ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΜΙΠΕΡΑΤΩΝ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΩΝ ΣΕ ΓΡΑΦΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΣΕ ΦΩΤΙΣΜΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ ΑΝΔΡΕΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ

ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ ΔΙΟΝΥΣΙΑ

ΧΑΝΙΑ,ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ, 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μία από τις πιο βασικές προκλήσεις της σύγχρονης εποχής, είναι η εξοικονόμηση ενέργειας. Τα εμπορικά κτίρια και τα γραφεία, αποτελούν ένα μεγάλο ποσοστό του κτιριακού τομέα τα οποία διαθέτουν μεγάλο δυναμικό εξοικονόμησης ενέργειας και στόχος, είναι παράλληλα με την εξοικονόμηση ενέργειας , να επιτυγχάνεται οπτική αλλά και θερμική άνεση εντός του κτιρίου για τους εργαζομένους. Τα ημιπερατά Φ/Β , είναι μία σχετικά καινούρια τεχνολογία με μεγάλες προοπτικές ανάπτυξης ειδικότερα στην Ελλάδα και γενικά σε χώρες και περιοχές που ως επί των πλείστων επικρατεί ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια του χρόνου. Η βασική πρόκληση στην ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής, είναι η αύξηση της απόδοσης των ημιπερατών Φ/Β για μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και η επίτευξη μεγαλύτερων διαπερατοτήτων για καλύτερη οπτική επαφή των εργαζομένων με το εξωτερικό περιβάλλον. Στην παρούσα εργασία, μελετάται η εφαρμογή ημιπερατών φωτοβολταϊκών σε γραφεία, στην περιοχή της Αθήνας μέσω μοντελοποίησης, με σκοπό την εύρεση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας,της διαθεσιμότητας φυσικού φωτισμού αλλά και τις ενεργειακές ανάγκες για τεχνητό φωτισμό, για τις διάφορες διαπερατότητες, WWR, ώρες και ημερομηνίες που εξετάζονται, με την βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων, του DIALux και του RETscreen Expert . Βασική παράμετρος για την μοντελοποίηση, ήταν η κάλυψη των χώρων με φωτισμό 500 lux ο οποίος προβλέπεται για χώρους γραφείων από το πρότυπο EN 12464 . Για την μοντελοποίηση, πάρθηκαν τέσσερα ημιπερατά Φ/Β , εκ των οποίων τα τρία είναι κατασκευασμένα από άμορφο πυρίτιο με διαπερατότητες 10%, 20% και 30% και ένα από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο με διαπερατότητα 38%. Η εφαρμογή τους έγινε σε τετραόροφο κτίριο με νότιο προσανατολισμό, για Window to Wall Ratio από 30% μέχρι 80% με βήμα 10%, για τα 2 ηλιοστάσια του χρόνου, δηλαδή 21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου, και για τις 2 ενδιάμεσες περιόδους 21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου για τις ώρες 10:00 π.μ , 13:00 μ.μ και 16:00 μ.μ . Τα βασικά ευρήματα της μελέτης, είναι ότι με την αύξηση του WWR δηλαδή της επιφάνειας των ημιπερατών Φ/Β και για μικρές διαπερατότητες, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη, ενώ όσον αφορά το κρυσταλλικό πυρίτιο, παρόλο που είχε την μεγαλύτερη διαπερατότητα είχε παράλληλα και την μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας το 4 φορές περίπου πιο αποδοτικό από το άμορφο πυρίτιο. Επίσης, οι ημερομηνίες με τις λιγότερες ενεργειακές ανάγκες για τεχνητό

φωτισμό, είναι στις 21 Σεπτεμβρίου και 21 Μαρτίου, λόγω αυξημένου διαθέσιμου φυσικού φωτισμού, όμως στις πλείστες περιπτώσεις για όλες τις εξεταζόμενες ώρες και ημερομηνίες, δημιουργούνται φαινόμενα θάμβωσης, ειδικότερα στα 2 γραφεία κοντά στο παράθυρο καταλήγοντας στο γεγονός ότι για την καλύτερη οπτική άνεση των εργαζομένων πρέπει να γίνεται χρήση κάποιων σκιάστρων. Τέλος, πραγματοποιώντας το ενεργειακό ισοζύγιο, δηλαδή αφαιρώντας τις ενεργειακές ανάγκες για τεχνητό φωτισμό από την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, βρέθηκε ότι η μόνη περίπτωση με αρνητικό πρόσημο, ήταν για WWR 30% με διαπερατότητα 10% λόγω του μειωμένου φυσικού φωτισμού που διέρχεται εντός των γραφείων ενώ για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις το ενεργειακό ισοζύγιο είναι θετικό.

ABSTRACT

One of the major challenges in modern times, is energy saving. Commercial buildings and offices are a big part of the real estate sector and they have big potential for saving energy. Beside saving energy, the aim is also to achieve visual and thermal comfort for people working in the building. Semi- transparent photovoltaics is a relatively new technology with big potential development, especially in Greece and other countries where there is a lot of sunshine for most of the year. The main challenge in developing this technology is the increase of performance of the semi-transparent PV for greater electricity production, but also the achievement of better transparencies, so people that are inside the building will have a better view of the external environment.

This paper focuses on the application of semi-transparent PVs in offices set in Athens, through modelling with the objective to find the amount of electricity produced, the availability of natural daylight, but also the energy needs for artificial lighting, while changing the basic variables like transparencies, WWR, date and time. DIALux and RETscreen expert are the software tools used for the modelling. The basic parameter for modelling, was to cover the offices with 500 lux as standard EN12464 requires. Four semi-transparent PVs were taken, which three of them was made from a-Si with transparencies 10%, 20% and 30% respectively and one which was made from c-Si with transparency 38%. They were applied through modelling on a four-floor building with south orientation and WWR ranged from 30% to 80% increased 10% at a time. The date, was set on 21st of December and 21st of June, which are the two solstices of the year, and two in between dates 21st of March and 21st of September for three hours of the day, 10:00 am, 13:00 p.m. and 16:00 p.m. The main conclusions of this paper, are that as WWR is increasing which means bigger surface covered with semi-transparent PVs and as transparency is decreasing , electricity production is rising. Although c-Si had the greater transparency, it had the most electricity production, concluding that c-Si is about four times more efficient that a-Si. Moreover, 21st of September and 21st of March had the least energy needs for artificial lighting, because of increased natural daylight which in most of the cases, caused glaring effect, especially at the offices close to window. Thus, shade rollers must necessarily be used for better visual comfort and to avoid glaring.

Additionally, the energy balance for all the cases was positive, except the one with WWR 30% and 10% transparency, because of the low available natural lighting getting into the offices. Energy balance was calculated by subtracting the energy needed for artificial lighting, from the energy produced by the semi-transparent PVs.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ 10

1.1 Περιβαλλοντικά προβλήματα και εκπομπές CO2 σε παγκόσμιο επίπεδο 10

1.2 Ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα 11

1.3 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ 13

1.4 Η πολιτική της Ελλάδας για τις ΑΠΕ και νομοθετικό πλαίσιο 15

2 Φωτοβολταική Τεχνολογία 16

2.1 Φωτοβολταικό στοιχείο 17

2.2 Φωτοβολταικό Σύστημα 18

2.3 Χαρακτηριστικά του Φ/Β 18

2.3.1 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου- καμπύλη ισχύος 18

2.3.2 Εξάρτηση χαρακτηριστικής καμπύλης I-V από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου 20

2.3.3 Απόδοση Φ/Β στοιχείου και απώλειες 21

2.4 Τα πλεονεκτήματα των Φ/Β συστημάτων 22

3 Ημιπερατά Φ/Β 23

3.1 Σύγκριση Ημιπερατών Φ/Β με τα συμβατικά Φ/Β 23

3.2 Οπτικές ιδιότητες υαλοπινάκων 24

3.3 Τεχνολογίες και υλικά ημιπερατών Φ/Β 24

3.3.1 Ημιπερατά Φ/Β πυριτίου 25

3.3.2 Ημιπερατά οργανικά κελιά (OSC) 26

3.3.3 Ημιπερατά κελιά περοβσκίτη 27

4 Βασικές έννοιες φωτισμού 27

4.1 Θάμβωση (glare) 28

4.2 Όρια και πρότυπα σε χώρους γραφείων 30

5 Διεθνής επιστημονική εμπειρία 31

6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ 49

7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ 50

7.1 Μοντελοποίηση στο DIALux 50

7.2 Υπολογισμός φωτισμού στο DIALux 55

7.3 Μοντελοποίηση στο RETscreen 57

7.4 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο RETScreen Expert 61

7.5 Επεξεργασία δεδομένων του DIALux στο MS Excel για την εύρεση της κατανάλωσης για τεχνητό φωτισμό 65
8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ 66
9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 91
10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 93

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά Μορφή Ενέργειας 2015/2016 12
Διάγραμμα 2 : Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά Τομέα στην Ελλάδα 2015/2016 .. 12
Διάγραμμα 3 : Μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα 1990-2014 14
Διάγραμμα 4 : Μερίδιο ΑΠΕ επί της Συνολικής Ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα, 1973-2016 14
Διάγραμμα 5: Εγκατεστημένη Ισχύς Αιολικής, Ηλιακής και Υδροηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα, 2000-2015 15
Διάγραμμα 6: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της διαπερατότητας και WWR 31
Διάγραμμα 7: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της διαπερατότητας και WWR 32
Διάγραμμα 8: Απόδοση πολυκρυσταλλικού και οργανικού συναρτήσει της διαπερατότητας 33
Διάγραμμα 9: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες ανά τομέα σε WWR 40%(αριστερά) και WWR 60% (δεξιά) 34
Διάγραμμα 10: Ποσοστό αυτονομίας για φωτισμό 300 lux (αριστερά) και ποσοστό αυτονομίας για 300 και 500 lux ανά διαπερατότητα (δεξιά) 36
Διάγραμμα 11: Ποσοστιαία αυτονομία για φυσικό φωτισμό εποχικά με χρήση λεπτού φιλμ (αριστερά) και κελιών πυριτίου με κενό (δεξία) 37
Διάγραμμα 12: Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας για όλα τα ημιπερατά Φ/Β και τα WWR 39
Διάγραμμα 13: Κατανάλωση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλοντας (a)το βάθος,(b)το ύψος,(c)το πλάτος,(d)το ύψος υαλοπίνακα,(e) το WWR 40

Διάγραμμα 14: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πόλη, τεχνολογία ημιπερατών Φ/Β και προσανατολισμό 43
Διάγραμμα 15: Κατανάλωση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Florianopolis για 8 m2 (M1) (αριστερά) και 16 m2 (M2) (δεξιά) 44
Διάγραμμα 16: Συντελεστές ηλιακών θερμικών κερδών συναρτήσει της κλίσης 46
Διάγραμμα 17 : Ανάγκες τεχνητού φωτισμού και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις 4 κατευθύνσεις 48
Διάγραμμα 18 : Διάγραμμα ροής διεργασιών μεθοδολογίας 49
Διάγραμμα 19: Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας 66
Διάγραμμα 20: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα (WWR 60% και Διαπερατότητα 20%) 67
Διάγραμμα 21: Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό 68
Διάγραμμα 22: Ημερήσια κατανάλωση (kWh) για τις 21 Μαρτίου 81
Διάγραμμα 23: Ημερήσια κατανάλωση (kWh) για τις 21 Ιουνίου 81
Διάγραμμα 24: Ημερήσια κατανάλωση (kWh) για τις Σεπτεμβρίου 82
Διάγραμμα 25: Ημερήσια κατανάλωση (kWh) για τις 21 Δεκεμβρίου 82
Διάγραμμα 26: Ενεργειακό ισοζύγιο (Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μείον την κατανάλωση για τεχνητό φωτισμό) 83
Διάγραμμα 27: Ετήσιο κόστος (€) για τεχνητό φωτισμό 83
Διάγραμμα 28: Οικονομικό ισοζύγιο 84
Διάγραμμα 29: Χρόνος αποπληρωμής ημιπερατών Φ/Β 85
Διάγραμμα 30: Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας 86
Διάγραμμα 31: Εξοικονόμηση ρύπων 87

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 : Επαφή p-n 17
Εικόνα 2: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και καππύλη ισχύος Φ/Β στοιχείου 19
Εικόνα 3 : Εξάρτηση χαρακτηριστικής καμπύλης I-V από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και από την θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου 21
Εικόνα 4: Μήκη κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας 27
Εικόνα 5: Ζώνες κτιρίου βάση προσανατολισμού 38
Εικόνα 6: Θέσεις αισθητήρων στο κανονικό διπλό τζάμι (αριστερά) και στο τζάμι άμορφου πυριτίου (δεξία) 45

Εικόνα 7: Διάταξη χώρου μοντελοποίησης 47
Εικόνα 8: Διάταξη γραφείου.....50
Εικόνα 9: Κάτοψη κτιρίου και διαστάσεις 51
Εικόνα 10: Πρόσοψη κτιρίου 51
Εικόνα 11: Απεικόνιση φωτισμού με χρωματισμούς.....52
Εικόνα 12: Τεχνικά χαρακτηριστικά λαμπτήρων LED 53
Εικόνα 13: Επιλογή μετεωρολογικών συνθήκων, ημερομηνίας και ώρας 54
Εικόνα 14: Πρόσοψη γραφείων.....54
Εικόνα 15: Απευθείας πρόσπτωση ηλιακή ακτινοβολίας (5000 lux).....55
Εικόνα 16: Υπολογισμός οριζόντιας φωτεινότητας 56
Εικόνα 17: Υπολογισμός κατακόρυφης φωτεινότητας.....56
Εικόνα 18: Κλιματολογικά δεδομένα για την τοποθεσία από το RETscreen Expert 57
Εικόνα 19: Κλιματολογικά δεδομένα για την τοποθεσία από το RETscreen Expert 57
Εικόνα 20:Ημερήσια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία ($kWhm2\ d$) από το RETScreen Expert.....58
Εικόνα 21: Άμορφο πυρίτιο διαπερατότητας 10% 58
Εικόνα 22: Άμορφο πυρίτιο διαπερατότητας 20% 59
Εικόνα 23: Άμορφο πυρίτιο διαπερατότητας 30% 59
Εικόνα 24: Κρυσταλλικό πυρίτιο διαπερατότητας 38%.....59
Εικόνα 25: Μοντελοποίηση κλίσης και αζιμούθιου στο RETscreen Expert.....60
Εικόνα 26: Μοντελοποίηση ημιπερατών Φ/Β και μετατροπέα στο RETscreen Expert 61
Εικόνα 27:Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (7500 lux) στο δεξιά γραφείο (21/3 10:00 π.μ).....69
Εικόνα 28: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (10000 lux) στα 2 γραφεία κοντά στο παράθυρο (21/3 13:00 π.μ).....70
Εικόνα 29: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (7500 lux) στο αριστερά γραφείο (21/3 16:00 μ.μ) 71
Εικόνα 30: Απουσία θάμβωσης σε διαπερατότητα 30% (21/6 10:00 π.μ).....72
Εικόνα 31: Θάμβωση σε διαπερατότητα 38% (3000 lux) στα 2 γραφεία κοντά στο παράθυρο (21/6 13:00 μ.μ) 73
Εικόνα 32: Απουσία θάμβωσης σε διαπερατότητα 30%.....74
Εικόνα 33: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (7500 lux) στο δεξιά γραφείο (21/9 10:00 π.μ).....75

Εικόνα 34: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (10000 lux) στα 2 γραφεία κοντά στο παράθυρο (21/9 13:00 μ.μ) 76
Εικόνα 35: Θάμβωση σε διαπερατότητα 38% (10000 lux) στο αριστερά γραφείο (21/9 16:00 μ.μ) 77
Εικόνα 36: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (2000-3000 lux) στα 2 δεξιά γραφεία (21/12 10:00 π.μ) 78
Εικόνα 37: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (1000-5000 lux) σε όλα τα γραφεία (21/12 13:00 μ.μ) 79
Εικόνα 38: Απουσία θάμβωσης σε διαπερατότητα 30% (21/12 16:00) 80

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 : Εγκατεστημένη Ισχύς (MW) Μονάδων Παραγωγής στα Μη Διασυνδεμένα Νησιά (2017) 12
Πίνακας 2 : Πρότυπο φωτισμού σε χώρους γραφείων 30
Πίνακας 3: Ηλεκτρικές ιδιότητες πολυκρυσταλλικού, άμορφου και οργανικού 33
Πίνακας 4: Ηλεκτρικές ιδιότητες ημιπερατού Φ/Β ισχύος 44 W 35
Πίνακας 5: Τεχνικά χαρακτηριστικά των ημιπερατών Φ/Β άμορφου πυριτίου 38
Πίνακας 6: Τεχνικά χαρακτηριστικά ημιπερατών Φ/Β και συμβατικών υαλοπινάκων 40
Πίνακας 7: Πειραματικά αποτελέσματα θερμοκρασιών 45
Πίνακας 8: Τεχνολογίες Φ/Β πλαισίων και συντελεστές 64
Πίνακας 9: Αρχικό κόστος για κάθε ημιπερατό Φ/Β της Onyx Solar ανά τετραγωνικό μέτρο 84

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιβαλλοντικά προβλήματα και εκπομπές CO2 σε παγκόσμιο επίπεδο

Τις τελευταίες δεκαετίες η αλόγιστη χρήση υδρογονανθράκων για παραγωγή ενέργειας, έχει επιφέρει πολλαπλά περιβαλλοντικά προβλήματα όχι μόνο σε τοπικό αλλά και σε παγκόσμιο επίπεδο. Κάποια από τα περιβαλλοντικά προβήματα είναι το φαινόμενο του «θερμοκηπίου» , η παγκόσμια κλιματική αλλαγή, η μείωση του στρατοσφαιρικού όζοντος, η όξινη βροχή, η αστική ατμοσφαιρική ρύπανση και γενικότερα η υποβάθμιση του αστικού και φυσικού περιβάλλοντος. Οι συνέπειες των προβλημάτων αυτών είναι ήδη αισθητές οι οποίες αποτελούν την οικολογική κρίση που έχει να αντιμετωπίσει η ανθρωπότητα. Η τήξη των πάγων στους πόλους, η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη ,η άνοδος της στάθμης της θάλασσας, τα ακραία καιρικά φαινόμενα , η εξάντληση των μη ανανεώσιμων φυσικών πόρων και τα διάφορα προβήματα υγείας στον άνθρωπο που παρουσιάζονται λόγω της ρύπανσης της ατμόσφαιρας είναι μερικές από αυτές.

Η μέση θερμοκρασία του πλανήτη έχει αυξηθεί κατά 1 °C από την προβιομηχανική εποχή και η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα ξεπερνά τα 400 ppm, τιμή η οποία είναι η υψηλότερη τα τελευταία 800.000 χρόνια. Ετησίως, εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα 36 δισεκατομμύρια τόνοι διοξειδίου του άνθρακα ποσό το οποίο αναμένεται να αυξηθεί.

Το 88% των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα προέρχονται από την Ασία, την βόρεια Αμερική και την Ευρώπη οι οποίες εκπέμπουν 19 δισεκατομμύρία τόνους, 6.5 δισεκατομμύρια τόνους και 6.1 δισεκατομμύρια τόνους διοξειδίου του άνθρακα ετησίως αντίστοιχα. Σύμφωνα με στατιστικά, το 2017 η Αμερική είχε την μεγαλύτερη μέση εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα ανά κάτοικο η οποία ήταν 17.24 τόνοι. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατηγοριοποιούνται ως προς το είδος του καυσίμου αλλά και ως προς τον τομέα για τον οποίο έχει χρησιμοποιηθεί. Το 2017 η εκπομπή ήταν 36.15 δισεκατομμύρια τόνοι από τους οποίους το 95.22% προήλθε από την καύση λιγνίτη και πετρελαίου. Το 2014, το 49.04% των εκπομπών οφείλεται στην παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, το 20.45% στις μεταφορές, το 19.96% στις βιομηχανίες και τις κατασκευές, το 8.6% στον κτιριακό τομέα, οικιστικό και εμπορικό και το 1.96% σε άλλους τομείς.

1.2 Ηλεκτροπαραγωγή στην Ελλάδα

Το κύριο μερίδιο στο μείγμα της ηλεκτροπαραγωγής ανήκει στους λιγνιτικούς σταθμούς, ενώ υψηλό παραμένει και το μερίδιο των πετρελαϊκών προϊόντων, κυρίως λόγω της χρήσης τους στα μη διασυνδεδεμένα νησιά. Τα τελευταία χρόνια γίνεται μια συνεχής προσπάθεια αξιοποίησης του δυναμικού ΑΠΕ, με σκοπό την ικανοποίηση των δεσμεύσεων της χώρας για την υψηλότερη διείσδυση αυτών στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα, αλλά και την αξιοποίηση εγχώριου δυναμικού για την διασφάλιση ενεργειακού εφοδιασμού. Η έμφαση δίνεται σε τεχνολογίες υψηλής εμπορικής ωριμότητας και εγχώριου δυναμικού (π.χ. αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκά, βιομάζα, μικρά υδροηλεκτρικά), οι οποίες έχουν προσελκύσει υψηλό επενδυτικό ενδιαφέρον.Στην Ελλάδα (κυρίως στο Αιγαίο), τα περισσότερα νησιά σήμερα ηλεκτροδοτούνται από τους αυτόνομους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά κύριο λόγο, οι οποίοι λειτουργούν με καύσιμο πετρέλαιο, diesel και μαζούτ, και τους σταθμούς ΑΠΕ (αιολικούς και φωτοβολταϊκούς). Τα νησιά αυτά δεν έχουν διασυνδεθεί μέχρι σήμερα με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό σύστημα, λόγω κυρίως τεχνικών και οικονομικών δυσκολιών καθώς οι διασυνδέσεις είναι έργα μεγάλης έντασης κεφαλαίου. Σύμφωνα με στοιχεία της ΡΑΕ23, η αιχμή ζήτησης των 32 αυτόνομων νησιωτικών ηλεκτρικών συστημάτων της χώρας ποικίλει:

• 19 «μικρά» αυτόνομα συστήματα έχουν αιχμή ζήτησης έως 10 MW,

• 11 «μεσαίου μεγέθους» αυτόνομα συστήματα έχουν αιχμή ζήτησης από 10 MW έως 100 MW και

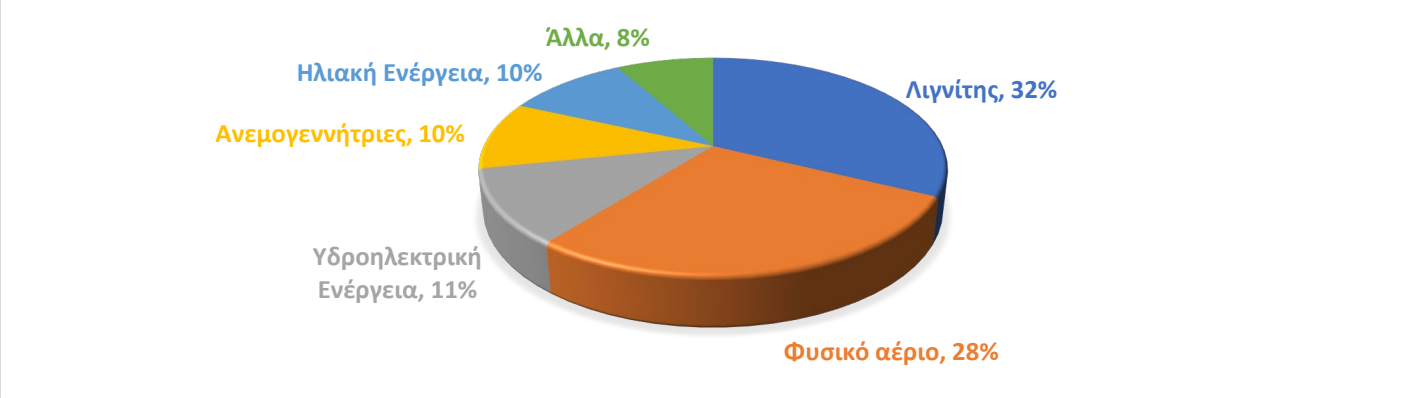
• 2 «μεγάλα» αυτόνομα συστήματα έχουν αιχμή ζήτησης άνω των 100 MW, δηλαδή η Κρήτη και η Ρόδος.

Πίνακας 1 : Εγκατεστημένη Ισχύς (MW) Μονάδων Παραγωγής στα Μη Διασυνδεμένα Νησιά (2017)

Κατηγορίες	Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)	Ποσοστό (%)
Θερμικοί Σταθμοί	1.845,3	79,18%
Αιολικά	322,23	13,83%
Φωτοβολταϊκά	135,88	5,83%
Στέγης-ΝΕΤ	26,4	1,13%
Βιομάζα	0,5	0,02%
Μικρά Υδροηλεκτρικά	0,3	0,01%
Σύνολο	**2.330,61**	**100,00%**

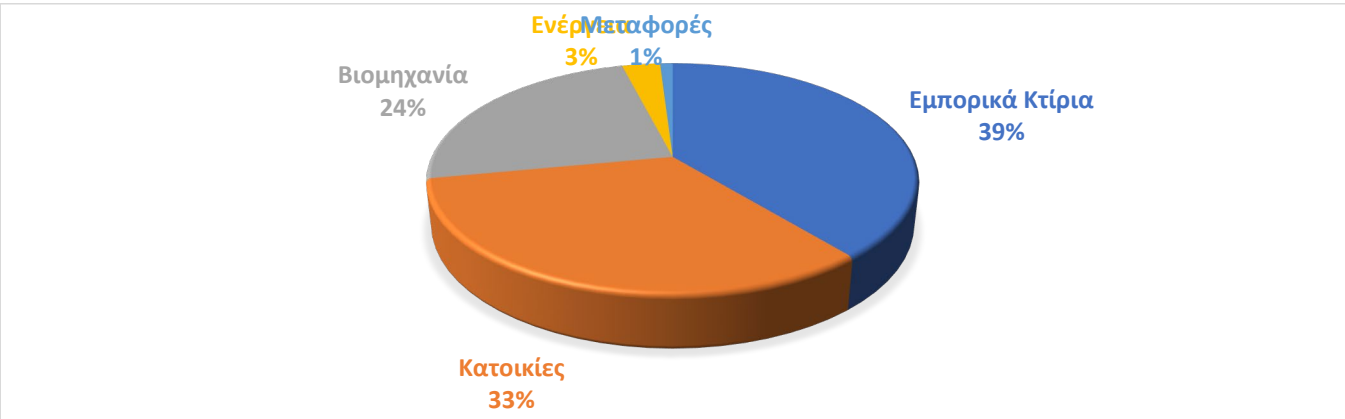
Πηγή: ΔΕΔΔΗΕ (2018)

Διάγραμμα 1: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά Μορφή Ενέργειας 2015/2016



πηγή:IEA (2017)

Διάγραμμα 2 : Κατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά Τομέα στην Ελλάδα 2015/2016



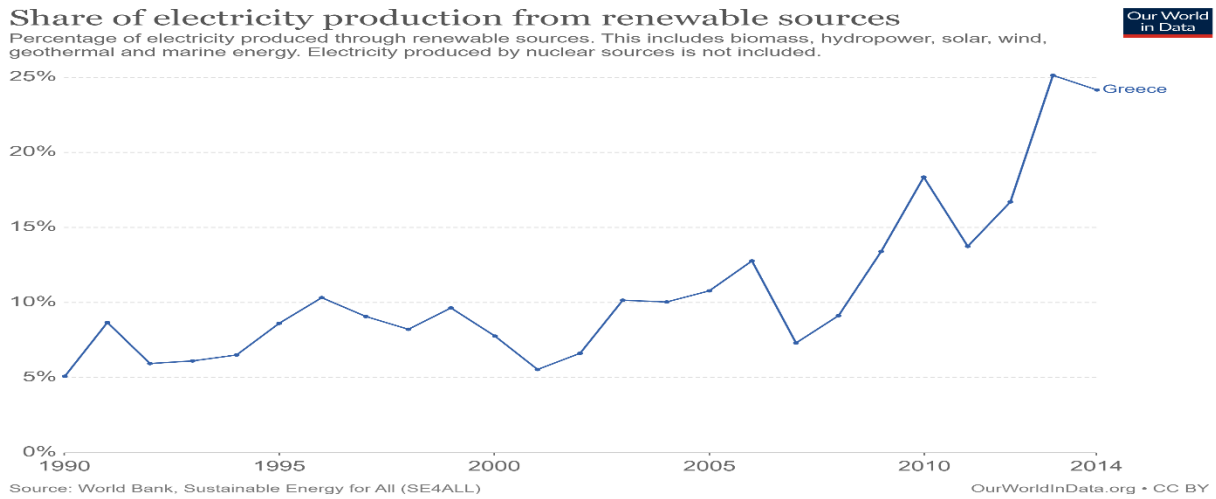
πηγή:IEA (2017)

Η Ελλάδα παρήγαγε 45,8 TWh ηλεκτρικής ενέργειας το 2017 στο διασυνδεδεμένο σύστημα, σημειώνοντας μία αύξηση της τάξεως του 8% από το 2016. Ο λιγνίτης είναι η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή, με 16,4 TWh το 2017, ακολουθούμενος από το φυσικό αέριο, με 15,4 TWh το προηγούμενο έτος. Ωστόσο, η κυριαρχία των ορυκτών καυσίμων μειώθηκε την τελευταία δεκαετία. Ενώ η παραγωγή ηλεκτρισμού από το λιγνίτη μειώθηκε κατά περίπου 50% μεταξύ 2006 και 2016, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από ΑΠΕ (10,6 TWh το 2017) σχεδόν διπλασιάστηκε την ίδια περίοδο .

1.3 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ

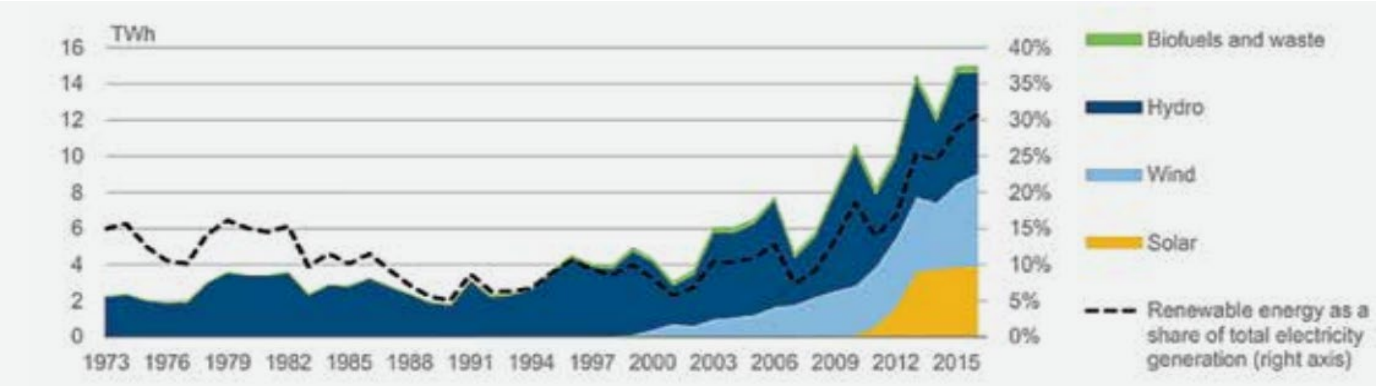
Στην Ελλάδα, οι ΑΠΕ έφθασαν τις 10,5 TWh ή το 20,1% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 2017, συνέπεια της ταχείας ανάπτυξης της εγκατεστημένης ισχύος αιολικής και ηλιακής ενέργειας και της μείωσης της συνολικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας κατά την τελευταία δεκαετία. Η παραγωγή αιολικής ενέργειας αυξήθηκε από τα αμελητέα επίπεδά της στα τέλη της δεκαετίας του ‘90 σε 5,5 TWh το 2017, ενώ η ηλιακή ενέργεια πέτυχε μία ακόμα πιο εντυπωσιακή ανάπτυξη, σημειώνοντας μία αύξηση σχεδόν είκοσι πέντε φορές μεγαλύτερη, από τις 0,16 TWh το 2010 στις 3,5 TWh το 2017. Η υδροηλεκτρική ενέργεια αποτελεί παγίως το μεγαλύτερο μερίδιο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, αλλά με σημαντικές ετήσιες διακυμάνσεις. Η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα ανήλθε σε περίπου 3,5 TWh το 2017, ίση με το 5,4% της συνολικής παραγωγής (χωρίς εισαγωγές). Η Ελλάδα έχει, επίσης, ένα μικρό μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από βιοκαύσιμα, αντιπροσωπεύοντας λιγότερο από το 1,0% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής.

Διάγραμμα 3 : Μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ελλάδα 1990-2014



πηγή: www.ourworldindata.org

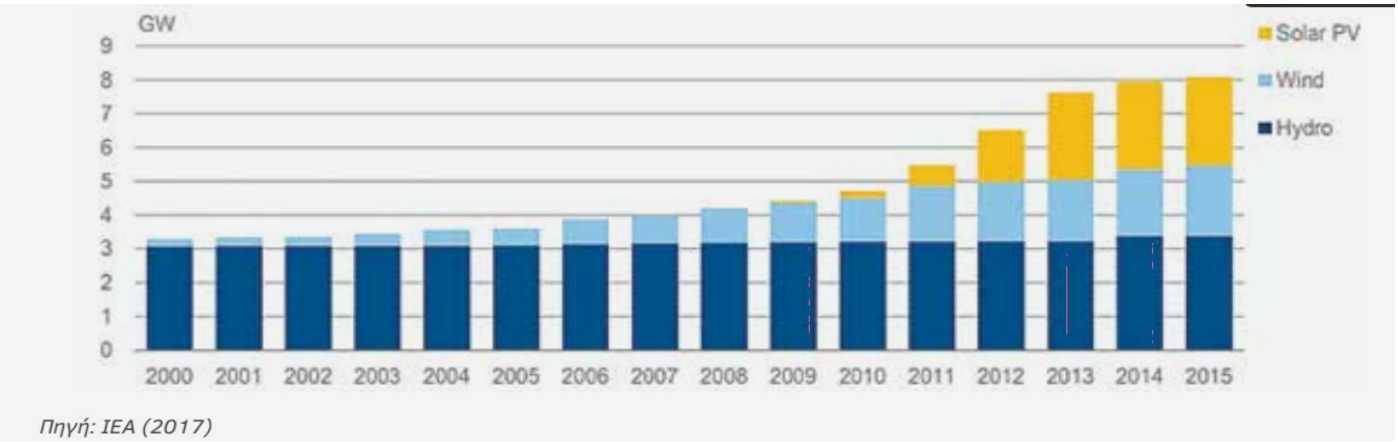
Διάγραμμα 4 : Μερίδιο ΑΠΕ επί της Συνολικής Ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα, 1973-2016



πηγή: IEA (2017)

Στην Ελλάδα, το μερίδιο της διακυμαινόμενης ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ (δηλ. αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική ενέργεια) ανήλθε στο 19% το 2016. Ενώ ο ρυθμός εφαρμογών της αιολικής ενέργειας έχει αυξηθεί, η ανάπτυξη της ηλιακής ενέργειας έχει επιβραδυνθεί τα τελευταία χρόνια σε περισσότερο μέτρια επίπεδα, με μία αύξηση της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας κατά 8% μεταξύ 2013 και 2016

Διάγραμμα 5: Εγκατεστημένη Ισχύς Αιολικής, Ηλιακής και Υδροηλεκτρικής Ενέργειας στην Ελλάδα, 2000-2015



πηγή:Μεζαρτάσογλου, Κ. Ν. Σταμπολής, & Χατζηβασιλειάδης, 2019

1.4 Η πολιτική της Ελλάδας για τις ΑΠΕ και νομοθετικό πλαίσιο

«Η ενσωμάτωση της Οδηγία 2009/28/ΕΚ στο εθνικό δίκαιο για την προώθηση των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα της χώρας υποστηρίζεται σήμερα από το Ν. 3851/2010. Με βάση αυτόν, τίθενται σε εθνικό επίπεδο ιδιαίτερα φιλόδοξοι στόχοι για το 2020, με το μερίδιο των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας να αποτελεί το 20% το 2020 (έναντι του 18% που ορίζει η Οδηγία), ενώ τομεακά εξειδικεύεται περαιτέρω σε (Ν. 3851/2010):

- 40% ενέργεια από ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας,

- 20% ενέργεια από ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας σε θέρμανση-ψύξη και

- 10% ενέργεια από ΑΠΕ στην τελική κατανάλωση ενέργειας στις μεταφορές.

Η επίτευξη των παραπάνω στόχων επιδιώκεται μέσα από ένα πλαίσιο πολιτικής, που επικεντρώνεται σε δύο άξονες (Ministry of Environment, Energy and Climate Change, 2010) και συγκεκριμένα: α) στη διάχυση των τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ και β) στην ενεργειακή αποδοτικότητα.

