



“Επίδραση του συνδυασμού μόνωσης και υαλοπινάκων στη μεταβατική κατανάλωση ενέργειας των κτιρίων”

Χ. Τζιβανίδης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Φ. Γιώτη, Μηχανολόγος Μηχανικός, υπ. Διδάκτωρ Ε.Μ.Π.

Κ.Α. Αντωνόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

- Μελετάται η επίδραση του **συνδυασμού** των χαρακτηριστικών της **μόνωσης** και των **υαλοπινάκων** στην μεταβατική κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης των κτηρίων.
- Τα δύο αυτά δομικά στοιχεία είναι οι **σημαντικότεροι** κατασκευαστικοί παράγοντες που επιδρούν στην **ενεργειακή κατανάλωση**, διότι παρουσιάζουν την μεγαλύτερη και την μικρότερη θερμική αντίσταση.
- Κατά την χειμερινή περίοδο, οι υαλοπίνακες, και σε μικρότερο βαθμό η μόνωση, επιτρέπουν την είσοδο τόσο **θετικών** (ηλιακή ακτινοβολία) όσο και **αρνητικών** (αγωγή θερμότητας λόγω θερμοκρασιακής διαφοράς) φορτίων.
- Για την προσέγγιση του θερμικού αυτού προβλήματος αναπτύχθηκε μοντέλο προσομοίωσης της **μεταβατικής ενεργειακής συμπεριφοράς** των κτηρίων, το οποίο βασίζεται σε επίλυση **πεπερασμένων διαφορών** του συστήματος των διαφορικών εξισώσεων που διέπουν το πρόβλημα.
- Συμπεραίνεται ότι, κατά το χειμερινό 24ωρο, η εισερχόμενη από τους υαλοπίνακες ηλιακή ακτινοβολία **υπερισχύει** των απωλειών αγωγής μέσω αυτών, πλην ακραίων περιπτώσεων, και παρέχονται διαγράμματα για την επιλογή των συνδυασμών που ελαχιστοποιούν την κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης.

Εισαγωγή

- Οι σημαντικότεροι κατασκευαστικοί παράγοντες που επιδρούν στο επίπεδο κατανάλωσης ενέργειας στα κτήρια είναι η **μόνωση** (με χαρακτηριστικά το πάχος και την ειδική θερμική αγωγιμότητα) και οι **υαλοπίνακες** (με χαρακτηριστικά τον συντελεστή θερμικής διαπερατότητας, το ποσοστό επιφανείας επί του κελύφους και τον προσανατολισμό).
- Επί πλέον οι υαλοπίνακες επιτρέπουν την **είσοδο ηλιακών φορτίων** υπό μορφή ακτινοβολίας καθώς επίσης σχετίζονται με τον **φωτισμό** του κτηρίου, ο οποίος συχνά δημιουργεί ένα από τα σημαντικότερα φορτία θέρους.
- Η λειτουργία της μόνωσης, και πολύ περισσότερο των υαλοπινάκων, διαφέρει κατά την χειμερινή και την θερινή περίοδο λόγω της επιθυμητής, κατά τον χειμώνα, **ηλιακής ενέργειας**, της οποίας την είσοδο **δυσκολεύει** η μόνωση, ενώ αντιθέτως επιτρέπει ο υαλοπίνακας.
- Η ιδιότητα αυτή των υαλοπινάκων γίνεται περισσότερο σημαντική αν στους απέναντι τοίχους υπάρχουν συστήματα αύξησης του **θερμοαποθηκευτικού δυναμικού** (π.χ. υλικά αλλαγής φάσης).

Εισαγωγή

- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι υαλοπίνακες, και σε μικρότερο βαθμό η μόνωση, κατά την χειμερινή περίοδο αφού επιτρέπουν την είσοδο τόσο θετικών (ηλιακή ακτινοβολία) όσο και αρνητικών (αγωγή θερμότητας λόγω διαφοράς θερμοκρασίας) φορτίων.
- Με την επιλογή των **καταλλήλων τιμών** των χαρακτηριστικών των υαλοπινάκων και της μόνωσης επιδιώκεται **θετικό αλγεβρικό άθροισμα** των παραπάνω φορτίων με αποτέλεσμα την μείωση της κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσης και γενικά την εξοικονόμηση ενέργειας.
- Σε πολλά δημοσιεύματα μελετάται η επίδραση των χαρακτηριστικών της μόνωσης, ενώ άλλα περιορίζονται στην μελέτη της επίδρασης των χαρακτηριστικών των υαλοπινάκων.
- Παρά την μεγάλη σημασία της μόνωσης και των υαλοπινάκων, δεν είναι άμεσα γνωστή η επίδραση της μεταβολής τους καθώς και των συνδυασμών των μεταβολών τους στην κατανάλωση ενέργειας υπό μεταβατικές συνθήκες.
- Δεν υπάρχουν σχετικοί πίνακες ή διαγράμματα, τα οποία θα μπορούσαν να διευκολύνουν την ενεργειακή αξιολόγηση υφισταμένων κτηρίων καθώς και την επιλογή των χαρακτηριστικών της μόνωσης και των υαλοπινάκων νέων κτηρίων.

