



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ**

Διπλωματική Εργασία

**Επίδραση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων  
στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων**

Παναγιώτης Ντελαλής

*Επιβλέπων: Χρήστος Τζιβανίδης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.*

ΑΘΗΝΑ 2016



*"The scientist describes what is; the engineer creates what never was."*

*Theodore von Kármán (11 May 1881 - 7 May 1963)*

## Περίληψη

Ένα σημαντικό ποσοστό της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και έκλυσης ρύπων παγκοσμίως λαμβάνει χώρα στον κτιριακό τομέα, ενώ μεγάλο μέρος αυτών οφείλεται στις ανάγκες για θέρμανση και ψύξη των χώρων. Είναι λοιπόν επιτακτική η εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια και μια βασική μέθοδος για το σκοπό αυτό είναι η χρήση ενεργειακά αποδοτικών υαλοπινάκων, δεδομένου ότι μέσω των ανοιγμάτων του κτιριακού κελύφους μεταφέρονται γενικά πολύ μεγάλες ποσότητες ενέργειας.

Μια θεμελιώδης έννοια που ορίζει και ορίζεται από την κατανάλωση ενέργειας σε ένα κτίριο είναι η ενεργειακή απόδοσή του. Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων. Αυτοί είναι υαλοπίνακες με καινοτόμες ιδιότητες και συγκεκριμένα με δυναμική μεταβολή της διαπερατότητάς τους στην ηλιακή ακτινοβολία, συναρτήσει της θερμοκρασίας τους. Για το σκοπό αυτό της εργασίας, είναι αρχικά αναγκαία η παρουσίαση θεωρητικών στοιχείων που αφορούν την ηλιακή ακτινοβολία. Επίσης, γίνεται ανάπτυξη διαφόρων εννοιών, όπως τα θερμικά και τα ψυκτικά φορτία, η παρουσίαση των οποίων βοηθά τον αναγνώστη στη βαθύτερη κατανόηση τόσο αυτών, όσο και άλλων σχετικών μεγεθών που σχετίζονται με το αντικείμενο της εργασίας. Είναι όμως χρήσιμη και η εκτενής παρουσίαση διαφόρων στοιχείων που αφορούν τους υαλοπίνακες γενικά, όπου μεταξύ άλλων αναφέρονται οι ηλιακές-οπτικές και θερμικές τους ιδιότητες και παρουσιάζονται τα περισσότερα από τα είδη υαλοπινάκων που χρησιμοποιούνται σήμερα (με έμφαση στη χρήση για εξοικονόμηση ενέργειας). Στη βάση αυτή, ακολούθως συμπεριλαμβάνεται βιβλιογραφική έρευνα σχετική με τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες και ανάλυση της συμπεριφοράς τους και του δυναμικού εξοικονόμησης ενέργειας που μπορούν να προσφέρουν, ακριβώς λόγω των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους.

Πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων είναι η ενεργειακή προσομοίωση κτιρίων με χρήση κατάλληλων λογισμικών Η/Υ. Ένα λογισμικό ενεργειακής προσομοίωσης, που προσφέρει πολλές δυνατότητες και χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη, είναι το EnergyPlus. Αρχικά γίνεται παρουσίαση του λογισμικού και του τρόπου με τον οποίο μοντελοποιούνται σε αυτό οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες σε ένα κτίριο, ενώ γίνεται αναφορά και σε σχετικές έρευνες που έχουν γίνει. Για τους σκοπούς της εργασίας, προσομοιώνεται με χρήση του EnergyPlus ένα υποθετικό κτίριο κατοικίας εμβαδού 94 m<sup>2</sup> στην περιοχή της Αθήνας. Γίνεται αναλυτική περιγραφή της υλοποίησης της προσομοίωσης και εκτελούνται ποικίλες προσομοιώσεις, με σκοπό την παραμετρική ανάλυση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα συγκεκριμένων ιδιοτήτων, τη σύγκριση της κατανάλωσης ενέργειας με την αντίστοιχη που επιφέρει η εγκατάσταση άλλων ειδών υαλοπινάκων που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα και τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του θερμοχρωμικού.

Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν τις δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας που μπορούν να προσφέρουν οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες, ιδιαίτερα σε κλίματα με σημαντική ανάγκη ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στο εσωτερικό ενός κτιρίου κατά τη θερινή περίοδο. Η πρόοδος της σχετικής τεχνολογίας κατασκευής τους, που θα επιφέρει ακόμη μεγαλύτερη βελτίωση των ιδιοτήτων τους, μπορεί να οδηγήσει σε επαναστατική τεχνολογία στον τομέα αυτόν των κατασκευών.

## Abstract

A significant amount of total energy consumption and pollutant release on global scale occurs in the building sector, whilst a large part of these is due to needs for space heating and cooling. Therefore, energy savings in buildings are imperative and a basic method for this purpose is the use of energy efficient glazing, given the fact that very large amounts of energy are generally transported through the building envelope openings.

A fundamental concept that defines and is defined by the energy consumption in a building is its energy efficiency. The subject of the present diploma thesis is the study of the effect of thermochromic glazing on building energy efficiency. These are glazing units with innovative properties and particularly dynamically changing solar radiation transmittance as a function of their temperature. For the purpose of this thesis, it is firstly necessary to present theoretical framework regarding solar radiation. Development of various concepts, such as heating and cooling loads, is also carried out, whose presentation helps the reader to a deeper understanding of both of these and other parameters related to the scope of this study. The comprehensive presentation of various elements relating to glazing is, however, also useful, where their solar-optical and thermal properties are mentioned and most of the types of glazing used today are presented (with emphasis on the use for energy savings), among others. On this basis, a literature review related to thermochromic glazing is subsequently included and their behavior and energy saving potential are analyzed, precisely because of their special properties.

A very useful tool for the study of building energy efficiency is building energy simulation using appropriate computer software. An energy simulation software that offers many capabilities and is used in the present study is EnergyPlus. Initially, the software and the way it models thermochromic glazing in a building are presented, while reference is made to relevant research done. For the purposes of this thesis, a hypothetical residential building of 94 m<sup>2</sup> in Athens is simulated using EnergyPlus. A detailed description of the implementation of the simulation is given and various simulations are performed, aiming at the parametric analysis of a thermochromic glazing with specific properties, the comparison of the resulting energy consumption with the corresponding consumption from the installation of other types of glass that are widely used today and the investigation of the behavior of the thermochromic glazing.

The results highlight the potential energy savings that thermochromic glazing can offer, particularly in climates with significant need for control of solar radiation entering the interior of a building during the summer. The progress of the relevant manufacturing technology, which will bring even greater improvement of their properties, can lead to a breakthrough technology in this sector of construction.

## Ευχαριστίες

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας μου και Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Χρήστο Τζιβανίδη για την ανάθεση ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, αλλά και για το ότι ήταν άμεσα διαθέσιμος κάθε φορά που χρειάστηκα την καθοδήγησή του.

Ευχαριστώ επίσης την οικογένειά μου για την υποστήριξη που μου παρείχε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Παναγιώτης Ντελαλής

Αθήνα, Ιούνιος 2016

# Περιεχόμενα

Περίληψη .....	4
Abstract .....	5
Ευχαριστίες .....	6
Περιεχόμενα .....	7
<b>1 Εισαγωγή.....</b>	<b>9</b>
1.1 Κατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα.....	9
1.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια — Ο ρόλος των υαλοπινάκων.....	10
1.3 Σκοπός της εργασίας .....	11
1.4 Δομή της εργασίας.....	12
<b>2 Ενεργειακή απόδοση κτιρίων και χρήσιμο θεωρητικό υπόβαθρο .....</b>	<b>14</b>
2.1 Ενεργειακή απόδοση κτιρίων — Σχετική νομοθεσία.....	14
2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο .....	16
2.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία.....	16
2.2.2 Διάφοροι ορισμοί .....	22
<b>3 Υαλοπίνακες.....</b>	<b>32</b>
3.1 Ιστορικά στοιχεία.....	32
3.2 Επίδραση υαλοπινάκων στον ηλιασμό κτιρίου .....	34
3.3 Ηλιακές-οπτικές και θερμικές ιδιότητες υαλοπινάκων .....	38
3.4 Είδη υαλοπινάκων .....	47
3.5 Κουφώματα.....	77
3.6 Ο ιδανικός υαλοπίνακας.....	90
<b>4 Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες.....</b>	<b>94</b>
4.1 Θερμοχρωμικά υλικά.....	94
4.2 Το διοξείδιο του βαναδίου .....	95
4.3 Βελτίωση των ιδιοτήτων του διοξειδίου του βαναδίου.....	100
4.4 Μέθοδοι κατασκευής θερμοχρωμικών υαλοπινάκων.....	105

4.5 Συμπεριφορά και αποδοτικότητα θερμοχρωμικών υαλοπινάκων .....	117
<b>5 Εισαγωγή στο λογισμικό EnergyPlus και στην ενεργειακή μελέτη κτιρίων με θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες .....</b>	<b>124</b>
5.1 Ενεργειακή προσομοίωση κτιρίων .....	124
5.2 Εισαγωγή στο EnergyPlus .....	127
5.2.1 Γενική περιγραφή – χαρακτηριστικά προγράμματος .....	127
5.2.2 Εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων στο/από το λογισμικό .....	131
5.3 Οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες στο EnergyPlus .....	137
5.4 Σχετική έρευνα .....	143
<b>6 Ενεργειακή προσομοίωση κτιρίου με το EnergyPlus.....</b>	<b>148</b>
6.1 Γενική περιγραφή κτιρίου .....	148
6.2 Σχεδίαση του κτιρίου στο λογισμικό Sketchup .....	149
6.3 Επεξεργασία με το IDF-Editor .....	157
6.4 Μεταβλητά στοιχεία προσομοίωσης .....	192
6.5 Εκτέλεση προσομοίωσης στο EP-Launch .....	199
<b>7 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων .....</b>	<b>202</b>
7.1 Αμετάβλητα γενικά αποτελέσματα .....	202
7.2 Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης θερμοχρωμικού υαλοπίνακα .....	209
7.3 Αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ διαφόρων ειδών υαλοπινάκων .....	212
7.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της συμπεριφοράς των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων της κατοικίας .....	228
<b>8 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....</b>	<b>239</b>
8.1 Συμπεράσματα .....	239
8.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	241
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>242</b>
Ελληνική .....	242
Ξενόγλωσση .....	244
Πηγές σχημάτων .....	247



# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Κατανάλωση ενέργειας στον κτιριακό τομέα

Το ενεργειακό πρόβλημα είναι σήμερα ένα από τα πλέον σημαντικά θέματα της παγκόσμιας κοινότητας. Η ενέργεια είναι ένα αγαθό που εξυπηρετεί κοινωνικές και αναπτυξιακές ανάγκες, παρουσιάζει συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση, ενώ οι επιπτώσεις από τη χρήση της στο περιβάλλον είναι καθοριστικές.

Ο κτιριακός τομέας συμμετέχει γενικά με υψηλό ποσοστό στην κατανάλωση ενέργειας και στην έκλυση ρύπων (και αυτό παρατηρείται εντονότερα στις ανεπτυγμένες χώρες). Είναι υπεύθυνος για το 40% περίπου της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Περίπου 41% της πρωτογενούς ενέργειας που οι ΗΠΑ (ως ο δεύτερος μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας παγκοσμίως, που αντιπροσωπεύει το 19% της παγκόσμιας κατανάλωσης) κατανάλωσαν το 2010 ήταν για τον κτιριακό τομέα. Κατά συνέπεια, το ποσό αυτό αντιστοιχεί περίπου στο 7% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας το 2010. Στα κτίρια στην Κίνα (που είναι ο μεγαλύτερος καταναλωτής παγκοσμίως) καταναλώθηκε το 26% της πρωτογενούς ενέργειας το 2006 – το ποσοστό αναμένεται να αυξηθεί σε πάνω από 30% κατά το 2020. Περίπου 60% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια το 2010, ήταν για θέρμανση και ψύξη χώρων, φωτισμό και εξαερισμό. Η κατανάλωση ενέργειας σε κτίρια είναι ακόμα πιο κυρίαρχη σε θερμές και υγρές περιοχές, χρησιμοποιώντας από το ένα τρίτο έως και την μισή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε μερικές χώρες. Η ενεργειακή αυτή κατανάλωση, είτε σε μορφή θερμικής (κυρίως πετρέλαιο) είτε σε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα, εκτός της σημαντικής οικονομικής επιβάρυνσης λόγω του υψηλού κόστους της ενέργειας, τη μεγάλη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας με ρύπους, κυρίως διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), που ευθύνεται για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε διοξείδιο του άνθρακα έχει ανέβει από ~315 ppm στα τέλη της δεκαετίας του 1950 σε ~400 ppm το 2014 και ο ρυθμός αύξησης έχει σχεδόν τριπλασιαστεί. Είναι ξεκάθαρο ότι πρέπει να παρθούν δραστικά μέτρα για την απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα.

Στην Ελλάδα, τα κτίρια καταναλώνουν περίπου το 67% της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και συμβάλλουν κατά περίπου 43% στις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Το μεγαλύτερο ποσοστό του κτιριακού αποθέματος της χώρας, σχεδόν το 90%, έχει κατασκευαστεί πριν από το 1980. Κατά συνέπεια, υπάρχουν πολλά κτίρια που είναι θερμικά απροστάτευτα και ενεργοβόρα. Σύμφωνα με έρευνα της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ) που πραγματοποιήθηκε κατά το χρονικό διάστημα Οκτωβρίου 2011-Σεπτεμβρίου 2012 με την συνδρομή του Κέντρου Ανανεώσιμων Πηγών & Εξοικονόμησης Ενέργειας (ΚΑΠΕ) προέκυψε ότι κάθε νοικοκυριό της χώρας καταναλώνει κατά μέσο όρο 13.994 kWh ετησίως για την κάλυψη των ενεργειακών του αναγκών. Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας στα ελληνικά κτίρια παρουσιάζει αυξητική τάση. Ο μέσος ρυθμός αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας στα ελληνικά κτίρια είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο ρυθμό αύξησης της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της χώρας. Για παράδειγμα, την περίοδο 2000-2007 ο μέσος

ρυθμός αύξησης στα κτίρια ήταν 2,8% σε σχέση με 1,8% για τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Επομένως υπάρχει τεράστιο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στον κτιριακό τομέα (ιδιαίτερα στην Ελλάδα) και είναι προφανής η ανάγκη ολοένα και μεγαλύτερης λήψης μέτρων για την επίτευξη στόχων προς την κατεύθυνση αυτή.

## **1.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια — Ο ρόλος των υαλοπινάκων**

Ένας από τους βασικούς λόγους για τους οποίους τα ελληνικά κτίρια είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα, είναι η παλαιότητά τους και η μη ενσωμάτωση σύγχρονης τεχνολογίας σε αυτά, λόγω και της έλλειψης σχετικής νομοθεσίας τα προηγούμενα χρόνια.

Πολλά από αυτά τα κτίρια αντιμετωπίζουν θέματα όπως:

- μερική ή παντελή έλλειψη θερμομόνωσης
- παλαιάς τεχνολογίας κουφώματα (πλαίσια/μονοί υαλοπίνακες)
- ελλιπή ηλιοπροστασία των νότιων και δυτικών όψεών τους
- μη επαρκή αξιοποίηση του υψηλού ηλιακού δυναμικού της χώρας
- ανεπαρκή συντήρηση των συστημάτων θέρμανσης/κλιματισμού με αποτέλεσμα χαμηλή απόδοση

Η εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτίριο εξασφαλίζεται εν μέρει με τον κατάλληλο σχεδιασμό του κτιρίου (και του περιβάλλοντα χώρου) και τη χρήση ενεργειακά αποδοτικών δομικών στοιχείων και συστημάτων και εν μέρει μέσω της υψηλής αποδοτικότητας των εγκατεστημένων ενεργειακών συστημάτων, η οποία προϋποθέτει την άριστη ποιότητα του σχετικού εξοπλισμού και της εγκατάστασής του καθώς και των σχετικών τεχνικών μελετών που τον προδιαγράφουν. Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας επίσης συμβάλλει ουσιαστικά στην εξοικονόμηση ενέργειας σε ένα κτίριο. Ιδιαίτερη σημασία για την ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου έχει και η χρήση τεχνικών βιοκλιματικού σχεδιασμού. Με τον όρο αυτό περιγράφεται ο σχεδιασμός, ο οποίος, λαμβάνοντας υπόψη το τοπικό κλίμα, επιδιώκει την επίτευξη των βέλτιστων συνθηκών εσωτερικής άνεσης, με την αξιοποίηση των διαθέσιμων φυσικών πηγών και την ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας. Συνδυασμένες παρεμβάσεις εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια μπορούν να επιφέρουν εξοικονόμηση έως και 60%. Επιπλέον, σημαντικός παράμετρος που καθορίζει την κατανάλωση ενέργειας σε ένα κτίριο είναι και η συμπεριφορά των ενοίκων. Η ελλιπής ενημέρωση των χρηστών-κατοίκων σε θέματα ορθολογικής χρήσης και διαχείρισης της ενέργειας, οδηγεί συχνά σε σπάταλες συμπεριφορές όπως η εγκατάσταση μεμονωμένων κλιματιστικών συστημάτων χωρίς μελέτη, η χρήση συσκευών χαμηλής απόδοσης, ή μη συντήρηση του συστήματος θέρμανσης, κ.ά. Επομένως, άλλος ένας καθοριστικός παράγοντας εξοικονόμησης ενέργειας είναι η ενεργειακή διαχείριση του κτιρίου και η ορθολογική χρήση του, μία συστηματική, οργανωμένη και συνεχής δραστηριότητα που αποτελείται από ένα προγραμματισμένο σύνολο διοικητικών, τεχνικών και οικονομικών δράσεων.

Αναφορικά με τα παράθυρα (και γενικότερα ανοίγματα) των κτιρίων (μιας και η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στον ρόλο τους στην ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου), αναμφισβήτητα συντελούν σε ένα μεγάλο ποσοστό στην ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση και ψύξη των κτιρίων, γιατί μέσω αυτών μεταφέρεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας. Η πυκνότητα ροής θερμότητας (ροή θερμότητας ανά  $m^2$ ) διαμέσου των παραθύρων είναι η μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτές διαμέσου των υπολοίπων δομικών στοιχείων ενός κτιριακού κελύφους. Αυτό συντελεί στην μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας μέσω αυτών, παρά την μικρή συγκριτικά επιφάνειά τους. Το χειμώνα χάνεται θερμότητα από μέσα προς τα έξω, ενώ το καλοκαίρι εισέρχεται θερμότητα από το ζεστό εξωτερικό περιβάλλον. Η διαδικασία αυτή μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με τη χρήση κατάλληλα κατασκευασμένων, ενεργειακά αποδοτικών παραθύρων. Τα παράθυρα αυτά θα πρέπει να έχουν υαλοπίνακες και πλαίσια με καλές θερμομονωτικές και λοιπές ιδιότητες και επιπλέον, θα πρέπει να είναι αεροστεγανά, ώστε να εμποδίζουν τη διαφυγή θερμότητας από χαραμάδες, οι οποίες μπορεί να επιφέρουν σημαντικές απώλειες θερμότητας, όπως παρατηρείται σε κτίρια κακής κατασκευής ή παλαιά. Η χρήση βελτιωμένων ειδικών υαλοπινάκων μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην εξοικονόμηση ενέργειας για τη θέρμανση, ψύξη και φωτισμό των κτιρίων και στη βελτίωση των συνθηκών θερμικής και οπτικής άνεσης που διαμορφώνονται στους εσωτερικούς χώρους. Σύμφωνα με έρευνα του Ολλανδικού Ερευνητικού Ινστιτούτου TNO, στην Ελλάδα θα μπορούσαν να εξοικονομηθούν περισσότερες από 3,4 δισ. kWh ετησίως από την ενέργεια για ψύξη με την αντικατάσταση των απλών τζαμιών και την τοποθέτηση διπλών υαλοπινάκων ηλιακού ελέγχου σε εμπορικά κτήρια και κατοικίες μέχρι το 2020. Η ευκολία αντικατάστασης των υαλοπινάκων, το μικρό σχετικά κόστος και η αντιστρόφως ανάλογη εξοικονόμηση ενέργειας, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η απλούστερη και αποδοτικότερη παρέμβαση που μπορεί να γίνει σε ένα υπάρχον κτίριο για να αναβαθμιστεί ενεργειακά, είναι η αντικατάσταση των υαλοπινάκων με άλλους πιο σύγχρονους, βελτιωμένων ιδιοτήτων. Οι υαλοπίνακες αποτελούν πεδίο με συγκριτικά μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια. Συνεπώς, παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον η μελέτη υποσχόμενων νέων τεχνολογιών που τους αφορούν και που δεν έχουν βρει ακόμα μεγάλη πρακτική εφαρμογή στον κτιριακό τομέα.

### **1.3 Σκοπός της εργασίας**

Το θέμα της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της επίδρασης των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων. Αρχικά γίνεται εκτενής θεωρητική έρευνα, που καλύπτει με λογική σειρά θέματα που το καθένα σχετίζεται με τα υπόλοιπα. Γίνεται διερεύνηση βασικών εννοιών όπως η ενεργειακή απόδοση κτιρίων, η ηλιακή ακτινοβολία και ανάλυση ουσιαστών μεγεθών όπως τα ψυκτικά και θερμικά φορτία κ.λπ. Ακολουθεί αναλυτική μελέτη στοιχείων που αφορούν τους υαλοπίνακες γενικά και η κατάληξη της θεωρητικής έρευνας είναι η έρευνα σχετικά με τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες και τις δυνατότητες που προσφέρουν. Απώτερος σκοπός είναι η μελέτη με χρήση λογισμικού δυναμικής προσομοίωσης (και συγκεκριμένα με το EnergyPlus) της επίδρασης που έχει η ύπαρξη θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίου, συγκριτικά

πάντα με άλλα είδη υαλοπινάκων. Η εξαγωγή των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων από την προσομοίωση αυτή και ο έλεγχος του αν αυτά συμφωνούν με τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν λόγω των ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων, καθώς και με τα αποτελέσματα ερευνών που έχουν γίνει από άλλους, είναι σημεία με ιδιαίτερο ενδιαφέρον – και ειδικά για ένα θέμα σαν αυτό που δεν έχει διερευνηθεί ακόμη σε μεγάλο βαθμό από την επιστημονική κοινότητα, ιδιαίτερα σε εγχώριο, αλλά και σε διεθνές επίπεδο.

## **1.4 Δομή της εργασίας**

### **1 Εισαγωγή**

Δηλώνεται ο σκοπός της εργασίας και γίνεται μια πρώτη εισαγωγή στο θέμα, με αναφορά στην ενεργειακή κατανάλωση των κτιρίων και στον ρόλο των υαλοπινάκων στην προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτά.

### **2 Ενεργειακή απόδοση κτιρίων και χρήσιμο θεωρητικό υπόβαθρο**

Στο κεφάλαιο αυτό, που είναι το πρώτο της θεωρητικής έρευνας, αρχικά μελετάται η έννοια της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων, με αναφορά και στη σχετική νομοθεσία. Ακολουθεί ανάλυση εννοιών από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων, ειδικότερα από τη σκοπιά της αλληλεπίδρασής της με τους υαλοπίνακες. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με αναφορά σε χρήσιμα μεγέθη και έννοιες, τα οποία ο αναγνώστης συναντά παρακάτω στο κείμενο.

### **3 Υαλοπίνακες**

Στο εκτενές αυτό κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορα στοιχεία που αφορούν τους υαλοπίνακες γενικά. Αρχικά γίνεται αναφορά σε ιστορικά στοιχεία από το πεδίο αυτό και στην επίδραση των υαλοπινάκων στον ηλιασμό κτιρίου. Παρακάτω αναλύονται οι ηλιακές-οπτικές και θερμικές ιδιότητες των υαλοπινάκων, μεγέθη πρωταρχικής σημασίας για την λειτουργικότητά τους και την επίδρασή τους στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων. Η ποικιλία των ειδών των υαλοπινάκων που υπάρχουν σήμερα είναι πολύ μεγάλη και καλύπτει από τυπικές έως πολύ εξειδικευμένες εφαρμογές. Η παρουσίαση των περισσότερων από αυτά, βοηθά τον αναγνώστη να κατανοήσει τις δυνατότητες που υπάρχουν, με ιδιαίτερη έμφαση στην εξοικονόμηση ενέργειας. Μετέπειτα γίνεται παρουσίαση στοιχείων που αφορούν τα κουφώματα των ανοιγμάτων των κτιρίων και αναφορά στην έννοια του ιδανικού υαλοπίνακα.

#### **4 Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες**

Με το κεφάλαιο αυτό ολοκληρώνεται η θεωρητική έρευνα, με αναφορά στους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες. Οι υαλοπίνακες αυτοί παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς τους και πιθανώς βρίσκονται τώρα στα πρόθυρα ευρύτερης εφαρμογής. Ύστερα από γενική αναφορά στα θερμοχρωμικά υλικά, μελετάται το διοξείδιο του βαναδίου, που παρουσιάζει πολύ ελπιδοφόρες ιδιότητες για εφαρμογή σε υαλοπίνακες. Αυτές βέβαια επιδέχονται βελτιώσεων και παρουσιάζονται οι σχετικοί τρόποι. Ακολουθεί παρουσίαση των μεθόδων κατασκευής των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων και το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με γενικότερη αναφορά στη συμπεριφορά και αποδοτικότητά τους.

#### **5 Εισαγωγή στο λογισμικό EnergyPlus και στην ενεργειακή μελέτη κτιρίων με θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες**

Αρχικά παρουσιάζεται το λογισμικό Η/Υ EnergyPlus, που είναι εργαλείο ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων. Μετέπειτα αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο το λογισμικό αυτό διαχειρίζεται τη μοντελοποίηση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων σε κτίρια. Ακολουθεί αναφορά σε σχετικές έρευνες που έχουν γίνει για την επίδραση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων με το EnergyPlus, καθώς και με άλλα αντίστοιχα λογισμικά.

#### **6 Ενεργειακή προσομοίωση κτιρίου με το EnergyPlus**

Στο επίσης εκτενές κεφάλαιο αυτό επεξηγούνται αναλυτικά τα βήματα της προσομοίωσης του κτιρίου μελέτης της εργασίας. Αυτά περιλαμβάνουν τη σχεδίασή του, τη μοντελοποίηση της λειτουργίας του και εισαγωγή των απαραίτητων παραμέτρων της προσομοίωσης, καθώς και την εκτέλεση της προσομοίωσης και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Πραγματοποιήθηκαν διάφορες προσομοιώσεις, μέσω μεταβολής συγκεκριμένων στοιχείων κάθε φορά.

#### **7 Αποτελέσματα προσομοιώσεων**

Εδώ παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των διάφορων προσομοιώσεων, τα οποία ενδιαφέρουν για την εξαγωγή των ζητούμενων συμπερασμάτων.

#### **8 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα**

Στο τελευταίο αυτό κεφάλαιο γίνεται σύντομη ανασκόπηση της εργασίας, αναφέρονται τα τελικά συμπεράσματα που εξήχθησαν και προτείνονται μελλοντικές εργασίες για περαιτέρω έρευνα.

## **2 Ενεργειακή απόδοση κτιρίων και χρήσιμο θεωρητικό υπόβαθρο**

### **2.1 Ενεργειακή απόδοση κτιρίων — Σχετική νομοθεσία**

Η ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου προσδιορίζεται βάσει της υπολογιζόμενης ή μετρούμενης ετήσιας ενέργειας που καταναλώνεται, προκειμένου να καλυφθούν οι διάφορες ανάγκες που σχετίζονται με την τυπική χρήση του, ώστε να διατηρούνται οι επιθυμητές συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας εντός αυτού. Λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως η θέρμανση, το ζεστό νερό, ο κλιματισμός, ο φωτισμός και τα χαρακτηριστικά του κελύφους, με επίκεντρο τις ενεργειακές απώλειες και τα ενεργειακά οφέλη.

Ο ρόλος της εγχώριας, ευρωπαϊκής και παγκόσμιας ενεργειακής πολιτικής στην εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα είναι ουσιαστικός. Το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ε.Ε. εξέδωσαν στις 16 Δεκεμβρίου του 2002 την Οδηγία 2002/91/ΕΚ για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων με την οποία έπρεπε τα κράτη μέλη να συμμορφωθούν μέχρι τον Ιανουάριο του 2006. Η οδηγία αυτή έθεσε απαιτήσεις ενεργειακής κατανάλωσης για την θέρμανση, την ψύξη, τον φωτισμό και την ηλεκτρική χρήση στα κτίρια. Στα πλαίσια της οδηγίας προβλέπεται ο έλεγχος της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και η έκδοση σχετικού πιστοποιητικού. Ακολούθησε η αναδιτύπωση της Οδηγίας 2002/91/ΕΚ από την Οδηγία 2010/31/ΕΕ της 19ης Μαΐου 2010. Αυτή αποτελεί την κύρια υπάρχουσα νομοθετική πράξη σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων και αποσκοπεί στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων στην ΕΕ, λαμβάνοντας υπόψη διάφορες κλιματολογικές και τοπικές συνθήκες. Θεσπίζει ελάχιστες απαιτήσεις και κοινή μεθοδολογία, ενώ καλύπτει την ενέργεια που χρησιμοποιείται για θέρμανση, ζεστό νερό, ψύξη, εξαερισμό και φωτισμό. Επίσης, δίνεται έμφαση στην επίτευξη των πιο μακροπρόθεσμων στόχων της Οδηγίας, στα κτίρια σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας (nearly Zero-Energy Buildings – nZEB), που είναι κτίρια πολύ υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Τα κτίρια που ανήκουν σε δημόσιες αρχές και χρησιμοποιούνται από αυτές θα πρέπει να επιτυγχάνουν κατάσταση σχεδόν μηδενικής κατανάλωσης ενέργειας έως τις 31 Δεκεμβρίου 2018 και τα υπόλοιπα νέα κτίρια έως 2 χρόνια αργότερα. Όταν υποβάλλονται σε ανακαίνιση μεγάλης κλίμακας, τα υφιστάμενα κτίρια πρέπει να αναβαθμίζουν την ενεργειακή απόδοσή τους για να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις της Ε.Ε.

Σχετικά με την κατάσταση στην Ελλάδα, η πρώτη ουσιαστικά προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας στον κτιριακό τομέα έγινε το 1979 με τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων (ΦΕΚ 362Δ/1979). Ο κανονισμός αυτός ήταν σχετικά ελαστικός, και εφαρμόστηκε υποχρεωτικά από το 1979 μέχρι το 2010 χωρίς καμία τροποποίηση. Χαρακτηριστικό του κανονισμού σε σχέση με τους υαλοπίνακες ήταν ότι έγινε υποχρεωτική η χρήση διπλών υαλοπινάκων σε νέα κτίρια, έτσι ώστε να πληρούνται οι απαιτήσεις του. Στο πλαίσιο της Κοινοτικής Οδηγίας 2002/91/ΕΚ, το πρώτο βήμα για την εναρμόνισή μας με την οδηγία αυτή ήταν η έκδοση του ν. 3661/2008 (ΦΕΚ Α΄ 89) «Μέτρα για τη μείωση της Ενεργειακής Κατανάλωσης των

Κτιρίων και άλλες διατάξεις». Βάσει του νόμου υπήρχε η υποχρέωση έκδοσης σχετικού «Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης κτιρίων» (Κ.Εν.Α.Κ.) στον οποίο, μεταξύ άλλων, θα πρέπει να καθορίζονται οι ελάχιστες τεχνικές προδιαγραφές και απαιτήσεις ενεργειακής απόδοσης των νέων και ριζικά ανακαινιζόμενων, καθώς και η μεθοδολογία υπολογισμού της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων (ημι-σταθερής κατάστασης μηνιαίου βήματος του ευρωπαϊκού προτύπου ΕΛΟΤ EN ISO 13790 και των λοιπών σχετικών προτύπων). Ο Κ.Εν.Α.Κ. αντικατέστησε τον Κανονισμό Θερμομόνωσης Κτιρίων το 2010. Η εναρμόνισή μας με τη νέα Οδηγία 31/2010/ΕΚ έγινε με την έκδοση του νέου νόμου 4122/2013 (ΦΕΚ Α' 42) «Ενεργειακή Απόδοση Κτιρίων - Εναρμόνιση με την οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου και λοιπές διατάξεις».

Το Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ), με σκοπό την υποστήριξη της αποτελεσματικής εφαρμογής του Κ.Εν.Α.Κ., κατάρτισε σε συνεργασία με την πολιτεία τις απαραίτητες Τεχνικές Οδηγίες (ΤΟΤΕΕ), οι οποίες εξειδικεύουν τα πρότυπα των μελετών και των επιθεωρήσεων της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων, στα Ελληνικά κλιματικά και κτιριακά δεδομένα. Παράλληλα, ανέπτυξε ειδικό λογισμικό (ΤΕΕ-ΚΕΝΑΚ) για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης και κατάταξης (βαθμονόμησης) των κτιρίων, τόσο κατά την διαδικασία ενεργειακών επιθεωρήσεων, όσο και κατά την εκπόνηση μελέτης ενεργειακής απόδοσης.

Με την έκδοση του Κανονισμού Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.) και τις συνοδευτικές Τεχνικές Οδηγίες (ΤΟΤΕΕ), με τη σύσταση του σώματος των Ενεργειακών Επιθεωρητών (π.δ. 100/2010) και τη συγκρότηση της Ειδικής Υπηρεσίας Επιθεωρητών Ενέργειας (ΕΥΕΠΕΝ), εφαρμόζεται και στη χώρα μας νομοθεσία για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων, η οποία περιλαμβάνει:

α) εκπόνηση Μελέτης Ενεργειακής Απόδοσης κατά την έκδοση άδειας δόμησης για νέα ή ριζικά ανακαινιζόμενα κτίρια και

β) έκδοση Πιστοποιητικών Ενεργειακής Απόδοσης (ΠΕΑ) κατά την πώληση και μίσθωση κτιρίων και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής νέων ή ριζικά ανακαινιζόμενων κτιρίων. Με αυτό τα κτίρια κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες ενεργειακής απόδοσης (Α+, Α, Β+, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ & Η), οι οποίες καθορίζονται από ένα εύρος τιμών κατανάλωσης ενέργειας για κάθε χρήση κτιρίου και κλιματική ζώνη. Η κατάταξη του κτιρίου γίνεται βάσει της υπολογιζόμενης συνολικής κατανάλωσης (πρωτογενούς) ενέργειας σε  $[kWh/m^2]$ .

Ουσιαστικός είναι επίσης ο ρόλος της πολιτείας στην θέσπιση κινήτρων για την βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης υφιστάμενων και νέων κτιρίων και γενικότερα την εξοικονόμηση ενέργειας σε αυτά.

Τέλος, σημαντική είναι η έννοια της περιβαλλοντικής πιστοποίησης κτιρίου, που είναι μια διαδικασία κατά την οποία αξιολογείται και επιβεβαιώνεται η βιώσιμη απόδοση ενός κτιρίου, και παρέχεται εξασφάλιση ποιότητας. Η περιβαλλοντική πιστοποίηση κτιρίου μπορεί να γίνει με μια ή περισσότερες μεθόδους. Οι πλέον γνωστές και παγκοσμίως αναγνωρισμένες μέθοδοι είναι:

- LEED Certification
- BREEAM
- DGNB
- HQE

## 2.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

Ακολουθεί παράθεση χρήσιμων θεωρητικών στοιχείων που σχετίζονται με το αντικείμενο μελέτης της εργασίας. Αρχικά γίνεται αναφορά στην ηλιακή ακτινοβολία, ενώ ακολουθεί ανάπτυξη ορισμών κάποιων μεγεθών και εννοιών που αναφέρονται σε επόμενα κεφάλαια. Βασικές έννοιες από την μεταφορά θερμότητας σε κτιριακό κέλυφος θεωρούνται γνωστές και ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει σε σχετική βιβλιογραφία. Στην παρούσα εργασία γίνεται ιδιαίτερη αναφορά (στο επόμενο κεφάλαιο) σε έννοιες μεταφοράς θερμότητας που σχετίζονται με τους υαλοπίνακες.

### 2.2.1 Ηλιακή ακτινοβολία

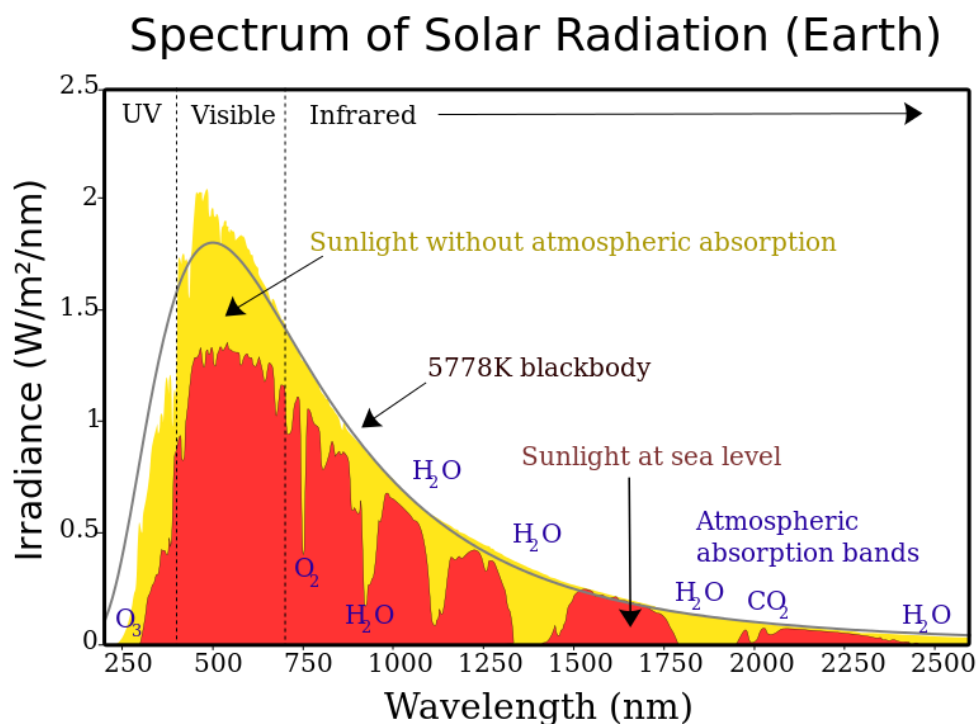
Η ηλιακή ακτινοβολία είναι παράγοντας που επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την θερμική και ενεργειακή συμπεριφορά ενός κτιρίου. Συμβάλλει στην θέρμανση των δομικών στοιχείων του κελύφους, ενώ μέσω των υαλοπινάκων μέρος της εισέρχεται και στον εσωτερικό χώρο του κτιρίου. Η εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στον χώρο, απορροφάται από τα διάφορα υλικά αυξάνοντας τη θερμοκρασία τους. Οπότε ο ρόλος της ηλιακής ακτινοβολίας στην συμπεριφορά ενός κτιρίου είναι πολύπλευρος. Στην προσπάθεια ελέγχου και ορθής αξιοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας είναι σημαντική η κατανόηση των χαρακτηριστικών της ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και της ηλιακής γεωμετρίας.

Το φάσμα της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας είναι κοντινό σε μορφή με αυτό ενός μέλανος σώματος θερμοκρασίας περίπου 5800 K. Ο ήλιος εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σχεδόν σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Αν και εκπέμπει ακτίνες  $\gamma$  ως αποτέλεσμα πυρηνικής σύντηξης, αυτά τα υπερ-υψηλής ενέργειας φωτόνια μετατρέπονται σε χαμηλότερης προτού φτάσουν στην επιφάνεια του ηλίου και εκπεμφθούν στο διάστημα. Σαν αποτέλεσμα, ο ήλιος δεν εκπέμπει ακτίνες  $\gamma$  από αυτή την διεργασία, παρά μόνο μέσω των ηλιακών εκλάμψεων. Εκπέμπει όμως ακτίνες X, υπεριώδη ακτινοβολία, ορατή ακτινοβολία (φως), υπέρυθη ακτινοβολία και ραδιοκύματα. Αν και το συνολικό φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας περιλαμβάνει ακτίνες X και μικροκύματα-ραδιοκύματα, αυτές οι ακτινοβολίες συντελούν ένα πολύ μικρό μέρος της ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας. Παράλληλα, συντελείται και απορρόφηση κατά την διαδρομή της ακτινοβολίας προς την γη. Το φάσμα λοιπόν σχεδόν όλης της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο περίβλημα της ατμόσφαιρας της γης κυμαίνεται πρακτικά από 0,2 έως περίπου 3  $\mu\text{m}$ . Η ηλιακή ακτινοβολία κατά την διέλευση στην ατμόσφαιρα υπόκειται και εξασθένηση αφ' ενός λόγω διασκορπισμού από τα μόρια του αέρα, του υδρατμού και της σκόνης και αφ' ετέρου λόγω απορρόφησης από τα  $\text{O}_3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ . Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της γης βρίσκεται κυρίως στην περιοχή μηκών κύματος 0,3 – 2,5  $\mu\text{m}$ , περιλαμβάνοντας το ορατό φως μεταξύ 0,4 και 0,7  $\mu\text{m}$  και το κοντινό



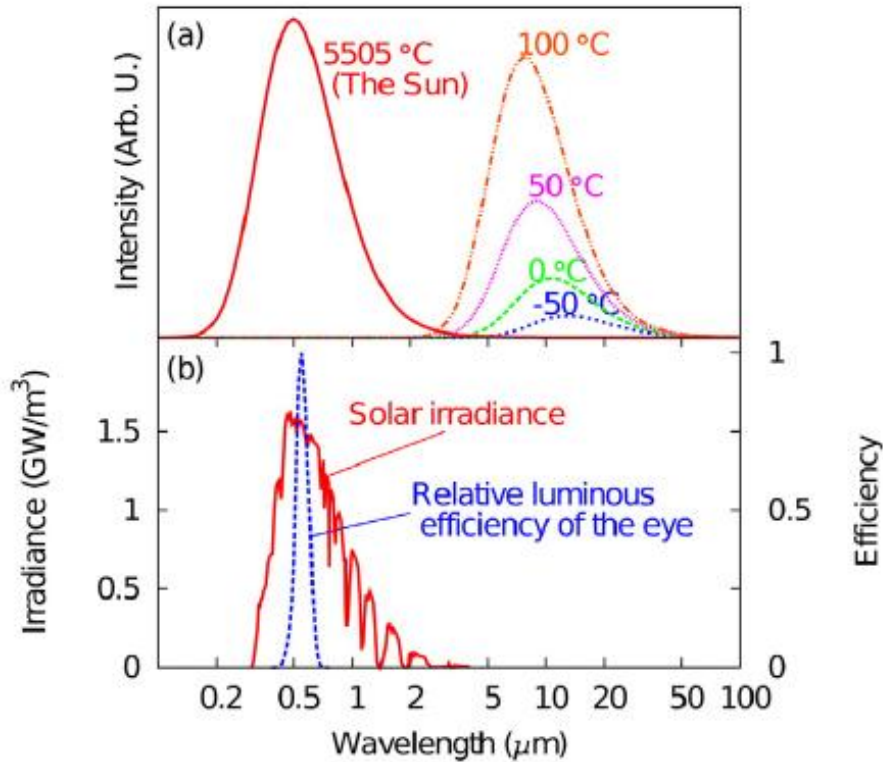
υπέρουθρο (near-IR – NIR) μεταξύ 0,7 και 2,5  $\mu\text{m}$ . Το ορατό μέρος φέρει περίπου το 42,8% της συνολικής ηλιακής ενέργειας και το NIR περίπου το 52,5%.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται τυπική μορφή του φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο περίβλημα της ατμόσφαιρας και (ενδεικτικά) στην επιφάνεια της γης. Διακρίνονται οι ζώνες απορρόφησης από αέρια της ατμόσφαιρας και η καμπύλη φάσματος ακτινοβολίας μέλανος σώματος 5778 K.



**Σχήμα 2.1:** Φασματική κατανομή προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο περίβλημα της ατμόσφαιρας και στην επιφάνεια της γης.

Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τυπικά στοιχεία για το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας και το φάσμα που αντιλαμβάνεται το ανθρώπινο μάτι:



Σχήμα 2.2: (α) Φάσματα ακτινοβολίας μελάνων σωμάτων για διάφορες θερμοκρασίες (συμπεριλαμβανομένης της θερμοκρασίας της επιφάνειας του ηλίου), (β) Τυπικό φάσμα προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας για καθαρό ουρανό και στην επιφάνεια της θάλασσας – και σχετική ευαισθησία του προσαρμοσθέντος στο φως ανθρώπινου ματιού.

Στο σημείο αυτό να σημειωθεί ότι όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα εκπομπής (δηλαδή μικρότερο μήκος κύματος), τόσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια που μεταφέρεται από την ακτινοβολία.

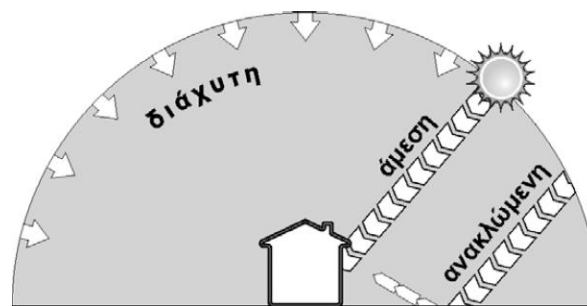
Γενικώς, περίπου το 35% της ακτινοβολίας που φτάνει στα όρια της ατμόσφαιρας ανακλάται πίσω στο διάστημα και το υπόλοιπο φτάνει στη γη. Η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στη γη αποτελείται από δύο επί μέρους συνιστώσες:

- Από την άμεση ακτινοβολία (δέσμη παράλληλων ακτίνων προερχόμενη απευθείας από τον ήλιο). Η άμεση ακτινοβολία έχει διεύθυνση που καθορίζεται από τη θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο (ηλιακή γεωμετρία). Γωνία πρόσπτωσης της αμέσου ακτινοβολίας πάνω σε μία επιφάνεια είναι η γωνία μεταξύ των προσπίπτουσών ηλιακών ακτίνων και της καθέτου στην επιφάνεια.
- Από τη διάχυτη ακτινοβολία (μετά από σκέδαση σε αιωρούμενα σωματίδια της ατμόσφαιρας). Η διάχυτη ακτινοβολία δεν έχει συγκεκριμένη διεύθυνση και το ποσοστό της εξαρτάται από το ύψος ηλίου, το υψόμετρο του τόπου, την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε αιωρούμενα σωματίδια, το μέγεθος

και το είδος των νεφών και την ανακλαστικότητα του εδάφους (λευκάυγεια – albedo).

Από την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης, ένα μέρος απορροφάται και εκπέμπεται ως θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος και είναι η γήινη ακτινοβολία και ένα μέρος ανακλάται ως ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος και είναι η ανακλώμενη ακτινοβολία.

Επομένως, η ολική ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται μια κεκλιμένη επιφάνεια αποτελείται από την άμεση ακτινοβολία, τη διάχυτη ακτινοβολία και την (συνήθως διάχυτα) ανακλώμενη από το έδαφος ακτινοβολία.



Σχήμα 2.3: Συνιστώσες της ηλιακής ακτινοβολίας.

Σχετικά με την ένταση της (προσπίπτουσας) ηλιακής ακτινοβολίας, ορίζεται ως η ενέργεια που δέχεται στη μονάδα του χρόνου η μονάδα της επιφάνειας που τοποθετείται κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της ακτινοβολίας. Οι μονάδες μέτρησής της είναι:  $W/m^2$ , ή  $kcal/cm^2/h$  ή  $cal/cm^2/min$ . Εξαρτάται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Από αστρονομικούς παράγοντες:
  - Τη μεταβολή της απόστασης γης-ηλίου (η μείωση ανάλογη με το μήκος της διαδρομής). Στην μέση απόσταση και εκτός ατμόσφαιρας είναι  $1353 W/m^2$  και είναι η τιμή της λεγόμενης ηλιακής σταθεράς.
  - Το ύψος του ηλίου πάνω από τον ορίζοντα. Όσο πιο μικρή είναι η γωνία πρόσπτωσης στο οριζόντιο επίπεδο μιας περιοχής, τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαδρομή της ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα και η μείωση της έντασής της.
- Από γεωγραφικούς παράγοντες:
  - Το γεωγραφικό πλάτος, διότι επηρεάζει τον υπολογισμό του μέγιστου ύψους του ηλίου, της ηλιοφάνειας και των ημερήσιων ποσών ηλιακής ακτινοβολίας.
  - Το ύψος του σημείου μέτρησης από την επιφάνεια της θάλασσας.
  - Την τοπογραφία του ορίζοντα στο σημείο παρατήρησης.
  - Το είδος και της υφή της επιφάνειας που δέχεται την ακτινοβολία.
  - Την κατάσταση της ατμόσφαιρας (νεφοκάλυψη, ρύπανση).
- Από γεωμετρικούς παράγοντες:
  - Τον προσανατολισμό της επιφάνειας.
  - Την κλίση της επιφάνειας.

Η ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας μεγιστοποιείται σε καθαρή ατμόσφαιρα και όταν η ακτινοβολία προσπίπτει σε επίπεδο κάθετο προς τις ηλιακές ακτίνες. Η ένταση της διάχυτης ακτινοβολίας εξαρτάται από την περιεκτικότητα της ατμόσφαιρας σε αιωρούμενα σωματίδια, το ποσό και το είδος των νεφών και την ανακλαστικότητα του εδάφους.

Στην Ελλάδα παρατηρείται αύξηση των τιμών της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας από βορρά προς νότο με μεγαλύτερες τιμές στη Ρόδο και Κρήτη (5860-6100 MJ/m<sup>2</sup>/έτος). Οι μέσες μηνιαίες τιμές κυμαίνονται από 150 έως 780 MJ/m<sup>2</sup>/μήνα. Οι μηνιαίες τιμές της χειμερινής περιόδου είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες της θερινής (το χειμώνα επικρατεί γενικά μεγαλύτερη νέφωση και επίσης μικρότερο ύψος ηλίου). Οι μεγαλύτερες μέσες μηνιαίες τιμές παρατηρούνται τον Ιούλιο (τότε επικρατούν οι ετήσιοι άνεμοι, με αποτέλεσμα τη νεφοδιάλυση). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται για την ελληνική επικράτεια η μέση ετήσια ακτινοβολία, προσπίπτουσα σε οριζόντιο επίπεδο (σε kWh/m<sup>2</sup>), με βάση στοιχεία της περιόδου 1994-2013:

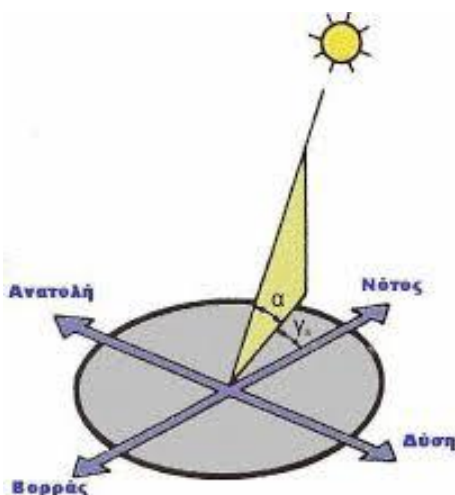


**Σχήμα 2.4:** Μέση ετήσια ακτινοβολία, προσπίπτουσα σε οριζόντιο επίπεδο, σε περιοχές της Ελλάδας.

Ουσιαστικό ρόλο στον ηλιασμό, για παράδειγμα ενός κτιρίου, κατέχει, όπως είναι προφανές, η θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο. Αυτή προκύπτει από την ηλιακή γεωμετρία που την προσδιορίζει, για κάθε γεωγραφικό μήκος και πλάτος, τόσο σε εποχιακό επίπεδο, όσο και σε ωριαίο επίπεδο στο διάστημα της ημέρας. Η θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο προσδιορίζεται από την στερεά γωνία του, η οποία αναλύεται στις παρακάτω συνιστώσες:

- Το ηλιακό ύψος, που είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ευθεία όρασης του ηλίου και την προβολή της στο οριζόντιο επίπεδο.
- Το αζιμούθιο ηλίου, που είναι η γωνία μεταξύ της προβολής της ευθείας όρασης του ηλίου στο οριζόντιο επίπεδο και της νότιας κατεύθυνσης.

Οι δύο προαναφερθείσες συνιστώσες φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.5: Ηλιακό ύψος ( $\alpha$ ) και αζιμούθιο ηλίου ( $\gamma_s$ ).

Ο προσδιορισμός του ηλιασμού ενός κτιρίου βασίζεται στη συσχέτιση των γεωμετρικών δεδομένων του κτιρίου με τα γεωμετρικά δεδομένα της εκάστοτε θέσης του ηλίου.

Για τον ηλιασμό των υπαίθριων αστικών χώρων (οριζόντιες επιφάνειες), το αζιμούθιο του ηλίου έχει πολύ μικρή σημασία, ενώ το ηλιακό ύψος προσδιορίζει κυρίως την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Στις κατακόρυφες επιφάνειες (κτιριακά μέτωπα) οι τιμές αζιμουθίου και ηλιακού ύψους παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο (π.χ. χαμηλό ύψος – ικανοποιητικό για ηλιασμό και γωνία πλάγιας πρόσπτωσης λόγω αζιμουθίου, σχεδόν παράλληλη της πρόσοψης). Τα πολύ χαμηλά ηλιακά ύψη ( $5^{\circ}$ - $7^{\circ}$ ) δεν δημιουργούν παραδεκτές συνθήκες ηλιασμού (η μέση απόσταση που διανύει η ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα αυξάνει την ανάκλαση και τη διάχυση της ακτινοβολίας, καθιστώντας την ανενεργή).

Αξίζει να αναφερθούν και τα ακόλουθα μεγέθη:

- Γωνία ζενίθ: είναι η γωνία που σχηματίζεται από την κατακόρυφο και την ευθεία όρασης του ηλίου (είναι συμπληρωματική γωνία του ηλιακού ύψους).
- Αέριος μάζα: είναι ο λόγος της οπτικής διαδρομής της άμεσου ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα προς την οπτική διαδρομή αν ο ήλιος βρισκόταν στο ζενίθ (μηδενική γωνία ζενίθ). Η αέριος μάζα λοιπόν εξαρτάται από την θέση του ηλίου στην τροχιά ανύψωσής του στον ουράνιο θόλο, οπότε μεταβάλλεται μέσα στην ημέρα, με την πάροδο των εποχών και με το γεωγραφικό πλάτος του παρατηρητή. Έξω από την ατμόσφαιρα λαμβάνεται μηδενική.
- Ηλιακή απόκλιση: είναι η γωνία μεταξύ της ευθείας που ενώνει τα κέντρα γης-ηλίου και του ισημερινού. Μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους με την περιφορά της γης γύρω από τον ήλιο. Οι ακραίες τιμές για το βόρειο ημισφαίριο είναι  $+23,45^\circ$  στις 21 Ιουνίου (θερινό ηλιοστάσιο) έως  $-23,45^\circ$  στις 21 Δεκεμβρίου (χειμερινό ηλιοστάσιο).

### 2.2.2 Διάφοροι ορισμοί

Ακολουθεί λεπτομερής ανάπτυξη ορισμών διαφόρων μεγεθών και εννοιών, για τα οποία γίνεται αναφορά στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

#### Θερμικό κέρδος χώρου

Θερμικό κέρδος χώρου (heat gain) είναι ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα εισέρχεται ή παράγεται μέσα στο χώρο σε μία ορισμένη χρονική στιγμή. Το θερμικό κέρδος προέρχεται από:

- 1) Ηλιακή ακτινοβολία μέσω διαφανών επιφανειών
- 2) Αγωγή θερμότητας διαμέσου των εξωτερικών τοίχων και οροφών
- 3) Αγωγή θερμότητας διαμέσου εσωτερικών χωρισμάτων (τοίχοι, δάπεδα, οροφές)
- 4) Παραγωγή θερμότητας μέσα στο χώρο (άνθρωποι, φωτισμός, συσκευές)
- 5) Ανανέωση και διείσδυση εξωτερικού αέρος

Άλλος διαχωρισμός του θερμικού κέρδους είναι σε αισθητό και λανθάνον κέρδος. Το θερμικό κέρδος ονομάζεται αισθητό όταν πρόκειται για άμεση απόδοση θερμότητας στο χώρο με τους γνωστούς μηχανισμούς μετάδοσης θερμότητας (αγωγή, συναγωγή, ακτινοβολία), ενώ ονομάζεται λανθάνον όταν προστίθεται στο χώρο υδρατμός. Το θερμικό κέρδος που οφείλεται στην ακτινοβολία απορροφάται μερικώς από τα δομικά στοιχεία και το περιεχόμενο του χώρου, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας τους. Όταν αυτή γίνει μεγαλύτερη της θερμοκρασίας του αέρα του χώρου, μέρος της θερμότητάς που βρίσκεται σε αυτά μεταφέρεται με συναγωγή στον αέρα του χώρου. Υπάρχει δηλαδή μία χρονική καθυστέρηση μεταξύ της αποθήκευσης της θερμότητας (στα δομικά στοιχεία και το περιεχόμενο του

χώρου) και της αποβολής της, για το θερμικό κέρδος που οφείλεται στην ακτινοβολία. Κατά την επιλογή της ψυκτικής συσκευής του χώρου, για την ψύξη ενός χώρου, πρέπει να γίνεται διάκριση του θερμικού κέρδους σε αισθητό και λανθάνον, διότι οι συσκευές έχουν διαφορετική μέγιστη ικανότητα απομάκρυνσης αισθητού και λανθάνοντος φορτίου.

#### Ψυκτικό φορτίο χώρου

Ψυκτικό φορτίο χώρου (cooling load) είναι ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα πρέπει να απομακρύνεται από τον χώρο, κατά την ψύξη του, ώστε η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα του χώρου να παραμένει σταθερή. Γενικά, η τιμή του ψυκτικού φορτίου και του θερμικού κέρδους κατά την ίδια χρονική στιγμή διαφέρουν μεταξύ τους. Δημιουργείται μεταξύ τους μια διαφορά φάσης, λόγω του μηχανισμού αποθήκευσης της θερμότητας και αποβολής της με χρονική καθυστέρηση που περιγράφηκε προηγουμένως στην παράγραφο για το θερμικό κέρδος. Σε 24ωρη βάση, τα ποσά θερμότητας λόγω θερμικού κέρδους και λόγω ψυκτικού φορτίου είναι ίσα. Η εκλογή του μεγέθους του ψυκτικού μηχανήματος επηρεάζεται σημαντικά από το φαινόμενο της συσσώρευσης της θερμότητας – η μέγιστη τιμή του ψυκτικού φορτίου είναι αισθητά μικρότερη του μεγίστου θερμικού κέρδους. Ο ρυθμός απομάκρυνσης θερμότητας από τον χώρο είναι ίσος με το ψυκτικό φορτίο μόνο όταν η θερμοκρασία αέρος του χώρου διατηρείται σταθερή, πράγμα που σπάνια συμβαίνει. Συνήθως, το σύστημα ελέγχου (θερμοστάτης) σε συνδυασμό με την διακοπτόμενη λειτουργία της ψυκτικής συσκευής προκαλεί ταλάντωση της θερμοκρασίας του χώρου.

#### Θερμικό φορτίο χώρου

Θερμικό φορτίο χώρου (heating load) είναι ο ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα πρέπει να προσδίδεται στον χώρο, κατά την θέρμανσή του, ώστε η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα του χώρου να παραμένει σταθερή. Η τιμή του θερμικού κέρδους κατά την περίοδο του χειμώνα (όπου αναφέρεται κυρίως το θερμικό φορτίο) λειτουργεί συμπληρωματικά και υποστηρίζει την τιμή του θερμικού φορτίου. Ο ρυθμός πρόσδοσης θερμότητας στον χώρο είναι ίσος με το θερμικό φορτίο μόνο όταν η θερμοκρασία αέρος του χώρου διατηρείται σταθερή, πράγμα που σπάνια συμβαίνει. Συνήθως, το σύστημα ελέγχου (θερμοστάτης) σε συνδυασμό με την διακοπτόμενη λειτουργία της θερμαντικής συσκευής προκαλεί ταλάντωση της θερμοκρασίας του χώρου.

Η διάκριση μεταξύ ψυκτικού και θερμικού φορτίου ουσιαστικά δεν ορίζει ούτε ορίζεται από την διαδικασία υπολογισμού των φορτίων κάθε εποχής, ορίζει όμως την εικόνα και τα αίτια της ύπαρξης των φορτίων. Επιπλέον, είναι δυνατή η εμφάνιση και των δύο ειδών φορτίων κατά την ίδια εποχή. Για παράδειγμα, τον χειμώνα σε κτίριο με μεγάλη ισχύ φωτισμού και εξοπλισμού, με αποτέλεσμα μεγάλη παραγωγή

θερμότητας, είναι δυνατή κατά διαστήματα η εμφάνιση ψυκτικών φορτίων αντί των θερμικών.

### Θερμική ζώνη κτιρίου

Η θερμική ζώνη κτιρίου (thermal zone) ορίζεται ως σύνολο (ομάδα) χώρων μέσα στο κτίριο με όμοιες απαιτούμενες εσωτερικές συνθήκες και χρήση. Πρακτικά, μπορεί επίσης να οριστεί ως το σύνολο του όγκου αέρα που βρίσκεται σε ομοιόμορφη θερμοκρασία, μαζί με τις επιφάνειες μεταφοράς και αποθήκευσης θερμότητας που βρίσκονται στο σύνορο ή στο εσωτερικό του όγκου αυτού. Οι θερμικές ζώνες καθορίζονται με βάση τα παρακάτω κριτήρια:

- 1) Η επιθυμητή θερμοκρασία των εσωτερικών χώρων διαφέρει περισσότερο από 4 K για τη χειμερινή ή/και τη θερινή περίοδο.
- 2) Υπάρχουν χώροι με διαφορετική χρήση / λειτουργία.
- 3) Υπάρχουν χώροι στο κτίριο που καλύπτονται με διαφορετικά συστήματα θέρμανσης ή/και ψύξης ή/και κλιματισμού λόγω διαφορετικών εσωτερικών συνθηκών.
- 4) Υπάρχουν χώροι στο κτίριο που παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές εσωτερικών ή/και ηλιακών κερδών\* ή/και θερμικών απωλειών.
- 5) Υπάρχουν χώροι όπου το σύστημα του μηχανικού αερισμού καλύπτει λιγότερο από το 80% της επιφάνειας κάτοψης του χώρου.

Τα περισσότερα κτίρια έχουν περισσότερες από μία θερμικές ζώνες και κάθε ζώνη μπορεί να έχει αρκετά διαφορετικά κέρδη και απώλειες σε κάθε χρονική στιγμή σε σχέση με τις υπόλοιπες. Επομένως, σε ένα κτίριο με διάφορες θερμικές ζώνες είναι δυνατόν κατά την ίδια χρονική στιγμή άλλες μεν ζώνες να απαιτούν θέρμανση, ενώ άλλες ψύξη. Κατά το σχεδιασμό των συστημάτων θέρμανσης/ψύξης η κάθε θερμική ζώνη προσδιορίζεται ως μια περιοχή που λειτουργεί με βάση ένα σημείο ή κόμβο ελέγχου (π.χ. θερμοστάτη), που μπορεί να διαφοροποιείται ανάλογα με τη χρήση (π.χ. διαφορετική ρύθμιση θερμοκρασίας). Έτσι, ο έλεγχος των συστημάτων καθίσταται απλούστερος και αποδοτικότερος. Τα συστήματα στα περισσότερα μεγάλα κτίρια είναι σχεδιασμένα ώστε να μπορούν να καλύπτουν τις ανάγκες όλων των θερμικών ζωνών του κτιρίου (κεντρικά συστήματα) και πρέπει να είναι σε θέση ταυτόχρονα να θερμαίνουν μία ζώνη και να ψύχουν μία άλλη. Σημαντικό ρόλο στην διαφοροποίηση των αναγκών μιας θερμικής ζώνης από μία άλλη συνήθως έχει το αν αυτή έχει μόνο εσωτερικά κέρδη (από ανθρώπους, φωτισμό και εξοπλισμό) ή και ηλιακά κέρδη σε μία χρονική στιγμή.

---

\* Τα ηλιακά (θερμικά) κέρδη είναι οι θερμικές πρόσοδοι εντός του κτιρίου μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας και της μετατροπής της σε θερμότητα. Διακρίνονται σε άμεσα κέρδη τα οποία οφείλονται στην ηλιακή ακτινοβολία που διέρχεται μέσω των παραθύρων και λοιπών ανοιγμάτων και σε έμμεσα κέρδη που προέρχονται από την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από διαφανή και αδιαφανή στοιχεία.



Ο διαχωρισμός των κτιρίων σε θερμικές ζώνες αποτελεί σημαντικό κομμάτι του ενεργειακού τους σχεδιασμού και τεχνική ορθολογικής χρήσης ενέργειας και αφορά δύο επίπεδα:

- Τον ορθολογικό αρχιτεκτονικό σχεδιασμό βάσει ενεργειακών κριτηρίων (π.χ. βιοκλιματικό σχεδιασμό).
- Το σχεδιασμό και τη λειτουργία των μηχανολογικών συστημάτων θέρμανσης/ψύξης.

Και στις δύο περιπτώσεις είναι σημαντική η δυνατότητα χωροθέτησης των λειτουργιών των κτιρίων ανάλογα με τις ενεργειακές τους απαιτήσεις. Οι ενεργειακές απαιτήσεις εξαρτώνται από τη λειτουργία/χρήση του κτιρίου και τις αντίστοιχες απαιτήσεις σε θερμικές και άλλες συνθήκες (θερμοκρασία, ποιότητα αέρα, φωτισμό, κ.ά.), τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, τα ωράρια λειτουργίας, κ.ο.κ.

Δύο βασικά στοιχεία που πρέπει να εξεταστούν κατά τον καθορισμό και τη χωροθέτηση των θερμικών ζωνών ενός κτιρίου είναι:

- 1) η διαφορετική έκθεση των τμημάτων του κτιρίου στην ηλιακή ακτινοβολία και
- 2) η χρήση του κάθε χώρου

Γενικά οι χώροι θα πρέπει να ομαδοποιούνται ανάλογα με τις ενεργειακές τους απαιτήσεις και με το βαθμό χρήσης τους και να είναι προσανατολισμένοι κατάλληλα. Για παράδειγμα, χώροι οι οποίοι χρησιμοποιούνται πολλές ώρες, ή χώροι που απαιτούν υψηλότερες θερμοκρασίες συνιστάται να προσανατολίζονται στη νότια πλευρά, ενώ στο βορινό προσανατολισμό μπορεί να τοποθετηθούν χώροι που χρησιμοποιούνται περιστασιακά ή βοηθητικοί χώροι, οι οποίοι το χειμώνα λειτουργούν ως ζώνες θερμικής ανάσχεσης (buffer), αλλά και χώροι που χρησιμοποιούνται κυρίως το καλοκαίρι. Στο βόρειο προσανατολισμό ενδέχεται να τοποθετούνται χώροι με ιδιαίτερες απαιτήσεις σε σταθερό, ομοιογενή φωτισμό. Ο ανατολικός προσανατολισμός είναι κατάλληλος για χώρους όπου απαιτείται πρωινός ηλιασμός, όπως για τα υπνοδωμάτια αλλά και για την κουζίνα σε μία κατοικία. Ο δυτικός προσανατολισμός είναι κατάλληλος για χώρους που χρησιμοποιούνται πολύ το χειμώνα, όπως για το καθιστικό μιας κατοικίας.

### Θερμογέφυρα

Ως θερμογέφυρα (ή θερμική γέφυρα) (thermal bridge) ορίζεται το τμήμα εκείνο του περιβλήματος (κελύφους) του κτιρίου, στο οποίο η θερμική του αντίσταση εμφανίζεται σημαντικά μειωμένη συγκριτικά με τη θερμική αντίσταση στο υπόλοιπο κέλυφος και κατά συνέπεια στη θέση εκείνη η θερμική ροή είναι αυξημένη. Μελέτες έχουν αποδείξει ότι οι θερμογέφυρες προσ αυξάνουν τις ενεργειακές απώλειες του κτιρίου σχετικά με τις θεωρητικώς υπολογιζόμενες, κατά ένα ποσοστό που κυμαίνεται μεταξύ 5% και 30%, παρά το γεγονός ότι συνήθως αποτελούν ένα μικρό τμήμα του εξωτερικού κελύφους του. Αυτό το ποσοστιαίο εύρος έχει να κάνει με το μέγεθος του κτιρίου, τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά, τα αρχιτεκτονικά του στοιχεία και κατ'

επέκταση με το πλήθος των εμφανιζόμενων θερμογεφυρών. Γι' αυτό το λόγο και οι θερμογέφυρες θεωρούνται ως τα “ασθενή” σημεία του κτιριακού κελύφους και λειτουργούν επιβαρυντικά στη θερμική του προστασία. Εμφανίζονται κατεξοχήν στην διεπιφάνεια δύο διαφορετικών δομικών στοιχείων ή δύο ίδιων δομικών στοιχείων διαφορετικού πάχους, σε συνδέσεις εξωτερικών δομικών στοιχείων και πλευρικά γύρω από ανοίγματα. Επηρεάζουν την ενεργειακή συμπεριφορά του κτιρίου και επιφέρουν μείωση της αίσθησης της θερμικής άνεσης στο εσωτερικό του χώρου, ενώ ευνοούν την εκδήλωση του φαινομένου της συμπύκνωσης των υδρατμών και την ανάπτυξη μυκήτων (μούχλας) στην επιφάνεια των δομικών στοιχείων.

Οι θερμογέφυρες διακρίνονται σε κατασκευαστικές και γεωμετρικές. Οι κατασκευαστικές αφορούν σε σημεία συμβολής υλικών με διαφορετική θερμική αγωγιμότητα. Παραδείγματα τέτοιων θερμογεφυρών είναι οι ενώσεις και η διακοπή της θερμομόνωσης του κτιρίου από δομικά στοιχεία, κουφώματα, προβόλους, κ.ά. Οι γεωμετρικές οφείλονται στη διαφορά εσωτερικού και εξωτερικού εμβαδού θερμομονωμένης επιφάνειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι μια θερμομονωμένη γωνία κτιρίου, όπου η επιφάνεια εξωτερικά είναι πάντα μεγαλύτερη από την εσωτερική, με αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση της θερμικής αγωγιμότητας και τη δημιουργία θερμογέφυρας. Στην πράξη, τα χαρακτηριστικά των δύο παραπάνω ειδών μπορούν να συνδυάζονται. Οι θερμογέφυρες γενικά μπορούν να είναι σημειακές ή γραμμικές, αναλόγως με το αν είναι επαναλαμβανόμενες ή απλά σε ένα συγκεκριμένο σημείο (στις ενώσεις των γραμμικών). Ανάλογα με τη θέση εμφάνισής τους στο κτίριο, οι θερμογέφυρες διακρίνονται σε κατακόρυφες, οριζόντιες ή θερμογέφυρες κουφωμάτων. Για τον υπολογισμό των θερμικών απωλειών λόγω της ύπαρξης θερμογεφυρών πρέπει να είναι γνωστή η τιμή του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας  $\Psi$  [W/m·K] και το μήκος  $l$  της θερμογέφυρας που δημιουργείται.

Οι θερμογέφυρες χαρακτηρίζονται από την πολυδιάστατη μεταφορά θερμότητας και για το λόγο αυτό δεν μπορούν να προσδιοριστούν από μονοδιάστατα μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή προσομοίωση κτιρίων (συντελεστές θερμοπερατότητας U-values). Βέβαια είναι δυνατή η ενσωμάτωση των απωλειών που επιφέρουν μέσω τεχνασμάτων/προσεγγίσεων. Στον Κανονισμό για την Ενεργειακή Απόδοση των Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.) υπάρχει ειδική αναφορά στον εντοπισμό των θερμογεφυρών σε μια κτιριακή κατασκευή με παράθεση σειράς ενδεικτικών θέσεων εμφάνισης θερμογεφυρών και πρακτικών κατασκευαστικών λύσεων αντιμετώπισής τους. Στον κανονισμό δίνεται η δυνατότητα υπολογισμού της επαύξησης των θερμικών απωλειών λόγω θερμογεφυρών στο σύνολο του περιβλήματος του κτιρίου\*.

Γενική κατεύθυνση για την αποφυγή εμφάνισης θερμογεφυρών σε μια κατασκευή αποτελεί η πλήρης θερμική προστασία της. Ωστόσο, πρακτικά δεν είναι εφικτή η κατασκευή ενός συμβατικού κτιρίου χωρίς τη δημιουργία θερμογεφυρών. Και αυτό

---

\* Στην παρουσία εργασία, παρακάτω δεν ακολουθείται μια τέτοια θεώρηση γιατί δεν είναι αναγκαία για την εξαγωγή των ζητούμενων συμπερασμάτων, τα οποία είναι ανεξάρτητα αυτής. Οπότε η ύπαρξη θερμογεφυρών αγνοείται.

όχι κατ' ανάγκη επειδή δεν θα έχει εκπονηθεί η απαραίτητη μελέτη θερμικής προστασίας ή επειδή αυτή δεν θα έχει εφαρμοσθεί πλήρως, αλλά επειδή κάποιιο σημείο ή τμήμα ενός δομικού στοιχείου λόγω της θέσης του ή του κατασκευαστικού σχήματος του περιβλήματος θα παρουσιάζει υψηλότερες θερμικές απώλειες, τις οποίες ένας συμβατικός τρόπος δόμησης δεν μπορεί να αντιμετωπίσει.

### Θερμική μάζα κτιρίου

Η θερμική μάζα ενός κτιρίου (thermal mass) αποτελείται από το σύνολο των θερμοσυσσωρευτικών υλικών των εσωτερικών δομικών στοιχείων. Το πιο πρόσφορο μέσο για την αποθήκευση της θερμότητας αποτελούν τα υλικά με υψηλή θερμοχωρητικότητα και υψηλή πυκνότητα, όπως ορισμένα οικοδομικά υλικά (πέτρα, σκυρόδεμα, πλίνθοι, κεραμικά πλακίδια, μάρμαρο) ή νέας τεχνολογίας υλικά, όπως τα υλικά αλλαγής φάσης (PCM – phase change materials). Η θερμική μάζα απορροφά θερμότητα είτε από την ηλιακή ακτινοβολία είτε από τον θερμό αέρα στο εσωτερικό των κτιρίων, την οποία συσσωρεύει και αποθηκεύει. Για το λόγο αυτό ονομάζεται και αποθήκη θερμότητας του κτιρίου. Τα δομικά στοιχεία αποθηκεύουν θερμότητα όταν ο εσωτερικός αέρας είναι θερμότερος από αυτά, ενώ, όταν ο αέρας είναι ψυχρότερος, τα δομικά στοιχεία αποδίδουν θερμότητα. Ο ρυθμός με τον οποίο ένα στοιχείο απορροφά ή αποβάλλει τη θερμότητα ονομάζεται θερμική αδράνεια και επηρεάζεται από το πάχος και τη θερμοχωρητικότητά του.

Η θερμική μάζα είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό ενός κτιρίου, καθώς έχει τη δυνατότητα να εκπέμπει τη θερμότητα που απορροφούν τα δομικά του στοιχεία με χρονική καθυστέρηση. Έτσι συντελεί τόσο στη μείωση της ανάγκης για τη θέρμανση, όσο και για την ψύξη των εσωτερικών χώρων. Η απουσία της απαραίτητης θερμικής μάζας, οδηγεί στην εξισορρόπηση των εσωτερικών με τις εξωτερικές θερμοκρασίες σε μικρό χρονικό διάστημα, επηρεάζοντας άμεσα το εσωτερικό περιβάλλον του κτιρίου και κατά συνέπεια οδηγεί στη συνεχή λειτουργία των μονάδων κλιματισμού. Όσο μεγαλύτερη είναι δηλαδή η θερμική μάζα της κατασκευής, τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος που χρειάζεται για να επηρεαστούν οι εσωτερικές συνθήκες από τις εξωτερικές. Αν για παράδειγμα ένα κτίριο έχει μεγάλη θερμική μάζα, κατά τη διάρκεια του χειμώνα θα έχει συνεχώς μεγάλη ποσότητα θερμότητας αποθηκευμένη, οπότε το σύστημα θέρμανσης θα αναγκάζεται να λειτουργεί για μικρή χρονική διάρκεια σε αραιά διαστήματα. Το αντίστροφο ισχύει για την θερινή περίοδο. Κάτι τέτοιο βέβαια δε σημαίνει ότι η θερμική μάζα της κατασκευής θα πρέπει να είναι απεριόριστη, καθώς κάτι τέτοιο ουσιαστικά δεν θα την καθιστούσε πρακτική, διότι θα χρειαζόνταν τεράστια ποσά ενέργειας για να εξισορροπήσει ακόμα και μικρές διαφορές μεταξύ εξωτερικών και εσωτερικών συνθηκών.

Το χειμώνα, κατά τη διάρκεια των ημερών ηλιοφάνειας, η ηλιακή ακτινοβολία διεισδύει από τα νότια ανοίγματα βαθιά στο εσωτερικό των κτιρίων και θερμαίνει τον αέρα των χώρων και τη θερμική τους μάζα, δηλαδή τα θερμοχωρητικά τους δομικά στοιχεία. Ο αέρας δεν αποθηκεύει θερμότητα. Τη χάνει κάθε φορά που ανανεώνεται για λόγους αερισμού ή λειτουργικών αναγκών. Όμως τα δομικά στοιχεία αποθηκεύουν θερμότητα και τη συγκρατούν. Το βράδυ, μετά τη δύση του ηλίου, όταν η θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα πέφτει, τα θερμά δομικά στοιχεία αποδίδουν

θερμότητα (με ακτινοβολία και συναγωγή) προς τους χώρους. Η θερμική μάζα του κτιρίου πρέπει να είναι τόση, ώστε:

- Να προλαβαίνει να θερμανθεί ικανοποιητικά κατά τη διάρκεια της μέρας.
- Να αποδίδει θερμότητα και να διατηρεί συνθήκες θερμικής άνεσης όλη τη νύχτα, μέχρι το επόμενο πρωί.

Το καλοκαίρι, κατά τις θερμές μέρες, η εσωτερική θερμοκρασία των κτιρίων αυξάνεται. Κατά κανόνα υπερβαίνει σημαντικά τα ανεκτά επίπεδα θερμικής άνεσης, προκαλώντας δυσφορία. Όταν τα δομικά στοιχεία των χώρων είναι ψυχρά, απορροφούν θερμότητα από τον εσωτερικό αέρα και τον ψύχουν, ενώ ταυτόχρονα τα ίδια θερμαίνονται. Τα δομικά στοιχεία ψύχονται τη νύχτα. Αποβάλλουν τη θερμότητα τους προς το δροσερό νυχτερινό αέρα, με την προϋπόθεση να γίνεται πλήρης και διαρκής νυχτερινός αερισμός-δροσισμός. Η θερμική μάζα του κτιρίου πρέπει να είναι τόση, ώστε τα δομικά στοιχεία:

- Να προλαβαίνουν να ψυχθούν κατά τη διάρκεια της νύχτας.
- Να εξακολουθούν, έστω και οριακά, να ψύχουν τον εσωτερικό αέρα, έως τη δύση του ήλιου ή την ώρα κατά την οποία η εξωτερική θερμοκρασία αρχίζει να πέφτει σε επίπεδα χαμηλότερα από την εσωτερική.

Η θερμική μάζα είναι ο ρυθμιστής της εσωτερικής θερμοκρασίας:

- Καθυστερεί την ψύξη των χώρων κατά τις χειμερινές νύχτες, διατηρώντας τους περισσότερο θερμούς έως το πρωί.
- Καθυστερεί τη θέρμανση των χώρων κατά τις θερινές μέρες, διατηρώντας τους περισσότερο δροσερούς έως το βράδυ.
- Συμβάλλει στη μείωση των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων στο εσωτερικό των κτιρίων, μεταξύ μέρας και νύχτας, αλλά και μεταξύ χειμώνα και καλοκαιριού.

Η θερμική μάζα τοποθετείται στο εσωτερικό του κτιρίου. Η απαιτούμενη ποσότητα θερμικής μάζας διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του κτιρίου. Σε ορισμένα κτίρια τα οποία δεν χρησιμοποιούνται όλο το εικοσιτετράωρο, αλλά χρειάζονται άμεση θέρμανση ή ψύξη για λίγες ώρες, απαιτείται λιγότερη θερμική μάζα απ' ό,τι σε άλλα κτίρια, έως και ελάχιστη. Προϋπόθεση για την αποδοτική λειτουργία της είναι η πλήρης εξωτερική της κάλυψη με θερμομόνωση, ή έστω ενδιάμεσα, εάν δεν είναι ολόσωμη κατασκευή. Έτσι, απορροφά και αποδίδει θερμότητα ουσιαστικά από και προς τον εσωτερικό χώρο και όχι από και προς το περιβάλλον. Επειδή πάντως στην ημερήσια φόρτιση και αποφόρτιση της θερμικής μάζας συμμετέχουν τα πρώτα 9-12 cm από τη διατομή του δομικού στοιχείου, η εφαρμογή θερμομόνωσης στον πυρήνα

των τοιχοποιιών δεν μειώνει την δυνατότητα εκμετάλλευσης της θερμικής μάζας της τοιχοποιίας. Η σωστή θερμική λειτουργία του κτιρίου και η διατήρηση της θερμικής ισορροπίας μεταξύ των χώρων του (μείωση θερμοκρασιακών διακυμάνσεων), δεν εξαρτάται μόνο από τη συνολική ποσότητα της θερμικής μάζας αλλά και από την ισορροπημένη κατανομή της. Στην Ελλάδα, τα κτίρια που κατασκευάζονται από μη θερμοχωρητικά υλικά, π.χ. από ξύλο ή γυψοσανίδα δε μπορούν να αποθηκεύσουν θερμότητα, δηλαδή να αξιοποιήσουν τον ήλιο για τη θέρμανσή τους, ούτε μπορούν να έχουν το καλοκαίρι φυσικό δροσισμό. Η αναγκαία ποσότητα της θερμικής μάζας υπολογίζεται με βάση την αναγκαία θερμοχωρητικότητα του κτιρίου και τα θερμικά χαρακτηριστικά των υλικών που την αποτελούν.

Η ικανή και αναγκαία θερμοχωρητικότητα των κτιρίων είναι διαφορετική για κάθε κλίμα, ανάλογη της διαφοράς μεταξύ χειμερινών και θερινών θερμοκρασιών και ανάλογη των θερμοκρασιακών διακυμάνσεων μεταξύ μέρας και νύχτας κάθε τόπου. Όσο μεγαλύτερες είναι αυτές οι διαφορές, τόσο ο ρόλος της θερμικής μάζας γίνεται σημαντικότερος για την εξασφάλιση της θερμικής άνεσης στα κτίρια. Στο κλίμα της Ελλάδας η ύπαρξη θερμικής μάζας είναι μία από τις βασικότερες προϋποθέσεις που δίνουν τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας έως και 70% το χειμώνα και έως και 100% το καλοκαίρι. Ο υπολογισμός της αναγκαίας θερμοχωρητικότητας και της ποσότητας θερμικής μάζας, είναι απαραίτητος, ώστε να εξασφαλιστεί το βέλτιστο επίπεδο θερμικής άνεσης στο εσωτερικό των κτιρίων για όλες τις εποχές.

### Θερμική ακτινοβολία

Θερμική ακτινοβολία (thermal radiation) ονομάζεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος λόγω της θερμοκρασίας του. Γενικά, η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα αντιστοιχεί σε συχνότητες ολόκληρου του φάσματος ακτινοβολίας αφού προέρχεται από τη θερμική, «τυχαία», κίνηση των συστατικών της ύλης. Η θερμική ενέργεια είναι αποτέλεσμα των κινήσεων των ατόμων και των μορίων της ύλης. Αφού τα άτομα και τα μόρια αποτελούνται από φορτισμένα σωματίδια, δηλαδή τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια, η κίνησή τους έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία απομακρύνει ενέργεια από το υλικό. Την ίδια στιγμή, το σώμα ή η περιοχή του μέσου που εξετάζεται, δέχεται θερμική ακτινοβολία από το περιβάλλον του η οποία μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια μέσα στο σώμα. Η ενέργεια που εκπέμπει το κάθε σώμα είναι ανεξάρτητη από αυτήν που δέχεται, και εξαρτάται μόνο από την θερμοκρασία του. Αλλά επειδή ένα θερμότερο σώμα εκπέμπει περισσότερη ακτινοβολία από ένα ψυχρότερο, υπάρχει μια μεταβίβαση θερμότητας από πρώτο στο δεύτερο.

Ενέργεια με την μορφή ακτινοβολίας εκπέμπεται από κάθε σώμα το οποίο έχει θερμοκρασία ανώτερη από αυτήν του απολύτου μηδενός (αυτό βέβαια δεν συνεπάγεται απαραίτητα για κάθε θερμοκρασία και σημαντικά ποσοστά ακτινοβολούμενης ενέργειας – στις εφαρμογές αυτό που ενδιαφέρει είναι το ποσοστό κατά το οποίο η ακτινοβολία συμμετέχει στην μετάδοση θερμότητας παράλληλα με άλλους μηχανισμούς). Η ποσότητα της θερμικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την κατάσταση της επιφάνειάς του. Σε

οποιαδήποτε όμως θερμοκρασία η ακτινοβολία που εκπέμπεται εκτείνεται σε ένα φάσμα. Με την αλλαγή της θερμοκρασίας έχουμε αλλαγή τόσο της ισχύος της ακτινοβολίας όσο και της κατανομής ενέργειας. Η συνολική ποσότητα ακτινοβολίας που εκπέμπει το σώμα σε όλες τις συχνότητες αυξάνεται πολύ γρήγορα όσο αυξάνεται η θερμοκρασία: είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας του σώματος. Η ποσότητα της ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε περιοχή συχνότητας εξαρτάται από τον συντελεστή εκπομπής του σώματος, ο οποίος καθορίζεται από το υλικό και την θερμοκρασία του σώματος καθώς και από την γωνία υπό την οποία γίνεται η εκπομπή ή η απορρόφηση. Το μήκος κύματος στο οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς της εκπομπής ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του εκπέμποντος σώματος. Ο βαθμός στον οποίο ένα σώμα εκπέμπει θερμική ακτινοβολία μιας ορισμένης συχνότητας είναι ανάλογος με τον βαθμό στον οποίο μπορεί να απορροφήσει την ίδια συχνότητα. Έτσι, μια επιφάνεια που απορροφά περισσότερο το κόκκινο φως, θα εκπέμπει περισσότερο κόκκινο φως. Αυτή η αρχή επεκτείνεται σε όλες τις ιδιότητες των κυμάτων, όπως η κατεύθυνση (τα πραγματικά σώματα εκπέμπουν διαφορετική ισχύ μιας συχνότητας σε διαφορετικές γωνίες) και η πόλωση.

Το μήκος κύματος της θερμικής ακτινοβολίας κυμαίνεται από 0,1 έως 100  $\mu\text{m}$ , ενώ εκτός της περιοχής αυτής η ακτινοβολία δεν εκδηλώνεται ως θερμότητα. Η θερμική ακτινοβολία περιλαμβάνει τμήμα της υπεριώδους, την ορατή και την υπέρυθρη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία που εκπέμπουν τα σώματα σε θερμοκρασία δωματίου είναι στην υπέρυθρη περιοχή. Το φάσμα του ορατού φωτός εμφανίζεται στο τμήμα του χαμηλού μήκους κύματος του φάσματος της θερμικής ακτινοβολίας, επομένως με την αύξηση της θερμοκρασίας έχουμε συνεχώς αυξανόμενα ποσά θερμικής ακτινοβολίας στην ορατή περιοχή. Σε τιμές θερμοκρασίας μεταξύ 900 και 1000 K, όπου το ορατό φως μόλις εκπέμπεται, αυτό έχει κόκκινο χρώμα, με την αύξηση όμως της θερμοκρασίας περισσότερη ενέργεια εκπέμπεται σε χαμηλά μήκη κύματος και το φως αποκτά τελικά λευκό χρώμα. Για παράδειγμα, ο ήλιος με μια υποθετική θερμοκρασία στην επιφάνειά του ίση με 6000 K ακτινοβολεί την περισσότερη ενέργειά του σε μήκη κύματος μικρότερα από 3 $\mu\text{m}$ , ενώ η γη με μία θερμοκρασία π.χ. 300 K ακτινοβολεί σχεδόν όλη της την ενέργεια σε μήκη κύματος πάνω από 3  $\mu\text{m}$ . Η διαφορά αυτή οδηγεί στην κατανόηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ο υαλοπίνακας ενός παραθύρου ενώ επιτρέπει στην ηλιακή ακτινοβολία να περάσει στο εσωτερικό ενός χώρου, συμπεριφέρεται ως αδιαφανές σώμα στην θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, αναγκάζοντάς την να εγκλωβιστεί στον χώρο (συντελώντας έτσι στην αύξηση της θερμοκρασίας του).

### Θερμοκρασία ηλίου - αέρος

Θερμοκρασία ηλίου - αέρος ή ισοδύναμη θερμοκρασία (Sol - Air Temperature),  $t_e$ , είναι η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα η οποία σε απουσία όλων των θερμικών συναλλαγών μέσω ακτινοβολίας, δίνει σε μία επιφάνεια την ίδια εισερχόμενη θερμότητα με αυτήν που προκύπτει με τον πραγματικό συνδυασμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, με την συναλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας με τον ουρανό και τα πέριξ και με την συναλλαγή μέσω συναγωγής με τον εξωτερικό αέρα.

Η εισερχόμενη θερμορροή,  $\dot{q} / A$  σε  $W/m^2$ , σε επιφάνεια δεχόμενη ηλιακή ακτινοβολία είναι:

$$\frac{\dot{q}}{A} = a \cdot I_t + h_o \cdot (t_o - t_s) - \varepsilon \cdot \Delta R \quad (2.1)$$

όπου:

- $a$ : συντελεστής απορρόφησης της επιφάνειας για την ηλιακή ακτινοβολία
- $I_t$ : προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία, [ $W/m^2$ ]
- $h_o$ : συντελεστής μετάδοσης θερμότητας που περιλαμβάνει συναγωγή και ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, [ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ]
- $t_o$ : θερμοκρασία εξωτερικού αέρα, [ $^\circ C$ ]
- $t_s$ : θερμοκρασία επιφανείας, [ $^\circ C$ ]
- $\varepsilon$ : συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας, [-]
- $\Delta R$ : διαφορά μεταξύ των ποσοτήτων μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας προσπίπτουσας στην επιφάνεια από τον ουρανό και τα πέριξ και εκπεμπόμενης από μέλαν σώμα στη θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα, [ $W/m^2$ ]
- $\varepsilon \Delta R$ : εκπεμπόμενη ακτινοβολία από την επιφάνεια, [ $W/m^2$ ]

Σύμφωνα με τον ορισμό της θερμοκρασίας ηλίου – αέρος,  $t_e$  [ $^\circ C$ ], η θερμορροή  $\dot{q} / A$  εκφράζεται:

$$\frac{\dot{q}}{A} = h_o \cdot (t_e - t_s) \quad (2.2)$$

Και από τις σχέσεις (2.1) και (2.2) προκύπτει:

$$t_e = t_o + \frac{a \cdot I_t}{h_o} - \frac{\varepsilon \cdot \Delta R}{h_o} \quad (2.3)$$

## 3 Υαλοπίνακες

### 3.1 Ιστορικά στοιχεία

Φυσικό γυαλί σαν ορυκτό στη φύση (όπως ο οψιδιανός) υπήρχε ανέκαθεν, δημιουργούμενο όταν συγκεκριμένα είδη πετρωμάτων έλιωναν σαν αποτέλεσμα φαινομένων πολύ υψηλής θερμοκρασίας, όπως ηφαιστειακές εκρήξεις, χτυπήματα κεραυνών ή πτώσεις μετεωριτών, τα οποία κατόπιν ψύχονταν ταχύτατα και στερεοποιούνταν. Ελάχιστα στοιχεία είναι γνωστά για τις πρώτες απόπειρες κατασκευής γυαλιού. Κατά πάσα πιθανότητα το γυαλί εφευρέθηκε στη Μεσοποταμία την 4η ή 3η χιλιετία π.Χ., αν και στην Αίγυπτο έχουν βρεθεί επίσης πολύ πρώιμα παραδείγματα. Στην Ελλάδα το γυαλί πρωτοεμφανίζεται κατά τον 14ο π.Χ. αιώνα, στα νησιά του Αιγαίου και τις Μυκήνες. Πάντως στον ελλαδικό χώρο δεν είναι γνωστό κανένα αξιόλογο κέντρο παρασκευής γυαλιού, πιθανώς επειδή δεν υπήρχε η πρώτη ύλη (πυριτική άμμος). Κατά την πρώτη π.Χ. χιλιετία, η υαλουργία έγινε ευρύτερα γνωστή στον κόσμο και συντελέστηκαν αρκετές βελτιώσεις. Οι υαλουργοί έμαθαν να παράγουν διάφανο ή χρωματιστό γυαλί και να βελτιώνουν την αντοχή του γυαλιού προσθέτοντας διάφορα υλικά. Παρ' όλα αυτά, η παραγωγή του γυαλιού συνέχισε να είναι μια δύσκολη διαδικασία και τα προϊόντα από γυαλί χρησιμοποιούνταν κυρίως από τις βασιλικές οικογένειες ή σε θρησκευτικές τελετές.

Το χυτό, επίπεδο γυαλί πρωτοεμφανίζεται τον πρώτο π.Χ. αιώνα στην Ρώμη. Το λιωμένο γυαλί χύνεται σε ξύλινα επίπεδα καλούπια που έχουν προηγουμένως βραχεί. Τα πρώτα αυτά επίπεδα γυαλιά έχουν διαστάσεις 40x40 εκ. και πάχος 4 έως 5 χιλιοστών. Δημιουργήθηκαν με τον τρόπο αυτόν γυαλιά για την πλήρωση παραθύρων. Οι πρώτοι υαλοπίνακες της ιστορίας τοποθετούνται την πρώτη μ.Χ. δεκαετία, στην Ρώμη, αν και οι Ρωμαίοι δεν είχαν ακόμη ανακαλύψει κατάλληλες μεθόδους λείανσης, ώστε να παίρνουν διαφανές γυαλί. Χυτά γυαλίνα παράθυρα, έστω και χαμηλής οπτικής ποιότητας, άρχισαν έτσι να εμφανίζονται στα σημαντικότερα κτίρια στην Ρώμη καθώς και στις πολυτελείς βίλες της Πομπηίας, παρέχοντας προστασία των κατοίκων τους από καιρικά φαινόμενα (άνεμο, βροχή, κρύο κ.λπ.) ενώ επέτρεπαν στο φως να μπαίνει μέσα. Αυτός παραμένει και σήμερα ο βασικός προορισμός των υαλοπινάκων.

Η πτώση της Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας έχει σαν συνέπεια όχι μόνο την ανάσχεση της προόδου στην τεχνολογία παρασκευής γυαλιού, αλλά και την οπισθοδρόμηση, καθώς η δραστηριότητα μειώνεται δραστικά, μεταφερόμενη σταδιακά στην Βυζαντινή Αυτοκρατορία κυρίως στα μοναστήρια και σε περιοχές της κεντρικής Ευρώπης. Χαρακτηριστική συνέπεια αυτού είναι το γεγονός ότι τα πρώτα παράθυρα που ντύνονται με γυαλί ήταν αυτά των εκκλησιών. Οι υαλώσεις στις εκκλησίες απέκτησαν σύντομα διακοσμητικό ρόλο με την ανάπτυξη της τεχνοτροπίας του ζωγραφιστού γυαλιού. Γύρω στα 650 μ.Χ. Σύριοι υαλουργοί ανέπτυξαν μια επαναστατική κατασκευαστική μέθοδο παραγωγής γυαλιού - το καμπυλωτό γυαλί, το οποίο χρησιμοποιούνταν σε παράθυρα μέχρι και το τέλος του 19ου αιώνα. Ο 11ος αιώνας είδε επίσης την εξέλιξη και από τους Γερμανούς υαλουργούς, μιας τεχνικής για την παραγωγή επίπεδων φύλλων γυαλιού, η οποία εξελίχθηκε δύο αιώνες μετά από Βενετούς τεχνίτες. Στα τέλη του 13ου αιώνα οι Βενετοί, οι οποίοι μέχρι τότε εισήγαγαν



γυάλινα αντικείμενα από το Βυζάντιο, χρησιμοποιώντας Βυζαντινούς τεχνίτες, άρχισαν να αναπτύσσουν την δική τους υαλουργία. Κατά την διάρκεια του Μεσαίωνα η Βενετία είναι το αδιαμφισβήτητο κέντρο της υαλουργίας. Όσον αφορά την Βρετανία, παρατηρείται και εκεί εξέλιξη στην τεχνολογία του γυαλιού, τουλάχιστον κατά τους τελευταίους αιώνες. Με την ίδρυση της Βρετανικής Εταιρίας Υαλοπινάκων το 1773, η Αγγλία κατέστη το κέντρο του κόσμου όσον αφορά τους ποιοτικούς υαλοπίνακες παραθύρων. Είναι η πρώτη φορά στην ιστορία, που το λείο, κατάλληλο για παράθυρα γυαλί, ήταν διαθέσιμο και προσιτό για τους περισσότερους ιδιοκτήτες σπιτιών. Στην Γαλλία οι υαλουργοί, πέρα από την βελτίωση των Ιταλικών μεθόδων και την χρήση μεγαλύτερων πάγκων που τους έδιναν την δυνατότητα παραγωγής μεγαλύτερων υαλοπινάκων, ανέπτυξαν και διαδικασία ανόπτησης, αφήνοντας τις πλάκες γυαλιού να ψύχονται επί ημέρες μέσα σε ειδικά κατασκευασμένους φούρνους. Η Ευρωπαϊκή τεχνογνωσία στον τομέα της υαλουργίας, εισήχθη στην Αμερική, μετά την Αμερικανική Επανάσταση, αφού μέχρι τότε η Αγγλία φοβούμενη των ανταγωνισμό απαγόρευε την υαλουργία στην Αμερική. Έτσι άρχισε σταδιακά η άνθηση της υαλουργίας και στην Αμερική.

Η υαλουργία με το πέρασμα των χρόνων συνέχισε να εξελίσσεται δειλά μέχρι τη βιομηχανική επανάσταση, που επέδρασε και στην τεχνολογία της υαλουργίας – όχι μόνο στην ανάπτυξη της μηχανολογικής υποδομής, αλλά και στον τομέα της επιστημονικής έρευνας, ως προς τη χημική σύνθεση του γυαλιού, τα χαρακτηριστικά του και τις ιδιότητές του. Στον 20ο αιώνα συντελούνται οι σημαντικότερες μεταβολές. Γύρω στις αρχές του 20ου αιώνα, οι υαλουργοί ανακάλυψαν ότι οι υαλοπίνακες μπορούσαν ξαναθερμαινόμενοι να καμπυλωθούν, ενώ αν ψύχονταν αποκτούσαν αυξημένες μηχανικές αντοχές σε κάμψη ή σε θέρμανση κατά 400%. Πρόσωπο κλειδί και ένας από τους προγόνους της σύγχρονης έρευνας του γυαλιού υπήρξε ο Γερμανός Otto Schott (1851-1935), ο οποίος χρησιμοποίησε επιστημονικές μεθόδους για να μελετήσει τις επιδράσεις πλήθους χημικών στοιχείων πάνω στα οπτικά και θερμικά χαρακτηριστικά του γυαλιού. Το 1871 ο William Pilkington, εφεύρε μια μηχανή που αυτοματοποίησε την παραγωγή των υαλοπινάκων, που φτιάχνονταν με την μέθοδο των κυλίνδρων, την οποία μηχανή βελτίωσε αργότερα (1903) ο J.H.Lubber στην Αμερική. Ο Αμερικανός μηχανικός Michael Owens ανακαλύπτει μια αυτόματη φιάλη παραγωγής φουσητού γυαλιού. Με την ταυτόχρονη βελτίωση του συστήματος τροφοδοσίας, κατέστη δυνατή η βιομηχανική παραγωγή φιαλών σταθερού μεγέθους σε ταχείς ρυθμούς. Μετά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, η Βρετανική εταιρία “Pilkington Brothers Ltd” παρουσίασε τη νέα μέθοδο παραγωγής επίπεδου γυαλιού, την οποία εφεύρε ο Alastair Pilkington, με την επωνυμία “float”, η οποία τέθηκε σε εμπορική εφαρμογή το 1959, συνδυάζοντας για πρώτη φορά το λαμπερό φινίρισμα του γυάλινου «σεντονιού» με την οπτική ποιότητα της πλάκας του γυαλιού. Το λιωμένο γυαλί περνάει (χύνεται) από το φούρνο τήξης σε ένα ρηχό μπάνιο με λιωμένο κασσίτερο, στην ιδανικά επίπεδη επιφάνεια του οποίου επιπλέει (floats) ως ελαφρύτερο, απλώνει και αυτοεπιπεδώνεται, διαμορφώνοντας μια λεία και απόλυτα επίπεδη μάζα και στη συνέχεια περνάει οριζοντίως μέσα στο θάλαμο ανόπτησης, σχηματίζοντας μια συνεχή γυάλινη ταινία μέχρι τη γραμμή κοπής. Με αυτή τη μέθοδο παράγεται σήμερα παγκοσμίως το σύνολο σχεδόν του επίπεδου γυαλιού.

Στη δεκαετία του 1960, οι εταιρείες αύξησαν τον όγκο παραγωγής τους, ενώ παράλληλα μείωσαν την τιμή του επίπεδου γυαλιού. Η απλούστερη εφαρμογή υαλοπινάκων, η οποία κυριάρχησε μέχρι και τη δεκαετία του 1980 ήταν οι μονοί απλοί υαλοπίνακες, οι οποίοι ουσιαστικά δεν προσέφεραν τίποτα περισσότερο συγκριτικά με αυτό που προσέφεραν οι υαλοπίνακες από την πρώτη στιγμή που εμφανίστηκαν στις ανθρώπινες κατασκευές από τα αρχαία χρόνια. Η εξέλιξη της τεχνολογίας έδωσε τους διπλούς (απλούς) υαλοπίνακες, οι οποίοι βελτίωσαν τη θερμομόνωση κατά 80% περίπου – περί τα τέλη της δεκαετίας του 1940 ξεκίνησε η καλλιέργεια της ιδέας των διπλών υαλοπινάκων. Παρόλα αυτά, η παγκόσμια ενεργειακή κρίση της δεκαετίας του 1970 σε συνδυασμό με τις δυσμενείς παγκόσμιες οικολογικές εξελίξεις, κατέστησαν τους διπλούς (απλούς) υαλοπίνακες παρωχημένους μέσα σε δύο μόλις δεκαετίες (σε σχέση με τους αιώνες που χρειάστηκαν για τους μονούς απλούς). Η σύγχρονη ανάγκη βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων οδήγησε την παγκόσμια βιομηχανία παραγωγής υαλοπινάκων στην κατασκευή των σύγχρονων διπλών ενεργειακών υαλοπινάκων χαμηλής εκπομπής ηλιακού ελέγχου (Low-e Solar Control). Οι υαλοπίνακες αυτοί κατόρθωσαν να βελτιώσουν τη θερμομόνωση σε σχέση με τους απλούς διπλούς κατά 200% περίπου και κατά 400% περίπου σε σχέση με τους απλούς μονούς. Παράλληλα, έχουν αναπτυχθεί πολλά άλλα είδη υαλοπινάκων με βελτιωμένες θερμικές, οπτικές και μηχανικές ιδιότητες, αλλά και επιπρόσθετα χαρακτηριστικά. Μια σημαντική περιοχή ενδιαφέροντος στη βιομηχανία στην επόμενη δεκαετία θα είναι η θερμοχρωμική και η φωτοχρωμική τεχνολογία, που επιτρέπουν στο επίπεδο γυαλί να αντιληφθεί τις αλλαγές στη θερμοκρασία και το φως και να ρυθμίζεται ανάλογα. Περισσότερα όμως στοιχεία σχετικά με αυτά δίδονται παρακάτω.

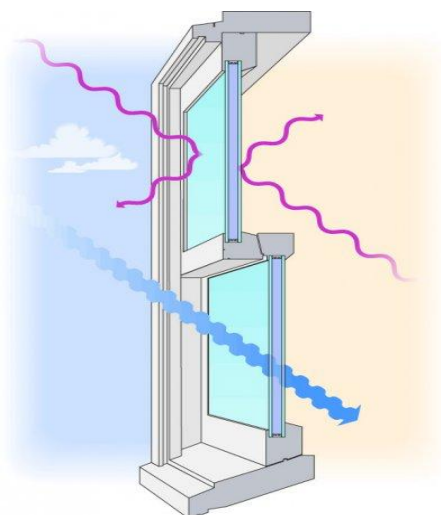
Καθώς η βιομηχανία του γυαλιού διευρύνεται, ο όγκος παραγωγής ξεπερνά την παγκόσμια ζήτηση κατά 1% περίπου ετησίως. Η περιοχή Ασίας-Ειρηνικού συνέχισε τη σημαντική αύξηση της, η οποία μέχρι το 2002 αποτέλεσε το 50% του παγκόσμιου όγκου παραγωγής επίπεδου γυαλιού. Η Ευρώπη μαζί με το σύνολο της Αμερικής θα έχουν επαρκή όγκο παραγωγής για να καλύψουν τις δικές τους ανάγκες σε γυαλί. Από την άλλη μεριά, τα περιθώρια κέρδους στην Κίνα έχουν ήδη εξαφανιστεί, αφού η τιμή πώλησης είναι σχεδόν ίση με το κόστος παραγωγής. Το γυαλί πλέον κατέχει εξέχουσα θέση στα δομικά υλικά με απεριόριστες ιδιότητες, δημιουργώντας ταυτοχρόνως έργα υψηλής αισθητικής. Χαρακτηρίζει την αρχιτεκτονική του 21ου αιώνα, αφού χρησιμοποιείται και σε εσωτερικούς και σε εξωτερικούς χώρους. Η συνεχής έρευνα και η εξέλιξη της τεχνολογίας του γυαλιού, το καθιστούν το υλικό του μέλλοντος.

### **3.2 Επίδραση υαλοπινάκων στον ηλιασμό κτιρίου**

Η θέση, το μέγεθος και το σχήμα των υαλοπινάκων στο κέλυφος ενός κτιρίου έχουν προφανώς πρωταρχικό ρόλο στον ηλιασμό του. Βέβαια, σημασία έχει και το είδος των υαλοπινάκων, αλλά αυτό είναι κάτι που εξετάζεται αργότερα.

Όλα τα κτίρια δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία περνάει μέσα από τα ανοίγματα στους εσωτερικούς χώρους. Η ακτινοβολία φτάνει σε τοίχους, πατώματα και έπιπλα, που απορροφούν μέρος της και θερμαίνονται. Ακολουθώντας, επιστρέφουν

τη θερμότητά τους με τη μορφή θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Οι υαλοπίνακες είναι αδιαπέραστοι από τέτοια μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία – γενικά είναι αδιαφανείς για μήκη κύματος μεγαλύτερα των 3 μm (το κοινό γυαλί κυρίως απορροφά την ακτινοβολία αυτή, παρά την ανακλά). Η προερχόμενη θερμότητα με αυτόν τον τρόπο δεν μπορεί να διαπεράσει ως θερμική ακτινοβολία τον υαλοπίνακα και εγκλωβίζεται στον εσωτερικό χώρο. Η παγιδευμένη θερμότητα απορροφάται και από τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία και κατόπιν μεταδίδεται στον εσωτερικό αέρα με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, συμβάλλοντας στη διαμόρφωση της εσωτερικής θερμοκρασίας του χώρου. Έτσι λειτουργεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου, που είναι επιθυμητό στα σπίτια κατά την διάρκεια των ψυχρών περιόδων του έτους, όμως μπορεί να είναι ανεπιθύμητο σε κοινόχρηστα κτίρια στα οποία ο μεγάλος αριθμός εργαζομένων, οι ηλεκτρικές συσκευές και τα φώτα, συντελούν μαζί με την ηλιακή ακτινοβολία στην υπερβολική αύξηση της εσωτερικής θερμοκρασίας. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου στα κτίρια είναι μία από τις αρχές στις οποίες στηρίζεται η λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων.



**Σχήμα 3.1:** Ο υαλοπίνακας είναι (εν γένει πολύ) διαφανής για την ηλιακή ακτινοβολία και (σχεδόν εντελώς) αδιαφανής για την θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος.

Η ποσότητα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας εξαρτάται από τον προσανατολισμό του ανοίγματος. Το πιο σημαντικό στοιχείο στην εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση των κτιρίων το χειμώνα (αλλά και για αποφυγή της υπερθέρμανσης το καλοκαίρι) είναι ο σωστός προσανατολισμός των ανοιγμάτων. Νότια ανοίγματα δέχονται την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία το χειμώνα (στο βόρειο ημισφαίριο) και, με το κατάλληλο οριζόντιο σκίαστρο, ελάχιστη το καλοκαίρι. Αυτό γιατί το καλοκαίρι οι νότια προσανατολισμένες κατακόρυφες επιφάνειες δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία για λίγες ώρες και με μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης. Η ηλιακή ενέργεια που εισέρχεται από τα νότια υαλοστάσια μπορεί να αξιοποιηθεί σωστά, μόνο όταν το κτήριο διαθέτει επαρκή θερμική μάζα. Ανοίγματα στο βορρά (στο βόρειο ημισφαίριο) βοηθούν στην καλύτερη ποιότητα φωτισμού στο χώρο γιατί

πρακτικά δέχονται μόνο διάχυτο και όχι άμεσο φως, συνιστώνται για το καλοκαίρι, αλλά πρέπει να είναι περιορισμένης επιφάνειας γιατί παρουσιάζουν μεγάλες απώλειες και ελάχιστα κέρδη το χειμώνα. Ανατολικά και δυτικά ανοίγματα έχουν τη χειρότερη συμπεριφορά όλο το χρόνο και δέχονται μεγάλα ποσά ηλιακής ακτινοβολίας (ιδιαίτερα το καλοκαίρι), γι' αυτό συνιστώνται μόνο όπου είναι απαραίτητα για λόγους φωτισμού ή θέας. Επιπλέον, κατά την ανατολή και τη δύση του, ο ήλιος είναι χαμηλά στον ορίζοντα (η αέριος μάζα έχει υψηλή τιμή) και έτσι οι ακτίνες εισχωρούν βαθιά μέσα στον εσωτερικό χώρο. Ιδιαίτερα τα δυτικά ανοίγματα είναι πολύ δυσμενή το καλοκαίρι, καθώς δέχονται άμεση ηλιακή ακτινοβολία μετά το μεσημέρι – τότε παρουσιάζονται συγχρόνως και άλλα φορτία (μεταχρονισμένα), τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα να αυξάνεται πολύ το ψυκτικό φορτίο. Γενικά στα ανατολικά και δυτικά ανοίγματα πρέπει να προβλέπεται σκίαση κατά προτίμηση εξωτερική και κατακόρυφου τύπου. Τα ανοίγματα δυτικού προσανατολισμού, είναι τα περισσότερο κρίσιμα όταν προσπαθούμε να ελέγξουμε την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια.

