

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΗΣ
ΗΛΙΑΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΣΕ
ΚΛΕΙΣΤΟΥΣ ΧΩΡΟΥΣ**

Διπλωματική εργασία

Κωνσταντίνος Ι. Χατζηαγγελίδης

Επιβλέπων καθηγητής: Μπούρης Δημήτριος

Κοζάνη

Οκτώβριος, 2005

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με βοήθησε ώστε να έρθω ένα βήμα πιο κοντά, κυρίως στην ηλιακή γεωμετρία αλλά γενικότερα και στην προσομοίωση κτιρίων, με την οποία ασχολήθηκα κατά την εκπόνηση της σπουδαστικής μου εργασίας, καθώς και κατά την διάρκεια του πέμπτου και τελευταίου έτους σπουδών μου. Για την περάτωσή της χρειάστηκαν περίπου εννέα μήνες, κατά τους οποίους χρησιμοποιήθηκαν τόσο το προσομοιωτικό πρόγραμμα *TRNSYS*, όσο και η γλώσσα προγραμματισμού *Fortran*. Αξίζει να σημειωθεί ότι πέρα από το βιβλιογραφικό κομμάτι, προϊόν αυτής της δουλειάς είναι και ο κώδικας *VFCALC*, ο οποίος δημιουργήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού *Fortran*, προκειμένου τα αποτελέσματα του να χρησιμοποιηθούν στον εμπορικό κώδικα *TRNSYS*. Πριν κλείσω με τον σύντομο αυτό πρόλογο, αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους, χωρίς την συμβολή των οποίων η ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα ήταν αδύνατη.

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάσκοντα κο. Μπούρη Δημήτριο, η συμβολή του οποίου, όχι μόνο ως επιβλέποντα καθηγητή αλλά και ως συνεργάτη, ήταν καθοριστική καθ' όλη την διάρκεια της εργασίας μου. Πέρα από το γεγονός ότι η αρχική ιδέα της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν δική του, οι γνώσεις και η εμπειρία του επάνω στον θεματικό πυρήνα της εργασίας, ήταν οι παράγοντες που με καθοδήγησαν σωστά ώστε να φτάσω στο επιθυμητό αποτέλεσμα.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον διδάσκοντα κο. Θεοδοσίου Θεόδωρο, με τον οποίο είχα την χαρά να συνεργαστώ κατά το τελευταίο έτος των σπουδών μου. Η βοήθειά του ήταν σημαντική ως προς τον τομέα της προσομοίωσης, διότι οφείλω να ομολογήσω ότι το μεγαλύτερο μέρος των γνώσεων μου πάνω στο πρόγραμμα *TRNSYS* και γενικά στην ενεργειακή προσομοίωση κτιρίων, είναι προϊόν της συνεργασίας μου μαζί του.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο Σταματίου Λυσίμαχο, ο οποίος μου μετέδωσε κάποιες βασικές αρχές τρισδιάστατης σχεδίασης στο πρόγραμμα *AUTOCAD*. Οι αρχές αυτές αποτέλεσαν σημαντικό βοήθημα για την σχεδίαση των σχημάτων που υπάρχουν στην παρούσα εργασία.

3.3.3 Ροές θερμικής ακτινοβολίας (μόνο) σε τοίχους και παράθυρα	33
3.3.4 Ενσωμάτωση παραθύρων και τοίχων	34
3.3.5 Μαθηματικό μοντέλο δικτύου αστέρα	36
3.4 Περιγραφή οπτικού και θερμικού μοντέλου παραθύρου στο TRNSYS	40
3.4.1 Περιγραφή παραθύρου	40
3.4.2 Μοντέλο παραθύρου διμερούς ηλιακής ακτινοβολίας	41
3.4.3 Μετάδοση ηλιακής ακτινοβολίας	42
3.4.4 Ροή θερμότητας μεταξύ υαλοπινάκων	42
3.4.5 Απορρόφηση ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος	44
3.4.6 Επαναληπτική λύση για θερμοκρασίες υαλοπινάκων	45
3.4.7 Συνολική ενεργειακή ροή μέσω του υαλοπίνακα	45
3.4.8 Διανομή ηλιακής ακτινοβολίας	46
3.4.9 Διανομή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος	47
4. Αριθμητική προτυποποίηση κατανομής εισερχόμενης ακτινοβολίας	48
4.1 Εισαγωγή	48
4.2 Μαθηματικό μοντέλο κώδικα	48
4.3 Ηλιακό ισοζύγιο παραθύρου (NTYPE 903)	50
4.4 Διάγραμμα ροής αριθμητικής διαδικασίας	52
4.5 Εφαρμογή του κώδικα	53
5. Προσομοίωση γεωμετρίας ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου	55
5.1 Σύγκριση θερμοκρασιών ζώνης	59
5.2 Σύγκριση θερμοκρασιών των εσωτερικών επιφανειών της ζώνης	60
5.3 Σύγκριση ποσοστών της συνολικά εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται στις εσωτερικές επιφάνειες	64
6. Προσομοίωση γεωμετρίας κύβου	72
6.1 Σύγκριση θερμοκρασιών ζώνης	75
6.2 Σύγκριση θερμοκρασιών των εσωτερικών επιφανειών της ζώνης	76
6.3 Σύγκριση ποσοστών της συνολικά εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται στις εσωτερικές επιφάνειες	80

7. Προσομοίωση μονοκατοικίας	86
7.1 Παρουσίαση κτιρίου	86
7.2 Σύγκριση θερμοκρασιών ζώνης	93
7.3 Σύγκριση θερμοκρασιών των εσωτερικών επιφανειών της ζώνης	94
7.4 Σύγκριση ποσοστών της συνολικά εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται στις εσωτερικές επιφάνειες	98
8. Κριτική και συμπεράσματα για τον κώδικα VFCALC	104
Βιβλιογραφία	107
Παράρτημα 1	108
Παράρτημα 2	119

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση καθώς και η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου, ο οποίος ως στόχο έχει τον υπολογισμό της κατανομής άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό ενός εξαέδρου, με την βοήθεια των συντελεστών μορφής και της πορείας του ηλίου. Ο αλγόριθμος, που δημιουργήθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού *FORTRAN*, συνεργάζεται με το προσομοιωτικό πρόγραμμα *TRNSYS*, ώστε να βελτιώσει τον υφιστάμενο αλγόριθμο κατανομής. Πιο συγκεκριμένα η δομή της εργασίας έχει ως εξής:

Κεφάλαιο 1. Γίνεται αναφορά και περιγραφή βασικών εννοιών όπως: μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, υπέρυθρη και ορατή ακτινοβολία, μέλανα σώματα. Επιπλέον αναλύεται ο θεμελιώδης, για την μετάδοση της θερμικής ακτινοβολίας, νόμος των *Stefan-Boltzman*.

Κεφάλαιο 2. Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στην θεωρία και τον υπολογισμό των συντελεστών μορφής (*View Factors*). Στην αρχή αναφέρεται ο ρόλος των συντελεστών μορφής στην μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, στην συνέχεια γίνεται εκτενής αναφορά στον τρόπο υπολογισμού τους για οποιαδήποτε γεωμετρία, με την μέθοδο “λωρίδων και κομματιών” (*strip & patch*) και τέλος παρουσιάζονται οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού τους για δύο συγκεκριμένες γεωμετρίες.

Κεφάλαιο 3. Εδώ παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο ο εμπορικός κώδικας προσομοίωσης *TRNSYS* επεξεργάζεται και στην συνέχεια κατανέμει την θερμική ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται τα μαθηματικά μοντέλα και τα ισοζύγια που χρησιμοποιεί.

Κεφάλαιο 4. Αρχικά, περιγράφεται το μαθηματικό μοντέλο πάνω στο οποίο βασίζεται ο αλγόριθμος και στην συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής που ακολουθούν τα αριθμητικά παραδείγματα των τριών επομένων κεφαλαίων. Επίσης γίνεται αναφορά στα αναγκαία δεδομένα εξόδου του *TRNSYS*, που απαιτούνται από τον αναπτυχθέντα αλγόριθμο, καθώς και στην βασική αρχή λειτουργίας του. Τέλος, περιγράφονται τα μεγέθη τα οποία θα συγκριθούν κατά τις διαδικασίες των προσομοιώσεων.

Κεφάλαιο 5. Η πρώτη προσομοίωση διεξάγεται για πρότυπο κτίριο με γεωμετρία ορθογωνίου παραλληλεπίεδου. Στην αρχή γίνεται αναφορά στην μορφή και το είδος των δεδομένων που περιέχουν τα συγκριτικά διαγράμματα που συναντιούνται και στις τρεις προσομοιώσεις. Στην συνέχεια παρατίθενται οι προσομοιωτικές παραδοχές που έγιναν και ισχύουν και στο *Κεφάλαιο 6*. Τέλος, παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα, τα οποία περιέχουν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και κατόπιν σχολιάζονται.

Κεφάλαιο 6. Στην δεύτερη προσομοίωση, γίνεται περιγραφή και ανάλυση πρότυπου κτιρίου με γεωμετρία κύβου αυτή την φορά. Μετά το πέρας των προσομοιώσεων γίνεται, όπως και στο *Κεφάλαιο 5*, παρουσίαση και σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 7. Η τελευταία προσομοίωση αναφέρεται σε πραγματική γεωμετρία μιας μονοκατοικίας. Αφού γίνει πλήρης περιγραφή του κτιρίου με την βοήθεια των σχημάτων κάτοψης, εμβαδομέτρησης και αναπαράστασης των διατομών των δομικών στοιχείων του, αναδιατυπώνονται οι προσομοιωτικές παραδοχές. Τέλος γίνεται παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων.

Κεφάλαιο 8. Η διπλωματική εργασία κλείνει με κριτική πάνω στον αναπτυχθέντα αλγόριθμο του κώδικα *VFCALC*.

Τέλος στα **Παρατήματα 1 και 2** γίνεται μια πιο αναλυτική προσέγγιση της χρήσης του κώδικα *VFCALC* σε συνδυασμό με το πρόγραμμα *TRNSYS* καθώς και η επεξήγηση των εντολών, σε γλώσσα *Fortran*, που χρησιμοποιεί. Έτσι ο αναγνώστης εξοικειώνεται περισσότερο με την χρήση και την φιλοσοφία του κώδικα *VFCALC*.

1. Μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία

1.1 Θεωρητικές βάσεις

Κάθε μορφή ύλης εκπέμπει ή/και απορροφά ενέργεια υπό μορφή ακτινοβολίας, η οποία μπορεί να περιγραφεί τόσο με την σωματιδιακή θεωρία, που αναλύει την κίνηση των φωτονίων, όσο και με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Ειδικότερα, μεταξύ επιφανειών στερεών σωμάτων με διαφορετικές θερμοκρασίες λαμβάνει χώρα μετάδοση θερμότητας (ακριβέστερα, μεταφορά ενέργειας) με ακτινοβολία. Όπως γνωρίζουμε από την φυσική, στον χώρο διάδοσης της ακτινοβολίας δεν απαιτείται η ύπαρξη ύλης και από αυτή την σκοπιά η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία αποτελεί ένα εντελώς διαφορετικό μηχανισμό μεταφοράς ενέργειας σε σύγκριση με την θερμική αγωγή και την συναγωγή [1].

Η ένταση του φαινομένου της προαναφερθείσας ροής ενέργειας, έχει να κάνει με την θερμοκρασία και το είδος των επιφανειών. Για παράδειγμα, αντικείμενα ψυχρότερα από κάποια άλλα, εκπέμπουν λιγότερη ενέργεια λόγω του ότι η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας του. Πολύ συχνά η μεταφορά ενέργειας ή η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία από ψυχρότερα σώματα, μπορεί να αγνοηθεί σε σύγκριση με την αγωγή και την συναγωγή. Αντίθετα, σε περιπτώσεις όπου η μεταφορά θερμότητας λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες, το φαινόμενο καταλαμβάνει ένα σημαντικό ποσοστό ακτινοβολίας [2].

1.2 Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα

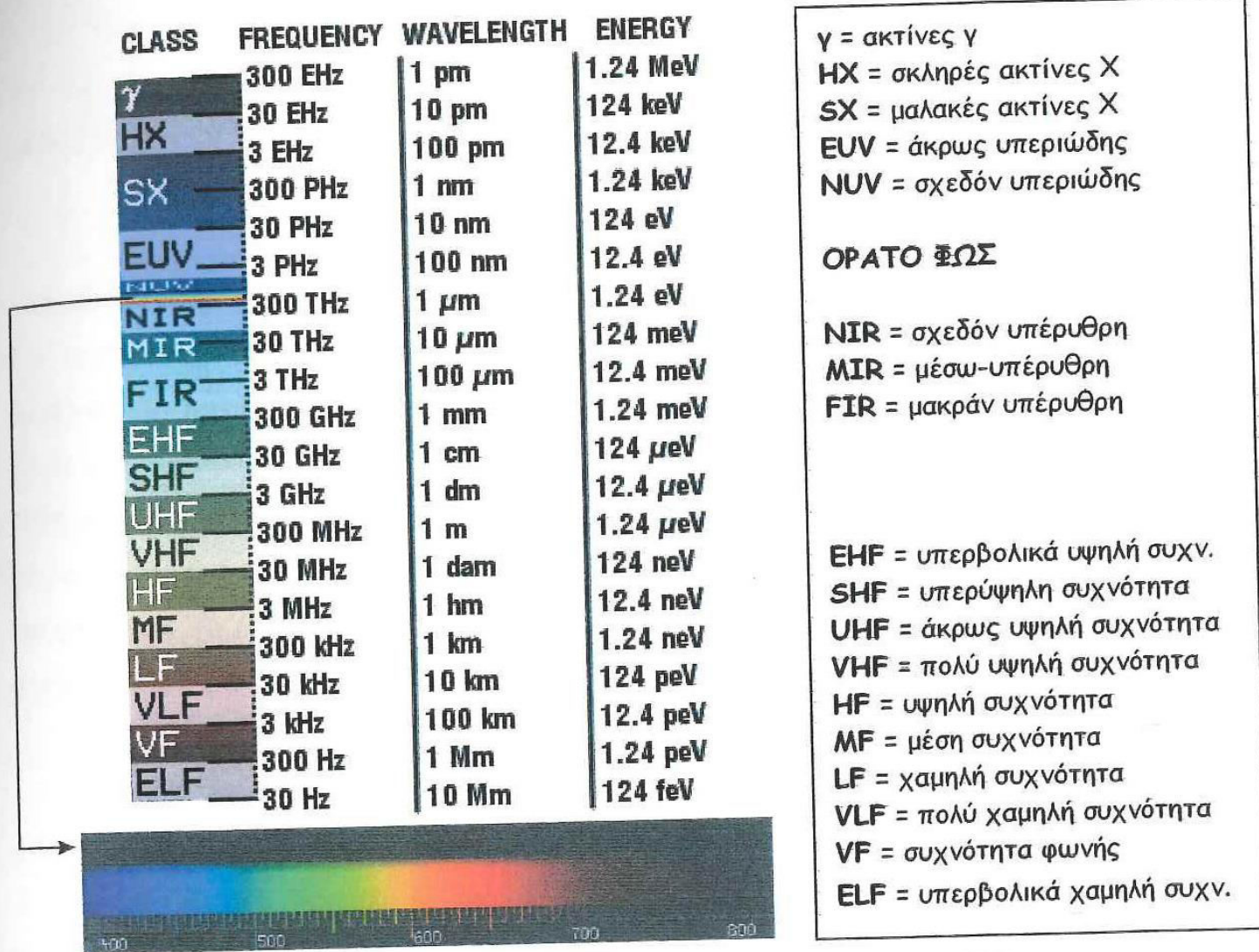
Η θερμική ακτινοβολία παρατηρείται σε ένα τμήμα του εύρους του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος μεταφοράς ενέργειας. Κατά συνέπεια παρουσιάζει τις ίδιες κυματικές ιδιότητες του φωτός και των ραδιοκυμάτων. Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος λ στο κενό, έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα ν και μια συγκεκριμένη ενέργεια φωτονίου E , τα οποία συσχετίζονται μεταξύ τους βάσει των παρακάτω εξισώσεων [3].

$$\lambda = c / \nu \quad (\text{Εξ. 1.1})$$

$$E = h \nu \quad (\text{Εξ. 1.2})$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός ($c = 299,6 \times 10^6 \text{ [m/s]}$) και h η σταθερά του M. Planck ($h = 6,62607 \times 10^{-34} \text{ [J*s]} = 4,13567 \text{ [}\mu\text{eV/GHz]})$.

Ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος ενεργοφόρων κυμάτων, εκ' των οποίων η θερμότητα αποτελεί μόλις ένα μικρό μέρος. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει τα είδη του φάσματος και επιπλέον την συχνότητα (*frequency*), το μήκος κύματος (*wave length*) και την ενέργεια (*energy*) του κάθε είδους. Μόνο ένα μικρό “παράθυρο” υπάρχει στο φάσμα, μέσω του οποίου μπορούμε να “δούμε” τον κόσμο που μας περιβάλλει. Η θερμική ακτινοβολία, της οποίας η βασική συνιστώσα είναι το φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας, περνάει μέσα από ένα μεγαλύτερο “παράθυρο”, πιο συγκεκριμένα το εύρος του μήκους κύματός της περιλαμβάνει τρεις τάξεις μεγέθους ($0,1 - 1000 \mu\text{m}$).



Σχήμα 1.1: Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα & φάσμα ορατής ακτινοβολίας

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά μεγέθη φάσματος ορατής ακτινοβολίας

Χρώμα	Μήκος Κύματος	Συχνότητα
κόκκινο	~ 625 to 740 nm	~ 480 to 405 THz
πορτοκαλί	~ 590 to 625 nm	~ 510 to 480 THz
κίτρινο	~ 565 to 590 nm	~ 530 to 510 THz
πράσινο	~ 520 to 565 nm	~ 580 to 530 THz
κυανό	~ 500 to 520 nm	~ 600 to 580 THz
μπλε	~ 430 to 500 nm	~ 700 to 600 THz
μωβ	~ 380 to 430 nm	~ 790 to 700 THz

1.2.1 Υπέρυθρη ακτινοβολία

Το υπέρυθρο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος καλύπτει ένα εύρος συχνοτήτων από 300 GHz έως 400 THz και μπορεί επιπλέον να διαχωριστεί σε τρία μέρη [3]:

- Μακράν υπεριώδης (*far-IR*), από 300 GHz (1 mm) έως 30 THz ($10\mu\text{m}$)

Το χαμηλότερο τμήμα αυτού του εύρους ονομάζεται και μικροκύματα (*microwaves*). Η ακτινοβολία αυτή απορροφάται συνήθως από τα μόρια των αερίων. Το νερό που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα της γης, απορροφά τόσο έντονα στο εύρος αυτό έτσι ώστε η ατμόσφαιρα φαίνεται αδιαφανής. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποια συγκεκριμένα μήκη κύματος, μέσα στο εύρος αυτό, τα οποία επιτρέπουν την μερική μετάδοση και χρησιμοποιούνται κυρίως στην αστρονομία. Το εύρος μήκους κύματος από $200\mu\text{m}$ έως μερικά mm , αναφέρεται συχνά στην αστρονομία ως υπο-χιλιοστόμετρο (*sub-millimeter*).

- Μέσω υπεριώδης (*mid-IR*), από 30 έως 120 THz ($10 - 2.5\mu\text{m}$)

Τα θερμά σώματα εκπέμπουν ισχυρά σε αυτό το εύρος. Απορροφάται από τις μοριακές δονήσεις (*molecular vibrations*), οι οποίες συμβαίνουν όταν τα άτομα ενός μορίου μετατοπίζονται γύρω από την θέση ισορροπίας τους. Το εύρος αυτό ονομάζεται και περιοχή αποτυπώματος (*fingerprint region*).

- Σχεδόν υπεριώδης (*near IR*), από 120 έως 400 THz ($2.500 - 750\text{ nm}$)

Οι φυσικές διεργασίες που σχετίζονται με το εύρος αυτό είναι παρόμοιες με αυτές που σχετίζονται με το ορατό φως.

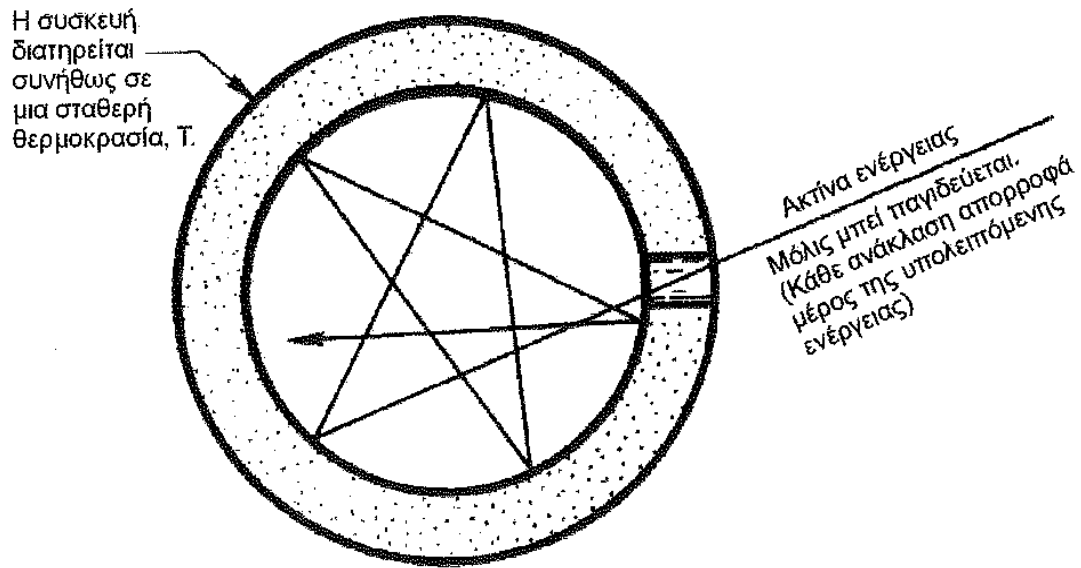
1.2.2 Ορατή ακτινοβολία (φως)

Μετά την υπέρυθη ακτινοβολία ακολουθεί το ορατό φως (Πίνακας 1.1). Αυτό είναι το εύρος μέσα στο οποίο ο ήλιος και τα παρόμοια με αυτόν άστρα εκπέμπουν το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας τους. Πιθανώς δεν αποτελεί σύμπτωση το γεγονός ότι το ανθρώπινο μάτι είναι ευαίσθητο στα μήκη κύματος στα οποία εκπέμπει ισχυρότερα ο ήλιος. Το ορατό φως, καθώς και το σχεδόν υπέρυθρο, απορροφάται και εκπέμπεται από τα ηλεκτρόνια των μορίων και των ατόμων, όταν μετακινούνται από μια ενεργειακή στιβάδα σε μια άλλη. Το ορατό στα μάτια μας φως είναι ένα πραγματικά μικρό τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το ουράνιο τόξο μας δείχνει το ορατό μέρος του φάσματος. Εάν θα μπορούσαμε να δούμε την υπέρυθη ακτινοβολία, αυτή θα βρισκόταν μόλις πάνω από την κόκκινη άκρη του, ενώ η υπεριώδης ακτινοβολία θα ήταν πάνω από την μωβ άκρη του [3].

1.3 Μέλανα σώματα

Το τέλειο μοντέλο για ένα θερμαντικό σώμα ονομάζεται μέλαν σώμα (*black body*) [2]. Το σώμα αυτό απορροφά όλη την ενέργεια που προσπίπτει πάνω του και δεν αντανακλά κανένα τμήμα της. Ο όρος θα μπορούσε εύκολα να παρεξηγηθεί επειδή τέτοιου είδους σώματα εκπέμπουν ενέργεια. Έτσι, εάν διαθέταμε υπέρυθη όραση θα μπορούσαμε να δούμε το κάθε μέλαν σώμα να έχει χρώμα ανάλογο με την θερμοκρασία του, φυσικά οι τέλειοι εκπομποί ενέργειας θα είχαν μαύρο χρώμα, διότι απορροφούν όχι μόνο το ορατό φως, αλλά και κάθε είδους ακτινοβολία που προσπίπτει επάνω τους.

Είναι απαραίτητο να υπάρξει μια πειραματική μεθοδολογία που θα επιτρέψει την κατασκευή ενός μελανού σώματος. Μια συμβατική συσκευή που ως στόχο έχει την επίτευξη της ιδανικής αυτής κατάστασης ονομάζεται *hohlraum* (Σχήμα 1.3), από τον αντίστοιχο γερμανικό όρο που σημαίνει “κενός χώρος”. Η διάταξη αυτή απλά φυλακίζει όλη την ενέργεια που περνάει στο εσωτερικό από το διάφραγμα της.

Σχήμα 1.3 Τομή σφαιρικής συσκευής *hohlraum*

Ποιες όμως είναι η σημαντικότερες ιδιότητες ενός μέλανος σώματος; Αρχικά λαμβάνεται υπόψη η διαφορά μεταξύ θερμικής και υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η υπέρυθρη ακτινοβολία αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος μηκών κύματος, ενώ η θερμότητα αναφέρεται σε ολόκληρη την ενέργεια που μεταφέρεται υπό μορφή ακτινοβολίας από το ένα σώμα στο άλλο. Υποθέτουμε ότι μια ροή θερμικής ενέργειας q , εκπεμπόμενη με ακτινοβολία, προσπίπτει σε μια ημιδιαφανή επιφάνεια, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4. Ένα μέρος α της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, που ονομάζεται απορροφητικότητα (*absorptance*), απορροφάται από την επιφάνεια. Το μέρος ρ που ανακλάται ονομάζεται αντανακλαστικότητα (*reflectance*), ενώ το μέρος τ ονομάζεται εκπεμνημότητα (*transmittance*). Έτσι για τα παραπάνω έχουμε [2]:

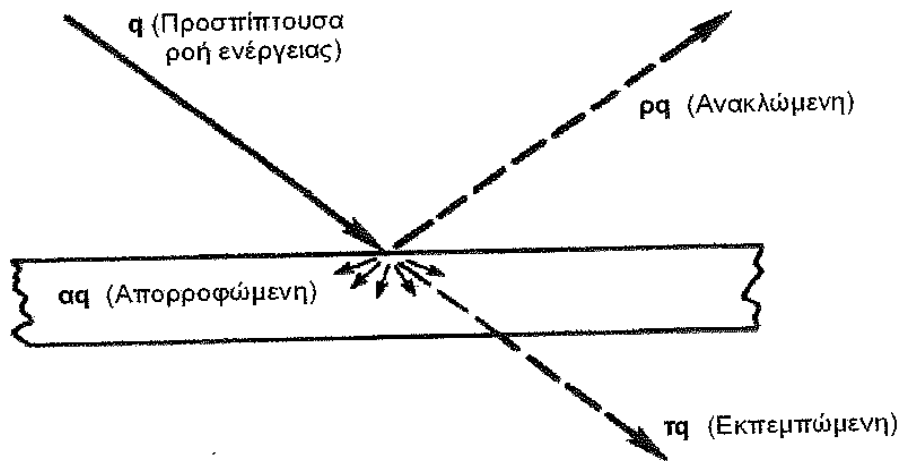
$$1 = \alpha + \tau + \rho$$

(Εξ. 1.3)

Η σχέση αυτή μπορεί να γραφεί για την ενέργεια που φέρει κάθε μήκος κύματος, το οποίο μαζί με όλα τα υπόλοιπα συνθέτουν το φάσμα της θερμικής ακτινοβολίας, που προέρχεται από μια πηγή οποιασδήποτε θερμοκρασίας:

$$1 = \alpha_\lambda + \tau_\lambda + \rho_\lambda$$

(Εξ. 1.4)



Σχήμα 1.4: Διανομή ενέργειας που προσπίπτει σε ημιδιαφανή επιφάνεια

Η προσπιτώμενη ενέργεια σε ένα μέλαν σώμα απορροφάται ολόκληρη, έτσι ώστε a_b ή $a_{\lambda b} = 1$ και $\tau_b = \rho_b = 0$. Επιπλέον η ενέργεια που προέρχεται από ένα μέλαν σώμα φτάνει σε κάποιο θεωρητικό μέγιστο, το οποίο υπολογίζεται από τον νόμο *Stefan-Boltzman*.

1.4 Ο νόμος Stefan-Boltzman

Η ενέργεια που εκπέμπεται από ένα σώμα, υπό μορφή ακτινοβολίας, ορίζεται ως $e(T)$ [W/m^2]. Το σύμβολο $e_\lambda(\lambda, T)$ ορίζει την εξίσωση διανομής της ακτινικής ροής, για συγκεκριμένο μήκος κύματος λ ή αλλιώς την μονοχρωματική ισχύ εκπομπής (*monochromatic emissive power*) [2]:

$$e_\lambda(\lambda, T) = \frac{de(\lambda, T)}{d\lambda} \quad \text{ή} \quad e_\lambda(\lambda, T) = \int_0^\lambda e_\lambda(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{Εξ. 1.5})$$

Έτσι:

$$e(T) \equiv E(\infty, T) = \int_0^\infty e_\lambda(\lambda, T) d\lambda \quad (\text{Εξ. 1.6})$$

Η εξάρτηση του $e(T)$ από το T για ένα μέλαν σώμα καθιερώθηκε πειραματικά από τον *Stefan* το 1879 και εξηγήθηκε, βάσει θερμοδυναμικών νόμων, από τον *Boltzman* το 1884. Η εξίσωση που περιγράφει τον νόμο είναι:

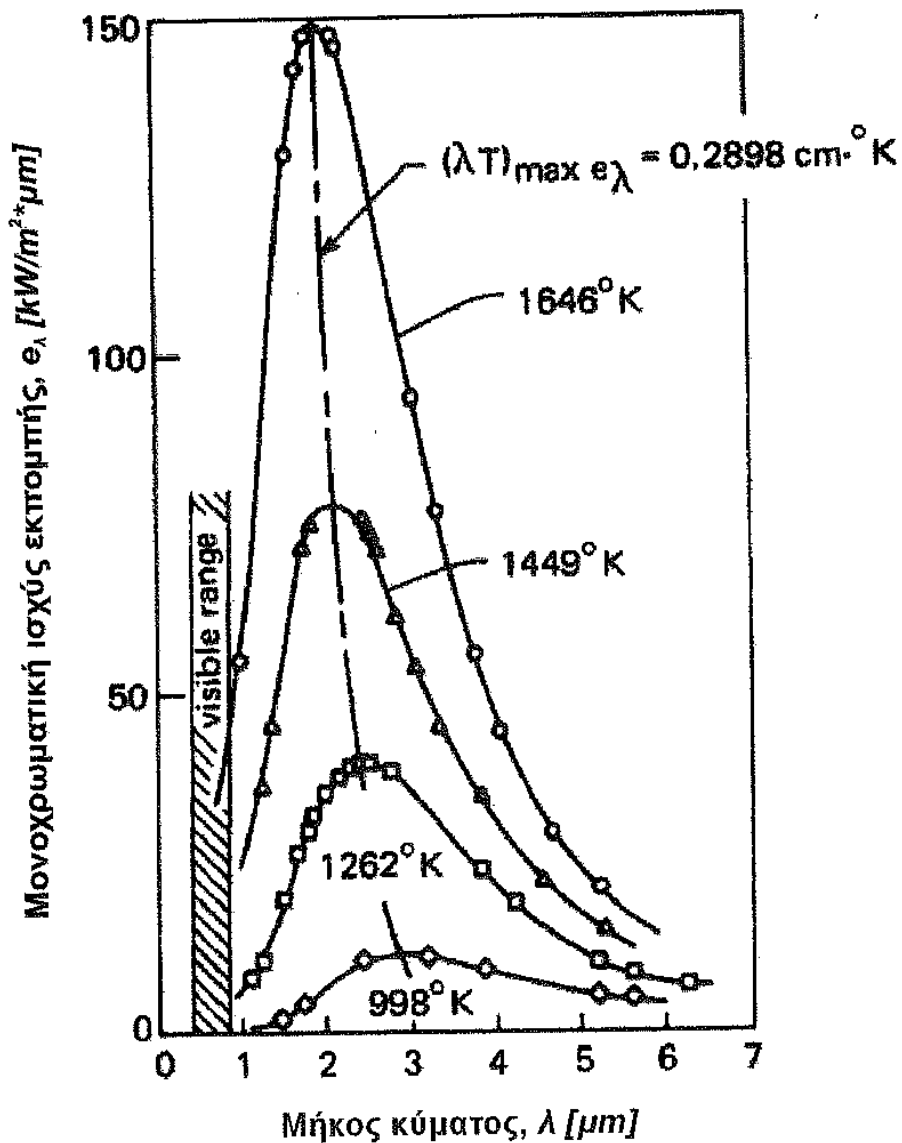
$$e_b(T) = \sigma T^4$$

(Εξ. 1.7)

όπου σ η σταθερά *Stefan-Boltzman* η οποία ισούται με $5,670400 \times 10^{-8} [W/m^2 \cdot K^4]$ ή $1,714 \times 10^{-9} [Btu/hr \cdot ft^2 \cdot R^4]$ και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία.

1.5 e_λ ή λ

Η φύση μας αποδεικνύει ότι, για μια δεδομένη θερμοκρασία, ένα σώμα εκπέμπει την μέγιστη ενέργεια σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος [2]. Για τον λόγο αυτό αν θερμάνουμε ένα κομμάτι μετάλλου στην φωτιά στην αρχή αποκτά ένα θαμπό κόκκινο χρώμα, πράγμα που σημαίνει ότι εκπέμπει ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος (μακριά από το ορατό φάσμα), ενώ όσο περισσότερο θερμαίνεται αποκτά έντονο κόκκινο χρώμα, γεγονός που μας δείχνει ότι η προερχόμενη από αυτό ακτινοβολία εκπέμπεται σε χαμηλότερα μήκη κύματος που πλησιάζουν το φάσμα του ορατού φωτός. Σε κάθε θερμοκρασία ένα μέλαν σώμα προσδίδει την μέγιστη τιμή e_λ που θα μπορούσε να πάρει ένα οποιοδήποτε σώμα.



Σχήμα 1.5: Μονοχρωματική ισχύς εκπομπής μέλανος σώματος για διάφορες τιμές θερμοκρασίας

Πολύ ακριβείς μετρήσεις σχετικά με το ενεργειακό φάσμα του μέλανος σώματος, έγιναν από τους *Lummer* και *Pringsheim* το 1899 και παρατίθενται στο Σχήμα 1.5. Η γραμμή μεγίστων των καμπυλών (*locus maxima*) έχει επίσης σημειωθεί. Η γραμμή αυτή ακολουθεί μια σχέση γνωστή ως νόμος του *Wien* :

$$(\lambda T)_{e\lambda=\max} = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (\text{Εξ. 1.8})$$

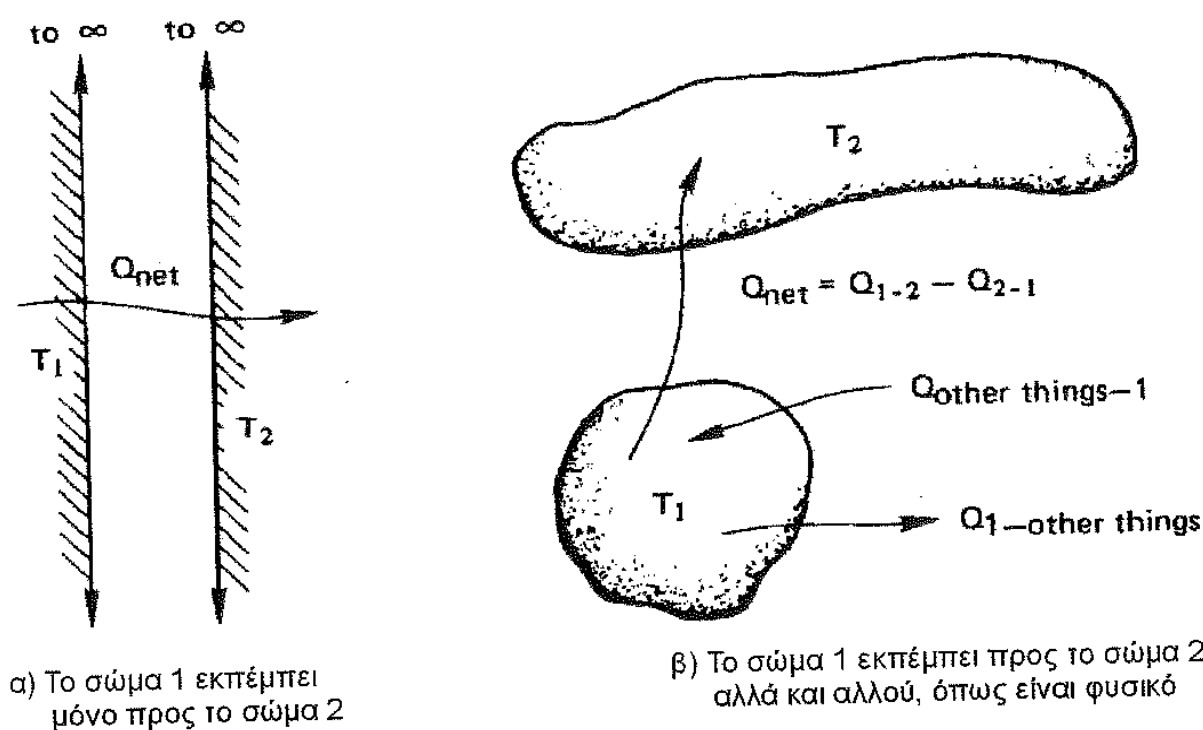
Σχεδόν τα τρία τέταρτα της εκπεμπόμενης ενέργειας, ενός μέλανος σώματος, βρίσκονται στα δεξιά της γραμμής μεγίστων. Παρατηρούμε ότι καθώς η γραμμή κλίνει προς την ορατή ακτινοβολία σε υψηλότερες θερμοκρασίες, μόνο ένα μικρό μέρος της ακτινοβολίας είναι ορατό, ακόμη και στην μέγιστη θερμοκρασία.

Ο υπολογισμός της σχέσης μεταξύ την μονοχρωματικής ισχύος εκπομπής και του λ , αποτελούσε ένα πρόβλημα διαρκώς αυξημένης σημασίας προς τα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Ο υπολογισμός αυτός αποτέλεσε την βάση για μια από τις πιο σημαντικές επιστημονικές επαναστάσεις που γνώρισε ποτέ ο κόσμος. Το 1901 ο *Max Planck* ολοκλήρωσε τον υπολογισμό, περιέχοντας έτσι στην δουλειά του τον αρχικό τύπο της κβαντομηχανικής (*quantum mechanics*). Πιο συγκεκριμένα, ανακάλυψε ότι:

$$e_{\lambda b} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 [\exp(hc / \sigma T \lambda) - 1]} \quad (\text{Εξ. 1.9})$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός ($c = 299,6 \times 10^6 \text{ [m/s]}$), h είναι η σταθερά του M. Planck ($h = 6,62607 \times 10^{-34} \text{ [J*s]}$) και σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzman, που ισούται με $1,3806503 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}$.

1.6 Εναλλαγή θερμότητας μέσω ακτινοβολίας



Σχήμα 1.6: Η καθαρή μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, από το ένα σώμα στο άλλο

Ας υποτεθεί ότι ένα θερμαινόμενο σώμα (1, Σχήμα 1.6α) ακτινοβολεί μόνο προς ένα άλλο (2) και ότι και τα δύο είναι θερμικά μελανά. Όλη η θερμότητα που εγκαταλείπει το σώμα 1 προσπίπτει στο σώμα 2, και όλη η θερμότητα που προσπίπτει στο σώμα 1 προέρχεται από το σώμα 2. Για τον λόγο αυτό η τελική θερμότητα που μεταφέρεται από το σώμα 1 στο 2 Q_{net} , θα ισούται με την διαφορά των $Q_{1 \rightarrow 2} = A_1 e_b(T_1)$ και $Q_{2 \rightarrow 1} = A_1 e_b(T_2)$ [2].

$$Q_{net} = A_1 e_b(T_1) - A_1 e_b(T_2) = A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{Εξ. 1.10})$$

Εάν το σώμα 1 “βλέπει” και άλλα σώματα, πλέον του 2 (Σχήμα 1.6β), τότε ένας συντελεστής μορφής (view factor) $F_{1 \rightarrow 2}$, θα πρέπει να συμπεριληφθεί στην εξ. 1.10. Μπορούμε να θεωρήσουμε τον συντελεστή μορφής ως το κλάσμα της ακτινοβολίας που φεύγει από το σώμα 1 και φτάνει άμεσα στο σώμα 2.

$$Q_{net} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{Εξ. 1.11})$$

Έχει αποδειχτεί ότι τα μη-μέλανα σώματα απορροφούν λιγότερη ακτινοβολία από τα μελανά σώματα, τα οποία είναι τέλειοι δέκτες. Ομοίως, τα μη-μέλανα σώματα εκλύουν λιγότερη ακτινοβολία από τα μελανά σώματα, τα οποία τυγχάνει να είναι και τέλειοι πομποί. Μπορούμε να περιγράψουμε την ισχύ εκπομπής ενός μη-μέλανος σώματος χρησιμοποιώντας μια ιδιότητα που ονομάζεται εκπεμπημότητα (*emittance*, ϵ) :

$$e_{\text{non-black}} = \epsilon e_b = \epsilon \sigma T^4 \quad (\text{Εξ. 1.12})$$

όπου $0 \leq \epsilon \leq 1$.

Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται εκτενής αναφορά στην θεωρία καθώς και στον υπολογισμό των συντελεστών μορφής.

2. Συντελεστές μορφής (view factors, VF)

2.1 Συντελεστές μορφής και θερμική ακτινοβολία

Όταν δύο αντικείμενα ανταλλάσσουν διάχυτη θερμική ακτινοβολία, η τελική ανταλλαγή καθορίζεται από την ροή ακτινοβολίας, που προέρχεται από το κάθε σώμα, καθώς και από τον συντελεστή μορφής μεταξύ των δύο σωμάτων [4]. Ο συντελεστής μορφής (*shape factor*), αναφέρεται και ως συντελεστής γωνίας (*angle factor*) ή ως συντελεστής διαμόρφωσης (*configuration factor*). Ο συντελεστής μορφής από ένα αντικείμενο σε ένα άλλο μπορεί να κατανοηθεί ως το κλάσμα της ακτινοβολίας που εγκαταλείπει το πρώτο αντικείμενο και εμποδίζεται άμεσα από το δεύτερο. Ένας άλλος τρόπος για να εξηγήσουμε τον συντελεστή μορφής από, για παράδειγμα, το αντικείμενο 1 στο αντικείμενο 2, είναι να φανταστούμε πόσο χώρο από τον “θόλο” της θερμικής ακτινοβολίας του αντικειμένου 1 καταλαμβάνει το αντικείμενο 2. Η πιο κοινότυπη φράση που αναφέρεται στους συντελεστές μορφής έχει να κάνει με το κατά πόσο το ένα αντικείμενο “βλέπει” το άλλο.

Κάθε αντικείμενο που ανταλλάσει θερμική ακτινοβολία με κάποιο άλλο θα πρέπει να έχει ένα μη-μηδενικό συντελεστή μορφής σε σχέση με το άλλο αντικείμενο. Ο συντελεστής μορφής παίρνει τιμές από 0 (καμία ανταλλαγή) έως 1 (ανταλλαγή μόνο με το δεύτερο αντικείμενο). Ένα αντικείμενο μπορεί να παρουσιάζει συντελεστή μορφής ακόμη και προς τον ίδιο του τον εαυτό, εάν μέρος της ακτινοβολίας που εγκαταλείπει την επιφάνειά του διακόπτεται άμεσα από ένα άλλο τμήμα του ίδιου του αντικειμένου (για παράδειγμα, η εσωτερική επιφάνεια ενός ημισφαιρίου ακτινοβολεί μερικώς προς τον εαυτό του).

Όταν έχουμε ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ δύο αντικειμένων, το καθένα από τα δύο αντικείμενα έχει έναν συντελεστή μορφής προς το άλλο, οι οποίοι όμως δεν είναι ίσοι. Παρόλα αυτά η παρακάτω σχέση μπορεί να τους συσχετίσει:

$$F_{1 \rightarrow 2} A_1 = F_{2 \rightarrow 1} A_2 \quad (\text{Εξ. 2.1})$$

όπου $F_{1 \rightarrow 2}$ είναι ο συντελεστής μορφής από το αντικείμενο 1 στο 2 και A_1 και A_2 είναι οι επιφάνειες των αντικειμένων 1 και 2 αντίστοιχα.

Ένας συντελεστής μορφής ο οποίος συναντάται συνήθως στην γεωργική μηχανολογία (*agricultural engineering*) και γενικότερα στην περιβαλλοντική ανάλυση (*environmental analysis*), αναφέρεται στην ανταλλαγή θερμικής ακτινοβολίας μεταξύ ενός μικρού αντικειμένου και του μεγάλου περιβάλλοντός του [4]. Για παράδειγμα, ένα ζώο μέσα σε ένα στάβλο ή ένα φυτό μέσα σε ένα θερμοκήπιο, είναι μικρά σε σχέση με τον χώρο που τα περιβάλλει. Ο συντελεστής μορφής του ζώου προς τους τοίχους, το ταβάνι και το πάτωμα του στάβλου είναι σχεδόν 1, εκτός αν άλλα αντικείμενα μέσα στο στάβλο ανταλλάσσουν σημαντικά ποσά θερμικής ακτινοβολίας με το ζώο. Ο συντελεστής μορφής ενός φυτού προς το κάλυμμα του θερμοκηπίου είναι 0,5, η μισή δηλαδή ακτινοβολία του φυτού προσπίπτει στο κάλυμμα και την οροφή. Η άλλη μισή προσπίπτει στο πεζούλι και τα υπόλοιπα φυτά του θερμοκηπίου. Από την εξ. 2.1 συμπεραίνουμε ότι οι συντελεστές μορφής του στάβλου προς το ζώο και του καλύμματος του θερμοκηπίου προς το φυτό είναι μικροί αλλά όχι μηδενικοί.

Το άθροισμα των συντελεστών μορφής από ένα σώμα προς όλα τα άλλα θα πρέπει να ισούται με 1 (αρχή διατήρησης της θερμικής ακτινοβολίας). Η θερμική ακτινοβολία που προέρχεται από ένα αντικείμενο θα πρέπει να εμποδίζεται άμεσα από τα άλλα αντικείμενα, με τα οποία ανταλλάσει ακτινοβολία το πρώτο αντικείμενο. Εκτενείς πίνακες συντελεστών μορφής υπάρχουν σε πολλά κείμενα μετάδοσης θερμότητας.

2.2 Προσδιορισμός συντελεστών μορφής

Ο προσδιορισμός των συντελεστών μορφής είναι μια δίολου εύκολη διαδικασία, στην περίπτωση γεωμετριών με πιθανότητα εσω-επιφανειακών εμποδίων, επανεισερχομένων γωνιών, επιφανειακών ανοιγμάτων και κατοπτρικών ανακλάσεων (Moore και Numan, 1983), όπως αναφέρεται από τον Clarke [5]. Οι προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των συντελεστών μορφής κυμαίνονται μεταξύ περίπλοκων αριθμητικών μεθόδων και διαδεδομένων λύσεων που αφορούν συγκεκριμένες γεωμετρίες.

Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει μια ακτίνα έντασης I , η οποία περιέχεται σε μια συμπαγή γωνία (solid angle) $d\Omega$, που αντιστοιχεί σε μια στοιχειώδη επιφάνεια dA , η οποία προβάλλεται σε μια διεύθυνση Ω και σχηματίζει μια γωνία θ με την κάθετο n της επιφάνειας. Η εκλυόμενη ροή από την $d\Omega$ είναι:

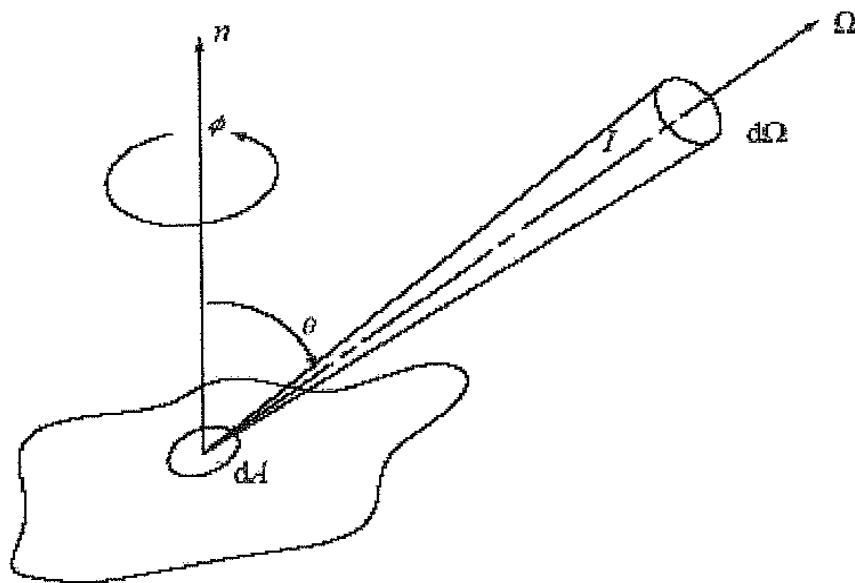
$$dq = I \cos\theta d\Omega \quad (\text{Εξ. 2.2})$$

ολοκληρώνοντας την ροή, που περιέχεται στην συμπαγή γωνία, για ολόκληρο το ημισφαίριο έχουμε:

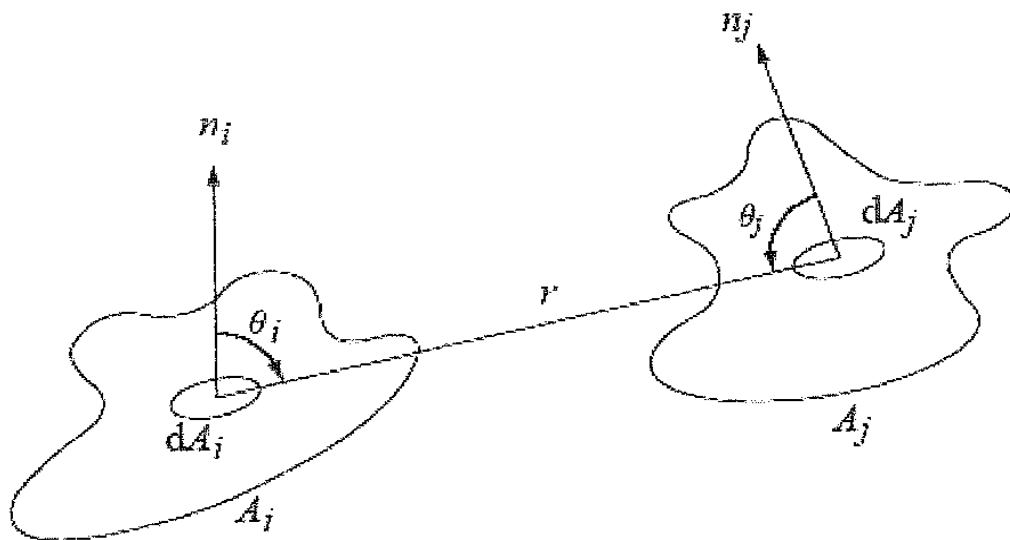
$$q = \int I \cos\theta d\Omega \quad (\text{Εξ. 2.3})$$

Η αντικατάσταση της σχέσης $d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi$, όπου ϕ η γωνία αζιμουθίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1, στην εξ. 2.3 μας δίνει:

$$q = \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} I \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = \pi I \quad (\text{Εξ. 2.4})$$



Σχήμα 2.1: Υπολογισμός συντελεστή μορφής



Σχήμα 2.2: Δύο στοιχειώδεις επιφάνειες που επικοινωνούν

Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται δύο επίπεδες στοιχειώδεις επιφάνειες, dA_i και dA_j , η μεταξύ τους απόσταση r και οι πολικές γωνίες θ_i και θ_j , που σχηματίζονται από την απόσταση r και τις κάθετες n_i και n_j αντίστοιχα. Η ροή ακτινοβολίας που προέρχεται από την dA_i και φτάνει στην dA_j , βάσει της εξ. 2.2, είναι:

$$dq_i = I_i \cos\theta_i d\Omega_{ij} \tag{Εξ. 2.5}$$

και εφόσον ισχύει ότι $d\Omega_{ij} = dA_j \cos\theta_j / r^2$, συνεπάγεται ότι:

$$dq_i = I_i \cos\theta_i dA_j \cos\theta_j / r^2 \tag{Εξ. 2.6}$$

Στο σημείο αυτό μπορούμε να εισάγουμε τον συντελεστή μορφής $df_{dA_i \rightarrow dA_j}$, ο οποίος ισούται με τον λόγο της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από την επιφάνεια dA_i και φτάνει κατευθείαν στην dA_j , προς την συνολική ακτινοβολία που εκπέμπει η επιφάνεια dA_i :

$$df_{dA_i \rightarrow dA_j} = dq_i/q = \cos\theta_i dA_j \cos\theta_j / \pi r^2 \quad (\text{Εξ. 2.7})$$

Ομοίως, ο σημειακός συντελεστής μορφής $f_{dA_i \rightarrow A_j}$ μπορεί να οριστεί ως το κλάσμα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το σημείο dA_i και προσπίπτει στην επιφάνεια A_j :

$$f_{dA_i \rightarrow A_j} = \int_{A_j} df_{dA_i \rightarrow dA_j} = \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_j \quad (\text{Εξ. 2.8})$$

Η ροή που εκλύεται από την A_j είναι $I_j A_j$, και το ποσό που προσπίπτει στην dA_i είναι $I_j \int_{dA_i} df_{dA_j \rightarrow dA_i} dA_j$ και γι' αυτό ο $f_{A_j \rightarrow dA_i}$ δίνεται από την σχέση:

$$f_{A_j \rightarrow dA_i} = I_j \int_{dA_i} \frac{df_{dA_j \rightarrow dA_i}}{I_i A_j} dA_i = \frac{1}{A_j} \int_{dA_i} df_{dA_j \rightarrow dA_i} dA_i \quad (\text{Εξ. 2.9})$$

έτσι από την εξ. 2.7 έχουμε:

$$f_{A_j \rightarrow dA_i} = \frac{dA_i}{A_j} \int_{A_j} \frac{\cos\theta_i \cos\theta_j}{\pi r^2} dA_j \quad (\text{Εξ. 2.10})$$

Από τις εξισώσεις 2.8 και 2.10 έχουμε:

$$dA_i f_{dA_i \rightarrow A_j} = A_j f_{A_j \rightarrow dA_i} \quad (\text{Εξ. 2.11})$$

Τέλος, η ροή που εκλύεται από την A_i είναι $I_i A_i$, και το ποσό που προσπίπτει στην dA_j είναι $I_i \int_{dA_j} f_{dA_i \rightarrow A_j} dA_i$ και γι' αυτό ο συντελεστής μορφής $f_{A_i \rightarrow A_j}$, από επιφάνεια σε επιφάνεια, δίνεται από την σχέση:

$$f_{A_i \rightarrow A_j} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i}^{A_j} f_{dA_i \rightarrow A_j} dA_i \quad (\text{Εξ. 2.12})$$

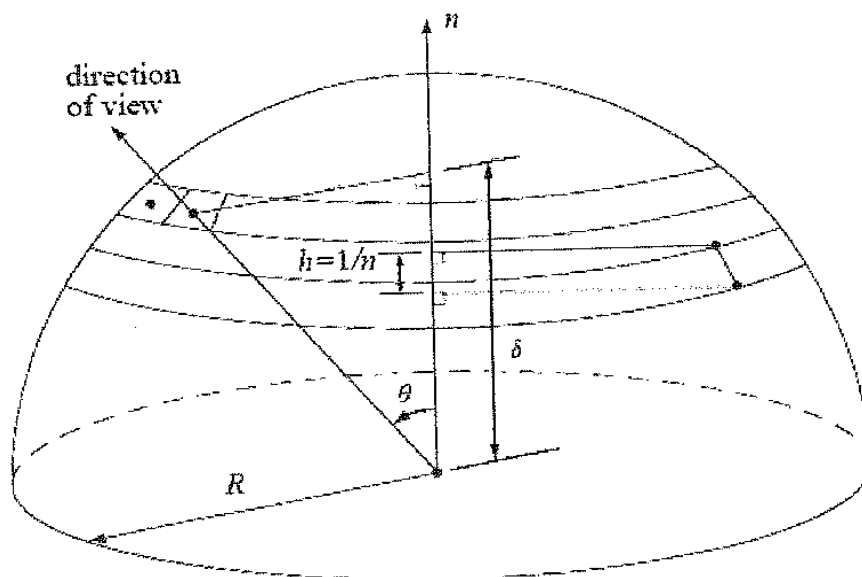
και από την εξ. 2.8 έχουμε:

$$f_{A_i \rightarrow A_j} = \frac{1}{A_i} \iint_{A_i}^{A_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi r^2} dA_j dA_i \quad (\text{Εξ. 2.13})$$

έτσι καταλήγουμε στην σχέση:

$$A_i f_{A_i \rightarrow A_j} = A_j f_{A_j \rightarrow A_i} \quad (\text{Εξ. 2.14})$$

Έτσι αποδεικνύεται, μέσω αλγεβρικών σχέσεων, η εξ. 2.1 που παρουσιάστηκε στην αρχή του κεφαλαίου (§ 2.1). Ο προσδιορισμός του συντελεστή μορφής, με διπλή ολοκλήρωση των επιφανειών, δύο σωμάτων που επικοινωνούν μπορεί να επιτευχθεί με αναπαράσταση της εξ. 2.13 με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Ο αλγόριθμος των Moore και Numan (1982), όπως αναφέρεται από τον Clarke [5] έχει ως εξής: Αρχικά, ένα επιφανειακό πολύγωνο υποδιαιρείται σε στοιχειώδεις επιφάνειες, για κάθε μια από τις οποίες δημιουργείται ένα μοναδιαίο ημισφαίριο πάνω από το κεντρικό σημείο της, το οποίο και αναπαριστά την dA_i , όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Τμηματοποίηση ημισφαιρίου

Κάθε μοναδιαίο ημισφαίριο χωρίζεται με την σειρά του σε σταθερές γωνίες με την μέθοδο των “λωρίδων και των κομματιών” (*strip and patch*) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Η κάθε συμπαγής γωνία προβάλλεται μέχρι να παρουσιαστεί τομή με μια άλλη επιφάνεια, έτσι ώστε το κάθε κομμάτι του ημισφαιρίου να βλέπει το πολύγωνο που μας ενδιαφέρει, υπενθυμίζουμε ότι η ακτινοβολία εκπέμπεται από την επιφάνεια dA_i . Ο σημειακός συντελεστής μορφής της εξ. 2.8 υπολογίζεται αθροίζοντας την συνεισφορά του κάθε πολυγώνου. Ο συντελεστής μορφής μεταξύ δύο επιφανειών υπολογίζεται από την εξ. 2.12.

