

**ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟΥ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ & ΑΡΧΙΚΗ
ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ (Ε.Π.Ε.Α.Ε.Κ. ΙΙ)**

**«ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙ - ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ
ΟΜΑΔΩΝ ΣΤΑ ΤΕΙ (ΕΕΟΤ)»**

ΠΑΡΑΔΟΤΕΑ 4^{ου} ΠΑΚΕΤΟΥ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

ΘΕΜΑ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ:

**“ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΑΕΡΑΓΩΓΟΥ
ΦΥΣΙΚΟΥ ΕΛΚΥΣΜΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ”**

Ίδρυμα (Φορέας Υλοποίησης): Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών

Τμήμα: Μηχανολογίας

Επιστημονικός Υπεύθυνος: Δημήτριος Χασάπης

Χρονική Περίοδος: 01/06/2006 – 31/12/2006

ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ

Διάρκεια έργου : 24 Μήνες

Ημερομηνία έναρξης έργου: 01/01/2005

Ημερομηνία λήξης έργου: 31/12/2006

Όνοματεπώνυμο επιστημονικού υπευθύνου υποέργου: Δημήτριος Χασάπης
Ιδιότητα / Θέση: Καθηγητής
Τμήμα: Μηχανολογίας
Ίδρυμα: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών (Τ.Ε.Ι Σερρών)
Ταχυδρομική Διεύθυνση: Τέρμα Μαγνησίας – 62124 Σέρρες
Τηλ.: 2321049243 | Fax: 2321046556 | E-mail: dcasap@teiser.gr

Όνοματεπώνυμο μέλους της ερευνητικής ομάδας: Αναστάσιος Μπαλουκτσής
Ιδιότητα / Θέση: Καθηγητής – Αντιπρόεδρος Τ.Ε.Ι Σερρών
Τμήμα: Πληροφορικής & Επικοινωνιών
Ίδρυμα: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών (Τ.Ε.Ι Σερρών)
Ταχυδρομική Διεύθυνση: Τέρμα Μαγνησίας – 62124 Σέρρες
Τηλ.: 23210 49102 | Fax: 23210 46556 | E-mail: tasosb@teiser.gr

Όνοματεπώνυμο μέλους της ερευνητικής ομάδας: Κων/νος Δαυίδ
Ιδιότητα / Θέση: Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα: Μηχανολογίας
Ίδρυμα: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Σερρών (Τ.Ε.Ι Σερρών)
Ταχυδρομική Διεύθυνση: Τέρμα Μαγνησίας – 62124 Σέρρες
Τηλ.: 2321049143 | Fax: 2321046556 | E-mail: david@teiser.gr

Όνοματεπώνυμο μέλους της ερευνητικής ομάδας: Αριστομένης Αντωνιάδης
Ιδιότητα / Θέση: Αναπληρωτής Καθηγητής – Διευθυντής Σ.Τ.Ε.Φ
Τμήμα: Φυσικών Πόρων & Περιβάλλοντος
Ίδρυμα: Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Ηρακλείου, Κρήτης (Τ.Ε.Ι Ηρακλείου)
Τηλ.: 2821023012 | E-mail: antoniadis@chania.teiher.gr

Όνοματεπώνυμο μέλους της ερευνητικής ομάδας: Θεόδωρος Καραπάντσιος
Ιδιότητα / Θέση: Επίκουρος Καθηγητής
Τμήμα: Χημείας
Ίδρυμα: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (Α.Π.Θ)
Ταχυδρομική διεύθυνση: Πανεπιστημιακή Θυρίδα 116, 54124 Θεσσαλονίκη
Τηλ.: 2310997772 | Fax: 2310997759 | E-mail: karapant@chem.auth.gr

1. ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

1.1. Φαινομενολογικό μοντέλο αεραγωγού φυσικού ελκυσμού

Στην ανάλυση, θεωρούμε ότι η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία είναι ικανή για να φέρει σε μια σταθερή θερμοκρασία τα υλικά κατασκευής του ηλιακού αεραγωγού. Τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες: α) χρονολογικά (ημέρα του χρόνου, ώρα) και γεωγραφικά δεδομένα (γεωγραφικό πλάτος), β) μετεωρολογικά δεδομένα (μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία ημέρας σε οριζόντιο επίπεδο, μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος ημέρας), γ) γεωμετρικά δεδομένα (διαστάσεις ηλιακού αεραγωγού, πάχος του υαλοπίνακα και του μονωτικού υλικού), δ) οπτικές και ιδιότητες ακτινοβολίας των υλικών κατασκευής (δείκτης διάθλασης και συντελεστής απόσβεσης του υαλοπίνακα, συντελεστής απορροφητικότητας και εκπομπής των μαύρων επιφανειών) και ε) φυσικές ιδιότητες του αέρα και των υλικών μόνωσης (για τον υπολογισμό των απωλειών θερμότητας). Η κλίση και το ύψος του ηλιακού αεραγωγού θεωρούνται μεταβλητές στο εύρος 30°-90° (κλίση από το οριζόντιο επίπεδο) και 1-12 m, αντίστοιχα. Οι φυσικές ιδιότητες του αέρα έχουν ληφθεί από τον VDI - Wärmesatlas, (1991). Τα δεδομένα για τη μέση μηνιαία ολική ακτινοβολία ημέρας και τη μέση μηνιαία θερμοκρασία περιβάλλοντος ημέρας έχουν ληφθεί από τον ΕΛΟΤ, (1991) - τον Ελληνικό οργανισμό προτυποποίησης - για τις Σέρρες, όπου έγιναν και οι πειραματικές δοκιμές. Τα δεδομένα του ΕΛΟΤ συμφωνούν αρκετά καλά με τις μετρήσεις από τον μετεωρολογικό σταθμό του Τ.Ε.Ι - Σερρών, με μια ετήσια απόκλιση της τάξης του 3% (Karapantsios et al., 1999).

Το μοντέλο αποτελείται από τρεις βασικές υπορουτίνες. Η πρώτη αποτιμά την ηλιακή ακτινοβολία (άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη λόγω εδάφους) που προσπίπτει στην επιφάνεια του ηλιακού αεραγωγού σε ωριαία βάση, με μεταβαλλόμενη κλίση και ύψος. Γι αυτούς τους υπολογισμούς είναι χρήσιμα μόνο τα χρονολογικά, τα γεωγραφικά και τα μετεωρολογικά δεδομένα. Οι εξισώσεις παρακάτω, εκτός αν αναφερθεί ξεχωριστά, έχουν ληφθεί από τον Duffie & Beckman, (1991).

Η ολική ημερήσια ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, H , εκφράζεται σαν άθροισμα δυο συνιστωσών: την άμεση ακτινοβολία και την διάχυτη ακτινοβολία από τον ουρανό:

$$H = H_{dir} + H_{dif} \quad (1)$$

όπου H_o είναι η εξωγήινη ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο, η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (2)$$

όπου G_{sc} είναι η ηλιακή σταθερά (1367 W/m²), n είναι η ημέρα του χρόνου (1 ως 365), ϕ είναι το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας (η γωνία που σχηματίζει η ακτινική γραμμή που ενώνει την τοποθεσία ενδιαφέροντος και το κέντρο της γης με την προέκταση της γραμμής του ισημερινού, για τις Σέρρες $\phi = 41$), δ είναι η ηλιακή απόκλιση (η γωνία που σχηματίζει η γραμμή που ενώνει τα κέντρα του ήλιου και της γης με την προέκταση της γραμμής του ισημερινού) και ω_s είναι η ωριαία γωνία δύσης (γωνιακή μέτρηση του χρόνου και ισοδυναμεί με 15⁰ της ώρας) που δίνεται από τη σχέση:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3)$$

