοιχη καρτέλα ορίζονται και τα αέρια πλήρωσης που χρησιμοποιούνται στα διάκενα των παραθύρων με τις ιδιότητές τους.

Δομή επιφανειών του κτιριακού κελύφους

Η θερμική αντίσταση R_i [m^2 K/W] ενός στρώματος υλικού i ορίζεται ως εξής:

$$R_i = \frac{l_i}{k_i}$$

Όπου με l_i συμβολίζεται το πάχος του στρώματος υλικού i [m] και με k_i η ειδική θερμική αγωγιμότητα [W/mK]. Η συνολική θερμική αντίσταση R ενός δομικού στοιχείου ισούται με το άθροισμα των επιμέρους θερμικών αντιστάσεων των N στρωμάτων υλικού από τα οποία αποτελείται:

$$R = \sum_{i=1}^{N} R_i = \sum_{i=1}^{N} \frac{l_i}{k_i}$$

Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας U προκύπτει ως η αντίστροφη τιμή του του αθροίσματος της συνολικής θερμικής αντίστασης ενός δομικού στοιχείου και των επιφανειακών αντιστάσεων λόγω συναγωγής. Είναι δηλαδή:

$$U = \frac{1}{R + R_i + R_e}$$

Όπου R η συνολική θερμική αντίσταση ενός δομικού στοιχείου, R_e η θερμική αντίσταση της εξωτερικής επιφάνειας και R_i η θερμική αντίσταση της εσωτερικής επιφάνειας. Για τις επιφανειακές αντιστάσεις λόγω συναγωγής λαμβάνονται οι τυπικές τιμές R_e=0,04 m^2K/W και R_i=0,13 m^2K/W (17).

Στο υπό μελέτη κτίριο του BCA College είναι γνωστοί οι συντελεστές θερμοπερατότητας (U-factor) για τα εξής δομικά στοιχεία:

Δομικό στοιχείο	**Συντελεστής θερμοπερατότητας U [W/m^2K]**	**Συνολική θερμική αντίσταση R [m^2K/W]**
Εξωτερικός τοίχος	0,8	1,08
Δάπεδο	0,7	1,26
Οροφή	0,5	1,83

Πίνακας 7.2: Τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας δομικών στοιχείων

Για κάθε ένα από τα υλικά είναι γνωστή η ειδική θερμική αγωγιμότητα, καθώς και το πάχος τους πέρα από τα υλικά των μονώσεων, ενώ επίσης είναι γνωστές και οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας U του κάθε δομικού στοιχείου. Συνεπώς, σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση είναι εφικτή η εύρεση του πάχους της αντίστοιχης μόνωσης για κάθε δομικό στοιχείο.

Για τα δομικά στοιχεία των εσωτερικών τοίχων και των ταβανιών δε χρησιμοποιείται κάποια μόνωση.

Στη συνέχεια παρατίθενται πίνακες για το κάθε δομικό στοιχείο του κτιριακού κελύφους με τις αντίστοιχες πληροφορίες των υλικών από τα οποία αποτελείται:

Εξωτερικοί τοίχοι			
Υλικό	**l_i [m]**	**k_i [W/mK]**	**R_i [m^2 K/W]**
Φύλλο αλουμινίου	0,01	205	$4,8 \cdot 10^{-5}$
Τούβλο	0,09	0,51	0,176
Μόνωση	**0,03**	0,035	0,869
Τούβλο	0,09	0,51	0,176
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος	0,025	0,87	0,029

Δάπεδο			
Υλικό	**l_i [m]**	**k_i [W/mK]**	**R_i [m^2 K/W]**
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος	0,1	0,87	0,115
Μόνωση	**0,042**	0,035	1,206
Σκυρόδεμα	0,2	2,5	0,08
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος	0,02	0,87	0,023
Κεραμικά πλακάκια	0,01	1,84	0,005

Οροφή			
Υλικό	**l_i [m]**	**k_i [W/mK]**	**R_i [m^2 K/W]**
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος	0,1	0,87	0,115
Μόνωση	**0,062**	0,035	1,7820
Σκυρόδεμα	0,2	2,5	0,08
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος	0,02	0,87	0,023

Εσωτερικοί τοίχοι		
Υλικό	**l_i [m]**	**k_i [W/mK]**
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος	0,025	0,87
Τούβλο	0,09	0,51
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος	0,025	0,87

Ταβάνια		
Υλικό	**l_i [m]**	**k_i [W/mK]**
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος	0,1	0,87
Σκυρόδεμα	0,2	2,5
Επίχρισμα ασβεστοκονιάματος	0,02	0,87
Κεραμικά πλακάκια	0,01	1,84

Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικά δομικών στοιχείων

Για τους εσωτερικούς τοίχους ο συντελεστής θερμοπερατότητας U είναι 4,275 W/m^2K, ενώ για τα ταβάνια προκύπτει ίσος με 4,477 W/m^2K.

Εσωτερικοί τοίχοι

Οι εσωτερικοί τοίχοι που βρίσκονται στους διάφορους χώρους-θερμικές ζώνες του υπό μελέτη κτιρίου για λόγους απλούστευσης δε σχεδιάστηκαν στο SketchUp, όμως μοντελοποιήθηκαν ως εσωτερικές μάζες στην αντίστοιχη θερμική ζώνη που ανήκουν.

Φορτία τεχνητού φωτισμού

Κάθε χώρος πρέπει να παρέχει το φωτισμό εκείνο που εξασφαλίζει στους χρήστες οπτική άνεση, δηλαδή ένα περιβάλλον με την απαιτούμενη ποσότητα και ποιότητα φωτισμού για την ευχάριστη διαμονή και την άσκηση της προβλεπόμενης δραστηριότητά τους, αποφεύγοντας έτσι φαινόμενα που οδηγούν στην οπτική δυσφορία ή/και κόπωση (41).

Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 12464.1-2011 τα συνιστώμενα επίπεδα φωτισμού ανάλογα με τη χρήση του χώρου είναι τα ακόλουθα:

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	**Στάθμη φωτισμού [lx]**	**Επίπεδο αναφοράς μέτρησης [m]**	**Δείκτης θάμβωσης UGR**	**Ομοιομορφία φωτισμού Uo (min/μέση τιμή)**
Γραφείο	500	0,8	19	0,6
Κοινόχρ. χώροι	100	0,8	28	0,4

Πίνακας 7.4: Μεγέθη για φορτία τεχνητού φωτισμού

Στα φωτιστικά χρησιμοποιούνται φωτοδίοδοι (LED), για τις οποίες λαμβάνεται ως τυπική τιμή πυκνότητας ισχύος ανά 100 lux τα 2,5 $W/(m^2 \cdot 100\ lux)$ (41).

Φορτία ατόμων

Κάθε άτομο ανάλογα με τη δραστηριότητά του, εκλύει θερμότητα υπό τη μορφή αισθητού και λανθάνοντος φορτίου, με το αισθητό φορτίο να προέρχεται από την ακτινοβολία του σώματός του και από τη μεταφορά θερμότητας από το σώμα του στον αέρα σε αναλογία περίπου 50%-50%. Το λανθάνον φορτίο οφείλεται στην αναπνοή και την εφίδρωση κάθε ανθρώπου και είναι τόσο μεγαλύτερο, όσο αυξάνεται η δραστηριότητα του ατόμου. Ο συνυπολογισμός των φορτίων των ατόμων στα φορτία του κτιρίου θα πρέπει να γίνεται βάσει συντελεστή

ετεροχρονισμού (μέσος συντελεστής παρουσίας χρηστών), ο οποίος εκφράζει την πραγματική -κατά μέσο όρο- παρουσία των ατόμων στους χώρους κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ημέρας (41).

Σύμφωνα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ ΕΝ ISO 13790:2009 και ΕΛΟΤ ΕΝ 13779:2008 για να προσδιοριστούν τα φορτία των ατόμων χρησιμοποιούνται τα εξής μεγέθη:

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	**Θερμική ισχύς ανά άτομο [W/άτομο]**	**Θερμική ισχύς ανά μονάδα δομημένης επιφάνειας [W/m²]**	**Μέσος συντελεστής παρουσίας**
Γραφείο	80	8	0,3
Κοινόχρ. χώροι	0	0	0

Πίνακας 7.5: Μεγέθη για φορτία ατόμων

Φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού

Η τρίτη βασική κατηγορία εσωτερικών κερδών στα κτίρια περιλαμβάνει την εκλυόμενη θερμική ισχύ από ηλεκτρικό εξοπλισμό (ηλεκτρικές συσκευές), αλλά και δευτερευόντως από άλλες συσκευές. Όπως αντίστοιχα και με τα φορτία ατόμων και φωτισμού αυτή η θερμότητα μεταφέρεται με ακτινοβολία και συναγωγή, σε αναλογία που εξαρτάται από το είδος της συσκευής. Στην πλειονότητα των εφαρμογών ο ηλεκτρικός εξοπλισμός παράγει αισθητά φορτία. Λόγω της αύξησης των εφαρμογών ηλεκτρικών συσκευών και ειδικότερα της πληροφορικής και των επικοινωνιών, τα εσωτερικά κέρδη από ηλεκτρικές συσκευές είναι ιδιαίτερα σημαντικά σε κτίρια εμπορικών και διοικητικών δραστηριοτήτων (γραφεία, υπηρεσίες κ.ά).

Ο συνυπολογισμός των φορτίων ηλεκτρικού εξοπλισμού του κτιρίου γίνεται με κατάλληλο συντελεστή ετεροχρονισμού, ο οποίος εκφράζει την πραγματική -κατά μέσο όρο- λειτουργία των συσκευών στους χώρους κατά τη διάρκεια της λειτουργικής ημέρας (41).

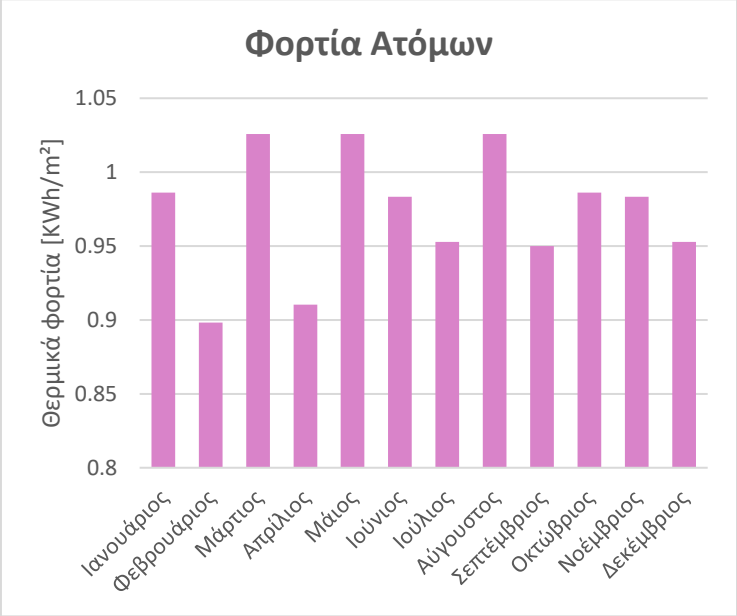
Σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ ISO 13790:2009 για να προσδιοριστούν τα φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού χρησιμοποιούνται τα εξής μεγέθη:

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	**Ισχύς εξοπλισμού [W/m²]**	**Μέσος συντελεστής ετεροχρονισμού**	**Ετεροχρον. Ισχύς εξοπλ. [W/m²]**	**Μέσος συντελεστής λειτουργίας**
Γραφείο	15	0,3	4,5	0,3
Κοινόχρ. χώροι	0	0	0	0

Πίνακας 7.6: Μεγέθη για φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού

Φορτία ατόμων και ηλεκτρικού εξοπλισμού

Στο EnergyPlus έχουν οριστεί κατάλληλα προγράμματα λειτουργίας που προσαρμόζουν τα θερμικά φορτία λόγω της παρουσίας ατόμων στο κτίριο και λόγω του ηλεκτρικού εξοπλισμού ανάλογα με τη μέρα της εβδομάδας και την ώρα μέσα στην ημέρα. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τα ζητούμενα θερμικά φορτία παρατίθενται στα ακόλουθα διαγράμματα:



Σχήμα 7.7: Μηνιαία φορτία ατόμων

Σχήμα 7.8: Μηνιαία φορτία ηλεκτρικού εξοπλισμού

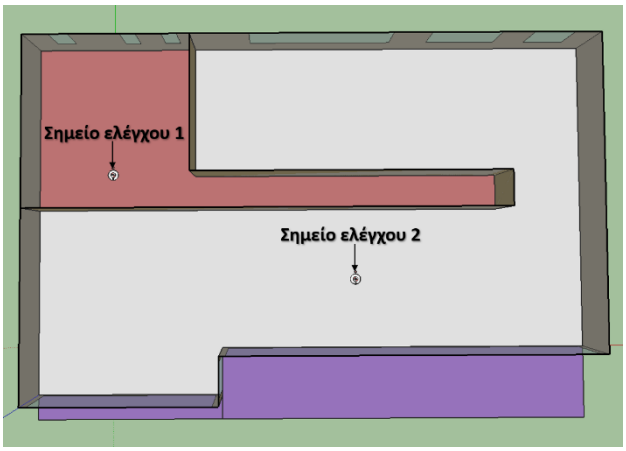
Όπως παρατηρείται τα φορτία αυτά είναι αρκετά μικρά και πρακτικά μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα σε σχέση με τα υπόλοιπα θερμικά φορτία (φορτία θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού που υπολογίζονται στην ενότητα 6 των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης).

Φυσικός φωτισμός

Ο φυσικός φωτισμός επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τις ενεργειακές καταναλώσεις του κτιρίου, διότι καθορίζει τα επίπεδα τεχνητού φωτισμού που είναι αναγκαία για την εξασφάλιση της οπτικής άνεσης των ατόμων που βρίσκονται στους διάφορους χώρους. Κατά τη μοντελοποίηση του κτιρίου ελέγχεται κάθε χρονική στιγμή το επίπεδο του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό του κτιρίου και ανάλογα με αυτό ρυθμίζεται και η ένταση του τεχνητού φωτισμού. Συνεπώς, τα φώτα ενεργοποιούνται μόνο όταν δεν υπάρχει επαρκής φυσικός φωτισμός, γεγονός που εξασφαλίζει σημαντική εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.

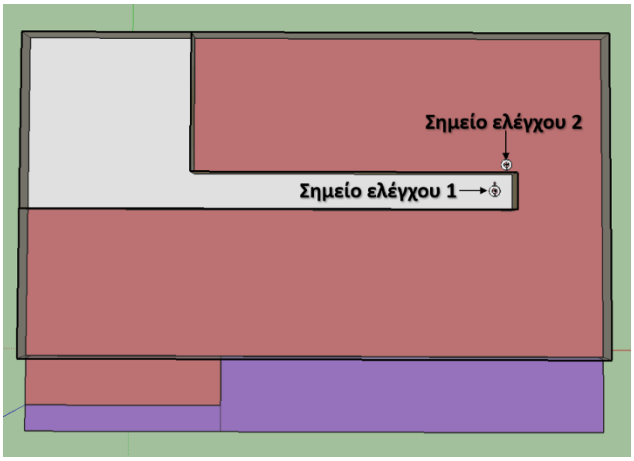
Ο έλεγχος του επιπέδου του φυσικού φωτισμού γίνεται με βάση την επιθυμητή στάθμη φωτισμού τού κάθε χώρου (Πίνακας 7.4) σε σημεία αναφοράς που ορίζονται για κάθε θερμική ζώνη.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση για διαφορετικό αριθμό σημείων ελέγχου, καθώς και για διαφορετική τοποθεσία τους στην εκάστοτε θερμική ζώνη. Αρχικά για κάθε θερμική ζώνη χρησιμοποιήθηκε μόνο ένα σημείο ελέγχου, το οποίο επιλέχθηκε, ώστε να βρίσκεται σχετικά κοντά στο φυσικό φωτισμό. Δηλαδή για τις θερμικές ζώνες των γραφείων, τοποθετήθηκαν κοντά στα παράθυρα της νότιας όψης, ενώ για τις θερμικές ζώνες των κοινόχρηστων χώρων τοποθετήθηκαν κοντά στα παράθυρα της βόρειας όψης.



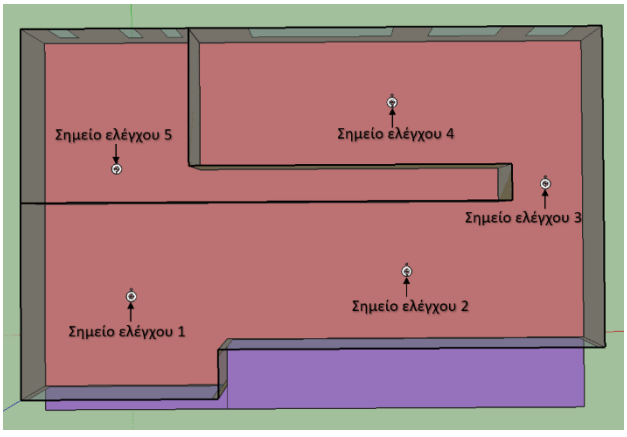
Σχήμα 7.9: Κάτοψη 4ου ορόφου με σημεία ελέγχου κοντά στο φυσικό φωτισμό

Στη συνέχεια οι συντεταγμένες των σημείων ελέγχου ορίστηκαν, ώστε να είναι στα πιο σκοτεινά σημεία των θερμικών ζωνών. Η επιλογή αυτών των σημείων έγινε, αφού βρέθηκε από το EnergyPlus ο χάρτης φωτισμού (Illuminance Map), που παρουσιάζεται στην ενότητα των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αναλυτικά και ο οποίος δείχνει ουσιαστικά την κατανομή του φωτός στο χώρο-θερμική ζώνη. Στην περίπτωση των σημείων ελέγχου που βρίσκονται στα σημεία των θερμικών ζωνών που δέχονται το λιγότερο φυσικό φωτισμό, αναμένεται στα αποτελέσματα αυξημένη ηλεκτρική ενέργεια από τον τεχνητό φωτισμό.



Σχήμα 7.10: Κάτοψη 4ου ορόφου με σημεία ελέγχου μακριά από το φυσικό φωτισμό

Τελικά, η προσομοίωση έγινε με περισσότερα σημεία ελέγχου σε κάθε θερμική ζώνη, καθώς πρόκειται για μεγάλους χώρους που χρειάζονται αρκετό φωτισμό για τη δραστηριότητα των ατόμων μέσα σε αυτούς. Με βάση αυτήν την περίπτωση έγιναν όλες οι προσομοιώσεις και τα αποτελέσματα της αναλύονται στην επόμενη ενότητα της εργασίας.



Σχήμα 7.11: Κάτοψη 4ου ορόφου με περισσότερα σημεία ελέγχου

Φορτία ανανέωσης αέρα

Σε κάθε κτίριο εσωτερικά καθώς και σε κάθε ανεξάρτητο τμήμα του κτιρίου είναι απαραίτητη για την εξασφάλιση συνθηκών υγιεινής η ανανέωση του αέρα, δηλαδή η αντικατάσταση του εσωτερικού αέρα από νωπό αέρα περιβάλλοντος. Ανάλογα με τη χρήση του κτιρίου και το πλήθος των ατόμων στο εσωτερικό του καθορίζονται και οι απαιτήσεις σε νωπό αέρα περιβάλλοντος (41). Λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις αερισμού όπως ορίζονται στο πρότυπο ΕΛΟΤ ΕΝ 15251:2007, στο πρότυπο της ASHRAE 62.1-2010 και στην Τεχνική Οδηγία του Τεχνικού Επιμελητηρίου Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 2425/86 ορίζονται τα εξής μεγέθη σχετικά με την ανανέωση του αέρα:

Χρήση κτιρίου ή θερμικής ζώνης	**Άτομα / 100 m^2 επιφ. δαπέδου**	**Νωπός αέρας [m^3/h/άτομο]**	**Νωπός αέρας [m^3/h/m^2]**
Γραφείο	10	30	3
Κοινόχρ. χώροι	-	-	2,6

Πίνακας 7.7: Μεγέθη για φορτία ανανέωσης αέρα

Φορτία διείσδυσης αέρα

Ο αερισμός λόγω της διείσδυσης του αέρα στο κτίριο πραγματοποιείται μέσω των χαραμάδων των κουφωμάτων του κελύφους ή μέσω των αρμών των δομικών αδιαφανών επιφανειών του κτιρίου (41).