Εισαγωγή

- Για την προσέγγιση του προβλήματος **αναπτύχθηκε** και επιβεβαιώθηκε πειραματικά μοντέλο **προσομοίωσης** της μεταβατικής ενεργειακής συμπεριφοράς των κτιρίων.
- Το αναπτυχθέν μοντέλο βασίζεται στην επίλυση του **συστήματος** των **διαφορικών εξισώσεων** που εκφράζουν το πρόβλημα, με την τεχνική των **πεπερασμένων διαφορών**.
- Γίνεται εφαρμογή για τυπικά κτήρια υπό τις κλιματικές συνθήκες της **Αθήνας**, οι οποίες έχουν προκύψει με στατιστική επεξεργασία μετρημένων ωριαίων τιμών της **θερμοκρασίας** και της **ηλιακής ακτινοβολίας** πολλών ετών.
- Παρέχονται διαγράμματα της **μεταβατικής κατανάλωσης ενέργειας** συναρτήσει συνδυασμών των χαρακτηριστικών μόνωσης και υαλοπινάκων.

Ημερήσια κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης για διάφορους συνδυασμούς μόνωσης και υαλοπινάκων

- Στις κυριότερες από τις πολυάριθμες παραμέτρους που καθορίζουν το πρόβλημα, περιλαμβάνονται:

-- τα χαρακτηριστικά των **υαλοπινάκων** (συντελεστής θερμικής διαπερατότητας, ποσοστό επιφανείας επί του κελύφους, προσανατολισμός)

-- τα χαρακτηριστικά της **μόνωσης** του κελύφους (πάχος και ειδική θερμική αγωγιμότητα)

-- τα λοιπά **δομικά χαρακτηριστικά** του κτηρίου

-- οι συνθήκες εξωτερικού περιβάλλοντος (θερμοκρασία και ηλιακή ακτινοβολία) η **επιθυμητή** θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος

- Επειδή, για προφανείς λόγους, δεν είναι δυνατή η παρουσίαση των αποτελεσμάτων για όλους τους συνδυασμούς των παραμέτρων, θα καλυφθούν οι συνηθέστερες περιπτώσεις, ξεκινώντας με μια βασική περίπτωση μελέτης (ΒΠΜ) και συνεχίζοντας με αλλαγή, κάθε φορά, μίας μόνο παραμέτρου της ΒΠΜ.

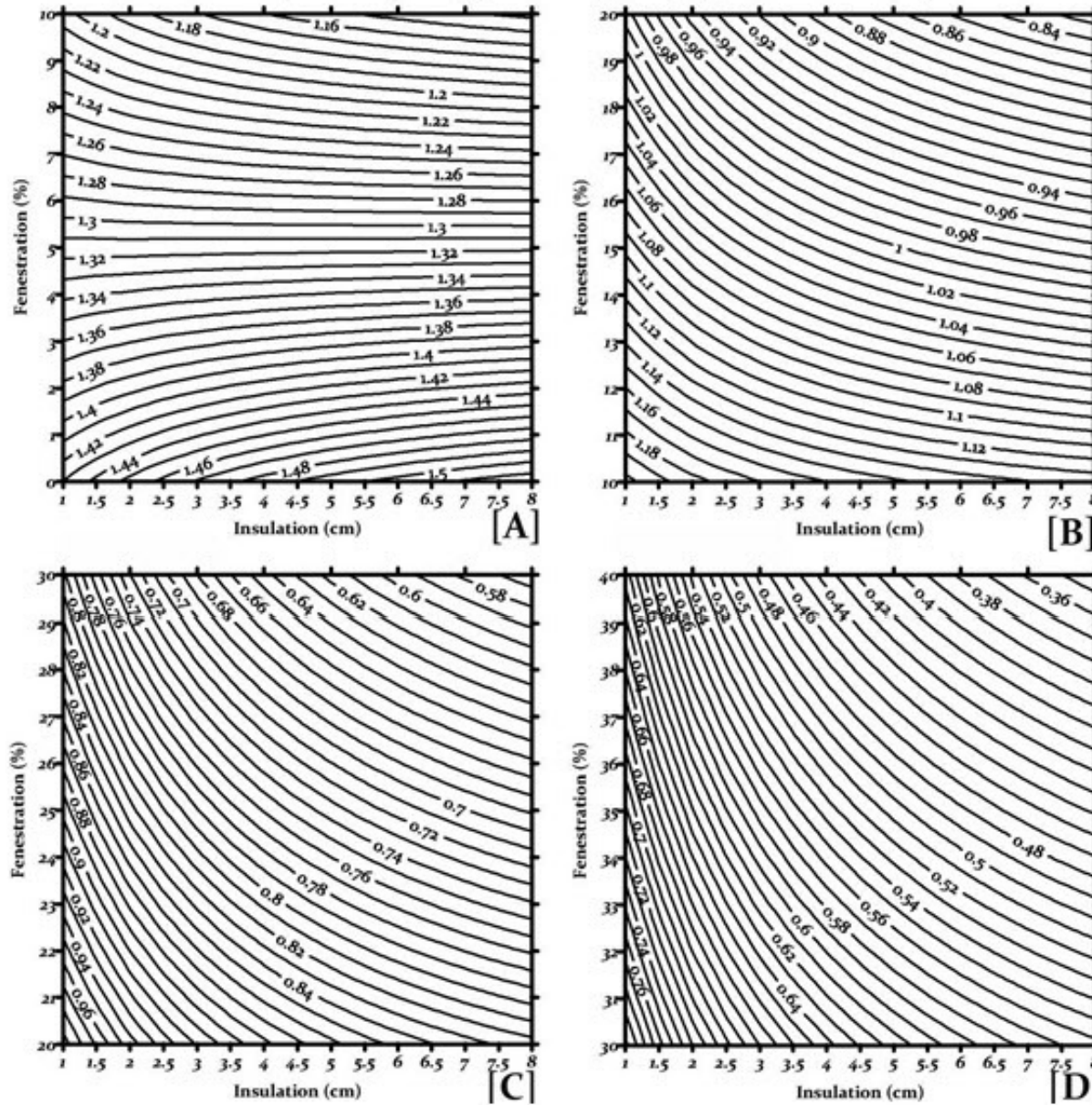
Βασική Περίπτωση Μελέτης (ΒΠΜ)

