

ΤΕΙ Λάρισας
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
Τμήμα Μηχανολογίας

bark 0.5.2

Λογισμικό μονοδιάστατης προσομοίωσης
μετάδοσης θερμότητας σε πολλαπλά στρώματα

Ονούφριος Χαραλάμπους

10 Οκτωβρίου 2013

Έκδοση 0.1, Λάρισα 2013
Copyright ©

Ονούφριος Χαραλάμπους - Επίκουρος Καθηγητής ΤΕΙ Λάρισας
onoufrios@teilar.gr

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	5
2	Μαθηματικό μοντέλο	7
2.1	Ισοζύγιο ενέργειας	7
2.2	Ακτινοβολία σε αδιαφανή και διαφανή υλικά	7
2.3	Οριακές συνθήκες	7
2.4	Ηλιακή ακτινοβολία	8
3	Αρχείο εισόδου	11
3.1	Μεγέθη	11
3.2	Τύποι παραμέτρων	13
3.3	Συναρτήσεις	14
4	case	15
4.1	simulation	15
4.2	setup	16
4.2.1	materials	17
4.2.2	layers	18
4.2.3	boundaries	19
4.2.4	geometry	20
4.2.5	position	21
4.3	output	22
4.3.1	screen	23
4.3.2	file	23
5	Αρχείο εξόδου	25
6	Ενδεικτικά παραδείγματα	27
7	Μηνύματα λάθους	29
	Βιβλιογραφία	31

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 2

Μαθηματικό μοντέλο

2.1 Ισοζύγιο ενέργειας

Το μονοδιάστατο μεταβατικό ενεργειακό ισοζύγιο εκφράζεται από την εξίσωση [2]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + S. \quad (2.1)$$

2.2 Ακτινοβολία σε αδιαφανή και διαφανή υλικά

Στην επιφάνεια των υλικών εφαρμόζεται το κλασσικό ισοζύγιο ακτινοβολίας που περιλαμβάνει συντελεστές απορρόφησης, διαπερατότητας και ανάκλασης

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.2)$$

Στην περίπτωση αδιαφανών υλικών, όλη η απορρόφηση ακτινοβολίας λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια, ενώ για διαφανή υλικά χρησιμοποιείται ο νόμος εκθετικής μείωσης

$$\alpha = 1 - e^{-\kappa L} \quad (2.3)$$

Στην τελευταία περίπτωση η απορρόφηση ακτινοβολίας περιλαμβάνεται στον ισοζύγιο ενέργειας ως όρος πηγής.

2.3 Οριακές συνθήκες

Η παρακάτω εκφράσεις χρησιμοποιούνται για τις οριακές συνθήκες και στις δύο πλευρές

$$\left[-k \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=0} = h_{conv} (T_{\infty} - T_s) + \sigma \epsilon (T_{\infty}^4 - T_s^4) + \dot{q}_{solar}'' + \dot{q}'' \quad (2.4)$$

$$\left[-k \frac{\partial T}{\partial x} \right]_{x=L} = h_{conv} (T_s - T_{\infty}) + \sigma \epsilon (T_s^4 - T_{\infty}^4) - \dot{q}_{solar}'' + \dot{q}'' \quad (2.5)$$

όπου, οι τέσσερις όροι της δεξιάς πλευράς αντιστοιχούν στην συναγωγή, την ακτινοβολία περιβάλλοντος, την ηλιακή ακτινοβολία και οποιαδήποτε άλλη θερμορροή.

2.4 Ηλιακή ακτινοβολία

Για να εκτιμηθεί η ηλιακή ακτινοβολία, χρησιμοποιείται το "Μοντέλο Ηλιακής Ακτινοβολίας Καθαρού Ουρανού", όπως προτείνεται από την ASHRAE και περιγράφεται από τον Kuehn και συνεργάτες [3]. Τέσσερις παράμετροι από πίνακες απαιτούνται για να υπολογιστεί η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της γης. Για ευκολία, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω προσαρμοσμένες εξισώσεις

$$A = 1161.97 + 76.565 \cos \left(\frac{month - \frac{11.6633}{30}}{6\pi} \right) \quad (2.6)$$

$$B = 0.171844 + 0.034158 \cos \left(\frac{month - \frac{17.3658}{30}}{6\pi} \right) \quad (2.7)$$

$$C = 0.0907911 + 0.0401521 \cos \left(\frac{month - \frac{15.0141}{30}}{6\pi} \right) \quad (2.8)$$

Είναι επίσης απαραίτητη η απόκλιση της γης για όλη την περίοδο των δώδεκα μηνών

$$d = -23.44 \cos \left(2\pi \frac{month}{12} \right) \frac{\pi}{180} \quad (2.9)$$

