



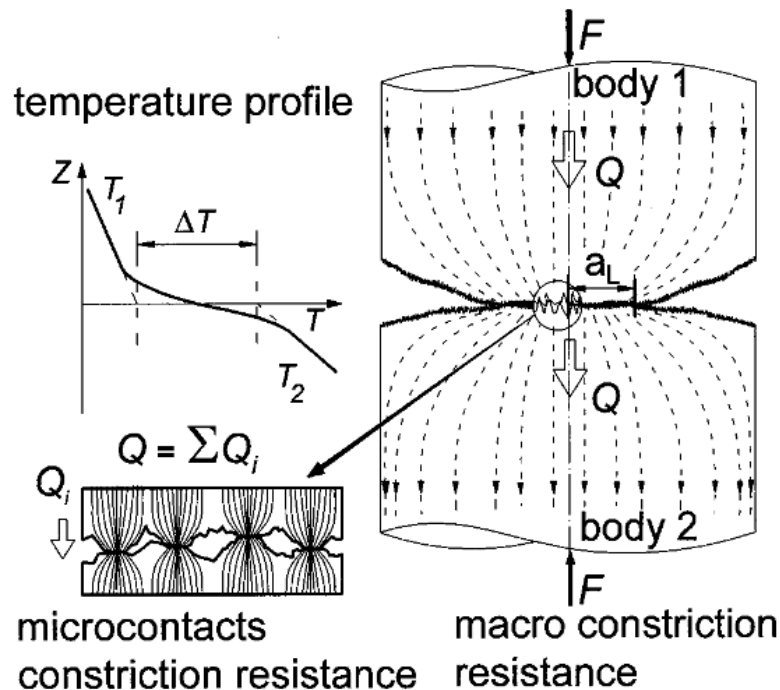
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΜΣ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ

Διπλωματική Εργασία

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ
ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΡΑΧΕΙΩΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

ΣΟΦΙΑ ΤΣΑΝΑΚΤΣΙΔΟΥ



Επιβλέπουσα: Δρ. Ολυμπία Παναγούλη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα
Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΒΟΛΟΣ 2023

© 2023 Σοφία Τσανακτσίδου

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 Δρ. Ολυμπία Παναγούλη
(Επιβλέπων) Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

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

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Θεοφάνης Γραμμένος
Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο
Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κα. Ολυμπία Παναγούλη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε απλόχερα σε κάθε στάδιο εκπόνησης της εργασίας. Της είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων για τις συμβουλές και τη στήριξή της σε μια δύσκολη περίοδο της επιστημονικής και επαγγελματικής μου πορείας. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας, τον Καθηγητή κ. Ευριπίδη Μυστακίδη και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Θεοφάνη Γραμμένο για την προσεκτική ανάγνωση της εργασίας μου και για τις πολύτιμες υποδείξεις τους. Οφείλω ευχαριστίες στον εκλιπόντα διδάσκοντα Δρ. Κωνσταντίνο Τζάρο, για την εξαιρετική διδασκαλία του λογισμικού MARC στα πλαίσια των μαθημάτων του ΠΜΣ καθώς και για την παρότρυνσή του να απευθυνθώ στην κα. Ολυμπία Παναγούλη για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον επί έτη προϊστάμενό μου, Επίτιμο – πλέον – Προϊστάμενο του Τμήματος Αρχαιολογικών Έργων και Μελετών της Εφορείας Αρχαιοτήτων Λάρισας, Αρχιτέκτονα και Αναστηλωτή, Δημήτρη Καραγκούνη, για την ηθική και έμπρακτη υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο ΠΜΣ. Τέλος, είμαι ευγνώμων στη μητέρα μου, Βασιλική Βακρατσά για την ολόψυχη αγάπη και τις θυσίες της όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και στην αδερφή μου, Πασχαλίνα, που είναι πάντα δίπλα μου, όσο κι αν μας χωρίζουν χιλιομετρικές αποστάσεις.

Μάιος 2023,

Σοφία Τσανακτσίδου

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΟΛΛΑΠΛΗΣ ΚΛΙΜΑΚΑΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ ΤΡΑΧΕΙΩΝ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ

Σοφία Τσανακτσίδου

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2023

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ολυμπία Παναγούλη, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια

Περίληψη

Η θερμική αγωγιμότητα αποτελεί ένα ανερχόμενο ερευνητικό αντικείμενο, στο οποίο συνυπάρχουν μηχανικά, θερμικά και γεωμετρικά προβλήματα. Στην παρούσα εργασία, μελετάται η επιρροή της τραχύτητας και της κατακόρυφης φόρτισης στη θερμική αγωγιμότητα, λόγω επαφής στη διεπιφάνεια δύο μεταλλικών δίσκων, ενός παραμορφώσιμου, στον οποίο επιβάλλεται ομοιόμορφο κατακόρυφο φορτίο, και ενός άκαμπτου, στον οποίο εφαρμόζεται ομοιόμορφο θερμικό φορτίο. Μελετήθηκαν διαφορετικά επίπεδα τραχύτητας της διεπιφάνειας, υπό την επιβολή διαφορετικών φορτίσεων. Για την περιγραφή των συνόρων της διεπιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν fractal συναρτήσεις παρεμβολής από τις οποίες παράχθηκαν πέντε διαφορετικές αναλύσεις αυξανόμενης ακρίβειας. Πραγματοποιήθηκαν δισδιάστατες μη γραμμικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας το λογισμικό MARC, από τις οποίες υπολογίστηκαν οι τιμές του συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας για τα σημεία επαφής κάθε περίπτωσης, καθώς και οι τιμές του μακροσκοπικού συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας. Παρατηρήθηκε ότι για τις εξεταζόμενες πιέσεις, η αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας όπως και η αύξηση του επιβαλλόμενου κατακόρυφου φορτίου οδηγούν σε αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας.

Λέξεις Κλειδιά: *Θερμική Αγωγιμότητα, Γεωμετρία Fractal, Επιφανειακή Τραχύτητα, Προβλήματα Επαφής, Συζευγμένη Ανάλυση*

MULTISCALE MODELING OF THERMAL CONTACT CONDUCTANCE OF ROUGH INTERFACES

Sofia Tsanaktsidou

University of Thessaly, Department of Civil Engineering, 2023

Supervisor: Olympia Panagouli, Associate Professor

Abstract

Thermal contact conductance (TCC) is an emerging research subject, which involves mechanical, thermal, and geometrical sub-problems. Because of roughness of the contacting surfaces, real contacts in the form of microcontacts occur only at the top of surface asperities, which are a small portion of the nominal contact area. Moreover, because of curvature of the contacting bodies, a macro-contact area is formed, the area where the microcontacts are distributed. In the present work, the influence of surface roughness and vertical loading on thermal conductivity is studied, by performing coupled analysis of two metal discs. A uniform vertical load is imposed on the top, deformable one, and a uniform thermal load is applied on the bottom rigid disc. Fractal interpolation functions were used to describe the interface roughness, producing five different scales of asperities of increasing precision. Two-dimensional nonlinear analyses were performed using MARC software, from which the values of the local coefficient of thermal contact conductance were calculated at the real contact points of each case. In the sequence, the macroscopic TCC coefficient was calculated from the values of the local coefficient of TCC. It was observed that for the considered values of pressure, the increase of the surface roughness and the increase of the imposed vertical load led to an increase of the TCC coefficient.

Keywords: *Thermal Contact Conductance, Fractal Geometry, Surface Roughness, Contact Problems, Coupled Analysis*

Πίνακας Περιεχομένων

Εισαγωγή.....	1
Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας	2
Κεφάλαιο 1 Μεταφορά Θερμότητας.....	4
1.1 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας	4
1.1.1 Μετάδοση μέσω αγωγής.....	5
1.1.2 Μετάδοση μέσω συναγωγής.....	6
1.1.3 Μετάδοση μέσω ακτινοβολίας.....	6
1.2 Περιγραφή του προβλήματος – διασαφήνιση όρων και εννοιών	7
1.2.1 Φορτίο και επιφάνεια επαφής	7
1.2.2 Θερμική αντίσταση επαφής και αντίσταση στένωσης.....	8
1.3 Παραδοχές θερμικού μοντέλου προσομοίωσης.....	11
Κεφάλαιο 2 Η Χρήση Fractal Γεωμετρίας στην Προσομοίωση του Κυματισμού και της Τραχύτητας των Επιφανειών.....	13
2.1 Τραχύτητα επιφάνειας.....	13
2.2 Η fractal γεωμετρία.....	15
2.3 Μέθοδοι υπολογισμού κλασματικών διαστάσεων.....	16
2.3.1 Μεθοδος Richardson	16
2.3.2 Μεθοδος box counting	17
2.4 Fractal συναρτήσεις παρεμβολής	18
Κεφάλαιο 3 Χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων στη Δισδιάστατη μη Γραμμική Ανάλυση Θερμομηχανικού Προβλήματος.....	21
3.1 Γεωμετρία κατασκευής.....	21
3.2 Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος	22
3.3 Ιδιότητες υλικού της κατασκευής.....	24
3.3.1 Θερμική αγωγιμότητα χάλυβα	25
3.3.2 Ειδική θερμότητα χάλυβα.....	25
3.3.3 Εφελκυστική αντοχή χάλυβα και όριο διαρροής	26
3.4 Χρήση των fractal συναρτήσεων παρεμβολής για την προσομοίωση της τραχύτητας της διεπιφάνειας	28
3.5 Διακριτοποίηση προσομοιώματος.....	30
3.6 Επίλυση του προβλήματος της επαφής δύο σωμάτων με αλγόριθμο node-to-segment .	31
3.6.1 Ανάλυση της επαφής μεταξύ δυο σωμάτων	32
3.6.2 Συζευγμένη ανάλυση (coupled analysis)	33

Κεφάλαιο 4	Επιρροή του Κυματισμού, της Τραχύτητας και του Κατακόρυφου Φορτίου στη Θερμική Αγωγιμότητα Μεταλλικών Διεπιφανειών σε Μικροσκοπικό Επίπεδο	36
4.1	Μελέτη της θερμική αγωγιμότητας τραχειών επιφανειών	36
4.2	Μελέτη της θερμικής αγωγιμότητας τραχειών επιφανειών υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου	39
Κεφάλαιο 5	Επιρροή του Κυματισμού της Τραχύτητας, και του Κατακόρυφου Φορτίου στη Θερμική Αγωγιμότητα Μεταλλικών Διεπιφανειών σε Μακροσκοπικό Επίπεδο	57
5.1	Μελέτη της επιρροής της τραχύτητας της διεπιφάνειας στο μακροσκοπικό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας	58
5.2	Συγκεντρωτικά διαγράμματα μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και απεικόνιση της θερμικής ροής και των πλαστικών παραμορφώσεων στη διεπιφάνεια ..	64
Κεφάλαιο 6	Συμπεράσματα	81
Βιβλιογραφία.....		83
Παράρτημα Α.....		86
Παράρτημα Β.....		102
B1. Απεικόνιση Θερμικής Ροής.....		102
B2. Απεικόνιση Πλαστικών Παραμορφώσεων		113

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.2.1.: Υπολογισμός συγκεντρωμένων δυνάμεων που ασκήθηκαν στους κόμβους του άνω συνόρου για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις φόρτισης.....	24
Πίνακας 3.4.1 : Χαρακτηριστικά των αναλύσεων της διεπιφάνειας.....	29
Πίνακας 3.5.1.: Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση του προσομοιώματος σε κάθε ανάλυση.....	30

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.2.1.1: Σχηματική απεικόνιση περιοχής επαφής μεταξύ τραχειών επιφανειών.....	8
Σχήμα 1.2.2.1: Σχηματική απεικόνιση της συγκέντρωσης των γραμμών της θερμικής ροής στα σημεία επαφής μεταξύ τραχειών επιφανειών.....	9
Σχήμα 1.2.2.2: Απεικόνιση της στένωσης της θερμικής ροής σε ένα από τα προσομοιώματα που μελετήθηκαν.....	9
Σχήμα 1.2.2.3: Απεικόνιση της στένωσης της θερμικής ροής στα σημεία επαφής του αριστερού τμήματος του προσομοιώματος του σχήματος 1.2.2.2.....	10
Σχήμα 1.2.2.4: Απεικόνιση της μακρο- και μικροθερμικής αντίστασης στένωσης.....	11
Σχήμα 2.1.1: Απεικόνιση των κατηγοριών αποκλίσεων της τραχύτητας σύμφωνα με το πρότυπο DIN 4760 (1982).....	14
Σχήμα 2.1.2: Απεικόνιση των χαρακτηριστικών παραμέτρων της τραχύτητας.....	15
Σχήμα 2.4.1 : Αναλύσεις f_3 έως f_6 του άνω συνόρου της διεπιφάνειας σε επαφή με την 2 ^η ανάλυση f_2 του κάτω συνόρου.....	20
Σχήμα 3.1.1: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης.....	22
Σχήμα 3.2.1: Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος. Εξετάζεται η περίπτωση δέσμευσης της οριζόντιας μετατόπισης για το αριστερό άκρο του άνω σώματος	22
Σχήμα 3.2.3: Επιβολή του κατακόρυφου μηχανικού φορτίου συναρτήσει του χρόνου.....	23
Σχήμα 3.2.4: Επιβολή θερμοκρασιακής κατανομής συναρτήσει του χρόνου.....	23
Σχήμα 3.3.1.1 : Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	25
Σχήμα 3.3.2.1.: Διάγραμμα της ειδικής θερμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.....	26
Σχήμα 3.3.3.1.: Διάγραμμα μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας (E) του χάλυβα σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας.....	27
Σχήμα 3.3.3.2.: Σχηματικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα, για θερμοκρασίες 20°C και 400°C.....	28
Σχήμα 3.4.1 : Απεικόνιση της 3 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας.....	29
Σχήμα 3.4.2 : Απεικόνιση της 6 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας.....	30
Σχήμα 3.5.1: Element 201, τριγωνικό στοιχείο επίπεδης έντασης.....	30
Σχήμα 3.5.2 : Λεπτομέρεια διακριτοποίησης της κατασκευής γύρω από τις διεπιφάνειες f_3 έως f_6	31
Σχήμα 3.6.1.1 :Εύρος της απόστασης «ανοχής».....	32
Σχήμα 3.6.1.2: Μετατόπιση και διείδυση του κόμβου A εντός έτερου σώματος.....	33
Σχήμα 3.6.2.1.: Απόσταση d μεταξύ δύο σωμάτων.....	34
Σχήμα 4.1.1: Διάγραμμα του πλήθους των κόμβων που βρίσκονται σε επαφή σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου.....	38
Σχήμα 4.1.2: Διάγραμμα του πλήθους των κόμβων που βρίσκονται σε επαφή κατά τη διάρκεια της ανάλυσης συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου.....	39
Σχήμα 4.2.1.: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.02$	40
Σχήμα 4.2.2: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.02$	40
Σχήμα 4.2.3: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.02$	41

Σχήμα 4.2.28: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.035$	53
Σχήμα 4.2.29: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$	54
Σχήμα 4.2.30: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$	54
Σχήμα 4.2.31: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$	55
Σχήμα 4.2.32: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6 ^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$	55
Σχήμα 5.1.1: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.02$	59
Σχήμα 5.1.2: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$	59
Σχήμα 5.1.3: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.025$	60
Σχήμα 5.1.4: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.0275$	61
Σχήμα 5.1.5: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.03$	61
Σχήμα 5.1.6: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.0325$	62
Σχήμα 5.1.7: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.035$	62
Σχήμα 5.1.8: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$	63
Σχήμα 5.2.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του μακροσκοπικού συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε μακροσκοπικό επίπεδο συναρτήσει του φορτίου για τις τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας τη χρονική στιγμή $t = 60$ sec.	65
Σχήμα 5.2.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του μακροσκοπικού συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε μακροσκοπικό επίπεδο συναρτήσει του φορτίου για τις τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec.....	65
Σχήμα 5.2.3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του μακροσκοπικού συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε μακροσκοπικό επίπεδο συναρτήσει του φορτίου για τις τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας τη χρονική στιγμή $t = 400$ sec	66
Σχήμα 5.2.4: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του μακροσκοπικού συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε μακροσκοπικό επίπεδο συναρτήσει του φορτίου για τις τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας τη χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	66
Σχήμα 5.2.5: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $Pv/fy= 0.02$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	67
Σχήμα 5.2.6: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $Pv/fy= 0.02$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	68
Σχήμα 5.2.7: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $Pv/fy= 0.0225$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	68
Σχήμα 5.2.8: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $Pv/fy= 0.0225$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	68
Σχήμα 5.2.9: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $Pv/fy= 0.025$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	69

Σχήμα 5.2.10: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.025$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	69
Σχήμα 5.2.11: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	69
Σχήμα 5.2.12: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	70
Σχήμα 5.2.13: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.03$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.	70
Σχήμα 5.2.14: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.03$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	70
Σχήμα 5.2.15: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0325$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	71
Σχήμα 5.2.16: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0325$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	71
Σχήμα 5.2.17: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.035$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	71
Σχήμα 5.2.18: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.035$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	72
Σχήμα 5.2.19: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	72
Σχήμα 5.2.20: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.....	72
Σχήμα 5.2.21: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $P_v/f_y = 0.02$, $t=600$ sec.....	73
Σχήμα 5.2.22: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $P_v/f_y = 0.02$, $t=600$ sec.....	73
Σχήμα 5.2.23: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $P_v/f_y = 0.0225$, $t=600$ sec.....	74
Σχήμα 5.2.24: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $P_v/f_y = 0.0225$, $t=600$ sec.....	74
Σχήμα 5.2.25: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $P_v/f_y = 0.025$, $t=600$ sec.....	75
Σχήμα 5.2.26: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $P_v/f_y = 0.025$, $t=600$ sec.....	75
Σχήμα 5.2.27: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$, $t=600$ sec.....	76
Σχήμα 5.2.28: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$, $t=600$ sec.....	76
Σχήμα 5.2.29: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$, $t=600$ sec.....	77
Σχήμα 5.2.30: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$, $t=600$ sec.....	77
Σχήμα 5.2.31: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $P_v/f_y = 0.0325$, $t=600$ sec.....	78
Σχήμα 5.2.32: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $P_v/f_y = 0.0325$, $t=600$ sec.....	78
Σχήμα 5.2.33: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $P_v/f_y = 0.035$, $t=600$ sec.....	79

Σχήμα 5.2.34: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $Pv/fy = 0.035$, $t=600$ sec.....	79
Σχήμα 5.2.35: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$, $t=600$ sec.....	80
Σχήμα 5.2.36: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$, $t=600$ sec.....	80

Εισαγωγή

Η μετάδοση της θερμότητας αποτελεί αντικείμενο μελέτης των επιστημόνων εδώ και εκατοντάδες χρόνια, από το Νεύτωνα και το Fourier μέχρι τις μέρες μας. Οι πολλοί μηχανισμοί με τους οποίους αυτή γίνεται, οι πολλές παράμετροι που υπεισέρχονται, καθιστούν τη μετάδοση θερμότητας ένα πολύπλοκο και απαιτητικό πεδίο έρευνας.

Σύμφωνα με το Yovanovich (2005), ελάχιστα πειραματικά και ακόμη λιγότερα αναλυτικά δεδομένα υπήρχαν διαθέσιμα πάνω στα προβλήματα θερμικής επαφής πριν το 1930. Η ανάπτυξη της αεροναυπηγικής κατά το 1940-1955 και η έρευνα για τις εφαρμογές της πυρηνικής ενέργειας τη δεκαετία του 1950 έδωσαν ώθηση στη μελέτη των προβλημάτων μετάδοσης της θερμότητας λόγω επαφής. Από το 1960 και έως τα μέσα της δεκαετίας του 1980, και την εξερεύνηση του διαστήματος, η NASA προχώρησε σε ερευνητικά προγράμματα πάνω στο πεδίο της θερμικής αντίστασης επαφής για την ανάπτυξη διαστημικών σκαφών και άλλων οχημάτων, εξετάζοντας ιδιαίτερα τη συμπεριφορά κοχλιωτών ενώσεων σε συνθήκες κενού. Από το 1970 περίπου και έως σήμερα, οι βιομηχανίες της μικροηλεκτρονικής αφιέρωσαν ιδιαίτερη χρηματοδότηση στην έρευνα των προβλημάτων της θερμικής επαφής που εμφανίζονται σε διάφορα επίπεδα των ηλεκτρονικών συστημάτων τους, με πιο χαρακτηριστικό το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της μετάδοσης θερμότητας από ένα μικροεπεξεργαστή στη ψύκτρα. Τέλος, στην αυγή του 21^{ου} αιώνα, καθώς η μικροηλεκτρονική προχωρά σε όλο και μικρότερες κλίμακες, εμφανίζονται οι πρώτες έρευνες στη θερμική αντίσταση επαφής σχετικές με τη νανοτεχνολογία.

Τα θερμομηχανικά προβλήματα συνδυάζουν τη μετάδοση θερμότητας με το πρόβλημα της μηχανικής συμπεριφοράς των σωμάτων που έρχονται σε επαφή, καθώς και τα προβλήματα γεωμετρίας που απορρέουν από αυτή, και έχουν ευρεία εφαρμογή στις κατασκευές, τη βιομηχανία, την παραγωγή ενέργειας. Με τα σύγχρονα λογισμικά και τη διαθέσιμη υπολογιστική δύναμη, είναι αυξανόμενο το ερευνητικό ενδιαφέρον της προσομοίωσης αυτών των προβλημάτων είτε για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού είτε για τη διερεύνηση του φαινομένου.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την επιρροή των ατελειών πολλαπλής κλίμακας των διεπιφανειών στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής δύο μεταλλικών δίσκων, υπό την επιβολή κατακόρυφης φόρτισης. Η τραχύτητα στη διεπιφάνεια των δίσκων περιγράφεται από “ανωμαλίες”, η κατανομή των οποίων κατά μήκος της διεπιφάνειας, το ύψος τους καθώς και η διαφορετική τους κλίμακα, επηρεάζουν την πραγματική επιφάνεια επαφής και κατά συνέπεια την αγωγή θερμότητας μεταξύ αυτών. Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι παραπάνω παράμετροι στην προσομοίωση της τραχύτητας, χρησιμοποιήθηκε η fractal γεωμετρία. Πιο συγκεκριμένα, η -προσομοίωση της τραχύτητας της διεπιφάνειας έγινε με τη χρήση των fractal συναρτήσεων παρεμβολής f , με τις οποίες είναι δυνατή η παραγωγή μιας συνεχούς fractal καμπύλης από ένα διακριτό σύνολο συνεπίπεδων σημείων, χρησιμοποιώντας μια επαναληπτική διαδικασία. Παράχθηκαν τέσσερις διαφορετικές αναλύσεις για το άνω σύνορο, με αύξηση της ανάλυσης σε κάθε επανάληψη. Κατ’ αυτόν τον τρόπο γίνεται δυνατή η αριθμητική μελέτη της επιρροής της κλίμακας της τραχύτητας στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής στη διεπιφάνεια στερεών σωμάτων, υπό την επιβολή κατακόρυφης φόρτισης, και πώς η ακριβέστερη προσομοίωση της τραχύτητας σε συνδυασμό με την μεταβολή της κατακόρυφης φόρτισης επιδρούν στο φαινόμενο.

Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε έξι ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαιο 1 - 6, αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται συνοπτικά το φαινόμενο της μεταφοράς θερμότητας και οι μηχανισμοί της, αγωγή, συναγωγή και ακτινοβολία. Επίσης, γίνεται αναφορά στους όρους και τις έννοιες που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν το θερμικό πρόβλημα που εξετάζεται, καθώς και οι παραδοχές του θερμικού μοντέλου προσομοίωσης.

Το Κεφάλαιο 2 πραγματεύεται τη fractal γεωμετρία και τη χρήση της στην περιγραφή περίπλοκης γεωμετρίας. Γίνεται αναφορά στην έννοια της τραχύτητας, στην κλασματική – fractal διάσταση και τη χρήση fractal συναρτήσεων παρεμβολής στην παραγωγή τραχιών επιφανειών.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η χρήση της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων για τη δισδιάστατη μη γραμμική ανάλυση της θερμικής αγωγιμότητας. Γίνεται περιγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και των συνοριακών συνθηκών του χρησιμοποιούμενου προσομοιώματος, των ιδιοτήτων του υλικού που χρησιμοποιήθηκε και πώς αυτές

επηρεάζονται από τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η χρήση των fractal συναρτήσεων παρεμβολής για την προσομοίωση της τραχύτητας της διεπιφάνειας. Τέλος γίνεται αναφορά στη χρήση αλγορίθμου node-to-segment που χρησιμοποιεί το λογισμικό MARC για την επίλυση προβλημάτων επαφής και θερμικής σύζευξης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης, σε μικροσκοπικό επίπεδο. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η θερμική αγωγιμότητα στα σημεία επαφής της διεπιφάνειας για τις διαφορετικές αναλύσεις της τραχύτητας και τις διαφορετικές εντάσεις του κατακόρυφου φορτίου που ελήφθησαν υπόψη στην παρούσα μελέτη.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης της επιρροής της τραχύτητας και του κατακόρυφου φορτίου στη θερμική αγωγιμότητα επαφής στη διεπιφάνεια σε μακροσκοπικό επίπεδο, καθώς και τα συγκεντρωτικά διαγράμματα θερμικής αγωγιμότητας και οι απεικονίσεις της θερμικής ροής και των πλαστικών παραμορφώσεων.

Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα τελικά συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας και προτείνονται κατευθύνσεις περαιτέρω έρευνας πάνω στο αντικείμενο που αυτή πραγματεύθηκε.

Κεφάλαιο 1 Μεταφορά Θερμότητας

Η μεταφορά θερμότητας είναι το φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο μεταδίδεται θερμική ενέργεια από ένα θερμότερο σε ένα ψυχρότερο σώμα, ως αποτέλεσμα της διαφοράς θερμοκρασίας. Υπάρχουν τρεις τρόποι μετάδοσης θερμότητας, σύμφωνα με το Cengel and Ghajar (2014):

Αγωγή, δηλαδή η μετάδοση μέσω επαφής. Γίνεται λόγω της αλληλεπίδρασης των στοιχειωδών σωματιδίων με περισσότερη ενέργεια, με τα γειτονικά τους με λιγότερη, και δεν πραγματοποιείται μετακίνηση μάζας.

Συναγωγή, δηλαδή μεταξύ μιας στέρεης επιφάνειας και ενός ρευστού που βρίσκεται σε κίνηση. Το ρευστό μεταφέρει την ενέργειά του στις στέρεες επιφάνειες.

Ακτινοβολία, δηλαδή την εκπομπή ενέργειας μέσω ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, χωρίς την παρεμβολή ενδιάμεσου σώματος.

1.1 Μηχανισμοί μετάδοσης θερμότητας

Το πρόβλημα της μεταφοράς θερμότητας απασχόλησε πολλούς σπουδαίους επιστήμονες, που κατάφεραν να περιγράψουν μαθηματικά μοντέλα εξισώσεων για τη μελέτη των μηχανισμών. Έτσι, για την αγωγή έχουμε το νόμο του J.B. Fourier, οποίος βασίστηκε στο νόμο ψύξης του I. Newton που περιγράφει τη ροή θερμότητας λόγω συναγωγής, το νόμο Stefan–Boltzmann για την εκπομπή της ακτινοβολίας μελανού σώματος λόγω της θερμοκρασίας του, και του Kirchoff για τη θερμική ακτινοβολία.

Στα επόμενα υποκεφάλαια γίνεται περιγραφή των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας και των φυσικών νόμων που τους περιγράφουν, με τις εξισώσεις ρυθμού.

Σύμφωνα με το Cengel and Ghajar (2014), η θερμότητα που μεταφέρεται από ένα σώμα σε ένα άλλο, συμβολίζεται με Q και έχει μονάδα μέτρησης το J. Ο ρυθμός μετάδοσης θερμότητας, δηλαδή η ποσότητα της θερμότητας που μεταφέρεται από μια επιφάνεια στη μονάδα του χρόνου, συμβολίζεται με \dot{Q} και μετριέται σε W. Τέλος, ο ρυθμός μετάδοσης

Θερμότητας στη μονάδα επιφανείας, κάθετης στη κατεύθυνση της μετάδοσης, ονομάζεται ροή θερμότητας, \dot{q} , μετριέται σε W/m^2 και δίνεται από τη σχέση:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (1.1)$$

A είναι η επιφάνεια από την οποία γίνεται η μετάδοση ενέργειας (m^2)

1.1.1 Μετάδοση μέσω αγωγής

Όπως αναφέρθηκε ήδη, η αγωγή αποτελεί τον τρόπο μετάδοσης θερμότητας διαμέσου στερεών ή ακίνητων ρευστών σωμάτων. Στο επίπεδο των σωματιδίων, η θερμότητα μεταδίδεται μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρονίων (διάχυση) είτε από τις δονήσεις των μορίων μέσω των δεσμών του δικτυωτού πλέγματος. Ο ρυθμός της μετάδοσης θερμότητας, ή αλλιώς η θερμική ροή, εξαρτάται από τη γεωμετρία, το πάχος και το υλικό του μέσου, καθώς και από τη διαφορά θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση μονοδιάστατης αγωγής μόνιμης ροής (steady state), η εξίσωση που δίνει το ρυθμό μετάδοσης θερμότητας βασίζεται στο νόμο του Fourier, σύμφωνα με το Cengel and Ghajar (2014):

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1.2)$$

Όπου,

k είναι η θερμική αγωγιμότητα του υλικού (W/mK)

dT είναι η θερμοκρασιακή διαφορά κατά μήκος ενός απειροελάχιστου πάχους dx

dx είναι το απειροελάχιστο πάχος του υλικού στη διεύθυνση της θερμικής ροής

Η θερμική ροή πραγματοποιείται από τις υψηλότερες προς τις χαμηλότερες θερμοκρασίες γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται αρνητικό πρόσημο «-»

Στη μεταβατική κατάσταση (transient state) λαμβάνεται υπόψη η ικανότητα του σώματος να αποθηκεύει θερμική ενέργεια, επομένως η ροή θερμότητας εξαρτάται και από την πυκνότητα ρ και την ειδική θερμότητα c_p του υλικού. Σε αυτή την περίπτωση, σύμφωνα με το Cengel and Ghajar (2014), για μονοδιάστατη θερμική ροή, η εξίσωση γίνεται:

$$\dot{Q}(t) = hA_s [T(t) - T_\infty] \quad (1.3)$$

Όπου,

h ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ σώματος και περιβάλλοντος (W/m^2K)

A_s το εμβαδόν της επιφάνειας (m^2)

$T(t)$ η θερμοκρασία του σώματος τη χρονική στιγμή t , σε K

T_{∞} η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε K

Τότε, η θερμότητα που μεταφέρεται μεταξύ ενός σώματος αρχικής θερμοκρασίας T_i και του περιβάλλοντός του, περιγράφεται από την εξίσωση:

$$Q = mc_p [T(t) - T_i] \quad (1.4)$$

1.1.2 Μετάδοση μέσω συναγωγής

Η συναγωγή αφορά τη μεταφορά θερμότητας μεταξύ ενός στερεού και ενός ρευστού που βρίσκεται σε κίνηση. Όπως αναφέρεται στο Cengel and Ghajar (2014), μπορεί να είναι φυσική, όταν η κίνηση του ρευστού οφείλεται στον θερμό αέρα κοντά στην επιφάνεια που ανεβαίνει, όντας ελαφρύτερος, και τον ψυχρότερο που κατεβαίνει. Αντίθετα, στην εξαναγκασμένη, η ροή του ρευστού διατηρείται με χρήση κάποιου εξωτερικού μέσου (ανεμιστήρας, άνεμος, αντλία)

Η ροή θερμότητας λόγω συναγωγής περιγράφεται από το νόμο ψύξης του Newton και δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (1.5)$$

Όπου

h ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας λόγω συναγωγής (W/m²K).

A_s το εμβαδόν της επιφάνειας του στερεού (m²)

T_s η θερμοκρασία της επιφάνειας του στερεού σε K

T_{∞} η θερμοκρασία του ρευστού πριν έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του στερεού σε K

1.1.3 Μετάδοση μέσω ακτινοβολίας

Η ενέργεια που εκπέμπει ένα σώμα υπό τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, ονομάζεται ακτινοβολία, και οφείλεται σε αλλαγές της ενεργειακής κατάστασης των ηλεκτρονίων των μορίων ή ατόμων. Σύμφωνα με το Cengel and Ghajar (2014), σε αντίθεση με την αγωγή και τη συναγωγή, η ακτινοβολία δεν προϋποθέτει την ύπαρξη ενδιάμεσου μέσου αλλά μεταδίδεται χωρίς απώλειες σε συνθήκες κενού. Η θερμική ακτινοβολία διαφέρει από τις άλλες μορφές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (ραδιοκύματα, μικροκύματα, ακτίνες X κ.λπ.) καθώς σχετίζεται με τη θερμοκρασία των σωμάτων. Συνεπώς κάθε σώμα με θερμοκρασία ανώτερη των 0 K εκπέμπει θερμική ακτινοβολία.

Το ιδεατό σώμα που εκπέμπει θερμική ακτινοβολία με το μέγιστο δυνατό ρυθμό ονομάζεται μέλαν σώμα (blackbody). Επιπλέον, το μέλαν σώμα έχει την ικανότητα να απορροφά όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτό. Για τις πραγματικές επιφάνειες, το μέγεθος της απορροφητικότητας α , παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1, ενώ για το μέλαν σώμα $\alpha=1$.

Για μια επιφάνεια θερμοδυναμικής θερμοκρασίας T_s , ο ρυθμός αυτός στη μονάδα του χρόνου δίνεται από το νόμο των Stefan–Boltzmann:

$$\dot{Q}_{emit} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (1.6)$$

Όπου

ε η ικανότητα εκπομπής (emissivity), η οποία λαμβάνει τιμές μεταξύ 0 και 1, και προσδιορίζει το βαθμό στον οποίο ένα σώμα προσεγγίζει την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, για το οποίο $\varepsilon = 1$.

$\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ η σταθερά Stefan–Boltzmann

Όπως αναφέρεται στο Cengel and Ghajar (2014), για μια επιφάνεια που περικλείεται από μια άλλη, πολύ μεγαλύτερη επιφάνεια θερμοδυναμικής θερμοκρασίας T_{sur} , και μεταξύ τους παρεμβάλλεται ρευστό που δεν παρεμβαίνει στο μηχανισμό της ακτινοβολίας, ο καθαρός ρυθμός θερμικής ακτινοβολίας δίνεται από την εξίσωση:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad (1.7)$$

1.2 Περιγραφή του προβλήματος – διασαφήνιση όρων και εννοιών

Το πρόβλημα που μελετάται στην παρούσα εργασία αφορά τη μετάδοση της θερμότητας μέσω αγωγιμότητας στη διεπιφάνεια μεταξύ δύο μεταλλικών δίσκων, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της τραχύτητας, υπό την επιβολή διάφορων τιμών κατακόρυφου φορτίου. Το πρόβλημα διαχωρίζεται σε θερμικό και μηχανικό. Ο άνω δίσκος είναι παραμορφώσιμος ενώ ο κάτω άκαμπτος. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με την παραδοχή συνθηκών κενού στη διεπιφάνεια των δύο σωμάτων, επομένως δεν υφίσταται συναγωγή, και η ακτινοβολία θεωρείται αμελητέα. Στις επόμενες παραγράφους γίνεται αναφορά στις έννοιες που συναντώνται στα προβλήματα θερμικής επαφής, όπως είναι η επιφάνεια επαφής, η θερμική αγωγιμότητα επαφής, η θερμική αντίσταση επαφής και η αντίσταση στένωσης.

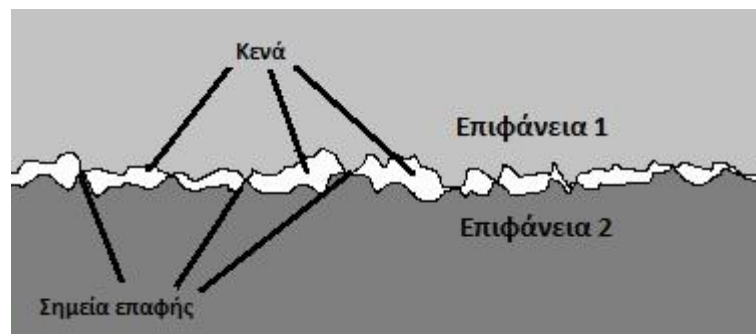
1.2.1 Φορτίο και επιφάνεια επαφής

Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω, οι δύο δίσκοι έρχονται σε επαφή με την επιβολή κατακόρυφου φορτίου. Το φορτίο εφαρμόζεται ομοιόμορφα στην άνω επιφάνεια του άνω δίσκου, ο οποίος

μετατοπίζεται και έρχεται σε επαφή με τον κάτω δίσκο σε σημεία της διεπιφάνειας. Η επιβολή του φορτίου έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων και την παραμόρφωση του άνω δίσκου. Κατ' αυτόν τον τρόπο, υπάρχει σταδιακή μεταβολή των σημείων επαφής και η δημιουργία νέων επιφανειών επαφής. Η επιφάνεια αυτή που βρίσκεται σε επαφή λόγω της επιβολής του μηχανικού φορτίου αποτελεί την επιφάνεια σύσφιξης.

Επιπλέον, η ανάλυση των κατεργασμένων επιφανειών από μικροσκοπική άποψη αποδεικνύει ότι όλες διαθέτουν ατέλειες ή αποκλίσεις από την εξιδανικευμένη γεωμετρία τους. Συνεπώς, λόγω της τραχύτητας και του κυματισμού που παρουσιάζουν, οι επίπεδες επιφάνειες έρχονται σε επαφή μόνο σε μερικά διακριτά σημεία, με αποτέλεσμα η πραγματική επιφάνεια επαφής να είναι πολύ μικρότερη από αυτή που παρατηρείται μακροσκοπικά (φαινόμενη επιφάνεια επαφής), όπως αναφέρουν οι Mantelli and Yovanovich (2002).

Στο σχήμα 1.2.1.1 παρουσιάζεται σχηματικά η περιοχή επαφής μεταξύ δύο τραχειών επιφανειών.



Σχήμα 1.2.1.1: Σχηματική απεικόνιση περιοχής επαφής μεταξύ τραχειών επιφανειών.

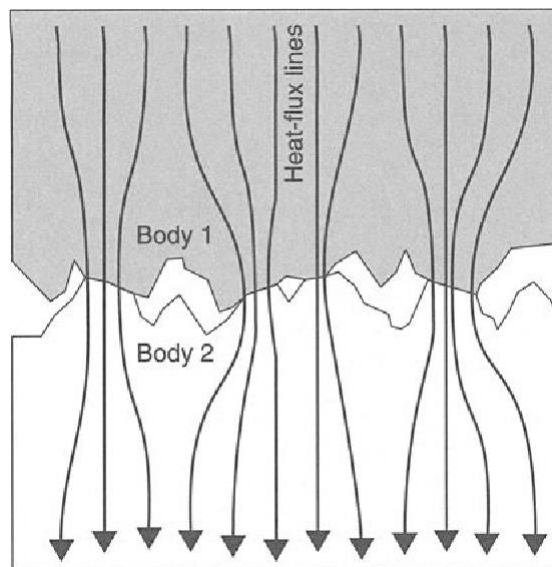
1.2.2 Θερμική αντίσταση επαφής και αντίσταση στένωσης

Σε συνέχεια των ανωτέρω, η τραχύτητα των επιφανειών επαφής στο μικροσκοπικό επίπεδο, συνίσταται σε κοιλάδες και κορυφές, με κυμαινόμενο ύψος και άλλα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, που οφείλονται στον τρόπο κατασκευής και διαμόρφωσης των επιφανειών.

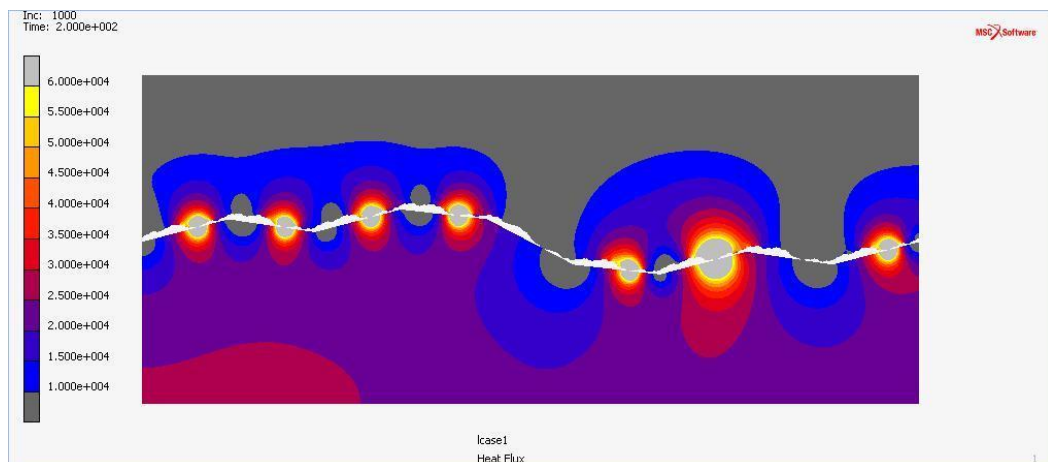
Σύμφωνα με το Mantelli and Yovanovich (2002), καθώς η πίεση μεταξύ των σωμάτων αυξάνεται, οι περιοχές που εμφανίζουν εντονότερη τραχύτητα (μεγαλύτερο ύψος αιχμών) παραμορφώνονται, δημιουργώντας περιοχές όπου η ροή θερμότητας γίνεται μόνο μέσω αγωγιμότητας αφού επικρατούν συνθήκες κενού μεταξύ των διεπιφανειών των δύο σωμάτων. Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι η θερμότητα που μεταδίδεται μέσω ακτινοβολίας στις περιπτώσεις αυτές (θερμοκρασίες $T < 700^\circ\text{K}$) είναι πολύ μικρή και αμελείται.

Επειδή στην περίπτωση επαφής τραχειών επιφανειών, η επιφάνεια από την οποία είναι δυνατή η μετάδοση θερμότητας είναι πολύ περιορισμένη, η θερμική ροή περιορίζεται στα σημεία επαφής που διαμορφώνονται λόγω της ανώμαλης γεωμετρίας. Η συγκέντρωση, αυτή, των γραμμών της ροής θερμότητας προκύπτει λόγω αύξησης της θερμικής αντίστασης, που ονομάζεται αντίσταση στένωσης.

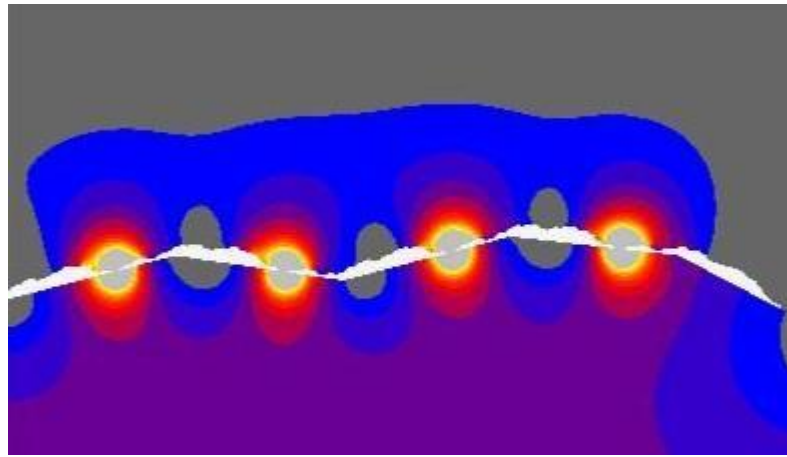
Στο σχήμα 1.2.2.1 δίνεται σχηματική απεικόνιση της συγκέντρωσης των γραμμών της θερμικής ροής στα σημεία επαφής μεταξύ τραχειών επιφανειών, όπως παρουσιάζεται στο Mantelli and Yovanovich (2002) και στα σχήματα 1.2.2.2 και 1.2.2.3 παρουσιάζεται η στένωση της θερμικής ροής στα σημεία επαφής της διεπιφάνειας του προσομοιώματος που μελετήθηκε.



Σχήμα 1.2.2.1: Σχηματική απεικόνιση της συγκέντρωσης των γραμμών της θερμικής ροής στα σημεία επαφής μεταξύ τραχειών επιφανειών



Σχήμα 1.2.2.2: Απεικόνιση της στένωσης της θερμικής ροής σε ένα από τα προσομοιώματα που μελετήθηκαν.

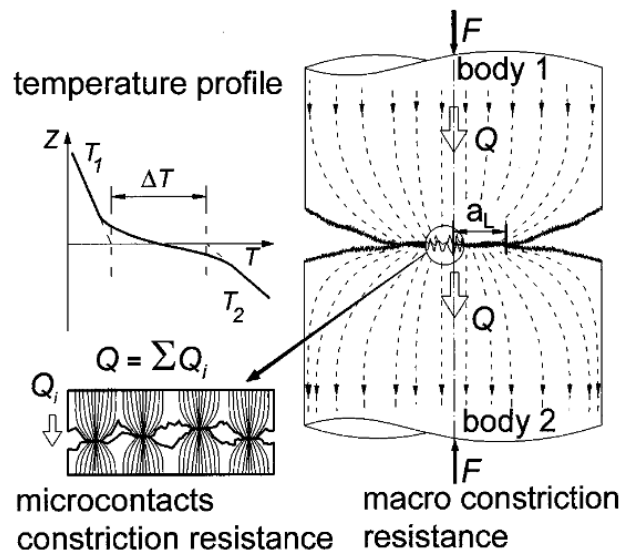


Σχήμα 1.2.2.3: Απεικόνιση της στένωσης της θερμικής ροής στα σημεία επαφής του αριστερού τμήματος του προσομοιώματος του σχήματος 1.2.2.2.

Οι έννοιες της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής και της θερμικής αντίστασης επαφής συχνά χρησιμοποιούνται εναλλακτικά, καθώς αποτελούν μεγέθη αντιστρόφως ανάλογα.

Σύμφωνα με τους Mantelli and Yovanovich (2002) η αντίσταση επαφής (ή η αγωγιμότητα) μπορεί να διαχωριστεί σε δύο αντιστάσεις (ή αγωγιμότητες) σε σειρά, ανάλογα με την κλίμακα των επιφανειακών ατελειών. Όταν τουλάχιστον μία από τις επιφάνειες επαφής έχει ατέλειες μεγάλης κλίμακας, δηλαδή εμφανίζει κυματισμό, τα σημεία επαφής δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στη φαινόμενη επιφάνεια επαφής. Αντίθετα, συγκεντρώνονται σε καλά οριοθετημένες περιοχές εντός της φαινόμενης περιοχής επαφής. Επομένως, η θερμική ροή περιορίζεται πρώτα στην περιοχή μακροεπαφής (αντίσταση μακροεπαφής) και στη συνέχεια περιορίζεται περαιτέρω στα σημεία επαφής μέσα σε αυτήν τη μακροσκοπική περιοχή (αντίσταση μικροεπαφής). Όταν και οι δύο επιφάνειες που έρχονται σε επαφή δεν εμφανίζουν ατέλειες μεγάλης κλίμακας τότε υφίσταται μόνο η αντίσταση μικροεπαφής.

Στο σχήμα 1.2.2.4, σύμφωνα με το Bahrami et al (2006) παρουσιάζεται η μακροσκοπική περιοχή επαφής που προκύπτει λόγω της καμπυλότητας της επιφάνειας ή της μη επιπεδότητας των σωμάτων. Οι μικροεπαφές σχηματίζονται στη διεπιφάνεια μεταξύ των επιφανειακών ατελειών των τραχιών επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ροή θερμότητας παρουσιάζει δύο στάδια αντίστασης σε σειρά, μακροσκοπική και μικροσκοπική αντίσταση. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε σχετικά μεγάλη θερμοκρασιακή πτώση σε όλη τη διεπαφή (θερμοκρασιακό προφίλ πάνω αριστερά).



Σχήμα 1.2.2.4: Απεικόνιση της στένωσης της μακρο- και μικροθερμικής αντίστασης στένωσης.

1.3 Παραδοχές θερμικού μοντέλου προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, αντικείμενο της εργασίας είναι η μελέτη της επιρροής της τραχύτητας και του κυματισμού μεταλλικών επιφανειών στην θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής. Για τον λόγο αυτόν, ήταν αναγκαίο να αποκλειστεί η δυνατότητα μετάδοσης θερμότητας μέσω άλλων μηχανισμών, συνεπώς το προσομοίωμα δημιουργήθηκε με βάση τις ακόλουθες παραδοχές:

- Για την αποφυγή της μετάδοσης μέσω συναγωγής, θεωρήθηκαν για το περιβάλλον της προσομοίωσης συνθήκες κενού στη διεπιφάνεια των δύο σωμάτων.
- Όσον αφορά την ακτινοβολία, πλήθος ερευνητών έχει ασχοληθεί με τη συνεισφορά της, ως μηχανισμός μετάδοσης θερμότητας, στα προβλήματα επαφής. Ο Sadhal (1981) κατέληξε στο συμπέρασμα ότι για χαμηλές θερμοκρασίες διεπιφάνειας έως 1.000 K (726.85 °C) μεταξύ μεταλλικών στερεών σωμάτων που εφάπτονται σε λιγότερο από 1% της διεπιφάνειας, με απόσταση μεταξύ των επαφών μικρότερη του 1 cm, η θερμική ακτινοβολία συνεισφέρει λιγότερο από 2% σε σχέση με το μηχανισμό της αγωγής. Στις εργασίες των Yovanovich and Marotta (2003) και Savija et al (2003) αναφέρεται ότι για θερμοκρασίες διεπιφάνειας έως 600 °C η συνεισφορά της θερμικής ακτινοβολίας γίνεται αμελητέα, ο Bloom (1964) προσδιορίζει αυτή την τιμή στους 1000 °F (540 °C), ενώ οι Fenech and Rohsenow (2003) αντίστοιχα αναφέρουν ότι η μεταφορά θερμότητας λόγω ακτινοβολίας στα κενά της διεπιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα εάν οι θερμοκρασίες είναι μικρότερες από 700 K (426.85 °C).

Καθώς οι εξεταζόμενες θερμοκρασίες δεν υπερβαίνουν τους 400 °C, στην παρούσα εργασία δεν λήφθηκε υπόψη η συνεισφορά της ακτινοβολίας.

- Οι επιφάνειες είναι καθαρές και χωρίς επικαθήσεις ή προσμείξεις και γενικώς ξένα υλικά.
- Το υλικό είναι ισότροπο, επομένως η ροή θερμότητας και η θερμική αγωγιμότητα παραμένουν σταθερές σε όλες τις κατευθύνσεις.

Κεφάλαιο 2 Η Χρήση Fractal Γεωμετρίας στην Προσομοίωση του Κυματισμού και της Τραχύτητας των Επιφανειών

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην χρήση της fractal γεωμετρίας για την προσομοίωση της επιφανειακής τραχύτητας των επιφανειών. Παρουσιάζονται οι όροι που περιγράφουν την τραχύτητα, τα βασικά χαρακτηριστικά της γεωμετρίας fractal, οι συναρτήσεις παρεμβολής που χρησιμοποιήθηκαν και οι παράμετροί τους με επίδραση στην δημιουργία της διεπιφάνειας.

2.1 Τραχύτητα επιφάνειας

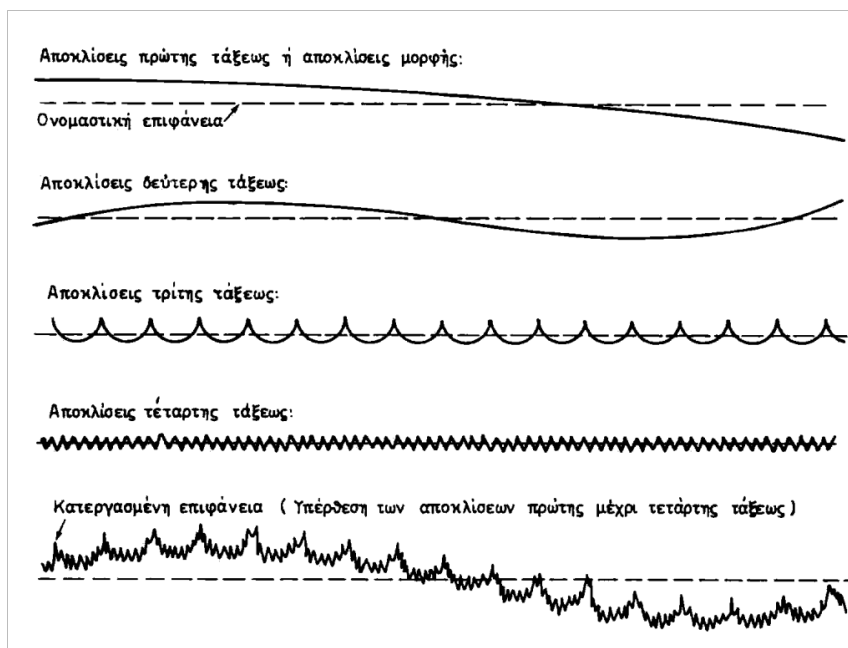
Η έννοια της τραχύτητας αφορά την υφή μιας επιφάνειας, η οποία εμφανίζει αποκλίσεις από την ιδεατή επίπεδη μορφή. Το σύνολο των διαδοχικών αιχμών/βυθίσεων του ανάγλυφου, συνιστά την επιφανειακή τοπογραφία. Για μικρές κατακόρυφες αποκλίσεις η επιφάνεια θεωρείται ομαλή ενώ για μεγάλες αποκλίσεις θεωρείται τραχιά. Οι ατέλειες αυτές συνήθως κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την τραχύτητα και τον κυματισμό των επιφανειών. Σύμφωνα με το Mantelli and Yovanovich (2002), η τραχύτητα (roughness) είναι μια ατέλεια πολύ μικρής κλίμακας και είναι αποτέλεσμα του σχήματος του εργαλείου, της διαδικασίας κατεργασίας, του καλουπιού χύτευσης, κ.λπ. Ο κυματισμός (waviness) αποτελεί ατέλεια μεγαλύτερης κλίμακας, και είναι απόρροια της μηχανικής κατεργασίας.

Σύμφωνα με το πρότυπο DIN 4760 οι γεωμετρικές αποκλίσεις των κατεργασμένων επιφανειών κατηγοριοποιούνται ως εξής (όπως αναφέρεται στο Petropoulos et al, 2010):

- Αποκλίσεις πρώτης τάξης (αποκλίσεις μορφής): πρόκειται για μακρογεωμετρικές αποκλίσεις από την ιδεατή επιφάνεια, όπως αποκλίσεις επιπεδότητας, παραλληλότητας, καθετότητας, κυλινδρικότητα κ.λπ.
- Αποκλίσεις δεύτερης τάξης: είναι οι αποκλίσεις κυματοειδούς μορφής της επιφάνειας που εμφανίζουν σχετικά μεγάλη περίοδο.
- Αποκλίσεις τρίτης τάξης: πρόκειται για αυλακοειδείς ανωμαλίες της επιφάνειας.

- Αποκλίσεις τέταρτης τάξης: ανωμαλίες μικρογεωμετρικής μορφής που οφείλονται σε φθορά των εργαλείων ή ατέλειες της κατεργασίας.
- Αποκλίσεις πέμπτης και ανώτερης τάξης: μικρογεωμετρικές ανωμαλίες λόγω χημικών επιδράσεων.

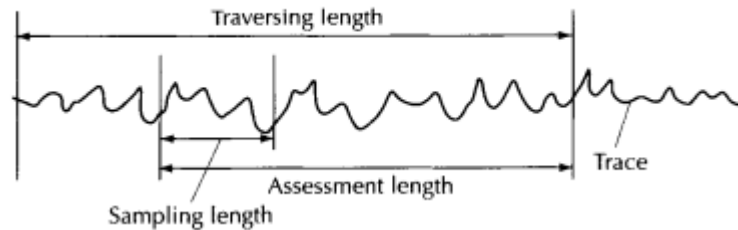
Στο σχήμα 2.1.1. παρουσιάζονται οι γεωμετρικές αποκλίσεις των κατεργασμένων επιφανειών σύμφωνα με το πρότυπο DIN 4760 (1982). Οι αποκλίσεις που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, δηλαδή αυτές που συνιστούν τον κυματισμό και τη μικρο-τραχύτητα μιας επιφάνειας είναι υπέρθεση αποκλίσεων δεύτερης μέχρι τέταρτης τάξεως.



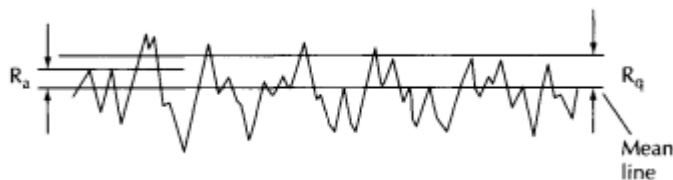
Σχήμα 2.1.1: Απεικόνιση των κατηγοριών αποκλίσεων της τραχύτητας σύμφωνα με το πρότυπο DIN 4760 (1982)

Σύμφωνα με το Whitehouse (2002), στις παραμέτρους που περιγράφουν την τραχύτητα συγκαταλέγονται το ύψος και το πλάτος της τραχύτητας, καθώς και το δειγματοληπτικό μήκος (sampling length, Σχήμα 2.1.2.α)). Το ύψος της τραχύτητας (R) αφορά το ύψος των ανωμαλιών σε σχέση με την ιδεατή επιφάνεια. Στο σχήμα 2.1.2.β) παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι του ύψους, όπως το μέσο ύψος τραχύτητας R_a , που είναι ο μέσος όρος των απόλυτων τιμών των αποκλίσεων των σημείων του πραγματικού περιγράμματος από την κεντρική γραμμή αναφοράς και το R_q ή RMS που αποτελεί την τετραγωνική ρίζα του αριθμητικού μέσου του αθροίσματος των τετραγώνων των τεταγμένων του προφίλ τραχύτητας. Το πλάτος της τραχύτητας αναφέρεται στην απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κορυφών παράλληλα με την επιφάνεια και ονομάζεται και

βήμα τραχύτητας (A_w). Το «μήκος δειγματοληψίας» αφενός πρέπει να περιλαμβάνει αρκετή επιφάνεια δείγματος ώστε να διασφαλίζεται ότι είναι αξιόπιστη η τιμή οποιασδήποτε παραμέτρου επιφάνειας χρησιμοποιείται. Αφετέρου, πρέπει να έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να λαμβάνεται υπόψη μόνο η τραχύτητα και όχι ο κυματισμός.



α)



β)

Σχήμα 2.1.2: Απεικόνιση χαρακτηριστικών παραμέτρων της τραχύτητας

2.2 Η fractal γεωμετρία

Ο όρος fractal, ή μορφόκλασμα, στα ελληνικά, χρησιμοποιείται για να περιγράψει ένα γεωμετρικό σχήμα που προκύπτει από την επανάληψη του ίδιου σχήματος μεγεθυνόμενο σε άπειρο βαθμό. Ο όρος αποδίδεται στον Benoit Mandelbrot, γνωστό για τη συμβολή του στη μελέτη της fractal γεωμετρίας, μεταξύ άλλων με το Mandelbrot (1982), τη «θεωρία της τραχύτητας» και τη χρήση της για την περιγραφή σχημάτων που είναι αδύνατον να περιγραφούν με την ευκλείδεια γεωμετρία. Κατ' αυτόν τον τρόπο, στο Mandelbrot (1967) επιχείρησε να υπολογίσει το μήκος της ακτογραμμής της Βρετανίας, καθώς με την ευκλείδεια γεωμετρία παρατηρείται το παράδοξο η κλίμακα μέτρησης να επηρεάζει το μετρούμενο μήκος, με όσο μικρότερη κλίμακα, το μήκος να τείνει στο άπειρο.

Ένα μορφοκλασματικό σύνολο χαρακτηρίζεται από αυτό-ομοιότητα, η οποία μπορεί να είναι ακριβής με την αναπαραγωγή ολόκληρου του σχήματος σε όλες τις κλίμακες. Η αναπαραγωγή μπορεί να είναι απλή, με την επανάληψη σε διάφορες κλίμακες ή να προκύπτει από μαθηματικούς μετασχηματισμούς. Εμφανίζονται λεπτομερείς δομές ανεξαρτήτου κλίμακας, καθώς η απεικόνιση του fractal σχηματισμού παραμένει ίδια, όσο και

αν μεγεθυνθεί ή σμικρυνθεί. Επίσης η πολυπλοκότητα που παρουσιάζει ένας fractal σχηματισμός δεν μπορεί να περιγραφεί μέσω της ευκλείδειας γεωμετρίας, και υπεισέρχεται η έννοια της κλασματικής fractal διάστασης.

Βάσει της ευκλείδειας γεωμετρίας οποιοδήποτε μήκος μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$L = \sum_{i=1}^{N(\delta)} \delta^1 \quad (2.1)$$

Όπου δ είναι το μήκος ενός στοιχειώδους τμήματος, $N(\delta)$ το πλήθος των στοιχειωδών τμημάτων που συνιστούν το μήκος L και ο εκθέτης 1 αντιπροσωπεύει τη διάσταση της γραμμής.

Το μήκος L δεν εξαρτάται από το μέγεθος του στοιχείου δ , δηλαδή το μήκος L είναι συγκεκριμένο ακόμα και όταν το $\delta \rightarrow 0$. Γενικότερα η Σχέση 2.2.1 μπορεί να εκφραστεί για τη fractal γεωμετρία:

$$L = \sum_{i=1}^{N(\delta)} \delta^D \quad (2.2)$$

Όπου D είναι πραγματικός αριθμός, που παίρνει μη ακέραιες τιμές και αντιπροσωπεύει τη fractal διάσταση μιας καμπύλης. Η μη ακέραια διάσταση D των δομών fractal παραμένει ίδια σε όλες τις κλίμακες δ , σε ένα διάστημα $\delta^* < \delta < \Delta^*$.

2.3 Μέθοδοι υπολογισμού κλασματικών διαστάσεων

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθενται δύο μέθοδοι υπολογισμού κλασματικών διαστάσεων, η μέθοδος Richardson και η μέθοδος box counting.

2.3.1 Μέθοδος Richardson

Η μέθοδος Richardson αναπτύχθηκε από τον Lewis Fry Richardson, Άγγλο φυσικομαθηματικό και μετεωρολόγο, όπως αναφέρεται στο Majumdar and Bhushan (1990). Η εργασία του Richardson (1961) για το συσχετισμό της πιθανότητας δύο γειτονικών χωρών να εμπλακούν σε πόλεμο με το μήκος του κοινού τους συνόρου, και το παράδοξο της ακτογραμμής που αναφέρθηκε προηγουμένως, αποτέλεσε σημείο καμπής για τον Mandelbrot, με την εργασία του Mandelbrot (1967) και την έρευνά του γύρω από τη γεωμετρία fractal.

Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, για τον υπολογισμό της fractal διάστασης D μιας καμπύλης f , η καμπύλη διαιρείται σε N τμήματα μήκους δ , όπου η αρχή ενός τμήματος ταυτίζεται με το τέλος του προηγούμενου. Αν η διαδικασία αυτή επαναληφθεί για

διαφορετικό μήκος δ κάθε φορά, η καμπύλη που προκύπτει αποτελεί σχηματισμό fractal εάν σε ένα διάστημα $\delta^* < \delta < \Delta^*$ ικανοποιείται η σχέση:

$$N(\delta) \sim \delta^{-D} \quad (2.3)$$

Ο εκθέτης D αποτελεί τη «διάσταση Richardson» και συμβολίζεται με D_R

Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο είναι δυνατόν να υπολογιστεί το μήκος της καμπύλης f , χρησιμοποιώντας κάθε φορά διαφορετικό μήκος μέτρησης. Η διάσταση της καμπύλης μπορεί να υπολογιστεί από το γράφημα του μήκους της συναρτήσεως του δ .

2.3.2 Μέθοδος box counting

Σύμφωνα με το Mandelbrot (1982), με τη μέθοδο box counting, γνωστή και ως μέθοδο του πλέγματος, είναι δυνατή η εκτίμηση της κλασματικής διάστασης για μορφοκλασματικούς σχηματισμούς για τους οποίους δεν μπορεί να εφαρμοστεί κάποια αριθμητική διαδικασία υπολογισμού λόγω της περίπλοκης μορφής τους.

Η μέθοδος έχει ευρύτερη εφαρμογή στην ανάλυση σύνθετων προτύπων και μοτίβων και συνίσταται στη διαίρεση μια πολύπλοκης εικόνας ή αντικειμένου σε πλέγματα όλο και μικρότερων τετραγώνων, μέσω της οποίας εξάγονται πληροφορίες.

Η fractal διάσταση μιας καμπύλης εξάγεται από την κάλυψή της με πλέγμα τετραγώνων με πλευρά δ_n και υποδιαίρεση κάθε τετραγώνου εκ νέου σε τετράγωνα με πλευρά $\delta_{n+1} = \delta_n/2$. Η κλασματική διάσταση προκύπτει από το πλήθος των υποτετραγώνων στα οποία εσωκλείονται τμήματα της καμπύλης f . Με τη δημιουργία διαγράμματος σε λογαριθμική κλίμακα, όπου το πλήθος τετραγώνων που περιέχουν τμήματα της fractal καμπύλης συσχετίζεται με το μέγεθος της πλευράς των τετραγώνων, η παραγόμενη καμπύλη, βάσει της εξίσωσης (2.3), προσεγγίζει ευθεία γραμμή. Η κλίση της ευθείας δίνει την κλασματική διάσταση της fractal καμπύλης f και ονομάζεται «φυσική διάσταση box» με το συμβολισμό D_B .

Με βάση τα ανωτέρω, ο υπολογισμός της φυσικής διάστασης box δίνεται από τις σχέσεις:

$$N(f, \delta) = C \times \delta^{-D} \quad (2.4)$$

Όπου C είναι μια θετική σταθερά

Κατά συνέπεια η κλασματική διάσταση δίνεται από τη σχέση:

$$D = \frac{\ln N(f, \delta) - \ln C}{\ln \left(\frac{1}{\delta}\right)} \quad (2.5)$$

Όταν $\delta \rightarrow 0$ τότε και ο όρος $\frac{\ln C}{\ln(\frac{1}{\delta})} \rightarrow 0$ και επομένως η σχέση (2.5) γράφεται:

$$D = \frac{\ln N(f, \delta)}{\ln(\frac{1}{\delta})} \quad (2.6)$$

2.4 Fractal συναρτήσεις παρεμβολής

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η γεωμετρία fractal μπορεί να περιγράψει περίπλοκες δομές και έχει χρησιμοποιηθεί κατεξοχήν για την μελέτη τραχειών επιφανειών. Στη βιβλιογραφία συναντάται πλήθος ερευνητικών εργασιών (π.χ. Majumdar and Buhushan, 1990, Majumdar and Tien, 1990, Panagiotopoulos and Panagouli, 1997, Borodich and Onishchenco, 1999, Mistakidis and Panagouli, 2003, Chen et al, 2009, Panagouli et al, 2020), με αντικείμενο τα προβλήματα επαφής, όπου η επιφανειακή τραχύτητα προσομοιώνεται μέσω της fractal γεωμετρίας, επαληθεύοντας την καταλληλότητά της για την περιγραφή αυτού του είδους των επιφανειών.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, η προσομοίωση της τραχύτητας των επιφανειών των μεταλλικών δίσκων, πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τις fractal συναρτήσεις παρεμβολής, βάσει της διαδικασίας που εφάρμοσε ο Barnsley (1988). Είναι δυνατόν, από ένα σύνολο σημείων $\{(x_i, y_i), i = 0, 1, 2, \dots, N\}$, όπου $f(x_i) = y_i$ και N φυσικός αριθμός, να παραχθεί ένα συνεχές μοντέλο fractal γεωμετρίας, χρησιμοποιώντας τις fractal συναρτήσεις παρεμβολής που προκύπτουν από την επαναληπτική διαδικασία που αναφέρεται στο Panagouli et al (2020):

$$f_{n+1}(x) = c_i l_i^{-1}(x) + d_i f_n(l_i^{-1}(x)) + g_i \quad (2.7)$$

Όπου ο μετασχηματισμός $l_i : [x_0, x_N] \rightarrow [x_{i-1}, x_i]$ ορίζεται από τη σχέση:

$$l_i(x) = a_i x + e_i \quad (2.8)$$

Το γράφημα της fractal συνάρτησης παρεμβολής είναι ο ελκυστής του επαναληπτικού συστήματος συναρτήσεων (Iterated Function System (IFS)) της μορφής $\{R^2; w_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ που προσδιορίζεται από τους μετασχηματισμούς w_i :

$$w_i \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_i & 0 \\ c_i & d_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_i \\ g_i \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Οι μετασχηματισμοί w_i υπόκεινται στους περιορισμούς:

$$w_i \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \end{pmatrix} \text{ και } w_i \begin{pmatrix} x_N \\ y_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} \text{ για } i = 1, 2, \dots, N \quad (2.10)$$

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει ότι σε κάθε μετασχηματισμό w_i υπάρχει μια ελεύθερη παράμετρος που μπορεί να προσδιοριστεί αυθαίρετα. Επειδή οι μετασχηματισμοί w_i μετασχηματίζουν ένα γραμμικό τμήμα παράλληλο στον άξονα y , σε γραμμικό τμήμα παράλληλο στον άξονα y στην κλίμακα που ορίζεται από την παράμετρο d_i (είναι δηλαδή διατμητικοί), επιλέγεται ως ελεύθερη παράμετρος η d_i , καθώς έτσι θα είναι δυνατό να ελεγχθεί η κατακόρυφη κλιμάκωση που παράγεται από το μετασχηματισμό, και άρα το ύψος της τραχύτητας των επιφανειών.

