

# ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΓΥΑΛΙΝΗ ΔΙΚΕΛΥΦΗ ΟΨΗ: ΣΥΝΤΟΜΗ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

N. Χρυσομαλλίδου\*<sup>1</sup>, A. Καραούλης\*<sup>1</sup>, Θ.Θεοδοσίου \*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup>Εργαστήριο Οικοδομικής και Δομικής Φυσικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ. Τ.Θ. 429  
[niobe@civil.auth.gr](mailto:niobe@civil.auth.gr) & [akara@civil.auth.gr](mailto:akara@civil.auth.gr)

\*<sup>2</sup> Τμήμα Μηχανικών Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων, Π.Δ.Μ. – [ttheodos@civil.auth.gr](mailto:ttheodos@civil.auth.gr)

**KEYWORDS:** γυάλινες δικέλυφες όψεις, κατηγορίες, λειτουργία, θερμοκρασιακή και ενεργειακή απόδοση κτιρίων, αξιολόγηση.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Οι γυάλινες δικέλυφες όψεις (ΓΔΟ), με εντυπωσιακή πράγματι μορφή, αποτελούν τα τελευταία ιδίως χρόνια μία νέα πρόταση, στον τομέα του ενεργειακού σχεδιασμού των κτιρίων και της προστασίας τους από την όχληση του αστικού θορύβου. Η διερεύνηση της θερμικής τους απόδοσης, υστερεί συγκριτικά με την ταχύτητα ανάπτυξης αυτού του τύπου όψεων και τις αντίστοιχες εφαρμογές σε πολυάριθμα κτίρια στον ευρωπαϊκό χώρο. Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά στις διάφορες κατηγορίες ΓΔΟ, στο μηχανισμό λειτουργίας τους, ενώ έμφαση δίνεται στην ανάλυση και αξιολόγηση, μέσω προσομοιώσεων, της θερμοκρασιακής και ενεργειακής συμπεριφορά τους, κάτω από τις ελληνικές κλιματικές συνθήκες.

## THERMAL RESPONSE OF BUILDINGS WITH DOUBLE SKIN FAÇADE: A BRIEF REVIEW

N. Chrisomallidou\*<sup>1</sup>, A. Karaoulis\*<sup>1</sup>, T.Theodosiou \*<sup>2</sup>

\*<sup>1</sup>Laboratory of Building Construction and, Civil Engineering Dep., AUTH., P.BOX. 429, Thessaloniki, Greece , [niobe@civil.auth.gr](mailto:niobe@civil.auth.gr) & [akara@civil.auth.gr](mailto:akara@civil.auth.gr)

\*<sup>2</sup> Energy Management Engineering Dep., UWM – [ttheodos@civil.auth.gr](mailto:ttheodos@civil.auth.gr)

**KEYWORDS:** double skin facades, types, operation, thermal and energy efficiency of buildings, evaluation.

**ABSTRACT:** Double Skin Facades (DSF) nowadays, forms a new prospective in the fields of energy conscious building design and urban noise protection. The study on their thermal efficiency is currently in a preliminary stage compared to the large number of building applications that can be found in Europe. This paper presents the various types of DSFs along with their functional mechanism and emphasizes on the simulation study and evaluation of DSFs under the Greek climatic conditions

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι γυάλινες δικέλυφες όψεις ΓΔΟ, αποτελούν αναμφισβήτητα τα τελευταία χρόνια μία νέα πρόταση και τάση στη σύγχρονη βιοκλιματική αρχιτεκτονική. Οι κατασκευές αυτού του τύπου υπόσχονται:

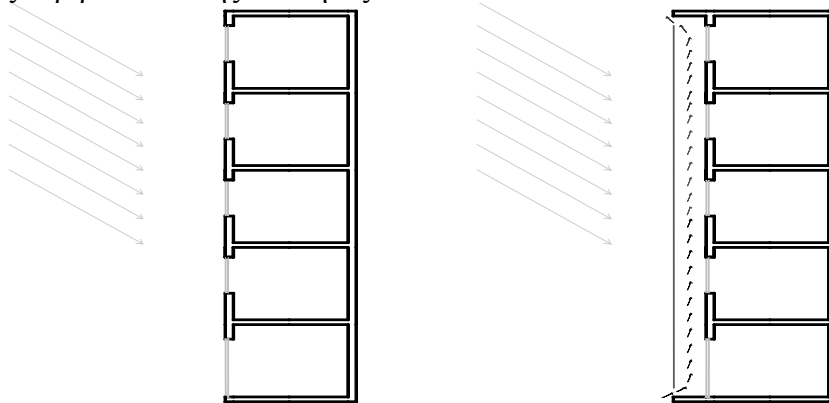
- Αντιμετώπιση των συνεχώς αυξανόμενων επιπέδων αστικού θορύβου
- Προστασία του βασικού κελύφους από τις εξωτερικές καιρικές επιδράσεις
- Φυσικό αερισμό των χώρων μέσω του κλωβού μεταξύ των δύο κελυφών, και γενικότερα
- Παθητική θέρμανση, φυσικό δροσισμό και φωτισμό των κτιρίων.

Η μικρή όμως ηλικία των κτιρίων που έχουν ενσωματώσει στο κέλυφός τους δικέλυφες γυάλινες όψεις, δεν επέτρεψε μέχρι στιγμής την πλήρη αξιολόγησή τους ως προς τα παραπάνω υποσχόμενα, με αποτέλεσμα να διατυπώνονται αντικρουόμενες απόψεις μεταξύ των ερευνητών, οι οποίοι και βασίζουν τις θέσεις τους κυρίως σε προσομοιωτικές μεθόδους και λιγότερο συχνά σε πειράματα ή μετρήσεις σε ήδη κατασκευασμένα κτίρια. Επιπλέον σημειώνεται, ότι θα ήταν επισφαλές να υιοθετήσει κανείς τα αποτελέσματα ξένων μελετητών και να υποθέσει ότι αυτά θα ίσχυαν και για τις ελληνικές κλιματικές συνθήκες. Έτσι με την εργασία αυτή επιδιώκεται να γίνει κατ' αρχάς σαφής ο μηχανισμός λειτουργίας των ΓΔΟ, να γίνει μια κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με τη γεωμετρία τους και το μηχανισμό κίνησης της αέριας μάζας, ενώ στη συνέχεια ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και κριτική αξιολόγηση, από τη διερεύνηση της θερμοκρασιακής και θερμικής συμπεριφοράς των ΓΔΟ μέσω δυναμικού προσομοιωτικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα βασίζονται στην ελληνική πραγματικότητα.