- Η ΒΠΜ αφορά πανταχόθεν ελεύθερο ισόγειο κτήριο τετραγωνικού δαπέδου επιφανείας $10 \times 10 = 100 \text{ m}^2$, με επιφάνεια κελύφους (πλην αδιαβατικού δαπέδου) $f = 220 \text{ m}^2$ και όγκο κτηρίου $v = 300 \text{ m}^3$ (λόγος $f/v = 0.733 \text{ m}^{-1}$).
- Εξωτερικοί τοίχοι αποτελούμενοι από τα παρακάτω διαδοχικά στρώματα: εξωτερικό επίχρισμα πάχους 2 cm , 9 cm δρομική οπτοπλινθοδομή, μόνωση μεταβλητού πάχους ($1 \text{ cm} - 8 \text{ cm}$) και ειδικής θερμικής αγωγιμότητας 0.038 W/mK , 9 cm δρομική οπτοπλινθοδομή και 2 cm εσωτερικό επίχρισμα.
- Η οροφή αποτελείται από 2 cm εσωτερικό επίχρισμα, πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος πάχους 15 cm , μόνωση ίσου πάχους και ειδικής θερμικής αγωγιμότητας με την μόνωση των εξωτερικών τοίχων, και λοιπά στρώματα κονιαμάτων και επιστρώσεων συνολικού πάχους 10 cm .
- Μήκος εσωτερικών τοίχων 20 m , κατασκευασμένων από οπτοπλινθοδομή με επίχρισμα 2 cm εκατέρωθεν.
- Οι τέσσερες πλευρές του κτηρίου είναι προσανατολισμένες προς τα τέσσερα κύρια σημεία του ορίζοντα.
- Κάθε μια από αυτές αποτελείται, κατά μεταβαλλόμενο ποσοστό $0 - 40\%$ της επιφανείας της, από υαλοπίνακες με ολικό συντελεστή θερμικής διαπερατότητας $3.5 \text{ w/m}^2\text{k}$.
- Εξωτερικός και εσωτερικός συντελεστής συναγωγής $16 \text{ W/m}^2\text{K}$ και $8 \text{ W/m}^2\text{K}$, αντιστοίχως.

Βασική Περίπτωση Μελέτης (ΒΠΜ)

- Εξωτερική επιφάνεια κελύφους ανοικτού χρώματος, με συντελεστή απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας 44%.
- Θερμοκρασία εσωτερικού περιβάλλοντος 22°C.
- Ως κλιματολογικά δεδομένα ελήφθησαν οι τιμές Αθηνών, οι οποίες προέκυψαν με στατιστική επεξεργασία ωριαίων μετρήσεων 20 ετών της εξωτερικής θερμοκρασίας και της ηλιακής ακτινοβολίας.
- Η διαπερατότητα των υαλοπινάκων για την ηλιακή ακτινοβολία ελήφθη ίση προς 85%. ποσοστό 5% της εισερχομένης ακτινοβολίας απορροφάται άμεσα από τον εσωτερικό αέρα, ενώ το υπόλοιπο απορροφάται από το απέναντι δομικό στοιχείο (εσωτερικός τοίχος) και αποδίδεται αργότερα.
- Ανανέωση αέρα ίση προς 2 αλλαγές ανά ώρα.
- Αδιαβατικό δάπεδο.
- Τα αποτελέσματα όλων των σχημάτων αντιστοιχούν στην τυπική 21^η Ιανουαρίου στην περιοχή της Αθήνας.

