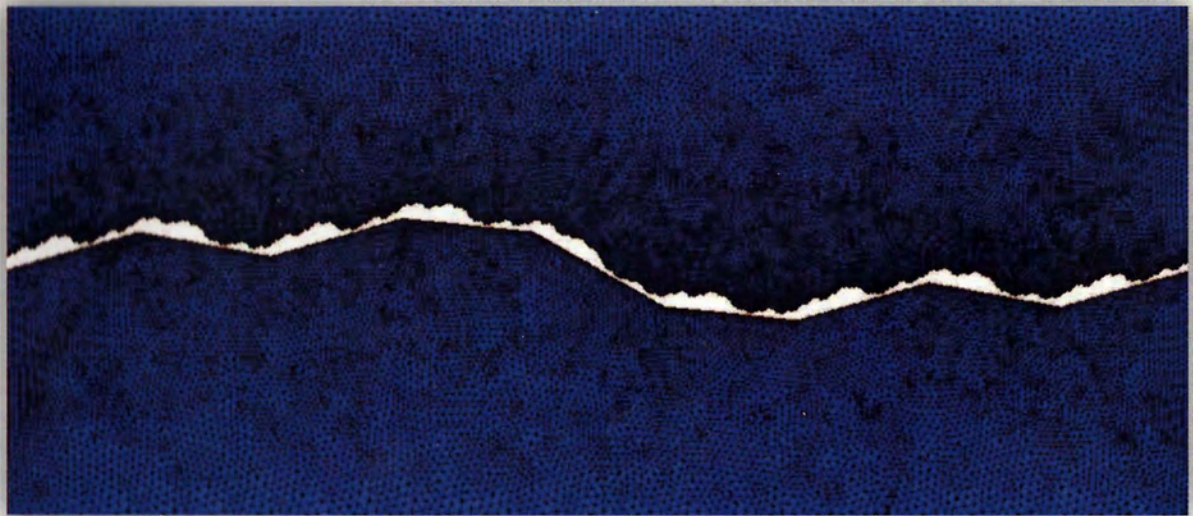




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μελέτη της Επιρροής της Τραχύτητας και της
Κατακόρυφης Φόρτισης Μεταλλικών Διεπιφανειών στη
Θερμική Αγωγιμότητα λόγω Επαφής**



ΜΕΣΣΗΝΗ ΑΡΕΤΗ

**Επιβλέπουσα: Ολυμπία Παναγούλη, Καθηγήτρια Τ.Π.Μ
Παν/μίου Θεσσαλίας**

Βόλος, Ιούλιος 2015

© 2015 Αρετή Μεσσήνη

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 14053/1
Ημερ. Εισ.: 03-08-2017
Δωρεά: Συγγραφέας
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2015
ΜΕΣ

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής Ολυμπία Παναγούλη
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών,
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Ευριπίδης Μυστακίδης
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Γιώργος Εφραιμίδης
Λέκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν με οποιονδήποτε τρόπο στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Θα πρέπει να ευχαριστήσω θερμά την κα. Ολυμπία Παναγούλη επίκουρο καθηγήτρια του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ήταν πάντα διαθέσιμη να μου προσφέρει τις γνώσεις και την εμπειρία της για την βαθύτερη κατανόηση των βασικών εννοιών που διαπραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία. Η επιμονή της, η καθοδήγηση της και κυρίως η ακεραιότητα του χαρακτήρα της αποτέλεσαν τους βασικούς πυλώνες για την ορθή διεκπεραίωση της διπλωματικής εργασίας μου.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ την κα. Δάφνη Παντούσα διδάκτορα του τμήματος για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Ιδιαίτερα μνεία οφείλω στον κ. Κωσταντίνο Τζάρο διδάκτορα του τμήματος μας, ο οποίος τον τελευταίο χρόνο ήταν πάντα διαθέσιμος να ασχοληθεί με κάθε απορία εντός και εκτός των πλαισίων της παρούσας εργασίας και με κάθε δισταγμό μου, όσο ασήμαντος και να ήταν, για την χρήση του λογισμικού Marc Mentat της εταιρείας Msc Software, μέσω του οποίου ήρθαν εις πέρας όλες οι αναλύσεις της παρούσας εργασίας.

Έπειτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές της σχολής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας που με καθοδήγησαν τα τελευταία πέντε χρόνια στο πολύ ενδιαφέρον και ευρύ αντικείμενο του πολιτικού μηχανικού. Αισθάνομαι ιδιαίτερη ανάγκη να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ευριπίδη Μυστακίδη και τον λέκτορα κ. Γιώργο Εφρεμίδη που με τίμησαν με την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή μου.

Σε αυτό το σημείο θέλω να αναφέρω ανθρώπους, εκτός του στενού ακαδημαϊκού περιβάλλοντος, που υπήρξαν σημαντικοί πόλοι στη ζωή μου, προσδίδοντας την απαιτούμενη ισορροπία. Θέλω αρχικά να ευχαριστήσω τους φίλους και τις φίλες των φοιτητικών μου χρόνων, που έκαναν τα χρόνια αυτά μία πραγματικά αξέχαστη εμπειρία. Βέβαια, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το οφείλω στους γονείς μου, των οποίων η πίστη στις δυνατότητες μου αποτέλεσε αρωγός σε όλους τους στόχους και τα όνειρά μου. Την παρούσα εργασία την αφιερώνω στον αδελφό μου Νίκο.

Ιούλιος, 2015

Μεσσήνη Αρετή



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας σε προβλήματα επαφής στερέων σωμάτων προσελκύει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών, εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασιακής διαφοράς που εμφανίζεται στην διεπιφάνεια τους. Ένα φαινόμενο που επιδεινώνεται από την παρουσία υψηλών θερμοκρασιών. Η διαδικασία της μεταφοράς θερμότητας αποτελεί ένα ιδιαίτερος περίπλοκο πρόβλημα, το οποίο δικαιολογείται αν αναλογιστούμε ότι, σύμφωνα με τα έως τώρα πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα που έχουν προκύψει από την επιστημονική μελέτη του φαινομένου αυτού, η θερμική αντίσταση των διεπιφανειών οφείλεται κυρίως στην ανομοιομορφία και στην πολυπλοκότητα της γεωμετρία τους.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας μελετάται η επιρροή της τραχύτητας καθώς και της κατακόρυφης φόρτισης μεταλλικών διεπιφανειών στη διάδοση της θερμότητας μέσω θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η γεωμετρία των διεπιφανειών αυτών είναι περίπλοκη, με αποτέλεσμα να μην αποτελεί αντικείμενο το οποίο μπορεί να οριστεί με τη βοήθεια της ευκλείδειας γεωμετρίας. Αυτό αποτέλεσε το βασικό μας κίνητρο για να απευθυνθούμε σε σύνθετα μαθηματικά μοντέλα και συγκεκριμένα στη fractal γεωμετρία, ώστε να επιτύχουμε την όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση τους.

Για τη μελέτη της επιρροής της τραχύτητας των διεπιφανειών στη μετάδοση της θερμότητας δημιουργήθηκε ένα δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Στη συνέχεια έγιναν παραμετρικές αναλύσεις όπου μελετήθηκε η επιρροή, τόσο της fractal διάστασης των διεπιφανειών και της ανάλυσής τους, όσο και της μεταβολής του επιβαλλόμενου κατακόρυφου φορτίου στο μηχανισμό μεταφοράς θερμότητας. Τέλος, για την πραγματοποίηση των μη γραμμικών αναλύσεων επιλέχθηκε το πρόγραμμα λογισμικού MARC.

Λέξεις κλειδιά

Μεταφορά θερμότητας, θερμική αγωγιμότητα, τραχύτητα διεπιφανειών, fractal γεωμετρία, κατακόρυφο φορτίο, πεπερασμένα στοιχεία, παραμετρικές αναλύσεις



Abstract

The variation of thermal conductance of solids surfaces which are in contact attracts the interest of many researchers because of the high temperature drops which occur at their interface. A phenomenon (a procedure) exacerbated when high temperatures are encountered. The process of heat transfer across an interface is a particularly complex problem, which is justified if we consider that, according to our present experimental and theoretical data derived from the scientific study of this phenomenon, the thermal resistance of the interface is mainly due to the unevenness and complexity their geometry.

In this diploma thesis we study the influence of roughness and vertical load of metal interfaces to the dissemination of heat by thermal contact conductance. In the majority the geometry of the interfaces is complicated, as a result it is very difficult to be defined by the Euclidean geometry. This was our main motivation to reach out to complex mathematical models, such as the fractal geometry to achieve the most accurate simulation.

To study the influence of the roughness of the interfaces of cracks in heat transfer we create a two-dimensional finite element model. Then with parametric analyzes we studied the influence of both the fractal dimension of the interfaces and their analysis, and the change of the respective imposed vertical load on the heat transfer mechanism. In the end we have to mention that the analysis in this work, because of the nonlinearity of our problem was chosen the MARC software program.

Keywords

Heat transfer, thermal contact conductance, surface roughness, Fractal geometry, vertical load, finite element analysis, parametric analysis



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
1ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ-ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	7
1.1 Γενικά	7
1.2 Αναλυτική Παρουσίαση Μηχανισμών Μεταφοράς Θερμότητας-Εξισώσεις Ρυθμού	8
1.2.1 Αγωγιμότητα	8
1.2.2 Μεταγωγή	10
1.2.3 Ακτινοβολία	10
1.3 Καθορισμός Όρων και Εννοιών	11
1.3.1 Επιφάνεια Επαφής	11
1.3.2 Φορτίο Επαφής	12
1.3.3 Αντίσταση Επαφής και Αντίσταση Στένωσης	12
1.4 Περιγραφή & Ανάλυση Θερμοκρασιακού Προσομοιώματος	13
1.4.1 Γενικά	14
1.4.2 Ορισμός Θερμικής Αγωγιμότητας	15
1.4.3 Θερμικό Προσομοίωμα	17
2ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΗΣ FRACTAL ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	19
2.1 Ορισμός Τραχύτητας	19
2.2 Γεωμετρία Fractal	20
2.3 Υπολογισμός Κλασματικής διάστασης D	22
2.3.1 Μέθοδος Richardson	22
2.3.2 Μέθοδος Box counting	22
2.4 Fractal Συναρτήσεις Παρεμβολής	23
3ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΥΠΟΥ FRACTAL	28
3.1 Περιγραφή του Δισδιάστατου Αναλυτικού Μοντέλου	28
3.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά	31
3.2.1 Συνοριακές Συνθήκες	31
3.3 Ιδιότητες Υλικού	33
3.3.1 Ειδική Θερμότητα	33
3.3.2 Θερμική Αγωγιμότητα	34
3.3.3 Εφελκυστική Αντοχή και Όρια Διαρροής Χάλυβα	35
3.4 Διακριτοποίηση του Προσομοιώματος με Πεπερασμένα Στοιχεία	36
3.5 Μη- γραμμικότητα	46
4ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΕΠΑΦΗΣ	47
4.1 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$	47
4.2 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$	51
4.3 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$	53
5ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΕΠΑΦΗΣ	58
5.1 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$	59
5.2 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$	62
5.3 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$	64
6ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	67
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	69
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	73



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αλματώδης τεχνολογική εξέλιξη στην εποχής μας, θα ήταν αδιανόητο να μην είχε εισχωρήσει και στα πεδία των έργων του πολιτικού μηχανικού. Ως εκ τούτου, θερμομηχανικά προβλήματα επαφής έχουν εμφανιστεί στο προσκήνιο πολλών ερευνών, καθώς βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα συσκευών και μηχανήματων, όπως λόγου χάρη μικρό-ήλεκτρο-μηχανικά συστήματα συγκομιδής και διαχείρισης ενέργειας, προηγμένες συσκευές μικροσυγκολλήσεων και πολλά άλλα, ιδιαίτερος χρήσιμα στην υλοποίηση και βελτίωση των κατασκευών. Ωστόσο, οι επιδώσεις των εν λόγω συσκευών εξαρτώνται από το βαθμό επαφής που είναι δυνατόν να επιτευχθεί. Συνεπώς, σημαντικές προσπάθειες και πολυάριθμες έρευνες έχουν αφιερωθεί στην κατανόηση και διερεύνηση του πολύπλοκου αυτού φαινομένου.

Είναι γνωστό ότι όλες οι επιφάνειες αποτελούνται από ένα συνονθύλευμα μικροανωμαλιών, των οποίων ο βαθμός εμφάνισης καθώς και η κατανομή, δυσχεραίνουν την διαδικασία της ομαλής επαφής δυο σωμάτων. Γενικά, τόσο η επιφάνεια επαφής όσο και η μεταφορά της θερμότητας που πραγματοποιείται όταν δυο παραμορφώσιμα σώματα έρχονται σε επαφή, εξαρτώνται από την τραχύτητα των διεπιφανειών, η οποία είναι πολύπλοκη και απαιτεί νέα προηγμένα μαθηματικά εργαλεία για την περιγραφή της.

Για να επιτευχθεί η ορθότερη προσομοίωση και περιγραφή των τραχειών διεπιφανειών, χρειάστηκε να ξεφύγουμε από τα συμβατικά γεωμετρικά σχήματα της κλασικής Ευκλείδειας γεωμετρίας και να χρησιμοποιήσουμε πολύπλοκες γεωμετρικές μορφές που έχουν την ιδιότητα της αυτοομοιότητας, τα fractals. Βασιζόμενη σε απλούς αλγόριθμους και στη χρήση μικρού αριθμού παραμέτρων, η γεωμετρία των fractals έχει την δυνατότητα να περιγράψει με ακρίβεια τέτοιες μορφές. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της μηχανικής που λαμβάνει υπόψη δομές τύπου fractal σε συνδυασμό με τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, ένας μεγάλος αριθμός φυσικών προβλημάτων μπορεί να μελετηθεί [1], [2], [3], [4].

Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση της τραχύτητας των διεπιφανειών έγινε με την βοήθεια των fractal συναρτήσεων παρεμβολής, οι οποίες εξασφαλίζουν τη μετάβαση από ένα δεδομένο διακριτό σύνολο σημείων σε μία συνεχή fractal καμπύλη [5]. Οι διεπιφάνειες που παράγονται με αυτό τον τρόπο, μέσα από μια επαναληπτική διαδικασία, χαρακτηρίζονται σε κάθε βήμα από μια διαφορετική ανάλυση, η ακρίβεια της οποίας αυξάνεται με τις επαναλήψεις. Με αυτόν τον τρόπο, η επαναληπτική διαδικασία μας δίνει την δυνατότητα να μελετήσουμε pre-fractals γεωμετρίες με διαφορετική ανάλυση κάθε φορά. Το γεγονός αυτό καθιστά τη συγκεκριμένη προσέγγισή κατάλληλη για την προσομοίωση της γεωμετρίας των διεπιφανειών σε προβλήματα επαφής, όπου σε συνδυασμό με τη χρήση αξιόπιστων αριθμητικών μεθόδων οδηγεί σε μια ακριβή μελέτη του προβλήματος.



Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών το φαινόμενο της θερμικής αγωγιμότητας εξ' επαφής, έχει μελετηθεί θεωρητικά χρησιμοποιώντας ποικίλα θερμικά και μηχανικά μοντέλα, καθώς και διαφορετικές προσεγγίσεις προσομοίωσης των διεπιφανειών. Στηριζόμενοι σε αυτές τις μελέτες [6], [7] γίνεται κατανοητό ότι η θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, οι κυριότερες των οποίων είναι:

- Το είδος των υλικών που έρχονται σε επαφή
- Η γεωμετρία των επιφανειών
- Η θερμοκρασία των υλικών
- Τα υλικά λίπανσης ή οι διάφορες προσμίξεις (σε περίπτωση που υπάρχουν)
- Το πάχος της διεπιφάνειας

Τέλος, η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε έξι κεφάλαια:

1. Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύονται περιληπτικά οι μηχανισμοί μεταφοράς της θερμότητας και ορισμένες έννοιες σχετικά με την επαφή δυο επιφανειών, που θα χρησιμοποιηθούν στην συνέχεια της εργασίας.
2. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία προσομοίωσης των διεπιφανειών με τη βοήθεια της γεωμετρίας fractal.
3. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η δισδιάστατη ανάλυση της κατασκευής με διεπιφάνειες τύπου fractal, ορίζονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της, καθώς και οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού από το οποίο αποτελείται.
4. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται μελέτη της επιρροής της ανάλυσης των διεπιφανειών στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής.
5. Στο πέμπτο κεφάλαιο μελετάται η επίδραση του επιβαλλόμενου κατακόρυφου φορτίου στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής.
6. Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα βασικά αποτελέσματα και συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα εργασία.



1^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται γενικά οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας και στη συνέχεια δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη περιγραφή και ανάλυση του θερμικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Παράλληλα, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των βασικών εννοιών για την πλήρη κατανόηση του φαινομένου της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή ανάμεσα σε δυο μεταλλικές επιφάνειες που έρχονται σε επαφή.

1.1 Γενικά

Θερμότητα είναι η ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ δυο συστημάτων από την θερμότερη προς τη ψυχρότερη περιοχή εξαιτίας της μεταξύ τους διαφοράς θερμοκρασίας. Κατά συνέπεια, τα εμπλεκόμενα συστήματα τείνουν σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, με αποκατάσταση ομοιόμορφης θερμοκρασίας σε όλες τις περιοχές. Μονάδα μέτρησής της στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων (SI) είναι το Joule. Ο ρυθμός με τον οποίο μεταδίδεται η θερμότητα ονομάζεται ισχύς και τότε χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησής το Watt [8].

Ο κλάδος της Μεταφοράς Θερμότητας μελετά τους μηχανισμούς με τους οποίους πραγματοποιείται η μεταφορά θερμότητας με στόχο την ανάπτυξη σχέσεων υπολογισμού του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας. Αυτό αποτελεί και το κρισιμότερο πρόβλημα στο σχεδιασμό από τη σκοπιά του μηχανικού. Η γνώση του ρυθμού μεταφοράς θερμότητας θα επιτρέψει τον υπολογισμό και εν συνεχεία την υλοποίηση όλων των απαραίτητων διεργασιών για την αντιμετώπιση των απαιτήσεων και των αστοχιών των κατασκευών [8].

Θερμότητα μεταφέρεται πάντα όταν υπάρχει διαφορά θερμοκρασίας μέσα σε ένα σώμα ή μεταξύ δυο σωμάτων. Αυτό που διαφοροποιείται είναι ο φυσικός μηχανισμός με τον οποίο πραγματοποιείται η μεταφορά. Διακρίνονται τρεις βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας:

- Μεταφορά με Αγωγή:

Η μεταφορά θερμότητας οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις των μικροσκοπικών σωματιδίων, χωρίς μακροσκοπικά να παρατηρείται μετακίνηση υλικού από τη μια θέση του χώρου στην άλλη. Ο μηχανισμός αυτός είναι κυρίαρχος σε στερεά σώματα ή σε μη κινούμενα ρευστά. Η μεταφορά θερμότητας με αγωγή αντιστοιχεί στην μεταφορά ορμής και μάζας με μοριακή διάχυση, δηλαδή λόγω της κίνησης των μορίων [8].

- Μεταφορά με Συναγωγή:

Η μεταφορά θερμότητας οφείλεται σε μετακίνηση της μάζας ρευστού. Το ρευστό, όταν μετακινείται από μια θέση του χώρου σε άλλη, μεταφέρει μαζί του και την ενέργεια που περιέχει, επηρεάζοντας έτσι το ενεργειακό περιεχόμενο, και κατ' επέκταση τη θερμοκρασία, του χώρου στον οποίο καταλήγει. Η μεταφορά θερμότητας



με συναγωγή αντιστοιχεί στη μεταφορά ορμής και μάζας λόγω της μετακίνησης «πακέτων» ύλης ρευστού [8].

- Μεταφορά με Ακτινοβολία:

Η ενέργεια μεταφέρεται με ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο μηχανισμός αυτός δεν παρουσιάζει καμία αντιστοιχία με αλλά φαινόμενα μεταφοράς. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν μόνο ενέργεια, όχι ορμή και μάζα [8].

1.2 Αναλυτική Παρουσίαση Μηχανισμών Μεταφοράς Θερμότητας-Εξισώσεις ρυθμού

Στο σημείο αυτό είναι σκόπιμο να παρουσιαστούν αναλυτικά οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας και να γίνει μια συνοπτική αναφορά στις σχέσεις που επιτρέπουν τον υπολογισμό τους. Οι σχέσεις αυτές αποτελούν τη βάση της μεταφοράς θερμότητας και είναι γνωστές ως εξισώσεις ρυθμού.

1.2.1 Αγωγιμότητα

Η αγωγιμότητα (conduction) είναι ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας στα στερεά. Στα υλικά τα οποία είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας, η θερμότητα μεταφέρεται από τις αλληλεπιδράσεις των ελεύθερων ηλεκτρονίων και ως εκ τούτου τα υλικά που είναι καλοί ηλεκτρικοί αγωγοί είναι συνήθως και καλοί αγωγοί της θερμότητας. Η αγωγιμότητα είναι ένας σημαντικός παράγοντας στην ανάφλεξη των στερεών επιφανειών και στην αντίσταση σε πυρκαγιά (πυραντίσταση) των δομικών μελών. Για τον υπολογισμό μεταφοράς θερμότητας στα στερεά υλικά απαιτούνται συγκεκριμένες ιδιότητες των υλικών. Αυτές είναι, η πυκνότητα ρ , η ειδική θερμότητα C_p και η θερμική αγωγιμότητα k .

Η ειδική θερμότητα C_p είναι η θερμότητα που απαιτείται, για να αυξηθεί η θερμοκρασία της μοναδιαίας μάζας κατά 1 βαθμό σε (J/kgK). Η θερμική αγωγιμότητα k αντιπροσωπεύει το ρυθμό της θερμότητας που μεταφέρεται μέσω μοναδιαίου πάχους του υλικού ανά μονάδα θερμοκρασιακής διαφοράς σε (W/mk). Η πυκνότητα δεν μεταβάλλεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αντιθέτως, η θερμική αγωγιμότητα και η ειδική θερμότητα μεταβάλλονται με τη θερμοκρασία αλλά σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να θεωρηθούν σταθερές.

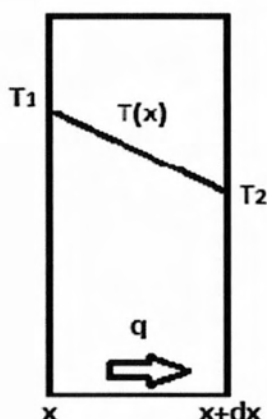
Η μεταφορά θερμότητας στα στερεά μπορεί να είναι σταθερής κατάστασης μεταφορά θερμότητας (steady state heat flow), ή μεταβατικής κατάστασης μεταφορά θερμότητας (transient heat flow) ανάλογα με την ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει θερμότητα [9], [10].



- Σταθερής κατάστασης μεταφορά θερμότητας:

Η βασική εξίσωση για μονοδιάστατη σταθερή κατάσταση μεταφοράς θερμότητας (steady state condition) σε ένα στερεό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2.1.1. με αγωγιμότητα k βασίζεται στο Νόμο του Fourier και είναι :

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.2.1.1)$$



Σχήμα 1.2.1.1. : Αγωγή θερμότητας σε επίπεδο τοίχωμα

όπου q είναι η ροή θερμότητας κατά μήκος του πάχους του υλικού μετρημένη σε (W/m^2), k είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού σε (W/mk), dT είναι η θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος ενός απειροελάχιστου πάχους dx σε ($^{\circ}K$) και dx είναι το απειροελάχιστο πάχος του υλικού στη διεύθυνση της θερμικής ροής. Το αρνητικό πρόσημο είναι συνέπεια του γεγονότος ότι η θερμότητα μεταδίδεται από υψηλές σε χαμηλότερες περιοχές θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση σταθερής κατάστασης η ικανότητα αποθήκευσης θερμότητας του υλικού δεν λαμβάνεται υπόψη επειδή είναι ασήμαντη. Η μεταβολή της θερμοκρασίας μεταξύ δύο σημείων εξαρτάται μόνο από τη μεταξύ τους απόσταση και τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού.

- Μεταβατικής κατάστασης μεταφοράς θερμότητας:

Στη μεταβατική κατάσταση μεταφοράς θερμότητας (transient heat flow), θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται η ποσότητα θερμότητας που αποθηκεύεται στο υλικό. Δηλαδή η μεταβολή της θερμοκρασίας σε ένα υλικό δεν εξαρτάται μόνο από την απόσταση μεταξύ δύο σημείων της μάζας τους και τη θερμική αγωγιμότητα αλλά και από την ικανότητα του υλικού να αποθηκεύει θερμότητα. Για μονοδιάστατη θερμική ροή στο στερεό δίνεται η σχέση :

$$k \frac{d^2T}{dx^2} = p c \frac{dT}{dt} \quad (1.2.1.2)$$

όπου p είναι η πυκνότητα και c η ειδική θερμότητα. Η μεταφορά θερμότητας μέσα στο υλικό εξαρτάται από τις ιδιότητες του υλικού που αναφέρθηκαν αλλά και από τις



επιφανειακές θερμοκρασίες του δομικού στοιχείου. Οι επιφανειακές θερμοκρασίες είναι άγνωστες και η μεταβολή τους εξαρτάται από τον τρόπο που ανταλλάσσεται η θερμότητα με το περιβάλλον [9], [10], [11].

1.2.2 Συναγωγή (convection)

Η συναγωγή αναφέρεται στη μεταφορά θερμότητας στην επιφάνεια αλληλεπίδρασης μεταξύ ενός στερεού και ενός ρευστού λόγω της κίνησης του ρευστού, αερίου ή υγρού, πάνω σε αυτή την επιφάνεια. Η κίνηση αυτή του ρευστού μπορεί να οφείλεται σε μια εξωτερική δύναμη και τότε η μεταγωγή ονομάζεται εξαναγκασμένη μεταγωγή. Από την άλλη πλευρά, όταν η κίνηση του ρευστού στην επιφάνεια του στερεού οφείλεται σε θερμοκρασιακή διαφορά, ονομάζεται φυσική μεταγωγή.

Οι υπολογισμοί για τη μεταφορά θερμότητας με συναγωγή περιλαμβάνουν τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ της επιφάνειας ενός στερεού και ενός ρευστού που περιβάλλει το στερεό και έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες. Ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ταχύτητα του ρευστού στην επιφάνεια. Η θερμική ροή δίνεται από τη σχέση:

$$q = h_c \Delta T \quad (1.2.2.1)$$

όπου h_c είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή (convective heat transfer coefficient) σε (W/m^2K) και ΔT η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ της επιφάνειας του στερεού και του ρευστού ($^{\circ}C$ ή $^{\circ}K$). Η τιμή του συντελεστή h_c εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η γεωμετρία της επιφάνειας, η φύση της ροής και το πάχος του συνοριακού στρώματος. Η εξίσωση (1.2.2.1) προτάθηκε από τον Isaac Newton και είναι γνωστή ως νόμος ψύξης του Newton [10], [12].

1.2.3 Ακτινοβολία (radiation)

Η ακτινοβολία εμφανίζεται σε όλα τα σώματα και οφείλεται στη συνεχή εκπομπή ενέργειας λόγω της θερμοκρασίας τους. Η ακτινοβολία είναι η ανταλλαγή ενέργειας με ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία μπορούν να απορροφώνται, να αντανακλώνται ή να μεταφέρονται σε μια επιφάνεια. Η ακτινοβολία είναι πολύ σημαντική στην περίπτωση της φωτιάς, για το λόγο αυτό την συναντάμε συχνά σε προβλήματα πολιτικού μηχανικού καθώς είναι ο βασικός μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας από τις φλόγες στις καύσιμες επιφάνειες, από τον καπνό στα αντικείμενα του κτιρίου και από ένα κτίριο σε ένα άλλο γειτονικό. Η ροή θερμότητας από την επιφάνεια εκπομπής ενέργειας σε μία επιφάνεια που λαμβάνει ενέργεια δίνεται από τη σχέση :

$$q = \frac{Q}{A} = \varphi \varepsilon_{thr} \sigma_{SB} (T_e^4 - T_r^4) \quad (1.2.3.1)$$

όπου φ ο συντελεστής διαμόρφωσης (configuration factor ή view factor) είναι ένα μέτρο, του κατά πόσο η επιφάνεια εκπομπής είναι ορατή από τη λαμβάνουσα επιφάνεια



και δεν μπορεί να πάρει τιμή μεγαλύτερη από 1. Η τιμή του συντελεστή διαμόρφωσης είναι ίση με 1 όταν, για παράδειγμα σε περίπτωση πυρκαγιάς, η φωτιά βρίσκεται σε επαφή με το δομικό στοιχείο. T_e η απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας εκπομπής και T_r η απόλυτη θερμοκρασία της λαμβάνουσας επιφάνειας, σ_{SB} είναι η σταθερά Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/ m}^2\text{K}^4$), ε_{thr} είναι ο συντελεστής εκπομπής (resultant emissivity) που δείχνει την αποδοτικότητα της επιφάνειας εκπομπής και δίνεται από τη σχέση :

$$\varepsilon_{thr} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{A_e}{A_r} \left(\frac{1}{\varepsilon_r} - 1 \right)} \quad (1.2.3.2)$$

όπου ε_e είναι η ικανότητα εκπομπής της επιφάνειας που εκπέμπει και ε_r η ικανότητα εκπομπής της λαμβάνουσας επιφάνειας, ενώ A_e και A_r οι επιφάνειες εκπομπής και απορρόφησης αντίστοιχα. Οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι από 0 έως 1 [11],[12].