Συνδυάζοντας τις Εξ. (2.9) και Εξ. (2.10) προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις από τις οποίες υπολογίζονται οι υπόλοιπες παράμετροι:

$$a_i = (x_i - x_{i-1}) / (x_N - x_0) \quad (2.11)$$

$$c_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_N - x_0} - \frac{d_i(y_N - y_0)}{x_N - x_0} \quad (2.12)$$

$$e_i = (x_N x_{i-1} - x_0 x_i) / (x_N - x_0) \quad (2.13)$$

$$g_i = (x_N y_{i-1} - x_0 y_i) / (x_N - x_0) - \frac{d_i(x_N y_0 - x_0 y_N)}{x_N - x_0} \quad (2.14)$$

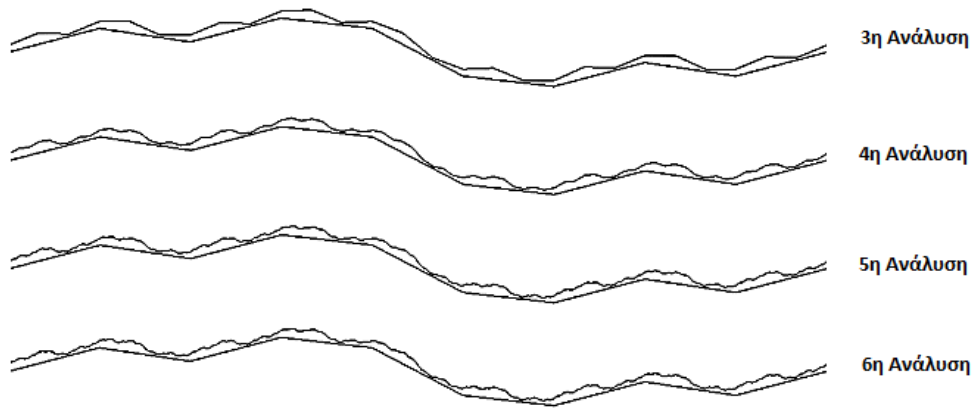
Σύμφωνα με το Barnsley (1988), εάν για την παράμετρο d_i ισχύει $0 \leq d_i \leq 1$ και εάν

$$\sum_{i=1}^N |d_i| > 1 \quad (2.15)$$

και υπό την προϋπόθεση ότι τα σημεία παρεμβολής δεν είναι συνευθειακά, η κλασματική διάσταση του γραφήματος της fractal συνάρτησης παρεμβολής είναι:

$$D = 1 + \frac{\log(\sum_{i=1}^N |d_i|)}{\log(N)} \quad (2.16)$$

Η διεπιφάνεια που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, προέκυψε από την ανωτέρω διαδικασία και τέσσερα συνεπίπεδα σημεία παρεμβολής. Οι τιμές των ελεύθερων παραμέτρων λήφθηκαν $d_1 = d_2 = d_3 = 0.365$ που αντιστοιχούν σε κλασματική διάσταση $D = 1.0826$. Στο ακόλουθο Σχήμα 2.4.1 παρουσιάζονται οι αναλύσεις τις fractal διεπιφάνειας f_3 έως f_6 που προέκυψαν για τη μελέτη του προβλήματος της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 2.4.1 : Αναλύσεις f_3 έως f_6 του άνω συνόρου της διεπιφάνειας σε επαφή με την 2η ανάλυση f_2 του κάτω συνόρου

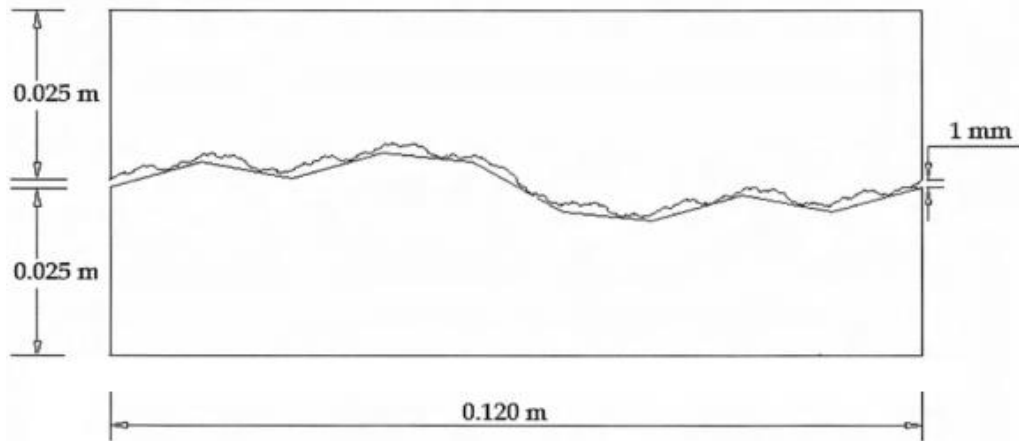
Κεφάλαιο 3 Χρήση της Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων στη Δισδιάστατη μη Γραμμική Ανάλυση Θερμομηχανικού Προβλήματος

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της θερμικής αγωγιμότητας και η επίλυσή του με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, εφαρμόζοντας μη γραμμική ανάλυση σε δύο διαστάσεις. Το πρόβλημα που επιλύεται συνίσταται στην επαφή μιας λείας άκαμπτης επιφάνειας με μία τραχεία παραμορφώσιμη επιφάνεια με ανελαστική συμπεριφορά, υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου αρχικά και στη συνέχεια αύξηση της θερμοκρασίας.

Στα ακόλουθα υποκεφάλαια αναπτύσσονται αρχικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κατασκευής, οι συνοριακές συνθήκες του προσομοιώματος με αναφορά στα θερμικά και μηχανικά φορτία όπως και στις συνθήκες στήριξης καθώς και τα μηχανικά χαρακτηριστικά και οι θερμικές ιδιότητες του υλικού. Στη συνέχεια περιγράφεται η προσομοίωση της τραχύτητας της διεπιφάνειας με χρήση των fractal συναρτήσεων παρεμβολής. Τέλος παρουσιάζεται η διακριτοποίηση του προσομοιώματος με πεπερασμένα στοιχεία και η μέθοδος ανάλυσης που εφαρμόστηκε, χρησιμοποιώντας το λογισμικό MARC έκδοση 2015 (MSC. Marc, 2015a, 2015b).

3.1 Γεωμετρία κατασκευής

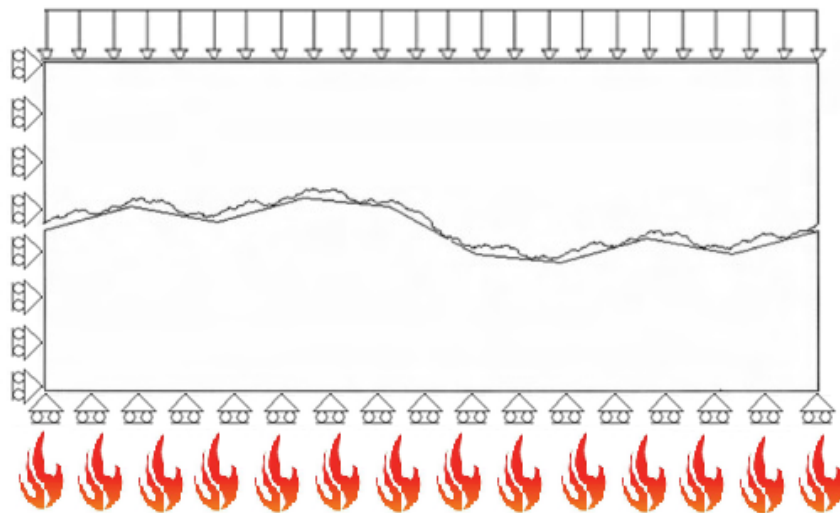
Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από δύο σώματα (δίσκους) με πάχος κατασκευής ίσο με 0.10m, μήκος 0.12 m και ύψος στα δύο άκρα τους ίσο με 0.025 m. Η απόσταση των διεπιφανειών στα άκρα τέθηκε 1 mm. Για το άνω σύνορο της διεπιφάνειας μελετήθηκαν τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας οι οποίες προσομοιώθηκαν γεωμετρικά με τις επαναλήψεις f_3 , f_4 , f_5 και f_6 της fractal συνάρτησης παρεμβολής f ενώ το κάτω σύνορο θεωρήθηκε λείο με τη γεωμετρία του να αντιστοιχεί στη 2η ανάλυση f_2 της fractal συνάρτησης παρεμβολής f . Στο σχήμα 3.1.1 παρουσιάζεται η περίπτωση της 5ης ανάλυσης για το πάνω σύνορο.



Σχήμα 3.1.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δισδιάστατου μοντέλου προσομοίωσης

3.2 Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος

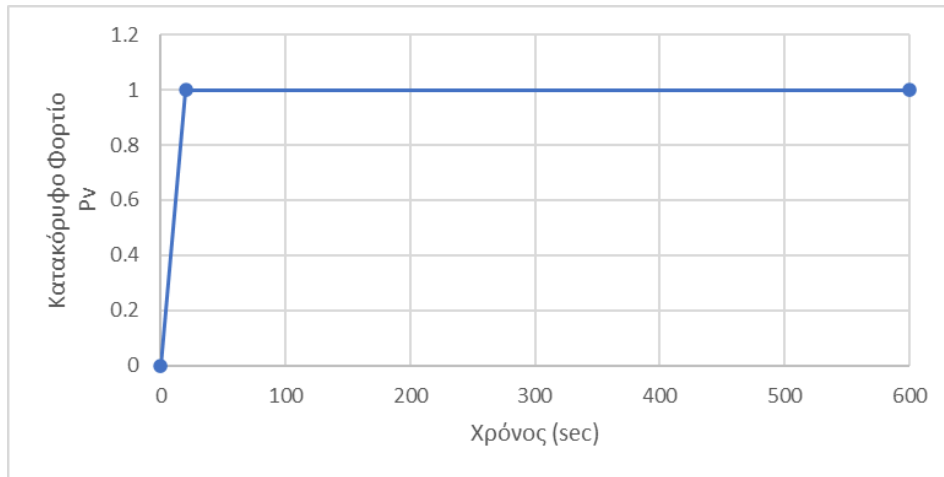
Στο ακόλουθο σχήμα (3.2.1.) παρουσιάζονται οι συνοριακές συνθήκες των μελετούμενων προσομοιωμάτων όπως ορίστηκαν στο λογισμικό MARC 2015. Όπως φαίνεται στο σχήμα, έχουν δεσμευτεί οι κόμβοι της κάτω πλευράς του κάτω σώματος ως προς την κατακόρυφη μετακίνηση (διεύθυνση Y), και οι κόμβοι των αριστερών άκρων και των δύο σωμάτων ως προς την οριζόντια μετατόπιση (διεύθυνση X).



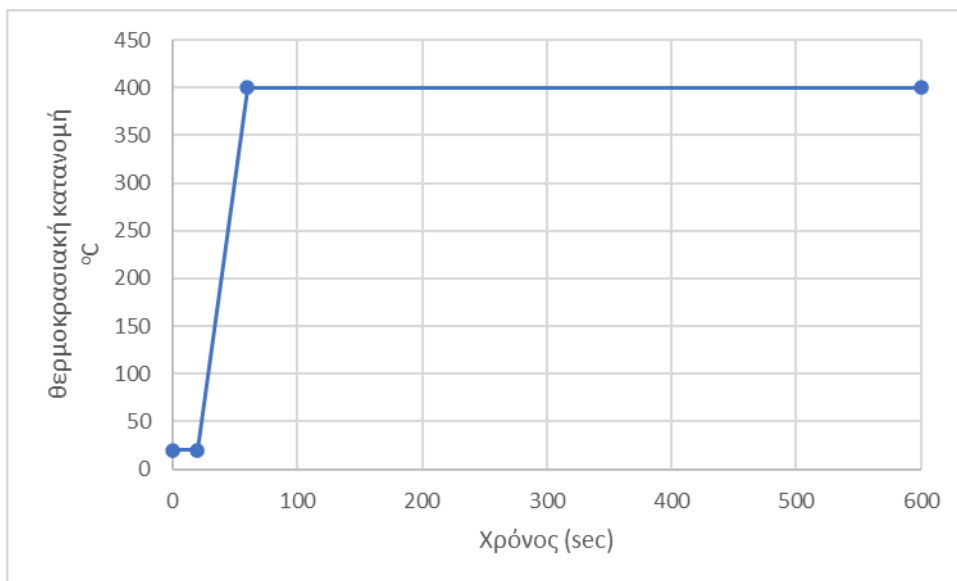
Σχήμα 3.2.1 Συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος. Εξετάζεται η περίπτωση δέσμευσης της οριζόντιας μετατόπισης για το αριστερό άκρο του άνω σώματος.

Η κατασκευή βρίσκεται σε θερμοκρασία 20 °C επομένως εφαρμόστηκε αυτή η αρχική θερμοκρασία σε όλους τους κόμβους των δύο σωμάτων. Στους κόμβους της άνω πλευράς του άνω σώματος εφαρμόστηκε ομοιόμορφο κατακόρυφο φορτίο με σταδιακή επιβολή σύμφωνα με το σχήμα 3.2.3. από την αρχή της ανάλυσης και έως τη χρονική στιγμή 20 sec.

Οι τιμές του φορτίου P_v εμφανίζονται στον πίνακα 3.2.1. Στους κόμβους της κάτω πλευράς του κάτω σώματος επιβλήθηκε σταδιακά ομοιόμορφη θερμοκρασία όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.4. αυξανόμενη από τους 20 °C τη χρονική στιγμή 20 sec και έως τους 400 °C τη χρονική στιγμή 60 sec, και παραμένοντας σταθερή έως το τέλος της ανάλυσης.



Σχήμα 3.2.3 Επιβολή του κατακόρυφου μηχανικού φορτίου συναρτήσει του χρόνου



Σχήμα 3.2.4 Επιβολή θερμοκρασιακής κατανομής συναρτήσει του χρόνου

Όπως προαναφέρθηκε, επιβλήθηκε ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο P (σε kN) στους 101 κόμβους της άνω πλευράς του άνω δίσκου. Αυτό υπολογίστηκε έτσι ώστε να ισοδυναμεί με την επιβολή κατανεμημένου φορτίου:

$$P = \lambda \times f_y \times t \quad (3.1)$$

όπου $f_y = 275 \times 10^3$ kPa, για χάλυβα S275

λ είναι ο πολλαπλασιαστής της τάσης διαρροής για καθεμιά από τις περιπτώσεις φόρτισης που εξετάστηκαν και $t = 0.10\text{m}$ είναι το πάχος του δίσκου

Συνεπώς, σε κάθε ενδιάμεσο κόμβο του άνω συνόρου ασκήθηκε συγκεντρωμένη δύναμη:

$$P = (0.12 \times P_v) / 100 \quad (3.2)$$

όπου 0.12m το συνολικό μήκος του δίσκου, της κατασκευής. ενώ σε κάθε ακραίο κόμβο του άνω συνόρου ασκήθηκε κατακόρυφη συγκεντρωμένη δύναμη:

$$P = (0.12 \times P_v) / (100 \times 2) \quad (3.3)$$

Στον πίνακα 3.2.1 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές που υπολογίστηκαν για τις διάφορες περιπτώσεις φόρτισης.

Πίνακας 3.2.1. Υπολογισμός συγκεντρωμένων δυνάμεων που ασκήθηκαν στους κόμβους του άνω συνόρου για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις φόρτισης.

Πολλαπλασιαστής Τάσης Διαρροής (λ)	Συγκεντρωμένες Δυνάμεις στους Ακραίους Κόμβους (kN)	Συγκεντρωμένες Δυνάμεις στους Ενδιάμεσους Κόμβους (kN)	Τιμή κατακόρυφου κατανεμημένου φορτίου που εφαρμόζεται: $P = \lambda \times f_y \times t$, (kN/m)
0.020	0.33	0.66	550
0.0225	0.37125	0.7425	618.75
0.025	0.4125	0.825	687.5
0.0275	0.45375	0.9075	756.25
0.030	0.4950	0.99	825
0.0325	0.53625	1.0725	893.75
0.035	0.5775	1.155	962.5
0.0375	0.61875	1.2375	1031.25
0.050	0.825	1.65	1375
0.100	1.65	3.3	2750

3.3 Ιδιότητες υλικού της κατασκευής

Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται αναφορά στις ιδιότητες του χάλυβα που θεωρήθηκαν για τις ανάγκες της ανάλυσης. Γενικά είναι γνωστό ότι η μεταβολή της θερμοκρασίας επηρεάζει τα δομικά υλικά, και πιο συγκεκριμένα η αύξησή της επιφέρει μείωση της φέρουσας ικανότητας τους, σαν αποτέλεσμα της δυσμενούς επιρροής της στα μηχανικά χαρακτηριστικά και τις φυσικοχημικές ιδιότητες των υλικών.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι ιδιότητες του χάλυβα S275, υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι οι δύο δίσκοι. Ο κάτω δίσκος όπως αναφέρθηκε και παραπάνω θεωρήθηκε άκαμπτο σώμα (rigid body), ενώ για τον άνω δίσκο θεωρήθηκε ισότροπο υλικό με μέτρο ελαστικότητας $E = 210 \text{ GPa}$ μεταβαλλόμενο σύμφωνα με το κεφάλαιο 3.3.3, λόγο

Poisson $\nu = 0.30$, πυκνότητα $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ και συντελεστή θερμικής διαστολής $\alpha = 1.3 \cdot 10^{-5} /^\circ\text{C}$.

3.3.1 Θερμική αγωγιμότητα χάλυβα

Η θερμική αγωγιμότητα είναι η ιδιότητα που προσδιορίζει την ευκολία μετάδοσης της θερμότητας διαμέσου του υλικού. Συμβολίζεται με λ και μετριέται σε W/mK . Η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα μπορεί να υπολογιστεί βάσει του Ευρωκώδικα EN 1993-1-2 από τις κάτωθι σχέσεις:

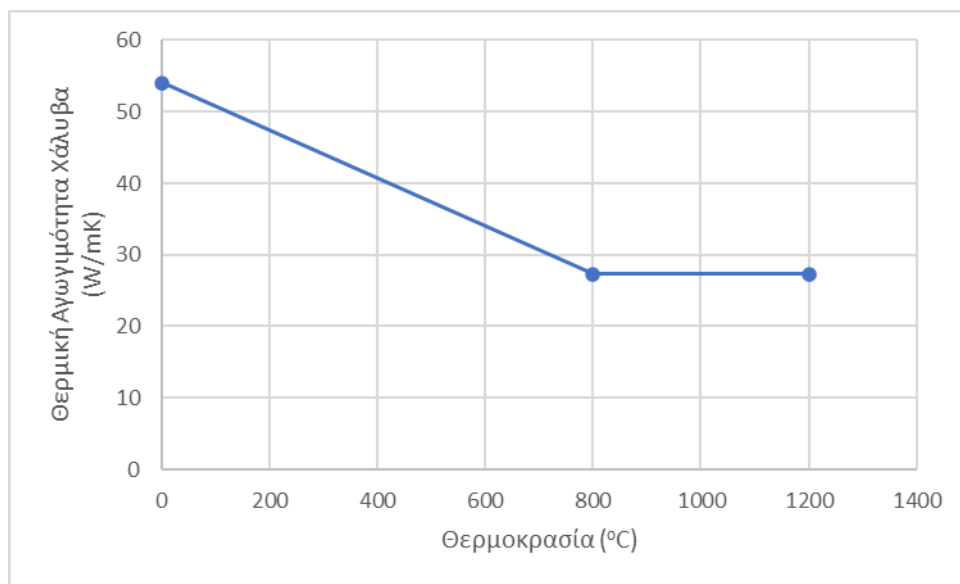
Για θερμοκρασία μεταξύ $20^\circ\text{C} \leq T_\alpha \leq 800^\circ\text{C}$:

$$\lambda_\alpha = 54 - 33.3 \times 10^{-3} T_\alpha \quad (3.4)$$

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

$$\lambda_\alpha = 27.3 \text{ W/mK}$$

Η απεικόνιση των ανωτέρω σχέσεων δίνεται στο σχήμα 3.3.1.1. όπου η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα εμφανίζει γραμμική μείωση για θερμοκρασίες από 20°C έως 800°C και σταθεροποιείται στη τιμή 27.3 W/mK για θερμοκρασίες υψηλότερες από 800°C .



Σχήμα 3.3.1.1 : Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας.

3.3.2 Ειδική θερμότητα χάλυβα

Η ειδική θερμότητα ενός υλικού είναι η ενέργεια που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας ενός σώματος μάζας 1 kg κατά 1 βαθμό K . Συμβολίζεται με C_α και μονάδα

μέτρησης J/kgK. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN 1993-1-2 η σχέση μεταξύ της ειδικής θερμότητας και της θερμοκρασίας για θερμοκρασίες έως και 1200 °C προσδιορίζεται ως εξής:

Για θερμοκρασία μεταξύ 20 °C ≤ T_α ≤ 600 °C :

$$C_a = 425 + 0.773T_a - 1.69 \times 10^{-3}T_a^2 + 2.22 \times 10^{-6}T_a^3 \quad (3.5)$$

Για θερμοκρασία μεταξύ 600 °C ≤ T_α ≤ 735 °C :

$$C_a = 666 - \frac{13002}{T_a - 738} \quad (3.6)$$

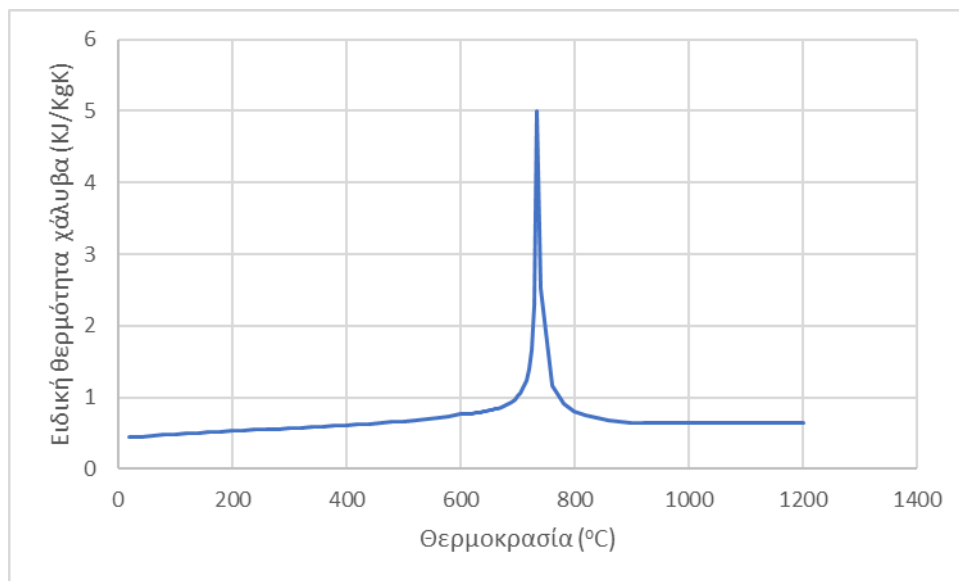
Για θερμοκρασία μεταξύ 735 °C ≤ T_α ≤ 900 °C :

$$C_a = 545 + \frac{17820}{T_a - 731} \quad (3.7)$$

Για θερμοκρασία μεταξύ 900 °C ≤ T_α ≤ 1200 °C :

$$C_a = 650 \text{ J/kgK}$$

Στο ακόλουθο σχήμα 3.3.2.1. δίνεται η μεταβολή της ειδικής θερμότητας σε σχέση με τη θερμοκρασία.



Σχήμα 3.3.2.1. Διάγραμμα της ειδικής θερμότητας του χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας

3.3.3 Εφελκυστική αντοχή χάλυβα και όριο διαρροής

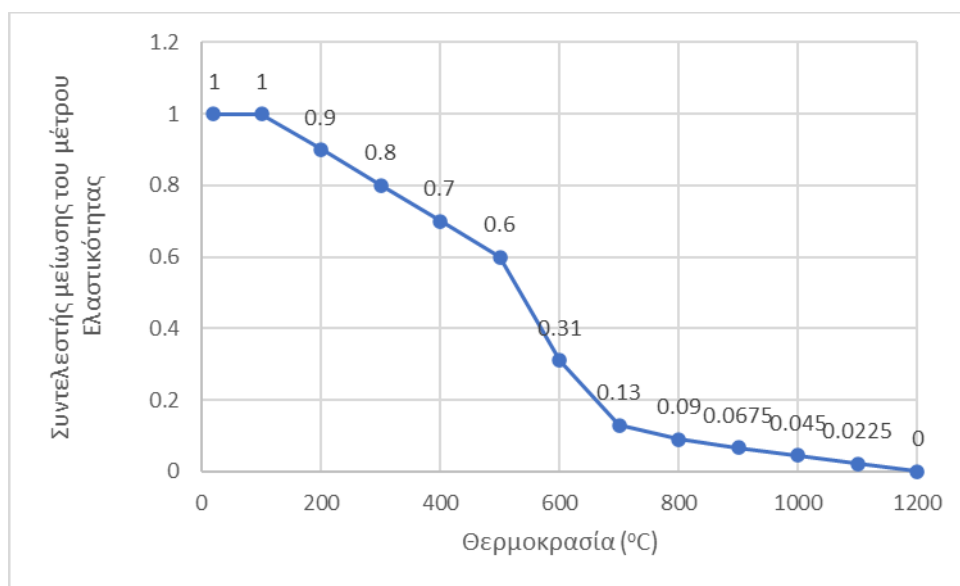
Η αύξηση της θερμοκρασίας επηρεάζει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα, με αποτέλεσμα τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας και της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα.

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EN 1993-1-2, η τιμή του μέτρου ελαστικότητας παραμένει σταθερή για θερμοκρασίες από 20 °C μέχρι και 100 °C και στη συνέχεια από τους 100 °C μέχρι και τους 500 °C μειώνεται γραμμικά στο 60% της αρχικής τιμής. Έπειτα, ο ρυθμός

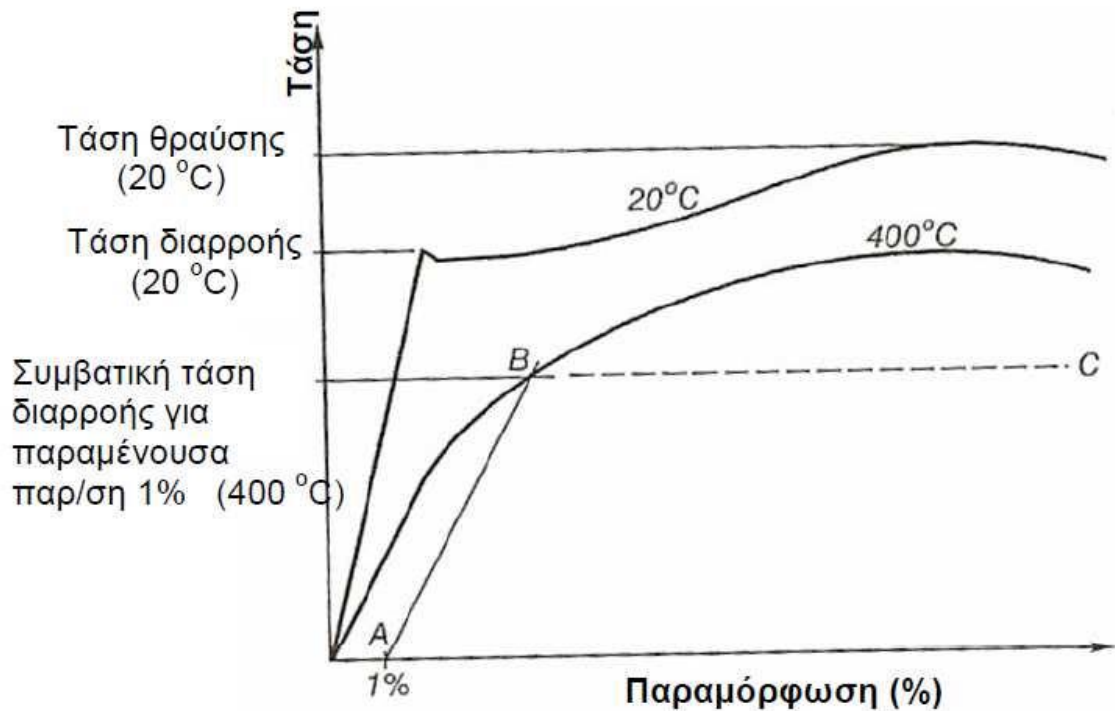
μείωσης του μέτρου ελαστικότητας μεταβάλλεται ανά 100 °C και μέχρι τους 800°C, όπου η τιμή του φτάνει το 9% της αρχικής. Τέλος το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται γραμμικά από τους 800°C έως τους 1200°C όπου πρακτικά μηδενίζεται.

Στο σχήμα 3.3.3.1. παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου Ελαστικότητας για χάλυβα θερμής έλασης σε σχέση με τη θερμοκρασία του υλικού, όπως λήφθηκαν από τον Ευρωκώδικα EN 1993-1-2.

Στο σχήμα 3.3.3.2. δίνονται σχηματικά διαγράμματα τάσεων – παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$) του χάλυβα, για τις θερμοκρασίες 20 °C και 400 °C , όπως αναφέρονται στο Buchanan (2001) που είναι οι ακραίες τιμές που εφαρμόζονται στο προσομοίωμα.



Σχήμα 3.3.3.1. Διάγραμμα μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας (E) του χάλυβα σε σχέση με την αύξηση της θερμοκρασίας.



Σχήμα 3.3.3.2. Σχηματικό διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα, για θερμοκρασίες 20°C και 400°C

3.4 Χρήση των fractal συναρτήσεων παρεμβολής για την προσομοίωση της τραχύτητας της διεπιφάνειας

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η προσομοίωση της τραχύτητας της διεπιφάνειας χρησιμοποιώντας fractal συναρτήσεις παρεμβολής f . Μέσω των συναρτήσεων αυτών, τροποποιείται ένα σύνολο σημείων σε καμπύλη fractal που αναπαριστά διάφορες κλίμακες της τραχύτητας.

Προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή της τραχύτητας στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής, πραγματοποιήθηκαν διαφορετικές αναλύσεις για το άνω σύνορο της διεπιφάνειας. Δημιουργήθηκαν διαφορετικά προφίλ ανάλυσης της τραχύτητας δ , χρησιμοποιώντας επαναλήψεις της fractal συνάρτησης παρεμβολής f . Μεταβαίνοντας από τις χαμηλότερες σε ανώτερες επαναλήψεις, αυξάνεται η τραχύτητα της διεπιφάνειας, καθώς εισάγονται στη διεπιφάνεια ολοένα και μικρότερης κλίμακας «ανωμαλίες».

Χρησιμοποιώντας το γράφημα της συνάρτησης παρεμβολής $f \in C^0$ (όπου C^0 είναι ένα σύνολο συνεχών συναρτήσεων $f: [x_0, x_N] \rightarrow R$) προσομοιώθηκε η διεπιφάνεια της κατασκευής, η οποία διέρχεται από τα σταθερά σημεία παρεμβολής $\{(0,0,0.0), (0.04,0.05), (0.08, -0.05), (0.12,0.0)\}$. Για τις ελεύθερες παραμέτρους λήφθηκαν οι τιμές $d_1 = d_2 = d_3 =$

0.365 και με τη βοήθεια της σχέσης 2.16 υπολογίστηκε η κλασματική διάσταση της διεπιφάνειας η οποία είναι $D = 1.0826$. Για τις υπόλοιπες παραμέτρους χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις των εξ. (2.11) – (2.14). Οι αναλύσεις της διεπιφάνειας υπολογίστηκαν με την επαναληπτική σχέση της εξ. (2.7)

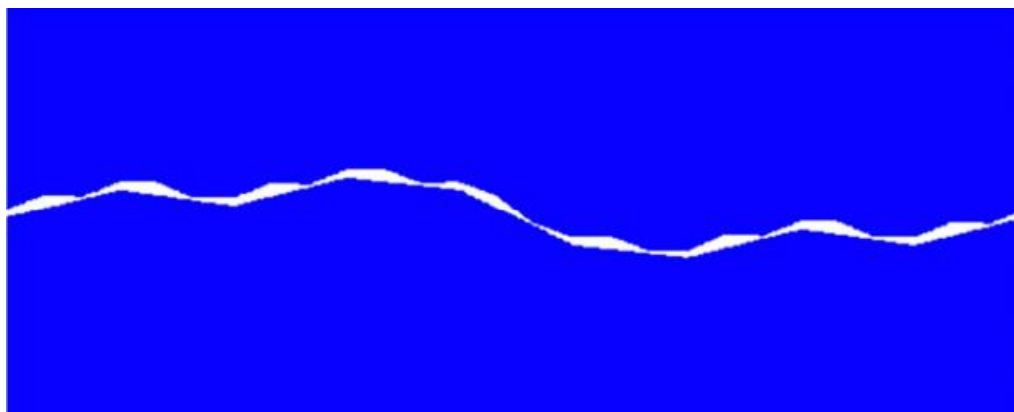
Η διαδικασία αυτή παράγει τις επαναλήψεις f_3, \dots, f_6 που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση της τραχύτητας του άνω συνόρου της διεπιφάνειας, καθώς και την επανάληψη f_2 που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση του κάτω συνόρου της διεπιφάνειας.

Στον ακόλουθο πίνακα 3.4.1 δίνονται τα χαρακτηριστικά των αναλύσεων της fractal διεπιφάνειας f για τις προαναφερθείσες αναλύσεις. Οι επαναλήψεις της συνάρτησης παρεμβολής χαρακτηρίζονται από την τιμή του στοιχειώδους μήκους δ_n της κάθε επανάληψης.

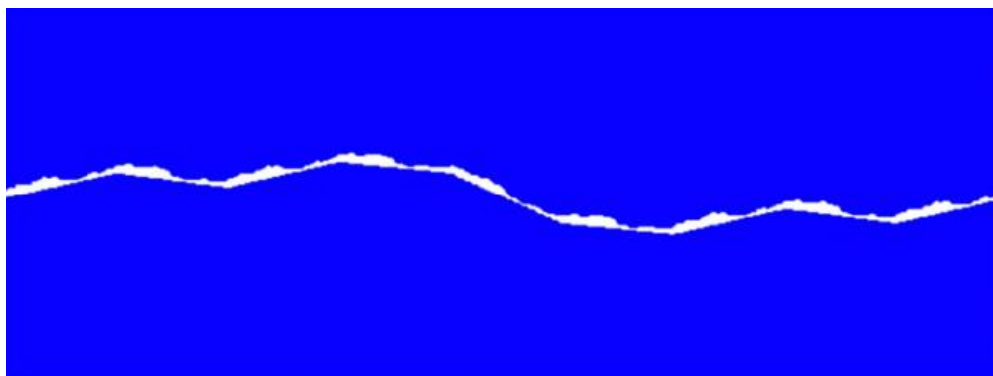
Πίνακας 3.4.1 : Χαρακτηριστικά των αναλύσεων της διεπιφάνειας.

Ανάλυση της διεπιφάνειας f	Βασικό μήκος επανάληψης δ_n (mm)	Συνολικό μήκος της επιφάνειας f (mm)
2 ^η	13.333	123.98
3 ^η	4.444	126.47
4 ^η	1.481	129.18
5 ^η	0.494	132.37
6 ^η	0.160	135.98

Στα σχήματα 3.4.1 και 3.4.2 παρουσιάζονται η 3^η και 6^η περιπτώσεις ανάλυσης της διεπιφάνειας οι οποίες λήφθηκαν υπόψη στα πλαίσια της παρούσας μελέτης.



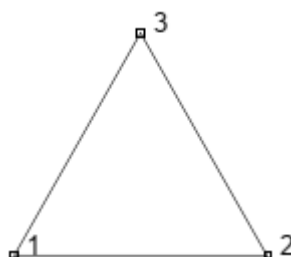
Σχήμα 3.4.1 : Απεικόνιση της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας.



Σχήμα 3.4.2 : Απεικόνιση της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας.

3.5 Διακριτοποίηση προσομοιώματος

Για τη διακριτοποίηση των σωμάτων χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο 201 του λογισμικού MARC, ένα δισδιάστατο, τρίκομβο, ισοπαραμετρικό, τριγωνικό στοιχείο για εφαρμογή σε αναλύσεις επίπεδης έντασης (MSC. Marc, 2015b). Η αρίθμηση των κόμβων γίνεται αντίστροφα της φοράς του ρολογιού (σχήμα 3.5.1). Κάθε κόμβος διαθέτει δύο μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας (u_i, v_i).



Σχήμα 3.5.1 Element 201, τριγωνικό στοιχείο επίπεδης έντασης

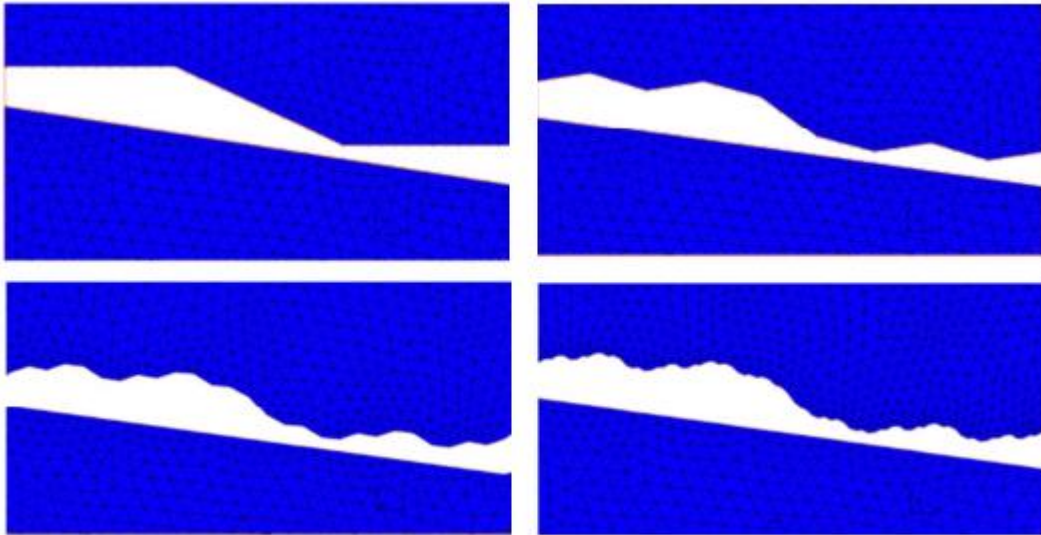
Τα στοιχεία αυτά είναι κατάλληλα διότι έχουν τη δυνατότητα προσομοίωσης πολύπλοκων γεωμετριών. Επειδή οι τάσεις και οι παραμορφώσεις είναι σταθερές σε όλο το στοιχείο, καθώς στο εσωτερικό του ικανοποιούνται οι συνθήκες ισορροπίας, είναι απαραίτητη η χρήση πυκνού κανάβου στην περιοχή της διεπιφάνειας. Η πύκνωση του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων δίνεται στον πίνακα 3.5.1

Πίνακας 3.5.1 Πλήθος πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διακριτοποίηση του προσομοιώματος σε κάθε ανάλυση.

Ανάλυση	Αριθμός Πεπερασμένων Στοιχείων
3 ^η	36883
4 ^η	38267
5 ^η	39638
6 ^η	43514

Για την επαρκή πύκνωση της διακριτοποίησης, έγινε διαχωρισμός των τμημάτων των fractal διεπιφανειών σε στοιχεία μήκους $\delta_6/2$, όπου δ_6 είναι το βασικό μήκος της 6^{ης} επανάληψης.

Στο σχήμα 3.5.2 παρουσιάζονται λεπτομέρειες της διακριτοποίησης γύρω από τις διεπιφάνειες f_3 έως f_6 .



Σχήμα 3.5.2 : Λεπτομέρεια διακριτοποίησης της κατασκευής γύρω από τις διεπιφάνειες f_3 έως f_6 .

3.6 Επίλυση του προβλήματος της επαφής δύο σωμάτων με αλγόριθμο node-to-segment

Στην παράγραφο αυτή κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στην μέθοδο ανάλυσης που ακολουθήθηκε χρησιμοποιώντας το λογισμικό MARC, για την επίλυση του προβλήματος της επαφής δύο σωμάτων και της μετάδοσης θερμότητας από το ένα στο άλλο.

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο MSC. Marc (2015a), το αντικείμενο της αριθμητικής ανάλυσης είναι να ανιχνευθεί η κίνηση των σωμάτων, να εφαρμοστούν περιορισμοί προκειμένου να εμποδιστεί η διείσδυση του ενός σώματος μέσα στο άλλο, και να τεθούν οι κατάλληλες συνοριακές συνθήκες για την προσομοίωση της ενδεχόμενης τριβής και της μετάδοσης θερμότητας. Επιπλέον, η προσομοίωση της επαφής απαιτεί συχνά τη χρήση ειδικών στοιχείων επαφής ή κενού. Εντούτοις, το λογισμικό MARC επιτρέπει την αυτόματη εκτέλεση αναλύσεων επαφής χωρίς τη χρήση ειδικών elements. Είναι δυνατόν να εφαρμοστούν δύο αριθμητικές διαδικασίες για την προσομοίωση του προβλήματος της επαφής: ο αλγόριθμος node-to-segment και ο αλγόριθμος segment-to-segment. Στην

παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος node-to-segment, η οποία αποτελεί και την προεπιλογή (default) του προγράμματος και δε λήφθηκε υπόψη η τριβή στη διεπιφάνεια.

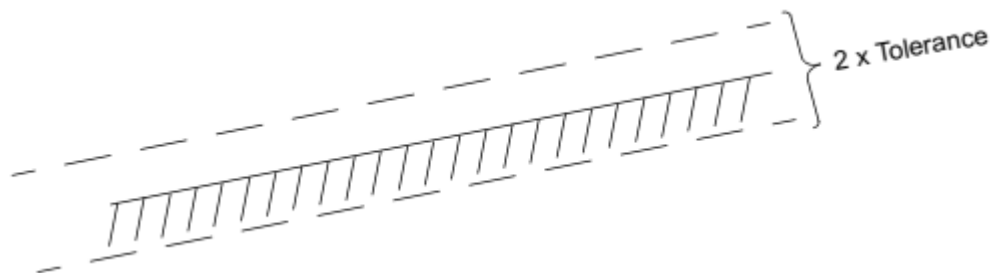
3.6.1 Ανάλυση της επαφής μεταξύ δυο σωμάτων

Στο λογισμικό MARC, όπως αναφέρεται στο MSC. Marc (2015a), τα σώματα που μπορούν να έρθουν σε επαφή μπορεί να είναι είτε παραμορφώσιμα (deformable) είτε άκαμπτα (rigid). Γενικότερα, τα σώματα μπορούν να διαχωριστούν σε διακριτοποιημένα σώματα (meshed body) και γεωμετρικά σώματα (geometric body) , όπου τα πρώτα αποτελούνται από πεπερασμένα στοιχεία και τα δεύτερα από καμπύλες (2-D) ή επιφάνειες (3-D).

Με βάση το σύνολο των στοιχείων που ορίζουν το σώμα, το λογισμικό MARC καθορίζει αυτόματα τους κόμβους και τα άκρα (2-D) ή τις όψεις (3-D) που βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια του σώματος, και χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό της επαφής με το ίδιο ή με άλλο σώμα, ανάλογα με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιείται. Στην περίπτωση node-to-segment που εφαρμόστηκε, κάθε κόμβος που βρίσκεται στη διεπιφάνεια του σώματος αποτελεί εν δυνάμει κόμβο επαφής.

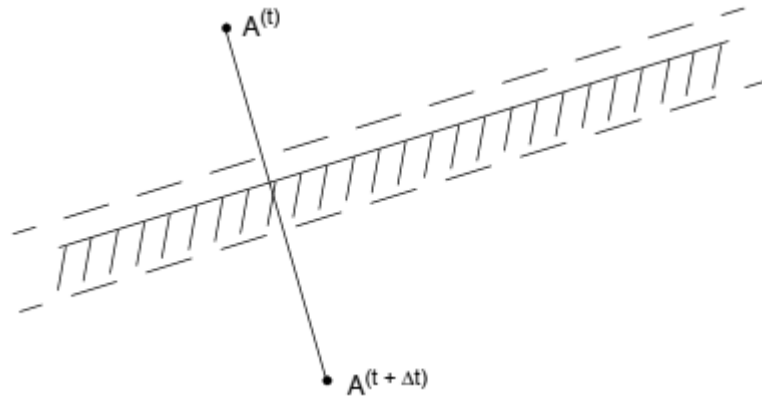
Σε συζευγμένα προβλήματα (coupled analysis), τα άκαμπτα σώματα αποτελούνται από καμπύλες (2-D) ή επιφάνειες (3-D) ή πλέγματα μόνο με θερμικά στοιχεία.

Κατά την επαυξητική διαδικασία ελέγχεται κάθε εν δυνάμει κόμβος επαφής ώστε να διαπιστωθεί εάν βρίσκεται κοντά σε κάποιο τμήμα (segment). Επειδή, από προεπιλογή, ένα σώμα μπορεί να έρθει σε επαφή με οποιοδήποτε άλλο σώμα, γίνεται χρήση των contact tables όπου είναι δυνατόν να οριστεί ποια σώματα δύνανται να έρθουν σε επαφή, με ποιο τρόπο και ποια είναι τα χαρακτηριστικά της επαφής. Προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη ή όχι επαφής, γίνεται χρήση της έννοιας contact tolerance, δηλαδή μιας απόστασης «ανοχής», εντός των ορίων της οποίας θεωρείται ότι υπάρχει επαφή (σχήμα 3.6.1.1).



Σχήμα 3.6.1.1: Εύρος της απόστασης «ανοχής»

Εάν ένας κόμβος βρίσκεται εντός της απόστασης «ανοχής», θεωρείται ότι βρίσκεται σε επαφή με το τμήμα. Όπως αναφέρεται στο MSC. Marc (2015a), η προεπιλεγμένη απόσταση «ανοχής» υπολογίζεται από το λογισμικό MARC και είναι η μικρότερη μεταξύ του $1/20$ του μικρότερου σε μέγεθος στοιχείου της διεπιφάνειας και του $1/4$ του μικρότερου πάχους όλων των στοιχείων σε οποιοδήποτε σώμα επαφής. Στο σχήμα 3.6.1.2 αναπαρίσταται σχηματικά η διείδυση ενός κόμβου A κατά τη μετακίνησή του πέραν της απόστασης ανοχής. Σε αυτή την περίπτωση εφαρμόζεται μια ειδική διαδικασία για την αποφυγή της διείδυσης.



Σχήμα 3.6.1.2: Μετατόπιση και διείδυση του κόμβου A εντός έτερου σώματος

Γενικά, μια μεγάλη απόσταση ανοχής μπορεί να οδηγεί σε υπερεκτίμηση των κόμβων επαφής, και μια μικρή απόσταση δυσχεραίνει την ανίχνευση επαφής, με αποτέλεσμα να αυξάνει δυσανάλογα το υπολογιστικό κόστος. Στην παρούσα περίπτωση, έπειτα από διάφορες δοκιμές, επιλέχθηκε η χρήση της προεπιλεγμένης ρύθμισης. Επιπλέον θεωρήθηκε ότι το παραμορφώσιμο σώμα ολισθαίνει πάνω στο άκαμπτο, και ότι δεν δημιουργείται συσσωμάτωμα.

3.6.2 Συζευγμένη ανάλυση (coupled analysis)

Κατά τη συζευγμένη ανάλυση, τα σώματα παραμορφώνονται υπό την επίδραση των μηχανικών και των θερμικών φορτίων, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών λόγω αύξησης της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση που ένα σώμα είναι άκαμπτο, είναι δυνατόν να γίνει η θεώρηση ότι αυτό έχει σταθερή θερμοκρασία, αποτελεί δηλαδή πηγή ή καταβόθρα θερμότητας, και υπάρχει θερμική ροή μεταξύ αυτού και του παραμορφώσιμου σώματος. Εναλλακτικά, το άκαμπτο σώμα θα πρέπει να αποτελείται από πεπερασμένα στοιχεία, τα οποία όμως έχουν τη δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας αλλά δεν παραμορφώνονται, προκειμένου να είναι δυνατή η διεξαγωγή ανάλυσης για μετάδοση θερμότητας. Κατ' αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το υπολογιστικό κόστος που θα είχε η

ανάλυση αν όλα τα σώματα ήταν παραμορφώσιμα. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε αυτή η λύση, έναντι του ορισμού ενός παραμορφώσιμου σώματος με πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας και σχεδόν μηδενικό συντελεστή θερμικής διαστολής.

Για τον υπολογισμό των θερμικών ροών, αυτές δημιουργούνται αυτόματα στα όρια των παραμορφώσιμων σωμάτων. Διακρίνονται τρεις ροές θερμότητας, κάθε μία με τα δικά της φυσικά χαρακτηριστικά. Όπως αναφέρεται στο MSC. Marc (2015a), το λογισμικό MARC χρησιμοποιεί την αντίστοιχη ροή, ανάλογα με την απόσταση μεταξύ των σωμάτων που έρχονται σε επαφή:

Η απόσταση $d_{contact}$ είναι η απόσταση κάτω από την οποία θεωρείται ότι δύο σώματα έρχονται σε επαφή. Η απόσταση αυτή μπορεί να ορίζεται από το χρήστη, είτε ανά αλληλεπίδραση (contact interaction) είτε συνολικότερα για την ανάλυση, διαφορετικά ταυτίζεται με την προεπιλεγμένη τιμή της απόστασης «ανοχής» (contact tolerance). Η απόσταση d_{near} είναι η απόσταση μεταξύ των δύο σωμάτων η οποία υποδηλώνει την ύπαρξη μικρού κενού και μπορεί να παίρνει ως μέγιστη τιμή αυτή του μικρότερου μεγέθους στοιχείου. Εάν αυτή η απόσταση δεν έχει οριστεί, αυτός ο τύπος ροής αγνοείται. Ο τρίτος τύπος ροής χρησιμοποιείται όταν η απόσταση είναι μεγαλύτερη από d_{near} .

Στην περίπτωση που $d < d_{contact}$ τα σώματα βρίσκονται σε επαφή και υπάρχει αγωγή θερμότητας μεταξύ τους. Τότε η θερμική ροή προσδιορίζεται από τη σχέση:

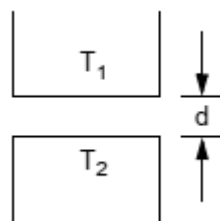
$$q = H_{TC}(T_2 - T_1) \quad (3.8)$$

Όπου

T_1 η θερμοκρασία της επιφάνειας

H_{TC} ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ των δύο επιφανειών,

T_2 η θερμοκρασία στη θέση επαφής, όπως προκύπτει από την παρεμβολή των επικόμβιων θερμοκρασιών του σώματος που έρχεται σε επαφή.



Σχήμα 3.6.2.1.: Απόσταση d μεταξύ δύο σωμάτων

Εάν $d_{contact} < d < d_{near}$, τότε υπάρχει ένα μικρό κενό μεταξύ των σωμάτων. Η θερμική ροή μέσα σε αυτό το κενό οφείλεται στις ακόλουθες φυσικές διεργασίες: συναγωγή, φυσική συναγωγή, ακτινοβολία και αγωγή η οποία εξαρτάται από την απόσταση d :

$$q = H_{CV}(T_2 - T_1) + H_{NC}(T_2 - T_1)^{B_{NC}} + H_{NL}(T_2^{B_{NL}} - T_1^{B_{NL}}) + \sigma \epsilon f (T_2^4 - T_1^4) + \left\{ H_{TC} \left(1 - \frac{d}{d_{near}} \right) + H_{BL} \frac{d}{d_{near}} \right\} (T_2 - T_1) \quad (3.9)$$

Όπου

H_{CV} ο συντελεστής συναγωγής εγγύς πεδίου

H_{NC} ο συντελεστής μεταφοράς για φυσική συναγωγή στο εγγύς πεδίο

B_{NC} ο εκθέτης που σχετίζεται με τη φυσική συναγωγή

H_{NL} ο μη γραμμικός συντελεστής μεταφοράς

B_{NL} ο μη γραμμικός εκθέτης συναγωγής

f ο συντελεστής σκίασης

H_{BL} συντελεστής μεταφοράς θερμότητας που εξαρτάται από την απόσταση διαχωρισμού

Τέλος, εάν $d > d_{near}$, ή δεν έχει οριστεί η απόσταση d_{near} και $d > d_{contact}$, τότε τα σώματα δεν βρίσκονται σε επαφή και υπάρχει ροή θερμότητας προς το περιβάλλον που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q = H_{CTVE}(T_{SINK} - T_1) + \sigma \epsilon f (T_{A2}^4 - T_{A1}^4) \quad (3.10)$$

Όπου

H_{CTVE} ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας στο περιβάλλον

T_{SINK} η θερμοκρασία της επ' άπειρον ροής περιρρέοντος ρευστού

T_{A2} ισούται με $T_2 + T_{ABSREF}$ και είναι η θερμοκρασία σε απόλυτη κλίμακα, δηλαδή μετρημένη σε Κ. Η διαφορά μεταξύ της θερμοκρασίας που έχει εισαχθεί με τη μονάδα μέτρησης του χρήστη και της απόλυτης θερμοκρασίας δίνεται στην επιλογή PARAMETERS.

Στην παρούσα εργασία, όπου μελετάται η μεταφορά θερμότητας αποκλειστικά μέσω αγωγής, ορίστηκε μόνο ο συντελεστής αγωγιμότητας $H_{TC} = 5000 \text{ W/m}^2\text{K}$ για μεταφορά θερμότητας (εξ. 3.8).

Κεφάλαιο 4 Επιρροή του Κυματισμού, της Τραχύτητας και του Κατακόρυφου Φορτίου στη Θερμική Αγωγιμότητα Μεταλλικών Διεπιφανειών σε Μικροσκοπικό Επίπεδο

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η επιρροή της τραχύτητας στη θερμική αγωγιμότητα, υπό την επιβολή κατακόρυφης φόρτισης, στα σημεία επαφής της διεπιφάνειας. Εξετάστηκαν οκτώ περιπτώσεις φόρτισης με ελάχιστο φορτίο το φορτίο που οδηγεί σε τάση ίση με 0.020fy και μέγιστο το φορτίο που οδηγεί σε τάση ίση με 0.0375fy. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν οι περιπτώσεις φόρτισης όπου $P_n/f_y = 0.020, 0.0225, 0.025, 0.0275, 0.03, 0.0325, 0.035, 0.0375$ για τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις ανάλυσης της τραχύτητας (3^η, 4^η, 5^η και 6^η ανάλυση της διεπιφάνειας).

Αρχικά περιγράφεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη της επιρροής της τραχύτητας στην αγωγή θερμότητας λόγω επαφής και στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που εξήχθησαν για κάθε περίπτωση φόρτισης με σχολιασμό των αποτελεσμάτων.

4.1 Μελέτη της θερμική αγωγιμότητας τραχειών επιφανειών

Για κάθε περίπτωση που μελετήθηκε, εξήχθησαν τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών, της θερμικής ροής και άλλων χρήσιμων μεγεθών, για τους κόμβους στα σημεία επαφής, προκειμένου να υπολογιστούν οι θερμοκρασιακές διαφορές και η θερμική αγωγιμότητα σε μικροσκοπικό επίπεδο (asperity level).

Αρχικά, αναγνωρίστηκαν οι κόμβοι της διεπιφάνειας του άνω σώματος, οι οποίοι σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης έρχονται σε επαφή με τη λεία διεπιφάνεια του κάτω σώματος. Για τα ζεύγη των κόμβων (άνω και κάτω σώματος) που αναγνωρίστηκαν επί της διεπιφάνειας, εξήχθησαν για τις χρονικές στιγμές $t = 4, 8, 12, \dots, 600 \text{ sec}$ τα αποτελέσματα της θερμοκρασίας στο σημείο ολοκλήρωσης (temperature at integration point), της ροής θερμότητας (heat flux),

των ολικών πλαστικών παραμορφώσεων (total equivalent plastic strain), των τάσεων Von Mises (Equivalent Von Mises Stress) και της οριζόντιας μετατόπισης (displacement X).

Η επαφή ή μη ενός κόμβου της άνω επιφάνειας με κάποιο σημείο της κάτω επιφάνειας κρίθηκε με βάση την τιμή contact status που λήφθηκε υπόψη (όπου 1= επαφή και 0 = όχι επαφή, βλ. παράγραφο 3.6.1). Επειδή κατά την ανάλυση ελήφθη υπόψη η node-to-segment επαφή στη διεπιφάνεια, όπου κάθε κόμβος της άνω διεπιφάνειας δεν έρχεται απαραίτητα σε επαφή με κόμβο της κάτω, αλλά με κάποια παρειά (edge) ενός στοιχείου της, για λόγους απλοποίησης της διαδικασίας, για την κάτω επιφάνεια, λαμβάνονται υπόψη οι τιμές του πλησιέστερου στο σημείο επαφής κόμβου.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν σε κάθε κόμβο επαφής οι θερμοκρασιακές διαφορές ΔT και η τιμή της θερμικής αγωγιμότητας. Για τη μελέτη σε μικροσκοπικό επίπεδο και την εξαγωγή των τελικών διαγραμμάτων ελήφθησαν υπόψη μόνον οι κόμβοι οι οποίοι διατηρούν την επαφή έως το τέλος της ανάλυσης, ανεξαρτήτως χρονικής στιγμής εκκίνησης της επαφής. Στο Παράρτημα Α δίνονται τα διαγράμματα, για κάθε ανάλυση, όπου συμπεριλαμβάνονται όλοι οι κόμβοι που κάποια στιγμή κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, έρχονται σε επαφή με το κάτω σώμα.

Για τον υπολογισμό της θερμικής αγωγιμότητας στο μικροσκοπικό επίπεδο της τραχύτητας χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη θεώρηση:

Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας ορίζεται από τη σχέση:

$$h = \frac{Q/A_\alpha}{\Delta T} \quad (4.1)$$

Όπου $q = \frac{Q}{A_\alpha}$ είναι η ροή θερμότητας στη φαινόμενη επιφάνεια επαφής A_α και ΔT η διαφορά θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια.

Η αντίσταση στη θερμική ροή λόγω επαφής ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια προς τη ροή θερμότητας:

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (4.2)$$

Συνεπώς η σχέση μεταξύ θερμικής αντίστασης και αγωγιμότητας λόγω επαφής παίρνει τη μορφή:

$$R = \frac{1}{hA_\alpha} \quad (4.3)$$

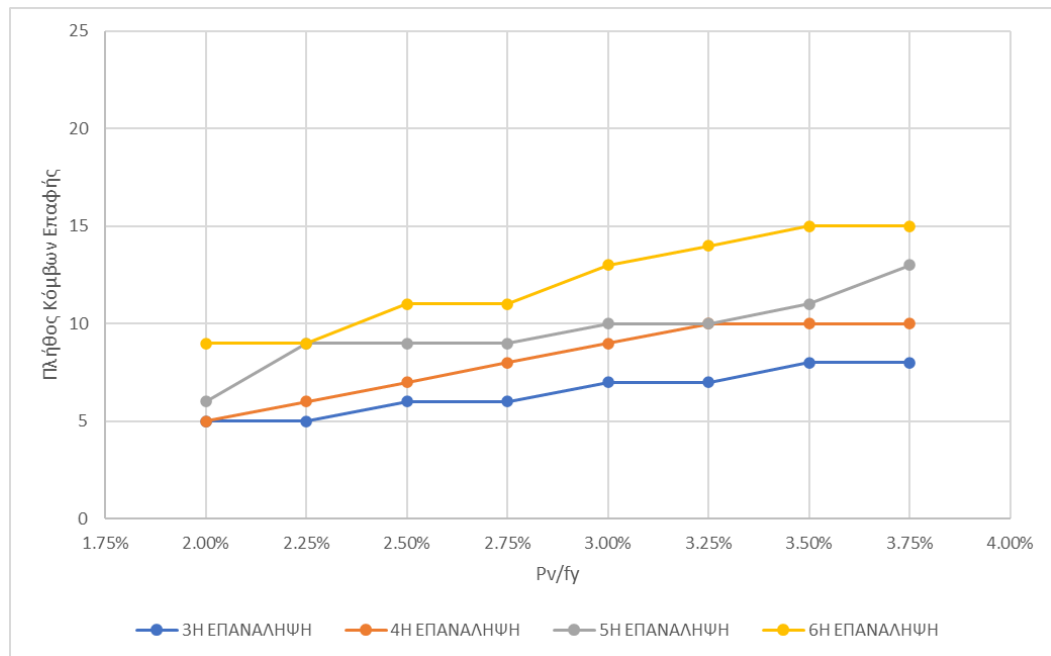
Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής ορίζεται μικροσκοπικά (micro ή local TCC) από τη σχέση:

$$q_c(x, y) = h_c(x, y)[T^{(1)}(x, y) - T^{(2)}(x, y)] \quad (4.4)$$

όπου

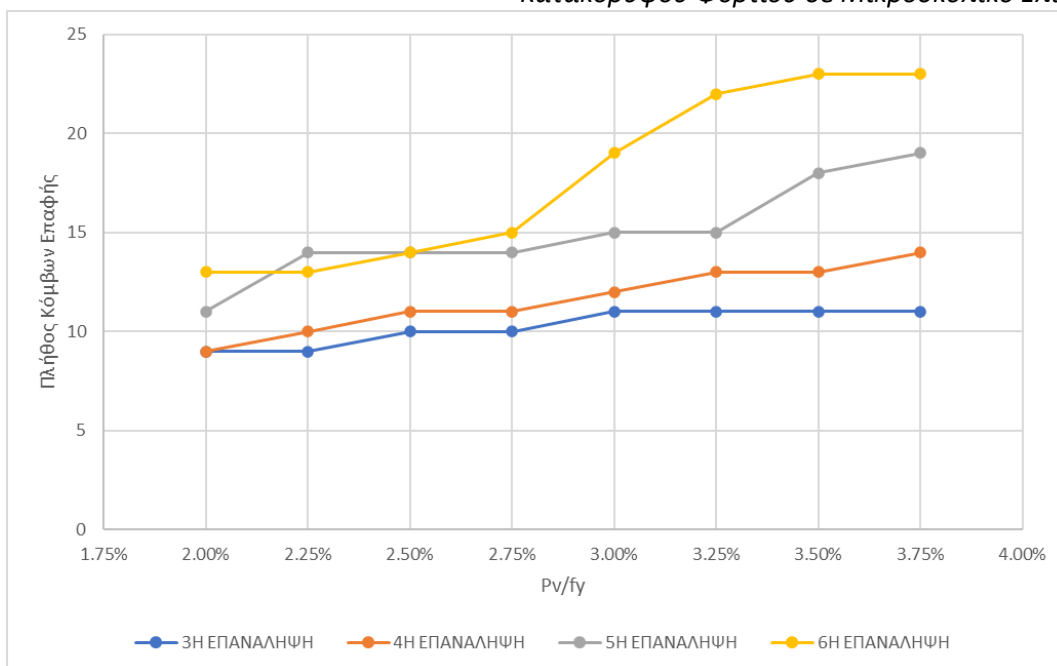
$T^{(i)}$ είναι οι θερμοκρασίες της διεπιφάνειας στο σημείο επαφής με συντεταγμένες (x, y) .

Στο ακόλουθο διάγραμμα (σχήμα 4.1.1) παρουσιάζεται το πλήθος των κόμβων που βρίσκονται σε επαφή σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης συναρτήσει του επιβαλλόμενου κατακόρυφου φορτίου για τις τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας που μελετήθηκαν. Παρατηρείται ότι το πλήθος των κόμβων της διεπιφάνειας που βρίσκονται σε επαφή αυξάνεται με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου, και με την αύξηση της ανάλυσης της τραχύτητας (δηλ. όταν λαμβάνονται υπόψη ολοένα και μικρότερης κλίμακας αποκλίσεις της διεπιφάνειας).



Σχήμα 4.1.1: Διάγραμμα του πλήθους των κόμβων που βρίσκονται σε επαφή σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου.

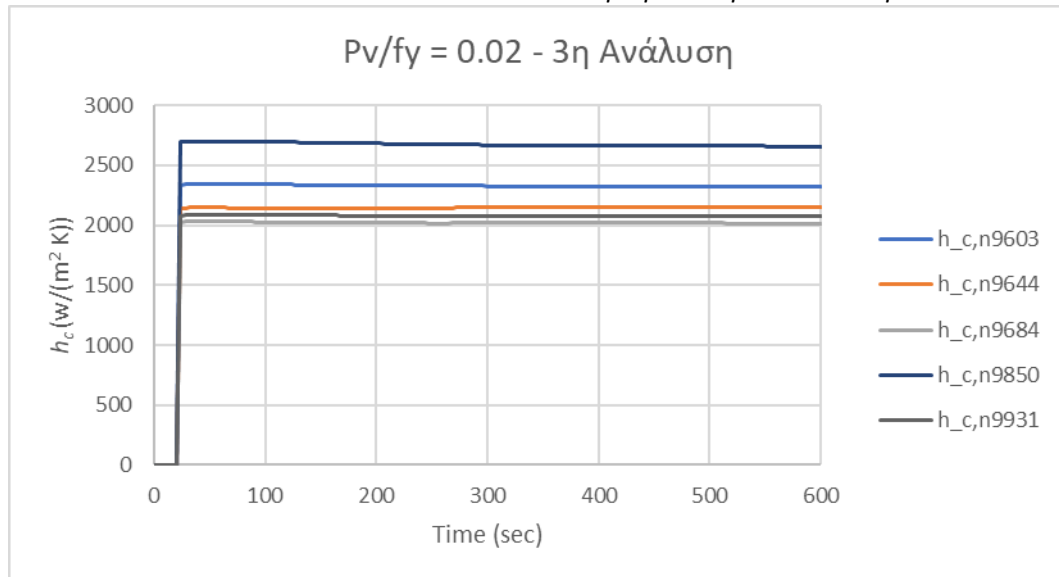
Στο Σχήμα 4.1.2. παρουσιάζεται το πλήθος των κόμβων που ήρθαν σε επαφή κάποια στιγμή κατά διάρκεια της ανάλυσης, για όλες τις περιπτώσεις της τραχύτητας και του κατακόρυφου φορτίου που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας παρατηρούνται μεγαλύτερες διαφορές μεταξύ του αριθμού των κόμβων που ήρθαν σε επαφή κάποια στιγμή κατά την διάρκεια της ανάλυσης και εκείνων που παρέμειναν σε επαφή μέχρι το τέλος της ανάλυσης. Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο όταν το κατακόρυφο φορτίο παίρνει μεγαλύτερες τιμές.