Daily Heating Energy Consumption [GJ], Basic Case Study

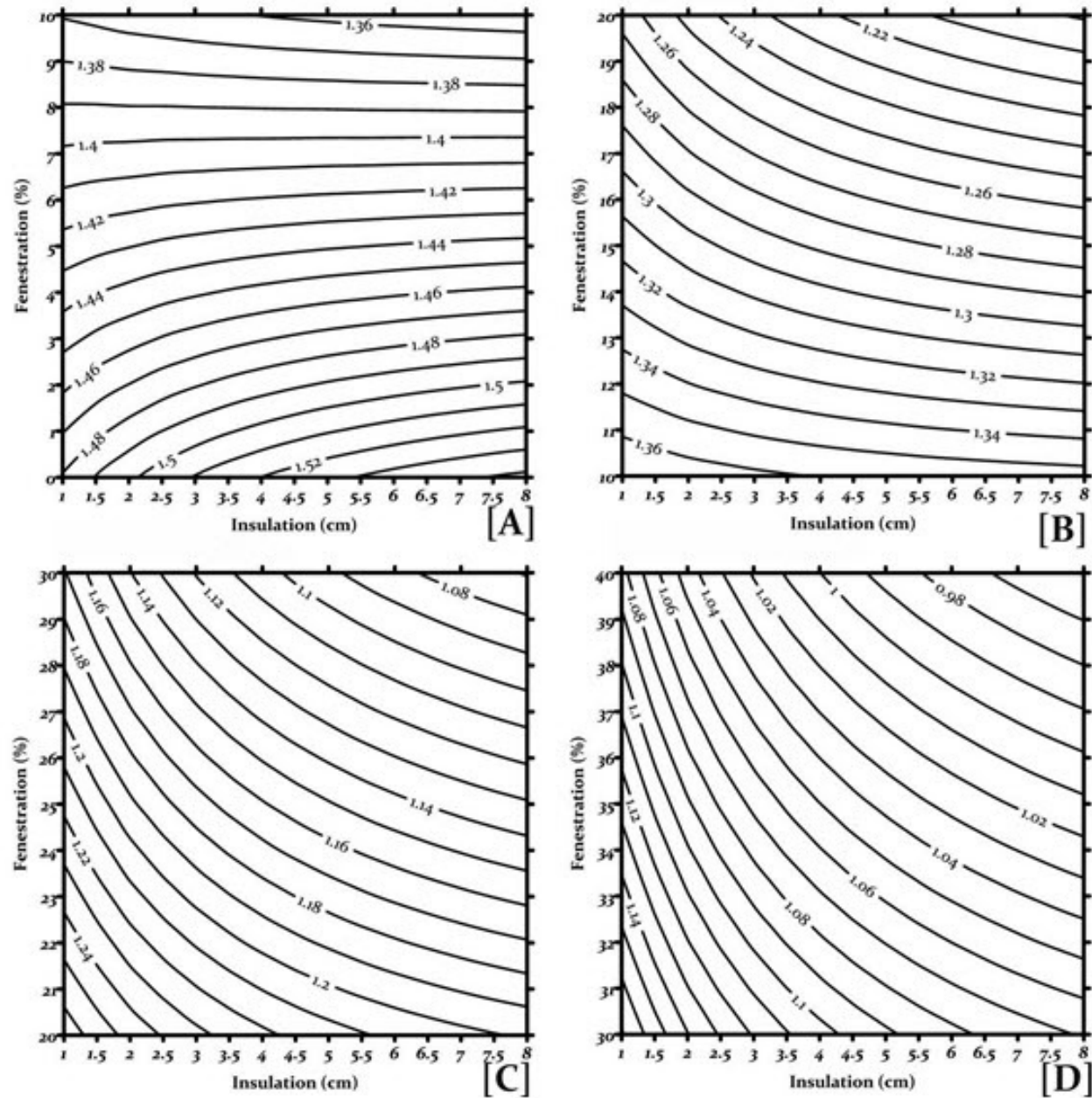


Σχήμα 1. Υπολογισθείσες καμπύλες ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσης E_d , οι οποίες αντιστοιχούν σε πάχη μόνωσης w και ποσοστά επιφανείας υαλοπράκτων p αναγραφόμενα στις κλίμακες των καρτεσιανών αξόνων, για την Βασική Περίπτωση Μελέτης (ΒΠΜ). [A]: $p=0-10\%$, [B]: $p=10-20\%$, [C]: $p=20-30\%$, [D]: $p=30-40\%$