Ο παραπάνω αλγόριθμος εγγυάται ότι $\sum_j f_{i \rightarrow j} = 1$, καθώς και ότι ισχύει η αμοιβαιότητα (*reciprocity*). Σαν απόδειξη θεωρούμε την εξ. 2.8, η οποία μπορεί να ξαναγραφεί ως:

$$f_{dA_i \rightarrow A_j} = \int_{\Omega_i} \frac{\cos \theta_i}{\pi} d\Omega \quad (\text{Εξ. 2.15})$$

Τώρα για $f_{dA_i \rightarrow A_j} = 1$, η παραπάνω ολοκλήρωση μας δίνει:

$$\int_{\Omega_i} \cos \theta_i d\Omega = \pi \quad (\text{Εξ. 2.16})$$

Προσεγγίζοντας την εξ. 2.16 ως άθροισμα, όπου όλοι οι όροι $d\Omega_n$ είναι ίσοι, τότε:

$$\sum^n \cos \theta_n d\Omega_n = d\Omega_n \sum^n \cos \theta_n \quad (\text{Εξ. 2.17})$$

Από τον ορισμό της συμπαγούς γωνίας, για να έχουμε ίσα $d\Omega_n$, οι επιφάνειες από τις οποίες αποτελείται το μοναδιαίο ημισφαίριο πρέπει να είναι ίδιες. Η επιφάνεια μιας λωρίδας, του Σχήματος 2.3, ισούται με $A_s = 2\pi R h$. Έτσι, προκειμένου να χωρίσουμε το ημισφαίριο σε λωρίδες ίσου εμβαδού, απαιτούνται ίσα h . Έχοντας επιτύχει αυτό, κομμάτια ίσης επιφάνειας μπορούν δημιουργηθούν με υποδιαιρώντας ισομερώς την κάθε λωρίδα. Τα κομμάτια αυτά θα πρέπει να βρίσκονται απέναντι από ίσες συμπαγείς γωνίες στον κεντρικό κόμβο, που βρίσκεται στην βάση του ημισφαιρίου. Σε κάθε περίπτωση, το πλάτος του κάθε κομματιού

ορίζεται από μια γωνία φ σε ένα επίπεδο παράλληλο προς τον ισημερινό του ημισφαιρίου.

Για το μοναδιαίο ημισφαίριο ισχύει:

$$\cos \theta = \delta$$

(Εξ. 2.18)

όπου δ είναι η προβολή της ακτίνας στην κάθετο. Για ημισφαίριο χωρισμένο σε n λωρίδες, το συνημίτονο θα ισούται με:

$$1/2n, 1/2n + 1/n, 1/2n + 2/n, \dots, 1/2n + (n-1)/n$$

(Εξ. 2.19)

αθροίζοντας τους όρους της παραπάνω σειράς παίρνουμε:

$$S_n = (n/2)[2a + (n-1)b]$$

(Εξ. 2.20)

στην προκειμένη περίπτωση ισχύ ότι $a = 1/2n$ και $b = 1/n$, άρα συνεπάγεται ότι:

$$S_n = n/2$$

(Εξ. 2.21)

Με κάθε λωρίδα να χωρίζεται σε περταίρω ίσα κομμάτια, το άθροισμα των συνημιτόνων θα ισούται με $mn/2$. Εφόσον το κάθε κομμάτι αντιστοιχεί σε μια συμπαγή γωνία, ίση με $2\pi/mn$ στερακτίνια (*steradians*), η εξ. 2.17 γίνεται:

$$(2\pi/mn)(mn/2) = \pi$$

(Εξ. 2.22)

κι έτσι επαληθεύεται η σχέση $\sum f_{i \rightarrow j} = 1$.

Μια δεύτερη αλγοριθμική προσέγγιση (Marvel et al 1987), Clarke [5], είναι ο προσδιορισμός του σημειακού συντελεστή μορφής, βρίσκοντας πιο πολύγωνο "φαίνεται" από καθένα από τα ίσης επιφάνειας κομμάτια και στην συνέχεια αθροίζοντας τις συνεισφορές του κάθε πολυγώνου. Ένα πολύγωνο φαίνεται εάν ο άξονας της συμπαγούς γωνίας του τέμνει το πολύγωνο αυτό σε σημείο πιο κοντινό από ότι τέμνει οποιοδήποτε άλλο πολύγωνο. Παρά το γεγονός ότι θεωρητικά ολόκληρη η ακτινοβολία λαμβάνεται υπόψη, πρέπει να δείξουμε μεγάλη προσοχή στην εφαρμογή επειδή οι αριθμητικές προσεγγίσεις που σχετίζονται με:

δημιουργία πλέγματος (*mesh generation*), διαχωρισμό πολυγώνων (*polygon clipping*), έλεγχο εγκλεισμού σημείου (*point containment test*), εφαρμογή σημειακών συντελεστών μορφής σε πεπερασμένες επιφάνειες κλπ., μπορεί να παρουσιάσουν σφάλματα. Τα σφάλματα αυτά μπορούν να ελαχιστοποιηθούν με την αύξηση των λωρίδων και των κομματιών, στα οποία υποδιαιρείται το μοναδιαίο ημισφαίριο, με συνεπαγόμενη αύξηση της δυσκολίας και του όγκου των υπολογισμών.

Για πολλές απλοποιημένες γεωμετρίες ένας τέτοιου είδους υπολογιστικός όγκος δεν θα ήταν δικαιολογημένος κι έτσι απλοποιητικές υποθέσεις είναι συχνά δεκτές. Στην συνέχεια παρατίθενται κάποιες περιπτώσεις που επιδέχονται απλοποίηση [3].

- Συντελεστής μορφής μεταξύ δύο μικρών επιφανειών

Εάν δύο επιφάνειες που επικοινωνούν, μπορούν να θεωρηθούν μικρές σε σχέση με τις υπόλοιπες επιφάνειες που αποτελούν το περιβάλλον τους τότε μια απλοποίηση του $f_{i \rightarrow j}$ είναι η χρήση του στοιχειώδους συντελεστή μορφής (*elemental VF*), ο οποίος ορίζεται από την εξ. 2.7.

- Συντελεστής μορφής μεταξύ δύο μεγάλων παραλλήλων επιφανειών

Στην περίπτωση αυτή το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας από την μία επιφάνεια εμποδίζεται από την άλλη κι έτσι μπορούμε να δεχτούμε ότι $f_{i \rightarrow j} = f_{j \rightarrow i} \rightarrow 1$.

- Συντελεστής μορφής σε περίπτωση που μια επιφάνεια περιβάλλει την άλλη

Κι εδώ ισχύει ότι $f_{i \rightarrow j} \rightarrow 1$, όπου i η επιφάνεια που περιβάλλεται και ανάλογα για την επιφάνεια j ισχύει $f_{j \rightarrow i} = f_{i \rightarrow j} A_i/A_j$.

- Συντελεστές μορφής, απουσία γεωμετρικών πληροφοριών

Σε πολλές εφαρμογές μοντελοποίησης (κυρίως στα πρώτα στάδια σχεδιασμού), ακριβείς λεπτομέρειες γεωμετρίας δεν είναι διαθέσιμες. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι χρήσιμο να εφαρμόσουμε μια από τις δύο ακόλουθες προσεγγίσεις. Μπορούμε για παράδειγμα να αποδεχτούμε μια συγκεκριμένη γεωμετρία, από τις πολλές που μπορούμε να βρούμε στην βιβλιογραφία (*Hottel 1930, Chung and Samitra 1972*), όπως αναφέρεται από τον *Clarke [5]*. Για πολλές τέτοιες αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις έχουν υπολογισθεί οι συντελεστές μορφής.

Εναλλακτικά μπορούμε να βασιστούμε σε μεθόδους οι οποίες δίνουν βάρος στην επιφάνεια και δεν παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα ακρίβειας. Για παράδειγμα ακριβείς συντελεστές μορφής δίνονται από τις σχέσεις:

$$f_{i \rightarrow j} = A_j / (\sum A - A_i) \quad (\text{Εξ. 2.23})$$

$$f_{j \rightarrow i} = A_i / (\sum A - A_i) \quad (\text{Εξ. 2.24})$$

όπου το άθροισμα αναφέρεται σε όλες τις συμμετέχουσες επιφάνειες. Οι σχέσεις αυτές ικανοποιούν το θεώρημα της αμοιβαιότητας (reciprocity theorem), αλλά όχι πάντα την σχέση $\sum f_{i \rightarrow j} = 1$, λόγω του ότι δεν βασίζονται σε γωνιακές θεωρίες. Πιο συγκεκριμένα δίνουν ακριβείς απαντήσεις για κυβικές γεωμετρίες.

2.3 Ακριβείς αναλυτικές λύσεις

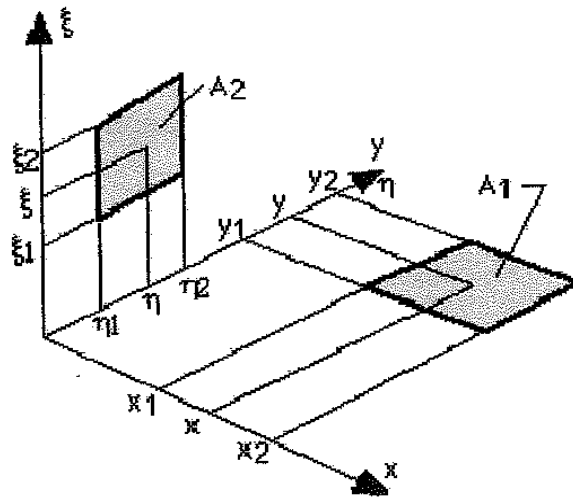
Όπως προαναφέρθηκε, η πλειοψηφία των συγγραμμάτων που αναφέρονται στην μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία, παρέχουν μεθοδολογίες για τον υπολογισμό των συντελεστών μορφής. Οι περισσότερες από αυτές απαιτούν μεγάλο όγκο υπολογισμών, λόγω των περίπλοκων γεωμετριών που χρησιμοποιούν. Ευτυχώς όμως, σε πολλές περιπτώσεις οι συντελεστές μορφής μπορούν να υπολογισθούν με την χρήση απλών γεωμετριών, για τις οποίες υπάρχουν αναλυτικοί αλγεβρικοί τύποι. Αντικαθιστώντας στους προαναφερθέντες τύπους απλά γεωμετρικά μεγέθη, όπως διαστάσεις, αποστάσεις ή γωνίες, μπορούμε σχετικά εύκολα και με ακρίβεια να υπολογίσουμε τον συντελεστή μορφής για δύο επιφάνειες που μας ενδιαφέρουν.

Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε τους αναλυτικούς αλγεβρικούς τύπους για τον υπολογισμό των συντελεστών μορφής σε γεωμετρία ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Όπως γίνεται αντιληπτό από τον τίτλο της, το βασικό αντικείμενο με το οποίο ασχολείται η παρούσα διπλωματική εργασία, έχει να κάνει με την μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας στο εσωτερικό παραλληλεπίπεδης γεωμετρίας. Πιο συγκεκριμένα η θερμική ακτινοβολία προέρχεται από την ακτινοβολία του ηλίου, ενώ η παραλληλεπίπεδη γεωμετρία αναφέρεται στα υπό προσομοίωση κτίρια καθώς και στα ανοίγματά (παράθυρά) τους. Έτσι, γίνεται προφανές ότι οι γεωμετρίες για τις οποίες θα χρειαστεί να υπολογισθούν οι συντελεστές μορφής είναι οι εξής:

- Ορθογωνικές επιφάνειες, κάθετες μεταξύ τους, §2.3.1
- Ορθογωνικές επιφάνειες, παράλληλες μεταξύ τους, §2.3.2

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τύποι που ακολουθούν προέρχονται από τον *John R. Howell* [6], ο οποίος τους δημοσίευσε για πρώτη φορά το 1982.

2.3.1 Συντελεστής μορφής μεταξύ δύο ορθογωνικών επιφανειών, κάθετων μεταξύ τους



Σχήμα 2.4: Ορθογωνικές επιφάνειες κάθετες μεταξύ τους

Οι εξισώσεις που ισχύουν για τον υπολογισμό του συντελεστή μορφής $F_{1 \rightarrow 2}$ είναι:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \left[(-1)^{(i+j+k+l)} G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l) \right] \quad (\text{Εξ. 2.25})$$

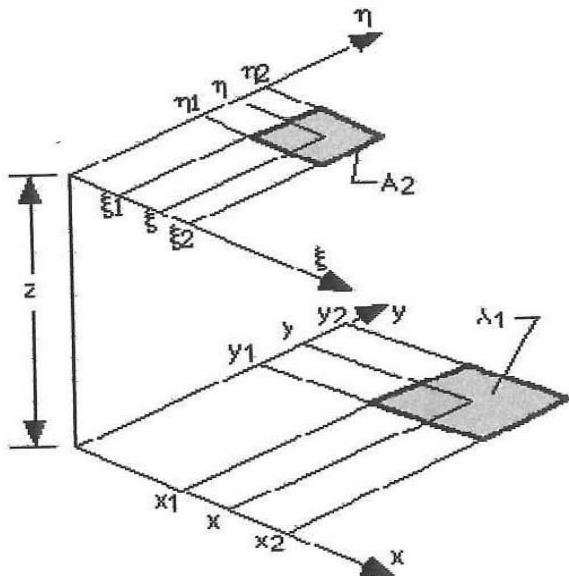
όπου

$$G = \frac{1}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} & (y - \eta) (x^2 + \xi^2)^{1/2} \tan^{-1} \left[\frac{(y - \eta)}{(x^2 + \xi^2)^{1/2}} \right] \\ & - \frac{1}{4} \left[x^2 + \xi^2 - (y - \eta)^2 \right] \ln \left[x^2 + \xi^2 + (y - \eta)^2 \right] \end{aligned} \right\} \quad (\text{Εξ. 2.26})$$

Στην προκειμένη περίπτωση μιλάμε για δύο ορθογωνικές επιφάνειες (A_1 και A_2), οι οποίες μπορούν να έχουν οποιοσδήποτε διαστάσεις και τυχαία μεταξύ τους μετατόπιση (προς τους άξονες x , y , και ξ), αρκεί τα επίπεδα που τις περιέχουν να τέμνονται κάθετα (Σχήμα 2.4). Όπως βλέπουμε, από την εξ. 2.25, ο συντελεστής μορφής αποτελείται, στο κυρίως μέρος του, από ένα άθροισμα 16 όρων και ο κάθε όρος με την σειρά του υπολογίζεται με αντικατάσταση των συντεταγμένων των επιφανειών, πάνω στους άξονες x , y , και ξ στην εξ. 2.26 και στην εξ. 2.25. Παρά τις απλές πράξεις από τις οποίες αποτελούνται οι τύποι, ο τελικός υπολογισμός ενός και μόνο συντελεστή μορφής μεταξύ δύο επιφανειών απαιτεί ένα σημαντικό όγκο υπολογισμών, για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκε κώδικας σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN (VFCALC §4.4), έτσι ώστε οι υπολογισμοί, τόσο για την πρώτη όσο και για την

δεύτερη γεωμετρία, να γίνονται γρηγορότερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια. Στην συνέχεια παρατίθενται τα στοιχεία για την δεύτερη γεωμετρία.

2.3.2 Συντελεστής μορφής μεταξύ δύο ορθογωνικών επιφανειών, παραλλήλων μεταξύ τους



Σχήμα 2.5: Ορθογωνικές επιφάνειες παράλληλες μεταξύ τους

Οι εξισώσεις που ισχύουν για τον υπολογισμό του συντελεστή μορφής $F_{1 \rightarrow 2}$ είναι:

$$F_{1 \rightarrow 2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+j+k+l)} G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l) \quad (\text{Εξ. 2.27})$$

$$G = \frac{1}{2\pi} \left(\begin{aligned} & (y - \eta) \left[(x - \xi)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{y - \eta}{\left[(x - \xi)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ & + (x - \xi) \left[(y - \eta)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{x - \xi}{\left[(y - \eta)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ & - \frac{z^2}{2} \ln \left[(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2 \right] \end{aligned} \right)$$

(Εξ. 2.28)



Όπως παρατηρούμε από τις παραπάνω σχέσεις και σε αυτή την περίπτωση έχουμε το άθροισμα των 16 όρων. Οι συντεταγμένες παραμένουν ως μεταβλητές εισόδου και εισάγεται ακόμη το μέγεθος z , που όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.5, εκφράζει την απόσταση μεταξύ των δύο παραλλήλων επιφανειών. Τέλος, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι κι εδώ οι δύο επιφάνειες μπορούν να έχουν οποιαδήποτε απόσταση και μετατόπιση μεταξύ τους, αρκεί τα επίπεδα που τις περιέχουν να είναι παράλληλα το ένα προς το άλλο.

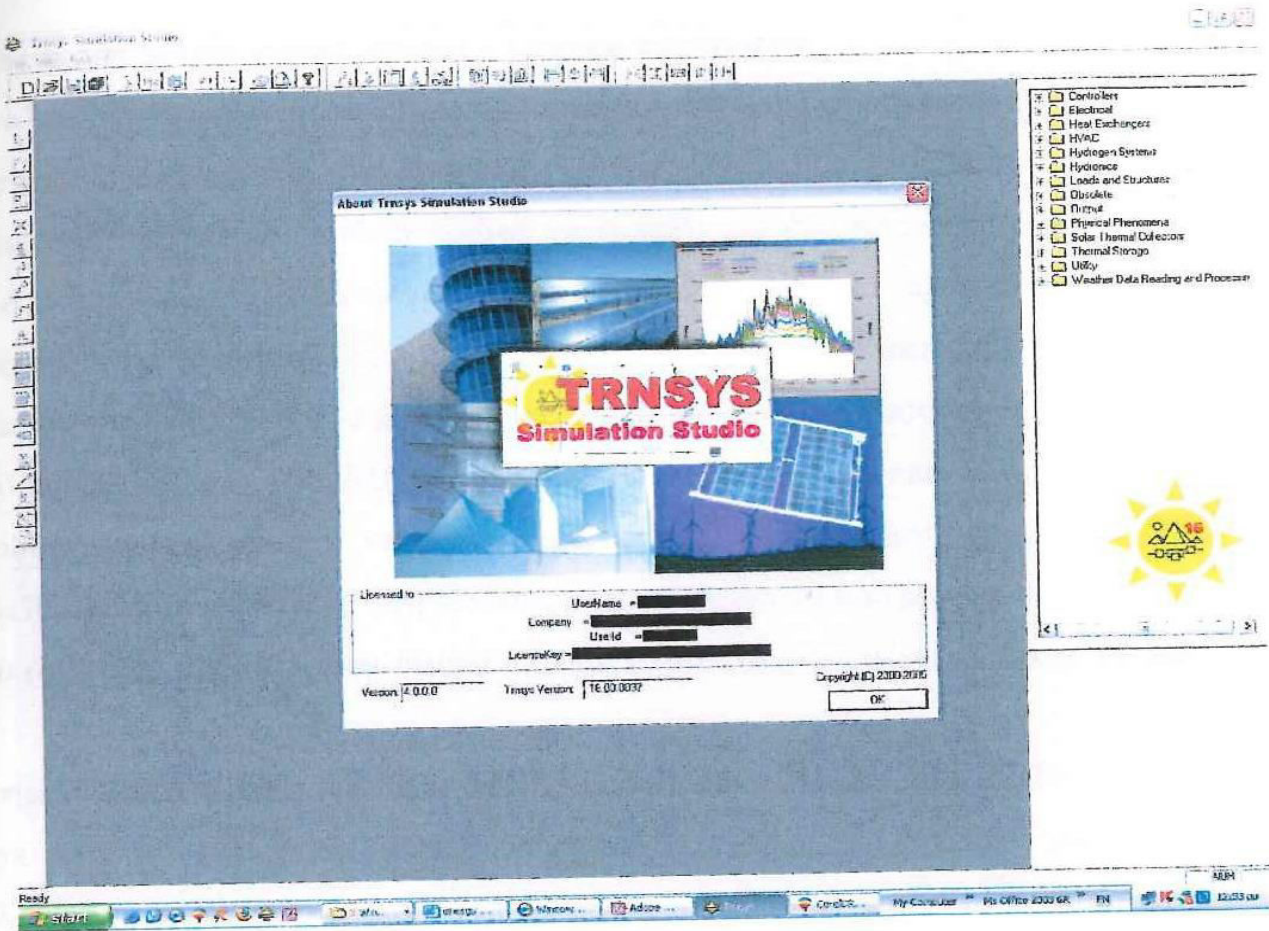
3. Μαθηματική περιγραφή θερμικής ακτινοβολίας στο TRNSYS

3.1 Λίγα λόγια για το TRNSYS

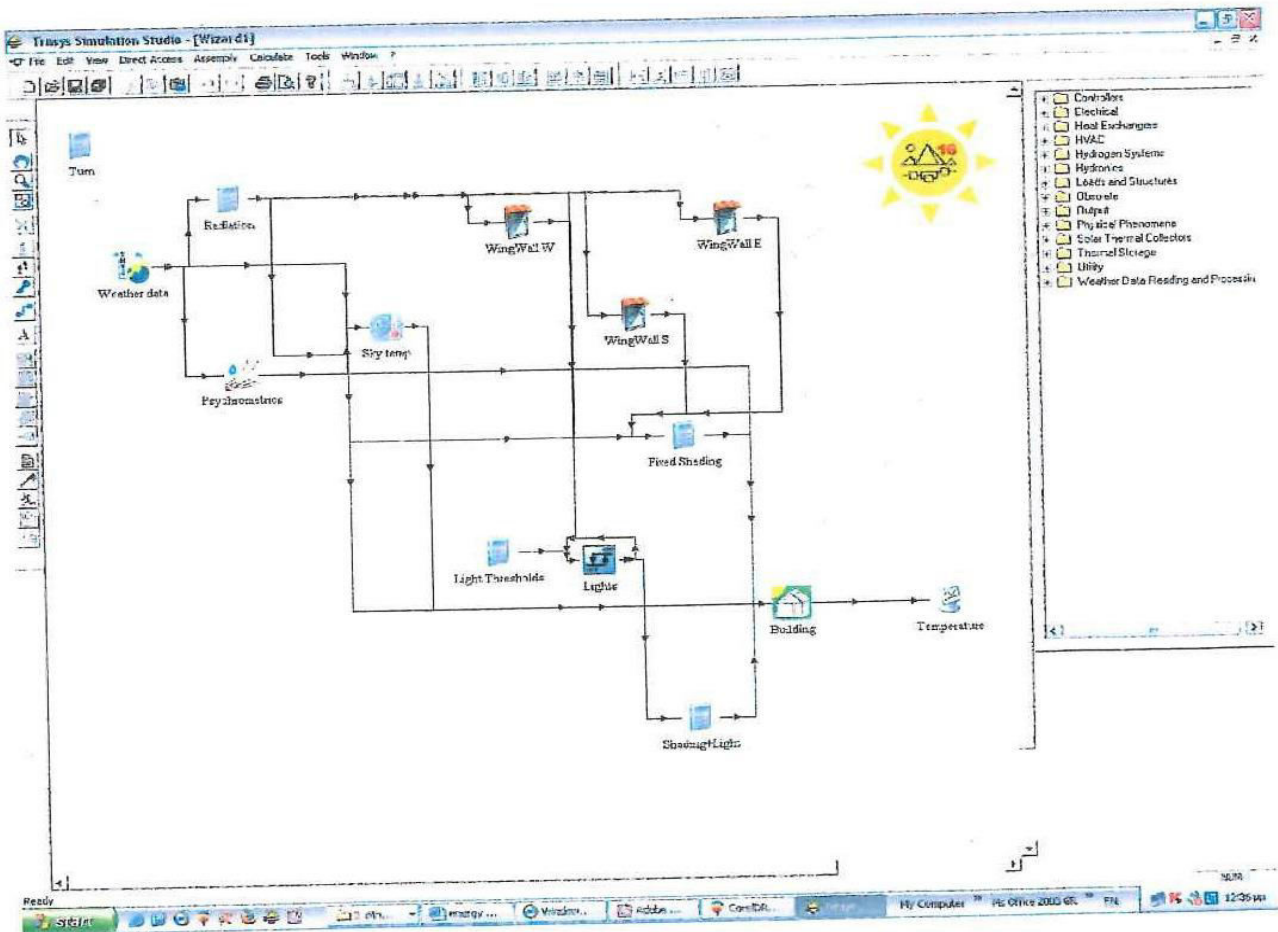
Το *TRNSYS*, το οποίο κυκλοφόρησε για πρώτη φορά στην αγορά το 1975, έχει σχεδιαστεί για να προσομοιάσει την απόδοση των θερμικών συστημάτων. Βασίζεται στην επίλυση μεγάλων συστημάτων πολύπλοκων εξισώσεων, οι οποίες περιγράφονται από υπορουτίνες (*subroutines*) της ευρέως διαδεδομένης γλώσσας προγραμματισμού *Fortran*. Κάθε υπορουτίνα περιέχει ένα μοντέλο, για κάποιο στοιχείο του συστήματος [7].

Δημιουργώντας ένα αρχείο εισόδου (*input file*), ο χρήστης καθοδηγεί το πρόγραμμα να ενώσει πολλές υπορουτίνες ώστε τελικά να διαμορφώσει ένα σύστημα. Η μηχανή (*engine*) του *TRNSYS* καλεί τα στοιχεία του συστήματος, τα οποία εξαρτώνται από το αρχείο εισόδου και επαναλαμβάνει κάθε βήμα της διαδικασίας μέχρι να λυθεί το σύστημα των εξισώσεων. Η εναλλακτική μέθοδος για έναν ερευνητή, είναι να γράψει ένα απλό μονόπλευρο πρόγραμμα το οποίο θα αναφέρεται σε ένα και μόνο δεδομένο σύστημα.

Ένα από τα βασικότερα γνωρίσματά του είναι το γεγονός ότι, σε αντίθεση με άλλα προγράμματα επιτρέπει στους χρήστες του να περιγράψουν και ελέγξουν πλήρως όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των στοιχείων του συστήματος. Κατά καιρούς το *TRNSYS*, έχει χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει ηλιακά θερμικά συστήματα, σύγχρονα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά, κλπ.) και γενικότερα συστήματα Θ.Ψ.Κ. και κτίρια.



Σχήμα 3.1: Οθόνη υποδοχής TRNSYS 16



Σχήμα 3.2: Παράδειγμα μορφής ενός Project

3.2 TYPE 56: Πολυζωνικό κτίριο – Γενική περιγραφή

Το εργαλείο (*component*) αυτό μοντελοποιεί την θερμική συμπεριφορά ενός κτιρίου, το οποίο πρωτίστως έχει χωριστεί σε θερμικές ζώνες [8]. Προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το προαναφερθέν εργαλείο, πρέπει πρώτα να εκτελεστεί ένα προ-παρασκευαστικό πρόγραμμα. Το πρόγραμμα *TRNBUILD* διαβάζει και επεξεργάζεται το αρχείο το οποίο περιέχει την περιγραφή του κτιρίου και δημιουργεί δύο αρχεία, που με την σειρά τους θα χρησιμοποιηθούν από το *TYPE 56*, κατά την διάρκεια μιας προσομοίωσης με το *TRNSYS*. Το αρχείο εισαγωγής του *TRNBUILD*, μπορεί να δημιουργηθεί από τον χρήστη με την βοήθεια οποιουδήποτε επεξεργαστή κειμένου (*text editor*) ή του ίδιου του *TRNBUILD*. Τέλος, το *TRNBUILD* δημιουργεί ένα αρχείο το οποίο περιέχει πληροφορίες σχετικά με τα δεδομένα εξόδου (*outputs*) και τα απαιτούμενα από το *TYPE 56*, δεδομένα εισόδου (*inputs*).

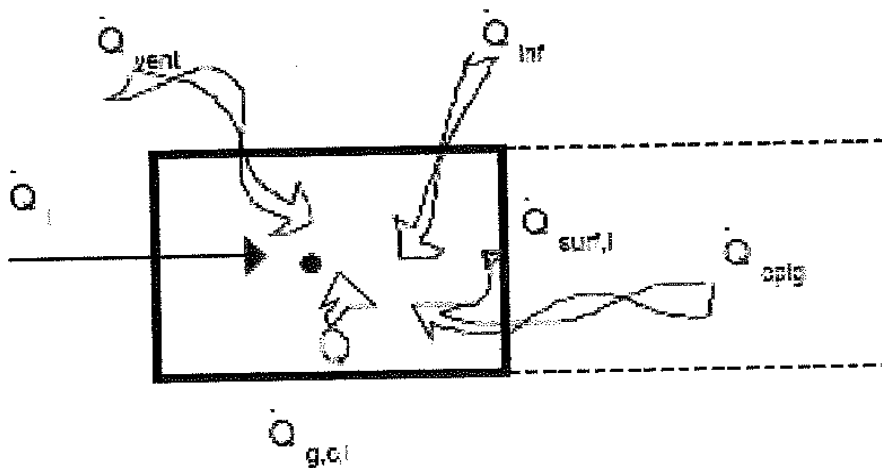
Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι μόνο μία μονάδα του *TYPE 56*, επιτρέπεται να υπάρχει ανα προσομοίωση. Στην συνέχεια περιγράφεται εκτενέστερα το απλό θερμικό μοντέλο κτιρίου, το οποίο δεν περιλαμβάνει εξοπλισμό ψύξης και θέρμανσης, καθώς το μοντέλο του οπτικού και θερμικού παραθύρου.

(Όλοι οι τύποι καθώς και τα σχήματα που παρούσας αλλά και των υπολοίπων ενοτήτων του Κεφαλαίου 3, βασίζονται στο εγχειρίδιο του *TRNSYS*, [8])

3.3 Περιγραφή απλού θερμικού μοντέλου κτιρίου στο TRNSYS

3.3.1 Θερμική ζώνη

Το μοντέλο κτιρίου του TYPE 56 είναι ένα μη-γεωμετρικό μοντέλο ισορροπίας με έναν κόμβο αέρα (*air node*) ανα ζώνη, το οποίο αναπαριστά την θερμική χωρητικότητα του όγκου του αέρα της ζώνης και τις χωρητικότητες που συνδέονται στενά με τον κόμβο του αέρα (έπιπλα, για παράδειγμα). Έτσι, η χωρητικότητα του κόμβου είναι ξεχωριστό δεδομένο εισόδου, επί πρόσθετα με τον όγκο της ζώνης.



Σχήμα 3.3: Θερμικό ισοζύγιο στον κόμβο αέρα

3.3.2 Μετάδοση θερμότητας προς τον κόμβο με συναγωγή

Σε αυτή την περίπτωση ισχύει:

$$\dot{Q}_i = \dot{Q}_{surf,i} + \dot{Q}_{inf,i} + \dot{Q}_{vent} + \dot{Q}_{g,c,i} + \dot{Q}_{cplg,i} \quad (Εξ. 3.1)$$

όπου:

$\dot{Q}_{surf,i}$ = ροή θερμότητας με συναγωγή από όλες τις εσωτερικές επιφάνειες

$$\dot{Q}_{surf,i} = U_{w,i} \cdot A_{w,i} \cdot (T_{wall,i} - T_{air}) \quad (Εξ. 3.2)$$

$\dot{Q}_{inf,i}$ = κέρδη αερισμού (ροή αέρα από έξω)

$$\dot{Q}_{inf,i} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{outside} - T_{air}) \quad (Εξ. 3.3)$$

$\dot{Q}_{vent,i}$ = κέρδη εξαερισμού (σύστημα HVAC)

$$\dot{Q}_{vent,i} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{ventilation,i} - T_{air}) \quad (Εξ. 3.4)$$

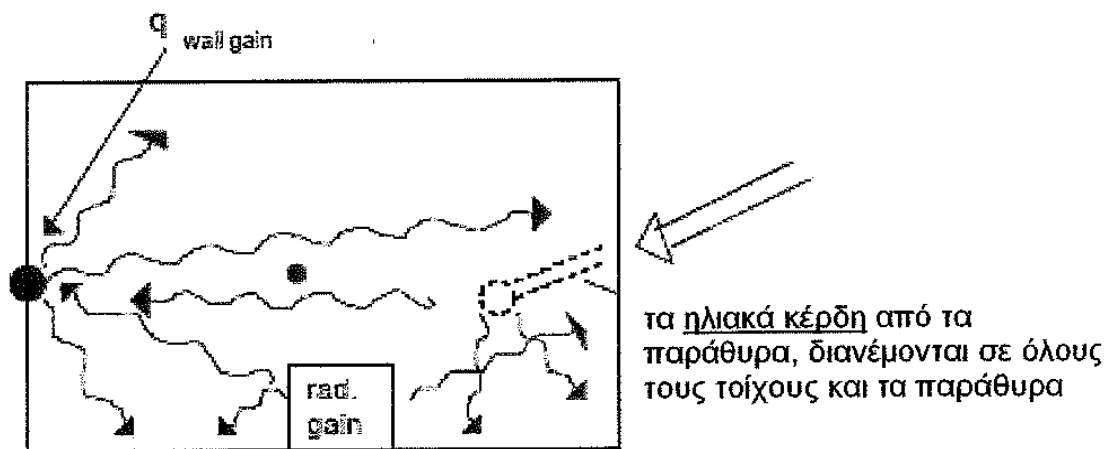
$\dot{Q}_{g,c,i}$ = εσωτερικά κέρδη από συναγωγή (άνθρωποι, εξοπλισμός, κλπ.)

$$\dot{Q}_{g,c,i} = \left[\frac{kJ}{h} \right] \quad (Εξ. 3.5)$$

$\dot{Q}_{cplg,i}$ = κέρδη συναγωγής από γειτονική ζώνη i

$$\dot{Q}_{cplg,i} = \dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_{zone,i} - T_{air}) \quad (Εξ. 3.6)$$

3.3.3 Ροές θερμικής ακτινοβολίας (μόνο) σε τοίχους και παράθυρα



Σχήμα 3.4: Ροές θερμικής ακτινοβολίας σε τοίχο

Η εξίσωση που ισχύει εδώ είναι:

$$\dot{Q}_{r,w_i} = \dot{Q}_{g,r,i,w_i} + \dot{Q}_{sol,w_i} + \dot{Q}_{long,w_i} + \dot{Q}_{wall-gains} \quad (Εξ. 3.7)$$

όπου:

\dot{Q}_{r,w_i} = κέρδη από ακτινοβολία στην επιφάνεια του τοίχου [kJ/h]

\dot{Q}_{g,r,i,w_i} = εσωτερικά κέρδη ζώνης από ακτινοβολία, που προέρχεται από τον τοίχο [kJ/h]

\dot{Q}_{sol,w_i} = ηλιακά κέρδη από παράθυρα που προσπίπτουν στον τοίχο [kJ/h]

\dot{Q}_{long,w_i} = ανταλλαγή μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας μεταξύ αυτού του τοίχου και των υπόλοιπων τοίχων και παραθύρων ($\epsilon_i = 1$) [kJ/h]

$\dot{Q}_{wall-gains}$ = θερμική ροή, καθορισμένη από τον χρήστη προς την επιφάνεια του τοίχου ή του παραθύρου [kJ/h]

3.3.4 Ενσωμάτωση παραθύρων και τοίχων

Το Σχήμα 3.5 παρουσιάζει τις θερμικές ροές και θερμοκρασίες που χαρακτηρίζουν την θερμική συμπεριφορά του κάθε τοίχου ή του κάθε παραθύρου. Η ονοματολογία που χρησιμοποιείται στο Σχήμα 3.5 έχει ως εξής:

$S_{s,i}$ = θερμική ακτινοβολία που απορροφάται στην εσωτερική επιφάνεια (ηλιακά κέρδη και κέρδη από ακτινοβολία)

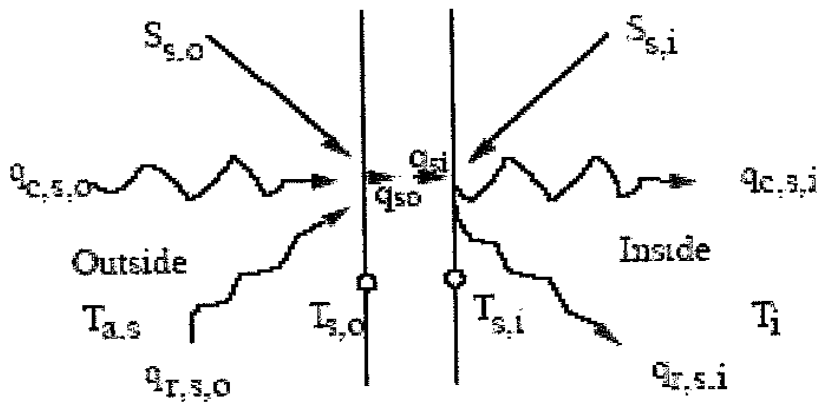
$S_{s,o}$ = θερμική ακτινοβολία που απορροφάται στην εξωτερική επιφάνεια (ηλιακά κέρδη)

$\dot{q}_{r,s,i}$ = καθαρή μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας με όλες τις υπόλοιπες επιφάνειες της ζώνης

$\dot{q}_{r,s,o}$ = καθαρή μετάδοση θερμικής ακτινοβολίας με όλες τις επιφάνειες, εν όψει της εξωτερικής επιφάνειας

$\dot{q}_{w,g,i}$ = θερμική ροή στην επιφάνεια τοίχου ή παραθύρου, καθορισμένη από τον χρήστη

- $\dot{q}_{s,i}$ = ροή θερμότητας με αγωγή από τον τοίχο στην εσωτερική επιφάνεια
- $\dot{q}_{s,o}$ = ροή θερμότητας με αγωγή μέσα στον τοίχο
- $\dot{q}_{c,s,i}$ = ροή θερμότητας με συναγωγή από την εσωτερική επιφάνεια στον αέρα της ζώνης
- $\dot{q}_{c,s,o}$ = ροή θερμότητας με συναγωγή στην εξωτερική επιφάνεια από το περιβάλλον/όριο
- $T_{s,i}$ = θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας
- $T_{s,o}$ = θερμοκρασία εξωτερικής επιφάνειας
- T_i = θερμοκρασία ζώνης
- $T_{a,s}$ = θερμοκρασία αέρα περιβάλλοντος στο εξωτερικό όριο της επιφάνειας



Σχήμα 3.5: Επιφανειακές ροές θερμότητας και θερμοκρασίες

Οι τοίχοι μοντελοποιούνται σύμφωνα με τις εξισώσεις μεταφοράς των *Mitalas* και *Arseneault*, οι οποίες ορίζονται από επιφάνεια σε επιφάνεια. Για κάθε τοίχο, η αγωγή θερμότητας στις επιφάνειες θα είναι:

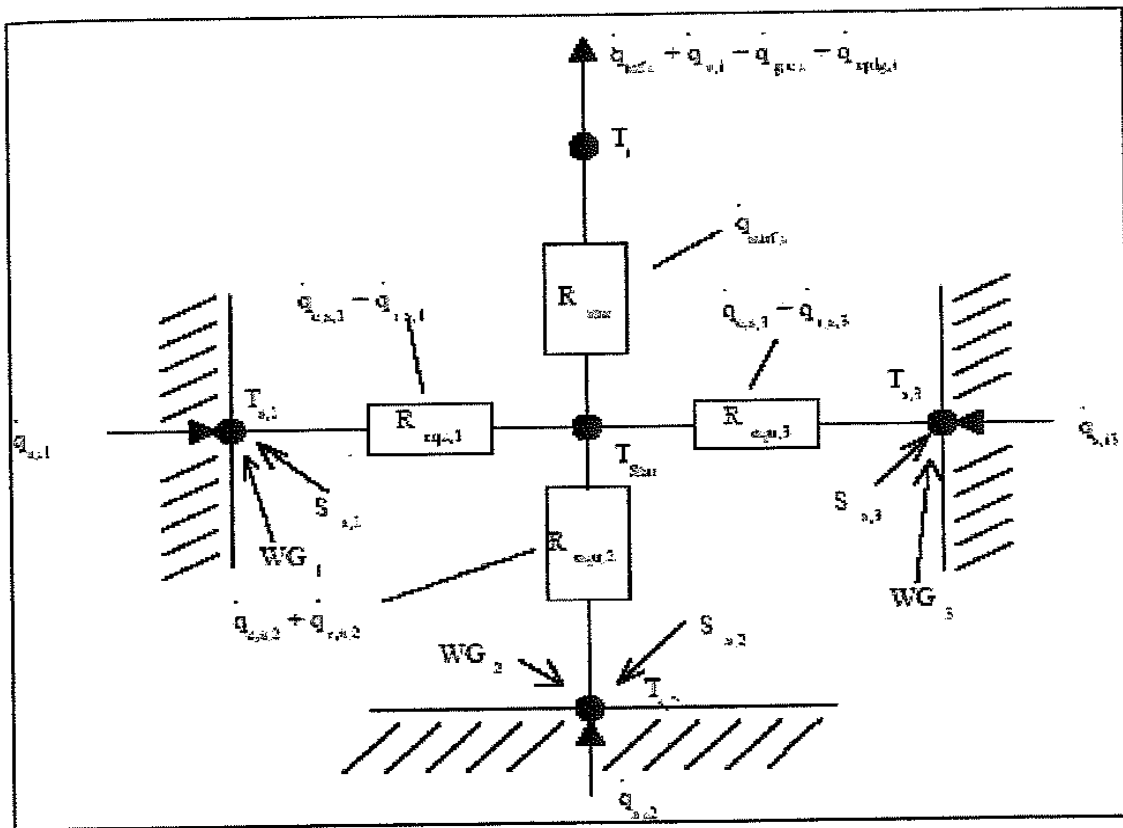
$$\dot{q}_{s,i} = \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{c_s}} c_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,i}^k \tag{Εξ. 3.8}$$

$$\dot{q}_{s,o} = \sum_{k=0}^{n_{a_s}} a_s^k T_{s,o}^k - \sum_{k=0}^{n_{b_s}} b_s^k T_{s,i}^k - \sum_{k=1}^{n_{d_s}} d_s^k \dot{q}_{s,o}^k \quad (\text{Εξ. 3.9})$$

Οι παραπάνω σειρές, από άποψη επιφανειακών θερμοκρασιών και θερμικών ροών εκτιμώνται σε ίσα χρονικά διαστήματα. Ο εκθέτης k αναφέρεται στην χρονική σειρά. Ο τρέχων χρόνος δίνεται για $k=0$, ο προηγούμενος για $k=1$ κοκ. Η χρονική βάση πάνω στην οποία στηρίζονται οι υπολογισμοί αυτοί, καθορίζονται από τον χρήστη μέσω της περιγραφής του *TRNBUILD*. Οι συντελεστές a , b , c και d καθορίζονται επίσης μέσα στο πρόγραμμα *TRNBUILD*, με χρήση των ρουτινών συναρτήσεων μεταφοράς z (*z-transfer function routines*).

3.3.5 Μαθηματικό μοντέλο δικτύου αστέρα

Η ανταλλαγή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος μεταξύ των επιφανειών μιας ζώνης καθώς και η ροή θερμότητας με συναγωγή από τις εσωτερικές επιφάνειες στον αέρα της ζώνης, υπολογίζονται με την χρήση του δικτύου αστέρα (*star network*) του *Seem*, όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο του *TRNSYS* [8], το οποίο αναπαρίσταται στο Σχήμα 3.6. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί έναν τεχνητό θερμοκρασιακό κόμβο, T_{star} , ώστε να ορισθεί η παράλληλη ροή ενέργειας από την επιφάνεια ενός τοίχου με συναγωγή στον κόμβο του αέρα και με ακτινοβολία στους υπόλοιπους τοίχους και παράθυρα.



Σχήμα 3.6: Δίκτυο αστέρα για μια ζώνη με τρεις επιφάνειες

Για το παραπάνω σχήμα ισχύει η σχέση:

$$R_{star,i} = f(a_i, A_{surf,i}) = \frac{1}{Q_{surf,i}} (T_{star} - T_i) \quad (Εξ. 3.10)$$

Οι μέθοδοι υπολογισμού της συνολικής θερμικής αντίστασης αστέρα, $R_{star,i}$ καθώς και της ισοδύναμης θερμικής αντίστασης, $R_{equiv,i}$ δίδονται από τον Seem, όπως αναφέρεται στο εγχειρίδιο του TRNSYS [8]. Στους υπολογισμούς αυτούς χρησιμοποιούνται λόγοι επιφανειών, ώστε να βρεθούν οι συντελεστές απορρόφησης (*absorption factors*) μεταξύ όλων των επιφανειών. Η θερμοκρασία του αστέρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί να για υπολογισθεί μια καθαρή θερμική ροή με συναγωγή, $q_{c,s,i}$ και ακτινοβολία $q_{r,s,i}$ από την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \dot{q}_{c,s,i} + \dot{q}_{r,s,i} \quad (Εξ. 3.11)$$

επίσης ισχύει:

$$\dot{q}_{comb,s,i} = \frac{1}{R_{equiv,i} A_{s,i}} (T_{s,i} - T_{star}) \quad (Eξ. 3.12)$$

όπου:

$\dot{q}_{comb,s,i}$ = συνδυασμένη θερμική ροή με ακτινοβολία και συναγωγή

$A_{s,i}$ = εσωτερική επιφάνεια

Για εξωτερικές επιφάνειες η εναλλαγή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους υπολογίζεται με την χρήση μιας φανταστικής θερμοκρασίας του ουρανού, T_{sky} , η οποία εισάγεται στο *TYPE 56* καθώς και ενός συντελεστή μορφής προς τον ουρανό, f_{sky} , για κάθε εξωτερική επιφάνεια. Η συνολική μετάδοση θερμότητας $\dot{q}_{comb,s,o}$ δίνεται ως το άθροισμα της μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή και ακτινοβολία:

$$\dot{q}_{comb,s,o} = \dot{q}_{c,s,o} + \dot{q}_{r,s,o} \quad (Eξ. 3.13)$$

με:

$$\dot{q}_{c,s,o} = h_{conv,s,o} \cdot (T_{a,s} - T_{s,o}) \quad (Eξ. 3.14)$$

$$\dot{q}_{r,s,o} = \sigma \cdot \varepsilon_{s,o} \cdot (T_{s,o}^4 - T_{fsky}^4) \quad (Eξ. 3.15)$$

$$T_{fsky} = (1-f_{sky}) \cdot T_{a,s} + f_{sky} \cdot T_{sky} \quad (Eξ. 3.16)$$

όπου:

$\dot{q}_{comb,s,o}$ = συνδυασμένη θερμική ροή με ακτινοβολία και συναγωγή στην επιφάνεια

$\dot{q}_{c,s,o}$ = θερμική ροή με συναγωγή στην επιφάνεια

$\dot{q}_{r,s,o}$ = θερμική ροή με ακτινοβολία στην επιφάνεια

$h_{conv,s,o}$ =	συντελεστής συναγωγής για την εξωτερική επιφάνεια
f_{sky} =	μέρος του ουρανού που φαίνεται από την εξωτερική επιφάνεια
T_{sky} =	υποθετική θερμοκρασία ουρανού
$\epsilon_{s,o}$ =	εκπεμπημότητα μεγάλου μήκους ακτινοβολίας εξωτερικής επιφάνειας
σ =	σταθερά <i>Stephan-Boltzman</i>

τα ενεργειακά ισοζύγια των επιφανειών δίνουν:

$$\dot{q}_{s,i} = \dot{q}_{comb,s,i} + S_{s,i} + wgain \quad (Eξ. 3.17)$$

$$\dot{q}_{s,o} = \dot{q}_{comb,s,o} + S_{s,o} \quad (Eξ. 3.18)$$

Για τις εσωτερικές επιφάνειες ο παράγοντας $S_{s,i}$ μπορεί να περιλαμβάνει την ηλιακή αλλά και την μεγάλου μήκους ακτινοβολία από εσωτερικά αντικείμενα, όπως άνθρωποι ή έπιπλα. Ο παράγον $wgain$ (=wall gain) αναφέρεται στην, από τον χρήστη ορισμένη, ροή ενέργειας στις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων και των παραθύρων. Μπορεί να περιγράψει τα ηλιακά κέρδη που μεταβάλλονται κατά την διάρκεια της ημέρας εξ' αιτίας των διαφορετικών θέσεων του ηλίου είτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένας απλός τρόπος μοντελοποίησης συστημάτων θέρμανσης δαπέδου (*floor heating system*) ή ψύξης οροφής (*ceiling cooling system*). Για εξωτερικές επιφάνειες ο $S_{s,o}$ αποτελείται από ηλιακή ακτινοβολία μόνο.

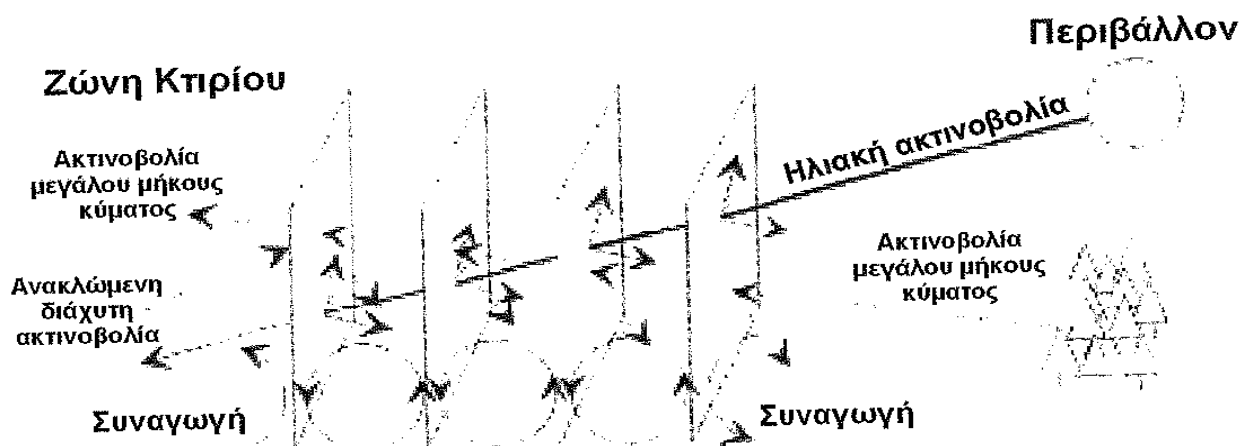
3.4 Περιγραφή οπτικού και θερμικού μοντέλου παραθύρου στο TRNSYS

Ένα λεπτομερές μοντέλο παραθύρου έχει ενσωματωθεί στο *TYPE 56*, με την χρήση δεδομένων εξόδου από το πρόγραμμα *WINDOW 4.1*, το οποίο αναπτύχθηκε από το *Lawrence Berkeley Laboratory, USA*. Το προαναφερθέν μοντέλο παραθύρου υπολογίζει λεπτομερώς την μετάδοση, ανάκλαση και απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας, για παράθυρα που έχουν έως και έξι υαλοπίνακες (*panes*).

3.4.1 Περιγραφή παραθύρου

Τα παράθυρα μπορεί να αποτελούνται από έως και έξι υαλοπίνακες με πέντε διαφορετικές ενδιάμεσες στρώσεις αερίων (*gas fillings*). Κάθε υαλοπίνακας έχει τον δικό του θερμοκρασιακό κόμβο και ο εσωτερικός υαλοπίνακας συνδέεται, μέσω του δικτύου αστέρα με την θερμοκρασία του κόμβου του αστέρα της ζώνης κτιρίου. Ο εξωτερικός υαλοπίνακας συνδέεται μέσω θερμικής συναγωγής με την θερμοκρασία του αέρα και μέσω εναλλαγής μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολίας με την υποθετική θερμοκρασία του ουρανού, T_{sky} . Η θερμική χωρητικότητα του κουφώματος, των υαλοπινάκων και των στρωμάτων αερίων αγνοούνται.

Η θερμοκρασία του κάθε υαλοπίνακα υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την μετάδοση, την απορρόφηση και την ανάκλαση της εισερχομένης άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας, της διάχυτης μικρού μήκους ακτινοβολίας που αντανακλάται από τους τοίχους της ζώνης και από το τυχόν εσωτερικό σκίαστρο, καθώς και την αγωγή, συναγωγή και με μεγάλο μήκους ακτινοβολία μετάδοση θερμότητας μεταξύ του καθένα υαλοπίνακα και επιπλέον με το εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον, *Σχήμα 3.7*.



Σχήμα 3.7: Λεπτομερές μοντέλο παραθύρου

3.4.2 Μοντέλο παραθύρου διμερούς ηλιακής ακτινοβολίας

Με την έκδοση 16 του εμπορικού κώδικα *TRNSYS* εισήχθη το Μοντέλο παραθύρου διμερούς ηλιακής ακτινοβολίας (*2-Band-Solar-Radiation-Window-Model*). Το μοντέλο διαφέρει μόνο ως προς την μικρού μήκους κύματος ηλιακή ακτινοβολία. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο διαχωρίζει την εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία σε ορατό και μη ορατό μέρος. Το κλάσμα του ορατού μέρους ισούται με την ακτινοβολία ενός μέλανος σώματος, θερμοκρασίας 5800 K, για μήκος κύματος μεταξύ 380nm-780nm προς την συνολική ακτινοβολία του σώματος στην ίδια θερμοκρασία. Αυτό οδηγεί στις ακόλουθες εξισώσεις για την ορατή ακτινοβολία:

$$I_{\text{dif,visual}} = 0,466 \cdot I_{\text{dif,solar}} \quad [\text{kJ/h m}^2] \quad (\text{Εξ. 3.19})$$

$$I_{\text{dir,visual}} = 0,466 \cdot I_{\text{dir,solar}} \quad [\text{kJ/h m}^2] \quad (\text{Εξ. 3.20})$$

Έτσι το μη ορατό μέρος της ηλιακής ακτινοβολίας μπορεί να υπολογιστεί:

$$I_{\text{dif,n-visual}} = (1 - 0,466) \cdot I_{\text{dif,solar}} \quad [\text{kJ/h m}^2] \quad (\text{Εξ. 3.21})$$

$$I_{\text{dir,n-visual}} = (1 - 0,466) \cdot I_{\text{dir,solar}} \quad [\text{kJ/h m}^2] \quad (\text{Εξ. 3.22})$$

Το μοντέλο διαβάζει την οπτική μετάδοση και ανάκλαση για την μπροστινή και την πίσω πλευρά από την βιβλιοθήκη *W4*. Οι τιμές της σχετικής απορροφητικότητας για ολόκληρη την ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνονται από την διανομή της απορροφώμενης ενέργειας του ορατού καθώς και του μη ορατού μέρους σε κάθε υαλοπίνακα.

