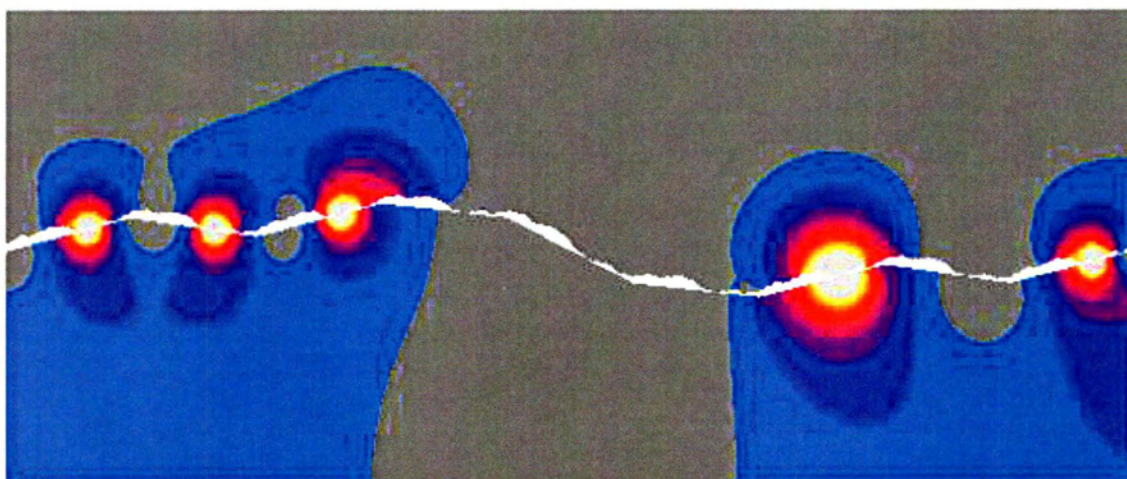




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Μακροσκοπική Ανάλυση της Θερμικής Αγωγιμότητας  
λόγω Επαφής υπό Συνθήκες Χαμηλής Πίεσης σε Τραχιές  
Μεταλλικές Διεπιφάνειες**



**ΜΑΡΓΑΡΩΝΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ**

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

**Βόλος, Μάρτιος 2017**



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

Αριθ. Εισ.: 16072/1  
Ημερ. Εισ.: 02-10-2017  
Δωρεά: Συγγραφέας  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ  
2017  
ΜΑΡ



© 2017 Μαργαρώνης Κωνσταντίνος

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).

## Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Ολυμπία Παναγούλη Επίκουρος Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Γεώργιος Εφραιμίδης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Κωνσταντίνος Τζάρος Δρ.-Πολιτικός Μηχανικός, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία σηματοδοτεί την ολοκλήρωση των σπουδών μου στη Σχολή των Πολιτικών Μηχανικών Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Από τη θέση αυτή, οφείλω ως μια ελάχιστη αναγνώριση να ευχαριστήσω όλα τα πρόσωπα που συνέβαλαν επιστημονικά και ηθικά για τη διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά την κα. Ολυμπία Παναγούλη, Επίκουρο Καθηγήτρια του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας για την επίβλεψη, την αδιάλειπτη υποστήριξη και καθοδήγηση που παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου.

Αισθάνομαι ιδιαίτερη ανάγκη να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Εφραιμίδη Γεώργιο και τον Δρ. – Πολιτικό Μηχανικό κ. Τζάρο Κωνσταντίνο που με τίμησαν με την συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως την κα. Δάφνη Παντούσα διδάκτορα του τμήματος, γιατί ήταν πάντα πρόθυμη να παράσχει την πολύτιμη βοήθεια της και να ασχοληθεί με κάθε απορία εντός και εκτός των πλαισίων της παρούσας εργασίας καθώς και με κάθε δισταγμό μου, όσο ασήμαντος και να ήταν, για την χρήση του λογισμικού Marc Mentat της εταιρίας MSC Software.

Σε αυτό το σημείο θέλω να ευχαριστήσω τη συμφοιτήτριά μου, Τσοτουλίδη Βασιλική για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε όλο αυτό το διάστημα. Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη της σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Την παρούσα εργασία την αφιερώνω στον αδελφό μου Αντρέα.

Μάρτιος, 2017  
Μαργαρώνης Κωνσταντίνος

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαδικασία της μεταφοράς θερμότητας μέσω της αγωγής στις επιφάνειες επαφής σε διεπιφάνειες στερεών σωμάτων αποτελεί ένα ιδιαίτερος περίπλοκο πρόβλημα, καθώς όπως έχει προκύψει από τα πειραματικά και θεωρητικά δεδομένα της επιστημονικής μελέτης του φαινομένου, η θερμική αντίσταση της διεπιφάνειας εξαρτάται κυρίως από την πολύπλοκη γεωμετρία των επιφανειών. Η παρούσα εργασία εστιάζει στο πρόβλημα αυτό, καθώς εξετάζεται η επιρροή της τραχύτητας και της κατακόρυφης φόρτισης στο φαινόμενο σε διεπιφάνεια μεταξύ δύο δίσκων από χάλυβα S275 με την επιβολή ομοιόμορφης θερμοκρασιακής κατανομής κατά τη διεύθυνση X στο όριο του ενός από τα δύο τμήματα της κατασκευής.

Για την πραγματοποίηση της μελέτης δημιουργήθηκε ένα δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και έγιναν παραμετρικές, μη γραμμικές αναλύσεις στις οποίες εξετάστηκαν διαφορετικές αναλύσεις της τραχύτητας του άνω συνόρου της διεπιφάνειας υπό την επιβολή διαφόρων τιμών μηχανικού φορτίου στις κατασκευές. Έτσι, εξετάστηκε τόσο η επιρροή της τραχύτητας όσο και του κατακόρυφου φορτίου στην θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής. Οι μη γραμμικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν στο πρόγραμμα MARC. Για τη θερμοκρασιακή μεταβολή της κατασκευής εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, στη πρώτη εφαρμόστηκε ομοιόμορφο κατά τη διεύθυνση X θερμικό φορτίο στο κάτω όριο της κατασκευής ενώ στη δεύτερη η ίδια θερμική φόρτιση εφαρμόστηκε στο άνω όριο της κατασκευής. Τέλος, ο κάτω δίσκος της κατασκευής προσομοιώθηκε ως απόλυτο στερεό, ενώ το άνω τμήμα παραμορφώνεται ελαστοπλαστικά υπό την επιβολή του μηχανικού φορτίου.

Η προσομοίωση των τραχειών διεπιφανειών έγινε με τη βοήθεια της fractal γεωμετρίας, με σκοπό να επιτευχθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερη περιγραφή τους, καθώς η περίπλοκη γεωμετρία των ορίων τους δεν μπορεί να περιγραφεί με την βοήθεια της Ευκλείδειας γεωμετρίας. Στα μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν, έχουν εξεταστεί πέντε διαφορετικές αναλύσεις όλο και μεγαλύτερης ακρίβειας για το άνω σύνορο της διεπιφάνειας, ενώ το κάτω σύνορο λήφθηκε σταθερό στην μικρότερης ακρίβειας ανάλυση.

### Λέξεις κλειδιά

Μεταφορά θερμότητας, θερμική αγωγιμότητα, διεπιφάνεια, τραχύτητα διεπιφάνειας, κατακόρυφο φορτίο, πεπερασμένα στοιχεία, παραμετρικές αναλύσεις, μη γραμμικότητα



## ABSTRACT

The process of heat transfer through convection on the interface of solid bodies is a particularly complicated problem since, as it has resulted from the experimental and theoretical data of the scientific study of this phenomenon, interfacial thermal resistance depends mainly on the complex geometry of the surfaces. The present study focuses on the above mentioned problem as it examines the influence of roughness as well as of vertical loading on an interface between two discs made of steel S275, by applying homogeneous temperature distribution in the x direction to the boundary of one of the two parts of the construction.

A two-dimensional model of finite elements was created for the dissertation and parametric, non-linear analyses took place, which studied the roughness of the upper boundary of the interface under the application of different values of mechanical load to the constructions. Therefore, in this way both the influence of roughness and vertical load on thermal conductivity due to contact were examined. The MSC.Marc Mentat software by the MSC Software Corporation was used for the non-linear analyses. Two cases were studied regarding the temperature change of the construction. In the first case, a homogeneous in the x-direction thermal load was applied to the lower boundary of the construction while in the second case the same thermal loading was applied to the upper boundary of the construction. Finally the lower disc of the construction was simulated as total solid, while the upper part is getting deformed in an elastic/plastic way under the application of mechanical load.

The simulation of rough interface took place with the help of fractal geometry in order to achieve the most accurate description possible, since the complicated geometry of the boundaries cannot be described with the help of Euclidean geometry. In the simulation models used, five different analyses have been examined of increasing accuracy concerning the upper boundary of the interface, while the lower boundary was considered stable at the less accurate analysis.

## **Key words**

Heat transfer, thermal conductivity, interface, interface roughness, fractal geometry, vertical mechanical load/stress/charge, finite elements, parametric analysis, non-linearity

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>7</b>
<b>1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....</b>	<b>9</b>
1.1 Μηχανισμοί Μεταφοράς Θερμότητας.....	9
1.1.1 Αγωγιμότητα.....	10
1.1.2 Ακτινοβολία.....	12
1.1.3 Συναγωγή.....	12
1.2 Περιγραφή του Προβλήματος της Επαφής Τραχειών Μεταλλικών Επιφανειών.....	13
1.2.1 Φορτίο Σύσφιξης – Επιφάνεια Επαφής.....	14
1.2.2 Αντίσταση Στένωσης.....	14
1.3 Παραδοχές Θερμικού Μοντέλου Προσομοίωσης.....	17
<b>2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ FRACTAL ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.....</b>	<b>19</b>
2.1 Τραχύτητα.....	19
2.2 Γεωμετρία Fractal.....	21
2.3 Κλασματική – Fractal διάσταση.....	23
2.3.1 Μέθοδος Richardson.....	24
2.3.2 Μέθοδος Box counting.....	24
2.4 Fractal Συναρτήσεις Παρεμβολής.....	25
<b>3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ - ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΧΑΜΗΛΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ.....</b>	<b>31</b>
3.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά Κατασκευής.....	31
3.2 Συνοριακές Συνθήκες.....	32
3.3 Ιδιότητες Υλικού.....	35
3.3.1 Θερμική Αγωγιμότητα.....	35
3.3.2 Ειδική Θερμότητα.....	36
3.3.3 Επιρροή της Υψηλής Θερμοκρασίας στα Μηχανικά Χαρακτηριστικά του Χάλυβα.....	37
3.4 Προσομοίωση της Τραχύτητας της Διεπιφάνειας με την βοήθεια της Fractal Συνάρτησης Παρεμβολής $f$ .....	39

3.5 Διακριτοποίηση του Προσομοιώματος με Πεπερασμένα Στοιχεία.....43

**4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΕΠΑΦΗΣ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ.....46**

4.1 Μελέτη της Επιρροής της Τραχύτητας της Διεπιφάνειας στην Θερμική Αγωγιμότητα.....46

4.1.1 Πρώτης περίπτωση: Μελέτη των Περιπτώσεων Φόρτισης Υπό την Επιβολή του Θερμικού Φορτίου στο Κάτω Όριο της Κατασκευής.....48

4.1.2 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας της Μακροσκοπικής Μελέτης των Αναλύσεων της Διεπιφάνειας της Πρώτης Περίπτωσης Θερμικής Φόρτισης.....63

4.1.3 Δεύτερη Περίπτωση: Μελέτη του Προβλήματος με Επιβολή του Θερμικού Φορτίου στο Άνω Σύνορο του Άνω Τμήματος της Κατασκευής.....66

4.1.4 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας της Μακροσκοπικής Μελέτης των Αναλύσεων της Διεπιφάνειας της Δεύτερης Περίπτωσης Θερμικής Φόρτισης.....80

4.2 Σύγκριση της Θερμικής Αγωγιμότητας των Δύο Περιπτώσεων Θερμικής Φόρτισης που Μελετήθηκαν Μακροσκοπικά.....83

**5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ.....90**

5.1 Περιγραφή της Διαδικασίας Βάση της Οποίας Πραγματοποιήθηκε η Μελέτη της Επιρροής της Τραχύτητας στην Αγωγή Θερμότητας Λόγω Επαφής στις Χαμηλές Πιέσεις.....91

5.2 Μελέτη της Θερμικής Αγωγιμότητας στη Διεπιφάνεια για την Πρώτη Περίπτωση Επιβολής του Θερμικού Φορτίου.....94

5.3 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας της Διεπιφάνειας και Εικόνες Θερμικής Ροής για την Πρώτη Περίπτωση Θερμικής Φόρτισης.....104

5.4 Μελέτη της Θερμικής Αγωγιμότητας στη Διεπιφάνεια για την Δεύτερη Περίπτωση Επιβολής του Θερμικού Φορτίου.....114

5.5 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας της Διεπιφάνειας και Εικόνες Θερμικής Ροής για τη Δεύτερη Περίπτωση Θερμικής Φόρτισης.....125

5.6 Σύγκριση των Τιμών Θερμικής Αγωγιμότητας Λόγω Επαφής στη Διεπιφάνεια που Προέκυψαν από τις Δύο Διαφορετικές Περιπτώσεις Επιβολής του Θερμικού Φορτίου.....134

<b>6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>140</b>
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	141
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	150
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	151
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>153</b>



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα θερμοχημικά προβλήματα επαφής έχουν αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνητικών εργασιών, λόγω της εφαρμογής τους σε μεγάλο αριθμό μηχανημάτων και συσκευών, των οποίων οι επιδόσεις εξαρτώνται από τις επιφάνειες επαφής. Τέτοιες συσκευές είναι οι προηγμένες συσκευές μικροσυγκολλήσεων και τα μικρο-ήλεκτρο-μηχανικά συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Στην παρούσα εργασία πραγματοποιείται μελέτη πάνω στην επιρροή της τραχύτητας και της κατακόρυφης φόρτισης στην θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής μεταξύ δύο στερεών σωμάτων από χάλυβα S275. Το άνω τμήμα της κατασκευής παραμορφώνεται ελαστοπλαστικά, ενώ το κάτω τμήμα έχει προσομοιωθεί ως άκαμπτο.

Κάθε επιφάνεια στερεού αποτελείται από μικροσκοπικές ανωμαλίες, η κλίμακα και η κατανομή των οποίων επηρεάζουν σημαντικά την πραγματική επιφάνεια επαφής δύο σωμάτων. Επομένως, η τραχύτητα των επιφανειών αποτελεί σημαντική παράμετρο για τον βαθμό της επαφής που επιτυγχάνεται και κατά συνέπεια επηρεάζει την αγωγή θερμότητας που πραγματοποιείται όταν δύο στερεά έρχονται σε επαφή. Εξαιτίας της πολύπλοκης γεωμετρίας των διεπιφανειών δεν είναι δυνατή η περιγραφή τους με την Ευκλείδεια γεωμετρία και ήταν απαραίτητο να εφαρμοσθούν πιο προηγμένα μαθηματικά για την προσομοίωση τους. Έτσι, για την βέλτιστη προσομοίωση των συνόρων των αναλύσεων της διεπιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν fractals, δηλαδή πιο πολύπλοκες γεωμετρικές μορφές που έχουν την ιδιότητα της αυτό-ομοιότητας.

Τα όρια της διεπιφάνειας που εξετάστηκε, προσομοιώθηκαν μέσω μίας fractal συνάρτησης παρεμβολής  $f$  με την οποία πραγματοποιήθηκε η μετάβαση από ένα διακριτό σύνολο συνεπίπεδων σημείων σε μία συνεχή fractal καμπύλη. Για τη διεπιφάνεια εξετάστηκαν πέντε διαφορετικές αναλύσεις του άνω συνόρου, που παράχθηκαν από μία επαναληπτική διαδικασία. Συγκεκριμένα, η ανάλυση γίνεται ακριβέστερη όσο αυξάνεται η επανάληψη. Έτσι, εξετάζονται fractal καμπύλες με διαφορετικής ακρίβειας αναλύσεις, με συνέπεια να μελετάται η επιρροή της τραχύτητας στην επαφή των δίσκων. Μέσω της προσέγγισης αυτής και με την χρήση αξιόπιστων αριθμητικών μεθόδων πραγματοποιείται ακριβή μελέτη της επιρροής της τραχύτητας στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής στη διεπιφάνεια με μεταβαλλόμενη την παράμετρο του μηχανικού φορτίου που επιβάλλεται στο δισδιάστατο μοντέλο της προσομοίωσης, με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα και για την επίδραση του φορτίου στο φαινόμενο.

Εξαιτίας της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας των διεπιφανειών έπρεπε να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες για την μελέτη του φαινομένου. Οι κυριότερες παράμετροι που επιδρούν στην θερμική αγωγιμότητα λόγω της επαφής σε διεπιφάνειες στερεών σωμάτων είναι οι παρακάτω:

- Η τραχύτητα των ορίων της διεπιφάνειας
- Το υλικό των σωμάτων
- Η θερμοκρασία των σωμάτων
- Οι επικαλύψεις στις επιφάνειες επαφής
- Τα φορτία σύσφιξης στις επιφάνειες επαφής
- Το πάχος της διεπιφάνειας

Τέλος, η παρούσα εργασία είναι οργανωμένη στα εξής κεφάλαια:

1. Στο πρώτο κεφάλαιο παρατίθενται οι μηχανισμοί μεταφοράς θερμότητας και οι βασικές έννοιες που αφορούν την επαφή και την θερμική αγωγή στη διεπιφάνεια. Επίσης παρουσιάζονται οι παραδοχές του θερμικού μοντέλου προσομοίωσης.
2. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές παράμετροι της τραχύτητας και τα χαρακτηριστικά της fractal γεωμετρίας και παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την προσομοίωση των διεπιφανειών με την χρήση της fractal συνάρτησης παρεμβολής  $f$ .
3. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το δισδιάστατο παραμετρικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη, τα χαρακτηριστικά των διάφορων αναλύσεων της διεπιφάνειας που εξετάστηκαν και η γεωμετρία της κατασκευής. Επίσης παρουσιάζονται οι μηχανικές και οι θερμικές ιδιότητες του υλικού.
4. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που διεξάχθηκαν από την μακροσκοπική μελέτη στο σύνολο των κόμβων της διεπιφάνειας πάνω στην επιρροή της ανάλυσης της διεπιφάνειας και του κατακόρυφου φορτίου στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής.
5. Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από την μικροσκοπική μελέτη των κόμβων επαφής της διεπιφάνειας πάνω στην επιρροή της ανάλυσης της διεπιφάνειας και του κατακόρυφου φορτίου στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής.
6. Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην παρούσα εργασία.

## 1<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιείται μελέτη πάνω στην επιρροή της τραχύτητας και της κατακόρυφης φόρτισης στην θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής σε διεπιφάνεια μεταξύ μεταλλικών στερεών σωμάτων. Ο περιορισμός της μεταφοράς θερμότητας σε μετάδοση μόνο μέσω της επαφής ήταν απαραίτητος για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα της έρευνας. Η μελέτη του φαινομένου διεκπεραιώθηκε μέσω της αριθμητικής ανάλυσης των αποτελεσμάτων που εξάχθηκαν από την προσομοίωση της επαφής σε διεπιφάνεια μεταξύ δύο μεταλλικών δίσκων, υπό την επιβολή κατακόρυφου μηχανικού φορτίου  $P_v$  και θερμοκρασιακής μεταβολής στον έναν από τους δίσκους. Για να παρουσιαστεί ο τρόπος που προσομοιώθηκε το φαινόμενο πρέπει να γίνει μια συνοπτική παρουσίαση των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας, καθώς και των μεγεθών που τους περιγράφουν και των νόμων που τα διέπουν.

#### 1.1 Μηχανισμοί Μεταφοράς Θερμότητας

Η θερμότητα είναι ενέργεια που μεταδίδεται κατά κανόνα από τα θερμότερα προς τα ψυχρότερα συστήματα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, μέχρις ότου να επέλθει ομοιόμορφη θερμοκρασιακή ισορροπία μεταξύ των συστημάτων. Στο διεθνές σύστημα μονάδων η μονάδα μέτρησης της θερμότητας είναι το Joule [1].

Η μετάδοση θερμότητας είναι ένα φυσικό φαινόμενο που πραγματοποιείται με τρεις δυνατούς μηχανισμούς:

- Αγωγή θερμότητας, που πραγματοποιείται μέσω της μάζας, δηλαδή της αλληλεπίδρασης των μορίων στερεών σωμάτων [1]
- Συναγωγή θερμότητας, που πραγματοποιείται μόνο κατά την κίνηση ενός ρευστού στην επιφάνεια ενός στερεού και οφείλεται στην μεταφορά ενέργειας κατά την κίνηση του ρευστού [1]
- Θερμική ακτινοβολία, που είναι μεταφορά θερμότητας που πραγματοποιείται από απόσταση μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, χωρίς να γίνεται μεταφορά μάζας ή ορμής ταυτόχρονα με τη μετάδοση της ενέργειας [1]

Οι φυσικοί νόμοι που διέπουν τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας περιγράφονται από σχέσεις που ονομάζονται εξισώσεις ρυθμού, οι οποίες επιτρέπουν τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών τους μεγεθών.

### 1.1.1 Αγωγιμότητα

Η μετάδοση θερμότητας στα στερεά σώματα γίνεται όπως προαναφέρθηκε με το μηχανισμό μεταφοράς της αγωγής θερμότητας και πραγματοποιείται μέσω των συγκρούσεων μικροσκοπικών σωματιδίων και της κίνησης ηλεκτρονίων στο εσωτερικό των σωμάτων. Η μετάδοση θερμότητας μέσω του μηχανισμού αυτού εξαρτάται από συγκεκριμένες ιδιότητες του υλικού, την πυκνότητα ( $\rho$ ), την ειδική θερμότητα ( $C_p$ ) και την θερμική αγωγιμότητα ( $k$ ).

Η πυκνότητα  $\rho$  είναι το χαρακτηριστικό μέγεθος της ύλης που εκφράζει την μάζα που περιέχεται ανά μονάδα όγκου του σώματος. Ο τύπος υπολογισμού της είναι:

$$\rho = \frac{m}{V}, \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (1.1.1.1)$$

όπου  $m$  (Kg) η μάζα του υλικού και  $V$  ( $\text{m}^3$ ) ο όγκος του. Η πυκνότητα του υλικού παραμένει σταθερή όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Η θερμική αγωγιμότητα αποτελεί τη χαρακτηριστική ιδιότητα της ύλης, που προσδιορίζει την ευχέρεια διάδοσης της θερμότητας στο εσωτερικό ενός υλικού. Το μέγεθος μέτρησης της θερμικής αγωγιμότητας του υλικού είναι ο συντελεστής αγωγιμότητας  $k$ , που αντιπροσωπεύει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας ανά μονάδα πάχους του υλικού και θερμοκρασιακής διαφοράς σε ( $\text{W/mK}$ ). Ο συντελεστής αγωγιμότητας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του υλικού. Η ειδική θερμότητα  $C_p$  αποτελεί το μέτρο της θερμοχωρητικότητας του υλικού ανά μονάδα μάζας, δηλαδή είναι η ποσότητα ενέργειας, που απαιτείται για να αυξηθεί κατά ένα βαθμό η θερμοκρασία μοναδιαίας μάζας υλικού σε ( $\text{J/KgK}$ ). Η ειδική θερμότητα εξαρτάται από την θερμοκρασία του υλικού, όπως και ο συντελεστής αγωγιμότητας. Ανάλογα με το μέτρο της θερμοχωρητικότητας του υλικού, η μετάδοση θερμότητας μπορεί να χαρακτηριστεί μεταβατικής κατάστασης, όπου πρέπει να ληφθεί υπόψη η αποθήκευση θερμότητας στη μάζα του υλικού, ή σταθερής κατάστασης [2], [3].

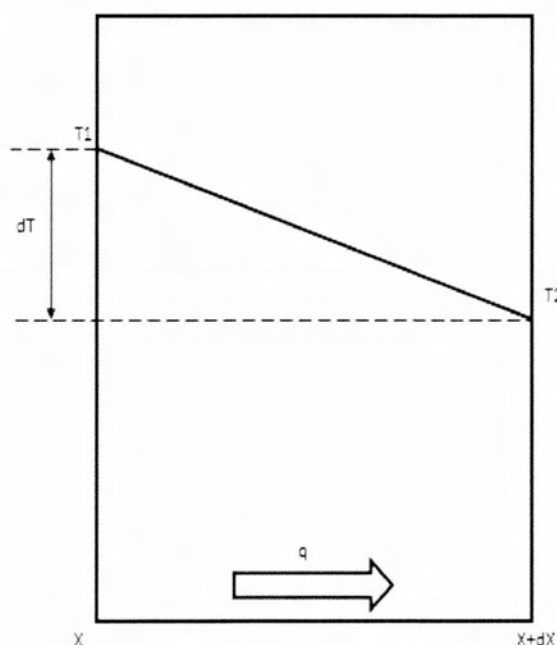
Στην σταθερής κατάστασης μετάδοση θερμότητας δεν λαμβάνεται υπόψη η ειδική θερμότητα του υλικού, διότι θεωρείται αμελητέα. Έτσι, ο ρυθμός μετάδοσης της θερμότητας εξαρτάται μόνο από την απόσταση μεταξύ των σημείων που αλληλεπιδρούν και από την θερμική αγωγιμότητα του υλικού. Έτσι, η βασική εξίσωση



για τη μονοδιάστατη σταθερής κατάστασης μεταφορά θερμότητας, που βασίζεται στον νόμο Fourier διαμορφώνεται ως εξής:

$$q = -k \frac{dT}{dX} \quad (1.1.1.2)$$

όπου  $q$  είναι η σταθερή ροή θερμότητας κατά τη διεύθυνση  $X$  μετρημένη σε ( $W/m^2$ ),  $dT$  είναι η διαφορά θερμοκρασίας που προκύπτει κατά μήκος του απειροστού πάχους  $dX$  και  $k$  είναι ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού, σε ( $W/mK$ ). Στο Σχήμα 1.1.1.1 που παρατίθεται παρακάτω απεικονίζεται η μονοδιάστατη σταθερής κατάστασης αγωγή θερμότητας στο επίπεδο ενός τοιχώματος.



Σχήμα 1.1.1.1: Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας σε επίπεδο.

Στη μεταβατικής κατάστασης μεταφορά θερμότητας η θερμοχωρητικότητα του υλικού είναι σημαντική και πρέπει να ληφθεί υπόψη στους υπολογισμούς. Σε αυτή τη περίπτωση η σχέση για μονοδιάστατη μετάδοση θερμότητας μέσω του υλικού γίνεται:

$$k \frac{d^2T}{dx^2} = \rho C_P \frac{dT}{dt} \quad (1.1.1.3)$$

όπου  $\rho$ , είναι η πυκνότητα του υλικού,  $k$  ο συντελεστής αγωγιμότητας και  $C_P$  η θερμοχωρητικότητα του [2], [3], [4].

### 1.1.2 Ακτινοβολία

Θερμική ακτινοβολία ονομάζεται η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από την επιφάνεια ενός σώματος λόγω της θερμοκρασίας του. Γενικά η θερμική ακτινοβολία που εκπέμπει ένα σώμα αντιστοιχεί σε συχνότητες ολόκληρου του φάσματος ακτινοβολίας αφού προέρχεται από τη θερμική-τυχαία κίνηση των συστατικών της ύλης. Η ποσότητα της ενέργειας που αντιστοιχεί σε κάθε περιοχή συχνότητας εξαρτάται από το συντελεστή εκπομπής του σώματος, ο οποίος καθορίζεται από το υλικό και την θερμοκρασία στην επιφάνεια καθώς και από την γωνία υπό την οποία γίνεται η εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας σε σχέση με την επιφάνεια που την απορροφάει. Η ροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας, από μία επιφάνεια που εκπέμπει προς μία επιφάνεια που την λαμβάνει δίνεται από τη σχέση:

$$q = \frac{Q}{A} = \varphi \varepsilon_{\text{thr}} \sigma_{\text{SB}} (T_e^4 - T_r^4) \quad (1.1.2.1)$$

όπου  $\varphi$  ο συντελεστής διαμόρφωσης (view factor) είναι ένα μέτρο, που εκφράζει πόσο ορατή είναι η επιφάνεια εκπομπής από την λαμβάνουσα επιφάνεια, με τιμές που φτάνουν μέχρι τη μονάδα. Το  $\sigma_{\text{SB}}$  είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann με τιμή  $5.67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \text{K}^4)$ , οι θερμοκρασίες  $T_e$  και  $T_r$  είναι οι απόλυτες θερμοκρασίες της επιφάνειας εκπομπής και της λαμβάνουσας επιφάνειας αντίστοιχα. Ο παράγοντας  $\varepsilon_{\text{thr}}$  είναι ο συντελεστής εκπομπής, που εκφράζει την αποδοτικότητα της επιφάνειας εκπομπής και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\varepsilon_{\text{thr}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{A_e}{A_r} \left( \frac{1}{\varepsilon_r} - 1 \right)} \quad (1.1.2.2)$$

όπου  $A_e$  και  $A_r$  είναι οι επιφάνειες εκπομπής και απορρόφησης της ακτινοβολίας και  $\varepsilon_e$ ,  $\varepsilon_r$  οι αντίστοιχες ικανότητες εκπομπής των επιφανειών. Οι τιμές του συντελεστή εκπομπής είναι μικρότερες ή ίσες της μονάδας [4], [5].

Η μετάδοση θερμότητας με ακτινοβολία θεωρείται συνήθως αμελητέα σε χαμηλές θερμοκρασίες και έτσι δεν λαμβάνεται υπόψιν. Συγκεκριμένα στα μέταλλα δεν συνυπολογίζεται για θερμοκρασίες μικρότερες της θερμοκρασίας ερυθροποίησης τους.

### 1.1.3 Συναγωγή

Η συναγωγή θερμότητας, συμβαίνει ανάμεσα σε ένα ρευστό, υγρό ή αέριο και ένα στερεό και ειδικότερα όταν ένα ρευστό κινείται πάνω σε μία επιφάνεια στερεού διαφορετικής θερμοκρασίας. Το φαινόμενο μετάδοσης της θερμότητας είναι πιο

πολύπλοκο όταν δύο ρευστά διαφορετικής θερμοκρασίας έρχονται σε επαφή, όπου πραγματοποιείται ανάμιξη ρευστών και ταυτόχρονη μεταφορά θερμότητας και μάζας.

Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας της συναγωγής πραγματοποιείται με γρήγορη διάχυση της θερμότητας σε μεγάλη έκταση του ρευστού και έτσι οι θερμοκρασιακές διαφορές μεταξύ επιφάνειας-ρευστού δεν μειώνονται σημαντικά. Η συναγωγή είναι ο μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας που μεταφέρει γρηγορότερα μεγάλες ποσότητες ενέργειας σε σχέση με την αγωγή και την ακτινοβολία σε μικρές θερμοκρασίες.

Η συναγωγή είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο, που για να μελετηθεί, χρειάζεται να επιλυθεί και το πρόβλημα της ροής των ρευστών, ώστε να γίνει η εξαγωγή των εξισώσεων για τον υπολογισμό της θερμοροής. Η εξίσωση που προτάθηκε από τον Isaac Newton για τον υπολογισμό της θερμικής ροής λόγω συναγωγής είναι γνωστή ως νόμος ψύξης του Newton και είναι η παρακάτω:

$$Q = h_c A \Delta T \quad (1.1.3.1)$$

όπου  $A$  είναι το εμβαδόν της επιφάνειας του στερεού σε ( $m^2$ ),  $\Delta T$  είναι η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ του ρευστού και της επιφάνειας του στερεού σε ( $^{\circ}C$  ή  $^{\circ}K$ ) και  $h_c$  είναι ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή σε ( $W/m^2K$ ). Ο συντελεστής μεταφοράς προκύπτει από πειραματικά δεδομένα για διάφορες περιπτώσεις και διαφορετικές γεωμετρίες προβλημάτων συναγωγής. Παράγοντες, όπως η φύση της ροής και το πάχος του συνοριακού στρώματος, επηρεάζουν την τιμή του [3], [5].

## 1.2 Περιγραφή του Προβλήματος της Επαφής Τραχειών Μεταλλικών Επιφανειών.

Το πρόβλημα της μελέτης της αγωγής θερμότητας στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο μεταλλικών δίσκων του μοντέλου της προσομοίωσης εξετάστηκε κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η μελέτη να επικεντρώνεται στην επίδραση του παράγοντα της τραχύτητας στο φαινόμενο. Για να είναι εφικτή η ακριβής προσομοίωση όλων των παραμέτρων του φαινομένου, το μοντέλο της προσομοίωσης διαχωρίστηκε σε μηχανικό και σε θερμικό επίπεδο. Στη συνέχεια παρατίθεται (στο Σχήμα 1.2.1.) μια ενδεικτική εικόνα διασύνδεσης τραχειών επιφανειών, όπου απεικονίζεται ευκρινώς η επιρροή της τραχύτητας των διεπιφανειών στην πραγματική επιφάνεια επαφής των δύο σωμάτων.



Σχήμα 1.2.1: Μεγεθυμένη περιοχή επαφής σε διεπιφάνεια μεταξύ τραχιών επιφανειών.

### 1.2.1 Φορτίο επαφής-επιφάνεια επαφής

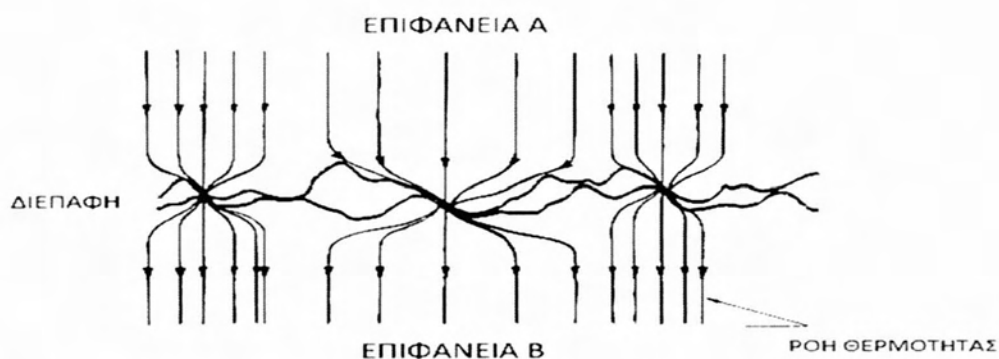
Για την επίτευξη της επαφής μεταξύ των δύο μεταλλικών δίσκων, επιβάλλεται κατακόρυφο κατανεμημένο μηχανικό φορτίο  $P_v$ , στην κορυφή του άνω τμήματος της κατασκευής, το οποίο οδηγεί στη μετατόπιση του και κατ' επέκτασή στην επαφή των σωμάτων. Επιπρόσθετα, εξαιτίας της εξωτερικής φόρτισης και των πιέσεων που παράγονται ως συνέπεια της επαφής, προκαλούνται παραμορφώσεις του άνω μεταλλικού στερεού, για το οποίο δεν έχει οριστεί άπειρη σκληρότητα. Έτσι, τα περιορισμένα σημεία επαφής που εμφανίζονται αρχικά επεκτείνονται μέσω των παραμορφώσεων, ενώ δημιουργούνται και νέες επιφάνειες επαφής. Η συνολική επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή υπό την επίδραση του μηχανικού φορτίου ονομάζεται επιφάνεια σύσφιξης, καθώς φέρει το φορτίο σύσφιξης της επαφής. Η επιφάνεια σύσφιξης είναι σημαντικά μικρότερη από την μακροσκοπικά παρατηρούμενη επιφάνεια επαφής, εξαιτίας της επιφανειακής μικρό-τραχύτητας των σωμάτων η οποία αποτρέπει τις επιφάνειες από το να εφαρμόσουν η μία πάνω στην άλλη. Η επιφάνεια αυτή της επαφής, που παρατηρείται μακροσκοπικά είναι η φαινόμενη επιφάνεια επαφής. Τέλος, η πραγματική επιφάνεια επαφής ορίζεται ως η επιφάνεια από την οποία γίνεται η αγωγή θερμότητας μεταξύ των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής. Δηλαδή, η πραγματική επιφάνεια είναι το τμήμα της επιφάνειας σύσφιξης όπου η απουσία επικαλύψεων και οξειδίων επιτρέπει την διέλευση της θερμικής ροής [6].

### 1.2.2 Αντίσταση στένωσης

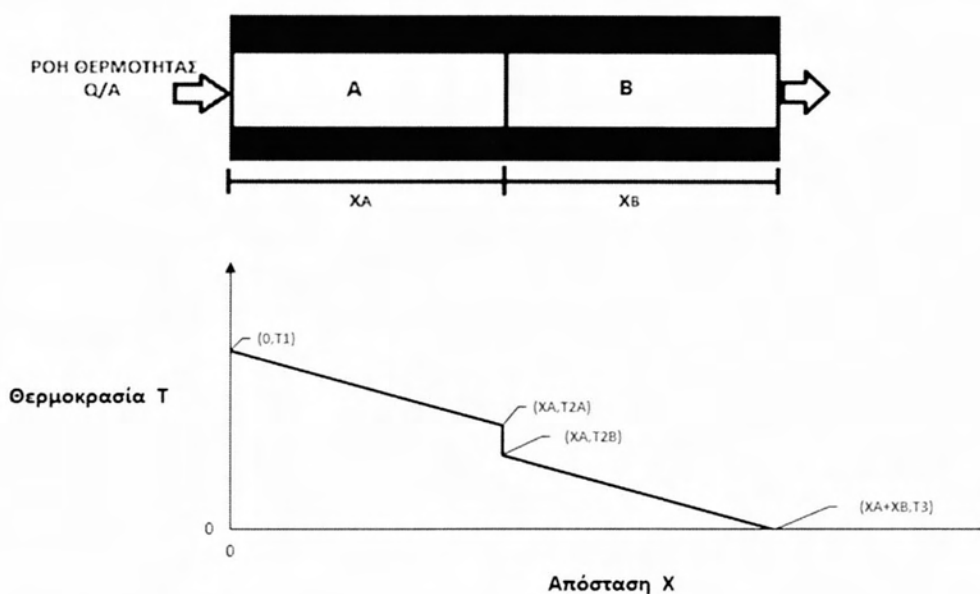
Η διάχυση της θερμότητας στον όγκο ενός στερεού σώματος τείνει να οδηγήσει σε κατάσταση θερμοκρασιακής ισορροπίας η οποία διακόπτεται απότομα μεταξύ των επιφανειών δύο σωμάτων που έρχονται σε επαφή. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στον περιορισμό των περιοχών μετάδοσης της θερμότητας στη πραγματική επιφάνεια επαφής, η οποία περιορίζεται σε μικροσκοπικά τμήματα της



μακροσκοπικά φαινόμενης επιφάνειας επαφής. Επιπρόσθετα, η παρουσία μονωτικών στρωμάτων στις επιφανειακές αιχμές, ή κοιλάδες περιορίζει ακόμα περισσότερο τις πραγματικές περιοχές της επαφής, από τις οποίες διέρχεται η θερμική ροή. Σε κάθε επιφάνεια στερεού σώματος υπάρχουν επιφανειακές ανωμαλίες, η γεωμετρία των οποίων διαμορφώνεται κατά τη διαδικασία σχηματισμού της επιφάνειας και αυτές οι επιφανειακές ανωμαλίες κατά την επαφή οδηγούνται σε ελαστοπλαστικές παραμορφώσεις. Έτσι, οι περιοχές διέλευσης θερμικής ροής συγκεντρώνονται σε διακριτά σημεία επαφής και αυτή η στένωση των θερμικών γραμμών ροής, που πραγματοποιείται κατά τη θερμική σύζευξη (Σχήμα 1.2.2.1.) οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αντίστασης, που ορίζεται ως αντίσταση στένωσης της διασύνδεσης. Η συνολική αύξηση της αντίστασης στη διασύνδεση προκύπτει ως συνδυασμός της αντίστασης στένωσης της επαφής και της αντίστασης τυχόν επικαλύψεων από στρώματα ενδιάμεσου υλικού [7], [8]. Έτσι, προκύπτει το άλμα στη θερμοκρασία, που παρατηρείται στην διεπιφάνεια μεταξύ των δύο επιφανειών που έρχονται σε επαφή [9], [10] που απεικονίζεται γραφικά παρακάτω, στο σχήμα 1.2.2.2.

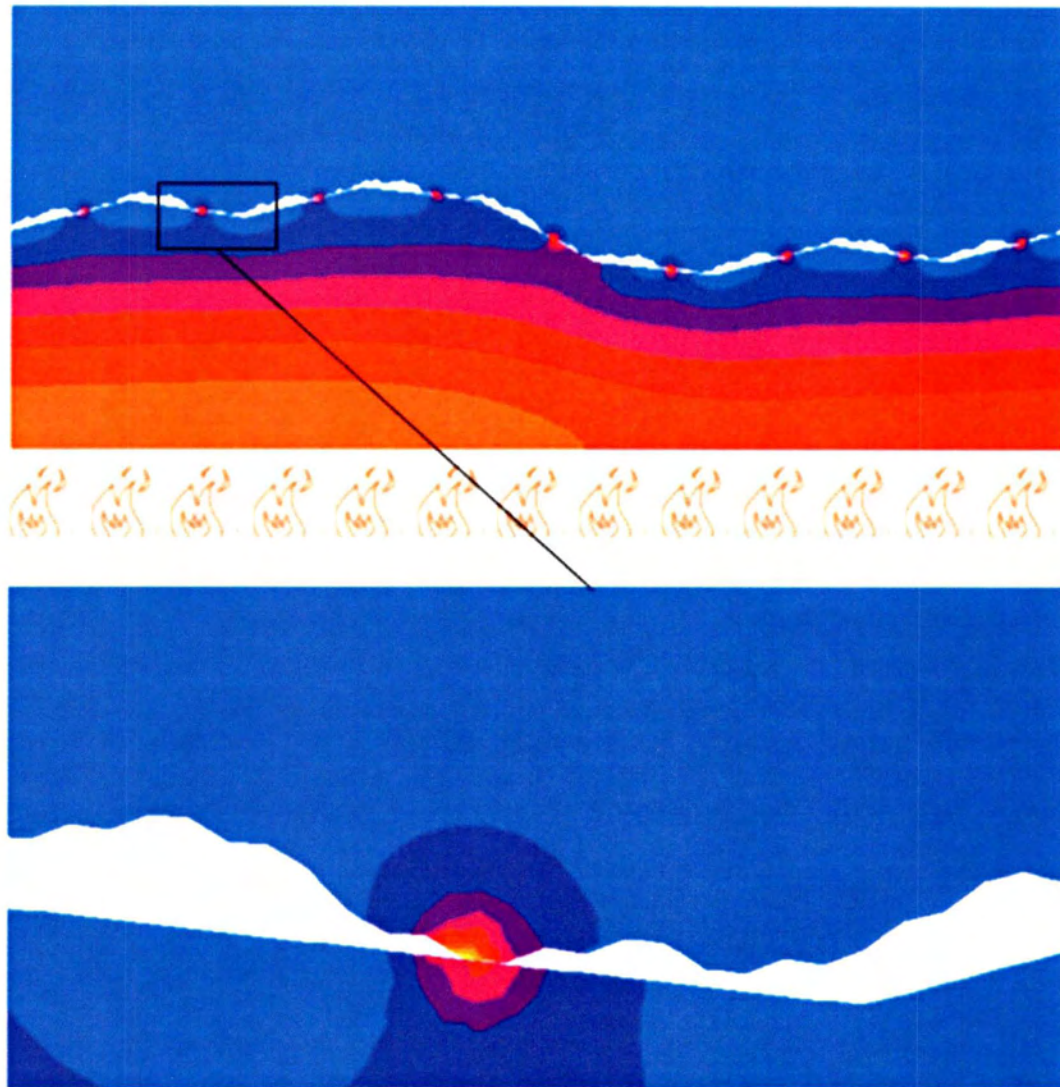


**Σχήμα 1.2.2.1:** Σχηματική απεικόνιση της στένωσης των θερμικών γραμμών ροής στη διεπιφάνεια (A - B).



**Σχήμα 1.2.2.2:** Διάγραμμα της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από την επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή μεταβολή, σε θερμική αγωγή λόγω επαφής στην διεπιφάνεια των στερεών σωμάτων A,B.

Με την κατάλληλη προσομοίωση της τραχύτητας των επιφανειών στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία εξετάστηκε το φαινόμενο της στένωσης της θερμικής ροής στην διεπιφάνεια μεταξύ των μεταλλικών στερεών της κατασκευής. Έτσι, προέκυψε η παρακάτω εικόνα που λήφθηκε για την θερμική ροή στην κατασκευή που απεικονίζεται στο Σχήμα 1.2.2.3, στο οποίο παρατίθεται και η μεγέθυνση ενός διακριτού σημείου επαφής της διεπιφάνειας.



Σχήμα 1.2.2.3 : Στένωση της θερμικής ροής σε διακριτά σημεία της διεπιφάνειας του μοντέλου προσομοίωσης και μεγέθυνση σημείου επαφής.

### 1.3 Παραδοχές θερμικού μοντέλου Προσομοίωσης.

Όπως προαναφέρθηκε, για την συσχέτιση της τραχύτητας των μεταλλικών επιφανειών με τη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής είναι απαραίτητος ο περιορισμός της μεταφοράς θερμότητας σε μετάδοση αποκλειστικά μέσω του μηχανισμού της αγωγής. Για τον αποκλεισμό της μεταφοράς θερμότητας μέσω συναγωγής θεωρήθηκαν συνθήκες κενού για το περιβάλλον της προσομοίωσης, ώστε να μην παρεμβάλλεται η ροή κάποιου ρευστού στη διεπιφάνεια. Επίσης, σύμφωνα με πειραματικούς υπολογισμούς η συνεισφορά της θερμικής ακτινοβολίας στην μεταφορά θερμότητας για μεταλλικά στερεά σε αποστάσεις της τάξης που λήφθηκαν για τη διεπιφάνεια στο μοντέλο της προσομοίωσης και θερμοκρασία διεπιφάνειας

άνω των 1000 °K είναι πολύ μικρό ποσοστό της θερμότητας που μεταδίδεται λόγω της επαφής [11]. Έτσι, δεν συνυπολογίστηκε η θερμική ακτινοβολία στους υπολογισμούς που αφορούν τη μετάδοση της θερμότητας μεταξύ των σωμάτων της κατασκευής. Τέλος, οι επιφάνειες θεωρήθηκαν καθαρές, χωρίς προσμίξεις ή άλλα στρώματα υλικών ή οξειδία, με συνέπεια να συμπίπτει η επιφάνεια σύσφιξης με την πραγματική επιφάνεια επαφής και η συνολική αύξηση της αντίστασης στην διεπιφάνεια, να ταυτίζεται με την αντίσταση στένωσης της διασύνδεσης.

Με βάση αυτές τις παραδοχές αποκλείεται η μετάδοση θερμότητας μέσω ενδιάμεσου μέσου και θερμικής ακτινοβολίας και η μελέτη επικεντρώνεται στην αγωγιμότητα μέσω επαφής. Κατά συνέπεια εξετάζεται η πραγματική περιοχή σύνδεσης των σωμάτων, στην οποία περιορίζονται οι γραμμές θερμικής ροής, οδηγώντας σε ξαφνική θερμοκρασιακή πτώση στη διεπιφάνεια. Επίσης, αποκλείοντας και τις επικαλύψεις στην επιφάνεια η μελέτη τη επαφής επικεντρώνεται στην τραχύτητα των επιφανειών [12].

Με τα δεδομένα που προαναφέρθηκαν ο ορισμός της θερμικής αγωγιμότητας διαμορφώνεται ως εξής:

$$h = \frac{Q/A}{\Delta T} \quad (1.3.1)$$

όπου  $Q/A$  είναι η ροή θερμότητας που διέρχεται από τα σημεία επαφής και  $\Delta T$  είναι η θερμοκρασιακή πτώση στην διεπιφάνεια [9], [13]. Η θερμική αντίσταση στένωσης της διασύνδεσης ή θερμική αντίσταση επαφής ορίζεται ως ο λόγος της θερμοκρασιακής πτώσης στη διεπιφάνεια προς τον ρυθμό ροής θερμότητας:

$$R = \frac{\Delta T}{Q} = \frac{1}{hA} \quad (1.3.2)$$

Επίσης, για την μελέτη της επιρροής της τραχύτητας των επιφανειών και της φόρτισης στην επαφή, λήφθηκε υπόψη στο μοντέλο προσομοίωσης τόσο η ύπαρξη διάφορων αναλύσεων επιφανειακής μικροσκοπικής τραχύτητας όσο και μακροσκοπικές ανωμαλίες των επιφανειών υπό την μορφή σταθερών σε όλες τις αναλύσεις κυματισμών και εξάχθηκαν αποτελέσματα από τις αναλύσεις αυτές σε ένα εύρος κατακόρυφων φορτίσεων. Τέλος, επιλέχθηκαν ισότροπα μέταλλα για την κατασκευή, ώστε η θερμική ροή να είναι σταθερή.



## 2<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΜΕ FRACTAL ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ.

Όπως προαναφέρθηκε, για την παρούσα εργασία οι υπό εξέταση επιφάνειες έχουν θεωρηθεί καθαρές από επικαλύψεις. Έτσι, το πρόβλημα της επαφής των δύο μεταλλικών τμημάτων της κατασκευής επηρεάζεται μόνο από τους παράγοντες της τραχύτητας και του μηχανικού φορτίου. Για την προσομοίωση της τραχύτητας των επιφανειών, που έρχονται σε επαφή χρησιμοποιήθηκαν συναρτήσεις παρεμβολής τύπου fractal. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική περιγραφή των όρων, που περιγράφουν την τραχύτητα και των βασικών χαρακτηριστικών της fractal γεωμετρίας και παρατίθενται οι συναρτήσεις παρεμβολής, που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των τραχειών επιφανειών και οι παράμετροι των συναρτήσεων αυτών, που επιδρούν στη κατασκευή της διεπιφάνειας.

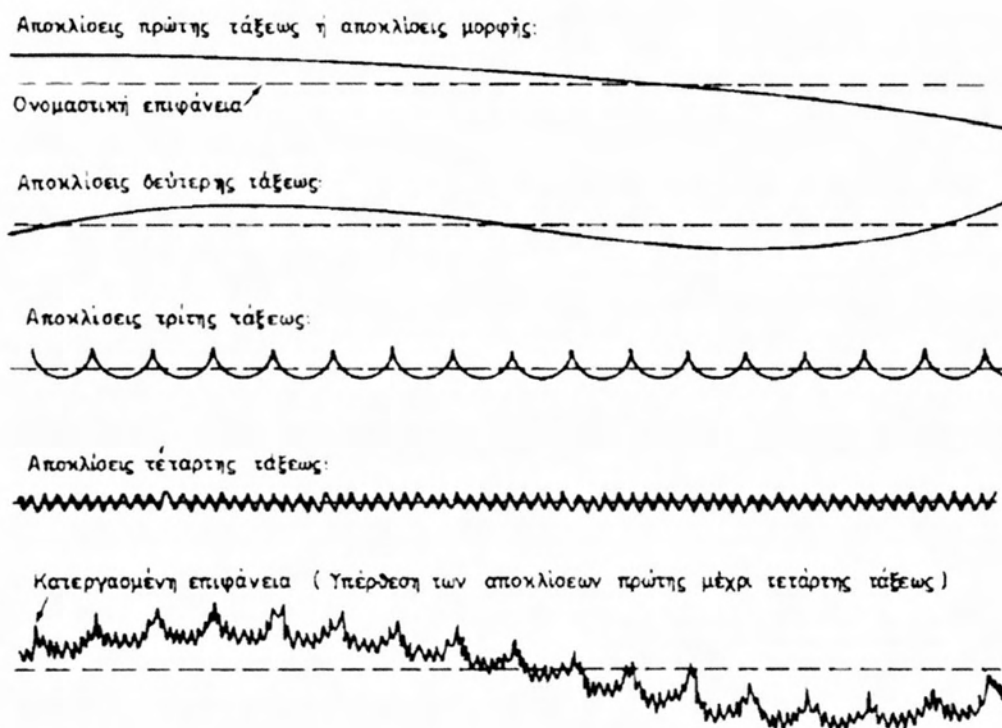
#### 2.1 Τραχύτητα

Η τραχύτητα αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πραγματικής επιφάνειας. Γενικά, κάθε κατεργασμένη επιφάνεια παρουσιάζει αποκλίσεις από την θεωρητική της μορφή που αποτελεί την ονομαστική επιφάνεια. Όπως φαίνεται και παρακάτω στο Σχήμα 2.1.1, οι αποκλίσεις αυτές είναι δυνατό να κατηγοριοποιηθούν ως εξής [14]:

- **Αποκλίσεις πρώτης τάξης** ή αποκλίσεις μορφής, που είναι μακρογεωμετρικές αποκλίσεις από την ονομαστική επιφάνεια, όπως είναι οι αποκλίσεις από την επιπεδότητα της επιφάνειας.
- **Αποκλίσεις δεύτερης τάξης**, όπως καλούνται οι κυματώσεις της επιφάνειας με σχετικά μεγάλη περίοδο.
- **Αποκλίσεις τρίτης τάξης**, οι οποίες είναι ανωμαλίες της επιφάνειας που εμφανίζονται συνήθως με την μορφή αυλακώσεων.
- **Αποκλίσεις τέταρτης τάξης**, οι οποίες αποτελούν μικρογεωμετρικές ανωμαλίες της επιφάνειας, που οφείλονται σε ατέλειες ή φθορές των εργαλείων κατά την κατεργασία της επιφάνειας.
- **Αποκλίσεις πέμπτης τάξης**, δηλαδή ανωμαλίες μικρογεωμετρικής μορφής, που αποδίδονται σε χημικές επιδράσεις, μεταβολές του κρυσταλλικού ιστού του μετάλλου και σε άλλες αιτίες.

Οι αποκλίσεις που αναφέρονται στην μικρομορφή της επιφάνειας, δηλαδή τρίτης ή ανώτερης τάξης συνιστούν την μικρό-τραχύτητα μίας επιφάνειας και αποτελούν το

αντικείμενο της παρούσας μελέτης, καθώς έχουν ληφθεί υπόψη αποκλίσεις δεύτερης τάξης στην κατασκευή της διεπιφάνειας του μοντέλου της προσομοίωσης, όμως οι κυματώσεις αυτές έχουν ληφθεί σταθερές σε όλες τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν. Ενώ οι αποκλίσεις ανώτερης τάξης διαφοροποιήθηκαν σε διαφορετικές αναλύσεις της διεπιφάνειας.



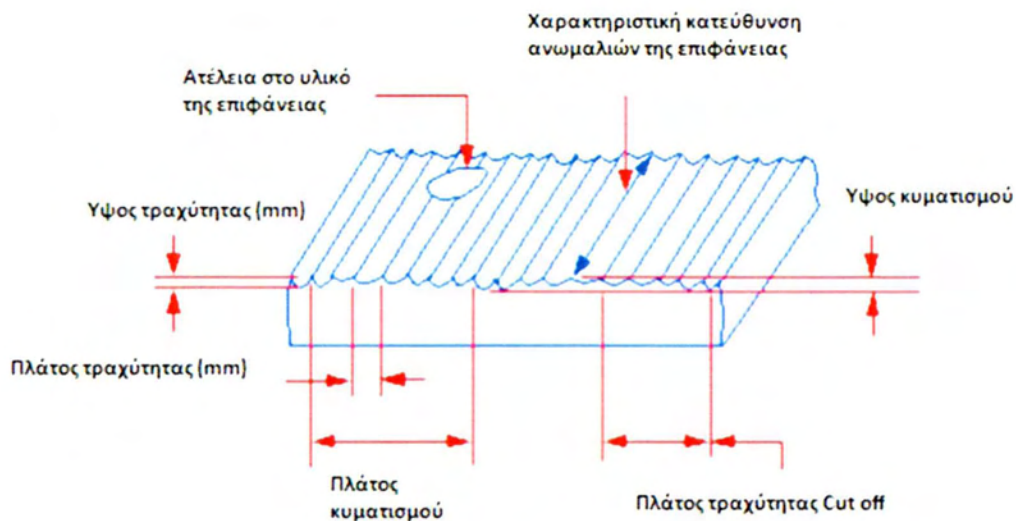
Σχήμα 2.1.1 : Κατηγορίες αποκλίσεων κατεργασμένης επιφάνειας από την ονομαστική επιφάνεια.

Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα, η τραχύτητα μίας επιφάνειας προσδιορίζεται από το μέγεθος και την πυκνότητα των κατακόρυφων αποκλίσεων της επιφάνειας από την θεωρητική της μορφή, για την περιγραφή της τραχύτητας είναι απαραίτητες οι παρακάτω βασικές παράμετροι:

- **Ύψος τραχύτητας**  
Το οποίο αποτελεί την μέση τιμή του κατακόρυφου ύψους των αποκλίσεων, που υπολογίζεται σε σχέση με μία γραμμή αναφοράς για συγκεκριμένο μήκος της ονομαστικής επιφάνειας, συνήθως μετριέται σε χιλιοστά.
- **Πλάτος τραχύτητας**  
Είναι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κορυφών, που μετριέται παράλληλα προς την ονομαστική επιφάνεια, συνήθως σε χιλιοστά.
- **Πλάτος τραχύτητας Cut off**

Ορίζεται ως η μέγιστη απόσταση μεταξύ αντίστοιχων επιφανειακών αποκλίσεων, που συμπεριλαμβάνεται στον υπολογισμό του μέσου ύψους τραχύτητας. Το μέγεθος αυτό πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος της τραχύτητας για να είναι εφικτή η εκτίμηση του συνολικού ύψους της τραχύτητας [15].

Στο Σχήμα 2.1.2 που ακολουθεί απεικονίζονται οι βασικές αυτές παράμετροι που αναφέρθηκαν.



Σχήμα 2.1.2 : Απεικόνιση των βασικών παραμέτρων της επιφανειακής τραχύτητας.

## 2.2 Γεωμετρία Fractal

Με τον όρο fractal που στα ελληνικά φέρει την ονομασία μορφοκλασματικό σύνολο, περιγράφεται ένα μαθηματικό σύνολο το οποίο παρουσιάζει επαναλαμβανόμενη εικόνα σε κάθε μεγέθυνση. Fractal επομένως είναι ένα γεωμετρικό σχήμα που επαναλαμβάνεται σε διαφορετικές κλίμακες, διαθέτει δηλαδή την ιδιότητα της αυτό-ομοιότητας σε ορισμένες δομές του. Ο όρος fractal προτάθηκε από τον Mandelbrot το 1975 [16], ο οποίος από τα τέλη της δεκαετίας του 1960 και κατά την επόμενη δεκαετία κατάφερε να περιγράψει τις βασικές ιδιότητες, που χαρακτηρίζουν ένα μορφοκλασματικό σύνολο και να δώσει έναν ακριβή μαθηματικό ορισμό. Το πρόβλημα που κατέστησε απαραίτητη την επινόηση της fractal γεωμετρίας προέκυψε στη προσπάθεια υπολογισμού της περιμέτρου της Βρετανίας, όπου χρησιμοποιώντας ως μονάδα μέτρησης το μέτρο ή ακόμα και το



εκατοστό δεν λαμβάνονταν υπόψη κοιλότητες μικρότερης κλίμακας και προκύπταν σημαντικές αποκλίσεις από το πραγματικό μέγεθος της περιμέτρου, για το οποίο οι εκτιμήσεις διέφεραν σημαντικά μεταξύ τους [17]. Φαινόμενο που οφείλεται στο παράδοξο της ακτογραμμής, σύμφωνα με το οποίο το μετρούμενο μήκος της ακτογραμμής εξαρτάται από την κλίμακα μέτρησης. Συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε πως η μονάδα μέτρησης και το μήκος της περιμέτρου ήταν αντιστρόφως κινούμενα μεγέθη και η χρησιμοποίηση απειροστού μήκους ως μονάδα μέτρησης, θα οδηγούσε σε υπολογισμό απείρου μήκους της περιμέτρου (Richardson's effect). Αυτό το παράδοξο στο οποίο κατέληξε η επίλυση του προβλήματος με την Ευκλείδεια γεωμετρία οδήγησε στην ανάπτυξη της fractal γεωμετρίας. Τα βασικά χαρακτηριστικά ενός μορφοκλασματικού συνόλου είναι τα παρακάτω [18]:

- Αυτό-ομοιότητα, η οποία μπορεί να εκδηλωθεί ως:
  - Ακριβής αυτό-ομοιότητα, όπου το σχήμα είναι αυτούσιο σε όλες τις κλίμακες.
  - Μερική αυτό-ομοιότητα όπου προσεγγιστικά εμφανίζεται το ίδιο πρότυπο σε διαφορετικές κλίμακες.
  - Στατιστική αυτό-ομοιότητα όπου επαναλαμβάνεται στοχαστικά ένα πρότυπο σε διαφορετικές κλίμακες, δηλαδή διατηρούνται αριθμητικά και στατιστικά μεγέθη σε ποικίλες μεγεθύνσεις των δομών.
  - Ποιοτική, που εμφανίζεται σε χρονικές σειρές.
  - Πολυκλασματική, όπου τα χαρακτηριστικά των δομών διαφοροποιούνται στα διαφορετικά τμήματα των προτύπων.
- Λεπτομερείς δομές σε αυθαίρετα μικρές κλίμακες.
- Έντονη πολυπλοκότητα, όπου οι τοπικές ή συνολικές ανωμαλίες των δομών δεν είναι εφικτό να παρουσιαστούν με την κλασσική Ευκλείδεια γεωμετρία.
- Απλές δομές που εμφανίζονται επαναλαμβανόμενα.

