

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ  
ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΧΑΛΥΒΑ – SFRM ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ**

**ΑΣΤΕΡΙΟΣ ΒΑΛΟΓΙΑΝΝΗΣ**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των  
απαιτήσεων για την απόκτηση του  
Διπλώματος Πολιτικού Μηχανικού  
2018

© 2018 Αστέριος Βαλογιάννης

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

## **Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων) Δρ. Ευριπίδης Μυστακίδης  
Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος Εξεταστής Δρ. Θεοφάνης Γραμμένος  
Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος Εξεταστής Δρ. Απόστολος Κουκουσέλης  
Διδάσκων, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

## Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα ευχαριστώ ιδιαίτερος τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Μυστακίδη Ευριπίδη, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Πολύτιμη ήταν, επίσης, η βοήθεια της υποψήφιας διδάκτορος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Π.Θ., κας Ζωγραφοπούλου Καλλιόπης σε όλες τις φάσεις εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής για τις υποδείξεις τους. Τέλος, ευχαριστώ πολύ την οικογένεια και τους φίλους μου για τη στήριξή τους.

Βαλογιάννης Αστέριος

# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΧΑΛΥΒΑ-SFRM ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Βαλογιάννης Αστέριος

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, 2018

Επιβλέπων Καθηγητής: Μυστακίδης Ευριπίδης, Καθηγητής

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας μεταξύ τσιμεντοειδούς πυράντοχου υλικού και μεταλλικού δομικού μέλους, μέσω μιας σειράς αριθμητικών αναλύσεων. Η χρήση του χάλυβα σε δομικά έργα πέραν των πολλαπλών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει, έχει και ορισμένα μειονεκτήματα, όπως είναι η συμπεριφορά του σε συνθήκες πυρκαγιάς. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται μέτρα πυροπροστασίας της κατασκευής. Η πυροπροστασία χωρίζεται σε ενεργητική και παθητική. Η ενεργητική πυροπροστασία στοχεύει στην άμεση κατάσβεση της φωτιάς ενώ η παθητική στην ελεγχόμενη διάδοσή της εντός του δομήματος. Όμως, σε περιπτώσεις σεισμικής διέγερσης, η ενεργητική πυροπροστασία μπορεί να υποστεί βλάβες. Έτσι, σε περιπτώσεις σεισμού ή κρούσεων η χρήση μέτρων παθητικής πυροπροστασίας αποτελεί ίσως το μόνο μέσο για την προστασία της κατασκευής έναντι πυρκαγιάς. Ωστόσο, ακόμη και τα μέσα παθητικής πυροπροστασίας δύναται να υποστούν βλάβες κατά τη διάρκεια σεισμού ή κρούσης, καθώς μπορεί αυτά να αποκολληθούν από το δομικό μέλος. Έτσι, κρίνεται απαραίτητο να διερευνηθεί η συμπεριφορά που αναπτύσσει η διεπιφάνεια μεταξύ πυράντοχου υλικού και μεταλλικού δομικού μέλους, προκειμένου να γίνει η πρόληψη έναντι των βλαβών που προαναφέρθηκαν. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, μελετώνται τα τσιμεντοειδή εκτοξευόμενα πυράντοχα υλικά (SFRMs) σε μια από τις σημαντικότερες καταπονήσεις, όπως είναι η διάτμηση καθώς συμφέρουν οικονομικά σε σχέση με τα άλλα μέσα πυροπροστασίας. Για την αριθμητική προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων και μορφώθηκε τρισδιάστατο προσομοίωμα που αποτελείται από μεταλλικό πλακίδιο που έχει μονωθεί θερμικά. Χρησιμοποιήθηκε επίσης, η συνθήκη προσκολλημένης επαφής για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας και συγκεκριμένα, εξετάστηκαν 3 διαφορετικές μεθοδολογίες. Ιδιαίτερα, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής μεθοδολογίες: το κριτήριο τάσεων Yamada-Sun, η συμπεριφορά της διεπιφάνειας βάσει της παραμόρφωσης του πυράντοχου υλικού και οι νόμοι συμπεριφοράς ορθής και διατμητικής διεπιφανειακής τάσης. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων για τις τρεις μεθόδους, αποδεικνύεται ότι με τη χρήση της τρίτης μεθοδολογίας προσομοιώνεται σε ικανοποιητικό βαθμό η συμπεριφορά της διεπιφάνειας σε συνθήκες καθαρής διάτμησης.

## Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1 .....	7
1.1. Εισαγωγή .....	7
1.2. Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας .....	9
Κεφάλαιο 2 .....	11
2.1. Ο χάλυβας ως δομικό υλικό .....	11
2.2. Συμπεριφορά του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες.....	12
2.2.1. Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα.....	12
2.2.2. Θερμικές ιδιότητες χάλυβα .....	15
Κεφάλαιο 3 .....	18
3.1. Παθητική πυροπροστασία μεταλλικών δομικών μελών .....	18
3.2. Μέτρα παθητικής πυροπροστασίας .....	18
3.2.1. Πυράντοχες πλάκες .....	19
3.2.2. Πυράντοχα χρώματα.....	20
Κεφάλαιο 4 .....	21
4.1. Εκτοξευόμενα πυράντοχα υλικά .....	21
4.2. Τσιμεντοειδή εκτοξευόμενα πυράντοχα υλικά.....	21
4.2.1. Σύσταση.....	21
4.2.2. Ιδιότητες.....	23
4.2.2.1. Πυκνότητα .....	23
4.2.2.2. Πάχος.....	24
4.2.2.3. Πρότυπο E605.....	24
4.2.2.4. Τρόπος παρασκευής και τοποθέτησης εκτοξευόμενων πυράντοχων υλικών.....	24
4.2.2.5. National Fireproofing Contractors Association.....	27
4.2.2.6. Πλεονεκτήματα.....	30
4.2.2.7. Μειονεκτήματα .....	30
4.2.2.7.1. Πρότυπο E736 .....	30
4.2.2.7.2. Τρόποι αστοχίας .....	31
Κεφάλαιο 5 .....	39
5.1. Παρουσίαση προβλήματος διπλωματικής εργασίας .....	39
5.2. Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων .....	40
5.3. Αριθμητική προσομοίωση του τρισδιάστατου προσομοιώματος.....	40
5.3.1. Υλικά προσομοιώματος.....	40



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1. Εισαγωγή

Η ραγδαία βιομηχανική ανάπτυξη είχε ως αποτέλεσμα την ανάγκη ανέγερσης κτιρίων, εργοστασίων και χώρους αποθήκευσης για τις ανάγκες του κοινωνικού συνόλου. Παράλληλα, όμως, υπήρχε και η απαίτηση της κατασκευαστικής διαδικασίας σε σύντομο χρονικό διάστημα, γεγονός που οδήγησε στη δημιουργία νέων οικοδομικών υλικών που να ανταποκρίνονται στις ανάγκες της εποχής. Ένα από αυτά τα υλικά είναι ο χάλυβας.

Η χρήση του χάλυβα σε δομικά έργα και έργα υποδομής, έδειξε ότι ο χάλυβας ως δομικό υλικό παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα και για το λόγο αυτό οι μεταλλικές κατασκευές χρησιμοποιούνται κατά κόρον. Υπάρχουν, ωστόσο κι ορισμένα μειονεκτήματα που παρουσιάζει ο χάλυβας. Ένα από αυτά και ίσως από τα πιο σημαντικά, είναι η συμπεριφορά που εμφανίζει όταν βρεθεί σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, π.χ. σε συνθήκες πυρκαγιάς. Για το λόγο αυτό, απαιτούνται μέτρα πυροπροστασίας της κατασκευής.

Η πυροπροστασία αφορά στο σύνολο των μέτρων που λαμβάνονται προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι δυσμενείς συνέπειες της φωτιάς (<https://bit.ly/2IFzDez>). Χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες, την ενεργητική και την παθητική πυροπροστασία. Η ενεργητική πυροπροστασία ενός κτιρίου επιτυγχάνεται, συνήθως, με τη χρήση ειδικού μηχανολογικού εξοπλισμού όπως συστήματα καταιονητήρων (Εικόνα 1) και μόνιμο υδροδοτικό πυροσβεστικό δίκτυο (Εικόνα 2) και έχει ως σκοπό την άμεση κατάσβεση της φωτιάς όταν αυτή εκδηλωθεί. Αντίθετα, η παθητική πυροπροστασία εισάγεται μέσω της δομικής πυροπροστασίας του κτιρίου και στοχεύει στην ελεγχόμενη διάδοση της φωτιάς αλλά και στην εκκένωση του κτιρίου σε εύλογο χρονικό διάστημα από τους ανθρώπους που βρίσκονται εντός αυτού.



Εικόνα 1: Σύστημα καταιονητήρα (πηγή: <https://www.abcofire.com/fire-protection/fire-sprinkler-services/>)





Εικόνα 2: Υδροδοτικό πυροσβεστικό δίκτυο (πηγή: <https://bit.ly/2PenQGR>)

Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις, στις οποίες η ενεργητική πυροπροστασία μπορεί να υποστεί κάποια βλάβη. Μια τέτοια περίπτωση αποτελούν οι βλάβες που υπόκειται η ενεργητική πυροπροστασία σε κτίρια σεισμογενών περιοχών κατά τη διάρκεια σεισμικής διέγερσης. Δηλαδή ο σεισμός δύναται να προκαλέσει αστοχία στο υδροδοτικό σύστημα πυρόσβεσης με αποτέλεσμα αυτό να παύει να είναι αποτελεσματικό. Συνεπώς, σε περιπτώσεις βλάβης της ενεργητικής πυροπροστασίας η χρήση μέτρων παθητικής πυροπροστασίας, αποτελεί ίσως το μόνο μέσο για την προστασία της κατασκευής έναντι πυρκαγιάς (Nicole Leo Braxtan & Stephen P. Pessiki, 2011).

Ωστόσο, από γεγονότα των τελευταίων ετών (Δίδυμοι Πύργοι 2001), αποδείχθηκε ότι λόγω ενός σεισμού ή μιας κρούσης, ενδέχεται να προκληθεί βλάβη στην παθητική πυροπροστασία της κατασκευής. Κατ' αρχάς, από ένα συμβάν σεισμού ή κρούσης σε μία κατασκευή, δημιουργούνται βλάβες σε αυτή, με αποτέλεσμα την πρόκληση πυρκαγιάς σε πολλές περιπτώσεις. Μία από τις βλάβες αυτές, αποτελεί αυτή στα μέσα παθητικής πυροπροστασίας της. Συνεπώς, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό, στη μελέτη και την τοποθέτηση των μέσων παθητικής πυροπροστασίας προκειμένου να αποφευχθούν οι βλάβες που προαναφέρθηκαν.

Ως παράδειγμα αξίζει να αναφερθεί το περιστατικό του πρωινού της 11<sup>ης</sup> Σεπτεμβρίου 2001 (<https://bit.ly/2Od0d4P>), όπου το Παγκόσμιο Κέντρο Εμπορίου δέχθηκε επιθέσεις από αεροσκάφη (Εικόνα 3) και λόγω της κρούσης των αεροσκαφών σε δύο ουρανοξύστες δημιουργήθηκαν εστίες φωτιάς. Εξαιτίας των ασκούμενων ισχυρών δυνάμεων στους ουρανοξύστες, το υλικό παθητικής πυροπροστασίας που προστάτευε τα μεταλλικά δομικά συστήματά τους, υπέστη βλάβη και μεγάλο τμήμα του αποκολλήθηκε από τα δομικά μέλη. Η αποκόλληση των πυράντοχων υλικών σε συνδυασμό με κάποιους άλλους παράγοντες συντέλεσαν τελικά στην πτώση των κτιρίων.

Η μελέτη της συμπεριφοράς που αναπτύσσει η διεπιφάνεια μεταξύ του πυράντοχου υλικού και του μεταλλικού δομικού μέλους, προκαλεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε πολλούς ερευνητές, προκειμένου να γίνει η πρόληψη έναντι των βλαβών που προαναφέρθηκαν. Όπως διαπιστώνεται και από βιβλιογραφικές πηγές, έχουν διεξαχθεί πολλά πειράματα προκειμένου να εντοπιστεί τόσο η συμπεριφορά της διεπιφάνειας όσο και οι μηχανισμοί αστοχίας του πυράντοχου υλικού. Αναφέρεται ως παράδειγμα ένα πείραμα που υλοποιήθηκε από τους Su-wen Chen, Jin Chu και Guo-qiang Li στο Tongji University, οι οποίοι προσπάθησαν να μελετήσουν,

τις μηχανικές ιδιότητες του πυράντοχου υλικού που χρησιμοποιήσαν αλλά και τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας μεταξύ αυτού και του μεταλλικού μέλους που επέλεξαν.



Εικόνα 3: Εκδήλωση πυρκαγιάς στους Δίδυμους Πύργους (πηγή: <https://bit.ly/2Od0d4P>)

Κρίνεται, συνεπώς, απαραίτητο να πραγματοποιηθεί η παρούσα διπλωματική εργασία, προκειμένου να διερευνηθεί η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας μεταξύ τσιμεντοειδούς πυράντοχου υλικού και μεταλλικού δομικού μέλους. Για το σκοπό αυτό, έγινε η επιλογή της αριθμητικής προσομοίωσης του φαινομένου αυτού, όταν το πυράντοχο υλικό υπόκειται σε μία από τις βασικότερες καταπονήσεις, όπως είναι η διάτμηση. Υλοποιήθηκε πλήθος αναλύσεων και συγκρίθηκαν διαφορετικές μεθοδολογίες με τη χρήση προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων, τα αποτελέσματα των οποίων θα συζητηθούν εκτενέστερα παρακάτω.

## 1.2. Οργάνωση της διπλωματικής εργασίας

Στο Κεφάλαιο 1, παρατίθενται γενικά στοιχεία για την ενεργητική και την παθητική πυροπροστασία και παρουσιάζεται η οργάνωση της διπλωματικής εργασίας σε Κεφάλαια καθώς επίσης και το περιεχόμενο των Κεφαλαίων αυτών. Ακόμη, επισημαίνεται η αναγκαιότητα διερεύνησης του προβλήματος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2, αναλύονται οι ιδιότητες του χάλυβα τόσο σε κανονικές όσο και σε υψηλές συνθήκες θερμοκρασίας.

Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι κατηγορίες των μέτρων παθητικής πυροπροστασίας, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχει η κάθε

μία από αυτές.

Στο Κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται οι ιδιότητες, η σύσταση, οι τρόποι παρασκευής και τοποθέτησης, τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα καθώς και τα πρότυπα που ισχύουν στα εκτοξευόμενα πυράντοχα υλικά. Επίσης, παρατίθενται οι τρόποι αστοχίας των θερμικά μονωμένων μεταλλικών δομικών μελών μέσα από πειράματα που διεξήχθησαν στο παρελθόν.

Στο Κεφάλαιο 5, ορίζονται όλα τα στοιχεία και οι συνθήκες που εισάγονται στις αριθμητικές αναλύσεις. Δηλαδή, ορίζεται το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται, τα υλικά του προσομοιώματος, η γεωμετρία του, οι συνθήκες επαφής που ενσωματώνονται στο προσομοίωμα. Επιπλέον, αναλύονται οι τρεις διαφορετικές μεθοδολογίες που εφαρμόζονται στο τρισδιάστατο προσομοίωμα για την περιγραφή της συμπεριφοράς της διεπιφάνειάς του.

Στο Κεφάλαιο 6, παρατίθενται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τις τρεις μεθοδολογίες που εξετάστηκαν. Ακόμη, παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα μεταξύ των διαφορετικών μεθόδων και εξάγονται συμπεράσματα για την καταλληλότητα της κάθε μεθόδου στην προσομοίωση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας μεταξύ πυράντοχου υλικού και μεταλλικού πλακιδίου.

Στο Κεφάλαιο 7, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τις τρεις μεθοδολογίες προσομοίωσης της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

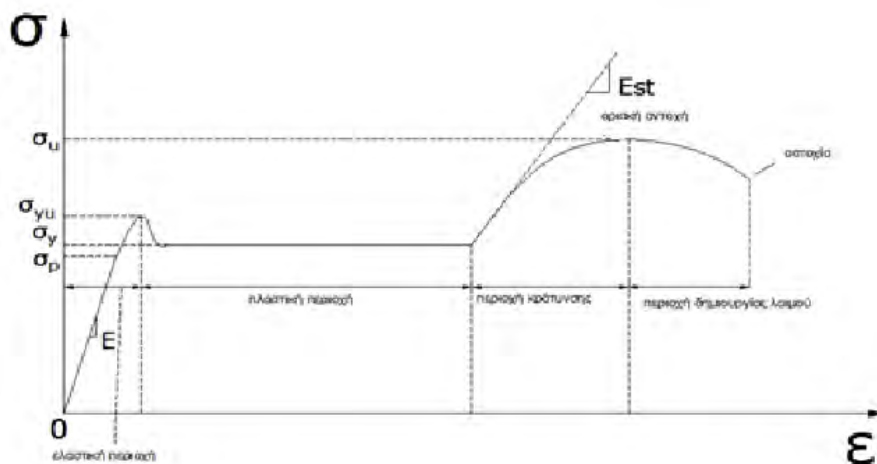
### 2.1 Ο χάλυβας ως δομικό υλικό

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, κρίθηκε αναγκαία η επιτάχυνση των κατασκευαστικών εργασιών λόγω των αυξημένων απαιτήσεων που επέβαλλε η βιομηχανική ανάπτυξη. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, θεωρήθηκε αρκετά καλή λύση η χρήση του χάλυβα ως δομικό υλικό. Ο χάλυβας παρουσιάζει πληθώρα πλεονεκτημάτων και για το λόγο αυτό παρατηρείται ότι τα τελευταία χρόνια αποτελεί τον φέροντα οργανισμό πολλών δομικών έργων. Μερικά από τα πλεονεκτήματα (Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., κ.ά., 2005) που αξίζει να αναφερθούν, είναι τα παρακάτω:

- Υψηλό επίπεδο ολκιμότητας. Το πλεονέκτημα αυτό παίζει ιδιαίτερο σημαντικό ρόλο στη σεισμική απόκριση της κατασκευής, ιδιαίτερα σε σειсмоγενείς περιοχές. Κατά τη σεισμική διέγερση του δομήματος, η μεταλλική κατασκευή έχει την ικανότητα να παραμορφώνεται σε μεγάλο βαθμό χωρίς να γίνεται ασταθής.
- Μεγάλη ταχύτητα στην κατασκευαστική διαδικασία. Τα μεταλλικά δομικά μέλη μπορούν να κατασκευάζονται στο εργοστάσιο κατά τη διάρκεια των γεωτεχνικών εργασιών (π.χ. εκσκαφές, θεμελιώσεις, τοίχοι αντιστήριξης) και όταν κριθούν έτοιμα να μεταφερθούν στο εργοτάξιο όπου τόσο η συναρμολόγηση των μελών όσο και η ανέγερση εξελίσσονται με ιδιαίτερα ταχείς ρυθμούς σε σχέση με κατασκευές που αποτελούνται από άλλα δομικά υλικά.
- Ο σεισμός προκαλεί αδρανειακές δυνάμεις σε μια κατασκευή. Συνεπώς, όσο πιο ελαφριά είναι μια κατασκευή, τόσο πιο μικρές σεισμικές δυνάμεις θα δεχθεί. Επειδή οι κατασκευές που έχουν ως φέρον οργανισμό τον χάλυβα θεωρούνται ελαφριές, είναι αρκετά ευνοϊκές όσον αφορά τη σεισμική τους απόκριση.
- Η ευκολία στην επισκευή του. Εάν κατά τη διάρκεια ζωής του έργου παρουσιαστεί κάποια βλάβη στη μεταλλική κατασκευή (π.χ. διάβρωση του χάλυβα), είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί αντικατάσταση με παρόμοια διατομή.