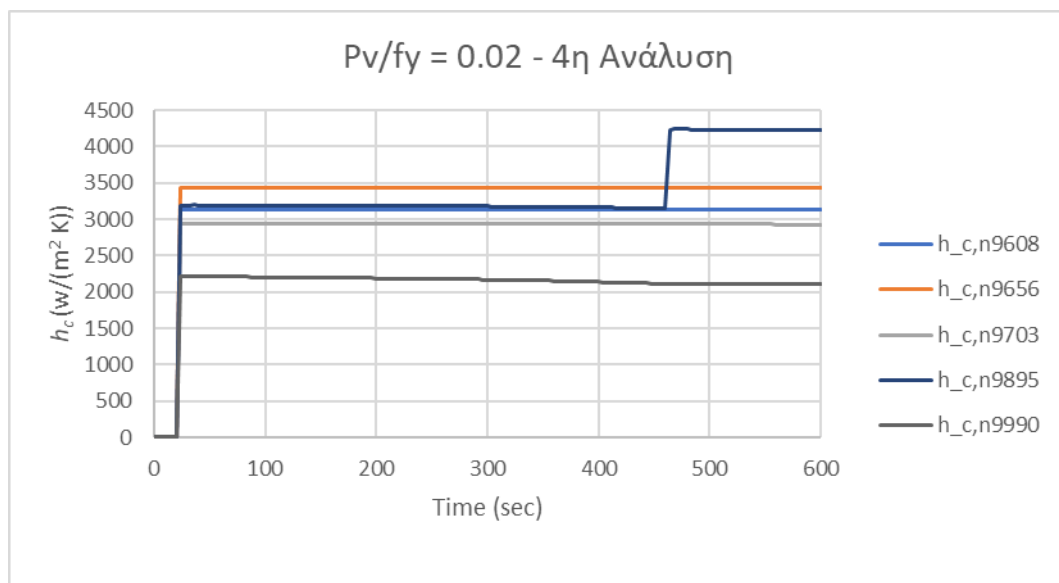
Σχήμα 4.1.2: Διάγραμμα του πλήθους των κόμβων που βρίσκονται σε επαφή κατά τη διάρκεια της ανάλυσης συναρτήσει του κατακόρυφου φορτίου.

4.2 Μελέτη της θερμικής αγωγιμότητας τραχειών επιφανειών υπό την επιβολή κατακόρυφου φορτίου

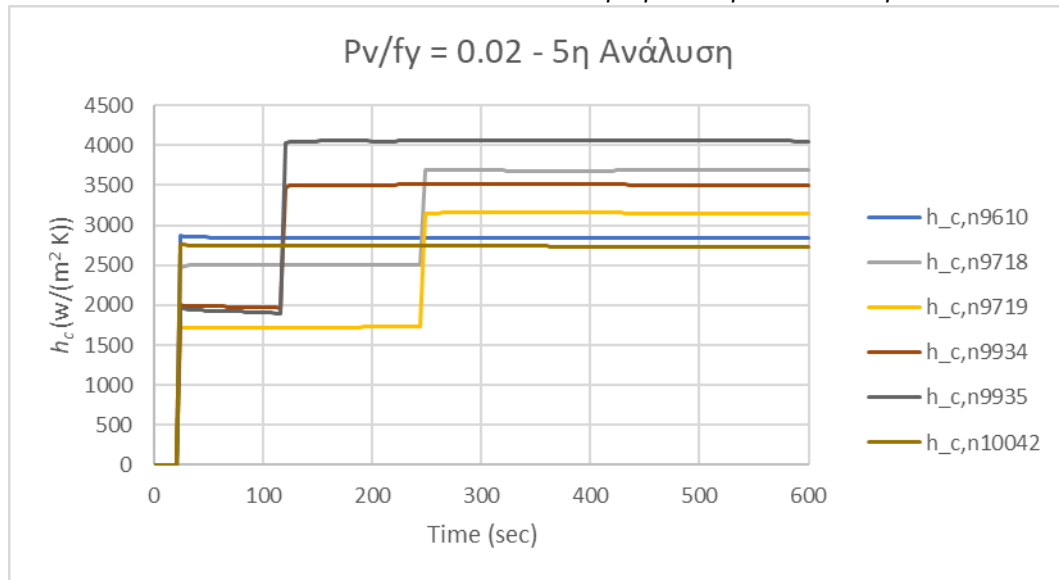
Στα Σχήματα 4.2.1 έως 4.2.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής συναρτήσει του χρόνου, για τις τέσσερις εξεταζόμενες αναλύσεις τραχύτητας του άνω συνόρου για την περίπτωση φόρτισης $Pv/fy = 0.02$. Παρατηρείται ότι ο αριθμός των σημείων επαφής αυξάνεται με την αύξηση της ανάλυσης της τραχύτητας της διεπιφάνειας, καθώς στις υψηλότερες αναλύσεις πλαστικοποιούνται περιοχές γύρω από τους κόμβους επαφής με αποτέλεσμα να έρχονται σε επαφή με το κάτω σύνορο της διεπιφάνειας και οι γειτονικοί τους κόμβοι. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται στα διαγράμματα με μορφή «σκαλοπατιού», όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στα Σχήματα 4.2.3 και 4.2.4. Εντοπίζονται, επίσης, περιπτώσεις όπου οι νέοι κόμβοι επαφής που εμφανίζονται οφείλονται στη σχετική μετατόπιση, λόγω της θερμικής διαστολής του άνω δίσκου, κατά την οποία ορισμένοι κόμβοι «χάνουν» ή «βρίσκουν» επαφή, ανάλογα με τη θέση τους κατά μήκος της διεπιφάνειας.



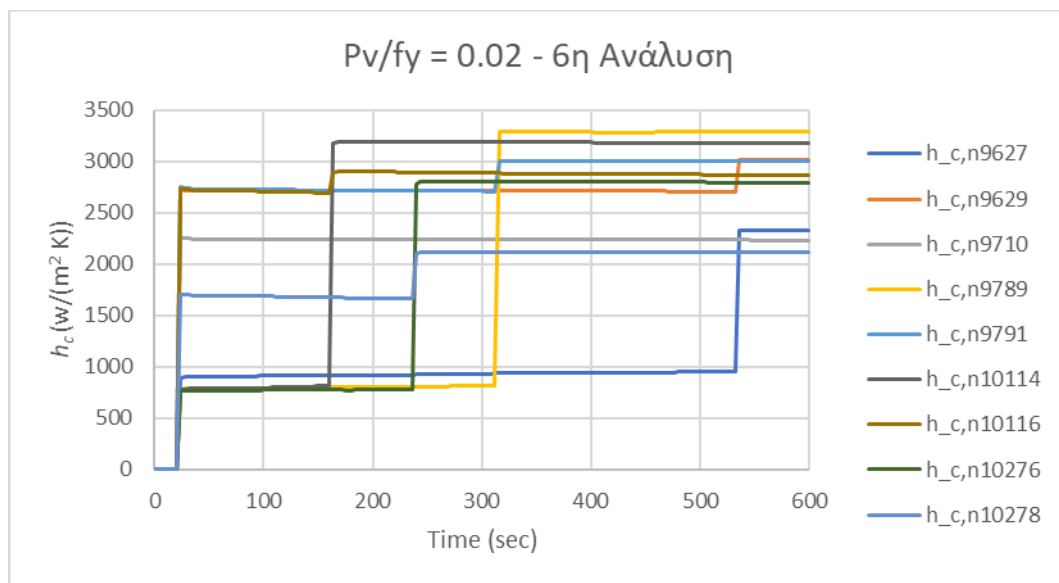
Σχήμα 4.2.1: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.02$



Σχήμα 4.2.2: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.02$

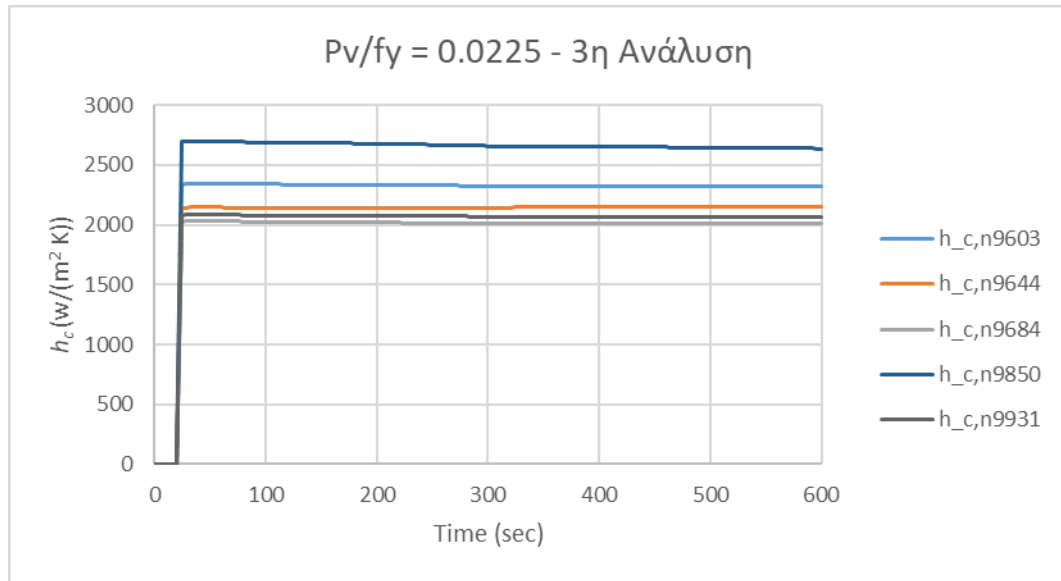


Σχήμα 4.2.3: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.02$

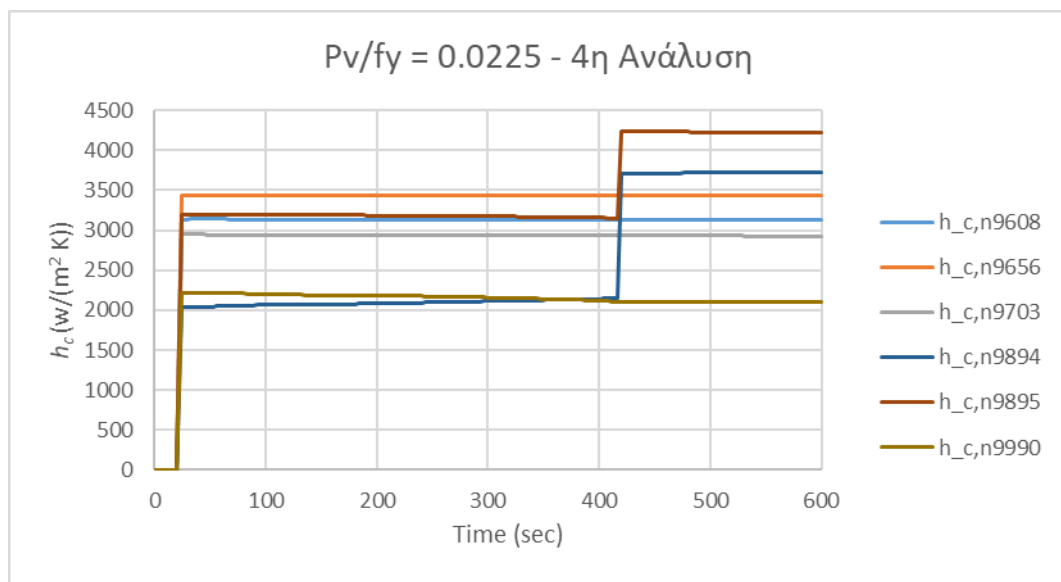


Σχήμα 4.2.4 :Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.02$

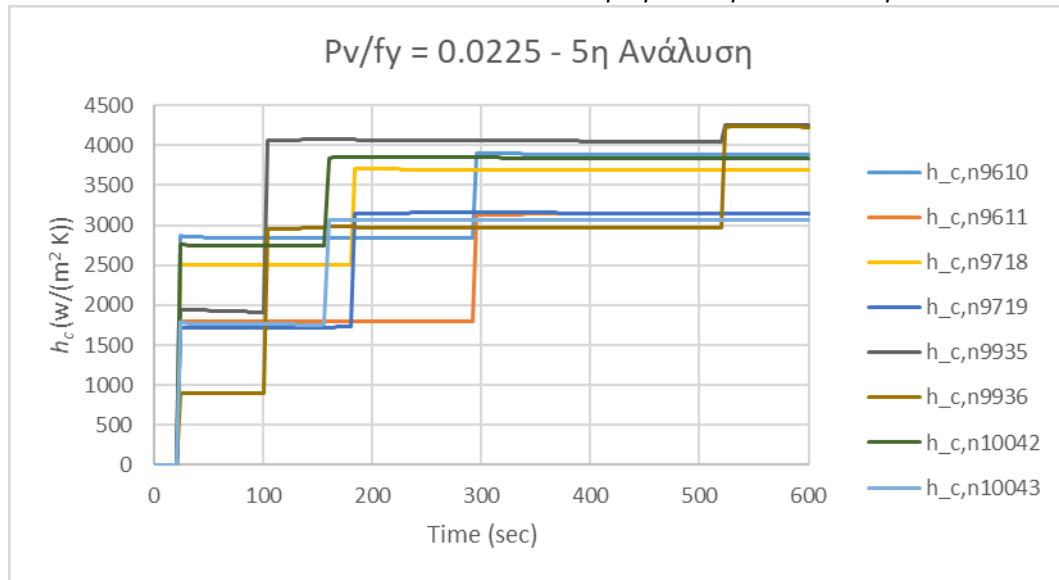
Στα Σχήματα 4.2.5 έως 4.2.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής συναρτήσει του χρόνου, για τις τέσσερις εξεταζόμενες αναλύσεις του άνω συνόρου για την περίπτωση φόρτισης $Pv/fy = 0.0225$. Και στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ανάλογη εικόνα με αύξηση του αριθμού των κόμβων επαφής στις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας. Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου στις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας παρατηρείται εμφάνιση νέων επαφών από τα πρώτα κίολας βήματα της ανάλυσης.



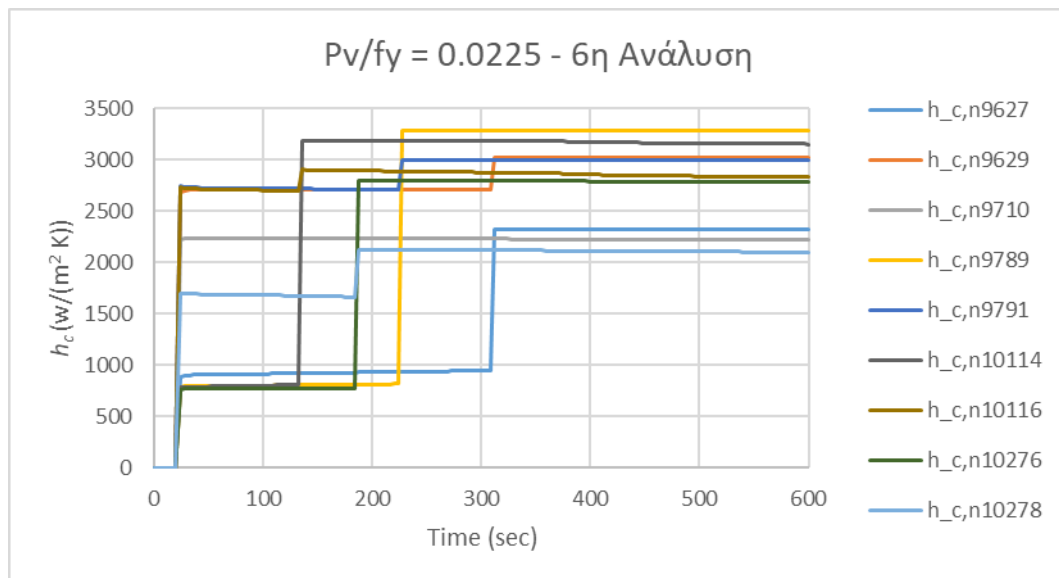
Σχήμα 4.2.5: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$



Σχήμα 4.2.6: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$



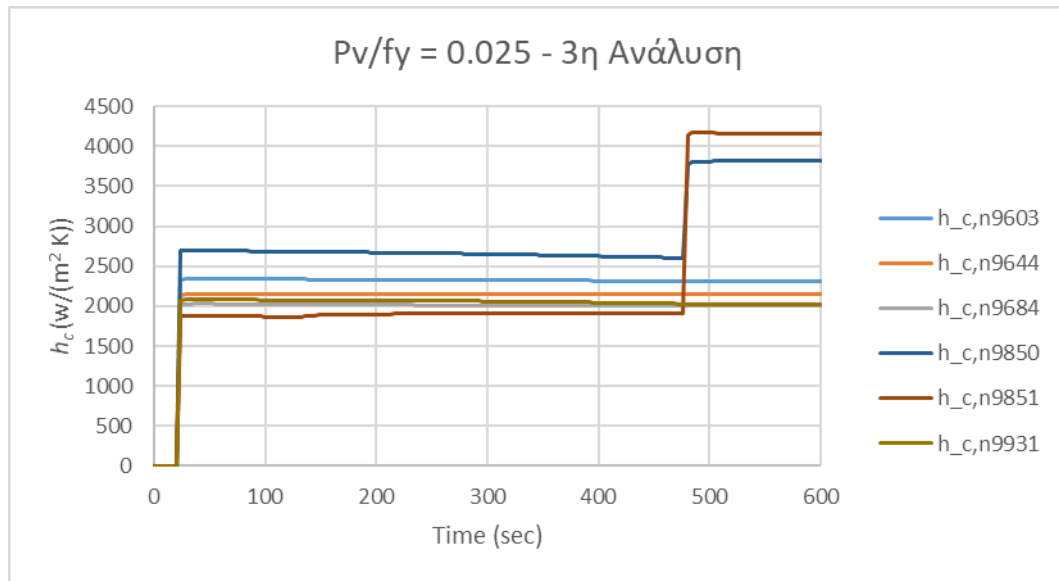
Σχήμα 4.2.7: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$



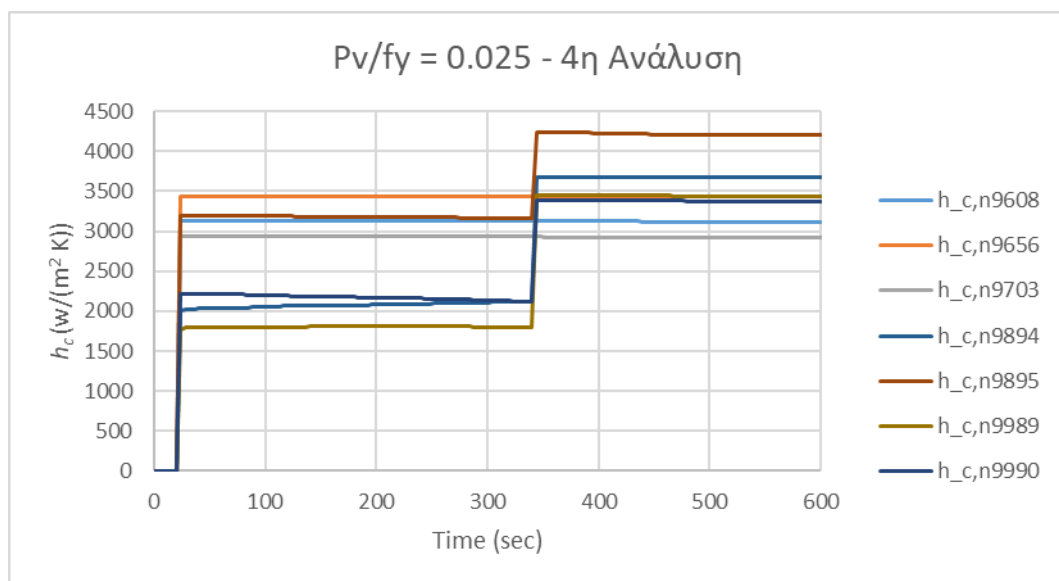
Σχήμα 4.2.8: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$

Στα Σχήματα 4.2.9 έως 4.2.12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής συναρτήσει του χρόνου, για τις τέσσερις εξεταζόμενες αναλύσεις του άνω συνόρου για την περίπτωση φόρτισης $Pv/fy = 0.025$. Παρατηρούμε ότι με την αύξηση της τιμής του κατακόρυφου φορτίου έχουμε αύξηση του αριθμού των σημείων επαφής σε όλες τις εξεταζόμενες αναλύσεις της διεπιφάνειας. Επίσης, και σε αυτήν την περίπτωση κατακόρυφης φόρτισης παρατηρείται αύξηση του αριθμού των κόμβων επαφής με την αύξηση της ανάλυσης της τραχύτητας της διεπιφάνειας. Είναι σημαντικό να σημειωθεί εδώ ότι στα πρώτα βήματα της ανάλυσης ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας στα σημεία

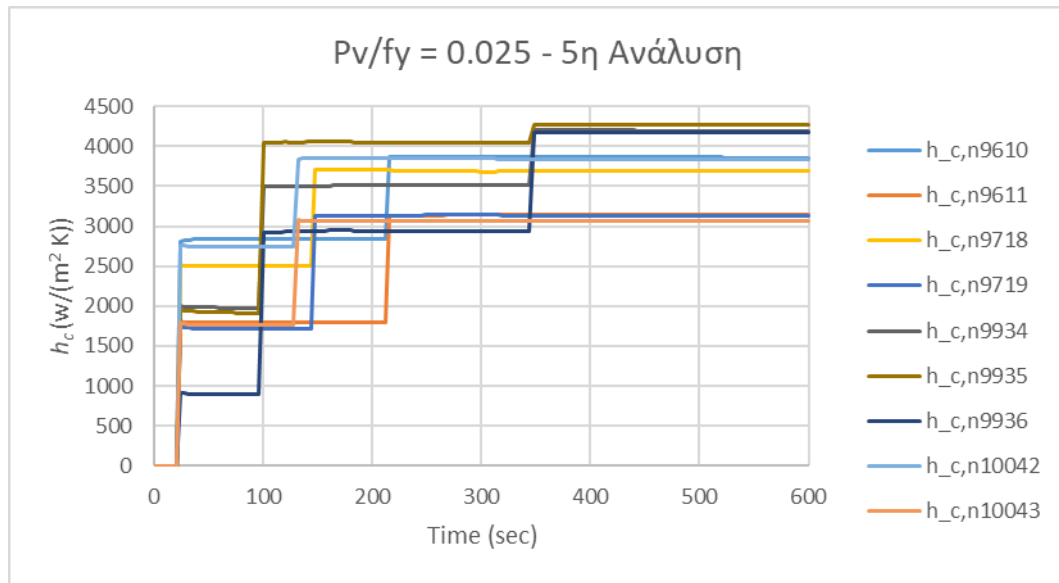
επαφής της διεπιφάνειας είναι μικρότερος στις ανώτερες αναλύσεις της τραχύτητας γεγονός που οφείλεται στο ότι η διεπιφάνεια σε αυτές τις αναλύσεις παρουσιάζει εντονότερο «κυματισμό» (Σχήμα 2.1.1). Παρατηρούμε όμως, ότι σε αυτές τις διεπιφάνειες οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας παρουσιάζουν άλματα από τα πρώτα κιάλας βήματα της ανάλυσης, γεγονός που οφείλεται στην πλαστικοποίηση των αιχμών μικρότερης κλίμακας που υπάρχουν σε αυτές τις διεπιφάνειες.



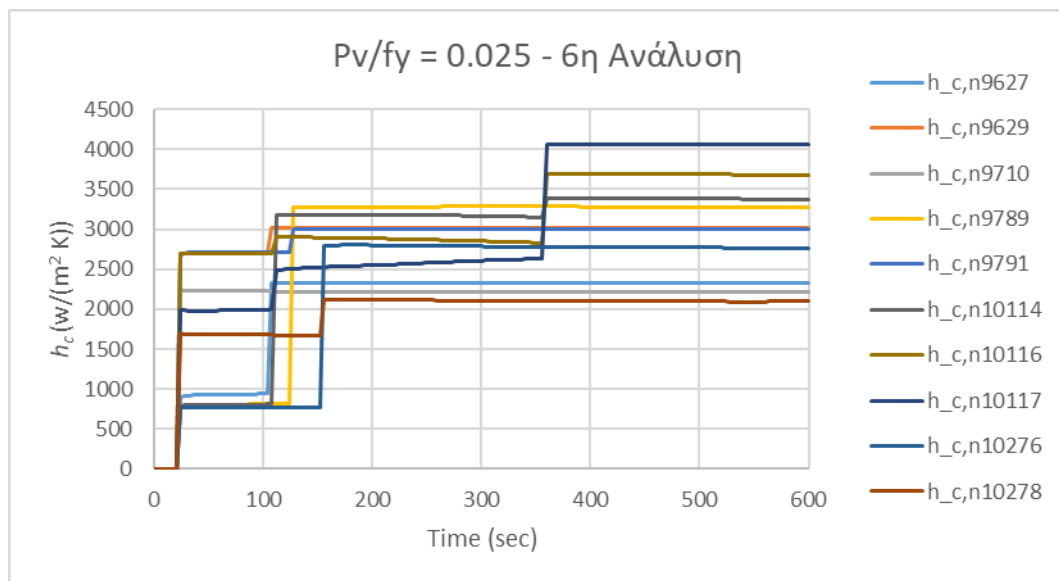
Σχήμα 4.2.9: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.025$



Σχήμα 4.2.10: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.025$



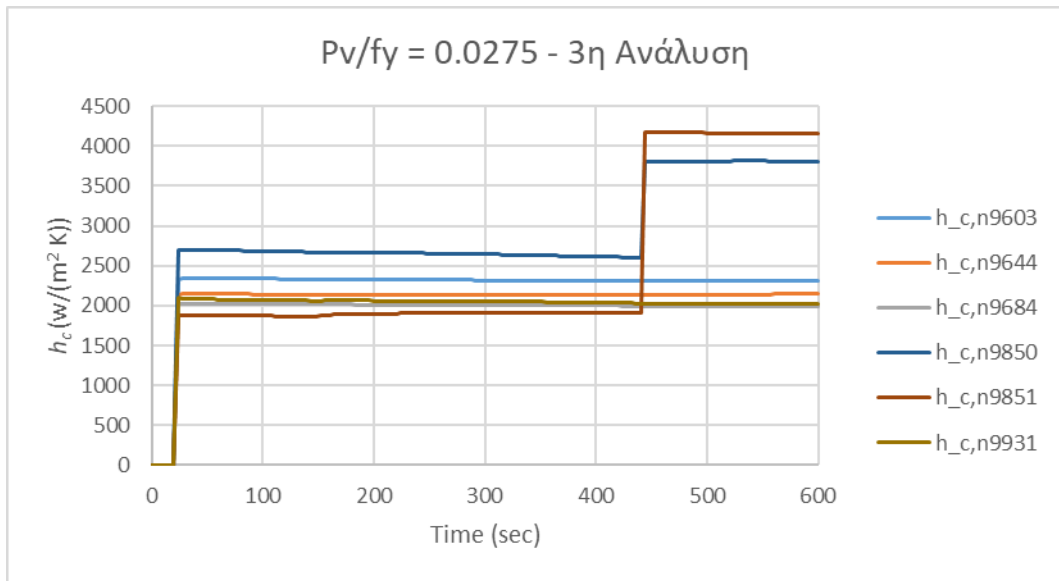
Σχήμα 4.2.11: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.025$



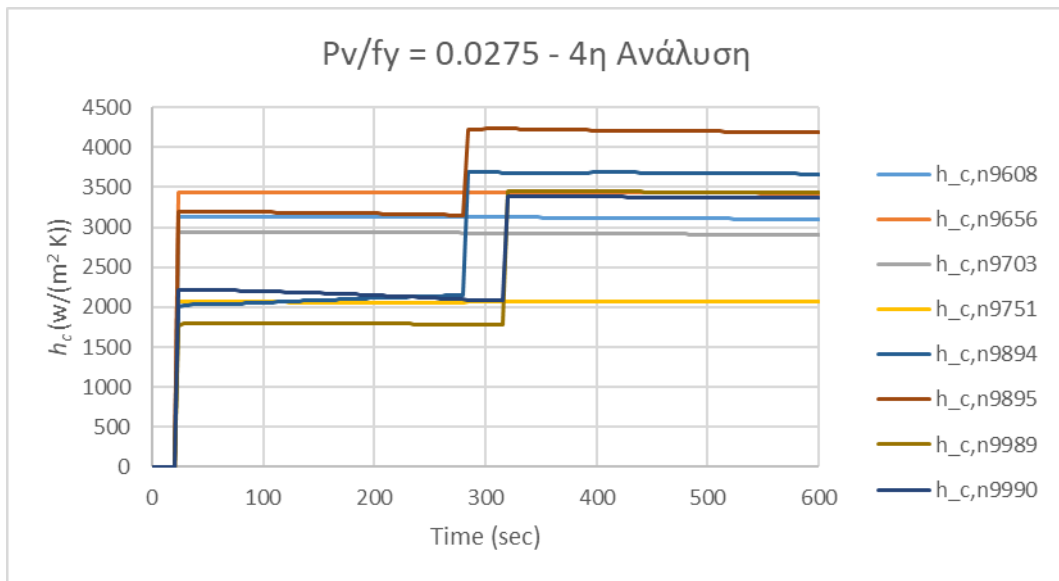
Σχήμα 4.2.12: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.025$

Αντίστοιχα, στα Σχήματα 4.2.13 έως 4.2.16 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής συναρτήσει του χρόνου, για τις ίδιες αναλύσεις της τραχύτητας του άνω συνόρου και για την περίπτωση φόρτισης $Pv/fy = 0.0275$. Παρατηρείται μικρή αύξηση του αριθμού των σημείων επαφής, σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση φόρτισης, αλλά καθώς αυξάνεται η τιμή του κατακόρυφου φορτίου

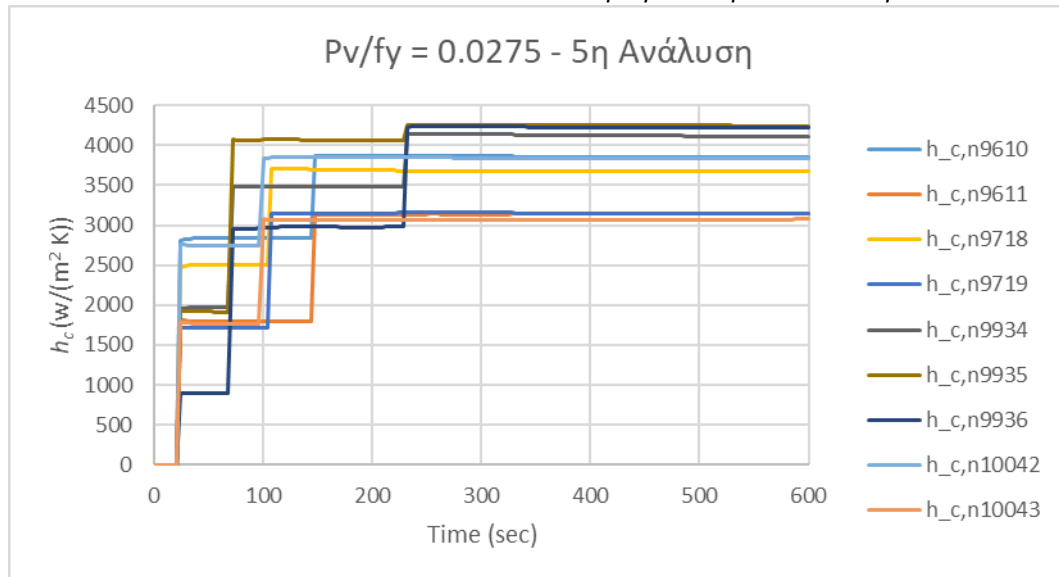
τα άλματα στο διάγραμμα του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής εμφανίζονται πιο νωρίς.



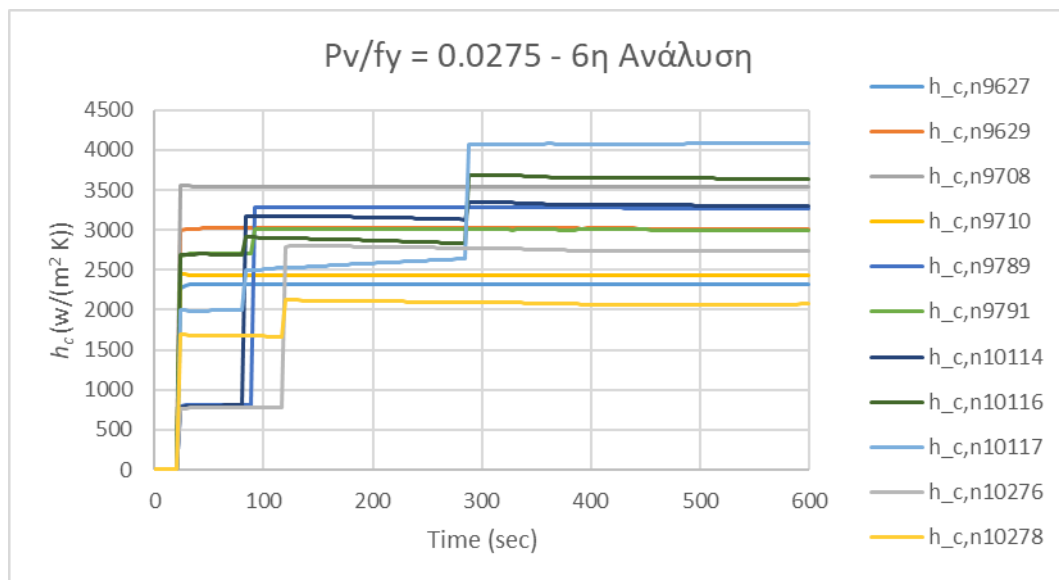
Σχήμα 4.2.13: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$



Σχήμα 4.2.14: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$

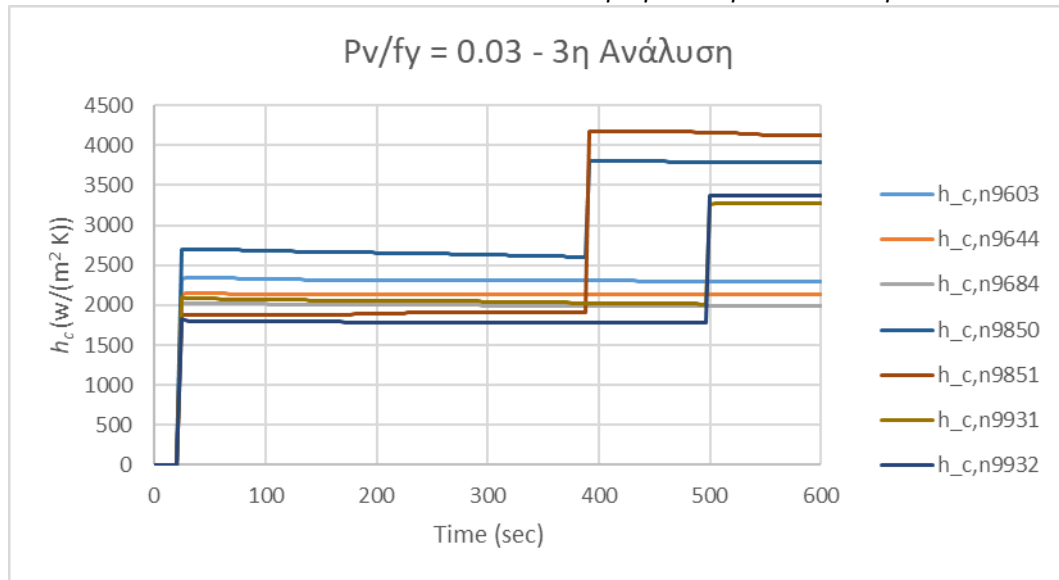


Σχήμα 4.2.15: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0275$

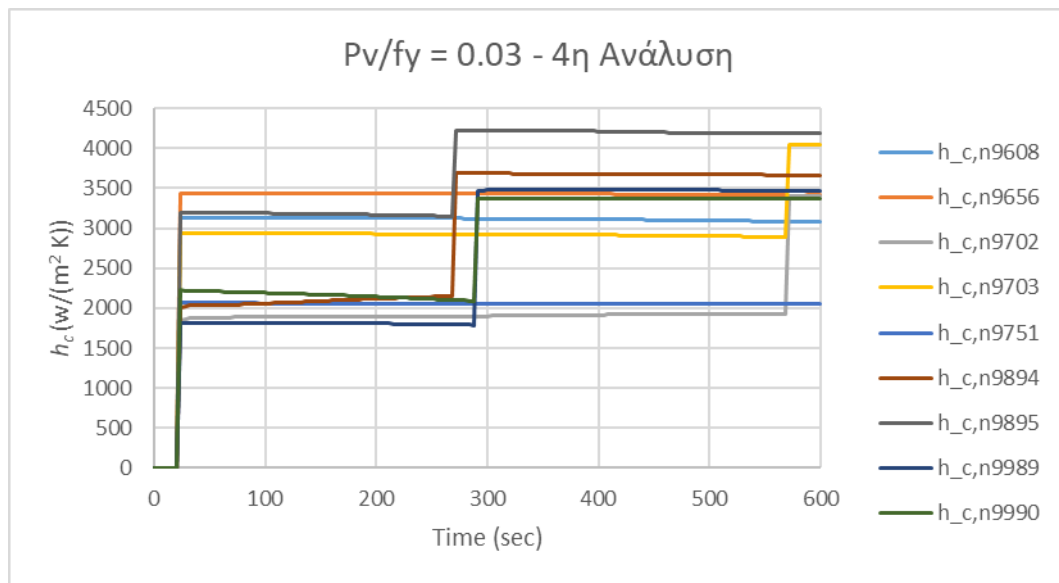


Σχήμα 4.2.16: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0275$

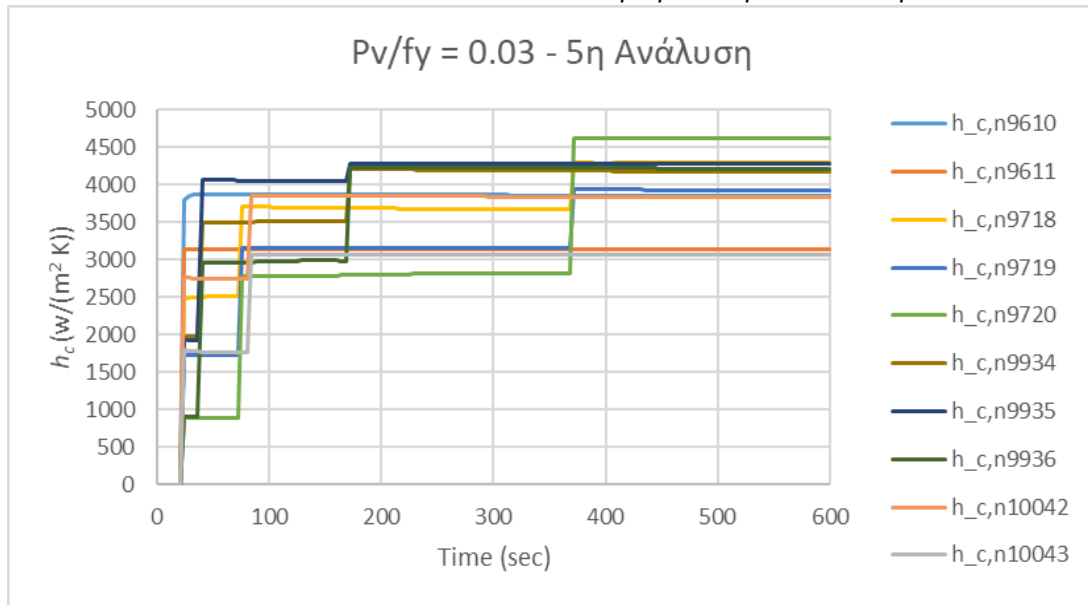
Παρατηρώντας τη θερμική αγωγιμότητα στους κόμβους επαφής της διεπιφάνειας για διαφορετικές τιμές του κατακόρυφου φορτίου, στα Σχήματα 4.2.17 έως 4.2.20 παρουσιάζονται οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής για την περίπτωση φόρτισης $Pv/fy = 0.03$. Τα σημεία επαφής εξακολουθούν να αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου, ενώ το εύρος των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής κυμαίνεται σε ανάλογα επίπεδα με αυτό της προηγούμενης περίπτωσης φόρτισης.



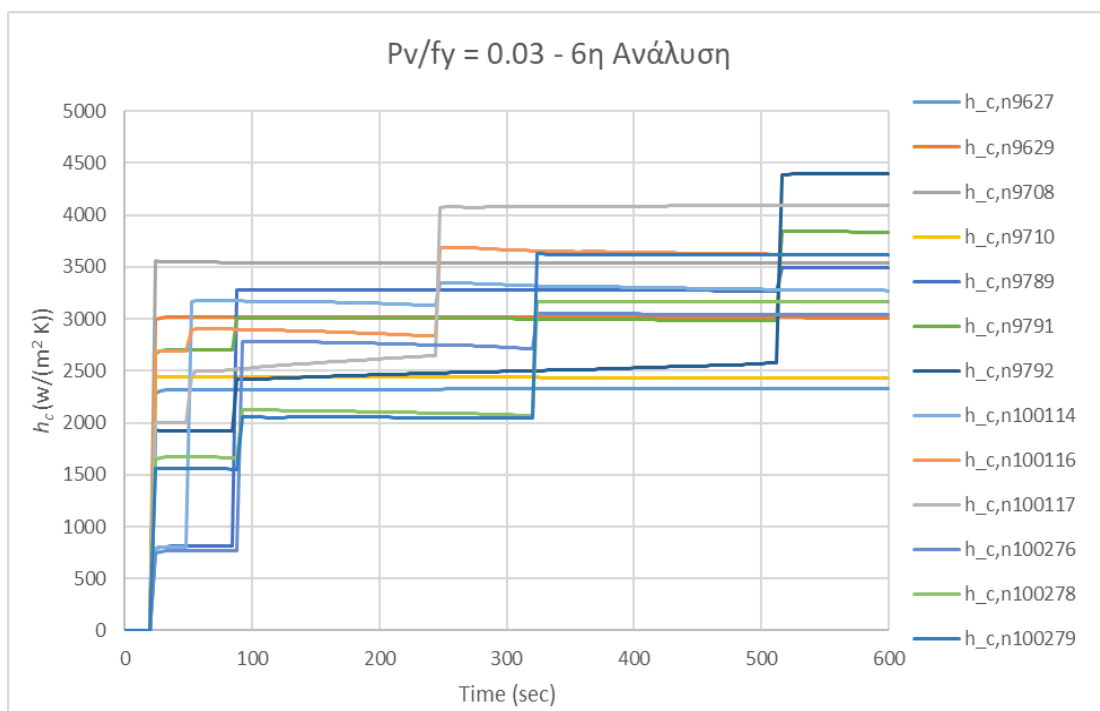
Σχήμα 4.2.17: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.03$



Σχήμα 4.2.18: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.03$



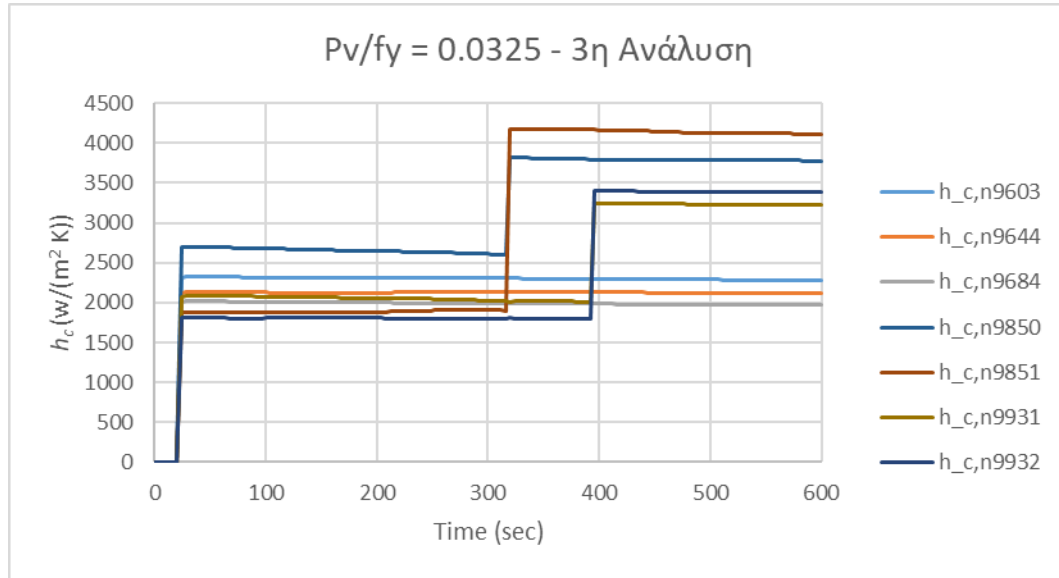
Σχήμα 4.2.19: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$



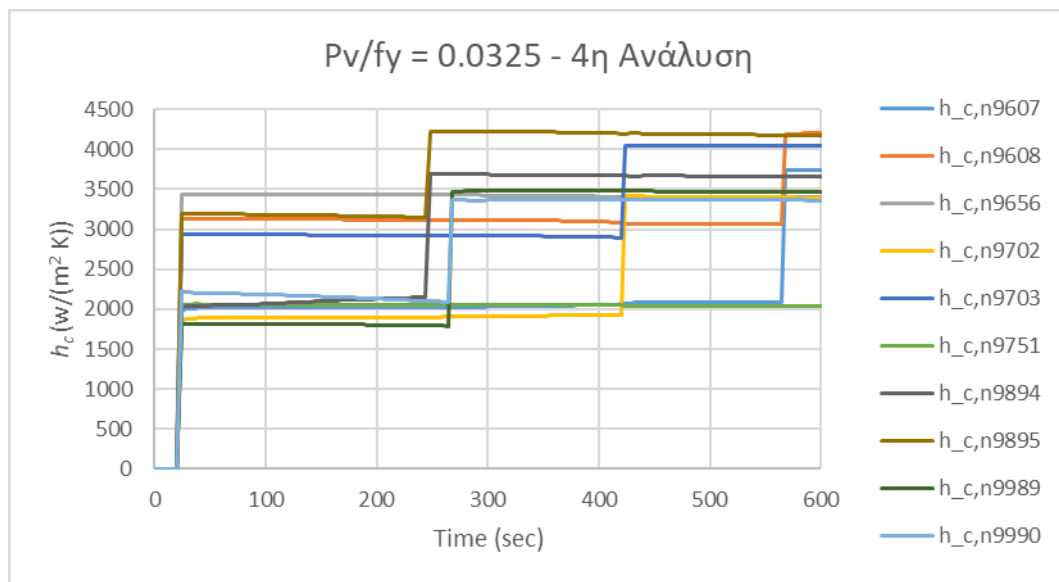
Σχήμα 4.2.20: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$

Στα Σχήματα 4.2.21 έως 4.2.24, 4.2.25 έως 4.2.28 και 4.2.29 έως 4.32 παρουσιάζονται τα διαγράμματα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τις τέσσερις εξεταζόμενες αναλύσεις της τραχύτητας του άνω συνόρου για τις περιπτώσεις φόρτισης $P_v/f_y = 0.0325$, 0.0350 και 0.0375 αντίστοιχα. Σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης τα σημεία επαφής αυξάνονται με την αύξηση του φορτίου, ενώ το εύρος της

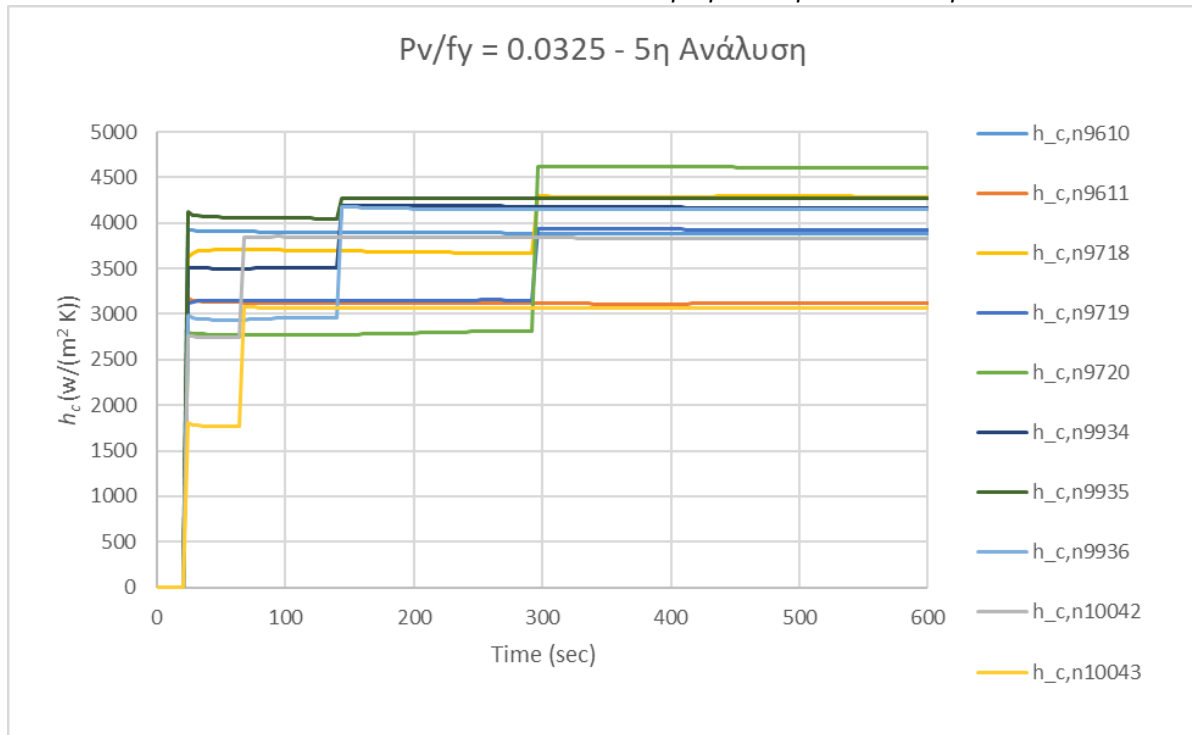
Θερμικής αγωγιμότητας κυμαίνεται στα ίδια επίπεδα για την 3^η, 4^η, και 5^η ανάλυση της τραχύτητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρατηρείται οριακή αύξηση στο εύρος της θερμικής αγωγιμότητας στην περίπτωση της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας.



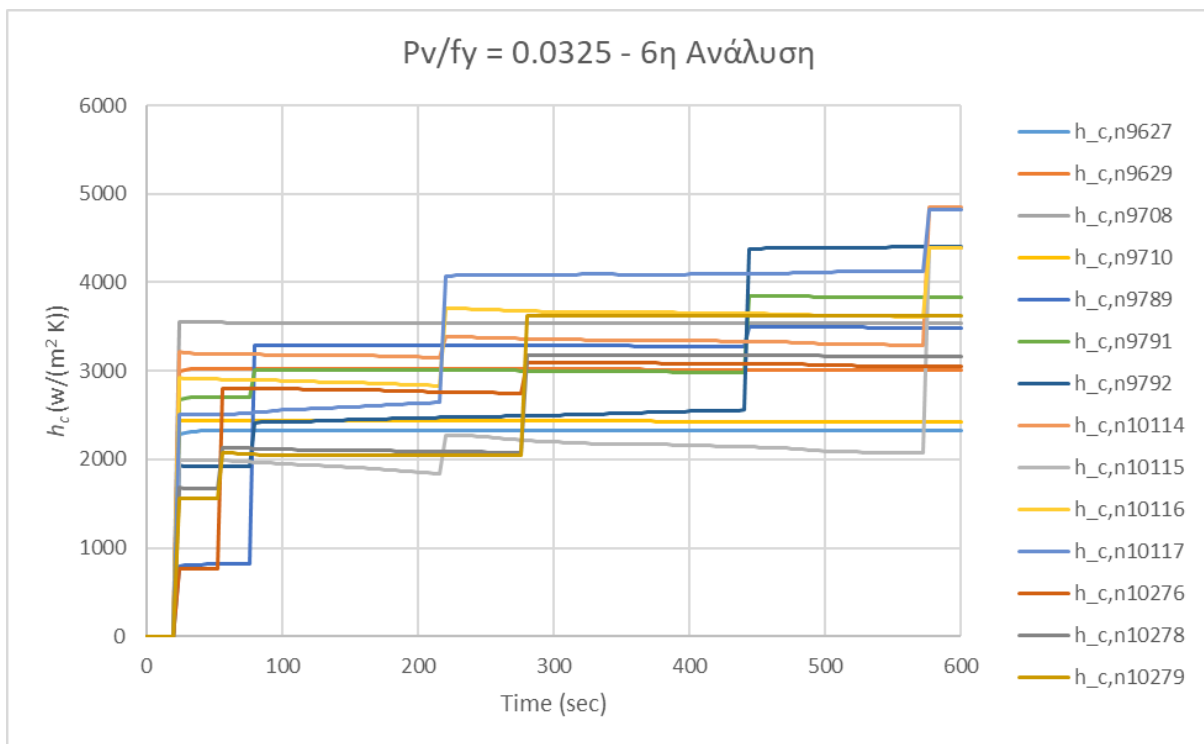
Σχήμα 4.2.21 Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0325$



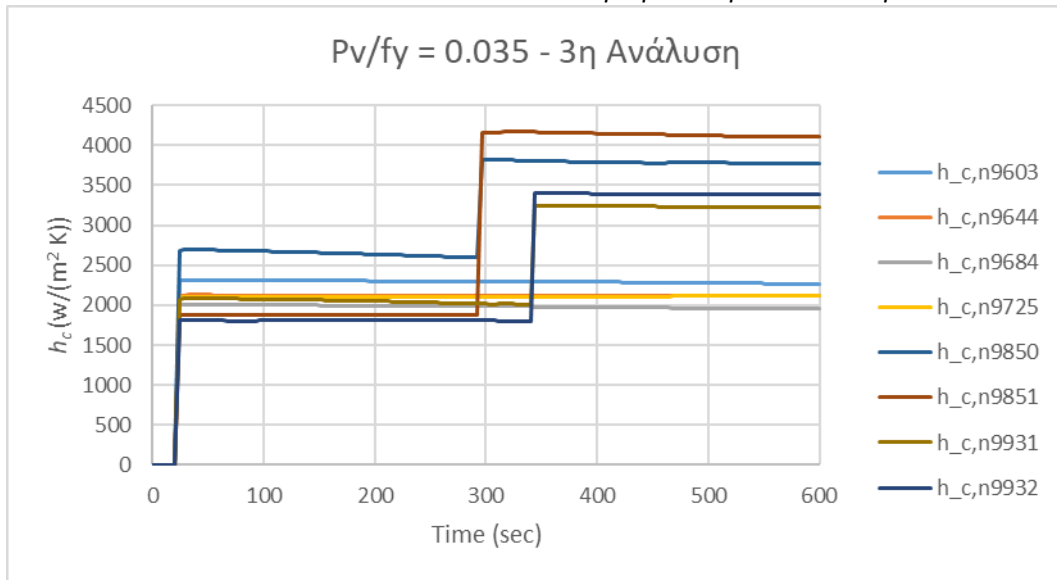
Σχήμα 4.2.22 Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0325$



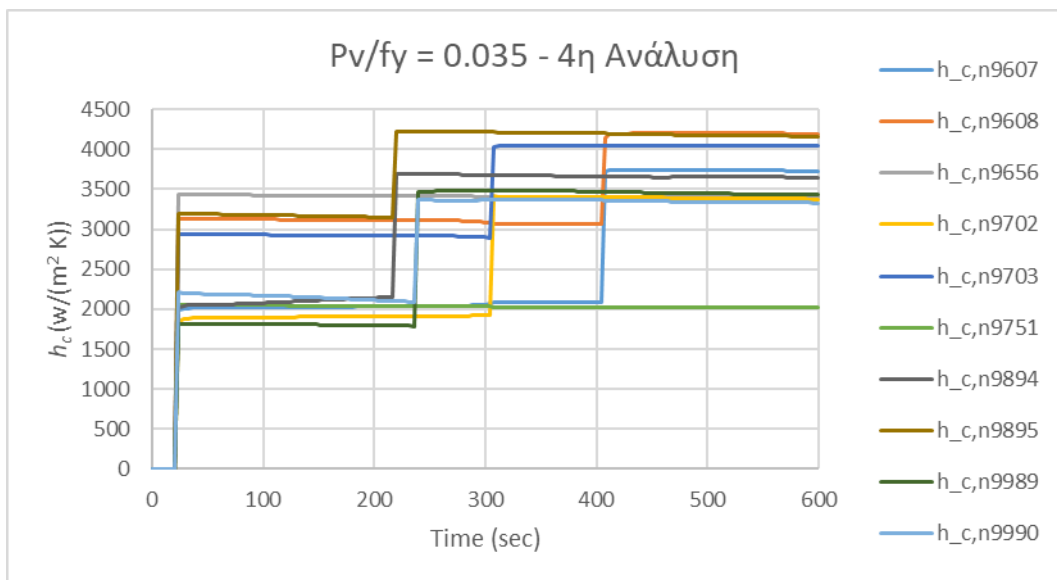
Σχήμα 4.2.23 Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0325$



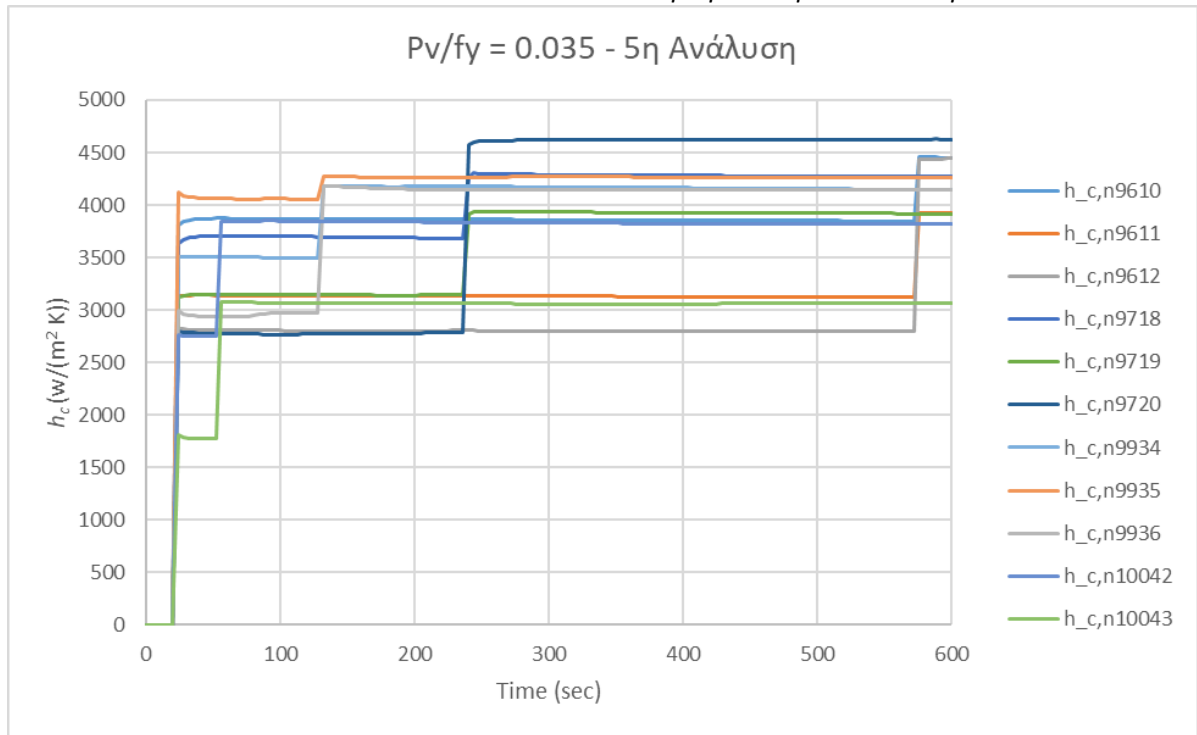
Σχήμα 4.2.24 Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0325$



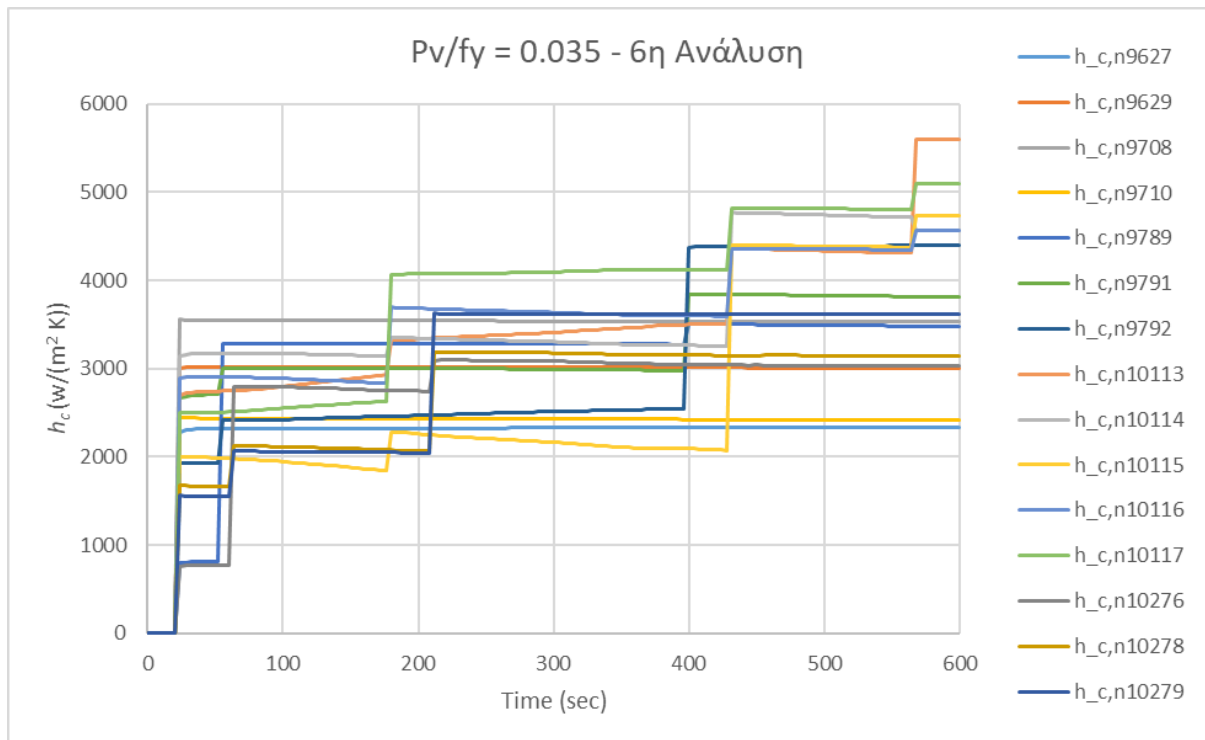
Σχήμα 4.2.25: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.035$



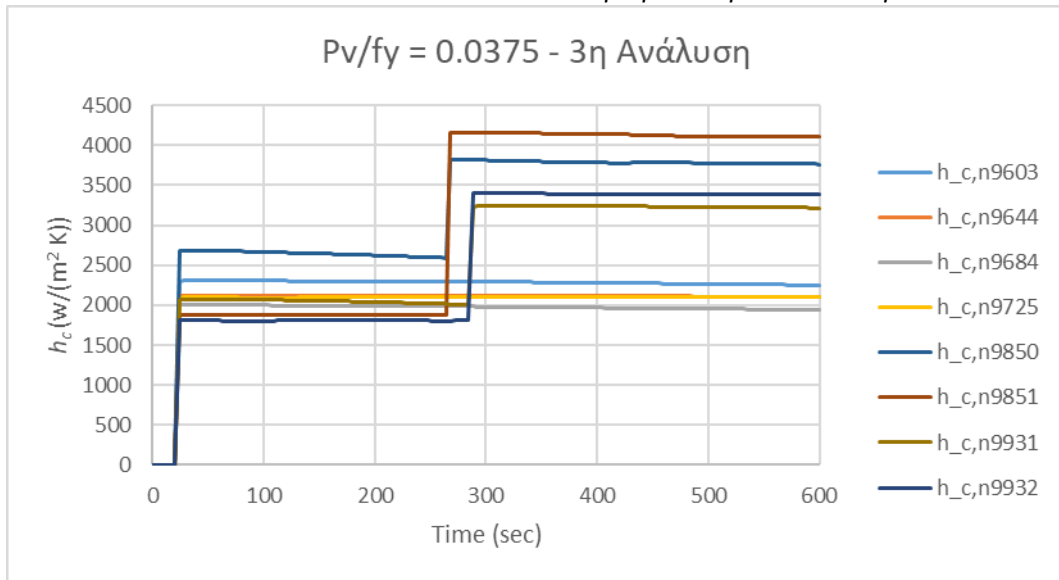
Σχήμα 4.2.26: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.035$



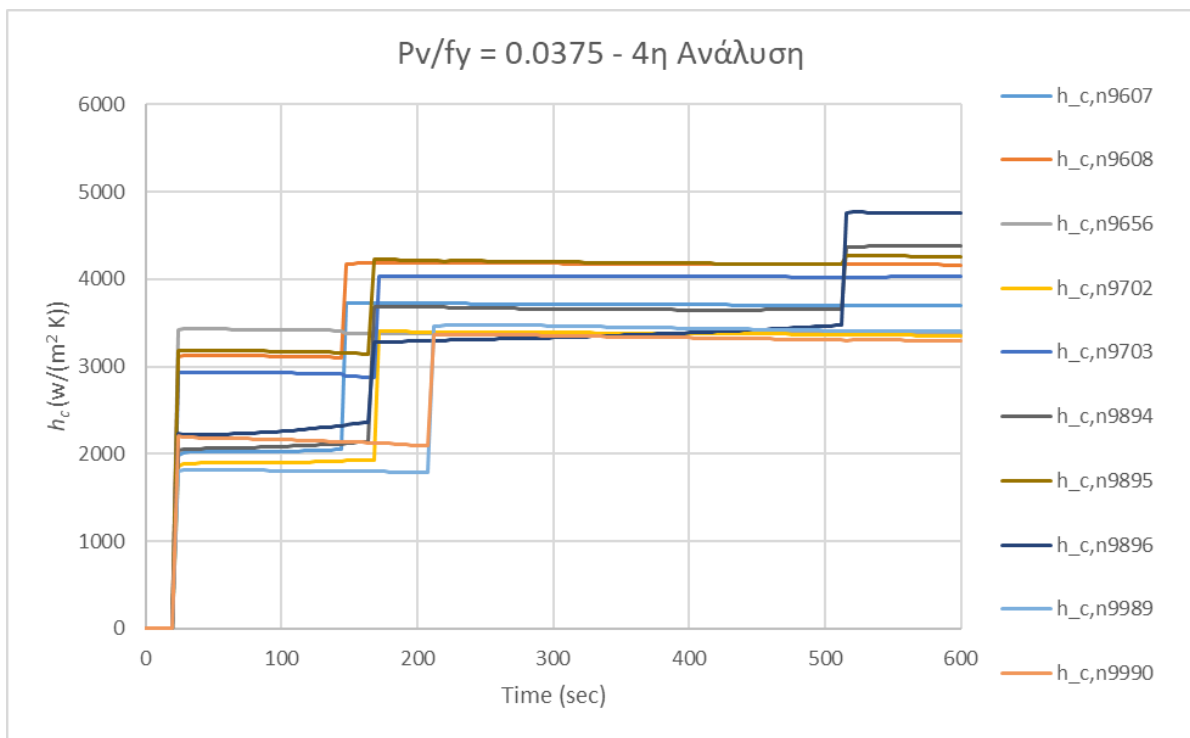
Σχήμα 4.2.27: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.035$



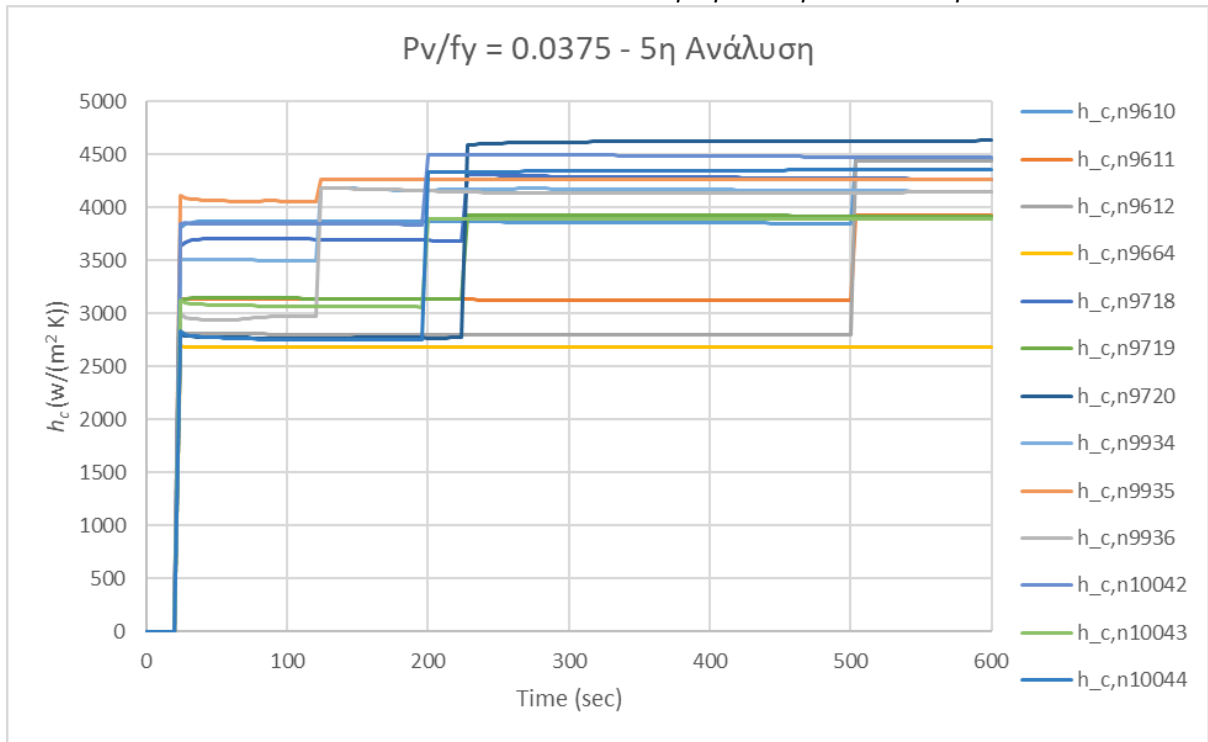
Σχήμα 4.2.28: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.035$



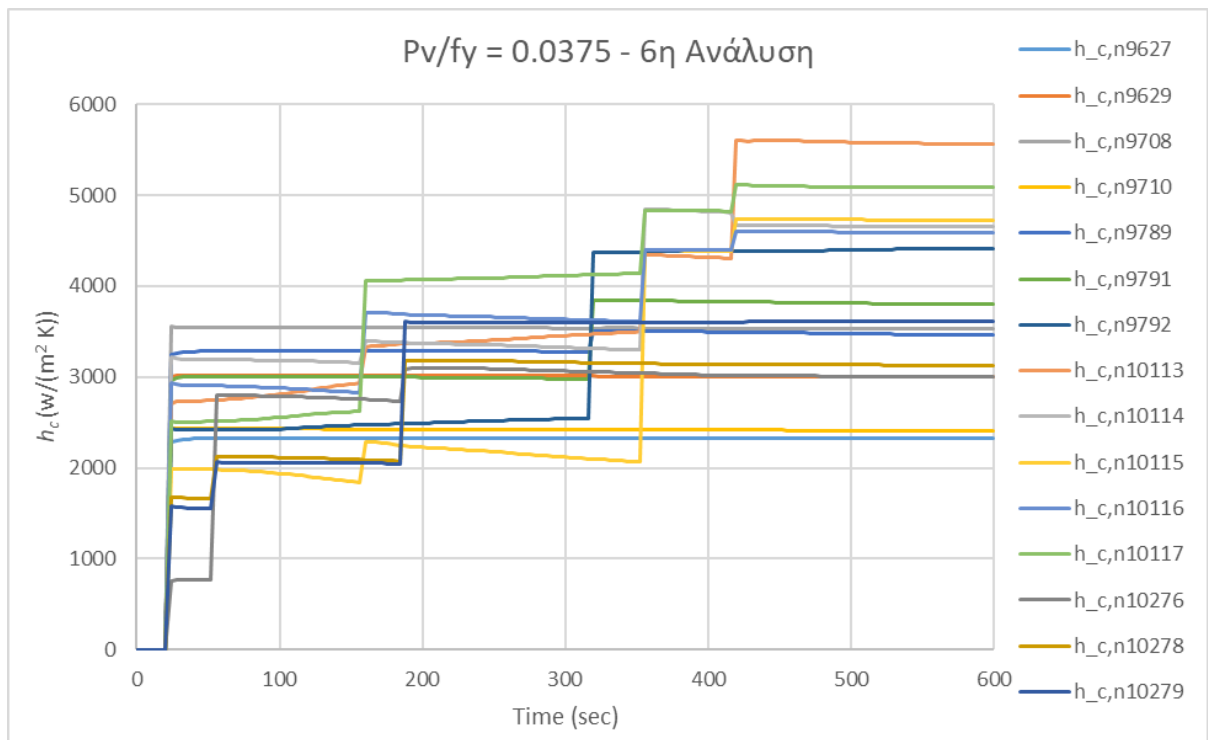
Σχήμα 4.2.29 Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$



Σχήμα 4.2.30 Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 4^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$



Σχήμα 4.2.31 Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 5^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$



Σχήμα 4.2.32 Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$

- Όπως είναι αναμενόμενο, για το ίδιο φορτίο, παρατηρείται αύξηση των σημείων επαφής με την αύξηση της ανάλυσης της τραχύτητα της διεπιφάνειας (δηλαδή όταν λαμβάνονται υπόψη ατέλειες μικρότερης κλίμακας).
- Αντίστοιχα, για την ίδια ανάλυση της τραχύτητας του άνω συνόρου της διεπιφάνειας, τα σημεία επαφής αυξάνονται, με την αύξηση του φορτίου.
- Η θερμική αγωγιμότητα στους κόμβους επαφής φαίνεται να επηρεάζεται από την αύξηση της τραχύτητας της διεπιφάνειας. Συγκεκριμένα, όταν λαμβάνονται υπόψη μικρότερης κλίμακας αιχμές στην προσομοίωση της διεπιφάνειας το εύρος των τιμών της θερμικής αγωγιμότητας στους κόμβους επαφής στο τέλος της ανάλυσης ($t=600\text{sec}$) αυξάνει με την αύξηση του φορτίου καθώς νέοι κόμβοι έρχονται σε επαφή.
- Καθώς πλαστικοποιούνται οι περιοχές γύρω από τους κόμβους επαφής, γειτονικοί τους κόμβοι έρχονται σε επαφή με αποτέλεσμα να εμφανίζονται άλματα στις τιμές της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής με τη μορφή «σκαλοπατιού». Το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο με την αύξηση της τραχύτητας της διεπιφάνειας και για τις υψηλότερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου.
- Ο αριθμός των κόμβων επαφής στην πιο τραχειά διεπιφάνεια είναι σημαντικά μεγαλύτερος σε σχέση με τις άλλες διεπιφάνειες σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης.
- Γενικότερα, σε ό,τι έχει να κάνει με τους κόμβους επαφής παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της ανάλυσης ορισμένοι κόμβοι της διεπιφάνειας «χάνουν» την επαφή. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο στις ανώτερες αναλύσεις της τραχύτητας και ιδιαίτερα στην 6^η ανάλυση, λόγω της γεωμετρίας των αιχμών και της δυνατότητας που έχει το επάνω σώμα να διαστέλλεται προς τα δεξιά (λόγω των συνοριακών συνθηκών).