Παρατηρήσεις

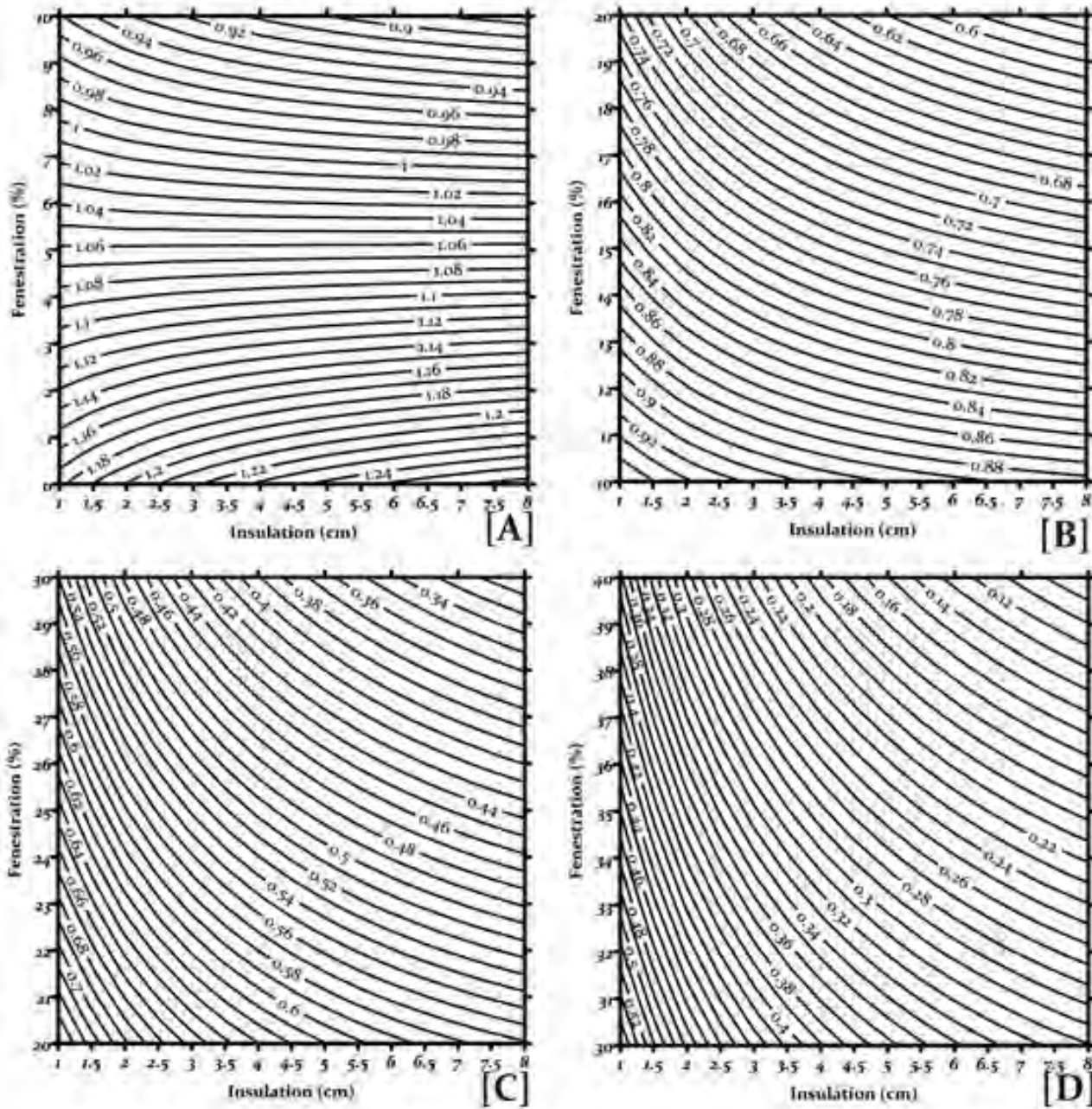
- Από τα παραπάνω σχήματα προκύπτει ότι για σταθερό πάχος μόνωσης w , αύξηση του ποσοστού υαλοπινάκων p προκαλεί μείωση της ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσης E_d .
- Τούτο συμβαίνει λόγω αύξησης της εισερχομένης ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία **υπερκαλύπτει** τις απώλειες αγωγής που αυξάνουν με την αύξηση της επιφάνειας των υαλοπινάκων λόγω της μικρής θερμικής αντίστασης αυτών σε σχέση με την αντίσταση των εξωτερικών τοίχων.
- Για σταθερό ποσοστό υαλοπινάκων $p > 5\%$, αύξηση του πάχους της μόνωσης w προκαλεί την αναμενόμενη μείωση της ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας θέρμανσης E_d .
- Το αντίθετο όμως συμβαίνει για $p < 5\%$. η μη αναμενόμενη αυτή συμπεριφορά οφείλεται στην **μείωση** (λόγω αύξησης του πάχους της μόνωσης) της δι' αγωγής εισερχομένης **ηλιακής θερμότητας** μέσω των εξωτερικών τοίχων, η οποία παίζει τώρα τον ρυθμιστικό ρόλο αντί της ηλιακής ακτινοβολίας που εισέρχεται από την περιορισμένη επιφάνεια των υαλοπινάκων ($p < 5\%$).
- Λόγω της αντίθετης συμπεριφοράς της μόνωσης για $p > 5\%$ και $p < 5\%$, η ημερήσια κατανάλωση ενέργειας θέρμανσης E_d εμφανίζεται σχεδόν ανεξάρτητη του πάχους της μόνωσης όταν το ποσοστό των υαλοπινάκων είναι $p_0 \approx 5\%$.
- Η τιμή αυτή, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα που θα δοθούν παρακάτω, εξαρτάται από τον συνδυασμό των παραμέτρων του προβλήματος.
- **Οι παραπάνω παρατηρήσεις θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στην πράξη για την εκτίμηση του συνδυασμού ποσοστού υαλοπινάκων και πάχους μόνωσης, που μεγιστοποιεί την εξοικονόμηση ενέργειας.**