1.3 Καθορισμός Όρων και Εννοιών

Για την ορθή περιγραφή και μελέτη του φαινομένου της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής μεταλλικών τραχειών επιφανειών κρίθηκε απαραίτητη η χρήση ενός συνόλου φυσικών και μαθηματικών σχέσεων. Στη συνέχεια ακολουθεί μια σύντομη επεξήγηση ορισμένων εκ των βασικότερων όρων και εννοιών που θα φανούν ιδιαίτερος χρήσιμα στην κατανόηση του αντικειμένου της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.3.1 Επιφάνεια επαφής

Τα μέταλλα από τα οποία κατασκευάζονται συνήθως οι επαφές έχουν, για λόγους διευκόλυνσης της διάβασης της θερμότητας, μεγάλη θερμική αγωγιμότητα. Για το λόγο αυτό η σκληρότητα των μετάλλων αυτών δεν είναι μεγάλη, και υπό την επίδραση των δυνάμεων σύσφιξης παραμορφώνονται ελαστικά και πλαστικά στις περιοχές που εφάπτονται υπό την επίδραση της δύναμης σύσφιξης. Αποτέλεσμα των παραμορφώσεων αυτών είναι η δημιουργία ορισμένων περιοχών πάνω στο σύνδεσμο, οι οποίες φέρουν το φορτίο σύσφιξης της επαφής. Το σύνολο των περιοχών αυτών δίνει την επιφάνεια σύσφιξης, A_B . Η κατανομή των παραπάνω περιοχών είναι στατιστική και εξαρτάται κυρίως από το είδος των υλικών και την τραχύτητα των επιφανειών.

Ως πραγματική επιφάνεια επαφής, A_C , εννοούμε την επιφάνεια μέσω της οποίας γίνεται τελικά η διέλευση της θερμότητας από το ένα μέρος της επαφής στο άλλο. Η επιφάνεια αυτή είναι, στην περίπτωση που υπάρχουν ξένες επικαθίσεις στις επαφές (κυρίως οξειδία, μετάλλων και σκόνη), μικρότερη από την A_B . Όταν παρατηρεί κανείς δυο μεταλλικές επιφάνειες σε επαφή νομίζει ότι τα δύο μέρη της εφάπτονται σε μία πολύ ευρύτερη επιφάνεια από το σύνολο των πραγματικών περιοχών επαφής που προαναφέρθηκαν. Αυτή η μακροσκοπικά παρατηρούμενη επιφάνεια ονομάζεται φαινόμενη επιφάνεια επαφής, A_a και είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από το σύνολο των



επί μέρους επιφανειών πραγματικής επαφής, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να άγουν την θερμότητα. Γενικά ισχύει : $A_a > A_b > A_c$ [13].

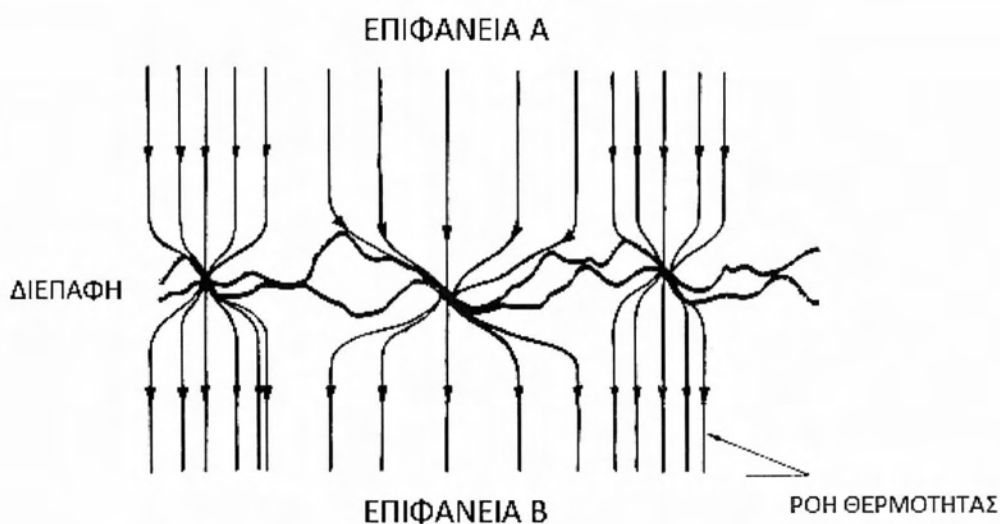
1.3.2 Φορτίο επαφής

Η δύναμη η οποία κρατάει τα μέρη της επαφής συνδεδεμένα είναι το μηχανικό φορτίο ή απλά το φορτίο, P . Αν θεωρητικώς τα μέρη της επαφής ήταν απεριόριστως σκληρά, τότε καμία δύναμη δε θα μπορούσε να τα φέρει σε επαφή μεταξύ τους σε περισσότερα από τρία σημεία. Εφόσον όμως, τα πραγματικά υλικά που χρησιμοποιούνται στις επαφές μπορούν να παραμορφωθούν, τα σημεία μεγεθύνονται σε μικρές περιοχές, ενώ ταυτόχρονα νέα σημεία επαφής μπορεί να εμφανιστούν. Το σύνολο των περιοχών ή των σημείων αυτών είναι η περιοχή που φέρει το φορτίο, A_b , πάνω στην οποία η πίεση είναι πεπερασμένη [13].

1.3.3 Αντίσταση επαφής και αντίσταση στένωσης

Η έκφραση «αντίσταση επαφής» χρησιμοποιείται συχνά. Αυτός ο όρος επινοήθηκε σε μία εποχή όταν υπήρχε η πεποίθηση ότι η μεταλλική επιφάνεια της επαφής, ευθυνόταν για την παρατηρούμενη αντίσταση. Στην πραγματικότητα, αυτό που ορίζεται ως αντίσταση επαφής, είναι η αντίσταση στένωσης, κάτι το οποίο είναι συνέπεια του περιορισμού της θερμότητας μέσα από μικρά αγωγή σημεία. Φυσικά, η στένωση διευρύνεται ως όρος και στα δύο μέρη της επαφής.

Όλες οι στερεές επιφάνειες είναι τραχιές σε μικροσκοπική κλίμακα. Η επιφανειακή αυτή μικρο-τραχύτητα αποτελείται από κορυφές και κοιλάδες των οποίων το σχήμα, οι διακυμάνσεις σε ύψος και τα λοιπά γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τη διαδικασία διαμόρφωσης της επιφάνειας. Γι' αυτό και η επαφή μεταξύ δύο μηχανικών μελών συμβαίνει σε διακριτά σημεία τα οποία παράγονται από τη μηχανική επαφή των εξογκωμάτων των δύο επιφανειών, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.3.3.1. Επομένως, για όλα τα στερεά υλικά, η περιοχή της πραγματικής επαφής είναι ένα μικρό μόνο κλάσμα της ονομαστικής περιοχής επαφής, για ένα ευρύ φάσμα φορτίων. Η μέθοδος παραμόρφωσης των εξογκωμάτων της επαφής είναι είτε ελαστική είτε πλαστική ή μίγμα πλαστικής-ελαστικής ανάλογα με τις τοπικές μηχανικές δυνάμεις που ασκούνται. Γενικότερα, η διασύνδεση γίνεται θερμικά αγωγή μόνο όταν παράγονται μέταλλο προς μέταλλο σημεία επαφής, όπου δεν υπάρχουν κάποια οξειδία ή άλλα μονωτικά στρώματα στις επιφανειακές ανωμαλίες. Σε μία περίπτωση σύζευξης μεταλλικών επιφανειών, η περιοχή αυτή της θερμικής επαφής είναι, επομένως, μικρότερη από την περιοχή πραγματικής μηχανικής επαφής.



Σχήμα 1.3.3.1 : Σχηματική απεικόνιση της ροής θερμότητας σε μια διεπαφή.

Σε μία θερμική σύζευξη, οι γραμμές της ροής θερμότητας στρεβλώνονται όσο πλησιάζουν στη διασύνδεση της επαφής και οι γραμμές ροής συσσωρεύονται για να περάσουν μέσα από τα διακριτά σημεία επαφής όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η στένωση των θερμικών γραμμών ροής στα συγκεκριμένα αυτά σημεία μειώνει την επιφάνεια και την ποσότητα του υλικού που πραγματικά άγει και ως λογικό επακόλουθο αυξάνει την θερμική αντίσταση. Αυτή η αύξηση της αντίστασης ορίζεται ως αντίσταση στένωσης της διασύνδεσης. Η συνολική αντίσταση διασύνδεσης προκαλείται από τη στένωση και από την αντίσταση των τυχόν στρωμάτων ρύπων ή ενδιάμεσου υλικού που άγει την θερμότητα και καθορίζει την αντίσταση επαφής της σύνδεσης [14].

1.4 Περιγραφή & Ανάλυση Θερμικού Προσομοιώματος

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας που λαμβάνει χώρα κατά την επαφή δυο μεταλλικών τραχειών επιφανειών. Συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στις σχέσεις που διέπουν το φαινόμενο της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής και παρουσιάζονται οι προδιαγραφές που χαρακτηρίζουν το θερμικό μας μοντέλο. Στο σημείο αυτό όμως είναι χρήσιμο να επισημάνουμε, ότι στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν είναι η μικροσκοπική και αναλυτική μελέτη της διάδοσης της θερμότητας αλλά η συσχέτιση της τραχύτητας των μεταλλικών επιφανειών με το φαινόμενο αυτό.



1.4.1 Γενικά

Όταν δυο τραχιές στερεές επιφάνειες, οι οποίες είναι παράλληλες και επίπεδες, έρχονται σε επαφή, στην πραγματικότητα μόνο ένας περιορισμένος αριθμός διακριτών σημείων εφάπτονται μεταξύ τους, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4.1.1 που ακολουθεί. Ακόμη και στην περίπτωση επιβολής σχετικής υψηλής πίεσης, της τάξεως των 10MPa, η πραγματική περιοχή σύνδεσης θα είναι μόνο το 1-2% της φαινομενικής αρχικής περιοχής επαφής. Δεδομένου επίσης ότι οι γραμμές θερμικής ροής περιορίζονται στα διαστήματα, στα οποία ενώνονται οι επιφάνειες των σωμάτων, υπάρχει μια πρόσθετη αντίσταση στη μεταφορά θερμότητας στα σημεία επαφής. Αυτό εκδηλώνεται ως μια ξαφνική θερμοκρασιακή πτώση στην διεπιφάνεια.

Κατά τη μεταφορά θερμότητας λόγω επαφής δυο μεταλλικών επιφανειών μπορεί να θεωρηθεί ότι διεξάγονται τα ακόλουθα:

- αγωγιμότητα μέσω των πραγματικών σημείων επαφής
- αγωγιμότητα μέσω του ενδιάμεσου μέσου, όπως λόγου χάρη του αέρα
- ακτινοβολία

Στην περίπτωση που το πάχος της διεπιφάνειας είναι γενικά της τάξεως του 1 χιλιοστού θεωρείται πολύ μικρό για να συσταθούν ρεύματα μεταφοράς θερμότητας. Για το λόγο αυτό η ακτινοβολία μπορεί συνήθως να παραλείπεται, αυτό δεν συμβαίνει όμως εάν οι θερμοκρασίες στα σημεία επαφής ξεπερνούν κατά πολύ τους 300°C ή στην περίπτωση που η θερμοκρασιακή πτώση σε όλη την διεπιφάνεια είναι πολύ μεγάλη. Αν η μεταφορά θερμότητας από ακτινοβολία είναι σημαντική ή όχι εξαρτάται, επομένως, από την αντίσταση επαφής. Έτσι είναι πολλές οι φορές, όπως και στην παρούσα εργασία, που μπορεί να λαμβάνεται υπόψιν μόνο η θερμική αγωγιμότητα που πραγματοποιείται στα σημεία επαφής. Ωστόσο, η διαθέσιμη έκταση για την ροή θερμότητας μέσω των ενδιάμεσων οπών (σημεία των επιφανειών που δεν ενώνονται κατά την επαφή των σωμάτων) είναι συχνά 2 με 4 φορές μεγαλύτερη από την πραγματική επιφάνεια επαφής. Ως εκ τούτου, στις περισσότερες των περιπτώσεων η μεταφορά της θερμότητας που πραγματοποιείται στα διαστήματα αυτά δεν μπορεί να αγνοηθεί. Ειδικά αν το στερεό υλικό παρουσιάζει μικρότερη θερμική αγωγιμότητα από το ενδιάμεσο υλικό των μη εφαπτόμενων διαστημάτων [15]. Παρ'όλα αυτά οι αναλύσεις μας λαμβάνουν χώρα στο κενό, επομένως μας δίνεται η δυνατότητα να αγνοήσουμε τη θερμική ροή στα διαστήματα αυτά.



Σχήμα 1.4.1.1 : Σχηματικό διάγραμμα μιας επαφής.

1.4.2 Ορισμός θερμικής αγωγιμότητας:

Η θερμική αγωγιμότητα ορίζεται ως εξής:

$$h = \frac{Q/A}{\Delta T} \quad (1.4.2.1)$$

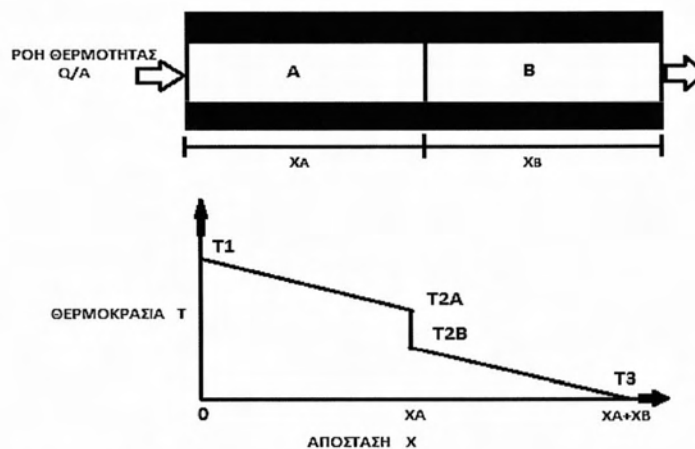
όπου Q/A είναι η σταθερή ροή θερμότητας με βάση την επιφάνεια επαφής και ΔT η θερμοκρασιακή πτώση στην διεπιφάνεια (Σχήμα 1.4.2.1) [7], [16].

Ενώ η θερμική αντίσταση επαφής ορίζεται σαν το λόγο της θερμοκρασιακής πτώσης στη διεπιφάνεια προς τον ρυθμό ροή θερμότητας. Έτσι έχουμε :

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (1.4.2.2)$$

Προκύπτει, ως εκ τούτου, η παρακάτω σχέση ανάμεσα στη θερμική αντίσταση επαφής και την θερμική αγωγιμότητα :

$$R = \frac{1}{hA} \quad (1.4.2.3)$$



Σχήμα 1.4.2.1: Θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής δυο τραχιών επιφανειών & διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής.



Όπως παρατηρείται στο Σχήμα 1.4.2.1 εξαιτίας της τραχύτητας των σωμάτων και ως εκ τούτου της ατελής επαφής τους, παρουσιάζεται απότομη θερμοκρασιακή πτώση στην διεπιφάνεια τους [16].

Γενικά, όταν δυο μεταλλικές επιφάνειες έρχονται σε επαφή μπορεί να ορισθεί η θερμική αγωγιμότητα με τη βοήθεια δυο χαρακτηριστικών μηκών, a και b , που περιγράφουν ένα σημείο επαφής στη διεπιφάνεια τους. Προκειμένου να προσδιοριστούν τα προαναφερθέντα αυτά μήκη, βασιζόμενοι σε σχετική δημοσίευση του τμήματος μηχανολόγων μηχανικών του πανεπιστήμιου της Ιορδανίας [6], θεωρείται ένα ζεύγος εφαπτομένων σωλήνων μέσω των οποίων ρέει θερμότητα. Οι σωλήνες αυτοί είναι κλειστού κυλινδρικού σχήματος με αδιαβατικά τοιχώματα, έτσι ώστε η θερμότητα να ρέει σε μια ευθύγραμμη δέσμη σωλήνων χωρίς ανταλλαγή ενέργειας με το εξωτερικό περιβάλλον [19]. Κάθε σωλήνας χαρακτηρίζεται από ένα ισοδύναμο μήκος b όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.4.2.2 τέτοιο ώστε $b > a$, όπου a είναι το ισοδύναμο μήκος του σημείου επαφής τους. Επομένως, εξαιτίας αυτού η εγκάρσια διαθέσιμη περιοχή για την ροή θερμότητας περιορίζεται στο σημείο επαφής τους, δημιουργώντας έτσι τη θερμική αντίσταση στένωσης (§1.3.3). Η θερμική αντίσταση στένωσης ξεχωριστά για κάθε πτυχή (ή σημείο επαφής) για ένα ζευγάρι σωλήνων δίνεται από τον την σχέση [20]:

$$R = \frac{\psi}{k\sqrt{A_i}} \quad (1.4.2.4)$$

όπου k είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ψ είναι ο μικροσκοπικός συντελεστής στένωσης και A_i είναι το εμβαδόν μιας εκ των πτυχών.

Η συνολική αντίσταση στη ροή θερμότητας από τον ένα σωλήνα στον άλλον μέσω του σημείου επαφής καθορίζεται από το άθροισμα δυο ξεχωριστών αντιστάσεων που περιλαμβάνουν ίδια παράμετρο στένωσης και ορίζεται ως εξής:

$$R_{oi} = \frac{2\psi_i}{k_m\sqrt{A_i}} \quad (1.4.2.5)$$

$$k_m = \frac{2k_1k_2}{(k_1+k_2)} \quad (1.4.2.6)$$

όπου k_1 και k_2 είναι οι συντελεστές θερμικής αγωγιμότητας των δυο σωμάτων και k_m είναι ο συνολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας.

Η συνολική θερμική αντίσταση θα είναι το άθροισμα των αντιστάσεων όλων των σημείων επαφής:

$$R = \frac{\psi}{\sum_{i=1}^N \frac{\sqrt{A_i}}{\beta_i}} \quad (1.4.2.7)$$

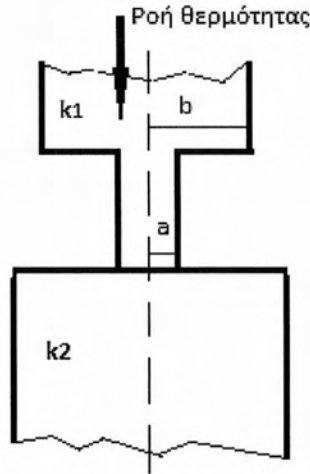
όπου R είναι η συνολική αντίσταση, N είναι ο αριθμός των σημείων επαφής και β_i είναι ο συντελεστής κατανομής ή αριθμός Biot. Μια σχετικά ακριβή προσέγγιση για το ψ δίνεται από τον Yovanovich και Antonetti (1988) [16] :



$$\psi = 0,475 - 0,62\varepsilon + 0,13\varepsilon^3 \quad (1.4.2.8)$$

$$\varepsilon = \frac{a}{b} \quad (1.4.2.9)$$

Ενώ τα μήκη a και b απεικονίζονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 1.4.3.1: Σχηματική απεικόνιση της θερμικής ροής μέσω του συστήματος των συζευγμένων σωλήνων.

Για πολύ μικρές επαφές, $\varepsilon < 0.1$, παίρνουμε $\beta_i = 1$ και στην περίπτωση που θεωρήσουμε ότι όλα τα σημεία επαφής έχουν το ίδιο μέγεθος ($A_1 = A_2 = \dots = A_n$), για ομοιόμορφη κατανομή, η εξίσωση (1.4.2.7) παίρνει την πιο απλή της μορφή :

$$R = \frac{\psi}{kN\sqrt{A}} \quad (1.4.2.10)$$

Έτσι ώστε η αγωγιμότητα για τα δυο σώματά σε επαφή να είναι :

$$h_c = \frac{1}{RA_\alpha} = \frac{k_m N \sqrt{A}}{2\psi A_\alpha} \quad (1.4.2.11)$$

όπου A_α φαινόμενη επιφάνεια επαφής .

1.4.3 Θερμικό προσομοίωμα

Στην προσπάθεια μας να ορίσουμε, όσο το δυνατόν ορθότερα, τη θερμική αγωγιμότητα στα σημεία επαφής της διεπιφάνειας των μεταλλικών στέρεων σωμάτων έγινε ο διαχωρισμός του προβλήματος μας σε μηχανικό και θερμικό επίπεδο. Ο διαχωρισμός αυτός αποτέλεσε τη βάση ώστε να ορίσουμε ακριβέστερα τις σχέσεις που περιγράφουν το θερμικό μοντέλο του προβλήματος μας.

Σε θερμικό επίπεδο για την οργάνωση του θερμικού μας προσομοιώματος βασιστήκαμε στις ακόλουθες προδιαγραφές:

1. Ύπαρξη μόνο επιφανειακής μικροσκοπικής τραχύτητας. Αυτό υποδηλώνει ότι αγνοούνται μακροσκοπικές ανωμαλίες όπως κυματισμοί ή έλλειψη επιπεδότητας. Ουσιαστικά το ενδιαφέρον μας εστιάζεται, κυρίως στην τραχύτητα που εμφανίζει η διεπιφάνεια των μεταλλικών σωμάτων [17].



2. Μεταφορά θερμότητας μόνο με αγωγιμότητα λόγω επαφής. Για το λόγο αυτό δεν λαμβάνεται υπόψη η μετάδοση της θερμότητας μέσω ακτινοβολίας. Βασιζόμενοι σε πειραματικούς υπολογισμούς έχει αποδειχθεί ότι για μεταλλικά στερεά σώματα που βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη του ενός εκατοστού και θερμοκρασία διεπιφάνειας πάνω από 1.000°K η συνεισφορά του μηχανισμού της ακτινοβολίας στη μεταφορά της θερμότητας είναι λιγότερο από 2% από αυτή της θερμικής αγωγιμότητας μέσω επαφής [18].
3. Διεκπεραίωση των πειραματικών διεργασιών σε περιβάλλον κενού. Ως εκ τούτου στην διεπιφάνεια δεν παρεμβάλλεται κάποιο υλικό ή ρευστό και αυτό αποτελεί έναν ακόμα λόγο για τον οποίο η μεταφορά θερμότητας πραγματοποιείται μόνο μέσω αγωγιμότητας στα σημεία επαφής.
4. Χρήση καθαρών επιφανειών. Δεν υπάρχουν προσμείξεις ή επιρροές από άλλα οξείδια ή επιπρόσθετα υλικά.
5. Επιλογή ισοτροπικών μεταλλικών επιφανειών. Αυτό υποδηλώνει ότι θερμική αγωγιμότητα επαφής και καθώς και άλλα φυσικά φαινόμενα όπως και η ροή θερμότητας είναι σταθερά.

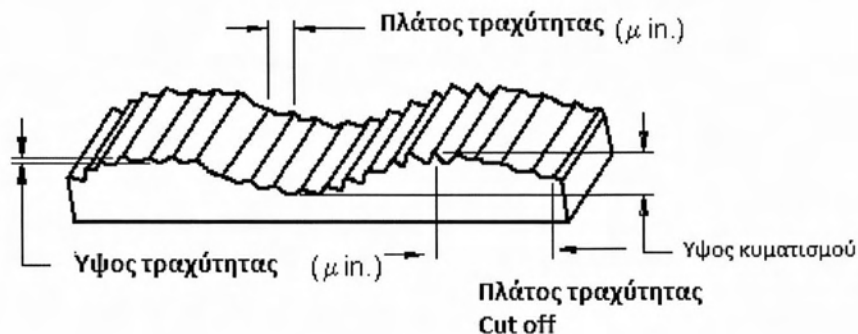
2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗ ΒΟΗΘΕΙΑ ΤΗΣ FRACTAL ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Στο κεφάλαιο αυτό της εργασίας παρουσιάζεται το μαθηματικό εργαλείο στο οποίο βασιστήκαμε για την προσομοίωση της τραχύτητας των μεταλλικών διεπιφανειών που μελετήθηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, στην Ενότητα 2.1 παρατίθεται συνοπτικά ο ορισμός της τραχύτητας, ενώ στις Ενότητες 2.2 έως και 2.4 παρουσιάζεται η fractal γεωμετρία, που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της τραχύτητας των διεπιφανειών.

2.1 Ορισμός Τραχύτητας

Η τραχύτητα επιφάνειας υπολογίζεται από τις κατακόρυφες αποκλίσεις της πραγματικής επιφάνειας από την ιδανική μορφή της. Εάν αυτές οι αποκλίσεις είναι μεγάλες, η επιφάνεια είναι τραχιά. Αντίστοιχα αν είναι μικρές η επιφάνεια είναι ομαλή. Οι βασικές παράμετροι που περιγράφουν πλήρως την τραχύτητα είναι οι ακόλουθες:

- Ύψος τραχύτητας
Είναι το ύψος των ανωμαλιών σε σχέση με μία γραμμή αναφοράς. Μετριέται συνήθως σε χιλιοστά. Είναι επίσης γνωστή και ως το ύψος της ανομοιομορφίας.
- Πλάτος τραχύτητας
Το πλάτος τραχύτητας είναι η απόσταση παράλληλα προς την ονομαστική επιφάνεια μεταξύ διαδοχικών κορυφών ή κορυφογραμμών που αποτελούν το κυρίαρχο μοτίβο τραχύτητας. Μετριέται και αυτό σε χιλιοστά.
- Πλάτος τραχύτητας Cut off
Το Πλάτος τραχύτητας Cut off είναι η μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των αντίστοιχων επιφανειακών ανωμαλιών που συμπεριλαμβάνονται στη μέτρηση του μέσου ύψους τραχύτητας. Θα πρέπει πάντα να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος τραχύτητας, προκειμένου να επιτευχθεί το συνολικό ύψος τραχύτητας [21].



Σχήμα 2.1.1 : Σχηματική απεικόνιση των βασικών παραμέτρων της τραχύτητας



Η Τραχύτητα διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό τού πώς ένα πραγματικό αντικείμενο θα αλληλοεπιδράσει με το περιβάλλον του. Επιπλέον, όπως παρουσιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, η τραχύτητα των διεπιφανειών επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την επαφή ανάμεσα σε δυο στερεά σώματα. Ως εκ τούτου, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή και εφαρμογή του κατάλληλου μοντέλου προσομοίωσης της τραχύτητας, προκειμένου τα αποτελέσματα που απορρέουν από τις αναλύσεις να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα.

2.2 Γεωμετρία Fractal

Με τον διεθνή όρο fractal, (μορφόκλασμα ή μορφοκλασματικό σύνολο στα ελληνικά) στα Μαθηματικά, τη Φυσική αλλά και σε πολλές επιστήμες ονομάζεται ένα γεωμετρικό σχήμα που επαναλαμβάνεται αυτούσιο σε άπειρο βαθμό μεγέθυνσης και έτσι συχνά αναφέρεται σαν «απείρως περίπλοκο». Το fractal παρουσιάζεται ως «μαγική εικόνα» που όσες φορές και να μεγεθυνθεί οποιοδήποτε τμήμα του θα συνεχίζει να παρουσιάζει ένα εξίσου περίπλοκο σχέδιο με μερική ή ολική επανάληψη του αρχικού. Χαρακτηριστικό επομένως, των fractals είναι η λεγόμενη αυτό-ομοιότητα (self-similarity) σε κάποιες δομές τους, η οποία εμφανίζεται σε διαφορετικά επίπεδα μεγέθυνσης. Ο όρος προτάθηκε από τον Benoît Mandelbrot το 1975 [22] και προέρχεται από τη λατινική λέξη «Fractus» που σημαίνει «σπασμένος», «θρυμματισμένος», «κατακερματισμένος». Ήδη από τα τέλη της δεκαετίας του 1960, αλλά κυρίως την επόμενη δεκαετία, ο Mandelbrot φρόντισε να προσφέρει έναν αρκετά ευρύ και μαθηματικά ακριβή ορισμό των fractal δομών, καθώς και των ιδιαίτερων ιδιοτήτων τους (αυτό-ομοιότητα, κλασματική διάσταση, μικρή επιφάνεια fractal αλλά άπειρη σε μήκος περίμετρος). Κίνητρο για την ενασχόληση του με την γεωμετρία fractal αποτέλεσε η διαπίστωση ότι το μήκος της περιμέτρου ενός νησιού δεν συγκλίνει, αλλά αντιθέτως αυξάνει μονοτονικά με την μείωση της μονάδας μέτρησης. Συγκεκριμένα, διαπίστωσε ότι χρησιμοποιώντας ακρίβεια ενός μέτρου για την μέτρηση της περιμέτρου, το μήκος που πρόκυπτε δεν ανταποκρινόταν στο πραγματικό καθώς δεν είχαν συμπεριληφθεί οι κοιλότητες που είναι μικρότερες του ενός μέτρου [23]. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, ακόμα και η μέτρηση με ακρίβεια ενός εκατοστού οδηγούσε σε περίμετρο μικρότερη της πραγματικής. Προκειμένου, επομένως, να μετρηθεί με ακρίβεια το μήκος της περιμέτρου ενός νησιού θα πρέπει να απευθυνθούμε στη χρήση μιας απειροστά μικρής μονάδας μέτρησης. Ωστόσο, παρατηρείται ότι η μονάδα μέτρησης και το μήκος της περιμέτρου του νησιού είναι αντιστρόφως κινούμενα μεγέθη. Απειροστά μικρή μονάδα μέτρησης, επομένως, οδηγεί σε άπειρο μήκος περιμέτρου. Η επιφάνεια όμως του νησιού είναι ένα πεπερασμένο μέγεθος, γεγονός που αναιρεί τα όσα προέκυψαν. Τα παράδοξα αυτό, κλήθηκε να αντιμετωπίσει η fractal γεωμετρία, καθώς η κλασική Ευκλείδεια Γεωμετρία αδυνατεί να εξηγήσει.