## 2. ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΓΔΟ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

### 2.1. Κατηγοριοποίηση των ΓΔΟ

Οι γυάλινες δικέλυφες όψεις συντίθενται γενικά, από το βασικό κέλυφος του κτιρίου (εσωτερικό κέλυφος) και από μία δεύτερη γυάλινη όψη (εξωτερικό κέλυφος) που τοποθετείται σε μικρή σχετικά απόσταση από το κτίριο (περίπου 0,40 έως 1,5 m). Στην κορυφή και στη βάση της εξωτερικής όψης ή ανάλογα με τον τύπο του συστήματος, υπάρχουν ανοίγματα (θυρίδες) για την εισαγωγή και εξαγωγή αέρα στον ενδιάμεσο χώρο που δημιουργείται μεταξύ των δύο όψεων, τον κλωβό. Τα ανοίγματα του εσωτερικού κελύφους, αποτελούνται κατά κανόνα από διπλούς υαλοπίνακες ενώ, η ηλιοπροστατευτική διάταξη για την προστασία των εσωτερικών χώρων από την θάμβωση και την υπερθέρμανση, τοποθετείται συχνά μέσα στον κλωβό και συνήθως πίσω από την εξωτερική όψη σε απόσταση ίση με το 1/3 του πλάτους του κλωβού. Η ροή του αέρα από τις θυρίδες είναι συνήθως ελεγχόμενη, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη προσαρμογή του συστήματος στις περιβαλλοντικές συνθήκες.

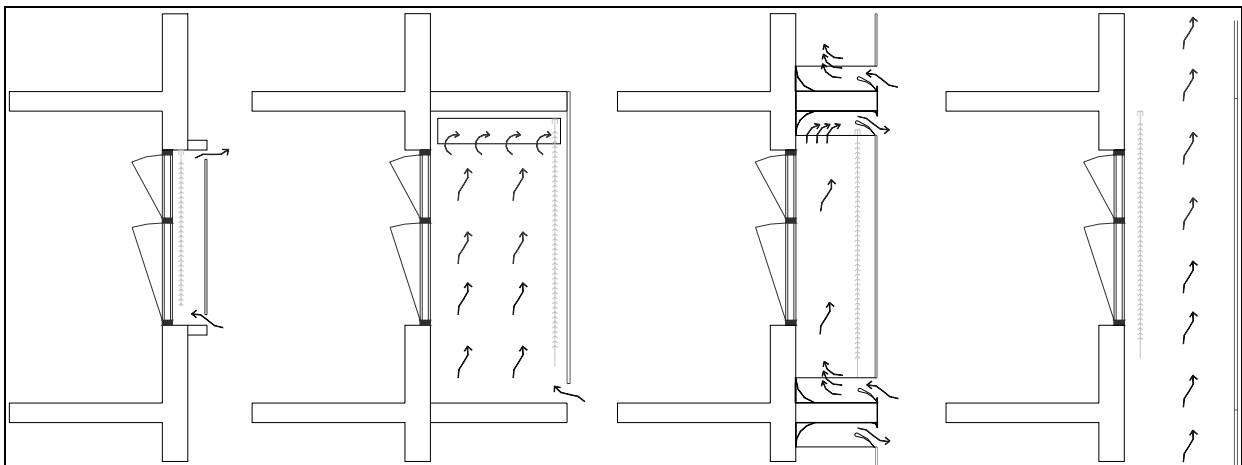


Σχήμα 1: Συμβατικό κτίριο και κτίριο με προσαρμοσμένη γυάλινη δικέλυφη όψη.

Εάν θα επιχειρούσε κανείς να κατατάξει τους διάφορους τύπους ΓΔΟ, θα έπρεπε να το κάνει παίρνοντας υπόψη τους δύο πιο βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργία τους : τη γεωμετρία [1] και το βασικό μηχανισμό κίνησης της αέριας μάζας μέσα στον κλωβό [2].

Έτσι με βάση τη γεωμετρία των ΓΔΟ διαμορφώνονται οι εξής κατηγορίες (σχήμα 2):

- **Όψη κιβωτοειδούς παραθύρου:** Η όψη αυτού του τύπου αποτελείται από έναν κάρναβο ο οποίος διαμορφώνει σχετικά μικρά και ανεξάρτητα μεταξύ τους παράθυρα – κουτιά, με δύο γυάλινα φύλλα σε απόσταση μεταξύ τους. Τα εσωτερικά φύλλα είναι συνήθως ανοιγόμενα ή και ανακλινόμενα, ενώ τα εξωτερικά περιλαμβάνουν άνω και κάτω θυρίδες, οι οποίες και επιτρέπουν την ανανέωση του αέρα εξυπηρετώντας με αυτό τον τρόπο τον αερισμό τόσο του ενδιάμεσου χώρου μεταξύ των δύο φύλλων, όσο και των εσωτερικών χώρων. Ο οριζόντιος και κατακόρυφος διαχωρισμός στα παράθυρα μπορεί να γίνει είτε ακολουθώντας τον κατασκευαστικό κάρναβο, είτε τους χώρους που εξυπηρετούν. Με τη λύση αυτή αποφεύγεται τόσο η μετάδοση του ήχου από χώρο σε χώρο και εν πολλοίς από το εξωτερικό περιβάλλον, όσο και η μετάδοση του χρησιμοποιημένου αέρα, οσμών κλπ.
- **Όψη τύπου κιβωτοειδούς αγωγού:** Πρόκειται για ειδική μορφή πρόσοψης κιβωτοειδούς και πάλι τύπου, η οποία περιλαμβάνει ένα σύστημα από παράθυρα – κουτιά που συνδέονται μέσω πλευρικών θυρίδων με συνεχείς κατακόρυφους αγωγούς αερισμού τοποθετημένων στην εξωτερική όψη. Ο αερισμός στην περίπτωση αυτή επιτυγχάνεται με την εισαγωγή του ψυχρού αέρα από τη βάση των παραθύρων και την πλευρική από τα παράθυρα απαγωγή του θερμού αέρα μέσω των κατακόρυφων αγωγών. Στον τύπο αυτό, η διάταξη της όψης αποτελείται από μία εναλλαγή ορθογωνίων παραθύρων και κατακόρυφων αγωγών αερισμού.
- **Όψη τύπου διαδρόμου:** Στις όψεις αυτού του τύπου, ο ενδιάμεσος χώρος μεταξύ των δύο κελυφών είναι κλειστός, προσπελάσιμος και έχει συνήθως το ύψος του ορόφου. Ο διάδρομος αυτός μπορεί να διακόπτεται κατά το μήκος του με κατακόρυφα στοιχεία, προκειμένου να βελτιωθεί η ακουστική, η πυροπροστασία και ο αερισμός. Οι θυρίδες αερισμού (είσοδος έξοδος αέρα) στο εξωτερικό κέλυφος είναι συνήθως τοποθετημένες σε εναλλασσόμενη θέση, προκειμένου να παρεμποδίζεται η μεταφορά του εξαγόμενου αέρα από τους χώρους του κάτω ορόφου σε αυτούς του αμέσως επόμενου.
- **Πολυώροφες συνεχείς όψεις:** Στις όψεις αυτού του τύπου ο κλωβός που δημιουργείται μεταξύ των δύο όψεων είναι συνεχής και εκτείνεται σε όλο το ύψος του κτιρίου. Συνεπώς η κίνηση της αέριας μάζας μέσα στον κλωβό γίνεται απρόσκοπτα (δεν διακόπτεται), η δε εισαγωγή και εξαγωγή του αέρα επιτυγχάνεται μέσω μεγάλων ανοιγμάτων στη βάση και στην οροφή του κτιρίου.