Τα ‘εργαλεία’ πολιτικής που αξιοποιούνται για την προώθηση των ΑΠΕ και την επίτευξη των ενεργειακών στόχων για το 2020 στη χώρα μας είναι:

- το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ,
- το Ειδικό Πλαίσιο Χωροταξικού Σχεδιασμού και Αειφόρου Ανάπτυξης για τις ΑΠΕ, το οποίο εστιάζει στη χωρική διάσταση της ανάπτυξής τους,
- ο Αναπτυξιακός Νόμος, ως το 'εργαλείο' στήριξης των επενδυτικών δραστηριοτήτων στον τομέα των ΑΠΕ, και
- το Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Ενεργειακή Αποδοτικότητα.»
  πηγή:Stratigea, 2020

2 Φωτοβολταική Τεχνολογία

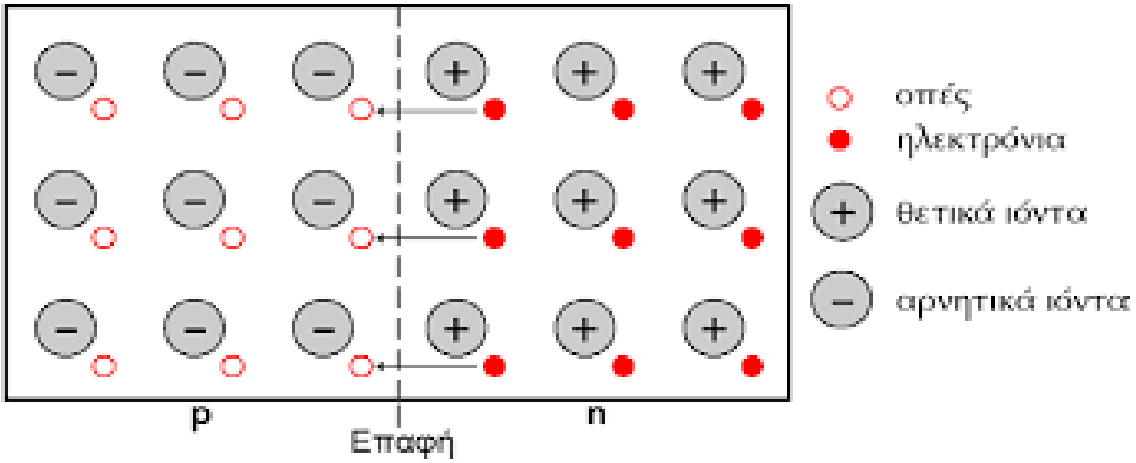
Φωτοβολταική τεχνολογία είναι η τεχνολογία η οποία επιτρέπει την απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας (ή άλλης τεχνητής φωτεινής ενέργειας) σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταικού στοιχείου. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν έχει μορφή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος και μπορεί:

- Να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως συνεχές ρεύμα
- Να μετατραπεί σε εναλασσόμενο ρεύμα
- Να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη χρονική στιγμή

Η φυσική διαδικασία που συμβαίνει στο φωτοβολταικό στοιχείο ονομάζεται φωτοβολταικό φαινόμενο. Όταν μια επαφή p-n φωτιστεί από μια φωτεινή πηγή όπως η ηλιακή ακτινοβολία, τότε κάποια από τα φωτόνια της ακτινοβολίας θα απορροφηθούν από τα άτομα του υλικού των ημιαγωγών πρόσμειξης που βρίσκονται στην περιοχή απογύμνωσης δημιουργώντας έτσι ζεύγη ηλεκτρονίου-οπής. Τα ηλεκτρόνια θα κινηθούν προς την πλευρά του ημιαγωγού του -n , λόγω του ενδογενούς ηλεκτρικού πεδίου, αυξάνοντας έτσι την πυκνότητα των ελεύθερων φορέων αγωγιμότητας του δηλαδή τα ηλεκτρόνια. Αντίθετα οι οπές θα κινηθούν προς την πλευρά του ημιαγωγού τύπου-p , αυξάνοντας την πυκνότητα των δικών του φορέων αγωγιμότητας(οπές). Με αυτό τον τρόπο ο ημιαγωγός τύπου -n φορτίζεται ισχυρότερα αρνητικά, ενώ ο ημιαγωγός τύπου-p , φορτίζεται ισχυρότερα θετικά. Η κίνηση των ηλεκτρονίων , μαζί με την αντίθετη κίνηση των οπών , συνιστούν ηλεκτρικό ρεύμα , το οποίο ονομάζεται φωτόρευμα και αποτελεί συνέπεια του φωτισμού της επαφής p-n από την ηλιακή ακτινοβολία. Η δημιουργία

φωτορεύματος με τη διαδικασία αυτή, όπως περιγράφτηκε σε μικροσκοπικό επίπεδο , είναι αποτελέσμα της εμφάνισης σε μακροσκοπικό επίπεδο, ηλεκτρεγερτικής δύναμης (τάσης emf) στα άκρα της επαφής p-n (που μπορεί να μετρηθει΄με βολτόμετρο). Αυτό σημαίνει ότι με την παρουσία του φωτός η επαφή p-n λειτουργεί ως γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος (μπαταρία), δηλαδή λειτουργεί ως Φ/Β γεννήτρια.

Εικόνα 1 : Επαφή p-n



πηγή:courseware.mech.ntua.org

2.1 Φωτοβολταικό στοιχείο

Το φωτοβολταικό στοιχείο αποτελείται από μία επαφή p-n στην οποία δημιουργείται το Φ/Β φαινόμενο όταν η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει επάνω του. Το βασικό φωτοαγώγιμο υλικό δηλαδή ο ημιαγωγός πρόσμειξης από το οποίο είναι κατασκευασμένο το Φ/Β στοιχείο είναι συνήθως το πυρίτιο. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές με τις οποίες από την πρώτη ύλη που είναι η άμμος πυριτίου και το οξείδιο του πυριτίου SiO_2 , κατασκευάζεται ο τελικός ημιαγωγός πρόσμειξης του κρυσταλλικού πυριτίου και δημιουργείται έτσι η επαφή p-n. Κάποιες από αυτές είναι η μέθοδος επιπλέουσας ζώνης (float zone method, FZ) , η μέθοδος ανάπτυξης μονοκρυστάλλου (Czochralksi technique) και η μέθοδος κράματος (alloying technique) .

2.2 Φωτοβολταικό Σύστημα

Τα Φ/Β πλαίσια μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους παράλληλα ή σε σειρά ανάλογα πάντα με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά που χρειάζεται το σύστημα, δημιουργώντας έτσι μία Φ/Β συστοιχία. Σε μια συστοιχία, τα Φ/Β πλαίσια που συνδέονται σε σειρά δημιουργούν ένα κλάδο και οι κλάδοι συνδέονται μεταξύ τους παράλληλα δίνοντας έτσι στη συστοιχία την τελική της μορφή . Μια τυπική Φ/Β συστοιχία μικρής ισχύος είναι της τάξης των 50 W- 2 kW. Όταν εγκατασταθούν σε μια περιοχή πολλές Φ/Β συστοιχίες που συνεργάζονται μεταξύ τους, τότε πρόκειτα για Φ/Β πεδίο ή πάρκο.

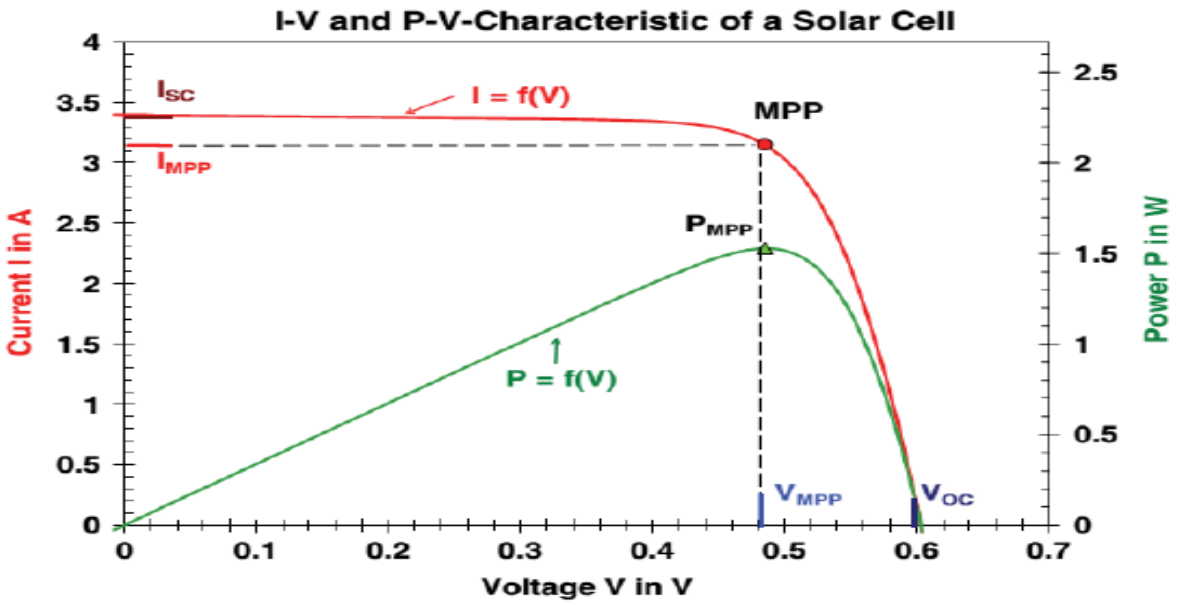
2.3 Χαρακτηριστικά του Φ/Β

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ένα Φ/Β σύστημα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες με κυριότερους την ροή φωτονίων που προσπίπτουν στην επιφάνεια του δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία, την θεμοκρασία που αναπτύσσεται στα κελιά, το ρεύμα και την ισχύ, την απόδοση και προφανώς την επιφάνεια των συλλεκτών. Παρακάτω περιγράφονται πιο αναλυτικά τα κύρια χαρακτηριστικά του Φ/Β συστήματος.

2.3.1 Χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου- καμπύλη ισχύος

Το παρακάτω σχήμα δείχνει την εξάρτηση του ρεύματος I που διαρρέει το κύκλωμα Φ/Β στοιχείου σε συνάρτηση με την τάση V που δημιουργείται στα άκρα του. Αυτή η γραφική παράσταση είναι τυπική χαρακτηριστκή καμπύλη I-V ενός φωτιζόμενου Φ/Β στοιχείου και αποτελεί την ταυτότητά του.

Εικόνα 2: Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και καππύλη ισχύος Φ/Β στοιχείου



πηγή:www.ResearchGate.net

Όπως φαίνεται από την παραπάνω γραφική παράσταση , το ρεύμα I ξεκινά από μια μέγιστη τιμή (I_{sc}) , παραμένει σχεδόν σταθερό (με μια μικρή μείωση) για αυξανόμενες τιμές της τάσης μέχρι ενός σημείου (που είναι λίγο πριν από το σημείο μέγιστης ισχύος (maximum power point- mpp) (V_{mp} , I_{mp}) και στη συνέχεια αρχίζει να μειώνεται έντονα μέχρις ότου η τάση να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή της V_{oc} , όπου το ρεύμα μηδενίζεται.

Η μέγιστη τιμή του ρεύματος ονομάζεται ρεύμα βραχυκυκλώματος (short circuit current) I_{sc} και είναι η τιμή που έχει το ρεύμα στην ιδανική περίπτωση που η τιμή των αντιστάσεων είναι μηδενική (τότε το ρεύμα διόδου I_D = 0 και το I είναι ίσο με το I_L , δηλαδή ουσιαστικά I_{sc} = I_L . Η μέγιστη τιμή της τάσης ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος (open circuit voltage) V_{oc} και είναι ίση με την τάση που υπάρχει στα άκρα του Φ/Β στοιχείου όταν το φωτόρευμα I_L γίνει ίσο με το ρεύμα της διόδου I_D . Τότε το ρεύμα μηδενίζεται I = 0 και η τάση στο κύκλωμα είναι η V_{oc} . Αυτή είναι και η τάση που υπάρχει στα άκρα του Φ/Β στοιχείου όταν εκείνο δεν φωτίζεται (όπως για παράδειγμα τις νυχτερινές ώρες).

Η ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παράγει ένα Φ/Β στοχείο (όπως και κάθε ηλεκτρική πηγή) εξαρτάται από το γινόμενο τάσης V και της έντασης I του ρεύματος δηλαδή:

$$P = V \cdot I$$

Με βάση τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών I_{sc} , V_{oc} , I_m, V_m ενός Φ/Β στοιχείου ορίζεται ένας αριθμός που ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης FF (Fill Factor και ισούται με :

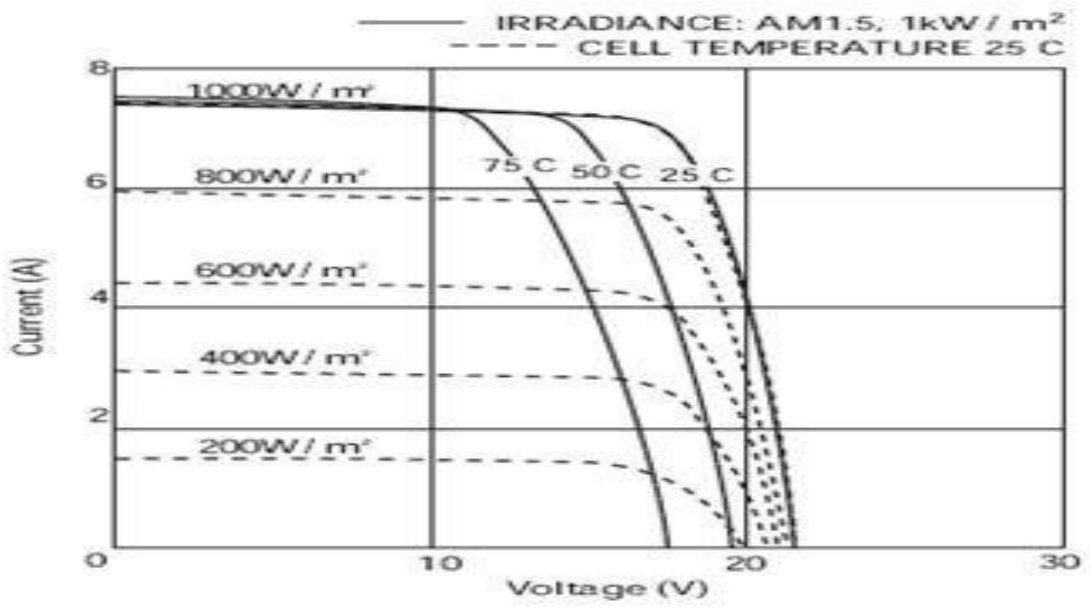
$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

Ο αριθμητής του κλάσματος δίνει τη μέγιστη ισχύ P_m που παράγει το συγκεκριμένο Φ/Ω στοιχείο (σε συγκεκριμένες τιμές ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας), ενώ ο παρονομαστής τη μέγιστη θεωριτικά ισχύ που θα μπορούσε να παράγει το συγκεκριμένο Φ/Β στοιχείο αν η τάση και η ένταση έπαιρναν τις μέγιστες τιμές τους . Ο συντελεστή πλήρωσης είναι δείκτης ποιότητας ενός Φ/Β στοιχείου , καθώς μεγάλες τιμές του συντελεστή πλήρωσης (σίγουρα μεγαλύτερες από 0.7) δείχνουν ότι το Φ/Β έχει καλή ενεργειακή απόδοση.

2.3.2 Εξάρτηση χαρακτηριστικής καμπύλης I-V από την ηλιακή ακτινοβολία και τη θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου

Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V ενός Φ/Β στοιχείου εξαρτάται βασικά από δύο παραμέτρους : την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας G που προσπίπτει στην επιφάνεια του και τη θερμοκρασία θ που έχει η επιφάνεια του. Γενικά μπορεί να ειπωθεί ότι με την αύξηση της G αυξάνεται ανάλογα και το ρεύμα I_{sc}, ενώ η V_{oc} αυξάνεται, όχι όμως ανάλογα, αλλά με πολύ μικρότερο ρυθμό (λογαριθμικά). Ταυτόχρονα αυξάνεται και η ποσότητα της μέγιστης ισχύος P_m που παρέχει το Φ/Β στοιχείο στο κύκλωμα.

Εικόνα 3 : Εξάρτηση χαρακτηριστικής καμπύλης I-V από την πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και από την θερμοκρασία του Φ/Β στοιχείου



πηγή:www.altestore.com

Η αύξηση της θερμοκρασία της Φ/Β κυψέλης (στοιχείου) αυξάνει ελαφρώς το ρεύμα I_{sc} , ενώ μειώνει με ισχυρότερο τρόπο τη V_{oc} . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μέγιστης ισχύος P_m που δίνει το Φ/Β. Συνεπώς, μπορεί να ειπωθεί ότι η μέγιστη ισχύς P_m που μπορεί να δώσει ένα Φ/Β στοιχείο, αυξάνεται με την αύξηση της ηλιακής ακτινοβολίας , ενώ μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.

2.3.3 Απόδοση Φ/Β στοιχείου και απώλειες

Η απόδοση (efficiency) ενός Φ/Β στοιχείου είναι δείκτης που σχετίζεται με το ποσοστό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας (δηλαδή ενέργειας) που μπορεί να μετατέψει σε ηλεκτρική ενέργεια το Φ/Β στοιχείο.

Συνήθως η απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου (n) ορίζεται ως το πηλίκο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να προσφέρει το στοιχείο προς την προσπίπτουσα φωτεινή ηλιακή ισχύ.

$$\text{Απόδοση (n)} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}} = \frac{(FF) I_{sc} V_{oc}}{P_{in}}$$

Όπου

$\mathbf{P_{in}}$: η προσπίπτουσα φωτεινή ισχύς στο Φ/Β

$\mathbf{V_m} \cdot \mathbf{I_m}$: μέγιστη ηλεκτρική ισχύς

Οι αποδόσεις των Φ/Β στοιχείων μεγαλώνουν συνεχώς με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και της έρευνας. Σήμερα οι αποδόσεις των εμπορικών Φ/Β στοιχείων κατασκευασμένων από πυρίτιο φτάνουν περίπου το 18%, ενώ από άλλα ημιαγώγιμα υλικά ξεπερνούν το 20%

2.4 Τα πλεονεκτήματα των Φ/Β συστημάτων

- Είναι μια καθαρή και οικολογική πηγή ενέργειας η οποία δεν παράγει εκπομπές CO_2, SO_2 και NOx
- Δεν εκλύονται τοξικά αέρια κατά την παραγωγή πυριτικών Φ/Β συλλεκτών,
- Ο χρόνος ενεργειακής απόσβεσης (ο χρόνος που απαιτείται για να παράγει ένα Φ/Β όση ενέργεια καταναλώθηκε για την κατασκευή του) είναι 2-5 χρόνια, ενώ η διάρκεια ζωής ενός Φ/Β συλλέκτη μπορεί να ξεπεράσει τα 20 χρόνια.
- Έχουν σχετικά μικρό χρόνο οικονομικής απόσβεσης.
- Η ενέργεια παράγεται επί τόπου με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν μεγάλες απώλειες κατά τη μεταφορά της, σε αντίθεση με απομακρυσμένες μονάδες παροχής παραγόμενης ενέργειας, οι οποίες λειτουργούν μέσω δικτύων παροχής μεγάλων αποστάσεων κι έτσι οι απώλειες αυξάνονται.
- Είναι αξιόπιστα. Απλά τοποθετούνται στη στέγη και η παραγωγή ενέργειας αρχίζει άμεσα. Η εγγύηση του συλλέκτη ισχύει συνήθως για 20 χρόνια.
- Είναι αθόρυβα.
- Έχουν χαμηλό κόστος συντήρησης αφού μετά την εγκατάσταση , θα πρέπει απλά να καθαρίζεται την επιφάνειά τους, ειδικά αν είναι εγκατεστημένα σε περιοχές όπου υπάρχει πολλή σκόνη. Η υπερβολική σκόνη μειώνει την απόδοση του συλλέκτη.
- Μπορούν να τροφοδοτούν με ενέργεια περιοχές που είναι πολύ απομακρυσμένες από το δίκτυο ηλεκτροδότησης.

- Τα Φ/Β συστήματα μπορούν να μεταφερθούν από κτίριο σε κτίριο.
- Μπορούν να παράγουν ρεύμα κατά τη διάρκεια των διακοπών ηλεκτροδότησης.

3 Ημιπερατά Φ/Β

Όπως προαναφέρθηκε ένα Φ/Β σύστημα θεωρείται ενσωματωμένο σε κτίριο, όταν η εγκάτασταση του έχει ενταχθεί στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του κτιρίου και η τοποθέτηση του γίνεται παράλληλα με την κατασκευή του οικοδομήματος. Τα Φ/Β συστήματα ενσωματωμένα σε κτίρια τότε αποτελούν δομικό στοιχείο του κτιρίου ικανοποιώντας σε μεγάλο βαθμό αισθητικά κριτήρια που ένα μη ενσωματωμένο Φ/Β σύστημα δεν θα ικανοποιούσε . Τα ημιπερατά Φ/Β μπορούν επίσης να εγκατασταθούν σε ένα ήδη υφιστάμενο κτίριο και να βρουν πολλές εφαρμογές στον σύγχρονο σχεδιασμό κτιρίων λόγω της μεγάλης ιδιαιτερότητας τους, να έχουν την δυνατότητα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και να γίνει η χρήση τους ως αντικατάσταση των υαλοπινάκων του κτιρίου προσφέροντας έτσι φυσικό φωτισμό. Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός ημιπερατού Φ/Β είναι ο λόγος της επιφάνειας των παραθύρων προς την επιφάνεια του τοίχου (Window to Wall Ratio, WWR) , η διαπερατότητά τους αλλά και η απόδοσή τους. Διαχωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με τις οπτικές τους ιδιότητες, τις τεχνολογίες αλλά και τα υλικά τα οποία θα αναλυθούν περαιτέρω στη συνέχεια.

3.1 Σύγκριση Ημιπερατών Φ/Β με τα συμβατικά Φ/Β

Ένα από τα κύρια προβλήματα εγκατάστασης Φ/Β είναι ο περιορισμένος χώρος που διαθέτουν τα σπίτια και τα διάφορα εμπορικά κτίρια. Κατά κανόνα, τα Φ/Β πρέπει να εγκατασταθούν στην οροφή του κτιρίου γεγονός το οποίο πολλές φορές δεν είναι εφικτό. Αντιθέτως, τα ημιπερατά Φ/Β μπορούν να αντικαταστήσουν τους υαλοπίνακες του κτιρίου προσφέροντας έτσι άφθονο χώρο για την εγκατάσταση τους με αποτέλεσμα μεγαλύτερες επιφάνειες και προοπτική για μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τα μειωμένα θερμικά κέρδη κυρίως του θερινούς μήνες λόγω της χαμηλότερης διαπερατότητας αλλά και του υλικού κατασκευής, μπορούν να μειώσουν σε μεγάλο βαθμό την τελική κατανάλωση του κτιρίου.Η εφαρμογή τους δεν

μπορεί να γίνει μόνο ως αντικατάσταση των υαλιπινάκων του κτιρίου η οποία είναι και η βασικότερη εφαρμογή, αλλά να τοποθετητούν στην οροφή και στο πάτωμα ως δομικό υλικό, ακόμα και ως επιφάνεια σε διάφορα έπιπλα. Όσον αφορά την απόδοση, προφανώς τα συμβατικά Φ/Β έχουν μεγαλύτερη , αφού απορροφούν όλο το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει πάνω στο συλλέκτη ενώ τα ημιπερατά αφήνουν ένα ποσοστό να τα διαπεράσει με αποτέλεσμα τις μειωμένες αποδόσεις. Δηλαδή η παραγωγή ενέργειας στα ημιπερατά Φ/Β ανά τετραγωνικό είναι μικρότερη από αυτή των συμβατικών Φ/Β.

3.2 Οπτικές ιδιότητες υαλοπινάκων

Η εφαρμογή ημιπερατών Φ/Β σε ήδη υφιστάμενα κτίρια αλλά και στο σχεδιασμό νέων κτιρίων είναι μία αποτελεσματική λύση για την ισορροπία παραγωγής ενέργειας και οπτικής άνεσης. Το ορατό φως είναι μόνο ένα μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας το οποίο εκπέμπεται σε μήκη κύματος μεταξύ 380 και 780 nm . Η κατανομή του φωτός από την ηλιακή ενέργεια που μεταφέρεται εντός των κτιρίων μέσω των ημιπερατών Φ/Β έχει μεγάλο αντίκτυπο στην οπτική άνεση των ανθρώπων. Άλλες παραμέτροι ενός ημιπερατού Φ/Β εκτός από την απόδοση, είναι η μέση διαπερατότητα ορατού φωτός (average visible light transmittance) ,η ανακλαστικότητα (reflectance), η απορροφητικότητα (absorptance), η αντίληψη του χρώματος (color perception) , η θεμοκρασία χρώματος (corresponding color temperature) , και ο δείκτης απόδοσης χρωμάτων (color rendering index CRI).

3.3 Τεχνολογίες και υλικά ημιπερατών Φ/Β

Η διαπερατότητα είναι μία φυσική ιδιότητα η οποία επιτρέπει στο φως να περάσει μέσα από ένα σώμα χωρίς να το επηρεάζει. Αυτό που καθιστά ένα υλικό διαφανές, είναι η διάταξη των ατόμων και των ηλεκτρονίων του. Όταν ένα ηλεκτρόνιο έχει ισοδύναμο ενεργειακό χάσμα με ένα φωτόνιο, τότε το ηλεκτρόνιο απορροφά την ενέργεια του φωτονίου με αποτέλεσμα να διαπερνά μία πολύ μικρή ποσότητα φωτός μέσα από το υλικό καθιστώντας το αδιαφανές. Σε ένα διαφανές υλικό, το ενεργειακό χάσμα του

ηλεκτρονίου είναι μεγαλύτερο από αυτό του φωτονίου με αποτέλεσμα να μην μπορεί να απορροφήσει την ενέργειά του και να αφήσει το φως να περάσει μέσα από το υλικό. Η βασική πρόκληση στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των ημιπερατών Φ/Β , είναι η αύξηση της διαπερατότητας των υλικών χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή τους, αφού η διαπερατότητα η οποία είναι ουσιαστικά η διέλευση φωτονίων μέσα από ένα υλικό , είναι σε αντίφαση με το Φ/Β φαινόμενο στο οποίο γίνεται η απορρόφηση φωτονίων και η μετατροπή τους σε ηλεκτρική ενέργεια.

3.3.1 Ημιπερατά Φ/Β πυριτίου

Το 80% των Φ/Β κελιών παγκοσμίως είναι κατασκευασμένα από πυρίτιο αφού είναι το πρώτο υλικό το οποίο είχε σχετικά καλή απόδοση και διαχωρίζεται σε τρεις υποκατηγορίες: μονοκρυσταλλικό, πολυκρυσταλλικό και άμορφο. Το πυρίτιο, έχει το πλεονέκτημα ότι βρίσκεται εύκολα και σε αφθονεία στη φύση καθώς το διοξείδιο του πυρίτου (SiO_2) και ο χαλαζίτης αποτελούν περίπου το 28% του φλοιού της Γης. Μπορεί να μετατραπεί σχετικά εύκολα στην μονοκρυσταλλική του μορφή αλλά και να λιώσει και να μορφοποιηθεί. Ο λόγος που τα Φ/Β στοιχεία πυριτίου μπορούν να ανταπεξέλθουν εύκολα στο μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και στις δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες είναι γιατί το πυρίτιο διατηρεί τις ηλεκτρικές του ιδιότητες ακόμα και σε θερμοκρασία 125 °C.

3.3.1.1 Μονοκρυσταλλικό (sc-Si)

Το μονοκρυσταλλικό έχει την μεγαλύτερη απόδοση σε σχέση με τις άλλες δύο υποκατηγορίες πυριτίου ή αλλιώς έχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα αλλά και το μεγαλύτερο κόστος. Κατασκευάζεται από κρύσταλλο πυριτίου υψηλής καθαρότητας το οποίο του προσδίδει ένα ομοιόμορφο μαύρο χρώμα που σε ζεστά κλίματα όπως στην Ελλάδα , προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του πλαισίου με αποτέλεσμα την μείωση της απόδοσής του. Οι δύο μεθόδοι κατασκευής του είναι η μέθοδος CZ (Czochralski Silicon) και η μέθοδος Float Zone

πηγή:https://meroli.web.cern.ch/Lecture_silicon_floatzone_czochralski.html

3.3.1.2 Πολυκρυσταλλικό (mc-Si)

Το πολυκρυσταλλικό έχει σχετικά μικρότερη απόδοση από το μονοκρυσταλλικό αλλά σε υψηλότερες θερμοκρασίες έχει μικρότερη μείωση απόδοσης λόγω του σκούρου μπλε χρώματος που έχει δηλαδή λιγότερη απορρόφηση θερμότητας, σε σχέση με το μαύρο του μονοκρυσταλλικού. Έχει μικρότερο κόστος και οι βασικές μεθόδοι κατασκευής του, είναι η μέθοδος απ' ευθείας στερεοποίησης DS (directional solidification), η ηλεκτρομαγνητική χύτευση EMC και η ανάπτυξη λιωμένου πυριτίου ("χύτευση").

3.3.1.3 Άμορφο (a-Si)

Το άμορφο πυρίτιο έχει χαμηλότερες αποδόσεις από το μονοκρυσταλλικό και το πολυκρυσταλλικό, αλλά το βασικό του πλεονέκτημα είναι ότι δεν επηρεάζεται σε μεγαλό βαθμό από τις υψηλές θερμοκρασίες και έχει αρκετά καλή απόδοση όταν υπάρχει διάχυτη ακτινοβολία δηλαδή συννεφιά. Ο χαρακτηρισμός άμορφο προκύπτει από τον τυχαίο τρόπο κατά τον οποίο είναι διατεταγμένα τα άτομα του πυριτίου και πρόκειτα για ταινίες λεπτών επιστρώσεων που παράγονται με την εναπόθεση ημιαγωγού υλικού δηλαδή πυρίτιο, σε υπόστρωμα υποστήρικής χαμηλού κόστους όπως είναι το γυαλί και το αλουμίνιο.

3.3.2 Ημιπερατά οργανικά κελιά (OSC)

Σε αντίθεση με τα μη οργανικά , τα ημιπερατά οργανικά κελιά έχουν εκ φύσεως πλεονεκτήματα στις λειτουργικές ιδιότητες των ημιπερατών κελιών. Συγκεκριμένα, το χρώμα τους μπορεί να τροποποιηθεί ελεγχόμενα μεταβάλλοντας τα συστατικά του φωτοενεργού στρώματος γεγονός το οποίο ικανοποιεί αισθητικούς σκοπούς στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό κτιρίων. Επίσης, έχουν την ιδιότητα απορρόφησης σε μήκη κύματος μεταξύ 250 με 350 nm, δηλαδή στην υπέρυθρη ακτινοβολία προσφέροντας έτσι μεγάλη διαπερατότητα στην ακτινοβολία ορατού φωτός. (Shin & Choi, 2018)

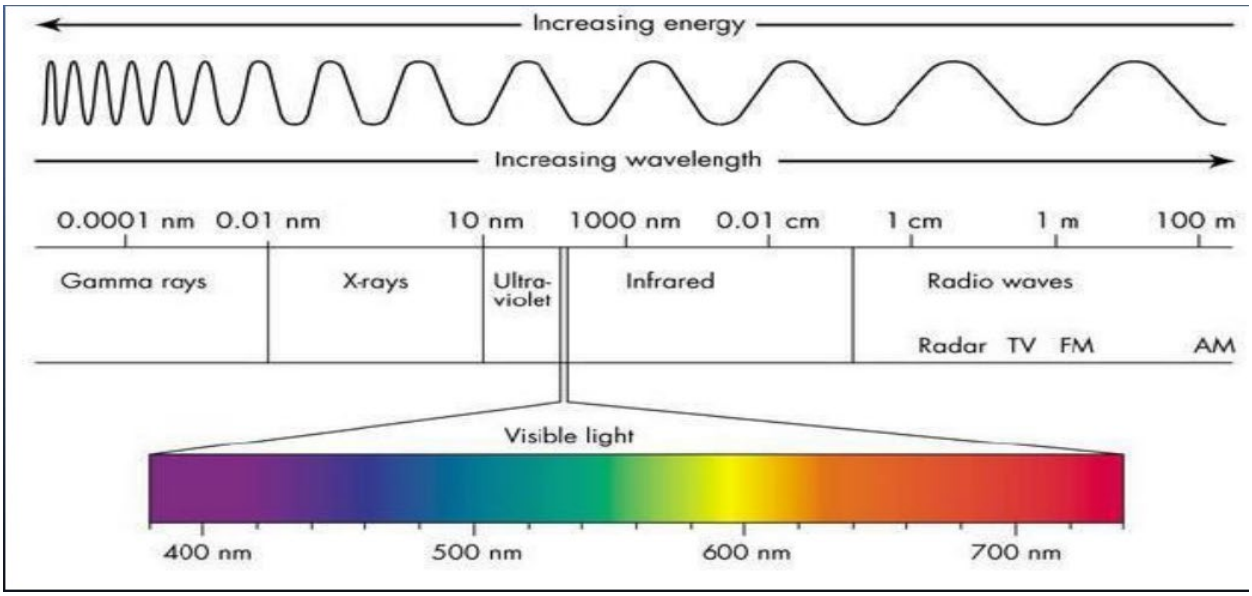
3.3.3 Ημιπερατά κελιά περοβσκίτη

Ο περοβσκίτης ορυκτό οξείδιο του ασβεστίου και του τιτανίου, και έλαβε το όνομά του από τον ορυκτολόγο Λεβ Αλεξέγιεβιτς Περόβσκιι. Τα τελευταία χρόνια, τα κελιά περοβσκίτη έχουν προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω της υψηλής απόδοσής τους και του χαμηλού κόστους παραγωγής. Μπορούν να επεξεργαστούν σχετικά εύκολα σε εύκαμπτα υποστρώματα σε χαμηλή θερμοκρασία παρόμοια με τα οργανικά. Το πάχος των φιλμς περοβσκίτη, μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν σε ημιπερατά στην ακτινοβολία ορατού φωτός.

4 Βασικές έννοιες φωτισμού

Το **φως** είναι το εύρος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που αποτελείται από φωτόνια κινούμενα σε κυματομορφή και γίνεται αντιληπτό από το ανθρώπινο μάτι σε μήκη κύματος 380 με 760 nm. Κάθε διαδοχική περιοχή μήκους κύματος αντιπροσωπεύει ένα διαφορετικό χρώμα όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

Εικόνα 4: Μήκη κύματος ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



πηγή:www.sc663henad.weebly.com

Η **φωτεινή ροή (Luminous Flux)** , είναι η συνολική παραγωγή φωτός μιας φωτεινής πηγής όπως για παράδειγμα ο ήλιος ή ένας λαμπτήρας, σε όλο το οπτικό φάσμα και μετριέται σε lumen. Το lumen, είναι παράγωγη μονάδα του SI, και η σχέση που το συνδέει με το candela που είναι θεμελιώδες μονάδα στο S.I είναι:

1 lumen = 1 candela x sr, όπου sr = στερακτίνιο.

Η **ειδική φωτεινή ροή** αφορά την παραγόμενη φωτιστική ροή ανά μονάδα καταναλισκόμενης ισχύος (lm/w) και ουσιαστικά δείχνει την απόδοση ενός λαμπτήρα, δηλαδή όσα παραπάνω lumen αποδίδει ένας λαμπτήρας ανά W τόση μεγαλύτερη απόδοση έχει.

Illuminance (E) είναι το πηλίκο της φωτεινής ροής προς την μονάδα επιφανείας στην οποία προσπίπτει το φως, σε ένα ορισμένο σημείο και μετριέται σε lux, δηλαδή, 1 Lux = 1lumen/m². Κατά περίπτωση εξετάζεται ο φωτισμός καθέτων, οριζοντίων και κυλινδρικών επιφανειών.

Πηγή: (*Κ ω σ τ α σ μ. κ α π ο σ*, 2014)

4.1 Θάμβωση (glare)

Θάμβωση είναι η αρνητική αίσθηση που δημιουργείται από την υπερβολική και ανεξέλεγκτη φωτεινότητα στο οπτικό πεδίο του παρατηρητή και προκαλεί δυσφορία, μειωμένη οπτική ικανότητα ή και τα δύο . Ο βαθμός θάμβωσης δεν εξαρτάται μόνο από το φωτιστικό ή τον ήλιο , αλλά και από τη θέση του παρατηρητή, τις διαστάσεις του δωματίου και τις αντανακλάσεις των επιφανειών. Η θάμβωση μπορεί να είναι άμεση ή ανακλώμενη και ο έλεγχος της επιτυγχάνεται με τον έλεγχο της λαμπρότητας της φωτεινής πηγής κατά την κατεύθυνση των οφθαλμών ενός παρατηρητή. Υπάρχουν 2 είδη θάμβωσης, η θάμβωση ανικανότητας(Disability glare, φυσιολογική θάμβωση) και η θάμωση δυσφορίας (discomfort glare, ψυχολογική θάμβωση)

«<u>Θάμβωση ανικανότητας (Disability glare)</u>. Το είδος αυτό της θάμβωσης εμποδίζει την όραση χωρίς αναγκαστικά να προκαλεί δυσφορία. Συνήθως όταν δημιουργηθεί, η

αντίδραση είναι άμεση με τροποποίηση της θέσης εργασίας (δηλ. με τροποποίηση της διεύθυνσης παρατήρησης).