Κεφάλαιο 5 Επιρροή του Κυματισμού της Τραχύτητας, και του Κατακόρυφου Φορτίου στη Θερμική Αγωγιμότητα Μεταλλικών Διεπιφανειών σε Μακροσκοπικό Επίπεδο

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η επιρροή της τραχύτητας και του κυματισμού της διεπιφάνειας στη θερμική αγωγιμότητα, υπό την επιβολή κατακόρυφης φόρτισης, σε μακροσκοπικό επίπεδο. Εξετάστηκαν και εδώ οι περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης και ανάλυσης της τραχύτητας της διεπιφάνειας που εξετάστηκαν και σε μικροσκοπικό επίπεδο. Η προσέγγιση του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} (macroscopic TCC coefficient) βασίστηκε στη θεώρηση που λαμβάνεται υπόψη στην εργασία Panagouli et al, (2020):

Εφόσον θεωρούνται συνθήκες κενού, και η μετάδοση θερμότητας γίνεται μόνο με αγωγή μέσω των σημείων επαφής, ο τοπικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας είναι $h_c(x, y) = h_{loc}(x, y)$ στα σημεία επαφής και $h_c(x, y) = 0$ στα υπόλοιπα σημεία. Στην προκειμένη περίπτωση, τα σημεία επαφής έχουν εντοπιστεί βάσει της τιμής του contact status των κόμβων του άνω συνόρου της διεπιφάνειας, σε κάθε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της ανάλυσης.

Χρησιμοποιώντας τα μεγέθη που εξήχθησαν από τη μικροσκοπική μελέτη του προβλήματος, υπολογίζεται ο μακροσκοπικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} , ως εξής:

Ορίζονται οι μέσες τιμές της θερμικής ροής και των θερμοκρασιών για κάθε ανάλυση της τραχύτητας της διεπιφάνειας, λαμβάνοντας υπόψη τις αντίστοιχες τιμές στις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες το σημείο βρίσκεται σε επαφή με τη διεπιφάνεια:

$$\bar{q}_c = \langle q_c \rangle , \quad \bar{T}_c^{(i)} = \langle T_c^{(i)} \rangle \quad (5.1)$$

όπου $\langle \dots \rangle$ εννοείται η μέση τιμή των μεγεθών

Στη συνέχεια, ο μακροσκοπικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} ορίζεται ως το πηλίκο της μέσης τιμής της θερμικής ροής στα σημεία επαφής προς τη διαφορά των μέσων τιμών των θερμοκρασιών μεταξύ των δύο σωμάτων στα σημεία επαφής:

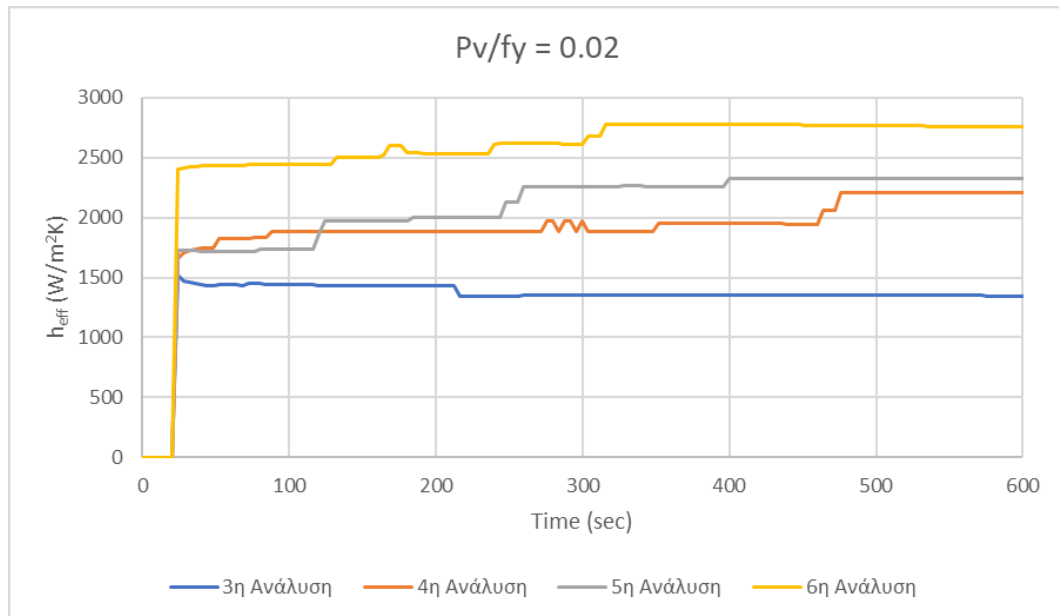
$$h_{eff} = \frac{\bar{q}_c}{\bar{T}_c^{(1)} - \bar{T}_c^{(2)}} \quad (5.2)$$

Γίνεται φανερό ότι σε μακροσκοπικό επίπεδο, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εξαρτάται από την αγωγιμότητα σε μικροσκοπικό επίπεδο αλλά και από την κατανομή των σημείων επαφής κατά μήκος της διεπιφάνειας.

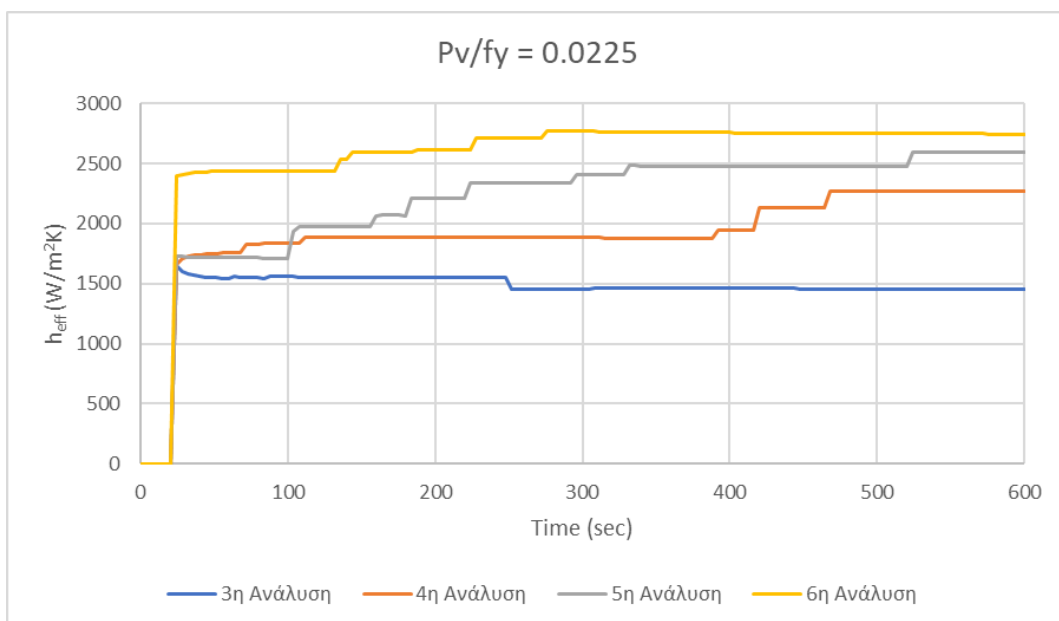
5.1 Μελέτη της επιρροής της τραχύτητας της διεπιφάνειας στο μακροσκοπικό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μακροσκοπικής ανάλυσης για όλες τις προαναφερθείσες περιπτώσεις φόρτισης και αναλύσεις της τραχύτητας της διεπιφάνειας. Με τη χρήση της Εξ. 5.2, υπολογίστηκαν τα διαγράμματα μεταβολής της τιμής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας συναρτήσει του χρόνου, που παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.1.1 έως 5.1.8.

Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 5.1.1 και 5.1.2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τις τέσσερις εξεταζόμενες αναλύσεις της τραχύτητας της διεπιφάνειας και για κατακόρυφο φορτίο $Pv/fg = 0.02$ και 0.0225 αντίστοιχα. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της 3^{ης} ανάλυσης της τραχύτητας όπου λαμβάνονται υπόψη μόνο ατέλειες μεγάλης κλίμακας (κυματισμός) ο μακροσκοπικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας διατηρεί περίπου την ίδια τιμή (δε μεταβάλλεται με τον χρόνο και την αύξηση της θερμοκρασίας στη διεπιφάνεια), η οποία είναι σημαντικά μικρότερη από τις αντίστοιχες τιμές που εμφανίζονται στις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας όπου λαμβάνονται υπόψη και μικρότερης κλίμακας ατέλειες (τραχύτητα). Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι σε αυτές τις αναλύσεις παρατηρούνται «άλματα» στις τιμές του μακροσκοπικού συντελεστή αγωγιμότητας, σε διάφορες χρονικές στιγμές. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την πλαστικοποίηση των αιχμών μικρότερης κλίμακας καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία τους και μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο όσο λαμβάνονται υπόψη στο μοντέλο ολοένα και μικρότερης κλίμακας αιχμές.



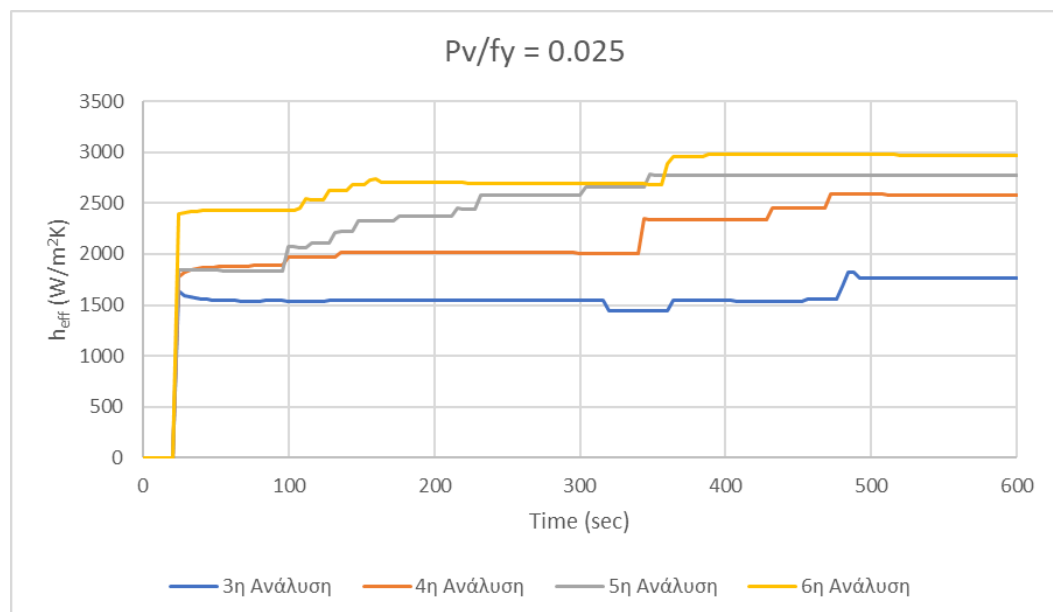
Σχήμα 5.1.1: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.02$



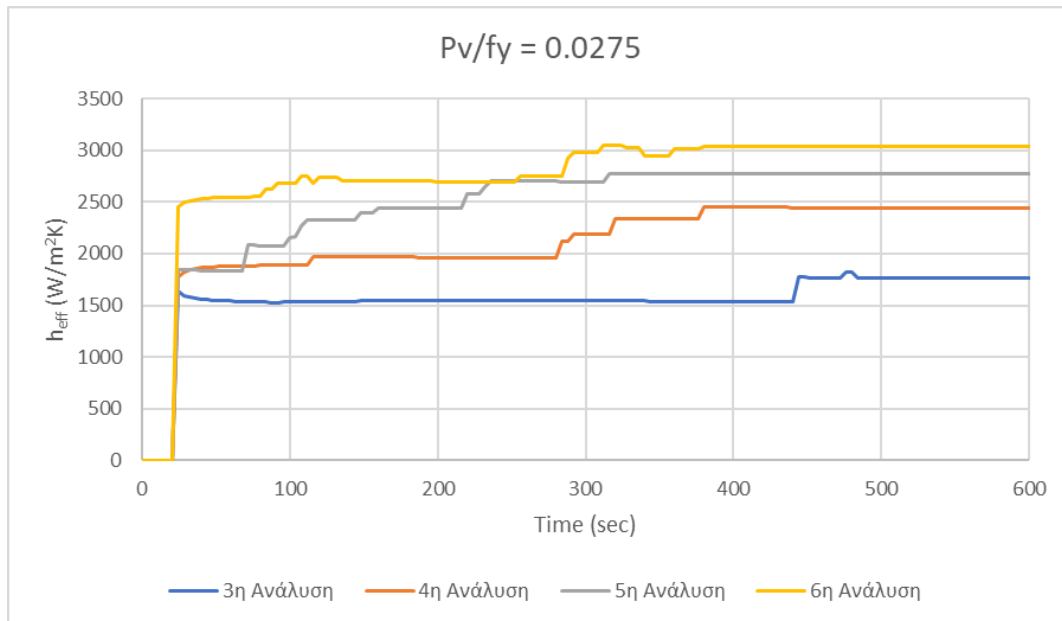
Σχήμα 5.1.2: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$

Στα Σχήματα 5.1.3 έως 5.1.5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε συνάρτηση με τον χρόνο, για τις εξεταζόμενες αναλύσεις της τραχύτητας της διεπιφάνειας και για κατακόρυφο φορτίο $Pv/fy = 0.025, 0.0275$ και 0.03 αντίστοιχα. Και σε αυτές τις περιπτώσεις φόρτισης παρατηρείται ότι στην περίπτωση της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας όπου λαμβάνονται υπόψη μόνο ατέλειες μεγάλης κλίμακας (κυματισμός) ο μακροσκοπικός συντελεστής θερμικής

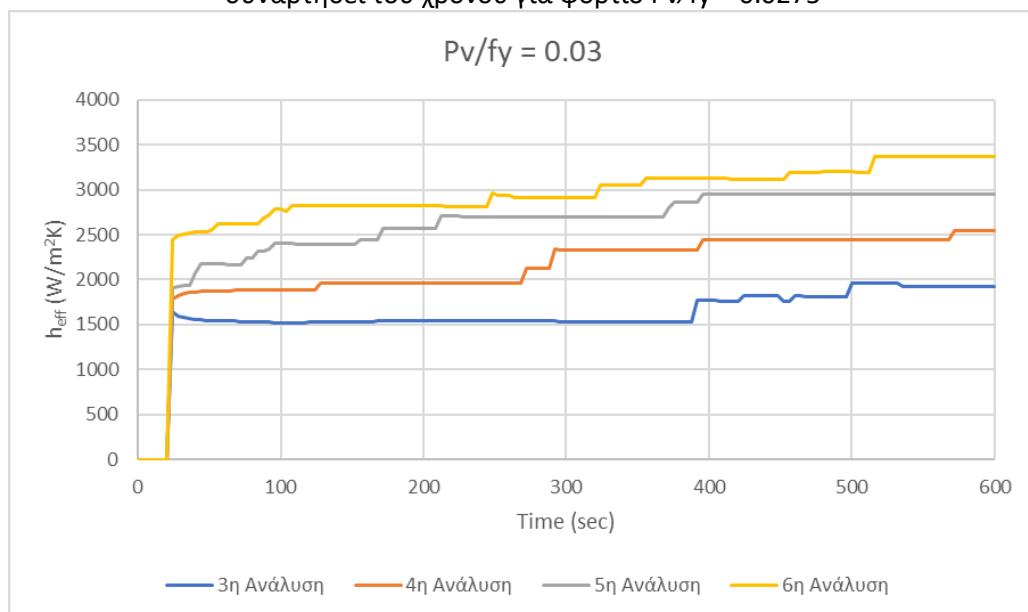
αγωγιμότητας διατηρεί περίπου την ίδια τιμή και αυξάνεται λίγο προς το τέλος του φαινομένου. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η μικρή αυτή αύξηση στις τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας εμφανίζεται νωρίτερα καθώς αυξάνει η τιμή του κατακόρυφου φορτίου ($t=500\text{sec}$ για $P_v/f_y=0.025$ και $t=400\text{sec}$ για $P_v/f_y=0.03$). Επίσης, τα άλματα που παρατηρούνται στις τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας των αναλύσεων που λαμβάνουν υπόψη μικρότερης κλίμακας αιχμές της διεπιφάνειας (5^η και 6^η ανάλυση), παρουσιάζονται πολύ νωρίς και συγκεκριμένα την χρονική στιγμή $t=100\text{sec}$, όπου δεν έχουν προλάβει ακόμα να αναπτυχθούν υψηλές θερμοκρασίες στη διεπιφάνεια και οφείλονται στις πλαστικοποιήσεις των αιχμών, λόγω της αύξησης του φορτίου, ακόμα και με μικρή μείωση του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα. Πρέπει να τονιστεί εδώ ότι στις περιπτώσεις που λαμβάνονται υπόψη μικρής κλίμακας ατέλειες, καθώς το κατακόρυφο φορτίο αυξάνεται παρατηρούνται «άλματα» στις τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας σε όλη τη διάρκεια εξέλιξης του φαινομένου.



Σχήμα 5.1.3: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $P_v/f_y = 0.025$



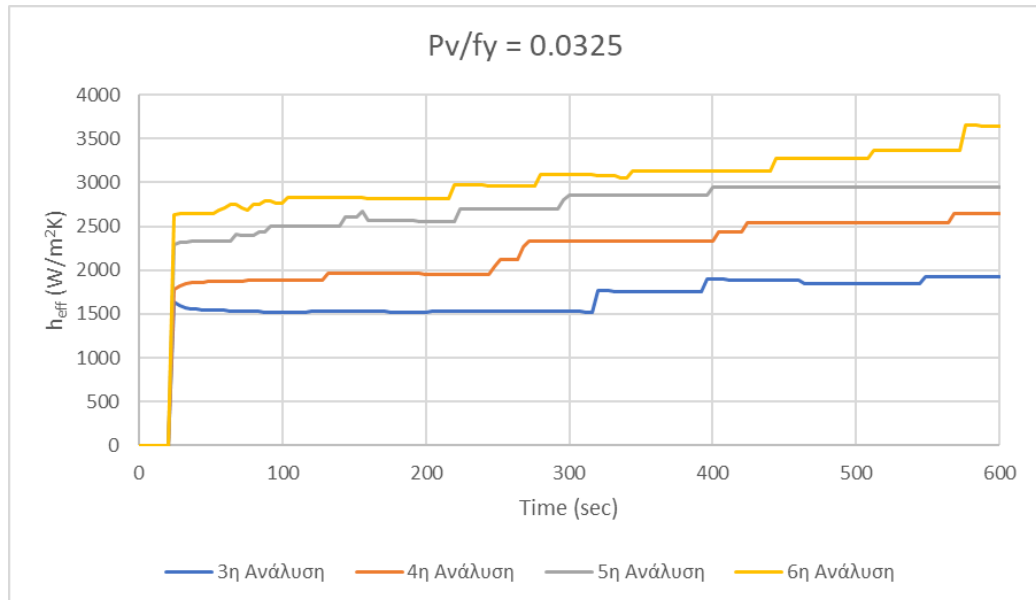
Σχήμα 5.1.4: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$



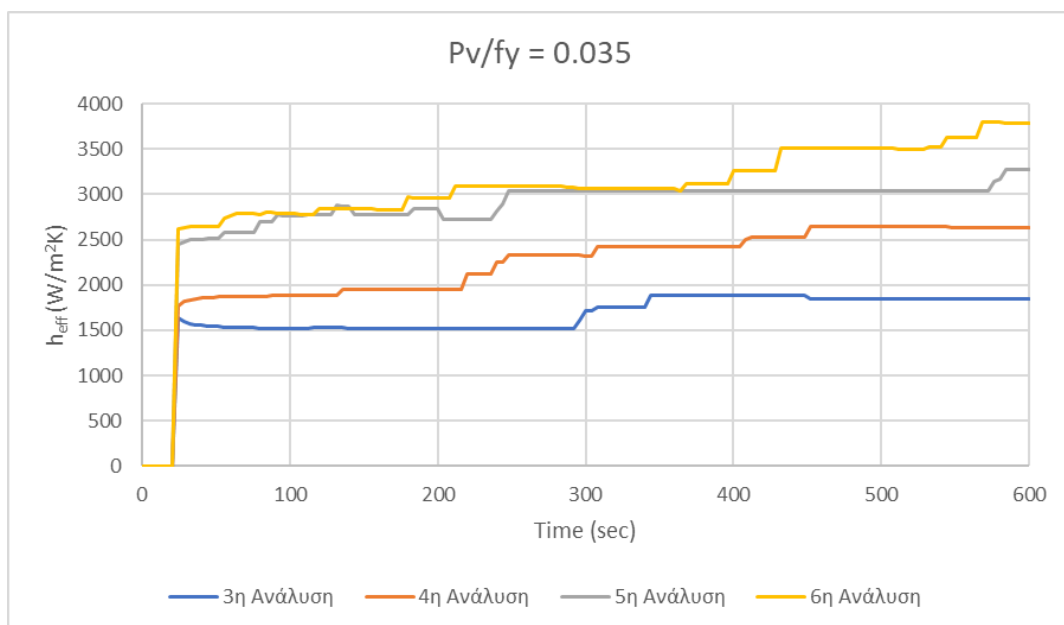
Σχήμα 5.1.5: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$

Στα σχήματα 5.1.6 έως 5.1.8, παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου, για τις εξεταζόμενες κλίμακες της τραχύτητας της διεπιφάνειας και για τιμές του κατακόρυφου φορτίου $P_v/f_y = 0.0325, 0.035$ και 0.0375 . Παρατηρείται ότι σε κάθε ανάλυση, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου, λόγω αύξησης των σημείων επαφής, σε όλο και νωρίτερα στάδια της ανάλυσης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι για την 5^η ανάλυση της διεπιφάνειας, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας προσεγγίζει τις τιμές του

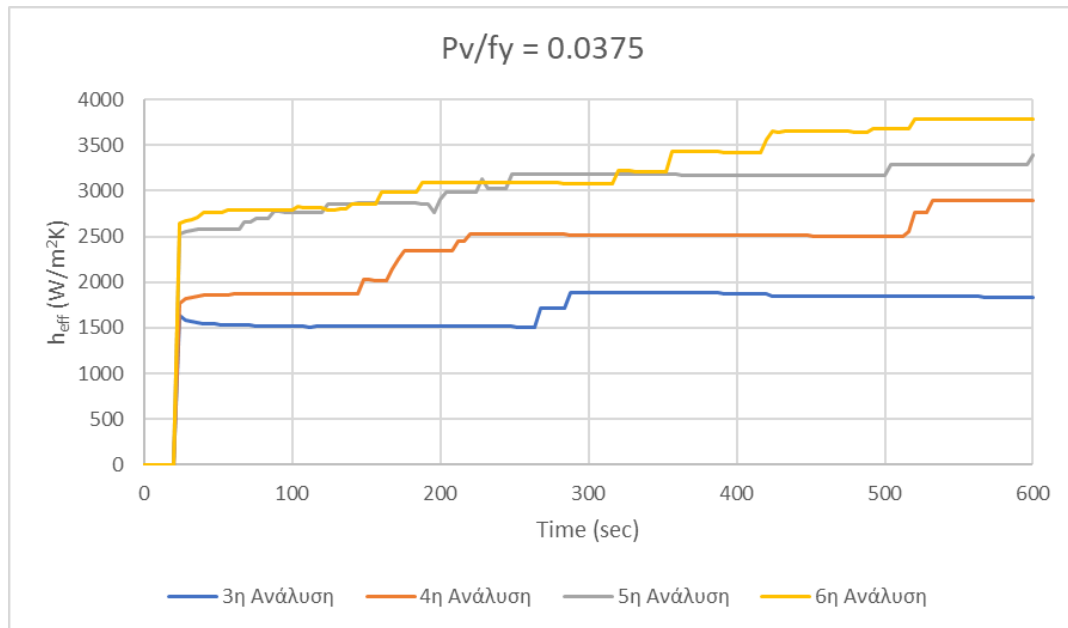
συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας της 6^{ης} ανάλυσης, καθώς το φορτίο αυξάνεται, και μάλιστα στις περιπτώσεις όπου $P_v/f_y = 0.035$ και 0.0375 σχεδόν ταυτίζονται κατά το πρώτο περίπου μισό χρονικό διάστημα της ανάλυσης.



Σχήμα 5.1.6: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $P_v/f_y = 0.0325$



Σχήμα 5.1.7: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $P_v/f_y = 0.035$



Σχήμα 5.1.8: Διάγραμμα μεταβολής του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} συναρτήσει του χρόνου για φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$

Όπως είναι αναμενόμενο, ο μακροσκοπικός συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου και με την αύξηση της ανάλυσης της τραχύτητας, όταν δηλαδή λαμβάνονται υπόψη μικρότερης κλίμακας ατέλειες της διεπιφάνειας.

Γενικά παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης, ο μακροσκοπικός συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} παίρνει τις υψηλότερες τιμές για την 6^η ανάλυση της διεπιφάνειας σε σχέση με τις υπόλοιπες αναλύσεις.

Στην 3^η ανάλυση όπου ο κυματισμός της διεπιφάνειας είναι κυρίαρχος, ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας εμφανίζεται μειωμένος σε σύγκριση με τις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας και φαίνεται να σταθεροποιείται σχετικά νωρίς στις περιπτώσεις που το κατακόρυφο φορτίο παίρνει τις τιμές $P_v/f_y < 0.03$, ενώ όταν $P_v/f_y \geq 0.03$ παρουσιάζει μικρή αύξηση τη χρονική στιγμή $t=300\text{sec}$ και στη συνέχεια σταθεροποιείται.

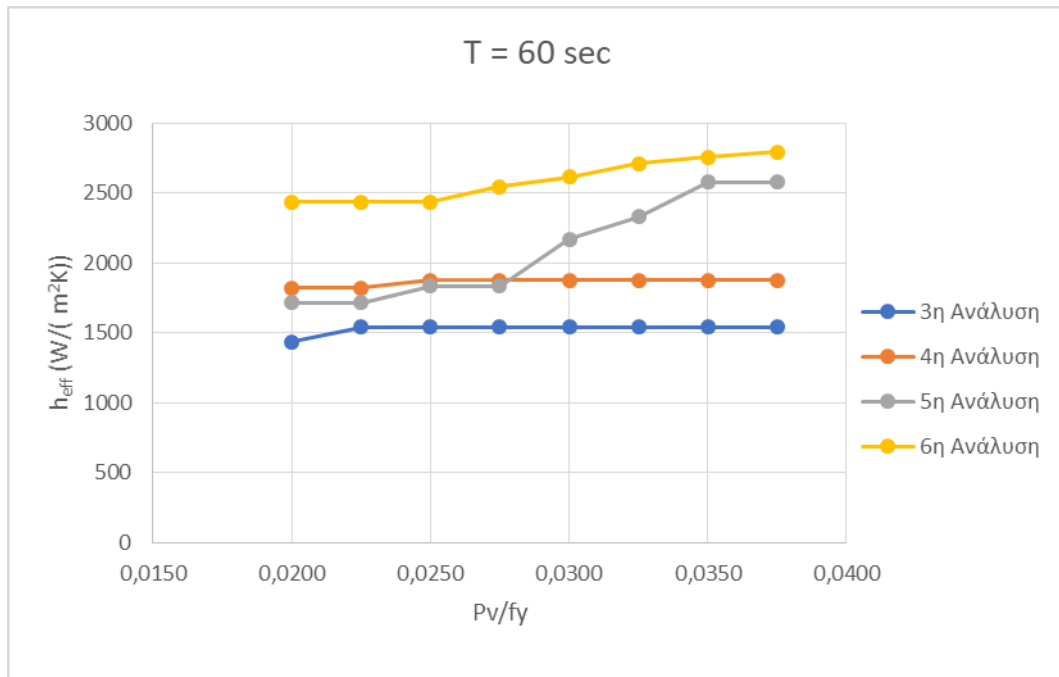
Αξίζει να σημειωθεί το γεγονός, ότι συχνά παρουσιάζονται προσωρινές μικρές πτώσεις στην τιμή του συντελεστή κατά τη διάρκεια των αναλύσεων, άλλοτε μικρότερης και άλλοτε μεγαλύτερης διάρκειας που οφείλονται στην απώλεια σημείων επαφής λόγω της θερμικής διαστολής του άνω δίσκου, όπου ορισμένοι κόμβοι «χάνουν» ή «βρίσκουν» επαφή, ανάλογα με τη θέση τους κατά μήκος της διεπιφάνειας.

5.2 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας και απεικόνιση της θερμικής ροής και των πλαστικών παραμορφώσεων στη διεπιφάνεια

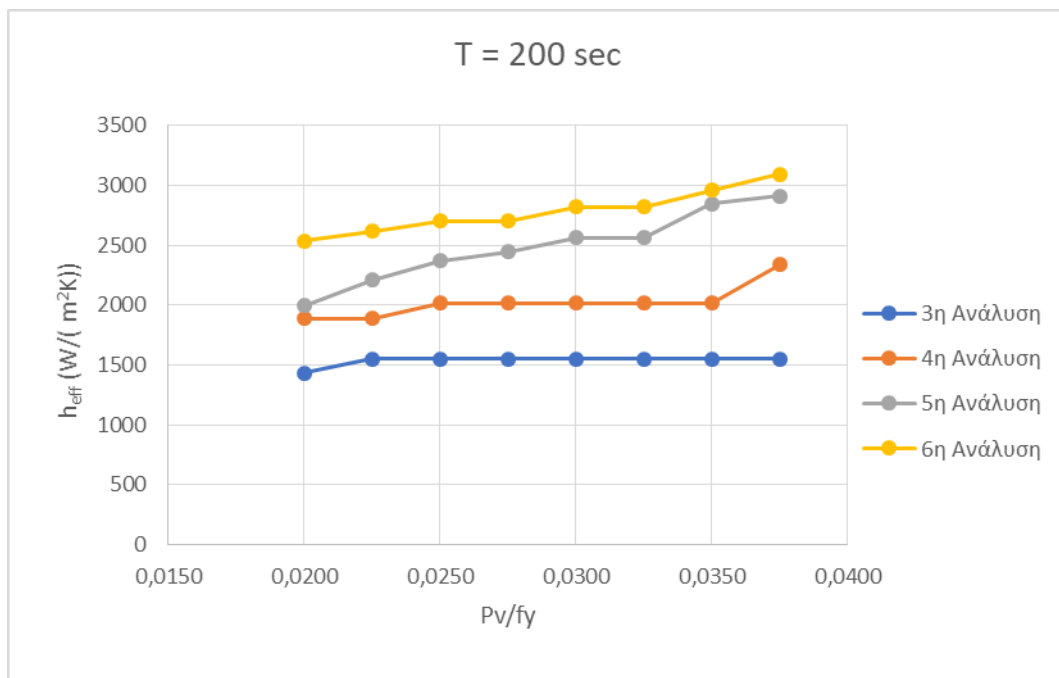
Σε αυτή την παράγραφο, στα σχήματα 5.2.1 - 5.2.4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα του μακροσκοπικού συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} λόγω επαφής συναρτήσει του κατακόρυφου επιβαλλόμενου φορτίου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές ($t = 60, 200, 400, 600$ sec). Στη συνέχεια παρατίθενται απεικονίσεις της θερμικής ροής στις περιοχές της διεπιφάνειας που βρίσκονται σε επαφή, για την 3^η και 6^η ανάλυση της διεπιφάνειας, κατά τη χρονική στιγμή $t = 600$ sec. Τέλος, παρουσιάζονται απεικονίσεις των πλαστικών παραμορφώσεων για την 6^η ανάλυση της διεπιφάνειας κατά τη χρονική στιγμή $t = 600$ sec.

Όσον αφορά την 3^η ανάλυση της διεπιφάνειας, η οποία όπως έχει ήδη αναφερθεί παρουσιάζει ατέλειες μεγάλης κλίμακας, ο μακροσκοπικός συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας παραμένει σχεδόν σταθερός για όλες τις περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης έως τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec (σχήματα 5.2.1 και 5.2.2), και παρουσιάζει μια μικρή αύξηση μετά τη χρονική στιγμή $t = 400$ sec στις περιπτώσεις όπου το κατακόρυφο φορτίο είναι μεγάλο (σχήματα 5.2.3 και 5.2.4). Επίσης, οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στην περίπτωση αυτής της διεπιφάνειας είναι αρκετά χαμηλότερες σε σχέση με αυτές των υπόλοιπων αναλύσεων της διεπιφάνειας, λόγω του αναλογικά μικρού αριθμού των σημείων επαφής που παρατηρούνται σε αυτήν την περίπτωση.

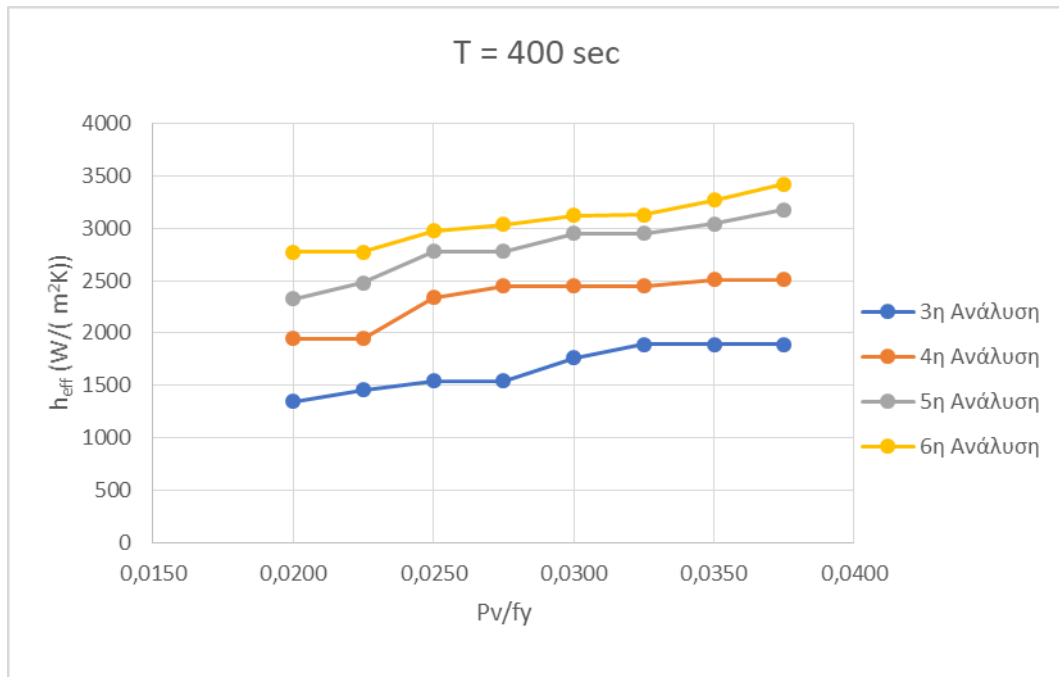
Σε ό,τι έχει να κάνει με τις υπόλοιπες αναλύσεις της διεπιφάνειας παρατηρούμε ότι η 4^η ανάλυση παρουσιάζει ανάλογη συμπεριφορά με την 3^η, δηλ. σχεδόν σταθερό συντελεστή αγωγιμότητας για όλες τις περιπτώσεις φόρτισης μέχρι την χρονική στιγμή $t = 200$ sec. Από την χρονική στιγμή $t = 400$ sec βλέπουμε σημαντική αύξηση στις τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, η οποία ακολουθεί την αύξηση που παρατηρείται στις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας (5^η και 6^η). Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι οι τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στις ανώτερες αναλύσεις της διεπιφάνειας, μετά τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec παρουσιάζουν πολύ μικρές διαφορές σε όλες τις περιπτώσεις φόρτισης που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία.



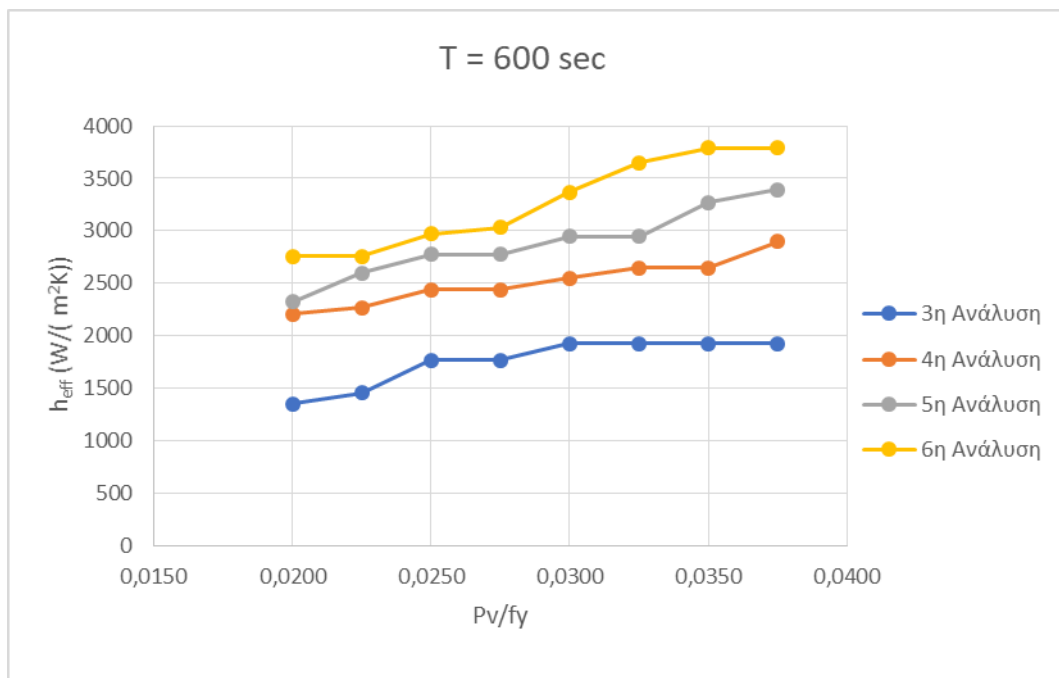
Σχήμα 5.2.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του μακροσκοπικού συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε μακροσκοπικό επίπεδο συναρτήσει του φορτίου για τις τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας τη χρονική στιγμή $t = 60$ sec.



Σχήμα 5.2.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του μακροσκοπικού συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε μακροσκοπικό επίπεδο συναρτήσει του φορτίου για τις τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας τη χρονική στιγμή $t = 200$ sec.



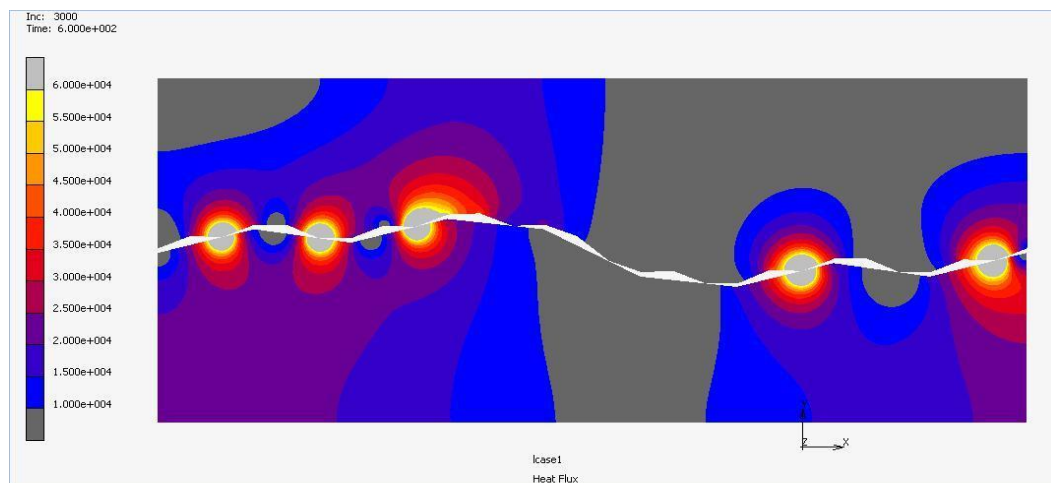
Σχήμα 5.2.3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του μακροσκοπικού συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε μακροσκοπικό επίπεδο συναρτήσει του φορτίου για τις τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας τη χρονική στιγμή $t = 400$ sec.



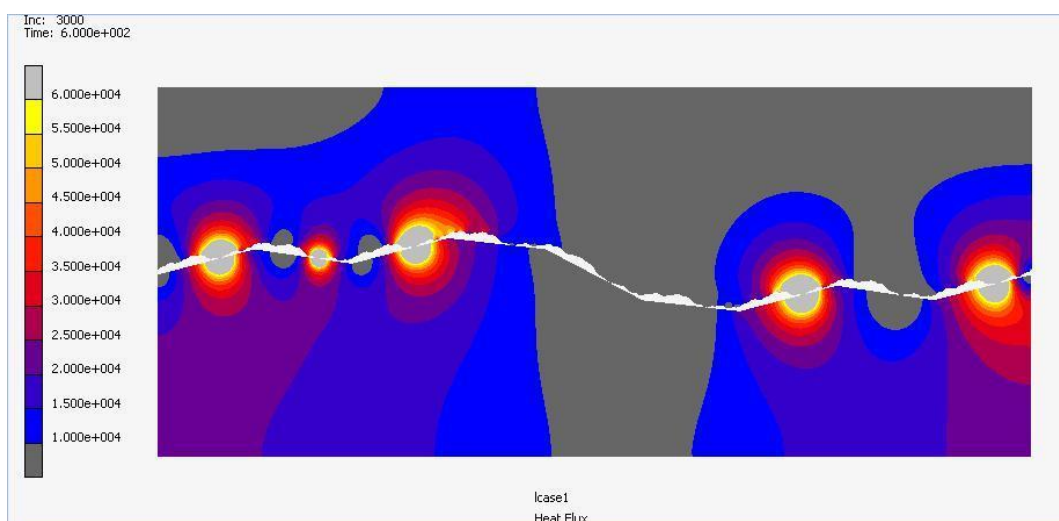
Σχήμα 5.2.4: Συγκεντρωτικό διάγραμμα του μακροσκοπικού συντελεστή της θερμικής αγωγιμότητας h_{eff} σε μακροσκοπικό επίπεδο συναρτήσει του φορτίου για τις τέσσερις αναλύσεις τραχύτητας τη χρονική στιγμή $t = 600$ sec.

Γενικά παρατηρείται ότι καθώς εξελίσσεται η ανάλυση, ο μακροσκοπικός συντελεστής της θερμικής αγωγιμότητας αυξάνεται με την αύξηση του φορτίου αλλά και με την αύξηση της τραχύτητας.

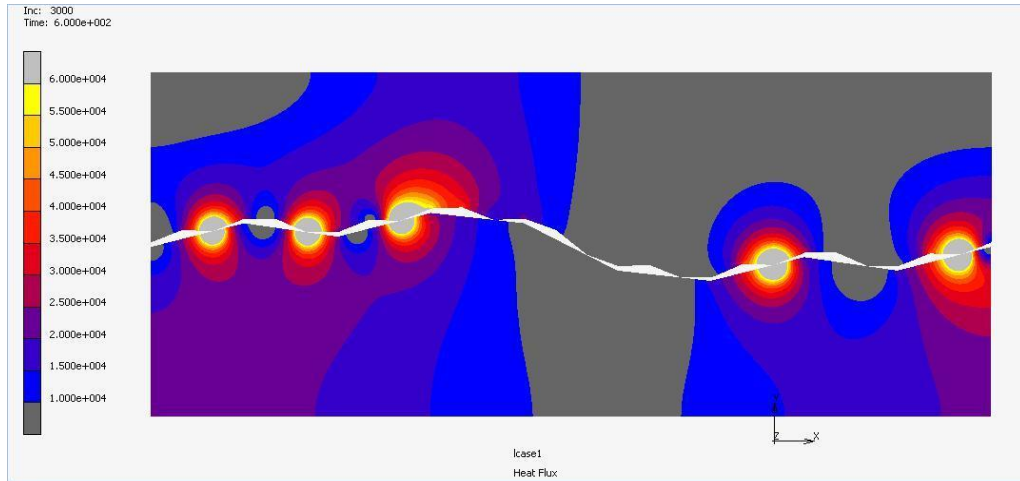
Στα Σχήματα 5.2.5 – 5.2.20 παρουσιάζονται οι εικόνες θερμικής ροής την χρονική στιγμή $t = 600\text{sec}$, για τις περιπτώσεις της 3^{ης} και 6^{ης} ανάλυσης της τραχύτητας της διεπιφάνειας και τις διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης φόρτισης που εξετάστηκαν. Από τη μελέτη των εικόνων της θερμικής ροής διαπιστώνεται ότι οι πλαστικοποιήσεις των αιχμών μικρότερης κλίμακας, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις που το κατακόρυφο φορτίο είναι μεγάλο, οδηγούν σε μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής και αυξημένη ροή θερμότητας. Το γεγονός της έντονης πλαστικοποίησης των αιχμών μικρότερης κλίμακας επιβεβαιώνεται και από τα σχήματα B2.1 έως B2.32 στα οποία φαίνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις στις δύο διαφορετικές αναλύσεις της διεπιφάνειας.



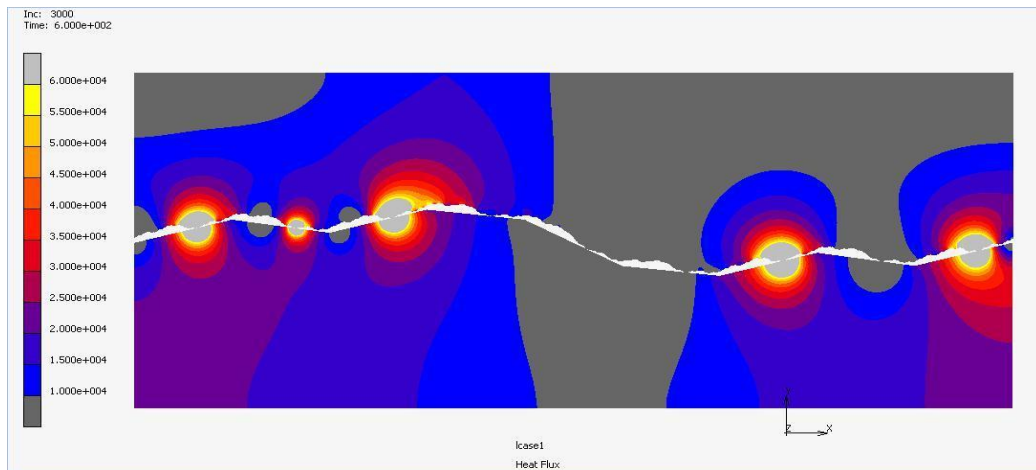
Σχήμα 5.2.5: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.02$, την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$.



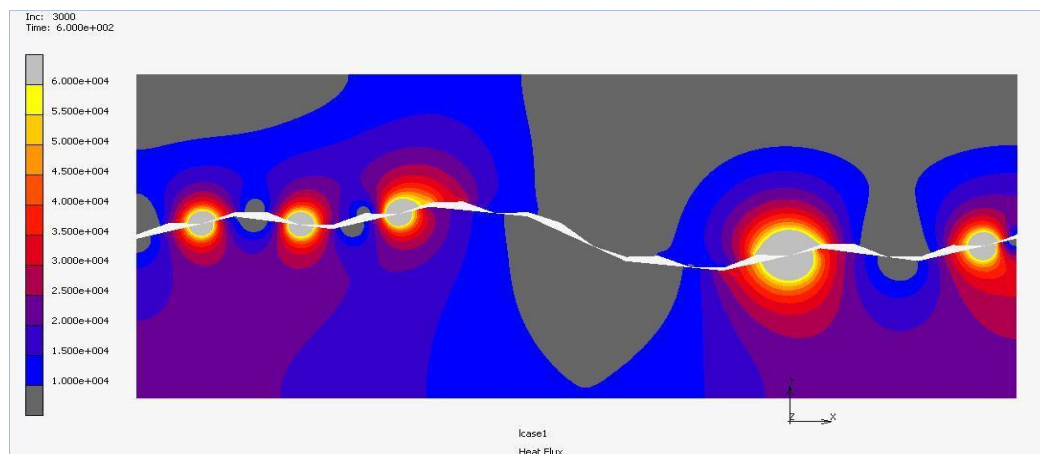
Σχήμα 5.2.6: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.02$, την χρονική στιγμή $t = 600\text{ sec}$.



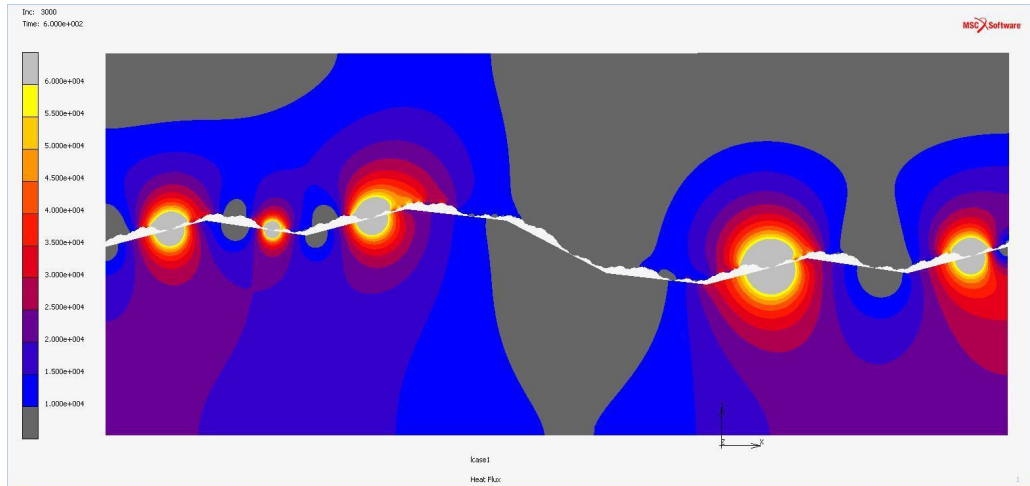
Σχήμα 5.2.7: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0225$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



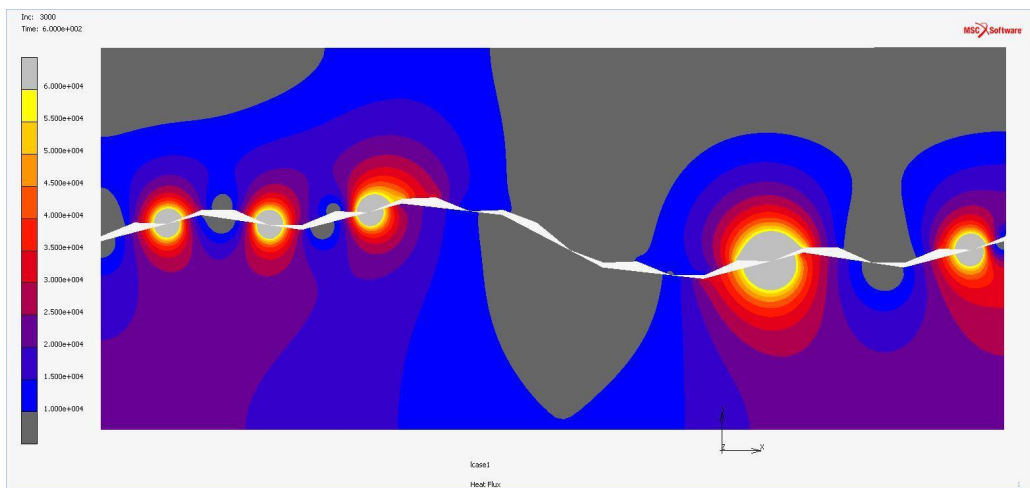
Σχήμα 5.2.8: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0225$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



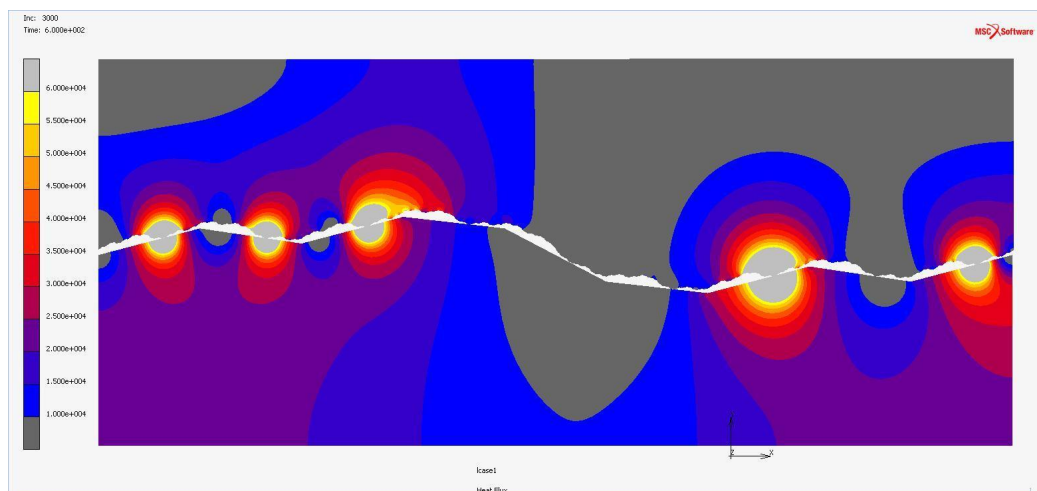
Σχήμα 5.2.9: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.025$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



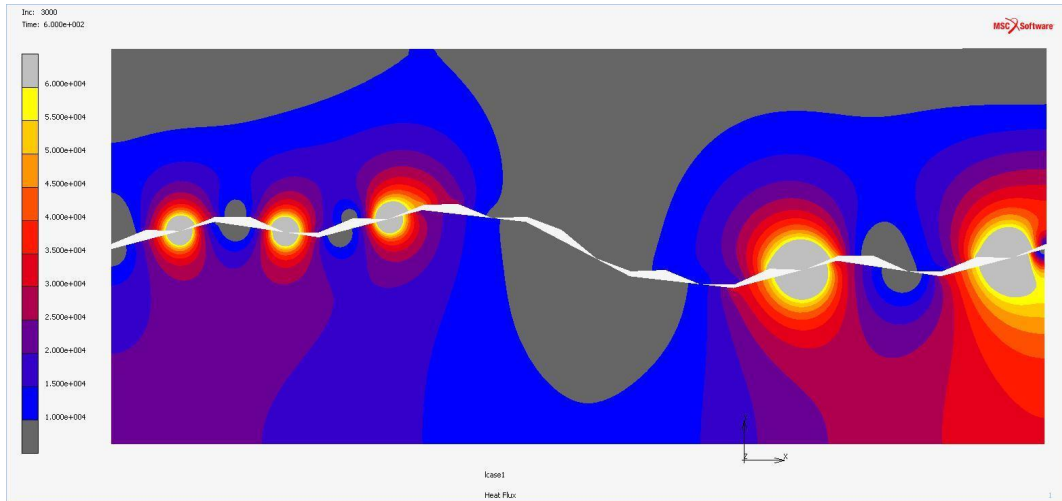
Σχήμα 5.2.10: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_n/f_y = 0.025$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



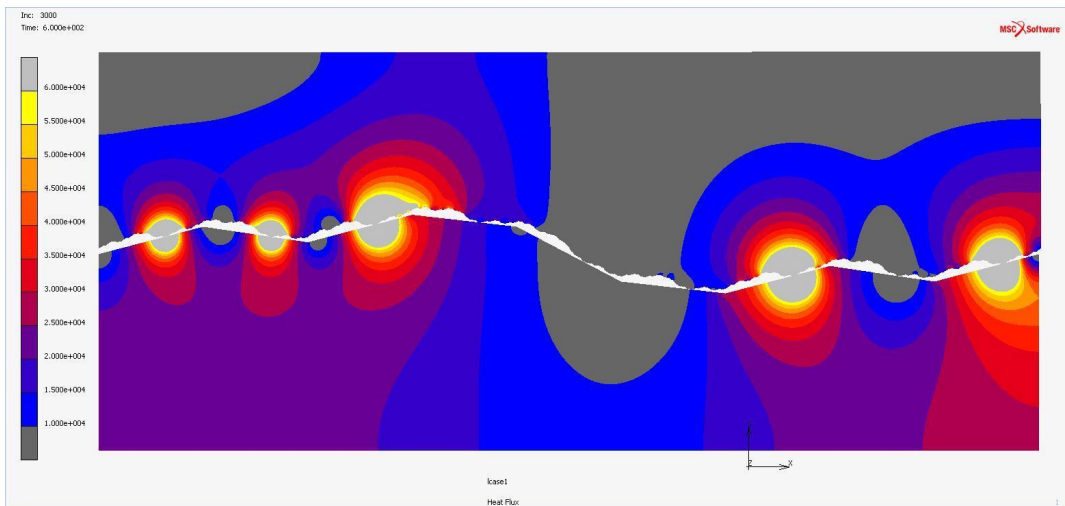
Σχήμα 5.2.11: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_n/f_y = 0.0275$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



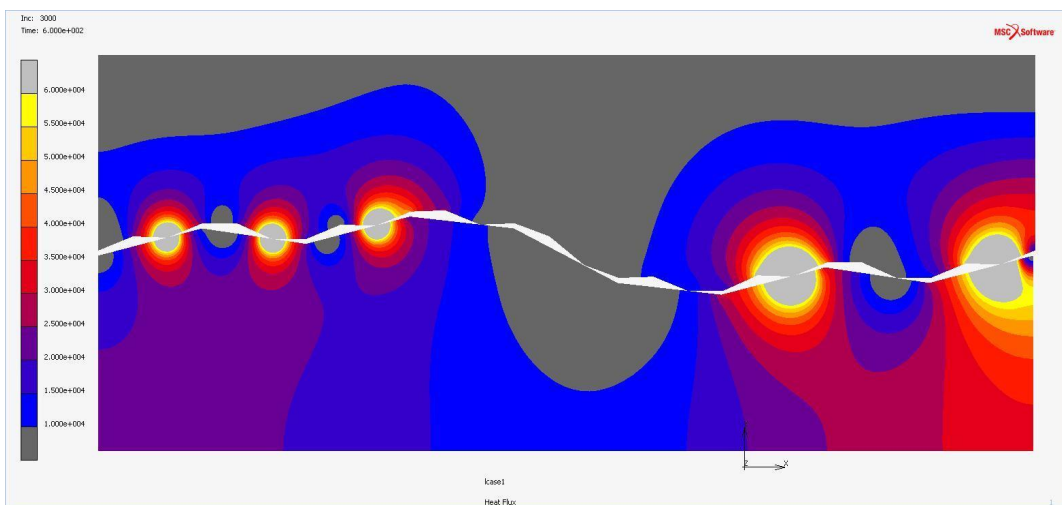
Σχήμα 5.2.12: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_n/f_y = 0.0275$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



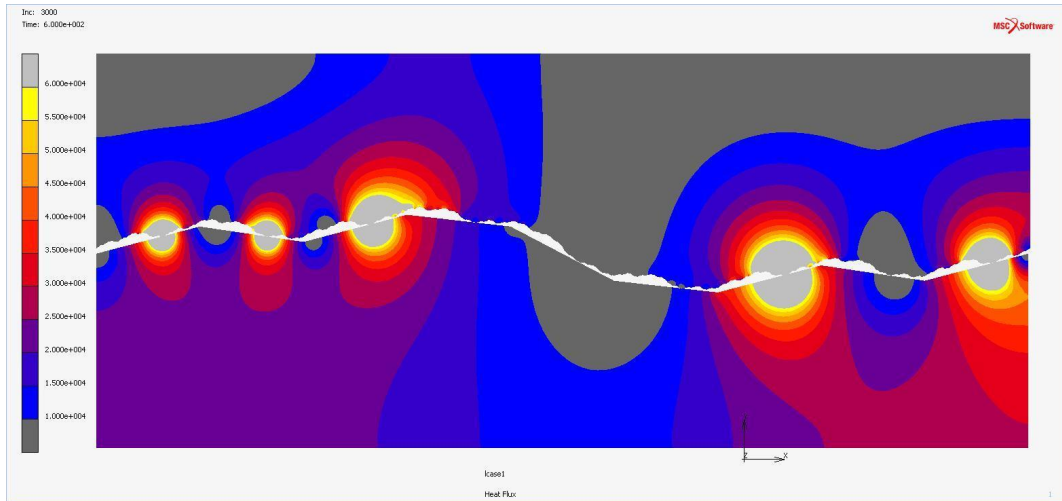
Σχήμα 5.2.13: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_n/f_y = 0.03$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



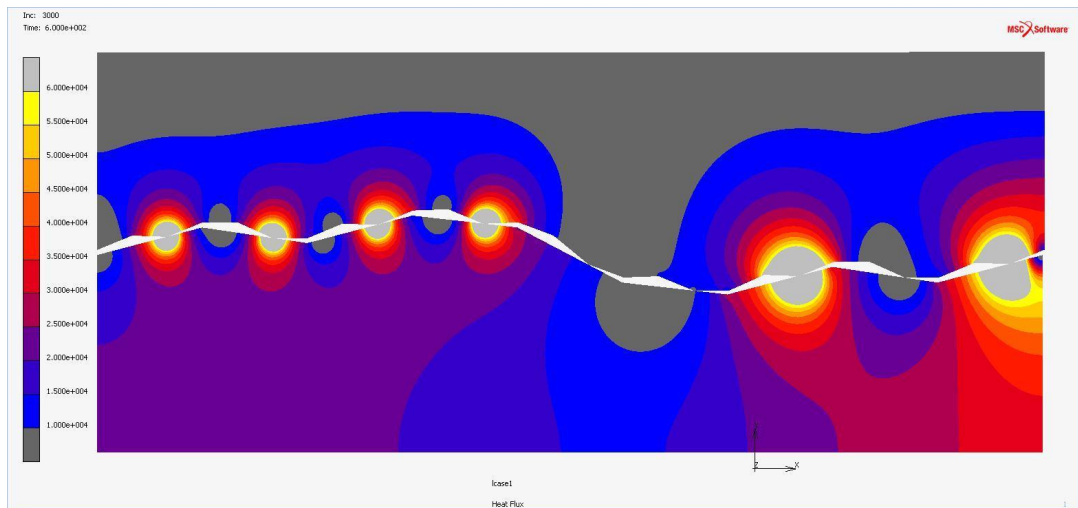
Σχήμα 5.2.14: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_n/f_y = 0.03$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



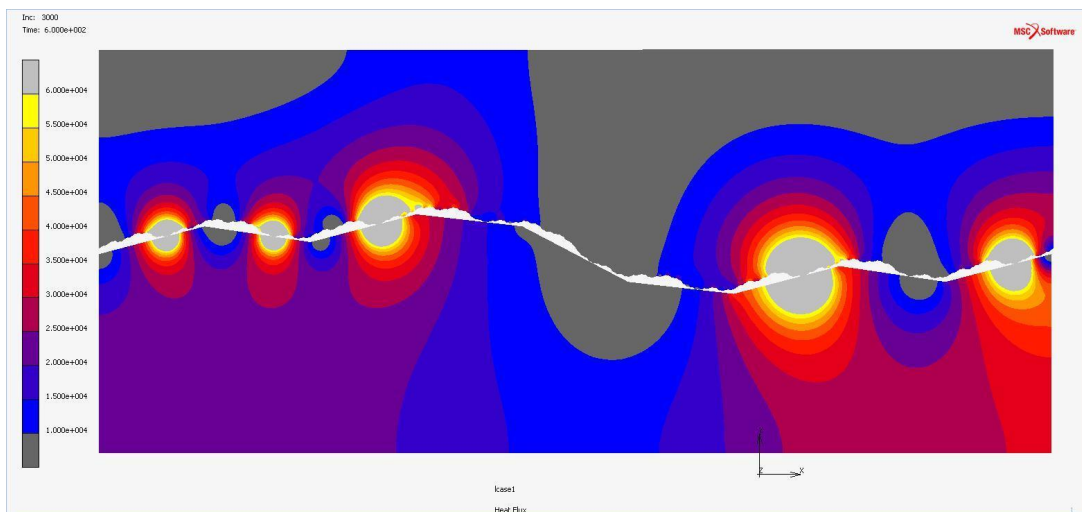
Σχήμα 5.2.15: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_n/f_y = 0.0325$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



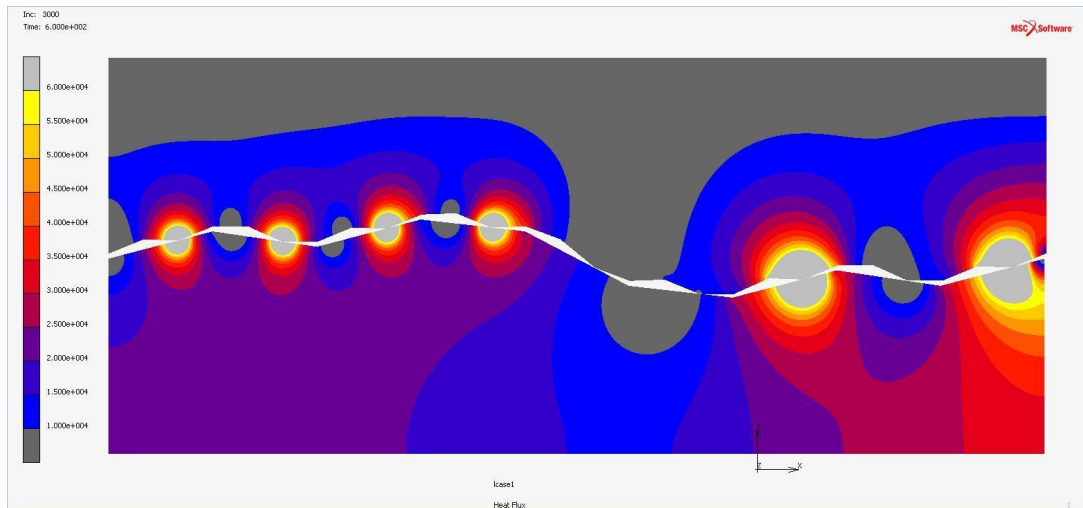
Σχήμα 5.2.16: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0325$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



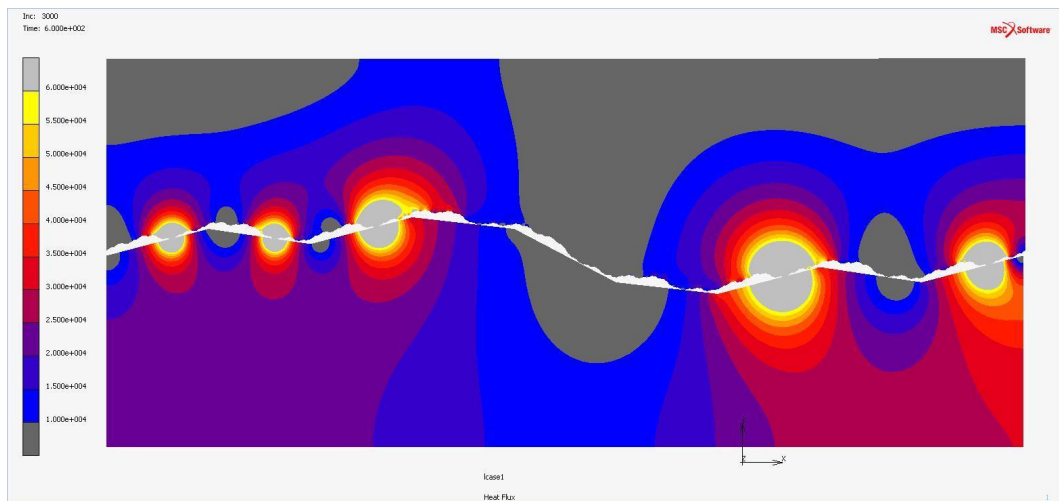
Σχήμα 5.2.17: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.035$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.