Ο ηλιασμός των κτιρίων και μάλιστα από τη θέση του επιθυμητού προσανατολισμού, είναι συχνά δυσχερής έως αδύνατος, ιδιαίτερα σε πυκνοδομημένες περιοχές. Υπάρχουν όμως πολλές λύσεις για τη βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς κτιρίων σε δυσμενείς προσανατολισμούς και με ελάχιστη πρόσβαση στο άμεσο ηλιακό φως, απλά απαιτούν περισσότερη αρχιτεκτονική ευλυγισία και φαντασία (π.χ. φεγγίτες ή κατάλληλα ανοίγματα στην οροφή).

Η αναλογία ύψος/πλάτος ενός υαλοπίνακα αποτελεί ένα άλλο καθοριστικό στοιχείο και επηρεάζει την κατανομή του φωτισμού και το βάθος μέχρι το οποίο εισχωρεί το φως. Όσο οι αναλογίες αυτές γίνονται πιο κατακόρυφες περιορίζεται η θέα, αλλά μεγαλώνει η διεισδυτικότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Αντιθέτως, υαλοπίνακες με πιο οριζόντιες αναλογίες περιορίζουν την διεισδυτικότητα της ακτινοβολίας, αλλά προσδίδουν μεγάλη ομοιομορφία στο φωτισμό. Είναι επίσης εύλογο ότι το μέγεθος και η θέση ενός ανοίγματος στην τοιχοποιία επηρεάζουν τον ηλιασμό του εσωτερικού χώρου. Σχετικά με το εμβαδόν του ανοίγματος, χαρακτηριστικό μέγεθος που αναφέρεται και χρησιμοποιείται συχνά είναι ο λόγος εμβαδόν υαλοπινάκων/εμβαδόν εξωτερικών τοίχων (Window-to-Wall Ratio – WWR). Το μέγεθος αυτό επηρεάζει γενικά την ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου. Ένας γενικός πρακτικός κανόνας είναι ότι ο WWR πρέπει να είναι το πολύ ίσος με 40% για επαρκή θερμομόνωση (με βάση τον μέσο συντελεστή θερμοπερατότητας του κτιρίου), αν και βελτιωμένοι υαλοπίνακες με υψηλότερη θερμική αντίσταση (χαμηλότερο συντελεστή θερμοπερατότητας) επιτρέπουν και μεγαλύτερες τιμές. Προφανές είναι ότι σε εμπορικά, για παράδειγμα, κτίρια με πολύ μεγάλο WWR (έως και σχεδόν 100%) πρέπει να δίνεται μεγάλη σημασία στο είδος των υαλοπινάκων που τοποθετούνται. Επίσης όσο θερμότερο είναι το κλίμα της περιοχής στην οποία βρίσκεται το κτίριο, τόσο πιο ελαστικό είναι το όριο αυτό, με την προϋπόθεση της ύπαρξης σκίασης για την θερινή περίοδο.

Ο σκιασμός των ανοιγμάτων ενός κτιρίου είναι στη σημερινή εποχή η βασικότερη τεχνική για τη μείωση των ηλιακών θερμικών κερδών του κατά τη θερινή περίοδο. Θα πρέπει να εξασφαλίζει την ελάχιστη εισερχόμενη ακτινοβολία το καλοκαίρι, συνδυάζοντας όμως τη δυνατότητα φυσικού φωτισμού, αερισμού και θέας και, φυσικά, να μην εμποδίζει τον απαραίτητο ηλιασμό κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Επίσης πρέπει να ελέγχεται και ο ηλιασμός των ανοιγμάτων κατά τις ενδιάμεσες περιόδους (άνοιξη - φθινόπωρο). Η συνιστώμενη ηλιοπροστασία (σκίαση) των ανοιγμάτων εξαρτάται από τον προσανατολισμό τους. Σε νότια ανοίγματα, ένα οριζόντιο σκίαστρο (σταθερό ή κινητό) εμποδίζει τις ηλιακές ακτίνες, οι οποίες έρχονται από ψηλότερο σημείο του ορίζοντα το καλοκαίρι σε σχέση με τον χειμώνα (οπότε και η άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι λιγότερη). Η νότια όψη ενός κτιρίου είναι δηλαδή η ευνοϊκότερη όψη για όλο το χρόνο, αφού θερμαίνεται άμεσα το χειμώνα και σκιάζεται εύκολα το καλοκαίρι. Για τα ανατολικά και δυτικά ανοίγματα, στα οποία οι ηλιακές ακτίνες προσπίπτουν από χαμηλά, απαιτείται σκίαση κατακόρυφου τύπου. Σε βορινά ανοίγματα δεν απαιτείται σύστημα σκίασμού. Η σκίαση του κτιρίου και των ανοιγμάτων του επιτυγχάνεται με πολλούς τρόπους. Το ίδιο το σχήμα του κτιρίου (εσοχές, εξοχές, διατάξεις σε σχήμα Γ ή Π, διαμόρφωση εσωτερικών αυλών ή στοών κ.λπ.), αλλά και ειδικά διαμορφωμένες προεξοχές (όπως πρόβολοι στο νότο) μπορούν να αποτελέσουν σύστημα σκίασης του κτιρίου. Ο υπολογισμός της επιφάνειας υαλοπίνακα που σκιάζεται, σε μία δεδομένη χρονική στιγμή της ημέρας, από κατακόρυφες ή οριζόντιες προεξοχές δομικών στοιχείων ή από γειτονικά κτίρια, μπορεί να γίνει συνδυάζοντας στοιχεία από την ηλιακή γεωμετρία και την γεωμετρία του κτιρίου. Επιπλέον, μπορούν να τοποθετηθούν σκίαστρα στα ανοίγματα, τα οποία διακρίνονται ανάλογα με τη θέση τους (εσωτερικά, εξωτερικά ή ενδιάμεσα των υαλοπινάκων), ανάλογα με τη γεωμετρία τους (κατακόρυφα, οριζόντια, σχαρωτά), ανάλογα με τη δυνατότητα χειρισμού τους (σταθερά ή κινητά) και τέλος, ανάλογα με το υλικό και τις θερμικές και οπτικές ιδιότητες τους και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα έχουν τα σκίαστρα που βρίσκονται εξωτερικά των παραθύρων, καθώς σταματούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία πριν αυτή φτάσει στο άνοιγμα και διεισδύσει στο εσωτερικό του, υπάρχουν όμως και δυνατότητες συνδυασμού συστημάτων (εξωτερικά σταθερά σε συνδυασμό με εσωτερικά κινητά) και πάντοτε η επιλογή τους είναι και συνάρτηση του κόστους με την αποτελεσματική λειτουργία τους για αρκετά χρόνια. Επιπλέον, η διάτρητη ηλιοπροστασία είναι πιο αποτελεσματική από τη συμπαγή, εφόσον δεν εγκλωβίζει θερμό αέρα και δεν επιβαρύνει θερμικά τις όψεις των κτιρίων. Η σκίαση αποτελεί και μέσο ελέγχου του φυσικού φωτισμού και ιδιαίτερα της θάμβωσης, καθώς μειώνει την άμεση πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στους χώρους. Συνεπώς, κατά την επιλογή του κατάλληλου σκίαστρου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη τόσο η θερμική, όσο και η οπτική του απόδοση όλο το χρόνο. Δεν πρέπει πάντως να παραβλέπεται το γεγονός ότι τα συστήματα σκίασης, ενώ πρέπει να παρέχουν καλή ηλιοπροστασία το καλοκαίρι, δεν θα πρέπει να περιορίζουν τα ηλιακά κέρδη το χειμώνα, να εμποδίζουν το φυσικό φωτισμό ή να παρακωλύουν το φυσικό αερισμό.

Ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος ηλιοπροστασίας του κτιρίου και των ανοιγμάτων του είναι και η χρήση βλάστησης είτε με κατάλληλα φυτεμένα φυλλοβόλα ή αειθαλή δέντρα, είτε με άλλα φυτά σε κατάλληλες θέσεις (πέργκολες, μπαλκόνια, κ.λπ.). Ένας άλλος τρόπος ηλιοπροστασίας των κτιρίων είναι η χρήση ειδικών υαλοπινάκων. Υπάρχουν διάφορα είδη τέτοιων υαλοπινάκων: απορροφητικοί, ανακλαστικοί, αδιαφανείς, θερμοχρωμικοί, ηλεκτροχρωμικοί, κ.ά., με μεγάλη ποικιλία θερμικών και οπτικών ιδιοτήτων, κατάλληλοι για εφαρμογή σε κτίρια διαφόρων τύπων. Γίνεται αναφορά σε αυτούς παρακάτω στο κείμενο.

### 3.3 Ηλιακές-οπτικές και θερμικές ιδιότητες υαλοπινάκων

Οι ηλιακές-οπτικές και οι θερμικές ιδιότητες των υαλοπινάκων χαρακτηρίζουν την ενεργειακή συμπεριφορά τους και οι τιμές τους αποτελούν τα κυριότερα κριτήρια επιλογής υαλοπινάκων με σκοπό την εξασφάλιση των απαιτούμενων συνθηκών θερμικής άνεσης και εξοικονόμησης ενέργειας στα κτίρια. Οι βασικότερες και συχνότερα χρησιμοποιούμενες ιδιότητες παρουσιάζονται παρακάτω.

Η ολική ηλιακή ακτινοβολία,  $I_t$ , που προσπίπτει σε υαλοπίνακα είναι ίση προς το άθροισμα της διερχόμενης,  $\tau \cdot I_t$ , της ανακλώμενης,  $\rho \cdot I_t$  και της απορροφούμενης,  $\alpha \cdot I_t$ , ακτινοβολίας. Δηλαδή είναι:

$$I_t = \tau \cdot I_t + \rho \cdot I_t + \alpha \cdot I_t \quad (3.1)$$

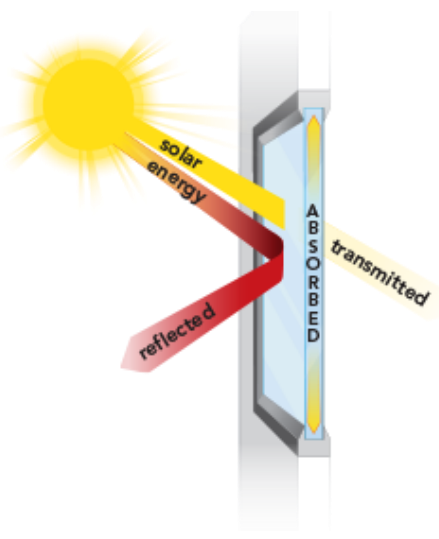
και συνεπώς:

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \quad (3.2)$$

όπου:

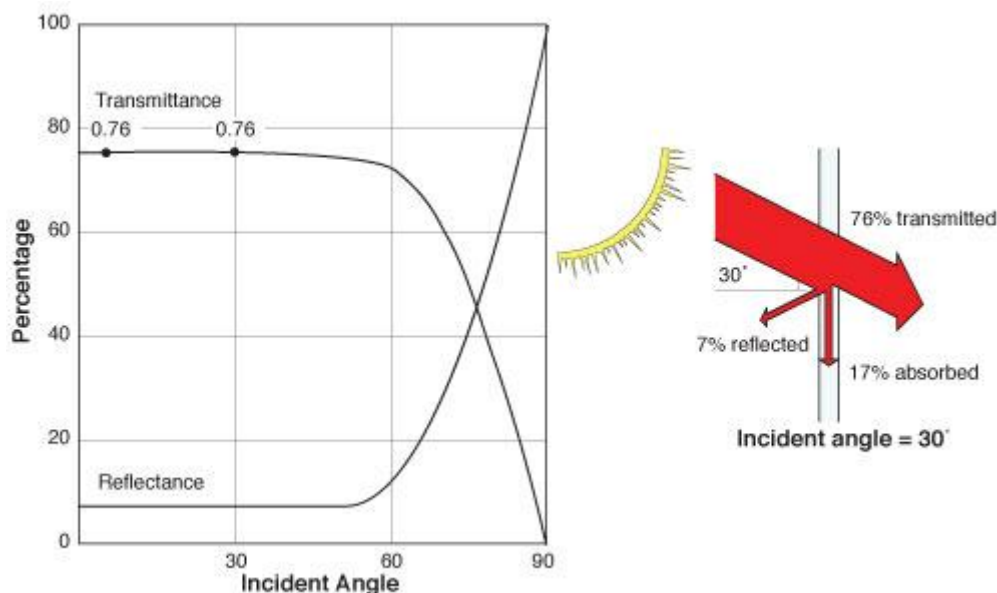
- $\tau$  είναι η διαπερατότητα (transmittance) του υαλοπίνακα και αναφέρεται στο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που διέρχεται από τον υαλοπίνακα
- $\rho$  είναι η ανακλαστικότητα (reflectance) του υαλοπίνακα και αναφέρεται στο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που ανακλάται από τον υαλοπίνακα
- $\alpha$  είναι η απορροφητικότητα (absorptance) του υαλοπίνακα και αναφέρεται στο ποσοστό της προσπίπτουσας ακτινοβολίας που απορροφάται από τον υαλοπίνακα

Αυτή είναι γνωστή ως εξίσωση RAT από τα αρχικά των αγγλικών λέξεων Reflection (ανάκλαση), Absorption (απορρόφηση), Transmission (μετάδοση).



Σχήμα 3.2: Ένα ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας διέρχεται από τον υαλοπίνακα, ένα ποσοστό ανακλάται και το υπόλοιπο απορροφάται.

Οι παραπάνω οπτικές ιδιότητες του υαλοπίνακα εξαρτώνται 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. Επίσης, 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.



**Σχήμα 3.3:** Ποσοστό διερχόμενης και ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας από διαφανές γυαλί (πάχους περίπου 6 mm), συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης – σχηματικό παράδειγμα για γωνία πρόσπτωσης ίση με 30°.

Λόγω της ακτινοβολίας που απορροφά, ο υαλοπίνακας θερμαίνεται, οπότε η θερμότητα στο εσωτερικό του μεταδίδεται στο περιβάλλον του (ένα μέρος της στον εξωτερικό χώρο και ένα στον εσωτερικό) είτε μέσω συναγωγής με τον περιβάλλοντα αέρα, είτε μέσω εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος. Η ικανότητα ενός υαλοπίνακα να εκπέμπει ακτινοβολία χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή εκπομπής (emissivity) του,  $\epsilon$ . Η ικανότητα εκπομπής ενός υαλοπίνακα, μπορεί να μεταφραστεί και σαν το επίπεδο απορρόφησής του. Εξάλλου, σύμφωνα με τον νόμο του Kirchoff για την θερμική ακτινοβολία, για δεδομένη θερμοκρασία ο συντελεστής εκπομπής για ορισμένο μήκος κύματος και κατεύθυνση ισούται με τον συντελεστή απορρόφησης για ορισμένο μήκος κύματος και κατεύθυνση. Όσο μικρότερη είναι η ικανότητα εκπομπής (δηλαδή η απορροφητικότητα), τόσο μεγαλύτερη είναι και η ανακλαστικότητά του.

Ο συντελεστής ηλιακού θερμικού κέρδους (Solar Heat Gain Coefficient – SHGC) ενός υαλοπίνακα εκφράζει το ποσοστό της προσπίπτουσας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στον υαλοπίνακα, το οποίο γίνεται ηλιακό θερμικό κέρδος χώρου. Ισούται με το άθροισμα της οπτικής διαπερατότητας  $\tau$  (άμεσο κέρδος) και του

ποσοστού της ενέργειας που απορροφάται από τον υαλοπίνακα και εκπέμπεται στον εσωτερικό χώρο (έμμεσο κέρδος). Ο SHGC παίρνει τιμές από 0 έως 1 και εξαρτάται από τον τύπο του υαλοπίνακα και από τη γωνία πρόσπτωσης και τη φασματική κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, για απλοποίηση, οι κατασκευαστές συνήθως απλώς παρέχουν μία φασματικά σταθμισμένη τιμή του SHGC για κάθετο πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Τυπικά, υαλοπίνακες με χαμηλή τιμή του SHGC είναι επιθυμητοί όταν υπάρχουν μεγάλα ψυκτικά φορτία, ενώ υαλοπίνακες με υψηλές τιμές του SHGC είναι επιθυμητοί για παράδειγμα σε κτίρια με παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης. Ο SHGC είναι δείκτης που χρησιμοποιείται κυρίως στις ΗΠΑ.

Ο συντελεστής σκίασης (Shading Coefficient – SC) ενός υαλοπίνακα αποτελεί προγενέστερο δείκτη του SHGC, που ορίστηκε ουσιαστικά για τον ίδιο σκοπό. Είναι ο λόγος του ηλιακού θερμικού κέρδους μέσω ενός δεδομένου υαλοπίνακα (με ή χωρίς εξωτερικό ή εσωτερικό σύστημα σκίασης) υπό δεδομένες συνθήκες, προς το ηλιακό θερμικό κέρδος μέσω του υαλοπίνακα αναφοράς, DSA, υπό τις ίδιες συνθήκες – ο υαλοπίνακας αναφοράς της ASHRAE, DSA, είναι μονός υαλοπίνακας με πάχος 3 mm, διαπερατότητα, ανακλαστικότητα και απορροφητικότητα καθέτου πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας ίσες με 0,86, 0,08 και 0,06 αντίστοιχα. Αν SHG (Solar Heat Gain) το ηλιακό θερμικό κέρδος του υαλοπίνακα και SHGF (Solar Heat Gain Factor) το ηλιακό θερμικό κέρδος του υαλοπίνακα αναφοράς, τότε:

$$SC = \frac{SHG}{SHGF} \quad (3.3)$$

Ο SC μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του SHGC και του αντίστοιχου SHGC<sub>r</sub> του υαλοπίνακα αναφοράς, ως εξής:

$$SC = \frac{SHGC}{SHGC_r} \quad (3.4)$$

Επειδή η τυπική θερινή τιμή του SHGC<sub>r</sub> είναι 0,87, οι δύο δείκτες συνδέονται με τον παρακάτω τύπο αναλογικότητας:

$$SHGC = SC \cdot 0,87 \quad (3.5)$$

Ο ηλιακός συντελεστής (g-Value, ή Solar Factor – SF) ενός υαλοπίνακα αντιπροσωπεύει τη συνολική ποσότητα της ενέργειας που διέρχεται από αυτόν, ως ποσοστό της ολικής προσπίπτουσας ηλιακής ενέργειας. Εκφράζει κατά συνέπεια το άθροισμα της άμεσα μεταφερόμενης ακτινοβολίας και αυτής η οποία απορροφάται και επανεκπέμπεται προς τον εσωτερικό χώρο. Ο g είναι δείκτης ισοδύναμος του SHGC (έχουν τον ίδιο ορισμό) και χρησιμοποιείται γενικά στην Ευρώπη. Παίρνει και αυτός τιμές από 0 έως 1 και εξαρτάται από τον τύπο του υαλοπίνακα και από τη γωνία πρόσπτωσης και τη φασματική κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ωστόσο, για απλοποίηση, οι κατασκευαστές συνήθως απλώς παρέχουν μία φασματικά σταθμισμένη τιμή του g για κάθετο πρόσπτωση ηλιακής



ακτινοβολίας. Η μοναδική διαφορά μεταξύ των δύο δεικτών είναι ότι για τον ορισμό του SHGC χρησιμοποιείται αέριος μάζα ίση με 1,5, ενώ για τον ορισμό του g αέριος μάζα ίση με 1,0. Ορίζεται και ο συντελεστής  $g_{gl}$ , ο οποίος εκφράζει τη μέση τιμή του λόγου της ηλιακής ακτινοβολίας που περνά από την επιφάνεια του υαλοπίνακα προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτόν και λαμβάνεται ίσος με το 90% του συντελεστή g σε κάθετη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας.

Η διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία (Solar Radiation Transmittance – SRT) είναι ο δείκτης που υποδηλώνει το ποσοστό της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά την επιφάνεια του υαλοπίνακα. Εξαρτάται από τον τύπο του υαλοπίνακα και από τη γωνία πρόσπτωσης και τη φασματική κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν αναφερόμαστε σε ηλιακή προσπίπτουσα ακτινοβολία, το μέγεθος  $\tau$  που αναφέρεται παραπάνω ταυτίζεται με το SRT.

Η οπτική (ή φωτεινή) διαπερατότητα (Visible Light Transmittance – VLT –  $T_{vis}$ ) ενός υαλοπίνακα υποδηλώνει το ποσοστό του ορατού φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά την επιφάνειά του. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη αυτού, τόσο περισσότερο ηλιακό φως διαπερνά την επιφάνεια του υαλοπίνακα. Εξαρτάται από τον τύπο του υαλοπίνακα και από τη γωνία πρόσπτωσης και τη φασματική κατανομή της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Η οπτική διαπερατότητα επιδιώκεται να είναι υψηλή, καθώς μεγάλες τιμές της επάγουν μικρές ανάγκες σε τεχνητό φωτισμό και αντίστροφα.

Η διαπερατότητα στην υπέρυθρη ακτινοβολία (Infrared Radiation Transmittance – IRT) και η διαπερατότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία (UV Light Transmittance) είναι οι δείκτες που υποδηλώνουν το ποσοστό της υπέρυθρης και της υπεριώδους ακτινοβολίας, αντίστοιχα, που διαπερνούν την επιφάνεια του υαλοπίνακα.

Ο λόγος φωτεινού προς ηλιακό κέρδος (Light to Solar Gain Ratio – LSG) ορίζεται ως ο λόγος της οπτικής διαπερατότητας (VLT) προς τον συντελεστή ηλιακού θερμικού κέρδους (SHGC). Είναι χρήσιμο μέγεθος λόγω του ότι σε έναν υαλοπίνακα μπορεί να είναι επιθυμητή η μείωση του ηλιακού θερμικού κέρδους, χωρίς παράλληλες μεγάλες εκπτώσεις στην οπτική του διαπερατότητα.

Ισοδύναμο μέγεθος, αλλά με βάση τον ηλιακό συντελεστή g, είναι η επιλεκτικότητα (selectivity) ενός υαλοπίνακα, που ορίζεται ως ο λόγος της οπτικής διαπερατότητας προς τον συντελεστή g. Οι τιμές που μπορεί να πάρει η επιλεκτικότητα ενός υαλοπίνακα κυμαίνονται ανάμεσα στο 0 και περίπου 2 (για την ακρίβεια, οι πιο επιλεκτικοί υαλοπίνακες έχουν επιλεκτικότητα περίπου ίση με 2,5). Μηδενική επιλεκτικότητα έχει ένας αδιαφανής υαλοπίνακας, ενώ περίπου 2 είναι η καλύτερη

δυνατή επιλεκτικότητα αφού το φως αντιπροσωπεύει περίπου το 50% του ηλιακού φάσματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή, τόσο πιο επιλεκτικός είναι ο υαλοπίνακας.

Με την ευρύτερη έννοια του όρου, φασματικά επιλεκτικός είναι ένας υαλοπίνακας του οποίου οι ιδιότητες μεταβάλλονται σημαντικά συναρτήσει του μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας – δηλαδή είναι δυνατή και η ύπαρξη υαλοπίνακα που να παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη διαπερατότητα για μήκη κύματος διαφορετικά αυτών του φωτός.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας (ή θερμικής διαπερατότητας) ( $U_g$  Value) ενός υαλοπίνακα δίνει την ποσότητα της θερμότητας που διέρχεται σε 1h από επιφάνεια εμβαδού  $1 \text{ m}^2$  και πάχος  $d$  m, υπό σταθερή θερμική κατάσταση, όταν η διαφορά θερμοκρασίας του αέρα που βρίσκεται εκατέρωθεν της επιφάνειας είναι  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  (ο δείκτης  $g$  αναφέρεται στην αγγλική μετάφραση glazing). Μονάδα μέτρησης του συντελεστή  $U_g$  (στο σύστημα SI) είναι το  $\frac{W}{m^2 \cdot K}$ . Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ορίζεται από τη σχέση:

$$U_g = \frac{1}{R_{ολ.g}} \quad (3.6)$$

όπου  $R_{ολ.g}$  είναι η συνολική θερμική αντίσταση του υαλοπίνακα που δίνεται από τη σχέση:

$$R_{ολ.g} = R_i + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + \sum_{j=1}^{n-1} R_{\delta_j} + R_a \quad (3.7)$$

όπου:

- $n$  [-]: το πλήθος των φύλλων του υαλοπίνακα:  $n=1$ , για μονό υαλοπίνακα  
 $n=2$ , για διπλό υαλοπίνακα  
 $n=3$ , για τριπλό υαλοπίνακα
- $d$  [m]: το πάχος του κάθε φύλλου του υαλοπίνακα
- $\lambda$  [W/(m·K)]: ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας της υάλου
- $R_i$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]: η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από τον εσωτερικό χώρο προς το δομικό στοιχείο– στον όρο αυτόν μπορεί να συμπεριλαμβάνεται τυχούσα επίδραση διαφόρων επιστρώσεων (ή μεμβρανών) στην πλευρά προς τον εσωτερικό χώρο του εσωτερικού φύλλου του υαλοπίνακα, όπως για παράδειγμα η επίστρωση χαμηλής εκπομπής low-e που αναφέρεται παρακάτω
- $R_a$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]: η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από το δομικό στοιχείο προς το εξωτερικό περιβάλλον– ισχύουν τα ανάλογα με τον προηγούμενο όρο, για επιστρώσεις (ή μεμβράνες) στην πλευρά προς το εξωτερικό περιβάλλον του εξωτερικού φύλλου του υαλοπίνακα

- $R_{\delta}$  [ $m^2 \cdot K/W$ ]: Η θερμική αντίσταση του εγκλωβισμένου στρώματος αέρα (ή αερίου γενικότερα) στο διάκενο ανάμεσα στα φύλλα του υαλοπίνακα – ισχύουν τα ανάλογα με τον προηγούμενο όρο, για επιστρώσεις (ή μεμβράνες) στην πλευρά προς το εσωτερικό του υαλοπίνακα των φύλλων

Προς σύντομη επεξήγηση του πώς η ύπαρξη επίστρωσης μπορεί να μεταβάλλει τη θερμική αντίσταση, δίνεται για παράδειγμα η σχέση για τη θερμική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία (που αποτελεί μέρος της συνολικής θερμικής αντίστασης) του εγκλωβισμένου στρώματος αέρα (ή άλλου αερίου) στο διάκενο ενός διπλού υαλοπίνακα, που μπορεί να γραφεί:

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad} \cdot A} \quad (3.8)$$

όπου  $h_{rad}$  ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ φύλλων επιφάνειας άπειρου εμβαδού και δίνεται από τη σχέση:

$$h_{rad} = \frac{\sigma \cdot (T_1 + T_2) \cdot (T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (3.9)$$

όπου:

- $T_1$  και  $T_2$  είναι οι θερμοκρασίες της επιφάνειας των δύο φύλλων
- $\varepsilon_1$  και  $\varepsilon_2$  είναι οι συντελεστές εκπομπής των δύο φύλλων

Είναι προφανές ότι μεταβολή των συντελεστών εκπομπής μέσω εσωτερικών επιστρώσεων στην πλευρά προς το εσωτερικό των φύλλων, επιφέρει μεταβολή στη θερμική αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία.

Το γυαλί γενικά έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα –περίπου  $1 \text{ W}/(m \cdot K)$ – οπότε παρουσιάζει μικρή θερμική αντίσταση στην μεταδιδόμενη με αγωγή θερμότητα μέσω αυτού. Οπότε το κυρίως μέρος της θερμικής αντίστασης, σε υαλοπίνακες με περισσότερα από 1 φύλλα, προέρχεται από τα στρώματα αέρα (ή άλλου αερίου) στο διάκενο ανάμεσα στα φύλλα, που εμποδίζουν την μετάδοση θερμότητας με αγωγή και συναγωγή. Πρακτικά, όσο πιο μικρές είναι οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας ενός υαλοπίνακα, τόσο μεγαλύτερη είναι η θερμομονωτική του

ικανότητα. Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα (όπως και αυτές άλλων ιδιοτήτων) αναφέρεται με ακρίβεια στο πιστοποιητικό που συνοδεύει το προϊόν και προέρχεται από τον κατασκευαστή του. Η τιμή αυτή δίνεται με βάση κατακόρυφη στήριξη του υαλοπίνακα. Μια αλλαγή στην γωνία στήριξης την επηρεάζει, αφού για παράδειγμα τοποθέτηση σε οροφή γωνίας κλίσης 20° ως προς το οριζόντιο επίπεδο αυξάνει τον συντελεστή  $U_g$  κατά 10-20% σε σχέση με την κατακόρυφη τοποθέτηση (υπό χειμερινές συνθήκες). Οι καιρικές συνθήκες, όπως η εξωτερική-εσωτερική θερμοκρασία και η ταχύτητα του ανέμου, επίσης επηρεάζουν την τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας. Οι κατασκευαστές συνήθως αναφέρουν τιμή του για χειμερινές και σχετικά δυσμενείς καιρικές συνθήκες, όπως ταχύτητα (εξωτερικού) ανέμου 24 km/h, εξωτερική θερμοκρασία -18 °C και εσωτερική θερμοκρασία 21 °C με φυσική συναγωγή στην εσωτερική επιφάνεια του υαλοπίνακα. Μπορούν πάντως να δίνονται και θερινές τιμές του συντελεστή που αντιστοιχούν σε εξωτερικές συνθήκες όπως 12 km/h, 32 °C, ηλιακή ακτινοβολία 732 W/m<sup>2</sup> και εσωτερικές 24 °C και φυσική συναγωγή. Οι τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας (όπως και των υπολοίπων ιδιοτήτων των υαλοπινάκων και κουφωμάτων γενικότερα) πρέπει να υπολογίζονται, να δίνονται, ή και να εναρμονίζονται με βάση συγκεκριμένα διεθνή και εθνικά πρότυπα (νόρμες) που έχουν θεσπιστεί. Για διαφορετικές συνθήκες υπάρχουν δυνατότητες μετατροπής. Η τιμή του  $U_g$  μπορεί να υπολογιστεί και πειραματικά. Να τονιστεί επίσης ότι ο  $U_g$  αναφέρεται στον υαλοπίνακα και μόνο (και μάλιστα ουσιαστικά στην κεντρική περιοχή του, καθώς δεν συμπεριλαμβάνονται οι επιδράσεις των άκρων στήριξης), καθώς η παρουσία του πλαισίου στήριξής του και της κάσας του κουφώματος επιδρά στον συνολικό συντελεστή του παραθύρου (όπως και σε άλλες ιδιότητές του) – αυτό εξετάζεται σε επόμενο υποκεφάλαιο.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι πολύ σημαντικός δείκτης για την μελέτη και εφαρμογή των υαλοπινάκων σε κτίρια, καθώς όπως φαίνεται και πιο κάτω, οι τιμές του σε υαλοπίνακες είναι γενικά υψηλότερες από αυτές των υπολοίπων δομικών υλικών σε ένα κτιριακό κέλυφος. Για αυτό το λόγο υπάρχει γενικά σημαντικό δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας και από την σκοπιά των θερμομονωτικών ιδιοτήτων των υαλοπινάκων, πέρα από αυτή των οπτικών ιδιοτήτων, που αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας.

Ο θερμικός ισολογισμός υαλοπίνακα σε σχέση με το περιβάλλον (εξωτερικό και εσωτερικό) εκφράζεται από την εξίσωση:

$$I_t + U_g \cdot (t_o - t_i) = \dot{q}_R + \dot{q}_S + \dot{q}_T + \dot{q}_{RCo} + \dot{q}_{RCi} \quad (3.10)$$

όπου:

- $I_t$ : προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία, [W/m<sup>2</sup>]
- $U_g$ : συντελεστής θερμοπερατότητας υαλοπίνακα, [W/(m<sup>2</sup>·K)]
- $t_o, t_i$ : εξωτερική και εσωτερική θερμοκρασία, αντίστοιχα, [°C]

- $\dot{q}_R, \dot{q}_S, \dot{q}_T$ : θερμική ισχύς ανακλώμενη, αποθηκευόμενη στον υαλοπίνακα και διερχόμενη από τον υαλοπίνακα, αντίστοιχα, [W/m<sup>2</sup>] – συνήθως είναι:  
 $\dot{q}_S \ll \dot{q}_T, \dot{q}_R$
- $\dot{q}_{RCo}, \dot{q}_{RCi}$ : θερμική ισχύς αποδιδόμενη από τον υαλοπίνακα προς το εξωτερικό και το εσωτερικό περιβάλλον, αντίστοιχα, μέσω ακτινοβολίας και συναγωγής, [W/m<sup>2</sup>]

Το συνολικό θερμικό κέρδος χώρου,  $\dot{q}_A$  [W/m<sup>2</sup>], μέσω του υαλοπίνακα μπορεί να εκφραστεί ως το άθροισμα της διερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, της ροής της απορροφούμενης (από τον υαλοπίνακα) θερμότητας προς το εσωτερικό και της θερμοροής λόγω διαφοράς εξωτερικής-εσωτερικής θερμοκρασίας:

$$\dot{q}_A = \tau \cdot I_t + N_i \cdot (\alpha \cdot I_t) + U_g \cdot (t_o - t_i) \quad (3.11)$$

όπου  $N_i$  είναι το κλάσμα της απορροφούμενης ηλιακής ακτινοβολίας που αποδίδεται προς το εσωτερικό και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_i = \frac{U_g}{h_o} \quad (3.12)$$

όπου  $h_o$  είναι ολικός (δηλαδή περιλαμβάνει συναγωγή και ακτινοβολία) συντελεστής μεταφοράς θερμότητας της εξωτερικής επιφάνειας του υαλοπίνακα.

Για απλό μονό υαλοπίνακα είναι:

$$SHGC = \tau + \alpha \cdot N_i \quad (3.13)$$

Οπότε προκύπτει:

$$\dot{q}_A = SHGC \cdot I_t + U_g \cdot (t_o - t_i) = SHG + U_g \cdot (t_o - t_i) \quad (3.14)$$

Η παραπάνω σχέση διαχωρίζει το συνολικό θερμικό κέρδος του υαλοπίνακα στις δύο συνιστώσες του, δηλαδή το ηλιακό θερμικό κέρδος και το θερμικό κέρδος λόγω διαφοράς θερμοκρασίας.

Η εξίσωση (3.14) είναι γενική και ισχύει για οποιοδήποτε είδος υαλοπίνακα, εφόσον ο SHGC αντικατασταθεί με την κατάλληλη έκφρασή του. Έτσι, για παράδειγμα, για απλό διπλό υαλοπίνακα, η έκφραση του SHGC είναι:

$$SHGC = \bar{\tau} + \frac{U_g \cdot \alpha_o}{h_o} + \left( \frac{U_g}{h_o} + \frac{U_g}{h_s} \right) \cdot \alpha_i \quad (3.15)$$

όπου:

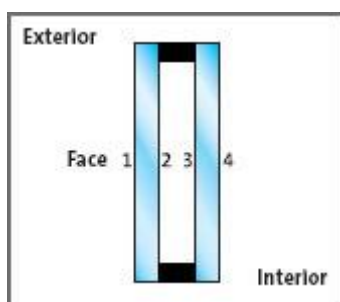
$$\bar{\tau} = \frac{\tau_o \cdot \tau_i}{1 - \rho_2 \cdot \rho_3} \quad (3.16)$$

$$\alpha_o = \alpha_1 + a_2 \cdot \frac{\tau_o \cdot \rho_3}{1 - \rho_2 \cdot \rho_3} \quad (3.17)$$

$$\alpha_i = \alpha_3 \cdot \frac{\tau_o}{1 - \rho_2 \cdot \rho_3} \quad (3.18)$$

Η εξήγηση των συμβόλων στις εξισώσεις (3.15) - (3.18), σε συνδυασμό με το σχήμα 3.4, έχει ως εξής:

- $\bar{\tau}$  : διαπερατότητα διπλού υαλοπίνακα
- $\tau_o$ : διαπερατότητα εξωτερικού φύλλου
- $\tau_i$ : διαπερατότητα εσωτερικού φύλλου
- $\alpha_o$ : συνολική απορροφητικότητα εξωτερικού φύλλου
- $\alpha_i$ : συνολική απορροφητικότητα εσωτερικού φύλλου
- $\alpha_1$ : απορροφητικότητα εξωτερικού φύλλου για ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στην εξωτερική του επιφάνεια
- $\alpha_2$ : απορροφητικότητα εξωτερικού φύλλου για ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στην εσωτερική του επιφάνεια
- $\alpha_3$ : απορροφητικότητα εσωτερικού φύλλου για ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στην εξωτερική του επιφάνεια
- $\alpha_4$ : απορροφητικότητα εσωτερικού φύλλου για ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στην εσωτερική του επιφάνεια
- $\rho_1$ : ανακλαστικότητα εξωτερικής επιφάνειας εξωτερικού φύλλου
- $\rho_2$ : ανακλαστικότητα εσωτερικής επιφάνειας εξωτερικού φύλλου
- $\rho_3$ : ανακλαστικότητα εξωτερικής επιφάνειας εσωτερικού φύλλου
- $\rho_4$ : ανακλαστικότητα εσωτερικής επιφάνειας εσωτερικού φύλλου
- $h_s$ : ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο διάστημα αέρα μεταξύ των δύο φύλλων



Σχήμα 3.4: Διπλός υαλοπίνακας αποτελούμενος από το εξωτερικό και το εσωτερικό φύλλο.

### 3.4 Είδη υαλοπινάκων

Η επιλογή του είδους υαλοπίνακα προς εγκατάσταση, έχει σημαντικές επιπτώσεις στην εξοικονόμηση ενέργειας στα κτίρια και στη δημιουργία άνετων συνθηκών εσωκλίματος. Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν παράμετροι όπως:

- τα ηλιακά κέρδη
- οι θερμικές απώλειες
- ο φυσικός φωτισμός
- η ηχομόνωση
- η μηχανική αντοχή
- το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του υαλοπίνακα και η συνεισφορά του στην εξοικονόμηση ενέργειας σε ετήσια βάση
- η ευκολία συντήρησής του
- η θέα
- η αισθητική.

Η επιλογή του κατάλληλου τύπου υαλοπίνακα, γίνεται με βάση τα τεχνικά του χαρακτηριστικά, αλλά και τα τοπικά κλιματικά δεδομένα, τα χαρακτηριστικά του κτιρίου, τις ανάγκες και απαιτήσεις των χρηστών κ.λπ. Η τεχνολογία υαλοπινάκων, που αναπτύσσεται διαρκώς, τείνει πλέον να γίνει αρκετά εκλεπτυσμένη και αυτό επιβάλλεται και από το μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας που υπάρχει στον τομέα αυτό. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κυριότερα και περισσότερο διαδεδομένα (σε επίπεδο χρήσης ή/και έρευνας) είδη υαλοπινάκων, ξεκινώντας από τα πιο απλά που υπάρχουν και καταλήγοντας σε πιο σύνθετα. Παράλληλα, γίνεται παράθεση τιμών για κάποιες από τις ιδιότητες πολλών από τα είδη τους.

#### Απλοί μονοί υαλοπίνακες

Πρόκειται για την πιο απλή μορφή υαλοπίνακα. Είναι το είδος υαλοπίνακα που χρησιμοποιούσαν παλιότερα στις κατασκευές, όμως πλέον οι περισσότεροι αντικαθίστανται από άλλα είδη. Το πάχος αυτών των υαλοπινάκων που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές κουφωμάτων είναι συνήθως από 4mm έως 12 mm. Ανάλογα με το πάχος, τη λείανση και τη μηχανική αντοχή χωρίζονται σε κοινούς, ημικρύσταλλους και κρύσταλλα. Οι απλοί (λέγονται και λευκοί) μονοί υαλοπίνακες έχουν τον μεγαλύτερο συντελεστή θερμοπερατότητας, ο οποίος μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του γυαλιού. Τυπική τιμή του συντελεστή αυτού για έναν απλό μονό υαλοπίνακα πάχους 4 mm είναι 5,8 W/(m<sup>2</sup>·K), ενώ τυπικές τιμές για τον SHGC και την VLT είναι 0,86 και 0,90 αντίστοιχα. Επίσης ενδεικτικές τιμές της διαπερατότητας καθέτου πρόσπτωσης καθαρού γυαλιού πάχους 2,5 mm, 3 mm και 6 mm, είναι 86%, 84% και 78% της ολικής προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.

#### Απλοί διπλοί και τριπλοί υαλοπίνακες

Οι απλοί διπλοί (και οι τριπλοί) υαλοπίνακες αποτελούνται από δύο (τρία) παράλληλα φύλλα (μονούς υαλοπίνακες) με την παρεμβολή ενός αποστάτη με

αφυγραντικό υλικό στο εσωτερικό του (ή δύο αποστατών για τους τριπλούς) και που μεταξύ των φύλλων υπάρχει στρώμα ξηρού αέρα. Ο αέρας πρέπει να είναι ξηρός για να αποφεύγονται υγρασιές των υδατμών που αλλιώς θα υπήρχαν στο εσωτερικό των υαλοπινάκων. Το στρώμα αέρα, λόγω της θερμομονωτικής ιδιότητας του αέρα, αυξάνει την θερμική αντίσταση σε σχέση με τον απλό μονό υαλοπίνακα. Το ενδιάμεσο διάκενο σφραγίζεται περιμετρικά με αεροστεγή υλικά, τα οποία πρέπει να είναι στεγανά ώστε να αποτελούν φράγμα υδατμών\*. Πρέπει να είναι ελαστικά, ώστε να παραλαμβάνουν τις διαφοροποιήσεις του όγκου του αέρα του διακένου εξαιτίας διαστολών και συστολών σε θερμοκρασιακές μεταβολές μεταξύ  $-20^{\circ}\text{C}$  και  $+100^{\circ}\text{C}$ . Πρέπει επίσης να είναι ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία και σε χημικές ουσίες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι πολυκαρβονικά υλικά ή πολυαμίδια (καουτσούκ του βουτυλενίου), πολυουρεθάνες, πολυσουλφίδια ή σιλικόνες.

Σε έναν διπλό υαλοπίνακα, το εσωτερικό φύλλο απορροφά και ανακλά μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας που διέρχεται από το εξωτερικό φύλλο. Το πάχος του διακένου (ή διακένων) επηρεάζει τη θερμομονωτική ικανότητα του υαλοπίνακα. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος του διακένου – κατά κύριο λόγο επηρεάζεται από αυτό και όχι από το πάχος φύλλων γυαλιού. Πάχος διακένου 15-17 cm σε διπλό υαλοπίνακα εξασφαλίζει ικανοποιητική θερμομόνωση. Μεγαλύτερα πάχη επιτρέπουν την κίνηση του αέρα στο διάκενο, με συνέπεια τη μείωση της θερμομονωτικής ικανότητας, εξαιτίας μεταφοράς θερμότητας από τον εσωτερικό προς τον εξωτερικό υαλοπίνακα (φύλλο) το χειμώνα ή αντίστροφα το καλοκαίρι. Βέβαια υπάρχουν και περιορισμοί από τα πλαίσια των κουφωμάτων ως προς το συνολικό πάχος ενός υαλοπίνακα. Με κατεύθυνση την επίτευξη ακουστικής άνεσης, πρέπει να επιλέγονται διπλοί υαλοπίνακες με μεγάλο ενδιάμεσο διάκενο, με ειδικό ενδιάμεσο παρέμβυσμα, ενώ τα πάχη των δύο φύλλων του διπλού υαλοπίνακα θα πρέπει να διαφέρουν από 2 έως και 6 mm, ώστε η ηχομόνωση να παρουσιάζεται σε ευρύτερο φάσμα συχνοτήτων.

Ένας τριπλός υαλοπίνακας παρουσιάζει γενικά μεγαλύτερη θερμομόνωση συγκριτικά με έναν διπλό. Στο σημείο αυτό όμως χρειάζεται προσοχή στις λεπτομέρειες, γιατί για παράδειγμα ένας απλός τριπλός υαλοπίνακας με ίδιο πάχος φύλλων γυαλιού και του ίδιου συνολικού πάχους με έναν διπλό, έχει μεγαλύτερο συντελεστή θερμοπερατότητας από τον διπλό, αφού ο αέρας – του οποίου χώρο καταλαμβάνει φύλλο γυαλιού στον τριπλό υαλοπίνακα – έχει μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από το γυαλί (και ο συντελεστής συναγωγής του αέρα δεν προσφέρει βελτίωση λόγω της ύπαρξης δύο διακένων, συγκριτικά). Γενικά πάντως το πάχος των τριπλών υαλοπινάκων είναι μεγαλύτερο. Οι τριπλοί υαλοπίνακες έχουν και αυξημένο βάρος, οπότε παρουσιάζονται δυσκολίες. Μπορούν να τοποθετηθούν σε ειδικές κατηγορίες κουφωμάτων και με ειδικούς μηχανισμούς ανθεκτικούς σε μεγάλα βάρη. Να σημειωθεί εδώ ότι στην αγορά υπάρχουν ακόμα και υαλοπίνακες τετραπλοί και πενταπλοί, αν και δεν είναι τόσο διαδεδομένοι.

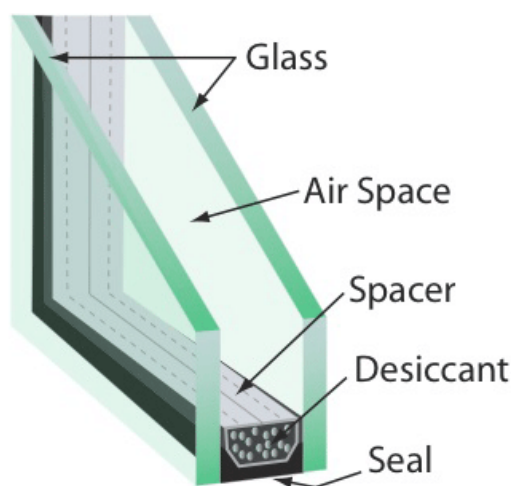
---

\* Τα πυριτικά άλατα που τοποθετούνται στο εσωτερικό του αποστάτη μειώνουν δραματικά την υγρασία που μπορεί παρόλα αυτά να εισέλθει στο εσωτερικό των υαλοπινάκων. Η απορρόφηση της υγρασίας γίνεται μέσα από τις οπές, που υπάρχουν στην εσωτερική πλευρά του αποστάτη.



Ένα υαλοστάσιο με διπλό υαλοπίνακα, αποτελούμενο από δύο απλούς υαλοπίνακες 4 mm με 6 mm διάκενο αέρα ανάμεσά τους, έχει  $U_g$  ίσο με  $3,4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Το ίδιο υαλοστάσιο αλλά με διάκενο 12 mm έχει  $U_g$  ίσο με  $2,9 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Ο  $U_g$  τριπλού υαλοπίνακα φύλλων πάχους 4 mm το καθένα και διακένων πάχους 12 mm το καθένα είναι περίπου  $2,2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Για καλύτερη αντίληψη των τιμών αυτών, σε σχέση με τον απλό υαλοπίνακα και με το υπόλοιπο κτιριακό κέλυφος, αξίζει να γίνει σύγκριση με τον συντελεστή θερμοπερατότητας ενός τοίχου (διπλή τοιχοποιία) χωρίς μόνωση στο εσωτερικό του, ο οποίος έχει τυπική τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας ίση με  $1,5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  περίπου, ενώ ένας τοίχος με καλή μόνωση μπορεί να έχει τυπική τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας μικρότερη και από  $0,2 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Δηλαδή η διαφορά που παρουσιάζεται σε σχέση με τους μονωμένους τοίχους είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Ενδεικτικές τιμές για απλό διπλό υαλοπίνακα διακένου 12 mm για τα μεγέθη SHGC και VLT είναι 0,75 και 0,81 αντίστοιχα, ενώ για αντίστοιχο τριπλό είναι 0,61 για τον SHGC και 0,70 για την VLT. Το ανθρώπινο μάτι δεν είναι εύκολο να αντιληφθεί τη διαφορά που παρουσιάζεται στην VLT σε σχέση με τον μονό υαλοπίνακα.



**Σχήμα 3.5:** Σχεδιαστική απεικόνιση διπλού υαλοπίνακα σε τομή. Διακρίνονται τα φύλλα γυαλιού, το διάκενο αέρα, ο αποστάτης με το αφυγραντικό υλικό στο εσωτερικό του και η περιμετρική σφράγιση του διακένου.

### Θερμομονωτικοί υαλοπίνακες με πλήρωση αερίων ή με κενό αέρος

Εκτός από τους απλούς διπλούς (ή τριπλούς) υαλοπίνακες, αυξημένη θερμομονωτική ικανότητα έχουν υαλοπίνακες που στο διάκενό τους περιέχουν ευγενές αέριο (αντί για αέρα), ή κενό αέρος. Η πλήρωση του διακένου των υαλοπινάκων με ευγενή αέρια (αργό, κρυπτό, ξένο κ.λπ.) αυξάνει τη θερμομονωτική και την ηχομονωτική τους ικανότητα. Τα αέρια αυτά παρουσιάζουν μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από τον αέρα, αλλά και μεγαλύτερη πυκνότητα, ώστε να περιορίζουν

την μετάδοση θερμότητας με συναγωγή (κάνουν δυσκολότερη την κίνηση). Το αργό (Ar) είναι καλύτερο μονωτικό από τον αέρα και το κρυπτό ακόμη καλύτερο και ακριβότερο από το αργό, ενώ το κενό αέρος προσφέρει την μεγαλύτερη θερμομόνωση, αλλά είναι η ακριβότερη μέθοδος. Το κενό παρέχει εξαιρετική θερμική απόδοση και αν η πίεση είναι αρκετά χαμηλή\*, ουσιαστικά μηδενίζεται η μεταφορά θερμότητας με αγωγή και συναγωγή. Οι υαλοπίνακες με κενό αέρος επιτρέπουν για τον λόγο αυτόν την ύπαρξη αρκετά μικρότερου πάχους διακένου (έως και 0,2 mm).

Συνηθέστερη είναι η χρήση αργού, που αποτελεί το 0,93% του αέρα. Το αργό πρέπει να καταλαμβάνει τουλάχιστον το 90% του όγκου στο διάκενο του υαλοπίνακα. Η πλήρωση με αργό πρέπει να παραμένει για ολόκληρη τη διάρκεια ζωής του υαλοπίνακα και σε μια περίοδο 25 ετών να μην χάνεται πάνω από 5% αυτής. Το κρυπτό περιέχει μικρά ποσοστά του ραδιενεργού ισότοπου κρυπτό-85 και αποφεύγεται από ορισμένους κατασκευαστές. Το ξένο αποτελεί το 0,000009% του αέρα και η χρήση του είναι σχετικά ασύμφορη. Κάποιες φορές χρησιμοποιούνται και μίγματα των αερίων. Η πλήρωση με αέριο επηρεάζει ελάχιστα τον SHGC και ουσιαστικά καθόλου την VLT.

Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας για διάφορους υαλοπίνακες αυτής της κατηγορίας είναι:

- διπλός υαλοπίνακας φύλλων πάχους 4 mm και διακένου 6 mm, με πλήρωση αργού: 3,0 W/(m<sup>2</sup>·K)
- διπλός υαλοπίνακας φύλλων πάχους 4 mm και διακένου 12 mm, με πλήρωση αργού: 2,7 W/(m<sup>2</sup>·K)
- διπλός υαλοπίνακας φύλλων πάχους 4 mm και διακένου 12 mm, με πλήρωση κρυπτού: 2,6 W/(m<sup>2</sup>·K)
- τριπλός υαλοπίνακας φύλλων πάχους 4 mm και διακένων 12 mm το καθένα, με πλήρωση αργού: 2,0 W/(m<sup>2</sup>·K)
- διπλός υαλοπίνακας συνολικού πάχους 6,5 mm, με κενό αέρος (εμπορικά διαθέσιμος): 1,1 W/(m<sup>2</sup>·K) (αν και έχει επίστρωση Low-e οπότε η σύγκριση πρέπει να γίνεται με υαλοπίνακες αυτής της κατηγορίας, που αναφέρονται παρακάτω)

[υαλοπίνακας με 0,4 W/(m<sup>2</sup>·K) αναφέρεται στο πεδίο επιστημονικής έρευνας – προς το παρόν τα διαθέσιμα προϊόντα δεν πλησιάζουν σε τέτοιες τιμές λόγω τεχνικών περιορισμών]

---

\* Στη μηχανολογία, κενό χαρακτηρίζεται οποιαδήποτε περιοχή εντός της οποίας η πίεση ενός αερίου είναι (αρκετά) μικρότερη της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η επίτευξη απόλυτου κενού με μηδενική πίεση είναι στην πράξη αδύνατη. Ενδεικτική τιμή της πίεσης στο εσωτερικό ενός υαλοπίνακα με κενό αέρος είναι τα 10<sup>-3</sup> hPa (περίπου 10<sup>-6</sup> atm). Για την αποφυγή της σύνθλιψης των φύλλων γυαλιού του υαλοπίνακα μεταξύ τους από την εμφανιζόμενη διαφορά πίεσης, μικροσκοπικοί ειδικοί αποστάτες τοποθετούνται ανάμεσά τους σε συγκεκριμένες αποστάσεις κατά ύψος και κατά μήκος. Επίσης η περιμετρική σφράγιση του διακένου, πρέπει να διατηρεί την εσωτερική πίεση χαμηλή, καθώς πίεση μόνο 10 φορές μεγαλύτερη από 10<sup>-6</sup> atm είναι αρκετή για να επαναφέρει την μετάδοση θερμότητας με αγωγή κοντά στην κανονική της τιμή.

## Υαλοπίνακες χαμηλού συντελεστή εκπομπής (Low-e)

Οι υαλοπίνακες χαμηλού συντελεστή εκπομπής, ή χαμηλής (θερμικής) εκπομπής (Low emissivity), που ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των ενεργειακών\* υαλοπινάκων, είναι υαλοπίνακες (συνήθως διπλοί ή τριπλοί) με ειδική, σχεδόν αόρατη, λεπτή επίστρωση (μετάλλων και μεταλλικών οξειδίων, όπως του αργύρου) σε τουλάχιστον μία από τις επιφάνειές τους. Η επίστρωση αυτή εμφανίζει υψηλή ανακλαστικότητα στη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (γενικά υπέρυθρη – τυπικά η θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος εκτείνεται από τα 4 έως τα 100 μm).

Το κοινό γυαλί έχει ενδεικτική τιμή του συντελεστή εκπομπής ( $\epsilon$ ) ίση με 0,84 (84%) για το τμήμα της θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, που σημαίνει ότι εκπέμπει το 84% της ενέργειας που είναι δυνατόν για σώμα θερμοκρασίας δωματίου (σε σχέση δηλαδή με το μέλαν σώμα). Αυτό σημαίνει επίσης ότι για τη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που φτάνει στην επιφάνεια του γυαλιού, το 84% αυτής απορροφάται και μόνο το 16% ανακλάται (η διάβαση της ακτινοβολίας αυτής είναι μηδαμινή). Με την επίστρωση χαμηλής εκπομπής εξασφαλίζεται συντελεστής εκπομπής τιμής έως και 0,02. Ένα τέτοιο φύλλο υαλοπίνακα ανακλά λοιπόν το 98% της προσπίπτουσας μεγάλου μήκους κύματος υπέρυθρης ακτινοβολίας. Οπότε, για παράδειγμα, τον χειμώνα το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος από τον εσωτερικό χώρο, που προσπίπτει στον υαλοπίνακα, ανακλάται και δεν απορροφάται μεγάλο ποσό της ακτινοβολίας αυτής, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας, ως θερμότητα, θα αποδιδόταν προς τα έξω λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας (και θα ήταν μεγάλη θερμική απώλεια). Οι υαλοπίνακες Low-e εμποδίζουν μεγάλο μέρος της θερμικής ακτινοβολίας είτε να εισέρχεται προς το κτίριο, είτε να εκπέμπεται προς το εξωτερικό περιβάλλον. Υπάρχουν υαλοπίνακες Low-e με βέλτιστη απόδοση σε κλίματα που κυριαρχεί ψύξη (για μείωση των θερμικών κερδών) και άλλοι με βέλτιστη απόδοση σε κλίματα που κυριαρχεί θέρμανση (για μείωση των θερμικών απωλειών) – αυτό εξηγείται παρακάτω. Οι κατασκευαστές υαλοπινάκων πολλές φορές μπορεί να μην παρέχουν την τιμή του συντελεστή εκπομπής, αλλά η επίστρωση Low-e προκαλεί σημαντική βελτίωση στον συντελεστή θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα, οπότε η επίδρασή της ενσωματώνεται στην τιμή αυτού.

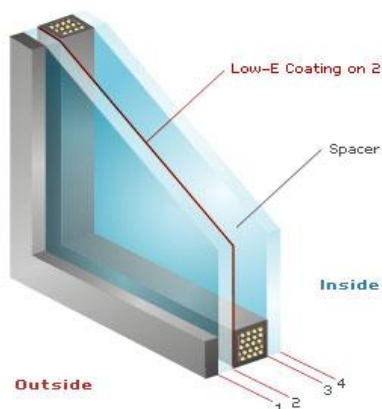
Υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι για την απόθεση της επίστρωσης low-e. Η επίστρωση μπορεί να εφαρμόζεται σε χωριστή φάση από την παραγωγή του γυαλιού (off-line) και προκύπτουν οι υαλοπίνακες low-e μαλακής επίστρωσης ή εν κενώ επίστρωσης (εναπόθεση της επίστρωσης σε κενό αέρος). Μειονέκτημα της επίστρωσης αυτής είναι η ευαισθησία της σε μηχανικές και χημικές καταπονήσεις,

---

\* Ο όρος “ενεργειακοί υαλοπίνακες” χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια ως ελεύθερη μετάφραση του όρου “energy efficient glazing”, για να προσδιορίσει την κατηγορία εκείνη των υαλοπινάκων, οι οποίοι έχουν χαρακτηριστικά τα οποία συντελούν σε μεγάλο βαθμό στην εξοικονόμηση ενέργειας. Τα κυριότερα είδη ενεργειακών υαλοπινάκων είναι οι υαλοπίνακες χαμηλού συντελεστή εκπομπής (Low-e) και οι υαλοπίνακες ηλιακού ελέγχου (Solar control). Οι υαλοπίνακες ηλιακού ελέγχου αναλύονται παρακάτω.

οπότε πρέπει υποχρεωτικά να τοποθετείται σε εσωτερική πλευρά φύλλου του υαλοπίνακα. Επίσης δημιουργούνται χρωματικές αποχρώσεις στη μεριά της επίστρωσης. Επιτυγχάνονται όμως χαμηλοί συντελεστές εκπομπής (γενικά από 0,05 έως 0,15). Η δεύτερη μέθοδος είναι η επίστρωση να εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της παραγωγής των υαλοπινάκων (on-line), οπότε προκύπτουν οι υαλοπίνακες low-e σκληρής επίστρωσης ή πυρολυτικής επίστρωσης (υπό θερμοκρασίες της τάξης των 500 °C). Πλεονέκτημα της επίστρωσης αυτής είναι η ανθεκτικότητά της σε μηχανικές και χημικές καταπονήσεις, αλλά παρουσιάζει υψηλότερη τιμή του συντελεστή εκπομπής (γενικά από 0,35 έως 0,40), οπότε και υψηλότερες τιμές του  $U_g$ . Οι δύο αυτές μέθοδοι επίστρωσης\* εφαρμόζονται γενικότερα σε επιστρωμένους υαλοπίνακες.

Σε έναν διπλό υαλοπίνακα, υπάρχουν 4 δυνατές επιφάνειες για την τοποθέτηση μιας επίστρωσης. Γενικά, για θερμά κλίματα η επίστρωση συμφέρει να εφαρμόζεται, με βάση το σχήμα 3.4 όπου η επιφάνεια “1” επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον, στην επιφάνεια “2” ώστε να ανακλά ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος από τον εξωτερικό χώρο, ενώ σε ψυχρά κλίματα στην επιφάνεια “3”. Συνηθίζεται δηλαδή σε κάθε περίπτωση να τοποθετείται στο εσωτερικό του υαλοπίνακα. Ο συντελεστής θερμοπερατότητας είναι ο ίδιος για τις δύο τοποθετήσεις, αλλά ο SHGC επηρεάζεται. Τοποθέτηση της επίστρωσης, για παράδειγμα στην επιφάνεια “3”, έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη τιμή του SHGC (πάντως μικρότερη σε σχέση με υαλοπίνακα χωρίς επίστρωση) και καθιστά τον υαλοπίνακα λιγότερο αποτελεσματικό σχετικά με τον έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τους θερινούς μήνες. Σημαντικός είναι και ο προσανατολισμός των ανοιγμάτων και το αν αυτά σκιάζονται ή όχι. Πάντως, η διαφορά μεταξύ τοποθέτησης στη θέση “2” και στη θέση “3” είναι έτσι και αλλιώς



**Σχήμα 3.6:** Σχεδιαστική απεικόνιση διπλού υαλοπίνακα Low-e σε πλαίσιο, σε τομή. Η επίστρωση είναι τοποθετημένη στην επιφάνεια “2”.

---

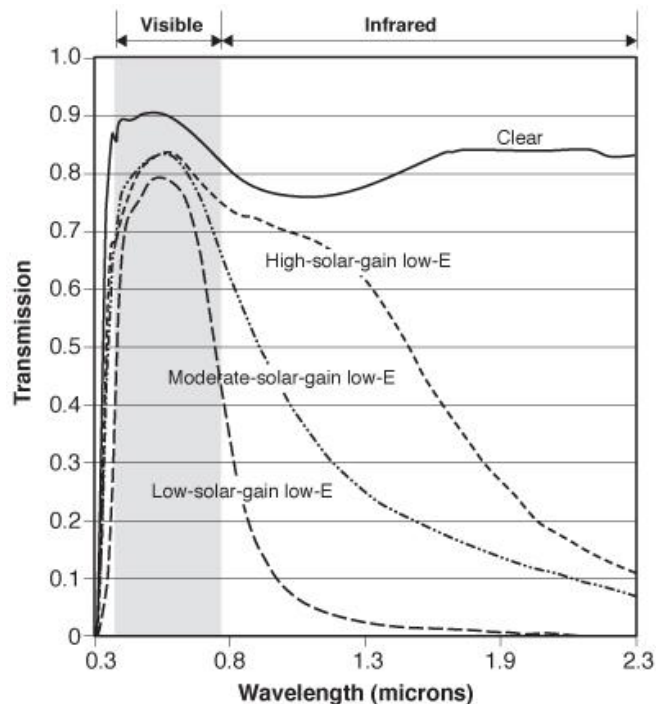
\* Ιδιαίτερη αναφορά σε διάφορες μεθόδους επιστρώσεων γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο, που αφορά τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες.

μικρή, σε σύγκριση με την διαφορά μεταξύ ύπαρξης ή όχι της επίστρωσης γενικά. Να σημειωθεί επίσης ότι τοποθέτηση στη θέση “2” έχει σαν αποτέλεσμα ίδια τιμή του  $U_g$  σε σχέση με τοποθέτηση στη θέση “3”. Τοποθέτηση της επίστρωσης στη θέση “2” ή “3” είναι πολύ αποδοτική, επειδή το μεγαλύτερο μέρος της μεταφοράς θερμότητας διαμέσου του διακένου γίνεται μέσω ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, αν δεν υπάρχει επίστρωση.

Τοποθέτηση στη θέση “4” έχει επίσης επίδραση στην θερμική αντίσταση του υαλοπίνακα, αλλά έχει το δυνητικό μειονέκτημα ότι αφού επιφέρει μείωση της θερμοκρασίας της εσωτερικής αυτής επιφάνειάς του, μπορεί σε ψυχρές περιόδους να παρουσιαστούν πιο εύκολα υγροποιήσεις υδρατμών του ατμοσφαιρικού αέρα πάνω σε αυτήν (αφού μπορεί να συμβεί η θερμοκρασία της επιφάνειας αυτής να είναι χαμηλότερη από το σημείο δρόσου, η τιμή του οποίου αυξάνεται με αύξηση της σχετικής υγρασίας). Σε αυτή την περίπτωση τοποθέτησης πρέπει ο υαλοπίνακας να έχει επαρκή συνολική θερμική αντίσταση για να υπερκαλύπτεται η αρνητική αυτή επίδραση της επίστρωσης (αυτό βέβαια εξαρτάται και από το σημείο της επιφάνειας του υαλοπίνακα, αφού στα άκρα του είναι πιο πιθανό να σχηματιστούν υγροποιήσεις).

Η επίστρωση Low-e γενικά προσδίδει σχετικά μικρή επιπλέον επίδραση (συγκριτικά με άλλες επιστρώσεις) στα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας, σε έναν υαλοπίνακα. Μια επίστρωση με  $\epsilon = 0,15$  έχει ηλιακή και οπτική διαπερατότητα ίσες με 72% και 87%. Μια επίστρωση με  $\epsilon = 0,04$  έχει αντίστοιχα μεγέθη με τιμές 50% και 80% αντίστοιχα. Οι διαφορές αυτές υλοποιούνται μέσω διαφορετικών συνδυασμών μετάλλων και μεταλλικών οξειδίων στην επίστρωση. Οι τιμές αυτές αφορούν την επίστρωση και όχι τον υαλοπίνακα συνολικά, στον οποίο θα είναι μικρότερες, ανάλογα και με τη θέση της επίστρωσης. Οι επιστρώσεις Low-e αποκόπτουν και μέρος της υπεριώδους και της υπέρυθρης ακτινοβολίας (NIR) του ηλιακού φάσματος, αν και όπως τονίστηκε και παραπάνω η κύρια λειτουργία τους σχετίζεται με την ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος.

Οι διαφορές στις τιμές της ηλιακής διαπερατότητας, για τις δύο επιστρώσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω, υποδεικνύουν ότι είναι δυνατή η κατασκευή υαλοπίνακα Low-e με υψηλό, μεσαίο ή χαμηλό SHGC (αλλά περίπου ίδιες VLT). Υπάρχουν υαλοπίνακες Low-e υψηλού ηλιακού (θερμικού) κέρδους (που είναι και οι πρώτοι που εμφανίστηκαν – 1<sup>ης</sup> γενιάς)(και που συνήθως είναι σκληρής επίστρωσης), μετρίου ή και χαμηλού ηλιακού (θερμικού) κέρδους (2<sup>ης</sup> γενιάς Low-e2 και 3<sup>ης</sup> γενιάς Low-e3 ή Low-e High-Performance)(και που συνήθως είναι μαλακής επίστρωσης). Οι δύο τελευταίοι είναι αρκετά επιλεκτικοί, επειδή αποκόπτουν μεγαλύτερα τμήματα του ηλιακού φάσματος μειώνοντας τα ηλιακά θερμικά κέρδη, χωρίς να αποκόπτουν σημαντικά ποσά φωτός. Στην αγγλική ορολογία αναφέρονται ως spectrally selective Low-e (φασματικά επιλεκτικοί Low-e).



**Σχήμα 3.7:** Καμπύλες διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία, για διάφορους υαλοπίνακες με επιστρώσεις Low-e και για υαλοπίνακα χωρίς επίστρωση.

Οι Low-e μετρίου και χαμηλού ηλιακού (θερμικού) κέρδους πρακτικά είναι υαλοπίνακες Low-e ηλιακού ελέγχου (Low-e Solar Control) και είναι γνωστοί στην αγορά και σαν ενεργειακοί υαλοπίνακες τεσσάρων εποχών, υπό την έννοια ότι λειτουργούν αποδοτικά και για την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει πάνω τους, ιδιαίτερα φυσικά το καλοκαίρι και σε θερμά κλίματα. Είναι όμως προφανές ότι αν δεν παρουσιάζεται ηλιασμός των παραθύρων, είτε γιατί αυτά είναι βορεινά, είτε γιατί είναι υπό σκίαση, είτε γιατί βρίσκονται σε ψυχρά κλίματα (όπου ο ηλιασμός μπορεί να είναι ιδιαίτερα επιθυμητός) αρκεί η επίστρωση Low-e 1<sup>ης</sup> γενιάς (αν και έχει κάπως υψηλότερο συντελεστή  $U_g$ ). Ενδεικτικές τιμές για τον SHGC και την VLT είναι:

- Διπλός υαλοπίνακας με πλήρωση αργού και επίστρωση Low-e υψηλού ηλιακού (θερμικού) κέρδους:
  - SHGC = 0,67
  - VLT = 0,78
- Διπλός υαλοπίνακας με πλήρωση αργού και επίστρωση Low-e μετρίου ηλιακού (θερμικού) κέρδους:
  - SHGC = 0,42
  - VLT = 0,72
- Διπλός υαλοπίνακας με πλήρωση αργού και επίστρωση Low-e χαμηλού ηλιακού (θερμικού) κέρδους:
  - SHGC = 0,26
  - VLT = 0,64

Οι διάφοροι τύποι υαλοπινάκων Low-e παρουσιάζουν βέλτιστη απόδοση σε διαφορετικά κλίματα, για παράδειγμα οι χαμηλού ηλιακού κέρδους είναι γενικά καταλληλότεροι για θερμά κλίματα. Ακόμα και σε ένα θερμό κλίμα όμως, μπορεί να υπάρχουν ψυχρές περιόδους οπότε η θερμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας να είναι επιθυμητή. Το ίδιο ισχύει και για παθητικά ηλιακά συστήματα. Από αυτό το παράδειγμα διαφαίνεται ότι είναι επιθυμητή η ύπαρξη υαλοπινάκων με δυναμικά χαρακτηριστικά, δηλαδή ιδιότητες που μπορούν να μεταβάλλονται.

Τέλος, σε έναν υαλοπίνακα Low-e μπορεί να τοποθετηθεί και διαφορετικού είδους επιπλέον επίστρωση, με σκοπό την πρόσδοση επιπρόσθετων χαρακτηριστικών, ανάλογα με τις ανάγκες – αυτό ισχύει γενικά για τους υαλοπίνακες. Η επίστρωση Low-e μπορεί επίσης να εναποτεθεί σε πλαστικό φιλμ ώστε να γίνει η τοποθέτησή αυτού σε ήδη εγκατεστημένο υαλοπίνακα σε κτίριο, με σκοπό την αναβάθμισή του (το ίδιο ισχύει και για άλλου τύπου επιστρώσεις).

Παρακάτω δίνονται ενδεικτικές τιμές για τον συντελεστή θερμοπερατότητας  $U_g$  διαφόρων υαλοπινάκων με επίστρωση Low-e:

- Διπλός υαλοπίνακας, πάχους 4-12-4 mm, με πλήρωση αέρα και επίστρωση Low-e στο ένα φύλλο: 1,7 – 2,1 W/(m<sup>2</sup>·K) – ανάλογα και με τον συντελεστή εκπομπής της επίστρωσης
- Διπλός υαλοπίνακας πάχους 4-12-4 mm, με πλήρωση αργού και επίστρωση Low-e στο ένα φύλλο: 1,3 – 1,7 W/(m<sup>2</sup>·K) (παρόμοια τιμή με αυτή σε διπλή τοιχοποιία χωρίς μόνωση στο εσωτερικό) – ανάλογα και με τον συντελεστή εκπομπής της επίστρωσης
- Διπλός υαλοπίνακας Low-e μαλακής επίστρωσης, με  $\epsilon=0,04$  (με επίστρωση στο ένα φύλλο), πάχους 4-6-4 mm, με πλήρωση αργού: 2,0 W/(m<sup>2</sup>·K)
- Διπλός υαλοπίνακας Low-e μαλακής επίστρωσης, με  $\epsilon=0,04$  (με επίστρωση στο ένα φύλλο), πάχους 4-15-4 mm, με πλήρωση κρυπτού: 1,1 W/(m<sup>2</sup>·K)
- Διπλός υαλοπίνακας Low-e μαλακής επίστρωσης, με  $\epsilon=0,04$  (με επίστρωση στο ένα φύλλο), πάχους 4-20-4 mm, με πλήρωση κρυπτού: 1,2 W/(m<sup>2</sup>·K) – δηλαδή μεγαλύτερη τιμή από την προηγούμενη περίπτωση
- Τριπλός υαλοπίνακας Low-e μαλακής επίστρωσης (με επίστρωση στο ένα φύλλο), πάχους 4-16-4-16-4 mm, με πλήρωση αργού: 0,9 W/(m<sup>2</sup>·K)
- Τριπλός υαλοπίνακας Low-e μαλακής επίστρωσης, πάχους 4-16-4SC-16-4SC mm, με πλήρωση αργού: 0,6 W/(m<sup>2</sup>·K), όπου ο δείκτης SC υποδηλώνει την μαλακή επίστρωση (Soft Coat) – δηλαδή ο υαλοπίνακας αυτός έχει επιστρώσεις σε δύο φύλλα

Πριν από την αναφορά σε υπόλοιπα είδη υαλοπινάκων, αξίζει να γίνει μια γενικότερη αναφορά στους υαλοπίνακες ηλιακού ελέγχου (Solar Control glazing), ή ελέγχου ηλιακής ακτινοβολίας. Οι υαλοπίνακες ηλιακού ελέγχου, που ανήκουν στους ενεργειακούς υαλοπίνακες, είναι ευρύτερη κατηγορία υαλοπινάκων με τους οποίους επιτυγχάνεται παρέμβαση στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω τους.

Η ανάγκη ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας ανακύπτει κυρίως σε κτίρια με μεγάλα ανοίγματα, άμεσα εκτιθέμενα στις ακτίνες του ηλίου (και ειδικά σε θερμά κλίματα). Χαρακτηριστικό και σημαντικό παράδειγμα είναι δημόσια και εμπορικά κτίρια με γυάλινες προσόψεις – που έχουν πολύ μεγάλο λόγο εμβαδού υαλοπινάκων προς εμβαδόν εξωτερικών τοίχων (Window-to-Wall Ratio – WWR) – και στα οποία δεν υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης εξωτερικής σκίασης, που είναι και πιο αποδοτική σε σχέση με την εσωτερική, αλλά και η ύπαρξη εσωτερικής σκίασης πίσω από κάθε υαλοπίνακα μπορεί να μην είναι τόσο πρακτική και επιθυμητή. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



**Σχήμα 3.8: Κτίριο με πολύ μεγάλο WWR.**

Η ύπαρξη τέτοιων υαλοπινάκων επιτρέπει μεγάλες επιφάνειες σε αυτούς, χωρίς ταυτόχρονη ύπαρξη υπερβολικών ηλιακών κερδών το καλοκαίρι, που θα είχαν ως αποτέλεσμα μεγάλη αύξηση της θερμοκρασίας. Επιτρέπουν ουσιαστικά τη χρήση υαλοστασίων σε μεγάλες επιφάνειες, χωρίς οι σχετικοί χώροι να μετατρέπονται σε «θερμοκήπια». Με τη χρήση των κατάλληλων υαλοπινάκων, υπάρχει η δυνατότητα παρέμβασης, μεταβάλλοντας ουσιαστικά δύο μεγέθη:

- 1) την ποσότητα της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας (θερμότητας)
- 2) την ποσότητα του εισερχόμενου φυσικού φωτός

Η όποια μείωση στην διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας συνεπάγεται αντίστοιχη μείωση, μικρή ή μεγάλη, στη διαπερατότητα του φωτός, δηλαδή του φυσικού φωτισμού. Αυτό εξαρτάται από την επιλεκτικότητα του υαλοπίνακα που θα τοποθετηθεί. Ιδανικό για έναν υαλοπίνακα ηλιακού ελέγχου (όπως και γενικότερα)



που τοποθετείται σε θερμά κλίματα, από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας, είναι να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο επιλεκτικός. Μείωση του εισερχόμενου φωτός σε έναν χώρο, μπορεί όμως να είναι σε κάποιες περιπτώσεις και επιθυμητή. Προφανώς είναι αναγκαίος ο εξαρχής προσδιορισμός της απαιτούμενης στάθμης φυσικού φωτός στο εσωτερικό του κελύφους, προκειμένης της επιλογής του κατάλληλου υαλοπίνακα. Σημαντικό είναι επίσης το όφελος από τα μειωμένα ψυκτικά φορτία λόγω μείωσης των ηλιακών κερδών, σε θερμές περιόδους, να μην αντισταθμίζεται από το κόστος αυξημένου τεχνητού φωτισμού που μπορεί να ανακύψει (αν και κάτι τέτοιο είναι σχετικά δύσκολο) – εδώ όμως πρέπει να συνυπολογίζεται και το ότι ο τεχνητός φωτισμός μπορεί να συμβάλλει στην αύξηση των ψυκτικών φορτίων. Με τα συστήματα σκίασης μπορεί να επιτευχθεί και ρύθμιση του εισερχόμενου φωτός, οπότε σε αυτό τα συστήματα σκίασης γενικά πλεονεκτούν. Βέβαια, η ολοένα και μεγαλύτερη έρευνα και χρήση υαλοπινάκων με μεταβλητές οπτικές ιδιότητες – είτε αυτομάτως, είτε κατά ανθρώπινη βούληση – υπερκαλύπτει και αυτό το εμπόδιο.

Οι υαλοπίνακες ηλιακού ελέγχου σχετίζονται με τον συντελεστή SHGC (ή τον g), σε αντίθεση με τους υαλοπίνακες low-e που παρέχουν θερμομόνωση αφού σχετίζονται (εν γένει) κυρίως με τον συντελεστή  $U_g$ , για τον υπολογισμό του οποίου λαμβάνεται υπόψιν και η μεταφορά θερμότητας με θερμική ακτινοβολία (μεγάλου μήκους κύματος, αφού οι σχετικές θερμοκρασίες είναι χαμηλές). Αν και όπως αναφέρεται και παραπάνω, πλέον υπάρχουν και επιστρώσεις low-e με ιδιότητες ηλιακού ελέγχου.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο ρόλος του ηλιακού ελέγχου και της θερμομόνωσης (απέναντι στη μεταφορά θερμότητας με θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος) σε έναν υαλοπίνακα, αναφορικά με τα μήκη κύματος της ακτινοβολίας:



**Σχήμα 3.9:** Μήκη κύματος στα οποία αναφέρεται ο ηλιακός έλεγχος και η θερμομόνωση απέναντι στη μεταφορά θερμότητας με θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος, σε έναν υαλοπίνακα.

Ο έλεγχος της ηλιακής ακτινοβολίας επιτυγχάνεται είτε με αύξηση της ανακλαστικότητας, είτε με αύξηση της απορροφητικότητας, είτε με συνδυασμό των

δύο. Οι υαλοπίνακες ηλιακού ελέγχου διακρίνονται σε δύο τύπους: τους ανακλαστικούς και τους απορροφητικούς. Βέβαια, οι δύο ιδιότητες μπορούν να συνδυαστούν στον ίδιο υαλοπίνακα, όπως επίσης είναι δυνατή η συνύπαρξη σε π.χ. διπλό υαλοπίνακα μονού υαλοπίνακα (φύλλου) ηλιακού ελέγχου με υαλοπίνακα άλλης κατηγορίας (π.χ. χαμηλής εκπομπής), ή η πλήρωση του διακένου με άλλο αέριο εκτός από τον αέρα. Στοιχεία για αυτούς δίνονται παρακάτω. Η διάκριση αυτή γίνεται με βάση το κύριο χαρακτηριστικό τους, που αφορά τον ηλιακό έλεγχο. Ασφαλώς υπάρχουν και άλλοι υαλοπίνακες με τέτοια χαρακτηριστικά, όπως οι Low-e χαμηλού ηλιακού κέρδους, ή οι θερμοχρωμικοί που αναλύονται παρακάτω, που όμως τυπικά εμπίπτουν σε άλλες κατηγορίες επειδή παρουσιάζουν επιπλέον λειτουργίες. Για παράδειγμα, κύριο χαρακτηριστικό των τελευταίων είναι η δυναμική μεταβολή των ιδιοτήτων τους.

### Ανακλαστικοί υαλοπίνακες

Πρόκειται για υαλοπίνακες που ανακλούν σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε συνιστώνται για τη μείωση των ηλιακών κερδών ενός χώρου. Η βασική αρχή της παραγωγής ανακλαστικών γυαλιών είναι η επίστρωση της μίας επιφάνειάς τους με λεπτά στρώματα οξειδίων διαφόρων μετάλλων και μεταλλικών αλάτων, με τα οποία το γυαλί αποκτά αυξημένες ανακλαστικές ιδιότητες αφ' ενός και διάφορους χρωματισμούς αφ' ετέρου. Η ανακλαστική επίστρωση του οποιουδήποτε μετάλλου συνδυάζεται με άλλες προ και μετά επιστρώσεις οξειδίων μετάλλων, προκειμένου να επιτευχθεί ο επιθυμητός συντελεστής ανακλαστικότητας (ο οποίος εξαρτάται και από τη γωνία πρόσπτωσης της ηλιακής ακτινοβολίας) και η χρωματική χροιά του γυαλιού. Η επίστρωση ανακλά μέρος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Δεν εμποδίζει, βέβαια, τη μετάδοση θερμότητας με αγωγή ή συναγωγή. Επίσης, η ποσότητα της απορροφούμενης από τον υαλοπίνακα ενέργειας, παραμένει υψηλή, όπως και η εκπεμπόμενη υπέρυθη ακτινοβολία (θερμότητα) – σε αντίθεση με τους υαλοπίνακες Low-e (αν και υπάρχουν μικρές μειώσεις στον συντελεστή εκπομπής ανάλογα και με το είδος της ανακλαστικής επίστρωσης, οπότε και στον συντελεστή  $U_g$ ). Η επίστρωση μπορεί να γίνεται με πυρόλυση (σκληρή επίστρωση), ή εν κενώ (μαλακή επίστρωση).

Μια πολύ σημαντική παράμετρος των ανακλαστικών υαλοπινάκων είναι το οπτικό αποτέλεσμα που δίνουν οι χρωματισμοί τους. Η δημιουργία τους στηρίζεται στους διαφορετικούς δείκτες διάθλασης που έχουν δύο διαφορετικά υλικά, αλλά και δύο διαφορετικού πάχους στρώματα του ίδιου υλικού. Συνδυάζοντας λοιπόν οι παραγωγοί των γυαλιών τόσο διαφορετικά υλικά (οξείδιο τιτανίου, οξείδιο χρωμίου, οξείδιο χαλκού κ.λπ.), όσο και διαφορετικού πάχους επιστρώσεις του ίδιου υλικού, παράγουν ανακλαστικά γυαλιά με διαφορετικό οπτικό-χρωματικό αποτέλεσμα (Fume, Bronze, Green, Blue, Silver, Gold κ.λπ.), αλλά και διαφορετικό βαθμό ανακλαστικότητας. Επιστρώσεις υψηλής ανακλαστικότητας γενικά έχουν χαμηλή VLT, αλλά υαλοπίνακες με χαμηλότερη ανακλαστικότητα και υψηλότερη VLT είναι επίσης διαθέσιμοι προς χρήση.



**Σχήμα 3.10: Ανακλαστικοί υαλοπίνακες χρυσού χρώματος και μέτριας ηλιακής ανακλαστικότητας, της Pilkington (Pilkington Eclipse Gold).**

Σε διπλή υάλωση, η επίστρωση μπορεί να τοποθετηθεί εξωτερικά ή εσωτερικά του διακένου (η δεύτερη περίπτωση είναι σχεδόν απαραίτητη για μαλακές επιστρώσεις). Όταν τοποθετείται εξωτερικά, η πρόσοψη είναι πιο ανακλαστική και ομοιόμορφη στην εμφάνιση, δίνοντας έτσι μια μεταλλική απόχρωση και δημιουργώντας αληθινές και έντονες αντανακλάσεις στο γειτονικό περιβάλλον. Όταν όμως χρησιμοποιείται εσωτερικά, η εμφάνιση και η ανακλαστικότητά του είναι γενικά πιο ήπια και το χρώμα του γυαλιού βάσης είναι πιο εμφανές.

Ανάλογα με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις της εφαρμογής, είναι δυνατόν να ενταθούν τα επίπεδα φυσικού φωτισμού του εσωτερικού χώρου (με υψηλή VLT), ή να μειωθεί η απολαβή της θερμότητας της ηλιακής ακτινοβολίας (με χαμηλό SHGC – ή g), ανάλογα με τον υαλοπίνακα που τοποθετείται.

Η ανάκλαση φωτός τυπικά συμβαίνει προς την πλευρά με την μεγαλύτερη ένταση φωτισμού, έτσι κατά τη διάρκεια της νύχτας η κατεύθυνση της ανακλαστικότητας μπορεί να αλλάξει, ώστε η ανάκλαση να είναι προς τον εσωτερικό χώρο. Μειονέκτημα των ανακλαστικών υαλοπινάκων είναι ότι μπορεί να προκαλούν θάμβωση (glare) στον περιβάλλοντα χώρο και τα γύρω κτίρια. Έχουν αναφερθεί ακόμα και περιπτώσεις, όπου λόγω υψηλής ανακλαστικότητας στην ηλιακή ακτινοβολία, προκαλείται τήξη σε σημεία προσόψεων (από συνθετικό υλικό – π.χ. uPVC-vinyl siding) γειτονικών κτιρίων.

Ενδεικτικές τιμές για διάφορα μεγέθη, για διάφορους υαλοπίνακες αυτής της κατηγορίας είναι:

- Διπλός ανακλαστικός υαλοπίνακας τύπου του σχήματος 3.10 (Pilkington Eclipse Gold), πάχους 6-12-6 mm, με την (σκληρή) επίστρωση στη θέση “2”:
  - SHGC = 0,45
  - VLT = 0,36 (αρκετά μικρότερη σε σχέση με τον Low-e αντίστοιχου SHGC που περιγράφεται παραπάνω)
  - SRT = 0,35

- Ανακλαστικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία= 0,27
  - Εξωτερική οπτική ανακλαστικότητα = 0,38
  - Εσωτερική οπτική ανακλαστικότητα = 0,45
  - Διαπερατότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία = 0,07
  - $U_g$ , με πλήρωση αέρα = 2,8 W/(m<sup>2</sup>·K)
  - $U_g$ , με πλήρωση αργού = 2,6 W/(m<sup>2</sup>·K)
- Μονός ανακλαστικός υαλοπίνακας του σχήματος τύπου του σχήματος 3.10 (Pilkington Eclipse Gold), πάχους 6 mm, με την (σκληρή) επίστρωση στη θέση “2”:
    - SGHC = 0,54
    - VLT = 0,40
    - SRT = 0,45
    - Ανακλαστικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία = 0,25
    - Εξωτερική οπτική ανακλαστικότητα = 0,36
    - Εσωτερική οπτική ανακλαστικότητα = 0,45
    - Διαπερατότητα στην υπεριώδη ακτινοβολία = 0,09
    - $U_g = 5,7$  W/(m<sup>2</sup>·K)
  - Διπλός ανακλαστικός υαλοπίνακας υψηλής ηλιακής ανακλαστικότητας, με έγχρωμο\* μπρονζέ εξωτερικό υαλοπίνακα (φύλλο) και την επίστρωση στη θέση “1”:
    - SGHC = 0,18
    - VLT = 0,10



**Σχήμα 3.11: Ανακλαστικοί υαλοπίνακες υψηλής ανακλαστικότητας.**

---

\* Οι έγχρωμοι υαλοπίνακες είναι απορροφητικοί και εξετάζονται αμέσως παρακάτω.

Για περιπτώσεις ήδη εγκατεστημένων σε κτίριο απλών υαλοπινάκων, υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης πλαστικού φιλμ με ανακλαστική επίστρωση πάνω σε αυτό. Το φιλμ αυτό, που τοποθετείται στην εσωτερική επιφάνεια του υαλοπίνακα, δεν είναι όμως τόσο ανθεκτικό συγκριτικά με υαλοπίνακα που είναι ανακλαστικός εκ κατασκευής.

### Απορροφητικοί υαλοπίνακες

Οι απορροφητικοί υαλοπίνακες απορροφούν σημαντικό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας, οπότε και αυτοί συνιστώνται για τη μείωση των ηλιακών κερδών ενός χώρου. Έχουν το πλεονέκτημα σε σχέση με τους ανακλαστικούς, ότι δεν δημιουργούν θάμβωση στον περιβάλλοντα χώρο του κτιρίου.

Τέτοιοι είναι οι έγχρωμοι υαλοπίνακες (φυμέ, πράσινοι, μπλε κ.λπ. – ανάλογα με τα μεταλλικά οξειδία που προστίθενται στη σύνθεση της μάζας του γυαλιού κατά την παραγωγή του) ή ειδικά επιστρωμένοι έγχρωμοι υαλοπίνακες, οι οποίοι έχουν υψηλό συντελεστή απορρόφησης, με αποτέλεσμα να συγκρατούν μεγαλύτερο μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας σε σύγκριση με τους κοινούς υαλοπίνακες. Η απορροφούμενη ηλιακή ακτινοβολία μετατρέπεται σε θερμότητα, που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας τους.

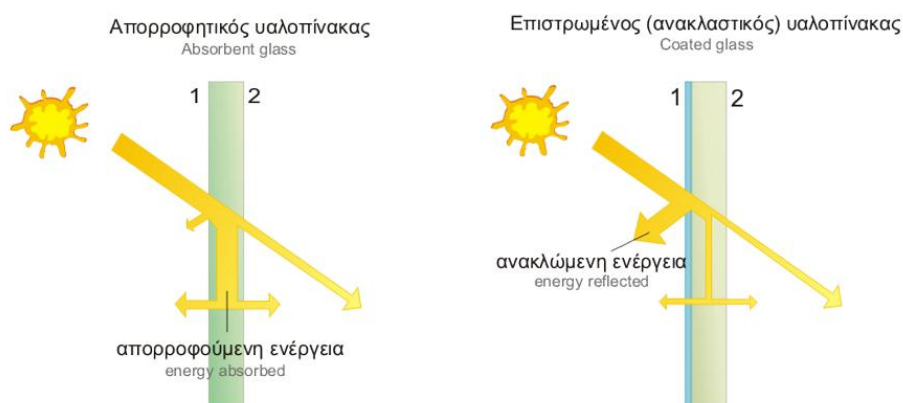
Οι έγχρωμοι υαλοπίνακες μπορούν να φιλτράρουν τμήματα του ηλιακού φάσματος επιλεκτικά, π.χ. τα κίτρινα γυαλιά φιλτράρουν το ιώδες και το μπλε φως. Οι υαλοπίνακες χρώματος πράσινου και μπλε προσφέρουν συγκριτικά μεγαλύτερη οπτική διαπερατότητα (δηλαδή στο φως). Οι έγχρωμοι υαλοπίνακες, συγκριτικά με τους ανακλαστικούς, μειονεκτούν στο ότι μπορεί να διαστρεβλώνουν τα χρώματα (ανάλογα με το χρώμα τους). Σε κάθε περίπτωση, οι διάφοροι χρωματισμοί και οι ανακλαστικές επιστρώσεις πολλών υαλοπινάκων μπορούν, πέρα από την εξοικονόμηση ενέργειας, να προσδώσουν σε ένα κτίριο μια αισθητικά ωραία εμφάνιση. Στις διπλές υαλώσεις τα χρωματιστά γυαλιά τοποθετούνται στην εξωτερική πλευρά, ώστε η θερμότητα που συσσωρεύουν να διαχέεται ευκολότερα στο εξωτερικό περιβάλλον. Οι απορροφητικοί υαλοπίνακες επίσης δεν προσφέρουν κάποια βελτίωση στον συντελεστή θερμοπερατότητας, αφού η βαφή δεν επηρεάζει την αγωγιμότητα και τον συντελεστή εκπομπής του γυαλιού. Κατά συνέπεια η χρήση τους μειώνεται συνεχώς, καθώς αντικαθίστανται με υαλοπίνακες οι οποίοι συνδυάζουν και χαρακτηριστικά χαμηλής εκπομπής. Επιτυγχάνεται μείωση στον SHGC (ή συντελεστή g), αν και γενικά μικρή συγκριτικά με άλλα είδη υαλοπινάκων (π.χ. οι ανακλαστικοί). Όπως και στους ανακλαστικούς υαλοπίνακες, η μείωση στον SHGC συνοδεύεται από ακόμα μεγαλύτερη μείωση στην VLT. Οπότε πρέπει να γίνεται κάποιος συμβιβασμός ανάμεσα στην επιθυμητή μείωση του SHGC και στην αναπόφευκτη μείωση της VLT.

Για να αναμετωπίσουν πάντως το πρόβλημα αυτό των συμβατικών έγχρωμων υαλοπινάκων, οι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει υψηλής απόδοσης έγχρωμους υαλοπίνακες, που είναι περισσότερο επιλεκτικοί. Αυτό επιτυγχάνεται με ειδικά πρόσθετα στην μάζα του γυαλιού κατά την παραγωγή του. Η βελτίωση της επιλεκτικότητας σε σχέση με τους υαλοπίνακες π.χ. μπρονζέ, ή γκρι (φυμέ)

χρώματος είναι σημαντική. Σε σχέση με τους συμβατικούς υαλοπίνακες μπλε και πράσινου χρώματος, που έτσι και αλλιώς παρουσιάζουν κάποια επιλεκτικότητα, η βελτίωση είναι μικρότερη. Οι έγχρωμοι υαλοπίνακες υψηλής απόδοσης, που έχουν ένα ανοιχτό μπλε ή ανοιχτό πράσινο χρώμα, παρουσιάζουν χαμηλότερα επίπεδα στην τιμή του SGHC.

Μια βασική παράμετρος της χρήσης απορροφητικών υαλοπινάκων είναι ο κίνδυνος του “θερμικού σοκ”, το οποίο προκαλείται από την ανομοιόμορφη έκθεση της επιφάνειας του γυαλιού στην ηλιακή ακτινοβολία, που οδηγεί σε μεγάλες διαφορές της θερμοκρασιακής βαθμίδας και άρα στη δημιουργία τάσεων πέρα από τα όρια αντοχής του υαλοπίνακα και τελικά στη θραύση του (αυτόθραυση). Ένας σκούρος έγχρωμος υαλοπίνακας τυπικά θα απορροφήσει περισσότερη θερμότητα και θα φτάσει σε υψηλότερες θερμοκρασίες από έναν πιο ανοιχτόχρωμο. Μείωση του κινδύνου αυτού επιτυγχάνεται με το πλευρικό τρόχισμα των γυαλιών και ελαχιστοποίησή του με την χρήση σκληρυμένων (tempered ή securit) υαλοπινάκων (αναφορά σε αυτούς γίνεται παρακάτω).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η διαφορά στην αρχή λειτουργίας (διαχείριση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας) μεταξύ απορροφητικού και ανακλαστικού υαλοπίνακα:



**Σχήμα 3.12: Αρχή λειτουργίας απορροφητικού και ανακλαστικού υαλοπίνακα.**

Για περιπτώσεις ήδη εγκατεστημένων σε κτίριο απλών υαλοπινάκων, υπάρχει η δυνατότητα τοποθέτησης πλαστικού φιλμ με έγχρωμη επίστρωση πάνω σε αυτό. Το φιλμ αυτό, που τοποθετείται στην εσωτερική επιφάνεια του υαλοπίνακα, προσφέρει κάποια μείωση στα ηλιακά κέρδη, αλλά δεν είναι τόσο αποτελεσματικό όσο οι επιλεκτικοί έγχρωμοι υαλοπίνακες και τόσο ανθεκτικό όσο οι υαλοπίνακες που η πρόσδοση του χρώματος έγινε στην μάζα τους κατά την παραγωγή τους.

Παρακάτω δίνονται ενδεικτικές τιμές μεγεθών, για έγχρωμους υαλοπίνακες:

- Διπλός υαλοπίνακας με έγχρωμο μπονζέ εξωτερικό υαλοπίνακα (φύλλο):
  - SHGC = 0,50

- $VLT = 0,48$  (αρκετά μικρότερη σε σχέση με τον Low-e αντίστοιχου SHGC που περιγράφεται παραπάνω)
- Διπλός υαλοπίνακας με έγχρωμο μπρονζέ υψηλής απόδοσης εξωτερικό υαλοπίνακα (φύλλο):
  - $SHGC = 0,29$
  - $VLT = 0,52$  (όχι πολύ μικρότερη σε σχέση με τον Low-e αντίστοιχου SHGC που περιγράφεται παραπάνω)



**Σχήμα 3.13: Απορροφητικοί μπρονζέ υαλοπίνακες.**

Μία άλλη ευρύτερη κατηγορία υαλοπινάκων, που τα τελευταία χρόνια έχει αναπτύξει δυναμική για ευρύτερη εφαρμογή σε κτίρια κ.λπ. (αν και η σχετική με αυτούς έρευνα γίνεται εδώ και δεκαετίες) είναι οι υαλοπίνακες μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων, ή “δυναμικοί” υαλοπίνακες (dynamic glazing) που αναφέρονται και ως “έξυπνοι” (smart glazing). Η αναδυόμενη ιδέα για τα παράθυρα του μέλλοντος είναι περισσότερο η ύπαρξη πολυλειτουργικών “συσκευών” στους τοίχους, παρά στατικών, απλών ή επιστρωμένων, φύλλων γυαλιού. Οι ιδιότητες αυτών των υαλοπινάκων μπορούν να μεταβάλλονται, αυτομάτως ή κατά ανθρώπινη βούληση, ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες, τις ανάγκες του κτιρίου και τις επιθυμίες των χρηστών. Με την ενεργό διαχείριση της εισερχόμενης ηλιακής ενέργειας και φωτός σε ένα κτίριο, τα έξυπνα παράθυρα μπορούν να επιφέρουν μείωση στα ηλεκτρικά φορτία αιχμής έως και κατά 20-30% σε πολλά δημόσια και εμπορικά κτίρια, να επιφέρουν σημαντική μείωση στα ψυκτικά φορτία και να βελτιώσουν την ποιότητα του φυσικού φωτισμού και τα επίπεδα άνεσης. Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να προσφέρουν μέγιστη ευελιξία απέναντι στις δυναμικά και έντονα μεταβαλλόμενες ανάγκες χρήσης της ενέργειας στον κτιριακό τομέα. Αν και υπάρχουν ήδη διάφορες διαθέσιμες τεχνολογίες τέτοιων υαλοπινάκων, γενικά είναι ένα πεδίο που είναι ακόμα υπό ανάπτυξη και πολλές τεχνολογίες είναι σε φάση δοκιμών και θα είναι εμπορικά διαθέσιμες τα επόμενα χρόνια. Οι έξυπνοι υαλοπίνακες αποτελούν το επόμενο μεγάλο βήμα στον τομέα των εκλεπτυσμένων και ενεργειακά αποδοτικών υαλοπινάκων.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη υαλοπινάκων μεταβλητών ιδιοτήτων: οι παθητικοί, που ανταποκρίνονται αυτόματα στην αλλαγή μιας μεταβλητής (όπως το προσπίπτον φως ή η θερμοκρασία) και οι ενεργητικοί, των οποίων οι ιδιότητες μπορούν να είναι υπό έλεγχο ανάλογα με τις προτιμήσεις των χρηστών, ή τις ανάγκες για θέρμανση και ψύξη. Είναι αυτονόητο ότι πολλοί από αυτούς τους υαλοπίνακες μπορούν να παρουσιάζουν ιδιότητες ηλιακού ελέγχου. Τα κυριότερα είδη παθητικών υαλοπινάκων μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων που υπάρχουν σήμερα είναι οι φωτοχρωμικοί και οι θερμοχρωμικοί, ενώ οι ενεργητικοί περιλαμβάνουν τους ηλεκτροχρωμικούς, τους αεριοχρωμικούς, τους υαλοπίνακες υγρών κρυστάλλων και τους υαλοπίνακες αιωρούμενων σωματιδίων. Παρακάτω γίνεται αναφορά σε καθεμία από αυτές τις κατηγορίες.

### Φωτοχρωμικοί υαλοπίνακες

Είναι υαλοπίνακες των οποίων οι οπτικές ιδιότητες μεταβάλλονται ανάλογα με το ποσό της προσπίπτουσας σε αυτούς ηλιακής ακτινοβολίας. Η οπτική διαπερατότητά τους μειώνεται με την αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (πιο συγκεκριμένα η εξάρτηση είναι από την υπεριώδη ακτινοβολία, λόγω χημικής αντίδρασης που συμβαίνει) και αντίστροφα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση βαφών με οξειδία αλογόνων, καθώς και διάφορα οργανικά ή ανόργανα συνθετικά υλικά. Οι φωτοχρωμικοί υαλοπίνακες είναι κατάλληλοι με τον τρόπο αυτό στο να μειώνουν την θάμβωση από το φυσικό φως, αλλά δεν ελέγχουν τα ηλιακά θερμικά κέρδη. Αυτό συμβαίνει επειδή η ποσότητα του φωτός που προσπίπτει σε ένα παράθυρο δεν συμπίπτει κατ' ανάγκη με την ποσότητα της θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία που απορροφά. Επίσης, επειδή ο ήλιος είναι χαμηλότερα στον ουράνιο θόλο κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών, προσπίπτουν περισσότερες ακτίνες στην επιφάνεια ενός υαλοπίνακα με νότιο προσανατολισμό, σε σχέση με το καλοκαίρι. Στην περίπτωση αυτή, ο υαλοπίνακας αυτός γίνεται πιο σκούρος τον χειμώνα, παρά το καλοκαίρι – όμως τον χειμώνα τα ηλιακά κέρδη είναι περισσότερο ωφέλιμα και επιθυμητά. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι αν και η τεχνολογία αυτή λειτουργεί σωστά σε πολύ μικρά κομμάτια γυαλιού (π.χ. σε γυαλιά ηλίου), αυτό δεν έχει ακόμα γίνει επιτυχημένα σε μεγάλη κλίμακα για γυαλιά ανθεκτικά και μεγέθους κατάλληλου για παράθυρα και ανοίγματα γενικότερα – επίσης το σχετικό κόστος είναι ακόμα αρκετά μεγάλο.

### Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες

Είναι υαλοπίνακες των οποίων οι οπτικές ιδιότητες μεταβάλλονται ανάλογα με τη θερμοκρασία τους. Μεταβάλλουν τη διαπερατότητά τους στην ηλιακή ακτινοβολία με αλλαγή του χρωματισμού τους από ανοιχτό σε σκούρο και αντίστροφα. Μπορεί να είναι προτιμότερο η μεταβολή αυτή της διαπερατότητας να είναι συνεχής γύρω από ένα πεδίο θερμοκρασιών, ώστε όχι μόνο να μειώνουν τα ψυκτικά φορτία, αλλά και να μεγιστοποιείται κατά το δυνατόν ο φυσικός φωτισμός. Αν σχεδιαστούν κατάλληλα, είναι λιγότερο ευαίσθητοι στις μεταβολές της εξωτερικής και εσωτερικής



θερμοκρασίας, αλλά ανταποκρίνονται δραστικά σε μεταβολές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (που προκαλούν μεταβολή της θερμοκρασίας τους), με αποτέλεσμα την μείωση των ηλιακών θερμικών κερδών και των επαγόμενων ψυκτικών φορτίων. Πάντως γενικά η κατάσταση τους εξαρτάται και από την θερμοκρασία περιβάλλοντος και από την θερμότητα λόγω της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας – κατά μία έννοια εξαρτάται δηλαδή από την θερμοκρασία ηλίου - αέρος. Σε μία κρύα χειμερινή και ηλιόλουστη ημέρα, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες γενικά σκουραίνουν από λίγο έως και καθόλου, οπότε τα ωφέλιμα ηλιακά θερμικά κέρδη δεν αποκόπτονται. Εκτός από τον έλεγχο των ηλιακών θερμικών κερδών, επιτυγχάνουν και μείωση της θάμβωσης. Όσο πιο άμεση και έντονη είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία, τόσο πιο σκούρο γίνεται το γυαλί.

Ένας ενδεικτικός διπλός υαλοπίνακας που είναι εμπορικά διαθέσιμος σήμερα (από το 2010) ενσωματώνει έναν θερμοχρωμικό (άχρωμος laminated\* με εσωτερική θερμοχρωμική μεμβράνη Suntuitive από την Pleotint) και έναν Low-e (Solarban 60 από την PPG), έχει τιμές για τον SHGC που κυμαίνονται από 0,37 έως 0,17 (ανάλογα με τη θερμοκρασία του θερμοχρωμικού), αντίστοιχες για την VLT από 0,60 έως 0,13 και αντίστοιχες για την SRT από 0,26 έως 0,08. Για καλύτερη εποπτεία των παραπάνω τιμών (ώστε να είναι διακριτή η επίδραση του θερμοχρωμικού) να αναφερθούν και οι τιμές για διπλό υαλοπίνακα με ένα απλό φύλλο και ένα φύλλο Low-e (Solarban 60 από την PPG), που είναι: SHGC=0,40 και VLT=0,72.



**Σχήμα 3.14: Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες κατά τη διάρκεια της ημέρας (με μεμβράνη Suntuitive από την Pleotint).**

Οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες αποτελούν την πιο ανεπτυγμένη – και ταυτόχρονα συγκριτικά απλή από την φύση της – διαθέσιμη τεχνολογία στον τομέα των υαλοπινάκων μεταβλητών οπτικών ιδιοτήτων. Αυξάνεται συνεχώς η δημοτικότητά τους και εγκαθίστανται σε κατοικίες, δημόσια, εμπορικά κ.λπ. κτίρια σε όλο τον κόσμο.

Οι υαλοπίνακες αυτοί, που είναι το αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας, αναλύονται εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο, όπου μεταξύ άλλων, δίνονται και στοιχεία για το θεωρητικό υπόβαθρο της λειτουργίας τους, τους τρόπους κατασκευής τους, τα χαρακτηριστικά τους κ.ά.

---

\* Οι υαλοπίνακες τύπου laminated αναφέρονται παρακάτω στο κείμενο.

### Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες

Είναι υαλοπίνακες των οποίων οι οπτικές ιδιότητες μεταβάλλονται με τη διοχέτευση ηλεκτρικού ρεύματος χαμηλής τάσης. Είναι επίσης μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία. Συγκεκριμένα, οι υαλοπίνακες αυτοί αλλάζουν το χρωματισμό τους από ανοιχτό σε σκούρο και αντίστροφα. Όταν εφαρμόζεται τάση ανάμεσα σε δύο λεπτούς διαφανείς ηλεκτρικούς αγωγούς, αναπτύσσεται ένα ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί (αναστρέψιμη) μετακίνηση ιόντων (συνήθως λιθίου ή υδρογόνου) διαμέσου ενός στρώματος ηλεκτρολύτη, μεταξύ ενός φιλμ αποθήκευσης ιόντων και ενός ηλεκτροχρωμικού φιλμ. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο υαλοπίνακας αυτός αλλάζει κατάσταση μεταξύ μιας διαυγούς καθαρής και μιας μπλε-γκρι σκουρόχρωμης κατάστασης.



**Σχήμα 3.15: Ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες.**

Σημαντικά πλεονεκτήματα των ηλεκτροχρωμικών υαλοπινάκων είναι ότι γενικά απαιτούν χαμηλή τάση (0-10 V DC), μπορούν να ρυθμιστούν και σε ενδιάμεσες καταστάσεις (μεταξύ καθαρής-διαυγούς και πλήρως χρωματισμένης κατάστασης) και παραμένουν διαφανείς σε αυτές. Επίσης, σε κάποιους τύπους, η απαιτούμενη ενέργεια χρησιμοποιείται μόνο για την αλλαγή από μία κατάσταση σε μία άλλη και όχι για την διατήρηση μιας κατάστασης (όπου μπορεί να παραμείνει για αρκετές μέρες χωρίς παροχή ισχύος). Μια κατάσταση χαμηλότερης διαπερατότητας μπορεί να είναι επιθυμητή για ιδιωτικότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας, καθώς και για έλεγχο της ηλιακής ακτινοβολίας και της θάμβωσης, ενδεχομένως εξαλείφοντας την ανάγκη ύπαρξης εσωτερικής σκίασης (ειδικά λόγω της δυνατότητας αλλαγής της κατάστασής τους κατά βούληση). Η αντίθετη κατάσταση μπορεί να είναι επιθυμητή σε ημέρες με πλήρη συννεφιά, ή για παθητική ηλιακή θέρμανση το χειμώνα. Όσο μεγαλύτερο είναι το δυνατό εύρος μεταβολών, τόσο πιο ικανός είναι ο υαλοπίνακας να ικανοποιήσει ένα μεγάλο εύρος απαιτήσεων και αναγκών. Στην σκουρόχρωμη κατάσταση, η ηλιακή ακτινοβολία απορροφάται (παρόμοια με τους έγχρωμους υαλοπίνακες), αν και υαλοπίνακες με δυνατότητα ρύθμισης της ανακλαστικότητάς τους είναι σήμερα υπό έρευνα και ανάπτυξη. Επιστρώσεις χαμηλής εκπομπής είναι δυνατόν να τοποθετηθούν στο εσωτερικό φύλλο διπλού ηλεκτροχρωμικού υαλοπίνακα, με σκοπό

την παρεμπόδιση της μετάδοσης της απορροφούμενης θερμότητας με θερμική ακτινοβολία προς τον εσωτερικό χώρο. Οι υαλοπίνακες αυτοί τυγχάνουν εφαρμογής και σε άλλα πεδία, εκτός του κτιριακού τομέα, όπως σε αυτοκίνητα. Επίσης, οι υαλοπίνακες αυτοί μπορούν να λειτουργούν και μέσω αυτοματισμών, για παράδειγμα με σύνδεση με ειδικούς φωτοαισθητήρες. Ενδεικτικές τιμές για το ανώτερο όριο της VLT είναι 0,50 – 0,70, και για το κατώτερο όριο 0,02 – 0,25. Ο συντελεστής SHGC κυμαίνεται μεταξύ 0,10 και 0,50.

### Αεριοχρωμικοί υαλοπίνακες

Οι αεριοχρωμικοί υαλοπίνακες παρουσιάζουν παρόμοια χρωματική εμφάνιση με τους ηλεκτροχρωμικούς, αλλά για τον χρωματισμό του γυαλιού χρησιμοποιείται υδρογόνο (κάτω από το κατώτερο όριο ανάφλεξης 3% κ.ο.) μέσα στο διάκενο π.χ. διπλού υαλοπίνακα. Η έκθεση σε οξυγόνο επαναφέρει το παράθυρο στην αρχική καθαρή του κατάσταση. Για τη διατήρηση μιας συγκεκριμένης κατάστασης, το διάκενο απλώς απομονώνεται από περαιτέρω αλλαγές στην περιεκτικότητά του σε υδρογόνο. Το οπτικώς ενεργό συστατικό είναι ένα πορώδες φιλμ οξειδίου του βολφραμίου, πάχους μικρότερου από 1 μm. Παραλλαγές στο πάχος του φιλμ και στην περιεκτικότητα του διακένου σε υδρογόνο μπορούν να επηρεάσουν τον βαθμό και την ταχύτητα του χρωματισμού. Το υδρογόνο μπορεί να δημιουργείται μέσω ηλεκτρόλυσης και ένα σύστημα διανομής ενσωματωμένο μέσα στο υαλοστάσιο να το παρέχει στο διάκενο. Η VLT μεταβάλλεται ενδεικτικά μεταξύ 0,10 και 0,59 και ο SHGC μεταξύ 0,12 και 0,46. Επίπεδα διαπερατότητας της τάξης του 0,01 για ιδιωτικότητα ή έλεγχο της θάμβωσης είναι εφικτά. Αεριοχρωμικοί υαλοπίνακες μεγέθους περίπου 0,5 m x 1 m είναι υπό μελέτες μεγάλης κλίμακας και αναμένεται να φτάσουν στην αγορά στο κοντινό μέλλον.