. Θάμβωση δυσφορίας (Discomfort glare,) . Σε αυτό το είδος θάμβωσης προκαλείται απλώς δυσφορία χωρίς απαραίτητα να επηρεάζεται η ικανότητα εκτέλεσης κάποιας εργασίας. Το γεγονός ότι μπορεί να μην ανιχνεύεται άμεσα όταν συμβαίνει δεν σημαίνει όμως ότι συσσωρευτικά δεν παρατηρούνται αντιδράσεις (π.χ. πονοκέφαλοι). Συχνά παρατηρούνται και τα δύο είδη θάμβωσης ταυτόχρονα και υπάρχει αντικειμενική δυσκολία στο να διαχωρισθεί η αιτία. Σήμερα είναι φνωστός ο μηχανισμός ανάπτυξης της θάμβωσης ανικανότητας (σκέδαση φωτός στο υαλώδες σώμα το ματιού με συνέπεια τη μείωση της αντίθεσης στην εικόνα που σχηματίζεται στον αμφιβληστροειδή) όχι όμως της θάμβωσης δυσφορίας. Η τελευταία φαίνεται οτι σχετίζεται με τη συνδιαστική επίδραση αντίθεσης και κορεσμού του οπτικού συστήματος.» (Α.Τσαγκρασούλης, 2016)

Το UGR (Unified Glare Rating) είναι μία μέθοδος υπολογισμού της θάμβωσης που προκαλείται από τα φωτιστικά, του φωτός που διέρχεται από τα παράθυρα και διάφορων φωτεινών πηγών. Ο δείκτης UGR , ουσιαστικά προσδιορίζει πόσο πιθανο είναι ένα φωτιστικό να προκαλέσει δυσφορία σε ένα παρατηρητή όπως για παράδειγμα ένα φωτιστικό LED σε ένα γραφείο. Οι τιμές κυμαίνονται από 5 μέχρι 40 όπου για μικρές τιμές υποδηλώνει ελάχιστη εώς καθόλου θάμβωση ενώ για υψηλές τιμές μεγάλη θάμβωση. Ο δείκτης UGR υπολογίζεται χρησιμοποιώντας μία εξίσωση η οποία λαμβάνει υπόψη διάφορες παραμέτρους οι οποίες συμβάλλουν στην ύπαρξη θάμβωσης που προκαλείται από ένα φωτιστικό, όπως η γωνία του φωτιστικού, φωτεινή ροή κτλπ.

Η εξίσωση για τον υπολογισμό του UGR είναι η ακόλουθη:

$$\mathbf{UGR} = 8 \cdot \log \left[\frac{0.25}{L_b} \cdot \sum \left(\frac{L^2 x\, \omega}{p^2} \right) \right]$$

Όπου

Lb = φωτεινότητα περιβάλλοντος (cd / m2)

L = φωτεινότητα των φωτεινών τμημάτων κάθε φωτιστικού στην διεύθυνση των οφθαλμών του παρατηρητή (cd / m2)

ω = στερεά γωνία υπό την οποία φαίνονται τα φωτεινά τμήματα κάθε φωτιστικού από τους οφθαλμούς του παρατηρητή (Sr)

p = δείκτης θέσης Guth για κάθε ξεχωριστό φωτιστικό, ο οποίος το συσχετίζει με την μετατόπιση από την γραμμή θέασης

4.2 Όρια και πρότυπα σε χώρους γραφείων

«Τα μέλη της Ε.Ε. έχουν από το 2003 ένα κοινό πρότυπο όσον αφορά τον σχεδιασμό του φωτισμού σε χώρους εργασίας. Το πρότυπο EN 12464-1: "Light and lighting. Lighting of work places. Indoor work places", καθορίζει τις ελάχιστες απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιεί το εγκατεστημένο σύστημα φωτισμού εσωτερικών χώρων. Ορίζει τις ελάχιστες τιμές φωτισμού στις επιφάνειες εργασίας (Maintained Illuminance Level - Em) σε lux ανάλογα με την δραστηριότητα, την ελάχιστη ομοιομορφία φωτισμού που πρέπει να επιτευχθεί (Uo), το ανώτατο όριο του δείκτη θάμβωσης (Unified Glare Rating Limit - UGRL), καθώς και τον δείκτη χρωματικής απόδοσης (Color Rendering Index - CRI). Η στάθμη φωτισμού Em υπολογίζεται στον κύκλο συντήρησης του συστήματος φωτισμού, η οποία είναι χαμηλότερη από την αρχική φωτεινή ισχύ των φωτιστικών, σύμφωνα με τον λόγο συντήρησης. Το αντίστοιχο πρότυπο για τον φωτισμό εξωτερικών χώρων είναι το EN 12464-2: "Light and lighting. Lighting of work places. Outdoor work places". Οι τιμές των βασικών παραμέτρων φωτισμού ορίζονται από το πρότυπο EN 12464-1 κατά δραστηριότητα και για τον φωτισμό γραφείων τα όρια είναι τα εξής:

Πίνακας 2 : Πρότυπο φωτισμού σε χώρους γραφείων

5.26	**Γραφεία**	Em (lx)	Uo	UGRL	Ra
5.26.1	Αρχειοθέτηση, φωτοαντίγραφα κτλ	300	0.40	19	80
5.26.2	Συγγραφή, δακτυλογράφηση, ανάγνωση, επεξεργασία δεδομένων	500	0.60	19	80
5.26.3	Τεχνικό σχέδιο	750	0.70	16	80
5.26.4	CAD work stations	500	0.60	19	80
5.26.5	Αίθουσες συνεδρίων και συσκέψεων	500	0.60	19	80
5.26.6	Χώρος υποδοχής	300	0.60	22	80
5.26.7	Αρχείο	200	0.40	25	80

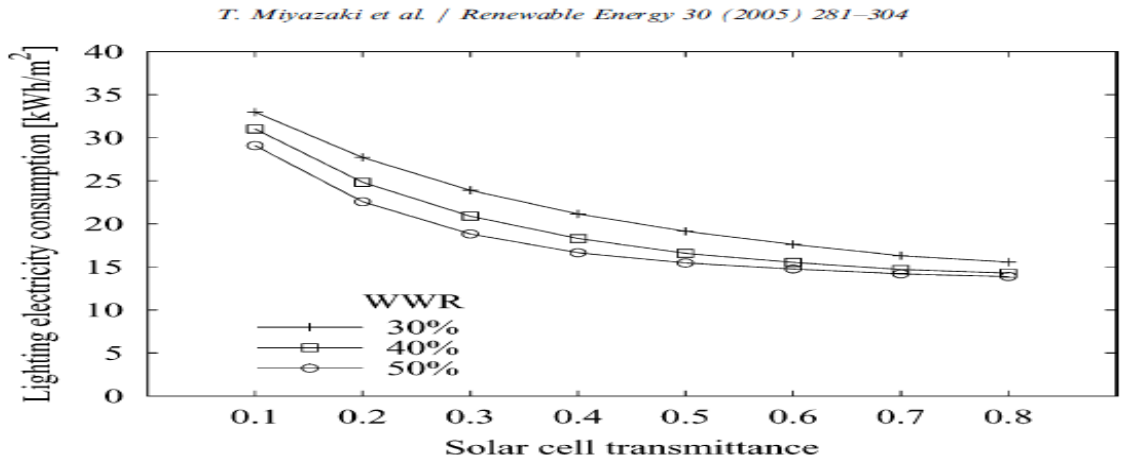
πηγή:www.techlumen.gr

5 Διεθνής επιστημονική εμπειρία

Η μελέτη της τεχνολογίας των ημιπερατών Φ/Β έχει ξεκινήσει από τις αρχές του 2000 κι έπειτα, και με την πάροδο του χρόνου η τεχνογνωσία στο αντικείμενο αυξάνεται. Παρακάτω, ακολουθούν μερικά άρθρα και μελέτες που έχουν γίνει είτε πειραματικά είτε μέσω μοντελοποίησης με σκοπό την εύρεση των ηλεκτρικών και οπτικών ιδιοτήτων των ημιπερατών Φ/Β και πως επηρεάζεται η απόδοσή τους από την θερμοκρασία και τον προσανατολισμό στις διάφορες περιοχές του πλανήτη.Επίσης μελετώνται οι διάφορες τεχνολογίες ημιπερατών Φ/Β και συγκρίνονται μεταξύ τους αλλά και με συμβατικά υλικά, προκειμένου να βρεθεί εάν τελικά η εφαρμογή τους είναι ενεργειακά και οικονομικά πιο συμφέρουσα επιλογή. Το υλικό που είναι κατασκευασμένα, το WWR και η διαπερατότητα είναι οι κοινές παραμέτροι που μελετώνται σχεδόν σε όλες τις μελέτες ημιπερατών Φ/Β.

- Μία ερευνητική εργασία που πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο Γεωργίας και Τεχνολογίας στο Τόκυο, το 2004 με τίτλο «Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows» με τη χρήση του προγράμματος Energy Plus, έδειξε πως με την αύξηση της διαπερατότητας και της επιφάνειας των ημιπερατών Φ/Β οι ανάγκες για ηλεκτρισμό όσον αφορά τον φωτισμό μειώθηκαν όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

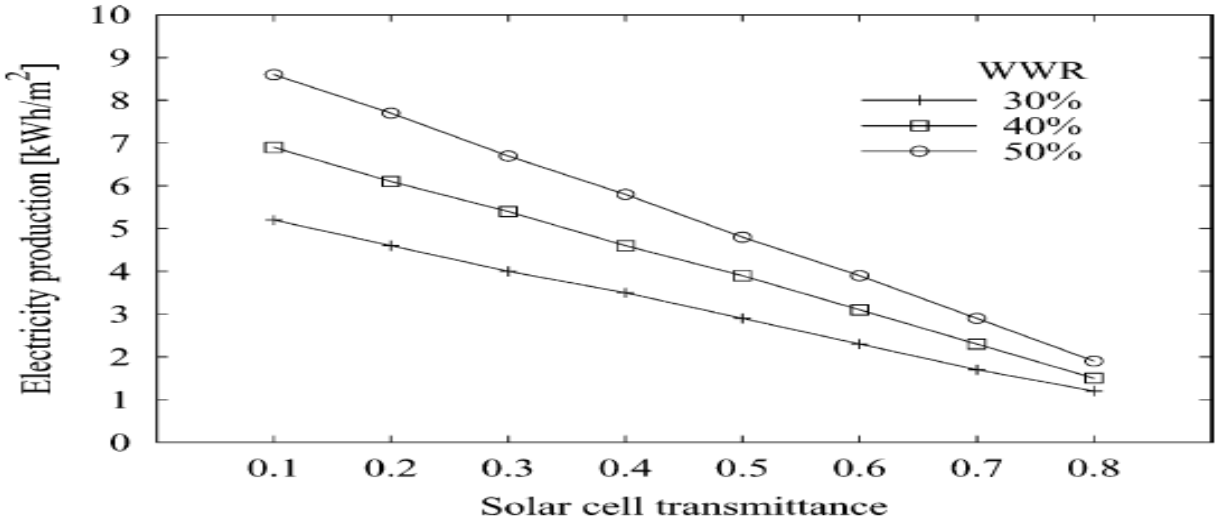
Διάγραμμα 6: Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της διαπερατότητας και WWR



πηγή: Miyazaki et al., 2005

Στην έρευνα, όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα, μελετήθηκαν 3 WWR, 30%, 40% και 50% και 7 διαπερατότητες από 10% μέχρι 80%. Να σημειωθεί ότι το υλικό των ημιπερατών Φ/Β αφορά άμορφο πυρίτιο . Με τα ίδια αυτά δεδομένα εξετάστηκε η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και πως μεταβάλλεται ανάλογα με την διαπερατότητα και το WWR.

Διάγραμμα 7: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει της διαπερατότητας και WWR

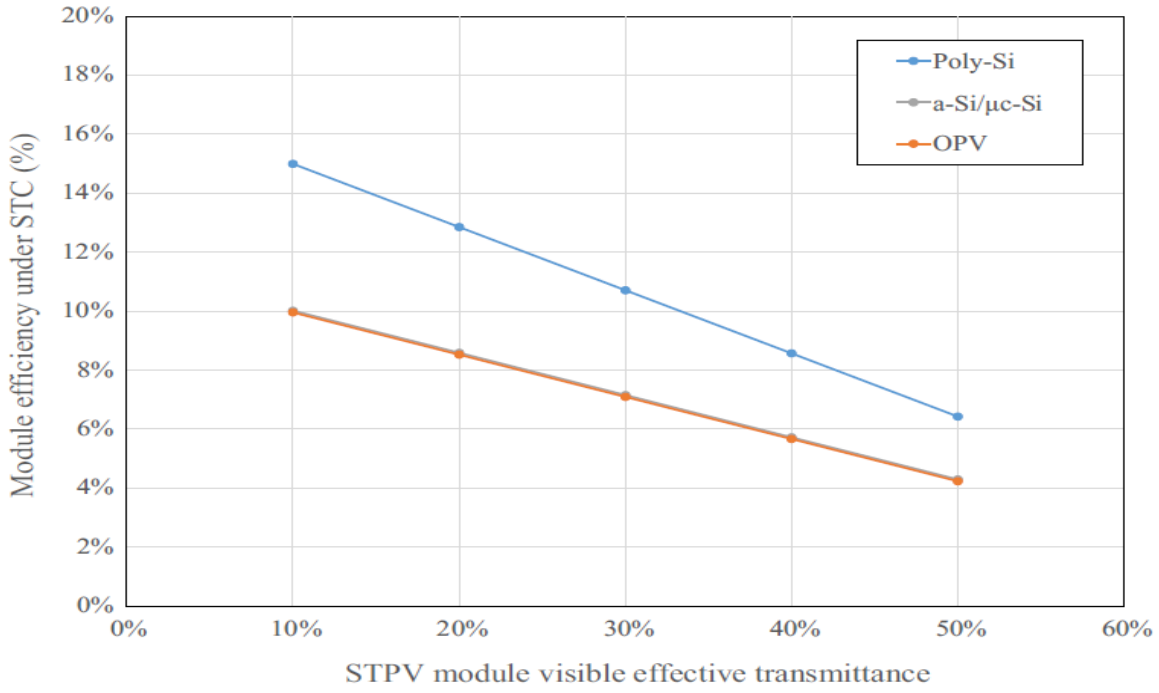


πηγή: Miyazaki et al., 2005

Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά τετραγωνικό μέτρο, και φαίνεται πως με την αύξηση της διαπερατότητας η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μειώνεται γραμμικά για κάθε WWR. (Miyazaki et al., 2005)

- Σε μία εξίσου σημαντική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στο Concordia University,το 2015 με τίτλο «A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings» μελετήθηκαν μέσω μοντελοποίησης 3 τεχνολογίες ημιπερατών Φ/Β ως προς τις οπτικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες τα οποία ήταν πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, άμορφο πυρίτιο λεπτού φιλμ και οργανικό. Οι βασικές παραμέτροι ήταν 2 WWR, 40% και 60% , και 5 διαπερατότητες, 10% , 20% , 30% , 40% και 50% με προσανατολισμό προς το Νότο.

Διάγραμμα 8: Απόδοση πολυκρυσταλλικού και οργανικού συναρτήσει της διαπερατότητας



πηγή: Konstantinos Kapsis & Athienitis, 2015

Στο παραπάνω διάγραμμα γίνεται η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ του πολυκρυσταλλικού πυριτίου και των οργανικών κελιών που όπως φαίνεται και στις 2 περιπτώσεις η απόδοση μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της διαπερατότητας.

Πίνακας 3: Ηλεκτρικές ιδιότητες πολυκρυσταλλικού, άμορφου και οργανικού

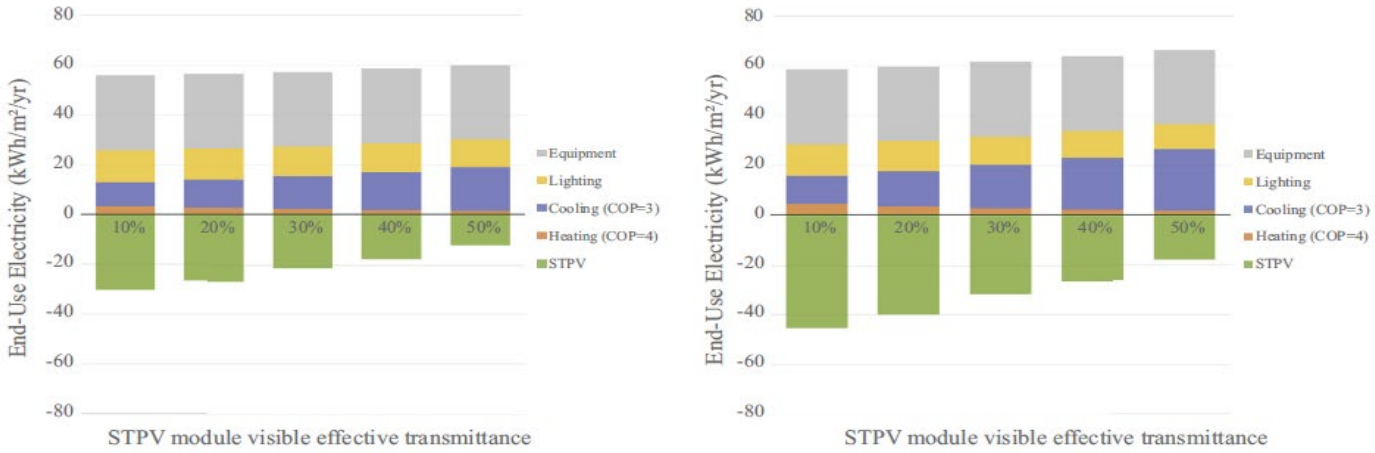
Table 4
Electrical data for the three STPV module technologies simulated, for visible effective transmittance of 10%.

STPV module technology	Poly-Si	a-Si/μc-Si	OPV
Visible effective transmittance (STPV10%)	10%	10%	10%
Area (m^2)	1.88	1.88	1.88
Efficiency under STC	15%	10%	10%
Short circuit current (A)	10.01	1.65	29.59
Open circuit voltage (V)	37.22	167	11.3
Current at maximum power under STC (A)	9.36	1.52	23.8
Voltage at maximum power under STC (V)	30.12	123.9	7.9
Temperature coefficient of maximum power (%/K)	−0.445	−0.270	0.050
Temperature coefficient of short circuit current (%/K)	0.054	0.071	−0.210
Temperature coefficient of open circuit voltage (%/K)	−0.333	−0.270	−0.270

πηγή: Konstantinos Kapsis & Athienitis, 2015

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται όλες οι ηλεκτρικές ιδιότητες των τριών υλικών ημιπερατών Φ/Β σε διαπερατότητα 10%, με το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο να έχει την μεγαλύτερη απόδοση με 15% ενώ το άμορφο πυρίτιο και τα οργανικά κελιά 10%.

Διάγραμμα 9: Ετήσιες ενεργειακές ανάγκες ανά τομέα σε WWR 40%(αριστερά) και WWR 60% (δεξιά)



πηγή: Konstantinos Kapsis & Athienitis,2015

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζονται οι ετήσιες ενεργειακές ανάγκες για θέρμανση, ψύξη , εξοπλισμό και φωτισμό και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για 2 WWR, 40% (αριστερά) και 60% (δεξιά). Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για WWR 60% ήταν αρκετά μεγαλύτερη ενώ ταυτόχρονα μειώθηκαν οι ανάγκες για φωτισμό λόγω μεγαλύτερης επιφάνειας υαλοπινάκων ενώ οι ανάγκες για ψύξη αυξήθηκαν λόγω ανεπιθύμητων θερμικών κερδών. (Konstantinos Kapsis & Athienitis, 2015)

- Σε έρευνα η οποία διεξήχθει στο Πανεπιστήμιο του Χονγκ Κονγκ το 2008, με τίτλο «Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings», μελετήθηκαν πειραματικά οι ηλεκτρικές ιδιότητες ενός ημιπερατού Φ/Β, άμορφου πυριτίου διαπερατότητας 10%.

Πίνακας 4: Ηλεκτρικές ιδιότητες ημιπερατού Φ/Β ισχύος 44 W

Table 1
Performance parameters of the semi-transparent PV module from manufacturer

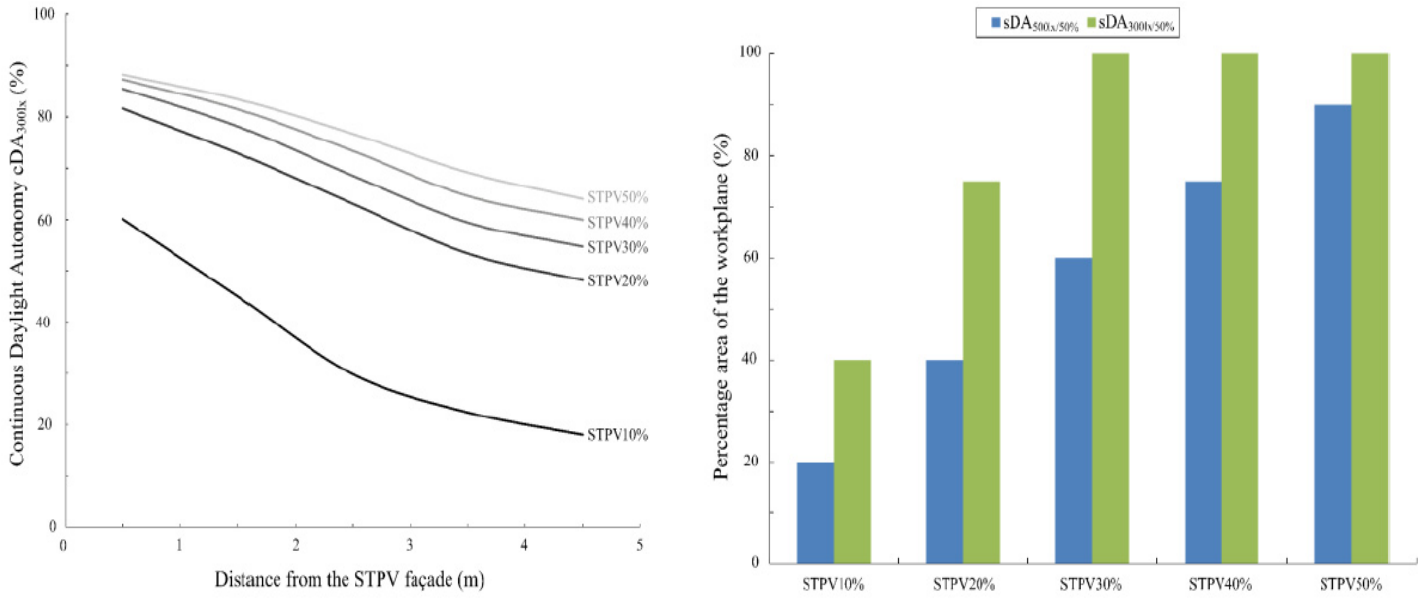
Output power	44 W
Maximum power voltage	59.6 V
Maximum power current	0.74 A
Open circuit voltage	91.8 V
Short circuit current	0.97 A
Visible light transmittance	10.6%
Solar energy transmittance	10.0%
Shading coefficient	0.27

πηγή: Li et al., 2009

Στον παραπάνω πίνακα φαίνονται οι ηλεκτρικές ιδιότητες του ημιπερατού Φ/Β με ισχύ 44 W. Στη συνέχεια μοντελοποιήθηκε η εφαρμογή του σε ένα κτίριο αναφοράς με διαστάσεις 35m x 35m , 40 ορόφων και με WWR 43%, τιμή η οποία είναι ο μέσος όρος επιφάνειας υαλοπινάκων στην περιοχή του Χονγκ Κονγκ, με προσανατολισμό προς την Δύση. Στη περίπτωση όπου εφαρμόστηκαν ημιπερατά Φ/Β σε νοτιοδυτικό προσανατολισμό και ρυθμιστής φωτισμού σε όλες τις περιμετρικές ζώνες του κτιρίου, η ετήσια εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 1203 MWh, τα φορτία αιχμής για ψύξη μειώθηκαν κατά 450 kW και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα μειώθηκαν κατά 852 τόνους. Ο χρόνος αποπληρωμής των ημιπερατών Φ/Β λαμβάνοντας υπόψη την τιμή του ηλεκτρισμού, το κόστος εγκατάστασης ψυκτικών συσκευών και την τιμή εμπορικοποίησης του διοξειδίου του άνθρακα ήταν 15 χρόνια. (Li et al., 2009)

- Το 2015 διεξήχθει έρευνα με τίτλο «Daylight performance of perimeter office façades utilizing semi-transparent photovoltaic windows: a simulation study» μελετώντας τις οπτικές ιδιότητες ημιπερατού Φ/Β λεπτού φιλμ πυριτίου με διαπερατότητες 10%, 20%, 30%, 40% και 50% αλλά και την περίπτωση διαχωρισμού του ημιπερατού σε 3 μέρη με διαφορετικές τεχνολογίες με σκοπό τη βελτιστοποίηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, του φωτισμού και την αποφυγή θάμβωσης. Το πρώτο μέρος αφορά ύψος από 0 εώς 0.8 m που είναι το ύψος εργασίας σε γραφεία, το δεύτερο από 0.8 m μέχρι 2 m και το τρίτο μέρος από 2 m μέχρι 3.2 m. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε μέσω μοντελοποίησης στο Daysim και τα ημιπερατά Φ/Β είχαν νότιο προσανατολισμό.

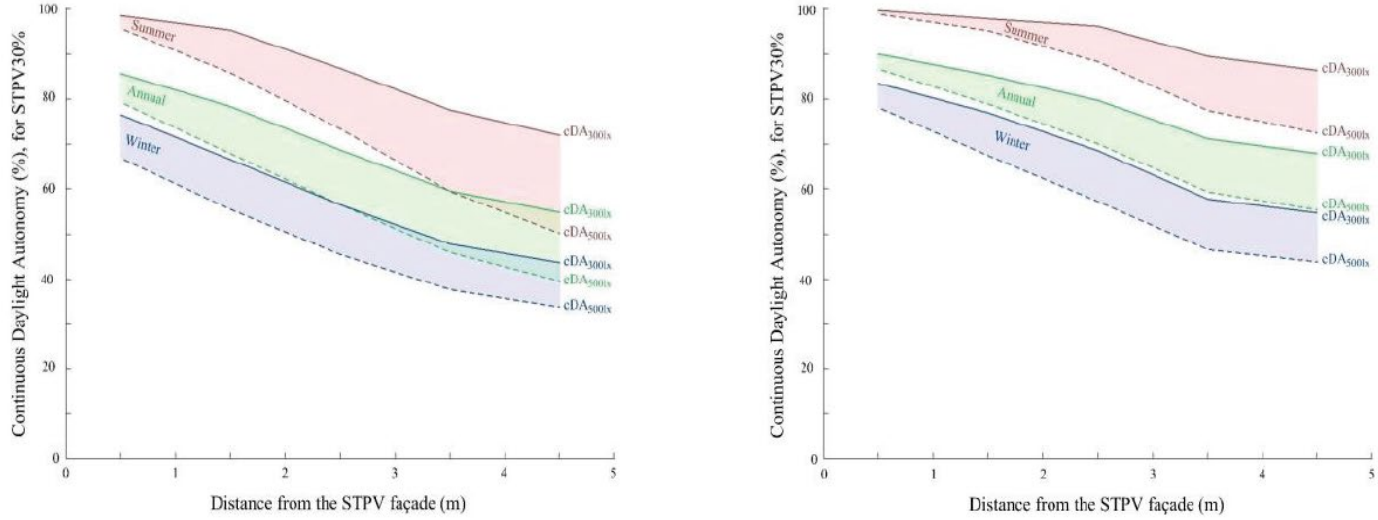
Διάγραμμα 10: Ποσοστό αυτονομίας για φωτισμό 300 lux (αριστερά) και ποσοστό αυτονομίας για 300 και 500 lux ανά διαπερατότητα (δεξιά)



πηγή: K. Kapsis et al., 2015

Το παραπάνω διάγραμα στα αριστερά δείχνει το ποσοστό αυτονομίας για τις συνολικές ώρες εργασίας του γραφείου μέσω φυσικού φωτισμού για 300 lux για κάθε διαπερατότητα από 10% μέχρι 50%. Στο διάγραμμα δεξιά , φαίνεται η ποσοστιαία κάλυψη του χώρου, για το 50% των εργάσιμων ωρών του γραφείου, με 300 lux (πράσινο χρώμα) και 500 lux (μπλε χρώμα) για τις 5 διαπερατότητες. Από τα παραπάνω διαγράμματα, φαίνεται πως τα ημιπερατά Φ/Β με διαπερατότητα 30%, δίνουν επαρκή φωτισμό καθόλη τη διάρκεια του χρόνου ενώ για μικρότερες διαπερατότητες ο φωτισμός είναι ανεπαρκής και για υψηλότερες η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι μειωμένη και υπάρχουν αυξημένα ανεπιθύμητα θερμικά φορτία.

Διάγραμμα 11: Ποσοστιαία αυτονομία για φυσικό φωτισμό εποχικά με χρήση λεπτού φιλμ (αριστερά) και κελιών πυριτίου με κενό (δεξία)



πηγή:K. Kapsis et al., 2015

Στο παραπάνω διάγραμμα στα αριστερά φαίνεται η ποσοστιαία αυτονομία για φυσικό φωτισμό, ετήσια και εποχικά με χρήση μόνο λεπτού φιλμ , ενώ στα δεξιά έγινε η χρήση κελιών πυριτίου με κενό, στο μεσαίο κομμάτι του ημιπερατού Φ/Β (0.8m – 2m) και λεπτού φιλμ στο άνω μέρος (2m – 3.2 m) όπου διακρίνεται ξεκάθαρα η βελτίωση στο φωτισμό τόσο εποχικά όσο και ετήσια για 300 και 500 lux.

Στο τέλος η έρευνα καταληγεί στο γεγονός πως με διαπερατότητα 30%, κελιά πυριτίου με κενό στο άνω μέρος (2m - 3.2m) και λεπτού φιλμ στο μεσαίο μέρος (0.8m – 2m) βελτιστοποιεί την εκμετάλλευση της ηλιακης ακτινοβολίας όσον αφορά τον φυσικό φωτισμό. (K. Kapsis et al., 2015)

- Σε έρευνα η οποία διεξήχθει στο Εθνικό Πανεπιστήμιο της Σιγκαπούρης το 2013, με τίτλο « Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings» , μελετήθηκαν 6 διαφορετικά ημιπερατά Φ/Β άμορφου πυριτίου (a-Si) και μικροκρυστάλλων κάτω απο άμορφο στρώμα (μc-Si) τα οποία είναι διαθέσιμα στην αγορά, όπου εξετάστηκαν εργαστηριακά οι οπτικές τους ιδιότητες και οι αποδόσεις τους και στη συνέχεια μοντελοποιήθηκαν σε κτίριο διαχωρισμένο σε 5 ζώνες στο πρόγραμμα EnergyPlus.

Πίνακας 5: Τεχνικά χαρακτηριστικά των ημιπερατών Φ/Β άμορφου πυριτίου

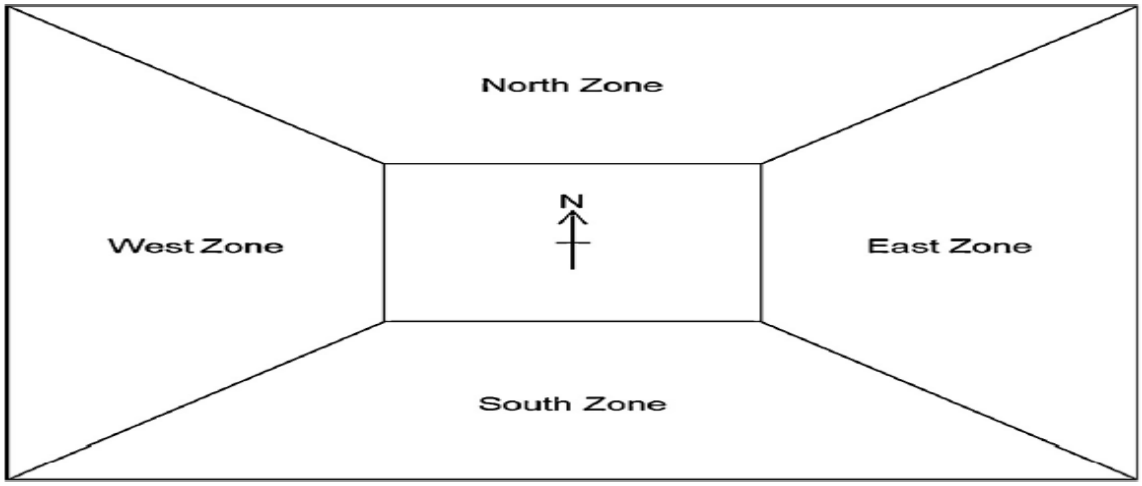
Technical data and specifications of six semi-transparent BIPV modules under investigation.

	Module 1	Module 2	Module 3	Module 4	Module 5	Module 6
Module area (mm × mm)	980 × 950	1300 × 1100	1300 × 1100	1300 × 1100	989 × 930	980 × 950
Efficiency [%]	8.02	5.90	3.32	4.43	5.01	4.75
SHGC (measured)	0.289	0.413	0.298	0.387	0.154	0.123
U-value (measured) [W/(m^2 K)]	5.08	4.80	5.08	5.10	1.67	2.14
Visible light transmittance [%]	9.17	5.19	1.84	4.17	6.91	7.34
Photovoltaic technology	a-Si	μc-Si	μc-Si	μc-Si	a-Si	a-Si
Construction assembly	Glass–glass single pane laminate	Glass–glass single pane laminate	Glass–glass single pane laminate	Glass–glass single pane laminate	Double glazed unit	Double glazed unit
Appearance	Standard	Red	Golden	Dark blue	Standard	Standard

Note: a-Si, amorphous silicon; μc-Si, micromorph silicon.

πηγή: Ng et al, 2013

Εικόνα 5: Ζώνες κτιρίου βάση προσανατολισμού



πηγή: Ng et al, 2013

Ο βασικός δείκτης αξιολόγησης της έρευνας ήταν ο NEB (Net Electrical Benefit) λαμβάνοντας υπόψη τις εξής παραμέτρους: NEB = Lsavings − Celectricity + PVgeneration [kWh/m2] όπου ο πρώτος όρος είναι η εξοικονόμηση ενέργειας από τεχνητό φωτισμό , ο δεύτερος όρος η κατανάλωση ενέργειας για κλιματισμο λόγω των φορτίων ψύξης και ο τρίτος όρος η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μοντελοποίηση έδειξε ότι τα module 1, 5 και 6 είχαν θετικό NEB ενώ τα υπόλοιπα αρνητικό και για τους 4 προσανατολισμούς για όλα τα WWR (10% - 100%) .

Επίσης έγινε η σύγκριση των 6 ημιπερατών Φ/Β με συμβατικούς υαλοπίνακες , και τα ποσοστά εξοικονόμησης είχαν ως βάση μόνο τζάμι όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα

Διάγραμμα 12: Ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας για όλα τα ημιπερατά Φ/Β και τα WWR

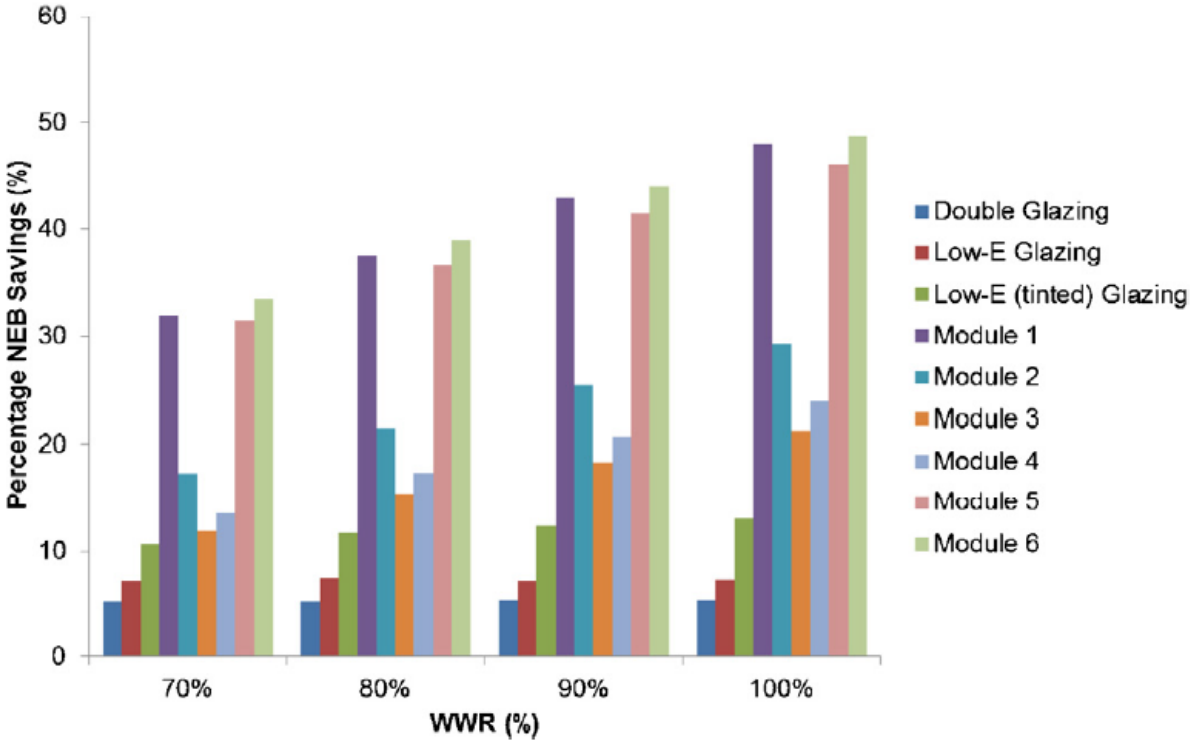


Fig. 9. Percentage of total NEB savings through alternative window types with single glazing as reference (therefore not shown here).