Στο υπό μελέτη κτίριο του BCA College είναι γνωστό το ποσό του αέρα που εναλλάσσεται ανά ώρα, το οποίο είναι 0,5 ach (air changes/h).

Συστήματα θέρμανσης και ψύξης

Η θερμική άνεση σε έναν χώρο διαμορφώνεται από τη θερμοκρασία και τη σχετική υγρασία του αέρα μέσα σε αυτόν. Οι δύο αυτές παράμετροι ρυθμίζονται μέσω του συστήματος θέρμανσης (μόνο η θερμοκρασία του αέρα) ή κλιματισμού (θερμοκρασία και σχετική υγρασία του αέρα) με σκοπό την επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών άνεσης.

Το σύστημα θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου επιτυγχάνεται με τη χρήση αντλιών θερμότητας με τιμή συντελεστή συμπεριφοράς COP=3,6 και βαθμό ενεργειακής απόδοσης 3,2.

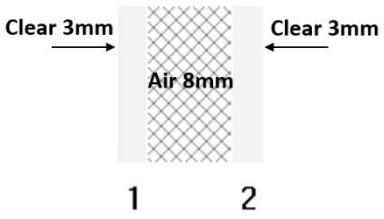
Όπως προαναφέρθηκε στην αρχή αυτής της υποενότητας, σύμφωνα με την αναθεώρηση του Κ.Εν.Α.Κ. (2017) για τη χειμερινή περίοδο η επιθυμητή τιμή της θερμοκρασίας στα γραφεία είναι 20°C και στους βοηθητικούς χώρους είναι 18°C, ενώ για τη θερινή περίοδο είναι 26°C στα γραφεία και στους κοινόχρηστους

βοηθητικούς χώρους (41). Επομένως, το σύστημα θέρμανσης και ψύξης του κτιρίου ρυθμίστηκε με σκοπό τη διατήρηση της εσωτερικής θερμοκρασίας στις παραπάνω τιμές.

7.4 Σενάρια προς Εξέταση

7.4.1 Πραγματικό σενάριο κτιριακού μοντέλου με εξωτερική σκίαση

Αρχικά μελετήθηκε το πραγματικό σενάριο του κτιριακού μοντέλου με τους προβόλους που διαθέτει για εξωτερική σκίαση στη νότια όψη και με διπλούς υαλοπίνακες. Τα πάχη των δύο γυάλινων στρώσεων και το υλικό πλήρωσης ανάμεσά τους επιλέχθηκαν να είναι τέτοια, ώστε να προσεγγίζουν όσο πιο πολύ γίνεται τον γνωστό πραγματικό συντελεστή θερμοπερατότητας U των παραθύρων. Σύμφωνα με τις πληροφορίες του κτιρίου ο συντελεστής U των παραθύρων είναι 3,3 W/m^2K, ιδιαίτερα υψηλή τιμή για τη σημερινή εποχή, όμως είναι λογικό μιας και η ανέγερση του κτιρίου έγινε πριν από 30 χρόνια. Ύστερα από δοκιμές στο λογισμικό WINDOW, επιλέχθηκαν τελικά τα πάχη των γυάλινων στρώσεων (Clear 3mm), καθώς και ο αέρας ως υλικό πλήρωσης στο διάκενο (8 mm) και τελικά προέκυψε ένας συντελεστής U ίσος με 2,956 W/m^2K, μια τιμή ελαφρώς βελτιωμένη από εκείνη που έχει πραγματικά το κτίριο. Παρακάτω παρατίθενται σχηματικά η διάταξη του διπλού υαλοπίνακα και πίνακας με τις βασικές οπτικές και θερμικές ιδιότητές του.



Σχήμα 7.12: Διπλός υαλοπίνακας με αέρα στο διάκενο

Συντελεστής θερμοπερατότητας-U ($W/(m^2K)$)	2,956
Συντελεστής ηλιακού θερμ. κέρδους-SHGC	0,759
Διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία -VT	0,814

Πίνακας 7.8: Ιδιότητες για τους διπλούς υαλοπίνακες

7.4.2 Σενάριο κτιριακού μοντέλου με εσωτερική σκίαση

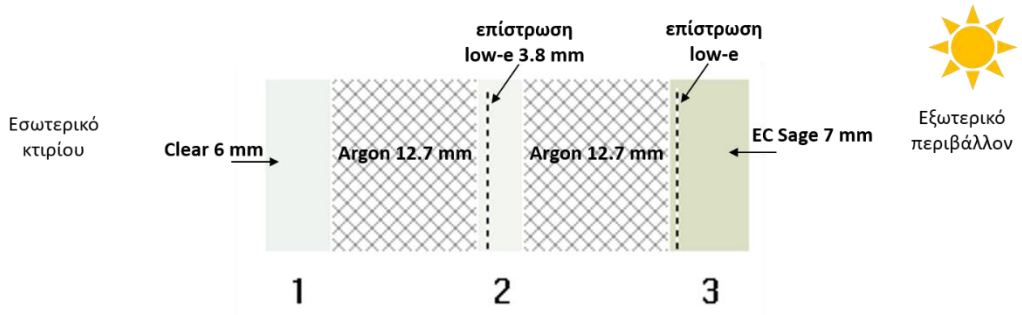
Σε αυτό το σενάριο μελετήθηκε μια παραλλαγή του πραγματικού κτιριακού μοντέλου με αλλαγή της εξωτερικής σκίασης που προσφέρουν οι πρόβολοι σε εσωτερική σκίαση με στόρια. Η εσωτερική σκίαση όμως αφορά και τα παράθυρα που βρίσκονται στη βόρεια όψη. Η διάταξη του υπόλοιπου συστήματος παραθύρου παρέμεινε ίδια, δηλαδή διπλός υαλοπίνακας με αέρα ως υλικό πλήρωσης στο διάκενο. Σκοπός αυτής της μελέτης είναι να ελεγχθεί αν συμφέρει περισσότερο η εσωτερική ή εξωτερική σκίαση για το κτίριο όσο αφορά τις ενεργειακές του καταναλώσεις. Τα στόρια ρυθμίστηκαν να κατεβαίνουν με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία στους υαλοπίνακες με μεταβατική τιμή τα 150 W/m^2.

Διαπερατότητα σε ακτινοβολία	0,05
Ανακλαστικότητα	0,5
Διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία-VT	0,05
Πάχος (m)	0,003
Θερμική αγωγιμότητα (W/(m·K))	0,1

Πίνακας 7.9: Ιδιότητες για τα στόρια

7.4.3 Σενάριο κτιριακού μοντέλου με ηλεκτροχρωμικά παράθυρα

Για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του κτιρίου επιλέχθηκε η αντικατάσταση των παρόντων υαλοπινάκων με σύστημα ηλεκτροχρωμικών παραθύρων. Από το λογισμικό WINDOW επιλέχθηκαν τριπλοί υαλοπίνακες με ηλεκτροχρωμικά παράθυρα της εταιρείας SAGE, υλικό πλήρωσης το αργό και με επίστρωση χαμηλής εκπομπής (low-e). Η επιλογή τριπλών υαλοπινάκων έγινε, διότι σε σύγκριση με τους διπλούς υαλοπίνακες παρουσιάζουν κατά βάση μεγαλύτερη θερμομόνωση, γεγονός που μπορεί να επιβεβαιωθεί και από το συντελεστή θερμοπερατότητας. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας U αυτού του συστήματος υαλοπίνακα είναι 0,75 W/m^{2}K, τιμή αρκετά μικρότερη από αυτή που έχει το κτίριο κανονικά. Παρακάτω παρατίθενται σχηματικά η διάταξη του τριπλού υαλοπίνακα και πίνακας με τις βασικές οπτικές και θερμικές ιδιότητές του στη διαυγή (EC-clear) και την πλήρως χρωματισμένη του κατάσταση (EC-dark).



Σχήμα 7.13: Ηλεκτροχρωμικό παράθυρο, Τριπλός υαλοπίνακας με αργό στα διάκενα και επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής

	EC-clear	EC-dark
Συντελεστής θερμοπερατότητας-U (W/(m^{2}K))	0,75	0,75
Συντελεστής ηλιακού θερμ. κέρδους-SHGC	0,316	0,064
Διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία-VT	0,591	0,051

Πίνακας 7.10: Βασικές θερμικές και οπτικές ιδιότητες των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων στις δύο τους καταστάσεις (διαυγής και πλήρως χρωματισμένη)

Στο σενάριο αυτό τα παράθυρα λειτουργούν σε δύο καταστάσεις. Στη διαφανή τους κατάσταση, όπου επιτρέπεται η διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και στη χρωματισμένη-σκουρόχρωμή τους κατάσταση. Ο έλεγχος των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων γίνεται είτε με βάση την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (με τιμή μετάβασης τα 150 W/m^2) είτε με βάση τον επιθυμητό φωτισμό στους εσωτερικούς χώρους (500 lux στα γραφεία και 100 lux στους κοινόχρηστους χώρους). Επίσης, ως υποσενάριο των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων μελετήθηκε η περίπτωση να χρωματίζονται μόνο κατά την περίοδο ψύξης, ενώ κατά την υπόλοιπη περίοδο διατηρούν τη διαφανή-ανοιχτόχρωμη κατάστασή τους.

8 Αποτελέσματα προσομοίωσης και σχολιασμός

Οι προσομοιώσεις έγιναν για 3 βασικά σενάρια:

1. Πραγματικό κτιριακό μοντέλο με εξωτερική σκίαση από προβόλους
2. Κτιριακό μοντέλο με εσωτερική σκίαση από στόρια
3. Κτιριακό μοντέλο με ηλεκτροχρωμικά παράθυρα

Το τελευταίο σενάριο αποτελεί το σημείο ενδιαφέροντος της παρούσας εργασίας. Για την περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων (EC) μελετήθηκαν διάφορα υποσενάρια:

3.1 Έλεγχος με βάση την ένταση της ακτινοβολίας χωρίς την εξωτερική σκίαση των προβόλων

3.2 Έλεγχος με βάση τον επιθυμητό φωτισμό στους εσωτερικούς χώρους χωρίς την εξωτερική σκίαση των προβόλων

3.3 Έλεγχος με βάση την ένταση της ακτινοβολίας και εξωτερική σκίαση των προβόλων

3.4 Έλεγχος με βάση τον επιθυμητό φωτισμό στους εσωτερικούς χώρους και εξωτερική σκίαση των προβόλων

3.5 Μετάβαση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων στην αδιαφανή τους κατάσταση μόνο κατά την περίοδο ψύξης, έλεγχος με βάση την ένταση της ακτινοβολίας και εξωτερική σκίαση των προβόλων (κατά τη χειμερινή περίοδο παραμένουν συνεχώς στη διαυγή τους κατάσταση-EC clear)

3.6 Μετάβαση των ηλεκτροχρωμικών στην αδιαφανή τους κατάσταση παραθύρων μόνο κατά την περίοδο ψύξης, έλεγχος με βάση τον επιθυμητό φωτισμό στους εσωτερικούς χώρους και εξωτερική σκίαση των προβόλων (κατά τη χειμερινή περίοδο παραμένουν συνεχώς στη διαυγή τους κατάσταση-EC clear)

8.1 Ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις

Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν οι προσομοιώσεις των παραπάνω σεναρίων προκειμένου να βρεθούν οι ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις του υπό μελέτη κτιρίου για ψύξη, φωτισμό και θέρμανση. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν και οι συνολικές ετήσιες καταναλώσεις του κτιρίου ως άθροισμα των ετήσιων αναγκών θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού. Προκειμένου να γίνει η άθροιση θα πρέπει τα θερμικά και τα ψυκτικά φορτία των συστημάτων HVAC να εκφραστούν ως ηλεκτρικές καταναλώσεις και στη συνέχεια να εκφραστούν σε πρωτογενή ενέργεια.

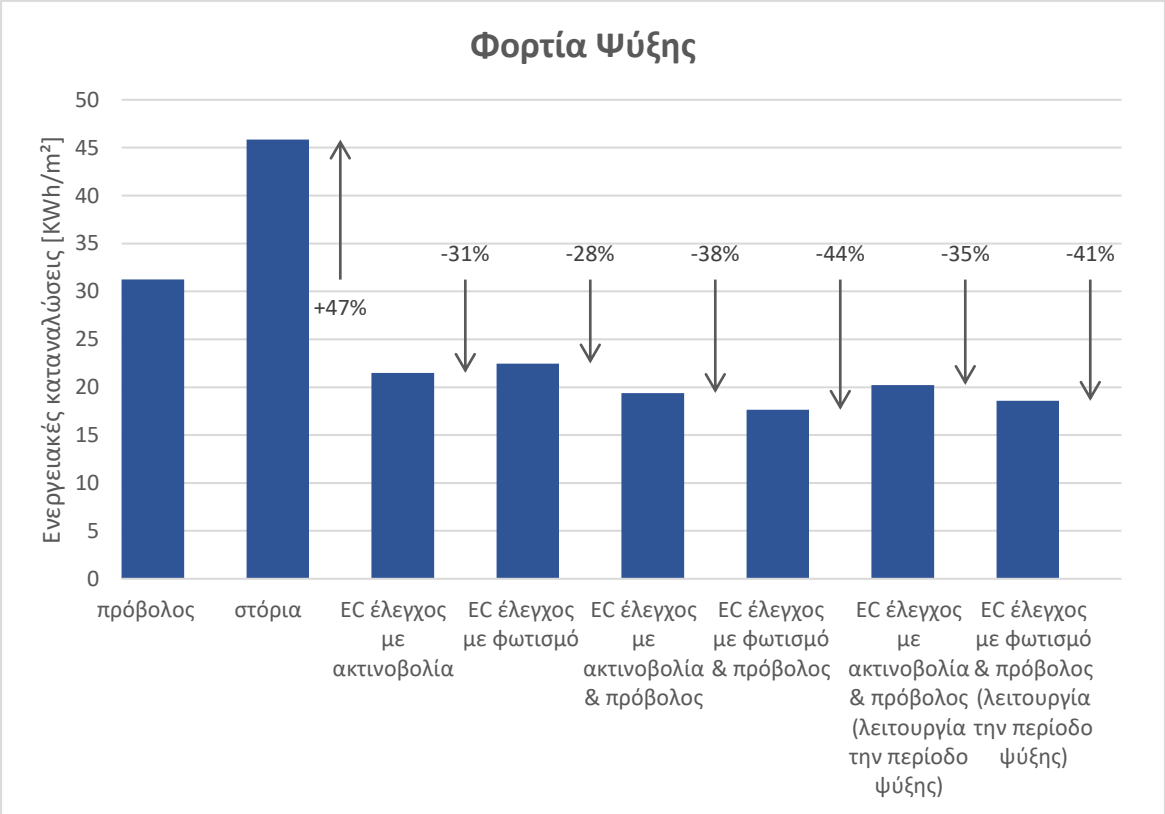
Θεωρείται ότι η θέρμανση και η ψύξη του κτιρίου επιτυγχάνεται με τη χρήση αντλιών θερμότητας με τιμή συντελεστή συμπεριφοράς COP=3,6 και βαθμό ενεργειακής απόδοσης 3,2.

Τα φορτία του ηλεκτρικού εξοπλισμού είναι σταθερά σε όλα τα σενάρια, για αυτό το λόγο θεωρήθηκε σκόπιμο να παραλειφθεί η συμμετοχή τους στο τελικό άθροισμα των ετήσιων αναγκών. Επίσης, ως κατάσταση αναφοράς ορίζεται το πραγματικό σενάριο του κτιριακού μοντέλου του BCA College που διαθέτει προβόλους εξωτερικά για σκίαση και διπλούς υαλοπίνακες με αέρα στο διάκενό τους.

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν έχουν μετατραπεί σε πρωτογενή ενέργεια, καθώς με βάση αυτή προσδιορίζεται η ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Για τη μετατροπή της ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας σε πρωτογενή ενέργεια γίνεται πολλαπλασιασμός με το συντελεστή 2,9 σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του Κ.Εν.Α.Κ. (41).

Ετήσια φορτία ψύξης

Τα ετήσια φορτία ψύξης που προκύπτουν για τα διάφορα σενάρια παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 8.1: Ετήσια φορτία ψύξης πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια

Για τα φορτία ψύξης σημειώνεται μείωση για όλα τα σενάρια που μελετώνται, πέρα από την περίπτωση του κτιρίου που σκιάζεται εσωτερικά με στόρια. Σε αυτό το

σενάριο παρατηρείται αύξηση των φορτίων ψύξης κατά 47%. Αυτό σημαίνει ότι τα στόρια κατά τη θερινή περίοδο όπου παρουσιάζονται και τα ψυκτικά φορτία, επιτρέπουν πολύ περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει στους εσωτερικούς χώρους. Αυτό οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου, αντισταθμίζεται όμως με τη λειτουργία των συστημάτων ψύξης που ρυθμίζονται, ώστε η θερμοκρασία στους χώρους να είναι η επιθυμητή.

Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας (-44%) εντοπίζεται στο υποσενάριο με τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα με πρόβολο, η μεταβατική κατάσταση των οποίων ρυθμίζεται με βάση το επίπεδο του φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους-θερμικές ζώνες. Λίγο μικρότερα ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας (-38%) σημειώνονται στο υποσενάριο των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων με πρόβολο που η ρύθμιση της μεταβατικής τους κατάστασης γίνεται ανάλογα με την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους υαλοπίνακες. Ο έλεγχος των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων με βάση το φωτισμό συμφέρει δηλαδή καλύτερα από ότι ο έλεγχος με βάση την ηλιακή ακτινοβολία στην περίπτωση που υπάρχει και η εξωτερική σκίαση από τους προβόλους στη νότια όψη. Αυτό οφείλεται και στη δυναμικότητα που προσφέρει ο έλεγχος με βάση το φωτισμό, καθώς προκειμένου να εξασφαλίσει τα 500 lux στα γραφεία και τα 100 lux στους κοινόχρηστους χώρους, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα περνούν από όλες τις ενδιάμεσες καταστάσεις (από διαυγή μέχρι πλήρως χρωματισμένη). Αντίθετα, ο έλεγχος με βάση την ηλιακή ακτινοβολία είναι τύπου “on-off”, διαθέτει δηλαδή δύο μόνο διακριτές καταστάσεις των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων (τη διαυγή και την πλήρως χρωματισμένη).

Αυτά τα δύο υποσενάρια μεταβαίνουν στη σκουρόχρωμη κατάστασή τους για διαφορετικές συνθήκες και άρα ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους που καθορίζει και το πόσο εύκολα εισέρχεται η ηλιακή ακτινοβολία στο κτίριο, μεταβάλλεται για διαφορετικές ώρες κατά τη διάρκεια του έτους, οδηγώντας τελικά σε διαφορετικές ενεργειακές καταναλώσεις. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του EnergyPlus τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα που ρυθμίζονται με βάση το επίπεδο του φωτισμού -είτε με εξωτερική σκίαση είτε χωρίς- χρωματίζονται για περισσότερες ώρες μέσα στην ημέρα, όταν υπάρχει ηλιοφάνεια (από νωρίς το πρωί μέχρι το απόγευμα), όμως δύσκολα μεταβαίνουν στην πλήρως χρωματισμένη τους κατάσταση. Αντίθετα, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα με τους προβόλους στη νότια όψη που ρυθμίζονται με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, όταν έχει ηλιοφάνεια, χρωματίζονται για λιγότερες ώρες (κυρίως τις ώρες του μεσημεριού) μέσα στην ημέρα, όμως όταν συμβαίνει αυτό βρίσκονται πάντα στην πλήρως χρωματισμένη τους κατάσταση. Αυτή η διαφοροποίηση μεταξύ των δύο υποσεναρίων των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων είναι που καθιστά τελικά τα ηλεκτροχρωμικά που ελέγχονται με βάση το φωτισμό πιο ευέλικτα.

Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα που δε διαθέτουν εξωτερική σκίαση και ελέγχονται με βάση την ακτινοβολία μεταβαίνουν στη χρωματισμένη τους κατάσταση από το πρωί μέχρι το απόγευμα τις ημέρες που υπάρχει επαρκής ηλιοφάνεια και για όλο αυτό το διάστημα βρίσκονται στην πλήρως χρωματισμένη τους κατάσταση. Αυτό

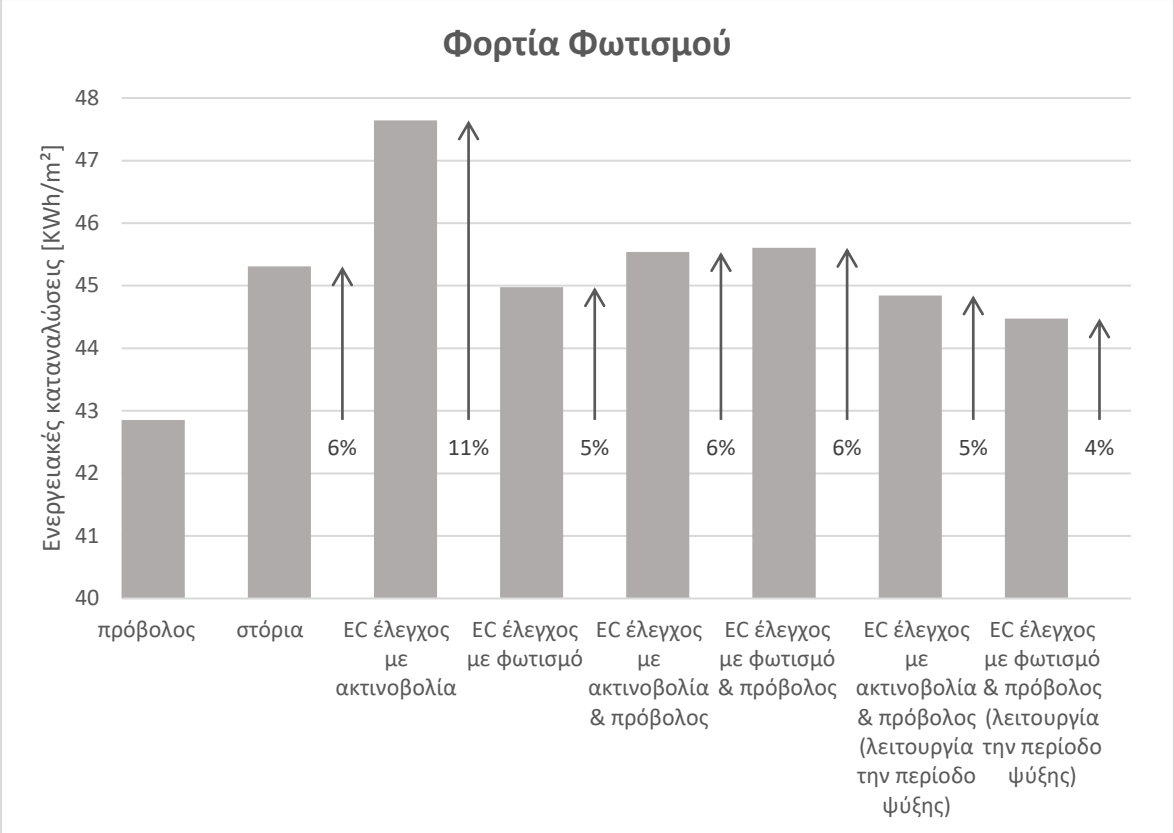
έχει ως αποτέλεσμα να μην επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία να διεισδύει στο εσωτερικό του κτιρίου και για αυτό τα ψυκτικά φορτία σε αυτήν την περίπτωση είναι μικρότερα από εκείνα που καταναλώνονται στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων χωρίς πρόβολο που ρυθμίζονται με βάση το φωτισμό.

Επιπλέον, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα με εξωτερική σκίαση (πρόβολοι στη νότια όψη του κτιρίου) έχουν καλύτερες ενεργειακές επιδόσεις όσο αφορά τα ψυκτικά φορτία από ότι τα ηλεκτροχρωμικά χωρίς την οριζόντια σκίαση που προσφέρουν οι πρόβολοι. Αυτό το εξωτερικό σύστημα σκίασης καταφέρνει να αποκόψει σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας τους θερινούς μήνες όπου χρειάζεται η ψύξη των εσωτερικών χώρων του κτιρίου και όπου ο ήλιος βρίσκεται πιο ψηλά, οπότε δεν εισέρχεται εύκολα στο εσωτερικό του.

Συνεπώς, παρατηρείται ότι για όλα τα υποσενάρια των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων που χρησιμοποιήθηκαν, μειώνεται η μεταφορά θερμότητας από το εξωτερικό περιβάλλον στο εσωτερικό του κτιρίου. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα είναι τριπλά και έχουν χαμηλότερο συντελεστή θερμοπερατότητας (U=0,75 W/(m^2K)) από ότι τα διπλά παράθυρα του αρχικού σεναρίου (U=2,956 W/(m^2K)). Τα τριπλά ηλεκτροχρωμικά προσφέρουν δηλαδή περισσότερη θερμομόνωση. Επίσης, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα παρουσιάζουν πολύ μικρότερο συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC) σε σύγκριση με τους διπλούς υαλοπίνακες (Πίνακες 7.8 και 7.10), αποτρέποντας σε μεγάλο βαθμό ηλιακά θερμικά κέρδη που είναι υπεύθυνα για την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου. Μάλιστα, ο SHGC των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων μειώνεται ακόμη περισσότερο ύστερα από τη μετάβασή τους στη χρωματισμένη τους κατάσταση (SHGC=0,064), προσδίδοντας μεγαλύτερη ικανότητα σκίασης. Για αυτό κατά τη θερινή περίοδο, όπου και λειτουργούν λόγω αυξημένων θερμοκρασιών τα συστήματα ψύξης στο κτίριο παρατηρούνται με τα σενάρια των ηλεκτροχρωμικών μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις.

Ετήσια φορτία φωτισμού

Τα ετήσια φορτία φωτισμού (σε πρωτογενή ενέργεια) που προκύπτουν για τα διάφορα σενάρια παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 8.2: Ετήσια φορτία φωτισμού πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια

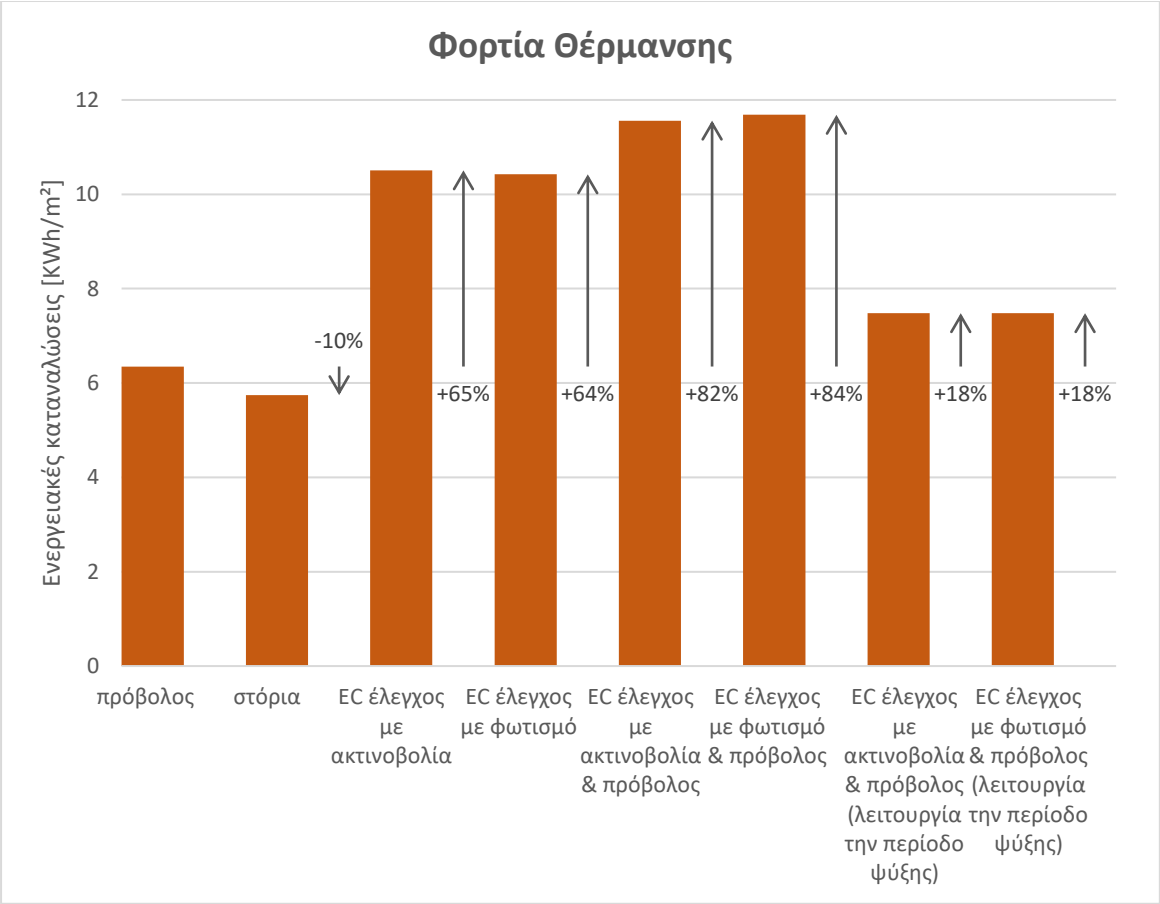
Οι ετήσιες ηλεκτρικές καταναλώσεις οφείλονται στον τεχνητό φωτισμό με χρήση φωτοδίοδων (LED). Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα οι μικρότερες ενεργειακές ανάγκες τεχνητού φωτισμού εντοπίζονται στο αρχικό-πραγματικό σενάριο (42,9 KWh/m^2), όπου το κτίριο διαθέτει διπλούς υαλοπίνακες με αέρα ως υλικό πλήρωσης. Στους διπλούς υαλοπίνακες η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία (VT=0,814) είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων (σε διαυγή κατάσταση VT=0,591 και σε χρωματισμένη κατάσταση VT=0,051). Από τη στιγμή που διέρχεται περισσότερη ορατή ηλιακή ακτινοβολία μέσω των παραθύρων εσωτερικά του κτιρίου, υπάρχει αρκετός φυσικός φωτισμός που εξασφαλίζει την οπτική άνεση των ατόμων που βρίσκονται στους διάφορους χώρους. Αντίθετα, με την προσθήκη επιστρώσεων low-e στα συστήματα παραθύρων και των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων που μεταβαίνουν στη σκουρόχρωμη κατάστασή τους, περιορίζεται ο φυσικός φωτισμός και έτσι δημιουργείται μεγαλύτερη ανάγκη για ύπαρξη τεχνητού φωτισμού.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του EnergyPlus τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα που δε διαθέτουν εξωτερική σκίαση και ελέγχονται με βάση την ακτινοβολία μεταβαίνουν στη χρωματισμένη τους κατάσταση από το πρωί μέχρι το απόγευμα τις ημέρες που υπάρχει επαρκής ηλιοφάνεια και για όλο αυτό το διάστημα βρίσκονται στην πλήρως χρωματισμένη τους κατάσταση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία να διεισδύει στο

εσωτερικό του κτιρίου και να αποκόπτουν το φυσικό φωτισμό. Για αυτό η μεγαλύτερη αύξηση των φορτίων του τεχνητού φωτισμού (11%) εντοπίζεται σε αυτό το υποσενάριο. Χωρίς τους προβόλους που εμποδίζουν την ανεπιθύμητη είσοδο θερμότητας, αλλά όχι και το φυσικό φωτισμό, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα μεταβαίνουν εύκολα στη χρωματισμένη τους κατάσταση (αφού υπερβεί η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία τα 150 W/m^2) και για να διατηρηθούν τα επιθυμητά επίπεδα φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους, καταναλώνεται ηλεκτρική ενέργεια.

Ετήσια φορτία θέρμανσης

Τα ετήσια φορτία θέρμανσης που προκύπτουν για τα διάφορα σενάρια παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 8.3: Ετήσια φορτία θέρμανσης πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια

Για τα θερμικά φορτία φαίνεται ότι οι δύο τρόποι ελέγχου της μετάβασης των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων στη χρωματισμένη τους κατάσταση παρουσιάζουν πολύ μικρή σχετική διαφορά μεταξύ τους, από 0% έως 2%.

Για τα φορτία της θέρμανσης παρατηρείται επίσης ότι συναντάται ενεργειακή εξοικονόμηση μόνο στην περίπτωση της εσωτερικής σκίασης του κτιρίου με στόρια (κατά 10%), ενώ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρατηρείται σημαντικότατη αύξηση. Λαμβάνοντας υπόψιν μεμονωμένα τα φορτία θέρμανσης διαπιστώνεται ότι δε συμφέρουν ενεργειακά και κατ' επέκταση ούτε οικονομικά τα νέα σενάρια σε σχέση με το ήδη υπάρχον κτιριακό μοντέλο. Αυτό το γεγονός βέβαια αναιρείται όταν λαμβάνονται υπόψιν και τα φορτία ψύξης και φωτισμού. Πρέπει να επισημανθεί ότι τα φορτία θέρμανσης σε σύγκριση με τα φορτία ψύξης και τα φορτία του φωτισμού είναι σημαντικά μικρότερα, οπότε και η συνεισφορά τους στα συνολικά φορτία είναι αρκετά μικρότερη.

Συγκεκριμένα στο υποσενάριο των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων με πρόβολο που ελέγχονται με βάση το επίπεδο του φωτισμού στο εσωτερικό των θερμικών ζωνών εντοπίζεται αύξηση των ετήσιων φορτίων θέρμανσης κατά 84%. Αυτή η αύξηση οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα κατά την περίοδο θέρμανσης μεταβαίνουν για μεγάλο διάστημα στην χρωματισμένη τους κατάσταση, χωρίς να επιτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο κτίριο. Η ακτινοβολία αυτή προσφέρει πέρα από φωτισμό και θερμικό φορτίο στο κτίριο και συνεπώς όταν περιορίζεται σημαντικά η διέλευσή της, λειτουργούν πιο πολύ τα συστήματα θέρμανσης του κτιρίου και τελικά αυξάνονται οι ενεργειακές απαιτήσεις σε θέρμανση. Προκειμένου να μειωθούν τα φορτία θέρμανσης αποφασίστηκε τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα να μη λειτουργούν κατά την περίοδο θέρμανσης. Με κατάλληλη ρύθμιση στο EnergyPlus ορίστηκε πρόγραμμα λειτουργίας που καθιστά δυνατό το χρωματισμό των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων μόνο κατά την περίοδο ψύξης.

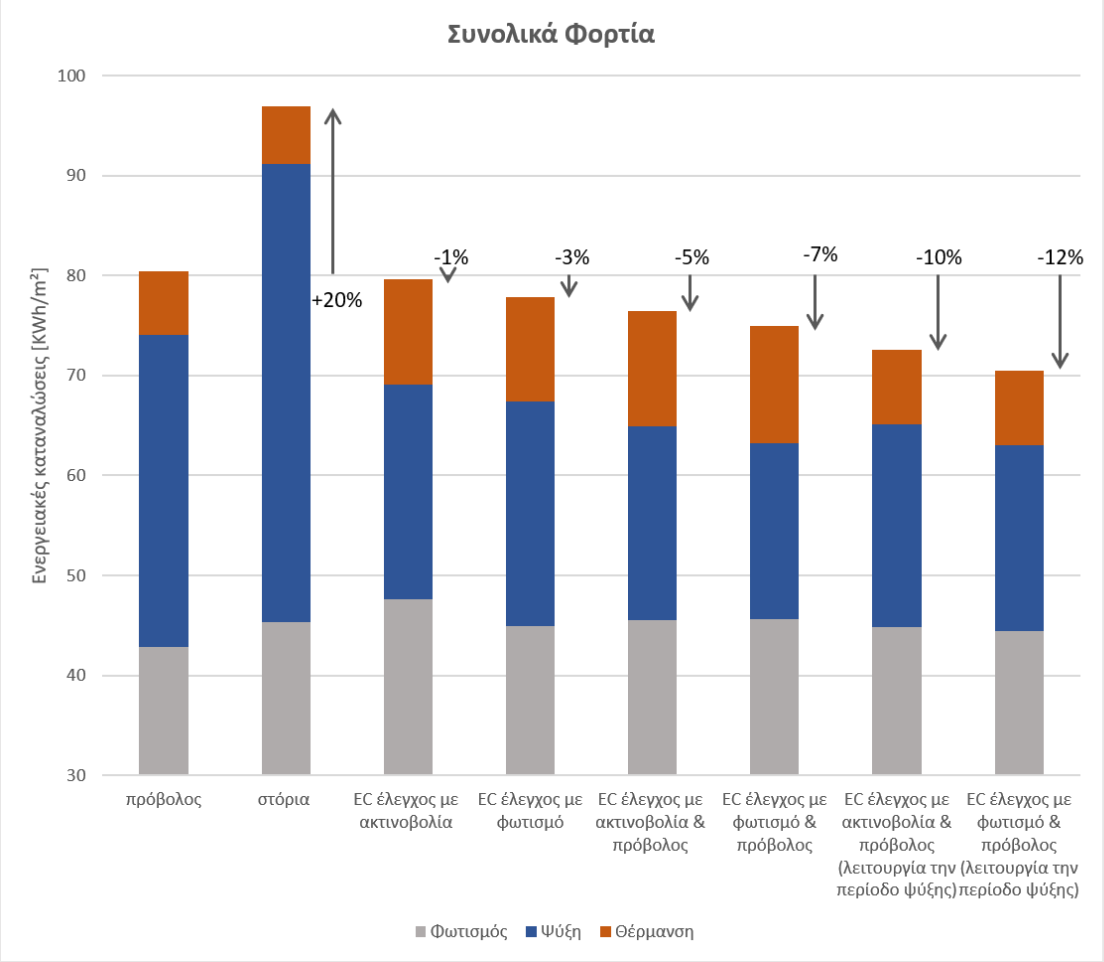
Όπως φαίνεται και από το Σχήμα 8.3 με αυτή τη ρύθμιση προκύπτει μεγάλη μείωση των φορτίων θέρμανσης (δύο τελευταίες ράβδοι) σε σχέση με τα προηγούμενα υποσενάρια των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων, ενώ βέβαια σε σχέση με το αρχικό-πραγματικό σενάριο τα φορτία θέρμανσης υπερέχουν κατά 18%.

Τα δύο τελευταία υποσενάρια των τριπλών ηλεκτροχρωμικών παραθύρων παραμένουν δηλαδή συνεχώς στην αποχρωματισμένη τους κατάσταση κατά την περίοδο θέρμανσης, οπότε καθίσταται ευκολότερη η σύγκριση ανάμεσα στους διπλούς υαλοπίνακες του πρώτου υποσεναρίου που διαθέτουν εξωτερική σκίαση και στους τριπλούς υαλοπίνακες με εξωτερική σκίαση (δύο τελευταίες ράβδοι). Οι τριπλοί υαλοπίνακες έχουν μικρότερο συντελεστή θερμοπερατότητας (U) και μικρότερο συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC) σε σχέση με τους διπλούς υαλοπίνακες που έχει πραγματικά το κτιριακό μοντέλο (Πίνακες 7.8 και 7.10). Ο μικρότερος συντελεστής U προσφέρει από τη μία μεγαλύτερη θερμομόνωση που είναι επιθυμητή, καθώς το χειμώνα η εξωτερική θερμοκρασία είναι χαμηλότερη από τη θερμοκρασία στο εσωτερικό του κτιρίου. Όμως ταυτόχρονα, ο μικρότερος συντελεστής SHGC των τριπλών υαλοπινάκων επιτρέπει λιγότερη ακτινοβολία -που λειτουργεί και ως θερμικό φορτίο- να διεισδύσει στο εσωτερικό του κτιρίου. Από το διάγραμμα διαπιστώνεται ότι η αρνητική επίδραση του χαμηλότερου SHGC

υπερνικά τη θετική επίδραση του χαμηλότερου U στην περίπτωση των τριπλών ηλεκτροχρωμικών παραθύρων και ως αποτέλεσμα προκειμένου η εσωτερική θερμοκρασία να φθάσει τα επιθυμητά επίπεδα καταναλώνεται περισσότερη ενέργεια για τη θέρμανση των εσωτερικών χώρων.