Στην Ευκλείδεια γεωμετρία οποιαδήποτε γραμμή, επιφάνεια και όγκος ορίζονται ως ένα σύνολο στοιχείων μήκους, επιφανείας ή όγκου αντίστοιχα. Έτσι οποιοδήποτε μήκος μπορεί να υπολογιστεί ως:

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

όπου  $\delta$  είναι το μήκος ενός στοιχειώδους τμήματος,  $N$  το πλήθος στοιχειωδών τμημάτων που συνιστούν το μήκος  $L$  και ο εκθέτης αντιπροσωπεύει τη διάσταση της γραμμής. Ο υπολογισμός του μήκους  $L$  γίνεται ανεξάρτητα από το μέγεθος του στοιχείου  $\delta$ , έτσι όταν το  $\delta$  τείνει στο μηδέν, το μήκος  $L$  εξακολουθεί να είναι πεπερασμένο μέγεθος. Η γενική έκφραση της Σχέσης 2.2.1 είναι η παρακάτω:

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

Στην fractal γεωμετρία η διάσταση  $D$  είναι πραγματικός μη ακέραιος αριθμός και αντιπροσωπεύει την κλασματική ή fractal διάσταση μίας καμπύλης. Λόγω της πολυπλοκότητας τους, τα στοιχεία της fractal γεωμετρίας αντίθετα με εκείνα της κλασσικής Ευκλείδειας γεωμετρίας δεν είναι εφικτό να γίνουν αντικείμενο άμεσης παρατήρησης και επεξεργασίας. Επίσης, οι εικόνες των fractal δομών διατηρούν αναλλοίωτη κλασματική διάσταση σε όλες τις κλίμακες και δεν έχουν χαρακτηριστικό μέγεθος μέτρησης. Τέλος, οι μέθοδοι για την κατασκευή ενός μορφοκλασματικού συνόλου ποικίλουν, καθώς πολλές φορές είναι δυνατή η δημιουργία fractal δομών με απλούς τρόπους, ενώ σε άλλες περιπτώσεις απαιτείται μια επαναληπτική διαδικασία, όπου εφαρμόζονται οι ίδιοι μαθηματικοί μετασχηματισμοί σε κάθε βήμα.

### 2.3 Κλασματική-Fractal διάσταση

Η κλασματική διάσταση  $D$  αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό κάθε fractal δομής, καθώς παραμένει αναλλοίωτη σε όλες τις κλίμακες και ο υπολογισμός της αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την διεκπεραίωση κάθε μελέτης στα πλαίσια της fractal γεωμετρίας. Εξαιτίας της σημασίας της κλασματικής διάστασης έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι για τον υπολογισμό της. Αυτές οι μέθοδοι είναι στην πλειονότητα τους εκτιμητικές και σε πολλές περιπτώσεις εφαρμόζουν επαναληπτικές διαδικασίες μέχρις ότου ορισμένες συνθήκες που στοχεύουν στον ορισμό ενός fractal σχηματισμού να εκπληρωθούν. Επίσης, η εκτίμηση της κλασματικής διάστασης πραγματοποιείται σε ποικίλες περιπτώσεις από πραγματικά δεδομένα, καθώς πολλά φαινόμενα επιδεικνύουν περιορισμένες ή στατιστικές fractal ιδιότητες και fractal διαστάσεις έχουν εκτιμηθεί από δείγματα δεδομένων με χρήση τεχνικών fractal ανάλυσης σε ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Η πρακτική αυτή παρουσιάζει αρκετές δυσκολίες, αφού οι μετρήσεις των fractal διαστάσεων επηρεάζονται πρακτικά από πολλά προβλήματα μεθοδολογίας και είναι ευαίσθητες σε αριθμητικά και πειραματικά σφάλματα, ενώ πολλές φορές τα δεδομένα είναι ανεπαρκή. Παρόλα αυτά το πεδίο εξελίσσεται, καθώς η εκτίμηση του δείκτη σε φαινόμενα που παρουσιάζουν στατιστική αυτό-ομοιότητα έχει πρακτικές εφαρμογές σε ποικίλα πεδία. Οι δύο μέθοδοι υπολογισμού κλασματικών διαστάσεων που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία είναι η μέθοδος box counting και η μέθοδος Richardson, ενώ παρατίθεται και η διαδικασία βάση της οποίας πραγματοποιήθηκε η μετάβαση από ένα διακριτό σύνολο σημείων στη διεπιφάνεια της κατασκευής που προσομοιώθηκε.

### 2.3.1 Μέθοδος Richardson

Η μέθοδος αυτή πήρε το όνομα της από τον Άγγλο μετεωρολόγο Lewis Richardson ο οποίος την ανέπτυξε [19]. Κατά την εφαρμογή της, η υπό εξέταση καμπύλη διαιρείται σε τμήματα μήκους  $\delta$  και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιείται σε ένα ορισμένο διάστημα  $\delta' < \delta < \Delta$  η σχέση:

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

όπου  $N(\delta)$  είναι το πλήθος των τμημάτων μήκους  $\delta$  που μορφώνουν την καμπύλη της μελέτης. Εφόσον, πληρείται αυτή η συνθήκη η καμπύλη αποτελεί fractal σχηματισμό με κλασματική διάσταση  $D$ , η οποία ονομάζεται διάσταση Richardson και συμβολίζεται με  $D_R$ . Η τελική εκτίμηση της fractal διάστασης με αυτή τη μέθοδο ολοκληρώνεται υπολογίζοντας το μήκος της καμπύλης για διάφορες τιμές του μήκους  $\delta$  και σχεδιάζοντας το γράφημα του μήκους της καμπύλης συναρτήσει του  $\delta$ .

### 2.3.2 Μέθοδος box counting

Η μέθοδος box counting ή αλλιώς μέθοδος του πλέγματος είναι μια διαδικασία εκτίμησης της κλασματικής διάστασης για μορφοκλασματικούς σχηματισμούς όπου η περίπλοκη μορφή τους καθιστά ανέφικτη την εφαρμογή αριθμητικής διαδικασίας υπολογισμού [16]. Ουσιαστικά πρόκειται για μία μέθοδο εξαγωγής πληροφοριών για την ανάλυση πολύπλοκων προτύπων, μέσω της διαίρεσης ενός συνόλου δεδομένων, ενός σύνθετου αντικειμένου ή κάποιας εικόνας σε πλέγματα όλο και μικρότερων τετραγώνων. Η ουσία της μεθόδου έχει συγκριθεί με τη μεγέθυνση δομών με οπτικές μεθόδους ή με την χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, ώστε να εξεταστεί ο τρόπος που αλλάζουν οι λεπτομέρειες μιας δομής με τις αλλαγές της κλίμακας. Ωστόσο, στην μέθοδο του πλέγματος ο ερευνητής δεν αλλάζει τη μεγέθυνση, άλλα το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος που χρησιμοποιείται για την έρευνα.

Για την εξαγωγή της fractal διάστασης μίας καμπύλης με αυτή τη μέθοδο, η καμπύλη καλύπτεται από ένα πλέγμα τετραγώνων πλευράς  $\delta_n$  και έπειτα το κάθε τετράγωνο διαιρείται σε τετράγωνα πλευράς  $\delta_{n+1} = \frac{\delta_n}{2}$ . Στη συνέχεια, από το πλήθος των υποτετραγώνων που εσωκλείουν τμήματα της fractal καμπύλης  $f$  προκύπτει η κλασματική διάσταση. Συγκεκριμένα, δημιουργείται το διάγραμμα του πλήθους τετραγώνων που περιέχουν τμήματα της fractal καμπύλης συναρτήσει του μεγέθους της πλευράς των τετραγώνων σε λογαριθμική κλίμακα. Εφόσον, η καμπύλη είναι fractal σχηματισμός το τελικό διάγραμμα που προκύπτει, προσεγγίζει ευθεία γραμμή ως συνέπεια της σχέσης 2.3.1.1, που ορίζει τις fractal καμπύλες. Στη

συνέχεια, σχεδιάζεται η ευθεία που προσεγγίζεται από το διάγραμμα και η κλασματική διάσταση λαμβάνεται ως η κλίση της ευθείας αυτής. Η κλασματική διάσταση που προκύπτει με αυτή τη μέθοδο ονομάζεται «φυσική διάσταση box» και συμβολίζεται  $D_B$ . Όπως προκύπτουν από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της φυσικής διάστασης box είναι οι εξής:

$$N_{(f,\delta)} = C \times \delta^{-D}, \text{ όπου } C \text{ είναι μία θετική σταθερά} \quad (2.3.2.1)$$

Συνεπώς:

$$D = \frac{\ln N_{(f,\delta)} - \ln C}{\ln \left(\frac{1}{\delta}\right)} \quad (2.3.2.2)$$

Επιπρόσθετα, όταν  $\delta \rightarrow 0$ , τότε και ο όρος  $\frac{\ln C}{\ln \left(\frac{1}{\delta}\right)} \rightarrow 0$  οπότε η σχέση (2.3.2.2) μετασχηματίζεται ως εξής:

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

## 2.4 Fractal Συναρτήσεις Παρεμβολής

Όπως προαναφέρθηκε, η τραχύτητα αποτελεί παράγοντα που επηρεάζει σε πολύ σημαντικό βαθμό την επαφή πραγματικών επιφανειών. Συνεπώς, η προσομοίωση της τραχύτητας στην μελέτη που διεξάχθηκε για την επαφή των επιφανειών δύο μεταλλικών δίσκων ήταν απαραίτητο να πραγματοποιηθεί όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά. Έτσι, δεδομένου ότι μεγάλος αριθμός ερευνητικών εργασιών έχουν καταλήξει πως οι fractal δομές είναι από τις πλέον κατάλληλες για την προσομοίωση της επιφανειακής τραχύτητας σε προβλήματα επαφής [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25], η χρησιμοποίηση της fractal γεωμετρίας στην παρούσα μελέτη που εστιάζει ακριβώς σε αυτό το πρόβλημα κρίθηκε ικανοποιητική μέθοδος για την προσομοίωση της διεπιφάνειας. Η προσομοίωση της επιφανειακής τραχύτητας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής βασίστηκε στη διαδικασία που εφαρμόστηκε από τον Barnsley (1988), [26].

Μέσω των fractal συναρτήσεων παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκαν πραγματοποιείται η μετάβαση από ένα διακριτό σύνολο σημείων πλήθους  $N+1$ , σε ένα συνεχές μοντέλο fractal γεωμετρίας. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μίας διαδικασίας η οποία περιλαμβάνει τη χρήση συναρτήσεων παρεμβολής τύπου fractal  $f: [x_0, x_N] \rightarrow \mathbb{R}$ , τέτοιων ώστε  $f(x_i) = y_i$ , για  $i = 0, 1, \dots, N$ , [27]. Όταν  $C^0$  είναι ένα σύνολο, που αποτελείται από συνεχείς συναρτήσεις  $f: [x_0, x_N] \rightarrow \mathbb{R}$  και  $T$  τελεστής όπου  $T: C^0 \rightarrow C^0$  που ορίζεται από την σχέση:

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

,τότε ισχύει η ακολουθία συναρτήσεων  $f_{n+1}(x) = (Tf_n)(x)$ . Η ακολουθία αυτή συγκλίνει σε συγκεκριμένη καμπύλη  $f$ , όταν το  $n \rightarrow \infty$ . Ο τελεστής  $T: C^0 \rightarrow C^0$  έχει τη συσταλτική ιδιότητα, δηλαδή υπάρχει ένα μοναδικό, σταθερό σημείο στο πεδίο ορισμού του. Άρα, υπάρχει μια συνάρτηση  $f \in C^0$ :

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

Το γράφημα της fractal συνάρτησης παρεμβολής  $f: [x_0, x_N] \rightarrow \mathbb{R}$ , που προσεγγίζεται από την ακολουθία, αποτελεί τον μοναδικό ελκυστή ενός επαναληπτικού συστήματος συναρτήσεων  $\{\mathbb{R}^2; w_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ , το οποίο σύστημα ορίζεται με την βοήθεια των μετασχηματισμών  $w_i$ , για  $i = 1, 2, \dots, N$ :

$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_i & 0 \\ c_i & d_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ g_i \end{pmatrix} \quad (2.4.3)$$

Για τους οποίους μετασχηματισμούς ισχύουν οι εξής περιορισμοί:

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

Ως αποτέλεσμα των παραπάνω συνθηκών, για κάθε έναν από τους μετασχηματισμούς  $w_i$  υπάρχει μία αυθαίρετη ελεύθερη παράμετρος. Έτσι, για τους μετασχηματισμούς επιλέχθηκε ως ελεύθερη παράμετρος η  $d_i$ , η απόλυτη τιμή της



οποίας αντιστοιχεί στον λόγο του μετασχηματισμένου μήκους  $w_i(L)$  προς το αρχικό μήκος  $L$ . Επίσης, οι μετασχηματισμοί  $w_i$  είναι διατμητικοί, δηλαδή κάθε νέος σχηματισμός διατηρεί παράλληλη κατεύθυνση με τον αρχικό, συνεπώς η κατακόρυφη κλιμάκωση που προκύπτει από τους μετασχηματισμούς προσδιορίζεται από την ελεύθερη παράμετρο  $d_i$ . Απαραίτητη προϋπόθεση για να διασφαλίζεται η συσταλτική ιδιότητα του τελεστή  $T$ , έτσι ώστε να υπάρχει ελκυστής στο πεδίο ορισμού του είναι να πληρείται η ακόλουθη συνθήκη για τις ελεύθερες παραμέτρους των μετασχηματισμών:

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

Από την σχέση (2.4.3) που ορίζει το επαναληπτικό σύστημα συναρτήσεων και τους περιορισμούς της σχέσης (2.4.4) προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις, από τις οποίες υπολογίζονται οι υπόλοιπες παράμετροι:

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

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

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

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

Στη συνέχεια, μέσω αυτών των συναρτήσεων παρεμβολής πραγματοποιείται ο άμεσος υπολογισμός της κλασματικής διάστασης  $D$ . Για την επίτευξη του υπολογισμού της fractal διάστασης, η γραφική παράσταση της συνάρτησης παρεμβολής τύπου fractal  $f: [x_0, x_N] \rightarrow \mathbb{R}$ , καλύπτεται από πλέγμα τετραγώνων πλευράς  $\delta$ :  $\delta' < \delta < \Delta$ , όπου για πλήθος τετραγώνων  $N(\delta)$  ικανοποιείται η βασική σχέση (2.3.1.1). Έπειτα, για  $i=1,2,\dots,N$ , σε κάθε διάστημα  $[x_{i-1}, x_i]$  υπολογίζεται το  $N_i(\delta)$ , δηλαδή το πλήθος τετραγώνων πλευράς  $\delta$  που τέμνουν τη καμπύλη στο αντίστοιχο διάστημα  $i$ , για τα οποία ισχύει η σχέση:



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

Το πλέγμα των τετραγώνων που καλύπτει την καμπύλη διακρίνεται σε πλήθος  $\mathfrak{Z}(\delta)$ , στήλες τετραγώνων. Το πλήθος των τετραγώνων που τέμνουν την fractal καμπύλη ανά στήλη συμβολίζεται ως:  $\{c_j(\delta): j = 1, 2, \dots, \mathfrak{Z}(\delta)\}$ . Με βάση την υπόθεση πως  $|d_i| > a_i$ , για  $i = 1, 2, \dots, N$  προκύπτει πως ο ελάχιστος αριθμός τετραγώνων που τέμνουν την καμπύλη και το μήκος  $\delta$  της πλευράς είναι αντιστρόφως κινούμενα μεγέθη. Η εφαρμογή του μετασχηματισμού  $w_i$  σε κάποια στήλη τετραγώνων  $c_j(\delta)$  έχει σαν συνέπεια την μετατροπή του μεγέθους του πλάτους της στήλης σε  $(a_i\delta)$ , ενώ το ύψος της στήλης μετά τον μετασχηματισμό ισούται με το αρχικό ύψος της, πολλαπλασιασμένο επί  $|d_i|$ . Όπως προκύπτει από όσα προαναφέρθηκαν, αν το πλήθος των τετραγώνων μίας στήλης  $j$ , είναι  $N(c_j(\delta))$  τότε με την εφαρμογή του μετασχηματισμού  $w_i$  στην στήλη προκύπτει η μετασχηματισμένη στήλη που αποτελείται από  $|d_i| \times N(c_j(\delta)) \times \delta / (a_i \times \delta) = |d_i| N(c_j(\delta)) / a_i$ , τετράγωνα πλευράς  $(a_i\delta)$ . Το τελικό πλήθος των τετραγώνων που καλύπτουν την καμπύλη, υπολογίζεται ως το άθροισμα των επιμέρους αριθμών τετραγώνων που αντιστοιχούν σε καθεμία από τις στήλες. Έτσι, προκύπτει η παρακάτω σχέση για τον υπολογισμό του συνολικού αριθμού τετραγώνων μετά τον μετασχηματισμό:

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

Επιπλέον, όταν το  $\delta$  είναι πολύ μικρό σε σχέση με το διάστημα  $[x_0, x_N]$ , τότε η σχέση (2.4.11) μετασχηματίζεται ως εξής:

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

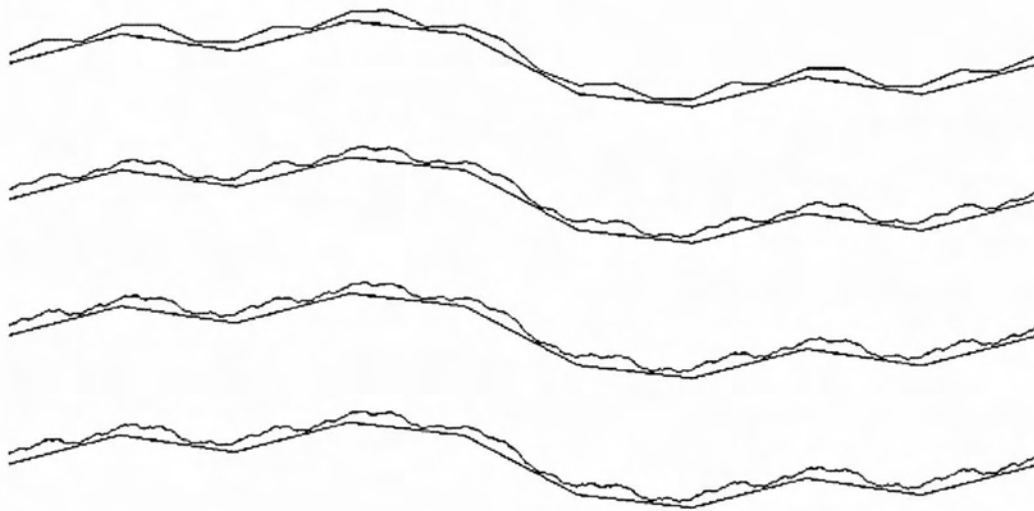
Έτσι, αντικαθιστώντας τα  $N_i(\delta)$  όπως υπολογίζονται στην σχέση (2.4.10) στη σχέση (2.4.12) εξάγεται η παρακάτω εξίσωση:

$$N(\delta) = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{|d_i|}{a_i} \right) N\left(\frac{\delta}{a_i}\right) \right] \quad (2.4.13)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την βασική σχέση των fractal σχηματισμών σύμφωνα με την οποία  $N(\delta) \sim \delta^{-D}$ , συνεπάγεται  $N(\delta/a_i) \sim \delta^{-D} a_i^D$ . Επομένως, αντικαθιστώντας αντίστοιχα τους όρους  $N(\delta/a_i)$  και  $N(\delta)$  στην εξίσωση (2.4.13) προκύπτει η ακόλουθη σχέση:

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

Εφόσον, τα σημεία παρεμβολής δεν είναι συνευθειακά, διότι σε αυτή την περίπτωση η  $f$  αποτελεί ευθεία γραμμή, ο αριθμητικός υπολογισμός της κλασματικής διάστασης  $D$ :  $1 < D < 2$ , πραγματοποιείται από την τελευταία αυτή σχέση. Το μέγεθος και η πυκνότητα των κατακόρυφων αποκλίσεων που εμφανίζει η fractal καμπύλη που κατασκευάζεται εξαρτώνται από την τιμή της κλασματικής διάστασης  $D$ , της οποίας η τιμή καθορίζεται από την επιλογή των ελεύθερων παραμέτρων  $d_i$  που θέτονται στους αντίστοιχους μετασχηματισμούς  $w_i$ . Οι fractal καμπύλες που είναι δυνατόν να κατασκευαστούν με αυτή τη διαδικασία ποικίλουν σε μορφή. Όσο η κλασματική διάσταση τείνει στην μονάδα, οι καμπύλες τείνουν σε μονοδιάστατες γραμμές, ενώ καθώς οι τιμές του δείκτη προσεγγίζουν την τιμή δύο οι καμπύλες τείνουν να αναπαραστήσουν επίπεδο. Για την παρούσα εργασία εξετάστηκαν έξι αναλύσεις για το άνω τμήμα της διεπιφάνειας, ενώ το κάτω σύνορο έχει ληφθεί σταθερό και κατασκευάζεται από την δεύτερη από τις επαναλήψεις. Η διεπιφάνεια που μελετήθηκε κατασκευάστηκε με την προαναφερθείσα διαδικασία από την συνάρτηση παρεμβολής τύπου fractal  $f$  και τέσσερα συνεπίπεδα σημεία παρεμβολής, για τις ελεύθερες παραμέτρους λήφθηκαν οι τιμές  $d_1 = d_2 = d_3 = 0.365$  που οδήγησαν στην τιμή της κλασματικής διάστασης  $D = 1.083$ . Παρακάτω απεικονίζονται στο Σχήμα 2.4.1 οι αναλύσεις τις fractal διεπιφάνειας  $f_{3-6}$  που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη της επαφής στην παρούσα εργασία.



**Σχήμα 2.4.1 :** Αναλύσεις  $f_{3-6}$  του άνω συνόρου της διεπιφάνειας σε σύγκριση με την δεύτερη ανάλυση της fractal συνάρτησης παρεμβολής  $f_2$  που σχηματίζει το κάτω σύνορο.

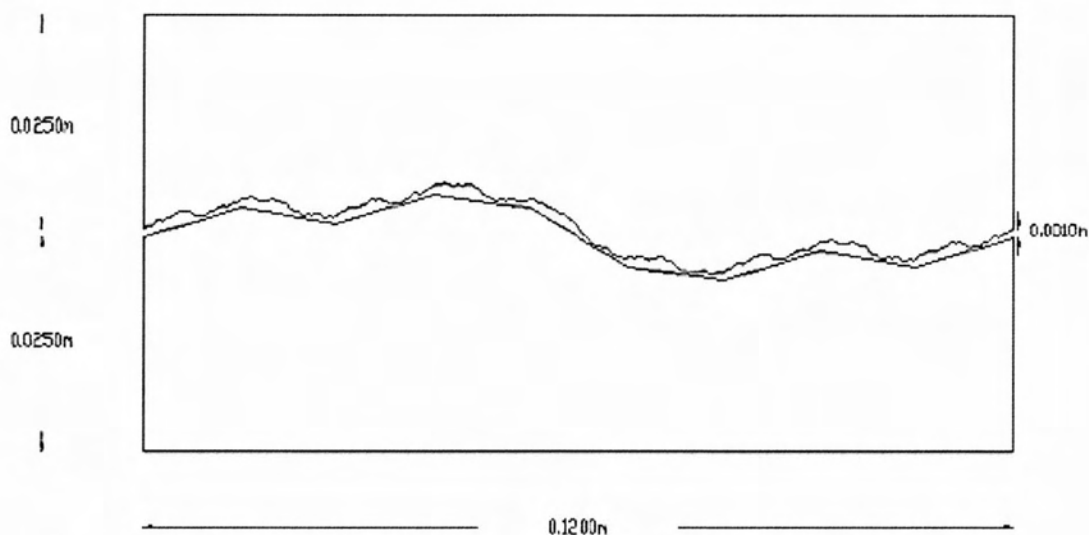
## 3<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΛΗ ΧΑΜΗΛΩΝ ΠΙΕΣΕΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική παρουσίαση της κατασκευής του μοντέλου προσομοίωσης, πάνω στην οποία πραγματοποιήθηκε η μελέτη της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής. Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από δύο δίσκους από ισότροπο χάλυβα S275 μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται η διεπιφάνεια στην οποία γίνεται η διασύνδεση τους. Για την μελέτη εξετάζεται η επαφή ενός άκαμπτου σώματος με παραμορφώσιμο δίσκο. Συγκεκριμένα, το κάτω τμήμα της κατασκευής προσομοιώθηκε ως άκαμπτο, ενώ το άνω τμήμα παραμορφώνεται ελαστοπλαστικά υπό την επίδραση του μηχανικού φορτίου και των μεταβολών της θερμοκρασίας του. Η εξασφάλιση της παραδοχής αυτής για το κάτω τμήμα, επιτεύχθηκε με σημαντική αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του, το οποίο πολλαπλασιάστηκε επί χίλια και με μείωση του συντελεστή θερμικής διαστολής, ώστε να μην οδηγεί σε παραμορφώσεις η αύξηση της θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα, στο άνω τμήμα της κατασκευής ο συντελεστής θερμικής διαστολής τέθηκε  $\alpha = 1.3 \times 10^{-5}$ , ενώ στο κάτω τμήμα που προσομοιώθηκε ως άκαμπτο ο συντελεστής λήφθηκε ίσος με  $\alpha = 10^{-20}$ . Όσον αφορά στον λόγο Poisson, τέθηκε ίσος με  $\nu = 0.30$  για τα δύο στερεά και λήφθηκε σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης του κάθε μοντέλου προσομοίωσης. Η γεωμετρία της διεπιφάνειας προσομοιώθηκε με χρήση της συνάρτησης παρεμβολής τύπου fractal  $f$ .

#### 3.1 Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά κατασκευής

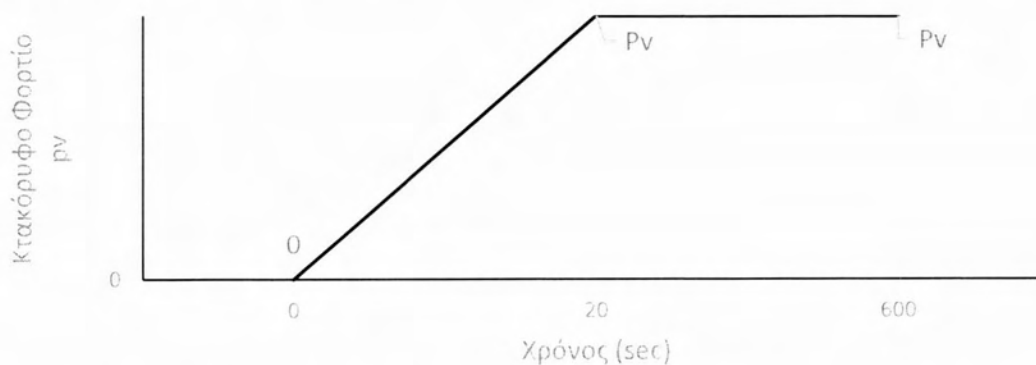
Το δισδιάστατο αναλυτικό μοντέλο που δημιουργήθηκε για την παρούσα προσομοίωση φαίνεται στο Σχήμα 3.1.1 παρακάτω. Η απόσταση των διεπιφανειών στα άκρα ορίστηκε ίση με 1mm και το πάχος της κατασκευής τέθηκε ίσο με 10cm και στους δύο δίσκους. Επίσης το μήκος των δύο σωμάτων της κατασκευής ορίστηκε ίσο με 12cm, ενώ το ύψος στα άκρα του άνω και του κάτω τμήματος ισούται με 2.5cm. Για την διεπιφάνεια εξετάστηκαν έξι αναλύσεις του άνω συνόρου της, ενώ το κάτω σύνορο παρέμεινε σταθερό σε όλες τις αναλύσεις, ως η δεύτερη από τις αναλύσεις της fractal συνάρτησης παρεμβολής  $f$ . Η εικονιζόμενη κατασκευή αντιστοιχεί στην πέμπτη από τις αναλύσεις του άνω συνόρου της διεπιφάνειας.



Σχήμα 3.1.1 : Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης.

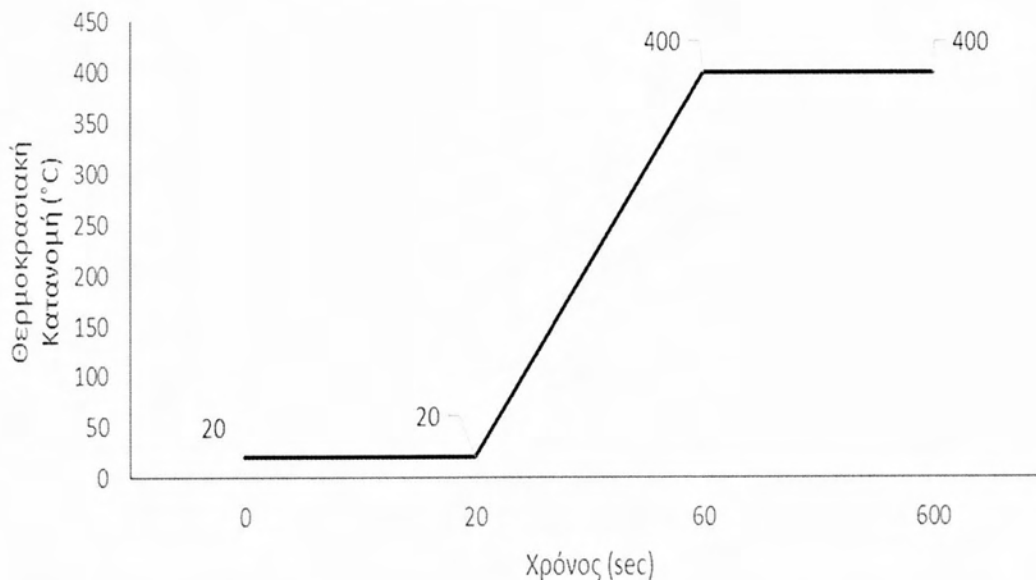
### 3.2 Συνοριακές Συνθήκες

Αρχικά σε όλους τους κόμβους της κατασκευής επιβλήθηκε ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας ίση με 20°C. Για την στήριξη της κατασκευής επιβλήθηκε δέσμευση της κατακόρυφης μετακίνησης στους κόμβους της κάτω πλευράς του κάτω τμήματος της κατασκευής και δέσμευση της μετακίνησης κατά τη διεύθυνση X στους κόμβους της αριστερής πλευράς και των δύο τμημάτων του μοντέλου της προσομοίωσης. Το μηχανικό κατακόρυφο φορτίο  $P_v$  ενεργεί σταδιακά στους άνω κόμβους του άνω τμήματος της κατασκευής, οι τιμές κατακόρυφου μηχανικού φορτίου που εξετάστηκαν αντιστοιχούν σε τάσεις ίσες με  $0.001f_y$ ,  $0.0015f_y$ ,  $0.002f_y$ ,  $0.0025f_y$ ,  $0.005f_y$ ,  $0.0075f_y$ ,  $0.01f_y$ ,  $0.0125f_y$ ,  $0.015f_y$ ,  $0.0175f_y$ ,  $0.02f_y$  και  $0.0225f_y$ , όπου  $f_y$  είναι η τάση διαρροής του υλικού. Ο τρόπος με τον οποίο έγινε η σταδιακή επιβολή του μηχανικού φορτίου φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα του Σχήματος 3.2.1:



Σχήμα 3.2.1 : Σταδιακή επιβολή του μηχανικού φορτίου συναρτήσει του χρόνου.

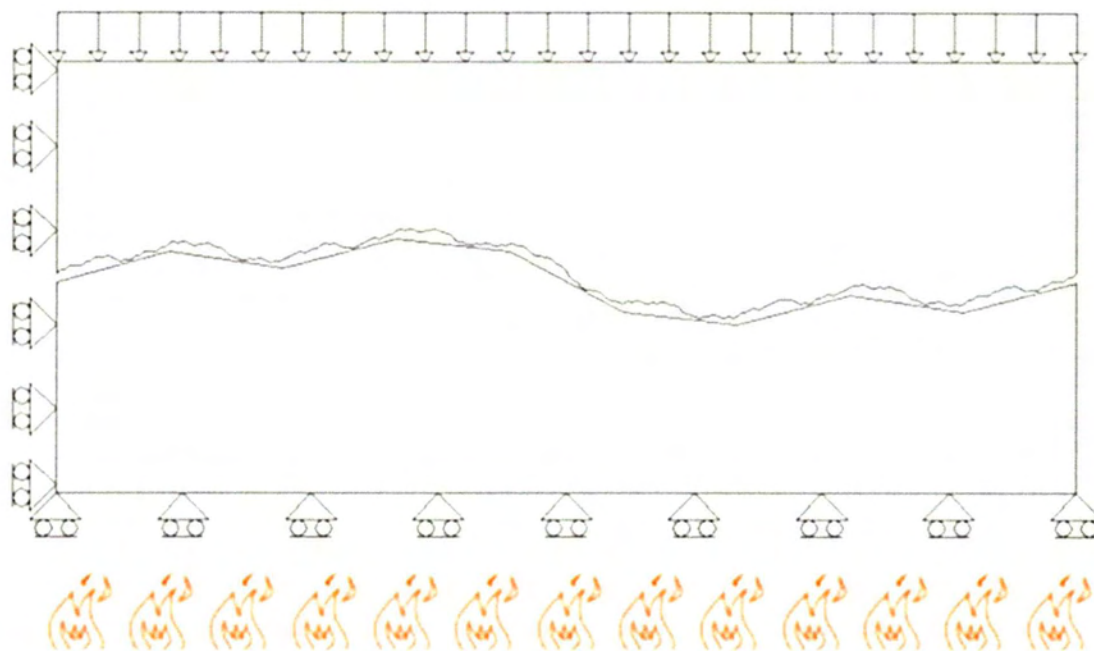
Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα το μηχανικό φορτίο επιβάλλεται γραμμικά στα 20 πρώτα δευτερόλεπτα, οπότε και φτάνει στην τελική τιμή του και σταθεροποιείται. Με την σταθεροποίηση του μηχανικού φορτίου ξεκινάει στην κατασκευή η σταδιακή επιβολή ομοιόμορφης θερμοκρασιακής κατανομής που μεταβάλλεται γραμμικά από τους 20°C και καταλήγει σε τελική τιμή 400°C στο εξηκοστό δευτερόλεπτο της επίλυσης όπου και σταθεροποιείται. Η θερμοκρασιακή μεταβολή εφαρμόζεται κατά την διεύθυνση X, όπως φαίνεται παρακάτω, στο Σχήμα 3.2.2. Για την επιβολή της θερμοκρασιακής κατανομής εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις, στην πρώτη επιβλήθηκε σε όλους τους κόμβους της κάτω πλευράς του κάτω τμήματος της κατασκευής και στη δεύτερη σε όλους τους κόμβους του άνω ορίου του άνω τμήματος.



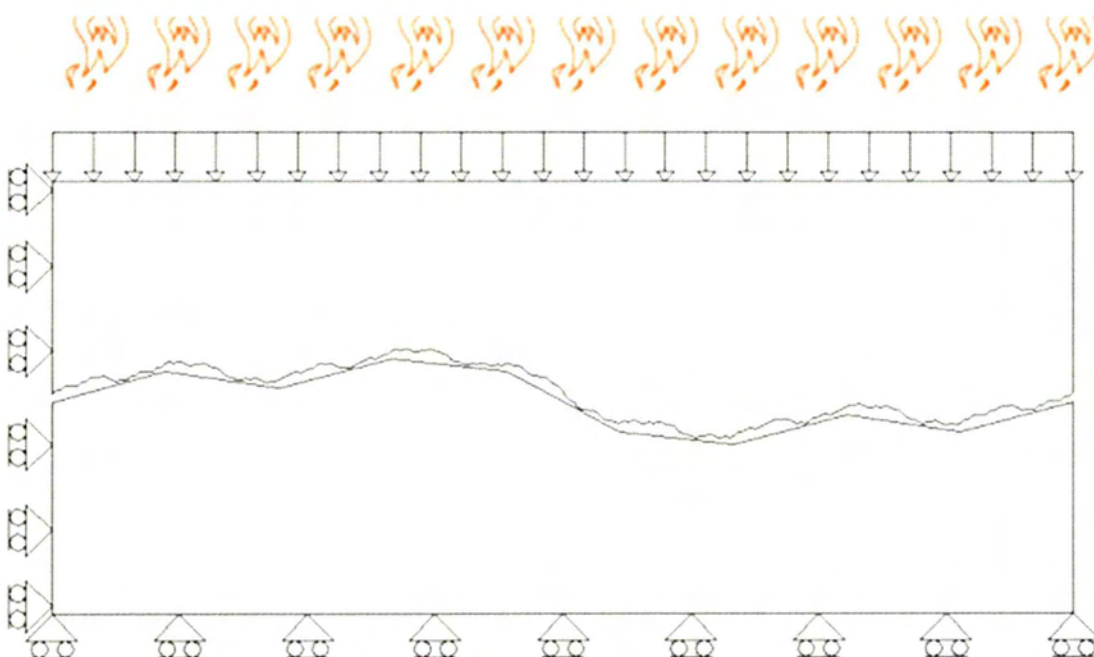
**Σχήμα 3.2.2 :** Επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή κατανομή συναρτήσει του χρόνου.

Στα Σχήματα 3.2.3 και 3.2.4 που ακολουθούν απεικονίζονται όλες οι συνοριακές συνθήκες της κατασκευής που προαναφέρθηκαν για τις δύο περιπτώσεις επιβαλλόμενης θερμοκρασιακής κατανομής που εξετάστηκαν.





**Σχήμα 3.2.3 :** Συνοριακές συνθήκες της κατασκευής στην πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε με την επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή μεταβολή στο κάτω τμήμα.



**Σχήμα 3.2.4 :** Συνοριακές συνθήκες της κατασκευής στην δεύτερη περίπτωση με την εφαρμογή της θερμοκρασιακής κατανομής στο άνω όριο της.

Πρέπει να σημειωθεί, πως οι συνοριακές συνθήκες που λήφθηκαν για την παρούσα προσομοίωση και αναφέρθηκαν παραπάνω οδηγούν σε μη-γραμμικές

σχέσεις μεταξύ των τάσεων και των παραμορφώσεων, καθώς η αστάθεια της επαφής στις αναλύσεις, που πραγματοποιήθηκαν ισοδυναμεί με μη-γραμμικές συνοριακές συνθήκες. Επίσης, η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του χάλυβα και οι έντονες πλαστικές παραμορφώσεις σε περιοχές της επιφάνειας σύσφιξης της επαφής συνάδουν στη μη-γραμμικότητα των καταστατικών εξισώσεων, των εξισώσεων συμβιβαστού και των εξισώσεων ισορροπίας.

### 3.3 Ιδιότητες Υλικού

Τα υλικά δομήσεως γενικά παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή και δυσκαμψία σε υψηλές θερμοκρασίες, έτσι αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μειωμένη φέρουσα ικανότητα και αύξηση των παραμορφώσεων υπό σταθερό φορτίο. Επιπρόσθετα τα περισσότερα μηχανικά χαρακτηριστικά (Μέτρο ελαστικότητας, ερπυσμός κ.α.) όπως και οι περισσότερες φυσικοχημικές ιδιότητες των υλικών (διαστολή, τήξη, θερμικές ιδιότητες κ.τ.λ.) επηρεάζονται δυσμενώς από την αύξηση της θερμοκρασίας. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του χάλυβα S275 που επιδρούν στο αντικείμενο της μελέτης μας, καθώς και οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για να ληφθεί υπόψη η εξάρτηση τους από την θερμοκρασία της κατασκευής.

#### 3.3.1 Θερμική Αγωγιμότητα

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN 1993-1-2 [28], η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις:

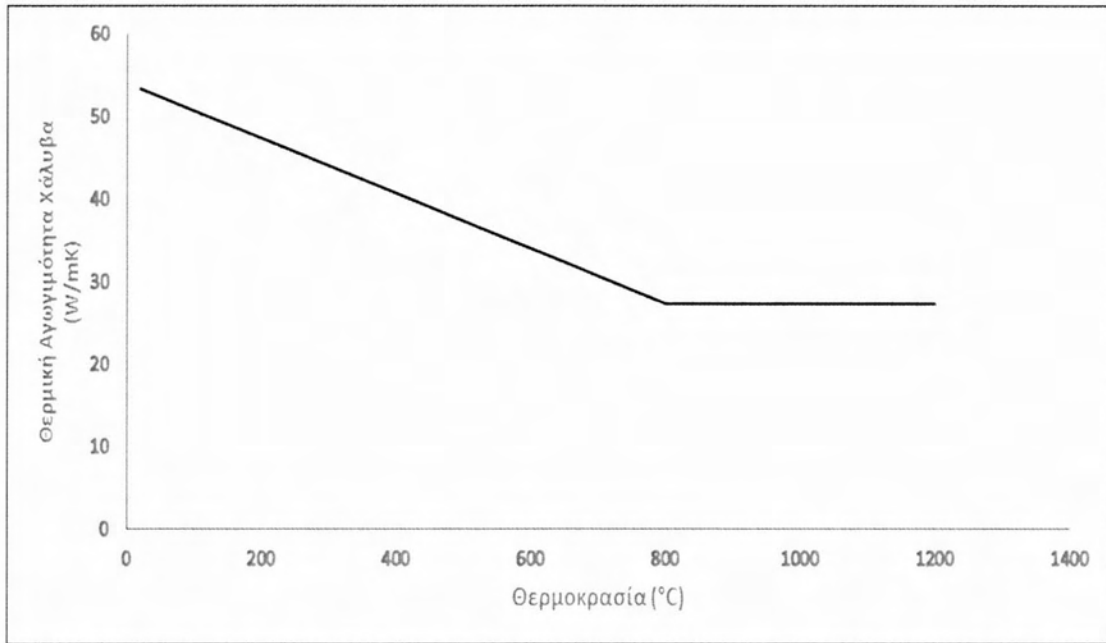
Για  $20^{\circ}\text{C} \leq T_{\alpha} \leq 800^{\circ}\text{C}$  :

$$\lambda_{\alpha} = 54 - 33.3 \times 10^{-3}T_{\alpha} \text{ (W/mK)} \quad (3.3.1.1)$$

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

$$\lambda_{\alpha} = 27.3 \text{ (W/mK)} \quad (3.3.1.2)$$

όπως φαίνεται από τις παραπάνω σχέσεις η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα μειώνεται γραμμικά για θερμοκρασίες από  $20^{\circ}\text{C}$  έως  $800^{\circ}\text{C}$  και σταθεροποιείται στη τιμή  $27.3 \text{ (W/mK)}$  για θερμοκρασίες υψηλότερες από  $800^{\circ}\text{C}$ . Οι σχέσεις αυτές που προαναφέρθηκαν φαίνονται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα που ακολουθεί στο Σχήμα 3.3.1.1.



Σχήμα 3.3.1.1 : Θερμική Αγωγιμότητα του Χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

### 3.3.2 Ειδική Θερμότητα

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία για την συσχέτιση της θερμοκρασίας με την ειδική θερμότητα λήφθηκαν από τον Ευρωκώδικα EN 1993-1-2 [28]. Οι παρακάτω σχέσεις ισχύουν για θερμοκρασίες μέχρι και 1200°C και οι τιμές που δίνουν απεικονίζονται στο διάγραμμα που ακολουθεί (Σχήμα 3.3.2.1).

Για  $20^{\circ}\text{C} \leq T_{\alpha} < 600^{\circ}\text{C}$  :

$$C_{\alpha} = 425 + 0.773T_{\alpha} - 1.69 \times 10^{-3}T_{\alpha}^2 + 2.22 \times 10^{-6}T_{\alpha}^3 \text{ J/KgK} \quad (3.3.2.1)$$

Για  $600^{\circ}\text{C} \leq T_{\alpha} < 735^{\circ}\text{C}$  :

$$C_{\alpha} = 666 - \frac{13002}{T_{\alpha}-738} \text{ J/KgK} \quad (3.3.2.2)$$

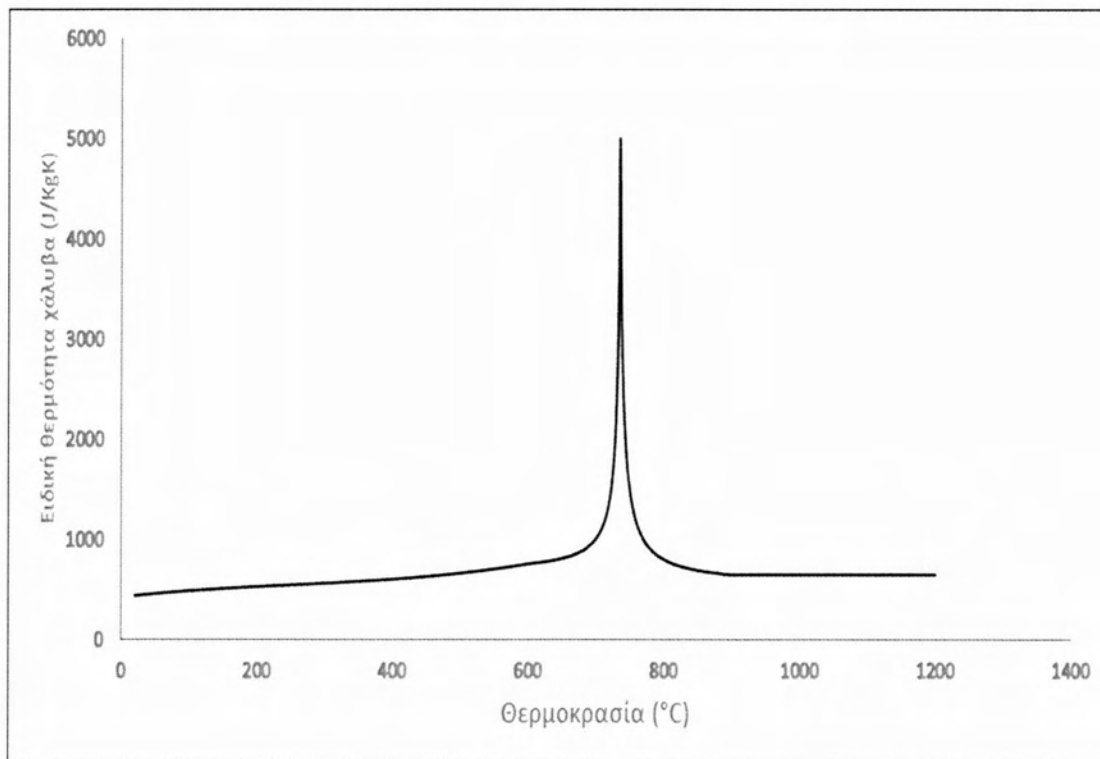
Για  $735^{\circ}\text{C} \leq T_{\alpha} < 900^{\circ}\text{C}$  :

$$C_{\alpha} = 545 + \frac{17820}{T_{\alpha}-731} \text{ J/KgK} \quad (3.3.2.3)$$

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

$$C_{\alpha} = 650 \text{ J/KgK} \quad (3.3.2.4)$$

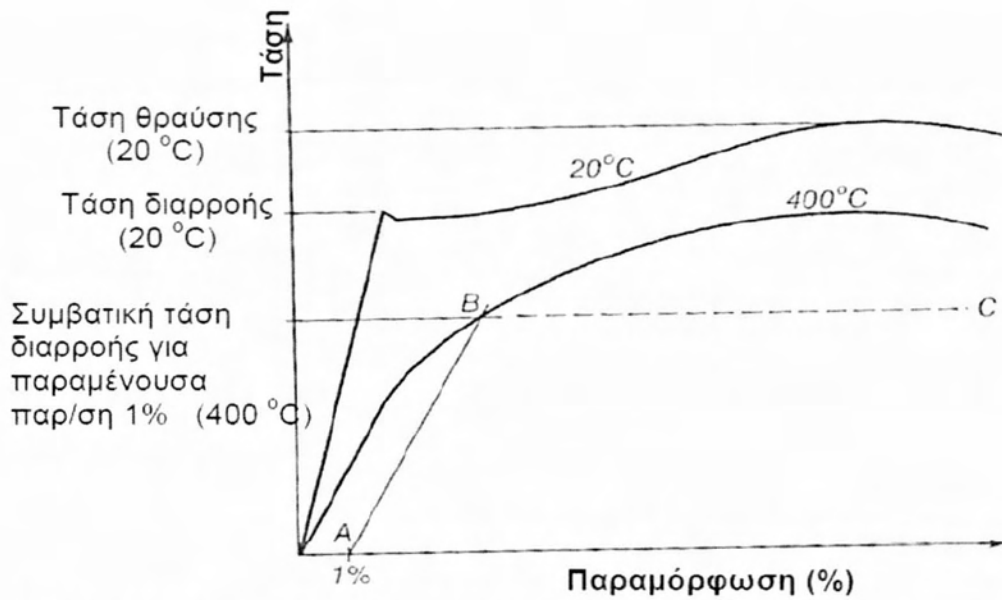
όπου  $T_{\alpha}$  η θερμοκρασία του χάλυβα σε ( $^{\circ}\text{C}$ ).



Σχήμα 3.3.2.1 : Ειδική Θερμότητα του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

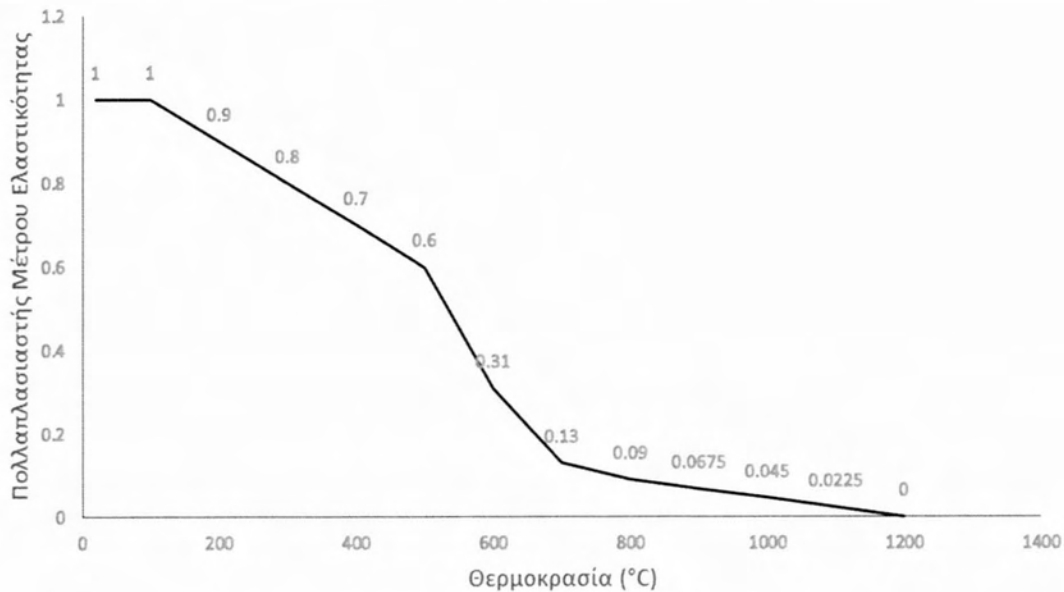
### 3.3.3 Επιρροή της υψηλής θερμοκρασίας στα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα.

Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής σε διαρροή του χάλυβα καθώς και τη σταδιακή μείωση του μέτρου ελαστικότητας. Οι μειώσεις αυτές δεν είναι σημαντικές για θερμοκρασίες υλικού μέχρι και 200°C και η τιμή της αντοχής μπορεί να θεωρηθεί σταθερή. Για τιμές θερμοκρασίας από 200°C μέχρι και 600°C οι μειώσεις αυξάνονται και φτάνουν μέχρι και το 60% των αρχικών τιμών. Για θερμοκρασίες υψηλότερες από 600°C η μείωση του ορίου διαρροής γίνεται περισσότερο απότομη και στους 1200°C προσεγγίζει το μηδέν. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 [28], για χάλυβες θερμής έλασης χωρίς περαιτέρω θερμική επεξεργασία και τις μικρότερες των 400°C θερμοκρασίες, που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία το όριο διαρροής του χάλυβα μπορεί να θεωρηθεί σταθερό. Για χάλυβες με διακριτό όριο διαρροής η ανάπτυξη υψηλής θερμοκρασίας προκαλεί καμπύλωση του διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων [29]. Το παρακάτω Σχήμα 3.3.3.1 παρουσιάζεται για τη σύγκριση των διαγραμμάτων για τις ακραίες τιμές της θερμοκρασίας, που αναπτύσσονται στο μοντέλο της προσομοίωσης, δηλαδή για τιμές θερμοκρασίας 20°C και 400°C .



**Σχήμα 3.3.3.1 :** Σχηματικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα, για θερμοκρασίες 20°C και 400°C.

Οι τιμές του μέτρου Ελαστικότητας για χάλυβα θερμής έλασης συναρτήσει της θερμοκρασίας του υλικού, που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο της προσομοίωσης λήφθηκαν από τον Ευρωκώδικα 2 [28] και παρουσιάζονται στο παρακάτω διάγραμμα του Σχήματος 3.3.3.2 :



**Σχήμα 3.3.3.2 :** Μεταβολή του μέτρου Ελαστικότητας του χάλυβα θερμής έλασης συναρτήσει της θερμοκρασίας του.



όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.3.3.2 οι τιμές του μέτρου Ελαστικότητας λήφθηκαν σταθερές, χωρίς μειώσεις για θερμοκρασίες από 20°C έως και 100°C, ενώ μειώνονται γραμμικά από τους 100°C μέχρι και τους 500°C, όπου η μείωση φτάνει το 40% της αρχικής τιμής. Για θερμοκρασίες από 500°C μέχρι και 800°C η μείωση του μέτρου Ελαστικότητας γίνεται πιο απότομη και λαμβάνεται γραμμική τμηματικά ανά 100°C με διαφορετικούς ρυθμούς μείωσης σε κάθε τμήμα. Από την θερμοκρασία 800°C όπου η τιμή του μέτρου Ελαστικότητας φτάνει το 9% της αρχικής τιμής, η μεταβολή της τιμής αποκτάει σταθερό ρυθμό μέχρι την θερμοκρασία 1200°C όπου και προσεγγίζει το μηδέν. Η αρχική τιμή του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα που ορίστηκε για το άνω τμήμα της κατασκευής είναι  $E = 210 \text{ GPa}$ , ενώ για τον κάτω δίσκο αυτή η τιμή λήφθηκε πολλαπλασιασμένη επί χίλια, ώστε να προσομοιωθεί η ακαμψία του.

### 3.4 Προσομοίωση της Τραχύτητας της Διεπιφάνειας με την βοήθεια των Fractal Συναρτήσεων Παρεμβολής

Η τραχύτητα της διεπιφάνειας προσομοιώθηκε μέσω μίας διαδικασίας, που εμπεριέχει τη fractal συνάρτηση παρεμβολής  $f$ , διαμέσου της οποίας πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλοι μετασχηματισμοί, ώστε να τροποποιηθεί ένα σύνολο αρχικών σημείων σε μία fractal καμπύλη. Οι διαδικασίες αυτές παρήγαγαν με επιτυχία μια ακριβή προσομοίωση της επιφανειακής τραχύτητας της διεπιφάνειας του μοντέλου. Με σκοπό να μελετηθεί η τραχύτητα ως παράγοντας επιρροής της θερμικής αγωγιμότητας λόγω της επαφής στη κατασκευή, εξετάστηκαν πέντε διαφορετικές αναλύσεις του άνω συνόρου της διεπιφάνειας. Αυτό επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας διαφορετικές επαναλήψεις της fractal συνάρτησης παρεμβολής  $f$  που δημιουργήσαν διαφορετικά προφίλ ανάλυσης της τραχύτητας  $\delta$ . Όσο υψηλότερες γίνονται οι επαναλήψεις, τόσο αναπαρίστανται μικρότερες κλίμακες κατακόρυφων αποκλίσεων της επιφάνειας, με συνέπεια να γίνεται πιο τραχιά η διεπιφάνεια.

Τα δύο όρια της διεπιφάνειας που εξετάστηκε λήφθηκαν ως τα γραφήματα της fractal συνάρτησης παρεμβολής  $f \in C^0$ , για την οποία οι τιμές που λήφθηκαν στις ελεύθερες παραμέτρους είναι  $d_1 = d_2 = d_3 = 0.365$  και με τη βοήθεια της Σχέσης 2.4.14 υπολογίστηκε η τιμή της κλασματικής διάστασης  $D = 1.0826$ . Για τον υπολογισμό των υπόλοιπων παραμέτρων των μετασχηματισμών εφαρμόστηκαν οι Σχέσεις (2.4.6)-(2.4.9). Για την διεπιφάνεια που εξετάστηκε στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα συνεπίπεδα σημεία παρεμβολής από τα οποία διέρχονται οι καμπύλες όλων των αναλύσεων που ολοκληρώθηκαν. Το διακριτό αυτό



σύνολο σημείων είναι το εξής:  $\{(0.0,0.0), (0.04,0.05), (0.08, -0.05), (0.12,0.0)\}$ . Για τον υπολογισμό των αναλύσεων της διεπιφάνειας που εξετάστηκαν χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω επαναληπτική σχέση :

$$f_{n+1}(x) = (Tf_n)(x) \quad (3.4.1)$$

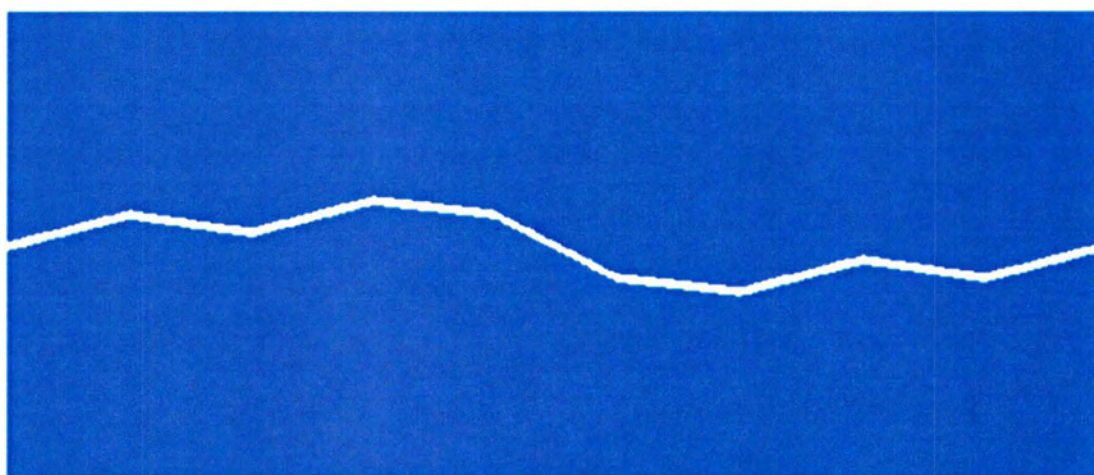
για  $n = 1, 2, \dots$ , και τελεστή  $T$  όπως ορίζεται από την σχέση (2.4.2). Με αυτή την διαδικασία δημιουργούνται οι πέντε επαναλήψεις που αφορούν στην κατασκευή των άνω τμημάτων της διεπιφάνειας. Όσον αφορά στο κάτω σύνορο της διεπιφάνειας, λήφθηκε αναλλοίωτο σε όλες τις επιλύσεις και αντιστοιχεί στην δεύτερη ανάλυση της διεπιφάνειας  $f$ . Ο αλγόριθμος που παράγει τις επαναλήψεις που λήφθηκαν για το άνω σύνορο της διεπιφάνειας αντιστοιχίζει στην  $n$ -οστή επανάληψη της συνάρτησης παρεμβολής τύπου fractal  $f_n$ , το διακριτό σύνολο  $N + 1$  σημείων παρεμβολής  $\{(x_i, y_i), i = 0, 1, \dots, N\}$  μετασχηματίζοντας το σε μία κατασκευή της επιφάνειας που αποτελείται από  $N^n$  ευθύγραμμα τμήματα. Έτσι, από το σύνολο τεσσάρων διακριτών σημείων παρεμβολής που λήφθηκε, αρχικά παράχθηκε στην πρώτη επανάληψη μια δομή από τρία διαδοχικά ευθύγραμμα τμήματα και στην συνέχεια για τις υπόλοιπες πέντε επαναλήψεις μετασχηματίστηκε σε δομές που αποτελούνται από διαφορετικού πλήθους και κλίμακας επιφανειακές αιχμές.