Για τον υπολογισμό της ηλιακής ακτινοβολίας σε μια συγκεκριμένη επιφάνεια, πρέπει να είναι γνωστές μια σειρά από γωνίες. Η γωνία ηλιακού ύψους μεταξύ των ακτίνων και του οριζώντιου επίπεδου μεταβάλλεται ημερήσια και εποχικά

$$\sin \beta = \cos l \cos h \cos d + \sin l \sin d \quad (2.10)$$

Η γωνία ηλιακού αζιμούθιου μεταξύ της προβολής των ηλιακών ακτίνων στο οριζόντιο επίπεδο και του άξονα Βορρά-Νότου μεταβάλλεται ομοίως

$$\cos \phi = \frac{1}{\cos \beta} (\cos d \sin l \cos h - \sin d \cos l) \quad (2.11)$$

Ο προσανατολισμός της επιφάνειας χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της γωνίας ηλιακού αζιμούθιου-όψης

$$\gamma = |(\phi - \psi)| \quad (2.12)$$

Τέλος όλα τα παραπάνω οδηγούν στον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (2.13)$$

Η ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης δίνεται από την σχέση

$$I_{DN} = A e^{-B/\sin \beta}, \quad (2.14)$$

ενώ η ένταση της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια

$$I_D = I_{DN} \cos \theta \quad (2.15)$$

Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία υπολογίζεται ως ποσοστό της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας

$$I_d = C I_{DN} F_s \quad (2.16)$$

όπου ο συντελεστής όψης ορίζεται ως

$$F_s = \frac{1 + \cos \Sigma}{2} \quad (2.17)$$

Η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία περιλαμβάνει το μέγεθος της ακτινοβολίας που ανακλάται από όμορες επιφάνειες και υπολογίζεται ως

$$I_R = \rho_g I_{DN} (C + \sin \beta) F_{Ag} \quad (2.18)$$

με τον κατάλληλο συντελεστή όψης

$$F_{Ag} = \frac{1 - \cos \Sigma}{2} \quad (2.19)$$

όπου το Σ , υποδηλώνει την γωνία κλίσης της επιφάνειας.

Λαμβάνοντας υπόψη όλους τους παραπάνω όρους, η συνολική ηλιακή ακτινοβολία εκφράζεται ως

$$I = I_D + I_d + I_R \quad (2.20)$$

Κεφάλαιο 3

Αρχείο εισόδου

3.1 Μεγέθη

Μέγεθος	Προεπιλεγμένες μονάδες	Εναλλακτικές μονάδες
Δεν εφαρμόζεται	—	
Αδιάστατο	—	
Μήκος	m	cm, mm
Χρόνος	s	$min, hour, day$
Γωνία	deg	rad
Θερμοκρασία	K	$degC$
Θερμική αγωγιμότητα	W/mK	
Θερμοχωρητικότητα	J/kgK	
Πυκνότητα	kg/m^3	
Ταχύτητα	m/s	
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	W/m^2K	
Ειδική θερμορροή	W/m^2	
Ημερομηνία	$month$	

3.2 Τύποι παραμέτρων

Τύπος	Σύνταξη	Περιγραφή
ομάδα	<pre> <tag> <child_tag1>...</child_tag1> <child_tag2>...</child_tag2> ... </tag> </pre>	Μια ομάδα παραμέτρων.
σταθερά	<pre> <tag> <constant unit="..."> 1.0 </constant> </tag> </pre>	Ένα μέγεθος που παραμένει σταθερό καθόλη την προσομοίωση. Δηλώνεται μόνο μία αριθμητική τιμή μαζί με μονάδα.
μεταβλητή	<pre> <tag> <variable x_unit="..." unit="..."> 0.0 1.0 1.0 4.0 ... </variable> </tag> </pre>	Ένα μέγεθος που μεταβάλλεται συναρτήσει ενός άλλου μεγέθους. Δηλώνεται ένας πίνακας δύο στηλών και απεριόριστων γραμμών. Δηλώνονται μονάδες και για τις δύο στήλες.
συνάρτηση	<pre> <tag> <function> <function1> </function1> </function> </tag> </pre>	Ένα μέγεθος που μεταβάλλεται συναρτήσει ενός άλλου μεγέθους. Επιλέγεται μία εσωτερική συνάρτηση και δηλώνονται οι απαραίτητες αριθμητικές παράμετροι.
αναφορά	<pre> <tag reference="target_tag" /> </pre>	Μια αναφορά σε άλλη παράμετρο δηλωμένη ονομαστικά.
λέξη-κλειδί	<pre> <tag> <keyword> keyword1 </keyword> </tag> </pre>	Μια παράμετρος που ορίζεται με λέξεις-κλειδιά.