Σχήμα 2: Τύποι ΓΔΟ (α) όψη κιβωτοειδούς παραθύρου, (β) όψη τύπου κιβωτοειδούς αγωγού, (γ) όψη τύπου διαδρόμου, (δ) πολυώροφη συνεχής όψη

Με βάση το μηχανισμό κίνησης της αέριας μάζας μέσα στον κλωβό θα μπορούσε κανείς να διακρίνει τρεις κατηγορίες:

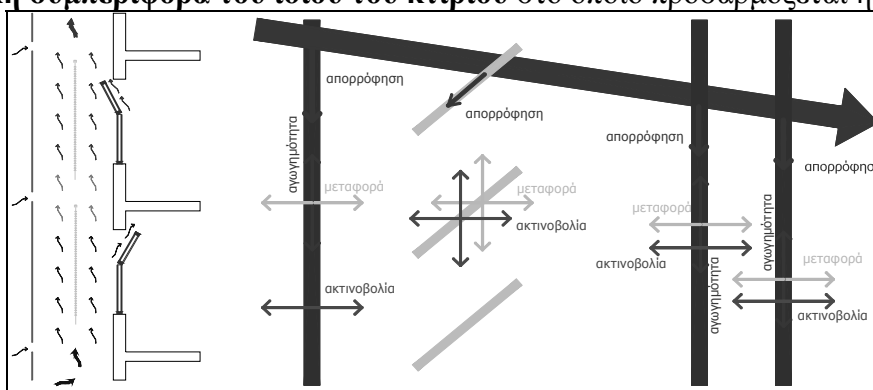
- **Παθητική κίνηση:** η κίνηση της αέριας μάζας μέσα στον κλωβό οφείλεται αποκλειστικά και μόνον στο φαινόμενο της θερμικής άνωσης λόγω των θερμοκρασιακών διαφορών και των ανεμοπιέσεων.
- **Ενεργητική κίνηση:** στην περίπτωση αυτή η κυκλοφορία και η ανακύκλωση του αέρα μέσα στον κλωβό υποστηρίζεται πλήρως από μηχανικές διατάξεις.
- **Υβριδική κίνηση:** πρόκειται για έναν συνδυασμό των δύο προηγούμενων περιπτώσεων, όπου δηλαδή ο φυσικός αερισμός του κλωβού ενισχύεται από μηχανικό σύστημα.

## 2.2. Μηχανισμός λειτουργίας της ΓΔΟ

Από τη σύντομη περιγραφή των διαφορετικών συστημάτων ΓΔΟ, μπορεί κανείς να διατυπώσει την άποψη, ότι δύο είναι οι βασικοί μηχανισμοί που επηρεάζουν τη λειτουργία τους, σε σχέση με τα αναγκαία θερμικά και ψυκτικά φορτία. Οι μηχανισμοί αυτοί αφορούν τη μετάδοση της θερμότητας σε συνδυασμό με την κίνηση του αέρα στον κλωβό. Συνεπώς, όπως προκύπτει και από το σχήμα 3, για την αξιολόγηση των ΓΔΟ και των κτιρίων στα οποία εφαρμόζονται, θα έπρεπε να αναπτυχθεί ένα σύνθετο υπολογιστικό εργαλείο, το οποίο να περιγράφει με κάθε λεπτομέρεια το δυναμικό αυτό φαινόμενο. Στην πραγματικότητα δηλαδή θα έπρεπε να γίνει σύνθεση τριών μαθηματικών μοντέλων όπου κυκλικά το ένα να μπορεί να τροφοδοτήσει με αξιόπιστα στοιχεία το επόμενο [3].

Τα μοντέλα αυτά θα έπρεπε να ασχολούνται με :

- **1<sup>ο</sup>: την κίνηση του αέρα:** ακριβής περιγραφή του μηχανισμού ροής του αέρα στον ενδιάμεσο χώρο της ΓΔΟ, συνδυάζοντας τα φαινόμενα της ανεμοπίεσης και της θερμικής άνωσης, καθώς και το ενδεχόμενο εξαναγκασμένης ροής στην περίπτωση που αποφασιστεί η μηχανική υποστήριξη.
- **2<sup>ο</sup>: τη θερμική συμπεριφορά της ΓΔΟ:** με ακριβή περιγραφή του μηχανισμού μετάδοσης της θερμότητας με αγωγιμότητα, μεταφορά και ακτινοβολία, και τέλος
- **3<sup>ο</sup>: τη θερμική συμπεριφορά του ιδίου του κτιρίου** στο οποίο προσαρμόζεται η ΓΔΟ.



Σχήμα 3: (α) κίνηση του αέρα μέσα στον κλωβό μίας ΓΔΟ, (β) Μετάδοση θερμότητας στις ΓΔΟ

Σημειώνεται ότι οι παράμετροι που θα έπρεπε να διερευνώνται με μεγάλη λεπτομέρεια, καθώς έχουν μεγάλη επίδραση τόσο στη μετάδοση της θερμότητας, όσο και στην κίνηση της αέριας μάζας στον κλωβό, είναι [4]:

- η διάταξη και το μέγεθος των θυρίδων εισαγωγής και εξαγωγής του αέρα, ανάλογα με τον τύπο της ΓΔΟ

- η θέση μέσα στον κλωβό και το υλικό της ηλιοπροστατευτικής διάταξης, προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα υπερθέρμανσης, καθώς και
- η ποιότητα των εξωτερικών και εσωτερικών υαλοπινάκων, με έμφαση στο συντελεστή ηλιακής διαπερατότητας, απορρόφησης και ο θερμοπερατότητας.