Καθεμιά από τις επαναλήψεις που εξετάστηκαν για τις μορφοκλασματικές διεπιφάνειες των αναλύσεων χαρακτηρίζεται από μία ακριβή τιμή της ανάλυσης  $\delta_n$  η οποία εκφράζει το βασικό μήκος της επιφάνειας που αντιστοιχεί στην  $n$ -οστή επανάληψη. Ουσιαστικά, αποτελεί το μήκος στην διεύθυνση  $X$ , του κάθε ευθυγράμμου τμήματος της επιφάνειας, το οποίο παραμένει σταθερό σε όλα τα τμήματα. Στις αναλύσεις που ολοκληρώθηκαν, έχουν ληφθεί υπόψη πέντε επαναλήψεις της fractal συνάρτησης παρεμβολής  $f_n, n = 2, 3, \dots, 6$ , καθώς θεωρήθηκε πως για την κλίμακα της κατασκευής δεν θα προκύπταν σημαντικές μεταβολές των αποτελεσμάτων διαμέσου της επιπρόσθετης βελτίωσης της ανάλυσης. Τα χαρακτηριστικά των επαναλήψεων της fractal διεπιφάνειας  $f$  παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 3.4.1:

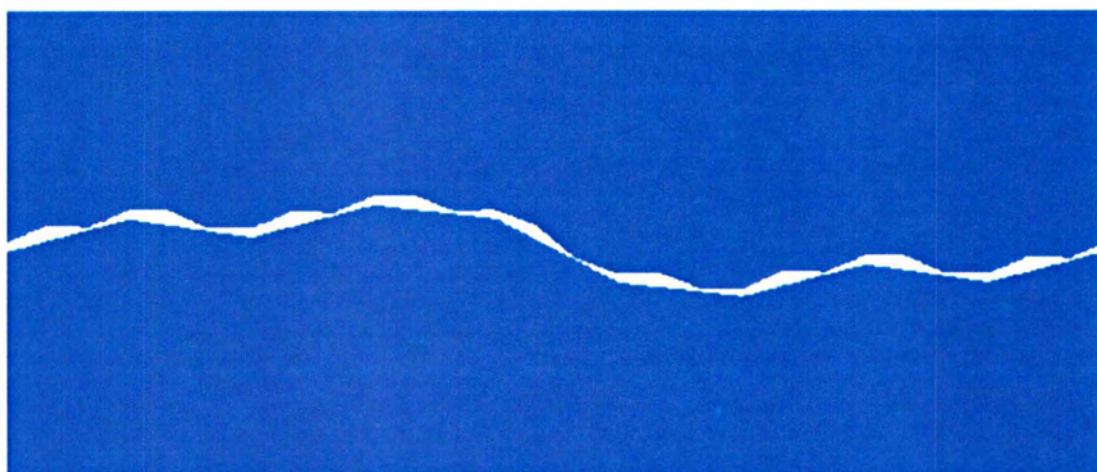
Ανάλυση της διεπιφάνειας f	Βασικό μήκος επανάληψης $\delta_n$ (mm)	Συνολικό μήκος της επιφάνειας f (mm)
2 <sup>η</sup>	13.333	123.98
3 <sup>η</sup>	4.444	126.47
4 <sup>η</sup>	1.481	129.18
5 <sup>η</sup>	0.494	132.37
6 <sup>η</sup>	0.160	135.98

**Πίνακας 3.4.1** : Χαρακτηριστικά των συνόρων της διεπιφάνειας στις αναλύσεις που εξετάστηκαν.

Τέλος, παρατίθενται στα σχήματα (3.4.1)-(3.4.5) οι κατασκευές διαφορετικής ανάλυσης της διεπιφάνειας  $f_n$ ,  $n = 2,3, \dots, 6$ , που εξετάστηκαν.

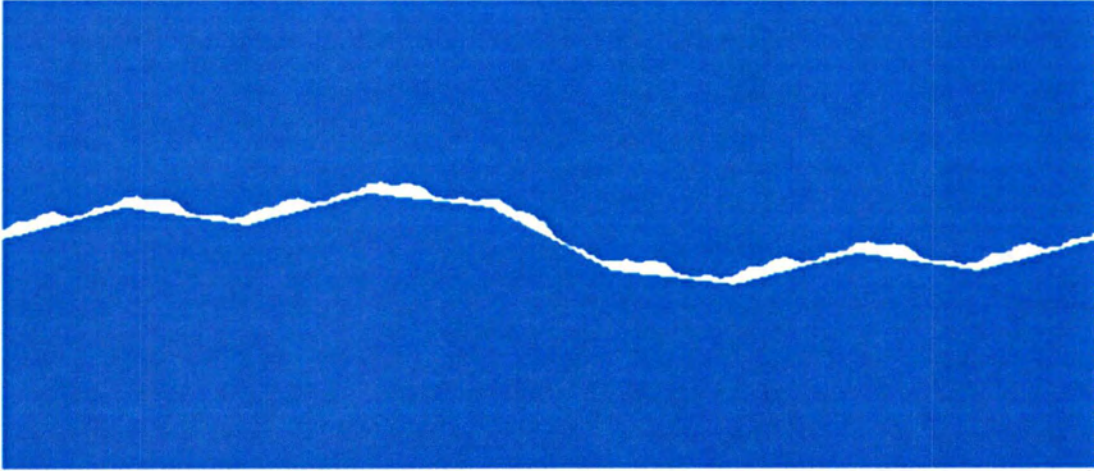


**Σχήμα 3.4.1** : 2<sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f.

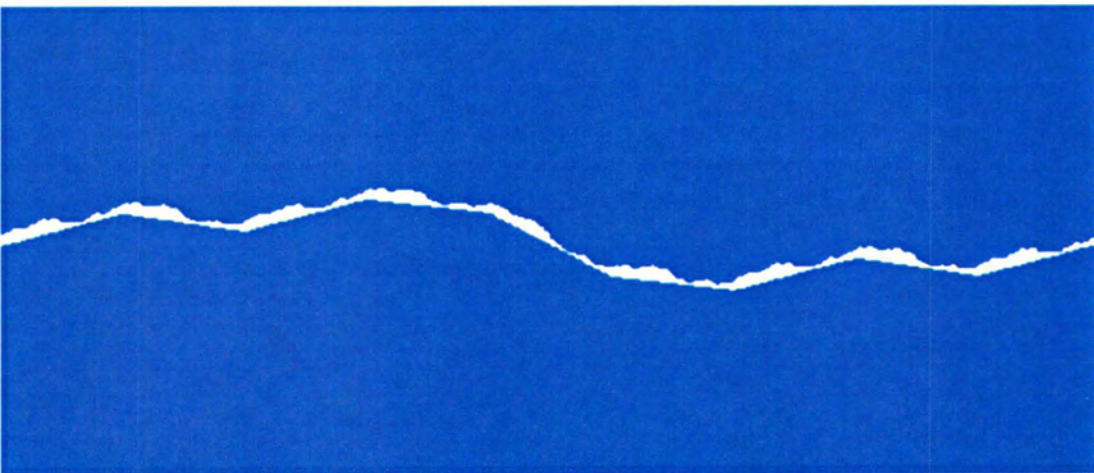


**Σχήμα 3.4.2** : 3<sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f.

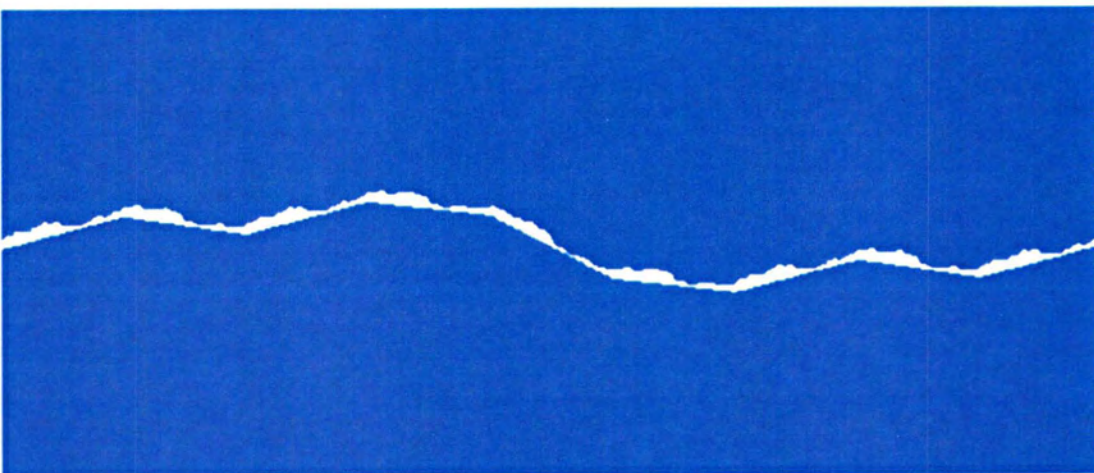




Σχήμα 3.4.3 : 4<sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f.



Σχήμα 3.4.4 : 5<sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f



Σχήμα 3.4.5 : 6<sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f.

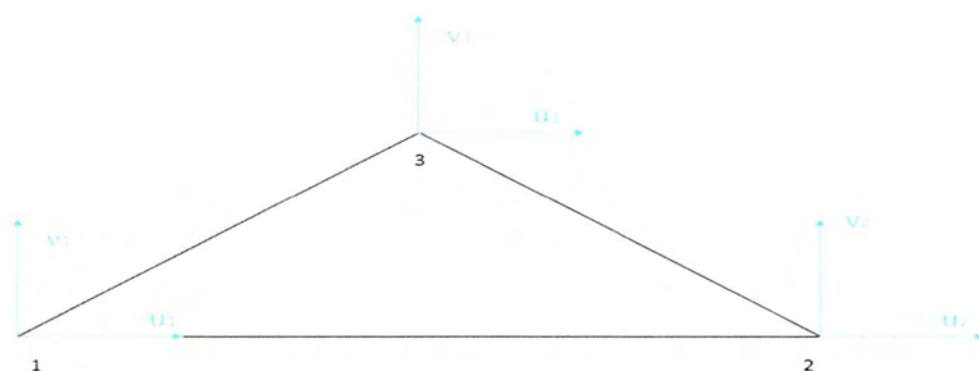
### 3.5 Διακριτοποίηση Προσομοιώματος με Πεπερασμένα Στοιχεία.

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι συνθήκες φορτίσεως της κατασκευής, επιτρέπουν συγκεκριμένες απλοποιητικές παραδοχές κατά την ανάλυση της. Για την μείωση της πολυπλοκότητας του προβλήματος θεωρήθηκαν για το μοντέλο συνθήκες επίπεδης έντασης και επίπεδης παραμόρφωσης. Έτσι για την παρούσα προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δισδιάστατα στοιχεία επίπεδης εντατικής κατάστασης. Τα πεπερασμένα στοιχεία που λήφθηκαν από την βιβλιοθήκη του Marc, για την διακριτοποίηση της κατασκευής είναι τριγωνικά επίπεδης έντασης-παραμόρφωσης, τριών κόμβων, τύπου 201. Τα στοιχεία αυτά κρίθηκαν τα καταλληλότερα για την προσομοίωση της κατασκευής, διότι επιτρέπουν την προσομοίωση φορέων με πολύπλοκη γεωμετρία, σε αντίθεση με τα ορθογωνικά στοιχεία επίπεδης έντασης-παραμόρφωσης [30]. Επομένως παρέχουν τη δυνατότητα ικανοποιητικής διακριτοποίησης μιας κατασκευής με τα πολύπλοκα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που παρουσιάζει στη διεπιφάνεια το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία.

Λόγω των παραδοχών που προαναφέρθηκαν, στο δισδιάστατο μοντέλο θεωρούνται μόνο ομοεπίεδες μετατοπίσεις και τα στοιχεία έχουν δύο μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας σε κάθε κόμβο, δηλαδή έξι συνολικά βαθμούς ελευθερίας (Σχήμα 3.5.1). Η συνθήκη συμβιβαστού των μετατοπίσεων των κόμβων των στοιχείων με τους κόμβους του φορέα είναι δεδομένη, λόγω της διατύπωσης των εξισώσεων ισορροπίας του προβλήματος ως προς τις επικόμβιες μετατοπίσεις του φορέα. Στο εσωτερικό των στοιχείων οι παραμορφώσεις και οι τάσεις είναι σταθερές στα τριγωνικά στοιχεία επίπεδης έντασης-παραμόρφωσης και ικανοποιούν τις συνθήκες συμβιβαστού. Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι οι συνθήκες ισορροπίας ικανοποιούνται στους κόμβους του στοιχείου, όμως δεν ικανοποιούνται κατά μήκος των εξωτερικών τους συνόρων, όπου πληρούνται μόνο οι συνθήκες συμβατότητας, με συνέπεια να υπάρχουν ασυνέχειες των τάσεων. Η πύκνωση του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων βελτιώνει σημαντικά την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, που επηρεάζεται από αυτή την ανισορροπία [30].

Για την μελέτη της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής τραχιών μεταλλικών επιφανειών, φαινόμενο που επηρεάζεται άμεσα από τη συμπεριφορά των επιφανειών οι οποίες έρχονται σε επαφή, είναι απαραίτητη η εξαγωγή όσο γίνεται ακριβέστερων αποτελεσμάτων για την περιοχή γύρω από τη διεπιφάνεια. Έτσι το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων της διακριτοποίησης είναι σημαντικά πυκνότερο γύρω από τις διεπιφάνειες, που μελετήθηκαν. Για την επίτευξη της ικανοποιητικής ακρίβειας όλων των αποτελεσμάτων, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση και αξιολόγηση τους, χρησιμοποιήθηκε για όλα τα μοντέλα η ίδια πυκνότητα

διακριτοποίησης (Σχήμα 3.5.2). Για να επιτευχθεί επαρκώς πυκνή διακριτοποίηση ακόμα και για την ανώτερη ανάλυση της διεπιφάνειας, τα τμήματα που ορίζουν τις fractal διεπιφάνειες διαχωρίστηκαν σε στοιχεία μήκους  $\delta_6/2$ , όπου  $\delta_6$  είναι το βασικό μήκος της έκτης επανάληψης. Το αποτέλεσμα αυτής της διακριτοποίησης είναι πως το βασικό μήκος της ανώτερης επανάληψης προσομοιώνεται με τουλάχιστον δύο πεπερασμένα στοιχεία. Το πλήθος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ανάλυση της διεπιφάνειας παρατίθεται στον Πίνακα 3.5.1 που ακολουθεί.

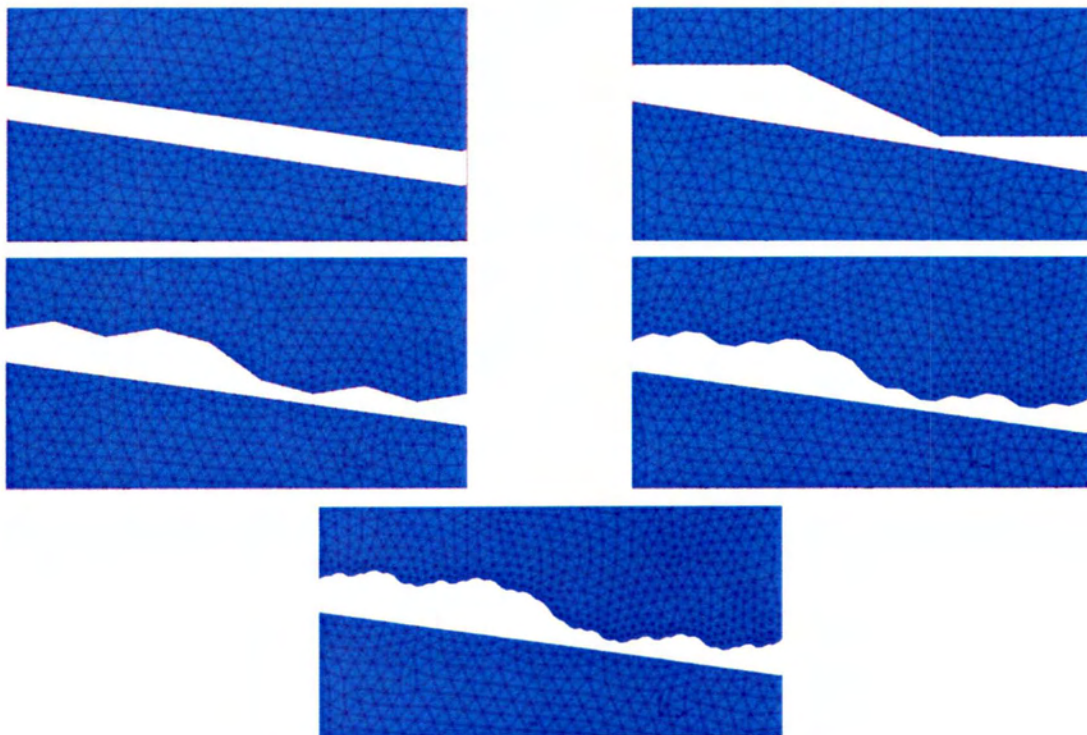


**Σχήμα 3.5.1** : Αρίθμηση κόμβων και βαθμών ελευθερίας τριγωνικού πεπερασμένου στοιχείου.

Ανάλυση	Αριθμός Πεπερασμένων Στοιχείων
2 <sup>η</sup>	35712
3 <sup>η</sup>	36883
4 <sup>η</sup>	38267
5 <sup>η</sup>	39638
6 <sup>η</sup>	43514

**Πίνακας 3.5.1** : Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση της κατασκευής κάθε ανάλυσης.





**Σχήμα 3.5.2 :** Λεπτομέρεια διακριτοποίησης της κατασκευής γύρω από τις διεπιφάνειες  $f_n, n = 2 \div 6$ .



## 4<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΕΠΑΦΗΣ ΣΤΗ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

Η προσομοίωση του φαινομένου της αγωγής θερμότητας λόγω επαφής μεταξύ των τμημάτων της κατασκευής, μέσω της διασύνδεσης τους στη μεταξύ τους διεπιφάνεια πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα λογισμικού Marc. Οι αναλύσεις επιλύθηκαν θεωρώντας δύο περιπτώσεις, στην πρώτη επιβλήθηκε η ομοιόμορφη κατανομή θερμοκρασίας στο κάτω τμήμα της κατασκευής, ενώ στην δεύτερη η θερμοκρασιακή μεταβολή εφαρμόστηκε στο άνω τμήμα του άνω δίσκου. Τα μοντέλα για τις δύο περιπτώσεις επιλύθηκαν για δώδεκα περιπτώσεις φόρτισης, με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή του κατακόρυφου φορτίου στο φαινόμενο. Το ελάχιστο φορτίο που εξετάστηκε αντιστοιχεί σε τιμή τάσης  $0.001f_y$  και το μέγιστο σε τιμή τάσης  $0.0225f_y$ . Μετά την ολοκλήρωση κάθε ανάλυσης, λήφθηκαν από το πρόγραμμα τα αποτελέσματα που αφορούν στις θερμοκρασιακές διαφορές και στη θερμική ροή στη διεπιφάνεια και υπολογίστηκε η θερμική αγωγιμότητα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης εξετάστηκαν τόσο μακροσκοπικά σε επίπεδο διεπιφάνειας, όσο και μικροσκοπικά στα μεμονωμένα σημεία της επαφής. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται για τις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν, τα αποτελέσματα που αφορούν στην διεπιφάνεια μακροσκοπικά, τα οποία υπολογίστηκαν ως οι μέσες τιμές των αντίστοιχων μεγεθών που λήφθηκαν από το πρόγραμμα για το σύνολο των κόμβων του κάθε συνόρου της διεπιφάνειας.

#### 4.1 Μελέτη της Επιρροής της Τραχύτητας της Διεπιφάνειας στην Θερμική Αγωγιμότητα

Όπως προαναφέρθηκε στο τρίτο Κεφάλαιο, για την προσομοίωση της επιβολής του μηχανικού κατανεμημένου φορτίου στο άνω σύνορο του άνω τμήματος της κατασκευής του μοντέλου της προσομοίωσης, εφαρμόστηκαν στους κόμβους του άνω ορίου του άνω δίσκου κατακόρυφες συγκεντρωμένες δυνάμεις. Στο άνω σύνορο της κατασκευής έχουν οριστεί 101 κόμβοι και σε καθέναν από αυτούς εφαρμόστηκε συγκεντρωμένη κατακόρυφη δύναμη τέτοιας τιμής, ώστε να ισοδυναμούν με την επιβολή κατανεμημένου φορτίου  $P_v = \lambda \times f_y \times t_\pi$  [KN/m], δηλαδή αντιστοιχούν σε

τάση  $P_v^* = \lambda \times f_y$  [KPa], όπου  $f_y = 275 \times 10^3$  KPa, για χάλυβα S275,  $\lambda$  είναι ο πολλαπλασιαστής της τάσης διαρροής για καθεμιά από τις περιπτώσεις φόρτισης που εξετάστηκαν και  $t_\pi = 0.10\text{m}$  είναι το πάχος της κατασκευής. Επομένως, σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο ασκήθηκε συγκεντρωμένη δύναμη:

$$P = (0.12 \times P_v)/100 \text{ [KN]} \quad (4.1.1)$$

όπου 0.12m είναι το συνολικό μήκος της κατασκευής. Ενώ στον καθένα από τους δύο ακραίους κόμβους του άνω συνόρου ασκήθηκε κατακόρυφη συγκεντρωμένη δύναμη:

$$P = (0.12 \times P_v)/(100 \times 2) \text{ [KN]} \quad (4.1.2)$$

Έτσι για τις περιπτώσεις φόρτισης που εξετάστηκαν εφαρμόστηκαν στις κατασκευές οι συγκεντρωμένες δυνάμεις που υπολογίστηκαν με την παραπάνω μέθοδο και παρατίθενται παρακάτω στον Πίνακα 4.1.1:

Πολλαπλασιαστής Τάσης Διαρροής ( $\lambda$ )	Συγκεντρωμένες Δυνάμεις στους Ακραίους Κόμβους (KN)	Συγκεντρωμένες Δυνάμεις στους Ενδιάμεσους Κόμβους (KN)
0.001	0.0165	0.033
0.0015	0.02475	0.0495
0.002	0.033	0.066
0.0025	0.04125	0.0825
0.005	0.0825	0.165
0.0075	0.12375	0.2475
0.01	0.165	0.33
0.0125	0.20625	0.4125
0.015	0.2475	0.495
0.0175	0.28875	0.5775
0.02	0.33	0.66
0.0225	0.37125	0.7425

**Πίνακας 4.1.1 :** Συγκεντρωμένες δυνάμεις των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

#### 4.1.1 Πρώτης περίπτωση: Μελέτη των Περιπτώσεων Φόρτισης Υπό την Επιβολή του Θερμικού Φορτίου στο Κάτω Όριο της Κατασκευής

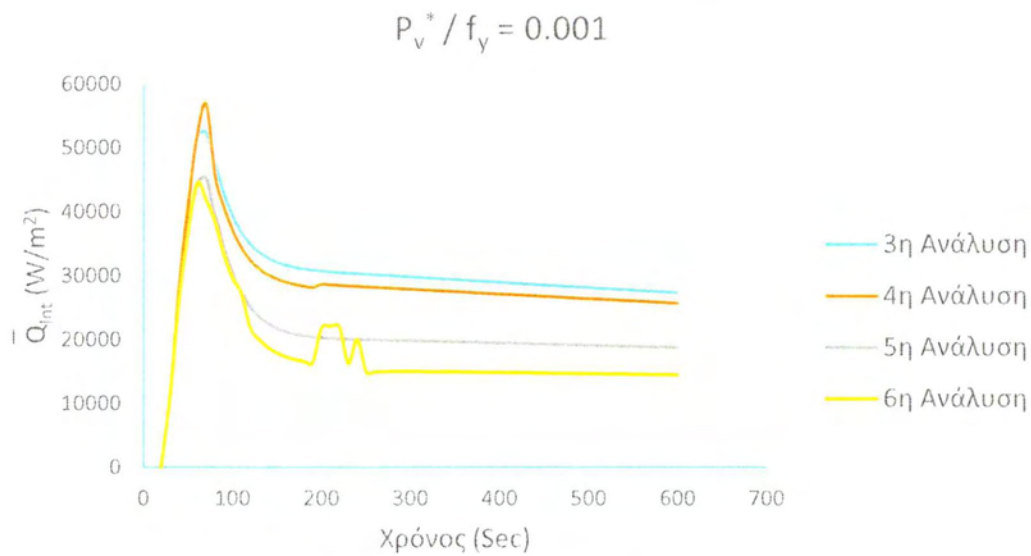
Μετά την ολοκλήρωση της κάθε ανάλυσης σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα Χρόνου - Θερμικής ροής για τα δύο σύνορα της διεπιφάνειας. Οι τιμές που λήφθηκαν στα διαγράμματα, αντιστοιχούν στις μέσες τιμές θερμικής ροής για κάθε χρονική στιγμή στο διάστημα [20,600]sec, με βήμα 20 sec που υπολογίστηκαν από όλους τους κόμβους για το άνω και το κάτω σύνορο της διεπιφάνειας κάθε επίλυσης δηλαδή υπολογίζονται ως εξής:

$$\overline{Q}_{Int} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{Q_i}{A_i} \right] \left[ W/m^2 \right] \quad (4.1.1.1)$$

όπου N το πλήθος των κόμβων στο κάθε σύνορο της διεπιφάνειας. Πρέπει να σημειωθεί πως οι υπολογισμοί των τιμών του  $\overline{Q}_{Int}$  που παρατίθενται στη παρούσα εργασία, αντιστοιχούν πάντα στο θερμότερο σύνορο της διεπιφάνειας από το οποίο γίνεται αγωγή θερμότητας προς το ψυχρότερο όριο. Έτσι, οι τιμές της ροής θερμότητας στα διαγράμματα που επισυνάπτονται, λήφθηκαν από το κάτω όριο της διεπιφάνειας στην πρώτη περίπτωση θερμικής φόρτισης, που η θερμοκρασιακή μεταβολή επιβάλλεται στο κάτω τμήμα της κατασκευής. Επίσης, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας για καθεμιά από τις επιφάνειες που συνιστούν την διεπιφάνεια σε κάθε ανάλυση. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για όλες τις χρονικές στιγμές από 20 έως 600 sec με βήμα 20 sec. Οι τιμές που αφορούν στην θερμοκρασιακή διαφορά λήφθηκαν για τις προαναφερθείσες χρονικές στιγμές από την Σχέση 4.1.1.2:

$$\overline{\Delta T}_{Int} = \overline{T}_{\text{Κάτω Επιφάνειας}} - \overline{T}_{\text{Άνω Επιφάνειας}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.1.1.2)$$

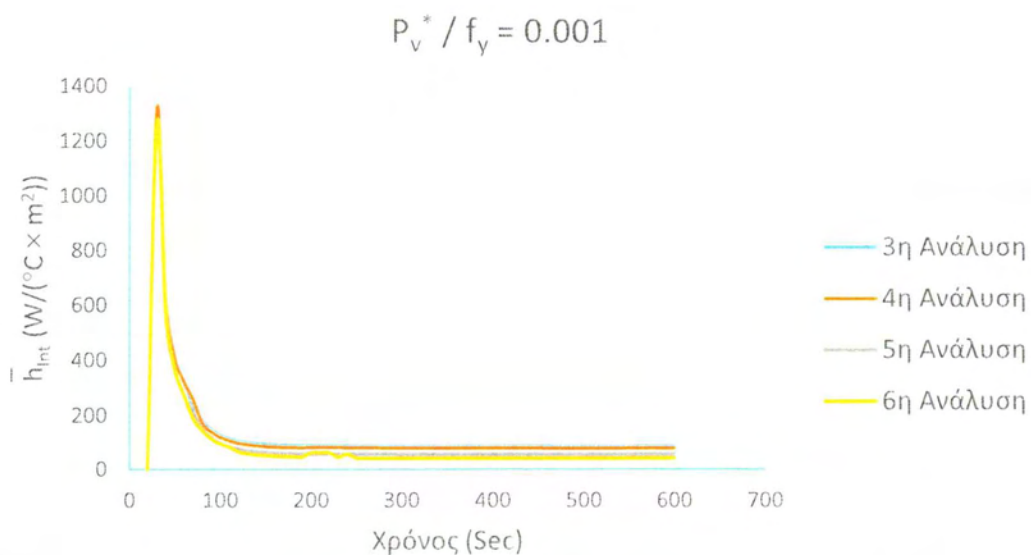
Έτσι, προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα θερμικής ροής του Σχήματος 4.1.1.1 στη διεπιφάνεια για τιμή τάσης ίσης με 1%ο της τάσης διαρροής  $f_y$ :



**Σχήμα 4.1.1.1:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.001$ .

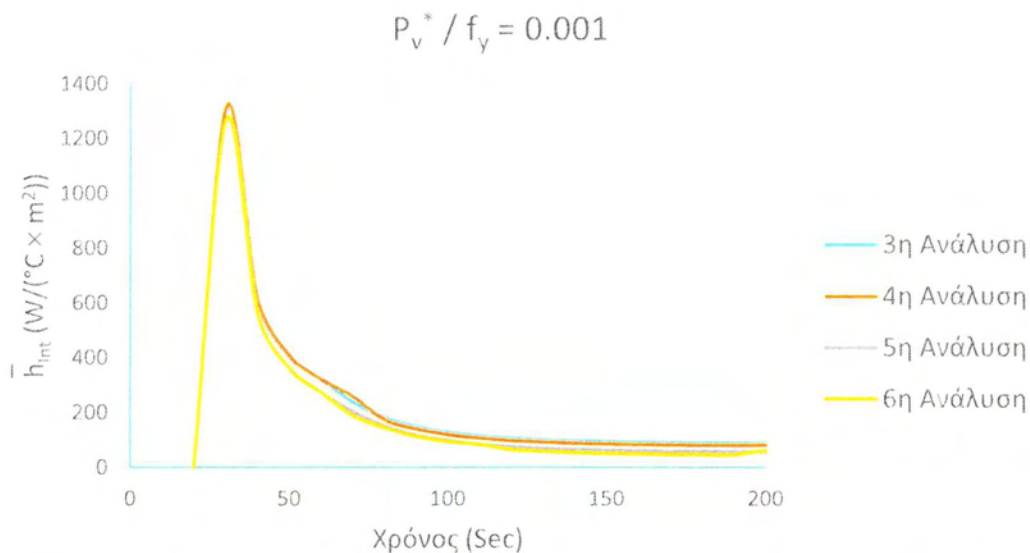
Έπειτα πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός της θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια για κάθε χρονική στιγμή  $t$ , μέσω της Σχέσης 4.1.1.3 και σχεδιάστηκε για τις αναλύσεις τρία έως έξι το διάγραμμα χρόνου – θερμικής αγωγιμότητας (Σχήμα 4.1.1.2).

$$\bar{h}_{Int} = \frac{\bar{Q}_{Int}}{\Delta T_{Int}} \left[ \text{W} / \text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \right] \quad (4.1.1.3)$$



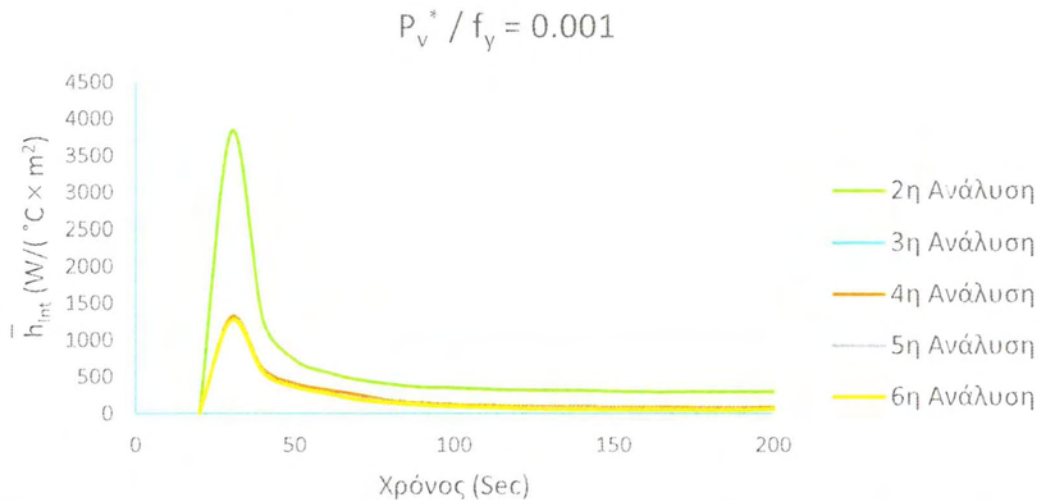
**Σχήμα 4.1.1.2:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.001$ .

Στην συνέχεια, παρουσιάζεται (Σχήμα 4.1.1.3) το αντίστοιχο διάγραμμα χρόνου – θερμικής αγωγιμότητας που εστιάζει στο χρονικό διάστημα  $[0 \div 200]$  sec, για την βελτίωση της ευκρίνειας της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων στο συγκεκριμένο διάστημα και παρακάτω παρατίθεται στο Σχήμα 4.1.1.4 το αντίστοιχο διάγραμμα που συμπεριλαμβάνει και τις τιμές της δεύτερης ανάλυσης της διεπιφάνειας για το ίδιο χρονικό διάστημα. Με σκοπό, την σύγκριση των αποτελεσμάτων των ανώτερων αναλύσεων με τη δεύτερη ανάλυση  $f_2$  της διεπιφάνειας, όπου τα σύνορα της συμπίπτουν με αποτέλεσμα να εφαρμόζουν μεταξύ τους κατά την επαφή.



**Σχήμα 4.1.1.3:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.001$ .



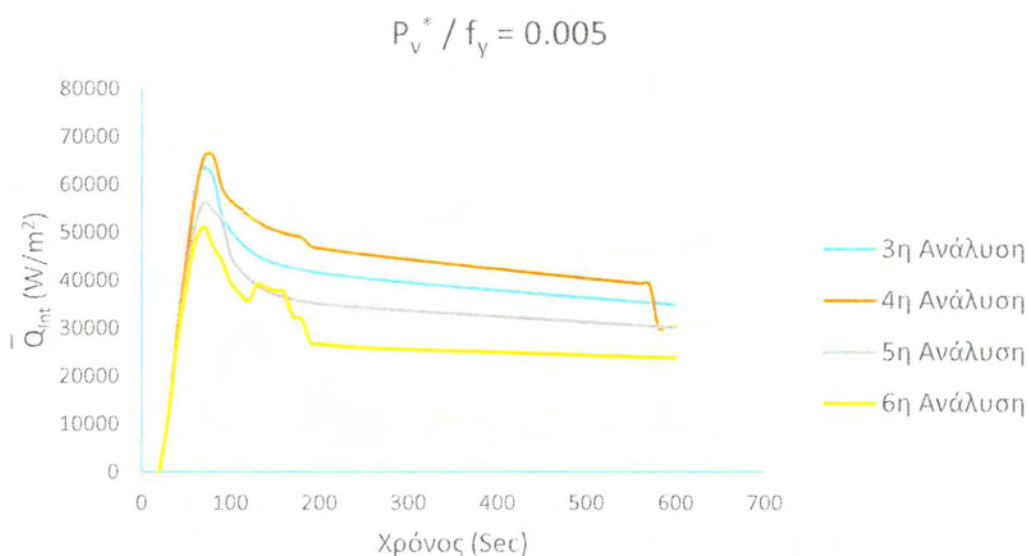


**Σχήμα 4.1.1.4:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.001$ .

Όπως διακρίνεται στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.1.1.2 – 4.1.1.4, για την τιμή του κατακόρυφου φορτίου  $P_v^* / f_y = 0.001$ , η θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής είναι μέγεθος, που τείνει να μειωθεί όσο αυξάνεται η ανάλυση της διεπιφάνειας  $f$ . Συγκεκριμένα, από την δεύτερη ανάλυση, όπου τα επιμέρους τμήματα της διεπιφάνειας εφαρμόζουν μεταξύ τους, προκύπτουν αυξημένες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας, σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες αναλύσεις, ενώ τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν από τις αναλύσεις τρία και τέσσερα συγκλίνουν, όπως και εκείνα από τις δύο ανώτερες αναλύσεις. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων προκύπτει για τα μεγέθη της θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων, πως όσο ακριβέστερη γίνεται η ανάλυση της διεπιφάνειας τόσο μειώνεται η θερμική αγωγιμότητα για το φορτίο που εξετάστηκε.

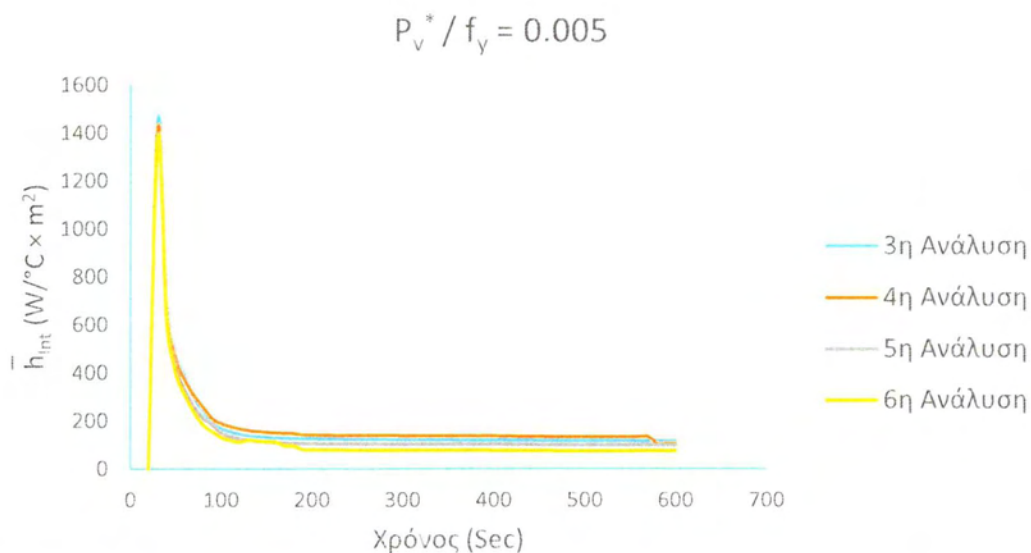
Για μικρές αυξήσεις του κατακόρυφου φορτίου που επιβάλλεται στην κατασκευή δεν προκύπτουν ιδιαίτερα ευκρινείς αλλαγές των αποτελεσμάτων. Έτσι, κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστούν συνολικά πέντε ενδεικτικές περιπτώσεις, για τα χαμηλά φορτία που εξετάστηκαν, η δεύτερη περίπτωση που εμπεριέχεται αντιστοιχεί στην τιμή κατακόρυφου φορτίου,  $P_v^* / f_y = 0.005$ . Με την ίδια διαδικασία που αναφέρθηκε παραπάνω πραγματοποιήθηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα και για την παρούσα περίπτωση φόρτισης από τις τιμές που λήφθηκαν στις ίδιες χρονικές στιγμές:  $[20 \div 600]$  sec, με βήμα 20 sec. Παρακάτω επισυνάπτεται στο Σχήμα 4.1.1.5 το διάγραμμα χρόνου - θερμικής ροής της φόρτισης.



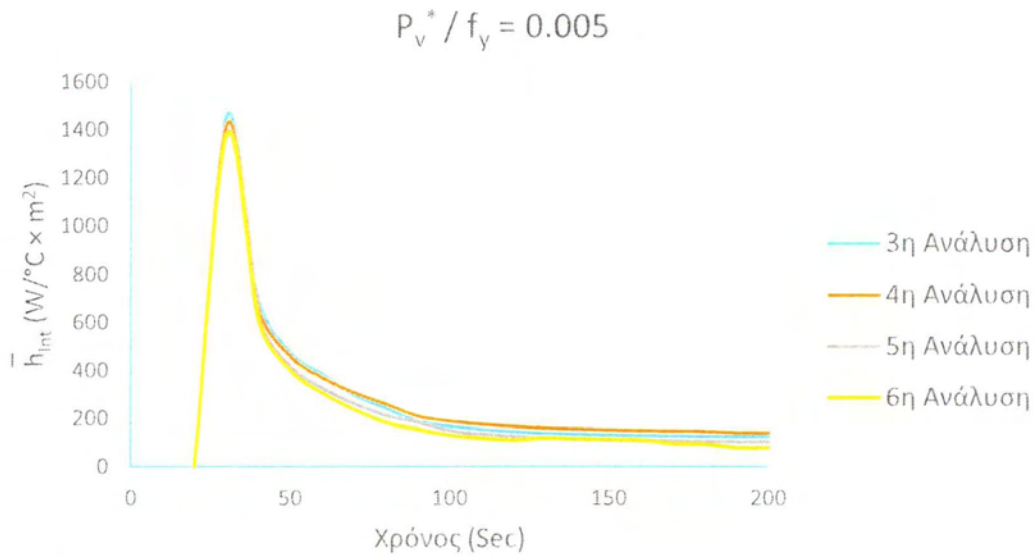


**Σχήμα 4.1.1.5:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

Στην συνέχεια, υπολογίστηκαν για τις ίδιες χρονικές στιγμές οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια χρησιμοποιώντας την Σχέση 4.1.1.3 και σχηματίστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα των Σχημάτων 4.1.1.6 - 4.1.1.7:

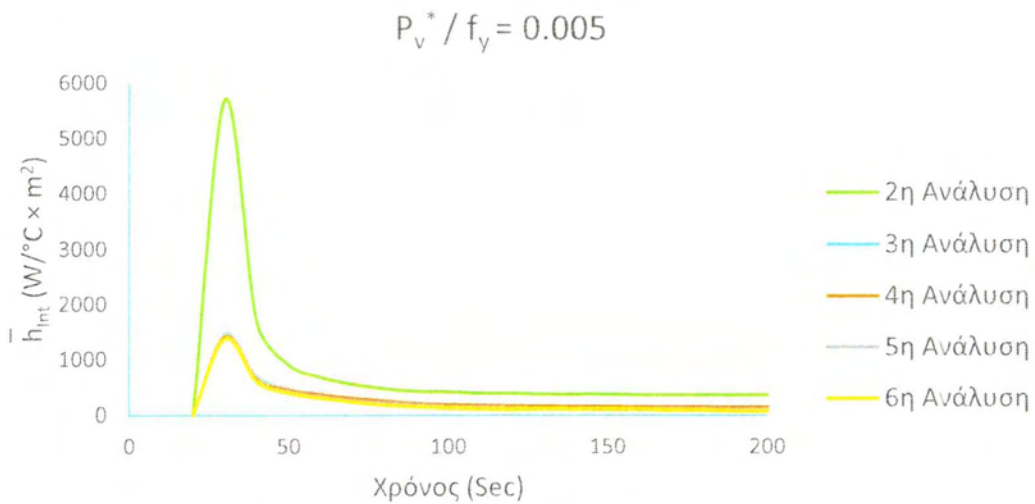


**Σχήμα 4.1.1.6:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.005$ .



**Σχήμα 4.1.1.7:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

Το αντίστοιχο διάγραμμα που περιλαμβάνει και την θερμική αγωγιμότητα της δεύτερης ανάλυσης  $f_2$  της διεπιφάνειας ακολουθεί στο Σχήμα 4.1.1.8 παρακάτω:

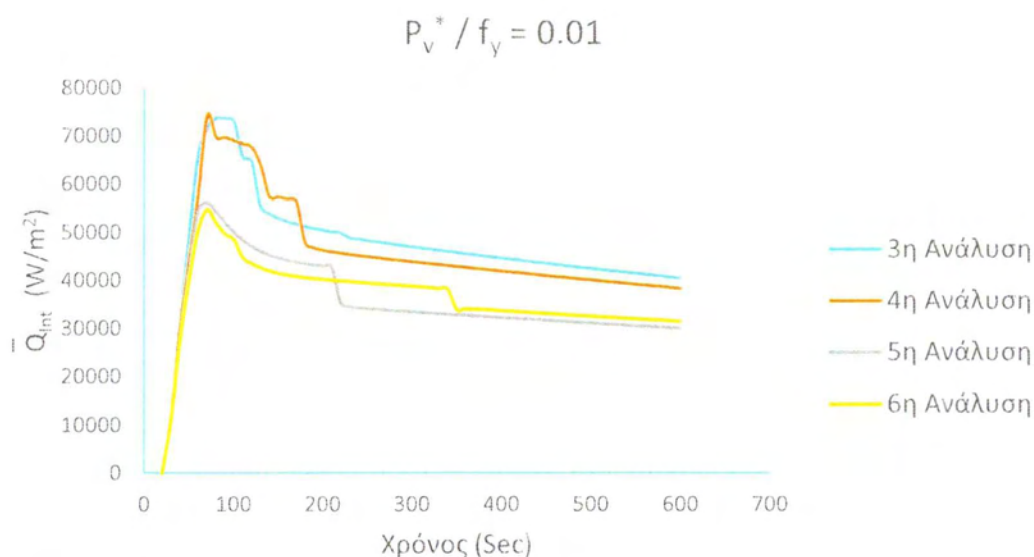


**Σχήμα 4.1.1.8:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

Όπως είναι εμφανές από τα διαγράμματα των Σχημάτων 4.1.1.6 – 4.1.1.8, όσο εντονότερη γίνεται η τραχύτητα της διεπιφάνειας, τόσο μειώνεται η θερμική

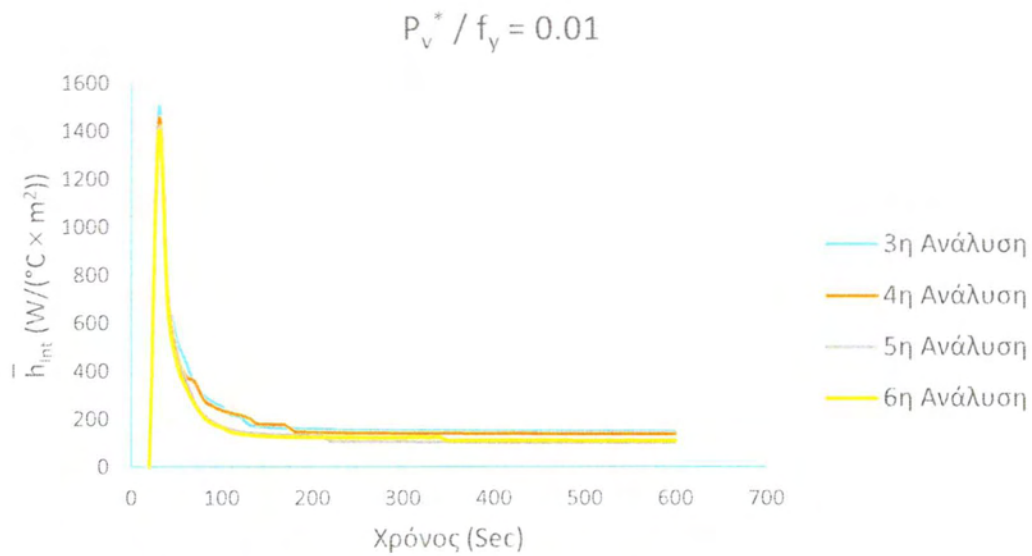
αγωγιμότητα στην διεπιφάνεια. Επομένως, εξακολουθεί να παρουσιάζεται η ίδια εικόνα των αποτελεσμάτων με εκείνη της προηγούμενης φόρτισης. Αξίζει ωστόσο να σημειωθεί η αναμενόμενη αύξηση της αγωγιμότητας των αναλύσεων, που προέκυψε με την αύξηση του μηχανικού φορτίου της κατασκευής. Αύξηση, που αποτελεί άμεση συνέπεια των υψηλότερων φορτίων που επιβάλλονται στην κατασκευή, συμβάλλοντας έτσι στην επέκταση της επιφάνειας επαφής των δύο δίσκων, λόγω των παραμορφώσεων των επιφανειακών αιχμών.

Ακολούθως, μελετάται η θερμική αγωγιμότητα των αναλύσεων που μελετήθηκαν υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου  $P_v^* / f_y = 0.01$ . Αρχικά παρατίθεται το διάγραμμα χρόνου – θερμικής ροής της διεπιφάνειας (Σχήμα 4.1.1.9), οι τιμές του οποίου λήφθηκαν με τη βοήθεια της Σχέσης 4.1.1.1.

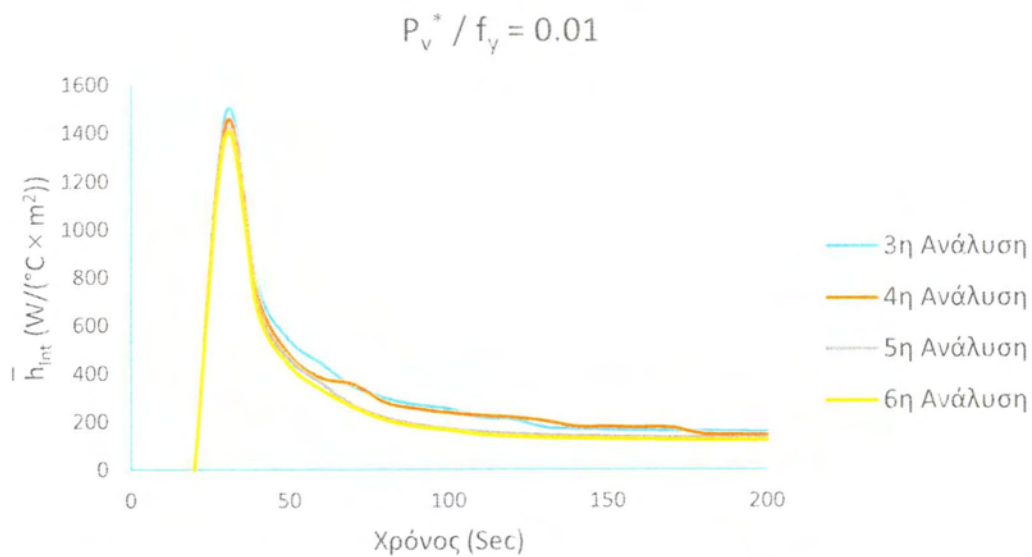


**Σχήμα 4.1.1.9:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.01$ .

Στη συνέχεια, δίνονται στα Σχήματα 4.1.1.10 – 4.1.1.12 τα διαγράμματα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια οι τιμές των οποίων υπολογίστηκαν από την Σχέση 4.1.1.3.

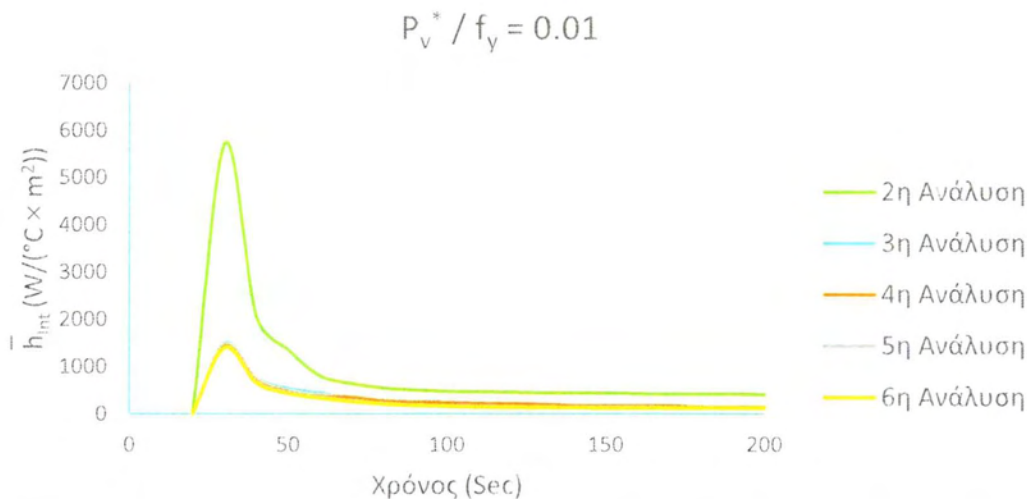


**Σχήμα 4.1.1.10:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.01$ .



**Σχήμα 4.1.1.11:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.01$ .





**Σχήμα 4.1.1.12:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.01$ .

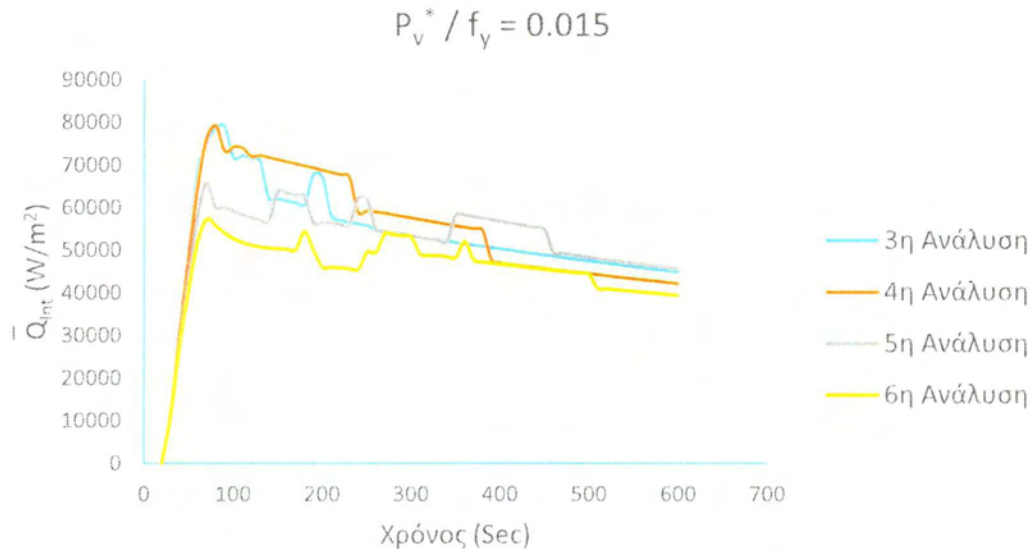
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα τα ακριβέστερα προφίλ τραχύτητας της διεπιφάνειας εξακολουθούν να συνεπάγονται μειωμένη θερμική αγωγιμότητα λόγω της επαφής. Επιπρόσθετα, καταγράφεται συνέπεια ως προς την αυξητική τάση της θερμικής αγωγιμότητας σε όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας καθώς αυξάνεται το κατακόρυφο φορτίο.

Έτσι, είναι δυνατόν να αξιολογηθούν συνολικά τα αποτελέσματα στο φάσμα φορτίσεων:  $[0.001f_y \div 0.01f_y]$ . Τα συμπεράσματα που εξαγονται από το συγκεκριμένο εύρος φορτίων είναι τα παρακάτω:

- Στις χαμηλές φορτίσεις που εξετάστηκαν, όσο ακριβέστερο είναι το προφίλ τραχύτητας της διεπιφάνειας, τόσο μειώνεται η θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής στην διεπιφάνεια
- Καθώς αυξάνεται η κατακόρυφη φόρτιση, προκύπτει άνοδος των τιμών θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια όλων των αναλύσεων
- Η θερμική αγωγιμότητα στις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας αυξάνει με εντονότερο ρυθμό καθώς μεγαλώνει η κατακόρυφη φόρτιση, με συνέπεια να μειώνονται οι διαφορές μεταξύ των μεγεθών που αφορούν στην τρίτη και τέταρτη ανάλυση και των αντίστοιχων μεγεθών των ανώτερων αναλύσεων της διεπιφάνειας

Τέλος, για να εξεταστεί η εξέλιξη του φαινομένου στις υψηλότερες φορτίσεις οι οποίες εφαρμόστηκαν στη κατασκευή, παρατίθενται τα αποτελέσματα για δύο τιμές του κατακόρυφου φορτίου:  $P_v^* / f_y = 0.015$  και  $P_v^* / f_y = 0.02$ . Οι τιμές της θερμικής

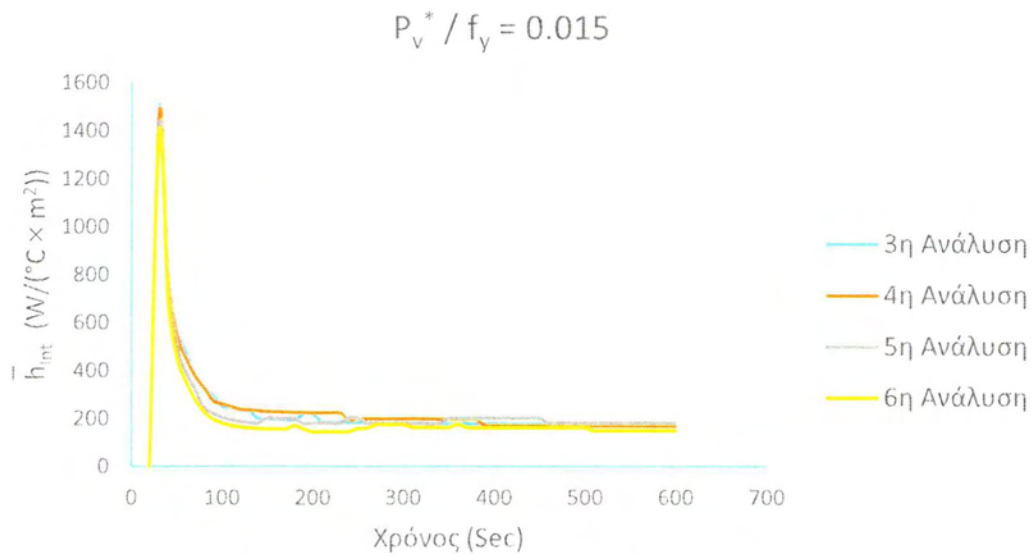
ροής  $\bar{Q}_{Int} [W/m^2]$  της διεπιφάνειας, που υπολογίστηκαν από την Σχέση 4.1.1.1, για την φόρτιση  $P_v^*/f_y = 0.015$  οδήγησαν στο διάγραμμα του Σχήματος 4.1.1.13 που παρατίθεται στη συνέχεια.



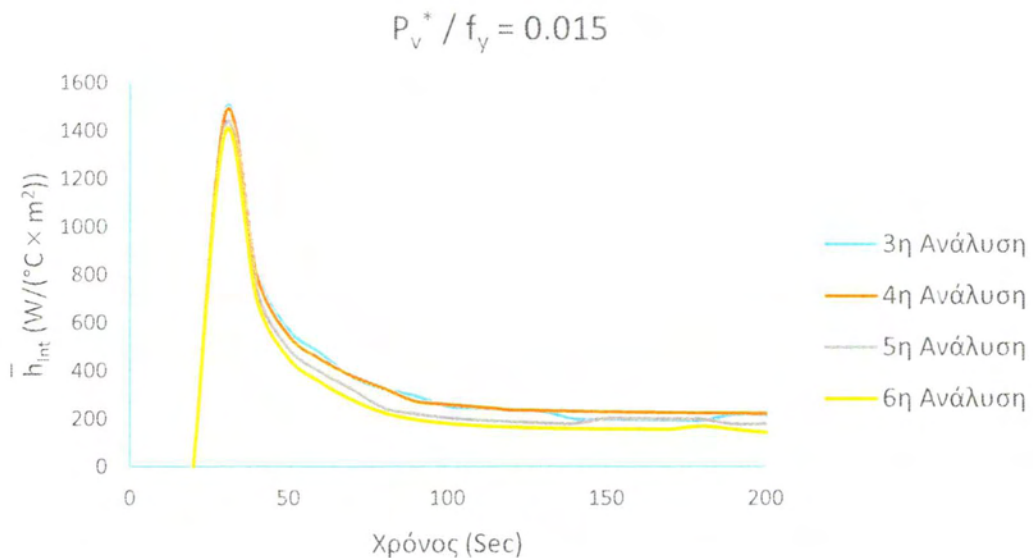
**Σχήμα 4.1.1.13:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

Ακολουθώντας, με βάση την Σχέση 4.1.1.3 υπολογίστηκαν οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια  $\bar{h}_{Int} [W/^\circ C \times m^2]$  που παρατίθενται παρακάτω στα Σχήματα 4.1.1.14 – 4.1.1.16:

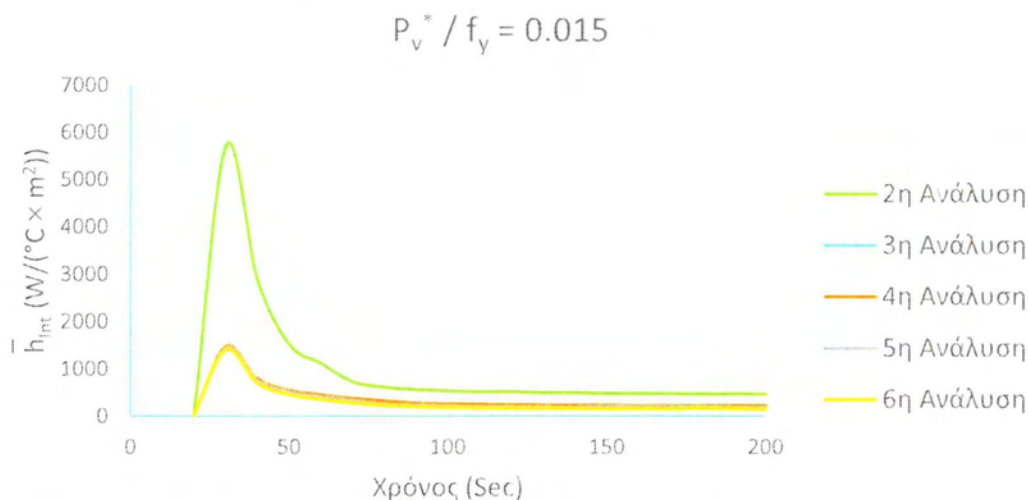




**Σχήμα 4.1.1.14:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

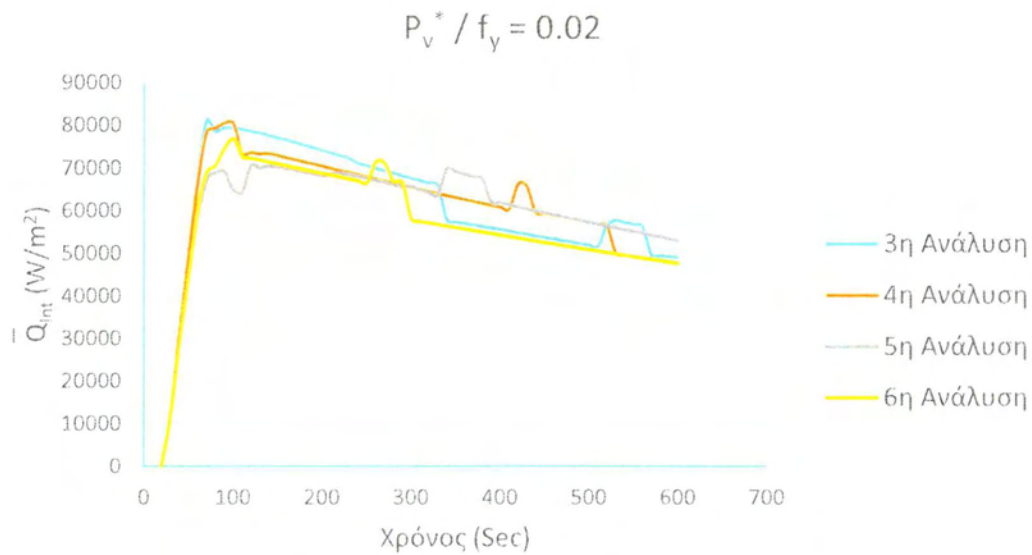


**Σχήμα 4.1.1.15:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.015$ .



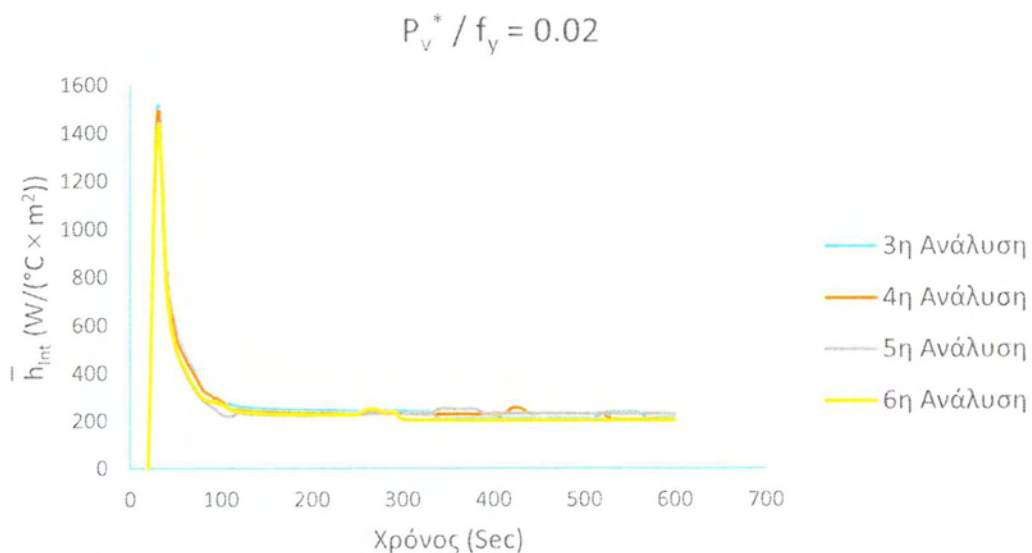
**Σχήμα 4.1.1.16:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα η τρίτη και η τέταρτη από τις αναλύσεις εξακολουθούν να εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας στις χρονικές στιγμές πριν την σταθεροποίηση του φαινομένου. Ωστόσο, μετά την σταθεροποίηση του φαινομένου προκύπτει πρόσθετη αγωγή θερμότητας από την σημαντική επέκταση της επιφάνειας επαφής στις ανώτερες αναλύσεις, που συντελείται λόγω των εντονότερων παραμορφώσεων του άνω συνόρου της διεπιφάνειας. Έτσι, οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας τείνουν να εξισορροπήσουν για τις αναλύσεις  $f_n$ ,  $n = 3 \div 6$ . Επίσης, στο Σχήμα 4.1.1.16 φαίνεται, πως η δεύτερη ανάλυση εξακολουθεί και σε αυτή την περίπτωση φόρτισης να παρουσιάζει την μέγιστη θερμική αγωγιμότητα, λόγω της ταύτισης των συνόρων της διεπιφάνειας. Για την τελευταία φόρτιση που εξετάστηκε και αντιστοιχεί σε τιμή κατανεμημένου φορτίου,  $P_v = 0.02f_y t_{\pi}$ , πραγματοποιήθηκαν με τον ίδιο τρόπο τα διαγράμματα που παρατίθενται στη συνέχεια. Με βάση την Σχέση 4.1.1.1 υπολογίστηκαν οι τιμές της ροής θερμότητας της διεπιφάνειας  $\bar{Q}_{int} [W/m^2]$  από τις οποίες σχηματίστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 4.1.1.17.