Όμως, για να είναι αποτελεσματικά, όλα τα παραπάνω πλεονεκτήματα, πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή κατά τη μελέτη του έργου αλλά και κατά τη διάρκεια της μελέτης ανέγερσης.

Η συμπεριφορά του χάλυβα ως υλικό καθορίζεται από τον καταστατικό του νόμο, που αποτελεί το διάγραμμα της τάσης σε σχέση με την ανηγμένη του παραμόρφωση όταν καταπονείται σε εφελκυσμό. Το μέτρο ελαστικότητας του δομικού χάλυβα ισούται με  $E= 210 \text{ GPa}$ , ο λόγος Poisson( $\nu$ ) είναι ίσος με 0,3 και το ειδικό βάρος ( $\gamma$ ) ισούται με  $78,5 \text{ kN/m}^3$ . Στην εικόνα 4, απεικονίζεται το διάγραμμα τάσης – ανηγμένης παραμόρφωσης του δομικού χάλυβα στους  $20^\circ\text{C}$ , δηλαδή σε συνήθεις θερμοκρασίες.



Εικόνα 4: Καμπύλη τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων δομικού χάλυβα (πηγή: σημειώσεις μαθήματος μεταλλικών κατασκευών, τμήμα πολιτικών μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας)

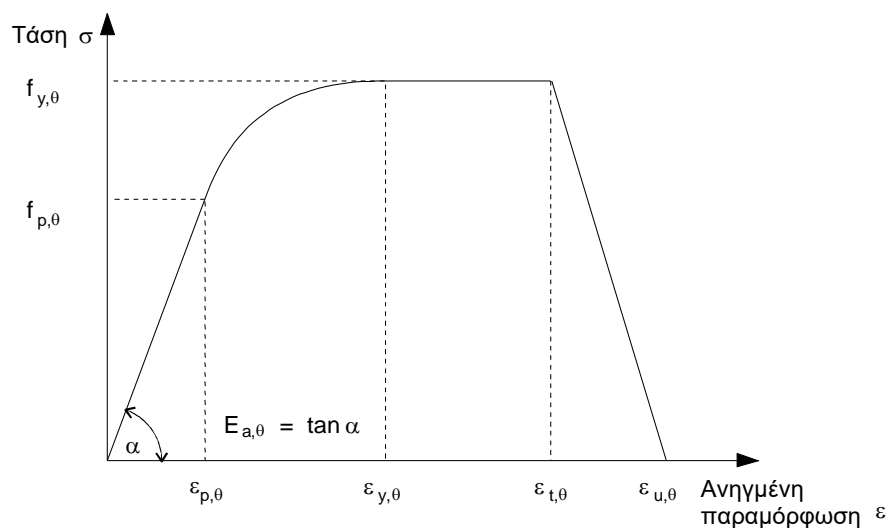
Στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 4) παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά σημεία της καμπύλης τάσης ( $\sigma$ ) – ανηγμένης παραμόρφωσης ( $\epsilon$ ) τα οποία επεξηγούνται στη συνέχεια. Πρόκειται για τα εξής σημεία τάσης:

- $\sigma_D$ : όριο αναλογίας. Η σχέση  $\sigma$ - $\epsilon$  είναι γραμμική με κλίση ίση με το μέτρο ελαστικότητας μέχρι το όριο αναλογίας.
- $\sigma_y$ : τάση διαρροής. Όταν η τάση που ασκείται σε ένα στερεό φτάσει στην τάση διαρροής, η παραμόρφωση παύει να είναι ελαστική και γίνεται πλέον πλαστική.
- $\sigma_u$ : τάση αστοχίας.

## 2.2. Συμπεριφορά του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες

### 2.2.1. Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα

Στην προηγούμενη παράγραφο έγινε αναφορά στις ιδιότητες που παρουσιάζει ο χάλυβας ως δομικό υλικό στις κατασκευές. Αυτές, όμως, οι ιδιότητες ισχύουν όταν η μεταλλική κατασκευή βρίσκεται σε περιβάλλον συνήθων θερμοκρασιών ( $20^\circ\text{C}$ ). Όταν, όμως, μια μεταλλική κατασκευή βρεθεί σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών, τότε ο καταστατικός νόμος που περιγράφει τη συμπεριφορά του χάλυβα αλλάζει και απεικονίζεται στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 5).



**Εικόνα 5:** Σχέση τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων για συνήθεις χάλυβες σε υψηλές θερμοκρασίες (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2)

Από την εικόνα 5 παρατηρείται ότι η τάση διαρροής του χάλυβα είναι η μέγιστη που μπορεί να επιτευχθεί και η αντίστοιχη ανηγμένη παραμόρφωσή του στο σημείο αυτό είναι της τάξης του  $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$ . Από το σημείο διαρροής και έπειτα ξεκινά η πλαστική περιοχή του υλικού όπου τερματίζεται σε παραμόρφωση  $\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$  και στη συνέχεια η τάση ακολουθεί πτωτική πορεία μηδενίζοντας την τιμή της σε τιμή παραμόρφωσης ίση με  $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$ . Τέλος, ο χάλυβας δεν εμφανίζει περιοχή κράτυνσης.

Οι μηχανικές ιδιότητές του χάλυβα, όπως το όριο αναλογίας, η ενεργός τάση διαρροής και το μέτρο ελαστικότητας μεταβάλλονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Η μεταβολή αυτή γίνεται διακριτή από τον πίνακα 3.1 του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-2 (Εικόνα 6).

**Πίνακας 3.1: Μειωτικοί συντελεστές για τις ιδιότητες του χάλυβα που συνδέονται με το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων, σε υψηλές θερμοκρασίες**

Θερμοκρασία χάλυβα $\theta_k$	Μειωτικοί συντελεστές σε θερμοκρασία $\theta_k$ ως προς την τιμή της $f_y$ ή του $E_s$ σε 20°C		
	Μειωτικός συντελεστής (ως προς την $f_y$ ) για την ενεργό τάση διαρροής $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Μειωτικός συντελεστής (ως προς την $f_y$ ) για το όριο αναλογίας $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Μειωτικός συντελεστής (ως προς το $E_s$ ) για την κλίση της γραμμικής ελαστικής περιοχής $k_{E,\theta} = E_{s,\theta}/E_s$
20°C	1,000	1,000	1,000
100°C	1,000	1,000	1,000
200°C	1,000	0,807	0,900
300°C	1,000	0,613	0,800
400°C	1,000	0,420	0,700
500°C	0,780	0,360	0,600
600°C	0,470	0,180	0,310
700°C	0,230	0,075	0,130
800°C	0,110	0,050	0,090
900°C	0,060	0,0375	0,0675
1000°C	0,040	0,0250	0,0450
1100°C	0,020	0,0125	0,0225
1200°C	0,000	0,0000	0,0000

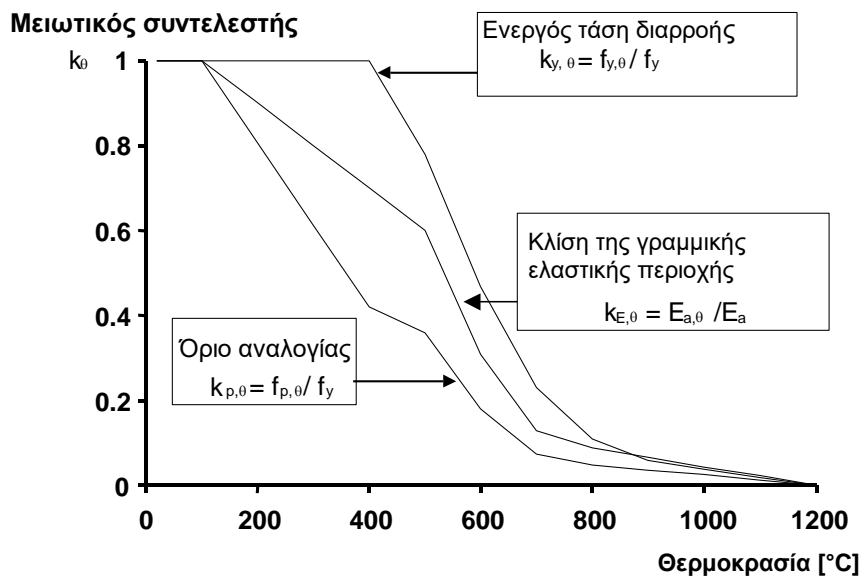
**ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Για ενδιάμεσες τιμές της θερμοκρασίας του χάλυβα, μπορεί να χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή.

Εικόνα 6:  
Πίνακας 3.1, Ευροκώδικας 3, Μέρος 1-2

Αξιοσημείωτο σημείο του πίνακα 3.1 είναι τα χαρακτηριστικά που παρουσιάζει ο χάλυβας σε θερμοκρασίες μεταξύ 500-600°C, κατά τις οποίες τόσο η τάση διαρροής όσο και το μέτρο ελαστικότητας μειώνονται περίπου στο μισό από τις τιμές τους στους 20°C. Περαιτέρω αύξηση της θερμοκρασίας, συντελεί σε επιπλέον μείωση της αντοχής του χάλυβα, με αποτέλεσμα αυτή να μηδενίζεται στους 1200°C.

Με τη χρήση των τιμών του παραπάνω πίνακα (Εικόνα 6), προκύπτει το επόμενο διάγραμμα (Εικόνα 7) στο οποίο παρατηρείται σημαντική μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία.





Εικόνα 7: Μείωση ιδιοτήτων χάλυβα συναρτήσει της αύξησης θερμοκρασίας

Αντίθετα, υπάρχουν και μεγέθη που δεν μεταβάλλονται με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως ο λόγος Poisson και το ειδικό βάρος του χάλυβα.

### 2.2.2. Θερμικές ιδιότητες χάλυβα

Τα περισσότερα υλικά, έχουν την τάση να μεταβάλλουν, εκτός από τις μηχανικές ιδιότητές τους και ορισμένες από τις θερμικές τους ιδιότητες όταν βρίσκονται σε περιβάλλον υψηλών θερμοκρασιών. Σε αυτή την κατηγορία υλικών ανήκει και ο δομικός χάλυβας. Συγκεκριμένα, στα μεταλλικά δομικά μέλη παρατηρείται μεταβολή στη θερμική διαστολή, την ειδική θερμότητα και τη θερμική αγωγιμότητα του υλικού.

#### ❖ Θερμική διαστολή

Η Θερμική διαστολή είναι η ιδιότητα του χάλυβα να αυξάνονται οι διαστάσεις του καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία του. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, «Σχεδιασμός Δομικών Στοιχείων Έναντι Πυρκαγιάς», Μέρος 1-2, η θερμική διαστολή του χάλυβα ( $\Delta l/l$ ) προσδιορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις:

- $20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\Delta l/l = 1,2 \cdot 10^{-5} \theta_a + 0,4 \cdot 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \cdot 10^{-4}$
- $750\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 860\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\Delta l/l = 1,1 \cdot 10^{-2}$
- $860\text{ }^{\circ}\text{C} < \theta_a \leq 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  $\Delta l/l = 2 \cdot 10^{-5} \theta_a - 6,2 \cdot 10^{-3}$

Όπου:

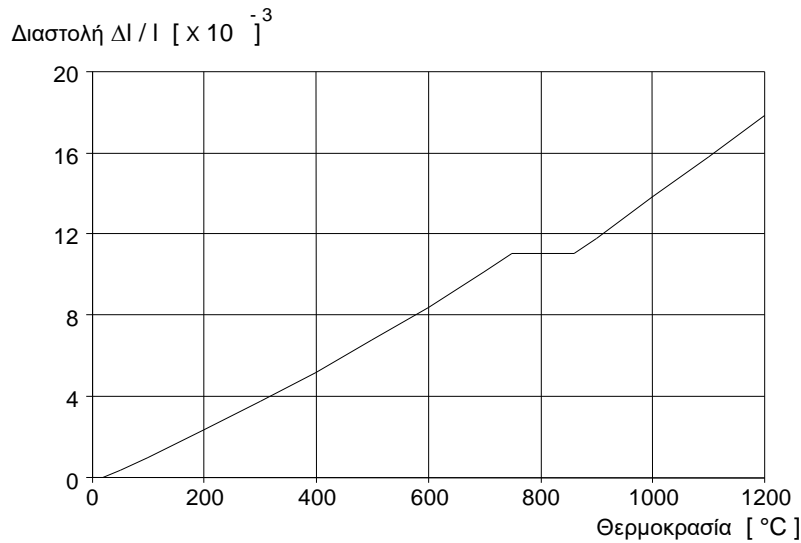
$l$ : είναι το μήκος του χάλυβα σε συνήθεις θερμοκρασίες ( $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta l$ : η διαστολή (αύξηση των διαστάσεων του χάλυβα) λόγω της θερμοκρασίας

$\theta_a$ : η θερμοκρασία του χάλυβα ( $^{\circ}\text{C}$ )

Η μεταβολή της θερμικής διαστολής του χάλυβα σε σχέση με την θερμοκρασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 8. Σε θερμοκρασία  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  η διαστολή του χάλυβα αντιστοιχεί σε παραμόρφωση της τάξης του  $18 \cdot 10^{-3}$ .





Εικόνα 8: Σχέση θερμικής διαστολής χάλυβα - αύξησης θερμοκρασίας

❖ Ειδική θερμότητα

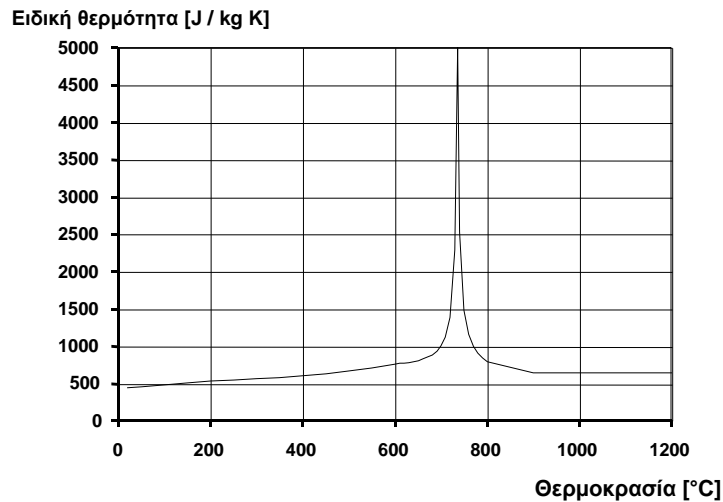
Ειδική θερμότητα ορίζεται ως το ποσό της θερμότητας που πρέπει να απορροφήσει ο χάλυβας προκειμένου να μεταβληθεί η θερμοκρασία του κατά 1 βαθμό Κέλβιν. Η ειδική θερμότητα του χάλυβα  $c_a$  προσδιορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις του Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-2:

- $20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600\text{ }^\circ\text{C}$ :  $c_a = 425 + 7,73 \cdot 10^{-1} \theta_a - 1,69 \cdot 10^{-3} \theta_a^2 - 2,22 \cdot 10^{-6} \theta_a^3$  J/kgK
- $600\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735\text{ }^\circ\text{C}$ :  $c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a}$  J/kgK
- $900\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ }^\circ\text{C}$ :  $c_a = 650$  J/kgK

Όπου:

$\theta_a$ : η θερμοκρασία του χάλυβα ( $^\circ\text{C}$ )

Η μεταβολή της ειδικής θερμότητας του χάλυβα σε συνάρτηση με την αύξηση της θερμοκρασίας, απεικονίζεται στην Εικόνα 9.



Εικόνα 9:

Σχέση ειδικής θερμότητας χάλυβα - θερμοκρασίας (πηγή: Σχήμα 3.4, Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2)

Στην Εικόνα 9, παρατηρείται μία απότομη αύξηση της ειδικής θερμότητας του χάλυβα σε θερμοκρασία 750 °C.