Στη βάση της Ευκλείδειας Γεωμετρίας το μήκος μιας γραμμής δίνεται από τη σχέση :

$$L = \sum_{i=1}^{N(\delta)} \delta^1 \quad (2.2.1)$$

Όπου δ είναι το μήκος του στοιχειώδους τμήματος, το οποίο διαιρεί τη γραμμή και $N(\delta)$ το πλήθος αυτών των τμημάτων. Στην Ευκλείδεια γεωμετρία το μήκος L είναι ανεξάρτητο του δ , για κάθε δ . ακόμα και στην περίπτωση που $\delta \rightarrow 0$, το μήκος παραμένει πεπερασμένο. Ο εκθέτης 1 αντιστοιχεί στη διάσταση της γραμμής, ενώ η γενική έκφραση της Σχέσης (2.2.1) είναι :

$$L = \sum_{i=1}^{N(\delta)} \delta^D \quad (2.2.2)$$

όπου D είναι ένας πραγματικός αριθμός, που παίρνει μη ακέραιες τιμές και αντιπροσωπεύει τη fractal διάσταση μιας καμπύλης, στην περίπτωση που το L είναι ανεξάρτητο του δ καθώς το $\delta \rightarrow 0$.

Ενώ τα στοιχεία της παραδοσιακής Ευκλείδειας Γεωμετρίας (ευθεία, κύκλος, σφαίρα κ.λπ.) δίνουν τη δυνατότητα άμεσης παρατήρησης και επεξεργασίας, τα στοιχεία της Fractal Γεωμετρίας, λόγω της πολυπλοκότητας τους δεν το επιτρέπουν πάντα. Οι βασικές διαφορές των Fractals αντικειμένων από τα απλά σχήματα της Ευκλείδειας Γεωμετρίας εντοπίζονται κυρίως σε δυο παράγοντες:

- 1) Οι αναπαραστάσεις εμφανίζουν την ιδιότητα της αυτομοιότητας. Έτσι, αν κοιτάξουμε ένα μικρό τμήμα ενός Fractal σχήματος θα δούμε ότι είναι όμοιο με ένα μεγαλύτερο τμήμα. Αν μεγεθύνουμε στη συνέχεια το μικρό αυτό τμήμα θα παρατηρήσουμε ότι και αυτό με τη σειρά του περιέχει μικρά όμοια τμήματα με το αρχικό κ.ο.κ.
- 2) Οι Fractals εικόνες είναι ανεξάρτητες από τις αλλαγές της κλίμακας. Ουσιαστικά η διάσταση που χαρακτηρίζει ένα fractal σχηματισμό παραμένει αναλλοίωτη στην όποια αλλαγή κλίμακας υφίσταται, σε αντίθεση με τα μήκη που αλλάζουν μέτρο. Επίσης, αντίθετα με τα Ευκλείδεια σχήματα δεν έχουν ένα χαρακτηριστικό μέγεθος μέτρησης.

Συνοψίζοντας, οι βασικές ιδιότητες ενός συνόλου fractal είναι οι ακόλουθες [24]:

- Λεπτομερή δομή. Παρουσιάζει, δηλαδή λεπτομέρεια σε αυθαίρετα μικρές κλίμακες.
- Έντονη πολυπλοκότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μπορεί να περιγραφεί με την κλασική Ευκλείδεια Γεωμετρία, τόσο τοπικά όσο και ολικά.
- Εμφάνιση κάποιας μορφής αυτομοιότητας, η οποία μπορεί να είναι είτε προσεγγιστική, είτε στατιστική ιδιότητα του συνόλου.
- Διάσταση συνήθως μεγαλύτερη από την τοπολογική διάσταση.



- Ποικιλία στον τρόπο κατασκευής του. Σε πολλές περιπτώσεις προκύπτει με πολύ απλό τρόπο, ενώ ορισμένες φορές κατασκευάζεται μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας που σε κάθε βήμα επαναλαμβάνει τους ίδιους μαθηματικούς μετασχηματισμούς.

2.3 Υπολογισμός Κλασματικής Fractal Διάστασης D

Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη παράγραφο, οι διαστάσεις που περιγράφουν τους fractal σχηματισμούς δεν έχουν τη δυνατότητα να παίρνουν ακέραιες τιμές. Ως εκ τούτου, σε αντίθεσή με τα κλασικά σχήματα της Ευκλείδειας Γεωμετρίας, τα fractal χαρακτηρίζονται από ένα κλασματικό αριθμό διαστάσεων. Η κλασματική αυτή διάσταση, D , εμφανίζει την ιδιότητα να παραμένει αναλλοίωτη σε οποιαδήποτε αλλαγή κλίμακας, γεγονός που την καθιστά πολύ σημαντική στα πλαίσια της μελέτης της γεωμετρίας fractal. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της κλασματικής fractal διάστασης D . Δύο απ' αυτές η μέθοδος Richardson και η μέθοδος box counting παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.3.1 Μέθοδος Richardson

Ο Άγγλος μετεωρολόγος Lewis Fry Richardson (1950) κατάφερε να αναπτύξει μία μέθοδο υπολογισμού της κλασματικής διάστασης [25], η οποία πήρε και το όνομα του. Με την μέθοδο Richardson, προκειμένου να υπολογιστεί η διάσταση μιας καμπύλης f , διαιρούμε την καμπύλη αυτή σε τμήματα μήκους δ , έτσι ώστε το τέλος του πρώτου μήκους να ταυτίζεται με την αρχή του επόμενου. Στη συνέχεια επαναλαμβάνοντας κάθε φορά τη διαδικασία για διαφορετικό μήκος δ , αν ικανοποιείται η σχέση:

$$N(\delta) \sim \delta^{-D} \quad (2.3.1.1)$$

σε ένα διάστημα $\delta^* < \delta < \Delta^*$, όπου $N(\delta)$ είναι ο αριθμός των τμημάτων στα οποία έχει διαιρεθεί η καμπύλη f , τότε η καμπύλη αποτελεί ένα fractal σχηματισμό. Ο εκθέτης D ονομάζεται «διάσταση Richardson» και συμβολίζεται με D_R . Με τη χρήση της μεθόδου αυτής μπορεί, επομένως, να υπολογιστεί το μήκος της καμπύλης f χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη μέτρησης κάθε φορά. Στη συνέχεια σχεδιάζοντας το γράφημα του μήκους της καμπύλης συναρτήσει του δ μπορεί να υπολογιστεί η ζητούμενη διάσταση της.

2.3.2 Μέθοδος Box counting

Μια άλλη μέθοδος υπολογισμού της κλασματικής διάστασης είναι κι η μέθοδος box counting ή αλλιώς μέθοδος του πλέγματος [22]. Η μέθοδος αυτή είναι μια διαδικασία εκτίμησης της κλασματικής fractal διάστασης αντικειμένων και σχηματισμών περίπλοκης μορφής. Ενδείκνυται κυρίως στις περιπτώσεις που δεν είναι εφικτή η εφαρμογή κάποιας αριθμητικής διαδικασίας υπολογισμού, καθώς επίσης και



για τον προσδιορισμό της διάστασης της κλίσης ενός αντικειμένου σύνθετου σχήματος. Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου αρχικά η fractal καμπύλη καλύπτεται από ένα πλέγμα τετραγώνων πλευράς δ_n . Στη συνέχεια το κάθε τετράγωνο του πλέγματος, πλευράς δ_n , υποδιαιρείται σε υποτετράγωνα πλευράς $\delta_{n+1} = \frac{\delta_n}{2}$ και υπολογίζεται το πλήθος των υποτετραγώνων που περιέχουν τμήμα της fractal καμπύλης f . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να ικανοποιείται η Σχέση (2.3.1.1) σε διάστημα $\delta^* < \delta < \Delta^*$ και ο εκθέτης D ονομάζεται «φυσική διάσταση box», συμβολίζεται D_B και υπολογίζεται μέσω των παρακάτω σχέσεων:

$$N(f, \delta) \approx c \times \delta^{-D}, c = \text{σταθ. με } c > 0 \quad (2.3.2.1)$$

$$D \approx \frac{L_n N(f, \delta) - L_n c}{L_n \left(\frac{1}{\delta}\right)} \quad (2.3.2.2)$$

Επειδή ο όρος $\frac{L_n c}{L_n \left(\frac{1}{\delta}\right)} \rightarrow 0$ όταν $\delta \rightarrow 0$ η σχέση παίρνει τη μορφή :

$$D = \frac{L_n(f, \delta)}{L_n \left(\frac{1}{\delta}\right)} \quad (2.3.2.3)$$

Από τη σχέση (2.3.2.3) προκύπτουν εύκολα οι φυσικές διαστάσεις της Ευκλείδειας γεωμετρίας.

2.4 Fractal Συναρτήσεις Παρεμβολής

Είναι γνωστό, με βάση όσα ήδη έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ότι η τραχύτητα των επιφανειών διαδραματίζει σπουδαίο ρόλο στα προβλήματα επαφής στερεών σωμάτων. Πολλές ερευνητικές εργασίες [25],[26],[27], [28], [29], [30], [31], κατέληξαν στο συμπέρασμα πως μια από τις πιο κατάλληλες μορφές προσομοίωσης τραχειών επιφανειών, σε προβλήματα επαφής, είναι η fractal γεωμετρία. Η προσημείωση της τραχύτητας μιας επιφάνειας μέσω της fractal γεωμετρίας, που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο αυτής της εργασίας, βασίστηκε σε μια διαδικασία που εφαρμόστηκε από τον Barnsley (1988), [32].

Με την βοήθεια των fractal συναρτήσεων παρεμβολής δίνεται η δυνατότητα μετάβασης από ένα συγκεκριμένο διακριτό σύνολο σημείων $\{(x_i, y_i), i = 0, 1, 2, \dots, N\}$, σε ένα συνεχές μοντέλο fractal γεωμετρίας. Πιο αναλυτικά, αυτό υλοποιείται μέσω μια συγκεκριμένης διαδικασίας [33], κατά την οποία η προσαρμογή των δεδομένων αυτών γίνεται με τη χρήση συναρτήσεων παρεμβολής τύπου fractal $f: [x_0, x_N] \rightarrow R$ τέτοιες ώστε $f(x_i) = y_i, i = 0, 1, \dots, N$. Εάν C^0 είναι ένα σύνολο συνεχών συναρτήσεων $f: [x_0, x_N] \rightarrow R$, τότε ισχύει η ακολουθία συναρτήσεων $f_{n+1}(x) = (Tf_n)(x)$, με τελεστή $T: C^0 \rightarrow C^0$, ο οποίος ορίζεται από την σχέση:





$$(Tf)(a_i x + e_i) = c_i x + d_i f(x) + g_i \quad (2.4.1)$$

Η ακολουθία των συναρτήσεων $f_{n+1}(x)$ συγκλίνει σε μια καμπύλη f , καθώς το $n \rightarrow \infty$. Ο τελεστής $T: C^0 \rightarrow C^0$ έχει τη συσταλτική ιδιότητα. Αυτό σημαίνει ότι ο τελεστής, T έχει ένα μοναδικό σταθερό σημείο στο C^0 . Συνεπώς υπάρχει μια συνάρτηση $f \in C^0$ τέτοια ώστε :

$$(Tf)(x) = f(x) \quad \forall x \in [x_0, x_N] \quad (2.4.2)$$

Το γράφημα της fractal συνάρτησης παρεμβολής $f: [x_0, x_N] \rightarrow R$ είναι ο μοναδικός ελκυστής ενός επαναληπτικού συστήματος συναρτήσεων $\{R^2; w_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ που προσδιορίζεται από τον μετασχηματισμό :

$$w_i \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} a_i & 0 \\ c_i & d_i \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} e_i \\ g_i \end{Bmatrix}, i = 1, 2, \dots, N \quad (2.4.3)$$

Οι μετασχηματισμοί w_i υπακούουν στους περιορισμούς :

$$w_i \begin{Bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \end{Bmatrix}, w_i \begin{Bmatrix} x_N \\ y_N \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} x_i \\ y_i \end{Bmatrix} \quad (2.4.4)$$

Από τους παραπάνω περιορισμούς προκύπτει ότι υπάρχει μια ελεύθερη παράμετρος σε κάθε μετασχηματισμό w_i που ορίζεται αυθαίρετα. Η παράμετρος d_i είναι αυτή που επιλέγεται ως αυθαίρετη παράμετρος. Κάθε μετασχηματισμός του w_i χαρακτηρίζεται ως «διατμητικός μετασχηματισμός», γεγονός που σημαίνει ότι ο νέος σχηματισμός διατηρεί κατεύθυνση παράλληλη με εκείνη του αρχικού σχηματισμού. Ο λόγος του μετασχηματισμένου μήκους $w_i(L)$ προς το μήκος L ισούται με την ελεύθερη παράμετρο $|d_i|$. Συνεπώς επιλέγοντας το d_i να είναι ελεύθερη παράμετρος αυτόματα προσδιορίζεται η κατακόρυφη κλιμάκωση που παράγεται από το μετασχηματισμό. Προκειμένου ο τελεστής T να διατηρεί την συσταλτική του ιδιότητα και κατά συνέπεια να έχει έναν ελκυστή (σταθερό σημείο), η ελεύθερη παράμετρος d_i θα πρέπει να ικανοποιεί την ακόλουθη ανισότητα:

$$0 \leq d_i < 1 \quad (2.4.5)$$

Από τον συνδυασμό των σχέσεων (2.4.3) και (2.4.4) υπολογίζονται οι υπόλοιπες παράμετροι που δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$a_i = (x_i - x_{i-1}) / (x_N - x_0) \quad (2.4.6)$$

$$c_i = (y_i - y_{i-1}) / (x_N - x_0) - d_i (y_N - y_0) / (x_N - x_0) \quad (2.4.7)$$

$$e_i = (x_N x_{i-1} - x_0 x_i) / (x_N - x_0) \quad (2.4.8)$$

$$g_i = (x_N y_{i-1} - x_0 y_i) / (x_N - x_0) - d_i (x_N y_0 - x_0 y_N) / (x_N - x_0) \quad (2.4.9)$$



Οι συναρτήσεις παρεμβολής τύπου fractal μας δίνουν τη δυνατότητα άμεσου αριθμητικού υπολογισμού της κλασματικής διάστασης D . Με σκοπό να επιτευχθεί αυτό, θεωρούμε ότι η γραφική παράσταση μιας συνάρτησης παρεμβολής τύπου fractal $f: [x_0, x_N] \rightarrow R$, καλύπτεται από τετράγωνα πλευράς δ , όπου $\delta^* < \delta < \Delta^*$. Εάν $N(\delta)$ το πλήθος των τετραγώνων αυτών, τότε θα πρέπει να ικανοποιείται η Σχέση (2.3.1.1) προκειμένου η γραφική αυτή παράσταση να είναι τύπου fractal. Έστω $N_i(\delta)$ το πλήθος των τετραγώνων πλευράς δ που τέμνουν την καμπύλη f στο διάστημα $[x_{i-1}, x_i]$ για $i=1, \dots, N$. Τότε, εξαιτίας της δομής των συναρτήσεων παρεμβολής τύπου fractal ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$N = N_1(\delta) + N_2(\delta) + \dots + N_N(\delta) = \sum_{i=1}^N N_i(\delta) \quad (2.4.10)$$

Έστω τώρα ότι το πλήθος των στηλών των τετραγώνων πλευράς δ που τέμνουν την καμπύλη f συμβολίζεται με $\{c_j(\delta): j = 1, 2, \dots, \mathfrak{N}(\delta)\}$ όπου $\mathfrak{N}(\delta)$ ο αριθμός των στηλών. Υποθέτοντας ότι $|d_i| > a_i$ για $i=1, 2, \dots, N$, ο ελάχιστος αριθμός τετραγώνων που τέμνουν την καμπύλη f αυξάνει συνεχώς καθώς το δ τείνει στο μηδέν. Αν, παραδείγματος χάριν, ο μετασχηματισμός w_i εφαρμοσθεί σε μια στήλη τετραγώνων $c_j(\delta)$, τότε το πλάτος της στήλης θα ισούται με $a_i \delta$ και το ύψος θα ισούται με $|d_i|$ φορές το ύψος της στήλης πριν τον μετασχηματισμό. Έστω $N(c_j(\delta))$ ο αριθμός των τετραγώνων της στήλης $c_j(\delta)$, τότε η μετασχηματισμένη στήλη $w_i(c_j(\delta))$ αποτελείται από περίπου $|d_i| N(c_j(\delta)) / a_i$ τετράγωνα πλευράς $a_i \delta$. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνεισφορά κάθε στήλης $N_i(a_i \delta)$, προκύπτει ο παρακάτω τύπος:

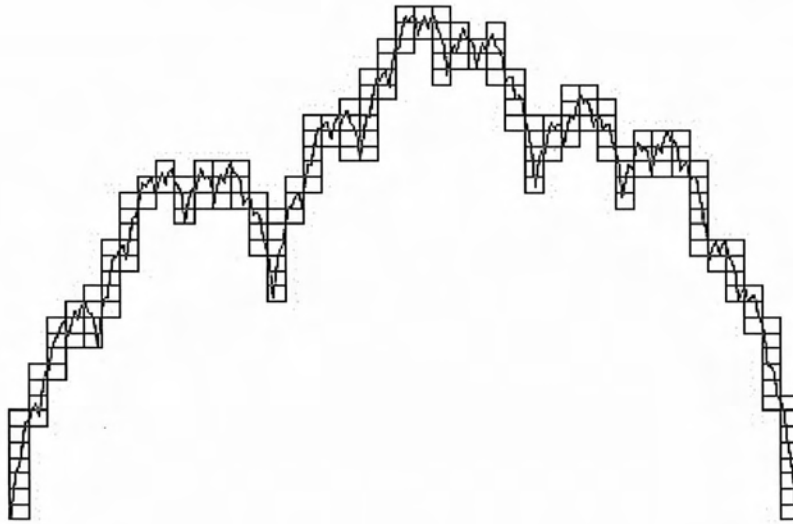
$$N(a_i \delta) \approx \sum_{j=1}^{\mathfrak{N}(\delta)} \frac{|d_i| N(c_j(\delta))}{a_i} = \frac{|d_i|}{a_i} \sum_{j=1}^{\mathfrak{N}(\delta)} N(c_j(\delta)) = \frac{|d_i|}{a_i} N(\delta) \quad (2.4.11)$$

Για δ πολύ μικρό σε σχέση με το διάστημα $[x_0, x_N]$ η σχέση (2.4.11) τροποποιείται ως εξής:

$$N_i(\delta) = \frac{|d_i|}{a_i} N\left(\frac{\delta}{a_i}\right), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.4.12)$$

Με αντικατάσταση της εξίσωσης (2.4.12) στην εξίσωση (2.4.10) προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$N(\delta) = \frac{|d_1|}{a_1} N\left(\frac{\delta}{a_1}\right) + \frac{|d_2|}{a_2} N\left(\frac{\delta}{a_2}\right) + \dots + \frac{|d_N|}{a_N} N\left(\frac{\delta}{a_N}\right) \quad (2.4.13)$$

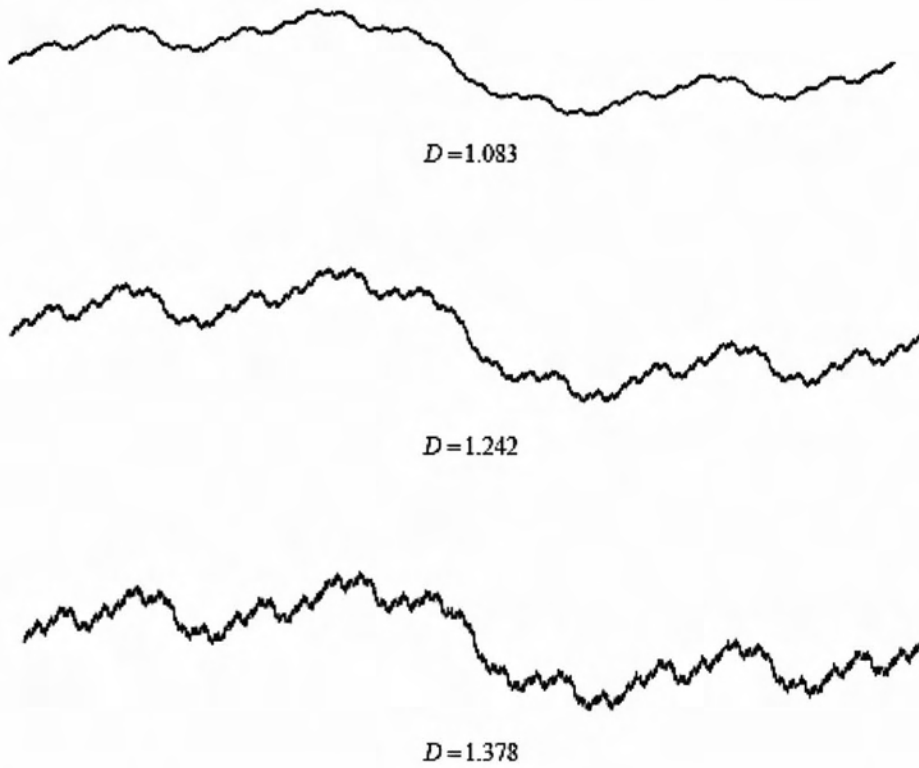


Σχήμα 2.4.1 : Υπολογισμός της fractal διάστασης των συναρτήσεων παρεμβολής τύπου fractal

Τέλος λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση (2.3.1.1) δηλαδή τη βασική σχέση που πρέπει να ικανοποιείται προκειμένου να χαρακτηριστεί ένα σύνολο fractal, $N(\delta) \sim \delta^{-D}$ και επομένως $N(\delta/a_i) \sim \delta^{-D} a_i^D$, η σχέση (2.4.13) παίρνει τη μορφή :

$$\delta^{-D} \approx \sum_{i=1}^N |d_i| a_i^{D-1} \delta^{-D} \leftrightarrow \sum_{i=1}^N |d_i| a_i^{D-1} = 1 \quad (2.4.14)$$

Μέσω της Εξίσωσης (2.4.14) δίνεται η δυνατότητα αριθμητικού υπολογισμού της fractal διάστασης D μιας συνάρτησης παρεμβολής τύπου fractal ($1 < D < 2$), στην περίπτωση που τα σημεία παρεμβολής δε βρίσκονται σε μια ευθεία. Στην αντίθετη περίπτωση στην οποία τα σημεία παρεμβολής βρίσκονται σε μια ευθεία γραμμή, τότε η f που προκύπτει είναι ευθεία. Η διαβάθμιση στις τιμές της διάστασης D μιας fractal συνάρτησης παρεμβολής, που διέρχεται από συγκεκριμένα σημεία, επιτυγχάνεται με κατάλληλη εκλογή των ελεύθερων παραμέτρων d_i . Αυτό γίνεται κατανοητό εάν παρατηρήσουμε το Σχήμα 1.4.2 στο οποίο φαίνονται τα γραφήματα διαφορετικών συναρτήσεων παρεμβολής, που διέρχονται από το ίδιο αρχικό σύνολο σημείων $\{(x_i, y_i), i = 0, 1, 2, 3\}$, έχουν όμως διαφορετικές ελεύθερες παραμέτρους $d_i, i = 1, 2, 3$ και κατά συνέπεια διαφορετική fractal διάσταση D .



Σχήμα 1.4.2 : Γραφήματα fractal συναρτήσεων παρεμβολής με, που διέρχονται από το ίδιο αρχικό σύνολο σημείων.



3^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΤΥΠΟΥ FRACTAL

3.1 Περιγραφή του Δισδιάστατου Αναλυτικού Μοντέλου

Για την προσομοίωση της γεωμετρίας των τριών διεπιφανειών έγινε χρήση συναρτήσεων παρεμβολής τύπου fractal, τα γραφήματα των οποίων παράγονται με τη βοήθεια κατάλληλων αλγορίθμων και προσομοιώνουν με ακρίβεια την τραχύτητα των διεπιφανειών. Έτσι, για τη μελέτη της επιρροής της τραχύτητας στην θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής δυο μεταλλικών επιφανειών, ελήφθησαν υπόψη διαφορετικές επαναλήψεις fractal συναρτήσεων παρεμβολής, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία προφίλ διαφορετικής ανάλυσης δ και κατά συνέπεια διαφορετική τραχύτητας. Ο υπολογισμός των ανωτέρων επαναλήψεων είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία προφίλ εντονότερης τραχύτητας, καθώς λαμβάνονται υπόψη «ανωμαλίες» από διαφορετικές κλίμακες.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θεωρούμε τρεις διαφορετικές διεπιφάνειες στην κατασκευή μας, που προσομοιώνονται με τα γραφήματα τριών συναρτήσεων παρεμβολής $f^{(m)} \in C^0, m=1,2,3$ οι οποίες διέρχονται από το ίδιο διακριτό σύνολο σημείων $\{(0.0,0.0), (0.04,0.005), (0.08,-0.005), (0.12,0.0)\}$. Οι τιμές των ελεύθερων παραμέτρων των διεπιφανειών $f^{(m)}$ φαίνονται στον Πίνακα 3.1.1. Στην τελευταία στήλη του πίνακα δίνονται οι κλασματικές διαστάσεις, D , των τριών διεπιφανειών οι οποίες υπολογίστηκαν από την εξίσωση (2.4.14). Ενώ, οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίστηκαν μέσω των Εξισώσεων (2.4.6) - (2.4.9). Στη συνέχεια υπολογίζονται οι επαναλήψεις των fractal συναρτήσεων παρεμβολής $n=1,2,\dots$, με τη βοήθεια του επαναληπτικού σχήματος:

$$f_{n+1}^{(m)}(x) = (Tf_n^{(m)})(x) \quad (3.1.1)$$

όπου ο τελεστής, T , δίνεται από τη Εξίσωση (2.4.2). Για κάθε fractal διεπιφάνεια $f^{(m)}$ λαμβάνονται υπόψη έξι επαναλήψεις του άνω συνόρου της διεπιφάνειας με σκοπό τη μελέτη της επιρροής της ανάλυσης της fractal διεπιφάνειας στη θερμική αγωγιμότητα λόγω της επαφής των δυο μεταλλικών επιφανειών. Το κάτω σύνορο της διεπιφάνειας σε κάθε κατασκευή δεν μεταβάλλεται στη διάρκεια της επαναληπτικής αυτής διαδικασίας, προσομοιώνεται με τη δεύτερη επανάληψη της κάθε διεπιφάνειας της κατασκευής. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι, η n -οστή επανάληψη μιας συνάρτησης τύπου fractal που παρεμβάλει ένα σύνολο δεδομένων $\{(x_i, y_i), i = 0.1.2 \dots N\}$ αποτελείται από N^n γραμμικά τμήματα.



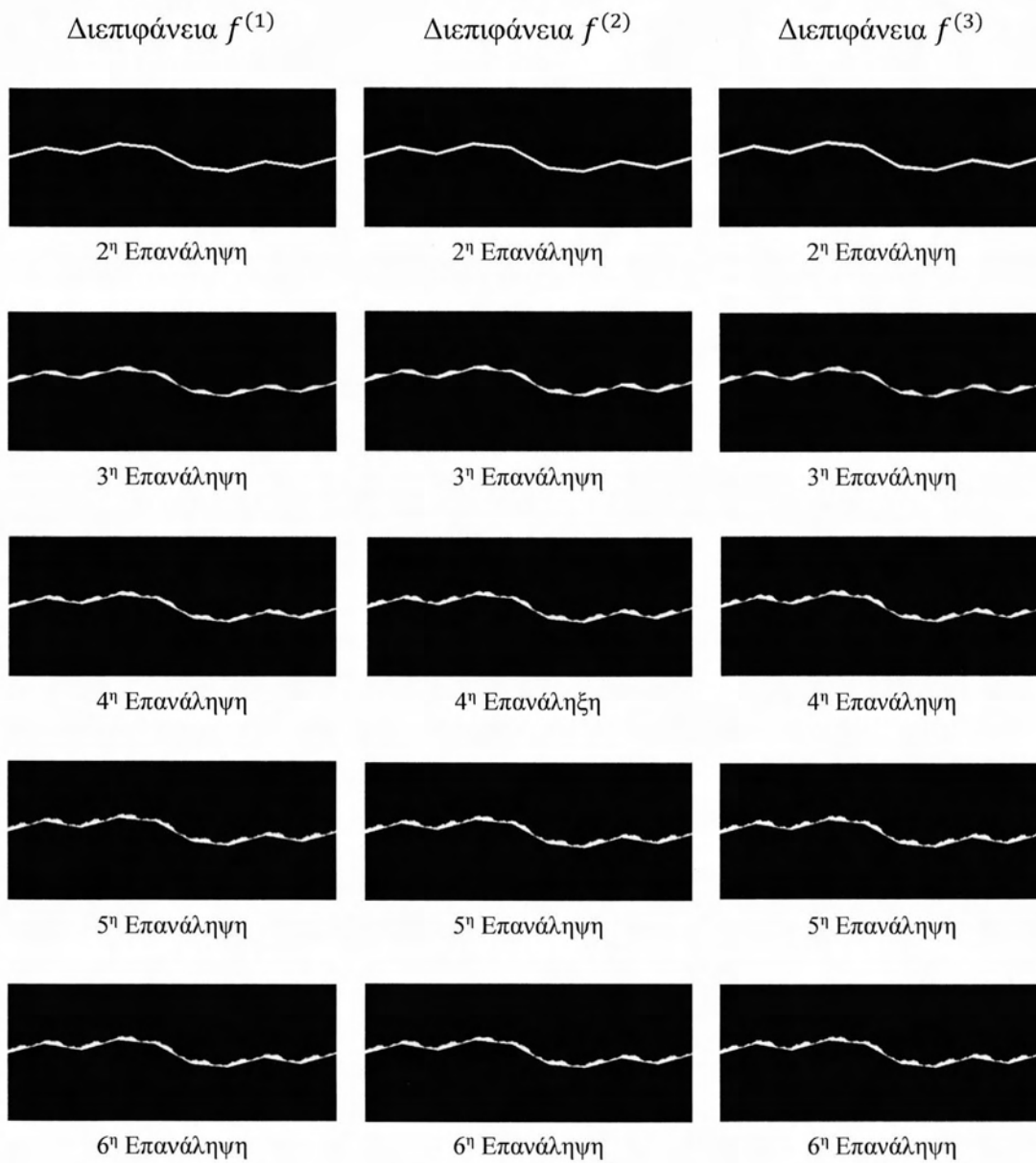
Διεπιφάνεια	d_1	d_2	d_3	D
$f^{(1)}$	0.365	0.365	0.365	1.0826
$f^{(2)}$	0.390	0.390	0.390	1.1429
$f^{(3)}$	0.405	0.405	0.405	1.1773

Πίνακας 3.1.1 : Ελεύθερες παράμετροι και fractal διάσταση των fractal συναρτήσεων παρεμβολής, τα γραφήματα των οποίων προσομοιώνουν τη γεωμετρία των υπό εξέταση διεπιφανειών.