Η ηλιακή απόκλιση δ υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (4)$$

Η ημερήσια εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία H_o σχετίζεται με την ημερήσια ολική ακτινοβολία H (δεδομένο εισόδου στον κώδικα) από τον δείκτη αιθριότητας, k_T , που ορίζεται ως:

$$k_T = \frac{H}{H_o} \quad (5)$$

Γνωρίζοντας την τιμή του δείκτη αιθριότητας, μπορεί να υπολογιστεί η διάχυτη ακτινοβολία (για $\omega_s \leq 81.4^\circ$), ως εξής:

$$\frac{H_{dif}}{H} = \begin{cases} 1.0 - 0.2727k_T + 2.4495k_T^2 - 11.9514k_T^3 + 9.3879k_T^4 & \text{για } k_T < 0.715 \\ 0.143 & \text{για } k_T \geq 0.715 \end{cases} \quad (6)$$

$\omega_s > 81.4^\circ$:

$$\frac{H_{dif}}{H} = \begin{cases} 1.0 + 0.2832k_T - 2.5557k_T^2 + 0.8448k_T^3 & \text{για } k_T < 0.722 \\ 0.143 & \text{για } k_T \geq 0.722 \end{cases} \quad (7)$$

Οπότε, η άμεση ηλιακή ακτινοβολία, μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (1). Το πηλίκο της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας, I , με την ημερήσια ολική ακτινοβολία, H , δίνεται από τη σχέση:

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (8)$$

και μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (9)$$

όπου οι συντελεστές a και b δίνονται από τις σχέσεις:

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (10)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (11)$$

όπου η γωνία ω δίνεται σε μοίρες (αρνητικές πριν το μεσημέρι και θετικές μετά), από την εξίσωση:

$$\omega = (hour - 12) \cdot \frac{360}{24} \quad (12)$$

όπου ο παράγοντας $hour$ είναι η ώρα της ημέρας (δεδομένο εισόδου). Ομοίως, το πηλίκο της ωριαίας ακτινοβολίας διάχυσης, I_{dif} , με την ημερήσια ακτινοβολία διάχυσης, H_{dif} , δίνεται από την εξίσωση:

$$r_d = \frac{I_{dif}}{H_{dif}} \quad (13)$$

όπου,

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (14)$$

Έπειτα, I και I_{dif} υπολογίζονται από τις εξισώσεις (8) και (13), αντίστοιχα, όπου η ωριαία άμεση ακτινοβολία, I_{dir} , υπολογίζεται από την σχέση:

$$I_{dir} = I - I_{dif} \quad (15)$$

Μια συνήθη προσέγγιση για την εκτίμηση της ακτινοβολίας σε κεκλιμένες επιφάνειες είναι η θεώρηση ενός ισοτροπικού μοντέλου για την διάχυτη ακτινοβολία (Liu & Jordan, 1963) όπου επίσης θεωρούμε ότι οι ανακλώμενες επιφάνειες διαχέουν την ακτινοβολία και δεν γίνεται κατοπτρική ανάκλαση. Σ' αυτή την περίπτωση, η ολική ακτινοβολία σε μια κεκλιμένη επιφάνεια με κλίση s , δίνεται από (Sukhatme, 1984):

$$I_T = I_{dir} R_b + I_{dif} \left(\frac{1 + \cos s}{2} \right) + I_{r_g} \left(\frac{1 - \cos s}{2} \right) \quad (16)$$

Στο δεξιό μέρος της εξίσωσης (16), ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει την άμεση ακτινοβολία, ο δεύτερος όρος την διάχυτη ακτινοβολία και ο τρίτος όρος την ακτινοβολία που ανακλάται από τον περιβάλλοντα χώρο. Στην (16), ο όρος r_g είναι ο συντελεστής ανάκλασης της ακτινοβολίας (diffuse reflectance) του περιβάλλοντος χώρου (συνήθως η τιμή είναι γύρω στο 0.25) και ο όρος R_b είναι το πηλίκο της άμεσης ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια με αυτή στο οριζόντιο επίπεδο. Το R_b για το βόρειο ημισφαίριο δίνεται από την σχέση (Sukhatme, 1984):

$$R_b = \frac{\cos(\phi - s) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - s) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (17)$$

Οπότε, τα συστατικά μέρη της μέσης ωριαίας ολικής ακτινοβολίας σε κεκλιμένη επιφάνεια που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς του ηλιακού αεραγωγού είναι:

$$I_{T,dir} = I_{dir} \cdot R_b \quad (18)$$

$$I_{T,dif} = I_{dif} \cdot \left(\frac{1 + \cos s}{2} \right) \quad (19)$$

$$I_{T,ref} = I \cdot 0.25 \cdot \left(\frac{1 - \cos s}{2} \right) \quad (20)$$

Η δεύτερη υπορουτίνα του μοντέλου υπολογίζει την εκπομπή, τ , και την απορρόφηση, α_g , του υαλοπίνακα για την ολική προσπίπτουσα ακτινοβολία. Η εκπομπή της άμεσης ακτινοβολίας, τ_{dir} , δίνεται κατά προσέγγιση από το γινόμενο:

$$\tau_{dir} \cong \tau_{\alpha,dir} \cdot \tau_{r,dir} \quad (21)$$

όπου $\tau_{\alpha,dir}$ δείχνει το πηλίκο της εκπεμπόμενης με την προσπίπτουσα ακτινοβολία, όπου έχουν ληφθεί υπόψη μόνο απώλειες απορρόφησης και το $\tau_{r,dir}$ είναι η εκπομπή μη-πολωμένης ακτινοβολίας, όπου έχουν ληφθεί υπόψη μόνο απώλειες ανάκλασης. Στην εξίσωση (21), το $\tau_{\alpha,dir}$ δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{\alpha,dir} = \exp\left(-\frac{Kl}{\cos \theta_2}\right) \quad (22)$$

όπου K είναι ο συντελεστής απόσβεσης του υαλοπίνακα που μεταβάλλεται από περίπου 4 m^{-1} για καθαρό γυαλί μέχρι και 32 m^{-1} για χαμηλής ποιότητας γυαλί (Duffie & Beckman, 1991). Σ' αυτή την εργασία ο συντελεστής K είναι ίσος με 10 m^{-1} . Επιπλέον, το l δείχνει το μήκος της τροχιάς της ακτινοβολίας μέσω του υαλοπίνακα, που τελικά είναι το πάχος του υαλοπίνακα. Σ' αυτή την εργασία, το l ισούται με 0.004 m . Το θ_2 είναι η γωνία της διάθλασης, που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \quad (23)$$

όπου n_1 και n_2 είναι οι συντελεστές διάθλασης του αέρα και του υαλοπίνακα, αντίστοιχα, με τιμές $n_1 = 1$ και $n_2 = 1.526$ (Duffie & Beckman, 1991). Επιπλέον, θ_1 είναι η γωνία πρόσπτωσης που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\theta_1 = \arccos[\sin(\phi - s)\sin \delta + \cos(\phi - s)\cos \delta \cos \omega] \quad (24)$$

Η παράμετρος τ_r είναι ο μέσος όρος των δυο συνιστωσών της ακτινοβολίας, δηλαδή:

$$\tau_{r,dir} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right) \quad (25)$$

όπου r_{\perp} είναι η κάθετη συνιστώσα, ενώ r_{\parallel} είναι η οριζόντια συνιστώσα της μη-πολωμένης ακτινοβολίας, τα οποία δίνονται από τις εξισώσεις:

$$r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (26)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (27)$$