❖ Θερμική αγωγιμότητα

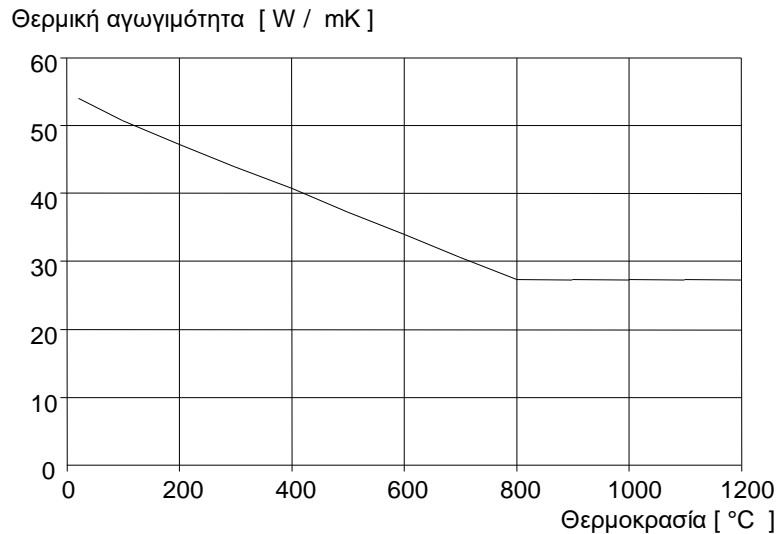
Θερμική αγωγιμότητα ονομάζεται η χαρακτηριστική ιδιότητα της ύλης του χάλυβα που προσδιορίζει το πόσο εύκολα ή δύσκολα διαδίδεται η θερμότητα στο εσωτερικό του υλικού. Ανάλογα με το πόσο εύκολα πραγματοποιείται η διάδοση της θερμότητας στο εσωτερικό του υλικού, τα υλικά διακρίνονται σε καλούς και κακούς αγωγούς θερμότητας. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα μέταλλα, άρα και ο δομικός χάλυβας. Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-2, η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα  $\lambda_a$ , προσδιορίζεται από τις επόμενες σχέσεις:

- $20\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800\text{ }^\circ\text{C}$ :  $\lambda_a = 54 - 3,33 * 10^{-2} \theta_a\text{ W/mK}$
- $800\text{ }^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200\text{ }^\circ\text{C}$ :  $\lambda_a = 27,3\text{ W/mK}$

Όπου:

$\theta_a$ : η θερμοκρασία του χάλυβα (°C)

Η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας του χάλυβα σε συνάρτηση με την αύξηση της θερμοκρασίας απεικονίζεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10: Σχέση θερμικής αγωγιμότητας χάλυβα - αύξηση θερμοκρασίας (πηγή: Σχήμα 3.4, Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2)

Από την Εικόνα 10 παρατηρείται ότι η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα μειώνεται γραμμικά μέχρι τους 800 °C και μετά παραμένει σταθερή.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1. Παθητική πυροπροστασία μεταλλικών δομικών μελών

Σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 2), όπου παρουσιάστηκαν τόσο οι μηχανικές όσο και οι θερμικές ιδιότητες του δομικού χάλυβα, διαπιστώνεται ότι ο χάλυβας παρουσιάζει αρκετά προβλήματα όταν εκτεθεί σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, όπως σε μια πυρκαγιά. Επομένως, πρέπει να ληφθούν μέτρα αντιμετώπισης ώστε πρώτον να υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος εκκένωσης του κτιρίου, προκειμένου οι άνθρωποι που βρίσκονται εντός αυτού να έχουν την δυνατότητα άμεσης όδευσης διαφυγής και δεύτερον το δομικό σύστημα να μην υποστεί, κατά το δυνατόν, βλάβες από τα θερμικά φορτία. Τα μέτρα αυτά, αφορούν στη δράση της παθητικής πυροπροστασίας των μεταλλικών δομικών μελών η οποία κρίνεται απαραίτητη ειδικά σε μεταλλικά κτίρια συνάθροισης κοινού, όπως εμπορικά κέντρα, αεροδρόμια κλπ. Ακόμη, μέσω της παθητικής πυροπροστασίας παρεμποδίζεται και η εξάπλωση της φωτιάς τόσο μέσα στο φλεγόμενο κτίριο, όσο και στα γειτονικά κτίρια. Κατά αυτό τον τρόπο είναι δυνατόν να προληφθούν οι αρνητικές συνέπειες των θερμικών φορτίων σε μεταλλικό δομικό μέλος, όπως είναι η απώλεια ευστάθειας του, όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει συγκεκριμένα όρια.

### 3.2. Μέτρα παθητικής πυροπροστασίας

Προκειμένου, να μην τεθεί σε κίνδυνο ένα μεταλλικό δομικό μέλος κατά την έκθεση του σε φωτιά, εφαρμόζονται διάφορα μέτρα παθητικής πυροπροστασίας σε αυτό. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες μέτρων παθητικής πυροπροστασίας. Στις κατηγορίες αυτές ανήκουν τα εξής:

- 1) Πυράντοχες πλάκες
- 2) Πυράντοχα χρώματα
- 3) Εκτοξευόμενα υλικά

Η επιλογή του κατάλληλου μέτρου παθητικής πυροπροστασίας εξαρτάται από:

- τη διατομή του χάλυβα
- το πυροθερμικό φορτίο του καιόμενου μεταλλικού κτιρίου  
Πυροθερμικό φορτίο (σε MJ) ορίζεται ως η εκλυόμενη, από το υλικό που καίγεται, ποσότητα θερμότητας εντός του χώρου που εκδηλώθηκε η πυρκαγιά. (Μιχάλτσος Γεώργιος, 2009)
- τις κοινωνικές συνήθειες
- το κόστος

### 3.2.1. Πυράντοχες πλάκες

Οι πυράντοχες πλάκες είναι συνήθως μονές ή διπλές γυψοσανίδες, πλάκες από οργανικά υλικά ή πλάκες από περλίτη και βερμικουλίτη. Οι πλάκες αυτές καλύπτουν το μεταλλικό δομικό μέλος και το προστατεύουν έναντι των θερμικών φορτίων. Έχουν πυραντίσταση 60-120 min. Ένα από τα μειονεκτήματά τους είναι ότι εφαρμοζόνται δύσκολα γύρω από σύνθετες λεπτομέρειες, όπως είναι οι συνδέσεις μεταξύ μεταλλικών δομικών μελών. Στην Εικόνα 11, απεικονίζεται μία πυράντοχη γυψοσανίδα τύπου F με αυξημένη αντίσταση σε υψηλές θερμοκρασίες. Το κύριο συστατικό της είναι ο γύψος ενισχυμένος με ίνες από γυαλί. Επίσης, στην Εικόνα 12 απεικονίζεται μία χαλύβδινη δοκός πάνω στην οποία έχει εφαρμοστεί πυράντοχη πλάκα.



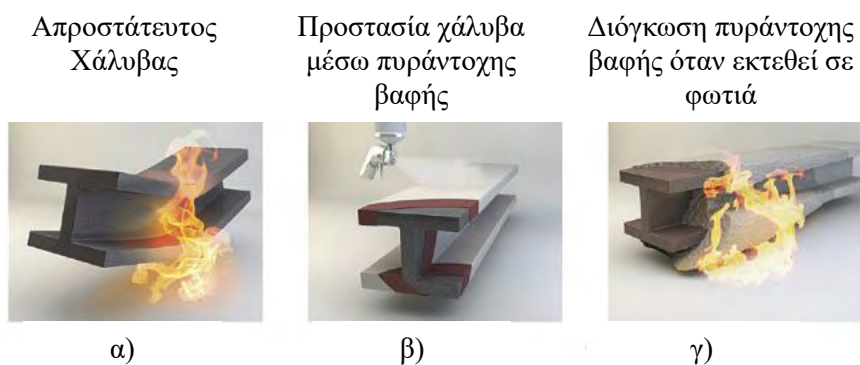
Εικόνα 11: Πυράντοχη γυψοσανίδα (πηγή: <https://bit.ly/2QnxGak>)



Εικόνα 12: Πυράντοχη πλάκα εφαρμόζομενη σε μεταλλικό δομικό μέλος (πηγή: <https://bit.ly/2xiMIGc>)

### 3.2.2. Πυράντοχα χρώματα

Σε πολλές περιπτώσεις πυροπροστασίας, οι μηχανικοί πέρα από τη σωστή τοποθέτηση, σχεδιασμό και λειτουργία των μέτρων παθητικής πυροπροστασίας, καλούνται να μην αλλοιώσουν την αρχιτεκτονική και την αισθητική της κατασκευής. Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω, μπορεί να γίνει βαφή των μελών με πυράντοχα χρώματα τα οποία προσφέρουν ένα καλαίσθητο τελείωμα. Τα πυράντοχα χρώματα έχουν την τάση να διογκώνονται μέχρι και 50 φορές σε υψηλές θερμοκρασίες. Μέσω της διόγκωσης σχηματίζεται ένα σπογγώδες στρώμα το οποίο προσφέρει θερμομονωτικές ιδιότητες. Για τις κοινές απαιτήσεις πυροπροστασίας, οι οποίες αφορούν χρονικό διάστημα έως 2 ώρες, προτιμώνται οι διογκωτικές βαφές, λόγω της απλής τους εφαρμογής. Στην Εικόνα 13, απεικονίζεται μία μεταλλική δοκός στην οποία έχει εφαρμοστεί πυράντοχη βαφή.



Εικόνα 13: α) Απροστάτευτος χάλυβας κατά την έκθεσή του σε φωτιά, β) Πυράντοχη βαφή εφαρμόζεται στην επιφάνεια μεταλλικής δοκού, γ) Διόγκωση πυράντοχης βαφής κατά την έκθεση της μεταλλικής δοκού σε φωτιά (πηγή: <https://bit.ly/2Pz2Dr1>)

Για μεγαλύτερης κλίμακας έργα, όμως, η χρήση πυράντοχων χρωμάτων δεν είναι πλέον οικονομική. Σε τέτοιου είδους περιπτώσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί το τρίτο μέτρο παθητικής πυροπροστασίας που είναι τα εκτοξευόμενα υλικά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1. Εκτοξευόμενα πυράντοχα υλικά

Τα εκτοξευόμενα πυράντοχα υλικά ή Sprayed Fire Resistive Materials (SFRMs) αποτελούν ένα από τα βασικά μέτρα παθητικής πυροπροστασίας. Είναι υλικά που αποτελούνται από οργανικά υλικά, περλίτη ή βερμικουλίτη. Υπάρχουν ποικίλοι τύποι SFRMs διαθέσιμοι στο εμπόριο. Συνήθως χωρίζονται στα τσιμεντοειδή υλικά και στα υλικά που περιέχουν ορυκτές ίνες. Τα τσιμεντοειδή SFRMs χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες, τα SFRMs με βάση το γύψο και τα SFRMs με βάση το τσιμέντο Portland. Οι δύο βασικές κατηγορίες εκτοξευόμενων πυράντοχων υλικών χρησιμοποιούνται στις κατασκευές ως εξής: τα τσιμεντοειδή SFRMs ως υγρό μείγμα και τα SFRMs με βάση τις ορυκτές ίνες ως ξηρό μείγμα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται τα εκτοξευόμενα πυράντοχα τσιμεντοειδή υλικά ή Cementitious Sprayed Fire Resistive Materials, διότι έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μονωτικών υλικών. Ωστόσο, παρουσιάζουν και μειονεκτήματα τα οποία θα αναλυθούν εκτενέστερα παρακάτω.

### 4.2. Τσιμεντοειδή εκτοξευόμενα πυράντοχα υλικά

#### 4.2.1. Σύσταση

Τα τσιμεντοειδή εκτοξευόμενα πυράντοχα υλικά, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, χωρίζονται σε δύο υποκατηγορίες. Στα υλικά με βάση το γύψο τα οποία είναι μείγματα από γύψο και βερμικουλίτη και στα υλικά με βάση το τσιμέντο τύπου Portland τα οποία αποτελούνται από τσιμέντο Portland και βερμικουλίτη.

Η γύψος (Εικόνα 14) ανήκει στις κονίες. Κονίες είναι τα υλικά τα οποία όταν αναμειχθούν και κατεργαστούν με ένα ρευστό, συνήθως νερό, μεταβάλλονται σε εύπλαστο πολύ με συγκολλητικές ιδιότητες. (Δομικά Υλικά, Τριανταφύλλου Α.)



Εικόνα 14: Γύψος (πηγή: [http://www.geo.auth.gr/106/6\\_sulfates/gypsum\\_27.jpg](http://www.geo.auth.gr/106/6_sulfates/gypsum_27.jpg))

Το τσιμέντο τύπου Portland (Εικόνα 15) ονομάστηκε έτσι από τον κατασκευαστή τσιμέντου Joseph Aspdin, ο οποίος του έδωσε το συγκεκριμένο όνομα διότι είχε το χρώμα των εδαφών της περιοχής Portland της Αγγλίας. Παράγεται από το άλεσμα κλίνκερ που αποτελεί προϊόν ψησίματος δύο κύριων συστατικών του τσιμέντου, του ασβεστόλιθου και του αργίλου. (Δομικά Υλικά, Τριανταφύλλου Α.)



Εικόνα 15: Τσιμέντο τύπου Portland  
(πηγή: <http://www.vassiliko.com/el/what-we-do/cement>)

Ο Βερμικουλίτης είναι ένα ένυδρο φολιδωτό ορυκτό και υπόκειται σε σημαντική αύξηση όταν θερμαίνεται. Συγκεκριμένα το υλικό αποφλοιώνεται όταν θερμαίνεται και το εξατμιζόμενο νερό που βρίσκεται εγκλωβισμένο εντός του ορυκτού έχει την ιδιότητα να απορροφά τη θερμότητα και με αυτό τον τρόπο να μην επιτρέπει την αύξηση της θερμοκρασίας του μεταλλικού δομικού μέλους πάνω στο οποίο εφαρμόζεται. Μερικά βασικά χαρακτηριστικά του είναι ότι παρουσιάζει μικρή θερμοαγωγιμότητα, γεγονός που το καθιστά πυράντοχο προϊόν παντός τύπου και έχει



χαμηλό βάρος. ( [www.firesecurity.gr/xalybas.html](http://www.firesecurity.gr/xalybas.html)). Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 16) απεικονίζεται μία μεταλλική δοκός που έχει μονωθεί θερμικά μέσω βερμικουλίτη.



Εικόνα 16: Βερμικουλίτης γύρω από μεταλλική δοκό  
(πηγή: <https://www.progressivematerials.com.au/product/vermiculite-spray/>)

#### 4.2.2. Ιδιότητες

Η κυριότερη λειτουργία των Sprayed Fire Resistive Materials είναι η θερμική μόνωση μεταλλικών δομικών μελών, όπως, υποστυλώματα, δοκοί και πλάκες. Όταν ο χάλυβας εκτίθεται σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών, π.χ. πυρκαγιά, τότε τα SFRMs που παίρνουν τη μορφή της διατομής του και τον καλύπτουν από όλες τις πλευρές, καθυστερούν την αύξηση της θερμοκρασίας στο χάλυβα με αποτέλεσμα να επιβραδύνεται η μείωση των ιδιοτήτων της αντοχής και δυσκαμψίας του. Έτσι, όταν μια μεταλλική κατασκευή είναι θερμικά μονωμένη μέσω των SFRM και εκτεθεί σε φωτιά, είναι δυνατόν να προληφθεί η άμεση κατάρρευσή της, να υπάρξει επίσης ασφαλές χρονικό περιθώριο για την διαφυγή του κοινού από το φλεγόμενο κτίριο αλλά και να περιοριστεί η διάδοση της φωτιάς σε γειτονικά κτίρια. Τρεις βασικές ιδιότητές τους αποτελούν η πυκνότητα, το πάχος του υλικού που εφαρμόζεται πάνω στο μεταλλικό δομικό μέλος καθώς και η αντοχή προσκόλλησης που εμφανίζει πάνω σε αυτό.

##### 4.2.2.1. Πυκνότητα

Τα υλικά αυτά μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την πυκνότητά τους. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι εξής:

- Τα χαμηλής πυκνότητας υλικά ( $15-21 \text{ N/m}^3$ ) περιέχουν γύψο ως συνδετικό υλικό. Προσφέρουν υψηλότερη απόδοση και μεγαλύτερο ρυθμό κάλυψης σε σχέση με τα μεσαίας πυκνότητας υλικά. Παρουσιάζουν, ωστόσο, το μειονέκτημα αποφλοιώσής τους ιδιαίτερα όταν εκτίθενται σε χώρους όπου επικρατεί έντονη κινητικότητα ανθρώπων. Για το λόγο αυτό πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο όταν υπάρχει δυνατότητα προστασίας τους.
- Τα μεσαίας πυκνότητας υλικά ( $22-39 \text{ N/m}^3$ ) περιέχουν ως συνδετικό υλικό τσιμέντο ή μείγμα τσιμέντου με γύψο. Αποτελούν ένα πιο σταθερό προϊόν αλλά, όπως ισχύει και με τα χαμηλής πυκνότητας υλικά, δε πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει έντονη κυκλοφορία ανθρώπων.
- Τα υψηλής πυκνότητας υλικά (πάνω από  $39 \text{ N/m}^3$ ) φτιάχνονται συνήθως με τσιμέντο και αποτελούν το πιο σκληρό πυράντοχο υλικό. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται ευρέως σε εργοστάσια και χώρους στάθμευσης αυτοκινήτων. Διακρίνονται για την αντοχή τους σε εξωτερικές καταπονήσεις,



π.χ. χτυπήματα, κάτι που δεν ισχύει για τα χαμηλής και μεσαίας πυκνότητας υλικά.

#### 4.2.2.2. Πάχος

Όσον αφορά το πάχος που συνιστάται να έχει το πυράντοχο υλικό αφού εκτοξευθεί πάνω στην επιφάνεια του μεταλλικού δομικού μέλους, αυτό πρέπει να είναι αποτελεσματικό ως προς την θερμική του μόνωση. Συνήθως οι κατασκευαστές παρέχουν οδηγίες σχετικά με το απαιτούμενο πάχος για ωριαίες απαιτήσεις πυραντίστασης. Η επιλογή του κατάλληλου πάχους βασίζεται στον τύπο και το μέγεθος του μεταλλικού δομικού μέλους που προστατεύουν.