Σχήμα 5.2.18: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.035$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.

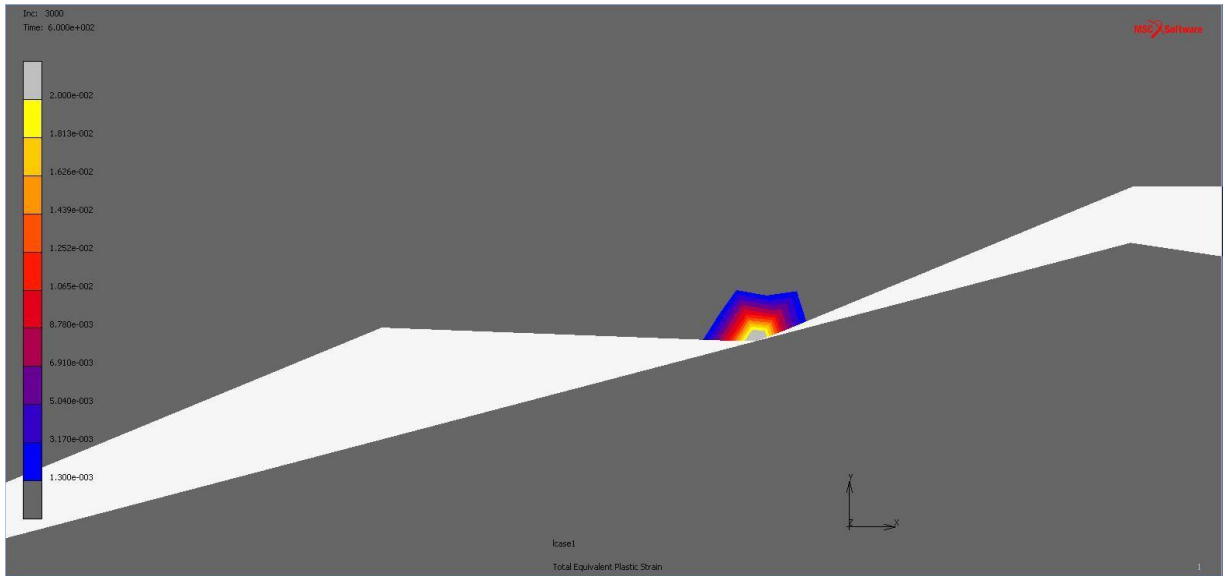


Σχήμα 5.2.19: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.

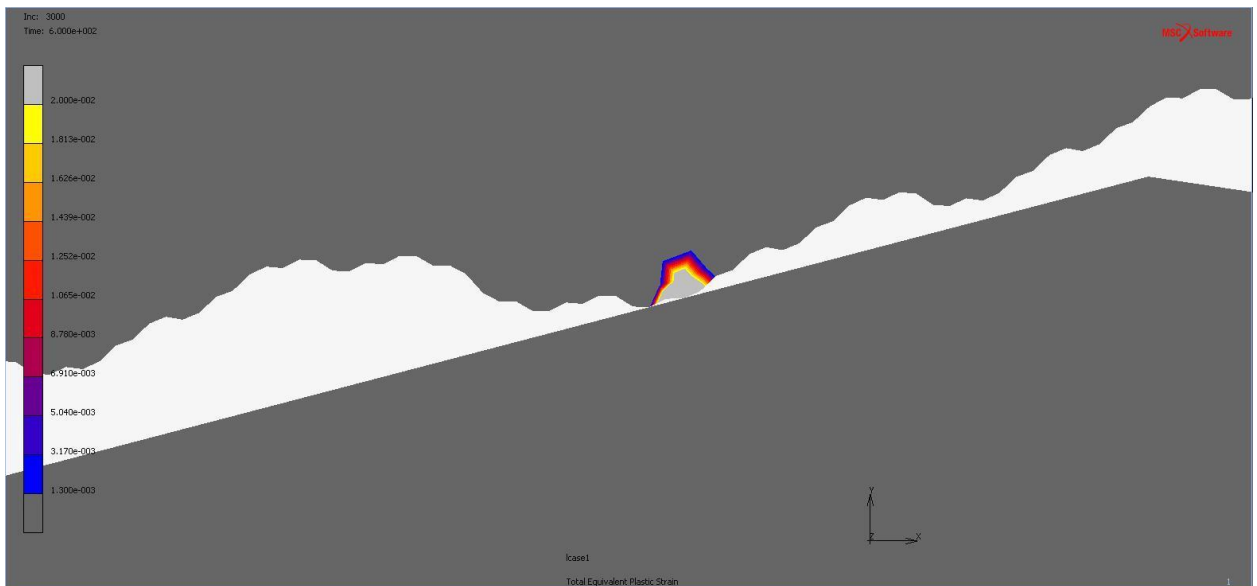


Σχήμα 5.2.20: Απεικόνιση της ροής θερμότητας στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 , υπό φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$, την χρονική στιγμή $t = 600$ sec.

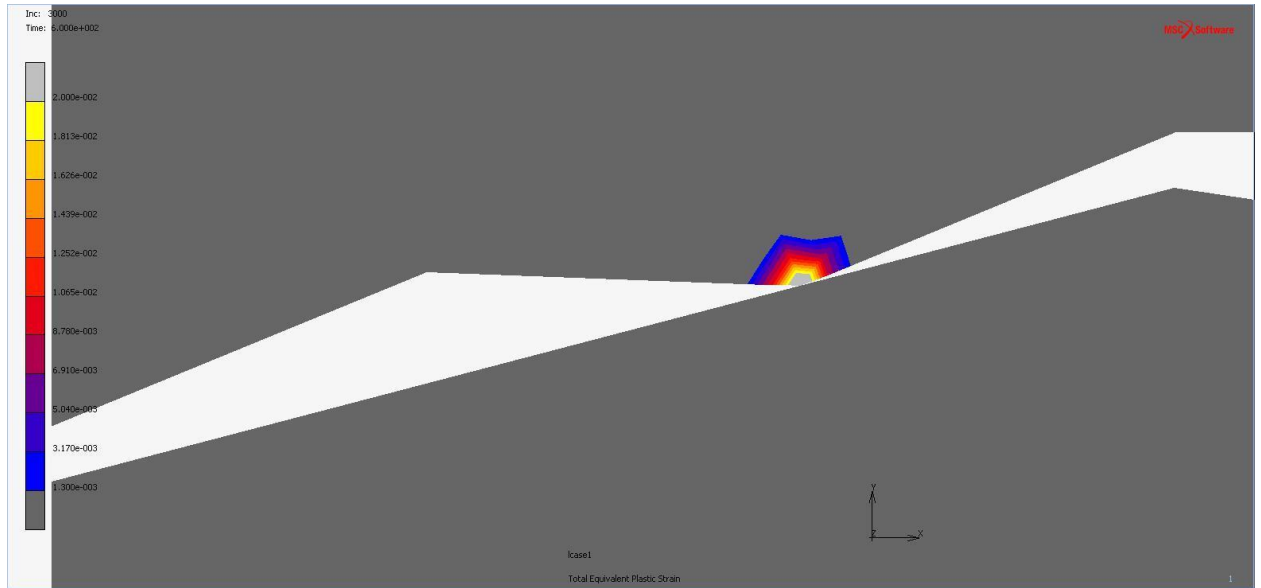
Στα Σχήματα 5.2.21 – 5.2.36 παρουσιάζονται οι εικόνες των πλαστικών παραμορφώσεων την χρονική στιγμή $t = 600$ sec, για τις περιπτώσεις της 3^{ης} και 6^{ης} ανάλυσης της τραχύτητας της διεπιφάνειας και τις διαφορετικές τιμές της κατακόρυφης φόρτισης που εξετάστηκαν. Από τη μελέτη των εικόνων των πλαστικών παραμορφώσεων είναι φανερό ότι για τις αιχμές μικρότερης κλίμακας, με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου επέρχονται περισσότερες πλαστικοποιήσεις κόμβων, που οδηγούν σε ολοένα και μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής και αυξημένη ροή θερμότητας.



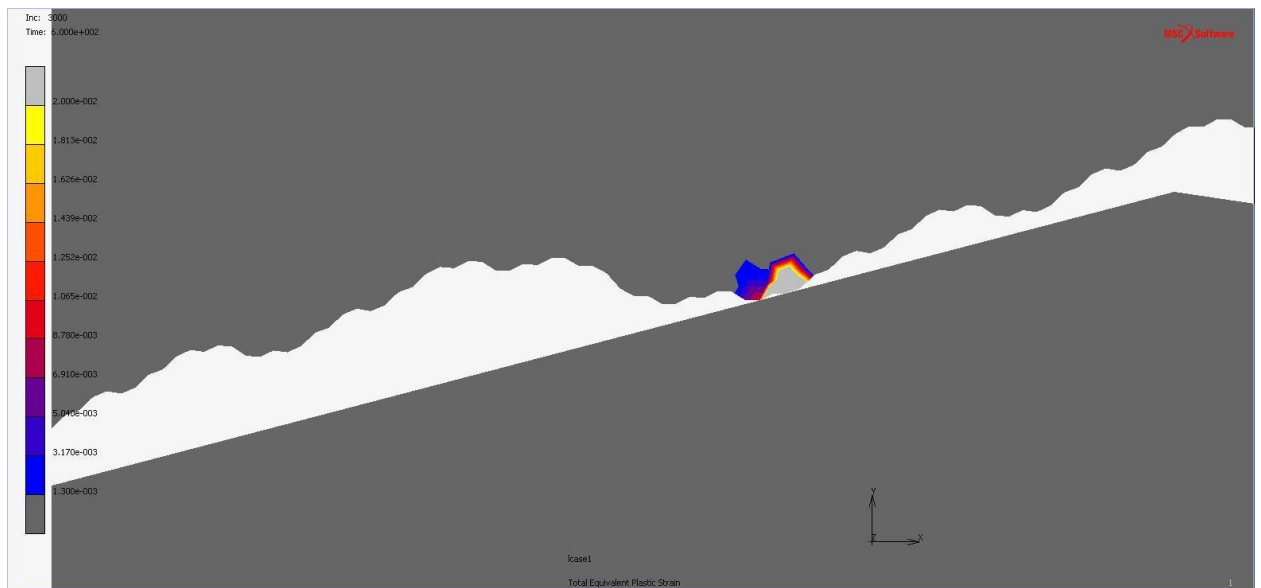
Σχήμα 5.2.21: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $Pv/fy = 0.02$, $t=600$ sec



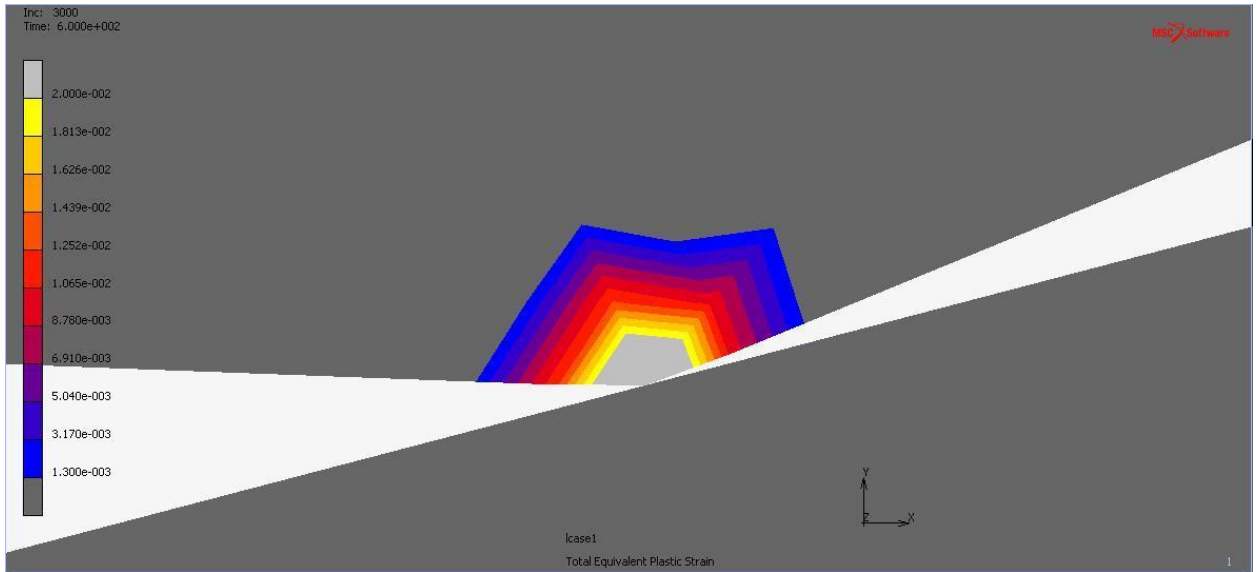
Σχήμα 5.2.22: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $Pv/fy = 0.02$, $t=600$ sec



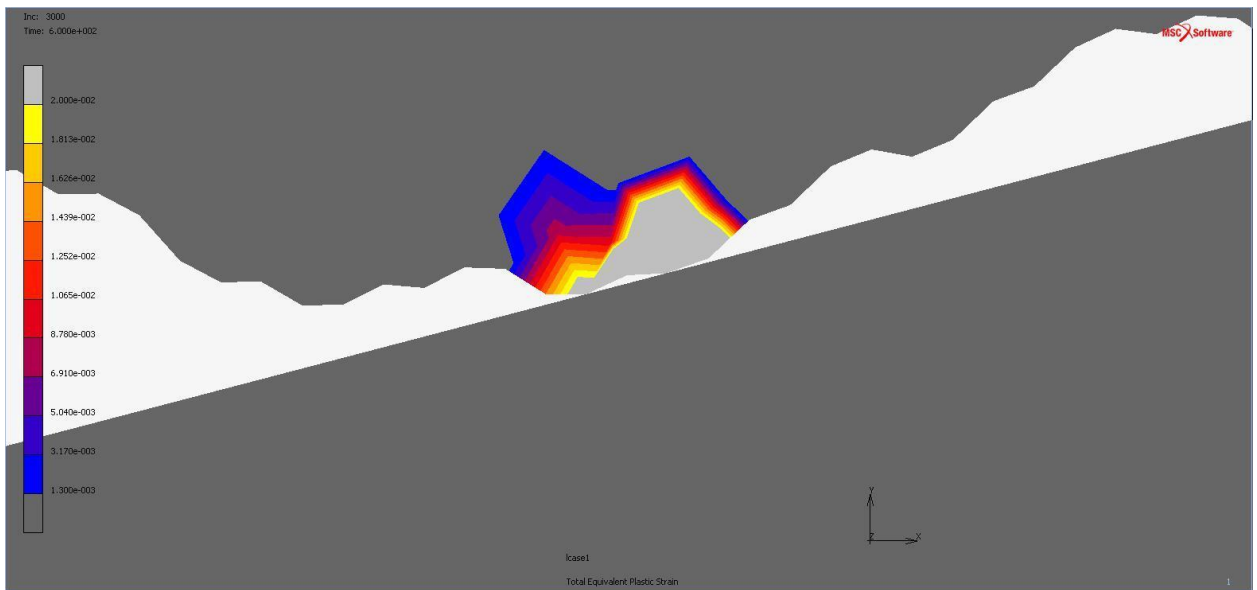
Σχήμα 5.2.23: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $Pv/f_y = 0.0225$, $t=600$ sec



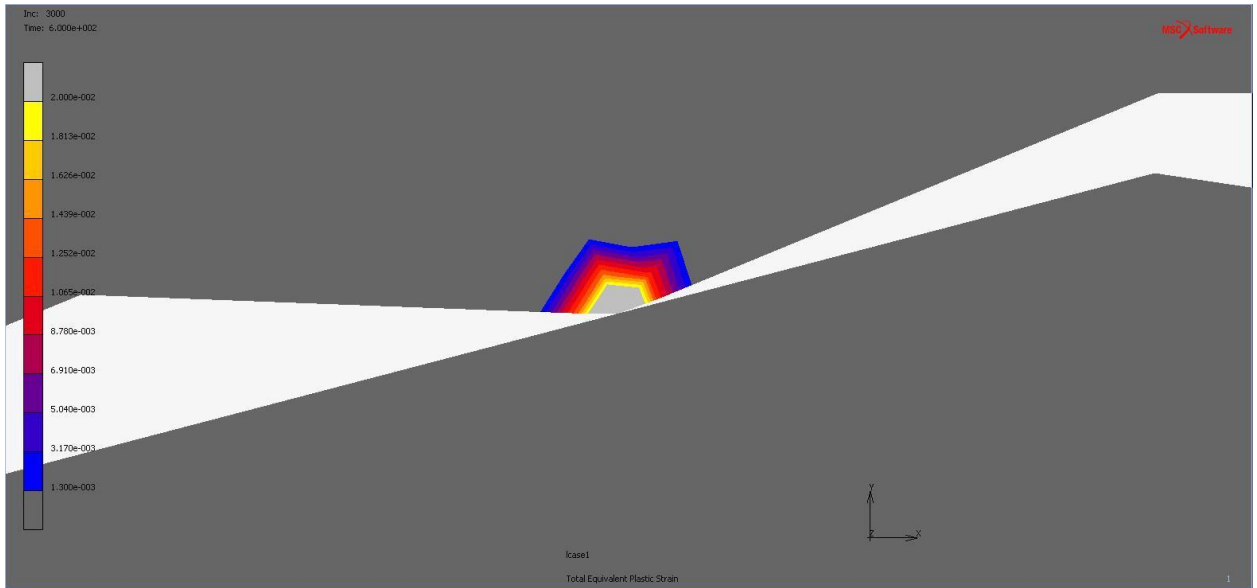
Σχήμα 5.2.24: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $Pv/f_y = 0.0225$, $t=600$ sec



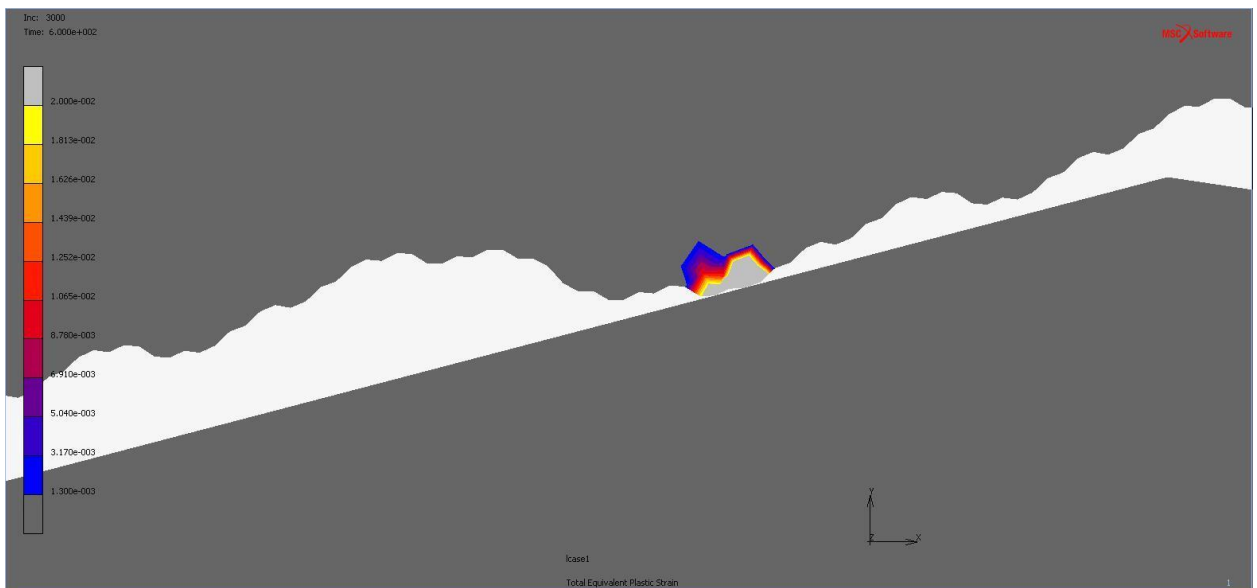
Σχήμα 5.2.25: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $Pv/fy = 0.025$, $t=600$ sec



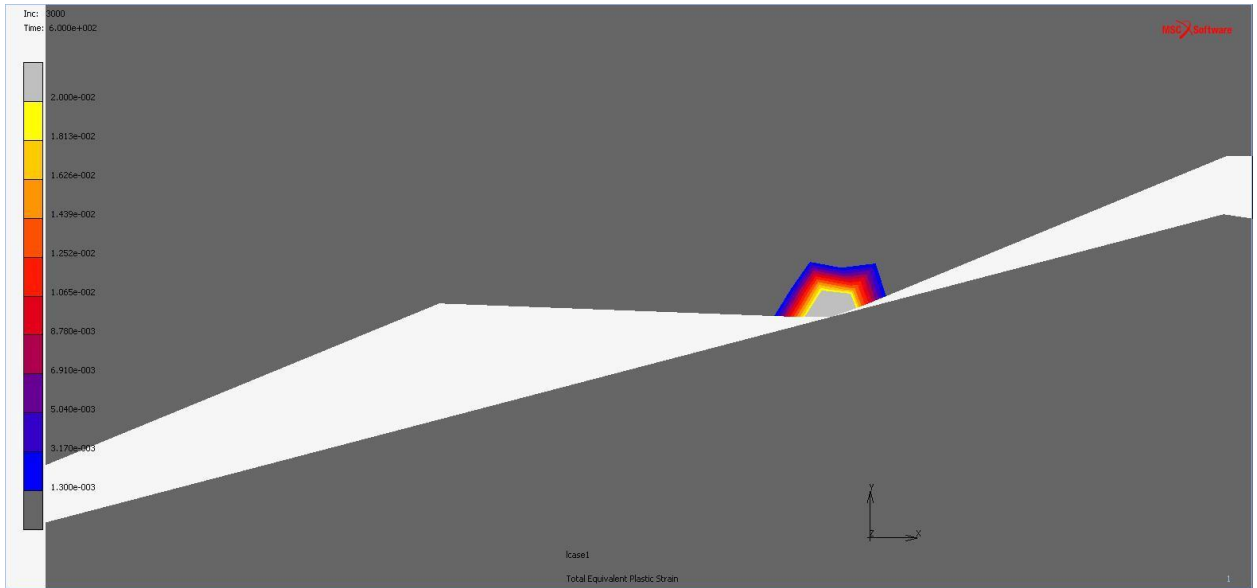
Σχήμα 5.2.26: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $Pv/fy = 0.025$, $t=600$ sec



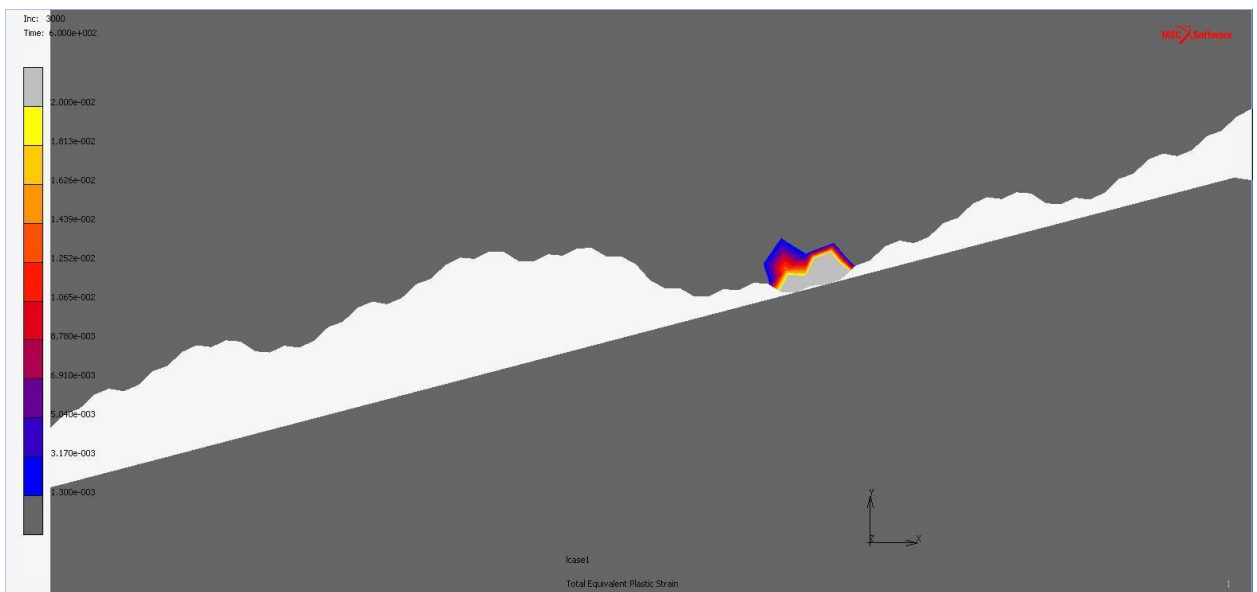
Σχήμα 5.2.27: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $Pv/f_y = 0.0275$, $t=600$ sec



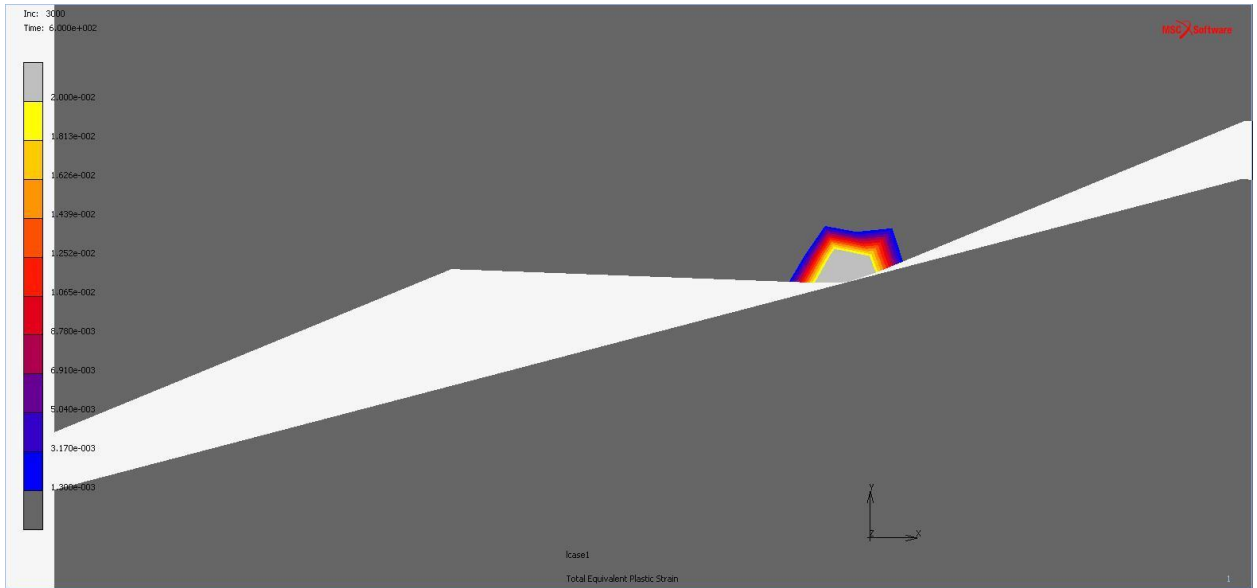
Σχήμα 5.2.28: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $Pv/f_y = 0.0275$, $t=600$ sec



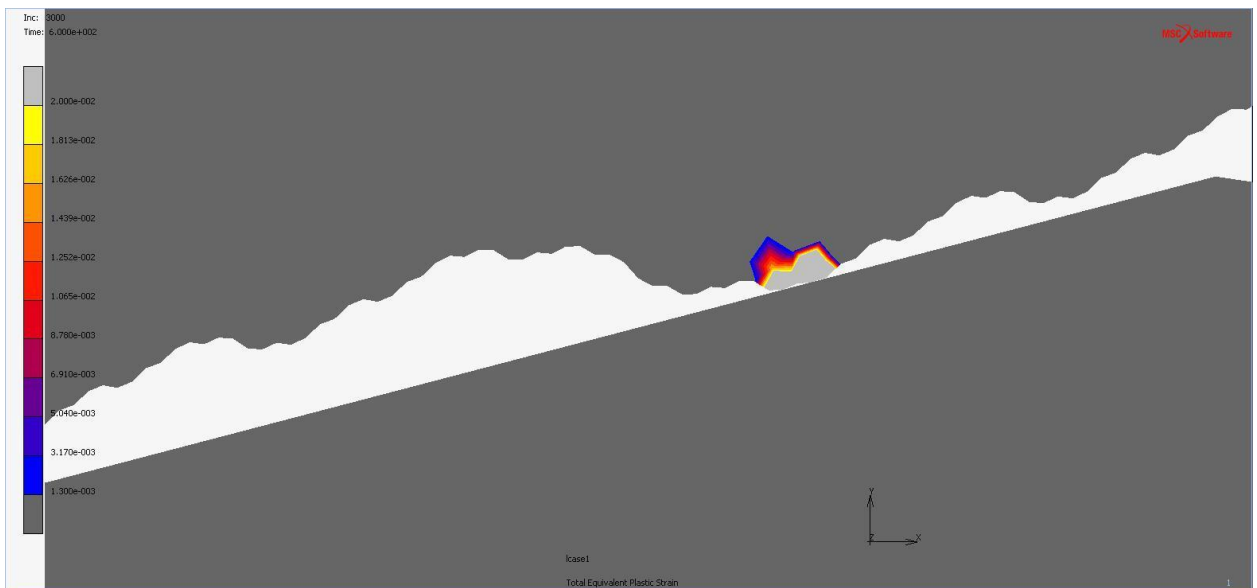
Σχήμα 5.2.29: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $Pv/f_y = 0.03$, $t=600$ sec



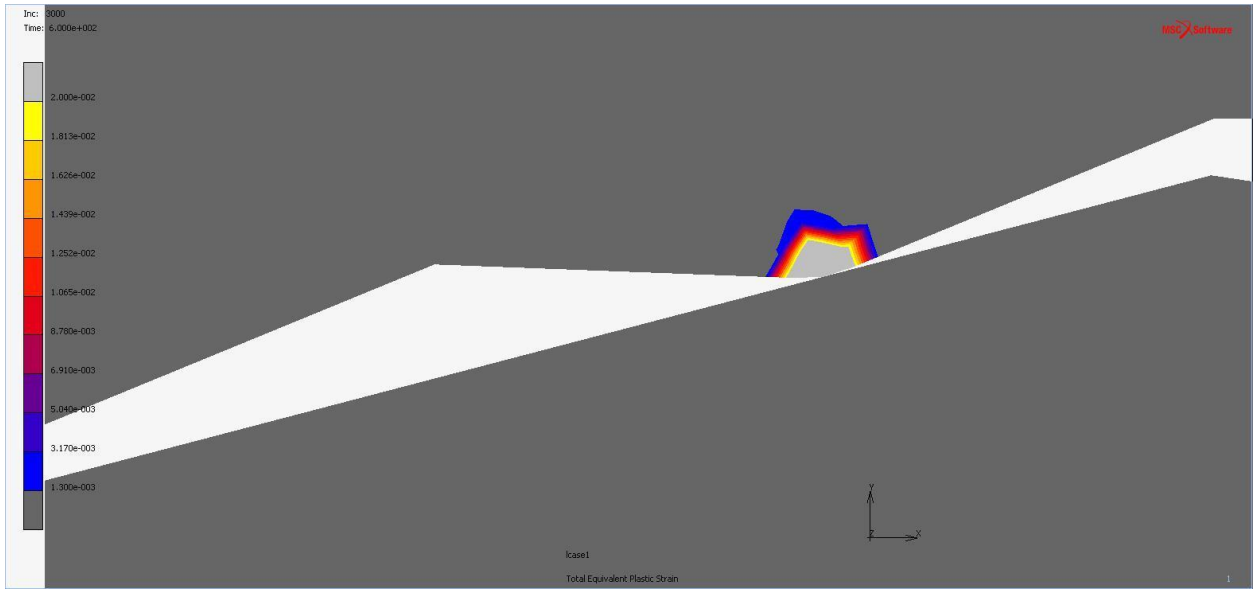
Σχήμα 5.2.30: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $Pv/f_y = 0.03$, $t=600$ sec



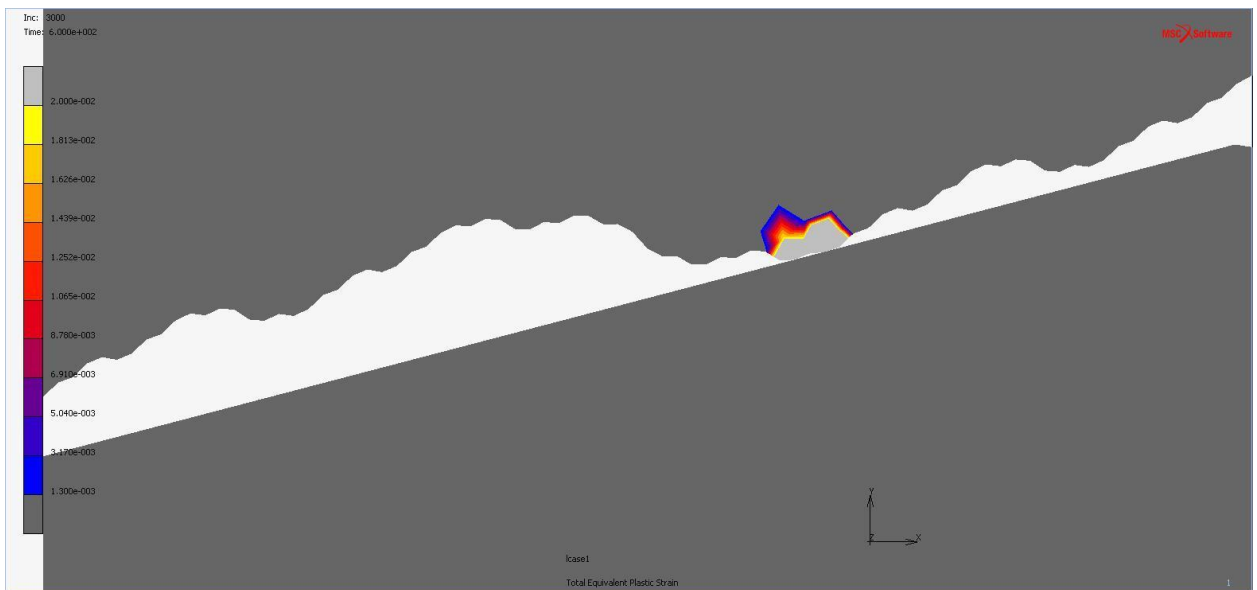
Σχήμα 5.2.31: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $Pv/f_y = 0.0325$, $t=600$ sec



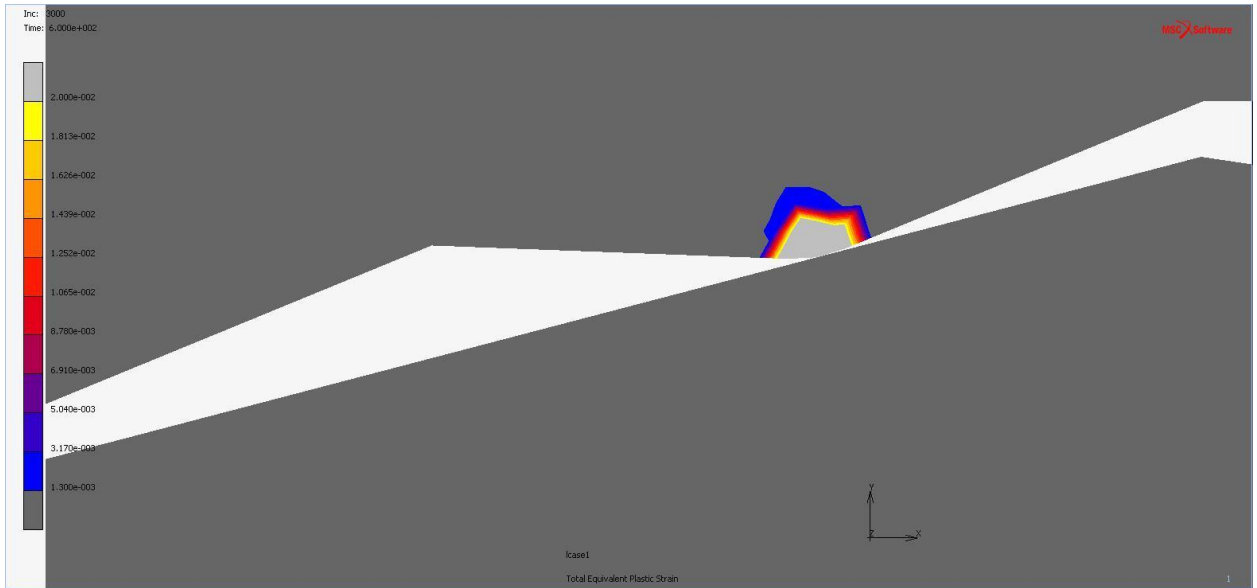
Σχήμα 5.2.32: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $Pv/f_y = 0.0325$, $t=600$ sec



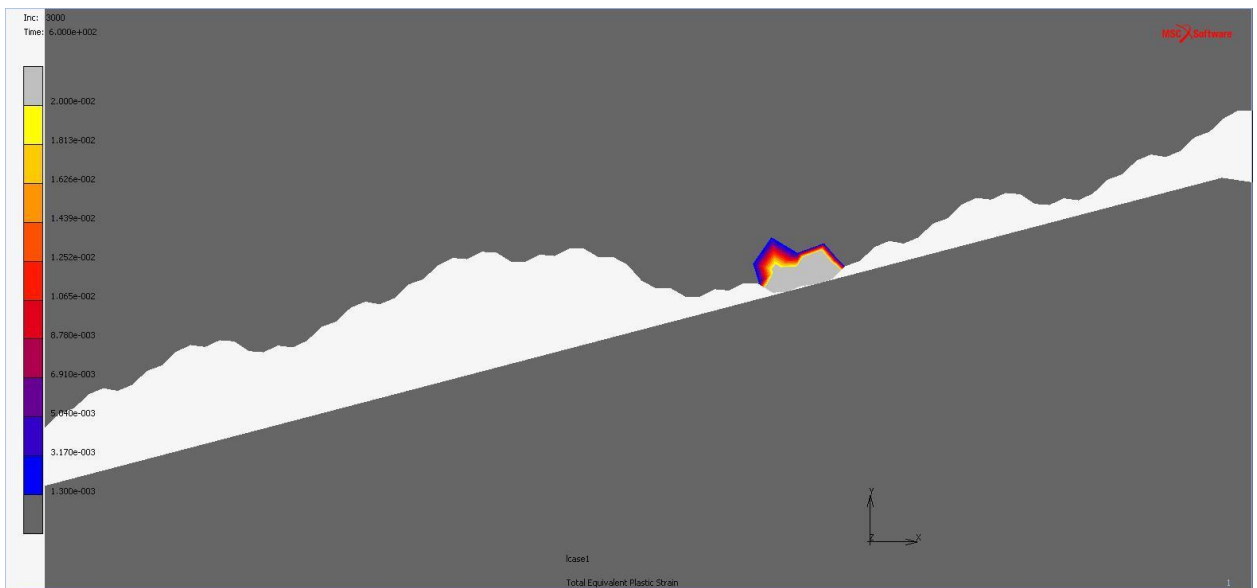
Σχήμα 5.2.33: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $P_v/f_y = 0.035$, $t=600$ sec



Σχήμα 5.2.34: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $P_v/f_y = 0.035$, $t=600$ sec



Σχήμα 5.2.35: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_3 για φορτίο $Pv/f_y = 0.0375$, $t=600$ sec



Σχήμα 5.2.36: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη κατασκευή της διεπιφάνειας f_6 για φορτίο $Pv/f_y = 0.0375$, $t=600$ sec

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η επιρροή του κυματισμού και της τραχύτητας της διεπιφάνειας μεταξύ δύο μεταλλικών δίσκων, στη θερμική αγωγιμότητα, υπό την επιβολή κατακόρυφης φόρτισης. Η τραχύτητα και ο κυματισμός της διεπιφάνειας προσομοιώθηκε με τη χρήση των fractal συναρτήσεων παρεμβολής, από τις οποίες προέκυψαν τέσσερις διαφορετικές αναλύσεις της επιφανειακής τραχύτητας του άνω δίσκου (3^η, 4^η, 5^η και 6^η ανάλυση), ενώ ο κάτω δίσκος θεωρήθηκε λείος. Για την προσομοίωση του προβλήματος της θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής θεωρήθηκε ότι ο άνω δίσκος είναι παραμορφώσιμος ενώ ο κάτω άκαμπτος. Επίσης, θεωρήθηκαν συνθήκες κενού μεταξύ των δύο δίσκων και δεν λήφθηκε υπόψη η τριβή που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια. Εξετάστηκαν οκτώ περιπτώσεις φόρτισης με ελάχιστο φορτίο αντίστοιχο με τιμή τάσης 0.020fy και μέγιστο με 0.0375fy για τις τέσσερις εξεταζόμενες περιπτώσεις τραχύτητας του άνω δίσκου (3^η, 4^η, 5^η και 6^η ανάλυση της τραχύτητας). Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων MARC και από τη μελέτη των αποτελεσμάτων εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται αύξηση των σημείων επαφής με την αύξηση του κατακόρυφου φορτίου και κατά συνέπεια, αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας λόγω επαφής.
- Για το ίδιο κατακόρυφο φορτίο το πλήθος των σημείων επαφής αυξάνεται με την αύξηση της ανάλυσης της τραχύτητας της διεπιφάνειας, καθώς στις υψηλότερες αναλύσεις παρατηρείται πλαστικοποίηση των αιχμών μικρότερης κλίμακας, με αποτέλεσμα να έρχονται σε επαφή περισσότεροι κόμβοι της διεπιφάνειας. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι να παρουσιάζεται απότομη αύξηση στις τιμές του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας στα σημεία αυτά.
- Στις επιφάνειες που παρουσιάζουν ατέλειες μεγάλης κλίμακας (κυματισμό) μόνο, παρατηρούνται μικρές τιμές του συντελεστή αγωγιμότητας λόγω επαφής, σε σχέση με τις επιφάνειες που εκτός από κυματισμό παρουσιάζουν και τραχύτητα (ατέλειες μικρής κλίμακας). Αξίζει να σημειωθεί, ότι στις πρώτες ο συντελεστής θερμικής

αγωγιμότητας παραμένει σταθερός σε όλες τις περιπτώσεις κατακόρυφης φόρτισης που μελετήθηκαν.

- Στις επιφάνειες στις οποίες λαμβάνονται υπόψη ατέλειες πολλαπλής κλίμακας παρατηρείται έντονη αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με την αύξηση του φορτίου. Επίσης, στις επιφάνειες αυτές παρατηρείται αύξηση του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας με την αύξηση της θερμοκρασίας τους, η οποία οδηγεί σε έντονες πλαστικοποιήσεις των αιχμών μικρής κλίμακας.

Στο σημείο αυτό, παρατίθενται οι παρακάτω προτάσεις για μελλοντική έρευνα:

- Διερεύνηση της επιρροής των συνοριακών συνθηκών στήριξης των δίσκων στη θερμική αγωγιμότητα λόγω επαφής
- Μελέτη της επιρροής αιχμών μικρότερης κλίμακας στη θερμική αγωγιμότητα τραχείων διεπιφανειών.
- Επίλυση του προβλήματος για μεγαλύτερες τιμές του κατακόρυφου φορτίου.

Βιβλιογραφία

- Bahrami, M., Culham, J.R., Yovanovich, M. and Schneider, G. (2006), Review of Thermal Joint Resistance Models for Nonconforming Rough Surfaces, *Applied Mechanics Reviews*, 59, pp. 1-12.
- Barnsley, M. (1988), *Fractals Everywhere*, Academic Press, Boston, N. York
- Bloom, M.F. (1964), Thermal contact conductance in a vacuum environment at low temperatures, in Rudkin, R.L. (ed) *Proceedings of the 4th Conference on Thermal Conductivity*, US Naval Radiological Defense Laboratory, pp. III-F-1 – III-F-34, San Francisco, California, United States of America
- Borodich, F.M. and Onishchenko, D.A. (1999), Similarity and fractality in the modeling of roughness by a multilevel profile with hierarchical structure, *International Journal of Solids and Structures* 36(17), pp. 2585-2612.
- Buchanan A. H. (2001), *Structural Design for Fire Safety*, Wiley, Chichester, England, New York
- Cengel, Y.A. and Ghajar, A.J. (2014), *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 5th Edition, McGraw-Hill Higher Education, New York
- 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* 39(4), pp. 1732-1743.
- European Committee for Standardization (CEN), (2003), EN 1993-1-2, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2. General rules – structural fire design. (Abbreviation in the document as EN 1993-1-2).
- Fenech, H. and Rohsenow, W. M. (1963), Prediction of thermal conductance of metallic surfaces in contact. *ASME J. Heat Transfer*, 85, pp. 15–24
- Majumdar, A. and Tien, C.L. (1990), Fractal characterization and simulation of rough surfaces, *Wear* 136(2), pp. 313-327

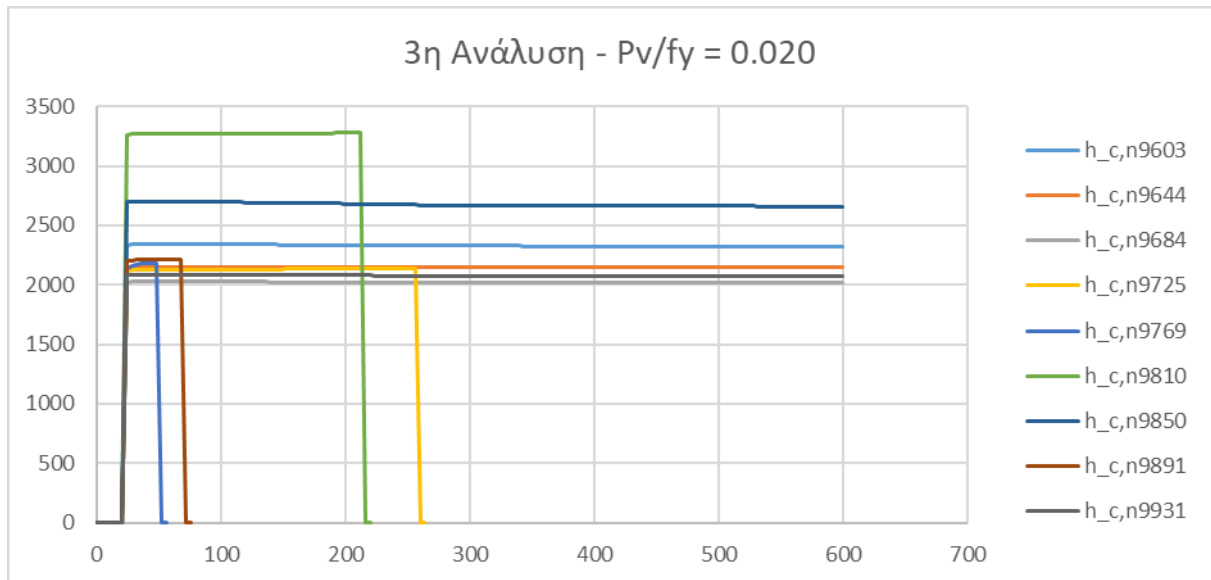
- Mandelbrot, B. (1967), How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension, *Science* 156 (3775), pp.636- 638.
- Mandelbrot, B. (1982), *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman and Co., N. York.
- Mantelli, M., Yovanovich, M. (2002) Thermal contact resistance, in Gilmore D. (ed) “Spacecraft Thermal Control Handbook, Volume I Fundamental Technologies”, 2nd ed., The Aerospace Press, American Institute of Aeronautics and Astronautics, El Segundo, California, pp. 599-638
- Mistakidis, E.S., and Panagouli, O.K. (2003), Friction evolution as a result of roughness in fractal interfaces, *Engineering Computations* 20 (1), pp. 40-57.
- MSC. Marc (2015a), User’s Guide, “Volume A: Theory and User Information”, MSC. Software Corporation
- MSC. Marc (2015b), User’s Guide, “Volume B: Element Library”, MSC. Software Corporation
- Panagiotopoulos, P.D. and Panagouli, O.K. (1997), Fractal geometry in contact mechanics and numerical applications, in: Carpinteri, A. and Mainardi, F. (eds) “Fractals and Fractional Calculus in Continuum Mechanics”, International Centre for Mechanical Sciences, vol 378, Springer, Vienna.
- Panagouli, O.K., Margaronis, K. and Tsotoulidou, V. (2020), A multiscale model for thermal contact conductance of rough surfaces under low applied pressure, *International Journal of Solids and Structures* 200-201, pp. 106-118.
- Petropoulos, G., Pandazaras, C. and Davim, J. (2010), Surface Texture Characterization and Evaluation Related to Machining, in Davim, J. (ed) *Surface Integrity in Machining*, Springer, London, pp. 37-66
- Richardson, L.F. (1961) The Problem of Contiguity: An Appendix to Statistics of Deadly Quarrels, *General System Yearbook*, 6, pp. 139-187.
- Savija, I., Culham, J., Marotta, E. and Yovanovich, M. (2003), Review of Thermal Conductance Models for Joints Incorporating Enhancement Materials, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 17, pp. 43-52.
- Whitehouse, D. (2002). *Surfaces and their Measurement*, Hermes Penton Press, London, UK

Yovanovich, M. (2005), Four Decades of Research on Thermal Contact, Gap, and Joint Resistance in Microelectronics, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 28, pp. 182 - 206.

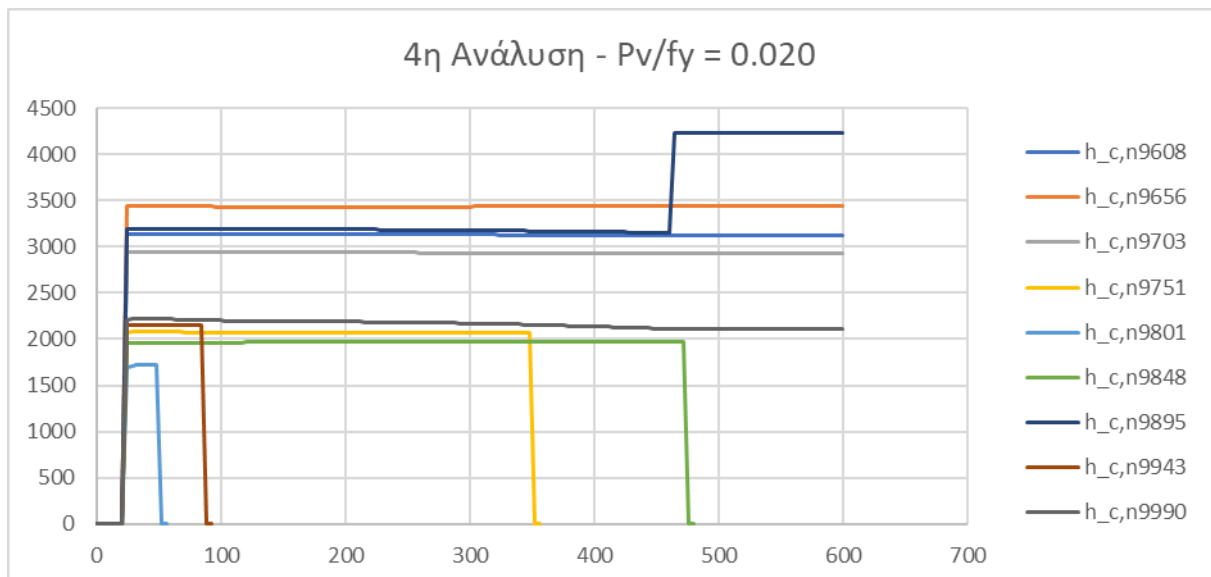
Yovanovich, M., and Marotta, E. (2003), Thermal Spreading and Contact Resistances, Chap. 4, in Bejan A. and Kraus A. D. (eds.) Heat Transfer Handbook, Wiley, Hoboken, New Jersey, pp. 261-394

Παράρτημα Α

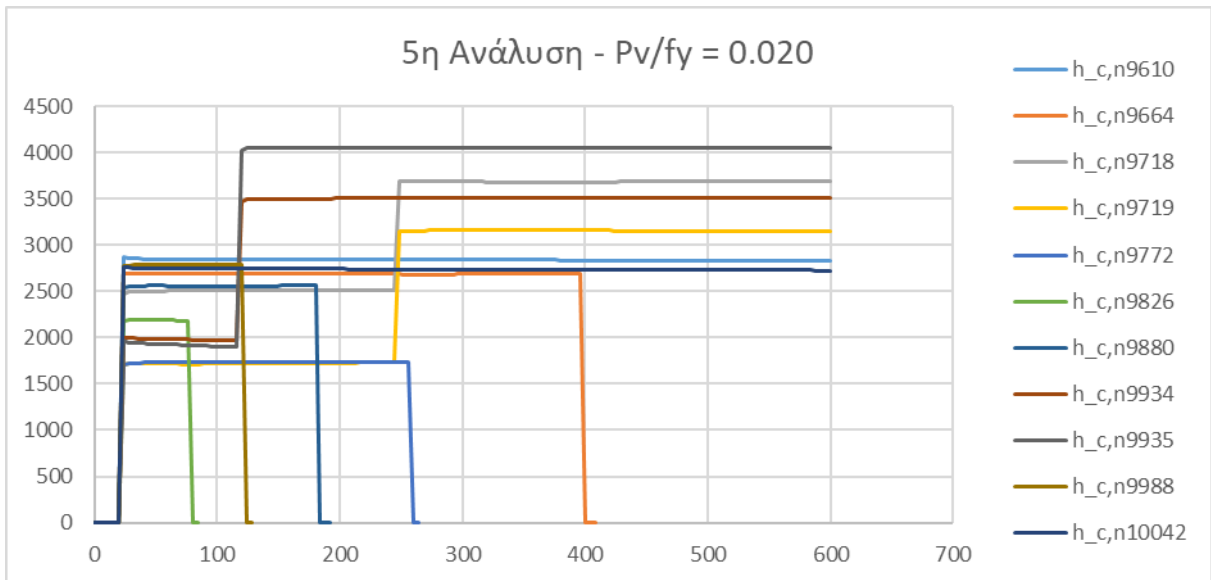
Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται τα διαγράμματα της μικροσκοπικής ανάλυσης δηλαδή παρουσιάζεται ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας σε όλους τους κόμβους επαφής, ανεξαρτήτως αν η επαφή διατηρείται σε όλη τη διάρκεια της ανάλυσης.