Η συνιστώσα της διάχυσης, T_{dif} , και αυτή της ανάκλασης, T_{ref} , της εκπομπής του υαλοπίνακα, υπολογίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως το T_{dir} , αλλά με την κλίση s στην εξίσωση (24) να αντικαθίσταται από την γωνία διάχυσης θ_{dif} και τη γωνία ανάκλασης θ_{ref} , αντίστοιχα, οι οποίες ορίζονται ως:

$$\theta_{dif} = 59.7 - 0.1388 \cdot s + 0.001497 \cdot s^2 \quad (28)$$

και

$$\theta_{ref} = 90 - 0.5788 \cdot s + 0.002693 \cdot s^2 \quad (29)$$

Ομοίως, οι συνιστώσες της απορρόφησης του υαλοπίνακα: άμεση $\alpha_{g,dir}$, διαχυτή $\alpha_{g,dif}$ και ανακλώμενη $\alpha_{g,ref}$, δίνονται από τις παρακάτω προσεγγιστικές σχέσεις:

$$a_{g,dir} \cong 1 - \tau_{\alpha,dir} \quad (30)$$

$$a_{g,dif} \cong 1 - \tau_{\alpha,dif} \quad (31)$$

$$a_{g,ref} \cong 1 - \tau_{\alpha,ref} \quad (32)$$

Για λόγους συνοπτικότητας, τα γινόμενα $(\tau \cdot I)_T$ and $(a_g \cdot I)_T$ από εδώ και μπρος θα συμβολίζουν τις παρακάτω ποσότητες:

$$(\tau \cdot I)_T = \tau_{dir} \cdot I_{T,dir} + \tau_{dif} \cdot I_{T,dif} + \tau_{ref} \cdot I_{T,ref} \quad (33)$$

$$(a_g \cdot I)_T = a_{g,dir} \cdot I_{T,dir} + a_{g,dif} \cdot I_{T,dif} + a_{g,ref} \cdot I_{T,ref} \quad (34)$$

Αυτές είναι οι ποσότητες που υπεισέρχονται στα ισοζύγια ενέργειας του αεραγωγού και επομένως πρέπει να υπολογιστούν πρώτα, κατά την εκτέλεση του κώδικα. Η τρίτη υπορουτίνα του μοντέλου επιλύει το ολικό ισοζύγιο ενέργειας του αεραγωγού με μορφή συστήματος τριών αλγεβρικών εξισώσεων που περιγράφουν την μετάδοση θερμότητας στη μαύρη απορροφητική μεταλλική επιφάνεια, στον υαλοπίνακα και στον αέρα μέσα στον αεραγωγό, αντίστοιχα. Οι εξισώσεις μετάδοσης θερμότητας είναι οι εξής (οι θερμοκρασίες σε Kelvin):

$$a_{bw}(\tau \cdot I)_T A_g = U_{bw} \cdot A_{bw} \cdot (T_{bw} - T_o) + h_{bw} \cdot A_{bw} \cdot (T_{bw} - T_{air}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_g \cdot (T_{bw}^4 - T_g^4) \quad (35)$$

$$(a_g \cdot I)_T A_g + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_g \cdot (T_{bw}^4 - T_g^4) = h_g \cdot A_g \cdot (T_g - T_{air}) + U_g \cdot A_g \cdot (T_g - T_o) \quad (36)$$

$$h_{bw} \cdot A_{bw} \cdot (T_g - T_{air}) + h_g \cdot A_g \cdot (T_g - T_{air}) = 2 \cdot c_{p,air} \cdot \rho_{air} \cdot A_{gap} \cdot v \cdot (T_{air} - T_o) \quad (37)$$

Σε αυτές τις εξισώσεις, οι τρεις άγνωστοι είναι η μέση θερμοκρασία της μαύρης απορροφητικής μεταλλικής επιφάνειας, T_{bw} , η μέση θερμοκρασία αέρα της καμινάδας, T_{air} και η μέση θερμοκρασία του υαλοπίνακα, T_g . Η θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_o , αποτελεί δεδομένο εισόδου. Επιπλέον, A_{bw} είναι η επιφάνεια της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας, A_g είναι η επιφάνεια του υαλοπίνακα και A_{gap} είναι η επιφάνεια της διατομής του διάκενου της καμινάδας. U_{bw} είναι ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας και του περιβάλλοντος (η τιμή στην δική μας περίπτωση είναι $U_{bw} = 0.9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ για τυπική μόνωση πάχους 5 cm, με θερμοαγωγιμότητα $0.045 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ και σε συνήθεις περιβαλλοντικές συνθήκες), U_g είναι ο ολικός συντελεστής μετάδοσης θερμότητας μεταξύ του υαλοπίνακα και του περιβάλλοντος (η τιμή στην δική μας περίπτωση είναι $U_g = 0.9 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ και επιλέχθηκε από ένα εύρος 1 - 15 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ που προτάθηκε από τον Garg, 1987), h_{bw} είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή μεταξύ της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας και του αέρα μέσα στην καμινάδα και h_g είναι ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή μεταξύ του υαλοπίνακα και του αέρα μέσα στην καμινάδα. Επιπροσθέτως, α_{bw} είναι ο συντελεστής απορρόφησης της μαύρης μεταλλικής επιφάνειας (η τιμή στην δική μας περίπτωση είναι $\alpha_{bw} = 0.9$, η οποία δίνεται από τους Duffie & Beckman, 1991), ϵ είναι ο συντελεστής εκπομπής της μαύρης μεταλλικής επιφάνειας (η τιμή στην δική μας περίπτωση είναι $\epsilon = 0.95$, η οποία δίνεται από τους Duffie & Beckman, 1991). Επίσης, σ είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann ($5.6697 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\cdot\text{K}^4$), ενώ τα $c_{p,air}$ και ρ_{air} είναι η ειδική θερμότητα και πυκνότητα του αέρα, αντίστοιχα, που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Τέλος, u είναι η μέση ταχύτητα του αέρα στον αεραγωγό, που εφόσον δεν μπορεί να αποτελεί έναν τέταρτο άγνωστο στο παραπάνω σύστημα των εξισώσεων, πρέπει να περιγραφεί από σχέση που βασίζεται σε άλλες παραμέτρους του συστήματος (βλέπε παρακάτω). Οι συντελεστές μετάδοσης θερμότητας με συναγωγή για τον υαλοπίνακα και τη μαύρη απορροφητική μεταλλική επιφάνεια, για αεραγωγό σε κάθετη θέση, δίνονται από την εξίσωση (VDI - Warmeatlas, 1991):

$$Nu_{g,bw} = \frac{h_{g,bw}L}{\lambda} = \left\{ 0.825 + 0.387 \cdot (0.345 \cdot Ra_{g,bw})^{1/6} \right\}^2 \text{ για } 10^{-1} < Ra \sin(s) < 10^{12} \quad (38)$$

Στην παραπάνω σχέση, Nu είναι ο αριθμός Nusselt, Ra είναι ο αριθμός Raleigh, L είναι το μήκος του αεραγωγού και λ είναι η θερμοαγωγιμότητα του αέρα. Για κλίσεις μεταξύ 30° και 75° , ο συντελεστής μετάδοσης θερμότητας για τον υαλοπίνακα, h_g , (θερμαινόμενη επιφάνεια κοιτάει προς τα κάτω) και της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας, h_{bw} , (θερμαινόμενη επιφάνεια κοιτάει προς τα άνω) υπολογίζονται από τις σχέσεις (VDI - Warmeatlas, 1991):

$$Nu_g = \frac{h_g L}{\lambda} = 0.56 [Ra_g \sin(s)]^{1/4} \text{ για } 10^5 < Ra \sin(s) < 10^{11} \quad (39)$$

$$Nu_{bw} = \frac{h_{bw} L}{\lambda} = 0.56 [Ra_c \sin(s)]^{1/4} + 0.13 [Ra^{1/3} - Ra_c^{1/3}] \text{ για } 10^8 < Ra \sin(s) < 10^{11} \quad (40)$$

Όπου Ra_c είναι ο κρίσιμος αριθμός Raleigh που δείχνει την μετάβαση μεταξύ της στρωτής και της τυρβώδους ροής και που προσεγγιστικά δίνεται από την σχέση:

$$\log(Ra_c) = 8.9 - 0.00178 \cdot (90 - s)^{1.82} \quad (41)$$

Οι εξισώσεις (39) και (40) προήλθαν αρχικά από πειράματα με κλίσεις κάτω από 75° . Για αυτό το λόγο, για κλίσεις μεταξύ 75° και 90° , χρησιμοποιείται η cubic spline παρεμβολή (interpolation)