#### 4.2.2.3. Πρότυπο E605

Η Αμερικάνικη Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών (American Society for Testing and Materials-ASTM) είναι ένας παγκόσμιος οργανισμός τυποποίησης που παρέχει πρότυπα γενικής αποδοχής σε ένα ευρύ φάσμα τεχνικών προϊόντων και υλικών. Ένα από τα πρότυπα που παρέχει αφορά τον υπολογισμό του πάχους και της πυκνότητας των εκτοξευόμενων πυράντοχων υλικών (SFRMs). Συγκεκριμένα, το SFRM εφαρμόζεται πάνω σε γυμνά ή γαλβανισμένα μεταλλικά πλακίδια πάχους 1,5 mm και διαστάσεων 400 mm x 400 mm ή πραγματοποιείται δοκιμή στο πεδίο σε δομικά μέλη με ήδη υπάρχοντα πυράντοχα υλικά. Λαμβάνονται μετρήσεις πάχους από 12 θέσεις των μελών και στη συνέχεια παίρνεται ένας μέσος όρος βάσει των αποτελεσμάτων. Το πάχος βρίσκεται με τη βοήθεια μιας κλίμακας με την οποία μετρείται η διείσδυση από την επιφάνεια του πυράντοχου υλικού έως το μεταλλικό έλασμα.

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας περιγράφεται παρακάτω. Από το μεταλλικό μέλος κόβεται ένα δείγμα SFRM 5800 mm<sup>2</sup> και υπολογίζεται η μάζα του μέσω ζυγαριάς. Ο όγκος του βρίσκεται βάσει της μεθόδου μετακινήσεων που περιγράφει το πρότυπο. Η πυκνότητα υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\rho = \frac{m \cdot 1000}{V}$$

όπου:

$\rho$ = πυκνότητα του SFRM, σε kg/m<sup>3</sup>

M= μάζα του δείγματος, σε g

V= όγκος του δείγματος, σε cm<sup>3</sup>

#### 4.2.2.4. Τρόπος παρασκευής και τοποθέτησης εκτοξευόμενων πυράντοχων υλικών

Τα υλικά αυτά αφού παρασκευαστούν, εκτοξεύονται απευθείας πάνω στην επιφάνεια του μεταλλικού δομικού μέλους μέσω ειδικού σωλήνα και ακολουθούν τη μορφή της διατομής σε αντίθεση με τις πυράντοχες πλάκες που δεν μπορούν να προσαρμωστούν στη μορφή της.

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η παραγωγή και η εφαρμογή των SFRM στα μεταλλικά δομικά μέλη είναι απλός και εύκολος. Αναφέρεται ως παράδειγμα, ο τρόπος παραγωγής και εφαρμογής δύο βασικών τύπων SFRM που χρησιμοποιούνται ευρέως, ενός υγρού και ενός ξηρού μείγματος. Το υγρό μείγμα (Εικόνα 17- αριστερά) που αποτελείται από βερμικουλίτη και γύψο μεταφέρεται σε ξηρή κατάσταση υπό χαμηλή πίεση αέρα και προστίθεται νερό στο ακροφύσιο του σωλήνα καθώς το μείγμα εφαρμόζεται πάνω στη μεταλλική επιφάνεια (Nicole Leo Braxtan & Stephen P. Pessiki, 2011). Αυτή η διαδικασία μπορεί να βελτιώσει το ρυθμό εγκατάστασης κατά 10-15% ανά ημέρα. Τόσο ο τρόπος παρασκευής του όσο και ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται πάνω στην επιφάνεια του μεταλλικού δομικού μέλους

απεικονίζονται στις εικόνες 18 και 19 αντίστοιχα.



Εικόνα 17: Φωτογραφία υγρού και ξηρού μείγματος: αριστερά απεικονίζεται τσιμεντοειδές υγρό μείγμα και δεξιά απεικονίζεται ξηρό ινώδες μείγμα ( <https://cdn.ymaws.com/www.sfpe.org> )



Εικόνα 18: Υγρό μείγμα εκτοξευόμενου πυράντοχου υλικού (πριν την εφαρμογή του στο μεταλλικό δομικό μέλος) ( <https://cdn.ymaws.com/www.sfpe.org> )



Εικόνα 19: Υγρό μείγμα εκτοξευόμενου πυράντοχου υλικού έτοιμο για εφαρμογή στην επιφάνεια του μεταλλικού δομικού μέλους (πηγή: <https://cdn.ymaws.com/www.sfpe.org> )

Το ξηρό μείγμα που αποτελείται από τσιμέντο Portland και ορυκτές ίνες αναμιγνύεται με νερό και στη συνέχεια αφού μεταβληθεί σε υγρό πολτό εφαρμόζεται πάνω στην επιφάνεια του μεταλλικού δομικού μέλους υπό συμπιεσμένο αέρα (Nicole Leo Braxtan & Stephen P. Pessiki, 2011). Η μηχανή στην οποία γίνεται η παραγωγή του καθώς και ο σωλήνας με τον οποίο εκτοξεύεται απεικονίζονται στην Εικόνα 20. Τα δύο είδη SFRM που αναφέρθηκαν χρησιμοποιούνται σε αρκετά πειράματα που πραγματοποιούνται με σκοπό να διερευνήσουν τις ιδιότητες που αναπτύσσουν μεταξύ αυτών και των μεταλλικών δομικών μελών.

Τέλος, στην Εικόνα 21 απεικονίζεται το τσιμεντοειδές εκτοξευόμενο πυράντοχο υλικό εφαρμοσμένο πάνω στις επιφάνειες των δομικών μελών μια πραγματικής μεταλλικής κατασκευής.





Εικόνα 20: Ξηρό μείγμα εκτοξευόμενου πυράντοχου υλικού έτοιμο: Μηχανή παραγωγής και Σωλήνας εφαρμογής (πηγή:

[https://cdn.ymaws.com/www.sfpe.org/resource/resmgr/fpe\\_journal\\_archives/2011/JFPE\\_2011\\_1\\_2.pdf](https://cdn.ymaws.com/www.sfpe.org/resource/resmgr/fpe_journal_archives/2011/JFPE_2011_1_2.pdf))



Εικόνα 21: Φωτογραφία ενός τυπικού Sprayed Fire Resistive Material σε κτίριο

([https://cdn.ymaws.com/www.sfpe.org/resource/resmgr/fpe\\_journal\\_archives/2011/JFPE\\_2011\\_1\\_2.pdf](https://cdn.ymaws.com/www.sfpe.org/resource/resmgr/fpe_journal_archives/2011/JFPE_2011_1_2.pdf))

#### 4.2.2.5. National Fireproofing Contractors Association

Στα πλαίσια ανάλυσης της παραγωγής και εφαρμογής των Sprayed Fire Resistive Materials, αναφέρεται ο οδηγός χρήσης που προσφέρει η National Fireproofing Contractors Association. Η NFCA αντιπροσωπεύει εξειδικευμένο προσωπικό που ασχολείται με την εγκατάσταση εκτοξευόμενου πυράντοχου υλικού

(SFRM) και διογκωτικού πυράντοχου υλικού (IFRM). Παρέχει συμβουλές ώστε η εφαρμογή τους να πραγματοποιείται σύμφωνα με τους κτιριακούς κανονισμούς και τις οδηγίες των κατασκευαστών των υλικών αυτών για τη διατήρηση της ασφάλειας των ανθρώπων. Συγκεκριμένα, η NFCA παρέχει οδηγίες για τα παρακάτω:

- Χρήση: Συνιστάται να χρησιμοποιούνται από προσωπικό που εξειδικεύεται στην επιστήμη των υλικών.
- Ασφάλεια: Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης τεχνικών έργων απαιτείται η λήψη μέτρων ασφαλείας. Το ίδιο ισχύει και κατά την εφαρμογή των SFRMs. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την παραγωγή και εφαρμογή των SFRMs πρέπει να ακολουθεί συνθήκες ασφαλείας όπως αναγράφονται από τον OSHA (Occupational Safety and Health Administration). Το δε προσωπικό που είναι υπεύθυνο πρέπει να διαθέτει προστατευτικό ενδυματολογικό εξοπλισμό, όπως μάσκα σκόνης, γυαλιά προστασίας και προστατευτικά κράνη.
- Υλικά: Η παραγωγή των SFRMs πρέπει να πραγματοποιείται βάσει οδηγιών παράγονται των κατασκευαστών και να περνούν από ποιοτικό έλεγχο σύμφωνα με της οδηγίες του προϊόντος.
- Αποθήκευση και συντήρηση: Τα SFRMs που πρόκειται να εφαρμοστούν στα μεταλλικά δομικά μέλη πρέπει να πηγαίνουν στο χώρο του εργοταξίου σε ειδικούς αποθηκευτικούς σάκους πάνω στους οποίους να αναγράφονται βασικά στοιχεία τους. Τα στοιχεία αυτά πρέπει να περιλαμβάνουν το όνομα του προϊόντος, το όνομα του κατασκευαστή, χαρακτηριστικά του, και τον οργανισμό έγκρισης. Υπάρχουν, ωστόσο και SFRMs που έχουν ενδεχομένως υπερβεί τη διάρκεια ζωής τους. Τα συγκεκριμένα πυράντοχα υλικά πρέπει να αποσύρονται ή να ελέγχονται από τον κατασκευαστή εάν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Τα υλικά πρέπει να διατηρούνται στεγνά και να αποθηκεύονται σε σκιερό χώρο μέχρι να χρησιμοποιηθούν.
- Εξοπλισμός: Ο εξοπλισμός που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί τόσο για την παραγωγή των SFRMs όσο και την για εφαρμογή τους πάνω στις μεταλλικές επιφάνειες πρέπει να είναι αποδεκτός από τον κατασκευαστή. Ως εξοπλισμός μπορούν να χαρακτηριστούν τα εξής:
  - Εξοπλισμό άντλησης
  - Συσκευές μέτρησης
  - Ενισχυτικές αντλίες
  - Αντλίες έγχυσης
  - Εξαρτήματα, όπως ο τύπος του σωλήνα που θα χρησιμοποιηθεί.
- Περιβάλλον εφαρμογής:
  - Σε αρκετές περιπτώσεις εγκατάστασης τεχνικών προϊόντων, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να επικρατεί συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασίας προκειμένου να τοποθετηθούν σωστά και να μην αλλοιωθεί η σύστασή τους. Έτσι και στην περίπτωση εγκατάστασης των SFRMs πρέπει να διατηρείται ελάχιστη θερμοκρασία 4°C πριν, κατά τη διάρκεια και τουλάχιστον 24 ώρες μετά την εφαρμογή του SFRM, εκτός εάν συστήνεται διαφορετική θερμοκρασία από τον κατασκευαστή.
  - Επάρκεια φυσικού αερισμού. Δεδομένου ότι το πυράντοχο υλικό μετά την εφαρμογή του στο μεταλλικό δομικό μέλος, πρέπει να σκληρύνει, απαιτείται η ύπαρξη φυσικού αερισμού. Ειδικά σε κλειστούς χώρους συνιστάται να υπάρχει σχετική μέριμνα.
  - Μέσα στο κτίριο θα πρέπει να υπάρχει διαθέσιμος χώρος εισόδου-εξόδου των μηχανημάτων και εργαλείων και ειδικά στο χώρο

- εφαρμογής του εκτοξευόμενου τσιμεντοειδούς πυράντοχου υλικού.
- Πρέπει να υπάρχει διαθέσιμος χώρος για την εγκατάσταση άντλησης κ.λ.π.
  - Πηγές ηλεκτροδότησης και νερού πρέπει να βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από το πεδίο εφαρμογής και αποτελούν ευθύνη του γενικού διαχειριστή του έργου.
- Εφαρμογή:
- Τα εκτοξευόμενα τσιμεντοειδή πυράντοχα υλικά πρέπει να εφαρμόζονται από έμπειρο και εξειδικευμένο προσωπικό το οποίο να έχει λάβει την έγκριση του κατασκευαστή.
  - Τόσο ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται όσο και τα μείγματα (π.χ. υγρό και ξηρό μείγμα) πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις του κατασκευαστή.
  - Η εκτόξευση των SFRMs πάνω στις επιφάνειες των μεταλλικών δομικών μελών δε πρέπει να ξεκινήσει μέχρι τα μεταλλικά δομικά μέλη να θεωρηθούν έτοιμα για χρήση.
  - Σε ορισμένες περιπτώσεις εκτόξευσης, ίσως χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί κόλλα όταν απαιτείται και σύμφωνα με τις συστάσεις του κατασκευαστή.
- Κατάλληλες τεχνικές εκτόξευσης: οι ψεκαστήρες πρέπει να ακολουθούν τις συνιστώμενες οδηγίες εγκατάστασης από τον κατασκευαστή και τις οδηγίες διασφάλισης ποιότητας που αναφέρονται στο NFCA-200.
- Προστασία κατά τη διάρκεια σκλήρυνσης:
- Τα SFRMs είναι ευαίσθητα κατά τη διάρκεια σκλήρυνσής τους. Πρέπει να λαμβάνονται μέτρα προφύλαξης, ώστε να μην πάθουν κάποια βλάβη σε αυτό το χρονικό διάστημα.
  - Κατά τη διάρκεια σκλήρυνσής τους, ενδέχεται να είναι απαραίτητη η παροχή θερμότητας και αερισμού.
  - Δε θα πρέπει να υπάρχει έντονη κινητικότητα στο χώρο εφαρμογής του που να επηρεάσει τη διαδικασία.
  - Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στο μεταλλικό δομικό μέλος πάνω στο οποίο θα εφαρμοστεί. Κατά τη σκλήρυνση, ο χάλυβας συνιστάται να μην έχει υποστεί παραμορφώσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, οι παραμορφώσεις πρέπει να είναι εντός του ορίου που επιτρέπει ο κατασκευαστής των SFRMs.
- Επισκευή:
- Εάν υπάρξει αποκόλληση κάποιου τμήματος του SFRM από το μεταλλικό δομικό μέλος, πρέπει να γίνει αντικατάστασή του από το ίδιο υλικό ή από άλλο υλικό που διαθέτει τις απαραίτητες προδιαγραφές. Η επισκευή πρέπει να εφαρμόζεται από εξειδικευμένο προσωπικό/
  - Το τμήμα που υπέστη βλάβη πρέπει να καθοριστεί πριν την επισκευή.

Με βάση τα παραπάνω, παρατηρείται η σημασία που δίνεται τόσο για τον τρόπο παραγωγής των εκτοξευόμενων τσιμεντοειδών πυράντοχων υλικών όσο και για τις συνθήκες που πρέπει να επικρατούν στο πεδίο εφαρμογής τους. Για περισσότερες και αναλυτικότερες πληροφορίες σχετικά με τα υλικά αυτά, μπορεί κανείς ανατρέξει στον ιστότοπο της Εθνικής Εταιρείας Κατασκευαστών Πυροπροστασίας.

#### 4.2.2.6. Πλεονεκτήματα

Υπάρχει πλήθος πλεονεκτημάτων που χαρακτηρίζει το τσιμεντοειδές εκτοξευόμενο πυράντοχο υλικό (ή SFRM), γι' αυτό και προτιμάται για την πυροπροστασία μεταλλικών δομικών μελών. Βασικό χαρακτηριστικό που το διαφοροποιεί σε σχέση με άλλα μονωτικά υλικά, είναι ότι η θερμότητα που προέρχεται από τη φωτιά, δυσκολεύεται να διαδοθεί στο εσωτερικό του, γεγονός που το καθιστά υλικό με χαμηλή θερμική αγωγιμότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζει καλές θερμομονωτικές ιδιότητες. Επιπλέον, έχει μικρό βάρος και σε αντίθεση με τις πυράντοχες βαφές συμφέρει περισσότερο από οικονομικής άποψης, κυρίως όταν πρόκειται για κατασκευές μεγάλης κλίμακας. Έχει, τέλος, την δυνατότητα να προστατεύει τη μεταλλική κατασκευή σε σύνθετα κατασκευαστικά σημεία.

#### 4.2.2.7. Μειονεκτήματα

Τα SFRMs, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, προτιμώνται ως θερμικά μονωτικά υλικά και αποτελούν σε πολλές περιπτώσεις την κύρια μέθοδο παθητικής πυροπροστασίας των μεταλλικών κατασκευών. Για να είναι αποτελεσματικά, όμως, θα πρέπει να μην υποστούν κάποια βλάβη μετά από ένα συμβάν σεισμού ή κρούσης. Η βλάβη αυτή μπορεί να είναι αποτέλεσμα κάποιας ρηγμάτωσης του υλικού, καθώς ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν αυτά είναι ότι δεν έχουν μεγάλη εφελκυστική αντοχή. Επιπλέον, γεγονότα έχουν δείξει (Κατάρρευση Δίδυμων Πύργων, 2001) ότι παρουσιάζουν ασθενή δύναμη προσκόλλησης με το μεταλλικό δομικό μέλος μετά από μια ισχυρή καταπόνηση.

Επομένως, προκειμένου να προστατευθεί ο χάλυβας έναντι των θερμικών φορτίων, κρίνεται αναγκαία η εύρεση λύσης σχετικά με την αύξηση αντοχής της διεπιφάνειας μεταξύ του εκτοξευόμενου πυράντοχου υλικού και του μεταλλικού δομικού μέλους πάνω στο οποίο εφαρμόζεται.

Στη συνέχεια, περιγράφεται το πρότυπο E736 της Αμερικάνικης Εταιρείας Δοκιμών και Υλικών (ASTM) που αφορά την πρότυπη δοκιμή για την συνοχή και προσκόλληση των τσιμεντοειδών εκτοξευόμενων πυράντοχων υλικών (SFRM) όταν εφαρμόζονται στα δομικά μέλη. Κατόπιν, ακολουθεί μια σειρά πειραμάτων όπου μεταλλικά δομικά μέλη υπόκεινται σε διάφορες καταπονήσεις και αναλύονται οι μηχανισμοί αστοχίας που εμφανίζονται τόσο στο εσωτερικό των πυράντοχων υλικών όσο και στη διεπιφάνειά τους με τα δομικά μέλη.