### Υαλοπίνακες υγρών κρυστάλλων

Είναι το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο είδος έξυπνου υαλοπίνακα που εμφανίστηκε. Μετατρέπονται από ημιδιαφανείς (γαλακτόχρωμοι) σε διαφανείς και αντίστροφα, μέσω της εφαρμογής ηλεκτρικής τάσης. Αναλυτικότερα, εμπεριέχουν ανάμεσα σε δύο διαφανείς ηλεκτρικούς αγωγούς ένα φιλμ υγρών κρυστάλλων (όπου το σύνολο τοποθετείται σε μορφή laminated), οι οποίοι όντας σε άτακτη διάταξη, επιτρέπουν μεν τη διόδο του φωτός, προκαλούν δε διάχυσή του, με αποτέλεσμα ο υαλοπίνακας να καθίσταται ημιδιαφανής. Η εφαρμογή ηλεκτρικής τάσης συνεπάγεται τον άμεσο προσανατολισμό των κρυστάλλων και κατ' επέκταση τη διαφάνεια του υαλοπίνακα. Πέρα από τη διάχυση του φωτός, οι οπτικές ιδιότητες των δύο καταστάσεων είναι σχεδόν πανομοιότυπες – το παράθυρο επιτρέπει την είσοδο σχεδόν των ίδιων ποσοτήτων φωτός και θερμότητας από την ηλιακή ακτινοβολία, είτε είναι στην κατάσταση off, είτε στην κατάσταση on. Δηλαδή, ο SHGC παραμένει σε κάθε περίπτωση σχετικά υψηλός. Επειδή υπάρχει πολύ μικρή μεταβολή στις επιδόσεις του και επειδή απαιτεί συνεχή παροχή ενέργειας για να παραμείνει στην διαφανή του κατάσταση, ένας τέτοιος υαλοπίνακας δεν προσφέρει οφέλη εξοικονόμησης ενέργειας. Χρησιμοποιείται κυρίως για λόγους προστασίας της ιδιωτικής ζωής. Η VLT

είναι ενδεικτικά στην περιοχή 50-80% και ο SHGC στην περιοχή 0,55-0,69, αν και βαφές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γίνει πιο σκούρο το χρώμα του υαλοπίνακα στην κατάσταση off.

#### Υαλοπίνακες αιωρούμενων σωματιδίων

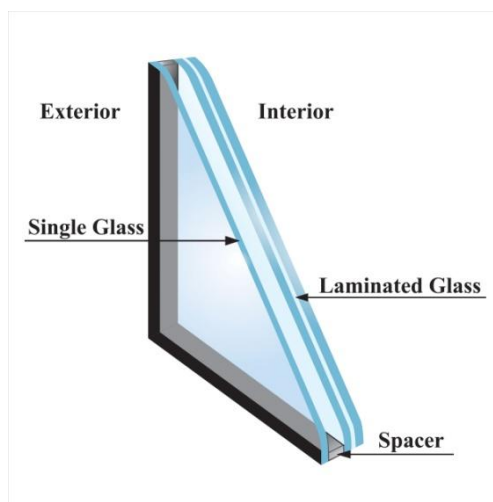
Αυτή η κατηγορία, ηλεκτρικά ελεγχόμενων, υαλοπινάκων χρησιμοποιεί ένα λεπτό φιλμ, με μορφή παραπλήσια αυτής υγρού, στο οποίο πολλά μικροσκοπικά σωματίδια αιωρούνται. Όταν δεν τροφοδοτείται τα σωματίδια είναι τυχαία προσανατολισμένα (σε άτακτη διάταξη) και μερικώς αποκόπτουν την διαπερατότητα του φωτός και τη θέα (μπλε χρώμα). Διαφανείς ηλεκτρικοί αγωγοί επιτρέπουν τη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου που εφαρμόζεται στο φιλμ, ώστε να ευθυγραμμίζονται τα σωματίδια και να αυξάνεται η διαπερατότητα. Ενδεικτικές τιμές των VLT και SHGC για το αυτοτελές φιλμ είναι 0,22-0,005 ή 0,57-0,12 και 0,56-0,41 ή 0,70-0,50 αντίστοιχα, με σχεδόν άμεσα εφαρμόσιμες αλλαγές της κατάστασης. Το εύρος μεταβολής του SHGC είναι μικρότερο συγκριτικά με τους ηλεκτροχρωμικούς υαλοπίνακες. Η συσκευή χρειάζεται περίπου 100 V AC (με βάση τα σημερινά δεδομένα στην αγορά) για την μετάβαση στην διαφανή (καθαρή) κατάσταση και μπορεί επίσης να ρυθμιστεί σε οποιαδήποτε ενδιάμεση. Απαιτείται συνεχής παροχή ενέργειας για τη διατήρηση σε κατάσταση αυξημένης διαπερατότητας. Είναι υπό έρευνα νεότεροι υαλοπίνακες αυτής της κατηγορίας που απαιτούν μικρότερη τάση και επιτυγχάνουν διαφορετικούς χρωματισμούς, αλλά και μεγαλύτερο εύρος μεταβολής της διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία. Σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας αυτής είναι και η παρεμπόδιση διάβασης για πάνω από το 99% της υπεριώδους ακτινοβολίας. Οι υαλοπίνακες αυτοί γενικά τώρα εισέρχονται στην αγορά, αλλά το κόστος παραμένει ένα ζήτημα.

Παρακάτω γίνεται σχετικά σύντομη αναφορά σε διάφορες κατηγορίες υαλοπινάκων, που παρουσιάζουν άλλα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όπως αυξημένη μηχανική αντοχή, δυνατότητα για παραγωγή ενέργειας, διαφορετικό τρόπο κατασκευής, κ.ά. και μπορεί να είναι κατάλληλοι για χρήση σε εφαρμογές με εξειδικευμένες απαιτήσεις – ως αυτοτελείς, ή και σε συνδυασμό με τα προαναφερθέντα είδη υαλοπινάκων.

#### Πολυστρωματικοί ή πολύφυλλοι υαλοπίνακες (laminated, triplex ή safety)

Είναι υαλοπίνακες δύο ή περισσότερων στέρεα συνδεδεμένων φύλλων, μεταξύ των οποίων μεσολαβεί λεπτό στρώμα συνθετικού υλικού, (διάφανη, ημιδιάφανη ή έγχρωμη μεμβράνη, ή ρητίνη). Επίσης, μπορεί να υπάρχουν διαδοχικές επιστρώσεις μεμβρανών. Η συγκόλληση των υαλοπινάκων πραγματοποιείται με θέρμανση και μετέπειτα συμπίεση. Μετά από την ένωση, το συσσωμάτωμα συμπεριφέρεται και

φαίνεται σαν μονός υαλοπίνακας. Χρησιμοποιούνται ως ηχομονωτικοί, ή ως υαλοπίνακες ασφαλείας ή αντιβανδαλιστικοί. Κατά τη θραύση τους, τα θραύσματα συγκρατούνται από το συνθετικό υλικό. Υαλοπίνακες αλληπάλληλων φύλλων γυαλιού και μεμβρανών, που ξεπερνούν συνήθως σε πάχος τα 40 mm, είναι αλεξίσφαιροι.



**Σχήμα 3.16: Σχεδιαστική απεικόνιση διπλού υαλοπίνακα, όπου το εσωτερικό φύλλο είναι υαλοπίνακας τύπου laminated.**

Οι πολυστρωματικοί υαλοπίνακες με μεμβράνη PVB (πολυβινυλοβουτιράλη – η χρήση της είναι η συνηθέστερη), μπορούν να εμποδίσουν τη μετάδοση μέχρι και του 99,6% της υπεριώδους ακτινοβολίας. Η ιδιότητα αυτή κάνει τον πολυστρωματικό υαλοπίνακα κατάλληλο απέναντι στο φαινόμενο του θερμοκηπίου των χρωμάτων που παρατηρείται σε υφάσματα κ.λπ. σε εσωτερικούς χώρους, εξαιτίας της υπεριώδους ακτινοβολίας. Οι πολυστρωματικοί υαλοπίνακες είναι εξαιρετικά ανθεκτικοί στο χρόνο, στις καιρικές συνθήκες και σταθεροί στην UV ακτινοβολία, ακόμα και σε παρατεταμένη απευθείας ηλιακή ακτινοβολία. Η χρήση τέτοιων υαλοπινάκων είναι πολύ συνηθισμένη και βρίσκουν εφαρμογή και μέσω της τοποθέτησης μεμβρανών στο εσωτερικό τους, με σκοπό την πρόσδοση διαφόρων ιδιοτήτων (γίνεται αναφορά παραπάνω στο κείμενο). Τα συνθετικά υλικά μεταξύ των υαλοπινάκων μπορεί να είναι έγχρωμα, διακοσμητικά, ανακλαστικά κ.ά. Μονός laminated υαλοπίνακας με πλαστικό φιλμ με επιλεκτική επίστρωση Low-e στο εσωτερικό του, προσφέρει την ενεργειακή αποδοτικότητα του μονού επιλεκτικού υαλοπίνακα χαμηλής εκπομπής και την ασφάλεια του laminated. Όμως, σε αυτή την διαμόρφωση, αφού η επίστρωση Low-e δεν είναι εκτεθειμένη σε διάκενο αέρα, η χαμηλότερη εκπεμπιμότητα δεν προκαλεί συγκριτικά τόσο μεγάλη ποσοστιαία βελτίωση στον συντελεστή  $U_g$  του υαλοπίνακα, όπως και στον SHGC. Με laminated διπλό υαλοπίνακα, το πλήρες όφελος της επίστρωσης χαμηλής εκπομπής μπορεί να πραγματοποιηθεί βάζοντας την επίστρωση σε μία από τις επιφάνειες που βρίσκονται προς την πλευρά του διακένου αέρα.

Ένας laminated υαλοπίνακας με δύο απλά φύλλα και μεμβράνη PVB έχει ενδεικτική τιμή για την VLT ίση με 0,84 και για τον SHGC 0,61.

### Ενισχυμένοι ή σκληρυμένοι υαλοπίνακες (securit ή tempered)

Έχουν αυξημένες μηχανικές και θερμικές αντοχές. Με τη μέθοδο της θερμικής προέντασης αυξάνεται η αντοχή του γυαλιού σε ελκυσμό και θερμοκρασιακές μεταβολές. Πρακτικά, τα τζάμια αυτού του τύπου «ψήνονται» και σκληραίνουν με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η θραύση τους. Με την προένταση παράγονται υαλοπίνακες ασφαλείας, που όταν σπάσουν δεν θρυμματίζονται σε αιχμηρά θραύσματα, αλλά σε πολύ μικρά κομμάτια (λόγω της υψηλής επιφανειακής τάσης) κάνοντας έτσι την πιθανότητα σοβαρού τραυματισμού μικρή, καθώς επίσης και άθραυστοι υαλοπίνακες. Η χρήση τους κυρίως γίνεται σε ειδικές κατασκευές. Μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε κατασκευή υαλοπίνακα τύπου laminated.

### Πυρίμαχοι υαλοπίνακες

Σύμφωνα με τις επικρατούσες νομοθεσίες στα διάφορα κράτη, τόσο τα νέα όσο και τα ήδη υπάρχοντα κτίρια, είναι υποχρεωτικό να παρέχουν ικανοποιητική πυρασφάλεια στους ενοίκους. Τα κοινά τζάμια, τα οποία είναι σε ευρεία χρήση στις αρχιτεκτονικές εφαρμογές, ουδόλως ικανοποιούν αυτήν την απαίτηση. Οι υαλοπίνακες αυτοί σπάζουν όταν στην επιφάνειά τους αναπτυχθούν θερμοκρασιακές διαφορές άνω των 40°C. Επίσης, το συνηθισμένο γυαλί ασφαλείας τύπου triplex έχει παρόμοια συμπεριφορά και δεν μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές σε περίπτωση πυρκαγιάς. Τέλος, οι υαλοπίνακες ασφαλείας τύπου securit, αν και είναι σημαντικά πιο ανθεκτικοί στις θερμοκρασιακές μεταβολές (αντέχουν σε θερμοκρασίες μέχρι 350°C), εντούτοις είναι ανεπαρκείς σε συνθήκες φωτιάς όπου οι θερμοκρασίες αγγίζουν τους 1000°C. Την ζήτηση αυτή, την καλύπτουν οι πυρίμαχοι υαλοπίνακες, οι οποίοι αντέχουν για προκαθορισμένο χρόνο σε θερμοκρασίες της τάξης των 1000°C, ώστε να εξασφαλίσουν επαρκή χρόνο διαφυγής στους ενοίκους σε περίπτωση πυρκαγιάς. Οι υαλοπίνακες αυτοί είναι διαφόρων τύπων όπως απλοί, απλοί με σπλισμό (σύρμα) στο εσωτερικό τους, πολυστρωματικοί με ενδιάμεσο θερμικά ενεργοποιούμενο διογκωτικό υλικό. Παρέχουν υψηλό επίπεδο διαπερατότητας φωτός και πλήρη διαφάνεια. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου οι κανονισμοί των κτιρίων το απαιτούν και όπου ο φυσικός φωτισμός και η διαφάνεια είναι βασικοί παράγοντες, όπως σε νοσοκομεία και εργαστήρια, σχολεία και γραφεία, ξενοδοχεία και εστιατόρια, θέατρα και μουσεία, εμπορικά κέντρα και υπόγειοι σταθμοί, τράπεζες κ.λπ.

### Υαλοπίνακες με αναρτημένες μεμβράνες

Είναι προφανές ότι υπάρχουν οικονομικά και φυσικά (λόγω βάρους) όρια στον αριθμό των φύλλων γυαλιού που μπορούν να τοποθετηθούν παράλληλα σε έναν υαλοπίνακα. Παρ' όλα αυτά, οι υαλοπίνακες πολλαπλών φύλλων δεν περιορίζονται σε συναρμολογημένα σύνολα από γυαλί. Μια καινοτομία βασίζεται στην αντικατάσταση ενός μεσαίου φύλλου σε τριπλό υαλοπίνακα με πλαστικό φιλμ. Αυτό προσφέρει την δυνατότητα για μείωση του βάρους, του πάχους και κάποιες φορές και του κόστους του υαλοπίνακα. Επίσης, με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη τιμή της οπτικής διαπερατότητας σε σχέση με έναν κοινό τριπλό

υαλοπίνακα. Οι υαλοπίνακες με αναρτημένες μεμβράνες (suspended films), ανάλογα με την μεμβράνη (ή περισσότερες) που τοποθετείται, παρουσιάζουν και τις ανάλογες ιδιότητες. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται υαλοπίνακας με αναρτημένη μεμβράνη με επίστρωση Low-e. Η μεμβράνη αυτή αναφέρεται και ως heat mirror film και παρουσιάζει το πλεονέκτημα σε σχέση με τις επιστρώσεις Low-e σε γυαλί ότι είναι σχεδόν αδιαπέραστη από την υπεριώδη ακτινοβολία – ενώ ακόμα και το πιο επιλεκτικό γυαλί Low-e αφήνει περίπου το 26% της ακτινοβολίας αυτής να το διαπεράσει.



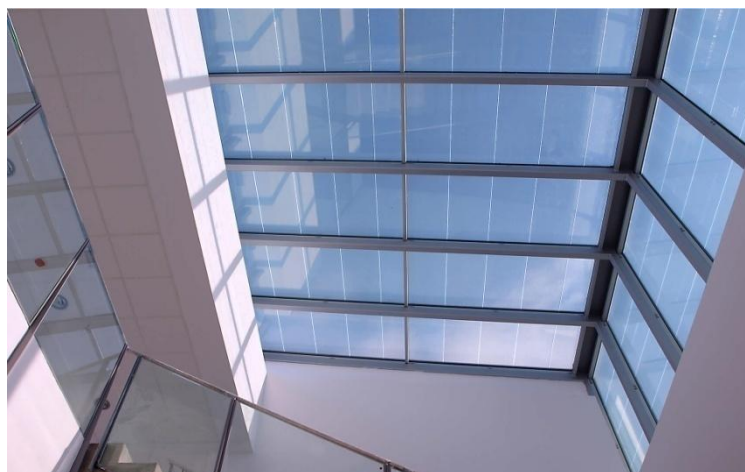
**Σχήμα 3.17: Υαλοπίνακας με αναρτημένη μεμβράνη heat mirror.**

### Φωτοβολταϊκοί υαλοπίνακες

Οι φωτοβολταϊκοί υαλοπίνακες (μέρος των Building Integrated Photovoltaics – BIPV) είναι μια νέα τάση που παρατηρείται στον κτιριακό τομέα. Σε ένα πολυόροφο, για παράδειγμα, κτίριο με μικρό συγκριτικά χώρο στην οροφή, τα ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά (BIPV) αποτελούν μια πολύ καλή λύση. Σήμερα, έχει αναπτυχθεί ένα μεγάλο εύρος φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων σχεδιασμένων ειδικά για τοποθέτηση σε κτίρια. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία στους υαλοπίνακες τοποθετούνται στο εσωτερικό τους (σε διπλά, τριπλά, ή triplex τζάμια), ή πάνω στην επιφάνεια του τζαμιού. Η τεχνολογία πλέον επιτρέπει τη χρησιμοποίηση φωτοβολταϊκών υαλοπινάκων ακόμα και σε προσόψεις, χωρίς τον κατάλληλο προσανατολισμό, για παράδειγμα σε μια βόρεια πρόσοψη – με την ανάλογη μείωση της απόδοσης των στοιχείων φυσικά.

Επειδή όμως τα ανοίγματα παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο και στον ηλιασμό και στις απώλειες του κτιρίου, πρέπει να συνυπολογίζονται η φωτοδιαπερατότητα και η θερμομόνωση του υαλοπίνακα. Σχετικά με την φωτοδιαπερατότητα, ο βέλτιστος συνδυασμός είναι η τοποθέτηση “φωτοβολταϊκών σκιάστρων” όπου δεν απαιτείται αυτή και ημιδιαφανών φωτοβολταϊκών όπου είναι απαραίτητη. Όλα τα είδη φωτοβολταϊκών μπορούν να ενσωματωθούν σε γυαλί, αλλά μόνο τα φωτοβολταϊκά thin films μπορούν να παρουσιάζουν κάποια διαφάνεια (σήμερα έχουν επιτευχθεί σημαντικοί βαθμοί διαφάνειας και διάφοροι χρωματισμοί). Αν και τα ημιδιαφανή φωτοβολταϊκά στοιχεία που υπάρχουν σήμερα γενικά έχουν σχετικά χαμηλούς

βαθμούς απόδοσης, η ενσωμάτωσή τους σε μεγάλες επιφάνειες υαλοπινάκων μπορεί να παράγει ικανοποιητικά ποσά ηλεκτρικής ενέργειας.



**Σχήμα 3.18: Φωτοβολταϊκοί υαλοπίνακες με μεγάλη διαφάνεια (από την Onyx Solar).**

Με την πρόοδο της τεχνολογίας το εμπόδιο της σκίασης μπορεί να ξεπεραστεί πλήρως – πολύ πρόσφατα, ερευνητές κατάφεραν να δημιουργήσουν ηλιακό κύτταρο με πλήρη διαφάνεια, που εκμεταλλεύεται μόνο υπεριώδη και υπέρυθη ακτινοβολία. Όσο τα σχετικά κόστη των φωτοβολταϊκών θα μειώνονται προς το μέλλον και οι ανάγκες για παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές θα αυξάνονται, τόσο μεγαλύτερο ενδιαφέρον θα παρουσιάζεται για την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών στα κτιριακά κελύφη.

#### Διπλοί υαλοπίνακες με εσωτερικά σκίαστρα

Πρόκειται για ένα σύστημα με ενσωματωμένες περσίδες, ύφασμα κ.ά. στη διπλή υάλωση. Εφόσον το σύστημα αυτό σφραγιστεί στη διπλή υάλωση, παραμένει πάντα προστατευμένο από τις καιρικές συνθήκες, τους ρύπους και τα χτυπήματα. Τα σκίαστρα μπορεί να είναι σταθερά ή κινούμενα με χειροκίνητο ή ηλεκτρικό τρόπο.

#### Ματ (matt) υαλοπίνακες

Πρόκειται για υαλοπίνακες με ματ-σατινέ φινίρισμα, που κατασκευάζονται από τους διαφανείς με αμμοβολή, ή με την επίδραση υδροφθορικού οξέος στη μία ή και στις δύο επιφάνειές τους, ώστε να γίνουν αδρές. Έχουν γαλακτώδες χρώμα και είναι αδιαφανείς. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε χώρους όπου επιδιώκεται μείωση της ορατότητας. Επίσης εμφανίζουν υψηλή ανθεκτικότητα στην σατινέ επιφάνεια και επιπλέον καθαρότητα, καθώς δεν λεκιάζουν έντονα και δεν αποτυπώνουν τα δακτυλικά αποτυπώματα.

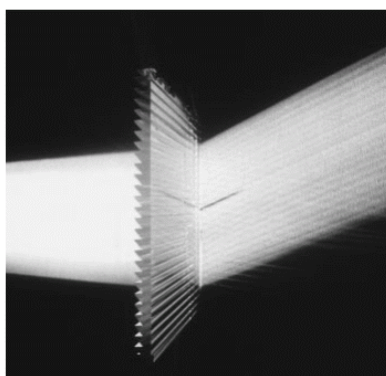


### Υαλοπίνακες από ακρυλικό υλικό

Αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία, διότι η πρώτη ύλη για την κατασκευή τους είναι το γνωστό Plexiglass. Πρόκειται για ένα διάφανο θερμοπλαστικό υλικό που συχνά λόγω του χαμηλού του βάρους και της ιδιότητάς του να μην θρυμματίζεται, χρησιμοποιείται εναλλακτικά του γυαλιού. Μάλιστα πολλές φορές αποκαλείται και ακρυλικό “γυαλί”, αν και δεν ανήκει στην κατηγορία των γυαλιών με βάση το πυρίτιο, αλλά παρουσιάζει και αυτό υαλώδη, μη-κρυσταλλική δομή. Είναι θερμομονωτικό υλικό που αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες και δυσμενείς καιρικές συνθήκες. Επίσης, είναι πιο διαφανές από το γυαλί και έχει μεγάλη αντοχή στη χρήση του. Προτιμάται συχνά εξαιτίας του μικρού του βάρους σε σχέση με το γυαλί, της ευκολίας του στο χειρισμό και την επεξεργασία του, καθώς και του σχετικά χαμηλού του κόστους. Για αυτούς ακριβώς τους λόγους χρησιμοποιείται κυρίως σε μεγάλες εφαρμογές αλλά και σε ειδικές κατασκευές ασφαλείας, καθώς η συνένωση πολλών στρωμάτων του, του προσδίδουν αλεξίσφαιρες ιδιότητες.

### Πρισματικοί υαλοπίνακες

Οι πρισματικοί υαλοπίνακες, μέσω της διαμόρφωσής τους (πρισματικές πριονωτές επιφάνειες από ακρυλικό υλικό – συνήθως σταθερές, ανάμεσα σε δύο απλούς υαλοπίνακες), επιτυγχάνουν την αλλαγή της διεύθυνσης ποσοστού ηλιακών ακτινών. Με τη χρησιμοποίησή τους εξασφαλίζεται κυρίως διάχυτος φυσικός φωτισμός και εμποδίζεται η θάμβωση. Η λειτουργία τους στηρίζεται σε δύο φυσικά φαινόμενα: τη διάθλαση του φωτός (στην ανώτερη πλευρά της πριονωτής επιφάνειας) και την ολική ανάκλασή του (στην εσωτερική επιφάνεια του πρίσματος). Υπάρχει η δυνατότητα, ανάλογα με την κατασκευή της πριονωτής διάταξης, να απορρίπτουν ή να ανακατευθύνουν το φως σε έναν χώρο.



**Σχήμα 3.19: Οι πρισματικοί υαλοπίνακες ανακατευθύνουν το φως.**

### Υαλοπίνακες ειδικής επεξεργασίας με laser

Αποτελούνται από λεπτά ακρυλικά φύλλα στα οποία έχουν δημιουργηθεί παράλληλες εγκοπές με τη βοήθεια laser. Οι εγκοπές αυτές αποτελούν διαφανή παραλληλεπίπεδα μεγάλης ανακλαστικότητας που αναδιανέμουν το φως προς την επιθυμητή κατεύθυνση. Όπως και οι πρισματικοί υαλοπίνακες, έτσι και οι διατάξεις

αυτές συνήθως τοποθετούνται στο εσωτερικό διπλών τζαμιών για λόγους προστασίας.



**Σχήμα 3.20: Υαλοπίνακας ειδικής επεξεργασίας με laser.**

### Ολογραφικοί υαλοπίνακες

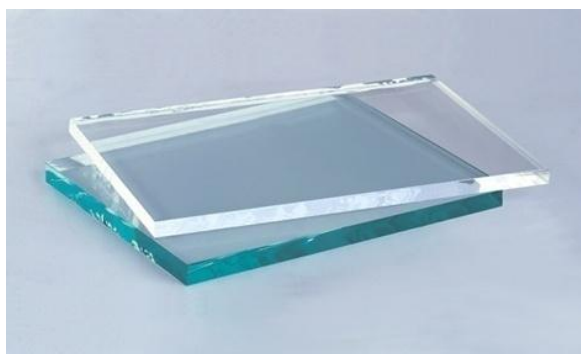
Οι ολογραφικοί υαλοπίνακες αξιοποιούν το φαινόμενο της διάθλασης του φωτός, για να μεταβάλλουν την κατεύθυνσή του προς συγκεκριμένες περιοχές. Ειδική πολυμερής μεμβράνη που φέρει λεπτές λωρίδες ανακατευθύνει μόνο την ακτινοβολία που προσπίπτει υπό συγκεκριμένη γωνία, ενώ δεν αλλοιώνει την ακτινοβολία που προσπίπτει από άλλες κατευθύνσεις. Η ειδική μεμβράνη τοποθετείται ανάμεσα σε δύο απλούς υαλοπίνακες. Τα ολογραφικά οπτικά στοιχεία, είτε σε επίπεδη μορφή είτε σε τρισδιάστατη, εστιάζουν το προσπίπτον ηλιακό φως και το διασπούν φασματικά. Με τον τρόπο αυτό ελέγχεται το ηλιακό φάσμα και η ποσότητα του διερχόμενου φωτός: επιλεγμένες φασματικές αποκλείονται, ενώ σε κάποιες άλλες επιτρέπεται η διέλευση προς το εσωτερικό του κτιρίου. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως «επιλεκτικά» σκίαστρα τα οποία αποτρέπουν την άμεση ακτινοβολία, ενώ επιτρέπουν τη διέλευση της διάχυτης ακτινοβολίας. Τα τρισδιάστατα ολογραφικά οπτικά στοιχεία συνδυάζονται και με φωτοβολταϊκές μεμβράνες.

### Αντιανακλαστικοί υαλοπίνακες

Οι αντιανακλαστικοί υαλοπίνακες (non-glare) είναι διάφανοι υαλοπίνακες, επιστρωμένοι με ειδική στρώση στη μία ή και στις δύο επιφάνειές τους. Οι υαλοπίνακες αυτοί έχουν εξαιρετικά χαμηλό συντελεστή ανακλαστικότητας και εξαιρετικά αυξημένο συντελεστή φωτεινής διαπερατότητας. Η ιδιότητα που αποκτούν μετά την κατεργασία αυτή, είναι ότι αποκτούν εξαιρετική αντιανακλαστική απόδοση. Χρησιμοποιούνται οπουδήποτε υπάρχει πρόβλημα αντανάκλασης, το οποίο δημιουργεί "ενοχλητικά" είδωλα πάνω στον υαλοπίνακα. Αυτό το φαινόμενο δημιουργείται συνήθως όταν φυσικό ή τεχνητό φως κατευθύνεται πάνω σε έναν υαλοπίνακα ο οποίος καλύπτει ένα σκοτεινότερο μέρος.

### Υαλοπίνακες επιπρόσθετης καθαρότητας (extra clear)

Οι επιπρόσθετης καθαρότητας υαλοπίνακες (χαμηλότερης περιεκτικότητας σε οξειδία σιδήρου) ξεχωρίζουν για την διάφανη εμφάνιση και οπτική άνεση εξασφαλίζοντας υψηλή φωτεινή διαπερατότητα, μεγαλύτερη διαύγεια και μειωμένη πράσινη απόχρωση της μάζας τους σε σχέση με τους κοινούς λευκούς υαλοπίνακες. Μπορούν να επεξεργαστούν και να χρησιμοποιηθούν σε πολλούς τομείς, συμπεριλαμβανομένης της κατασκευής, της διακόσμησης και της βιομηχανίας υψηλής τεχνολογίας.



**Σχήμα 3.21: Γυαλί επιπρόσθετης καθαρότητας, σε σύγκριση με κοινό γυαλί.**

### Υαλοπίνακες με πλήρωση μόνωσης

Είναι υαλοπίνακες στους οποίους έχει τοποθετηθεί μόνωση στο εσωτερικό τους, δηλαδή στο διάκενο ανάμεσα στα φύλλα. Υπάρχουν πολλές επιλογές για την μόνωση που τοποθετείται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το aerogel, ένα καινοτόμο ημιδιαφανές θερμομονωτικό υλικό με πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα. Οι υαλοπίνακες με πλήρωση μόνωσης παρέχουν μόνο διάχυτο και όχι άμεσο φυσικό φωτισμό.



**Σχήμα 3.22: Υαλοπίνακες με πλήρωση aerogel (από την Pilkington).**

### Αυτοκαθαριζόμενοι υαλοπίνακες

Είναι υαλοπίνακες πυρολυτικής επίστρωσης και κατασκευάζονται από λευκό ή χρωματικό γυαλί, στην επιφάνεια του οποίου επιστρώνεται ένα λεπτό στρώμα μεταλλικών οξειδίων και συγκεκριμένα διοξείδιο του τιτανίου. Τα υλικά της επίστρωσης δρουν στην υπεριώδη ακτινοβολία φωτοκαταλυτικά και χαλαρώνουν τους δεσμούς της σκόνης και των διαφόρων ρυπαντών με το γυαλί. Ταυτόχρονα είναι υλικά υδρόφιλα, που διευκολύνουν την απρόσκοπτη ροή του βρόχινου νερού πάνω στη γυάλινη επιφάνεια, διευκολύνοντας έτσι τον καθαρισμό της. Οι αυτοκαθαριζόμενοι υαλοπίνακες τοποθετούνται κυρίως σε ψηλά και ογκώδη κτίρια στα οποία είναι δύσκολη η πρόσβαση για καθαριότητα.

### Υαλοπίνακες ακτινοπροστασίας (μολυβδύαλος)

Είναι υαλοπίνακες στους οποίους, κατά το στάδιο της κατασκευής, προστέθηκε στο αρχικό μείγμα πρώτων υλών ικανή ποσότητα οξειδίου του μολύβδου (PbO). Το συστατικό αυτό έχει την ιδιότητα να αυξάνει εξαιρετικά την ικανότητα του υαλοπίνακα να απορροφά ιοντίζουσες (οι οποίες είναι εξαιρετικά επιβλαβείς) ακτινοβολίες (ακτίνες χ, ακτίνες γ κ.λπ). Χρησιμοποιούνται κυρίως σε χώρους όπου υπάρχουν σκεδαζόμενες ή και απευθείας εκπεμπόμενες ιοντίζουσες ακτινοβολίες.

### Μονόδρομοι υαλοπίνακες

Οι καθρέπτες που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία ("κατασκοπευτικοί" καθρέπτες) είναι διάφανοι υαλοπίνακες, επιστρωμένοι με ειδική στρώση αργύρου (εν κενώ). Οι υαλοπίνακες αυτοί έχουν εξαιρετικά αυξημένο συντελεστή ανακλαστικότητας (50%) και εξαιρετικά χαμηλό συντελεστή φωτεινής διαπερατότητας (κάτω από 2%). Ο συνδυασμός αυτός είναι που κάνει αυτόν τον υαλοπίνακα τόσο ξεχωριστό. Κύρια εφαρμογή των υαλοπινάκων αυτών είναι για την παρακολούθηση χώρων χωρίς να γίνεται αντιληπτή η παρουσία του παρατηρητή. Για να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα, είναι απαραίτητο να έχει εξασφαλιστεί μια μεγάλη σχέση έντασης φωτισμού. Αυτό σημαίνει ότι ο χώρος προς παρατήρηση πρέπει να είναι πολλές φορές πιο φωτεινός από τον χώρο στον οποίο στέκεται ο παρατηρητής.

### Υαλοπίνακες ψηφιακής εκτύπωσης

Ο υαλοπίνακας ψηφιακής εκτύπωσης κατασκευάζεται από διαφόρων χρωμάτων και τύπων γυαλιά (triplex, security, φυμέ, μπρονζέ, καθρέφτης) πάνω στα οποία εκτυπώνεται οποιοδήποτε σχέδιο. Υπάρχει μεγάλη ποικιλία σχεδίων και χρωμάτων, ανάλογα με τις προτιμήσεις του πελάτη. Μπορεί να τοποθετηθεί σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους, με σκοπό την πρόσδοση υψηλής αισθητικής στον χώρο.

## Χυτοί υαλοπίνακες

Οι χυτοί υαλοπίνακες (γενική κατηγορία), που βασίζονται σε πολύ παλαιότερη μέθοδο κατασκευής σε σχέση με αυτήν της επίπλευσης (float), είναι υαλοπίνακες μειωμένης διαφάνειας, συνήθως διακοσμητικοί (διαμαντέ) ή ενισχυμένοι (αρμέ) με ατσάλινο πλέγμα.

- Διακοσμητικοί υαλοπίνακες (διαμαντέ): Είναι επίπεδοι ημιδιαφανείς, άχρωμοι ή έγχρωμοι υαλοπίνακες, με ανάγλυφη επιφάνεια στη μία ή και στις δύο πλευρές τους. Διαχέουν το φως και είναι κατάλληλοι για φωτισμό σκοτεινών εσωτερικών χώρων.
- Υαλοπίνακες συρμάτινου πλέγματος (αρμέ): Είναι χυτοί υαλοπίνακες, οπλισμένοι στη μέση του πάχους τους με ατσάλινο πλέγμα. Είναι λείοι ή ανάγλυφοι. Το πλέγμα συγκρατεί τα θραύσματα γυαλιού κατά τη θραύση, μειώνει όμως την αντοχή του υαλοπίνακα σε λυγισμό. Χρησιμοποιούνται σε γυάλινες στέγες, πυράντοχες κατασκευές, κατασκευή γυάλινων στηθαίων και αλλού.
- Υαλοπίνακες καμπύλης διατομής: Είναι κυρτοί υαλοπίνακες, διαφανείς, έγχρωμοι, με ή χωρίς πλέγμα, που κατά τη διαδικασία παραγωγής τους μορφοποιούνται, ώστε να σχηματίσουν τις επιθυμητές καμπύλες επιφάνειες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το U glass, που μπορεί να τοποθετηθεί σε μεγάλα ανοίγματα χωρίς σημαντική επιπρόσθετη υποστήριξη (πλαίσιο) και αποτελεί αρκετά πρακτική και οικονομική λύση, τόσο για εξωτερικές επενδύσεις κτιρίων, όσο και για εσωτερικά χωρίσματα.

## **3.5 Κουφώματα**

Κουφώματα γενικά ονομάζονται όλα εκείνα τα στοιχεία, τα οποία χρησιμοποιούνται για να κουφώσουν (κλείσουν) τα ανοίγματα των τοίχων ενός κτιρίου. Τα κουφώματα διακρίνονται σε εξωτερικά, τα οποία χρησιμοποιούνται στους εξωτερικούς τοίχους του κτιρίου και οριοθετούν το εξωτερικό με το εσωτερικό μέρος του κτίσματος και σε εσωτερικά, τα οποία οριοθετούν και χωρίζουν τις διαιρέσεις (δωμάτια) του κτίσματος. Τα εξωτερικά κουφώματα χωρίζονται σε παράθυρα, μπαλκονόπορτες και πόρτες εισόδου και συμβάλλουν σε διάφορες λειτουργίες του κτιρίου. Εξωτερικά έχουν άμεση σχέση με την αισθητική και την ασφάλεια ενώ εσωτερικά εξυπηρετούν τη θερμομόνωση, τον ηλιασμό, το φυσικό φωτισμό, την ηχομόνωση, τον αερισμό, την υδατοστεγανότητα και φυσικά τη θέα. Γενικά σημαντικότερο ρόλο στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου κατέχουν τα εξωτερικά κουφώματα, αφού αποτελούν το σύνορό του με το εξωτερικό περιβάλλον. Επίσης σε αυτά είναι συνηθέστερη η χρήση υαλοπινάκων, οπότε τα κουφώματα που αναφέρονται παρακάτω, αφορούν κυρίως τα εξωτερικά ανοίγματα.

Πλαίσιο (κάσα) ονομάζεται το σταθερό τμήμα του κουφώματος που στερεώνεται στα περιμετρικά δομικά στοιχεία και υποδέχεται το φύλλο σε ειδικές υποδοχές (πατούρες) – πολλές φορές ως κούφωμα εννοείται μόνο η κάσα. Στερεώνεται σταθερά στα περιμετρικά στα περιμετρικά στοιχεία με βίδες, ειδικά άγκιστρα, λάμες και λοιπά είδη στερεώσεως.

Τα ανοίγματα στο εξωτερικό κέλυφος κτιρίου διακόπτουν τη συνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης. Τα κουφώματα που συμπληρώνουν τα ανοίγματα συνήθως τοποθετούνται “πρόσωπο” με την εσωτερική επιφάνεια του εξωτερικού περιμετρικού κελύφους και δεν βρίσκονται σε ευθεία συνέχεια με τη θερμομονωτική στρώση. Στις περισσότερες κατασκευές η θερμομονωτική στρώση των δικέλυφων τοιχοποιιών βρίσκεται στον πυρήνα, ενώ στα φέροντα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος στην εξωτερική τους πλευρά. Αφήνονται έτσι ουσιαστικά η παραστάδα (λαμπάς), το υπέρθυρο (πρέκι ή ανωκάσι) και η ποδιά (κατωκάσι) του ανοίγματος μέχρι τη θέση του κουφώματος θερμικά απροστάτευτα, δημιουργώντας θερμογέφυρες – είναι οι θερμογέφυρες κουφωμάτων, που αναφέρονται στο κεφάλαιο 2. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με την τοποθέτηση θερμομονωτικής στρώσης περιμετρικά του ανοίγματος, δηλαδή στις παραστάδες, τα υπέρθυρα και τις ποδιές, φροντίζοντας βεβαίως αυτή να αποτελεί συνέχεια της θερμομονωτικής στρώσης της τοιχοποιίας. Και σε αυτή την περίπτωση το κατασκευαστικό πρόβλημα που δημιουργείται είναι η καλή σύνδεση της κάσας του κουφώματος με την τοιχοποιία, δεδομένου ότι η θερμομονωτική στρώση που προσθέτως θα τοποθετηθεί περιμετρικά του ανοίγματος δεν εξασφαλίζει κάτι τέτοιο. Τότε, ως πλέον πρόσφορη λύση έρχεται η επιλογή της εξωτερικής θερμομόνωσης και η τοποθέτηση του κουφώματος στην εξωτερική θέση του ανοίγματος, ώστε να είναι συνεπίπεδο με τη θερμομονωτική στρώση στην τοιχοποιία ή, ακόμα καλύτερα, ελάχιστα εκατοστά “τραβηγμένο” προς τα μέσα, όσο θα είναι το πάχος της θερμομονωτικής στρώσης της τοιχοποιίας, προκειμένου να βρει σταθερή βάση στην τοιχοποιία για να στερεωθεί.

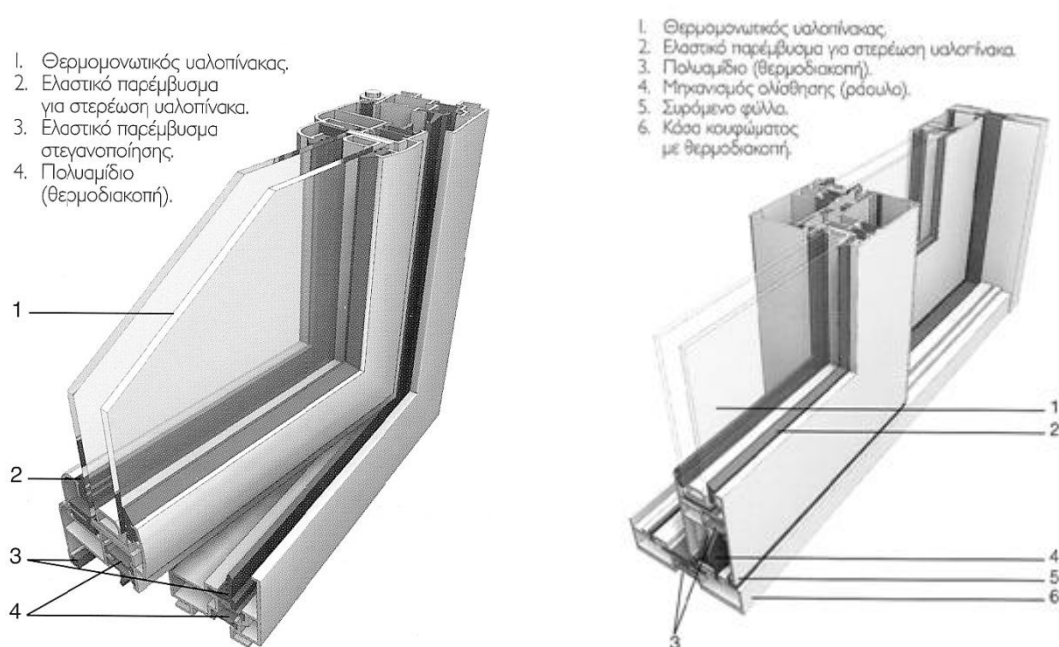
Καθώς όμως κανένας συμβατικός τοίχος επιχρισμένων οπτοπλίνθων στο τελειώμα του δεν σχηματίζει απόλυτη ευθεία, είναι πρακτικά αδύνατη η πλήρης επαφή μεταξύ κάσας του κουφώματος και τοιχοποιίας. Τα κενά που δημιουργούνται κατά την εφαρμογή (άλλοτε ευμεγέθη και άλλοτε σχεδόν αδιόρατα) λειτουργούν πάντα και αυτά ως θερμογέφυρες. Πρέπει να πληρούνται με κατάλληλο θερμομονωτικό υλικό (π.χ. διογκωμένη πολυουρεθάνη). Από τις περιοχές των αρμών διαφεύγει ή διεισδύει ψυχρός ή θερμός αέρας. Έχει ιδιαίτερη σημασία η σχολαστική σφράγιση τους, με υλικά όμως μη τοξικά, που αναπνέουν. Σήμερα, κύριο μέλημα πολλών τεχνιτών κατά την πλήρωση των κενών δεν είναι η αποφυγή της θερμογέφυρας, αλλά η καλή στερέωση του κουφώματος, με αποτέλεσμα, όταν η στερέωση εξασφαλιστεί, να αδιαφορούν για την κάλυψη των υπολοίπων κενών. Με την τοποθέτηση κατόπιν του αρμοκάλυπτρου και το στοκάρισμα του τοίχου τα κενά επικαλύπτονται, δεν παύουν όμως να υφίστανται. Σε εκείνες τις θέσεις ο τοίχος είναι θερμικά ιδιαίτερα εξασθενημένος και το πάχος του είναι στην πραγματικότητα όσο το πάχος του αρμοκάλυπτρου. Επομένως, δεν υπάρχει καμία θερμική προστασία. Επίσης, πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την αποφυγή θερμογέφυρας στα κουτιά των περιελισσόμενων περσίδων (ρολών) των κουφωμάτων, που είναι η συνηθέστερη επιλογή σκίασης.

Με τη διευρυμένη έννοια του όρου, θερμογέφυρες αποτελούν και όλα τα εξωτερικά κουφώματα ενός κτιρίου, καθώς οι θερμικές απώλειες μέσω αυτών είναι πολλαπλάσιες των λοιπών κατακόρυφων και οριζόντιων δομικών στοιχείων. Άλλωστε, ως “ασθενή” σημεία στη θερμική προστασία της κατασκευής τα δέχεται εξ αρχής κάθε κανονισμός, καθώς οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του συντελεστή

θερμοπερατότητας των κουφωμάτων είναι πολλαπλάσιες των αντίστοιχων μέγιστων επιτρεπόμενων τιμών των λοιπών δομικών στοιχείων. Σήμερα πάντως έχουν κατασκευαστεί και κυκλοφορούν στην αγορά κουφώματα με πιστοποιημένες τιμές πολύ μικρότερες (πλησιάζουν τα  $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ) αυτών που προβλέπονταν από τον προηγούμενο κανονισμό θερμομόνωσης. Γι' αυτό και οι μέγιστες επιτρεπόμενες τιμές του Κ.Εν.Α.Κ. έχουν μειωθεί σχεδόν στο μισό αυτών του προηγούμενου κανονισμού. Τα κουφώματα αλουμινίου έχουν πλέον (συνήθως) στο σκελετό των πλαισίων (κάσα και πλαίσιο υαλοπίνακα) θερμοδιακοπή, ενώ οι υαλοπίνακες εξασφαλίζουν πολύ καλύτερες τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητάς τους.

Η στερέωση των πλαισίων επί των τοίχων ή των ελαφρών χωρισμάτων επιτυγχάνεται με σιδηρές λάμες, συνδετήρες UPAT ή παρεμφερή υλικά. Στην περίπτωση που τα πλαίσια έχουν μεταβλητό πλάτος, μπορούν να τοποθετηθούν μετά την αποπεράτωση των χρωματισμών, οπότε τοποθετείται ψευδόκασα για την αποπεράτωση των επιχρισμάτων. Τα πλαίσια φέρουν και τους μηχανισμούς, τα εξαρτήματα στερέωσης και λειτουργίας των φύλλων του κουφώματος.

Φύλλα (ένα ή περισσότερα) είναι τα κινητά (ή ακίνητα) μέρη του κουφώματος και μπορεί να είναι ανοιγόμενα, συρόμενα (επάλληλα ή χωνευτά), ανασυρόμενα, σταθερά κ.λπ. Το κάθε φύλλο περιλαμβάνει τον υαλοπίνακα και το πλαίσιο στήριξής του. Η όλη κατασκευή του κουφώματος ονομάζεται και υαλοστάσιο. Ο υαλοπίνακας συνήθως καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας του κουφώματος (ενδεικτική τιμή 80%). Είναι όμως προφανές ότι και το υπόλοιπο μέρος του κουφώματος επηρεάζει τις διάφορες ιδιότητες του υαλοστασίου και δεν πρέπει να αγνοείται.



**Σχήμα 3.23α & 3.23β:** (α): Στοιχεία κουφώματος αλουμινίου με ανοιγόμενο φύλλο. (β): Στοιχεία κουφώματος αλουμινίου με συρόμενα επάλληλα φύλλα.

Τα κυριότερα είδη πλαισίων που υπάρχουν είναι:

### Πλαίσια αλουμινίου

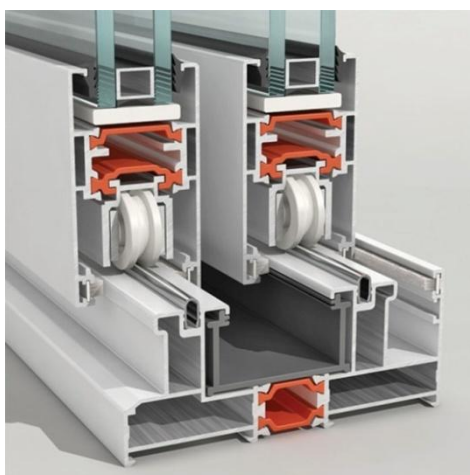
Τα πλαίσια αλουμινίου είναι σήμερα πολύ διαδεδομένα. Η εξέλιξη στην τεχνολογία της παραγωγής προφίλ (διατομών) αλουμινίου, η δυνατότητα κατασκευής σύνθετων διατομών και η ευρηματικότητα στον τομέα σχεδιασμού συστημάτων συνέβαλαν στη γρήγορη εξάπλωσή τους. Η ασφάλεια των κατασκευών και οι απαιτήσεις ποιότητας, οι ανάγκες χρήσης και η αισθητική εμφάνιση, οδήγησαν στο σχεδιασμό ολοκληρωμένων κουφωμάτων αλουμινίου, τα γνωστά «συστήματα», τα οποία συνδυάζουν κατάλληλα προφίλ αλουμινίου, ειδικά εξαρτήματα, μηχανισμούς λειτουργίας, τζάμια και υλικά στεγάνωσης. Σήμερα, τα συστήματα αλουμινίου κυριαρχούν στα κουφώματα, καθώς κυκλοφορούν στην αγορά σε μεγάλη ποικιλία και συνδυάζουν ποικιλία τεχνικών χαρακτηριστικών και μηδαμινή ανάγκη συντήρησης. Το αλουμίνιο (και πιο συγκεκριμένα, ορισμένα κράματά του) έχει γενικά καθιερωθεί ως το πλέον ιδανικό υλικό κατασκευής κουφωμάτων και προτιμάται από την πλειοψηφία των καταναλωτών, χάρη στα αδιαμφισβήτητα προτερήματα που προσφέρει σε σχέση με άλλα υλικά. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην Ελλάδα, όπου οι κλιματολογικές συνθήκες εναρμονίζονται πλήρως με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των κουφωμάτων αυτών. Το αλουμίνιο δεν αντιδρά σοβαρά στις αλλαγές κλίματος και θερμοκρασίας, σε αντίθεση με το ξύλο στο οποίο προκαλούνται διαβρώσεις και στρεβλώσεις και το uPVC που γίνεται πιο εύθραυστο στις χαμηλές θερμοκρασίες και πιο εύκαμπτο στις υψηλές. Επίσης, είναι πιο ανθεκτικό στις παραμορφώσεις και δεν απαιτεί ενίσχυση όπως τα πλαστικά κουφώματα. Τα λεπτότερα και κομψότερα πλαίσια αλουμινίου δίνουν μεγαλύτερες επιφάνειες γυαλιού χωρίς να μειώνεται η αντοχή και η ακαμψία τους, καθώς κατασκευάζονται με τη χρήση διελασμένων προφίλ. Χαρακτηριστικό των κουφωμάτων αυτών είναι η ύπαρξη θαλάμων στο προφίλ τους, σε βελτιστοποιημένο σχήμα, μέγεθος και πλήθος.

Σημαντικός παράγοντας κατά την επιλογή των συστημάτων αλουμινίου που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε νέο ή ανακαινισμένο κτίριο είναι η μόνωση που αυτά προσφέρουν και η οποία εξαρτάται από την επιλογή των υλικών και τη συναρμολόγηση και τοποθέτηση στην οικοδομή. Κατασκευαστικά, τα σύγχρονα συστήματα κουφωμάτων αλουμινίου έχουν ικανοποιητική αεροστεγανότητα και υδατοστεγανότητα, καθώς διαθέτουν περιμετρικά λάστιχα και μάκτρα, συγκολλημένα στις γωνίες, προβλέπουν διόδους απορροής των νερών κ.λπ. Η αεροστεγανότητα επηρεάζει άμεσα τόσο την θερμομόνωση όσο και την ηχομόνωση των κτιρίων. Η ικανότητα των κουφωμάτων να εμποδίζουν τη διάδοση της θερμότητας εξαρτάται από την αεροπερατότητα της επιφάνειας του κουφώματος (που απαλείφεται όταν τοποθετείται σωστά το κούφωμα), τον τύπο του υαλοπίνακα και τον τύπο του προφίλ αλουμινίου.

Σήμερα υπάρχουν ειδικά σχεδιασμένα προφίλ, τα θερμομονωτικά, των οποίων το εσωτερικό μέρος χωρίζεται από το εξωτερικό με κάποιο υλικό διαφορετικής υφής και χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, το οποίο εμποδίζει την άμεση μεταβίβαση της θερμότητας από μέσα προς τα έξω και αντιστρόφως. Είναι τα λεγόμενα προφίλ με θερμοδιακοπή, όπου η θερμοδιακοπή αναφέρεται αποκλειστικά και μόνο στα κουφώματα αλουμινίου. Το πολυαμίδιο είναι ένα είδος πλαστικού PVC που, σε αντίθεση με το αλουμίνιο, είναι κακός αγωγός της θερμότητας και συνεπώς μειώνει



δραστικά τη θερμική διαπερατότητα του κουφώματος (αν και αυξάνεται το κόστος αγοράς). Πιο συγκεκριμένα, το πολυαμίδιο, που πρακτικά δημιουργεί την θερμοδιακοπή, είναι ένα πολύ ανθεκτικό μονωτικό υλικό το οποίο εκτός από την πολύ μικρή του θερμική αγωγιμότητα, διαθέτει και υψηλή σκληρότητα, κάτι που προσδίδει στιβαρότητα και ανθεκτικότητα στα κουφώματα. Η έννοια της θερμοδιακοπής δεν υπάρχει ούτε στα πλαστικά κουφώματα uPVC ούτε στα ξύλινα κουφώματα (αφού τα υλικά τους έχουν μικρότερο συγκριτικά συντελεστή θερμοπερατότητας από το αλουμίνιο). Τα απλά πλαίσια αλουμινίου, χωρίς θερμοδιακοπή, παρουσιάζουν αυξημένο συντελεστή θερμοπερατότητας (γιατί το αλουμίνιο είναι καλός αγωγός της θερμότητας) και πέρα από την αυξημένη ροή θερμότητας διαμέσου τους, μπορεί να παρουσιάζουν τους χειμερινούς μήνες υγραποίηση υδρατμών στην επιφάνειά τους. Το φαινόμενο της υγραποίησης των υδρατμών μπορεί να παρουσιαστεί και στα ενεργειακά κουφώματα αλουμινίου (με θερμοδιακοπή), uPVC ή ξύλου, αλλά σε πιο ακραίες συνθήκες.



**Σχήμα 3.24: Σχέδιο προφίλ κουφώματος αλουμινίου με συρόμενα επάλληλα φύλλα διπλού υαλοπίνακα. Διακρίνεται η ύπαρξη θερμοδιακοπής (πορτοκαλί χρώμα) στα φύλλα και στην κάσα.**

### Ξύλινα πλαίσια

Τα ξύλινα πλαίσια είναι ο παλαιότερος τύπος πλαισίου. Κατασκευάζονται από ποικιλία υλικών με βάση τη φυσική ξυλεία και παράγωγα αυτής. Τα ξύλα που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι meranti, δρυς, teak, πεύκο, αγριόπευκα (Λάριξ) και ερυθρελάτες (έλατα), τα οποία έχουν υποστεί ξήρανση και είναι απεντομωμένα. Τα παράγωγα ξύλου, σε σύγκριση με τη φυσική ξυλεία, παρουσιάζουν βελτιωμένη συμπεριφορά σε υγρασία, αυξημένη μηχανική αντοχή και μεγαλύτερη αντοχή στη διάβρωση. Η μηχανική αντοχή ποικίλει, ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο ξύλο. Τα σύγχρονα ξύλινα κουφώματα, έπειτα από πολλά χρόνια εξέλιξης, είναι και αυτά δομικά στοιχεία σύγχρονων προδιαγραφών και τεχνολογίας. Βάφονται με υψηλής αντοχής υδροδιαλυτά οικολογικά βερνίκια εμπότισμού, η ξυλεία τους είναι τρικολλητή (ξυλεία τριών στρώσεων, που μειώνει σημαντικά το ενδεχόμενο στρέβλωσης) και δεν χρειάζονται συντήρηση παλαιού τύπου (ξύσιμο – βάψιμο). Αντί αυτού, θέλουν απλώς

καλό πλύσιμο με άφθονο νερό και ανά 1-2 χρόνια μπορούν να εφαρμοστούν στο επίπεδο του καθαρισμού υλικά με βάση το νερό. Περιλαμβάνουν, επίσης, περιμετρικούς μηχανισμούς προηγμένης τεχνολογίας. Τα ξύλινα πλαίσια έχουν συγκριτικά χαμηλότερο συντελεστή θερμοπερατότητας, γιατί το ξύλο είναι θερμομονωτικό υλικό. Για τον λόγο αυτόν το ξύλο ήταν και παραμένει το υλικό που προτιμάται στην κατασκευή κουφωμάτων σε ιδιαίτερα ψυχρές περιοχές. Βέβαια, τα ξύλινα πλαίσια έχουν μεγαλύτερο κόστος, συγκριτικά με τα υπόλοιπα είδη.



**Σχήμα 3.25:** Τομή τριπλού υαλοπίνακα σε ξύλινο κούφωμα.

#### Πλαίσια από συνθετικό υλικό (uPVC)

Από τα συνθετικά υλικά, για την κατασκευή κουφωμάτων χρησιμοποιείται κυρίως το μη πλαστικοποιημένο πολυβινυλοχλωρίδιο (σκληρό PVC, ή uPVC). Τα κουφώματα αυτού του είδους έχουν χαμηλό κόστος αγοράς, χωρίς όμως να στερούνται ποιότητας και αποδοτικότητας, μιας και έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και χαμηλή ανάγκη συντήρησης και παρουσιάζουν συγκριτικά χαμηλό συντελεστή θερμοπερατότητας, καλή ηχομόνωση και στεγανότητα. Οι διατομές αυτών των πλαισίων επίσης έχουν θαλάμους.



**Σχήμα 3.26:** Σχέδιο προφίλ κουφώματος παραθύρου, από uPVC, με ανοιγόμενο φύλλο διπλού υαλοπίνακα.

Το υλικό των πλαισίων αυτών περιέχει στη σύστασή του διάφορους σταθεροποιητές, απαραίτητα συστατικά για την αντοχή τους στην ηλιακή ακτινοβολία και τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις. Το κιτρίνισμα ήταν πιο συχνό φαινόμενο τις προηγούμενες δεκαετίες σε χαμηλότερης ποιότητας πλαστικά κουφώματα. Στα κουφώματα αυτού του τύπου υπάρχει θέμα ασφάλειας, λόγω της συγκριτικά χαμηλής μηχανικής αντοχής του υλικού, όμως τα σύγχρονα συνθετικά κουφώματα έχουν εσωτερικό προφίλ αλουμινίου, που προσδίδει στιβαρότητα στην κατασκευή.

Εκτός από τους παραπάνω, κυριότερα χρησιμοποιούμενους, τύπους πλαισίων, υπάρχουν και άλλα είδη, όπως:

- Σύνθετα πλαίσια αλουμινίου-ξύλου, όπως:
  - Ξύλινα πλαίσια με εξωτερική επένδυση φύλλου αλουμινίου, το οποίο δεν συμμετέχει στη μηχανική αντοχή του κουφώματος, αλλά κυρίως προστατεύει το ξύλο από τις καιρικές συνθήκες.
  - Πλαίσια αλουμινίου με εσωτερική ξύλινη επένδυση, που καλύπτει τα σταθερά και κινητά μέρη του κουφώματος από την εσωτερική πλευρά, ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία θερμογεφυρών.
  - Ξύλινα πλαίσια με ενσωματωμένη ενίσχυση από ράβδους αλουμινίου, που αυξάνει την αντοχή και την ακαμψία του κουφώματος και επιτρέπει την κατασκευή κουφωμάτων με περιορισμένη διατομή.
  - Πλαίσια που όλα τα μέρη τους αποτελούνται από σύνθετες διατομές με εξωτερικό τμήμα από αλουμίνιο και εσωτερικό τμήμα από ξύλο. Τα δύο τμήματα της διατομής συμμετέχουν εξίσου στην αντοχή του συνολικού κουφώματος.
- Πλαίσια από fiberglass (υαλόνημα).
- Πλαίσια από πολυουρεθάνη.
- Πλαίσια από ανοξειδωτο ατσάλι.
- Σιδηρά πλαίσια.

Τα κουφώματα είναι τρισδιάστατα πολύπλοκα συναρμολογημένα σύνολα, στα οποία τα υλικά και οι διατομές μεταβάλλονται μεταξύ σχετικά μικρών αποστάσεων, οπότε είναι περιοριστική η θεώρηση της ύπαρξης μόνο των ιδιοτήτων του υαλοπίνακα. Η ύπαρξη των πλαισίων και λοιπών εξαρτημάτων επίσης επηρεάζει τις ιδιότητες του συνολικού κουφώματος. Για παράδειγμα, στους μεταλλικούς αποστάτες στο διάκενο του υαλοπίνακα (για υαλοπίνακα με περισσότερα από ένα φύλλα) υπάρχει πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα ροής θερμότητας, συγκριτικά με την κεντρική περιοχή του υαλοπίνακα, γεγονός που αυξάνει τη ροή θερμότητας στα εξωτερικά όρια του υαλοπίνακα. Η σχετική επίδραση αυτών των “φαινομένων των άκρων” γίνεται περισσότερο σημαντική όσο η θερμική αντίσταση της συνολικής κατασκευής αυξάνεται και επίσης σε μικρούς σε μέγεθος υαλοπίνακες, όπου ο λόγος εμβαδού περιμετρικής προς εμβαδό κεντρικής περιοχής του υαλοπίνακα είναι αυξημένος. Τα

πλαίσια επίσης επηρεάζουν τη θερμοπερατότητα του κουφώματος, μιας και γενικά παρουσιάζουν μεγαλύτερες θερμοπερατότητες από τους βελτιωμένους υαλοπίνακες που τοποθετούνται σήμερα.

Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας του κουφώματος ( $U_w$ ) προκύπτει από τους συντελεστές θερμοπερατότητας του πλαισίου του κουφώματος (εννοώντας το σύνολο του πλαισίου υαλοπίνακα και της κάσας) και του υαλοπίνακα κατά την ποσοστιαία αναλογία των εμβαδών των δύο υλικών στην επιφάνεια του κουφώματος, λαμβανομένης υπόψιν και της γραμμικής θερμογέφυρας που αναπτύσσεται μεταξύ πλαισίου και υαλοπίνακα. Όταν στο κούφωμα περιλαμβάνονται και άλλα αδιαφανή τμήματα, πέραν του πλαισίου, λαμβάνονται και αυτά υπόψιν στον υπολογισμό.

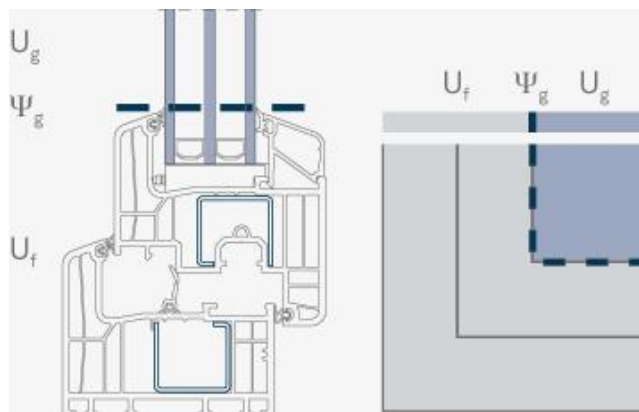
### Αναλυτικός υπολογισμός του $U_w$ κουφώματος

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός κουφώματος προκύπτει από τον τύπο:

$$U_w = \frac{A_f \cdot U_f + A_g \cdot U_g + l_g \cdot \Psi_g}{A_f + A_g} \quad (3.19)$$

όπου:

- $U_w$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας όλου του κουφώματος
- $U_f$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας του πλαισίου του κουφώματος
- $U_g$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα του κουφώματος
- $A_f$  [ $m^2$ ]: το εμβαδό επιφάνειας του πλαισίου του κουφώματος
- $A_g$  [ $m^2$ ]: το εμβαδό επιφάνειας του υαλοπίνακα του κουφώματος
- $l_g$  [ $m$ ]: το μήκος της θερμογέφυρας του υαλοπίνακα του κουφώματος (το μήκος συναρμογής πλαισίου-υαλοπίνακα, δηλαδή η περίμετρος του υαλοπίνακα)
- $\Psi_g$  [ $W/(m \cdot K)$ ]: ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα του κουφώματος



**Σχήμα 3.27:** Τμήματα και σημεία του κουφώματος, στα οποία αναφέρονται οι συντελεστές  $U_f$ ,  $U_g$ ,  $\Psi_g$ .

Η τιμή του συντελεστή  $\Psi_g$  εξαρτάται κυρίως από το υλικό του αποστάτη στον υαλοπίνακα (για υαλοπίνακα με περισσότερα από ένα φύλλα). Το συνηθέστερο υλικό, που έχει και τις χειρότερες θερμικές ιδιότητες, είναι το αλουμίνιο. Αποστάτες με βελτιωμένη θερμική μόνωση αναφέρονται και ως αποστάτες warm-edge, ή thermal-break και είναι φτιαγμένοι από ανοξείδωτο ατσάλι ή πλαστικό. Ενδεικτικές τιμές του  $\Psi_g$  είναι:

- Για υαλοπίνακα με αποστάτη αλουμινίου: 0,08 W/(m·K)
- Για υαλοπίνακα με αποστάτη warm-edge: 0,04 W/(m·K)

Στην περίπτωση κουφωμάτων με μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή και μονούς ή διπλούς υαλοπίνακες, χωρίς κάποια ειδική επίστρωση χαμηλής εκπομπής, η επίδραση της θερμογέφυρας στο συνολικό συντελεστή θερμοπερατότητας είναι μικρή και γι' αυτό το λόγο γενικά μπορεί να αγνοηθεί. Στην περίπτωση κουφωμάτων που φέρουν μονούς υαλοπίνακες, ο συντελεστής  $\Psi_g$  ισούται με 0. Τυπικές τιμές του συντελεστή γραμμικής θερμοπερατότητας  $\Psi_g$ , ανάλογα με τον τύπο του πλαισίου και του υαλοπίνακα, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Τύπος πλαισίου	$\Psi_g$ [W/(m·K)]	
	Χωρίς επίστρωση Low-e	Με επίστρωση Low-e
Μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή	0,02	0,05
Μεταλλικό πλαίσιο με θερμοδιακοπή	0,08	0,11
Συνθετικό πλαίσιο	0,06	0,08
Ξύλινο πλαίσιο	0,06	0,08

**Σχήμα 3.28:** Τυπικές τιμές γραμμικής θερμοπερατότητας στη συναρμογή πλαισίου-υαλοπίνακα.

Όσο μεγαλώνει η συνολική επιφάνεια ενός κουφώματος, τόσο μεγαλύτερο ρόλο παίζει ο υαλοπίνακας, αφού καταλαμβάνει μεγαλύτερο ποσοστό επιφάνειας. Η θερμοπερατότητα του κουφώματος σε αυτή την περίπτωση μειώνεται, γιατί ο υαλοπίνακας έχει κατά βάση μικρότερο συντελεστή από αυτό του πλαισίου.

Ο συντελεστής θερμοπερατότητας ενός πλαισίου (όπως και άλλες ιδιότητες) αναφέρεται στο πιστοποιητικό που συνοδεύει το προϊόν και προέρχεται από τον κατασκευαστή του. Τυπικές τιμές συντελεστών θερμοπερατότητας πλαισίων φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Υλικό πλαισίου	Χαρακτηριστικό πλαισίου	U <sub>f</sub> [W/(m <sup>2</sup> ·K)]
Μεταλλικό	Χωρίς θερμοδιακοπή	7,0
	Με θερμοδιακοπή	1,0 - 4,0
Συνθετικό	Πολυουρεθάνη	2,8
	uPVC με δύο θαλάμους	2,2
	uPVC με τρεις θαλάμους	2,0
	uPVC πολυθαλαμικό	1,0 - 2,0
Ξύλινο	Σκληρής ξυλείας μέσου πάχους πλαισίου-κάσας 5 cm	2,4
	Μαλακής ξυλείας μέσου πάχους πλαισίου-κάσας 5 cm	2,0
	Σκληρής ξυλείας μέσου πάχους πλαισίου-κάσας 10 cm	1,7
	Μαλακής ξυλείας μέσου πάχους πλαισίου-κάσας 10 cm	1,5

Σχήμα 3.29: Τυπικές τιμές συντελεστή θερμοπερατότητας πλαισίων.

Αναλυτικός υπολογισμός του U<sub>w</sub> κουφώματος που περιλαμβάνει πέτασμα (π.χ. κουτί ρολού)

Προκύπτει από τον τύπο:

$$U_w = \frac{A_f \cdot U_f + A_g \cdot U_g + l_g \cdot \Psi_g + A_p \cdot U_p + l_p \cdot \Psi_p}{A_f + A_g + A_p} \quad (3.20)$$

όπου:

- U<sub>w</sub> [W/(m<sup>2</sup>·K)]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας όλου του κουφώματος
- U<sub>f</sub> [W/(m<sup>2</sup>·K)]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας του πλαισίου του κουφώματος
- U<sub>g</sub> [W/(m<sup>2</sup>·K)]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα του κουφώματος
- U<sub>p</sub> [W/(m<sup>2</sup>·K)]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας του πετάσματος του κουφώματος
- A<sub>f</sub> [m<sup>2</sup>]: το εμβαδό επιφάνειας του πλαισίου του κουφώματος
- A<sub>g</sub> [m<sup>2</sup>]: το εμβαδό επιφάνειας του υαλοπίνακα του κουφώματος
- A<sub>p</sub> [m<sup>2</sup>]: το εμβαδό επιφάνειας του πετάσματος του κουφώματος
- l<sub>g</sub> [m]: το μήκος της θερμογέφυρας του υαλοπίνακα του κουφώματος (το μήκος συναρμογής πλαισίου-υαλοπίνακα, δηλαδή η περίμετρος του υαλοπίνακα)
- Ψ<sub>g</sub> [W/(m·K)]: ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας του υαλοπίνακα του κουφώματος
- l<sub>p</sub> [m]: το μήκος της θερμογέφυρας του πετάσματος του κουφώματος (το μήκος συναρμογής πλαισίου-πετάσματος, δηλαδή η περίμετρος του πετάσματος)

- $\Psi_p$  [W/(m·K)]: ο συντελεστής γραμμικής θερμοπερατότητας του πετάσματος του κουφώματος

#### Αναλυτικός υπολογισμός του $U_w$ ενός διπλού κουφώματος

Η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας ενός διπλού κουφώματος, δηλαδή ενός κουφώματος αποτελούμενου από δύο χωριστά κουφώματα με τους υαλοπίνακές τους, υπολογίζεται σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία και κατ' εφαρμογή της σχέσης (3.19) ξεχωριστά για την τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας του κάθε κουφώματος (δηλαδή των τιμών  $U_{w,a}$  του εξωτερικού κουφώματος και  $U_{w,i}$  του εσωτερικού) και κατόπιν για την τιμή του διπλού κουφώματος στο σύνολό του, βάσει του τύπου:

$$U_w = \frac{1}{\left(\frac{1}{U_{w,i}} - R_a\right) + R_{\delta,w} + \left(\frac{1}{U_{w,a}} - R_i\right)} \quad (3.21)$$

όπου:

- $U_w$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας ολόκληρου του διπλού κουφώματος
- $U_{w,i}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας του εσωτερικού κουφώματος
- $U_{w,a}$  [W/(m<sup>2</sup>·K)]: ο συντελεστής θερμοπερατότητας του εξωτερικού κουφώματος
- $R_a$  [m<sup>2</sup>·K/W]: η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από το διάκενο μεταξύ των δύο κουφωμάτων προς το δομικό στοιχείο, που θα συνυπολογιζόταν αν το διάκενο θεωρείτο εξωτερικό περιβάλλον
- $R_i$  [m<sup>2</sup>·K/W]: η αντίσταση θερμικής μετάβασης που προβάλλει το επιφανειακό στρώμα αέρα στη μετάδοση της θερμότητας από το διάκενο μεταξύ των δύο κουφωμάτων προς το δομικό στοιχείο, που θα συνυπολογιζόταν αν το διάκενο θεωρείτο εσωτερικό περιβάλλον
- $R_{\delta,w}$  [m<sup>2</sup>·K/W]: η θερμική αντίσταση του αέρα του διακένου μεταξύ των δύο κουφωμάτων

Επίσης, υπάρχει σχέση υπολογισμού της θερμοπερατότητας υαλοπετάσματος (curtain wall), που όμως ξεφεύγει από τις ανάγκες του παρόντος, καθώς η λογική του υπολογισμού στην ουσία δεν διαφέρει. Η σχέση αυτή μπορεί να βρεθεί στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010.

Ενδεικτικές τιμές της θερμικής διαπερατότητας  $U_w$  για διάφορους συνδυασμούς πλαισίων και υαλοπινάκων είναι:

- Κούφωμα με μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή και απλό μονό υαλοπίνακα, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού:  $6,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με ξύλινο πλαίσιο και απλό μονό υαλοπίνακα, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού:  $5,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με ξύλινο πλαίσιο και απλό μονό υαλοπίνακα, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 30% του συνολικού:  $4,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Διπλό ξύλινο παράθυρο με απλούς μονούς υαλοπίνακες, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού (εφόσον και τα δύο φύλλα δεν παρουσιάζουν προβλήματα αεροστεγανότητας):  $2,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή και απλό διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού:  $3,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή και απλό διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 30% του συνολικού:  $4,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με μεταλλικό πλαίσιο χωρίς θερμοδιακοπή και διπλό υαλοπίνακα επίστρωσης Low-e με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού:  $3,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με μεταλλικό πλαίσιο με θερμοδιακοπή 12 mm και απλό διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού:  $3,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με μεταλλικό πλαίσιο με θερμοδιακοπή 12 mm και διπλό υαλοπίνακα επίστρωσης Low-e με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού:  $2,6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με μεταλλικό πλαίσιο με θερμοδιακοπή 24 mm και απλό διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού:  $3,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με ξύλινο πλαίσιο και απλό διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού:  $2,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με ξύλινο πλαίσιο και απλό διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 30% του συνολικού:  $2,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με συνθετικό πλαίσιο και απλό διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού:  $3,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Κούφωμα με συνθετικό πλαίσιο και απλό διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 30% του συνολικού:  $2,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$



- Κούφωμα με συνθετικό πλαίσιο και διπλό υαλοπίνακα επίστρωσης Low-e, με διάκενο αέρα 12 mm, όπου το ποσοστό του εμβαδού του πλαισίου είναι 20% του συνολικού: 2,2 W/(m<sup>2</sup>·K)

Εξωτερική πόρτα (σε επαφή με εξωτερικό αέρα) χωρίς υαλοπίνακα, από μέταλλο, συνθετικό υλικό, ή ξύλο, έχει ενδεικτικές τιμές του συντελεστή θερμοπερατότητας ίσες με 6,0, 3,5 και 3,5 W/(m<sup>2</sup>·K) αντίστοιχα.

Εκτός όμως από τον συντελεστή θερμοπερατότητας και οι υπόλοιπες ιδιότητες του κουφώματος στο σύνολό του, διαφέρουν από αυτές του υαλοπίνακα. Σχετικά με τον ηλιακό συντελεστή  $g$  (ή και SHGC) του κουφώματος  $g_w$ , εκφράζει τη μέση τιμή του λόγου της ηλιακής ακτινοβολίας που περνά από την επιφάνεια του κουφώματος προς την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό. Η τιμή του εξαρτάται από το είδος του υαλοπίνακα και το ποσοστό του πλαισίου επί του κουφώματος. Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από το πλαίσιο και μεταδίδεται με τη μορφή θερμότητας στο εσωτερικό είναι πολύ μικρή συγκριτικά με αυτή που διέρχεται από το διαφανές τμήμα του κουφώματος και γι' αυτό γενικά αγνοείται. Ο ηλιακός συντελεστής  $g_w$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση και εξαρτάται από το ποσοστό του πλαισίου:

$$g_w = g_{gl} \cdot (1 - F_f) \quad (3.22)$$

όπου:

- $g_{gl}$ : ο ηλιακός συντελεστής του υαλοπίνακα (αναφέρεται στο υποκεφάλαιο 3.3)
- $F_f$ : το ποσοστό του πλαισίου στο κούφωμα

Επίσης, για παράδειγμα, είναι προφανές ότι αφού η οπτική διαπερατότητα VLT του πλαισίου του κουφώματος είναι μηδενική, η VLT του κουφώματος στο σύνολό του είναι γενικά μικρότερη από αυτή του υαλοπίνακα. Οπότε χρειάζεται προσοχή στο που αναφέρονται κάθε φορά οι ιδιότητες κουφωμάτων από τους κατασκευαστές.

Σημαντική παράμετρος της ύπαρξης ενός κουφώματος σε κτιριακό κέλυφος είναι και η διείσδυση του αέρα μέσω των χαραμάδων στις θέσεις συναρμογής με τα περιμετρικά δομικά στοιχεία και στις θέσεις επαφής των σταθερών πλαισίων με τα κινητά φύλλα. Ο αερισμός λόγω ύπαρξης χαραμάδων στα κουφώματα εξαρτάται από το μήκος των χαραμάδων, την ποιότητα των χαραμάδων (αεροστεγείς ή όχι), τον αριθμό (και την επιφάνεια) των ανοιγμάτων στις εξωτερικές επιφάνειες του κτιρίου, καθώς και από την αναλογία εξωτερικών προς εσωτερικά ανοίγματα (εσωτερικές πόρτες) στο χώρο. Για τον υπολογισμό του αερισμού λόγω της ύπαρξης χαραμάδων (διείσδυση αέρα) χρησιμοποιείται η σχέση:

$$V_{inf} = \sum (l \cdot \alpha) \cdot R \cdot H \quad (3.23)$$

όπου:

- $I$  [m]: το συνολικό μήκος των χαραμάδων του ανοίγματος (πόρτα, παράθυρο κ.ά.)
- $\alpha$  [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m})$ ]: ο συντελεστής αεροδιαπερατότητας από χαραμάδες του ανοίγματος, ανάλογα με την ποιότητα του κουφώματος
- $R$  [-]: ο συντελεστής διεισδυτικότητας, που εξαρτάται από το λόγο επιφανείας των εξωτερικών προς τα εσωτερικά ανοίγματα
- $H$  [-]: ο συντελεστής θέσης του ανοίγματος και ανεμόπτωσης

Τιμές για τους συντελεστές  $\alpha$ ,  $R$  και  $H$ , μπορούν να βρεθούν στην Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010.

Ενδεικτικές τιμές του αερισμού ανά μονάδα επιφανείας του κουφώματος είναι:

- Κούφωμα παραθύρου με ξύλινο πλαίσιο και μονό υαλοπίνακα, μη αεροστεγές:  $15,1 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$
- Κούφωμα παραθύρου με μεταλλικό ή συνθετικό πλαίσιο και μονό υαλοπίνακα, μη αεροστεγές:  $8,7 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$
- Ανοιγόμενο κούφωμα παραθύρου με μεταλλικό ή συνθετικό πλαίσιο και διπλό υαλοπίνακα, με αεροστεγανότητα μη πιστοποιημένη (ή και επάλληλα συρόμενο, με ψήκτρες):  $6,8 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$
- Ανοιγόμενο κούφωμα παραθύρου με μεταλλικό ή συνθετικό πλαίσιο και διπλό υαλοπίνακα, αεροστεγές, με πιστοποίηση:  $6,2 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$
- Ανοιγόμενο κούφωμα πόρτας με μεταλλικό ή συνθετικό πλαίσιο και διπλό υαλοπίνακα, αεροστεγές, με πιστοποίηση:  $4,8 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$

### 3.6 Ο ιδανικός υαλοπίνακας

Στην παράγραφο αυτή γίνεται αναφορά στην έννοια του ιδανικού υαλοπίνακα, μια έννοια που απέχει από την πραγματικότητα, αλλά βοηθάει στην βαθύτερη κατανόηση του ρόλου των υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων και των δυνατοτήτων που υπάρχουν για βελτίωση της συμπεριφοράς τους.

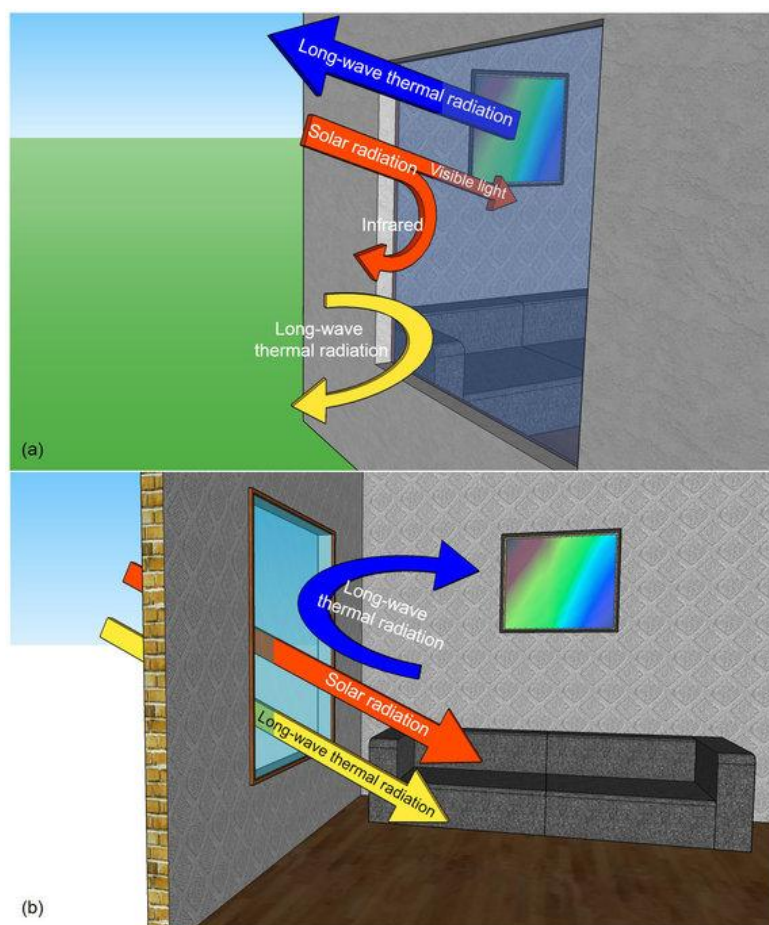
Όπως διαφαίνεται γενικώς στο υποκεφάλαιο 3.4, όπου παρουσιάζονται τα διάφορα είδη των υαλοπινάκων και όπως φαίνεται και από το σχήμα 3.9, με τη σωστή “ρύθμιση” της διαπερατότητας και ανακλαστικότητας στην υπεριώδη\* και την

---

\* Η υπεριώδης περιοχή του φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μεταφέρει επίσης θερμότητα, αλλά σημαντικά λιγότερη από την υπέρυθη NIR, επειδή στην περιοχή αυτή η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μικρότερη. Επίσης, η ενέργεια μεταφέρεται πιο εύκολα στα μόρια, άτομα, ή ιόντα των σωμάτων στις συχνότητες της υπέρυθρης ακτινοβολίας, επειδή αλληλεπιδρά ευκολότερα με αυτά και η κινητική ενέργεια και η ενέργεια ταλάντωσής τους εμφανίζεται μακροσκοπικά ως θερμότητα. Επίσης, η θερμότητα αποθηκεύεται με τη διέγερση των δεσμευμένων ηλεκτρονίων σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες. Έτσι συμβαίνει μεταφορά της θερμότητας και με ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, που εκπέμπεται καθώς τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν στη μη διεγερμένη τους κατάσταση.

υπέρουθρη NIR περιοχή του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και του συντελεστή εκπομπής στο τμήμα της θερμικής ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος, η συμπεριφορά ενός απλού υαλοπίνακα μπορεί να βελτιωθεί ώστε να προσεγγίσει αυτήν του ιδανικού υαλοπίνακα για ψυχρές περιόδους ή για θερμές περιόδους. Η τρίτη κατεύθυνση προς βελτίωση της συμπεριφοράς, είναι η βελτίωση του συντελεστή θερμοπερατότητας  $U_g$  του υαλοπίνακα μέσω των υπόλοιπων κατασκευαστικών του στοιχείων (π.χ. με τριπλά τζάμια, με κενό αέρος, ή με πλήρωση μόνωσης).

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι ιδιότητες του ιδανικού υαλοπίνακα για το καλοκαίρι (a) και για τον χειμώνα (b), σε σχέση με τις διάφορες ακτινοβολίες:



**Σχήμα 3.30:** (a): Λειτουργία του ιδανικού υαλοπίνακα για το καλοκαίρι, σε σχέση με τις διάφορες ακτινοβολίες. (b): Λειτουργία του ιδανικού υαλοπίνακα για τον χειμώνα, σε σχέση με τις διάφορες ακτινοβολίες.

Το κόκκινο βέλος στο σχήμα 3.30 παριστάνει την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, που αποτελείται (κατά κύριο λόγο) από το φως (visible light) και την υπέρυθρη NIR (infrared). Το κίτρινο βέλος παριστάνει τη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος που εκπέμπεται από το εξωτερικό περιβάλλον και το μπλε βέλος την αντίστοιχη που εκπέμπεται από επιφάνειες στον εσωτερικό χώρο του

κτιρίου. Η έννοια του ιδανικού υαλοπίνακα για καλοκαίρι και για χειμώνα είναι λοιπόν ο απόλυτος στόχος των υαλοπινάκων (σχετικά με τη συμπεριφορά του υαλοπίνακα απέναντι στις ακτινοβολίες διαφόρων μηκών κύματος – γιατί η μείωση του  $U_g$  μέσω άλλων κατασκευαστικών λύσεων αποτελεί διαφορετικό κεφάλαιο).

Η ρύθμιση της διαπερατότητας/ανακλαστικότητας στην εκτός του φωτός περιοχή φάσματος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να είναι δυναμική, δηλαδή μεταβαλλόμενη ανάλογα με τις ανάγκες (την εποχή). Οι “χρωμογενικοί” (chromogenic) υαλοπίνακες είναι η αντιπροσωπευτική κατηγορία υαλοπινάκων που μπορούν να επιτυγχάνουν αυτή τη ρύθμιση. Αποτελούνται από τους ηλεκτροχρωμικούς, τους αεριοχρωμικούς, τους θερμοχρωμικούς και τους φωτοχρωμικούς υαλοπίνακες. Οι δύο πρώτοι είναι, όπως αναφέρεται και στο υποκεφάλαιο 3.4, ενεργητικοί, ενώ οι δύο τελευταίοι παθητικοί. Υπάρχουν πάντως διάφορα προβλήματα στην πρακτική εφαρμογή των έξυπνων αυτών υαλοπινάκων, ένα από τα οποία είναι ο μηχανισμός και η αποδοτικότητα της ρύθμισης της διαπερατότητας στο φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας: η ρύθμιση αυτή εν γένει επιτυγχάνεται (σήμερα) κυρίως μέσω μεταβολής στην απορροφητικότητα, παρά μέσω μεταβολής στην ανακλαστικότητα. Οπότε, στην κατάσταση αποκοπής της NIR ακτινοβολίας (και της υπεριώδους), η μείωση των ηλιακών θερμικών κερδών αντισταθμίζεται κατά ένα μέρος από την αύξηση της θερμότητας που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο λόγω αυξημένης απορρόφησης. Ένα άλλο πρόβλημα είναι ότι παρουσιάζουν (ιδιαίτερα στην κατάσταση αποκοπής της NIR και υπεριώδους) μειωμένη οπτική διαπερατότητα. Επίσης, σε αυτούς τους υαλοπίνακες, ακόμα και στην κατάσταση αυξημένης (μέγιστης δυνατής) διαπερατότητας στην NIR και υπεριώδη ακτινοβολία, η διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία (SRT) είναι εν γένει χαμηλότερη από αυτήν ενός απλού υαλοπίνακα, οπότε η ενεργειακή αποδοτικότητά τους διαφαίνεται βάσει λογικής ότι θα είναι εν γένει μικρότερη από αυτήν ενός απλού υαλοπίνακα (ίδιου αριθμού φύλλων) σε μια ψυχρή περίοδο. Αυτό γιατί σε ψυχρές περιόδους, τα ηλιακά θερμικά κέρδη μέσω υαλοπινάκων έχουν επικουρικό ρόλο στην θέρμανση των εσωτερικών χώρων.

Ο ιδανικός έξυπνος υαλοπίνακας παρουσιάζει την μεγαλύτερη δυνατή οπτική διαπερατότητα (100%) και επιτυγχάνει το βέλτιστο της ρύθμισης της διαπερατότητας στην NIR και υπεριώδη ακτινοβολία, μέσω μεταβολής της ανακλαστικότητάς του σε αυτές. Βέλτιστη ρύθμιση σημαίνει ότι στην κατάσταση αυξημένης διαπερατότητας παρουσιάζει διαπερατότητα ίση με 1 για αυτές τις ακτινοβολίες, ενώ στην κατάσταση αποκοπής αυτών των ακτινοβολιών παρουσιάζει ανακλαστικότητα ίση με 1 για αυτές. Επειδή το ορατό μέρος φέρει περίπου το 42,8% της συνολικής ηλιακής ενέργειας, η SRT του ιδανικού έξυπνου υαλοπίνακα για καλοκαίρι μπορεί να θεωρηθεί ίση με 42,8%. Οπότε είναι δυνατόν ένας έξυπνος υαλοπίνακας με αρκετά χαμηλότερη SRT να είναι γενικά περισσότερο αποδοτικός από τον ιδανικό έξυπνο το καλοκαίρι, με παράλληλη φυσικά μείωση της οπτικής διαπερατότητας (και με την προϋπόθεση ότι δεν παρεμποδίζεται σε τόσο σημαντικό βαθμό ο φυσικός φωτισμός, ώστε να παρουσιάζεται αύξηση των ηλεκτρικών φορτίων τεχνητού φωτισμού). Αν και αρχικά αυτό φαίνεται παράδοξο, είναι κατανοητό ότι οφείλεται στον ορισμό του ιδανικού υαλοπίνακα, όπως δόθηκε, ο οποίος εστιάζει και στο ότι έχει μέγιστη οπτική διαπερατότητα (που τυπικά είναι συνήθως επιθυμητή). Η έννοια του ιδανικού έχει να κάνει δηλαδή περισσότερο με τις ιδιότητες και την λειτουργικότητά του, παρά με την

ενεργειακή αποδοτικότητά του. Μέγιστη ενεργειακή απόδοση το καλοκαίρι θα επιτυγχανόταν με μηδενική οπτική διαπερατότητα, κάτι που όμως δεν θα ήταν πρακτικό. Είναι επίσης εύλογο ότι με βάση τον ορισμό αυτό, ο ιδανικός έξυπνος υαλοπίνακας δεν είναι κατάλληλος για εφαρμογές όπου επιζητείται μείωση της οπτικής διαπερατότητας για λόγους μείωσης της θάμβωσης.

Αντίστοιχος ορισμός μπορεί να δοθεί και για τον ιδανικό υαλοπίνακα χαμηλού συντελεστή εκπομπής για χειμώνα και για καλοκαίρι. Ο ιδανικός υαλοπίνακας χαμηλού συντελεστή εκπομπής για χειμώνα έχει τις ίδιες ιδιότητες ηλιακού ελέγχου με έναν Low-e υψηλού ηλιακού θερμικού κέρδους, διαπερατότητα της εξωτερικής επιφάνειάς του στη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ίση με 100% και αντίστοιχη ανακλαστικότητα της εσωτερικής επιφάνειας ίση με 100%. Ο ιδανικός υαλοπίνακας χαμηλού συντελεστή εκπομπής για καλοκαίρι έχει τις ίδιες ιδιότητες ηλιακού ελέγχου με έναν Low-e χαμηλού ηλιακού θερμικού κέρδους, διαπερατότητα της εσωτερικής επιφάνειάς του στη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος ίση με 100% και αντίστοιχη ανακλαστικότητα της εξωτερικής επιφάνειας ίση με 100%.

Ο κατάλληλος συνδυασμός των εννοιών του ιδανικού έξυπνου υαλοπίνακα για χειμώνα/καλοκαίρι και του ιδανικού υαλοπίνακα χαμηλού συντελεστή εκπομπής για χειμώνα/καλοκαίρι οδηγεί στον ιδανικό υαλοπίνακα για χειμώνα/καλοκαίρι του σχήματος 3.30. Αυτά αφορούν τη συμπεριφορά του υαλοπίνακα απέναντι στις ακτινοβολίες διαφόρων μηκών κύματος – περαιτέρω βελτίωση της απόδοσής του επιτυγχάνεται με βελτίωση του συντελεστή θερμοπερατότητας  $U_g$  του υαλοπίνακα μέσω των υπόλοιπων κατασκευαστικών του στοιχείων. Φυσικά, η επίτευξη της ιδανικής αυτής κατάστασης δεν είναι πρακτικά δυνατή, αλλά ο ορισμός της έννοιας του ιδανικού υαλοπίνακα μπορεί να αποτελεί οδηγό για την βελτίωση των ιδιοτήτων των υαλοπινάκων.

## 4 Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναλυτικότερη περιγραφή των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων, με σκοπό τη βαθύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας και των δυνατοτήτων τους. Αρχικά, γίνεται παράθεση χρήσιμων γενικών εννοιών, ενώ ακολουθεί ανάλυση των ιδιοτήτων τους, διαφόρων τρόπων που υπάρχουν για βελτίωση αυτών, βασικών μεθόδων κατασκευής των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων και διάφορα άλλα στοιχεία.

### 4.1 Θερμοχρωμικά υλικά

Τα θερμοχρωμικά υλικά ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των χρωμογενικών υλικών, τα οποία είναι υλικά που παρουσιάζουν αλλαγές στις οπτικές τους ιδιότητες εξαιτίας κάποιας εξωτερικής διέγερσης. Τα πιο κοινά χρωμογενικά υλικά είναι τα φωτοχρωμικά, τα θερμοχρωμικά, τα ηλεκτροχρωμικά και τα αεριοχρωμικά, όπου η διέγερση είναι η πρόσπτωση φωτός, η αλλαγή της θερμοκρασίας του υλικού, η εφαρμογή ηλεκτρικού πεδίου και η έκθεση σε οξειδωτικά/αναγωγικά αέρια, αντίστοιχα.

Ένα θερμοχρωμικό υλικό παρουσιάζει σημαντική αλλαγή στον χρωματισμό του μόλις η θερμοκρασία του φτάσει σε μια χαρακτηριστική τιμή που ονομάζεται “θερμοκρασία μετάβασης” (transition temperature) (αυτό μάλιστα δεν έχει καμία σχέση με την πυράκτωση ή άλλα φαινόμενα, στα οποία επίσης συμβαίνει αλλαγή του χρωματισμού). Με την ευρύτερη έννοια του όρου, ως θερμοχρωμισμός (thermochromism) ορίζεται η παρουσία θερμοκρασιακά εξαρτώμενων αλλαγών στις ιδιότητες ενός υλικού. Τυπικά, το φαινόμενο αυτό συμβαίνει γύρω από ένα εύρος θερμοκρασιών, οπότε παρατηρείται βαθμιαία αλλαγή του χρώματος, δηλαδή συνεχής θερμοχρωμισμός. Αντιθέτως, η έννοια του διακριτού θερμοχρωμισμού περιλαμβάνει μια δομική αλλαγή (δηλαδή αλλαγή της δομής) του υλικού στη θερμοκρασία μετάβασης. Το θερμοχρωμικά υλικά είναι δυνατόν να τυγχάνουν εφαρμογής σε τεχνολογικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα σε αισθητήρες θερμοκρασίας, θερμόμετρα, θερμός, δείκτες επιπέδου φόρτισης μπαταριών, μέσα αποθήκευσης δεδομένων κ.ά. Πολλές ουσίες, όπως ανόργανα οξείδια, υγροί κρύσταλλοι, συζευγμένα ολιγομερή και ειδικές βαφές που αλλάζουν χρώμα (leuco dyes), είναι γνωστό ότι παρουσιάζουν την ικανότητα αναστρέψιμης μεταβολής του χρώματός του συναρτήσει της θερμοκρασίας τους. Ωστόσο, οι θερμοχρωμικές βαφές συνήθως βασίζονται σε οργανικές χημικές ενώσεις, οι οποίες με θέρμανση παρουσιάζουν μη αναστρέψιμες χρωματικές αλλαγές.

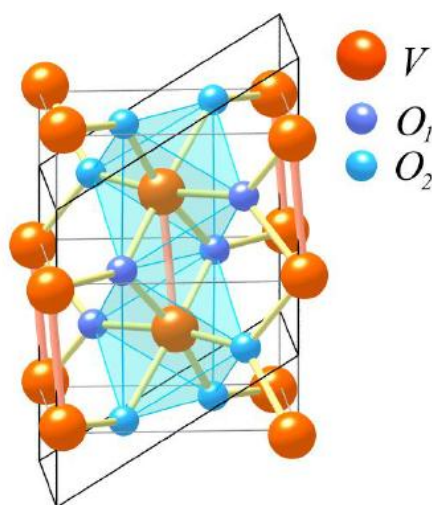
Διάφορα οξείδια μετάλλων μετάπτωσης, σουλφίδια και άλλες χημικές ενώσεις, όπως τα  $Fe_3O_4$ ,  $FeSi_2$ ,  $NbO_2$ ,  $NiS$ ,  $Ti_2O_3$ ,  $Ti_4O_7$ ,  $Ti_5O_9$ ,  $V_2O_3$ ,  $V_2O_5$ ,  $VO_2$  παρουσιάζουν ενδιαφέρουσες θερμοχρωμικές ιδιότητες. Τα οξείδια μετάλλων μετάπτωσης είναι τα περισσότερο μελετημένα θερμοχρωμικά υλικά στερεάς κατάστασης, λόγω των συγκριτικά καλύτερων ιδιοτήτων που παρουσιάζουν (επιτυγχάνουν καλύτερη ρύθμιση στο NIR τμήμα του φάσματος της ηλιακής

ακτινοβολίας). Όμως, το  $VO_2$  (διοξειδίο του βαναδίου) είναι το μόνο που παρουσιάζει μια σχετικά απότομη θερμοχρωμική μετάβαση σχετικά κοντά στη θερμοκρασία δωματίου, αφού τα υπόλοιπα υλικά γενικά παρουσιάζουν είτε πολύ χαμηλές είτε πολύ υψηλές τιμές. Οπότε η σχετική με αυτό έρευνα παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για εφαρμογές που αφορούν τους υαλοπίνακες σε κτίρια – για το λόγο αυτόν γίνεται και ιδιαίτερη αναφορά σε αυτό, αμέσως παρακάτω.

## 4.2 Το διοξειδίο του βαναδίου

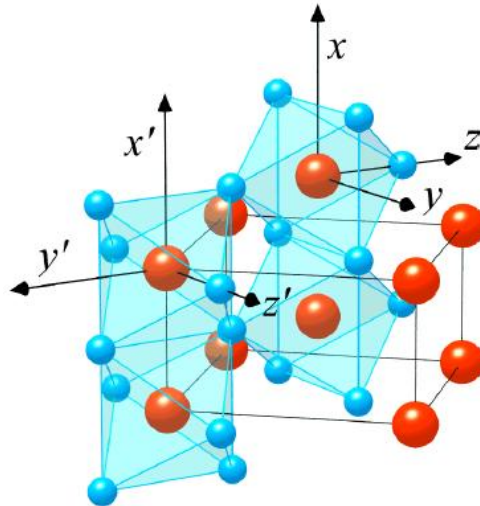
Το διοξειδίο του βαναδίου ( $VO_2$ ) είναι με διαφορά το περισσότερο μελετημένο θερμοχρωμικό υλικό στερεάς κατάστασης. Το υλικό αυτό είναι πολλά υποσχόμενο για χρήση σε εφαρμογές όπως οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες. Ο θερμοχρωμισμός του  $VO_2$  αναφέρθηκε για πρώτη φορά το 1959 από τον Morin. Το φαινόμενο της μεταβολής των ιδιοτήτων του διοξειδίου του βαναδίου στη θερμοκρασία μετάβασης, οφείλεται στην αλλαγή της κρυσταλλικής δομής του (αυτό ισχύει γενικότερα και για άλλα θερμοχρωμικά υλικά). Το διοξειδίο του βαναδίου υφίσταται μια αντιστρεπτή μετάβαση στη θερμοκρασία μετάβασης (transition temperature)  $T_T$  (λέγεται και κρίσιμη θερμοκρασία,  $T_c$ ):

- Όταν η θερμοκρασία του είναι μικρότερη από τη θερμοκρασία  $T_T$ , κρυσταλλώνεται σε μονοκλινές σύστημα – δηλαδή το γεωμετρικό σχήμα της κυψελίδας του κρυσταλλικού πλέγματος είναι παραλληλεπίπεδο με τις δύο βάσεις του και το ένα ζεύγος παράλληλων εδρών ορθογώνια, ενώ το τρίτο ζεύγος παράλληλων εδρών απλά παραλληλόγραμμα. Σε αυτή την κατάσταση, το υλικό παρουσιάζει ημιαγώγιμη (semiconducting) συμπεριφορά και είναι περισσότερο διαφανές στην κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία. Η δομή ενός κρυστάλλου διοξειδίου του βαναδίου σε αυτή την περίπτωση φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.1: Δομή του  $VO_2$  σε ημιαγώγιμη κατάσταση, δηλαδή όταν  $T < T_T$ . Οι κόκκινες σφαίρες συμβολίζουν ιόντα  $V^{4+}$  και οι μπλε και γαλάζιες σφαίρες ιόντα οξυγόνου. Διακρίνονται δηλαδή δύο είδη ιόντων οξυγόνου.

- Όταν η θερμοκρασία του είναι μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία  $T_T$ , κρυσταλλώνεται σε τετραγωνικό σύστημα – δηλαδή το γεωμετρικό σχήμα της κυψελίδας του κρυσταλλικού πλέγματος είναι ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο με βάση τετράγωνο. Σε αυτή την κατάσταση, το υλικό παρουσιάζει συμπεριφορά μετάλλου (metallic) και είναι περισσότερο αδιαφανές στην κοντινή υπέρυθη ακτινοβολία. Η δομή ενός κρυστάλλου διοξειδίου του βαναδίου σε αυτή την περίπτωση φαίνεται παρακάτω:



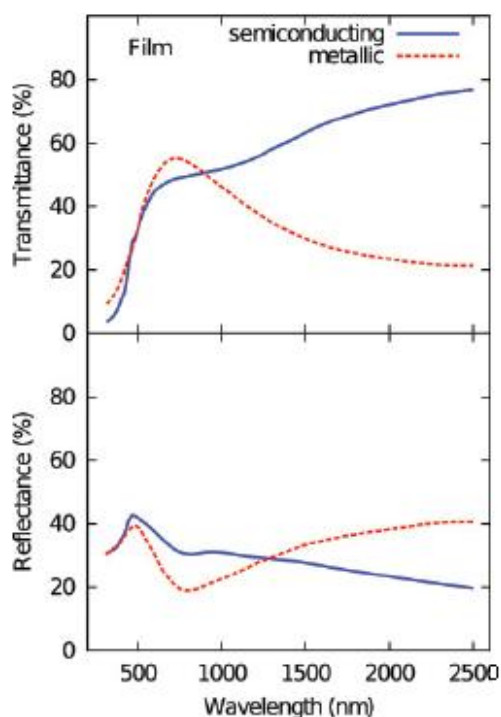
**Σχήμα 4.2:** Δομή του  $\text{VO}_2$  σε μεταλλική κατάσταση, δηλαδή όταν  $T > T_T$ . Οι κόκκινες σφαίρες συμβολίζουν ιόντα  $\text{V}^{4+}$  και οι γαλάζιες σφαίρες ιόντα  $\text{O}^{2-}$ .

Ένας καθαρός κρύσταλλος  $\text{VO}_2$  παρουσιάζει μια θερμοκρασία μετάβασης από-ημιαγωγό-σε-μέταλλο ίση με  $68^\circ\text{C}$ . Με τη μετάβαση σε θερμοκρασία μεγαλύτερη ή ίση σε σχέση με τη θερμοκρασία μετάβασης  $T_T$ , η ηλεκτρική αγωγιμότητα αυξάνεται σημαντικά. Αυτό συνοδεύεται από δραματική αύξηση στην ανακλαστικότητα στο κοντινό υπέρυθρο (για την ακρίβεια, αυξάνεται η ανακλαστικότητα γενικότερα στην υπέρυθη ακτινοβολία, δηλαδή υπάρχει και μικρή αύξηση στο μέσο και μακρινό υπέρυθρο – ενδιαφέρει όμως ιδιαίτερα η μεταβολή στο NIR τμήμα, για λόγους ηλιακού ελέγχου), με σχετικά μικρή αλλαγή στην ορατή περιοχή. Επίσης, η ιδιότητα του διοξειδίου του βαναδίου να είναι διαφανές στο κοντινό υπέρυθρο για θερμοκρασίες μικρότερες της  $T_T$ , είναι πολύ σημαντική για την εφαρμογή του ως λεπτή επίστρωση σε θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες. Η φύση της μετάβασης αυτής για το διοξείδιο του βαναδίου -ή οξειδίο (IV) του βαναδίου- έχει ερευνηθεί μέσω υπολογιστικών, πειραματικών και θεωρητικών μελετών. Η συμπεριφορά του υλικού (αλλά και γενικότερα διαφόρων ουσιών στερεάς κατάστασης με θερμοχρωμικές ιδιότητες) στις διάφορες καταστάσεις του σχετίζεται και με τις ενεργειακές στάθμες των ηλεκτρονίων και την αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρονίων (και το επίπεδο Fermi κ.λπ.). Πιο αναλυτική αναφορά εδώ δεν γίνεται, καθώς υπερβαίνει τα όρια και τους σκοπούς της εργασίας. Πάντως, να αναφερθεί ότι ο κύριος μηχανισμός της μετάβασης για το διοξείδιο του βαναδίου δεν έχει γίνει ακόμα απολύτως κατανοητός από την επιστημονική κοινότητα.



Ένα προφανές πρόβλημα σχετικά με την πρακτική εφαρμογή του  $\text{VO}_2$  σε επίστρωση για κατασκευή θερμοχρωμικών υαλοπινάκων είναι το ότι η θερμοκρασία μετάβασης για την καθαρή ουσία είναι ίση με  $68\text{ }^\circ\text{C}$ , που είναι υψηλή σε σχέση με τις θερμοκρασίες δωματίου (αν και η βέλτιστη συγκριτικά με άλλα θερμοχρωμικά υλικά). Ιδανικό γενικά για έναν θερμοχρωμικό υαλοπίνακα είναι η θερμοκρασία μετάβασης να είναι γύρω στους  $20\text{-}25\text{ }^\circ\text{C}$  (αυτό βέβαια είναι συνάρτηση και του κλίματος της περιοχής στην οποία λειτουργεί). Επίσης, από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας, η μετάβαση είναι ιδανικό να ολοκληρώνεται απότομα, σχεδόν σε συγκεκριμένη θερμοκρασία και όχι βαθμιαία σε εύρος θερμοκρασιών – αυτό ισχύει πάντως για τιμές της θερμοκρασίας μετάβασης γύρω στους  $20\text{-}25\text{ }^\circ\text{C}$ . Από την άλλη, βαθμιαία μετάβαση αυξάνει την ποιότητα και ποσότητα του εισερχόμενου φυσικού φωτισμού.

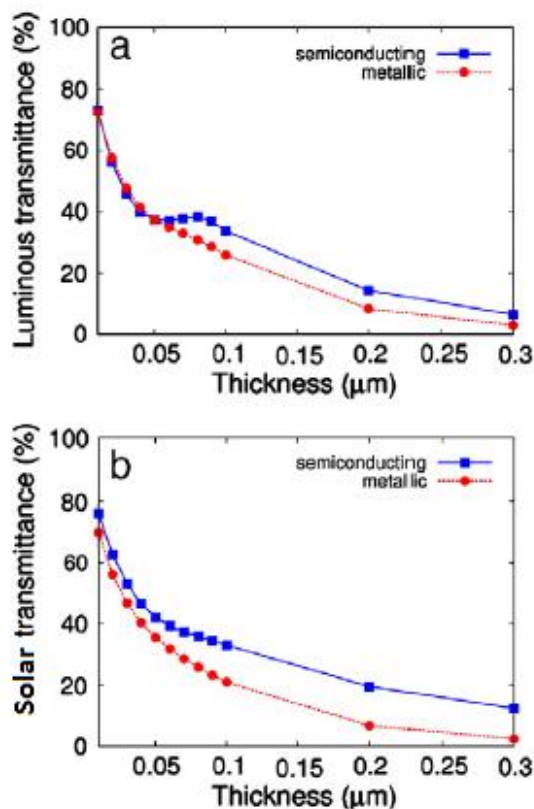
Ένα δεύτερο πρόβλημα του καθαρού  $\text{VO}_2$  είναι ότι η οπτική διαπερατότητα είναι σχετικά χαμηλή, ακόμα και για την ημιαγώγιμη κατάσταση. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τιμές της διαπερατότητας (πάνω διάγραμμα) και της ανακλαστικότητας (κάτω διάγραμμα) συναρτήσει του μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας, για ένα φιλμ  $\text{VO}_2$  πάχους  $50\text{ nm}$  τοποθετημένο σε υπόστρωμα γυαλιού και για τις δύο καταστάσεις του υλικού (ημιαγώγιμη-μπλε καμπύλη, μεταλλική-κόκκινη καμπύλη):



**Σχήμα 4.3:** Διαπερατότητα και ανακλαστικότητα συναρτήσει του μήκους κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας, για ένα φιλμ  $\text{VO}_2$  πάχους  $50\text{ nm}$  τοποθετημένο σε υπόστρωμα γυαλιού, για τις δύο καταστάσεις του υλικού.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται ότι για μικρά μήκη κύματος οι οπτικές ιδιότητες είναι παρόμοιες ανεξαρτήτως της θερμοκρασίας. Επίσης, η οπτική διαπερατότητα (VLT) είναι γύρω στο 40%, που είναι σχετικά χαμηλή τιμή, ενώ θα ήταν ιδανικό αυτή

να είναι υψηλή τουλάχιστον για την κατάσταση χαμηλής θερμοκρασίας (ημιαγώγιμη). Σαφώς το φιλμ θα ήταν περισσότερο διαφανές αν ήταν λεπτότερο από 50 nm, αλλά τέτοιες επιστρώσεις παρουσιάζουν μικρότερο εύρος ρύθμισης της διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία, μεταξύ των δύο καταστάσεων. Φαίνεται επίσης ότι η μεταβολή στην διαπερατότητα είναι μεγαλύτερη για μεγάλα μήκη κύματος του ηλιακού φάσματος κοντά στα 2,5 μm, στα οποία η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι χαμηλή. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται δεδομένα από υπολογισμούς, σχετικά με την οπτική (a) και την ηλιακή (b) διαπερατότητα, συναρτήσει του πάχους των φιλμ VO<sub>2</sub> και για τις δύο καταστάσεις του υλικού:



**Σχήμα 4.4:** Δεδομένα από υπολογισμούς για την οπτική (a) και την ηλιακή (b) διαπερατότητα, συναρτήσει του πάχους των φιλμ VO<sub>2</sub>, για τις δύο καταστάσεις του υλικού.

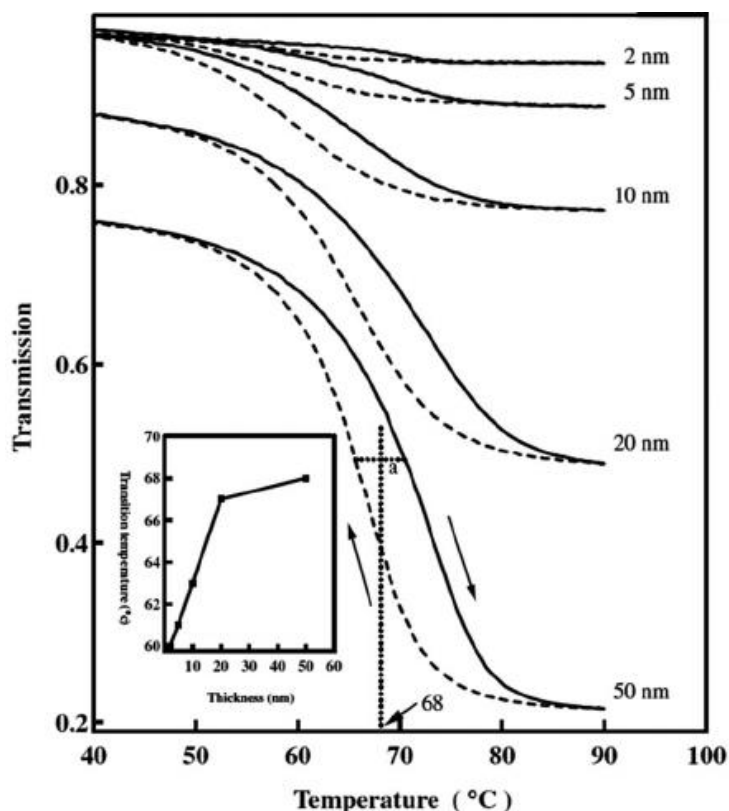
Από το τελευταίο σχήμα διαφαίνεται και ένα τρίτο πρόβλημα που εμφανίζεται στην πρακτική εφαρμογή του VO<sub>2</sub> σε υαλοπίνακες. Αυτό είναι είναι το ότι η ρύθμιση της διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία, που εκφράζεται από τη σχέση:

$$\Delta SRT = SRT (T < T_T) - SRT (T > T_T) \quad (4.1)$$

δεν είναι μεγαλύτερη από περίπου 10%. Επίσης, φαίνεται ότι η VLT δεν είναι μεγαλύτερη από 40% για φιλμ τα οποία έχουν αντιληπτή τιμή της ΔSRT. Όπως φαίνεται μετά από παρατήρηση των σχημάτων 2.1 και 4.3, η ρύθμιση της SRT έχει μεγάλο εύρος μόνο για μήκη κύματος όπου η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι σχετικά χαμηλή.