για την επίτευξη ομαλής μεταβολής των συντελεστών με την κλίση. Για να περιγράψουμε τη μέση ταχύτητα του αέρα μέσα στην καμινάδα σε συνάρτηση με άλλες παραμέτρους του συστήματος, έχουν χρησιμοποιηθεί δυο διαφορετικές σχέσεις. Η πρώτη βγαίνει, υποθέτοντας ότι η πίεση σε κεκλιμένη καμινάδα είναι ίση με την πτώση πίεσης λόγω τριβών στο τοίχωμα της και τις απώλειες πίεσης στην είσοδο και στην έξοδο. Για ίδιες επιφανειακές διατομές στην είσοδο και έξοδο της καμινάδας και για μικρές διαφορές πυκνότητας μέσα στην καμινάδα, παίρνουμε:

$$f \cdot \frac{L}{D_H} \cdot \frac{\rho_{air} v^2}{2} + k_{in} \cdot \frac{\rho_{air} v^2}{2} + k_{out} \cdot \frac{\rho_{air} v^2}{2} = H_{ch} \cdot g \cdot \sin(s) \cdot (\rho_o - \rho_{air}) \quad (42)$$

όπου D_H είναι η υδραυλική διάμετρος της καμινάδας που ορίζεται ως:

$$D_H = \frac{2 \cdot w \cdot d}{w + d} \quad (43)$$

όπου w είναι το πάχος και d είναι το βάθος του διάκενου της καμινάδας. Επίσης, k_{in} και k_{out} είναι οι συντελεστές πτώσης πίεσης εισόδου και εξόδου, H_{ch} είναι η διαφορά ύψους μεταξύ εισόδου και εξόδου της καμινάδας ($= L \cdot \sin(s)$) και f είναι ο συντελεστής τριβής του τοιχώματος (για τυρβώδη ροή) που υπολογίζεται με τη σχέση:

$$f = \frac{0.316}{Re^{1/4}} \quad (44)$$

όπου Re είναι ο φαινομενικός αριθμός Reynolds, που ορίζεται ως $D_H \cdot u \cdot \rho_{air} / \mu_{air}$. Συνδυάζοντας τα παραπάνω παίρνουμε:

$$v = \left[\frac{2 \cdot L \cdot g \cdot (\sin(s))^2 \cdot (\rho_o - \rho_{air})}{\left(f \cdot \frac{L}{D_H} + k_{in} + k_{out} \right) \cdot \rho_{air}} \right]^{1/2} \quad (45)$$

Για ορθογώνιο κανάλι με τις δυο άκρες ανοικτές και θερμαινόμενο το ένα τοίχωμα, οι Sandberg & Moshfegh, (1998) πρότειναν $k_{in} = 1.5$, $k_{out} = 1.0$, $f = 0.056$.

Η δεύτερη σχέση που χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο έχει περιγραφεί από τους Bansal et al., (1993) και Andersen, (1995). Πρόκειται για μια εμπειρική σχέση που χρησιμοποιεί την έννοια του συντελεστή εκφόρτισης (discharge) για να ρυθμίσει την ταχύτητα του αέρα σε σχέση με τις ολικές αντιστάσεις στη ροή στο σύστημα (απώλειες τριβής στο τοίχωμα της καμινάδας, πτώση πίεσης στην είσοδο και έξοδο, κ.α.). Για την περίπτωση της ίδιας επιφανειακής διατομής στην είσοδο και έξοδο της καμινάδας, αυτή η σχέση είναι (T σε Kelvin):

$$v_{ave} = C_d \cdot \frac{\rho(T_{air})}{\rho(T_o)} \cdot \left[\frac{L \cdot g \cdot (\sin(s))^2 \cdot (T_{air} - T_o)}{T_o} \right]^{1/2} \quad (46)$$

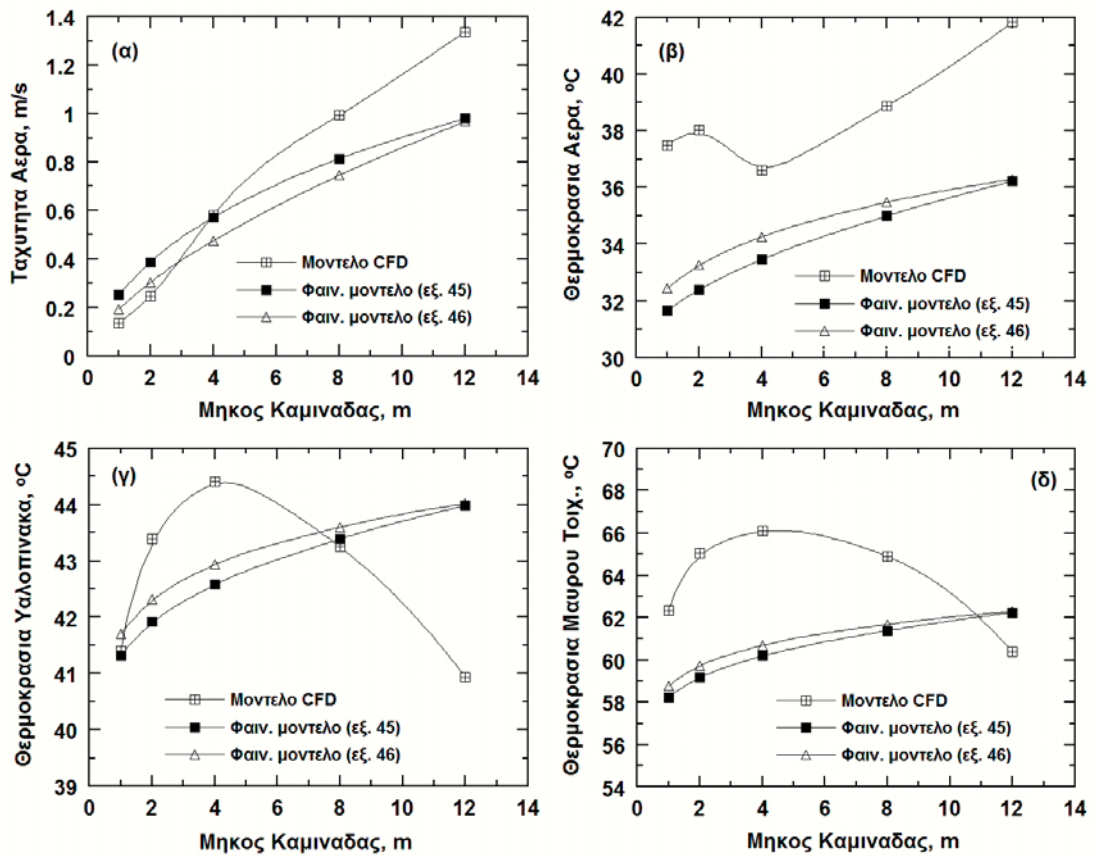
όπου C_d είναι ο συντελεστής εκφόρτισης (discharge) που για θερμικές ροές άνωσης προτάθηκε να έχει τιμή 0.57 (Andersen, 1995).