##### 4.2.2.7.1. Πρότυπο E736

Σύμφωνα με το πρότυπο E736 της ASTM, πραγματοποιείται δοκιμή υπολογισμού της αντοχής συνοχής και της αντοχής που δημιουργείται στη διεπιφάνεια μεταξύ του πυράντοχου υλικού και των δομικών μελών. Συγκεκριμένα, προσκολλάται SFRM 12 με 25 mm σε γαλβανισμένο χάλυβα 300 x 300 mm ή στο πεδίο σε δοκίμια με ήδη υπάρχοντα SFRM. Αρχικά, ενσωματώνεται μέσα στο SFRM ένα άγκιστρο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 22, και συμπληρώνεται με μία κόλλα δύο συστατικών η οποία εφαρμόζεται πάνω στο SFRM. Αφού η κόλλα σκληρύνει, επιβάλλεται δύναμη μέχρι να αστοχήσει το SFRM. Εάν συμβεί αστοχία στο εσωτερικό του SFRM, τότε πρόκειται για αστοχία συνοχής (cohesive failure), ενώ αν συμβεί αστοχία στη διεπιφάνεια μεταξύ του SFRM και της μεταλλικής επιφάνειας, τότε πρόκειται για αστοχία διεπιφάνειας (adhesive failure). Η μέγιστη δύναμη που επιβάλλεται μετριέται με κλίμακα, ενώ η αντοχή συνοχής και διεπιφάνειας

προσδιορίζεται μέσω του παρακάτω τύπου:

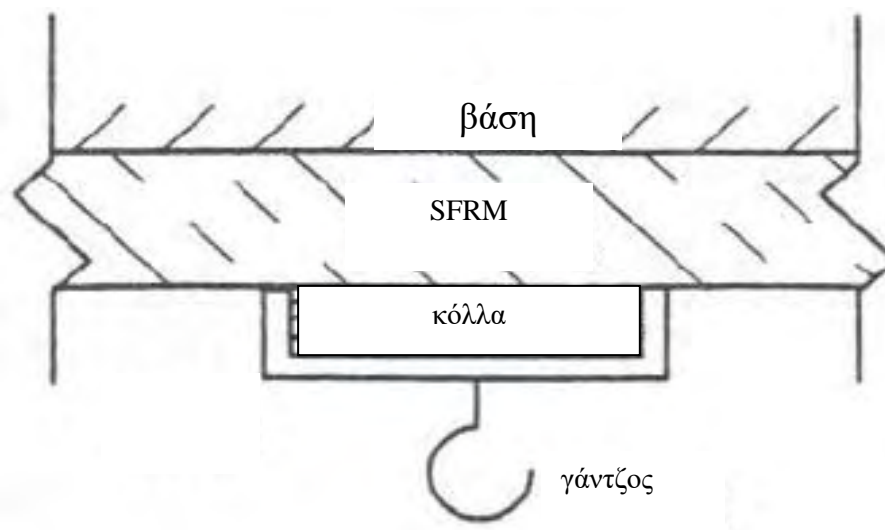
$$CA = \frac{F}{A}$$

όπου:

CA, η αντοχή συνοχής/διεπιφάνειας σε μονάδες Pa

F, η δύναμη που μετράται σε μονάδες N

A, το εμβαδόν εφαρμογής της δύναμης σε m<sup>2</sup>



Εικόνα 22: Δοκιμή πρότυπου E736 (πηγή:

[https://cdn.ymaws.com/www.sfpe.org/resource/resmgr/fpe\\_journal\\_archives/2011/JFPE\\_2011\\_1\\_2.pdf](https://cdn.ymaws.com/www.sfpe.org/resource/resmgr/fpe_journal_archives/2011/JFPE_2011_1_2.pdf) )

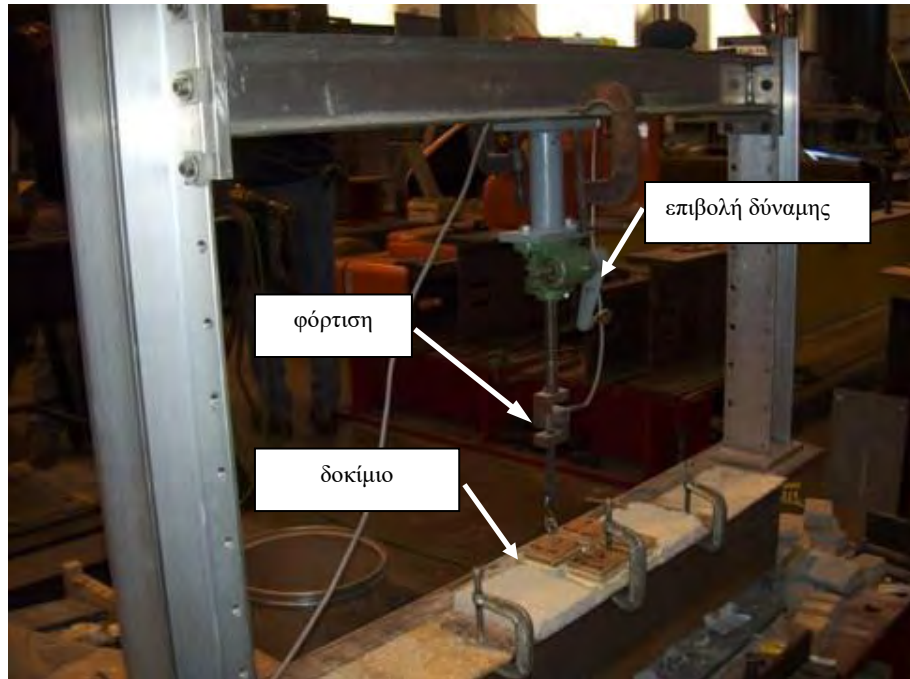
#### 4.2.2.7.2. Τρόποι αστοχίας

Έχουν διεξαχθεί αρκετά πειράματα προκειμένου να εντοπισθεί και να αναλυθεί ο τρόπος αστοχίας των θερμικά μονωμένων μεταλλικών δομικών μελών με τη χρήση SFRM, έπειτα από διάφορες καταπονήσεις. Τα πειράματα έδειξαν ότι η αστοχία που μπορεί να επέλθει, σχετίζεται και με τον τρόπο που επιβάλλεται η φόρτιση. Παρακάτω, αναφέρονται πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί και οι τύποι αστοχίας που προέκυψαν ανάλογα με την καταπόνηση που δέχθηκαν.

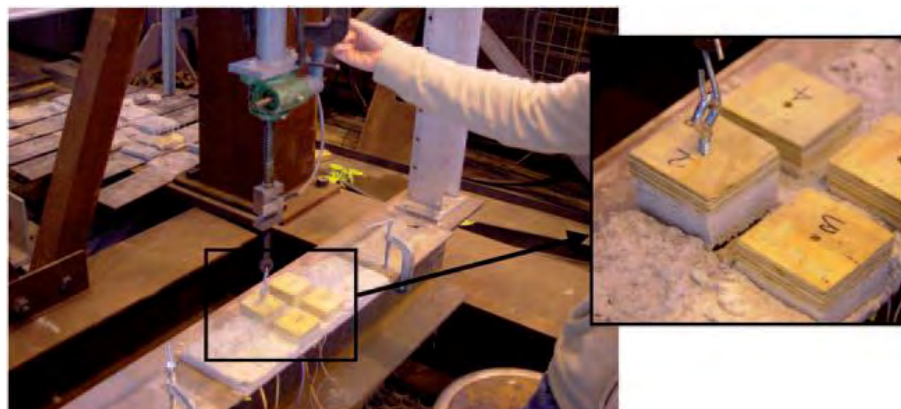
##### ➤ Εφελκυσμός

Αναφέρεται ως παράδειγμα ένα πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Nicole Leo Braxtan και Stephen Pessiki (Nicole Leo Braxtan & Stephen P. Pessiki, 2011) και εξετάστηκε η αντοχή της διεπιφάνειας μεταξύ του SFRM και μεταλλικών πλακιδίων όταν αυτά υπόκεινται σε εφελκυσμό. Το πείραμα περιλάμβανε κυβικά δοκίμια από υγρό και ξηρό μείγμα τα οποία υποβλήθηκαν σε εφελκυσμό. Ο τρόπος άσκησης της φόρτισης απεικονίζεται στην Εικόνα 23. Στην Εικόνα 24 απεικονίζεται με περισσότερη λεπτομέρεια το δοκίμιο που εξετάστηκε.



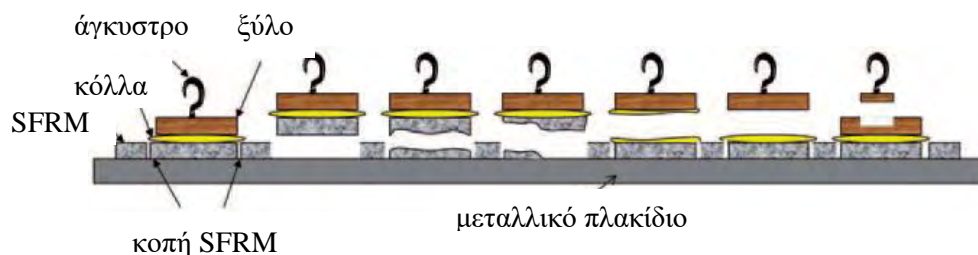


Εικόνα 23: Τρόπος επιβολής φόρτισης (πηγή: <https://bit.ly/2Pym2Zd> )



Εικόνα 24: Λεπτομέρεια δοκίμιου (πηγή: <https://bit.ly/2Pym2Zd> )

Οι μορφές αστοχίας που προέκυψαν κατά τη διάρκεια του πειράματος απεικονίζονται στην Εικόνα 25. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς, υπάρχουν αρκετοί τύποι αστοχίας. Αστοχία, λοιπόν, μπορεί να συμβεί στη διεπιφάνεια μεταξύ του χάλυβα και του SFRM (adhesive failure), στο εσωτερικό του SFRM (cohesion failure), στην κόλλα μεταξύ του sfrm και του ξύλινου κύβου που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της δύναμης και συνδυασμός αυτών.



Εικόνα 25: Τρόποι αστοχίας που προέκυψαν από το πείραμα (πηγή: <https://bit.ly/2Pym2Zd> )

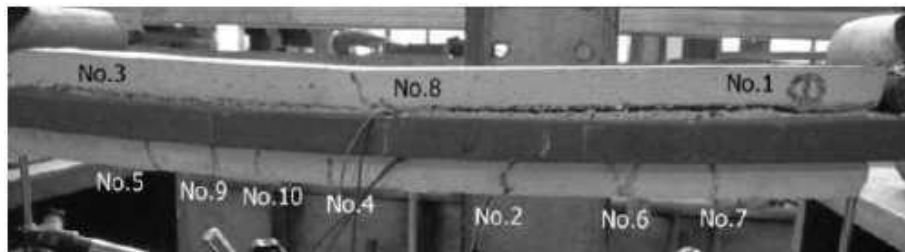
➤ Κάμψη

Όταν μια δοκός που έχει μονωθεί θερμικά με SFRM κάμπτεται, παρουσιάζεται ένας σύνθετος τρόπος αστοχίας, καθώς η πλευρά που θλίβεται (άνω πλευρά) εμφανίζει διαφορετικό τρόπο αστοχίας σε σχέση με την πλευρά που εφελκύεται (κάτω πλευρά). Προκειμένου να αναλυθεί το σύνθετο αυτό φαινόμενο, πραγματοποιήθηκε αριθμητική προσομοίωση της θερμικής συμπεριφοράς μεταλλικής δοκού με επικαλύψεις SFRM που έχουν υποστεί βλάβη, από τους Μυστακίδη Ευριπίδη και Ζωγραφοπούλου Καλλιόπη του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας (Zografopoulou, K., Mistakidis, E).

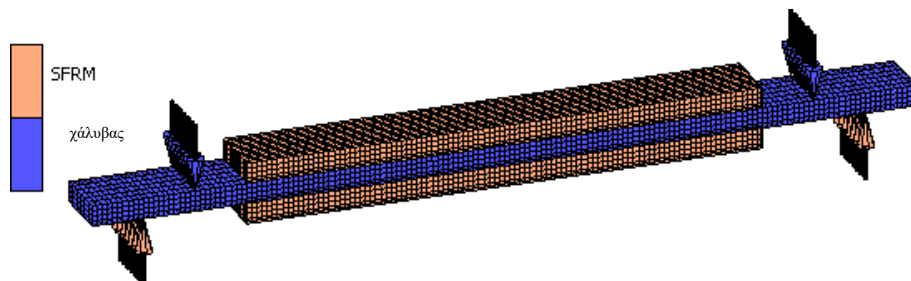
Αρχικά, και για καλύτερη κατανόηση του πειράματος, στις Εικόνες 26 και 27 παρουσιάζονται η εφελκυστική και θλιπτική πλευρά της δοκού με τις αστοχίες που υπέστησαν, αντίστοιχα. Η αριθμητική προσομοίωση του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων MSC MARC και απεικονίζεται στην Εικόνα 28.



Εικόνα 26: Αστοχία του SFRM στην εφελκυστική πλευρά (πηγή: [http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089\\_PAP\\_Zografopoulou.pdf](http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089_PAP_Zografopoulou.pdf))



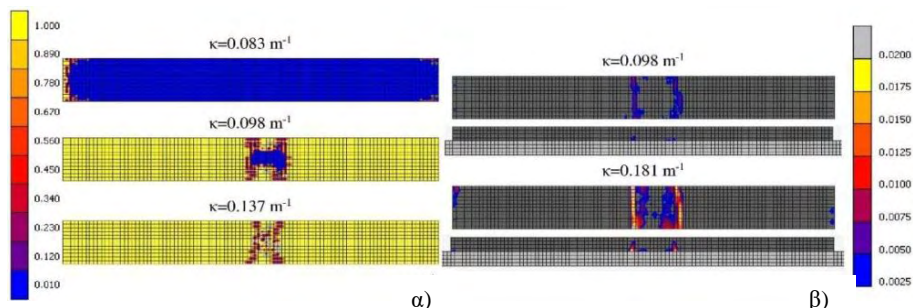
Εικόνα 27: Αστοχία του SFRM στη θλιπτική πλευρά (πηγή: [http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089\\_PAP\\_Zografopoulou.pdf](http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089_PAP_Zografopoulou.pdf))



Εικόνα 28: Προσομοίωμα (πηγή: [http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089\\_PAP\\_Zografopoulou.pdf](http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089_PAP_Zografopoulou.pdf))

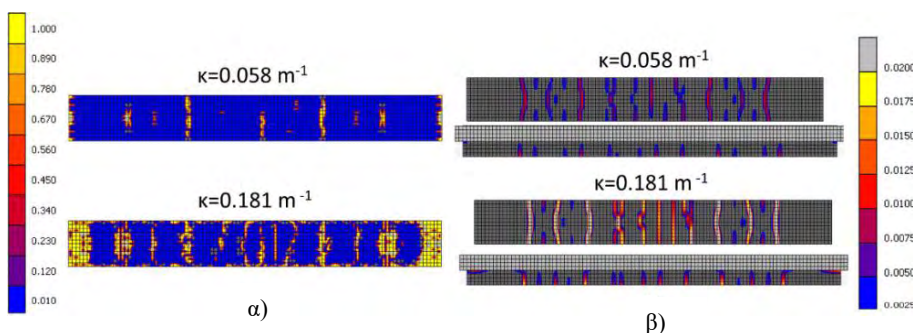
Όπως φαίνεται στο προσομοίωμα (Εικόνα 28), πρόκειται για πείραμα κάμψης 4 σημείων. Από τις Εικόνα 27, παρατηρείται ότι στη θλιπτική περιοχή της δοκού, η αποκόλληση του SFRM ξεκινά από τα άκρα της δοκού και

καθώς αυξάνεται η φόρτιση, η ρωγή διαδίδεται (interfacial cracking propagation) προς το κέντρο της δοκού, οπότε τελικά μένει μόνο ένα μικρό κομμάτι κολλημένο πάνω στη δοκό. Στην Εικόνα 29, απεικονίζεται η αστοχία της θλιπτικής περιοχής, όπως προέκυψε από το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων MSC MARC.



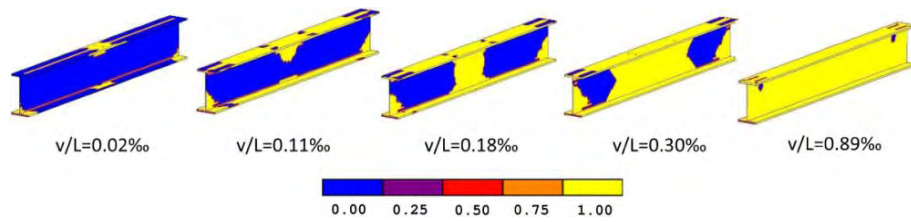
Εικόνα 29: Αστοχία θλιπτικής πλευράς δοκού μέσω του προσομοιώματος (πηγή: [http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089\\_PAP\\_Zograforoulou.pdf](http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089_PAP_Zograforoulou.pdf))

Στην εικόνα 29 β) παρατηρείται, επίσης, ότι καθώς η καμπυλότητα της δοκού αυξάνεται, η σύνδεση των δύο υλικών αρχίζει να μειώνεται. Η ρηγματώση συμβαίνει κοντά στο μέσο του πυράντοχου υλικού. Ακολουθεί η αστοχία (Εικόνα 30) που προέκυψε από το προσομοίωμα στην εφελκυστική πλευρά της δοκού. Εδώ, ο τρόπος με τον οποίο αστοχεί η διεπιφάνεια των δύο υλικών είναι πιο σύνθετη. Η αποκόλληση (delamination) του πυράντοχου υλικού από τη μεταλλική δοκό προκαλείται από τη δημιουργία εγκάρσιων ρωγμών. Καθώς αυξάνεται η φόρτιση άρα και η καμπυλότητα της δοκού, οι εγκάρσιες ρωγμές αυξάνονται και διαδίδονται προς το κέντρο ώσπου να βρεθεί η πλησιέστερη εγκάρσια ρωγή οπότε και σταματάει η διάδοση.