πηγή: Ng et al. 2013

Τα τελικά συμπεράσματα της έρευνας ήταν ότι τα ημιπερατά Φ/Β μπορούν να εφαρμοστούν σε όλους τους προσανατολισμούς , η εφαρμογή τους πρέπει να συνοδεύεται με καλές αποδόσεις και θερμικές ιδιότητες για μεγαλύτερο NEB και ότι σε μεγάλα WWR τα ημιπερατά Φ/Β είναι καλύτερη λύση σε σχέση με τους συμβατικούς υαλοπίνακες (Ng et al., 2013)

- Το 2015 στο Huazhong University of Science and Technology στην Κίνα, διεξήχθει έρευνα με τίτλο «Energy performance comparison among see-through amorphous silicon PV (photovoltaic) glazings and traditional glazings under different

architectural conditions in China», μελετώντας την εφαρμογή 2 ημιπερατών Φ/Β άμορφου πυριτίου σε γραφεία και έγινε η σύγκρισή τους με συμβατικούς υαλοπίνακες μέσω μοντελοποίησης στο EnergyPlus. Τα χαρακτηριστικά των ημιπερατών Φ/Β αλλά και των υαλοπινάκων ήταν τα εξής:

Πίνακας 6: Τεχνικά χαρακτηριστικά ημιπερατών Φ/Β και συμβατικών υαλοπινάκων

Properties of the studied glazings.

Glazing	U-value (W/m2K)	Visible transmittance	SHGC	PV conversion efficiency
A: See-through a-Si PV glazing (low transmittance)	5.18	0.20	0.26	0.049
B: See-through a-Si PV glazing (high transmittance)	5.18	0.32	0.41	0.041
Single glazing	5.8	0.87	0.87	/
Double glazing	2.8	0.71	0.75	/
Low-E double glazing	1.9	0.62	0.45	/

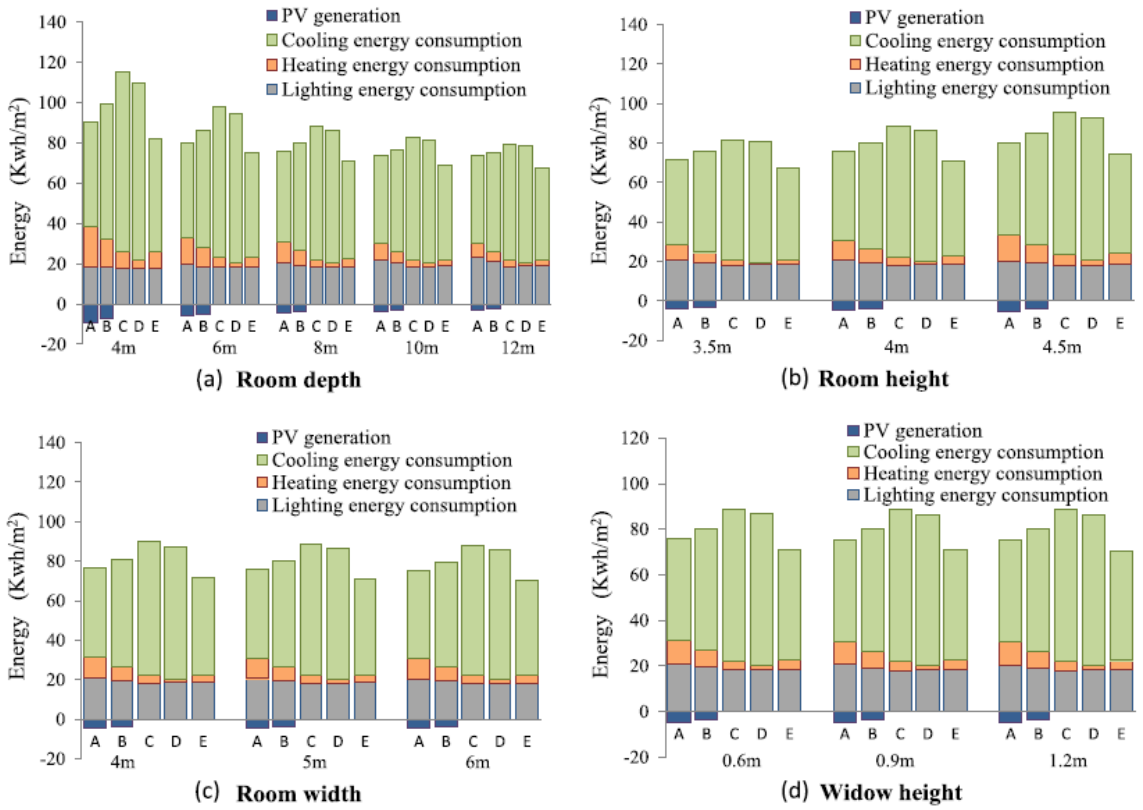
SHGC: solar heat gain coefficient.

πηγή: Liao & Xu, 2015

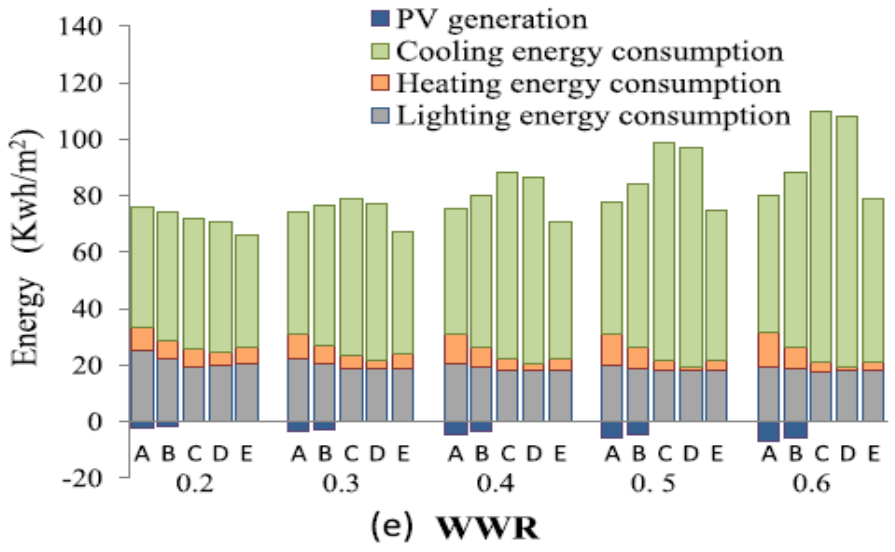
Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh / m^2) του κτιρίου βάση 5 παραμέτρων οι οποίες μεταβάλλονταν: 1) το βάθος του δωματίου, 2) το ύψος του δωματίου, 3) το πλάτος του δωματίου, 4) το ύψος των παραθύρων και 5) το WWR.

Τα αποτελέσματα που βρέθηκαν για τα 2 ημιπερατά Φ/Β και τους 3 υαλοπίνακες μεταβάλλοντας τις 5 παραπάνω παραμέτρους ήταν τα εξής:

Διάγραμμα 13: Κατανάλωση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλοντας (a)το βάθος,(b)το ύψος,(c)το πλάτος,(d)το ύψος υαλοπίνακα,(e) το WWR



πηγή: Liao & Xu, 2015



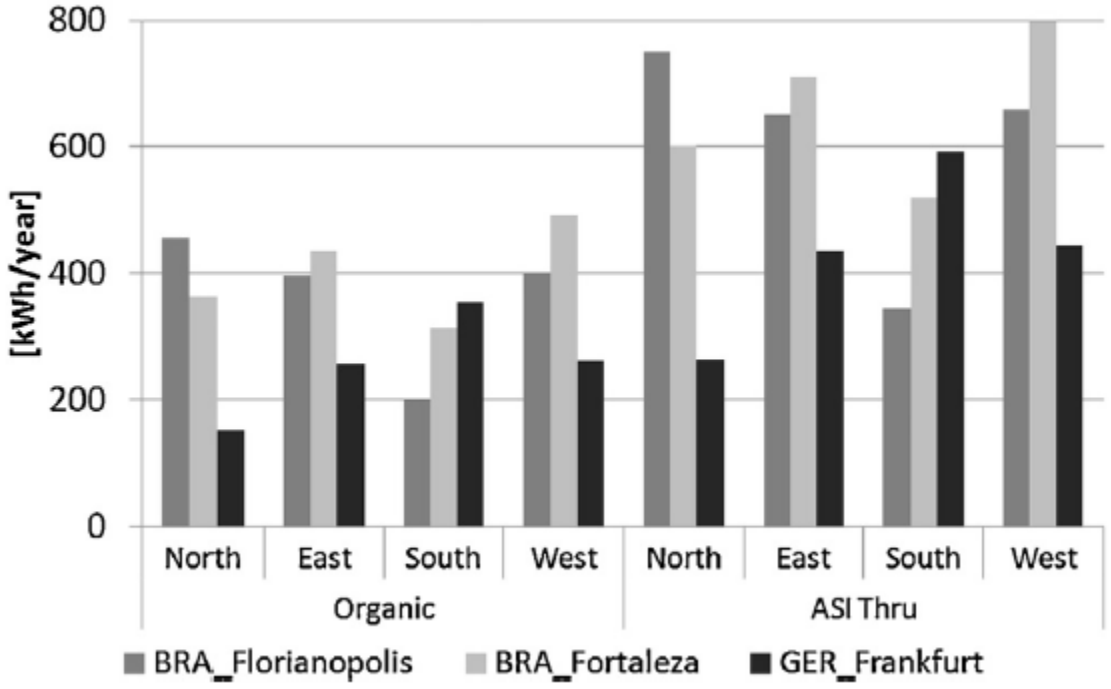
πηγή: Liao & Xu, 2015

Τα συμπεράσματα της έρευνας ήταν ότι σε γραφεία που ως βασικός παράγοντας είναι τα φορτία ψύξης , η εφαρμογή ημιπερατών Φ/Β υπερτερεί έναντι του μονού τζαμιού και των

διπλών τζαμιών ενώ έχει ελάχιστα μικρότερη απόδοση όσον αφορά την κατανάλωση σε σχέση με τα τζάμια low-e . Επίσης, το ημιπερατό Φ/Β με την χαμηλότερη διαπερατότητα (20%) είχε καλύτερη απόδοση από το ημιπερατό Φ/Β με την μεγαλύτερη διαπερατότητα (32%) και αυτό οφείλεται στα αυξημένα θερμικά φορτία του 2ου δηλαδή μεγαλύτερες ανάγκες σε ψύξη. Η καλύτερη απόδοση των ημιπερατών σε σχέση με τα συμβατικά τζάμια, οφείλεται κυρίως στα μειωμένα ψυκτικά φορτία και σε μικρότερο ποσοστό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, καταλήγει ότι οι παράγοντες που μελετήθηκαν δηλαδή το βάθος και το ύψος του δωματίου και το WWR επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την ενεργειακή απόδοση του κτιρίου. Η εφαρμογή των ημιπερατών Φ/Β είναι πιο αποδοτική έναντι των συμβατιών υαλοπινάκων όταν εφαρμόζονται σε δωμάτια με μικρό βάθος και σε μεγάλα WWR. (Liao & Xu, 2015)

- Σε έρευνα που διεξήχθει το 2013 με τίτλο « Semi-transparent PV windows: A study for office buildings in Brazil» μελετήθηκε η εφαρμογή οργανικών ημιπερατών φωτοβολταϊκών απόδοσης 3% και διαπερατότητας 30% και ημιπερατά φωτοβολταϊκά της εταιρείας Schott , απόδοσης 5% και διαπερατότητας 8% σε ένα κτίριο αναφοράς με 2 διαφορετικά WWR (<50% και > 50%) σε 2 πόλεις της Βραζιλίας μέσω μοντελοποίησης για 4 διευθύνσεις, Βορρά Νότο, Ανατολή και Δύση. Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις 2 πόλεις αλλά και για την πόλη της Φρανκφούρτης φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα για WWR >50% (16 m^2)

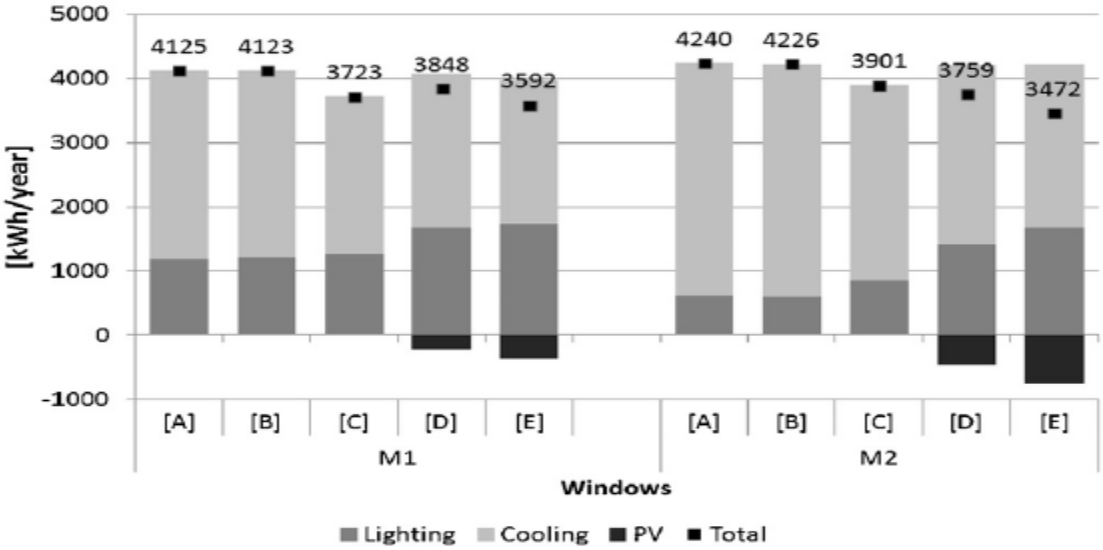
Διάγραμμα 14: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά πόλη, τεχνολογία ημιπερατών Φ/Β και προσανατολισμό



πηγή: Leite Didone &Wagner, 2013

Να σημειώθεί ότι η πόλη της Βραζιλίας Florianopolis, βρίσκεται στο νότιο ημισφαίριο και για το λόγο αυτό έχει την μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας όταν ο προσανατολισμός των ημιπερατών Φ/Β είναι προς τον βορρά. Επίσης κατά την μοντελοποίηση έγινε η σύγκριση των 2 ημιπερατών Φ/Β με μονό τζάμι (A) , διπλό τζάμι (B) και διπλό τζάμι Low -e (C) . Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η ετήσια ενεργειακή κατανάλωση για την πόλη της Florianopolis με προσανατολισμό προς τον βορρά όσον αφορά τον φωτισμό, τα ψυκτικά φορτία και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τα 2 WWR δηλαδή 8 m^2 (M1) και 16 m^2 (M2)

Διάγραμμα 15: Κατανάλωση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Florianopolis για 8 m^2 (M1) (αριστερά) και 16 m^2 (M2) (δεξιά)

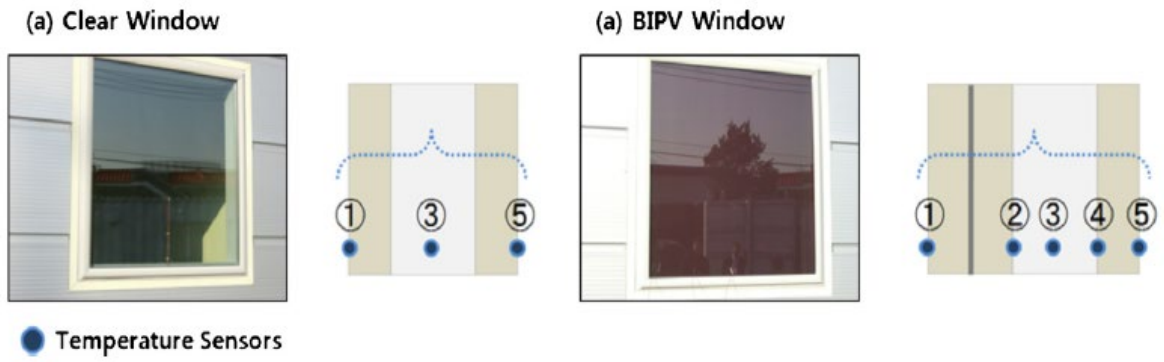


πηγή: Leite Didone & Wagner, 2013

Τέλος, η έρευνα καταλήγει στο γεγονός ότι οι επιφάνειες χωρίς ημιπερατά Φ/Β για WWR <50% έχουν χαμηλότερη κατανάλωση από τις επιφάνειες με WWR >50%, ενώ εάν υπάρχουν ημιπερατά Φ/Β η καλύτερη λύση είναι οι επιφάνειες με WWR >50 δηλαδή μεγάλες επιφάνειες όπου γίνεται και μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. (Leite Didoné & Wagner, 2013)

- Σε έρευνα που διεξήχθει το 2006 με τίτλο «An experimental study on the annual surface temperature characteristics of amorphous silicon BIPV window», μελετήθηκε πειραματικά η θερμοκρασία και η επιρροή της στην εφαρμογή διπλού τζαμιού άμορφου ημιπερατού Φ/Β διαπερατότητας 7.5% , συγκρίνοντας ταυτοχρόνως τις αντίστοιχες παραμέτρους με κανονικά διπλά τζάμια διαπερατότητας 81.5% υπό κλίσεις 0, 30 και 90 μοίρες σε νότιο προσανατολισμό. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι θέσεις των αισθητήρων θερμοκρασίας για το κανονικό διπλό τζάμι και για το διπλό τζάμι με φιλμ λεπτού υμένα άμορφου πυριτίου.

Εικόνα 6: Θέσεις αισθητήρων στο κανονικό διπλό τζάμι (αριστερά) και στο τζάμι άμορφου πυριτίου (δεξία)



πηγή: Yoon et al.,2013

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι ετήσιες μέγιστες, ελάχιστες, μέσες θερμοκρασίες για τις 2 περιπτώσεις αλλά και η μέγιστη διαφορά μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής πλευράς των τζαμιών.

Πίνακας 7: Πειραματικά αποτελέσματα θερμοκρασιών

Sensor location	BIPV windows					Normal clear windows		
	① Outermost surface	② Outer surface of cavity	③ Cavity air	④ Inner surface of cavity	⑤ Innermost surface	① Outermost surface	③ Cavity air	⑤ Innermost surface
Horizontal plane								
Min.	−15.2 (13.01.2007)	−15.2 (13.01.2007)	−14.9 (13.01.2007)	−11.9 (13.01.2007)	−8.5 (13.01.2007)	−12.6 (13.01.2007)	−12.7 (13.01.2007)	−10.3 (13.01.2007)
Max.	62.2 (17.08.2007)	65.6 (17.08.2007)	65.8 (17.08.2007)	58.7 (17.08.2007)	57.5 (17.08.2007)	45.9 (17.08.2007)	46.2 (17.08.2007)	47.5 (17.08.2007)
Average	12.7	13.4	13.6	14.4	14.7	10.5	11.9	15.3
ΔT			21.4 (17.08.2007)				14.2 (20.08.2007)	
Inclined plane								
Min.	−16.0 (13.01.2007)	−14.7 (13.01.2007)	−13.5 (13.01.2007)	−11.5 (13.01.2007)	−11.0 (13.01.2007)	−16.6 (13.01.2007)	−13.7 (13.01.2007)	−12.5 (13.01.2007)
Max.	59.8 (17.08.2007)	67.2 (17.08.2007)	64.7 (17.08.2007)	58.8 (17.08.2007)	56.8 (17.08.2007)	58.6 (20.08.2007)	58.6 (17.08.2007)	55.0 (20.08.2007)
Average	12.7	15.1	15.5	15.4	15.5	11.9	14.8	16.7
ΔT			24.9 (16.08.2007)				16.5 (03.08.2007)	
Vertical plane								
Min.	−10.9 (13.01.2007)	−10.3 (13.01.2007)	−9.5 (13.01.2007)	−8.3 (13.01.2007)	−7.8 (13.01.2007)	−16.4 (13.01.2007)	−15.5 (13.01.2007)	−8.5 (13.01.2007)
Max.	39.5 (17.08.2007)	51.9 (20.08.2007)	51.4 (20.08.2007)	47.7 (20.08.2007)	46.1 (17.08.2007)	42.3 (20.08.2007)	52.5 (03.08.2007)	49.3 (20.08.2007)
Average	10.9	15.1	15.6	15.5	15.5	10.5	11.9	15.3
ΔT			24.1 (16.08.2007)				14.7 (03.08.2007)	

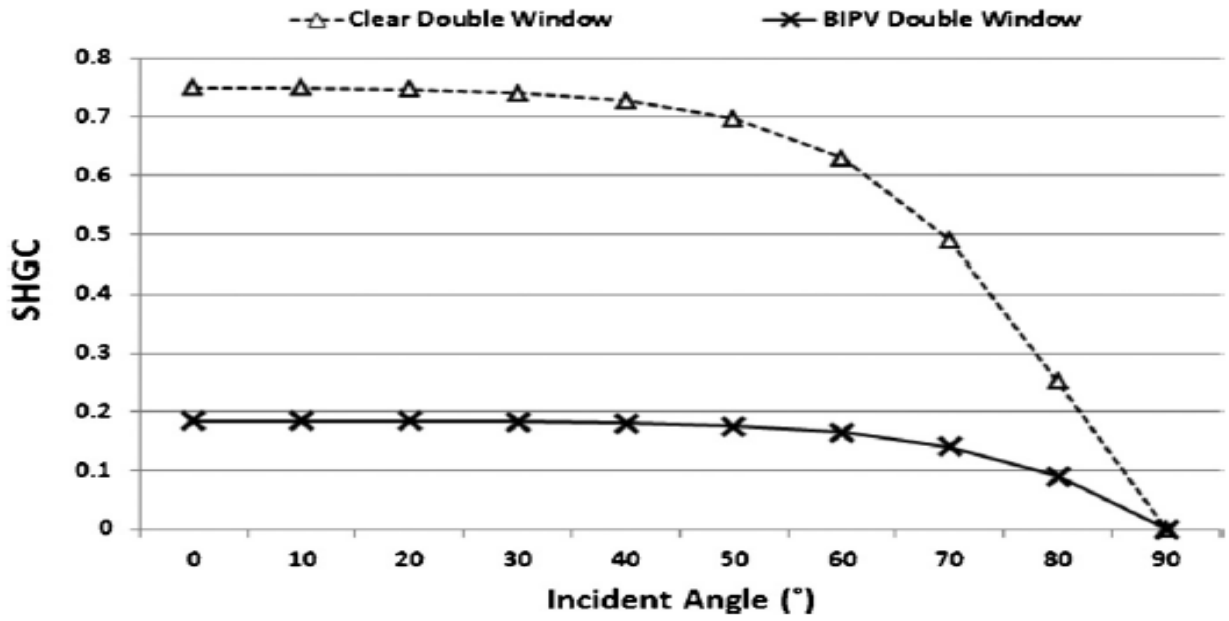
πηγή: Yoon et al., 2013

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα της έρευνας, το διπλό τζάμι με το άμορφο πυρίτιο υπό κλίση 90 μοιρών, είχε χαμηλότερη θερμοκρασία στην επιφάνεια από το κανονικό διπλό τζάμι κατά τη διάρκεια της ημέρας ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας υψηλότερη. Επίσης, το διπλό τζάμι με το άμορφο πυρίτιο έχει μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εξωτερικής και εσωτερικής πλευράς των τζαμιών γεγονός που

το καθιστά καλύτερη λύση όσον αφορά την θερμομόνωση σε σχέση με το κανονικό διπλό τζάμι.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι συντελεστές ηλιακών θερμικών κερδών για τις 2 περιπτώσεις υπό διάφορες κλίσεις.

Διάγραμμα 16: Συντελεστές ηλιακών θερμικών κερδών συναρτήσει της κλίσης



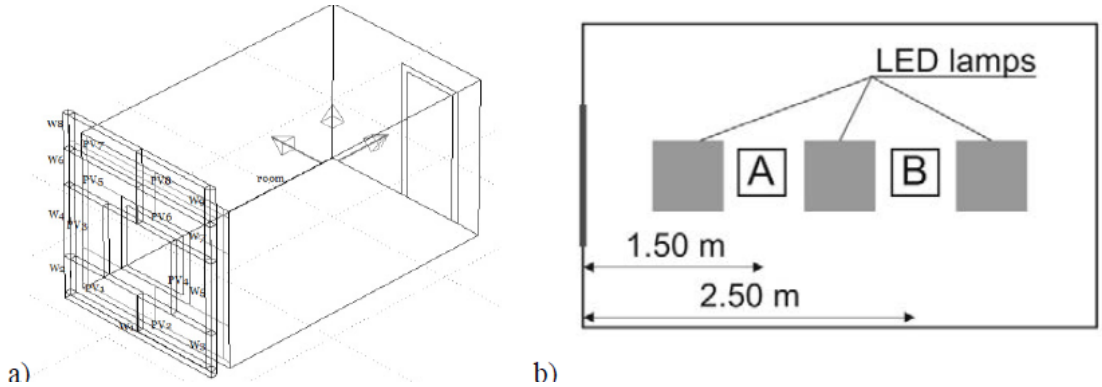
πηγή: Yoon et al., 2013

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα ο συντελεστής ηλιακών θερμικών κερδών για το διπλό τζάμι με άμορφο πυριτίο είναι περίπου 4 φορές μικρότερος από τον αντίστοιχο του κανονικού διπλού τζαμιού, δηλαδή η εσωτερική θερμοκρασία δωματίου είναι χαμηλότερη και μειώνονται τα ανεπιθύμητα θερμικά κέρδη.

Τέλος η έρευνα καταλήγει πως η θερμοκρασία των επιφανειών αυξάνεται σημαντικά τον χειμώνα όταν η κλίση των τζαμιών είναι 90 μοίρες, ενώ για κλίσεις 0 και 30 μοίρες η θερμοκρασία αυξάνεται το καλοκαίρι. Επίσης, η επιφάνεια των τζαμιών με άμορφο πυριτίο ήταν 1 °C χαμηλότερη κατά τη διάρκεια της ημέρας την θερινή περίοδο, ενώ περίπου 2 °C υψηλότερη κατά τη διάρκεια της νύχτας την χειμερινή περίοδο καθιστώντας το καλύτερη θερμομονωτική λύση από το κανονικό διπλό τζάμι. (Yoon et al., 2013)

- Σε έρευνα που διεξήχθει το 2015, με τίτλο «Potential of PV façade for supplementary lighting in winter», μελετήθηκε η εφαρμογή ημιπερατών Φ/Β διαπερατότητας 70% και απόδοσης 12% σε γραφείο, με σκοπό την κάλυψη των 500 lux που προβλέπεται σε χώρους γραφείων κατά τη χειμερινή περίοδο για τις 4 κατευθύνσεις, βορρά, νότο, ανατολή και δύση. Συγκεκριμένα, η περίοδος που μελετήθηκε ήταν από Σεπτέμβριο μέχρι Μάρτιο για τις ώρες 8:00 μέχρι 16:00 και η μοντελοποίηση είχε 2 σημεία αναφοράς: 1.5 m και 2.5 m από το παράθυρο. Σε περίπτωση μη επαρκούς φυσικού φωτισμού, 3 λάμπες LED 36 W η κάθε μία, ανάλογα με τις ανάγκες συμπλήρωναν τα απαραίτητα lux για την επίτευξη των 500 lux όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

Εικόνα 7: Διάταξη χώρου μοντελοποίησης

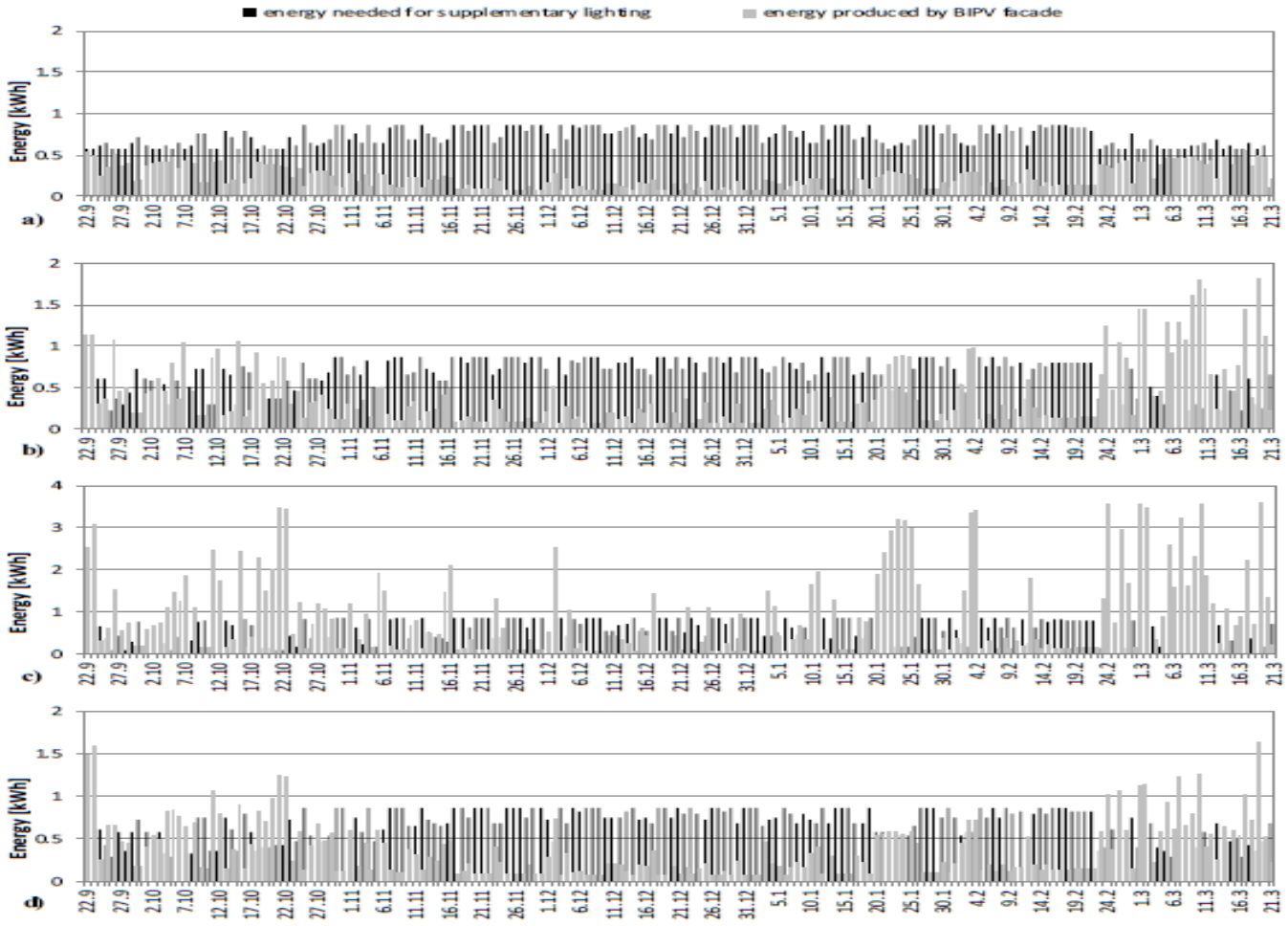


πηγή: Knera et al., 2015

Βάση των αποτελεσμάτων της μοντελοποίησης, το σημείο Α είχε επαρκή φωτισμό καθ'όλη την περίοδο που εξετάζεται , ενώ στο σημείο Β ειδικά στον βόρειο, ανατολικό και δυτικό προσανατολισμό ήταν ανεπαρκής με αποτέλεσμα να χρειάζονται διαρκώς 2 λάμπες LED αναμμένες.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται οι ανάγκες για τεχνητό φωτισμό αλλά και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το ημιπερατό Φ/Β για τον a) βορρά, b) ανατολή ,c) νότο και d) δύση αντίστοιχα.

Διάγραμμα 17 : Ανάγκες τεχνητού φωτισμού και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις 4 κατευθύνσεις



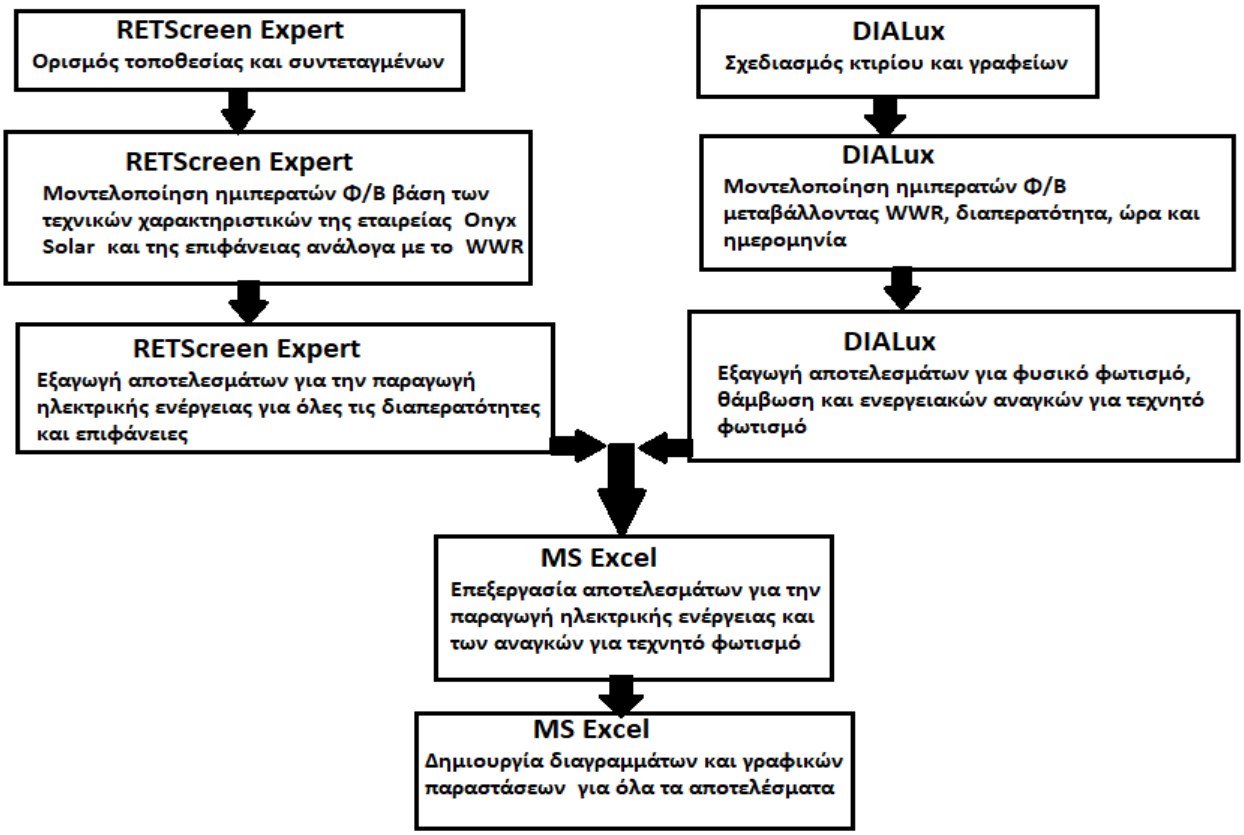
πηγή: Knera et al., 2015

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, η μέγιστη ανάγκη για τεχνητό φωτισμό υπάρχει τους μήνες, Νοέμβριο, Δεκέμβριο και Ιανουάριο ειδικότερα στην αρχή και στο τέλος του ωραρίου εργασίας (8:00, 15:00 και 16:00). Επίσης, ο νότος είναι ο μόνος προσανατολισμός στον οποίο καθόλη τη διάρκεια της περιόδου εξέτασης, παράγεται αρκετή ενέργεια για την κάλυψη του απαραίτητου τεχνητού φωτισμού , ο ανατολικος και δυτικός προσανατολισμός καλύπτουν την ανάγκη για τεχνητό φωτισμό τους μήνες Σεπτέμβριο, Οκτώβριο, το δεύτερο μισό του Φεβρουαρίου και Μάρτιο, και ο βόρειος προσανατολισμός, είναι ανεπαρκής για την κάλυψη του τεχνητού φωτισμού καθ'όλη τη διάρκεια της περιόδου εξέτασης. (Knera et al., 2015)

6 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η μοντελοποίηση και γενικά ο στόχος της παρούσας αναφοράς είναι η εύρεση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την εφαρμοφή ημιπερατών Φ/Β σε γραφεία και πως επηρεάζεται η οπτική άνεση των εργαζομένων εντός των γραφείων ανάλογα με την διαπερατότητα και το WWR. Τα θερμικά και ψυκτικά φορτία και γενικά έννοιες όπως θερμοπερατότητα και U- value των υλικών δεν λήφθηκαν υπόψη στην μοντελοποίηση του κτιρίου. Στο πρόγραμμα RETscreen Expert,έγινε η μοντελοποίηση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του κάθε ημιπερατού και στο πρόγραμμα DIALux έγινε ο σχεδιασμός των γραφείων, η εφαρμογή των ημιπερατών Φ/Β στο κτίριο και η εύρεση του φυσικού φωτισμού, των ενεργειακών αναγκών για τεχνητό φωτισμό και των φαινομένων θάμβωσης για κάθε περίπτωση.