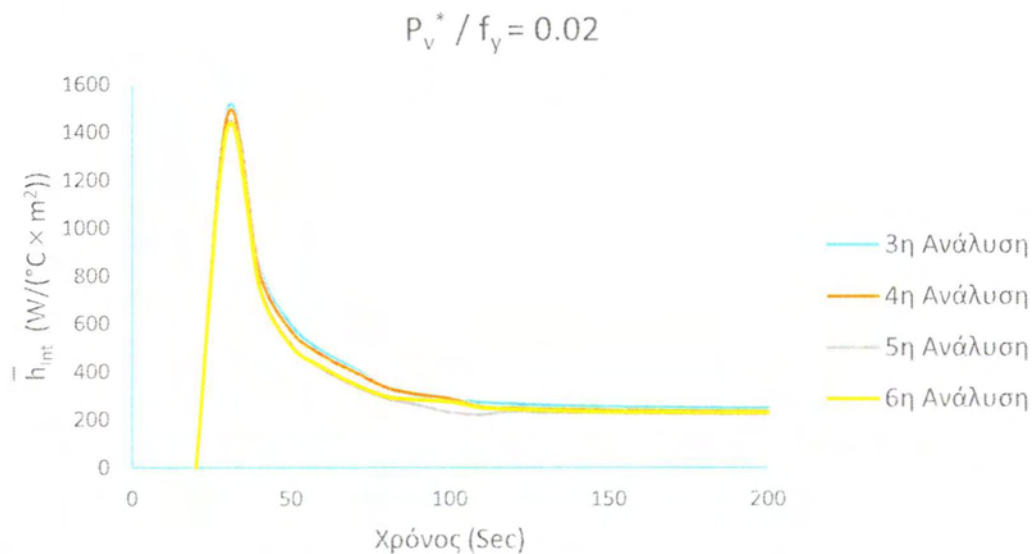
**Σχήμα 4.1.1.17:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.02$ .

Από τις παραπάνω τιμές της θερμικής ροής και τις αντίστοιχες τιμές μέσης θερμοκρασιακής διαφοράς στη διεπιφάνεια που υπολογίστηκαν από την Σχέση 4.1.1.2 πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας  $\bar{h}_{int}$  [W/°C × m<sup>2</sup>], με βάση την Σχέση 4.1.1.3. Οι τιμές αυτές παρατίθενται για τις αναλύσεις της διεπιφάνειας  $f_{3+6}$  στο παρακάτω διάγραμμα του Σχήματος 4.1.1.18.



**Σχήμα 4.1.1.18:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.02$ .

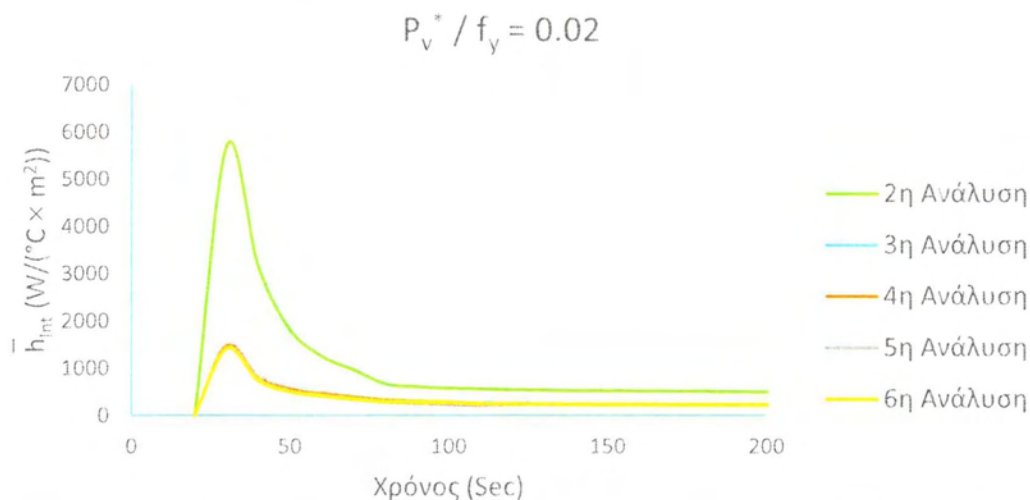
Για την βελτίωση της ευκρίνειας των αποτελεσμάτων παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα που απομονώνεται στο χρονικό διάστημα  $[0 \div 200]$  sec του Σχήματος 4.1.1.19 που ακολουθεί :



**Σχήμα 4.1.1.19:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.02$ .

Στη συνέχεια, (Σχήμα 4.1.1.20) απεικονίζεται η θερμική αγωγιμότητα της διεπιφάνειας  $f_2$  σε σύγκριση με τις ανώτερες αναλύσεις στο διάστημα  $[0 \div 200]$ sec.





**Σχήμα 4.1.1.20:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.02$ .

Στα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν για την τελευταία περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης, εξακολουθεί να εμφανίζεται στα αποτελέσματα η ίδια εικόνα με εκείνη της προηγούμενης κατακόρυφης φόρτισης. Πριν τη σταθεροποίηση του φαινομένου, οι μέγιστες θερμοκρασιακές διαφορές και οι ελάχιστες τιμές θερμικής ροής παρουσιάζονται στις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας. Αφού σταθεροποιείται το φαινόμενο στις ανώτερες αναλύσεις και η αγωγή θερμότητας πραγματοποιείται από την αυξημένη επιφάνεια επαφής που προκύπτει εξαιτίας των εκτεταμένων πλαστικών παραμορφώσεων του άνω συνόρου της διεπιφάνειας, οι ακριβέστερες αναλύσεις τείνουν να παρουσιάσουν αυξημένη θερμική αγωγιμότητα. Η τελευταία φόρτιση που εξετάστηκε παρουσιάζει για καθεμιά από τις αναλύσεις τις μέγιστες τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με όλες τις προηγούμενες, συνεπώς η αύξηση του κατακόρυφου φορτίου εξακολουθεί να οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας.

Τα συμπεράσματα που εξάγονται από το σύνολο των περιπτώσεων φόρτισης που εξετάστηκαν για την πρώτη περίπτωση θερμικής φόρτισης είναι τα παρακάτω:

- Στην ανάλυση  $\delta_2$  εμφανίζονται οι μέγιστες τιμές θερμικής αγωγιμότητας. Λόγω της ταύτισης των δύο συνόρων, καθώς η περίπτωση αυτή αντιστοιχεί σε λεία διεπιφάνεια, η επιφάνεια επαφής είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες διεπιφάνειες
- Στις χαμηλές φορτίσεις που εξετάστηκαν η αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη στις κατώτερες αναλύσεις του άνω συνόρου της διεπιφάνειας, διότι η επιφάνεια επαφής είναι μεγαλύτερη στις αναλύσεις αυτές
- Η θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής στην διεπιφάνεια εξαρτάται από το επιβαλλόμενο μηχανικό φορτίο. Συγκεκριμένα, η θερμική αγωγιμότητα

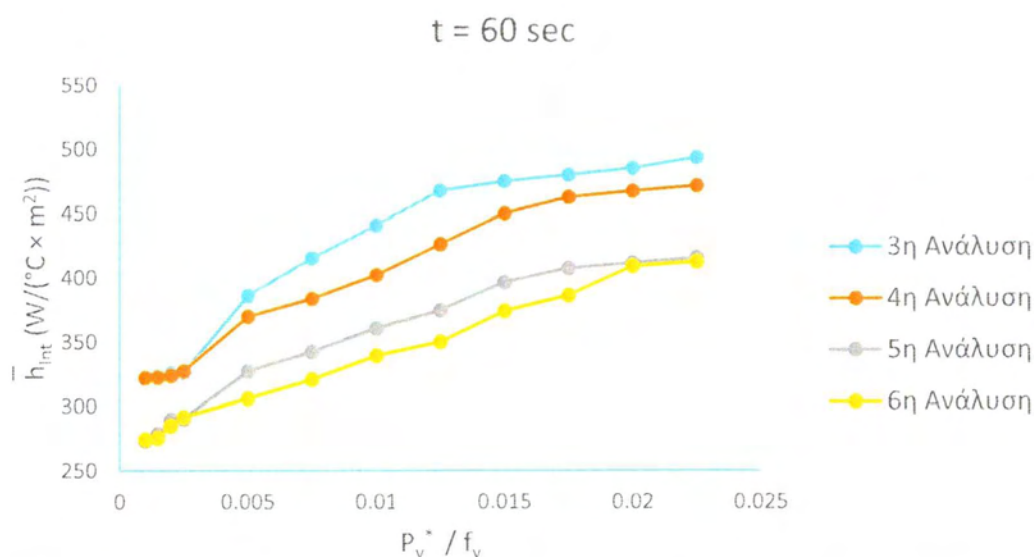


αυξάνει, όσο αυξάνεται το κατακόρυφο φορτίο. Η εξάρτηση αυτή είναι εντονότερη στις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας, γιατί το φαινόμενο της πλαστικοποίησης των αιχμών εκτείνεται σε μεγαλύτερο τμήμα της, με αποτέλεσμα να διευκολύνεται η μεταφορά θερμότητας

- Όσο αυξάνονται οι τιμές μηχανικού φορτίου που επιβλήθηκαν οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας στις ανώτερες αναλύσεις  $\delta_5, \delta_6$ , μετά τη σταθεροποίηση του φαινομένου προσεγγίζουν και ξεπερνούν στις υψηλότερες φορτίσεις τις αναλύσεις  $\delta_3, \delta_4$

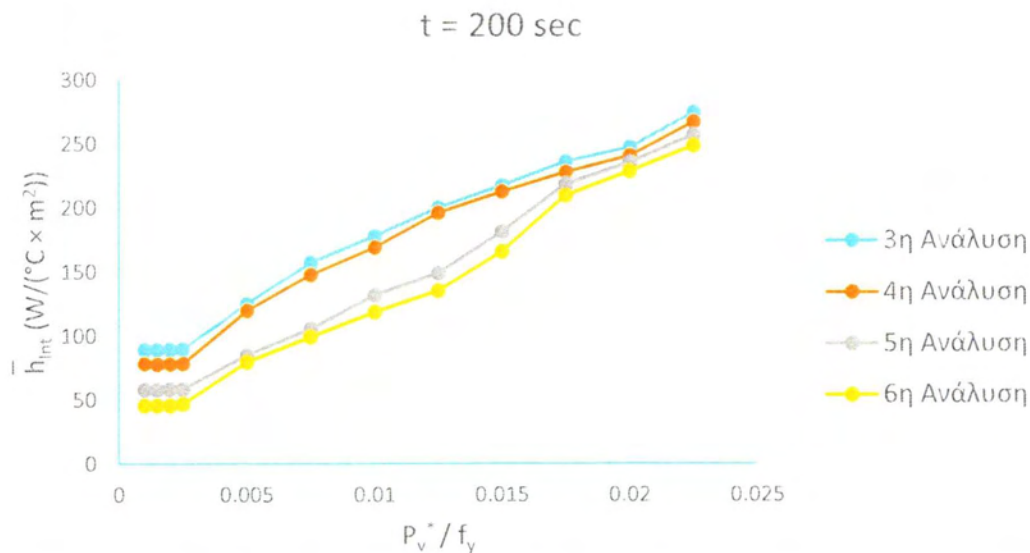
#### 4.1.2 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας της Μακροσκοπικής Μελέτης των Αναλύσεων της Διεπιφάνειας της Πρώτης Περίπτωσης Θερμικής Φόρτισης

Σε αυτή τη παράγραφο παρουσιάζονται για τις χρονικές στιγμές 60 sec, 200 sec, 400 sec και 600 sec τα συγκεντρωτικά διαγράμματα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας για τις αναλύσεις  $f_{3-6}$ . Στο Σχήμα 4.1.2.1 δίνεται το συγκεντρωτικό διάγραμμα για  $t = 60$  sec.

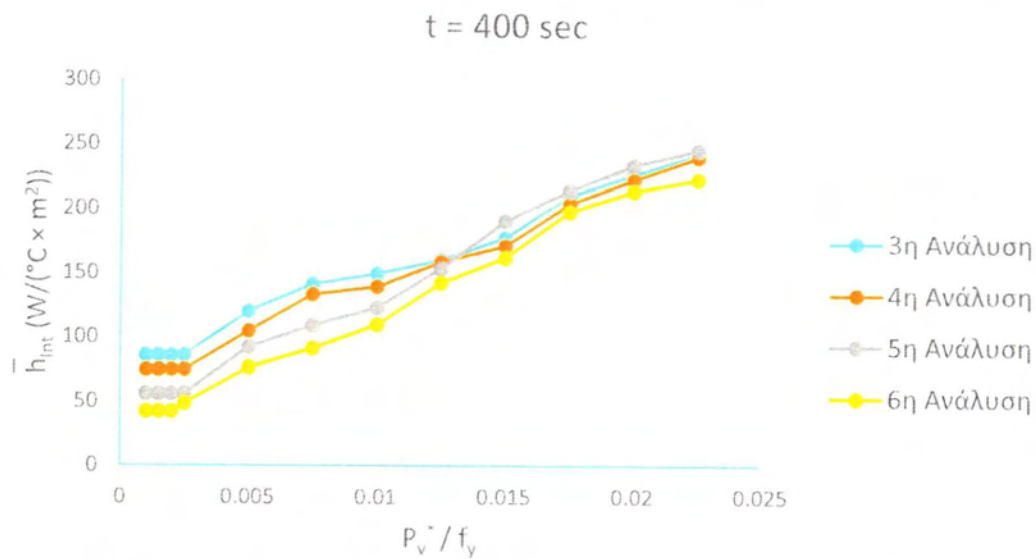


**Σχήμα 4.1.2.1:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή  $t = 60$  sec.

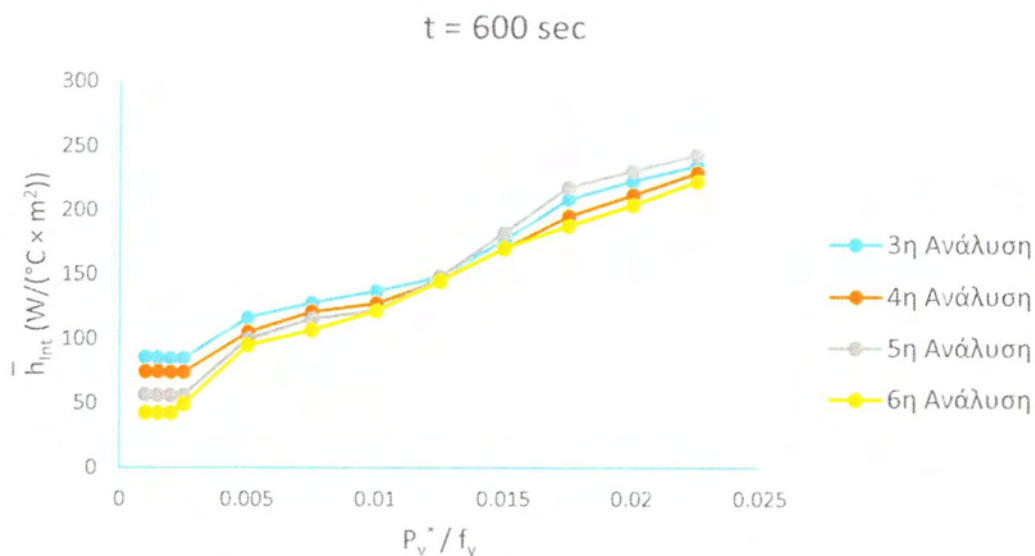
Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.1.2.1 είναι εμφανής η αύξηση των μεγεθών της θερμικής αγωγιμότητας καθώς αυξάνεται το κατακόρυφο φορτίο. Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα είναι αρκετά μεγαλύτερη στις αναλύσεις  $\delta_3$  και  $\delta_4$  σε σχέση με τις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας. Πρέπει να σημειωθεί, ότι για τις μικρότερες τιμές κατακόρυφου φορτίου τα μεγέθη των διεπιφανειών  $f_{3-4}$  και  $f_{5-6}$  συγκλίνουν. Ωστόσο, στις υψηλότερες φορτίσεις που εξετάστηκαν και αντιστοιχούν σε κατακόρυφα φορτία  $0.02f_y$  και  $0.0225f_y$  οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας στην ανώτερη ανάλυση  $f_6$  αυξάνουν εντονότερα και προσεγγίζουν τις αντίστοιχες τιμές της ανάλυσης  $f_5$ . Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην πλαστικοποίηση των αιχμών μικρότερης κλίμακας της ανώτερης ανάλυσης λόγω της αύξησης του κατακόρυφου φορτίου. Στα Σχήματα 4.1.2.2 – 4.1.2.4 παρατίθενται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα για τις χρονικές στιγμές  $t = 200, 400$  και  $600$  sec.



**Σχήμα 4.1.2.2:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή  $t = 200$  sec.



**Σχήμα 4.1.2.3:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή  $t = 400 \text{ sec}$ .



**Σχήμα 4.1.2.4:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή  $t = 600 \text{ sec}$ .

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.1.2.2 – 4.1.2.4 φαίνεται η επιρροή της αύξησης της θερμοκρασίας της διεπιφάνειας στο φαινόμενο, καθώς πλαστικοποιούνται εντονότερα οι αιχμές των ανώτερων αναλύσεων με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η επιφάνεια επαφής και κατά συνέπεια η θερμική αγωγιμότητα της διεπιφάνειας. Όπως παρατηρείται, όσο εξελίσσεται το φαινόμενο και αυξάνεται η κατακόρυφη

φόρτιση οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας των ανώτερων αναλύσεων αυξάνονται σημαντικά, προσεγγίζουν και ξεπερνούν τις αντίστοιχες τιμές από τις αναλύσεις  $\delta_3$  και  $\delta_4$ .

Συνοπτικά, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα συγκεντρωτικά διαγράμματα της πρώτης περίπτωσης θερμικής φόρτισης που εξετάστηκε είναι τα παρακάτω:

- Η αύξηση του κατακόρυφου φορτίου οδηγεί σε όλες τις αναλύσεις σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω της επαφής
- Στις αρχικές χρονικές στιγμές μελέτης του φαινομένου, η θερμική αγωγιμότητα επηρεάζεται από τις επιφάνειες επαφής στις οποίες εφαρμόζουν τα όρια της διεπιφάνειας. Έτσι, οι μέγιστες τιμές για τις χρονικές στιγμές  $t = 60,200 \text{ sec}$  παρουσιάζονται στις διεπιφάνειες  $f_{3-4}$ , που οι μεγαλύτερης κλίμακας επιφανειακές αιχμές του άνω συνόρου τους, οδηγούν σε μεγαλύτερες επιφάνειες επαφής
- Όσο εξελίσσεται το φαινόμενο, οι εκτενέστερες παραμορφώσεις των επιφανειακών αιχμών των ανώτερων αναλύσεων, οδηγούν σε επέκταση της επιφάνειας επαφής, με αποτέλεσμα να αυξάνεται περισσότερο η θερμική αγωγιμότητα όσο μεγαλώνει το κατακόρυφο φορτίο που επιβάλλεται στις αναλύσεις  $\delta_5$  και  $\delta_6$ . Έτσι, οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας των τεσσάρων αναλύσεων συγκλίνουν στα μεγαλύτερα φορτία που επιβλήθηκαν

#### **4.1.3 Δεύτερη Περίπτωση: Μελέτη του Προβλήματος με Επιβολή του Θερμικού Φορτίου στο Άνω Σύνορο του Άνω Τμήματος της Κατασκευής**

Στην ενότητα αυτή εξετάζεται η δεύτερη περίπτωση θερμικής φόρτισης της κατασκευής, για την οποία πραγματοποιήθηκε η μελέτη της θερμικής αγωγιμότητας στις αναλύσεις της διεπιφάνειας. Για να είναι τα αποτελέσματα των δύο επιλύσεων συγκρίσιμα, θα εξεταστούν οι ίδιες περιπτώσεις κατακόρυφων φορτίσεων με εκείνες που παρατέθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.3.1:



Συντελεστής Τάσης Διαρροής (λ)	Τιμή κατακόρυφου κατανεμημένου φορτίου που εφαρμόζεται: $P_v = \lambda \times f_y \times t_{\pi}$ , (KN/m)
0.001	27.5
0.005	137.5
0.01	275
0.015	412.5
0.02	550

**Πίνακας 4.1.3.1:** Τιμές κατακόρυφου κατανεμημένου φορτίου που εξετάζονται.

Για όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας από όλους τους κόμβους του άνω και του κάτω συνόρου της διεπιφάνειας  $\bar{T}_{\text{Κάτω Επιφάνειας}}$  και  $\bar{T}_{\text{Άνω Επιφάνειας}}$  αντίστοιχα, για τις χρονικές στιγμές  $t = [20 \div 600]$  sec, με βήμα 20 sec. Η εξίσωση υπολογισμού της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια στην δεύτερη περίπτωση που το θερμικό φορτίο επιβάλλεται στο άνω τμήμα της κατασκευής μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\bar{\Delta T}_{\text{Int}} = \bar{T}_{\text{Άνω Επιφάνειας}} - \bar{T}_{\text{Κάτω Επιφάνειας}} \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (4.1.3.1)$$

Αντίστοιχα, για τις ίδιες χρονικές στιγμές υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές θερμικής ροής του άνω συνόρου της διεπιφάνειας από το οποίο πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας προς το κάτω σύνορο από την παρακάτω σχέση:

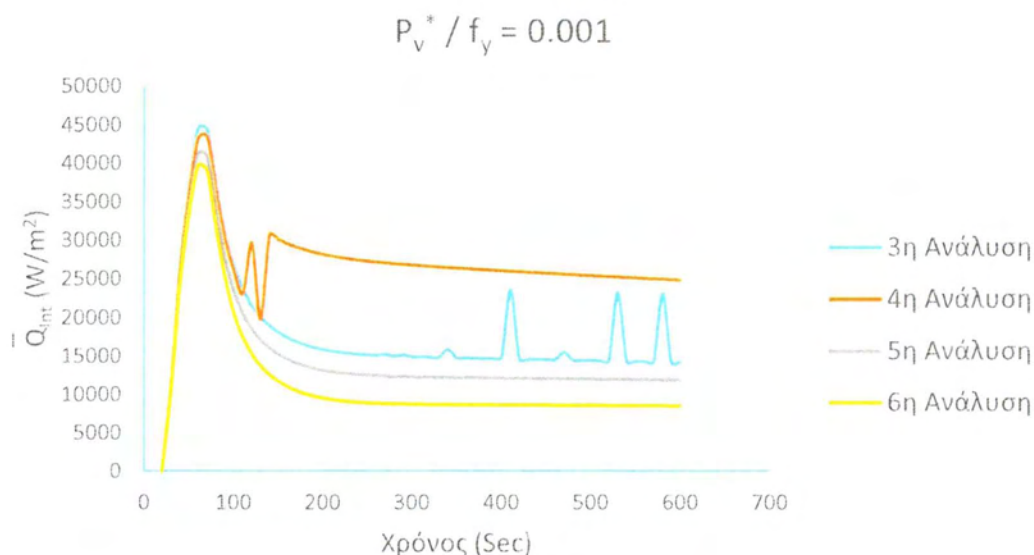
$$\bar{Q}_{\text{Int}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{Q_i}{A_i} \right] \text{ [W/m}^2\text{]}, t = 20, 40, \dots, 600 \text{ sec} \quad (4.1.3.2)$$

όπου N είναι το πλήθος των κόμβων στο άνω σύνορο της διεπιφάνειας. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας την Σχέση 4.1.3.3, υπολογίστηκε η θερμική αγωγιμότητα στη διεπιφάνεια για καθεμία από τις προαναφερθείσες χρονικές στιγμές t.

$$\bar{h}_{\text{Int}} = \frac{\bar{Q}_{\text{Int}}}{\bar{\Delta T}_{\text{Int}}} \text{ [W/m}^2\text{ }^\circ\text{C]} \quad (4.1.3.3)$$

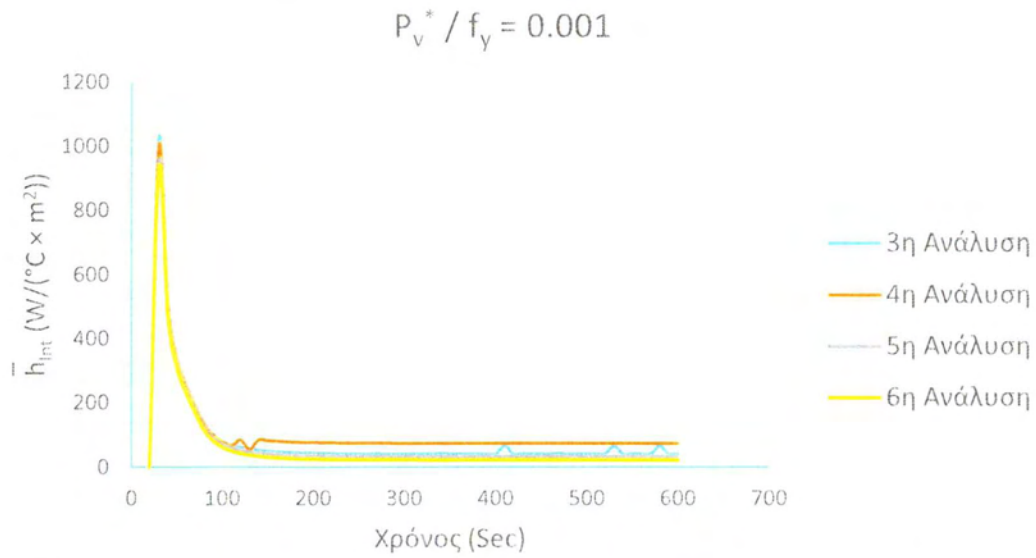


Με τις παραπάνω σχέσεις πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί των τιμών των μεγεθών που επισυνάπτονται στα διαγράμματα κάθε φόρτισης που ακολουθούν. Όπως και στη προηγούμενη περίπτωση, πρώτη εξετάζεται η περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης:  $P_v^* / f_y = 0.001$ . Το διάγραμμα χρόνου - θερμικής ροής που προέκυψε παρατίθεται στο Σχήμα 4.1.3.1.

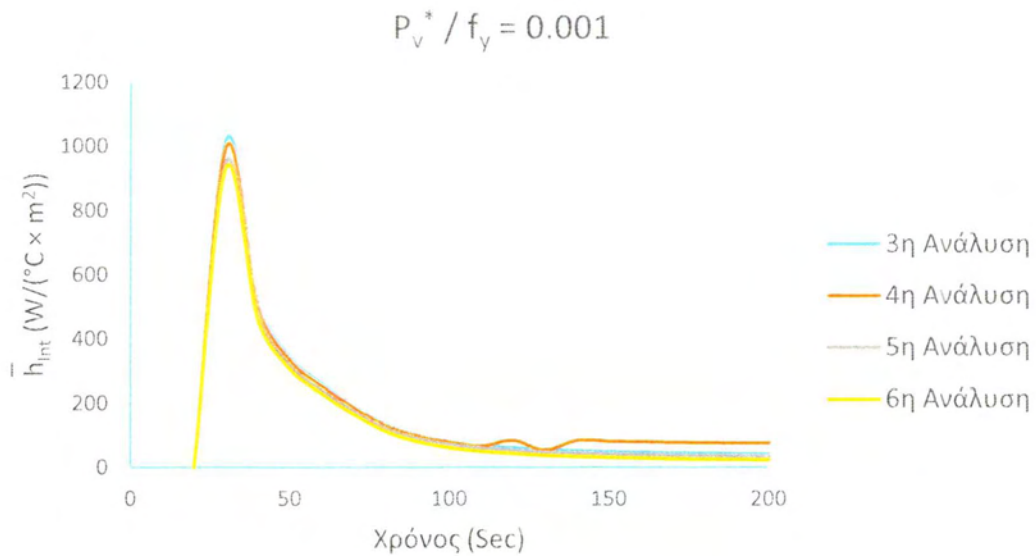


**Σχήμα 4.1.3.1:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσεϊ του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.001$ .

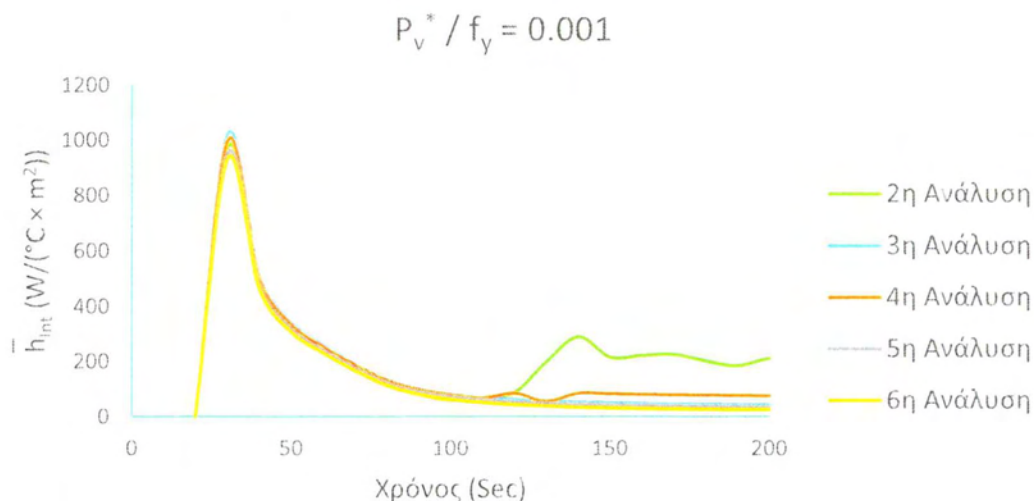
Στα διαγράμματα των Σχημάτων 4.1.3.2 – 4.1.3.4 δίνεται η εικόνα της θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων.



**Σχήμα 4.1.3.2:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.001$ .

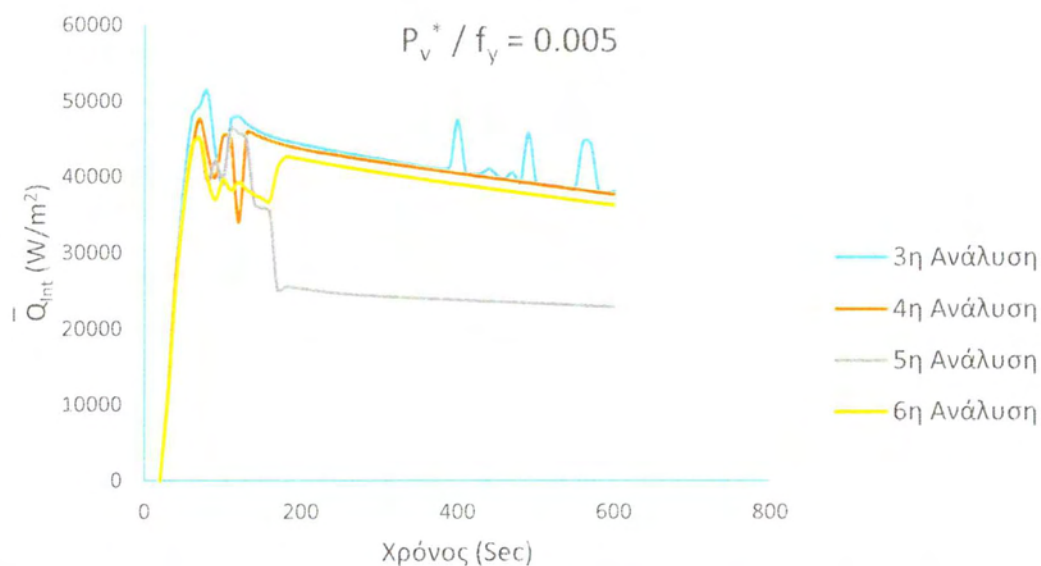


**Σχήμα 4.1.3.3:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.001$ .



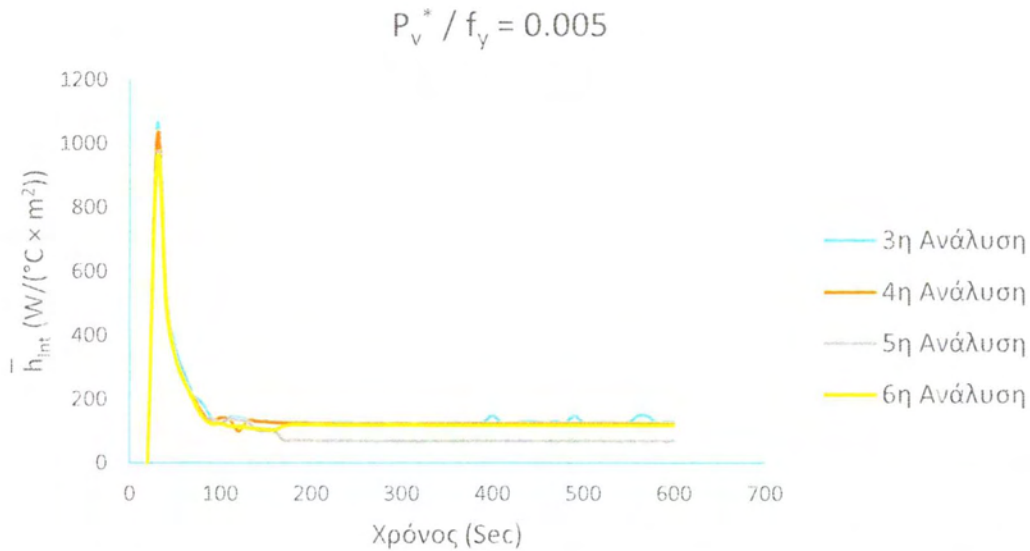
**Σχήμα 4.1.3.4:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.001$ .

Στη συνέχεια μελετάται η περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.005$ . Το διάγραμμα χρόνου – θερμικής ροής που σχεδιάστηκε, απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.3.5.

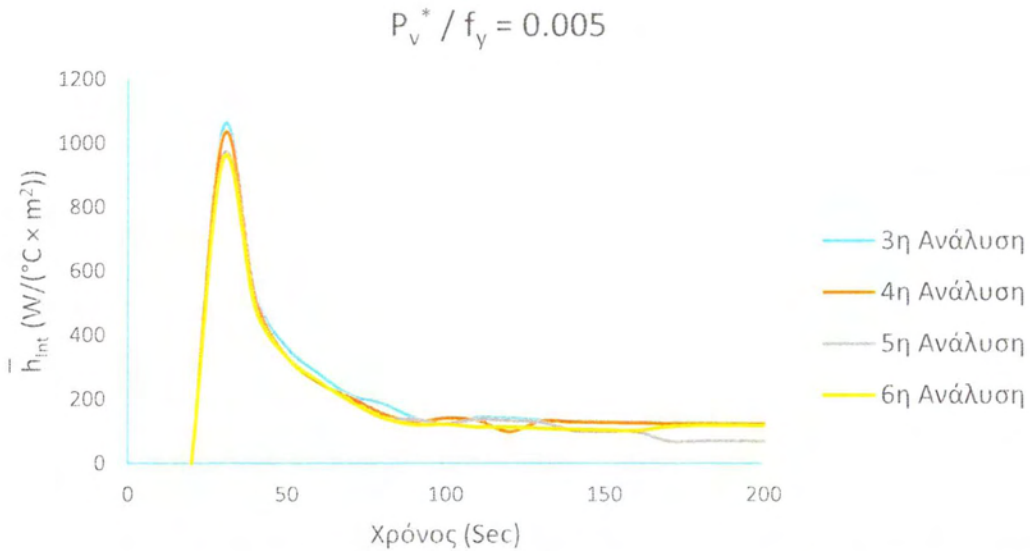


**Σχήμα 4.1.3.5:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

Στα Σχήματα 4.1.3.6 – 4.1.3.8 δίνονται τα διαγράμματα της θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια, οι τιμές των οποίων υπολογίστηκαν με βάση την προαναφερθείσα διαδικασία.

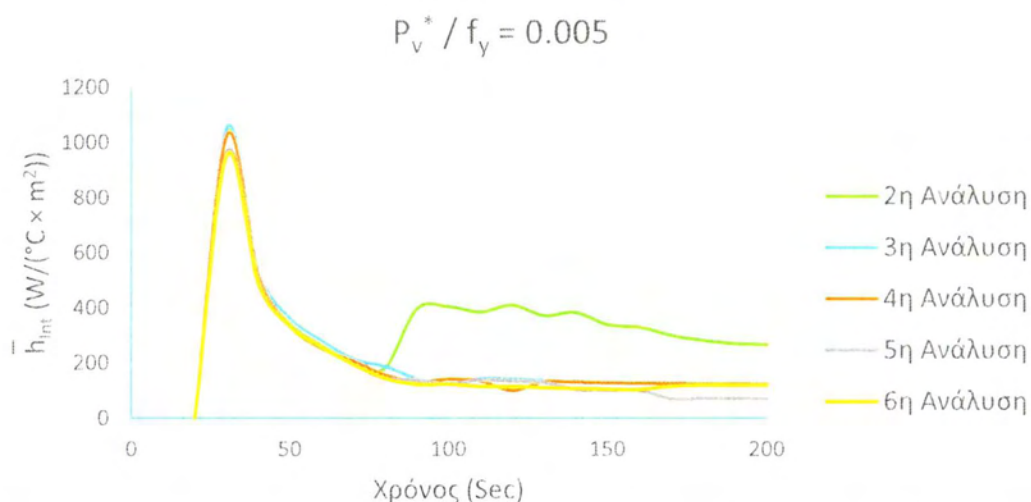


**Σχήμα 4.1.3.6:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.005$ .



**Σχήμα 4.1.3.7:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.005$ .



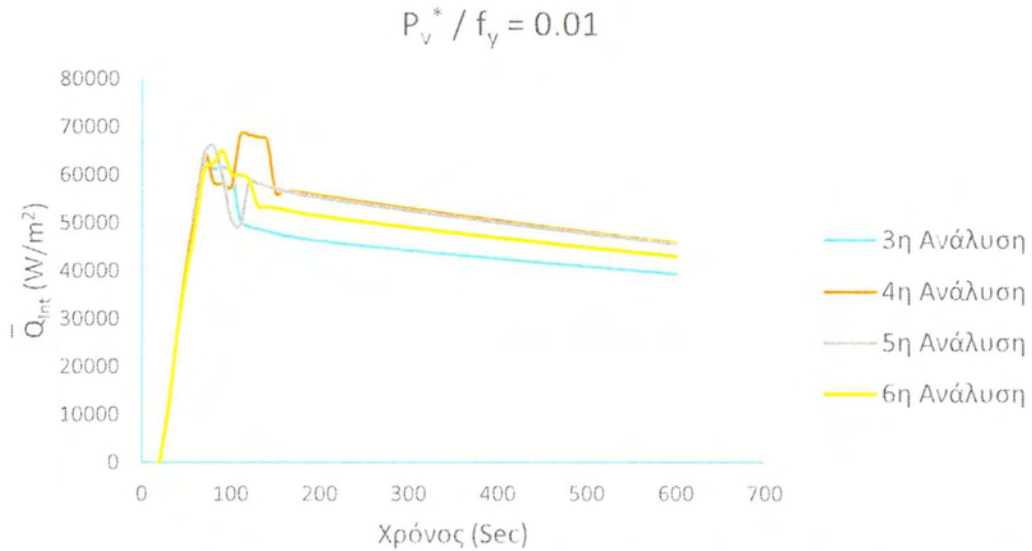


**Σχήμα 4.1.3.8:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

Στα διαγράμματα των περιπτώσεων κατακόρυφης φόρτισης:  $P_v^* / f_y = 0.001$  και  $P_v^* / f_y = 0.005$  παρατηρούνται διαφοροποιήσεις σε σχέση με τα αντίστοιχα διαγράμματα της προηγούμενης περίπτωσης. Συγκεκριμένα, στα αρχικά χρονικά διαστήματα πριν τη σταθεροποίηση του φαινομένου οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας της δεύτερης ανάλυσης της διεπιφάνειας προσεγγίζουν εκείνες από τις αναλύσεις  $\delta_3$  και  $\delta_4$ , ενώ αυξάνονται απότομα μετά την σταθεροποίηση της θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια. Όσον αφορά στη σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων τρία έως έξι, οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας που λήφθηκαν από τις διεπιφάνειες  $f_{3-4}$  είναι σημαντικά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των αναλύσεων  $\delta_{5-6}$ , για την κατακόρυφη φόρτιση  $P_v^* / f_y = 0.001$ . Ωστόσο, η θερμική αγωγιμότητα της έκτης ανάλυσης παρουσιάζει αύξηση στο ρυθμό μεταβολής της μετά την σταθεροποίηση της αγωγής, για κατακόρυφο φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.005$  και συγκλίνει στα μεγέθη των αναλύσεων  $f_{3-4}$ , δηλαδή σε μικρότερη τιμή κατακόρυφης φόρτισης από την αντίστοιχη της πρώτης περίπτωσης εμφανίζει εκτεταμένες παραμορφώσεις των επιφανειακών της αιχμών που αυξάνουν την θερμική αγωγιμότητα στην συγκεκριμένη διεπιφάνεια. Πρέπει να παρατηρηθεί πως η ανάλυση  $\delta_5$  δεν παρουσιάζει αντίστοιχη συμπεριφορά, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι πιέσεις της διεπιφάνειας δεν επαρκούν για να παραμορφώσουν τις επιφανειακές της ανωμαλίες επαρκώς, ώστε να επηρεαστεί σημαντικά το φαινόμενο υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου μικρότερου ή ίσου με την τιμή  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

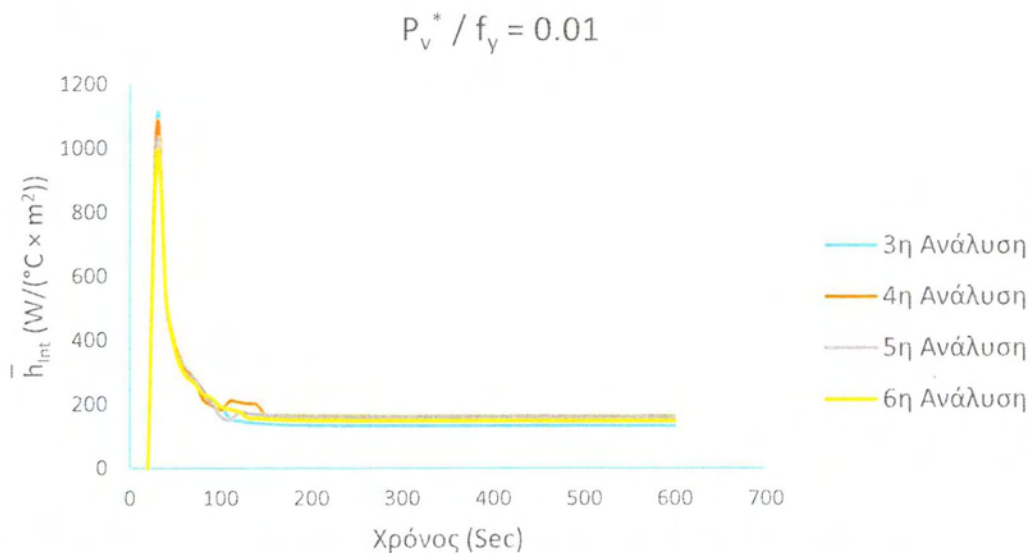
Στη συνέχεια εξετάζεται η κατασκευή υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου  $P_v^* / f_y = 0.01$ . Το διάγραμμα χρόνου – θερμικής ροής που προέκυψε παρατίθεται στο Σχήμα 4.1.3.9.



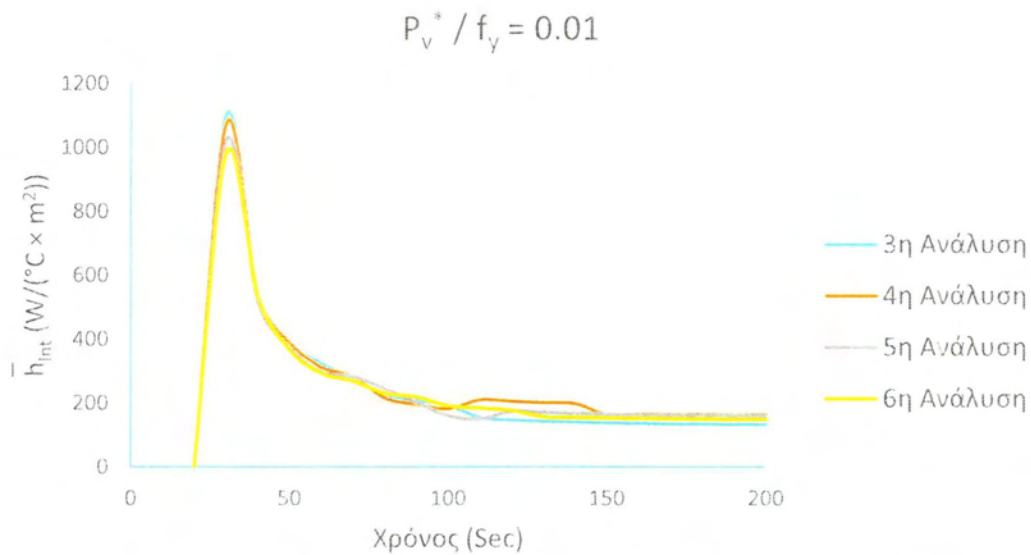


**Σχήμα 4.1.3.9:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.01$ .

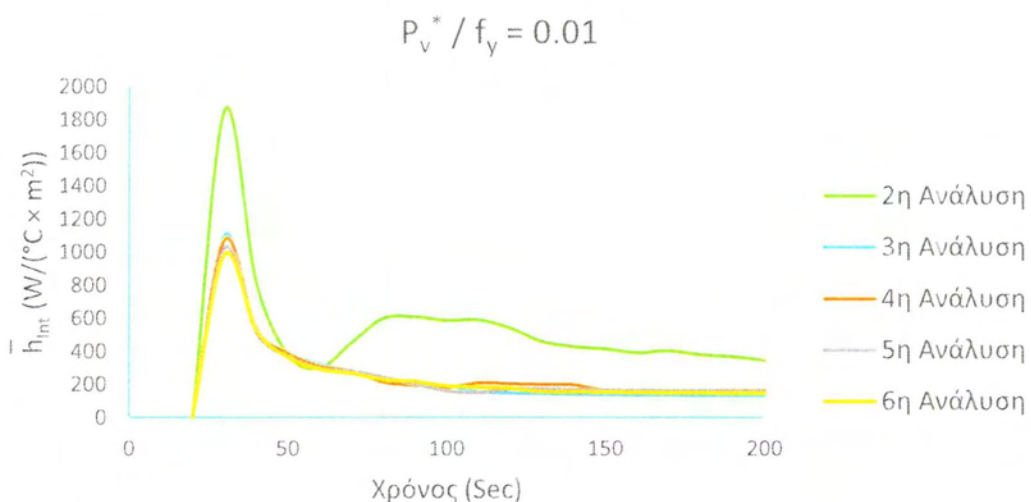
Ο υπολογισμός των μεγεθών της θερμικής αγωγιμότητας κάθε ανάλυσης πραγματοποιήθηκε από την Σχέση 4.1.3.3 και με βάση τις τιμές αυτές σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα χρόνου – θερμικής αγωγιμότητας που παρατίθενται στα Σχήματα 4.1.3.10 – 4.1.3.12.



**Σχήμα 4.1.3.10:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.01$ .



**Σχήμα 4.1.3.11:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.01$ .

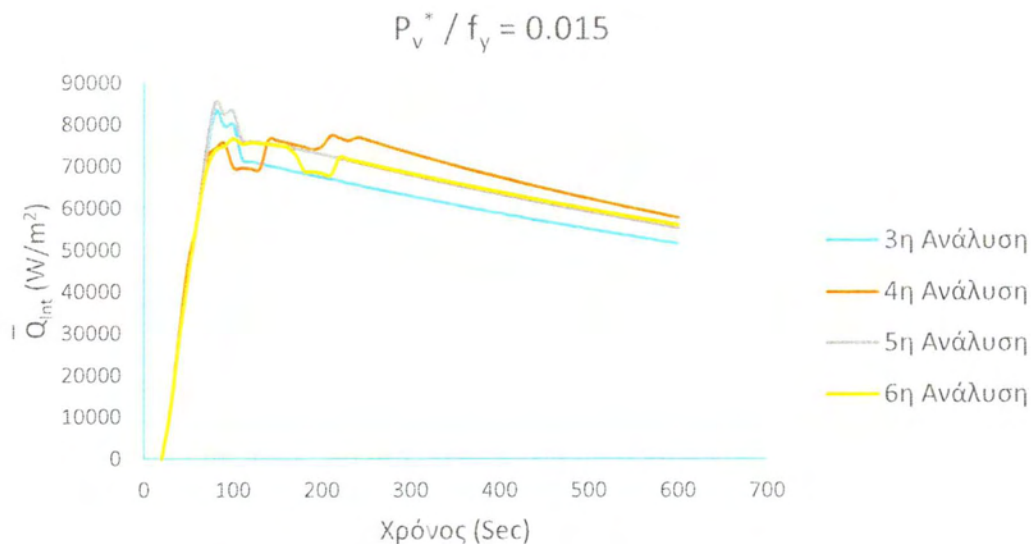


**Σχήμα 4.1.3.12:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.01$ .

Καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο και σταθεροποιείται η αγωγή θερμότητας στις αναλύσεις της διεπιφάνειας που μελετήθηκαν, οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας που λήφθηκαν από την έκτη ανάλυση συγκλίνουν ή ξεπερνούν τις αντίστοιχες τιμές των διεπιφανειών  $f_{3-4}$ . Επιπρόσθετα, η διεπιφάνεια  $f_5$  παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά και οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας της ξεπερνούν τα αντίστοιχα

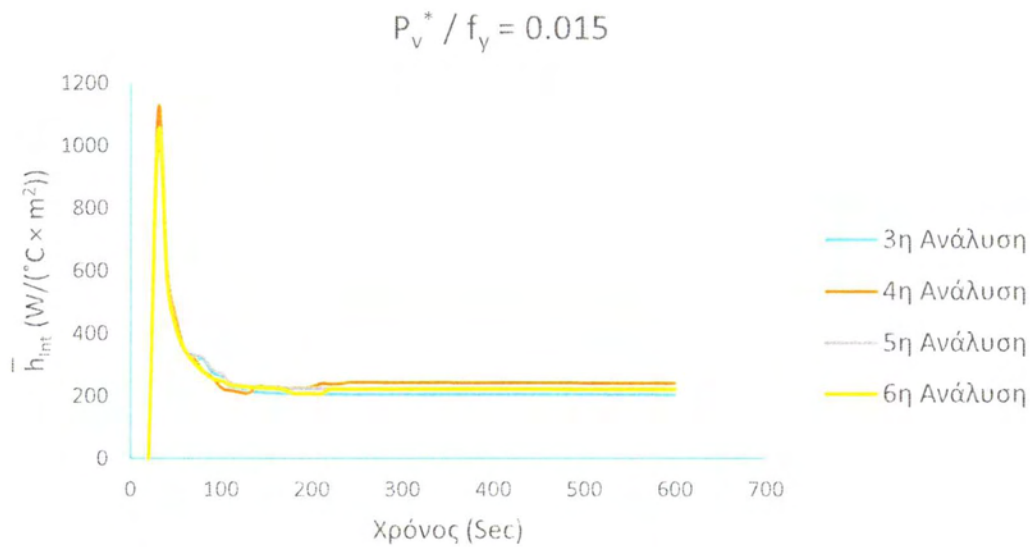
μεγέθη των υπόλοιπων αναλύσεων. Το γεγονός αυτό δείχνει πως η αύξηση του κατακόρυφου φορτίου στη τιμή  $P_v^* / f_y = 0.01$  οδηγεί σε έντονες πλαστικές παραμορφώσεις τόσο τις επιφανειακές αιχμές της κλίμακας της διεπιφάνειας  $f_6$ , όσο και τις μεγαλύτερης κλίμακας αιχμές της διεπιφάνειας  $f_5$ , συμβάλλοντας στην επέκταση της επιφάνειας επαφής από την οποία πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας στις διεπιφάνειες αυτές. Όσον αφορά στη σύγκριση της ανάλυσης  $f_2$  με τις υπόλοιπες αναλύσεις, είναι εμφανές πως η θερμική αγωγιμότητα είναι μεγαλύτερη στην διεπιφάνεια αυτή σε όλη τη διάρκεια μελέτης του φαινομένου.

Για την εξέταση των υψηλότερων κατακόρυφων φορτίσεων που επιβλήθηκαν στις κατασκευές θα παρουσιαστούν τα αντίστοιχα διαγράμματα που προέκυψαν από την μελέτη των αναλύσεων για κατακόρυφες φορτίσεις  $P_v^* / f_y = 0.015$  και  $P_v^* / f_y = 0.02$ . Το διάγραμμα της θερμικής ροής στη διεπιφάνεια που σχηματίστηκε από τις αναλύσεις της κατασκευής υπό τη πρώτη από τις δύο φορτίσεις που προαναφέρθηκαν επισυνάπτεται παρακάτω στο Σχήμα 4.1.3.13.



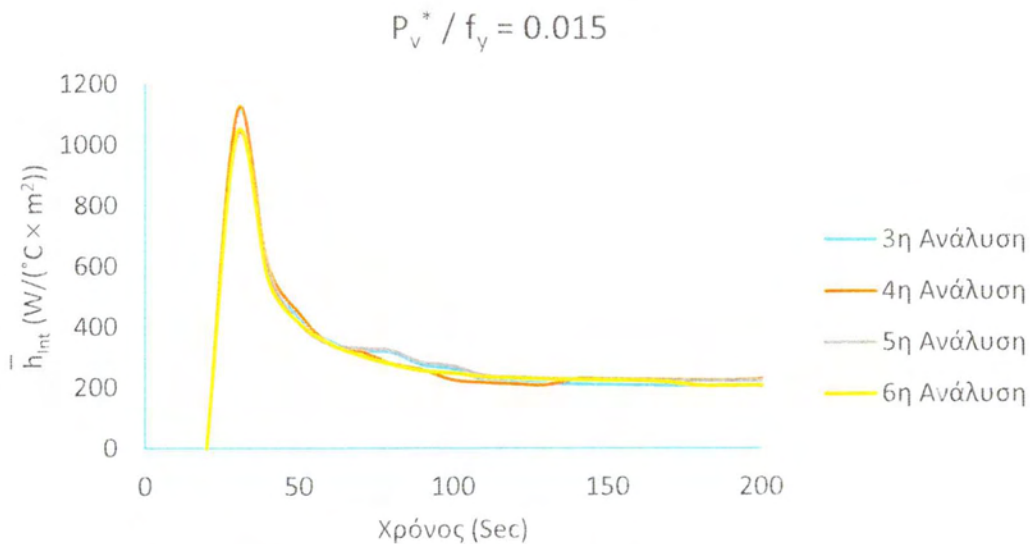
**Σχήμα 4.1.3.13:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

Το διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας που προέκυψε από τις παραπάνω τιμές θερμικής ροής παρατίθεται στο Σχήμα 4.1.3.14:



**Σχήμα 4.1.3.14:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

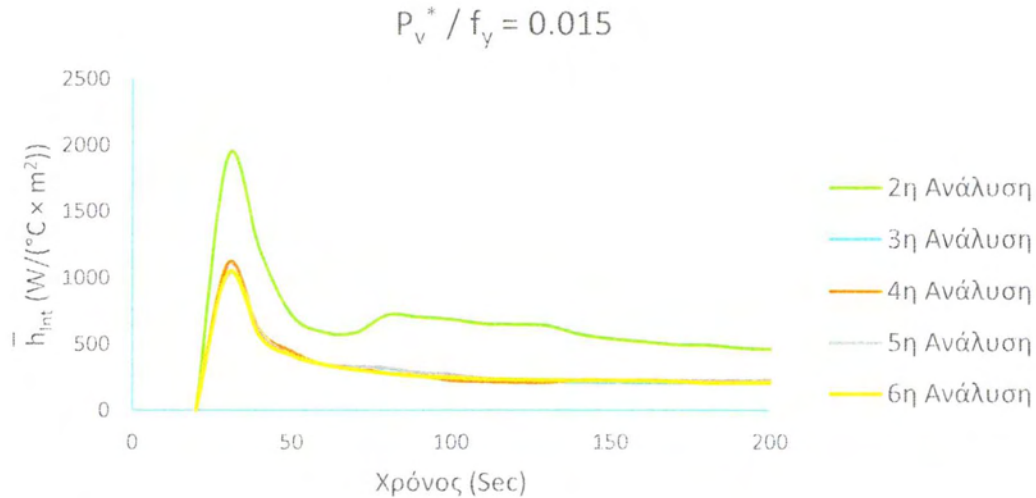
Παρακάτω, παρατίθεται το αντίστοιχο διάγραμμα που εστιάζει στο χρονικό διάστημα  $[0 \div 200]$ sec, (Σχήμα 4.1.3.15) ώστε να βελτιωθεί η ευκρίνεια της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των αναλύσεων στο διάστημα αυτό.