Αυτά τα τρία εμπόδια που αναφέρθηκαν , μπορούν να ξεπεραστούν – σχετική αναφορά γίνεται στο επόμενο υποκεφάλαιο.

Στην πραγματικότητα, στη μετάβαση από-ημιαγωγό-σε-μέταλλο (metal-to-semiconductor-transition – MST) του διοξειδίου του βαναδίου, παρατηρείται ένας βρόχος υστέρησης (hysteresis loop), με συγκεκριμένο πλάτος (width) (γύρω από τη θερμοκρασία μετάβασης) και κλίση (gradient). Αυτό (και συγκεκριμένα η κλίση) σχετίζεται με την έννοια του συνεχούς θερμοχρωμισμού που αναφέρεται παραπάνω, όμως γενικά είναι συνήθως επιθυμητό η μετάβαση να είναι απότομη (σε συγκεκριμένη θερμοκρασία). Το αν στη μετάβαση ενός θερμοχρωμικού υλικού θα υπάρχει βρόχος υστέρησης ή όχι, εξαρτάται από τη θερμοδυναμική του φαινομένου (σχετίζεται με το θερμοδυναμικό δυναμικό–ελεύθερη ενθαλπία Gibbs και πιο συγκεκριμένα με τις παραγώγους της ως προς θερμοδυναμικές μεταβλητές). Πιο αναλυτική αναφορά, δεν θα γίνει εδώ. Για το  $\text{VO}_2$  πάντως υπάρχει ένας τέτοιος βρόχος υστέρησης. Η ύπαρξη πλάτους στον βρόχο υστέρησης σημαίνει ότι η μετάβαση από τη μία κατάσταση στην άλλη ξεκινάει να συμβαίνει σε διαφορετική θερμοκρασία σε σχέση με την αντίστροφη μετάβαση. Ακολουθείται δηλαδή διαφορετικός “δρόμος” για τη μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού συναρτήσει της θερμοκρασίας του κατά τη θέρμανσή του, σε σχέση με αυτόν κατά την ψύξη του – συγκεκριμένα, η μετάβαση κατά την ψύξη γίνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, για το ίδιο επίπεδο διαπερατότητας. Η κλίση του βρόχου υποδηλώνει το πόσο γρήγορα γίνεται η μετάβαση (και η αντίστροφή της) συναρτήσει της θερμοκρασίας. Παράδειγμα βρόχων υστέρησης για τη διαπερατότητα για το διοξείδιο του βαναδίου, για διάφορα πάχη φιλμ και για τα 2000nm, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.5: Βρόχοι υστέρησης για τη διαπερατότητα για διάφορα πάχη φιλμ  $\text{VO}_2$ , που η απόθεσή τους έγινε με τη μέθοδο PVD (αναφέρεται πιο κάτω) και όπου η διαπερατότητα αναφέρεται σε μήκος κύματος 2000nm. Στο εσωτερικό σχήμα φαίνεται ότι η θερμοκρασία μετάβασης είναι αύξουσα συνάρτηση του πάχους του φιλμ – για παράδειγμα, για φιλμ πάχους 50 nm είναι ακριβώς ίση με 68 °C.

Από το τελευταίο σχήμα παρατηρείται και το ότι όσο μικραίνει το πάχος του φιλμ, τόσο λιγότερο απότομη γίνεται η μετάβαση και τόσο μικρότερου εύρους σχετικά με τη διαφορά διαπερατότητας είναι. Στο σημείο αυτό, ας αναφερθεί απλώς ότι η μορφή ενός τέτοιου βρόχου υστέρησης εξαρτάται και από την μέθοδο εναπόθεσης της επίστρωσης και τη θερμοκρασία στην οποία θα γίνει αυτή. Η μορφή του μπορεί επίσης να τροποποιηθεί μέσω παρεμβάσεων στη σύσταση και δομή του υλικού και σχετική αναφορά γίνεται παρακάτω.

### 4.3 Βελτίωση των ιδιοτήτων του διοξειδίου του βαναδίου

Όπως αναφέρθηκε, κάποια σημαντικά στοιχεία του καθαρού  $\text{VO}_2$  που αποτελούν εμπόδια στην πρακτική εφαρμογή του προς κατασκευή θερμοχρωμικών υαλοπινάκων είναι:

- Η θερμοκρασία μετάβασης των  $68^\circ\text{C}$ .
- Η χαμηλή οπτική διαπερατότητα και για τις δύο καταστάσεις του (πριν και μετά από τη θερμοκρασία μετάβασης).
- Το μικρό εύρος ρύθμισης της ηλιακής διαπερατότητας μεταξύ των δύο καταστάσεων.
- Η ύπαρξη του βρόχου υστέρησης, όπου έχει αποδειχτεί από σχετικές έρευνες ότι η βέλτιστη απόδοση για όλα τα κλίματα επιτυγχάνεται για βρόχο μηδενικού πλάτους και πολύ μεγάλης κλίσης.

Είναι προφανές ότι είναι αναγκαία η τροποποίηση των ιδιοτήτων του υλικού, ώστε να επιτευχθούν  $\Delta\text{SRT} \gg 10\%$ ,  $\text{VLT} \gg 40\%$  και  $T_T \approx 25^\circ\text{C}$ . Η προσθήκη βελτιωτικών ουσιών (dopants) στη σύσταση του διοξειδίου του βαναδίου μπορεί να επιφέρει σημαντικές αλλαγές σε αυτές τις ιδιότητές του, ώστε να υπάρξει ανταπόκριση στις παραπάνω προκλήσεις, αλλά και να τροποποιηθούν και άλλες ιδιότητες. Βελτίωση για κάποιες ιδιότητες επιτυγχάνεται όμως και με άλλες μεθόδους, που αναφέρονται παρακάτω.

Από τα παραπάνω μειονεκτήματα του καθαρού  $\text{VO}_2$ , το πιο σημαντικό προς αντιμετώπιση είναι η μείωση της θερμοκρασίας μετάβασης  $T_T$ . Ο μηχανισμός με τον οποίο η προσθήκη βελτιωτικών στο κρυσταλλικό πλέγμα του  $\text{VO}_2$  επηρεάζει τη θερμοκρασία μετάβασης είναι στην πραγματικότητα λιγότερο κατανοητός από τη φύση της ίδιας της μετάβασης από-ημιαγωγό-σε-μέταλλο. Έχει βρεθεί ότι η προσθήκη ιόντων διαφόρων μετάλλων (κυρίως μετάπτωσης) επιφέρει αλλαγές στη θερμοκρασία μετάβασης, μεταβάλλοντας την ηλεκτρονιακή δομή του υλικού. Η προσθήκη των ιόντων γίνεται κατά τη φάση εναπόθεσης της επίστρωσης. Το μέγεθος και το ηλεκτρικό φορτίο των ιόντων που ενσωματώνονται, καθώς και η πυκνότητα ελεύθερων ηλεκτρονίων (electron carrier density) είναι παράγοντες που επηρεάζουν την  $T_T$  του διοξειδίου του βαναδίου. Πρόσθετα ιόντα με ιοντική ακτίνα μεγαλύτερη από αυτή του  $\text{V}^{4+}$ , ή που δημιουργούν ελαττώματα παρουσίας  $\text{V}^{5+}$  στο κρυσταλλικό πλέγμα, μειώνουν την  $T_T$ . Χρειάζεται βέβαια προσοχή, γιατί πολύ χαμηλή τιμή της  $T_T$  δεν είναι πρακτική, αφού το φιλμ θα μετέβαινε πολύ εύκολα στην κατάσταση μειωμένης διαπερατότητας. Τα ιόντα (II) μαγνησίου (ιόντα  $\text{Mg}^{2+}$ ) ήταν τα πρώτα που βρέθηκε ότι μπορούν να μειώσουν την  $T_T$  και ταυτοχρόνως να αυξήσουν

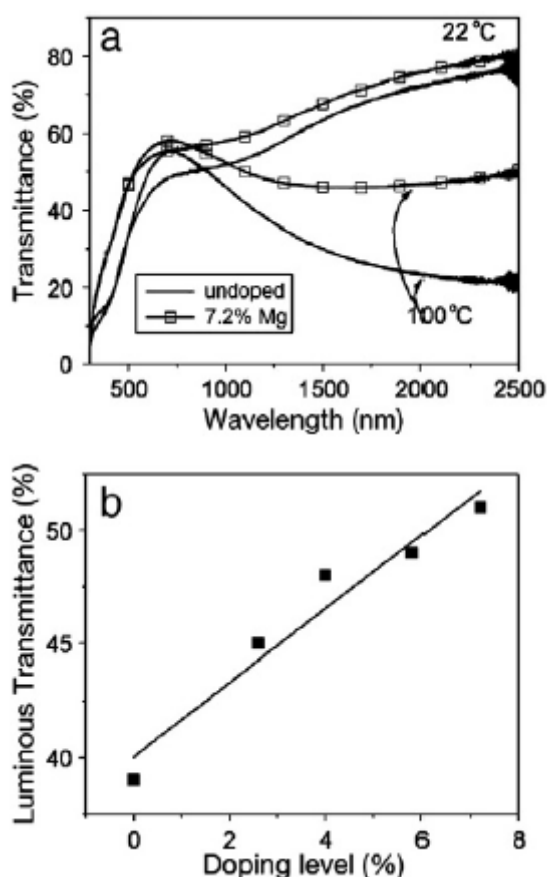
την οπτική διαπερατότητα. Η προσθήκη ιόντων (VI) βολφραμίου (tungsten) (ιόντα  $W^{6+}$ ) έχει αποδειχτεί ότι μειώνει τη θερμοκρασία μετάβασης κατά τη μεγαλύτερη τιμή σε σχέση με άλλες ουσίες, που μπορεί να είναι ίση με έως και κατά  $25^{\circ}C$  για κάθε ατομικό κλάσμα\* του βελτιωτικού που ενσωματώνεται (ανάλογα και με τις συνθήκες εναπόθεσης της επίστρωσης). Ένας μηχανισμός μεταφοράς φορτίου λαμβάνει χώρα, αφού ένα ιόν βολφραμίου αντικαθιστά ένα ιόν βαναδίου. Έχει αναφερθεί έως και τιμή  $-27^{\circ}C/at\%W$ . Οπότε πρακτικά για ενσωμάτωση ίση με 2 at% επιτυγχάνεται τιμή της θερμοκρασίας μετάβασης του  $W_x V_{1-x} O_2$  ίση με  $25^{\circ}C$ . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί τόσο σε υλικά με αξιοσημείωτο όγκο, όσο και σε λεπτές επιστρώσεις. Μείωση της  $T_T$  μπορεί να επιτευχθεί και μέσω ενσωμάτωσης ιόντων άλλων μετάλλων, όπως ιόντα (V) νιοβίου (niobium), ιόντα (IV) τιτανίου κ.ά. Αντιθέτως, ιόντα με μικρότερη ιοντική ακτίνα, όπως τα ιόντα (III) αλουμινίου και τα ιόντα (III) χρωμίου, επιφέρουν αύξηση της  $T_T$ . Και άλλα βελτιωτικά έχουν βρεθεί να μειώνουν τη θερμοκρασία μετάβασης, όπως ο χρυσός και το μολυβδαίνιο. Πολύ μικρή ποσότητα χρυσού (0,25 at%) χρειάζεται για τη μείωση της  $T_T$ , όμως όσο η συγκέντρωσή του αυξάνεται, η μεταλλική φάση του βελτιωμένου  $VO_2$  γίνεται λιγότερο ανακλαστική σε μεγάλα μήκη κύματος του υπέρυθρου της ηλιακής ακτινοβολίας (οπότε η ρύθμιση έχει μικρότερο εύρος). Το μολυβδαίνιο μειώνει την  $T_T$  κατά  $24^{\circ}C$  για ενσωμάτωση ιόντων ίση με 7 at%. Η μείωση μπορεί να επιτευχθεί και με συνδυασμούς ιόντων διαφόρων μετάλλων. Επίσης, είναι δυνατό να επιτευχθεί ταυτόχρονη μείωση της  $T_T$  και αύξηση της VLT μέσω αντικατάστασης ιόντων οξυγόνου από ιόντα φθορίου. Όμως, τότε το πλάτος του βρόχου υστέρησης της θερμοχρωμικής μετάβασης γίνεται σημαντικά μεγαλύτερο – οπότε η προσθήκη φθορίου είναι λιγότερο κατάλληλη για εφαρμογές όπως οι επιστρώσεις σε θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες. Η θερμοκρασία μετάβασης έχει επίσης δειχθεί ότι επηρεάζεται από τη μηχανική παραμόρφωση (strain) του φιλμ του  $VO_2$  και ότι αυτή μπορεί να εισαχθεί μέσω προσεκτικής επιλογής των συνθηκών απόθεσης της επίστρωσης του φιλμ.

Από το σχήμα 4.3 φαίνεται ότι η οπτική διαπερατότητα του  $VO_2$  μειώνεται απότομα για μήκη κύματος μικρότερα από 0,6  $\mu m$ , που ανήκουν στο ορατό φάσμα. Το πρόβλημα αυτό του διοξειδίου του βαναδίου είναι γνωστό εδώ και δεκαετίες. Μια μερική λύση είναι όπως ήδη αναφέρθηκε η δυνατότητα προσθήκης ιόντων μαγνησίου ή ιόντων φθορίου. Η οπτική διαπερατότητα σε ένα φιλμ πάχους 50 nm αυξάνεται από 39% σε 51% όταν η προσθήκη Mg πηγαίνει από 0% σε 7,2% αντίστοιχα, με αύξηση και για κάτω από 0,6  $\mu m$ . Επίσης, η τοποθέτηση αντι-ανακλαστικών στρωμάτων (antireflection layers – AR) πάνω από το φιλμ διοξειδίου του βαναδίου, όπως στρωμάτων  $SnO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $In_2O_3$ : Sn εμφανίζει ικανότητα αύξησης της VLT. Αποτελέσματα που έχουν επιτευχθεί είναι για παράδειγμα:  $\Delta SRT \approx 15,1\%$ ,  $VLT(T < T_T) \approx 49,5\%$  και  $VLT(T > T_T) \approx 44,8\%$  σε κάθετη πρόσπτωση. Πολυστρωματικές δομές που περιλαμβάνουν  $VO_2$  και  $TiO_2$  έχουν επίσης ιδιαίτερα μελετηθεί. Έχουν μελετηθεί δομές όπως  $TiO_2/VO_2/TiO_2$  και  $TiO_2/VO_2/TiO_2/VO_2/TiO_2$  και αποδείχτηκε ότι

---

\* Ατομικό κλάσμα ονομάζεται η ατομική επί τοις εκατό αναλογία (atomic percentage) σε σχέση με το σύνολο των ατόμων και συμβολίζεται με at%.

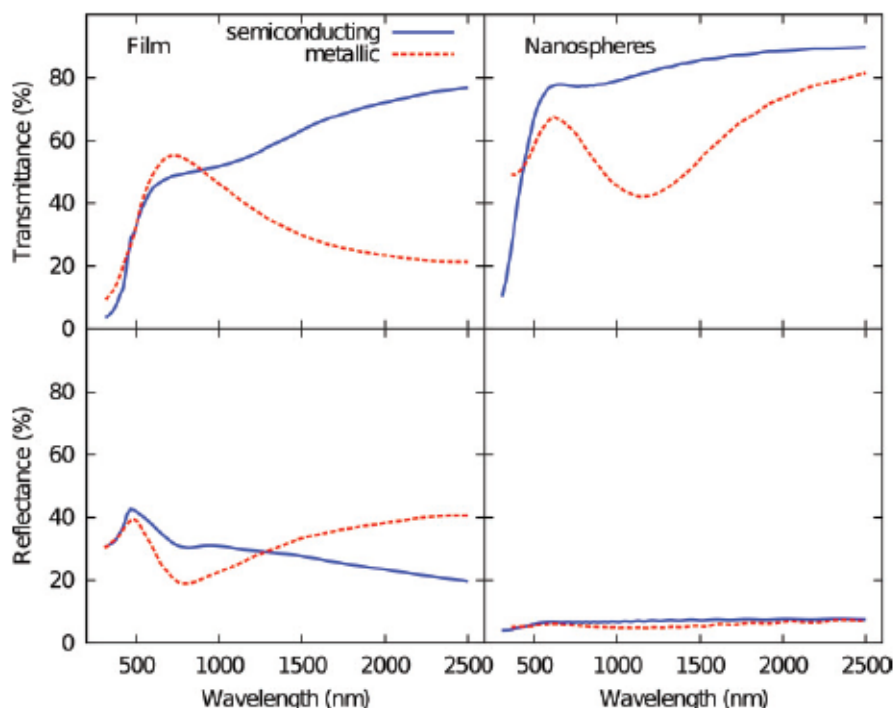
η μέγιστη ικανότητα διαπέρασης φωτός (transmissivity) του φιλμ  $\text{TiO}_2/\text{VO}_2/\text{TiO}_2$ , που είναι η βέλτιστη δομή για αύξηση της ικανότητας διαπέρασης φωτός, είναι 50% μεγαλύτερη από αυτή ενός φιλμ  $\text{VO}_2$ . Έχει επίσης δειχθεί ότι οι VLT και ΔVLT για την πεντα-στρωματική δομή  $\text{TiO}_2/\text{VO}_2/\text{TiO}_2/\text{VO}_2/\text{TiO}_2$  μπορούν να ενισχυθούν για όχι κάθετες γωνίες πρόσπτωσης, κάτι που είναι ευεργετικό για τις εφαρμογές των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων. Μέθοδοι υψηλής ποιότητας προετοιμασίας της επίστρωσης έχουν καλύτερη επίδραση στη βελτίωση των VLT και ΔVLT του φιλμ  $\text{VO}_2$ , σε σχέση με την τοποθέτηση αντι-ανακλαστικών στρωμάτων. Στο παρακάτω σχήμα 4.6(a) φαίνονται φασματικά δεδομένα για φιλμ πάχους  $\approx 50$  nm που περιέχουν 7,2 at% Mg, για τις δύο καταστάσεις ( $T < T_T$  και  $T > T_T$ ) και γίνεται σύγκριση με τα αντίστοιχα δεδομένα για φιλμ χωρίς προσθήκη βελτιωτικών. Το σχήμα 4.6(b) απεικονίζει τον ποσοτικό ρόλο της προσθήκης Mg στην τιμή της VLT, η οποία φαίνεται να αυξάνεται μονότονα, από  $\approx 40\%$  σε πάνω από 50%. Όμως, από το σχήμα 4.6(a) φαίνεται και μια ταυτόχρονη μείωση της έντασης του θερμοχρωμικού φαινομένου (μείωση της  $\Delta\text{SRT}$ ) με την προσθήκη Mg. Πάντως το Mg, όπως αναφέρθηκε, προσφέρει και μείωση της θερμοκρασίας μετάβασης – έως και  $6^\circ\text{C}/\text{at}\%$ .



Σχήμα 4.6: Διαπερατότητα συναρτήσεως του μήκους κύματος, για  $T < T_T$  και  $T > T_T$  (a) και οπτική διαπερατότητα συναρτήσεως του ποσοστού  $x$  ενσωμάτωσης Mg, για  $T < T_T$  (b), για φιλμ  $\text{Mg}_x\text{V}_{1-x}\text{O}_2$  πάχους 50 nm.

Ανακεφαλαιώνοντας, να σημειωθεί ότι σε αντίθεση με τη μείωση της θερμοκρασίας μετάβασης, που με τους τρόπους που περιγράφηκαν προηγουμένως μπορεί να μειωθεί σε επιθυμητά επίπεδα και δεν αποτελεί πλέον πρόβλημα, η ταυτόχρονη αύξηση των VLT και ΔSRT είναι πεδίο που έχει ακόμα περιθώρια βελτίωσης, παρόλη την προσπάθεια της επιστημονικής κοινότητας προς την κατεύθυνση αυτή.

Σημαντική, καινοτόμος και με μεγάλο ενδιαφέρον προσπάθεια που γίνεται τα τελευταία χρόνια προς τη βελτίωση των ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων είναι η χρήση νανοσωματιδίων  $\text{VO}_2$  ενσωματωμένων σε διηλεκτρικό υποδοχέα, αντί των συμβατικών φιλμ. Η πρακτική αυτή μπορεί να επιφέρει ριζικές βελτιώσεις. Για παράδειγμα, η οπτική διαπερατότητα στην σκουρόχρωμη κατάσταση μπορεί να αυξηθεί έως και στην τιμή 60%. Σχετικοί υπολογισμοί έχουν δείξει ότι το μέγεθος των σωματιδίων πρέπει να είναι περίπου 20 nm ή μικρότερο, ώστε να μην προκαλείται σκέδαση των ακτίνων. Τέτοιος “νανοθερμοχρωμισμός” (nanothermochromism) φαίνεται στο δεξιό τμήμα του παρακάτω σχήματος 4.7, στο οποίο φαίνεται η διαπερατότητα και η ανακλαστικότητα συναρτήσει του μήκους κύματος, για ένα φιλμ διαφανούς μέσου πάχους 50 nm, με ιδιότητες τυπικές για γυαλί και πολυμερή, που εμπεριέχει 1 vol.% καλώς-διεσπαρμένων νανοσφαιρών  $\text{VO}_2$  (έχει αποδειχτεί ότι η καλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται με σφαιρικό σχήμα) με διαμέτρους πολύ μικρότερες από κάθε σχετικό μήκος κύματος. Η επιλογή αυτή των παραμέτρων δίνει ένα ισοδύναμο πάχος  $\text{VO}_2$  ίσο με 50 nm και καθιστά τα δεδομένα για τα νανοσωματίδια και το συμβατικό συνεχές φιλμ εύκολα συγκρίσιμα.



**Σχήμα 4.7:** Διαπερατότητα (πάνω διαγράμματα) και ανακλαστικότητα (κάτω διαγράμματα) συναρτήσει του μήκους κύματος, για ένα συμβατικό φιλμ  $\text{VO}_2$  (αριστερά διαγράμματα) και ένα για ένα στρώμα αραιής διασποράς νανοσωματιδίων  $\text{VO}_2$  με ισοδύναμο πάχος φιλμ  $\text{VO}_2$  ίσο με 50 nm, σε ένα μέσο χαρακτηριστικών ιδιοτήτων διαφανούς γυαλιού και πολυμερούς.

Είναι φανερό ότι διάφορα σημαντικά χαρακτηριστικά διαχωρίζουν τις δύο ομάδες δεδομένων του προηγούμενου σχήματος:

- Το φιλμ που περιέχει νανοσφαίρες είναι πολύ πιο διαφανές από το αντίστοιχο συμβατικό φιλμ.
- Οι νανοσφαίρες στην μεταλλική κατάσταση εμφανίζουν ένα διακριτό ελάχιστο της διαπερατότητας στην περιοχή μηκών κύματος  $0,7 < \lambda < 1,5 \mu\text{m}$ , το οποίο περικλύπτει σημαντικά τη διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία (που έχει υψηλή ένταση σε αυτά τα μήκη), ενώ αντίθετα οι ιδιότητες στο ορατό μέρος δεν επηρεάζονται σημαντικά.
- Οι νανοσφαίρες περισσότερο απορροφούν, παρά ανακλούν (δυναμικά αρνητικό στοιχείο, ιδιαίτερα για μεγάλες επιφάνειες υαλοστασίων – βέβαια για να αυξηθεί η θερμοκρασία του υαλοπίνακα, πρέπει να απορροφήσει έτσι και αλλιώς ακτινοβολία).

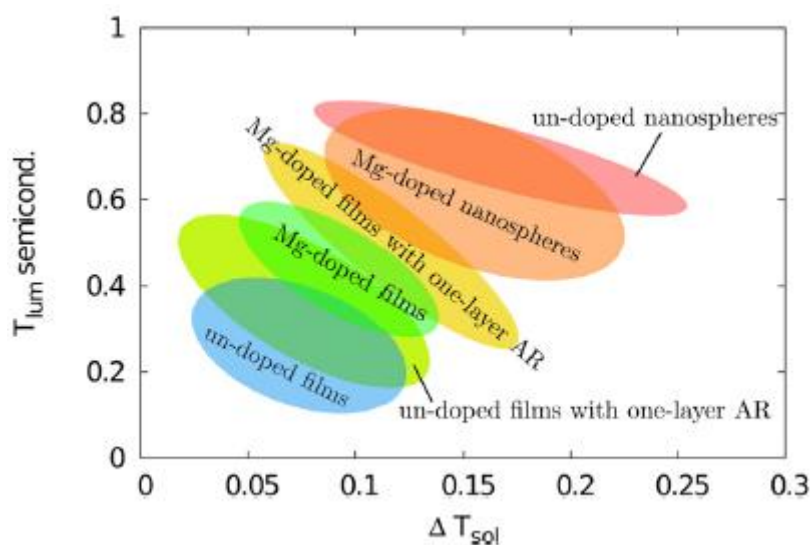
Με τα νανοσωματίδια  $\text{VO}_2$  μπορούν να επιτευχθούν τιμές της  $\Delta\text{SRT}$  γύρω στο 0,167 και της  $\text{VLT}$  έως και 0,72 και 0,62 για την ημιαγώγιμη και τη μεταλλική κατάσταση αντίστοιχα. Ίσως απροσδόκητα, νανοσωματίδια που περιέχουν  $\text{Mg}$  δεν οδηγούν σε καλύτερη απόδοση σε σχέση με τα καθαρά νανοσωματίδια  $\text{VO}_2$  – ο λόγος είναι ότι η προσθήκη  $\text{Mg}$  μειώνει τη δυνατότητα ρύθμισης της  $\text{SRT}$  σε έκταση που δεν εξισορροπείται από την αυξημένη διαπερατότητα σε μικρά μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, η χρήση νανοσωματιδίων τύπου πυρήνα-κέλυφος (με διαφορετική σύσταση στον πυρήνα και στο κέλυφος) όπου το  $\text{VO}_2$  αποτελεί το κέλυφος, μπορεί να επιτρέψει την επίτευξη τιμών της  $\Delta\text{SRT}$  μεγαλύτερων από 0,20, με το κόστος χαμηλότερης  $\text{VLT}$  (γύρω στο 0,59 στην ημιαγώγιμη κατάσταση). Ένα ακόμη πλεονέκτημα των νανοσωματιδίων είναι ότι ενσωματώνοντάς τα σε άλλα λειτουργικά στρώματα μπορεί να επιτευχθεί η δημιουργία πολυλειτουργικών επιστρώσεων. Μειονέκτημα των νανοσωματιδίων γενικά, αποτελεί το ότι είναι λίγο δύσκολη η κατασκευή τους, προς το παρόν.

Το παρακάτω σχήμα 4.8 δείχνει μια επισκόπηση της υφιστάμενης κατάστασης της τεχνολογίας για την επίτευξη τιμών των  $\text{VLT}(T < T_r)$  και  $\Delta\text{SRT}$  σε φιλμ με βάση το διοξείδιο του βαναδίου. Η  $\text{VLT}$  δεν εξαρτάται ισχυρά από τη θερμοκρασία. Όλες οι κατηγορίες που φαίνονται στο σχήμα αυτό αναφέρονται πιο πάνω. Για τη διευκόλυνση του αναγνώστη, δίνεται η μετάφραση της ονομασίας κάθε τύπου φιλμ που υπάρχει στο διάγραμμα αυτό:

- un-doped films: φιλμ χωρίς προσθήκη κάποιου βελτιωτικού
- un-doped films with one-layer AR: φιλμ χωρίς προσθήκη βελτιωτικού, με ένα αντι-ανακλαστικό στρώμα
- Mg-doped films: φιλμ με προσθήκη  $\text{Mg}$
- Mg-doped films with one-layer AR: φιλμ με προσθήκη  $\text{Mg}$  και ένα αντι-ανακλαστικό στρώμα
- Mg-doped nanospheres: νανοσφαίρες  $\text{VO}_2$  που περιέχουν  $\text{Mg}$
- Un-doped nanospheres: νανοσφαίρες  $\text{VO}_2$



Οι “καθαρές” νανοσφαίρες VO<sub>2</sub> φαίνεται ότι παρουσιάζουν την καλύτερη απόδοση, όσον αφορά στην ΔSRT (ΔT<sub>sol</sub> στο διάγραμμα) και στην VLT(T<T<sub>T</sub>) (T<sub>lum</sub> semicond. στο διάγραμμα).



**Σχήμα 4.8:** Σχηματική αναπαράσταση των ορίων απόδοσης διαφόρων υλικών βασισμένων στο VO<sub>2</sub> που ενδιαφέρουν για τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες.

Σχετικά με το πλάτος και την κλίση του βρόχου υστέρησης, το επίπεδο ενσωμάτωσης βελτιωτικών, αλλά και παραμενουσών παραμορφώσεων, έχει βρεθεί ότι αλλάζει την φύση της μετάβασης, οδηγώντας συχνά σε μικρότερες κλίσεις, ή στενότερα πλάτη του βρόχου. Ερευνητές έχουν δείξει ότι προσθήκη τιτανίου στα νανοσωματίδια VO<sub>2</sub> καθιστά το πλάτος του βρόχου υστέρησης όχι μεγαλύτερο από 5°C. Ομοιόμορφο μέγεθος των σωματιδίων μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μείωση του πλάτους.

Τέλος, σχετικά με την απόχρωση του φιλμ διοξειδίου του βαναδίου, γενικά έχει ένα όχι τόσο αισθητικά ωραίο κίτρινο/καφέ χρώμα. Η παράμετρος αυτή, αν και για λόγους εξοικονόμησης ενέργειας δεν έχει κάποια σημασία, είναι ιδιαίτερα σημαντική για κτίρια με πολύ μεγάλο WWR, στα οποία η αισθητική εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τους υαλοπίνακες. Με την ενσωμάτωση νανοσωματιδίων χρυσού επιτυγχάνεται μείωση της θερμοκρασίας μετάβασης και η απόχρωση του φιλμ μεταβάλλεται σε πράσινο/μπλε που είναι περισσότερο ευχάριστο. Ωστόσο, λόγω της υψηλής τιμής του χρυσού, αυτή η πρακτική δεν μπορεί να είναι και πολύ επικρατούσα.

#### 4.4 Μέθοδοι κατασκευής θερμοχρωμικών υαλοπινάκων

Παραπάνω στο κείμενο γίνεται αναφορά σε διάφορα σημεία για επίστρωση διοξειδίου του βαναδίου σε γυαλί προς δημιουργία φιλμ. Αυτός είναι και ο βασικότερος τρόπος κατασκευής θερμοχρωμικών υαλοπινάκων. Φυσικά υπάρχει και η δυνατότητα απόθεσης της επίστρωσης σε πλαστικό PET για δημιουργία φιλμ που

μπορεί να τοποθετηθεί αργότερα σε υαλοπίνακα. Ένα τέτοιο παράδειγμα φαίνεται στην επόμενη φωτογραφία:



**Σχήμα 4.9: Θερμοσταθερό PET φιλμ με επικάλυψη VO<sub>2</sub>.**

Μια ποικιλία μεθόδων απόθεσης θερμοχρωμικών λεπτών μεμβρανών και ειδικά φιλμ διοξειδίου του βαναδίου, έχουν χρησιμοποιηθεί. Η βασική λειτουργία και αποτελέσματα πολλών από αυτές περιγράφονται παρακάτω.

#### Φυσική εναπόθεση ατμών (Physical vapor deposition – PVD)

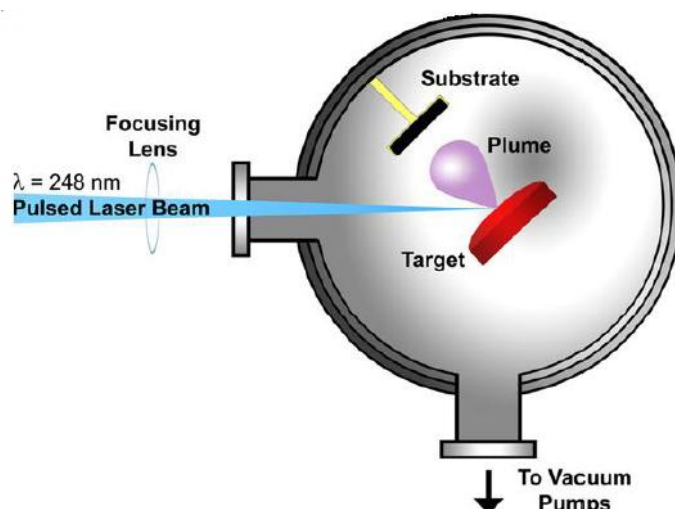
Η τεχνική της φυσικής εναπόθεσης ατμών περιλαμβάνει τέσσερα βήματα, δηλαδή εξάτμιση (evaporation), μεταφορά (transportation), αντιδράσεις (reactions) και απόθεση (deposition). Το υλικό προς απόθεση, γνωστό και ως στόχος (target), είναι συνήθως στερεάς κατάστασης ένωση πρόδρομος μετάλλου, που βομβαρδίζεται από μια πηγή υψηλής ενέργειας (όπως ακτίνες ηλεκτρονίων ή ιόντων) κάτω από χαμηλή πίεση. Έτσι, τα άτομα της επιφάνειας του μεταλλικού στόχου εκτοπίζονται και “εξατμίζονται” (αποκολλώνται) δημιουργώντας ένα νέφος. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα συστήματα για την αφαίρεση ατόμων από έναν στόχο και τα περισσότερα έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή λεπτών φιλμ διοξειδίου του βαναδίου. Η μέθοδος αντιδραστικής καθοδικής ιοντοβολής (reactive sputtering) είναι μία από τις πιο κοινές τεχνικές PVD και θερμοχρωμικά φιλμ έχουν συντεθεί χρησιμοποιώντας RF (AC) magnetron sputtering, DC magnetron sputtering και ion beam sputtering. Το RF magnetron sputtering χρησιμοποιεί μη αγώγιμους στόχους, ενώ το DC magnetron sputtering αποθέτει λεπτές μεμβράνες μέσω μεταλλικών (που είναι αγώγιμοι) στόχων. Η καθοδική ιοντοβολή ενός μετάλλου σε περιβάλλον αδρανούς αερίου, με μικρή ποσότητα αντιδραστικού αερίου παρούσα, έχει εκτεταμένα χρησιμοποιηθεί ως τεχνική για το σχηματισμό μεταλλικών ενώσεων από V, Nb, Ta, Mo και W, οι οποίες αλλιώς είναι δύσκολο να επιτευχθούν. Μεμβράνες VO<sub>2</sub> με καθοδική ιοντοβολή κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά με ιοντοβολή ενός στόχου βαναδίου σε περιβάλλον αργού-οξυγόνου, από τον Fuls κ.ά. Ακολούθως, το βανάδιο σε μορφή νέφους αντιδρά με το οξυγόνο μέσα στον θάλαμο απόθεσης, προς σχηματισμό ενός φιλμ VO<sub>2</sub> μέσω συμπύκνωσης πάνω σε ένα υπόστρωμα (π.χ. γυαλί).

Το sputtering προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα, όπως τη δυνατότητα παραγωγής ομοιόμορφων φιλμ, την επεκτασιμότητα σε μεγαλύτερης επιφάνειας υποστρώματα και την αποδοτική απόθεση. Παρόλα αυτά, υπάρχουν φυσικά και διάφορα μειονεκτήματα σε αυτή τη μέθοδο, για παράδειγμα είναι μια διαδικασία off-line, με χαμηλούς ρυθμούς ανάπτυξης και σχετικά πτωχή πρόσφυση των φιλμ, καθώς και ανάγκη ύπαρξης ακριβούς εξοπλισμού. Με τον έλεγχο της ποσότητας του υλικού που αφαιρείται από τον στόχο, καθώς και του όγκου του αντιδραστικού αερίου που είναι παρόν στον θάλαμο απόθεσης, η σύσταση και το πάχος του δημιουργούμενου φιλμ μπορεί να προκαθοριστεί με ακρίβεια. Η χρήση βελτιωτικών μπορεί επίσης εύκολα να επιτευχθεί τοποθετώντας και άλλο στόχο μέσα στον θάλαμο. Η ποσότητα της προσθήκης βελτιωτικού μπορεί να ελεγχθεί μέσω των σχετικών μεγεθών των στόχων. Επίσης, η συσκευή RF sputtering λειτουργεί σε χαμηλότερη τάση και πιέσεις αερίων και επιτυγχάνει υψηλότερους ρυθμούς απόθεσης σε σχέση με άλλες μορφές sputtering, ενώ εισάγει και τη δυνατότητα ιοντοβολής ενός ηλεκτρικά μονωτικού στόχου.

#### Μέθοδος παλμικής εναπόθεσης με laser (Pulsed laser deposition – PLD)

Θερμοχρωμικές λεπτές μεμβράνες έχουν επίσης, πιο πρόσφατα, επιστρωθεί χρησιμοποιώντας αποκόλληση με laser. Η PLD είναι μια ακόμη τεχνική φυσικής απόθεσης ατμών, που αρχικά αναπτύχθηκε για την απόθεση υπεραγωγίων οξειδίων στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και είναι ιδανική για την ανάπτυξη φιλμ οξειδίων μετάλλων. Χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά προς κατασκευή φιλμ  $\text{VO}_2$  από τον Borek κ.ά. το 1993. Στη μέθοδο PLD μια υψηλής ισχύος παλμική δέσμη laser χρησιμοποιείται για την αποδόμηση μεταλλικού στόχου επιθυμητής σύστασης, ο οποίος τοποθετείται μέσα σε έναν θάλαμο με κενό. Μπορεί να υπάρχει υπερ-υψηλό κενό, ή η διαδικασία να γίνεται με την παρουσία ενός αερίου στο υπόβαθρο, συνήθως οξυγόνου όταν αποτίθενται οξειδία. Το υλικό μεταλλικών οξειδίων, που αποκολλάται από τον στόχο, αποτίθεται ως λεπτό φιλμ σε ένα υπόστρωμα. Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της μεθόδου PLD είναι η δυνατότητα διατήρησης της στοιχειομετρίας του στόχου πάνω στο δημιουργούμενο φιλμ, εξαιτίας του μεγάλου ρυθμού διάβρωσής του, που επιτρέπει σε όλα τα στοιχεία ή ενώσεις του στόχου να αποκολλούνται ταυτόχρονα. Η πηγή laser βρίσκεται έξω από τον θάλαμο αντίδρασης, οπότε είναι εύκολη η διαχείριση του συστήματος. Επιπρόσθετα, η ανάπτυξη μονοκρυσταλλικών φιλμ σε κρυσταλλικά υποστρώματα (epitaxial films), με ισχυρή πρόσφυση και σε χαμηλές θερμοκρασίες υποστρώματος, είναι δυνατή εξαιτίας της εκπομπής ιόντων με υψηλή ενέργεια, κατά την διάρκεια της αλληλεπίδρασης laser-στόχου-νέφους. Η PLD είναι μια καθαρή, ευέλικτη και οικονομικά αποδοτική τεχνική. Ωστόσο, τα μειονεκτήματά της περιλαμβάνουν περιορισμένα μεγέθη δείγματος (οπότε τη δυσκολία ελέγχου του πάχους και της ομοιομορφίας των φιλμ), καθώς και την απότομη πρόσκρουση των σωματιδίων πάνω στο φιλμ, που οδηγεί σε επιφανειακά ελαττώματα, υπό την παρουσία θερμικού σοκ. Διάφορες μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μείωση της πρόσκρουσης, όπως η χρήση μηχανικών φίλτρων σωματιδίων, δια των οποίων φιλτράρονται τα σωματίδια χαμηλής ταχύτητας. Μια άλλη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση στόχου υψηλής πυκνότητας και λείας επιφάνειας, ή τη στίλβωση του στόχου πριν από κάθε κύκλο λειτουργίας. Η χρήση πηγής σχετικά μικρότερης ενεργειακής πυκνότητας, ή οι

χαμηλότεροι ρυθμοί απόθεσης της επίστρωσης, μπορούν επίσης να οδηγήσουν στην αποφυγή του φαινομένου.



**Σχήμα 4.10:** Τυπική πειραματική διάταξη PLD. Η δέσμη laser συγκεντρώνεται πάνω στον στόχο, ο οποίος περιστρέφεται για τη διατήρηση ομοιόμορφης διάβρωσης.

Ο Borek κ.ά. πραγματοποίησαν διάβρωση ενός μεταλλικού στόχου βαναδίου με παλμικό KrF excimer laser (248 nm), μέσα σε θάλαμο απόθεσης με αργό και 10% οξυγόνο σε μερική πίεση 100-200 mTorr, που ήταν η μερική πίεση του οξυγόνου που ευνοούσε την απόθεση του αμιγούς  $\text{VO}_2$ . Συνεπώς, ο λόγος οξυγόνου προς αργό βρέθηκε ότι είναι μια κρίσιμη πειραματική παράμετρος, μιας και παραλλαγές της μερικής πίεσης του οξυγόνου, οδηγούν σε πολλές διαφορετικές μορφές ενώσεων βαναδίου-οξυγόνου που μπορούν να υφίστανται, για παράδειγμα  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{V}_3\text{O}_7$  κ.λπ. Η θερμοκρασία του υποστρώματος διατηρήθηκε μεταξύ  $500^\circ\text{C}$  και  $525^\circ\text{C}$ . Μετά την απόθεση, τα δείγματα ανοιπήθηκαν για περίπου 1 h στην ίδια θερμοκρασία και πίεση, προς απόκτηση φιλμ  $\text{VO}_2$ . Το 1994, ο Kim κ.ά. ανέφεραν ότι χρησιμοποιώντας ένα παλμικό KrF excimer laser (193 nm) σε ένα στόχο φτιαγμένο από 99% καθαρή συμπιεσμένη σκόνη  $\text{V}_2\text{O}_3$ , λεπτά φιλμ  $\text{VO}_2$  αναπτύχθηκαν σε υποστρώματα από ζαφείρι, ενώ διατηρούσαν τη θερμοκρασία στους  $630^\circ\text{C}$  και μετά από αυτό τα δείγματα ψύχθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου χωρίς ακόλουθη ανόπτηση, διατηρώντας τη μερική πίεση του οξυγόνου σταθερή. Η απόθεση του  $\text{VO}_2$  σε θερμοκρασία δωματίου χωρίς ακόλουθη ανόπτηση έχει επίσης μελετηθεί από τον Maaza κ.ά. και τα φιλμ που αποτέθηκαν με αυτό τον τρόπο παρουσίασαν οξείες μεταβάσεις σε περίπου  $70^\circ\text{C}$ . Ωστόσο, PLD σε θερμοκρασία δωματίου για λεπτά φιλμ  $\text{VO}_2$  δεν είχε ακόμα επιτευχθεί.

#### Μέθοδος διαλύματος-πηκτώματος (Sol-gel method)

Παραγωγή λεπτών φιλμ μέσω της μεθόδου sol-gel έχει ευρέως χρησιμοποιηθεί για την απόθεση θερμοχρωμικών φιλμ διοξειδίου του βαναδίου. Αυτός ο τρόπος σύνθεσης παρέχει μια σχετικά φθηνή και κατάλληλη μέθοδο για επίστρωση σε

επιφάνειες μεγάλου εμβαδού, με την ευκολία της εισαγωγής βελτιωτικών μετάλλων και σχετικά χαμηλών θερμοκρασιών κατεργασίας. Ωστόσο, οι παραγόμενες μεμβράνες είναι μικρότερης πυκνότητας σε σχέση με αυτές που αποτίθενται με μεθόδους PVD και έτσι είναι περισσότερο επιρρεπείς σε εμφάνιση ρωγμών. Η υγρή-χημική μέθοδος sol-gel γενικά πραγματοποιείται με βύθιση ή περιστροφική επίστρωση διαφόρων υποστρωμάτων μέσα σε ένα χημικό διάλυμα που περιέχει κολλοειδείς πρόδρομες ουσίες (sol), που τυπικά είναι αλκοξειδία μετάλλων, οι οποίες υφίστανται υδρόλυση και αντιδράσεις πολυσυμπύκνωσης προς σχηματισμό ενός κολλοειδούς που περιβάλλεται από μόρια του διαλυτικού μέσου. Για παράδειγμα, το αλκοξειδίο διαλύεται σε μία σχετική αλκοόλη για να σχηματίσει το διάλυμα (sol), μιας και διαφορετικές αλκοόλες προκαλούν μια ποικιλία αντιδράσεων μετεστεροποίησης και το σχηματισμό διάφορων αλκοξειδίων. Το διάλυμα τότε υπόκειται σε κατάλληλες διεργασίες ξήρανσης (για πορώδες) και θέρμανσης (για κρυσταλλικότητα), για την αφαίρεση του διαλύτη και την ενθάρρυνση του σχηματισμού ενός ανόργανου δικτύου του μεταλλικού οξειδίου. Αυτό περιλαμβάνει τη σύνδεση των μεταλλικών κέντρων με οξο- (M-O-M) ή υδροξο- (M-OH-M) γεφυρωμένα πολυμερή σε μια υγρή φάση (gel), τα οποία τότε αποτίθενται πάνω στο υπόστρωμα. Η προετοιμασία των VO<sub>2</sub> φιλμ γενικά ξεκινά με ένα φιλμ V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> επιστρωμένο με sol-gel μέσω βύθισης ή περιστροφής και ακόλουθη μεταχείριση με θέρμανση σε κενό ή σε αναγωγική ατμόσφαιρα.

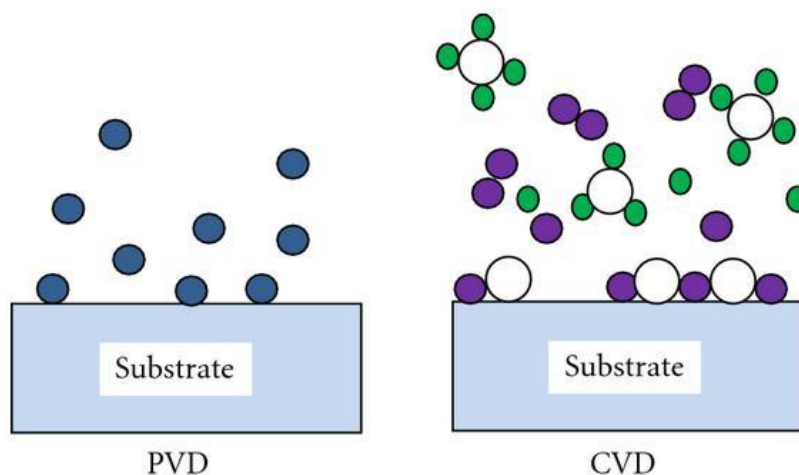
Το 1983, ο Greenberg εισήγαγε τη μέθοδο “πηγματοποίησης-υδρόλυσης” (“gelation-hydrolysis”) για τη δημιουργία κρυσταλλικού VO<sub>2</sub>, η οποία περιλαμβάνει μερική υδρόλυση της αρχικής επίστρωσης και ακόλουθη ανόπτηση σε αναγωγική ατμόσφαιρα. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι πρόδρομοι για τη sol-gel προετοιμασία φιλμ διοξειδίου του βαναδίου είναι τα vanadyl tri(iso-propoxide) και vanadyl tri(tert-amylloxide). Επιπρόσθετα αλκοξειδία μετάλλων ή άλατα μπορεί να περιλαμβάνονται στο διάλυμα της πρόδρομης ουσίας, στις απαιτούμενες αναλογίες, έτσι ώστε να εισάγονται βελτιωτικά μέσα στο δίκτυο. Ολόκληρη η πρώτη σειρά και πολλά από τα στοιχεία της δεύτερης και τρίτης σειράς του τομέα d του περιοδικού πίνακα έχουν χρησιμοποιηθεί ως βελτιωτικά στο διοξείδιο του βαναδίου, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο sol-gel.

Τη δεκαετία του 1990, ο Livage κ.ά. βρήκαν ότι τα πηκτώματα του διοξειδίου του βαναδίου και του πεντοξειδίου του βαναδίου μπορούν να συντεθούν μέσω της οξίνισης υδατικών διαλυμάτων βαναδικών ενώσεων, όπως το NaVO<sub>3</sub>, ή μέσω της υδρόλυσης οξο-αλκοξειδίων του βαναδίου, για παράδειγμα του VO(OR)<sub>3</sub>. Ο Yin κ.ά. έδειξαν ότι το V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πρόδρομος, αντί για ένα αλκοξειδίο του βαναδίου, το οποίο υποστηρίζουν ότι προσφέρει πλεονεκτήματα, όπως ότι είναι φθηνό και εύκολο να αποκτηθεί και το πηκτώμα που δημιουργείται από τη μέθοδο απόσβεσης που χρησιμοποίησαν είναι σταθερό.

Η χρήση πολυβαναδικών πηκτωμάτων που περιέχουν βολφράμιο και μολυβδαίνιο αναφέρθηκε από τον Takahashi κ.ά., οι οποίοι διέλυσαν σκόνη V, W και Mo σε διάλυμα 30% υπεροξειδίου του υδρογόνου, το οποίο θερμάνθηκε για να σχηματιστεί ένα υδροπήκτωμα και επιστρώθηκε με περιστροφή πάνω σε ένα κατάλληλο υπόστρωμα. Το βελτιωμένο φιλμ VO<sub>2</sub> υπέστη τότε αναγωγή σε περιβάλλον υδρογόνου.

### Χημική εναπόθεση ατμών (Chemical vapor deposition – CVD)

Η χημική εναπόθεση ατμών είναι η πρότυπη βιομηχανική διεργασία εναπόθεσης για την παραγωγή μεγάλης ποιότητας και υψηλής λειτουργικότητας λεπτών επιστρώσεων. Η διαδικασία διαφέρει από αυτήν της PVD, αφού ένα στερεό φιλμ προκύπτει από μια αέρια φάση μέσω χημικών αντιδράσεων πάνω στο θερμαινόμενο υπόστρωμα. Ποιοτικά η διαφορά φαίνεται στο παρακάτω απλοποιημένο σχήμα:



**Σχήμα 4.11: Απλοποιημένη σχηματική παράσταση της διαφοράς μεταξύ PVD και CVD.**

Τα κύρια πλεονεκτήματα της CVD είναι ότι η τεχνική προσδίδει τη δυνατότητα παραγωγής πυκνών υλικών μεγάλης καθαρότητας και ομοιόμορφων φιλμ με άριστη πρόσφυση, μεγάλους και ρυθμιζόμενους ρυθμούς απόθεσης, σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και επίσης είναι αναπαράξιμη. Η CVD είναι μια non-line-of-sight διεργασία, οπότε μπορεί να επιστρώσει με ομοιομορφία υποστρώματα πολύπλοκων σχημάτων. Οι υψηλοί ρυθμοί απόθεσης συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται για την απόθεση προστατευτικών επιστρώσεων μεγάλου πάχους, ενώ οι χαμηλοί γενικά για λεπτές επιστρώσεις (π.χ. και σε μικροηλεκτρονικά εξαρτήματα). Οι παράμετροι της διαδικασίας είναι εύκολα ελεγχόμενες και μπορούν να τροποποιούνται για το καθορισμό της κρυσταλλικής δομής, καθώς και της κατεύθυνσης και της μορφολογίας των κρυστάλλων των φιλμ. Υπάρχει μια πληθώρα κατάλληλων πρόδρομων ουσιών για την CVD, όπως αλογονίδια, υδρίδια, οργανομεταλλικές ενώσεις, οι οποίες καθιστούν δυνατή την απόθεση μεγάλου φάσματος υλικών, που περιλαμβάνουν μέταλλα, καρβίδια, νιτρίδια, οξειδία, σουλφίδια κ.λπ. Ωστόσο, αυτές οι πρόδρομες ουσίες πρέπει να είναι πτητικές. Μια από τις αδυναμίες που σχετίζονται με την CVD είναι η δυσκολία απόθεσης υλικών πολλών συστατικών με καλά ελεγχόμενη στοιχειομετρία, μιας και διαφορετικές πρόδρομες ουσίες έχουν διαφορετικούς βαθμούς εξάτμισης. Οπότε μπορεί να είναι δυσμενής η χρήση πρόδρομων από πολλές πηγές, σε αντίθεση με τη χρήση πρόδρομου μιας πηγής, που βοηθά στην εξάλειψη του προβλήματος, αλλά μπορεί να οδηγήσει στην ενσωμάτωση ατελειών άνθρακα στην επιφάνεια του φιλμ.

Η διεργασία CVD που χρησιμοποιείται για την παραγωγή λεπτών φιλμ διοξειδίου του βαναδίου βασίζεται κυρίως στη χρήση πρόδρομων οργανομεταλλικών ενώσεων, συνεπώς συνήθως ονομάζεται μεταλλο-οργανική χημική εναπόθεση ατμών (metal-organic chemical vapor deposition – MOCVD), ή οργανομεταλλική χημική εναπόθεση ατμών (organometallic chemical vapor deposition – OMCVD). Συνήθως αποτίθενται φιλμ πεντοξειδίου του βαναδίου ( $V_2O_5$ ) και η επακόλουθη αναγωγή έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή λεπτών φιλμ διοξειδίου του βαναδίου.

Η πρώτη αναφορά χρήσης της CVD για απόθεση φιλμ  $VO_2$  έγινε από τους Koide και Takei το 1966. Αρχικά ανέπτυξαν χύδην μονούς κρυστάλλους  $VO_2$  με CVD. Τον επόμενο χρόνο απόθεσαν λεπτά φιλμ  $VO_2$  χρησιμοποιώντας την ίδια μέθοδο με  $VOCl_3$  ως πρόδρομους και  $N_2$  ως φέρον αέριο, το οποίο υδρολύθηκε πάνω στα υποστρώματα προς παραγωγή φιλμ  $VO_2$  με επίταξη (epitaxial  $VO_2$  films). Η επόμενη εξέλιξη συνέβη την επόμενη χρονιά (1968) από τον McChesney κ.ά. που άλλαξαν το φέρον αέριο άζωτο με διοξείδιο του άνθρακα, για τη μεταφορά του πρόδρομου  $VOCl_3$ . Πεντοξείδιο του βαναδίου σχηματίστηκε πάνω σε μονοκρυσταλλικά υποστρώματα από ζαφείρι (sapphire), το οποίο μετά με αναγωγή έγινε διοξείδιο του βαναδίου, μέσω ανόπτησης σε ελεγχόμενη ατμόσφαιρα. Αυτή αποτελείτο από ένα μίγμα CO και  $CO_2$  σε χαμηλές μερικές πιέσεις οξυγόνου, μεταξύ  $500^\circ C$  και  $550^\circ C$ . Έχουν χρησιμοποιηθεί και άλλες ουσίες ως πρόδρομοι, όπως  $VO(OC_3H_7)_3$  από τον Greenberg και  $VO(O-i-Bu)_3$  από τον Takahasi κ.ά. Χαμηλής πίεσης χημική εναπόθεση ατμών (Low pressure CVD – LPCVD) έχει επίσης χρησιμοποιηθεί για την απόθεση λεπτών επιστρώσεων  $VO_2$  σε υποστρώματα γυαλιού. Αυτό έδειξε ότι παραλλαγές στα χαρακτηριστικά της μετάβασης ήταν συνάρτηση της μικροδομής του φιλμ. Τα φιλμ ήταν πολύ πυκνά με απόθεση στους  $475^\circ C$  και παρουσίαζαν μεγάλη αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση στους  $66^\circ C$  (λόγω της μετάβασης από ημιαγωγό σε μέταλλο). Επίσης παρουσίαζαν μικρή θερμοκρασιακή υστέρηση στη μετάβαση. Από την άλλη, απόθεση στους  $520^\circ C$  οδήγησε σε φιλμ που παρουσίαζαν μια μεγαλύτερη θερμοκρασία μετάβασης των  $72^\circ C$ , ενώ η αλλαγή στην ηλεκτρική αντίσταση ήταν μικρότερη και το πλάτος του βρόχου υστέρησης μεγαλύτερο. Η LPCVD είναι πλεονεκτική για επιστρώσεις σε παράθυρα, αφού μπορεί να επεκταθεί σε μεγαλύτερης επιφάνειας υποστρώματα με καλή ομοιομορφία – ωστόσο, ένα μειονέκτημα είναι οι χαμηλοί ρυθμοί απόθεσης. Εκτός από οργανομεταλλικές ενώσεις ως πρόδρομους, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αλογονίδια του βαναδίου, για παράδειγμα  $VCl_4$  ή  $VOCl_3$ , με νερό ή αιθανόλη ως πηγή οξυγόνου και τα φιλμ που προκύπτουν μπορούν να υποστούν αναγωγή σε διοξείδιο του βαναδίου σε κατάλληλη ατμόσφαιρα.

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της CVD για την απόθεση τέτοιων επιστρώσεων, όπως:

Χημική εναπόθεση ατμών σε ατμοσφαιρική πίεση (Atmospheric pressure CVD – APCVD):

Η APCVD είναι η πιο κατάλληλη μέθοδος για υψηλό ρυθμό απόθεσης λεπτών επιστρώσεων σε υποστρώματα από γυαλί. Στη μέθοδο αυτή, ο θάλαμος αντίδρασης είναι περίπου ή ακριβώς υπό ατμοσφαιρική πίεση. Κατά συνέπεια, με σκοπό τη

διευκόλυνση της μεταφοράς επαρκούς αερίου φάσης υλικού στο θάλαμο αντίδρασης, οι πρόδρομες ενώσεις πρέπει να έχουν επαρκή πίεση ατμών, οπότε χρειάζεται να είναι στερεά χαμηλού σημείου τήξεως ή πτητικά υγρά. Τα αντιδρώντα μεταφέρονται στην τοποθεσία αντίδρασης μέσω ενός θερμού αδρανούς φέροντος αερίου. Η θερμοκρασία του υποστρώματος χρειάζεται επίσης να είναι σχετικά υψηλή για να διευκολύνει το ξεκίνημα της απόθεσης. Δύο είδη αντιδράσεων μπορεί να συμβούν στο θάλαμο αντίδρασης, είτε ομογενείς (όπου τα αντιδρώντα είναι αποκλειστικά σε αέρια μορφή), είτε ετερογενείς (συμβαίνουν στη διεπαφή μεταξύ ατμού και επιφάνειας στερεού). Στους αντιδραστήρες ψυχρού τοιχώματος (cold-wall reactors) οι ομογενείς και ετερογενείς αντιδράσεις στα τοιχώματα του αντιδραστήρα καταστέλλονται, οπότε επικρατούν οι αντιδράσεις μεταξύ ατμού και επιφάνειας υποστρώματος. Η φύση αυτών των επιφανειακών αντιδράσεων δεν είναι πλήρως κατανοητή, εξαιτίας δυσκολιών στον ακριβή καθορισμό των ειδών στις τοποθεσίες αντίδρασης, καθώς και δυσκολίας κατανόησης του πώς η ηλεκτρονιακή δομή στην επιφάνεια του στερεού καθορίζει την κινητική της αντίδρασης.

Η APCVD έχει το πλεονέκτημα της ύπαρξης συγκριτικά απλής συσκευής, αφού δεν απαιτείται σύστημα δημιουργίας κενού. Άλλα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν ταχείς ρυθμούς ανάπτυξης των φιλμ και καλή και σύμμορφη κάλυψη ολόκληρου του υποστρώματος σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα μειονεκτήματα είναι πτωχός έλεγχος του πάχους και της βηματικής επίστρωσης, καθώς και δυναμική προσθήκη ανεπιθύμητων ουσιών στα φιλμ. Για παράδειγμα, οι πρόδρομοι  $\text{VCl}_4$  και  $\text{VOCl}_3$  μπορούν να οδηγήσουν στην ενσωμάτωση χλωρίου στην επίστρωση.

Έχουν υπάρξει διάφορες μελέτες σχετικά με την ανάπτυξη φιλμ  $\text{VO}_2$  σε υποστρώματα γυαλιού ή πυριτίου με τη μέθοδο αυτή. Για παράδειγμα, ο Manning κ.ά. διερεύνησαν εκτεταμένα την APCVD επιστρώσεων διοξειδίου του βαναδίου και έκαναν επιτυχή επιβελτίωση του  $\text{VO}_2$  με W, Ti, Mo και Nb. Προχώρησαν στην κατασκευή και επιστρώσεων άλλων οξειδίων του βαναδίου και φάνηκε ότι υψηλές θερμοκρασίες ευνοούσαν το σχηματισμό οξειδίων πτωχών σε οξυγόνο. Οι συγκεντρώσεις των αερίων πρόδρομων ουσιών στις αντιδράσεις βρέθηκαν επίσης να καθορίζουν τις φάσεις που αποτίθενται, όπου υψηλότερες συγκεντρώσεις ευνοούσαν το σχηματισμό οξειδίων του βαναδίου πλούσιων σε οξυγόνο. Η ίδια ομάδα ανέφερε την ανάπτυξη σύνθετων φιλμ από  $\text{VO}_2\text{-TiO}_2$ , χρησιμοποιώντας συνδυασμούς πρόδρομων ουσιών από  $\text{VOCl}_3$ ,  $\text{TiCl}_4$  και νερό και επίσης με το συνδυασμό  $\text{VOCl}_3$ , ισοπροποξειδίου του τιτανίου και νερού. Αυτά τα σύνθετα φιλμ παρουσίασαν υδροφιλία με μικρές γωνίες επαφής παρακινούμενη από το φως, φωτοκατάλυση, καθώς και μειωμένη θερμοκρασία θερμοχρωμικής μετάβασης - ίση με  $54^\circ\text{C}$ . Τέλος, σε πειράματα του Binions κ.ά. με την APCVD, βρέθηκε ότι οι ιδιότητες της θερμοχρωμικής μετάβασης επηρεάζονται σημαντικά από τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό του φιλμ, ο οποίος επηρεάζεται από παραλλαγές του ρυθμού ανάπτυξης της επίστρωσης. Εκτός από τη μορφολογία της επίστρωσης, φάνηκε ότι επηρεάζει την έκταση της μετάβασης και την οπτική διαπερατότητα του φιλμ.



Χημική εναπόθεση ατμών υποβοηθούμενη με αεροζόλ (Aerosol assisted CVD – AACVD):

Εδώ η πρόδρομη ουσία διαλύεται σε κατάλληλο διάλυμα (ώστε να κατέχει τις απαραίτητες φυσικές και χημικές ιδιότητες που επιτρέπουν το σχηματισμό αεροζόλ) και ακολουθεί η δημιουργία αεροζόλ με υπερήχους. Εκεί είναι που οι πρόδρομες ουσίες νεφελοποιούνται σε λεπτά διαχωρισμένα υγρά σταγονίδια πάχους μικρότερου από μμ. Τα σταγονίδια του αεροζόλ μεταφέρονται τότε στη θερμαινόμενη τοποθεσία της απόθεσης μέσω ροής αδρανούς αερίου (συνήθως αζώτου) και το διάλυμα εξατμίζεται ή αναφλέγεται και καίγεται για το σχηματισμό ενός λεπτού στερεού φιλμ. Ένα πλεονέκτημα της AACVD είναι ότι η πρόδρομη ουσία δεν απαιτείται να είναι πτητική (όπως στην APCVD), αλλά πρέπει να είναι διαλυτή στον διαλύτη. Οπότε, η χρήση μη συμβατικών πρόδρομων ουσιών, που δεν θα ήταν λειτουργικοί με την APCVD, είναι δυνατή. Άλλα πλεονεκτήματα είναι το χαμηλότερο κόστος της διεργασίας (αφού η δημιουργία ατμών της πρόδρομης ουσίας και η μέθοδος μεταφοράς είναι απλοποιημένες, σε σχέση με την συνήθη μέθοδο CVD) και ότι μπορεί να λάβει μέρος σε ανοιχτό περιβάλλον χωρίς την ανάγκη ύπαρξης συστήματος δημιουργίας κενού, ή θαλάμου CVD. Επιπρόσθετα, η AACVD συχνά χρησιμοποιεί πρόδρομες ουσίες μίας πηγής και συχνά είναι ευκολότερος ο έλεγχος της αναλογίας των πρόδρομων στο διάλυμα από ότι στην αέρια φάση - οπότε υλικά από πολλά συστατικά συνθέτονται με σχετική ευκολία και καλά ελεγχόμενη στοιχειομετρία. Τέλος, ταχεία απόθεση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, εξαιτίας των μικρών αποστάσεων διάχυσης μεταξύ των αντιδρώντων και των ενδιάμεσων ενώσεων. Η AACVD λεπτών επιστρώσεων υποφέρει από μειονεκτήματα, όπως ότι η πρόσφυση των φιλμ πάνω στα υποστρώματα μπορεί κάποιες φορές να μην είναι ισχυρή και ότι αντιδράσεις μεταξύ των αερίων φάσεων μπορεί να λάβουν χώρα, οδηγώντας σε ελαττώματα των φιλμ (π.χ. οπές εξαιτίας της απόθεσης σωματιδίων μεγάλου μεγέθους).

Διάφορες έρευνες έχουν υπάρξει και για τη μέθοδο αυτή, σχετικά με την ανάπτυξη θερμοχρωμικών επιστρώσεων. Ο Picirillo κ.ά. απόθεσαν λεπτά φιλμ οξειδίων του βαναδίου χρησιμοποιώντας AACVD με χρήση  $V(acac)_3$  και  $VO(acac)_2$ . Το είδος του οξειδίου που σχηματιζόταν ( $V_2O_3$ ,  $VO_2$  ή  $V_2O_5$ ) βρέθηκε ότι καθοριζόταν από τις μεταβαλλόμενες πειραματικές παραμέτρους, όπως η πρόδρομος ένωση βαναδίου, ο διαλύτης και η παροχή μάζας του φέροντος αερίου. Τροποποίηση των συνθηκών επέτρεψε το σχηματισμό ομοιόμορφης σύστασης  $V_2O_3$ ,  $VO_2$  ή  $V_2O_5$  σε ολόκληρη την επιφάνεια των υποστρωμάτων – και αυτή η μελέτη ήταν η πρώτη που ανέφερε τη σύνθεση λεπτών φιλμ  $V_2O_3$  μέσω CVD. Τα προκύπτοντα φιλμ παρουσίαζαν ενδιαφέρουσες λειτουργικές ιδιότητες, μεταξύ των οποίων υδροφοβία ( $VO_2$ ), ιδιότητες heat mirror για εφαρμογές ηλιακού ελέγχου ( $V_2O_3$ ) και υδροφιλία ( $V_2O_5$ ). Μετά προχώρησαν στη σύνθεση επιστρώσεων  $VO_2$  βελτιωμένων με βολφράμιο, μέσω των ίδιων συνθηκών με πριν, δηλαδή αιθανόλη,  $VO(acac)_2$  και  $W(OC_2H_5)_5$ , που χρησιμοποιήθηκε ως πρόδρομος ένωση για το βολφράμιο. Πραγματοποιήθηκαν διάφορες αποθέσεις χρησιμοποιώντας διαφορετικές συγκεντρώσεις βολφραμίου, με σκοπό τη διερεύνηση του αποτελέσματος της συγκέντρωσης του βολφραμίου στη θερμοκρασία της θερμοχρωμικής μετάβασης,  $T_T$ . Βρέθηκε ότι το μονοκλινές  $V_xW_{1-x}O_2$  ήταν η μόνη φάση παρούσα με περιεχόμενο βολφραμίου έως και περίπου 2at%, ενώ ανάμεικτες φάσεις όπως W-O ή W-V δεν σχηματίστηκαν. Υπήρχε μια γραμμική

σχέση μεταξύ της ποσότητας του βολφραμίου στο διάλυμα και της ποσότητας που ενσωματώνεται στα φιλμ, αναδεικνύοντας το δυναμικό της μεθόδου AACVD για την απόθεση βελτιωμένων λεπτών επιστρώσεων. Το καθαρό (μη βελτιωμένο) δείγμα  $\text{VO}_2$  που αποτέθηκε στην αρχική μελέτη με αυτή τη μεθοδολογία, παρουσίασε μια θερμοκρασία μετάβασης κατά προσέγγιση ίση με  $58^\circ\text{C}$ , που είναι  $10^\circ\text{C}$  χαμηλότερη από αυτήν που κανονικά παρατηρείται για το  $\text{VO}_2$ . Η μείωση πιστεύεται ότι οφείλεται σε μια παραμόρφωση στο φιλμ, που συνήθως παρατηρείται για φιλμ λεπτότερα από 300 nm. Ανέφεραν και ότι μια ποσότητα βελτιωτικού ίση με περίπου 1% μειώνει τη θερμοκρασία μετάβασης του  $\text{VO}_2$  κατά σχεδόν  $22^\circ\text{C}$ . Η ομάδα επίσης προχώρησε σε προσθήκη Nb στο διοξείδιο του βαναδίου μέσω AACVD ( $\text{V}_x\text{Nb}_{1-x}\text{O}_2$ ,  $x=0-0,037$ ). Τα δεδομένα υπέδειξαν μια καλή γραμμική συσχέτιση μεταξύ της τιμής της  $T_T$  και του περιεχομένου σε νιόβιο και ότι παρουσία 2% Nb στο φιλμ μείωνε τη θερμοκρασία μετάβασης κατά  $15^\circ\text{C}$ . Αν και το νιόβιο είναι λιγότερο αποτελεσματικό βελτιωτικό για τη μείωση της  $T_T$ , παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στη διαπερατότητα και την ανακλαστικότητα των επιστρώσεων – οπότε θεωρείται ένα κατάλληλο υλικό για εφαρμογή σε έξυπνους υαλοπίνακες.

Πρόσφατα, έχουν αναπτυχθεί και υβριδικά συστήματα CVD με ανάμιξη ροών από αεροζόλ και ροών σε ατμοσφαιρική πίεση, τα οποία επιτυγχάνουν χαρακτηριστικά των επιστρώσεων παρόμοια με αυτά από APCVD (δηλαδή καλή πρόσφυση της επίστρωσης, ομοιομορφία και καλή κάλυψη), με την επιπλέον ευελιξία της μεθόδου AACVD. Ο Binions κ.ά. το 2008 δημιούργησαν λεπτά φιλμ μονοκλινούς διοξειδίου του βαναδίου με ενσωματωμένα νανοσωματίδια χρυσού, μέσω αυτής της υβριδικής μεθόδου. Έχει επίσης αποδειχτεί ότι η χρήση επιφανειοδραστικών ουσιών (surfactants) σε υβριδικές αντιδράσεις CVD μπορεί να επηρεάσει τις ιδιότητες των αναπτυσσόμενων φιλμ. Οι επιφανειοδραστικές ουσίες είναι μόρια που μπορούν να μεταβάλλουν την επιφανειακή τάση ενός υγρού: σε μια υβριδική διαδικασία CVD μπορούν να επηρεάσουν τους μηχανισμούς της απόθεσης και συνεπώς τη δομή των επιστρώσεων. Στην περίπτωση του διοξειδίου του βαναδίου, εισάγουν παραμορφώσεις καθορίζοντας την ανάπτυξη των φιλμ, οπότε μειώνεται σημαντικά και η θερμοκρασία θερμοχρωμικής μετάβασης.

Ανακεφαλαιώνοντας σχετικά με όλα τα προαναφερθέντα, οι μέθοδοι PVD απαιτούν την ύπαρξη συνθηκών κενού ή μειωμένης πίεσης, οι οποίες χρειάζονται χρόνο για να επιτευχθούν και να διατηρηθούν, καθώς και ακριβό εξοπλισμό εξάτμισης / ιοντοβολής / διάβρωσης που αυξάνει τα κόστη παραγωγής. Επομένως, οικονομικοί παράγοντες περιορίζουν τις εμπορικές εφαρμογές της μεθόδου αυτής. Επιπλέον, οι χαμηλοί ρυθμοί ανάπτυξης των φιλμ που σχετίζονται με τις μεθόδους PVD κάνουν τα συστήματα αυτά ακατάλληλα για ενσωμάτωση σε μοντέρνες διαδικασίες παραγωγής γυαλιού επίπλευσης (float glass). Ωστόσο, η μέθοδος αυτή επιτρέπει την πιο αποδοτική χρήση πρόδρομων ουσιών και βοηθά την παραγωγή υπέρλεπτων επιστρώσεων με σχετική ευκολία, συγκριτικά με την CVD. Η PVD μπορεί να λειτουργεί σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και για το λόγο αυτό είναι κατάλληλη για ποικιλία υποστρωμάτων. Δεδομένου ότι καμία χημική αντίδραση δεν λαμβάνει χώρα στην PVD, σε αντίθεση με την CVD, η προσεκτική επιλογή των πρόδρομων ενώσεων

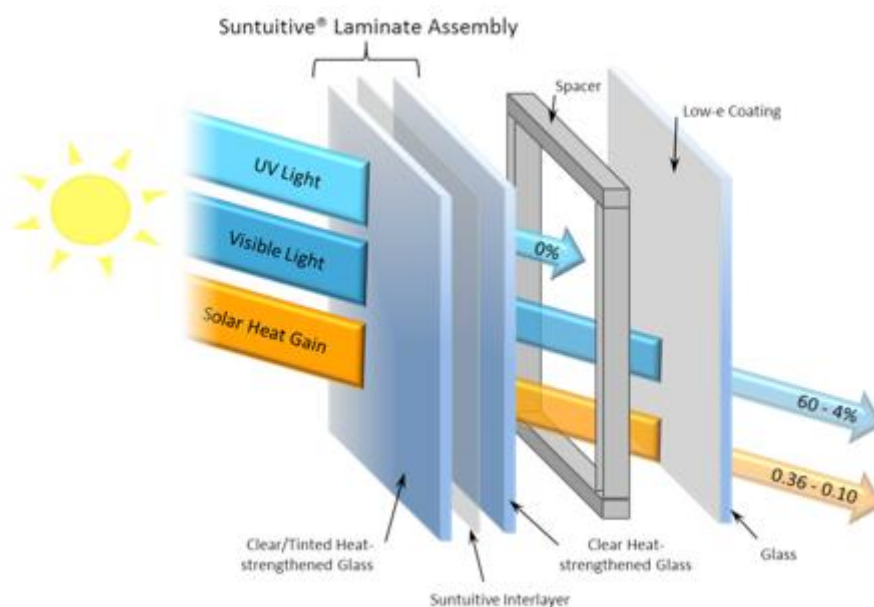
δεν είναι αντικείμενο ιδιαίτερης σημασίας. Η καθαρότητα του στόχου είναι όμως αναγκαία για την απόθεση επιστρώσεων χωρίς παρουσία ανεπιθύμητων ουσιών. Επιπρόσθετα, μια ποικιλία στόχων μπορούν να ενσωματωθούν μέσα στο σύστημα χωρίς δυσκολία, για την ανάπτυξη πολυστρωματικών διατάξεων.

Οι μέθοδοι PVD και Sol-gel χρησιμοποιούνται επί του παρόντος από κατασκευαστές γυαλιού για την παραγωγή εμπορευμάτων επιστρωμένου γυαλιού. Αυτές οι ακριβές off-line διεργασίες είναι παρ' όλα αυτά υπερβολικές όταν λαμβάνεται υπόψιν η ανάγκη παγκόσμιας εμπορικής εκμετάλλευσης. Οι μέθοδοι Sol-gel είναι εύκολες στη λειτουργία, αλλά ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία του διαλύματος είναι σημαντικός για την απόκτηση του επιθυμητού προϊόντος, οπότε μπορούν να είναι αργές διεργασίες πολλών βημάτων. Πλήρης κάλυψη του υποστρώματος με αρκετά ομοιόμορφο πάχος μπορεί να επιτευχθεί (το οποίο μπορεί να είναι δύσκολο να ελεγχθεί πάνω σε ένα υπόστρωμα μεγάλης επιφάνειας) με τη χρήση εύκολα διαθέσιμων πρόδρομων ουσιών, αν και αυτές είναι συνήθως ακριβές. Βελτιωτικά μπορούν εύκολα να εισαχθούν και η μέθοδος Sol-gel έχει χαμηλές θερμοκρασίες διεργασίας. Η διαδικασία τείνει να έχει υψηλά επίπεδα αποβλήτων, οπότε μειώνεται η αποδοτικότητα και η καταλληλότητα για ενσωμάτωση στις βιομηχανικές διεργασίες γυαλιού επίπλευσης. Επιπρόσθετα, οι τεχνικές Sol-gel συχνά περιλαμβάνουν περιστροφική επίστρωση του υποστρώματος, η οποία είναι δύσκολο να επιτευχθεί με πολύ μεγάλες επιφάνειες γυαλιού. Μπορεί επίσης να είναι δύσκολη η δημιουργία πολυστρωματικών λεπτών φιλμ με χρήση της μεθόδου αυτής.

Η CVD είναι μια μέθοδος non-line-of-sight (σε αντίθεση με την PVD), με υψηλούς ρυθμούς απόθεσης σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, οπότε αποτίθενται φιλμ με καλή και σύμμορφη κάλυψη και επιτρέπει τη σύνθεση αγνών, πυκνών και ομοιόμορφων λεπτών επιστρώσεων, οι οποίες γενικά παρουσιάζουν καλή πρόσφυση και καλή αντοχή. Η CVD χρησιμοποιείται εκτενώς στη βιομηχανία υαλοπινάκων, αφού μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί σε μια γραμμή παραγωγής γυαλιού επίπλευσης. Ιδανικά, μια διαδικασία που εκμεταλλεύεται εύκολα διαθέσιμες, χαμηλού κόστους πρόδρομες ενώσεις, απαιτείται για οικονομική παραγωγή θερμοχρωμικών προϊόντων. Η μέθοδος APCVD είναι μια ιδανική, υψηλής δυναμικότητας, μέθοδος για την παραγωγή λεπτών επιστρώσεων σε υποστρώματα γυαλιού. Αυτό γιατί ο εξοπλισμός μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί στη γραμμή παραγωγής γυαλιού επίπλευσης, χωρίς την ανάγκη ύπαρξης ακριβών συστημάτων δημιουργίας κενού και με αρκετά υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης της επίστρωσης, συγκριτικά με την PVD. Οι πρόδρομες ουσίες είναι συχνά εύκολα διαθέσιμες και λογικά τιμολογημένες. Μέθοδοι APCVD χρησιμοποιούνται επί του παρόντος από την Pilkington-NSG για την παραγωγή των υαλοπινάκων K-glass<sup>TM</sup> και Activ<sup>TM</sup>.

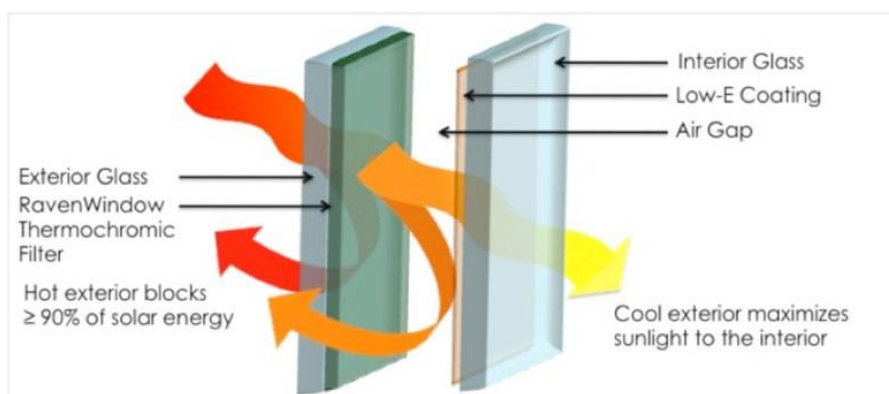
Τέλος, αναφορικά με τη θέση της επίστρωσης σε υαλοπίνακα, είναι συνήθως προτιμότερο αυτή να είναι η θέση "2" σε διπλό υαλοπίνακα, ώστε να υπάρχει προστασία της επίστρωσης από τις εξωτερικές συνθήκες, αλλά και να υπάρχει όσο το δυνατόν καλύτερη εκμετάλλευση των εξωτερικών συνθηκών (και κυρίως της ηλιακής ακτινοβολίας), στις οποίες βασίζεται η λειτουργία της θερμοχρωμικής επίστρωσης (και να μην επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες του εσωτερικού χώρου). Πάντως, ερευνητές έδειξαν πρόσφατα ότι τοποθέτηση επίστρωσης  $Al_2O_3$

πάνω από τη θερμοχρωμική επίστρωση μπορεί να παρέχει εξαιρετική προστασία στο διοξείδιο του βαναδίου και να οδηγήσει στη διατήρηση των θερμοχρωμικών ιδιοτήτων για πολλά χρόνια, σε υψηλές τιμές θερμοκρασιών και σχετικών υγρασιών. Λογικός συνειρμός είναι το ότι η τοποθέτηση στη θέση “2” επιφέρει μικρότερη επίδραση της εξωτερικής θερμοκρασίας πάνω στη θερμοκρασία της επίστρωσης, συγκριτικά με τοποθέτηση στη θέση “1”. Επίσης, είναι δυνατή και πολύ συνηθισμένη (αν και δεν υπάρχουν ακόμη πολλοί κατασκευαστές θερμοχρωμικών υαλοπινάκων) η απόθεση της θερμοχρωμικής επίστρωσης σε μεμβράνη PVB, ή ο διασκορπισμός θερμοχρωμικών νανοσωματιδίων σε πολυμερή για τη δημιουργία τέτοιας μεμβράνης και η επακόλουθη δημιουργία πολυστρωματικού υαλοπίνακα (laminated) (με δυνατότητα χρήσης υαλοπινάκων securit) για χρήση του σε διπλούς κ.λπ. υαλοπίνακες. Σε τέτοιους υαλοπίνακες είναι προφανώς δυνατή η τοποθέτηση και διαφορετικών επιπλέον επιστρώσεων, ή η τοποθέτηση του θερμοχρωμικού φιλμ σε διάφορα είδη υαλοπινάκων (π.χ. σε έγχρωμο), με σκοπό την περαιτέρω βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Συνήθης πρακτική είναι η τοποθέτηση επίστρωσης Low-e στη θέση “3” – για βελτίωση των ιδιοτήτων και για παρεμπόδιση της απορροφηθείσας από τον θερμοχρωμικό θερμότητας να μεταδοθεί με ακτινοβολία προς τον εσωτερικό χώρο. Ένα παράδειγμα υαλοπίνακα με θερμοχρωμικό laminated και επίστρωση Low-e στη θέση “3”, φαίνεται στο παρακάτω σχήμα και αφορά τον υαλοπίνακα Suntuitive®, αποτέλεσμα συνεργασίας των εταιριών Pleotint (LLC) και PPG. Ο υαλοπίνακας αυτός είναι εμπορικά διαθέσιμος από το 2010 και ως τα μέσα του 2015, μονάδες μεγέθους έως και 64"x144" (ιντσών) έχουν εγκατασταθεί σε διάφορες περιοχές σε όλο τον κόσμο.



**Σχήμα 4.12:** Σχηματική αναπαράσταση κατασκευής του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα Suntuitive®.

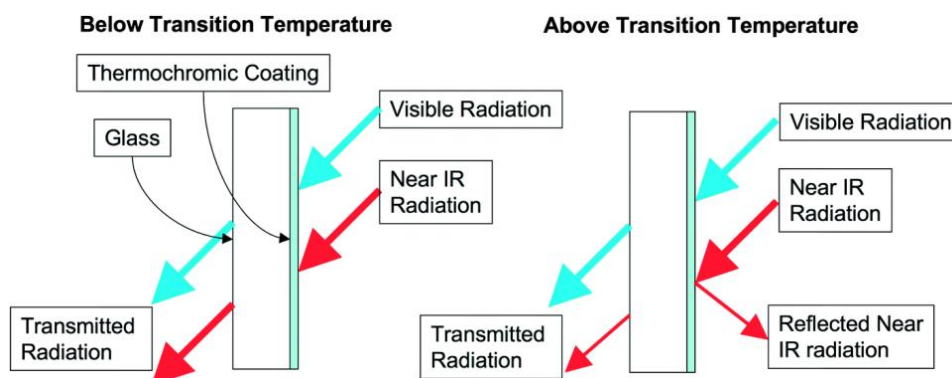
Παράδειγμα διπλού υαλοπίνακα με τοποθέτηση της θερμοχρωμικής επίστρωσης σε κοινό υαλοπίνακα στη θέση “2”, είναι ο RavenWindow από την εταιρεία RavenBrick, LLC. Σχηματική αναπαράσταση φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 4.13: Σχηματική αναπαράσταση της δομής του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα RavenWindow της εταιρείας RavenBrick, LLC.

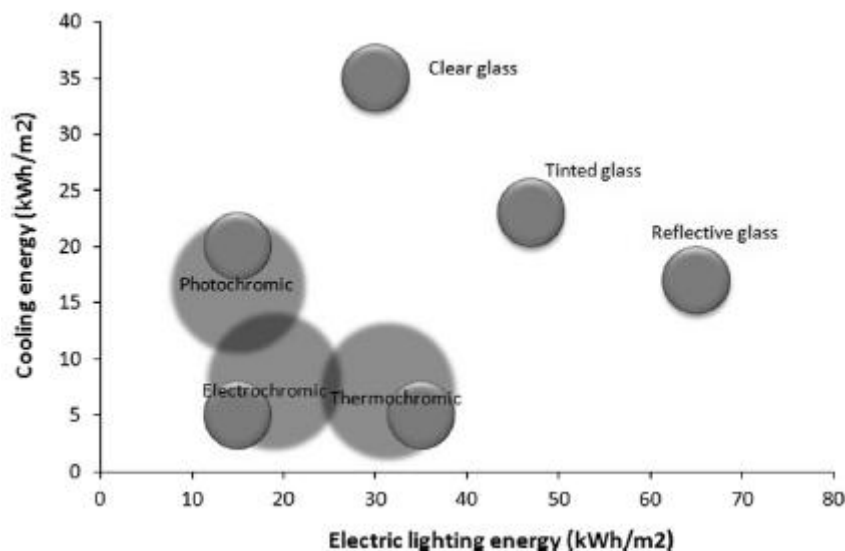
#### 4.5 Συμπεριφορά και αποδοτικότητα θερμοχρωμικών υαλοπινάκων

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3 στη σχετική παράγραφο για τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες, αυτοί ανταποκρίνονται σε αλλαγές παραμέτρων του εξωτερικού περιβάλλοντος – και συγκεκριμένα κατά κύριο λόγο στην προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία και κατά δεύτερο στην εξωτερική θερμοκρασία – μεταβάλλοντας τις ιδιότητές τους με αποτέλεσμα δυναμικό ηλιακό έλεγχο. Η έννοια δυναμικός σημαίνει ότι μπορεί να προσαρμόζεται και να μεταβάλλεται, ανάλογα με τις ανάγκες, με μεγάλη μάλιστα αποτελεσματικότητα. Ο δυναμικός αυτός ηλιακός έλεγχος, προσφέρει τη δυνατότητα σημαντικής εξοικονόμησης ενέργειας, μιας και τα ηλιακά θερμικά κέρδη συνήθως είναι επιθυμητά σε κρύες ημέρες του χειμώνα και ανεπιθύμητα σε θερμές ημέρες του καλοκαιριού. Απλοποιημένη σχηματική παράσταση της μεταβαλλόμενης λειτουργίας ενός θερμοχρωμικού υαλοπίνακα, ανάλογα με το αν η θερμοκρασία της επίστρωσης βρίσκεται κάτω ή πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης, φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4.14: Απλοποιημένη παράσταση της λειτουργίας θερμοχρωμικού υαλοπίνακα, για θερμοκρασία της επίστρωσης κάτω (αριστερό σχήμα) και πάνω (δεξιό σχήμα) από τη θερμοκρασία μετάβασης του υλικού από το οποίο αποτελείται.

Σαν μέρος της συνολικής έννοιας του αποδοτικού σχεδιασμού κτιρίων, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες μπορούν να βοηθήσουν στη διαχείριση των μεταβαλλόμενων αναγκών ενός κτιρίου για παθητικά ηλιακά θερμικά κέρδη και φυσικό φωτισμό. Συνολικά αυτό μπορεί να μειώσει τα κόστη που σχετίζονται με θέρμανση, κλιματισμό και τεχνητό φωτισμό.



**Σχήμα 4.15:** Σύγκριση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό και της απαιτούμενης ενέργειας για ψύξη (κλιματισμό) μεταξύ διαφόρων ειδών υαλοπινάκων.

Οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες δεν απαιτούν εγκατάσταση καλωδίων, τροφοδοτικών ισχύος, ή εξοπλισμού ελέγχου και η εγκατάστασή τους είναι ακριβώς ίδια με αυτή των συμβατικών υαλοπινάκων. Αυτά τα χαρακτηριστικά της απλής κατασκευής και αρχής λειτουργίας, μαζί με το χαμηλό κόστος συγκριτικά με διάφορες άλλες τεχνολογίες έξυπνων υαλοπινάκων (ενδεικτικό κόστος θερμοχρωμικού laminated υαλοπίνακα μπορεί να εκτιμηθεί σε τιμή χαμηλή έως και 50 US\$/m<sup>2</sup>, ενώ για τους φωτοχρωμικούς σε 500 US\$/m<sup>2</sup> και για τους ηλεκτροχρωμικούς κάπου ενδιάμεσα), τους καθιστούν γενικά αρκετά ελκυστικούς σε σχέση π.χ. με τους ηλεκτροχρωμικούς και άλλες παρόμοιες τεχνολογικές προσεγγίσεις ως προς την έννοια των μεταβαλλόμενων ιδιοτήτων. Γενικά πάντως, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες που υπάρχουν επί του παρόντος στην αγορά είναι κατά περίπου 50% πιο ακριβοί από το άνω όριο τιμών άλλων συμβατικών υαλοπινάκων. Με την αύξηση του όγκου παραγωγής, τα σχετικά κόστη παραγωγής θα μειωθούν και το ποσοστό αυτό θα μειωθεί σε σχέση με την τωρινή τιμή. Άλλο συγκριτικό πλεονέκτημα σε σχέση με τους ηλεκτροχρωμικούς και τους φωτοχρωμικούς, είναι ότι τελευταίοι στην κατάσταση μειωμένης διαπερατότητας αποκόπτουν σημαντικά περισσότερη ορατή ακτινοβολία (σε αντίθεση με τους θερμοχρωμικούς με διοξείδιο του βαναδίου, που με τα κατάλληλα βελτιωτικά πρόσθετα μπορούν να παρουσιάζουν καλή VLT). Υπάρχουν βέβαια και θερμοχρωμικές επιστρώσεις από κατάλληλα μίγματα θερμοχρωμικών πολυμερών που παρουσιάζουν σημαντική μεταβολή στην οπτική διαπερατότητα κατά τη μετάβαση και είναι καταλληλότεροι για εφαρμογές όπου

δίνεται μεγάλη σημασία και στη σκίαση. Με την ενσωμάτωση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα σε κούφωμα του οποίου τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά αφορούν κυρίως τη μείωση του συντελεστή θερμοπερατότητας U (π.χ. κούφωμα με διπλό υαλοπίνακα, πλήρωση αργού και επίστρωση Low-e υψηλού ηλιακού θερμικού κέρδους), μπορεί να επιτευχθεί πολύ καλή αποδοτικότητα του κουφώματος. Η ενσωμάτωση σε τέτοιο κούφωμα είναι πρωταρχικής σημασίας για την αποδοτικότητα του συστήματος, αφού οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες γενικά δεν επιφέρουν μείωση στο συντελεστή θερμοπερατότητας από μόνοι τους (παρουσιάζουν μηδαμινή συμπεριφορά Low-e).

Σχετικά με τη μετάβαση σε καταστάσεις μειωμένης διαπερατότητας, είναι προφανές ότι εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες (ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασία, ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου κ.λπ), αλλά και από τον προσανατολισμό και το μέγεθος του υαλοπίνακα, την εποχή και την ώρα της ημέρας (που καθορίζουν τη θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο) και τυχούσα ύπαρξη σκίασης από εξωτερικά εμπόδια. Η ιδιότητα αυτή των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα (σχετικά με την εξοικονόμηση ενέργειας) σε σύγκριση με τους φωτοχρωμικούς που, αν και είναι παθητικοί υαλοπίνακες με απλή αρχή λειτουργίας, η διαπερατότητά τους είναι συνάρτηση μόνο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η επίδραση στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου εξαρτάται όμως και από την κατασκευή του κτιριακού κελύφους, καθώς και από το προφίλ των εσωτερικών θερμικών κερδών και την αποδοτικότητα και τη λειτουργία των συστημάτων θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (HVAC). Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται διάφοροι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες και το οπτικό αποτέλεσμα που επιφέρουν:



**Σχήμα 4.16:** Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες Suntuitive® εγκατεστημένοι στην δεξιά πλευρά του χώρου.



**Σχήμα 4.17:** Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες Suntuitive®. Αριστερά, σε κατάσταση ελάχιστης διαπερατότητας. Δεξιά, σε κατάσταση μέγιστης διαπερατότητας, καθώς η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μειώθηκε.



**Σχήμα 4.18:** Θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες RavenWindow, αριστερά σε κατάσταση αυξημένης διαπερατότητας και δεξιά σε κατάσταση μειωμένης διαπερατότητας.



**Σχήμα 4.19:** Βαθμιαία μεταβολή χρώματος ενός θερμοχρωμικού laminated υαλοπίνακα.

Πολύ σημαντική για τη συμπεριφορά ενός θερμοχρωμικού υαλοπίνακα σε διάφορα κλίματα, είναι η τιμή της θερμοκρασίας μετάβασης της επίστρωσης. Είναι ουσιώδες η



τιμή της να είναι συμβατή με τη θερμοκρασία που συνήθως αναπτύσσεται σε έναν υαλοπίνακα εγκατεστημένο σε μια περιοχή, όταν είναι εκτεθειμένος στην ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό για να μην υπάρχει πιθανότητα μείωσης της διαπερατότητας, που θα οδηγεί σε (έστω μικρή) παρεμπόδιση της θέας, όταν ο υαλοπίνακας δεν υπόκειται σε ηλιασμό (δηλαδή να μην υπάρχει πιθανότητα η μετάβαση να ενεργοποιείται μόνο λόγω της εξωτερικής θερμοκρασίας). Η τιμή της θερμοκρασίας μετάβασης ιδανικά πρέπει να είναι η βέλτιστη για κάθε περίπτωση εγκατάστασης, ώστε να επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη δυνατή εξοικονόμηση ενέργειας. Εδώ όμως υπάρχει, τουλάχιστον προς το παρόν, το πρόβλημα της μη διαθεσιμότητας μεγάλης ποικιλίας επιστρώσεων από τους κατασκευαστές (που είναι και ελάχιστοι σε αριθμό, επί του παρόντος).

Πολύ χαμηλές θερμοκρασίες μετάβασης (π.χ. κάτω από 15°C) συνήθως είναι ανεπιθύμητες, γιατί μπορεί να καθιστούν τον υαλοπίνακα να βρίσκεται πολύ εύκολα σε κατάσταση μειωμένης διαπερατότητας (δηλαδή και τη χειμερινή περίοδο, ακόμα και για θερμοκρασίες περιβάλλοντος σημαντικά χαμηλότερες από το κάτω όριο της μετάβασης, λόγω της θέρμανσης και από την ηλιακή ακτινοβολία). Είναι εύλογο ότι σε αυτούς τους υαλοπίνακες γενικά (για τις συνήθεις τιμές θερμοκρασίας μετάβασης) δεν είναι εύκολη η εκμετάλλευση της λειτουργικότητάς τους σε ψυχρά κλίματα, αφού οι θερμοκρασίες μετάβασης μπορεί να είναι σχετικά υψηλές και η επίστρωση να μην βρίσκεται για επαρκές χρονικό διάστημα σε κατάσταση μειωμένης διαπερατότητας τους καλοκαιρινούς μήνες (παρά την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας). Αυτό γιατί η θερμοκρασία της επιφάνειας του υαλοπίνακα επηρεάζεται προφανώς και από την εξωτερική θερμοκρασία, εκτός από την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Βέβαια, σε τέτοια κλίματα η υπερθέρμανση του εσωτερικού χώρου κατά τη θερινή περίοδο μπορεί να μην είναι έτσι και αλλιώς πιθανή.

Από την άλλη αυτό είναι θετικό για χρήση σε θερμά κλίματα και κλίματα που οι καιρικές συνθήκες μεταβάλλονται σημαντικά ανά εποχή (και όπου τα ψυκτικά φορτία είναι περισσότερο κυρίαρχα από τα θερμικά), στα οποία ο υαλοπίνακας θα παρουσιάζει σχετικά αυξημένη διαπερατότητα (ή και τη μέγιστη δυνατή) σε ψυχρές ημέρες του χειμώνα, ακόμα και αν υπόκειται σε ηλιασμό. Είναι σημαντικό και ιδανικό όμως ένας τέτοιος υαλοπίνακας να έχει κατά το δυνατόν υψηλότερη διαπερατότητα (οπτική και ηλιακή) κατά την κατάσταση ημιαγωγού της επίστρωσης, ώστε να μην αποκόπτει σημαντικές ποσότητες ηλιακής ακτινοβολίας, όταν η είσοδός τους είναι επιθυμητή.

Σε περίπτωση πλήρους θερμοχρωμικής μετάβασης του υαλοπίνακα, ενδεικτική τιμή του χρόνου που διαρκεί αυτή, για μετάβαση από την κατάσταση μέγιστης διαπερατότητας σε αυτήν ελάχιστης διαπερατότητας και αντίστροφα, είναι τα 20–30 min – η τιμή αυτή συγκεκριμένα ισχύει για υαλοπίνακα με μεμβράνη Suntuitive της Pleotint. Επίσης, η θερμοκρασία μπορεί να μην είναι η ίδια σε όλα τα σημεία/περιοχές της επιφάνειας της επίστρωσης του υαλοπίνακα, οπότε η μετάβαση να μην συμβαίνει ομοιόμορφα στην επιφάνειά της. Ερευνητές έχουν αναφέρει ότι καλή τιμή του εύρους της μετάβασης ως προς τις θερμοκρασίες για καλό αισθητικό αποτέλεσμα (που καθορίζεται από την κλίση του βρόχου υστέρησης) είναι 6°C και ότι τιμή κάτω από 2°C μπορεί να οδηγεί σε ανομοιόμορφη χρωματική εμφάνιση μεταξύ των περιοχών του υαλοπίνακα (ειδικότερα όταν δεν υπάρχει ομοιόμορφη πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας πάνω του).

Τα αποτελέσματα των λειτουργικών ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων είναι τόσο περισσότερο εμφανή, όσο αυξάνεται η επιφάνεια των υαλοπινάκων σε ένα κτίριο. Επειδή βέβαια τυπικά σε χειμερινές ημέρες ο ηλιασμός μπορεί να είναι μειωμένος, είναι αναγκαίο να μην αμελείται και η τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας.

Η επίδραση της ύπαρξης ενός θερμοχρωμικού υαλοπίνακα (όπως και κάθε τύπου υαλοπίνακα) στην ενεργειακή απόδοση κτιρίου πρέπει να ελέγχεται σε ετήσια βάση, γιατί μπορεί να προσφέρει εξοικονόμηση κατά την καλοκαιρινή περίοδο π.χ. συγκριτικά με έναν κοινό διαφανή υαλοπίνακα, αλλά να επιφέρει μεγαλύτερα θερμικά φορτία το χειμώνα, λόγω μικρότερης διαπερατότητας στην κατάσταση ημιαγωγού της επίστρωσης, π.χ. συγκριτικά με έναν κοινό διαφανή υαλοπίνακα (με τον ίδιο συντελεστή θερμοπερατότητας), οπότε σε ετήσια βάση η απόδοση να είναι χαμηλότερη - αυτό συνήθως μπορεί να συμβαίνει σε κλίματα στα οποία κυριαρχούν τα θερμικά φορτία. Υπολογιστική μελέτη σχετική με την επίδραση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίου γίνεται στα επόμενα κεφάλαια, που αφορούν το πρακτικό μέρος της εργασίας, για κτίριο κατοικίας στην περιοχή της Αθήνας (κυρίως στα κεφάλαια 6, 7 και 8, καθώς το κεφάλαιο 5 είναι εισαγωγικό).

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται τιμές της διαπερατότητας και της ανακλαστικότητας που έχουν αναφερθεί για διάφορες θερμοχρωμικές επιστρώσεις, κάτω και πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης. Το μέγεθος  $\eta_T$  που φαίνεται δεξιά στον πίνακα είναι η μεταβολή της διαπερατότητας στα 2500 nm κατά τη μετάβαση από θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας μετάβασης  $T_T$  σε μεγαλύτερες. Το μέγεθος αυτό είναι γνωστό ως αποδοτικότητα της μετάβασης (switching efficiency) και είναι πολύ σημαντικός δείκτης της αποδοτικότητας των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων. Η τιμή του επηρεάζεται από την προσθήκη βελτιωτικών, την αλλαγή της μικροδομής και το πάχος της επίστρωσης. Ο περισσότερο κυρίαρχος παράγοντας είναι το πάχος του φιλμ, που επηρεάζει σημαντικά την τιμή του μεγέθους αυτού. Ωστόσο, αύξηση του πάχους του φιλμ έχει το αντίθετο αποτέλεσμα στην τιμή της οπτικής διαπερατότητας, όπως φαίνεται στον ίδιο πίνακα – το ιδανικό πάχος είναι μεταξύ 40 και 80 nm. Η επιλογή του καταλληλότερου βελτιωτικού προς ενσωμάτωση (για τη μείωση της  $T_T$  και την αύξηση της VLT), η μέθοδος απόθεσης της επίστρωσης που θα χρησιμοποιηθεί (για την απόκτηση του βέλτιστου πάχους των φιλμ και επαρκούς θερμοχρωμικής μετάβασης), η προσθήκη αποδοτικής αντι-ανακλαστικής επίστρωσης (για περαιτέρω αύξηση της VLT) και η μείωση του κόστους παραγωγής των επιστρώσεων είναι τα κρίσιμα σημεία για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων.

Thermochromic coating	Below $T_c$ (Cold)				Above $T_c$ (Hot)				$\eta_T$ (%)
	$T_{vis}$ (%)	$R_{vis}$ (%)	$T_{IR}^1$ (%)	$R_{IR}^1$ (%)	$T_{vis}$ (%)	$R_{vis}$ (%)	$T_{IR}^1$ (%)	$R_{IR}^1$ (%)	
280 nm tungsten-vanadium co-sputtered thin films on glass substrates by magnetron sputtering, $T_c=20^\circ\text{C}, T_h=70^\circ\text{C}$	41	6	60	14	41	8	12	30	48
RF reactive sputtered $\text{VO}_2$ thin films, $T_c=26^\circ\text{C}, T_h=90^\circ\text{C}$	38	-	67	-	48	-	10	-	47
deposited $\text{VO}_2$ thin films by CVD	78	-	-	-	74	-	-	-	-
sputter deposited $\text{VO}_2$ thin films, $T_c=20^\circ\text{C}, T_h=80^\circ\text{C}$	38	-	72	-	44	-	10	-	62
RF reactive sputtered $\text{VO}_2$ thin films, $T_c=20^\circ\text{C}, T_h=90^\circ\text{C}$	-	-	59	-	-	-	5	-	54
RF sputtered $\text{CeO}_2\text{-VO}_2$ bilayers on $\text{SiO}_2$ substrates, $T_c=25^\circ\text{C}, T_h=100^\circ\text{C}$	37	24	59	25	20	15	3	43	56
50 nm $\text{VO}_2$ thin films by the sol-gel process	20	-	60	-	35	-	5	-	55
$\text{VO}_2$ films produced by reactive e-beam evaporation	48	-	-	-	-	-	-	-	-
70 nm deposited $\text{VO}_2$ films by APCVD, $T_c=25^\circ\text{C}, T_h=65^\circ\text{C}$	-	-	19 <sup>2</sup>	-	-	-	11 <sup>2</sup>	-	18 <sup>2</sup>
40 nm ZnO-doped $\text{VO}_2$ thin films	60	38	85	10	65	32	32	30	53
$\text{VO}_2$ thin films sputtered onto corning glass, $T_c=25^\circ\text{C}, T_h=100^\circ\text{C}$	38	-	-	-	32	-	-	-	-
50 nm $\text{VO}_2$ thin films, $T_c=22^\circ\text{C}, T_h=100^\circ\text{C}$	50	42	76	20	55	39	20	41	56
RF sputtered $\text{VO}_2$ thin films with anti reflecting coating, $T_c=20^\circ\text{C}, T_h=90^\circ\text{C}$	55	-	52 <sup>3</sup>	-	50	-	33 <sup>3</sup>	-	19 <sup>3</sup>
• 80 nm thick $\text{VO}_2$ films prepared by APCVD, $T_c=25^\circ\text{C}, T_h=80^\circ\text{C}$	65	20	80	10	65	20	50	13	30
• 80 nm thick Tungsten-doped $\text{VO}_2$ films prepared by APCVD, $T_c=25^\circ\text{C}, T_h=40^\circ\text{C}$	55	30	64	14	55	28	28	30	36

<sup>1</sup>: Measured at 2500 nm wavelength  
<sup>2</sup>: Measured at 1500 nm wavelength  
<sup>3</sup>: Measured at 1000 nm wavelength

$T_{vis}$ : Visible transmittance     $T_{IR}$ : Infra-red transmittance  
 $R_{vis}$ : Visible reflectance     $R_{IR}$ : Infra-red reflectance

**Σχήμα 4.20:** Τιμές της διαπερατότητας και της ανακλαστικότητας που έχουν αναφερθεί για διάφορες θερμοχρωμικές επιστρώσεις, κάτω και πάνω από τη θερμοκρασία μετάβασης.

Μια αποδοτικότητα που, για παράδειγμα, θεωρείται περίπου ιδανική για έναν πρακτικό (και όχι θεωρητικό ιδανικό) θερμοχρωμικό υαλοπίνακα, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

State	Monoclinic/cold ( $T < T_c$ )		Rutile/hot ( $T > T_c$ )	
Wavelength	Visible (%)	NIR (%)	Visible (%)	NIR (%)
Transmittance (T)	60–65	80	60–65	15
Reflectance (R)	17	12	17	77

**Σχήμα 4.21:** Οπτική απόδοση θερμοχρωμικών υαλοπινάκων που θεωρείται περίπου ιδανική για έναν πρακτικό θερμοχρωμικό υαλοπίνακα.

Εξαιτίας αυτής της πολύ ιδιαίτερης συμπεριφοράς που παρουσιάζουν οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες, υαλοστάσια εξοπλισμένα με υψηλής απόδοσης τέτοιους υαλοπίνακες (διοξειδίου του βαναδίου) είναι πολύ πιθανό να βρουν τελικά μεγάλη εφαρμογή στα κτίρια στο άμεσο μέλλον. Αυτό είναι τόσο πιθανότερο, όσο η σχετική έρευνα θα βελτιώνει ακόμα περισσότερο την αποδοτικότητά τους και όσο αυτοί θα μπορούν να προσφερθούν από τους κατασκευαστές σε ανταγωνιστικές τιμές συγκριτικά με άλλους υαλοπίνακες υψηλής ενεργειακής απόδοσης.

## 5 Εισαγωγή στο λογισμικό EnergyPlus και στην ενεργειακή μελέτη κτιρίων με θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες

Στο κεφάλαιο αυτό αρχικά γίνεται αναφορά στην έννοια της ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων και σε σχετικά προγράμματα Η/Υ, ενώ ακολουθεί εισαγωγή στο λογισμικό EnergyPlus και ανάλυση του πώς αυτό μοντελοποιεί τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με αναφορά σε σχετικές έρευνες που έχουν γίνει για τη διερεύνηση της επίδρασης των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων.

### 5.1 Ενεργειακή προσομοίωση κτιρίων

Ενεργειακή προσομοίωση κτιρίων (building energy simulation) ονομάζεται η χρήση μεθόδων προσομοίωσης με τη βοήθεια λογισμικών ηλεκτρονικών υπολογιστών για την ανάλυση της ενεργειακής αποδοτικότητας και τον προσδιορισμό των ενεργειακών φορτίων ενός κτιρίου.

Οι βασικές πληροφορίες που χρειάζονται τα εργαλεία ενεργειακής προσομοίωσης είναι κατά βάση οι ίδιες που απαιτούνται στον απλό υπολογισμό ενεργειακών απωλειών. Επιπλέον, στην ενεργειακή προσομοίωση είναι απαραίτητη η συλλογή κλιματικών δεδομένων της περιοχής του κτιρίου, αλλά και πληροφοριών που αφορούν τον βασικό σχεδιασμό και προσανατολισμό του. Ένα τυπικό μοντέλο περιλαμβάνει δεδομένα εισόδου για:

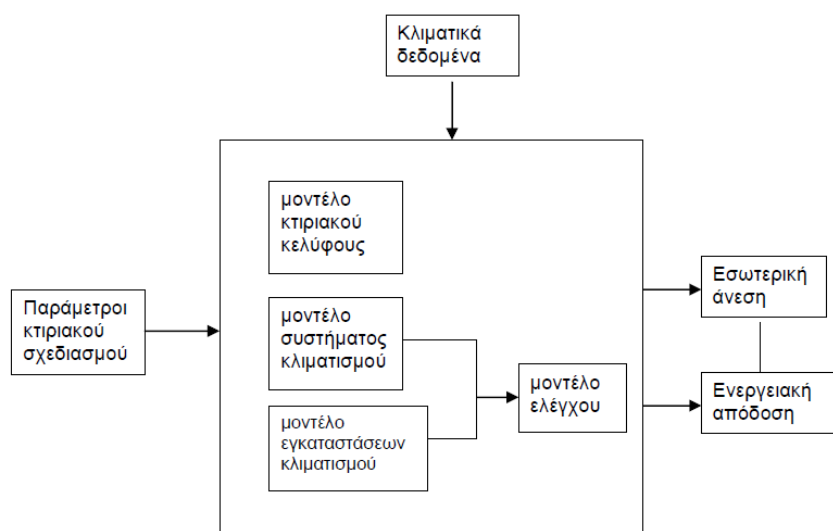
- το κτιριακό κέλυφος (γεωμετρία, προσανατολισμός, κατασκευή και τυχούσα ύπαρξη εξωτερικής σκίασης), με τον παράλληλο διαχωρισμό του κτιρίου σε θερμικές ζώνες και τον ορισμό του χρονικού προγράμματος λειτουργίας και χρήσης του
- τις καιρικές συνθήκες στην περιοχή του κτιρίου
- τα εσωτερικά θερμικά κέρδη από τεχνητό φωτισμό, ανθρώπους, συσκευές και εξοπλισμό και τα αντίστοιχα προγράμματα που καθορίζουν τη χρονική διακύμανση των κερδών αυτών
- την ανανέωση του αέρα του εσωτερικού χώρου με φυσικό αερισμό (natural ventilation) και τη διείσδυση του αέρα από τα στοιχεία του κτιριακού κελύφους (infiltration) και τα αντίστοιχα προγράμματα που καθορίζουν τη χρονική τους διακύμανση
- τα συστήματα θέρμανσης, εξαερισμού και κλιματισμού (heating, ventilating and air conditioning – HVAC) και τις επιθυμητές συνθήκες του εσωτερικού περιβάλλοντος που καθορίζουν τη λειτουργία τους
- την τυχούσα παρουσία διάφορων άλλων συστημάτων στο κτίρια (π.χ. ενεργητικά ηλιακά συστήματα)
- τις διάφορες παραμέτρους που καθορίζουν τη λειτουργία και τους υπολογισμούς του λογισμικού Η/Υ που χρησιμοποιείται

Ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δοθεί στη συλλογή κλιματικών δεδομένων, τα οποία ιδανικά πρέπει να αναφέρονται σε περίοδο ενός χρόνου και οι τιμές να έχουν κατά προτίμηση τουλάχιστον ωριαίο βήμα. Μια προσομοίωση γενικά απαιτεί διάφορα σετ κλιματικών παραμέτρων, όπως: ηλιακής ακτινοβολίας, θερμοκρασίας, υγρασίας, ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου, ατμοσφαιρικής πίεσης, ατμοσφαιρικών κατακρημνίσεων κ.λπ. Όλα αυτά τα δεδομένα συνήθως αναφέρονται σε περίοδο μίας τυπικής χρονιάς. Συνήθως οι μετρήσεις αυτές, για να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές, πρέπει να διαρκούν πολλά χρόνια.