Διάγραμμα 18 : Διάγραμμα ροής διεργασιών μεθοδολογίας

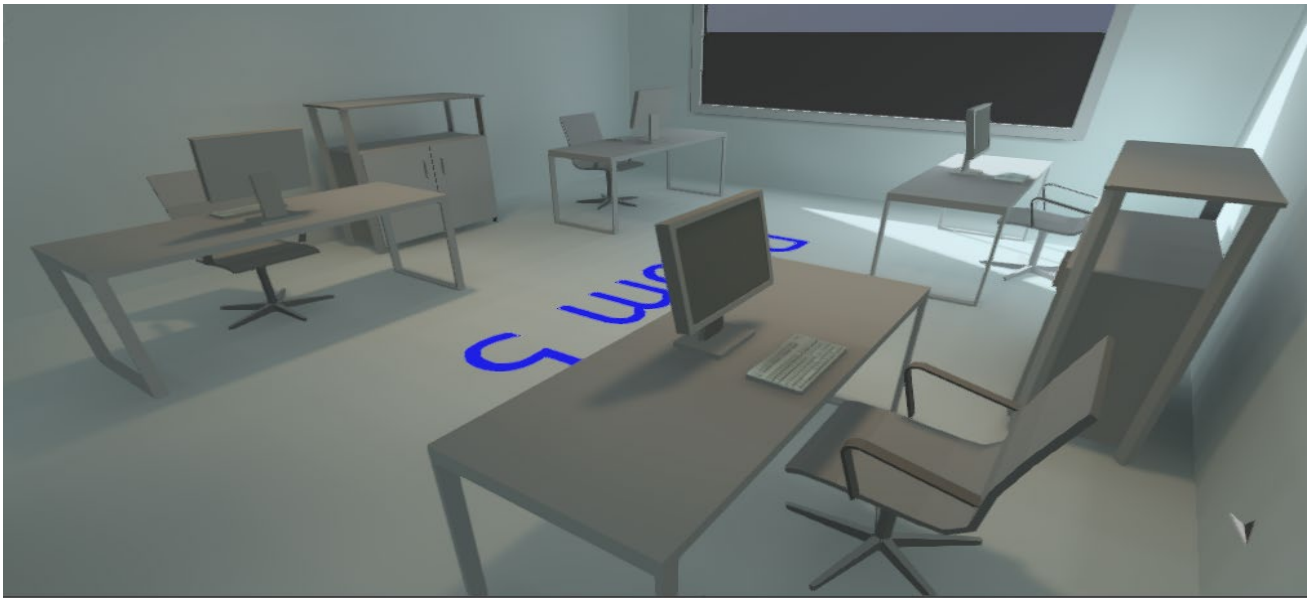


7 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

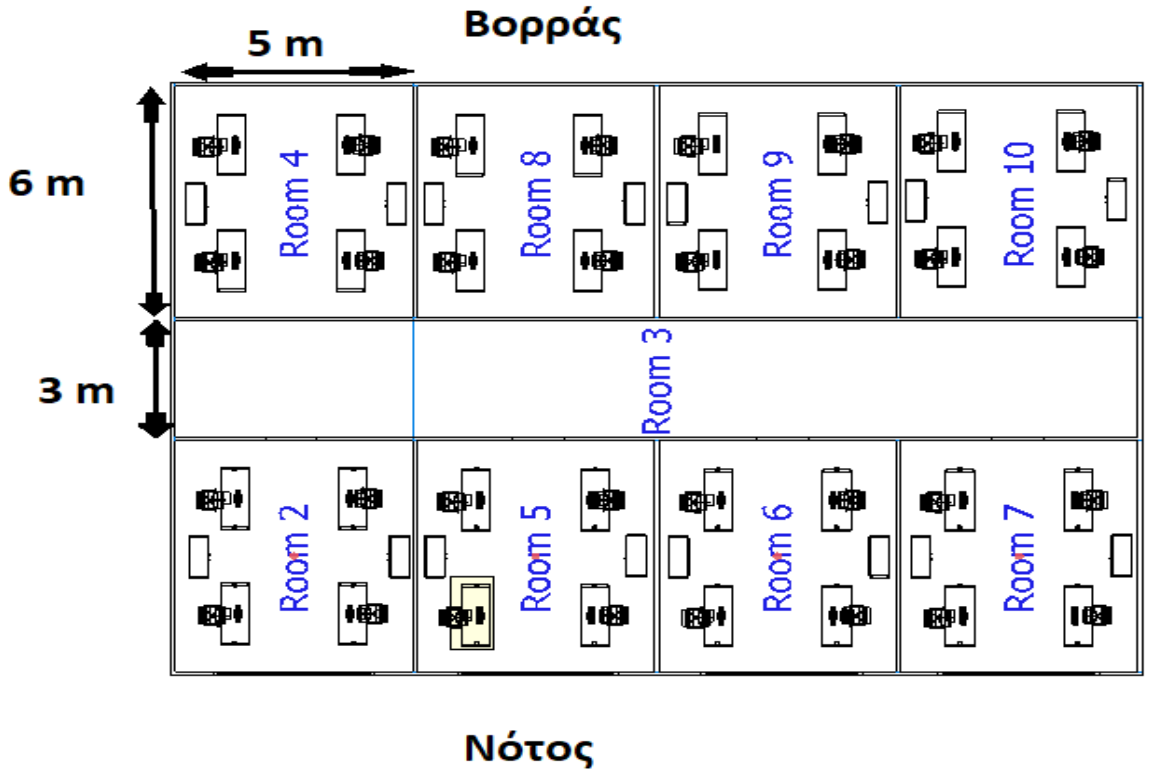
7.1 Μοντελοποίηση στο DIALux

Στο πρόγραμμα DIALux έγινε η μοντελοποίηση ενός τετραόροφου κτίρου διαστάσεων 15m x 20 m , με 8 γραφεία στον κάθε όροφο. Η μία πλευρά του κτιρίου στην οποία βρίσκονται 4 γραφεία έχει προσανοτολισμό προς τον βορρά ενώ η άλλη προς τον νότο όπου και έγινε η εφαρμοφή των ημιπερατών Φ/Β. Το κάθε γραφείο στεγάζει 4 υπαλλήλους και η βασική παράμετρος μοντελοποίησης, είναι να υπάρχει φωτισμός 500 lux στο γραφείο κάθε υπαλλήλου σε ύψος 0.8 m από το έδαφος, που προβλέπεται από το πρότυπο EN 12464 για συγγραφή , δακτυλόγραφηση, ανάγνωση και επεξεργασία δεδομένων.

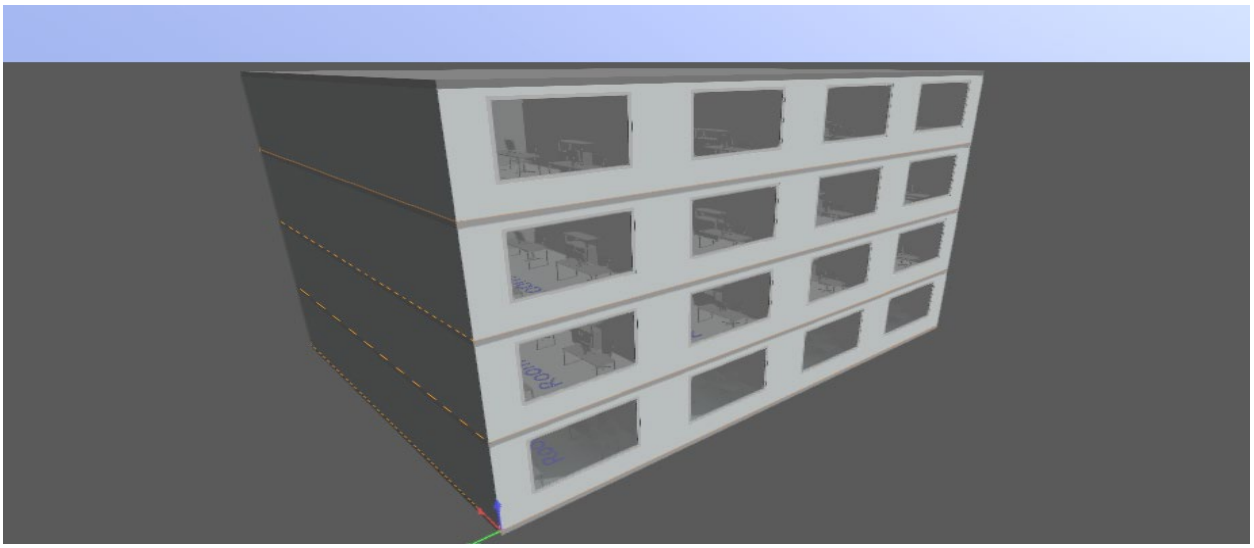
Εικόνα 8: Διάταξη γραφείου



Εικόνα 9: Κάτοψη κτιρίου και διαστάσεις

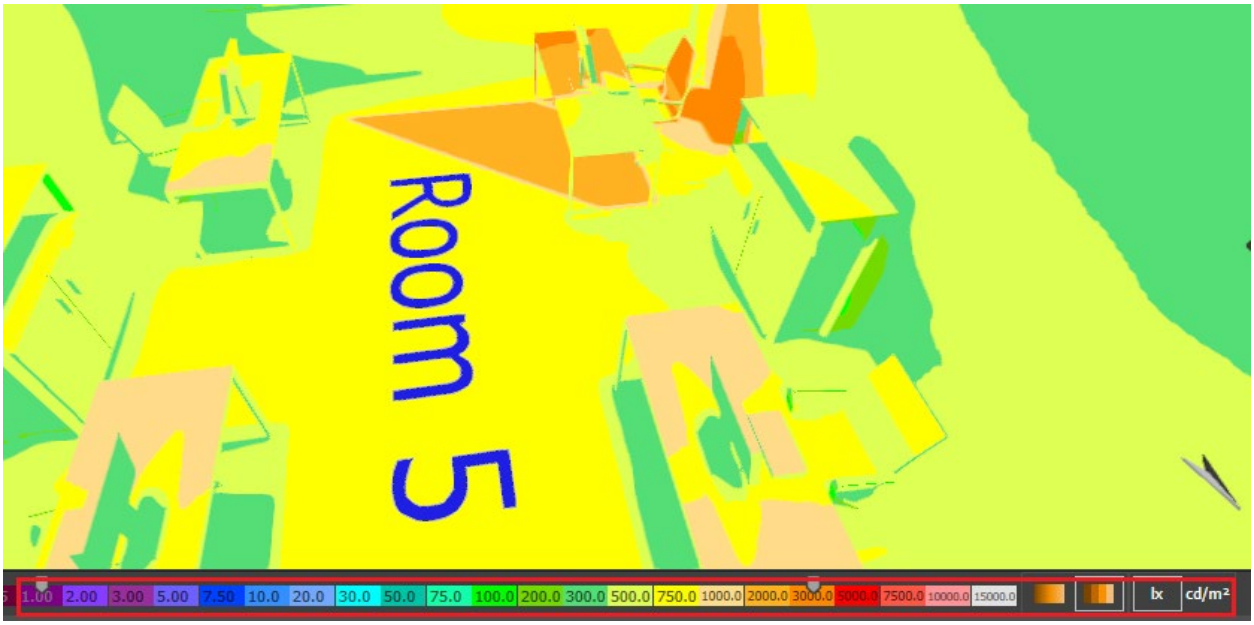


Εικόνα 10: Πρόσοψη κτιρίου



Η ένδειξη των αποτελεσμάτων στο DIALux γίνεται με ισοϋψείς καμπύλες αλλά και με χρωματισμούς για τα διάφορα επίπεδα φωτισμού. Στην προκειμένη περίπτωση, τα 500 lux απεικονίζονται με ελαφρύ κίτρινο χρώμα, τα 750 lux με έντονο κίτρινο χρώμα, τα 1000 lux με μπεζ χρώμα κι ούτω καθ'εξής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.

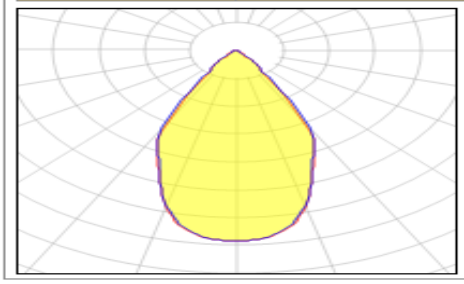
Εικόνα 11: Απεικόνιση φωτισμού με χρωματισμούς



Στόχος, είναι η όσο μεγαλύτερη κάλυψη της ανάγκης των 500 lux με φυσικό φωτισμό αλλά και η μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στις περιπτώσεις που δεν επαρκεί ο φυσικός φωτισμός, συμπληρώνεται με τεχνητό φωτισμό και συγκεκριμένα λάμπες LED υψηλής απόδοσης . Οι λάμπες που χρησιμοποιήθηκαν είναι της εταιρείας Rio, 24 Watt, με απόδοση 104 lumen/W

Εικόνα 12: Τεχνικά χαρακτηριστικά λαμπτήρων LED

Lamp type	Nominal lamp power	Total flux	Luminous efficacy	CCT	CRI
LED	24 W	2502 lm	104 lm/W	3926 K	95



LOR: 100%
Total power: 24 W

Mounting mode
Ceiling mounted, Contact rail

Shape and measurements
Length: 3.15 in
Width: 3.15 in
Height: 6.38 in

Adjustability
Rotatable, Tiltable

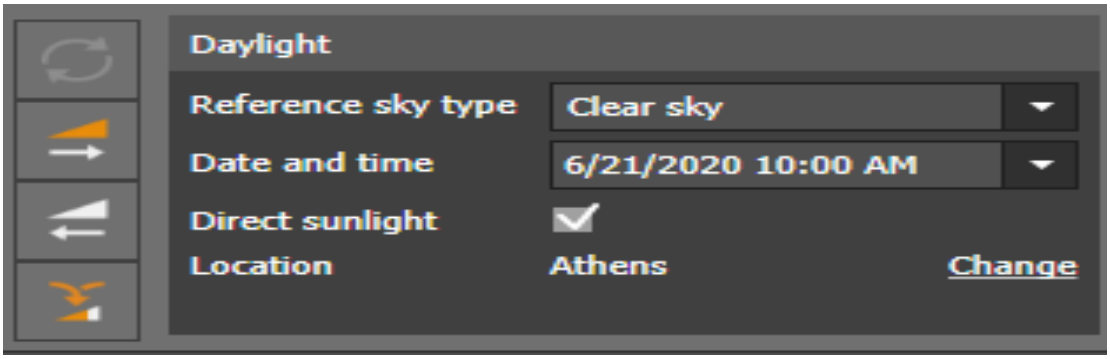
Electric
System power: 24 W

Protection
IP: 20

Η μοντελοποίηση έγινε για τα δύο ηλιοστάσια του χρόνου , δηλαδή στις 21 Ιουνίου και 21 Δεκεμβρίου όπου ο ήλιος φτάνει το ψηλότερο (θερινό ηλιοστάσιο) ή το χαμηλότερο σημείο (χειμερινό ηλιοστάσιο) που έχει το μεσημέρι στη διάρκεια ενός χρόνου, αλλά και στις δύο ενδιάμεσες περιόδους 21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου. Για τις 4 μέρες αυτές μέρες του χρόνου, έγινε εξαγωγή αποτελεσμάτων όσον αφορά τον φυσικό και τεχνητό φωτισμό για 3 ώρες της ημέρας: 10:00 π.μ , 13:00 μ.μ και 16:00 μ.μ.

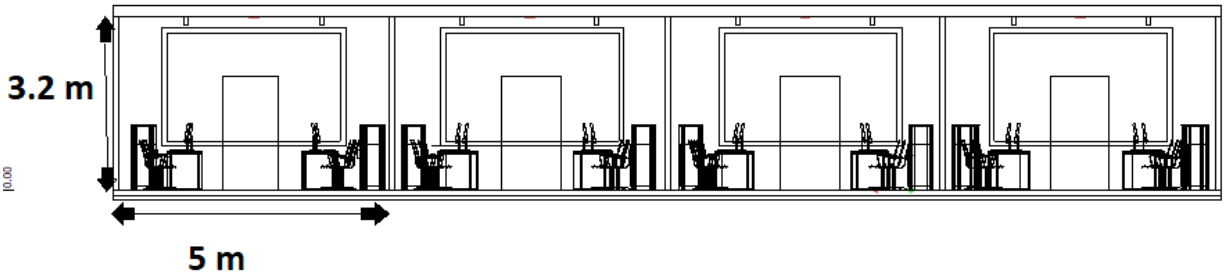
Στις 21 Ιουνίου, το κτίριο μοντελοποιήθηκε με την επιλογή Clear Sky, ενώ για τις άλλες 3 ημερομηνίες με την επιλογή Average Sky , αφού ουσιαστικά το καλοκαίρι στην Ελλάδα επικρατεί λιακάδα , ενώ τους άλλους μήνες υπάρχουν και μέρες με βροχοπτώσεις και συννεφιά.

Εικόνα 13: Επιλογή μετεωρολογικών συνθήκων, ημερομηνίας και ώρας



Η πρόσοψη του κάθε γραφείου της νότιας πλευράς του κτιρίου που μοντελοποιήθηκε έχει διαστάσεις 3.2 m ύψος και 5 m πλάτος όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα , δηλαδή 16 m^2 και βάση αυτού πολλαπλασιαζόταν με 0.3 εώς 0.8 για να βρεθεί η επιφάνεια των ημιπερατών Φ/Β για κάθε WWR.

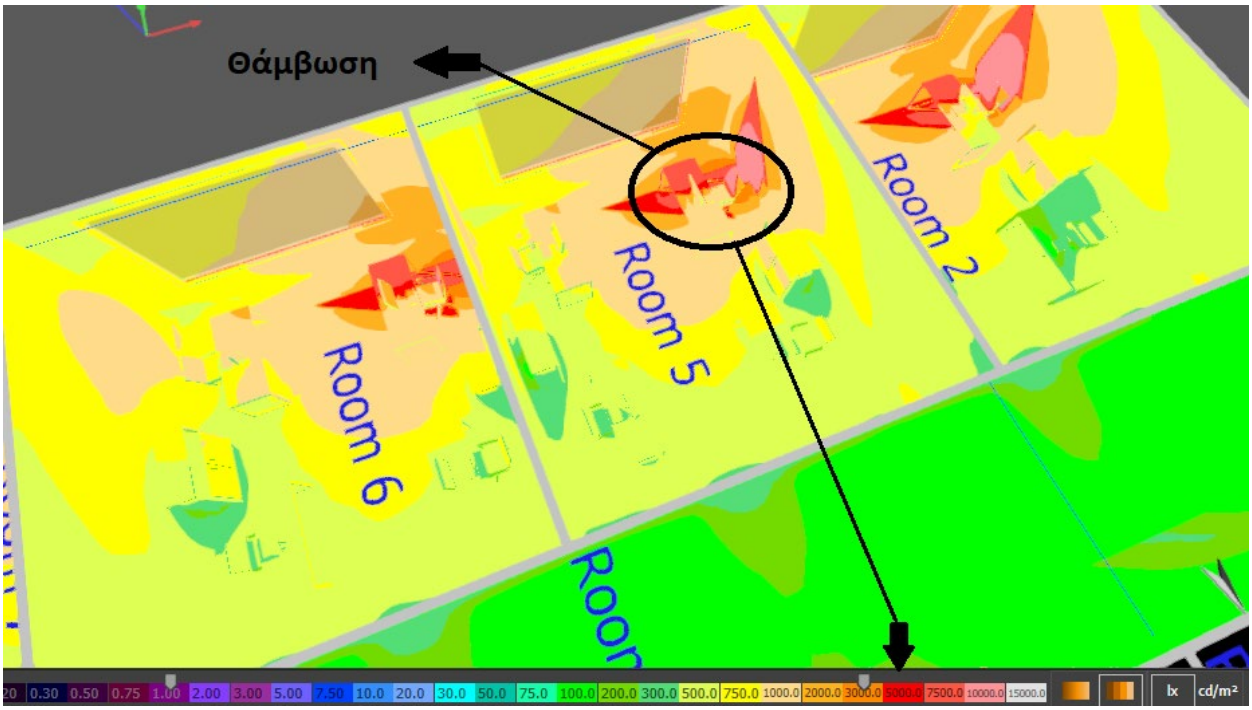
Εικόνα 14: Πρόσοψη γραφείων



Μία άλλη βασική παράμετρος στην μοντελοποίηση είναι η θάμβωση (glaring) δηλαδή η άμεση πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας εντός των γραφείων προκαλώντας δυσάρεστο περιβάλλον στους υπαλλήλους. Το αν υπάρχει θάμβωση ή όχι είναι άμεσα αλληλένδετο με την θέση ήλιου δηλαδή εξαρτάται από την εποχή και την ώρα της ημέρας. Η θάμβωση βρέθηκε έμμεσα από τα αποτελέσματα των lux του μοντέλου, δηλαδή όταν υπήρχε φωτισμός πάνω από 2000 lux. Να σημειωθεί ότι η μοντελοποίηση έγινε χωρίς κανένα κτίριο ή οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο το οποίο μπορεί να προκαλέσει σκίαση περιμετρικά του κτιρίου αναφοράς, γεγονός το οποίο επηρεάζει και τον φυσικό φωτισμό αλλά και την θάμβωση. Επίσης η εξαγωγή των αποτελεσμάτων για φυσικό φωτισμό και θάμβωση έγινε χωρίς την χρήση blinds ή σκίαστρων για να βρεθεί σε ποιες περιπτώσεις

είναι απαραίτητη η χρήση τους και πως επηρεάζει η ημερομηνία, η ώρα και η θέση του ήλιου την οπτική άνεση των υπαλλήλων εντός των γραφείων.

Εικόνα 15: Απευθείας πρόσπτωση ηλιακή ακτινοβολίας (5000 lux)

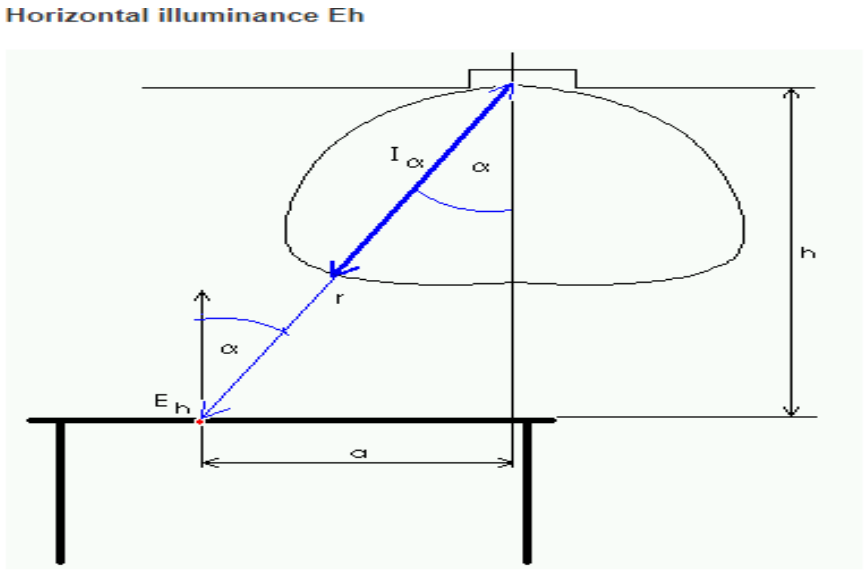


Για κάθε μία από τις 12 περιπτώσεις, εξετάστηκαν 4 διαφορετικές διαπερατότητες ημιπερατού Φ/Β, 10% , 20% , 30% και 38% και 6 διαφορετικές περιπτώσεις λόγου παραθύρων προς τοίχο (Window to Wall Ratio, WWR) , 30%, 40%, 50% , 60%, 70% και 80% .

7.2 Υπολογισμός φωτισμού στο DIALux

Οι υπολογισμοί φωτισμού στο εσωτερικό των κτιρίων, γίνονται λαμβάνοντας υπόψη την φωτεινότητα που κατανέμεται από τις διάφορες φωτεινές πηγές και το φως που ανακλάται από την περίμετρο του δωματίου δηλαδή την οροφή, τους τοίχους και το πάτωμα. Η κατακόρυψη και οριζόντια φωτεινότητα για ένα συγκεκριμένο σημείο μπορεί να υπολογιστεί βάση της έντασης φωτός και της δεδομένης γεωμετρίας όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα:

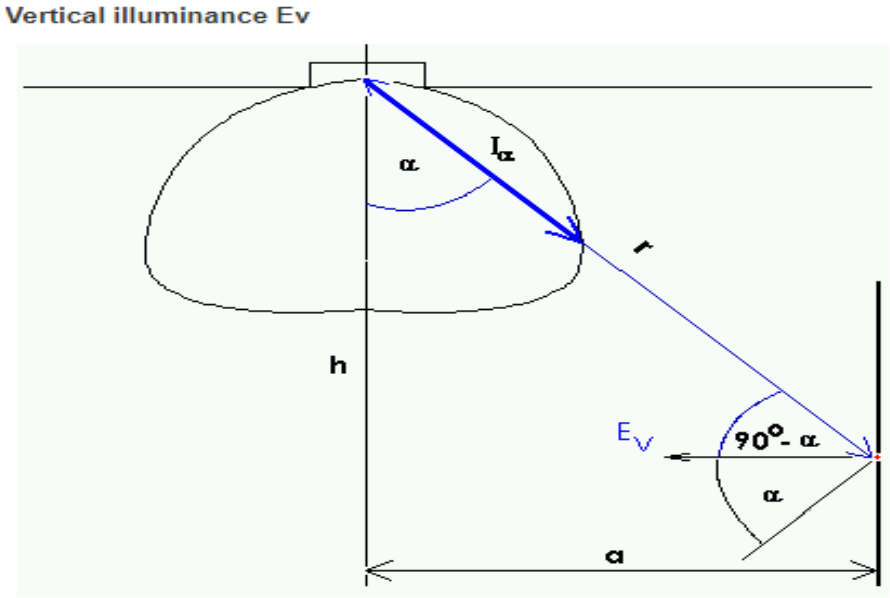
Εικόνα 16: Υπολογισμός οριζόντιας φωτεινότητας



$$E_h = \frac{I_\alpha}{r^2} \cdot \cos\alpha$$

$$= \frac{I_\alpha}{h^2} \cdot \cos^3\alpha$$

Εικόνα 17: Υπολογισμός κατακόρυφης φωτεινότητας



$$E_v = \frac{I_\alpha}{r^2} \cdot \cos^3 (90° - \alpha)$$

$$= \frac{I_\alpha}{h^2} \cdot \cos^2\alpha \cdot \sin\alpha$$

Όπου **Eh, Ev** : Οριζόντια και κατακόρυφη φωτεινότητα (lux)

Iα: Η ένταση του φωτός ή φωτεινή ροή (lumens)

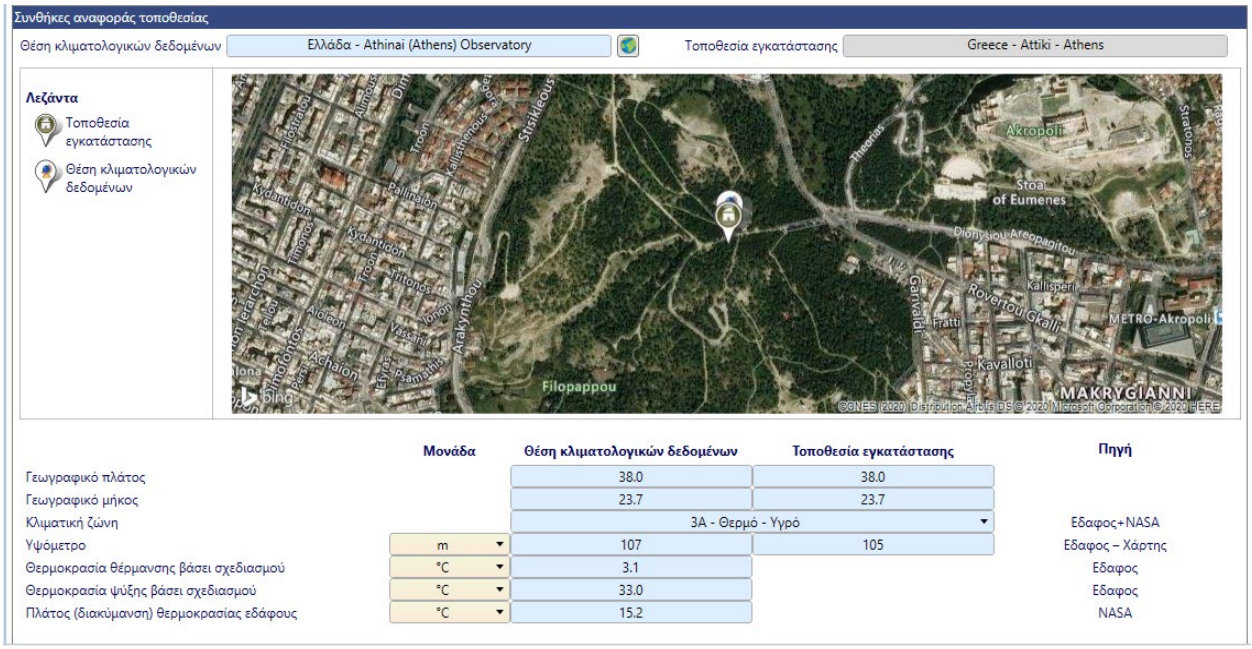
r: Η απόσταση μεταξύ της φωτεινή πηγής και του σημείου υπολογισμού (m)

α: Η γωνία ως προς το κάθετο και οριζόντιο επίπεδο αντίστοιχα

7.3 Μοντελοποίηση στο RETscreen

Στο πρόγραμμα RETscreen Expert, έγινε η μοντελοποίηση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του κάθε ημιπερατού. Το κτίριο τοποθετήθηκε στην Αθήνα με γεωγραφικό μήκος 23.7 μοίρες και γεωγραφικό πλάτος 38 μοίρες.

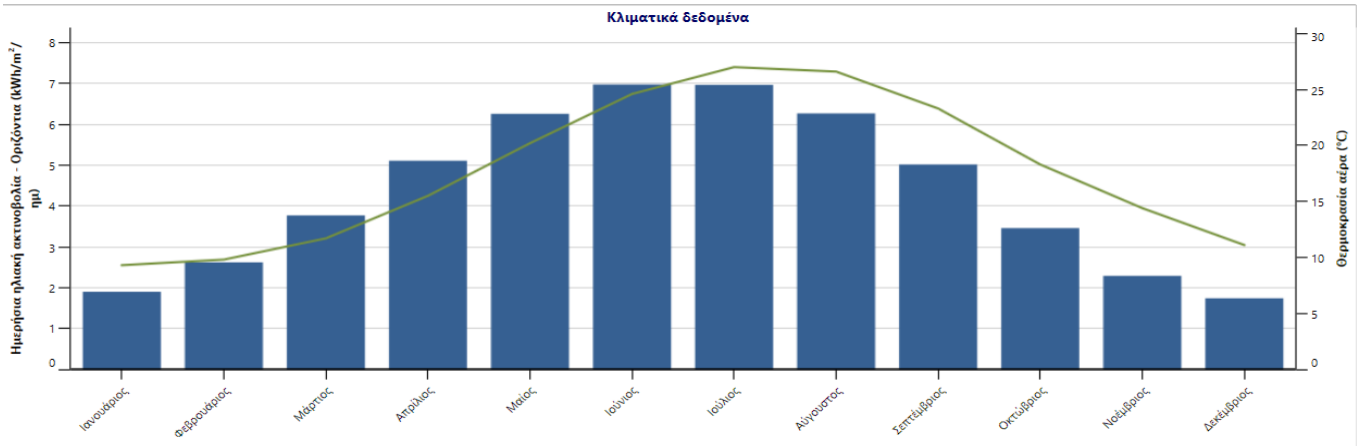
Εικόνα 18: Κλιματολογικά δεδομένα για την τοποθεσία από το RETscreen Expert



Εικόνα 19: Κλιματολογικά δεδομένα για την τοποθεσία από το RETscreen Expert

Μήνας	Θερμοκρασία αέρα	Σχετική υγρασία	Κατακρήμνιση	Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία - Οριζόντια	Ατμοσφαιρική πίεση	Ταχύτητα ανέμου	Θερμοκρασία εδάφους	Βαθμό-ημέρες θέρμανσης 18 °C	Βαθμο-ημέρες ψύξης 10 °C
	°C	%	mm	kWh/m²/ημ	kPa	m/Δευτερόλεπτ	°C	°C-ημ	°C-ημ
Ιανουάριος	9.3	72.0%	68.51	1.90	99.2	1.9	12.1	270	0
Φεβρουάριος	9.8	71.0%	60.48	2.62	99.0	2.2	12.0	230	0
Μάρτιος	11.7	68.0%	56.11	3.77	99.0	2.7	13.0	195	53
Απρίλιος	15.5	62.0%	36.60	5.11	98.8	1.8	15.3	75	165
Μαίος	20.2	58.0%	20.15	6.26	98.8	1.8	19.3	0	316
Ιούνιος	24.6	52.0%	9.00	6.98	98.8	1.8	24.0	0	438
Ιούλιος	27.0	48.0%	7.75	6.97	98.7	2.2	26.4	0	527
Αύγουστος	26.6	49.0%	7.75	6.27	98.7	2.2	26.6	0	515
Σεπτέμβριος	23.3	56.0%	16.20	5.02	99.0	1.9	24.5	0	399
Οκτώβριος	18.3	66.0%	47.43	3.46	99.3	1.8	20.9	0	257
Νοέμβριος	14.4	73.0%	80.70	2.29	99.3	2.3	17.1	108	132
Δεκέμβριος	11.1	73.0%	81.53	1.74	99.2	2.1	13.8	214	34
Ετήσιο	**17.7**	**62.3%**	**492.21**	**4.37**	**99.0**	**2.1**	**18.8**	**1,092**	**2,836**
Πηγή	Εδαφος	Εδαφος	NASA	Εδαφος	Εδαφος	Εδαφος	NASA	Εδαφος	Εδαφος
Μετρημένο σε					m	10	0		

Εικόνα 20:Ημερήσια οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία ($\frac{kWh}{m^2\ d}$) από το RETScreen Expert



Τα ημιπερατά Φ/Β που μοντελοποιήθηκαν είναι της εταιρείας Onyx Solar και οι διαπερατότητες 10%, 20% και 30% αφορούν άμορφο πυριτίο και η διαπερατότητα 38% αφορά μονοκρυσταλλικό πυρίτιο. Στα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, αναγράφεται ο συντελεστής ανακλαστικότητας αλλά και η μέγιστη ισχύς ανά τετραγωνικό μέτρο του εκάστοτε ημιπερατού Φ/Β και βάση αυτού μοντελοποιήθηκε η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στο RETscreen Expert. Στην κάθε περίπτωση, πολλαπλασιάστηκε το εμβαδόν των ημιπερατών με την μέγιστη ισχύ ανά τετραγωνικό μέτρο, κι έτσι βρέθηκε η συνολική ισχύς. Παρακάτω παρατίθενται τα διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά των ημιπερατών Φ/Β της εταιρείας Onyx Solar

Εικόνα 21: Άμορφο πυρίτιο διαπερατότητας 10%

LOW TRANSPARENCY

THICKNESS CONFIGURATION (mm)**	SHGC	U value m^2	U value ft^2	External Light Reflection	Transparency	Peak Power
	%	**W/m^2K	Btu/h ft^2 F	%	%	(Wp/m^2)
3.2+4	29%	5,7	1.00	7,6%	10,0%	40
6T+3.2+6T*	29%	5,2	0.92	7,3%	10,0%	40
6T+3.2+6T/12Air/6T	11%	2,7	0.48	7,3%	10,0%	40
6T+3.2+6T/12Air/6T low-e	9%	1,6	0.28	7,3%	10,0%	40
6T+3.2+6T/12Argon/6T low-e	9%	1,2	0.21	7,3%	10,0%	40
6T+3.2+6T/12Argon/4/12Argon/6T low-e	9%	1,0	0.18	7,3%	10,0%	40

Εικόνα 22: Άμορφο πυρίτιο διαπερατότητας 20%

MEDIUM TRANSPARENCY

THICKNESS CONFIGURATION (mm)**	SHGC	U value m^2	U value ft^2	External Light Reflection	Transparency	Peak Power
	%	**W/m^2K	Btu/h ft^2 F	%	%	(Wp/m^2
3.2+4	34%	5,7	1.00	7,6%	20,0%	34
6T+3.2+6T*	32%	5,2	0.92	7,3%	20,0%	34
6T+3.2+6T/12Air/6T	14%	2,7	0.48	7,3%	20,0%	34
6T+3.2+6T/12Air/6T low-e	12%	1,6	0.28	7,3%	20,0%	34
6T+3.2+6T/12Argon/6T low-e	12%	1,2	0.21	7,3%	20,0%	34
6T+3.2+6T/12Argon/4/12Argon/6T low-e	12%	1,0	0.18	7,3%	20,0%	34

Εικόνα 23: Άμορφο πυρίτιο διαπερατότητας 30%

HIGH TRANSPARENCY

THICKNESS CONFIGURATION (mm)**	SHGC	U value m^2	U value ft^2	External Light Reflection	Transparency	Peak Power
	%	**W/m^2K	Btu/h ft^2 F	%	%	(Wp/m^2
3.2+4	41%	5,7	1.00	7,6%	30,0%	28
6T+3.2+6T*	37%	5,2	0.92	7,3%	30,0%	28
6T+3.2+6T/12Air/6T	19%	2,7	0.48	7,3%	30,0%	28
6T+3.2+6T/12Air/6T low-e	17%	1,6	0.28	7,3%	30,0%	28
6T+3.2+6T/12Argon/6T low-e	17%	1,2	0.21	7,3%	30,0%	28
6T+3.2+6T/12Argon/4/12Argon/6T low-e	17%	1,0	0.18	7,3%	30,0%	28

Εικόνα 24: Κρυσταλλικό πυρίτιο διαπερατότητας 38%

LOW SOLAR CELL DENSITY

THICKNESS CONFIGURATION (mm)**	SHGC	Valor U m2	U value ft^2	External Light Reflection	Transparency
	%	**W/m^2K	Btu/h ft^2 F	%	%
6T+6T	40%	5,5	0.97	8,3%	38,0%
6T+6T/12Air/6T	22%	2,7	0.48	8,3%	38,0%
6T+6T/12Air/6T low-e	20%	1,6	0.28	8,3%	38,0%
6T+6T/12Argon/6T low-e	20%	1,2	0.21	8,3%	38,0%
6T+6T/12Argon/4/12Argon/6T low-e	20%	1,0	0.18	8,3%	38,0%

Επιλέγεται τα ημιπερατά Φ/Β να είναι σταθεροποιημένα, με κλίση 90 μοίρες και αζιμούθιο 0 μοίρες αφού είναι στραμμένα προς τον νότο.