**Σχήμα 4.1.3.15:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

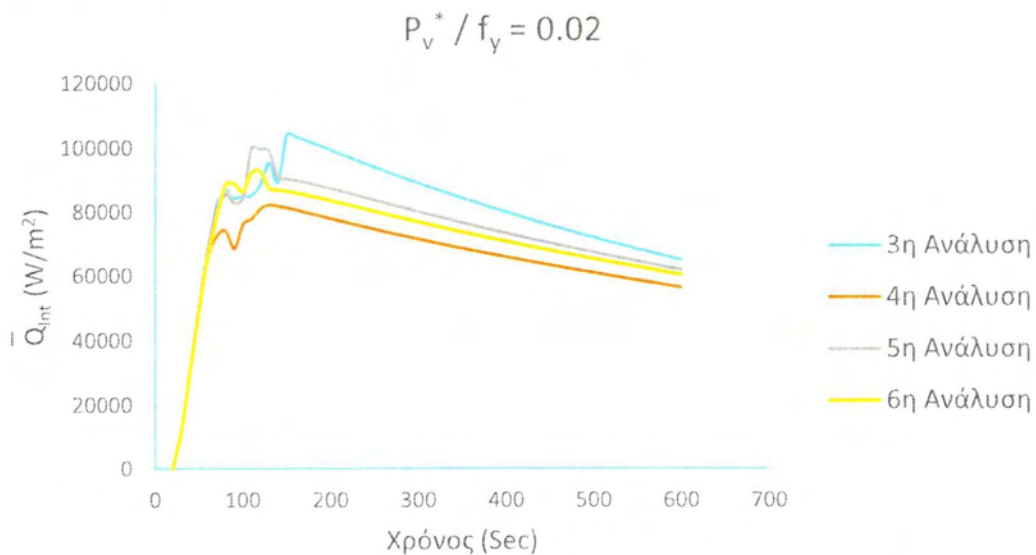


Επίσης, για την σύγκριση της διεπιφάνειας  $f_2$  με τις υπόλοιπες παρατίθεται το διάγραμμα του Σχήματος 4.1.3.16.



**Σχήμα 4.1.3.16:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

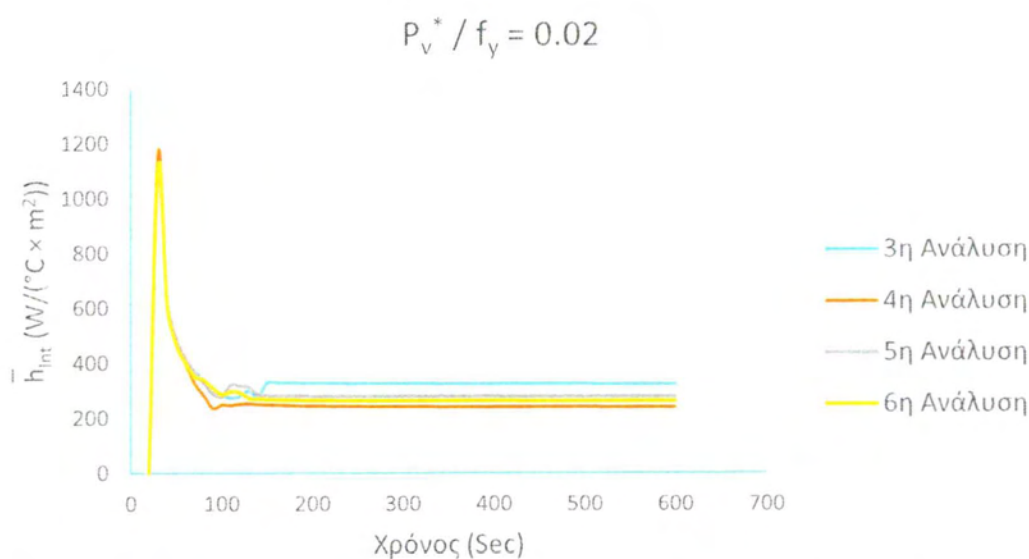
Τέλος, εξετάζεται η κατασκευή υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου  $P_v^* / f_y = 0.02$ . Στο Σχήμα 4.1.3.17 δίνεται το διάγραμμα χρόνου – ροής θερμότητας στη διεπιφάνεια.



**Σχήμα 4.1.3.17:** Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.02$ .

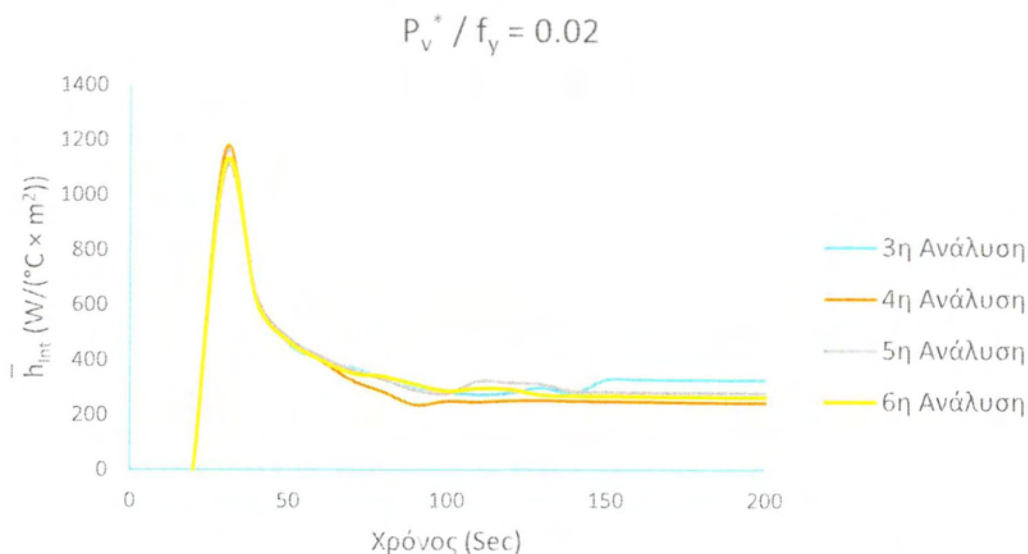


Έπειτα, με την ίδια διαδικασία που προαναφέρθηκε υπολογίστηκαν για τις τιμές θερμικής ροής που παρουσιάστηκαν, τα αντίστοιχα μεγέθη θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια κάθε ανάλυσης. Παρακάτω, παρατίθεται στο Σχήμα 4.1.3.18 το διάγραμμα χρόνου – θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων τρία έως έξι της διεπιφάνειας για όλη τη διάρκεια μελέτης του φαινομένου.



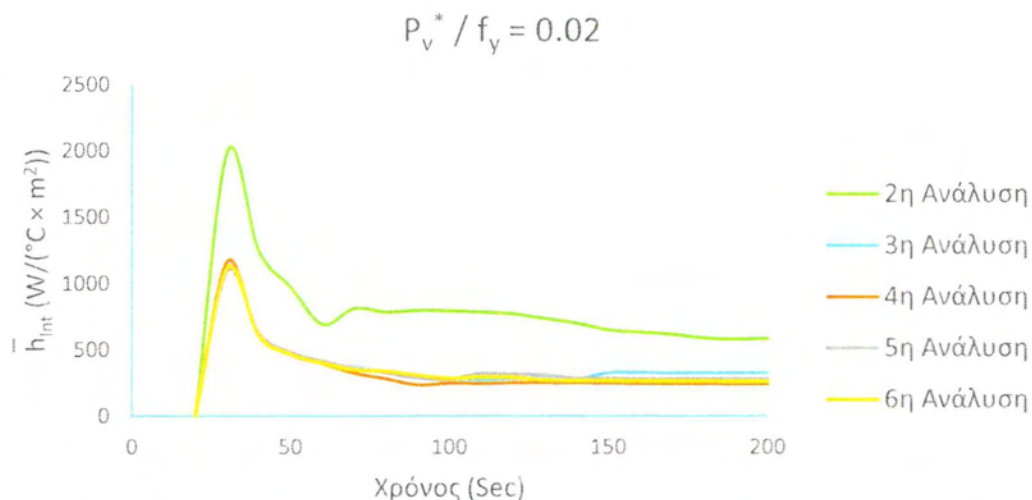
**Σχήμα 4.1.3.18:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.02$ .

Για την ευκρινέστερη σύγκριση των αναλύσεων στο χρονικό διάστημα  $[0 - 200]$  sec επισυνάπτεται στο Σχήμα 4.1.3.19 το αντίστοιχο διάγραμμα που εστιάζει σε αυτό το διάστημα.



**Σχήμα 4.1.3.19:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.02$ .

Στο ίδιο χρονικό διάστημα πραγματοποιήθηκε το διάγραμμα Χρόνου – Θερμικής αγωγιμότητας που συμπεριλαμβάνει και τη δεύτερη ανάλυση της διεπιφάνειας, το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.3.20.

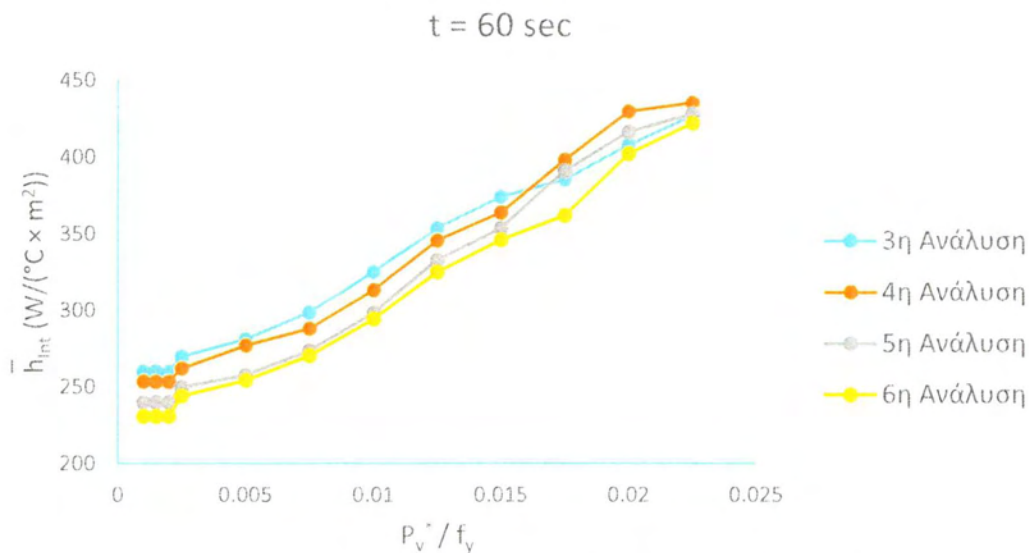


**Σχήμα 4.1.3.20:** Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.02$ .

Στα αποτελέσματα των δύο μεγαλύτερων κατακόρυφων φορτίων παρουσιάζεται η ίδια εικόνα στη σύγκριση των μεγεθών θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων  $f_{3-6}$  με τις μικρότερες κατακόρυφες φορτίσεις στο αρχικό χρονικό διάστημα. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις  $f_{3-4}$  που παρουσιάζουν μεγαλύτερης κλίμακας επιφανειακές ανωμαλίες, οδηγούν σε μεγαλύτερες επιφάνειες επαφής στη διεπιφάνεια και κατά συνέπεια παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές θερμικής αγωγιμότητας στις αρχικές χρονικές στιγμές. Καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο, στις αναλύσεις της διεπιφάνειας  $\delta_5$  και  $\delta_6$  παραμορφώνονται πλαστικά πιο εκτεταμένα οι μικρότερης κλίμακας επιφανειακές αιχμές του άνω συνόρου τους λόγω της σημαντικής αύξησης της θερμοκρασίας και των αυξημένων κατακόρυφων φορτίων που επιβάλλονται στη κατασκευή. Έτσι, παρατηρείται σύγκλιση των τιμών θερμικής αγωγιμότητας των τεσσάρων αναλύσεων και σταδιακά προς τις τελευταίες χρονικές στιγμές, οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας των ανώτερων αναλύσεων τείνουν να ξεπεράσουν τις αντίστοιχες που λήφθηκαν από τις διεπιφάνειες  $f_{3-4}$ . Επομένως, η εικόνα που παρουσιάστηκε από την κατακόρυφη φόρτιση  $P_V^* / f_y = 0.01$  εξακολουθεί να υφίσταται, όπως ήταν αναμενόμενο στις υψηλότερες κατακόρυφες φορτίσεις. Τέλος, όσον αφορά τις τιμές θερμικής αγωγιμότητας που υπολογίστηκαν από την δεύτερη ανάλυση της διεπιφάνειας που παραπέμπει σε λεία διεπιφάνεια παρουσιάζουν τις μέγιστες τιμές σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες αναλύσεις, σε όλη τη διάρκεια μελέτης του φαινομένου.

#### 4.1.4 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας της Μακροσκοπικής Μελέτης των Αναλύσεων της Διεπιφάνειας της Δεύτερης Περίπτωσης

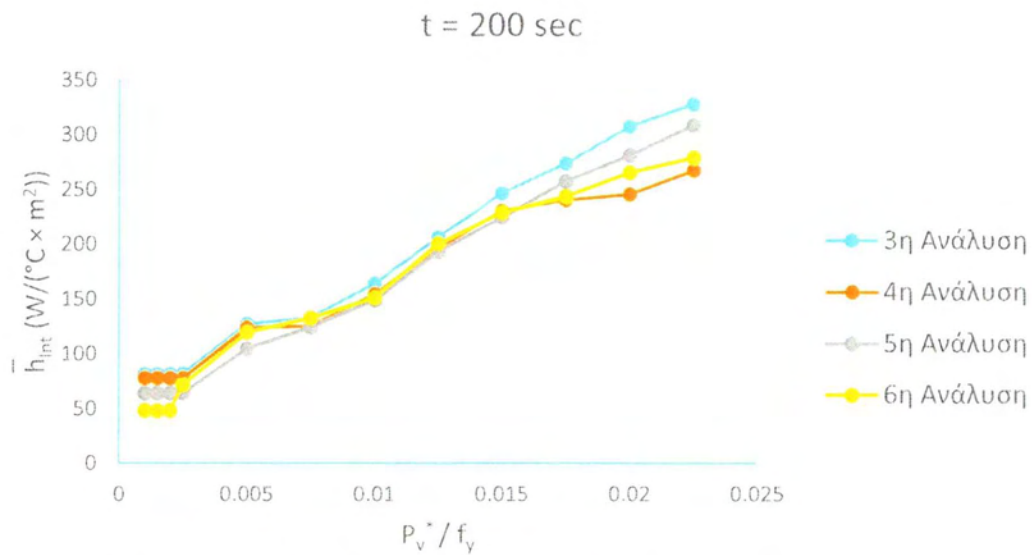
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας. Οι χρονικές στιγμές για τις οποίες μελετάται το φαινόμενο είναι όπως και στην προηγούμενη περίπτωση θερμικής φόρτισης που εξετάστηκε  $t = 60 \text{ sec}, 200 \text{ sec}, 400 \text{ sec}, 600 \text{ sec}$ , ώστε να αποτυπωθεί η χρονική εξέλιξη του φαινομένου, τα διαγράμματα αυτά δίνονται στα Σχήματα 4.1.4.1 – 4.1.4.4.



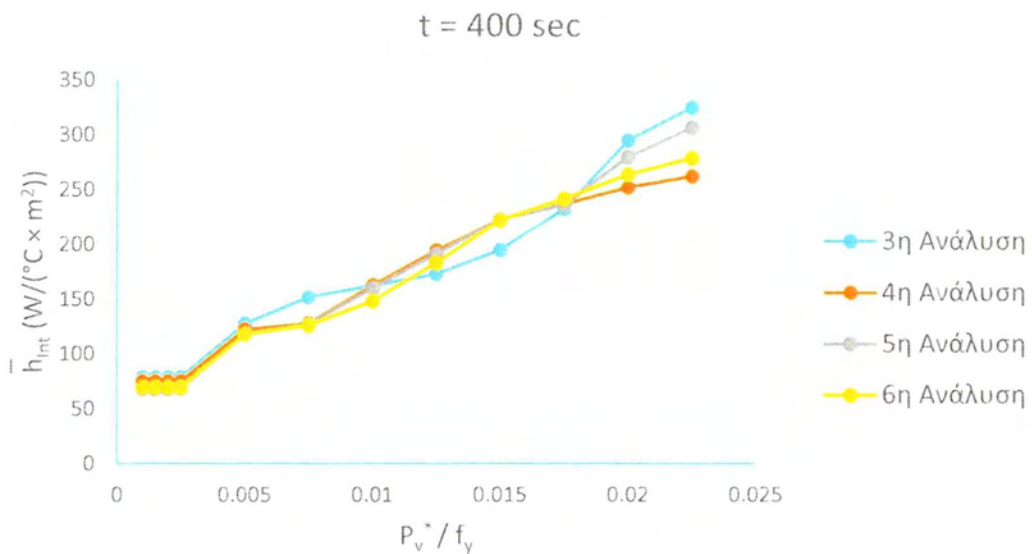
**Σχήμα 4.1.4.1:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή  $t = 60 \text{ sec}$ .

Στο διάγραμμα του Σχήματος 4.1.4.1 παρατηρείται ότι στο εξηκοστό δευτερόλεπτο της μελέτης και για κατακόρυφες φορτίσεις  $P_v^* / f_y \leq 0.015$ , οι κατώτερες αναλύσεις δίνουν μεγαλύτερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας από τις ανώτερες. Ωστόσο, στις υψηλότερες κατακόρυφες φορτίσεις που επιβλήθηκαν, η θερμική αγωγιμότητα από τις αναλύσεις  $\delta_5$  και  $\delta_6$  προσεγγίζουν για τις μεγαλύτερες κατακόρυφες φορτίσεις  $P_v^* / f_y \geq 0.0175$ , τις αντίστοιχες τιμές της τρίτης ανάλυσης. Στην υψηλότερη φόρτιση που επιβλήθηκε οι τιμές από όλες τις αναλύσεις τείνουν να εξισορροπήσουν μεταξύ τους. Παρατηρείται λοιπόν, πως στη δεύτερη περίπτωση θερμικής φόρτισης η σύγκριση των τιμών θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων αλλάζει εικόνα για  $t = 60 \text{ sec}$ , στις μεγαλύτερες από τις φορτίσεις που επιβλήθηκαν. Πρέπει να σημειωθεί, πως το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται πιο νωρίς στην περίπτωση αυτή, καθώς στην μελέτη των αναλύσεων με την επιβαλλόμενη μεταβολή θερμοκρασίας στο κάτω τμήμα της κατασκευής παρουσιάστηκε σύγκλιση των τιμών θερμικής αγωγιμότητας των ανώτερων και κατώτερων αναλύσεων, στο αντίστοιχο συγκεντρωτικό διάγραμμα του διακοσμοστού δευτερολέπτου.

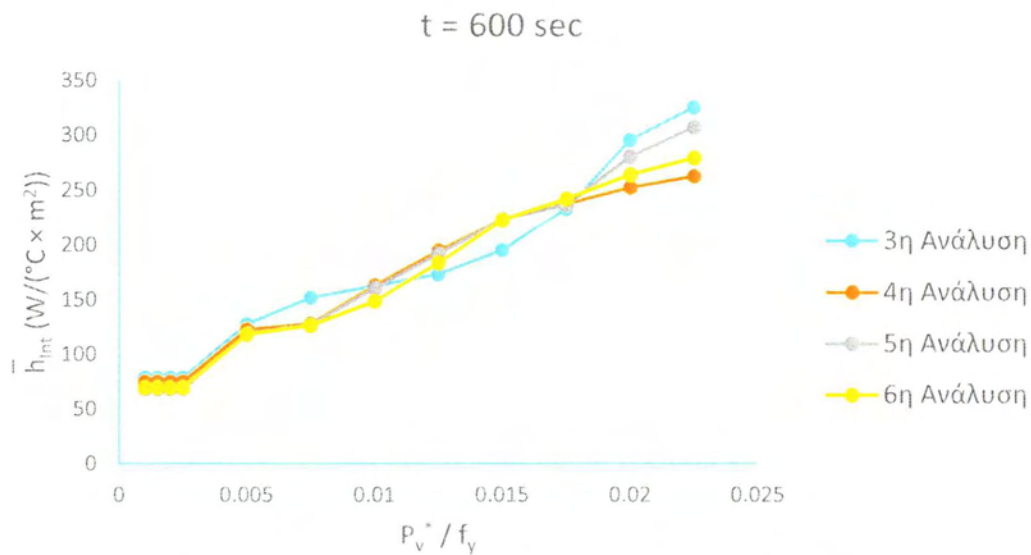




**Σχήμα 4.1.4.2:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή  $t = 200\text{sec}$ .



**Σχήμα 4.1.4.3:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή  $t = 400\text{sec}$ .



**Σχήμα 4.1.4.4:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή  $t = 600 \text{ sec}$ .

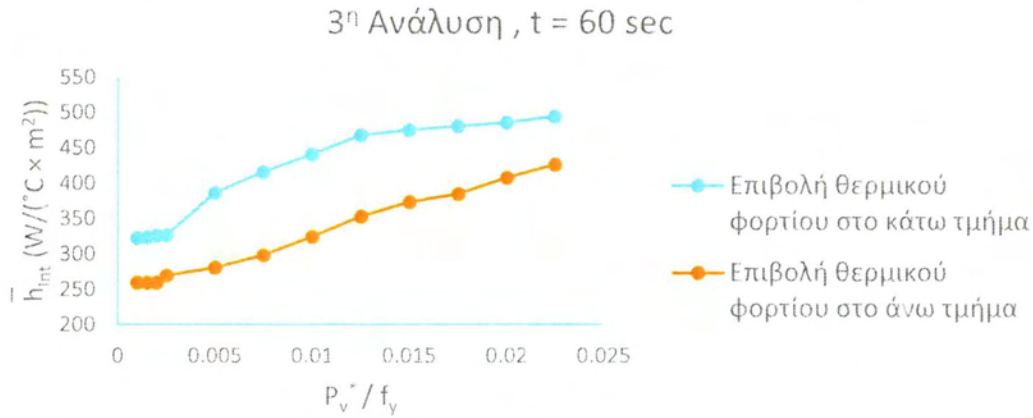
Στα διαγράμματα 4.1.4.2 – 4.1.4.4 διαφοροποιείται η εικόνα των αποτελεσμάτων σε σχέση με τις αρχικές χρονικές στιγμές. Καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο παρατηρείται σημαντική αύξηση των τιμών θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια των ανώτερων αναλύσεων. Έτσι, η θερμική αγωγιμότητα των διεπιφανειών  $f_5$  και  $f_6$  προσεγγίζει και τείνει να ξεπεράσει τις τιμές θερμικής αγωγιμότητας που υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις  $\delta_3$  και  $\delta_4$ . Το γεγονός αυτό οφείλεται στις έντονες πλαστικοποιήσεις των αιχμών μικρότερης κλίμακας λόγω της σημαντικής αύξησης της θερμοκρασίας της διεπιφάνειας.

## 4.2 Σύγκριση της Θερμικής Αγωγιμότητας των Δύο Περιπτώσεων Θερμικής Φόρτισης που Μελετήθηκαν Μακροσκοπικά

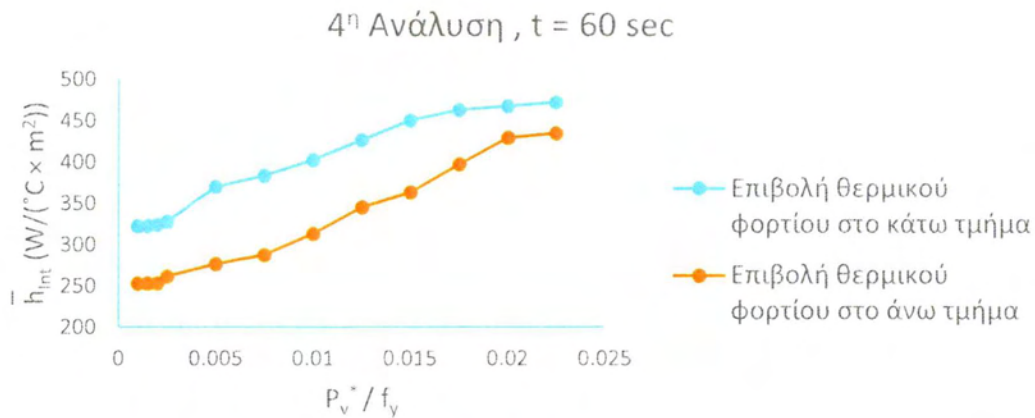
Στην παρούσα ενότητα πραγματοποιείται σύγκριση της θερμικής αγωγιμότητας των δύο περιπτώσεων που εξετάστηκαν:

1. Με την επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή μεταβολή στο κάτω σύνορο της κατασκευής
2. Με την θερμοκρασιακή μεταβολή στο άνω όριο της κατασκευής

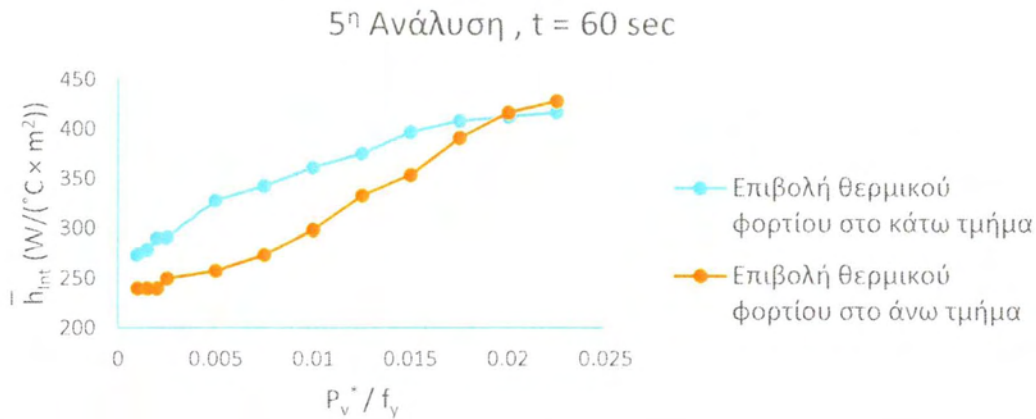
Η σύγκριση πραγματοποιείται για καθεμία από τις αναλύσεις τρία έως έξι ξεχωριστά και για τις χρονικές στιγμές  $t = 60, 200$  και  $400$  sec. Τα συγκριτικά διαγράμματα που λήφθηκαν για  $t = 60$  sec δίνονται στα Σχήματα 4.2.1 – 4.2.4.



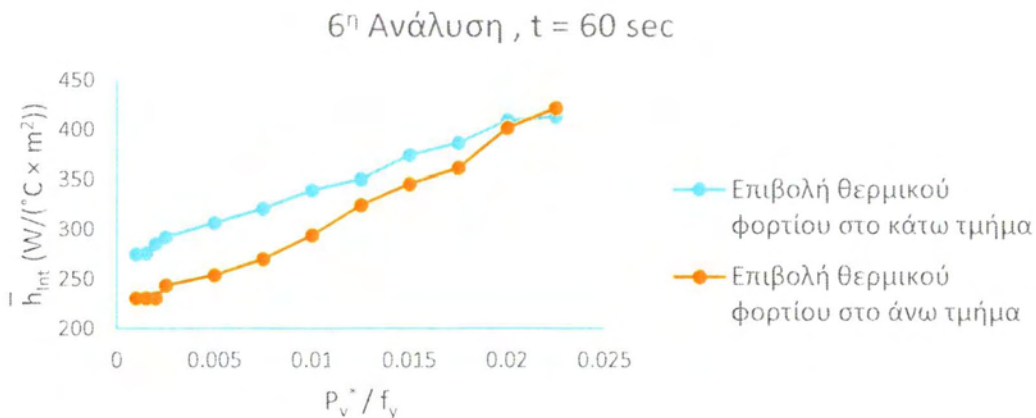
**Σχήμα 4.2.1:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης  $f_3$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 60$  sec.



**Σχήμα 4.2.2:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης  $f_4$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 60$  sec.



**Σχήμα 4.2.3:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης  $f_5$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 60$  sec.



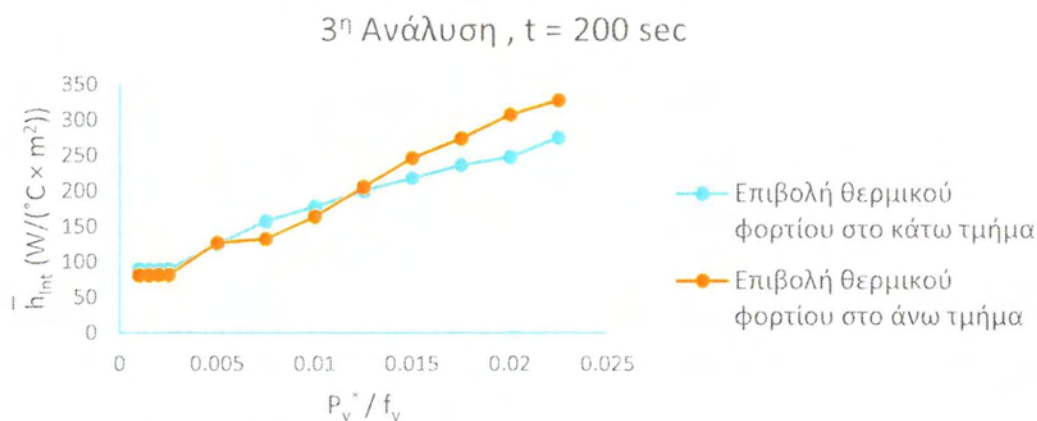
**Σχήμα 4.2.4:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης  $f_6$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 60$  sec.

Στα διαγράμματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω φαίνεται πως στην αρχή του φαινομένου οι αναλύσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα στην πρώτη περίπτωση, όπου η θερμοκρασιακή μεταβολή επιβλήθηκε στο κάτω τμήμα της κατασκευής. Το φαινόμενο αυτό είναι εντονότερο στις αρχικές αναλύσεις  $\delta_{3-4}$ , ενώ στις ακριβέστερες αναλύσεις και ειδικά στις υψηλότερες κατακόρυφες φορτίσεις τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων συγκλίνουν. Το γεγονός αυτό μπορεί να εξηγηθεί από την μεταβατική κατάσταση της επαφής στις διεπιφάνειες στη δεύτερη περίπτωση, καθώς επιμηκύνεται το άνω τμήμα της κατασκευής με την αύξηση της θερμοκρασίας και χάνονται σημεία επαφής. Ωστόσο, οι παραμορφώσεις γίνονται πιο εκτεταμένες στις ανώτερες αναλύσεις, με αποτέλεσμα να εξισορροπούν τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων. Αντίθετα, στις αναλύσεις τρία και τέσσερα των

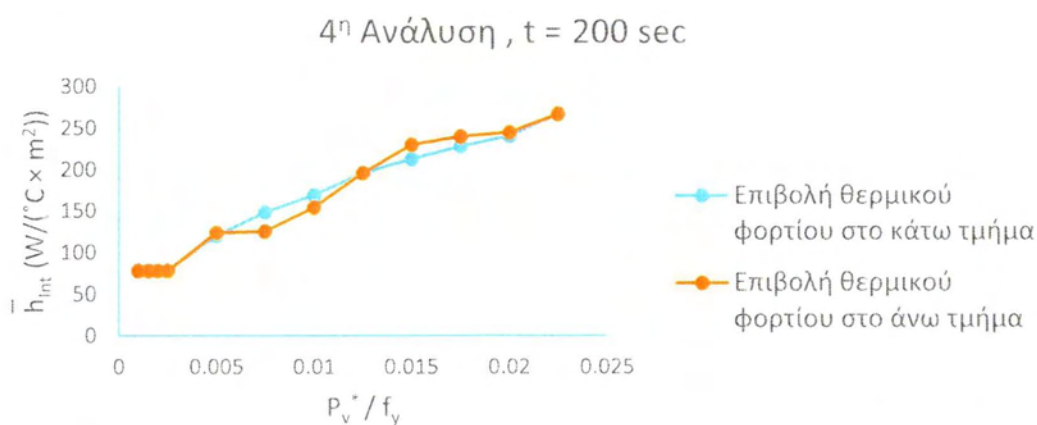


κατασκευών της διεπιφάνειας δεν υπάρχουν τόσο εκτεταμένες παραμορφώσεις στις περιοχές επαφής της διεπιφάνειας και η μη εφαρμογή των συνόρων της διεπιφάνειας περιορίζει σημαντικά την επιφάνεια επαφής από την οποία πραγματοποιείται μετάδοση θερμότητας πριν τη σταθεροποίηση του φαινομένου.

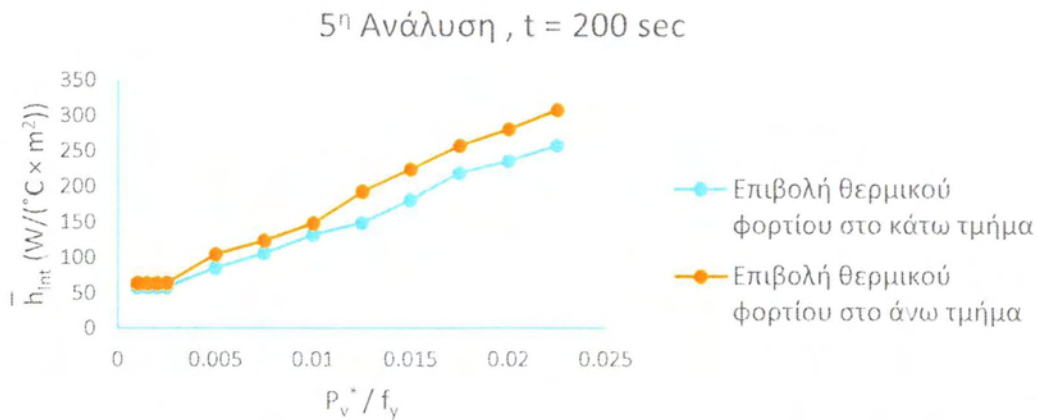
Στα Σχήματα 4.2.5 – 4.2.8 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα συγκριτικά διαγράμματα των δύο περιπτώσεων για την χρονική στιγμή  $t = 200 \text{ sec}$ , μετά την σταθεροποίηση του φαινομένου της θερμικής αγωγιμότητας στις διεπιφάνειες.



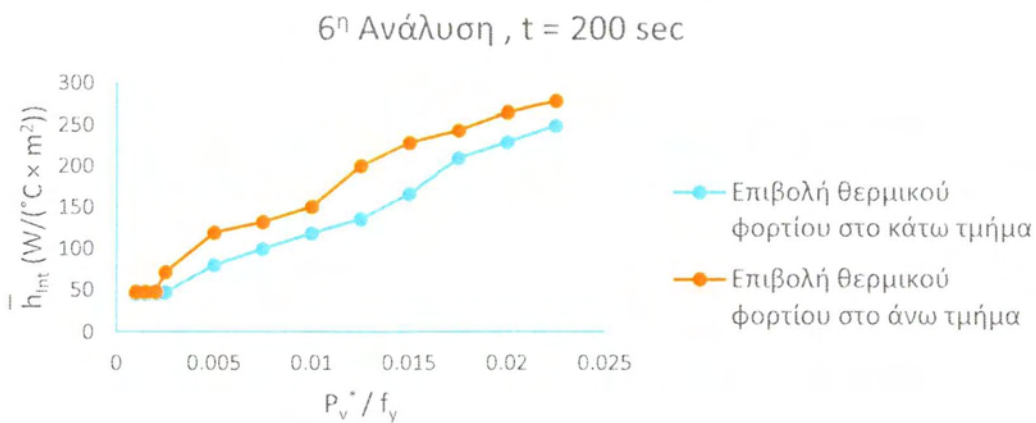
**Σχήμα 4.2.5:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης  $f_3$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 200 \text{ sec}$ .



**Σχήμα 4.2.6:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης  $f_4$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 200 \text{ sec}$ .



**Σχήμα 4.2.7:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης  $f_5$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 200$  sec.

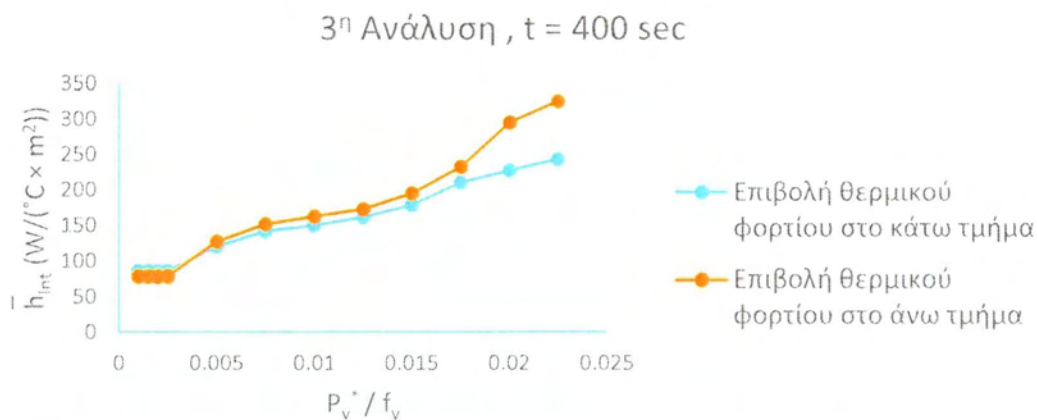


**Σχήμα 4.2.8:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης  $f_6$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 200$  sec.

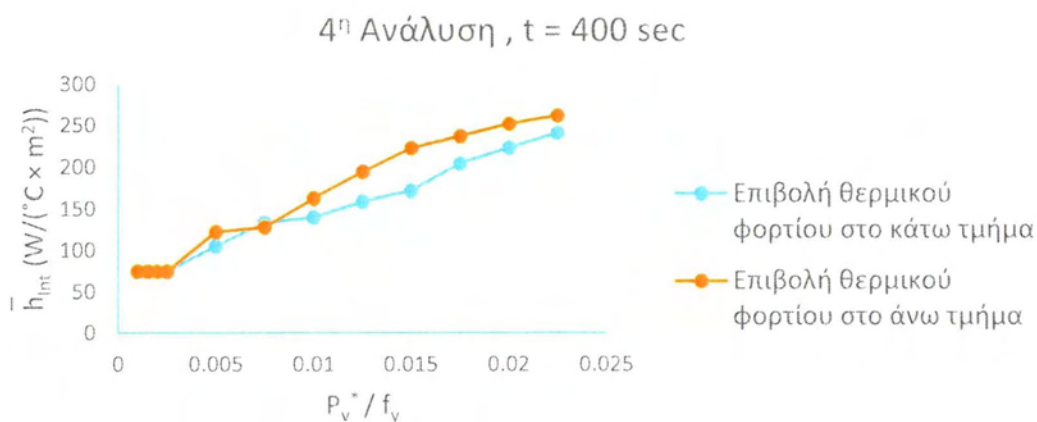
Στο διακοσιοστό δευτερόλεπτο παρατηρείται σύγκλιση στη θερμική αγωγιμότητα των δύο περιπτώσεων στις αναλύσεις  $\delta_3$  και  $\delta_4$  και στις υψηλότερες κατακόρυφες φορτίσεις που επιβλήθηκαν οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων με την θερμοκρασιακή μεταβολή στο άνω τμήμα ξεπερνούν τις αντίστοιχες της πρώτης περίπτωσης. Στις ανώτερες αναλύσεις οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας που λήφθηκαν από την δεύτερη περίπτωση επιβολής του θερμικού φορτίου ξεπερνούν τις αντίστοιχες τιμές της πρώτης από τις μικρότερες κατακόρυφες φορτίσεις και αυτή η εικόνα διατηρείται μέχρι και τις υψηλότερες τιμές κατακόρυφου φορτίου. Η σύγκριση οδηγεί στο συμπέρασμα, πως καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο η δεύτερη περίπτωση οδηγεί σε μεγαλύτερη επέκταση των περιοχών της επαφής, μέσω των

πλαστικών παραμορφώσεων των επιφανειακών αιχμών λόγω της μεγαλύτερης αύξησης της θερμοκρασίας της άνω διεπιφάνειας που παρουσιάζει τραχύτητα.

Τέλος, η σύγκριση των μεγεθών της θερμικής αγωγιμότητας των δύο περιπτώσεων πραγματοποιείται για τις διεπιφάνειες  $f_{3-6}$ , την χρονική στιγμή  $t = 400$  sec. Τα διαγράμματα αυτά δίνονται στα Σχήματα 4.2.9 – 4.2.12.

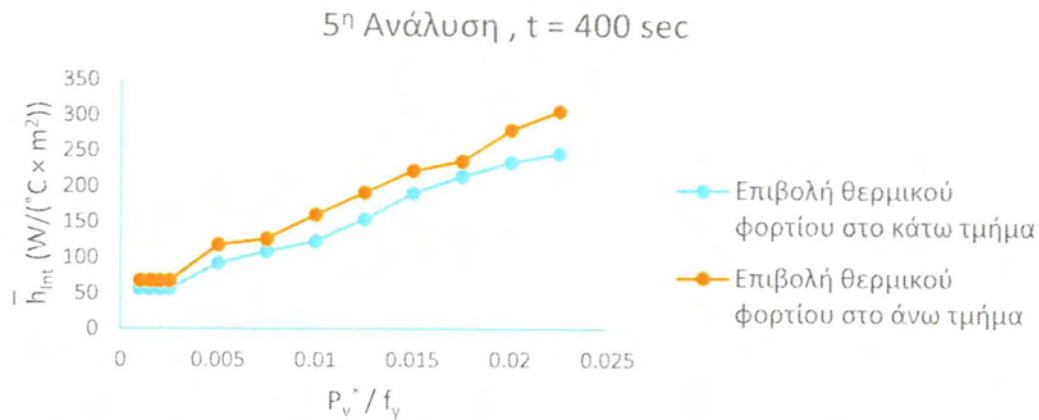


**Σχήμα 4.2.9:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης  $f_3$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 400$  sec.

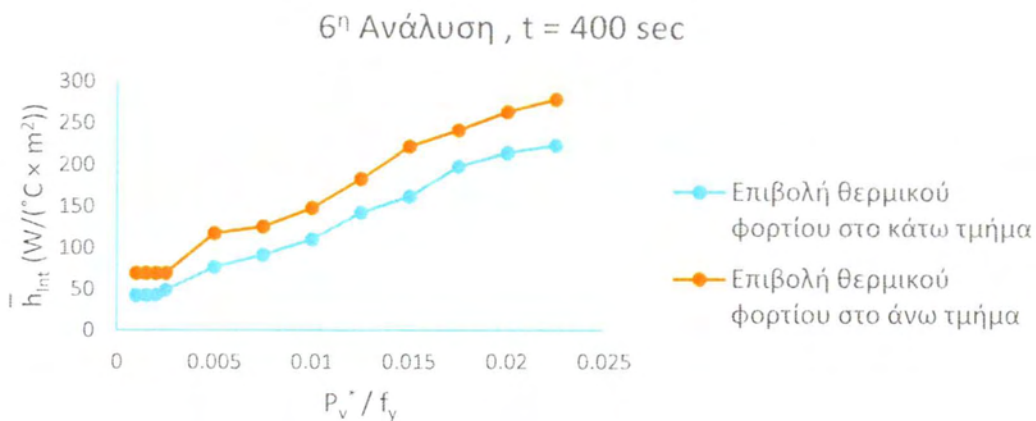


**Σχήμα 4.2.10:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης  $f_4$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 400$  sec.





**Σχήμα 4.2.11:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης  $f_5$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 400$  sec.



**Σχήμα 4.2.12:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης  $f_6$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 400$  sec.

Η εικόνα που λήφθηκε στο τετρακοσιοστό δευτερόλεπτο είναι παρόμοια με εκείνη της προηγούμενης χρονικής στιγμής. Συγκεκριμένα, στις αναλύσεις  $\delta_3$  και  $\delta_4$  της διεπιφάνειας, στις χαμηλές φορτίσεις που εφαρμόστηκαν, τα μεγέθη θερμικής αγωγιμότητας των δύο περιπτώσεων συγκλίνουν, ενώ για μεγαλύτερες κατακόρυφες φορτίσεις οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας που λήφθηκαν από την δεύτερη περίπτωση αυξάνονται πιο απότομα και ξεπερνούν τις αντίστοιχες τιμές της πρώτης. Στις ακριβέστερες αναλύσεις της διεπιφάνειας τα μεγαλύτερα μεγέθη παρουσιάζονται στις επιλύσεις με την μεταβολή θερμοκρασίας στο άνω σύνορο σε ολόκληρο το εύρος κατακόρυφων φορτίων που μελετήθηκαν. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη με βάση τις παρατηρήσεις που ήδη έγιναν πάνω στα αποτελέσματα που λήφθηκαν στο διακοσιοστό δευτερόλεπτο.



## 5<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΗΣ ΤΡΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΗ ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΕΠΑΦΗΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

Στο προηγούμενο Κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα που αφορούν τα μεγέθη της θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων, που λήφθηκαν από τη μακροσκοπική μελέτη του φαινομένου στο σύνολο των κόμβων της κάθε διεπιφάνειας. Στο παρόν Κεφάλαιο εξετάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την μικροσκοπική μελέτη των μεγεθών της θερμικής αγωγιμότητας, που λήφθηκαν απευθείας από τους κόμβους επαφής στις διεπιφάνειες όλων των αναλύσεων που ελήφθησαν υπόψη στη μακροσκοπική μελέτη του φαινομένου. Επομένως, εστιάζεται η μελέτη του φαινομένου στα σημεία επαφής των διεπιφανειών, όπου πραγματοποιείται η μετάδοση θερμότητας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο όριο. Με το δεδομένο αυτό, τα αποτελέσματα αναμένεται να έχουν πιο σαφή εικόνα όσο αφορά τη σύγκριση των αναλύσεων, καθώς εξετάζεται άμεσα η περιοχή της διασύνδεσης των δύο τμημάτων της κατασκευής από την οποία διέρχεται η θερμική ροή.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, για την μελέτη του φαινομένου εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις θερμικής φόρτισης. Στη πρώτη, εφαρμόστηκε στο κάτω τμήμα της κατασκευής ομοιόμορφη θερμοκρασιακή κατανομή κατά τη διεύθυνση X, όπως αυτή παρουσιάστηκε στο Τρίτο Κεφάλαιο (Σχήμα 3.2.2), ενώ στη δεύτερη περίπτωση η ίδια επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή μεταβολή εφαρμόστηκε στο άνω όριο του άνω τμήματος της κατασκευής. Για καθεμιά από τις περιπτώσεις αυτές εξετάστηκαν οι ίδιες αναλύσεις της διεπιφάνειας υπό κατακόρυφα κατανεμημένα φορτία που αντιστοιχούν στο εύρος τάσεων  $P_v^*$ :  $[0.001f_y \div 0.0225f_y]$ . Για τις δύο περιπτώσεις επιβαλλόμενης θερμοκρασιακής μεταβολής που προαναφέρθηκαν και για καθεμιά από τις περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης που εφαρμόστηκαν, λήφθηκαν από τις αναλύσεις τα αποτελέσματα της ροής θερμότητας και της διαφοράς θερμοκρασίας των χρονικών στιγμών 20, 40, 60, ..., 600 sec κάθε κόμβου επαφής και σχηματίστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές θερμικής αγωγιμότητας και έγιναν τα διαγράμματα χρόνου – θερμικής αγωγιμότητας για τους κόμβους επαφής. Τέλος, υπολογίστηκαν για κάθε ανάλυση της διεπιφάνειας τα αντιπροσωπευτικά μακροσκοπικά μεγέθη της μέσης θερμικής αγωγιμότητας στο σύνολο των κόμβων επαφής,  $\bar{h}_c$ .

## 5.1 Περιγραφή της Διαδικασίας Βάση της Οποίας Πραγματοποιήθηκε η Μελέτη της Επιρροής της Τραχύτητας στην Αγωγή Θερμότητας Λόγω Επαφής στις Χαμηλές Πιέσεις

Αρχικά, για κάθε τιμή κατακόρυφης φόρτισης που εφαρμόστηκε στην κατασκευή και για κάθε ανάλυση της διεπιφάνειας λήφθηκαν από το πρόγραμμα οι εικόνες της επαφής σε όλα τα χρονικά βήματα εξέλιξης του φαινομένου. Στη συνέχεια, από καθέναν από τους κόμβους επαφής λήφθηκαν οι τιμές της θερμικής ροής και της θερμοκρασιακής διαφοράς. Πρέπει να σημειωθεί πως κάθε σημείο επαφής στη διεπιφάνεια χαρακτηρίζεται από τον κόμβο του άνω ορίου της διεπιφάνειας και τον αντίστοιχο κόμβο του κάτω ορίου της που έρχονται σε επαφή. Με δεδομένο ότι το κάτω όριο της διεπιφάνειας παραμένει αμετάβλητο, ενώ για το άνω όριο της διεπιφάνειας μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές αναλύσεις, κάθε σημείο επαφής αναγνωρίστηκε από την θέση του αντίστοιχου κόμβου του κάτω ορίου. Για την μικροσκοπική μελέτη της επαφής των κόμβων των αναλύσεων, σε καθεμία από τις φορτίσεις που προαναφέρθηκαν τηρήθηκε ανεξάρτητη αρίθμηση των κόμβων επαφής η οποία αφορά το σύνολο των κόμβων επαφής που αναγνωρίστηκαν στις αναλύσεις  $3 \div 6$ . Αυτή η αρίθμηση έγινε από αριστερά προς τα δεξιά κατά μήκος της διεπιφάνειας, αφού αναγνωρίστηκαν όλοι οι κόμβοι επαφής των τεσσάρων διεπιφανειών.

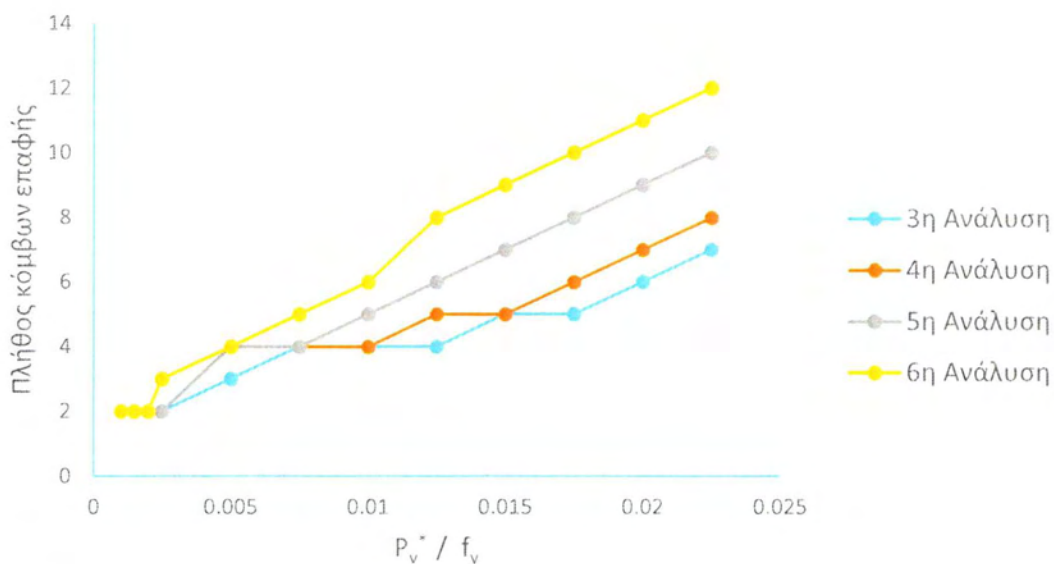
Έπειτα, για κάθε κόμβο  $i$  που έχει αριθμηθεί με την παραπάνω μέθοδο υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου, λήφθηκε η τιμή της ροής θερμότητας,  $Q_{c,i}$  [ $W/m^2$ ], για τις χρονικές στιγμές  $t = 20, 40, \dots, 600$  sec. Οι τιμές θερμικής ροής λήφθηκαν για τις δύο περιπτώσεις θερμικής φόρτισης που εξετάστηκαν, από τον κόμβο που αντιστοιχεί στη μεγαλύτερη θερμοκρασία και από τον οποίο μεταδίδεται θερμότητα προς το ψυχρότερο όριο της διεπιφάνειας. Επίσης, για τις ίδιες χρονικές στιγμές υπολογίστηκαν οι τιμές της θερμοκρασίας του άνω και του κάτω κόμβου της διεπιφάνειας που ορίζουν τον κόμβο επαφής  $i$  και υπολογίστηκαν από τη Σχέση 5.1.1 που ακολουθεί οι θερμοκρασιακές διαφορές σε αυτές χρονικές στιγμές:

$$\Delta T_i = |T_{i,Κάτω} - T_{i,Πάνω}| [^{\circ}C] \quad (5.1.1)$$

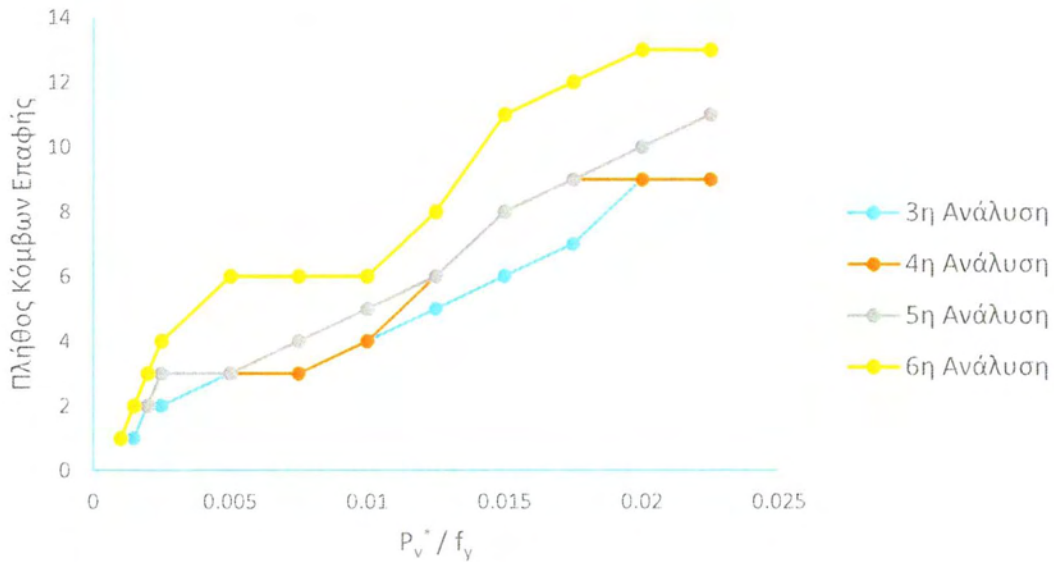
Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε κάθε κόμβο  $i$  από τη σχέση:

$$h_{c,i} = \frac{Q_{c,i}}{\Delta T_i} [W/^{\circ}C \times m^2] \quad (5.1.2)$$

Μετά τον υπολογισμό των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας σε κάθε έναν από τους κόμβους επαφής των αναλύσεων που εξετάστηκαν, πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των μεγεθών της μέσης θερμικής αγωγιμότητας που αφορούν στο σύνολο των κόμβων επαφής κάθε επίλυσης για όλες τις περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης. Για την κανονικοποίηση των τιμών αυτών υπολογίστηκε το άθροισμα των μεγεθών θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής κάθε ανάλυσης και διαιρέθηκε με το μέγιστο πλήθος κόμβων επαφής που προέκυψε από όλες τις αναλύσεις των κατασκευών, που επιλύθηκαν για τις ίδιες συνθήκες θερμοκρασιακού φορτίου. Έτσι, οι κόμβοι που δεν έρχονται σε επαφή σε κάποιες επιλύσεις, άλλα ορίζονται ως κόμβοι επαφής σε άλλες, έχουν μηδενική επιρροή στην θερμική αγωγιμότητα που πραγματοποιείται μεταξύ των ορίων της διεπιφάνειας στις αναλύσεις που δεν είναι σε επαφή. Στα Σχήματα 5.1.1 και 5.1.2 δίνονται τα διαγράμματα κατακόρυφου φορτίου – πλήθους κόμβων επαφής, που προέκυψαν για καθεμία από τις αναλύσεις στις περιπτώσεις θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν.



**Σχήμα 5.1.1:** Διάγραμμα πλήθους κόμβων επαφής συναρτήσει του φορτίου για την πρώτη περίπτωση θερμικής φόρτισης.



**Σχήμα 5.1.2:** Διάγραμμα πλήθους κόμβων επαφής συναρτήσει του φορτίου για την δεύτερη περίπτωση θερμικής φόρτισης.

Όπως ήταν αναμενόμενο, το μεγαλύτερο πλήθος κόμβων επαφής παρουσιάζεται στις μεγαλύτερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου που επιβλήθηκε στην έκτη ανάλυση της διεπιφάνειας. Στη πρώτη περίπτωση θερμικής φόρτισης το μέγιστο πλήθος κόμβων επαφής είναι  $N_{1,max} = 12$ , ενώ στη δεύτερη περίπτωση το πλήθος αυτό είναι  $N_{2,max} = 13$ . Έτσι, με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν οι σχέσεις που εφαρμόστηκαν για τον υπολογισμό των μεγεθών της μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επιφάνεια επαφής των διαφόρων αναλύσεων για τις δύο περιπτώσεις είναι:

- Για την πρώτη περίπτωση θερμικής φόρτισης:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{N_{1,max}} \sum_{j=1}^{N_{1,max}} h_{c,j} \quad [W/^\circ C \times m^2] \quad (5.1.3)$$

- Για την δεύτερη περίπτωση θερμικής φόρτισης:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{N_{2,max}} \sum_{j=1}^{N_{2,max}} h_{c,j} \quad [W/^\circ C \times m^2] \quad (5.1.4)$$

Πρέπει να σημειωθεί, ότι για την εφαρμογή των Σχέσεων 5.1.3 – 5.1.4 κάθε κόμβος  $i$  που έχει αριθμηθεί με την προαναφερθείσα διαδικασία σε κάθε περίπτωση φόρτισης και για το σύνολο των αναλύσεων αντιστοιχίζεται με βάση την αύξουσα σειρά των κόμβων επαφής της υπό εξέταση ανάλυσης στον μετρητή  $j$  όπου  $1 \leq j \leq N_{1,max}$  και  $1 \leq j \leq N_{2,max}$  αντίστοιχα.



## 5.2 Μελέτη της Θερμικής Αγωγιμότητας στη Διεπιφάνεια για την Πρώτη Περίπτωση Επιβολής του Θερμικού Φορτίου

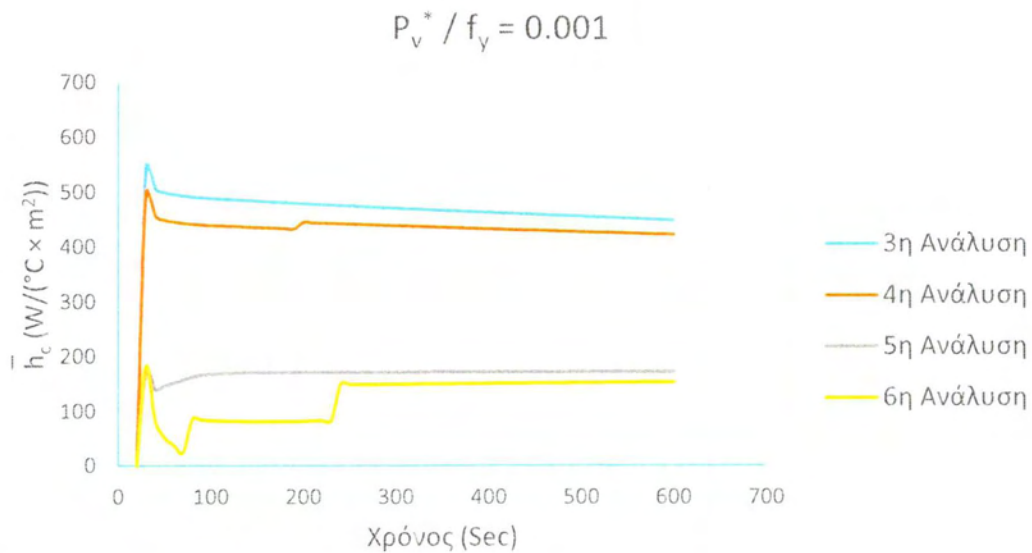
Στην παρούσα ενότητα, θα μελετηθούν τα αποτελέσματα στους κόμβους επαφής από τις αναλύσεις της πρώτης περίπτωσης επιβολής του θερμικού φορτίου. Όπως και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα πραγματοποιηθεί για τις εξής τιμές του κατακόρυφου φορτίου:  $P_v^*/f_y = 0.001, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02$ .

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα του Σχήματος 5.1.1 σε όλες τις διεπιφάνειες  $f_{3-6}$  προέκυψαν για την περίπτωση  $P_v^*/f_y = 0.001$  δύο κόμβοι επαφής. Αρχικά, εξετάστηκε κάθε κόμβος μεμονωμένα, λήφθηκαν για όλες τις χρονικές στιγμές  $t = 20, 40, 60, \dots, 600$  sec, οι τιμές της θερμικής ροής και υπολογίστηκαν οι θερμοκρασιακές διαφορές μέσω της Σχέσης 5.1.1. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η θερμική αγωγιμότητα  $h_{c,i}$  του κόμβου  $i$  με την βοήθεια της Σχέσης 5.1.2 για κάθε χρονική στιγμή.

Έπειτα, πραγματοποιήθηκε για κάθε ανάλυση της διεπιφάνειας ο υπολογισμός της μέσης θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής από τη Σχέση 5.1.3. Έτσι, με βάση τα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω η μέση τιμή της θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής για αυτή την περίπτωση κατακόρυφου φορτίου είναι:

$$\bar{h}_c = \frac{1}{12} \sum_{j=1}^2 h_{c,j}$$

Στο διάγραμμα του Σχήματος 5.2.1 δίνεται η μέση τιμή της θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής σε συνάρτηση με τον χρόνο.