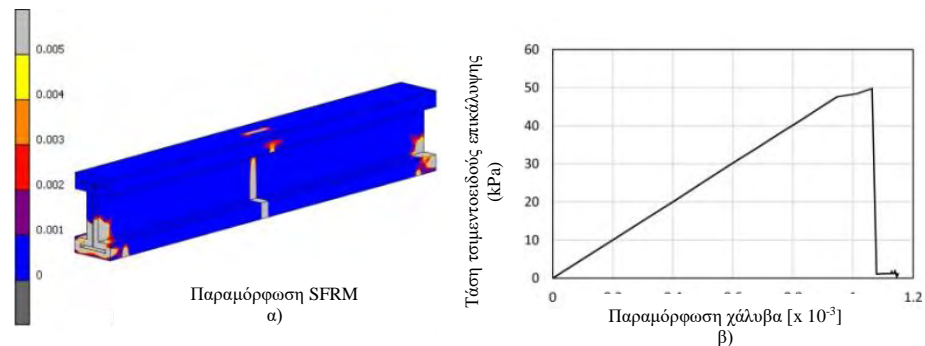
Εικόνα 30: Αστοχία εφελκυστικής πλευράς δοκού μέσω του προσομοιώματος (πηγή: [http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089\\_PAP\\_Zograforoulou.pdf](http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089_PAP_Zograforoulou.pdf))

Στα πλαίσια μελέτης της αντοχής διεπιφάνειας μεταξύ της μεταλλικής δοκού και του SFRM όταν υπόκεινται σε καμπτική καταπόνηση, αξίζει να αναφερθεί κι ένα επιπλέον πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Μυστακίδη Ευριπίδη και Ζωγραφοπούλου Καλλιόπη. Το πείραμα αφορά τρισδιάστατη μεταλλική δοκό διατομής IPE η οποία έχει καταπονηθεί σε κάμψη τριών σημείων. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 31).



Εικόνα 31: Αστοχία SFRM κατά τη διάρκεια της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (πηγή: [http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089\\_PAP\\_Zograforoulou.pdf](http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089_PAP_Zograforoulou.pdf))

Από την παραπάνω εικόνα παρατηρείται, ότι τα εκτοξευόμενα πυράντοχα υλικά δεν αναπτύσσουν ισχυρή δύναμη επαφής με τα μεταλλικά δομικά μέλη πάνω στα οποία εφαρμόζονται, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους. Η διεπιφάνεια των δύο υλικών αρχίζει να αστοχεί αρχικά στο άνω και κάτω πέλμα της δοκού και συγκεκριμένα τόσο στο μέσο όσο και στις στηρίξεις λόγω ανάπτυξης τοπικών τάσεων. Αυτό συμβαίνει λόγω αύξησης τόσο της ορθής τάσης όσο και της διατμητικής κατά μήκος του κορμού. Με την αύξηση του φορτίου η αποκόλληση διαδίδεται στα πέλματα και στον κορμό και το SFRM ξεκολλάει ολόκληρο από τη μεταλλική δοκό. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 32), απεικονίζονται τα αποτελέσματα της ρηγμάτωσης στο *sifm* όπως προέκυψε από το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων και το διάγραμμα της τάσης του σε συνάρτηση με την παραμόρφωση του χάλυβα. Διαπιστώνεται ότι το SFRM ξεκολλάει από τη μεταλλική δοκό όταν η τελευταία υποστεί σχετικά μικρή παραμόρφωση. Η τάση του μηδενίζεται σε παραμόρφωση του χάλυβα της τάξης του 0,0011 ενώ η μέγιστη τιμή της είναι της τάξης περίπου του 50 kPa δηλαδή 0,05 MPa. Η αντοχή, επομένως, της διεπιφάνειας μεταξύ του εκτοξευόμενου πυράντοχου υλικού και της μεταλλικής δοκού είναι ασθενής.



Εικόνα 32: α) Ρηγμάτωση του SFRM, β) Διάγραμμα τάσης SFRM-παραμόρφωσης χάλυβα (πηγή: [http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089\\_PAP\\_Zograforoulou.pdf](http://eeme.ntua.gr/proceedings/9th/Papers/089_PAP_Zograforoulou.pdf))

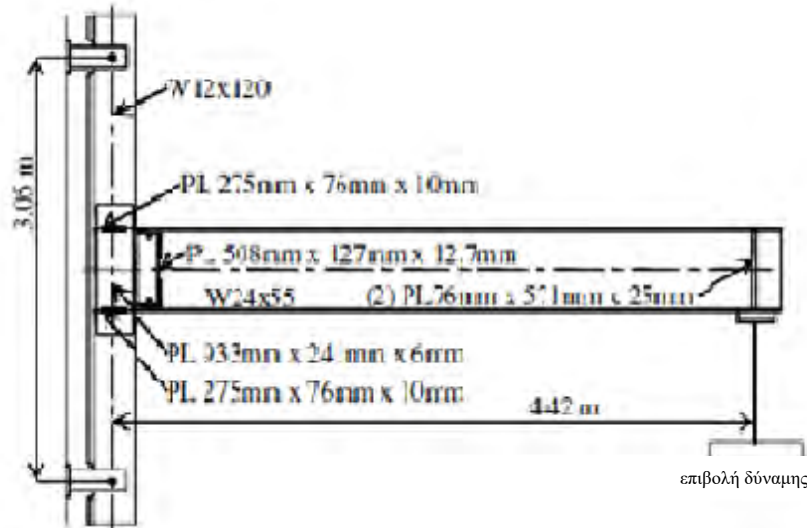
#### ➤ Ανακυκλιζόμενη φόρτιση

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζει κανείς την απόκριση των πυράντοχων υλικών σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών μετά από σεισμικά γεγονότα δηλαδή κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση. Στη συνέχεια, γίνεται αναφορά σε ένα πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Nicole Leo Braxtan και Stephen P. Pessiki (Nicole Leo Braxtan & Stephen P. Pessiki, 2011) και δημοσιεύτηκε στο περιοδικό *Journal of Structural Engineering*. Στο πείραμα αυτό μελετήθηκε μέρος ενός μεταλλικού πλαισίου που είχε μονωθεί θερμικά με SFRM και υποβλήθηκε σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση προκειμένου να προσομοιωθεί η



συμπεριφορά της διεπιφάνειάς τους μετά από μία σεισμική δόνηση (Εικόνα 33). Ως SFRM, χρησιμοποιήθηκαν δύο κατηγορίες, ένα ξηρό μείγμα κι ένα υγρό μείγμα.

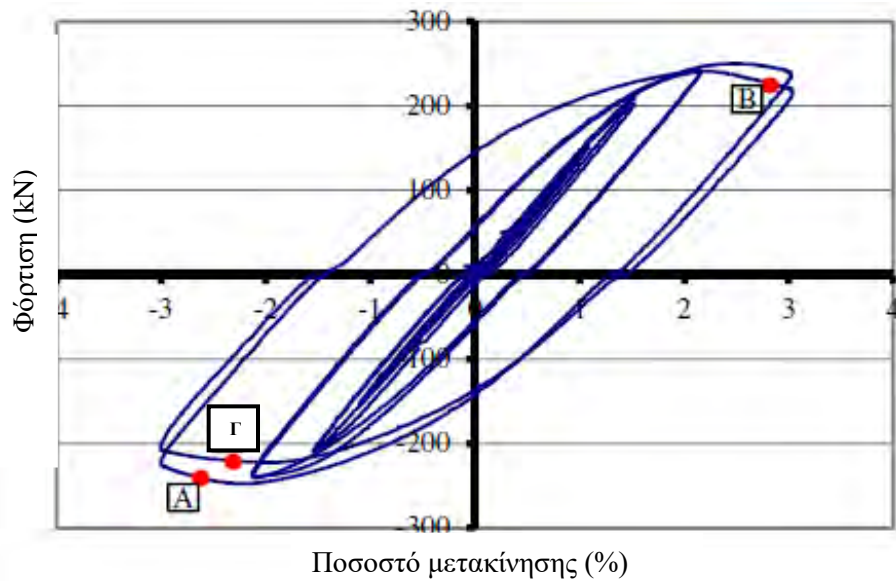
τοίχος αντίδρασης



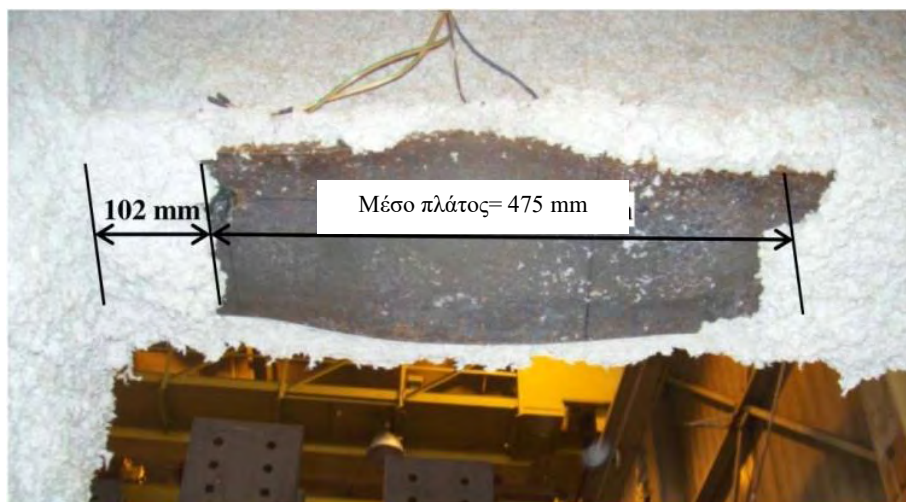
Εικόνα 33: Πείραμα ανακυκλιζόμενης φόρτισης (πηγή: <https://bit.ly/2PztDHb> )

- Συμπεριφορά του ξηρού μείγματος

Στην Εικόνα 34 απεικονίζεται το διάγραμμα φόρτισης σε σχέση με το ποσοστό μετακίνησης του πλαισίου και αναπαρίστανται οι κύκλοι φόρτισης. Το σημείο Α αφορά τον πρώτο κύκλο φόρτισης κατά οποίο παρατηρήθηκε ρωγμή στο πυράντοχο υλικό στο κάτω πέλμα της δοκού όταν βρισκόταν υπό θλίψη. Αντίθετα, το σημείο Β αφορά το δεύτερο κύκλο φόρτισης όπου παρατηρήθηκε ρωγμή στο πυράντοχο υλικό στο πάνω πέλμα της δοκού όταν βρισκόταν σε θλίψη. Τελικά, κατά τη διάρκεια του δεύτερου κύκλου φόρτισης πραγματοποιήθηκε αστοχία στη διεπιφάνεια του πυράντοχου υλικού και της μεταλλικής δοκού, με αποτέλεσμα να ξεκολλήσει ένα κομμάτι του SFRM από το κάτω μέρος του κάτω πέλματος της δοκού σε θλίψη. Αυτό το σημείο πάνω στο διάγραμμα φόρτισης – σχετικής μετακίνησης είναι το σημείο C. Στον κορμό της δοκού, το πυράντοχο υλικό παρέμεινε άθικτο. Η αστοχία στο SFRM απεικονίζεται στην Εικόνα 35.



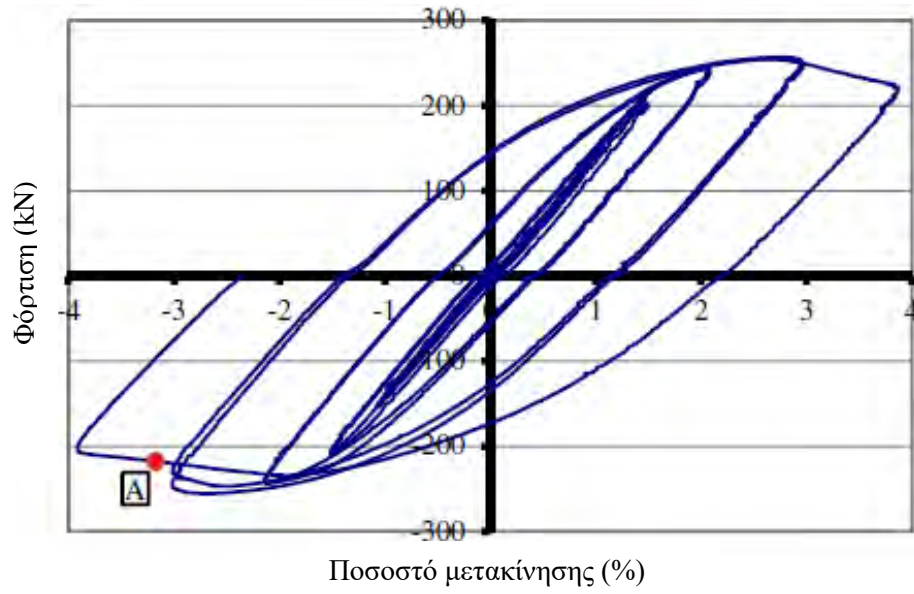
Εικόνα 34: Διάγραμμα φόρτισης-ποσοστού μετακίνησης για το ξηρό μείγμα (πηγή: <https://bit.ly/2PztDHb>)



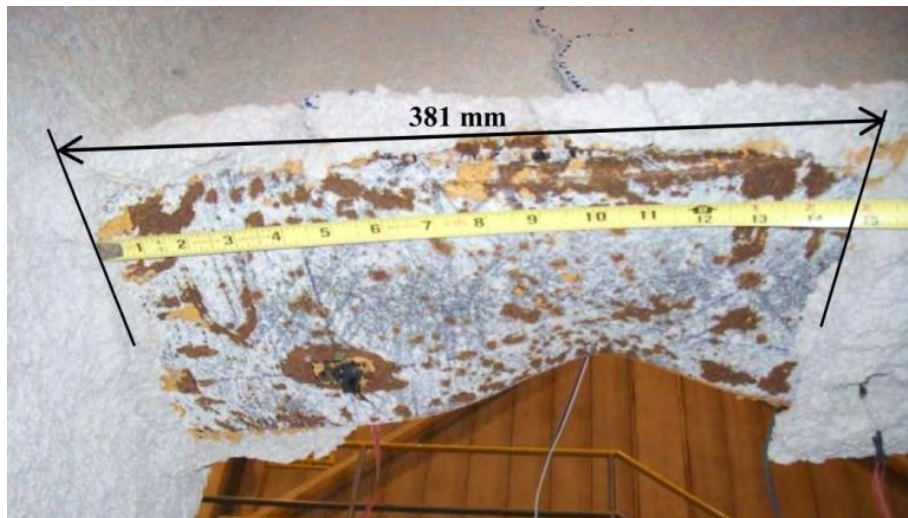
Εικόνα 35: Αστοχία SFRM ξηρού μείγματος (πηγή: <https://bit.ly/2PztDHb>)

- Συμπεριφορά του υγρού μείγματος

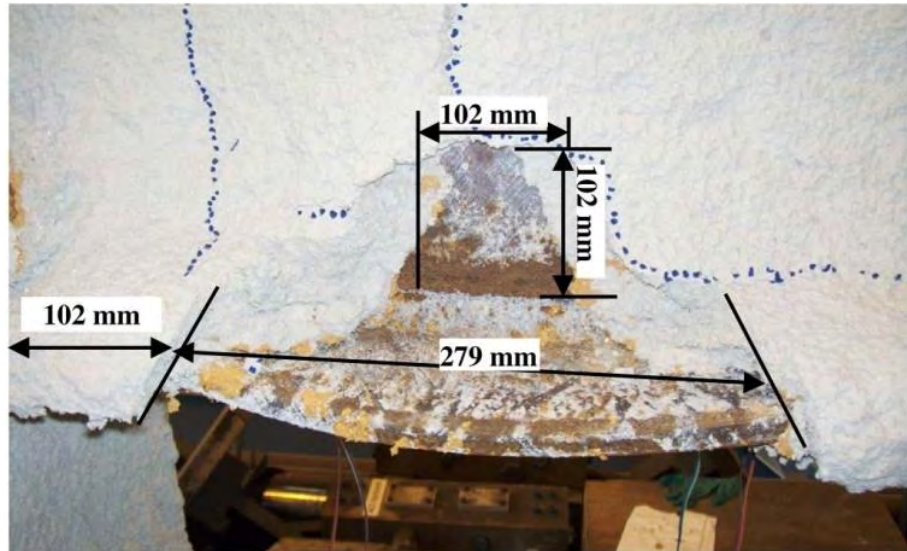
Στην περίπτωση χρησιμοποίησης υγρού μείγματος ως πυράντοχο υλικό, πραγματοποιήθηκε ένας κύκλος φόρτισης (Εικόνα 36), καθώς παρατηρήθηκε αστοχία του SFRM κατά τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Η αστοχία του πυράντοχου υλικού απεικονίζεται στην Εικόνα 37, από όπου παρατηρείται ότι η αστοχία εκτείνεται σε όλο το πλάτος της δοκού. Κατά τη διάρκεια του τεστ παρατηρήθηκαν και άλλες ρωγμές στο πυράντοχο υλικό. Στο τέλος, υπήρξαν ορισμένα τμήματα που είχαν ξεκολλήσει αλλά παρέμεναν στη δοκό. Στην Εικόνα 38 απεικονίζεται αστοχία που συνέβη στον κορμό της δοκού κοντά στο κάτω πέλμα της.