Το μοντέλο υπολογίζει στην συνέχεια για το ορατό και το μη ορατό μέρος ξεχωριστά την ανάκλαση, την απορρόφηση στους απλούς υαλοπίνακες και την διανομή μέσα στις ζώνες, συμπεριλαμβανομένης και της πολλαπλής ανάκλασης. Η απορροφώμενη και μεταδιδόμενη ακτινοβολία αθροίζονται ώστε να υπολογιστεί η συνολική ηλιακή απορροφώμενη ή μεταδιδόμενη ακτινοβολία. Για όλους τους επόμενους υπολογισμούς ενέργειας και θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται μόνο οι τιμές της συνολικής ηλιακής ακτινοβολίας.

3.4.3 Μετάδοση ηλιακής ακτινοβολίας

Ο κάθε υαλοπίνακας απορροφά και ανακλά ένα μέρος της εισερχόμενης ακτινοβολίας το οποίο εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του και από την γωνία πρόσπτωσης (*incidence angle*). Στο πρόγραμμα *WINDOW 4.1* ο λεπτομερής υπολογισμός την ανάκλασης μεταξύ του κάθε υαλοπίνακα καθώς και η απορρόφηση και η μετάδοσή του πραγματοποιείται, ημισφαιρικά για διάχυτη ακτινοβολία και για άμεση με βήμα 10° γωνίας πρόσπτωσης. Όλα τα παραπάνω σε συνδυασμό με τις θερμικές ιδιότητες των αερίων των διακένων και της αγωγιμότητας και της εκτεμψιμότητας των υαλοπινάκων και τα οπτικά δεδομένα του παραθύρου γράφονται σε ένα αρχείο τύπου *ASCII* από το πρόγραμμα *WINDOW 4.1*.

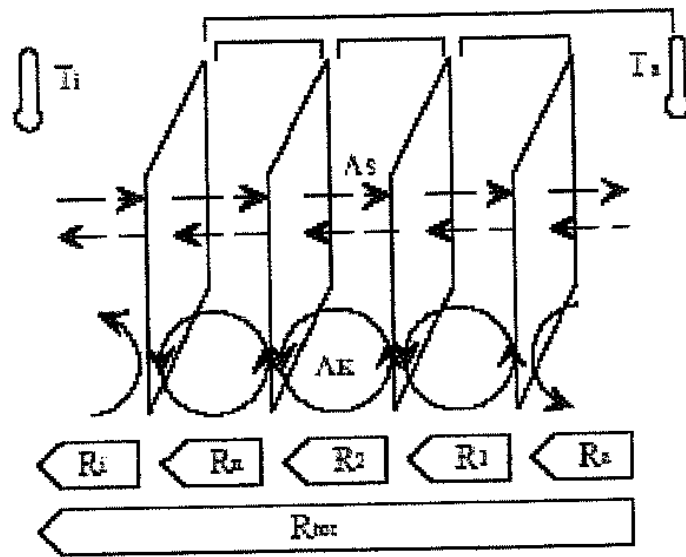
Το παραπάνω αρχείο εξόδου έχει μια συγκεκριμένη μορφή, η οποία καθιστά τα αποτελέσματά του προσβάσιμα από διάφορα προγράμματα θερμικής ανάλυσης και προσομοίωσης όπως τα *DOE 2.1* και *TRNSYS*. Για το *TRNSYS*, δημιουργήθηκε ένα αρχεία βιβλιοθήκης παραθύρων, με χρήση του *WINDOW 4.1*, το οποίο παρέχει στον χρήστη όλα τα ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα υαλοπινάκων. Τα δεδομένα διαβάζονται από το *TYPE 56* και επεξεργάζονται με την χρήση της συνάρτησης:

$$y = x(2 - x + (1 - x)^2 \cdot (c_1 + c_2 \cdot (2 + x))) \quad (\text{Εξ. 3.23})$$

Με την χρήση των δεδομένων που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση, η μετάδοση της ηλιακής ακτινοβολίας και η συνολική απορρόφηση της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος υπολογίζονται για κάθε υαλοπίνακα.

3.4.4 Ροή θερμότητας μεταξύ υαλοπινάκων

Η μεταφορά θερμότητας μεταξύ του καθενός υαλοπίνακα παρουσιάζεται στο *Σχήμα 3.8*. Η αγωγή, η συναγωγή και ακτινοβολία μεγάλου μήκους κύματος υπολογίζονται ξεχωριστά.



Σχήμα 3.8: Δίκτυο αντιστάσεων μεταξύ των υαλοπινάκων

Η θερμική ροή από τον εσωτερικό υαλοπίνακα του παραθύρου προς την ατμόσφαιρα υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\dot{Q}_{n-a} = k_{n-a} A (T_n - T_a) \quad (\text{Εξ. 3.24})$$

όπου:

$$k_{n-a} = \frac{1}{\sum_{jj} R_{jj} + R_a} \quad (\text{Εξ. 3.25})$$

$$R_{jj} = \frac{1}{\Lambda_{jj}} \quad (\text{Εξ. 3.26})$$

$$R_a = \frac{1}{a_{c,a} + a_{r,a}} \quad (\text{Εξ. 3.27})$$

$$\Lambda_{jj} = \Lambda_{\text{conv},jj} + \Lambda_{\text{rad},jj} + \Lambda_{\text{cond},jj} \quad (\text{Εξ. 3.28})$$

Η σταθερά μετάδοσης θερμότητας με ακτινοβολία μεταξύ των υαλοπινάκων θα ισούται με:

$$\Lambda_{rad} = 4\sigma(T_{mean})^3 \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{Εξ. 3.29})$$

Η σταθερά μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του καθενός υαλοπίνακα υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την κλίση του παραθύρου:

$$\Lambda_k = Nu \cdot \frac{\lambda(T)}{s} \quad (\text{Εξ. 3.30})$$

$$Ra = \frac{g\Delta TL^3}{\Gamma\mu\alpha} \quad (\text{Εξ. 3.31})$$

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708(\sin(1,8\beta))^{1,6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \quad (\text{Εξ. 3.32})$$

όπου s είναι το σύνολο της ακτινοβολούμενης ενέργειας που απορροφάται από μια εσωτερική επιφάνεια, λόγω ηλίου, φωτισμού και ανθρώπων, L η συνολική ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, μ η σταθερά θερμοκρασίας και α η απορροφητικότητα της επιφάνειας και β η κλίση της.

3.4.5 Απορρόφηση ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (άμεση και διάχυτη ακτινοβολία, διάχυτη ακτινοβολία ανακλώμενη από όλες τις επιφάνειες της ζώνης και από το προαιρετικό εσωτερικό σκίαστρο) στο σύστημα των υαλοπινάκων του παραθύρου, οδηγεί σε μια ροή θερμότητας από τον υαλοπίνακα στην ζώνη η οποία περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\dot{Q}_{abs,i} = \sum_{i \rightarrow n} \left((I_{dir} abs_{dir,i} + I_{dif} abs_{dif,i} + (I_{ref,z} + I_{ref,sh}) abs_{dif,i,b}) \frac{R_{i-1} + R_a}{R_{tot}} \right) \quad (\text{Εξ. 3.33})$$

Μπορεί να αποδειχθεί ότι η συνολική θερμική ροή ενός τέτοιου συστήματος υαλοπινάκων μπορεί να χωριστεί στην ροή απωλειών θερμότητας, η οποία εξαρτάται από τις θερμοκρασιακές διαφορές και στην θερμική ροή απορρόφησης του υαλοπίνακα, η οποία εξαρτάται μόνο από την ένταση της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας.

Επειδή η ηλιακή ακτινοβολία που ανακλάται από τις επιφάνειες της ζώνης μπορεί να υπολογιστεί μόνο από το *TYPE 56*, εάν είναι γνωστό το ποσό της μεταδιδόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από όλα τα εξωτερικά και εσωτερικά παράθυρα της ζώνης, μια επαναληπτική διαδικασία (*iterative loop*) για όλα τα παράθυρα της ζώνης εφαρμόζεται μέχρι ολόκληρη η εισερχόμενη άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία είτε να απορροφηθεί σε κάποιον εσωτερικό τοίχο ή επιφάνεια κουφώματος ή σε κάποιον υαλοπίνακα εσωτερικού ή εξωτερικού παραθύρου, είτε να επιστρέψει στο περιβάλλον μέσω κάποιου εξωτερικού παραθύρου. Μετά την διανομή της συνολικής εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας και όλες τις ζώνες του κτιρίου, συμπεριλαμβανομένων και των πολλαπλών ανακλάσεων σε μια ζώνη ή μεταξύ ζωνών μέσω εσωτερικών παραθύρων, πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί των επιφανειακών θερμοκρασιών καθώς και των θερμοκρασιών των υαλοπινάκων.

3.4.6 Επαναληπτική λύση για θερμοκρασίες υαλοπινάκων

Η απορρόφηση της μικρού μήκους κύματος ακτινοβολίας οδηγεί σε μια θερμοκρασιακή αύξηση του κάθε υαλοπίνακα. Έτσι υπάρχει μια θερμική ροή μεταξύ γειτονικών υαλοπινάκων ή από τον εσωτερικό (ζώνη) στον εξωτερικό (περιβάλλον) του παραθύρου, η οποία προκαλεί μια επιπλέον μεταβολή στις θερμοκρασίες των υαλοπινάκων. Η επαναληπτική διαδικασία των θερμοκρασιών των υαλοπινάκων γίνεται μέχρι η μεταβολή της θερμοκρασίας των υαλοπινάκων γίνει χαμηλότερη από μια σχετική ανεκτή τιμή.

3.4.7 Συνολική ενεργειακή ροή μέσω του υαλοπίνακα

Έχοντας καθορίσει την θερμοκρασία του κάθε υαλοπίνακα και όλες τις θερμικές ροές μέσα από αυτούς, η απορροφώμενη μικρού μήκους ακτινοβολία αθροίζεται για όλους τους υαλοπίνακες και διαμοιράζεται στο εσωτερικό και τον εξωτερικό κόμβο του παραθύρου. Βάσει των θερμοκρασιών των κόμβων του παραθύρου, η απορροφώμενη μικρού μήκους ακτινοβολία από τους κόμβους του παραθύρου ισούται με:

$$\dot{Q}_{abs,i} = 0,5 \cdot (\dot{Q}_{abs} + h_i \cdot (T_i - T_{zone}) - h_{c,o} \cdot (T_o - T_{amb}) - \dot{Q}_{sky}) \quad (Εξ. 3.34)$$

$$\dot{Q}_{abs,a} = \dot{Q}_{abs} - \dot{Q}_{abs,i} \quad (Εξ. 3.35)$$

Η παραπάνω ροές του μοντέλου των δύο κόμβων χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο θερμικής ισορροπίας του *TYPE 56*, ώστε να υπολογισθεί η δυναμική συμπεριφορά ενός πολυζωνικού κτιρίου.

3.4.8 Διανομή ηλιακής ακτινοβολίας

Η εισερχόμενη άμεση (κύρια) ηλιακή ακτινοβολία κατανέμεται σύμφωνα με τους συντελεστές διανομής (*GEOSURF*), οι οποίοι ορίζονται στην περιγραφή του κτιρίου. Οι τιμές αυτές είναι συντελεστές διανομής που σχετίζονται με την συνολική άμεση ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στην ζώνη και όχι με την επιφάνεια ($Q_{sol,wi}$ Εξ. 3.7). Το άθροισμα των τιμών *GEOSURF* που δίδονται για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες μιας ζώνης θα πρέπει να ισούται συνεχώς με 1. Το κλάσμα της εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από μια επιφάνεια, i προκύπτει από τι γινόμενο της ηλιακής απορροφητικότητας, α , επί τον συντελεστή *GEOSURF* της επιφάνειας. Εάν όλες οι τιμές των *GEOSURF* για μια ζώνη τεθούν ίσες με μηδέν, όλη η άμεση ακτινοβολία που εισέρχεται στην ζώνη αυτή θεωρείται σαν διάχυτη και διανέμεται με την βοήθεια των λόγων απορροφητικότητας βάσει επιφανείας (*absorptance-weighted area ratios*) που παρουσιάζονται στην Εξ. 3.36.

Όσον αφορά την διανομή της κύριας άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας δεν υπάρχει εξάρτηση στην επιφάνεια, είναι πιθανό να συγκεντρώσουμε ολόκληρη την άμεση ηλιακή ακτινοβολία σε μια μικρή επιφάνεια θέτοντας μια υψηλή τιμή *GEOSURF*. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα μια πολύ υψηλή επιφανειακή θερμοκρασία και πιθανές αστάθειες κατά την επίλυση των ενεργειακών ισοζυγίων του *TYPE 56*.

Μετά το πέρασμα από το δεύτερο εσωτερικό παράθυρο η ηλιακή ακτινοβολία αντιμετωπίζεται ως διάχυτη. Για να περάσει η άμεση ηλιακή ακτινοβολία μέσα από αρκετές ζώνες, μπορεί να χρειαστούν φανταστικά παράθυρα μεταξύ των ζωνών αυτών.

Η εισερχόμενη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και η κύρια ανακλώμενη άμεση ηλιακή ακτινοβολία διανέμονται σύμφωνα με τους λόγους απορροφητικότητας βάσει επιφανείας. Το κλάσμα της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από μια επιφάνεια s είναι:

$$f_{dif,s,s} = \frac{a_s A_s}{\sum_{surfaces} (1 - \rho_{d,s}) A_s} \quad (Eξ. 3.36)$$

όπου:

α_s = η ηλιακή απορροφητικότητα της επιφάνειας

$\rho_{d,s}$ = η ανακλαστικότητα διάχυτης ακτινοβολίας για την επιφάνεια

για επιφάνειες τοίχων όπου $\tau_s = 0$, ισχύει ότι:

$$\rho_{d,s} = (1 - \alpha_s) \quad (Eξ. 3.37)$$

για παράθυρα η απώλειες κατά την μετάδοση ισούνται με:

$$\tau_s = (1 - \alpha_s - \rho_{d,s}) \quad (Eξ. 3.38)$$

όπου:

$\rho_{d,s}$ = ανάκλαση διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας από μέσα

3.4.9 Διανομή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος

Όλες οι επιφάνειες θεωρούνται ως μέλανα σώματα όσον αφορά την ανταλλαγή ακτινοβολίας μεγάλου μήκους κύματος και τα εσωτερικά κέρδη από ακτινοβολία. Τα κέρδη αυτά διανέμονται βάσει των λόγων επιφανείας. Το κλάσμα των εσωτερικών κερδών από ακτινοβολία, οποιασδήποτε ζώνης που απορροφάται από μια επιφάνεια s είναι:

$$f_{l,s} = \frac{A_s}{\sum_{surfaces} A_s} \quad (Eξ. 3.39)$$

4. Αριθμητική προτυποποίηση κατανομής εισερχόμενης ακτινοβολίας

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται περιγραφή της αριθμητικής διαδικασίας η οποία εφαρμόζεται στα επόμενα κεφάλαια και αποτελεί τον θεματικό πυρήνα της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα περιγράφονται το μαθηματικό μοντέλο του κώδικα *VFCALC* (*View Factor CALCulator*), το απαιτούμενο ισοζύγιο παραθύρου, το διάγραμμα ροής της διαδικασίας, καθώς και ο τρόπος εφαρμογής του κώδικα.

4.2 Μαθηματικό μοντέλο κώδικα

Στην συνέχεια ακολουθεί μαθηματική ανάλυση του αριθμητικού μοντέλου που προτείνεται στην παρούσα εργασία, για εξάεδρη γεωμετρία με ένα έως πέντε ανοίγματα. Σημειώνεται ότι ο όρος Q_n αναφέρεται στο μέγεθος Q_TRANS_SOL (§ 4.3), στην εισερχόμενη δηλαδή ακτινοβολία από το παράθυρο n (το μέγεθος είναι διαφορετικό για κάθε ωριαίο βήμα της προσομοίωσης). Επίσης ο όρος $F'_{i \rightarrow j}$, αναφέρεται στον συντελεστή μορφής μεταξύ της επιφάνειας του εξωτερικού παραθύρου i και της εσωτερικής επιφάνειας τοίχου j , ο οποίος υπολογίζεται με μια από τις σχέσεις των *ενοτήτων* 2.3.1 και 2.3.2. (Χάριν απλότητας παρουσιάζονται οι σχέσεις για δύο μόνο ανοίγματα)

Υποθέτοντας ότι όλη η εισερχόμενη ακτινοβολία από το *Παράθυρο 1* κατανέμεται στις υπόλοιπες επιφάνειες βάσει των συντελεστών μορφής, θα είναι:

Παράθυρο 1

$$Q_1 = F'_{1 \rightarrow 2} Q_1 + F'_{1 \rightarrow 3} Q_1 + F'_{1 \rightarrow 4} Q_1 + F'_{1 \rightarrow 5} Q_1 + F'_{1 \rightarrow 6} Q_1 \quad (\text{Εξ. 4.1})$$

Η παραπάνω υπόθεση είναι βάσιμη αφού γίνεται κατανομή της ορατής και όχι της θερμικής ακτινοβολίας, η οποία θα ήταν συνάρτηση και της θερμοκρασίας της επιφάνειας που δέχεται την ακτινοβολία. Ομοίως για το *Παράθυρο 2* θα είναι:

Παράθυρο 2

$$Q_2 = F'_{2 \rightarrow 1} Q_2 + F'_{2 \rightarrow 3} Q_2 + F'_{2 \rightarrow 4} Q_2 + F'_{2 \rightarrow 5} Q_2 + F'_{2 \rightarrow 6} Q_2 \quad (\text{Εξ. 4.2})$$

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 \Rightarrow \sum_j F_{i \rightarrow j}^1 Q_1 + \sum_j F_{i \rightarrow j}^2 Q_2 = \sum_j GEOSURF_i \cdot (Q_1 + Q_2) \quad (\text{Εξ. 4.3})$$

αναλύοντας τα δύο αθροίσματα της εξ. 4.3 έχουμε:

$$\begin{aligned} & F_{1 \rightarrow 2}^1 Q_1 + F_{1 \rightarrow 3}^1 Q_1 + \dots + F_{2 \rightarrow 1}^2 Q_2 + F_{2 \rightarrow 3}^2 Q_2 + \dots = \\ & = GEOSURF_1(Q_1 + Q_2) + GEOSURF_2(Q_1 + Q_2) \end{aligned} \quad (\text{Εξ. 4.4})$$

έτσι για παράδειγμα ο υπολογισμός του συντελεστή $GEOSURF$ για την επιφάνεια 3 ισούται με:

$$GEOSURF_3 = \frac{F_{1 \rightarrow 3}^1 Q_1 + F_{2 \rightarrow 3}^2 Q_2}{Q_1 + Q_2} \quad (\text{Εξ. 4.5})$$

δίνοντας έτσι έναν συντελεστή βάσει του οποίου, για δεδομένη γεωμετρία, θα μεταβάλλεται η κατανομή της εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στις εσωτερικές επιφάνειες, συναρτήσει της κατανομής της στα εξωτερικά παράθυρα του χώρου. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία σε κάποιον εσωτερικό τοίχο j , θα είναι λοιπόν:

$$Q_{sol,dir,j} = GEOSURF_j \cdot Q_{sol,dir,tot} \quad (\text{Εξ. 4.6})$$

όπου:

$$Q_{sol,dir,tot} = \sum_{j=1}^6 Q_{sol,dir,j} \quad (\text{Εξ. 4.7})$$

Όπως προαναφέρθηκε, το παραπάνω μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί για γεωμετρία που περιέχει από ένα έως πέντε ανοίγματα, με τις εξ. 4.3–4.5 να μεταβάλλονται αντίστοιχα. Από την εξ. 4.5 προκύπτει επίσης ότι στην περίπτωση που η εξεταζόμενη γεωμετρία διαθέτει ένα και μόνο εξωτερικό παράθυρο ($Q_2=0$), οι συντελεστές $GEOSURF$ συμπίπτουν με τους συντελεστές μορφής (*View Factors, F*).

4.3 Ηλιακό ισοζύγιο παραθύρου (NTYPE 903)

Το ισοζύγιο αυτό δείχνει πόση ηλιακή ακτινοβολία εμποδίζεται και πόση εισέρχεται σε μια ζώνη, μέσω ενός εξωτερικού παραθύρου [8]. Εάν το *NTYPE 903* ζητηθεί ως έξοδος από τον χρήστη του *TRNSYS*, τότε αυτομάτως δημιουργείται ένα εξωτερικό αρχείο με μορφή *SOLAR_WIN_N.BAL* (όπου N είναι ο αριθμός επιφάνειας του παραθύρου), το οποίο περιέχει όλες τις μεταβλητές, που εξηγούνται παρακάτω, για κάθε ώρα προσομοίωσης. Επειδή πρωτεύον σκοπός αυτού του ισοζυγίου είναι να παρουσιάζει την απόδοση ενός παραθύρου και των διατάξεων σκιασμού, που πιθανόν να περιέχει, μόνο η εισερχόμενη, από εξωτερικό παράθυρο, ηλιακή ακτινοβολία λαμβάνεται υπόψη. Η ανακλώμενη από το δωμάτιο ακτινοβολία ή η εισερχόμενη από άλλα παράθυρα ηλιακή ακτινοβολία, εξαιρούνται από το ισοζύγιο. Η χαρακτηριστική του εξίσωση είναι:

$$\begin{aligned} \text{BAL_QSOL3} = & \text{QW_EXT_SOL} - \text{QW_BLK_ESHD} & (\text{Εξ. 4.8}) \\ & - \text{QW_BLK_FRAM} - \text{QW_BLK_REFGL} - \text{QW_SOLABSO1} \\ & - \text{QW_BLK_REF_ISHAD} - \text{QW_SOLABSO2} \\ & - \text{QSHF_WIN_PR} - \text{QW_TRANS_SOL} & [\text{kJ/h}] \end{aligned}$$

όπου:

Ισοζύγιο

$\text{BAL_QSOL3} =$ ηλιακό ισοζύγιο για ένα εξωτερικό παράθυρο (πρέπει πάντα να ισούται με μηδέν)

Μέγιστα κέρδη

$\text{QW_EXT_SOL} =$ συνολική εξωτερική ηλιακή ακτινοβολία σε εξωτερικό παράθυρο, συμπεριλαμβανομένου κουφώματος

Παρεμποδιζόμενα κέρδη

$\text{QW_BLK_REFGL} =$ ηλιακή ακτινοβολία παρεμποδιζόμενη από ανάκλαση στον υαλοπίνακα του εξωτερικού παραθύρου

$\text{QW_BLK_FRAM} =$ ηλιακή ακτινοβολία παρεμποδιζόμενη από το κούφωμα του εξωτερικού παραθύρου

$\text{QW_BLK_ESHD} =$ ηλιακή ακτινοβολία παρεμποδιζόμενη από εξωτερικά σκιάδια

$QW_SOLABSO1$ = ηλιακή ακτινοβολία παρεμποδιζόμενη από απορρόφηση στον υαλοπίνακα του εξωτερικού παραθύρου (μόνο κύρια ηλιακή ακτινοβολία)

$QW_SOLABSO2$ = ηλιακή ακτινοβολία παρεμποδιζόμενη από ανάκλαση στο εσωτερικό σκιάδιο (μέρος της οποίας απορροφάται και εξέρχεται, μόνο μεγάλου μήκους κύματος ακτινοβολία)

$QW_BLK_REF_ISHAD$ = ηλιακή ακτινοβολία παρεμποδιζόμενη από ανάκλαση στο εσωτερικό σκιάδιο (μόνο μικρού μήκους κύματος ακτινοβολία)

Κέρδη ζώνης

$QSHF_WIN_PR$ = δευτερεύουσα θερμική ροή εξωτερικού παραθύρου (μόνο κύρια ακτινοβολία), ανακλώμενη ακτινοβολία ή ακτινοβολία από άλλα παράθυρα εξαιρούνται

QW_TRANS_SOL = μετάδοση μικρού μήκους ακτινοβολίας στην ζώνη, μέσω εξωτερικού παραθύρου (αυτό είναι το μέγεθος ακτινοβολίας που χρησιμοποιεί ο κώδικας *VFCALC* για τον υπολογισμό των *GEOSURF*, Σχήμα 4.1, §4.2)

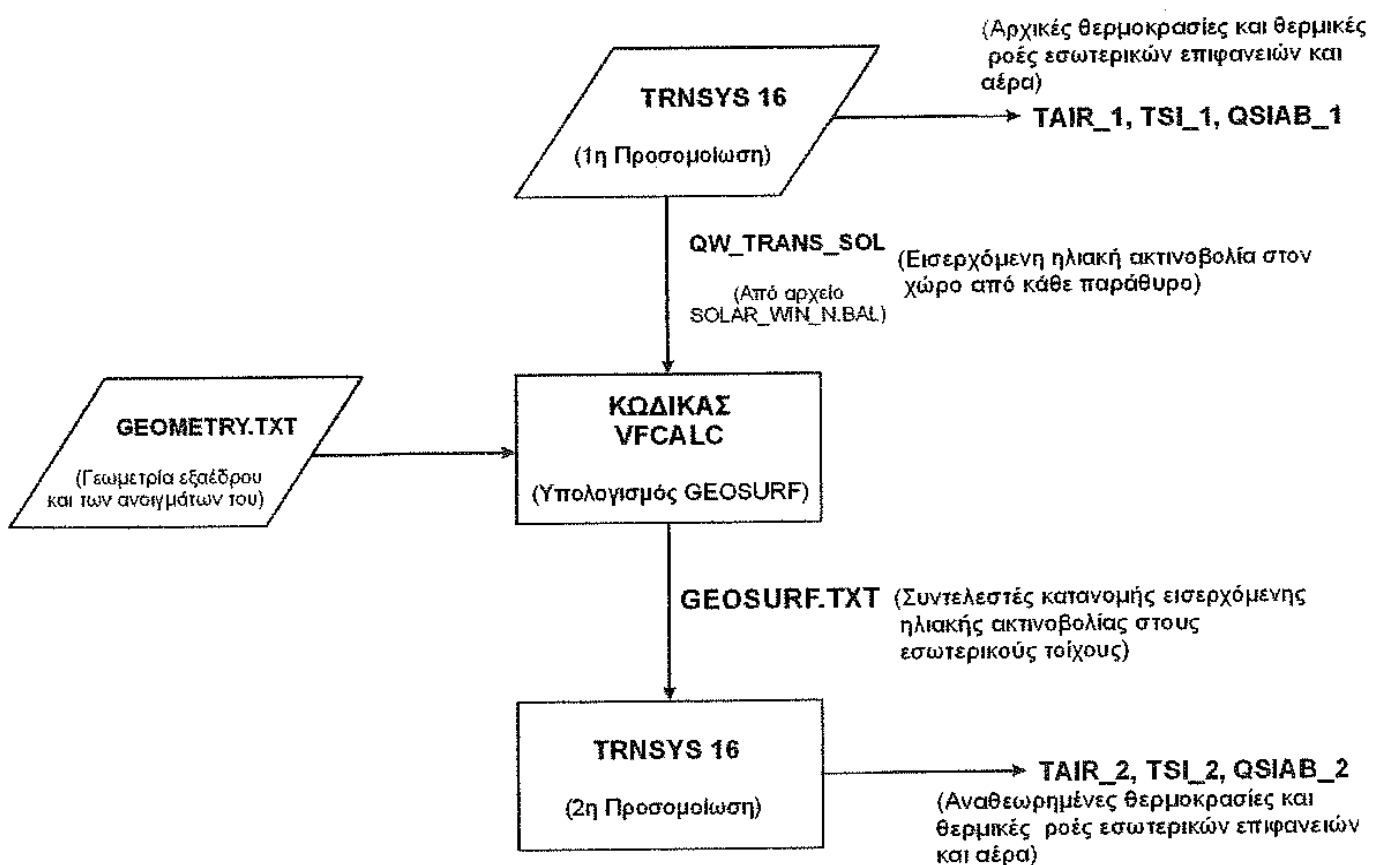
Η απόδοση ενός παραθύρου και των διατάξεων σκίασης που αυτό περιέχει υπολογίζεται με μια από τις ακόλουθες σχέσεις:

$$gtot = (QW_TRANS_SOL + QSHF_WIN_PR) / QW_EXT_SOL \quad (Εξ. 4.9)$$

$$gtot = fc_Eshade \cdot gframe \cdot gglas \cdot fc_ishade \quad (Εξ. 4.10)$$

4.4 Διάγραμμα ροής αριθμητικής διαδικασίας

Σε πρώτη φάση γίνεται προσομοίωση εξάεδρης γεωμετρίας με το πρόγραμμα *TRNSYS*, όπου οι τιμές των παραγόντων *GEOSURF* υπολογίζονται με την βοήθεια της μεθόδου του λόγου των επιφανειών (§ 3.4.8). Τα δεδομένα εξόδου που λαμβάνονται από την πρώτη προσομοίωση χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα δεδομένα τα οποία σε συνδυασμό με κάποια που δίδονται από τον χρήστη, διαβάζονται από τον κώδικα *VFCALC* ώστε να υπολογιστούν οι συντελεστές *GEOSURF*. Στην συνέχεια οι συντελεστές επανεισάγονται στον κώδικα του *TRNSYS* και η διαδικασία της προσομοίωσης επαναλαμβάνεται, για τις ίδιες ακριβώς συνθήκες (Παράρτημα 1). Τα δεδομένα που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία (*TAIR*=θερμοκρασία αέρα ζώνης [°C], *TSI*=θερμοκρασία εσωτερικής επιφάνειας *n* [°C], *QSIAB*=άμεση και διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία που απορροφάται από την εσωτερική επιφάνεια *n* [kJ/hr]), είναι αυτά που προέρχονται από τις δύο προσομοιώσεις και βοηθήσουν ώστε να γίνουν οι συγκρίσεις μεταξύ των δύο περιπτώσεων διαφορετικών *GEOSURF*. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της όλης διαδικασίας.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής διαδικασίας

4.5 Εφαρμογή του κώδικα

Ο κώδικας *VFCALC*, ο οποίος έχει ως στόχο τον υπολογισμό των συντελεστών διανομής της άμεσης ακτινοβολίας στις εσωτερικές επιφάνειες κλειστού χώρου *GEOSURF*, κατασκευάστηκε εξ' ολοκλήρου σε γλώσσα προγραμματισμού *FORTRAN* [9]. Στο σημείο αυτό πρέπει να πούμε ότι ο κώδικας *VFCALC* είναι κατασκευασμένος για απλή γεωμετρία εξαέδρου, η οποία μπορεί να περιέχει από ένα έως πέντε ανοίγματα, ένα σε κάθε εξωτερική επιφάνεια. Τα δεδομένα εισόδου που απαιτούνται κατά την εκτέλεσή του είναι:

1. Το μέγεθος *Q_TRANS_SOL* [*kJ/h*], το οποίο μεταβάλλεται ανα ώρα για κάθε εξωτερικό παράθυρο. Όπως προαναφέρθηκε οι τιμές του λαμβάνονται από αρχείο της μορφής *SOLAR_WIN_N.BAL*, το οποίο δημιουργείται από το *TRNSYS* ξεχωριστά για κάθε εξωτερικό παράθυρο.
2. Το αρχείο *GEOMETRY.TXT* (Σχήμα 4.1), το οποίο περιέχει πληροφορίες τόσο για την εξάεδρη γεωμετρία, για την οποία θα υπολογιστούν οι παράγοντες *GEOSURF*, όσο και για τις γεωμετρίες των ανοιγμάτων της (διαστάσεις, θέση).

Με την εκκίνησή του ο κώδικας, αφού αναγνώσει το αρχείο *GEOMETRY.TXT*, ζητά από τον χρήστη τα ονόματα των αρχείων που περιέχουν τα ηλιακά ισοζύγια για κάθε εξωτερικό παράθυρο ξεχωριστά. Στην συνέχεια αφού βεβαιωθεί ότι όλες οι γεωμετρίες είναι σωστά ορισμένες και με την χρήση του μαθηματικού μοντέλου της επόμενης ενότητας, δημιουργεί ένα αρχείο, με όνομα *GEOSURF.TXT*, το οποίο περιέχει για κάθε βήμα προσομοίωσης (8760 συνολικά, όσες οι ώρες που έχει ένας χρόνος) την τιμή *GEOSURF*, καθεμιάς από τις έξι εσωτερικές επιφάνειες της γεωμετρίας που μελετάμε.

Όσον αφορά το αρχείο *GEOSURF.TXT*, υπάρχουν δύο σημεία στα οποία θα πρέπει να δοθεί προσοχή. Πρώτα απ' όλα, μελετώντας το ανα σειρά προκύπτει ότι υπάρχουν διαστήματα για τα οποία όλα οι συντελεστές *GEOSURF* ισούνται με μηδέν. Αυτό δεν αποτελεί δείγμα αστοχίας του κώδικα μια και κατά την διάρκεια του έτους είναι λογικό να υπάρχουν διαστήματα κατά τα οποία η τιμή Q_n ισούται με μηδέν, έτσι είναι λογικό η τιμή των *GEOSURF* για εκείνα τα διαστήματα να τίθεται, αυτομάτως από τον κώδικα, ίση με το μηδέν, διότι αν υπολογισθεί βάσει της εξ. 4.5 απειρίζεται. Επιπλέον για της ώρες του χρόνου κατά τις οποίες οι τιμές των *GEOSURF* είναι μη μηδενικές, θα πρέπει το άθροισμα όλων των *GEOSURF* να ισούται με την μονάδα.

Τέλος, αφότου έχει δημιουργηθεί το αρχείο *GEOSURF.TXT*, λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω συνθήκες, εισάγεται στο *TRNSYS*, με την βοήθεια ενός αναγνώστη δεδομένων (*Data Reader*) και επαναλαμβάνεται η διαδικασία της προσομοίωσης. Μετά το πέρας και της δεύτερης προσομοίωσης γίνεται σύγκριση μεταξύ: των λόγων της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κάθε εσωτερική επιφάνεια του εξαέδρου προς την συνολική ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στον χώρο καθώς και των θερμοκρασιών των εσωτερικών επιφανειών και των θερμοκρασιών του αέρα της ζώνης, ανα ώρα προσομοίωσης, για τις δύο περιπτώσεις *GEOSURF*. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το *Παράρτημα 1* αποτελεί εγχειρίδιο χρήσης τόσο του *VFCALC* όσο και του *TRNSYS*, προκειμένου να διεξαχθούν σωστά οι δύο προσομοιώσεις ώστε να έχουν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

5. Προσομοίωση γεωμετρίας ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου

Η πρώτη γεωμετρία για την οποία θα γίνουν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων του *TRNSYS*, για τις περιπτώσεις χρήσης και μη του κώδικα *VFCALC* κατά την προσομοίωση, είναι αυτή του ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου με δύο ανοίγματα (παράθυρα). Μια τέτοια γεωμετρία είναι αρκετά κοντά στις γεωμετρίες θερμοκηπίων, στάβλων ή ακόμη και μονώροφων σπιτιών. Τα ανοίγματα έχουν νότιο και ανατολικό προσανατολισμό αντίστοιχα, έχουν το ίδιο ύψος και είναι τοποθετημένα στα κέντρα των όψεων. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφέρουμε τις παραδοχές που έγιναν προκειμένου τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να γίνουν πιο κατανοητά και επεξεργάσιμα.

1. Το κλιματικό αρχείο που χρησιμοποιήθηκε αναφέρεται στον νομό Καστοριάς.
2. Το υπό-προσομοίωση κτίριο είναι πλήρως μονωμένο ($u=0,045 \text{ W/m}^2\text{K}$), ώστε να μην υπάρχει καμία ροή ενέργειας μεταξύ της τοιχοποιίας του και του περιβάλλοντος.
3. Προκειμένου να μελετηθεί μόνο η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στον χώρο και διαμοιράζεται στις εσωτερικές επιφάνειές του, δεν υπάρχουν συστήματα θέρμανσης, ψύξης, εξαερισμού ή κλιματισμού (*HVAC*) και τα εσωτερικά κέρδη από ανθρώπους, φωτισμό, εξοπλισμό κλπ., θεωρούνται μηδενικά.
4. Μόνο οι απώλειες από φυσικό αερισμό λαμβάνονται υπόψη και θεωρούνται ίσες με $2,2 \text{ ach/h}$ (αλλαγές αέρα/ώρα).
5. Τα παράθυρα είναι φτιαγμένα από διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 10mm και συντελεστή $u=2.83 \text{ W/m}^2\text{K}$.
6. Επειδή ο όγκος των δεδομένων εξόδου για κάθε βήμα προσομοίωσης (8760 βήματα) είναι εξαιρετικά μεγάλος και κατά συνέπεια δύσχρηστος, για τις συγκρίσεις που θα ακολουθήσουν πάρθηκαν ως δείγματα δύο χρονικά διαστήματα από κάθε προσομοίωση. Το πρώτο διαρκεί από την 33^η μέχρι την 41^η ώρα προσομοίωσης και αντιστοιχεί στην 2^η ημέρα του Ιανουαρίου, ενώ το δεύτερο διαρκεί από την 3654^η μέχρι την 3668^η ώρα προσομοίωσης και αντιστοιχεί στην 1^η ημέρα του Ιουνίου. Όπως γίνεται αντιληπτό μιλάμε για τα διαστήματα ηλιοφάνειας

μιας αντιπροσωπευτικής ημέρας του χειμώνα καθώς και του καλοκαιριού αντίστοιχα. Στην συνέχεια υπολογίζονται οι γωνίες ηλιακού αζιμουθίου, ανατολής και δύσης, καθώς και το μέγιστο ηλιακό ύψος για τις μέρες αυτές, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η τροχία την οποία καταγράφει ο ήλιος. Ξεκινώντας από τον υπολογισμό των γωνιών ηλιακού αζιμουθίου έχουμε [10]:

$$\cos(\gamma_s) = [(\sin(\alpha_s) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta))] / [\cos(\alpha_s) \cdot \cos(\varphi)] \quad (\text{Εξ. 5.1})$$

όπου α_s η γωνία ηλιακού ύψους, φ το γεωγραφικό πλάτος και δ η ηλιακή απόκλιση. Μάλιστα για την γωνία δ ισχύει [11]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right) \quad (\text{Εξ. 5.2})$$

όπου n είναι η ημέρα του έτους κατ' αύξοντα αριθμό, με αρχή την 1^η Ιανουαρίου, ενώ για την γωνία α_s ισχύει [11]:

$$\theta_z + \alpha_s = 90^\circ \quad (\text{Εξ. 5.3})$$

όπου θ_z η γωνία ζενίθ, για την οποία ισχύει [11]:

$$\cos\theta_z = \cos\varphi \cos\delta \cos\omega + \sin\varphi \sin\delta \quad (\text{Εξ. 5.4})$$

όπου ω η ωριαία γωνία. Αρχίζοντας από την εξ. 5.2 και θέτοντας $n=2$ και $n=154$, για την 2^η Ιανουαρίου και την 1^η Ιουλίου αντίστοιχα, υπολογίζονται οι ηλιακές αποκλίσεις δ_w και δ_s . Στην συνέχεια θέτοντας $\varphi=40.47^\circ$ [12], $\alpha_s=0$ (λόγω ανατολής/δύσης), σε συνδυασμό με τις δ_w και δ_s , υπολογίζονται οι ηλιακές γωνίες αζιμουθίου ανατολής/δύσης για τις δύο ημέρες, ($\gamma_{s,w}=59,29^\circ$ και $\gamma_{s,s}=119,8^\circ$). Από την εξ. 5.4 και για $\omega=0$ (λόγω ηλιακής μεσημβρίας), προκύπτουν οι γωνίες θ_z και κατά συνέπεια τα μέγιστα ηλιακά ύψη από την εξ. 5.3 ($\alpha_{s,w}=26,8^\circ$ και $\alpha_{s,s}=72,03^\circ$).

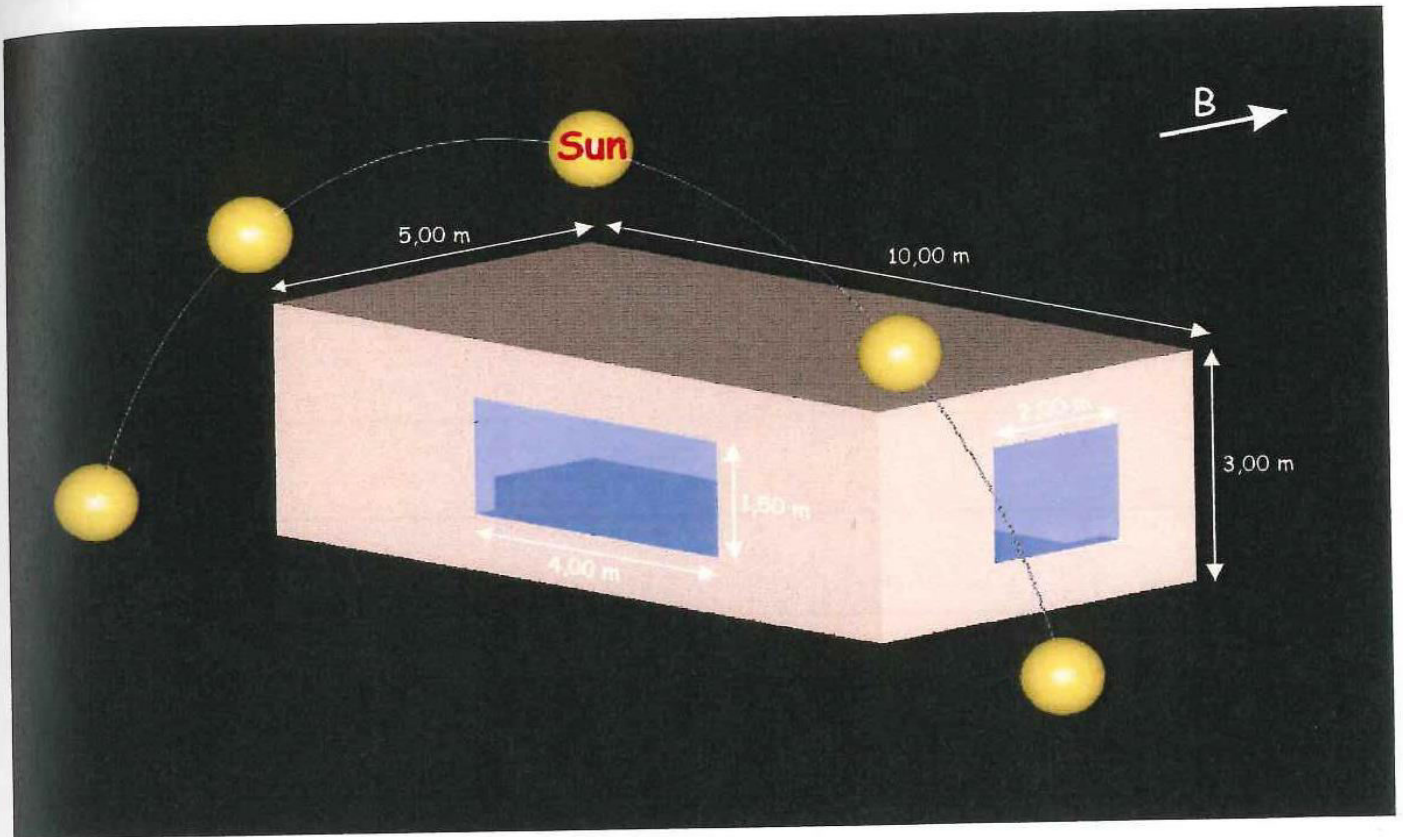
7. Αναφέρεται ξανά ότι για την σύγκριση των αποτελεσμάτων απαιτούνται δύο προσομοιώσεις (Σχήμα 4.1). Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι στην μεν πρώτη οι συντελεστές *GEOSURF* για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες, τίθενται ίσοι με το μηδέν και άρα υπολογίζονται βάσει των λόγων εμβαδών των επιφανειών, ενώ στη δεύτερη υπολογίζονται από τον κώδικα *VFCALC*, όπου η κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στις επιφάνειες γίνεται βάσει συντελεστών μορφής και κατανομής της εισερχόμενης ακτινοβολίας στα παράθυρα.

Στα Σχήματα 5.1 και 5.2 παρουσιάζεται η γεωμετρία του κτιρίου καθώς και των ανοιγμάτων του. Παράλληλα αναπαρίσταται και η τροχιά την οποία ακολουθεί ο ήλιος τις δύο διαφορετικές ημέρες της προσομοίωσης. Μετά το πέρας και των δύο διαδικασιών προσομοίωσης είναι πλέον εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων καθώς και η διεξαγωγή συμπερασμάτων. (Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν η ένδειξη *G0*, αναφέρεται στην προσομοίωση όπου όλοι οι συντελεστές *GEOSURF* υπολογίζονται βάσει του λόγου των επιφανειών, ενώ η ένδειξη *G1* αναφέρεται στην προσομοίωση, κατόπιν χρήσης του κώδικα *VFCALC*.)

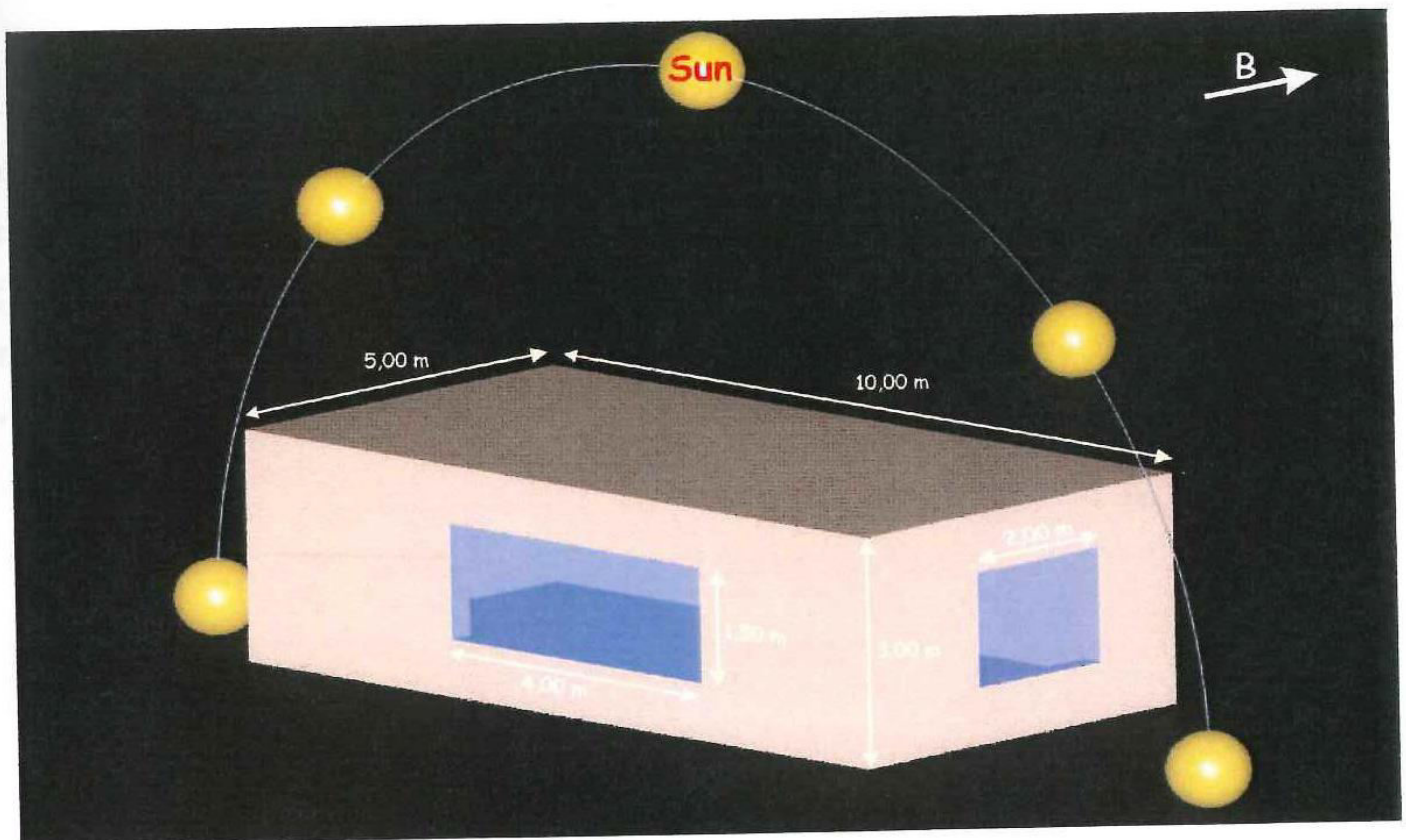
Ενδεικτικά, στον Πίνακα 5.1, αναφέρονται οι τιμές των συντελεστών μορφής του κάθε παραθύρου προς τις άλλες εσωτερικές επιφάνειες, όπως υπολογίστηκαν από τον κώδικα *VFCALC*.

Συντελεστές Μορφής	Νότιο παράθυρο	Ανατολικό παράθυρο
Βόρειος τοίχος	0,226	0,163
Νότιος τοίχος	-	0,163
Ανατολικός τοίχος	0,051	-
Δυτικός τοίχος	0,051	0,046
Οροφή	0,336	0,314
Δάπεδο	0,336	0,314
Σύνολο	1,000	1,000

Πίνακας 5.1: Συντελεστές μορφής μεταξύ παραθύρων και εσωτερικών επιφανειών.
για γεωμετρία ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου



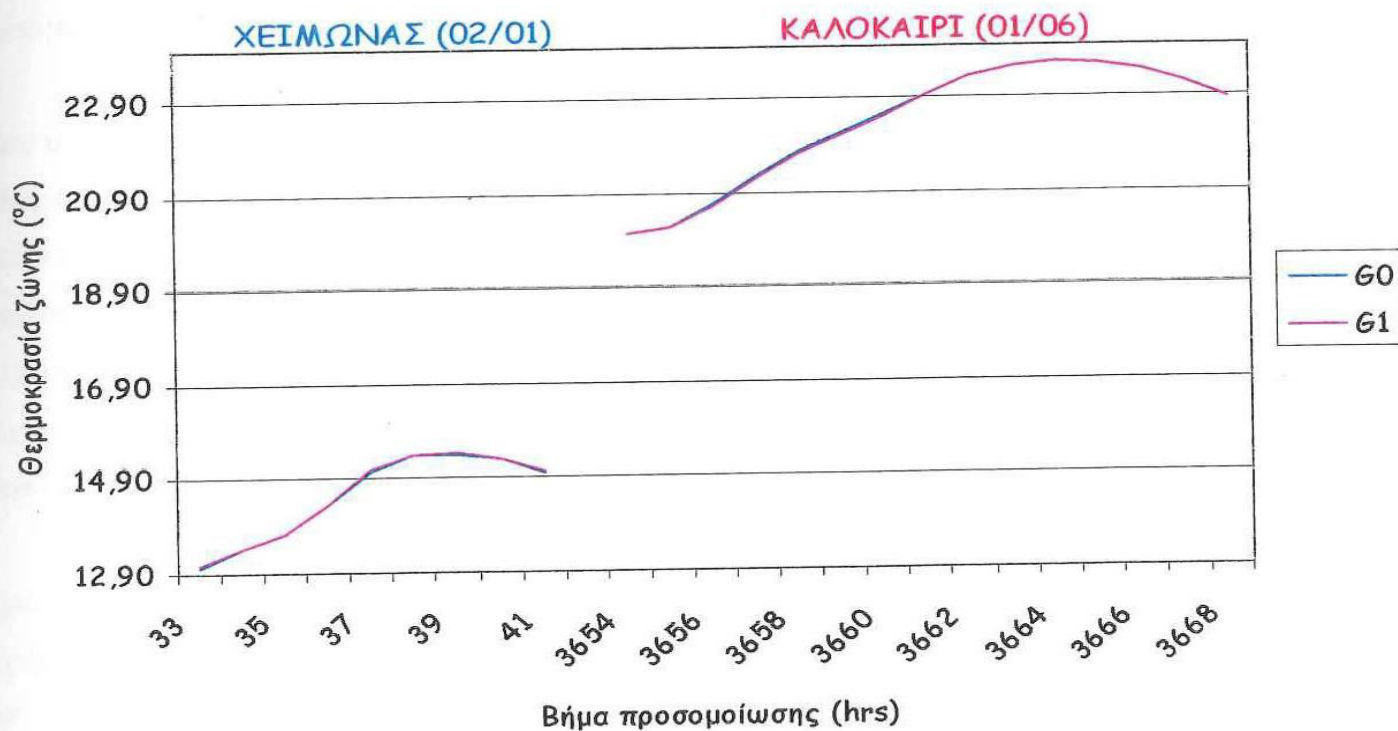
Σχήμα 5.1: Πλήρης γεωμετρία ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου και ηλιακή τροχιά κατά την 2^η ημέρα του Ιανουαρίου.



Σχήμα 5.2: Πλήρης γεωμετρία ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου και ηλιακή τροχιά κατά την 1^η ημέρα του Ιουνίου.

5.1 Σύγκριση θερμοκρασιών ζώνης

Σε πρώτη φάση, το Σχήμα 5.3 παρουσιάζει τις τιμές θερμοκρασιών ζώνης για κάθε μία από τις ώρες ηλιοφάνειας των δύο ημερών της προσομοίωσης.



Σχήμα 5.3: Θερμοκρασίες ζώνης

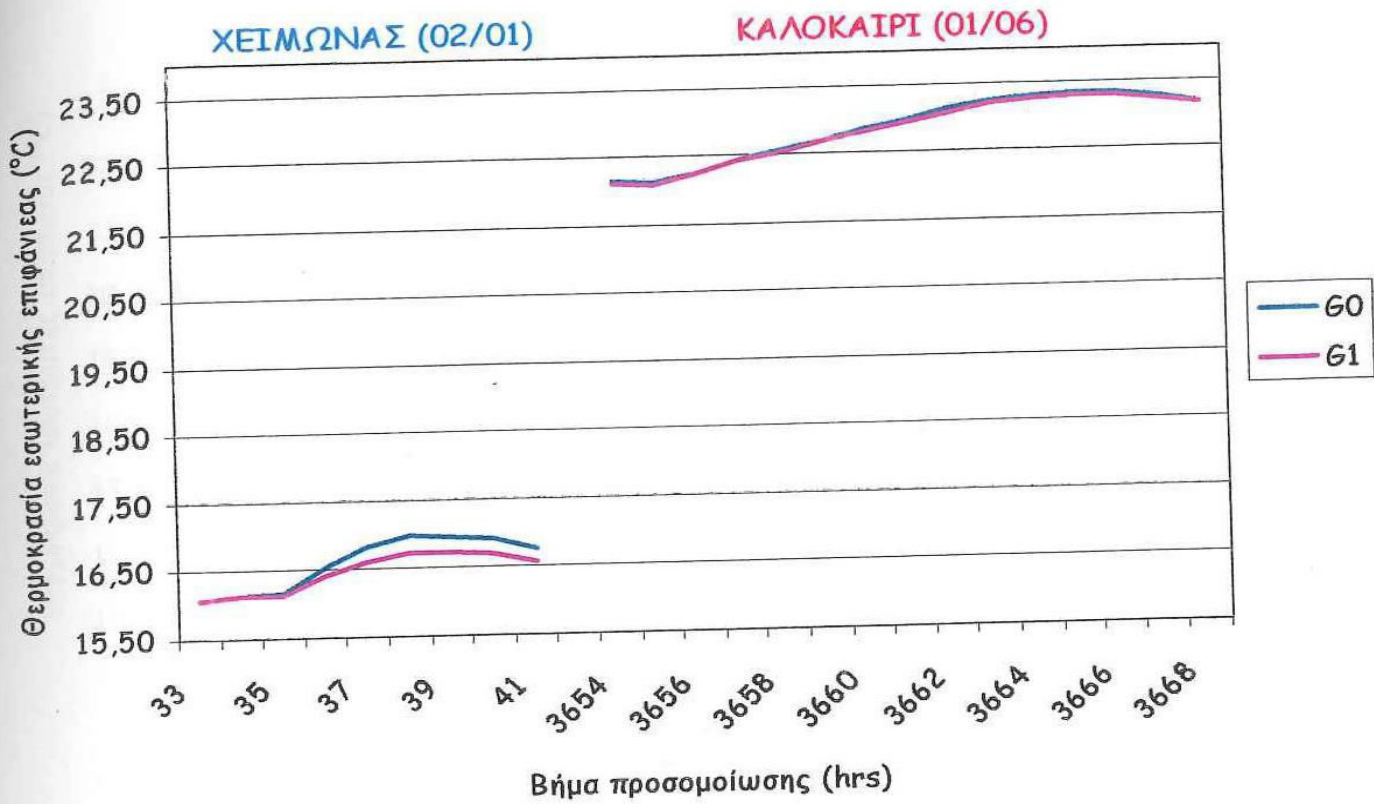
Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει ότι η χρήση του κώδικα *VFCALC*, επηρεάζει ελάχιστα την θερμοκρασία της ζώνης. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο διότι η μεταβολή της κατανομής και όχι του συνόλου, της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό ενός χώρου είναι ένας παράγοντας ο οποίος από μόνος του δεν μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την συνολική θερμοκρασία του χώρου.