Οι fractal διεπιφάνειες f_n , $n=1, 2, \dots$ που προκύπτουν μέσα από αυτή την επαναληπτική διαδικασία, χαρακτηρίζονται από μια ακριβή τιμή της ανάλυσης δ_n της διεπιφάνειας. Η ανάλυση δ_n εκφράζει το βασικό μήκος της διεπιφάνειας και σχετίζεται με την (n)-οστή επανάληψη της συνάρτησης παρεμβολής τύπου fractal. Στα πλαίσια των υπολογιστικών διαδικασιών της παρούσας εργασίας, για την αριθμητική προσομοίωση της γεωμετρίας της κάθε διεπιφάνειας, χρησιμοποιήθηκαν έξι επαναλήψεις, καθώς θεωρήθηκε ότι, για τις κλίμακες που μελετάμε, περαιτέρω βελτίωση της ανάλυσης δεν θα οδηγούσε σε σημαντικές αλλαγές στα αποτελέσματά μας. Στον Πίνακα 3.1.2 που παρατίθεται παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά όλων των επαναλήψεων των fractal διεπιφανειών $f^{(m)}$, $m=1, 2, 3$. Συγκεκριμένα, στην πρώτη στήλη καταγράφονται οι τιμές της ανάλυσης, δ_n , των διεπιφανειών οι οποίες επηρεάζουν σημαντικά το συνολικό μήκος των διεπιφανειών που παρουσιάζεται στις τελευταίες τρεις στήλες μετρημένο σε χιλιοστά (mm).

Επανάληψη	Ανάλυση δ_n	Μήκος (mm)	Μήκος (mm)	Μήκος (mm)
	(mm)	$f^{(1)}: D=1.083$	$f^{(2)}: D=1.143$	$f^{(3)}: D=1.177$
2 ⁿ	13,333	123,98	124,27	124,46
3 ⁿ	4,444	126,47	127,42	128,08
4 ⁿ	1,481	129,18	131,46	133,10
5 ⁿ	0,494	132,37	136,63	139,80
6 ⁿ	0,160	135,98	143,17	149,00

Πίνακας 3.1.2 : Χαρακτηριστικά των υπό εξέταση διεπιφανειών.

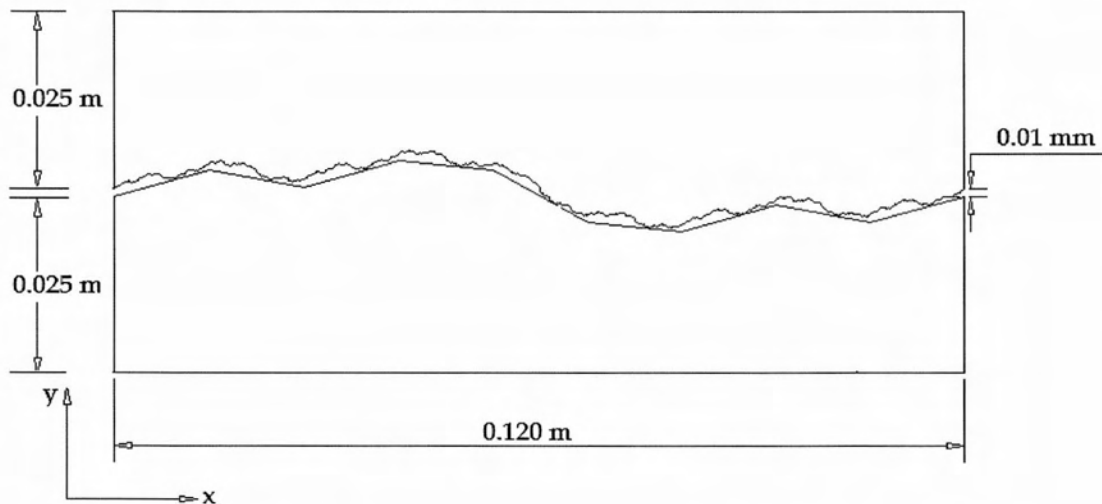


Σχήμα 3.1.1 : Οι υπό μελέτη κατασκευές



3.2 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά

Για την προσομοίωση των κατασκευών με τις fractal διεπιφάνειες που παρουσιάστηκαν παραπάνω δημιουργήθηκε το δισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο που φαίνεται στο Σχήμα 3.2.1 Το πάχος της κατασκευής θεωρήθηκε ίσο 10mm, ενώ η απόσταση των διεπιφανειών στα άκρα ορίστηκε ίση με 0,01mm.



Σχήμα 3.2.1 : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δισδιάστατου μοντέλου

3.2.1 Συνοριακές Συνθήκες

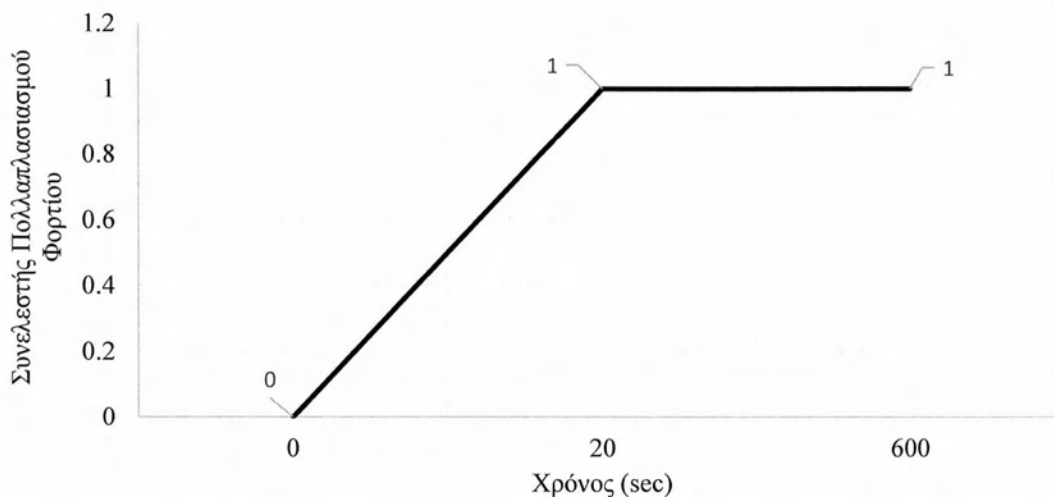
Για την εφαρμογή των συνοριακών συνθηκών της κατασκευής μας ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα :

- Στους κόμβους της κάτω στάθμης του κάτω τμήματος της κατασκευής δεσμεύτηκε η μετακίνηση ως προς τον άξονα y και επιβλήθηκε ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή κατά τη διεύθυνση x ίση με 400°C . Η θερμοκρασιακή αυτή κατανομή επιβλήθηκε σταδιακά, μέσα από 3000 βήματα φόρτισης. Πιο αναλυτικά η μεταβολή της θερμοκρασίας σε συνάρτησή με το χρόνο φαίνεται στο Σχήμα 3.2.1.2.
- Στους κόμβους της αριστερής πλευράς και των δύο τμημάτων της κατασκευής επιβλήθηκε δέσμευση των μετακινήσεων κατά τη x διεύθυνση.
- Στους άνω κόμβους του άνω τμήματος της κατασκευής επιβλήθηκε σταδιακά μέσα από 3000 βήματα κατακόρυφο φορτίο P_y . Για το P_y θεωρήθηκαν έξι τιμές, τέτοιες ώστε να δημιουργούν τάσεις ίσες με $0.2f_y, 0.3f_y, 0.4f_y, 0.5f_y, 0.6f_y$ και $0.7f_y$, όπου f_y είναι η τάση διαρροής του υλικού.

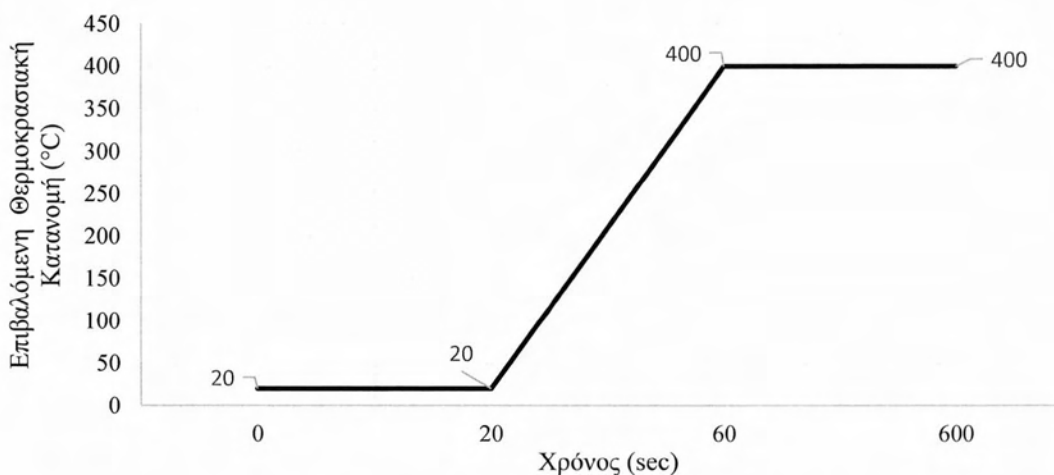
Στο σχήμα 3.2.1.1 απεικονίζεται το διάγραμμα μεταβολής του φορτίου συναρτήσεως του χρόνου. Σε όλους του κόμβους της κατασκευής ασκήθηκε ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας ίση με 20°C . Στο Σχήμα 3.2.1.3 που ακολουθεί απεικονίζονται



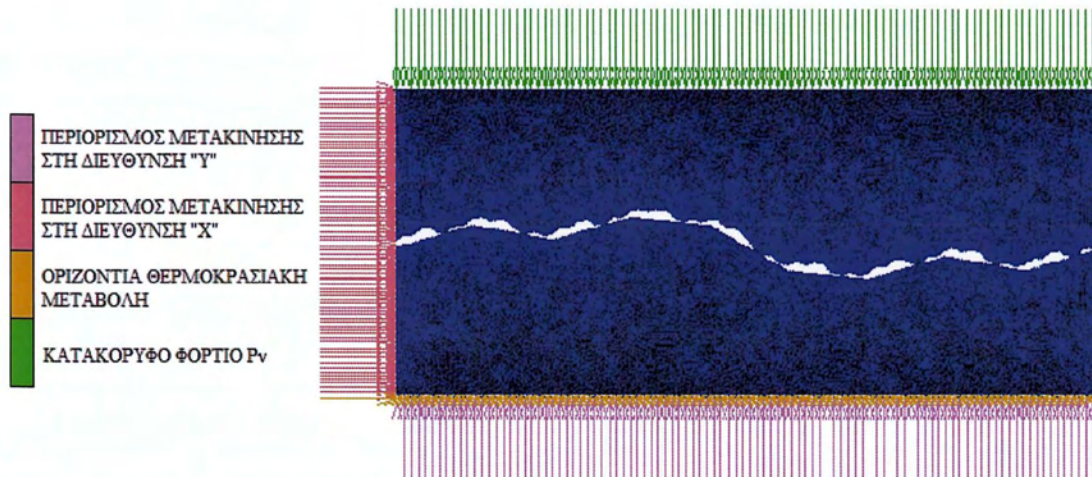
οι περιορισμοί στις μετακινήσεις που αναφέρθηκαν και η κατακόρυφη φόρτιση, καθώς και η οριζόντια θερμοκρασιακή κατανομή που επιβλήθηκαν στη κατασκευή μας.



Σχήμα 3.2.1.1: Μεταβολή του επιβαλλόμενου φορτίου συναρτήσει του χρόνου.



Σχήμα 3.2.1.2: Μεταβολή επιβαλλόμενης θερμοκρασιακής κατανομής συναρτήσει του χρόνου .



Σχήμα 3.2.1.3 : Απεικόνιση των συνολικών συνοριακών συνθήκων της κατασκευής.

3.3 Ιδιότητες Υλικού

Είναι γνωστό ότι η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών στα υλικά των κατασκευών μας, επηρεάζει δυσμενώς τόσο τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους (όρια διαρροής και θραύσεως, μέτρο ελαστικότητας κ.α.) όσο και τις φυσικοχημικές ιδιότητες τους (αλλαγή κρυσταλλικής δομής, πορώδους κ.α.). Συνέπεια αυτών των μεταβολών είναι αντίστοιχες μειώσεις στην φέρουσα ικανότητα των δομικών μελών, αύξηση των παραμορφώσεων τους υπό σταθερό φορτίο, ανακατανομές εντάσεων κ.ο.κ. Στην παρούσα ενότητα δίνονται στοιχεία, τα οποία αφορούν βασικές ιδιότητες του δομικού υλικού της κατασκευής μας, δηλαδή του χάλυβα S275, υπό υψηλές θερμοκρασίες καθώς και σχετικά διαγράμματα μεταβολής ιδιοτήτων.

3.3.1 Ειδική Θερμότητα

Ο Malhotra [34], βασιζόμενος στα πειραματικά αποτελέσματα των Petterson, Magnusson και Thor (1976)[35] πρότεινε για την ειδική θερμότητα του χάλυβα σε (J/Kg°C) την σχέση :

$$C_a = 475 + 6.010 \times 10^{-4} \theta_a^2 + 9,64 \times 10^{-2} \theta_a^2 \quad \theta_a \leq 750^\circ\text{C} \quad (3.3.1.1)$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της ασυνέχειας που παρουσιάζει η ειδική θερμότητα του χάλυβα γύρω στους 750°C, η Εξίσωση 3.3.1.1 ισχύει μέχρι αυτή την θερμοκρασία.

Ο EN 1993-1-2 δίνει τις παρακάτω εξισώσεις που ισχύουν μέχρι τους 1200°C [36]:

Για $20^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 600^\circ\text{C}$:

$$C_a = 425 + 0,773\theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-8} \theta_a^3 \quad (3.3.1.2)$$

Για $600^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 735^\circ\text{C}$:

$$C_a = 666 - \frac{13002}{\theta_a - 738} \quad (3.3.1.3)$$



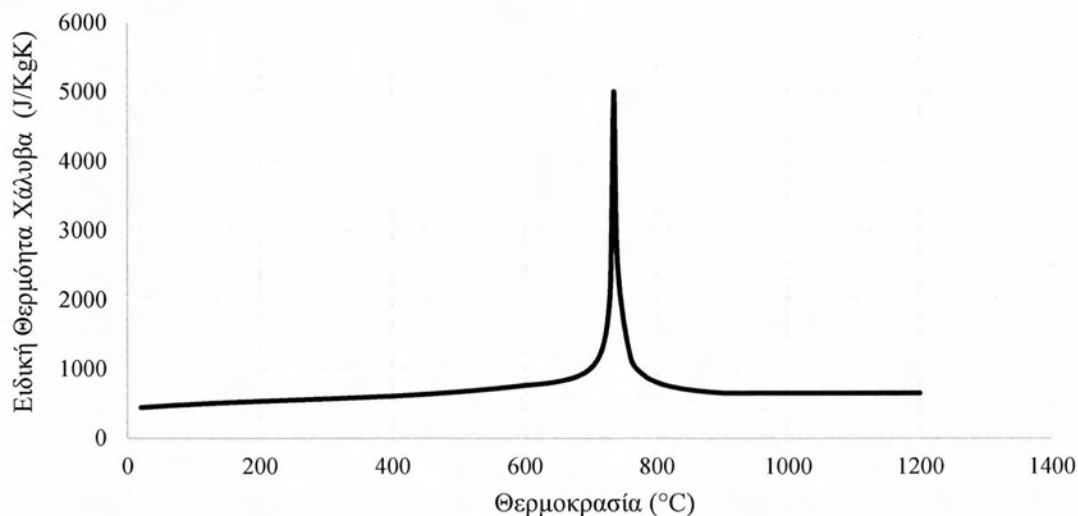
Για $735^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 900^{\circ}\text{C}$:

$$C_{\alpha} = 545 - \frac{17820}{\theta_{\alpha} - 731} \quad (3.3.1.4)$$

Για $900^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$C_{\alpha} = 650 \quad (3.3.1.5)$$

Πάντως, για απλά υπολογιστικά προσομοιώματα, μπορεί να θεωρηθεί και μια σταθερή τιμή για το C_{α} , ίση με 600 J/KgK .



Σχήμα 3.3.1.1 : Μεταβολή της ειδικής θερμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας

3.3.2 Θερμική Αγωγιμότητα

Κατά τον Ευρωκώδικα EN 1993-1-2 [36], η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα μειώνεται γραμμικά μέχρι τους 800°C και μετά παραμένει σταθερή.

Ειδικότερα, η ειδική θερμότητα μπορεί να λαμβάνεται από τις σχέσεις:

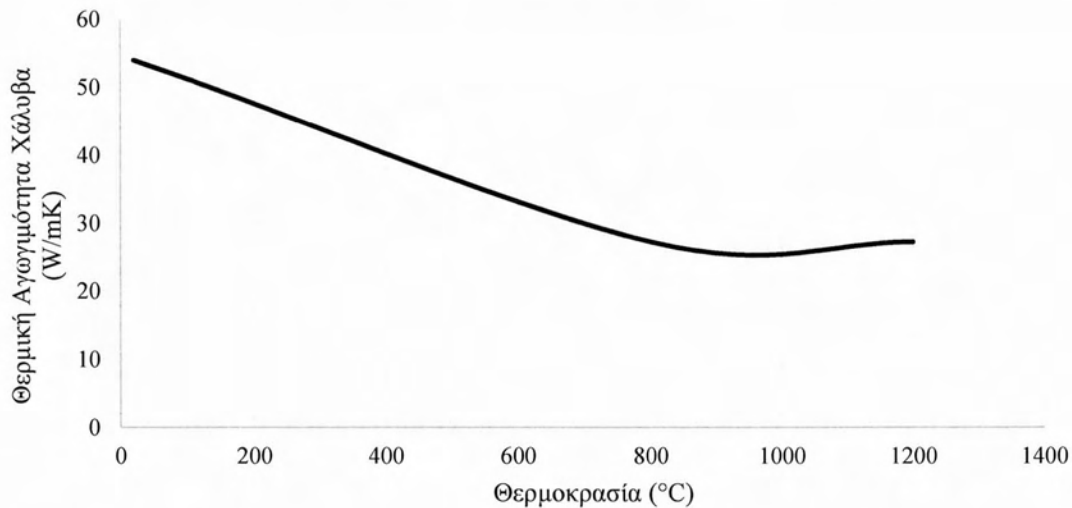
Για $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha} \leq 800^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda_{\alpha} = 54 - 33,3 \times 10^{-3} \theta_{\alpha} \quad (3.2.2.1)$$

Για $800^{\circ}\text{C} \leq \theta_{\alpha}$:

$$\lambda_{\alpha} = 27,3 \quad (3.2.2.2)$$

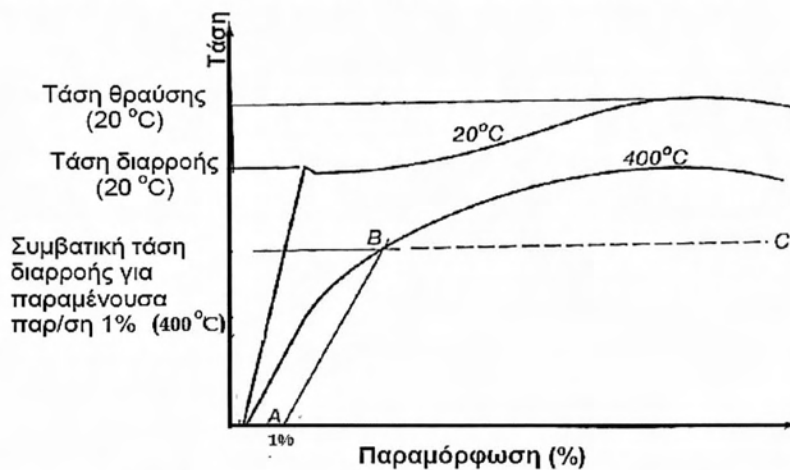
Να σημειωθεί επίσης ότι, για προσεγγιστικούς υπολογισμούς, είναι επιτρεπτό να θεωρηθεί η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα ίση με 45 W/mK .



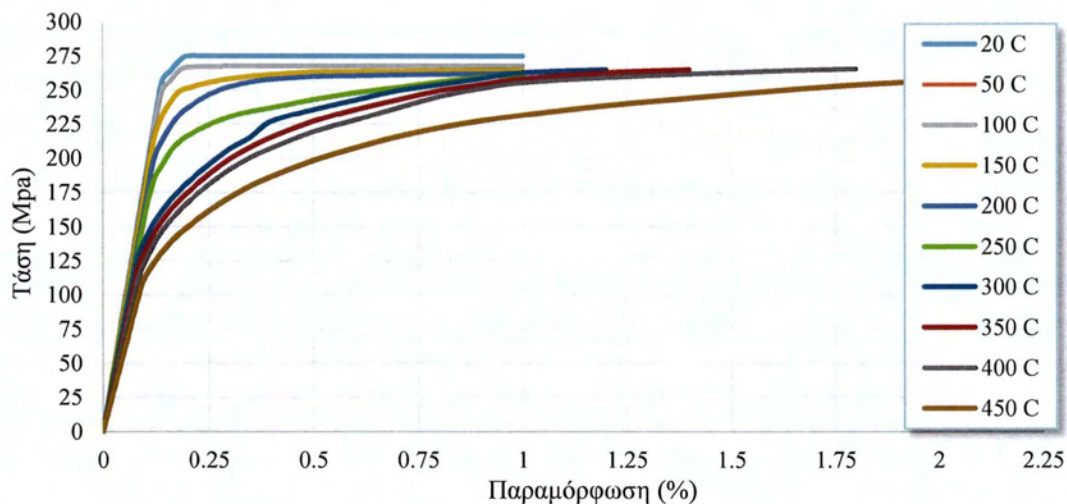
Σχήμα 3.3.2.2 : Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

3.3.3 Εφελκυστική Αντοχή και Όριο Διαρροής Χάλυβα

Η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα μειώνονται, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία έκθεσης. Οι μειώσεις είναι σχετικά μικρές για εκθέσεις σε θερμοκρασίες μέχρι περίπου 200°C και γίνονται μεγαλύτερες για υψηλότερες θερμοκρασίες, φθάνοντας σε μείωση έως και 60% των αρχικών τιμών για θερμοκρασία 600°C. Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 600°C ο ρυθμός μείωσης της αντοχής αυξάνεται, ενώ λόγω και των υπολοίπων μεταβολών που θα συμβούν στο χάλυβα (μεταβολές μικρογραφικής μορφής) είναι ενδεχόμενο να προκληθούν σοβαρές βλάβες στα στοιχεία της κατασκευής. Στους χάλυβες με διακριτό όριο διαρροής η έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες προκαλεί καμπύλωση του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων (Σχήμα 3.3.3.1) [37]. Τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων ($\sigma-\epsilon$) για διάφορες τιμές θερμοκρασίας φαίνονται στο Σχήμα 3.3.3.2 [37].



Σχήμα 3.3.3.1 : Σχηματικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα στο οποίο φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλωση που υφίσταται το διάγραμμα όταν ο χάλυβας εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες.

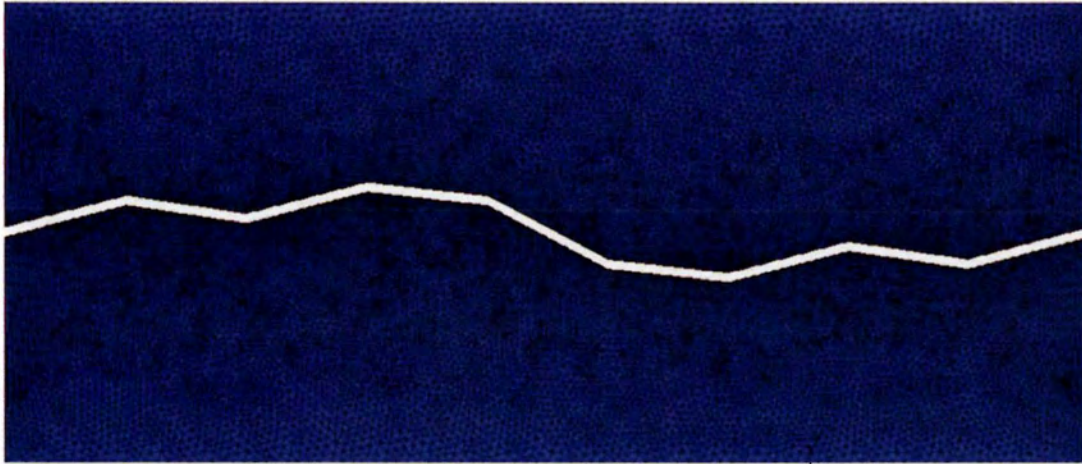


Σχήμα 3.3.3.2 : Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα S275 για διάφορες τιμές θερμοκρασίας.

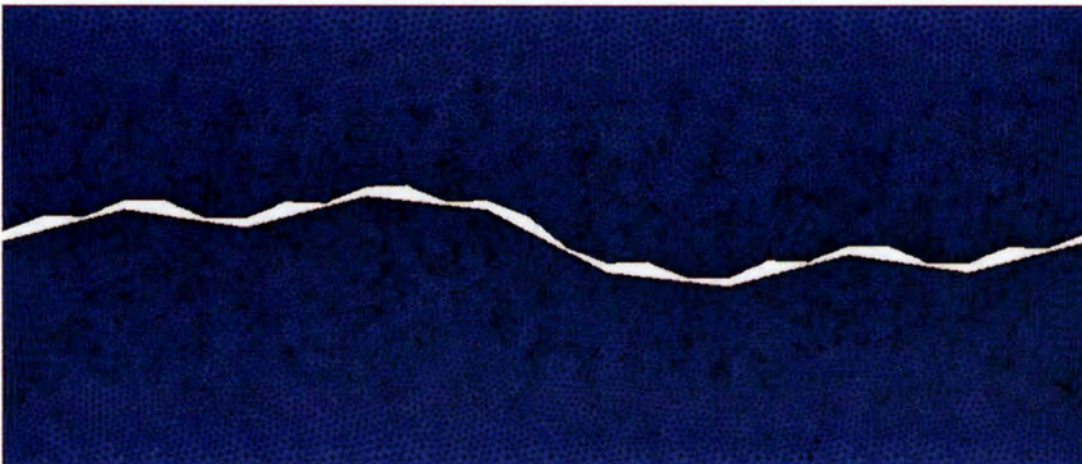
3.4 Διακριτοποίηση του Προσομιώματος με Πεπερασμένα Στοιχεία

Στην ενότητα αυτή γίνεται αναφορά στη διακριτοποίηση της κατασκευής, η οποία είναι «πυκνή» στην περιοχή γύρω από κάθε διεπιφάνεια της κατασκευής και «αραιή» στα υπόλοιπα τμήματα. Το γεγονός ότι η μετάδοση της θερμότητας με αγωγή είναι ένα φαινόμενο άρρηκτα συνδεδεμένο με τη συμπεριφορά των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, δικαιολογεί και την εικόνα αυτή της διακριτοποίησης, που παρουσιάζει η κατασκευή μας. Για λόγους ομοιομορφίας της κατασκευής και για τις τρεις περιπτώσεις διεπιφάνειας κι άμεσης μελέτης και σύγκρισης των εξαγόμενων αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η ίδια πυκνότητα διακριτοποίησης σε όλα τα μοντέλα. Πιο αναλυτικά, τα τμήματα που ορίζουν τις fractal διεπιφάνειες διαιρέθηκαν σε μικρότερα τμήματα με ίδιο περίπου μήκος, ίσο με $\delta_6/2$, όπου δ_6 αποτελεί το βασικό μήκος της ανώτερης επανάληψης που πραγματοποιήθηκε. Ως εκ τούτου, το βασικό μήκος στην έκτη επανάληψη των κατασκευών προσομοιώνεται με τουλάχιστον δυο πεπερασμένα στοιχεία.