Συνολικά ετήσια φορτία

Τα συνολικά ετήσια φορτία υπολογίζονται ως το άθροισμα των ετήσιων αναγκών θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού. Μέσω των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων είναι εύκολο να εξαχθεί συμπέρασμα για το ποιο σενάριο προσφέρει συνολικά τη μέγιστη ενεργειακή εξοικονόμηση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τα διάφορα σενάρια παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 8.4: Ετήσια συνολικά φορτία πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια

Παρατηρείται πως το βέλτιστο ενεργειακά σενάριο είναι και το τελευταίο που μελετάται, δηλαδή τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα που ελέγχονται με βάση το φωτισμό και λειτουργούν μόνο κατά την περίοδο ψύξης. Αυτό το υποσενάριο

οδηγεί σε ενεργειακή εξοικονόμηση κατά 12% και όπως προαναφέρθηκε, εξασφαλίζει τη δεύτερη μεγαλύτερη μείωση στα φορτία ψύξης και ταυτόχρονα όχι ιδιαίτερα σημαντική αύξηση των φορτίων θέρμανσης. Αξιοσημείωτη εξοικονόμηση εντοπίζεται και στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων που ελέγχονται με βάση την ακτινοβολία και λειτουργούν μόνο κατά την περίοδο ψύξης (-10%), ενώ μικρότερες εξοικονομήσεις παρουσιάζουν τα υπόλοιπα υποσενάρια των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων.

Η εξωτερική σκίαση με συμβατικά παράθυρα από μόνη της συμβάλλει στις ενεργειακές επιδόσεις ενός κτιρίου, όπως δηλαδή και στο υπό μελέτη κτίριο. Τα εξωτερικά σκίαστρα τοποθετημένα στις νότιες όψεις των κτιρίων κατορθώνουν να αποκόψουν την ηλιακή ακτινοβολία τους θερινούς μήνες, ενώ τους χειμερινούς μήνες επιτρέπουν την εισχώρησή της στο εσωτερικό των κτιρίων, μιας και ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά. Τελικά όμως η προσθήκη ηλεκτροχρωμικών παραθύρων και ο συνδυασμός τους με εξωτερικά σκίαστρα συμβάλλει στην περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας.

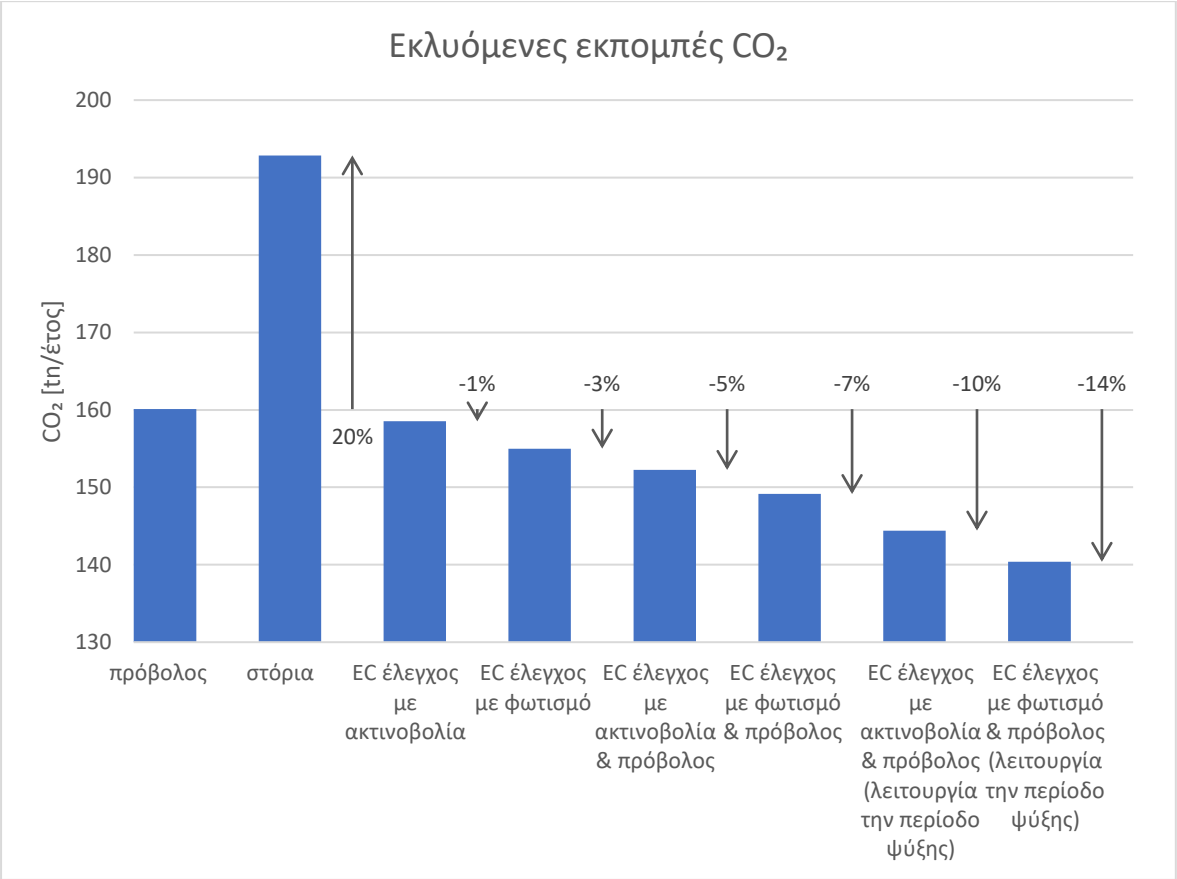
Ο έλεγχος των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων με βάση το επίπεδο του φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους παρουσιάζει τελικά καλύτερες ενεργειακές επιδόσεις συγκριτικά με τον έλεγχο που γίνεται με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στους υαλοπίνακες. Για τα διάφορα υποσενάρια των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων συμπεραίνεται ότι η σχετική διαφορά ανάμεσα στους δύο διαφορετικούς τρόπους ελέγχου είναι 2% προς όφελος του ελέγχου με βάση το φωτισμό. Αυτή η στρατηγική ελέγχου είναι δυναμική, καθώς προκειμένου να εξασφαλίσει τα 500 lux στα γραφεία και τα 100 lux στους κοινόχρηστους χώρους, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα προσαρμόζουν κάθε φορά τη διαπερατότητά τους περνώντας από όλες τις ενδιάμεσες καταστάσεις (από διαυγή μέχρι πλήρως χρωματισμένη). Αντίθετα, ο έλεγχος με βάση την ηλιακή ακτινοβολία είναι τύπου “on-off”, διαθέτοντας δύο μόνο διακριτές καταστάσεις.

Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα που ρυθμίζονται με βάση την ηλιακή ακτινοβολία μεταβαίνουν απευθείας στην πλήρως χρωματισμένη τους κατάσταση, όταν η προσπίπτουσα ακτινοβολία υπερβεί τα 150 W/m^2. Όταν ο έλεγχος γίνεται με βάση το επίπεδο του φωτισμού, τα ηλεκτροχρωμικά διατηρούνται σε ενδιάμεσες καταστάσεις που υπολογίζονται με παρεμβολή από το EnergyPlus και δύσκολα μεταβαίνουν στην πιο σκουρόχρωμη κατάστασή τους, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία. Συνεπώς στην πρώτη περίπτωση προκύπτουν μεγαλύτερα φορτία τεχνητού φωτισμού, που ειδάλλως αυτός ο φωτισμός θα μπορούσε να εξασφαλιστεί από το φυσικό φως του ήλιου. Στη δεύτερη περίπτωση με τον έλεγχο με βάση το επίπεδο του φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους, αυτό αποτρέπεται, καθώς γίνεται η βέλτιστη εκμετάλλευση του φυσικού φωτός.

Όσο αφορά το σενάριο με την εσωτερική σκίαση από τα στόρια τα συνολικά φορτία αυξήθηκαν κατά 20%, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στο παρόν κτίριο δε συμφέρει η εσωτερική, αλλά η εξωτερική σκίαση.

Μείωση εκπομπών CO_2

Η εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας έχει ως απόρροια τη μείωση των εκπομπών CO_2, κάτι το οποίο έχει για τον κτιριακό τομέα ιδιαίτερη σημασία τη σημερινή εποχή. Ο υπολογισμός των ετήσιων εκλυόμενων εκπομπών CO_2 προκύπτει με πολλαπλασιασμό της ετήσιας κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας με το συντελεστή 0,989 kg CO_2/KWh, καθώς και με τη συνολική επιφάνεια δαπέδου του κτιρίου (2012,44 m^2). Όπως προαναφέρθηκε, για τη μετατροπή της ετήσιας ηλεκτρικής ενέργειας σε πρωτογενή ενέργεια γίνεται πολλαπλασιασμός με το συντελεστή 2,9 (41). Ως κατάσταση αναφοράς θεωρείται το αρχικό σενάριο που ανταποκρίνεται στην υπάρχουσα λειτουργία του κτιριακού μοντέλου του BCA College.



Σχήμα 8.5: Ετήσιες εκλυόμενες εκπομπές CO_2 για τα εξεταζόμενα σενάρια

Σενάριο	Συνολ. Απαιτήσεις πρωτογενούς ενέργειας [KWh/m^2]	Εκλυόμενες εκπομπές CO_2 [tn/έτος]	Διαφορά εκπομπών σε σχέση με σενάριο αναφοράς [tn/έτος]
Πρόβολος	80,44	160,10	0
Στόρια	96,9	192,86	32,76
ΕC ακτινοβ.	79,64	158,51	-1,58
ΕC φωτισμό	77,87	154,99	-5,10
ΕC ακτινοβ. & πρόβολο	76,49	152,25	-7,85
ΕC φωτισμό & πρόβολο	74,93	149,13	-10,96
ΕC ακτινοβ. & πρόβολο (περίοδο ψύξης)	72,56	144,41	-15,68
ΕC φωτισμό & πρόβολο (περίοδο ψύξης)	70,53	140,38	-19,72

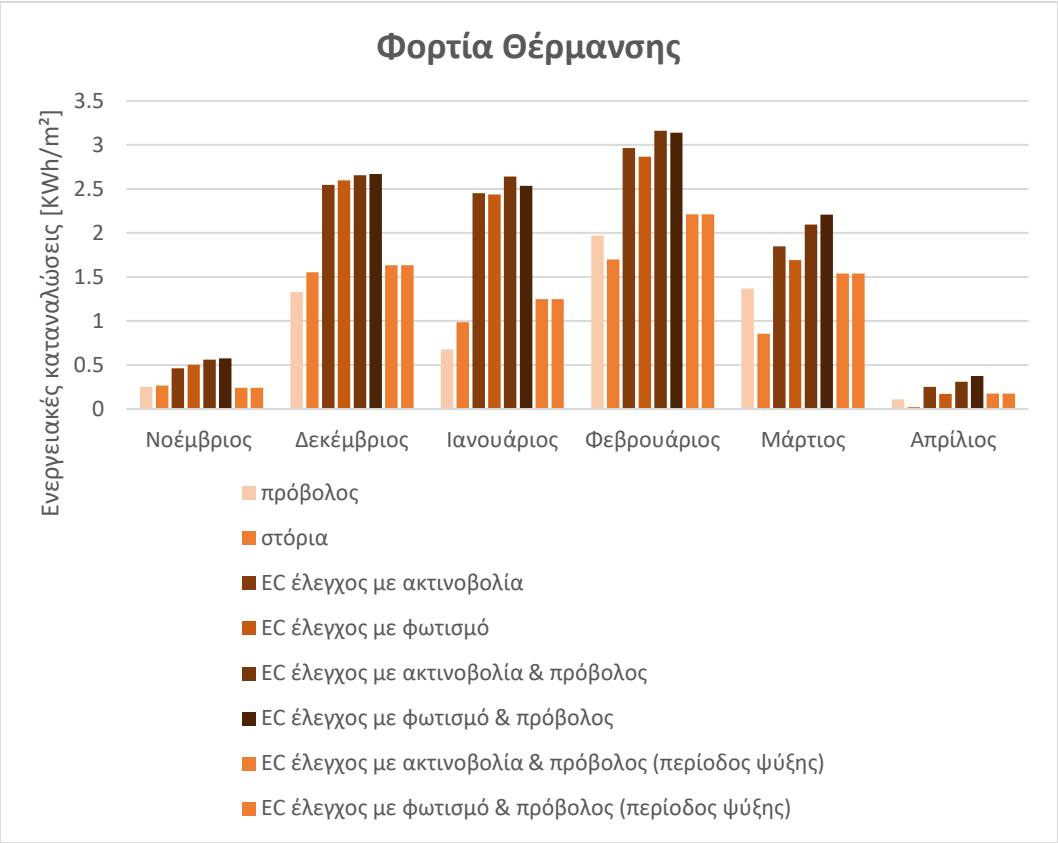
Πίνακας 8.1: Ετήσιες καταναλώσεις και εκλυόμενες εκπομπές CO_2 για τα εξεταζόμενα σενάρια

Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη ετήσια εξοικονόμηση εκπομπών CO_2 παρουσιάζεται στο τελευταίο σενάριο των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων με εξωτερική σκίαση που ελέγχονται με βάση το φωτισμό και λειτουργούν μόνο κατά την περίοδο ψύξης. Σε αυτή την περίπτωση εκλύονται 19,72 λιγότεροι τόνοι CO_2 ετησίως, δηλαδή οι ρύποι αυτοί μειώνονται κατά 14% σε σχέση με το σενάριο αναφοράς.

8.2 Μηνιαίες ενεργειακές καταναλώσεις

Μηνιαία φορτία θέρμανσης

Όπως έχει προαναφερθεί για την κλιματική ζώνη Β, στην οποία υπάγεται η Αθήνα, ορίζεται σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. ως περίοδος θέρμανσης, η περίοδος από την 1η Νοεμβρίου έως τις 15 Απριλίου (41). Για αυτό το χρονικό διάστημα που εξασφαλίζεται η λειτουργία του ιδανικού συστήματος θέρμανσης επιλέγεται να γίνουν οι προσομοιώσεις για τα διάφορα σενάρια που εξετάζονται. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν (σε πρωτογενή ενέργεια) παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα:



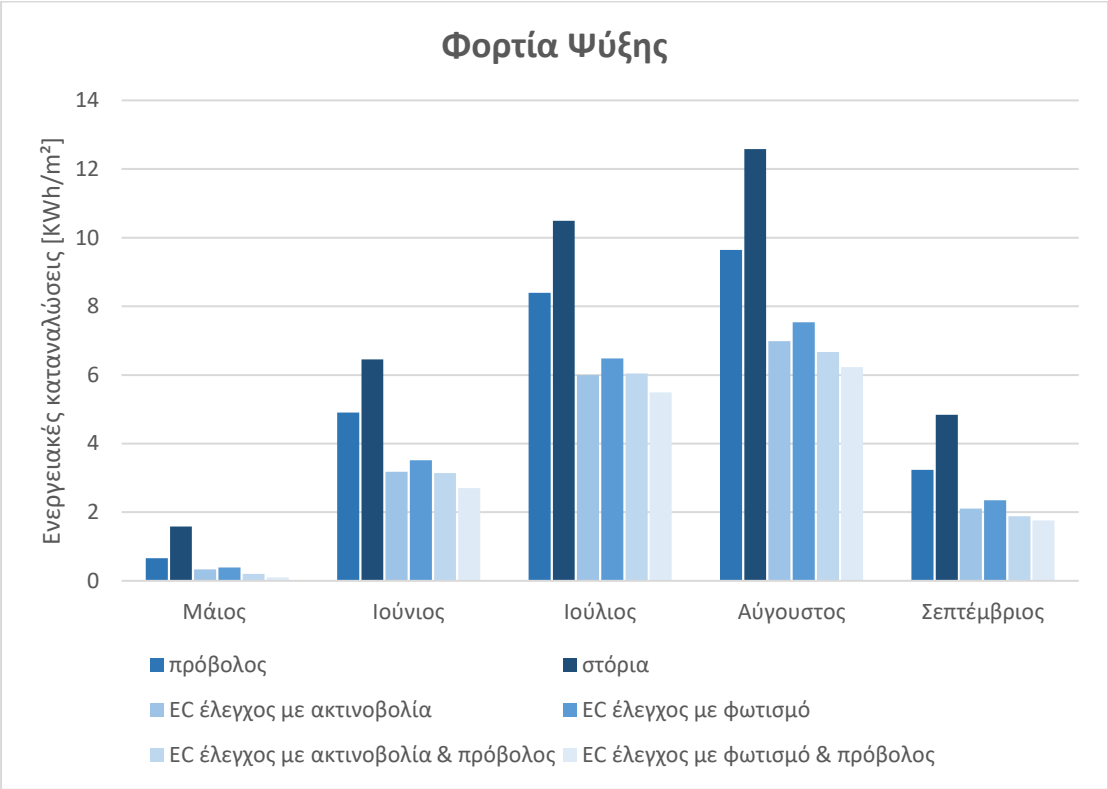
Σχήμα 8.6: Μηνιαία φορτία θέρμανσης πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια

Τα μικρότερα φορτία θέρμανσης για όλα τα σενάρια επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα ότι αντιστοιχούν στο μήνα του Απριλίου, μιας και τότε επικρατούν ευνοϊκότερες καιρικές συνθήκες, αλλά και επειδή η λειτουργία του συστήματος θέρμανσης αφορά μόνο το πρώτο δεκαπενθήμερο του Απριλίου. Τους χειμερινούς μήνες αντίθετα οι ανάγκες σε θέρμανση είναι εμφανώς μεγαλύτερες. Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται κατά το μήνα του Φεβρουαρίου για όλα τα σενάρια, καθώς είναι ο μήνας με τις πιο χαμηλές θερμοκρασίες, άρα απαιτεί και τις μεγαλύτερες ανάγκες σε θέρμανση. Για αυτόν το μήνα το σενάριο των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων που διαθέτουν εξωτερική σκίαση και ρυθμίζονται με βάση την τιμή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη μηνιαία ενεργειακή κατανάλωση θέρμανσης που είναι 3,16 KWh/m^2, ενώ τη μικρότερη ενεργειακή κατανάλωση θέρμανσης απαιτεί το σενάριο της εσωτερικής σκίασης με στόρια (1,7 KWh/m^2).

Σύμφωνα με το διάγραμμα, τα φορτία θέρμανσης παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά από μήνα σε μήνα για τα διάφορα σενάρια. Όπως έχει επιβεβαιωθεί ήδη και από το διάγραμμα των ετήσιων φορτίων θέρμανσης, στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών που χρωματίζονται μόνο κατά την περίοδο ψύξης παρατηρείται ότι μειώνονται τα φορτία θέρμανσης σημαντικά σε σχέση με όταν ρυθμίζονται να χρωματίζονται όλο το χρόνο.