5.2 Σύγκριση θερμοκρασιών των εσωτερικών επιφανειών της ζώνης

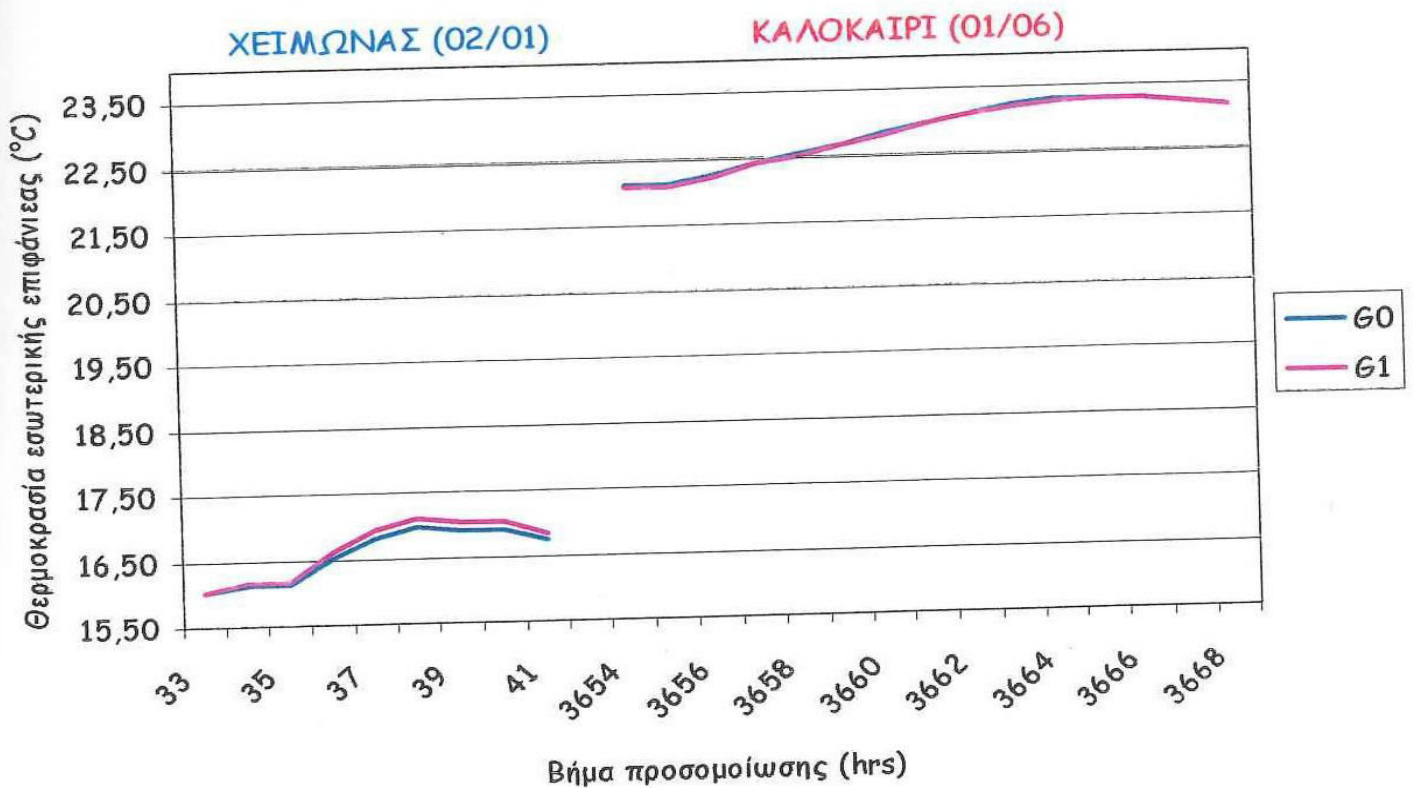
Τα Σχήματα 5.4-5.9 παρουσιάζουν τις θερμοκρασίες, καθεμιάς από τις εσωτερικές επιφάνειες του εξαέδρου, για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης. Κατά την διάρκεια της θερινής ημέρας παρατηρούνται μικρές διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών των επιφανειών και στις δύο προσομοιώσεις.

Όσον αφορά τον χειμώνα, η χαμηλή πορεία του ήλιου έχει ως αποτέλεσμα το νότιο παράθυρο να δέχεται την μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας, κι έτσι το δάπεδο, η οροφή και ο βόρειος τοίχος, όπου και κυρίως προσπίπτει, να θερμαίνονται περισσότερο. Το παραπάνω γεγονός απεικονίζεται στα Σχήματα 5.5, 5.8 και 5.9. Προκειμένου όμως να διατηρηθεί η θερμοκρασιακή ισορροπία, η αύξηση των θερμοκρασιών δαπέδου, οροφής και του βόρειου τοίχου, οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του νοτίου, ανατολικού και δυτικού τοίχου.

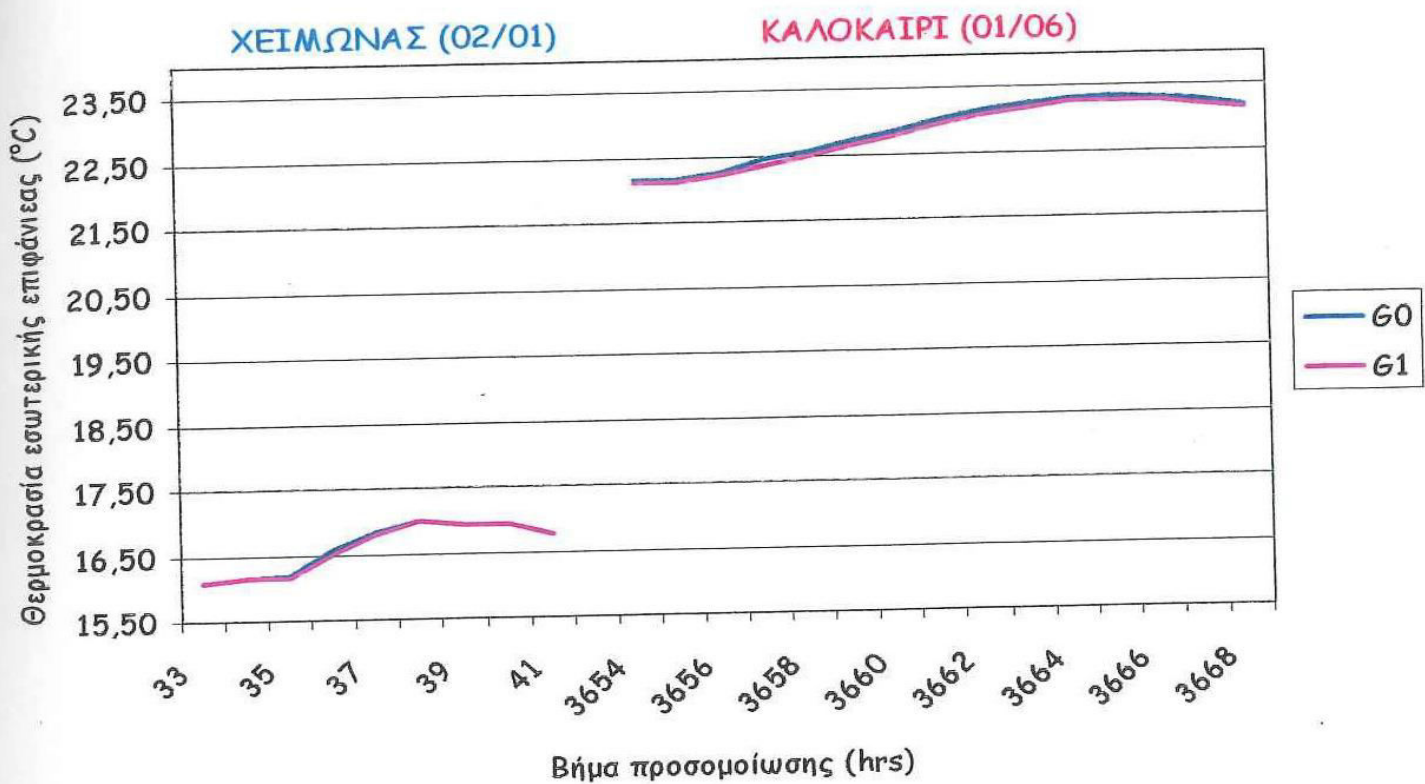
Η μειωμένη θερμοκρασία που παρουσιάζει ο δυτικός, τοίχος κατά την διάρκεια του χειμώνα (Σχήμα 5.7), εξηγείται από το γεγονός ότι το ανατολικό παράθυρο δεν δέχεται αρκετή ακτινοβολία κατά την διάρκεια της ημέρας, αφού ο ήλιος ανατείλει με γωνία αζιμουθίου $\gamma_{s,w}=59,29^\circ$, από τον άξονα B-N. Τέλος, το δάπεδο και η οροφή παρουσιάζουν τις ίδιες θερμοκρασίες, επειδή τα ανοίγματα είναι συμμετρικά τοποθετημένα.



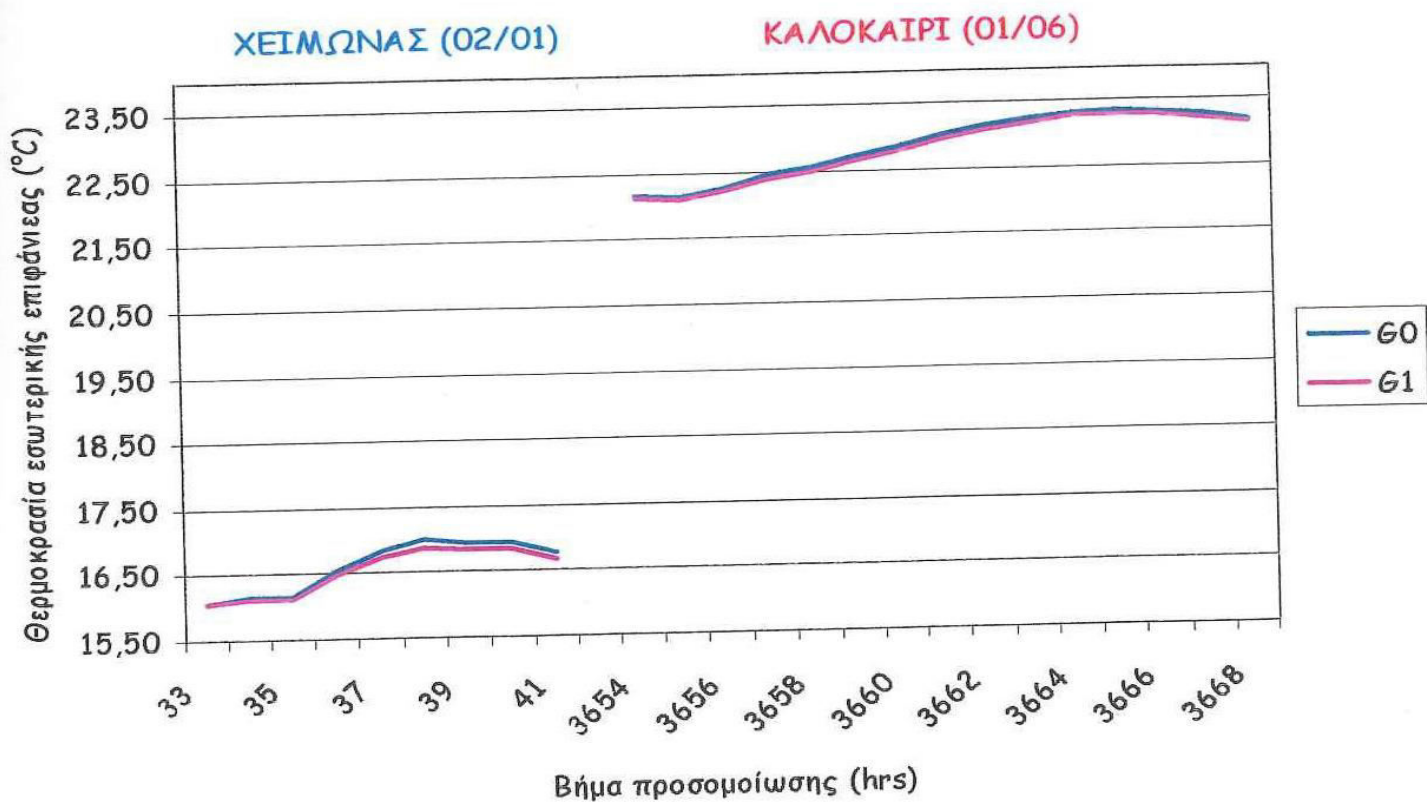
Σχήμα 5.4: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του **ΝΟΤΙΟΥ** τοίχου



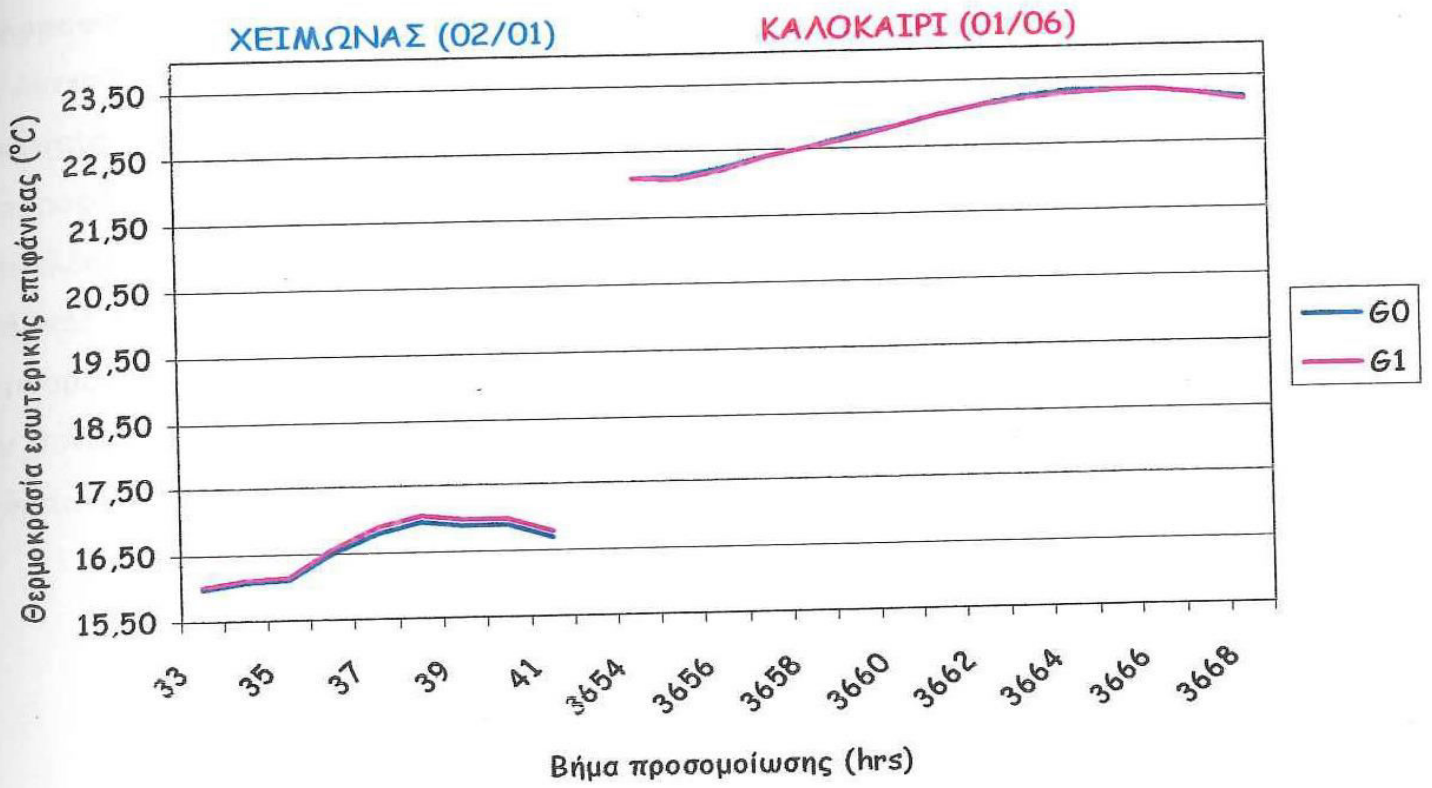
Σχήμα 5.5: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του **ΒΟΡΕΙΟΥ** τοίχου



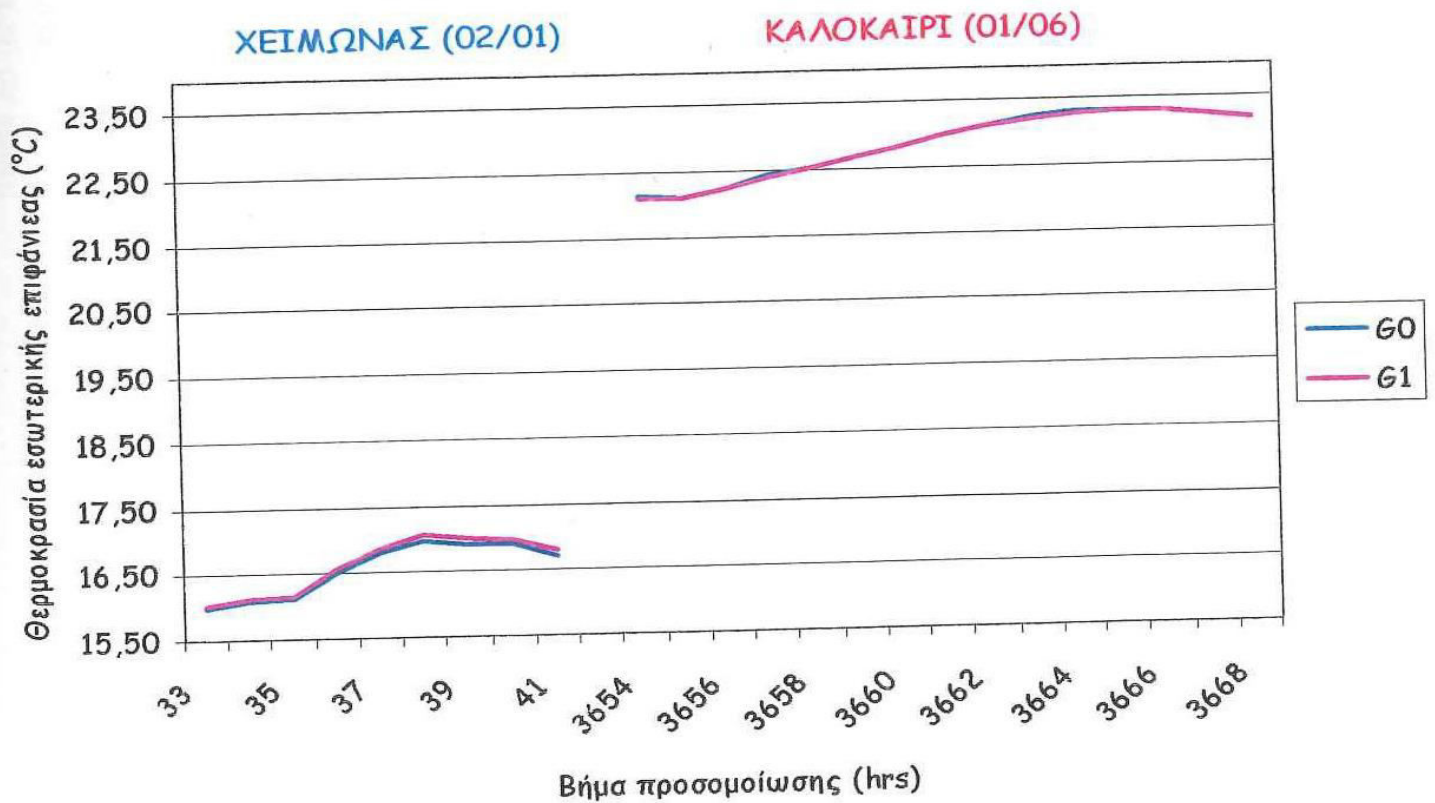
Σχήμα 5.6: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ τοίχου



Σχήμα 5.7: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του ΔΥΤΙΚΟΥ τοίχου



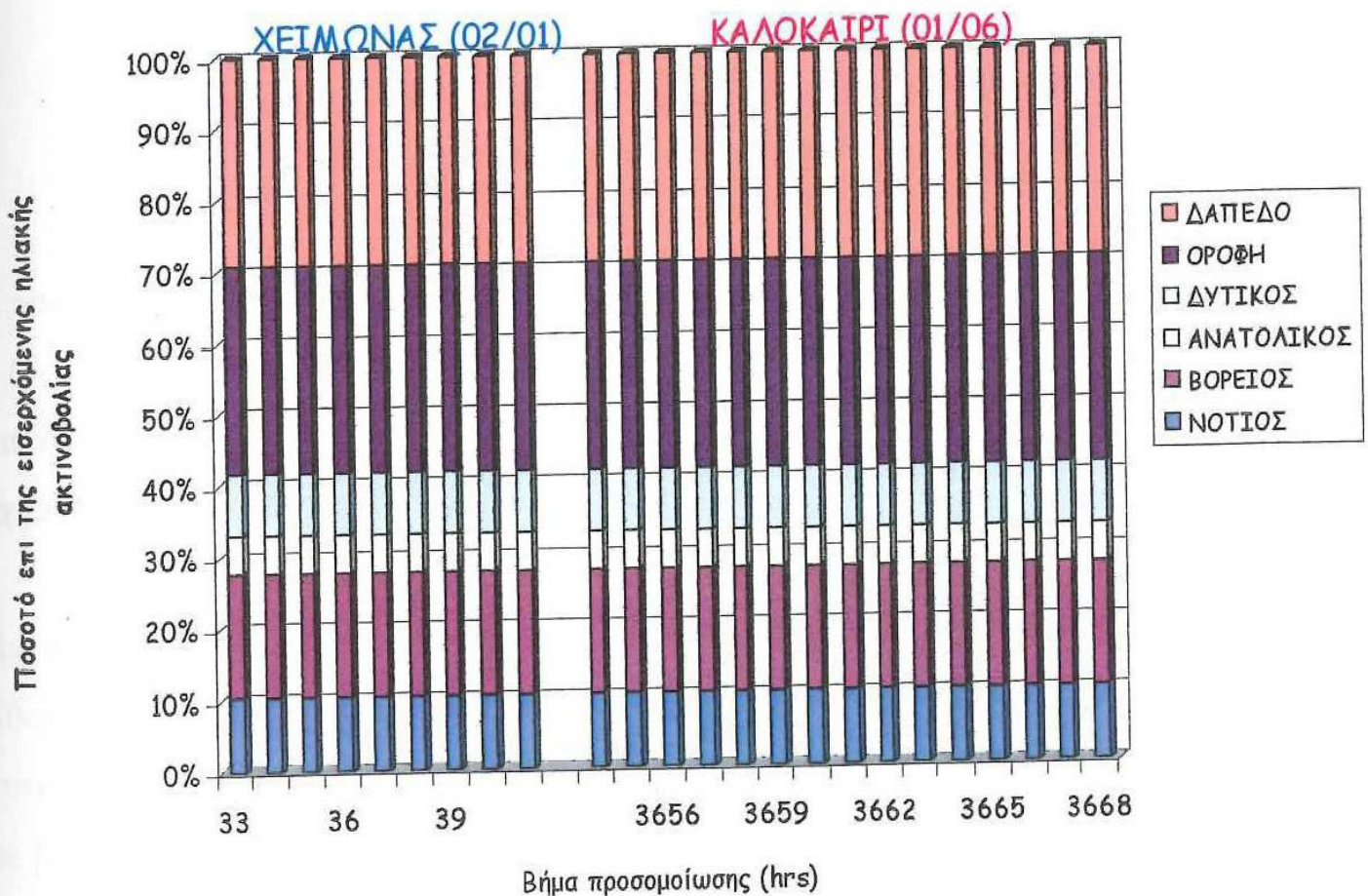
Σχήμα 5.8: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας ΟΡΟΦΗΣ



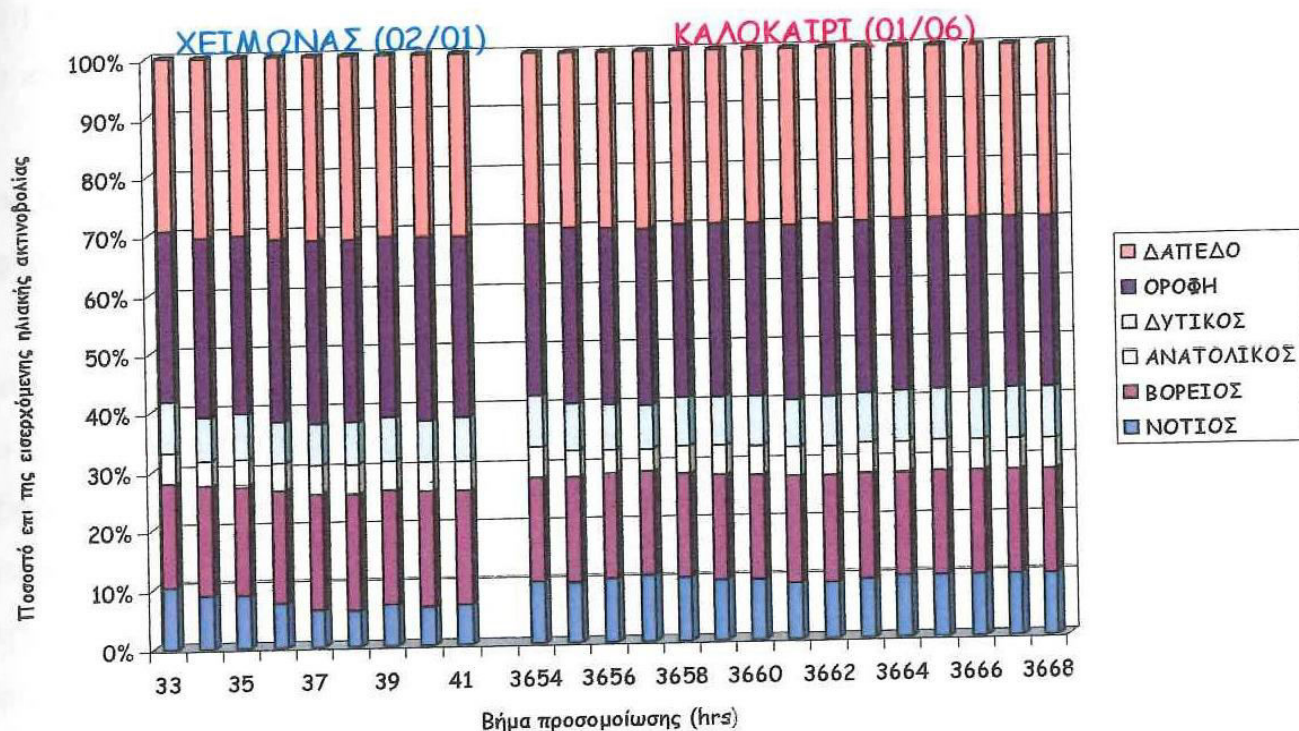
Σχήμα 5.9: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας ΔΑΠΕΔΟΥ

5.3 Σύγκριση ποσοτών της συνολικά εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται στις εσωτερικές επιφάνειες

Τα διαγράμματα που ακολουθούν αναφέρονται στα ποσοστά της άμεσης ακτινοβολίας, που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο από όλα τα ανοίγματα τις γεωμετρίας, και τελικά απορροφάται από κάθε εσωτερική επιφάνεια. Για καλύτερη κατανόηση και επεξεργασία, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε δύο είδη διαγραμμάτων. Στο πρώτο είδος ανήκουν τα Σχήματα 5.10 και 5.11, τα οποία παρουσιάζουν για κάθε ώρα προσομοίωσης το ποσοστό ακτινοβολίας που απορροφάται από κάθε εσωτερική επιφάνεια τοίχου, κάθε ράβδος αποτελεί την συνολικά εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στον χώρο. Στο δεύτερο είδος ανήκουν τα Σχήματα 5.12-5.17, που περιέχουν τα ποσοστά απορρόφησης για κάθε τοίχο ξεχωριστά.



Σχήμα 5.10: Ποσοστά απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων (G_0)



Σχήμα 5.11: Ποσοστά απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων (G_1)

Η πρώτη ουσιαστική διαφορά μεταξύ των παραπάνω διαγραμμάτων είναι ότι στο μεν Σχήμα 5.10 το ποσοστό της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται στην εσωτερική επιφάνεια του κάθε τοίχου παραμένει σταθερό καθ' όλη την διάρκεια του έτους, ενώ στο Σχήμα 5.11 δεν παρατηρείται κάτι αντίστοιχο.

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση της προσομοίωσης G_0 , όλοι οι συντελεστές $GEOSURF$ τίθενται ίσοι με το μηδέν, όταν συμβεί κάτι τέτοιο τότε το $TRNSYS$ μεταχειρίζεται την συνολικά εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία ως διάχυτη και την διαμοιράζει σε κάθε επιφάνεια με βάση τον λόγο του εμβαδού της προς το συνολικό εμβαδό των εσωτερικών επιφανειών, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η επιφάνεια των παράθυρων ή η κατανομή της ακτινοβολίας στα παράθυρα λόγω της πορείας του ηλίου (§3.4.8). Επειδή λοιπόν το ποσοστό, που εξετάζεται, υπολογίζεται βάσει ενός σταθερού γεωμετρικού μεγέθους (εμβαδό) είναι κι αυτό σταθερό.

Στην περίπτωση όμως της προσομοίωσης G_1 , οι συντελεστές $GEOSURF$ υπολογίζονται από τον κώδικα $VFCALC$ (§ 4.5), ο οποίος εκτός από τα γεωμετρικά μεγέθη του χώρου και των ανοιγμάτων του, λαμβάνει υπόψη και την κατανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στον χώρο. Έτσι με την χρήση του κώδικα, καθένα ποσοστό αλλάζει ανα ώρα,

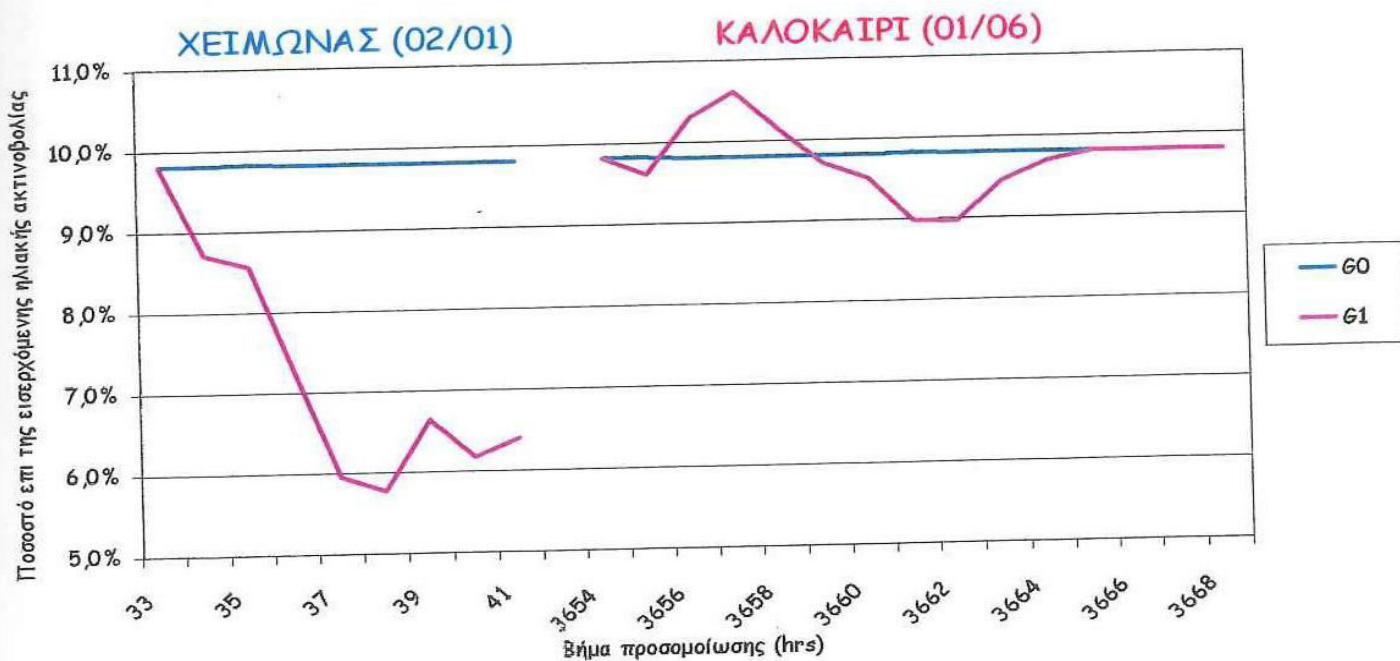
ακόμη και αν πρόκειται για την ίδια επιφάνεια, πράγμα που φέρνει την προσομοίωση ένα βήμα πιο κοντά στην πραγματικότητα.

Όσον αφορά τις τιμές των ποσοστών που απεικονίζονται στα Σχήματα 5.10 και 5.11, αναφέρονται τα εξής:

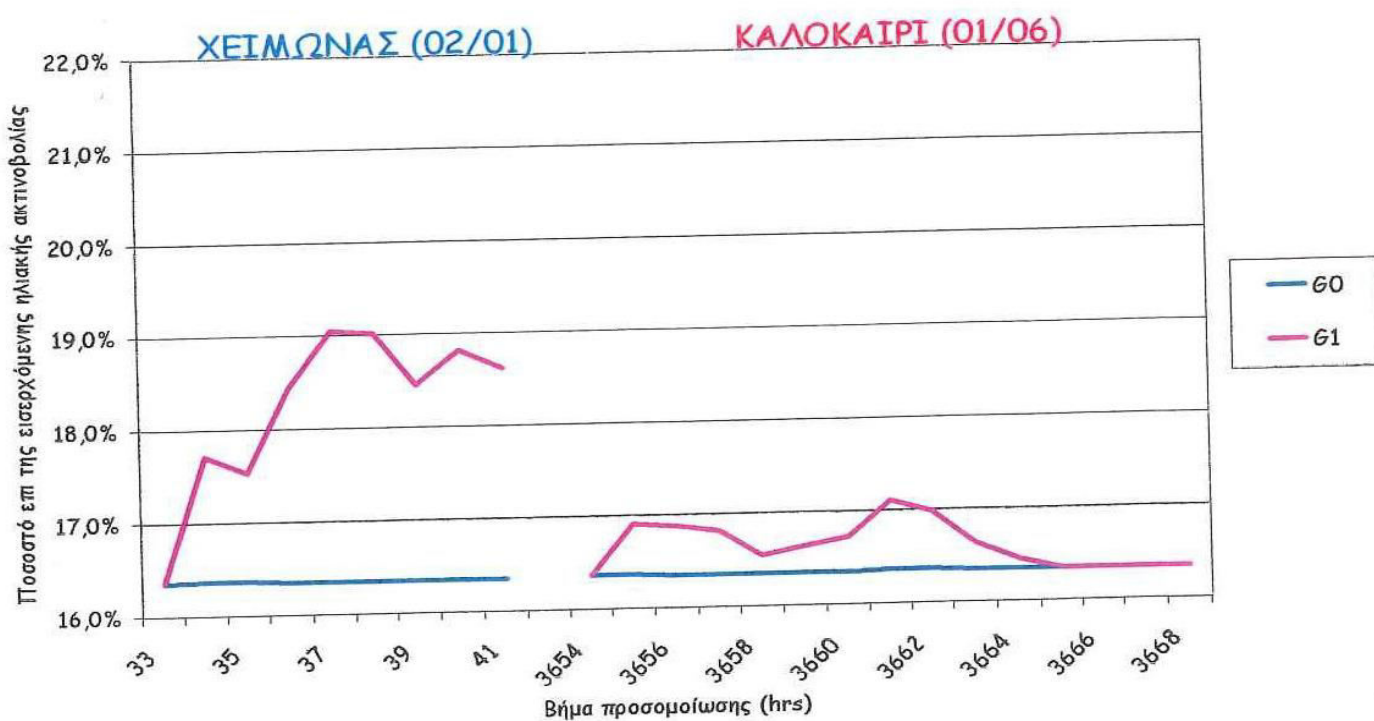
Πρώτα απ' όλα, γίνεται σαφές ότι το δάπεδο και η οροφή είναι οι μεγαλύτεροι δέκτες ηλιακής ακτινοβολίας και στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζοντας περίπου ίδια ποσοστά. Αυτό συμβαίνει λόγω της θέσης και του εμβαδού τους. Το δάπεδο είναι η πρώτη επιφάνεια στην οποία προσπίπτει η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στον χώρο, από οποιοδήποτε άνοιγμα. Επομένως είναι λογικό το μεγαλύτερο μέρος της να απορροφάται από αυτό. Η οροφή, λόγω μεγάλης ελεύθερης επιφάνειας, αντίστοιχης με αυτή του πατώματος, απορροφά το μεγαλύτερο μέρος της διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται στην ζώνη.

Επιπλέον σε κάποια βήματα, κατά την διάρκεια της δεύτερης προσομοίωσης, μειώνονται τα ποσοστά απορρόφησης των εσωτερικών επιφανειών του νοτίου και του ανατολικού τοίχου, λόγω της θέσης του ηλίου, με παράλληλη όμως αύξηση των ποσοστών των εσωτερικών επιφανειών του βορείου και του δυτικού τοίχου αντίστοιχα.

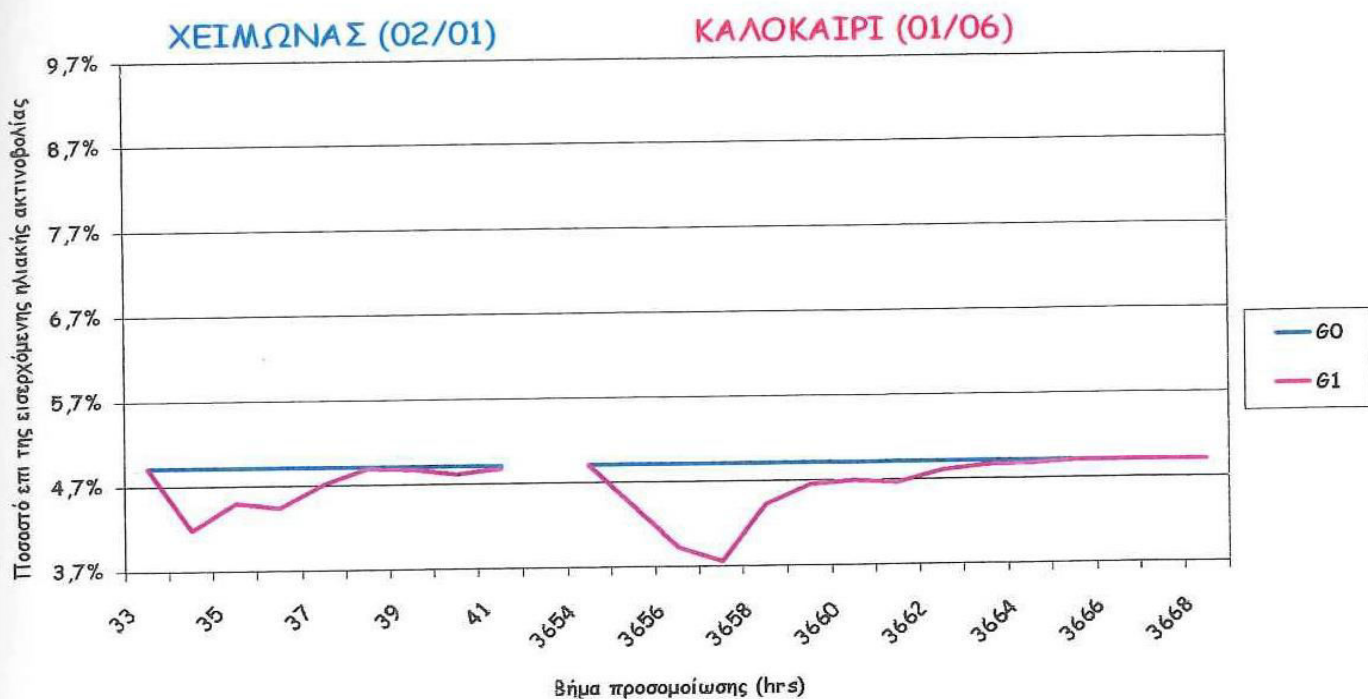
Τα Σχήματα 5.12-5.17 βοηθούν, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η διανομή της ακτινοβολίας σε κάθε εσωτερική επιφάνεια και να εκτιμηθεί η χρησιμότητα του κώδικα *VFCALC*.



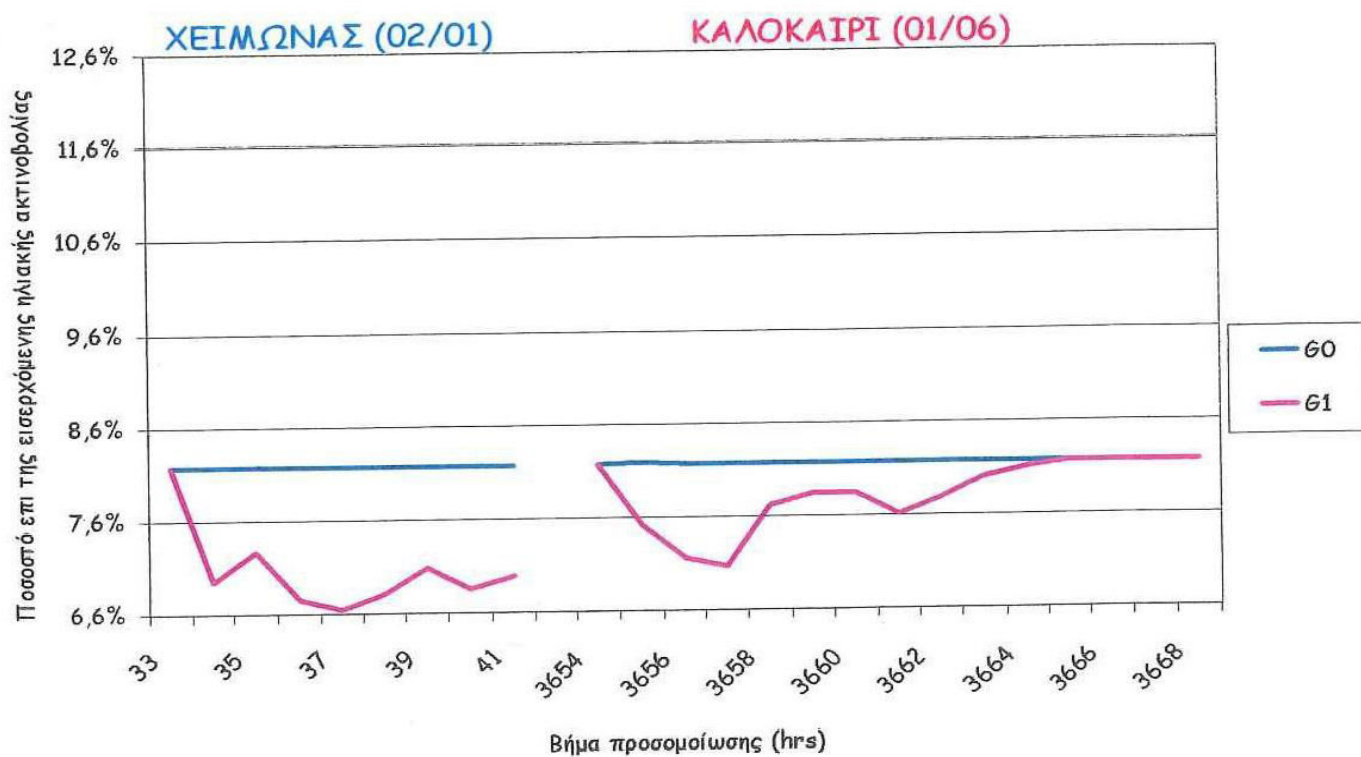
Σχήμα 5.12: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του **NOTIOY** τοίχου



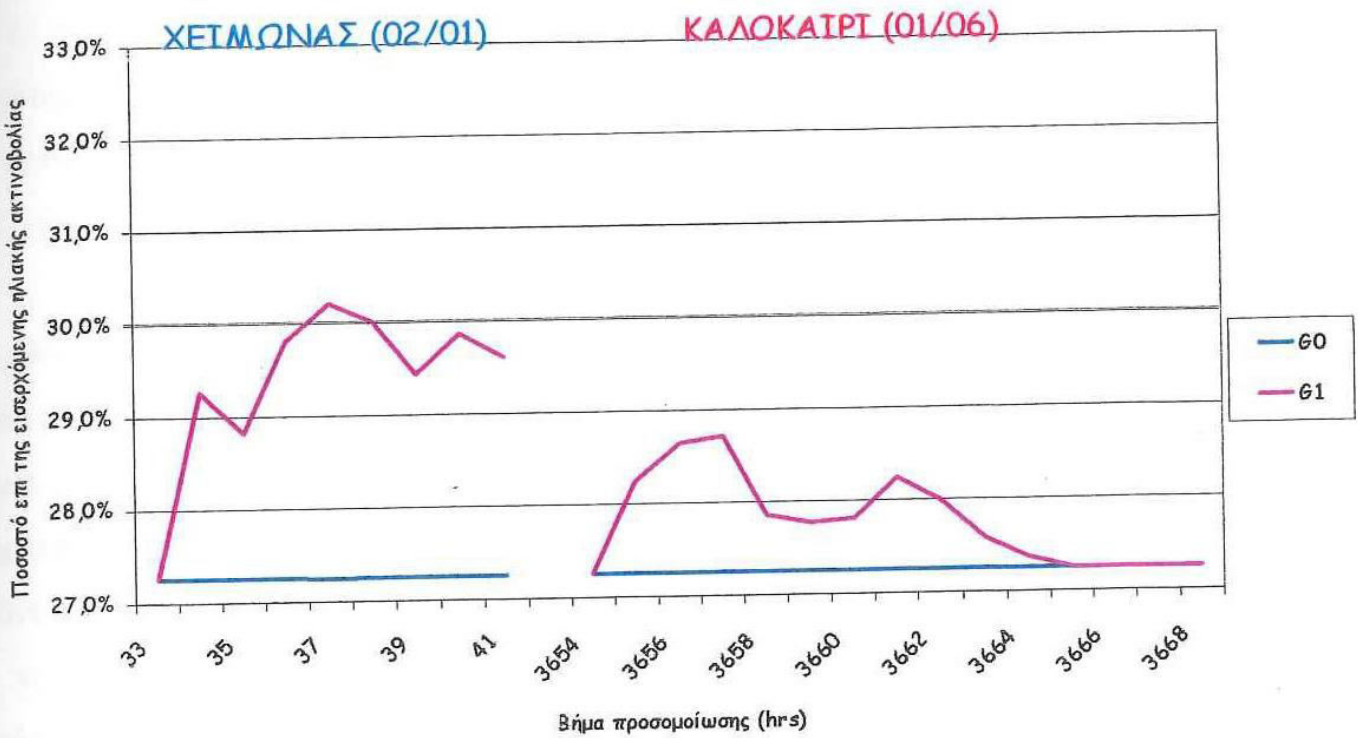
Σχήμα 5.13: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του **BOPEIOY** τοίχου



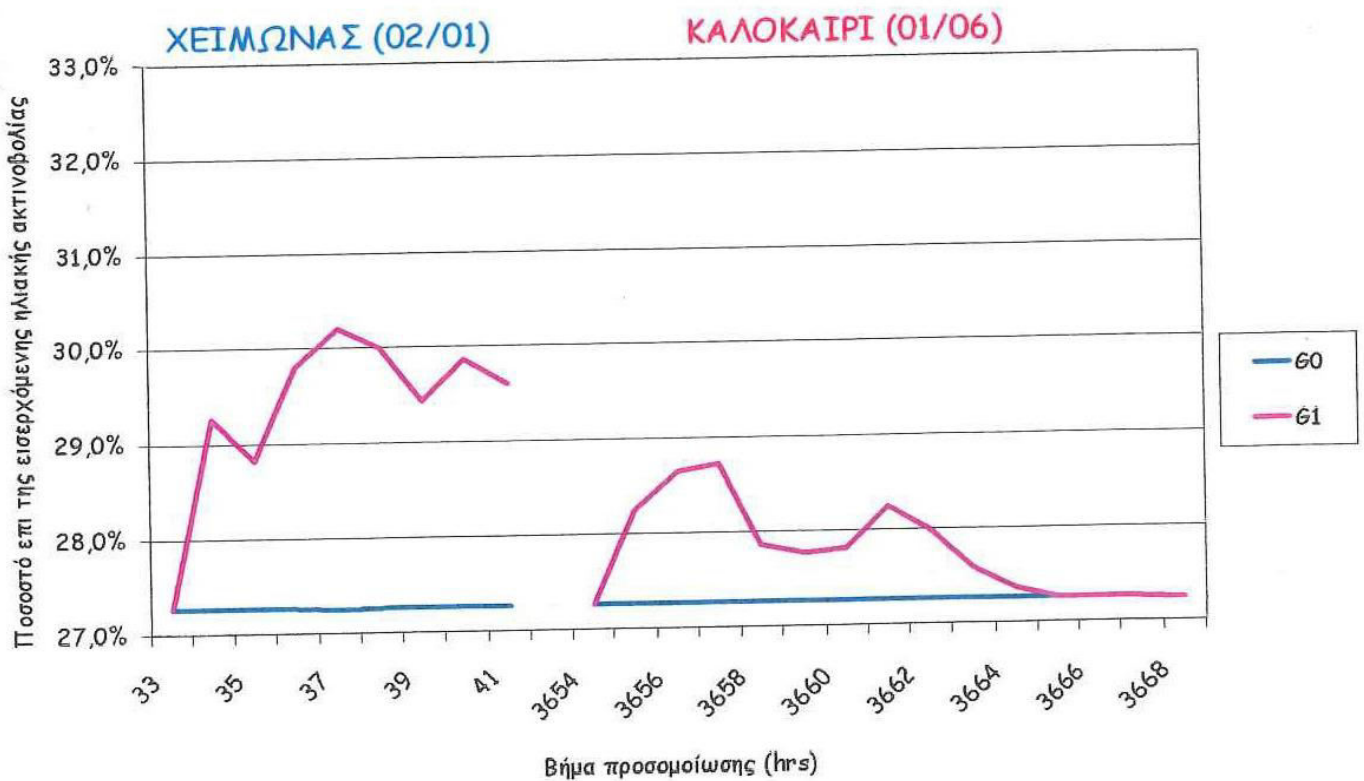
Σχήμα 5.14: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για εσωτερική επιφάνεια του ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ τοίχου



Σχήμα 5.15: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του ΔΥΤΙΚΟΥ τοίχου



Σχήμα 5.16: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια της ΟΡΟΦΗΣ



Σχήμα 5.17: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του ΔΑΠΕΔΟΥ

Πρώτα από όλα πρέπει να αναφερθεί ότι σε κάθε διάγραμμα θα σχολιαστούν τα ποσοστά απορρόφησης που προέρχονται από την προσομοίωση $G1$, διότι όπως προαναφέρθηκε, κατά την προσομοίωση $G0$ τα ποσοστά απορρόφησης παραμένουν σταθερά, λόγω του τρόπου υπολογισμού των συντελεστών $GEOSURF$ (λόγος εμβαδού).

Ξεκινώντας από τον νότιο τοίχο (Σχήμα 5.12), προκύπτει ότι κατά την διάρκεια της χειμερινής ημέρας το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται και κατά συνέπεια προσπίπτει επάνω στη επιφάνεια του τοίχου μειώνεται σημαντικά, επειδή η άμεση ακτινοβολία που εισέρχεται από το ανατολικό άνοιγμα είναι μέγιστη στην αρχή της ημέρας και στην συνέχεια μειώνεται συνεχώς, επομένως αντίστοιχα μειώνεται και η ακτινοβολία που απορροφάται από τον νότιο τοίχο, μιας και δεν υπάρχουν άλλα ανοίγματα απέναντι από την εσωτερική επιφάνεια του τοίχου. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, επειδή ο ήλιος διαγράφει μεγαλύτερη τροχιά ($\gamma_{s,s}=119,8^\circ$), εισέρχεται περισσότερη ακτινοβολία από το ανατολικό παράθυρο, η οποία όμως επίσης μειώνεται στην διάρκεια της ημέρας. Κατά τις απογευματινές ώρες ο νότιος τοίχος δέχεται μόνο διάχυτη ακτινοβολία και για αυτό το ποσοστό απορρόφησης του σταθεροποιείται στην τιμή της προσομοίωσης $G0$.

Ο βόρειος τοίχος (Σχήμα 5.13), παρουσιάζει αύξηση του ποσοστού απορρόφησης, τόσο κατά την διάρκεια του χειμώνα όσα και κατά την διάρκεια του θέρους. Το χειμώνα ο ήλιος “βλέπει” το νότιο παράθυρο σχεδόν ολόκληρη την ημέρα ($\gamma_{s,w}=59,29^\circ$ & $a_{s,w}=26,8^\circ$), με αποτέλεσμα ο βόρειος τοίχος να δέχεται αρκετή άμεση ακτινοβολία, ενώ το καλοκαίρι με την πορεία που διαγράφει περνάει από πίσω ή από πάνω του ($\gamma_{s,s}=119,8^\circ$ & $a_{s,s}=72,03^\circ$), για τον λόγο αυτό η ποσοστιαία αύξηση κατά τον χειμώνα είναι μεγαλύτερη.

Ο ανατολικός τοίχος (Σχήμα 5.14), παρουσιάζει μικρές διακυμάνσεις στο ποσοστό του, λόγω του ότι η μόνο άμεση ηλιακή ακτινοβολία που μπορεί να δεχτεί προέρχεται από το νότιο άνοιγμα όταν ο ήλιος φτάνει προς την δύση του. Τις υπόλοιπες ώρες η ακτινοβολία που δέχεται ο ανατολικός τοίχος, όπως και ο δυτικός (Σχήμα 5.15), είναι στο μεγαλύτερο μέρος της διάχυτη, γι’ αυτό άλλωστε έχουμε και ταύτιση των τιμών των διαγραμμάτων. Επιπλέον, ο δυτικός τοίχος δεν δέχεται σημαντικό μέρος της άμεσης ακτινοβολίας που προέρχεται από το ανατολικό παράθυρο, λόγω πορείας του ηλίου.