Daily Heating Energy Consumption [GJ], Cloudy Day [50%]

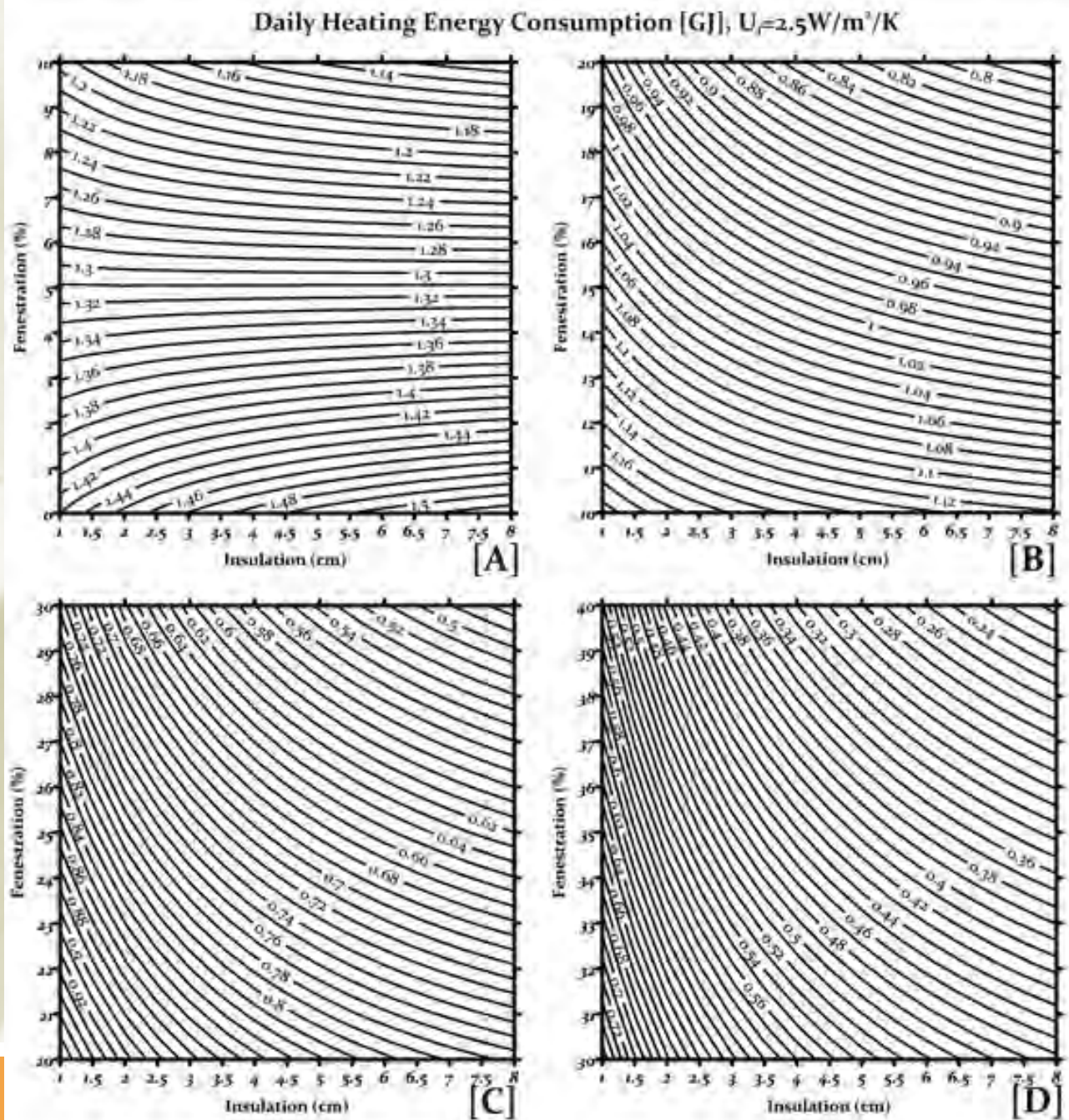


Σχήμα 2: Όπως στο Σχήμα 1 αλλά με προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία μειωμένη κατά 50% (προσομοίωση νεφελώδους ημέρας).