Μηνιαία φορτία ψύξης

Όπως έχει προαναφερθεί για την κλιματική ζώνη Β, στην οποία υπάγεται η Αθήνα, ορίζεται σύμφωνα με τον Κ.Εν.Α.Κ. ως περίοδος ψύξης, η περίοδος από τις 15 Μαΐου έως τις 15 Σεπτεμβρίου (41). Για αυτό το χρονικό διάστημα που εξασφαλίζεται η λειτουργία του ιδανικού συστήματος ψύξης επιλέγεται να γίνουν οι προσομοιώσεις για τα διάφορα σενάρια που εξετάζονται. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν (σε πρωτογενή ενέργεια) παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 8.7: Μηνιαία φορτία ψύξης πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια

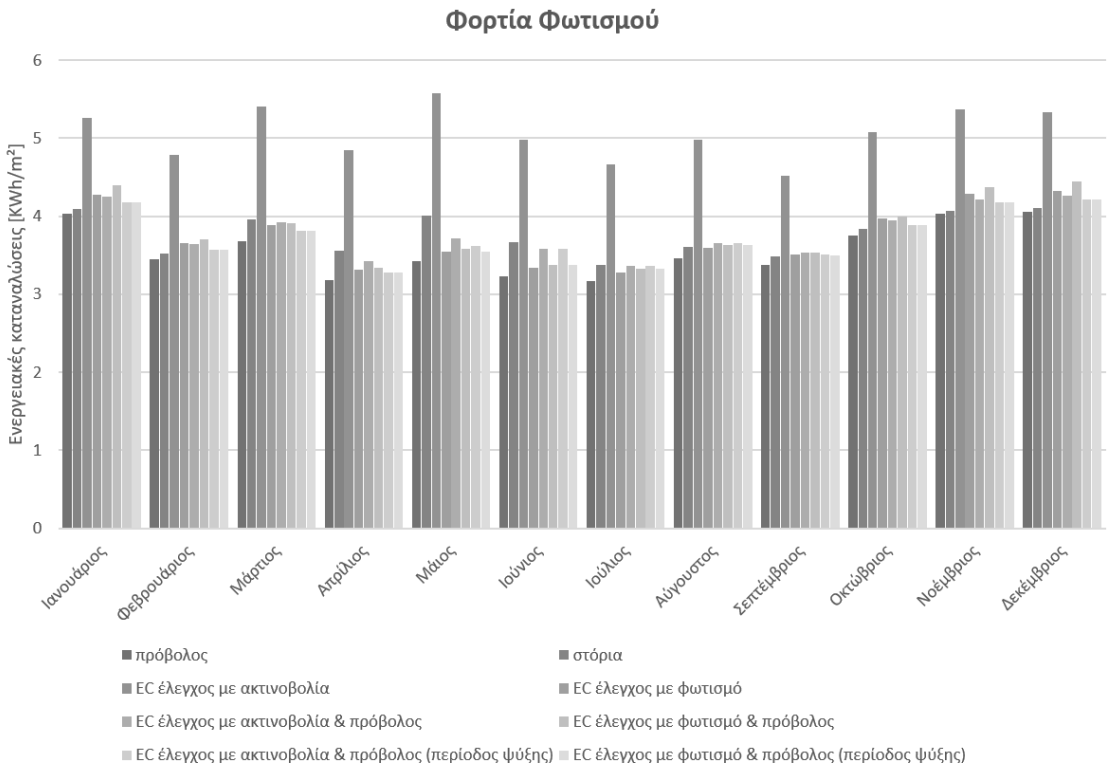
Τα μεγαλύτερα φορτία ψύξης για όλα τα σενάρια επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα ότι αντιστοιχούν στους μήνες Ιούλιο και Αύγουστο, καθώς αυτούς τους μήνες επικρατούν και οι υψηλότερες θερμοκρασίες μέσα στο χρόνο. Τον Ιούνιο από την άλλη τα ψυκτικά φορτία παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές.

Σύμφωνα με το διάγραμμα, τα φορτία ψύξης παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά από μήνα σε μήνα για τα διάφορα σενάρια, ενώ σε σύγκριση με τα φορτία θέρμανσης και από άποψη τάξης μεγέθους παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές. Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζονται από τα αρχικά σενάρια που έχουν οριστεί δύο λιγότερα, μιας και ο χρόνος που μελετάται είναι η περίοδος ψύξης και το υποσενάριο τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα να λειτουργούν όλο το χρόνο ταυτίζεται με το υποσενάριο να λειτουργούν μόνο κατά την περίοδο ψύξης.

Όπως έχει επιβεβαιωθεί ήδη και από το διάγραμμα των ετήσιων φορτίων ψύξης, στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών που χρωματίζονται με βάση το επίπεδο του φωτισμού παρατηρείται και η μεγαλύτερη μείωση των ψυκτικών φορτίων. Για αυτό το σενάριο και για το μήνα του Αυγούστου που παρουσιάζονται και οι μεγαλύτερες ανάγκες σε ψύξη λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, το ποσοστό μείωσης είναι -35% σε σχέση με την αντίστοιχη μηνιαία ενεργειακή κατανάλωση ψύξης του αρχικού-πραγματικού σεναρίου. Αντίθετα, για το μήνα του Αυγούστου το σενάριο με τα στόρια οδηγεί σε αύξηση των μηνιαίων ψυκτικών φορτίων κατά 30% σε σχέση με το αρχικό σενάριο.

Μηνιαία φορτία φωτισμού

Τα μηνιαία φορτία φωτισμού (σε πρωτογενή ενέργεια) που προκύπτουν για τα διάφορα σενάρια παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα:



Σχήμα 8.8: Μηνιαία φορτία φωτισμού πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια

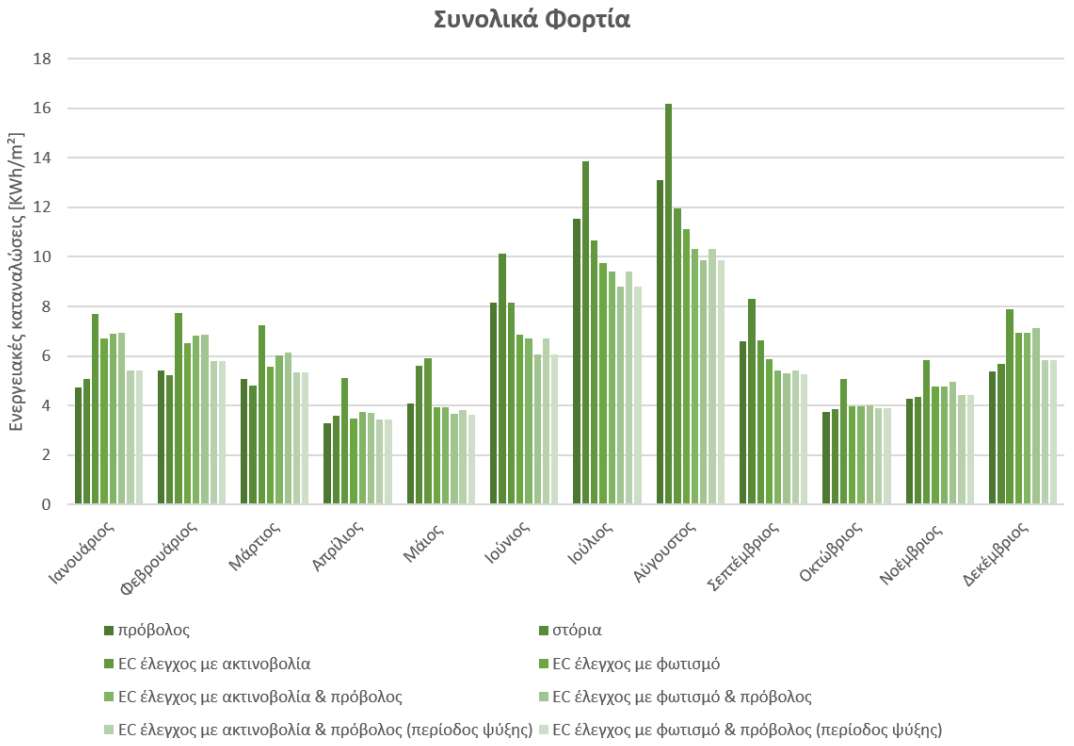
Τα χαμηλότερα φορτία φωτισμού για όλα τα σενάρια επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα ότι αντιστοιχούν στους μήνες Απρίλιο έως και Σεπτέμβριο, καθώς αυτούς τους μήνες η διάρκεια της ημέρας είναι μεγαλύτερη και παρουσιάζεται μεγαλύτερη ποσότητα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στις γυάλινες επιφάνειες του κτιρίου. Αντίθετα, κατά τους χειμερινούς μήνες όπου η διάρκεια της

ημέρας είναι μικρότερη παρουσιάζονται μεγαλύτερα φορτία τεχνητού φωτισμού. Για την περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων οι ανάγκες σε τεχνητό φωτισμό είναι μεγαλύτερες, μιας και όταν μεταβαίνουν στη σκουρόχρωμη κατάστασή τους δεν επιτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κτιρίου που συμβάλλει στο φυσικό φωτισμό των χώρων.

Από το διάγραμμα επίσης παρατηρείται ότι οι ανάγκες τεχνητού φωτισμού παρουσιάζουν τα μέγιστα φορτία τους για το σενάριο των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων χωρίς εξωτερικό πρόβολο που ρυθμίζονται με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία πάνω τους. Η ύπαρξη εξωτερικής σκίασης στο κτιριακό μοντέλο αποτρέπει ένα μέρος της ακτινοβολίας να περάσει στην επιφάνεια των υαλοπινάκων, ενώ η μη ύπαρξη εξωτερικής σκίασης οδηγεί στο να χρωματίζονται τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα πιο πολύ μέσα στη μέρα και έτσι οι ανάγκες σε τεχνητό φωτισμό για την εξασφάλιση της οπτικής άνεσης στους χώρους να είναι μεγαλύτερες.

Συνολικά μηνιαία φορτία

Τα συνολικά μηνιαία φορτία (σε πρωτογενή ενέργεια) υπολογίζονται ως το άθροισμα των μηνιαίων αναγκών θέρμανσης, ψύξης και φωτισμού. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τα διάφορα σενάρια παρατίθενται στο ακόλουθο διάγραμμα:

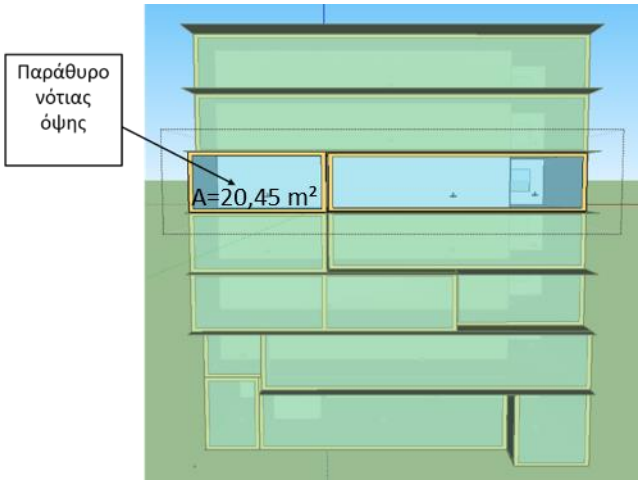


Σχήμα 8.9: Μηνιαία συνολικά φορτία πρωτογενούς ενέργειας για τα εξεταζόμενα σενάρια

Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση από τα συστήματα HVAC και από τα φορτία φωτισμού αντιστοιχεί στους μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου και οφείλεται στις ανάγκες ψύξης του κτιρίου, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τις ανάγκες θέρμανσής του. Φυσικά τους μήνες που οι καιρικές συνθήκες είναι πιο ευνοϊκές, δηλαδή το φθινόπωρο και την άνοιξη, τα συνολικά φορτία είναι χαμηλότερα.

8.3 Μεταδιδόμενη ηλιακή ακτινοβολία, θερμικά κέρδη και απώλειες μέσω των υαλοπινάκων

Για τη σύγκριση των σεναρίων που εξετάζονται στην παρούσα εργασία έχει νόημα να γίνει περισσότερη διερεύνηση στο κομμάτι των υαλοπινάκων και για αυτό εξάγονται αποτελέσματα σχετικά με τη μεταδιδόμενη ηλιακή ακτινοβολία, τα θερμικά κέρδη και τις απώλειες μέσω αυτών. Συγκεκριμένα επιλέγεται μια καλοκαιρινή ημέρα με αρκετή ηλιοφάνεια (13 Ιουλίου) και μια χειμερινή ημέρα (15 Φεβρουαρίου), η οποία σύμφωνα με το αρχείο καιρού έχει συννεφιά. Επίσης επιλέγεται παράθυρο της νότιας όψης του 4ου ορόφου και για τις δύο αντιπροσωπευτικές μέρες υπολογίζονται τα μεγέθη που προαναφέρθηκαν.

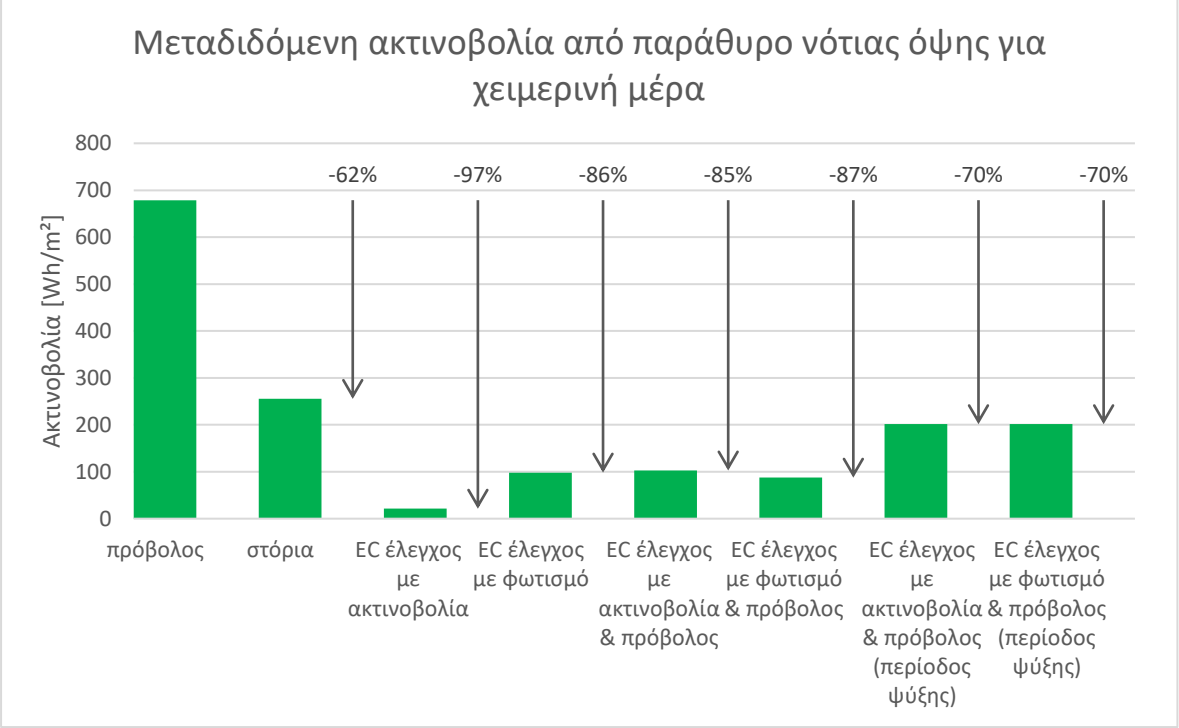


Σχήμα 8.10: Παράθυρο νότιας όψης

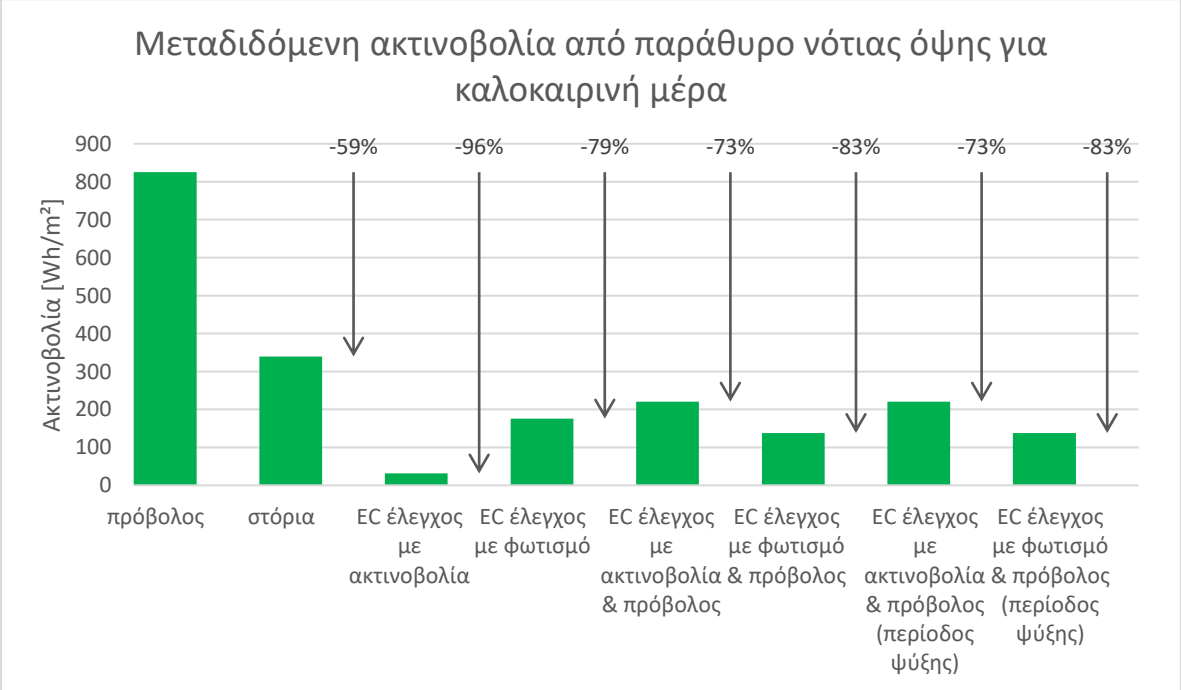
Μεταδιδόμενη ηλιακή ακτινοβολία μέσω των υαλοπινάκων

Από την ανάλυση που προηγήθηκε στα προηγούμενα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαπιστώθηκε πως το κτίριο καταναλώνει περισσότερα ψυκτικά από ότι θερμικά φορτία. Αυτό σημαίνει ότι η εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη θερινή περίοδο (όπου και καταναλώνονται τα περισσότερα φορτία) παίζει περισσότερο ρόλο σε σχέση με την εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη χειμερινή περίοδο. Στα κτίρια με μεγάλη γυάλινη επιφάνεια, όπως δηλαδή και αυτό που μελετάται, είναι απαραίτητος ο περιορισμός της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας με σκοπό την αποφυγή ηλιακών θερμικών κερδών και της υπερθέρμανσης κατά τη θερινή

περίοδο. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η συνολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που μεταδίδεται στον εσωτερικό χώρο μέσω του παραθύρου της νότιας όψης για τη χειμερινή και την καλοκαιρινή ημέρα:



Σχήμα 8.11: Συνολική μεταδιδόμενη ακτινοβολία από παράθυρο της νότιας όψης κατά τη χειμερινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια

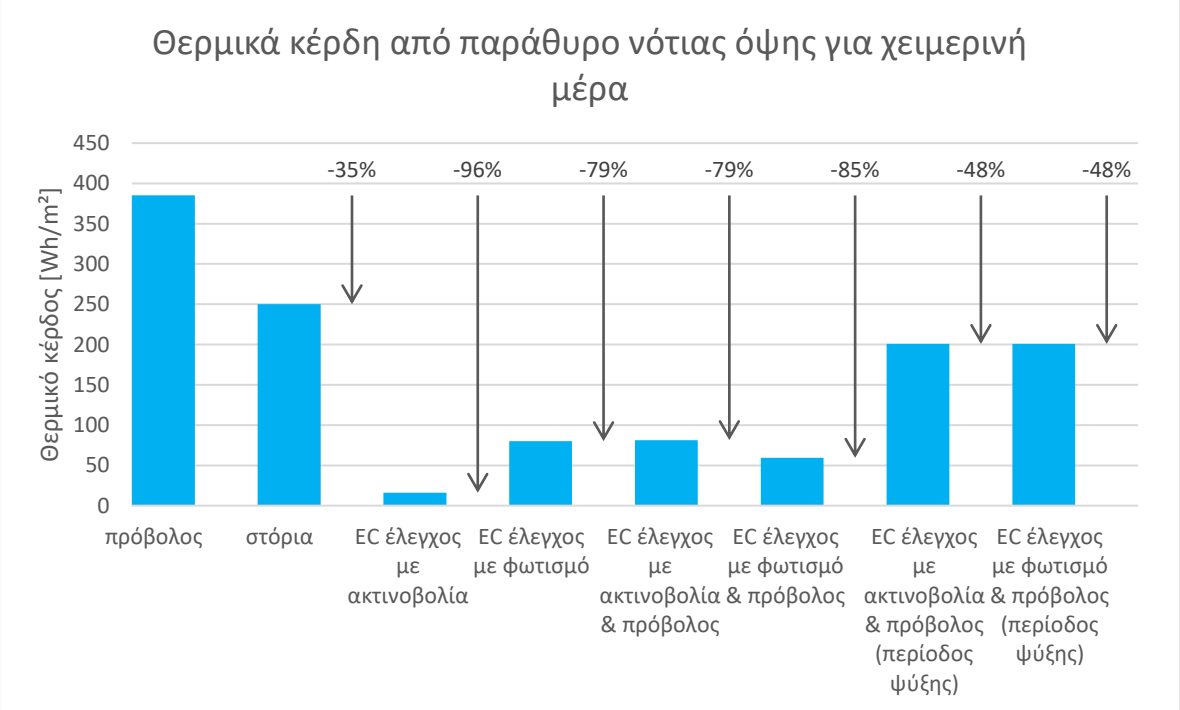


Σχήμα 8.12: Συνολική μεταδιδόμενη ακτινοβολία από παράθυρο της νότιας όψης κατά την καλοκαιρινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια

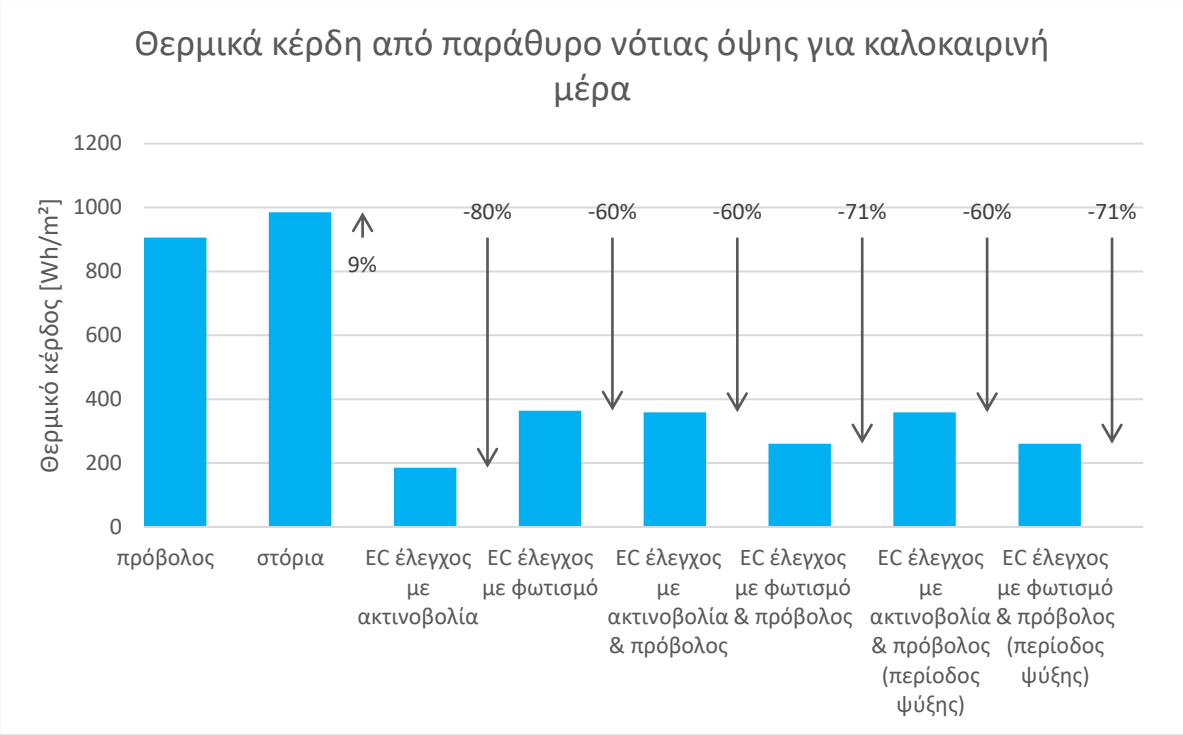
Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα μεταξύ τους παρατηρείται ότι την καλοκαιρινή ημέρα η συνολική προσπίπτουσα ακτινοβολία στους υαλοπίνακες είναι μεγαλύτερη λόγω της συννεφιάς κατά τη χειμερινή ημέρα και συνεπώς διέρχεται περισσότερη ακτινοβολία διαμέσου του παραθύρου. Επίσης για όλα τα υποσενάρια που εξετάστηκαν παρατηρείται ότι η ακτινοβολία που μεταδίδεται στον εσωτερικό χώρο μειώνεται αρκετά, γεγονός που είναι επιθυμητό. Στην περίπτωση του σεναρίου όπου δεν υπάρχει εξωτερική σκίαση και το παράθυρο είναι ηλεκτροχρωμικό και ρυθμίζεται με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία, η ακτινοβολία που τελικά μεταδίδεται στο εσωτερικό του κτιρίου μειώνεται πάρα πολύ. Αυτό σημαίνει ότι για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμα και το χειμώνα όπου τα ηλιακά θερμικά κέρδη από την ακτινοβολία είναι επιθυμητά, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα μεταβαίνουν στη χρωματισμένη-αδιαφανή τους κατάσταση μην επιτρέποντας την ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει. Για αυτό έχει νόημα να ελέγχονται τα ηλεκτροχρωμικά μόνο την περίοδο ψύξης. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα για τα δύο τελευταία σενάρια τη χειμερινή μέρα που δε μεταβαίνει το παράθυρο στη σκουρόχρωμη κατάστασή του μειώνεται η διαφορά σε σχέση με το πραγματικό σενάριο, επιτρέποντας δηλαδή μεγαλύτερα θερμικά κέρδη στο εσωτερικό του κτιρίου.

Θερμικά κέρδη μέσω των υαλοπινάκων

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα συνολικά θερμικά κέρδη μέσω του παραθύρου της νότιας όψης για τη χειμερινή και την καλοκαιρινή ημέρα:



Σχήμα 8.13: Συνολικά θερμικά κέρδη από παράθυρο νότιας όψης κατά τη χειμερινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια



Σχήμα 8.14: Συνολικά θερμικά κέρδη από παράθυρο νότιας όψης κατά την καλοκαιρινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα μεταξύ τους παρατηρείται ότι την καλοκαιρινή ημέρα που η προσπίπτουσα ακτινοβολία στους υαλοπίνακες αυξάνεται, διέρχεται και περισσότερη ακτινοβολία διαμέσου του παραθύρου και συνεπώς τα θερμικά κέρδη είναι μεγαλύτερα. Αντίστοιχα και με τα αποτελέσματα της μεταδιδόμενης ηλιακής ακτινοβολίας παρατηρείται ότι τα θερμικά κέρδη των σεναρίων με τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα είναι μικρότερα σε σχέση με το αρχικό πραγματικό σενάριο κάτι το οποίο είναι θετικό για τη θερινή περίοδο στην οποία τα θερμικά κέρδη είναι ανεπιθύμητα. Αυτό δικαιολογείται, καθώς οι τριπλοί υαλοπίνακες των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων έχουν μικρότερο συντελεστή θερμοπερατότητας (U=0,75 W/(m^{2}K)) από ότι οι διπλοί υαλοπίνακες του αρχικού σεναρίου (U=2,956 W/(m^{2}K)), προσφέροντας καλύτερη θερμομόνωση. Επίσης οι τριπλοί υαλοπίνακες στη διαυγή τους κατάσταση διαθέτουν και πολύ μικρότερο συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC=0,316) που μειώνεται ακόμη περισσότερο ύστερα από τη μετάβασή τους στη σκουρόχρωμη κατάσταση (SHGC=0,064), ενώ από την άλλη οι διπλοί υαλοπίνακες επιτρέπουν την είσοδο μεγαλύτερης ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό του κτιρίου (SHGC=0,759).

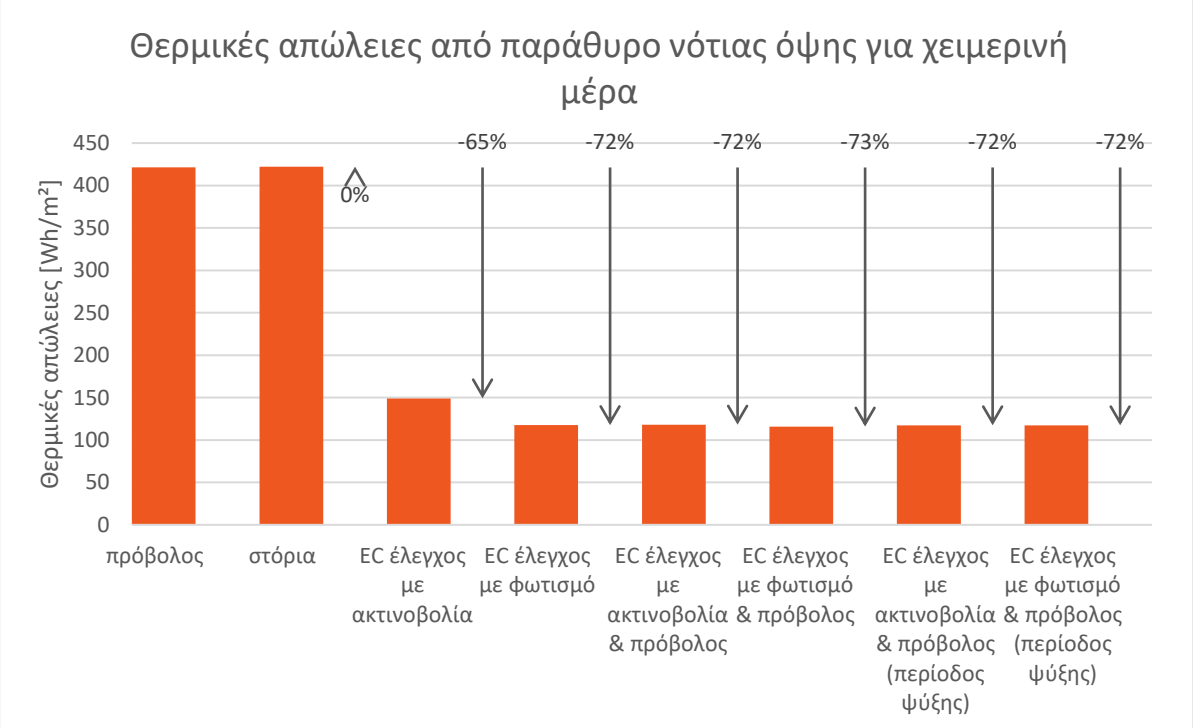
Επίσης, για την περίπτωση του σεναρίου όπου δεν υπάρχει εξωτερική σκίαση και το παράθυρο είναι ηλεκτροχρωμικό και ρυθμίζεται με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία, τα θερμικά κέρδη μειώνονται σημαντικά που σημαίνει ότι για μεγάλο χρονικό διάστημα, ακόμα και το χειμώνα όπου τα ηλιακά θερμικά κέρδη από την ακτινοβολία είναι επιθυμητά, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα μεταβαίνουν στη

χρωματισμένη-αδιαφανή τους κατάσταση μην επιτρέποντας στην ηλιακή ακτινοβολία να εισέλθει.

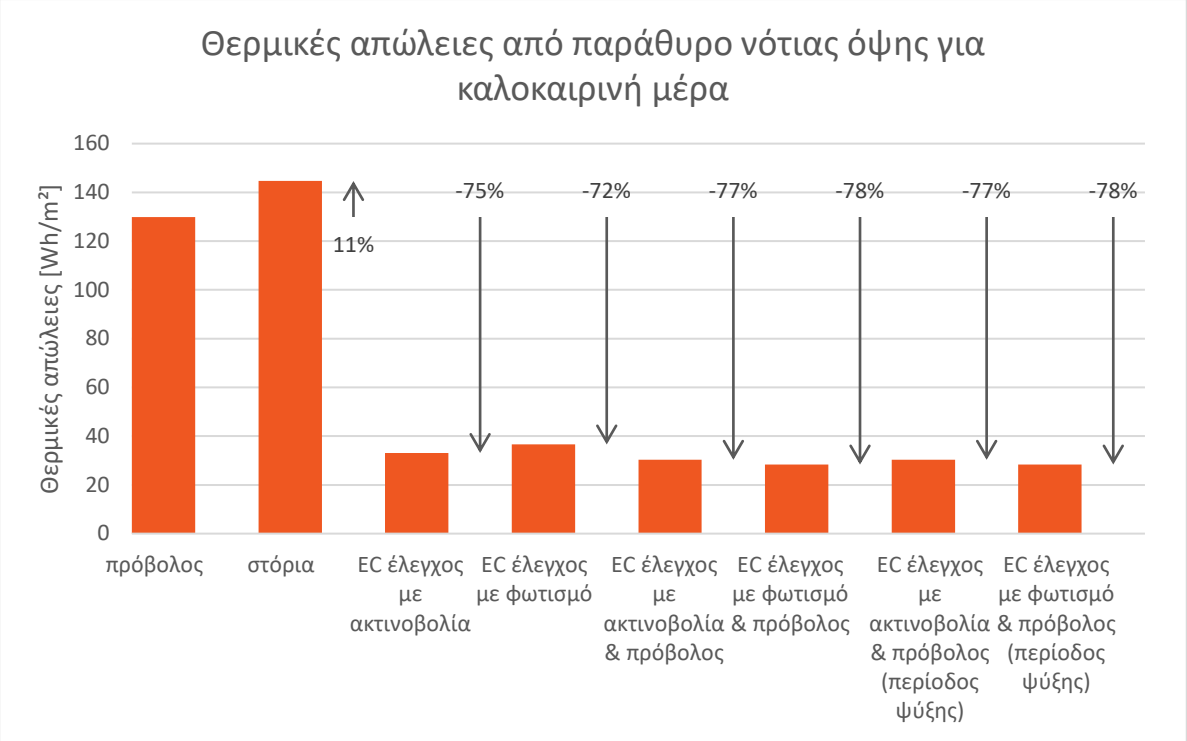
Όσο αφορά την εσωτερική σκίαση με στόρια συμπεραίνεται για άλλη μια φορά ότι σε σχέση με την εξωτερική σκίαση που προσφέρουν οι πρόβολοι, δε συμφέρει. Τη χειμερινή μέρα το θερμικό κέρδος του παραθύρου με την εσωτερική σκίαση μειώνεται αρκετά συγκριτικά με το σενάριο αναφοράς (-35%), ενώ την καλοκαιρινή μέρα παρουσιάζει μεγαλύτερο ηλιακό θερμικό κέρδος από το σενάριο αναφοράς (+9%). Επιτυγχάνει δηλαδή τα αντίθετα αποτελέσματα από αυτά που είναι επιθυμητά. Κατά το καλοκαίρι τα νότια ανοίγματα του κτιρίου που δέχονται ηλιακή ακτινοβολία για λίγες ώρες με μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, με την προσθήκη εξωτερικής σκίασης καταφέρνουν να μειώσουν τα ηλιακά θερμικά κέρδη, ενώ το χειμώνα όπου τα νότια ανοίγματα δέχονται το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας με σχεδόν κάθετες γωνίες πρόπτωσης οι εξωτερικοί πρόβολοι αποκόπτουν λιγότερο μέρος της ακτινοβολίας, με αποτέλεσμα να επιτρέπουν τη μετάδοσή της στο εσωτερικό του κτιρίου.

Θερμικές απώλειες μέσω των υαλοπινάκων

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται οι συνολικές θερμικές απώλειες μέσω του παραθύρου της νότιας όψης για τη χειμερινή και την καλοκαιρινή ημέρα:



Σχήμα 8.15: Συνολικές θερμικές απώλειες από παράθυρο νότιας όψης κατά τη χειμερινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια



Σχήμα 8.16: Συνολικές θερμικές απώλειες από παράθυρο νότιας όψης κατά την καλοκαιρινή μέρα για τα εξεταζόμενα σενάρια

Συγκρίνοντας τα δύο διαγράμματα μεταξύ τους παρατηρείται ότι την καλοκαιρινή ημέρα οι θερμικές απώλειες είναι μικρότερες από ότι τη χειμερινή ημέρα. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγαλύτερης θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στο εξωτερικό περιβάλλον και το εσωτερικό του κτιρίου που εντοπίζεται κατά τη χειμερινή περίοδο. Στην περιοχή της Αθήνας το καλοκαίρι η μέση εξωτερική θερμοκρασία είναι λίγο κάτω από 30°C, ενώ στο εσωτερικό του κτιρίου η θερμοκρασία διατηρείται στους 26°C, δημιουργώντας μια θερμοκρασιακή διαφορά μικρότερη των 4°C. Το χειμώνα αυτή η διαφορά ανέρχεται περίπου στους 11°C, με μέση εξωτερική θερμοκρασία περιβάλλοντος 9°C και εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου 20°C.

Επίσης παρατηρείται ότι οι απώλειες θερμότητας μέσω των υαλοπινάκων μειώνονται σημαντικά στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων -μέχρι και 78%-, καθώς παρουσιάζουν και μικρότερο συντελεστή θερμικής διαπερατότητας U, δηλαδή έχουν καλύτερη μονωτική ικανότητα.