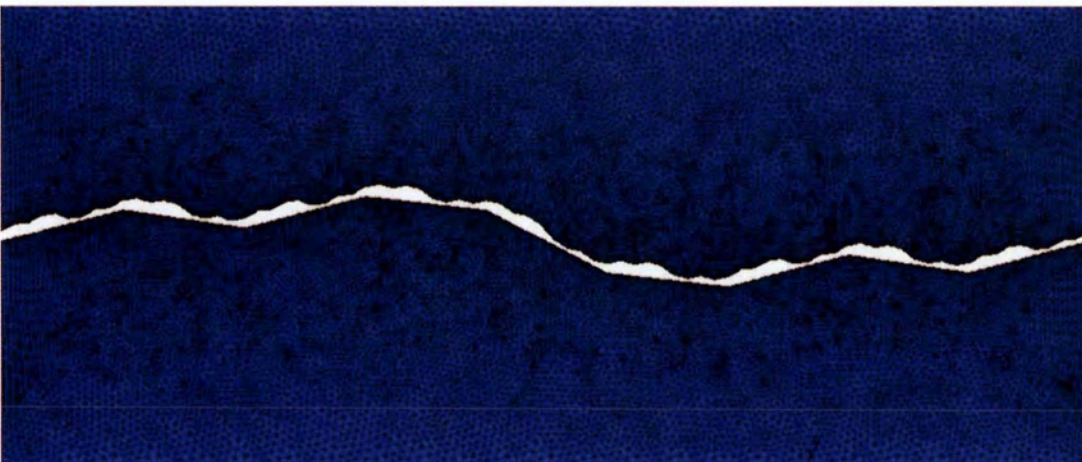
Στη συνέχεια ακολουθεί η παράθεση των Σχημάτων 3.4.1 έως 3.4.3 όπου παρουσιάζεται η διακριτοποίηση των διαφόρων επαναλήψεων για όλες τις διεπιφάνειες της κατασκευής. Επιπλέον, στα Σχήματα 3.4.4 έως 3.4.6 που παρουσιάζονται λεπτομέρειες της διακριτοποίησης στην περιοχή της διεπιφάνειας, για όλες τις επαναλήψεις των διεπιφανειών. Τέλος, τα χαρακτηριστικά κάθε διακριτοποίησης όλων των κατασκευών συνοψίζονται στον Πίνακα 3.4.1.



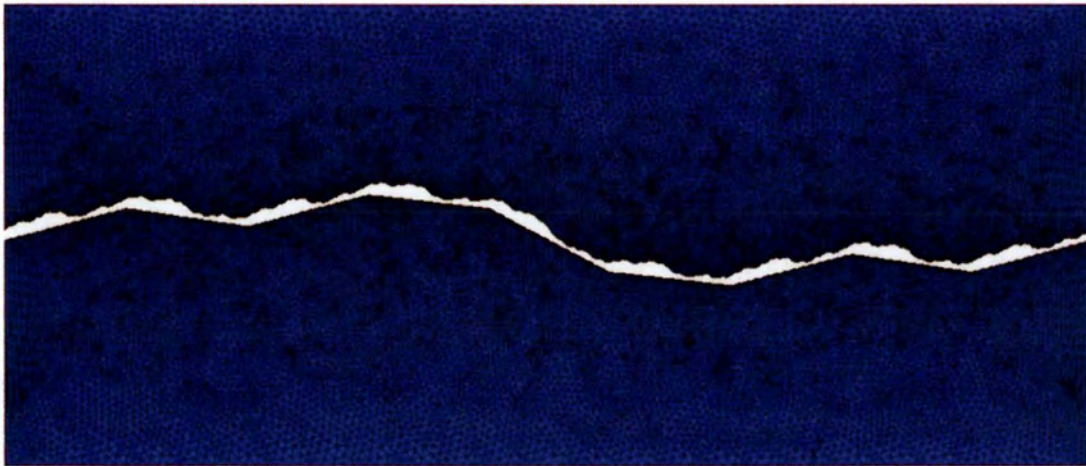
2^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$



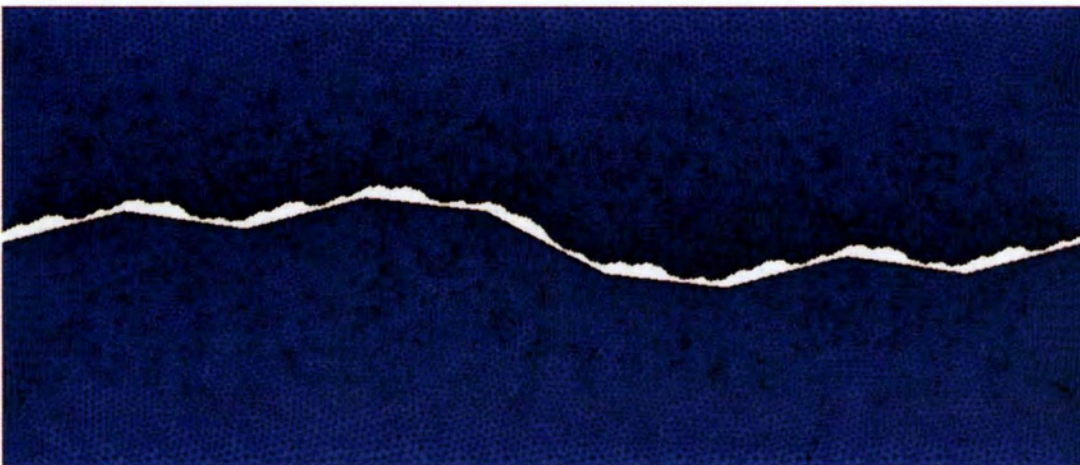
3^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$



4^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$

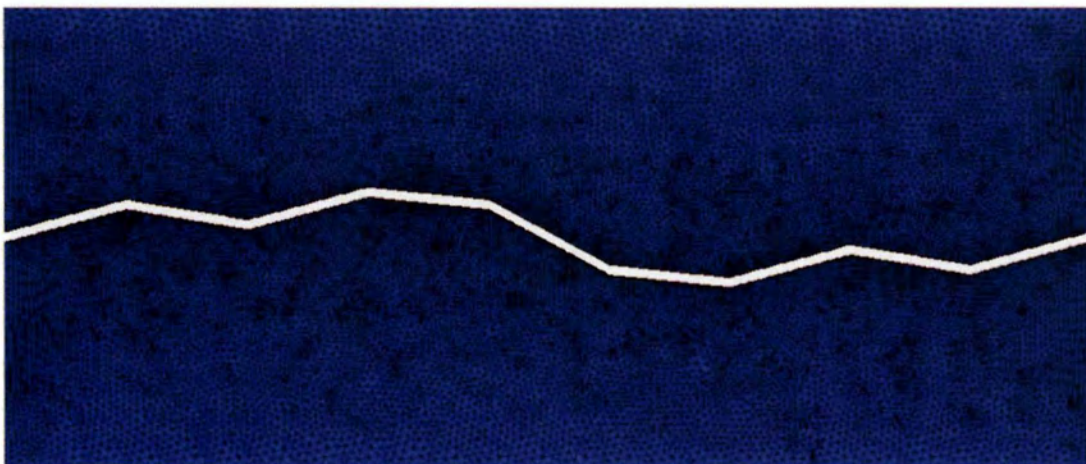


5^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$

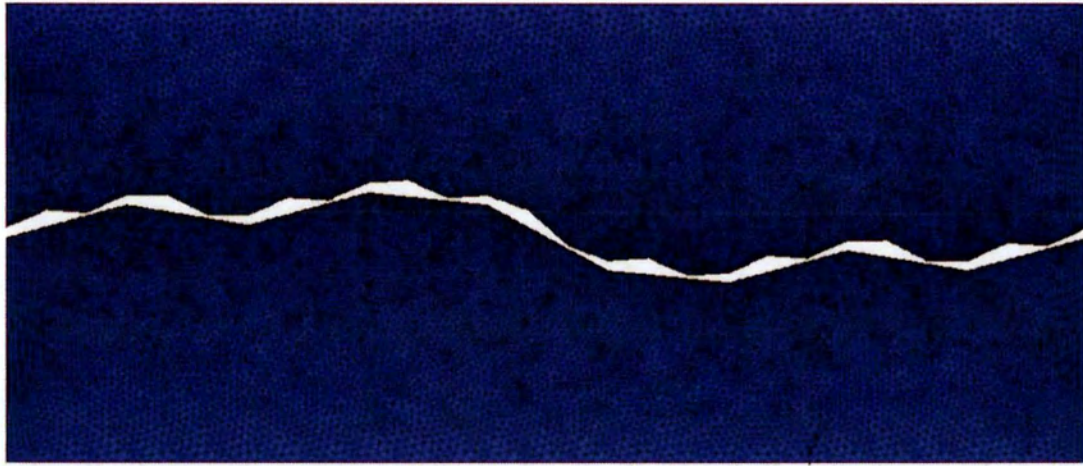


6^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$

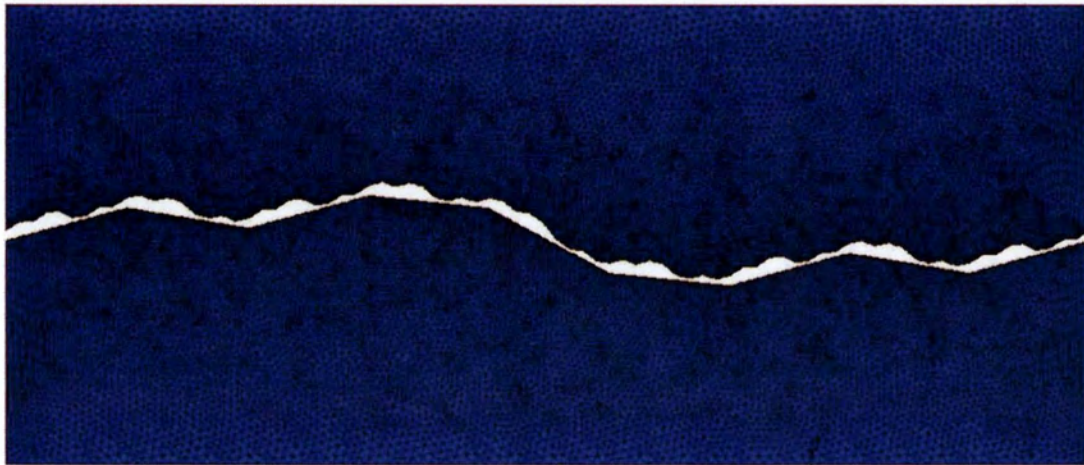
Σχήμα 3.4.1 : Διακριτοποίηση όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$.



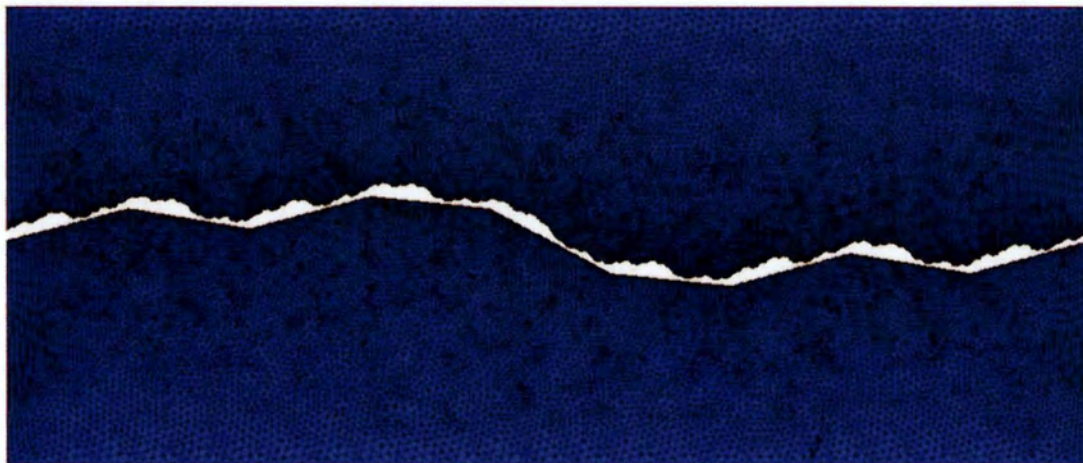
2^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$



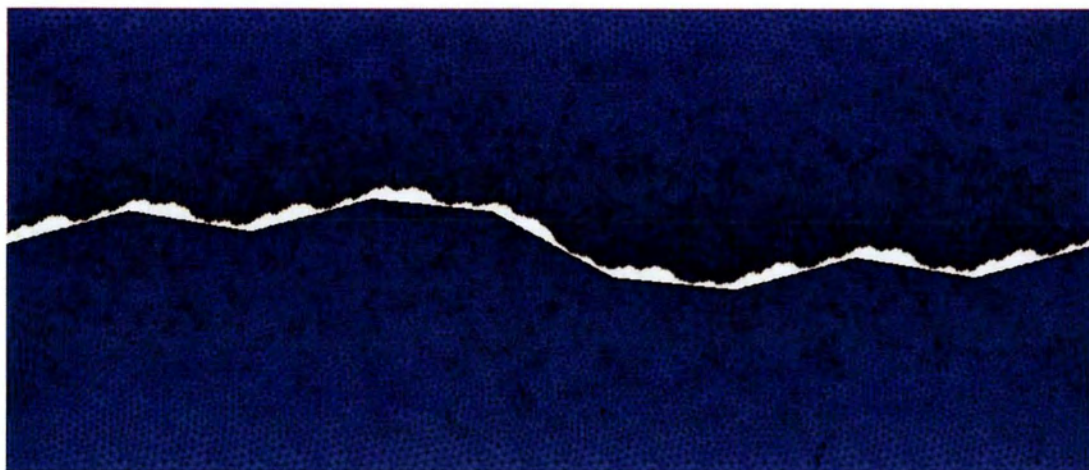
3^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$



4^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$

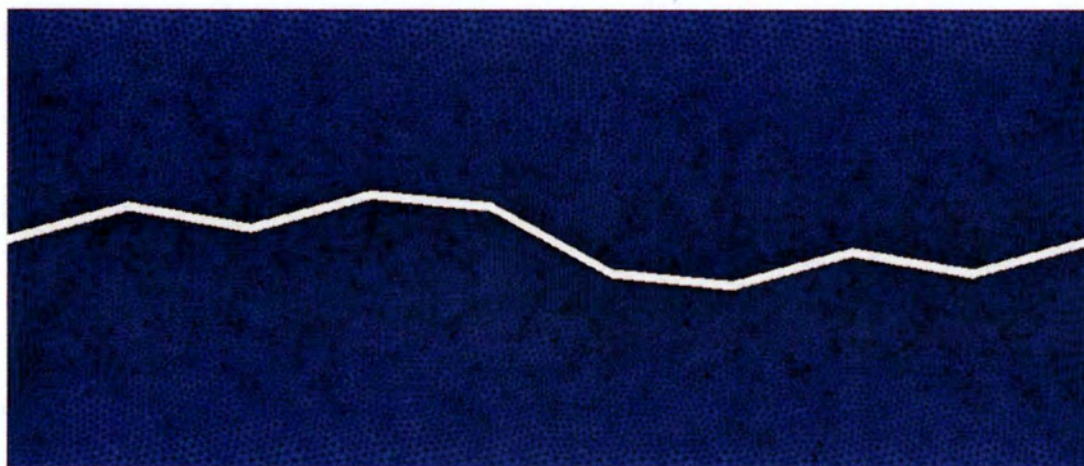


5^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$

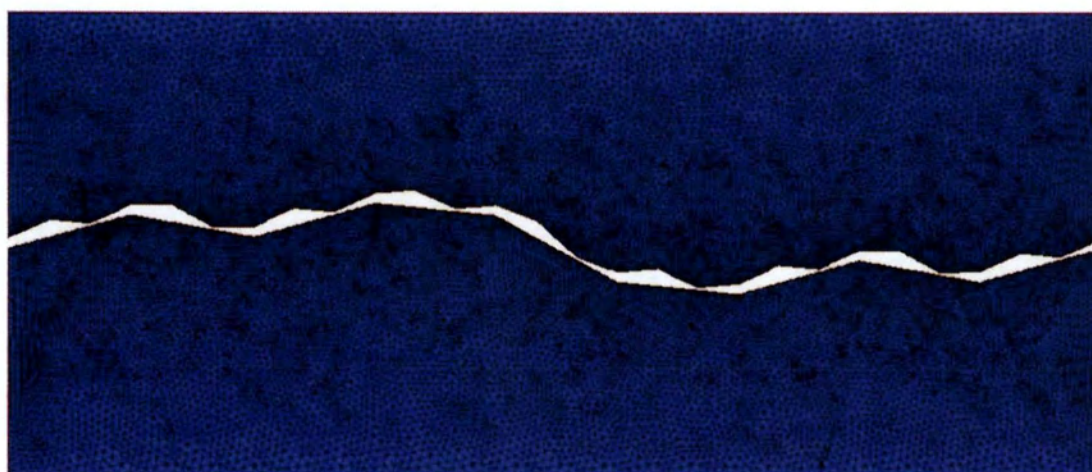


6^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$

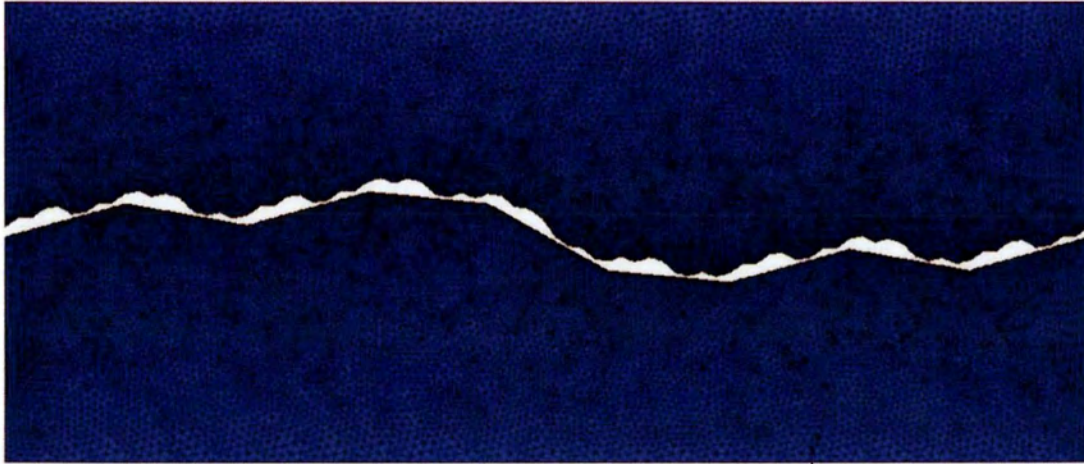
Σχήμα 3.4.2 : Διακριτοποίηση όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$.



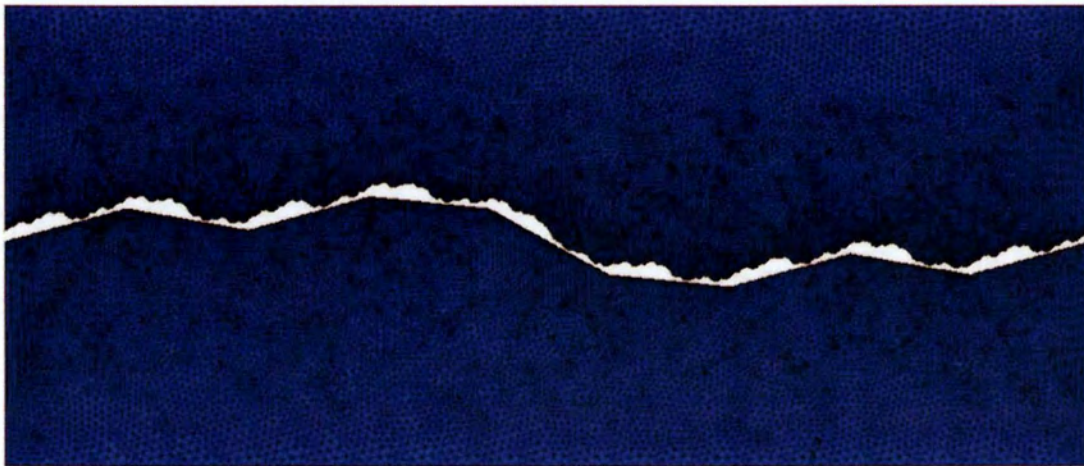
2^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$



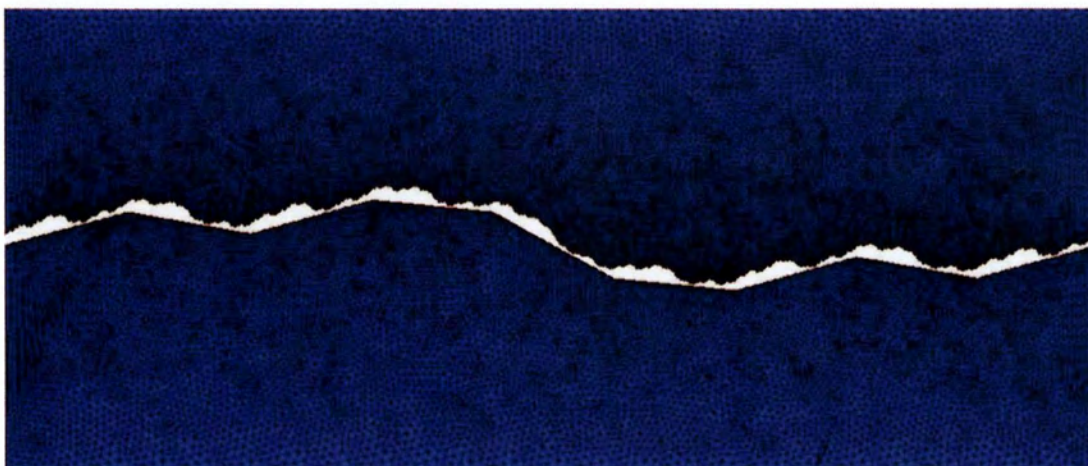
3^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$



4^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$



5^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$



6^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$

Σχήμα 3.4.3 : Διακριτοποίηση όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$.



2^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$



3^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$



4^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$

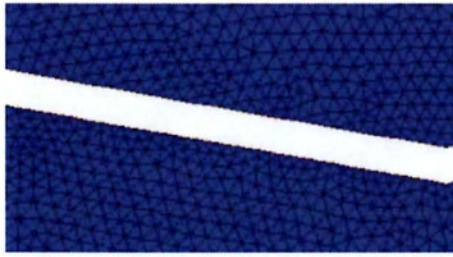


5^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$

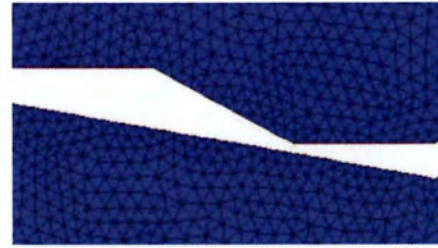


6^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(1)}$

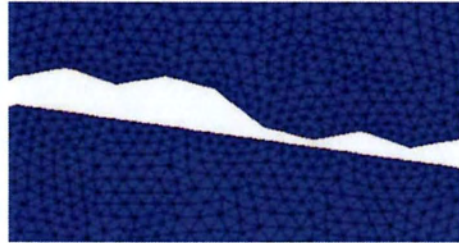
Σχήμα 3.4.4: Λεπτομέρεια του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στη διεπιφάνεια, όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$



2^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$



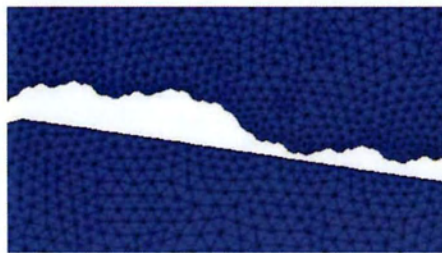
3^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$



4^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$

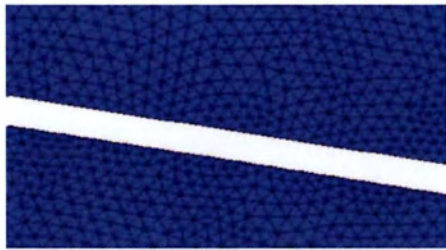


5^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$



6^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(2)}$

Σχήμα 3.4.5: Λεπτομέρεια του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στη διεπιφάνεια, όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$



2^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$



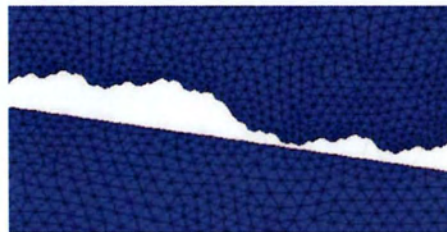
3^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$



4^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$



5^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$



6^η Επανάληψη της Διεπιφάνειας $f^{(3)}$

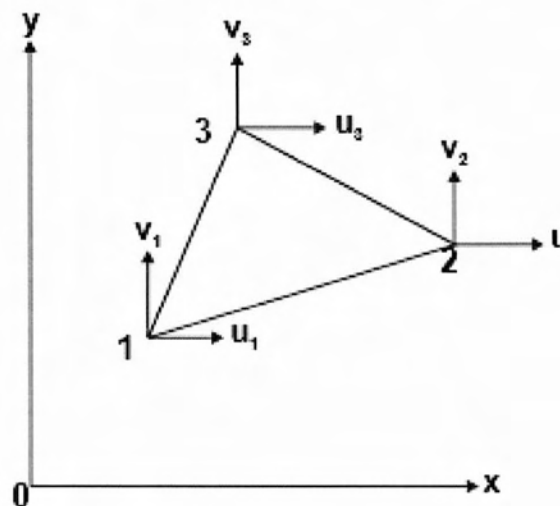
Σχήμα 3.4.6: Λεπτομέρεια του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στη διεπιφάνεια, όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$



Αριθμός στοιχείων	2 ^η Επανάληψη	3 ^η Επανάληψη	4 ^η Επανάληψη	5 ^η Επανάληψη	6 ^η Επανάληψη
Κατασκευή 1	35712	36883	38267	39638	43514
Κατασκευή 2	35915	37203	38456	40264	44216
Κατασκευή 3	35832	37344	38694	40315	44584

Πίνακας 3.4.1 : Αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση.

Για την προσομοίωση της κατασκευής έγινε χρήση δισδιάστατων στοιχείων επίπεδης εντατικής κατάστασης. Πιο αναλυτικά, από την βιβλιοθήκη πεπερασμένων στοιχείων του Marc επιλέχθηκαν τριγωνικά στοιχεία επίπεδης έντασης- παραμόρφωσης τριών κόμβων, τύπου 201. Τα στοιχεία αυτά κρίθηκαν ιδιαίτερα εύρηστα, καθώς οι περισσότερες δισδιάστατες κατασκευές μπορούν να αναπαρασταθούν με άθροισμα τριγώνων. Το σύστημα αναφοράς και η αρίθμηση των κόμβων δίνονται στο Σχήμα 3.4.7 και οι συντεταγμένες των κόμβων είναι $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$. Επειδή θεωρούνται μόνο ομοεπίπεδες μετατοπίσεις, τα στοιχεία έχουν δυο βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο και συνεπώς έξι συνολικά βαθμούς ελευθερίας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, για τα τριγωνικά στοιχεία επίπεδης εντατικής κατάστασης οι συνθήκες ισορροπίας και συμβατότητας ικανοποιούνται στο εσωτερικό του στοιχείου καθώς οι παραμορφώσεις και κατ' επέκταση οι τάσεις είναι σταθερές σε αυτό. Επίσης, η συμβατότητα ικανοποιείται και κατά μήκος των συνόρων των στοιχείων, σε αντιδιαστολή με την ισορροπία η οποία ικανοποιείται μόνο στους κόμβους. Έτσι εξασφαλίζεται η ισορροπία της κατασκευής συνολικά. Το σφάλμα που προκύπτει λόγω της τοπικής αυτής ανισορροπίας, με πυκνή διακριτοποίηση και χρήση στοιχείων μικρών διαστάσεων ελαττώνεται σημαντικά.



Σχήμα 3.4.7: Αρίθμηση των κόμβων του τριγωνικού πεπερασμένου στοιχείου (TRIA 3).



3.5 Μη-γραμμικότητα

Ο όρος «μη –γραμμικότητα» περιγράφει την κατάσταση εκείνη στην οποία οι σχέσεις μεταξύ της εξωτερικής φόρτισης και των μετακινήσεων δεν είναι γραμμικές. Τα αίτια της μη γραμμικής συμπεριφοράς ενός φορέα είναι τα ακόλουθα:

- Καταστατικές εξισώσεις: Μη γραμμικές σχέσεις τάσεων παραμορφώσεων οδηγούν συχνά σε μη γραμμική συμπεριφορά. Για τα περισσότερα υλικά, μετά από ένα μικρό διάστημα ελαστικής συμπεριφοράς επέρχεται πλαστικοποίηση ή/και θραύση.
- Συνοριακές συνθήκες: Μεταβολή των συνοριακών συνθηκών κατά τη διάρκεια φόρτισης του φορέα, καθώς και απώλεια επαφής του με κάποιο άλλο στοιχείο, έχουν ως αποτέλεσμα τη μη γραμμική συμπεριφορά του.
- Εξισώσεις ισορροπίας και συμβιβαστού: Για πολύ μεγάλες παραμορφώσεις του φορέα, χάνεται η γραμμικότητα των εξισώσεων ισορροπίας. Επιπλέον, όταν οι σχέσεις μετακινήσεων και παραμορφώσεων είναι μη γραμμικές παρουσιάζεται μη-γραμμικότητα στο φορέα η οποία χαρακτηρίζεται «γεωμετρική μη γραμμικότητα».

Στα πλαίσια των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, η μη γραμμική συμπεριφορά της κατασκευής μας οφείλεται σε όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες. Συγκεκριμένα, μη γραμμικότητα των καταστατικών εξισώσεων εμφανίζεται λόγω της ελαστικοπλαστικής συμπεριφοράς του χάλυβα, ενώ και οι συνοριακές συνθήκες χαρακτηρίζονται ως μη γραμμικές λόγω της μεταβολής της επιφάνειας επαφής. Τέλος, ο φορέας εμφανίζει μεγάλες παραμορφώσεις οδηγώντας σε μη γραμμικότητα των εξισώσεων ισορροπίας και συμβιβαστού.