Το δάπεδο και η οροφή (Σχήματα 5.16-5.17), είναι οι επιφάνειες της ζώνης που απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Από κάθε άνοιγμα, οποιουδήποτε προσανατολισμού, είναι εύλογο ότι το ένα μέρος αν όχι το μεγαλύτερο της άμεσης ακτινοβολίας θα προσέπιπτε στο δάπεδο. Η οροφή έχει τα ίδια ποσοστά απορρόφησης με το δάπεδο, επειδή όπως προαναφέρθηκε τα ανοίγματα είναι καθ' ύψος συμμετρικά τοποθετημένα προς τις δύο επιφάνειες.

6. Προσομοίωση γεωμετρίας κύβου

Η δεύτερη γεωμετρία την οποία θα εξετάσουμε αυτή του κύβου, με δύο ανοίγματα (παράθυρα). Μια τέτοια γεωμετρία, η οποία είναι πλήρως συμμετρική όχι μόνο από άποψη εμβαδού επιφανειών αλλά και τοποθέτησης ανοιγμάτων, θα βοηθήσει ώστε να μελετηθεί καθαρά η άμεση και διάχυτη ακτινοβολία, χωρίς να παρεμβάλλεται το πρόβλημα των αποστάσεων μεταξύ των επιφανειών, όπως αυτό προκύπτει στην περίπτωση γεωμετρίας ορθογωνίου παραλληλεπίπεδου. Τα ανοίγματα έχουν νότιο και ανατολικό προσανατολισμό αντίστοιχα, είναι τετραγωνικά και είναι τοποθετημένα στα κέντρα των όψεων.

Οι παραδοχές που έγιναν κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων, καθώς και η ονοματολογία και το είδος του περιεχομένου των σχημάτων και των διαγραμμάτων που ακολουθούν, είναι ίδια με αυτά του Κεφαλαίου 5. (Υπενθυμίζεται ότι ένδειξη $G\theta$, αναφέρεται στην προσομοίωση όπου όλοι οι συντελεστές *GEOSURF* υπολογίζονται βάσει των λόγων εμβαδού, ενώ η ένδειξη GI αναφέρεται στην προσομοίωση, όπου οι συντελεστές υπολογίζονται κατόπιν χρήσης του κώδικα *VFCALC*.) Στην συνέχεια παρατίθενται οι γωνίες ηλιακού αζιμουθίου ανατολής/δύσης και μέγιστου ηλιακού ύψους (Πίνακας 6.1) καθώς και οι συντελεστές μορφής για την γεωμετρία του κύβου (Πίνακας 6.2). Αναλυτική μεθοδολογία υπολογισμού των γωνιών αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5, ενώ οι συντελεστές μορφής μεταξύ παραθύρων και εσωτερικών επιφανειών υπολογίζονται από τον κώδικα *VFCALC*.

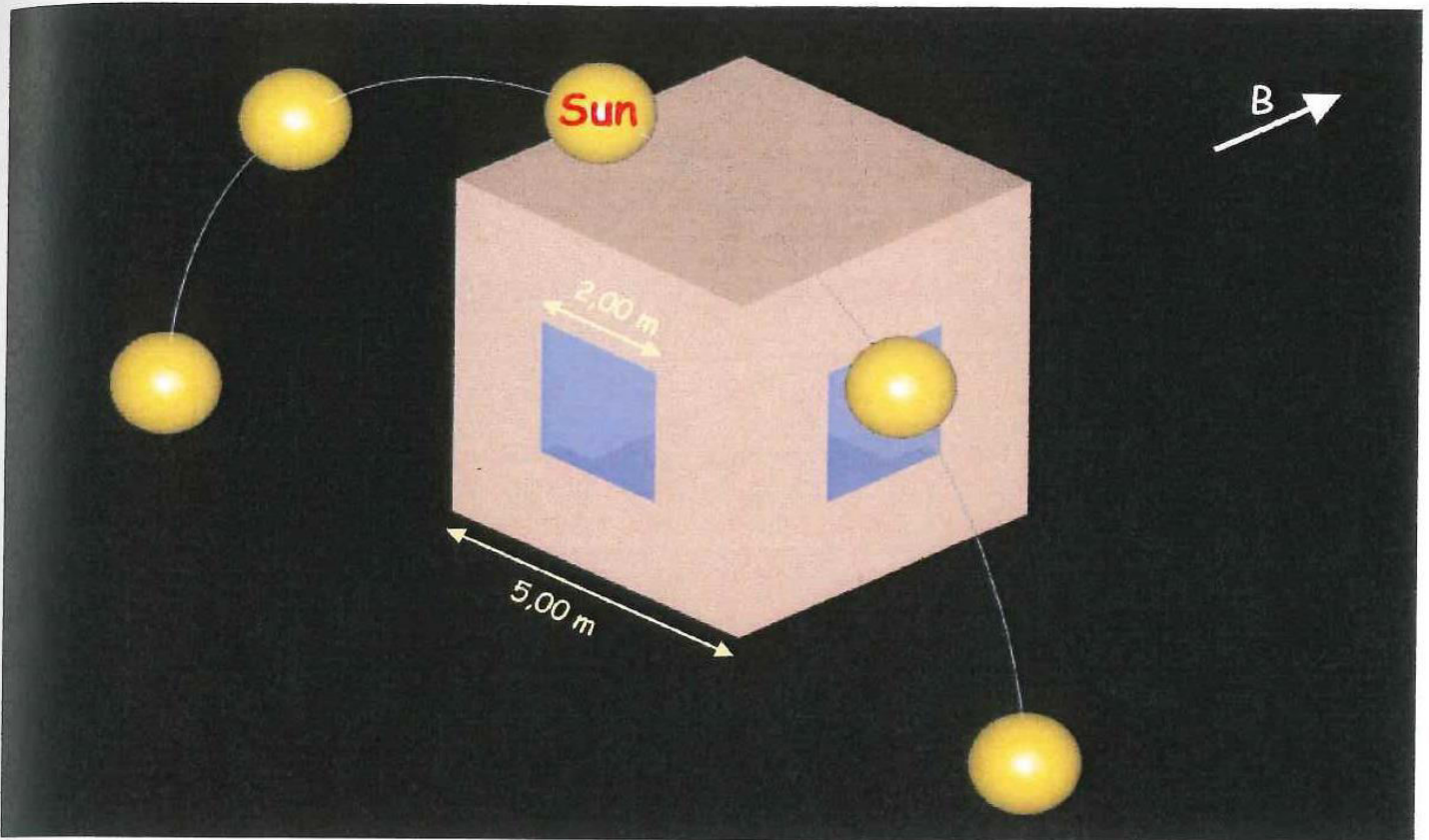
Ηλιακές Γωνίες	Χειμώνας (02/01) (w)	Καλοκαίρι (01/06) (s)
Γωνία ηλιακού αζιμουθίου ανατολής/δύσης (γ_s)	59,29 °	119,8 °
Γωνία μέγιστου ηλιακού ύψους (α_s)	26,8 °	72,03 °

Πίνακας 6.1: Ηλιακές γωνίες για την πόλη της Καστοριάς

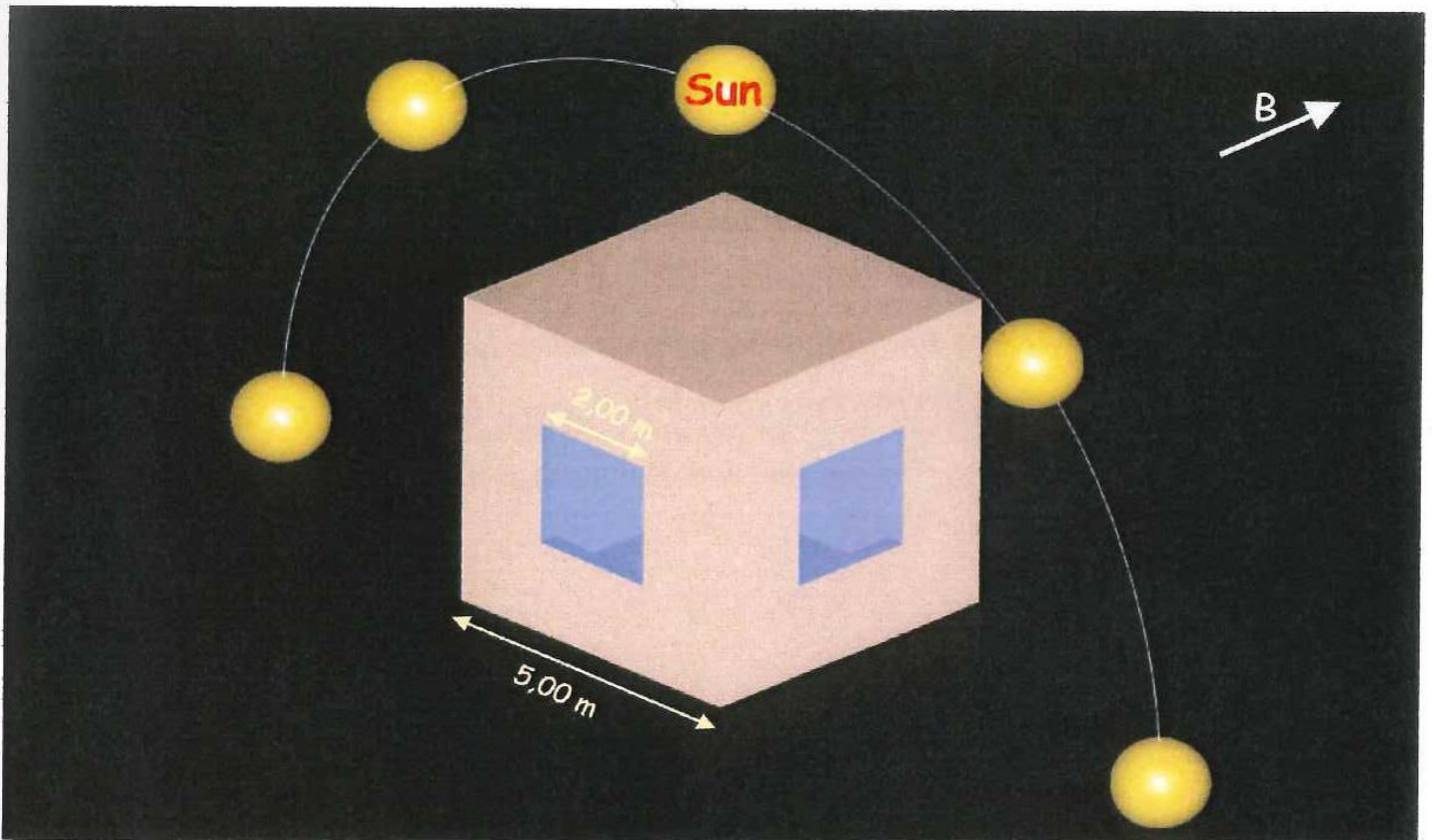
Συντελεστές Μορφής	Νότιο παράθυρο	Ανατολικό παράθυρο
Βόρειος τοίχος	0,232	0,192
Νότιος τοίχος	0,000	0,192
Ανατολικός τοίχος	0,192	0,000
Δυτικός τοίχος	0,192	0,232
Οροφή	0,192	0,192
Δάπεδο	0,192	0,192
Σύνολο	1,000	1,000

Πίνακας 6.2: Συντελεστές μορφής μεταξύ παραθύρων και εσωτερικών επιφανειών, για γεωμετρία κώβου

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η γεωμετρία του κτιρίου καθώς και των ανοιγμάτων του. Παράλληλα αναπαρίσταται και η τροχιά την οποία ακολουθεί ο ήλιος τις δύο διαφορετικές ημέρες της προσομοίωσης.



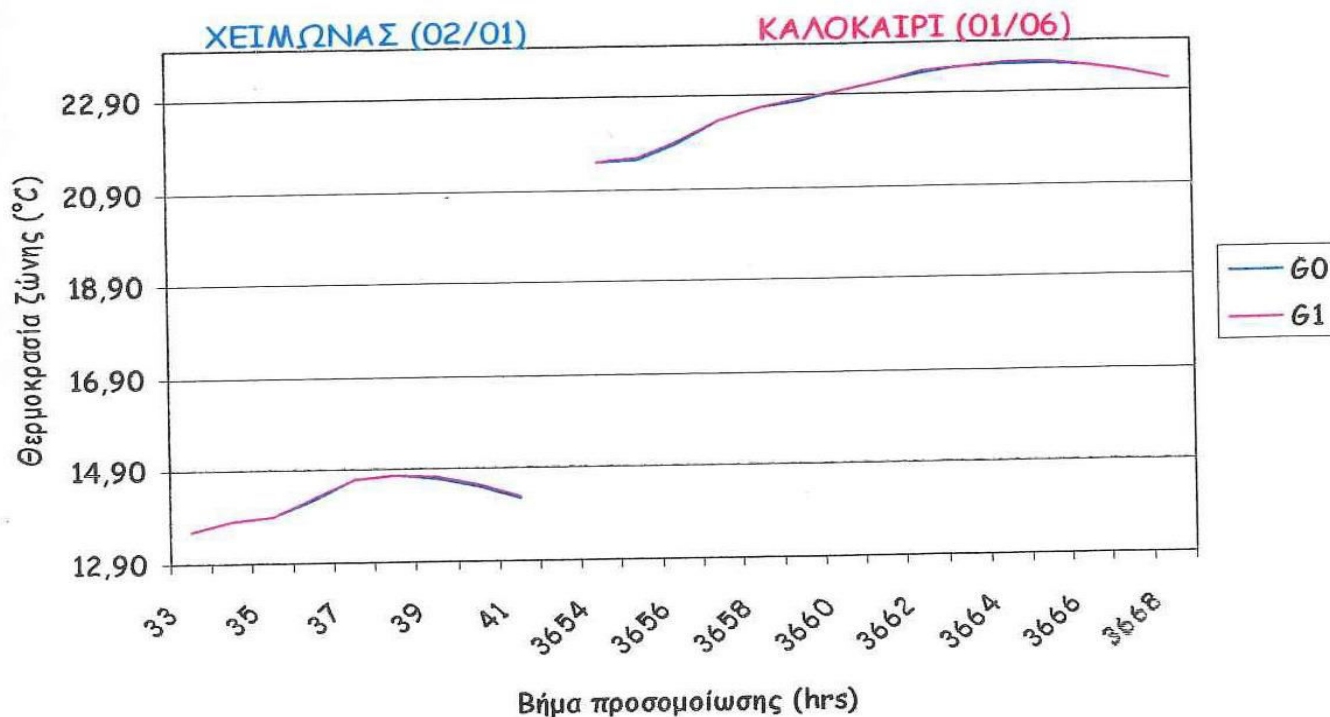
Σχήμα 6.1: Πλήρης γεωμετρία κώβου και ηλιακή τροχιά κατά την 2^η ημέρα του Ιανουαρίου.



Σχήμα 6.2: Πλήρης γεωμετρία κώβου και ηλιακή τροχιά κατά την 1^η ημέρα του Ιουνίου.

6.1 Σύγκριση θερμοκρασιών ζώνης

Το Σχήμα 6.3 παρουσιάζει τις τιμές θερμοκρασιών ζώνης για κάθε μία από τις ώρες ηλιοφάνειας των δύο ημερών της προσομοίωσης.



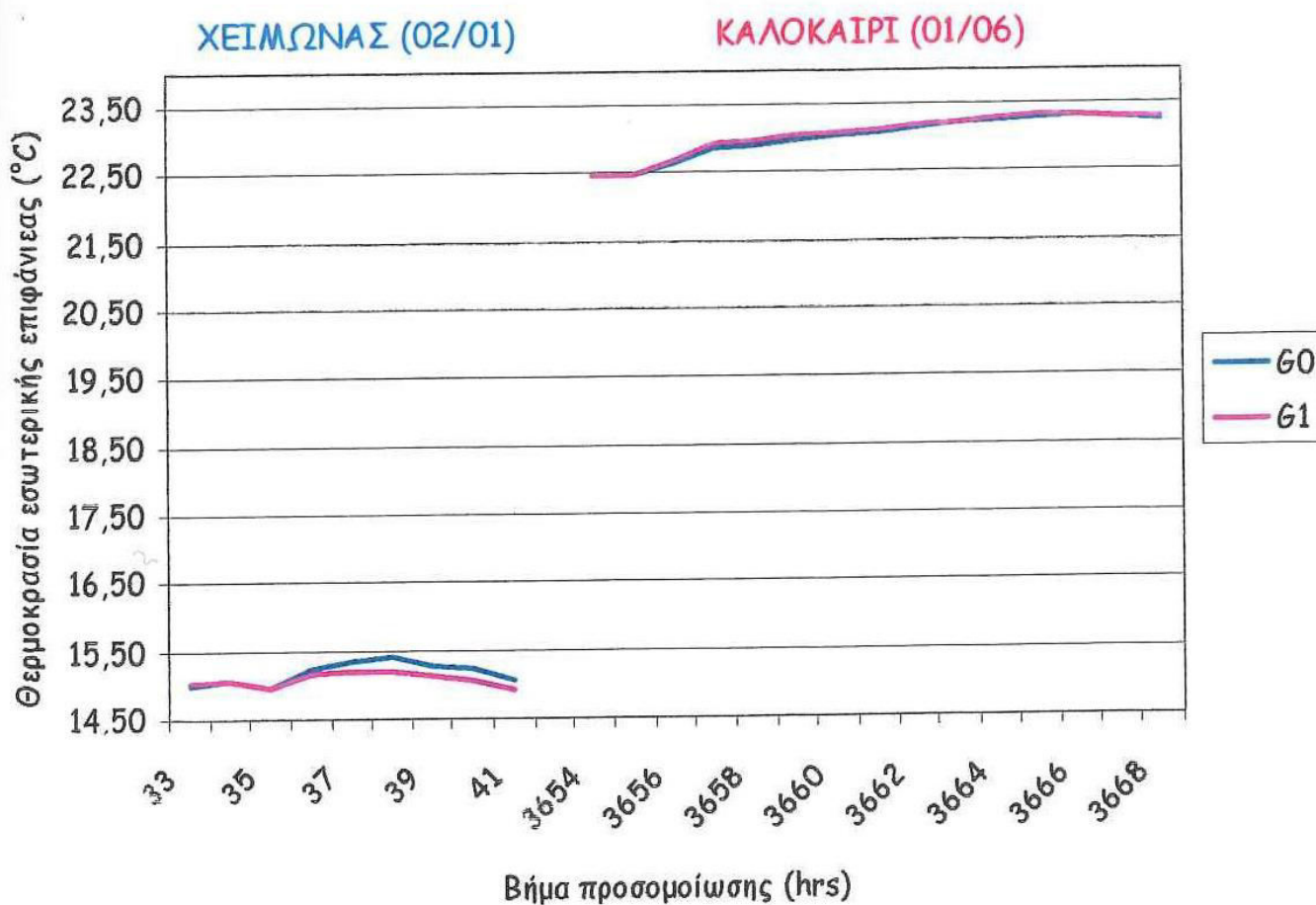
Σχήμα 6.3: Θερμοκρασίες ζώνης

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι η χρήση του κώδικα *VFCALC*, επηρεάζει ελάχιστα την θερμοκρασία της ζώνης. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο διότι η μεταβολή της κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας στο εσωτερικό ενός χώρου είναι ένας παράγοντας ο οποίος από μόνος του δεν μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την συνολική θερμοκρασία του χώρου. Άλλωστε για κυβικής μορφής σώματα οι παράγοντες μορφής αντιπροσωπεύονται με σχετική ακρίβεια από τους λόγους εμβαδών των επιφανειών.

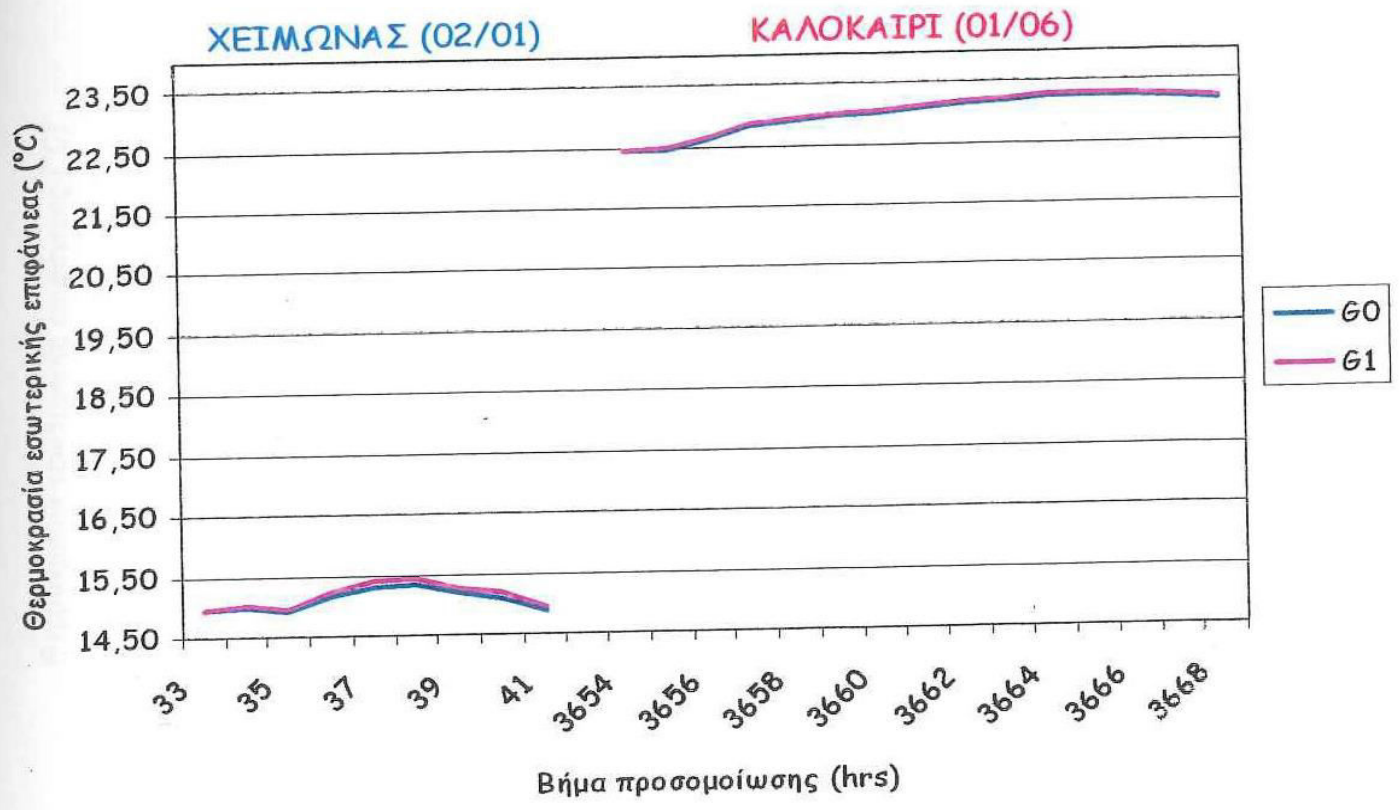
6.2 Σύγκριση θερμοκρασιών των εσωτερικών επιφανειών της ζώνης

Τα Σχήματα 6.4-6.9 παρουσιάζουν τις θερμοκρασίες, καθεμιάς από τις εσωτερικές επιφάνειες του κύβου, για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης. Το γεγονός ότι στην πλειονότητα των διαγραμμάτων οι θερμοκρασίες των δύο περιπτώσεων σχεδόν ταυτίζονται, είναι λογική συνεπαγωγή του ότι μια τέτοιου είδους γεωμετρία είναι πλήρως συμμετρική, γεγονός που επαληθεύει για μια ακόμη φορά τον ισχυρισμό ότι οι παράγοντες μορφής αντιπροσωπεύονται με σχετική ακρίβεια από τους λόγους εμβαδών των επιφανειών.

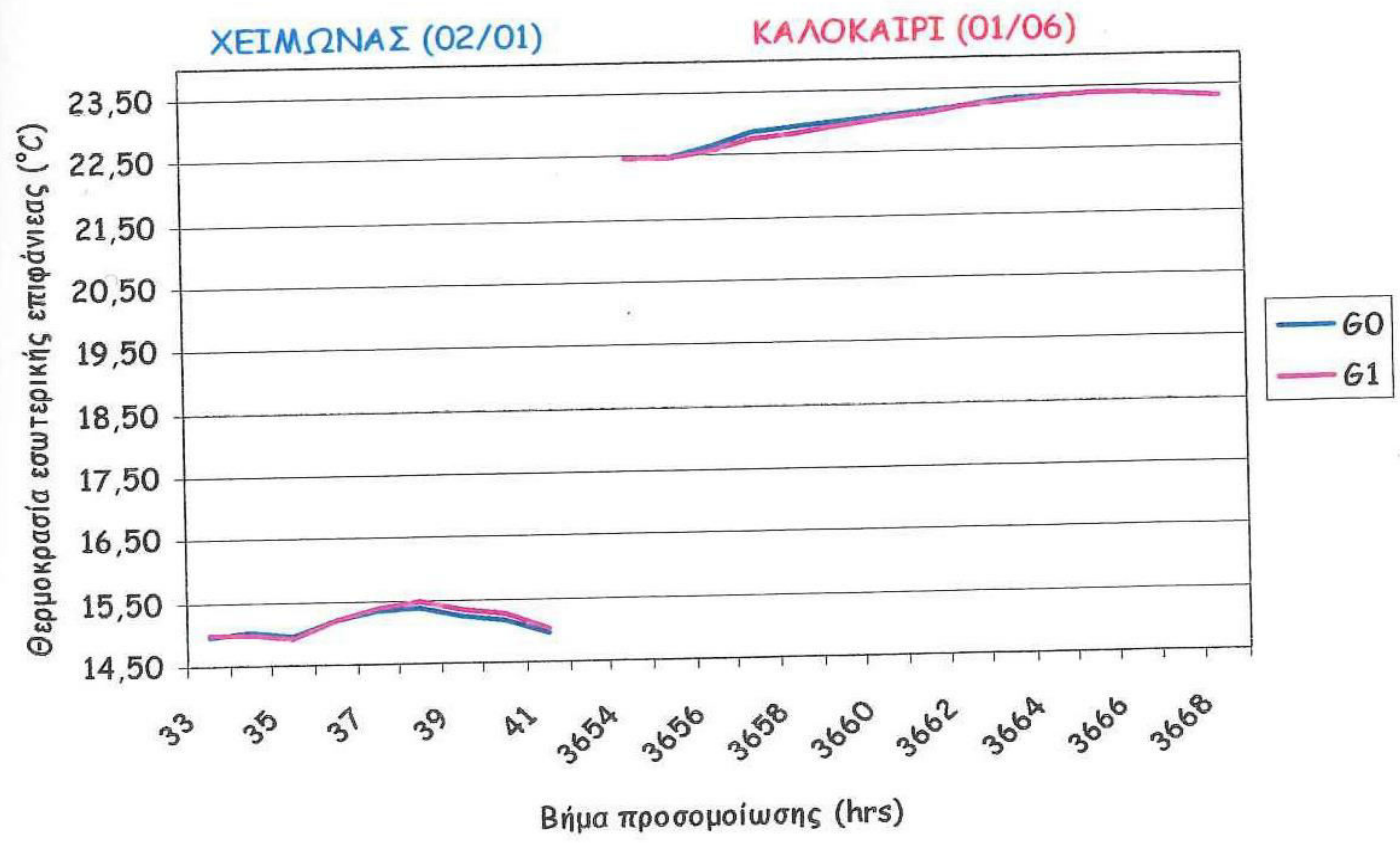
Όσον αφορά τον χειμώνα, η μείωση της θερμοκρασίας της εσωτερική επιφάνεια του νότιου τοίχου (Διάγραμμα 6.2), αντισταθμίζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας των υπολοίπων εσωτερικών επιφανειών του χώρου.



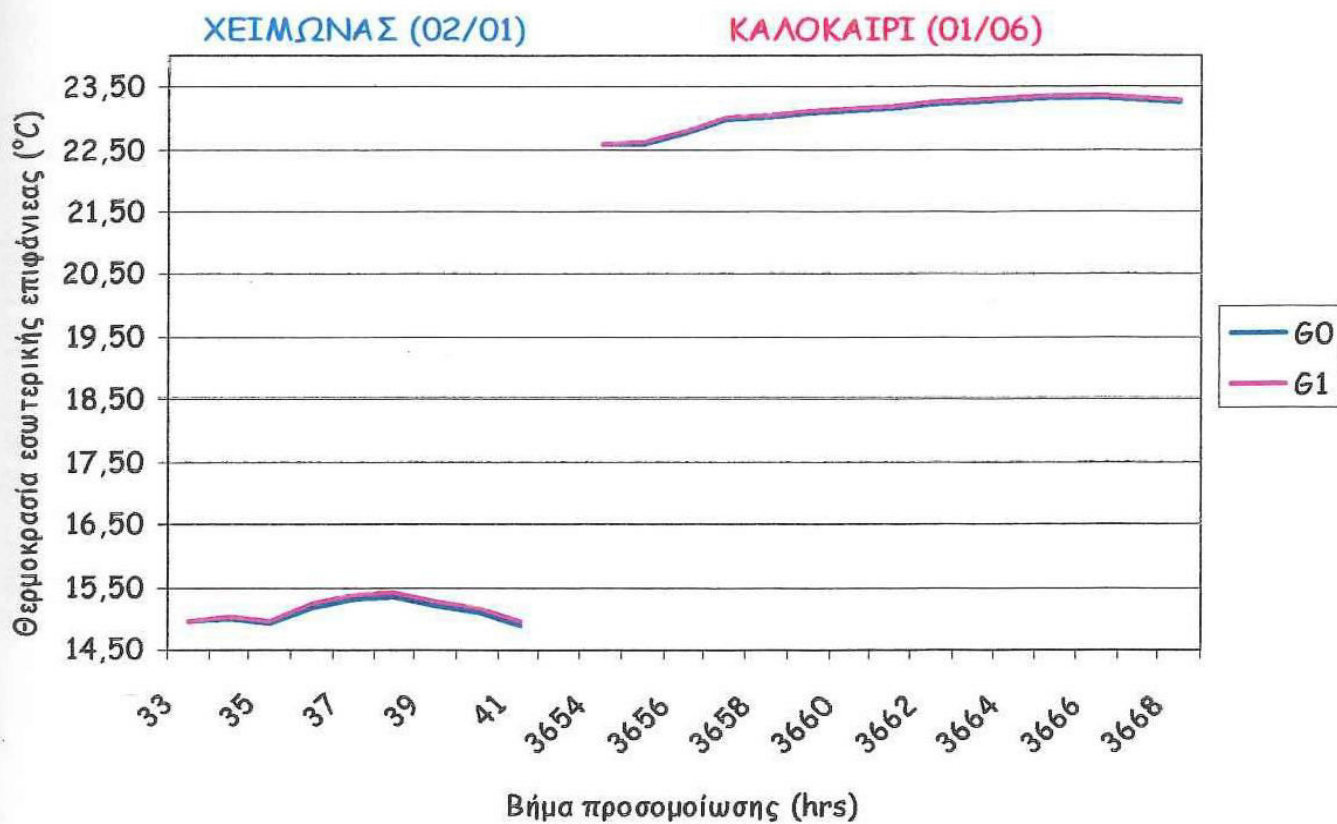
Σχήμα 6.4: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του NOTIOY τοίχου



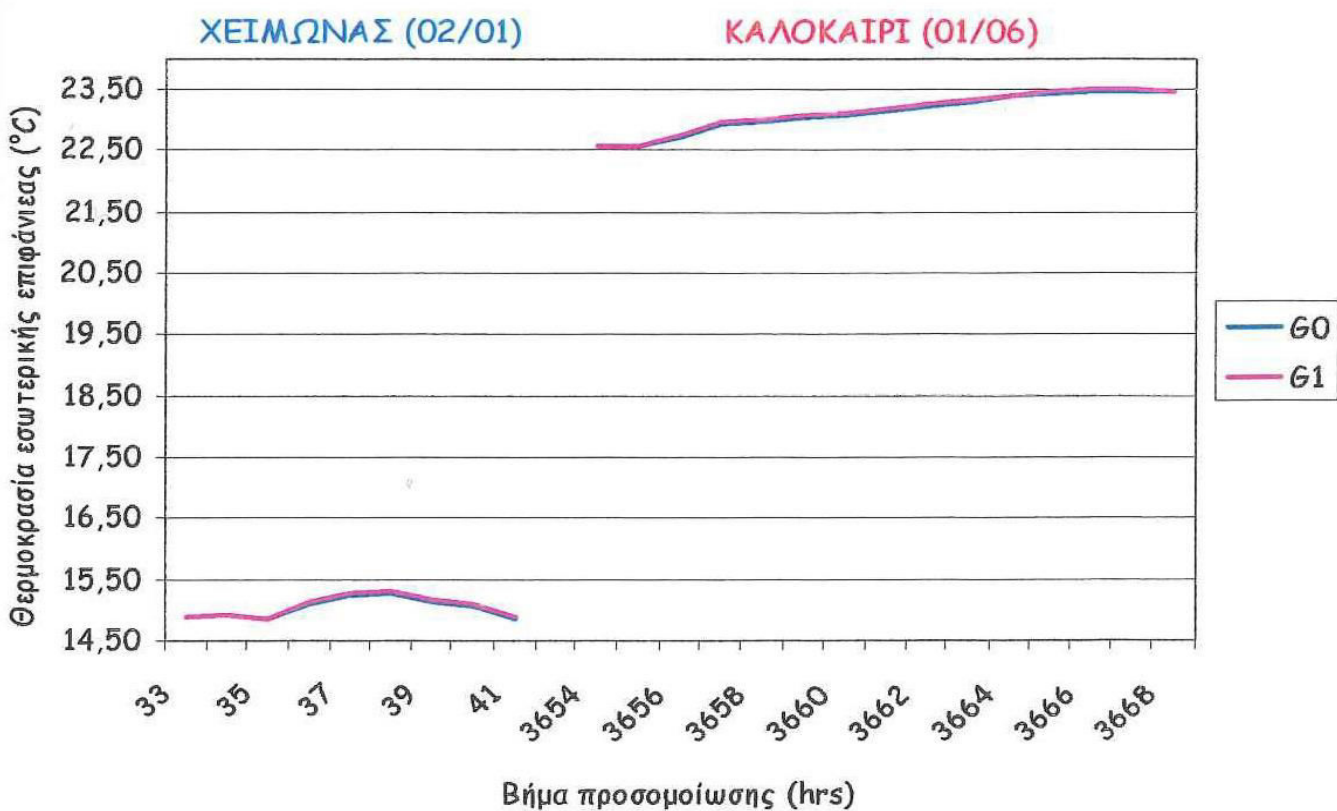
Σχήμα 6.5: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του ΒΟΡΕΙΟΥ τοίχου



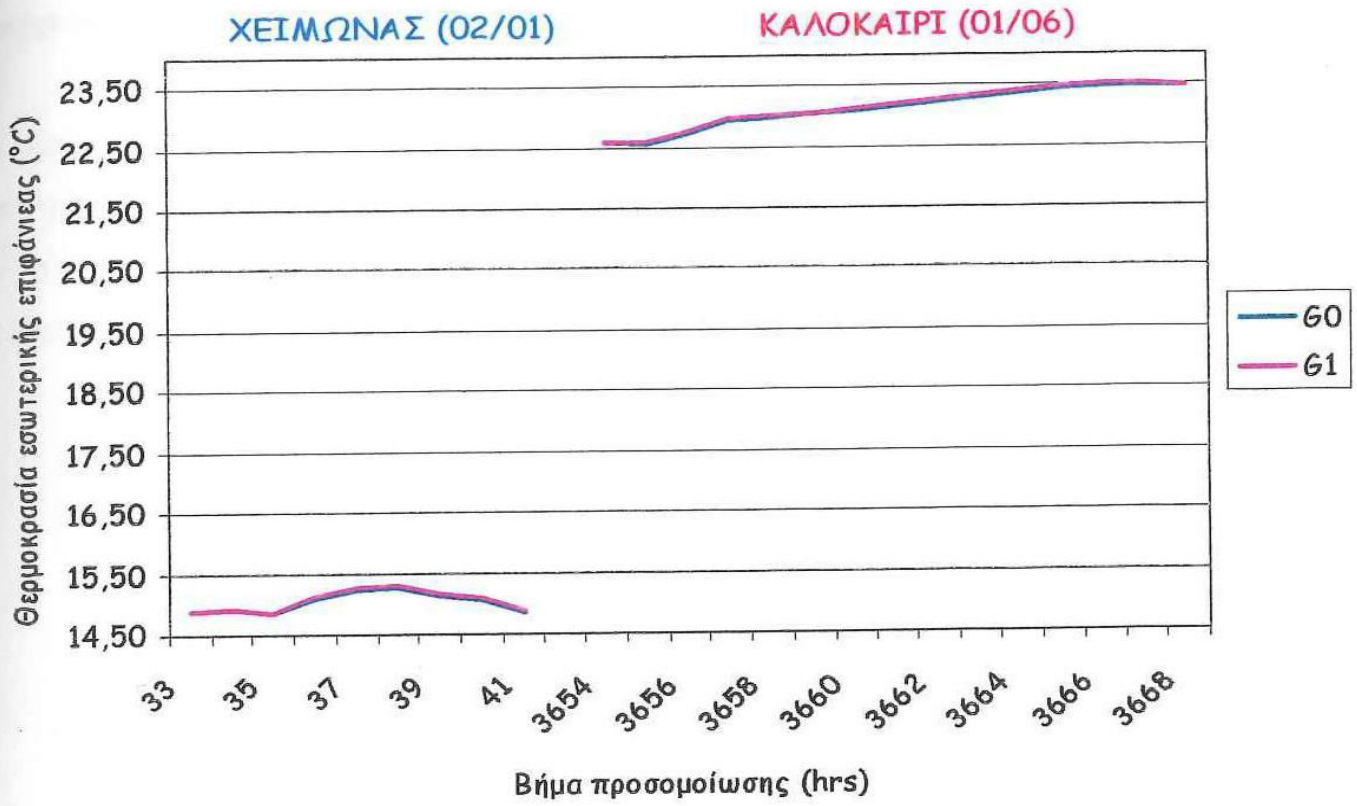
Σχήμα 6.6: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ τοίχου



Σχήμα 6.7: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του ΔΥΤΙΚΟΥ τοίχου



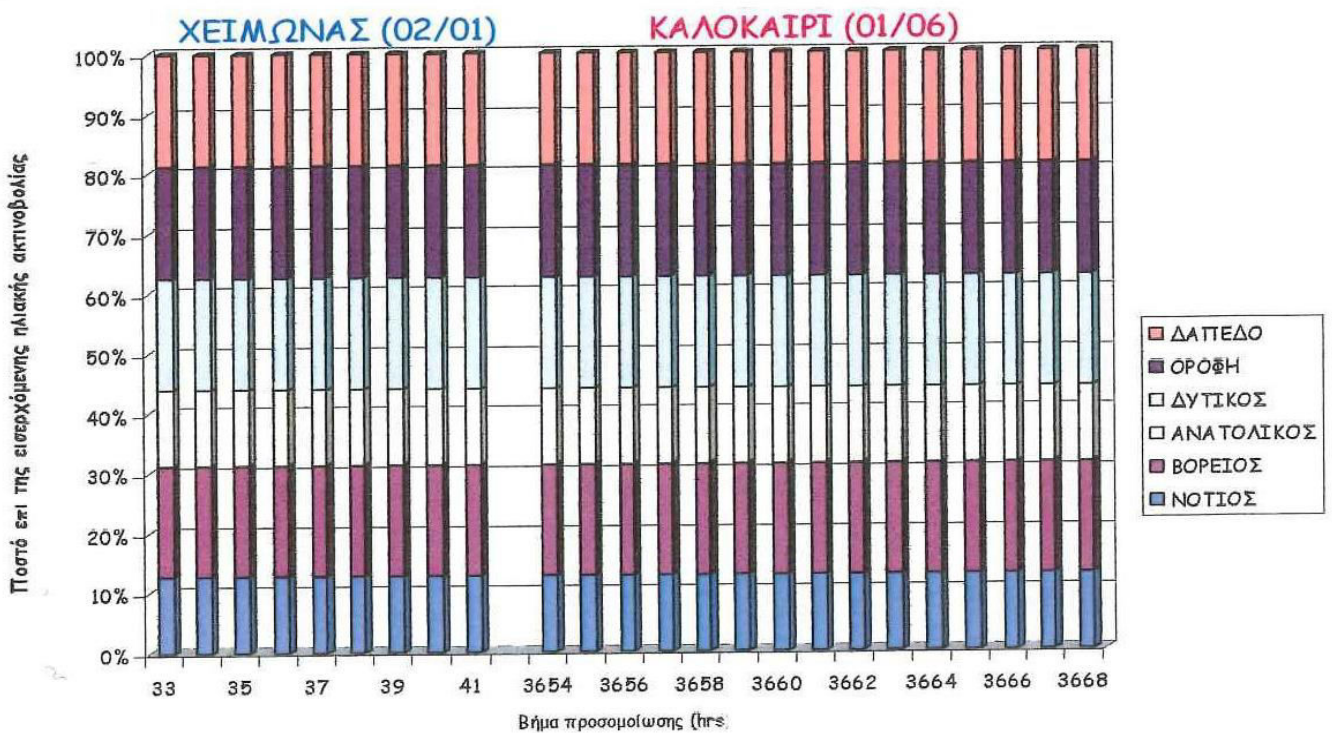
Σχήμα 6.8: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας ΟΡΟΦΗΣ



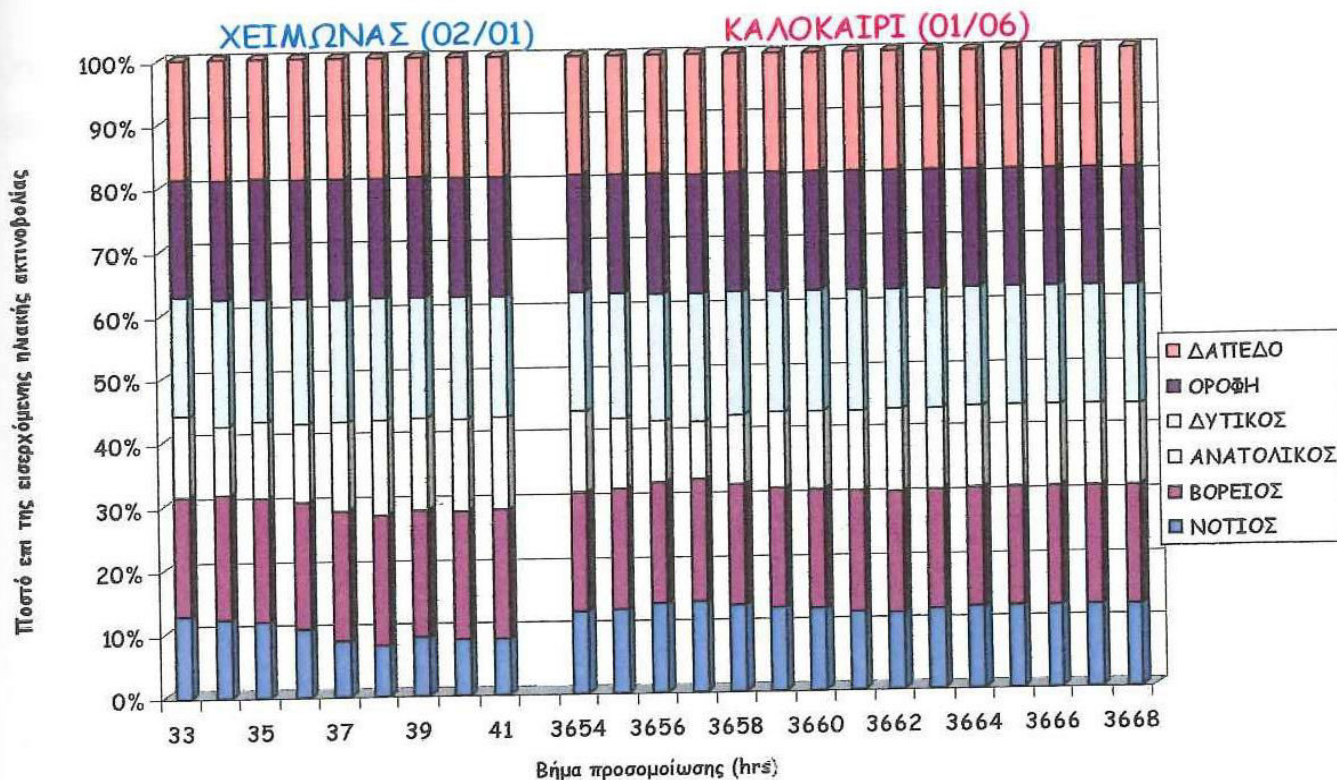
Σχήμα 6.9: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας ΔΑΠΕΔΟΥ

6.3 Σύγκριση ποσοστών της συνολικά εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται στις εσωτερικές επιφάνειες

Τα Σχήματα 6.10 και 6.11, παρουσιάζουν για κάθε ώρα προσομοίωσης το ποσοστό ακτινοβολίας που απορροφάται από κάθε εσωτερική επιφάνεια τοίχου. Κάθε ράβδος αποτελεί την συνολικά εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στον χώρο. Ενώ τα Σχήματα 6.12-6.17 περιέχουν τα ποσοστά απορρόφησης για κάθε τοίχο ξεχωριστά.



Σχήμα 6.10: Ποσοστά απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων (G_0)

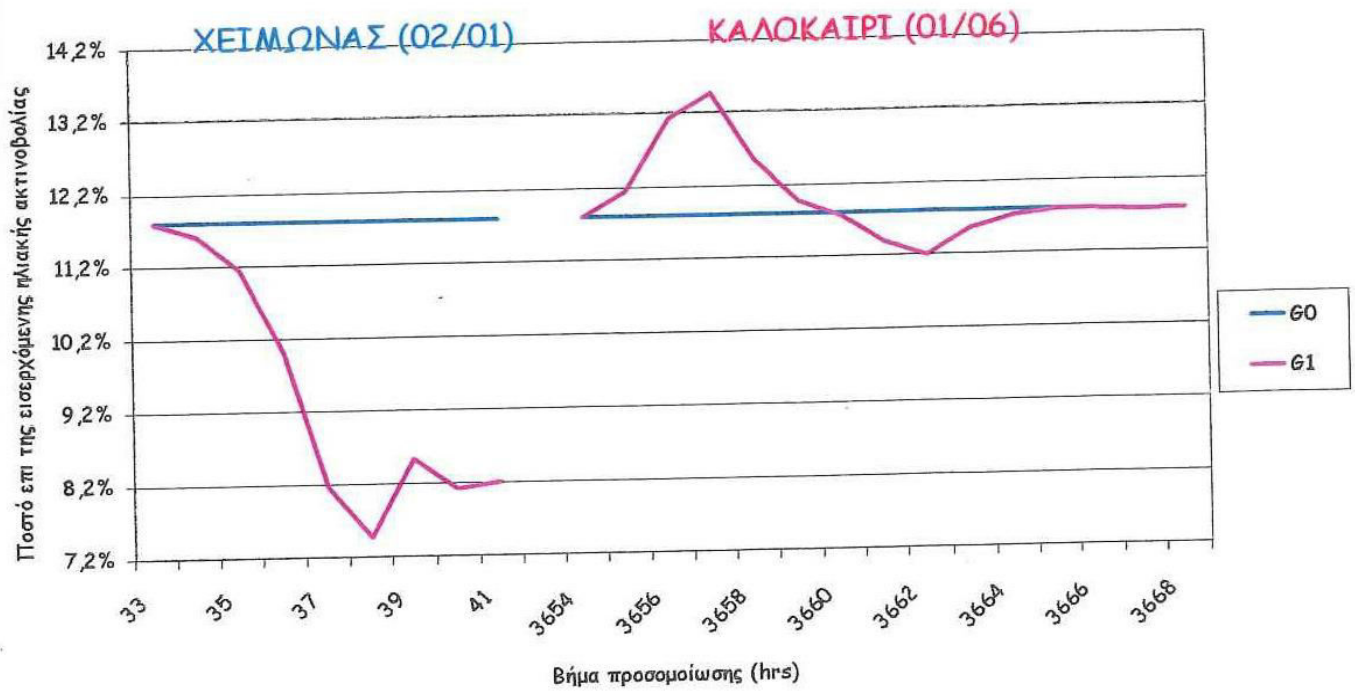


Σχήμα 6.11: Ποσοστά απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων (G_I)

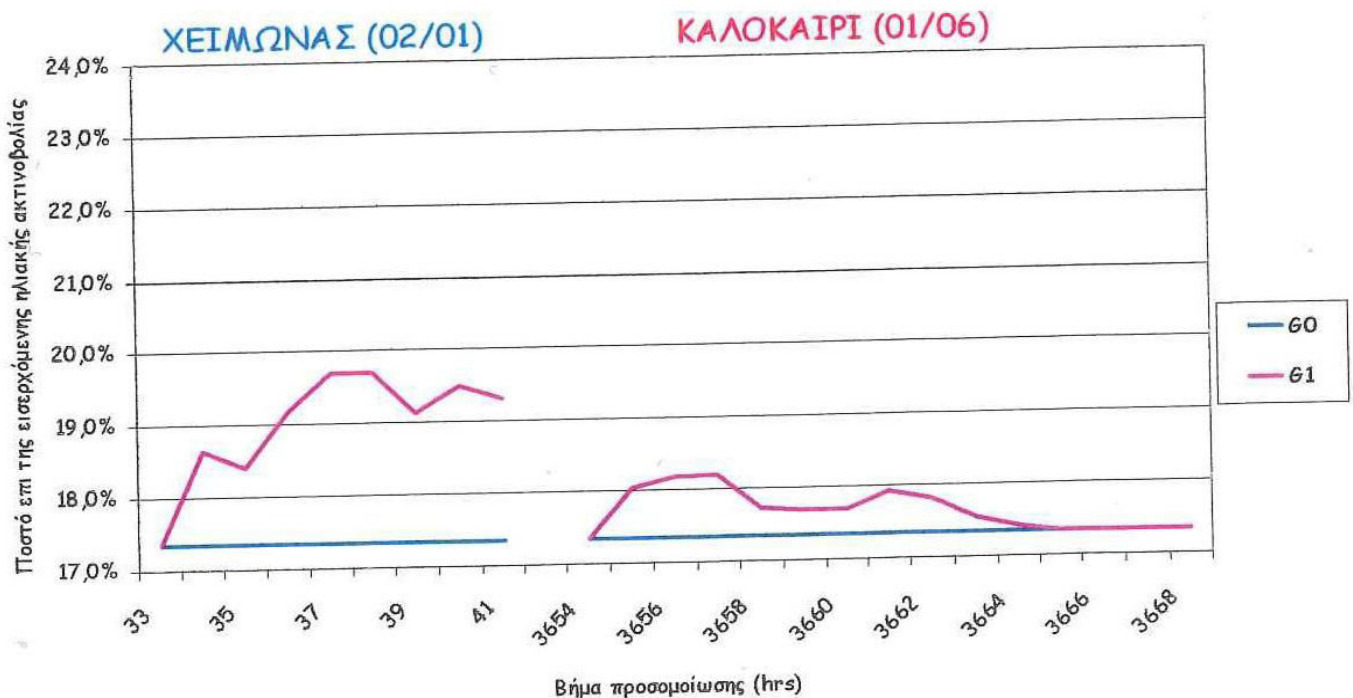
Η πρώτη ουσιαστική παρατήρηση που θα μπορούσε να γίνει για το Σχήμα 6.10 είναι ότι τα ποσοστά απορρόφησης των εσωτερικών επιφανειών του βόρειου και δυτικού τοίχου, καθώς και της οροφής και του δαπέδου είναι σταθερά και ίσα μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει επειδή η γεωμετρία του κύβου καθώς και η τοποθέτηση των ανοιγμάτων είναι πλήρως συμμετρικές. Οι επιφάνειες του ανατολικού και δυτικού τοίχου, επειδή ακριβώς περιέχουν τα ανοίγματα, παρουσιάζουν χαμηλότερα κλάσματα απορρόφησης.

Παρά την κυβική γεωμετρία όμως, στο Σχήμα 6.11 φαίνονται μεταβολές στα ποσοστά απορρόφησης των εσωτερικών επιφανειών του νοτίου, βόρειου, ανατολικού και δυτικού τοίχου, που αποτελούν άμεση συνάρτηση της ηλιακής τροχιάς και κατά συνέπεια της συνολικά εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα τα ποσοστά απορρόφησης των εσωτερικών επιφανειών του νοτίου και του ανατολικού τοίχου μειώνονται, ενώ παράλληλα τα αντίστοιχα ποσοστά των εσωτερικών επιφανειών του βόρειου και του δυτικού τοίχου αυξάνονται. Επιπλέον, η οροφή και το δάπεδο συνεχίζουν να διατηρούν τα ίδια με την προσομοίωση G_0 ποσοστά απορρόφησης.

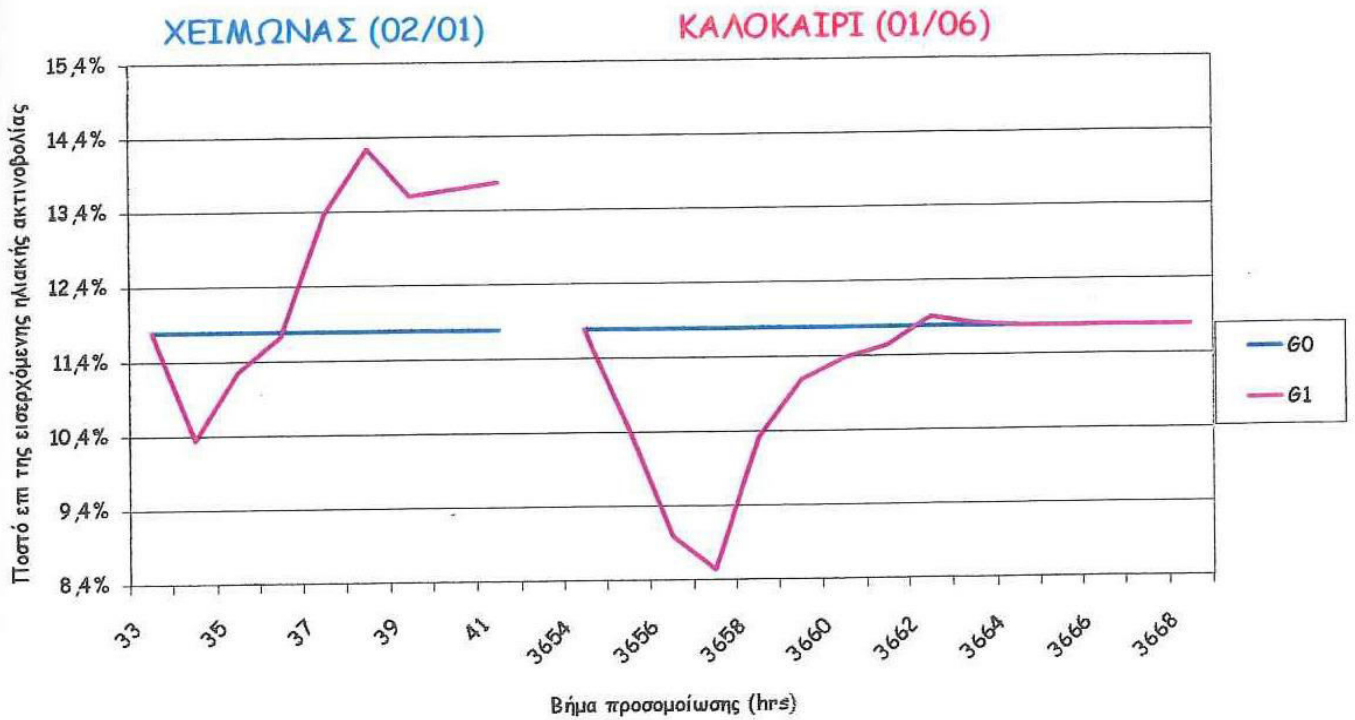
Τα Σχήματα 6.12-6.17 βοηθούν, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η διανομή της ακτινοβολίας σε κάθε εσωτερική επιφάνεια.