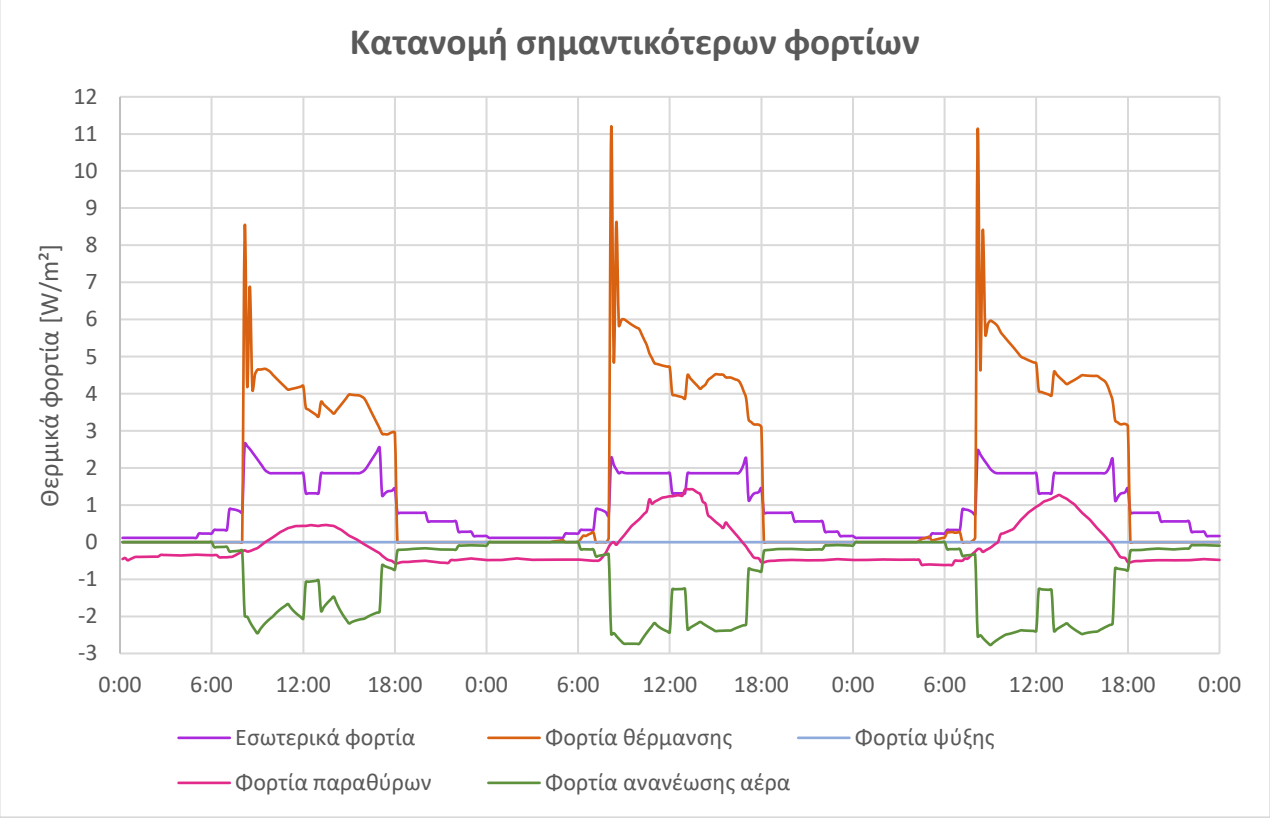
8.4 Κατανομή σημαντικότερων φορτίων κτιριακού μοντέλου

Στις τρεις προηγούμενες υποενότητες της παρούσας εργασίας έγινε η παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης για διάφορα σενάρια του κτιριακού μοντέλου. Το βέλτιστο σενάριο από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας είναι το

τελευταίο σενάριο που μελετήθηκε, όπου τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα ρυθμίζονται με βάση το επιθυμητό επίπεδο φωτισμού στους εσωτερικούς χώρους και λειτουργούν μόνο κατά την περίοδο ψύξης. Οι παρακάτω υπολογισμοί προέκυψαν για αυτό το σενάριο των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων.

Σε αυτήν την υποενότητα επιλέγονται δύο τριήμερα, ένα για τη χειμερινή και ένα για τη θερινή περίοδο και για αυτά τα χρονικά διαστήματα υπολογίζεται η κατανομή των σημαντικότερων φορτίων της κύριας θερμικής ζώνης (η θερμική ζώνη των γραφείων) του 4ου ορόφου του κτιρίου. Συγκεκριμένα για τη χειμερινή περίοδο επιλέγεται το τριήμερο από τις 14 έως τις 16 Φεβρουαρίου. Σύμφωνα με το αρχείο καιρού με το οποίο γίνεται η ενεργειακή προσομοίωση, αυτό το τριήμερο του έτους επικρατεί συννεφιά και έχει τη λιγότερη ηλιοφάνεια. Για τη θερινή περίοδο επιλέγεται το τριήμερο από τις 12 έως τις 14 Ιουλίου που έχει αρκετή ηλιοφάνεια. Έγινε έλεγχος πρώτα αυτά τα διαστήματα να μην αντιστοιχούν σε μέρες του Σαββατοκύριακου, όπου το κτίριο είναι εκτός υπηρεσίας, για να εξαχθούν αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα μια τυπικής λειτουργικής ημέρας του κτιρίου.

<u>Για το τριήμερο του Φεβρουαρίου:</u>

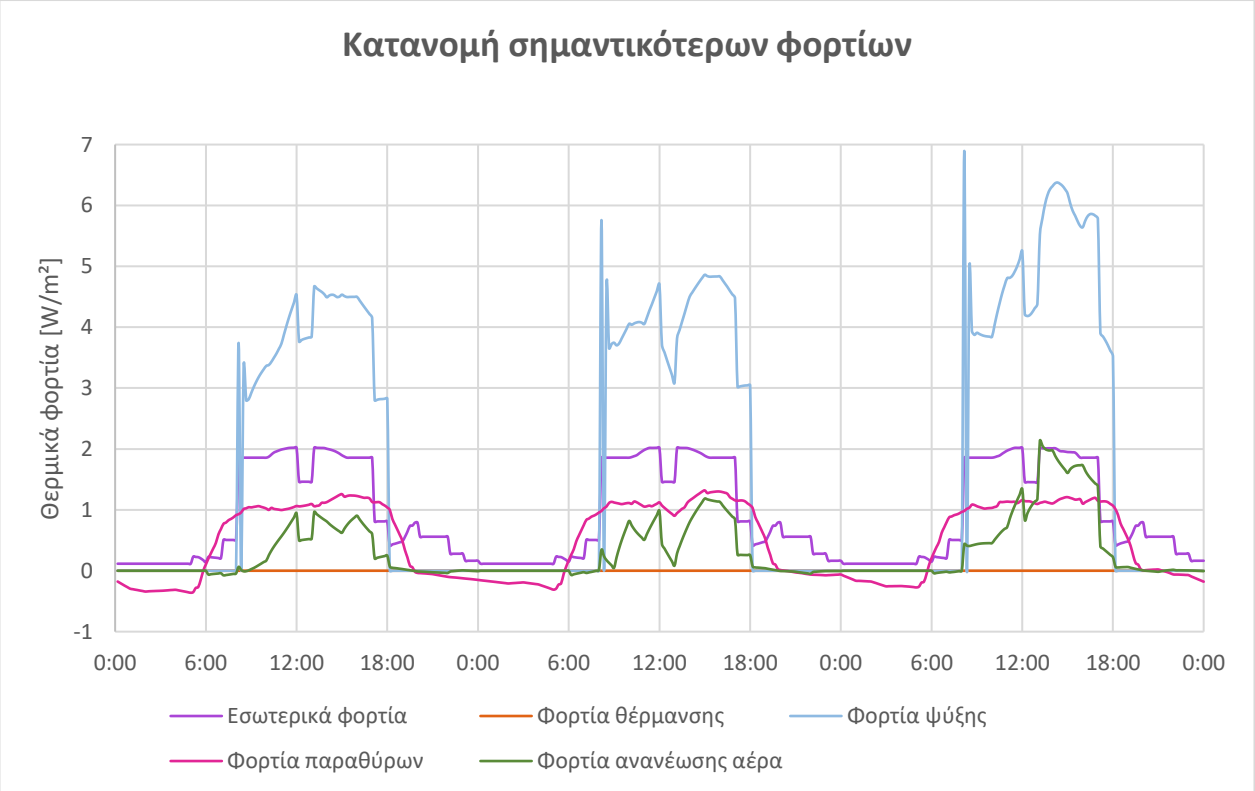


Σχήμα 8.17: Κατανομή φορτίων χειμερινού τριημέρου για κύρια θερμική ζώνη-γραφεία

Επειδή πρόκειται για περίοδο θέρμανσης δεν υπάρχουν ψυκτικά φορτία, παρά μόνο φορτία θέρμανσης που εξασφαλίζουν την επιθυμητή θερμοκρασία στους εσωτερικούς χώρους. Τα φορτία ανανέωσης του αέρα ακολουθούν αντίστροφο προφίλ από τα εσωτερικά φορτία, καθώς έχει ρυθμιστεί στο EnergyPlus να ανανεώνεται ο αέρας ανάλογα με τη δραστηριότητα των ατόμων στο χώρο. Το αρνητικό προφίλ των φορτίων ανανέωσης του αέρα δικαιολογείται, καθώς ο αέρας που εισέρχεται είναι ψυχρός και πρέπει να θερμανθεί. Το εσωτερικό του κτιρίου έχει υψηλότερη θερμοκρασία από ότι ο αέρας του περιβάλλοντος, οπότε η μεταφορά θερμότητας γίνεται από το κτίριο προς το περιβάλλον. Τα φορτία της θέρμανσης παρουσιάζουν το μέγιστό τους, όταν αρχίζει να λειτουργεί το κτίριο και πρέπει να φτάσει την επιθυμητή εσωτερική θερμοκρασία και στη συνέχεια μειώνονται λίγο και διατηρούνται σε σταθερό επίπεδο μέχρι και τη λήξη της λειτουργίας του το απόγευμα, όπου και μηδενίζονται.

Όσο αφορά τα φορτία των παραθύρων παρατηρείται ότι υπάρχει θερμικό κέρδος τη διάρκεια της ημέρας που μεταδίδεται ηλιακή ακτινοβολία, ενώ θερμότητα χάνεται κατά τις υπόλοιπες ώρες.

<u>Για το τριήμερο του Ιουλίου:</u>



Σχήμα 8.18: Κατανομή φορτίων καλοκαιρινού τριημέρου για κύρια θερμική ζώνη-γραφεία

Επειδή πρόκειται για περίοδο ψύξης δεν υπάρχουν φορτία θέρμανσης, παρά μόνο φορτία ψύξης που εξασφαλίζουν την επιθυμητή θερμοκρασία στους εσωτερικούς χώρους. Το θετικό προφίλ των φορτίων ανανέωσης του αέρα δικαιολογείται, καθώς ο αέρας που εισέρχεται στο εσωτερικό του κτιρίου είναι θερμότερος και λειτουργεί ως θερμικό κέρδος. Το εσωτερικό του κτιρίου έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από ότι ο αέρας του περιβάλλοντος, οπότε η μεταφορά θερμότητας γίνεται από το περιβάλλον προς το κτίριο. Τα φορτία της ψύξης εμφανίζονται, όταν αρχίζει να λειτουργεί το κτίριο και παρουσιάζουν το μέγιστό τους τις ώρες του μεσημεριού που η θερμοκρασία του περιβάλλοντος μεγιστοποιείται. Με τη λήξη της λειτουργίας του κτιρίου το απόγευμα, τα ψυκτικά φορτία μηδενίζονται.

Όσο αφορά τα φορτία των παραθύρων παρατηρείται ότι υπάρχει θερμικό κέρδος τη διάρκεια της ημέρας που μεταδίδεται ηλιακή ακτινοβολία, ενώ κατά τις υπόλοιπες ώρες υπάρχουν θερμικές απώλειες.

Υπενθυμίζεται ότι στα εσωτερικά φορτία συγκαταλέγονται τα θερμικά φορτία των ατόμων, του ηλεκτρικού εξοπλισμού και του τεχνητού φωτισμού.

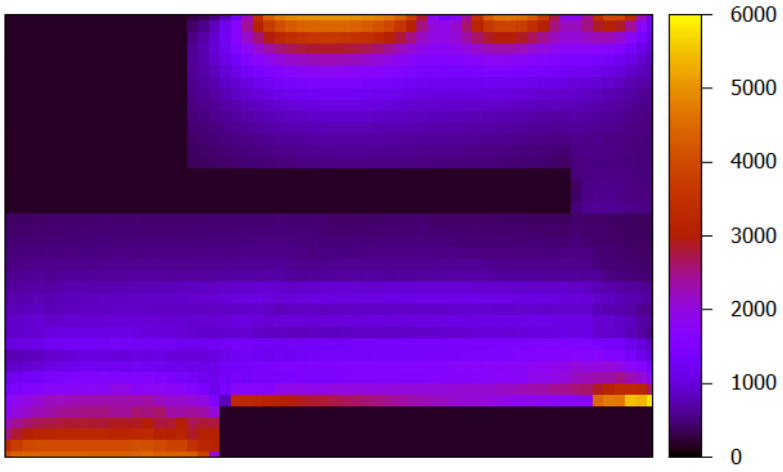
Και στα δύο διαγράμματα παρατηρείται ότι τα θερμικά φορτία, μηδενίζονται τις ώρες που το κτίριο δε λειτουργεί και παρουσιάζουν κατά κανόνα τις μέγιστες τιμές τους γύρω από το μεσημέρι με εξαίρεση τα φορτία θέρμανσης, τα φορτία ψύξης, τα εσωτερικά φορτία και τα φορτία ανανέωσης του αέρα που το μεσημέρι μειώνονται. Αυτό συμβαίνει, διότι θεωρείται ότι οι άνθρωποι που βρίσκονται στο χώρο κάνουν διάλειμμα και συνεπώς δε χρησιμοποιούν τον ηλεκτρικό εξοπλισμό και αντίστοιχα δε χρειάζεται εκείνη την ώρα να διατηρείται η θερμοκρασία στα επιθυμητά επίπεδα.

8.5 Κατανομή φυσικού φωτισμού σε θερμικές ζώνες του κτιριακού μοντέλου

Το EnergyPlus δίνει τη δυνατότητα εύρεσης της κατανομής του φυσικού φωτισμού στον εκάστοτε εξεταζόμενο χώρο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι επιλέγεται να εξεταστεί και να συγκριθεί η ίδια θερμική ζώνη για δύο σενάρια του κτιριακού μοντέλου. Ως θερμική ζώνη για την οποία θα προκύψουν τα αντίστοιχα 3D διαγράμματα επιλέγεται η κύρια θερμική ζώνη (γραφεία) του 4^{ου} ορόφου. Τα σενάρια που εξετάζονται είναι το πραγματικό σενάριο με την εξωτερική σκίαση και το σενάριο με τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα που ρυθμίζονται με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία. Οι προσομοιώσεις γίνονται για μια τυπική καλοκαιρινή και μια χειμερινή μέρα με πολλή συννεφιά για ενδεικτικές ώρες μέσα στη μέρα.

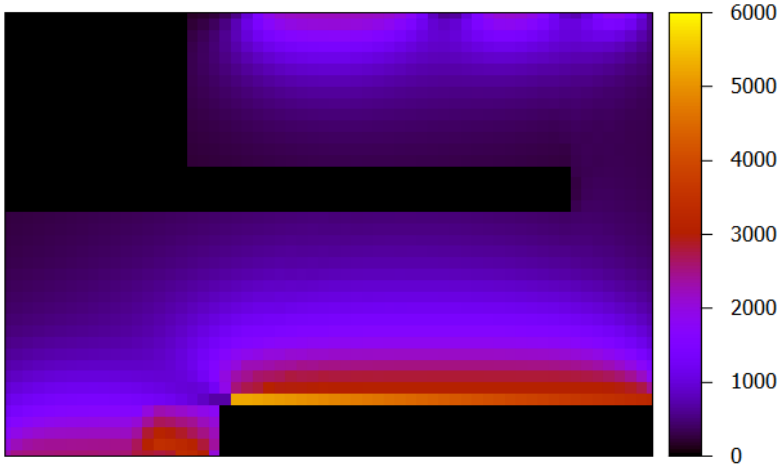
Για τυπική καλοκαιρινή ημέρα στις 11:00:

Η κατανομή φυσικού φωτισμού σε [lux] στο σενάριο με εξωτερική σκίαση-πρόβολο είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 8.19: Κατανομή φυσικού φωτισμού καλοκαιρινής μέρας για την κύρια θερμική ζώνη του 4ου ορόφου για το πραγματικό σενάριο

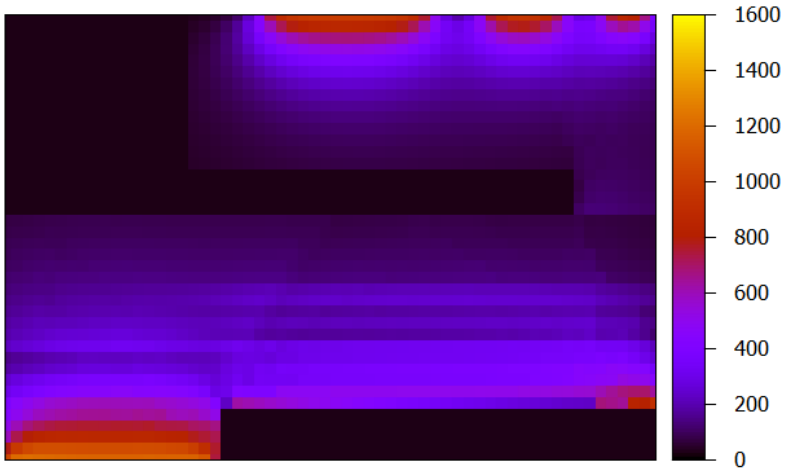
Η κατανομή φυσικού φωτισμού σε [lux] στο σενάριο με ηλεκτροχρωμικά παράθυρα χωρίς εξωτερική σκίαση είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 8.20: Κατανομή φυσικού φωτισμού καλοκαιρινής μέρας για την κύρια θερμική ζώνη του 4ου ορόφου για τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα

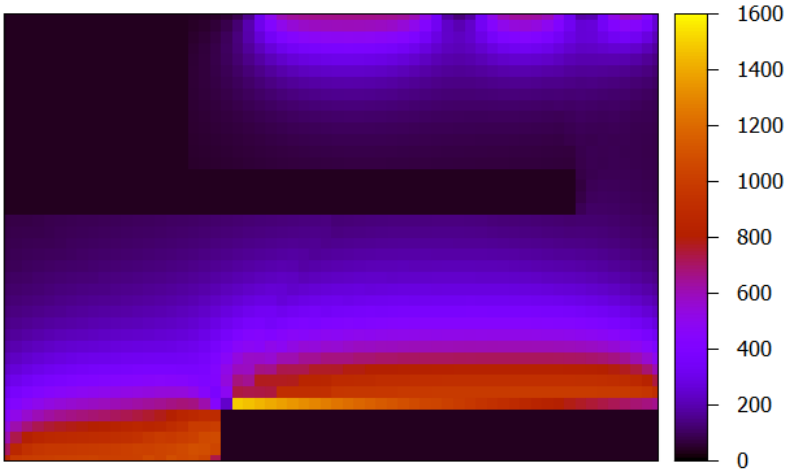
Για χειμερινή συννεφιασμένη ημέρα στις 11:00:

Η κατανομή φυσικού φωτισμού σε [lux] στο σενάριο με εξωτερική σκίαση-πρόβολο είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 8.21: Κατανομή φυσικού φωτισμού χειμερινής μέρας για την κύρια θερμική ζώνη του 4ου ορόφου για το πραγματικό σενάριο

Η κατανομή φυσικού φωτισμού σε [lux] στο σενάριο με ηλεκτροχρωμικά παράθυρα χωρίς εξωτερική σκίαση είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 8.22: Κατανομή φυσικού φωτισμού χειμερινής μέρας για την κύρια θερμική ζώνη του 4ου ορόφου για τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα

Παρατηρείται όπως είναι αναμενόμενο, ότι η ένταση του φωτισμού την καλοκαιρινή ημέρα με ηλιοφάνεια παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές από την ένταση του φωτισμού τη συννεφιασμένη χειμερινή ημέρα για την ίδια ώρα.

Επίσης συγκρίνοντας τα δύο σενάρια μεταξύ τους παρατηρείται ότι στα βόρεια ανοίγματα του κτιρίου και για την καλοκαιρινή και για τη χειμερινή ημέρα, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα έχοντας χαμηλότερη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία από τους διπλούς υαλοπίνακες (Πίνακες 7.8 και 7.10) μειώνουν τη μετάδοση του φυσικού φωτός στο εσωτερικό της θερμικής ζώνης, ενώ για το πραγματικό σενάριο όπου δεν υπάρχει κάποια μέθοδος σκίασης στα παράθυρα της βόρειας όψης εισέρχεται περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία και συνεπώς σημειώνεται υψηλότερη ένταση του φυσικού φωτισμού.

Την καλοκαιρινή ημέρα τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα και της βόρειας και της νότιας όψης στις 11:00 έχουν μεταβεί στην πλήρως χρωματισμένη τους κατάσταση, οπότε καταφέρνουν να περιορίσουν την ηλιακή ακτινοβολία περισσότερο από τους διπλούς υαλοπίνακες του πραγματικού σεναρίου. Εξαίρεση αποτελεί το παράθυρο της νότιας όψης που βρίσκεται πιο εσωτερικά στο κτίριο και το οποίο στην περίπτωση του πραγματικού σεναρίου λόγω του μεγαλύτερου μήκους του προβόλου αφήνει να διεισδύσει λιγότερος φυσικός φωτισμός σε σύγκριση με το ηλεκτροχρωμικό παράθυρο που δε διαθέτει εξωτερική σκίαση.