Με δεδομένα τα παραπάνω στοιχεία, προκύπτει μια δυναμική προσομοίωση της ενεργειακής κατανάλωσης του κτιρίου, που βασίζεται στις διακυμάνσεις των εξωτερικών κλιματικών συνθηκών, σε σχέση πάντα με τα εσωτερικά κριτήρια σχεδιασμού του κλιματισμού (θέρμανση, ψύξη, αερισμός, ύγρανση, αφύγρανση), καθώς και το προφίλ των εσωτερικών θερμικών κερδών. Ως αποτέλεσμα, μπορεί να καθοριστεί αναλυτικά η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου για 8760 ώρες σε ένα ή και περισσότερα έτη. Ενδιαφέρον επίσης παρουσιάζει, εκτός από τα μερικά επιμέρους φορτία κατανάλωσης ενέργειας και το μέγιστο ψυκτικό ή θερμικό φορτίο (peak cooling or heating load) στη διάρκεια του έτους, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη διαστασιολόγηση των συστημάτων HVAC. Αυτού του είδους η ανάλυση επιτρέπει τη διερεύνηση του ρόλου διαφόρων παραγόντων στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου και τη λήψη κατάλληλων αποφάσεων για ενέργειες που θα βοηθήσουν στη βελτίωση του ενεργειακού ισοζυγίου του. Εκτός από την εξαγωγή αποτελεσμάτων ενεργειακών μεγεθών, πολλά λογισμικά παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού και του κόστους της ενέργειας (μέσω της εισαγωγής της διατίμησης των λογαριασμών κοινής ωφελείας), καθώς και υπολογισμών ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής.

Κατά την ανάλυση του κτιρίου συνήθως περισσότερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ενεργειακή κατανάλωση του συστήματος κλιματισμού, επιπλέον όμως η δυναμική προσομοίωση μπορεί επίσης να εκτιμήσει την κατανάλωση ενέργειας και άλλων κτιριακών συστημάτων, όπως ο φωτισμός, τυχόν υπάρχοντες αυτοματισμοί, ανελκυστήρες κ.λπ. – και βέβαια τη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Ο μηχανισμός προσομοίωσης περιλαμβάνει την ανάλυση τεσσάρων βασικών μοντέλων: το μοντέλο του κτιριακού κελύφους, το μοντέλο του συστήματος κλιματισμού, το μοντέλο εγκαταστάσεων κλιματισμού που προκύπτει και το μοντέλο ελέγχου. Το παρακάτω διάγραμμα συνοψίζει σχηματικά τις βασικότερες συνιστώσες της ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων:



**Σχήμα 5.1: Οι βασικότερες συνιστώσες της ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων.**

Η εκπόνηση κτιριακών ενεργειακών προσομοιώσεων γίνεται με τη χρήση λογισμικών ηλεκτρονικών υπολογιστών που διακρίνονται κυρίως σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά εργαλεία συνήθως αρκετά πολύπλοκα, ανεπτυγμένα ή διακινούμενα από πανεπιστήμια ή δημόσιους οργανισμούς που χρησιμοποιούνται κυρίως για ερευνητικούς σκοπούς, όπως τα: EnergyPlus, DOE-2, BLAST, ESP-r, TRNSYS. Η δεύτερη κατηγορία αφορά λογισμικά ανεπτυγμένα ή διακινούμενα από εμπορικές εταιρείες, που συνήθως έχουν πιο εύκολη χρήση και πιο φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον και χρησιμοποιούνται κυρίως για εργασιακούς σκοπούς, όπως τα: eQUEST, TRACE 700, Ecotect, Green Building Studio. Άλλα από όλα αυτά τα προγράμματα διατίθενται δωρεάν και άλλα επί πληρωμή.

Συμπερασματικά, η βασική διαδικασία ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων αφορά πέντε βήματα:

1. Επιλογή λογισμικού εργαλείου
2. Περιγραφή μοντέλων και έλεγχος παραδοχών
3. Προετοιμασία και εισαγωγή δεδομένων προσομοίωσης
4. Εκτέλεση προσομοίωσης σε λογισμικό
5. Ανάλυση και αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Το τελευταίο βήμα (5) αποτελεί το βασικότερο σημείο για την κατανόηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου. Η σωστή μετάφραση και ανάλυση των αποτελεσμάτων κατευθύνει τους μελετητές του κτιρίου προς τις ενέργειες που θα βελτιώσουν τη βιωσιμότητά του (Decision making). Τα παραπάνω αποτελούν το βασικό σκοπό της ενεργειακής προσομοίωσης των κτιρίων.

## 5.2 Εισαγωγή στο EnergyPlus

### 5.2.1 Γενική περιγραφή – χαρακτηριστικά προγράμματος

Το EnergyPlus είναι ένα ελεύθερο λογισμικό Η/Υ (freeware), ανοιχτού κώδικα (open source) και ανεξάρτητο πλατφόρμας (cross-platform), που αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α., αποσκοπώντας στην προσομοίωση και την ενεργειακή ανάλυση κτιρίων. Το λογισμικό αυτό ξεκίνησε να αναπτύσσεται το 1997, ενώ εκδόθηκε για πρώτη φορά τον Απρίλιο του 2001. Το EnergyPlus επί του παρόντος χρηματοδοτείται από το Γραφείο Τεχνολογιών Κτιρίων του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. (U.S. Department of Energy's Building Technologies Office) και το διαχειρίζεται το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των Η.Π.Α. (National Renewable Energy Laboratory – NREL). Το λογισμικό αναπτύσσεται και βελτιώνεται συνεχώς, με τη συνεργασία του NREL, διαφόρων Εθνικών Εργαστηρίων του Υπουργείου Ενέργειας, ακαδημαϊκών ιδρυμάτων και ιδιωτικών επιχειρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια συνήθως υπήρχε έκδοση κύριων εκδόσεων του λογισμικού δύο φορές το χρόνο, με προσθήκη νέων στοιχείων και επιδιόρθωση σφαλμάτων. Ο πηγαίος κώδικας της εσωτερικής υπολογιστικής μηχανής του EnergyPlus αρχικά γράφτηκε σε FORTRAN90. Πρόσφατα, η εταιρεία Autodesk ανέλαβε τη μετάφραση των περισσότερων από 700.000 γραμμών του κώδικα σε γλώσσα C++, την πραγματοποίησε μαζί με την εταιρεία Objexx και δώρισε τον νέο κώδικα στο Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α τον Νοέμβριο του 2013. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα, μεταξύ άλλων, αύξηση κατά 20% στην ταχύτητα υπολογισμών και πολύ καλύτερη λειτουργικότητα σε συνεργασία με προγράμματα Μοντελοποίησης Κτιριακής Πληροφορίας (Building Information Modeling - BIM). Η πρώτη έκδοση του EnergyPlus με πηγαίο κώδικα σε γλώσσα C++ ήταν η 8.2.0, τον Οκτώβριο του 2014.

Βασισμένο στην αναλυτική περιγραφή από το χρήστη των γεωμετρικών και δομικών χαρακτηριστικών του μοντέλου του κτιρίου, των εσωτερικών θερμικών κερδών, των συστημάτων HVAC, των κλιματολογικών χαρακτηριστικών της περιοχής που βρίσκεται το κτίριο και άλλων στοιχείων, το EnergyPlus έχει τη δυνατότητα υπολογισμού πληθώρας αποτελεσμάτων, όπως η ενεργειακή κατανάλωση του κτιρίου, οι θερμοκρασίες των θερμικών ζωνών ή/και επιφανειών του κτιρίου, τα ψυκτικά και θερμικά φορτία που απαιτούνται για να καλυφθούν οι ψυκτικές και θερμικές απαιτήσεις του κτιρίου, η κατανάλωση νερού κ.λπ., καθώς και άλλες λεπτομέρειες της προσομοίωσης που είναι απαραίτητες ώστε να επικυρώνεται ότι το μοντέλο της προσομοίωσης θα συμπεριφέρεται όπως και το πραγματικό κτίριο.

Το EnergyPlus βασίζεται στα λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης BLAST (Building Loads Analysis and Systems Thermodynamics) και DOE-2 (Department of Energy-2) που αναπτύχθηκαν και εκδόθηκαν στα τέλη της δεκαετίας του 1970 με αρχές της δεκαετίας του 1980. Παρ' όλα αυτά έχει καταφέρει να αντιμετωπίσει πολλές από τις αδυναμίες των παραπάνω λογισμικών, εφαρμόζοντας καινοτόμες μεθόδους προσομοίωσης, όπως για παράδειγμα:

- Ολοκληρωμένη και ταυτόχρονη επίλυση των συνθηκών των θερμικών ζωνών και της απόκρισης των συστημάτων HVAC, που δεν υποθέτει ότι τα συστήματα αυτά μπορούν πάντοτε να ανταποκριθούν στα φορτία των θερμικών ζωνών.
- Δυνατότητα ορισμού από το χρήστη χρονικών βημάτων μικρότερων από μία ώρα για τους υπολογισμούς των αλληλεπιδράσεων μεταξύ θερμικών ζωνών και εξωτερικού περιβάλλοντος (το στοιχείο αυτό είναι σημαντικό του πλεονέκτημα γενικά σε σχέση με άλλα λογισμικά ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίων). Προσομοίωση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των συστημάτων HVAC με τις θερμικές ζώνες με αυτομάτως μεταβαλλόμενο (ρυθμιζόμενο) χρονικό βήμα (για την σίγουρη εξασφάλιση της ευστάθειας της λύσης). Αυτά επιτρέπουν τη μοντελοποίηση συστημάτων με έντονα δυναμικά χαρακτηριστικά, με παράλληλη θυσία υπολογιστικού χρόνου προς χάρην μεγάλης ακρίβειας.
- Μοντέλο ανισοτροπικού ουρανού για βελτιωμένο υπολογισμό της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένες επιφάνειες.
- Εξελιγμένα μοντέλα υαλοπινάκων, μεταξύ των οποίων θερμοχρωμικοί και ηλεκτροχρωμικοί υαλοπίνακες, ρυθμιζόμενα είδη εσωτερικής σκίασης και στρώμα-προς-στρώμα θερμοικοί ισολογισμοί, που επιτρέπουν τον υπολογισμό την ηλιακής ενέργειας που απορροφάται από τα φύλλα των υαλοπινάκων. Επίσης, ύπαρξη βιβλιοθήκης με στοιχεία για πληθώρα εμπορικά διαθέσιμων υαλοπινάκων.
- Υπολογισμοί φωτισμού και θάμβωσης για την αναφορά των επιπέδων οπτικής άνεσης και τον έλεγχο του τεχνητού φωτισμού.
- Ύπαρξη συνδυασμένου μοντέλου μεταφοράς θερμότητας και μάζας, το οποίο υπολογίζει την απορρόφηση-αποβολή υγρασίας από κάθε στρώμα επιφάνειας του κτιρίου.
- Μοντέλα συνδυασμού μεταφοράς θερμότητας και μάζας, που λαμβάνουν υπόψιν και την κίνηση του αέρα μεταξύ θερμικών ζωνών.
- Επίλυση με θερμοικό ισολογισμό φαινομένων μεταφοράς θερμότητας με αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία, που καθορίζουν τις θερμοκρασίες των επιφανειών και τη θερμική άνεση, καθώς και υπολογισμοί επιφανειακών συμπυκνώσεων υδρατμών.
- Δυνατότητα υπολογισμών εκπομπής ατμοσφαιρικών ρύπων (π.χ. CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC κ.ά.).
- Προσομοίωση με συστήματα HVAC τόσο συμβατικά, όσο και τελευταίας τεχνολογίας.
- Ποικιλία στρατηγικών ελέγχου των συστημάτων HVAC και του τεχνητού φωτισμού.
- Βελτιωμένη μοντελοποίηση της μετάδοσης θερμότητας μέσω του εδάφους, μέσω συνδέσμων σε μοντέλα πεπερασμένων διαφορών σε τρεις διαστάσεις και απλοποιημένων αναλυτικών τεχνικών.
- Εισαγωγή και εξαγωγή λειτουργικών γραφικών διεπαφών, για τη συνεργασία στην προσομοίωση με άλλες μηχανές προσομοίωσης.
- Δυνατότητα συνεργασίας με άλλα δημοφιλή λογισμικά, όπως το WINDOW και το Delight, ώστε να επιτρέπεται η περισσότερο λεπτομερής ανάλυση των στοιχείων του κτιριακού κελύφους και κτιρίου γενικά.



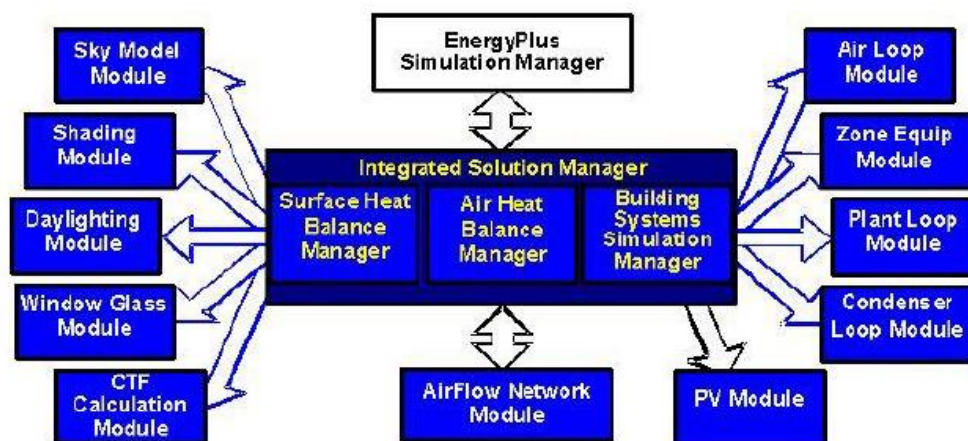
- Τυπική αναφορά αθροιστικών και άλλων λεπτομερών αποτελεσμάτων, όπως και εξαγωγή αναφορών αποτελεσμάτων οριζόμενων από το χρήστη με επιλεγόμενη χρονική ανάλυση από ετήσια έως υπο-ωριαία συχνότητα, με δυνατή εφαρμογή πολλαπλασιαστών για υπολογισμό της πρωτογενούς ενέργειας.

Το EnergyPlus αποτελείται από πολλές ενότητες προγραμματισμού, οι οποίες μέσω της συνεργασίας μεταξύ τους δίνουν τα ζητούμενα από τον μελετητή αποτελέσματα. Η δομή του προγράμματος ακολουθεί μια φιλοσοφία τύπου “ύπαρξης διαχειριστή” (manager). Αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα αποτελείται από πολλά τμήματα, τα οποία όταν απεικονιστούν γραφικά παριστάνουν ένα ανεστραμμένο δέντρο, όπου κάθε κλάδος έχει τον έλεγχο του πότε οι κλάδοι που βρίσκονται κάτω από αυτόν θα κληθούν προς χρήση. Αυτό μοιάζει πολύ με ένα οργανόγραμμα όπου η διαχείριση των λειτουργιών των υπαλλήλων προχωρά σε μια αλυσίδα εντολών, μέχρι να φτάσει στον “διευθύνοντα σύμβουλο - CEO” της προσομοίωσης. Στο EnergyPlus, μια υπορουτίνα που ονομάζεται ManageSimulation έχει τον ρόλο του “CEO”. Αυτή η υπορουτίνα ελέγχει τη λειτουργία τεσσάρων από τους πέντε βρόχους της προσομοίωσης – δηλαδή τα χρονικά βήματα του περιβάλλοντος, της ημέρας, της ώρας και υπο-ώρας, ενώ το χρονικό βήμα των συστημάτων HVAC ελέγχεται από τον HVAC manager. Επιπρόσθετα, η υπορουτίνα αυτή ελέγχει την κατάσταση της προσομοίωσης, έτσι ώστε κάθε μέρος του προγράμματος να γνωρίζει πότε πρέπει να διαβάσει δεδομένα εισόδου, να κάνει αρχικοποίηση, να αναφέρει αποτελέσματα κ.λπ. Η φιλοσοφία αυτή της δομής του λογισμικού καθιστά τους συνδέσμους μεταξύ των υπομονάδων του προγράμματος απλούς και σαφείς και οι προγραμματιστές δεν χρειάζεται πλέον να ανησυχούν για ύπαρξη κρυφών και απροσδόκητων συνδέσεων μεταξύ των υπορουτίνων.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα του EnergyPlus σε σχέση με τα λογισμικά στα οποία βασίστηκε είναι ότι ο κώδικας (code) μπορεί να είναι πολύ περισσότερο αντικειμενοστρεφής (object-oriented) και αρθρωτός (modular) στη φύση του. Το κύριο πλεονέκτημα αυτού είναι ότι οι ερευνητές μπορούν να αναπτύσσουν ενθέματα (modules) κώδικα ταυτόχρονα χωρίς να επεμβαίνουν σε άλλα ενθέματα υπό ανάπτυξη και χωρίς να απαιτείται σημαντική γνώση της δομής ολόκληρου του προγράμματος. Αυτό οδηγεί σε ευρέως διαδεδομένη γνώση και ανάπτυξη μοντέλων του προγράμματος. Τα δύο αυτά στοιχεία του προγράμματος που αναφέρονται στις τελευταίες δύο παραγράφους επιλύουν τα προβλήματα της μη ύπαρξης πολλών ειδικών που συμβαδίζουν με την τεχνολογία και του σημαντικού χρόνου και κόστους που απαιτούνταν παλαιότερα για να συμβαδίζει κάποιος με τη γνώση των επιπρόσθετων στοιχείων που έμπαιναν σε ένα πρόγραμμα. Επιπλέον, με αυτά επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση του αριθμού των προγραμματιστών που ολοκληρώνουν την εργασία τους μέσα στο EnergyPlus, μέσω ανάπτυξης νέων προγραμματιστικών δομών, με την ελάχιστη επένδυση πόρων, με αποτέλεσμα την ενσωμάτωση νέων δυνατοτήτων στο λογισμικό – το οποίο ενισχύεται σημαντικά και από το ότι ο κώδικας είναι ανοιχτός (open source).

Ένα από τα δυνατά σημεία του EnergyPlus είναι η ενσωμάτωση όλων των πλευρών μιας προσομοίωσης (π.χ. φορτία, συστήματα HVAC και εγκαταστάσεις που

αυτά χρησιμοποιούν για τη λειτουργία τους, όπως σωληνώσεις, αεραγωγοί κ.λπ.) και η άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η προσομοίωση να είναι ενοποιημένη και ο ερευνητής/σχεδιαστής να έχει τη δυνατότητα της περισσότερο ακριβούς διερεύνησης του αποτελέσματος της διαστασιολόγησης των συστημάτων HVAC, για παράδειγμα πάνω στη θερμική άνεση των χρηστών του κτιρίου. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει μια βασική επισκόπηση της ενσωμάτωσης και αλληλεπίδρασης όλων αυτών των σημαντικών στοιχείων μιας ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίου:



Σχήμα 5.2: Σχηματική απεικόνιση πυρήνα διαχείρισης προσομοίωσης του EnergyPlus.

Οι δυνατότητες του λογισμικού αυτού είναι πάρα πολλές, όμως (όπως κάθε πρόγραμμα Η/Υ) παρουσιάζει και αδυναμίες. Όπως όλα τα προγράμματα προσομοίωσης, δεν είναι ικανό να διαχειρίζεται την προσομοίωση οποιασδήποτε κατάστασης. Ωστόσο, στόχος του είναι να μπορεί να αντιμετωπίσει όσο το δυνατόν περισσότερες περιπτώσεις κτιρίων και εγκαταστάσεων HVAC, είτε άμεσα, είτε έμμεσα μέσω συνεργασίας με επιπλέον βοηθητικά προγράμματα. Ενώ η πρώτη έκδοση του προγράμματος περιείχε κυρίως χαρακτηριστικά άμεσα συσχετιζόμενα με τις θερμικές ιδιότητες των κτιρίων, οι νεότερες εκδόσεις περιλαμβάνουν και άλλες έννοιες που είναι σημαντικές για το περιβάλλον ενός κτιρίου, όπως ηλεκτρικά συστήματα, συστήματα ύδρευσης κ.λπ.

Αν και είναι λοιπόν σημαντικό να σημειώνεται το τι είναι (τι περιέχει) το EnergyPlus, πρέπει επίσης να υπενθυμίζεται και το τι δεν είναι:

- Το EnergyPlus δεν προσφέρει διεπαφή χρήστη (user interface). Προορίζεται για να είναι η μηχανή προσομοίωσης γύρω από την οποία ένα άλλο πρόγραμμα θα λειτουργεί, δανείζοντας το γραφικό του περιβάλλον. Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου είναι απλά αρχεία κειμένου ASCII που είναι κατανοητά, αλλά είναι καλύτερο να είναι διαχειρίσιμα μέσω γραφικής διεπαφής χρήστη (graphical user interface – GUI).
- Το EnergyPlus προς το παρόν δεν είναι εργαλείο υπολογισμών ανάλυσης κόστους κύκλου ζωής. Παράγει όμως αποτελέσματα που μπορούν να

τροφοδοτήσουν ένα τέτοιο πρόγραμμα, εάν τέτοιοι υπολογισμοί είναι επιθυμητοί.

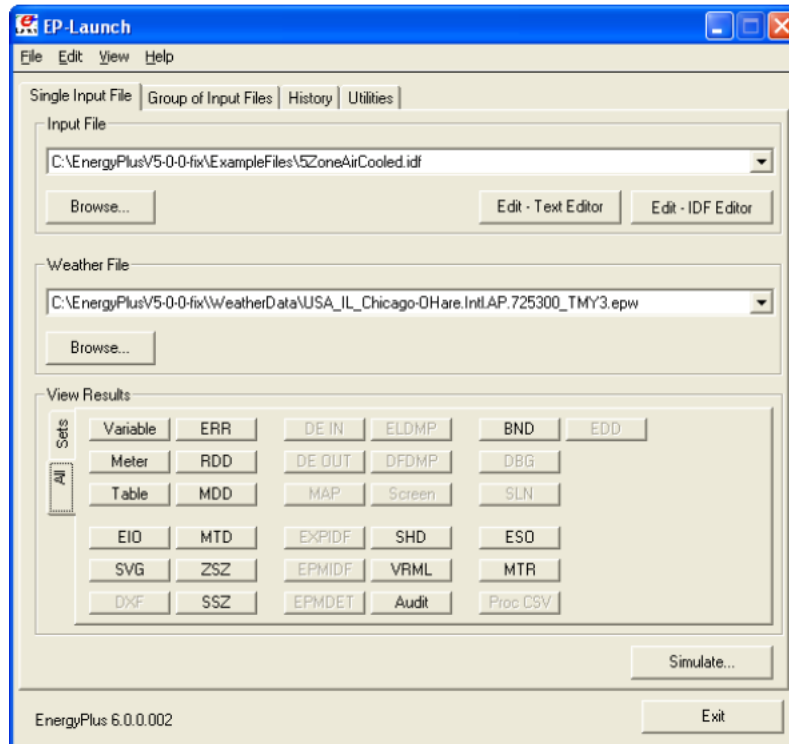
- Το EnergyPlus δεν αντικαθιστά τους μηχανικούς. Δεν ελέγχει τα δεδομένα εισόδου, δεν επαληθεύει την αποδοχή του εύρους διαφόρων παραμέτρων και δεν επιχειρεί τη μετάφραση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων. Αν και διάφορα GUI προγράμματα μπορούν να βοηθούν το χρήστη στη σωστή ρύθμιση των δεδομένων εισόδου και διόρθωση των λαθών, το EnergyPlus λειτουργεί υπό την αρχή του “garbage in, garbage out”. Οπότε οι μηχανικοί είναι πάντοτε ένα ζωτικό μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού και ανάλυσης.

### 5.2.2 Εισαγωγή και εξαγωγή δεδομένων στο/από το λογισμικό

Όπως αναφέρεται και παραπάνω, το EnergyPlus είναι μια μηχανή προσομοίωσης και σχεδιάστηκε ώστε να μπορεί να είναι ένα στοιχείο μέσα σε ένα σύστημα προγραμμάτων, τα οποία περιλαμβάνουν γραφική διεπαφή χρήστη (user interface). Για παράδειγμα, δημοφιλή user interfaces είναι το πρόγραμμα DesignBuilder, το Simergy, το BEopt, το Sefaira και η σουίτα προγραμμάτων OpenStudio. Ωστόσο, το EnergyPlus μπορεί να χρησιμοποιηθεί και χωρίς τέτοια διεπαφή, με εκτέλεση αρχείων batch. Όπως όλα τα προγράμματα προσομοίωσης, το EnergyPlus αποτελείται από περισσότερα του ενός εκτελέσιμα αρχεία. Απαιτεί διάφορα αρχεία εισόδου, που περιγράφουν το μοντέλο του κτιρίου και το περιβάλλον του. Το πρόγραμμα παράγει διάφορα αρχεία εξόδου, που χρειάζονται ερμηνεία ή περαιτέρω επεξεργασία σε σκοπό την εξαγωγή των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων της προσομοίωσης. Ακόμη και στη stand-alone μέθοδο, το πρόγραμμα συνήθως δεν εκτελείται “μηχανικά”, αλλά μέσω ενός αρχείου που καθορίζει τη διαδικασία (procedure file) και αναλαμβάνει την εύρεση των αρχείων εισόδου και την αποθήκευση ή την περαιτέρω επεξεργασία των αρχείων εξόδου.

Για την επιβοήθηση των ανωτέρω, με την εγκατάσταση του EnergyPlus σε λειτουργικό σύστημα Windows (αυτό δεν είναι διαθέσιμο για άλλα λειτουργικά συστήματα) εγκαθίσταται μια προαιρετική συνιστώσα του πακέτου του λογισμικού που ονομάζεται EP-Launch και παρέχει μια υποτυπώδη γραφική διεπαφή χρήστη. Το EP-Launch προσφέρει στους χρήστες έναν απλό τρόπο επιλογής των σχετικών αρχείων και εκτέλεσης του EnergyPlus, αλλά και άλλων επιπρόσθετων εργασιών. Επιπρόσθετα, το περιβάλλον του EP-Launch μπορεί να βοηθήσει στο άνοιγμα ενός προγράμματος συντάκτη κειμένου για επισκόπηση και επεξεργασία των αρχείων εισόδου και εξόδου, στο άνοιγμα λογιστικών φύλλων για την επισκόπηση μετα-επεξεργασμένων αρχείων αποτελεσμάτων, στο άνοιγμα προγράμματος περιήγησης στο διαδίκτυο για την επισκόπηση αρχείων αποτελεσμάτων σε μορφή πίνακα και στο άνοιγμα προγράμματος επισκόπησης για αρχεία σχεδίων. Το EP-Launch δηλαδή απλώς υποβοηθά την εκτέλεση άλλων προγραμμάτων και επιτρέπει την αποφυγή ανάγκης χρήσης της γραμμής εντολών DOS για την εκτέλεση του EnergyPlus.

Στην παρούσα εργασία, για την προσομοίωση του κτιρίου που μελετήθηκε, χρησιμοποιήθηκε αυτός ο τρόπος εισαγωγής δεδομένων, εκτέλεσης του EnergyPlus και εξαγωγής αποτελεσμάτων (EP-Launch) – βλέπε Κεφάλαιο 6.



**Σχήμα 5.3: Περιβάλλον του EP-Launch.**

Ακολουθεί παράθεση της σημασίας διαφόρων (των πιο βασικών και σημαντικών) αρχείων που σχετίζονται με το πρόγραμμα:

Το λεξικό δεδομένων εισόδου IDD (input data dictionary - .idd) είναι ένα αρχείο κειμένου ASCII (text) που περιέχει έναν κατάλογο όλων των πιθανών αντικειμένων (objects) του EnergyPlus και τον προσδιορισμό των δεδομένων που κάθε αντικείμενο χρειάζεται. Η πιθανή ανάγνωσή του μπορεί λοιπόν ενδεχομένως να διευκολύνει τον χρήστη κατά την εισαγωγή των αντικειμένων που αποτελούν το μοντέλο. Το αρχείο αυτό βρίσκεται στον κύριο φάκελο εγκατάστασης του EnergyPlus.

Το αρχείο δεδομένων εισόδου IDF (input data file - .idf) του λογισμικού, για μια προσομοίωση, είναι αρχείο κειμένου ASCII (text) που περιέχει τα δεδομένα (αντικείμενα) που περιγράφουν το κτίριο και τα συστήματα HVAC κ.λπ. προς προσομοίωση.

Το αρχείο καιρού του EnergyPlus (EnergyPlus weather file – .epw) είναι ένα αρχείο εισόδου (κειμένου) ASCII (text) που περιέχει τα ωριαία ή υπο-ωριαία δεδομένα καιρικών συνθηκών για την περιοχή τοποθεσίας του κτιρίου μελέτης, που απαιτούνται για την προσομοίωση. Το κάθε αρχείο (αφού υπάρχουν αρχεία για διάφορες περιοχές) περιέχει πληροφορίες για μια συγκεκριμένη περιοχή στην οποία

αναφέρεται, καθώς και ωριαίες τιμές κλιματικών παραμέτρων της εξεταζόμενης περιοχής, όπως: θερμοκρασία περιβάλλοντος (ξηρού βολβού), συνολική ηλιακή ακτινοβολία, ατμοσφαιρική πίεση, ταχύτητα και κατεύθυνση ανέμου, συνολικό και διάχυτο φως, σχετική υγρασία, νεφοσκίαση, ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις κ.λπ. Η αντιστοίχιση των ωριαίων αυτών τιμών με έναν συνεχή τρόπο για το πρόγραμμα με το χρονικό βήμα (όπου τα χρονικά βήματα μπορεί να είναι και μικρότερα της μίας ώρας), επιτυγχάνεται εάν αυτό είναι απαραίτητο με απλή γραμμική παρεμβολή μεταξύ μιας ώρας του παρόντος και της παρελθοντικής της (“Last Hour Interpolation”). Το κάθε αρχείο καλύπτει ένα τυπικό κλιματικό έτος. Υπάρχει για κάθε περιοχή και σχετικό αρχείο .stat που περιλαμβάνει σύνοψη στατιστικών στοιχείων του αρχείου .erw. Επίσης υπάρχει και σχετικό αρχείο .ddy (design day - .ddy) που περιέχει αντικείμενα προς εισαγωγή στο αρχείο .idf, που αφορούν ειδικές τυπικές ημέρες σχεδιασμού (ακραία κλιματικά δεδομένα) για τον υπολογισμό των φορτίων σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται στην (συνήθως προτιμότερη) αυτόματη διαστασιολόγηση (design) των διάφορων συστημάτων HVAC (π.χ. λέβητες, καυστήρες, ψύκτες, αντλίες θερμότητας κ.ά.), καθώς και του δευτερογενούς εξοπλισμού (π.χ. αντλίες, ανεμιστήρες κ.ά.). Τα κλιματικά αρχεία που είναι διαθέσιμα για τη χώρα μας είναι της μορφής IWEC (International Weather for Energy Calculation) και είναι το αποτέλεσμα του ASHRAE Research Project 1015 που εκτελέστηκε από την ASHRAE Technical Committee 4.2. Η δημιουργία των αρχείων IWEC πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια. Πρώτα, συλλέχθηκαν κλιματικά δεδομένα 18 ετών από το National Climatic Data Center, Asheville, NC. Έπειτα έγινε επεξεργασία των δεδομένων αυτών και προέκυψαν δώδεκα τυπικοί μετεωρολογικοί μήνες, μέσω των οποίων δημιουργήθηκαν τα κλιματικά αρχεία IWEC. Κάποια αρχεία (για περιοχές των Η.Π.Α.) υπάρχουν από την εγκατάσταση του προγράμματος, σε σχετικό φάκελο του σκληρού δίσκου του Η/Υ, ενώ τα υπόλοιπα (για διάφορες περιοχές του πλανήτη) βρίσκονται στην ιστοσελίδα του EnergyPlus στο διαδίκτυο, διαθέσιμα προς μεταφόρτωση. Για την Ελλάδα, υπάρχουν αρχεία για την Αθήνα, τη Θεσσαλονίκη και την Ανδραβίδα.

Το αρχείο .err, που είναι αρχείο (κειμένου - text) εξόδου, είναι ένα αρχείο κειμένου που περιέχει τα μηνύματα σφαλμάτων που πιθανώς εκδίδονται από το πρόγραμμα κατά τη φάση ανάγνωσης από αυτό των εισαχθέντων δεδομένων ή κατά την εκτέλεση. Αυτό είναι το πρώτο αρχείο εξόδου που πρέπει να εξετάζεται από τον χρήστη μετά από μία προσομοίωση. Υπάρχουν τρία επίπεδα σοβαρότητας των σφαλμάτων, που κατά φθίνουσα σειρά δριμύτητας είναι: μοιραία, αυστηρά και προειδοποιήσεις. Στο αρχείο αυτό υπάρχουν και απλές γραμμές πληροφοριών. Ένα μοιραίο σφάλμα προκαλεί τον άμεσο τερματισμό της προσομοίωσης.

Το τυπικό αρχείο εξόδου του EnergyPlus (EnergyPlus Standard Output – .eso) είναι ένα αρχείο κειμένου (text) που περιέχει τα χρονικά μεταβαλλόμενα δεδομένα εξόδου της προσομοίωσης. Τα περιεχόμενα του αρχείου προαποφασίζονται από τον χρήστη μέσω της επεξεργασίας του σχετικού αντικειμένου (object) στο αρχείο .idf. Αν και το αρχείο αυτό είναι ένα αρχείο κειμένου, δεν είναι εύκολα ερμηνεύσιμο από έναν άνθρωπο. Συνήθως γίνεται μετα-επεξεργασία (postprocessing) στο αρχείο αυτό, με

σκοπό τη δημιουργία αρχείου με μορφή που μπορεί να αναγνωστεί από ένα πρόγραμμα επεξεργασίας λογιστικών φύλλων (π.χ. Microsoft Excel). Βέβαια, μια γρήγορη οπτική επισκόπηση του αρχείου μπορεί να δείξει εάν οι αναμενόμενες μεταβλητές εξόδου περιέχονται σε αυτό και μάλιστα με το επιθυμητό χρονικό βήμα αναφοράς (αυτό μπορεί προφανώς να διαφέρει από το χρονικό βήμα των υπολογισμών).

Με τη μετα-επεξεργασία του αρχείου .eso μπορεί να εξαχθεί όπως αναφέρεται παραπάνω ένα αρχείο με μορφή αναγνώσιμη από πρόγραμμα επεξεργασίας λογιστικών φύλλων (με σειρές και στήλες), το οποίο έχει την κατάληξη .csv (comma separated variable). Αυτό το αρχείο είναι δηλαδή έτοιμο προς επισκόπηση και επεξεργασία των δεδομένων του από τον μελετητή.

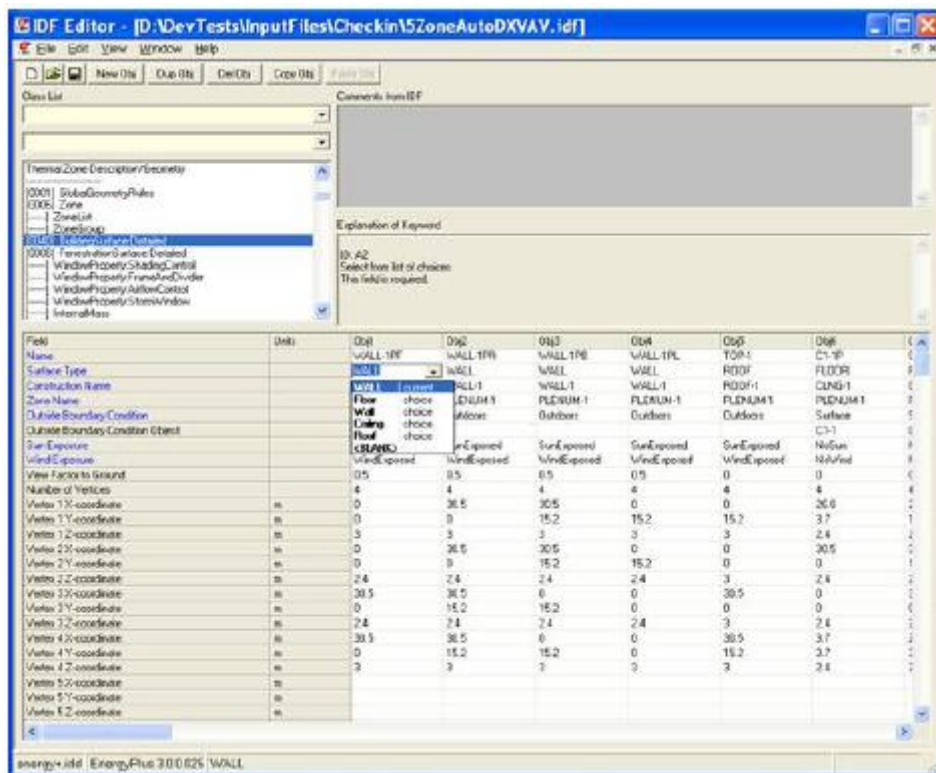
Υπάρχει και η δυνατότητα εξαγωγής από το πρόγραμμα αρχείου .html, που μπορεί να αναγνωστεί με τυπικά προγράμματα περιήγησης στο διαδίκτυο. Αυτό το αρχείο μπορεί να περιέχει μεγάλη ποικιλία δεδομένων και αποτελεσμάτων της προσομοίωσης σε πινακοποιημένη μορφή και η εξαγωγή του καθορίζεται μέσω της δημιουργίας του σχετικού αντικειμένου στο αρχείο .idf.

Το αρχείο αμετάβλητων δεδομένων εξόδου του EnergyPlus (EnergyPlus Invariant Output - .eio) (EIO) είναι ένα αρχείο κειμένου (text) που περιέχει δεδομένα εξόδου που δεν μεταβάλλονται συναρτήσει του χρόνου. Για παράδειγμα, οι πληροφορίες τοποθεσίας (γεωγραφικό πλάτος, γεωγραφικό μήκος, ζώνη ώρας, υψόμετρο) εμφανίζονται σε αυτό το αρχείο.

Το αρχείο αναφοράς (μεταβλητών) λεξικού δεδομένων [Report (variable) Data Dictionary - .rdd] είναι ένα αρχείο κειμένου (text) που καταγράφει τις μεταβλητές που είναι διαθέσιμες για αναφορά στο αρχείο .eso για μία συγκεκριμένη προσομοίωση. Το ποιες μεταβλητές είναι διαθέσιμες εξαρτάται από τη συγκεκριμένη μελέτη προσομοίωσης που περιγράφεται στο αρχείο .idf. Για παράδειγμα, ένα μοντέλο προσομοίωσης χωρίς ψύκτη (chiller) δεν θα επιτρέπει την εξαγωγή των οποιωνδήποτε μεταβλητών που αναφέρονται σε ψύκτες. Ο χρήστης μπορεί να εξετάσει το αρχείο αυτό για να βρει ποιες μεταβλητές υπάρχουν προς αναφορά, στην εκάστοτε προσομοίωση. Για την εξαγωγή του αρχείου είναι απαραίτητη η δημιουργία του σχετικού αντικειμένου στο αρχείο .idf.

Το αρχείο εισόδου του μοντέλου, που λέγεται αρχείο IDF (και έχει κατάληξη .idf), μπορεί να τροποποιηθεί μέσω επιλογής ενός από τους δύο τρόπους που υπάρχουν στο περιβάλλον του EP-Launch, στην περιοχή "Input File". Η επιλογή "Edit – Text

Editor” εκκινεί έναν επεξεργαστή κειμένου του Η/Υ για επισκόπηση του αρχείου, ενώ η επιλογή “Edit – IDF Editor” εκκινεί ένα ξεχωριστό πρόγραμμα που ονομάζεται IDF-Editor και παρέχει μια υποτυπώδη γραφική διεπαφή χρήστη. Το πρόγραμμα IDF-Editor επίσης παρέχεται (προαιρετικά) με την εγκατάσταση του EnergyPlus. Για χρήστες που επιθυμούν έναν απλό τρόπο δημιουργίας ή επεξεργασίας αρχείων IDF, το πρόγραμμα αυτό παρέχει αυτή την υπηρεσία. Είναι ένα απλό, εύχρηστο και “έξυπνο” πρόγραμμα επεξεργασίας που διαβάζει το αρχείο IDD και επιτρέπει τη δημιουργία και αναθεώρηση (τροποποίηση) αρχείων IDF. Πολλαπλά αρχεία IDF μπορούν ταυτόχρονα να ανοιχτούν από το IDF-Editor προς επεξεργασία. Το βοηθητικό αυτό πρόγραμμα μπορεί να εκτελεστεί μέσω shortcut στον κύριο φάκελο εγκατάστασης του EnergyPlus, ή μέσω του περιβάλλοντος του EP-Launch. Το IDF-Editor δεν ελέγχει τα δεδομένα εισόδου για εγκυρότητα, αν και κάποια αριθμητικά πεδία τονίζονται με χρώμα εάν είναι εκτός των προκαθορισμένων ορίων και κάποια πεδία κειμένου επίσης τονίζονται εάν περιέχουν μια άκυρη αναφορά σε άλλο πεδίο του αρχείου.



Σχήμα 5.4: Περιβάλλον του IDF-Editor.

Χαρακτηριστικό πεδίο του περιβάλλοντος του IDF-Editor είναι ο κατάλογος κατηγοριών (class list) που φαίνεται στην πάνω αριστερή γωνία της παραπάνω εικόνας. Ο κατάλογος αυτός δείχνει το πώς κατηγοριοποιούνται τα διάφορα είδη (items) του αρχείου IDF. Ο κατάλογος κατηγοριών ακολουθεί την περιγραφή του αρχείου IDD. Το πεδίο στα αριστερά μιας επιλεγμένης κατηγορίας θα περιέχει είτε το σύμβολο [-----] ώστε να υποδεικνύει ότι αυτή η κατηγορία (class) δεν περιέχει αντικείμενα (objects) στο αρχείο IDF, είτε έναν αριθμό, για παράδειγμα το [0003], ώστε να υποδεικνύει τον αριθμό των φορών που ένα αντικείμενο εμφανίζεται (φυσικά

με διαφορετικά στοιχεία κάθε φορά, αλλά του ίδιου είδους αντικείμενο) στο αρχείο IDF. Ένα σύνθηρες παράδειγμα κατηγορίας είναι η κατηγορία “Material” και τα αντικείμενα που περιέχει είναι τα βασικά υλικά κατασκευής του μοντέλου του κτιρίου και των πιθανών αντικειμένων που μπορεί να μοντελοποιούνται στο εσωτερικό του. Είναι προφανές ότι αυτή η κατηγορία είναι απαραίτητο να περιέχει αντικείμενα. Άλλη απαραίτητη κατηγορία είναι για παράδειγμα η κατηγορία “Construction”, η οποία περιέχει αντικείμενα που περιγράφουν τη στρωματοποίηση της κατασκευής των διάφορων αντικειμένων, όπως τοίχων, οροφών, δαπέδων, υαλοπινάκων κ.λπ. Ωστόσο, άλλες κατηγορίες περιέχουν αντικείμενα μόνο κατά περίπτωση και ανάλογα με το μοντέλο προς προσομοίωση – ένα παράδειγμα είναι η κατηγορία “Electric Equipment” που ανήκει στην ομάδα κατηγοριών (group) “Internal Gains” και η προσθήκη αντικειμένων σε αυτήν γίνεται μόνο εάν είναι επιθυμητή η μοντελοποίηση εσωτερικών θερμικών κερδών από ηλεκτρικό εξοπλισμό.

Οι λεπτομέρειες για κάθε αντικείμενο που ορίζεται αναπαρίστανται σε στήλες μέσα στο πλέγμα του περιβάλλοντος του IDF-Editor, όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα 5.4. Κάθε αντικείμενο αποτελείται από διάφορα πεδία τα οποία χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό του αντικειμένου αυτού. Για όσα πεδία έχουν αριθμητικό περιεχόμενο υπάρχει στην δεύτερη στήλη η μονάδα μέτρησης του αντίστοιχου μεγέθους του πεδίου. Το EnergyPlus χρησιμοποιεί για τους υπολογισμούς μεγέθη με μονάδες μέτρησης που εκφράζονται στο σύστημα SI – εάν βέβαια ο χρήστης το επιθυμεί, είναι δυνατή η εμφάνιση των μεγεθών με μονάδες στο αγγλοσαξονικό σύστημα IP. Ανάλογα με τον τύπο του πεδίου, μια αναπτυσσόμενη λίστα μπορεί να εμφανιστεί κατά την τροποποίησή του, ή να εμφανιστούν οι μέγιστες και ελάχιστες δυνατές τιμές, ή άλλες λέξεις κλειδιά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Αριθμητικά πεδία που μπορούν να διαστασιολογηθούν αυτομάτως από το πρόγραμμα, θα περιλαμβάνουν την επιλογή “autosize” στην αναπτυσσόμενη λίστα. Όταν κάποιο αντικείμενο μπορεί να συνδεθεί με κάποιο άλλο με αναφορά σε αυτό (π.χ. το αντικείμενο που αφορά ένα εσωτερικό θερμικό κέρδος με το αντικείμενο που περιγράφει το χρονικό πρόγραμμα μεταβολής των τιμών του θερμικού αυτού κέρδους), μια αναπτυσσόμενη λίστα εμφανίζεται στο κατάλληλο πεδίο του αντικειμένου. Επίσης, πολλά από τα πεδία έχουν προεπιλεγμένες (default) τιμές, οι οποίες ισχύουν ακόμα και εάν ο χρήστης αμελήσει να ορίσει τιμή σε αυτά – αυτό πολλές φορές βοηθά στην αποφυγή λαθών ή ορισμού εξωπραγματικών τιμών μεγεθών από ερασιτέχνες χρήστες. Το ίδιο ισχύει ακόμα και για αντικείμενα που δεν έχουν οριστεί από το χρήστη, σε κατηγορίες που είναι απαραίτητες για την προσομοίωση. Τέλος, υπάρχουν διάφορα διαθέσιμα αντικείμενα σε αρχεία IDF που αποτελούν βιβλιοθήκες του προγράμματος και βρίσκονται σε συγκεκριμένο υποφάκελο στον κύριο φάκελο εγκατάστασης του προγράμματος – τα αρχεία αυτά μπορούν να ανοιχτούν και μέσω ειδικής επιλογής μέσα στο περιβάλλον του IDF-Editor.

Να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι στην παρούσα εργασία για την επεξεργασία των δεδομένων εισόδου, της προσομοίωσης του κτιρίου που μελετήθηκε, χρησιμοποιήθηκε το IDF-Editor – βλέπε Κεφάλαιο 6.



Η διαδικασία προσομοίωσης ενός κτιρίου στο EnergyPlus, ξεκινάει με τη σχεδίαση της γεωμετρίας του και το διαχωρισμό αυτής σε θερμικές ζώνες, οι οποίες επικοινωνούν θερμικά τόσο μεταξύ τους, όσο και με το εξωτερικό περιβάλλον δεχόμενες τις επιδράσεις από αυτό. Φυσικά, ένα κτίριο μπορεί να είναι και μονοζωνικό. Τα εσωτερικά θερμικά κέρδη, καθώς και ο εξοπλισμός και έλεγχοι HVAC, είναι ανεξάρτητα μεγέθη και χαρακτηριστικά σε κάθε θερμική ζώνη.

Ο ορισμός των ζωνών που συνθέτουν το κτίριο γίνεται με τη δημιουργία οριζόντιων και κατακόρυφων περιμετρικών (και στις τρεις διαστάσεις) επιφανειών. Αξίζει να σημειωθεί ότι το EnergyPlus χαρακτηρίζεται ως δύσχρηστο στην περιγραφή των γεωμετρικών στοιχείων των κτιρίων, καθώς απαιτεί εισαγωγή πολλών δεδομένων, που ταυτοχρόνως είναι δύσκολα στην κατανόηση από τον χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, για παράδειγμα απαιτείται ο ορισμός από το χρήστη συντεταγμένων (στις τρεις διαστάσεις) που καθορίζουν τη σχετική θέση της αρχής των αξόνων (origin) κάθε θερμικής ζώνης σε σχέση με την αρχή των αξόνων του κτιρίου και ο ορισμός της διεύθυνσης σε σχέση με τον βορρά, καθώς και ο ορισμός των συντεταγμένων των διανυσμάτων (στις τρεις διαστάσεις) που καθορίζουν τις γωνίες των επιφανειών που απεικονίζουν τις τοιχοποιίες και τα ανοίγματα του μοντέλου του κτιρίου.

Αυτό το πρόβλημα παρακάμπτεται εύκολα, μέσω σχεδίασης της γεωμετρίας του κτιρίου με χρήση διάφορων σχεδιαστικών προγραμμάτων τύπου CAD. Με το γραφικό περιβάλλον που προσφέρουν τα προγράμματα αυτά, καθιστούν εύκολη και άμεση τη σχεδίαση της γεωμετρίας του μοντέλου του κτιρίου και την απεικόνισή του στον τρισδιάστατο χώρο, ώστε αυτή να εισαχθεί αργότερα προς χρήση για προσομοίωση με το EnergyPlus. Πολύ δημοφιλές πρόγραμμα για το σκοπό αυτό είναι το πρόγραμμα Sketchup – στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε αυτό το πρόγραμμα και περισσότερο σχετικά με αυτό αναφέρονται στο επόμενο κεφάλαιο (6) της εργασίας.

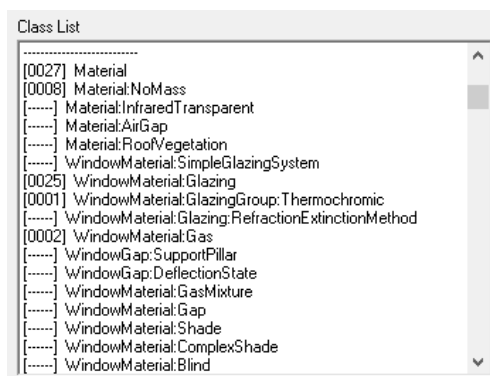
Για περισσότερα στοιχεία σχετικά με άλλους τύπους αρχείων, βοηθητικά (δευτερεύοντα) προγράμματα (utilities) του πακέτου του λογισμικού με προαιρετική χρήση (ανάλογα με τις ανάγκες και τις επιθυμίες του χρήστη) και άλλα στοιχεία και διαδικασίες του λογισμικού, ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στα διάφορα εγχειρίδια (αρχεία .pdf) που συνοδεύουν το λογισμικό και είναι διαθέσιμα και στη σχετική με αυτό ιστοσελίδα στο διαδίκτυο. Επίσης υπάρχουν στον κύριο φάκελο εγκατάστασης του λογισμικού και διάφορα αρχεία IDF παραδειγμάτων (example files) προς βοήθεια του μελετητή για στοιχεία της προσομοίωσης που τον δυσκολεύουν. Κάποια από τα χαρακτηριστικά του λογισμικού που αναφέρονται παραπάνω, καθώς και άλλα επιπρόσθετα, αναδεικνύονται με περισσότερη λεπτομέρεια και στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας, μέσω της μελέτης και της προσομοίωσης που πραγματοποιήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας.

### **5.3 Οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες στο EnergyPlus**

Η δυνατότητα άμεσης μοντελοποίησης θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στο EnergyPlus ενσωματώθηκε στο πρόγραμμα για πρώτη φορά στην έκδοση 3.1.0, που

κυκλοφόρησε τον Απρίλιο του 2009. Παλαιότερα, η μοντελοποίηση ήταν δυνατό να γίνει μόνο προσεγγιστικά και με έμμεσο τρόπο. Για παράδειγμα, ένας τρόπος θα μπορούσε να είναι η ενεργοποίηση/απενεργοποίηση ενός εξωτερικού κατακόρυφου συστήματος σκίασης μέσω ενός συστήματος ελέγχου με κατάλληλους αισθητήρες, όπου ο έλεγχος γίνεται με βάση την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στον υαλοπίνακα – που συσχετίζεται με την θερμοκρασία του υαλοπίνακα. Είναι προφανές όμως ότι ένας τέτοιος τρόπος δεν θα έδινε αποτελέσματα με μεγάλη ακρίβεια και θα έπρεπε κυρίως να χρησιμοποιηθεί μόνο ως μια πρώτη προσέγγιση στο θέμα.

Το EnergyPlus περιγράφει έναν θερμοχρωμικό υαλοπίνακα (στο σύνολό του – κατασκευή) με ένα αντικείμενο της κατηγορίας “Construction”, το οποίο στο κατάλληλο πεδίο του αναφέρεται σε αντικείμενο της κατηγορίας “WindowMaterial:GlazingGroup:Thermochromic” που περιγράφει το στρώμα (φύλλο) της κατασκευής που είναι ο θερμοχρωμικός υαλοπίνακας. Σε κατάλληλα πεδία του τελευταίου αντικειμένου υπάρχουν αναφορές σε άλλα αντικείμενα (μια σειρά αντικειμένων) της κατηγορίας “WindowMaterial:Glazing”, που το καθένα από αυτά αντιστοιχεί σε καθεμία θερμοκρασία προδιαγραφής του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα – δηλαδή θερμοκρασία στην οποία προδιαγράφονται συγκεκριμένες ιδιότητές του. Κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης του EnergyPlus, δημιουργείται μια σειρά από υαλοπίνακες των οποίων οι ιδιότητες αντιστοιχούν στις διάφορες θερμοκρασίες προδιαγραφής. Στην αρχή των υπολογισμών κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού βήματος, χρησιμοποιείται η θερμοκρασία που το θερμοχρωμικό φύλλο είχε κατά τη διάρκεια του προηγούμενου χρονικού βήματος, για την αναζήτηση της πιο κοντινής σε αυτήν θερμοκρασίας προδιαγραφής (δηλαδή δεν γίνεται γραμμική παρεμβολή), της οποίας η αντίστοιχη κατασκευή (construction) του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα στο σύνολό του θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς κατά τη διάρκεια αυτού του χρονικού βήματος. Η θερμοκρασία του θερμοχρωμικού φύλλου που υπολογίζεται (μέσω επίλυσης ακριβούς θερμικού ισολογισμού στην επιφάνειά του) κατά τη διάρκεια του τωρινού χρονικού βήματος μπορεί να είναι διαφορετική από αυτήν που είχε κατά τη διάρκεια του προηγούμενου χρονικού βήματος, αλλά δεν γίνονται επαναλήψεις κατά τη διάρκεια του τωρινού χρονικού βήματος για τον υπολογισμό της νέας θερμοκρασίας. Αυτή είναι μία προσέγγιση που θεωρεί ότι ο χρόνος αντίδρασης του θερμοχρωμικού φύλλου μπορεί να βρίσκεται χρονικά κοντά στο χρονικό βήμα της προσομοίωσης, για παράδειγμα να είναι ίσος με 10 με 15 min.



**Σχήμα 5.5:** Κατάλογος κατηγοριών (class list) στο περιβάλλον του IDF-Editor, όπου διακρίνονται οι δύο από τις τρεις προαναφερθέντες κατηγορίες σχετικά με τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες.

Με πιο απλά λόγια και χωρίς αναφορά σε αντικείμενα του προγράμματος, για κάθε χρονικό βήμα, το πρόγραμμα υπολογίζει τη θερμοκρασία του θερμοχρωμικού φύλλου χρησιμοποιώντας τη θερμοκρασία και τις ιδιότητες του φύλλου από το προηγούμενο χρονικό βήμα ως αρχικές συνθήκες και επιλύοντας τον θερμικό ισολογισμό του φύλλου, με δοθέντα ως δεδομένα εισόδου την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία, την προσπίπτουσα θερμική ακτινοβολία μεγάλους μήκους κύματος από εξωτερικές και εσωτερικές πηγές, την εξωτερική και την εσωτερική θερμοκρασία, την ταχύτητα του ανέμου και τους συντελεστές συναγωγής. Η νέα θερμοκρασία του θερμοχρωμικού φύλλου χρησιμοποιείται τότε για τον καθορισμό των οπτικών ιδιοτήτων του. Οι ιδιότητες αυτές χρησιμοποιούνται τότε για τον υπολογισμό των θερμικών κερδών (ή απωλειών) σε αυτό το χρονικό βήμα.

Η κατασκευή του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα στο σύνολό του αποφασίζεται προφανώς από τον μελετητή και για παράδειγμα μπορεί να είναι: διπλός υαλοπίνακας με το θερμοχρωμικό φύλλο στην εξωτερική πλευρά (προς το εξωτερικό περιβάλλον), ή τριπλός υαλοπίνακας με το θερμοχρωμικό φύλλο στο εσωτερικό του. Για έναν θερμοχρωμικό υαλοπίνακα με ύπαρξη κλίσης στη μετάβασή του (σταδιακή μετάβαση), που είναι και η περίπτωση που ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα (θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες του εμπορίου), είναι εύλογο ότι όσο περισσότερα αντικείμενα ορίζονται από τον μελετητή στην κατηγορία “WindowMaterial:Glazing”, τόσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια με την οποία μοντελοποιείται η μετάβαση. Για ύπαρξη “απείρου” πλήθους αντικειμένων, η μετάβαση δεν θα αποτελείται από διακριτές μεταβολές των χαρακτηριστικών (π.χ. της διαπερατότητας), αλλά θα είναι συνεχής και θα αντιστοιχεί σε συνεχή καμπύλη. Επειδή όμως και ο ορισμός πάρα πολλών αντικειμένων μπορεί να μην είναι πρακτικός, ο αριθμός των αντικειμένων ορίζεται ανάλογα με το ζητούμενο επίπεδο ακρίβειας και τις ανάγκες της προσομοίωσης. Πάντως, το αντικείμενο που αντιστοιχεί στη χαμηλότερη θερμοκρασία προδιαγραφής είναι αυτό που αναφέρεται στον θερμοχρωμικό υαλοπίνακα πριν από την εκκίνηση της μετάβασης. Αντίστοιχα, το αντικείμενο που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη θερμοκρασία προδιαγραφής είναι αυτό που αναφέρεται στον θερμοχρωμικό υαλοπίνακα από το σημείο ολοκλήρωσης της μετάβασης και μετά (δηλαδή και σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες). Επίσης, βάσει λογικής συνεπάγεται ότι για μοντελοποίηση ακαριαίας μετάβασης σε συγκεκριμένη θερμοκρασία απαιτείται ο ορισμός δύο αντικειμένων στην κατηγορία αυτή.

Με το EnergyPlus είναι επίσης δυνατή η μοντελοποίηση της ύπαρξης πλάτους σε βρόχο υστέρησης. Αυτό όμως είναι δυνατό (τουλάχιστον προς το παρόν) μόνο με έμμεσο τρόπο, μέσω τεχνάσματος. Πιο συγκεκριμένα, ένας πιθανός τρόπος προσέγγισης είναι να γίνει πρώτα η προσομοίωση του μοντέλου και τα αποτελέσματα να αναλυθούν ώστε να γίνει φανερό τότε το θερμοχρωμικό φύλλο βρίσκεται σε διαδικασία θέρμανσης και τότε σε διαδικασία ψύξης, ανάλογα με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του. Με χρήση των δεδομένων που θα προκύψουν από την ανάλυση αυτή, μπορεί να δημιουργηθεί μια σειρά από αυτοτελή ημερήσια χρονικά προγράμματα (daily schedules), τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό του ποιο αντικείμενο της κατηγορίας “WindowMaterial:Glazing” θα χρησιμοποιείται σε διάφορες χρονικές στιγμές. Τα αντικείμενα αυτά θα πρέπει προφανώς να έχουν οριστεί με κατάλληλο τρόπο, έτσι ώστε η μετάβαση να ξεκινά σε διαφορετικές θερμοκρασίες, για να είναι εφικτή η μοντελοποίηση του πλάτους του

βρόχου υστέρησης. Θα πρέπει δηλαδή να δημιουργηθούν δεδομένα δύο διαφορετικών ομάδων που θα καθορίζουν την ύπαρξη δύο διαφορετικών καμπυλών (μίας που αναφέρεται σε θέρμανση και μίας που αναφέρεται σε ψύξη), όπου η καθεμία θα έχει συγκεκριμένη κλίση (αν γίνει η υπόθεση ότι είναι ευθείες), όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.5. Φυσικά όλη αυτή η μοντελοποίηση του πλάτους του βρόχου υστέρησης είναι προσεγγιστική και όχι ευθέως κατανοητή. Το αν θα πραγματοποιηθεί εξαρτάται από τις ανάγκες της προσομοίωσης.

Τέλος, όπως και στη μοντελοποίηση κάθε υαλοπίνακα στο πρόγραμμα αυτό, για τις ιδιότητες που ορίζονται για τον καθορισμό του θερμοχρωμικού φύλλου μπορούν να χρησιμοποιηθούν φασματικά δεδομένα (spectral data) ή μέσες τιμές (spectral average). Να σημειωθεί επίσης ότι οι ιδιότητες αυτές δίνονται στα κατάλληλα πεδία των σχετικών αντικειμένων για κάθετο γωνία πρόσπτωσης και το πρόγραμμα κάνει τους κατάλληλους υπολογισμούς για να υπολογίσει τις τιμές τους και σε διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης. Το τι είδους δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν (φασματικά ή μέσες τιμές) είναι πάλι απόφαση του μελετητή και εξαρτάται από τις ανάγκες της προσομοίωσης και από τα δεδομένα που έχει διαθέσιμα για την κατασκευή του μοντέλου.

Σχετικά με τα δεδομένου εξόδου της προσομοίωσης που αφορούν άμεσα το αντικείμενο που ορίζει έναν θερμοχρωμικό υαλοπίνακα σε προσομοίωση κτιρίου με το EnergyPlus, είναι τα παρακάτω:

- Surface Window ThermoChromic Layer Temperature [°C]: που είναι η θερμοκρασία του θερμοχρωμικού (TC) φύλλου ενός θερμοχρωμικού υαλοπίνακα, δοθείσα σε κάθε χρονικό βήμα αναφοράς (το οποίο επιλέγεται από τον μελετητή).
- Surface Window ThermoChromic Layer Property Specification Temperature [°C]: που είναι η θερμοκρασία προδιαγραφής, υπό την οποία προσδιορίζονται τα δεδομένα των οπτικών ιδιοτήτων του θερμοχρωμικού (TC) φύλλου. Οι ολικές ιδιότητες του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα ( $U_g$ , SHGC, SRT σε κάθετο πρόσπτωση, VLT σε κάθετο πρόσπτωση) στις διάφορες θερμοκρασίες προδιαγραφής αναφέρονται στο αρχείο EIO (.eio) (ο συντελεστής θερμοπερατότητας  $U_g$  θα είναι βέβαια πρακτικά ο ίδιος για κάθε θερμοκρασία). Οι διάφορες κατασκευές (constructions) των υαλοπινάκων δημιουργούνται από το EnergyPlus κατά τη διάρκεια του χρόνου εκτέλεσης. Έχουν παρόμοια ονόματα, με κατάληξη "\_TC\_XX", όπου το XX αναπαριστά μια συγκεκριμένη θερμοκρασία προδιαγραφής (π.χ. 25).

Φυσικά, είναι δυνατή η εξαγωγή και πάρα πολλών άλλων δεδομένων που σχετίζονται γενικότερα με κουφώματα και υαλοπίνακες, όπως για παράδειγμα:

- Surface Window Transmitted Solar Radiation Rate [W]: που είναι η ισχύς της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά έναν υαλοπίνακα εξωτερικού κουφώματος (ως θερμικό κέρδος) και εισέρχεται στη σχετική θερμική ζώνη (μέση τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς – βέβαια, αν το χρονικό βήμα αναφοράς είναι ίσο με το χρονικό βήμα υπολογισμών δεν έχει σημασία η έννοια της μέσης τιμής).
- Surface Window Transmitted Solar Radiation Energy [J]: που είναι η αντίστοιχη ενέργεια που διαπερνά έναν υαλοπίνακα εξωτερικού κουφώματος (αθροιστική τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς).
- Zone Windows Total Transmitted Solar Radiation Rate [W]: που είναι η ισχύς της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (θερμικό κέρδος) που διαπερνά όλους τους υαλοπίνακες των εξωτερικών κουφωμάτων μιας θερμικής ζώνης (μέση τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς).
- Zone Windows Total Heat Gain Energy [J]: που είναι το άθροισμα των διερχόμενων ποσών θερμότητας από όλους τους υαλοπίνακες των εξωτερικών κουφωμάτων μιας θερμικής ζώνης, όταν αυτό είναι θετικός αριθμός, δηλαδή η θερμότητα εισέρχεται στη θερμική ζώνη (αθροιστική τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς).
- Zone Windows Total Heat Loss Energy [J]: που είναι η απόλυτη τιμή του αθροίσματος των διερχόμενων ποσών θερμότητας από όλους τους υαλοπίνακες των εξωτερικών κουφωμάτων μιας θερμικής ζώνης, όταν αυτό το άθροισμα είναι αρνητικός αριθμός, δηλαδή η θερμότητα εξέρχεται από τη θερμική ζώνη (αθροιστική τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς).
- Surface Window Total Glazing Layers Absorbed Solar Radiation Rate [W]: που είναι η ισχύς της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από όλα τα φύλλα γυαλιού ενός υαλοπίνακα εξωτερικού κουφώματος (μέση τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς).
- Surface Window Shading Device Absorbed Solar Radiation Rate [W]: που είναι η ισχύς της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα σύστημα σκίασης (αν αυτό υπάρχει), ενός εξωτερικού κουφώματος με υαλοπίνακα (μέση τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς).
- Surface Window Glazing Beam to Beam Solar Transmittance [-]: που είναι το ποσοστό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά ένα φύλλο γυαλιού ενός υαλοπίνακα εξωτερικού κουφώματος ως άμεση ηλιακή ακτινοβολία (χωρίς να διαχέεται). Λαμβάνεται υπόψιν και η γωνία πρόσπτωσης της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στο γυαλί (τιμή που αναφέρεται κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς).
- Zone Interior Windows Total Transmitted Beam Solar Radiation Rate [W]: που είναι η ισχύς της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που διαπερνά όλους τους υαλοπίνακες των εσωτερικών κουφωμάτων μιας θερμικής ζώνης (μέση τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς).
- Surface Window Inside Face Glazing Condensation Status [-]: που είναι ο δείκτης που δείχνει το αν πραγματοποιείται υγροποίηση υδρατμών στην

εσωτερική επιφάνεια ενός υαλοπίνακα εξωτερικού κουφώματος (τιμή που αναφέρεται κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς). Τιμή ίση με 1 σημαίνει ότι η υγροποίηση θα συμβεί. Αλλιώς η τιμή θα είναι ίση με 0. Η συνθήκη για την πραγματοποίηση της υγροποίησης είναι: θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας του υαλοπίνακα < θερμοκρασία σημείου δρόσου του αέρα στο εσωτερικό της θερμικής ζώνης.

- Surface Window Frame Heat Gain Rate [W]: που είναι η θετική θερμική ισχύς που διέρχεται από το πλαίσιο (και συγκεκριμένα το περιμετρικό τμήμα του) ενός εξωτερικού κουφώματος με υαλοπίνακα προς τη θερμική ζώνη, αν έχει οριστεί στο πρόγραμμα σχετικό αντικείμενο που να αφορά το πλαίσιο του κουφώματος (μέση τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς) [ακόμα και αν έχει οριστεί τέτοιο αντικείμενο, η λέξη παράθυρο (window)\* αναφέρεται στον υαλοπίνακα και μόνο, ενώ η αναφορά για παράδειγμα σε περιμετρικό πλαίσιο υαλοπίνακα γίνεται με τη φράση πλαίσιο παραθύρου (window frame)].
- Surface Window Inside Face Glazing Net Infrared Heat Transfer Rate [W]: που είναι η καθαρή συναλλαγή υπέρυθρης ακτινοβολίας μεταξύ της εσωτερικής επιφάνειας του υαλοπίνακα ενός κουφώματος και της θερμικής ζώνης σε W (μέση τιμή κατά τη διάρκεια του χρονικού βήματος αναφοράς).

Είναι φανερό ότι οι δυνατότητες του λογισμικού είναι πάρα πολλές. Για αυτό το λόγο, άλλωστε, χρησιμοποιείται ευρέως και για ερευνητικούς σκοπούς.

Η υλοποίηση, όσων αναφέρονται εδώ για τη μοντελοποίηση ενός θερμοχρωμικού υαλοπίνακα στο EnergyPlus, φαίνεται στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

---

\* Να σημειωθεί ότι και τα αντικείμενα που καθορίζουν τις κατασκευές των υαλοπινάκων των γυάλινων θυρών αναφέρονται στο πρόγραμμα ως παράθυρα (windows).

## 5.4 Σχετική έρευνα

Η χρήση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων έχει αξιωθεί για αρκετά χρόνια και μεγάλη ποσότητα έρευνας έχει γίνει πάνω στη σύνθεση των επιστρώσεων – εξάλλου η χρήση θερμοχρωμικών υλικών σε υαλοπίνακες έχει προταθεί από τη δεκαετία του 1980. Ωστόσο, λίγες δημοσιεύσεις έχουν γίνει σχετικά με το όφελος εξοικονόμησης ενέργειας τέτοιων επιστρώσεων και σχεδόν όλες αυτές πρόσφατα. Οι περισσότερες από αυτές, πειραματικές ή υπολογιστικές, αφορούν απλές κτιριακές κατασκευές (του τύπου πολύ απλών test rooms) και μάλιστα κάποιες τυγχάνουν συμπερασμάτων που μπορεί να είναι και αντικρουόμενα και ασύμβατα με αυτά άλλων αντίστοιχων. Το τελευταίο στοιχείο πάντως αιτιολογείται και από τη χρήση από τους διάφορους μελετητές, κατά τις προσομοιώσεις, διαφορετικών χαρακτηριστικών για τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες, καθώς αυτά προσδιορίζονται μέσω ποικίλων μεταβλητών, όπως για παράδειγμα από:

- τη μεταβολή των SRT και VLT
- τη μεταβολή της ανακλαστικότητας και της απορροφητικότητας στα διάφορα μήκη κύματος
- το αν η μετάβαση συμβαίνει σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες
- την κλίση της θερμοχρωμικής μετάβασης
- το πλάτος του βρόχου υστέρησης της μετάβασης κ.ά

Η χρήση ποικιλίας τέτοιων χαρακτηριστικών αποδίδεται στη φύση των υαλοπινάκων αυτών που είναι πολυσύνθετη, στα διάφορα είδη βελτιωτικών που μπορούν να προστεθούν στις επιστρώσεις, στις διάφορες μεθόδους που υπάρχουν για την απόθεση της επίστρωσης, καθώς και στην όχι εύκολη εύρεση στοιχείων από κατασκευαστές, αφού αυτοί είναι (τουλάχιστον προς το παρόν) ελάχιστοι. Επίσης, πολλοί άλλοι σημαντικοί παράγοντες είναι ικανοί να επιφέρουν διαφοροποιήσεις, όπως οι κλιματικές συνθήκες, ο προσανατολισμός και η επιφάνεια των υαλοπινάκων, το κτιριακό κέλυφος, τα συστήματα HVAC και το θερμοκρασιακό προφίλ λειτουργίας τους (ρύθμιση θερμοστάτη) κ.ά. Το ζήτημα είναι πολύπλευρο και για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων χρειάζεται η ταυτόχρονη εξέταση πολλών παραμέτρων, κάτι που είναι δύσκολο αλλά μπορεί να επιτευχθεί μέσω συνδυασμού πολλών πηγών μελέτης. Εξάλλου, οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες είναι στην ουσία ακόμη πεδίο υπό μελέτη και η εξέταση της επίδρασής τους στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων έχει και τον χαρακτήρα αυτόν – και όχι τόσο τη σημασία της επιβεβαίωσης της αποδοτικότητας ενός ήδη βελτιστοποιημένου προϊόντος. Συμπερασματικά, είναι αναγκαία η ανάπτυξη περισσότερης έρευνας στο πεδίο αυτό.

Διάφορες σχετικές μελέτες και δημοσιεύσεις, που έχουν γίνει με χρήση του EnergyPlus και αναφέρονται και στη βιβλιογραφία στο τέλος της εργασίας, φαίνονται παρακάτω μαζί με κάποια από τα εξαγόμενα συμπεράσματα:

Οι Manfredi Saeli, Clara Piccirillo, Ivan P. Parkin, Russel Binions και Ian Ridley δημοσίευσαν το 2010 έρευνα που έκαναν με το EnergyPlus 3.0.0, σχετικά με προσομοίωση κτιρίου (κελύφους με απλό ορθογωνικό σχήμα) με δύο διαφορετικές εκδοχές για την επιφάνεια του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα (25% WWR και 100% WWR, όπου το ποσοστό αναφέρεται σε σχέση με την επιφάνεια του τοίχου που περιέχει τον υαλοπίνακα – αφού ο χώρος που εξετάστηκε, θεωρήθηκε ότι

αναπαριστάνει την πρόσοψη μεγαλύτερου κτιρίου, με μόνο την πλευρά με τον υαλοπίνακα εκτεθειμένη στις εξωτερικές συνθήκες). Η προσομοίωση έγινε για διάφορες περιοχές και με διάφορους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες (με διαφορετικά χαρακτηριστικά). Η διερεύνηση της επίδρασής τους στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου έγινε συγκριτικά με άλλους συνήθεις υαλοπίνακες. Κατέληξαν στο ότι οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες μπορούν να προσφέρουν εξοικονόμηση συγκριτικά με τα συμβατικά είδη υαλοπινάκων. Πιο συγκεκριμένα, βρέθηκε ότι σε ψυχρά κλίματα προσφέρουν εξοικονόμηση μόνο για τον υαλοπίνακα με 100% WWR, ενώ στα θερμά κλίματα σε κάθε περίπτωση και μάλιστα για την χαμηλότερη θερμοκρασία μετάβασης που μελετήθηκε (20°C) (τότε βρέθηκε να επιτυγχάνεται γενικότερα η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας). Προχώρησαν και σε προσομοίωση με θερμοχρωμικό υαλοπίνακα ιδανικών χαρακτηριστικών, η οποία έδειξε ότι η ενεργειακή αποδοτικότητα βελτιστοποιείται όταν κατά τη μετάβαση υπάρχει μεγάλη μεταβολή των ιδιοτήτων στην περιοχή της υπέρυθρης ακτινοβολίας του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας.

Οι Sabine Hoffmann, Eleanor S. Lee και César Clavero πραγματοποίησαν το 2014 δημοσίευση έρευνας που έγινε με το EnergyPlus 7.0 και αφορούσε προσομοιώσεις σε μοντέλο μεγάλου κτιρίου γραφείων με θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες υποθετικών χαρακτηριστικών, με ιδιότητες που βασίστηκαν σε κατευθυντήριες γραμμές από την επιστημονική κοινότητα της επιστήμης των υλικών. Οι προσομοιώσεις αφορούσαν αρχικά τη μελέτη των χαρακτηριστικών της θερμοχρωμικής μετάβασης, της καθαρής ροής θερμότητας διαμέσου των υαλοπινάκων, των φορτίων των περιμετρικών θερμικών ζωνών και έπειτα τη μελέτη των συστημάτων HVAC των περιμετρικών θερμικών ζωνών και της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό. Η μελέτη έγινε για κλίμα με μικτά χαρακτηριστικά ψύξης/θέρμανσης, καθώς και για θερμό-υγρό κλίμα, στις Η.Π.Α. Με έναν από τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες που μελετήθηκαν (SRT=0,10 – 0,50, VLT=0,30 – 0,60, εύρος θερμοκρασιών κατά τη μετάβαση=14 – 20°C), σε συνδυασμό με υαλοπίνακα χαμηλής εκπομπής στην ίδια κατασκευή (δηλαδή διπλός υαλοπίνακας, με θερμοχρωμική επίστρωση στη θέση “2” και  $\varepsilon=0,04$  στη θέση “3”), επιτεύχθηκε μείωση στη συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας κατά 12-14% για WWR $\geq$ 30% στο Chicago και κατά 10-17% για WWR $\geq$ 45% στο Houston, συγκριτικά με έναν υαλοπίνακα Low-e υψηλού ηλιακού θερμικού κέρδους, στις νότιες, ανατολικές και δυτικές περιμετρικές θερμικές ζώνες.

Οι V. Costanzo, G. Evola και L. Marletta δημοσίευσαν τον Ιανουάριο του 2016 μελέτη που έκαναν με το EnergyPlus 8.1, με εφαρμογή θερμοχρωμικών υαλοπινάκων σε μοντέλο υπάρχοντος μονώροφου κτιρίου γραφείων, προς ανάλυση της εξοικονόμησης ενέργειας σε ετήσια βάση, με ταυτόχρονη εστίαση στη μελέτη του φυσικού φωτισμού και της θερμικής άνεσης. Πιο συγκεκριμένα, δόθηκε μεγάλη σημασία στην διερεύνηση της διαθεσιμότητας φυσικού φωτός, που αναλύεται με χρήση χαρτών φωτισμού (illuminance maps) στο μοντέλο και με υπολογισμό του παράγοντα φυσικού φωτισμού (daylight factor). Η μελέτη περιελάμβανε τόσο στοιχεία από έναν θερμοχρωμικό υαλοπίνακα εμπορικά διαθέσιμο, όσο και μια σειρά υποθετικών θερμοχρωμικών υαλοπινάκων. Η αποδοτικότητά αυτών συγκρίθηκε με



συμβατικούς διαυγείς και ανακλαστικούς υαλοπίνακες και οι προσομοιώσεις έγιναν για διάφορες κλιματικές συνθήκες. Αυτές που αφορούσαν θεωρητικούς θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες με θερμοκρασία μετάβασης 25°C και εύρος θερμοκρασιών (που καθορίζεται από την κλίση) ίσο με 5°C έδειξαν ότι η εξοικονόμηση ενέργειας συγκριτικά με απλό διαυγή υαλοπίνακα κυμαίνεται από 5% για ψυχρά κλίματα, έως 25% για θερμά κλίματα όπως της νότιας Ευρώπης, χωρίς συμβιβασμούς στην διαθεσιμότητα φυσικού φωτός. Πιο συγκεκριμένα, για τα θερμά κλίματα φάνηκε εξοικονόμηση 25% συγκριτικά με διαυγείς υαλοπίνακες και περίπου 15% συγκριτικά με ανακλαστικούς. Επιπλέον, εξέτασαν τον ρόλο της θερμοκρασίας μετάβασης και υπέδειξαν μια βέλτιστη θερμοκρασία μετάβασης που είναι ανεξάρτητη των κλιματικών συνθηκών, που είναι 25°C με εύρος θερμοκρασιών 5°C γύρω από αυτήν. Από την άλλη, η εξέταση εμπορικά διαθέσιμου θερμοχρωμικού υαλοπίνακα έδειξε σαφή μείωση της κατανάλωσης ενέργειας συγκριτικά με διαυγείς υαλοπίνακες και μηδαμινή μείωση συγκριτικά με ανακλαστικούς.

Οι Michael E.A. Warwick, Ian Ridley και Russell Binions, με εργασία που δημοσιεύτηκε το 2015, διερεύνησαν με το EnergyPlus 5.0 την επίδραση του πλάτους και της κλίσης του βρόχου υστέρησης της θερμοχρωμικής μετάβασης στην ενεργειακή αποδοτικότητα θερμοχρωμικού υαλοπίνακα νότιου προσανατολισμού σε μοντέλο κτιρίου με συνθήκες λειτουργίας γραφείων. Χρησιμοποίησαν υαλοπίνακες ιδανικών ιδιοτήτων (με μεγάλο εύρος μεταβολής της SRT στην NIR περιοχή), σε θερμά, μικτά και ψυχρά κλίματα και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα τωρινά βιομηχανικά πρότυπα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, κάτω από ιδανικές συνθήκες, μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας μεγαλύτερη και από 50% συγκριτικά με συμβατικό διπλό υαλοπίνακα – και αυτό σε θερμό κλίμα όπου η θερμοχρωμική μετάβαση συμβαίνει σε σχετικά χαμηλή θερμοκρασία (20-25°C), με στενό βρόχο υστέρησης (μικρό πλάτος) και μεγάλη (απότομη) κλίση της μετάβασης. Συμπέραναν ότι το μικρό πλάτος βρόχου υστέρησης επιτρέπει την καλύτερη αντίδραση του υαλοπίνακα στις μεταβολές της θερμοκρασίας και επιφέρει βελτίωση της αποδοτικότητας σε όλα τα κλίματα. Τα αποτελέσματα της έρευνάς τους υπέδειξαν επίσης ότι τιμή της θερμοκρασίας μετάβασης κοντά στις θερμοκρασίες δωματίου (20-25°C) είναι η βέλτιστη για όλα τα κλίματα και ότι αυτή είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για τον καθορισμό της αποδοτικότητας. Κατέληξαν ότι οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες είναι ένα πεδίο που αξίζει περαιτέρω έρευνας.

Παρόμοιες έρευνες έχουν γίνει και με άλλα λογισμικά προσομοίωσης, αλλά και μέσω πειραματικών διατάξεων. Κάποιες από αυτές αναφέρονται και στην βιβλιογραφία. Ενδεικτικά αναφέρονται παρακάτω τρεις μελέτες, των οποίων τα συμπεράσματα παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον:

Οι Georgios Kokogiannakis, Jo Darkwa και Cristina Aloisio, με μελέτη τους με χρήση του λογισμικού ESP-r που δημοσιεύτηκε το 2014, ασχολήθηκαν με την ανάλυση των ενεργειακών αναγκών ενός μοντέλου κτιρίου γραφείων μεγάλου ύψους

και με διπλούς θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες μεγάλης επιφάνειας. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση με την απόδοση διπλών υαλοπινάκων με αναρτημένη μεμβράνη heat mirror και τριπλών υαλοπινάκων (με πλήρωση αέρα ή αργού). Η αξιολόγηση έγινε για θερμά, ψυχρά και μικτά (με σημαντικές μεταβολές) κλίματα. Υπολογίστηκαν οι ετήσιες ανάγκες για θέρμανση και ψύξη και επίσης πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για μικρή χρονική διάρκεια, με σκοπό την αξιολόγηση της επίδρασης των υαλοστασίων στις θερμοκρασίες του αέρα εσωτερικού περιβάλλοντος. Βρέθηκε ότι οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες μπορούν να μειώσουν σημαντικά τα ψυκτικά φορτία (περίπου κατά 30% σε σχέση με άλλα συστήματα υαλοπινάκων) σε θερμά κλίματα και γενικά οπουδήποτε τα ψυκτικά φορτία έχουν σημαντική σχετική βαρύτητα. Από την άλλη, βρέθηκε ότι οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες μπορεί να έχουν αρνητικό αποτέλεσμα σε ψυχρά κλίματα, στα οποία τη βέλτιστη απόδοση μεταξύ των τριών τύπων υαλοστασίων είχαν οι υαλοπίνακες με μεμβράνη heat mirror. Σε μικτά κλίματα, όπου οι ανάγκες μεταβάλλονται σημαντικά με την εποχή, όπως και σε κτίρια με μεγάλη επιφάνεια υαλοπινάκων (μεγάλο WWR) στα οποία μπορούν να συνυπάρξουν ταυτόχρονα μεγάλα εσωτερικά και ηλιακά θερμικά κέρδη, η χρήση θερμοχρωμικών υαλοπινάκων βρέθηκε ότι είναι μια κατάλληλη τεχνική για την εξοικονόμηση ενέργειας και τη βελτίωση της θερμικής άνεσης.

Οι Hong Ye, Linshuang Long, Haitao Zhang κ.ά., μέσω πειραματικής και υπολογιστικής μελέτης που δημοσιεύτηκε το 2013, μελέτησαν την απόδοση μονού υαλοπίνακα με θερμοχρωμικό φιλμ. Η πειραματική έρευνα έγινε με κατασκευή δύο απλών test rooms κυβικού σχήματος και μικρής θερμικής μάζας, στην πόλη Hefei της Κίνας, που το ένα είχε απλό μονό υαλοπίνακα μεγάλου εμβαδού στη νότια πλευρά και το άλλο μονό υαλοπίνακα με PET φιλμ με επίστρωση VO<sub>2</sub>, του ίδιου εμβαδού και επίσης στη νότια πλευρά. Για την αξιολόγηση της απόδοσης των υαλοπινάκων αυτών μέσω υπολογιστικής μελέτης, χρησιμοποίησαν το λογισμικό BuildingEnergy (ένα λογισμικό που αναπτύχθηκε από τους ίδιους) για προσομοίωση στην πόλη Guangzhou της Κίνας. Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας έδειξαν ότι ο υαλοπίνακας με επίστρωση VO<sub>2</sub> μπορούσε να επιφέρει μείωση κατά 10,2-19,9% στα συνολικά ψυκτικά φορτία. Η προσομοίωση έδειξε ότι επιφέρει μείωση κατά περίπου 9,4% στην ηλεκτρική κατανάλωση για ψύξη, ανεξαρτήτως του προσανατολισμού του υαλοπίνακα. Επίσης συμπέραναν ότι η απόδοση μεταβάλλεται συναρτήσει του WWR, καθώς η ποσοστιαία μείωση της κατανάλωσης βρέθηκε αύξουσα για WWR έως 0,45 όπου είχε την τιμή 10,6% και από εκεί και έπειτα φθίνουσα – για WWR=0,80 η αντίστοιχη τιμή ήταν περίπου ίση με 8,6%. Αυτή την παρατήρηση την απέδωσαν στο ότι ο υαλοπίνακας με επίστρωση VO<sub>2</sub> που μελέτησαν παρουσιάζει μεγαλύτερη απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας συγκριτικά με τον απλό μονό υαλοπίνακα, οπότε όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνειά του, τόσο περισσότερο αυξάνεται η ροή απορροφηθείσας θερμότητας προς το εσωτερικό του χώρου, που με τη σειρά της τείνει να αντισταθμίσει το πλεονέκτημα της μείωσης των άμεσων ηλιακών θερμικών κερδών.

Οι Hong Ye, Xianchun Meng και Bin Xu, πραγματοποίησαν έρευνα, που δημοσιεύτηκε το 2012, με προσομοίωση στο λογισμικό BuildingEnergy ενός δωματίου κτιρίου, με μελέτη διάφορων θερμοχρωμικών υαλοπινάκων (μονών, μεταξύ των οποίων ένας πρακτικός με χαρακτηριστικά που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα και οι υπόλοιποι με διάφορα ιδανικά χαρακτηριστικά) και σε διάφορες πόλεις της Κίνας. Κατέληξαν στο ότι η εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη θερινή περίοδο του πρακτικού θερμοχρωμικού υαλοπίνακα που μελέτησαν, συμβαίνει μόνο εξαιτίας της μειωμένης διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία που έχει γενικά και ότι η θερμοχρωμική μετάβαση του συγκεκριμένου υαλοπίνακα είναι ανούσια και δεν προσφέρει επιπλέον εξοικονόμηση ενέργειας, αφού η αυξημένη απορρόφηση στην μεταλλική κατάσταση οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας από ότι στην κατάσταση ημιαγωγού. Οπότε οδηγήθηκαν στη διαπίστωση ότι το ιδανικό είναι η μείωση της διαπερατότητας στη μεταλλική κατάσταση να οφείλεται σε αυξημένη ανάκλαση και όχι σε αυξημένη απορρόφηση.

Περισσότερα στοιχεία σχετικά με τα δεδομένα εισόδου και τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνών (και διάφορων άλλων, μεταξύ των οποίων και θεωρητικές έρευνες) μπορεί ο αναγνώστης να αναζητήσει στη βιβλιογραφία που βρίσκεται στο τέλος της εργασίας.

## 6 Ενεργειακή προσομοίωση κτιρίου με το EnergyPlus

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται περιγραφή της ενεργειακής προσομοίωσης κτιρίου που πραγματοποιήθηκε για τους σκοπούς της εργασίας.

### 6.1 Γενική περιγραφή κτιρίου

Το προς ανάλυση κτίριο είναι μια υποθετική διώροφη κατοικία, τυπικής (συνήθους) θερμικής μάζας, στην περιοχή της Αθήνας. Το συνολικό εμβαδόν (κάτοψης των χώρων) του κτιρίου είναι ίσο με 94 m<sup>2</sup> και το ποσοστό της επιφάνειας των υαλοπινάκων ως προς την επιφάνεια των εξωτερικών τοίχων (και οροφών) (WWR) ίσο με 7% (όπου όλοι οι υαλοπίνακες του κτιρίου είναι εξωτερικοί).

Τα κτίρια κατοικιών εν γένει έχουν μικρότερη επιφάνεια υαλοστασίων σε σχέση με άλλα κτίρια μεγαλύτερου όγκου, όπως για παράδειγμα πολλά εμπορικά (στα οποία είναι δυνατόν να εμφανίζονται πολύ μεγάλες τιμές στον WWR). Σε αυτά τα κτίρια, όπως εξάγεται και από τη θεωρητική έρευνα σε προηγούμενα κεφάλαια, η επίδραση ενός τύπου υαλοπίνακα στην ενεργειακή απόδοσή τους είναι δυσκολότερο να προσδιοριστεί και οι επιθυμητοί στόχοι μπορεί να είναι δυσκολότερο να επιτευχθούν. Η επιλογή κτιρίου τύπου κατοικίας έγινε λοιπόν, πέρα από το γεγονός ότι στην Ελλάδα το μεγαλύτερο ποσοστό των κτιρίων είναι κτίρια κατοικίας, με σκοπό τη διερεύνηση του αν η ύπαρξη θερμοχρωμικών υαλοπινάκων μπορεί εύκολα να επιφέρει (πιθανώς) βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση και σε κτίρια αυτού του είδους, συγκριτικά με άλλους συμβατικούς υαλοπίνακες. Η τιμή του 7%, που επιλέχθηκε, φυσικά είναι επαρκής και ικανή για την ασφαλή εξαγωγή των συμπερασμάτων, αφού είναι για παράδειγμα λίγο μικρότερη από τις αντίστοιχες που έχουν γενικά τα κτίρια με παθητικά ηλιακά συστήματα (9-12%). Επίσης, πολύ σημαντική για την εξαγωγή συμπερασμάτων είναι η τοποθέτηση μεγάλης επιφάνειας υαλοπινάκων στους τοίχους ανατολικού και δυτικού προσανατολισμού, η οποία έγινε σκοπίμως – αφού είναι γνωστό ότι τα ανοίγματα αυτού του προσανατολισμού δέχονται την περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία σε ετήσια βάση. Όπως αναφέρεται και στην παράγραφο 3.2 της εργασίας, τα ανοίγματα δυτικού προσανατολισμού, είναι τα περισσότερο κρίσιμα όταν προσπαθούμε να ελέγξουμε την εισερχόμενη ηλιακή ενέργεια. Επαρκής επιφάνεια υαλοπινάκων τοποθετήθηκε όμως και στους τοίχους νοτίου προσανατολισμού, που δέχονται περισσότερη ακτινοβολία κατά τη χειμερινή περίοδο. Η τιμή, δηλαδή, του 7% που αναφέρεται με βάση τη συνολική επιφάνεια των εξωτερικών τοίχων δεν είναι τόσο αντιπροσωπευτική για τους διάφορους χώρους του κτιρίου, όπως φαίνεται παρακάτω, αφού το εμβαδόν των υαλοπινάκων του προς μελέτη μοντέλου δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένο στις πλευρές του κτιρίου προς τις διάφορες κατευθύνσεις του ορίζοντα. Αυτό μάλιστα επιτρέπει και την διερεύνηση του πώς κάποιοι χώροι του κτιρίου μπορεί να επηρεάζονται περισσότερο ή λιγότερο από την ηλιακή ακτινοβολία συγκριτικά με άλλους, με βάση το μέγεθος και τον προσανατολισμό των υαλοπινάκων, ή και την ύπαρξή τους ή όχι γενικά σε έναν χώρο.

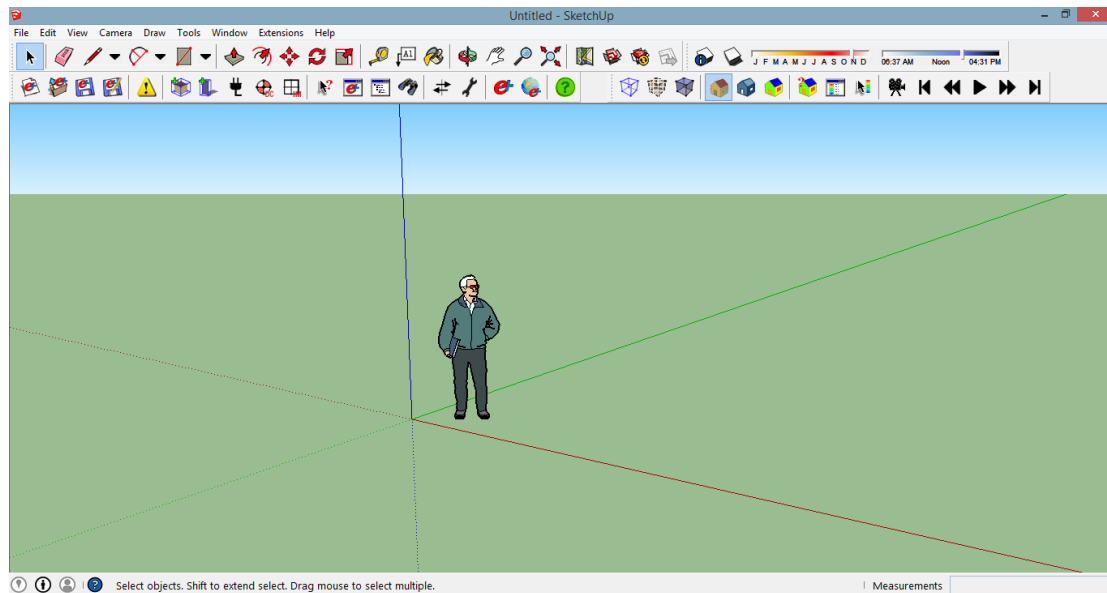
Η κατοικία που μελετήθηκε αποτελείται από 6 δωμάτια. Το ισόγειο, συνολικού εμβαδού (κάτοψης των χώρων) 82 m<sup>2</sup> αποτελείται από τον χώρο της κύριας εισόδου της κατοικίας (main entrance) (14 m<sup>2</sup>), το καθιστικό (living room) (24 m<sup>2</sup>), το μπάνιο (bathroom) (8 m<sup>2</sup>), την κουζίνα (kitchen) (16 m<sup>2</sup>) και το κύριο υπνοδωμάτιο (master bedroom) (20 m<sup>2</sup>). Στον δεύτερο όροφο, ακριβώς πάνω από το κύριο υπνοδωμάτιο βρίσκεται ένα δεύτερο υπνοδωμάτιο (bedroom) (12 m<sup>2</sup>). Το ύψος κάθε ορόφου είναι 3 m. Διάφορα χρήσιμα στοιχεία για κάθε χώρο ξεχωριστά, δίνονται παρακάτω.

## 6.2 Σχεδίαση του κτιρίου στο λογισμικό Sketchup

Η σχεδίαση του κτιρίου έγινε με το λογισμικό Sketchup, που προσφέρει εύχρηστο γραφικό περιβάλλον για την αποτύπωση της βασικής γεωμετρίας και προσανατολισμού του κτιρίου. Το Sketchup είναι ένα λογισμικό τρισδιάστατης σχεδίασης μοντέλων, με ευρύ πεδίο σχεδιαστικών εφαρμογών, όπως αρχιτεκτονική, εσωτερική διακόσμηση κτιρίων, εφαρμογές πολιτικού μηχανικού και μηχανολόγου μηχανικού κ.ά. Το πρόγραμμα αυτό, εξαιτίας της ευκολίας εκμάθησης και της σχετικά απλής λειτουργίας του, δίνει τη δυνατότητα χρήσης του ακόμα και σε χρήστες που δεν είναι εξοικειωμένοι με λογισμικά σχεδίασης CAD. Το Sketchup το διαχειρίζεται επί του παρόντος η εταιρεία Trimble Navigation, ενώ παλαιότερα ιδιοκτήτης υπήρξε και η Google. Υπάρχει συγκεκριμένη έκδοση του λογισμικού που είναι ελεύθερη και ονομάζεται Sketchup Make. Με χρήση αυτής έγινε η σχεδίαση του μοντέλου και συγκεκριμένα με το Sketchup Make 2015 (15.3.331).

Η χρήση του Sketchup για εφαρμογές που σχετίζονται με το EnergyPlus είναι ευρέως διαδεδομένη. Η συνεργασία μεταξύ των δύο προγραμμάτων είναι επιτεύξιμη με κατάλληλο plug-in, το οποίο προστίθεται στο Sketchup και επιτρέπει τη δημιουργία αρχείων IDF. Το συγκεκριμένο plug-in, που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία, ονομάζεται Legacy OpenStudio Plug-in και αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των Η.Π.Α. για το Υπουργείο Ενέργειας των Η.Π.Α. Το plug-in αυτό βοηθά στη δημιουργία αρχείου IDF με τον προσανατολισμό και τη γεωμετρία του ενεργειακού μοντέλου του κτιρίου. Η έννοια ενεργειακό μοντέλο, σημαίνει ότι με το Legacy OpenStudio Plug-in γίνεται και ο διαχωρισμός του κτιρίου σε θερμικές ζώνες. Να σημειωθεί επίσης ότι το Legacy OpenStudio Plug-in προσφέρει τη δυνατότητα πραγματοποίησης προσομοιώσεων EnergyPlus και προβολής των αποτελεσμάτων χωρίς να πραγματοποιείται έξοδος από το περιβάλλον του Sketchup – βέβαια αυτό είναι καταλληλότερο για απλές προσομοιώσεις, αφού δεν προσφέρονται με τον τρόπο αυτό οι δυνατότητες μοντελοποίησης (μέσω της δημιουργίας των σχετικών αντικειμένων) και προσομοίωσης που προσφέρουν τα IDF-Editor και EP-Launch. Η έκδοση του plug-in που χρησιμοποιήθηκε είναι η v1.0.14, που έπρεπε και να είναι συμβατή με τις εκδόσεις των Sketchup και EnergyPlus που χρησιμοποιήθηκαν.

Η σχεδίαση ενός σχετικά απλού κτιρίου σαν αυτό, μπορεί να πραγματοποιηθεί με απλούς χειρισμούς. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το περιβάλλον εργασίας του Sketchup:



**Σχήμα 6.1: Περιβάλλον εργασίας του Sketchup.**

Στο πάνω μέρος της εικόνας του σχήματος 6.1 φαίνεται η βασική μπάρα εργαλείων του Sketchup (πάνω σειρά) και οι δύο μπάρες εργαλείων του Legacy OpenStudio Plug-in (κάτω σειρά).

Τα εργαλεία του Sketchup που απαιτούνται για τη σχεδίαση της γεωμετρίας ενός ενεργειακού μοντέλου κτιρίου για το EnergyPlus είναι τα πολύ βασικά του λογισμικού, όπως για παράδειγμα τα εργαλεία:

- σχεδίασης γραμμών (Lines)
- σχεδίασης γεωμετρικών σχημάτων (Shapes)
- πρόσθεσης ύψους στα διάφορα γεωμετρικά σχήματα ενός επιπέδου μετατρέποντάς τα σε στερεά (Push/Pull)
- μετακίνησης στο χώρο για την επιθυμητή προβολή του μοντέλου (Orbit, Pan, Zoom)
- δημιουργίας οδηγών γραμμών (για τη διευκόλυνση της ορθής σχεδίασης) και μέτρησης αποστάσεων (Tape Measure Tool).

Τα εργαλεία στις δύο μπάρες του Legacy Openstudio Plug-in καθορίζουν τη δημιουργία του ενεργειακού μοντέλου και χωρίς αυτά δεν είναι δυνατή η δημιουργία μοντέλου προς προσομοίωση με το EnergyPlus. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι τα εργαλεία:

- δημιουργίας νέου αρχείου εισόδου στο EnergyPlus (New EnergyPlus Input File)
- ανοίγματος τέτοιου αρχείου (Open EnergyPlus Input File)
- αποθήκευσης τέτοιου αρχείου (Save EnergyPlus Input File και SaveAs EnergyPlus Input File)

- εμφάνισης λαθών και προειδοποιήσεων (Show Errors And Warnings)
- δημιουργίας θερμικής ζώνης (New EnergyPlus Zone)
- δημιουργίας συστημάτων σκίασης (New EnergyPlus Shading Group)
- εμφάνισης δεδομένων επιλεγμένων αντικειμένων του EnergyPlus (Info Tool)
- εμφάνισης πληροφοριών επιλεγμένων θερμικών ζωνών ή επιφανειών (Show Object Info Window)
- ταύτισης επιφανειών που είναι επιφάνειες συνόρου μεταξύ θερμικών ζωνών (Surface Matching)
- απόκρυψης μη επιλεγμένων (μη ενεργών) ομάδων επιφανειών και συνιστωσών (Hide Rest of Model)
- προβολής μοντέλου με διαφανή τρόπο (View Model in X-Ray Mode)
- απεικόνισης των επιφανειών του μοντέλου μέσω της κατηγορίας τους (Render By Surface Class)
- απεικόνισης των επιφανειών του μοντέλου μέσω των οριακών συνθηκών (Render By Boundary Condition)

Σημαντικό στοιχείο του περιβάλλοντος εργασίας είναι η περιοχή Measurements (κάτω δεξιά στην εικόνα του σχήματος 6.1), με την οποία δίνονται οι επιθυμητές διαστάσεις των αντικειμένων προς σχεδίαση.

Σχετικά με τους άξονες που ορίζουν τον προσανατολισμό του μοντέλου στο χώρο:

- ο **πράσινος άξονας** με συνεχή γραμμή ορίζει την κατεύθυνση του βορρά και την απόσταση από την αρχή των αξόνων προς αυτή την κατεύθυνση
- ο **πράσινος άξονας** με διακεκομμένη γραμμή ορίζει την κατεύθυνση του νότου και την απόσταση από την αρχή των αξόνων προς αυτή την κατεύθυνση
- ο **κόκκινος άξονας** με συνεχή γραμμή ορίζει την κατεύθυνση της ανατολής και την απόσταση από την αρχή των αξόνων προς αυτή την κατεύθυνση
- ο **κόκκινος άξονας** με διακεκομμένη γραμμή ορίζει την κατεύθυνση της δύσης και την απόσταση από την αρχή των αξόνων προς αυτή την κατεύθυνση
- ο **μπλε άξονας** με συνεχή γραμμή ορίζει την απόσταση από το επίπεδο του εδάφους προς τα πάνω
- ο **μπλε άξονας** με διακεκομμένη γραμμή ορίζει την απόσταση από το επίπεδο του εδάφους προς τα κάτω

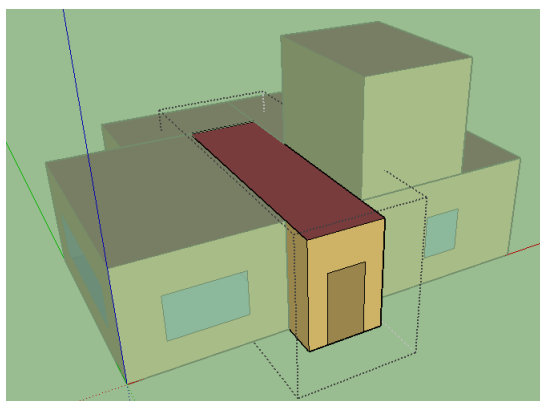
Σημαντικό σημείο, που χρειάζεται προσοχή από τον χρήστη, είναι το ότι πρέπει να αποθηκεύει το μοντέλο του χρησιμοποιώντας το εργαλείο αποθήκευσης του Legacy OpenStudio Plug-in και όχι αυτό του Sketchup. Μόνο έτσι θα αποθηκευτούν όλες οι ενεργειακές παράμετροι του μοντέλου που καθιστούν δυνατή την προσομοίωση με το EnergyPlus. Συγκεκριμένα, η αποθήκευση με το εργαλείο αυτό δημιουργεί το αρχείο IDF προς μετέπειτα επεξεργασία με το IDF-Editor.

Αναλυτικές οδηγίες για τη χρήση του Sketchup και του OpenStudio Plug-in μπορεί ο αναγνώστης να βρει στα σχετικά εγχειρίδια και διδακτικά υλικά στο διαδίκτυο, αλλά και στο περιβάλλον του Sketchup στις σχετικές επιλογές για βοήθεια.

Σχετικά με την κατοικία που σχεδιάστηκε για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης, χωρίστηκε σε 6 θερμικές ζώνες δηλαδή κάθε πραγματικός χώρος του κτιρίου από αυτούς που αναφέρονται παραπάνω αποτελεί μία ξεχωριστή θερμική ζώνη. Αν και αυτή η προσέγγιση επιφέρει αύξηση του υπολογιστικού χρόνου (ο οποίος όμως δεν αποτελεί πρόβλημα για τις ανάγκες της εργασίας, λόγω και του μεγέθους του μοντέλου), προσδίδει μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς. Αυτό είναι περισσότερο απαιτητό και λόγω του ότι, όπως φαίνεται παρακάτω, η κατανομή των υαλοπινάκων στο κτίριο δεν είναι ομοιόμορφη – οπότε τα ηλιακά θερμικά κέρδη αναμένεται να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των διάφορων χώρων της κατοικίας. Η χωροθέτηση των δωματίων της κατοικίας οδηγεί επίσης προς την κατεύθυνση αυτή, καθώς κάθε δωμάτιο έχει και διαφορετικό προσανατολισμό των εξωτερικών τοιχοποιιών του. Οπότε οι θερμικές ζώνες έχουν τα ονόματα των δωματίων που αναφέρονται παραπάνω στο υποκεφάλαιο 6.1. Η κάθε θερμική ζώνη σχεδιάστηκε ξεχωριστά.