1.2. Σύγκριση CFD και φαινομενολογικού μοντέλου

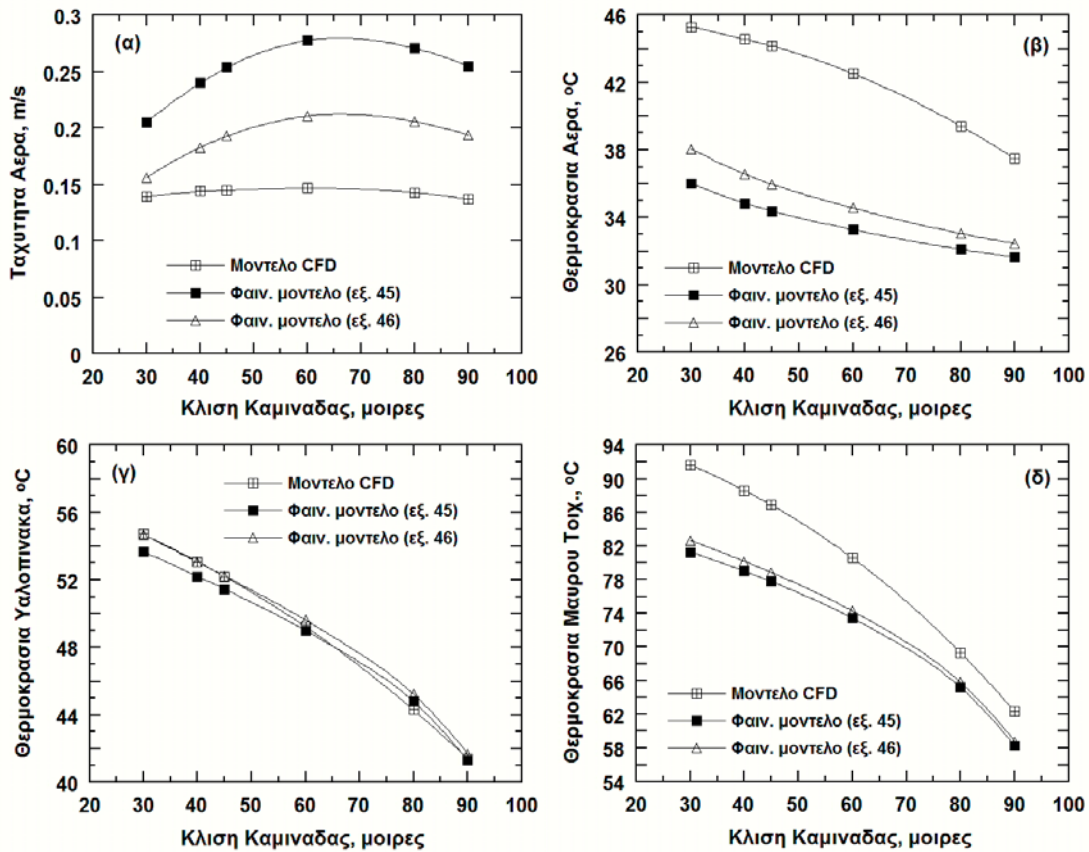
Στο Σχήμα 1(α)-(δ) παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των προσομοιώσεων του κώδικα υπολογιστικής ρευστομηχανικής με τις προβλέψεις του φαινομενολογικού μοντέλου, ως συνάρτηση του μήκους της καμινάδας, όταν αυτή βρίσκεται σε κατακόρυφη θέση (90°). Οι προβλέψεις αφορούν την μέση ταχύτητα και θερμοκρασία του αέρα στην καμινάδα, καθώς και την μέση θερμοκρασία υαλοπίνακα και μαύρης απορροφητικής επιφάνειας. Δυο εκδοχές προβλέψεων του μοντέλου παρουσιάζονται: η πρώτη βασίζεται στην εξίσωση (45) και η άλλη στην εξίσωση (46) για την εκτίμηση της ταχύτητας του αέρα στην καμινάδα. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την ημέρα 196 (μέσα Ιουλίου), επειδή αποδείχθηκε ότι είναι η περίοδος με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις μεταξύ των δυο μοντέλων. Και στα τέσσερα διαγράμματα, είναι προφανές ότι και τα δυο φαινομενολογικά μοντέλα δίνουν συγκρίσιμα αποτελέσματα, αλλά διαφορετικά από τις προβλέψεις του ρευστομηχανικού μοντέλου.

Αναφορικά με την ταχύτητα του αέρα, τα δεδομένα από το CFD είναι μικρότερα από το φαινομενολογικό μοντέλο για καμινάδες μικρότερες των 2 m, αλλά η κατάσταση αυτή αντιστρέφεται για καμινάδες μεγαλύτερες των 4 m. Οι θερμοκρασίες αέρα που προβλέπονται από το φαινομενολογικό μοντέλο είναι μικρότερες από τις τιμές του ρευστομηχανικού κώδικα για όλα τα εξεταζόμενα ύψη. Είναι ενδιαφέρον να αναφέρουμε ότι τα αποτελέσματα του CFD δείχνουν μια μη-μονότονη σιγμοειδή συμπεριφορά με σημείο καμπής γύρω στα 4 m. Αυτό είναι το πλέον πιθανό, λόγω της επικράτησης συνθηκών τύρβης για καμινάδες μεγαλύτερες των 4 m. Παρόμοια μη-μονότονη συμπεριφορά παρατηρείται στις προβλέψεις του μοντέλου CFD για τις θερμοκρασίες του υαλοπίνακα και της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας με μέγιστο σημείο ξανά κοντά στα 4 m. Αυτό το τελευταίο σημαίνει ότι για καμινάδες μεγαλύτερες των 4 m, η μετάδοση θερμότητας από τα τοιχώματα στον αέρα μέσα στην καμινάδα είναι δραστικά βελτιωμένη, καταδεικνύοντας την ύπαρξη συνθηκών τυρβώδους ροής.

Τα Σχήματα 2(α)-(δ) και 3(α)-(δ) δείχνουν την εξάρτηση όλων των προβλέψεων του μοντέλου με την κλίση της καμινάδας για μήκος καμινάδας 1 m και 4 m, αντίστοιχα.

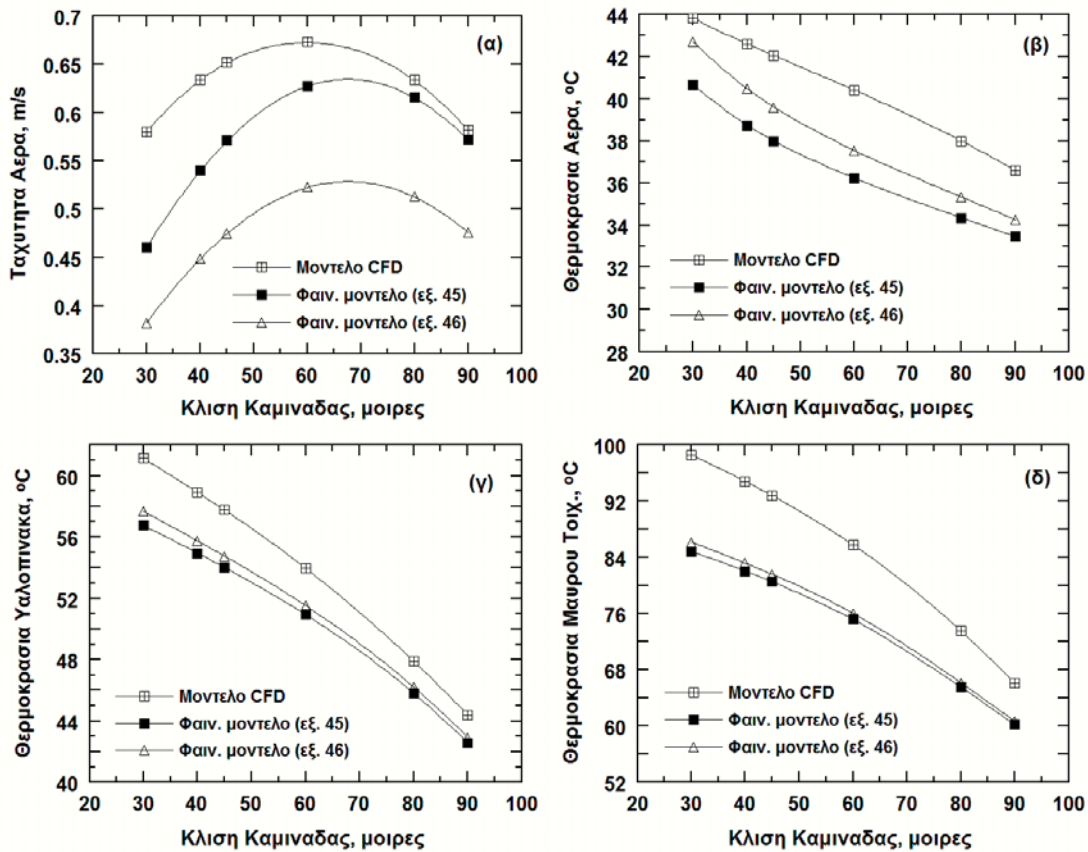


Σχήμα 1. Μέση ταχύτητα αέρα (α), μέση θερμοκρασία αέρα (β), μέση θερμοκρασία υαλοπίνακα (γ) και μέση θερμοκρασία μαύρης απορροφητικής επιφάνειας (δ) σε σχέση με το μήκος καμινάδας σε κατακόρυφη θέση αυτής, όπως υπολογίζεται από τις δυο εκδοχές του φαινομενολογικού μοντέλου και από τον κώδικα υπολ. ρευστομηχανικής (ημέρα = 196, $H = 23.1 \text{ M}\cdot\text{J}/\text{m}^2$, $T_{\text{amb}} = 28.9^\circ\text{C}$)