Daily Heating Energy Consumption [G], $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$

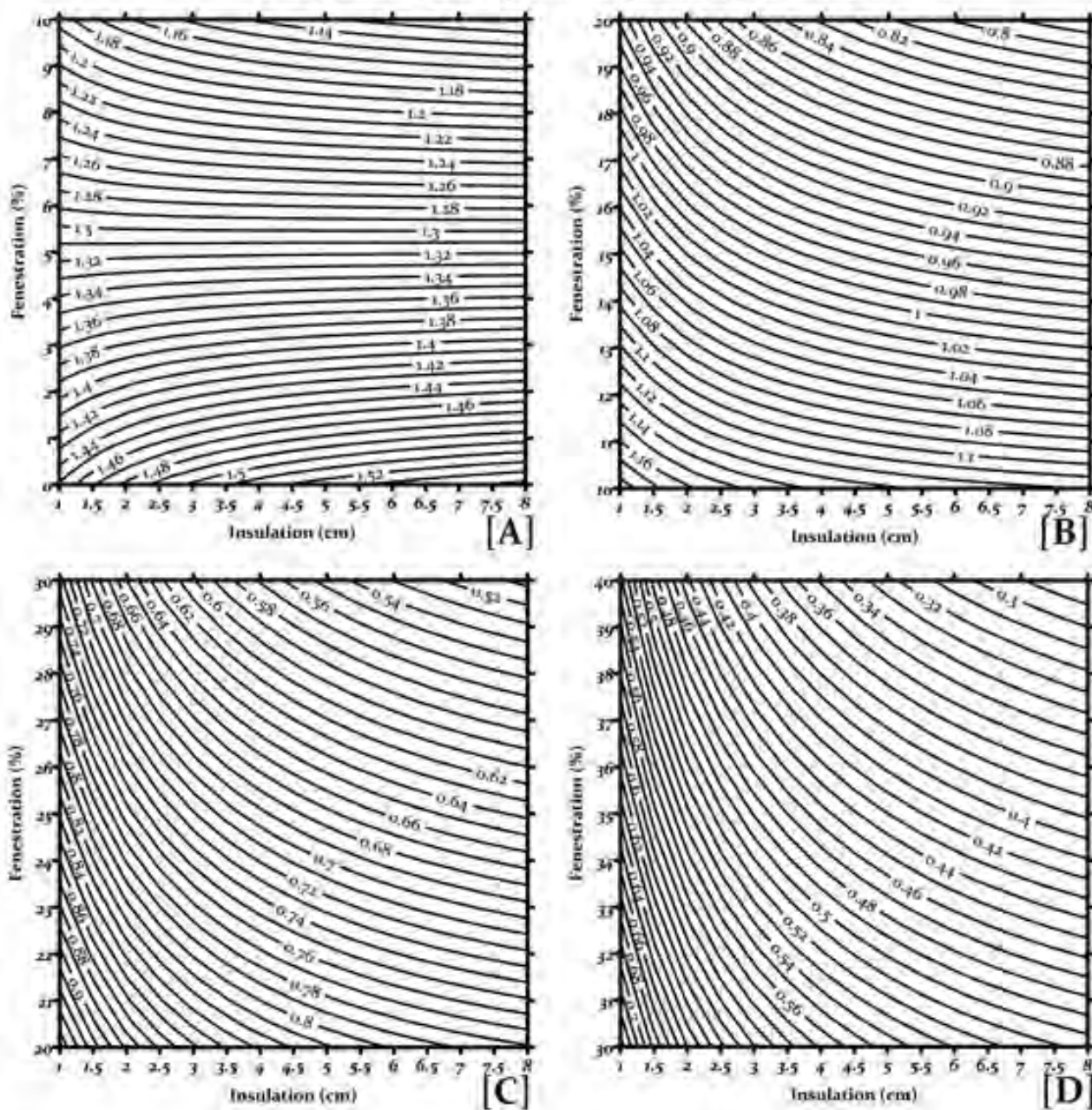


Σχήμα 3. Όπως στο Σχήμα 1 αλλά για εσωτερική θερμοκρασία $T_{in}=20^{\circ}\text{C}$