Παρακάτω φαίνονται εικόνες από τις 6 θερμικές ζώνες του κτιρίου, μαζί με στοιχεία για που τις χαρακτηρίζουν:

#### Θερμική ζώνη κύριας εισόδου (main entrance):



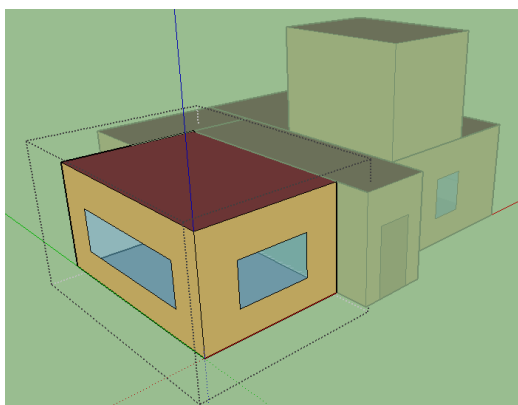
**Σχήμα 6.2: Μοντέλο κτιρίου με επιλεγμένη τη θερμική ζώνη κύριας εισόδου.**

Κύρια κατεύθυνση εξωτερικών τοίχων: Νότος

WWR = 0%



Θερμική ζώνη καθιστικού (living room):



**Σχήμα 6.3: Μοντέλο κτιρίου με επιλεγμένη τη θερμική ζώνη καθιστικού.**

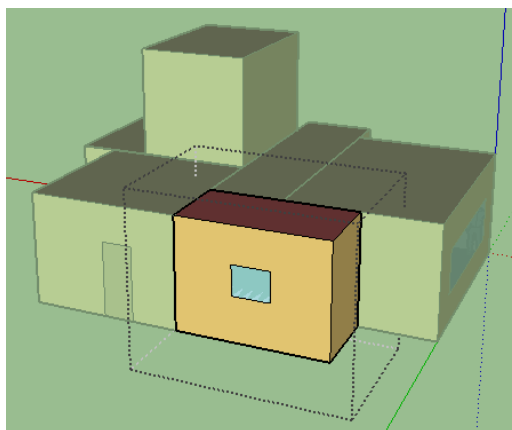
Κύρια κατεύθυνση εξωτερικών τοίχων: Δύση και Νότος

Δυτικός υαλοπίνακας: μήκος x ύψος = 4 x 1,2 m – WWR = 26,7%

Νότιος υαλοπίνακας: μήκος x ύψος = 2 x 1,2 m – WWR = 20%

Συνολικό WWR = 12% (με αναφορά στη συνολική επιφάνεια εξωτερικών τοίχων και οροφών)

Θερμική ζώνη μπάνιου (bathroom):



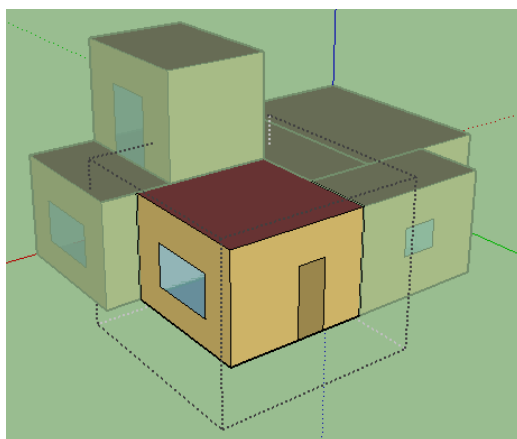
**Σχήμα 6.4: Μοντέλο κτιρίου με επιλεγμένη τη θερμική ζώνη μπάνιου.**

Κύρια κατεύθυνση εξωτερικών τοίχων: Βορράς

Βόρειος υαλοπίνακας: μήκος x ύψος = 1 x 0,8 m – WWR = 6,7%

Συνολικό WWR = 3,1% (με αναφορά στη συνολική επιφάνεια εξωτερικών τοίχων και οροφών)

Θερμική ζώνη κουζίνας (kitchen):



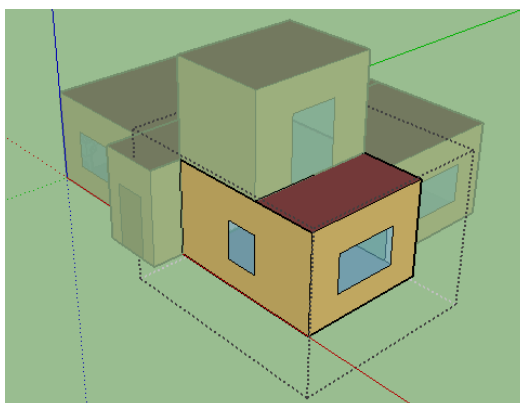
**Σχήμα 6.5: Μοντέλο κτιρίου με επιλεγμένη τη θερμική ζώνη κουζίνας.**

Κύρια κατεύθυνση εξωτερικών τοίχων: Βορράς και Ανατολή

Ανατολικός υαλοπίνακας: μήκος x ύψος = 2 x 1,2 m – WWR = 20%

Συνολικό WWR = 6% (με αναφορά στη συνολική επιφάνεια εξωτερικών τοίχων και οροφών)

Θερμική ζώνη κύριου υπνοδωματίου (master bedroom):



**Σχήμα 6.6: Μοντέλο κτιρίου με επιλεγμένη τη θερμική ζώνη κύριου υπνοδωματίου.**

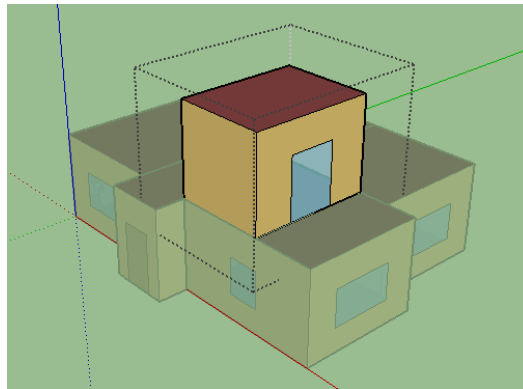
Κύρια κατεύθυνση εξωτερικών τοίχων: Ανατολή και Νότος

Ανατολικός υαλοπίνακας: μήκος x ύψος = 2 x 1,2 m – WWR = 20%

Νότιος υαλοπίνακας: μήκος x ύψος = 1 x 1,2 m – WWR = 8%

Συνολικό WWR = 9,5% (με αναφορά στη συνολική επιφάνεια εξωτερικών τοίχων και οροφών)

Θερμική ζώνη δεύτερου υπνοδωματίου (bedroom):



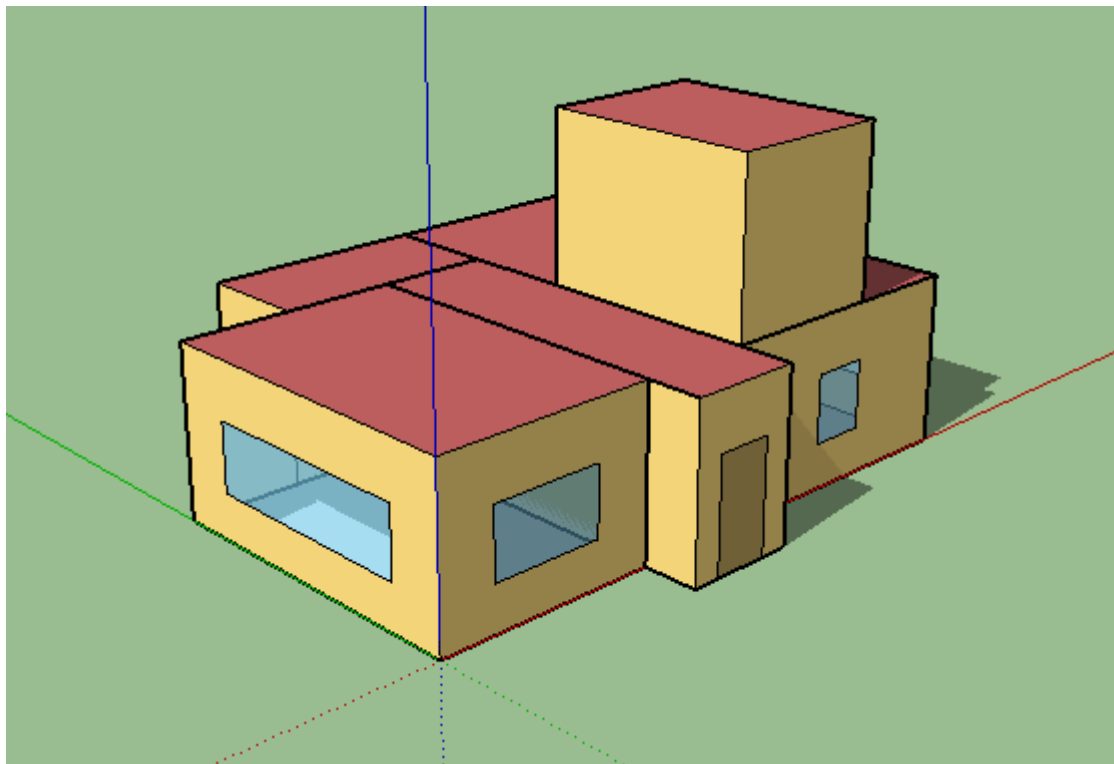
**Σχήμα 6.7: Μοντέλο κτιρίου με επιλεγμένη τη θερμική ζώνη δεύτερου υπνοδωματίου.**

Κύρια κατεύθυνση εξωτερικών τοίχων: Όλες οι κατευθύνσεις

Ανατολικός υαλοπίνακας: μήκος x ύψος = 1,5 x 2 m – WWR = 25%

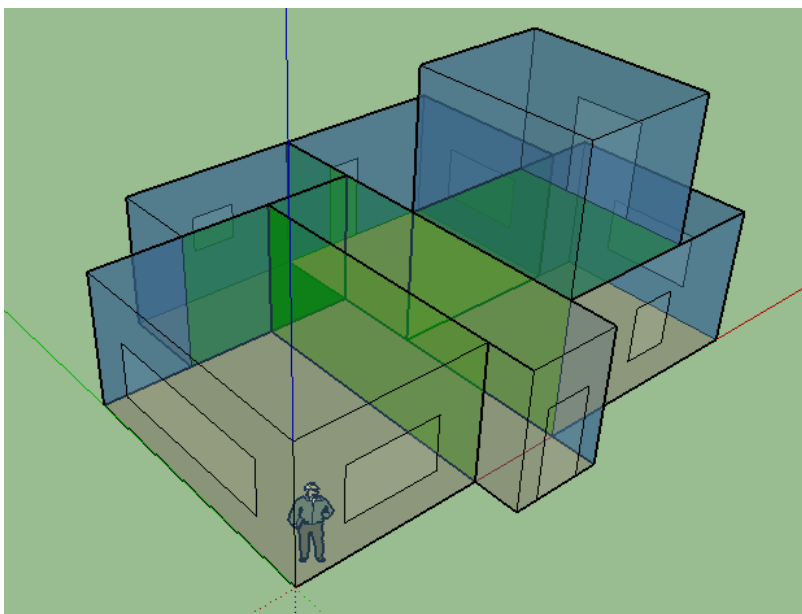
Συνολικό WWR = 5,6% (με αναφορά στη συνολική επιφάνεια εξωτερικών τοίχων και οροφών)

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται μια γενική άποψη της νοτιοδυτικής όψης της κατοικίας:



**Σχήμα 6.8: Νοτιοδυτική όψη της κατοικίας που μελετήθηκε, υπό ηλιασμό.**

Σημείο που επίσης αξίζει ιδιαίτερης προσοχής είναι το ότι οι επιφάνειες που αποτελούν σύνορα μεταξύ δύο θερμικών ζωνών πρέπει να δηλωθούν ως τέτοιες. Με τον τρόπο αυτό ένας τοίχος, για παράδειγμα, που βρίσκεται μεταξύ δύο θερμικών ζωνών ορίζεται ως εσωτερικός τοίχος και το EnergyPlus γνωρίζει ότι είναι κοινός μεταξύ τους. Αυτό επιτυγχάνεται με το εργαλείο Surface Matching. Πριν από αυτό βέβαια απαιτείται, εάν είναι αναγκαίος, ο διαχωρισμός κάθε επιφάνειας σε τμήματα ανάλογα με την εξωτερική οριακή συνθήκη. Για παράδειγμα ένας τοίχος θερμικής ζώνης, του οποίου μέρος επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον και μέρος είναι σύνορο με άλλη θερμική ζώνη, πρέπει να διαχωριστεί στα δύο αυτά τμήματα (τέτοιες επιφάνειες υπάρχουν όπως φαίνεται στα παραπάνω σχήματα και στο κτίριο που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία). Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται προβολή του κτιρίου μετά το Surface Matching και με Render By Boundary Condition. Με πράσινο χρώμα απεικονίζονται οι εσωτερικές επιφάνειες, οι οποίες αποτελούν σύνορα μεταξύ θερμικών ζωνών.



**Σχήμα 6.9: Απεικόνιση του μοντέλου του κτιρίου σε X-Ray Mode και με το Render By Boundary Condition, μετά από το Surface Matching.**

Όπως φαίνεται στην εικόνα του σχήματος 6.9, δεν μοντελοποιήθηκαν εσωτερικές πόρτες. Αυτή είναι μια πρακτική που ακολουθείται γενικότερα από μελετητές, καθώς δεν προσφέρει στην ουσία μεγαλύτερη ακρίβεια στο ενεργειακό μοντέλο, αντιθέτως το καθιστά πιο πολύπλοκο και χωρίς ουσιαστικό κέρδος. Οπότε τα εσωτερικά κατακόρυφα δομικά στοιχεία περιλαμβάνουν μόνο τοίχους.

Ακόμη, όπως φαίνεται και στις παραπάνω εικόνες, στο μοντέλο της κατοικίας δεν τοποθετήθηκαν συστήματα σκίασης, που, αν και η ύπαρξή τους γενικά θα ήταν λογική, αποτρέπουν την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων σε κτίριο με θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες αφού παρεμποδίζουν τον πλήρη ηλιασμό αυτών. Εξάλλου, ένα από τα αποτελέσματα που μπορούν να επιφέρουν οι θερμοχρωμικοί

υαλοπίνακες είναι η σημαντική μείωση της ανάγκης για συστήματα σκίασης. Για τον ίδιο λόγο δεν μοντελοποιήθηκε ύπαρξη σκίασης από διπλανά κτίρια, δηλαδή θεωρήθηκε ότι το κτίριο υπόκειται σε πλήρη ηλιασμό από όλες τις δυνατές κατευθύνσεις.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η σχεδίαση στο Sketchup για την δημιουργία ενός ενεργειακού μοντέλου κτιρίου με το Legacy OpenStudio Plug-in, δεν απαιτεί τη λεπτομερή σχεδίαση των επιφανειών με πάχος, αλλά την απλή σχεδίαση τρισδιάστατων γεωμετρικών σχημάτων. Ο ορισμός των υλικών και του πάχους των επιφανειών του κτιρίου, καθώς και πολλών άλλων στοιχείων, γίνεται στο IDF-Editor. Παρακάτω γίνεται η περιγραφή της διαδικασίας αυτής για το μοντέλο της παρούσας εργασίας.

### 6.3 Επεξεργασία με το IDF-Editor

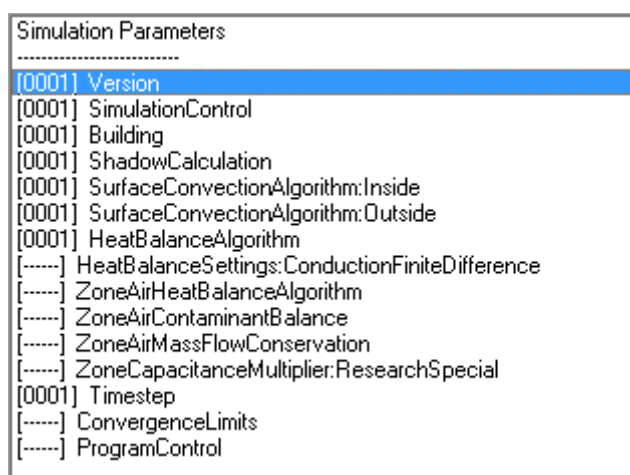
Το αρχείο IDF που προκύπτει από τη σχεδίαση στο περιβάλλον του Sketchup περιέχει εκτός από τα αντικείμενα που αφορούν τη γεωμετρία του κτιρίου και άλλα αντικείμενα, που αφορούν για παράδειγμα παραμέτρους που καθορίζουν τους υπολογισμούς της προσομοίωσης (π.χ. το χρονικό βήμα υπολογισμών), την τοποθεσία του κτιρίου, τα υλικά και την κατασκευή των επιφανειών του κ.ά. – τα οποία ορίζονται από προεπιλογή (by default). Βεβαίως, όλα αυτά τα αντικείμενα μπορούν να διαγραφούν ή να τροποποιηθούν, κατά προτίμηση, από τον μελετητή με το IDF Editor. Με το IDF-Editor προστίθενται και όλα τα υπόλοιπα επιθυμητά και απαραίτητα για την προσομοίωση αντικείμενα.

Η έκδοση του EnergyPlus που χρησιμοποιήθηκε είναι η 8.4.0. Με την επιλογή Edit - IDF Editor μέσα από το περιβάλλον του EP-Launch πραγματοποιείται είσοδος στο περιβάλλον του IDF-Editor. Ακολουθεί περιγραφή των διάφορων αντικειμένων (objects) που δημιουργήθηκαν στις διάφορες κατηγορίες (classes) και ομάδες κατηγοριών (groups). Είναι σημαντικό ο αναγνώστης να καταλάβει ότι δεν είναι υποχρεωτική η δημιουργία αντικειμένων σε όλες τις κατηγορίες, καθώς πολλές από αυτές αντιπροσωπεύουν αντικείμενα που μπορεί να μην υπάρχουν στο κτίριο προς ενεργειακή προσομοίωση. Για παράδειγμα, για ένα κτίριο που περιλαμβάνει μονούς υαλοπίνακες δεν δημιουργείται αντικείμενο/αντικείμενα που να αφορά το αέριο/αέρια πλήρωσης του διακένου. Ωστόσο, τα αντικείμενα του αρχείου IDF δεν περιγράφουν απαραίτητα υπαρκτά αντικείμενα του κτιρίου, αλλά μπορεί να σχετίζονται για παράδειγμα με παραμέτρους υπολογισμών της προσομοίωσης, επιλογή ενός αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί για κάποιον συγκεκριμένο υπολογισμό, χρονικά προγράμματα κατανομής των εσωτερικών θερμικών κερδών κ.ά. Επίσης, πολλές κατηγορίες (σε μία ή περισσότερες ομάδες κατηγοριών) μπορεί να σχετίζονται με την ίδια έννοια και να είναι επιλογή του μελετητή του σε ποια από αυτές θα δημιουργήσει αντικείμενο για την περιγραφή αυτής της έννοιας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η ύπαρξη πολλών κατηγοριών για τη δυνατή περιγραφή ενός συγκεκριμένου υπολογισμού της προσομοίωσης, με χρήση των οποίων ο υπολογισμός αυτός μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω διαφορετικών αλγορίθμων. Άλλο παράδειγμα είναι το να είναι δυνατή η μοντελοποίηση ενός υπαρκτού αντικειμένου με διαφορετικούς τρόπους (για παράδειγμα με διαφορετική ακρίβεια), μέσω δημιουργίας αντικειμένου

σε διαφορετικές κατηγορίες που σχετίζονται με αυτό. Βέβαια, υπάρχουν και κάποιες κατηγορίες στις οποίες είναι απαραίτητη η δημιουργία αντικειμένων για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης – όπως για παράδειγμα η κατηγορία Building, που περιγράφει παραμέτρους που χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση του κτιρίου.

Το κτίριο αρχικά μοντελοποιήθηκε με διαυγείς (clear) διπλούς υαλοπίνακες με πλήρωση αργού, πάχους 6-13-6 mm και η περιγραφή της συνολικής μοντελοποίησης του κτιρίου γίνεται με αυτούς. Φυσικά, όποιες αλλαγές έγιναν μετέπειτα στους υαλοπίνακες, επεξηγούνται ύστερα από αυτή την περιγραφή. Η περιγραφή των αντικειμένων στις διάφορες κατηγορίες γίνεται παρακάτω κατά σειρά εμφάνισης των κατηγοριών στο περιβάλλον του IDF-Editor, στον κατάλογο κατηγοριών (class list). Για όσα από τα αντικείμενα που δημιουργήθηκαν κρίθηκε ως χρήσιμο, γίνεται παρουσίαση και μέσω εικόνων, ενώ τα υπόλοιπα επεξηγούνται με απλή περιγραφή.

## Simulation Parameters



Σχήμα 6.10: Ομάδα κατηγοριών Simulation Parameters.

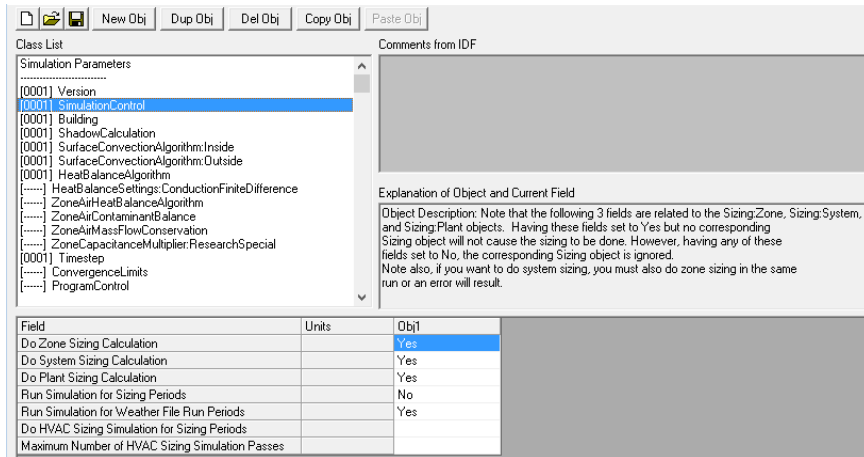
### Version

Προσδιορίζεται η έκδοση του EnergyPlus για την οποία προορίζεται το αρχείο. Εδώ είναι η έκδοση 8.4.

### Simulation Control

Στην κατηγορία αυτή ορίζεται το τι είδους υπολογισμοί θα πραγματοποιηθούν κατά την εκτέλεση του EnergyPlus. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, εδώ επιλέχθηκε να γίνουν γενικά όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί διαστασιολόγησης (φορτίων θερμικών ζωνών και παροχών αέρα από τα συστήματα HVAC για την κάλυψή τους, καθώς και ισχύος και άλλων στοιχείων των συστημάτων HVAC και των

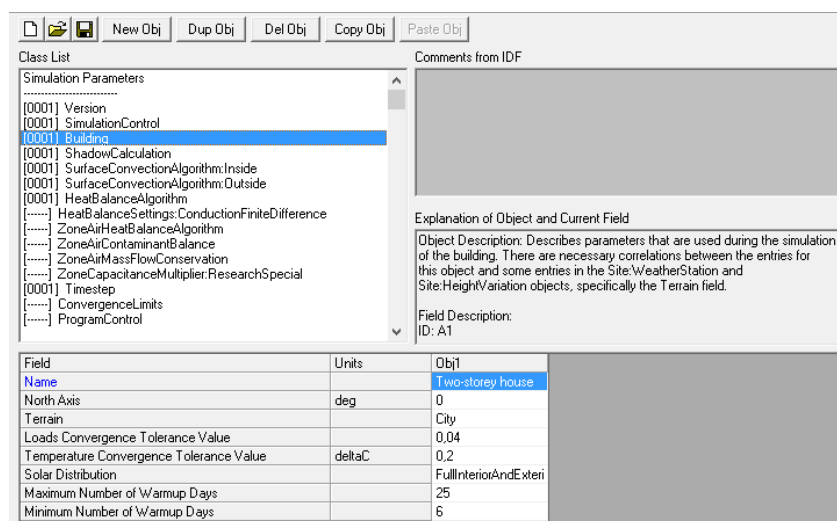
σχετικών κυκλωμάτων) και η προσομοίωση να γίνει για την περίοδο που αναφέρεται στο αρχείο καιρού (ετήσια) – και όχι και για τις περιόδους διαστασιολόγησης (sizing periods), που είναι οι ημέρες σχεδιασμού. Αυτές χρησιμοποιήθηκαν μόνο για τις διάφορες διαστασιολογήσεις που γίνονται κατά την εκτέλεση, πριν από την έναρξη της ετήσιας προσομοίωσης.



Σχήμα 6.11: Αντικείμενο στην κατηγορία Simulation Control.

## Building

Η κατηγορία αυτή περιγράφει τις παραμέτρους που χρησιμοποιούνται κατά την προσομοίωση του κτιρίου. Στο πεδίο Name, όπου το μπλε χρώμα της λέξης Name υποδηλώνει ότι η συμπλήρωση τιμής είναι υποχρεωτική, δηλώνεται το όνομα του κτιρίου. Τα υπόλοιπα πεδία αφορούν τον προσανατολισμό του κτιρίου ως προς τον άξονα του βορρά, το είδος της τοπογραφίας της περιοχής (για τον υπολογισμό του οριακού στρώματος του ανέμου), παραμέτρους που καθορίζουν τα κριτήρια σύγκλισης στους υπολογισμούς των φορτίων και των θερμοκρασιών των θερμικών ζωνών, τον τρόπο μοντελοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας και τον μέγιστο και ελάχιστο αριθμό των “ημερών προθέρμανσης”, στις οποίες επιτυγχάνεται η σύγκλιση.



Σχήμα 6.12: Αντικείμενο στην κατηγορία Building.

Σχετικά με τον τρόπο μοντελοποίησης της ηλιακής ακτινοβολίας, αυτός ορίστηκε να είναι ο FullInteriorAndExterior, που σημαίνει ότι γίνεται η θεώρηση ότι η εισερχόμενη από τους υαλοπίνακες ακτινοβολία προσπίπτει κανονικά σε όλες τις πιθανές εσωτερικές επιφάνειες μιας θερμικής ζώνης, ενώ λαμβάνεται υπόψιν και τυχούσα ύπαρξη εξωτερικών συστημάτων σκίασης και επιφανειών του κτιρίου που δυνητικά επιφέρουν σκίαση. Επίσης, υπολογίζεται η ποσότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στην εσωτερική επιφάνεια ενός υαλοπίνακα που απορροφάται, αυτή που ανακλάται και αυτή που διέρχεται προς το εξωτερικό.

### ShadowCalculation

Ένα αντικείμενο στην κατηγορία αυτή χρησιμοποιείται για τον έλεγχο κάποιων λεπτομερειών του EnergyPlus σχετικά με μοντέλα ηλιασμού, σκίασης και φυσικού φωτισμού. Σχετικά με τη μεταβολή της θέσης του ηλίου στον ουράνιο θόλο την ίδια ώρα της ημέρας από ημέρα σε ημέρα, αν και η προεπιλογή ήταν να υπολογίζεται κάθε 20 ημέρες και στις ενδιάμεσες να χρησιμοποιείται η τιμή αυτή, προτιμήθηκε η επιλογή του υπολογισμού για ημερήσιες μεταβολές. Αυτή η επιλογή προσθέτει αρκετό υπολογιστικό χρόνο, αλλά είναι πολύ χρήσιμη για εφαρμογές μοντελοποίησης κτιρίων με υαλοπίνακες μεταβλητών ιδιοτήτων. Αν και το αρχείο καιρού περιέχει τιμές της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας, ο “εσωτερικός υπολογισμός” της θέσης του ηλίου καθορίζει το πώς αυτή επηρεάζει τα διάφορα μέρη του κτιρίου.

### SurfaceConvectionAlgorithm:Inside

Ορίζεται ο αλγόριθμος συναγωγής που θα χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση θερμότητας με συναγωγή στις εσωτερικές πλευρές των επιφανειών μεταφοράς θερμότητας του κτιρίου (τοίχοι κ.λπ.). Παρέμεινε από προεπιλογή η χρήση του αλγορίθμου TARP, που συσχετίζει τον συντελεστή συναγωγής με τη θερμοκρασιακή διαφορά σε διάφορες κατευθύνσεις.

### SurfaceConvectionAlgorithm:Outside

Ορίζεται ο αντίστοιχος αλγόριθμος συναγωγής για τις εξωτερικές πλευρές των επιφανειών μεταφοράς θερμότητας του κτιρίου. Παρέμεινε από προεπιλογή η χρήση του αλγορίθμου DOE-2, που χρησιμοποιεί μια συσχέτιση από μετρήσεις των Klems και Yazdaniyan σε τραχείες επιφάνειες.

### Heat Balance Algorithm

Εδώ επιλέγεται ποιος αλγόριθμος θα χρησιμοποιηθεί για τον ενεργειακό ισολογισμό της μετάδοσης θερμότητας και υγρασίας. Επιλέχθηκε η προεπιλογή ConductionTransferFunction, που λαμβάνει υπόψιν μόνο την αισθητή θερμότητα (αγνοείται η αποθήκευση και διάχυση υγρασίας διαμέσου των δομικών στοιχείων).



## Timestep

Το χρονικό βήμα των υπολογισμών (timestep) είναι πολύ σημαντική παράμετρος της προσομοίωσης. Η τιμή αυτή είναι γνωστή και ως zone timestep, καθώς καθορίζει τους υπολογισμούς φορτίων και μεταφοράς θερμότητας στις θερμικές ζώνες (υπάρχει όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 5 και το χρονικό βήμα υπολογισμών για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ συστημάτων HVAC και θερμικών ζωνών – system timestep, που γενικά μεταβάλλεται αυτομάτως από το πρόγραμμα κατά την εκτέλεση). Η τιμή που ορίζεται εδώ είναι ο αριθμός των χρονικών βημάτων που χρησιμοποιούνται στο διάστημα μίας ώρας. Δηλαδή μεγαλύτερου χρονικού διαστήματος χρονικά βήματα έχουν μικρότερες τιμές για τον αριθμό των χρονικών βημάτων μέσα σε μία ώρα. Η επιλογή που θα γίνει έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ακρίβεια των υπολογισμών της προσομοίωσης και στον υπολογιστικό χρόνο. Οι δυνατές τιμές είναι από 1 έως 60, ενώ οι προτεινόμενες για συνήθεις εφαρμογές είναι από 4 έως 60. Τα αρχεία καιρού συνήθως έχουν τιμές με χρονικό βήμα μίας ώρας, αλλά το EnergyPlus, για χρονικά βήματα υπολογισμού μικρότερα αυτής, πραγματοποιεί γραμμική παρεμβολή σε αυτά τα δεδομένα καιρικών συνθηκών. Εξάλλου, η απόκριση του κτιρίου, δεν κυβερνάται από το χρονικό βήμα των δεδομένων καιρού, αλλά από τις χρονικές κλίμακες της δυναμικής συμπεριφοράς του κτιριακού κελύφους, όπως επίσης και από στοιχεία όπως τα χρονικά προγράμματα μεταβολής των εσωτερικών θερμικών κερδών, θερμοστατών και διαθεσιμότητας εξοπλισμού.

Εδώ χρησιμοποιήθηκε η προεπιλογή του IDF-Editor που είναι ίση με 6, δηλαδή οι υπολογισμοί να γίνονται κάθε 10 λεπτά της ώρας.

## **Location and Climate**

```
Location and Climate
-----
[0001] Site:Location
[0002] SizingPeriod:DesignDay
[-----] SizingPeriod:WeatherFileDays
[-----] SizingPeriod:WeatherFileConditionType
[0001] RunPeriod
[-----] RunPeriod:CustomRange
[-----] RunPeriodControl:SpecialDays
[0001] RunPeriodControl:DaylightSavingTime
[-----] WeatherProperty:SkyTemperature
[-----] Site:WeatherStation
[-----] Site:HeightVariation
[0001] Site:GroundTemperature:BuildingSurface
[-----] Site:GroundTemperature:FCfactorMethod
[-----] Site:GroundTemperature:Shallow
[-----] Site:GroundTemperature:Deep
```

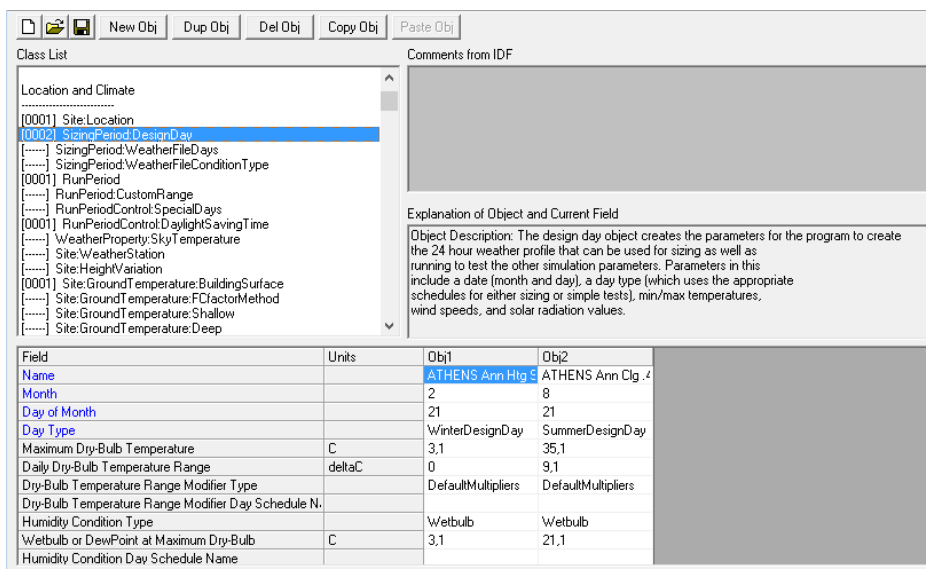
**Σχήμα 6.13: Ομάδα κατηγοριών Location and Climate. Υπάρχουν και άλλες κατηγορίες παρακάτω στη λίστα, στις οποίες δεν δημιουργήθηκαν αντικείμενα.**

## Site:Location

Η κατηγορία αυτή περιγράφει τις παραμέτρους που σχετίζονται με την τοποθεσία του κτιρίου, όπως όνομα τοποθεσίας, γεωγραφικό πλάτος και μήκος, ζώνη ώρας και υψόμετρο. Επιτρέπεται ορισμός μόνο μίας τοποθεσίας (δηλαδή ενός αντικειμένου). Εάν υπάρχει διαθέσιμο αρχείο καιρού για την προσομοίωση, χρησιμοποιούνται τα αντίστοιχα δεδομένα από αυτό και παραμερίζεται ό,τι και αν οριστεί στην κατηγορία αυτή του αρχείου IDF.

## SizingPeriod:DesignDay

Εδώ γίνεται περιγραφή των συνθηκών σχεδιασμού που θα χρησιμοποιηθούν. Τα αντικείμενα που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκεκριμένη προσομοίωση βρέθηκαν στο κατάλληλο αρχείο που συνοδεύει το αρχείο καιρού για την Αθήνα και περιλαμβάνει ποικιλία ημερών σχεδιασμού. Επιλέχθηκε ημέρα σχεδιασμού χειμώνα 99% και ημέρα σχεδιασμού θέρους 0,4%, ξηρού θερμομέτρου. Η τιμή του ποσοστού υποδηλώνει ότι χρησιμοποιούνται θερμοκρασίες, η υπέρβαση των οποίων παρατηρείται μόνο σε ποσοστό χρόνου λιγότερο αυτής της τιμής, για την εκάστοτε περίοδο.



The screenshot shows the software interface for configuring the SizingPeriod:DesignDay object. The Class List on the left shows the selected object. The right pane shows the object description and a table of field values.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		ATHENS Ann Htg S	ATHENS Ann Clg 4
Month		2	8
Day of Month		21	21
Day Type		WinterDesignDay	SummerDesignDay
Maximum Dry-Bulb Temperature	C	3,1	35,1
Daily Dry-Bulb Temperature Range	deltaC	0	9,1
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Type		DefaultMultipliers	DefaultMultipliers
Dry-Bulb Temperature Range Modifier Day Schedule Name			
Humidity Condition Type		Wetbulb	Wetbulb
Wetbulb or DewPoint at Maximum Dry-Bulb	C	3,1	21,1
Humidity Condition Day Schedule Name			

**Σχήμα 6.14: Αντικείμενα στην κατηγορία SizingPeriod:DesignDay.**

## RunPeriod

Η περίοδος για την οποία θα εκτελεστεί η προσομοίωση. Πολλαπλές περίοδοι μπορούν να οριστούν. Ο χρήστης μπορεί εδώ να ορίσει τα διάφορα επιθυμητά δεδομένα, παραμερίζοντας τα δεδομένα του αρχείου καιρού που αφορούν τις περιόδους θερινής ώρας και αργιών. Φυσικά αν δεν γίνει μια τέτοια προσέγγιση, χρησιμοποιούνται όλα τα δεδομένα του αρχείου καιρού.

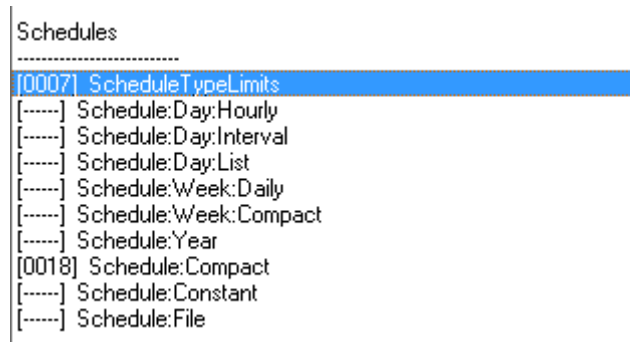
### RunPeriodControl:DaylightSavingTime

Με ορισμό αντικειμένου σε αυτή την κατηγορία, ορίζεται η χρονική περίοδος του έτους στην οποία θα εφαρμοστεί η θερινή ώρα, παραμερίζοντας τα αντίστοιχα δεδομένα του αρχείου καιρού. Εδώ ως ημέρες αλλαγής ώρας ορίστηκαν η τελευταία Κυριακή του Μαρτίου και η τελευταία Κυριακή του Οκτωβρίου, που σε κάθε περίπτωση είναι αυτές που εφαρμόζονται στην πραγματικότητα.

### Site:GroundTemperature:BuildingSurface

Εδώ ορίζονται θερμοκρασίες που αναφέρονται σε εξωτερικές επιφάνειες που έχουν σαν εξωτερική οριακή συνθήκη το έδαφος (η αναφορά γίνεται δηλαδή πρακτικά στην πλάκα του κατώτερου επιπέδου του κτιρίου). Η προεπιλογή είναι 18 °C. Για καλύτερα αποτελέσματα (και επειδή οι θερμοκρασίες αυτές επηρεάζονται και από το έδαφος και από τον κλιματισμό του κτιρίου), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό το βοηθητικό πρόγραμμα (utility) Slab, που εκτελείται μέσα από το περιβάλλον του EP-Launch. Μία άλλη λύση είναι ο ορισμός από τον μελετητή λογικών τιμών για τις θερμοκρασίες αυτές. Ένας απλός πρακτικός κανόνας είναι να ορίζονται θερμοκρασίες χαμηλότερες κατά περίπου 2 βαθμούς σε σχέση με τη θερμοκρασία του εσωτερικού αέρα, ανά εποχή. Προφανώς όσο καλύτερη μόνωση τοποθετείται στο δάπεδο, τόσο λιγότερο θα επηρεάζεται αυτό από το έδαφος. Για τις ανάγκες της εργασίας ορίστηκαν οι παρακάτω τιμές, ξεκινώντας από τον Ιανουάριο και καταλήγοντας στο Δεκέμβριο (οι τιμές ορίστηκαν ώστε να λαμβάνεται κατά κάποιο τρόπο υπόψιν και η μεγάλη θερμική αδράνεια του εδάφους κάτω από το κτίριο): 18.5, 18, 18.5, 19.5, 21, 22.5, 23.5, 24, 23.5, 22.5, 21, 19.5. Πάντως αξίζει να αναφερθεί ότι παρατηρήθηκε το ότι οι τιμές αυτές επηρέασαν ελάχιστα τα αποτελέσματα, συγκριτικά με τη χρήση των τιμών προεπιλογής (18°C).

## Schedules



**Σχήμα 6.15: Ομάδα κατηγοριών Schedules.**

## ScheduleTypeLimits

Στην κατηγορία αυτή ορίζονται με διάφορα αντικείμενα τα όρια (εύρους τιμών) από τα διάφορα χρονικά προγράμματα που έχουν καταχωρηθεί, καθώς και οι τύποι των δεδομένων που καταχωρούνται στα προγράμματα αυτά. Ένα παράδειγμα είναι η δημιουργία αντικειμένου που καθορίζει ότι σε κάποια προγράμματα θα χρησιμοποιηθούν κλάσματα με όρια το 0 και το 1 και συνεχείς τιμές στο ενδιάμεσο.

## Schedule:Compact

Η κατηγορία αυτή προσφέρει έναν πρακτικό και βολικό τρόπο ορισμού όλων των χρονικών προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των διάφορων λειτουργιών στο κτίριο, για ωριαίες (και υπο-ωριαίες), ημερήσιες και μηνιαίες μεταβολές. Για την προσομοίωση της εργασίας ορίστηκαν 18 αντικείμενα στην κατηγορία αυτή, όπου το καθένα περιγράφει και ένα διαφορετικό πρόγραμμα λειτουργίας. Το κάθε αντικείμενο δημιουργήθηκε κατά τη δημιουργία του αντικειμένου άλλης κατηγορίας με το οποίο σχετίζεται.

Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9
Bedrooms Occupan	Livn Occupancy Scl	Kit Occupancy Sch	Mentr Occupancy S	Bath Occupancy Sc	Activity Schedule	Work Efficiency Scl	Clothing Schedule	Air Velocity Schem
Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Any Number	Fraction	Any Number	Any Number
Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 04/15	Through: 12/31
For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Until: 07:00	Until: 14:00	Until: 09:00	Until: 08:00	Until: 07:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 24:00
.5	0	0	0	0	80	0	1	0.2
Until: 09:00	Until: 17:00	Until: 12:00	Until: 09:00	Until: 09:00			Through: 10/15	
.25	.25	.25	.25	.25			For: AllDays	
Until: 14:00	Until: 20:00	Until: 14:00	Until: 12:00	Until: 22:00			Until: 24:00	
0	.75	.5	0	0			.5	
Until: 17:00	Until: 22:00	Until: 20:00	Until: 13:00	Until: 24:00			Through: 12/31	
.25	0	0	.25	.25			For: AllDays	
Until: 24:00	Until: 24:00	Until: 22:00	Until: 21:00				Until: 24:00	
0	.5	.75	0				1	
		Until: 24:00	Until: 22:00					
		0	.25					
			Until: 24:00					
			0					

Σχήμα 6.16: Αντικείμενα στην κατηγορία Schedules (1<sup>ο</sup> μέρος).

Obj10	Obj11	Obj12	Obj13	Obj14	Obj15	Obj16	Obj17	Obj18
Lights Schedule	Kit Equip Sched	Bath Equip Sched	Other Rooms Equip	Infiltration Schedule	Ventilation Schedule	Mentr Ventil Sched	Heating Setpoint Sc	Cooling Setpoint Sc
Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Fraction	Temperature	Temperature
Through: 03/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 04/15	Through: 12/31	Through: 12/31	Through: 12/31
For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays	For: AllDays
Until: 07:00	Until: 10:30	Until: 23:00	Until: 09:00	Until: 24:00	Until: 09:00	Until: 24:00	Until: 10:00	Until: 10:00
0.05	.05	0	.1	1	.1	.1	18	28
Until: 08:00	Until: 11:00	Until: 23:30	Until: 12:00		Until: 09:30		Until: 22:00	Until: 23:00
0.1	.4	.5	.3		.5		20	26
Until: 17:00	Until: 14:00	Until: 24:00	Until: 14:00		Until: 17:00		Until: 24:00	Until: 24:00
.05	.1	0	.2		.2		18	28
Until: 18:00	Until: 19:00		Until: 17:00		Until: 17:30			
.4	.05		.6		.5			
Until: 23:00	Until: 21:00		Until: 19:00		Until: 24:00			
.8	.2		.4		.1			
Until: 24:00	Until: 24:00		Until: 22:00		Through: 10/15			
.6	.05		.3		For: AllDays			
Through: 09/30			Until: 24:00		Until: 09:00			
For: AllDays			.2		.8			
Until: 19:00					Until: 22:00			
.05					.4			

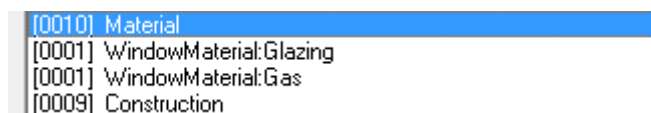
Σχήμα 6.17: Αντικείμενα στην κατηγορία Schedules (2<sup>ο</sup> μέρος) – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων 10 και 15.

Ενδεικτικά, επεξηγούνται παρακάτω τα σημαντικότερα χρονικά προγράμματα που ορίστηκαν:

- Τα αντικείμενα 1 έως 5 της εικόνας του σχήματος 6.16 σχετίζονται με την παρουσία ανθρώπων (χρηστών) στα υπνοδωμάτια, στο καθιστικό, στην κουζίνα, στην κύρια είσοδο και στο μπάνιο, αντίστοιχα. Για παράδειγμα, στο μπάνιο σε κάθε ημέρα του έτους (έως τις 31/12) δεν βρίσκονται χρήστες από τις 24:00 έως τις 07:00, βρίσκεται το  $\frac{1}{4}$  των χρηστών της κατοικίας από τις 07:00 έως τις 09:00 και ούτω καθεξής.
- Το αντικείμενο 10 της εικόνας του σχήματος 6.17 σχετίζεται με το χρονικό πρόγραμμα λειτουργίας του εσωτερικού τεχνητού φωτισμού. Στο αντικείμενο αυτό έγινε μια υποτυπώδης διάκριση ανάλογα με την εποχή, έτσι ώστε η λειτουργία να είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική (για παράδειγμα η χρήση του φωτισμού να ξεκινά πιο νωρίς το απόγευμα κατά τη χειμερινή περίοδο). Το ποσοστό σχετίζεται με την ισχύ του φωτισμού.
- Τα αντικείμενα 11 έως 13 της εικόνας του σχήματος 6.17 σχετίζονται με το χρονικό πρόγραμμα λειτουργίας του ηλεκτρικού εξοπλισμού στην κουζίνα, το μπάνιο και όλα τα υπόλοιπα δωμάτια αντίστοιχα. Το ποσοστό σχετίζεται με την ισχύ του ηλεκτρικού εξοπλισμού. Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει, για παράδειγμα, το αντικείμενο 11 όπου φαίνεται σημαντική αύξηση της χρησιμοποιούμενης ισχύος στην κουζίνα από τις 10:30 έως τις 11:00 καθημερινά (έγινε η υπόθεση ότι τότε γίνεται η προετοιμασία του φαγητού).
- Το αντικείμενο 14 της εικόνας του σχήματος 6.17 σχετίζεται με το χρονικό πρόγραμμα λειτουργίας του αερισμού λόγω διεύθυνσης εξωτερικού αέρα από τα διάφορα στοιχεία του κτιριακού κελύφους. Ορίστηκε σταθερή διεύθυνση του αέρα για όλες τις ώρες και μέρες.
- Τα αντικείμενα 15 και 16 της εικόνας του σχήματος 6.17 σχετίζονται με το χρονικό πρόγραμμα λειτουργίας του φυσικού αερισμού (ανανέωση αέρα) από τα ανοίγματα του κτιρίου. Το αντικείμενο 16 αφορά την κύρια είσοδο και το αντικείμενο 15 όλους τους υπόλοιπους χώρους της κατοικίας. Φαίνεται από την εικόνα ότι ο φυσικός αερισμός στον χώρο της κύριας εισόδου είναι συγκριτικά μικρότερος (κάτι που είναι λογικό). Έγινε επίσης η υπόθεση ότι γενικά ο φυσικός αερισμός κατά τη χειμερινή περίοδο είναι μικρότερος, σε σχέση με την θερινή.
- Τα τελευταία δύο αντικείμενα (17 και 18) της εικόνας του σχήματος 6.17 σχετίζονται με το χρονικό πρόγραμμα ρύθμισης του θερμοστάτη για θέρμανση και ψύξη, αντίστοιχα. Ο θερμοστάτης ορίστηκε σε ετήσια βάση, για όλους τους χώρους, για τη θέρμανση στη θερμοκρασία των 20°C, με νυχτερινή μείωση ισχύος (night setback) μέσω ρύθμισης στους 18°C για το διάστημα από 22:00 έως 10:00. Για την ψύξη ορίστηκε σε ετήσια βάση, για όλους τους χώρους, στη θερμοκρασία των 26°C, με νυχτερινή μείωση ισχύος (night setback) μέσω ρύθμισης στους 28°C για το διάστημα από 23:00 έως 10:00.

## Surface Construction Elements

Καθότι η ομάδα αυτή κατηγοριών έχει πληθώρα κατηγοριών, η παρακάτω εικόνα απεικονίζει μόνο τις κατηγορίες στις οποίες δημιουργήθηκαν αντικείμενα (μέσω κατάλληλης επιλογής στο περιβάλλον του IDF-Editor):



**Σχήμα 6.18: Κατηγορίες στην ομάδα κατηγοριών Surface Construction Elements.**

### Material

Εδώ δηλώνονται μέσω αντικειμένων τα αδιαφανή δομικά υλικά κατασκευής του κτιρίου μελέτης. Δημιουργήθηκαν 10 αντικείμενα, που φαίνονται παρακάτω:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		M14 150mm heavy	Insulation: Expande	102 70mm insulation	M01 100mm brick	11N Stucco
Roughness		MediumRough	MediumSmooth	MediumRough	MediumRough	Smooth
Thickness	m	0,1524	0,05	0,07	0,1016	0,0253
Conductivity	W/m-K	1,95	0,029	0,03	0,89	0,6918
Density	kg/m3	2240	29	43	1920	1858
Specific Heat	J/kg-K	900	1210	1210	790	837
Thermal Absorptance						0,9
Solar Absorptance						0,92
Visible Absorptance						0,92

**Σχήμα 6.19: Αντικείμενα στην κατηγορία Material (1<sup>ο</sup> μέρος).**

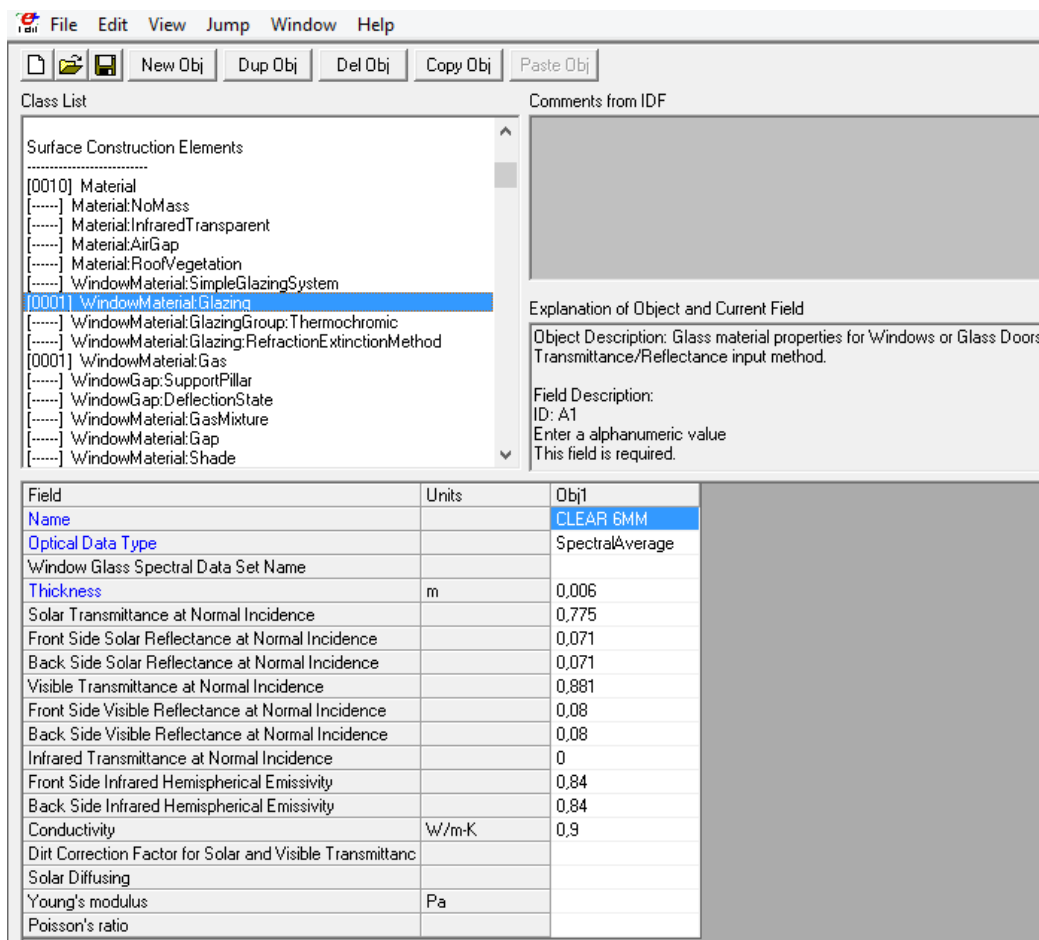
Obj6	Obj7	Obj8	Obj9	Obj10
1/2IN Gypsum	Hardwood - 12.9mm	Oak - 10mm	101 25mm insulation	Std Wood 2inch
Smooth	MediumSmooth	MediumSmooth	MediumRough	MediumSmooth
0,0127	0,0129	0,01	0,0254	0,0508
0,16	0,167	0,17	0,03	0,12
784,9	680	704	43	540
830	1630	1630	1210	1210
0,9	0,9	0,9		0,9
0,92	0,7	0,7		0,7
0,92	0,7	0,7		0,7

**Σχήμα 6.20: Αντικείμενα στην κατηγορία Material (2<sup>ο</sup> μέρος).**

Τα υλικά ορίζονται δίνοντας στα κατάλληλα πεδία το όνομα (Name), την τραχύτητα (Roughness), το πάχος (Thickness), την θερμική αγωγιμότητα (Conductivity), την ειδική θερμοχωρητικότητα (Specific Heat) και προαιρετικά την απορροφητικότητα στη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (Thermal Absorptance), την απορροφητικότητα στην ηλιακή ακτινοβολία (Solar Absorptance) και την απορροφητικότητα στην ορατή ακτινοβολία (Visible Absorptance). Οι τρεις τελευταίες ιδιότητες ορίστηκαν μόνο για τα υλικά που βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια κατασκευών. Να σημειωθεί ότι τα αντικείμενα των υλικών βρέθηκαν σε αντίστοιχη βιβλιοθήκη αντικειμένων του λογισμικού (προσβάσιμη μέσα από το περιβάλλον του IDF-Editor) και σε όποια πεδία ήταν επιθυμητό, έγιναν κάποιες τροποποιήσεις.

## WindowMaterial:Glazing

Στη κατηγορία αυτή, που έχει ιδιαίτερη σημασία για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, ορίζονται τα φύλλα των υαλοπινάκων που εγκαθίστανται στο κτιριακό κέλυφος.



Σχήμα 6.21: Αντικείμενο στην κατηγορία WindowMaterial:Glazing.

Αξίζει να σημειωθεί πως στην περίπτωση του προς μελέτη κτιρίου, που έχει μόνο εξωτερικούς υαλοπίνακες, ως μπροσινή πλευρά (front side) στις ιδιότητες που φαίνονται στην εικόνα του σχήματος 6.21 ορίζεται η πλευρά του γυαλιού που γειτνιάζει με τον εξωτερικό αέρα. Αντίστοιχα, ως πίσω πλευρά (back side) ορίζεται η πλευρά του γυαλιού που γειτνιάζει με τη θερμική ζώνη στην οποία εμπεριέχεται ο υαλοπίνακας.

Στο πεδίο Optical Data Type δηλώνεται το αν θα χρησιμοποιηθούν φασματικά δεδομένα (Spectral) ή μέσες τιμές (Spectral Average). Οι ιδιότητες του υαλοπίνακα που ορίζονται από το 4<sup>ο</sup> έως και το 14<sup>ο</sup> πεδίο είναι κατά σειρά:

- πάχος
- διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία σε κάθετο πρόσπτωση
- εξωτερική ηλιακή ανακλαστικότητα σε κάθετο πρόσπτωση

- εσωτερική ηλιακή ανακλαστικότητα σε κάθετο πρόσπτωση
- οπτική διαπερατότητα σε κάθετο πρόσπτωση
- εξωτερική οπτική ανακλαστικότητα σε κάθετο πρόσπτωση
- εσωτερική οπτική ανακλαστικότητα σε κάθετο πρόσπτωση
- διαπερατότητα στη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος σε κάθετο πρόσπτωση
- εξωτερικός ημισφαιρικός\* συντελεστής εκπομπής για τη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος
- εσωτερικός ημισφαιρικός συντελεστής εκπομπής για τη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος
- θερμική αγωγιμότητα.

Η επιλογή έγινε πάλι από σχετική βιβλιοθήκη του λογισμικού.

### WindowMaterial:Gas

Στην κατηγορία αυτή επιλέγεται με ορισμό αντικειμένου το αέριο που θα πληρώσει το (τυχόν) διάκενο των υαλοπινάκων. Οι δυνατές επιλογές ως προς το αέριο είναι: αέρας, αργό, κρυπτό ή ξένο. Μπορούν να οριστούν πολλά αντικείμενα, εάν στο κτίριο υπάρχουν διάφοροι υαλοπίνακες με πλήρωση διαφορετικών αερίων. Επίσης, είναι δυνατός ο ορισμός από τον μελετητή άλλου αερίου της επιλογής του (μέσω ορισμού τιμών για διάφορους συντελεστές σε κατάλληλα πεδία του αντικειμένου), ή και η χρησιμοποίηση μιγμάτων αερίων στο διάκενο (μέσω ορισμού αντικειμένου σε άλλη, εξειδικευμένη κατηγορία).

Εδώ επιλέχθηκε (από σχετική βιβλιοθήκη) αργό, σε διάκενο 13 mm.

### Construction

Η τελευταία κατηγορία αυτής της ομάδας κατηγοριών στην οποία δημιουργήθηκαν αντικείμενα. Είναι πολύ σημαντική κατηγορία, καθώς εδώ ορίζονται η κατασκευή (σύνθεση) των στοιχείων του κελύφους, τοποθετώντας σε επιθυμητή σειρά στρωματοποίησης τα υλικά που ορίστηκαν στις τρεις προηγούμενες κατηγορίες αυτής της ομάδας. Το εξωτερικό στρώμα κάθε στοιχείου είναι αυτό που βρίσκεται πιο μακριά από το εσωτερικό της σχετικής θερμικής ζώνης, ενώ το εσωτερικό είναι αυτό σε επαφή με τον εσωτερικό αέρα. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα αντικείμενα που δημιουργήθηκαν, μέσω των οποίων ορίστηκε η κατασκευή των στοιχείων (στις διάφορες θερμικές ζώνες):

- εξωτερικό δάπεδο (Exterior Floor)

---

\* Ημισφαιρικός (ή ολικός) συντελεστής εκπομπής σημαίνει ότι αφορά εκπομπή προς όλες τις κατευθύνσεις και σταθμισμένη τιμή (δηλαδή μέση τιμή) για το φάσμα ακτινοβολίας στο οποίο αναφέρεται. Όπου αλλού στο κείμενο γίνεται αναφορά στη φράση συντελεστής εκπομπής, εννοείται ημισφαιρικός.



- εσωτερικό δάπεδο (Interior Floor) (αφορά αυτό του δεύτερου υπνοδωματίου)
- εξωτερικός τοίχος (Exterior Wall)
- εσωτερικός τοίχος (Interior Wall)
- εξωτερική οροφή (Exterior Roof)
- εσωτερική οροφή (Interior Ceiling) (αφορά το ταβάνι του κύριου υπνοδωματίου)
- εξωτερική πόρτα (Exterior Door)
- εξωτερικός υαλοπίνακας (Exterior Window)

Όλα αυτά αφορούν τα δομικά στοιχεία του κελύφους (δεν μοντελοποιήθηκαν δοκάρια και υποστυλώματα από σκυρόδεμα). Επιπλέον μοντελοποιήθηκε (κατά προσέγγιση) η ύπαρξη (ξύλινης) εσωτερικής επίπλωσης (παρουσία θερμικής μάζας στο εσωτερικό της κατοικίας), με δημιουργία του σχετικού αντικειμένου (Interior Furnishings).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		Exterior Floor	Interior Floor	Exterior Wall
Outside Layer		1IN Stucco	1/2IN Gypsum	1IN Stucco
Layer 2		I02 70mm insulation board	M14 150mm heavyweight concrete	M01 100mm brick
Layer 3		M14 150mm heavyweight concrete	1/2IN Gypsum	Insulation: Expanded polystyrene
Layer 4		Hardwood - 12.9mm	Hardwood - 12.9mm	M01 100mm brick
Layer 5				1/2IN Gypsum
Layer 6				
Layer 7				
Layer 8				
Layer 9				
Layer 10				

**Σχήμα 6.22: Αντικείμενα στην κατηγορία Construction (1<sup>ο</sup> μέρος).**

Obj4	Obj5	Obj6
Interior Wall	Exterior Roof	Interior Ceiling
1/2IN Gypsum	1IN Stucco	Hardwood - 12.9mm
M01 100mm brick	M14 150mm heavyweight concrete	1/2IN Gypsum
1/2IN Gypsum	I02 70mm insulation board	M14 150mm heavyweight concrete
	1/2IN Gypsum	1/2IN Gypsum

**Σχήμα 6.23: Αντικείμενα στην κατηγορία Construction (2<sup>ο</sup> μέρος).**

Obj7	Obj8	Obj9
Exterior Door	Exterior Window	Interior Furnishings
Oak - 10mm	CLEAR 6MM	Std Wood 2inch
I01 25mm insulation board	ARGON 13MM	
Oak - 10mm	CLEAR 6MM	

**Σχήμα 6.24: Αντικείμενα στην κατηγορία Construction (3<sup>ο</sup> μέρος).**

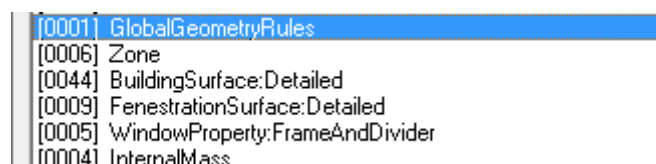
Αξίζει να παρατηρηθεί ότι το λογισμικό στην περίπτωση των διεπιφανειών μεταξύ δύο θερμικών ζωνών επιβάλλει την αντίστροφη σειρά στρωμάτων υλικών, ώστε να αναγνωρίζεται ότι οι διεπιφάνειες αυτές είναι κοινές μεταξύ των δύο θερμικών ζωνών. Δηλαδή, το πρώτο στρώμα της διεπιφάνειας για τη μία θερμική ζώνη είναι το τελευταίο για την άλλη. Στην περίπτωση διεπιφανειών με συμμετρική σύνθεση (στην προκειμένη περίπτωση οι εσωτερικοί τοίχοι) χρειάζεται να οριστεί μόνο ένα αντικείμενο, ενώ στην περίπτωση διεπιφανειών με (πιθανώς) μη συμμετρική σύνθεση (στην προκειμένη περίπτωση τα εσωτερικά δάπεδα/οροφές) πρέπει να οριστούν δύο αντικείμενα.

Το EnergyPlus υπολογίζει κατά την προσομοίωση το συντελεστή θερμοπερατότητας των δομικών στοιχείων και είναι δυνατή η εξαγωγή των τιμών αυτών στα δεδομένα εξόδου. Η μόνωση στους τοίχους, τα δάπεδα και τις οροφές επιλέχθηκε ώστε να προκύπτουν τιμές συμβατές με τις τιμές που ορίζει ο Κ.Εν.Α.Κ. για το μέγιστο επιτρεπόμενο συντελεστή θερμοπερατότητας των δομικών αυτών στοιχείων, κατά κλιματική ζώνη (η Αθήνα ανήκει στην κλιματική ζώνη Β).

Σχετικά με τους υαλοπίνακες συγκεκριμένα, το λογισμικό υπολογίζει και παρέχει στα αποτελέσματα (αν αυτό απαιτηθεί) τις τιμές των  $U_g$ , SHGC, VLT. Οι τιμές των  $U_g$  και SHGC υπολογίζονται με χρήση πρότυπων συνθηκών NFRC (δηλαδή για τον  $U_g$  εξωτερική θερμοκρασία  $-18^{\circ}\text{C}$  και εσωτερική  $21^{\circ}\text{C}$  και για τον SHGC εξωτερική  $32^{\circ}\text{C}$ , εσωτερική  $24^{\circ}\text{C}$  και ένταση ηλιακής ακτινοβολίας  $732 \text{ W/m}^2$ ) και όχι μέσω των δεδομένων του αρχείου καιρού. Με ορισμό αντικειμένου σε άλλη κατηγορία είναι δυνατή η περιγραφή ενός υαλοπίνακα (της συνολικής κατασκευής) μέσω αυτών των ιδιοτήτων, αλλά αυτό δεν προτείνεται από το ίδιο το λογισμικό (στο σχετικό εγχειρίδιο .pdf), καθώς αποτελεί προσεγγιστική περιγραφή συγκριτικά με την περιγραφή των αναλυτικών ιδιοτήτων κάθε φύλλου του υαλοπίνακα.

## Thermal Zones and Surfaces

Καθότι η ομάδα αυτή κατηγοριών έχει πληθώρα κατηγοριών, η παρακάτω εικόνα απεικονίζει μόνο τις κατηγορίες στις οποίες δημιουργήθηκαν αντικείμενα (μέσω κατάλληλης επιλογής στο περιβάλλον του IDF-Editor):



Σχήμα 6.25: Κατηγορίες στην ομάδα κατηγοριών Thermal Zones and Surfaces.

### GlobalGeometryRules

Ορίζονται οι κανόνες που θα χρησιμοποιηθούν για την περιγραφή του χώρου και των στοιχείων του (πώς γίνεται η περιγραφή μέσω διανυσμάτων και συστημάτων συντεταγμένων).

## Zone

Σε αυτή την κατηγορία δημιουργείται ένα αντικείμενο για κάθε θερμική ζώνη του κτιρίου.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		living room	bathroom	main entrance	master bedroom	kitchen	bedroom
Direction of Relative North	deg	0	0	0	0	0	0
X Origin	m	0	2	4	6	6	6
Y Origin	m	0	6	-1	0	4	0
Z Origin	m	0	0	0	0	0	3
Type							
Multiplier		1	1	1	1	1	1
Ceiling Height	m	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Volume	m3	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Floor Area	m2	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Zone Inside Convection Algorithm							
Zone Outside Convection Algorithm							
Part of Total Floor Area		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

**Σχήμα 6.26: Αντικείμενα στην κατηγορία Zone.**

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα, έχει επιλεγεί (από προεπιλογή) να υπολογίσει το πρόγραμμα (autocalculate) το εμβαδό του δαπέδου (Floor Area), τον όγκο κάθε εσωτερικού χώρου (Volume) και το ύψος από το δάπεδο έως το ταβάνι (Ceiling Height). Οι υπολογισμοί αυτοί σχετίζονται μόνο με τη γεωμετρία της κάθε θερμικής ζώνης, καθώς όλα τα δομικά στοιχεία στο EnergyPlus από γεωμετρική άποψη θεωρείται ότι δεν έχουν πάχος – το πάχος λαμβάνεται υπόψιν μόνο για τους ενεργειακούς υπολογισμούς μεταφοράς θερμότητας/θερμικής μάζας. Για τις περισσότερες περιπτώσεις κτιρίων, το αν η περιγραφή της γεωμετρίας θα γίνει με βάση τις εξωτερικές, εσωτερικές ή μέσες διαστάσεις έχει μηδαμινή επίδραση στα αποτελέσματα, οπότε γίνεται μια επιλογή με την ταυτόχρονη κατανόηση ότι τα εμβαδά, οι όγκοι και τα ύψη του μοντέλου θα διαφέρουν λίγο από την πραγματικότητα. Αυτά τα στοιχεία τα χρησιμοποιεί το λογισμικό για διάφορους υπολογισμούς.

Σχετικά με το πεδίο multiplier, είναι ένας πολλαπλασιαστής για τα εμβαδά δαπέδων, τα φορτία και τα εσωτερικά θερμικά κέρδη. Πολλαπλασιάζει το υπολογισθέν φορτίο μιας θερμικής ζώνης και “στέλνει” το αποτέλεσμα στο σχετικό σύστημα HVAC (είναι μια μέθοδος υπερδιαστασιολόγησης των συστημάτων HVAC). Η προεπιλογή είναι 1.

## BuildingSurface:Detailed

Είναι από τις πιο σημαντικές κατηγορίες αυτής της ομάδας κατηγοριών, καθώς εδώ γίνεται η συσχέτιση όλων των αδιαφανών δομικών στοιχείων (τοίχοι, δάπεδα, οροφές) με τα κατασκευαστικά στοιχεία που τους αντιστοιχούν και με τις θερμικές ζώνες στις οποίες ανήκουν και επίσης καθορίζεται και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους και με το περιβάλλον. Οι γεωγραφικές πληροφορίες δόθηκαν προφανώς μέσω της σχεδίασης στο Sketchup. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τα πρώτα 12 από τα 44 αντικείμενα:

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		livr floor	livr roof	livr south ext wall
Surface Type		Floor	Roof	Wall
Construction Name		Exterior Floor	Exterior Roof	Exterior Wall
Zone Name		living room	living room	living room
Outside Boundary Condition		Ground	Outdoors	Outdoors
Outside Boundary Condition Object				
Sun Exposure		NoSun	SunExposed	SunExposed
Wind Exposure		NoWind	WindExposed	WindExposed
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate
Number of Vertices		4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	4	0	0
Vertex 1 Y-coordinate	m	6	6	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	0	3	3
Vertex 2 X-coordinate	m	4	0	0
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	0	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	3	0
Vertex 3 X-coordinate	m	0	4	4
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	0	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	3	0
Vertex 4 X-coordinate	m	0	4	4
<				

Σχήμα 6.27: Αντικείμενα στην κατηγορία BuildingSurface:Detailed (1<sup>ο</sup> μέρος) – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων.

Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8
livr east int menr w	livr north int bath we	livr west ext wall	bath floor	bath roof
Wall	Wall	Wall	Floor	Roof
Interior Wall	Interior Wall	Exterior Wall	Exterior Floor	Exterior Roof
living room	living room	living room	bathroom	bathroom
Surface	Surface	Outdoors	Ground	Outdoors
menr west int livr w	bath south int livr w			
NoSun	NoSun	SunExposed	NoSun	SunExposed
NoWind	NoWind	WindExposed	NoWind	WindExposed
autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
4	4	4	4	4
4	4	0	4	0
0	6	6	2	2
3	3	3	0	3
4	4	0	4	0
0	6	6	0	0
0	0	0	0	3
4	2	0	0	4
6	6	0	0	0
0	0	0	0	3
4	2	0	0	4

Σχήμα 6.28: Αντικείμενα στην κατηγορία BuildingSurface:Detailed (2<sup>ο</sup> μέρος) – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων.

Obj8	Obj9	Obj10	Obj11	Obj12
bath roof	bath north ext wall	bath east int kit wall	bath south int livr w	bath west ext wall
Roof	Wall	Wall	Wall	Wall
Exterior Roof	Exterior Wall	Interior Wall	Interior Wall	Exterior Wall
bathroom	bathroom	bathroom	bathroom	bathroom
Outdoors	Outdoors	Surface	Surface	Outdoors
		kit west int bath wal	livr north int bath we	
SunExposed	SunExposed	NoSun	NoSun	SunExposed
WindExposed	WindExposed	NoWind	NoWind	WindExposed
autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
4	4	4	4	4
0	4	4	0	0
2	2	0	0	2
3	3	3	3	3
0	4	4	0	0
0	2	0	0	2
3	0	0	0	0
4	0	4	2	0
0	2	2	0	0
3	0	0	0	0
4	0	4	2	0

Σχήμα 6.29: Αντικείμενα στην κατηγορία BuildingSurface:Detailed (3<sup>ο</sup> μέρος) – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων.

Στις εικόνες αυτές το View Factor to Ground είναι ο συντελεστής θέασης του επιπέδου του εδάφους (που υποτίθεται οριζόντιο) και χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της διάχυτα ανακλώμενης ηλιακής ακτινοβολίας από το έδαφος που προσπίπτει σε μια επιφάνεια.

### FenestrationSurface:Detailed

Εδώ γίνεται η αντίστοιχη λεπτομερής περιγραφή όλων των υπόλοιπων στοιχείων της κατασκευής, που χαρακτηρίζονται από το λογισμικό ως υποεπιφάνειες (subsurfaces). Στην προκειμένη περίπτωση αυτές είναι δύο εξωτερικές αδιαφανείς πόρτες, μία (εξωτερική) γυάλινη πόρτα (που ανήκει στο δεύτερο υπνοδωμάτιο) και έξι (εξωτερικά) παράθυρα. Στο πεδίο Building Surface Name δηλώνεται η επιφάνεια στην οποία ανήκει κάθε υποεπιφάνεια.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		mentr door	livr west window	livr south window	bedr glass door
Surface Type		Door	Window	Window	GlassDoor
Construction Name		Exterior Door	Exterior Window	Exterior Window	Exterior Window
Building Surface Name		mentr south ext wall	livr west ext wall	livr south ext wall	bedr east ext wall
Outside Boundary Condition Object					
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Shading Control Name					
Frame and Divider Name			window - eight sashes	window - four sashes	window - two sashes
Multiplier					
Number of Vertices		4	4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	0,5	0	1	3
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	5	0	1,25
Vertex 1 Z-coordinate	m	2	2	2	2
Vertex 2 X-coordinate	m	0,5	0	1	3
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	5	0	1,25
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0,8	0,8	0
Vertex 3 X-coordinate	m	1,5	0	3	3
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	1	0	2,75
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0,8	0,8	0
Vertex 4 X-coordinate	m	1,5	0	3	3
Vertex 4 Y-coordinate	m	0	1	0	2,75

**Σχήμα 6.30: Αντικείμενα στην κατηγορία FenestrationSurface:Detailed (1<sup>ο</sup> μέρος) – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων.**

Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9
mbedr east window	bath window	mbedr south window	kit window	kit door
Window	Window	Window	Window	Door
Exterior Window	Exterior Window	Exterior Window	Exterior Window	Exterior Door
mbedr east ext wall	bath north ext wall	mbedr south ext wall	kit east ext wall	kit north ext wall
autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
window - four sashes	window - one sash	window - two sashes	window - four sashes	
4	4	4	4	4
5	2,5	2	4	2
1	2	0	1	4
2	2	2	2	2
5	2,5	2	4	2
1	2	0	1	4
0,8	1,2	0,8	0,8	0
5	1,5	3	4	1,2
3	2	0	3	4
0,8	1,2	0,8	0,8	0
5	1,5	3	4	1,2
3	2	0	3	4

**Σχήμα 6.31: Αντικείμενα στην κατηγορία FenestrationSurface:Detailed (2<sup>ο</sup> μέρος) – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων.**

Ο αναγνώστης μπορεί να παρατηρήσει στις εικόνες των σχημάτων 6.30 και 6.31 ότι στα αντικείμενα που αφορούν τα παράθυρα και τη γυάλινη πόρτα έχει δηλωθεί στο πεδίο Frame and Divider Name η αναφορά σε αντικείμενα άλλης κατηγορίας (που περιγράφεται αμέσως παρακάτω) που σχετίζονται με πλαίσια κουφωμάτων.

### WindowProperty:FrameAndDivider

Στην αυτή την κατηγορία γίνεται (προαιρετική) εισαγωγή αντικειμένων που περιγράφουν πλαίσια κουφωμάτων.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		glass door - two sashes	window - one sash	window - two sashes	window - four sashes	window - eight sashes
Frame Width	m	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Frame Outside Projection	m	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Frame Inside Projection	m	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Frame Conductance	W/m2-K	4	4	4	4	4
Ratio of Frame-Edge Glass Conductance to Center-Of-Glass Conductance		1	1	1	1	1
Frame Solar Absorptance		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Frame Visible Absorptance		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Frame Thermal Hemispherical Emissivity		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Divider Type		DividedLite	DividedLite	DividedLite	DividedLite	DividedLite
Divider Width	m	0,14	0	0,14	0,14	0,14
Number of Horizontal Dividers		0	0	0	0	0
Number of Vertical Dividers		1	0	1	3	7
Divider Outside Projection	m	0,02	0	0,02	0,02	0,02
Divider Inside Projection	m	0,02	0	0,02	0,02	0,02
Divider Conductance	W/m2-K	4	0	4	4	4
Ratio of Divider-Edge Glass Conductance to Center-Of-Glass Conductance		1	1	1	1	1
Divider Solar Absorptance		0,5	0	0,5	0,5	0,5
Divider Visible Absorptance		0,5	0	0,5	0,5	0,5
Divider Thermal Hemispherical Emissivity		0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Outside Reveal Solar Absorptance		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

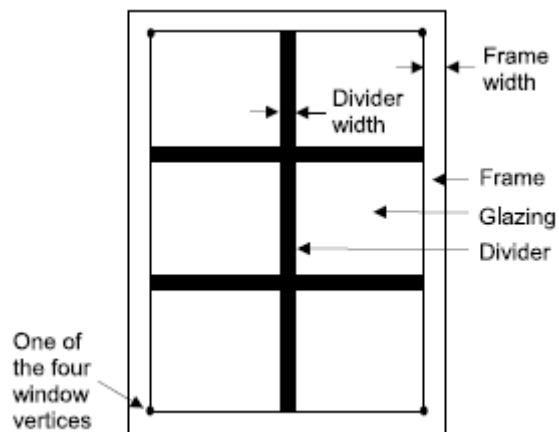
**Σχήμα 6.32: Αντικείμενα στην κατηγορία WindowProperty:FrameAndDivider – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων.**

Inside Sill Depth	m	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Inside Sill Solar Absorptance		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Inside Reveal Depth	m	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Inside Reveal Solar Absorptance		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

**Σχήμα 6.33: Τα υπόλοιπα πεδία των αντικειμένων της εικόνας του σχήματος 6.32.**

Δημιουργήθηκαν 5 αντικείμενα, ώστε να περιγράφουν 5 διαφορετικά είδη κουφωμάτων – ανάλογα με το μέγεθος του ανοίγματος. Για παράδειγμα, το δυτικό άνοιγμα (σχήμα 6.3) είναι το μεγαλύτερο της κατοικίας. Το μέγεθος του υαλοπίνακα αυτού που σχεδιάστηκε με το Sketchup είναι 4 x 1,2 m (μήκος x ύψος). Είναι προφανές ότι στην πραγματικότητα δεν είναι σύνηθες να υπάρχει υαλοπίνακας τέτοιων διαστάσεων. Το αντικείμενο 5 (window – eight sashes, όπου sash σημαίνει φύλλο) της εικόνας του σχήματος 6.32 περιγράφει ότι σε αυτό το άνοιγμα υπάρχει συστοιχία σε σειρά 8 φύλλων του κουφώματος με υαλοπίνακες (έστω ανοιγόμενων). Από την άλλη για το μπάνιο, όπου το άνοιγμα είναι μικρό, δημιουργήθηκε το αντικείμενο 2 που περιγράφει κούφωμα με 1 φύλλο.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται η σημασία των πεδίων Divider και Frame:



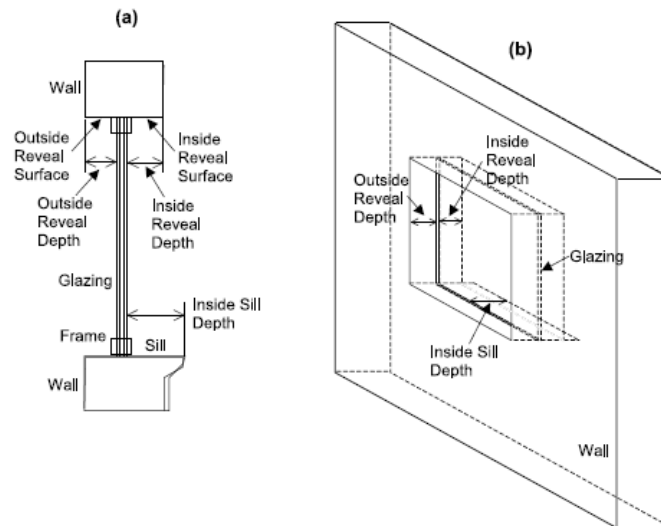
**Σχήμα 6.34:** Η σημασία των πεδίων Divider και Frame σε αντικείμενο της κατηγορίας WindowProperty:FrameAndDivider. Ως divider δηλαδή το λογισμικό εννοεί τα τμήματα (πηχάκια) που διαιρούν έναν υαλοπίνακα σε μικρότερες περιοχές.

Το Frame (πλαίσιο) δηλαδή αφορά το περιμετρικό πλαίσιο ολόκληρου του ανοίγματος. Για να είναι δυνατή λοιπόν η μοντελοποίηση των κατακόρυφων τμημάτων των πλαισίων, δημιουργήθηκαν μόνο κατακόρυφοι Dividers (Vertical) και όχι οριζόντιοι (Horizontal), όπου θεωρήθηκε ότι οι κατακόρυφοι αντιπροσωπεύουν τα κατακόρυφα τμήματα των πλαισίων των φύλλων.

Αξίζει να σημειωθεί πως το EnergyPlus, σε περίπτωση που οριστεί αντικείμενο που περιγράφει πλαίσιο κουφώματος, αφαιρεί το εμβαδόν του εξωτερικού πλαισίου (Frame) από το εμβαδόν της τοιχοποιίας που περιβάλλει τον υαλοπίνακα και όχι από το εμβαδόν του υαλοπίνακα. Αυτό φαίνεται και μέσω της εικόνας του σχήματος 6.34, όπου απεικονίζεται ένα από τα 4 διανύσματα (vertices) που περιγράφουν τον υαλοπίνακα (όπως αναφέρεται και στο υποκεφάλαιο 5.3 η λέξη παράθυρο αναφέρεται στον υαλοπίνακα και μόνο). Από την άλλη, είναι εύλογο ότι το εμβαδόν των dividers αναγκαστικά αφαιρείται από αυτό του υαλοπίνακα. Οπότε, οι τιμές των διαστάσεων των υαλοπινάκων και των WWR που αναφέρονται στην αρχή του παρόντος υποκεφαλαίου είναι μεγαλύτερες από τις πραγματικές, αφού ακολουθήθηκε αυτή η προσέγγιση μοντελοποίησης των κουφωμάτων.

Επίσης, το λογισμικό δεν υπολογίζει (οπότε ούτε εξάγει ως αποτελέσματα) τον συνολικό U και SHGC του κουφώματος, αλλά μόνο ξεχωριστά του υαλοπίνακα και του πλαισίου.

Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η σημασία των εννοιών Sill και Reveal που αναφέρονται σε κάποια από τα πεδία των αντικειμένων στις εικόνες των σχημάτων 6.32 και 6.33. Οι επιφάνειες αυτές πρακτικά χρησιμοποιούνται για υπολογισμούς που σχετίζονται με απορρόφηση ηλιακής ακτινοβολίας από αυτές και με ανάκλαση ηλιακής ακτινοβολίας προς τον υαλοπίνακα.



**Σχήμα 6.35:** Η σημασία των εννοιών Sill και Reveal που αναφέρονται σε κάποια από τα πεδία των αντικειμένων στις εικόνες των σχημάτων 6.32 και 6.33.

Τέλος, να αναφερθεί ότι για τις τιμές κάποιων από τα πεδία στα αντικείμενα αυτά χρησιμοποιήθηκαν πίνακες της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010. Για παράδειγμα, χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά πλαίσια με θερμοδιακοπή, με  $U_f = 4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  (από τον πίνακα 11). Για όλα τα κουφώματα ορίστηκε πάχος πλαισίου 7 cm. Οπότε για τους Dividers ορίστηκε πάχος 14 cm, ώστε να αντιπροσωπεύεται η ύπαρξη των κατακόρυφων πλαισίων δύο φύλλων σε σειρά (το ένα δίπλα στο άλλο).

### InternalMass

Εδώ μοντελοποιήθηκε η ύπαρξη εσωτερικής επίπλωσης μόνο στο σαλόνι, το κύριο υπνοδωμάτιο, την κουζίνα και το δεύτερο υπνοδωμάτιο, αφού συγκριτικά με την κύρια είσοδο και το μπάνιο περιέχουν (γενικά) αρκετά περισσότερα έπιπλα. Με τον τρόπο αυτό προστίθεται θερμική μάζα στο εσωτερικό των δωματίων (χωρίς βέβαια να επηρεάζεται η πρόσπτωση της ακτινοβολίας και άλλα σχετικά στοιχεία).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Name		livr internal mass	mbedr internal mass	kit internal mass	bedr internal mass
Construction Name		Interior Furnishings	Interior Furnishings	Interior Furnishings	Interior Furnishings
Zone Name		living room	master bedroom	kitchen	bedroom
Surface Area	m2	48	40	32	24

**Σχήμα 6.36:** Αντικείμενα στην κατηγορία InternalMass.

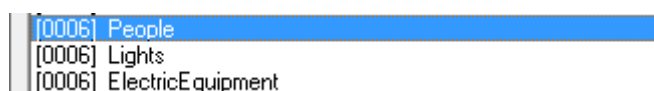
Σύμφωνα με τις οδηγίες σχετικού εγχειριδίου του προγράμματος, στο πεδίο για την επιφάνεια της εσωτερικής θερμικής μάζας (Surface Area) πρέπει να δηλώνεται το εμβαδό της συνολικής επιφάνειας που είναι εκτεθειμένη στην θερμική ζώνη. Έπειτα



από παρατήρηση ενός example IDF file που είχε επίσης μοντελοποιημένη εσωτερική ξύλινη επίπλωση, επιλέχθηκε να οριστεί ως εμβαδό επιφάνειας το διπλάσιο του εμβαδού του δαπέδου κάθε χώρου – η τιμή αυτή μπορεί να ανταποκριθεί στην πραγματικότητα, καθώς το σχετικό αντικείμενο στην κατηγορία Material έχει πάχος 2" (5,08 cm).

## Internal Gains

Καθότι η ομάδα αυτή κατηγοριών έχει πληθώρα κατηγοριών, η παρακάτω εικόνα απεικονίζει μόνο τις κατηγορίες στις οποίες δημιουργήθηκαν αντικείμενα (μέσω κατάλληλης επιλογής στο περιβάλλον του IDF-Editor):



Σχήμα 6.37: Κατηγορίες στην ομάδα κατηγοριών InternalGains.

## People

Εδώ ορίζονται τα εσωτερικά θερμικά κέρδη κάθε θερμικής ζώνης της κατοικίας που προκύπτουν από την παρουσία ανθρώπων σε αυτές και τη σχετική ανθρώπινη δραστηριότητα.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		mbedr people int ga	bedr people int gain	livr people int gain	kit people in gain	mentr people int gai	bath people int gain
Zone or ZoneList Name		master bedroom	bedroom	living room	kitchen	main entrance	bathroom
Number of People Schedule Name		Bedrooms Occupan	Bedrooms Occupan	Livi Occupancy Sch	Kit Occupancy Sch	Mentr Occupancy S	Bath Occupancy Sc
Number of People Calculation Method		People	People	People	People	People	People
Number of People		4	4	4	4	4	4
People per Zone Floor Area	person/m2						
Zone Floor Area per Person	m2/person						
Fraction Radiant		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Sensible Heat Fraction		autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
Activity Level Schedule Name		Activity Schedule	Activity Schedule	Activity Schedule	Activity Schedule	Activity Schedule	Activity Schedule
Carbon Dioxide Generation Rate	m3/s*W	0,0000000382	0,0000000382	0,0000000382	0,0000000382	0,0000000382	0,0000000382
Enable ASHRAE 55 Comfort Warnings		No	No	No	No	No	No
Mean Radiant Temperature Calculation Type		ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged	ZoneAveraged
Surface Name/Angle Factor List Name							
Work Efficiency Schedule Name		Work Efficiency Sch	Work Efficiency Sch	Work Efficiency Sch	Work Efficiency Sch	Work Efficiency Sch	Work Efficiency Sch
Clothing Insulation Calculation Method		ClothingInsulationSc	ClothingInsulationSc	ClothingInsulationSc	ClothingInsulationSc	ClothingInsulationSc	ClothingInsulationSc
Clothing Insulation Calculation Method Schedule Name							
Clothing Insulation Schedule Name		Clothing Schedule	Clothing Schedule	Clothing Schedule	Clothing Schedule	Clothing Schedule	Clothing Schedule
Air Velocity Schedule Name		Air Velocity Schedul	Air Velocity Schedul	Air Velocity Schedul	Air Velocity Schedul	Air Velocity Schedul	Air Velocity Schedul
Thermal Comfort Model 1 Type		Fanger	Fanger	Fanger	Fanger	Fanger	Fanger
Thermal Comfort Model 2 Type							

Σχήμα 6.38: Αντικείμενα στην κατηγορία People.

Ορίστηκαν 6 αντικείμενα, ένα για κάθε θερμική ζώνη. Στο πεδίο Number of People Schedule Name (φαίνεται στην εικόνα) έγινε η σύνδεση με τα αντίστοιχα χρονικά προγράμματα παρουσίας ανθρώπων. Στο ακριβώς επόμενο πεδίο ορίζεται ότι ο τρόπος υπολογισμού αυτών των κερδών θα γίνεται με βάση το πλήθος των ανθρώπων (και όχι με ανθρώπους/m<sup>2</sup>, ή m<sup>2</sup>/ανθρώπους). Η τιμή στο πεδίο People είναι το μέγιστο δυνατό πλήθος ανθρώπων σε κάθε χώρο. Εδώ, ορίστηκε πλήθος 4 για όλους τους χώρους, που είναι και ο αριθμός των κατοίκων του κτιρίου. Στο πεδίο Fraction Radiant, που δέχεται αριθμό από το 0 έως το 1 (αφού εκφράζει ποσοστό),

δηλώνεται ο τρόπος με τον οποίο η θερμότητα αποδίδεται από τα σώματα των ανθρώπων. Ο αριθμός που δίνεται στο πεδίο αυτό πολλαπλασιάζεται με την συνολική αισθητή θερμότητα από τους ανθρώπους, ώστε να καθοριστεί το ποσό της μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία από αυτούς. Επίσης, ορίστηκε να υπολογίζεται αυτομάτως (autocalculate) το ποσοστό της αισθητής θερμότητας σε σχέση με τη συνολική (που περιλαμβάνει και τη λανθάνουσα).

Μέσω του Activity Schedule (αντικείμενο 6 της εικόνας του σχήματος 6.16), ορίστηκε σταθερή θερμική ισχύς 80W/άτομο, με βάση τον πίνακα 2.7 της T.O.T.E.E. 20701-1/2010.

Τα υπόλοιπα πεδία είναι δευτερεύουσας σημασίας για την προσομοίωση αυτή και αφορούν ρυθμό παραγωγής CO<sub>2</sub> και υπολογισμούς θερμικής άνεσης.

## Lights

Η συγκεκριμένη κατηγορία αφορά τα εσωτερικά θερμικά κέρδη λόγω του (εσωτερικού) τεχνητού φωτισμού.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		mbedr lights int gain	bedr lights int gain	livr lights int gain	kit lights int gain	mentr lights int gain	bath lights int gain
Zone or ZoneList Name		master bedroom	bedroom	living room	kitchen	main entrance	bathroom
Schedule Name		Lights Schedule	Lights Schedule	Lights Schedule	Lights Schedule	Lights Schedule	Lights Schedule
Design Level Calculation Method		Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area	Watts/Area
Lighting Level	W						
Watts per Zone Floor Area	W/m <sup>2</sup>	5	5	5	5	5	5
Watts per Person	W/person						
Return Air Fraction		0	0	0	0	0	0
Fraction Radiant		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42
Fraction Visible		0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Fraction Replaceable		1	1	1	1	1	1
End-Use Subcategory		General	General	General	General	General	General
Return Air Fraction Calculated from Plenum Temperature		No	No	No	No	No	No
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co							
Return Air Fraction Function of Plenum Temperature Co	1/K						

**Σχήμα 6.39: Αντικείμενα στην κατηγορία Lights.**

Ορίστηκαν πάλι 6 αντικείμενα, ένα για κάθε θερμική ζώνη. Στο πεδίο Schedule Name έγινε η σύνδεση με το αντίστοιχο χρονικό πρόγραμμα λειτουργίας του εσωτερικού τεχνητού φωτισμού. Ο υπολογισμός της ισχύος του φωτισμού ορίστηκε να γίνεται με W/m<sup>2</sup> και δόθηκε η τιμή 5 W/m<sup>2</sup> σε κάθε δωμάτιο, με βάση και σχετικό πίνακα από την T.O.T.E.E. 20701-1/2010. Οι επόμενοι τρεις συντελεστές στα παρακάτω πεδία της εικόνας που είναι υποχρεωτικός ο ορισμός τους (μπλε πεδία) σχετίζονται με το είδος των φωτιστικών. Ο πρώτος καθορίζει το ποσοστό της θερμότητας που απάγεται από τυχόν υπάρχον σύστημα απαγωγής θερμότητας του φωτιστικού. Ο δεύτερος καθορίζει το ποσοστό της θερμότητας από τα φωτιστικά που εισέρχεται στη θερμική ζώνη ως θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος. Ο τρίτος ορίζει το αντίστοιχο ποσοστό της θερμότητας από το φωτισμό που εισέρχεται στη θερμική ζώνη ως ορατή ακτινοβολία. Από τη διαφορά του αθροίσματος αυτών των τριών συντελεστών από τη μονάδα, το πρόγραμμα υπολογίζει το ποσοστό της μεταφερόμενης θερμότητας με συναγωγή.

## ElectricEquipment

Στη συνέχεια, δηλώνονται τα εσωτερικά θερμικά κέρδη από τον ηλεκτρικό εξοπλισμό στις διάφορες θερμικές ζώνες.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		mbedr equip int gain	bedr equip int gain	livr equip int gain	kit equip int gain	mentr equip int gain	bath equip int gain
Zone or ZoneList Name		master bedroom	bedroom	living room	kitchen	main entrance	bathroom
Schedule Name		Other Rooms Equip	Other Rooms Equip	Other Rooms Equip	Kit Equip Sched	Other Rooms Equip	Bath Equip Sched
Design Level Calculation Method		EquipmentLevel	EquipmentLevel	EquipmentLevel	EquipmentLevel	EquipmentLevel	EquipmentLevel
Design Level	W	200	100	300	5000	50	500
Watts per Zone Floor Area	W/m2						
Watts per Person	W/person						
Fraction Latent		0	0	0	0,1	0	0,1
Fraction Radiant		0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1
Fraction Lost		0	0	0	0,2	0	0,6
End-Use Subcategory		General	General	General	General	General	General

Σχήμα 6.40: Αντικείμενα στην κατηγορία ElectricEquipment.

Ορίστηκε και εδώ αντικείμενο για κάθε θερμική ζώνη. Και εδώ έγινε προφανώς σύνδεση με τα σχετικά χρονικά προγράμματα λειτουργίας του ηλεκτρικού εξοπλισμού. Ο υπολογισμός ορίστηκε να γίνεται μέσω της συνολικής ηλεκτρικής ισχύος σε κάθε θερμική ζώνη. Χαρακτηριστικά φαίνεται ότι η συνολική ηλεκτρική ισχύς στην κουζίνα είναι 5kW. Η ηλεκτρική ισχύς εμφανίζεται εν τέλει ως θερμότητα που εισέρχεται στις θερμικές ζώνες. Ορίζονται και εδώ σχετικοί συντελεστές (κλάσματα), που καθορίζουν αυτή τη μετατροπή. Ο Fraction Latent ορίζει το ποσοστό που είναι λανθάνουσα θερμότητα, ο Fraction Radiant το ποσοστό για τη θερμική ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος και ο Fraction Lost το ποσοστό για τη θερμότητα που χάνεται και δεν επηρεάζει τη σχετική θερμική ζώνη, αλλά επίσης μπορεί να αναφέρεται και σε ηλεκτρική ενέργεια που μετατρέπεται σε μηχανικό έργο. Η διαφορά του αθροίσματος όλων αυτών από τη μονάδα ορίζει το αντίστοιχο ποσοστό για τη μεταφερόμενη θερμότητα με συναγωγή.

## Zone Airflow

```
Zone Airflow
-----
[0006] ZoneInfiltration:DesignFlowRate
[-----] ZoneInfiltration:EffectiveLeakageArea
[-----] ZoneInfiltration:FlowCoefficient
[0006] ZoneVentilation:DesignFlowRate
[-----] ZoneVentilation:WindandStackOpenArea
[-----] ZoneAirBalance:OutdoorAir
[-----] ZoneMixing
[-----] ZoneCrossMixing
[-----] ZoneRefrigerationDoorMixing
[-----] ZoneEarthtube
[-----] ZoneCoolTower:Shower
[-----] ZoneThermalChimney
```

Σχήμα 6.41: Ομάδα κατηγοριών Zone Airflow.

## ZoneInfiltration:DesignFlowRate

Με αντικείμενα στην κατηγορία αυτή ορίζεται για κάθε θερμική ζώνη ο (αθέλητος) αερισμός λόγω διείσδυσης εξωτερικού αέρα από τα κουφώματα και λόγω ανοίγματος και κλεισίματος των εξωτερικών πορτών (διείσδυση αέρα πραγματοποιείται και μέσω των αδιαφανών δομικών στοιχείων του κτιρίου, σε μηδαμινές βέβαια ποσότητες).

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		mbedr infiltration	bedr infiltration	livr infiltration	kit infiltration	mentr infiltration	bath infiltration
Zone or ZoneList Name		master bedroom	bedroom	living room	kitchen	main entrance	bathroom
Schedule Name		Infiltration Schedule	Infiltration Schedule	Infiltration Schedule	Infiltration Schedule	Infiltration Schedule	Infiltration Schedule
Design Flow Rate Calculation Method		Flow/Zone	Flow/Zone	Flow/Zone	Flow/Zone	Flow/Zone	Flow/Zone
Design Flow Rate	m3/s	0,0062	0,004	0,0124	0,0076	0,0044	0,0014
Flow per Zone Floor Area	m3/s-m2						
Flow per Exterior Surface Area	m3/s-m2						
Air Changes per Hour	1/hr						
Constant Term Coefficient		1	1	1	1	1	1
Temperature Term Coefficient		0	0	0	0	0	0
Velocity Term Coefficient		0	0	0	0	0	0
Velocity Squared Term Coefficient		0	0	0	0	0	0

**Σχήμα 6.42: Αντικείμενα στην κατηγορία ZoneInfiltration:DesignFlowRate.**

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, έγινε η σύνδεση του κάθε αντικειμένου με το αντικείμενο του χρονικού προγράμματος αερισμού λόγω διείσδυσης εξωτερικού αέρα. Η τιμή της διείσδυσης ορίστηκε να δίνεται σε  $m^3/s$  και για τον υπολογισμό έγινε η παραδοχή ότι η διείσδυση συμβαίνει μόνο από τα κουφώματα (με βάση την Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010). Για τον υπολογισμό χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τον πίνακα 3.26 της Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010 για τη διείσδυση σε  $[m^3/h/m^2]$ , όπου το γινόμενο αυτών με το εμβαδό κάθε κουφώματος έδωσε τις τιμές σε  $[m^3/h]$  και με μετατροπή προέκυψαν οι τιμές της παραπάνω εικόνας. Τέλος, όσον αφορά στους υπόλοιπους τέσσερις συντελεστές, κρατήθηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές του IDF-Editor, που δίνουν σταθερή ροή αέρα κάτω από όλες τις συνθήκες.

## ZoneVentilation:DesignFlowRate

Εδώ ορίστηκε για κάθε θερμική ζώνη ο φυσικός αερισμός από τα ανοίγματα.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		mbedr ventilation	bedr ventilation	livr ventilation	kit ventilation	mentr ventilation	bath ventilation
Zone or ZoneList Name		master bedroom	bedroom	living room	kitchen	main entrance	bathroom
Schedule Name		Ventilation Schedule	Ventilation Schedule	Ventilation Schedule	Ventilation Schedule	Mentr Ventil Sched	Ventilation Schedule
Design Flow Rate Calculation Method		AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour	AirChanges/Hour
Design Flow Rate	m3/s						
Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2						
Flow Rate per Person	m3/s-person						
Air Changes per Hour	1/hr	5	5	5	7	5	6
Ventilation Type		Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Fan Pressure Rise	Pa	0	0	0	0	0	0
Fan Total Efficiency		1	1	1	1	1	1
Constant Term Coefficient		1	1	1	1	1	1
Temperature Term Coefficient		0	0	0	0	0	0
Velocity Term Coefficient		0	0	0	0	0	0
Velocity Squared Term Coefficient		0	0	0	0	0	0

**Σχήμα 6.43: Αντικείμενα στην κατηγορία ZoneVentilation:DesignFlowRate – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων.**

Minimum Indoor Temperature	C	18	18	18	18	18	18
Minimum Indoor Temperature Schedule Name							
Maximum Indoor Temperature	C	26	26	26	26	26	26
Maximum Indoor Temperature Schedule Name							
Delta Temperature	deltaC	-100	-100	-100	-100	-100	-100
Delta Temperature Schedule Name							
Minimum Outdoor Temperature	C	14	14	14	14	14	14
Minimum Outdoor Temperature Schedule Name							
Maximum Outdoor Temperature	C	32	32	32	32	32	32
Maximum Outdoor Temperature Schedule Name							
Maximum Wind Speed	m/s	17	17	17	17	17	17

**Σχήμα 6.44: Τα υπόλοιπα πεδία των αντικειμένων της εικόνας του σχήματος 6.43.**

Στο τρίτο πεδίο φαίνεται η σύνδεση κάθε αντικείμενου με χρονικό πρόγραμμα λειτουργίας για τον φυσικό αερισμό. Η τιμή σε κάθε αντικείμενο επιλέχθηκε να δοθεί με εναλλαγές αέρα ανά ώρα (Air Changes per Hour) και δόθηκαν οι τιμές που φαίνονται στο πεδίο Air Changes per Hour. Φαίνεται ότι ο απαιτούμενος φυσικός αερισμός στην κουζίνα και στο μπάνιο είναι μεγαλύτερος από τα υπόλοιπα δωμάτια. Οι τιμές αυτές προφανώς πολλαπλασιάζονται με τους συντελεστές των σχετικών χρονικών προγραμμάτων. Αφού ορίστηκε ο αερισμός να γίνεται χωρίς χρήση ανεμιστήρα (Natural), τα σχετικά με αυτόν πεδία αγνοούνται από το λογισμικό κατά την προσομοίωση. Τα τελευταία 4 πεδία της εικόνας του σχήματος 6.43 έχουν την ίδια λογική με τα αντίστοιχα για τον αερισμό λόγω διείσδυσης αέρα.

Παρακάτω (εικόνα του σχήματος 6.44) δηλώθηκε ότι ο φυσικός αερισμός θα σταματά όταν η εσωτερική θερμοκρασία πέσει κάτω από 18°C ή ανέβει πάνω από 26°C και όταν η εξωτερική θερμοκρασία πέσει κάτω από 14°C ή ανέβει πάνω από 32°C. Τα όρια που δόθηκαν δεν είναι πολύ ελαστικά – και αυτό λόγω του ότι το σύστημα HVAC ορίστηκε να είναι διαθέσιμο όλο το χρόνο για θέρμανση και ψύξη (όπως φαίνεται και από το θερμοστάτη). Με τον τρόπο αυτό προσομοιώνεται η συμπεριφορά των ανθρώπων σε σχέση με το άνοιγμα και το κλείσιμο των παραθύρων και πορτών, ανάλογα με τις συνθήκες. Σχετικά με το πεδίο Delta Temperature, σε αυτό συμπληρώνεται η θερμοκρασιακή διαφορά της εξωτερικής από την εσωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού, κάτω από την οποία ο αερισμός σταματά. Επιτρέπονται και αρνητικοί αριθμοί και αυτό επιτρέπει στον αερισμό να συμβαίνει ακόμα και αν η εξωτερική θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την εσωτερική. Κρατήθηκε η προεπιλογή (-100°C).

## HVAC Templates

Καθότι η ομάδα αυτή κατηγοριών έχει πληθώρα κατηγοριών, η παρακάτω εικόνα απεικονίζει μόνο τις κατηγορίες στις οποίες δημιουργήθηκαν αντικείμενα (μέσω κατάλληλης επιλογής στο περιβάλλον του IDF-Editor):

```
[0001] HVACTemplate:Thermostat
[0006] HVACTemplate:Zone:FanCoil
[0001] HVACTemplate:Plant:ChilledWaterLoop
[0001] HVACTemplate:Plant:Chiller
[0001] HVACTemplate:Plant:Tower
[0001] HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop
[0001] HVACTemplate:Plant:Boiler
```

**Σχήμα 6.45: Κατηγορίες στην ομάδα κατηγοριών HVAC Templates.**

Πριν από την περιγραφή των κατηγοριών που φαίνονται στην παραπάνω εικόνα, αξίζει να γίνει μια γενικότερη αναφορά στην ομάδα κατηγοριών HVAC Templates. Μέσω αυτής καθίσταται πολύ πιο εύκολη (σε σχέση με άλλες ομάδες κατηγοριών που επιτελούν τον ίδιο σκοπό) η μοντελοποίηση των συστημάτων HVAC κτιρίων, καθώς η περιγραφή τους είναι σχετικά ενοποιημένη και χωρίς χρήση πολλών κατηγοριών και αντικειμένων. Σε αντίθεση με άλλα αντικείμενα του EnergyPlus, το λογισμικό δεν διαχειρίζεται με άμεσο τρόπο τα αντικείμενα αυτής της ομάδας κατηγοριών. Αντιθέτως, γίνεται αυτομάτως κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης η προεπεξεργασία τους από ένα (συνοδευτικό) πρόγραμμα που λέγεται ExpandObjects, το οποίο μετατρέπει όλα αυτά τα αντικείμενα σε άλλα διαφορετικά. Ακολούθως δημιουργεί ένα αρχείο exridf με αναλυτική περιγραφή των συστημάτων HVAC, το οποίο χρησιμοποιείται ως ρεύμα εισόδου στην προσομοίωση.

Με αλλαγή της κατάληξης (επέκτασης) του exridf σε [.idf] από τον χρήστη, μπορεί αυτό να χρησιμοποιηθεί ως κανονικό αρχείο IDF, όπου η περιγραφή των συστημάτων HVAC γίνεται αναλυτικά (για σιγουριά, καλύτερο είναι να αλλάζεται και το όνομα του αρχείου, εκτός από την κατάληξη). Φυσικά κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο, αλλά ένας έμπειρος μελετητής μπορεί με τον τρόπο αυτό να επεκτείνει την εργασία του πέρα από τις δυνατότητες του HVAC Templates, επιφέροντας αλλαγές στα αντικείμενα περιγραφής που προκύπτουν. Αυτό χωρίς βέβαια να κινδυνεύει σημαντικά να κάνει λάθη, αφού για την συνολική γενική περιγραφή έχει φροντίσει το λογισμικό μέσω των μετατροπών. Η μοντελοποίηση των συστημάτων HVAC χωρίς χρήση αυτής της μεθόδου, αλλά με εξαρχής δημιουργία των αντικειμένων άλλων κατηγοριών, μπορεί να δυσκολέψει ακόμα και πιο έμπειρους χρήστες.

Ακολουθεί επεξήγηση των κατηγοριών HVACTemplate, στις οποίες δημιουργήθηκαν αντικείμενα. Όλες αυτές μαζί συνθέτουν το σύστημα θέρμανσης και ψύξης που μοντελοποιήθηκε, που είναι τετρασωλήνιο σύστημα fan coils νερού (fan coils με δύο στοιχεία) με λέβητα φυσικού αερίου συμπύκνωσης, υδρόψυκτο ψύκτη και ψυκτικό πύργο.

#### HVACTemplate:Thermostat

Εδώ ορίστηκε ένα αντικείμενο, με όνομα All Zones Thermostat, που αφορά το θερμοστάτη θέρμανσης και ψύξης για όλες τις θερμικές ζώνες (ένας σε κάθε ζώνη, αλλά όλοι έχουν την ίδια ρύθμιση). Έγινε και η σύνδεση (σε δύο πεδία) με τα δύο αντικείμενα που ορίζουν τα χρονικά προγράμματα ρύθμισης του θερμοστάτη για θέρμανση και ψύξη.

Field	Units	Obj1
Name		All Zones Thermostat
Heating Setpoint Schedule Name		Heating Setpoint Sched
Constant Heating Setpoint	C	
Cooling Setpoint Schedule Name		Cooling Setpoint Sched
Constant Cooling Setpoint	C	

**Σχήμα 6.46:** Αντικείμενο στην κατηγορία HVACTemplate:Thermostat.

## HVACTemplate:Zone:FanCoil

Κάθε αντικείμενο σε αυτή την κατηγορία ορίζει ένα τετρασωλήνιο\* σώμα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας αέρα (fan coil), με θερμαντικό στοιχείο θερμού νερού, ψυκτικό στοιχείο ψυχρού νερού και δυνατότητα εισαγωγής νωπού εξωτερικού αέρα με κατάλληλο μίκτη.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Zone Name		living room	master bedroom	bedroom	kitchen	bathroom	main entrance
Template Thermostat Name		All Zones Thermost	All Zones Thermost	All Zones Thermost	All Zones Thermost	All Zones Thermost	All Zones Thermost
Supply Air Maximum Flow Rate	m3/s	autosize	autosize	autosize	autosize	autosize	autosize
Zone Heating Sizing Factor							
Zone Cooling Sizing Factor							
Outdoor Air Method		Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person	Flow/Person
Outdoor Air Flow Rate per Person	m3/s	0,00944	0,00944	0,00944	0,00944	0,00944	0,00944
Outdoor Air Flow Rate per Zone Floor Area	m3/s-m2						
Outdoor Air Flow Rate per Zone	m3/s						
System Availability Schedule Name							
Supply Fan Total Efficiency		0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Supply Fan Delta Pressure	Pa	75	75	75	75	75	75
Supply Fan Motor Efficiency		0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Supply Fan Motor in Air Stream Fraction		1	1	1	1	1	1
Cooling Coil Type		ChilledWater	ChilledWater	ChilledWater	ChilledWater	ChilledWater	ChilledWater
Cooling Coil Availability Schedule Name							
Cooling Coil Design Setpoint	C	12	12	12	12	12	12
Heating Coil Type		HotWater	HotWater	HotWater	HotWater	HotWater	HotWater
Heating Coil Availability Schedule Name							
Heating Coil Design Setpoint	C	50	50	50	50	50	50

**Σχήμα 6.47: Αντικείμενα στην κατηγορία HVACTemplate:Zone:FanCoil – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων.**

Dedicated Outdoor Air System Name							
Zone Cooling Design Supply Air Temperature Input Method		SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu
Zone Cooling Design Supply Air Temperature Difference	deltaC	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11	11,11
Zone Heating Design Supply Air Temperature Input Method		SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu	SupplyAirTemperatu
Zone Heating Design Supply Air Temperature Difference	deltaC	30	30	30	30	30	30
Design Specification Outdoor Air Object Name							
Design Specification Zone Air Distribution Object Name							
Capacity Control Method							
Low Speed Supply Air Flow Ratio		0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Medium Speed Supply Air Flow Ratio		0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66
Outdoor Air Schedule Name							
Baseboard Heating Type		None	None	None	None	None	None
Baseboard Heating Availability Schedule Name							
Baseboard Heating Capacity	W	autosize	autosize	autosize	autosize	autosize	autosize

**Σχήμα 6.48: Τα υπόλοιπα πεδία των αντικειμένων της εικόνας του σχήματος 6.47.**

Στο δεύτερο πεδίο φαίνεται η σύνδεση με το αντικείμενο του θερμοστάτη. Η μέγιστη παροχή αέρα κάθε σώματος διαστασιοποιείται από το λογισμικό (autosize), με βάση τα φορτία που υπάρχουν στις ημέρες σχεδιασμού (προφανώς επιλέγεται η μεγαλύτερη τιμή από τις δύο, μεταξύ των δύο ημερών σχεδιασμού). Η παροχή εξωτερικού αέρα (τέταρτο συμπληρωμένο πεδίο σε κάθε αντικείμενο) αφέθηκε στην τιμή προεπιλογής, ενώ τα επόμενα 4 πεδία που συμπληρώθηκαν αφορούν τον

\* Στο σύστημα 4 σωλήνων υπάρχει σωλήνας προσαγωγής ψυχρού νερού, σωλήνας προσαγωγής θερμού νερού, σωλήνας επιστροφής ψυχρού νερού και σωλήνας επιστροφής θερμού νερού. Στο κάθε σώμα παρέχεται μόνο ψυχρό ή μόνο θερμό νερό, από μία τρίοδη βαλβίδα στην είσοδο ή από 2 δίοδες βαλβίδες προοδευτικής λειτουργίας. Στην έξοδο του στοιχείου συνήθως τοποθετείται μία τρίοδη δύο θέσεων, που οδηγεί το νερό στον αντίστοιχο κλάδο επιστροφής. Με το σύστημα αυτό είναι δυνατή η ταυτόχρονη θέρμανση και ψύξη μεταξύ των θερμικών ζωνών, ανάλογα με τις ανάγκες της καθεμιάς.

ανεμιστήρα (Supply Fan) κάθε σώματος, καθώς και τον κινητήρα αυτού (Motor). Στα πεδία Cooling Coil Design Setpoint και Heating Coil Design Setpoint δίνονται οι θερμοκρασίες του αέρα παροχής των fan coil για τις οποίες θα διαστασιολογηθεί η παροχή αυτού του αέρα και τα στοιχεία. Στα πεδία Low Speed Supply Air Flow Ratio και High Speed Supply Air Flow Ratio δίνονται τιμές που καθορίζουν τις παροχές αέρα στην λειτουργία χαμηλής και μέσης ταχύτητας του αέρα αντίστοιχα (οι τιμές είναι το ποσοστό αυτών των παροχών ως προς τη μέγιστη).

#### HVACTemplate:Plant:ChilledWaterLoop

Εδώ περιγράφονται τα συστήματα των σωληνώσεων που συνδέουν τα ψυκτικά στοιχεία των fan coils με τους ψύκτες και τους ψυκτικούς πύργους (αν οι τελευταίοι υπάρχουν). Τα συστήματα αυτά καλούνται βρόχοι (loops) και το αντικείμενο σε αυτή την κατηγορία περιγράφει και τα συστήματα ελέγχου και αντλίες που υπάρχουν στους βρόχους. Δημιουργείται μόνο ένα αντικείμενο, με το οποίο εξυπηρετούνται όλα τα σώματα.