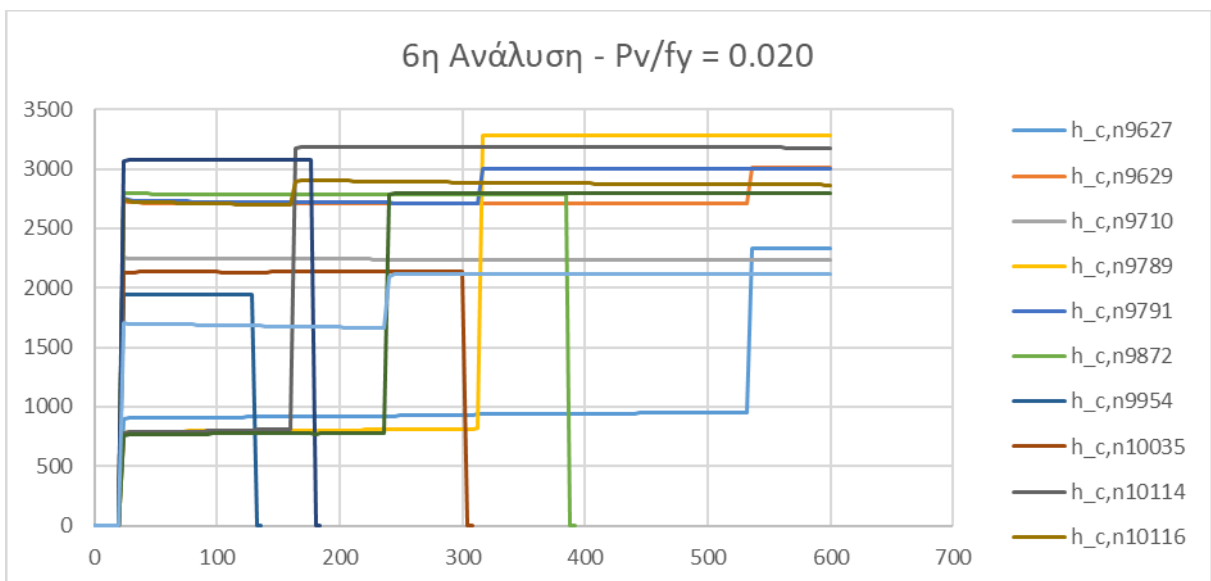
Σχήμα A1.1: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.02$



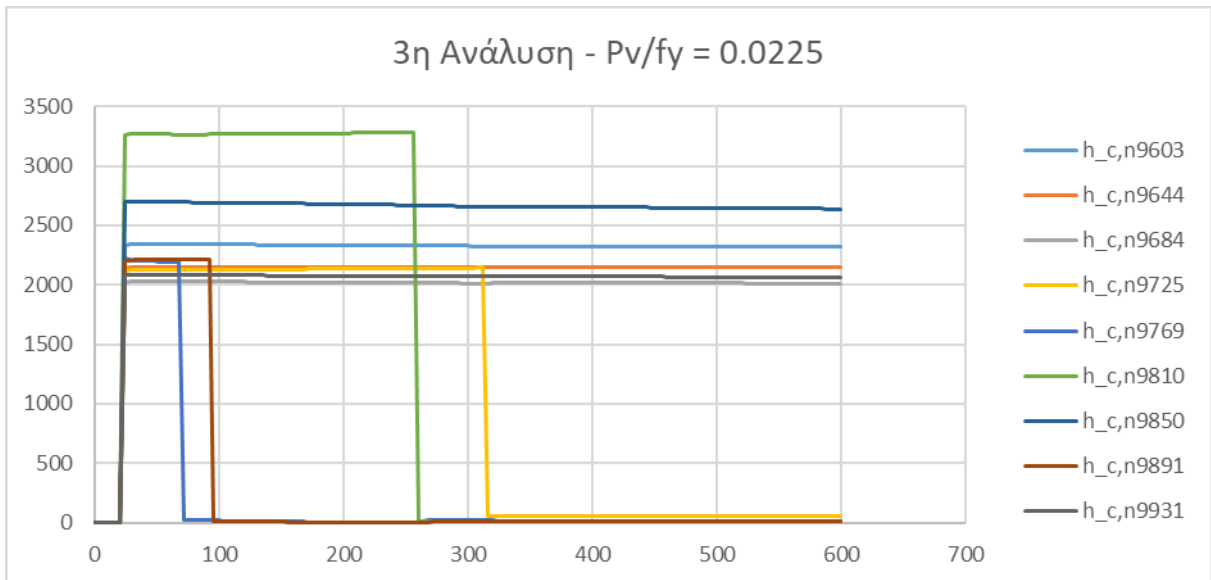
Σχήμα A1.2: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.02$



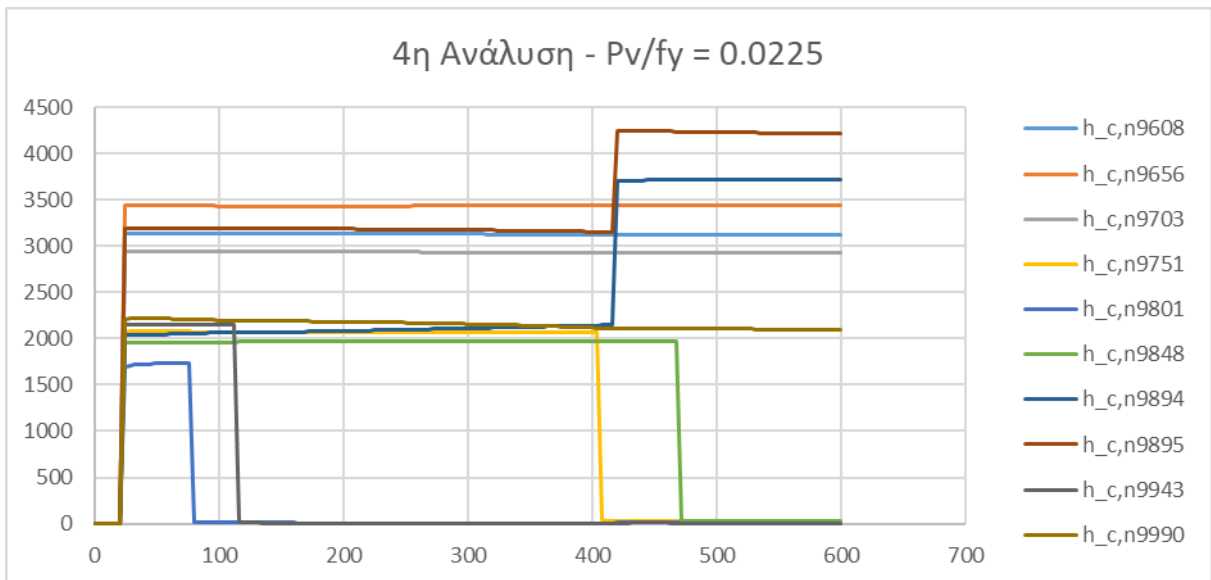
Σχήμα A1.3: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.02$



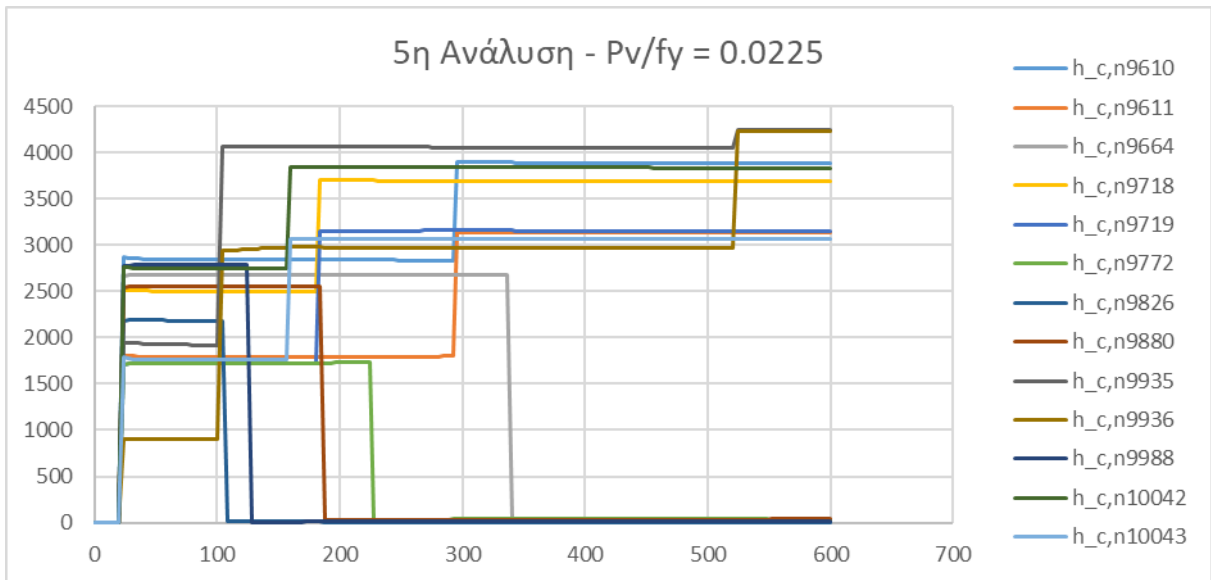
Σχήμα A1.4: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.02$



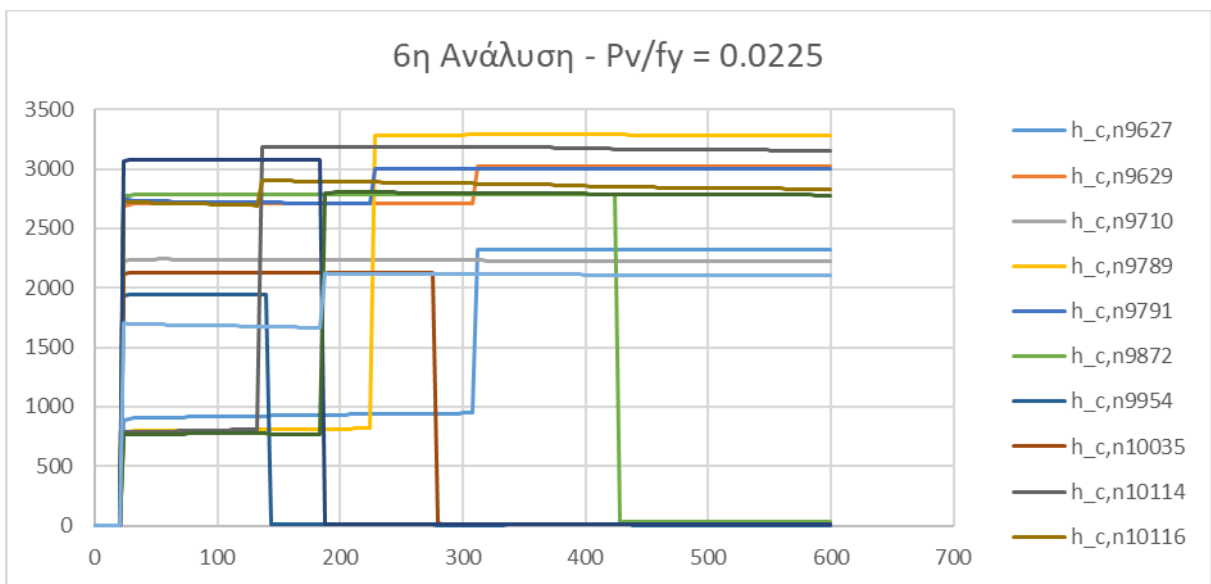
Σχήμα A1.5: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0225$



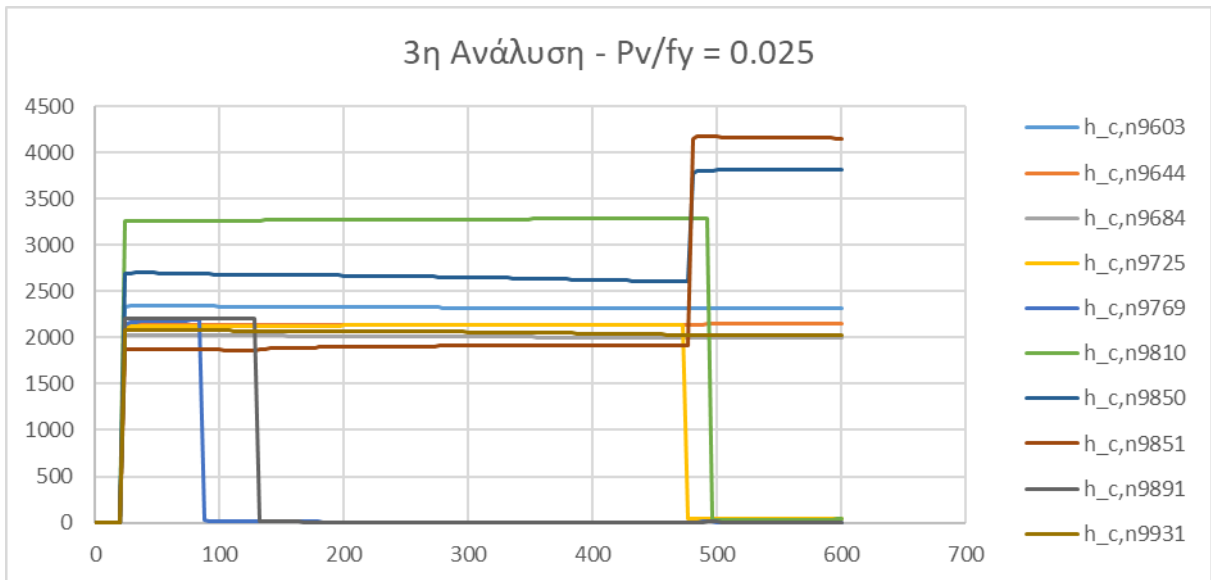
Σχήμα A1.6: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0225$



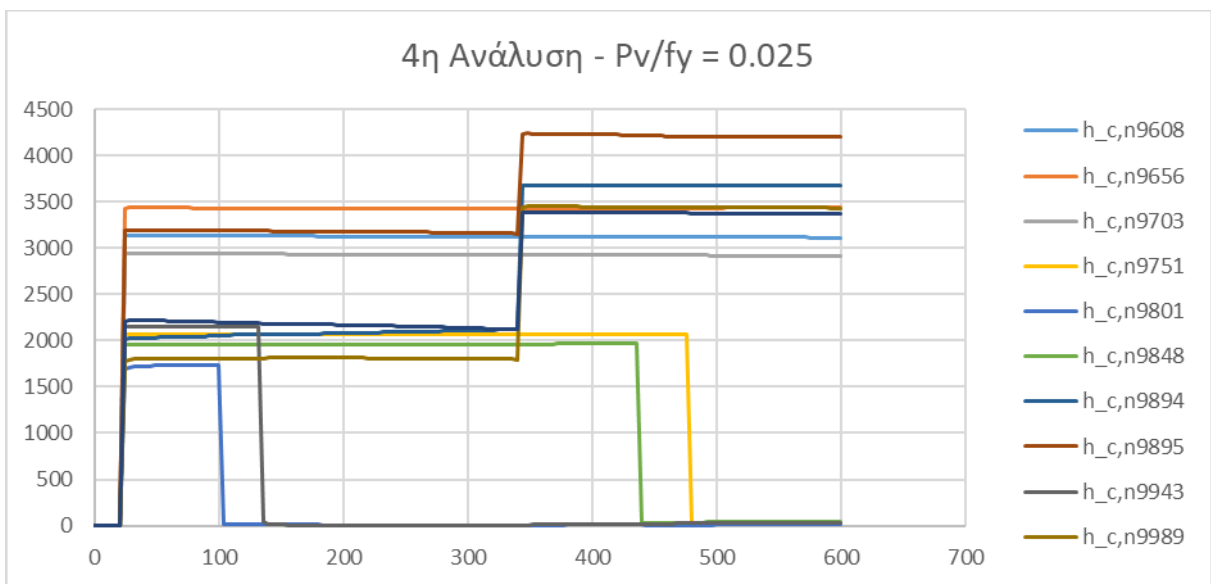
Σχήμα A1.7: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0225$



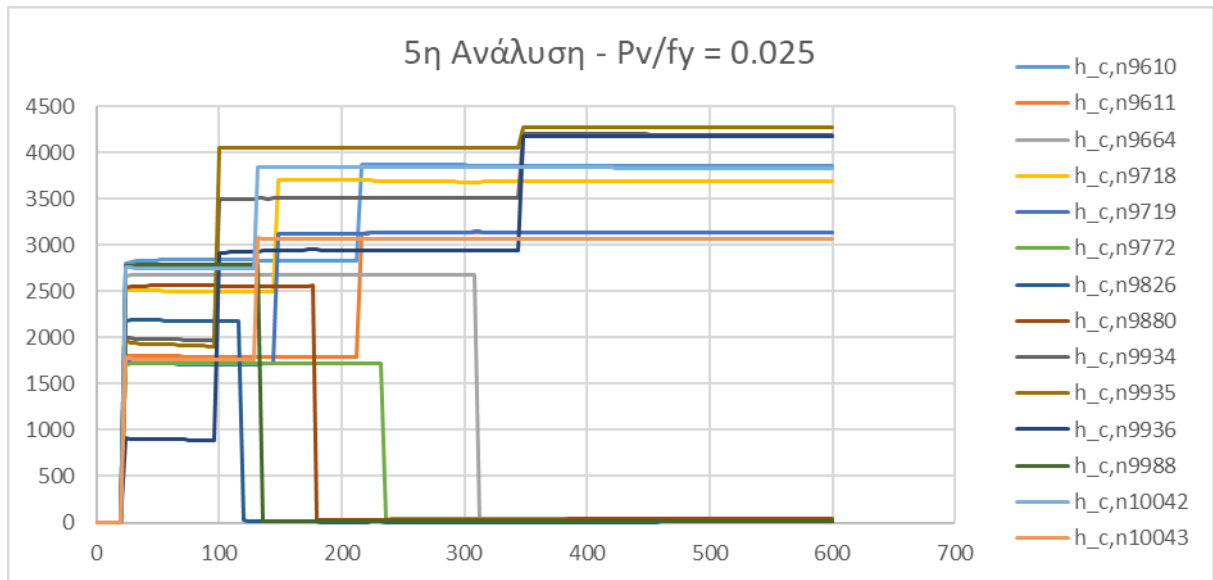
Σχήμα A1.8: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0225$



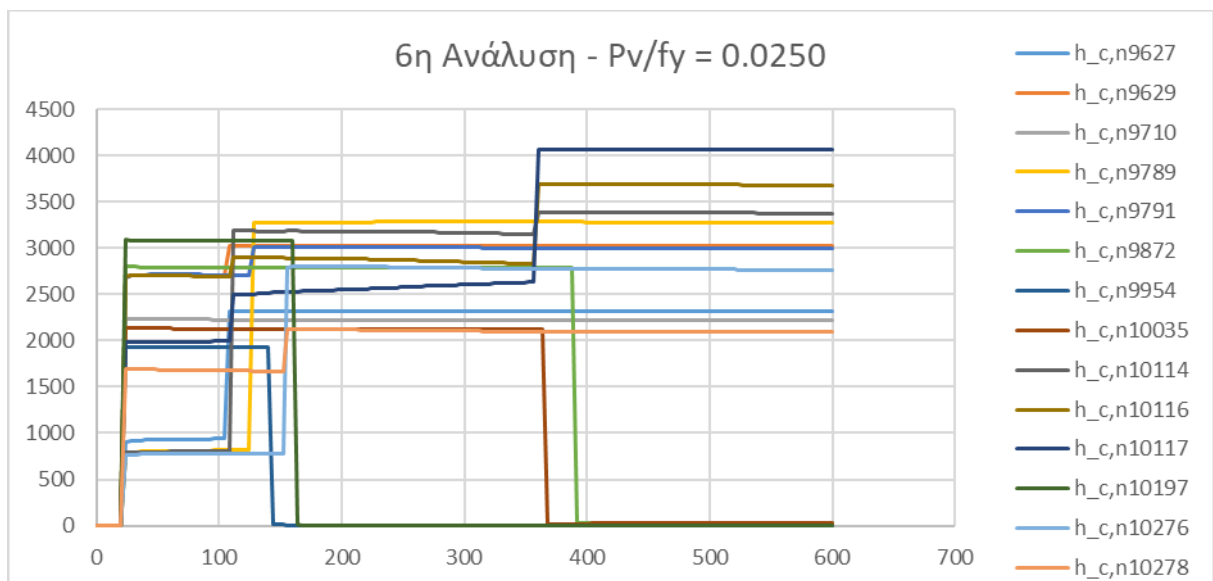
Σχήμα A1.9: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.025$



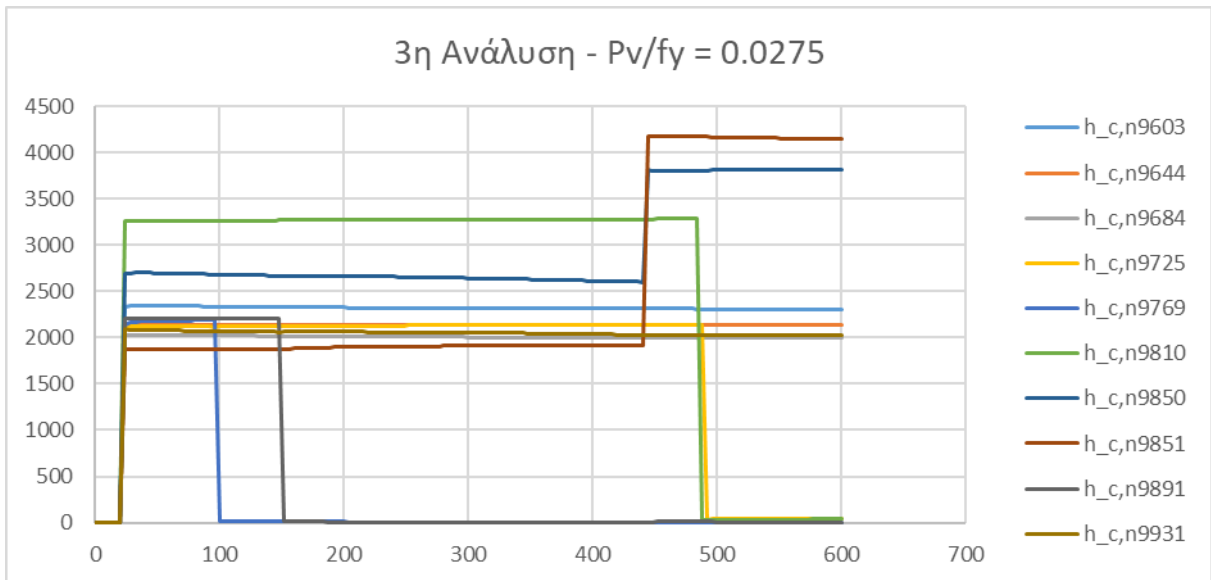
Σχήμα A1.10: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.025$



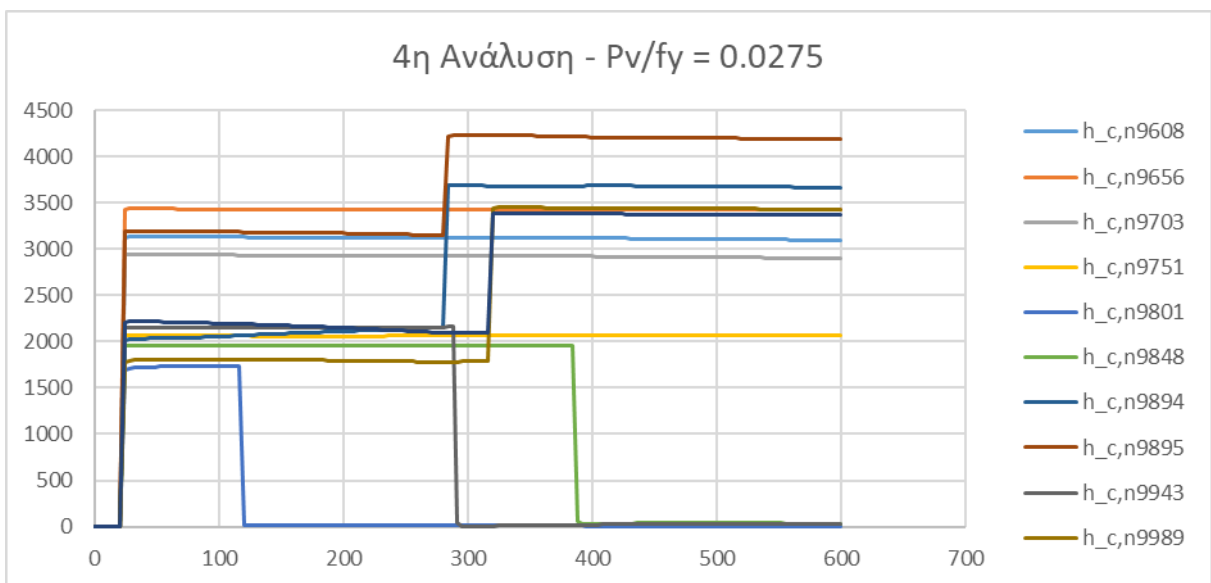
Σχήμα Α1.11: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.025$



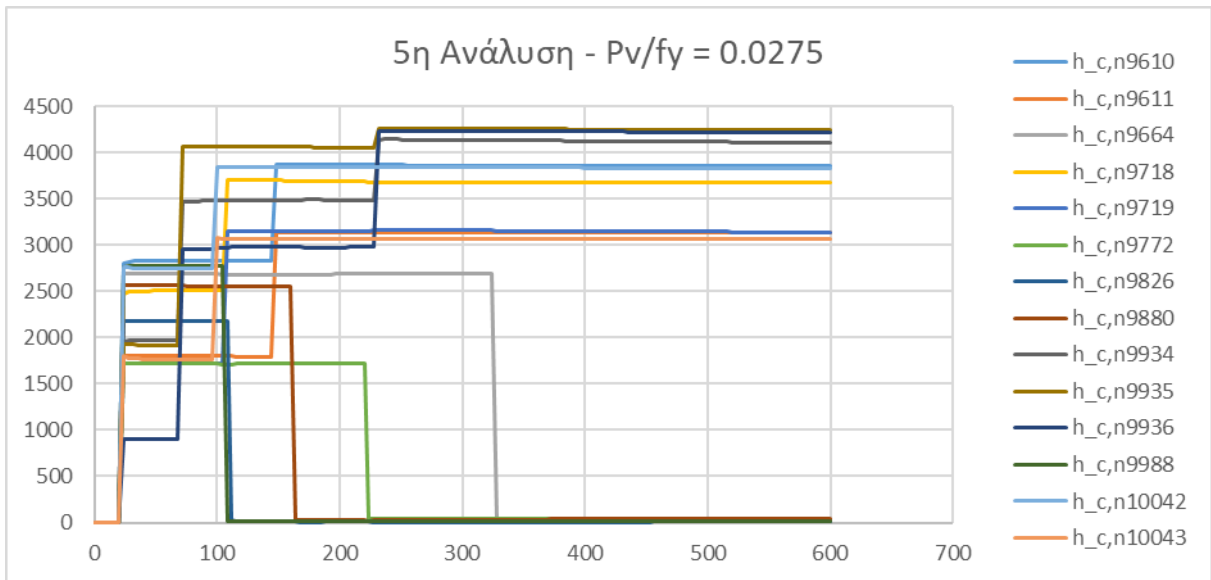
Σχήμα Α1.12: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.025$



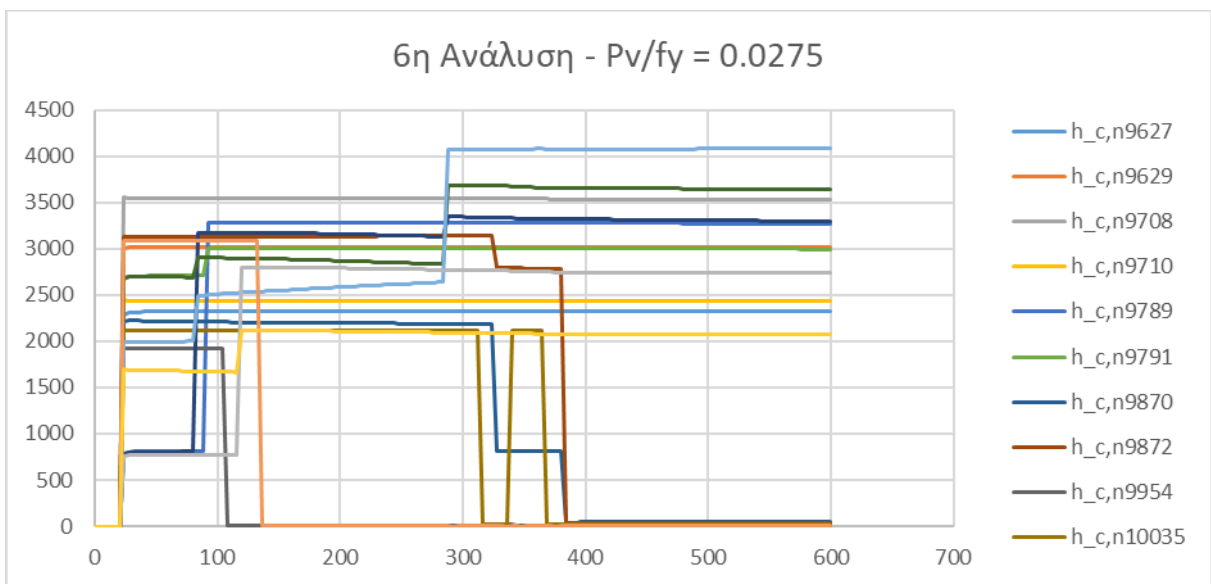
Σχήμα A1.13: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$



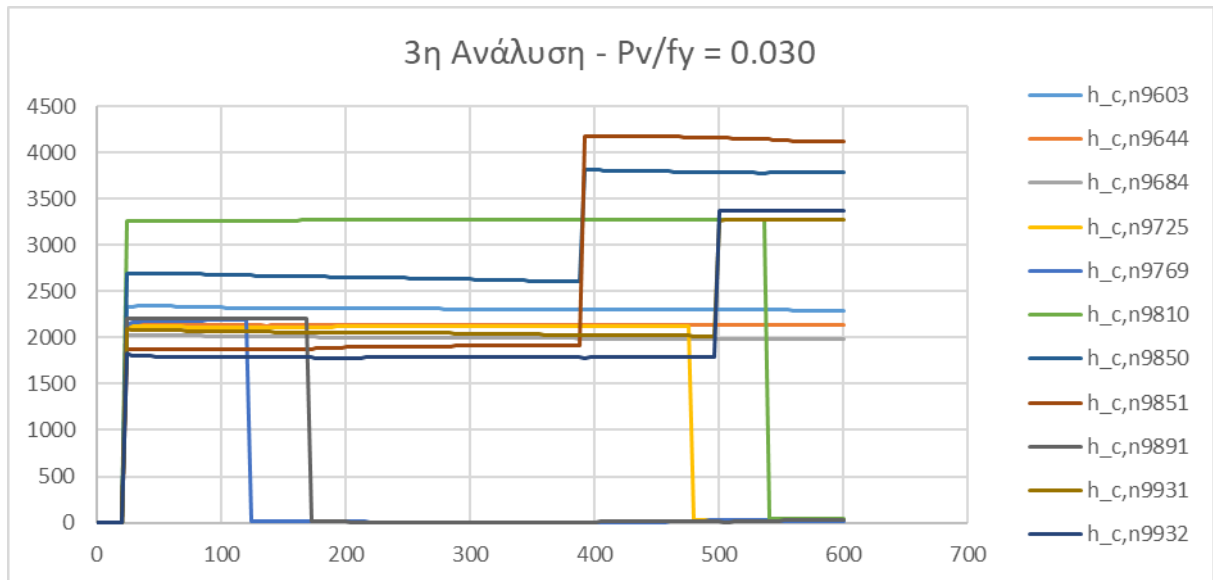
Σχήμα A1.14: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$



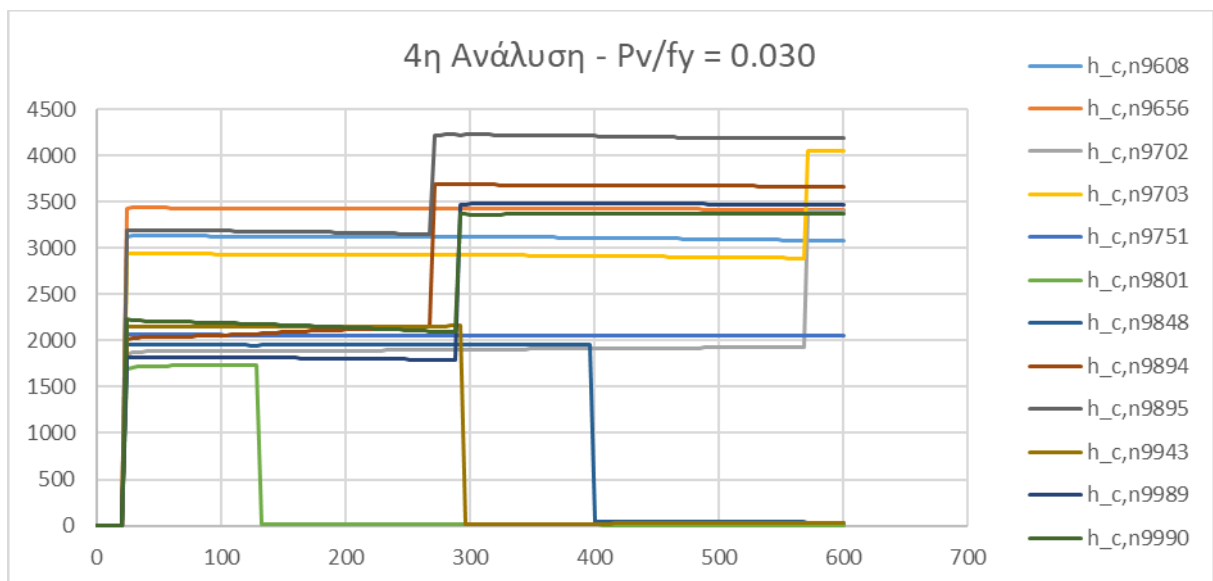
Σχήμα Α1.15: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0275$



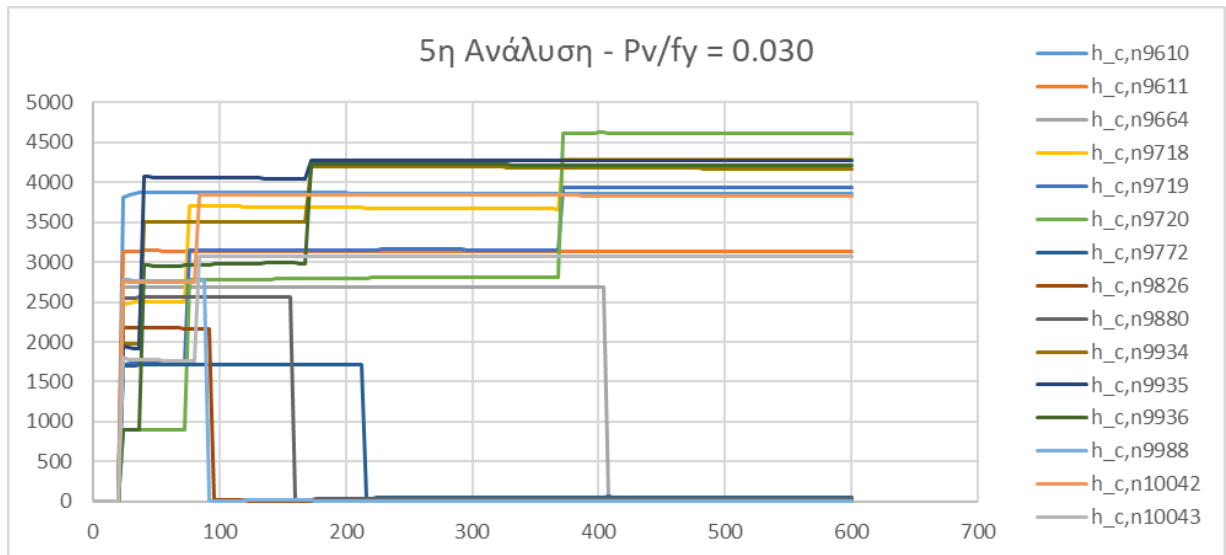
Σχήμα Α1.16: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0275$



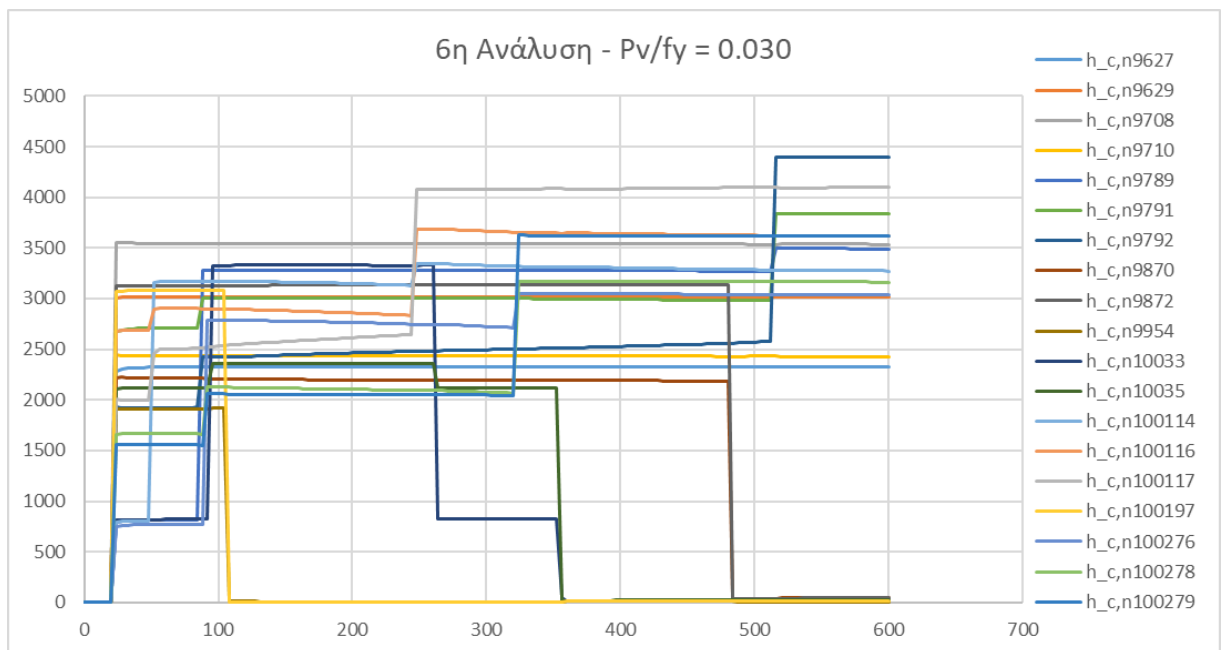
Σχήμα Α1.17: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$



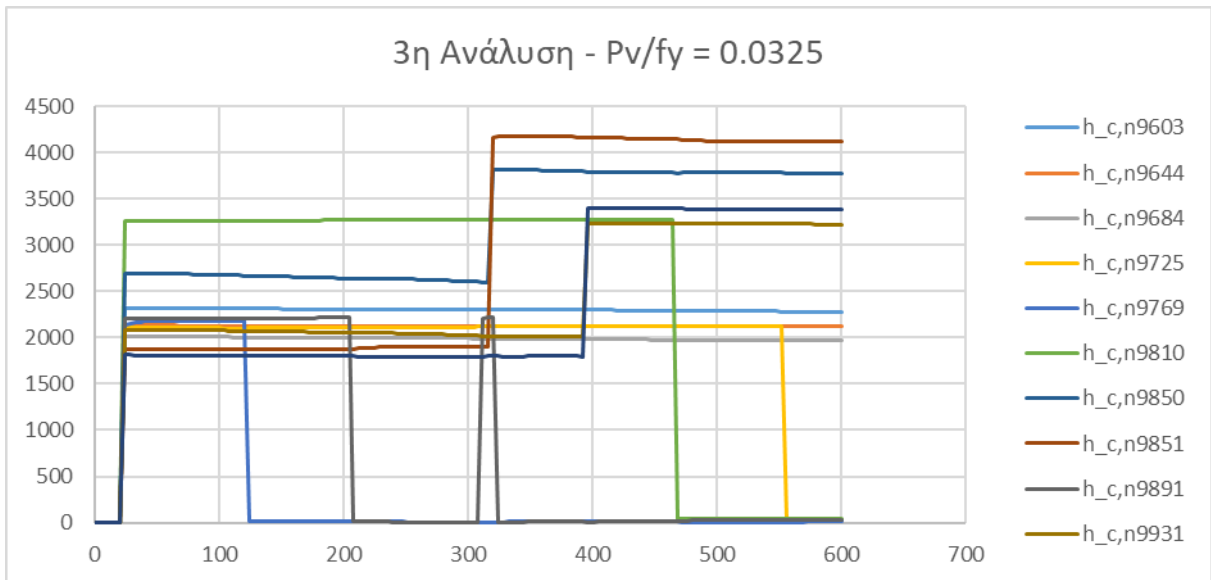
Σχήμα Α1.18: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$



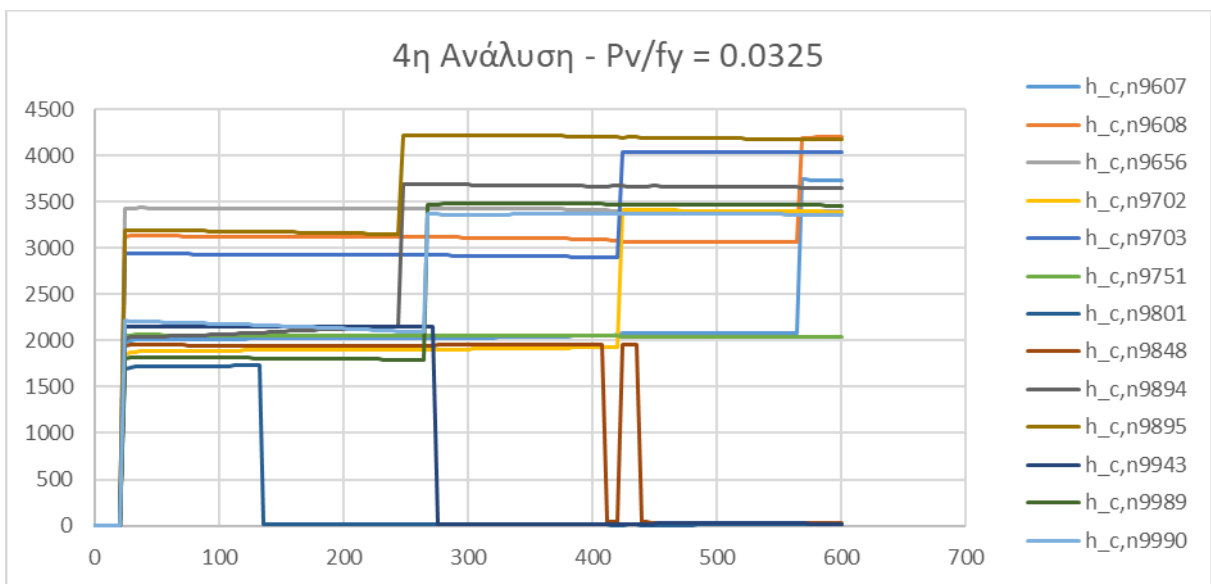
Σχήμα Α1.19: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.03$



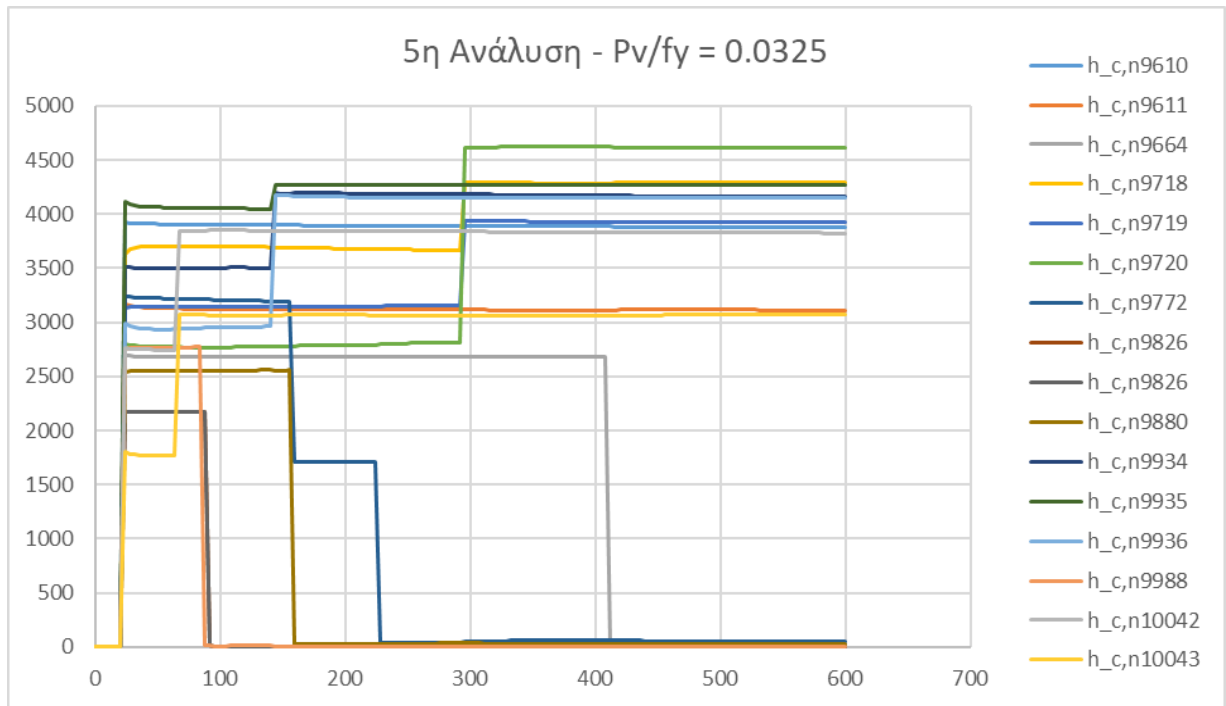
Σχήμα Α1.20: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.03$



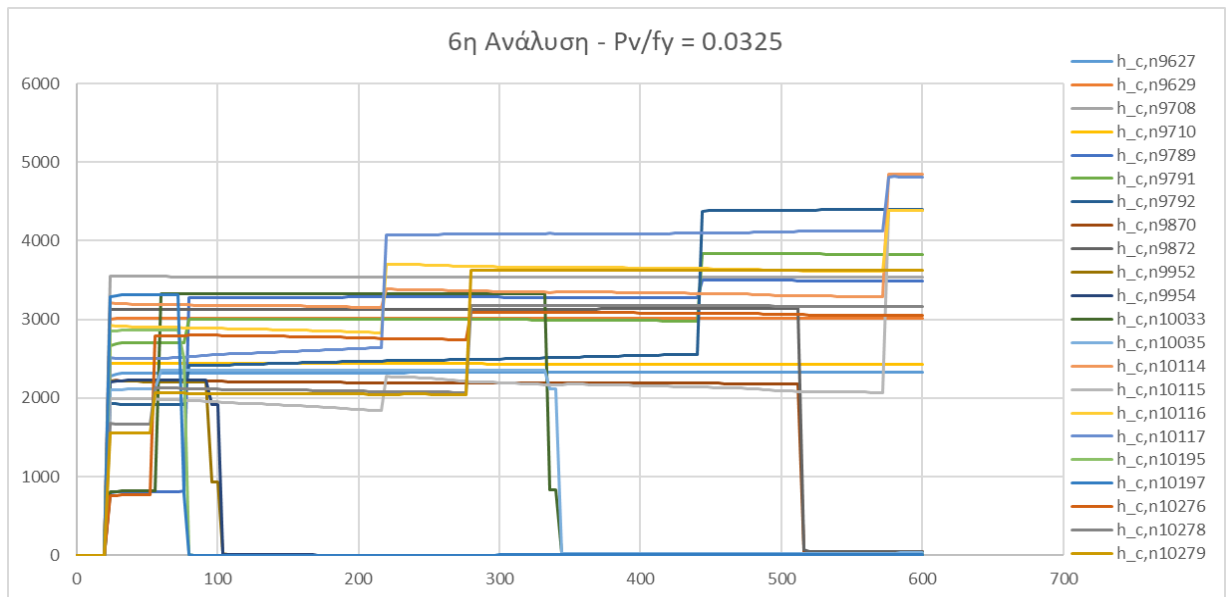
Σχήμα Α1.21: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0325$



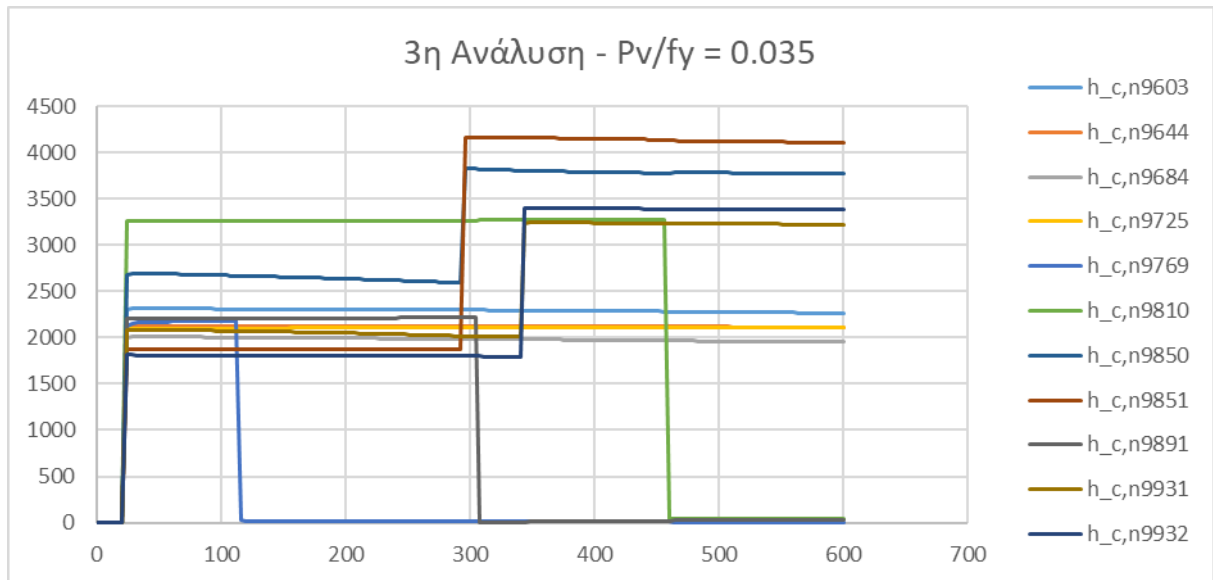
Σχήμα Α1.22: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0325$



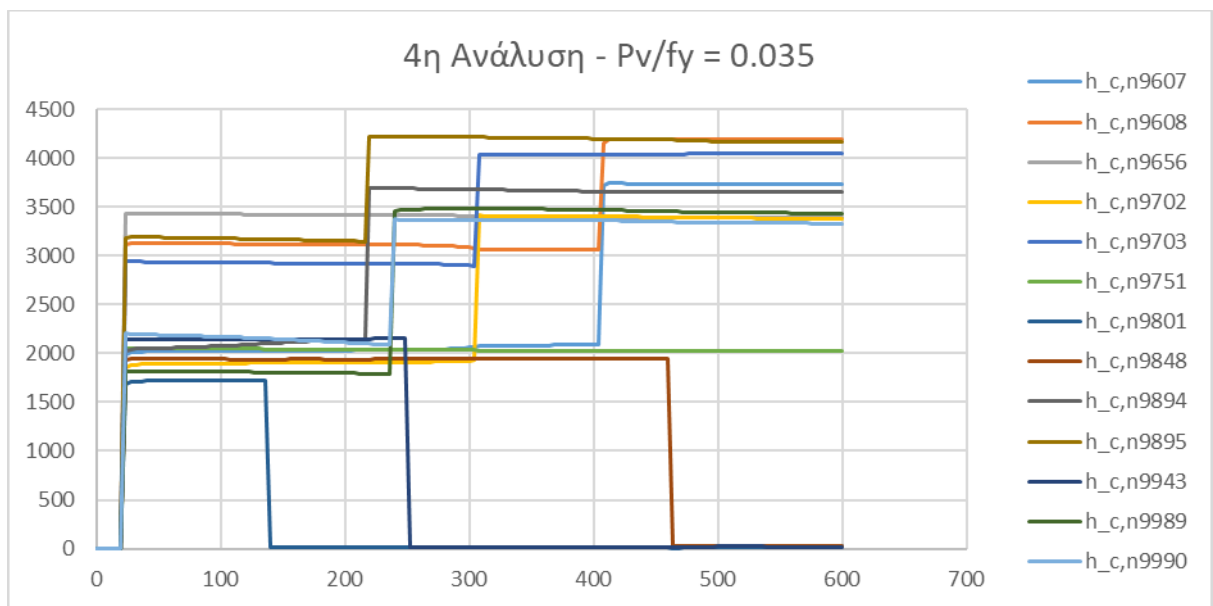
Σχήμα Α1.23: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0325$



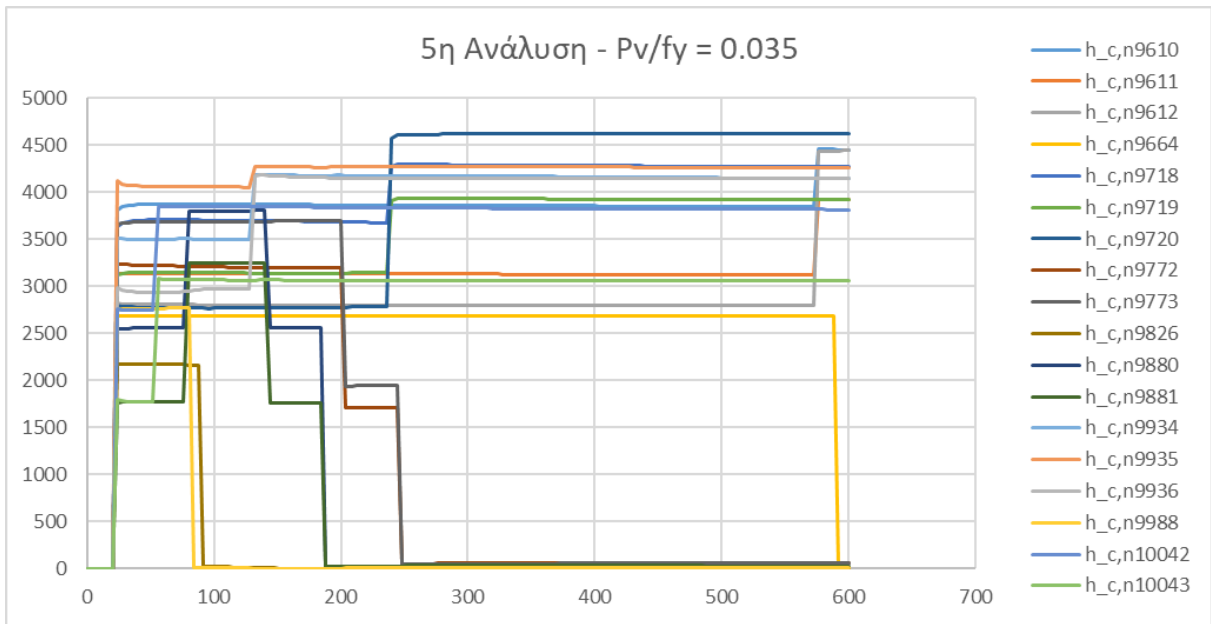
Σχήμα Α1.24: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0325$



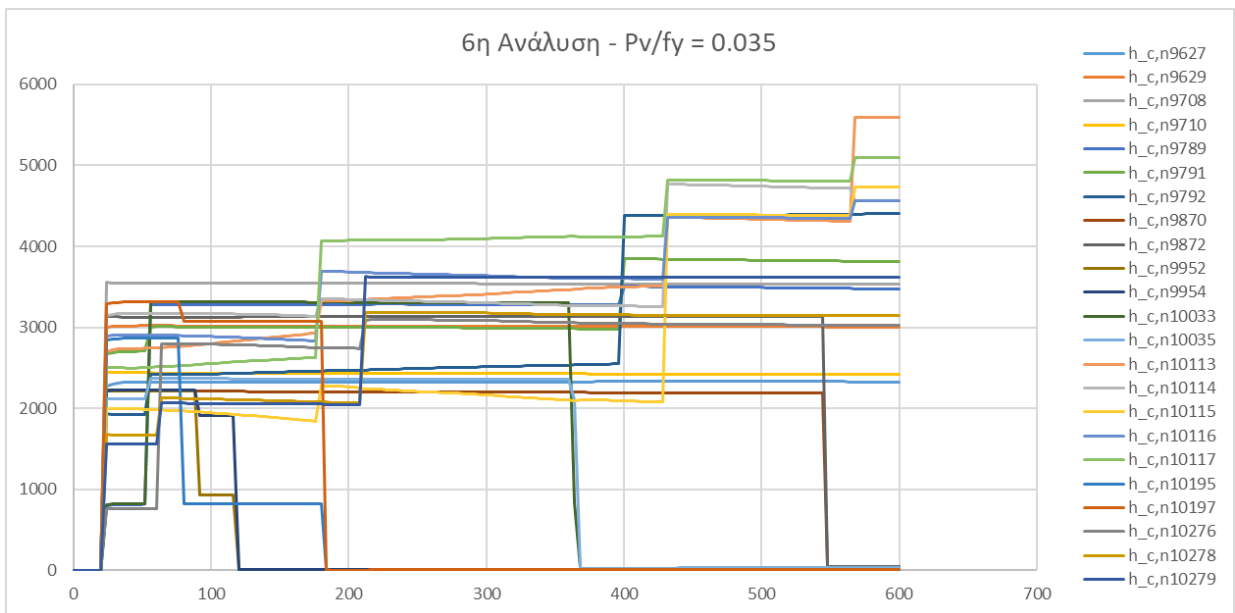
Σχήμα Α1.25: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.035$



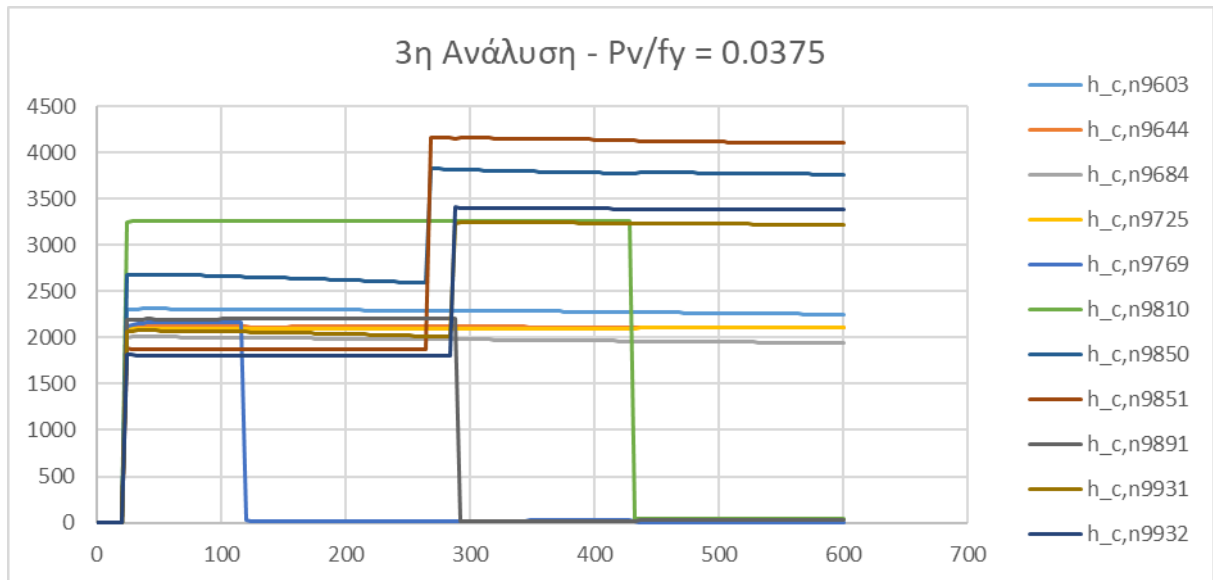
Σχήμα Α1.26: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.035$



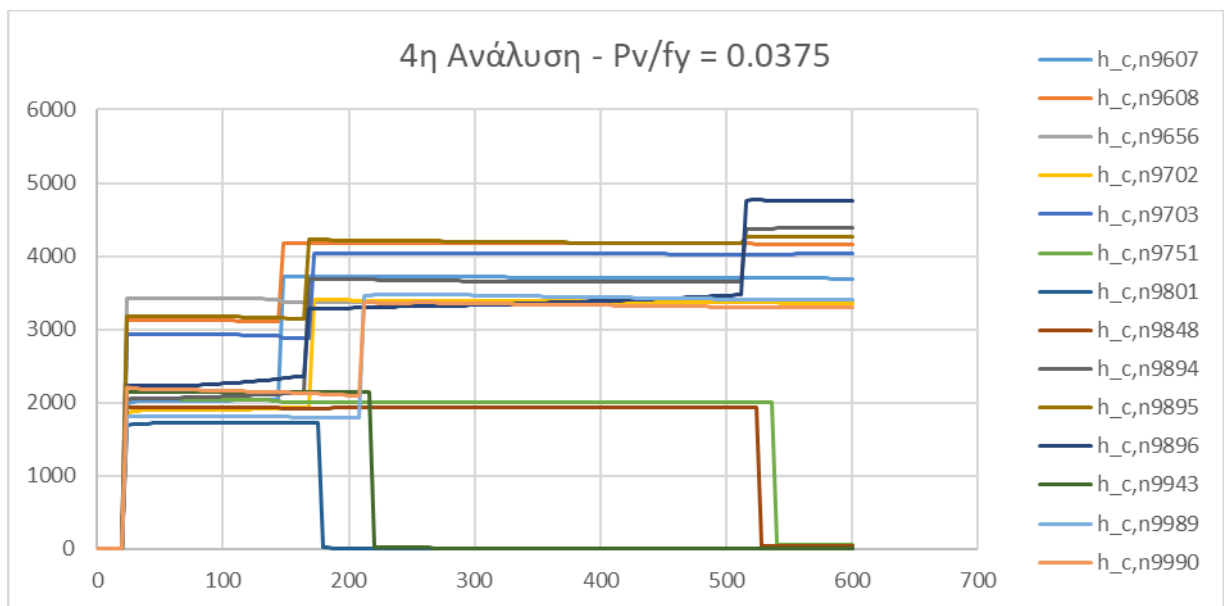
Σχήμα Α1.27: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.035$



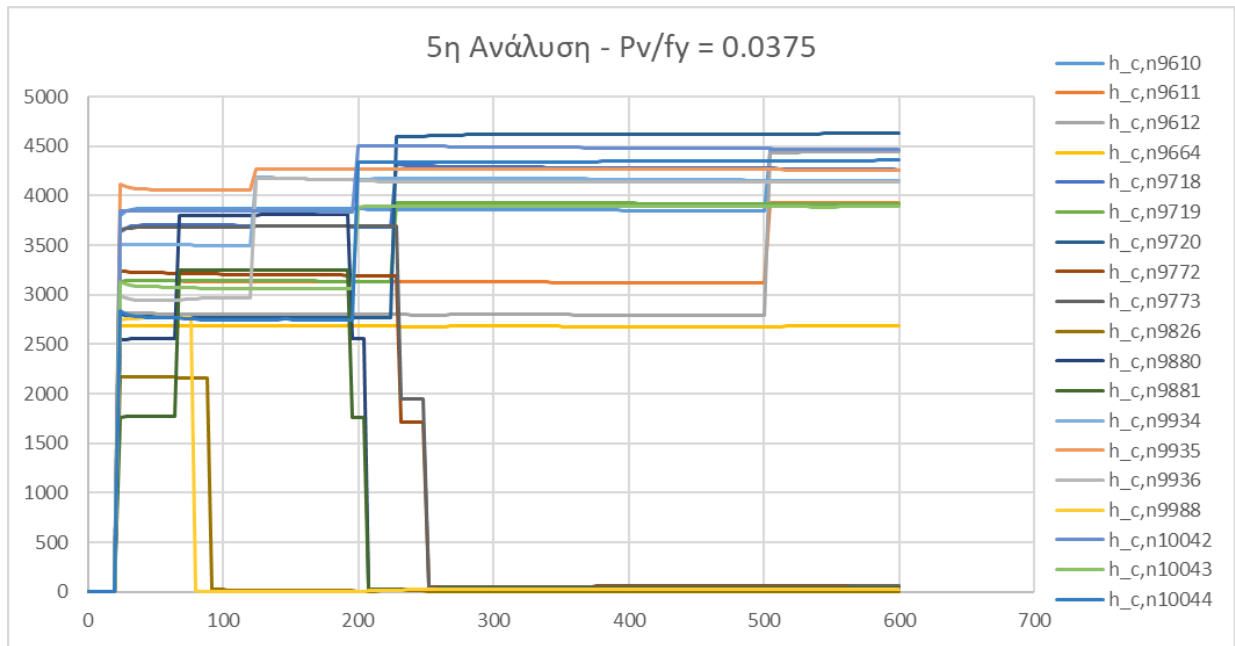
Σχήμα Α1.28: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.035$



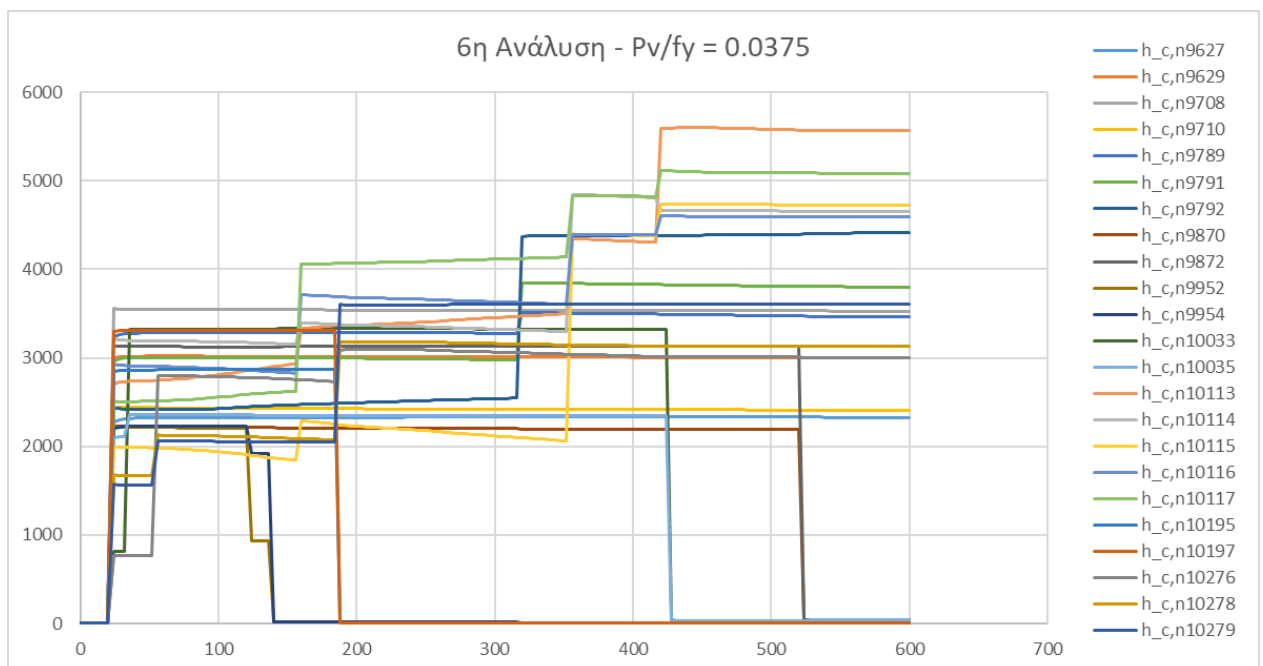
Σχήμα Α1.29: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0375$



Σχήμα Α1.30: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0375$



Σχήμα Α1.31: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$

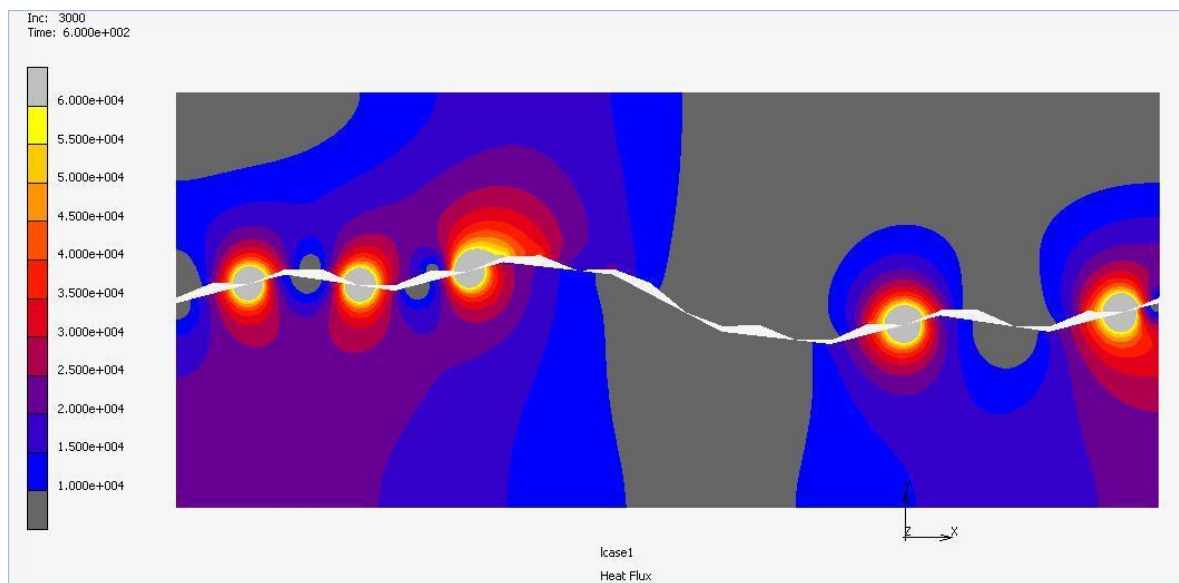


Σχήμα Α1.32: Διάγραμμα της θερμικής αγωγιμότητας σε μικροσκοπικό επίπεδο της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$

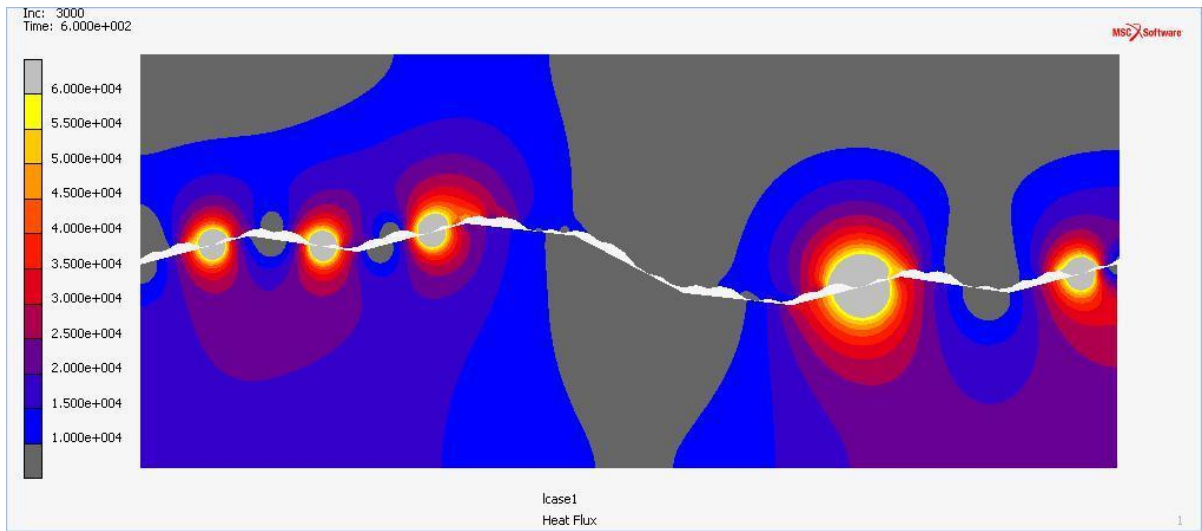
Παράρτημα Β

Στο παρόν παράρτημα παρατίθενται οι απεικονίσεις θερμικής ροής για τις όλες τις περιπτώσεις τραχύτητας της διεπιφάνειας και τις φορτίσεις που μελετήθηκαν, κατά το τέλος της προσομοίωσης ($t = 600 \text{ sec}$), καθώς και οι απεικονίσεις των πλαστικών παραμορφώσεων της πρώτης, από τα αριστερά της κατασκευής, συστάδας σημείων επαφής, για την 3^η και 6^η ανάλυση της τραχύτητας, τις χρονικές στιγμές $t = 60 \text{ sec}$ και $t = 600 \text{ sec}$.