4^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

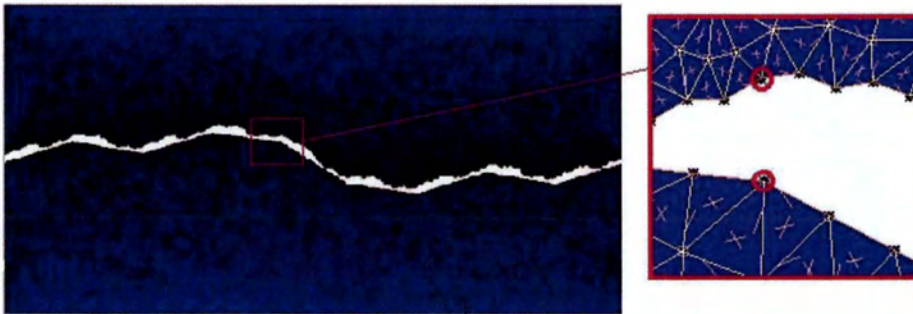
ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΕΠΑΦΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται η επιρροή της ανάλυσης τραχειών μεταλλικών διεπιφανειών στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής. Συγκεκριμένα, στις ενότητες που ακολουθούν παρατίθενται, για κάθε διεπιφάνεια ξεχωριστά, τα διαγράμματα διαφοράς θερμοκρασίας δυο κόμβων της διεπιφάνειας που βρίσκονται σε επαφή συναρτήσει του χρόνου, για όλες τις αναλύσεις των διεπιφανειών, για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης. Σκοπός της παρουσίασης των διαγραμμάτων αυτών είναι η μελέτη της επιρροής της ανάλυσης της διεπιφάνειας μιας κατασκευής στη διάδοση της θερμότητας λόγω επαφής.

4.1 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$

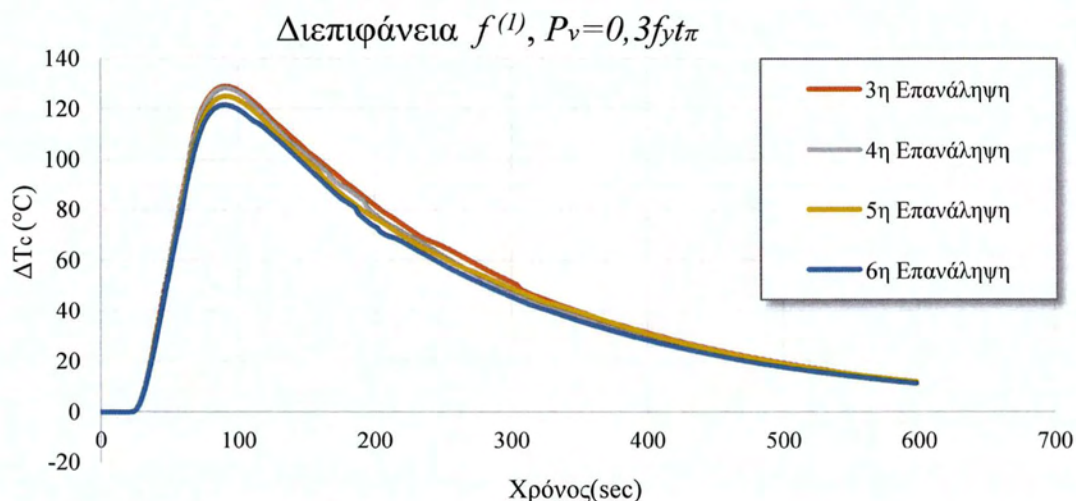
Στην ενότητα αυτή μελετάται η κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(1)}$ και fractal κλασματική διάσταση $D=1.083$. Για την προσομοίωση της διεπιφάνειας χρησιμοποιήθηκε fractal συνάρτηση παρεμβολής, η οποία διέρχεται από τα σημεία $\{(0.0, 0.0), (0.04, 0.005), (0.08, -0.005), (0.12, 0.0)\}$ και με τιμές ελευθέρων παραμέτρων ίσες με $d_1 = d_2 = d_3 = 0.365$. Τα γενικότερα χαρακτηριστικά και οι συνοριακές συνθήκες της κατασκευής παρουσιάστηκαν αναλυτικά στην Ενότητα 3.2. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης, $P_v = 0.3f_y t_\pi L = 99kN$, $P_v = 0.5f_y t_\pi L = 165kN$ και $P_v = 0.7f_y t_\pi L = 231kN$. Στις εξισώσεις αυτές των φορτίσεων με f_y αναπαρίσταται η τάση διαρροής του χάλυβα S275 και είναι $f_y = 275Mpa$, με t_π το πάχος των επιφανειών ίσο με 0.01m και με L το μήκος της κατασκευής που ισούται με 0.120m.

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν οι καμπύλες θερμοκρασιακής μεταβολής-χρόνου που παρουσιάζονται παρακάτω για τις τρεις αυτές περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης. Συγκεκριμένα, η θερμοκρασιακή μεταβολή, ΔT_c , στα διαγράμματα που ακολουθούν αποτελεί την διαφορά θερμοκρασίας δύο κόμβων της διεπιφάνειας, οι οποίοι μετά την επιβολή του κατακόρυφου φορτίου P_v βρίσκονται σε επαφή. Στο Σχήμα 4.1.1 παρουσιάζονται οι δύο κόμβοι, οι οποίοι αξίζει να σημειωθεί ότι είναι οι ίδιοι για όλες τις επαναλήψεις των διεπιφανειών $f^{(1)}, f^{(2)}$ και $f^{(3)}$ που μελετάμε εδώ.



Σχήμα 4.1.1 : Απεικόνιση των δύο κόμβων, που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό της διαφοράς της θερμοκρασίας τους στην διεπιφάνεια $f^{(1)}$.

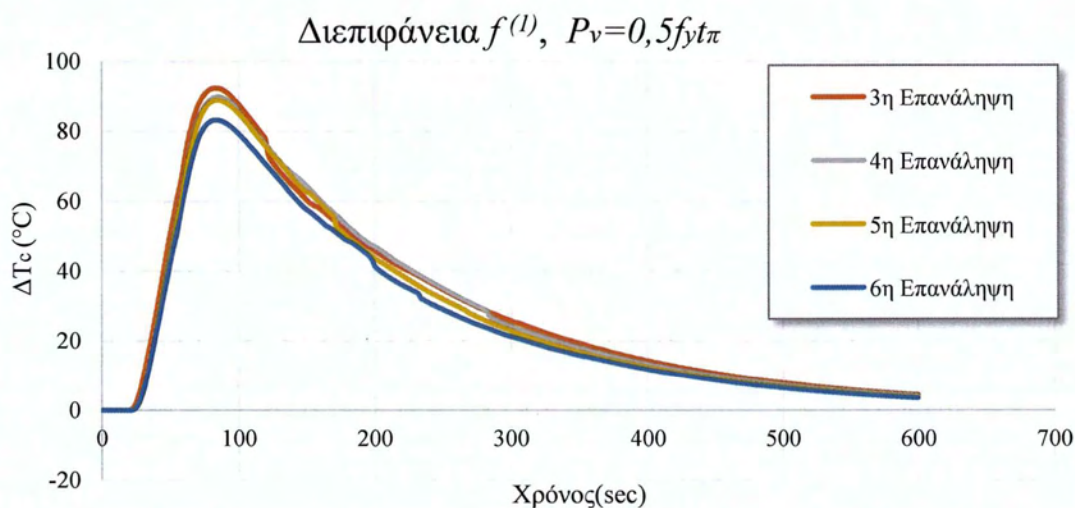
Για τους κόμβους που αναφέραμε δημιουργήθηκαν τα διαγράμματα θερμοκρασιακής μεταβολής ΔT_c-t . Στο Σχήμα 4.1.2 δίνονται τα διαγράμματα αυτά για την περίπτωση της διεπιφάνειας $f^{(1)}$ και για τις περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης που δημιουργούν τάσεις ίσες με $0.3f_y$, $0.5f_y$ και $0.7f_y$. Από τα διαγράμματα γίνεται φανερό ότι όσο αυξάνει η ανάλυση της διεπιφάνειας, δηλαδή όσο κινούμαστε σε ανώτερες επαναλήψεις, παρατηρείται μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς στη διεπιφάνεια της κατασκευής μας. Πιο συγκεκριμένα, στις αρχικές επαναλήψεις παρουσιάζεται μια σημαντική αύξηση στη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στους κόμβους της διεπιφάνειας, η οποία μειώνεται καθώς λαμβάνουμε υπόψη μεγαλύτερη ανάλυση της διεπιφάνειας. Αυτό συμβαίνει διότι, καθώς αυξάνει η ανάλυση της διεπιφάνειας λαμβάνονται υπόψη αιχμές μικρότερης κλίμακας που πλαστικοποιούνται ευκολότερα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η επιφάνεια επαφής και να πραγματοποιείται ευκολότερη μεταφορά της θερμότητας.



Σχήμα 4.1.2 : Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.3f_y t_\pi$.

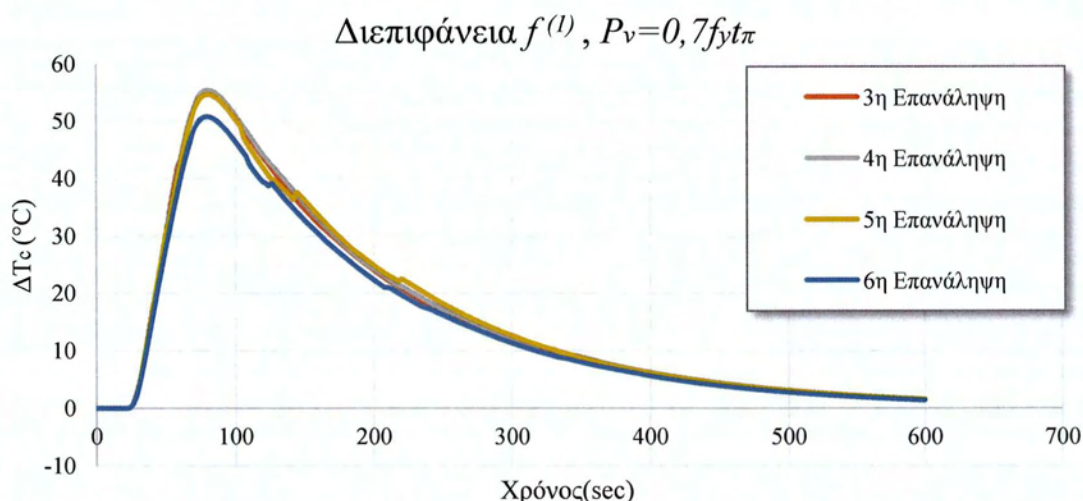


Στο Σχήμα 4.1.3 απεικονίζεται η θερμοκρασιακή διαφορά των δυο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(1)}$ σε σχέση με το χρόνο, για κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο $P_v=0.5f_y t_\pi$. Και εδώ παρατηρείται μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς στη διεπιφάνεια, καθώς κινούμαστε σε ανώτερες αναλύσεις. Η μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας παρατηρείται όταν λαμβάνεται υπόψη η 3^η επανάληψη και μειώνεται καθώς λαμβάνονται υπόψη ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας. Σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση φόρτισης και τα διαγράμματα του Σχήματος 4.1.2 η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά εμφανίζεται νωρίτερα σε όλες τις επαναλήψεις (τη χρονική στιγμή 84sec) και το εύρος της διαφοράς αυτής μεταξύ της τρίτης και της έκτης επανάληψης της διεπιφάνειας μειώνεται όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1.1. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της κατακόρυφης φόρτισης οδηγούμαστε σε έντονες πλαστικοποιήσεις της διεπιφάνειας από τις πρώτες αναλύσεις της, γεγονός που οδηγεί στην αύξηση της επιφάνειας επαφής και κατά συνέπεια στην αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής και την ταυτόχρονη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς στη διεπιφάνεια της κατασκευής, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.1.3.



Σχήμα 4.1.3 : Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.5f_y t_\pi$.

Στο σχήμα 4.1.4 παρουσιάζεται η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στους δύο κόμβους της διεπιφάνειας $f^{(1)}$ συναρτήσει του χρόνου, για κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.7f_y t_\pi$. Όπως ακριβώς και στις δυο προηγούμενες περιπτώσεις καθώς λαμβάνονται υπόψη ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας, η θερμοκρασιακή διαφορά στην διεπιφάνεια μειώνεται. Επιπλέον, είναι εμφανές ότι σε αυτήν την περίπτωση φόρτισης η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας εντοπίζεται στα 80sec, νωρίτερα δηλαδή σε σύγκριση με τις δυο προηγούμενες περιπτώσεις. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι το εύρος της διαφοράς της θερμοκρασίας μεταξύ της τρίτης και της έκτης επανάληψης της διεπιφάνειας βαίνει συνεχώς μειούμενο, καθώς αυξάνεται η τιμή της κατακόρυφης φόρτισης.



Σχήμα 4.1.4 : Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.7f_y t_\pi$.

Στη συνέχεια δίνεται ο συγκεντρωτικός Πίνακας 4.1.1, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(1)}$, στον οποίο παρουσιάζονται για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης που επιβλήθηκαν στο πλαίσιο των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν εδώ, η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά, $\Delta T_{c \max}$, των δύο κόμβων της διεπιφάνειας, καθώς και η χρονική στιγμή εμφάνισης των τιμών αυτών.

Φορτίο P_v (kN/m)	$\Delta T_{c \max}$ (°C) → Χρόνος (sec) ↓	3 ^η Επανάληψη	4 ^η Επανάληψη	5 ^η Επανάληψη	6 ^η Επανάληψη
$0.2f_y t_\pi$	94	160.8839	154.619	149.985	148.754
$0.3f_y t_\pi$	90	128.983	128.338	125.068	121.684
$0.4f_y t_\pi$	84	108.453	102.39	103.881	97.288
$0.5f_y t_\pi$	84	92.405	89.929	88.875	83.201
$0.6f_y t_\pi$	82	70.179	66.656	63.241	62.395
$0.7f_y t_\pi$	80	55.842	55.451	54.674	50.863

Πίνακας 4.1.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων τιμών θερμοκρασιακών διαφορών, $\Delta T_{c \max}$, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(1)}$, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης και για όλες τις τιμές ανάλυσης της.

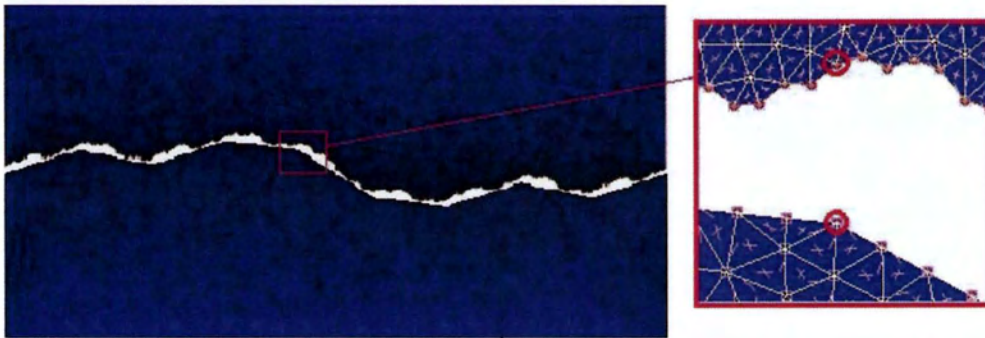
Από τα δεδομένα του πίνακα, αλλά και από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.1.2 έως 4.1.4, συμπεραίνουμε ότι αύξηση της τιμής ανάλυσης της διεπιφάνειας οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής των μεταλλικών επιφανειών. Η αύξηση αυτή γίνεται ακόμα πιο έντονη με την αύξηση της τιμής της κατακόρυφης φόρτισης. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι, στις ανώτερες αναλύσεις λαμβάνονται υπόψη αιχμές μικρότερης κλίμακας, οι οποίες πλαστικοποιούνται εντονότερα οδηγώντας έτσι, σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Η διαδικασία αυτή της πλαστικοποίησης είναι εντονότερη με την αύξηση της τιμής της κατακόρυφης φόρτισης. Είναι σημαντικό να τονιστεί στο σημείο



αυτό ότι, για πολύ μεγάλες τιμές του κατακόρυφου φορτίου η αύξηση της διεπιφάνειας παίζει δευτερεύοντα ρόλο στο πρόβλημα της θερμικής αγωγιμότητας.

4.2 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$

Στην παρούσα ενότητα γίνεται η μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$ και κλασματική fractal διάσταση $D=1.143$. Η προσομοίωση της διεπιφάνειας πραγματοποιήθηκε με μια fractal συνάρτηση παρεμβολής, η οποία παρεμβάλει στα ίδια σημεία με την προαναφερθείσα διεπιφάνεια. Τα σημεία αυτά είναι τα $\{(0.0, 0.0), (0.04, 0.005), (0.08, -0.005), (0.12, 0.0)\}$ και οι τιμές των ελεύθερων παραμέτρων της συνάρτησης παρεμβολής είναι $d_1 = d_2 = d_3 = 0.390$. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι συνοριακές συνθήκες της κατασκευής παρουσιάζονται αναλυτικά στην Ενότητα 3.2. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμοκρασιακής διαφοράς, ΔT_c , των δύο κόμβων της διεπιφάνειας που αναφέρονται στο σχήμα 4.2.1, συναρτήσει του χρόνου για τις ίδιες περιπτώσεις φόρτισης που επιλέχθηκαν και στην ενότητα 4.1. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δυο κόμβοι της διεπιφάνειας είναι οι ίδιοι με τους κόμβους της διεπιφάνειας $f^{(1)}$, προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

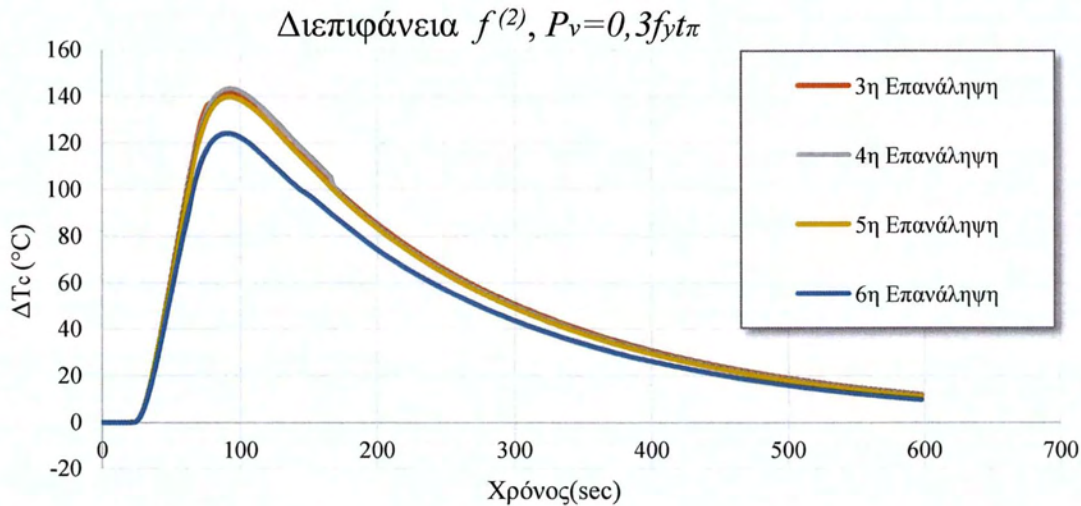


Σχήμα 4.2.1 : Απεικόνιση των δύο κόμβων που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό της διαφοράς της θερμοκρασίας στην διεπιφάνεια $f^{(2)}$.

Στα διαγράμματα του Σχήματος 4.2.2, παρουσιάζονται οι καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς, ΔT_c , των κόμβων του Σχήματος 4.2.1, σε συνάρτηση με τον χρόνο, για διαφορετικές τιμές της ανάλυσης της διεπιφάνειας $f^{(2)}$, για την περίπτωση κατακόρυφου φορτίου που προκαλεί τάσεις ίσες με $0.3f_y t_\pi$. Παρατηρούμε ότι και στην περίπτωση αυτή καθώς κινούμαστε σε ανώτερες επαναλήψεις, η θερμοκρασιακή διαφορά των κόμβων της διεπιφάνειας μειώνεται. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 4.2.2, διαπιστώνεται ότι οι θερμοκρασιακές διαφορές των δύο κόμβων στις περιπτώσεις της τρίτης, τέταρτης και πέμπτης ανάλυσης της διεπιφάνειας δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές. Η διαφοροποίηση εντοπίζεται στην περίπτωση της έκτης επανάληψης της διεπιφάνειας, όπου οι θερμοκρασιακές διαφορές των δυο κόμβων της διεπιφάνειας μειώνονται σημαντικά. Αυτή η διαφοροποίηση στη συμπεριφορά, σε σχέση με την διεπιφάνεια

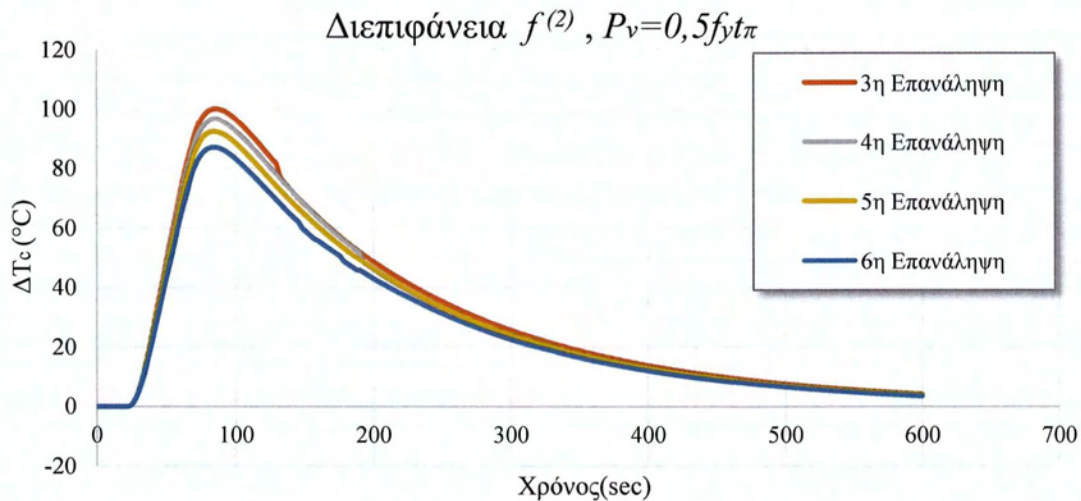


$f^{(1)}$, οφείλεται στο γεγονός ότι οι αιχμές της $f^{(2)}$ είναι πιο έντονες, επειδή οι ελεύθερες παράμετροι d_i με $i=1,2,3$ της fractal συνάρτησης παρεμβολής $f^{(2)}$ είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες παραμέτρους της $f^{(1)}$. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ανώτερη επανάληψη, στην οποία οι αιχμές είναι πολύ έντονες, να πλαστικοποιείται ακόμη και με την επίδραση μικρής σχετικά κατακόρυφης φόρτισης.



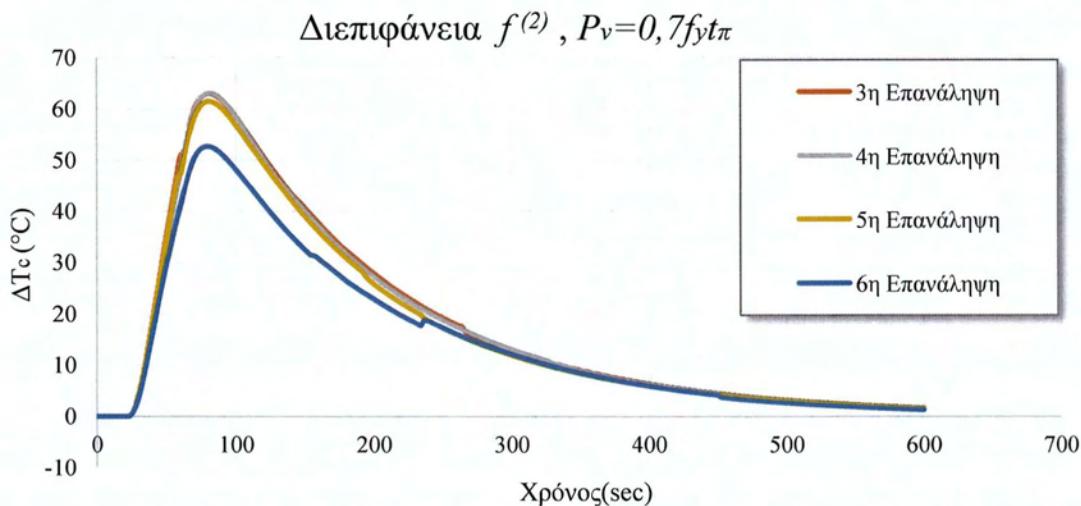
Σχήμα 4.2.2 : Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.3f_y t_\pi$.

Το Σχήμα 4.2.3 απεικονίζει τη μεταβολή της θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο επιλεγμένων κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(2)}$ σε σχέση με το χρόνο, για κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο ίσο με $P_v = 0.5f_y t_\pi$. Και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής των μεταλλικών διεπιφανειών, καθώς λαμβάνονται υπόψη ανώτερες αναλύσεις αυτών. Συγκρίνοντας τα διαγράμματα του Σχήματος 4.2.3 με τα αντίστοιχα διαγράμματα του Σχήματος 4.2.2, διαπιστώνουμε ότι οι μέγιστες τιμές θερμοκρασιακής διαφοράς στην διεπιφάνεια μειώνονται και εντοπίζονται νωρίτερα, καθώς αυξάνει η τιμή του κατακόρυφου φορτίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αύξηση του κατακόρυφου φορτίου, έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής των δυο μεταλλικών τμημάτων και κατά συνέπεια αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Τέλος, σε σύγκριση με τα διαγράμματα του Σχήματος 4.1.3, που αναφέρεται στην διεπιφάνεια $f^{(1)}$ για την ίδια τιμή κατακόρυφης φόρτισης, παρατηρούμε ότι οι διαφορές της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση της διεπιφάνειας $f^{(2)}$, που έχει μεγαλύτερη fractal διάσταση σε σχέση με την $f^{(1)}$.



Σχήμα 4.2.3 : Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.5f_y t_\pi$.

Στο σχήμα 4.2.4 δίνονται οι καμπύλες της διαφοράς θερμοκρασίας ανάμεσα στους κόμβους της διεπιφάνειας $f^{(2)}$ συναρτήσει του χρόνου, για διαφορετικές τιμές ανάλυσής της και για κατακόρυφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.7f_y t_\pi$. Ομοίως, και σε αυτήν την περίπτωση παρατηρείται μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς των κόμβων της διεπιφάνειας, καθώς αυξάνεται η ανάλυση της. Αξίζει να σημειωθεί ότι, τα διαγράμματα του Σχήματος 4.2.4 παρουσιάζουν πλήρη αντιστοιχία με τα διαγράμματα του Σχήματος 4.1.4, που αναφέρονται στην διεπιφάνεια $f^{(1)}$, για την ίδια τιμή κατακόρυφης φόρτισης. Παρατηρούμε ότι η θερμική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση της διεπιφάνειας με τη μικρότερη fractal διάσταση. Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο στις μικρότερες αναλύσεις, ενώ στην μεγαλύτερη ανάλυση (6^η επανάληψη) παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές.



Σχήμα 4.2.4 : Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.7f_y t_\pi$.



Στον Πίνακα 4.2.1 δίνονται για όλες τις τιμές κατακόρυφης φόρτισης της κατασκευής με την διεπιφάνεια $f^{(2)}$ και για όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας, οι μέγιστες θερμοκρασιακές διαφορές, ΔT_c , των κόμβων της διεπιφάνειας, καθώς και η χρονική στιγμή εμφάνισής τους. Από τη μελέτη του πίνακα διαπιστώνουμε, ότι μεγαλύτερη ανάλυση της διεπιφάνειας οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας σε όλες τις περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης. Η θερμική αγωγιμότητα όμως, για την ίδια ανάλυση αυξάνει σημαντικά με την αύξηση της τιμής της κατακόρυφης φόρτισης. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι, για πολύ μεγάλες τιμές της κατακόρυφης φόρτισης η ανάλυση της διεπιφάνειας παίζει και σε αυτήν την περίπτωση δευτερεύοντα ρόλο στο πρόβλημα της θερμικής αγωγιμότητας.

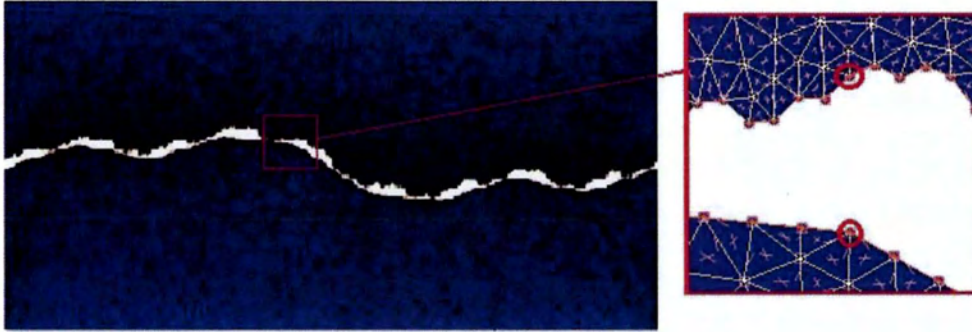
Φορτίο P_v (kN/m)	$\Delta T_c \max$ (°C)→ Χρόνος (sec)↓	3 ^η Επανάληψη	4 ^η Επανάληψη	5 ^η Επανάληψη	6 ^η Επανάληψη
$0.2f_y t_\pi$	92	170.9997	164.7641	163.725	152.2926
$0.3f_y t_\pi$	86	140.989	140.0608	138.7181	123.688
$0.4f_y t_\pi$	82	118.26	114.778	111.391	97.862
$0.5f_y t_\pi$	80	99.257	95.958	91.951	86.653
$0.6f_y t_\pi$	80	80.136	76.083	74.261	63.941
$0.7f_y t_\pi$	78	62.884	62.916	61.369	52.71

Πίνακας 4.2.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων τιμών θερμοκρασιακών διαφορών, $\Delta T_c \max$, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(2)}$, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης και για όλες τις τιμές ανάλυσης της.