Field	Units	Obj1
Name		Chilled Water Loop
Pump Schedule Name		
Pump Control Type		Intermittent
Chiller Plant Operation Scheme Type		Default
Chiller Plant Equipment Operation Schemes Name		
Chilled Water Setpoint Schedule Name		
Chilled Water Design Setpoint	C	7,22
Chilled Water Pump Configuration		ConstantPrimaryNoSecondary
Primary Chilled Water Pump Rated Head	Pa	179352
Secondary Chilled Water Pump Rated Head	Pa	179352
Condenser Plant Operation Scheme Type		Default
Condenser Equipment Operation Schemes Name		
Condenser Water Temperature Control Type		OutdoorWetBulbTemperature
Condenser Water Setpoint Schedule Name		

**Σχήμα 6.49: Αντικείμενα στην κατηγορία HVACTemplate:Plant:ChilledWaterLoop – δεν προβάλλονται όλα τα πεδία των αντικειμένων.**

Condenser Water Design Setpoint	C	29,4
Condenser Water Pump Rated Head	Pa	179352
Chilled Water Setpoint Reset Type		None
Chilled Water Setpoint at Outdoor Dry-Bulb Low	C	12,2
Chilled Water Reset Outdoor Dry-Bulb Low	C	15,6
Chilled Water Setpoint at Outdoor Dry-Bulb High	C	6,7
Chilled Water Reset Outdoor Dry-Bulb High	C	26,7
Chilled Water Primary Pump Type		SinglePump
Chilled Water Secondary Pump Type		SinglePump
Condenser Water Pump Type		SinglePump
Chilled Water Supply Side Bypass Pipe		Yes
Chilled Water Demand Side Bypass Pipe		Yes
Condenser Water Supply Side Bypass Pipe		Yes
Condenser Water Demand Side Bypass Pipe		Yes
Fluid Type		Water
Loop Design Delta Temperature	deltaC	6,67
Minimum Outdoor Dry Bulb Temperature	C	
Chilled Water Load Distribution Scheme		SequentialLoad
Condenser Water Load Distribution Scheme		SequentialLoad

**Σχήμα 6.50: Τα υπόλοιπα πεδία των αντικειμένων της εικόνας του σχήματος 6.49.**



Στο πεδίο Pump Control Type ορίστηκε ότι η αντλία θα λειτουργεί όταν υπάρχει ψυκτικό φορτίο, ενώ θα σταματά όταν δεν υπάρχει. Το σημείο ρύθμισης της θερμοκρασίας του ψυχρού νερού, που χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση του συστήματος σωληνώσεων και του σχετικού εξοπλισμού ορίζεται στο πεδίο Chilled Water Design Setpoint. Στο αμέσως επόμενο πεδίο ορίστηκε ότι θα υπάρχει σταθερή παροχή νερού (αντλία σταθερής παροχής) στον ψύκτη και στα σώματα, με παράκαμψη – χωρίς ύπαρξη δευτερεύουσας αντλίας. Το επόμενο πεδίο περιέχει την τιμή του ονομαστικού ύψους της αντλίας σε Pa. Παρακάτω δηλώνεται ότι η θερμοκρασία του νερού στον συμπυκνωτή του ψύκτη μειώνεται μειούμενης της εξωτερικής θερμοκρασίας υγρού βολβού, ενώ δηλώνεται και η τιμή του ονομαστικού ύψους της αντλίας σε Pa στο κύκλωμα του συμπυκνωτή. Ακόμη, στο πεδίο Chilled Water Setpoint Reset Type ορίστηκε ότι η λειτουργία θα γίνεται πάντοτε στη θερμοκρασία νερού σχεδιασμού του συστήματος (7,22°C), ενώ οι τιμές στα επόμενα τέσσερα πεδία αγνοούνται για αυτό τον λόγο από το πρόγραμμα. Τα επόμενα πεδία σχετίζονται με τις αντλίες, τους σωλήνες παράκαμψης από την πλευρά ανεφοδιασμού (ψύκτης/ψυκτικός πύργος) και ζήτησης (fan coils/συμπυκνωτής ψύκτη), το είδος του ρευστού (νερό) και τη θερμοκρασιακή διαφορά που χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση της παροχής στον βρόχο.

#### HVACTemplate:Plant:Chiller

Εδώ ορίζεται ο ψύκτης (Chiller). Είναι δυνατή η δημιουργία πολλών ψυκτών.

Field	Units	Obj1
Name		Chiller
Chiller Type		ElectricReciprocating
Capacity	W	autosize
Nominal COP	W/W	3,5
Condenser Type		WaterCooled
Priority		1
Sizing Factor		1
Minimum Part Load Ratio		0
Maximum Part Load Ratio		1
Optimum Part Load Ratio		1
Minimum Unloading Ratio		0,2
Leaving Chilled Water Lower Temperature Limit	C	2

**Σχήμα 6.51: Αντικείμενο στην κατηγορία HVACTemplate:Plant:Chiller.**

Μοντελοποιήθηκε ψύκτης με συμπιεστή παλινδρομικού τύπου που κινείται από ηλεκτροκινητήρα. Η ισχύς ορίστηκε να διαστασιολογηθεί από το πρόγραμμα (με βάση το μέγιστο ψυκτικό φορτίο, που συναντάται κατά την ημέρα σχεδιασμού θέρους). Αυτή η ισχύς αντιστοιχεί στη θερμοκρασία και παροχή νερού σχεδιασμού. Ο ονομαστικός COP είναι 3,5 και αντιστοιχεί επίσης στη θερμοκρασία και παροχή νερού σχεδιασμού. Στο πέμπτο πεδίο φαίνεται ότι ο συμπυκνωτής είναι υδρόψυκτος (από τον ψυκτικό πύργο). Στο πεδίο Minimum Part Load Ratio ορίζεται η δυνατότητα και ο τρόπος λειτουργίας του ψύκτη σε μερικά φορτία. Εάν η τιμή ήταν για παράδειγμα 0,2, κάτω από το ποσοστό αυτό μερικού φορτίου ο συμπιεστής θα

λειτουργούσε σε κύκλους (on/off) για την εξυπηρέτηση του ψυκτικού φορτίου. Το επόμενο πεδίο έχει αντίστοιχη σημασία και εδώ η τιμή μπορεί να είναι και μεγαλύτερη από 1. Τέλος, στο πεδίο Optimum Part Load Ratio δηλώνεται το σημείο λειτουργίας στο οποίο ο ψύκτης λειτουργεί με τον μέγιστο COP, ενώ η τιμή στο τελευταίο πεδίο ορίζει τη θερμοκρασία του νερού κάτω από την οποία σταματά η μεταφορά θερμότητας στον ατμοποιητή/εξατμιστή, ώστε να μην ψυχθεί περαιτέρω το νερό.

#### HVACTemplate:Plant:Tower

Με αντικείμενο σε αυτή την κατηγορία περιγράφεται ένας ψυκτικός πύργος, ενώ είναι δυνατή η δημιουργία πολλών αντικειμένων.

Field	Units	Obj1
Name		Tower
Tower Type		SingleSpeed
High Speed Nominal Capacity	W	autosize
High Speed Fan Power	W	autosize
Low Speed Nominal Capacity	W	autosize
Low Speed Fan Power	W	autosize
Free Convection Capacity	W	autosize
Priority		1
Sizing Factor		1
Template Plant Loop Type		

**Σχήμα 6.52: Αντικείμενο στην κατηγορία HVACTemplate:Plant:Tower.**

Ο ανεμιστήρας του ψυκτικού πύργου ορίστηκε να λειτουργεί σε συγκεκριμένη ταχύτητα (και όχι σε δύο διαφορετικές), ενώ τα δύο επόμενα πεδία με διαστασιολόγηση από το πρόγραμμα αφορούν την ονομαστική ισχύ του πύργου και του ανεμιστήρα του πύργου στην υψηλή ταχύτητα. Τα πεδία που αφορούν χαμηλή ταχύτητα (Low Speed) αγνοούνται από το λογισμικό, αφού ορίστηκε η λειτουργία του ανεμιστήρα να γίνεται σε μία ταχύτητα (υψηλή). Το πεδίο Free Convection Capacity αφορά την “ονομαστική” ικανότητα του πύργου να απορρίπτει θερμότητα, όταν λειτουργεί στην περιοχή ελεύθερης συναγωγής (υπάρχει ροή νερού, αλλά ο ανεμιστήρας δεν λειτουργεί), με θερμοκρασία εισερχόμενου νερού 35°C, εξερχόμενου νερού 29,4°C και εισερχόμενου αέρα με θερμοκρασία υγρού βολβού 25,6 °C και ξηρού βολβού 35°C. Η παροχή νερού σχεδιασμού υποτίθεται ότι είναι  $5,382 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s/W}$  στην λειτουργία ανεμιστήρα υψηλής ταχύτητας. Το 125% αυτής της ικανότητας [W] απόρριψης θερμότητας με ελεύθερη συναγωγή δίνει την πραγματική απόρριψη θερμότητας σε αυτές τις συνθήκες λειτουργίας.

#### HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop

Εδώ περιγράφονται τα συστήματα των σωληνώσεων που συνδέουν τα θερμαντικά στοιχεία των fan coils με τους λέβητες. Τα συστήματα αυτά καλούνται βρόχοι (loops) και το αντικείμενο σε αυτή την κατηγορία περιγράφει και τα συστήματα ελέγχου και

αντλίες που υπάρχουν στους βρόχους. Δημιουργείται μόνο ένα αντικείμενο, με το οποίο εξυπηρετούνται όλα τα σώματα.

Field	Units	Obj1
Name		Hot Water Loop
Pump Schedule Name		
Pump Control Type		Intermittent
Hot Water Plant Operation Scheme Type		Default
Hot Water Plant Equipment Operation Schemes Name		
Hot Water Setpoint Schedule Name		
Hot Water Design Setpoint	C	82
Hot Water Pump Configuration		ConstantFlow
Hot Water Pump Rated Head	Pa	179352
Hot Water Setpoint Reset Type		OutdoorAirTemperal
Hot Water Setpoint at Outdoor Dry-Bulb Low	C	82,2
Hot Water Reset Outdoor Dry-Bulb Low	C	-3
Hot Water Setpoint at Outdoor Dry-Bulb High	C	65,6
Hot Water Reset Outdoor Dry-Bulb High	C	10
Hot Water Pump Type		SinglePump
Supply Side Bypass Pipe		Yes
Demand Side Bypass Pipe		Yes
Fluid Type		Water
Loop Design Delta Temperature	deltaC	11
Maximum Outdoor Dry Bulb Temperature	C	
Load Distribution Scheme		SequentialLoad

**Σχήμα 6.53: Αντικείμενο στην κατηγορία HVACTemplate:Plant:HotWaterLoop.**

Το σημείο ρύθμισης της θερμοκρασίας του θερμού νερού, που χρησιμοποιείται για τη διαστασιολόγηση του συστήματος σωληνώσεων και του σχετικού εξοπλισμού, ορίστηκε στους 82°C. Η αντλία είναι σταθερής παροχής προς τα στοιχεία και τον λέβητα, με το πλεόνασμα νερού να παρακάμπτεται. Στο πεδίο Hot Water Setpoint Reset Type ορίστηκε η θερμοκρασία του θερμού νερού να ρυθμίζεται ανάλογα με την εξωτερική θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού είναι μικρότερη (ή ίση) από -3°C, το νερό θα θερμαίνεται στους 82,2°C. Όταν η εξωτερική θερμοκρασία ξηρού βολβού είναι μεγαλύτερη (ή ίση) από 10°C, το νερό θα θερμαίνεται στους 65,6°C. Στα ενδιάμεσα σημεία εξωτερικής θερμοκρασίας, η θερμοκρασία του νερού θα ρυθμίζεται γραμμικά.

#### HVACTemplate:Plant:Boiler

Εδώ ορίστηκε ο λέβητας (Boiler). Είναι δυνατή η δημιουργία πολλών λεβήτων. Όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα, στο πεδίο Boiler Type δηλώθηκε ότι ο λέβητας είναι τύπου συμπύκνωσης (των υδρατμών των καυσαερίων, προς εκμετάλλευση και της λανθάνουσας θερμότητας εξάτμισης). Η ισχύς του λέβητα ορίστηκε να διαστασιολογείται από το πρόγραμμα (με βάση το μέγιστο θερμικό φορτίο κατά την ημέρα σχεδιασμού χειμώνα). Στο πεδίο Efficiency δηλώνεται ο βαθμός απόδοσης του καυστήρα, ενώ στο αμέσως επόμενο πεδίο δηλώθηκε ότι το καύσιμο είναι φυσικό αέριο. Τέλος, στο πεδίο Water Outlet Upper Temperature Limit

δηλώθηκε ότι η μέγιστη δυνατή θερμοκρασία εξόδου του νερού είναι 100°C (προεπιλογή).

Field	Units	Obj1
Name		Boiler
Boiler Type		CondensingHotWaterBoiler
Capacity	W	autosize
Efficiency		0,8
Fuel Type		NaturalGas
Priority		1
Sizing Factor		1
Minimum Part Load Ratio		0
Maximum Part Load Ratio		1,1
Optimum Part Load Ratio		1
Water Outlet Upper Temperature Limit	C	100
Template Plant Loop Type		HotWater

Σχήμα 6.54: Αντικείμενο στην κατηγορία HVACTemplate:Plant:Boiler.

## HVAC Design Objects

```

HVAC Design Objects
-----
[-----] DesignSpecification:OutdoorAir
[-----] DesignSpecification:ZoneAirDistribution
[0001] Sizing:Parameters
[-----] Sizing:Zone
[-----] DesignSpecification:ZoneHVAC:Sizing
[-----] Sizing:System
[-----] Sizing:Plant
[-----] OutputControl:Sizing:Style
    
```

Σχήμα 6.55: Ομάδα κατηγοριών HVAC Design Objects.

### Sizing:Parameters

Το αντικείμενο στην κατηγορία αυτή επιτρέπει στον μελετητή να προσδιορίσει καθολικούς συντελεστές διαστασιολόγησης για τη θέρμανση και την ψύξη. Αυτοί οι συντελεστές εφαρμόζονται σε όλα τα θερμικά και ψυκτικά φορτία και τις παροχές αέρα. Τα νέα φορτία και παροχές αέρα που προκύπτουν, χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των παροχών και της ισχύος στα διάφορα στοιχεία που συνθέτουν τα συστήματα HVAC. Ο μελετητής μπορεί επίσης να προσδιορίσει το πλάτος (σε χρονικά βήματα φορτίων) ενός κινητού μέσου όρου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξομάλυνση των υπολογισθέντων σειρών παροχών σχεδιασμού των θερμικών ζωνών (αυτό εξηγείται αναλυτικότερα παρακάτω).

Field	Units	Obj1
Heating Sizing Factor		1,15
Cooling Sizing Factor		1,15
Timesteps in Averaging Window		6

Σχήμα 6.56: Αντικείμενο στην κατηγορία Sizing:Parameters.

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, επιλέχθηκε η τιμή 1,15 για την “υπερδιαστασιολόγηση” όλων των θερμικών και ψυκτικών φορτίων και απαιτούμενων παροχών αέρα στις θερμικές ζώνες.

Σχετικά με το πεδίο Timesteps in Averaging Window, να σημειωθεί αρχικά ότι ο υπολογισμός των παροχών αέρα σχεδιασμού των θερμικών ζωνών γίνεται από το λογισμικό με την υπόθεση της δυνατότητας ύπαρξης άπειρης προμήθειας θερμού ή ψυχρού αέρα σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Οπότε, η υπολογιζόμενη παροχή αέρα σχεδιασμού θα είναι πάντοτε ικανή να ικανοποιήσει (ανταποκριθεί σε) οποιοδήποτε φορτίο ή μεταβολή σε φορτίο, ανεξαρτήτως του πόσο μεγάλο είναι αυτό ή του πόσο απότομη είναι η μεταβολή. Στην πραγματικότητα βέβαια οι παροχές αέρα περιορίζονται από διάφορους παράγοντες, όπως η ισχύς των ανεμιστήρων. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε εξωπραγματικές τιμές για τις παροχές αυτές, ειδικά εάν ο χρήστης χρησιμοποιεί προγράμματα ρύθμισης θερμοστάτη με νυχτερινή μείωση ισχύος. Οι υπολογιζόμενες παροχές σχεδιασμού στις θερμικές ζώνες υπολογίζονται γενικά με βάση το χρονικό βήμα υπολογισμών, στο οποίο λαμβάνεται ο μέσος όρος τους. Με την τιμή 6 που ορίστηκε στην προκειμένη περίπτωση στο πεδίο αυτό, δηλώθηκε ότι θα λαμβάνεται ο μέσος όρος στο χρονικό διάστημα 6 χρονικών βημάτων (δηλαδή μίας ώρας). Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται εξομάλυνση των προαναφερθέντων τιμών και αποτροπή των παροχών αέρα κατά τις περιόδους σημαντικής μεταβολής της εσωτερικής θερμοκρασίας (δηλαδή τις στιγμές που αλλάζει η ρύθμιση του θερμοστάτη) να καθορίσουν σημαντικά τον υπολογισμό των παροχών σχεδιασμού.

## Output Reporting

Καθότι η ομάδα αυτή κατηγοριών έχει πληθώρα κατηγοριών, η παρακάτω εικόνα απεικονίζει μόνο τις κατηγορίες στις οποίες δημιουργήθηκαν αντικείμενα (μέσω κατάλληλης επιλογής στο περιβάλλον του IDF-Editor):

```
[0001] Output:VariableDictionary
[0001] Output:Surfaces:List
[0001] Output:Constructions
[0001] Output:Table:SummaryReports
[0001] OutputControl:Table:Style
[0016] Output:Variable
```

**Σχήμα 6.57: Κατηγορίες στην ομάδα κατηγοριών Output Reporting.**

### Output:Variable Dictionary

Το αντικείμενο σε αυτή την κατηγορία ετοιμάζει μετά από την εκτέλεση της προσομοίωσης κατάλογο με όλες τις διαθέσιμες μεταβλητές προς αναφορά, για διευκόλυνση του μελετητή. Αυτός ο κατάλογος βρίσκεται στο αρχείο (.rdd).

### Output:Surfaces:List

Προσθήκη αντικειμένου στην κατηγορία αυτή παράγει μια αναφορά στο αρχείο (.eio), που συνοψίζει λεπτομέρειες των διάφορων επιφανειών του κτιρίου.

### Output:Constructions

Προστίθεται μια αναφορά στο αρχείο (.eio), που προβάλλει λεπτομέρειες για κάθε κατασκευή (construction), συμπεριλαμβανομένων των συνολικών ιδιοτήτων, ενός καταλόγου των στρωμάτων των υλικών και υπολογιζόμενων αποτελεσμάτων που σχετίζονται με τις conduction transfer functions.

### Output:Table:SummaryReports

Δίνεται η δυνατότητα στο μελετητή να έχει περιληπτικές αναφορές για κάθε αποτέλεσμα, σε πινακοποιημένη μορφή.

Field	Units	Obj1
Report 1 Name		AllSummaryAndMonthly
Report 2 Name		
Report 3 Name		
Report 4 Name		
Report 5 Name		

**Σχήμα 6.58: Αντικείμενο στην κατηγορία Output:Table:SummaryReports.**

Επιλέχθηκε οι αναφορές αυτές να περιλαμβάνουν στοιχεία σχετικά με όλα τα διαθέσιμα δεδομένα και να γίνονται σε ετήσια (συνολική) και μηνιαία βάση.

### OutputControl:Table:Style

Εδώ ο μελετητής μπορεί να επιλέξει τη μορφή (format) με την οποία θα παραχθούν τα αποτελέσματα από την κατηγορία Output:Table:SummaryReports. Επιλέχθηκε να παραχθούν σε μορφή Comma (αρχείο .csv) και HTML (αρχείο .html).

### Output:Variable

Η κατηγορία αυτή είναι γενικά η πιο σημαντική αυτής της ομάδας κατηγοριών. Κάθε αντικείμενο εδώ ορίζει μια (διαθέσιμη) μεταβλητή που θα αναφερθεί ως αποτέλεσμα εξόδου στα σχετικά αρχεία εξόδου. Ένα στοιχείο που διευκολύνει σημαντικά τον μελετητή είναι ότι μετά από την “πρώτη” προσομοίωση, που μπορεί να εκτελεστεί χωρίς να έχουν οριστεί τέτοιες μεταβλητές εξόδου, υπάρχει αναπτυσσόμενη λίστα στο πεδίο Variable Name που εμφανίζει τις διαθέσιμες

μεταβλητές προς επιλογή (έτσι δεν είναι απαραίτητο για τον μελετητή να τις αναζητεί στο αρχείο RDD).

Στο πεδίο Reporting Frequency ορίζεται η συχνότητα αναφοράς της κάθε μεταβλητής (χρονικό βήμα αναφοράς) – η αναφορά ανά ώρα συνήθως είναι αρκετή. Να σημειωθεί ότι στις αναφορές που γίνονται ανά χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από αυτό που αντιστοιχεί στο χρονικό βήμα υπολογισμών (στην προκειμένη περίπτωση αυτό είναι 10 min) υπάρχουν μεταβλητές για τις οποίες οι αναφερόμενες τιμές είναι των άθροισμα των τιμών που υπολογίζονται στο χρονικό βήμα υπολογισμών (αυτό γίνεται για παράδειγμα για ενέργεια) και υπάρχουν άλλες μεταβλητές για τις οποίες οι αναφερόμενες τιμές είναι η μέση τιμή των τιμών που υπολογίζονται στο χρονικό βήμα υπολογισμών (αυτό γίνεται για παράδειγμα για ισχύ και για θερμοκρασία). Επίσης, υπάρχουν μεταβλητές που παράγονται στο χρονικό βήμα υπολογισμών και άλλες που παράγονται στο system timestep. Η προεπιλογή είναι η αναφορά ανά ώρα.

Στο πεδίο Key Value μπορεί να γίνει αναφορά σε συγκεκριμένο στοιχείο για το οποίο θα δοθεί μια μεταβλητή, όπως θερμική ζώνη ή επιφάνεια, ενώ αν συμπληρωθεί αστερίσκος ή αφηθεί κενό (η προεπιλογή είναι ο αστερίσκος) θα αναφερθεί η σχετική μεταβλητή για όλα τα στοιχεία. Για παράδειγμα, μπορεί να ενδιαφέρει η θερμοκρασία μόνο μιας συγκεκριμένης επιφάνειας, οπότε ο χρήστης θα συμπληρώσει την ονομασία της στο πεδίο αυτό.

Στο πεδίο Schedule Name μπορεί να οριστεί μέσω σχετικού χρονικού προγράμματος η αναφορά να γίνεται για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, προς αποφυγή της δημιουργίας πολλών δεδομένων. Για παράδειγμα, μπορεί να οριστεί η αναφορά της θερμοκρασίας\* μιας θερμικής ζώνης να γίνει μόνο για τον μήνα Ιούνιο.

Γενικά, ο μελετητής δεν εμποδίζεται από το να ορίσει διάφορες μεταβλητές εξόδου που βρίσκονται προς την κατεύθυνση των αναγκών του (και με διάφορους τρόπους αναφοράς) και να αποφασίσει αργότερα ποιες από αυτές θα χρησιμοποιήσει τελικά για ανάλυση και εξαγωγή συμπερασμάτων (πιθανώς προσθέτοντας/αφαιρώντας άλλες αργότερα ή τροποποιώντας το χρονικό βήμα αναφοράς και εκτελώντας εκ νέου την προσομοίωση). Εξάλλου, αυτές μπορεί να μεταβάλλονται κατά την τυχούσα μελέτη των επιπτώσεων που επιφέρουν διάφορες μεταβολές στο κτιριακό κέλυφος ή

---

\* Στο EnergyPlus, από προεπιλογή, για τους υπολογισμούς γίνεται η υπόθεση ότι στο εσωτερικό κάθε θερμικής ζώνης υπάρχει καλή ανάμιξη του εσωτερικού αέρα και ότι δηλαδή η θερμοκρασία είναι ομοιόμορφη. Ο μελετητής έχει τη δυνατότητα με δημιουργία αντικειμένων σε σχετική ομάδα κατηγοριών (Room Air Models) να ορίσει σχετικά απλοϊκές κατανομές θερμοκρασιών στο εσωτερικό των θερμικών ζωνών, που χρησιμοποιούνται στους ενεργειακούς υπολογισμούς. Από την άλλη, προηγμένα μοντέλα όπως το RANS-CFD έχουν πολύ μεγάλο υπολογιστικό κόστος για να ενσωματωθούν στο EnergyPlus, προς το παρόν. Βέβαια, το μοντέλο πλήρους ανάμιξης του εσωτερικού αέρα είναι ούτως ή άλλως εδώ και πολλά χρόνια το πρότυπο για υπολογισμούς ενεργειακής απόδοσης κτιρίων. Τέλος, ο μελετητής έχει τη δυνατότητα με δημιουργία αντικειμένων σε σχετικές κατηγορίες της ομάδας Zone Airflow να μοντελοποιήσει την ανάμιξη του αέρα μεταξύ θερμικών ζωνών. Αυτό συνήθως έχει νόημα να γίνεται για θερμικές ζώνες μεταξύ των οποίων υπάρχει μεγάλη διαφορά στις θερμοκρασίες.

σε άλλα στοιχεία. Εδώ φαίνονται όπως επιλέχθηκαν αρχικά.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Key Value		*	*	mbedr east window
Variable Name		Site Outdoor Air Dry	Site Direct Solar Ra	Surface Outside Fac
Reporting Frequency		Hourly	Hourly	Timestep
Schedule Name				

**Σχήμα 6.59: Αντικείμενα στη κατηγορία Output:Variable (1<sup>ο</sup> μέρος).**

Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9
livr south window	livr west window	*	mbedr east window	livr south window	livr west window
Surface Outside Fac	Surface Outside Fac	Zone Exterior Wind	Surface Window Tr	Surface Window Tr	Surface Window Tr
Timestep	Timestep	Hourly	Timestep	Timestep	Timestep

**Σχήμα 6.60: Αντικείμενα στη κατηγορία Output:Variable (2<sup>ο</sup> μέρος).**

Obj10	Obj11	Obj12	Obj13	Obj14	Obj15	Obj16
mbedr east window	livr south window	livr west window	*	*	*	*
Surface Window Sy	Surface Window Sy	Surface Window Sy	Fan Coil Heating Re	Fan Coil Total Coolir	Boiler Heating Energ	Chiller Electric Energ
Timestep	Timestep	Timestep	Hourly	Hourly	Hourly	Hourly

**Σχήμα 6.61: Αντικείμενα στη κατηγορία Output:Variable (3<sup>ο</sup> μέρος).**

## 6.4 Μεταβλητά στοιχεία προσομοίωσης

Όπως αναφέρεται και στην αρχή του υποκεφαλαίου 6.3, η περιγραφή της μοντελοποίησης του κτιρίου εκεί γίνεται για ύπαρξη διαυγών (clear) διπλών υαλοπινάκων με πλήρωση αργού, πάχους 6-13-6 mm, σε όλες τις θερμικές ζώνες. Το μεγάλο πλάτος διακένου, με πλήρωση αργού επιτρέπει την καλύτερη διερεύνηση της επίδρασης στην απόδοση των υαλοπινάκων του κτιρίου αυτού που μπορεί να έχει η χρήση διάφορων υαλοπινάκων με διαφορετική συμπεριφορά ηλιακού ελέγχου (ο παράγοντας δηλαδή του συντελεστή θερμοπερατότητας είναι δηλαδή ήδη σχετικά ικανοποιητικός).

Ακολούθως, γίνεται η υπόθεση ότι ο ιδιοκτήτης της κατοικίας αποφασίζει την τοποθέτηση θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στα ανοίγματα των θερμικών ζωνών του καθιστικού, του κύριου υπνοδωματίου, του δεύτερου υπνοδωματίου και της κουζίνας. Δεν τοποθετείται θερμοχρωμικός υαλοπίνακας στο άνοιγμα του μπάνιου, καθώς ως βόρειο άνοιγμα, γενικά δέχεται μόνο διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία (οπότε εκεί δεν υπάρχει πρακτικά ανάγκη ελέγχου της ηλιακής ακτινοβολίας).

Έγινε η υπόθεση ότι δεν παρουσιάζεται πλάτος βρόχου υστέρησης κατά τη θερμοχρωμική μετάβαση, οπότε για τις ανάγκες της εργασίας δεν μοντελοποιήθηκε αυτό. Επειδή πάντως η απόδοση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων γενικά εξαρτάται σημαντικά από το κλίμα της περιοχής εγκατάστασης, αρχικά έγινε μια



παραμετρική μελέτη ως προς τη θερμοκρασία μετάβασης. Συγκεκριμένα, μοντελοποιήθηκαν θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες με διάφορες τιμές αυτής, όπου το εύρος των θερμοκρασιών στις οποίες συμβαίνει η μετάβαση είναι σε όλους ίσο με 5°C (δηλαδή συγκεκριμένη κλίση). Όπως φαίνεται και στο κεφάλαιο 4, γενικά σε περίπτωση συνεχούς θερμοχρωμισμού (που ανταποκρίνεται περισσότερο στην πραγματικότητα για θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες) ως θερμοκρασία μετάβασης μπορεί να θεωρηθεί η κεντρική τιμή του εύρους των θερμοκρασιών στις οποίες συμβαίνει η μετάβαση. Για τους σκοπούς της εργασίας και της παραμετρικής μελέτης μοντελοποιήθηκαν θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες όπου θεωρήθηκε ότι σε θερμοκρασίες μικρότερες του κάτω ορίου ο κάθε υαλοπίνακας βρίσκεται στην κατάσταση μέγιστης διαπερατότητας, σε θερμοκρασίες μεταξύ των ορίων βρίσκεται στη μέση κατάσταση και σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες του πάνω ορίου βρίσκεται στην κατάσταση ελάχιστης διαπερατότητας (όπου η μετάβαση έχει ολοκληρωθεί). Οι δυνατές καταστάσεις είναι δηλαδή τρεις (διακριτές). Οι διακριτές αυτές καταστάσεις ορίζονται στους διάφορους υαλοπίνακες που μελετήθηκαν, για τις παρακάτω θερμοκρασίες:

- 15 – 20 °C
- 17 – 22 °C
- 20 – 25 °C
- 22 – 27 °C
- 25 – 30 °C
- 27 – 32 °C
- 30 – 35 °C
- 32 – 37 °C
- 35 – 40 °C
- 37 – 42 °C
- 40 – 45 °C
- 42 – 47 °C
- 45 – 50 °C

Είναι αναμενόμενο ότι είναι πολύ πιθανό για το κλίμα της Αθήνας ο βέλτιστος θερμοχρωμικός υαλοπίνακας (με δεδομένες τις ιδιότητες που ορίστηκαν και φαίνονται παρακάτω, καθώς και δεδομένο το εύρος της μετάβασης των 5 °C) από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας να έχει θερμοκρασίες μετάβασης στο πεδίο αυτών που αναφέρονται παραπάνω. Βέλτιστος από άποψη εξοικονόμησης ενέργειας σημαίνει ότι θα οδηγεί στην ελάχιστη κατανάλωση ενέργειας συνολικά για θέρμανση και ψύξη, σε ετήσια βάση. Αυτό με την παραδοχή ότι μεταξύ των διάφορων θερμοχρωμικών υαλοπινάκων δεν μεταβάλλονται οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια για τεχνητό φωτισμό, λόγω μεταβολών στην ποσότητα του φυσικού φωτισμού – αφού η χρήση του τεχνητού φωτισμού είναι στην προσομοίωση σταθερή (οι διαφορές πάντως δεν θα αναμενόταν σημαντικές).

Παρακάτω φαίνονται ενδεικτικά τα επιπλέον αντικείμενα που δημιουργήθηκαν ή μεταβλήθηκαν, σε άλλο αρχείο IDF, για τη μοντελοποίηση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα [25–30 °C] στις θερμικές ζώνες του σαλονιού, του κύριου υπνοδωματίου, του δεύτερου υπνοδωματίου και της κουζίνας.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5
Name		CLEAR 6MM	TC_24.99_6MM	TC_25_6MM	TC_29.99_6MM	TC_30_6MM
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name						
Thickness	m	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,775	0,5	0,35	0,35	0,1
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,15	0,2	0,2	0,25
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,3	0,4	0,4	0,5
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,881	0,6	0,45	0,45	0,3
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,08	0,1	0,1	0,12
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,08	0,12	0,12	0,16
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0	0	0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,6	0,5	0,5	0,4
Conductivity	W/m-K	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance			1	1	1	1
Solar Diffusing			No	No	No	No
Young's modulus	Pa		72000000000	72000000000	72000000000	72000000000
Poisson's ratio			0,22	0,22	0,22	0,22

**Σχήμα 6.62:** Προσθήκη αντικειμένων (για μοντελοποίηση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα) στην κατηγορία WindowMaterial:Glazing.

Field	Units	Obj1
Name		TC Glazing 6MM
Optical Data Temperature 1	C	24,99
Window Material Glazing Name 1		TC_24.99_6MM
Optical Data Temperature 2	C	25
Window Material Glazing Name 2		TC_25_6MM
Optical Data Temperature 3	C	29,99
Window Material Glazing Name 3		TC_29.99_6MM
Optical Data Temperature 4	C	30
Window Material Glazing Name 4		TC_30_6MM
Optical Data Temperature 5	C	

**Σχήμα 6.63:** Προσθήκη αντικειμένου (για μοντελοποίηση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα) στην κατηγορία WindowMaterial:GlazingGroup:Thermochromic – δεν φαίνονται όλα τα πεδία, αφού μπορούν να οριστούν έως και 45 διαφορετικές θερμοκρασίες προδιαγραφής.

Obj10
TC Window
TC Glazing 6MM
ARGON 13MM
CLEAR 6MM

**Σχήμα 6.64:** Προσθήκη αντικειμένου (για μοντελοποίηση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα) στην κατηγορία Construction.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3
Name		mentr door	livr west window	livr south window
Surface Type		Door	Window	Window
Construction Name		Exterior Door	TC Window	TC Window
Building Surface Name		mentr south ext wall	livr west ext wall	livr south ext wall
Outside Boundary Condition Object				
View Factor to Ground		autocalculate	autocalculate	autocalculate
Shading Control Name				
Frame and Divider Name			window - eight sash	window - four sashes
Multiplier				
Number of Vertices		4	4	4
Vertex 1 X-coordinate	m	0,5	0	1
Vertex 1 Y-coordinate	m	0	5	0
Vertex 1 Z-coordinate	m	2	2	2
Vertex 2 X-coordinate	m	0,5	0	1
Vertex 2 Y-coordinate	m	0	5	0
Vertex 2 Z-coordinate	m	0	0,8	0,8
Vertex 3 X-coordinate	m	1,5	0	3
Vertex 3 Y-coordinate	m	0	1	0
Vertex 3 Z-coordinate	m	0	0,8	0,8
Vertex 4 X-coordinate	m	1,5	0	3
Vertex 4 Y-coordinate	m	0	1	0

**Σχήμα 6.65: Τροποποίηση αντικειμένων (για μοντελοποίηση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα) στην κατηγορία FenestrationSurface:Detailed (1<sup>ο</sup> μέρος).**

Obj4	Obj5	Obj6	Obj7	Obj8	Obj9
bedr glass door	mbedr east window	bath window	mbedr south window	kit window	kit door
GlassDoor	Window	Window	Window	Window	Door
TC Window	TC Window	Exterior Window	TC Window	TC Window	Exterior Door
bedr east ext wall	mbedr east ext wall	bath north ext wall	mbedr south ext wal	kit east ext wall	kit north ext wall
autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate	autocalculate
4	4	4	4	4	4
3	5	2,5	2	4	2
1,25	1	2	0	1	4
2	2	2	2	2	2
3	5	2,5	2	4	2
1,25	1	2	0	1	4
0	0,8	1,2	0,8	0,8	0
3	5	1,5	3	4	1,2
2,75	3	2	0	3	4
0	0,8	1,2	0,8	0,8	0
3	5	1,5	3	4	1,2
2,75	3	2	0	3	4

**Σχήμα 6.66: Τροποποίηση αντικειμένων (για μοντελοποίηση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα) στην κατηγορία FenestrationSurface:Detailed (2<sup>ο</sup> μέρος).**

Obj17	Obj18	Obj19
mbedr east window	livr south window	livr west window
Surface Window ThermoChromic Layer Temperature Timestep	Surface Window ThermoChromic Layer Temperature Timestep	Surface Window ThermoChromic Layer Temperature Timestep

**Σχήμα 6.67: Προσθήκη αντικειμένων (για μοντελοποίηση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα) στην κατηγορία Output:Variable (1<sup>ο</sup> μέρος).**

Obj20	Obj21	Obj22
mbedr east window	livr south window	livr west window
Surface Window Thermochromic Layer Property Specification Temperature Timestep	Surface Window Thermochromic Layer Property Specification Temperature Timestep	Surface Window Thermochromic Layer Property Specification Temperature Timestep

**Σχήμα 6.68: Προσθήκη αντικειμένων (για μοντελοποίηση θερμοχρωμικού υαλοπίνακα) στην κατηγορία Output:Variable (2<sup>ο</sup> μέρος).**

Στις εικόνες των σχημάτων 6.62 και 6.63 φαίνεται το πώς πρέπει να οριστούν οι διάφορες θερμοκρασίες προδιαγραφής για την υλοποίηση των τριών διακριτών καταστάσεων θερμοχρωμικής μετάβασης. Επίσης φαίνεται ότι χρησιμοποιήθηκαν spectral average ιδιότητες και ότι η θερμοχρωμική επίστρωση είναι στη θέση “2” του διπλού αυτού υαλοπίνακα, αφού εκεί εμφανίζονται οι μεγαλύτερες τιμές ανακλαστικότητας, καθώς και η ύπαρξη σχετικά αμυδρών ιδιοτήτων χαμηλής εκπομπής στην υπέρυθη ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (αυτό παρουσιάζεται και στους ανακλαστικούς υαλοπίνακες, λόγω της φύσης της επίστρωσης).

Να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες του θερμοχρωμικού φύλλου δημιουργήθηκαν με βάση κατά κύριο λόγο καθοδήγηση από τη δημοσίευση των V. Costanzo, G. Evola και L. Marletta του Ιανουαρίου του 2016 – η δημοσίευση αυτή μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία της παρούσας εργασίας και σχετική αναφορά γίνεται και στο τέλος του κεφαλαίου 5. Οι ιδιότητες αυτές αφορούν θεωρητικό (υποθετικό) θερμοχρωμικό φύλλο, που όμως η κατασκευή του είναι δυνατό να επιτευχθεί. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να γίνουν κατανοητές οι δυνατότητες που υπάρχουν. Ακόμη, το σχετικά μικρό εύρος μετάβασης των 5 °C οδηγεί σε καλή αποδοτικότητα του υαλοπίνακα, χωρίς ταυτόχρονα να υπάρχει ανομοιομορφία στο χρωματισμό των διάφορων περιοχών του. Τέλος, όλες οι περιοχές των θερμοκρασιών μετάβασης που μελετήθηκαν είναι επιτεύξιμες με τις διάφορες τεχνικές πρόσθεσης βελτιωτικών υπάρχουν.

Ο θερμοχρωμικός υαλοπίνακας από τους παραπάνω που παρουσιάζει την καλύτερη αποδοτικότητα (στο κλίμα της Αθήνας) συγκρίνεται και με διάφορα άλλα είδη υαλοπινάκων. Είναι εύλογο η σύγκριση καταρχάς να γίνει με (θεωρητικούς) υαλοπίνακες (φύλλα) που παρουσιάζουν τις ιδιότητες των διάφορων καταστάσεων του θερμοχρωμικού φύλλου, σε μόνιμη βέβαια κατάσταση, ώστε η σύγκριση να γίνει κατά κύριο λόγο στη βάση των μεταβαλλόμενων ιδιοτήτων του θερμοχρωμικού φύλλου, σε σχέση με τις στατικές ιδιότητες των άλλων. Για τον σκοπό αυτό, δημιουργήθηκαν τρεις θεωρητικοί υαλοπίνακες (φύλλα) (οι REF1, REF2 και REF3) που ο καθένας παρουσιάζει τις ιδιότητες μίας από τις τρεις καταστάσεις του θερμοχρωμικού φύλλου – αυτοί οι υαλοπίνακες μπορούν να χαρακτηριστούν ως “ανακλαστικοί” και μάλιστα οι ιδιοτήτές τους δεν απέχουν πολύ από την πραγματικότητα. Παρακάτω, φαίνονται εν συντομία τα αντικείμενα EnergyPlus που αφορούν τους τρεις αυτούς ανακλαστικούς υαλοπίνακες και σχετίζονται με τις

ιδιότητες των φύλλων και με τη συνολική κατασκευή των υαλοπινάκων. Να σημειωθεί ότι και αυτοί τοποθετήθηκαν σε όλα των ανοίγματα των διάφορων θερμικών ζωνών, εκτός του μπάνιου.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CLEAR 6MM	REF1_6MM
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name			
Thickness	m	0,006	0,006
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,775	0,5
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,15
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,3
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,881	0,6
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,08
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,08
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,6
Conductivity	W/m-K	0,9	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance			1
Solar Diffusing			No
Young's modulus	Pa		72000000000
Poisson's ratio			0,22

**Σχήμα 6.69: Ιδιότητες ανακλαστικού φύλλου REF1.**

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CLEAR 6MM	REF2_6MM
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name			
Thickness	m	0,006	0,006
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,775	0,35
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,2
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,4
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,881	0,45
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,1
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,12
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,5
Conductivity	W/m-K	0,9	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance			1
Solar Diffusing			No
Young's modulus	Pa		72000000000
Poisson's ratio			0,22

**Σχήμα 6.70: Ιδιότητες ανακλαστικού φύλλου REF2.**

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CLEAR 6MM	REF3_6MM
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name			
Thickness	m	0,006	0,006
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,775	0,1
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,25
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,5
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,881	0,3
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,12
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,16
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,4
Conductivity	W/m-K	0,9	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance			1
Solar Diffusing			No
Young's modulus	Pa		72000000000
Poisson's ratio			0,22

**Σχήμα 6.71: Ιδιότητες ανακλαστικού φύλλου REF3.**

Obj10
Ref1 Window
REF1_6MM
ARGON 13MM
CLEAR 6MM

**Σχήμα 6.72: Κατασκευή ανακλαστικού υαλοπίνακα Ref1 – η κατασκευή των υπολοίπων είναι πανομοιότυπη.**

Τέλος, για τις ίδιες πάλι θέσεις τοποθέτησης στα ανοίγματα του κτιριακού κελύφους, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που επιφέρουν αυτοί οι υαλοπίνακες και με αυτά από άλλους δύο υαλοπίνακες με χαρακτηριστικά από σχετική βιβλιοθήκη, προσβάσιμη από το περιβάλλον του IDF-Editor. Αυτοί είναι:

- Διπλός επιλεκτικός υαλοπίνακας χαμηλής εκπομπής μετρίου ηλιακού θερμικού κέρδους, με την επίστρωση χαμηλής εκπομπής στη θέση “2” (σε διαυγές γυαλί).
- Τριπλός υαλοπίνακας χαμηλής εκπομπής, μεγαλύτερου ηλιακού θερμικού κέρδους από τον προηγούμενο, με την επίστρωση χαμηλής εκπομπής στη θέση “5” (σε διαυγές γυαλί).

Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η σύγκριση του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα και με υαλοπίνακες που παρουσιάζουν συγκριτικά σημαντικά χαμηλότερη τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας.

Τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά αυτών των δύο υαλοπινάκων φαίνονται στις επόμενες εικόνες. Ο πρώτος ονομάζεται LoE spec sel Window και ο δεύτερος LoE triple Window.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CLEAR 6MM	LoE SPEC SEL CLEAR 6MM
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name			
Thickness	m	0,006	0,006
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,775	0,43
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,3
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,42
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,881	0,77
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,07
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,06
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,03
Conductivity	W/m-K	0,9	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance			
Solar Diffusing			
Young's modulus	Pa		
Poisson's ratio			

**Σχήμα 6.73: Ιδιότητες φύλλου χαμηλής εκπομπής του υαλοπίνακα LoE spec sel Window.**

Obj9
LoE spec sel Window
LoE SPEC SEL CLEAR 6MM
ARGON 13MM
CLEAR 6MM

Σχήμα 6.74: Κατασκευή υαλοπίνακα LoE spec sel Window.

Field	Units	Obj1	Obj2
Name		CLEAR 6MM	LoE CLEAR 6MM Rev
Optical Data Type		SpectralAverage	SpectralAverage
Window Glass Spectral Data Set Name			
Thickness	m	0,006	0,006
Solar Transmittance at Normal Incidence		0,775	0,6
Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,22
Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence		0,071	0,17
Visible Transmittance at Normal Incidence		0,881	0,84
Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,078
Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence		0,08	0,055
Infrared Transmittance at Normal Incidence		0	0
Front Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,1
Back Side Infrared Hemispherical Emissivity		0,84	0,84
Conductivity	W/m-K	0,9	0,9
Dirt Correction Factor for Solar and Visible Transmittance			
Solar Diffusing			
Young's modulus	Pa		
Poisson's ratio			

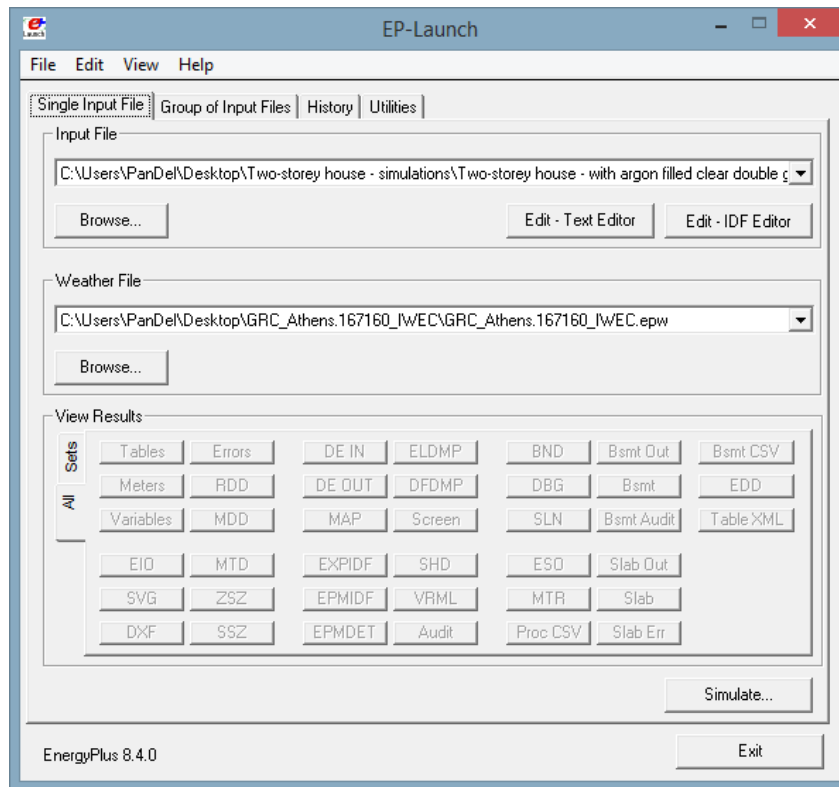
Σχήμα 6.75: Ιδιότητες φύλλου χαμηλής εκπομπής του υαλοπίνακα LoE triple Window – η ένδειξη Rev υποδηλώνει ότι η επίστρωση βρίσκεται στην μπροστινή πλευρά του φύλλου.

Obj10
LoE triple Window
CLEAR 6MM
ARGON 13MM
CLEAR 6MM
ARGON 13MM
LoE CLEAR 6MM Rev

Σχήμα 6.76: Κατασκευή υαλοπίνακα LoE triple Window.

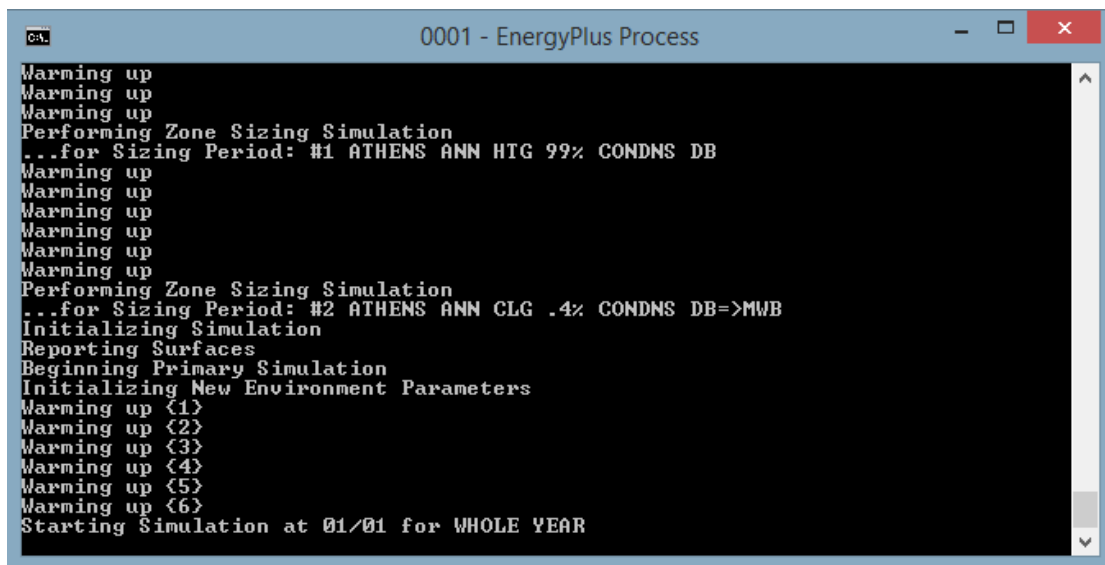
## 6.5 Εκτέλεση προσομοίωσης στο EP-Launch

Εφόσον ολοκληρωθεί η διαδικασία της εισαγωγής των δεδομένων στο περιβάλλον του IDF-Editor, μπορεί να ξεκινήσει η προσομοίωση του κτιρίου. Αυτό πραγματοποιείται με χρήση του περιβάλλοντος του EP-Launch. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το περιβάλλον αυτό, για την περίπτωση του αρχείου IDF με τους διαυγείς διπλούς υαλοπίνακες (πρώτη προσομοίωση που πραγματοποιήθηκε):



Σχήμα 6.77: Περιβάλλον του EP-Launch πριν από την αρχική προσομοίωση.

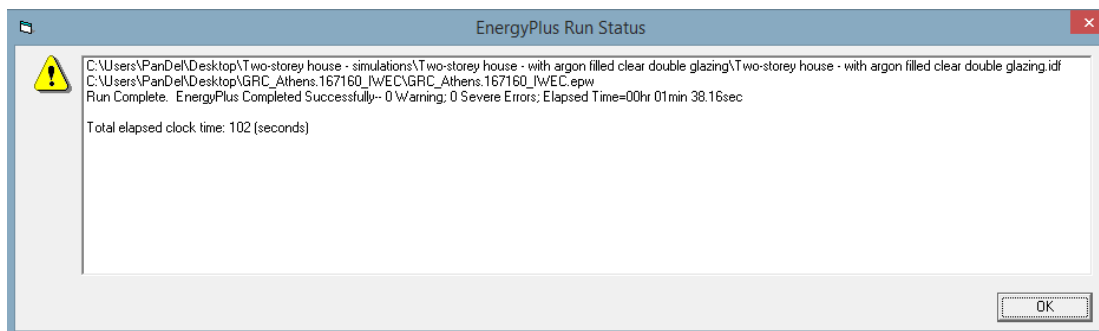
Στην περιοχή Input File εισάγεται το σχετικό αρχείο IDF (.idf) και στην περιοχή Weather File εισάγεται το αρχείο με τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής (.epw). Στη συνέχεια με απλό κλικ στην επιλογή Simulate... που βρίσκεται στην κάτω δεξιά περιοχή του περιβάλλοντος του EP-Launch ξεκινά η διαδικασία της προσομοίωσης, με εμφάνιση παραθύρου που ενημερώνει για την εξέλιξη της διαδικασίας:



Σχήμα 6.78: Παράθυρο ενημέρωσης σχετικά με τη διαδικασία της προσομοίωσης.



Με την ολοκλήρωση της προσομοίωσης, αναδύεται σχετικό παράθυρο που ενημερώνει για τον χρόνο που διήρκεσε η προσομοίωση, καθώς και για τυχούσα ύπαρξη σφαλμάτων και προειδοποιήσεων (περισσότερο ή λιγότερο σημαντικών). Εάν έχει εμφανιστεί μοιραίο σφάλμα (fatal error), τότε η προσομοίωση δεν θα ολοκληρωθεί και ο μελετητής θα πρέπει να το διορθώσει πριν την επανάλαβει.



**Σχήμα 6.79:** Παράθυρο ενημέρωσης σχετικά με την κατάσταση της προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και λοιπά χρήσιμα στοιχεία (π.χ. το αρχείο ERR και το αρχείο RDD) είναι διαθέσιμα στον μελετητή είτε μέσα από το περιβάλλον του EP-Launch στην περιοχή View Results (όπου με απλό κλικ ανοίγονται τα επιθυμητά αρχεία), είτε απευθείας στον φάκελο που βρίσκεται το σχετικό αρχείο IDF, όπου έχουν πλέον εμφανιστεί και όλα αυτά τα αρχεία.

Για τις ανάγκες της εργασίας έγιναν προσομοιώσεις για 19 αρχεία IDF και πιο συγκεκριμένα: 1 για τους διαυγείς υαλοπίνακες, 13 για την παραμετρική ανάλυση του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα, 3 για τους τρεις θεωρητικούς ανακλαστικούς υαλοπίνακες και άλλα 2 για τους δύο υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής.

## 7 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται και σχολιάζονται διάφορα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που έγιναν και ενδιαφέρουν για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τα αποτελέσματα αυτά βρέθηκαν στα αρχεία [.csv], [.html] και [.eio] και όπου πιθανώς χρειάστηκε, έγινε και η σχετική επεξεργασία τους. Να σημειωθεί ότι ο όγκος των δεδομένων που εξήχθησαν είναι πολύ μεγάλος, οπότε παρακάτω γίνεται παρουσίαση αυτών που κρίθηκαν ως πιο σημαντικά για την εξαγωγή των συμπερασμάτων.

### 7.1 Αμετάβλητα γενικά αποτελέσματα

Αρχικά, παρατίθενται κάποια γενικά στοιχεία για την τοποθεσία του κτιρίου, τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής, τις διάφορες θερμικές ζώνες, τα αδιαφανή δομικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους κ.λπ.:

#### Τοποθεσία και κλιματικά δεδομένα

	Value
Program Version and Build	EnergyPlus, Version 8.4.0-832e4bb9cb, YMD=2016.06.06 02:14
RunPeriod	WHOLE YEAR
Weather File	ATHENS - GRC IWEC Data WMO#=167160
Latitude [deg]	37.90
Longitude [deg]	23.73
Elevation [m]	15.00
Time Zone	2.00
North Axis Angle [deg]	0.00
Rotation for Appendix G [deg]	0.00
Hours Simulated [hrs]	8760.00

**Σχήμα 7.1: Γενικά στοιχεία τοποθεσίας κτιρίου και λοιπά στοιχεία.**

	Maximum Dry Bulb [C]	Daily Temperature Range [deltaC]	Humidity Value	Humidity Type	Wind Speed [m/s]	Wind Direction
ATHENS ANN HTG 99% CONDNS DB	3.10	0.00	3.10	Wetbulb [C]	3.50	0.00
ATHENS ANN CLG .4% CONDNS DB=>MWB	35.10	9.10	21.10	Wetbulb [C]	5.60	30.00

**Σχήμα 7.2: Στοιχεία ημερών σχεδιασμού.**

	Value
Reference	GRC_Athens.167160_IWEC
Site:Location	ATHENS - GRC
Latitude	{N 37° 54'}
Longitude	{E 23° 43'}
Time Zone	{GMT +2.0 Hours}
Elevation (m) above sea level	15
Standard Pressure at Elevation	101145Pa
Data Source	IWEC Data
WMO Station	167160
Weather File Design Conditions	Climate Design Data 2009 ASHRAE Handbook
Heating Design Temperature 99.6% (C)	1.6°
Heating Design Temperature 99% (C)	3.1°
Cooling Design Temperature 0.4% (C)	35.1°
Cooling Design Temperature 1% (C)	33.8°
Cooling Design Temperature 2% (C)	32.4°

**Σχήμα 7.3: Στατιστικά στοιχεία από το αρχείο κλιματικών δεδομένων (1<sup>ο</sup> μέρος).**

Maximum Dry Bulb Temperature (C)	37.2°
Maximum Dry Bulb Occurs on	Aug 6
Minimum Dry Bulb Temperature (C)	2.0°
Minimum Dry Bulb Occurs on	Dec 26
Maximum Dew Point Temperature (C)	24.4°
Maximum Dew Point Occurs on	Aug 27
Minimum Dew Point Temperature (C)	-7.0°
Minimum Dew Point Occurs on	Feb 23
Standard Heating Degree-Days (base 10°C)	119
Weather File Heating Degree-Days (base 10°C)	82
Standard Cooling Degree-Days (base 18.3°C)	1079
Weather File Cooling Degree-Days (base 18°C)	1076
Köppen Classification	Cfa
Köppen Description	Humid subtropical (mild with no dry season, hot summer, lat. 20-35°N)
Köppen Recommendation	Unbearably hot dry periods in summer, but passive cooling is possible
ASHRAE Climate Zone	3A
ASHRAE Description	Warm-Humid

**Σχήμα 7.4: Στατιστικά στοιχεία από το αρχείο κλιματικών δεδομένων (2<sup>ο</sup> μέρος).**

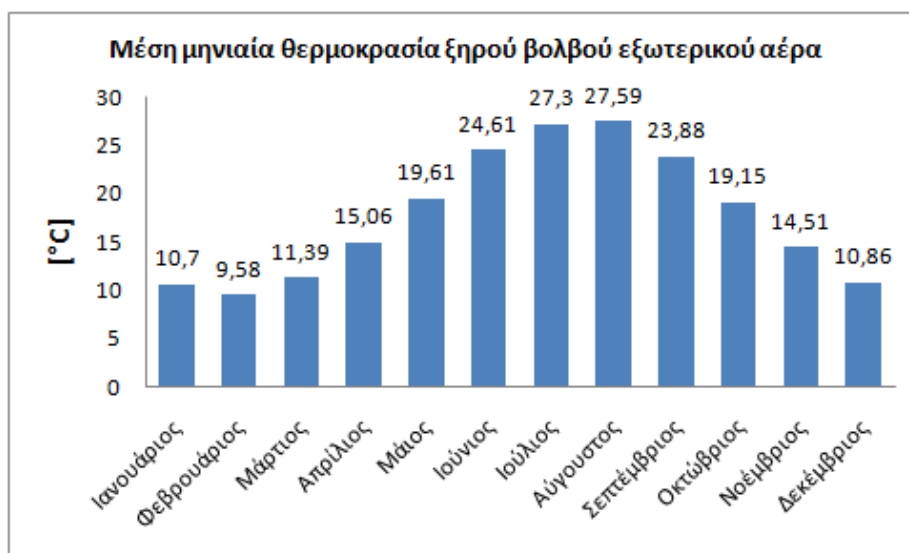
Από την εικόνα του σχήματος 7.4 φαίνεται ότι η μέγιστη θερμοκρασία εξωτερικού αέρα ξηρού βολβού είναι 37,2 °C και παρατηρείται στις 6 Αυγούστου. Η αντίστοιχη ελάχιστη είναι 2,0 °C και παρατηρείται στις 26 Δεκεμβρίου. Παρακάτω στην εικόνα

φαίνονται στοιχεία και για τις βαθμομέρες θέρμανσης (Heating Degree-Days) και ψύξης (Cooling Degree-Days) της περιοχής, με θερμοκρασίες σταθερής βάσης 10°C και 18,3/18 °C αντίστοιχα.

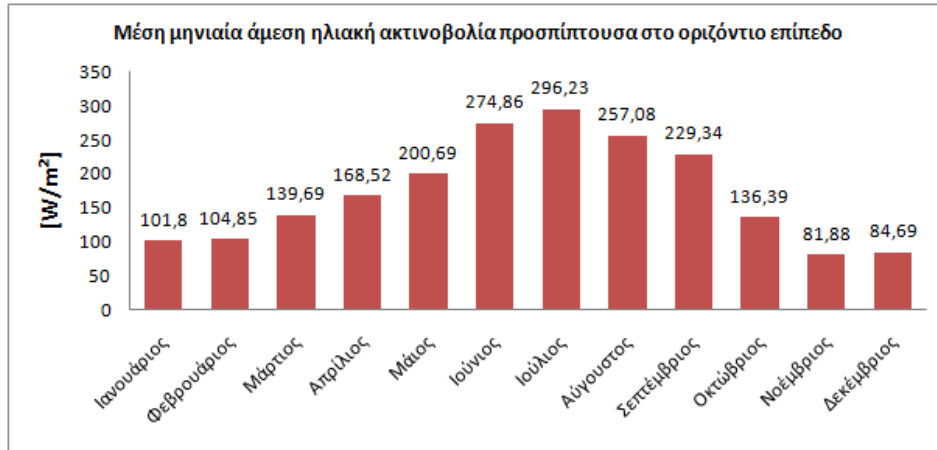
Ακολουθούν στοιχεία για μηνιαίες τιμές διάφορων καιρικών μεταβλητών:

	SITE OUTDOOR AIR DRYBULB TEMPERATURE [C]	SITE OUTDOOR AIR WETBULB TEMPERATURE [C]	SITE OUTDOOR AIR DEWPOINT TEMPERATURE [C]	SITE WIND SPEED [m/s]	SITE SKY TEMPERATURE [C]	SITE DIFFUSE SOLAR RADIATION RATE PER AREA [W/m2]	SITE DIRECT SOLAR RADIATION RATE PER AREA [W/m2]	SITE RAIN STATUS []
January	10.70	7.73	4.66	3.29	-1.6	45.33	101.80	0.01
February	9.58	6.76	3.61	3.75	-2.7	65.28	104.85	0.10
March	11.39	8.20	5.04	3.55	-1.4	83.34	139.69	0.07
April	15.06	10.83	7.17	2.67	1.97	101.66	168.52	0.01
May	19.61	14.99	11.88	2.94	6.45	111.47	200.69	0.03
June	24.61	17.30	12.83	3.73	11.44	102.17	274.86	0.00
July	27.30	19.59	15.46	3.24	14.26	89.80	296.23	0.00
August	27.59	19.93	15.92	2.96	14.97	88.70	257.08	0.00
September	23.88	17.85	14.34	3.09	10.84	75.45	229.34	0.00
October	19.15	14.98	12.20	3.24	6.56	69.38	136.39	0.03
November	14.51	11.60	9.21	3.12	2.90	52.38	81.88	0.08
December	10.86	8.06	5.11	2.60	-1.4	42.80	84.69	0.07

Σχήμα 7.5: Μέσες μηνιαίες τιμές διάφορων καιρικών μεταβλητών.



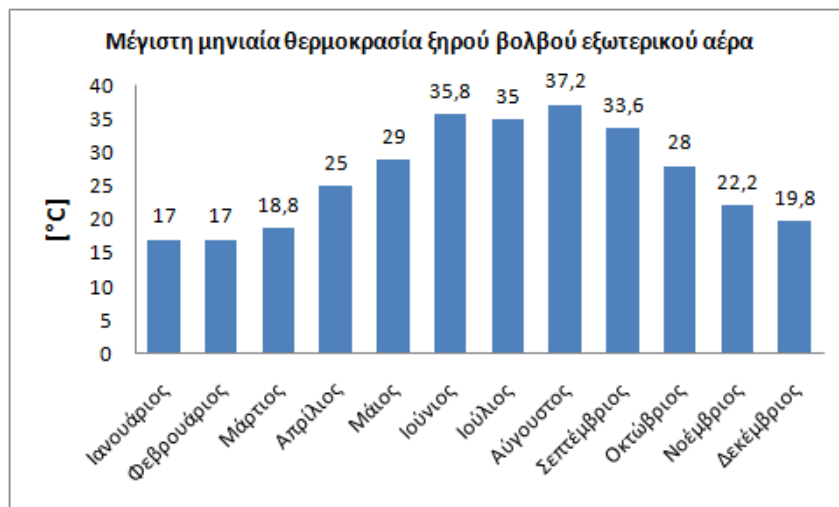
Σχήμα 7.6: Διάγραμμα μέσης μηνιαίας θερμοκρασίας ξηρού βολβού εξωτερικού αέρα.



Σχήμα 7.7: Διάγραμμα μέσης μηνιαίας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουσας στο οριζόντιο επίπεδο.

	SITE OUTDOOR AIR DRYBULB TEMPERATURE (Maximum) [C]	SITE OUTDOOR AIR DRYBULB TEMPERATURE (TIMESTAMP)	SITE OUTDOOR AIR WETBULB TEMPERATURE (AT MAX/MIN) [C]	SITE OUTDOOR AIR DEWPOINT TEMPERATURE (AT MAX/MIN) [C]	SITE WIND SPEED (AT MAX/MIN) [m/s]	SITE SKY TEMPERATURE (AT MAX/MIN) [C]	SITE DIFFUSE SOLAR RADIATION RATE PER AREA (AT MAX/MIN) [W/m2]	SITE DIRECT SOLAR RADIATION RATE PER AREA (AT MAX/MIN) [W/m2]
January	17.00	12-JAN-13:00	13.73	11.50	2.60	5.13	210.00	45.50
February	17.00	03-FEB-15:00	11.57	7.00	5.10	3.06	73.50	561.50
March	18.80	18-MAR-13:00	13.16	8.90	5.10	7.35	232.00	594.50
April	25.00	24-APR-13:00	17.20	12.60	2.60	12.98	406.00	152.50
May	29.00	07-MAY-10:00	16.82	8.90	7.20	13.54	144.00	862.00
June	35.80	29-JUN-13:00	19.05	8.60	7.70	20.05	162.00	820.50
July	35.00	15-JUL-15:00	20.20	12.00	3.10	20.05	156.00	672.50
August	37.20	06-AUG-13:00	19.91	10.10	4.10	21.78	153.00	823.50
September	33.60	18-SEP-13:00	18.21	8.00	5.70	17.75	146.00	773.00
October	28.00	02-OCT-11:00	17.54	11.00	5.10	13.16	234.50	601.00
November	22.20	08-NOV-13:00	18.02	15.90	2.10	11.07	128.00	597.50
December	19.80	09-DEC-13:00	16.62	14.80	4.10	7.55	173.00	17.50

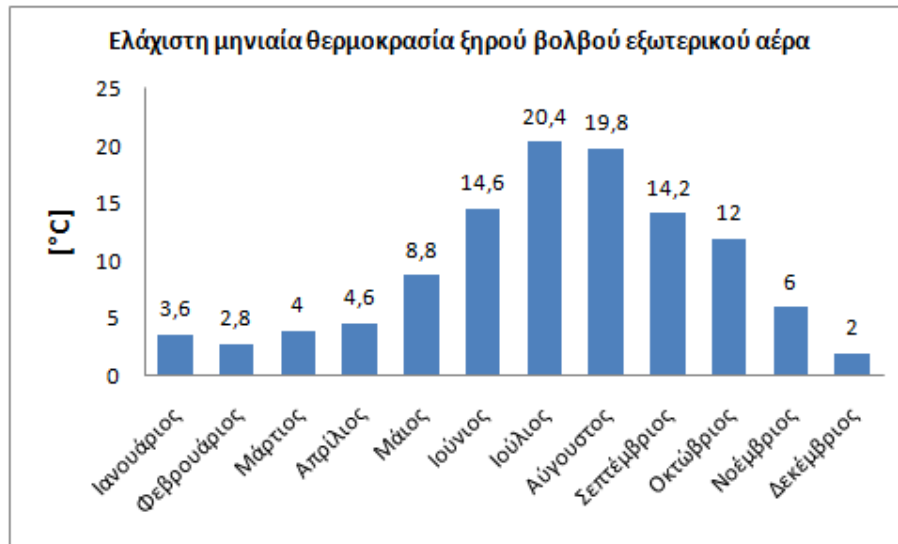
Σχήμα 7.8: Μέγιστες μηνιαίες θερμοκρασίες ξηρού βολβού εξωτερικού αέρα και άλλες καιρικές μεταβλητές στις χρονικές στιγμές που εμφανίζονται οι πρώτες.



Σχήμα 7.9: Διάγραμμα μέγιστης μηνιαίας θερμοκρασίας ξηρού βολβού εξωτερικού αέρα.

	SITE OUTDOOR AIR DRYBULB TEMPERATURE (MINIMUM)[C]	SITE OUTDOOR AIR DRYBULB TEMPERATURE (TIMESTAMP)	SITE OUTDOOR AIR WETBULB TEMPERATURE (AT MAX/MIN) [C]	SITE OUTDOOR AIR DEWPOINT TEMPERATURE (AT MAX/MIN) [C]	SITE WIND SPEED (AT MAX/MIN) [m/s]	SITE SKY TEMPERATURE (AT MAX/MIN) [C]	SITE DIFFUSE SOLAR RADIATION RATE PER AREA (AT MAX/MIN) [W/m2]	SITE DIRECT SOLAR RADIATION RATE PER AREA (AT MAX/MIN) [W/m2]
January	3.60	17-JAN-07:00	2.00	-0.2	0.00	-12.4	23.50	177.00
February	2.80	18-FEB-04:00	0.17	-3.7	0.00	-14.2	0.00	0.00
March	4.00	04-MAR-05:00	0.79	-4.0	2.60	-11.9	0.00	0.00
April	4.60	02-APR-04:00	2.05	-1.4	4.10	-10.7	0.00	0.00
May	8.80	03-MAY-04:00	5.08	0.40	2.10	-7.6	0.00	0.00
June	14.60	07-JUN-22:00	12.40	10.80	0.00	1.80	0.00	0.00
July	20.40	04-JUL-04:00	18.17	17.10	0.00	7.35	0.00	0.00
August	19.80	20-AUG-04:00	17.24	15.80	0.00	7.75	0.00	0.00
September	14.20	24-SEP-04:00	9.34	4.80	2.60	-1.4	0.00	0.00
October	12.00	23-OCT-02:00	9.30	7.00	0.00	-3.0	0.00	0.00
November	6.00	30-NOV-03:00	4.16	2.00	2.60	-8.5	0.00	0.00
December	2.00	26-DEC-03:00	-1.0	-6.0	0.00	-13.2	0.00	0.00

Σχήμα 7.10: Ελάχιστες μηνιαίες θερμοκρασίες ξηρού βολβού εξωτερικού αέρα και άλλες καιρικές μεταβλητές στις χρονικές στιγμές που εμφανίζονται οι πρώτες.



Σχήμα 7.11: Διάγραμμα ελάχιστης μηνιαίας θερμοκρασίας ξηρού βολβού εξωτερικού αέρα.

### Θερμικές ζώνες και αδιαφανή δομικά στοιχεία κτιριακού κελύφους

	Area [m2]	Conditioned (Y/N)	Part of Total Floor Area (Y/N)	Volume [m3]	Multipliers	Gross Wall Area [m2]	Window Glass Area [m2]	Lighting [W/m2]	People [m2 per person]	Plug and Process [W/m2]
LIVING ROOM	24.00	Yes	Yes	72.00	1.00	36.00	7.20	5.0000	6.00	12.5000
BATHROOM	8.00	Yes	Yes	24.00	1.00	18.00	0.80	5.0000	2.00	62.5000
MAIN ENTRANCE	14.00	Yes	Yes	42.00	1.00	12.00	0.00	5.0000	3.50	3.5714
MASTER BEDROOM	20.00	Yes	Yes	60.00	1.00	30.00	3.60	5.0000	5.00	10.0000
KITCHEN	16.00	Yes	Yes	48.00	1.00	24.00	2.40	5.0000	4.00	312.5000
BEDROOM	12.00	Yes	Yes	36.00	1.00	42.00	3.00	5.0000	3.00	8.3333
Total	94.00			282.00		162.00	17.00	5.0000	3.92	65.4255
Conditioned Total	94.00			282.00		162.00	17.00	5.0000	3.92	65.4255
Unconditioned Total	0.00			0.00		0.00	0.00			
Not Part of Total	0.00			0.00		0.00	0.00			

Σχήμα 7.12: Συνοπτική παρουσίαση διάφορων στοιχείων για τις θερμικές ζώνες.

	Construction	Reflectance	U-Factor with Film [W/m2-K]	U-Factor no Film [W/m2-K]	Gross Area [m2]	Azimuth [deg]	Tilt [deg]	Cardinal Direction
LIVR SOUTH EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	12.00	180.00	90.00	S
LIVR WEST EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	18.00	270.00	90.00	W
LIVR NORTH EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	6.00	0.00	90.00	N
LIVR FLOOR	EXTERIOR FLOOR	0.08	0.372	0.396	24.00	0.00	180.00	
LIVR ROOF	EXTERIOR ROOF	0.08	0.375	0.396	24.00	180.00	0.00	
BATH NORTH EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	12.00	0.00	90.00	N
BATH WEST EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	6.00	270.00	90.00	W
BATH FLOOR	EXTERIOR FLOOR	0.08	0.372	0.396	8.00	0.00	180.00	
BATH ROOF	EXTERIOR ROOF	0.08	0.375	0.396	8.00	180.00	0.00	
MENTR SOUTH EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	6.00	180.00	90.00	S
MENTR WEST EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	3.00	270.00	90.00	W
MENTR EAST EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	3.00	90.00	90.00	E
MENTR FLOOR	EXTERIOR FLOOR	0.08	0.372	0.396	14.00	0.00	180.00	
MENTR ROOF	EXTERIOR ROOF	0.08	0.375	0.396	14.00	180.00	0.00	
MBEDR SOUTH EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	15.00	180.00	90.00	S
MBEDR EAST EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	12.00	90.00	90.00	E
MBEDR NORTH EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	3.00	0.00	90.00	N
MBEDR FLOOR	EXTERIOR FLOOR	0.08	0.372	0.396	20.00	0.00	180.00	

**Σχήμα 7.13: Παρουσίαση στοιχείων για τα αδιαφανή εξωτερικά δομικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους (1<sup>ο</sup> μέρος).**

MBEDR ROOF	EXTERIOR ROOF	0.08	0.375	0.396	8.00	180.00	0.00	
KIT NORTH EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	12.00	0.00	90.00	N
KIT EAST EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	12.00	90.00	90.00	E
KIT FLOOR	EXTERIOR FLOOR	0.08	0.372	0.396	16.00	0.00	180.00	
KIT ROOF	EXTERIOR ROOF	0.08	0.375	0.396	16.00	180.00	0.00	
BEDR WEST EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	12.00	270.00	90.00	W
BEDR EAST EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	12.00	90.00	90.00	E
BEDR NORTH EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	9.00	0.00	90.00	N
BEDR SOUTH EXT WALL	EXTERIOR WALL	0.08	0.451	0.483	9.00	180.00	90.00	S
BEDR ROOF	EXTERIOR ROOF	0.08	0.375	0.396	12.00	180.00	0.00	

**Σχήμα 7.14: Παρουσίαση στοιχείων για τα αδιαφανή εξωτερικά δομικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους (2<sup>ο</sup> μέρος).**

	Construction	U-Factor with Film [W/m2-K]	U-Factor no Film [W/m2-K]	Gross Area [m2]	Parent Surface
MENTR DOOR	EXTERIOR DOOR	0.898	1.037	2.00	MENTR SOUTH EXT WALL
KIT DOOR	EXTERIOR DOOR	0.898	1.037	1.60	KIT NORTH EXT WALL

**Σχήμα 7.15: Παρουσίαση στοιχείων για τα αδιαφανή εξωτερικά δομικά στοιχεία του κτιριακού κελύφους (3<sup>ο</sup> μέρος).**

Στις εικόνες των τριών τελευταίων σχημάτων φαίνεται ότι δίνονται δύο τιμές για τον συντελεστή θερμοπερατότητας και συγκεκριμένα οι U-Factor with Film [W/m2-K] και U-Factor no Film [W/m2-K]. Περισσότερο αντιπροσωπευτική είναι η πρώτη, που λαμβάνει υπόψιν και τη θερμική αντίσταση των φιλμ του αέρα στην εξωτερική και εσωτερική επιφάνεια των δομικών στοιχείων.

## Ηλιασμός υαλοπινάκων

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποια βασικά στοιχεία για τον ηλιασμό των υαλοπινάκων κατά το μεσημέρι και τρεις ώρες πριν και μετά από αυτό, για την εαρινή ισημερία (περίπου), το θερινό ηλιοστάσιο και το χειμερινό ηλιοστάσιο. Το μέγεθος που αναφέρεται είναι το ποσοστό της επιφάνειας κάθε υαλοπίνακα που υπόκειται σε ηλιασμό (Sunlit Fraction). Να τονιστεί ότι οι τιμές αυτές δεν σχετίζονται με το αρχείο καιρού (όπου μπορεί να εμφανίζεται και νέφωση), αλλά μόνο με τη θέση του ηλίου στον ουράνιο θόλο (ηλιακή γεωμετρία) για την εκάστοτε περιοχή (εδώ η Αθήνα).

	March 21 9am	March 21 noon	March 21 3pm	June 21 9am	June 21 noon	June 21 3pm	December 21 9am	December 21 noon	December 21 3pm
LIVR SOUTH WINDOW	0.23	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.90	1.00	1.00
LIVR WEST WINDOW	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	1.00
BATH WINDOW	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MBEDR SOUTH WINDOW	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
MBEDR EAST WINDOW	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00
KIT WINDOW	1.00	0.86	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.15	0.00
BEDR GLASS DOOR	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.00

**Σχήμα 7.16: Βασικά στοιχεία για τον ηλιασμό των υαλοπινάκων της κατοικίας σε χαρακτηριστικές χρονικές στιγμές. Αναφέρεται το ποσοστό της επιφάνειας του κάθε υαλοπίνακα που υπόκειται σε ηλιασμό (άμεση ηλιακή ακτινοβολία). Οι τιμές σχετίζονται μόνο με την ηλιακή γεωμετρία και όχι με τα καιρικά δεδομένα του αρχείου καιρού.**

Προφανώς όμως οι τιμές του παραπάνω πίνακα δεν είναι πολύ αντιπροσωπευτικές του ηλιασμού των υαλοπινάκων σε ετήσια βάση. Για παράδειγμα, στην Αθήνα, οι βόρειοι υαλοπίνακες γενικά δέχονται άμεση ηλιακή ακτινοβολία μόνο κατά τις πολύ πρωινές και πολύ βραδινές ώρες των ημερών κοντά στο θερινό ηλιοστάσιο και μάλιστα υπό μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης (αυτό βέβαια με την προϋπόθεση ότι ο ορίζοντας είναι ορατός σε αυτές τις κατευθύνσεις και δεν υπάρχουν εμπόδια). Επίσης, οι δυτικοί υαλοπίνακες υπόκεινται σε σημαντικό ηλιασμό κατά τις απογευματινές ώρες, έως τη δύση του ηλίου.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται υποεπιφάνειες του κτιρίου (παράθυρα και θύρες) που μπορούν εν δυνάμει να σκιαστούν από άλλες επιφάνειές του – οι πρώτες φαίνονται δεξιά και οι δεύτερες αριστερά:

	Possible Shadow Receivers
LIVR SOUTH EXT WALL	LIVR SOUTH WINDOW
LIVR WEST EXT WALL	LIVR WEST WINDOW
BATH NORTH EXT WALL	BATH WINDOW
MENTR SOUTH EXT WALL	MENTR DOOR
MBEDR SOUTH EXT WALL	MBEDR SOUTH WINDOW
MBEDR EAST EXT WALL	MBEDR EAST WINDOW
KIT NORTH EXT WALL	KIT DOOR
KIT EAST EXT WALL	KIT WINDOW
BEDR EAST EXT WALL	BEDR GLASS DOOR

**Σχήμα 7.17: Υποεπιφάνειες που είναι πιθανό σε κάποιες χρονικές στιγμές να δέχονται σκίαση (Possible Shadow Receivers) από άλλες επιφάνειες του κτιρίου.**



Αξίζει πάντως να σημειωθεί ότι οι δυνατές αυτές σκιάσεις των παραθύρων και πορτών δεν είναι ικανές να επηρεάζουν τα αποτελέσματα και συμπεράσματα, επειδή θα έχουν σε κάθε περίπτωση μικρή χρονική διάρκεια (λόγω της διαμόρφωσης του κτιρίου).

## **7.2 Αποτελέσματα παραμετρικής ανάλυσης θερμοχρωμικού υαλοπίνακα**

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 6, η παραμετρική αυτή ανάλυση αφορά τη θερμοκρασία μετάβασης του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα, όπου βέβαια η μετάβαση πραγματοποιείται γύρω από εύρος θερμοκρασιών (το οποίο εύρος είναι πάντα ίσο με 5°C για τον υαλοπίνακα που μελετήθηκε). Οι διάφοροι αυτοί θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες βρέθηκε ότι παρουσιάζουν σημαντική διακύμανση στην επίδραση στις ενεργειακές καταναλώσεις του κτιρίου που μελετήθηκε.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται, για τους διάφορους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες, η τελική κατανάλωση της κατοικίας σε GJ ηλεκτρικής ενέργειας για ψύξη, τεχνητό ηλεκτρικό εσωτερικό φωτισμό, εσωτερικό ηλεκτρικό εξοπλισμό, λειτουργία ανεμιστήρων, λειτουργία αντλιών και για απόρριψη θερμότητας (λειτουργία συμπυκνωτή και ψυκτικού πύργου). Επίσης φαίνεται η κατανάλωση σε GJ θερμικής ενέργειας (ενεργειακού περιεχομένου) φυσικού αερίου για θέρμανση. Τέλος, φαίνεται και το άθροισμα όλων αυτών των ποσοτήτων. Οι διάφοροι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες παρουσιάζονται με το συμβολισμό TC XX-YY, όπου XX η θερμοκρασία στην αρχή της μετάβασης και YY η θερμοκρασία στο πέρας αυτής.

Η κατανάλωση για φωτισμό και ηλεκτρικό εξοπλισμό είναι σταθερή μεταξύ των περιπτώσεων (αφού ορίστηκε ως τέτοια στη μοντελοποίηση) και πολύ μικρές μεταβολές παρατηρούνται στην κατανάλωση ενέργειας για λειτουργία ανεμιστήρων, αντλιών και απόρριψη θερμότητας. Οι μεγάλες διαφορές παρατηρούνται στην κατανάλωση ενέργειας για ψύξη και θέρμανση, οπότε αυτές ουσιαστικά καθορίζουν το ποιος από τους υαλοπίνακες αυτούς είναι ο βέλτιστος για τη συγκεκριμένη κατοικία (για εγκατάσταση του ίδιου είδους θερμοχρωμικού σε όλα τα ανοίγματα, εκτός του μπάνιου).

	TC 15-20	TC 17-22	TC 20-25	TC 22-27	TC 25-30	TC 27-32	TC 30-35	TC 32-37	TC 35-40	TC 37-42	TC 40-45	TC 42-47	TC 45-50
Ψύξη [GJ <sub>el</sub> ]	7,52	7,53	7,54	7,56	7,61	7,66	7,79	7,90	8,09	8,21	8,40	8,55	8,86
Φωτισμός [GJ <sub>el</sub> ]	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Ηλ. Εξοπλ. [GJ <sub>el</sub> ]	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36	17,36
Ανεμιστήρες [GJ <sub>el</sub> ]	1,11	1,11	1,11	1,11	1,12	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,16	1,19
Αντλίες [GJ <sub>el</sub> ]	2,42	2,42	2,43	2,43	2,44	2,44	2,46	2,47	2,50	2,52	2,55	2,57	2,63
Απόρριψη Θερμ. [GJ <sub>el</sub> ]	0,80	0,80	0,80	0,81	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,88	0,90	0,93
Θέρμανση [GJ <sub>th</sub> ]	32,80	32,54	32,16	31,94	31,60	31,42	31,13	30,93	30,69	30,55	30,37	30,30	30,27
Σύνολο [GJ]	65,19	64,94	64,58	64,38	64,10	63,98	63,87	63,79	63,79	63,80	63,87	64,01	64,42

Σχήμα 7.18: Πίνακας τελικής κατανάλωσης ενέργειας της κατοικίας για διάφορες χρήσεις, για τους διάφορους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες που μελετήθηκαν.

Τα αποτελέσματα στον πίνακα της προηγούμενης σελίδας είναι αναμενόμενα ως προς τις μεταβολές που παρουσιάζονται στην κατανάλωση ενέργειας για ψύξη και θέρμανση. Αυτό γιατί όσο χαμηλότερες είναι οι θερμοκρασίες της θερμοχρωμικής μετάβασης τόσο ευκολότερα συμβαίνει αυτή και είναι εύλογο ότι τόσο περισσότερο θα μειώνονται οι ανάγκες για ψύξη (αφού μειώνονται τα ηλιακά θερμικά κέρδη). Από την άλλη, αυξάνονται οι ανάγκες για θέρμανση. Το σημαντικότερο στοιχείο είναι όμως ότι υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο, για το οποίο παρουσιάζονται οι ελάχιστες συνολικές ανάγκες για ψύξη και θέρμανση. Αυτό φαίνεται ότι αντιστοιχεί στους υαλοπίνακες TC 32-37 και TC 35-40, όπου παρουσιάζεται συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας της κατοικίας ίση με 63,79 GJ. Το λογισμικό βέβαια παρουσιάζει τα αποτελέσματα αυτά με στρογγυλοποίηση ψηφίων, η οποία σε μονάδα όπως το GJ (που αναφέρεται σε μεγάλη ποσότητα ενέργειας – εξάλλου  $1 \text{ GJ} = 277,78 \text{ kWh}$ ), μπορεί να οδηγήσει σε μη αμελητέες διαφορές (βέβαια όχι και σημαντικές, ειδικά αφού η αναφορά είναι σε ετήσια βάση). Στα αποτελέσματα πάντως των προσομοιώσεων αναφέρεται και η τιμή της τελικής συνολικής κατανάλωσης ενέργειας του κτιρίου ανά μονάδα επιφάνειας του δαπέδου. Αυτή η τιμή είναι για εγκατάσταση του TC 32-37 και του TC 35-40 ίση με 678,60 και 678,66 MJ/m<sup>2</sup> αντίστοιχα. Η διαφορά αυτή δεν είναι σημαντική, αλλά οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο βέλτιστος θερμοχρωμικός υαλοπίνακας από αυτούς που μελετήθηκαν είναι ο TC 32-37 (για εγκατάσταση του ίδιου είδους θερμοχρωμικού σε όλα τα ανοίγματα, εκτός του μπάνιου), με θερμοχρωμική μετάβαση στο διάστημα θερμοκρασιών από 32 έως 37 °C. Αυτός χρησιμοποιείται παρακάτω για τη σύγκριση με άλλα είδη υαλοπινάκων.

Συνοψίζοντας, με εγκατάσταση του TC 32-37 σε όλα τα ανοίγματα της κατοικίας, εκτός του μπάνιου, η συνολική τελική κατανάλωση ενέργειας σε αυτήν ανέρχεται σε 63,79 GJ, δηλαδή 17.719,6 kWh. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι λίγο αυξημένη, σε σχέση με καταναλώσεις κατοικιών αυτού του εμβαδού που ισχύουν γενικά στην πραγματικότητα, αλλά οφείλεται στο ότι το σύστημα ψύξης και θέρμανσης λειτουργεί συνεχώς όλο το χρόνο, όταν αυτό επιβάλλεται από τους θερμοστάτες των θερμικών ζωνών.

Σχετικά με τις θερμοκρασίες στις οποίες συμβαίνει η μετάβαση, η βέλτιστη τιμή που προέκυψε (32-37°C) είναι λογική, ειδικά για το κλίμα της Αθήνας, που είναι υποτροπικό μεσογειακό με σημαντική πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας και όπου κατά βάση κυριαρχούν τα ψυκτικά φορτία.

Τέλος, αξίζει να σχολιαστούν και κάποια άλλα στοιχεία. Για παράδειγμα, φαίνεται ότι η απαιτούμενη ενέργεια στην κατοικία για θέρμανση είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτήν για ψύξη. Αυτή η διαφορά, αν και αρχικά φαίνεται υπερβολική, εξηγείται από το ότι ο ψύκτης έχει ονομαστική (για παράδειγμα) τιμή του COP ίση με 3,5, ενώ ο βαθμός απόδοσης του λέβητα είναι πολύ χαμηλότερος. Επίσης, φαίνεται και ότι ο ηλεκτρικός εξοπλισμός της κατοικίας κατέχει σημαντικό μερίδιο στην ενεργειακή κατανάλωση σε αυτήν.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, εκτός από λογικά, είναι και ασφαλή και δεν κρίθηκε ως αναγκαία περαιτέρω ανάλυση των αποτελεσμάτων της παραμετρικής μελέτης, αφού ο κυριότερος και εγκυρότερος δείκτης για την εξαγωγή των συμπερασμάτων είναι η συνολική τελική ενεργειακή κατανάλωση της κατοικίας. Παρακάτω βέβαια γίνεται σύγκριση της επίδρασης του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα

TC 32-37 στην ενεργειακή απόδοση της κατοικίας, σε σχέση με τα άλλα είδη υαλοπινάκων που μελετήθηκαν. Εκεί παρουσιάζεται και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.

### 7.3 Αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ διαφόρων ειδών υαλοπινάκων

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα των διάφορων προσομοιώσεων, που η καθεμία αφορά εγκατάσταση διαφορετικού τύπου υαλοπίνακα στα ανοίγματα της κατοικίας. Δίνεται έμφαση στη σύγκριση της επίδρασης του (βέλτιστου) θερμοχρωμικού υαλοπίνακα στις ενεργειακές καταναλώσεις του κτιρίου, σε σχέση με όλους τους υπόλοιπους. Αυτός εξάλλου ήταν και ο κυριότερος σκοπός της εκτέλεσης των προσομοιώσεων.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι συνολικές ιδιότητες των υαλοπινάκων που μελετήθηκαν, όπως υπολογίστηκαν από το λογισμικό. Οι υαλοπίνακες έχουν όλοι πλήρωση αργού (13 mm οι διπλοί και 2 x 13 mm ο τριπλός), έχουν όλοι το ίδιο πάχος φύλλου και αναφέρονται ως διαυγής διπλός, θερμοχρωμικός διπλός, ανακλαστικός 1, ανακλαστικός 2, ανακλαστικός 3, χαμηλής εκπομπής επιλεκτικός διπλός και χαμηλής εκπομπής τριπλός. Η κατασκευή και οι ιδιότητες του καθενός εξηγούνται στο κεφάλαιο 6.

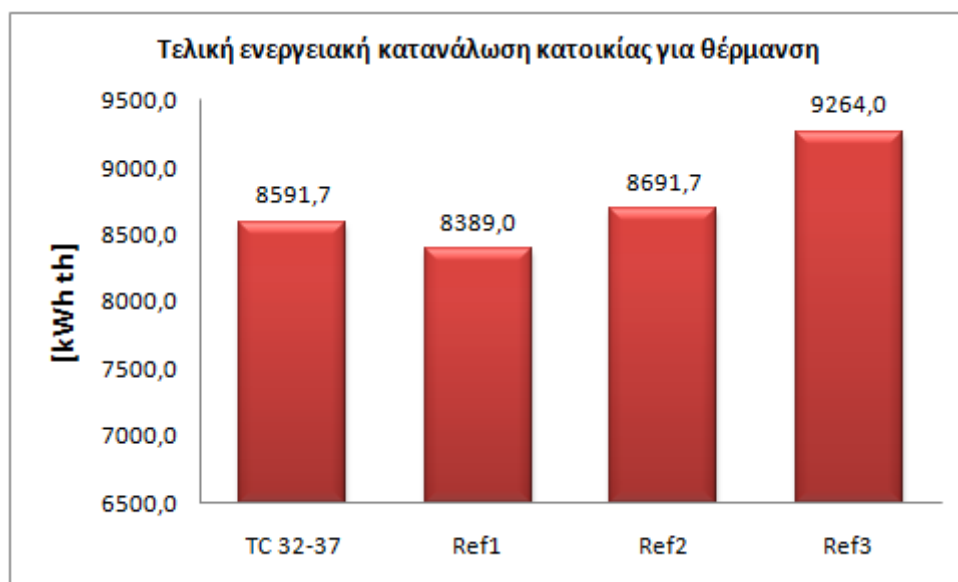
	$U_g$ [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	SHGC [-]	SRT σε κάθετο πρόσπτωση [-]	VLT σε κάθετο πρόσπτωση [-]
<b>Διαυγής διπλός</b>	2,511	0,704	0,604	0,781
<b>Θερμοχρωμικός διπλός (TC 32-37)</b>	2,267 – 2,145 – 2,010	0,498 – 0,377 – 0,170	0,397 – 0,280 – 0,08064	0,532 – 0,402 – 0,269
<b>Ανακλαστικός 1</b>	2,267	0,498	0,397	0,532
<b>Ανακλαστικός 2</b>	2,145	0,377	0,280	0,402
<b>Ανακλαστικός 3</b>	2,010	0,170	0,08064	0,269
<b>Χαμηλής εκπομπής επιλεκτικός διπλός</b>	1,333	0,420	0,345	0,682
<b>Χαμηλής εκπομπής τριπλός</b>	1,050	0,514	0,373	0,664

Σχήμα 7.19: Πίνακας συνολικών ιδιοτήτων των διάφορων υαλοπινάκων που μελετήθηκαν.

Να σημειωθεί ότι οι τρεις υποθετικοί “ανακλαστικοί” υαλοπίνακες δεν αντιπροσωπεύουν απόλυτα τους πραγματικούς ανακλαστικούς υαλοπίνακες, χωρίς βέβαια οι ιδιότητές του να απέχουν σημαντικά. Μοντελοποιήθηκαν, όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 6, με σκοπό την αξιολόγηση του θερμοχρωμικού πάνω στη βάση των μεταβαλλόμενων ιδιοτήτων του. Αυτό γιατί ο καθένας από αυτούς, όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.19, παρουσιάζει τις ιδιότητες μίας από τις τρεις καταστάσεις του θερμοχρωμικού. Αυτό επιτρέπει στα αποτελέσματα να είναι ξεκάθαρα, ώστε η εξαγωγή των συμπερασμάτων να είναι περισσότερο ασφαλής.

Οπότε αρχικά γίνεται παρακάτω μια σύγκριση μεταξύ των τεσσάρων, με σκοπό την ανάδειξη του πιθανού πλεονεκτήματος που παρέχει η λειτουργικότητα του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα.

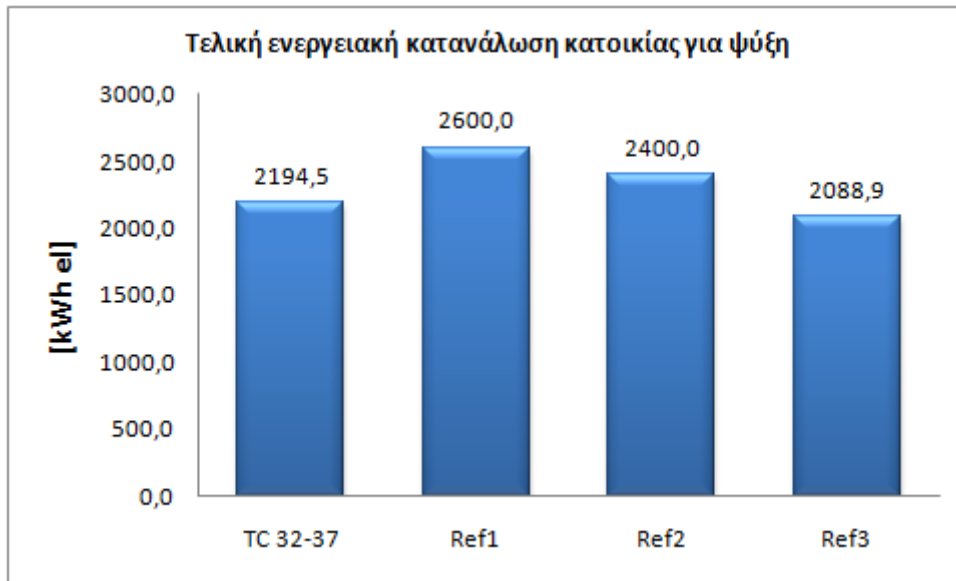
Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η τελική ενεργειακή κατανάλωση της κατοικίας για θέρμανση σε  $kWh_{th}$ , για την εγκατάσταση του θερμοχρωμικού και των τριών ανακλαστικών υαλοπινάκων (στα ανοίγματα όλων των χώρων, εκτός του μπάνιου). Προς οικονομία χώρου, όλοι αυτοί αναφέρονται ως: TC 32-37, Ref1, Ref2 και Ref3.



Σχήμα 7.20: Τελική ενεργειακή κατανάλωση κατοικίας για θέρμανση, ανάλογα με το είδος του εγκατεστημένου υαλοπίνακα.

Η μικρότερη κατανάλωση παρατηρείται για τον Ref1, που έχει μονίμως τις ιδιότητες του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα στην κατάσταση μέγιστης διαπερατότητας – οπότε επιτρέπει τη μέγιστη είσοδο ηλιακών θερμικών κερδών.

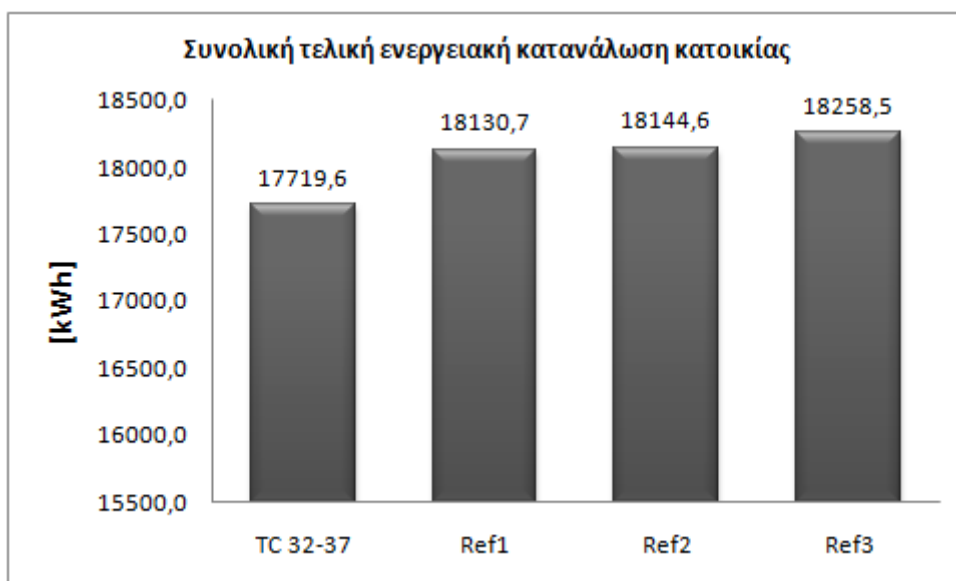
Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η τελική ενεργειακή κατανάλωση της κατοικίας για ψύξη σε  $kWh_{el}$ , για την εγκατάσταση του θερμοχρωμικού και των τριών ανακλαστικών υαλοπινάκων (στα ανοίγματα όλων των χώρων, εκτός του μπάνιου):



Σχήμα 7.21: Τελική ενεργειακή κατανάλωση κατοικίας για ψύξη, ανάλογα με το είδος του εγκατεστημένου υαλοπίνακα.

Η μικρότερη κατανάλωση παρατηρείται για τον Ref3, που έχει μονίμως τις ιδιότητες του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα στην κατάσταση ελάχιστης διαπερατότητας – οπότε επιτρέπει την ελάχιστη είσοδο ηλιακών θερμικών κερδών.

Στο διάγραμμα του επόμενου σχήματος φαίνεται η συνολική τελική ενεργειακή κατανάλωση της κατοικίας σε kWh, που δηλαδή περιλαμβάνει τις καταναλώσεις, για θέρμανση, ψύξη, τεχνητό ηλεκτρικό εσωτερικό φωτισμό, λειτουργία ανεμιστήρων και αντλιών και απόρριψη θερμότητας.



Σχήμα 7.22: Συνολική τελική ενεργειακή κατανάλωση κατοικίας, ανάλογα με το είδος του εγκατεστημένου υαλοπίνακα.

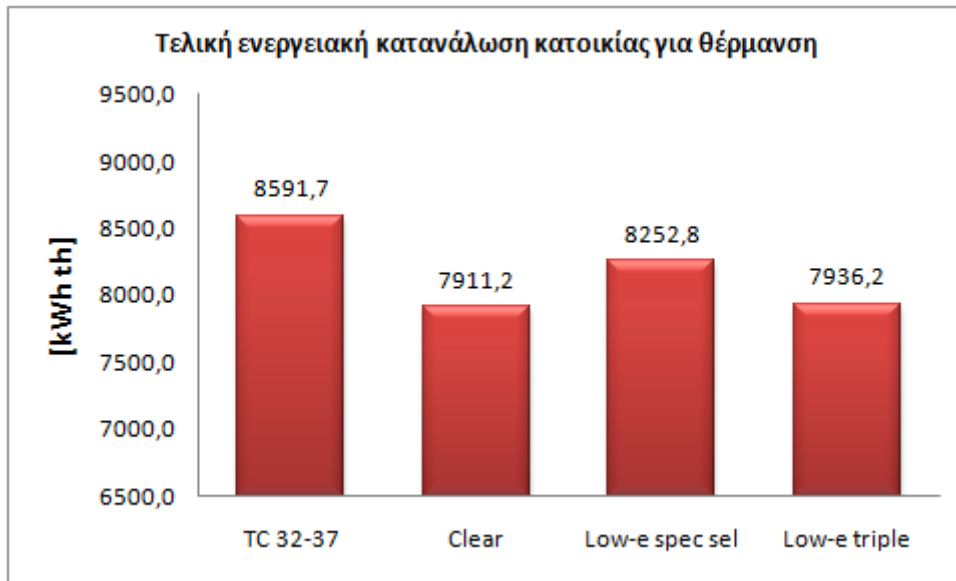
Να σημειωθεί ότι δόθηκαν οι τιμές της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης και όχι του αθροίσματος κατανάλωσης ενέργειας για ψύξη και θέρμανση, γιατί όπως φαίνεται και στον πίνακα του σχήματος 7.18, από το είδος του υαλοπίνακα που εγκαθίσταται επηρεάζεται (έστω λίγο) η ενεργειακή κατανάλωση για τη λειτουργία ανεμιστήρων, αντλιών και απόρριψη θερμότητας. Οπότε, μόνο μέσω του μεγέθους αυτού η σύγκριση μπορεί να είναι απολύτως ξεκάθαρη.

Το τελευταίο σχήμα φανερώνει ότι σε ετήσια βάση η εγκατάσταση του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα οδηγεί στην ελάχιστη συνολική κατανάλωση ενέργειας της κατοικίας. Αυτό οφείλεται προφανώς στην ιδιότητά του να μεταβάλλει τη διαπερατότητά του στην ηλιακή ακτινοβολία, ανάλογα με τις ανάγκες. Το στοιχείο αυτό υποδεικνύεται και στις εικόνες των σχημάτων 7.20 και 7.21, όπου ο θερμοχρωμικός υαλοπίνακας κατέχει και στα δύο τη δεύτερη θέση στην κατάταξη, δηλαδή μπορεί να ανταποκριθεί σχετικά ικανοποιητικά στις απαιτήσεις κάθε εποχής. Οι απαιτήσεις κάθε εποχής καθορίζονται από τις καιρικές συνθήκες και αυτές καθορίζουν και τις ιδιότητες του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα. Χρειάζεται βέβαια να τονιστεί ότι αυτή η συμπεριφορά αφορά τον συγκεκριμένο υαλοπίνακα και στη συγκεκριμένη κατοικία και περιοχή.

Ακόμη, ο παράγοντας του συντελεστή θερμοπερατότητας δεν μπορεί να κατέχει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματα, αφού οι διαφορές είναι μικρές (πίνακας του σχήματος 7.19). Αυτό επιβεβαιώνεται και ενισχύεται και από παρατήρηση της εικόνας του σχήματος 7.20, όπου φαίνεται ότι η μέγιστη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση παρουσιάζεται (με σημαντική διαφορά) για τον Ref3, που έχει τον ελάχιστο συντελεστή θερμοπερατότητας μεταξύ των τεσσάρων αυτών υαλοπινάκων – αλλά επίσης τον ελάχιστο SHGC.

Μετά από την πρώτη αυτή ένδειξη της αποδοτικότητας του συγκεκριμένου θερμοχρωμικού υαλοπίνακα, που αποδείχτηκε επειδή η σύγκριση έγινε πρακτικά με ίσους όρους, παρακάτω γίνεται εκτενής σύγκριση με τα υπόλοιπα είδη υαλοπινάκων για τα οποία έγιναν προσομοιώσεις της κατοικίας και συγκεκριμένα με τον διαυγή διπλό, τον επιλεκτικό χαμηλής εκπομπής διπλό και τον χαμηλής εκπομπής τριπλό. Προς οικονομία χώρου, όλοι αυτοί αναφέρονται ως: TC 32-37, Clear, Low-e spec sel και Low-e triple.

Αρχικά γίνεται σύγκριση των αντίστοιχων στοιχείων με παραπάνω, δηλαδή της ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση, για ψύξη, καθώς και της συνολικής.



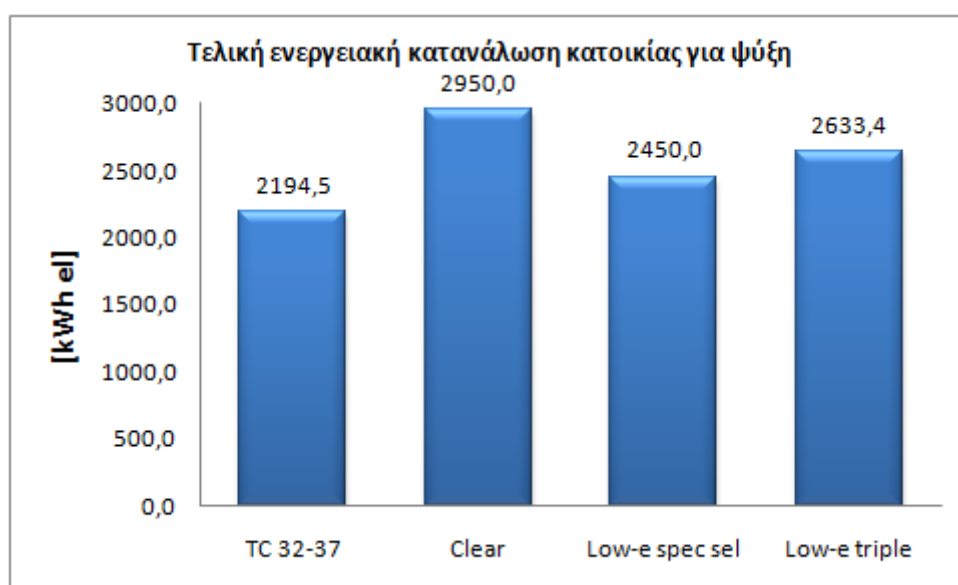
Σχήμα 7.23: Τελική ενεργειακή κατανάλωση κατοικίας για θέρμανση, ανάλογα με το είδος του εγκατεστημένου υαλοπίνακα.

Αξιοπρόσεκτο σημείο στο παραπάνω διάγραμμα είναι το ότι η εγκατάσταση του τριπλού υαλοπίνακα χαμηλής εκπομπής οδηγεί σε ελάχιστα μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, συγκριτικά με τον διαυγή διπλό υαλοπίνακα. Αυτό ίσως να οφείλεται στο ότι για το κλίμα της Αθήνας και για το συγκεκριμένο κτίριο τα θερμομονωτικά χαρακτηριστικά ( $U_g$ ) του δεύτερου είναι επαρκή, ενώ η μικρότερη τιμή του SHGC στον τριπλό υαλοπίνακα (που οδηγεί σε μειωμένα ηλιακά θερμικά κέρδη όταν αυτά είναι επιθυμητά) αντισταθμίζει και υπερκαλύπτει το όφελος που προσφέρει η σημαντικά μειωμένη θερμομόνωση. Σε πιο ψυχρά κλίματα το αποτέλεσμα αυτό πιθανότατα θα είναι διαφορετικό.

Η σημαντικά μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση για θέρμανση όταν εγκαθίσταται ο συγκεκριμένος θερμοχρωμικός, συγκριτικά με τον διαυγή διπλό, οφείλεται στην αρκετά μικρότερη τιμή του SHGC – ακόμα και στην κατάσταση μέγιστης διαπερατότητας, στην οποία αναμένεται (πιθανώς) κυρίως να βρίσκεται σε περιόδους που απαιτείται θέρμανση. Χρήσιμο στοιχείο σχετικά με την παρατήρηση της προηγούμενης παραγράφου είναι το ότι ο SHGC του θερμοχρωμικού στην κατάσταση μέγιστης διαπερατότητας είναι περίπου ίσος με αυτόν για τους δύο υαλοπίνακες χαμηλής εκπομπής. Το ίδιο ισχύει και για τον SHGC στην κατάσταση μέσης διαπερατότητας, στην οποία πιθανώς να μεταβαίνει (έστω για μικρά χρονικά διαστήματα) και σε περιόδους με θέρμανση (ειδικά όταν υπόκειται σε ηλιασμό). Αυτό επιτρέπει τη διατύπωση της άποψης ότι η διαφορά που παρατηρείται στην ενεργειακή κατανάλωση μεταξύ θερμοχρωμικού και υαλοπινάκων χαμηλής εκπομπής οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διαφορά του συντελεστή θερμοπερατότητάς τους. Η διαφορά όμως της ενεργειακής κατανάλωσης μεταξύ θερμοχρωμικού και διαυγούς είναι ακόμα μεγαλύτερη, ενώ έχουν παρόμοιους συντελεστές θερμοπερατότητας. Οπότε πιθανώς (για την κατοικία αυτή και στη συγκεκριμένη τοποθεσία) για τις περιόδους που απαιτείται θέρμανση –και από μία τιμή του συντελεστή θερμοπερατότητας και κάτω– ο ρόλος της ανάγκης ύπαρξης υαλοπινάκων με κατά το

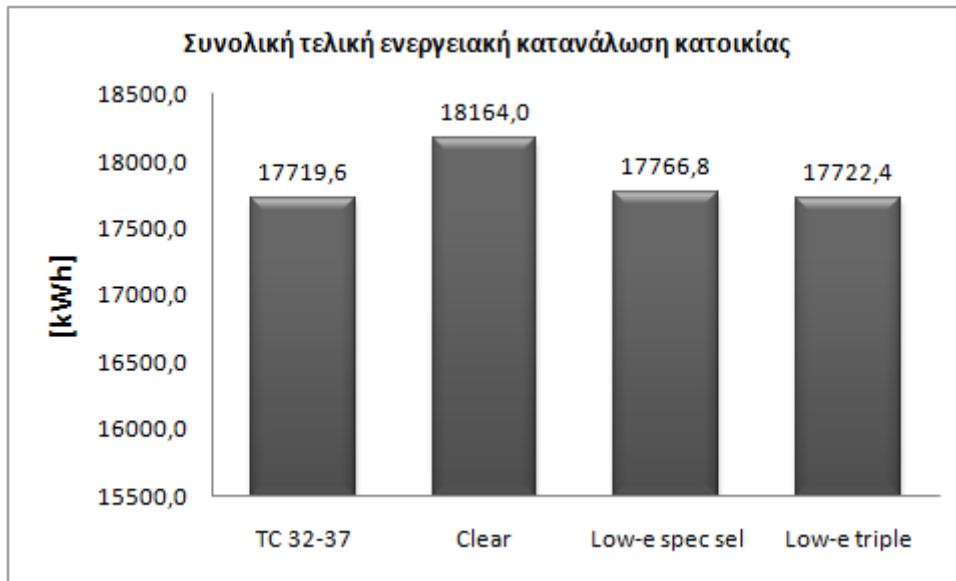


δυνατόν υψηλότερη τιμή του SHGC είναι περισσότερο σημαντικός από την περαιτέρω μείωση του  $U_g$ . Εξάλλου, η θέρμανση μπορεί να απαιτείται και οριακά, σε περιόδους του φθινοπώρου και της άνοιξης. Για τον έλεγχο αυτής της υπόθεσης εκτελέστηκε δοκιμαστική επιπρόσθετη προσομοίωση με τοποθέτηση στα ίδια ανοίγματα διπλού υαλοπίνακα χαμηλής εκπομπής με πλήρωση αργού στο διάκενο 13 mm και με επίστρωση στη θέση “3”, όπου η επίστρωση είναι η ίδια με αυτήν του τριπλού. Ο  $U_g$  προέκυψε ίσος με 1,493, ο SHGC ίσος με 0,602, η SRT σε κάθετο πρόσπτωση 0,474, η VLT σε κάθετο πρόσπτωση 0,745 και η τελική κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση ίση με 7758,3 kWh<sub>th</sub>. Το αποτέλεσμα αυτό ουσιαστικά επιβεβαιώνει τον ανωτέρω ισχυρισμό.



Σχήμα 7.24: Τελική ενεργειακή κατανάλωση κατοικίας για ψύξη, ανάλογα με το είδος του εγκατεστημένου υαλοπίνακα.