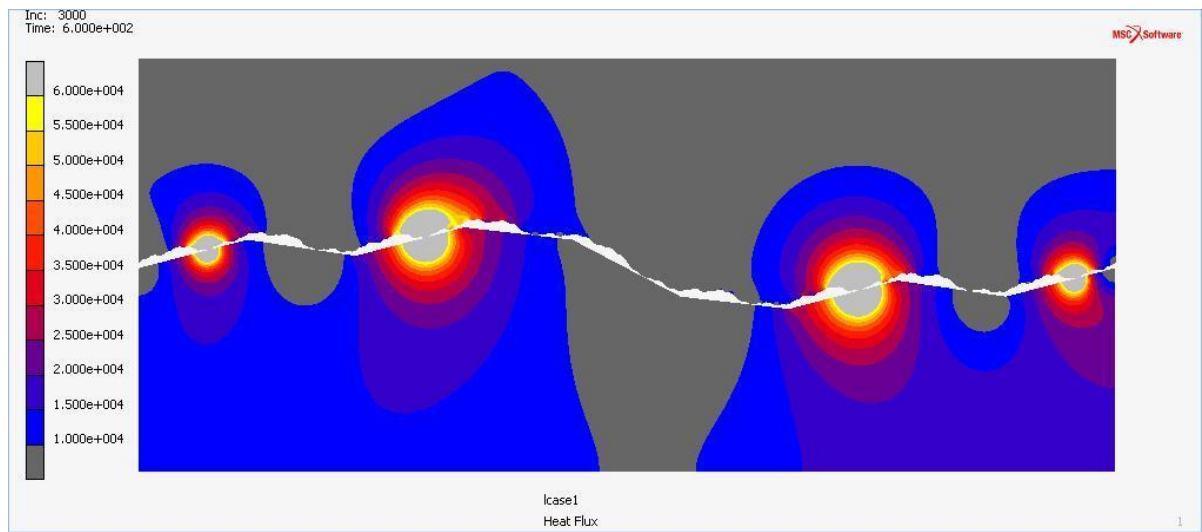
Β1. Απεικόνιση Θερμικής Ροής



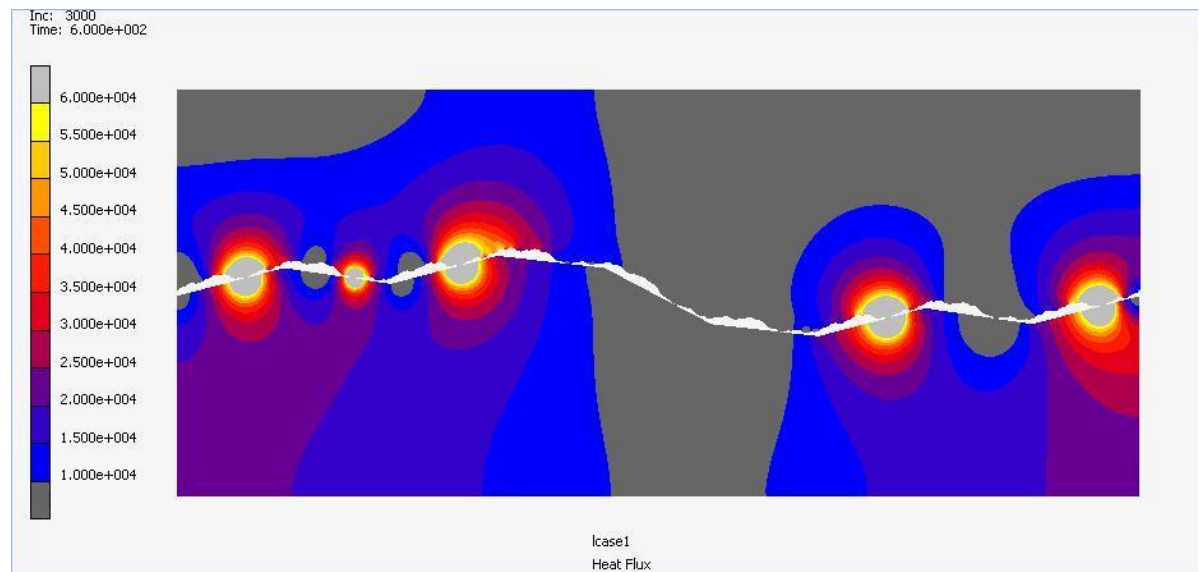
Σχήμα Β1.1: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.02$



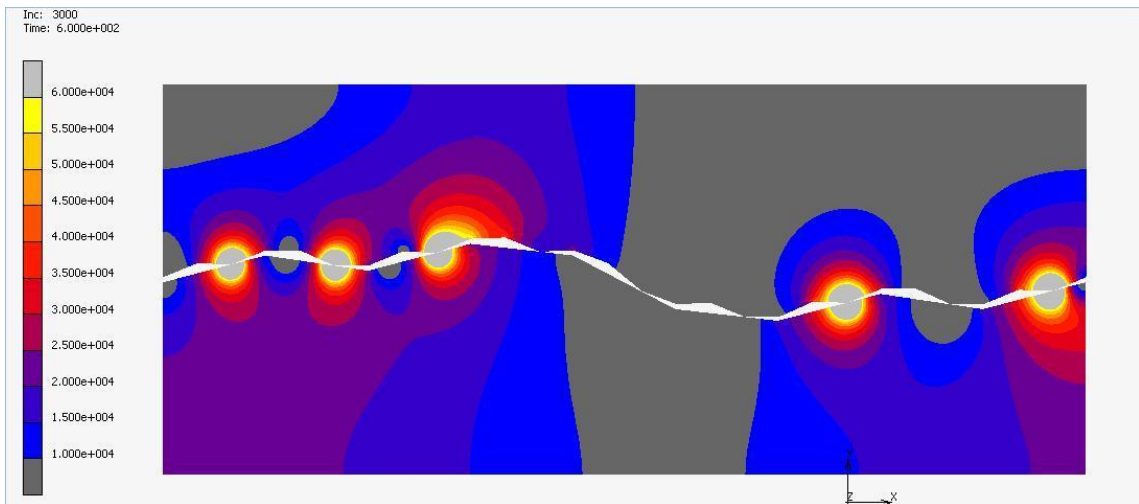
Σχήμα Β1.2: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.02$



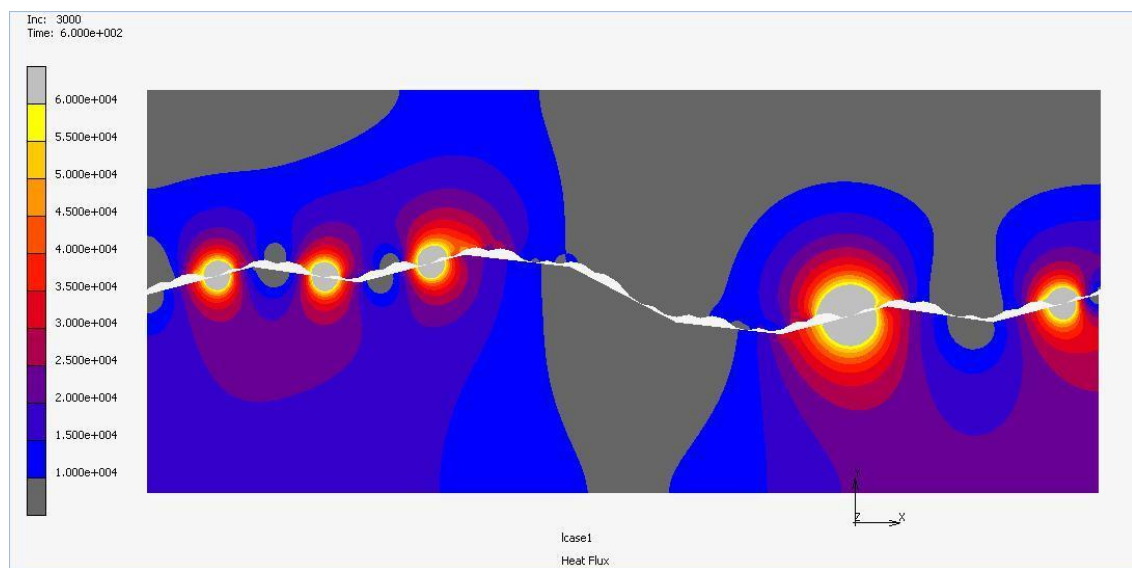
Σχήμα Β1.3: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.02$



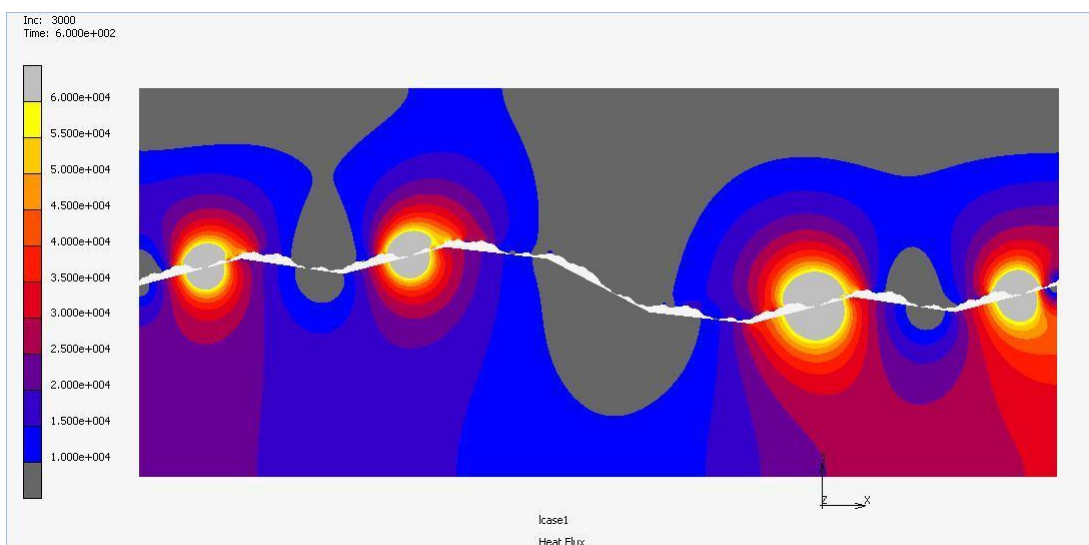
Σχήμα Β1.4: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.02$



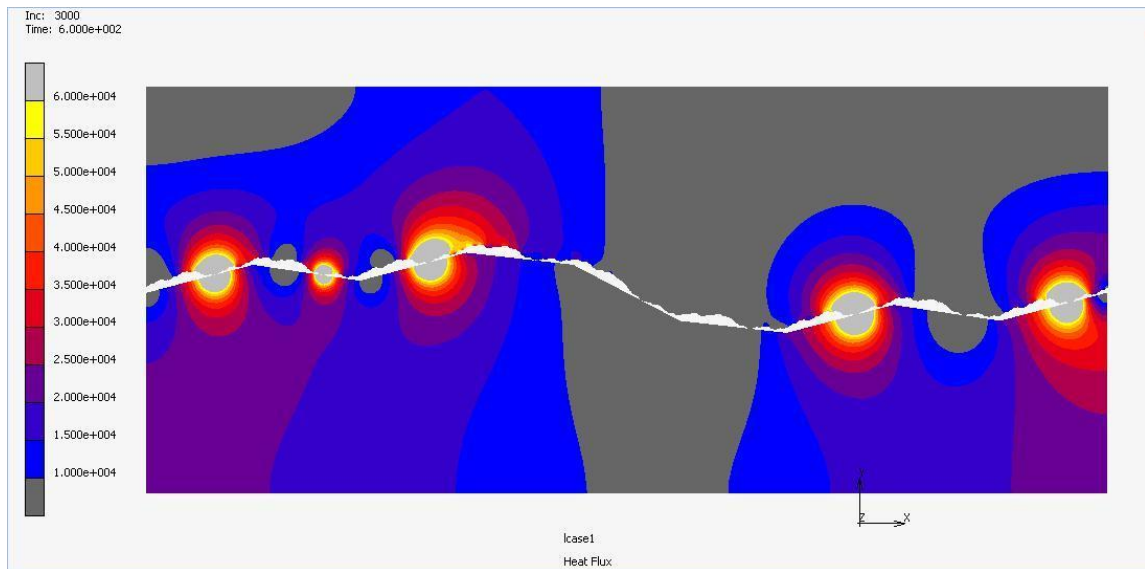
Σχήμα Β1.5: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$



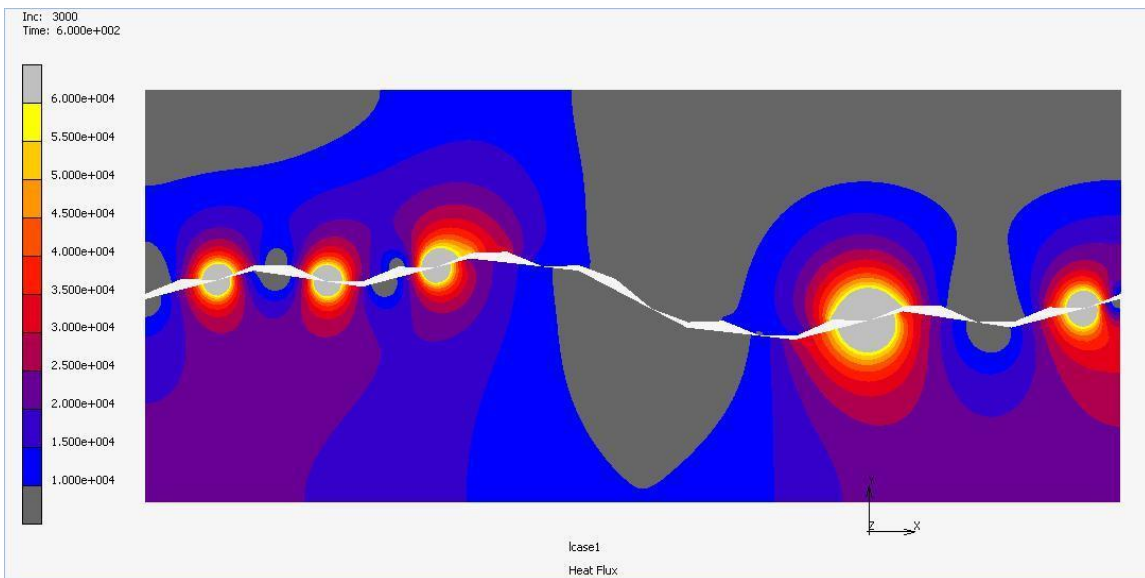
Σχήμα Β1.6: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$



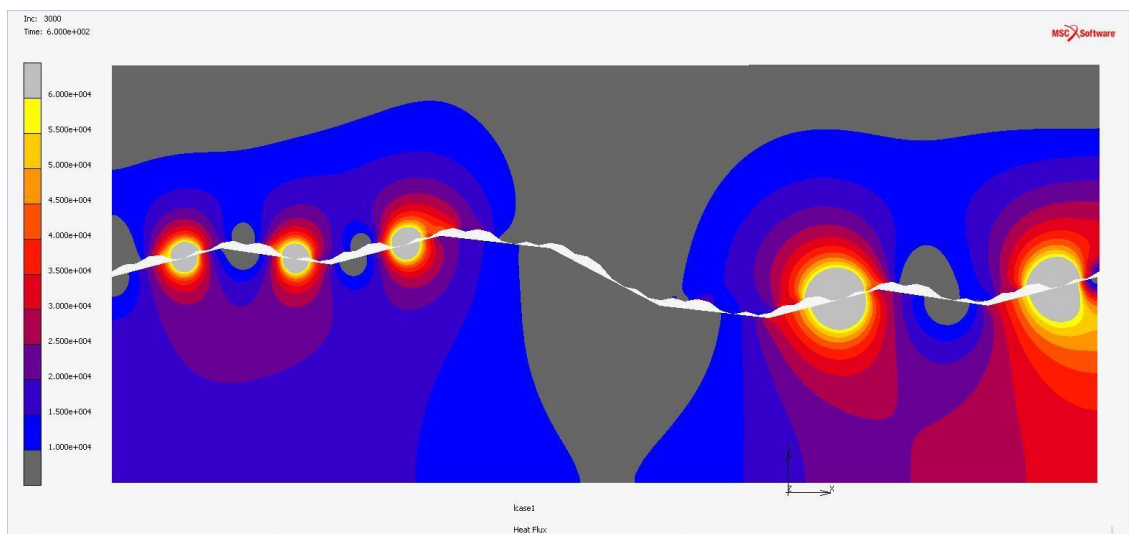
Σχήμα Β1.7: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$



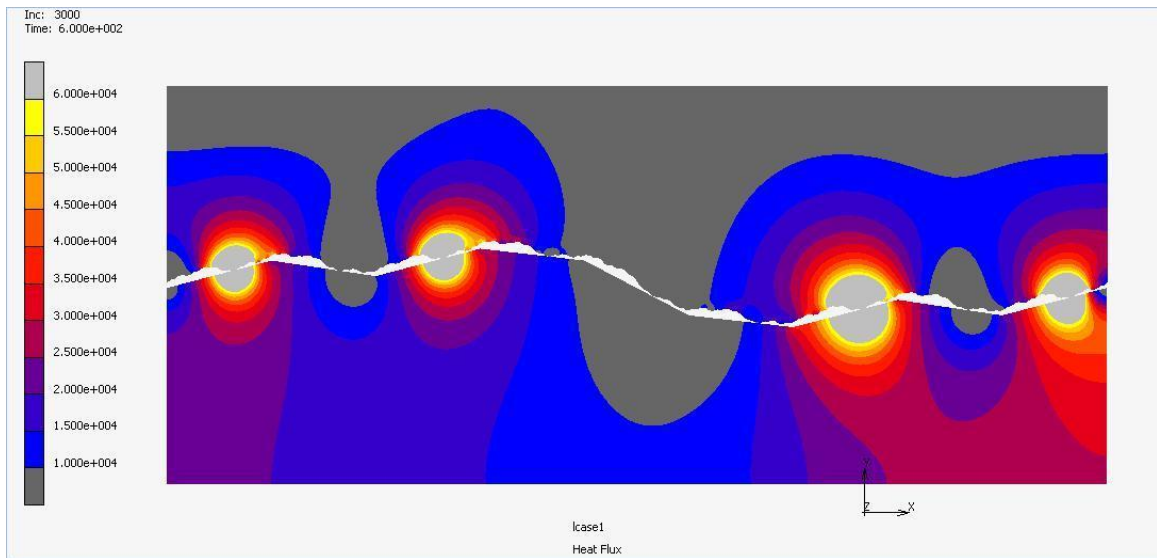
Σχήμα Β1.8: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.0225$



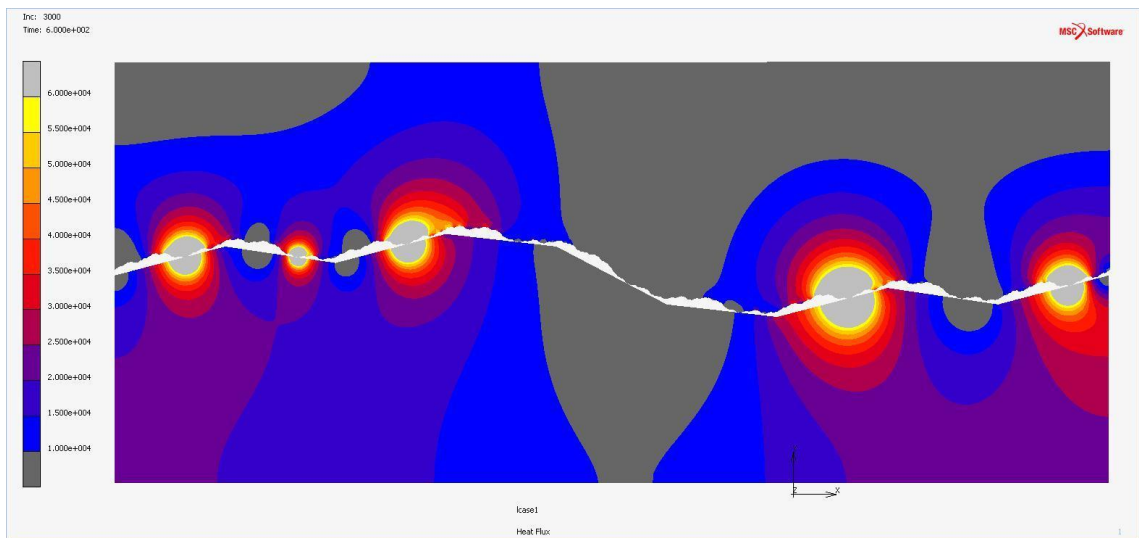
Σχήμα Β1.9: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.025$



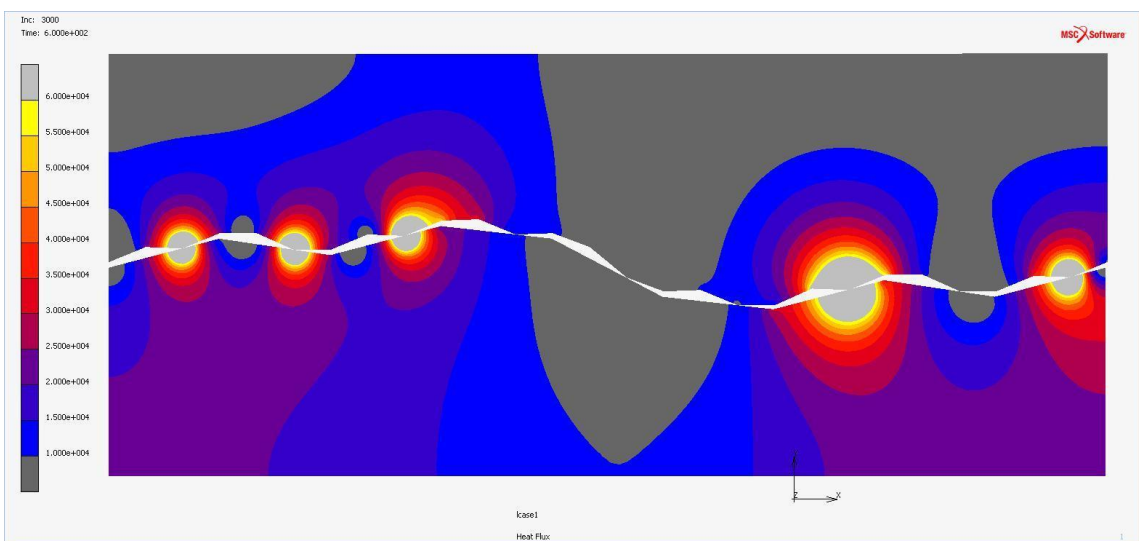
Σχήμα Β1.10: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $Pv/fy = 0.025$



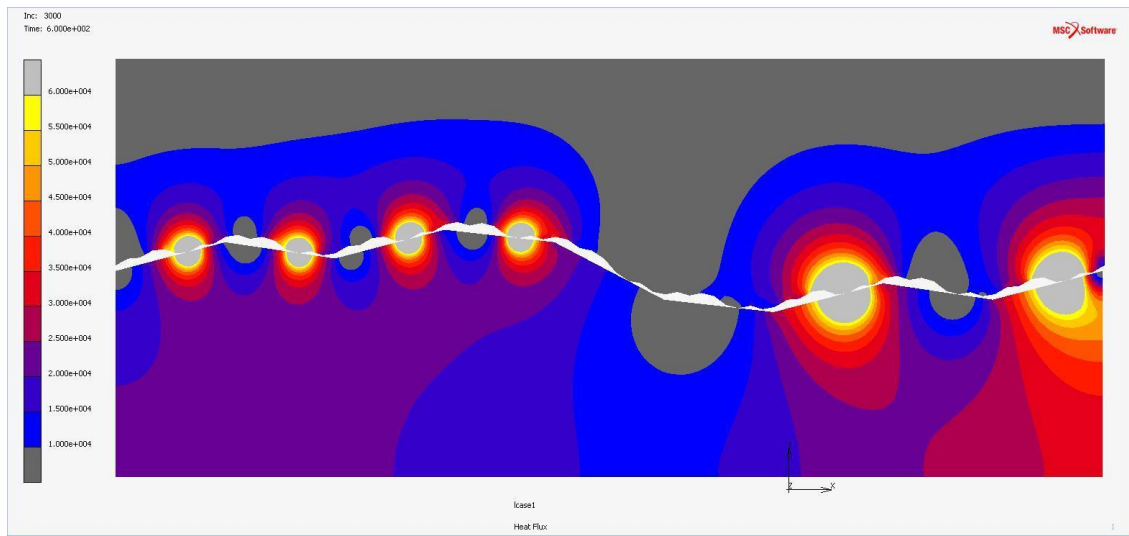
Σχήμα Β1.11: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.025$



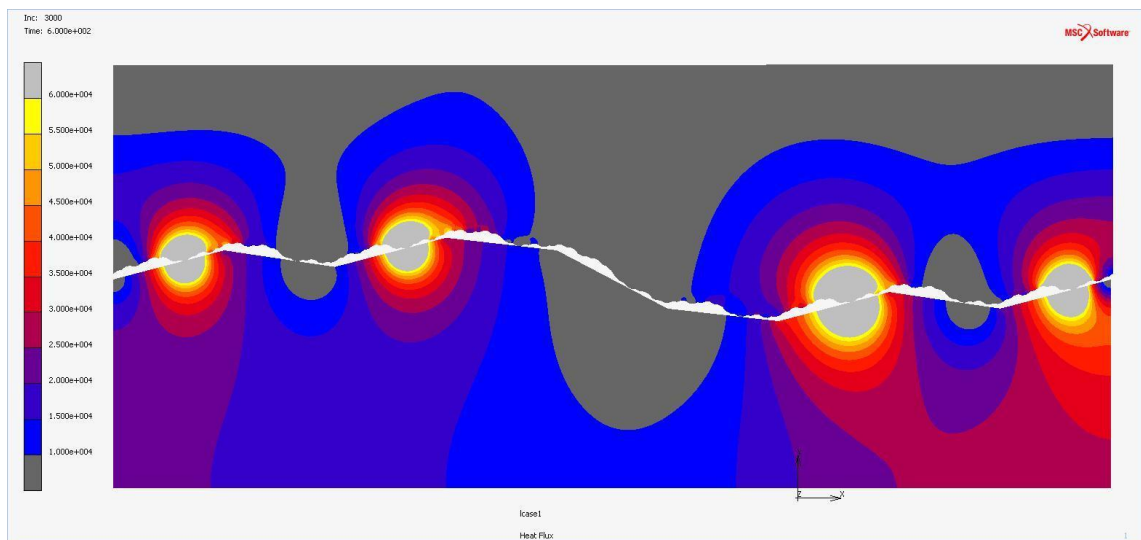
Σχήμα Β1.12: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.025$



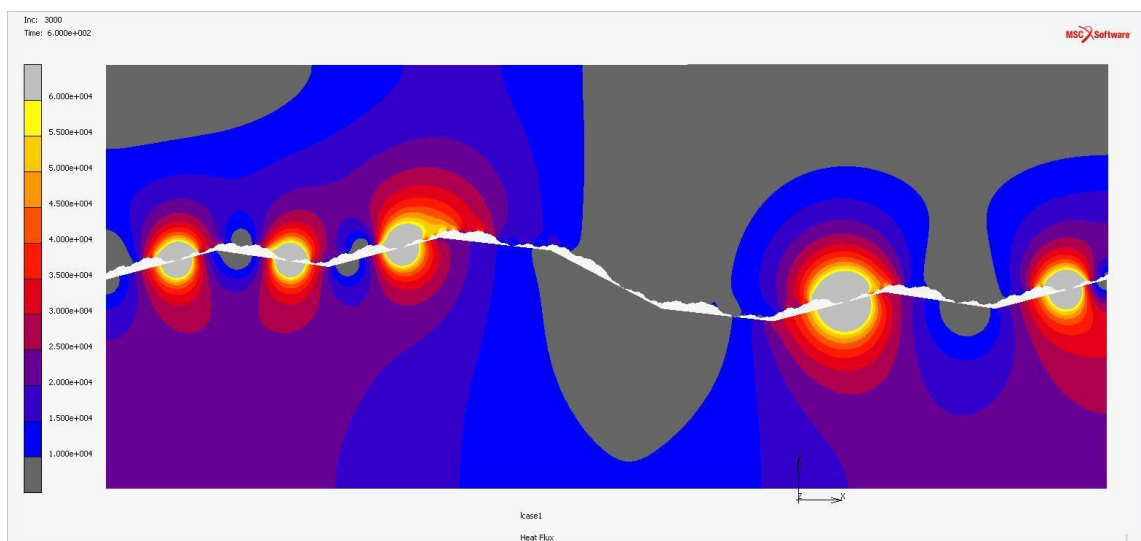
Σχήμα Β1.13: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$



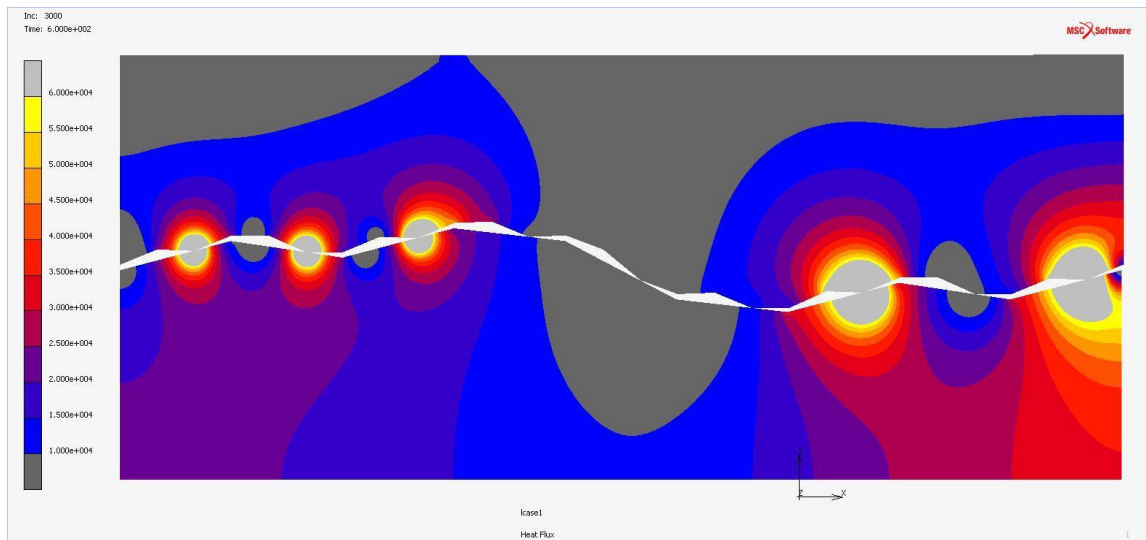
Σχήμα Β1.14: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$



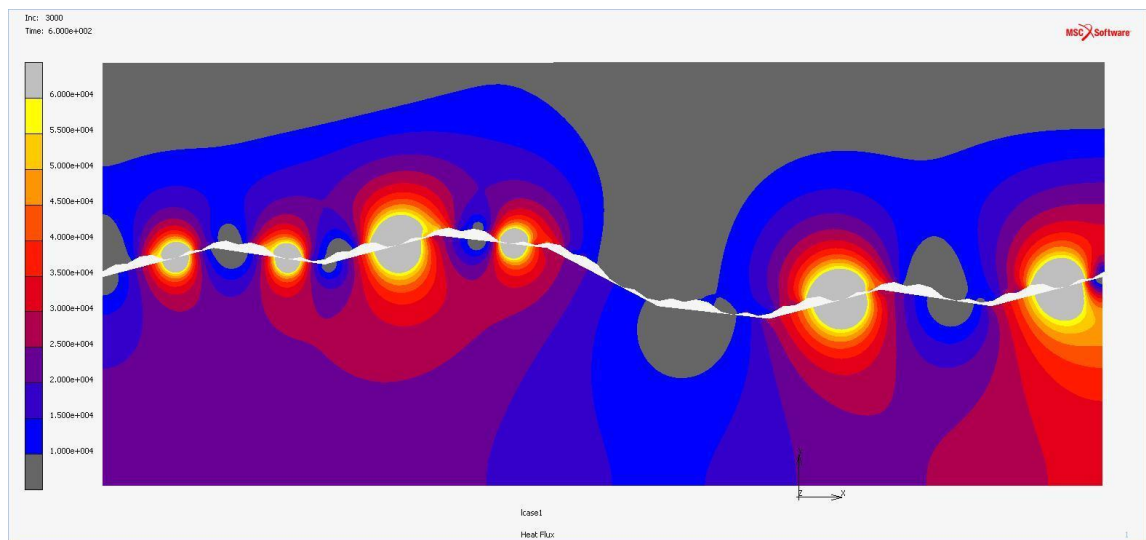
Σχήμα Β1.15: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$



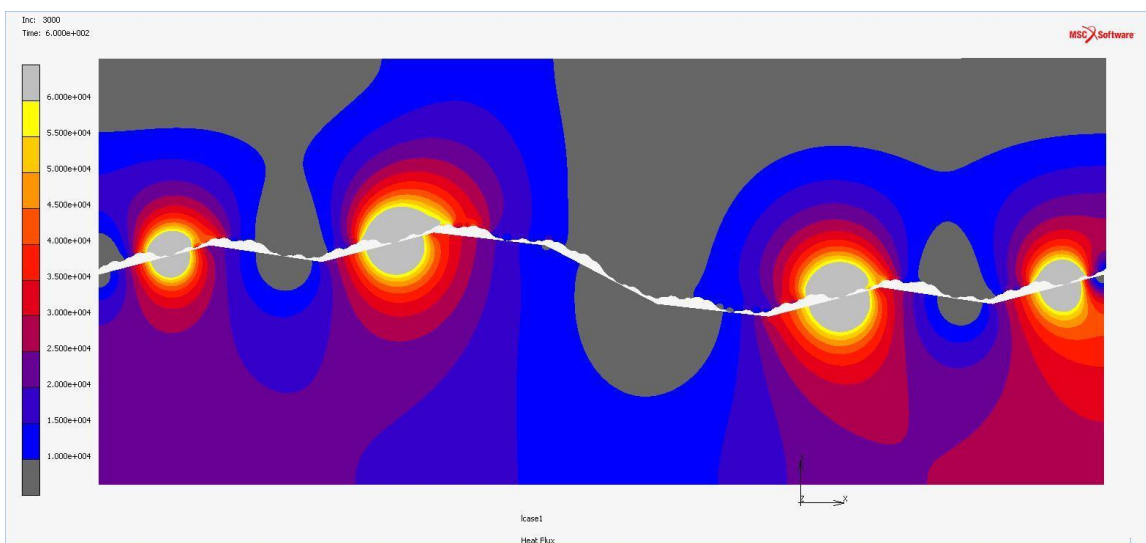
Σχήμα Β1.16: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0275$



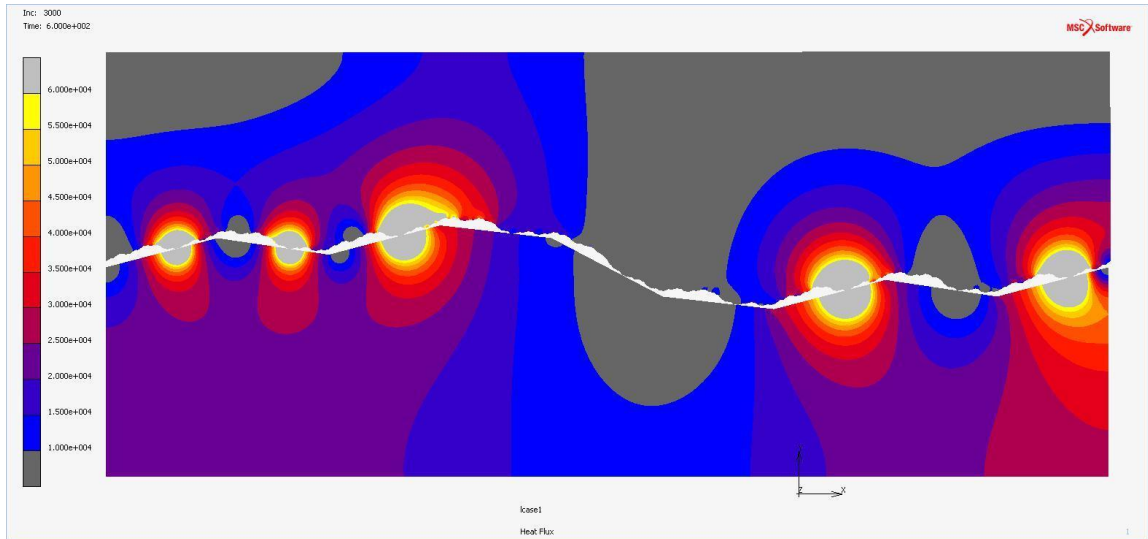
Σχήμα Β1.17: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$



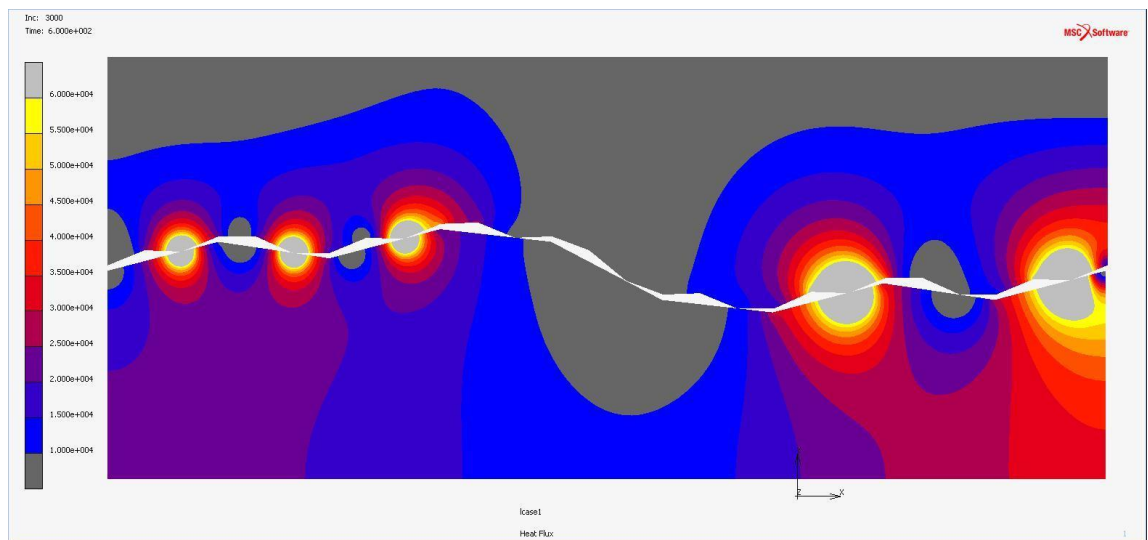
Σχήμα Β1.18: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$



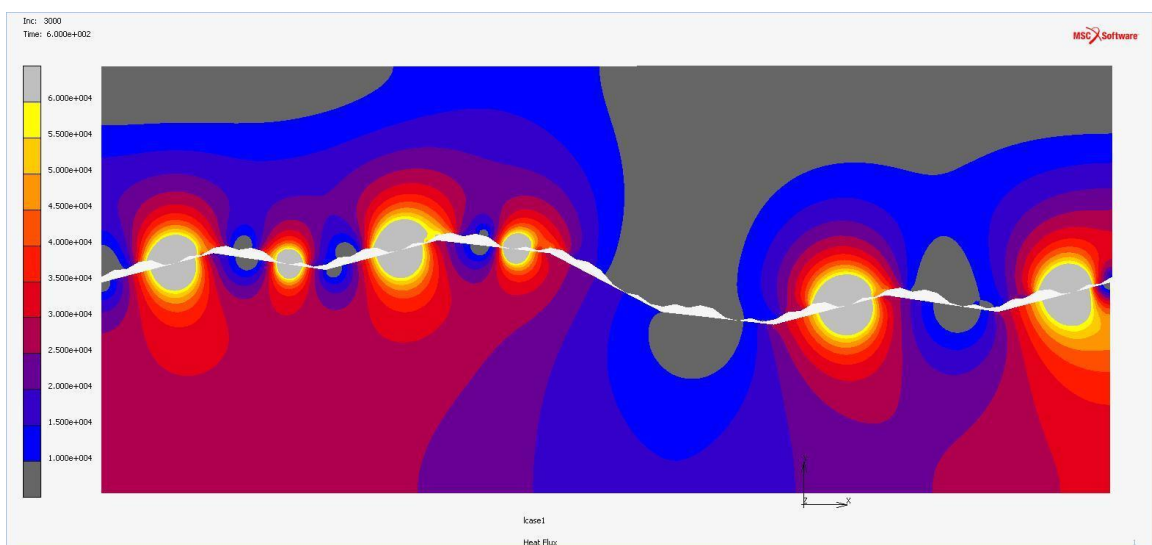
Σχήμα Β1.19: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$



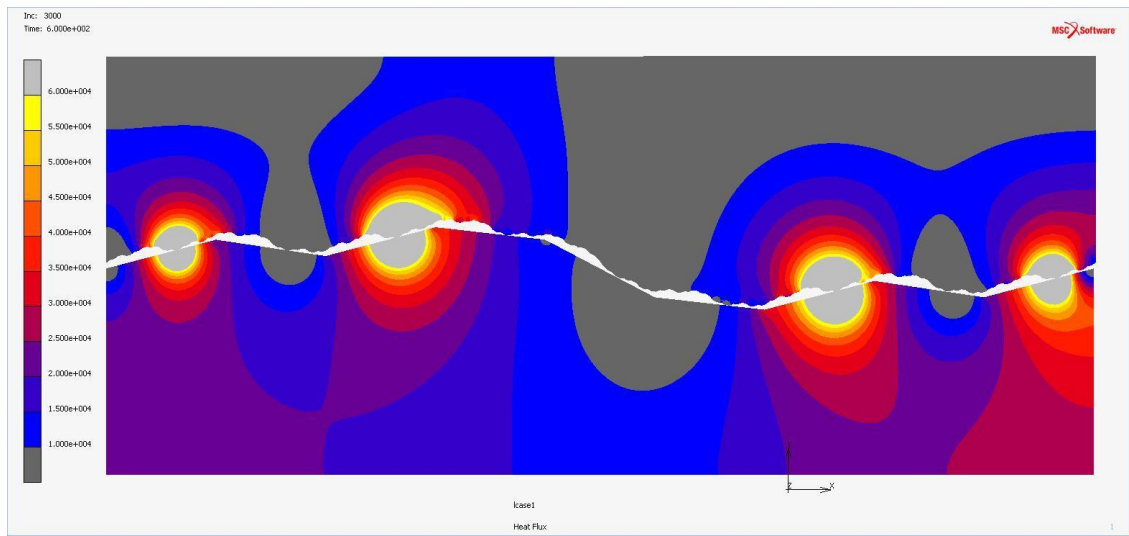
Σχήμα Β1.20: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.03$



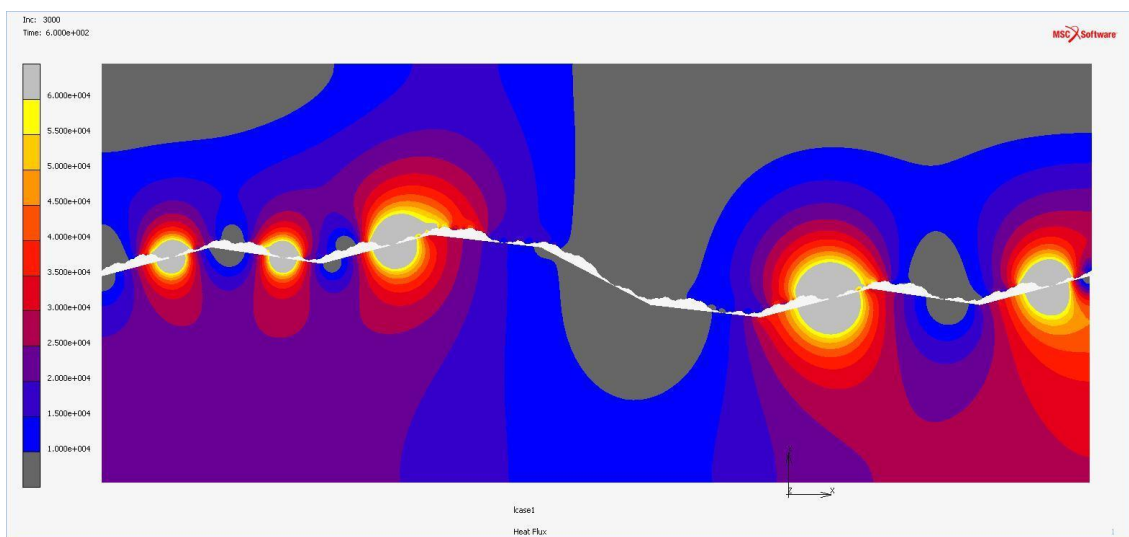
Σχήμα Β1.21: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0325$



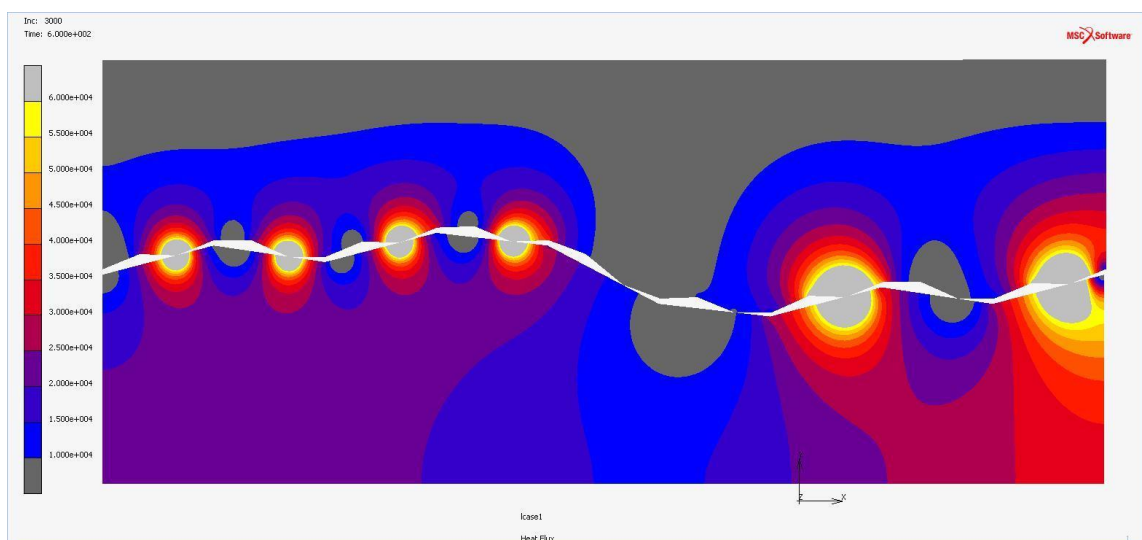
Σχήμα Β1.22: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0325$



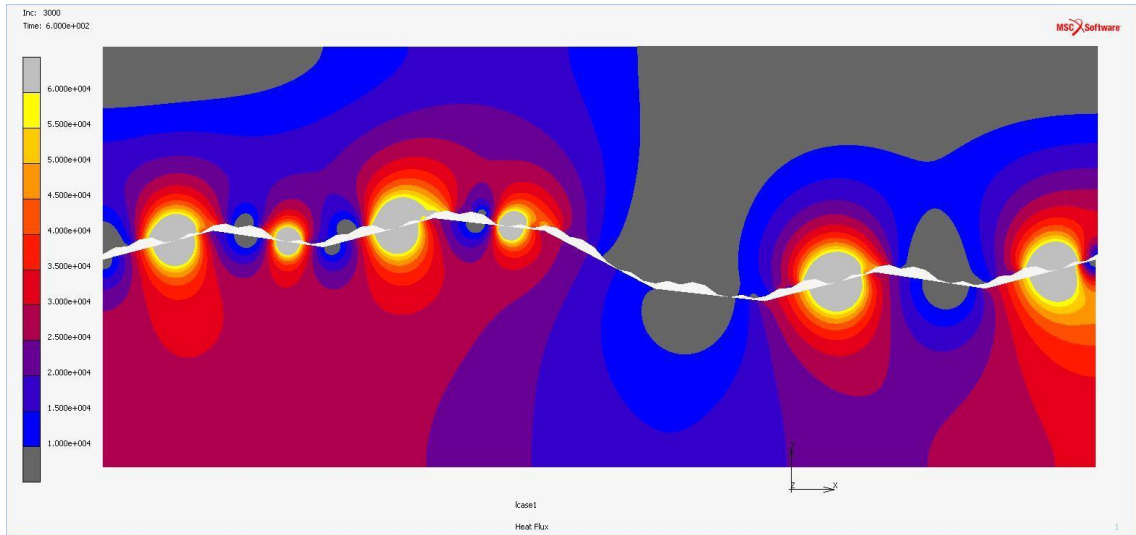
Σχήμα Β1.23: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0325$



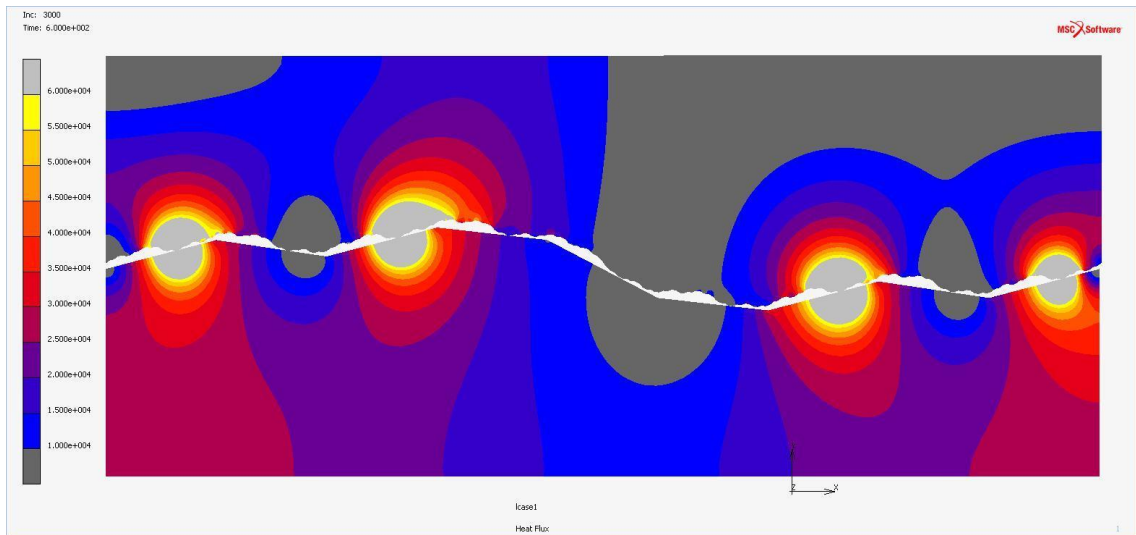
Σχήμα Β1.24: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0325$



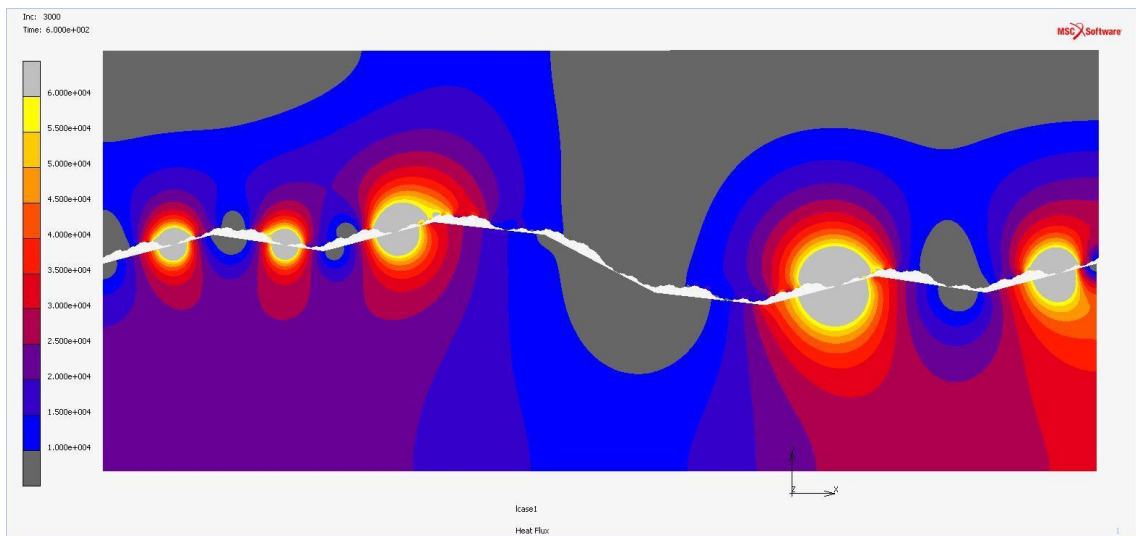
Σχήμα Β1.25: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.035$



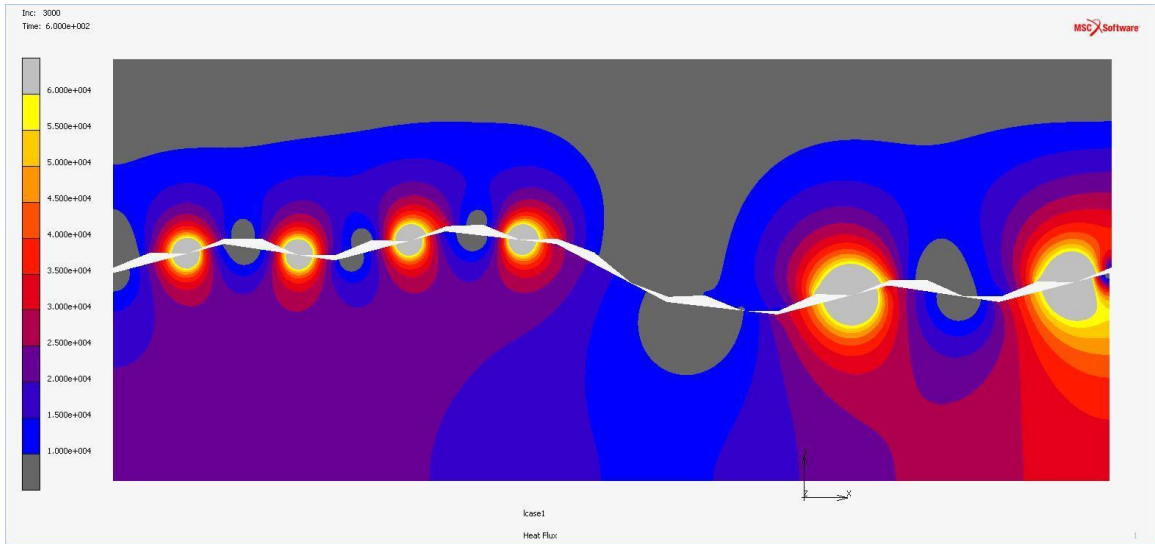
Σχήμα Β1.26: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.035$



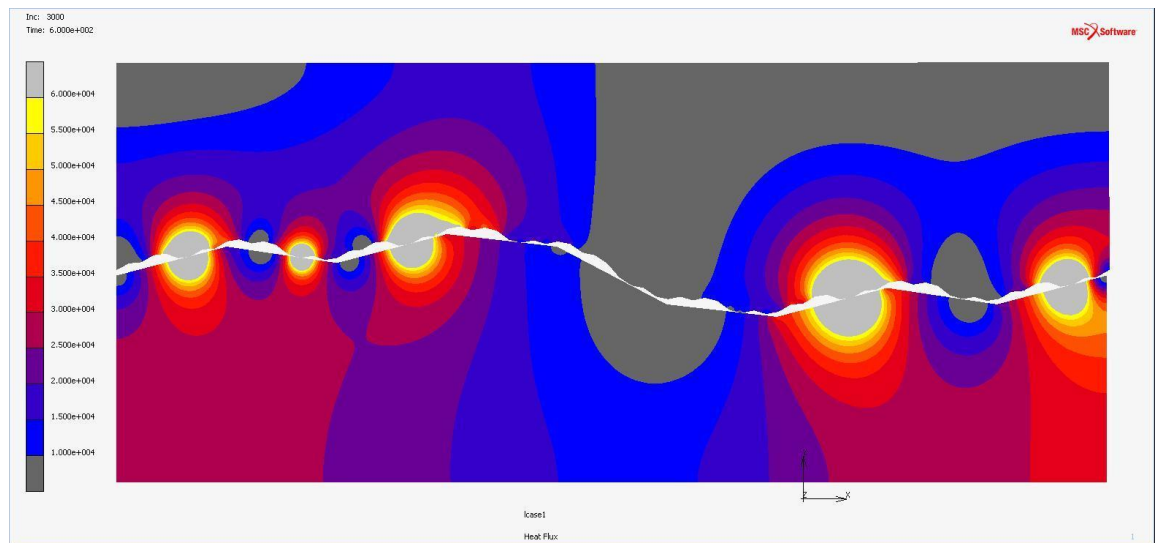
Σχήμα Β1.27: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.035$



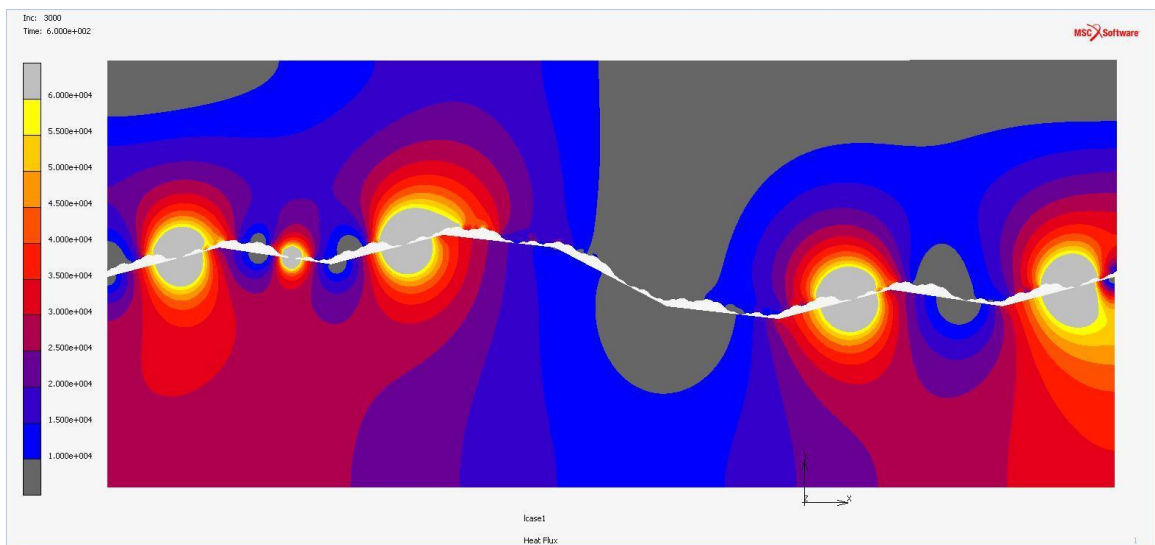
Σχήμα Β1.28: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.035$



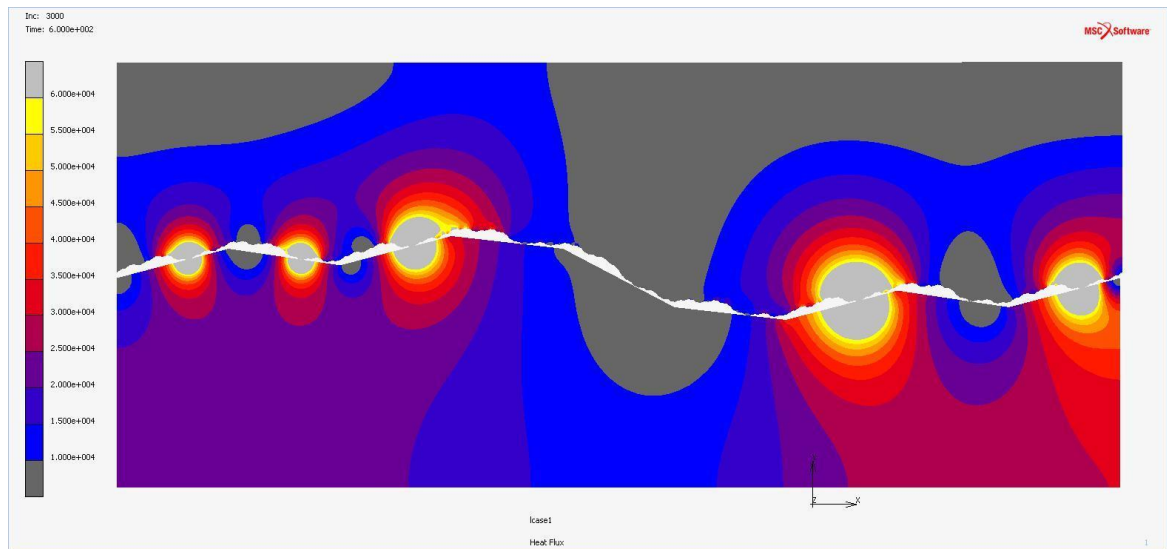
Σχήμα Β1.29: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 3^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0375$



Σχήμα Β1.30: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 4^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0375$

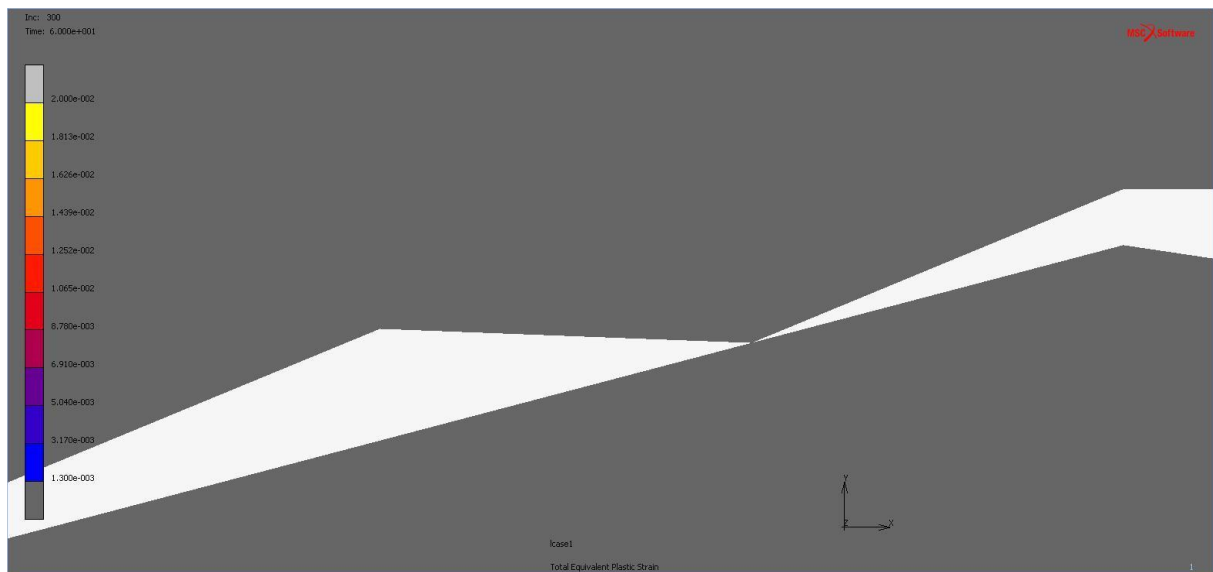


Σχήμα Β1.31: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 5^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_n/f_y = 0.0375$

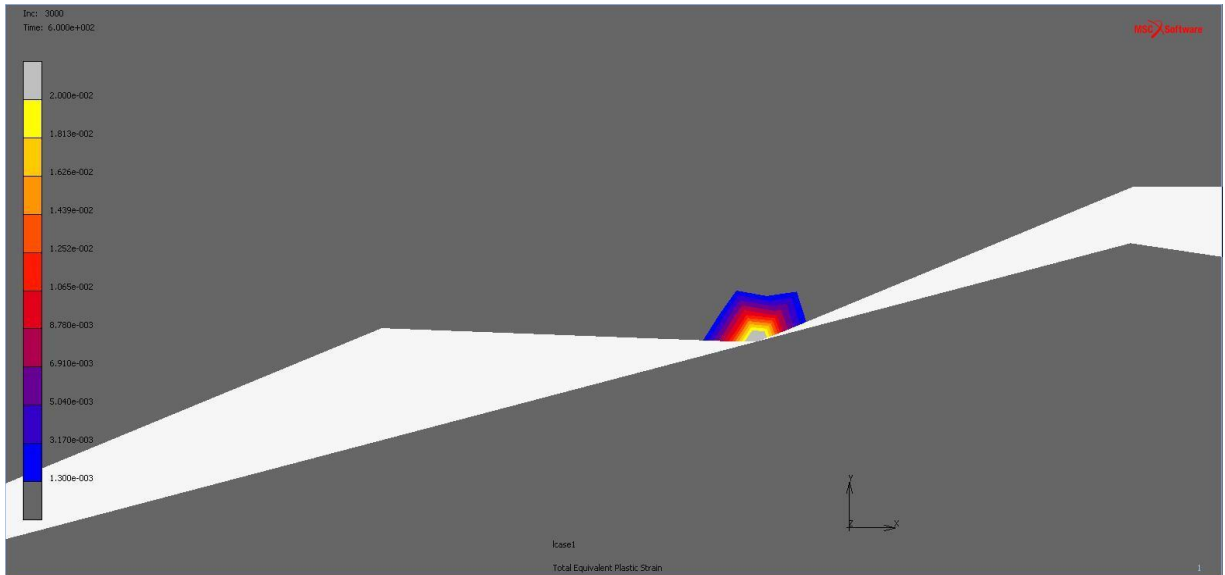


Σχήμα Β1.32: Απεικόνιση της θερμικής ροής της 6^{ης} ανάλυσης για φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$

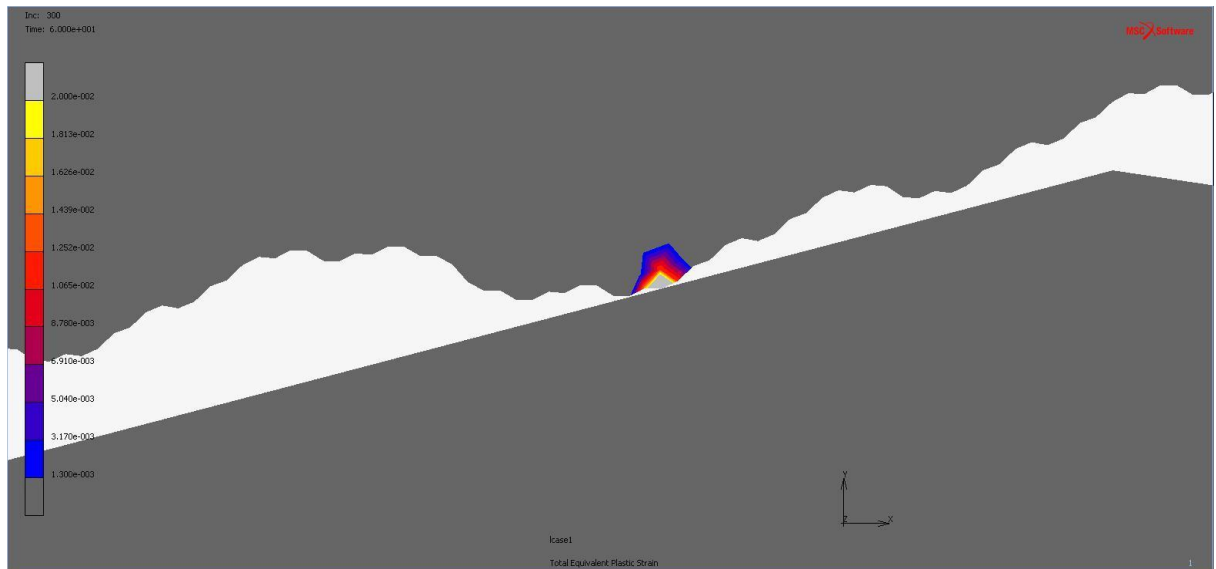
Β2. Απεικόνιση Πλαστικών Παραμορφώσεων



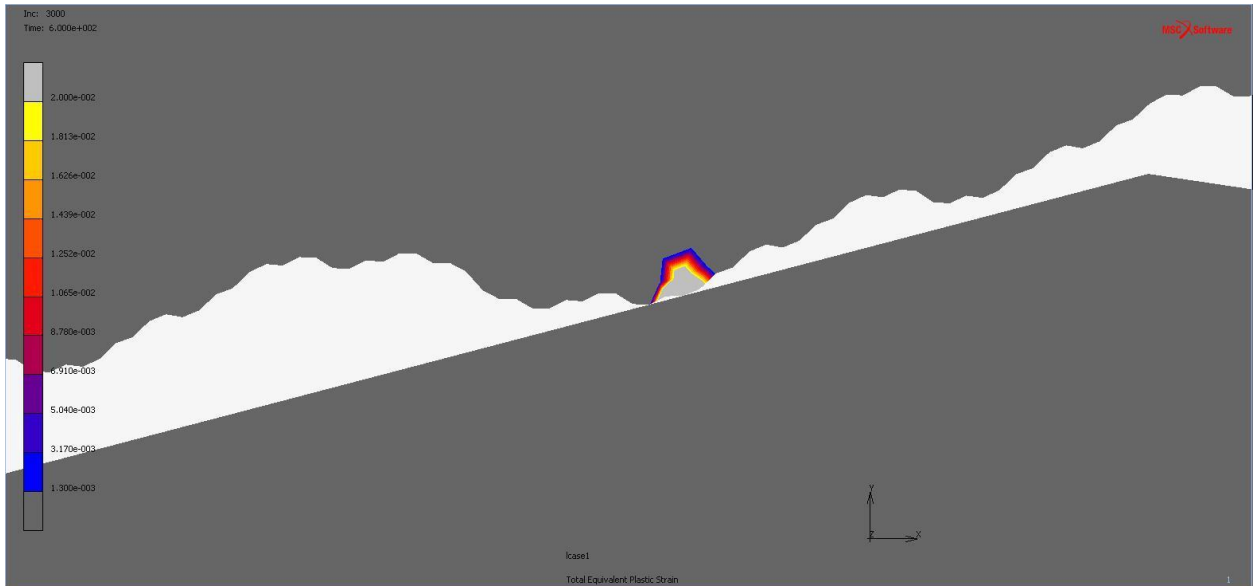
Σχήμα Β2.1: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.02$, $t=60$ sec