4.3 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$

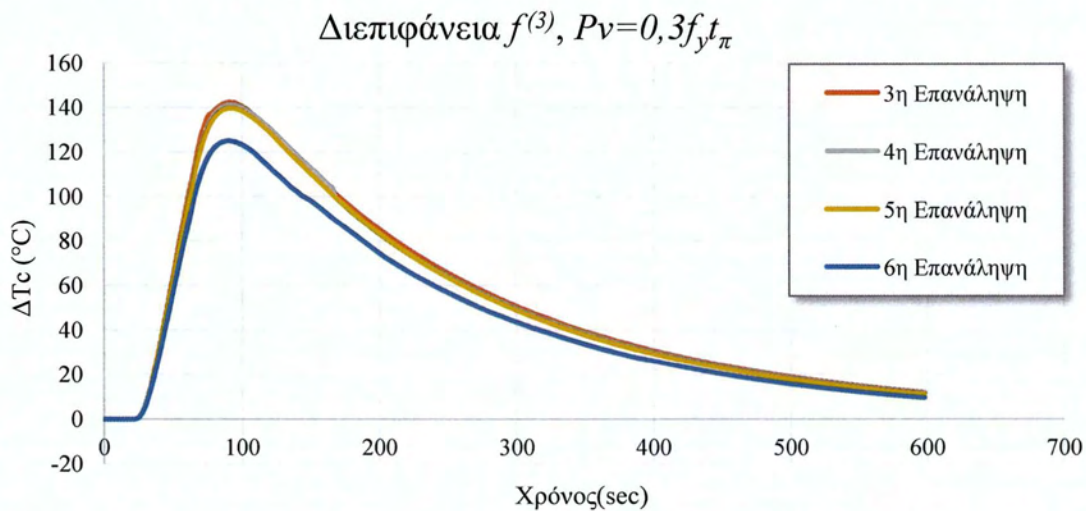
Το μοντέλο που μελετάται στην ενότητα αυτή είναι η κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(3)}$, που παρουσιάζει την μεγαλύτερη τραχύτητα από αυτή των προηγούμενων δυο περιπτώσεων και έχει fractal κλασματική διάσταση $D=1.177$. Η γεωμετρία της διεπιφάνειας αυτής ορίστηκε από τη fractal συνάρτηση παρεμβολής που διέρχεται από τα ίδια σημεία $\{(0.0, 0.0), (0.04, 0.005), (0.08, -0.005), (0.12, 0.0)\}$ και οι τιμές των ελεύθερων παραμέτρων είναι $d_1 = d_2 = d_3 = 0.405$. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι συνοριακές συνθήκες και στην περίπτωση αυτής της κατασκευής παρουσιάζονται αναλυτικά στην Ενότητα 3.2.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμικής διαφοράς, ΔT_c , των δύο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(3)}$ συναρτήσει του χρόνου, για τις περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης που μελετήθηκαν και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Πρέπει να σημειωθεί και εδώ, ότι οι κόμβοι που επελέγησαν είναι οι ίδιοι με τους κόμβους των δύο άλλων διεπιφανειών που μελετήθηκαν, για να μπορέσει να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.



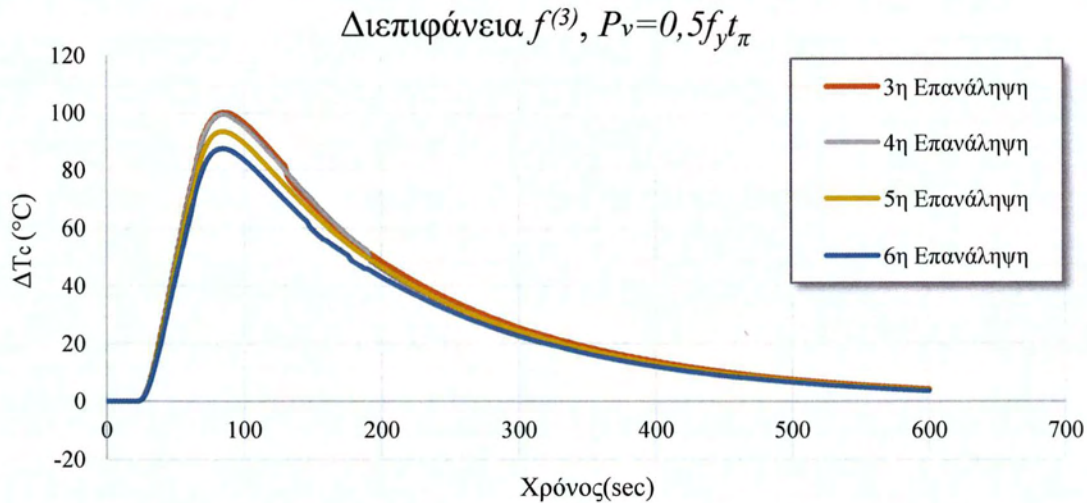
Σχήμα 4.3.1 : Απεικόνιση των δύο κόμβων που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό της διαφοράς της θερμοκρασίας στην διεπιφάνεια $f^{(3)}$.

Στα διαγράμματα του σχήματος που ακολουθεί δίνονται οι καμπύλες της θερμοκρασιακής διαφοράς των επιλεγμένων κόμβων της διεπιφάνειας σε συνάρτηση με τον χρόνο, για διαφορετικές τιμές της ανάλυσης της διεπιφάνειας $f^{(3)}$, για την περίπτωση ομοιόμορφα κατανεμημένου κατακόρυφου φορτίου με τιμή $P_v = 0.3f_y t_\pi$. Και σ' αυτήν την περίπτωση παρατηρούμε ότι η μετάβαση σε ακριβέστερη ανάλυση της διεπιφάνειας οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Αυτό συμβαίνει διότι, όσο αυξάνει η τραχύτητα της διεπιφάνειας, τόσο πιο έντονες είναι οι πλαστικοποιήσεις γύρω απ' αυτήν, με αποτέλεσμα η επιφάνεια επαφής να μεγαλώνει οδηγώντας έτσι, σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας.



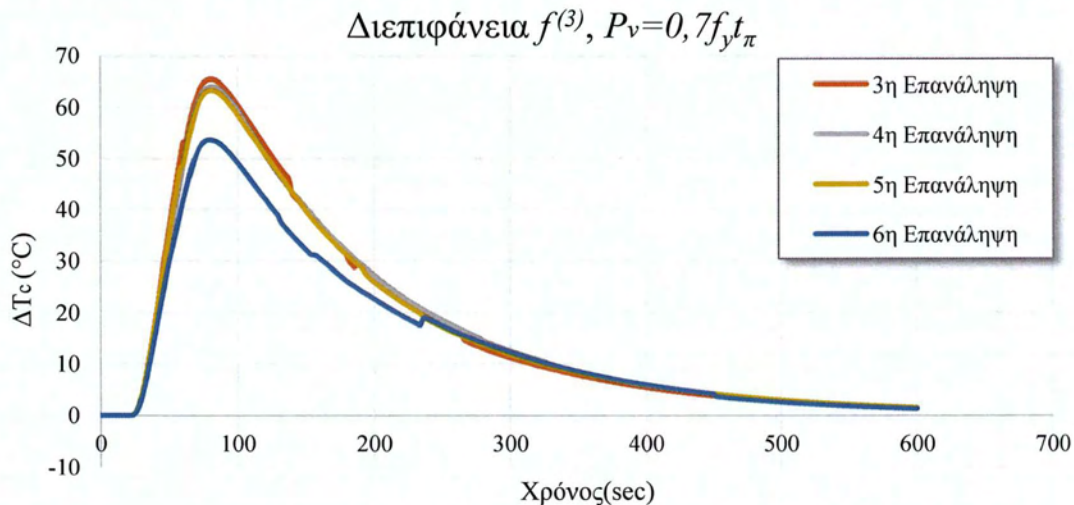
Σχήμα 4.3.2 : Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.3f_y t_\pi$.

Στο Σχήμα 4.3.3 παρουσιάζονται οι ίδιες καμπύλες για την περίπτωση όπου το κατακόρυφο φορτίο προκαλεί τάσεις όσες με $0.5f_y t_\pi$. Και εδώ, παρατηρείται αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής όταν πηγαίνουμε σε ακριβέστερη ανάλυση της διεπιφάνειας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η αύξηση αυτή είναι μεγαλύτερη στις δύο ανώτερες επαναλήψεις, όπου οι πλαστικοποιήσεις στην περιοχή της διεπιφάνειας είναι πιο έντονες.



Σχήμα 4.3.3 : Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.5f_y t_\pi$.

Ανάλογα είναι τα συμπεράσματα που εξάγονται και για την τρίτη περίπτωση, όπου το κατακόρυφο φορτίο παίρνει τιμή ίση με $P_v = 0.7f_y t_\pi$. Στην περίπτωση αυτή, παρατηρούμε ότι η συμπεριφορά της ανώτερης ανάλυσης διαφοροποιείται πλήρως σε σχέση με τις άλλες αναλύσεις, γεγονός που εξηγείται από την μορφή των αιχμών της ανώτερης ανάλυσης.



Σχήμα 4.3.4 : Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$, για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.7f_y t_\pi$.

Στον Πίνακα 4.3.1 καταγράφονται οι μέγιστες τιμές των θερμοκρασιακών διαφορών των δύο επιλεγμένων κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(3)}$ για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης και για όλες τις τιμές ανάλυσής της. Από τη μελέτη του πίνακα διαπιστώνουμε ότι και σ' αυτήν την περίπτωση μεγαλύτερη ανάλυση της διεπιφάνειας οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας. Συγκρίνοντας όμως τους Πίνακες 4.1.1,



4.2.1 και 4.3.1 που αναφέρονται στις διεπιφάνειες $f^{(1)}$, $f^{(2)}$ και $f^{(3)}$ αντίστοιχα παρατηρούμε ότι οι διαφορές στη θερμική αγωγιμότητα μεταξύ όλων των αναλύσεων της διεπιφάνειας, είναι μεγαλύτερες στην περίπτωση της διεπιφάνειας $f^{(3)}$ με τη μεγαλύτερη fractal διάσταση.

Φορτίο P_v (kN/m)	$\Delta T_{c \max}$ ($^{\circ}\text{C}$) \rightarrow Χρόνος (sec) \downarrow	3 ^η Επανάληψη	4 ^η Επανάληψη	5 ^η Επανάληψη	6 ^η Επανάληψη
$0.2f_y t_{\pi}$	96	176.205	170.765	165.609	154.192
$0.3f_y t_{\pi}$	92	142.247	141.392	139.755	125.025
$0.4f_y t_{\pi}$	86	124.759	120.24	112.369	97.826
$0.5f_y t_{\pi}$	84	100.173	99.777	93.437	87.569
$0.6f_y t_{\pi}$	82	80.312	79.238	74.084	67.726
$0.7f_y t_{\pi}$	80	65.424	64.042	63.299	53.655

Πίνακας 4.3.1: Συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων τιμών θερμοκρασιακών διαφορών, $\Delta T_{c \max}$, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(3)}$, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης και για όλες τις τιμές ανάλυσης της.



5^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΕΠΑΦΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η επιρροή του κατακόρυφου φορτίου στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής, ανάμεσα στις δυο μεταλλικές τραχείες διεπιφάνειες λαμβάνοντας υπόψη διάφορες ακρίβειες στην ανάλυση τους. Εξετάστηκαν έξι διαφορετικές περιπτώσεις ομοιόμορφα κατανεμημένου κατακόρυφου φορτίου, που παρουσιάζονται στον ακόλουθο Πίνακα 6.1. Η επιβολή των κατακόρυφων φορτίων ακολουθεί το χρονικό διάγραμμα του Σχήματος 3.1.1.1, σύμφωνα με το οποίο το φορτίο αυξάνεται σταδιακά τα πρώτα 20 λεπτά, έως ότου φτάσει στην τελική του τιμή και στη συνέχεια σταθεροποιείται, μέχρι την ολοκλήρωση της επίλυσης. Κατά την ανάλυση δεσμευτήκαν οι μετακινήσεις, των κόμβων της βάσης των κατασκευών, κατά τη διεύθυνση y και των κόμβων της αριστερής πλευράς της κατασκευής κατά τη διεύθυνση x. Επίσης στους κόμβους της βάσης, του κάτω τμήματος της κατασκευής ασκήθηκε ομοιόμορφη θερμοκρασιακή μεταβολή ίση με 400°C σταδιακά μέσα από 3000 βήματα φόρτισης (Σχήμα 3.1.2.2). Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν προέκυψαν τα διαγράμματα θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο επιλεγόμενων κόμβων σε συνάρτηση με το χρόνο, τα οποία παρατίθενται στις επόμενες ενότητες.

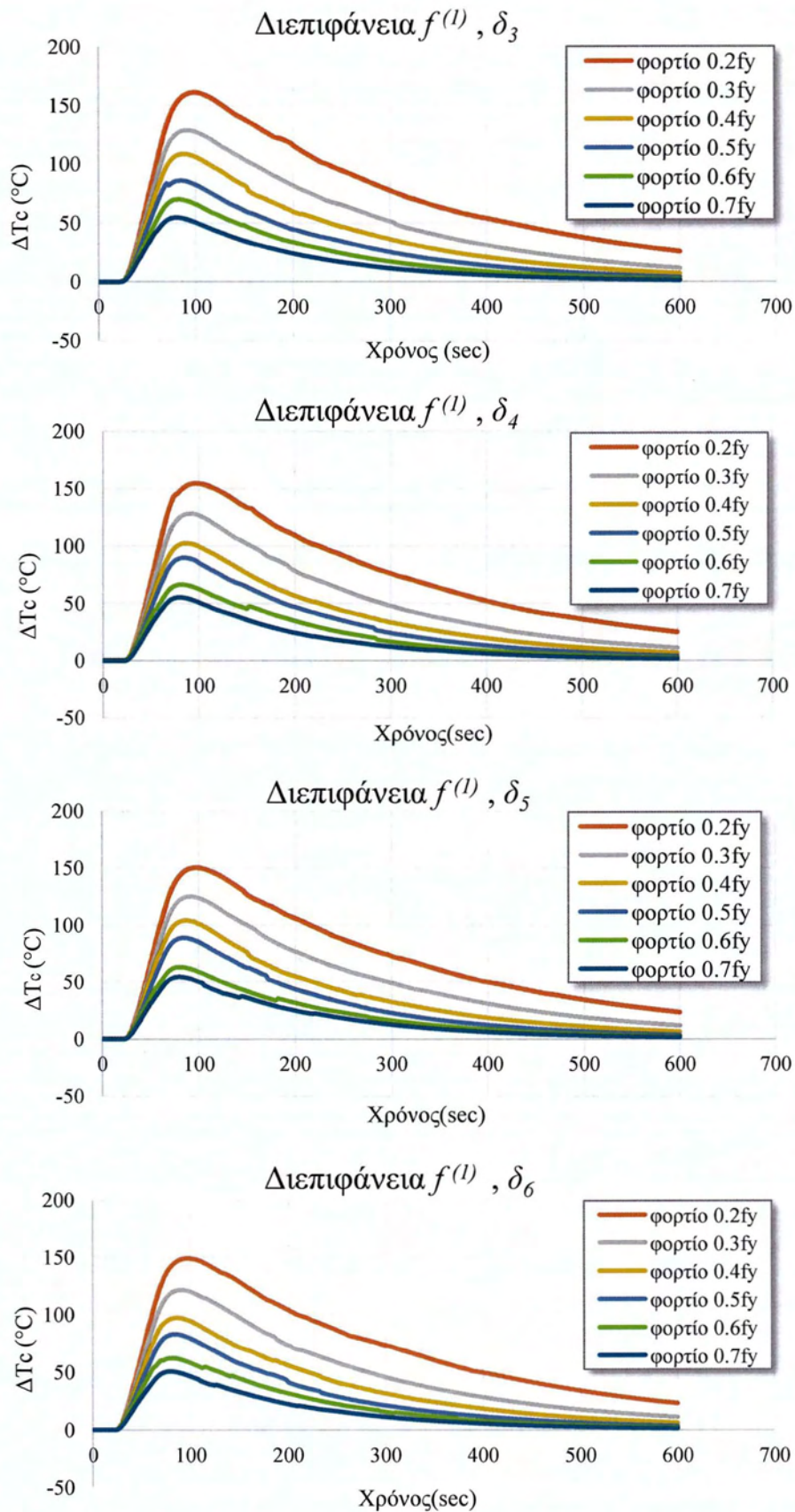
Ομοιόμορφα Κατανεμημένο Κατακόρυφο Φορτίο (kN/m)
$P_v = 0.2f_y t_{\pi} = 550$
$P_v = 0.3f_y t_{\pi} = 825$
$P_v = 0.4f_y t_{\pi} = 1100$
$P_v = 0.5f_y t_{\pi} = 1375$
$P_v = 0.6f_y t_{\pi} = 1650$
$P_v = 0.7f_y t_{\pi} = 1925$

Πίνακας 5.1 : Παρουσίαση των έξι διαφορετικών περιπτώσεων ομοιόμορφα κατανεμημένου κατακόρυφου φορτίου, που επιβλήθηκε στις κατασκευές που μελετήθηκαν.



5.1 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$

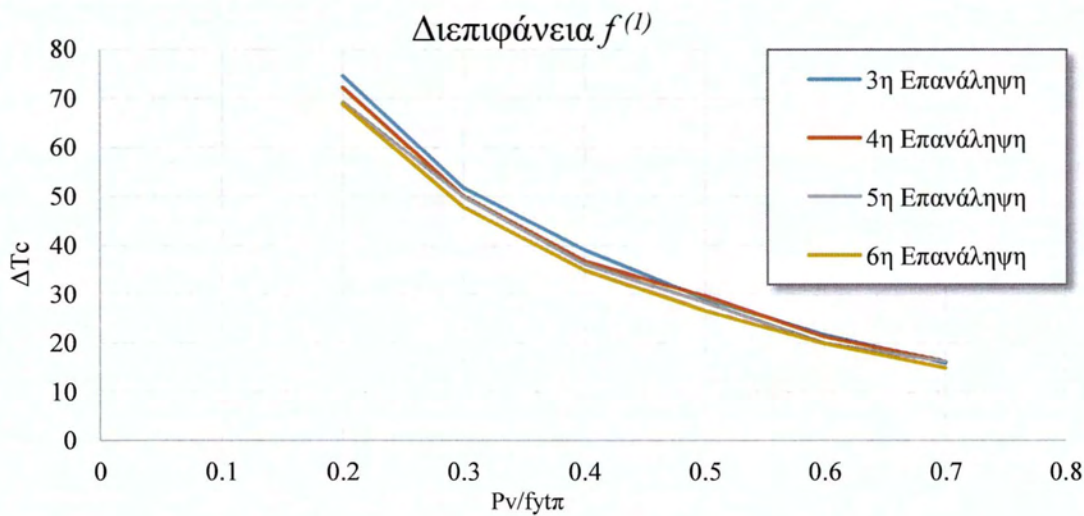
Στο σχήμα 5.1.1 παρουσιάζονται τα διαγράμματα θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(1)}$ συναρτήσει του χρόνου, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης που μελετήθηκαν και για όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας (δ_3 - δ_6). Από την μελέτη των διαγραμμάτων του σχήματος, είναι φανερό ότι η συμπεριφορά της κατασκευής για όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας της είναι ακριβώς η ίδια. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε ανάλυση της διεπιφάνειας παρατηρείται μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας των κόμβων της διεπιφάνειας, καθώς αυξάνει η τιμή του κατακόρυφου φορτίου. Έτσι, για την μικρότερη τιμή του κατακόρυφου φορτίου ($P_v = 0.2f_y t_\pi$) εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές θερμοκρασιακής διαφοράς στους δύο κόμβους της διεπιφάνειας, οι οποίες μειώνονται σταδιακά με την αύξηση του φορτίου, για να ελαχιστοποιηθούν όταν το φορτίο παίρνει τη μέγιστη τιμή του. Επιπλέον, συγκρίνοντας τις διαφορετικές αναλύσεις της διεπιφάνειας μεταξύ τους παρατηρείται ότι ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασιακής διαφοράς στους κόμβους της διεπιφάνειας, για την ίδια περίπτωση κατακόρυφου φορτίου, είναι παρόμοιος σε όλες τις αναλύσεις. Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι η θερμοκρασιακή διαφορά των δυο κόμβων της διεπιφάνειας μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου. Αυτό εξηγείται από το γεγονός, ότι η αύξηση του κατακόρυφου φορτίου οδηγεί σε έντονες πλαστικοποιήσεις των αιχμών της διεπιφάνειας, αυξάνοντας έτσι την επιφάνεια επαφής των δυο τμημάτων. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, η οποία εκφράζεται με τη μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας.



Σχήμα 5.1.1 : Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας συναρτήσει χρόνου, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(1)}$ και για διαφορετικές τιμές κατακόρυφου φορτίου.



Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέση τιμή των θερμοκρασιακών διαφορών των δύο επιλεγμένων κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(1)}$ σε συνάρτηση με το επιβαλλόμενο φορτίο, για όλες τις ακρίβειες ανάλυσης που μελετώνται εδώ. Μελετώντας τα διαγράμματα του Σχήματος 5.1.2 παρατηρούμε ότι ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασιακής διαφοράς των κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(1)}$ είναι μεγαλύτερος όταν κινούμαστε στις χαμηλότερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου και μειώνεται σταδιακά, καθώς λαμβάνονται υπόψη μεγαλύτερες τιμές αυτού. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια επαφής αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου όταν αυτό παίρνει μικρές τιμές (π.χ. από $P_v = 0.2f_y t_\pi$ στο $P_v = 0.3f_y t_\pi$) και τείνει να σταθεροποιηθεί όταν το κατακόρυφο φορτίο παίρνει μεγαλύτερες τιμές (π.χ. από το $P_v = 0.6f_y t_\pi$ στο $P_v = 0.7f_y t_\pi$). Ένα ακόμα σημαντικό συμπέρασμα, που τονίστηκε και παραπάνω, είναι ότι ο ρυθμός αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας της διεπιφάνειας δεν επηρεάζεται από την ανάλυση και είναι παρόμοιος σε όλες τις αναλύσεις για την ίδια πάντα περίπτωση κατακόρυφου φορτίου.

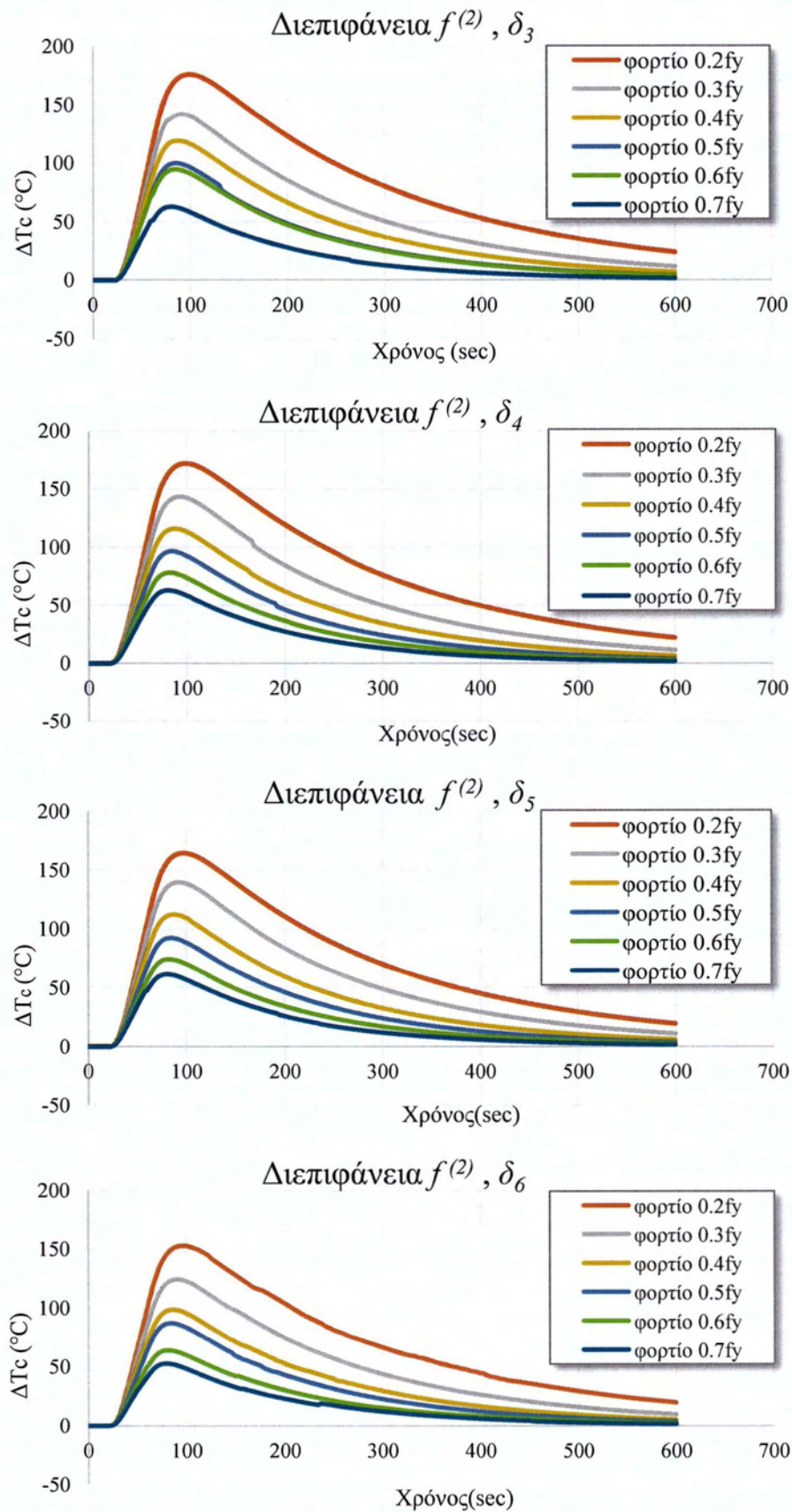


Σχήμα 5.1.2 : Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(1)}$ συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου, για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης της.



5.2 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$

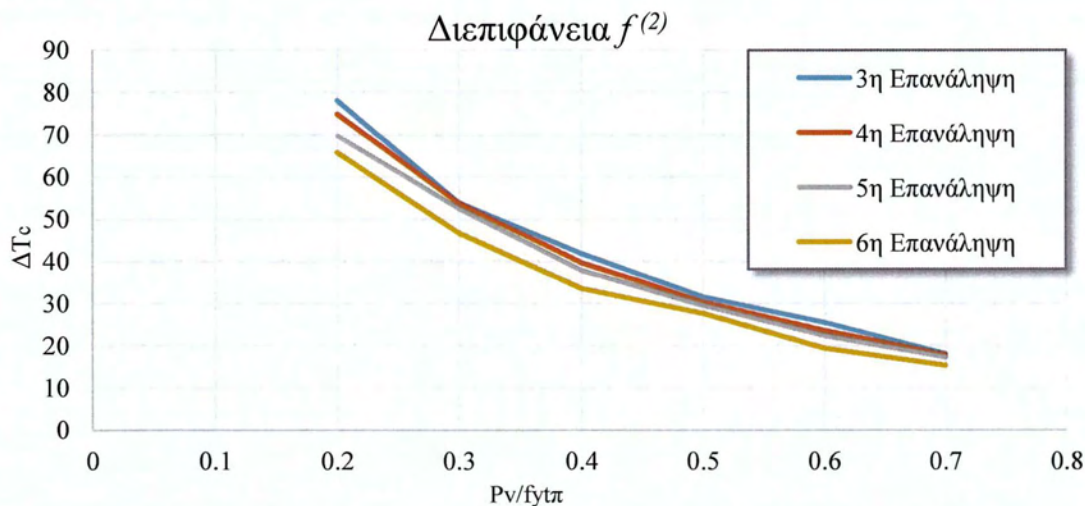
Το Σχήμα 5.2.1 περιλαμβάνει τις καμπύλες των τιμών θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(2)}$ σε συνάρτηση με το χρόνο, για τις έξι περιπτώσεις φόρτισης και για τις τέσσερις αναλύσεις της διεπιφάνειας (δ_3 - δ_6). Και σ' αυτήν την περίπτωση, η συμπεριφορά της κατασκευής για όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας, παρουσιάζει την ίδια εικόνα. Συγκεκριμένα, για κάθε ανάλυση της διεπιφάνειας $f^{(2)}$ διαπιστώνεται, ότι με την αύξηση του κατακόρυφου επιβαλλόμενου φορτίου οι τιμές της θερμοκρασιακής διαφοράς των κόμβων στη διεπιφάνεια μειώνονται. Επιπλέον, και σ' αυτήν την περίπτωση παρατηρείται ότι το σημείο εμφάνισης της μέγιστης θερμοκρασιακής διαφοράς των κόμβων, εντοπίζεται νωρίτερα με την αύξηση κατακόρυφου φορτίου. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στις εντονότερες πλαστικοποιήσεις των αιχμών, που επιτυγχάνονται με την άσκηση μεγαλύτερου κατακόρυφου φορτίου. Ως εκ τούτου, η πραγματική επιφάνεια επαφής των δυο μεταλλικών τμημάτων της κατασκευής διευρύνεται, με αποτέλεσμα να μεγαλώνουν και οι περιοχές μέσω των οποίων ρέει η θερμότητα. Αξίζει να σημειωθεί σ' αυτό το σημείο ότι με την αύξηση της τιμής του κατακόρυφου φορτίου, η χρονική στιγμή εμφάνισης της μέγιστης θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων είναι πολύ κοντά στην χρονική στιγμή ($t=60\text{sec}$) που ολοκληρώνεται η επιβολή της θερμοκρασιακής κατανομής στο κάτω τμήμα της κατασκευής. Επίσης, συγκρίνοντας τις καμπύλες που αναφέρονται στην ανάλυση δ_6 των διεπιφανειών $f^{(1)}$ και $f^{(2)}$ παρατηρούμε την ίδια σχεδόν συμπεριφορά, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης. Γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, η επιρροή της fractal διάστασης, D , της διεπιφάνειας στο πρόβλημα της θερμικής αγωγιμότητας κατασκευών με ελαστοπλαστική συμπεριφορά όταν λαμβάνονται υπόψη αναλύσεις μεγάλης ακρίβειας της διεπιφάνειας δεν είναι σημαντική.