### 3. ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΗ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΓΔΟ

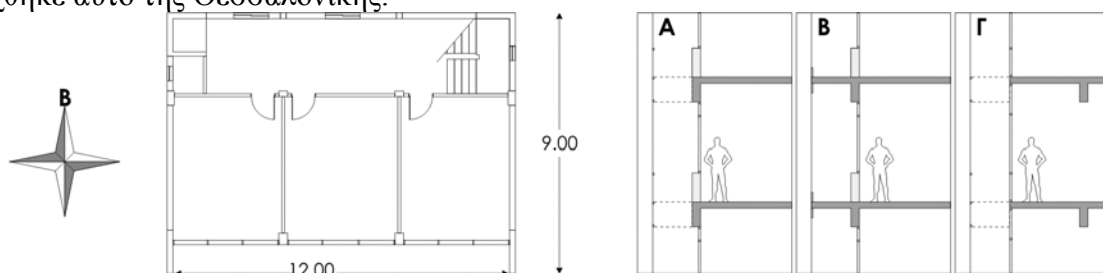
Η ενεργειακή προσομοίωση μιας δικέλυφης διαφανούς όψης, παρουσιάζει, όπως ήδη αναφέρθηκε, σημαντικές δυσκολίες, οι οποίες σχετίζονται κυρίως με τη θερμοκρασιακή διαστρωμάτωση και το ρεύμα αέρα που δημιουργείται στον κλωβό της κατασκευής. Οι παράμετροι αυτές, επηρεάζουν δραστικά την απόδοση του συστήματος καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και μάλιστα με σαφείς κινδύνους υπερθερμάνσεων την θερινή περίοδο, όπου καταγράφονται υψηλές θερμοκρασίες και έντονη ηλιακή ακτινοβολία.

Αν μάλιστα λάβει κανείς υπόψη, ότι δικέλυφες διαφανείς όψεις κατασκευάζονται κυρίως σε κτίρια γραφείων, στα οποία τα εσωτερικά κέρδη είναι αυξημένα, τότε μπορεί να αντιληφθεί, ότι ο κίνδυνος υπερθέρμανσης αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο του σχεδιασμού και ιδίως σε κλίμα όπως αυτό της Μεσογείου. Το τελευταίο, επιβεβαιώνεται και από τη διεθνή βιβλιογραφία, όπου και επισημαίνεται το πρόβλημα, ακόμη και σε βορειοευρωπαϊκές χώρες.

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μιας προσομοιωτικής μελέτης, σε σχέση με την ενεργειακή συμπεριφορά δύο βασικών τύπων ΓΔΟ, με τη βοήθεια του θερμικού μοντέλου SUNCODE-PC. Η ροή του αέρα στον κλωβό δεν αντιμετωπίζεται από το μοντέλο, όπως άλλωστε συμβαίνει για όλα τα αντίστοιχα θερμικά μοντέλα. Έτσι, το ζήτημα του αερισμού για την θερινή περίοδο ή ορθότερα της κίνησης του αέρα στον κλωβό με φυσικό τρόπο και όχι με μηχανικά μέσα, διερευνήθηκε παραμετρικά, δηλαδή εξετάζοντας πιθανές ταχύτητες αέρα (από 0,25-2,5 m/sec), οι οποίες συναντώνται σε παρόμοιες κατασκευές και είναι αποδεκτές από τη διεθνή βιβλιογραφία [7-10]. Με αυτό τον τρόπο, εκτός του ότι απλοποιήθηκαν οι σχετικοί έλεγχοι, χωρίς παράλληλα να μειωθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, δόθηκε η δυνατότητα να συσχετισθούν οι διάφορες τιμές ταχυτήτων και εναλλαγών αέρα και να δειχθεί η επίδρασή τους, τόσο στην ανάπτυξη των θερμοκρασιών μέσα στον κλωβό, όσο και στο ψυκτικό φορτίο.

Για την χειμερινή αντίστοιχα περίοδο, η ταχύτητα του αέρα στο κλωβό θεωρήθηκε αμελητέα, δεδομένου ότι την συγκεκριμένη εποχή οι θυρίδες αερισμού παραμένουν σε μεγάλο ποσοστό κλειστές λόγω του ψύχους. Σημειώνεται, ότι ο προθερμασμένος αέρας του κλωβού θα μπορούσε να διοχετευθεί στο σύστημα θέρμανσης - αερισμού και να αξιοποιηθεί ανάλογα με τις ανάγκες του κτιρίου.

Το κτίριο που μελετήθηκε θεωρήθηκε ότι είναι τετραώροφο με ισόγειο, με τη δικέλυφη κατασκευή να καλύπτει όλη τη νότια όψη (σχήμα 4). Το προφίλ λειτουργίας, τα εσωτερικά θερμικά κέρδη και τα λοιπά χαρακτηριστικά του κτιρίου, προσδιορίστηκαν έτσι, ώστε να συμπίπτουν με αυτά που παρουσιάζουν τυπικά κτίρια γραφείων. Οι θερμοστάτες θέρμανσης και ψύξης τέθηκαν στους 22°C και 26°C αντίστοιχα, για όλο το ημερήσιο διάστημα λειτουργίας του κτιρίου, ενώ ακόμη, ως κλίμα επιλέχθηκε αυτό της Θεσσαλονίκης.