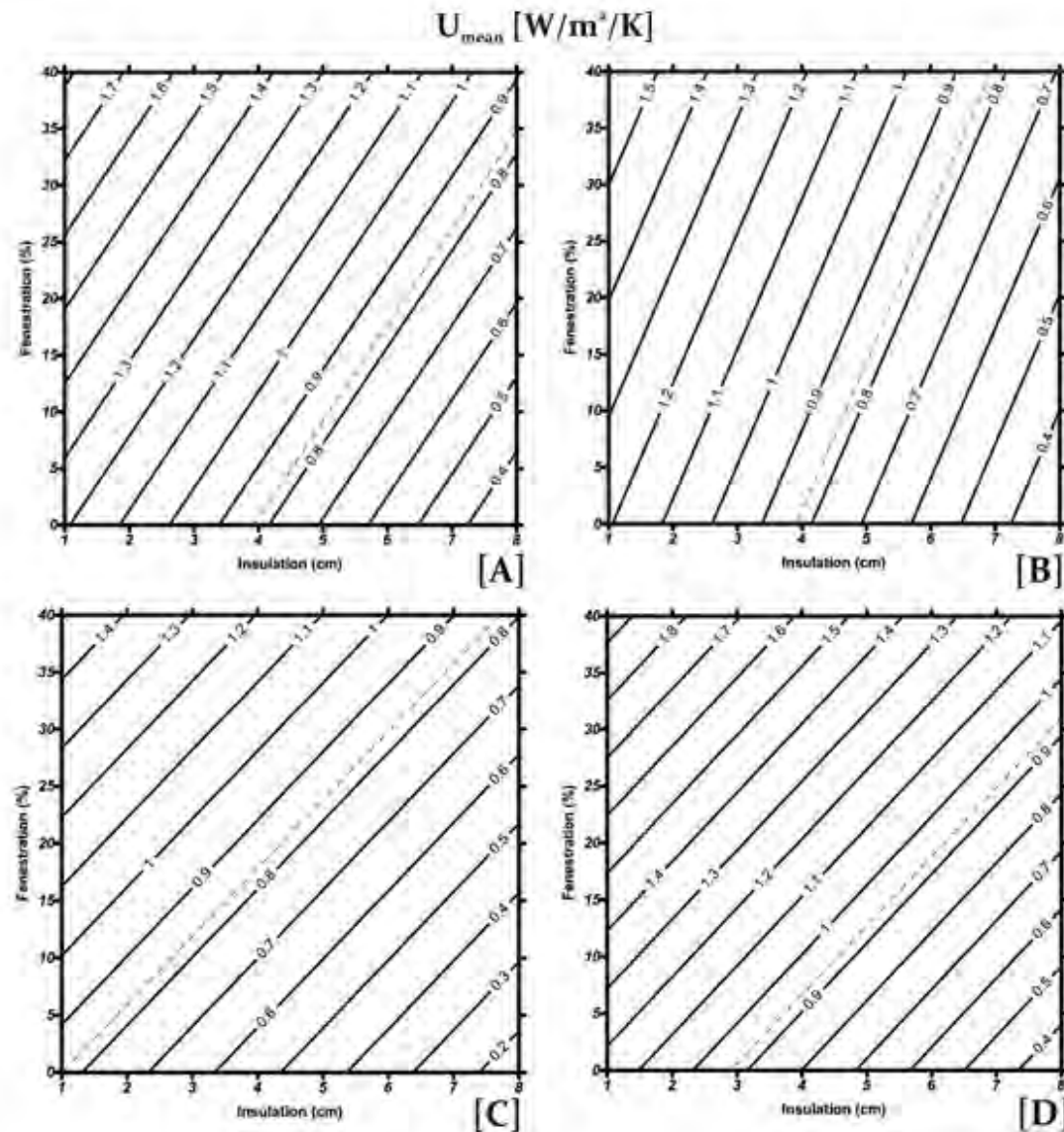


Σχήμα 4. Όπως στο Σχήμα 1 αλλά για θερμική διαπερατότητα υαλοπινάκων $U_f=2.5\text{W/m}^2/\text{K}$.

Daily Heating Energy Consumption [GJ], $k_{ins}=0.02W/m/K$



Σχήμα 5. Όπως στο Σχήμα 1 αλλά για ειδική θερμική αγωγιμότητα μόνωσης $k_{ins}=0.02W/mK$.



Σχήμα 6. Τιμές μέσου συντελεστή θερμικής διαπερατότητας κτηριακού κελύφους U_{mean} για πάχη μόνωσης w και ποσοστά επιφανείας υαλοπινάκων ρ αναγραφόμενα στις κλίμακες των καρτεσιανών αξόνων. Η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στην μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του U_{mean} για την Β κλιματική ζώνη, όπως ορίζεται από τον Κ.Εν.Α.Κ [12].

[A]: Βασική Περίπτωση Μελέτης (ΒΠΜ), ενότητα 3.1.

[B]: Όπως σε [A] αλλά με θερμική διαπερατότητα υαλοπινάκων $U_f=2.5$ W/m²K.

[C]: Όπως σε [A] αλλά με ειδική θερμική αγωγιμότητα μόνωσης $k_{\text{ins}}=0.02$ W/mK.

[D]: Όπως σε [A] αλλά με λόγο $F/V=0.5667$ m⁻¹.