Σχήμα 5.2.1 : Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας συναρτήσει χρόνου, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(2)}$ και για διαφορετικές τιμές κατακόρυφου φορτίου.



Το Σχήμα 5.2.2 απεικονίζει τη μέση τιμή της μεταβολής των τιμών θερμοκρασιακής διαφοράς των δυο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(2)}$, συναρτήσει του κατακόρυφου επιβαλλόμενου φορτίου, για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης της διεπιφάνειας. Και σ' αυτήν την περίπτωση, παρατηρούμε ότι ο ρυθμός αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας στην διεπιφάνεια είναι μεγαλύτερος στις χαμηλότερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου και μειώνεται σταδιακά καθώς κινούμαστε σε μεγαλύτερες τιμές αυτού. Αυτό, όπως τονίστηκε και παραπάνω, οφείλεται στο γεγονός ότι η επιφάνεια επαφής και κατά συνέπεια η θερμική αγωγιμότητα, αυξάνεται σημαντικά στις χαμηλότερες τιμές του (αύξηση π.χ. από $P_v = 0.2f_y t_\pi$ στο $P_v = 0.3f_y t_\pi$) και τείνει να σταθεροποιηθεί στις μεγαλύτερες τιμές (αύξηση π.χ. από $P_v = 0.6f_y t_\pi$ στο $P_v = 0.7f_y t_\pi$).



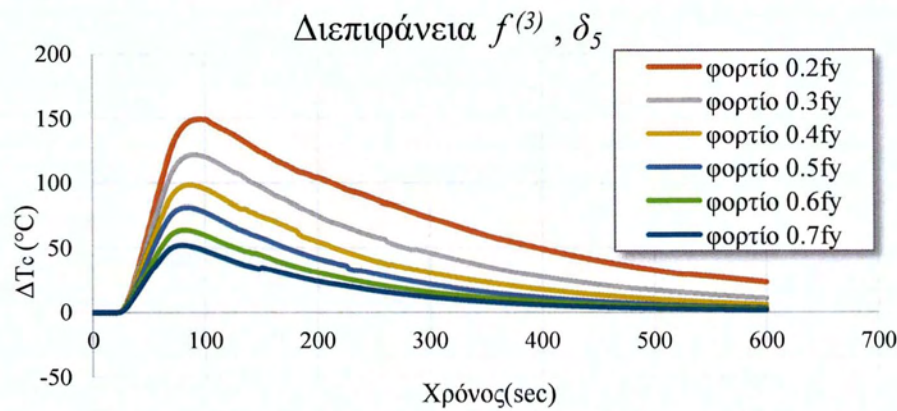
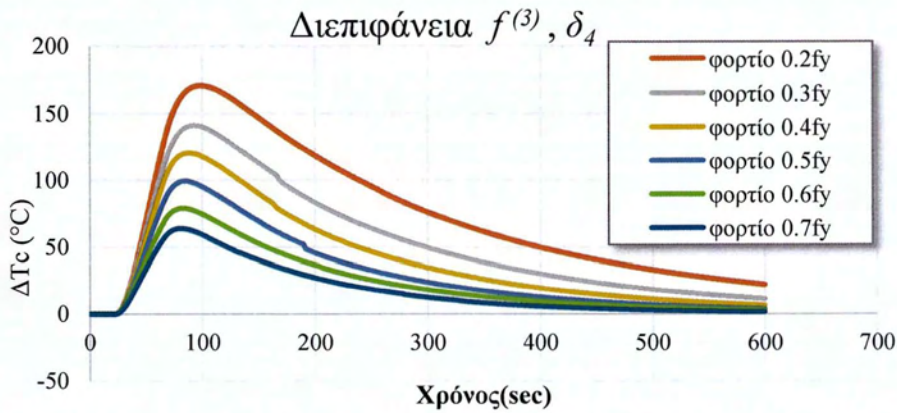
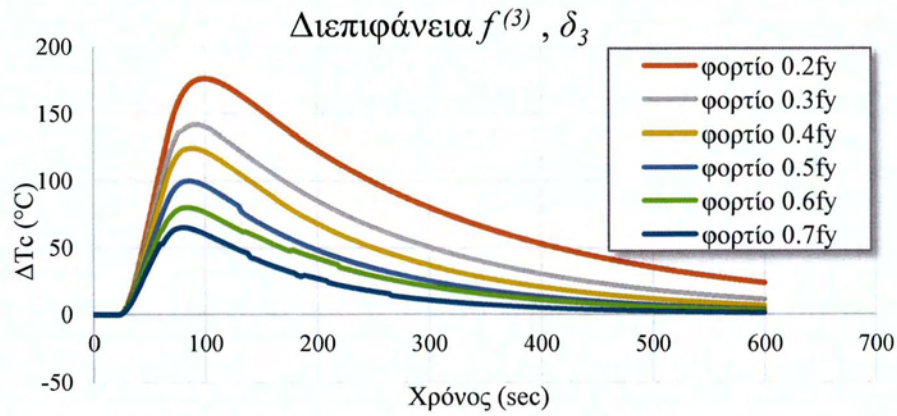
Σχήμα 5.2.2 : Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(2)}$ συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου, για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης της

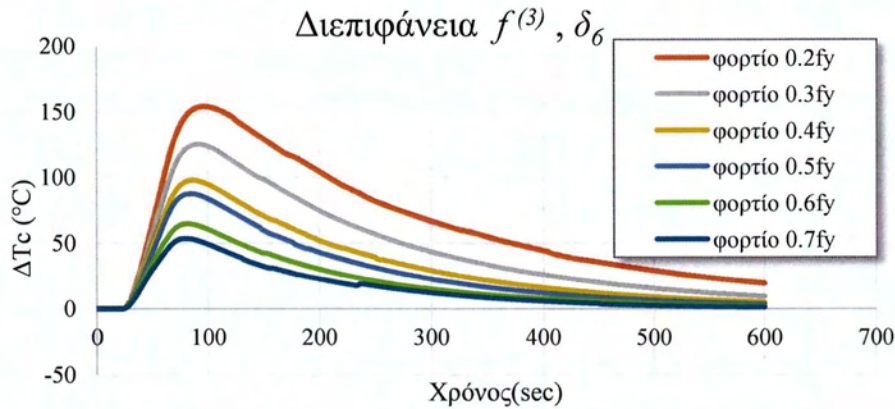
5.3 Μελέτη της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$

Στο σχήμα 5.3.1 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα θερμοκρασιακής διαφοράς των κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(3)}$ συναρτήσει του χρόνου, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης και για όλες τις ανάλυσης της διεπιφάνειας, που μελετήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας. Και σ' αυτήν την περίπτωση η συμπεριφορά της κατασκευής παρουσιάζει ανάλογη εικόνα με τις δύο άλλες περιπτώσεις, όπου η προσομοίωση της διεπιφάνειας έγινε με τις διαφορετικές fractal συναρτήσεις παρεμβολής $f^{(1)}$ και $f^{(2)}$. Πρέπει να σημειωθεί εδώ, ότι και η συμπεριφορά της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$, όταν λαμβάνεται υπόψη η ανάλυση δ_6 είναι εντελώς ανάλογη με τη συμπεριφορά των κατασκευών με διεπιφάνειες $f^{(1)}$ και $f^{(2)}$, για την ίδια ανάλυση. Το γεγονός αυτό επαληθεύει το συμπέρασμα της προηγούμενης παραγράφου, ότι δηλαδή η επιρροή της fractal διάστασης, D , της διεπιφάνειας στο



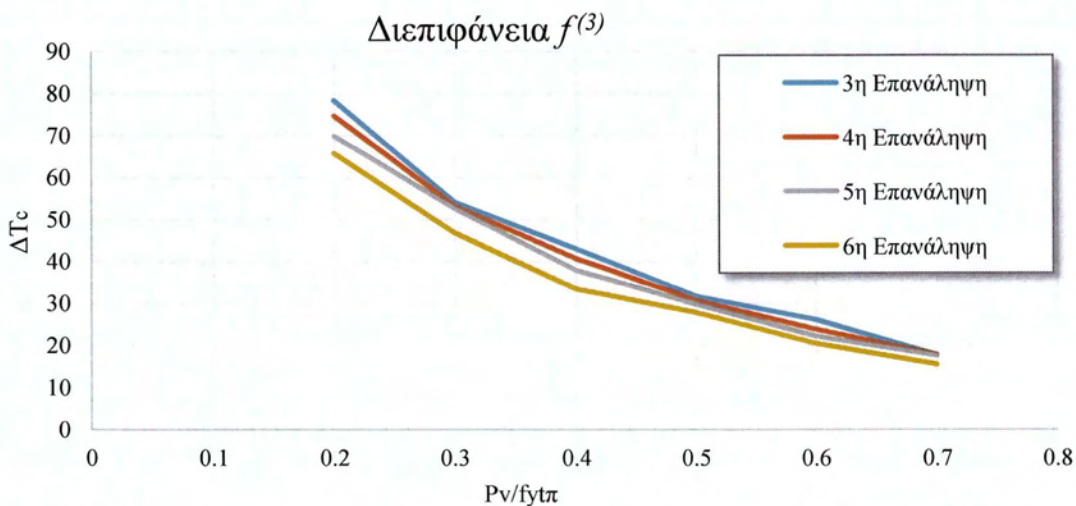
πρόβλημα της θερμικής αγωγιμότητας κατασκευών με ελαστοπλαστική συμπεριφορά όταν λαμβάνονται υπόψη ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας, δεν είναι σημαντική.





Σχήμα 5.3.1 : Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας συναρτήσει χρόνου, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(3)}$ και για διαφορετικές τιμές κατακόρυφου φορτίου.

Στο σχήμα 5.3.2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μέσης τιμής θερμοκρασιακής διαφοράς των κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(3)}$ συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης της διεπιφάνειας. Και εδώ παρατηρούμε ότι ο ρυθμός αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας (μείωσης της θερμοκρασιακής διαφοράς) στην διεπιφάνεια είναι μεγαλύτερος στις χαμηλότερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου και μειώνεται σταδιακά, καθώς οδηγούμαστε σε μεγαλύτερες τιμές του. Πρέπει όμως, να σημειωθεί ότι στην περίπτωση αυτή ο ρυθμός αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας είναι μεγαλύτερος στις χαμηλές τιμές του κατακόρυφου φορτίου συγκρινόμενος με τον αντίστοιχο ρυθμό αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας των άλλων περιπτώσεων (διεπιφάνειες $f^{(1)}$ και $f^{(2)}$) και μειώνεται πιο έντονα, καθώς κινούμαστε σε μεγαλύτερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου, όταν πηγαίνουμε από το φορτίο $P_v = 0.6f_y t_\pi$ στο $P_v = 0.7f_y t_\pi$.



Σχήμα 5.3.2 : Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(3)}$ συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου, για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης της



6^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της επιρροής της τραχύτητας που εμφανίζουν μεταλλικές διεπιφάνειες, καθώς και του κατακόρυφου φορτίου στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής. Χρησιμοποιήσαμε τη γεωμετρία fractal και ειδικότερα τις συναρτήσεις παρεμβολής τύπου fractal για να επιτύχουμε ρεαλιστική και ακριβή προσομοίωση της τραχύτητας, που εμφανίζουν οι διεπιφάνειες της κατασκευής μας. Διερευνήσαμε έτσι, την επιρροή της ανάλυσης των διεπιφανειών στη μεταφορά θερμότητας λόγω επαφής. Επίσης, μεταβάλαμε τις τιμές του κατακόρυφου φορτίου, προκειμένου να παρατηρήσουμε την επίδραση του στο φαινόμενο της θερμικής αγωγιμότητας των διεπιφανειών. Τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν, από τις επιλύσεις στο λογισμικό πρόγραμμα Marc και την επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Η θερμική αγωγιμότητα σχετίζεται άμεσα με την τραχύτητα της διεπιφάνειας. Αύξηση της τραχύτητας, που στην παρούσα εργασία συνδέεται με την αύξηση της ανάλυσης της διεπιφάνειας, οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής στις μεταλλικές διεπιφάνειες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την αύξηση της ανάλυσης λαμβάνονται υπόψη αιχμές μικρότερης κλίμακας, που πλαστικοποιούνται εντονότερα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η επιφάνεια επαφής και κατά συνέπεια να πραγματοποιείται ευκολότερα η μεταφορά της θερμότητας.
- ✓ Στις μεγαλύτερες αναλύσεις των διεπιφανειών με την αύξηση των τιμών του κατακόρυφου φορτίου τα φαινόμενα της πλαστικοποίησης της κατασκευής είναι πιο έντονα. Πιο συγκεκριμένα, στις μεγαλύτερες αναλύσεις των διεπιφανειών, όσο αυξάνει η τιμή της κατακόρυφης φόρτισης, το φαινόμενο της πλαστικοποίησης εκτείνεται σε μεγαλύτερο τμήμα του εσωτερικού της κατασκευής με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η μεταφορά της θερμότητας.
- ✓ Η θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής στις μεταλλικές διεπιφάνειες της κατασκευής μας συνδέεται άμεσα με την κατακόρυφη φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, αύξηση της τιμής του κατακόρυφου φορτίου οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας γεγονός που οφείλεται στην έντονη πλαστικοποίηση των αιχμών των διεπιφανειών με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου και κατά συνέπεια στην αύξηση της επιφάνειας επαφής των δυο τμημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασιακής διαφοράς των κόμβων των διεπιφανειών είναι μεγαλύτερος όταν κινούμαστε σε χαμηλότερες τιμές κατακόρυφου φορτίου και μειώνεται



σταδιακά καθώς λαμβάνονται υπόψη μεγαλύτερες τιμές κατακόρυφης φόρτισης. Αυτό συμβαίνει, διότι η επιφάνεια επαφής αυξάνει σημαντικά με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου όταν αυτό κινείται σε χαμηλές τιμές και τείνει να σταθεροποιηθεί όταν το κατακόρυφο φορτίο παίρνει μεγάλες τιμές.

- ✓ Για τις ανώτερες αναλύσεις των τριών διεπιφανειών για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης η συμπεριφορά που επέδειξε η κατασκευή ήταν σχεδόν ίδια. Γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η επιρροή της fractal διάστασης D της διεπιφάνειας δεν είναι σημαντική στο πρόβλημα της θερμικής αγωγιμότητας κατασκευών με ελαστοπλαστική συμπεριφορά όταν μελετώνται αναλύσεις μεγάλης ακρίβειας.
- ✓ Για την ίδια περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης οι διαφορές της θερμοκρασίας είναι μεγαλύτερες σε διεπιφάνειες με μεγαλύτερο fractal συντελεστή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αύξηση της διάστασης fractal της διεπιφάνειας οδηγεί σε αύξηση της τραχύτητας της και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής μέσω της οποίας μεταφέρεται θερμότητα.



ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.2.1.1 Αγωγή θερμότητας σε επίπεδο τοίχωμα.....	8
1.3.3.1 Σχηματική απεικόνιση της ροής θερμότητας σε μια διεπαφή	12
0.1.1 Σχηματικό διάγραμμα μιας επαφής.....	14
1.4.2.1 Θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής δυο τραχιών επιφανειών & διάγραμμα θερμοκρασιακής μεταβολής.....	14
1.4.3.1 Σχηματική απεικόνιση της θερμικής ροής μέσω του συστήματος των συζευγμένων σωλήνων	16
2.1.1 Σχηματική απεικόνιση των βασικών παραμέτρων της τραχύτητας	18
2.4.1 Υπολογισμός της fractal διάστασης των συναρτήσεων παρεμβολής τύπου fracta	25
2.4.2 Γραφήματα fractal συναρτήσεων παρεμβολής με, που διέρχονται από το ίδιο αρχικό σύνολο σημείων	26
3.1.1 Οι υπό μελέτη κατασκευές	29
3.2.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δισδιάστατου μοντέλου	30
3.2.1.1 Μεταβολή του επιβαλλόμενου φορτίου συναρτήσει του χρόνου	31
3.2.1.2 Μεταβολή επιβαλλόμενης θερμοκρασιακής κατανομής συναρτήσει του χρόνου	31
3.2.1.3 Απεικόνιση των συνολικών συνοριακών συνθήκων της κατασκευής.....	32
3.3.1.1 Μεταβολή της ειδικής θερμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	33
3.3.2.2 Μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	34
3.3.3.1 Σχηματικό διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων χάλυβα στο οποίο φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλωση που υφίσταται το διάγραμμα όταν ο χάλυβας εκτεθεί σε υψηλές θερμοκρασίες	34
3.3.3.2 Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης χάλυβα S275 για διάφορες τιμές θερμοκρασίας	35
3.4.1 Διακριτοποίηση όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$	37
3.4.2 Διακριτοποίηση όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$	39
3.4.3 Διακριτοποίηση όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$	40
3.4.4 Λεπτομέρεια του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στη διεπιφάνεια, όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$	41
3.4.5 Λεπτομέρεια του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στη διεπιφάνεια, όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$	42



3.4.6 Λεπτομέρεια του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στη διεπιφάνεια, όλων των επαναλήψεων της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$	43
3.4.7 Αρίθμηση των κόμβων του τριγωνικού πεπερασμένου στοιχείου (TRIA3)	44
4.1.1 Απεικόνιση των δύο κόμβων, που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό της διαφοράς της θερμοκρασίας τους στην διεπιφάνεια $f^{(1)}$	47
4.1.2 Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$ για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.3f_y t_\pi$	47
4.1.3 Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$ για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.5f_y t_\pi$	48
4.1.4 Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(1)}$ για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.7f_y t_\pi$	49
4.2.1 Απεικόνιση των δύο κόμβων που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό της διαφοράς της θερμοκρασίας στην διεπιφάνεια $f^{(2)}$	50
4.2.2 Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$ για και ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.3f_y t_\pi$	51
4.2.3 Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$ για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.5f_y t_\pi$	52
4.2.4 Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(2)}$ για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.7f_y t_\pi$	52
4.3.1 Απεικόνιση των δύο κόμβων που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό της διαφοράς της θερμοκρασίας στην διεπιφάνεια $f^{(3)}$	54
4.3.2 Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$ για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.3f_y t_\pi$	54
4.3.3 Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$ για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.5f_y t_\pi$	55
4.3.4 Καμπύλη θερμοκρασιακής μεταβολής, ΔT_c , της κατασκευής με διεπιφάνεια $f^{(3)}$ για ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο $P_v = 0.7f_y t_\pi$	55
5.1.1 Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας συναρτήσει χρόνου, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(1)}$ και για διαφορετικές τιμές κατακόρυφου φορτίου	59άλο
5.1.2 Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(1)}$ συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου, για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης της	60
5.2.1 Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας συναρτήσει χρόνου, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(2)}$ και για διαφορετικές τιμές κατακόρυφου φορτίου	62
5.2.2 Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(2)}$ συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου, για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης της	63



5.3.1 Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας συναρτήσεως χρόνου, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(3)}$ και για διαφορετικές τιμές κατακόρυφου φορτίου	64
5.3.2 Καμπύλες θερμοκρασιακής διαφοράς των δύο κόμβων της διεπιφάνειας $f^{(3)}$ συναρτήσεως του κατακόρυφου φορτίου, για όλες τις περιπτώσεις ανάλυσης της	65

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

3.1.1 Ελεύθερες παράμετροι και fractal διάσταση των fractal συναρτήσεων παρεμβολής, τα γραφήματα των οποίων προσομοιώνουν τη γεωμετρία των υπό εξέταση διεπιφανειών	28
3.1.2 Χαρακτηριστικά των υπό εξέταση διεπιφανειών	28
3.4.1 Αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση	44
4.1.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων τιμών θερμοκρασιακών διαφορών, $\Delta T_{c\ max}$, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(1)}$, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης και για όλες τις τιμές ανάλυσης της	49
4.2.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων τιμών θερμοκρασιακών διαφορών, $\Delta T_{c\ max}$, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(2)}$, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης και για όλες τις τιμές ανάλυσης της	53
4.3.1 Συγκεντρωτικός πίνακας των μέγιστων τιμών θερμοκρασιακών διαφορών, $\Delta T_{c\ max}$, για την κατασκευή με διεπιφάνεια $f^{(3)}$, για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης και για όλες τις τιμές ανάλυσης της	56
5.1 Παρουσίαση των έξι διαφορετικών περιπτώσεων ομοιόμορφα καταναμημένου κατακόρυφου φορτίου, που επιβλήθηκε στις κατασκευές που μελετήθηκαν	57

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

q	ροή θερμότητας
k	θερμική αγωγιμότητα υλικού
dT	θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος ενός απειροελάχιστου πάχους
dx	απειροελάχιστο πάχος υλικού στη διεύθυνση της θερμικής ροής
p	πυκνότητα υλικού
c	ειδική θερμότητα υλικού
h_c	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή
ΔT	θερμοκρασιακή διαφορά
ϕ	συντελεστής διαμόρφωσης πυρκαγιάς
T_e	απόλυτη θερμοκρασία της επιφάνειας εκπομπής
T_r	απόλυτη θερμοκρασία της λαμβάνουσας επιφάνειας
σ_{SB}	σταθερά Stefan- Boltzman
ϵ_{thr}	συντελεστής εκπομπής
ϵ_e	συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας εκπομπής
ϵ_r	συντελεστής εκπομπής της λαμβάνουσας επιφάνειας



A_e	επιφάνεια εκπομπής
A_r	επιφάνεια απορρόφησης
A_b	επιφάνεια σύσφιξης
A_c	πραγματική επιφάνεια επαφής
A_a	φαινόμενη επιφάνεια επαφής
Q/A	σταθερή ροή θερμότητας
ψ	μικροσκοπικός συντελεστής στένωσης
A_i	εμβαδόν μιας πτυχής
k_1	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του άνω σωλήνα
k_2	συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του κάτω σωλήνα
k_m	συνολικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας
b	ισοδύναμο μήκος σωλήνα
a	ισοδύναμο μήκος του σημείου επαφής των δυο σωλήνων
δ	μήκος του στοιχειώδους τμήματος που διαιρεί μια γραμμή
$N(\delta)$	το πλήθος των διαιρεμένων τμημάτων
D	κλασματική fractal διάσταση μιας καμπύλης
D_R	διάσταση Richardson
D_B	φυσική διάσταση box
T	τελεστής
C^0	ένα σύνολο συνεχών συναρτήσεων
w_i	διατμητικός μετασχηματισμός
d_i	ελεύθερη παράμετρος μετασχηματισμού
a_i, c_i, e_i, \dots	υπόλοιπες παράμετροι μετασχηματισμού
$f^{(m)}$	συναρτήσεις παρεμβολής τύπου fractal
c_α	ειδική θερμότητα χάλυβα
λ_α	θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα
δ_6	βασικό μήκος ανώτερης επανάληψης διεπιφάνειας
f_y	τάση διαρροής του χάλυβα S275
t_π	πάχος των επιφανειών
L	μήκος κατασκευής
t	χρόνος
ΔT_c	διαφορά θερμοκρασίας δυο κόμβων στη διεπιφάνεια
ΔT_{cmax}	μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας δυο κόμβων της διεπιφάνειας



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Takayasu, H. (1990), *Fractal in the Physical Sciences*, Manchester Uni.Press, Manchester.
- [2] Fleishmann, M. (Eds) (1990), *Fractal in Natural Sciences*, Princeton University Press, Princeton.
- [3] Crilly, A.J., Earnshaw, R.A., Jones, H., (Eds) (1991), *Fractal in Chaos*, Springer Verlag, N.York, Berlin.
- [4] Peitgen, H.O. and Saupe, D. (Eds) (1988), *The Science of Fractal Images*, Springer Verlag, N.York.
- [5] Barnsley, M. (1988), *Fractals Everywhere*, Academic Press, Boston-N.York.
- [6] Osama M. Abuzeida & Nasim Alnumand (2013), Thermal contact conductance of elastically deforming nominally flat surfaces using fractal geometry, *University of Jordan, Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 65 No 6, pp.391-394.
- [7] Wahid, S.M.S. & Madhusudana, C.V. (2003), Thermal contact conductance: effect of overloading and load cycling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.46, pp. 4139-4143.
- [8] Δ. Ασημακόπουλος, Β. Λυγερού, Γ. Αραμπατζής, *Μεταφορά Θερμότητας*, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2009, pp.68-70, 218-228, 487.
- [9] Taine, J., Petit J.P. (1993), *Heat transfer*, first edition, Prentice Hall International (UK) Ltd.
- [10] Cengel, Y.A. (2011), *Heat transfer-a practical approach*, fourth edition, McGraw- Hill, Inc.
- [11] Chapman, A. (1984), *Heat transfer*, fourth edition, Macmillan Publishing Company.
- [12] US Department of Energy, *Thermodynamics, Heat Transfer and Fluid Flow*, DOE-HDBK-1012/1-92, 1992
- [13] Paul G. Slade (1999), *Electrical contacts: Principles and Applications*, Marcel Dekker Editions, Unit. States of America.
- [14] Holm R. (2000), *Electric contacts: Theory and applications*, 4th Edition Springer-Verlag, Germany.
- [15] Madhusudana C.V., (2014), *Thermal Contact Conductance*, Mechanical Engineering Series, Springer International Publishing Switzerland.
- [16] Yovanovich, M.M. & Antonetti, V.W. (1988), Application of thermal contact resistance theory to electronic packages, in Bar-Cohen, A. & Kraus, A.D. (Eds), *Advances in Thermal Modeling of Electronic Components and Systems*, Chapter 2. Vol.1, Hemisphere, New York, pp. 79-128.



- [17] Nishino, K., Yamashita, S. & Tirii, K. (1995), Thermal contact conductance under low applied load in vacuum environment, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.10 No.2, pp.258-271.
- [18] Sadhal, S.S. (1981) , Unsteady heat flow between solids with partially contacting interface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.268, pp.77-85.
- [19] Blahey,A., Tevaarwerk, J.L. & Yovanovich, M.M. (1980), Contact conductance correlations of elastically deforming flat rough surface, *Proceeding of the 15th International Thermophysics Conference*, 14-15 july , AIAA Paper No. 80-1470.
- [20] Yovanovich, M.M. (1969), Overall constriction resistance between contacting rough, wavy surfaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer* , Vol.12, pp. 1517-1520.
- [21] Whitehouse, David (2012). *Surfaces and their Measurement*. Boston: Butterworth-Heinemann
- [22] Mandelbrot, B. (1982),*The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman and Co., N. York.
- [23] Mandelbrot, B. (1967), ‘How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension’, *Science*, Vol. 155, pp. 636-8.
- [24] Τάσος Μπουντής, «Ο θαυμαστός κόσμος των fractal», εκδόσεις Leader Books A.E., 2004
- [25] Majumdar and Buhushan, B. (1990), ‘Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces’, *Trans ASME J. Tribology*, Vol. 112, pp. 205-216.
- [26] Majumdar, A. and Tien, C.L. (1990), ‘Fractal characterization and simulation of rough surfaces’, *Wear*, Vol. 136, pp. 313-327.
- [27] Panagiotopoulos, P.D. and Panagouli, O.K. (1997), ‘Fractal geometry in contact mechanics and numerical applications’, in Carpintieri, A.and Mainardi, F. (Ed.), *CISM-Book on Scaling, Fractals and Fractional Calculus in Continuum Mechanics*, Springer Verlag, pp. 109-171.
- [28] Borodich, F.M. and Onishchenko, D.A., (1999), ‘Similarity and fractality in the modelling of roughness by a multilevel profile with hierarchical structure’, *Solids and Structures*, 36(17), pp. 2585-612.
- [29] Mistakidis, E.S. and Panagouli, O.K. (2002), ‘Strength evaluation of retrofit shear wall elements with interfaces of fractal geometry’, *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 649-659.
- [30] Mistakidis, E.S. and Panagouli, O.K. (2003), ‘Friction evolution as a result of roughness in fractal interfaces’, *Engineering Computations*, Vol. 20 No. 1, pp.40-57



- [31] Chen, Ching-Ju, Lee, Tzong-Yeang, Huang, Y.M., and Lai, Fu-Jou (2009), 'Extraction of characteristic points and its fractal reconstruction for terrain profile data', *Chaos, Solitons and Fractals*, Vol. 39, pp. 1732-1743.
- [32] Barnsley, M. (1988), *Fractals Everywhere*, Academic Press, Boston-N. York
- [33] Goerke D. and Willner, K. (2008), 'Normal contact of fractal surfaces - Experimental and numerical investigation', *Wear*, Vol. 264, pp. 589-598.
- [34] H. L. Malhotra, "Design of Fire-Resisting Structures", Surrey University Press, Glasgow, 1982.
- [35] O. Petterson, S. E. Magnusson and J. Thor, "Fire Engineering Design of Steel Structures", Publication No 50, Swedish Institute of Steel Construction, 1976.
- [36] Eurocode 2, Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design, EN 1992-1-2, December 2004.
- [37] A. H. Buchanan, "Structural Design for Fire Safety", Wiley, Chichester, England, New York, 2001.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125573