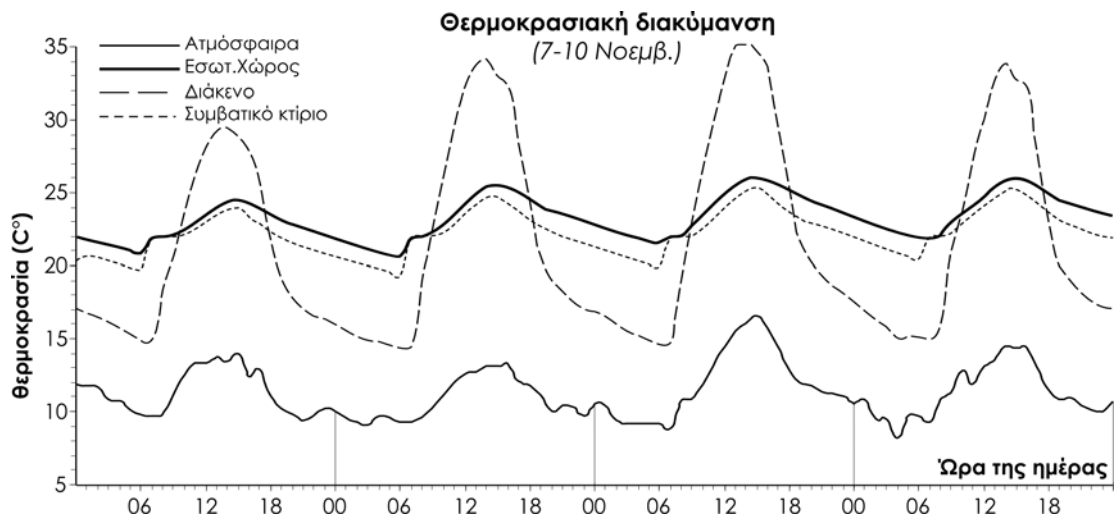
Σχήμα 4: Ενδεικτική κάτοψη κτιρίου και τομή με τους τύπους γυάλινων δικέλυφων όψεων που διερευνήθηκαν. Α. πολυώροφος τύπος ΓΔΟ με μικρή επιφάνεια εσωτερικών υαλοστασίων (ΠΜι)  
 Β. Τύπος διαδρόμου (Δ) Γ. Πολυώροφος τύπος ΓΔΟ με μεγάλες επιφάνειες εσωτερικών υαλοστασίων (ΠΜε).

Οι τύποι της γυάλινης δικέλυφης όψης που διερευνήθηκαν είναι αυτοί του σχήματος 4, με βάθος διακένου το οποίο καθορίστηκε στο 1μ, με εξωτερικό υαλοστάσιο που αποτελείται από μονό κρύσταλλο πάχους 6mm και το εσωτερικό από δίδυμο μονωτικό υαλοπίνακα.

Κάθε έλεγχος και για τις τρεις εξεταζόμενες ΓΔΟ, πραγματοποιείται με ή χωρίς διάταξη σκιασμού, για όλο το εύρος των εξεταζόμενων ταχυτήτων του αέρα (από 0,25-2,5 m/sec), καθώς και με απλό ή ανακλαστικό εξωτερικό υαλοστάσιο (για την τελευταία μόνο περίπτωση –ανακλαστικό τζάμι- εξετάστηκε μόνον το 1m/s ως ταχύτητα ροής αέρα στον κλωβό). Παράλληλα, για τις ανάγκες του συγκριτικού ελέγχου, εξετάζεται το ίδιο κτίριο με συμβατική όμως νότια όψη (δίχως το εξωτερικό υαλοστάσιο).

Ως βασικό μέγεθος για την αξιολόγηση της ενεργειακής συμπεριφοράς του κτιρίου, επιλέχθηκε το απαιτούμενο φορτίο θέρμανσης και ψύξης, ανηγμένο στην επιφάνεια κάτοψης σε kWh/m<sup>2</sup>ετησίως.

Στο σχήμα 5, παρουσιάζεται η θερμοκρασιακή διακύμανση που εμφανίζεται στον κλωβό, τον εσωτερικό χώρο και άλλες θέσεις κατά τη χειμερινή περίοδο του έτους .



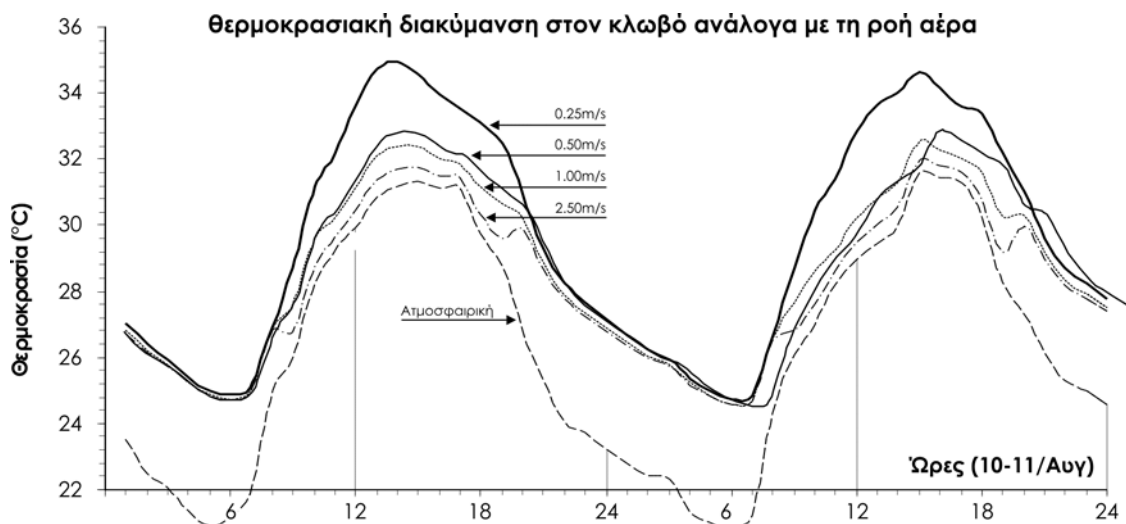
Σχήμα 5: Διακύμανση της θερμοκρασίας α. Εξωτερικού αέρα β. στον εσωτερικό χώρο πίσω από την ΓΔΟ (τύπος ΠΜι) γ. στον κλωβό της ΓΔΟ, δ. στον εσωτερικό χώρο του συμβατικού κτιρίου με μεγάλα ανοίγματα

- Τη χειμερινή περίοδο (με μικρή σχετικά ανανέωση του αέρα), η κατασκευή λειτουργεί παρόμοια με ένα θερμοκήπιο. Στο διάστημα της ημέρας θερμαίνεται από την ηλιακή ακτινοβολία. Ένα μέρος της θερμότητας απορρίπτεται στην ατμόσφαιρα (ή θα μπορούσε να διοχετευθεί στο σύστημα θέρμανσης εάν προβλεπόταν σύζευξη με την ΓΔΟ), ένα μέρος μεταβιβάζεται στο κτίριο και το υπόλοιπο χάνεται με τη μορφή θερμικών απωλειών από το εξωτερικό υαλοστάσιο. Οι θερμοκρασίες που εμφανίζονται είναι αρκετά υψηλές και θα μπορούσαν να είναι υψηλότερες εάν περιορίζονταν ο αερισμός του διακένου. Κάτι τέτοιο όμως, ενδέχεται να οδηγήσει σε έντονη υπερθέρμανση τις ηλιόλουστες ημέρες.
- Όπως φαίνεται στο σχήμα 5, η εσωτερική θερμοκρασία του κτιρίου με δικέλυφη όψη, υπερβαίνει τις περισσότερες ώρες της ημέρας το όριο της θερμοκρασίας του θερμοστάτη που έχει ρυθμιστεί στους 22°C. Επιπλέον στις 3:00 μμ η εσωτερική θερμοκρασία τις τρεις τελευταίες