Τα αποτελέσματα που φαίνονται στο διάγραμμα αυτό είναι περισσότερο ξεκάθαρα, αφού ο θερμοχρωμικός υαλοπίνακας που εν δυνάμει (και για μεγάλη χρονική διάρκεια) παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή του SHGC, οδηγεί στη μικρότερη κατανάλωση – αν και έχει αρκετά υψηλότερο  $U_g$  συγκριτικά με τους χαμηλής εκπομπής. Ενδιαφέρον είναι επίσης το ότι ο Low-e spec sel οδηγεί σε μικρότερη κατανάλωση από τον Low-e triple και αυτό αναδεικνύει την ανάγκη του ηλιακού ελέγχου κατά τη θερινή περίοδο, για την περιοχή της Αθήνας.

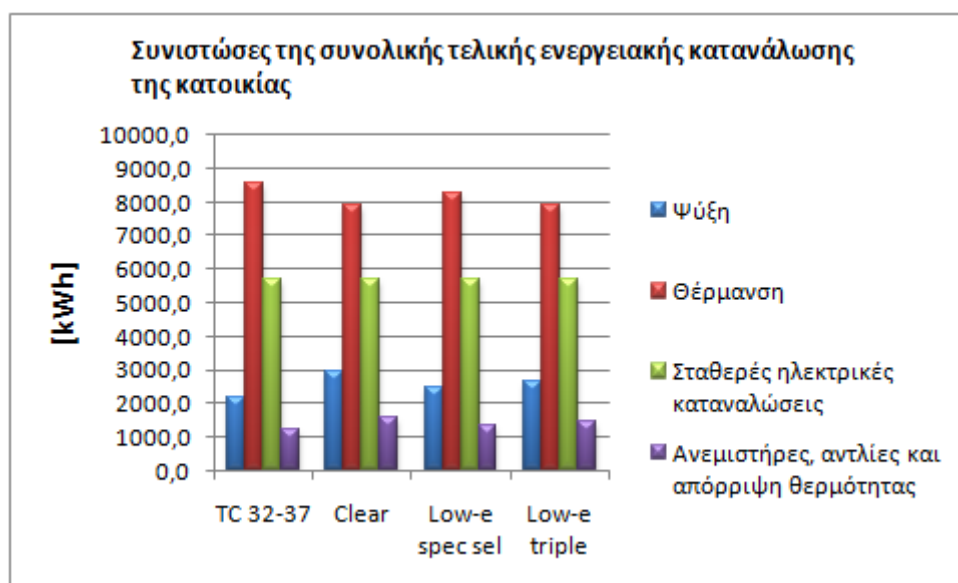


**Σχήμα 7.25:** Συνολική τελική ενεργειακή κατανάλωση κατοικίας, ανάλογα με το είδος του εγκατεστημένου υαλοπίνακα.

Σχετικά με το τελευταίο διάγραμμα, μπορεί αρχικά να παρατηρηθεί ότι, όπως ήταν αναμενόμενο, η εγκατάσταση του διαγούσ υαλοπίνακα οδηγεί στη μέγιστη συνολική κατανάλωση. Από την άλλη, όσον αφορά στην σύγκριση του θερμοχρωμικού με τους χαμηλής εκπομπής, φαίνεται ότι παρόλο που ο πρώτος έχει σημαντικά υψηλότερο συντελεστή θερμοπερατότητας, οδηγεί σε ίση πρακτικά κατανάλωση με τους δεύτερους (συγκεκριμένα είναι ελάχιστα μικρότερη). Η αξία του στοιχείου αυτού επιτείνεται έπειτα από παρατήρηση και των καταναλώσεων όταν εγκαθίστανται οι ανακλαστικοί υαλοπίνακες (σχήμα 7.22), οι οποίες είναι της τάξεως αυτής του διαγούσ. Οπότε συνάγεται το συμπέρασμα ότι η τοποθέτηση θερμοχρωμικής επίστρωσης σε υαλοπίνακα με συντελεστή θερμικής διαπερατότητας γύρω στο 1, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική περαιτέρω μείωση της κατανάλωσης ενέργειας.

Για τον έλεγχο της εγκυρότητας και αυτού του ισχυρισμού, πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική επιπρόσθετη προσομοίωση με τοποθέτηση στα ίδια ανοίγματα διπλού θερμοχρωμικού υαλοπίνακα με πλήρωση αργού στο διάκενο 13 mm, με την ίδια θερμοχρωμική επίστρωση στη θέση “2” και με την επίστρωση χαμηλής εκπομπής του τριπλού υαλοπίνακα στη θέση “3”. Ο  $U_g$  προέκυψε ίσος με 1,483-1,477-1,464, ο SHGC ίσος με 0,430-0,324-0,135, η SRT σε κάθετο πρόσπτωση 0,323-0,232-0,06781 και η VLT σε κάθετο πρόσπτωση 0,508-0,383-0,256. Η συνολική τελική ενεργειακή κατανάλωση προέκυψε ίση με 17508,3 kWh. Εδώ υπάρχει και το επιπλέον πλεονέκτημα ότι η επίστρωση Low-e αποτρέπει την απορροφηθείσα από το θερμοχρωμικό φύλλο θερμότητα να μεταδοθεί με ακτινοβολία προς τον εσωτερικό χώρο. Φαίνεται επίσης ότι τότε η ποσοστιαία μεταβολή του  $U_g$  μεταξύ των τριών καταστάσεων του υαλοπίνακα είναι μικρότερη από ότι στην περίπτωση που δεν υπάρχει επίστρωση Low-e.

Με σκοπό την εποπτεία του πώς η συνολική ενεργειακή κατανάλωση της κατοικίας αναλύεται στις συνιστώσες της, για κάθε τύπο υαλοπίνακα, παρουσιάζεται το παρακάτω διάγραμμα:



Σχήμα 7.26: Συνιστώσες της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας της κατοικίας, ανάλογα με το είδος του εγκατεστημένου υαλοπίνακα. Οι σταθερές ηλεκτρικές καταναλώσεις αφορούν τον εσωτερικό ηλεκτρικό φωτισμό και εξοπλισμό.

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται η εξοικονόμηση ενέργειας και η ποσοστιαία εξοικονόμηση που επιφέρει η εγκατάσταση του θερμοχρωμικού, του επιλεκτικού χαμηλής εκπομπής και του χαμηλής εκπομπής τριπλού, συγκριτικά με τον διαυγή υαλοπίνακα:

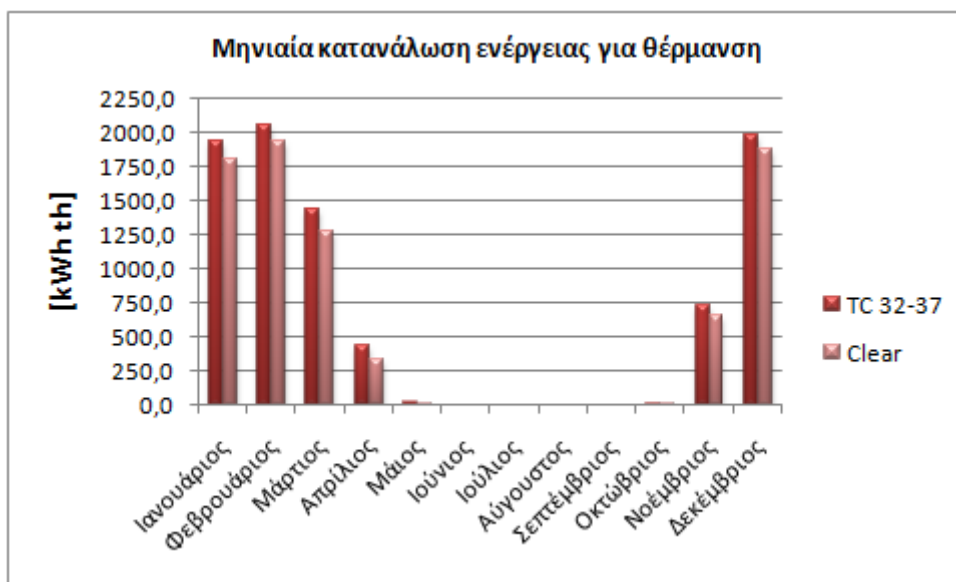
	Εξοικονόμηση Ενέργειας [kWh]	Ποσοστιαία εξοικονόμηση ενέργειας [%]
TC 32-37	444,4	2,45
Low-e spec sel	397,2	2,19
Low-e triple	441,7	2,43

Σχήμα 7.27: Εξοικονόμηση ενέργειας συγκριτικά με τον διαυγή υαλοπίνακα.

Οι μειώσεις που παρατηρούνται δεν είναι πάρα πολύ μεγάλες, αλλά δεν πρέπει να αμελείται το γεγονός ότι πρόκειται για κατοικία μικρού εμβαδού και με όχι υπερβολικά μεγάλη επιφάνεια υαλοστασίων, ενώ η σύγκριση γίνεται ούτως ή άλλως με υαλοπίνακα ικανοποιητικού  $U_g$  (για το κλίμα της Αθήνας). Προφανώς, σε ένα μεγαλύτερο κτίριο και με μεγαλύτερη συνολική επιφάνεια υαλοπινάκων οι μειώσεις θα ήταν μεγαλύτερες. Φαίνεται πάντως και από εδώ η ικανότητα της ύπαρξης θερμοχρωμικής επίστρωσης σε έναν υαλοπίνακα να επιφέρει μείωση στη συνολική κατανάλωση ενέργειας αντίστοιχη με αυτή υαλοπινάκων πολύ μικρότερου

συντελεστή θερμοπερατότητας. Το γεγονός μάλιστα ότι ο ένας από αυτούς (Low-e spec sel) προσφέρει και ηλιακό έλεγχο, αναδुकνύει ακόμα περισσότερο τη σημασία της δυναμικής συμπεριφοράς του θερμοχρωμικού.

Με σκοπό να φανεί και η μηνιαία κατανομή της ενεργειακής κατανάλωσης για θέρμανση και ψύξη, αυτή παρουσιάζεται στα επόμενα δύο διαγράμματα. Η σύγκριση για τις ανάγκες αυτής της αναφοράς γίνεται μεταξύ των TC 32-37 και Clear.



Σχήμα 7.28: Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, για εγκατάσταση είτε του TC 32-37, είτε του Clear.



Σχήμα 7.29: Μηνιαία κατανάλωση ενέργειας για ψύξη, για εγκατάσταση είτε του TC 32-37, είτε του Clear.

Η αύξηση της κατανάλωση ενέργειας για ψύξη μεταξύ Μαΐου και Ιουνίου είναι 313,4 kWh για εγκατάσταση του θερμοχρωμικού, ενώ είναι 390,4 kWh για εγκατάσταση του διαυγούς. Αυτό αποτελεί μια ένδειξη ότι τον Ιούνιο οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες στα ανοίγματα της κατοικίας βρίσκονται για μεγαλύτερη χρονική διάρκεια στην κατάσταση ελάχιστης διαπερατότητας από ότι τον Μάιο.

Επίσης, με παρατήρηση των τελευταίων δύο διαγραμμάτων γίνεται πιο εύκολα φανερό ότι το όφελος της μειωμένης ενεργειακής κατανάλωσης για ψύξη που προσφέρουν οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες είναι περισσότερο σημαντικό από το μειονέκτημα της αυξημένης κατανάλωσης για θέρμανση.

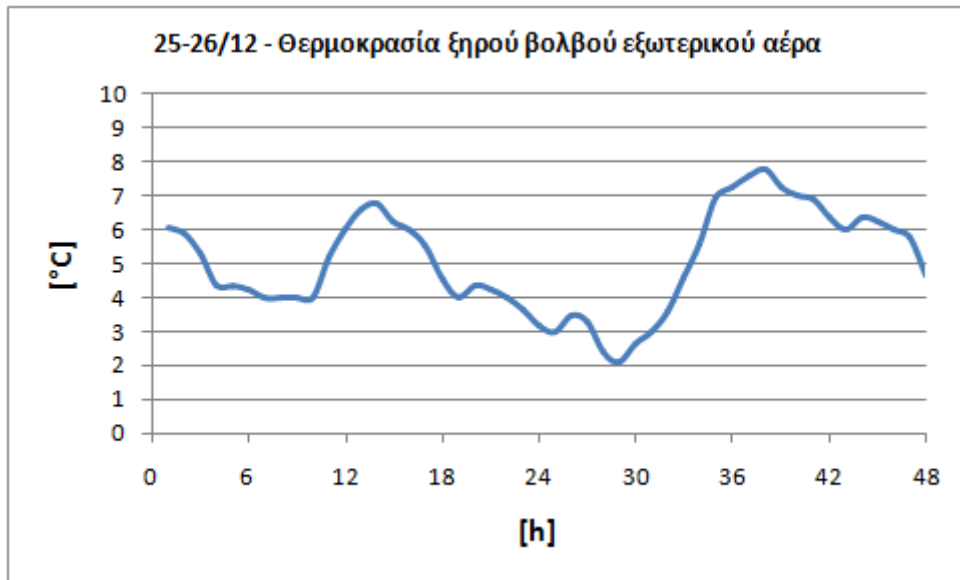
Με σκοπό η διερεύνηση της επίδρασης των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στις ανάγκες για θέρμανση και ψύξη να γίνει και στη βάση των θερμικών και ψυκτικών φορτίων, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν αυτά. Παράλληλα, γίνεται διαχωρισμός και ανά θερμική ζώνη, ώστε να φανεί η επίδραση που έχει το μέγεθος και ο προσανατολισμός των υαλοπινάκων, αλλά και γενικά η ύπαρξή τους ή όχι σε έναν χώρο. Η σύγκριση για τις ανάγκες αυτής της αναφοράς γίνεται μεταξύ των TC 32-37 και Clear.

Για τους σκοπούς της εργασίας χρησιμοποιούνται οι τιμές του ρυθμού θέρμανσης/ψύξης (μετάδοσης θερμότητας) από τα fan coil. Οι τιμές αυτές διαφέρουν γενικά από το θερμικό/ψυκτικό φορτίο, που είναι ένα θεωρητικό μέγεθος και εκφράζει το ρυθμό με τον οποίο η θερμότητα πρέπει να προσδίδεται στον/αφαιρείται από τον χώρο, κατά τη θέρμανσή/ψύξη του, ώστε η θερμοκρασία και η υγρασία του αέρα του χώρου να παραμένει σταθερή. Δεν είναι ακριβώς ίσα μεγέθη εξαιτίας της ανικανότητας του συστήματος HVAC να διατηρήσει απολύτως σταθερή τη θερμοκρασία στις επιθυμητές τιμές, αλλά και επειδή μπορεί να υπάρχουν περίοδοι στις οποίες το σύστημα δεν μπορεί να ανταποκριθεί. Επίσης, μπορεί να γίνεται εισαγωγή νωπού αέρα για θέρμανση/ψύξη, αλλά και η υπερπίεση που δημιουργεί ο ανεμιστήρας στον αέρα του χώρου μπορεί να οδηγήσει και σε διείσδυση αέρα προς το εξωτερικό.

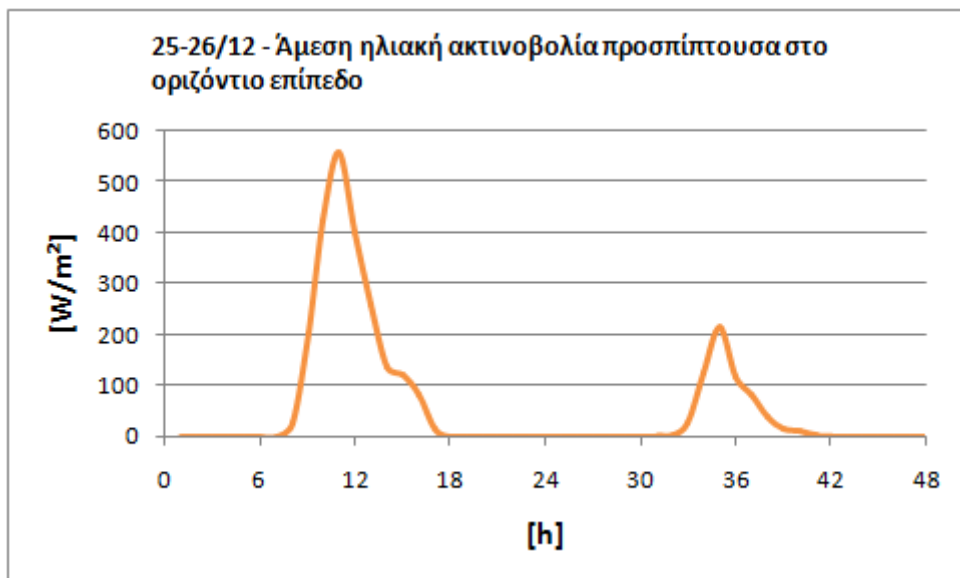
Σίγουρα όμως το θερμικό/ψυκτικό φορτίο μπορεί να αντιπροσωπευτεί ικανοποιητικά από το μέγεθος αυτό και εξάλλου η ουσία της χρήσης του μεγέθους είναι η αντιπροσώπευση, ώστε να αναδειχθούν οι όποιες διαφορές μεταξύ εγκατάστασης διαφορετικών υαλοπινάκων. Το χρονικό βήμα αναφοράς επιλέχθηκε να είναι ανά ώρα (μέσες τιμές).

Για να αναδειχθούν τα αποτελέσματα που επιφέρει η εγκατάσταση του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα, τα αποτελέσματα παρακάτω παρουσιάζονται στις διήμερες περιόδους όπου εμφανίζεται η ελάχιστη και η μέγιστη θερμοκρασία ξηρού βολβού του έτους, δηλαδή στις 25/12 - 26/12 και στις 6/8 - 7/8. Παρακάτω παρουσιάζονται για τις περιόδους αυτές οι ημερήσιες κατανομές της θερμοκρασίας ξηρού βολβού εξωτερικού αέρα, της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (προσπίπτουσα

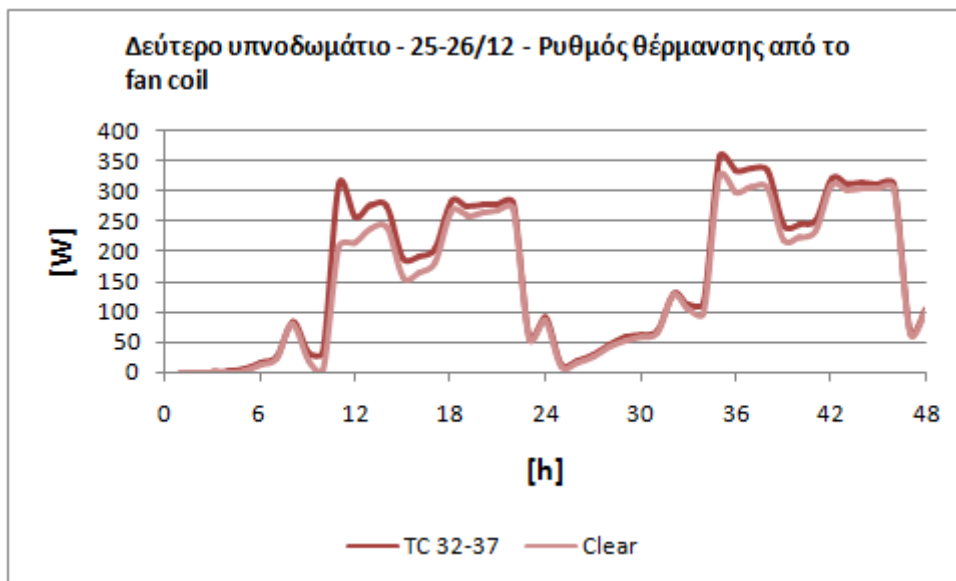
στο οριζόντιο επίπεδο), καθώς και τα θερμικά (μέσω προσθήκης ξηρού αέρα) και ψυκτικά (αισθητά και λανθάνοντα) φορτία για τις θερμικές ζώνες του δεύτερου υπνοδωματίου, της κύριας εισόδου και του καθιστικού.



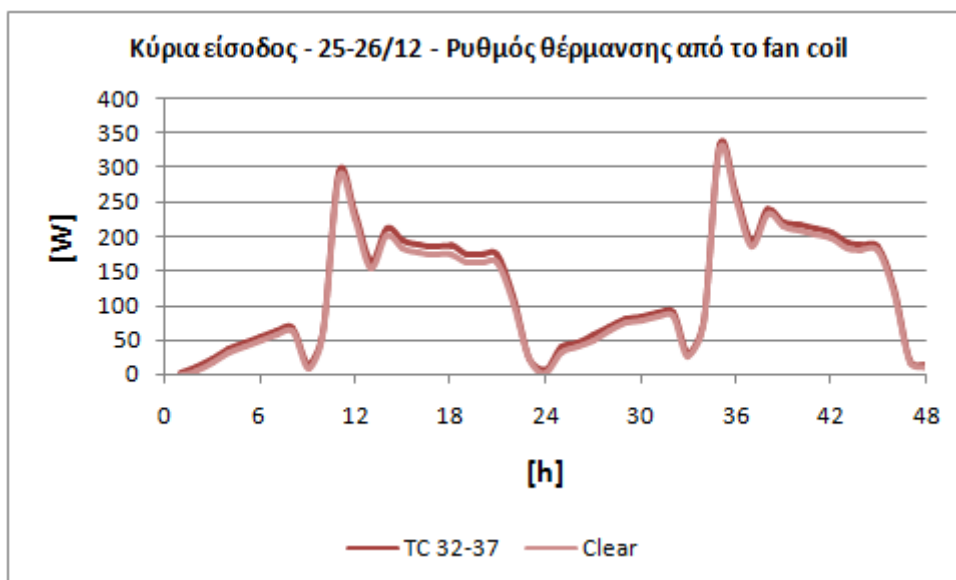
Σχήμα 7.30: Θερμοκρασία ξηρού βολβού εξωτερικού αέρα, κατά την περίοδο 25-26/12.



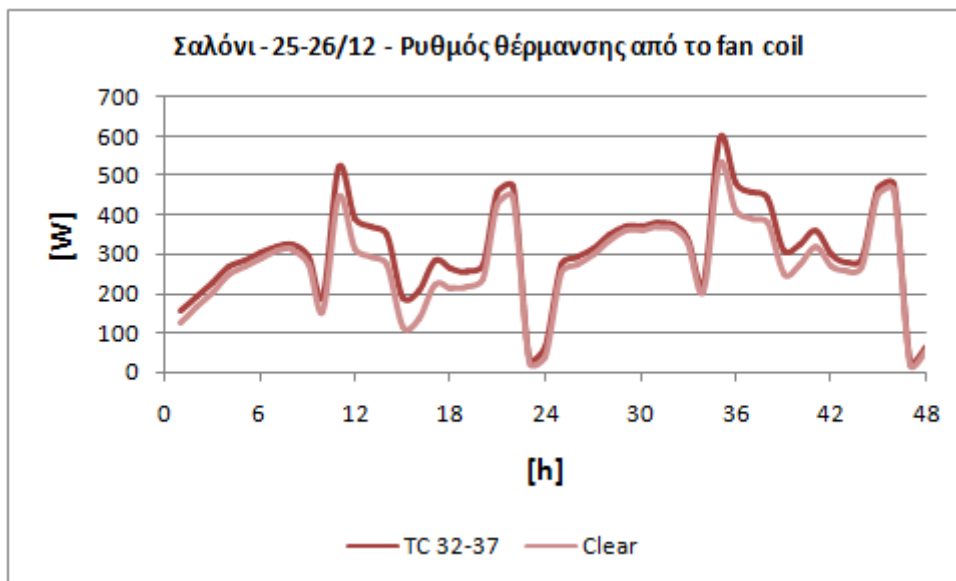
Σχήμα 7.31: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στο οριζόντιο επίπεδο, κατά την περίοδο 25-26/12.



Σχήμα 7.32: Ρυθμός θέρμανσης από το fan coil στο δεύτερο υπνοδωμάτιο, κατά την περίοδο 25-26/12 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.



Σχήμα 7.33: Ρυθμός θέρμανσης από το fan coil στην κύρια είσοδο, κατά την περίοδο 25-26/12 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.

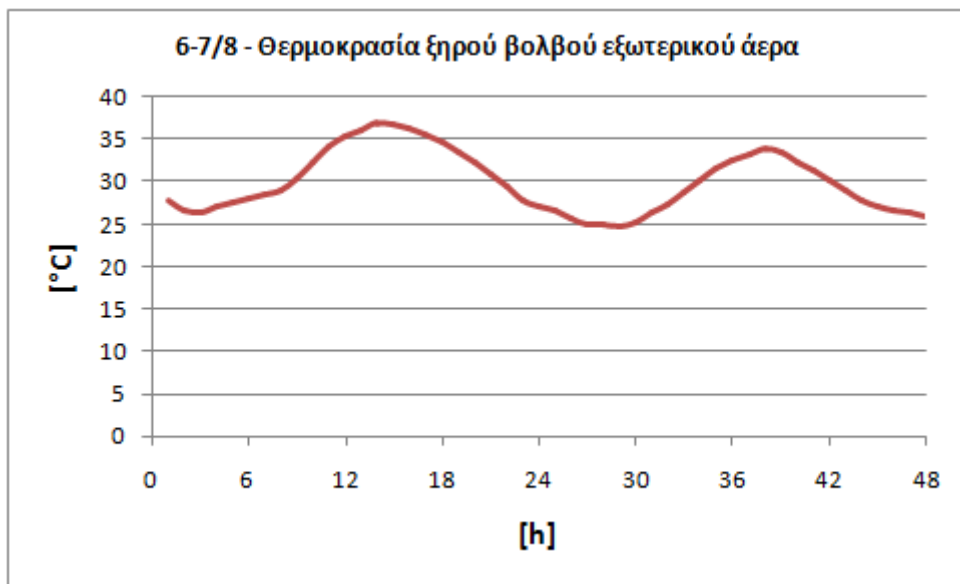


Σχήμα 7.34: Ρυθμός θέρμανσης από το fan coil στο σαλόνι, κατά την περίοδο 25-26/12 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.

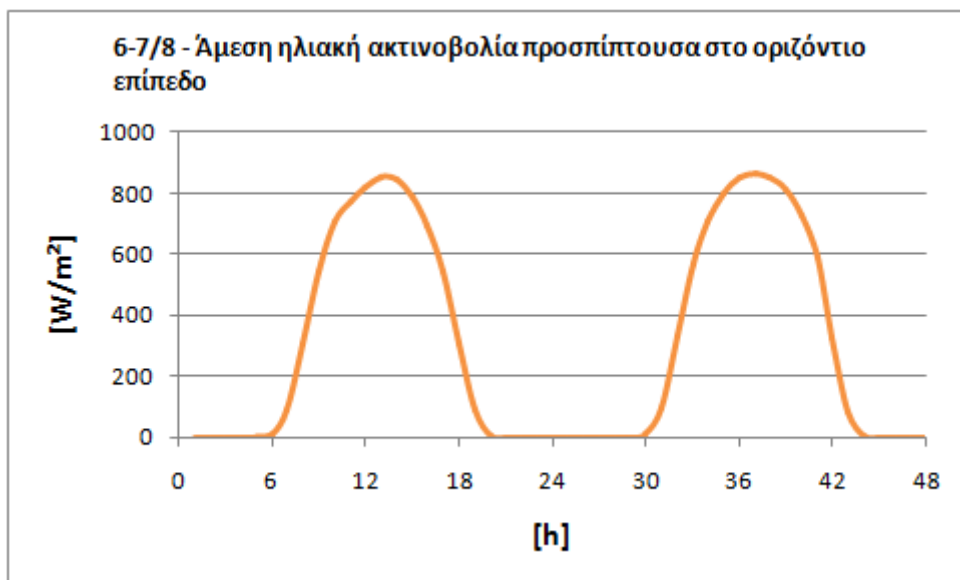
Μπορούν να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις:

- Οι διαφορές στους ρυθμούς θέρμανσης μεταξύ των δύο περιπτώσεων εγκατάστασης υαλοπινάκων δεν είναι πολύ σημαντικές.
- Αυτές οι διαφορές παρατηρούνται στις χρονικές περιόδους που οι υαλοπίνακες των δωματίων υπόκεινται σε ηλιασμό. Βέβαια αυτό δεν αποτελεί ένδειξη ότι οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες υφίστανται θερμοχρωμική μετάβαση – αφού έχουν μικρότερη διαπερατότητα στην ηλιακή ακτινοβολία ακόμα και στην κατάσταση μέγιστης διαπερατότητας.
- Στην κύρια είσοδο που δεν έχει υαλοπίνακες, πρακτικά δεν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων εγκατάστασης υαλοπινάκων.
- Οι απότομες μεταβολές που παρατηρούνται στις 10:00 και 22:00 οφείλονται στην αλλαγή της ρύθμισης του θερμοστάτη (night setback).
- Παρά το ότι στις 25/12 υπάρχει μεγάλη πρόσπτωση άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ στις 26/12 αρκετά μικρότερη, δεν διακρίνονται διαφορές μεταξύ των δύο ημερών ανάμεσα στο θερμικό φορτίο για εγκατάσταση του TC 32-37 και του Clear. Αυτό υποδηλώνει ότι γενικά δεν πραγματοποιείται θερμοχρωμική μετάβαση στις ημέρες αυτές.
- Οι ρυθμοί θέρμανσης κατά τη δεύτερη ημέρα είναι γενικά υψηλότεροι.

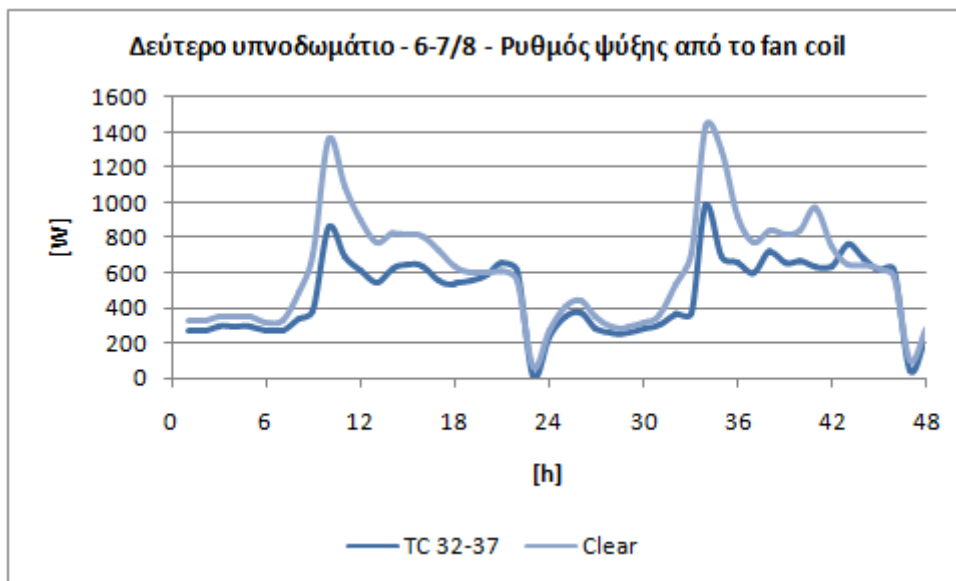




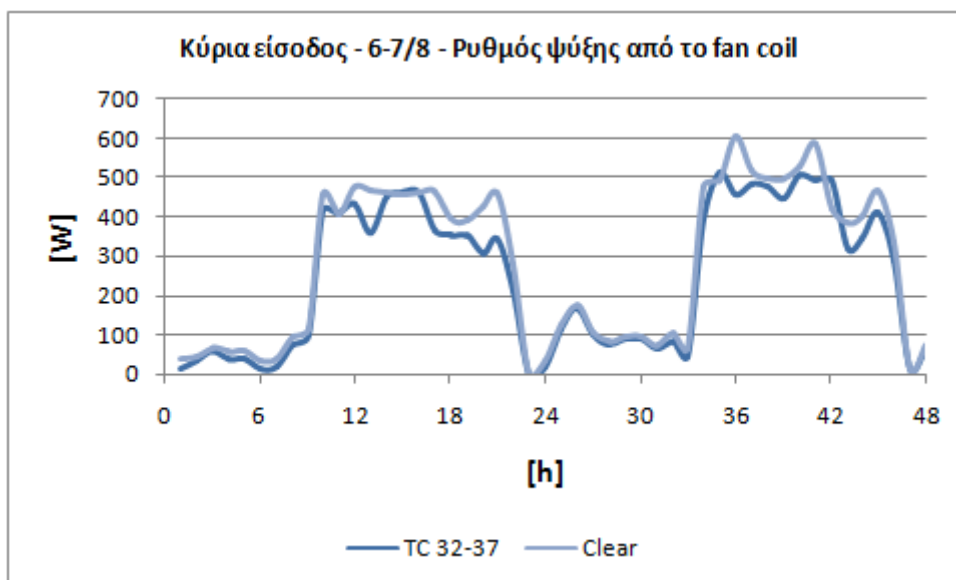
Σχήμα 7.35: Θερμοκρασία ξηρού βολβού εξωτερικού αέρα, κατά την περίοδο 6-7/8.



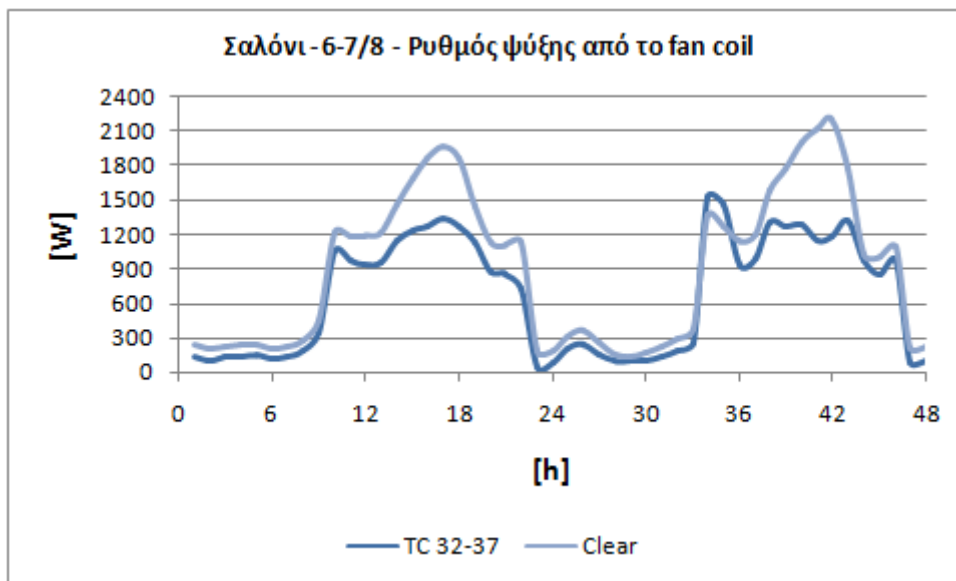
Σχήμα 7.36: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στο οριζόντιο επίπεδο, κατά την περίοδο 6-7/8.



Σχήμα 7.37: Ρυθμός ψύξης από το fan coil στο δεύτερο υπνοδωμάτιο, κατά την περίοδο 6-7/8 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.



Σχήμα 7.38: Ρυθμός ψύξης από το fan coil στην κύρια είσοδο, κατά την περίοδο 6-7/8 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.



Σχήμα 7.39: Ρυθμός ψύξης από το fan coil στο σαλόνι, κατά την περίοδο 6-7/8 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.

Μπορούν να γίνουν κάποιες παρατηρήσεις:

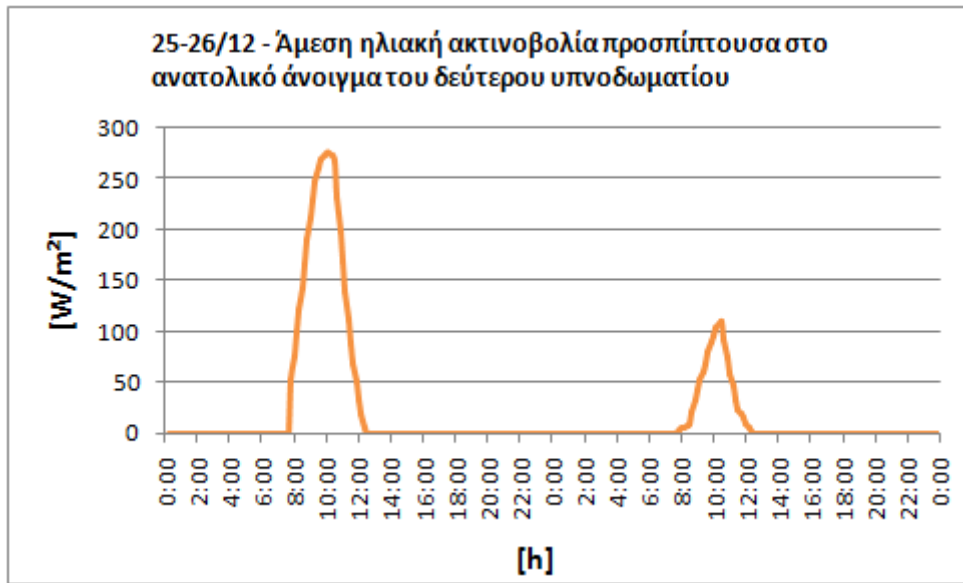
- Οι διαφορές στους ρυθμούς ψύξης μεταξύ των δύο περιπτώσεων εγκατάστασης υαλοπινάκων είναι πολύ μεγάλες. Αυτό αποτελεί ένδειξη ότι συμβαίνει θερμοχρωμική μετάβαση σε αυτές τις θερινές ημέρες, αφού οι διαφορές στα ψυκτικά φορτία για τις δύο περιπτώσεις εγκατάστασης είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες στα θερμικά.
- Αυτές οι διαφορές παρατηρούνται κυρίως στις χρονικές περιόδους που οι υαλοπίνακες των δωματίων υπόκεινται σε ηλιασμό – δηλαδή νωρίς το μεσημέρι στο δεύτερο υπνοδωμάτιο και το απόγευμα στο σαλόνι.
- Στο σαλόνι η διαφορά στο ψυκτικό φορτίο μεταξύ των δύο περιπτώσεων εγκατάστασης υαλοπινάκων είναι μεγαλύτερη από ότι στο δεύτερο υπνοδωμάτιο – αυτό οφείλεται στη μεγαλύτερη επιφάνεια υαλοπινάκων σε αυτό.
- Στην κύρια είσοδο που δεν έχει υαλοπίνακες, δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο περιπτώσεων εγκατάστασης υαλοπινάκων.
- Οι απότομες μεταβολές που παρατηρούνται στις 10:00 και 23:00 οφείλονται στην αλλαγή της ρύθμισης του θερμοστάτη (night setback).
- Οι ρυθμοί ψύξης κατά τη δεύτερη ημέρα είναι γενικά υψηλότεροι.

Γενικά φαίνεται το πλεονέκτημα που προσφέρουν οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες σε αυτή την κατοικία, δηλαδή η σημαντική μείωση των ψυκτικών φορτίων, χωρίς όμως να αυξάνονται σημαντικά τα θερμικά φορτία. Το αποτέλεσμα αυτό μάλιστα επιτρέπει γενικά την τοποθέτηση συστημάτων HVAC μικρότερης ονομαστικής ισχύος για ψύξη, χωρίς πρακτικά να αυξάνεται η ονομαστική ισχύς αυτών για θέρμανση. Αυτό επιβεβαιώνεται και από το μέγιστο ηλεκτρικό φορτίο για ψύξη και το μέγιστο φορτίο θερμικής ενέργειας φυσικού αερίου για θέρμανση, με αναφορά συνολικά στην κατοικία. Για εγκατάσταση του TC 32-37, το πρώτο παρατηρείται στις 08-AUG-09:50 και ισούται με 2224,72 W (με μέγιστο φορτίο ψύξης ίσο με 9861,85 W στις 10:40), ενώ το δεύτερο στις 25-DEC-17:00 και ισούται με 7026,25 W. Για εγκατάσταση του Clear, το πρώτο παρατηρείται στις 07-AUG-09:00 και ισούται με 2723,12 W (με μέγιστο φορτίο ψύξης ίσο με 12170,68 W στις 08-AUG-10:50), ενώ το δεύτερο στις 25-DEC-17:00 και ισούται με 6869,77 W. Το ίδιο μοτίβο παρουσιάζεται και για τις μέγιστες μηνιαίες τιμές και δεν κρίνεται ως αναγκαία η παρουσίαση αυτή.

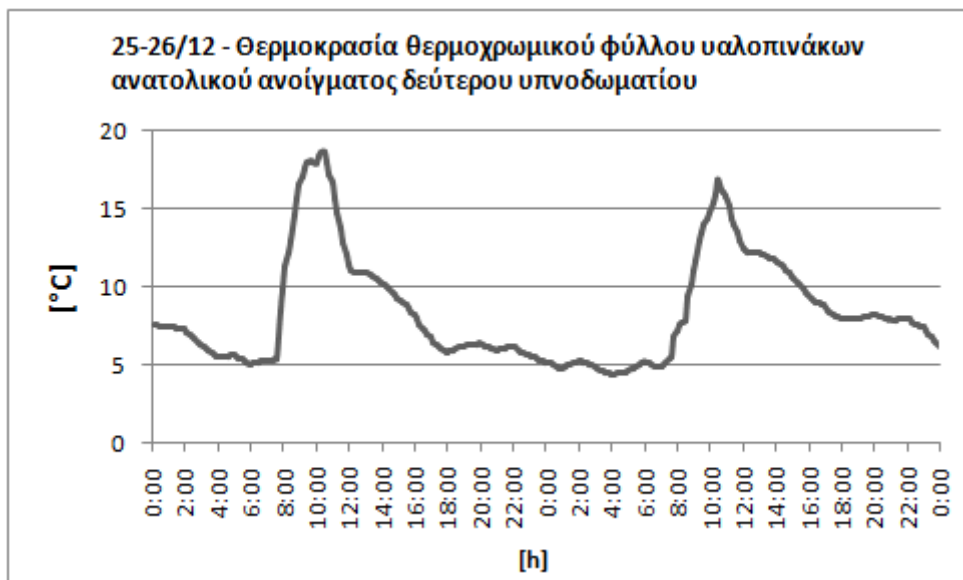
#### **7.4 Αποτελέσματα διερεύνησης της συμπεριφοράς των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων της κατοικίας**

Στο τελευταίο αυτό μέρος του κεφαλαίου επιχειρείται η διερεύνηση της συμπεριφοράς των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στα ανοίγματα του δεύτερου υπνοδωματίου και του σαλονιού (που είναι οι χώροι με υαλοπίνακες, στους οποίους αναλύονται παραπάνω τα φορτία), μέσω παρουσίασης των θερμοκρασιών των θερμοχρωμικών φύλλων τους στις χρονικές περιόδους 25-26/12 και 6-7/8 που αναφέρονται παραπάνω. Για τον σκοπό αυτό, οι σχετικές μεταβλητές που χρησιμοποιούνται δίνονται σε χρονικό βήμα αναφοράς ίσο με 10 min, δηλαδή ίσο με το χρονικό βήμα υπολογισμών για τις θερμικές ζώνες. Αυτή η προσέγγιση κρίθηκε ως καταλληλότερη, εξαιτίας της δυναμικής και έντονα μεταβαλλόμενης συμπεριφοράς των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων.

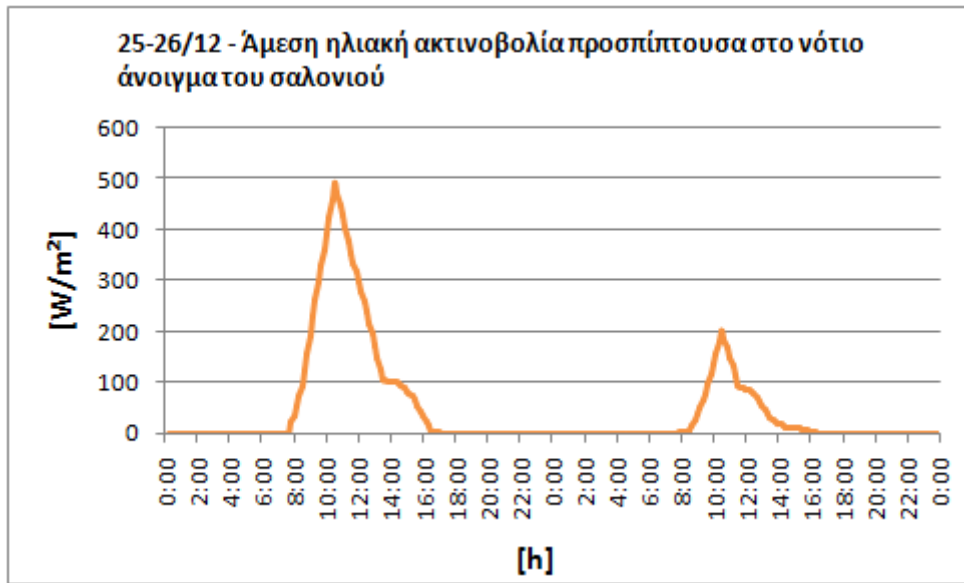
Παρακάτω λοιπόν παρουσιάζονται για τους υαλοπίνακες στα ανοίγματα του δεύτερου υπνοδωματίου και του σαλονιού, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στα ανοίγματα και η θερμοκρασία του θερμοχρωμικού φύλλου TC 32-37 των υαλοπινάκων των ανοιγμάτων, για τα διήμερα 25-26/12 και 6-7/8. Ο σχετικός σχολιασμός γίνεται συνολικά στο τέλος.



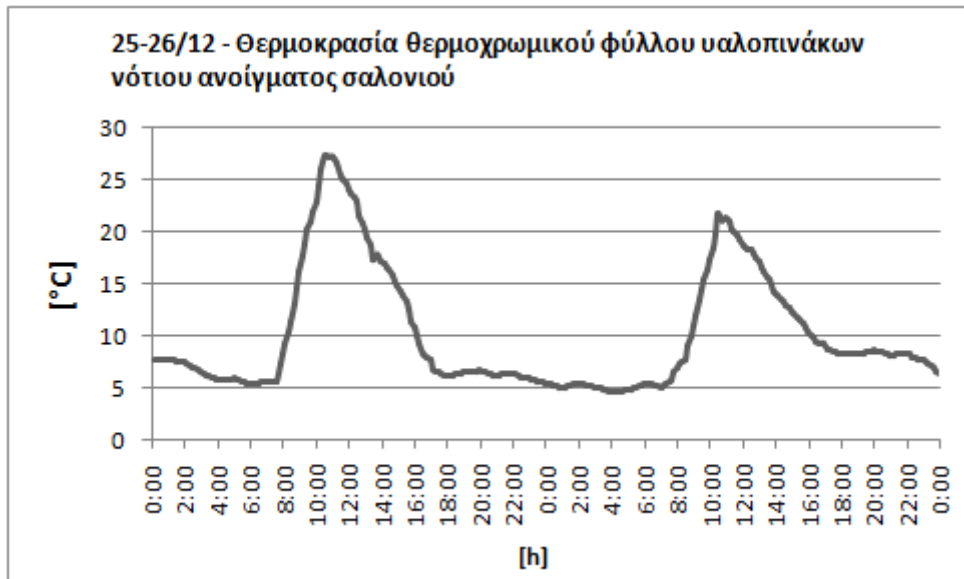
Σχήμα 7.40: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στο ανατολικό άνοιγμα του δεύτερου υπνοδωματίου, κατά την περίοδο 25-26/12.



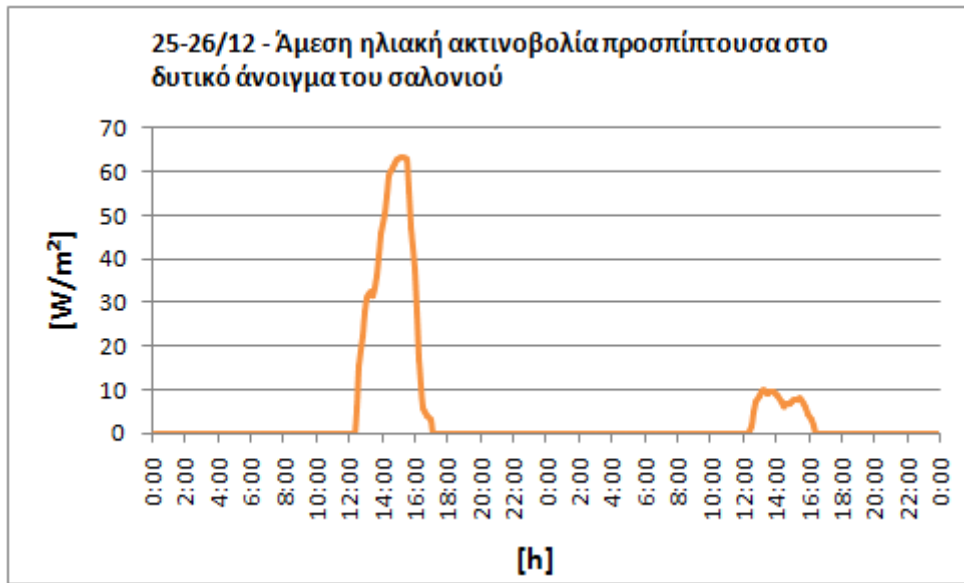
Σχήμα 7.41: Θερμοκρασία θερμοχρωμικού φύλλου υαλοπινάκων ανατολικού ανοίγματος δεύτερου υπνοδωματίου, κατά την περίοδο 25-26/12.



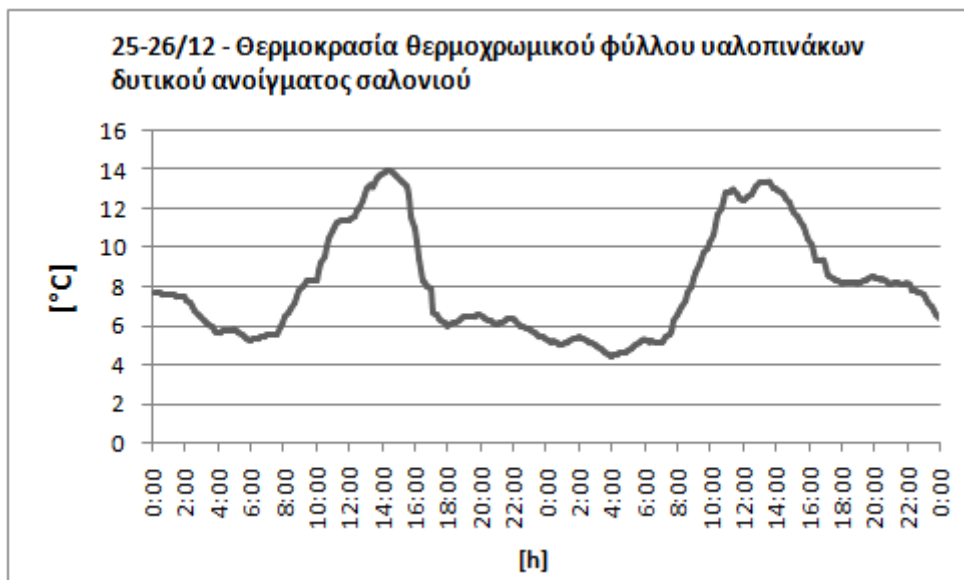
Σχήμα 7.42: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στο νότιο άνοιγμα του σαλονιού, κατά την περίοδο 25-26/12.



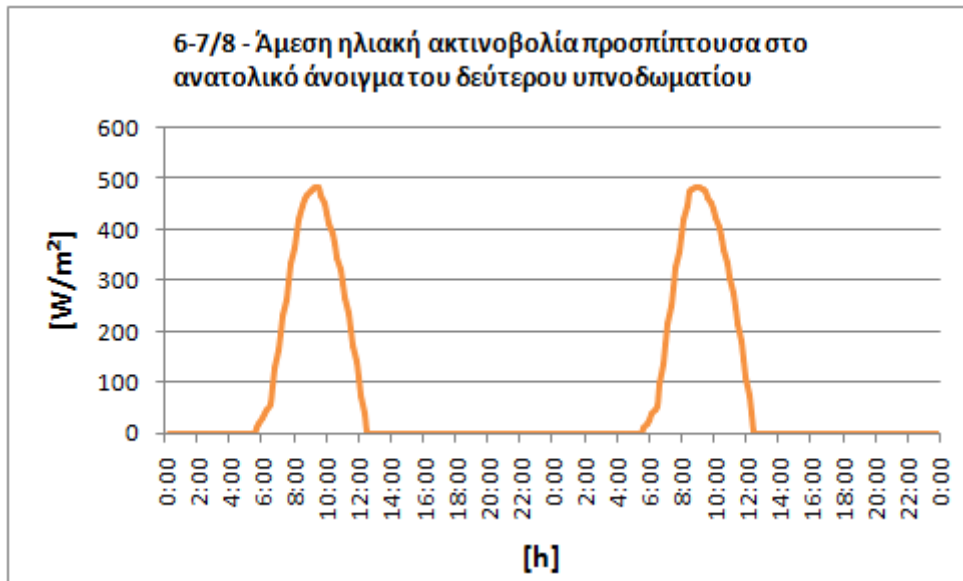
Σχήμα 7.43: Θερμοκρασία θερμοχρωμικού φύλλου υαλοπινάκων νότιου ανοίγματος σαλονιού, κατά την περίοδο 25-26/12.



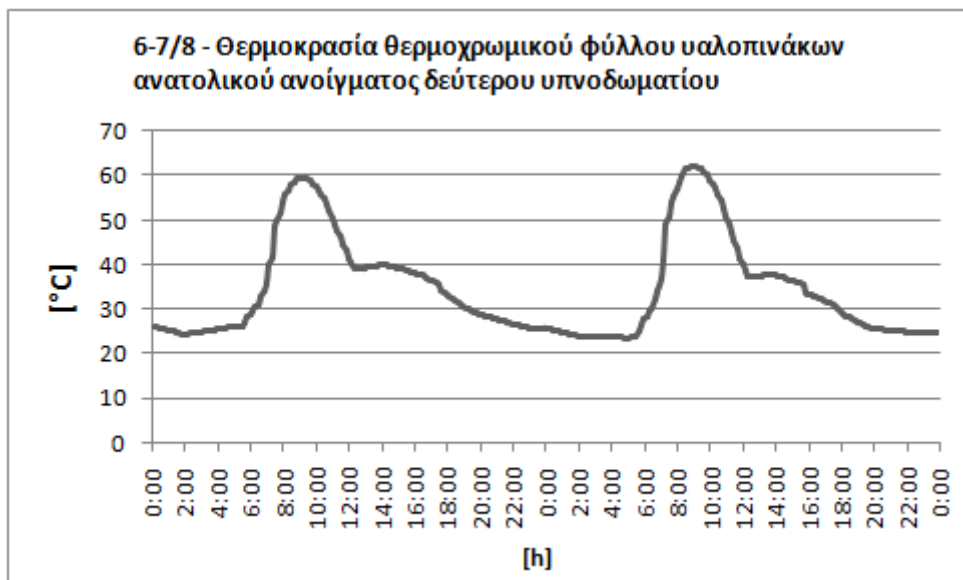
Σχήμα 7.44: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στο δυτικό άνοιγμα του σαλονιού, κατά την περίοδο 25-26/12.



Σχήμα 7.45: Θερμοκρασία θερμοχρωμικού φύλλου υαλοπινάκων δυτικού ανοίγματος σαλονιού, κατά την περίοδο 25-26/12.

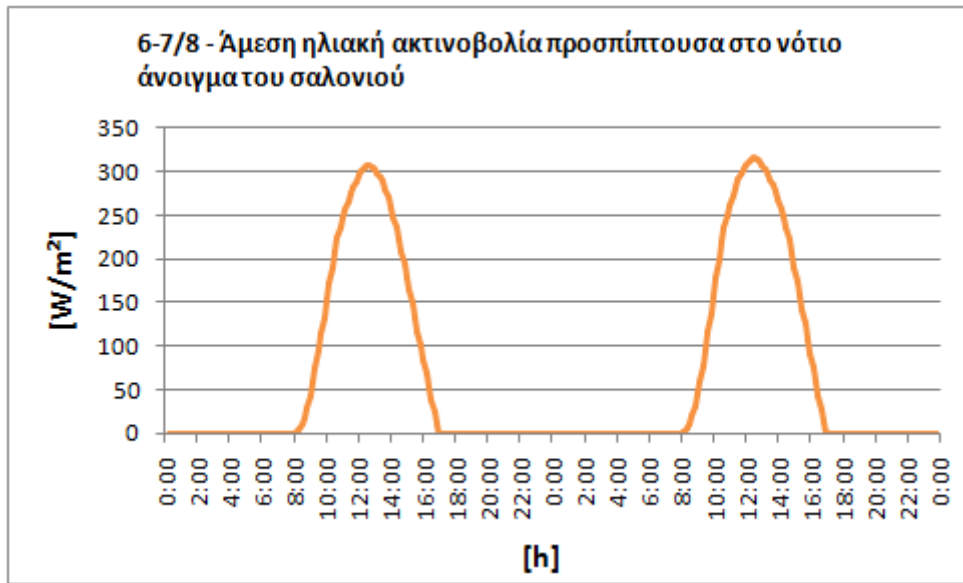


Σχήμα 7.46: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στο ανατολικό άνοιγμα του δεύτερου υπνοδωματίου, κατά την περίοδο 6-7/8.

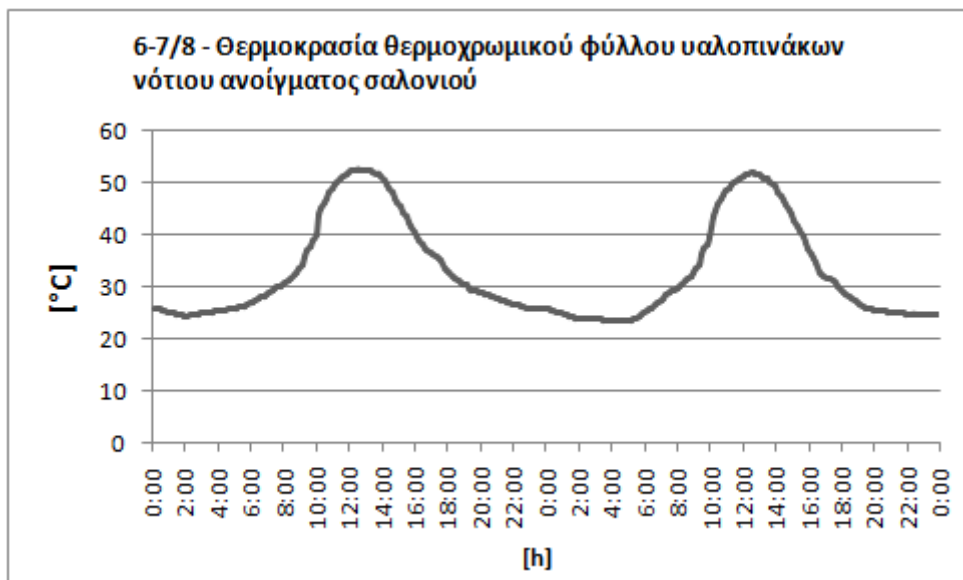


Σχήμα 7.47: Θερμοκρασία θερμοχρωμικού φύλλου υαλοπινάκων ανατολικού ανοίγματος δεύτερου υπνοδωματίου, κατά την περίοδο 6-7/8.

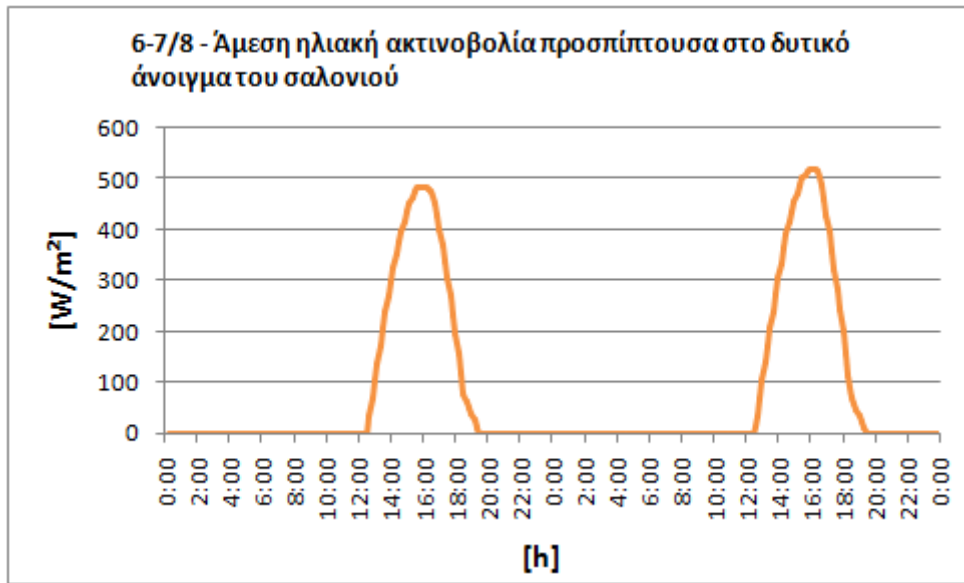




Σχήμα 7.48: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στο νότιο άνοιγμα του σαλονιού, κατά την περίοδο 6-7/8.



Σχήμα 7.49: Θερμοκρασία θερμοχρωμικού φύλλου υαλοπινάκων νότιου ανοίγματος σαλονιού, κατά την περίοδο 6-7/8.



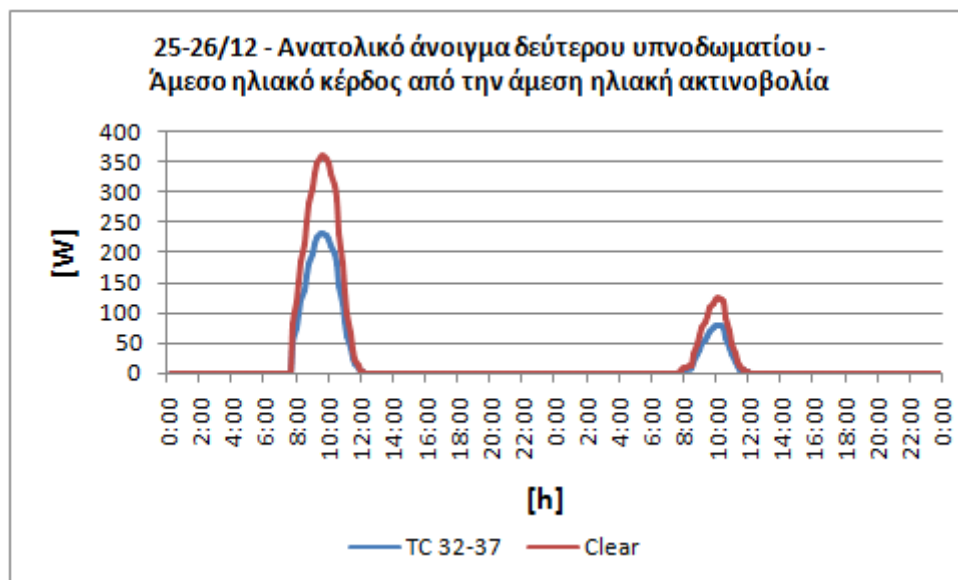
Σχήμα 7.50: Άμεση ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτουσα στο δυτικό άνοιγμα του σαλονιού, κατά την περίοδο 6-7/8.



Σχήμα 7.51: Θερμοκρασία θερμοχρωμικού φύλλου υαλοπινάκων δυτικού ανοίγματος σαλονιού, κατά την περίοδο 6-7/8.

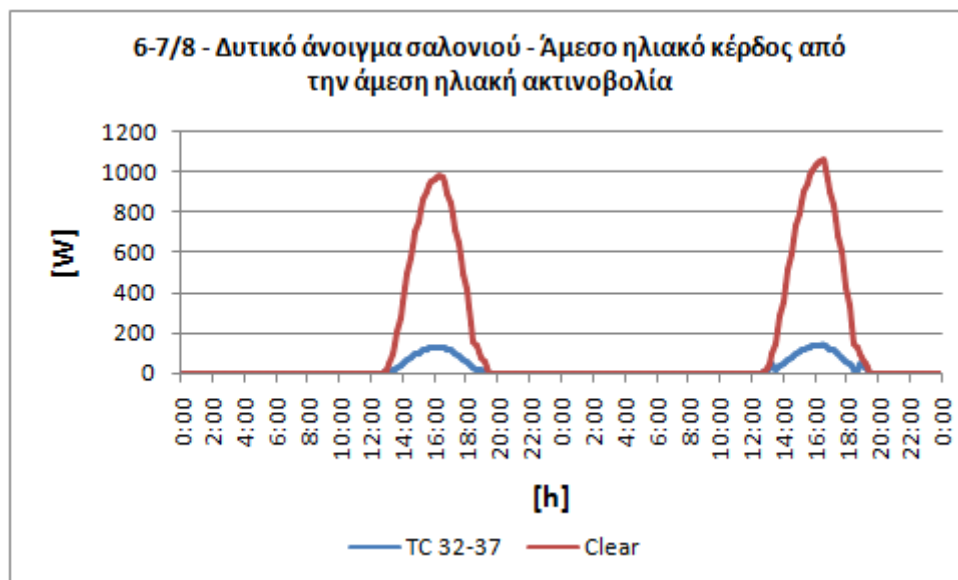
Καταρχήν, είναι φανερό ότι η θερμοκρασία των θερμοχρωμικών φύλλων των διάφορων ανοιγμάτων, για τις χειμερινές ημέρες που εξετάστηκαν, δεν παίρνει τιμές στις οποίες πραγματοποιείται η μετάβαση – κάτι που είναι θετικό. Συγκεκριμένα, για τους υαλοπίνακες (θερμοχρωμικά φύλλα) στο ανατολικό άνοιγμα του δεύτερου υπνοδωματίου και στο δυτικό άνοιγμα του σαλονιού η μέγιστη θερμοκρασία που παρατηρείται είναι περίπου 18 και 14 °C αντίστοιχα. Αντιθέτως, στους υαλοπίνακες του νότιου ανοίγματος του σαλονιού, λόγω των σημαντικά μεγαλύτερων ποσών προσπίπτουσας άμεσης ακτινοβολίας που δέχονται (αφού πρόκειται για χειμερινή περίοδο), η θερμοκρασία αγγίζει περίπου τους 27 °C. Μάλιστα, όπως φαίνεται από παρατήρηση των σχημάτων 7.31 και 7.42, η άμεσα προσπίπτουσα ακτινοβολία (στο οριζόντιο επίπεδο και στα νότια ανοίγματα της κατοικίας) στις 25/12 είναι αρκετά μεγάλη. Αντιθέτως, τις ημέρες του καλοκαιριού που εξετάστηκαν, τα φύλλα βρίσκονται σε θερμοκρασίες πολύ μεγαλύτερες από το άνω όριο της θερμοκρασίας μετάβασης, όταν προσπίπτει πάνω τους άμεση ηλιακή ακτινοβολία – κάτι που είναι θετικό. Επίσης φαίνεται ότι το νότιο άνοιγμα δέχεται μικρότερα ποσά ακτινοβολίας τις ημέρες αυτές, κάτι που ήταν αναμενόμενο. Γενικά παρουσιάζεται για τους υαλοπίνακες κάθε ανοίγματος (που έχουν διαφορετικό προσανατολισμό), όπως ήταν αναμενόμενο, χρονική σύμπτωση της προσπίπτουσας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας και της αύξησης της θερμοκρασίας τους.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ενδεικτικά η ισχύς της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (άμεσο ηλιακό κέρδος από την άμεση ακτινοβολία) που διαπερνά τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες TC 32-37 του ανατολικού ανοίγματος του δεύτερου υπνοδωματίου στις 25-26/12 και το ίδιο ποσό για εγκατάσταση του διαυγούς υαλοπίνακα:



Σχήμα 7.52: Άμεσο ηλιακό κέρδος άμεσης ακτινοβολίας, στο ανατολικό άνοιγμα του δεύτερου υπνοδωματίου, κατά την περίοδο 25-26/12 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.

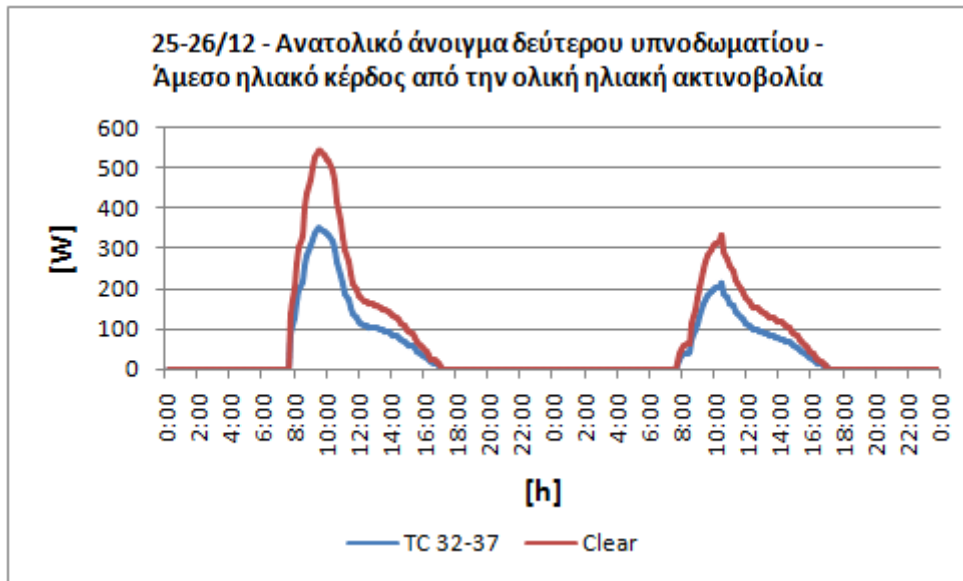
Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται ενδεικτικά η ισχύς της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας (άμεσο ηλιακό κέρδος από την άμεση ακτινοβολία) που διαπερνά τους θερμοχρωμικούς υαλοπίνακες TC 32-37 του δυτικού ανοίγματος του σαλονιού στις 6-7/8 και το ίδιο ποσό για εγκατάσταση του διαυγούς υαλοπίνακα:



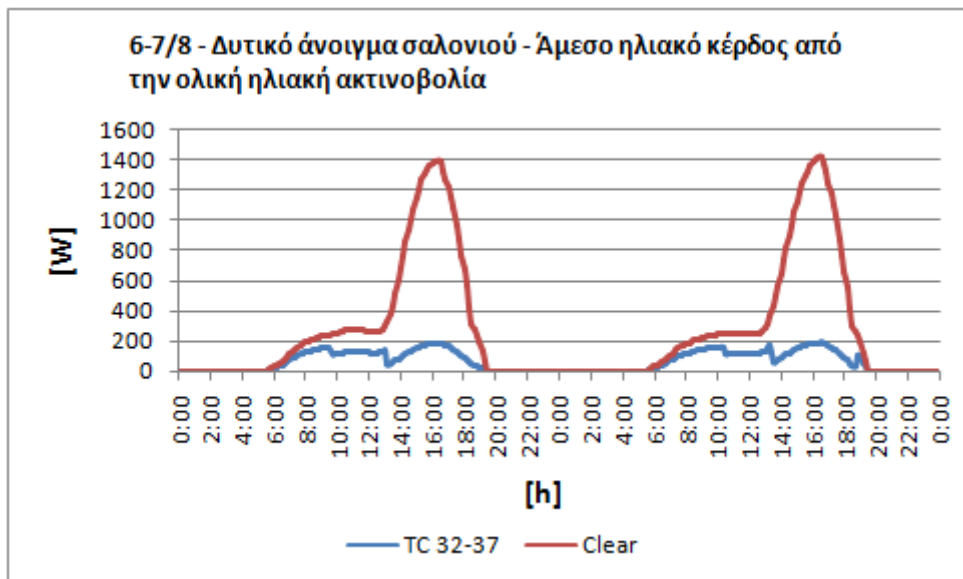
Σχήμα 7.53: Άμεσο ηλιακό κέρδος άμεσης ακτινοβολίας, στο δυτικό άνοιγμα του σαλονιού, κατά την περίοδο 6-7/8 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.

Μετά από παρατήρηση των τελευταίων δύο σχημάτων είναι πλέον άμεσα κατανοητό το πλεονέκτημα που προσφέρει η θερμοχρωμική μετάβαση. Για τις 25/12 η παρατηρούμενη διαφορά στο μέγιστο ηλιακό κέρδος από την άμεση ηλιακή ακτινοβολία είναι μόνο περίπου 125 W, ενώ για την 7/8 είναι περίπου 900 W.

Στα ακόλουθα δύο διαγράμματα φαίνονται και τα αντίστοιχα κέρδη από την ολική ηλιακή ακτινοβολία, στα αντίστοιχα ανοίγματα και στις αντίστοιχες χρονικές περιόδους:



Σχήμα 7.54: Άμεσο ηλιακό κέρδος ολικής ακτινοβολίας, στο ανατολικό άνοιγμα του δεύτερου υπνοδωματίου, κατά την περίοδο 25-26/12 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.



Σχήμα 7.55: Άμεσο ηλιακό κέρδος ολικής ακτινοβολίας, στο δυτικό άνοιγμα του σαλονιού, κατά την περίοδο 6-7/8 και για δύο περιπτώσεις εγκατάστασης υαλοπινάκων στην κατοικία.

Φαίνεται ότι το κέρδος αυτό έχει μεγαλύτερη χρονική διάρκεια, κάτι που είναι αναμενόμενο αφού διαρκεί από την ανατολή έως τη δύση του ηλίου. Επίσης μπορεί να διακριθεί σε κάθε διάγραμμα η περιοχή που αφορά το κέρδος αποκλειστικά από διάχυτη ακτινοβολία. Στο διάγραμμα του σχήματος 7.55 φαίνεται ότι σε αυτή την

περιοχή οι διαφορές μεταξύ των υαλοπινάκων είναι σημαντικά μικρότερες, κάτι που είναι λογικό, αφού η διάχυτη ακτινοβολία δεν μπορεί να θερμάνει αρκετά το θερμοχρωμικό φύλλο, οπότε αυτό παραμένει στην κατάσταση μέγιστης διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό μάλιστα προσφέρει και το επιπλέον πλεονέκτημα ότι δεν περιορίζεται η θέα όταν δεν προσπίπτει άμεση ηλιακή ακτινοβολία.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι στις 25/12 η θερμοκρασία ξηρού βολβού του εξωτερικού αέρα είναι αρκετά χαμηλή, οπότε η θερμοκρασία των θερμοχρωμικών φύλλων των υαλοπινάκων στο νότιο άνοιγμα του σαλονιού αγγίζει τη θερμοκρασία των 27°C πρακτικά μόνο λόγω της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στη διατύπωση της υπόθεσης ότι για τη συγκεκριμένη κατοικία και στο κλίμα της Αθήνας είναι πιθανό η τοποθέτηση του TC 32-37 στα νότια ανοίγματα να μην είναι τόσο ωφέλιμη, αφού είναι πιθανό να συμβαίνει σε αυτόν θερμοχρωμική μετάβαση κατά τη διάρκεια άλλων ημερών που λειτουργεί το σύστημα θέρμανσης. Μετά από έλεγχο στα σχετικά αρχεία με τα αποτελέσματα διαπιστώθηκε ότι αυτό όντως συμβαίνει. Βρέθηκε ότι για τους υαλοπίνακες στο νότιο άνοιγμα (για παράδειγμα) του σαλονιού το θερμοχρωμικό φύλλο μπορούσε να μεταβαίνει στην κατάσταση ελάχιστης διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία, για θερμοκρασίες ξηρού βολβού του εξωτερικού αέρα χαμηλές έως και περίπου 11 °C, όταν σε αυτό προσπίπτουν σημαντικά ποσά άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας. Το ίδιο βέβαια συμβαίνει και σε θερμές περιόδους όπου απαιτείται ψύξη (οπότε τότε είναι θετικό), τότε όμως κυρίως λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών ξηρού βολβού του εξωτερικού αέρα (αφού η προσπίπτουσα ακτινοβολία στα νότια ανοίγματα είναι το καλοκαίρι μικρότερη). Οπότε εκτελέστηκε δοκιμαστική επιπρόσθετη προσομοίωση, στην οποία ο θερμοχρωμικός υαλοπίνακας TC 32-37 τοποθετήθηκε μόνο στα δυτικά και ανατολικά ανοίγματα της κατοικίας, ενώ στα υπόλοιπα τοποθετήθηκαν διαυγείς υαλοπίνακες. Βρέθηκε ότι με αυτή τη διάταξη των υαλοπινάκων στα ανοίγματα η συνολική τελική ενεργειακή κατανάλωση της κατοικίας είναι ίση με 17575 kWh, οπότε πράγματι η λύση αυτή είναι καλύτερη. Μία πρακτική με ακόμη καλύτερα αποτελέσματα από την τελευταία, θα ήταν η τοποθέτηση οριζόντιων σκιάστρων στα νότια ανοίγματα, ώστε να αποτρέπουν πλήρως την είσοδο της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη θερινή περίοδο.

Με βάση το σκεπτικό ότι πιθανώς στα νότια ανοίγματα να είναι βέλτιστη η τοποθέτηση θερμοχρωμικών υαλοπινάκων με υψηλότερες θερμοκρασίες μετάβασης, εκτελέστηκαν άλλες πέντε δοκιμαστικές επιπρόσθετες προσομοιώσεις, με τοποθέτηση στα νότια ανοίγματα του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα TC 35-40, TC 37-42, TC 40-45, TC 42-47 και TC 45-50. Προέκυψε συνολική τελική ενεργειακή κατανάλωση ίση με 17694,4, 17772,2, 17655,6, 17655,6 και 17675 kWh αντίστοιχα. Η καλύτερη λύση συγκριτικά είναι δηλαδή η τοποθέτηση διαυγούς υαλοπίνακα. Είναι προφανές ότι εάν επιζητείται η βελτιστοποίηση, ακόμη και από την πλευρά των διαθέσιμων υαλοπινάκων, το πρόβλημα είναι πολυσύνθετο.

## 8 Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται σύντομη ανασκόπηση της εργασίας με ταυτόχρονη παρουσίαση των τελικών συμπερασμάτων και γίνονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, προς επέκταση και βελτίωση της παρούσας.

### 8.1 Συμπεράσματα

Το θέμα διερεύνησης αυτής της εργασίας ήταν η επίδραση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση κτιρίων. Καθώς οι υαλοπίνακες γενικά αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα των κτιρίων στη σημερινή εποχή και η χρήση τους στις κατασκευές αναμένεται να ενταθεί προς το μέλλον, η μελέτη καινοτόμων λύσεων που μπορούν να προσφερθούν για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων είναι ζωτικής σημασίας. Μία τέτοια λύση είναι οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες που, αν και δεν είναι ευρέως διαδεδομένοι προς το παρόν, παρουσιάζουν ιδιαίτερη συμπεριφορά και για το λόγο αυτό γίνονται ολοένα και περισσότερο αντικείμενο έρευνας και εφαρμογής.

Για τη διερεύνηση των δυνατοτήτων που μπορούν δυνητικά να προσφέρουν, καθώς και επειδή οι υαλοπίνακες γενικά είναι στοιχεία του κτιριακού κελύφους με ιδιαίτερες και σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες, είναι αρχικά απαραίτητη η θεωρητική θεμελίωση του θέματος. Αυτό έγινε στα πρώτα τέσσερα κεφάλαια της εργασίας. Συγκεκριμένα, σε αυτά γίνεται αρχικά εισαγωγή στο θέμα διαπραγμάτευσης της εργασίας και παρουσιάζονται έννοιες ουσιώδους σημασίας, που βοηθούν τον αναγνώστη να κατανοήσει τη σημασία της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων και του μεριδίου που κατέχουν οι υαλοπίνακες σε αυτήν. Η παράλληλη παρουσίαση θεωρητικών στοιχείων από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία καθορίζει κατά κύριο λόγο τον ρόλο των υαλοπινάκων στην ενεργειακή απόδοση ενός κτιρίου, αλλά και η αναφορά σε άλλα χρήσιμα μεγέθη, αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία αναλύεται παρακάτω το ζήτημα προς διαπραγμάτευση. Επειδή όπως οι υαλοπίνακες παρουσιάζουν ποικίλες ιδιότητες και οι λύσεις που προσφέρονται είναι πλέον πολλές, έπρεπε πρώτα να γίνει ανάλυση των ιδιοτήτων των υαλοπινάκων και παρουσίαση των κυριότερων ειδών υαλοπινάκων που υπάρχουν, καθώς η σύγκριση έχει αξία μόνο εάν γίνεται σχετικά με υπάρχουσες λύσεις. Ακολούθως, στο κεφάλαιο 4 έγινε παρουσίαση των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων και διάφορων στοιχείων που τους αφορούν και έγιναν φανερά τα στοιχεία που υποδεικνύουν το πλεονέκτημα που μπορούν να προσφέρουν στο δρόμο προς τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων και την εξοικονόμηση ενέργειας. Φάνηκε ότι το ανταγωνιστικό αυτό πλεονέκτημα είναι υπαρκτό και άμεσα επιτεύξιμο, αν και βέβαια υπάρχουν περιθώρια περαιτέρω βελτίωσης των ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων.

Επειδή όπως κάθε τέτοια έρευνα οφείλει να στηρίζεται και σε αριθμητικά δεδομένα υπολογισμών, τα οποία μπορούν δυνητικά να επικυρώσουν τις προηγούμενες διαπιστώσεις, στα υπόλοιπα κεφάλαια της εργασίας καλύπτεται αυτή η ανάγκη. Ένα κατάλληλο υπολογιστικό εργαλείο για το σκοπό αυτό είναι το λογισμικό προσομοίωσης EnergyPlus. Έγινε παρουσίαση του λογισμικού και του τρόπου με

τον οποίο αυτό διαχειρίζεται την δυναμική συμπεριφορά των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων. Πολύ σημαντική και χρήσιμη ήταν και η παράθεση αποτελεσμάτων από έρευνες επιστημόνων που έχουν γίνει με το λογισμικό αυτό (και με άλλα) για τη διερεύνηση της εξοικονόμησης ενέργειας που μπορεί να προσφέρει η τοποθέτηση τέτοιων υαλοπινάκων σε κτίρια. Οπότε παρουσιάζε ενδιαφέρον η διαπίστωση του αν τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα ήταν προς την ίδια κατεύθυνση με αυτές. Παρακάτω έγινε αναλυτική επεξήγηση της διαδικασίας για τις προσομοιώσεις που έγιναν για τη μελέτη περίπτωσης της εργασίας και παρουσιάστηκαν διάφορα χρήσιμα αποτελέσματα. Προέκυψε ότι αυτά εν γένει συμφωνούν με τις διαπιστώσεις από την ανάλυση των ιδιοτήτων των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων, καθώς και με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών. Αξίζει να τονιστεί και εδώ ότι η μελέτη περίπτωσης της παρούσας εργασίας αφορούσε κτίριο κατοικίας στην περιοχή της Αθήνας – και έχει γενικά διαπιστωθεί ότι η αποδοτικότητα ενός συγκεκριμένου θερμοχρωμικού υαλοπίνακα και η δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας είναι συνάρτηση του κλίματος στην περιοχή εγκατάστασης.

Σχετικά με το σημείο αυτό, ενδιαφέρον παρουσιάζει το ότι για το συγκεκριμένο κτίριο που μελετήθηκε, στη συγκεκριμένη περιοχή και με τον θερμοχρωμικό υαλοπίνακα των συγκεκριμένων ιδιοτήτων και εύρους θερμοκρασιών μετάβασης, βρέθηκε ότι η περιοχή θερμοκρασιών θερμοχρωμικής μετάβασης που επιφέρει τη μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας είναι 32-37 °C. Αυτό έρχεται κατά κάποιον τρόπο σε αντίθεση με τα αποτελέσματα κάποιων άλλων σχετικών ερευνών, στις οποίες είχαν γενικά βρεθεί λίγο χαμηλότερες βέλτιστες τιμές (π.χ. 20-25 °C) και μάλιστα ανεξαρτήτως του κλίματος.

Επίσης, η εξοικονόμηση ενέργειας (και η ποσοστιαία εξοικονόμηση) για τη συγκεκριμένη κατοικία που μελετήθηκε δεν βρέθηκε να είναι πάρα πολύ μεγάλη, αλλά αυτό είναι κατανοητό ότι οφείλεται στο ότι επιλέχθηκε η μελέτη κτιρίου με όχι πολύ μεγάλη επιφάνεια υαλοπινάκων. Οπότε η σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων ερευνών που αναφέρθηκαν δεν έχει τόσο ουσιαστική σημασία. Ένα συμπέρασμα πάντως που μπορεί εύκολα να εξαχθεί είναι ότι ο συνδυασμός χαμηλού συντελεστή θερμοπερατότητας και θερμοχρωμικής επίστρωσης σε έναν υαλοπίνακα μπορεί να επιφέρει σαφή εξοικονόμηση ενέργειας και σε κτίρια κατοικιών με συνήθη επιφάνεια υαλοπινάκων.

Ένα ακόμη σημείο με ιδιαίτερο ενδιαφέρον, σχετικά με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της εργασίας, είναι το ότι βρέθηκε ότι, για το συγκεκριμένο κτίριο και στο συγκεκριμένο κλίμα, η τοποθέτηση του θερμοχρωμικού υαλοπίνακα με τις συγκεκριμένες ιδιότητες στα νότια ανοίγματα επέφερε αρνητικό αποτέλεσμα. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη αρκετών ημερών με πρόσπτωση σημαντικών ποσοτήτων ηλιακής ακτινοβολίας στα νότια ανοίγματα κατά τις περιόδους όπου απαιτείται θέρμανση.

Σαν ένα γενικότερο συμπέρασμα, με την εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας διαπιστώθηκε ότι οι θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες είναι ένα αντικείμενο που αξίζει περαιτέρω ανάπτυξης της έρευνας από την επιστημονική κοινότητα. Αυτό γιατί είναι φανερό οι δυνατότητες εξοικονόμησης ενέργειας που προσφέρουν, όπου βέβαια αυτές εξαρτώνται σημαντικά από το κτίριο εγκατάστασής τους, αλλά κυρίως από το κλίμα της τοποθεσίας στην οποία βρίσκεται αυτό. Εάν μάλιστα η τεχνολογία



μπορέσει να οδηγήσει στην κατασκευή επιστρώσεων με ακόμα μεγαλύτερη ικανότητα ρύθμισης της διαπερατότητας στην ηλιακή ακτινοβολία (μεγαλύτερο εύρος αυτής), η επιτυγχανόμενη εξοικονόμηση ενέργειας θα οδηγήσει πιθανότατα σε τεχνολογική επανάσταση στον τομέα αυτόν των κατασκευών αλλά και γενικότερα, λόγω του μεγάλου μεριδίου στην παγκόσμια συνολική κατανάλωση ενέργειας που κατέχουν τα κτίρια.

## 8.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Στη βάση της συγκεκριμένης μελέτης που έγινε στην παρούσα εργασία, μπορεί να γίνει επιπρόσθετη έρευνα, με σκοπό την επέκτασή της και την εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων. Κάποια περαιτέρω μελλοντική εργασία, που θα μπορούσε να γίνει, φαίνεται παρακάτω:

- Προσθήκη περισσότερων ενδιάμεσων θερμοκρασιών προδιαγραφής, με σκοπό την ακριβέστερη μοντελοποίηση του συνεχούς θερμοχρωμισμού.
- Διερεύνηση της επίδρασης στην ενεργειακή απόδοση της κατοικίας θερμοχρωμικών υαλοπινάκων με διαφορετικά εύρη θερμοκρασιών θερμοχρωμικής μετάβασης, αντί των 5 °C που μελετήθηκαν εδώ.
- Μελέτη της επίδρασης που έχουν θερμοχρωμικοί υαλοπίνακες με διαφορετικές ιδιότητες (π.χ. διαφορετική ρύθμιση της διαπερατότητας κατά τη μετάβαση – με μικρότερο ή μεγαλύτερο εύρος).
- Διερεύνηση του αποτελέσματος εξοικονόμησης ενέργειας συγκριτικά με ακόμη περισσότερα είδη υαλοπινάκων.
- Περισσότερο αναλυτική διερεύνηση της επίδρασης του προσανατολισμού ενός θερμοχρωμικού υαλοπίνακα στην εξοικονόμηση ενέργειας.
- Μοντελοποίηση της ύπαρξης πλάτους στον βρόχο υστέρησης της μετάβασης.
- Παραμετρική ανάλυση με προσομοίωση σε περιοχές με διαφορετικά κλίματα.
- Παραμετρική ανάλυση με προσομοίωση για διάφορους λόγους WWR.
- Παραμετρική ανάλυση με προσομοίωση για διάφορους προσανατολισμούς της κατοικίας.
- Μελέτη του φυσικού φωτισμού στο εσωτερικό της κατοικίας, με την οποία μπορεί να λαμβάνεται υπόψιν και η πιθανή επίδραση της θερμοχρωμικής μετάβασης στην μεταβολή της κατανάλωσης ενέργειας για τεχνητό εσωτερικό φωτισμό.
- Οικονομική μελέτη-αξιολόγηση, με ταυτόχρονη θεώρηση του αρχικού κόστους αγοράς των θερμοχρωμικών υαλοπινάκων και υπολογισμό της περιόδου αποπληρωμής.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

[1] Αντωνόπουλος Κίμων Α., 2011, Κλιματισμός Μέρος Πρώτο, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

[2] Αντωνόπουλος Κίμων Α., 2011, Θερμικά – Ηλιακά Συστήματα Μέρος Πρώτο, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

[3] Εκπαιδευτικό υλικό κατάρτισης ενεργειακών επιθεωρητών, Α. Επιθεώρηση κτιρίων, Θεματική ενότητα ΔΕ1: Εισαγωγή στον τομέα της ενέργειας, Α έκδοση, Τ.Ε.Ε. 2011. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο:

<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tpree/dq2013/ktirio/DE1-Eisagogi%20stin%20energeia-final.pdf>

[4] Εκπαιδευτικό υλικό κατάρτισης ενεργειακών επιθεωρητών, Α. Επιθεώρηση κτιρίων, Θεματική ενότητα ΔΕ3: Κλίμα και εσωτερικό περιβάλλον. Βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων, Α έκδοση, Τ.Ε.Ε. 2011. Διαθέσιμο στον δικτυακό τόπο:

<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tpree/dq2013/ktirio/DE3-Bioklimatika-final.pdf>

[5] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-1/2010. Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτηρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης. Γ έκδοση. Αθήνα, Νοέμβριος 2014. Διαθέσιμη στον δικτυακό τόπο:

<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tpree/totree/TOTEE-20701-1-Final-%D4%C5%C5-3rd%20edition.pdf>

[6] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-2/2010. Θερμοφυσικές ιδιότητες δομικών υλικών και έλεγχος της θερμομονωτικής επάρκειας των κτηρίων. Β έκδοση. Αθήνα, Νοέμβριος 2014. Διαθέσιμη στον δικτυακό τόπο:

<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tpree/totree/TOTEE-20701-2-Final-%D4%C5%C5-2-%202nd%20edition.pdf>

[7] Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-3/2010. Κλιματικά δεδομένα ελληνικών περιοχών. Γ έκδοση. Αθήνα, Νοέμβριος 2014. Διαθέσιμη στον δικτυακό τόπο:

<http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tpree/totree/TOTEE-20701-3-Final-TEE%203rd%20Edition.pdf>

[8] Κανονισμός Ενεργειακής Απόδοσης Κτιρίων (Κ.Εν.Α.Κ.). Διαθέσιμος στον δικτυακό τόπο:

<http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=aiS4GyKxx04%3d&tabid=525&language=el-GR>

[9] [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC\\_WORK/GR\\_ENERGEIAS/kenak](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/kenak)

[10] [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/SEMINARIA/PALAIOTERA\\_SEMINARIA/H\\_KYKLOS\\_S\\_M\\_D\\_IAN\\_FEB\\_09/ENERGEIAKOS\\_SXEDIASMOΣ\\_NEWN\\_KAI\\_YFISTAMENWN\\_KTHRIWN/thermogefyres.pdf](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/teetkm/DRASTHRIOTHTES/SEMINARIA/PALAIOTERA_SEMINARIA/H_KYKLOS_S_M_D_IAN_FEB_09/ENERGEIAKOS_SXEDIASMOΣ_NEWN_KAI_YFISTAMENWN_KTHRIWN/thermogefyres.pdf)

[11] Οδηγία 2010/31/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 19ης Μαΐου 2010, για την ενεργειακή απόδοση των κτιρίων. Διαθέσιμη στον δικτυακό τόπο:

<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=celex:32010L0031>

[12] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=URISERV%3Aen0021>

[13] [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/ktiria\\_intro.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/ktiria_intro.htm)

[14] [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/thermiki\\_prostasia\\_kelyfous\\_xrisi\\_yalopi\\_nakon.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/thermiki_prostasia_kelyfous_xrisi_yalopi_nakon.htm)

[15] [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/oxe\\_thermikes\\_zones.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/oxe_thermikes_zones.htm)

[16] [http://www.cres.gr/energy\\_saving/Ktiria/hliasmos.htm](http://www.cres.gr/energy_saving/Ktiria/hliasmos.htm)

[17] <http://exoikonomisi.ypeka.gr>

[18] [http://www.hellaskps.gr/min\\_requirements/docs/PE1/DGTSY/5Ktiriaka/TD-D-1120.0.pdf](http://www.hellaskps.gr/min_requirements/docs/PE1/DGTSY/5Ktiriaka/TD-D-1120.0.pdf)

[19] <http://www.anelixi.org/oikologiki-arxitektoniki/bioklimatikos-sxediasmos-ktirion/thermomonomosi-thermiki-maza/>

[20] <http://www.anelixi.org/oikologiki-arxitektoniki/kathara-ulika-kai-technologies/oikodomika-proionta/proionta-ylikon-tis-gis/proionta-yaloyrgias/>

[21] <http://www.ktizontastomellon.gr>

[22] <http://diocles.civil.duth.gr/links/home/museum/mater/glass/glass1.html>

[23] <https://eclass.teicrete.gr/modules/document/file.php/TD130/%CE%9A%CE%95%CE%9D%CE%91%CE%9A%20%CE%98%CE%95%CE%A1%CE%9C%CE%9F%CE%93%CE%95%CE%A6%CE%A5%CE%A1%CE%95%CE%A3.pdf>

[24] <http://www.prismaglass.gr>

[25] <http://www.vasglass.gr>

[26] <http://www.klountzosglass.gr>

[27] <http://koufomata-expert.blogspot.gr>

[28] <http://yalosyiannoulis.gr/index.php/el/egkyklopaideia-gyaliou-ialos-giannoulis/istoria-gyaliou-ialos>

[29] <http://www.avramopoulosglass.gr/Products.aspx?CategoryID=29&lang=el&PageID=70>

[30] <http://www.patrinos.gr/images/products/1293621096-IDIOTITES%20ENERGEIAKON.pdf>

[31] <http://paneth.gr/index.php/el/monosi/jiajialy/jiajialy-tropos-leitourgias>

- [32] <http://www.praktikal.gr/products/yalopinakes/energiakoiyalopinakes.html>
- [33] <http://legakisglass.com/%CF%80%CF%85%CF%81%CE%AC%CE%BD%CF%84%CE%BF%CF%87%CE%B1-%CF%84%CE%B6%CE%AC%CE%BC%CE%B9%CE%B1/>
- [34] <http://www.foistamou.gr/proionta/typoi-yalopinakwn/float-glass/extra-clear>
- [35] <http://energyexpert.gr/wp-content/uploads/downloads/2012/10/%CE%95%CE%BD%CE%B5%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AE-%CF%80%CF%81%CE%BF%CF%83%CE%BF%CE%BC%CE%BF%CE%AF%CF%89%CF%83%CE%B7-%CE%BA%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%AF%CF%89%CE%BD.pdf>
- [36] <http://www.zeb.gr/ipiresies.html>
- [37] <http://www.zeroenergybuildings.org/2011/07/blog-post.html>
- [38] [http://www.digital-in.info/e-tomeas/images/stories/docs/2T1\\_41/df-c-iliamos.pdf](http://www.digital-in.info/e-tomeas/images/stories/docs/2T1_41/df-c-iliamos.pdf)
- [39] <https://sites.google.com/site/wildwaterwall/eliaka-spitia/4-periballon-choros- -mikroklima- -photismos-periballon-choros---mikroklima>
- [40] <http://www.econews.gr/2013/10/29/energeia-elstat-107280/>
- [41] [http://www.4green.gr/data/fotovoltaika/news/preview\\_news/88844.asp](http://www.4green.gr/data/fotovoltaika/news/preview_news/88844.asp)
- [42] <http://www.koufomata-myconstructor.gr/koufomata/thermodiakopi>
- [43] Καραφαγκά, Χ., “Αξιολόγηση της συμβολής των θερμογεφυρών στις θερμικές ροές από το κέλυφος με χρήση δυναμικής προσομοίωσης”, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 2015.

## Ξενόγλωσση

- [44] <http://www.commercialwindows.org>
- [45] <http://www.efficientwindows.org>
- [46] <https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>
- [47] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%BF%CE%B3%CE%AD%CF%86%CF%85%CF%81%CE%B1>
- [48] [https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE\\_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%98%CE%B5%CF%81%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%B9%CE%BD%CE%BF%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AF%CE%B1)
- [49] [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_gain](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_gain)

- [50] <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%BF%CF%85%CF%86%CF%8E%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1>
- [51] [https://en.wikipedia.org/wiki/Building\\_energy\\_simulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Building_energy_simulation)
- [52] <https://www.pilkington.com>
- [53] <http://www.suntuitive.com>
- [54] [http://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Solar\\_heat\\_gain\\_coefficient](http://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Solar_heat_gain_coefficient)
- [55] [http://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Low-e\\_glass](http://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Low-e_glass)
- [56] <http://www.slimdoubleglazing.co.uk/index.php/vacuum-glazing>
- [57] <https://www.bre.co.uk/page.jsp?id=3388>
- [58] [http://educationcenter.ppg.com/glassttopics/how\\_lowe\\_works.aspx](http://educationcenter.ppg.com/glassttopics/how_lowe_works.aspx)
- [59] <http://www.weatherproof-windows.co.uk/glass-uvalues.php>
- [60] <http://www.diamondglass.ie/single-double-triple-easy-123/>
- [61] [http://www.consumerenergycenter.org/residential/windows/windows\\_future.html](http://www.consumerenergycenter.org/residential/windows/windows_future.html)
- [62] <http://www.inoutic.de/en/tips-on-window-purchase/saving-energy/u-value-for-windows/>
- [63] <http://science.energy.gov/bes/highlights/2015/bes-2015-03-a/>
- [64] [http://technoglass.com.sa/wp-content/uploads/2013/09/downloads/tech\\_info/Thermocromic\\_Glazing.pdf](http://technoglass.com.sa/wp-content/uploads/2013/09/downloads/tech_info/Thermocromic_Glazing.pdf)
- [65] <http://www.rapidgrowthmedia.com/features/052710pleotint.aspx>
- [66] <http://www.sketchup.com/>
- [67] <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [68] <https://energyplus.net/>
- [69] εγχειρίδιο EnergyPlus GettingStarted.pdf
- [70] εγχειρίδιο EnergyPlus Input/Output Reference.pdf
- [71] εγχειρίδιο EnergyPlus Engineering Reference.pdf
- [72] <https://www.youtube.com/user/GARDAnalytics>
- [73] <https://www.youtube.com/user/BIMSourceVideos>
- [74] Kiri, P., et al., Solid state thermochromic materials, ADVANCED MATERIALS Letters, Volume 1, Issue 2, Pages 86-105, VBRI press, 2010.

- [75] Kokogiannakis G., et al., Simulating thermochromic and heat mirror glazing systems in hot and cold climates, *Energy Procedia*, Volume 62, Pages 22-31, Elsevier, 2014.
- [76] Saeli, M., et al., Energy modeling studies of thermochromic glazing, *Energy and Buildings*, Volume 42, Pages 1666-1673, Elsevier, 2010
- [77] Kamalisarvestani, M., et al., Performance, materials and coating technologies of thermochromic thin films on smart windows, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 26, Pages 353-364, Elsevier, 2013.
- [78] Costanzo, V., et al., Thermal and visual performance of real and theoretical thermochromic glazing solutions for office buildings, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volume 149, Pages 110-120, Elsevier, 2016.
- [79] Ye, H. et al., The demonstration and simulation of the application performance of the vanadium dioxide single glazing, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volume 117, Pages 168-173, Elsevier, 2013
- [80] Long, L., et al., Performance demonstration and simulation of thermochromic double glazing in building applications, *Solar Energy*, Volume 120, Pages 55-64, Elsevier, 2015.
- [81] Li, S., -Y., et al., Thermochromic fenestration with VO<sub>2</sub>-based materials: Three challenges and how they can be met, *Thin Solid Films*, Volume 520, Pages 3823-3828, Elsevier, 2012.
- [82] Warwick, M., E.A., et al., The effect of variation in the transition hysteresis width and gradient in thermochromic glazing systems, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volume 140, Pages 253-265, Elsevier, 2015.
- [83] Warwick, M., E.A., et al., The effect of transition gradient in thermochromic glazing systems, *Energy and Buildings*, Volume 77, Pages 80-90, Elsevier, 2014.
- [84] Granqvist, C., G., Electrochromics and thermochromics: towards a new paradigm for energy efficient buildings, *Materials Today: Proceedings*, Volume 3, Pages S2-S11, Elsevier, 2016.
- [85] Granqvist, C., G., Recent progress in thermochromics and electrochromics: A brief survey, *Thin Solid Films*, Elsevier, 2016.
- [86] Hoffmann, S., et al., Examination of the technical potential of near-infrared switching thermochromic windows for commercial building applications, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Volume 123, Pages 65-80, Elsevier, 2014.
- [87] Ye, H., et al., Theoretical discussions of perfect window, ideal near infrared solar spectrum regulating window and current thermochromic window, *Energy and Buildings*, Volume 49, Pages 164-172, Elsevier, 2012.

[88] Ye, H., et al., The route to a perfect window, Renewable Energy, Volume 55, Pages 448-455, Elsevier, 2013.

[89]: Paone, A., et al., Thermo-chromic films of VO<sub>2</sub>:W for “smart” solar energy applications, CISBAT 2009 Proceedings, 2-3 September 2009, Lausanne, Switzerland.

[90] SHUYI LI, VO<sub>2</sub>-based Thermo-chromic and Nanothermo-chromic Materials for Energy-Efficient Windows, Computational and Experimental Studies. PhD Thesis, Uppsala University, 2013.

## Πηγές σχημάτων

Σχήμα 2.1: [https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight#/media/File:Solar\\_spectrum\\_en.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight#/media/File:Solar_spectrum_en.svg)

Σχήμα 2.2: από τη βιβλιογραφική πηγή [84]

Σχήμα 2.3: από τη βιβλιογραφική πηγή [4]

Σχήμα 2.4: [http://solargis.info/doc/\\_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Greece-en.png](http://solargis.info/doc/_pics/freemaps/1000px/ghi/SolarGIS-Solar-map-Greece-en.png)

Σχήμα 2.5: <http://2.bp.blogspot.com/-o36Ev51QRs/UOP8pm7OqWI/AAAAAAAAAC0/fvls2MYmxM4/s320/azimouthio.jpg>

Σχήμα 3.1: <http://www.greenbuildingadvisor.com/sites/default/files/images/h114fib.thumbnail.jpg>

Σχήμα 3.2: [http://www.johnsonwindowfilms.com/images/uploads/SolarRay\\_AffectsGlass\\_Diag-EN.png](http://www.johnsonwindowfilms.com/images/uploads/SolarRay_AffectsGlass_Diag-EN.png)

Σχήμα 3.3: [http://www.commercialwindows.org/images/2\\_04.jpg](http://www.commercialwindows.org/images/2_04.jpg)

Σχήμα 3.4: <http://uk.saint-gobain-glass.com/sites/default/files/P-205-I-396-CONDensation-on-double-glazing-04.jpg>

Σχήμα 3.5: <http://www.justrite.com.au/assets/Uploads/20120528154759948.gif>

Σχήμα 3.6: <http://custombuiltri.com/wp-content/uploads/low-e.png>

Σχήμα 3.7: [http://www.efficientwindows.org/images/Lowe\\_Spectrum.jpg](http://www.efficientwindows.org/images/Lowe_Spectrum.jpg)

Σχήμα 3.8: [http://www.popsci.com/sites/popsci.com/files/styles/large\\_1x\\_/public/import/2013/images/2013/09/walkietalkie\\_0.jpg?itok=leNTSYL7](http://www.popsci.com/sites/popsci.com/files/styles/large_1x_/public/import/2013/images/2013/09/walkietalkie_0.jpg?itok=leNTSYL7)

Σχήμα 3.9: [http://www.vasglass.gr/sites/default/files/products/energy/energy\\_12.jpg](http://www.vasglass.gr/sites/default/files/products/energy/energy_12.jpg)

Σχήμα 3.10: [http://www.metropolismag.com/November-2013/Green-and-Beautiful/11NOV\\_PRD\\_08.jpg](http://www.metropolismag.com/November-2013/Green-and-Beautiful/11NOV_PRD_08.jpg)

Σχήμα 3.11: [http://orig02.deviantart.net/442f/f/2008/001/d/9/reflective\\_by\\_rose\\_peta\\_ls.jpg](http://orig02.deviantart.net/442f/f/2008/001/d/9/reflective_by_rose_peta_ls.jpg)

Σχήμα 3.12: από τη βιβλιογραφική πηγή [30]

Σχήμα 3.13: [https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRCUA6\\_mVZHPAMdtl2KONKhlswwjMonp9wFA8ufkAJYP\\_zV9vmB](https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRCUA6_mVZHPAMdtl2KONKhlswwjMonp9wFA8ufkAJYP_zV9vmB)

Σχήμα 3.14: <http://www.commercialwindows.org/images/suntuitive2.png>

Σχήμα 3.15: [https://c2.staticflickr.com/6/5136/5439476950\\_68fe1e5e2f\\_b.jpg](https://c2.staticflickr.com/6/5136/5439476950_68fe1e5e2f_b.jpg)

Σχήμα 3.16: [http://www.saigonglass.com/uploads/products/architecture/HOP/IMGHOP%20\(9\).jpg](http://www.saigonglass.com/uploads/products/architecture/HOP/IMGHOP%20(9).jpg)

Σχήμα 3.17: <http://mms.businesswire.com/bwapps/mediaserver/ViewMedia?mgid=1581118&vid=4&download=1>

Σχήμα 3.18: <http://www.greenstruct.gr/datafiles/cms33.jpg>

Σχήμα 3.19: [https://sites.google.com/site/wildwaterwall/\\_/rsrc/1362777112969/eliakaspitia/anartesechoristitlo/New%20Folder%20%283%29\\_00007.gif](https://sites.google.com/site/wildwaterwall/_/rsrc/1362777112969/eliakaspitia/anartesechoristitlo/New%20Folder%20%283%29_00007.gif)

Σχήμα 3.20: [https://sites.google.com/site/wildwaterwall/\\_/rsrc/1362777112969/eliakaspitia/anartesechoristitlo/New%20Folder%20%283%29\\_00009.gif](https://sites.google.com/site/wildwaterwall/_/rsrc/1362777112969/eliakaspitia/anartesechoristitlo/New%20Folder%20%283%29_00009.gif)

Σχήμα 3.21: <http://originoz.com.au/wp-content/uploads/2011/12/Extra-Clear-Glass.jpg>

Σχήμα 3.22: <http://www.tgpamerica.com/gallery/fullsize/profilitInsulation2.jpg>

Σχήμα 3.23 α&β: από τη βιβλιογραφική πηγή [23]

Σχήμα 3.24: <http://www.ergastiralouminiou.gr/uploads/editorfiles/images/02.jpg>

Σχήμα 3.25: <http://www.anelixi.org/wp-content/uploads/76.-Fenster.jpg>

Σχήμα 3.26: <http://www.windmillwindows.com/wp-content/uploads/cross-section-300x225.jpg>

Σχήμα 3.27: [http://www.inoutic.de/upload/bilder/b\\_nebennavigation/tipps\\_fensterkauf/sondergroessen/u\\_wert\\_fenster.jpg](http://www.inoutic.de/upload/bilder/b_nebennavigation/tipps_fensterkauf/sondergroessen/u_wert_fenster.jpg)

Σχήμα 3.28: πίνακας 3.11 από τη βιβλιογραφική πηγή [5]

Σχήμα 3.29: πίνακας 11 από τη βιβλιογραφική πηγή [6]

Σχήμα 3.30: [http://www.nature.com/article-assets/npg/srep/2014/140919/srep06427/images\\_hires/m685/srep06427-f1.jpg](http://www.nature.com/article-assets/npg/srep/2014/140919/srep06427/images_hires/m685/srep06427-f1.jpg)



Σχήμα 4.1: από τη βιβλιογραφική πηγή [74]

Σχήμα 4.2: από τη βιβλιογραφική πηγή [74]

Σχήμα 4.3: από τη βιβλιογραφική πηγή [84]

Σχήμα 4.4: από τη βιβλιογραφική πηγή [81]

Σχήμα 4.5: [http://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/Articleimage/2014/TA/c3ta14124a/c3ta14124a-f7\\_hi-res.gif](http://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/Articleimage/2014/TA/c3ta14124a/c3ta14124a-f7_hi-res.gif)

Σχήμα 4.6: από τη βιβλιογραφική πηγή [81]

Σχήμα 4.7: από τη βιβλιογραφική πηγή [84]

Σχήμα 4.8: από τη βιβλιογραφική πηγή [85]

Σχήμα 4.9: από τη βιβλιογραφική πηγή [79]

Σχήμα 4.10: από τη βιβλιογραφική πηγή [74]

Σχήμα 4.11: <http://www.hindawi.com/journals/jnm/2012/486301.fig.002.jpg>

Σχήμα 4.12: <http://www.commercialwindows.org/images/suntuitive.png>

Σχήμα 4.13: <http://smartwindowsco.com/files/2014/10/ravenwindow-smartwindow.jpg>

Σχήμα 4.14: [http://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/Articleimage/2014/TA/c3ta14124a/c3ta14124a-f1\\_hi-res.gif](http://pubs.rsc.org/services/images/RSCpubs.ePlatform.Service.FreeContent.ImageService.svc/ImageService/Articleimage/2014/TA/c3ta14124a/c3ta14124a-f1_hi-res.gif)

Σχήμα 4.15: από τη βιβλιογραφική πηγή [77]

Σχήμα 4.16: <http://cdnassets.hw.net/dims4/GG/fa835a9/2147483647/resize/876x%3E/quality/90/?url=http%3A%2F%2Fcdnassets.hw.net%2F07%2Fac%2F04d51fbb400e9eb924b4a4908b2b%2F2000s-suntuitive-tcm48-2179888.png>

Σχήμα 4.17: <http://ceramics.org/wp-content/uploads/2011/09/ppgpleotintsidebysidew1.jpg>

Σχήμα 4.18: <http://img-3.gizmag.com/ravenwindow.jpg?auto=format%2Ccompress&ch=Width%2CDPR&crop=entropy&fit=crop&h=394&q=60&w=700&s=443c0ec4f2a19ee671c904a9a1677b98>

Σχήμα 4.19: από τη βιβλιογραφική πηγή [77]

Σχήμα 4.20: από τη βιβλιογραφική πηγή [77]

Σχήμα 4.21: από τη βιβλιογραφική πηγή [77]

Σχήμα 5.1: από τη βιβλιογραφική πηγή [35]

Σχήμα 5.2: από τη βιβλιογραφική πηγή [69]

Σχήμα 5.3: από τη βιβλιογραφική πηγή [69]

Σχήμα 5.4: από τη βιβλιογραφική πηγή [69]

Σχήμα 5.5: από το example file ThermoChromicWindow του EnergyPlus

Σχήμα 6.34: από τη βιβλιογραφική πηγή [70]

Σχήμα 6.35: από τη βιβλιογραφική πηγή [70]