Τη χειμερινή συννεφιασμένη ημέρα τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα και της βόρειας και της νότιας όψης διατηρούν τη διαυγή τους κατάσταση. Στα νότια ανοίγματα του κτιρίου η εξωτερική οριζόντια σκίαση από τους προβόλους προσφέρει περισσότερη σκίαση στην μπροστινή ζώνη των γραφείων σε σχέση με τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα, παρόλο που αυτά διαθέτουν χαμηλότερη διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία. Στα βόρεια ανοίγματα όμως, όπως προαναφέρθηκε, που οι διπλοί υαλοπίνακες δεν έχουν προβόλους, τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα λόγω της χαμηλότερης διαπερατότητάς τους κατορθώνουν να προσφέρουν περισσότερη σκίαση στη θερμική ζώνη που μελετάται.

9 Συμπεράσματα

9.1 Συμπεράσματα της ενεργειακής προσομοίωσης

Η ενεργειακή προσομοίωση του κτιρίου για τα διάφορα υποσενάρια που εξετάστηκαν οδήγησε σε σημαντικά συμπεράσματα που αναλύονται στη συνέχεια της παρούσας ενότητας.

Καταρχάς σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δύο διαφορετικών τρόπων ελέγχου των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων διαπιστώνεται ότι για το παρόν κτιριακό μοντέλο, ο έλεγχος με βάση το επίπεδο του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό του συμφέρει περισσότερο από τον έλεγχο των υαλοπινάκων με βάση την τιμή της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η μετάβαση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων στη χρωματισμένη τους κατάσταση υπερτερεί, όταν ρυθμίζεται με βάση το επίπεδο του φωτισμού, διότι πρόκειται για μία δυναμική στρατηγική ελέγχου που προσαρμόζει τη διαπερατότητα των υαλοπινάκων περνώντας από όλες τις ενδιάμεσες καταστάσεις. Οι υαλοπίνακες αυτού του σεναρίου -είτε με εξωτερική σκίαση είτε χωρίς- χρωματίζονται για περισσότερες ώρες μέσα στην ημέρα, όταν υπάρχει ηλιοφάνεια (από νωρίς το πρωί μέχρι το απόγευμα), όμως διατηρούν ενδιάμεσες τιμές διαπερατότητας και δύσκολα μεταβαίνουν στην πλήρως χρωματισμένη τους κατάσταση. Αυτή η ευελιξία δεν προσφέρεται στην περίπτωση ελέγχου των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων με βάση την ηλιακή ακτινοβολία, καθώς διαθέτει δύο μόνο διακριτές καταστάσεις (διαυγής και πλήρως χρωματισμένη). Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα με τους προβόλους στη νότια όψη που ρυθμίζονται με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, όταν έχει ηλιοφάνεια, χρωματίζονται για λιγότερες ώρες (κυρίως τις ώρες του μεσημεριού) μέσα στην ημέρα, ενώ εκείνα που δε διαθέτουν εξωτερική σκίαση μεταβαίνουν στη χρωματισμένη τους κατάσταση από το πρωί μέχρι το απόγευμα τις ημέρες που υπάρχει επαρκής ηλιοφάνεια.

Ως προς τις ανάγκες ψύξης όλα τα σενάρια που μελετώνται, πέρα από την περίπτωση του κτιρίου που σκιάζεται εσωτερικά με στόρια (αύξηση ψυκτικών φορτίων κατά 47%) σημειώνουν σημαντική μείωση στις καταναλώσεις τους (μείωση κατά 28-44%) σε σχέση με το σενάριο αναφοράς που έχει διπλούς υαλοπίνακες και εξωτερική σκίαση από προβόλους στη νότια όψη του κτιρίου. Αυτό οφείλεται στο ότι τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα είναι τριπλά και έχουν χαμηλότερο συντελεστή θερμοπερατότητας και άρα καλύτερη θερμομόνωση (U=0,75 W/(m^2K)) από ότι τα διπλά παράθυρα του αρχικού σεναρίου (U=2,956 W/(m^2K)). Τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα παρουσιάζουν επίσης πολύ μικρότερο συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC=0,316 στη διαυγή κατάσταση και SHGC=0,064 στη σκουρόχρωμη κατάσταση) σε σύγκριση με τους διπλούς υαλοπίνακες (SHGC=0,759), αποτρέποντας σε μεγάλο βαθμό ηλιακά θερμικά κέρδη που είναι υπεύθυνα για την αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας του κτιρίου.

Όσο αφορά τις ανάγκες σε τεχνητό φωτισμό, οι μικρότερες ενεργειακές ανάγκες εντοπίζονται στο αρχικό-πραγματικό σενάριο, καθώς η διαπερατότητα σε ορατή ακτινοβολία των διπλών υαλοπινάκων (VT=0,814) είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων (σε διαυγή κατάσταση VT=0,591 και σε χρωματισμένη κατάσταση VT=0,051). Με την προσθήκη επιστρώσεων low-e στα συστήματα παραθύρων και των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων που μεταβαίνουν στη σκουρόχρωμη κατάστασή τους, περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό ο φυσικός φωτισμός και έτσι δημιουργείται μεγαλύτερη ανάγκη για ύπαρξη τεχνητού φωτισμού. Ακόμη, η προσθήκη επιπλέον υαλοπινάκων ή επιστρώσεων low-e συνεπάγεται και μείωση της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας μέσω των υαλοπινάκων, των θερμικών κερδών και των θερμικών απωλειών λόγω της μείωσης της θερμικής διαπερατότητας και του SHGC.

Ως προς τις ανάγκες του κτιρίου σε θέρμανση συναντάται ενεργειακή εξοικονόμηση μόνο στην περίπτωση της εσωτερικής σκίασης του κτιρίου με στόρια (κατά 10%), ενώ σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις παρατηρείται σημαντικότατη αύξηση. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα κατά την περίοδο θέρμανσης μεταβαίνουν για μεγάλο διάστημα στην χρωματισμένη τους κατάσταση, χωρίς να επιτρέπουν τη διέλευση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στο κτίριο, η οποία πέρα από φωτισμό προσφέρει και θερμικό φορτίο. Επίσης, η αύξηση των θερμικών φορτίων στα σενάρια των ηλεκτροχρωμικών-τριπλών παραθύρων αιτιολογείται λόγω του μικρότερου συντελεστή SHGC που επιτρέπει λιγότερη ακτινοβολία να διεισδύσει στο εσωτερικό του κτιρίου από ότι οι διπλοί υαλοπίνακες. Προκειμένου να μειωθούν τα φορτία θέρμανσης αποφασίστηκε τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα να μη λειτουργούν κατά την περίοδο θέρμανσης με κατάλληλη ρύθμιση στο EnergyPlus. Ο χρωματισμός των ηλεκτροχρωμικών μόνο κατά την περίοδο ψύξης οδηγεί σε μεγάλη μείωση των φορτίων θέρμανσης σε σχέση με τα υπόλοιπα υποσενάρια των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων, ενώ βέβαια σε σχέση με το αρχικό-πραγματικό σενάριο τα φορτία θέρμανσης υπερέχουν κατά 18%. Η αύξηση των φορτίων της θέρμανσης στα σενάρια των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων που εξετάζονται δεν είναι επιθυμητή ως προς την εξοικονόμηση ενέργειας, όμως πρέπει να επισημανθεί ότι τα φορτία θέρμανσης σε σύγκριση με τα φορτία ψύξης και τα φορτία του φωτισμού είναι σημαντικά μικρότερα, οπότε και η συνεισφορά τους στα συνολικά φορτία είναι αρκετά μικρότερη.

Συγκρίνοντας τις συνολικές ενεργειακές καταναλώσεις του κτιρίου για όλα τα σενάρια προέκυψε ως βέλτιστο ενεργειακά το τελευταίο σενάριο που μελετάται, δηλαδή τα ηλεκτροχρωμικά παράθυρα με εξωτερικούς προβόλους στη νότια όψη που ελέγχονται με βάση το φωτισμό και λειτουργούν μόνο κατά την περίοδο ψύξης. Αυτό οδηγεί σε ενεργειακή εξοικονόμηση κατά 12% και εξασφαλίζει τη δεύτερη μεγαλύτερη μείωση στα φορτία ψύξης και όχι ιδιαίτερα σημαντική αύξηση των φορτίων θέρμανσης. Σε αυτό το σενάριο εκλύονται 19,72 λιγότεροι τόνοι CO_2 ετησίως σε σχέση με το σενάριο αναφοράς, δηλαδή οι ρύποι αυτοί μειώνονται κατά 14%. Αξιοσημείωτη εξοικονόμηση εντοπίζεται και στην περίπτωση των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων που ελέγχονται με βάση την ακτινοβολία και

λειτουργούν μόνο κατά την περίοδο ψύξης (-10%), ενώ μικρότερες εξοικονομήσεις παρουσιάζουν τα υπόλοιπα υποσενάρια των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων. Αναφορικά με το σενάριο της εσωτερικής σκίασης από τα στόρια, τα συνολικά φορτία αυξήθηκαν κατά 20%, που σημαίνει ότι στο παρόν κτίριο δε συμφέρει η εσωτερική, αλλά η εξωτερική σκίαση.

Συμπερασματικά, η εξωτερική σκίαση με συμβατικά παράθυρα από μόνη της συμβάλλει στις ενεργειακές επιδόσεις ενός κτιρίου, όπως δηλαδή και στο υπό μελέτη κτίριο. Τα εξωτερικά σκίαστρα τοποθετημένα στις νότιες όψεις των κτιρίων κατορθώνουν να αποκόψουν την ηλιακή ακτινοβολία τους θερινούς μήνες, ενώ τους χειμερινούς μήνες επιτρέπουν την εισχώρησή της στο εσωτερικό των κτιρίων, μιας και ο ήλιος βρίσκεται πιο χαμηλά. Τελικά όμως, η προσθήκη ηλεκτροχρωμικών παραθύρων και ο συνδυασμός τους με εξωτερικά σκίαστρα συμβάλλει στην περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας που είναι σημαντική για την ενεργειακή αναβάθμιση του κτιρίου.

9.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με αφορμή την παρούσα εργασία θα μπορούσαν να γίνουν περαιτέρω ενεργειακές μελέτες στο συγκεκριμένο κτίριο για μελλοντική του ανακαίνιση και ενεργειακή αναβάθμιση. Επίσης κρίνεται σκόπιμη και η περαιτέρω έρευνα γενικά στον κλάδο της ενεργειακής προσομοίωσης των κτιρίων με στόχο την καλύτερη ενεργειακή τους απόδοση. Ορισμένα σημεία που μπορούν να διερευνηθούν είναι τα εξής:

- Η ενεργειακή προσομοίωση του υπό μελέτη κτιρίου σε διαφορετική τοποθεσία και κλιματικές συνθήκες, προκειμένου να γίνει βαθύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των διαφόρων συστημάτων υαλοπινάκων και σκίασης.
- Ο έλεγχος των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων λαμβάνοντας υπόψιν και το φαινόμενο της θάμβωσης. Στην παρούσα εργασία η εξέταση της θάμβωσης που πιθανόν να προκαλείται στους εσωτερικούς χώρους από τη διείσδυση της ορατής ακτινοβολίας, για λόγους απλότητας παραλείφθηκε. Όμως, είναι σημαντική για την ολοκληρωμένη ενεργειακή μελέτη του κτιρίου.
- Η οικονομική μελέτη και αξιολόγηση της αντικατάστασης των διπλών υαλοπινάκων που διαθέτει το παρόν κτιριακό μοντέλο με τριπλούς ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες. Κρίνεται απαραίτητη η εκτίμηση του αρχικού κόστους αγοράς και εγκατάστασης των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων και ο υπολογισμός της περιόδου αποπληρωμής τους.
- Η ενσωμάτωση θερμικών συστημάτων που βασίζονται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Θα μπορούσε να συνδυαστεί η χρήση αντλίας θερμότητας με ηλιακούς συλλέκτες τοποθετημένους στην οροφή του κτιρίου.
- Η προσθήκη ενδιάμεσων καταστάσεων των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων στο σενάριο που ελέγχονται με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία,

προκειμένου να υπάρχει περισσότερη ευελιξία. Στην παρούσα εργασία για αυτόν τον τρόπο ελέγχου των ηλεκτροχρωμικών παραθύρων χρησιμοποιήθηκαν δύο μόνο διακριτές καταστάσεις του υαλοπίνακα (η διαυγής και η πλήρως χρωματισμένη του κατάσταση).

10 Βιβλιογραφία

1. **Xiaodong Cao, Xilei Dai, Junjie Liu.** *Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade.* June 2016 .

2. **https://ourworldindata.org/energy.**

3. **https://www.iea.org/topics/energy-technology-perspectives.**

4. **Athina G. Gaglia, Evangelos N. Dialynas, Athanassios A. Argiriou, Effie Kostopoulou, Dimitris Tsiamitros, Dimitris Stimoniaris, Konstantinos M.Laskos.** *Energy performance of European residential buildings: Energy use, technical and environmental characteristics of the Greek residential sector – energy conservation and CO_2 reduction.*

5. **Kalliopi G.Droutsa, Simon Kontoyiannidis, Elena G.Dascalaki, Constantinos A.Balaras.** *Mapping the energy performance of hellenic residential buildings from EPC (energy performance certificate) data.* 2015.

6. **Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία 2013, Δελτίο Τύπου-Έρευνα κατανάλωσης ενέργειας στα νοικοκυριά, 2011-2012.** *https://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SFA40/-.*

7. **E. G. Dascalaki, C. A. Balaras, A. G. Gaglia, K. G. Droutsa, S. Kontoyiannidis.** *Energy performance of buildings—EPBD in Greece.* 2012.

8. **Bjørn Petter Jelle, Andrew Hynd, Arild Gustavsen, Dariush Arasteh, Howdy Goudey, Robert Hart.** *Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities.* 2011.

9. **Αλέξανδρος Μαυράκης.** *Μελέτη φυσικού φωτισμού δίκλινου θαλάμου νοσηλείας με λογισμικό.* Μάιος 2014 .

10. **Δ. Κατσαπρακάκης, Μ. Μονιάκης.** *Βασικά στοιχεία μεταφοράς θερμότητας,.* Τ.Ε.Ι. Κρήτης, 2015.

11. **Α. Ανδρουτσόπουλος.** *Τεχνολογίες κτιριακού κελύφους.* διαθέσιμο στο: http://library.tee.gr/digital/m2414/m2414_androutsopoulos.pdf, 2009.

12. **John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V.** *A heat transfer textbook.* 5th edition, 2019.

13. **Lawrence Berkeley National Laboratory.** *THERM 6.3/ WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual .* July 2013.

14. **Δ. Χουντάλας.** *Φαινόμενα μεταφοράς και εφαρμογές αυτών.* 2η Έκδοση, ΕΜΠ, Τμήμα Μηχανολόγων, Τομέας Θερμότητας.

15. **Μ. Φούντη, Δ. Χουντάλας.** *Μεταφορά Θερμότητας ΙΙ.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας.

16. **L. Marinoski, Saulo Güths, Fernando O.R. Pereira, Roberto Lamberts.** *Improvement of a measurement system for solar heat gain through fenestrations.* 2006.

17. **Erdem Cuce.** *Accurate and reliable U-value assessment of argon-filled double glazes windows: A numerical and experimental investigation.* 2018.

18. **Αθηνά Ρήγα.** *Το γυαλί στις κατασκευές.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Τεχνικών Υλικών, Αθήνα 2011.

19. **Παναγιώτης Ντελαλής.** *Επίδραση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, Αθήνα 2016.

20. **Chunying Li, Junyi Tan, Tin-Tai Chow, Zhongzhu Qiu.** *Experimental and theoretical study on the effect of window films on building energy consumption.* April 2015.

21. **Yueping Fang, Philip C. Eames, Brian Norton, Trevor J.Hyde, Junfu Zhao, Jinlei Wang, Ye Huang.** *Low emittance coatings and the thermal performance of vacuum glazing.* June 2006.

22. **M. Karmele Urbikain.** *Energy efficient solutions for retrofitting a residential multi-storey building with vacuum insulation panels and low-E windows in two European climates.* 2019.

23. **http://glassed.vitroglazings.com/topics/how-Low-e-glass-works.**

24. **Μιχαέλα Παναγιώτα Δέτση.** *Ενεργειακή προσομοίωση θερμοχρωμικών και ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων σε κτίριο γραφείων με μεγάλη εξωτερική γυάλινη επιφάνεια.* Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Θερμότητας, Σεπτέμβριος 2019.

25. **Αναστασία Ακρίβου.** *Το φυσικό φως στο μουσείο.* Ερευνητικό Θέμα, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Σεπτέμβριος 2010.

26. **ΤΕΕ, Τμήμα Ανατολικής και Δυτικής Κρήτης.** *Η ενεργειακή επιθεώρηση στα κτίρια και τη βιομηχανία και η προετοιμασία των μηχανικών στην Κρήτη.* Κεφ. 4.3.4, Οκτώβριος 2005.

27. **Mohammad Arif Kamal.** *A study of shading of buildings as a preventive measure for passive cooling and energy conservation in buildings.* December 2010.

28. **Athanassios Tzempelikos, Andreas K. Athienitis.** *The impact of shading design and control on building cooling and lighting demand .* 2006.

29. **Gyeong Yun, Doo Yong Park, Kang Soo Kim.** *Appropriate activation threshold of the external blind for visual comfort and lighting energy saving in different climate conditions.* November 2016.

30. **Y.C. Chan, A. Tzempelikos.** *Efficient venetian blind control strategies considering daylight utilization and glare protection.* 2013.

31. **Gon Kim, Hong Soo Lim, Tae Sub Lim, Laura Schaefer, Jeong Tai Kim.** *Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings.* November 2011.

32. **Arindam Dutta, Akash Samanta, SubhasisNeogi.** *Influence of orientation and the impact of external window shading on building thermal performance in tropical climate.* January 2017.

33. **Δ. Βερνάρδου.** *Καινοτόμες επιστρώσεις υαλοπινάκων για εξοικονόμηση ενέργειας .* Διατμηματικό εργαστήριο ΣΤΕΦ ΤΕΙ Κρήτης, Κέντρο Τεχνολογίας Υλικών και Λέιζερ .

34. **Παναγιώτα Δημακοπούλου.** *Πειραματική μελέτη φωτο-ηλεκτροχρωμικών διατάξεων .* Τμήμα Φυσικής, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών "Ενέργεια και Περιβάλλον", Πάτρα 2015.

35. **Marco Casini.** *Active dynamic windows for buildings: A review.* December 2017.

36. **Σπύρος Παπαευθυμίου, Γεώργιος Λευθεριώτης, Παναγιώτης Γιαννούλης.** *Δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας σε κτίρια με ενσωμάτωση ηλεκτροχρωμικών παραθύρων.* Εργαστήριο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών .

37. **Dhanaji S. Dalavi, Appasaheb K. Bhosale, Radhika S. Desai, Pramod S. Patil.** *Energy efficient electrochromic smart windows based on highly stable CeO2-V2O5 optically passive counter electrode.* 2020.

38. **Paulo Tavares, Hermano Bernardo, Adélio Gaspar, António Martins.** *Control criteria of electrochromic glasses for energy savings in mediterranean buildings refurbishment.* 2016.

39. **Rickard Tällberg, Bjørn Petter Jelle, Roel Loonen, Tao Gao, Mohamed Hamdy.** *Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies.* 2019.

40. **U.S Department of Energy.** *ENERGYPLUS VERSION 8.6 DOCUMENTATION, Getting Started.* September 2016.

41. **Τεχνική Οδηγία Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2017.** *ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΕΘΝΙΚΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΠΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΚΔΟΣΗ ΤΟΥ ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ Κ.ΕΝ.Α.Κ.* Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017.

42. ***2001 ASHRAE Handbook of Fundamentals.***