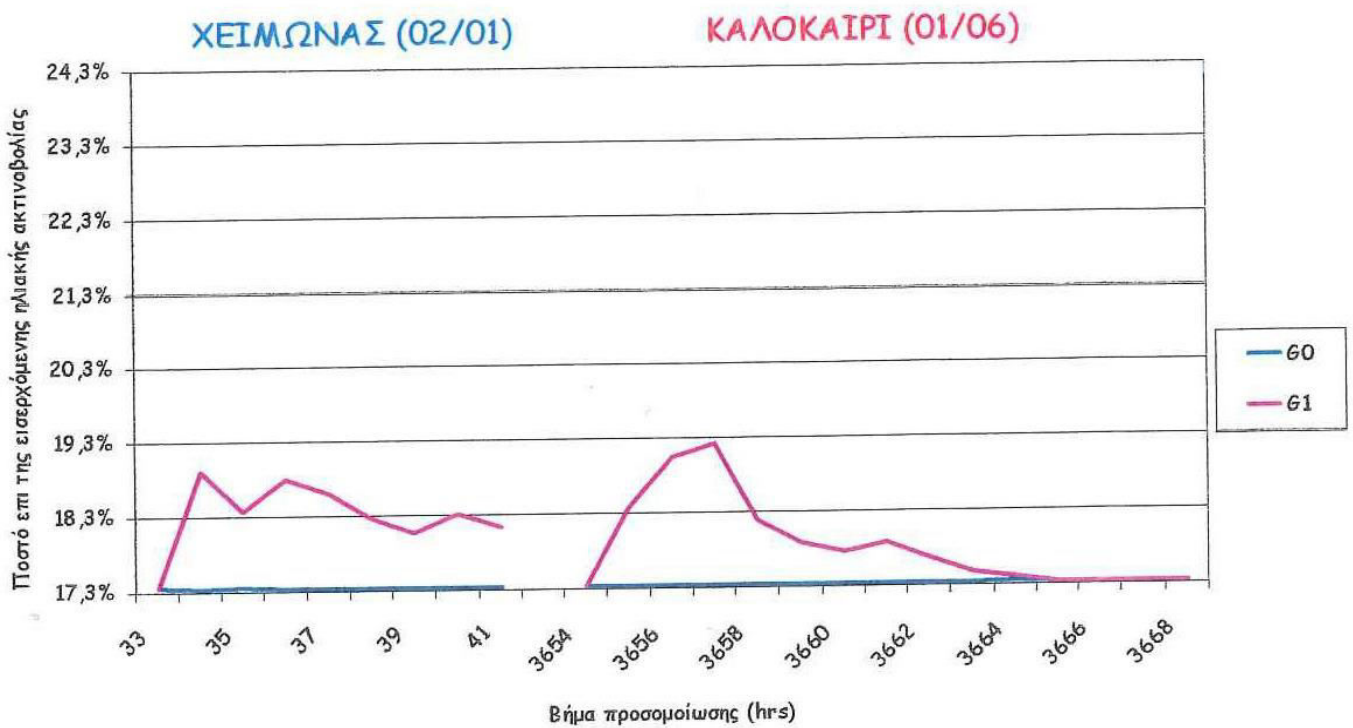
Σχήμα 6.12: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του NOTIOY τοίχου



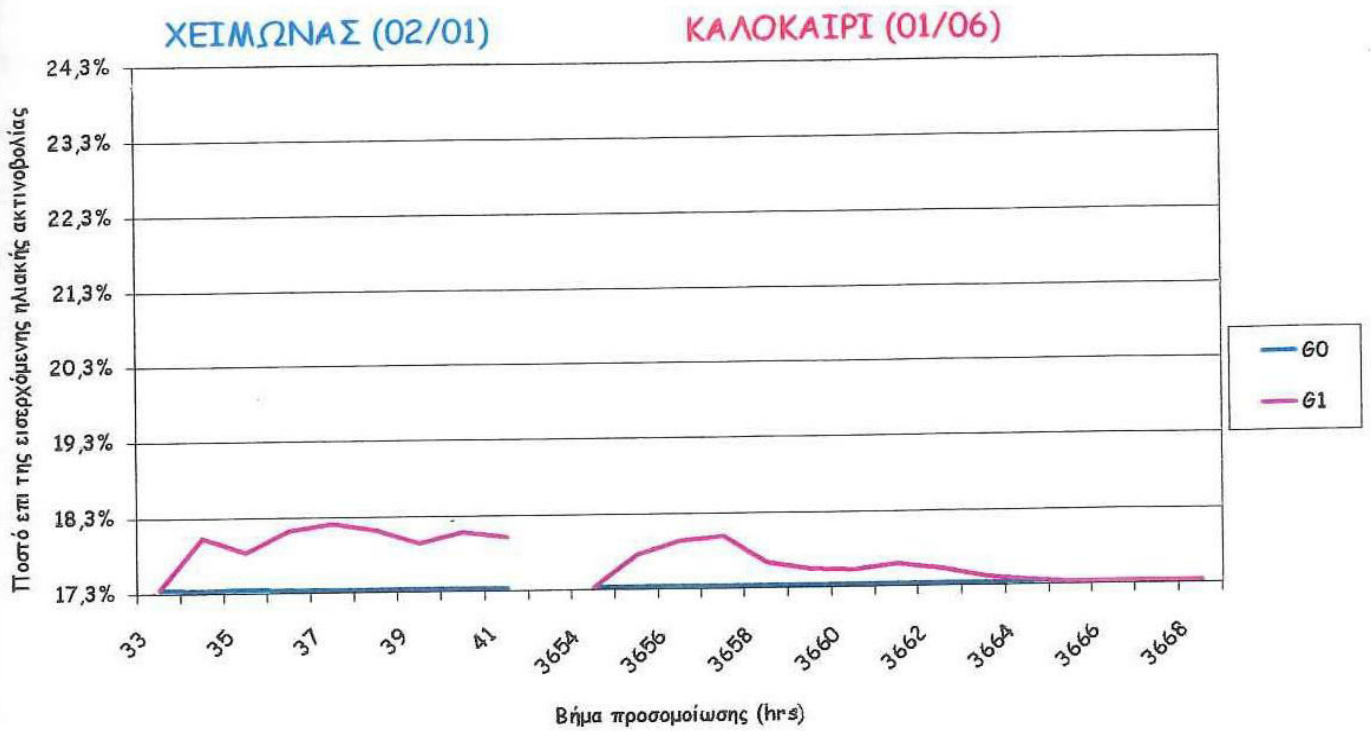
Σχήμα 6.13: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του BOPEIOY τοίχου



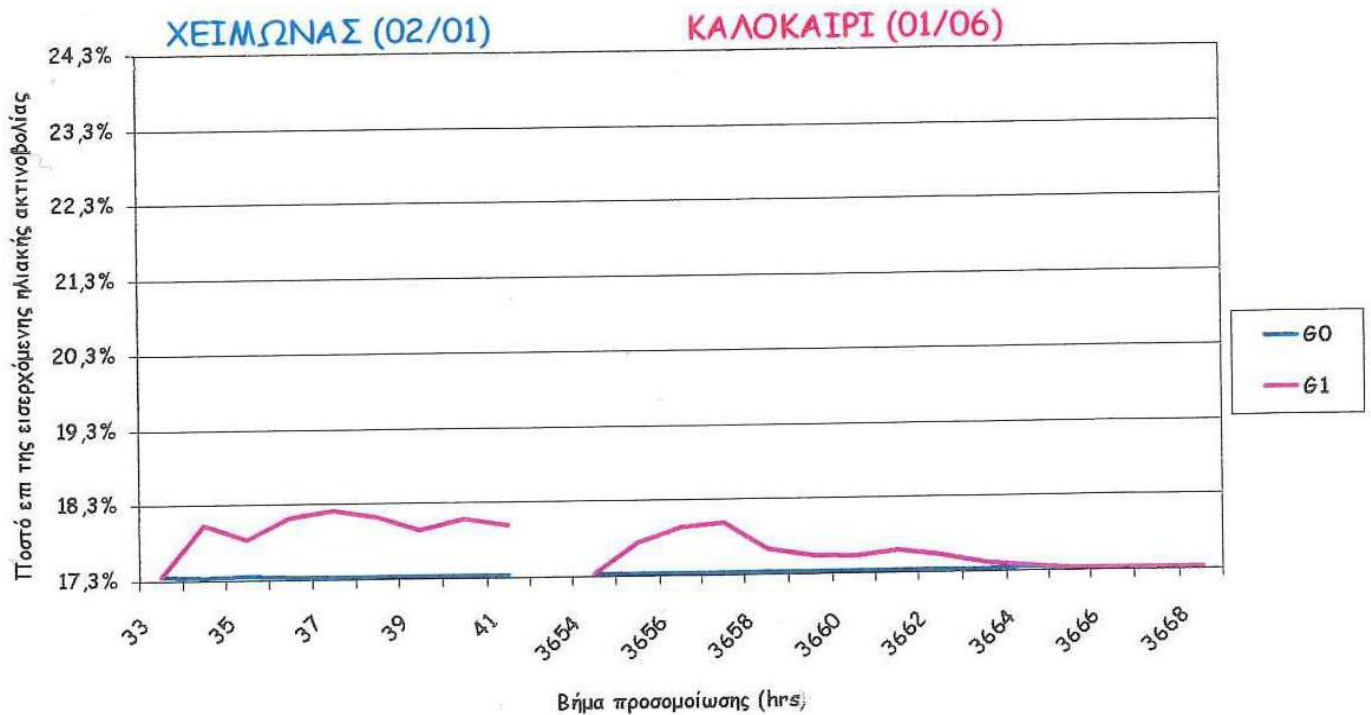
Σχήμα 6.14: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για εσωτερική επιφάνεια του ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ τοίχου



Σχήμα 6.15: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του ΔΥΤΙΚΟΥ τοίχου



Σχήμα 6.16: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια της ΟΡΟΦΗΣ



Σχήμα 6.17: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του ΔΑΠΕΔΟΥ

Το ποσοστό απορρόφησης του νοτίου τοίχου (Σχήμα 6.12), κατά την διάρκεια του χειμώνα παρουσιάζει αξιοσημείωτη μείωση. Αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι η μοναδική πηγή άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας για τον νότιο τοίχο είναι το ανατολικό παράθυρο σε συνδυασμό με την βαθμιαία ελάττωσή της καθ' όλη την διάρκεια της χειμερινής ημέρας, γίνεται κατανοητή η παραπάνω μείωση. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, επειδή ο ήλιος διαγράφει μεγαλύτερη τροχιά (Πίνακας 6.1), εισέρχεται περισσότερη ακτινοβολία από το ανατολικό παράθυρο, η οποία όμως επίσης μειώνεται στην διάρκεια της ημέρας. Κατά τις απογευματινές ώρες ο νότιος τοίχος δέχεται μόνο διάχυτη ακτινοβολία και για αυτό το ποσοστό απορρόφησης του σταθεροποιείται.

Ο βόρειος τοίχος (Σχήμα 6.13), παρουσιάζει αύξηση του ποσοστού απορρόφησης, τόσο κατά την διάρκεια του χειμώνα όσα και κατά την διάρκεια του θέρους. Το χειμώνα ο ήλιος “βλέπει” το νότιο παράθυρο σχεδόν ολόκληρη την ημέρα, με αποτέλεσμα ο βόρειος τοίχος να δέχεται αρκετή άμεση ακτινοβολία, ενώ το καλοκαίρι με την πορεία που διαγράφει περνάει από πίσω ή από πάνω του, για τον λόγο αυτό η ποσοστιαία αύξηση κατά τον χειμώνα είναι μεγαλύτερη.

Ο ανατολικός τοίχος (Σχήμα 6.14), παρουσιάζει μια ενδιαφέρουσα διακύμανση κατά την διάρκεια του χειμώνα η οποία έχει ως εξής: Την ημέρα εκείνη η χαμηλή πορεία του ηλίου (χαμηλά στον ορίζοντα) και η γεωμετρία του χώρου (μικρές σχετικά αποστάσεις), επιτρέπουν σε μέρος της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται από το νότιο παράθυρο να προσπίπτει στον ανατολικό τοίχο. Αυτό συμβαίνει κατά τις ώρες της δύσης του ηλίου, γι' αυτό και το διάγραμμα έχει την μορφή αυτή. Η πορεία του ηλίου κατά την διάρκεια του καλοκαιριού (ψηλά στον ορίζοντα) είναι αυτή που μειώνει το ποσοστό απορρόφησης του ανατολικού τοίχου.

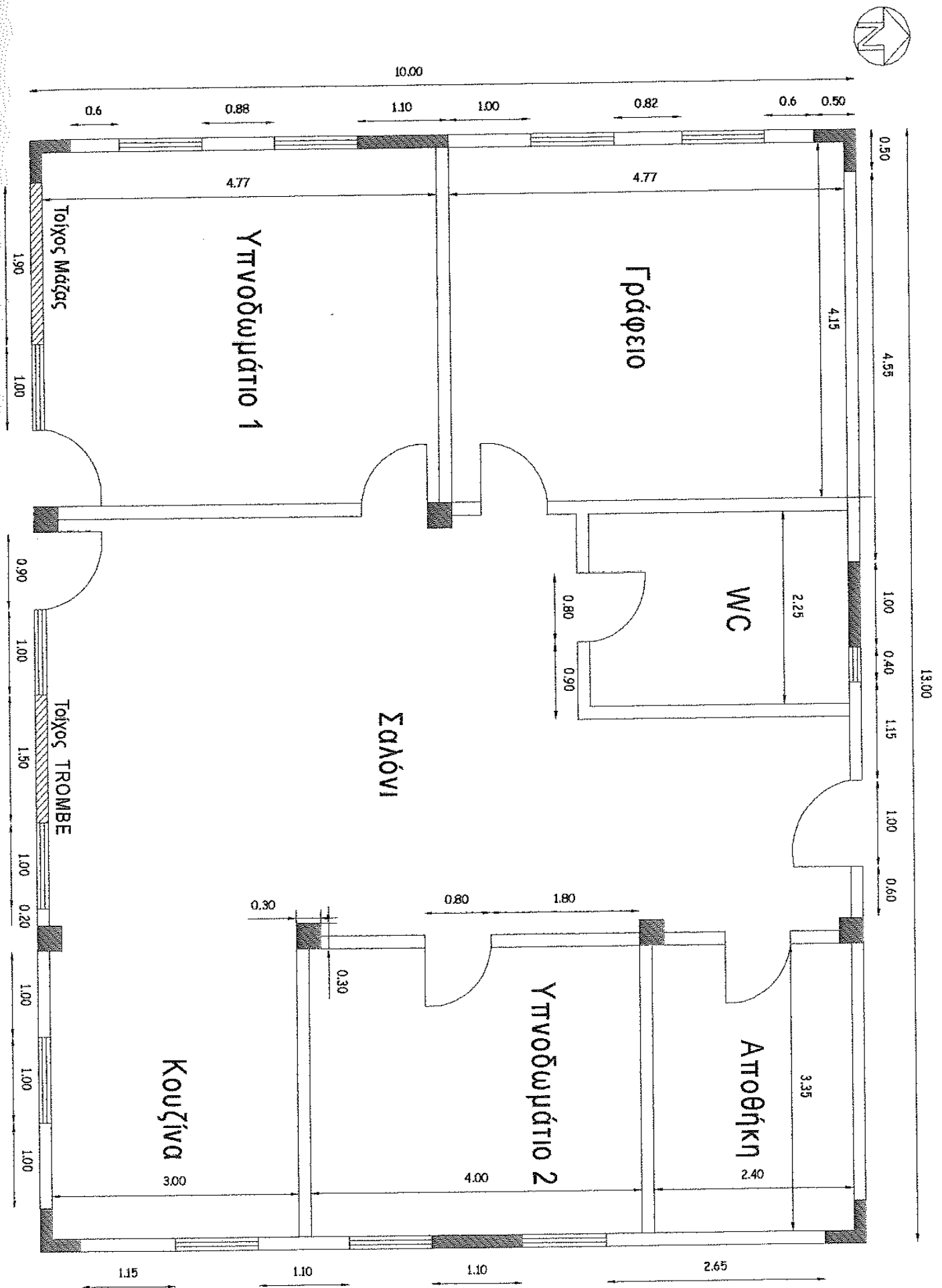
Η κυβική γεωμετρία είναι αυτή που δίνει στα διαγράμματα, των τριών επιφανειών που δεν διαθέτουν ανοίγματα, μια παρόμοια μορφή (Σχήματα 6.15-6.17). Πιο συγκεκριμένα και ενώ η προσομοίωση $G0$ δίνει στις επιφάνειες αυτές ποσοστό απορρόφησης ίσο με 17,3%, λόγω συμμετρίας, δεν συμβαίνει το ίδιο με την προσομοίωση $G1$, η οποία λαμβάνοντας υπόψη την γεωμετρία των ανοιγμάτων και την ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται μέσω αυτών, αναδεικνύει την βόρεια και την δυτική εσωτερική επιφάνεια, ως αυτές με τους μεγαλύτερους συντελεστές απορρόφησης που φτάνουν σε τιμές της τάξεως του 20%, λόγω της θέσης τους ακριβώς απέναντι από τα ανοίγματα.

7. Προσομοίωση μονοκατοικίας

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση μιας μονοκατοικίας $130m^2$ που βρίσκεται στην περιοχή της Κοζάνης. Στην περίπτωση αυτή μελετάται η εφαρμογή τον κώδικα *VFCALC* σε καθαρά πραγματικές συνθήκες, οι οποίες απέχουν από τις ιδανικές γεωμετρίες των προηγούμενων εφαρμογών. Βέβαια ακόμη και σε αυτή την προσομοίωση έχουν γίνει κάποιες απλοποιητικές παραδοχές, οι οποίες δίδονται παρακάτω, αλλά το γεγονός αυτό δεν εμποδίζει τα προς εξέταση αποτελέσματα να είναι λίγο πιο κοντά στην πραγματικότητα. Επισημαίνεται ότι η ονοματολογία και το είδος των δεδομένων που περιέχουν τα σχήματα καθώς και τα διαγράμματα αυτού το κεφαλαίου είναι πανομοιότυπα με αυτά των *Κεφαλαίων 5 και 6*. Επιπλέον στο *Παράρτημα 1* γίνεται λεπτομερής αναφορά στον τρόπο χρήσης, τόσο του *TRANSYS*, όσο και του κώδικα *VFCALC*, προκειμένου να γίνουν οι προσομοιώσεις του κεφαλαίου αυτού.

7.1 Παρουσίαση κτιρίου

Η ενότητα αυτή είναι αφιερωμένη στην πλήρη παρουσίαση του υπο-προσομοίωση κτιρίου. Αρχικά παρουσιάζεται η κάτοψη της μονοκατοικίας, όπως αυτή είναι στην πραγματικότητα, (*Σχήμα 7.1*). Στην συνέχεια γίνεται εμβαδομέτρηση της γεωμετρίας της και παρατίθενται οι διατομές των δομικών της στοιχείων, (*Σχήμα 7.2*). Στο τέλος της ενότητας παρατίθενται οι αναγκαίες για την προσομοίωση απλοποιητικές παραδοχές καθώς και η άποψη του μοντέλου που θα προσομοιωθεί, (*Σχήματα 7.3-7.4*).



Σχήμα 7.1: Κάτοψη μονοκατοικίας

Εμβαδομέτρηση

Χώρος

Εσωτερικό κτιρίου: $13 \times 10 = 130,00 \text{ m}^2$

Όγκος κτιρίου: $130 \times 3 = 390,00 \text{ m}^3$

Ανοίγματα

Νότος: $4 \times (1,30 \times 1,00) + 2 \times (2,20 \times 0,90) = 9,16 \text{ m}^2 \approx 9,00 \text{ m}^2$

Βορράς: $0,4 \times 0,4 = 0,16 \text{ m}^2$

Ανατολή: $3 \times 1,00 \times 1,30 = 3,90 \text{ m}^2 \approx 4,00 \text{ m}^2$

Δύση: $4 \times 1,00 \times 1,30 = 5,20 \text{ m}^2 \approx 5,00 \text{ m}^2$

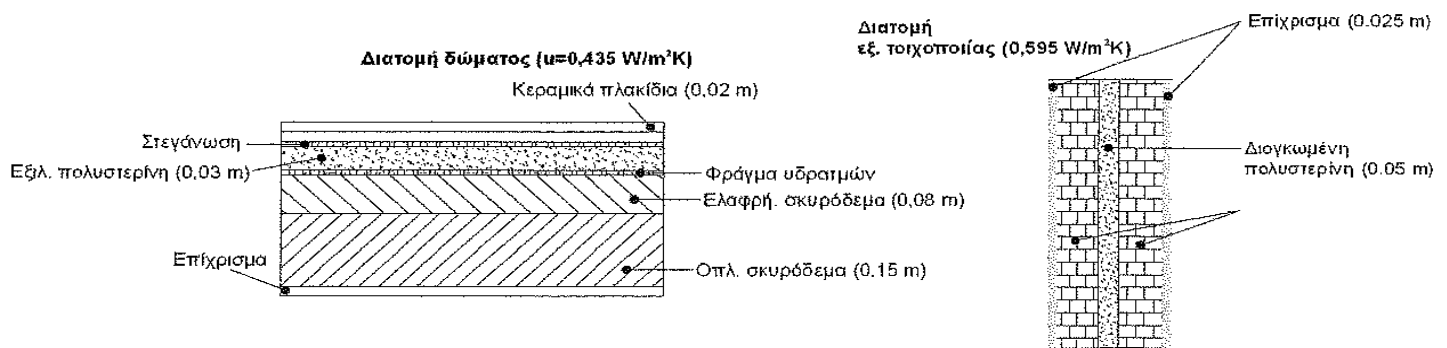
Τοιχοποιία

Νότος: $(3,00 \times 13,00) - 9,00 = 30,00 \text{ m}^2$

Βορράς: $(3,00 \times 13,00) - 0,16 = 38,84 \text{ m}^2$

Ανατολή: $(3,00 \times 10,00) - 4,00 = 26,00 \text{ m}^2$

Δύση: $(3,00 \times 10,00) - 5,00 = 25,00 \text{ m}^2$



Σχήμα 7.2: Διατομές δομικών στοιχείων

Παραδοχές προσομοίωσης

1. Το κλιματικό αρχείο που χρησιμοποιήθηκε αναφέρεται στον νομό Καστοριάς.
2. Από το εξωτερικό κέλυφος του κτιρίου αφαιρέθηκαν τα παθητικά ηλιακά συστήματα (τοίχοι TROMBE και Μάζας, ΠΗΣ) καθώς και οι φέροντες οργανισμοί, ώστε ολόκληρη η τοιχοποιία να έχει μια ενιαία διατομή. Επίσης αφαιρέθηκαν και όλα τα εσωτερικά χωρίσματα.
3. Προκειμένου να μελετηθεί μόνο η ηλιακή ακτινοβολία που εισέρχεται στον χώρο και διαμοιράζεται στις εσωτερικές επιφάνειές του, δεν υπάρχουν συστήματα θέρμανσης, ψύξης, εξαερισμού ή κλιματισμού (*HVAC*) και τα εσωτερικά κέρδη από ανθρώπους, φωτισμό, εξοπλισμό κλπ., θεωρούνται μηδενικά.
4. Μόνο οι απώλειες από φυσικό αερισμό λαμβάνονται υπόψη και θεωρούνται ίσες με 2,2 *ach/h* (αλλαγές αέρα ανα ώρα).
5. Όλα τα εξωτερικά παράθυρα είναι φτιαγμένα από διπλό υαλοπίνακα με διάκενο αέρα 10mm και συντελεστή $u=2.83 \text{ W/m}^2\text{K}$ και ενοποιηθήκαν σε ένα για κάθε όψη.
6. Ως αρχικές συνθήκες του χώρου θεωρούμε θερμοκρασία ίση με 20°C και υγρασία ίση με 50%.
7. Επειδή ο όγκος των δεδομένων εξόδου για κάθε βήμα προσομοίωσης (8760 βήματα) είναι εξαιρετικά μεγάλος και κατά συνέπεια δύσχρηστος, για τις συγκρίσεις που θα ακολουθήσουν πάρθηκαν ως δείγματα δύο χρονικά διαστήματα από κάθε προσομοίωση. Το πρώτο διαρκεί από την 33^η μέχρι την 41^η ώρα προσομοίωσης και αντιστοιχεί στην 2^η ημέρα του Ιανουαρίου, ενώ το δεύτερο διαρκεί από την 3654^η μέχρι την 3668^η ώρα προσομοίωσης και αντιστοιχεί στην 1^η ημέρα του Ιουνίου. Όπως γίνεται αντιληπτό μιλάμε για τα διαστήματα ηλιοφάνειας μιας αντιπροσωπευτικής ημέρας του χειμώνα καθώς και του καλοκαιριού αντίστοιχα.

8. Αναφέρεται ότι για την σύγκριση των αποτελεσμάτων απαιτούνται δύο προσομοιώσεις. Η διαφορά μεταξύ τους είναι ότι στην μεν πρώτη οι συντελεστές *GEOSURF* για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες, υπολογίζονται βάσει του λόγου των εμβαδών, ενώ στη δεύτερη υπολογίζονται από τον κώδικα *VFCALC*.

9. Τα ανοίγματα συγκεντρώθηκαν σε ένα, του ίδιου συνολικού εμβαδού για κάθε επιφάνεια

Στην συνέχεια παρατίθενται οι γωνίες ηλιακού αζιμουθίου ανατολής/δύσης και μέγιστου ηλιακού ύψους (Πίνακας 7.1) καθώς και οι συντελεστές μορφής για την γεωμετρία του κύβου (Πίνακας 7.2). Αναλυτική μεθοδολογία υπολογισμού των γωνιών αναφέρεται στο Κεφάλαιο 5, ενώ οι συντελεστές μορφής μεταξύ παραθύρων και εσωτερικών επιφανειών υπολογίζονται από τον κώδικα *VFCALC*.

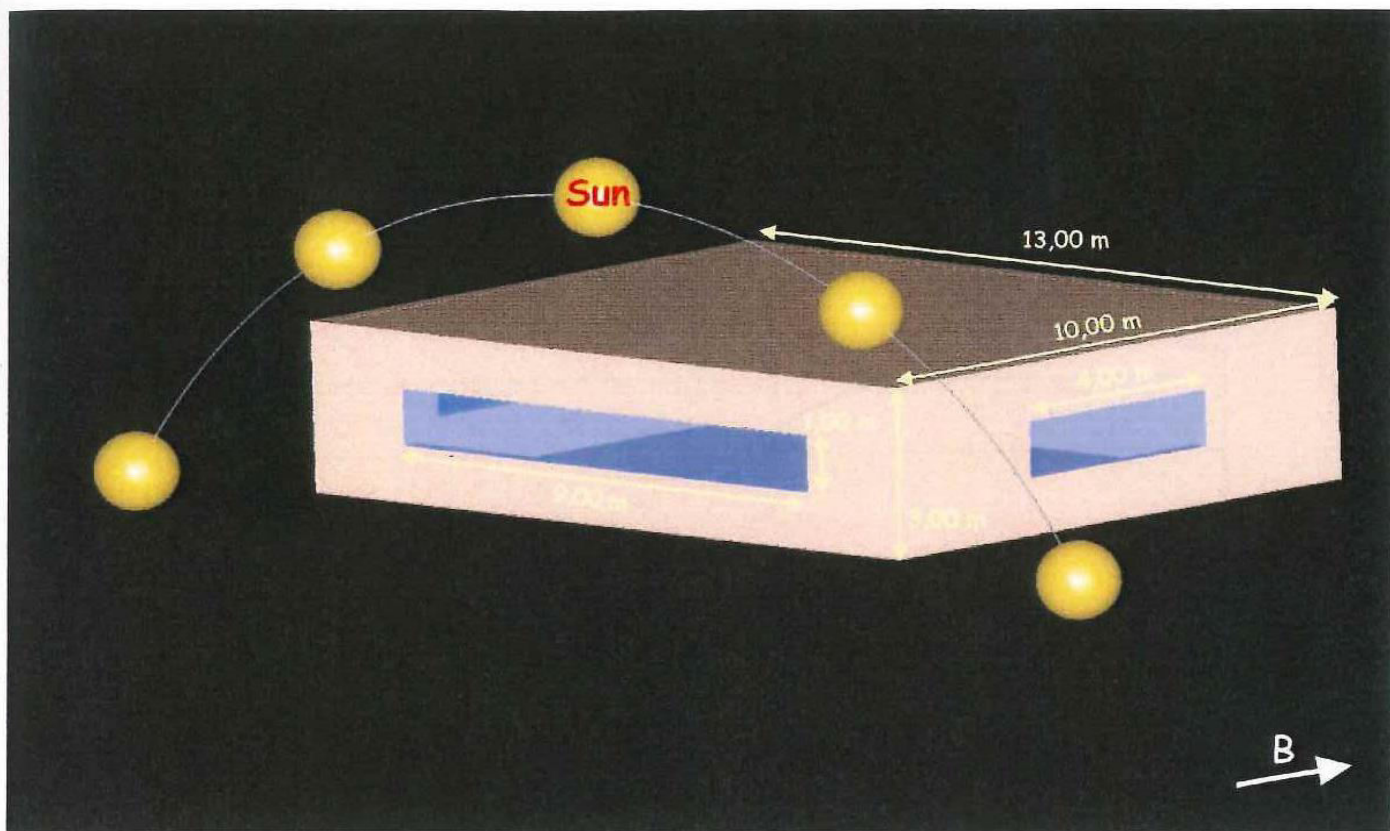
Ηλιακές Γωνίες	Χειμώνας (02/01) (w)	Καλοκαίρι (01/06) (s)
Γωνία ηλιακού αζιμουθίου ανατολής/δύσης (γ_s)	59,29 °	119,8 °
Γωνία μέγιστου ηλιακού ύψους (α_s)	26,8 °	72,03 °

Πίνακας 7.1: Ηλιακές γωνίες για την πόλη της Καστοριάς

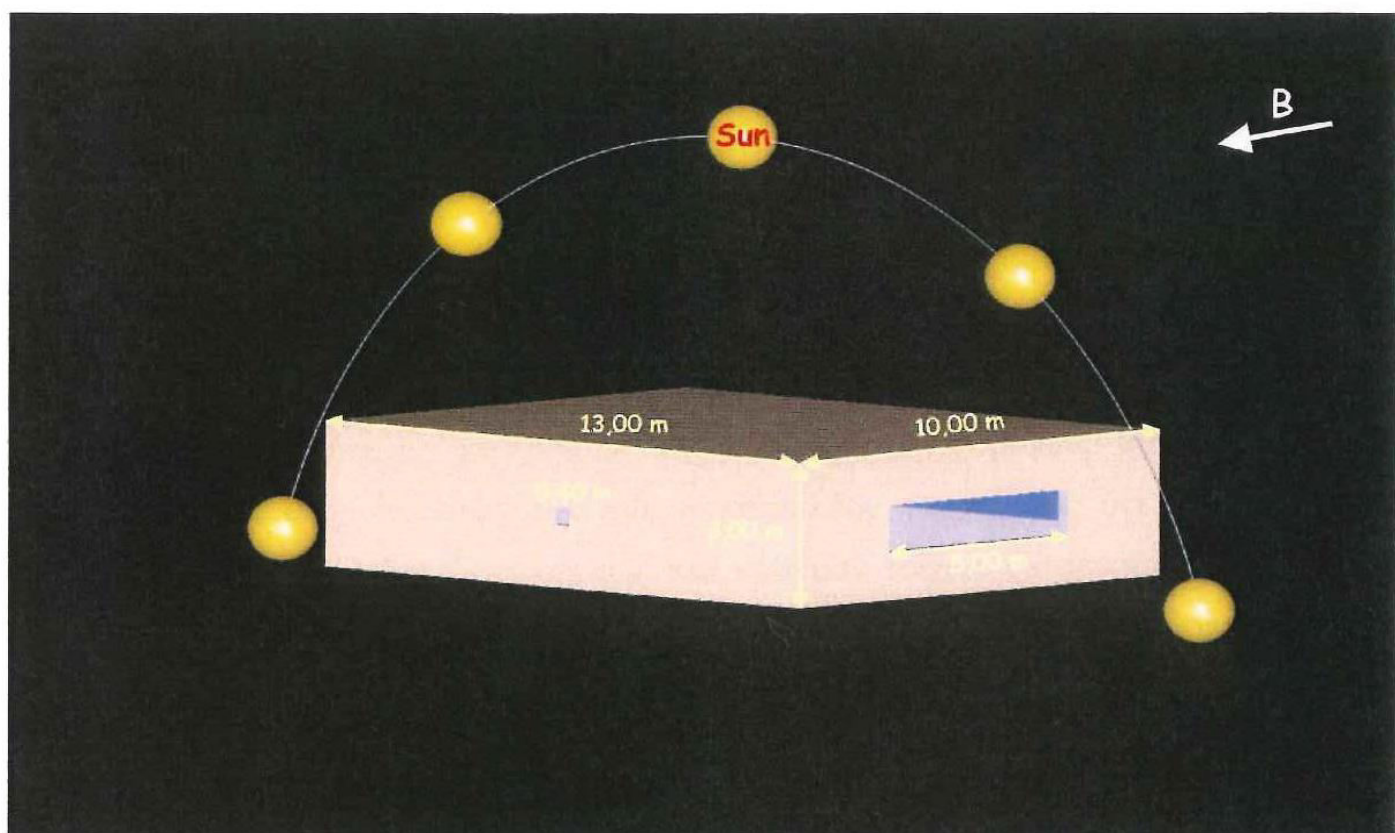
Συντελεστές Μορφής	Νότιο παράθυρο	Ανατολικό παράθυρο	Δυτικό παράθυρο	Βόρειο παράθυρο
Βόρειος τοίχος	0,092	0,085	0,088	0,000
Νότιος τοίχος	0,000	0,085	0,088	0,098
Ανατολικός τοίχος	0,066	0,000	0,050	0,050
Δυτικός τοίχος	0,066	0,051	0,000	0,050
Οροφή	0,388	0,389	0,387	0,401
Δάπεδο	0,388	0,389	0,387	0,401
Σύνολο	1,000	1,000	1,000	1,000

Πίνακας 7.2: Συντελεστές μορφής μεταξύ παραθύρων και εσωτερικών επιφανειών, για την γεωμετρία της μονοκατοικίας

Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η γεωμετρία του κτιρίου καθώς και των ανοιγμάτων του. Παράλληλα αναπαρίσταται και η τροχιά την οποία ακολουθεί ο ήλιος τις δύο διαφορετικές ημέρες της προσομοίωσης. (Σε όλα τα διαγράμματα που ακολουθούν η ένδειξη $G0$, αναφέρεται στην προσομοίωση όπου όλοι οι συντελεστές $GEOSURF$ υπολογίζονται βάσει του λόγου των εμβαδών, ενώ η ένδειξη $G1$ αναφέρεται στην προσομοίωση, κατόπιν χρήσης του κώδικα $VFCALC$.)



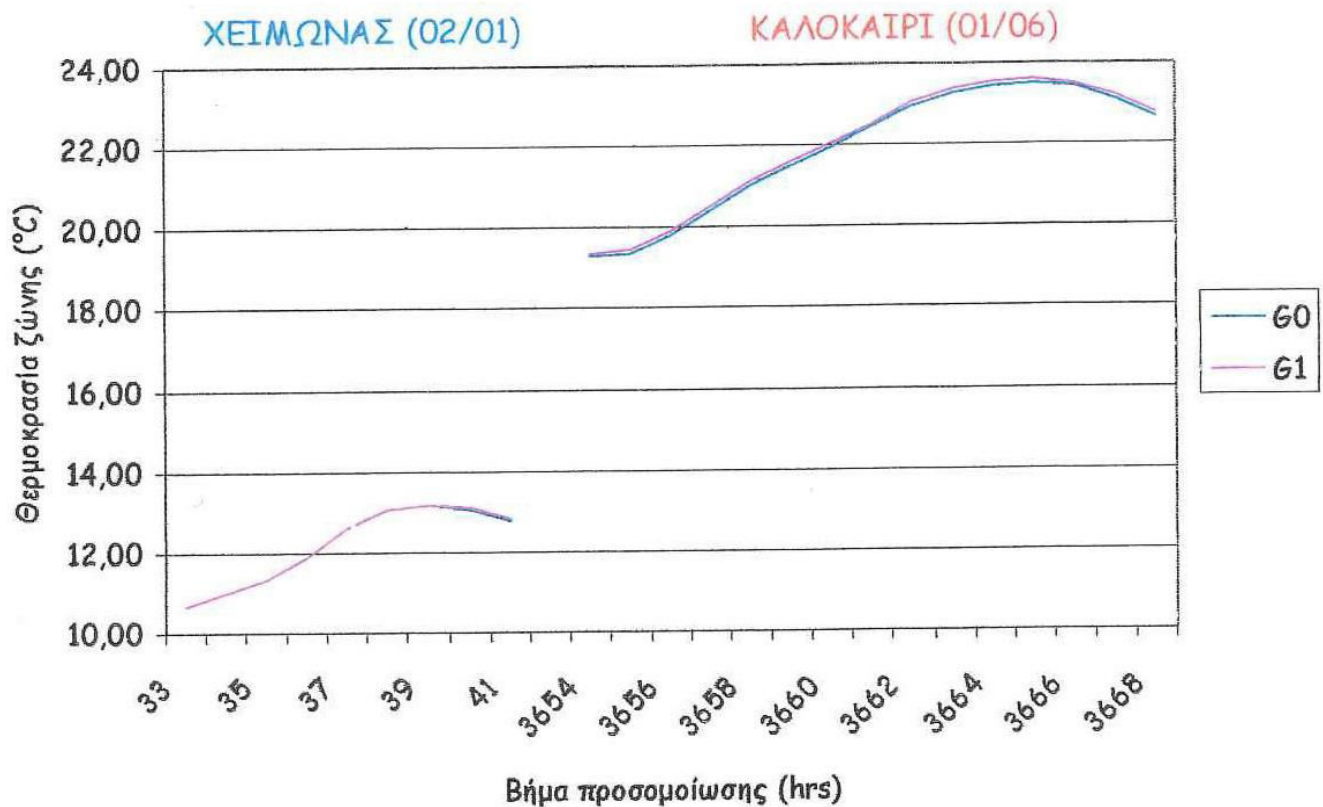
Σχήμα 7.3: Υπό-προσομοίωση μοντέλο μονοκατοικίας και ηλιακή τροχιά κατά την 2^η ημέρα του Ιανουαρίου.



Σχήμα 7.4: Υπό-προσομοίωση μοντέλο μονοκατοικίας και ηλιακή τροχιά κατά την 1^η ημέρα του Ιουνίου.

7.2 Σύγκριση θερμοκρασιών ζώνης

Το Σχήμα 7.5 παρουσιάζει τις τιμές θερμοκρασιών ζώνης για κάθε μία από τις ώρες ηλιοφάνειας των δύο ημερών της προσομοίωσης.



Σχήμα 7.5: Θερμοκρασίες ζώνης

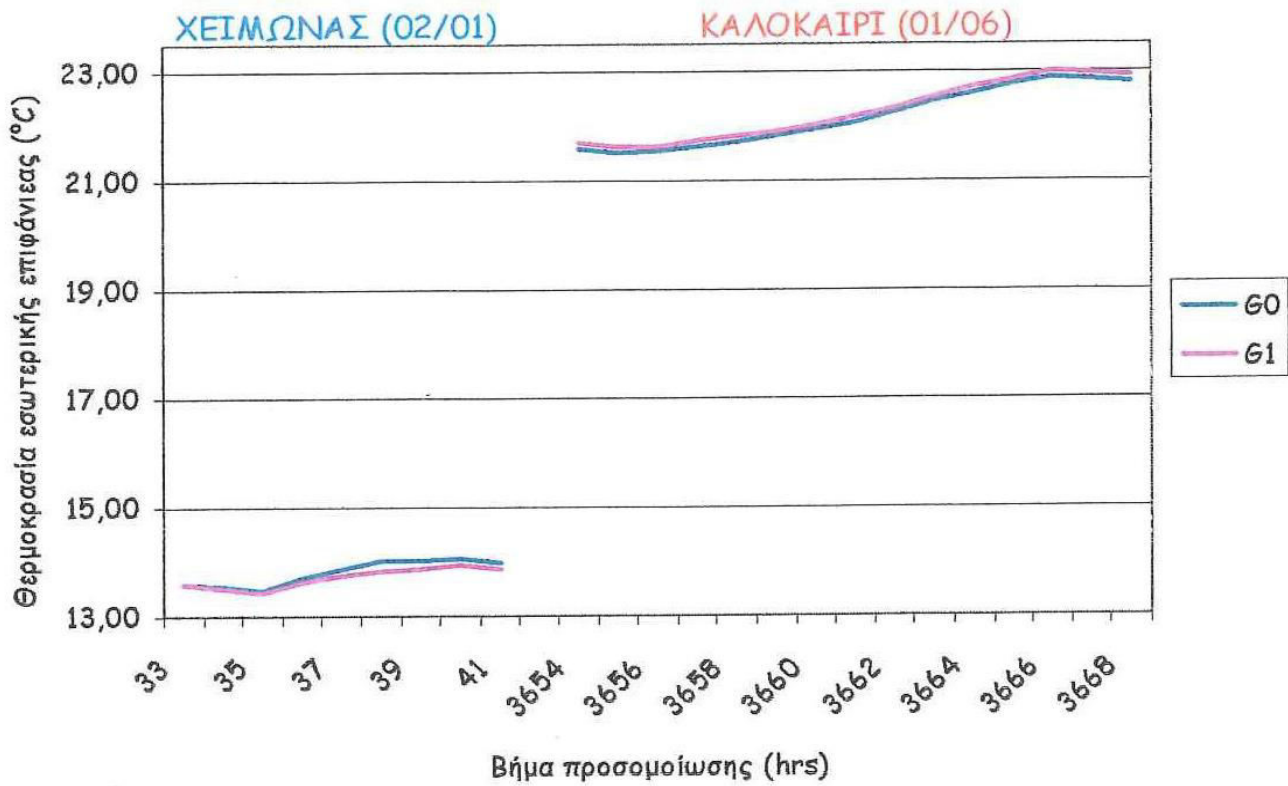
Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι η χρήση του κώδικα *VFCALC*, επηρεάζει ελάχιστα την θερμοκρασία της ζώνης. Κάτι όμως που αξίζει να αναφερθεί στην προκειμένη περίπτωση είναι το γεγονός ότι παρά την ταύτιση που παρουσιάζουν οι θερμοκρασίες ζώνης, κατά την διάρκεια του χειμώνα, το καλοκαίρι οι τιμές που λαμβάνει η θερμοκρασία της ζώνης εμφανίζονται ελαφρώς υψηλότερες κατά την διάρκεια της προσομοίωσης *G1*. Αυτό συμβαίνει λόγω καλύτερης κατανομής της ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια υπολογισμού των θερμοκρασιών του χώρου. Επιπλέον το γεγονός ότι στην προκειμένη περίπτωση οι διατομές δαπέδου, οροφής και κάθετων τοίχων διαφέρουν μεταξύ τους, με αποτέλεσμα τα δομικά στοιχεία αυτά να έχουν διαφορετικές θερμοχωρητικότητες, δικαιολογεί την μορφή του Σχήματος 7.5.

7.3 Σύγκριση θερμοκρασιών των εσωτερικών επιφανειών της ζώνης

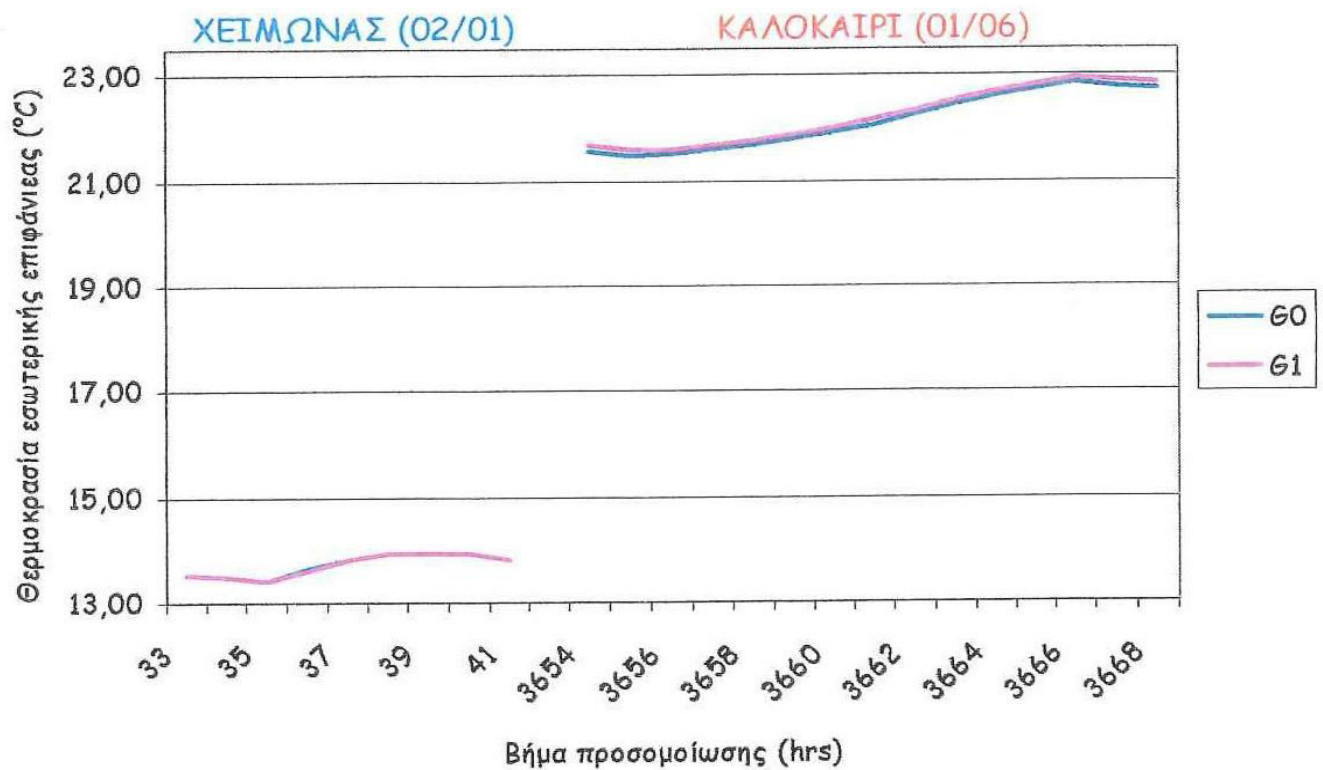
Τα Σχήματα 7.6-7.11 παρουσιάζουν τις θερμοκρασίες, καθεμιάς από τις εσωτερικές επιφάνειες της μονοκατοικίας, για τις δύο περιπτώσεις προσομοίωσης. Με μια πρώτη ματιά η μορφή τους είναι κοινή και όμοια με αυτή του διαγράμματος των θερμοκρασιών ζώνης (Σχήμα 7.5). Ένα κοινό γνώρισμα όλων το διαγραμμάτων είναι το γεγονός ότι κατά την διάρκεια του καλοκαιριού οι θερμοκρασίες της προσομοίωσης $G1$ είναι υψηλότερες από αυτές της $G2$. Αυτό συμβαίνει διότι κατά την διάρκεια του καλοκαιριού ο ήλιος διαγράφει μεγαλύτερη πορεία στον ορίζοντα (Πίνακας 7.1), από ότι τον χειμώνα, πράγμα που λαμβάνει υπόψη του ο κώδικας *VFCALC* και κατά συνέπεια κατανέμει καλύτερα την ηλιακή ακτινοβολία στις εσωτερικές επιφάνειες του χώρου, έτσι ώστε να διορθώνονται και οι τιμές των θερμοκρασιών τους.

Όσον αφορά τον χειμώνα, με εξαίρεση την εσωτερική επιφάνεια του νότιου τοίχου (Σχήμα 7.6), δεν παρατηρούμε σημαντικές διαφορές μεταξύ των θερμοκρασιών των επιφανειών της ζώνης. Η χαμηλή πορεία του ήλιου στον χειμερινό ορίζοντα έχει ως αποτέλεσμα το νότιο παράθυρο να δέχεται την μεγαλύτερη ποσότητα ηλιακής ακτινοβολίας, κι έτσι το δάπεδο και ο βόρειος τοίχος, όπου και κυρίως προσπίπτει, να θερμαίνονται περισσότερο, προκειμένου όμως να διατηρηθεί η θερμοκρασιακή ισορροπία, η αύξηση των θερμοκρασιών του δαπέδου και του βόρειου τοίχου, οδηγεί σε μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας του νοτίου τοίχου.

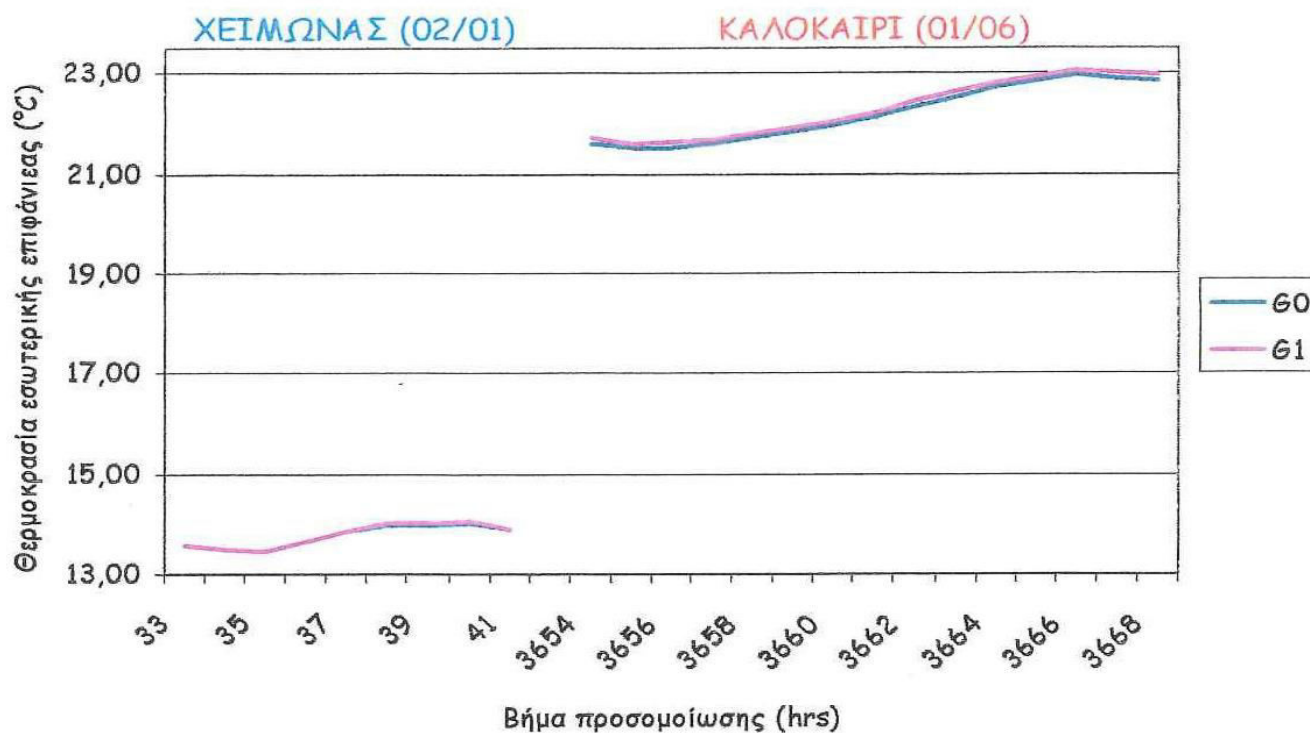
Τέλος, το δάπεδο και η οροφή παρουσιάζουν τις ίδιες θερμοκρασίες, επειδή τα ανοίγματα είναι συμμετρικά τοποθετημένα.