3.3 Συναρτήσεις

Συνάρτηση	Σύνταξη	Περιγραφή
-----------	---------	-----------

Chapter 4

case

Περίπτωση προσομοίωσης

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
simulation	ομάδα	Ενότητα	4.1	παραμετροι προσομοίωσης
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
setup	ομάδα	Ενότητα	4.2	παραμετροι διάταξης
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
output	ομάδα	Ενότητα	4.3	παραμετροι εξαγωγής αποτελεσμάτων
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

4.1 simulation

παραμετροι προσομοίωσης

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
start_time	σταθερά	Μέγεθος	Χρόνος	χρόνος εκκίνησης
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
end_time	σταθερά	Μέγεθος	Χρόνος	χρόνος τερματισμού
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
time_step	σταθερά	Μέγεθος	Χρόνος	χρονικό βήμα
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
space_step	σταθερά	Μέγεθος	Μήκος	χωρικό βήμα
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
initial_temperature	σταθερά	Μέγεθος	Θερμοκρασία	αρχική θερμοκρασία
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

4.2 setup

παραμετροι διάταξης

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
materials	ομάδα	Ενότητα	4.2.1	Λίστα υλικών
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
layers	ομάδα	Ενότητα	4.2.2	στρώματα
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
boundaries	ομάδα	Ενότητα	4.2.3	όρια
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
geometry	ομάδα	Ενότητα	4.2.4	γεωμετρία τοιχώματος
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
position	ομάδα	Ενότητα	4.2.5	θέση
		Χρήση	προαιρετική	
		Εμφανίσεις	1	

4.2.1 materials

Λίστα υλικών

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
material	ομάδα	Ενότητα	4.2.1	υλικό
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	-1	

material υλικό

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
conductivity	σταθερά	Μέγεθος	Θερμική αγωγιμότητα	Θερμική αγωγιμότητα
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
heat _capacity	σταθερά	Μέγεθος	Θερμοχωρητικότητα	Θερμοχωρητικότητα
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
density	σταθερά	Μέγεθος	Πυκνότητα	πυκνότητα
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
emissivity	σταθερά	Μέγεθος	Αδιάστατο	συντελεστής εκπομπής
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

4.2.2 layers

στρώματα

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
layer	ομάδα	Ενότητα	4.2.2	στρώμα
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	-1	

layer στρώμα

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
geometry	ομάδα	Ενότητα	4.2.4	γεωμετρία τοιχώματος
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
material	αναφορά	Μέγεθος	Δεν εφαρμόζεται	υλικό
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

geometry γεωμετρία τοιχώματος

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
thickness	σταθερά	Μέγεθος	Μήκος	πάχος στρώματος
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

4.2.3 boundaries

όρια

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
boundary	ομάδα	Ενότητα	4.2.3	όριο
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	-1	

boundary όριο

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
temperature	σταθερά μεταβλητή συνάρτηση	Μέγεθος	Θερμοκρασία	Θερμοκρασία ρευστού
		Μέγεθος X	Χρόνος	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
heat _transfer _coefficient	σταθερά	Μέγεθος	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας
		Μέγεθος X	Χρόνος	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
velocity	σταθερά μεταβλητή	Μέγεθος	Ταχύτητα	Ταχύτητα ρευστού
		Μέγεθος X	Χρόνος	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
heat_flux	σταθερά μεταβλητή	Μέγεθος	Ειδική θερμορροή	Ειδική θερμορροή
		Μέγεθος X	Χρόνος	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
infrared _irradiance	σταθερά	Μέγεθος	Ειδική θερμορροή	Πρόσπτωση υπέρυθρης ακτινοβολίας
		Μέγεθος X	Χρόνος	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
solar _irradiance	σταθερά	Μέγεθος	Ειδική θερμορροή	Πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας
		Μέγεθος X	Χρόνος	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

4.2.4 geometry

γεωμετρία τοιχώματος

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
height	σταθερά	Μέγεθος	Μήκος	ύψος τοιχώματος
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
length	σταθερά	Μέγεθος	Μήκος	πλάτος τοιχώματος
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
tilt	σταθερά	Μέγεθος	Μήκος	κλίση τοιχώματος
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

4.2.5 position

θέση

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
latitude	σταθερά	Μέγεθος	Γωνία	γεωγραφικό πλάτος
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
longitude	σταθερά	Μέγεθος	Γωνία	γεωγραφικό μήκος
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
orientation	σταθερά	Μέγεθος	Γωνία	προσανατολισμός
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
date	σταθερά	Μέγεθος	Ημερομηνία	ημερομηνία
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
time	σταθερά	Μέγεθος	Χρόνος	χρόνος
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

4.3 output

παραμετροι εξαγωγής αποτελεσμάτων

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
screen	ομάδα	Ενότητα	4.3.1	Παράμετροι εξαγωγής στην οθόνη.
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
file	ομάδα	Ενότητα	4.3.2	Παράμετροι εξαγωγής σε αρχείο.
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

4.3.1 screen

Παράμετροι εξαγωγής στην οθόνη.