Σχήμα 2. Μέση ταχύτητα αέρα (α), μέση θερμοκρασία αέρα (β), μέση θερμοκρασία υαλοπίνακα (γ) και μέση θερμοκρασία μαύρης απορροφητικής επιφάνειας (δ) σε σχέση με την κλίση καμινάδας μήκους 1 m, όπως υπολογίζεται από τις δυο εκδοχές του φαινομενολογικού μοντέλου και από τον κώδικα υπολ. ρευστομηχανικής (ημέρα = 196, $H = 23.1 \text{ M-J/m}^2$, $T_{\text{amb}} = 28.9^\circ\text{C}$)

Οι υπολογισμοί είναι για την ημέρα 196 (μέσα Ιουλίου), όπου οι συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων δεν είναι ευνοϊκές. Παρά τις αποκλίσεις μεταξύ των μοντέλων στις προβλεπόμενες τιμές των ταχυτήτων του αέρα, και των θερμοκρασιών του αέρα, του υαλοπίνακα και της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας, υπάρχει καλή συμφωνία στην βέλτιστη κλίση που αποδίδει τη μέγιστη ταχύτητα αέρα: το φαινομενολογικό μοντέλο προβλέπει μια βέλτιστη κλίση γύρω στις 65° , ενώ το ρευστομηχανικό μοντέλο γύρω στις 60° . Αυτό το αποτέλεσμα έχει μεγάλη σημασία, γιατί προσφέρει μεγαλύτερη υποστήριξη στην χρήση πιο απλών φαινομενολογικών μοντέλων για τον αρχικό σχεδιασμό και για συγκρίσεις μεταξύ πειραματικών σχεδίων.



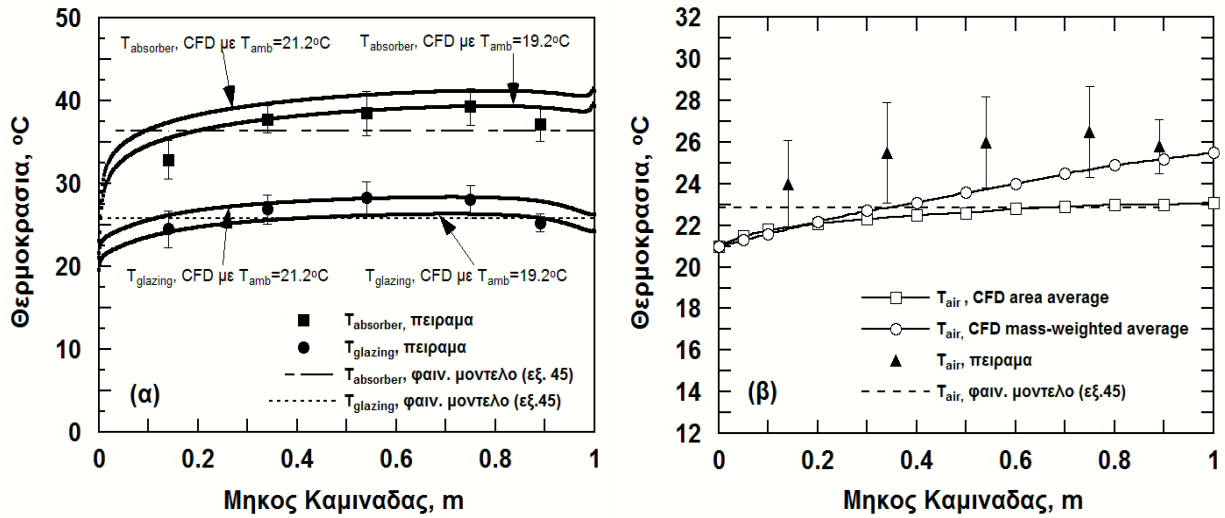
Σχήμα 3. Μέση ταχύτητα αέρα (α), μέση θερμοκρασία αέρα (β), μέση θερμοκρασία υαλοπίνακα (γ) και μέση θερμοκρασία μαύρης απορροφητικής επιφάνειας (δ) σε σχέση με την κλίση καμινάδας μήκους 4 m, όπως υπολογίζεται από τις δυο εκδοχές του φαινομενολογικού μοντέλου και από τον κώδικα υπολ. ρευστομηχανικής (ημέρα = 196, $H = 23.1 \text{ M}\cdot\text{J}/\text{m}^2$, $T_{\text{amb}} = 28.9^\circ\text{C}$)

1.3. Σύγκριση προβλέψεων και πειραματικών μετρήσεων

Στη συνέχεια, οι προβλέψεις του φαινομενολογικού και του μοντέλου υπολογιστικής ρευστομηχανικής συγκρίνονται με τις πειραματικές μετρήσεις. Οι μέρες στις οποίες έγιναν οι πειραματικές μετρήσεις επιλέγηκαν προσεκτικά με τον άνεμο να μην ξεπερνάει τα 0.5 m/s. Οι συγκρίσεις γίνονται με πειραματικά δεδομένα που ελήφθησαν στις μέρες 305, 306 και 307 (αρχές Νοέμβρη). Οι τιμές της ολικής οριζόντιας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας περιβάλλοντος που αναφέρονται στις λεζάντες, είναι αυτές που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων και χρησιμοποιήθηκαν σαν δεδομένα εισόδου στα μοντέλα. Πρέπει να σημειωθεί ότι για τον Νοέμβριο, οι αποκλίσεις μεταξύ του φαινομενολογικού και του μοντέλου CFD είναι μικρότερες από ότι τον Ιούλιο.