**Σχήμα 5.2.1:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^*/f_y = 0.001$ .

Η ίδια διαδικασία υπολογισμού εφαρμόστηκε για όλες τις περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης. Έτσι, για την περίπτωση όπου  $P_v^*/f_y = 0.005$  έχουμε:

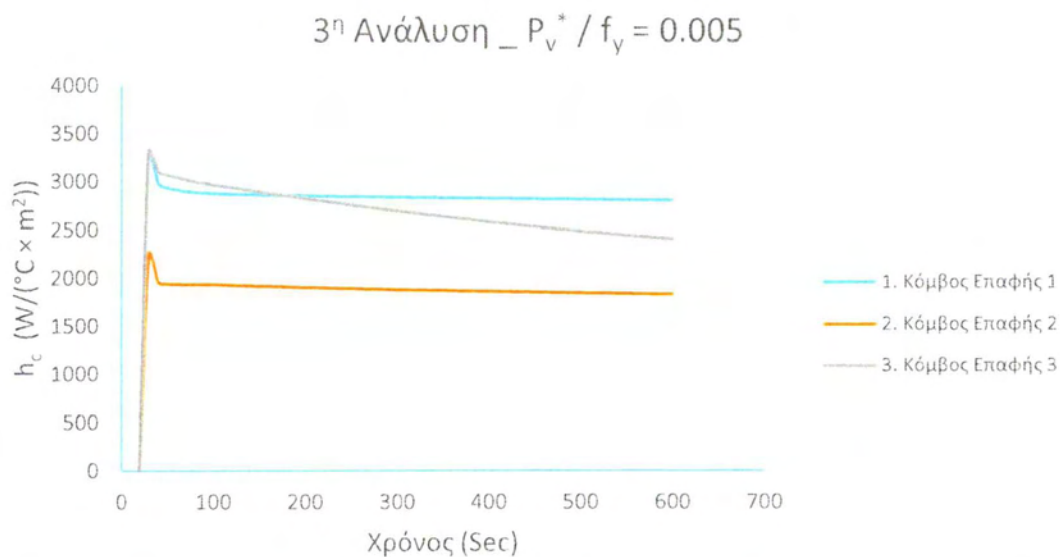
- Για την διεπιφάνεια  $f_3$  στην οποία όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1.1 υπάρχουν τρεις κόμβοι επαφής είναι:

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^3 \frac{h_{c,j}}{12}$$

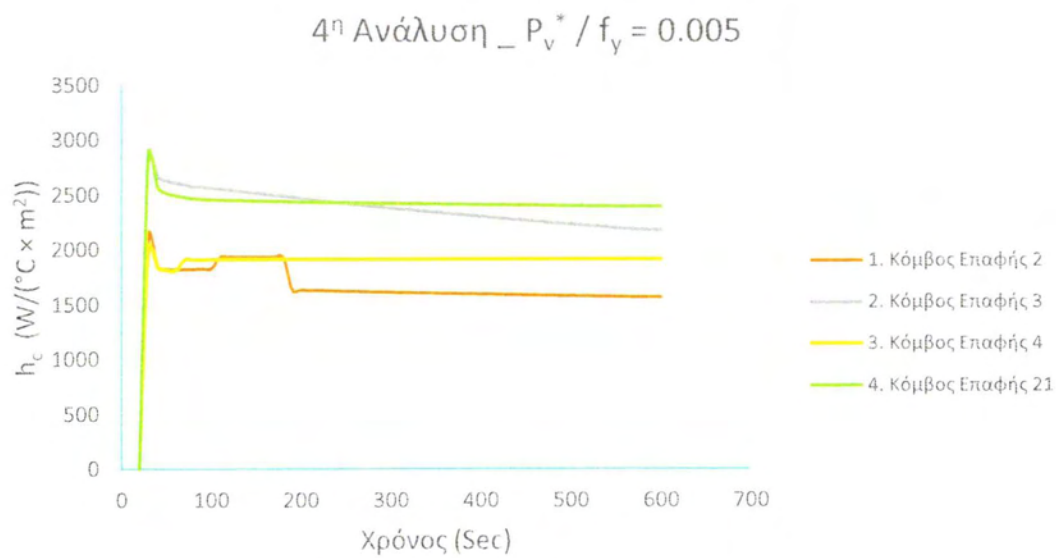
- Ενώ, για καθεμία από τις διεπιφάνειες  $f_{4+6}$  όπου οι κόμβοι επαφής είναι τέσσερις ισχύει:

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^4 \frac{h_{c,j}}{12}$$

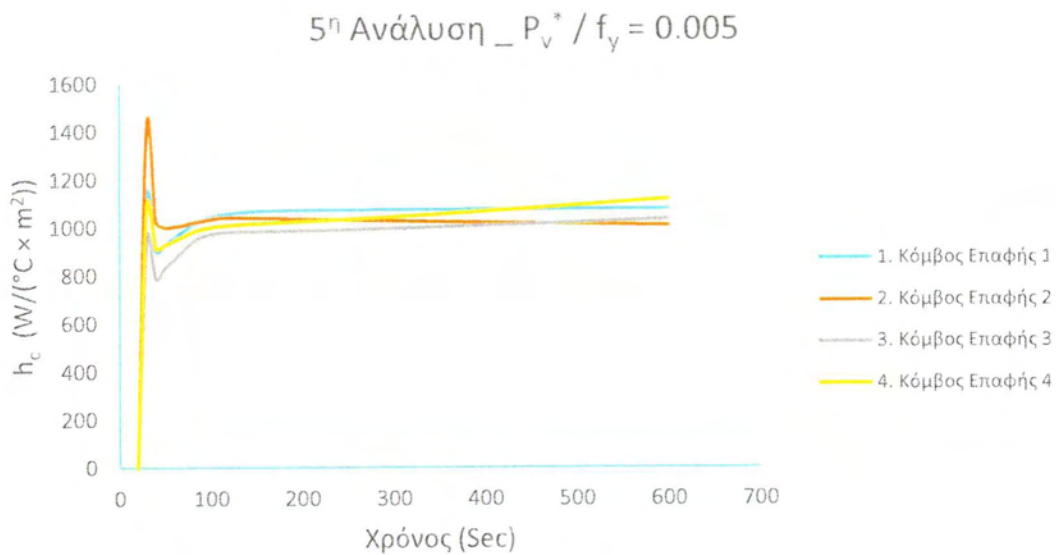
Τα αποτελέσματα της θερμικής αγωγιμότητας που λήφθηκαν από την μικροσκοπική μελέτη, που πραγματοποιήθηκε στους κόμβους επαφής όλων των αναλύσεων παρατίθενται στα Σχήματα 5.2.2 – 5.2.5.



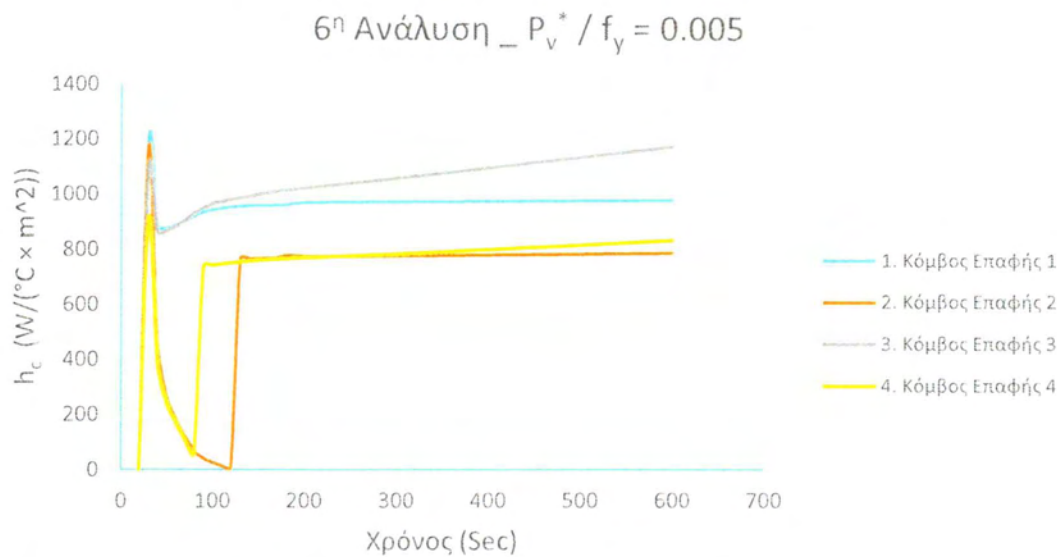
**Σχήμα 5.2.2:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.005$ .



Σχήμα 5.2.3: Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

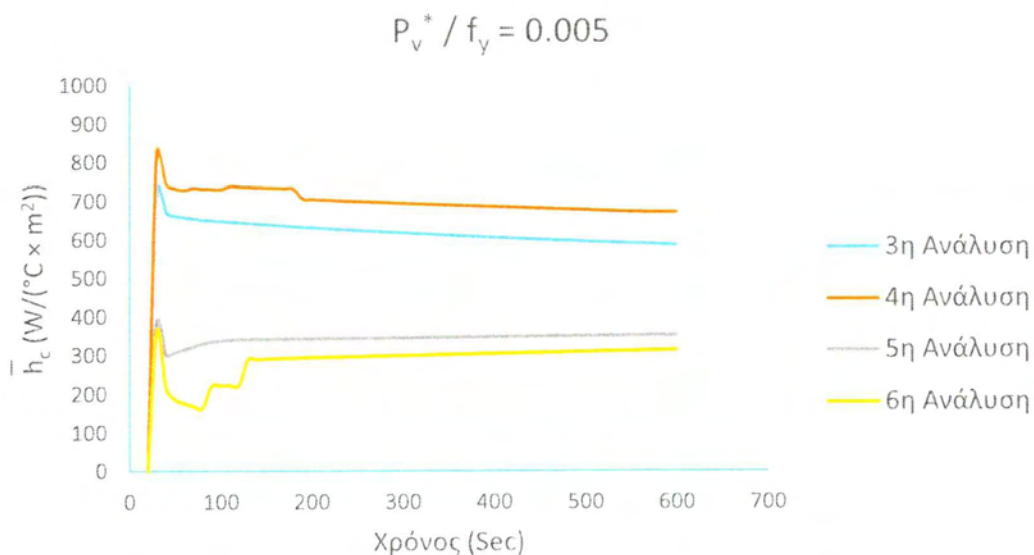


Σχήμα 5.2.4: Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.005$ .



**Σχήμα 5.2.5:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

Με βάση τις τιμές των παραπάνω διαγραμμάτων σχηματίστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 5.2.6 στο οποίο παρουσιάζεται η μέση τιμή της θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής συναρτήσει του χρόνου για όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας.



**Σχήμα 5.2.6:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^* / f_y = 0.005$ .



Στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.2.1 και 5.2.6 παρουσιάζεται ξεκάθαρα η επιρροή της τραχύτητας στο μέγεθος της θερμικής αγωγιμότητας στην περιοχή επαφής της διεπιφάνειας, όπου όσο μεγαλύτερη γίνεται η τραχύτητα τόσο μειώνονται οι τιμές  $\bar{h}_c$  για κατακόρυφες φορτίσεις:  $P_v^*/f_y \leq 0.005$ . Όπως παρατηρείται, οι διαφορές των τιμών είναι μικρές μεταξύ των αναλύσεων  $\delta_{3-4}$  και  $\delta_{5-6}$ . Ωστόσο, η αγωγιμότητα είναι σημαντικά μικρότερη στις δύο ανώτερες αναλύσεις σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές των διεπιφανειών  $f_{3-4}$ . Επίσης, σε κάθε ανάλυση παρατηρείται αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας με την αύξηση της τιμής της κατακόρυφης φόρτισης.

Στη συνέχεια εξετάζεται η θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής για την περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης  $P_v^*/f_y = 0.01$ . Το πλήθος των κόμβων επαφής που εμφανίστηκαν σε αυτή τη περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης είναι:

➤  $N = 4$ , για τις αναλύσεις  $\delta_3, \delta_4$

➤  $N = 5$ , για την ανάλυση  $\delta_5$

➤  $N = 6$ , για την ανάλυση  $\delta_6$

Έτσι, έχουμε:

➤ Για τις διεπιφάνειες  $f_{3-4}$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^4 \frac{h_{c,j}}{12}$$

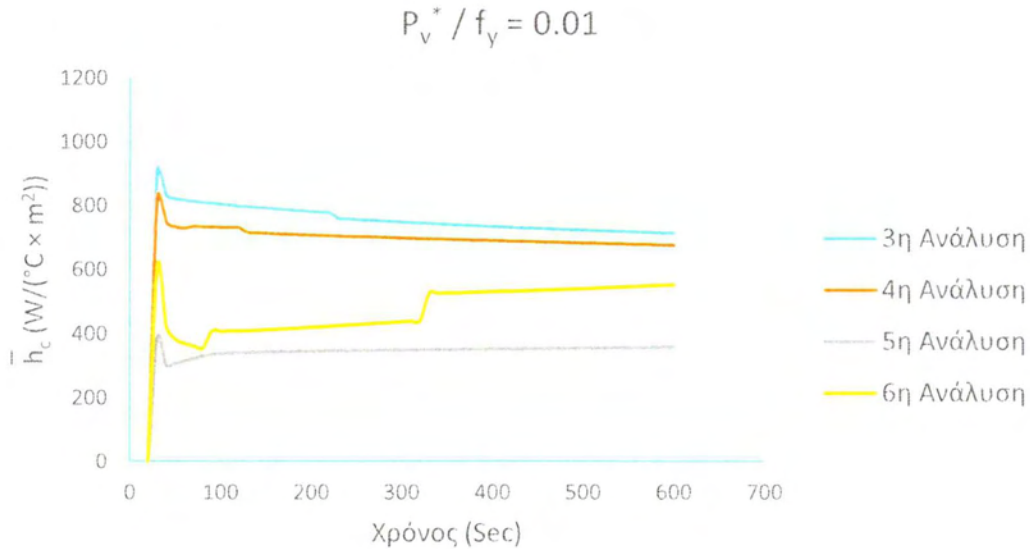
➤ Για τη διεπιφάνεια  $f_5$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^5 \frac{h_{c,j}}{12}$$

➤ Για την διεπιφάνεια  $f_6$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^6 \frac{h_{c,j}}{12}$$

Με βάση τις τιμές που υπολογίστηκαν με την παραπάνω διαδικασία, πραγματοποιήθηκε το διάγραμμα του Σχήματος 5.2.7.



**Σχήμα 5.2.7:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^* / f_y = 0.01$ .

Στα αποτελέσματα που καταγράφηκαν για αυτή την περίπτωση φόρτισης, παρουσιάζεται σημαντική αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που λήφθηκαν για μικρότερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου. Επίσης, μεταβάλλεται και η εικόνα όσον αφορά στη σύγκριση των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας των διαφόρων αναλύσεων. Συγκεκριμένα, στην έκτη ανάλυση που έχει αιχμές μικρότερης κλίμακας σε σχέση με τις υπόλοιπες, η αύξηση των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας είναι απότομη μετά την χρονική στιγμή  $t = 300\text{sec}$  επειδή η πλαστικοποιήσεις αυτών των αιχμών είναι εκτενέστερες με την αύξηση της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια. Αυτό έχει σαν συνέπεια την αύξηση της επιφάνειας επαφής και κατά συνέπεια την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας επαφής.

Με τον ίδιο τρόπο μελετήθηκε η θερμική αγωγιμότητα στις επιφάνειες επαφής της κατασκευής για την περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης  $P_v^* / f_y = 0.015$ . Παρακάτω παρατίθενται οι υπολογισμοί που προέκυψαν για κάθε ανάλυση της διεπιφάνειας.

➤ Στις αναλύσεις  $\delta_3, \delta_4$ , όπου  $N = 5$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^5 \frac{h_{c,j}}{12}$$

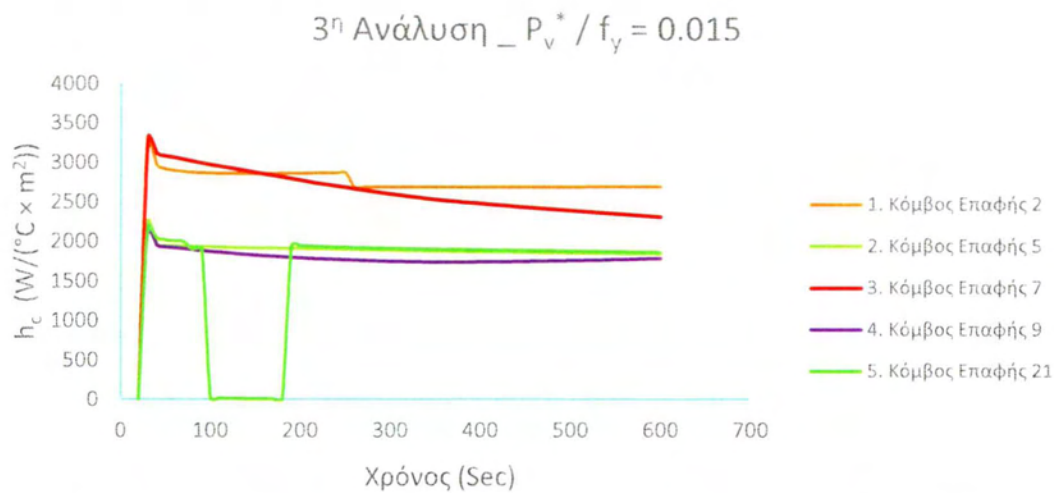
➤ Στην πέμπτη ανάλυση της διεπιφάνειας, όπου  $N = 7$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^7 \frac{h_{c,j}}{12}$$

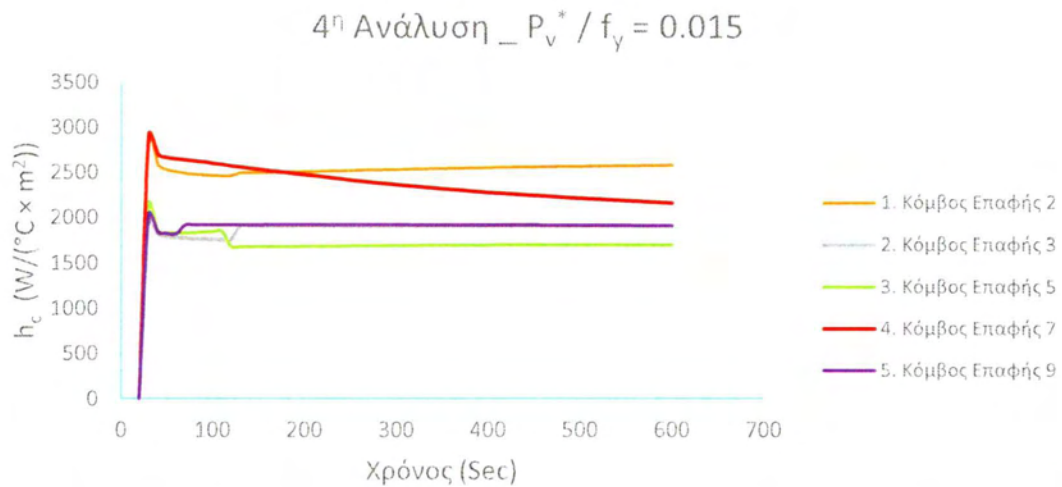
➤ Στην έκτη ανάλυση της διεπιφάνειας, όπου  $N = 9$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^9 \frac{h_{c,j}}{12}$$

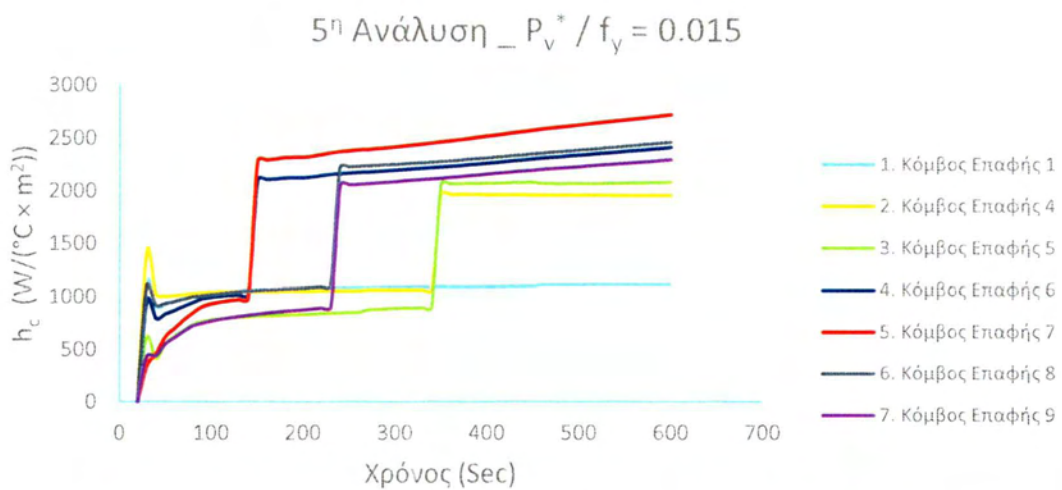
Στα Σχήματα 5.2.8 – 5.2.11 δίνονται τα διαγράμματα χρόνου – θερμικής αγωγιμότητας όλων των κόμβων επαφής κάθε διεπιφάνειας.



**Σχήμα 5.2.8:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

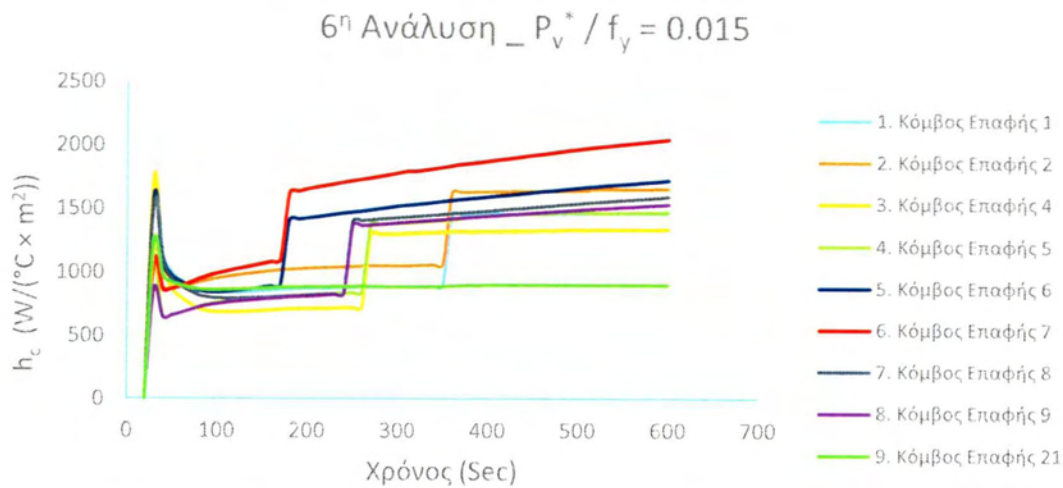


Σχήμα 5.2.9: Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.015$ .



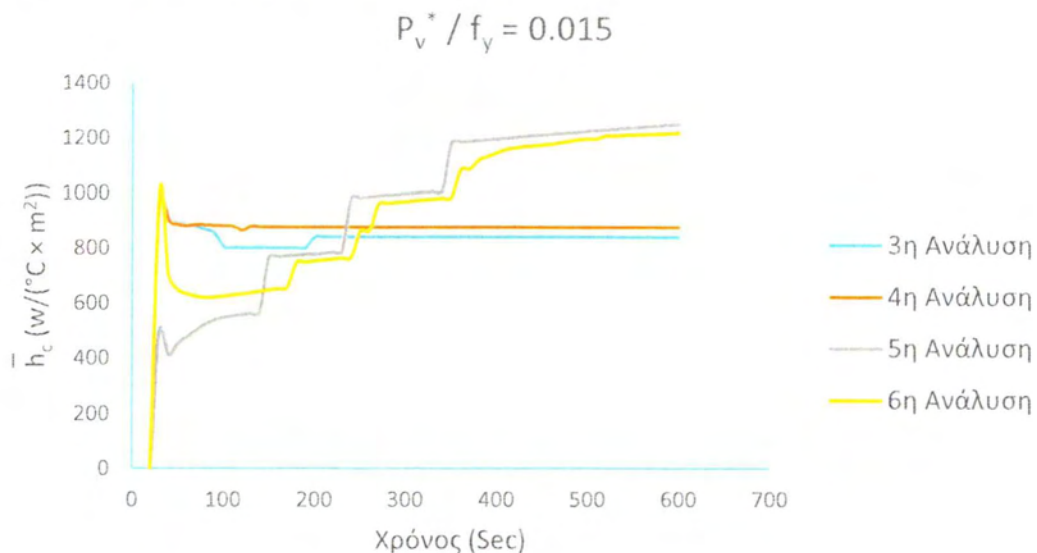
Σχήμα 5.2.10: Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.015$ .





**Σχήμα 5.2.11:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

Από τις τιμές που φαίνονται στα παραπάνω διαγράμματα, υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής για όλες τις αναλύσεις που μελετήθηκαν και παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2.12.



**Σχήμα 5.2.12:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

Οι διαφορές σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης που εξετάστηκαν είναι εμφανείς. Καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο οι πλαστικοποιήσεις που παρατηρούνται στις ανώτερες αναλύσεις, που λαμβάνουν υπόψη και αιχμές μικρότερης κλίμακας, οδηγούν σταδιακά σε επέκταση της επιφάνειας επαφής και συνεπώς σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής η οποία παρουσιάζεται

με την μορφή «αλμάτων». Στην περίπτωση αυτή αποτυπώνονται έντονα τόσο η επιρροή της κατακόρυφης φόρτισης όσο και η επιρροή της τραχύτητας.

Τελευταία εξετάστηκε η περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης  $P_V^*/f_y = 0.02$  όπου πραγματοποιήθηκαν οι εξής υπολογισμοί:

➤ Στην ανάλυση  $\delta_3$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^6 \frac{h_{c,j}}{12},$$

➤ Στην ανάλυση  $\delta_4$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^7 \frac{h_{c,j}}{12},$$

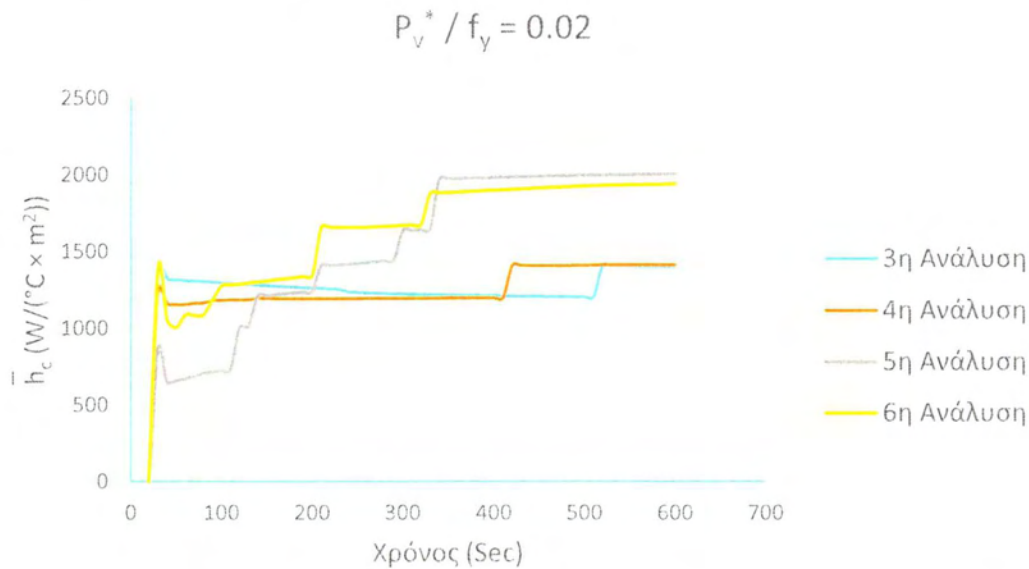
➤ Στην ανάλυση  $\delta_5$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^9 \frac{h_{c,j}}{12},$$

➤ Στην ανάλυση  $\delta_6$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^{11} \frac{h_{c,j}}{12}.$$

Από τις τιμές της μέσης θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής για κάθε χρονική στιγμή, υπολογίστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 5.2.13.

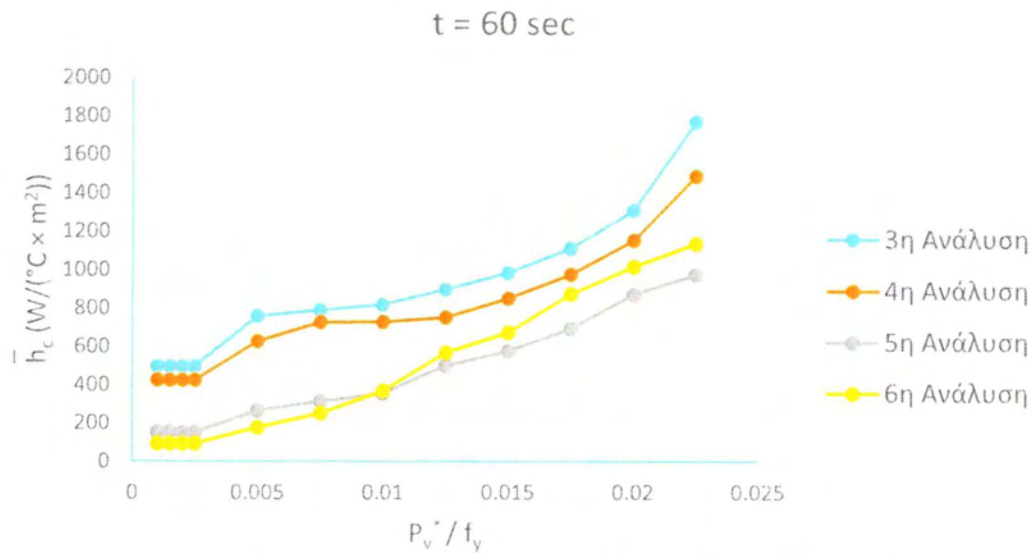


**Σχήμα 5.2.13:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^*/f_y = 0.02$ .

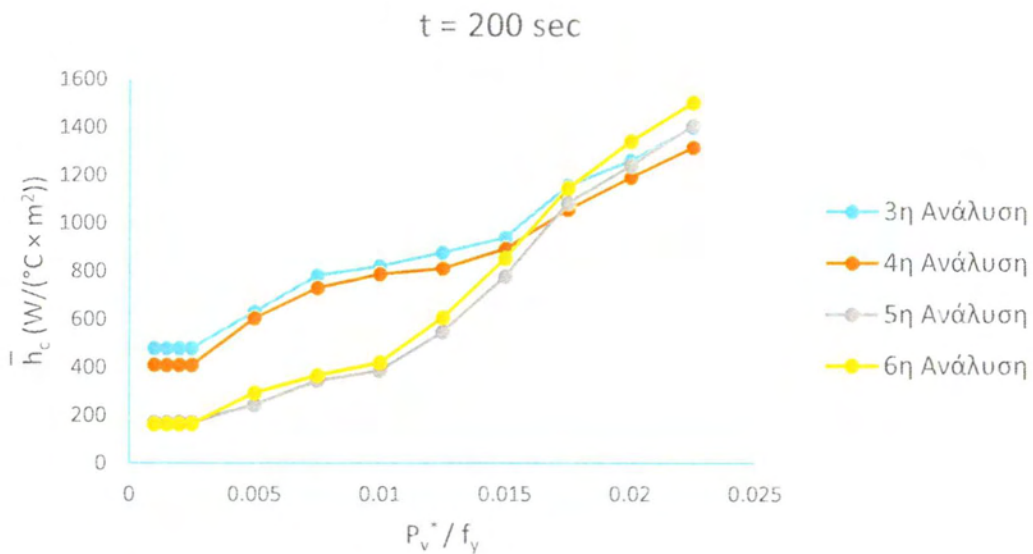
Και για αυτήν την περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης οι ανώτερες αναλύσεις παρουσιάζουν αυξημένη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τις κατώτερες λόγω των πλαστικοποιήσεων των αιχμών μικρότερης κλίμακας που εμφανίζονται στις ανώτερες αναλύσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την «κλιμακωτή» αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας επαφής η οποία γίνεται εντονότερη καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι για αυτή την περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης παρουσιάζεται άλμα στις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας και στη περίπτωση των αναλύσεων με αιχμές μεγαλύτερης κλίμακας. Το άλμα αυτό είναι πολύ μικρότερο από τα άλματα που παρουσιάζονται στα διαγράμματα  $\bar{h}_c, t$  των ανώτερων αναλύσεων και συμβαίνει πολύ αργότερα γεγονός που αποδεικνύει ότι για τη συγκεκριμένη κατακόρυφη φόρτιση και το συγκεκριμένο θερμικό φορτίο η πλαστικοποίηση των αιχμών μεγαλύτερης κλίμακας απαιτεί περισσότερο χρόνο.

### 5.3 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας της Διεπιφάνειας και Εικόνες Θερμικής Ροής για την Πρώτη Περίπτωση Θερμικής Φόρτισης

Στην παράγραφο αυτή μελετώνται τα διαγράμματα θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής – κατακόρυφης φόρτισης για όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας και για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές ( $t = 60, 200, 400, 600 \text{ sec}$ ), τα οποία δίνονται στα Σχήματα 5.3.1 – 5.3.4.

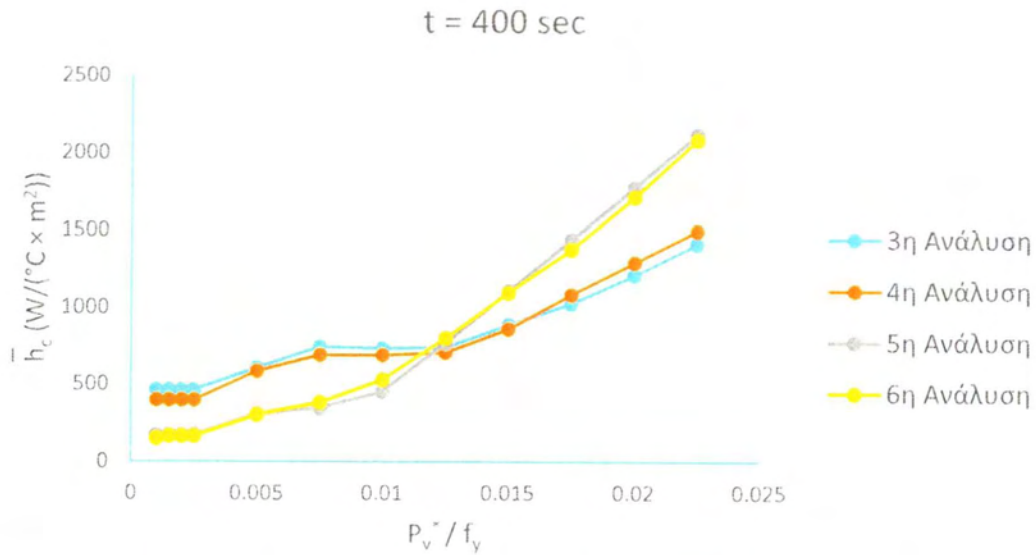


**Σχήμα 5.3.1:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή  $t = 60 \text{ sec}$ .

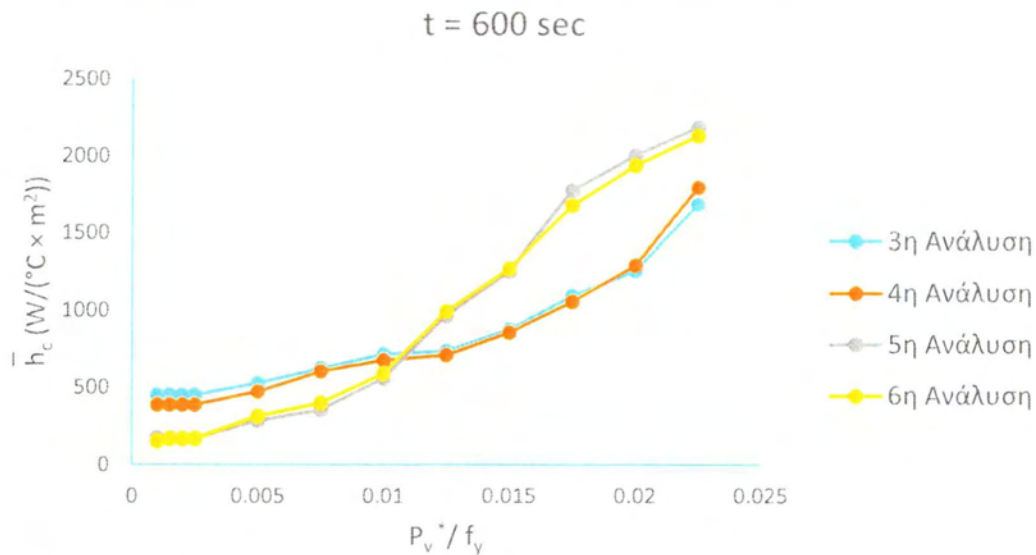


**Σχήμα 5.3.2:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή  $t = 200 \text{ sec}$ .





**Σχήμα 5.3.3:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή t = 400sec.



**Σχήμα 5.3.4:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή t = 600sec.

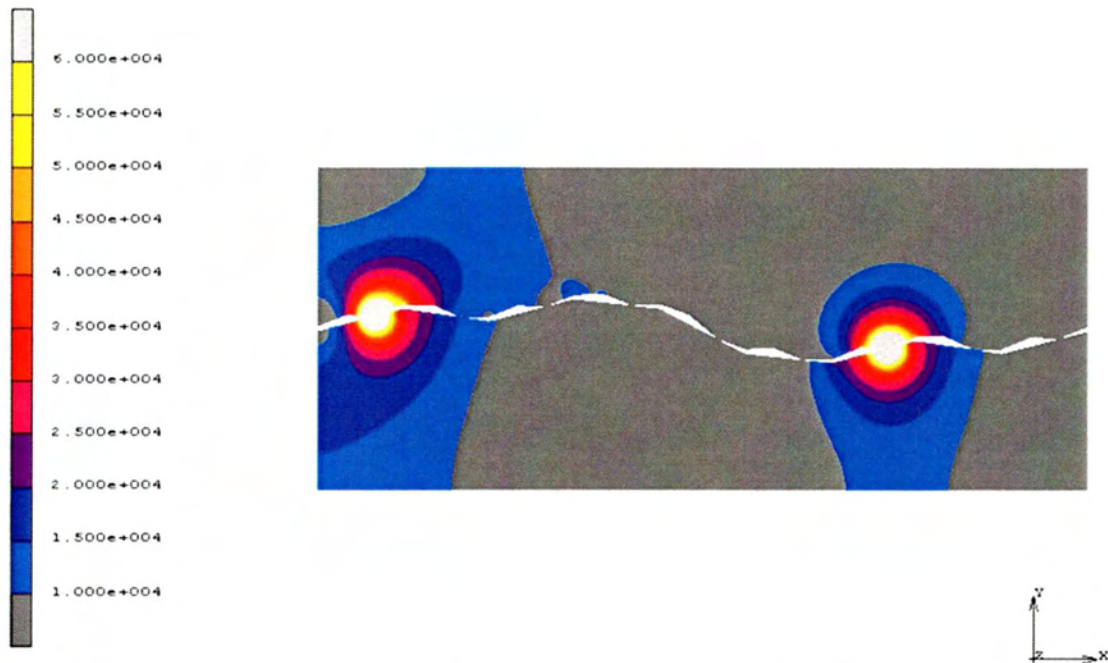
Από τα διαγράμματα γίνεται φανερό ότι η τρίτη και τέταρτη ανάλυση παρουσιάζουν ανάλογη συμπεριφορά διαφοροποιημένη από αυτή της πέμπτης και έκτης ανάλυσης. Αυτή η διαφοροποίηση παρατηρείται σε όλη τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου και αποτυπώνει την επιρροή της τραχύτητας στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής. Συγκεκριμένα, για μικρές τιμές της κατακόρυφης φόρτισης η θερμική αγωγιμότητα των κατώτερων αναλύσεων είναι μεγαλύτερη, διότι στα σημεία επαφής, εξασφαλίζεται μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής λόγω της μειωμένης τραχύτητας της διεπιφάνειας. Για μεγαλύτερες τιμές της κατακόρυφης φόρτισης οι διαφορές αυτές

αμβλύνονται από τις πρώτες χρονικές στιγμές λόγω της πλαστικοποίησης των αιχμών μικρότερης κλίμακας που υπάρχουν στις ανώτερες επαναλήψεις της διεπιφάνειας. Καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο ( $t = 200, 400, 600 \text{ sec}$ ), οι πλαστικοποιήσεις λόγω της συνδυασμένης καταπόνησης (μηχανικής και θερμικής) γίνονται πιο έντονες με αποτέλεσμα οι ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας να εμφανίζουν πολύ μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα για  $t = 400, 600 \text{ sec}$  και για  $P_V^*/f_y \geq 0.0125$ .

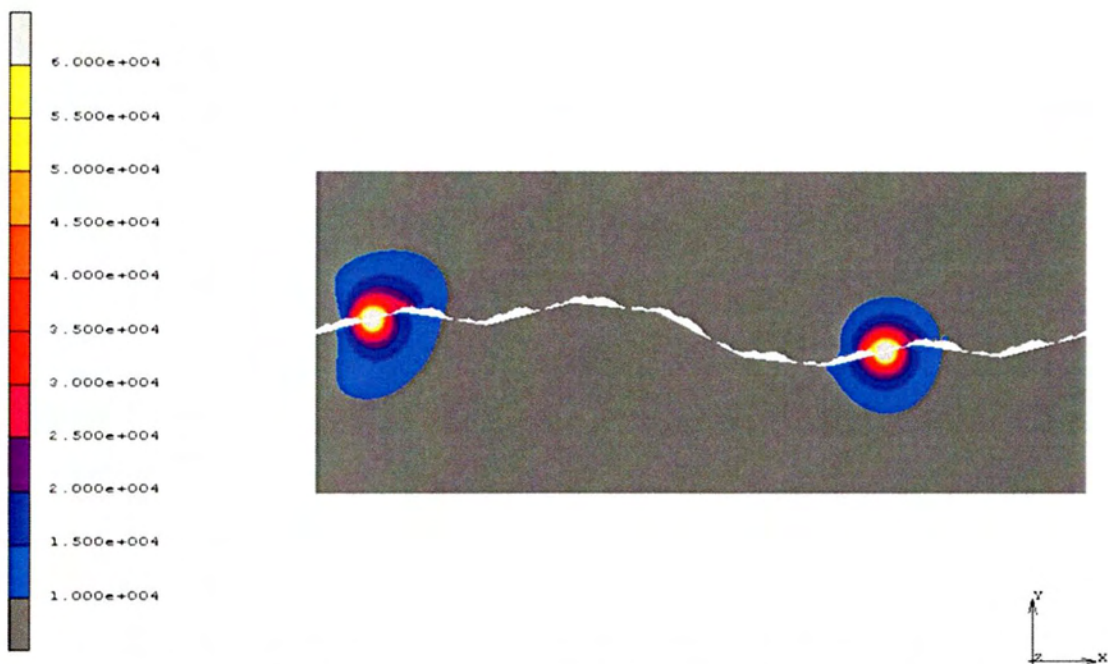
Συνοπτικά, τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τη μελέτη της κατασκευής με τη θερμική φόρτιση της πρώτης περίπτωσης είναι τα παρακάτω:

- Η αύξηση της κατακόρυφης φόρτισης, οδηγεί σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής. Η συμπεριφορά αυτή γίνεται αντιληπτή σε όλες τις αναλύσεις και είναι αναμενόμενη, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του κατακόρυφου φορτίου τόσο πιο έντονη είναι η επαφή των αιχμών της διεπιφάνειας οδηγώντας έτσι σε πλαστικές παραμορφώσεις, με αποτέλεσμα να επεκτείνεται περισσότερο η επιφάνεια επαφής
- Στις αρχικές χρονικές στιγμές επιβολής του θερμικού φορτίου οι διεπιφάνειες  $f_{3 \div 4}$  που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερης κλίμακας επιφανειακές ανωμαλίες, οι οποίες οδηγούν σε μεγαλύτερες επιφάνειες επαφής στα σημεία επαφής, δίνουν μεγαλύτερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας από τις ανώτερες αναλύσεις που οι μικρότερης κλίμακας επιφανειακές τους αποκλίσεις περιορίζουν σημαντικά την επιφάνεια επαφής στα σημεία επαφής
- Στις χαμηλές τιμές του κατακόρυφου φορτίου ( $P_V^*/f_y = 0.001 \div 0.01$ ) όπου δεν προκαλούνται εκτεταμένες πλαστικοποιήσεις στις διεπιφάνειες, οι ανώτερες αναλύσεις παρουσιάζουν μικρότερη θερμική αγωγιμότητα σε σχέση με τις κατώτερες αναλύσεις. Ωστόσο, καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο ο ρυθμός αύξησης της θερμικής αγωγιμότητας με το κατακόρυφο φορτίο αυξάνει σημαντικά στις ανώτερες αναλύσεις. Το γεγονός αυτό οφείλεται στις πλαστικοποιήσεις των διεπιφανειών που είναι πιο έντονες όταν το κατακόρυφο φορτίο παίρνει μεγάλες τιμές και ταυτόχρονα αυξάνεται η θερμοκρασία στη διεπιφάνεια
- Οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας αυξάνονται νωρίτερα και σε χαμηλότερες φορτίσεις στην έκτη ανάλυση σε σχέση με την πέμπτη. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη καθώς η διεπιφάνεια  $f_6$  παρουσιάζει μικρότερης κλίμακας επιφανειακές ανωμαλίες και κατά συνέπεια πλαστικοποιείται πιο εύκολα. Το φαινόμενο αυτό είναι έντονο στις περιπτώσεις όπου το κατακόρυφο φορτίο είναι μικρό και αμβλύνεται καθώς αυξάνονται οι τιμές του

Στη συνέχεια, για την βέλτιστη απεικόνιση της επιρροής της τραχύτητας και της κατακόρυφης φόρτισης στη θερμική αγωγιμότητα της διεπιφάνειας, παρατίθενται οι εικόνες που απεικονίζουν τη ροή θερμότητας στην τρίτη και έκτη ανάλυση της διεπιφάνειας. Στα Σχήματα 5.3.5 – 5.3.6 παρουσιάζονται οι εικόνες θερμικής ροής που αντιστοιχούν σε κατακόρυφη φόρτιση  $P_V^*/f_y = 0.001$ , την χρονική στιγμή  $t = 600 \text{ sec}$ .



Σχήμα 5.3.5: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.001$ , την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

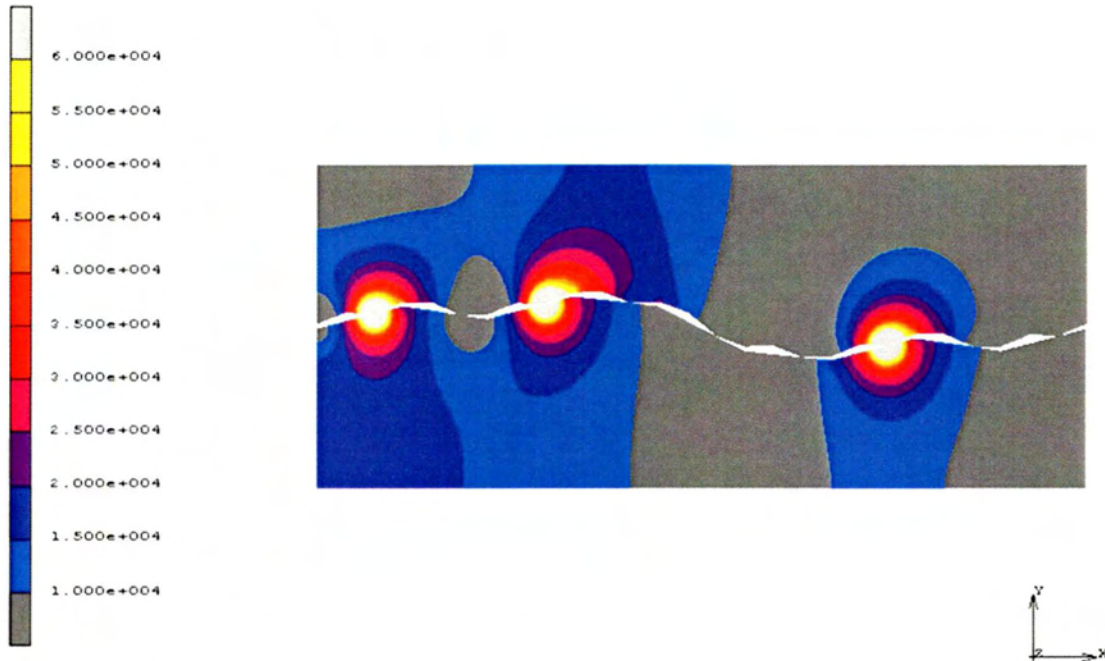


Σχήμα 5.3.6: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.001$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.



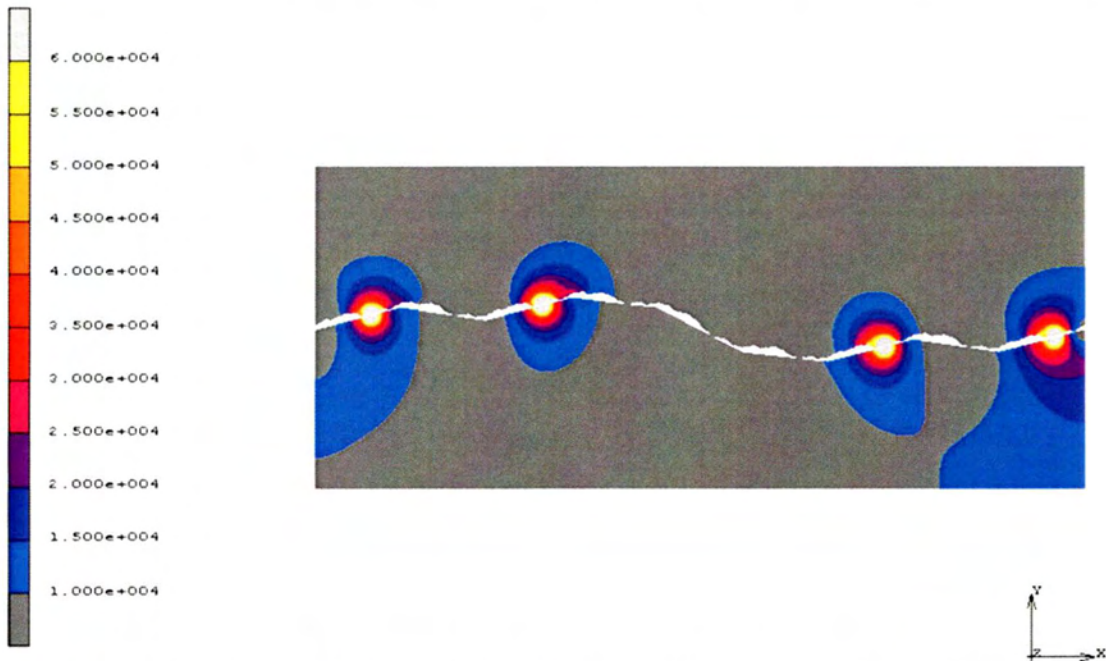
Στις δύο παραπάνω εικόνες παρουσιάζεται σημαντική διαφορά στις τιμές θερμικής ροής των δύο αναλύσεων. Συγκεκριμένα, όπως ήταν αναμενόμενο οι μεγαλύτερες τιμές θερμικής ροής εμφανίζονται στις επιφάνειες επαφής των δύο σωμάτων. Στην τρίτη ανάλυση όμως όπου η επιφάνεια επαφής των δύο δίσκων είναι μεγαλύτερη εμφανίζεται πιο έντονο το φαινόμενο της ροής θερμότητας, γεγονός που επαληθεύει τα όσα έχουμε συμπεράνει μέχρι τώρα.

Στα Σχήματα 5.3.7 – 5.3.8 δίνονται οι εικόνες θερμικής ροής για την περίπτωση κατακόρυφου φορτίου  $P_v^*/f_y = 0.005$ .



**Σχήμα 5.3.7:** Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.005$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

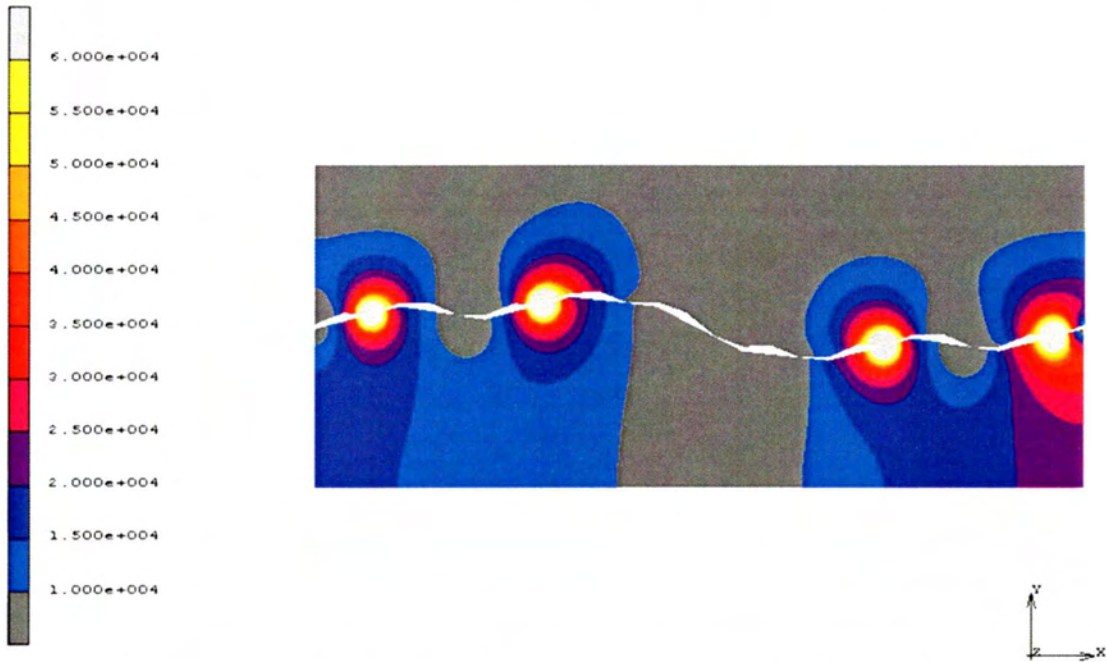




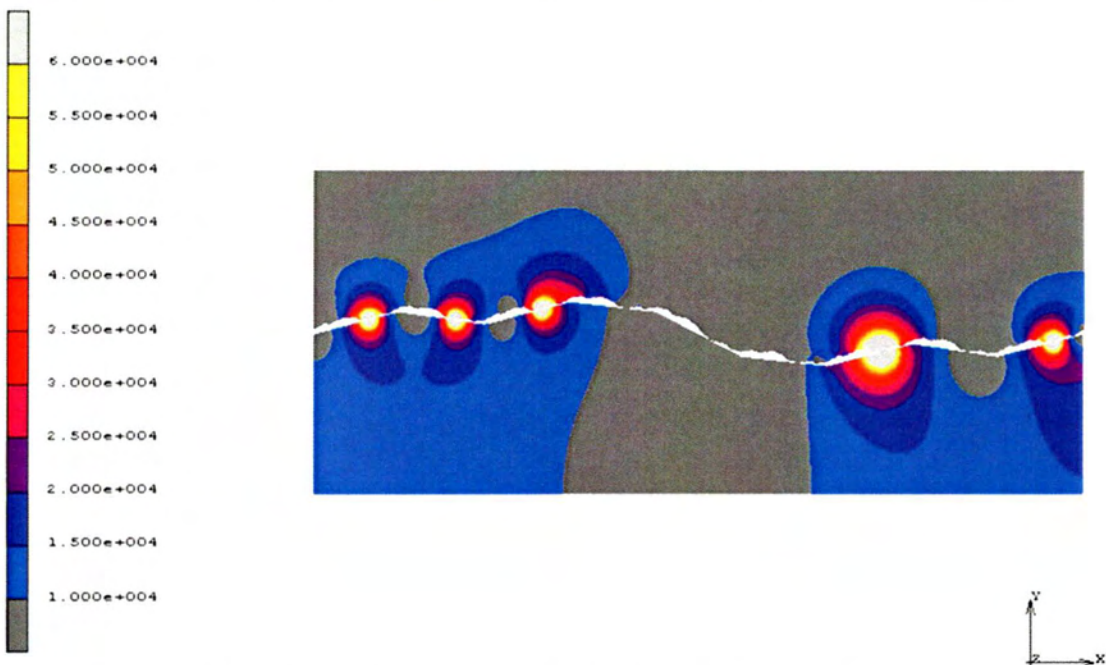
**Σχήμα 5.3.8:** Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.005$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

Με την αύξηση της φόρτισης παρατηρείται πως και στις δύο αναλύσεις είναι περισσότερα τα σημεία επαφής μέσω των οποίων μεταφέρεται θερμότητα. Επίσης, έχουν επεκταθεί τα τμήματα της κατασκευής στα οποία οι τιμές της ροής είναι μεγαλύτερες από  $10000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ . Συγκεκριμένα, στην έκτη ανάλυση προέκυψαν δύο επιπλέον σημεία επαφής στη διεπιφάνεια, ενώ στη τρίτη ένα, ωστόσο όπως και στην προηγούμενη περίπτωση φόρτισης κάθε θέση επαφής της τρίτης ανάλυσης αντιστοιχεί σε μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερες τιμές θερμικής ροής. Έτσι, παρόλο που οι θέσεις επαφής είναι περισσότερες στην έκτη ανάλυση, η θερμική ροή που παρουσιάζεται μέσω της διεπιφάνειας  $f_3$  είναι μεγαλύτερη.

Στα Σχήματα 5.3.9 – 5.3.10 δίνονται οι εικόνες θερμικής ροής για κατακόρυφη φόρτιση  $P_v^*/f_y = 0.01$ .



Σχήμα 5.3.9: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.01$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

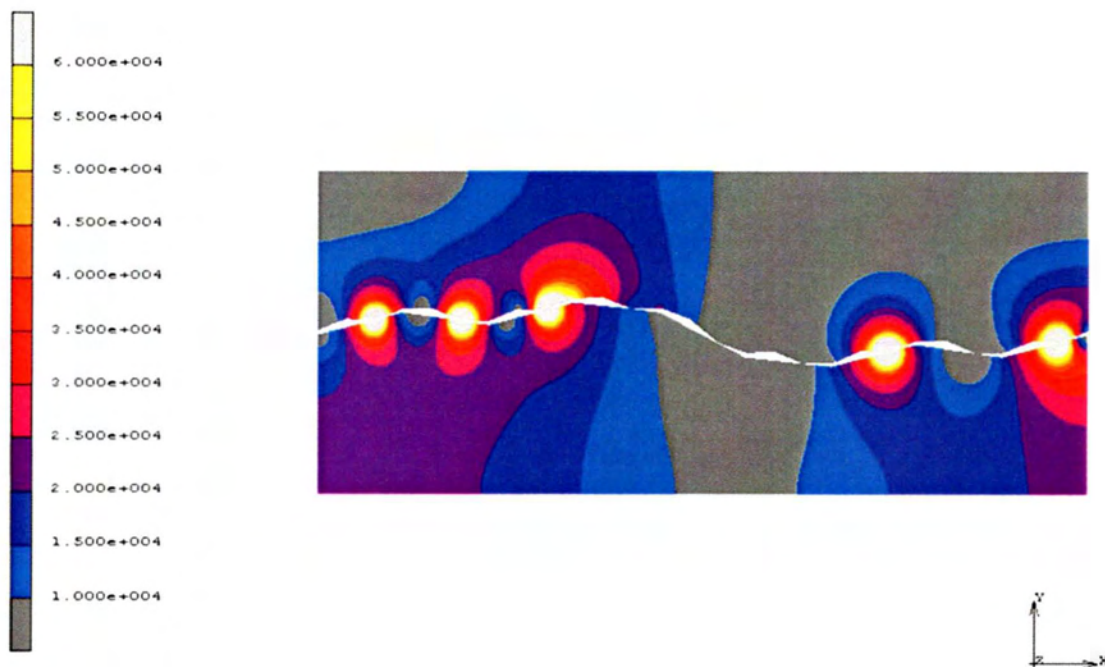


Σχήμα 5.3.10: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.01$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

Για τη συγκεκριμένη τιμή του κατακόρυφου φορτίου η τρίτη ανάλυση παρουσιάζει επαφή σε τέσσερις θέσεις, ενώ η έκτη σε πέντε. Στις περισσότερες θέσεις όμως η επιφάνεια επαφής της τρίτης ανάλυσης είναι μεγαλύτερη από αυτήν της έκτης. Η θερμική ροή και των δύο αναλύσεων είναι μεγαλύτερη συγκρινόμενη με την θερμική

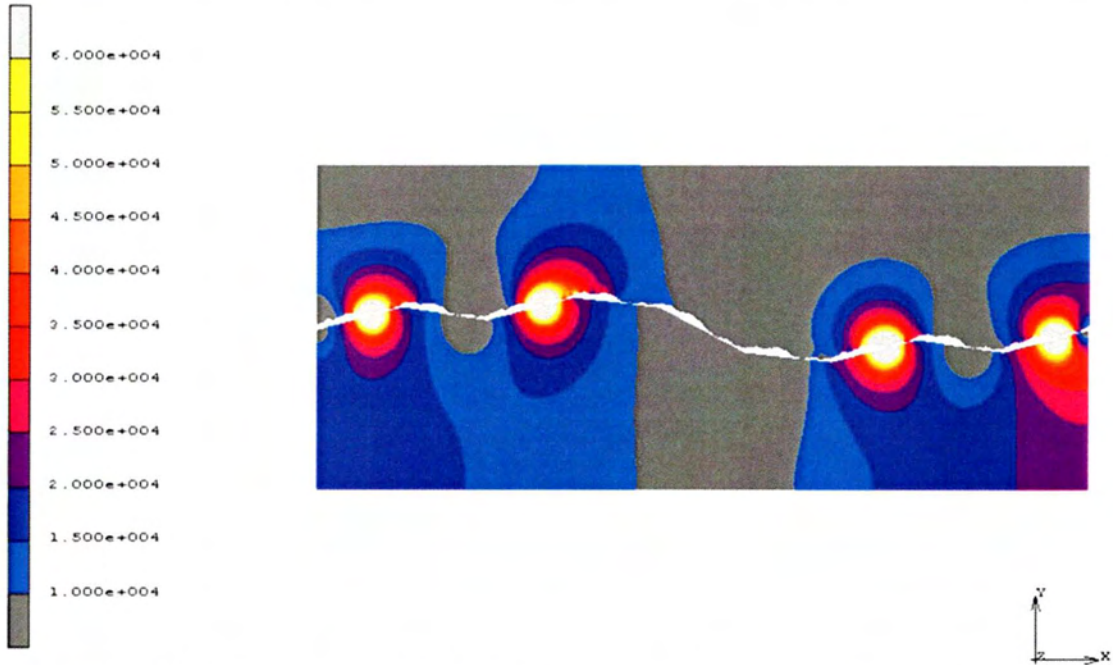
ροή που προκύπτει για μικρότερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου. Παράλληλα η θερμική ροή των δύο αναλύσεων για το συγκεκριμένο κατακόρυφο φορτίο είναι περίπου ίδια, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα του Σχήματος 5.3.4.