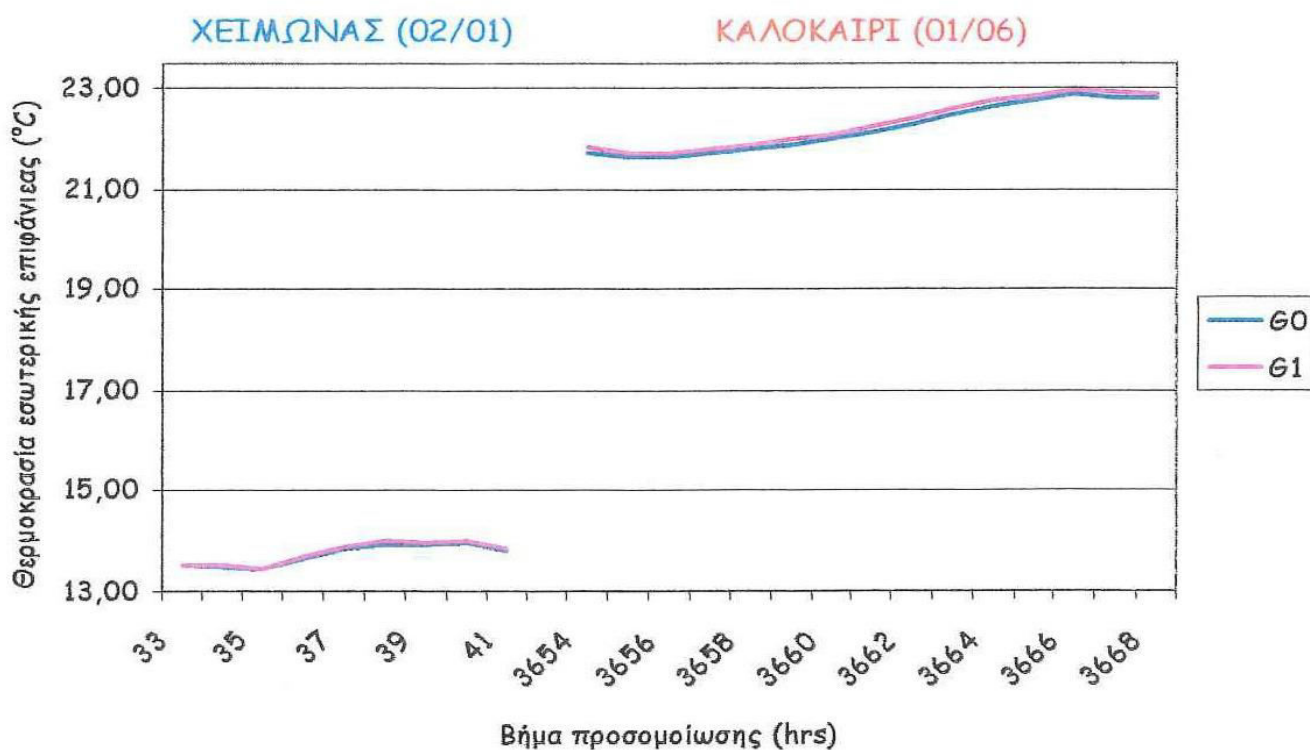
Σχήμα 7.6: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του **ΝΟΤΙΟΥ** τοίχου



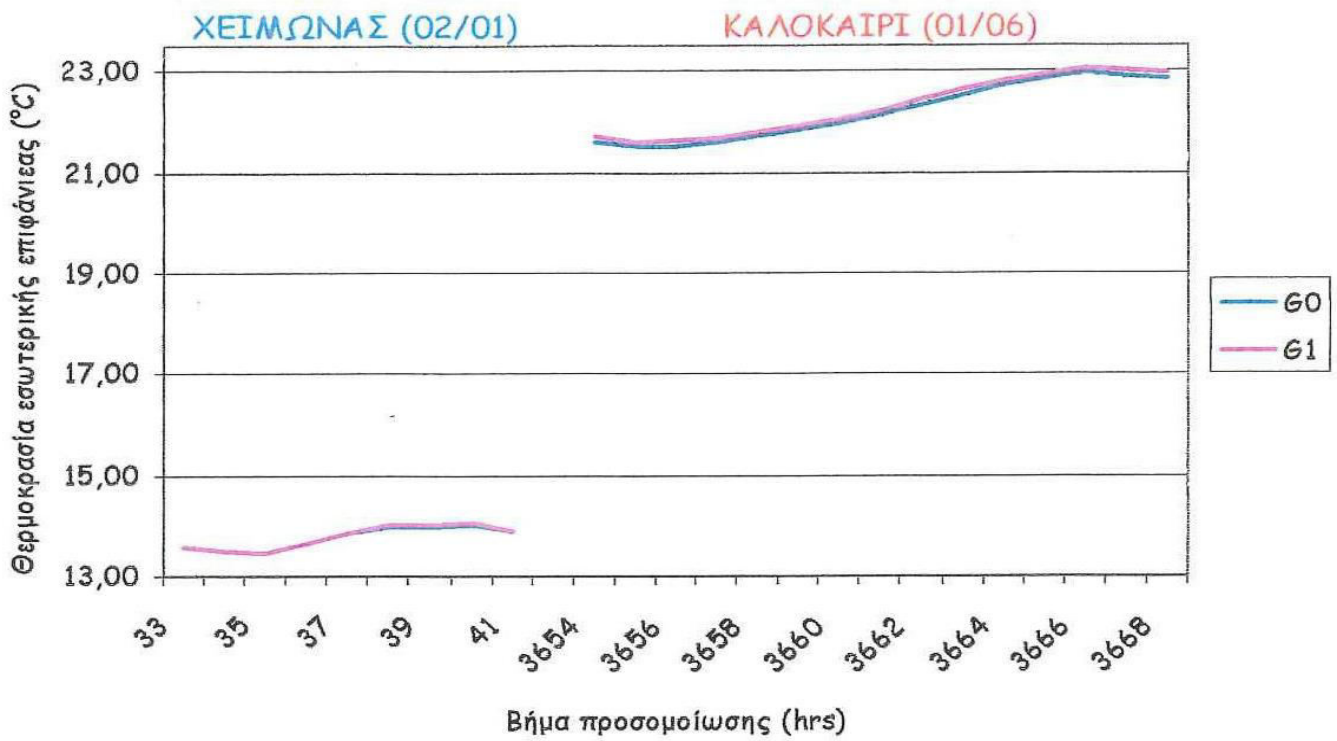
Σχήμα 7.7: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του **ΒΟΡΕΙΟΥ** τοίχου



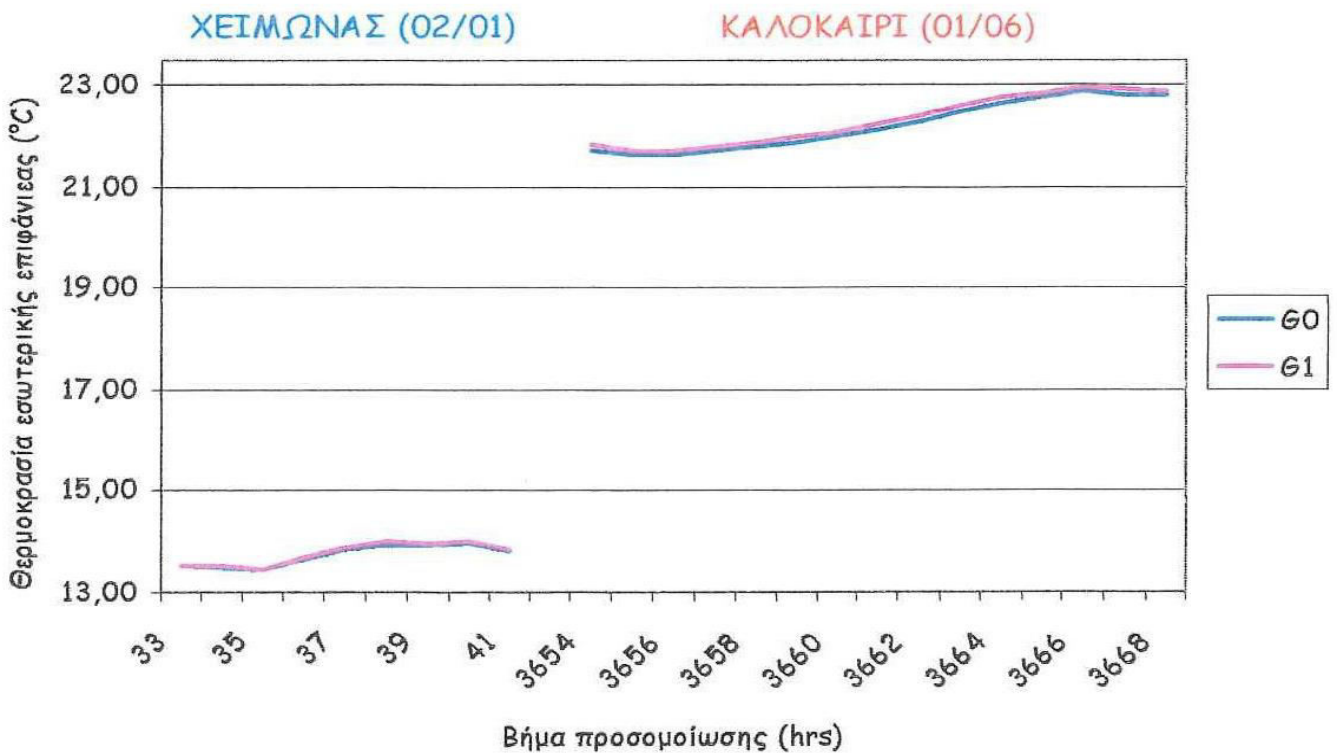
Σχήμα 7.8: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ τοίχου



Σχήμα 7.9: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας του ΔΥΤΙΚΟΥ τοίχου



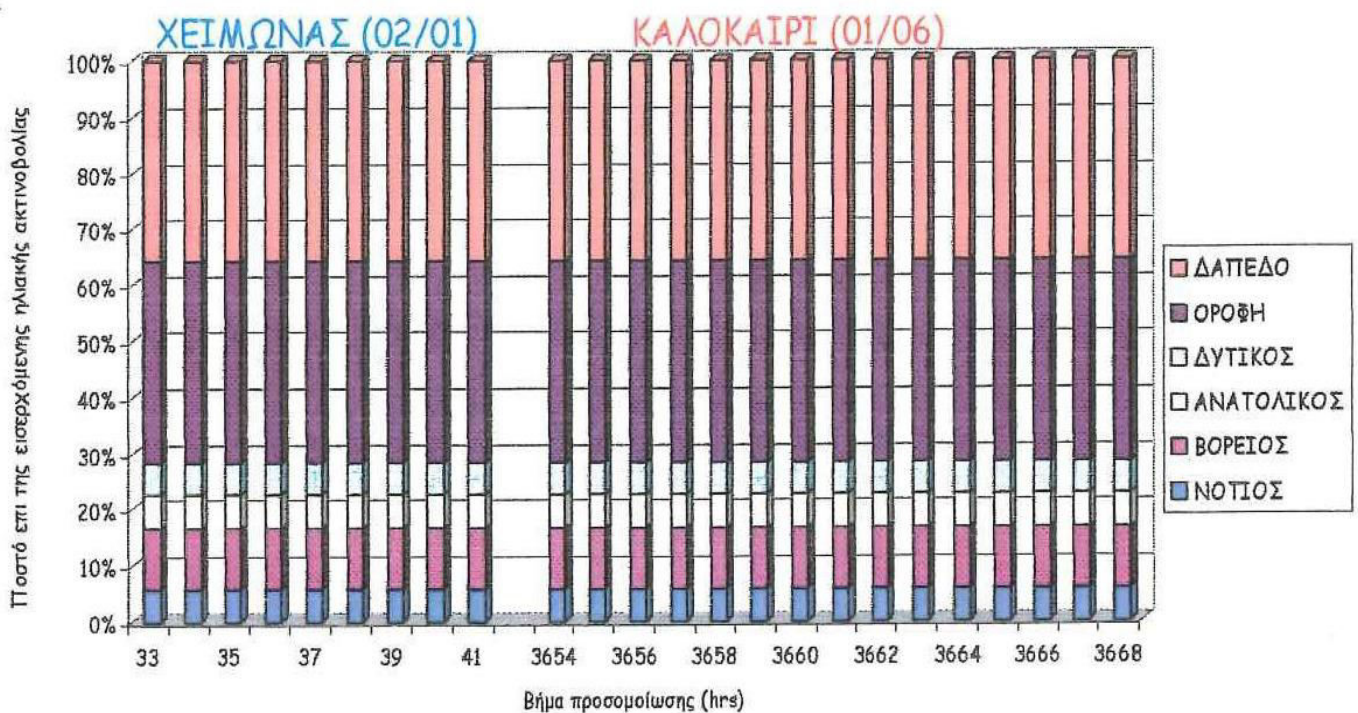
Σχήμα 7.10: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας ΟΡΟΦΗΣ



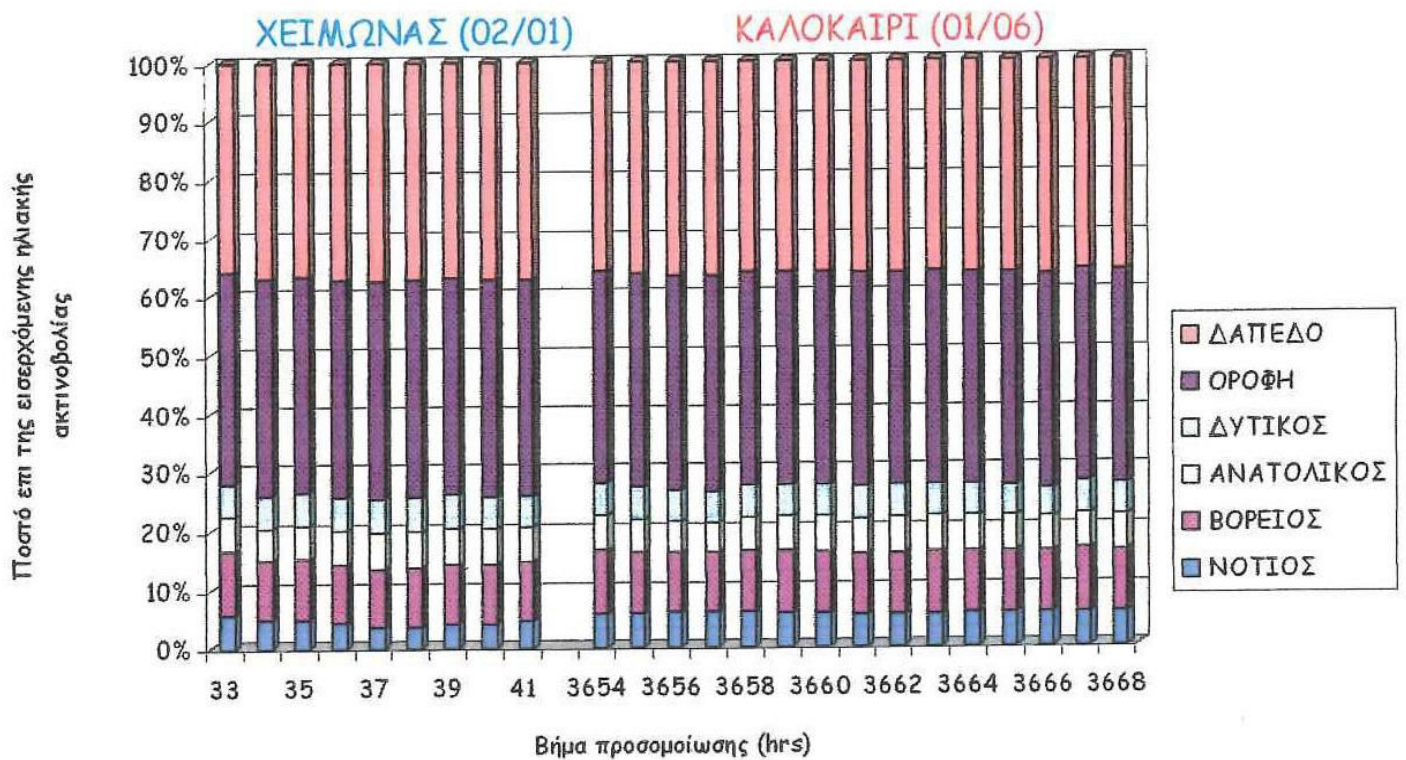
Σχήμα 7.11: Θερμοκρασίες εσωτερικής επιφάνειας ΔΑΠΕΔΟΥ

7.4 Σύγκριση ποσοστών της συνολικά εισερχόμενης άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται στις εσωτερικές επιφάνειες

Τα διαγράμματα που ακολουθούν αναφέρονται στα ποσοστά της άμεσης ακτινοβολίας, που εισέρχεται στον εσωτερικό χώρο από όλα τα ανοίγματα τις γεωμετρίας, και τελικά απορροφάται από κάθε εσωτερική επιφάνεια. Για καλύτερη κατανόηση και επεξεργασία, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε δύο είδη διαγραμμάτων. Στο πρώτο είδος ανήκουν τα Σχήματα 7.12 και 7.13, τα οποία παρουσιάζουν για κάθε ώρα προσομοίωσης το ποσοστό ακτινοβολίας που απορροφάται από κάθε εσωτερική επιφάνεια τοίχου, κάθε ράβδος αποτελεί την συνολικά εισερχόμενη ηλιακή ακτινοβολία στον χώρο. Στο δεύτερο είδος ανήκουν τα Σχήματα 7.14-7.19, που περιέχουν τα ποσοστά απορρόφησης για κάθε τοίχο ξεχωριστά.



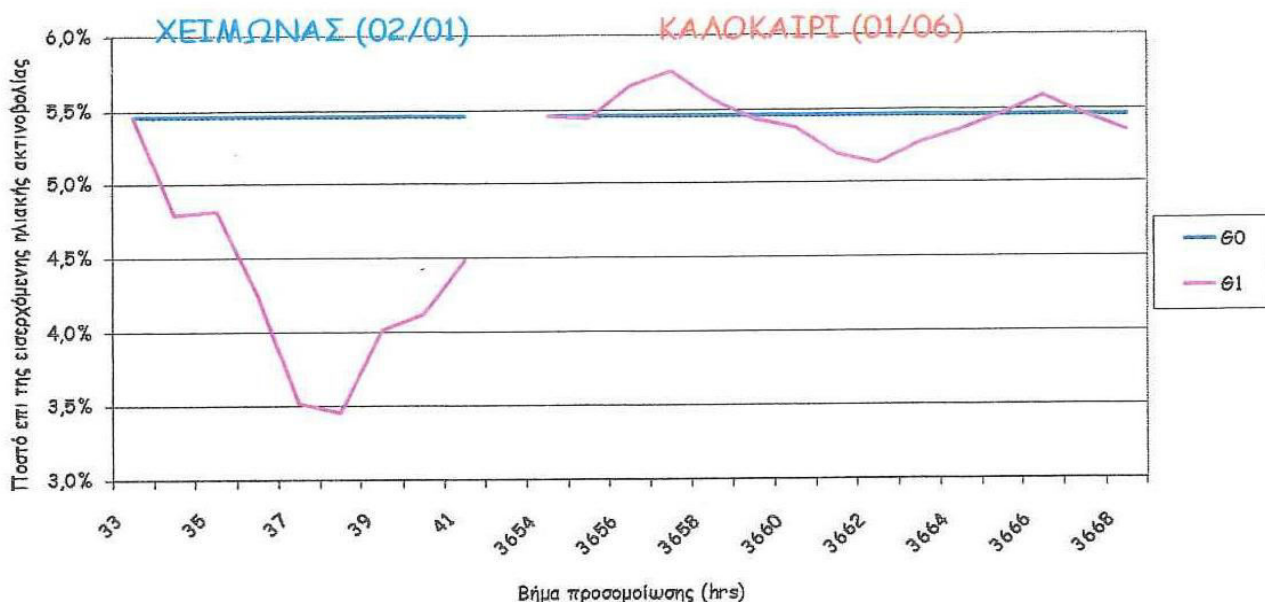
Σχήμα 7.12: Ποσοστά απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων ($G\theta$)



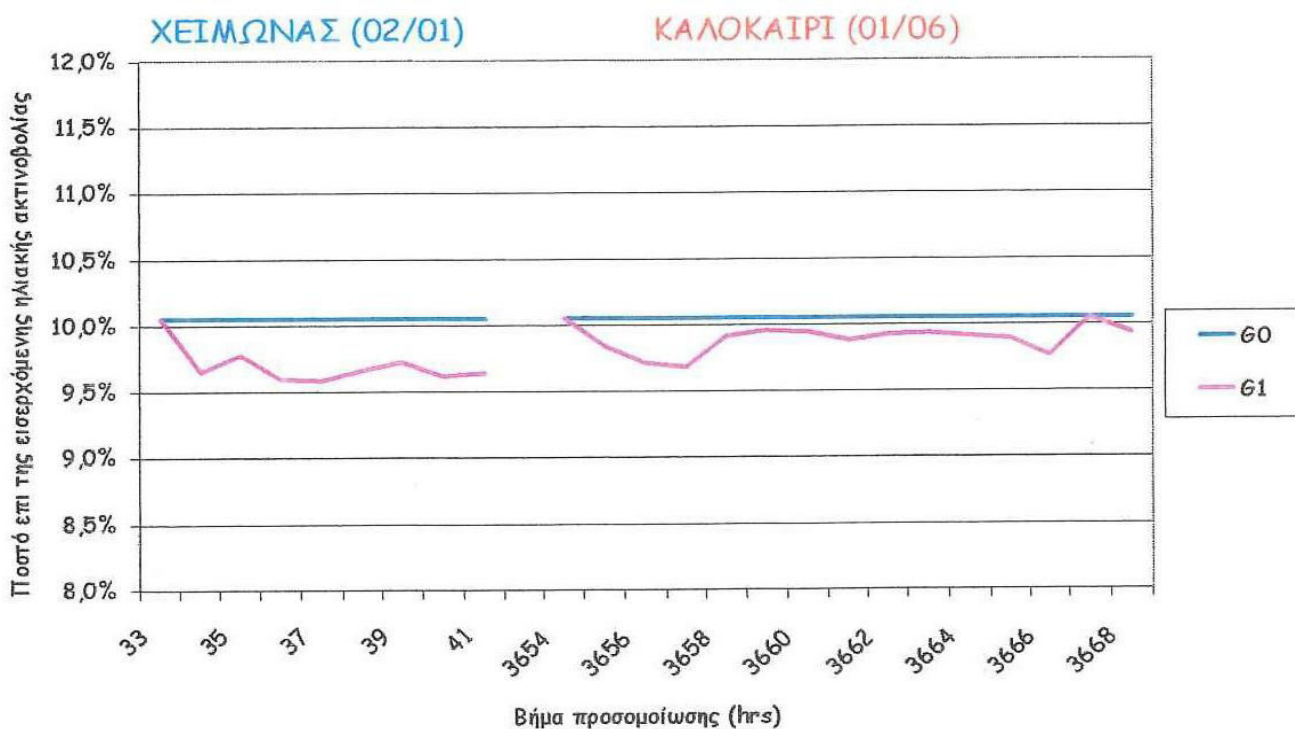
Σχήμα 7.13: Ποσοστά απορρόφησης της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για όλες τις εσωτερικές επιφάνειες των τοίχων (G1)

Πρώτα απ' όλα, γίνεται σαφές ότι το δάπεδο και η οροφή είναι οι μεγαλύτεροι δέκτες ηλιακής ακτινοβολίας και στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζοντας περίπου ίδια ποσοστά. Αυτό συμβαίνει λόγω της θέσης και του εμβαδού τους. Επιπλέον σε κάποια βήματα, κατά την διάρκεια της δεύτερης προσομοίωσης, μειώνονται τα ποσοστά απορρόφησης των εσωτερικών επιφανειών του νοτίου και του ανατολικού τοίχου, λόγω της θέσης του ηλίου, με παράλληλη όμως αύξηση των ποσοστών των εσωτερικών επιφανειών του βορείου και του δυτικού τοίχου αντίστοιχα.

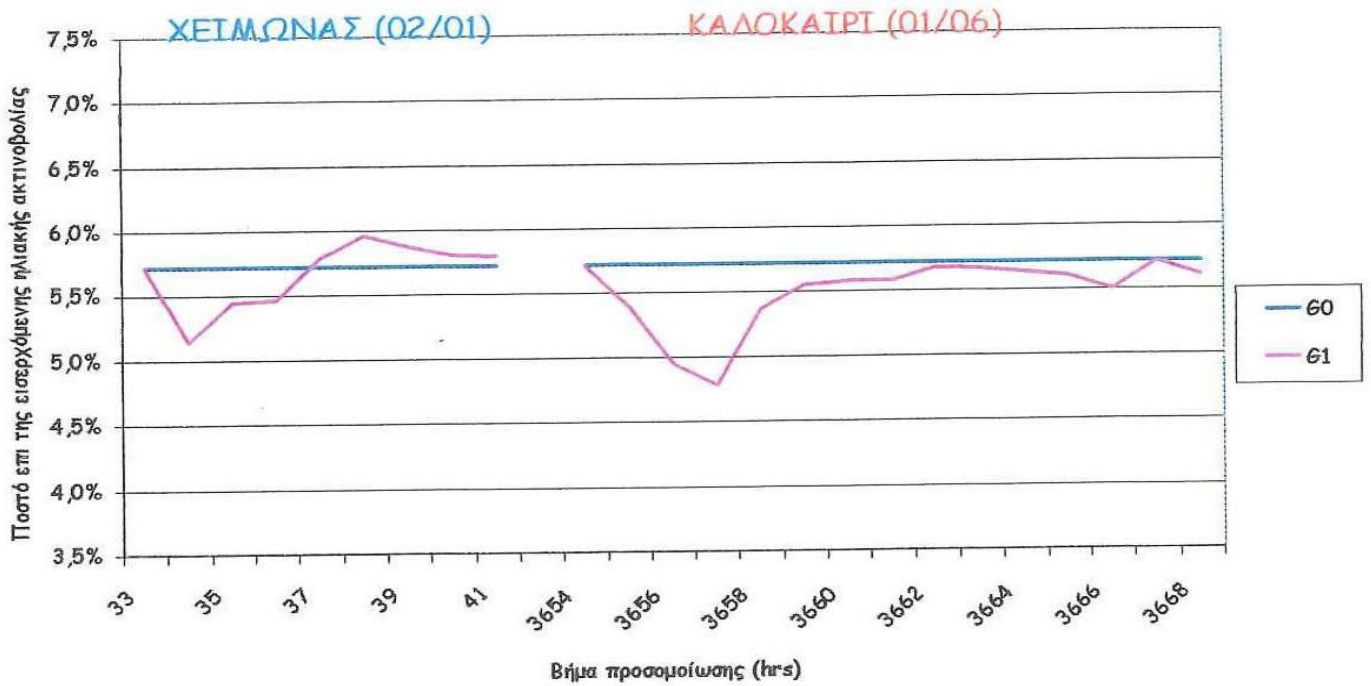
Τα Σχήματα 7.14-7.19 βοηθούν, ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η διανομή της ακτινοβολίας σε κάθε εσωτερική επιφάνεια.



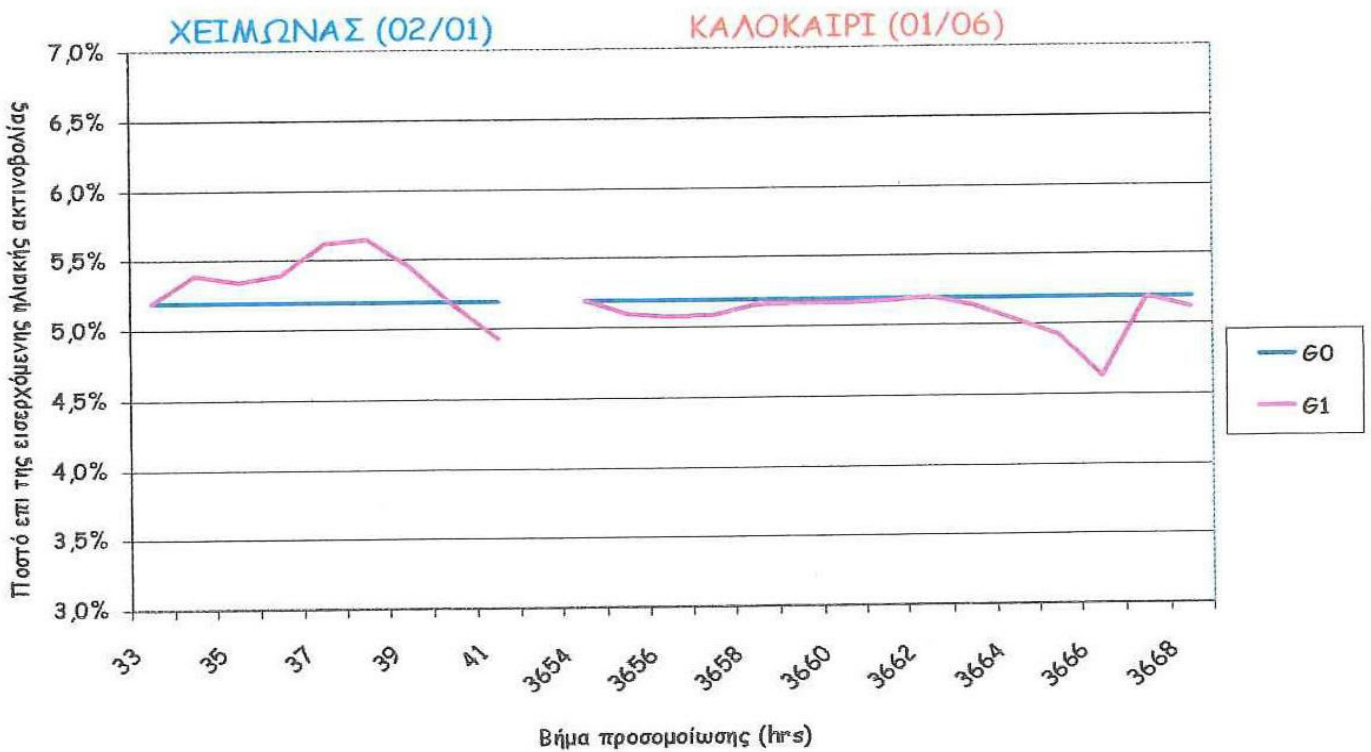
Σχήμα 7.14: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του **ΝΟΤΙΟΥ** τοίχου



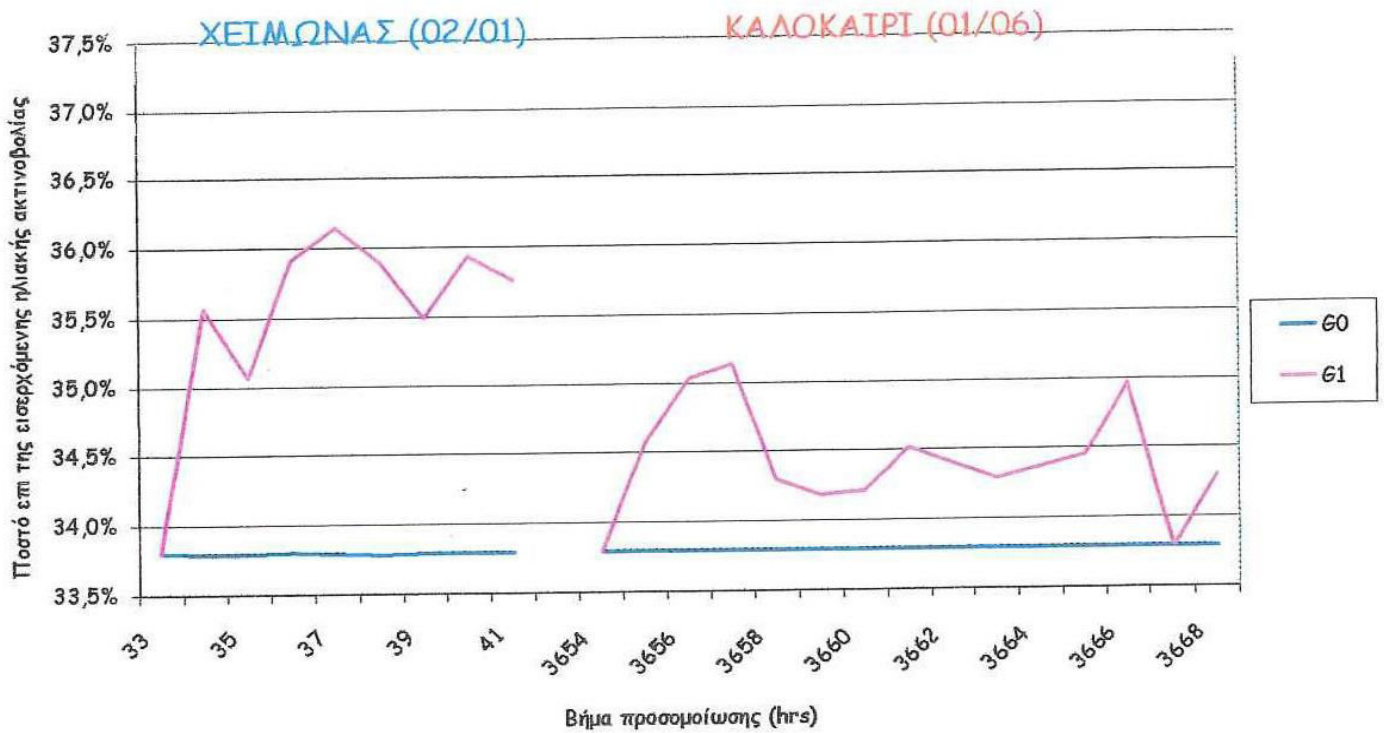
Σχήμα 7.15: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του **ΒΟΡΕΙΟΥ** τοίχου



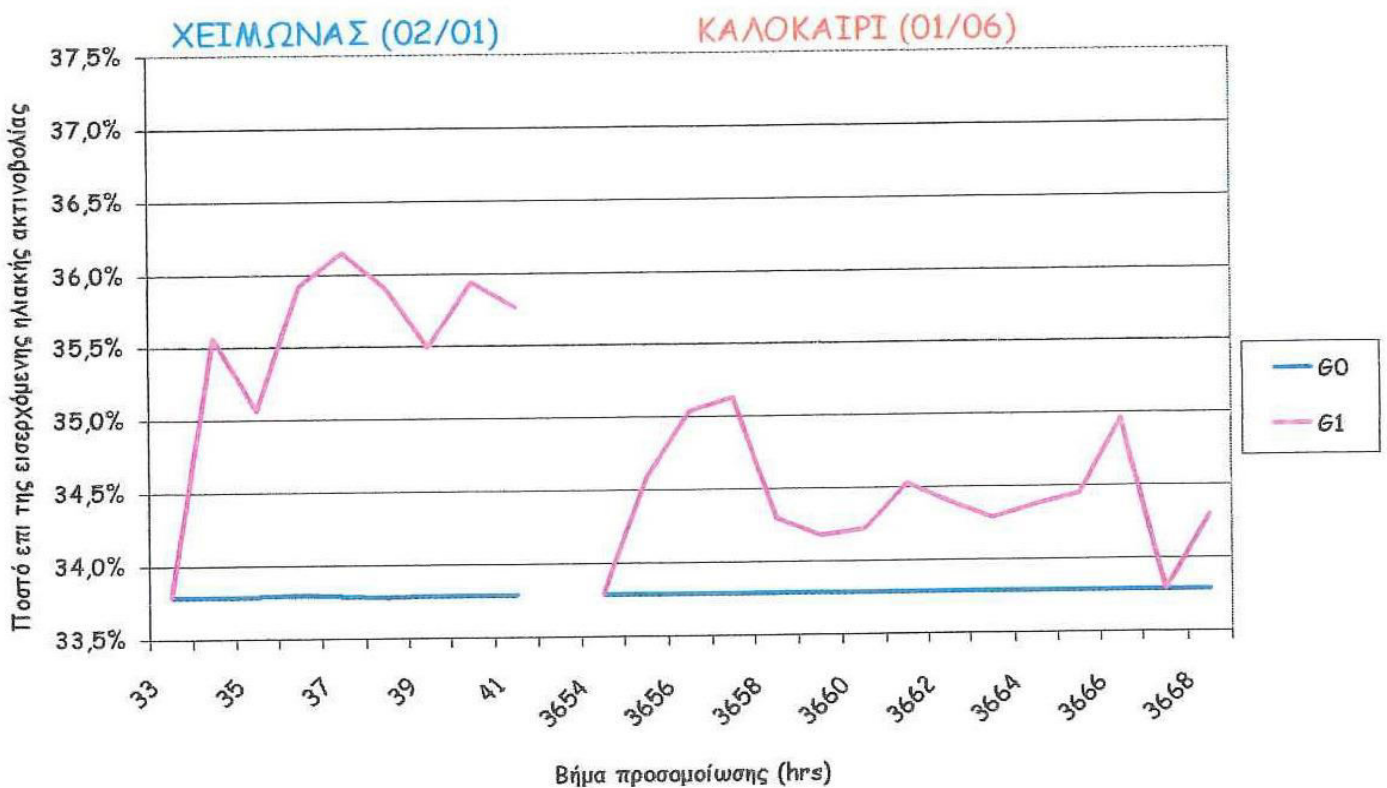
Σχήμα 7.16: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για εσωτερική επιφάνεια του ΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ τοίχου



Σχήμα 7.17: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του ΔΥΤΙΚΟΥ τοίχου



Σχήμα 7.18: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια της ΟΡΟΦΗΣ



Σχήμα 7.19: Ποσοστά απορρόφησης εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας για την εσωτερική επιφάνεια του ΔΑΠΕΔΟΥ

Ξεκινώντας από τον νότιο τοίχο (Σχήμα 7.14) βλέπουμε ότι κατά την διάρκεια της χειμερινής ημέρας το ποσοστό ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται και κατά συνέπεια προσπίπτει επάνω στη επιφάνεια του τοίχου μειώνεται σημαντικά και στη συνέχεια αυξάνεται. Η εξήγηση στο παραπάνω φαινόμενο έχει να κάνει με τα ανοίγματα από τα οποία προέρχεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στον τοίχο. Στην αρχή της ημέρας η ακτινοβολία εισέρχεται στον χώρο από το ανατολικό παράθυρο και στη συνέχεια περνάει στον νότο με αποτέλεσμα να μειώνεται η ακτινοβολία στο νότιο τοίχο. Από το μεσημέρι και μετά εισέρχεται από το δυτικό άνοιγμα και αυξάνεται μέχρι να δύσει εντελώς ο ήλιος, έτσι το Σχήμα 7.14 παίρνει την υποφαινόμενη μορφή του. Κατά την διάρκεια του καλοκαιριού, συμβαίνει ακριβώς το ίδιο φαινόμενο με μεγαλύτερη όμως ένταση λόγω της επίσης μεγαλύτερης τροχιάς που διαγράφει ο ήλιος στον ορίζοντα, καθώς και της κατακόρυφης θέσης του (Πίνακας 7.1).

Ο ανατολικός τοίχος (Σχήμα 7.16) παρουσιάζει μείωση του ποσοστού απορρόφησης στην αρχή όχι μόνο της χειμερινής αλλά και της θερινής ημέρας, διότι σε αυτό το διάστημα δεν δέχεται άμεσα ηλιακή ακτινοβολία από κανένα άνοιγμα. Όταν όμως ο ήλιος δύει στη μεν διάρκεια της χειμερινής ημέρας εισέρχεται άμεση ηλιακή ακτινοβολία από το νότιο παράθυρο, η οποία και προσπίπτει επάνω στον ανατολικό τοίχο που βρίσκεται σχετικά κοντά της, ενώ κατά την διάρκεια του καλοκαιριού η άμεση ηλιακή ακτινοβολία προέρχεται από το δυτικό παράθυρο.

Κλείνοντας τα σχόλια για τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της μονοκατοικίας, αξίζει να αναφέρουμε ότι λόγω γεωμετρίας του κτιρίου και συμμετρίας των ανοιγμάτων, το δάπεδο και η οροφή (Σχήματα 7.18-7.19), είναι οι επιφάνειες της ζώνης που απορροφούν το μεγαλύτερο ποσοστό της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα επειδή το ύψος της μονοκατοικίας είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τις άλλες δύο διαστάσεις της, είναι προφανές ότι ένα σημαντικό μέρος, αν όχι το μεγαλύτερο, από την άμεση ακτινοβολία που εισέρχεται στην ζώνη, από το κάθε άνοιγμα, θα απορροφηθεί από το δάπεδο. Η προαναφερθείσα αύξηση εξηγεί και την μείωση που παρατηρείται στα ποσοστά απορρόφησης του βορείου (Σχήμα 7.15) και δυτικού (Σχήμα 7.17) τοίχου, διότι πρέπει να διατηρείται η ενεργειακή ισορροπία. Η οροφή έχει τα ίδια ποσοστά απορρόφησης με το δάπεδο, επειδή όπως προαναφέρθηκε τα ανοίγματα είναι συμμετρικά τοποθετημένα προς τις δύο επιφάνειες.

8. Κριτική και συμπεράσματα για τον κώδικα VFCALC

Μετά το πέρας των τριών προσομοιώσεων, που αναφέρθηκαν στα Κεφάλαια 5, 6 και 7, οι οποίες καλύπτουν από ιδανικές έως λίγο πιο σύνθετες και συνάμα πιο κοντά στην πραγματικότητα γεωμετρίες, έγινε πλήρης παρουσίαση, επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Στο κεφάλαιο αυτό λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω θα γίνει κριτική για τον κώδικα *VFCALC*, η οποία και θα βοηθήσει στην διεξαγωγή συμπερασμάτων τόσο για την αποτελεσματικότητα όσο και για την αξιοπιστία του. Πιο συγκεκριμένα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του κώδικα είναι τα εξής:

Πλεονεκτήματα

1. Βελτίωση προσομοίωσης. Αποτελεί ένα από τα βασικότερα, αν όχι το σημαντικότερο πλεονέκτημα του κώδικα. Το γεγονός ότι ένα σταθερό για το *TRNSYS* μέγεθος (*GEOSURF*), μετατράπηκε σε μεταβλητό και μάλιστα συναρτήσεως της ωριαία μεταβαλλόμενης ηλιακής ακτινοβολίας, εγγυάται την καλύτερη ποιότητα προσομοίωσης. Όπως έγινε κατανοητό από τις δοκιμές που έγιναν τόσο σε απλές (κύβος, παραλληλεπίπεδο) όσο και σε πραγματική γεωμετρία (μονοκατοικία), η χρήση του κώδικα *VFCALC* βοηθάει το προσομοιωτικό πρόγραμμα να κάνει πιο ρεαλιστική κατανομή την άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στις επιφάνειες του εσωτερικού χώρου. Έτσι, οποιοδήποτε δεδομένο εξόδου ζητήσουμε από το πρόγραμμα προσομοίωσης (π.χ. απαιτούμενα θερμικά και ψυκτικά φορτία), για οποιοδήποτε υπό-προσομοίωση μοντέλο, κατόπιν χρήσης του κώδικα, θα είναι σωστότερο. Ο κώδικας *VFCALC* δηλαδή φέρνει την προσομοίωση ένα βήμα πιο κοντά στις πραγματικές συνθήκες.

2. Κατανοητό μαθηματικό μοντέλο. Μια ματιά στο μαθηματικό μοντέλο του κώδικα (§ 4.2), παρατηρούμε ότι βασίζεται σε σχετικά απλές πράξεις, με αυξημένο μεν όγκο υπολογισμών, ο οποίος όμως είναι εύκολα προσβάσιμος και κατανοητός. Έτσι η κατανόηση της ίδιας της φιλοσοφίας και της δομής του κώδικα γίνεται εύκολα κατανοητή.

3. Καλύτερη κατανόηση ηλιακής γεωμετρίας. Στην προσπάθεια ανάλυσης και κατανόησης των αποτελεσμάτων γίνονται πιο κατανοητές οι έννοιες της ηλιακής γεωμετρίας. Γίνεται δηλαδή πιο εφικτή η μελέτη της επίδρασης της πορείας του ηλίου στον ορίζοντα καθ' όλη την διάρκεια του χρόνου καθώς και του τρόπου και του προσανατολισμού από τον οποίο εισέρχεται η άμεση ηλιακή ακτινοβολία στο εσωτερικό ενός χώρου.

4. Πλήρης γεωμετρία ανοιγμάτων. Στον εμπορικό κώδικα *TRNSYS*, τα γεωμετρικά δεδομένα που εισάγουμε για τα ανοίγματα ενός χώρου περιορίζονται στην επιφάνεια που αυτά καταλαμβάνουν. Σε αντίθεση, οι υπολογισμοί του κώδικα *VFCALC* δεν επηρεάζονται μόνο από την επιφάνεια των ανοιγμάτων, αλλά και από τις διαστάσεις, καθώς και από τις θέσεις τους στον κάθε τοίχο, μέσω των παραγόντων μορφής. Το παραπάνω γεγονός βοηθάει στην περεταίρω διεξαγωγή συμπερασμάτων για την πλήρη γεωμετρία των ανοιγμάτων και κατά πόσο αυτή επηρεάζει την διανομή της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας.

Μειονεκτήματα

1. Απλές γεωμετρίες. Όπως έγινε μέχρι τώρα κατανοητό, ο κώδικας αναφέρεται σε πολύ συγκεκριμένες γεωμετρίες με περιορισμένο αριθμό ανοιγμάτων. Πιο συγκεκριμένα οι γεωμετρίες που μπορούν να εξεταστούν είναι ορθογώνια παραλληλεπίπεδα, με ένα ή κανένα άνοιγμα σε κάθε εξωτερικό τους τοίχο. Επιπλέον οι υπό-μελέτη γεωμετρίες θα πρέπει να είναι εσωτερικά κενές, δεν θα πρέπει να περιέχουν δηλαδή εσωτερικά χωρίσματα και παράθυρα.

2. Αυτόνομος κώδικας. Ο κώδικας *VFCALC* είναι σχεδιασμένος για να συνεργάζεται με το προσομοιωτικό πρόγραμμα *TRNSYS*, το γεγονός όμως ότι εφαρμόζεται ξεχωριστά και όχι ταυτόχρονα με αυτό, προϋποθέτει δύο προσομοιώσεις. Επιπλέον πριν από την εφαρμογή του ο χρήστης θα πρέπει να κατανοήσει τον τρόπο δημιουργίας του αρχείου εισαγωγής (*GEOMETRY.TXT*) καθώς και τα δεδομένα του *TRNSYS* που πρέπει να εισαχθούν στον κώδικα, έτσι η συνολική διαδικασία γίνεται πιο χρονοβόρα.

Κλείνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται κατανοητό ότι η χρήση του κώδικα *VFCALC*, στις περιπτώσεις όπου η γεωμετρία και οι απλοποιητικές παραδοχές το επιτρέπουν είναι απαραίτητη λόγω της σημαντικής βελτίωσης που επιφέρει στα ποιοτικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Η πρόβλεψη γεωμετριών με περισσότερα του ενός εξωτερικά ανοίγματα, στην ίδια επιφάνεια, η δυνατότητα ενσωμάτωσης εσωτερικών χωρισμάτων και παραθύρων καθώς και η πλήρης ενσωμάτωση του κώδικα στο *TRNSYS*, με την μορφή *TYPE*, είναι σημεία τα οποία μπορούν, στο κοντινό μέλλον, να μετατρέψουν τον κώδικα *VFCALC*, σε σημαντικό βοήθημα για κάθε προσομοίωση κτιρίου.

Επίσης, η χρήση του στην προσομοίωση πειραματικά μετρημένων τιμών θα επιβεβαιώνει τα λογικά συμπεράσματα που έχουν εξαχθεί, ενώ θα πιστοποιούσε και την ποσοτική, πέρα από ποιοτική, ορθότητά τους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

1. Μουσιόπουλος, Ν.Σ. (1991). *Εισαγωγή στην μετάδοση Θερμότητας*, Εκδόσεις Γιαχούδη - Γιαπούλη, Θεσσαλονίκη. [1]
2. Ματαράς Δ.Σ. (2001 – 2002). *Προγραμματισμός για επιστήμονες και μηχανικούς: Fortran 90/95*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη. [9]
3. Μοσχάτος, Α.Ε. (1992). *Ηλιακή ενέργεια: Συνιστώσες της ηλιακής θερμικής διαδικασίας*, Εκδόσεις Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος, Αθήνα. [11]

Διεθνής

1. Clarke, J.A. (1985 – 2001), *Energy simulation in building design*, Butterworth Heineman, Glasgow, Scotland. [5]
2. Albright, L.D. (1990). *Environment for animals and plants*, ASAE Publications. [4]
3. Lienhard, H.J. IV and Lienhard, H.J. V (2004). *A heat transfer textbook*, Phologiston Press, 3rd edition, Cambridge, Massachusetts. [2]
4. TRNSYS 16 a TRaNsient SYstem Simulation program (2000-2005). *Volume 6: Multizone Building modeling with Type 56 and TRNBuild*, Solar Energy Laboratory, Univ. of Wisconsin-Madison, TRANSSOLAR Energietechnik GmbH, CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, TESS – Thermal Energy Systems Specialists [8]

U R L (Διαδουκτιακοί τόποι)

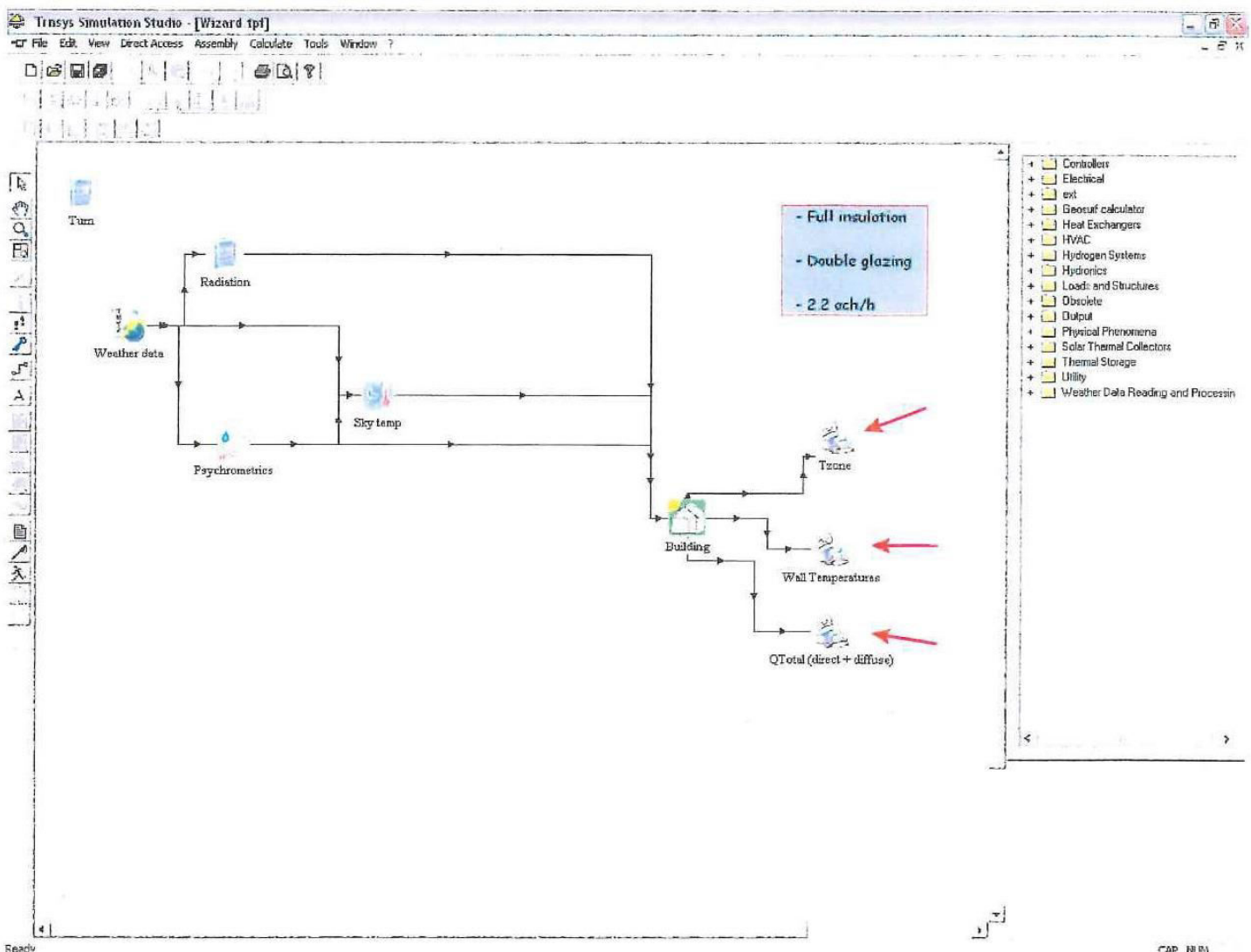
1. <http://www.google.com>
2. <http://www.wikipedia.com> [3]
3. <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/default.htm> [7]
4. <http://www.esru.strath.ac.uk>
5. <http://www.me.utexas.edu/~howell> [6]
6. http://holodeck.st.usm.edu/vrcomputing/vrc_t/tutorials/solar/azimuth.shtml [10]
7. <http://www.cres.gr> [12]

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Στο παρόν παράρτημα θα παρουσιαστεί αναλυτικά η μεθοδολογία χρήσης του κώδικα *VFCALC*, σε συνδυασμό με το προσομοιωτικό πρόγραμμα *TRNSYS*, για την γεωμετρία της μονοκατοικίας που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 7.

Βήμα 1^ο:

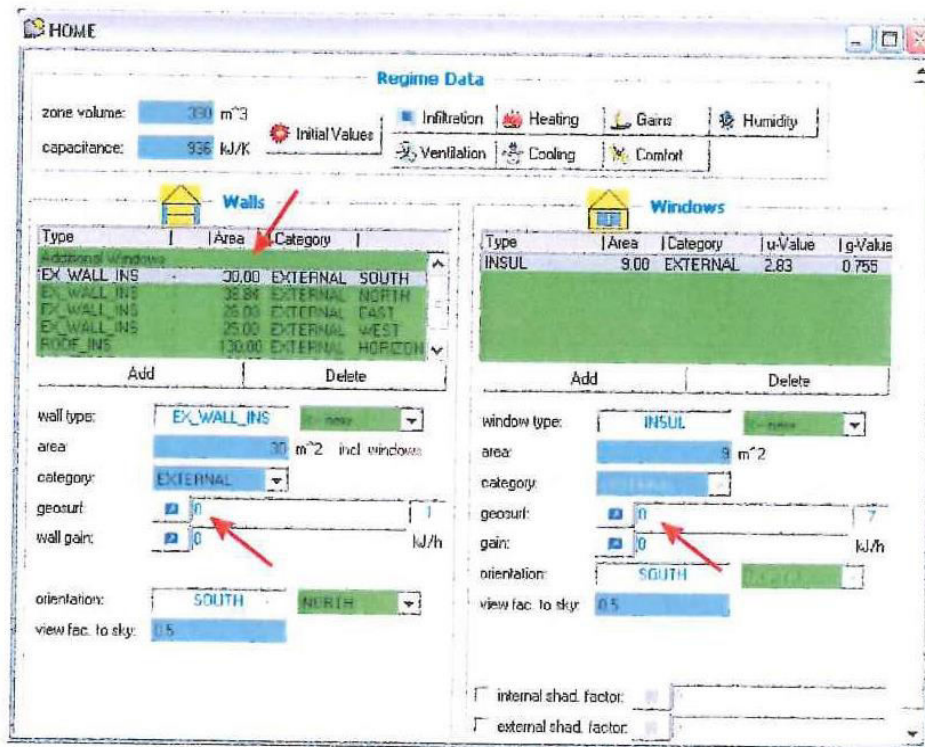
Το σχήμα Π1-1 παρουσιάζει την μορφή της πρώτης προσομοίωσης για την γεωμετρία της μονοκατοικίας. Με κόκκινα βέλη σημειώνονται τα δεδομένα εξόδου που απαιτούνται από το *TRNSYS* (*Tzone*=θερμοκρασία ζώνης, *Wall Temperatures*=θερμοκρασίες εσωτερικών επιφανειών, *QTotal*=σύνολο άμεσης και διάχυτης ηλιακής ακτινοβολίας που απορροφάται από κάθε επιφάνεια). Τα απαιτούμενα δεδομένα εξόδου μπορούν να διαφέρουν ανάλογα με το τι θέλει να συγκρίνει ο εκάστοτε χρήστης του *TRNSYS*.



Σχήμα Π1-1: Μορφή ενός τυπικού παραδείγματος προσομοίωσης στο *TRNSYS*

Βήμα 2^ο :

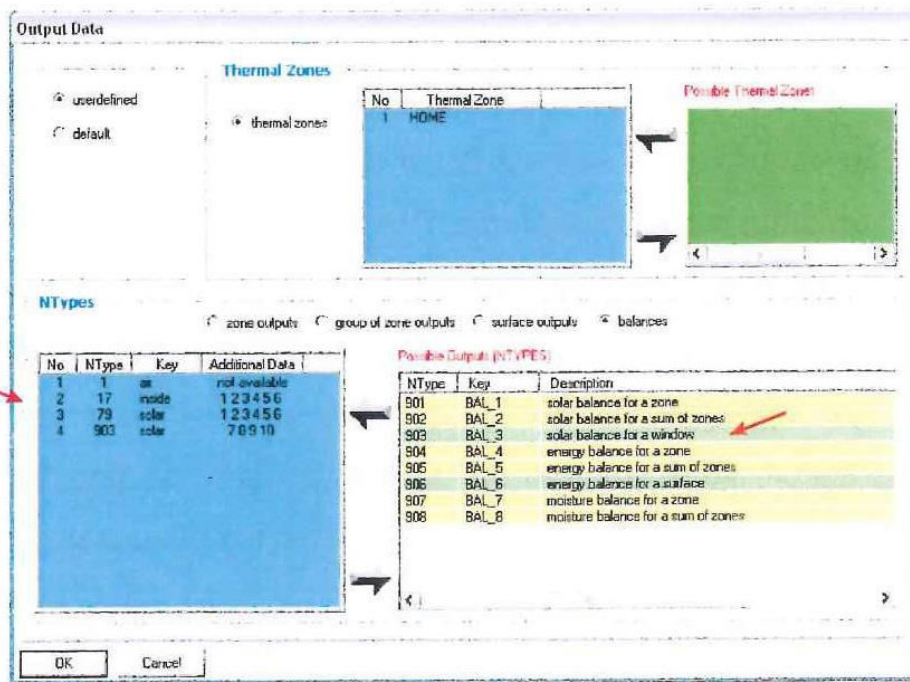
Κάνοντας δεξί κλικ στο εικονίδιο **Building** και επιλέγοντας **Edit Building**, εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος Π1-2 στο οποίο οι τιμές *geosurf* για όλες τις επιφάνειες θέτονται ίσες με 0 και αφαιρούνται τα εμβαδά των παραθύρων από τα εμβαδά των τοίχων. (Αν και το TRNSYS απαιτεί το πλήρες εμβαδό του τοίχου, μαζί με τα παράθυρα, πρέπει να γίνει η αφαίρεση προκειμένου να διεξαχθούν σωστά αποτελέσματα με την χρήση του κώδικα VFCALC)



Σχήμα Π1-2: Παράθυρο διαχείρισης δομικών στοιχείων κτιρίου

Βήμα 3^ο :

Στο παράθυρο του Σχήματος Π1-3 παρουσιάζονται τα δεδομένα εξόδου που απαιτούνται από το TRNSYS, προκειμένου να γίνουν οι συγκρίσεις. Επιπλέον σημειώνεται η προσθήκη του ισοζυγίου παραθύρου (*NTYPE 903*), το οποίο θα δημιουργήσει ένα αρχείο για κάθε παράθυρο, από όπου και θα παρθούν οι τιμές της ακτινοβολίας για τον υπολογισμό των *geosurf*, σε επόμενο στάδιο, από τον κώδικα VFCALC. Στην συνέχεια εκτελείται η πρώτη προσομοίωση. Όπως προαναφέρθηκε τα δεδομένα εξόδου αφήνονται στην κρίση του κάθε χρήστη, τα ισοζύγια των παραθύρων όμως είναι απαραίτητα για τον κώδικα VFCALC και έτσι πρέπει να ζητούνται.