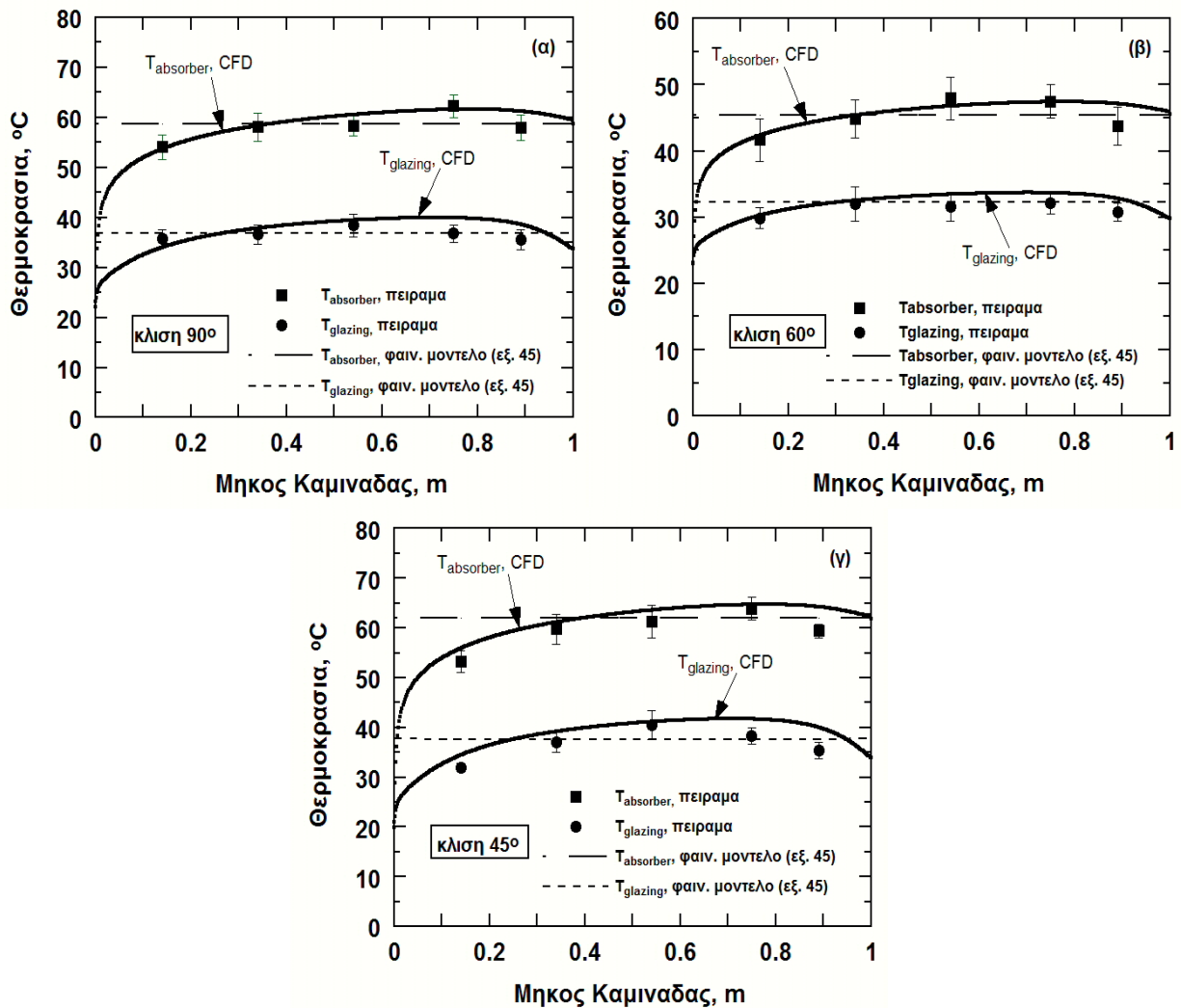
Το Σχήμα 4(α) συγκρίνει τις προβλεπόμενες θερμοκρασίες υαλοπίνακα και μαύρης απορροφητικής επιφάνειας για κάθετη θέση της καμινάδας. Τα περιθώρια λάθους (error bars) στα γραφήματα δείχνουν την τυπική απόκλιση των μετρήσεων. Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων, η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν ήταν σταθερή, οπότε δυο σειρές με δεδομένα CFD υπολογίστηκαν, βασισμένα σε δυο διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Η πρώτη είναι η μέση θερμοκρασία και η δεύτερη η διάμεση θερμοκρασία κατά την διάρκεια των μετρήσεων. Από το γράφημα φαίνεται ότι τα πειραματικά δεδομένα συμφωνούν αρκετά καλά με τις προβλέψεις των μοντέλων. Το Σχήμα 4(β) απεικονίζει συγκρίσεις σχετικά με τη μέση θερμοκρασία αέρα. Και εδώ υπάρχει μια καλή συμφωνία μεταξύ δεδομένων και προβλέψεων.

Αυτό ισχύει ακόμη πιο πολύ, αν ληφθεί υπόψη ότι οι τιμές των μετρήσεων είναι λίγο υψηλότερες από την πραγματικότητα, εξαιτίας της ακτινοβολίας που απορροφάται από το μετρητικό όργανο.



Σχήμα 4. Σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων του φαινομενολογικού με το μοντέλο CFD και τα πειραματικά δεδομένα σχετικά με (α) τις θερμοκρασίες του υαλοπίνακα και της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας και (β) την θερμοκρασία αέρα κατά μήκος της καμινάδας. Για το (α) ημέρα = 307, $H = 8.12 \text{ M}\cdot\text{J}/\text{m}^2$, διάμεση $T_{\text{amb}} = 19.2^{\circ}\text{C}$, μέση $T_{\text{amb}} = 21.2^{\circ}\text{C}$. Για το (β) ημέρα = 307, $H = 8.12 \text{ M}\cdot\text{J}/\text{m}^2$, μέση $T_{\text{amb}} = 21.2^{\circ}\text{C}$

Τα Σχήματα 5(α)-(γ) δείχνουν συγκρίσεις της καμινάδας τοποθετημένης σε τραπεζοειδή βάση και σε τρεις συγκεκριμένες και διαφορετικές γωνίες κλίσης. Και πάλι η συμφωνία μεταξύ των προβλέψεων και των πειραματικών δεδομένων είναι καλή.



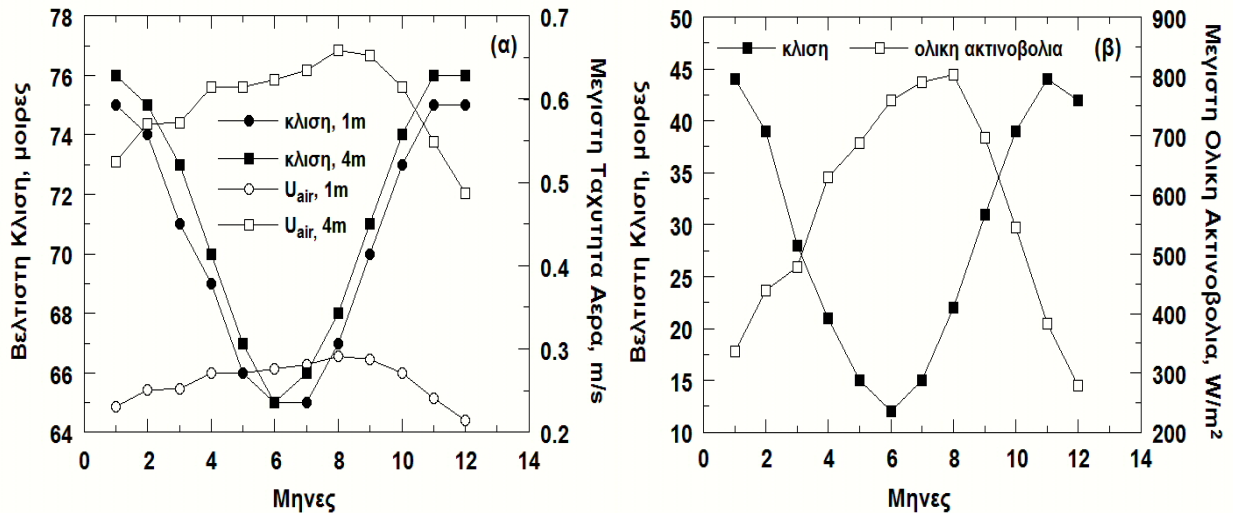
Σχήμα 5. Σύγκριση μεταξύ των προβλέψεων του φαινομενολογικού με το μοντέλο CFD και τα πειραματικά δεδομένα σχετικά με τις θερμοκρασίες του υαλοπίνακα και της μαύρης απορροφητικής επιφάνειας κατά μήκος της καμινάδας (α) για 90°, (β) 60° και (γ) 45° κλίση της καμινάδας. Για το (α) ημέρα = 305, $H = 9.70 \text{ M}\cdot\text{J}/\text{m}^2$, $T_{\text{amb}} = 21.7^\circ\text{C}$. Για το (β) ημέρα = 305, $H = 9.05 \text{ M}\cdot\text{J}/\text{m}^2$, $T_{\text{amb}} = 19.1^\circ\text{C}$. Για το (γ) ημέρα = 306, $H = 9.90 \text{ M}\cdot\text{J}/\text{m}^2$, $T_{\text{amb}} = 23.1^\circ\text{C}$.