Στα Σχήματα 5.3.11 – 5.3.14 δίνονται οι εικόνες θερμικής ροής της τρίτης και έκτης ανάλυσης της διεπιφάνειας για τις δύο μεγαλύτερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου:  $P_V^*/f_y = 0.015$  και  $P_V^*/f_y = 0.02$ .

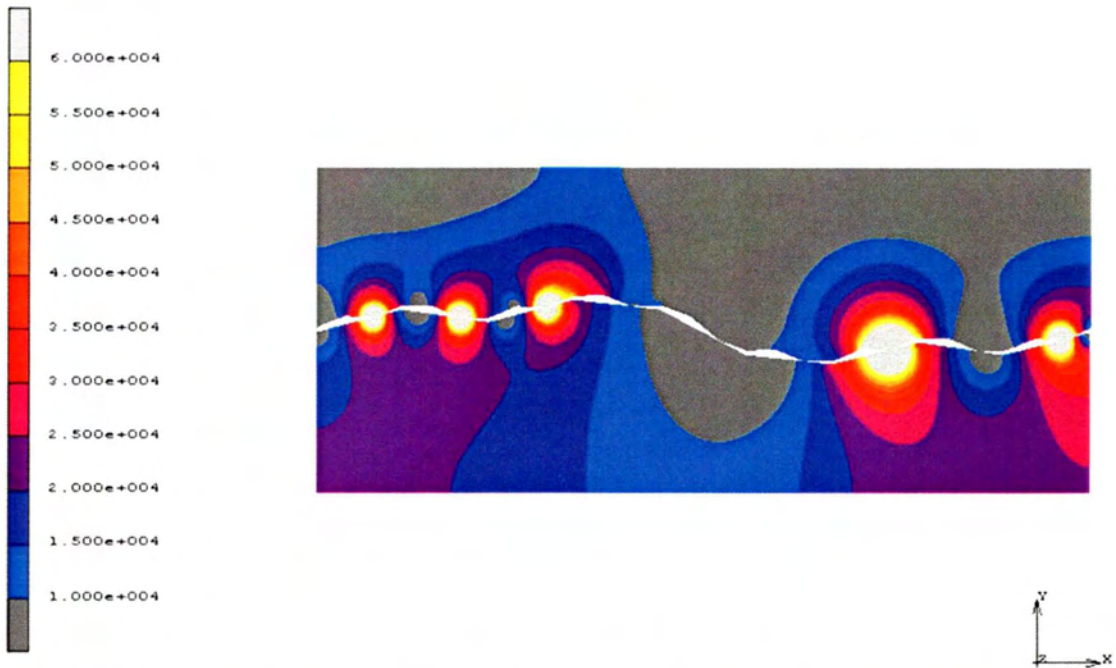


**Σχήμα 5.3.11:** Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.015$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.



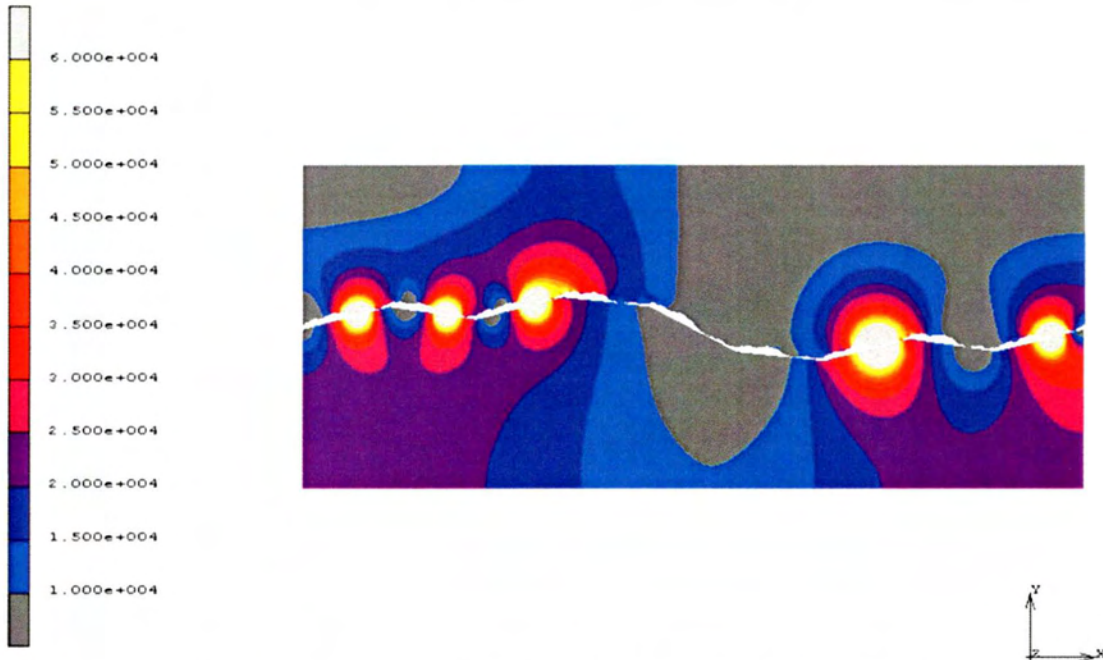


Σχήμα 5.3.12: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.015$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.



Σχήμα 5.3.13: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.02$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.





Σχήμα 5.3.14: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.02$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

Και στις δύο περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης η επιφάνεια επαφής της έκτης ανάλυσης είναι μεγαλύτερη λόγω της έντονης πλαστικοποίησης των αιχμών, με αποτέλεσμα η θερμική ροή που παρατηρείται στην έκτη ανάλυση να είναι μεγαλύτερη από τη θερμική ροή της τρίτης ανάλυσης. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα του Σχήματος 5.3.4.

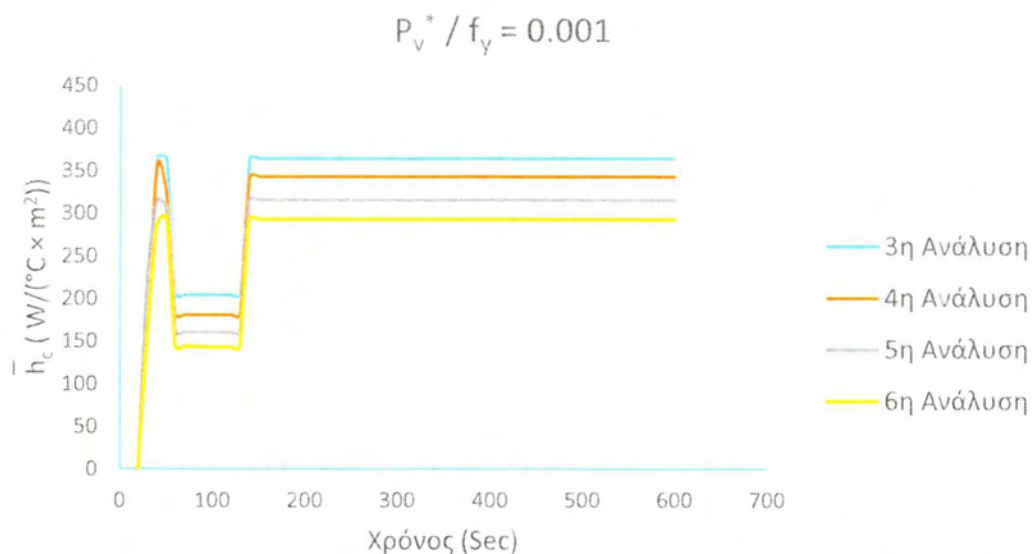
#### 5.4 Μελέτη της Θερμικής Αγωγιμότητας στη Διεπιφάνεια για την Δεύτερη Περίπτωση Επιβολής του Θερμικού Φορτίου

Στην ενότητα αυτή θα μελετηθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων υπό την δεύτερη περίπτωση θερμικής φόρτισης όπου το θερμικό φορτίο έχει επιβληθεί στο άνω όριο της κατασκευής. Οι πέντε περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης των οποίων τα αποτελέσματα θα συμπεριληφθούν, είναι οι ίδιες όπως και στη προηγούμενη περίπτωση θερμικής φόρτισης που μελετήθηκε. Δηλαδή, θα παρατεθούν τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τα εξής κατακόρυφα φορτία:  $P_v^*/f_y = 0.001, 0.005, 0.01, 0.015, 0.02$ . Αρχικά, θα εξεταστούν οι αναλύσεις στις οποίες εφαρμόστηκε η ελάχιστη τιμή κατακόρυφου φορτίου:  $P_v^*/f_y = 0.001$ . Το πλήθος κόμβων επαφής που εμφανίστηκαν σε κάθε ανάλυση φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 5.1.2, για κάθε έναν από αυτούς τους κόμβους ακολουθήθηκε η διαδικασία υπολογισμού που προαναφέρθηκε στη Παράγραφο 5.1 και με την εφαρμογή της

Σχέσης 5.1.4 υπολογίστηκαν οι τιμές της μέσης θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής κάθε ανάλυσης. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 5.1.2 σε κάθε ανάλυση της υπό εξέταση περίπτωσης φόρτισης υπάρχει ένας κόμβος επαφής. Έτσι, ο υπολογισμός που πραγματοποιήθηκε σε καθεμιά από τις διεπιφάνειες  $f_{3-6}$  είναι ο εξής:

$$\bar{h}_c = \frac{h_{c,1}}{13}$$

Με βάση τις τιμές που προέκυψαν με την παραπάνω διαδικασία σχηματίστηκε το διάγραμμα της μέσης τιμής της θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής του Σχήματος 5.4.1.



**Σχήμα 5.4.1:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^*/f_y = 0.001$ .

Η ίδια διαδικασία εφαρμόστηκε σε κάθε κόμβο επαφής όλων των αναλύσεων υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου:  $P_v^*/f_y = 0.005$ . Με βάση τη Σχέση 5.1.4 πραγματοποιήθηκαν οι υπολογισμοί των μεγεθών  $\bar{h}_c$  των αναλύσεων, όπως φαίνεται παρακάτω.

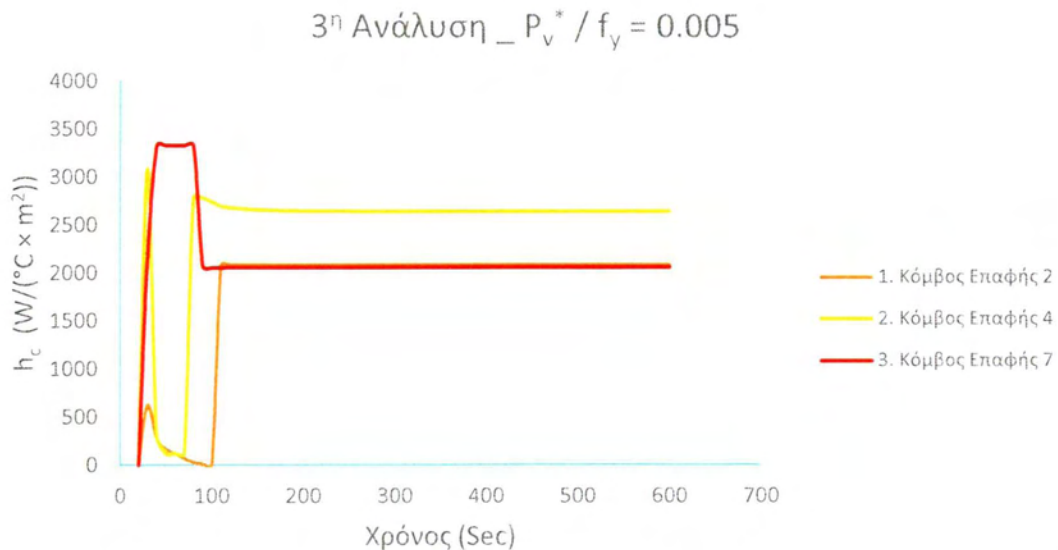
➤ Στις διεπιφάνειες  $f_{3-5}$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^3 \frac{h_{c,j}}{13}$$

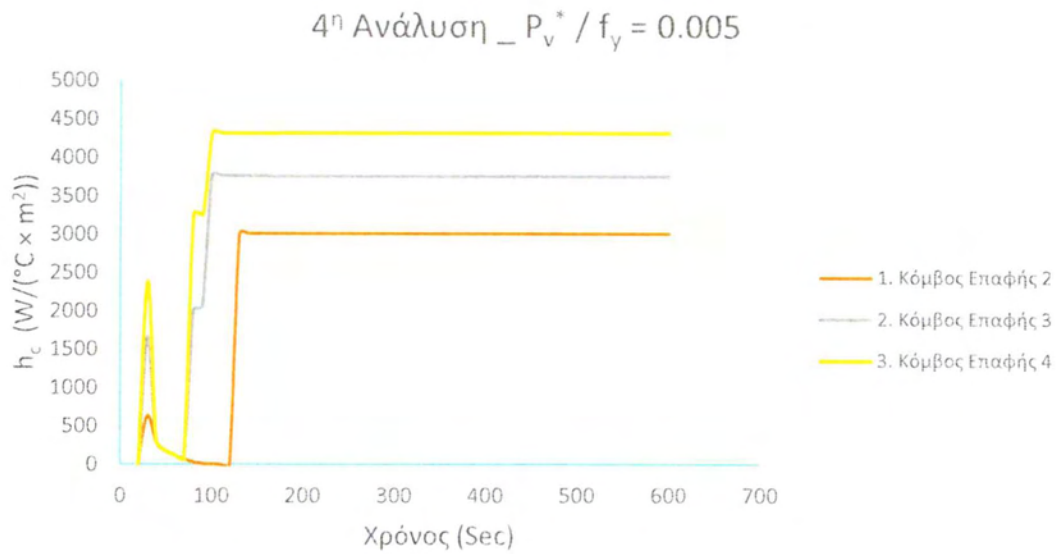
➤ Στη επιφάνειά  $f_6$ :

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^6 \frac{h_{c,j}}{13}$$

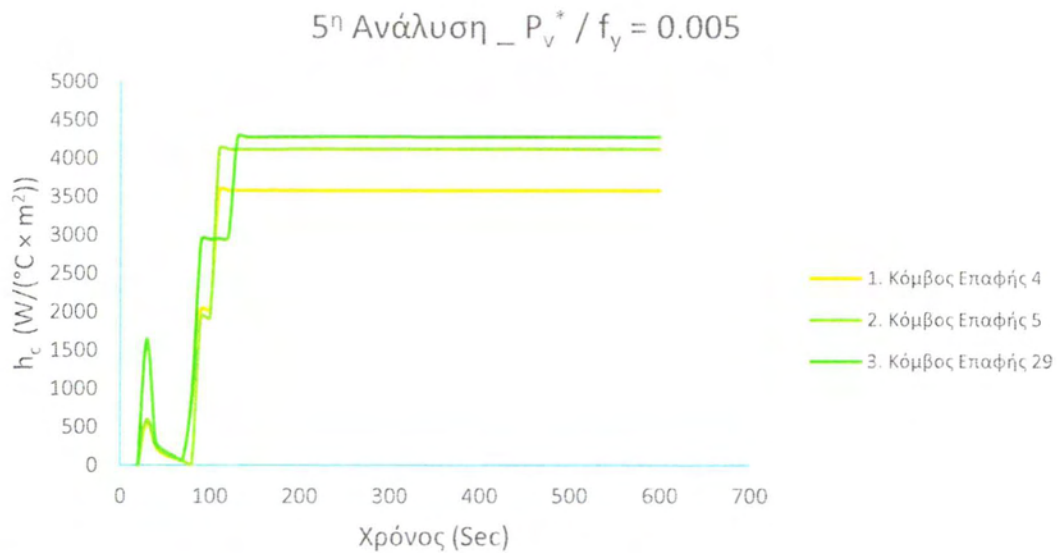
Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση θερμικής φόρτισης που εξετάστηκε, σε αυτό το σημείο θα παρατεθούν τα διαγράμματα της θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει του χρόνου για κάθε κόμβο επαφής και για όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας με εφαρμοσμένο κατακόρυφο φορτίο:  $P_v^*/f_y = 0.005$ . Στα Σχήματα 5.4.2 – 5.4.3 παρατίθενται αυτά τα διαγράμματα με την αρίθμηση των κόμβων επαφής που αφορά σε όλες τις αναλύσεις.



**Σχήμα 5.4.2:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.005$ .

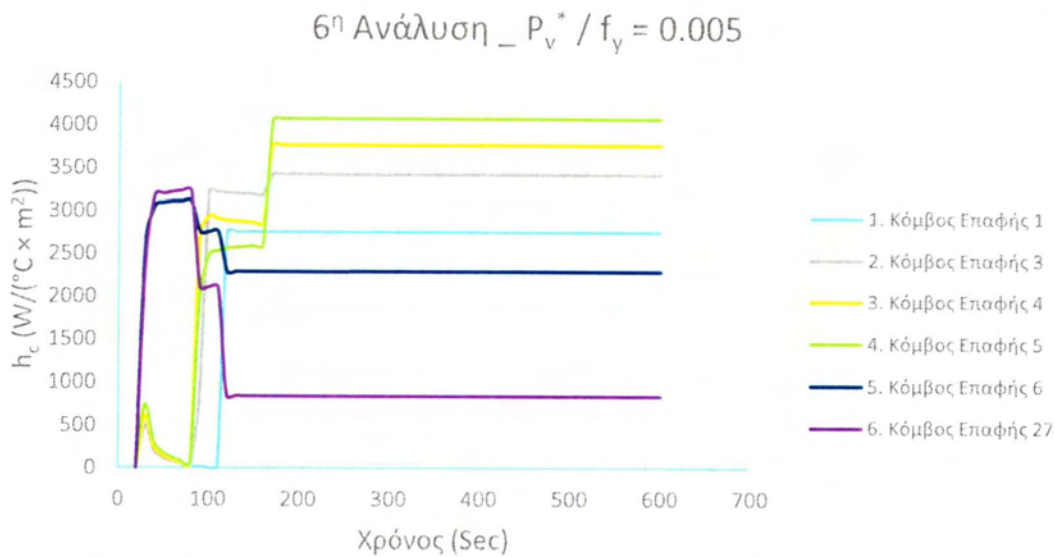


**Σχήμα 5.4.3:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.005$ .



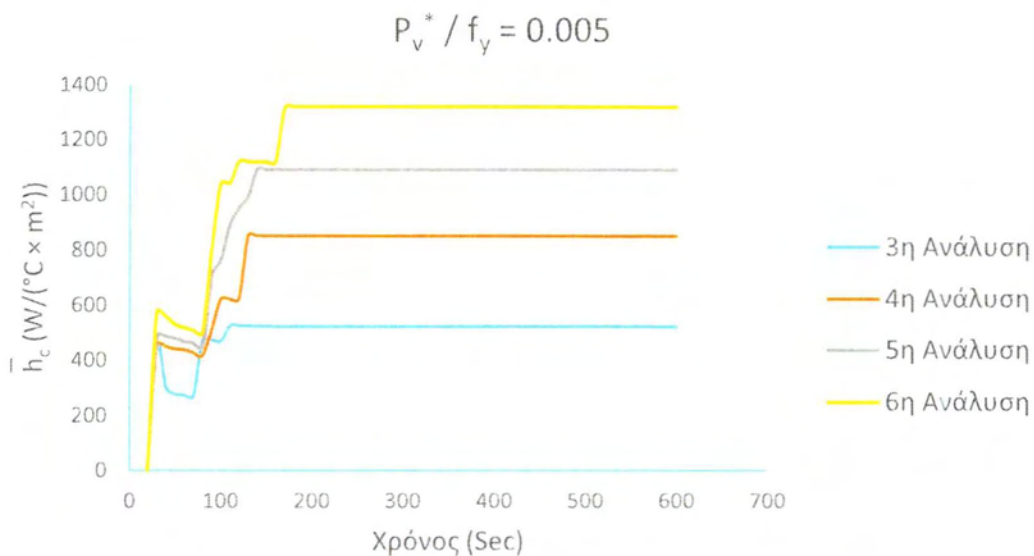
**Σχήμα 5.4.4:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.005$ .





**Σχήμα 5.4.5:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

Στη συνέχεια, με τα αποτελέσματα  $\bar{h}_c$  που υπολογίστηκαν μακροσκοπικά με βάση τις παραπάνω τιμές που λήφθηκαν από την μικροσκοπική μελέτη στους κόμβους επαφής και τους τύπους υπολογισμού που προαναφέρθηκαν, πραγματοποιήθηκε το διάγραμμα του Σχήματος 5.4.6.



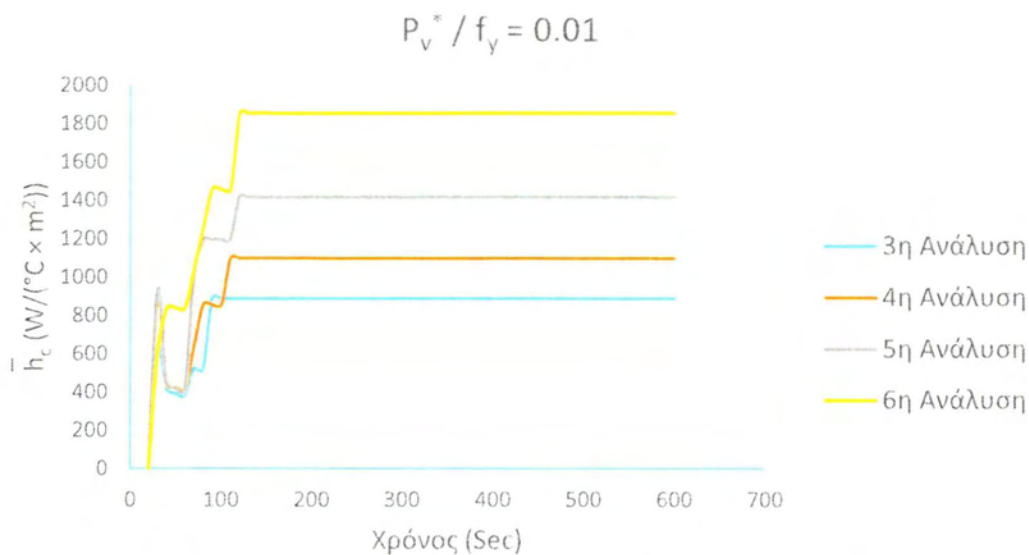
**Σχήμα 5.4.6:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^* / f_y = 0.005$ .

Στο διάγραμμα της φόρτισης  $P_v^*/f_y = 0.001$  είναι σαφής η επιρροή της τραχύτητας στη θερμική αγωγιμότητα επαφής, καθώς όσο ανώτερη είναι η ανάλυση, δηλαδή όσο εντονότερη είναι η τραχύτητα της διεπιφάνειας, τόσο μειώνονται οι τιμές της μέσης θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής. Ωστόσο, για την περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης  $P_v^*/f_y = 0.005$  η εικόνα της σύγκρισης αντιστρέφεται, αφού όσο ανώτερη γίνεται η ανάλυση της διεπιφάνειας τόσο αυξάνονται τα μεγέθη της θερμικής αγωγιμότητας. Πρέπει να σημειωθεί πως η αλλαγή στην εικόνα της σύγκρισης των αποτελεσμάτων των διεπιφανειών συντελείται στη παρούσα περίπτωση θερμικής φόρτισης για πολύ μικρότερη τιμή του κατακόρυφου φορτίου. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογείται από την επιβολή του θερμικού φορτίου στο άνω τμήμα της κατασκευής λόγω της οποίας οι πλαστικοποιήσεις των αιχμών μικρότερης κλίμακας είναι έντονες, επειδή η θερμοκρασία στην άνω διεπιφάνεια, που παρουσιάζει την τραχύτητα, αυξάνει σημαντικά. Τέλος, σε όλες τις αναλύσεις καταγράφηκε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας επαφής με την αύξηση της κατακόρυφης φόρτισης.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα, που λήφθηκαν από τις αναλύσεις για εφαρμοσμένο κατακόρυφο φορτίο:  $P_v^*/f_y = 0.01$ . Το πλήθος των κόμβων επαφής στις αναλύσεις  $\delta_3$  και  $\delta_4$  όπως φαίνεται και στο διάγραμμα του Σχήματος 5.1.2 είναι  $N = 4$ . Ενώ, για τις αναλύσεις  $\delta_5$  και  $\delta_6$  το πλήθος των κόμβων είναι αντίστοιχα  $N = 5$  και  $N = 6$ . Έτσι, με βάση τη Σχέση 5.1.4 πραγματοποιήθηκε σε κάθε ανάλυση ο υπολογισμός:

$$\bar{h}_c = \sum_{j=1}^N \frac{h_{c,j}}{13}$$

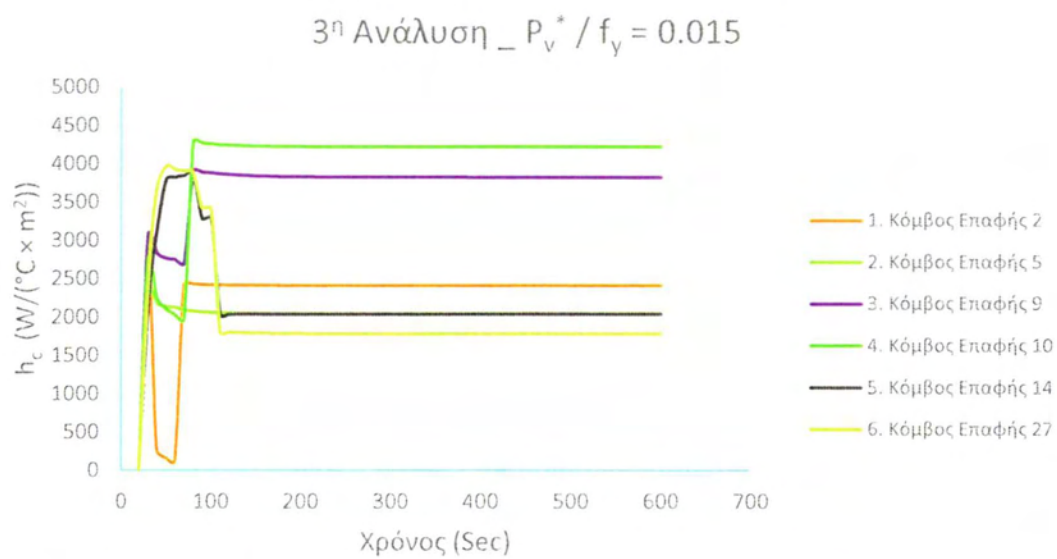
Με βάση τις τιμές που υπολογίστηκαν με τους παραπάνω υπολογισμούς, πραγματοποιήθηκε το διάγραμμα του Σχήματος 5.4.7.



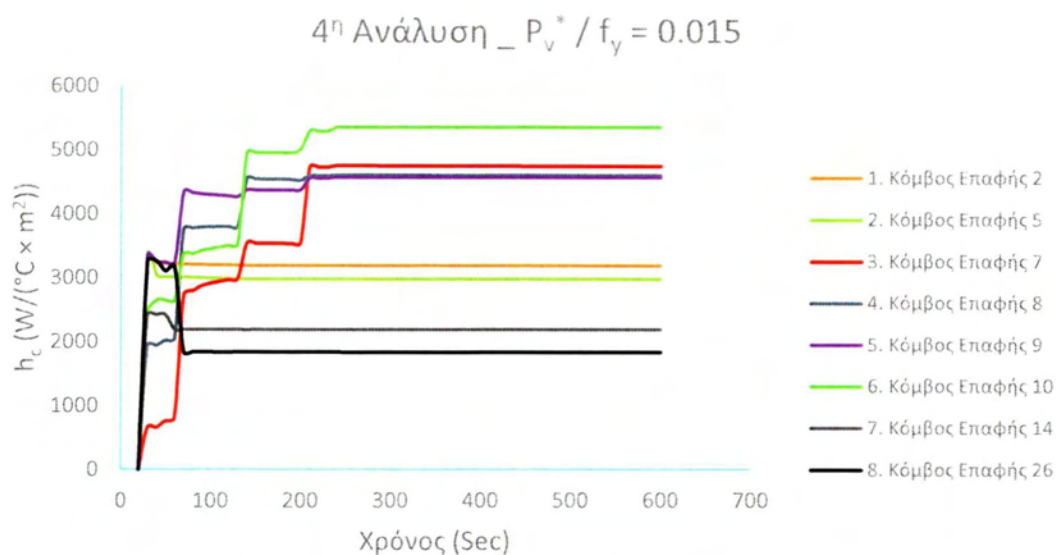
**Σχήμα 5.4.7:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^*/f_y = 0.01$ .

Η εικόνα όσον αφορά την σύγκριση των τιμών των αναλύσεων σε αυτή τη περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης παραμένει η ίδια με εκείνη της φόρτισης:  $P_v^*/f_y = 0.005$ . Συγκεκριμένα όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα της διεπιφάνειας τόσο αυξάνονται τα μεγέθη της μέσης θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη με βάση της παρατηρήσεις που έγιναν για τις μικρότερες φορτίσεις, δεδομένου ότι το κατακόρυφο φορτίο έχει αυξηθεί. Επιπρόσθετα, καταγράφεται αύξηση των τιμών  $\bar{h}_c$  σε όλες τις αναλύσεις σε σύγκριση με την προηγούμενη φόρτιση.

Με βάση την ίδια διαδικασία, μελετήθηκαν οι αναλύσεις υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου:  $P_v^*/f_y = 0.015$ . Στην περίπτωση αυτή προέκυψαν  $N = 6$  κόμβοι επαφής στην τρίτη ανάλυση, ενώ σε καθεμιά από τις αναλύσεις  $\delta_4$  και  $\delta_5$  οι κόμβοι επαφής είναι  $N = 8$ . Αντίστοιχα, στην ανώτερη ανάλυση της διεπιφάνειας  $f_6$  υπάρχουν  $N = 11$  κόμβοι επαφής. Μέσω της μικροσκοπικής μελέτης, σε κάθε έναν από αυτούς τους κόμβους λήφθηκαν τα μεγέθη της θερμικής αγωγιμότητας  $h_{c,i}$ , για τις χρονικές στιγμές  $t = 20 \text{ sec}, 40 \text{ sec}, \dots, 600 \text{ sec}$  και με βάση τις τιμές αυτές πραγματοποιήθηκαν τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.4.8 – 5.4.11.

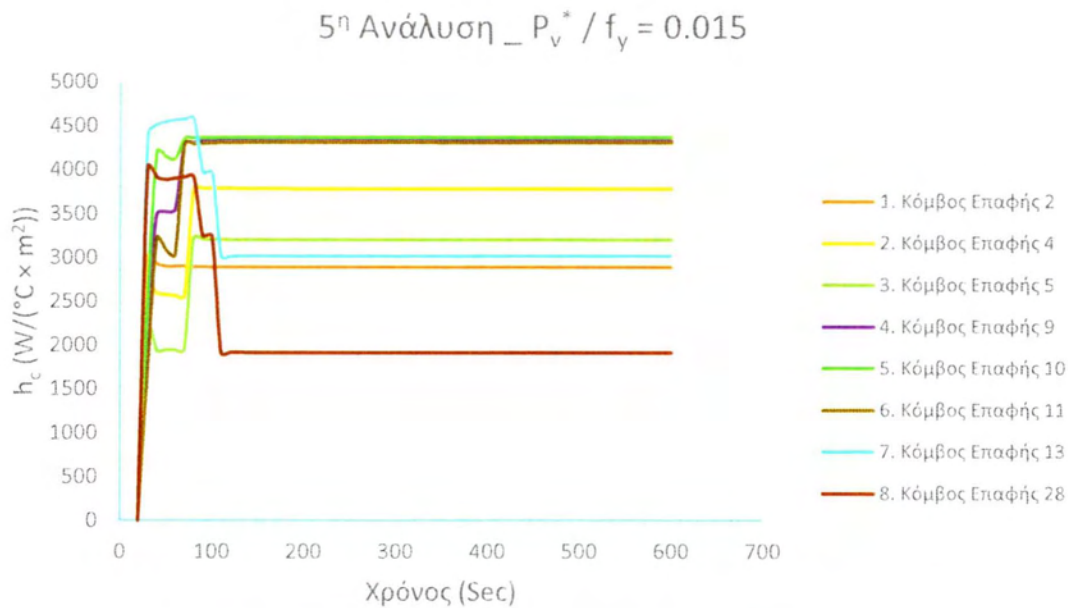


**Σχήμα 5.4.8:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

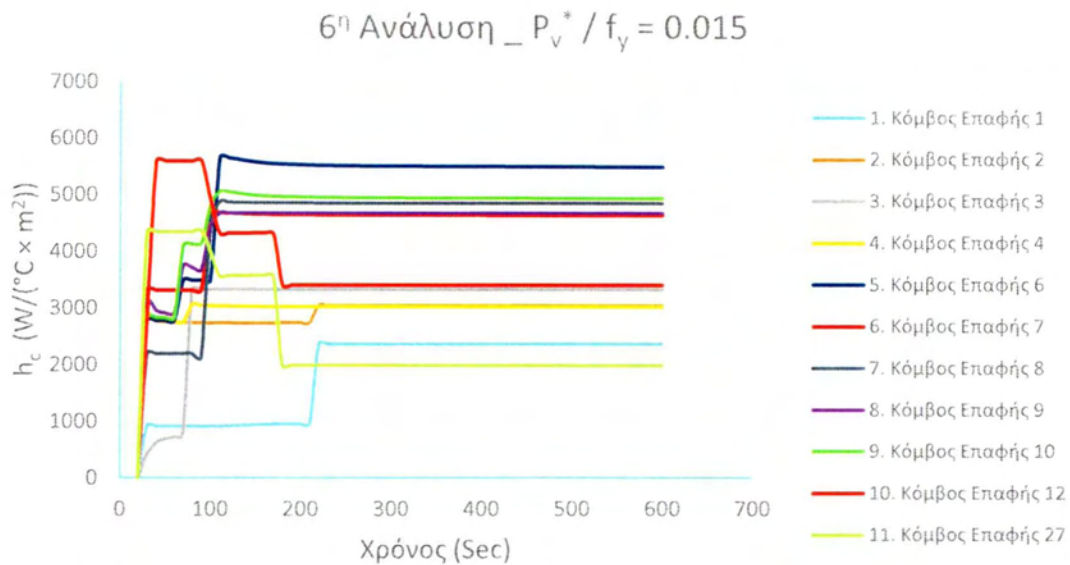


**Σχήμα 5.4.9:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.015$ .



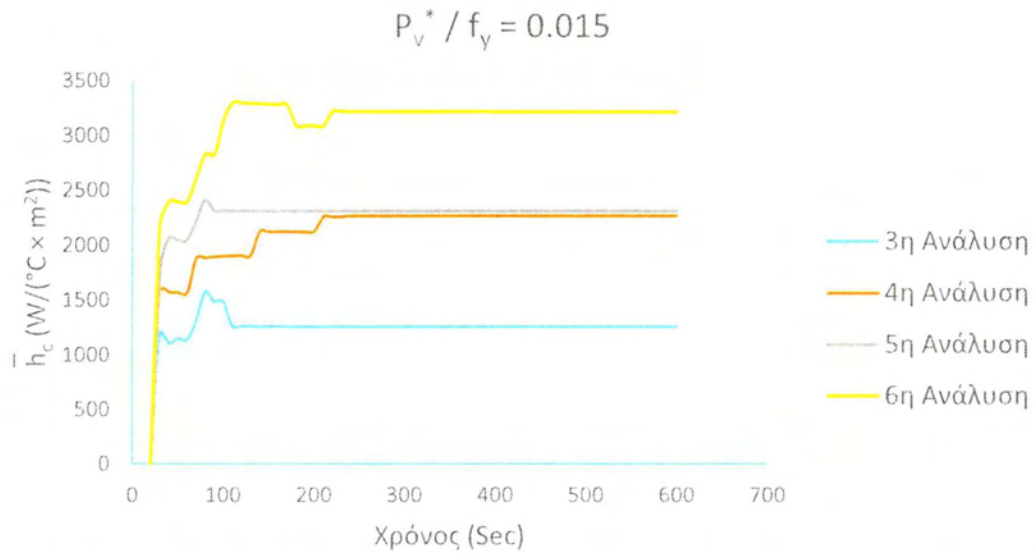


**Σχήμα 5.4.10:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.015$ .



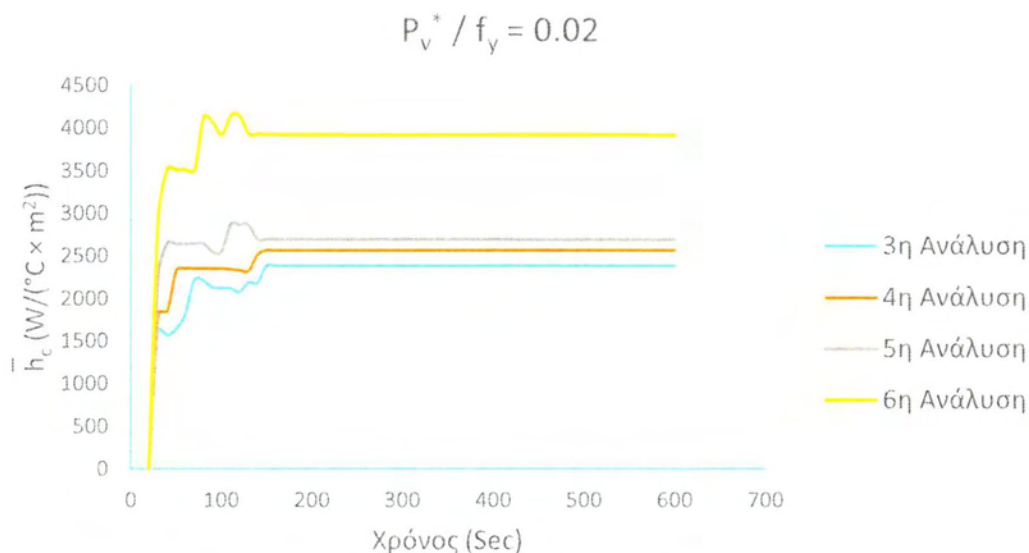
**Σχήμα 5.4.11:** Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης για φορτίο  $P_v^* / f_y = 0.015$ .

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε για τις ίδιες χρονικές στιγμές ο υπολογισμός της μέσης θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής κάθε ανάλυσης, με την εφαρμογή της Σχέσης 5.1.4 και από τα μεγέθη αυτά σχηματίστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 5.4.12.



**Σχήμα 5.4.12:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^*/f_y = 0.015$ .

Στην υψηλότερη από τις φορτίσεις που επιβλήθηκαν που θα συμπεριληφθεί, μέτρου  $P_v = 0.02f_y t_{π}$ , προέκυψαν  $N = 9$  κόμβοι επαφής στις δύο αρχικές αναλύσεις, ενώ στη διεπιφάνεια  $f_5$  εμφανίστηκαν  $N = 10$  κόμβοι επαφής και στην ανώτερη ανάλυση το πλήθος των κόμβων είναι  $N = 11$ . Αφού ολοκληρώθηκε η μικροσκοπική μελέτη και υπολογίστηκαν οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας όλων των κόμβων, στη συνέχεια μέσω της Σχέσης 5.1.4 λήφθηκαν οι τιμές  $\bar{h}_c$  των τεσσάρων αναλύσεων, με βάση τις οποίες σχηματίστηκε το διάγραμμα του Σχήματος 5.4.13 .

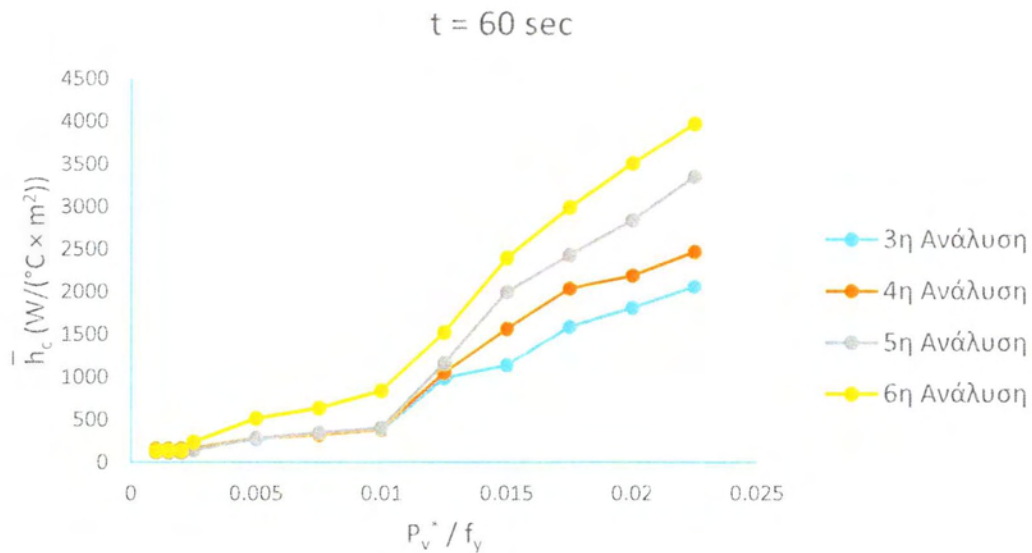


**Σχήμα 5.4.13:** Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για  $P_v^*/f_y = 0.02$ .

Στα διαγράμματα των Σχημάτων 5.4.12 – 5.4.13 εξακολουθεί να καταγράφεται η ίδια εικόνα της σύγκρισης των τιμών θερμικής αγωγιμότητας επαφής των αναλύσεων, όπου όσο ανώτερη είναι η ανάλυση της διεπιφάνειας τόσο αυξάνεται η μέση θερμική αγωγιμότητα των κόμβων επαφής. Όπως παρατηρείται και στα δύο διαγράμματα, η ανάλυση  $\delta_6$  παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας σε σχέση με τις υπόλοιπες αναλύσεις. Η εντονότερη αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας της ανώτερης ανάλυσης, που προκύπτει όσο αυξάνεται το φορτίο είναι αναμενόμενη, καθώς οι μικρότερης κλίμακας επιφανειακές αιχμές της διεπιφάνειας αυτής πλαστικοποιούνται εκτενέστερα υπό την επιβολή του κατακόρυφου φορτίου και την αύξηση της θερμοκρασίας. Όσον αφορά τις υπόλοιπες αναλύσεις, παρατηρείται πως οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας επαφής της διεπιφάνειας  $f_4$  τείνουν να αυξηθούν απότομα και να προσεγγίσουν τις αντίστοιχες της πέμπτης ανάλυσης από την κατακόρυφη φόρτιση  $P_v^*/f_y = 0.015$ , στην οποία τα μεγέθη της τρίτης ανάλυσης παραμένουν σημαντικά μικρότερα. Ενώ, με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου στη τιμή  $P_v^*/f_y = 0.02$  η θερμική αγωγιμότητα της τρίτης ανάλυσης τείνει να προσεγγίσει τις τιμές που λήφθηκαν από τις αναλύσεις  $\delta_4, \delta_5$ . Όπως παρατηρείται όσο αυξάνεται το κατακόρυφο φορτίο και καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο και αυξάνεται η θερμοκρασία της άνω διεπιφάνειας οι πλαστικοποιήσεις επεκτείνονται και στις αιχμές μεγαλύτερης κλίμακας, με αποτέλεσμα την αύξηση της επιφάνειας επαφής και της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής των κατώτερων αναλύσεων.

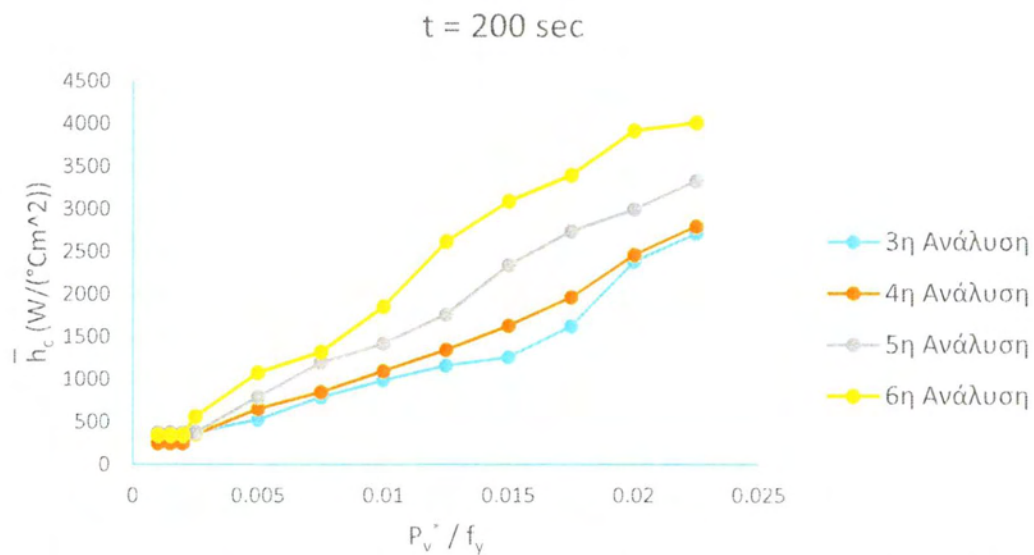
## 5.5 Συγκεντρωτικά Διαγράμματα Θερμικής Αγωγιμότητας της Διεπιφάνειας και Εικόνες Θερμικής Ροής για τη Δεύτερη Περίπτωση Θερμικής Φόρτισης

Στην ενότητα αυτή μελετώνται για όλες τις αναλύσεις τις διεπιφάνειες τα συγκεντρωτικά διαγράμματα θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής – κατακόρυφου φορτίου, για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές  $t = 60, 200, 400, 600 \text{ sec}$ , τα οποία δίνονται στα Σχήματα 5.5.1 – 5.5.4.

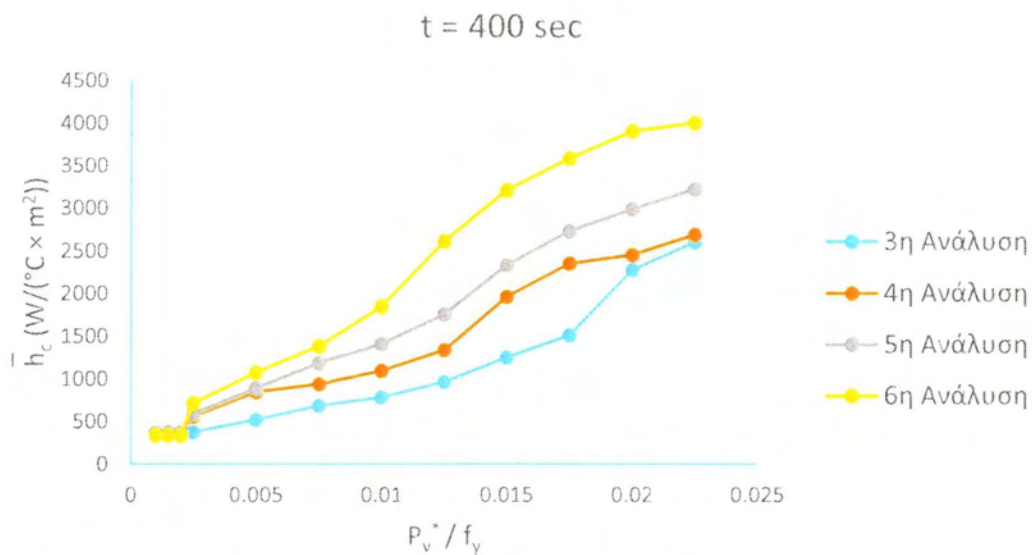


**Σχήμα 5.5.1:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή  $t = 60 \text{ sec}$ .

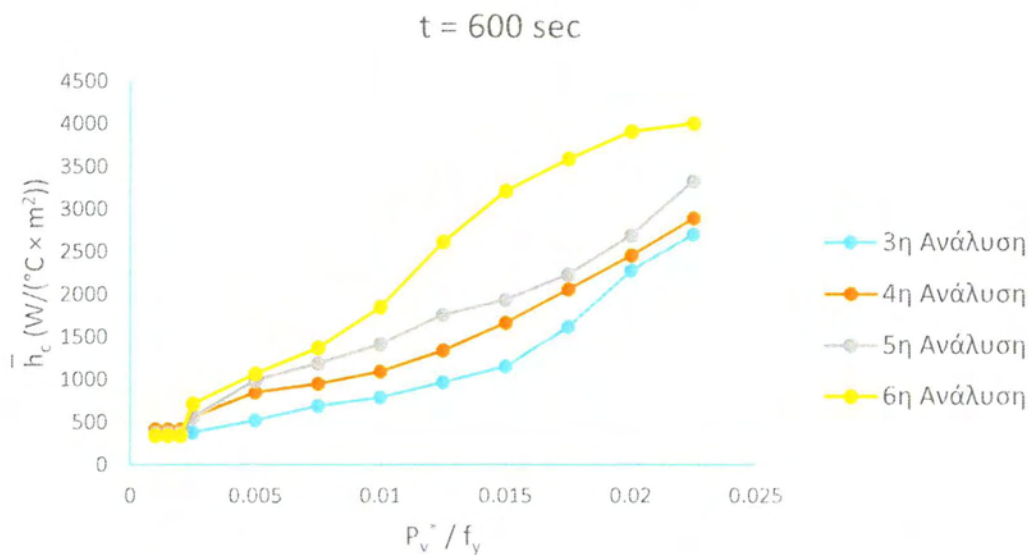




**Σχήμα 5.5.2:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή t = 200sec.



**Σχήμα 5.5.3:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή t = 400sec.



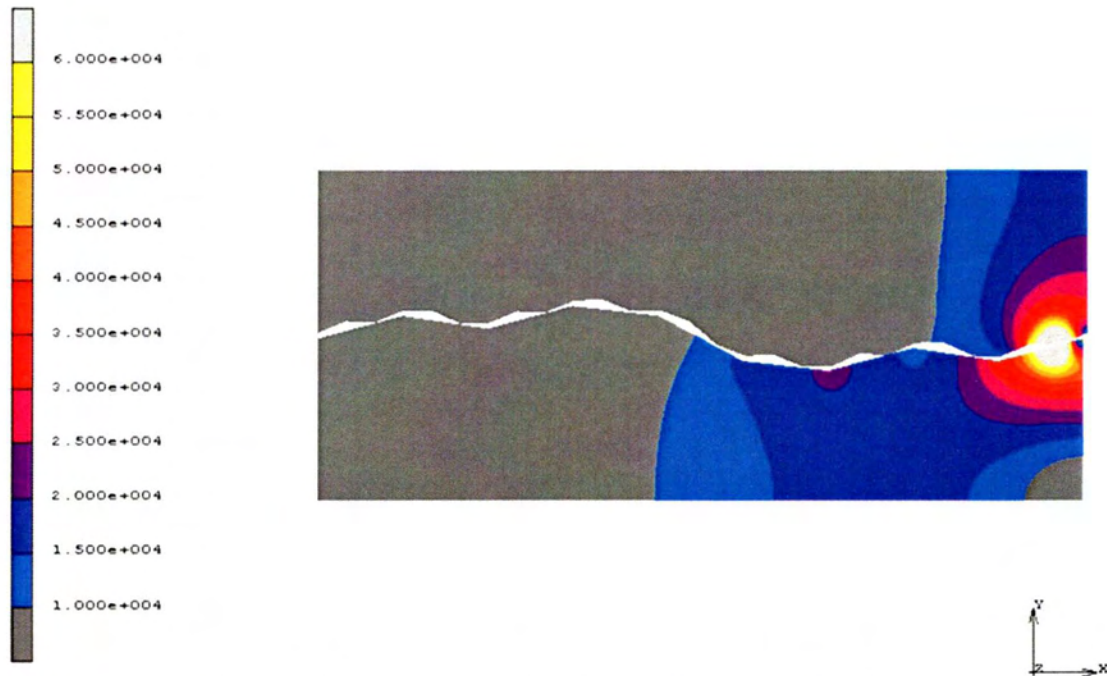
**Σχήμα 5.5.4:** Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή  $t = 600 \text{ sec}$ .

Στα συγκεντρωτικά διαγράμματα αυτής της περίπτωσης αποτυπώνεται η επιρροή της τραχύτητας στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής για το συγκεκριμένο θερμικό φορτίο, καθώς όσο ανώτερη είναι η ανάλυση της διεπιφάνειας τόσο αυξάνεται η θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής. Επίσης, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των τιμών θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων γίνονται πιο ευδιάκριτες καθώς μεγαλώνει το κατακόρυφο φορτίο και εξελίσσεται το φαινόμενο. Συγκεκριμένα, τη χρονική στιγμή  $t = 60 \text{ sec}$  οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας όλων των αναλύσεων εξισορροπούν για τα μικρότερα κατακόρυφα φορτία:  $P_v^*/f_y < 0.005$ . Ενώ η έκτη ανάλυση παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με τις υπόλοιπες διεπιφάνειες για κατακόρυφα φορτία:  $P_v^*/f_y \geq 0.005$ . Όσον αφορά τις υπόλοιπες αναλύσεις, οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας εξισορροπούν για φορτία  $P_v^*/f_y \leq 0.0125$ , ενώ για επιπρόσθετες αυξήσεις του κατακόρυφου φορτίου οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής των ανώτερων αναλύσεων αυξάνουν εντονότερα και ξεπερνούν τις αντίστοιχες τιμές των κατώτερων αναλύσεων της διεπιφάνειας. Επομένως, παρατηρείται εντονότερη αύξηση της επιφάνειας επαφής διαμέσου της οποίας μεταφέρεται θερμότητα στις αναλύσεις της διεπιφάνειας που παρουσιάζουν αιχμές μικρότερης κλίμακας, διότι λόγω του κατακόρυφου φορτίου και της αύξησης της θερμοκρασίας πλαστικοποιούνται εκτενέστερα από τις μεγαλύτερης κλίμακας αιχμές των κατώτερων αναλύσεων.

Για τις χρονικές στιγμές  $t = 200, 400, 600 \text{ sec}$  όπου το φαινόμενο έχει εξελιχθεί και η θερμοκρασία της άνω διεπιφάνειας που παρουσιάζει τραχύτητα έχει πάρει υψηλές τιμές η επιρροή της τραχύτητας γίνεται αντιληπτή από μικρότερες τιμές της κατακόρυφης φόρτισης και οι διαφοροποιήσεις των τιμών θερμικής αγωγιμότητας

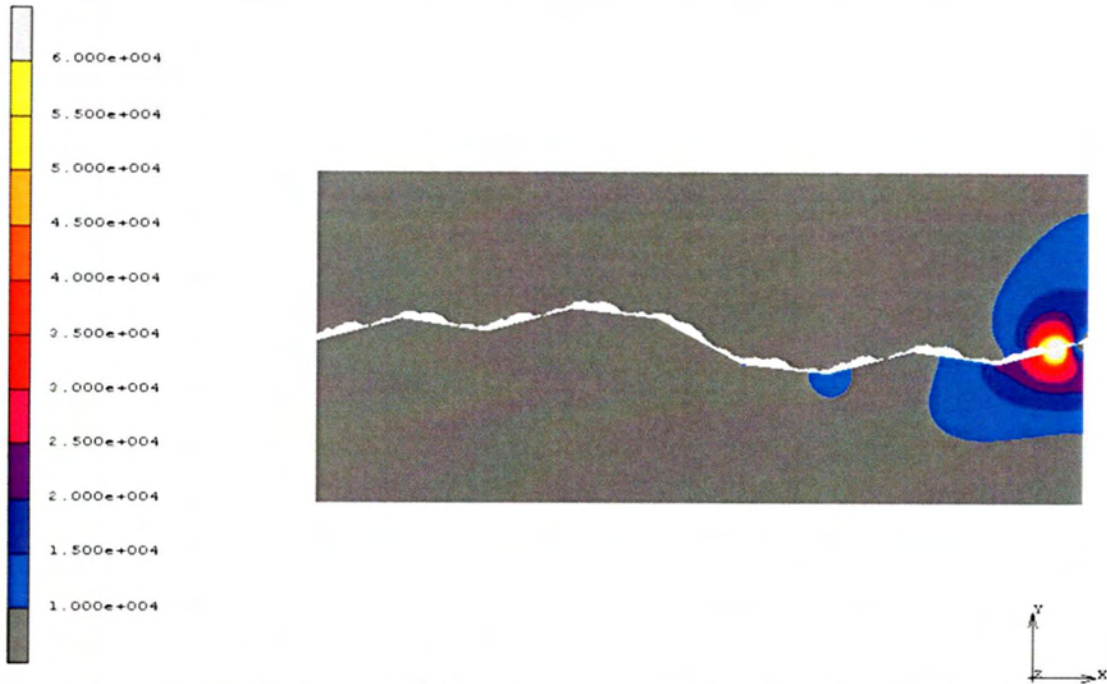
των διεπιφανειών είναι πιο ξεκάθαρες. Συγκεκριμένα, για κατακόρυφα φορτία  $P_V^*/f_y \geq 0.005$  οι τιμές μέσης θερμικής αγωγιμότητας των κόμβων επαφής διαφοροποιούνται στις διεπιφάνειες και είναι μεγαλύτερες όσο ανώτερη γίνεται η ανάλυση. Στις μικρότερες κατακόρυφες φορτίσεις οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων εξισορροπούν καθώς δεν προκαλούνται έντονες πλαστικοποιήσεις στις επιφανειακές αιχμές για τόσο χαμηλές κατακόρυφες φορτίσεις.

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι εικόνες ροής θερμότητας για τις διεπιφάνειες  $f_3$  και  $f_6$ , ώστε να συγκριθούν η ανώτερη και η κατώτερη ανάλυση οι οποίες μελετήθηκαν. Στα Σχήματα 5.5.5 – 5.5.8 παρακάτω δίνονται οι εικόνες της ροής θερμότητας των δύο διεπιφανειών για κατακόρυφα φορτία  $P_V^*/f_y = 0.001$  και  $P_V^*/f_y = 0.005$  και για την χρονική στιγμή  $t = 600 \text{ sec}$ .