Σχήμα Π1-3: Παράθυρο δεδομένων εξόδου (outputs) κτιρίου

Βήμα 4^ο :

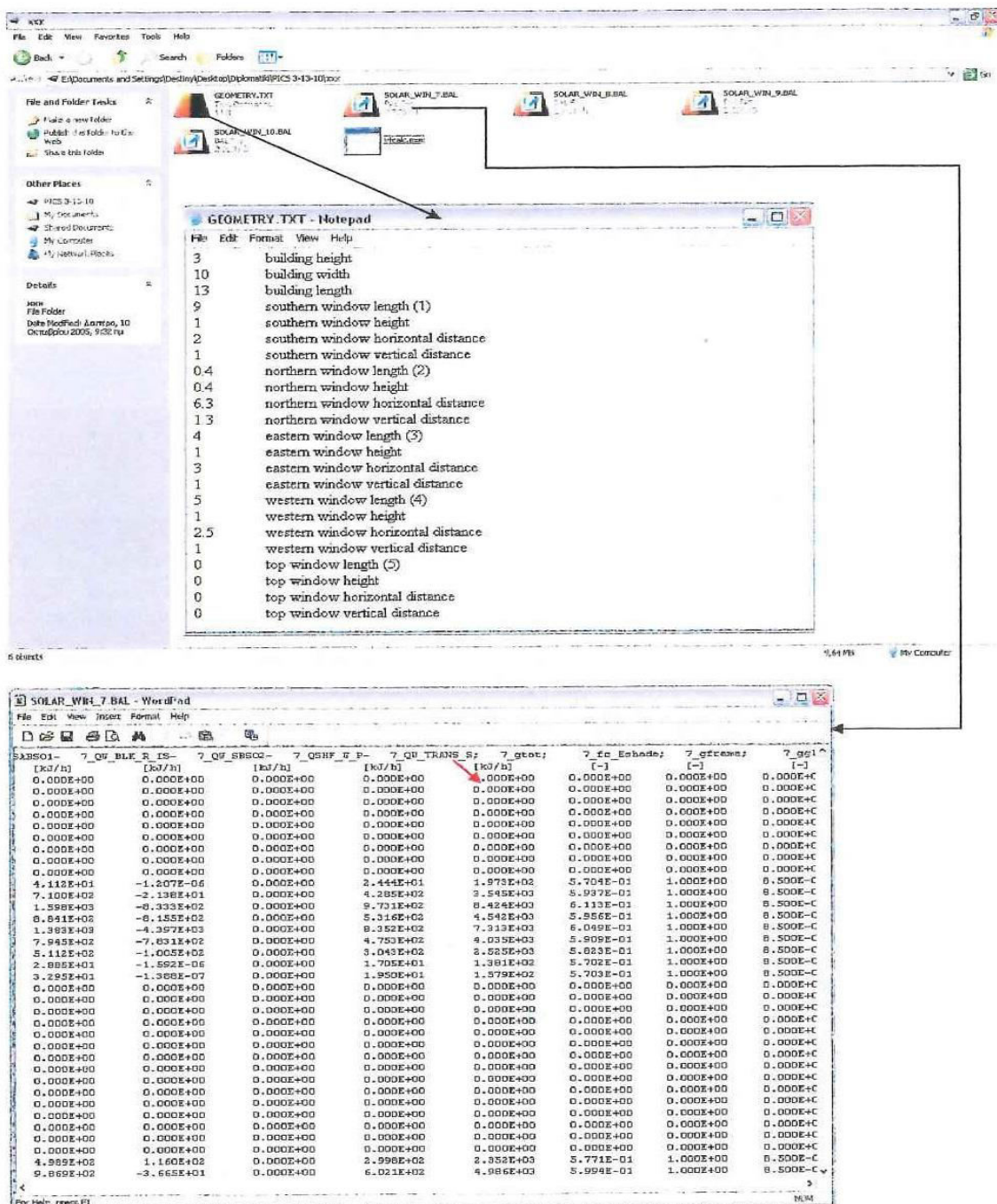
Στο Σχήμα Π1-4 παρουσιάζονται τα αρχεία που προκύπτουν από την πρώτη προσομοίωση της μονοκατοικίας. Σημειώνεται ότι τα κόκκινα βέλη αναφέρονται στα αρχεία ισοζυγίων των παραθύρων (*SOLAR_WIN 7-10.BAL*), τα οποία θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των *geosurf*, ενώ τα μαύρα βέλη αναφέρονται στα αρχεία που περιέχουν τα προς σύγκριση δεδομένα εξόδου.



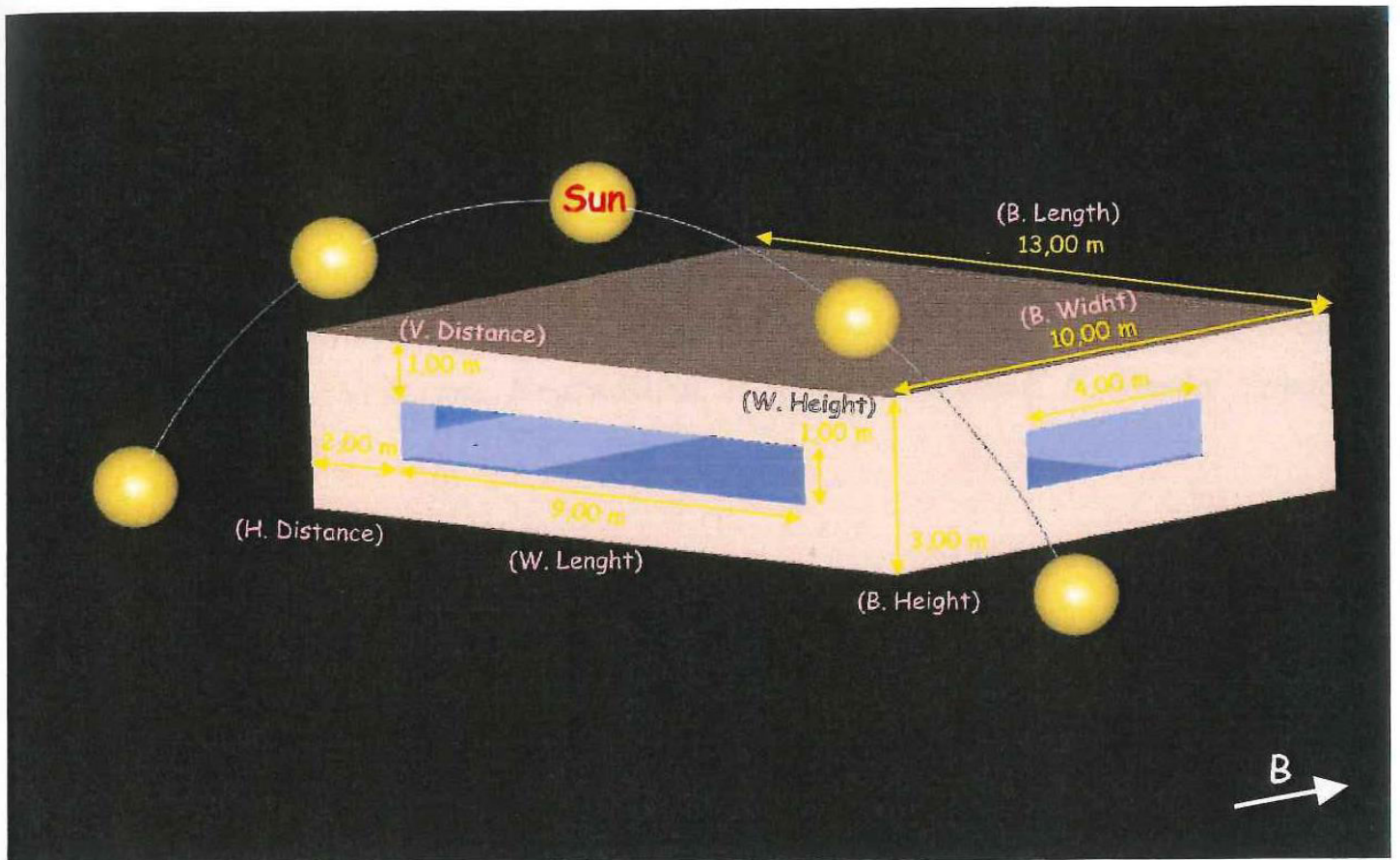
Σχήμα Π1-4: Αρχεία που προκύπτουν μετά το πέρας της πρώτης προσομοίωσης

Βήμα 5^ο :

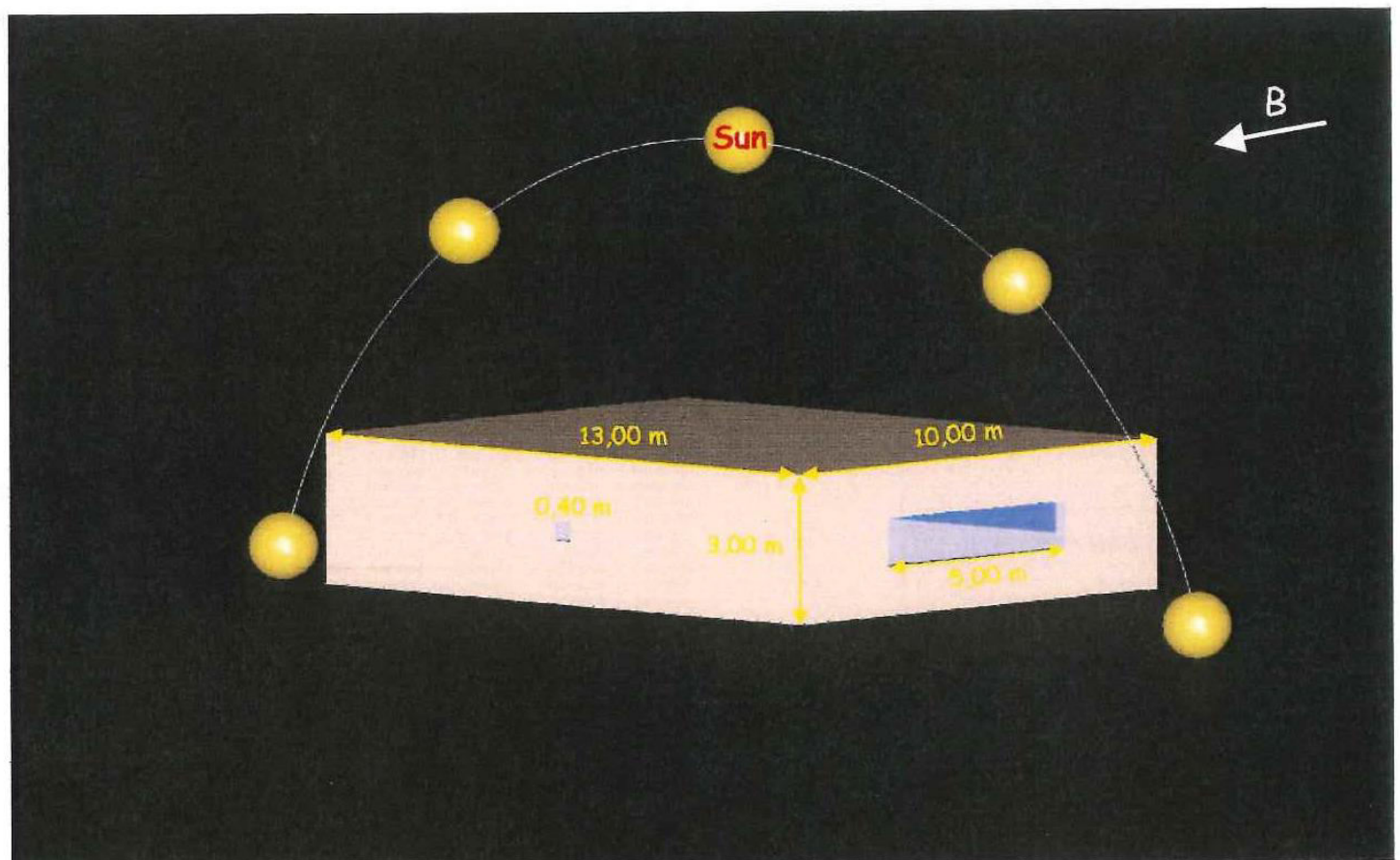
Σε ένα ξεχωριστό φάκελο τοποθετούνται τα αρχεία που φαίνονται στο Σχήμα Π1-5, προκειμένου να υπολογιστούν οι παράγοντες *geosurf* οι οποίοι θα εισαχθούν στην δεύτερη προσομοίωση. Το αρχείο **GEOMETRY.TXT** περιέχει την γεωμετρία του κτιρίου και των ανοιγμάτων του (Σχήματα Π1-5α & Π1-5β). Από τα αρχεία **SOLAR_WIN_7-10.BAL** θα χρειαστεί το μέγεθος **QW_TRANS_S**, για τον υπολογισμό των *geosurf*. Το αρχείο **VFCALC.EXE** είναι ο εκτελέσιμος κώδικας. (Τα αρχεία ισοζυγίων παραθύρων πρέπει να μετονομαστούν από **SOLAR_WIN_7-10.BAL** σε **SOLAR_WIN_7-10.BAL** προκειμένου να διαβαστούν από τον κώδικα **VFCALC**.)



Σχήμα Π1-5: Απαιτούμενα αρχεία για τον υπολογισμό των *geosurf*



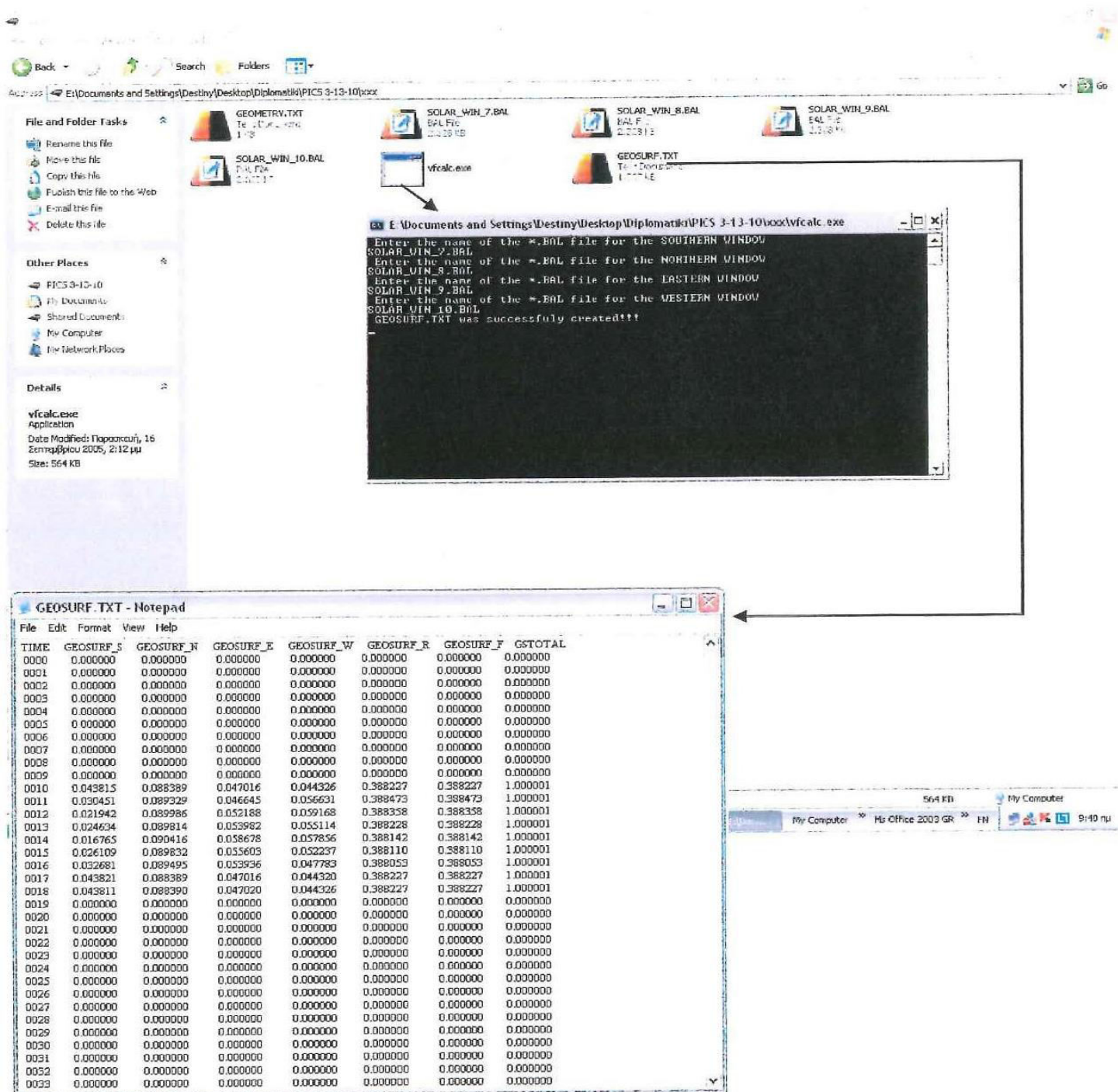
Σχήμα Π1-5α: Απεικόνιση γεωμετρίας μονοκατοικίας και αντιστοίχιση μεταβλητών του αρχείου *GEOMETRY.TXT*



Σχήμα Π1-5β: Απεικόνιση γεωμετρίας μονοκατοικίας από διαφορετικό προσανατολισμό

Βήμα 6^ο :

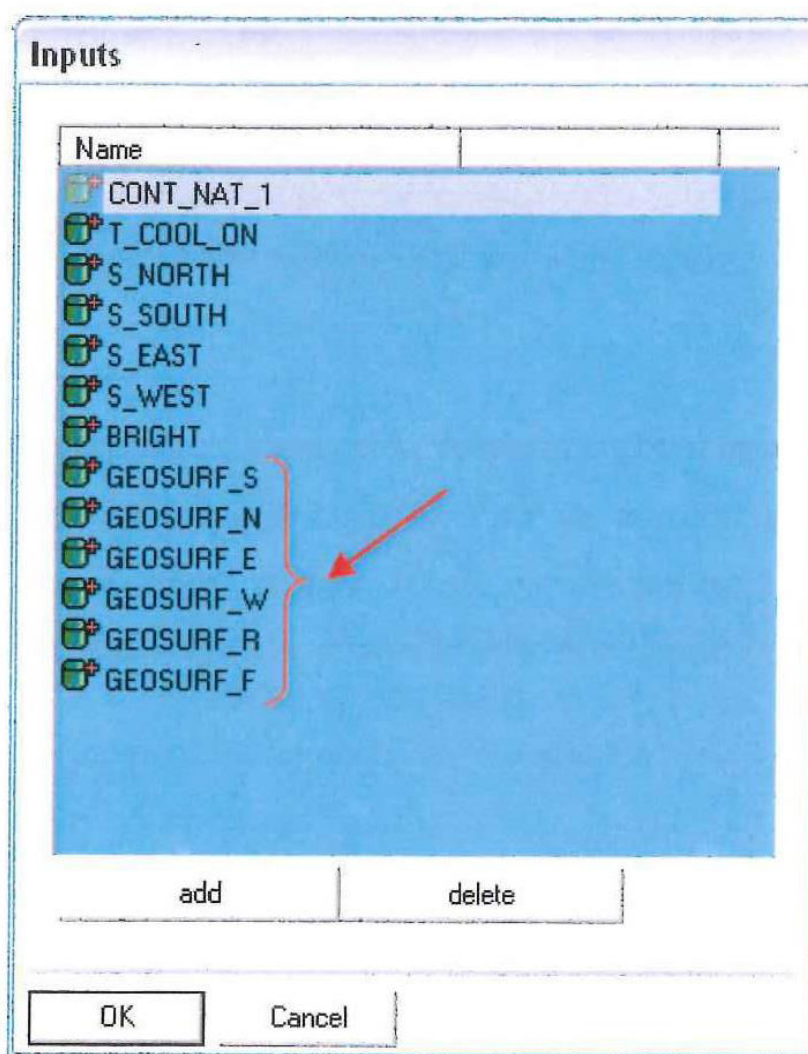
Στην συνέχεια εκτελείται ο κώδικας, κάνοντας διπλό κλικ στο εικονίδιο **VFCALC.EXE**. Αφού εισαχθούν τα ονόματα των αρχείων που περιέχουν τα ενεργειακά ισοζύγια των παραθύρων (ο χρήστης θα πρέπει να γνωρίζει την αντιστοιχία μεταξύ αριθμού παραθύρου και προσανατολισμού), δημιουργείται το αρχείο **GEOSURF.TXT** το οποίο και περιέχει τους συντελεστές που απαιτούνται για την δεύτερη προσομοίωση, για κάθε εσωτερική επιφάνεια ξεχωριστά (*S=νότια, N=βόρεια, E=ανατολική, W=δυτική, R=οροφή, F=δάπεδο, Σχήμα Π1-6*).



Σχήμα Π1-6: Εφαρμογή κώδικα VFCALC

Βήμα 7^ο :

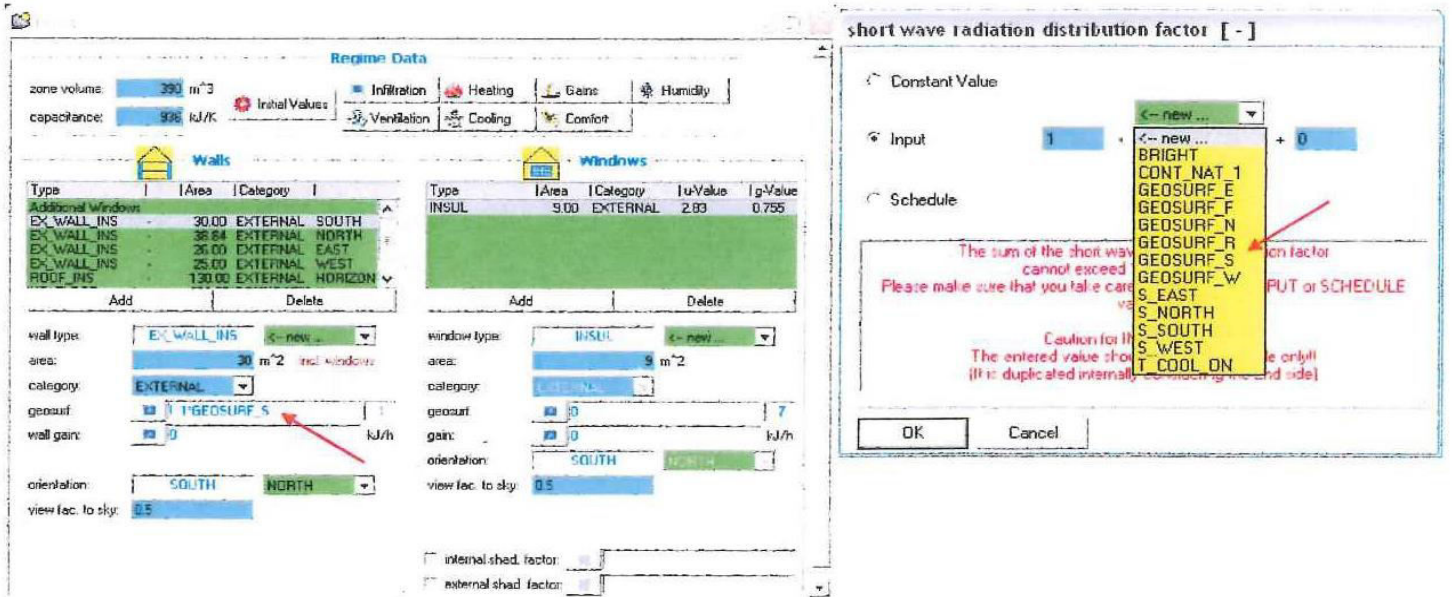
Πριν από την δεύτερη διαδικασία προσομοίωσης θα πρέπει να γίνουν κάποιες ρυθμίσεις ώστε να εισαχθούν οι τιμές του αρχείου **GEOSURF.TXT** στο πρόγραμμα **TRNSYS**. Στο περιβάλλον της δεύτερης προσομοίωσης, το οποίο είναι αντίγραφο της πρώτης, κάνοντας δεξί κλικ στο εικονίδιο **Building** και επιλέγοντας **Edit Building** και στην συνέχεια **Inputs**, εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος Π1-7, όπου και θέτουμε τα δεδομένα εισόδου.



Σχήμα Π1-7: Ορισμός δεδομένων εισόδου *Inputs*

Βήμα 8^ο :

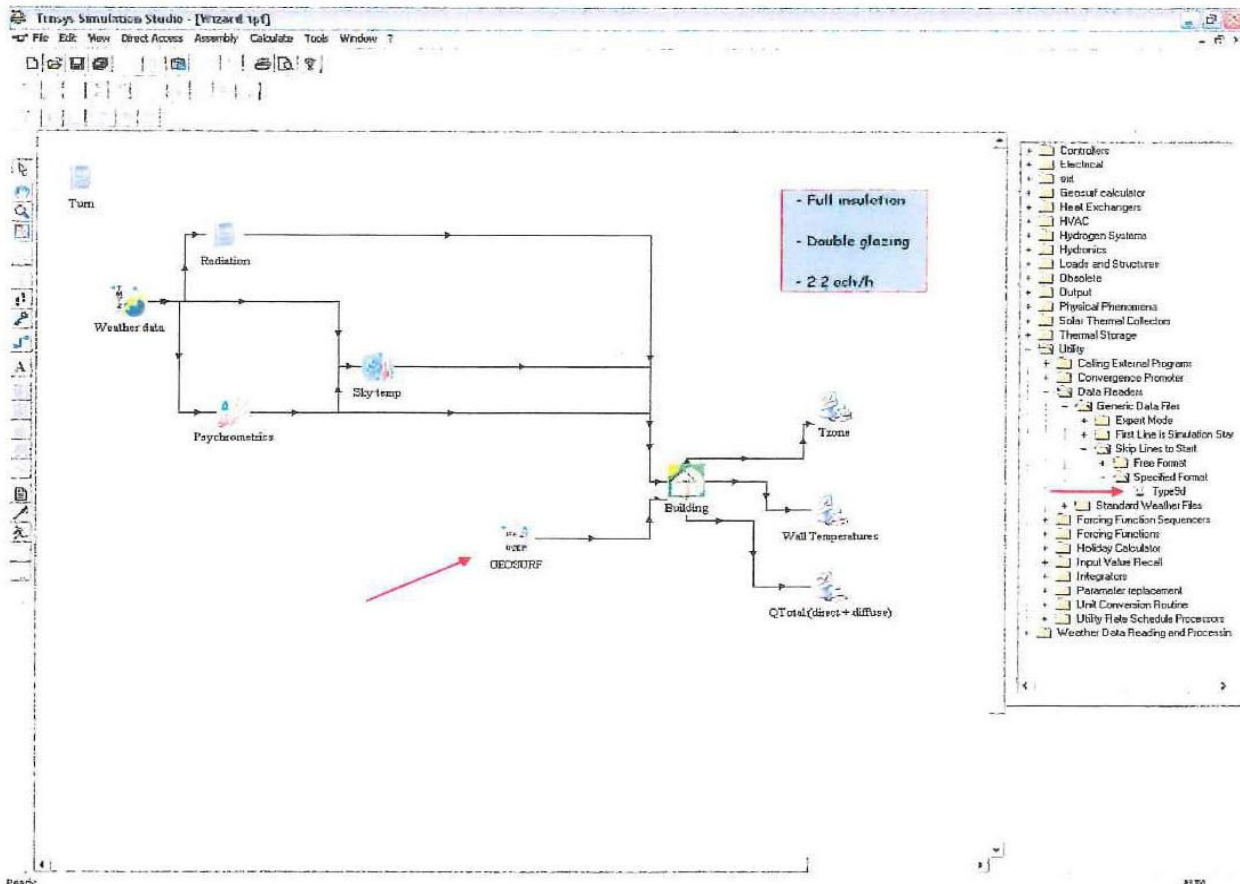
Στην συνέχεια ορίζεται για κάθε επιφάνεια ότι θα λαμβάνει την τιμή του **geosurf**, ανα ώρα προσομοίωσης, από κάποιο εξωτερικό αρχείο (Σχήμα Π1-8).



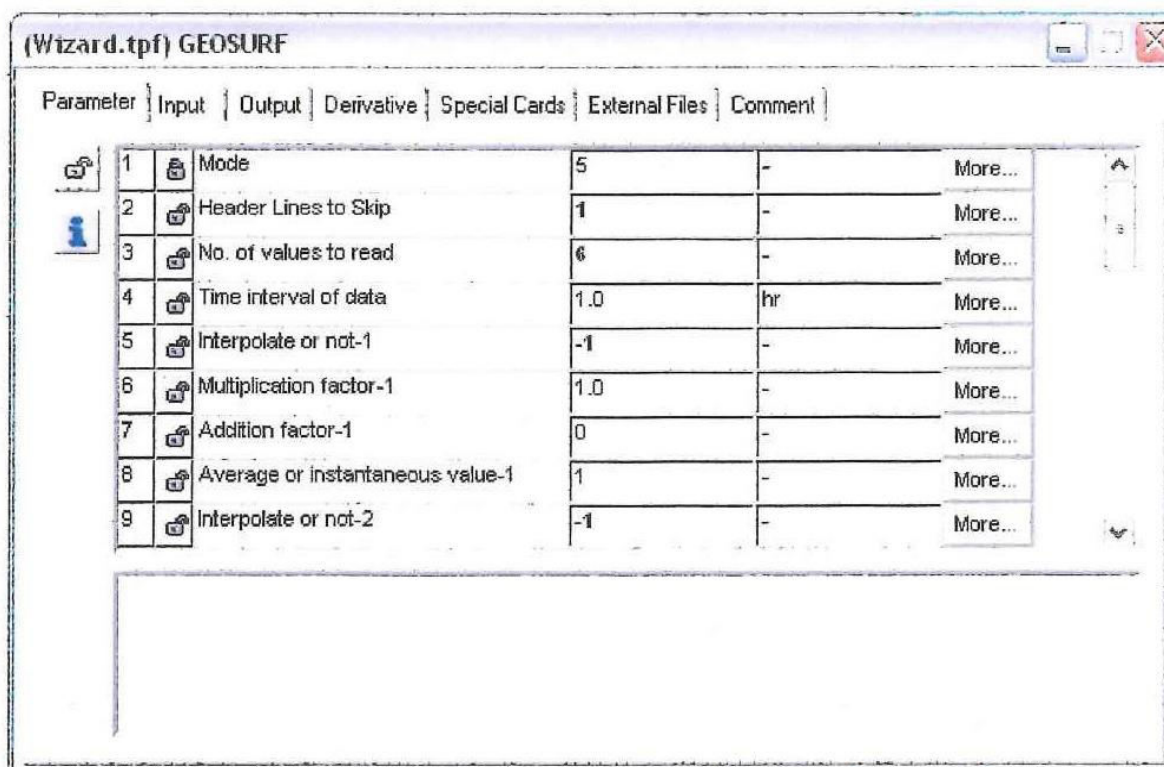
Σχήμα Π1-8: Ανάθεση τιμών *geosurf* σε επιφάνειες

Βήμα 9^ο :

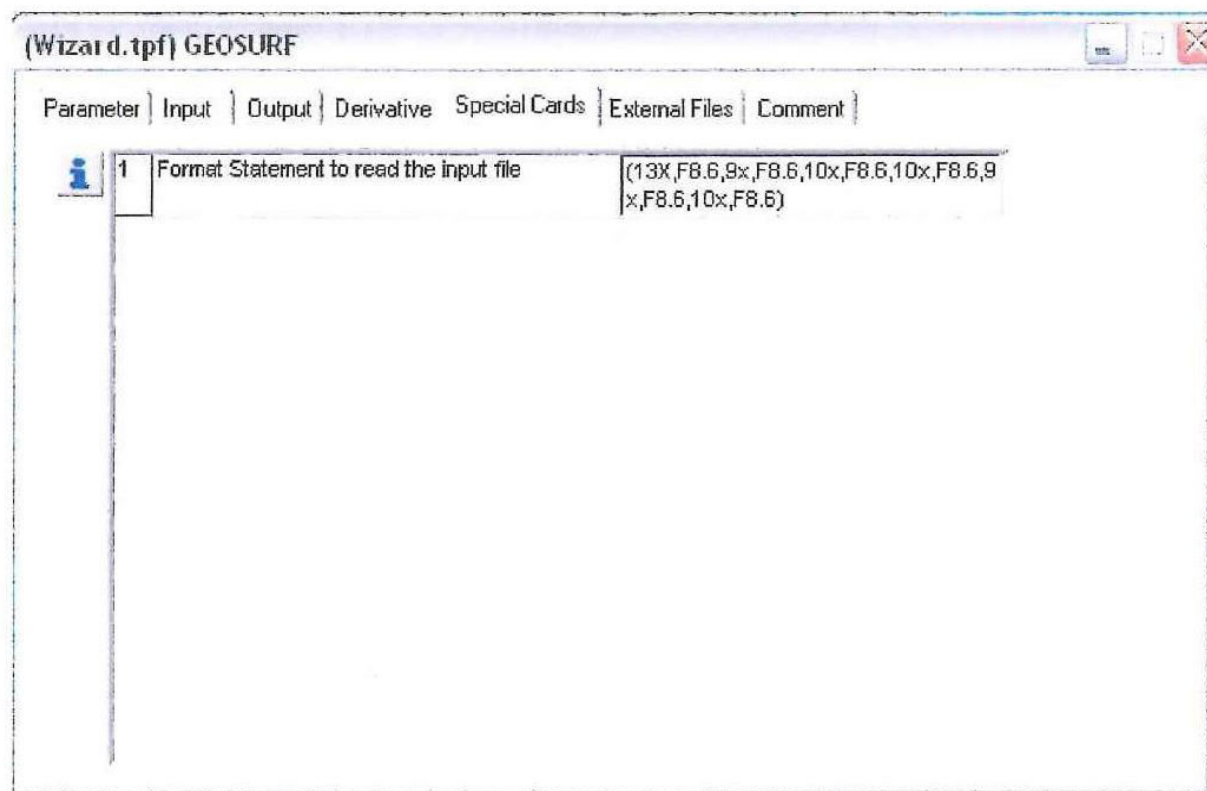
Τέλος, εισάγεται ένας αναγνώστης εξωτερικών δεδομένων (*Data Reader, Type 9d*), ο οποίος θα διαβάσει τις τιμές από το αρχείο *GEOSURF.TXT* και κατόπιν θα της εισάγει στα πεδία που περιγράφηκαν στο 8^ο Βήμα (Σχήμα Π1-9). Ο αναγνώστης παραμετροποιείται και ενώνεται με το εικονίδιο *Building* όπως αναπαριστάται στα Σχήματα Π1-9α-δ.



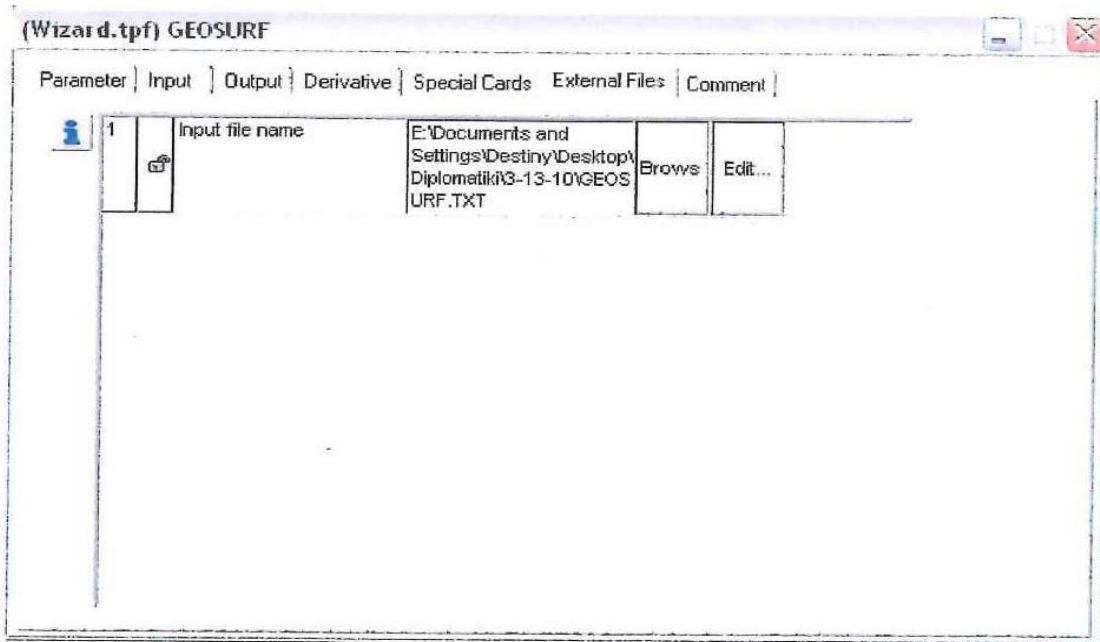
Σχήμα Π1-9: Εισαγωγή *Data Reader* στην προσομοίωση



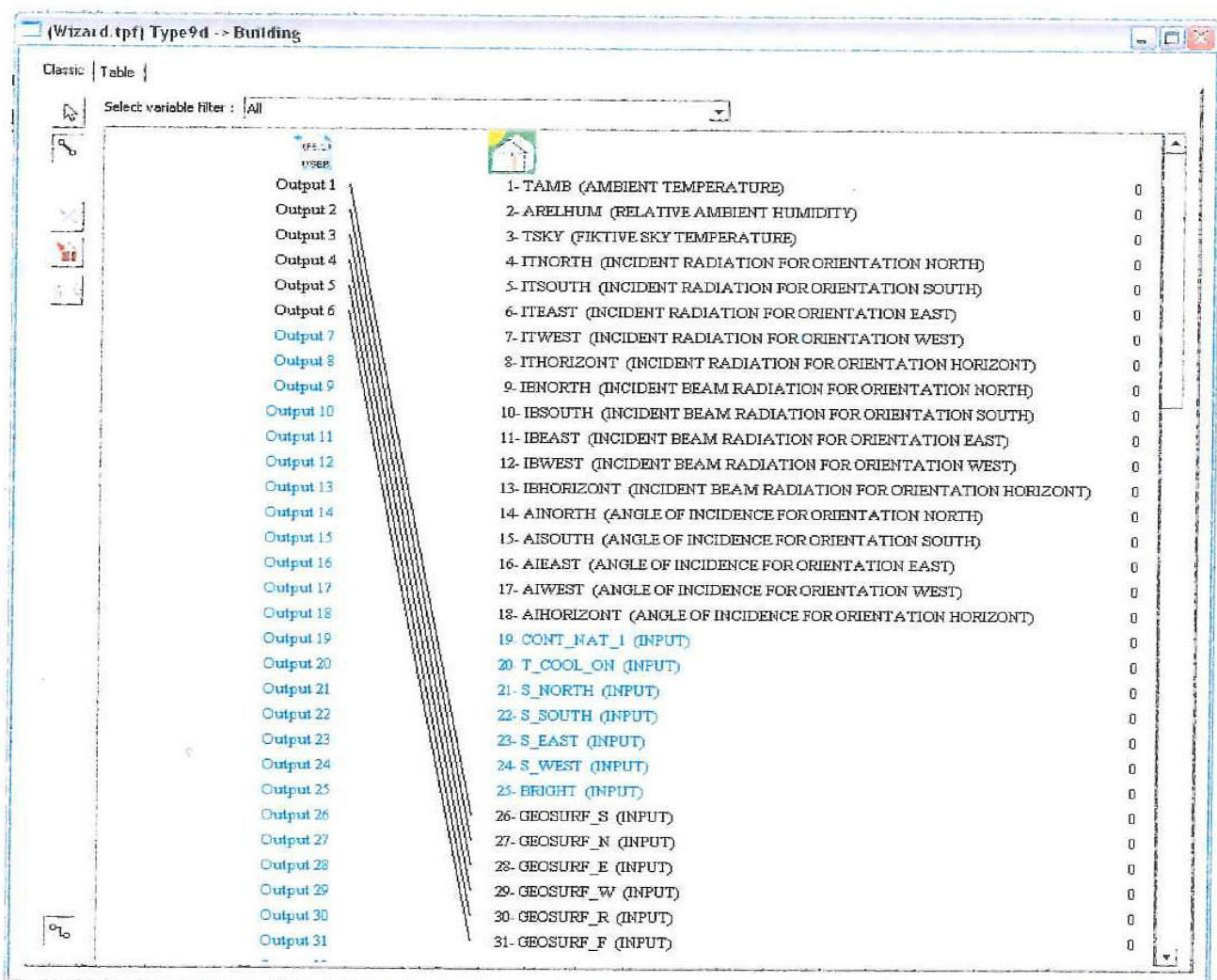
Σχήμα Π1-9α: Ορισμός αρχικής γραμμής, ποσότητας τιμών ανάγνωσης και μορφής τους στο αρχείο *GEOSURF.TXT*



Σχήμα Π1-9β: Ορισμός μορφοποίησης, σε γλώσσα *Fortran*, του αρχείου *GEOSURF.TXT*



Σχήμα Π1-9γ: Ορισμός θέσης αρχείου *GEOSURF.TXT*



Σχήμα Π1-9δ: Ένωση *Data Reader* και εικονιδίου *Building*

Μετά το πέρας και των διεργασιών του 9^{ου} Βήματος, ο χρήστης είναι σε θέση να επαναλάβει την διαδικασία της προσομοίωσης και να συγκρίνει τα αποτελέσματα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

Στο παρόν παράρτημα θα γίνει αναλυτική προσέγγιση ορισμένων τμημάτων του αλγορίθμου *VFCALC*. Θα παρουσιαστούν δηλαδή αυτούσια κομμάτια του κώδικα ο οποίος είναι γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού *Fortran* [9], έτσι ώστε να γίνει πιο κατανοητή η φιλοσοφία του. Σημειώνεται ότι η παράθεση ολόκληρου του κώδικα θα ήταν αδύνατη, λόγω της μεγάλης έκτασής του (1200 γραμμές) επειδή κάποια τμήματά του επαναλαμβάνονται. Επίσης με πράσινο χρώμα σημειώνονται τα *σχόλια*, ενώ με μπλε οι *εντολές* του κώδικα.

```

PROGRAM VFCALC
IMPLICIT NONE
!Εξήγηση σημειολογίας που χρησιμοποιείται στον κώδικα
!1 -> SOUTH (ΝΟΤΟΣ)
!2 -> NORTH (ΒΟΡΡΑΣ)
!3 -> EAST (ΑΝΑΤΟΛΗ)
!4 -> WEST (ΔΥΣΗ)
!5 -> ROOF (ΟΡΟΦΗ)
!6 -> FLOOR (ΔΑΠΕΔΟ)
!II -> Parallel surfaces (Επιφάνειες παράλληλες μεταξύ τους)
!I_ -> Perpendicular surfaces (Επιφάνειες κάθετες μεταξύ τους)

!Ακολουθούν οι δηλώσεις μεταβλητών
DOUBLE PRECISION::H,W,L !Διαστάσεις κτιρίου (H=ύψος, W=πλάτος, L=μήκος)
DOUBLE PRECISION::WH1,WL1,HD1,VD1 !Γεωμετρίες ανοιγμάτων
DOUBLE PRECISION::WH2,WL2,HD2,VD2
DOUBLE PRECISION::WH3,WL3,HD3,VD3
DOUBLE PRECISION::WH4,WL4,HD4,VD4
DOUBLE PRECISION::WH5,WL5,HD5,VD5

DOUBLE PRECISION::A,B,C,D,XY,E !Μεταβλητές γενικής χρήσης
INTEGER::I

DOUBLE PRECISION::VFI112,VFI_13,VFI_14,VFI_15,VFI_16 !Συντελεστές μορφής
DOUBLE PRECISION::VFI121,VFI_23,VFI_24,VFI_25,VFI_26
DOUBLE PRECISION::VFI134,VFI_31,VFI_32,VFI_35,VFI_36
DOUBLE PRECISION::VFI143,VFI_41,VFI_42,VFI_45,VFI_46
DOUBLE PRECISION::VFI156,VFI_51,VFI_52,VFI_53,VFI_54

DOUBLE PRECISION::Q1(8760) !Πίνακες όπου αποθηκεύονται
DOUBLE PRECISION::Q2(8760) !οι τιμές QW_SOL_TRANS, οι οποίες προέρχονται
DOUBLE PRECISION::Q3(8760) !από τα αρχεία SOLAR_WIN N.BAL
DOUBLE PRECISION::Q4(8760) !8760 = ώρες ενός χρόνου
DOUBLE PRECISION::Q5(8760)
DOUBLE PRECISION::QTOTAL

CHARACTER::WIN1F*16 !Πίνακες όπου αποθηκεύονται τα ονόματα των αρχείων
CHARACTER::WIN2F*16 !τα ονόματα των αρχείων που περιέχουν τα ισοζύγια
CHARACTER::WIN3F*16 !των παραθύρων
CHARACTER::WIN4F*16
CHARACTER::WIN5F*16

DOUBLE PRECISION::GS1(8760) !Πίνακες όπου αποθηκεύονται οι τιμές
DOUBLE PRECISION::GS2(8760) !GEOSURE για κάθε επιφάνεια, ανα ώρα
DOUBLE PRECISION::GS3(8760) !προσομοίωσης
DOUBLE PRECISION::GS4(8760)
DOUBLE PRECISION::GS5(8760)
DOUBLE PRECISION::GS6(8760)

```

```

!Πίνακες συντεταγμένων νοτίου ανοίγματος και βορείου τοίχου
DOUBLE PRECISION::XIII12(2) !1ος αριθμός=άνοιγμα, 2ος αριθμός=τοίχος
DOUBLE PRECISION::YIII12(2)
DOUBLE PRECISION::HIII12(2)
DOUBLE PRECISION::JIII12(2)
DOUBLE PRECISION::SIII12(16)
!Πίνακες συντεταγμένων νοτίου ανοίγματος και ανατολικού τοίχου
DOUBLE PRECISION::XI_13(2)
DOUBLE PRECISION::YI_13(2)
DOUBLE PRECISION::HI_13(2)
DOUBLE PRECISION::JI_13(2)
DOUBLE PRECISION::SI_13(16)
!Πίνακες συντεταγμένων νοτίου ανοίγματος και δυτικού τοίχου
DOUBLE PRECISION::XI_14(2)
DOUBLE PRECISION::YI_14(2)
DOUBLE PRECISION::HI_14(2)
DOUBLE PRECISION::JI_14(2)
DOUBLE PRECISION::SI_14(16)
!Πίνακες συντεταγμένων νοτίου ανοίγματος και οροφής
DOUBLE PRECISION::XI_15(2)
DOUBLE PRECISION::YI_15(2)
DOUBLE PRECISION::HI_15(2)
DOUBLE PRECISION::JI_15(2)
DOUBLE PRECISION::SI_15(16)
!Πίνακες συντεταγμένων νοτίου ανοίγματος και δαπέδου
DOUBLE PRECISION::XI_16(2)
DOUBLE PRECISION::YI_16(2)
DOUBLE PRECISION::HI_16(2)
DOUBLE PRECISION::JI_16(2)
DOUBLE PRECISION::SI_16(16)

OPEN (20, FILE='GEOMETRY.TXT') !Ανάθεση τιμών στις μεταβλητές του κώδικα
READ(20,*)H !από το αρχείο GEOMETRY.TXT
READ(20,*)W
READ(20,*)L
READ(20,*)WL1
READ(20,*)WH1
READ(20,*)HD1
READ(20,*)VD1
READ(20,*)WL2
READ(20,*)WH2
READ(20,*)HD2
READ(20,*)VD2
READ(20,*)WL3
READ(20,*)WH3
READ(20,*)HD3
READ(20,*)VD3
READ(20,*)WL4
READ(20,*)WH4
READ(20,*)HD4
READ(20,*)VD4
READ(20,*)WL5
READ(20,*)WH5
READ(20,*)HD5
READ(20,*)VD5
CLOSE (20)

```

Στο σημείο αυτό ο κώδικας ελέγχει την γεωμετρία του κάθε ανοίγματος και για κάθε υπαρκτό άνοιγμα ζητά από τον χρήστη το όνομα του αρχείου που περιέχει το ισοζύγιο του παραθύρου. Από το αρχείο αυτό παίρνει το μέγεθος *QW_TRANS_SOL* για κάθε ώρα προσομοίωσης. Το παρακάτω τμήμα του κώδικα αναφέρεται στο νότιο παράθυρο, ομοίως γίνεται και για τα υπόλοιπα ανοίγματα.

```

IF (WL1>0.AND.WH1>0) THEN
    WRITE(*,*) 'Enter the name of the *.BAL file for the SOUTHERN
                WINDOW'
    READ(*,*)WIN1F
    OPEN (21,FILE=WIN1F)
    READ(21, '(/,/,177x,ES9.3E2)')Q1(1)
    DO I=2,8760
        READ(21, '(177x,ES9.3E2)')Q1(I)
    END DO
    CLOSE (21)
ELSE
    Q1=0
END IF

```

Στην συνέχεια παρουσιάζεται ο υπολογισμός των συντελεστών μορφής μεταξύ του νοτίου παραθύρου και των υπολοίπων εσωτερικών επιφανειών. Ομοίως υπολογίζονται και οι συντελεστές μορφής των υπολοίπων ανοιγμάτων

```

!NOTIO ΠΑΡΑΘΥΡΟ
!Υπολογισμός συντελεστή μορφής μεταξύ νοτίου ανοίγματος και βορείου τοίχου
XIII12(1)=HD1
XIII12(2)=HD1+WL1
YIII12(1)=VD1
YIII12(2)=VD1+WH1
HIII12(1)=0
HIII12(2)=H
JIII12(1)=0
JIII12(2)=L

E=1

DO A=1,2
DO B=1,2
DO C=1,2
DO D=1,2
SIII12(E)=((-1)**(A+B+C+D))*PII(XIII12(A),YIII12(B),HIII12(C),JIII12(D),W)
E=E+1
END DO
END DO
END DO
END DO
XY=1/(WL1*WH1)
VFIII12=XY*SUM(SIII12)

```

```

!Υπολογισμός συντελεστή μορφής μεταξύ νοτίου ανοίγματος και ανατολικού
!τοιχίου
XI_13(1)=L-WL1-HD1
XI_13(2)=L-HD1
YI_13(1)=VD1
YI_13(2)=VD1+WH1
HI_13(1)=0
HI_13(2)=H
JI_13(1)=0
JI_13(2)=W

E=1

DO A=1,2
DO B=1,2
DO C=1,2
DO D=1,2
SI_13(E)=((-1)**(A+B+C+D))*PI_(XI_13(A),YI_13(B),HI_13(C),JI_13(D))
E=E+1
END DO
END DO
END DO
END DO
XY=1/(WL1*WH1)
VFI_13=XY*SUM(SI_13)

!Υπολογισμός συντελεστή μορφής μεταξύ νοτίου ανοίγματος και δυτικού τοίχου
XI_14(1)=HD1
XI_14(2)=HD1+WL1
YI_14(1)=VD1
YI_14(2)=VD1+WH1
HI_14(1)=0
HI_14(2)=H
JI_14(1)=0
JI_14(2)=W

E=1

DO A=1,2
DO B=1,2
DO C=1,2
DO D=1,2
SI_14(E)=((-1)**(A+B+C+D))*PI_(XI_14(A),YI_14(B),HI_14(C),JI_14(D))
E=E+1
END DO
END DO
END DO
END DO
XY=1/(WL1*WH1)
VFI_14=XY*SUM(SI_14)

!Υπολογισμός συντελεστή μορφής μεταξύ νοτίου ανοίγματος και οροφής
XI_15(1)=H-WH1-VD1
XI_15(2)=H-VD1
YI_15(1)=HD1
YI_15(2)=HD1+WL1
HI_15(1)=0
HI_15(2)=L
JI_15(1)=0
JI_15(2)=W

```



```

E=1

DO A=1,2
DO B=1,2
DO C=1,2
DO D=1,2
SI_15(E) = ((-1)**(A+B+C+D)) * PI_(XI_15(A), YI_15(B), HI_15(C), JI_15(D))
E=E+1
END DO
END DO
END DO
END DO
XY=1/(WL1*WH1)
VFI_15=XY*SUM(SI_15)

!Υπολογισμός συντελεστή μορφής μεταξύ νοτίου ανοίγματος και δαπέδου
XI_16(1)=VD1
XI_16(2)=VD1+WH1
YI_16(1)=HD1
YI_16(2)=HD1+WL1
HI_16(1)=0
HI_16(2)=L
JI_16(1)=0
JI_16(2)=W

```

```

E=1

DO A=1,2
DO B=1,2
DO C=1,2
DO D=1,2
SI_16(E) = ((-1)**(A+B+C+D)) * PI_(XI_16(A), YI_16(B), HI_16(C), JI_16(D))
E=E+1
END DO
END DO
END DO
END DO
XY=1/(WL1*WH1)
VFI_16=XY*SUM(SI_16)

```

Οι παρακάτω συναρτήσεις χρησιμοποιούνται στους παραπάνω υπολογισμούς προκειμένου να μεταφραστούν οι μαθηματικές σχέσεις των συντελεστών μορφής (§ 2.3) στην γλώσσα προγραμματισμού *Fortran*.

CONTAINS

```

DOUBLE PRECISION FUNCTION PI_(X, Y, H, J)
DOUBLE PRECISION :: Y, H, X, J, G1, G2, G3, G4, P
REAL, PARAMETER :: PI=3.14159

IF (X==0) THEN
X=X+0.001
END IF

IF (J==0) THEN
J=J+0.001
END IF

```

```

G1=(Y-H)*SQRT((X**2)+(J**2))
G2=ATAN((Y-H)/SQRT((X**2)+(J**2)))
G3=0.25*((X**2)+(J**2)-((Y-H)**2))
G4=LOG((X**2)+(J**2)+((Y-H)**2))
P=1/(2*PI)
PI_=P*((G1*G2)-(G3*G4))
END FUNCTION PI_

DOUBLE PRECISION FUNCTION PII(X,Y,H,J,Z)
DOUBLE PRECISION::Y,H,X,J,G1,G2,G3,G4,G5,P,Z
REAL, PARAMETER ::PI=3.14159

G1=(Y-H)*SQRT(((X-J)**2)+(Z**2))
G2=ATAN((Y-H)/SQRT(((X-J)**2)+(Z**2)))
G3=(X-J)*SQRT(((Y-H)**2)+(Z**2))
G4=ATAN((X-J)/SQRT(((Y-H)**2)+(Z**2)))
G5=((Z*Z)/2)*LOG(((X-J)**2)+((Y-H)**2)+(Z**2))
P=1/(2*PI)
PII=P*((G1*G2)+(G3*G4)-G5)
END FUNCTION PII

```

Σε περίπτωση μη υπαρκτού ανοίγματος ο κώδικας μηδενίζει τους συντελεστές μορφής

```

IF (WL1==0.AND.WH1==0) THEN
    VFII12=0
    VFI_13=0
    VFI_14=0
    VFI_15=0
    VFI_16=0
END IF

```

Τέλος ανοίγεται το αρχείο *GEOSURF.TXT* και εισάγονται οι τιμές *GEOSURF* για κάθε επιφάνεια ανα ώρα προσομοίωσης.

```

OPEN (40,FILE='GEOSURF.TXT')
WRITE(40,'(A4,4x,A10,4x,A10,4x,A10,4x,A10,4x,A10,4x,A10,4x,A7)') 'TIME', 'GEO
SURF_S', 'GEOSURF_N', 'GEOSURF_E', 'GEOSURF_W', 'GEOSURF_R', 'GEOSURF_F', 'GSTOTA
L'
WRITE(40,'(1x,I4.4,8x,F8.6,9x,F8.6,10x,F8.6,10x,F8.6,9x,F8.6,10x,F8.6,8x,F8
.6)') 0,0,0,0,0,0,0,0
DO I=1,8760
QTOTAL=Q1(I)+Q2(I)+Q3(I)+Q4(I)+Q5(I) !Υπολογισμός συνολικού Q
IF (QTOTAL==0) THEN !Σε περίπτωση που το QTOTAL μηδενίζεται
    QTOTAL=1 !αυτομάτως τίθεται η τιμή 1, επειδή είναι στον
END IF !παρονομαστή

IF (WL1>L.OR.WH1>H.OR.WL1+HD1>L.OR.WH1+VD1>H) THEN !Έλεγχος για τυχών
WRITE(*,*) 'WRONG SOUTHERN WINDOW GEOMETRY!' !λανθασμένη γεωμετρία
READ(*,*) !π.χ. ύψος παραθύρου
GO TO 100 !μεγαλύτερο από ύψος
ELSE !τοίχου

```

Παρακάτω υπολογίζεται ο συντελεστής *GEOSURF* για τον νότιο τοίχο, βάσει της εξ. 4.5.

```
GS1(I) = ( (VFI121*Q2(I)) + (VFI_31*Q3(I)) + (VFI_41*Q4(I)) + (VFI_51*Q5(I)) ) / QTOTAL  
END IF
```

```
100 END PROGRAM VFCALC
```