ημέρες, αγγίζει τους 26°C, ενώ ελάχιστη και επιθυμητή μείωση παρατηρείται τις μεταμεσονύκτιες κυρίως ώρες. Τις νυχτερινές ώρες, το κτίριο με τη δικέλυφη κατασκευή παραμένει θερμότερο συγκριτικά με τα συμβατικά κτίρια, πρώτον, λόγω του μεγαλύτερου ποσού θερμότητας που συσσωρεύεται στη μάζα των δομικών του στοιχείων και δεύτερον λόγω των περιορισμένων θερμικών απωλειών προς το περιβάλλον, μια και η δικέλυφη όψη λειτουργεί ως χώρος ανάσχεσης της θερμότητας.

- Είναι προφανές βέβαια, ότι το πλεονέκτημα αυτό της δικέλυφης κατασκευής, αν παραταθεί ο χρόνος όπου παρουσιάζονται υψηλές θερμοκρασίες, ή ακόμη αν αυτές αυξηθούν ακόμη πιο πολύ, μπορεί να οδηγήσει ακόμη και την χειμερινή περίοδο, στην ανάγκη για φυσικό δροσισμό, ή και μηχανικής ψύξης. Σ' αυτές τις περιπτώσεις μοναδική λύση θα αποτελούσε η ενεργοποίηση των θυρίδων αερισμού του κλωβού και συνεπώς η αύξηση των εναλλαγών αέρα, πέραν των καθορισμένων ορίων.
- Η ίδια περίπου θερμοκρασιακή συμπεριφορά παρουσιάζεται και στην περίπτωση του συμβατικού κτιρίου με όμοια μεγάλα ανοίγματα στο κέλυφός του, όπως αυτά του εσωτερικού κελύφους τις προηγούμενης περίπτωσης κτιρίου με ΓΔΟ. Η διαφορά είναι της τάξης των 2-3°C και με μία μετατόπιση φάσης σε σχέση με την έναρξη και λήξη της ώρας που το κτίριο παρουσιάζει υψηλότερες θερμοκρασίες από τους 22°C. Στο συμβατικό κτίριο ο χρόνος αυτός είναι πιο περιορισμένος. Γενικά θα μπορούσε να καταλήξει κανείς στη θέση, ότι οι ΓΔΟ σε ένα κτίριο λειτουργούν πιο αποτελεσματικά, συγκριτικά με όμοιο συμβατικό και με ίδιας έκτασης νότια ανοίγματα που προσλαμβάνουν άμεσο ηλιακό κέρδος.
- Οι υψηλές τέλος θερμοκρασίες που παρουσιάζονται στον κλωβό της ΓΔΟ, έως και 35°C, μπορεί να αξιοποιηθούν είτε μέσω του προθερμασμένου αέρα αερισμού των χώρων, είτε μέσω της σύζευξης του συστήματος της εγκατάστασης θέρμανσης με τον κλωβό της ΓΔΟ (ανάκτηση θερμότητας).

Στο σχήμα 6, παρουσιάζεται η μέση θερμοκρασία αέρα στον κλωβό, σε συσχετισμό με την ταχύτητα του ρεύματος αέρα που δημιουργείται λόγω θερμοσιφονισμού σε δυο θερινές ημέρες, Για λόγους σύγκρισης δίνεται επίσης και η θερμοκρασία του εξωτερικού αέρα



Σχήμα 6: Διακύμανση της θερμοκρασίας αέρα στον κλωβό, ανάλογα με την ταχύτητα του ρεύματος αέρα. (Οι θερμοκρασιακές καμπύλες για 1,5 και 2m/s έχουν παραληφθεί για λόγους ευκρίνειας) Το κτίριο που διερευνήθηκε είναι με ΓΔΟ τύπου ΠΜι.

- Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του αέρα, τόσο περισσότερο η μέση θερμοκρασία του διακένου –τις ώρες της ημέρας- προσεγγίζει την αντίστοιχη εξωτερική. Τα προφανή αυτά αποτελέσματα οφείλονται στο γεγονός, ότι με μεγάλη

ροή αέρα στον κλωβό (φυσική ή εξαναγκασμένη), το θερμικό ηλιακό κέρδος απορρίπτεται με μεταφορά στο περιβάλλον, μειώνοντας μ' αυτό τον τρόπο και τη θερμική επιβάρυνση. Αντίστοιχα, όσο μικρότερη είναι η ροή, τόσο λιγότερο ανανεώνεται ο αέρας του κλωβού, με αποτέλεσμα τη θερμοκρασιακή του άνοδο.

- Τη νύχτα, όταν η εξωτερική θερμοκρασία αρχίζει να παρουσιάζει καθοδικές τιμές, η θερμοκρασία στον κλωβό ακολουθεί ανάλογη πορεία, με μικρή μόνο χρονική καθυστέρηση και υψηλότερες φυσικά τιμές από τις εξωτερικές, κυρίως λόγω της επιρροής που δέχεται από την αποθηκευμένη θερμότητα στα δομικά στοιχεία του κελύφους ή οποία και εκλύεται σταδιακά. Ο αερισμός του κλωβού τις νυχτερινές ώρες είναι αρκετά μειωμένος σε σχέση με την ημέρα διότι η απουσία ακτινοβολίας οδηγεί σε εξασθένηση του φαινομένου της θερμικής άνωσης. Έτσι, ανεξάρτητα από την ταχύτητα αέρα που εμφανίζεται την ημέρα, τη νύχτα η ροή αέρα είναι περίπου κοινή σε κάθε μια από τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, γεγονός που οδηγεί σε περίπου κοινές θερμοκρασίες εντός του κλωβού

Η μεταβολή της θερμοκρασίας κλωβού ανάλογα με την ταχύτητα του ρεύματος αέρα, επηρεάζει όπως είναι αναμενόμενο και το ψυκτικό φορτίο του κτιρίου. Τα αποτελέσματα των σχετικών ελέγχων παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1.** Επίδραση της ταχύτητας αέρα στον κλωβό στο ανηγμένο φορτίο ψύξης (kWh/m<sup>2</sup>ετησίως) για δύο βασικούς τύπους γυάλινης δικέλυφης όψης (πολυώροφος με μικρή επιφάνεια υαλοπινάκων στην εσωτερική όψη ΠΜι, τύπου διαδρόμου Δ με μικρή επιφάνεια υαλοπινάκων στην εσωτερική όψη και πολυώροφος με μεγάλη επιφάνεια ανοιγμάτων ΠΜε)