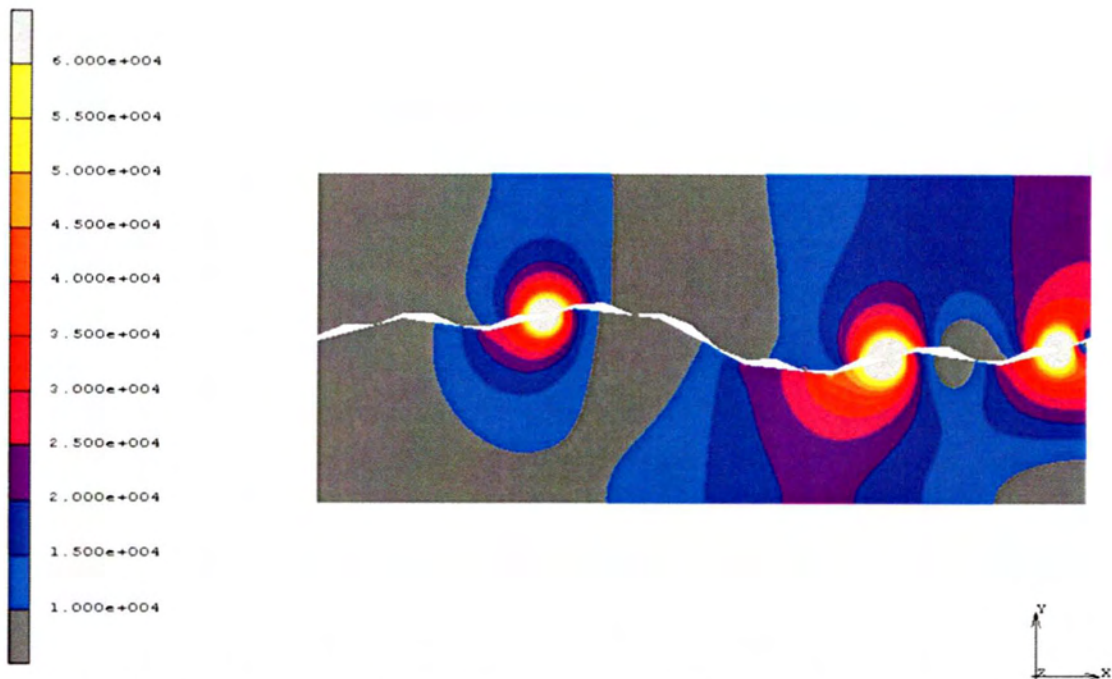


**Σχήμα 5.5.5:** Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.001$  την χρονική στιγμή  $t = 600 \text{ sec}$ .



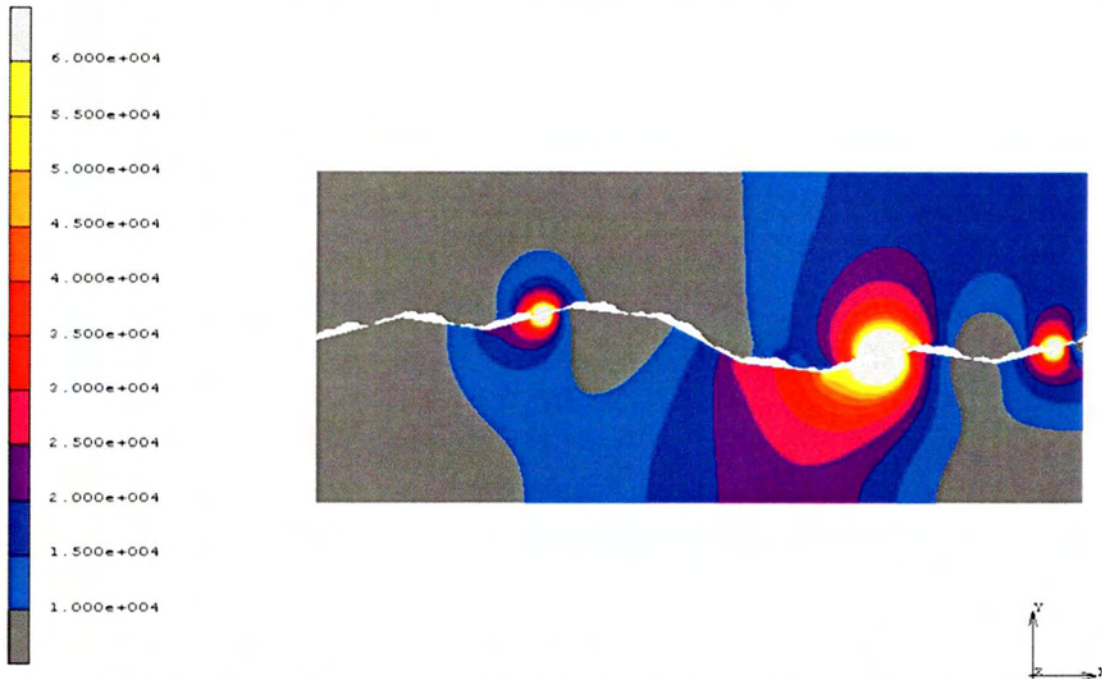


Σχήμα 5.5.6: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.001$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.



Σχήμα 5.5.7: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.005$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

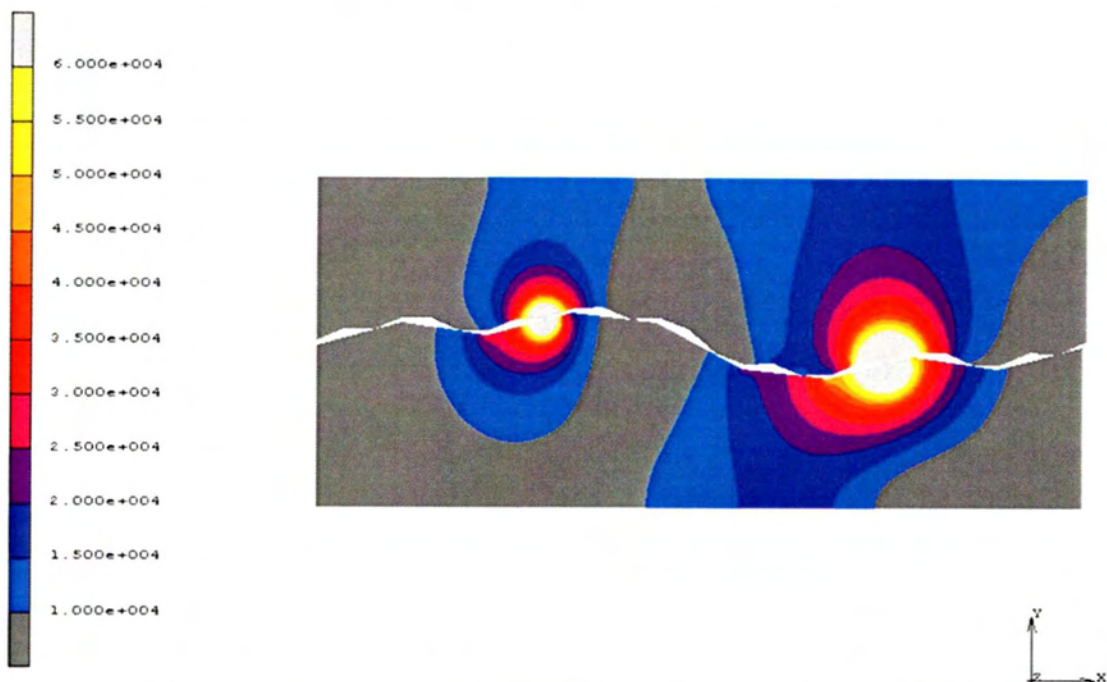




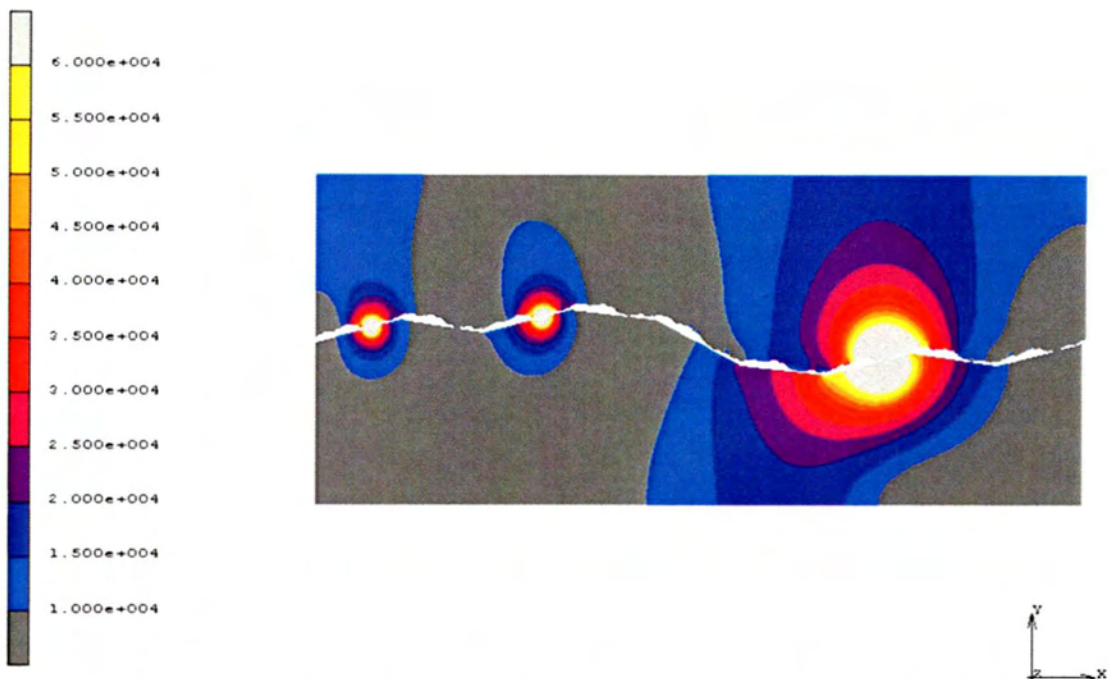
**Σχήμα 5.5.8:** Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.005$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

Στις παραπάνω εικόνες παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις που προκύπτουν στις αναλύσεις της δεύτερης περίπτωσης θερμικής φόρτισης, καθώς η επαφή χάνεται στους κατιόντες κλάδους του κάτω ορίου της διεπιφάνειας, εξαιτίας της επιμήκυνσης του άνω τμήματος της κατασκευής με αποτέλεσμα να υπάρχουν λιγότερες θέσεις επαφής στις διεπιφάνειες. Ωστόσο, λόγω της σημαντικής αύξησης της θερμοκρασίας στην άνω διεπιφάνεια προκαλούνται εκτενέστερες πλαστικοποιήσεις των επιφανειακών αιχμών, με αποτέλεσμα να είναι μεγαλύτερη η επιφάνεια επαφής σε κάθε θέση της διεπιφάνειας. Έτσι προκύπτουν αυξημένες τιμές θερμικής ροής σε μεγαλύτερα τμήματα των κατασκευών και στη διεπιφάνεια  $f_6$  αυξάνονται εντονότερα οι τιμές θερμικής ροής, λόγω των εκτεταμένων πλαστικοποιήσεων από μικρότερα φορτία, αφού όπως φαίνεται από το φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.005$  παρουσιάζει αυξημένες τιμές θερμικής ροής σε μεγάλα τμήματα της κατασκευής.

Στα Σχήματα 5.5.9 – 5.5.14 δίνονται οι εικόνες ροής θερμότητας των διεπιφανειών  $f_3$  και  $f_6$  για τις φορτίσεις  $P_v^*/f_y = 0.01$ ,  $P_v^*/f_y = 0.015$  και  $P_v^*/f_y = 0.02$ .

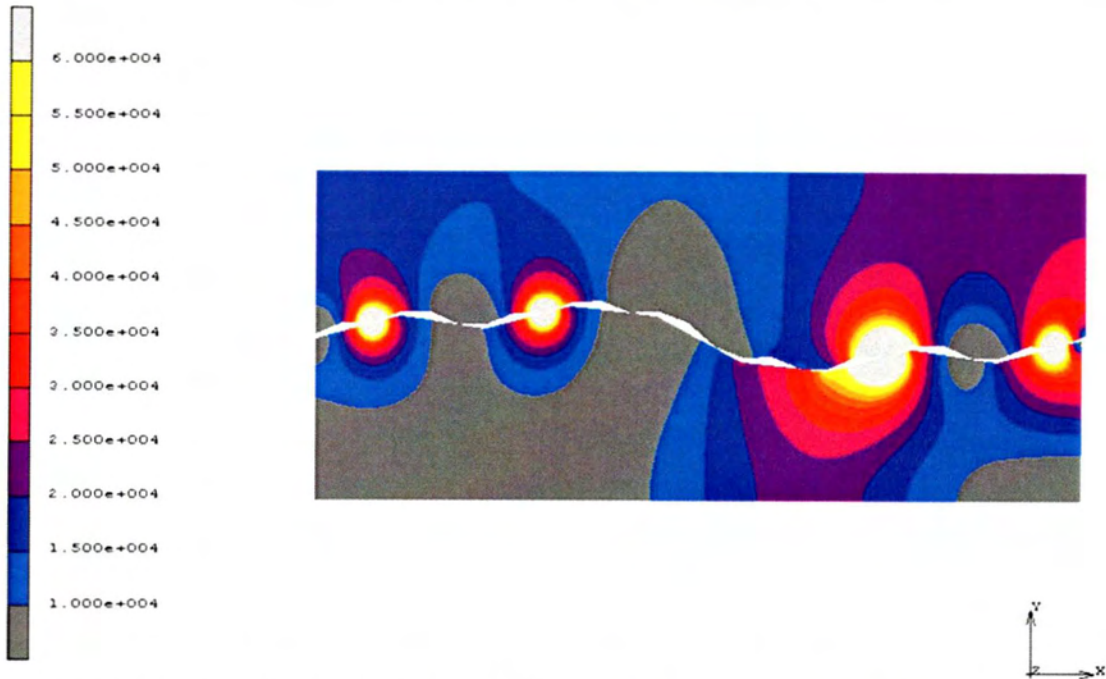


Σχήμα 5.5.9: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.01$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

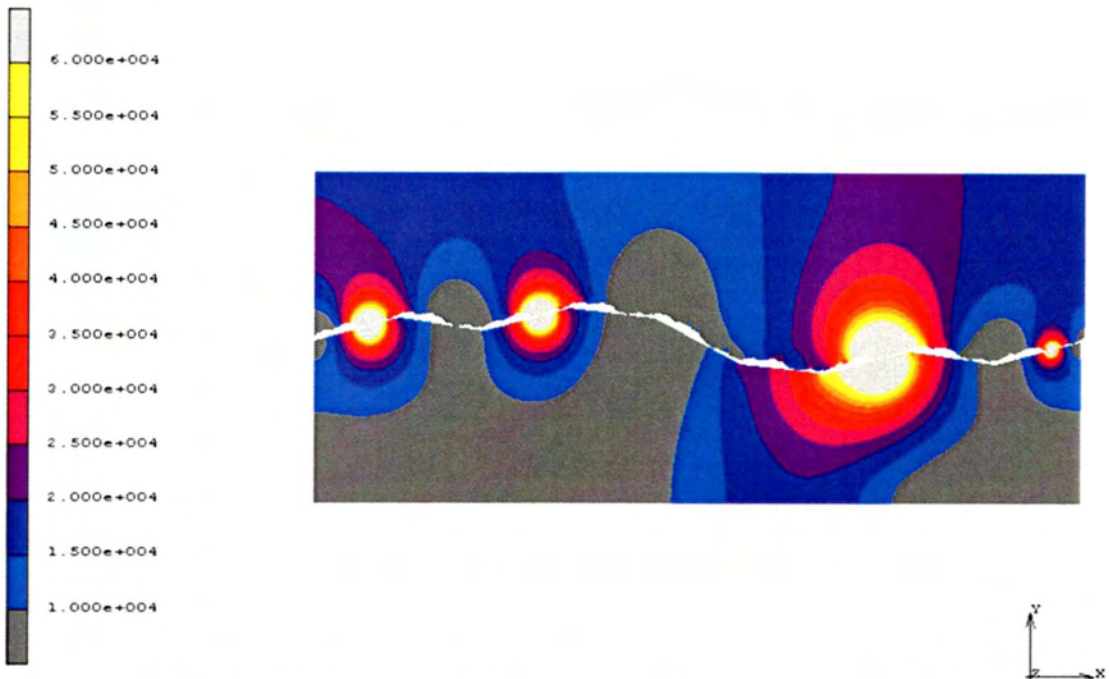


Σχήμα 5.5.10: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.01$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

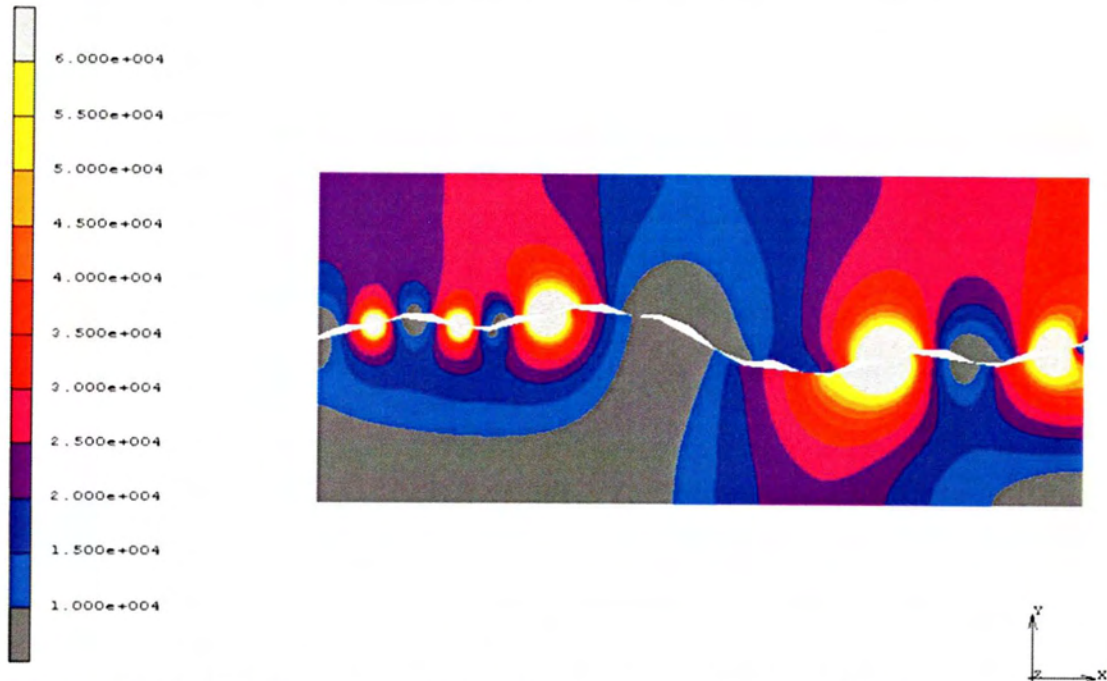




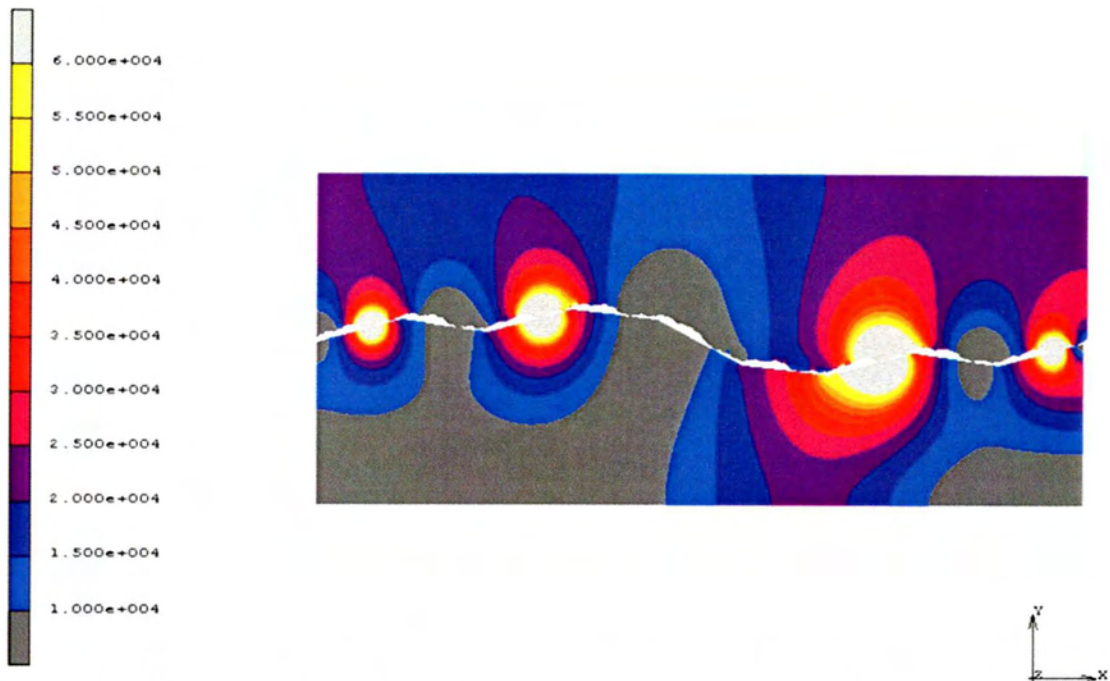
Σχήμα 5.5.11: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.015$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.



Σχήμα 5.5.12: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_V^*/f_y = 0.015$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.



Σχήμα 5.5.13: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_3$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.02$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.



Σχήμα 5.5.14: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας  $f_6$ , υπό φορτίο  $P_v^*/f_y = 0.02$  την χρονική στιγμή  $t = 600$  sec.

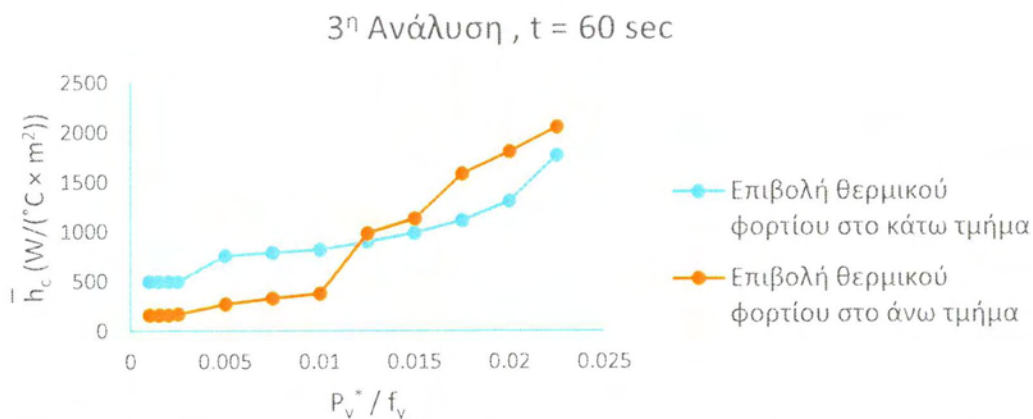
Όπως φαίνεται στις παραπάνω εικόνες, στις διεπιφάνειες  $f_3$  και  $f_6$  η ροή θερμότητας αυξάνεται καθώς μεγαλώνει το κατακόρυφο φορτίο. Επίσης, στην ανώτερη ανάλυση



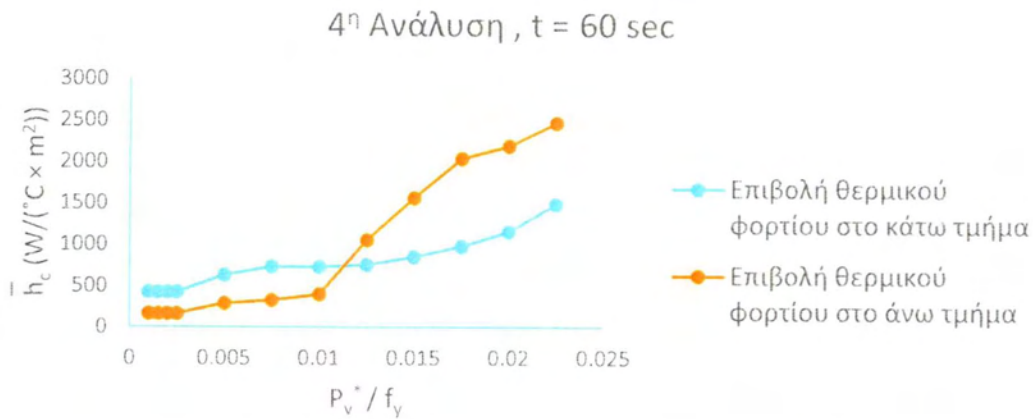
τα τμήματα γύρω από τις θέσεις επαφής της διεπιφάνειας που παρουσιάζουν μεγάλες τιμές ροής θερμότητας επεκτείνονται περισσότερο, λόγω των πλαστικοποιήσεων των επιφανειακών αιχμών μικρότερης κλίμακας.

### 5.6 Σύγκριση των Τιμών Θερμικής Αγωγιμότητας Λόγω Επαφής στη Διεπιφάνεια που Προέκυψαν από τις Δύο Διαφορετικές Περιπτώσεις Επιβολής του Θερμικού Φορτίου

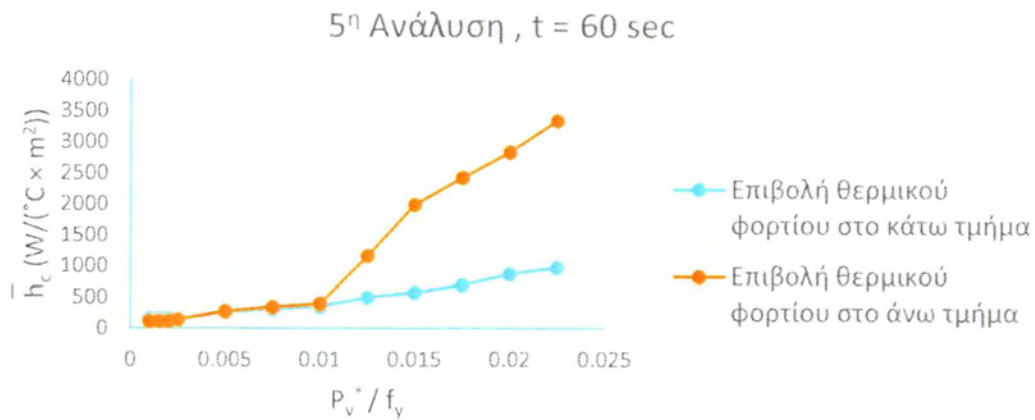
Μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής στη διεπιφάνεια και για τις δύο περιπτώσεις θερμικής φόρτισης, στην παράγραφο αυτή γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων για όλες τις αναλύσεις και για τις χρονικές στιγμές  $t = 60, 200, 400$  sec. Στα Σχήματα 5.6.1 – 5.6.4 δίνονται τα συγκριτικά διαγράμματα των δύο περιπτώσεων για  $t = 60$  sec.



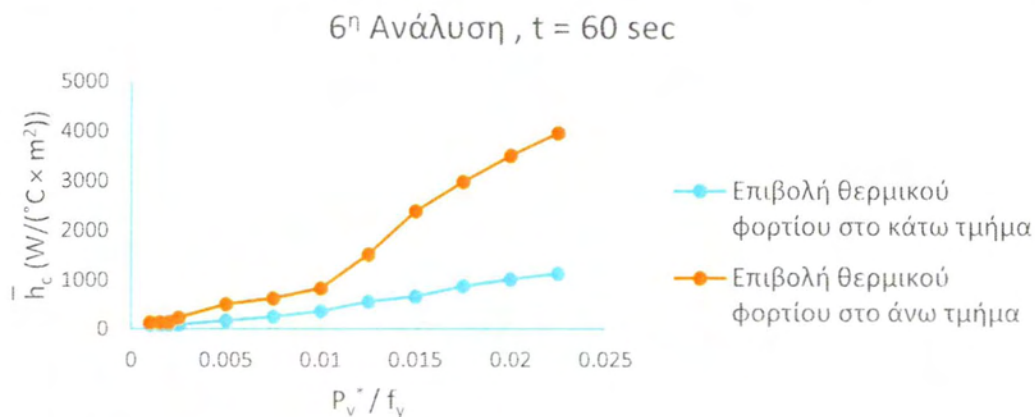
**Σχήμα 5.6.1:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης  $f_3$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 60$  sec.



Σχήμα 5.6.2: Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης  $f_4$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 60$  sec.



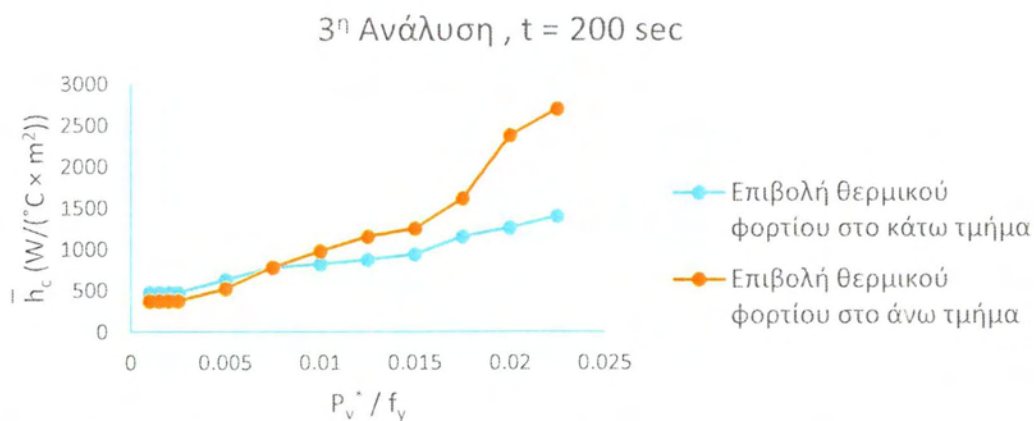
Σχήμα 5.6.3: Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης  $f_5$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 60$  sec.



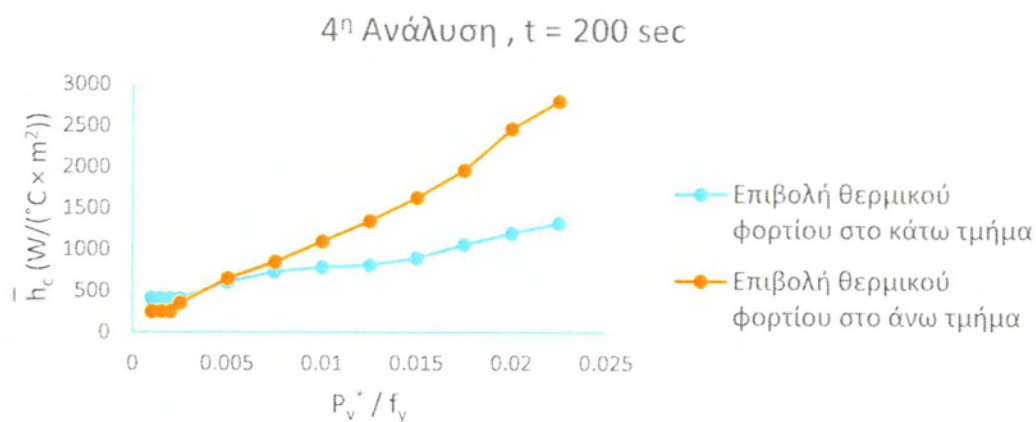
Σχήμα 5.6.4: Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης  $f_6$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 60$  sec.

Στην αρχή του φαινομένου, για  $t = 60 \text{ sec}$  παρατηρείται ότι για μικρές τιμές του κατακόρυφου φορτίου οι κατώτερες αναλύσεις παρουσιάζουν μεγαλύτερη θερμική αγωγιμότητα για επιβολή του θερμικού φορτίου στο κάτω τμήμα της κατασκευής. Με την αύξηση των τιμών του κατακόρυφου φορτίου η εικόνα αντιστρέφεται. Αντίθετα, οι ανώτερες επαναλήψεις παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας για όλες τις τιμές του κατακόρυφου φορτίου στην περίπτωση που το θερμικό φορτίο επιβάλλεται στο άνω τμήμα της κατασκευής. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι οι πλαστικοποιήσεις των αιχμών μικρότερης κλίμακας λόγω της επιβολής του θερμικού φορτίου στο άνω τμήμα είναι έντονες από την αρχή του φαινομένου ( $t = 60 \text{ sec}$ ) επειδή η θερμοκρασία στην άνω διεπιφάνεια, που παρουσιάζει την τραχύτητα, αυξάνει σημαντικά. Ο συνδυασμός των πλαστικοποιήσεων λόγω θερμικού και κατακόρυφου φορτίου οδηγεί σε πολύ αυξημένες τιμές της θερμικής αγωγιμότητας των ανώτερων αναλύσεων στις περιπτώσεις όπου το κατακόρυφο φορτίο είναι μεγάλο.

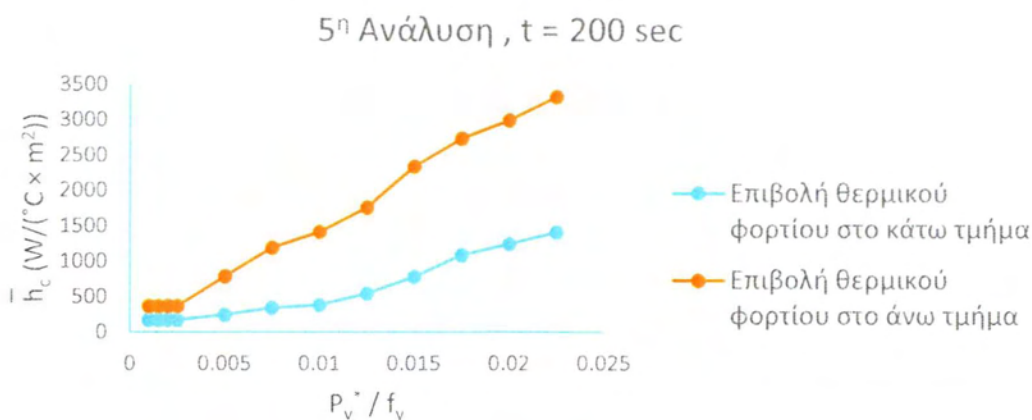
Στα Σχήματα 5.6.5 – 5.6.12 δίνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις χρονικές στιγμές  $t = 200 \text{ sec}$  και  $t = 400 \text{ sec}$ .



**Σχήμα 5.6.5:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης  $f_3$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 200 \text{ sec}$ .

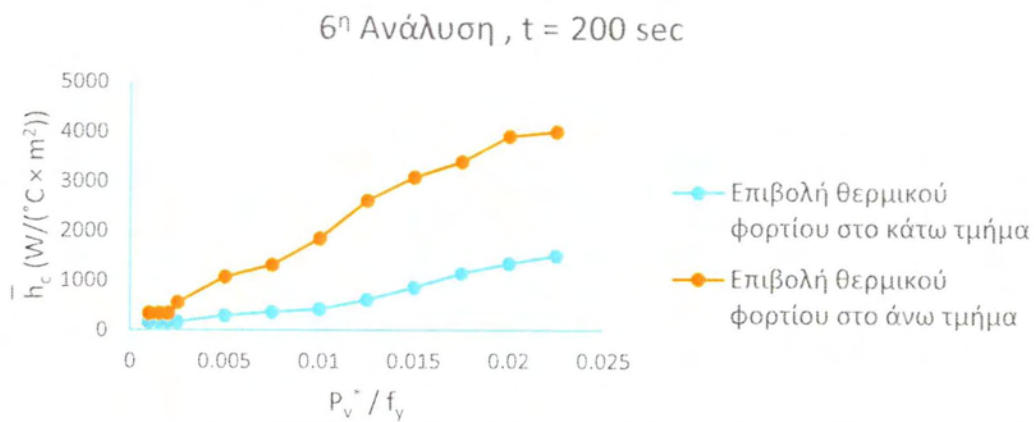


**Σχήμα 5.6.6:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης  $f_4$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 200$  sec.

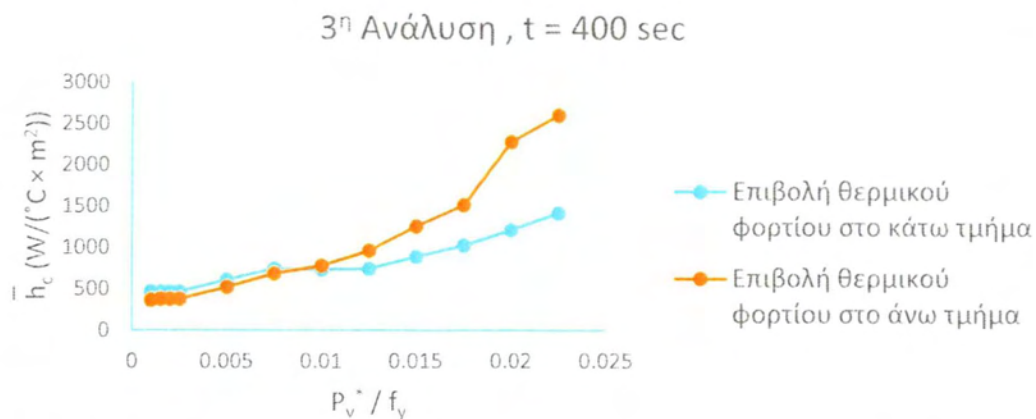


**Σχήμα 5.6.7:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης  $f_5$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 200$  sec.

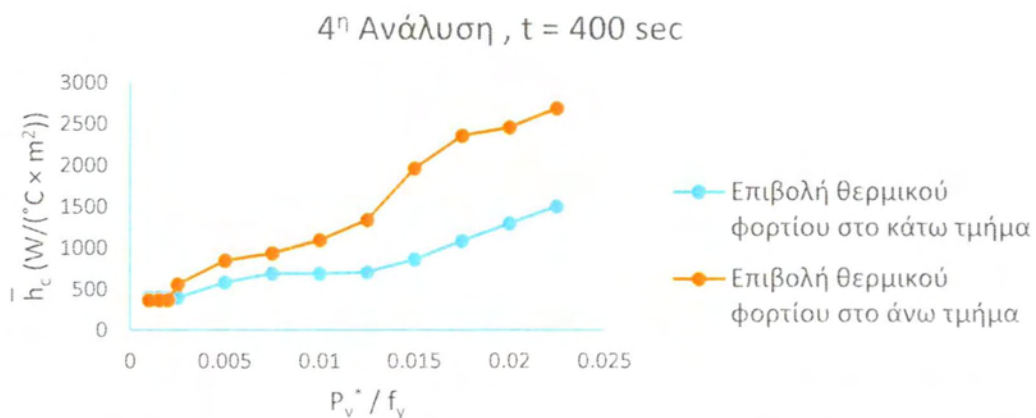




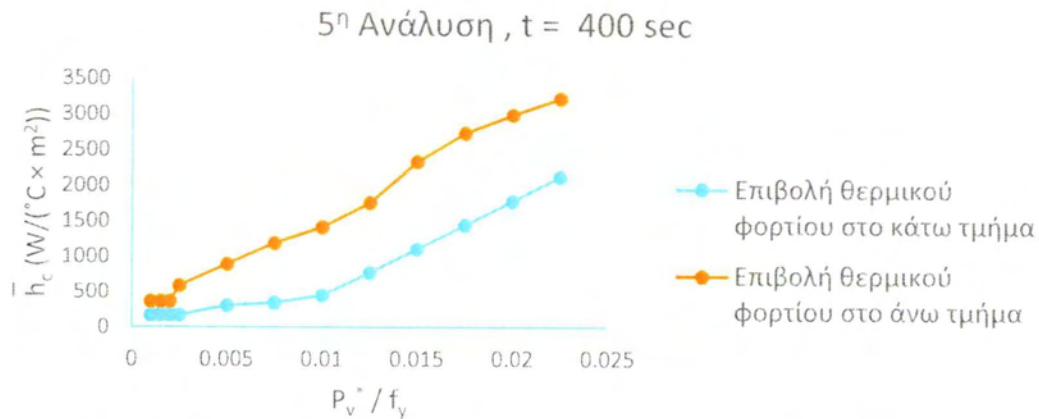
Σχήμα 5.6.8: Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης  $f_6$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 200$  sec.



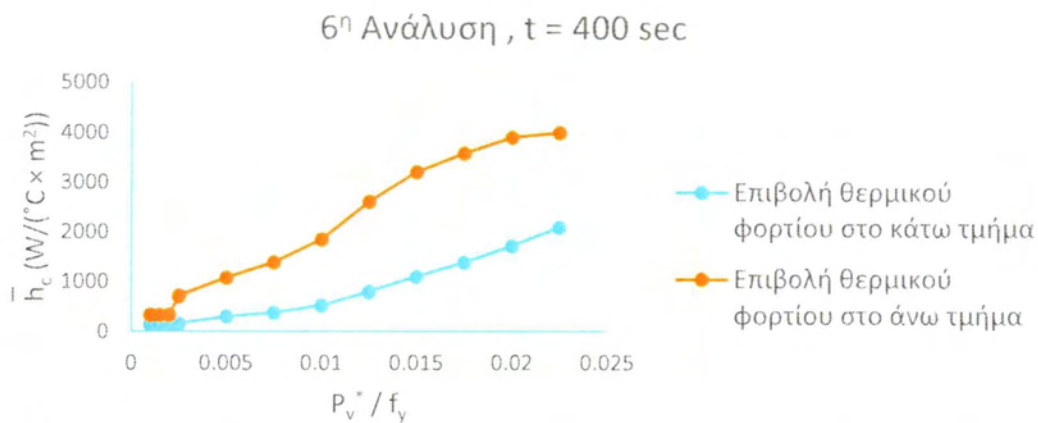
Σχήμα 5.6.9: Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης  $f_3$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 400$  sec.



Σχήμα 5.6.10: Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης  $f_4$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 400$  sec.



**Σχήμα 5.6.11:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης  $f_5$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 400 \text{ sec}$ .



**Σχήμα 5.6.12:** Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης  $f_6$  των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή  $t = 400 \text{ sec}$ .

Από την μελέτη των διαγραμμάτων γίνεται φανερό ότι καθώς εξελίσσεται το φαινόμενο και αυξάνει σημαντικά η θερμοκρασία της άνω διεπιφάνειας, οι πλαστικοποιήσεις επεκτείνονται και σε αιχμές μεγαλύτερης κλίμακας με αποτέλεσμα η θερμική αγωγιμότητα που προκύπτει για την περίπτωση επιβολής του θερμικού φορτίου στο άνω τμήμα της κατασκευής να είναι μεγαλύτερη σε όλες τις αναλύσεις της διεπιφάνειας. Οι διαφορές στη θερμική αγωγιμότητα της διεπιφάνειας είναι μεγαλύτερες στις ανώτερες αναλύσεις όπου οι πλαστικοποιήσεις είναι εντονότερες.

## 6<sup>ο</sup> ΚΕΦΑΛΑΙΟ

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η θερμική αγωγιμότητα σε μεταλλικές διεπιφάνειες με διαφορετικές αναλύσεις της επιφανειακής τραχύτητας του άνω συνόρου τους και για διάφορες τιμές κατακόρυφου φορτίου. Για την ακριβή προσομοίωση της τραχύτητας των διεπιφανειών της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε η fractal συνάρτηση παρεμβολής fractal  $f$ . Για την κατασκευή λήφθηκαν παραδοχές ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς για τον άνω δίσκο, ενώ το κάτω τμήμα της κατασκευής όπου η διεπιφάνεια παραπέμπει σε λεία είναι άκαμπτο. Για τις επιλύσεις εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις θερμικής φόρτισης, στην πρώτη επιβλήθηκε στο κάτω τμήμα σταδιακή ομοιόμορφη κατά τη διεύθυνση  $X$  θερμοκρασιακή αύξηση ίση με  $400^{\circ}\text{C}$ , ενώ στη δεύτερη η θερμοκρασιακή μεταβολή ασκήθηκε στο άνω τμήμα. Τα συμπεράσματα που διεξήχθησαν, από τις επιλύσεις στο λογισμικό πρόγραμμα Marc και την επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων είναι τα παρακάτω:

- Η επιρροή του κατακόρυφου φορτίου στο φαινόμενο είναι ξεκάθαρη σε όλες τις αναλύσεις. Αύξηση του κατακόρυφου φορτίου συνεπάγεται την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, φαινόμενο που είναι πιο έντονο στις ανώτερες αναλύσεις που συνδέονται με αυξημένη τραχύτητα, διότι οι πλαστικοποιήσεις των αιχμών μικρότερης κλίμακας είναι εντονότερες.
- Η θερμική αγωγιμότητα σχετίζεται με την τραχύτητα της διεπιφάνειας και το κατακόρυφο φορτίο. Για πολύ μικρές τιμές κατακόρυφου φορτίου, όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα της διεπιφάνειας, τόσο μικρότερες είναι οι τιμές θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, διότι οι επιφανειακές αιχμές μεγαλύτερης κλίμακας συνεπάγονται μεγαλύτερες επιφάνειες επαφής σε κάθε θέση επαφής στη διεπιφάνεια. Όσο αυξάνεται το κατακόρυφο φορτίο και προκαλούνται έντονες πλαστικοποιήσεις των επιφανειακών αιχμών μικρότερης κλίμακας η επιρροή της τραχύτητας αντιστρέφεται, καθώς όσο μεγαλύτερη είναι η τραχύτητα της διεπιφάνειας τόσο αυξάνονται οι τιμές της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής.
- Η θερμική αγωγιμότητα συνδέεται με την θερμοκρασία στη διεπιφάνεια. Όσο μεγαλύτερες τιμές θερμοκρασίας παρουσιάζονται στην άνω διεπιφάνεια που παρουσιάζει τραχύτητα τόσο αυξάνονται οι πλαστικοποιήσεις των αιχμών υπό το κατακόρυφο φορτίο, οδηγώντας σε μεγαλύτερες τιμές θερμικής αγωγιμότητας.

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1.1.1 Μονοδιάστατη αγωγή θερμότητας σε επίπεδο.....	11
1.2.1 Μεγεθυμένη περιοχή επαφής σε διεπιφάνεια μεταξύ τραχειών επιφανειών.....	14
1.2.2.1 Σχηματική απεικόνιση της στένωσης των θερμικών γραμμών ροής στη διεπιφάνεια (A – B).....	15
1.2.2.2 Διάγραμμα της θερμοκρασίας συναρτήσει της απόστασης από την επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή μεταβολή, σε θερμική αγωγή λόγω επαφής στη διεπιφάνεια των στερεών σωμάτων A,B.....	16
1.2.2.3 Στένωση της θερμικής ροής σε διακριτά σημεία της διεπιφάνειας του μοντέλου προσομοίωσης και μεγέθυνση σημείου επαφής.....	17
2.1.1 Κατηγορίες αποκλίσεων κατεργασμένης επιφάνειας από την ονομαστική επιφάνεια.....	20
2.1.2 Απεικόνιση των βασικών παραμέτρων της επιφανειακής τραχύτητας.....	21
2.4.1 Αναλύσεις $f_{3+6}$ του άνω συνόρου της διεπιφάνειας σε σύγκριση με την δεύτερη ανάλυση της fractal συνάρτησης παρεμβολής $f_2$ που σχηματίζει το κάτω σύνορο.....	30
3.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης.....	32
3.2.1 Σταδιακή επιβολή του μηχανικού φορτίου συναρτήσει του χρόνου.....	32
3.2.2 Επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή κατανομή συναρτήσει του χρόνου.....	33
3.2.3 Συνοριακές συνθήκες της κατασκευής στην πρώτη περίπτωση που εξετάστηκε με την επιβαλλόμενη θερμοκρασιακή μεταβολή στο κάτω τμήμα.....	34
3.2.4 Συνοριακές συνθήκες της κατασκευής στην δεύτερη περίπτωση με την εφαρμογή της θερμοκρασιακής κατανομής στο άνω όριο της.....	34
3.3.1.1 Θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	36
3.3.2.1 Ειδική θερμότητα του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	37
3.3.3.1 Σχηματικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα, για θερμοκρασίες 20°C και 400°C.....	38
3.3.3.2 Μεταβολή του μέτρου Ελαστικότητας του χάλυβα θερμής έλασης συναρτήσει της θερμοκρασίας του.....	38
3.4.1 2 <sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f.....	41



3.4.2 3 <sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f.....	41
3.4.3 4 <sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f.....	42
3.4.4 5 <sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f.....	42
3.4.5 6 <sup>η</sup> Ανάλυση της Διεπιφάνειας f.....	42
3.5.1 Αρίθμηση κόμβων και βαθμών ελευθερίας τριγωνικού πεπερασμένου στοιχείου.....	44
3.5.2 Λεπτομέρεια διακριτοποίησης της κατασκευής γύρω από τις διεπιφάνειες $f_n, n = 2 \div 6$ .....	45
4.1.1.1 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.001$ .....	49
4.1.1.2 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.001$ .....	49
4.1.1.3 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.001$ .....	50
4.1.1.4 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.001$ .....	51
4.1.1.5 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.005$ .....	52
4.1.1.6 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.005$ .....	52
4.1.1.7 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.005$ .....	53
4.1.1.8 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.005$ .....	53
4.1.1.9 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.01$ .....	54
4.1.1.10 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.01$ .....	55
4.1.1.11 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.01$ .....	55
4.1.1.12 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.01$ .....	56

4.1.1.13 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.015$ .....	57
4.1.1.14 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.015$ .....	58
4.1.1.15 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.015$ .....	58
4.1.1.16 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.015$ .....	59
4.1.1.17 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.02$ .....	60
4.1.1.18 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.02$ .....	60
4.1.1.19 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.02$ .....	61
4.1.1.20 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.02$ .....	62
4.1.2.1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή $t = 60 \text{ sec}$ .....	63
4.1.2.2 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	64
4.1.2.3 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	65
4.1.2.4 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	65
4.1.3.1 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.001$ .....	68
4.1.3.2 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.001$ .....	69
4.1.3.3 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.001$ .....	69
4.1.3.4 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_v^* / f_y = 0.001$ .....	70

4.1.3.5 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.005$ .....	70
4.1.3.6 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.005$ .....	71
4.1.3.7 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.005$ .....	71
4.1.3.8 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.005$ .....	72
4.1.3.9 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.01$ .....	73
4.1.3.10 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.01$ .....	73
4.1.3.11 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.01$ .....	74
4.1.3.12 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.01$ .....	74
4.1.3.13 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.015$ .....	75
4.1.3.14 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.015$ .....	76
4.1.3.15 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.015$ .....	76
4.1.3.16 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.015$ .....	77
4.1.3.17 Διάγραμμα θερμικής ροής στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.02$ .....	77
4.1.3.18 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.02$ .....	78
4.1.3.19 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.02$ .....	79
4.1.3.20 Διάγραμμα θερμικής αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια συναρτήσει του χρόνου για τη περίπτωση φόρτισης $P_V^* / f_y = 0.02$ .....	79

4.1.4.1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή $t = 60 \text{ sec}$ .....	81
4.1.4.2 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	82
4.1.4.3 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	82
4.1.4.4 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – θερμικής αγωγιμότητας την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	83
4.2.1 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης $f_3$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 60 \text{ sec}$ .....	84
4.2.2 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης $f_4$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 60 \text{ sec}$ .....	84
4.2.3 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης $f_5$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 60 \text{ sec}$ .....	85
4.2.4 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης $f_6$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 60 \text{ sec}$ .....	85
4.2.5 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης $f_3$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	86
4.2.6 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης $f_4$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	86
4.2.7 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης $f_5$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	87
4.2.8 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης $f_6$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	87
4.2.9 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης $f_3$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	88



4.2.10 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης $f_4$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	88
4.2.11 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης $f_5$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	89
4.2.12 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης $f_6$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	89
5.1.1 Διάγραμμα πλήθους κόμβων επαφής συναρτήσει του φορτίου για την πρώτη περίπτωση θερμικής φόρτισης.....	92
5.1.2 Διάγραμμα πλήθους κόμβων επαφής συναρτήσει του φορτίου για την δεύτερη περίπτωση θερμικής φόρτισης.....	93
5.2.1 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.001$ .....	94
5.2.2 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	95
5.2.3 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	96
5.2.4 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	96
5.2.5 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	97
5.2.6 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	97
5.2.7 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.01$ .....	99
5.2.8 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	100
5.2.9 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	101
5.2.10 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	101

5.2.11 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	102
5.2.12 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	102
5.2.13 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.02$ .....	104
5.3.1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή $t = 60\text{sec}$ .....	105
5.3.2 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή $t = 200\text{sec}$ .....	105
5.3.3 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή $t = 400\text{sec}$ .....	106
5.3.4 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή $t = 600\text{sec}$ .....	106
5.3.5 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.001$ την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	108
5.3.6 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.001$ την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	108
5.3.7 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	109
5.3.8 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	110
5.3.9 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.01$ την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	111
5.3.10 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.01$ την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	111
5.3.11 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	112
5.3.12 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ την χρονική στιγμή $t = 600 \text{ sec}$ .....	113

5.3.13 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.02$ την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	113
5.3.14 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.02$ την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	114
5.4.1 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.001$ .....	115
5.4.2 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	116
5.4.3 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	117
5.4.4 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	117
5.4.5 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	118
5.4.6 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.005$ .....	118
5.4.7 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.01$ .....	120
5.4.8 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	121
5.4.9 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	121
5.4.10 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	122
5.4.11 Μικροσκοπική αποτύπωση της θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης για φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	122
5.4.12 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.015$ .....	123
5.4.13 Διάγραμμα μέσης θερμικής αγωγιμότητας στην επαφή συναρτήσει του χρόνου για $P_v^*/f_y = 0.02$ .....	124
5.5.1 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή $t = 60$ sec.....	125

5.5.2 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή $t = 200\text{sec}$ .....	126
5.5.3 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή $t = 400\text{sec}$ .....	126
5.5.4 Συγκεντρωτικό διάγραμμα κατακόρυφου φορτίου – μέσης θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής, την χρονική στιγμή $t = 600\text{sec}$ .....	127
5.5.5 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.001$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	128
5.5.6 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.001$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	129
5.5.7 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	129
5.5.8 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.005$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	130
5.5.9 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.01$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	131
5.5.10 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.01$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	131
5.5.11 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	132
5.5.12 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.015$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	132
5.5.13 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_3$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.02$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	133
5.5.14 Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας $f_6$ , υπό φορτίο $P_v^*/f_y = 0.02$ την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$ .....	133
5.6.1 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης $f_3$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 60\text{ sec}$ .....	134
5.6.2 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης $f_4$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 60\text{ sec}$ .....	135



5.6.3 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης $f_5$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 60 \text{ sec}$ .....	135
5.6.4 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης $f_6$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 60 \text{ sec}$ .....	135
5.6.5 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης $f_3$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	136
5.6.6 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης $f_4$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	137
5.6.7 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης $f_5$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	137
5.6.8 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης $f_6$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 200 \text{ sec}$ .....	138
5.6.9 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τρίτης ανάλυσης $f_3$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	138
5.6.10 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της τέταρτης ανάλυσης $f_4$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	138
5.6.11 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της πέμπτης ανάλυσης $f_5$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	139
5.6.12 Διάγραμμα φορτίου - θερμικής αγωγιμότητας της έκτης ανάλυσης $f_6$ των περιπτώσεων θερμικής φόρτισης που μελετήθηκαν, την χρονική στιγμή $t = 400 \text{ sec}$ .....	139

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

3.4.1 Χαρακτηριστικά των συνόρων της διεπιφάνειας στις αναλύσεις που εξετάστηκαν.....	41
---	----

3.5.1 Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση της κατασκευής κάθε ανάλυσης.....	44
4.1.1 Συγκεντρωμένες δυνάμεις των επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.....	47
4.1.3.1 Τιμές κατακόρυφου κατανεμημένου φορτίου που εξετάζονται.....	67

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

$P_v$	κατακόρυφο ομοιόμορφο κατανεμημένο μηχανικό φορτίο κατασκευής
$\rho$	πυκνότητα υλικού
$k$	θερμική αγωγιμότητα υλικού
$C_p$	ειδική θερμότητα υλικού
$q$	ροή θερμότητας
$dX$	απειροστό πάχος στη διεύθυνση της θερμικής ροής
$dT$	Διαφορά θερμοκρασίας κατά μήκος απειροστού πάχους υλικού
$\varphi$	συντελεστής διαμόρφωσης
$\sigma_{SB}$	σταθερά Stefan - Boltzmann
$T_e$	απόλυτη θερμοκρασία επιφάνειας εκπομπής θερμικής ακτινοβολίας
$T_r$	απόλυτη θερμοκρασία λαμβάνουσας επιφάνειας
$e_{thr}$	συντελεστής εκπομπής
$A_e$	εμβαδό επιφάνειας εκπομπής
$A_r$	εμβαδό λαμβάνουσας επιφάνειας
$\epsilon_e$	συντελεστής εκπομπής της επιφάνειας εκπομπής
$\epsilon_r$	συντελεστής εκπομπής λαμβάνουσας επιφάνειας
$Q/A$	σταθερή ροή θερμότητας
$h_c$	συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή
$h$	θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής
$R$	θερμική αντίσταση επαφής
$\delta$	μήκος στοιχειώδους τμήματος
$N(\delta)$	πλήθος στοιχειωδών τμημάτων μήκους $\delta$ που σχηματίζουν μία καμπύλη
$L$	μήκος καμπύλης
$D$	κλασματική διάσταση μίας καμπύλης
$D_R$	διάσταση Richardson
$D_B$	φυσική διάσταση box
$C^0$	σύνολο συνεχών συναρτήσεων
$T$	τελεστής
$w_i$	διατμητικός μετασχηματισμός
$d_i$	ελεύθερη παράμετρος διατμητικού μετασχηματισμού
$a_i, b_i, c_i$	εξαρτημένες παράμετροι μετασχηματισμών
$f$	fractal συνάρτηση παρεμβολής

$\mathcal{Z}(\delta)$	πλήθος στηλών τετραγώνων πλευράς $\delta$ από τις οποίες καλύπτεται το γράφημα της fractal συνάρτησης παρεμβολής $f$
$c_j(\delta)$	πλήθος τετραγώνων που τέμνουν την fractal καμπύλη σε κάθε στήλη $j$
$N(c_j(\delta))$	πλήθος τετραγώνων της στήλης $j$
$\alpha$	συντελεστής θερμικής διαστολής
$\nu$	λόγος Poisson
$f_y$	τάση διαρροής του χάλυβα S275
$T_\alpha$	θερμοκρασία του χάλυβα
$\lambda_\alpha$	Θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα
$C_\alpha$	ειδική θερμότητα του χάλυβα
$E$	μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα
$f_n$	n-οστή ανάλυση της συνάρτησης $f$
$\delta_n$	βασικό μήκος της $f_n$
$\lambda$	πολλαπλασιαστής τάσης διαρροής
$t_\pi$	πάχος της κατασκευής
$P_v^*$	επιβαλλόμενη τάση
$P$	συγκεντρωμένες δυνάμεις που ασκήθηκαν στο άνω τμήμα της κατασκευής
$\overline{Q}_{Int}$	μέση θερμική ροή των κόμβων της διεπιφάνειας ανά μονάδα επιφάνειας
$\overline{T}_{\text{Κάτω Επιφάνειας}}$	Μέση θερμοκρασία του κάτω συνόρου της διεπιφάνειας
$\overline{T}_{\text{Άνω Επιφάνειας}}$	μέση θερμοκρασία του άνω συνόρου της διεπιφάνειας
$\overline{\Delta T}_{Int}$	μέση θερμοκρασιακή διαφορά των κόμβων της διεπιφάνειας
$\overline{h}_{Int}$	μέση θερμική αγωγιμότητα της διεπιφάνειας
$t$	χρόνος
$Q_{c,i}$	θερμική ροή ανά μονάδα επιφάνειας που διέρχεται από τον κόμβο επαφής $i$
$T_{i,Κάτω}$	θερμοκρασία κάτω κόμβου στον κόμβο επαφής $i$
$T_{i,Πάνω}$	Θερμοκρασία άνω κόμβου στον κόμβο επαφής $i$
$\Delta T_i$	διαφορά θερμοκρασίας κόμβου $i$
$h_{c,i}$	θερμική αγωγιμότητα στον κόμβο επαφής $i$
$\overline{h}_c$	μέση θερμική αγωγιμότητα κόμβων επαφής
$N_1$	μέγιστο πλήθος κόμβων επαφής από την πρώτη περίπτωση θερμικής φόρτισης που εξετάστηκε
$N_2$	μέγιστο πλήθος κόμβων επαφής από την δεύτερη περίπτωση θερμικής φόρτισης που εξετάστηκε
$N$	πλήθος κόμβων επαφής κάθε ανάλυσης

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ. Ασημακόπουλος, Β. Λυγερού, Γ. Αραμπατζής, Μεταφορά Θερμότητας, εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2009 pp.68-70,218-228,487.
- [2] Taine, J., Petit J.P. (1993) , Heat transfer, first edition, Prentice Hall International (UK) Ltd.
- [3] Cengel, Y.A. (2011) Heat transfer-a practical approach, fourth edition, McGraw-Hill, Inc.
- [4] Chapman, A. (1984), Heat transfer, fourth edition, Macmillan Publishing Company.
- [5] US Department of Energy, Thermodynamics, Heat transfer and Fluid Flow, DOE-HDBK-1012/1-92, 1992.
- [6] Paul G. Slade (1999), Electrical contacts: Principles and Applications, Marcel Dekker Editions, Unit. States of America.
- [7] Holm R. (2000). Electric contacts: Theory and applications, 4<sup>th</sup> Edition Springer-Verlag, Germany
- [8] Yüncü, H. (2006), Thermal contact conductance of nominally flat surfaces, Heat and Mass Transfer, Vol. 43, pp. 1-5
- [9] Yovanovich, M.M. & Anntonetti, 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, Chapter2. Vol.1, Hemisphere, New York, pp. 79-128.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Σημειώσεις στην Τεχνική Μετρήσεων, «Τραχύτητα επιφάνειας», ΤΕΙ Θεσσαλίας, Λάρισα 2012, <https://e-class.teilar.gr/modules/document/file.php/MH150>.
- [15] Whitehouse, David (2012). Surfaces and their Measurement. Boston: Butterworth-Heinemann.
- [16] Mandelbrot, B. (1982), The Fractal Geometry of Nature, W.H. Freeman and Co., N. York.



- [17] Mandelbrot, B. (1967), 'How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension', *Science*, Vol. 155, pp.636-8.
- [18] Τάσος Μπουντής, «Ο θαυμαστός κόσμος των fractal», εκδόσεις Leader Books A.E., 2004.
- [19] 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.
- [20] Majumdar, A. and Tien, C.L. (1990), 'Fractal characterization and simulation of rough surfaces', *Wear*, Vol. 136, pp. 313-327
- [21] 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.
- [22] Borodich, F.M. and Onishchenko, D.A., (1999), 'Similarity and fractality in the modeling of roughness by a multilevel profile with hierarchical structure', *Solids and Structures*, 36(17), pp. 2585-612.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] Barnsley, M. (1988), *Fractals Everywhere*, Academic Press, Boston-N. York
- [27] Goerke D. and Willner, K. (2008), 'Normal contact of fractal surfaces – Experimental and numerical investigation', *Wear*, Vol. 264, pp. 589-598.
- [28] Eurocode 2, *Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design*, EN 1992 -1 -2, December 2004.
- [29] A. H. Buchanan, "Structural Design for Fire Safety", Wiley, Chichester, England, New York, 2001.
- [30] Μ. Παπαδρακάκης, «Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2001.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000125605