1.4. Κλίση καμινάδας για μέγιστη ροή αέρα

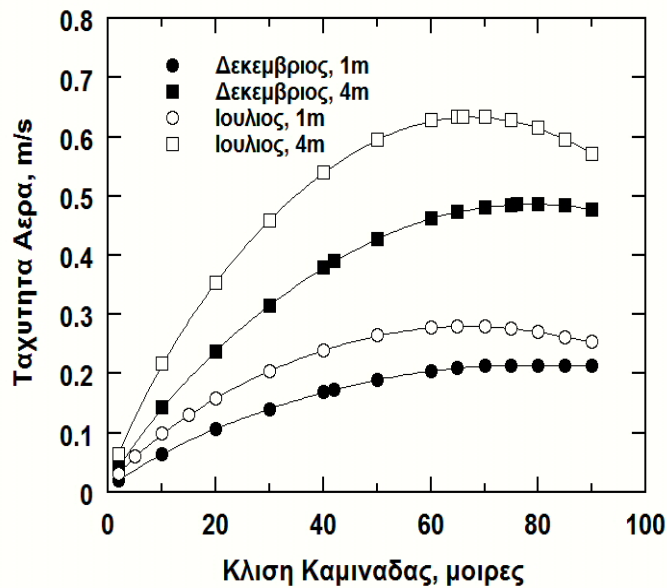
Οι υπολογισμοί με το φαινομενολογικό μοντέλο (χρησιμοποιώντας την εξίσωση 45) για διαφορετικούς μήνες του χρόνου για την εξακρίβωση της βέλτιστης κλίσης που αποφέρει τη μέγιστη ροή αέρα, παρουσιάζονται στο Σχήμα 6(α). Τα δεδομένα εισόδου της μηνιαίας μέσης ημερήσιας ολικής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και της μηνιαίας μέσης ημερήσιας θερμοκρασίας περιβάλλοντος είναι από τον ΕΛΟΤ, (1991). Οι αντίστοιχες μέγιστες τιμές ταχύτητας απεικονίζονται επίσης για να επιτρέψουν την εκτίμηση των μεταβολών κατά τη διάρκεια του χρόνου. Για λόγους σύγκρισης, το Σχήμα 6(β) απεικονίζει την κλίση που αποδίδει τη μέγιστη απορρόφηση της ακτινοβολίας με τις αντίστοιχες τιμές της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο.

Είναι προφανές ότι η ταχύτητα του αέρα και η ολική ακτινοβολία ποιοτικά εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, λαμβάνοντας τις χαμηλότερες τιμές τους κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Ωστόσο, οι κλίσεις είναι πολύ διαφορετικές. Για μέγιστη ροή αέρα η κλίση της καμινάδας μεταβάλλεται σε μικρό εύρος, από 65° μέχρι 76°, ενώ για την μέγιστη ακτινοβολία μεταβάλλεται από 12° μέχρι 44°. Επιπλέον, η μεταβολή των τιμών ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του χρόνου

είναι πολύ μεγαλύτερη (σε ποσοστιαία βάση), από την μεταβολή των τιμών της ταχύτητας. Σε σχετική εργασία που έκαναν οι Prasad & Chandra, (1990) σε μια τοποθεσία της Ινδίας, παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά (ποιοτικά), αλλά το εύρος των κλίσεων ήταν διαφορετικό: μεταξύ 53° και 76° για τη μέγιστη ροή αέρα και μεταξύ 0° και 55° για τη μέγιστη ακτινοβολία. Παίρνοντας υπόψη τα παραπάνω ανακύπτει η απορία, ποια είναι η καλύτερη επιλογή για την κλίση της καμινάδας για μέγιστη ταχύτητα αέρα, αν η καμινάδα πρόκειται να είναι τοποθετημένη σε συγκεκριμένη σταθερή γωνία καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Για να απαντηθεί η απορία, το Σχήμα 7 απεικονίζει την ταχύτητα του αέρα σε σχέση με την κλίση, για καμινάδα 1 m και 4 m, για ημέρα στο μέσο του Δεκεμβρίου και Ιουλίου, αντίστοιχα.



Σχήμα 6. (α) βέλτιστη κλίση ως προς τη μέγιστη ταχύτητα αέρα (για καμινάδα 1 m και 4 m) και (β) βέλτιστη κλίση ως προς τη μέγιστη ολική ακτινοβολία (για οποιοδήποτε μήκος καμινάδας) σε σχέση με τους μήνες του χρόνου, υπολογισμένη από το φαινομενολογικό μοντέλο



Σχήμα 7. Μέση ταχύτητα αέρα σε σχέση με την κλίση της καμινάδας, για καμινάδα 1 m και 4 m, υπολογισμένη από το φαινομενολογικό μοντέλο στο μέσο του Δεκεμβρίου και Ιουλίου, αντίστοιχα

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, για χειμερινές εφαρμογές η μικρή αύξηση (~1%) στην ταχύτητα του αέρα με την χρήση της βέλτιστης κλίσης (σε σύγκριση με καμινάδα σε κατακόρυφη θέση), δεν είναι σημαντική σε σχέση με προβλήματα που αφορούν την σταθερότητα της κατασκευής, σε κλίση άλλη από την κατακόρυφη. Ωστόσο, κατά τους θερινούς μήνες το κέρδος στην ταχύτητα του αέρα όταν χρησιμοποιείται η βέλτιστη κλίση είναι περίπου 10% και τότε οι αποφάσεις πρέπει να παίρνονται με μεγαλύτερη προσοχή.

3. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Andersen, K.T., 1995. Theoretical considerations on natural ventilation by thermal buoyancy. ASHRAE Transactions 101(2), 1103–1117.
- Bansal, N.K., Mathur, J., Mathur, S., Jain, M., 2005. Modeling of window-sized solar chimneys for ventilation. Building and Environment 40, 1302-1308.
- Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, second ed., Wiley Interscience, New York, pp. 46-249.
- ELOT, 1991. Greek Bureau of Standards, No. 1291.
- Fluent Inc., 2003. Fluent user's guide.
- Garg, H.P., 1987. Solar Food Drying, in: Advances in Solar Energy Technology, vol. 3, Heating Agricultural and Photovoltaic Applications of Solar Energy, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 1987, pp. 1-123.
- Karapantsios, T.D. Hatzimoisiadis, K.A., Balouktsis, A.I., 1999. Estimation of total atmospheric pollution using global radiation data: introduction of a novel clear day selection methodology. Renewable Energy 17, 169-181.
- Liu, B.Y.H., Jordan, R.C., 1963. The long term average performance of flat plate solar energy collectors. Solar Energy 7, 53-74.
- Prasad, M., Chandra, K.S., 1990. Optimum tilt of solar collector for maximum natural flow. Energy Conversion Management 30, 369-379.
- Sandberg, M., Moshfegh, B., 1998. Ventilated solar roof airflow and heat transfer investigation. Renewable Energy 15, 287-292.
- Sukhatme, S.P., 1984. Solar energy: principles of thermal collection and storage, McGraw-Hill, New Delhi, pp. 271.
- VDI-Wärmeatlas, 1991, sixth ed., Springer, Berlin, pp. Fa2-Fa3, Dc1-Dc38, Dea1-Dea14.

2. ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗ ΕΡΓΑΣΙΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΚΑΙ ΣΥΝΕΔΡΙΑ

Έχει σταλεί προς δημοσίευση στο περιοδικό SOLAR ENERGY επιστημονική εργασία με τα παρακάτω στοιχεία:

E. P. Sakonidou, T. D. Karapantsios*, A. I. Balouktsi and D. Chassapis, “An Engineering Model for Estimating the Optimum Tilt of a Solar Chimney for Maximum Air Flow”, *Solar Energy*.

Στη διάρκεια της παράτασης του έργου (2007) θα υποβληθούν προς παρουσίαση σε επιστημονικά συνέδρια τουλάχιστον 1-2 εργασίες.