Ροή αέρα (m/s)*		Ετήσιο ανηγμένο φορτίο ψύξης (kWh/m <sup>2</sup> )					
		Χωρίς σκιασμό			Με σκιασμό		
ΠΜι,Πμε	Δ	ΠΜι	ΠΜε	Δ	ΠΜι	ΠΜε	Δ
0.25	0.01	81.30	115.29	95.15	60.0	82.17	77.84
0.50	0.04	78.81	114.98	88.60	55.8	78.15	68.14
1.00	0.08	78.06	114.90	85.58	54.6	76.93	63.77
1.50	0.17	77.38	114.77	83.27	53.5	75.89	60.50
2.00	0.25	77.07	114.72	81.92	53.0	75.41	58.67
2.50	0.50	76.88	114.69	80.97	52.6	75.11	57.32

\*Στη μορφή δικέλυφης τύπου διαδρόμου, η ταχύτητα εμφανίζεται μικρότερη λόγω μειωμένης έντασης θερμοσιφονισμού

- Από τα αποτελέσματα του πίνακα 1, γίνεται καταρχάς αντιληπτός ο βαθμός ευαισθησίας του ψυκτικού φορτίου, σε σχέση με την ταχύτητα του αέρα, αλλά και με τον σκιασμό της όψης.
- Εξετάζοντας τον ίδιο τύπο ΓΔΟ (ΠΜι και ΠΜε), διαπιστώνει κανείς, ότι η αύξηση της ταχύτητας του αέρα στον κλωβό, δεν επαρκεί σε κάθε περίπτωση για να μειώσει την επίδραση του αυξημένου ηλιακού κέρδους και συνεπώς το φορτίο ψύξης. Στην περίπτωση της ΓΔΟ ΠΜι η διαφορά από 0,25 -2,5 ταχύτητα αέρα είναι μόλις 4,42 kWh/m<sup>2</sup>ετησίως, στην ΠΜε αντίστοιχα η διαφορά στο ψυκτικό φορτίο είναι αμελητέα 0,6 kWh/m<sup>2</sup>ετησίως, ενώ σημαντικότερη παρουσιάζεται στην Δ με αντίστοιχη διαφορά 14,18 kWh/m<sup>2</sup>ετησίως.
- Από την σύγκριση των ΠΜι και ΠΜε διαπιστώνεται, ότι οι μεγάλες γυάλινες επιφάνειες στον ίδιο τύπο ΓΔΟ επιβαρύνουν σημαντικά το ψυκτικό φορτίο, έως και 49%.
- Η προσθήκη σκιασμού με τη μορφή οριζόντιων περσίδων εντός του κλωβού μειώνει αισθητά το ψυκτικό φορτίο. Για παράδειγμα με ταχύτητα 2,5 m/s στην περίπτωση ΠΜι η μείωση λόγω σκίασης είναι 31,58%, στην ΠΜε 34,5%, ενώ στην Δ 29,2%.

Από τα παραπάνω θα κατέληγε κανείς στο συμπέρασμα, ότι οι ηλιοπροστατευτικές διατάξεις αποτελούν βασική παράμετρο στο σχεδιασμό των γυάλινων δικέλυφων όψεων, κάτω από τις συγκεκριμένες ελληνικές κλιματικές συνθήκες, προκειμένου να μειωθεί το ψυκτικό φορτίο των



δικέλυφων κατασκευών. Επίσης, ο περιορισμός της εσωτερικής γυάλινης επιφάνειας, θα συνέβαλε ακόμη περισσότερο στην παραπάνω κατεύθυνση, ενώ τέλος η κίνηση του αέρα στον κλωβό, αποδεικνύεται η πιο ασθενής παράμετρος, Μόνο με τον συνδυασμό των προηγούμενων δύο θα μπορούσε να συνεισφέρει στον περαιτέρω περιορισμό των φορτίων ψύξης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των καταναλώσεων για θέρμανση και ψύξη, των περιπτώσεων ΓΔΟ που εξετάστηκαν. Σημειώνεται ότι τα αποτελέσματα τα οποία αφορούν στο ψυκτικό φορτίο, υπολογίστηκαν για μέση ταχύτητα αέρα στον κλωβό, ίση με 1m/s. Για λόγους σύγκρισης δίνονται και οι καταναλώσεις της συμβατικής όψης (όπως η ΠΜι με αφαίρεση της εξωτερικής όψης).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Ετήσια ανηγμένη απαίτηση φορτίου θέρμανσης και ψύξης (kWh/m<sup>2</sup>a) για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις ανάλογα με την εφαρμογή σκίασμού και τον τύπο του εξωτερικού υαλοστασίου

Τύπος	Ετήσια ανηγμένη απαίτηση φορτίου (kWh/m <sup>2</sup> a)		
	Θέρμανση	Ψύξη	Ψύξη με σκίασμό
<b>Κοινό τζάμι</b>			
Συμβατική όψη	58.79	65.62	32.12
ΠΜι.(Κ)	36.69	78.06	54.6
Δ(Κ)	29.15	85.58	63.77
ΠΜε(Κ)	24.67	114.90	76.93
<b>Ανακλαστικό κρύσταλλο</b>			
Συμβατική όψη	98.58	39.8	26.3
ΠΜι.(Α)	77.05	44.4	33.6
Δ(Α)	72.28	47.8	37.7
ΠΜε(Α)	66.39	58.1	40.6