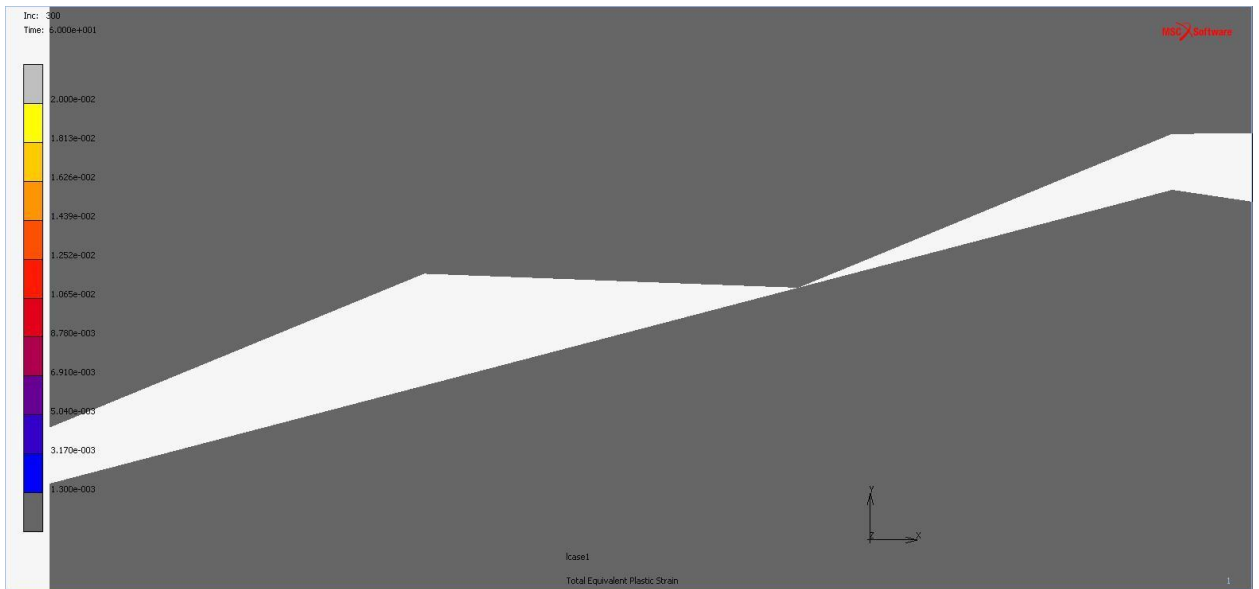
Σχήμα Β2.2: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.02$, $t=600$ sec



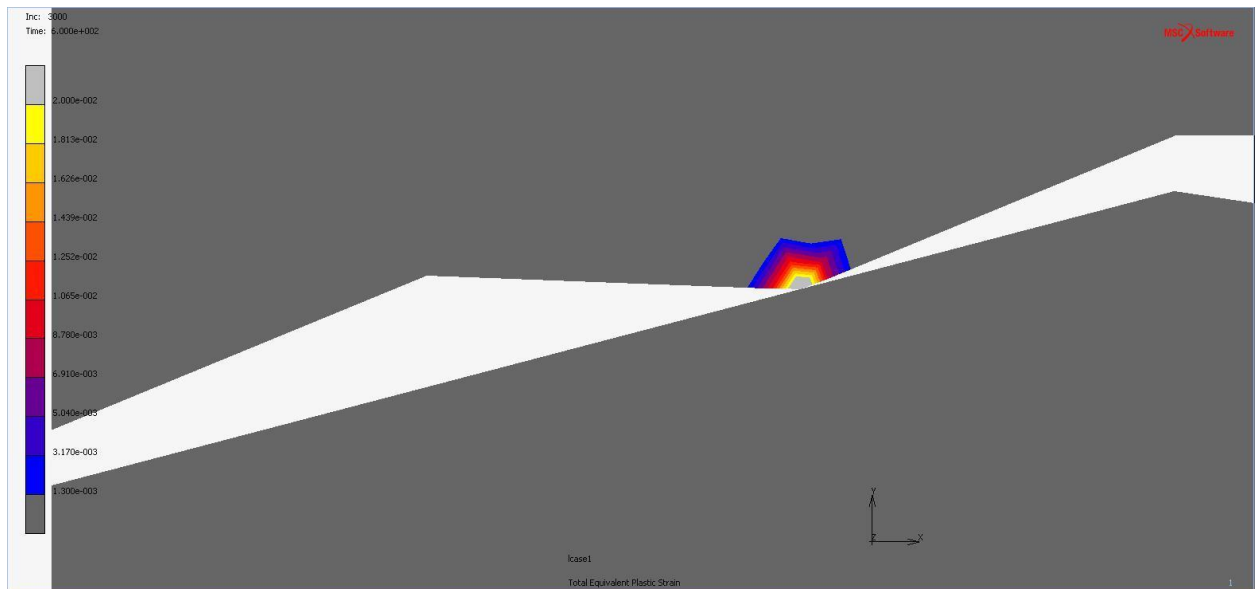
Σχήμα Β2.3: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.02$, $t=60$ sec



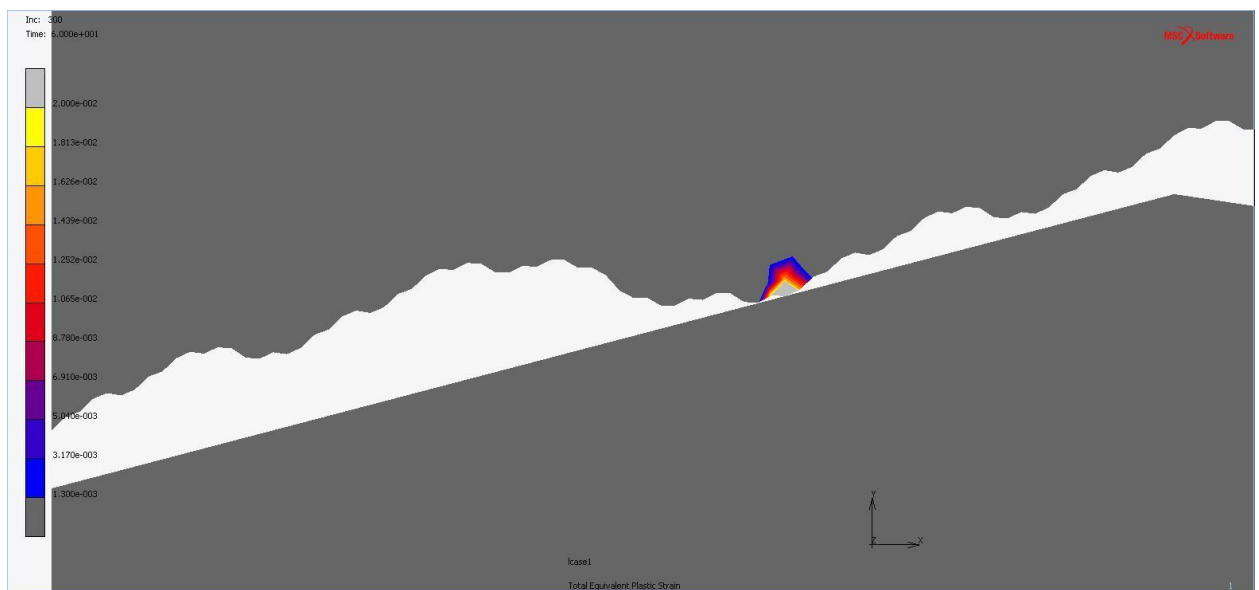
Σχήμα Β2.4: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.02$, $t=600$ sec



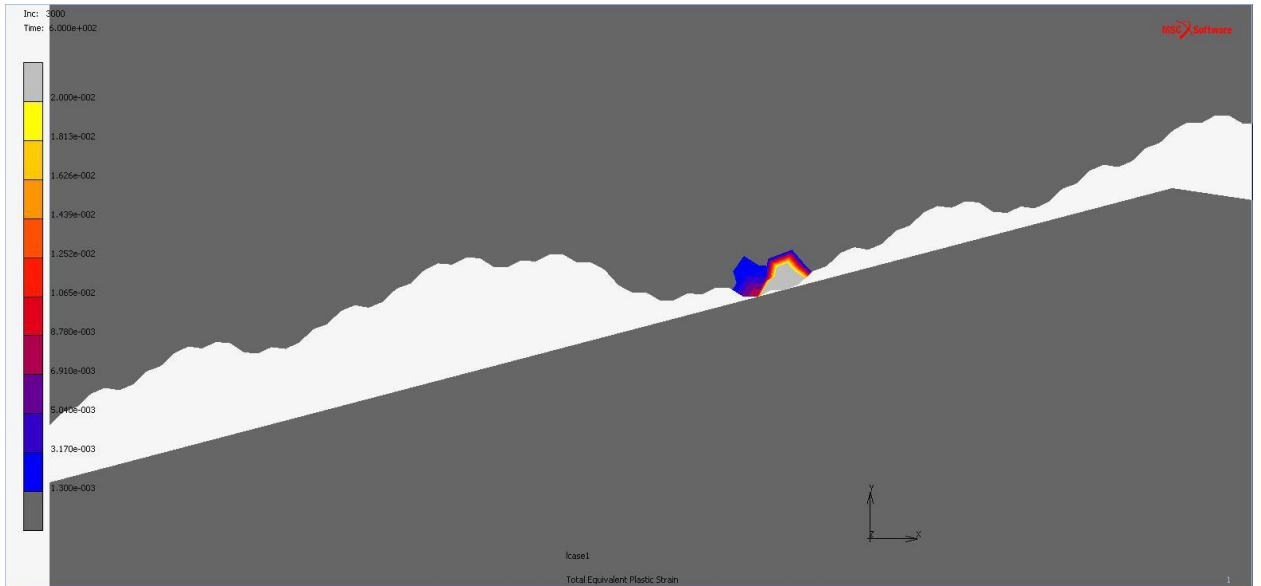
Σχήμα Β2.5: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.0225$, $t=60$ sec



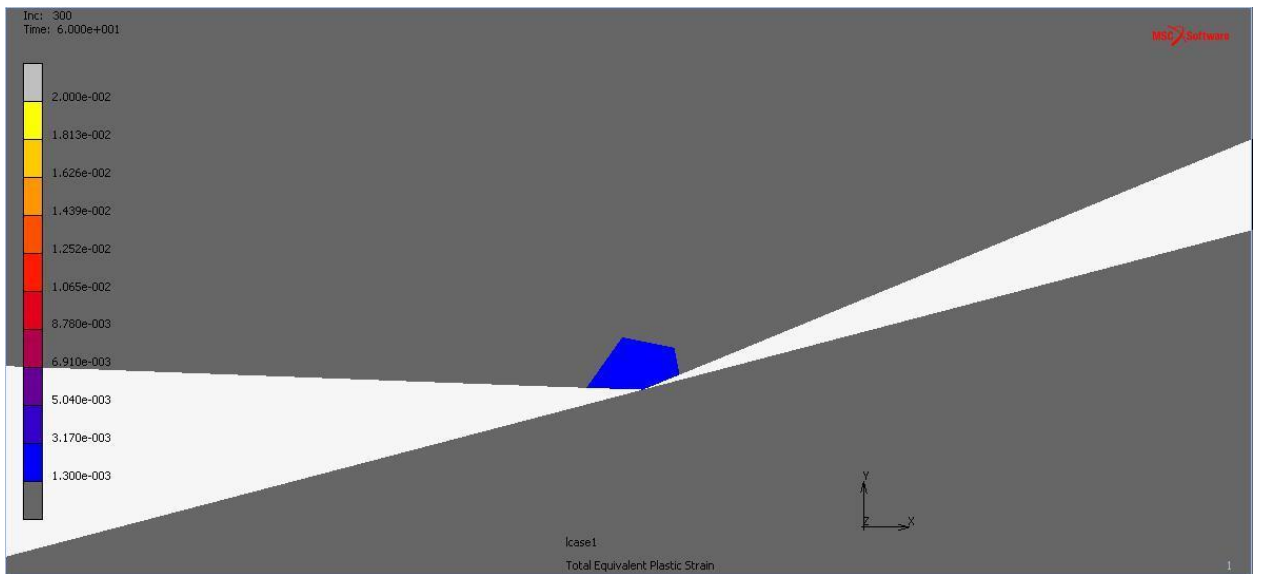
Σχήμα Β2.6: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.0225$, $t=600$ sec



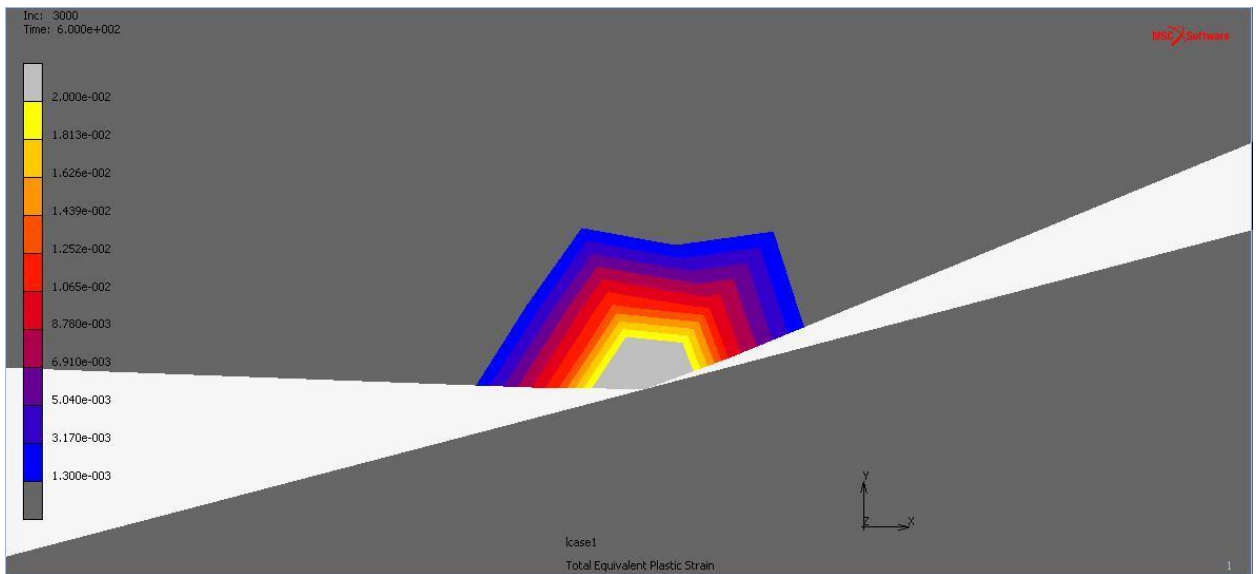
Σχήμα Β2.7: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.0225$, $t=60$ sec



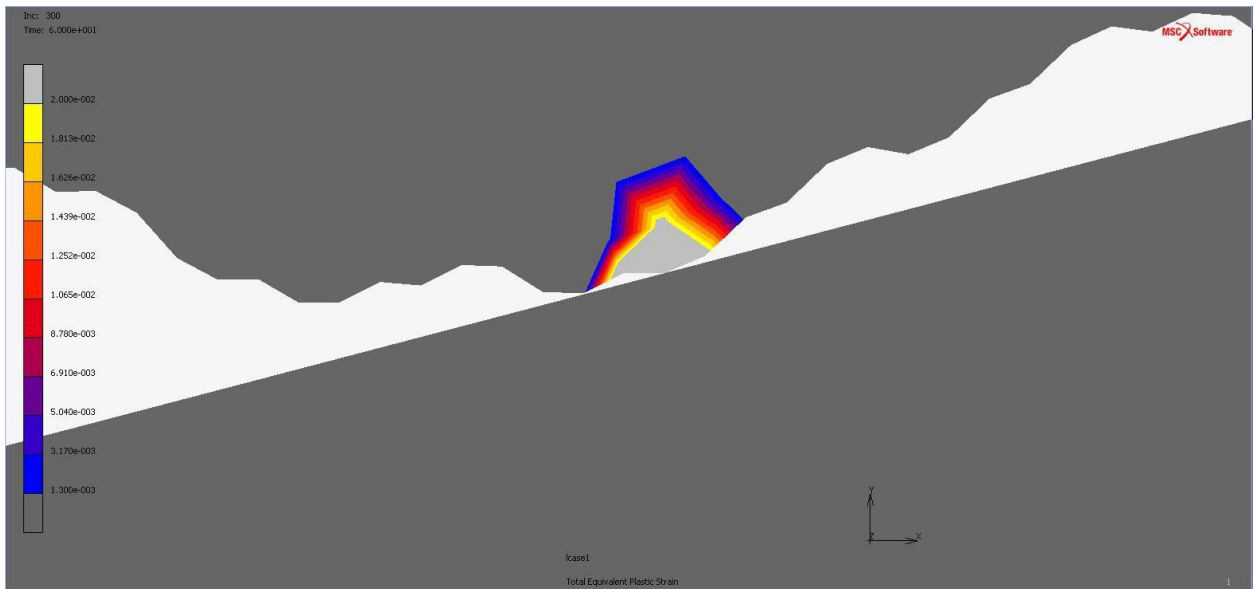
Σχήμα Β2.8: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.0225$, $t=600$ sec



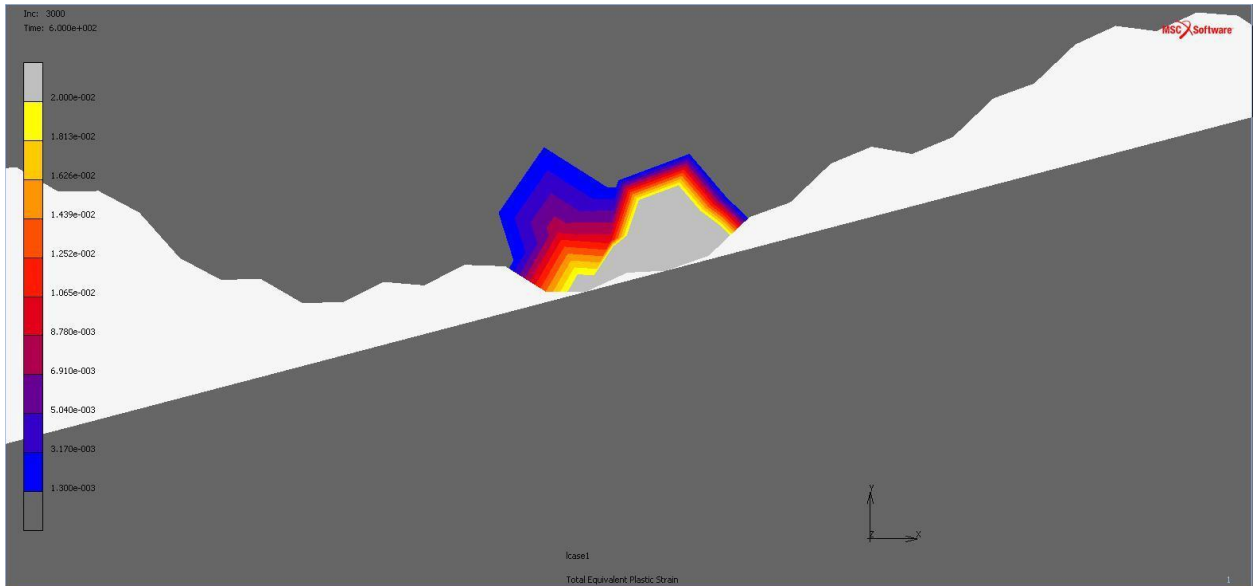
Σχήμα Β2.9: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.025$, $t=60$ sec



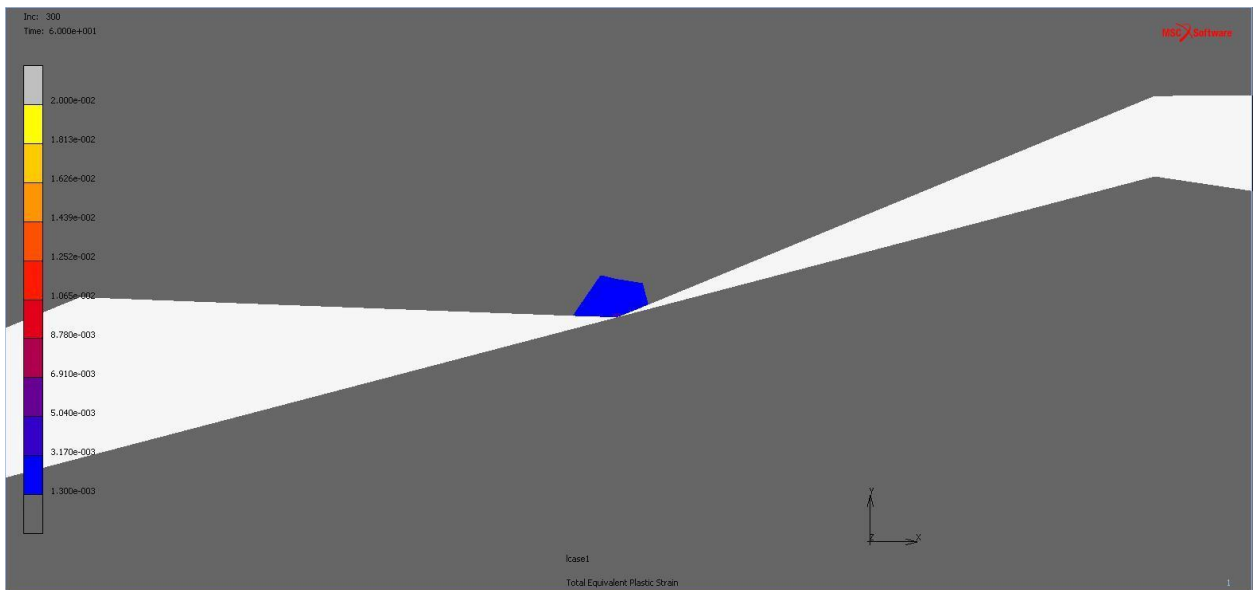
Σχήμα Β2.10: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3ης ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.025$, $t=600$ sec



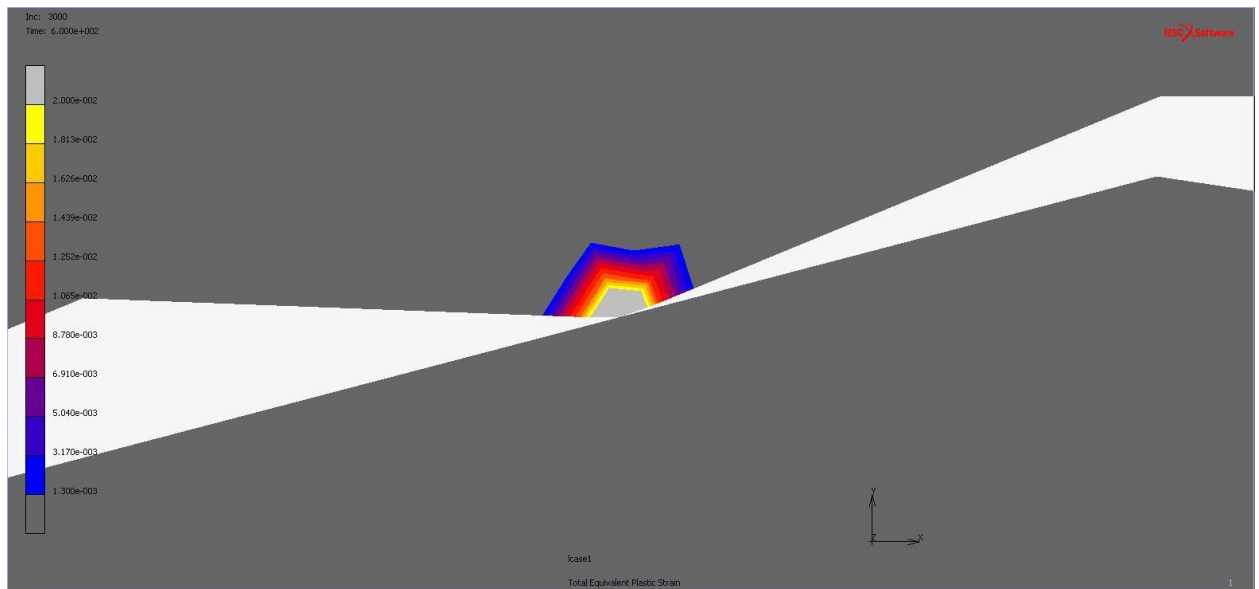
Σχήμα Β2.11: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6ης ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.025$, $t=60$ sec



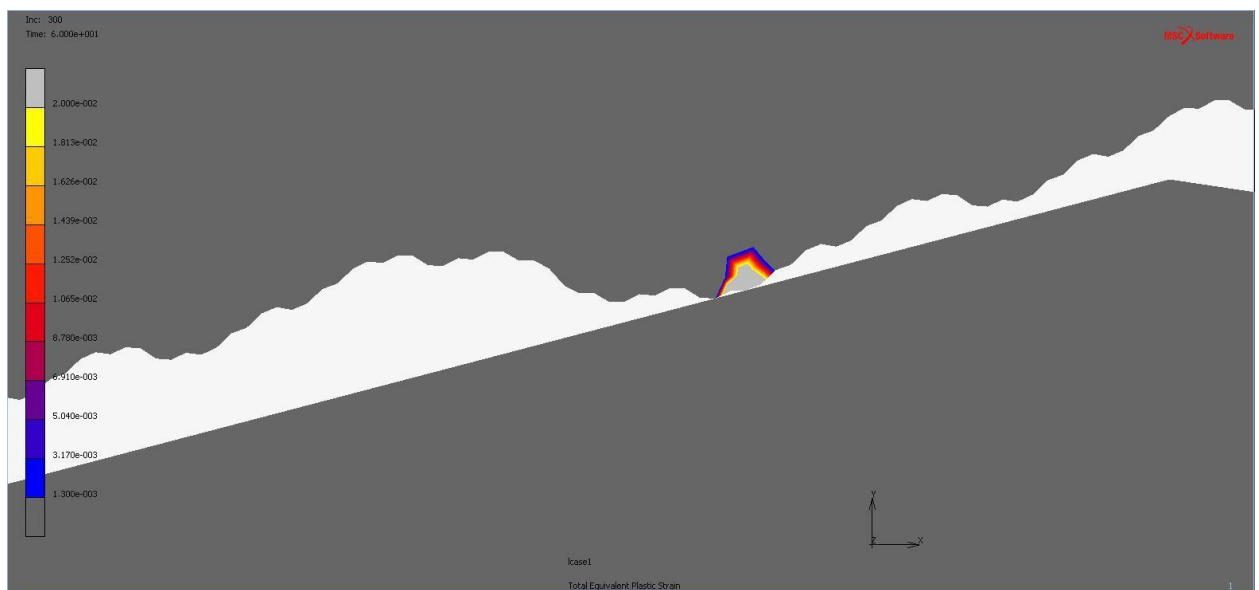
Σχήμα B2.12: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6ης ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.025$, $t=600$ sec



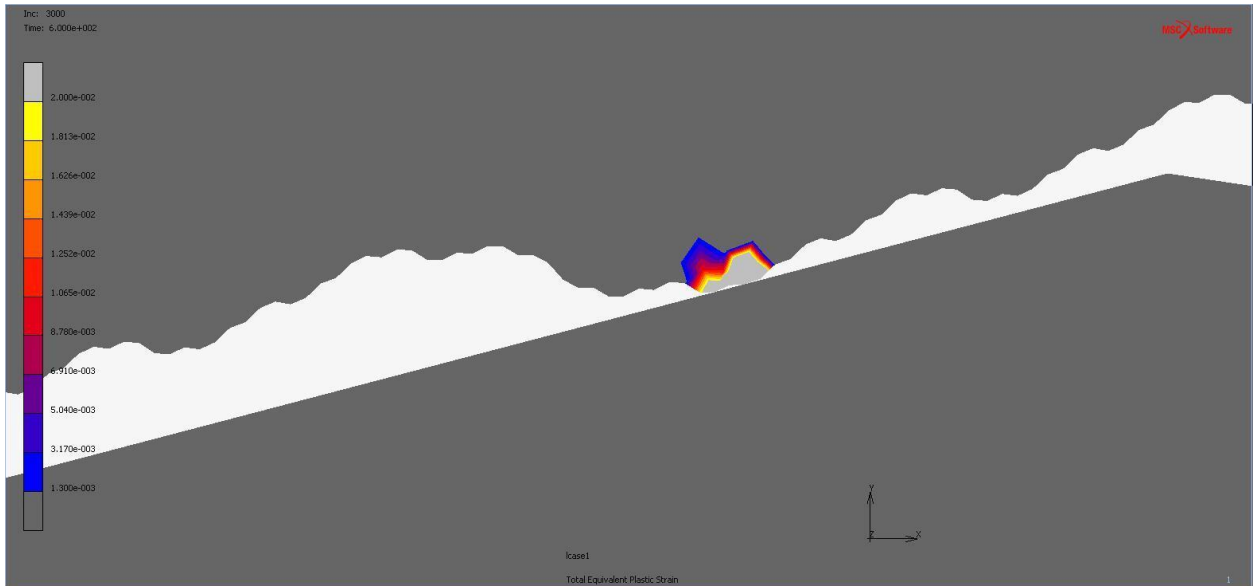
Σχήμα B2.13: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3ης ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0275$, $t=60$ sec



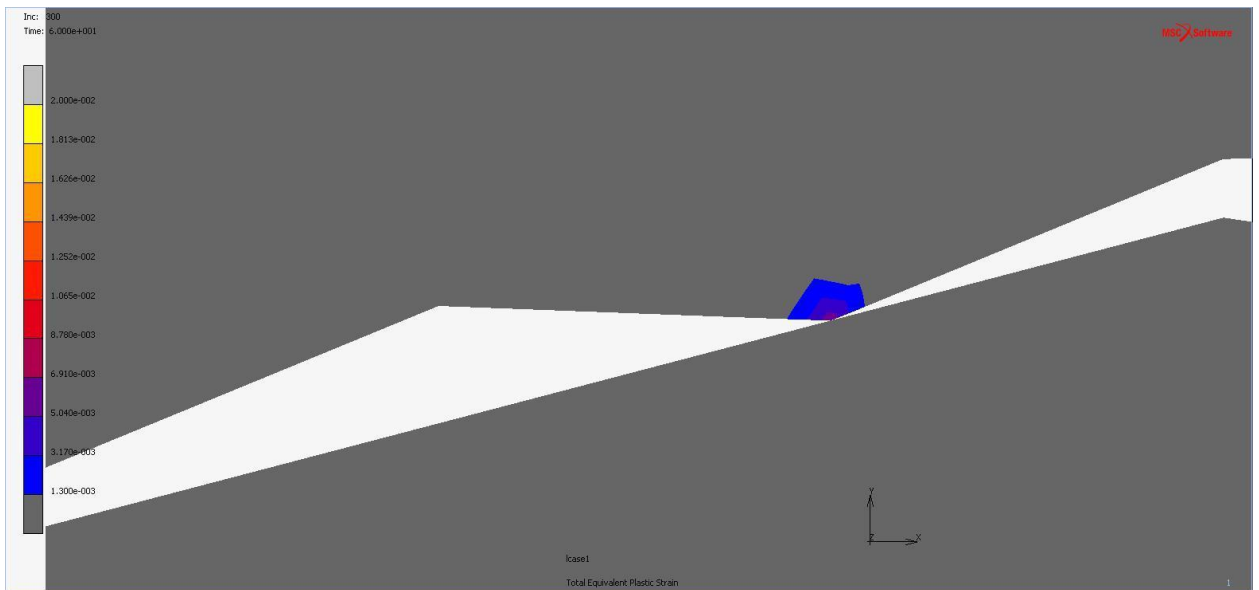
Σχήμα B2.14: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0275$, $t=600$ sec



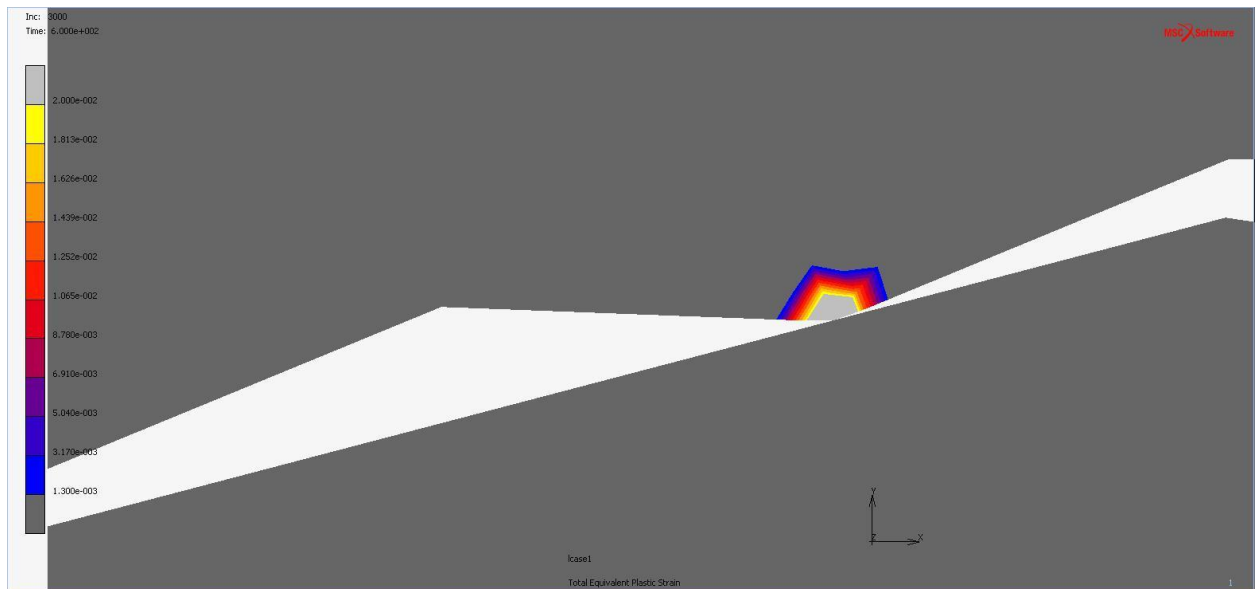
Σχήμα B2.15: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0275$, $t=60$ sec



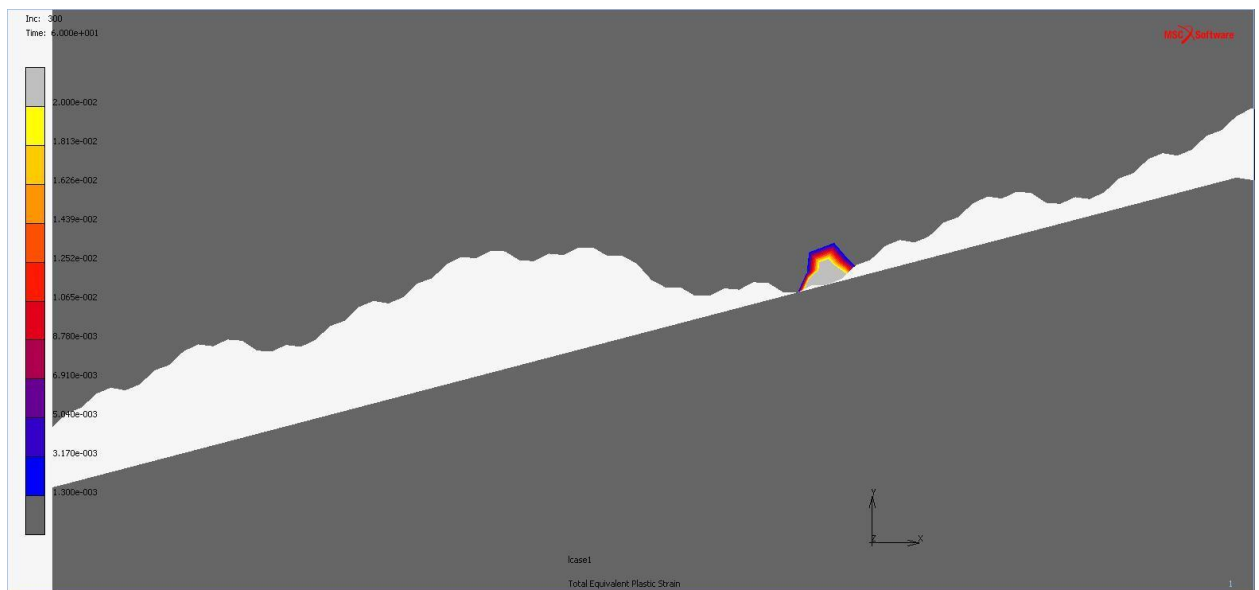
Σχήμα B2.16: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0275$, $t=600$ sec



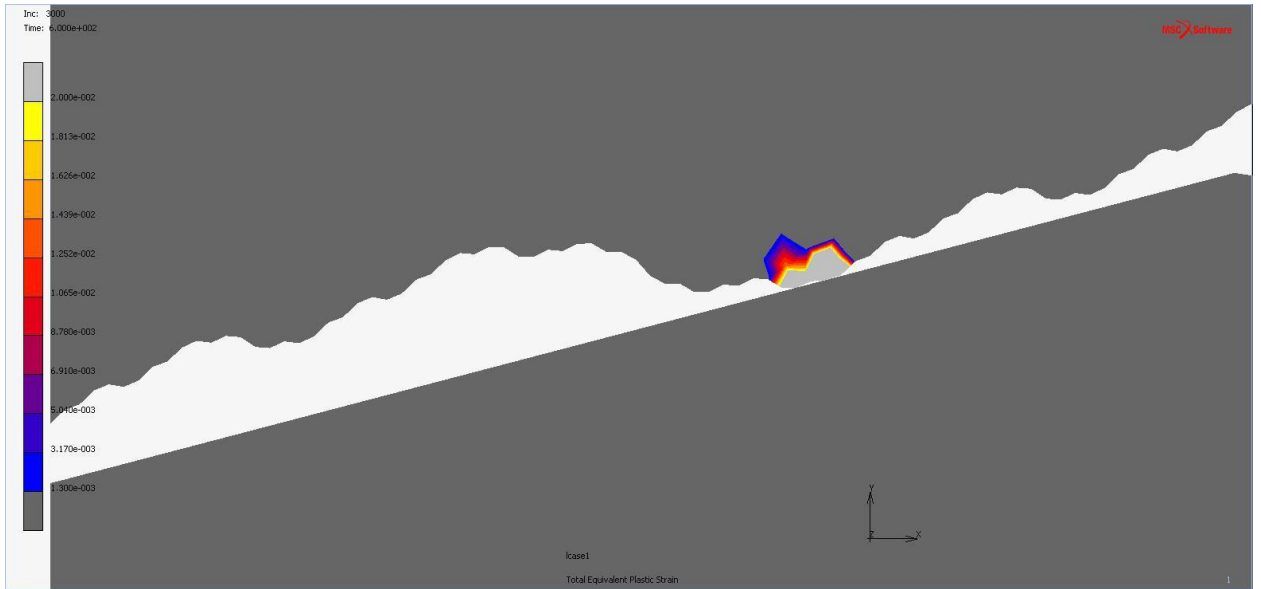
Σχήμα B2.17: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.03$, $t=60$ sec



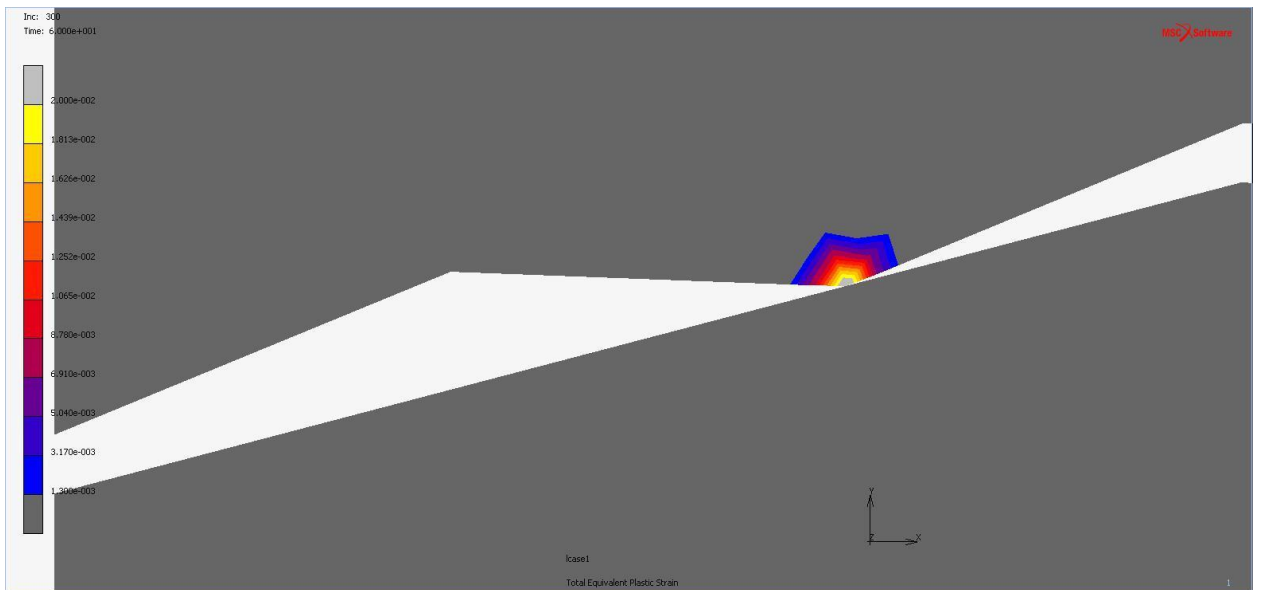
Σχήμα B2.18: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.03$, $t=600$ sec



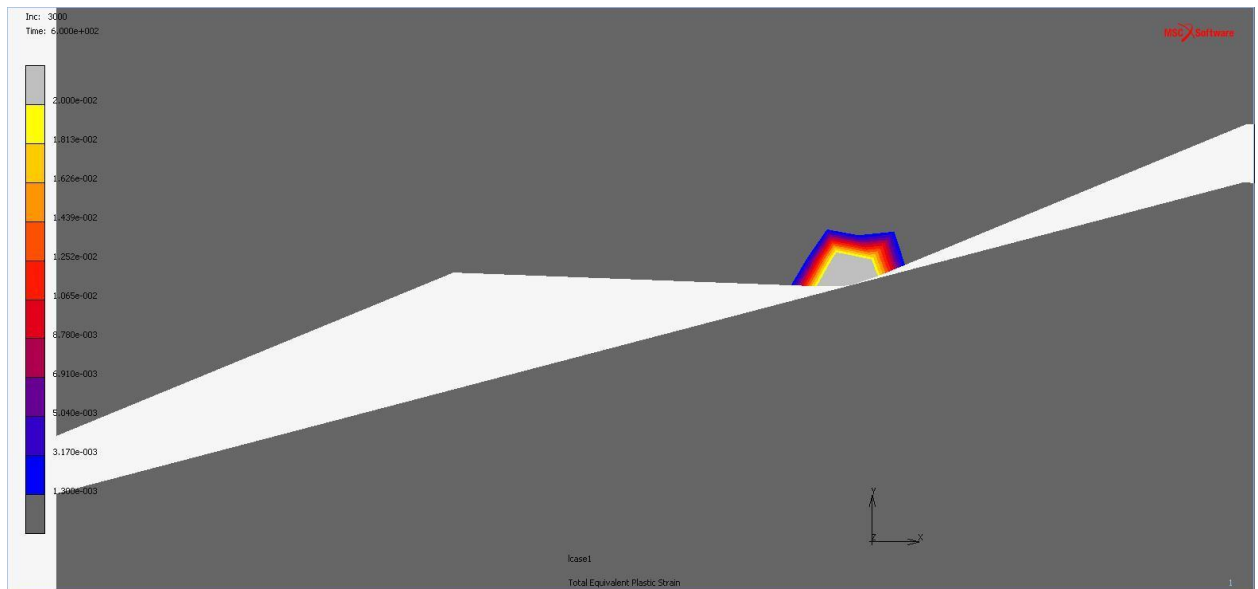
Σχήμα B2.19: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.03$, $t=60$ sec



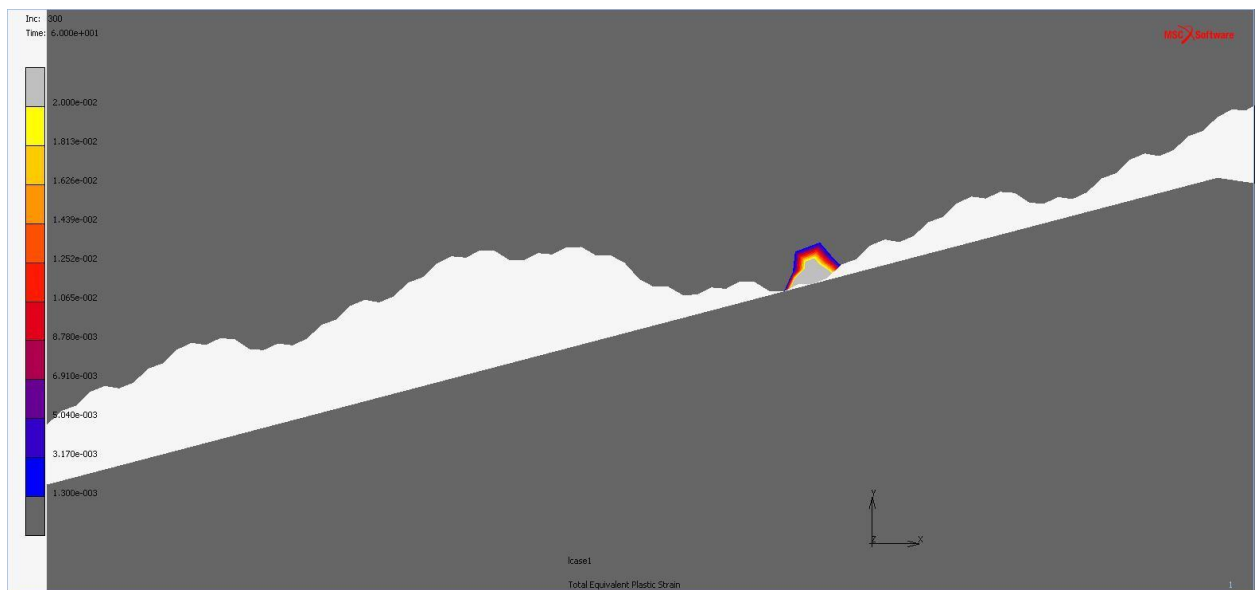
Σχήμα B2.20: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.03$, $t=600$ sec



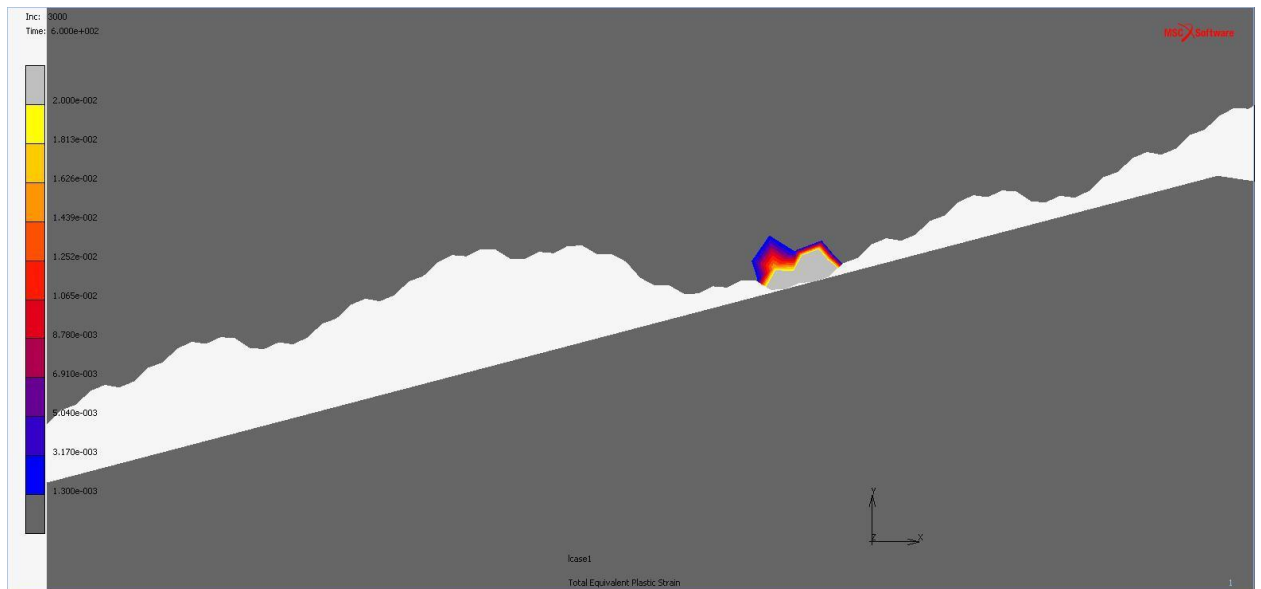
Σχήμα B2.21: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.0325$, $t=60$ sec



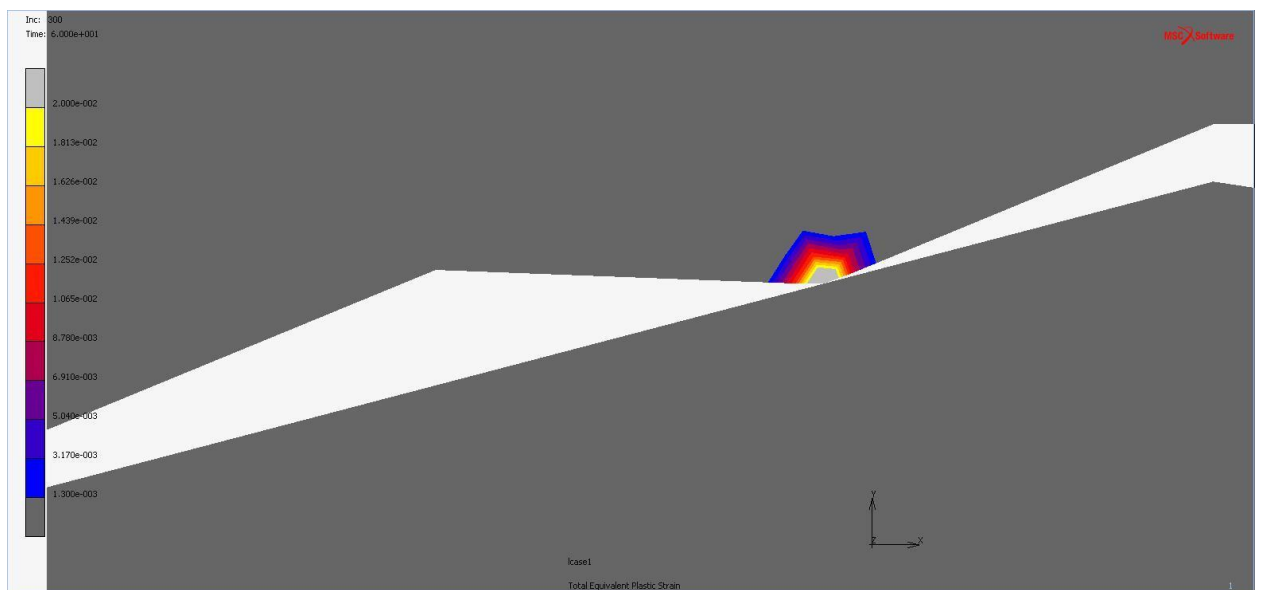
Σχήμα Β2.22: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0325$, $t=600$ sec



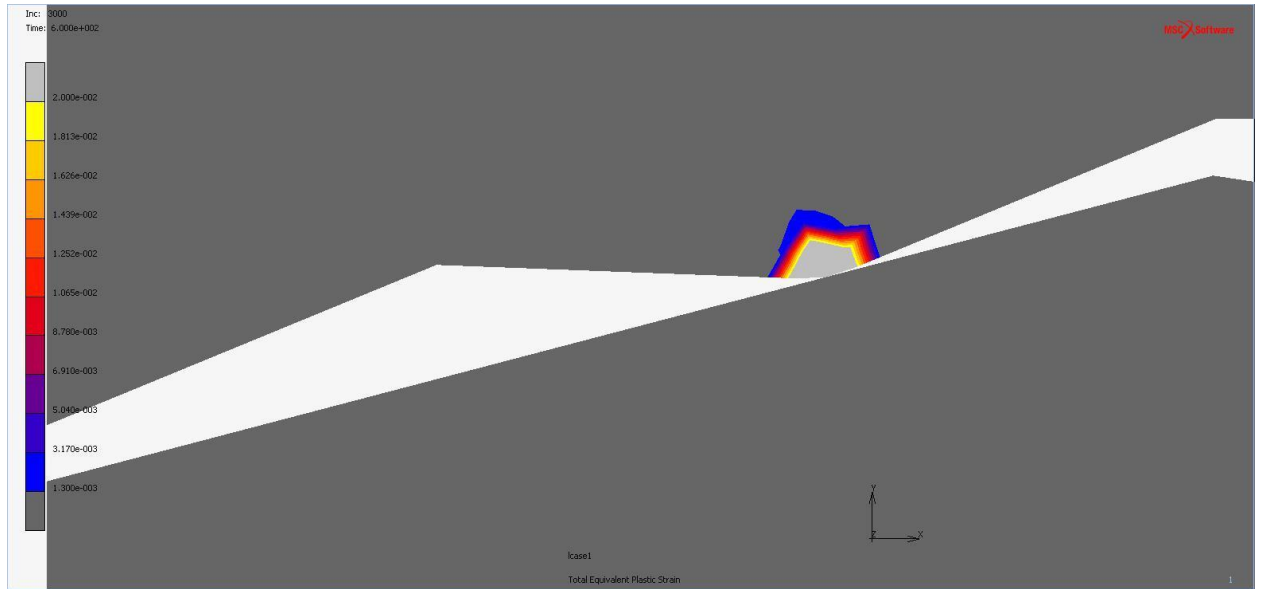
Σχήμα Β2.23: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0325$, $t=60$ sec



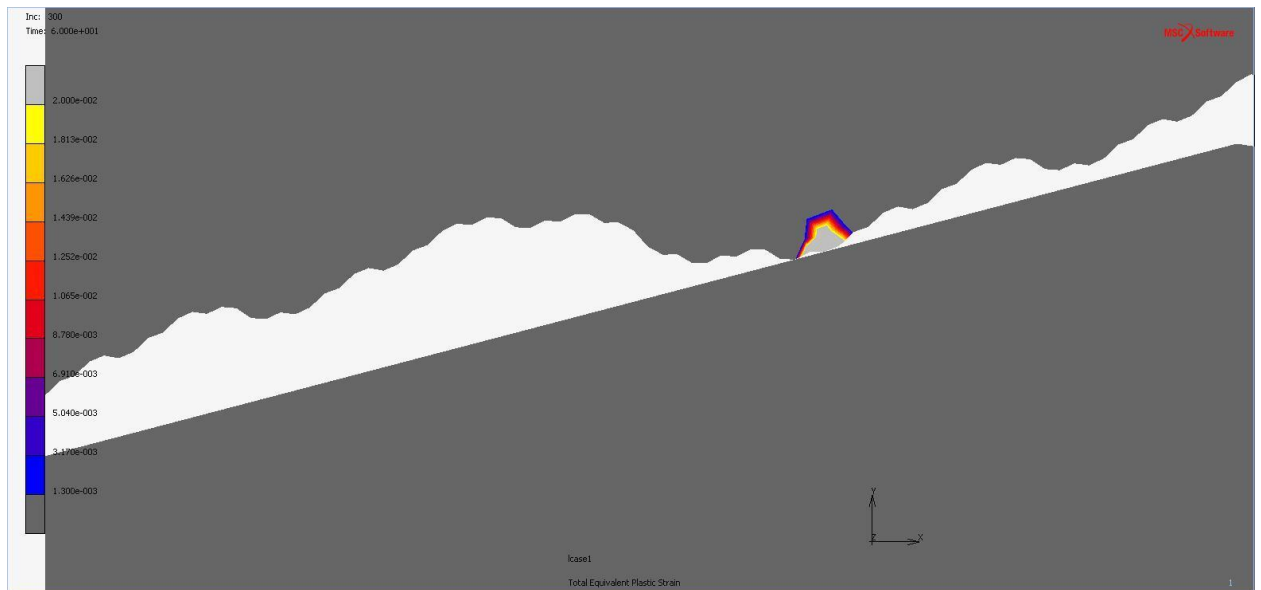
Σχήμα B2.24: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0325$, $t=600$ sec



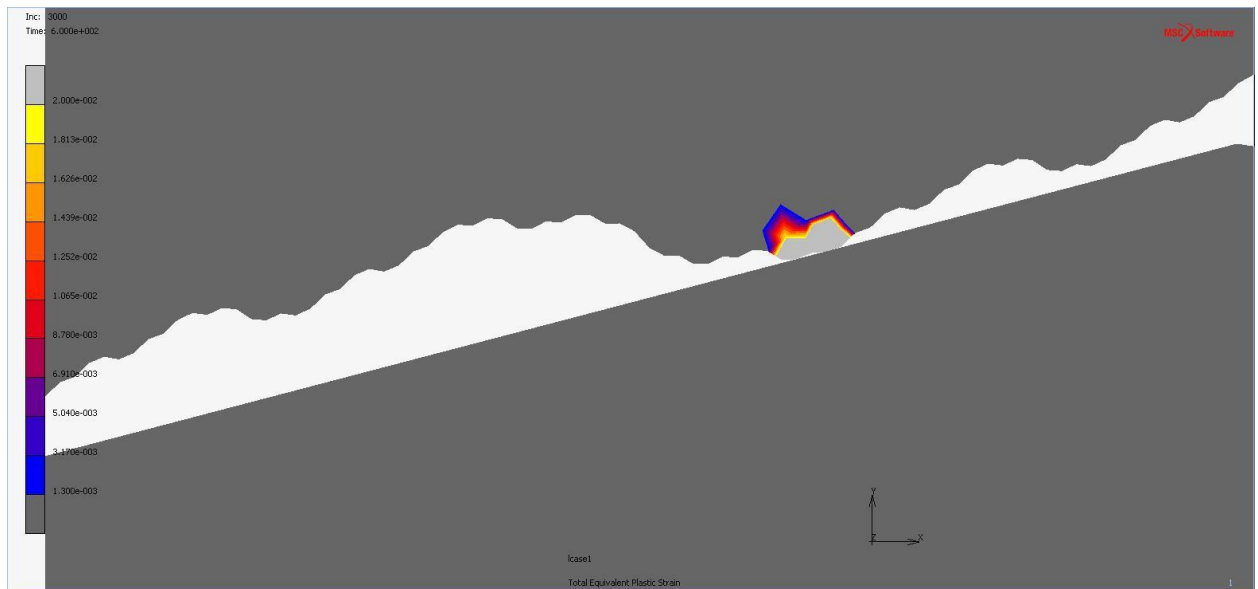
Σχήμα B2.25: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.035$, $t=60$ sec



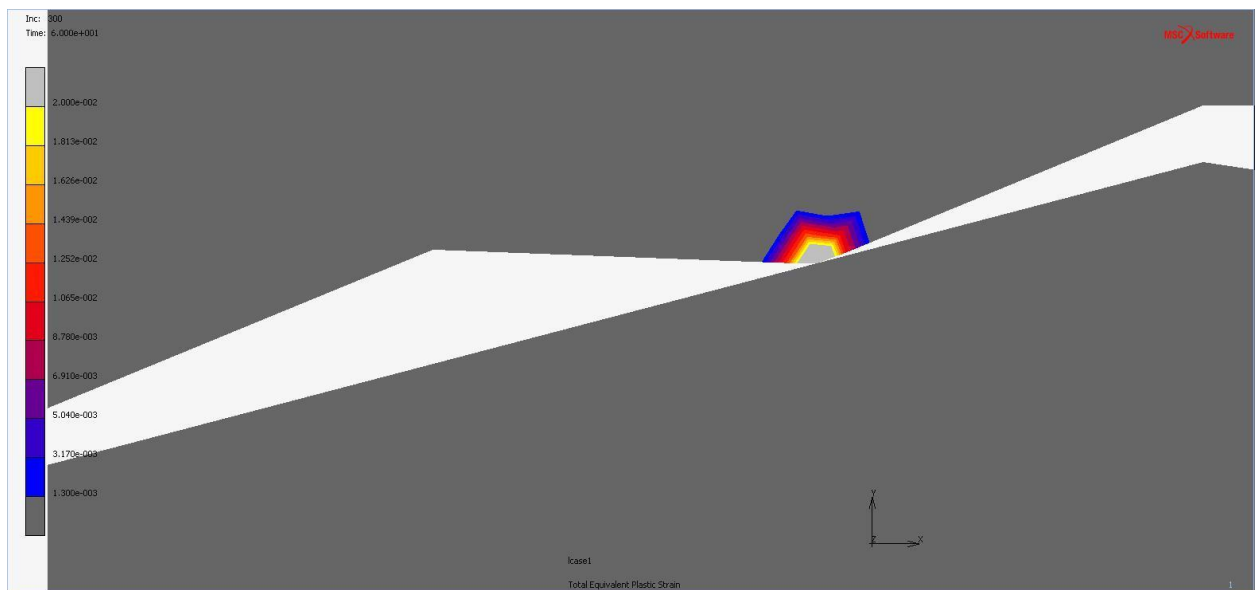
Σχήμα B2.26: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3ης ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.035$, $t=600$ sec



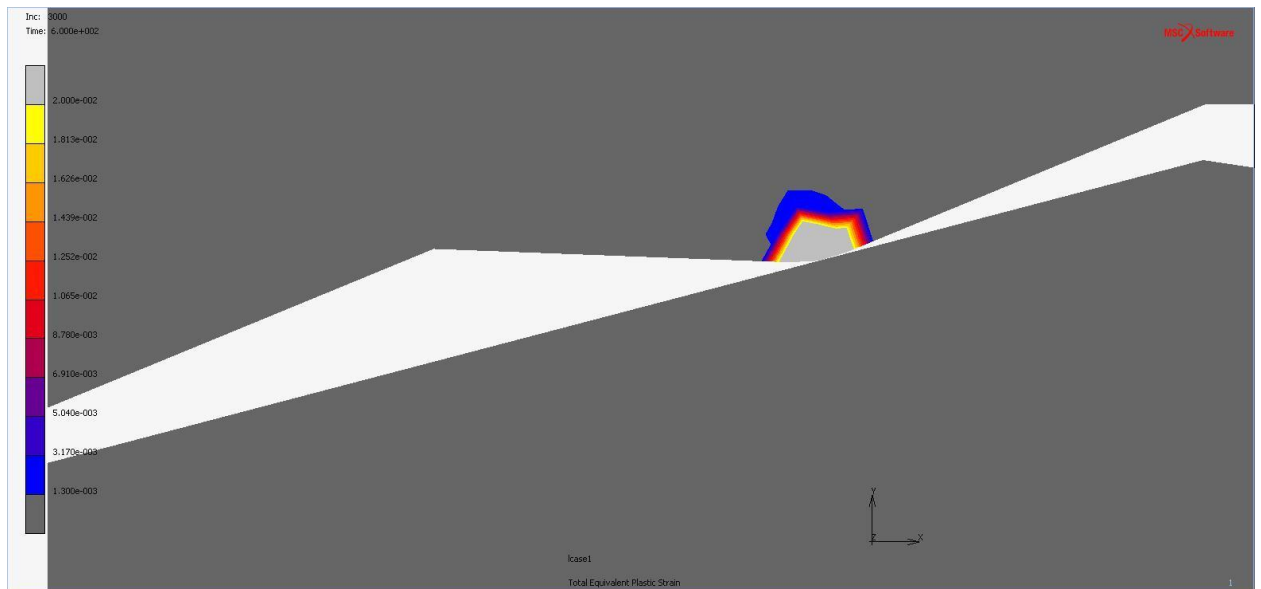
Σχήμα B2.27: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6ης ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.035$, $t=60$ sec



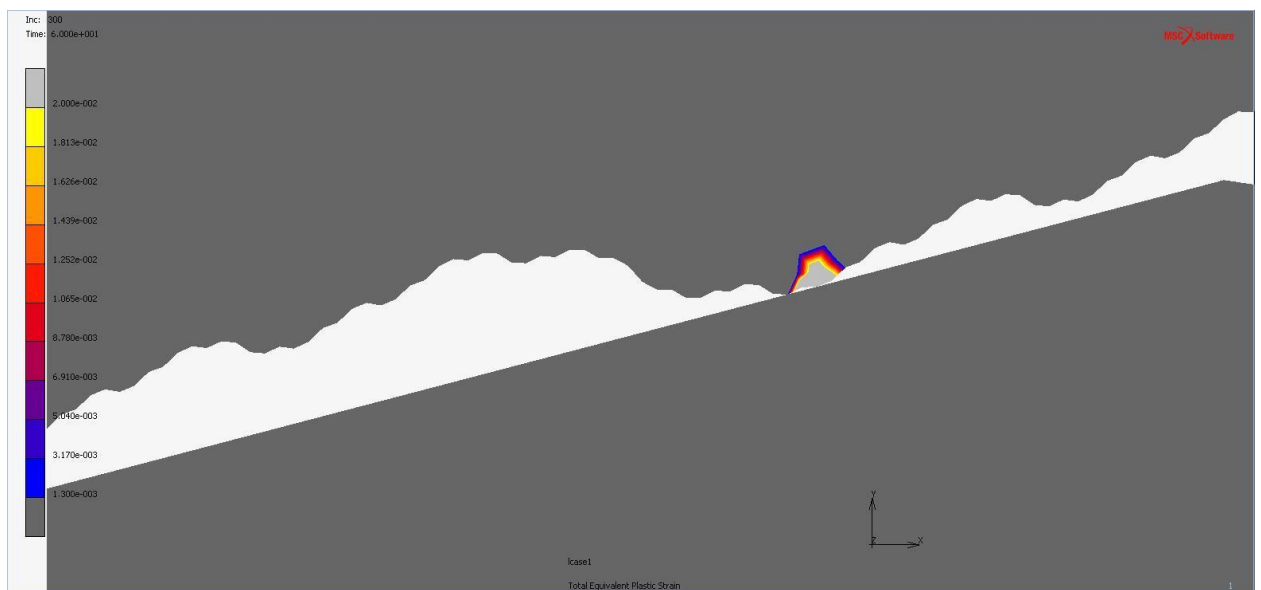
Σχήμα Β2.28: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.035$, $t=600$ sec



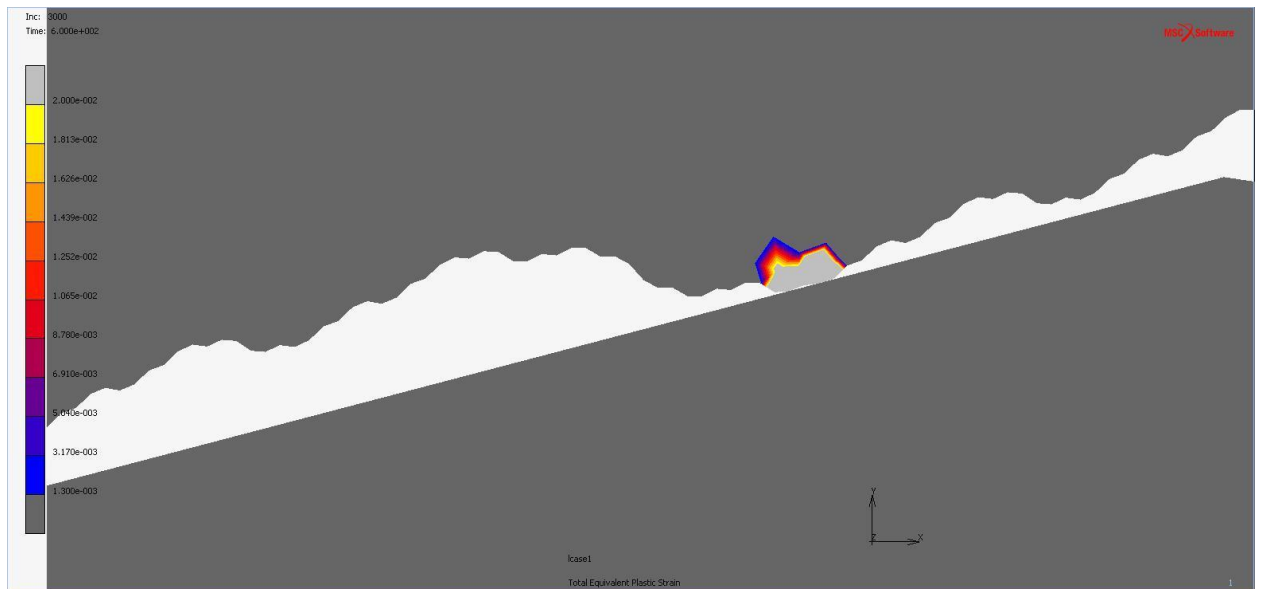
Σχήμα Β2.29: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3^{ης} ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $Pv/fy = 0.0375$, $t=60$ sec



Σχήμα B2.30: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 3ης ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$, $t=600$ sec



Σχήμα B2.31: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6ης ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_v/f_y = 0.0375$, $t=60$ sec



Σχήμα Β2.32: Απεικόνιση πλαστικών παραμορφώσεων της 6ης ανάλυσης της διεπιφάνειας για φορτίο $P_n/f_y = 0.0375$, $t=600$ sec