Εικόνα 25: Μοντελοποίηση κλίσης και αζιμούθιου στο RETscreen Expert

Αξιολόγηση πηγών

Λειτουργία παρακολούθησης του ήλιου		Σταθεροποιημένα
Κλίση	°	90
Αζιμούθιο	°	0

Δείξε δεδομένα

Μήνας	Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία - Οριζόντια kWh/m²/ημ	Ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία - κεκλιμένο επίπεδο kWh/m²/ημ	Τιμή Ηλεκτρισμού – ετήσιο $/kWh	Παραγωγή ηλεκτρισμού kWh
Ιανουάριος	1.90	2.62	0.05	206.624
Φεβρουάριος	2.62	2.83	0.05	201.303
Μάρτιος	3.77	3.05	0.05	239.955
Απρίλιος	5.11	2.97	0.05	225.759
Μαίος	6.26	2.73	0.05	213.727
Ιούνιος	6.98	2.61	0.05	197.456
Ιούλιος	6.97	2.74	0.05	213.101
Αύγουστος	6.27	3.16	0.05	245.533
Σεπτέμβριος	5.02	3.65	0.05	274.354
Οκτώβριος	3.46	3.52	0.05	274.316
Νοέμβριος	2.29	3.13	0.05	236.953
Δεκέμβριος	1.74	2.62	0.05	205.536
Ετήσιο	**4.37**	**2.97**	**0.05**	**2,734.618**

Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία - οριζόντιο επίπεδο	MWh/m²	1.60
Ετήσια ηλιακή ακτινοβολία - επικλινές επίπεδο	MWh/m²	1.08

Στο πρόγραμμα RETscreen Expert, δεν υπάρχει η επιλογή για ημιπερατά Φ/Β, έτσι επιλέχθηκαν συμβατικά Φ/Β του ίδιου υλικού με την ίδια ακριβώς ισχύ με απώλειες 12% και μετατροπέα ισχύος 20 kW, απόδοσης 95% και απώλειες 1%. Βάση των κλιματολογικών δεδομένων και των παραπάνω παραμέτρων υπολογίστηκε η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για διαπερατότητες 10% εώς 38% και για WWR 30% εώς 80% δηλαδή για 24 διαφορετικές περιπτώσεις.

Εικόνα 26: Μοντελοποίηση ημιπερατών Φ/Β και μετατροπέα στο RETscreen Expert

Φωτοβολταϊκό		
Τύπος		a-Si
Ηλεκτρική ισχύς	kW	3.07
Κατασκευαστής		Sinopuren
Μοντέλο		a-Si - JNP-10W
Αριθμός μονάδων		307
Βαθμός απόδοσης	%	4.36%
Ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κελλίου	°C	45
Συντελεστής θερμοκρασίας	% / °C	0.11%
Επιφάνεια ηλιακού συλλέκτη	m^2	70.4
Λοιπές απώλειες	%	12%
Μετατροπέας (inverter)		
Βαθμός απόδοσης	%	95%
Ισχύς	kW	20
Λοιπές απώλειες	%	1%

7.4 Υπολογισμός ηλιακής ακτινοβολίας και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο RETScreen Expert

Παρακάτω παρατίθονται οι εξισώσεις και οι φόρμουλες τις οποίες χρησιμοποιεί το RETScreen Expert για την εύρεση της ηλιακής ακτινοβολίας, της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο Φ/Β πλαίσιο, της απόδοσης του Φ/Β πλαισίου και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ηλιακή απόκλιση

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(2\pi \cdot \frac{284+n}{365}\right) \qquad \textbf{εξ. (1)}$$

Όπου **n**: η μέρα του χρόνου

Η ηλιακή απόκλιση έχει εύρος από -23.45° στις 21 Δεκεμβρίου μέχρι +23.45° στις 21 Ιουνίου

Γωνία δύσης Ηλίου

$$\cos\omega_s = -\tan\psi \cdot \tan\delta \qquad \textbf{εξ. (2)}$$

Όπου $\boldsymbol{\omega_s}$: η ημερήσια γωνία του Ήλιου σύμφωνα με την ώρα που δύει ο Ήλιος

ψ: το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής

Κοσμική ηλιακή ακτινοβολία

$$\mathbf{H_0} = \frac{86400 \cdot G_{sc}}{\pi} \cdot (1+0.33 \cdot \cos(2\pi\frac{n}{365}))(\cos\psi \cdot \cos\delta \cdot \sin\omega_s + \omega_s \cdot \sin\psi \cdot \sin\delta) \quad \textbf{εξ.(3)}$$

΄Οπου $\mathbf{H_0}$: η κοσμική ηλιακή ακτινοβολία

$\mathbf{G_{sc}}$: η ηλιακή σταθερά που ισούται με 1367 $\frac{W}{m^2}$

Μηνιαίος συντελεστής μετάδοσης

$$\mathbf{K_T} = \frac{\bar{H}}{\overline{H_0}} \qquad \textbf{εξ. (4)}$$

Όπου $\mathbf{K_T}$ **:** ο μηνιαίος συντελεστής μετάδοσης

$\bar{\mathbf{H}}$: η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο

$\overline{\mathbf{H_0}}$: η μέση μηνιαία κοσμική ακτινοβολία

Διάχυτη ακτινοβολία

$$\frac{\overline{\mathbf{H_d}}}{\bar{\mathbf{H}}} = 1.391-3.560 \cdot \overline{K_T} +4.189 \cdot \overline{K_T}^2 – 2.137 \cdot \overline{K_T}^3 \qquad \textbf{εξ. (5)}$$

Όταν η γωνία δύσης ηλίου για την μέση μέρα του μήνα είναι μικρότερη από 81.4º

$$\frac{\overline{\mathbf{H_d}}}{\bar{\mathbf{H}}} = 1.311-3.022 \cdot \overline{K_T} +3.427 \cdot \overline{K_T}^2 – 1.821 \cdot \overline{K_T}^3 \qquad \textbf{εξ. (6)}$$

Όταν η γωνία δύσης ηλίου για την μέση μέρα του μήνα είναι μεγαλύτερη από 81.4º

Όπου $\bar{\mathbf{H}}$:η μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία του μήνα

$\overline{\mathbf{H_d}}$: η μέση ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία του μήνα

Η μέση ημερήσια ακτινοβολία διαχωρίζεται σε ωριαίες τιμές σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$\mathbf{r_t} = \frac{\pi}{24} \cdot (\alpha + \beta \cdot \cos\omega) \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \omega_s . \cos\omega_s} \qquad \textbf{εξ. (7)}$$

$$\boldsymbol{\alpha} = 0.409 + 0.5016 \cdot \sin(\omega_s - \frac{\pi}{3}) \qquad \textbf{εξ. (7.1)}$$

$$\boldsymbol{\beta} = 0.6609 - 0.4767 \cdot \sin(\omega_s - \frac{\pi}{3}) \qquad \textbf{εξ. (7.2)}$$

Όπου $\mathbf{r_t}$**:** ο λόγος του συνόλου της ωριαίας προς το σύνολο της ημερήσιας ακτινοβολίας

$\boldsymbol{\omega_s}$: : η ημερήσια γωνία του Ήλιου σύμφωνα με την ώρα που δύει ο Ήλιος σε ακτίνια

ω: η ημερήσια γωνία το Ήλιου σε ακτίνια

$$\mathbf{r_d} = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \omega_s \mathrm{os}\omega_s} \qquad \textbf{εξ.(8)}$$

Όπου $\mathbf{r_d}$**:** ο λόγος του συνόλου της ωριαίας προς το σύνολο της ημερήσιας διάχυτης ακτινοβολίας

Δεδομένου των παραπάνω εξισώσεων, η οριζόντια ηλιακή ακτινοβολία **H** και η διάχυτη και άμεση ακτινοβολία $\mathbf{H_d}$ και $\mathbf{H_b}$ αντίστοιχα δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\mathbf{H} = r_t \cdot \overline{H} \qquad \textbf{εξ. (9)}$$

$$\mathbf{H_d} = r_d \cdot \overline{H_d} \qquad \textbf{εξ.(10)}$$

$$\mathbf{H_b} = H - H_d \qquad \textbf{εξ.(11)}$$

Υπολογισμός ωριαίας ακτινοβολίας που προσπίπτει στο Φ/Β

$$\mathbf{H_t} = H_b \cdot R_b + H_d(\frac{1+cos\beta}{2}) + H \cdot \rho \cdot (\frac{1-cos\beta}{2}) \qquad \textbf{εξ.(12)}$$

Όπου $\mathbf{H_t}$ **:** η ωριαία ακτινοβολία που προσπίπτει στο Φ/Β πλαίσιο

ρ: η ανάκλαση του εδάδους (albedo)

β: η κλίση του Φ/Β πλαισίου

Υπολογισμός απόδοσης Φ/Β πλαισίου και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Μέση απόδοση Φ/Β πλαισίου

$$\boldsymbol{\eta_p} = \eta_r[1- \beta_p \cdot (T_c - T_r)] \qquad \textbf{εξ.(13)}$$

Όπου $\boldsymbol{\eta_r}$: η απόδοση του του Φ/Β πλαισίου στη θερμοκρασία αναφοράς $\boldsymbol{T_r}$(=25°C)

$\boldsymbol{\beta_p}$: ο συντελεστής θερμοκρασίας

$\mathbf{T_c}$: η μέση μηνιαία θερμοκρασία

$$T_c - T_\alpha = (219+832 \cdot K_T) \cdot \frac{NOCT-20}{800} \qquad \textbf{εξ. (14)}$$

Όπου **NOCT**: η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας του κελιού

$\mathbf{K_T}$: ο μηνιαίος συντελεστής μετάδοσης

Η ονομαστικη θερμοκρασία λειτουργίας του κελιου και ο συντελεστής θερμοκρασίας εξαρτώνται από το είδος του Φ/Β ή μπορεί να το εισάγει ο χρήστης κατά την μοντελοποίηση. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται οι δύο μεταβλητές και η απόδοση ενός Φ/Β πλαισίου ανάλογα της τεχνολογίας που είναι κατασκευασμένο.

Πίνακας 8: Τεχνολογίες Φ/Β πλαισίων και συντελεστές

PV module type	$\boldsymbol{\eta_r}$ **(%)**	**NOCT(°C)**	$\boldsymbol{\beta_p}$**(% / °C)**
Mono-Si	13.0	45	0.40
Poly-Si	11.0	45	0.40
a-Si	5.0	50	0.11
CdTe	7.0	46	0.24
CIS	7.5	47	0.46

Η παραπάνω εξίσωση ισχύει μόνο όταν η κλίση του Φ/Β πλαισίου είναι βέλτιστη. Στην περίπτωση που η κλίση διαφέρει, τότε το δεξί μέρος της εξίσωση πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή $\mathbf{C_f}$ όπου:

$$\mathbf{C_f} = 1 - 1.17 \cdot 10^{-4}\ (s_M - s)^2 \qquad \textbf{εξ.(15)}$$

Όπου $\mathbf{s_M}$: η βέλτιση κλίση του Φ/Β πλαισίου (σε μοίρες)

$\mathbf{s}$: η πραγματική κλίση του Φ/Β πλαισίου (σε μοίρες)

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας που δίνει ένα Φ/Β πλαίσιο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\mathbf{E_p} = S \cdot \eta_p \cdot \overline{H_t} \qquad \textbf{εξ. (16)}$$

$$\mathbf{E_A} = E_p(1-\lambda_p) \cdot (1-\lambda_c) \qquad \textbf{εξ. (17)}$$

Όπου **S**: η επιφάνεια του Φ/Β πλαισίου

$\boldsymbol{\lambda_p}$: απώλειες Φ/Β πλαισίου

$\boldsymbol{\lambda_c}$: λοιπές απώλειες

$\mathbf{E_A}$**:** η διαθέσιμη ενέργεια στην μπαταρία

7.5 Επεξεργασία δεδομένων του DIALux στο MS Excel για την εύρεση της κατανάλωσης για τεχνητό φωτισμό

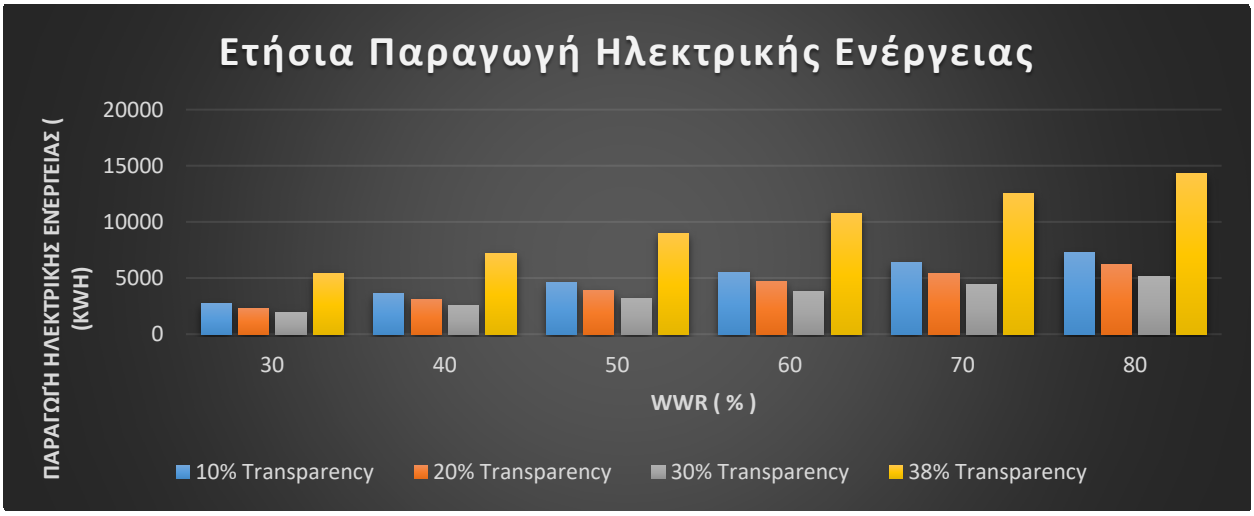
Κάθε σενάριο που έτρεξε στο DIALux, δηλαδή για μία συγκεκριμένη διαπερατότητα και WWR, για συγκεκριμένη ώρα και ημερομηνία, το λογισμικό έβγαζε ως αποτέλεσμα μία μέγιστη και μία ελάχιστη τιμή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ανά χρόνο από τους λαμπτήρες LED , ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε σεναρίου για την κάλυψη των 500 lux σε ύψος 0.8 m. Στο MS Excel, βρέθηκε αρχικά η μέση τιμή της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής, και στη συνέχεια ο μέσος όρος για κάθε διαπερατότητα και WWR για τις τέσσερις ημέρες και τρεις ώρες για κάθε ημέρα. Για παράδειγμα, για να βρεθεί η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για τεχνητό φωτισμό για διαπερατότητα 10% και WWR 30%, αθροίστικαν οι kWh για τις τέσσερις ημερομηνίες και τρεις ώρες δηλαδή 12 διαφορετικές

τιμές, και στη συνέχεια διαιρέθηκαν με 12 για να βρεθεί προσεγγεστικά η μέση ετήσια κατανάλωση ενέργειας. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε για όλα τα σενάρια.

8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

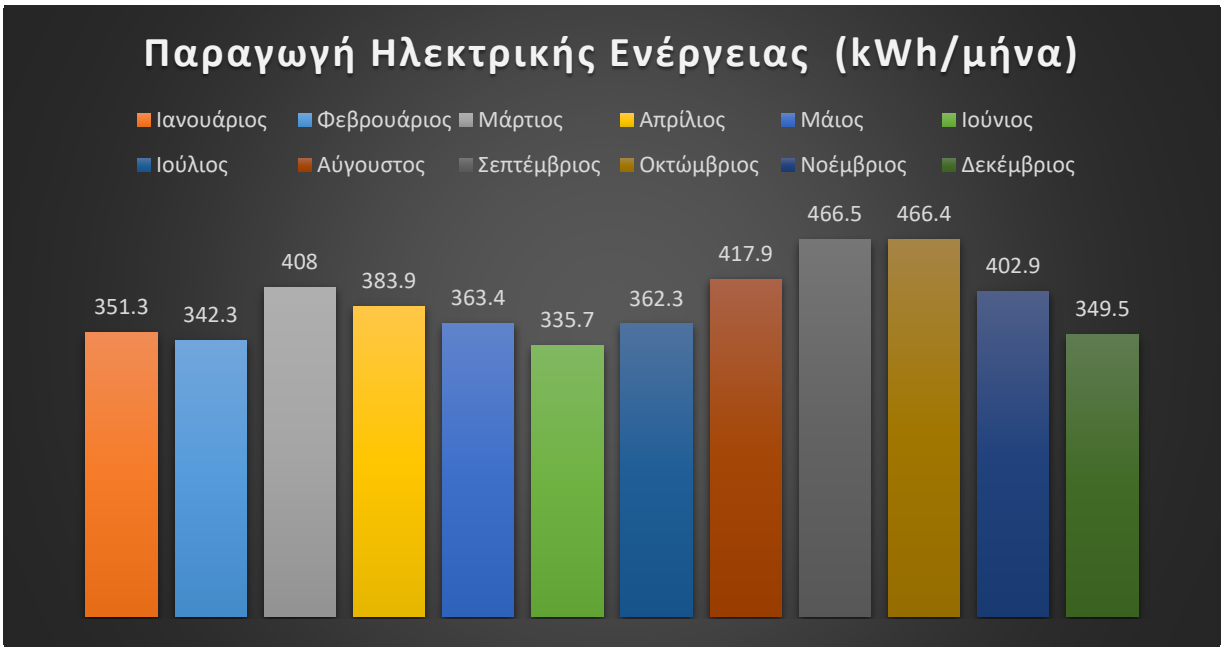
Μετά την εξαγωγή αποτελεσμάτων από το DIALux και το RETscreen Expert, έγινε η ανάλυση και επεξεργασία τους στο Microsoft Excel. Τα αποτελέσματα αφορούν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα ημιπερατά Φ/Β, έλεγχος για επαρκή φυσικό φωτισμό και θάμβωση, κατανάλωση από τον τεχνητό φωτισμό όταν αυτός ήταν απαραίτητος, ετήσια αλλά και ανά ημερομηνία, ενεργειακό ισοζύγιο δηλαδή η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μείον την κατανάλωση, κόστος, εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας και εξοικονόμηση ρύπων (CO_2) και παρουσιάζονται παρακάτω σε μορφή διαγραμμάτων.

Διάγραμμα 19: Ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας



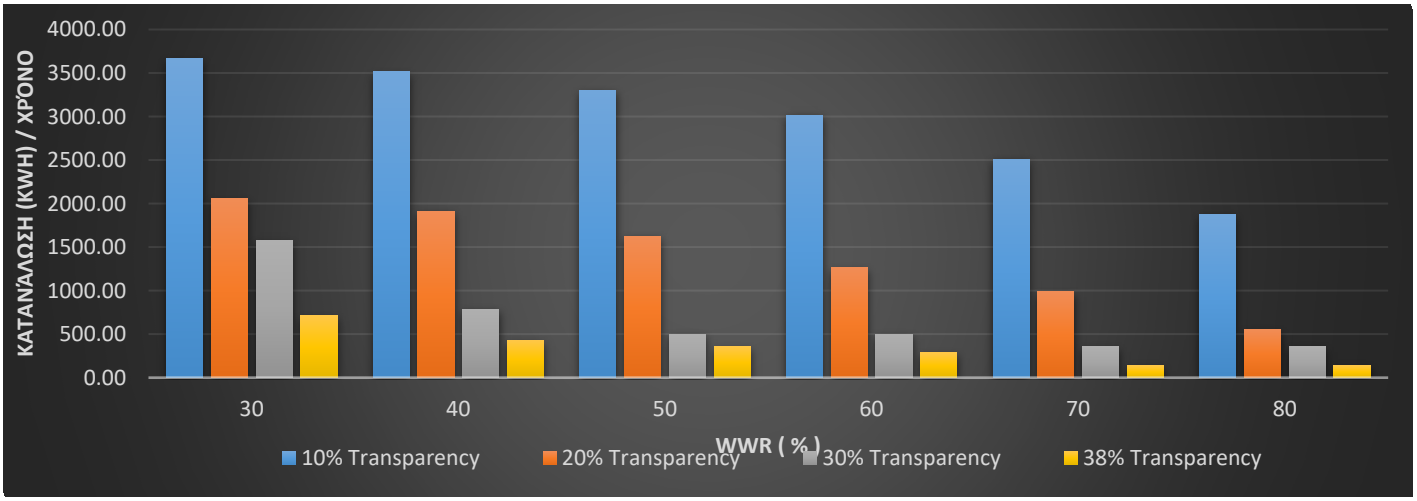
Το παραπάνω γράφημα δείχνει την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τις 4 διαπερατότητες και για τα 6 WWR. Παρατηρούμε ότι όπως είναι λογικό, όσο μεγαλώνει η επιφάνεια των ημιπερατών Φ/Β τόσο μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουμε.

Διάγραμμα 20: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά μήνα (WWR 60% και Διαπερατότητα 20%)



Το παραπάνω διάγραμμα που είναι διαπερατότητας 20% και WWR 60% είναι ενδεικτικό όσον αφορά την μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Για όλες τις διαπερατότητες και τα WWR, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει τις ίδιες διακυμάνσεις μηνιαία με διαφορετικές τιμές ενέργειας κάθε φορά. Όπως φαίνεται παραπάνω, ο μήνας με την μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο Σεπτέμβριος ακολουθούμενος από τους μήνες Οκτώμβριο και Μάρτιο. Το γεγονός ότι οι καλοκαιρινοί μήνες δεν έχουν την μέγιστη παραγωγή στους οποίους υπάρχει η περισσότερη διαθέσιμη ηλιακή ακτινοβολία, οφείλεται στην κλίση των ημιπερατών που είναι 90° με αποτέλεσμα η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει με μεγάλη κλίση στα ημιπερατά Φ/Β. Κατά τους χειμερινούς μήνες, η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει με μεγαλύτερη καθετότητα αλλά λόγω των καιρικών συνθηκών, δηλαδή λόγω της λιγότερης διαθέσιμης ηλιακής ακτινοβολίας αλλά και επειδή η διάρκεια της ημέρας είναι μικρότερη υπάρχει σχετικά χαμηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Διάγραμμα 21: Ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό



Όσο αυξάνεται η διαπερατότητα αλλά και η επιφάνεια των ημιπερατών τόσο περισσότερο φως εισέρχεται εντός των γραφείων με αποτελέσμα να μειώνεται η απαίτηση του τεχνητού φωτισμού

Θάμβωση (Glaring)

Στις παρακάτω εικόνες που ακολουθούν από το DIALux , το κάθε χρώμα αντιπροσωπεύει μία διαφορετική τιμή φωτισμού ως εξής:

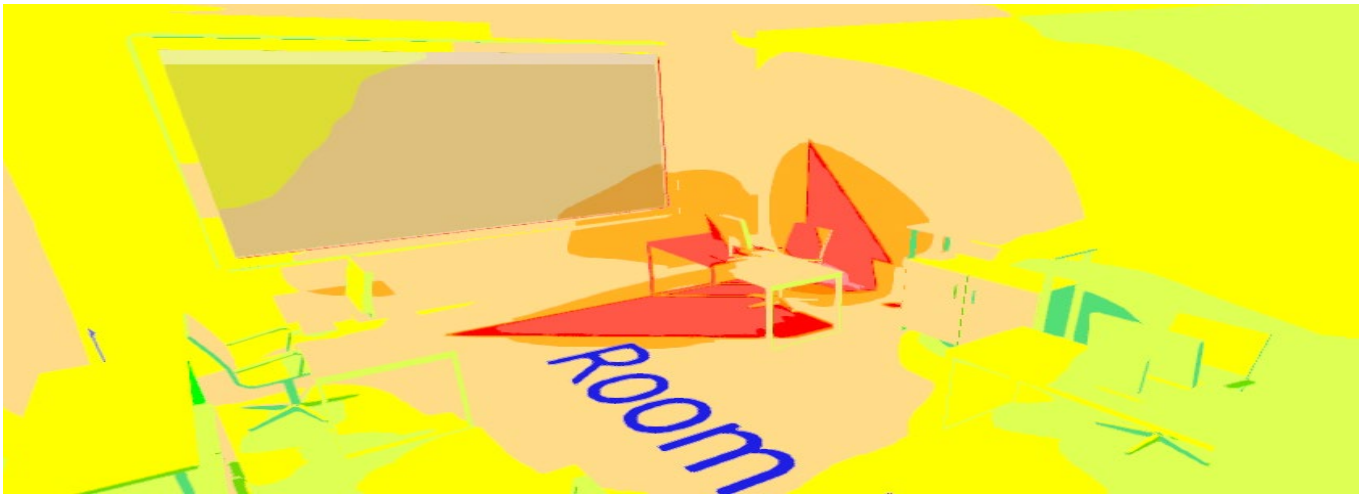
100 lux 200 lux 300 lux 500 lux 750 lux 1000 lux 2000 lux 3000 lux

5000 lux 7500 lux 10000 lux 15000 lux

21 Μαρτίου 10:00 π.μ.

Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Ναι	Δεξιά
20%	Ναι	Δεξιά
30%	Ναι	Δεξιά
38%	Ναι	Δεξιά

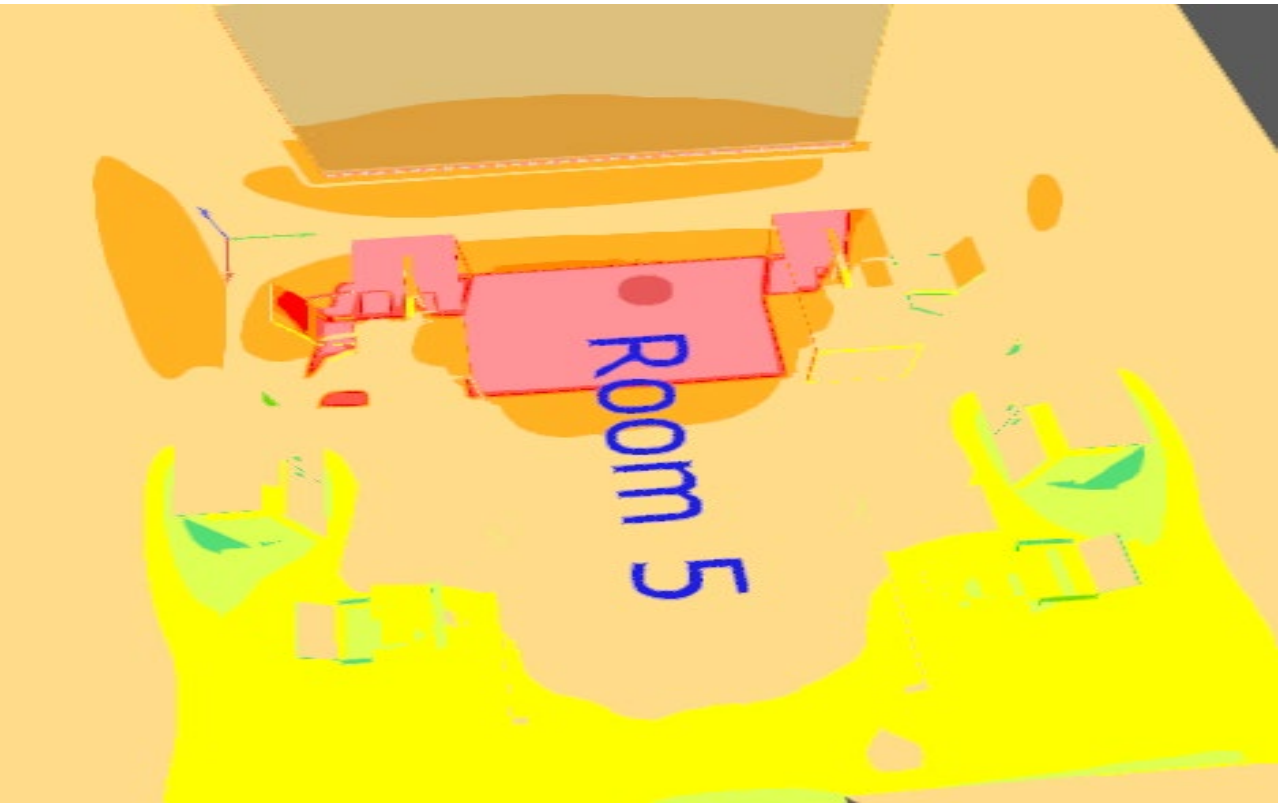
Εικόνα 27:Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (7500 lux) στο δεξιά γραφείο (21/3 10:00 π.μ)



21 Μαρτίου 13:00 μ.μ.

Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Ναι	Τα 2 κοντά στο παράθυρο
20%	Ναι	Τα 2 κοντά στο παράθυρο
30%	Ναι	Τα 2 κοντά στο παράθυρο
38%	Ναι	Τα 2 κοντά στο παράθυρο

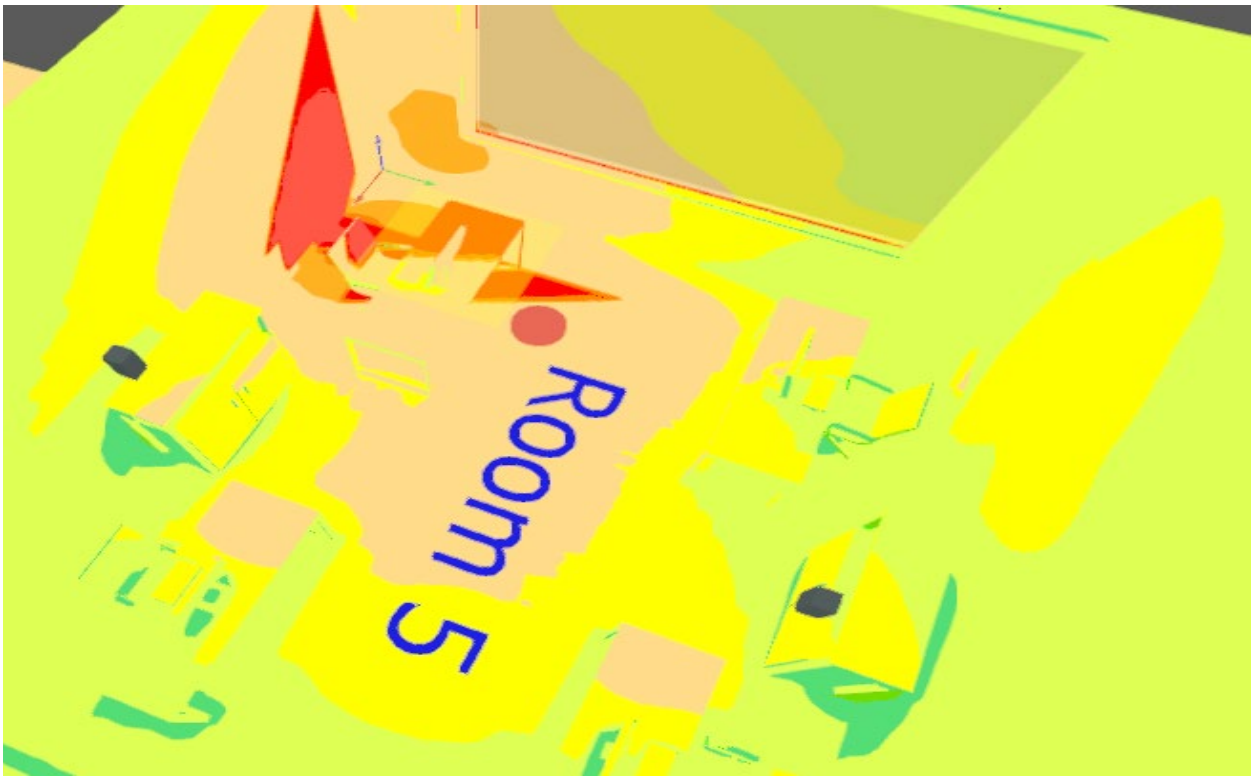
Εικόνα 28: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (10000 lux) στα 2 γραφεία κοντά στο παράθυρο (21/3 13:00 π.μ)



21 Μαρτίου 16:00 μ.μ.

Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Ναι	Αριστερά
20%	Ναι	Αριστερά
30%	Ναι	Αριστερά
38%	Ναι	Αριστερά

Εικόνα 29: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (7500 lux) στο αριστερά γραφείο (21/3 16:00 μ.μ)



21 Ιουνίου 10:00 π.μ.

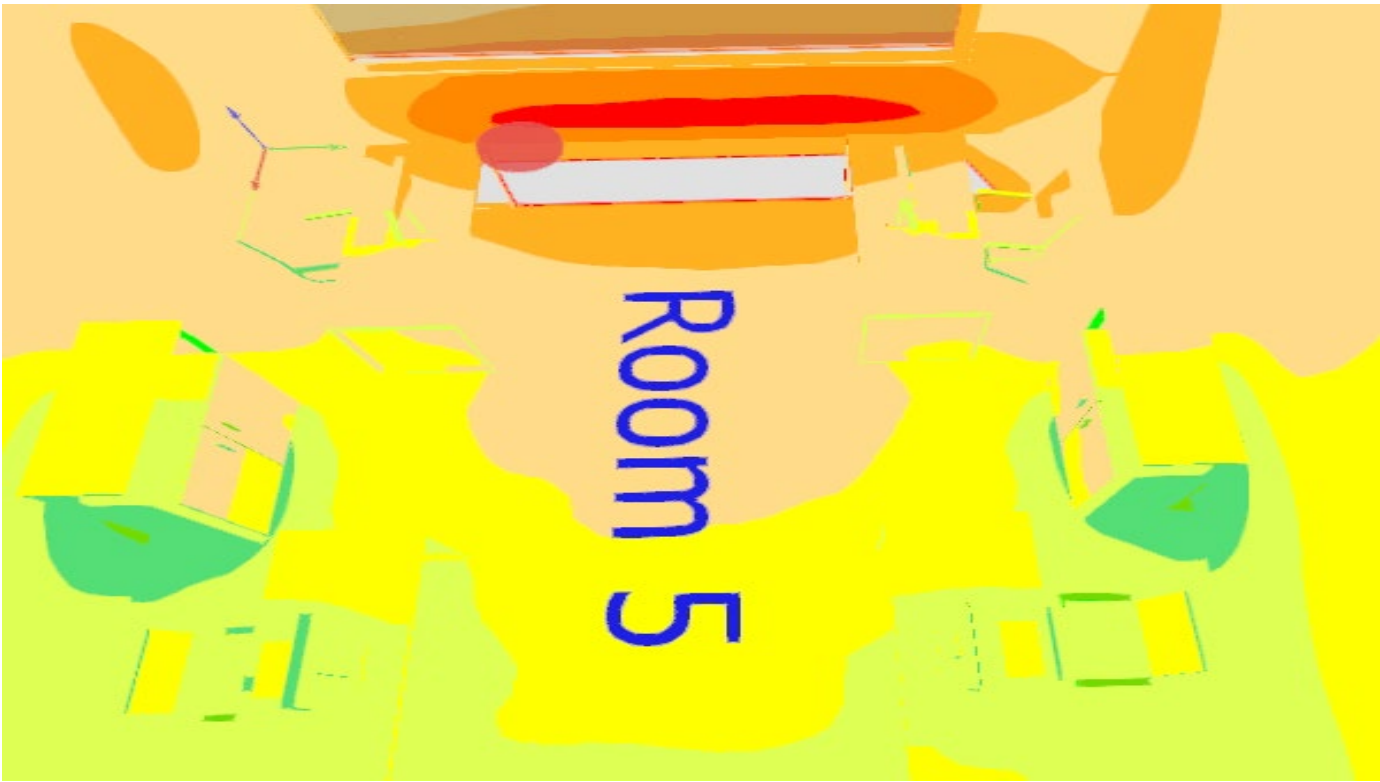
Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Όχι	-
20%	‘Οχι	-
30%	‘Οχι	-
38%	Όχι	-

Εικόνα 30: Απουσία θάμβωσης σε διαπερατότητα 30% (21/6 10:00 π.μ)

21 Ιουνίου 13:00 μ.μ.

Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Όχι	
20%	Όχι	
30%	Όχι	
38%	Ναι	Τα 2 κοντά στο παράθυρο

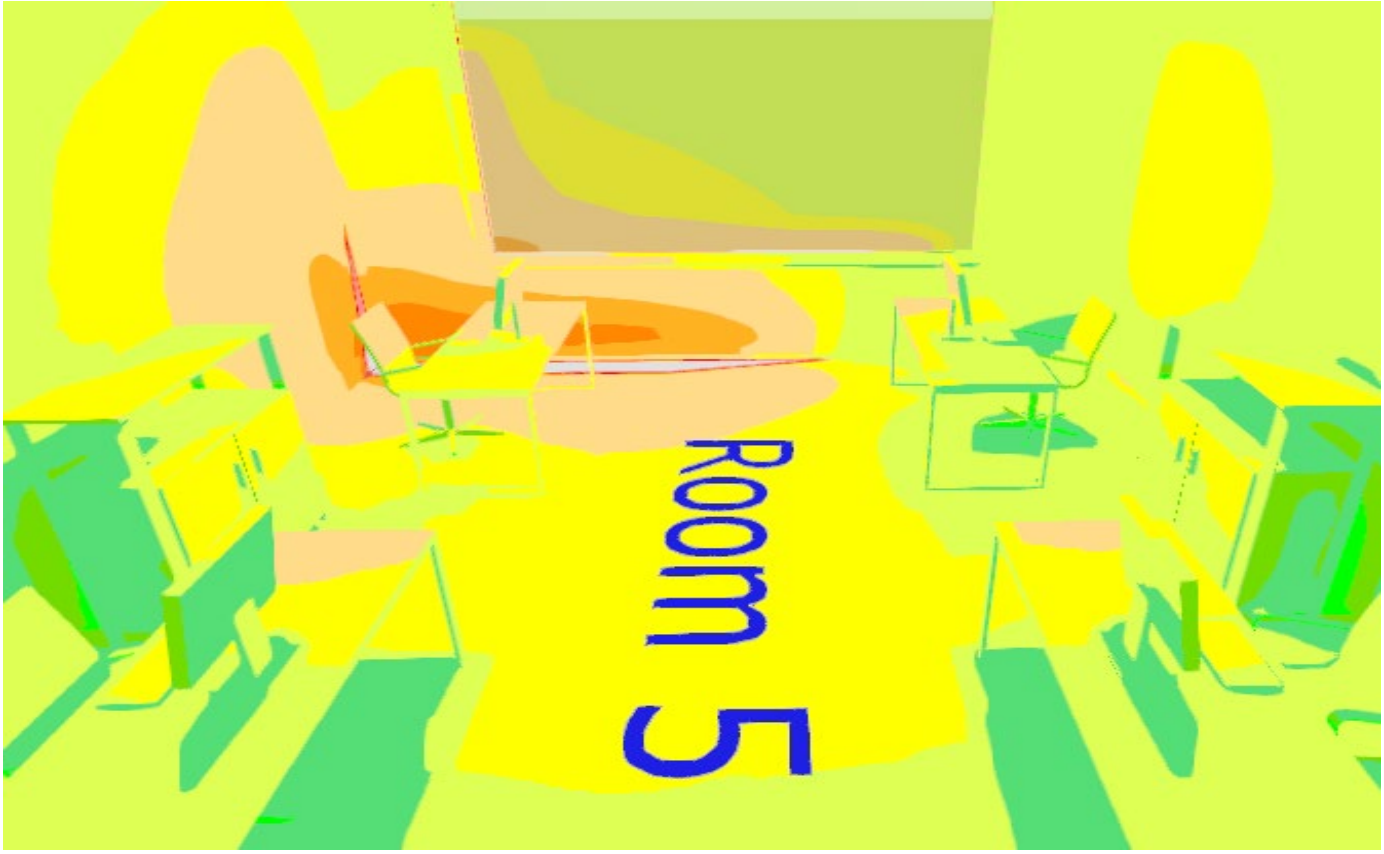
Εικόνα 31: Θάμβωση σε διαπερατότητα 38% (3000 lux) στα 2 γραφεία κοντά στο παράθυρο (21/6 13:00 μ.μ)



21 Ιουνίου 16:00 μ.μ

Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Όχι	-
20%	Όχι	-
30%	Όχι	-
38%	Όχι	-

Εικόνα 32: Απουσία θάμβωσης σε διαπερατότητα 30%



21 Σεπτεμβρίου 10:00 π.μ.

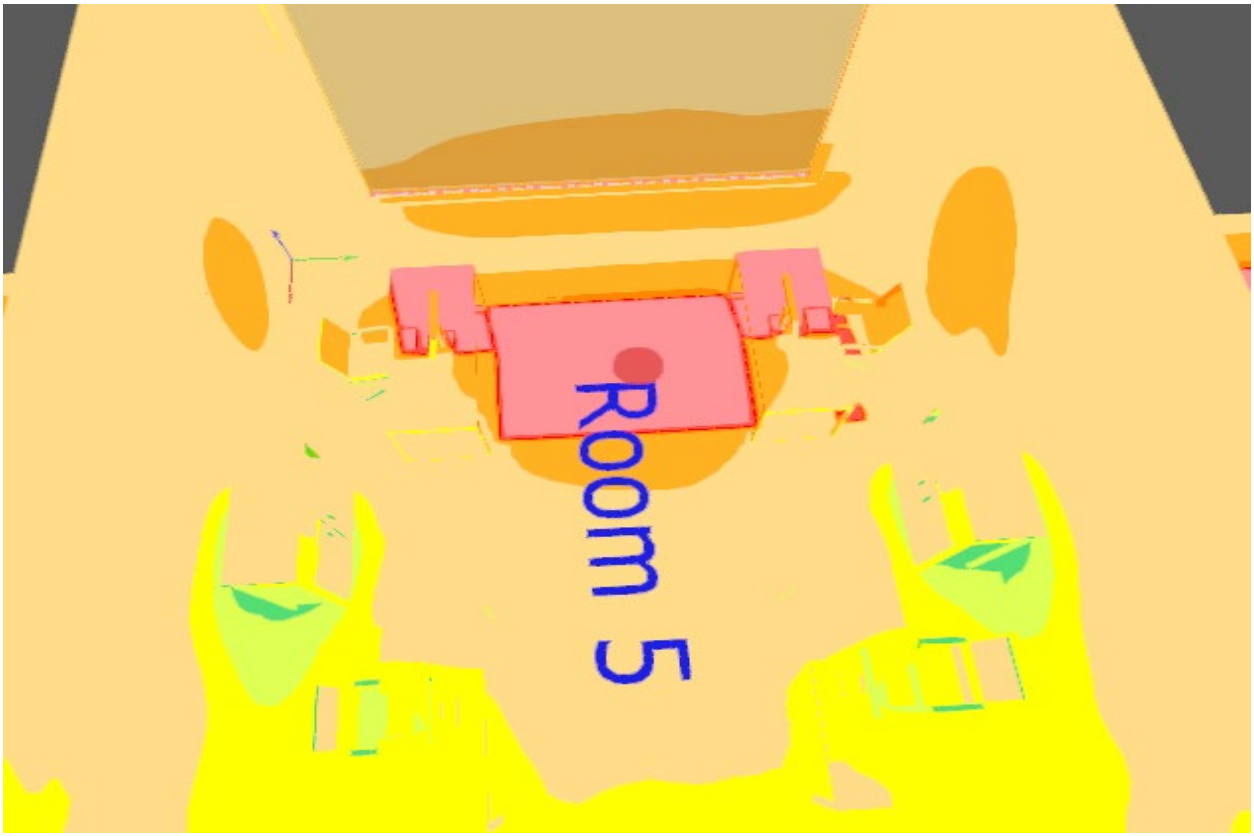
Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Ναι	Δεξιά
20%	Ναι	Δεξιά
30%	Ναι	Δεξιά
38%	Ναι	Δεξιά

Εικόνα 33: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (7500 lux) στο δεξιά γραφείο (21/9 10:00 π.μ)

21 Σεπτεμβρίου 13:00 μ.μ.

Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Ναι	Τα 2 κοντά στο παράθυρο
20%	Ναι	Τα 2 κοντά στο παράθυρο
30%	Ναι	Τα 2 κοντά στο παράθυρο
38%	Ναι	Τα 2 κοντά στο παράθυρο

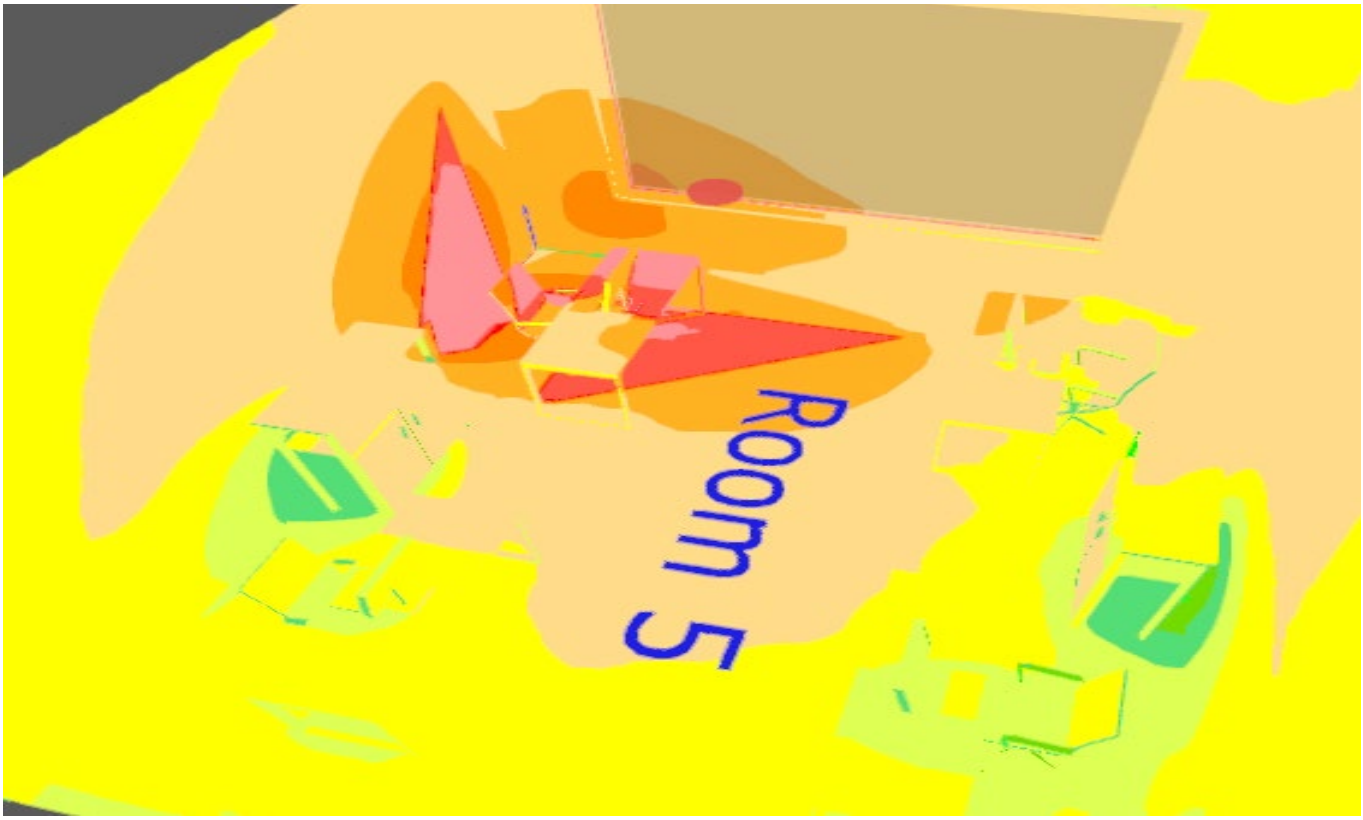
Εικόνα 34: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (10000 lux) στα 2 γραφεία κοντά στο παράθυρο (21/9 13:00 μ.μ)



21 Σεπτεμβρίου 16:00 μ.μ.

Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Ναι	Αριστερά
20%	Ναι	Αριστερά
30%	Ναι	Αριστερά
38%	Ναι	Αριστερά

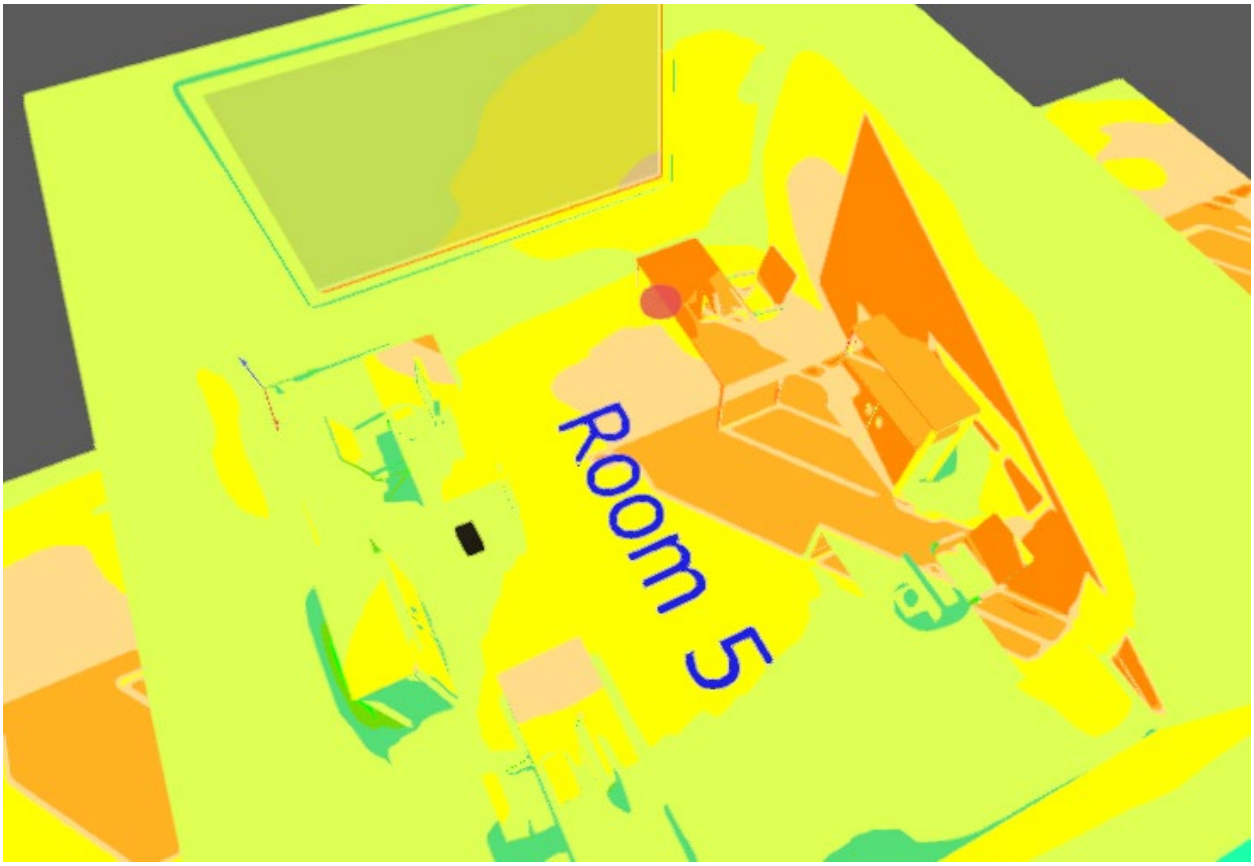
Εικόνα 35: Θάμβωση σε διαπερατότητα 38% (10000 lux) στο αριστερά γραφείο (21/9 16:00 μ.μ)



21 Δεκεμβρίου 10:00 π.μ.

Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Ναι	Στα 2 γραφεία δεξιά
20%	Ναι	Στα 2 γραφεία δεξιά
30%	Ναι	Στα 2 γραφεία δεξιά
38%	Ναι	Στα 2 γραφεία δεξιά

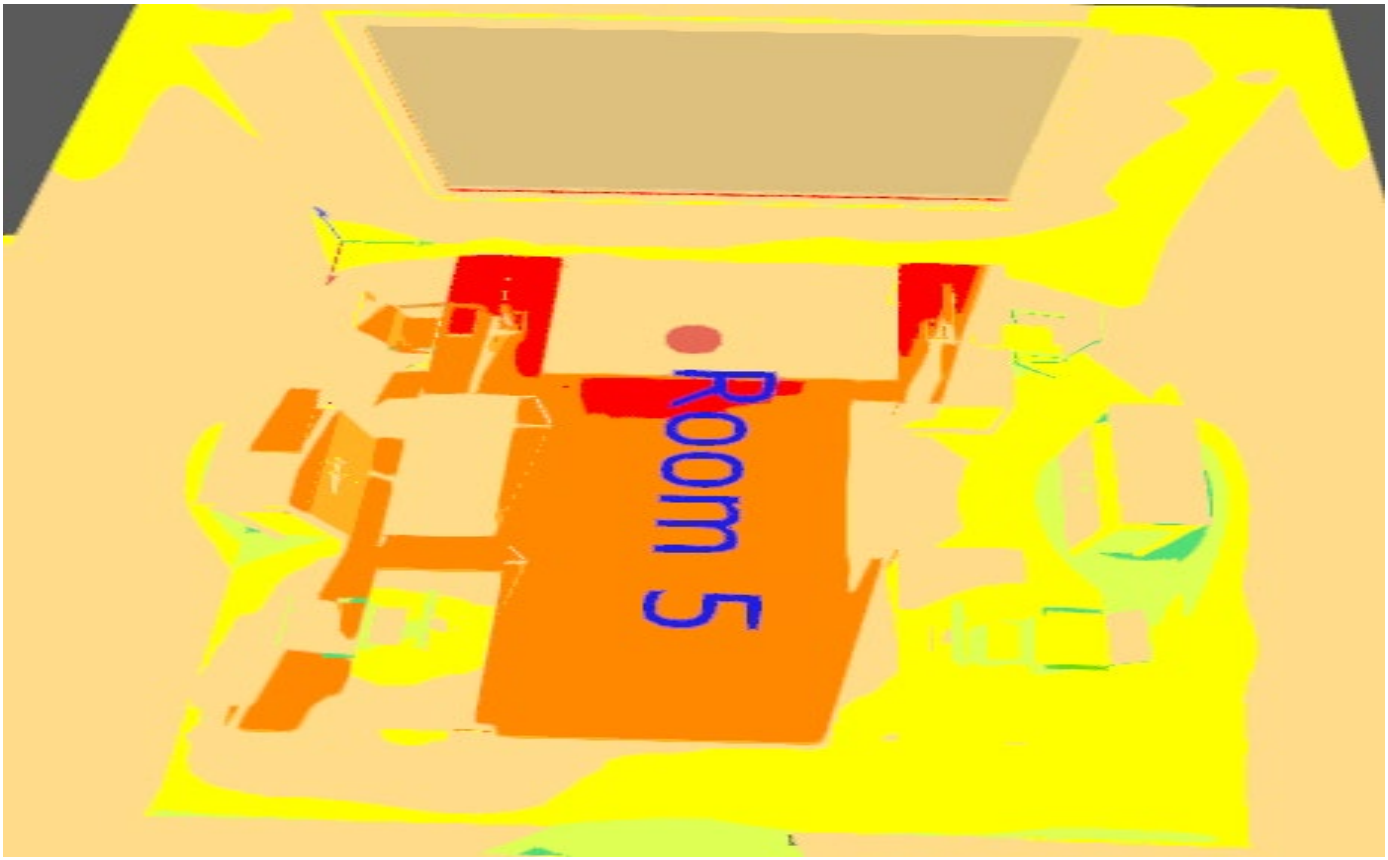
Εικόνα 36: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (2000-3000 lux) στα 2 δεξιά γραφεία (21/12 10:00 π.μ)



21 Δεκεμβρίου 13:00 μ.μ.

Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	Ναι	Σε όλα
20%	Ναι	Σε όλα
30%	Ναι	Σε όλα
38%	Ναι	Σε όλα

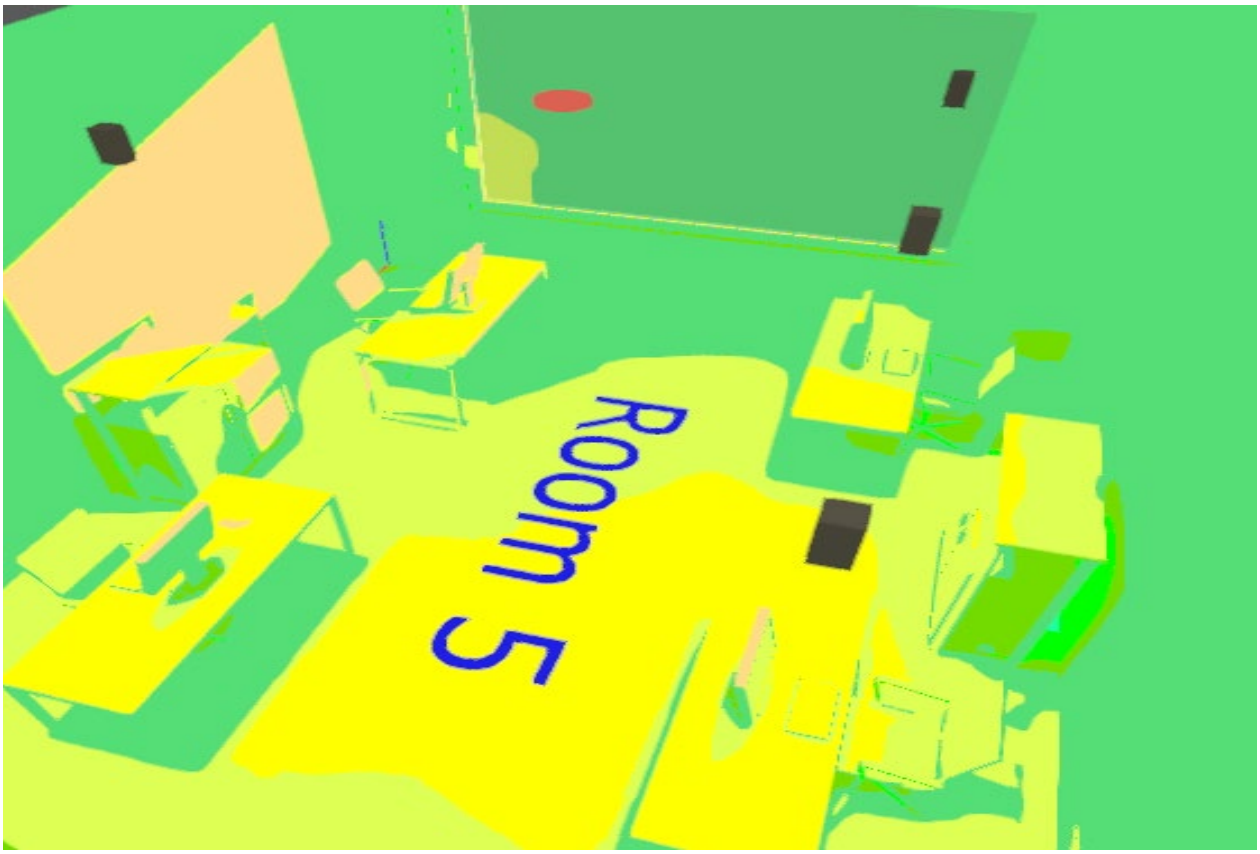
Εικόνα 37: Θάμβωση σε διαπερατότητα 30% (1000-5000 lux) σε όλα τα γραφεία (21/12 13:00 μ.μ)



21 Δεκεμβρίου 16:00 μ.μ.

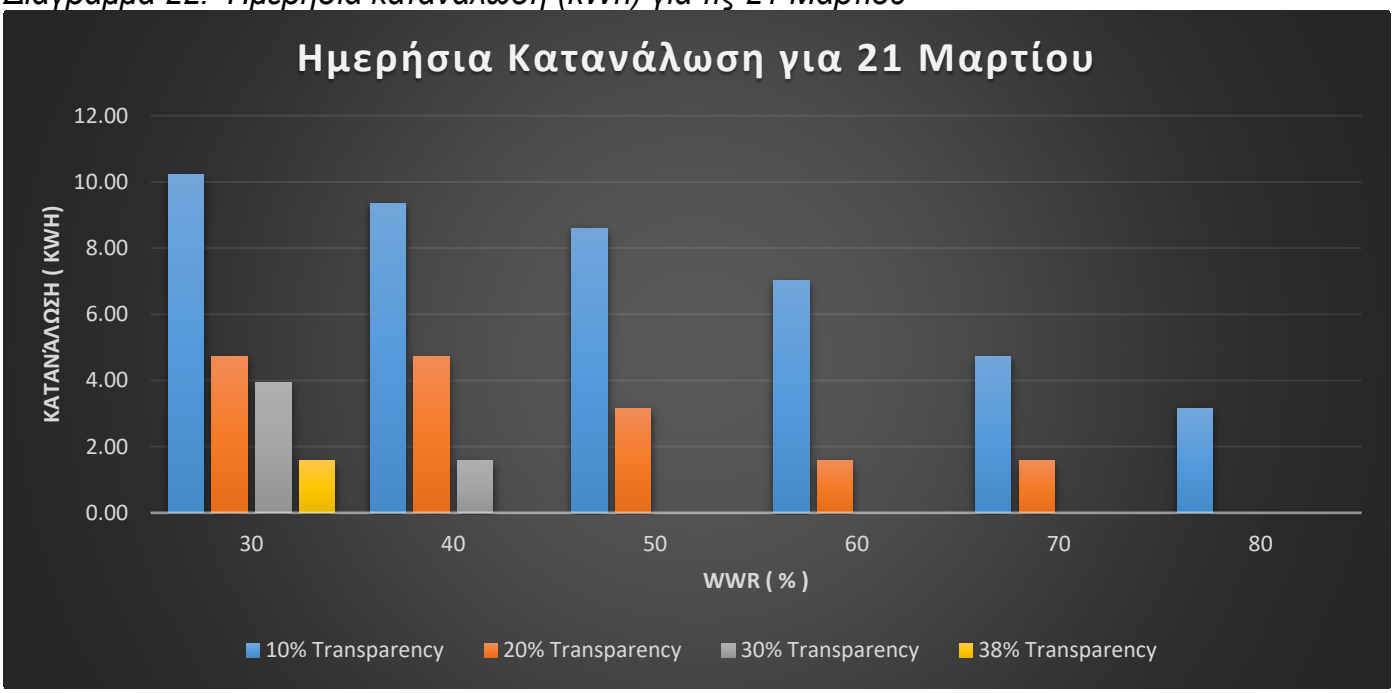
Transparency	Glare από ήλιο	Γραφείο
10%	όχι	
20%	Ναι	Αριστερα
30%	Ναι	Αριστερα
38%	Ναι	Αριστερά

Εικόνα 38: Απουσία θάμβωσης σε διαπερατότητα 30% (21/12 16:00)

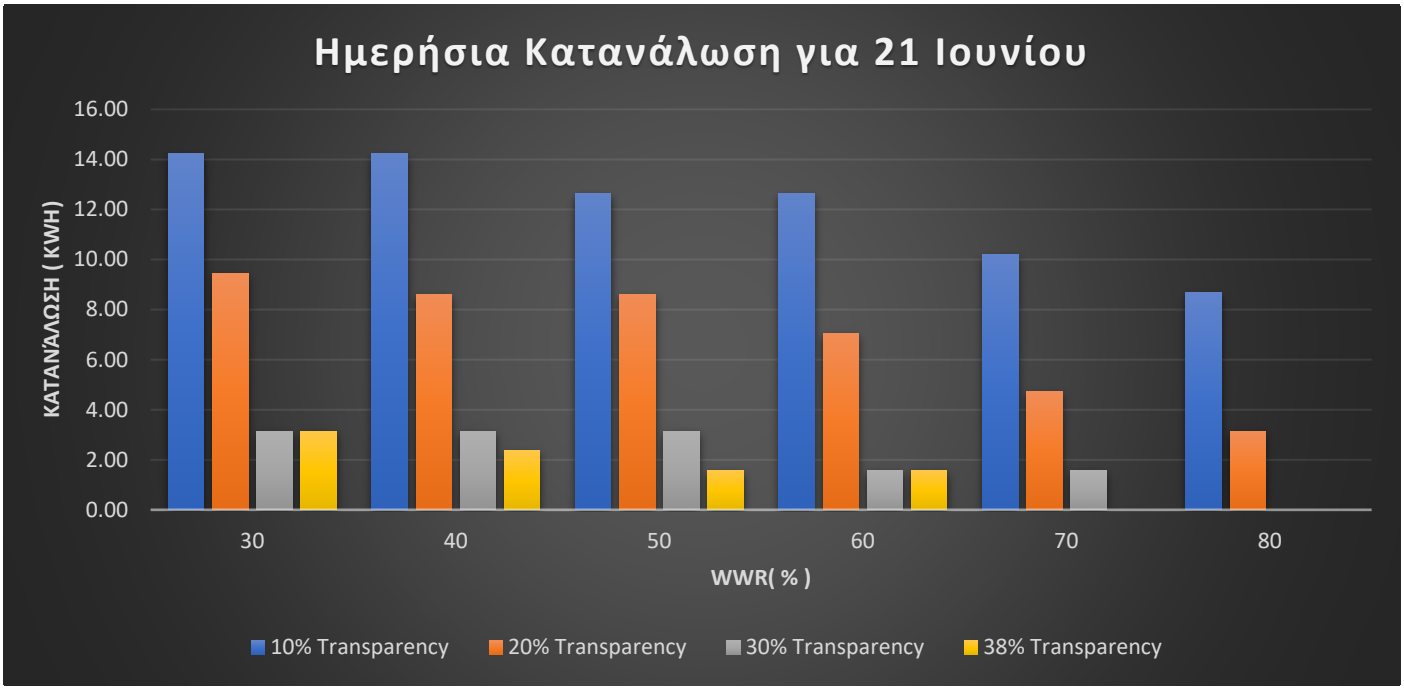


Ανάγκες για τεχνητό φωτισμό για κάθε ημερομηνία

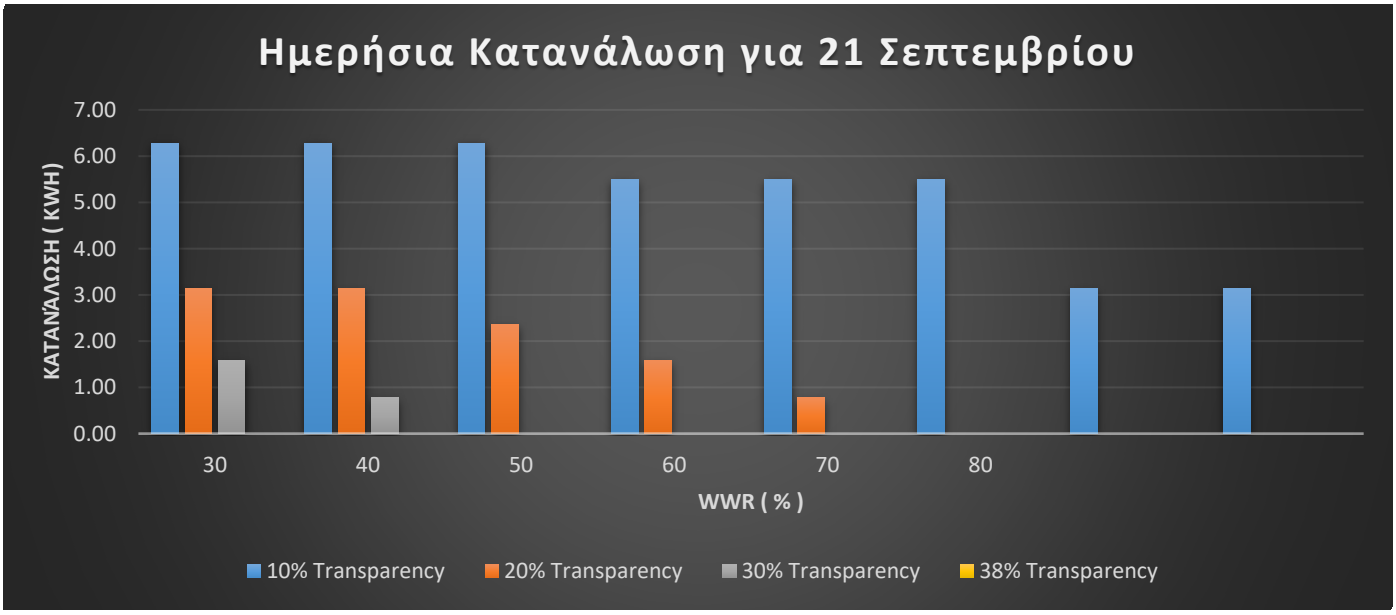
Διάγραμμα 22: Ημερήσια κατανάλωση (kWh) για τις 21 Μαρτίου



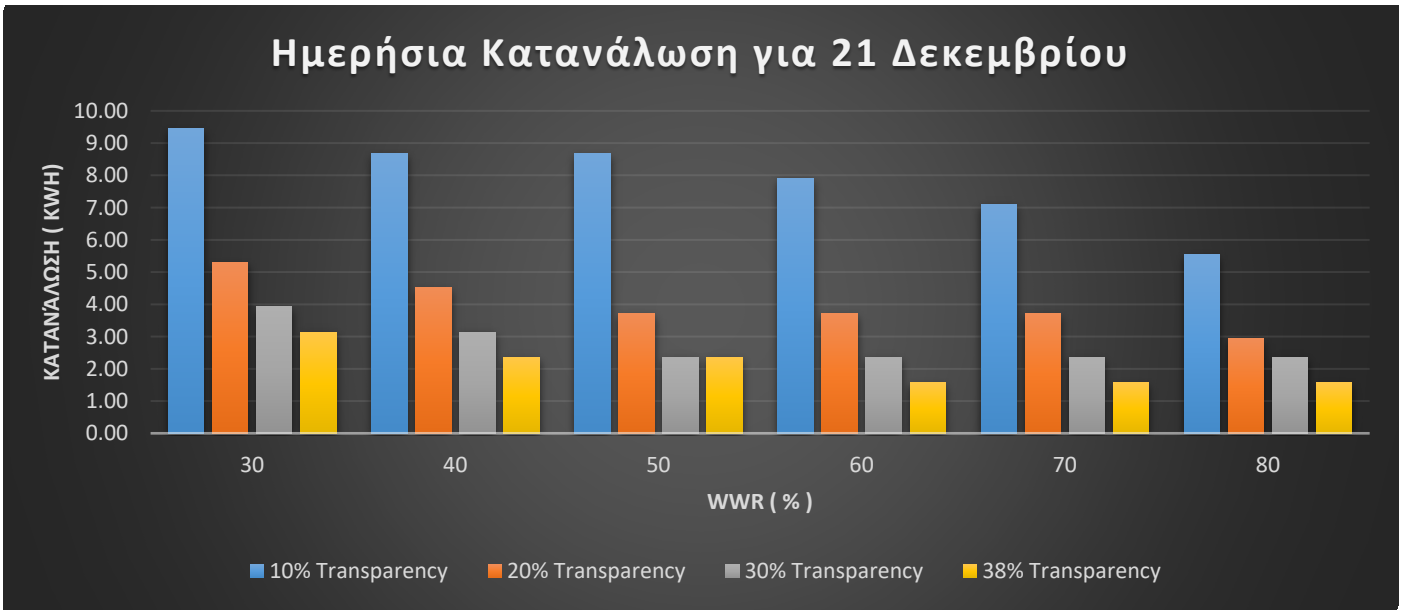
Διάγραμμα 23: Ημερήσια κατανάλωση (kWh) για τις 21 Ιουνίου



Διάγραμμα 24: Ημερήσια κατανάλωση (kWh) για τις Σεπτεμβρίου

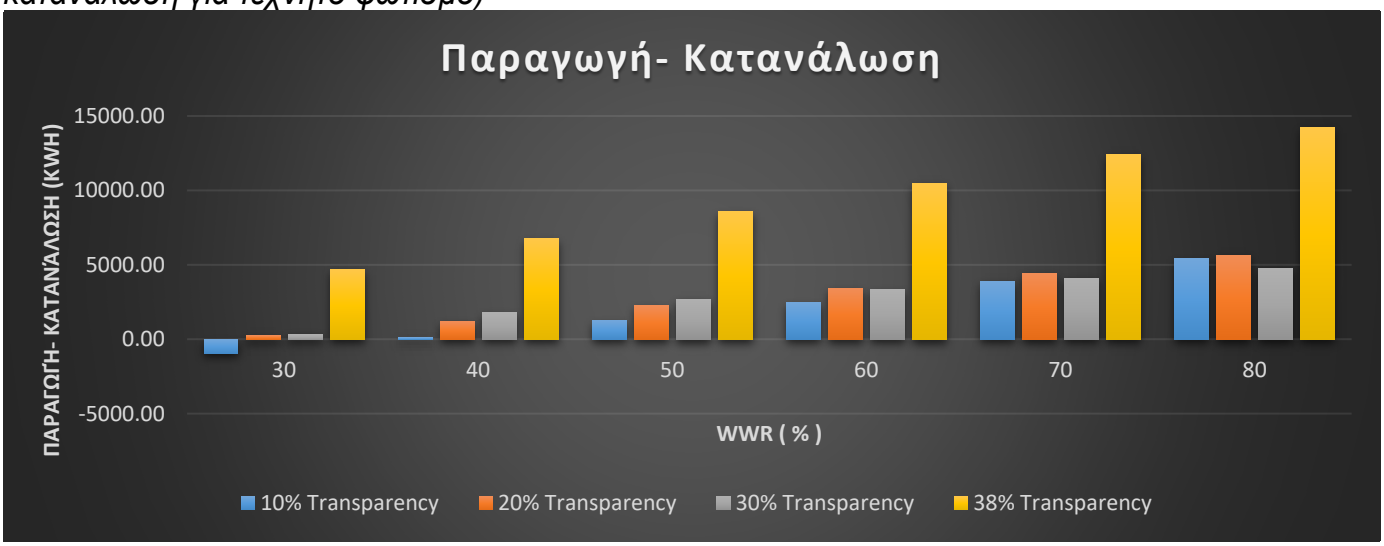


Διάγραμμα 25: Ημερήσια κατανάλωση (kWh) για τις 21 Δεκεμβρίου



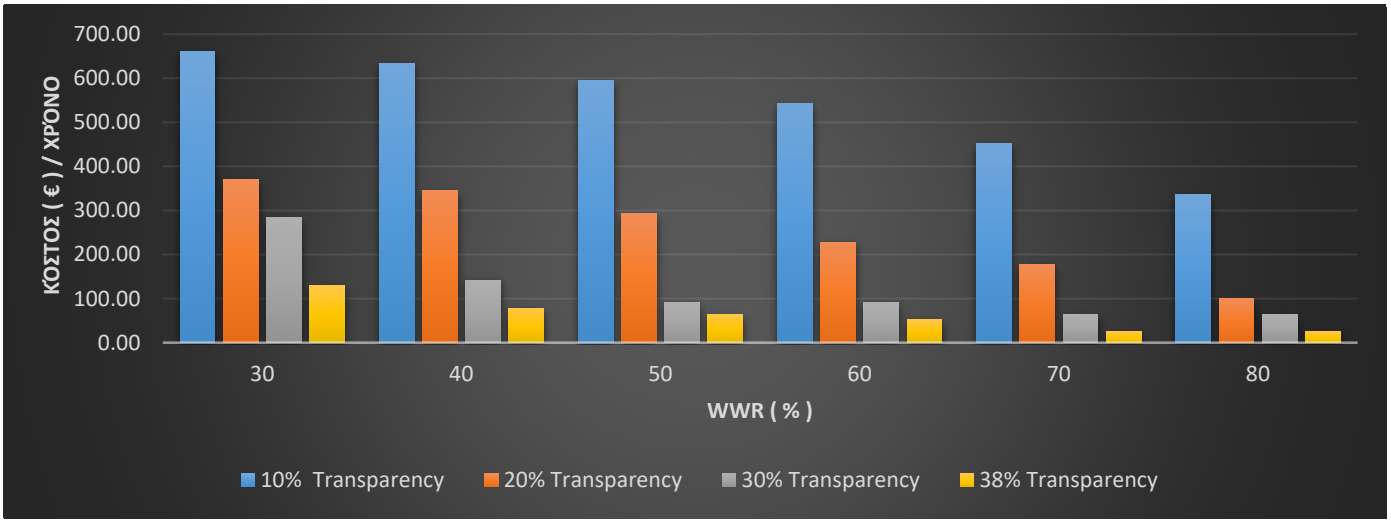
Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται οι ανάγκες για τεχνητό φωτισμό για τις 4 ημερομηνίες 21 Μαρτίου, 21 Ιουνίου, 21 Σεπτεμβρίου και 21 Δεκεμβρίου για όλες τις περιπτώσεις διαπερατότητας και WWR.