\*Κ: Κοινό κρύσταλλο Α: Ανακλαστικό κρύσταλλο

- Με βάση τα αποτελέσματα του πίνακα 2 θα κατέληγε κανείς στο βασικό συμπέρασμα, ότι οι διάφορες επιλογές στο σχεδιασμό των ΓΔΟ, θα έπρεπε να παίρνουν υπόψη τους τις προτεραιότητες, που επηρεάζονται κυρίως από τις κλιματικές συνθήκες της περιοχής. Έτσι, αν θα έπρεπε να αντιμετωπίσει κανείς κυρίως τα φορτία θέρμανσης, τότε η επιλογή ΓΔΟ τύπου ΠΜε (Κ) θα αποτελούσε τη βέλτιστη λύση. Η εξοικονόμηση ενέργειας που προκύπτει συγκριτικά με μία συμβατική κατασκευή και κοινό τζάμι, είναι της τάξης του 58%. Αντίστροφα, σε θερμό κλίμα, όπου μεγάλη σημασία αποκτούν τα φορτία ψύξης, τότε θα έλεγε κανείς, ότι η περίπτωση της συμβατικής όψης με ανακλαστικά κρύσταλλα και σκίαση, θα αποτελούσε μία σωστή επιλογή. Η εξοικονόμηση ενέργειας, συγκριτικά με την αντίστοιχη λύση ΠΜε(Α), είναι της τάξης του 35%.
- Σε κάθε περίπτωση, θα μπορούσε κανείς να προτείνει τις γυάλινες δικέλυφες όψεις, με την προϋπόθεση της αποτελεσματικής τους σκίασης και το άνοιγμα, εάν είναι δυνατόν, των εξωτερικών κρυστάλλων της όψης, προκειμένου να απενεργοποιηθεί το σύστημα την θερινή περίοδο. Με τον τρόπο αυτό, θεωρείται ότι οι ΓΔΟ θα μπορούσαν να δρουν αποτελεσματικά, για τις ελληνικές συνθήκες χειμώνα – καλοκαίρι.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μείωση των θερμικών φορτίων το χειμώνα, καθώς και η ελάττωση των αντίστοιχων ψυκτικών τους θερινούς μήνες, αποτελούν αναμφισβήτητα τους κοινούς στόχους για όλες τις εφαρμογές που βασίζονται στις αρχές του ενεργειακού σχεδιασμού των κτιρίων.

Όσον αφορά στις γυάλινες δικέλυφες όψεις, που αποτελούν αναμφισβήτητα νέες αναζητήσεις στην βιοκλιματική αρχιτεκτονική, με δεκάδες εφαρμογές σε ευρωπαϊκό επίπεδο, θα έλεγε κανείς ότι θα έπρεπε να προτείνονται μόνον κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις. Αυτές αφορούν την λεπτομερή μελέτη κυρίως για τον αποτελεσματικό φυσικό δροσισμό του κτιρίου, μέσω της σκίασης, της διαστασιολόγησης των ανοιγμάτων και της επιλογής του τύπου των κρυστάλλων τους, του φυσικού αερισμού και εάν είναι δυνατόν του νυχτερινού, της κατάργησης της λειτουργίας του εξωτερικού κελύφους με το άνοιγμα των υαλοπινάκων εφόσον η λειτουργία του κτιρίου το επιτρέπει, καθώς και άλλων σχετικών μέτρων που περιλαμβάνονται στον παθητικό δροσισμό των κτιρίων. Επιπλέον, θα έπρεπε να διερευνώνται, η γεωμετρία των ΓΔΟ, ο τρόπος κίνησης της αέριας μάζας μέσα στον κλωβό σε συνδυασμό φυσικά με τις κλιματικές συνθήκες του σχεδιασμού. Με τον τρόπο αυτό, θα μπορεί πλέον η ΓΔΟ να προσαρμόζει τη λειτουργία της ανάλογα με τις εξωκλιματικές συνθήκες. Για την ικανοποίηση του τελευταίου στόχου επιλέγονται συνήθως πολύπλοκα συστήματα ελέγχου, προκειμένου να απαλλαγούν οι χρήστες, από τις δια χειρός ρυθμίσεις.

Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι, κατά τη φάση σχεδιασμού ο μηχανισμός λειτουργίας των ΓΔΟ θα πρέπει να αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης και σε καμία περίπτωση η κατασκευή ΓΔΟ βασιζόμενη πάνω στις εμπειρίες προηγούμενων “πετυχημένων” σχεδιαστικών εφαρμογών, δεν αποτελεί εγγύηση καλής λειτουργίας και επίτευξης του επιθυμητού στόχου.

Βέβαιο είναι όμως, όπως αποδείχθηκε και από τη ανάλυση των περιπτώσεων που αναπτύχθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, ότι είναι δυνατή η βελτίωση της ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων με τη χρήση γυάλινων δικέλυφων όψεων, διερευνώντας με κάθε λεπτομέρεια τις παραμέτρους που την επηρεάζουν, ώστε πράγματι να διασφαλιστούν σωστές εσωκλιματικές συνθήκες όλες τις περιόδους. Η υιοθέτηση αποτελεσμάτων από την διεθνή βιβλιογραφία εκτιμάται ότι θα οδηγούσε σε εσφαλμένες γενικά επιλογές, διότι αυτά αναφέρονται κατά κανόνα σε διαφορετικές συνθήκες κλίματος και πολύ πιθανόν σε διαφορετική γεωμετρία και χαρακτηριστικά των ΓΔΟ. Τα τελευταία, όπως αποδείχθηκε στην εργασία, μπορεί να οδηγήσουν και σε εντελώς διαφοροποιημένα αποτελέσματα.

## **Βιβλιογραφία**

1. Oesterle E., Lieb R-D., Lutz M., & Heusler W., (2001). "**Doppelschalige Fassaden**", Callwey
2. Kragh M., (2000), "**Building Envelopes and Environmental Systems**". Paper presented at Morden Facades of Office Buildings Delft Technical University, The Netherlands.
3. Wojtek Stec, Dolf van Paassen, Defining the performance of the double skin façade with the use of the simulation model,
4. Jörn von Grabe, "A prediction tool for the temperature field of the double facades", **Energy and Buildings**, 2002, vol. 34, pp 891-899
5. Saelens D., Carmeliet J., & Hens H. (2003) . "Energy performance assessment of multiple skin facades". **International Journal of HVAC&R Research** 9(2): 167-186.
6. Hensen J., Bartak M., Drkal F., (2002), "Modeling and Simulation of a Double-Skin Facade System", **ASHRAE Transaction**, vol.108.
7. Todorovic B., Maric B., "The influence of double skin facades on building heat losses and cooling loads". Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade University, Yugoslavia.
8. Wojtek Stec\* & Dolf van Paassen, "Energy in Built Environment", Energy Technology, TU Delft, Mekelweg 2, 2628 CD, Delft, The Netherlands.
9. Saelens, D., 2002, "**Energy Performance Assessment of Multiple-Skin Facades**", PhD dissertation, Leuven: KU Leuven, Laboratory for Building Physics.
10. Till Pasquay, "Natural ventilation in high-rise buildings with double facades, saving or waste of energy", **Energy and Buildings**, 2004, vol. 36, pp 8381-38