Εικόνα 36: Διάγραμμα φόρτισης-ποσοστού μετακίνησης για το υγρό μείγμα (πηγή: <https://bit.ly/2PztDHb> )



Εικόνα 37: Αστοχία SFRM υγρού μείγματος (πηγή: <https://bit.ly/2PztDHb> )



Εικόνα 38: Αστοχία στον κορμό της δοκού (πηγή: <https://bit.ly/2PztDHb>)

➤ Διάτμηση

Η διάτμηση αποτελεί μία από τις κυριότερες καταπονήσεις και θα αναλυθεί διεξοδικά παρακάτω, καθώς αποτελεί το αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1. Παρουσίαση προβλήματος διπλωματικής εργασίας

Στην προηγούμενη παράγραφο (παράγραφος 4.2.2.7.2.) παρουσιάστηκε μια σειρά πειραμάτων των οποίων τα αποτελέσματα έδειξαν, ότι η αστοχία που συμβαίνει σε ένα μεταλλικό δομικό μέλος που έχει μονωθεί θερμικά με SFRM, μπορεί να αφορά είτε τη διεπιφάνειά τους είτε το εσωτερικό του SFRM. Όπως έχει αναφερθεί, πολλές φορές μετά την τοποθέτηση των SFRM αλλοιώνεται η αισθητική του δομήματος. Για το λόγο αυτό, πολλές φορές τα SFRMs ενσωματώνονται σε δομικά μέλη που δεν είναι άμεσα ορατά, με αποτέλεσμα η δομική ακεραιότητα των SFRM να μην μπορεί να παρατηρηθεί μετά από μια οποιαδήποτε καταπόνηση. Επομένως, θεωρείται σημαντικό, να μελετηθεί ο μηχανισμός λειτουργίας της διεπιφάνειας μεταξύ της τσιμεντοειδούς επικάλυψης και του μεταλλικού δομικού μέλους έτσι ώστε ο μηχανικός να γνωρίζει εκ των προτέρων τη συμπεριφορά του συστήματος αυτού.

Σκοπός, επομένως, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνηθεί το πρόβλημα που προαναφέρθηκε μέσω της αριθμητικής προσομοίωσης ενός πραγματικού τρισδιάστατου μεταλλικού δομικού μέλους που έχει μονωθεί θερμικά με SFRM συγκεκριμένου τύπου, όταν αυτό υπόκειται σε μία από τις βασικότερες καταπονήσεις, όπως είναι η διάτμηση. Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου, απαιτούνται βασικές γνώσεις μηχανικής της επαφής (contact theory) βάσει της οποίας συμπεριφέρεται η διεπιφάνεια. Για τις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε το ισχυρό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων μη γραμμικής ανάλυσης, το MSC MARC.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία και η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων των εκάστοτε αναλύσεων, έγινε σύγκρισή τους με υπάρχον πρόβλημα διάτμησης που πραγματοποιήθηκε από τους Amir Arablouei και Venkatesh Kodur από το Michigan State University στις Ηνωμένες Πολιτείες



Αμερικής.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων η οποία χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις και ακολουθούν οι μεθοδολογίες και τα αποτελέσματά τους.

## 5.2. Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και έγινε από διακεκριμένους επιστήμονες όπως ο Έλληνας μηχανικός Ιωάννης Αργύρης, ο Σουηδός θεωρητικός φυσικός Βάλτερ Ριτς κ.ά. Πολλές φορές υπάρχει η ανάγκη εύρεσης αναλυτικών λύσεων των διαφορικών εξισώσεων που περιγράφουν προβλήματα με σύνθετες καταπονήσεις και πολύπλοκα γεωμετρικά σχήματα. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται η αναζήτηση προσεγγιστικών μεθόδων. Μία από αυτές είναι η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων, η οποία εφαρμόζεται συνήθως μέσω προγραμμάτων Η/Υ. Είναι μια προσεγγιστική μέθοδος, παρόλα αυτά έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Ωστόσο, παρουσιάζει και το πρόβλημα της υπολογιστικής ισχύς ειδικά όταν πρόκειται για σύνθετα προβλήματα, το οποίο όμως αντιμετωπίστηκε λόγω της ραγδαίας εξέλιξης των επιστημονικών και τεχνολογικών επιτευγμάτων.

Προκειμένου, λοιπόν, να υλοποιηθεί η ανάλυση ενός σύνθετου προβλήματος της μηχανικής, είναι απαραίτητη η εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων στο οποίο δημιουργείται το προσομοίωμα. Στη συνέχεια, το προσομοίωμα διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία. Στο σημείο αυτό απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή από τον μελετητή. Προηγουμένως αναφέρθηκε το πρόβλημα της υπολογιστικής ισχύος, επομένως, ο μελετητής χρειάζεται κριτική σκέψη και εμπειρία ώστε να επιλεγθεί η κατάλληλη διακριτοποίηση. Βέλτιστη διακριτοποίηση σημαίνει απαραίτητος αριθμός πεπερασμένων στοιχείων, τέτοιος ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα με ακρίβεια και ελάχιστο κόστος. Ένα άλλο σημαντικό βήμα που χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, αποτελεί η εισαγωγή κατάλληλων στοιχείων. Τα προγράμματα ανάλυσης φορέων με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που κυκλοφορούν, διαθέτουν πλήθος στοιχείων ανάλογα με το είδος του φορέα που πρόκειται να αναλυθεί καθώς και τη λειτουργία που πρόκειται να έχει. Για παράδειγμα, αν πρόκειται να αναλυθεί μια δοκός υπό καμπτική καταπόνηση, γίνεται εισαγωγή των στοιχείων δοκού. Αφού γίνει η διακριτοποίηση και εισαγωγή των κατάλληλων στοιχείων ανάλογα με τις ανάγκες της ανάλυσης, εισάγονται οι φορτίσεις και ορίζονται οι θέσεις των στηρίξεων σε περίπτωση στατικής ανάλυσης. Ακολουθούν η επίλυση και η εξαγωγή αποτελεσμάτων.

## 5.3. Αριθμητική προσομοίωση των τρισδιάστατου προσομοιώματος

### 5.3.1. Υλικά προσομοιώματος

Το προσομοίωμα που εξετάζεται προσομοιώνει ένα μεταλλικό πλακίδιο το οποίο έχει μονωθεί θερμικά με ένα τσιμεντοειδές εκτοξευόμενο πυράντοχο υλικό με βάση το γύψο. Η φόρτιση που ασκείται είναι μία επιβαλλόμενη μετακίνηση ίση με 1,9 mm που ασκείται στο άκαμπτο σώμα (rigid). Το άκαμπτο σώμα είναι κολλημένο με το SFRM, ενώ βρίσκεται σε απλή επαφή με το μεταλλικό πλακίδιο. Τα χαρακτηριστικά των τριών υλικών αναφέρονται στη συνέχεια:

➤ Χάλυβας

- Κατηγορίας A992. Πρόκειται για δομικό χάλυβα που χρησιμοποιείται συχνά στις Η.Π.Α. για διατομές με πλατιά φλάντζα και διατομές I.
- Το μέτρο ελαστικότητας είναι ίσο με  $E= 200 \text{ GPa}$ .
- Η τάση διαρροής του χάλυβα ισούται με  $\sigma_y= 355 \text{ MPa}$  και ακολουθεί τη θεωρία von Mises.
- Για απλούστευση του προβλήματος, γίνεται υπόθεση ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς του υλικού που μπορεί να περιγραφεί από διγραμμικούς νόμους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση ως νόμος συμπεριφοράς του υλικού επιλέγεται το ελαστικό-τέλεια πλαστικό υλικό (Εικόνα 39).



Εικόνα 39: Καταστατικός νόμος ελαστικού - τελείως πλαστικού υλικού (πηγή: Σημειώσεις Μη Γραμμικής Συμπεριφοράς των Κατασκευών, Γαντές Χ., Ε.Μ.Π.)

➤ Τσιμεντοειδές πυράντοχο υλικό

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, τα εκτοξευόμενα τσιμεντοειδή πυράντοχα υλικά χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, σε αυτά που αποτελούνται με βάση το γύψο και σε αυτά που αποτελούνται με βάση το τσιμέντο Portland. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει γίνει επιλογή υλικού που ανήκει στην πρώτη κατηγορία.

Το τσιμεντοειδές πυράντοχο υλικό μπορεί να θεωρηθεί ότι χωρίζεται σε δύο φάσεις, την ομογενή και τη φάση εφαρμογής του. Η ομογενής φάση του περιλαμβάνει πάστα γύψου και κατά το στάδιο εφαρμογής του προστίθεται βερμικουλίτης για ενίσχυσή του. Ο γύψος αποτελεί περίπου το 70% του SFRM και είναι μέσης πυκνότητας. Τέλος, το μέτρο ελαστικότητας του πυράντοχου υλικού που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσο με  $E= 11500 \text{ GPa}$ .

➤ Άκαμπτο σώμα (rigid)

Όπως θα αναφερθεί στη συνέχεια, για την προσομοίωση της φόρτισης, προστέθηκε στο προσομοίωμα ένα άκαμπτο σώμα (rigid) με μέτρο ελαστικότητας  $E= 20000 \text{ GPa}$ .

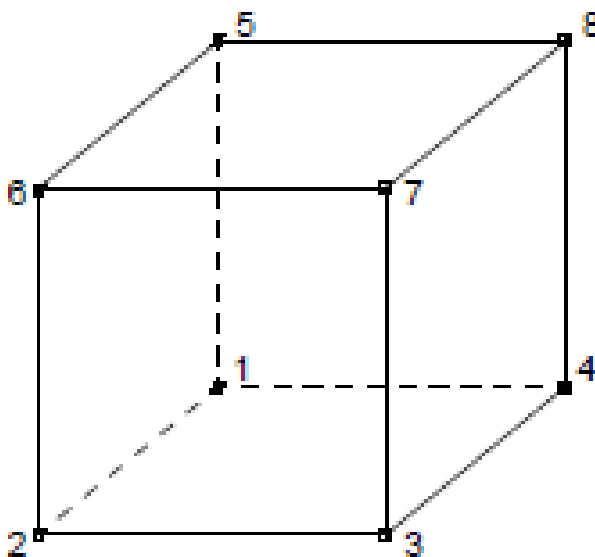
### 5.3.2. Εισαγωγή γεωμετρίας.

Όπως προαναφέρθηκε, το προσομοίωμα που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία αφορά τρισδιάστατο πραγματικό πρόβλημα. Προκειμένου να υπάρχει όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια και δεδομένου ότι πρόκειται για 3D ανάλυση, ως καταλληλότερη επιλογή πεπερασμένων στοιχείων, θεωρήθηκε η

κατηγορία στοιχείων 5 της βιβλιοθήκης του κώδικα MSC MARC.

### 5.3.2.1. Βιβλιοθήκη στοιχείων MSC MARC – Κατηγορία 5

Αυτή η κατηγορία στοιχείων αφορά πεπερασμένα στοιχεία σε 3 διαστάσεις, που σχηματίζονται μέσω 8 κόμβων και είναι ισοπαραμετρικά με τριγωνική παρεμβολή. Η σειρά με την οποία τοποθετούνται οι κόμβοι στο πρόγραμμα για να σχηματιστεί το πεπερασμένο στοιχείο απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 40).



Εικόνα 40: Πεπερασμένο στοιχείο κατηγορίας 5-Βιβλιοθήκη στοιχείων του MSC MARC

Προκειμένου να μεταφερθεί η πληροφορία από το καθολικό σύστημα συντεταγμένων  $x, y, z$  στο τοπικό σύστημα  $\xi, \eta, \zeta$ , χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος υπολογισμού των μετατοπίσεων:

$$\begin{aligned} x &= a_0 + a_1 \xi + a_2 \eta + a_3 \zeta + a_4 \xi \eta + a_5 \xi \zeta + a_6 \eta \zeta + a_7 \xi \eta \zeta \\ \psi &= b_0 + b_1 \xi + b_2 \eta + b_3 \zeta + b_4 \xi \eta + b_5 \xi \zeta + b_6 \eta \zeta + b_7 \xi \eta \zeta \end{aligned}$$

Στον κλάδο των πεπερασμένων στοιχείων, υπάρχει και η έννοια της συνάρτησης σχήματος. Συνάρτηση σχήματος είναι μια συνάρτηση που παρεμβάλλει τιμές μεταξύ δύο διακριτών τιμών στο πλέγμα του πεπερασμένου στοιχείου. Οι συναρτήσεις σχήματος είναι συνήθως πολυώνυμα, έτσι και στην περίπτωση του πεπερασμένου στοιχείου που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, η συνάρτηση σχήματος είναι η ακόλουθη:

$$x = \sum_{i=1}^8 x_i \Phi_i$$

όπου:

$$\Phi_1 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1+\zeta)$$

$$\Phi_3 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1-\zeta)$$

$$\Phi_5 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1+\eta)(1+\zeta)$$

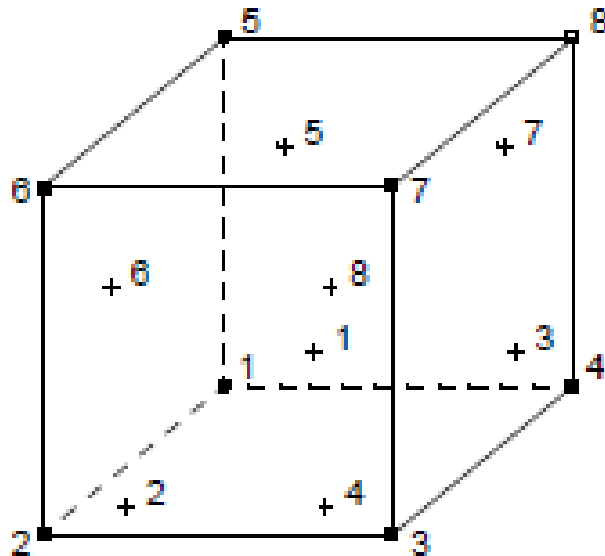
$$\Phi_6 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$\Phi_7 = \frac{1}{8}(1+\xi)(1-\eta)(1+\zeta)$$

$$\Phi_4 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1-\eta)(1-\zeta)$$

$$\Phi_8 = \frac{1}{8}(1-\xi)(1\eta)(1-\zeta)$$

Υπάρχουν τρεις βαθμοί ελευθερίας που αντιστοιχούν σε κάθε κόμβο του στοιχείου 7 που χρησιμοποιείται από τη βιβλιοθήκη στοιχείων του MSC MARC. Το στοιχείο αυτό χρησιμοποιεί την παρεμβολή κατά Gauss 8 σημείων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 41).



Εικόνα 41: Σημεία παρεμβολής κατά Gauss

#### 5.3.2.1.1. Βιβλιοθήκη MSC MARC – Στοιχείο 7

Το στοιχείο 7 της κατηγορίας 5 από τη βιβλιοθήκη στοιχείων του κώδικα MSC MARC χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση των 2 υλικών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Το στοιχείο αυτό, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, αποτελείται από 8 κόμβους, έχει 6 έδρες και είναι ισοπαραμετρικό. Ισοπαραμετρικά στοιχεία είναι μια σημαντική κατηγορία στοιχείων καθώς δίνουν τη δυνατότητα απόκτησης στοιχείων με καμπυλόγραμμες πλευρές. Τα ισοπαραμετρικά στοιχεία βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή σε προβλήματα επίπεδων κατασκευών, ελασμάτων και κελυφών.

Παρόλο που χρησιμοποιούν τριγωνικές συναρτήσεις παρεμβολής, οι παραμορφώσεις εντός του στοιχείου τείνουν να παραμένουν σταθερές το οποίο δημιουργεί ορισμένα προβλήματα στη διατμητική του συμπεριφορά. Η δυσκαμψία του υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την παρεμβολή κατά Gauss 8 σημείων. Το στοιχείο 7 χρησιμοποιείται συχνά σε αναλύσεις επαφής. Για το λόγο αυτό έγινε η επιλογή του στην προσομοίωση των 2 υλικών που εξετάζονται.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο τρόπος δημιουργίας του προσομοιώματος και ακολουθούν λίγα λόγια για τη θεωρία και τις μεθοδολογίες που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις.

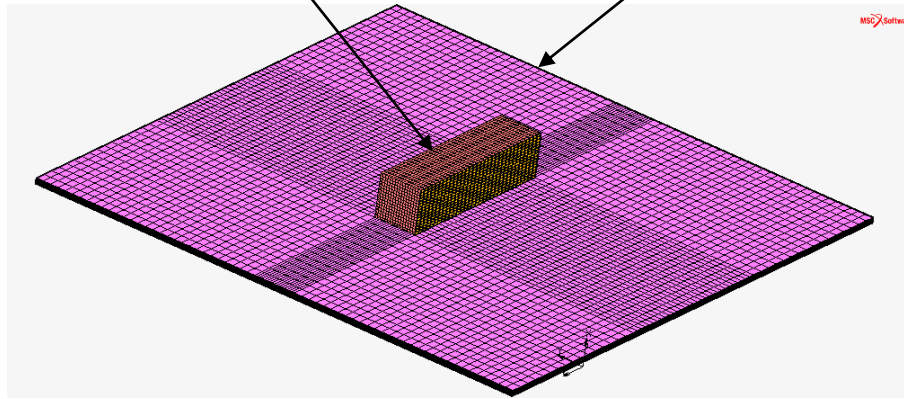
#### 5.3.3. Δημιουργία τρισδιάστατου προσομοιώματος

Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα έλασμα χάλυβα διαστάσεων 304,8mm x 304,8mm x 3.53mm (Εικόνα 42) και το SFRM διαστάσεων 25.4 mm x 25.4 mm x 101.6 mm (Εικόνα 42). Αφού έγινε εισαγωγή των κόμβων για τη δημιουργία του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων ακολούθησε η διακριτοποίησή του. Λόγω της ιδιαιτερότητας που παρουσιάζει το πρόβλημα, θεωρήθηκε σημαντικό να υλοποιηθεί

πιο πυκνή διακριτοποίηση στη διεπιφάνεια των δύο υλικών προκειμένου να εξαχθούν καλύτερα και πιο ακριβή αποτελέσματα (Εικόνα 43). Στην Εικόνα 45 παρουσιάζεται ο τρόπος επιβολής της μετακίνησης που είναι ίση με 1.9 mm κατά τον άξονα y με περιορισμό των μετακινήσεων κατά x και z ώστε να εξασφαλιστεί η μετακίνηση μόνο κατά τη διεύθυνση y, ενώ στην Εικόνα 46 απεικονίζεται το άκαμπτο σώμα (rigid) στο οποίο επιβάλλεται η μετακίνηση.