Διάγραμμα 26: Ενεργειακό ισοζύγιο (Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μείον την κατανάλωση για τεχνητό φωτισμό)



Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται ουσιαστικά το ενεργειακό ισοζύγιο για κάθε διαπερατότητα και κάθε WWR, δηλαδή η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται σε κάθε περίπτωση μείον την ενέργεια που χρειάζεται για τεχνητό φωτισμό για την κάλυψη των 500 lux που προβλέπονται σε χώρους γραφείων.

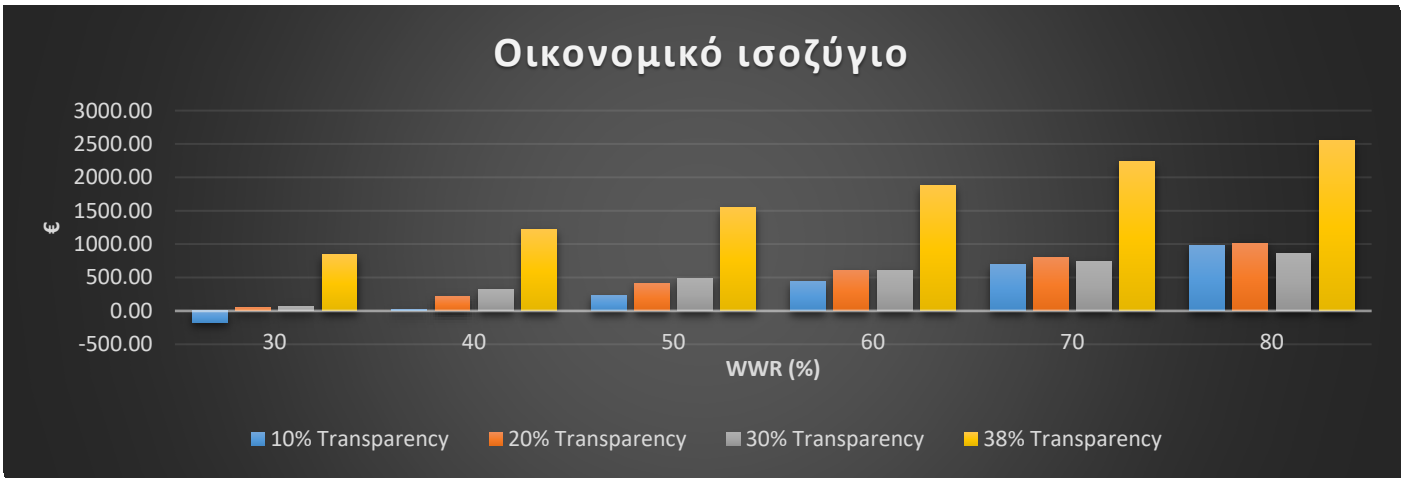
Διάγραμμα 27: Ετήσιο κόστος (€) για τεχνητό φωτισμό



Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται το ετήσιο κόστος για κάθε περίπτωση διαπερατότητας και WWR. Το κόστος υπολογίστηκε με το γινόμενο των αποτελεσμάτων του DIALux, δηλαδή πόσες kWh χρειάζονται για τεχνητό φωτισμό επί 0.18 € / kWh

χρέωση η οποία απευθύνεται σε επαγγελματίες χαμηλής τάσης όπως είναι τα γραφεία, και υπάγονται στο επαγγελματικό τιμολόγιο Γ21 της ΔΕΗ

Διάγραμμα 28: Οικονομικό ισοζύγιο



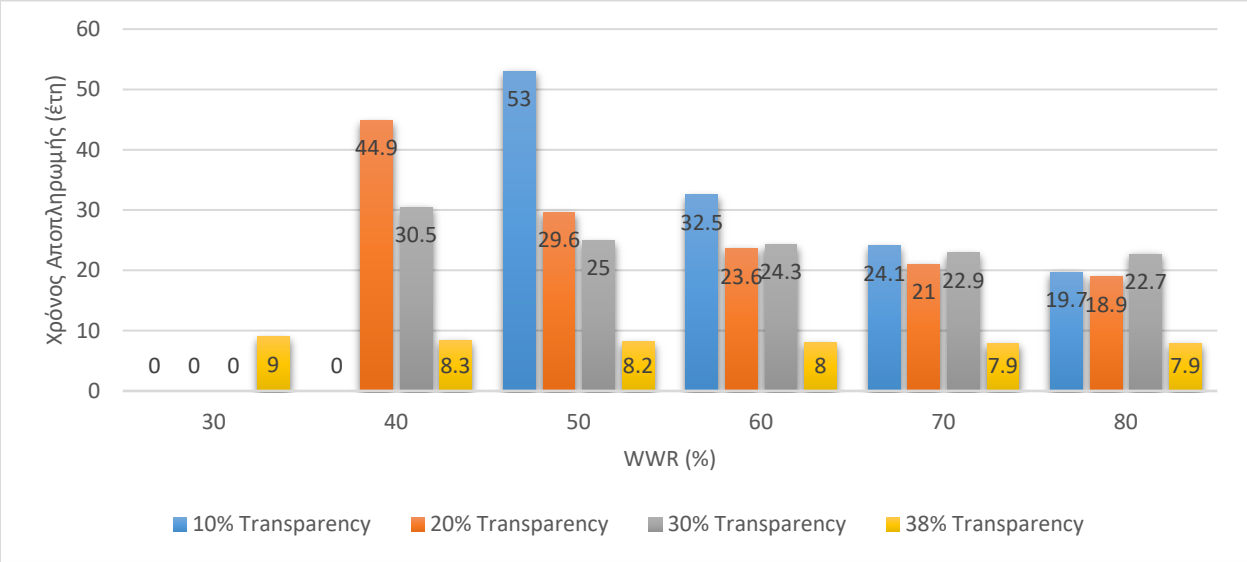
Το παραπάνω διάγραμμα είναι ουσιαστικά το ενεργειακό ισοζύγιο πολλαπλασιασμένο με 0.18 € / kWh και δείχνει το ετήσιο κέρδος από την εφαρμογή ημιπερατών Φ/Β σε γραφεία.

Χρόνος αποπληρωμής

Πίνακας 9: Αρχικό κόστος για κάθε ημιπερατό Φ/Β της Onyx Solar ανά τετραγωνικό μέτρο

Τεχνολογία ημιπερατού Φ/Β	**Κόστος (€ / m^2)**
Άμορφο, διαπερατότητας 10% με κενό 12mm	93.66
Άμορφο, διαπερατότητας 20% με κενό 12mm	93.73
Άμορφο, διαπερατότητας 30% με κενό 12mm	94.64
Μονοκρυσταλλικό, διαπερατότητας 38% με κενό 12mm	98.68

Διάγραμμα 29: Χρόνος αποπληρωμής ημιπερατών Φ/Β



Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να βρεθεί ο χρόνος αποπληρωμής ήταν η εξής:

$$\textbf{\textit{Χρόνος αποπληρωμής}} = \frac{\textbf{\textit{Αρχικό κόστος}}\ (€)}{\textbf{\textit{Παραγωγή ηλεκ.ενέργειας}}(€) - \textbf{\textit{Κατανάλωση για τεχνητό φωτισμό}}\ (€)}$$

Όπου **αρχικό κόστος**: Το συνολικό εμβαδόν ημιπερατών που εφαρμόζεται σε κάθε περίπτωση για κάθε τεχνολογία επί το αντίστοιχο κόστος ανά τετραγωνικό μέτρο.

Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (€): Η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε περίπτωση επί 0.18 €/kWh

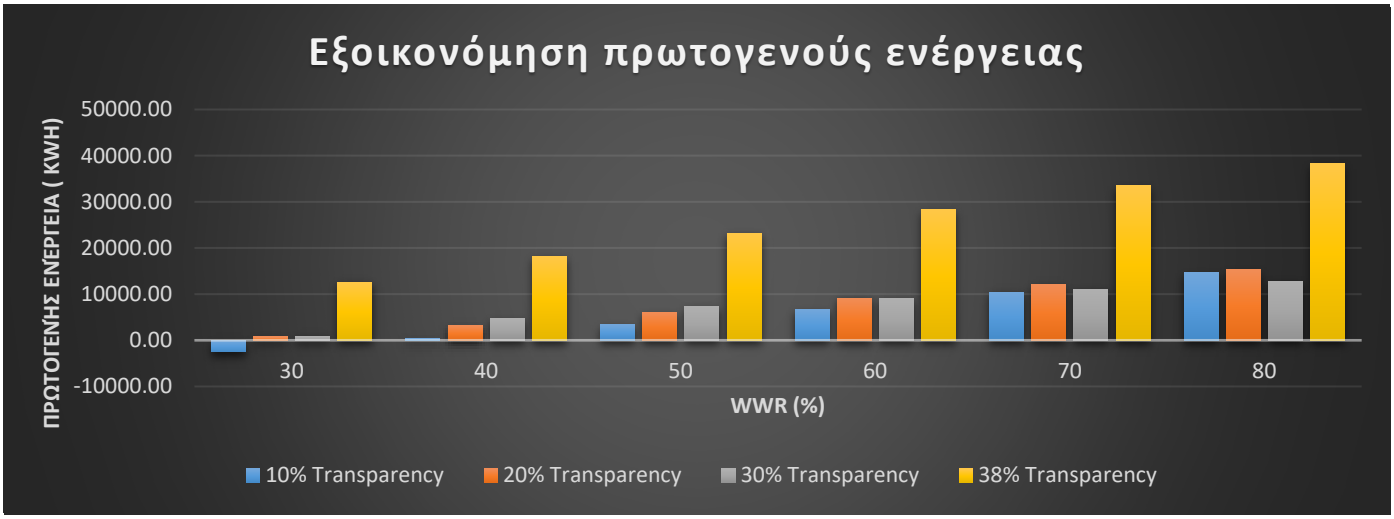
Κατανάλωση για τεχνητό φωτισμό (€) :Η ετήσια κατανάλωση ενέργειας για τεχνητό φωτισμό επί 0.18 €/kWh

Ο χρόνος αποπληρωμής βρέθηκε μόνο βάση του φωτισμού χωρίς να ληφθούν υπόψη συστήματα θέρμανσης και ψύξης τα οποία έχουν μεγαλη επιρροή στο χρόνο αποπληρωμής των ημιπερατών Φ/Β. Βάση μόνο της κατανάλωσης για φωτισμό, το μονοκρυσταλλικό έχει τον μικρότερο χρόνο αποπληρωμής για όλα τα WWR όπου με την αύξηση της επιφάνειας μειώνεται και ο χρόνος αποπληρωμής κανόνας ο οποίος ισχύει και για τις τρεις διαπερατότητες άμορφου πυριτίου. Αυτό οφείλεται στο ότι με την αύξηση

της επιφάνειας υπάρχει μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και περισσότερος διαθέσιμος φυσικός φωτισμός με αποτέλεσμα την μείωση χρήσης των λαμπήρων LED. Όσον αφορά το άμορφο πυρίτιο, για WWR 30%, ο χρόνος αποπληρωμής είναι πολύ μεγάλος με αποτέλεσμα να θεωρηθεί ότι η εφαρμογή τους είναι οικονομικά ασύμφορη όπως επίσης και για WWR 40%, όπου ο χρόνος αποπληρωμής ξεπερνά τον χρόνο ζωής των ημιπερατών Φ/Β. Επίσης, όσο αυξάνεται η επιφάνεια, ο χρόνος αποπληρωμής χαμηλότερων διαπερατοτήτων είναι μικρότερος λόγω της μεγαλύτερης ενεργειακής τους πυκνότητας με αποτέλεσμα την μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό φαίνεται στο WWR 80% όπου οι διαπερατότητες 10% και 20% έχουν μικρότερο χρόνο αποπληρωμής από την διαπερατότητα 30% ενώ για μικρότερες επιφάνειες ισχύει το αντίθετο.

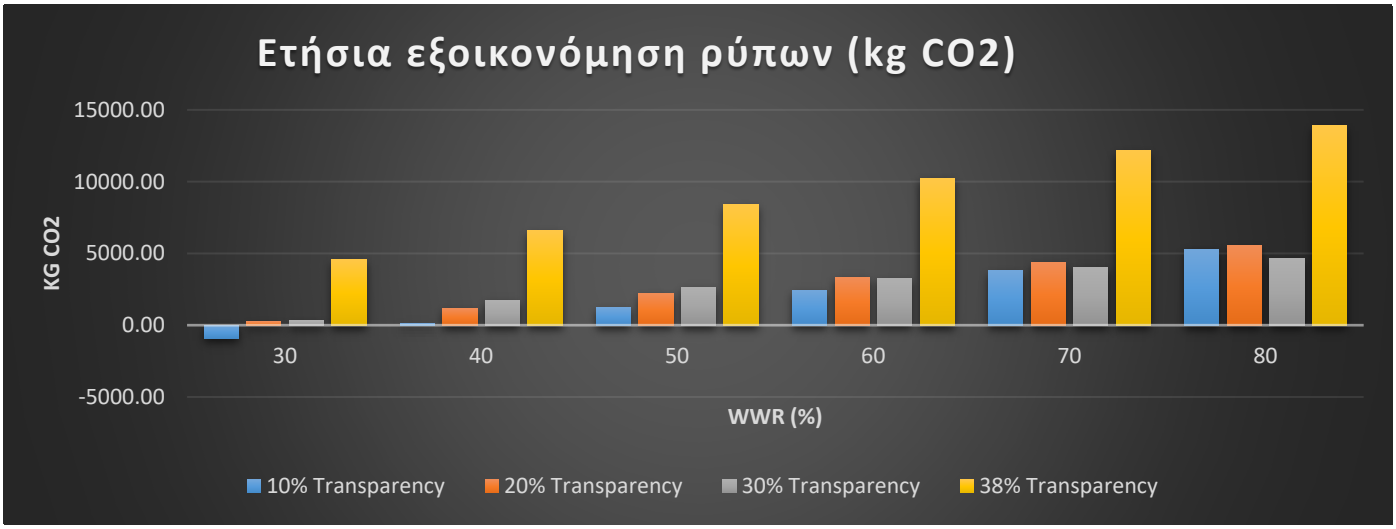
Πρωτογενής ενέργεια και εκπομπές CO_2

Διάγραμμα 30: Εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας



Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η εξοικόμηση πρωτογενούς ενέργειας, βάση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, την κατανάλωση αλλά και τον συντελεστή μετατροπής από τριτογενή σε πρωτογενή ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή

Διάγραμμα 31: Εξοικονόμηση ρύπων



Στο παραπάνω διάγραμμα φαίνεται η ετήσια εξοικονόμηση ρύπων δηλαδή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε kg. . Οι παραπάνω τιμές προέκυψαν από το ενεργειακό πλεόνασμα, δηλαδή μετά την αφαίρεση των αναγκών για τεχνητό φωτισμό πολλαπλασιασμένο με τον συντελεστή ρύπων για λιγνίτη που είναι 0.979 kg/ kWh

<u>Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας</u>

Όσο μικρότερη είναι η διαπερατότητα τόσο μεγαλύτερη παραγωγή έχουμε για το λόγο ότι όσο πιο ‘’σκούρο’’ είναι το ημιπερατό Φ/Β τόση μεγαλύτερη ηλιακή ενέργεια απορροφά και συγκεκριμένα στο φάσμα του ορατού φωτός. Τα παραπάνω φαινόμενα, παρατηρούνται για διαπερατότητες από 10% μέχρι 30% που είναι άμορφο πυρίτιο. Στην περίπτωση του κρυσταλλικού πυριτίου, παρατηρούμε πολύ μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας παρόλο που έχει την μεγαλύτερη διαπερατότητα, δηλαδή επιτρέπει μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας να διαπεράσει από μέσα του. Αυτό συμβαίνει γιατί το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και περίπου 4 φορές μεγαλύτερη απόδοση από το άμορφο, δηλαδή έχει περισσότερη ισχύ ανά τετραγωνικό μέτρο. Συγκεκριμένα, η ενεργειακές πυκνότητες για το κάθε ημιπερατό Φ/Β για διαπερατότητα 10%, 20% , 30% και 38% ήταν 40 $\frac{W}{m^2}$, 34$\frac{W}{m^2}$, 28 $\frac{W}{m^2}$ και 80 $\frac{W}{m^2}$ αντίστοιχα.

Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνητό φωτισμό

Στην περίπτωση της διαπερατότητας 10% , οι απαιτήσεις για τεχνητό φωτισμό είναι πολύ μεγαλύτερες από τις άλλες περιπτώσεις για τον λόγο ότι το ημιπερατό Φ/Β αφήνει ελάχιστο φως να εισέρχεται στον χώρο των γραφείων.. Στην περίπτωση του κρυσταλλικού πυριτίου με διαπερατότητα 38% , οι απαιτήσεις είναι ελάχιστες ακόμα και σε σχετικά μικρές επιφάνειες ημιπερατών.

Θάμβωση (Glaring)

Από τα αποτελέσματα του DIALux παρατηρείται ότι κατά τις 2 ενδιάμεσες περιόδους των 2 ηλιοστασίων , δηλαδή 21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου που ο ήλιος είναι σχετικά χαμηλά, προκαλείται θάμβωση στο εκάστοτε γραφείο ανάλογα με την θέση του ήλιου, δηλαδή τις πρωινές ώρες προκαλείται θάμβωση στο δεξιά γραφείο που είναι κοντά στο παράθυρο, τις ώρες κοντά στο μεσημέρι στα 2 γραφεία κοντά στο παράθυρο και τις απογευματινές ώρες στο αριστερά γραφείο που είναι κοντά στο παράθυρο. Στις 21 Ιουνίου, παρόλο που υπάρχει πολύ μεγαλύτερη ηλιοφάνεια από τις υπόλοιπες ημερομηνίες, προκαλείται η λιγότερη θάμβωση κι αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η θέση του ήλιου είναι στο υψηλότερό του σημείο. Η μόνη περίπτωση στην οποία προκαλείται θάμβωση είναι το μεσημέρι στην υψηλότερη διαπερατότητα μοντελοποίησης δηλαδή 38% η οποία επιτρέπει μεγάλη διέλευση ηλιακής ακτινοβολίας εντός των γραφείων. Όπως είναι προφανές από τους πίνακες, η χειρότερη περίπτωση θάμβωσης είναι στις 21 Δεκεμβρίου αφού ο ήλιος βρίσκεται στο χαμηλότερό του σημείο με αποτελέσμα η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει με μεγαλύτερη καθετότητα στους υαλοπίνακες προκαλώντας καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας θάμβωση. Ειδικότερα, στις 13:00 μ.μ , είναι η μόνη περίπτωση κατά την οποία προκαλείται θάμβωση σε όλα τα γραφεία αφού η ηλιακή ακτινοβολία εισχωρεί εις βάθος μέσα στο κτίριο.

Ανάγκες για τεχνητό φωτισμό ανά ημερομηνία

Με την βοήθεια του DIALux αλλά και την περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων μέσω του MS Excel, βρέθηκαν οι ανάγκες για τεχνητό φωτισμό για τις 4 ημερομηνίες 21 Μαρτίου, 21 Ιουνίου, 21 Σεπτεμβρίου και 21 Δεκεμβρίου για όλες τις περιπτώσεις διαπερατότητας και WWR. Παρόλο που στις 21 Ιουνίου επικρατεί λιακάδα και υπάρχει

περισσότερη ηλιακή ακτινοβολία προς εκμετάλλευση όσον αφορά τον φυσικό φωτισμό, δεν υπήρχαν οι χαμηλότερες ανάγκες για τεχνητό φωτισμό. Αυτό, οφείλεται στο γεγονός ότι ο ήλιος είναι στο ανώτατο του σημείο και η κλίση των ημιπερατών Φ/Β είναι 90 μοίρες με αποτέλεσμα, η ηλιακή ακτινοβολία να προσπίπτει υπό μεγαλύτερη κλίση εντός των γραφείων και να μην έχουμε τη μέγιστη δυναμικότητα για φυσικό φωτισμό ειδικά για διαπερατότητες 10% και 20%. Όπως παρατηρείται, οι ελάχιστες απαιτήσεις είναι στις 21 Μαρτίου και 21 Σεπτεμβρίου όπου ο ήλιος βρίσκεται χαμηλότερα επιτρέποντας έτσι την διέλευση περισσότερου φωτός εντός των γραφείων . Ειδικότερα, και για τις 2 αυτές ημερομηνίες για WWR 50% και άνω, οι ανάγκες για τεχνητό φωτισμό για διαπερατότητες 30% και 38% είναι μηδενικές. Στις 21 Δεκεμβρίου, παρόλο που ο ήλιος βρίσκεται στο χαμηλότερο του σημείο και η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει με μεγαλύτερη καθετότητα στα ημιπερατά Φ/Β , έχουμε τις μεγαλύτερες ανάγκες για τεχνητό φωτισμό λόγω των κλιματολογικών συνθήκων αλλά και για το λόγο ότι η ώρα 16:00 όπου τα γραφεία είναι ακόμα σε ωράριο λειτουργίας, ο ήλιος είναι πολύ χαμηλά με αποτέλεσμα να προσφέρει ελάχιστο φυσικό φωτισμό.

Ενεργειακό ισοζύγιο (παραγωγή – κατανάλωση)

Όπως φαίνεται, σε όλες τις περιπτώσεις το ενεργειακό ισοζύγιο είναι θετικό εκτός από την 1η περίπτωση δηλαδή για διαπερατότητα 10% και WWR 30%, όπου η ενέργεια που καταναλώνεται από τις λάμπες LED είναι μεγαλύτερη από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των ημιπερατών Φ/Β. Όσο μεγαλώνει η επιφάνεια των ημιπερατών , τόσο μεγαλύτερο ενεργειακό πλεόνασμα έχουμε. Επίσης, για το άμορφο πυρίτιο, για WWR μέχρι 50%, η διαπερατότητα 30% έχει το μεγαλύτερο πλεόνασμα ενώ για μεγαλύτερες επιφάνειες, η διαπερατότητα 20% είναι καλύτερη λύση. Για WWR 80%, η 10% διαπερατότητα έχει μεγαλύτερο πλεόνασμα από την 30% διαπερατότητα, αφού παρόλο που χρειάζεται πολύ περισσότερος τεχνητός φωτισμός, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της μεγαλύτερης ενεργειακής πυκνότητας υπερκαλύπτει το κενό αυτό. Στην περίπτωση του κρυσταλλικού πυριτίου, το ενεργειακό πλεόνασμα είναι ασύγκριτα μεγαλύτερο από τις περιπτώσεις άμορφου πυριτίου λόγω της μεγάλης διαπερατότητας, δηλαδή μειωμένης ανάγκης για τεχνητό φωτισμό αλλά και της μεγάλης ενεργειακής πυκνότητάς του.

Κόστος

Για διαπερατότητα 10%, παρατηρούμε ότι το κόστος λόγω τεχνητού φωτισμού είναι πολύ μεγαλύτερο από τις άλλες διαπερατότητες για όλα τα WWR , ενώ για διαπερατότητα 38% είναι ελάχιστό αφού λόγω του αυξημένου φυσικού φωτισμού οι ανάγκες για τεχνητό είναι αμελητέες.

Πρωτογενής Ενέργεια

Ο συντελεστής μετατροπής τριτογενούς ενέργειας σε πρωτογενή, στην Ελλάδα στην παρούσα κατάσταση είναι 2.7 , δηλαδή προκειμένου να παραχθεί 1 kWh τριτογενούς ενέργειας απαιτείται η χρήση 2.7 kWh ενέργειας από το ενεργειακό μίγμα για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που στην προκειμένη περίπτωση είναι κυρίως λιγνίτης και πετρέλαιο. Να σημειωθεί ότι η μετατροπή αυτή, λαμβάνει υπόψη και τις απώλειες του δικτύου για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Εξοικονόμηση CO_2

Η επιπλέον ενέργεια που παράγεται από τα ημιπερατά Φ/Β, πέρα από την κάλυψη του τεχνητού φωτισμού, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλες χρήσεις γραφείου όπως ηλεκτρονικούς υπολλογιστές, εκτυπωτές, ψυγεία κτλπ. Δεδομένου λοιπόν ότι όλη η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται, τα παραπάνω αποτελέσματα αποτυπώνουν την ετήσια εξοικονόμηση διοξειδίου του άνθρακα.

Μεθοδολογικές αδυναμίες έρευνας

Η παρούσα μελέτη έχει επικεντρωθεί μόνο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στις οπτικές ιδιότητες από την εφαρμογή ημιπερατών Φ/Β δηλαδή πως επηρεάζεται ο εσωτερικός φωτισμός των γραφείων στις διάφορες εποχές του χρόνου και ώρες της ημέρας. Ένα μεγάλο κομμάτι που δεν έχει ληφθεί υπόψη στην μοντελοποίηση, είναι τα θερμικά και ψυκτικά φορτία και πως αυτά μεταβάλλονται και επηρεάζονται στις διάφορες διαπεράτοτητες και τα WWR. Η επιφάνεια των υαλοπινάκων, η διαπερατότητα και το είδος των τζαμιών , δηλαδή εάν είναι μονά, διπλά ή low e τζάμια , παίζουν καθοριστικό ρόλο στη γενική ενεργειακή απόδοση του κτιρίου αφού σε πολλές περιπτώσεις, ειδικότερα σε υψηλές διαπερατότητες και μεγάλες επιφάνειες υαλοπινάκων υπάρχουν ανεπιθύμητα θερμικά κέρδη με αποτέλεσμα την αύξηση των ψυκτικών φορτίων του κτιρίου. Επίσης η αύξηση της θερμοκρασίας των κελιών ειδικότερα σε μεγάλο βαθμό, επηρεάζουν την απόδοση των ημιπερατών Φ/Β παράμετρος η οποία επίσης δεν λήφθηκε υπόψη κατά την μοντελοποίηση.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την μοντελοποίηση εφαρμογής ημιπερατών Φ/Β σε εμπορικά κτίρια και γραφεία παρατηρείται ότι η τεχνολογία αυτή έχει τεράστιο δυναμικό αξιοποίησης στο μέλλον αφού στην Ελλάδα υπάρχει μεγάλη ηλιοφάνεια καθ’όλη τη διάρκεια του χρόνου. Σε γραφεία παρόμοιων διαστάσεων με μεγάλα ανοίγματα δηλαδή για WWR πάνω από 30 % παρατηρείται ότι όλες οι διαπερατότητες έχουν θετικό πρόσημο στην ενεργειακή απόδοση του κτιρίου όσον αφορά τον φωτισμό. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην υψηλή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και στον διαθέσιμο φυσικό φωτισμό. Επίσης, από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι για μεγάλα WWR , δηλαδή μεγαλύτερα του 60% οι χαμηλότερες διαπερατότητες είναι καλύτερες ενεργειακά λύσεις, ενώ για μικρότερα ανοίγματα η διαπερατότητα 30% είναι πιο συμφέρουσα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις μικρότερες διαπερατότητες, δηλαδή στα ημιπερατά με μεγαλύτερες ενεργειακές πυκνότητες, υπερκαλύπτουν το μειονέκτηματα της μικρότερης διέλευσης

φωτός εντός των γραφείων άρα και της μεγαλύτερης ανάγκης τους για τεχνητό φωτισμό. Το γεγονός αυτό, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στον σχεδιασμό εφαρμογής ημιπερατών Φ/Β πρέπει να λαμβάνονται υπόψη το εμβαδόν, η διαπερατότητα αλλά και η ενεργειακή πυκνότητα για την βελτιστοποίηση του ενεργειακού πλεονάσματος. Επίσης, για την καλύτερη οπτική άνεση των εργαζομένων εντός των γραφείων, κρίνεται απαραίτητη η χρήση σκιάστρων και blinds, αφού στις πλείστες περιπτώσεις υπήρχαν φαινόμενα θάμβωσης εντός των γραφείων.

Τα ευρήματα της παρούσας μελέτης, βρέθηκαν μέσω μοντελοποίησης με τα ακριβή τεχνικά χαρακτηριστικά των ημιπερατών Φ/Β που εφαρμόστηκαν αλλά και κατάλληλων υπολογιστικών προγραμμάτων για την εύρεση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των οπτικών ιδιοτήτων τους σε χώρους γραφείων . Ωστόσο, η μοντελοποίηση πολλές φορές διαφέρει από τα πραγματικά δεδομένα και η καταλληλότερη μελλοντική έρευνα για την βελτιστοποίηση της τεχνογνωσίας στο θέμα των ημιπερατών Φ/Β είναι οι πειραματικές δοκιμές διάφορων τεχνολογιών ημιπερατών Φ/Β στην Ελλάδα για όλες τις εποχές του χρόνου με σκοπό την εύρεση των ηλεκτρικών και οπτικών τους ιδιοτήτων αποκτώντας έτσι ακριβέστερη εικόνα για τις δυνατότητες της τεχνολογίας αυτής.

Επίσης, στην παρούσα έρευνα, μελετήθηκε η εφαρμογή των ημιπερατών Φ/Β με προσανατολισμό μόνο προς τον νότο, προσανατολισμός ο οποίος επιφέρει την μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μεγαλύτερη αξιοποίηση του φυσικου φωτισμού όμως και μεγαλύτερη θάμβωση εντός των κτιρίων. Για μελλοντική έρευνα , κρίνεται σκόπιμο να πραγματοποιηθεί η μοντελοποίηση της εφαρμογής ημιπερατών Φ/Β ώστε να προσιοριστεί επίδραση του προσανατολισμού στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στον φωτισμό εντός των κτιρίων, δηλαδή να μελετηθεί εφαρμογή τους σε όλες τις πλευρές του κτιρίου.

10 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. *Θ.Τσούτσος,Ι.Κανάκης,2013, ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ-Τεχνολογίες και Περιβάλλον, Παπασωτηρίου,Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Σελίδα 119*
2. *Sue Roaf, Manuel Fuentes, Stephanie Thomas, ecoδομείν- βιοκλιματικός σχεδιασμός κτιρίων & εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, Εκδόσεις Ψυχάλου, Φωτοβολταϊκά Συστήματα, Σελίδα 279*
3. *www.ourworldindata.org*
4. *Δημήτρης Μεζαρτάσογλου, Κ.Ν. Σταμπόλης, Ι. Χατζηβασιλειάδης,2019, Ο Ελληνικός ενεργειακός τομέας-ετήσια έκθεση 2019*
5. *Αναστασία Στρατηγέα, 2015, Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Οικονομικη Κρίση- Η πορεία της Ελλάδας προς το 2020, αειχώρος, Σελίδες 128-129*
6. *ΚΩΣΤΑΣ Μ. ΚΑΠΟΣ , 2014,* ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΦΩΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΚΑΙ ΑΣΤΙΚΑ ΤΟΠΙΑ. ΤΕΧΝΙΚΕΣ & ΑΙΣΘΗΤΙΚΕΣ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΙΣ
7. http://www.docs.lighting.philips.com/
8. www.techlumen.gr
9. Α.Τσαγκρασούλης, 2016, Φυσικός Φωτισμός
10. https://www.techlumen.gr/el/odigoi-fotismoy/protypa-fotismoy-en12464-1-en12462-2
11. T. Miyazaki _, A. Akisawa, T. Kashiwagi, 2004, «Energy savings of office buildings by the use of semi-transparent solar cells for windows» www.ScienceDirect.com
12. Konstantinos Kapsis, Andreas K. Athienitis, 2015, «A study of the potential benefits of semi-transparent photovoltaics in commercial buildings», www.ScienceDirect.com
13. Danny H.W. Li , Tony N.T. Lam , Wilco W.H. Chan , Ada H.L. Mak, 2008, «Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings» www.ScienceDirect.com

14. K. Kapsis, V. Dermardiros & A.K. Athienitis, 2015, «Daylight performance of perimeter office façades utilizing semi-transparent photovoltaic windows: a simulation study» www.ScienceDirect.com
15. Poh Khai Nga, Nalanie Mithraratnea,, Harn Wei Kua, 2013, « Energy analysis of semi-transparent BIPV in Singapore buildings» www.ScienceDirect.com
16. Wei Liao, Shen Xu, 2014, «Energy performance comparison among see-through amorphous silicon PV (photovoltaic) glazings and traditional glazings under different architectural conditions in China» www.ScienceDirect.com
17. Evelise Leite Didone∗, Andreas Wagner, 2013, «Semi-transparent PV windows: A study for office buildings in Brazil» www.ScienceDirect.com
18. Jong-Ho Yoon, Se-Ra Shim, Young Sub An, Kwang Ho Lee , 2012, «An experimental study on the annual surface temperature characteristics of amorphous silicon BIPV window», www.ScienceDirect.com
19. Dominika Knera, Eliza Szczepańska-Rosiak, Dariusz Heim, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015, « Potential of PV façade for supplementary lighting in winter», www.ScienceDirect.com
20. www.courseware.mech.ntua.gr
21. www.ResearchGate.net
22. www.altestore.com
23. www.sc663henad.weebly.com