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
time_step	σταθερά	Μέγεθος	Χρόνος	χρονικό βήμα
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	
space_step	σταθερά	Μέγεθος	Μήκος	χωρικό βήμα
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

4.3.2 file

Παράμετροι εξαγωγής σε αρχείο.

Ετικέτα	Τύπος	Παράμετρος	Τιμή	Περιγραφή
time_step	σταθερά	Μέγεθος	Χρόνος	χρονικό βήμα
		Μέγεθος X	Δεν εφαρμόζεται	
		Χρήση	υποχρεωτική	
		Εμφανίσεις	1	

Κεφάλαιο 5

Αρχείο εξόδου

Όλα τα αποτελέσματα εξάγονται σε μονάδες SI.

Στήλη	Τίτλος	Μονάδα	Περιγραφή
1	time	s	Χρόνος
2	Civ.time	s	Πολιτικός χρόνος
3	Sol.time	s	Ηλιακός χρόνος
4	qconv1	$\frac{W}{m^2}$	Θερμορροή λόγω συναγωγής στην πλευρά 1
5	qrad1	$\frac{W}{m^2}$	Θερμορροή λόγω ακτινοβολίας από το περιβάλλον στην πλευρά 1
6	qsol1	$\frac{W}{m^2}$	Θερμορροή λόγω ηλιακής ακτινοβολίας στην πλευρά 1
7	qconv2	$\frac{W}{m^2}$	Θερμορροή λόγω συναγωγής στην πλευρά 2
8	qrad2	$\frac{W}{m^2}$	Θερμορροή λόγω ακτινοβολίας από το περιβάλλον στην πλευρά 2
9	qsol2	$\frac{W}{m^2}$	Θερμορροή λόγω ηλιακής ακτινοβολίας στην πλευρά 2
10	hcon1	$\frac{W}{m^2 K}$	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής στην πλευρά 1

Στήλη	Τίτλος	Μονάδα	Περιγραφή
11	hrad1	$\frac{W}{m^2 K}$	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω ακτινοβολίας στην πλευρά 1
12	hconv2	$\frac{W}{m^2 K}$	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής στην πλευρά 2
13	hrad2	$\frac{W}{m^2 K}$	Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω ακτινοβολίας στην πλευρά 2
14	Qcum1	$\frac{J}{m^2}$	Συνολική ενέργεια που έχει διαπεράσει την πλευρά 1 από την αρχή της προσομοίωσης
15	Qcum2	$\frac{J}{m^2}$	Συνολική ενέργεια που έχει διαπεράσει την πλευρά 2 από την αρχή της προσομοίωσης
16	Ta(-. . .)	K	Θερμοκρασία ρευστού στην πλευρά 1. Η θέση που αναφέρεται είναι ενδεικτική.
16 + 1	Ts(0mm)	K	Επιφανειακή θερμοκρασία στην πλευρά 1
...			
16 + ι	Ts(. . .)	K	Θερμοκρασία στερεού τοιχώματος στην θέση που αναφέρεται.
...			
16 + N	Ts(. . .)	K	Επιφανειακή θερμοκρασία στην πλευρά 2
16 + N + 1	Ta(. . .)	K	Θερμοκρασία ρευστού στην πλευρά 2. Η θέση που αναφέρεται είναι ενδεικτική.

Κεφάλαιο 6

Ενδεικτικά παραδείγματα

Κεφάλαιο 7

Μηνύματα λάθους

Βιβλιογραφία

- [1] Abdel-Wahed, R. M., Patankar, S. v., and Sparrow, E. M. (1976). Fully Developed Laminar Flow and Heat Transfer in a Square Duct with One Moving Wall, *Lett. Heat Mass Transfer*, vol. 3, p. 355.
- [2] Incropera F. P., DeWitt D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th edition, John Wiley and Sons, 1996
- [3] Kuehn T. H., Ramsey J. W., Threlkeld J. L., *Thermal Environmental Engineering*, 3rd edition, Prentice Hall, 1998