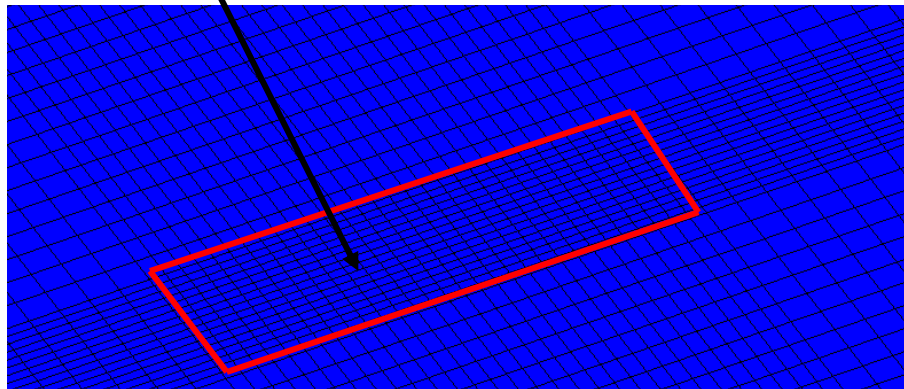
εκτοξευόμενο τσιμεντοειδές πυράντοχο υλικό (SFRM)

έλασμα δομικού χάλυβα

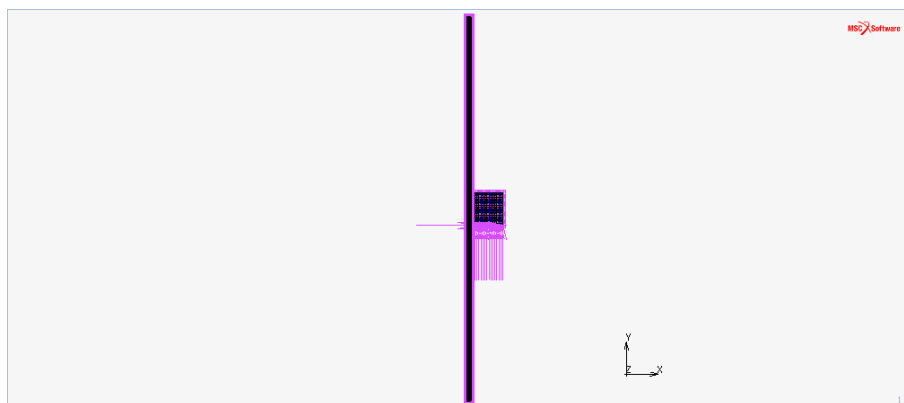


Εικόνα 42: Τρισδιάστατο προσομοίωμα

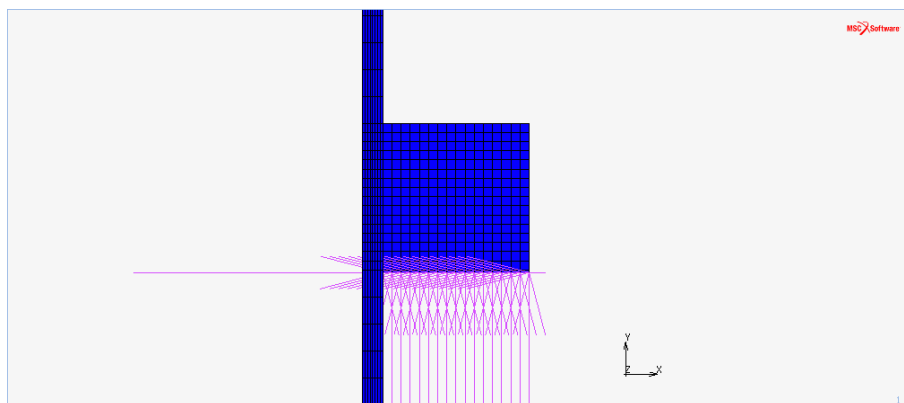
μεγαλύτερη διακριτοποίηση στην περιοχή της επαφής χάλυβα-SFRM



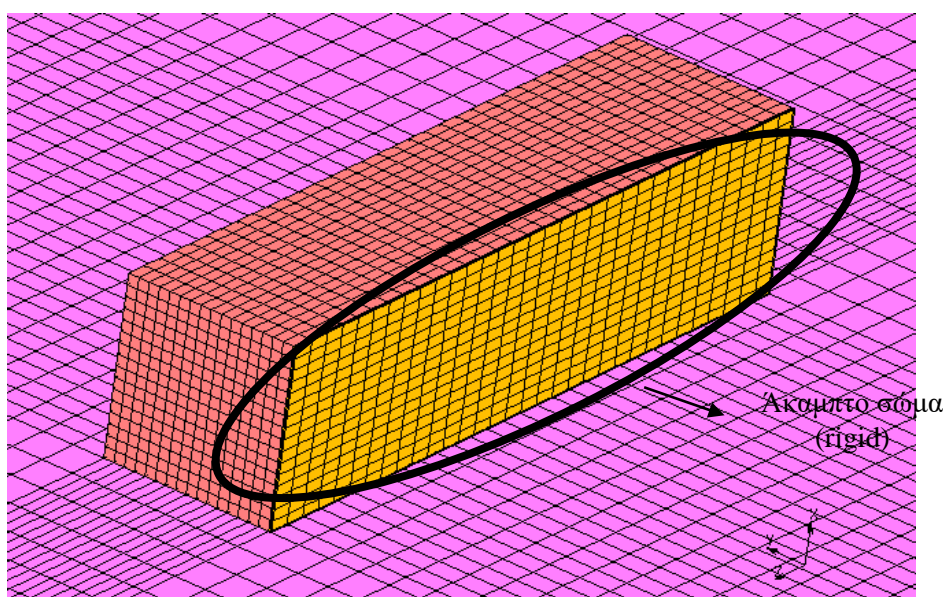
Εικόνα 43: Πυκνότερη διακριτοποίηση στη διεπιφάνεια χάλυβα - SFRM



Εικόνα 44: Επιβολή μετακίνησης



Εικόνα 45: Τρόπος επιβολής της μετακίνησης (Λεπτομέρεια)



Εικόνα 46: Ακαμπτο σώμα (rigid)

#### 5.3.4. Θεωρία μηχανικής της επαφής (contact theory)

Αφού εισήχθη το προσομοίωμα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, πριν την ανάλυση της μηχανικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, είναι σημαντικό να αναφερθούν λίγα λόγια για τη θεωρία που αποτελεί το υπόβαθρο αυτής της μελέτης.

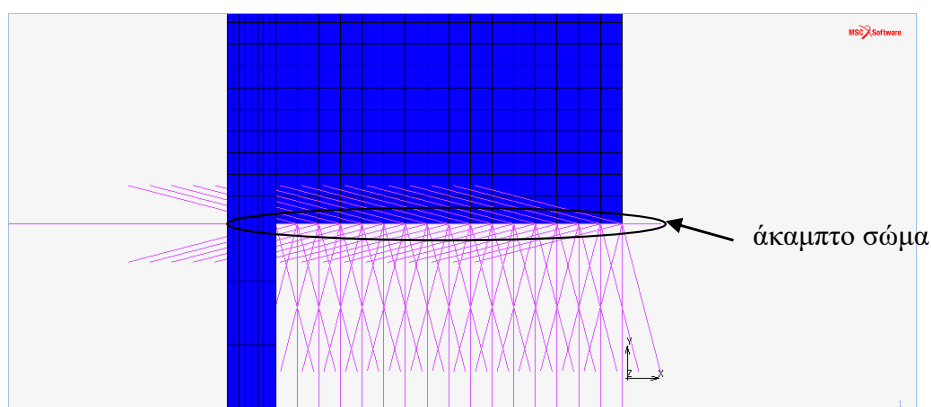
Πολλά φυσικά προβλήματα απαιτούν την ικανότητα μοντελοποίησης των φαινομένων επαφής. Ένα από αυτά είναι και το πρόβλημα της παρούσας εργασίας. Προκειμένου να προσομοιωθεί η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας μεταξύ των 2 υλικών, απαιτείται η γνώση και χρήση της θεωρίας της μηχανικής της επαφής. Η συγκεκριμένη ανάλυση είναι σύνθετη καθώς απαιτείται η γνώση της τροχιάς κίνησης των σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή. Σε τέτοιου είδους αναλύσεις κρίνεται, συχνά, απαραίτητη η χρήση ειδικών στοιχείων επαφής (contact elements), ωστόσο το πρόγραμμα MSC MARC επιτρέπει να πραγματοποιηθεί η ανάλυση χωρίς την ενεργοποίηση των στοιχείων αυτών. Συνεπώς, στην παρούσα εργασία δεν ενεργοποιήθηκαν τα στοιχεία επαφής. Σε τέτοιου είδους αναλύσεις, γίνεται διάκριση μεταξύ απλής επαφής (touching) και προσκολλημένης επαφής (glue).

##### 5.3.4.1. Απλή επαφή (touching condition)

Η συνθήκη της απλής επαφής (touching condition) σε μια ανάλυση



διεπιφάνειας δεν επιτρέπει τη διείσδυση μεταξύ των 2 σωμάτων, επιτρέπει όμως τη σχετική τους ολίσθηση στη διεπιφάνειά τους. Ο περιορισμός της μη διείσδυσης επιτυγχάνεται μέσω κάποιας δέσμευσης ή συνοριακής συνθήκης κάθετα στη διεύθυνση της διεπιφάνειας. Συνεπώς, η συνθήκη αυτή θέτει δεσμεύσεις στις κάθετες στη διεπιφάνεια μετακινήσεις, ενώ οι παράλληλες στη διεπιφάνεια μετακινήσεις είναι ελεύθερες εκτός αν υπάρχει τριβή. Η χρήση της συνθήκης αυτής χρησιμοποιείται σε όλες τις αναλύσεις που θα αναφερθούν παρακάτω. Συγκεκριμένα, εάν πρόκειται να επιβληθεί κάποια μετακίνηση, όπως στην παρούσα εργασία, είναι καλύτερο να εισαχθεί ένα άλλο άκαμπτο (rigid) σώμα στο οποίο θα εφαρμοστεί η μετακίνηση και το οποίο βρίσκεται σε απλή επαφή με το χάλυβα. Κατά αυτό τον τρόπο οι τάσεις που δημιουργούνται από το άκαμπτο σώμα στο πυράντοχο υλικό κατανέμονται με πιο ομοιόμορφο τρόπο (Εικόνα 47).



Εικόνα 47: Άκαμπτο σώμα (rigid) στο οποίο επιβάλλεται η μετακίνηση

#### 5.3.4.2. Προσκολλημένη επαφή (glue condition)

Η συνθήκη προσκολλημένης επαφής (glue condition) απαγορεύει όλες τις σχετικές μετακινήσεις μεταξύ των δύο σωμάτων μέσω δεσμεύσεων ή οριακών συνθηκών που εφαρμόζονται σε όλους τους βαθμούς ελευθερίας των κόμβων που βρίσκονται σε επαφή. Υπάρχει, ωστόσο, η πιθανότητα να μειωθεί η φέρουσα ικανότητα της διεπιφάνειας μέσω κάποια καταπόνησης.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν 3 μεθοδολογίες ώστε να μπορούν να προσομοιωθούν τη μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας και είναι οι παρακάτω:

- ❖ Χρήση του κριτηρίου τάσεων Yamada – Sun
- ❖ Χρήση συμπεριφοράς της διεπιφάνειας βάσει της παραμόρφωσης του τσιμεντοειδούς πυράντοχου υλικού
- ❖ Χρήση νόμων συμπεριφοράς ορθής και διατμητικής διεπιφανειακής τάσης.

##### 5.3.4.2.1. Κριτήριο τάσεων Yamada – Sun

Η πρώτη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είναι το κριτήριο Yamada-Sun. Το συγκεκριμένο κριτήριο χρησιμοποιείται σε αρκετές αριθμητικές αναλύσεις προκειμένου να προσομοιωθεί η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας μεταξύ δύο σωμάτων. Η αλληλεπίδραση στη διεπιφάνεια ανάμεσα στην ορθή και διατμητική τάση μοντελοποιείται μέσω του κριτηρίου με τον παρακάτω τύπο:

$$\left(\frac{\sigma_n}{S_n}\right)^m + \left(\frac{\sigma_t}{S_t}\right)^n \leq 1$$

όπου:

$\sigma_n$ : είναι η ορθή διεπιφανειακή τάση

$\sigma_i$ : είναι η διατμητική διεπιφανειακή τάση  
 $S_n$ : είναι η ορθή διεπιφανειακή αντοχή  
 $S_i$ : είναι η διατμητική διεπιφανειακή αντοχή  
 $m, n$ : είναι συντελεστές που ορίζονται από τον μελετητή και συνήθως λαμβάνεται  
 $m = n = 2$ .

Όταν ξεκινά η επιβαλλόμενη φόρτιση, οι επιφάνειες των δύο σωμάτων είναι κολλημένες μεταξύ τους, δηλαδή είναι δεσμευμένοι όλοι οι αντίστοιχοι κόμβοι της διεπιφάνειάς τους έτσι ώστε να μην υπάρχει σχετική ολίσθηση. Καθώς αυξάνεται, όμως, η φόρτιση, αυξάνονται και οι τάσεις σε κάθε ζεύγος διεπιφανειακών κόμβων. Τη στιγμή που ο παραπάνω τύπος γίνει ίσος με τη μονάδα, τότε η σύνδεση (glue condition) των δύο σωμάτων ξεκινά να μειώνεται, με αποτέλεσμα να επιτρέπονται οι σχετικές κινήσεις μεταξύ τους καθώς οι ορθές και διατμητικές διεπιφανειακές τάσεις ανακατανέμονται. Η τιμή της μονάδας, δηλαδή, σημαίνει ότι χάνεται η επαφή μεταξύ των δύο σωμάτων.

#### 5.3.4.2.2. Συμπεριφορά της διεπιφάνειας βάσει παραμόρφωσης του SFRM

Η δεύτερη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για να προσομοιώσει τη μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας μεταξύ του δομικού χάλυβα και του SFRM βασίζεται στην παραμόρφωση που έχει υποστεί το πυράντοχο υλικό μόλις ξεπεράσει την ελαστική περιοχή. Το SFRM, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, χαρακτηρίζεται για τη μικρή του εφελκυστική αντοχή. Συνεπώς, όσο είναι κολλημένο πάνω στο μεταλλικό δομικό μέλος και υποστεί κάποια καταπόνηση, μπορεί να μειωθεί η φέρουσα ικανότητα της διεπιφάνειας μέσω παραμόρφωσης του SFRM. Αυξάνοντας, δηλαδή, την επιβαλλόμενη μετακίνηση, η κάτω ίνα του πυράντοχου υλικού μπορεί να υποστεί παραμορφώσεις που να ξεπεράσουν την ελαστική του περιοχή, με αποτέλεσμα να χαθεί, ίσως, η επαφή οποιουδήποτε κόμβου της κάτω ίνας με τον αντίστοιχο κόμβο του χάλυβα.

#### 5.3.4.2.3. Νόμοι συμπεριφοράς ορθής και διατμητικής διεπιφανειακής τάσης

Σε πολλές περιπτώσεις προβλημάτων επαφής, η προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας μέσω της glue condition, μπορεί να οδηγήσει σε άκαμπτη σύνδεση. Για να ξεπεραστεί αυτό υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής νόμων που θα καθορίζουν την κατανομή της ορθής και διατμητικής διεπιφανειακής τάσης σε σχέση με τη σχετική μετακίνηση των σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή. Μέσω της συγκεκριμένης προσομοίωσης η δυσκαμψία των δύο σωμάτων είναι, στην πραγματικότητα, πεπερασμένη και η σχετική μετακίνηση των δύο σωμάτων απαιτείται να είναι μικρή. Απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την εισαγωγή του νόμου της ορθής διεπιφανειακής τάσης, καθώς η αρνητική μετακίνηση σημαίνει απώλεια επαφής των δύο σωμάτων, ενώ η θετική μετακίνηση σημαίνει διείσδυση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6.1. Αναλύσεις

#### 6.1.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι αναλύσεις που διεξήχθησαν προκειμένου να διερευνηθεί η μηχανική συμπεριφορά της διεπιφάνειας μεταξύ του δομικού χάλυβα και του τσιμεντοειδούς SFRM. Συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται αναλύσεις προσομοιωμάτων τα οποία καταπονούνται σε διάτμηση. Στόχος των αναλύσεων είναι να προσδιορισθεί η καμπύλη της διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση των δύο σωμάτων στη διεπιφάνεια, όταν το σύστημα υπόκειται σε διάτμηση. Σύμφωνα με το κεφάλαιο 5, για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς της διεπιφάνειας χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεθοδολογίες, τα αποτελέσματα των οποίων θα συζητηθούν και θα συγκριθούν εκτενέστερα παρακάτω. Για την ορθότητα, την ακρίβεια και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της αριθμητικής προσομοίωσης με συγκεκριμένο πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Amir Arablouei και Venkatesh Kodur από το Michigan State University στις Η.Π.Α.

Όπως συμβαίνει στις περισσότερες αριθμητικές προσομοιώσεις, υπάρχουν κάποιες παράμετροι που επιλέγονται προς εξέταση ανάλογα με το υπό μελέτη πρόβλημα. Πρώτα απ' όλα, ένα μέγεθος το οποίο χρησιμοποιείται συχνά σε αριθμητικές προσομοιώσεις είναι το μέτρο ελαστικότητας του πυράντοχου υλικού στην πλαστική του περιοχή. Το μέτρο αυτό καλείται ως 'softening modulus' και ο προσδιορισμός του δείχνει το πόσο απότομα ή όχι, θα υποστεί βλάβη το SFRM. Δηλαδή, όσο πιο μεγάλη τιμή έχει το συγκεκριμένο μέγεθος τόσο μεγαλύτερη είναι η κλίση της πλαστικής περιοχής του SFRM και κατά αυτό τον τρόπο υπάρχει ενδεχόμενο απότομης παραμόρφωσης. Αντίθετα, όσο μικρότερη είναι η τιμή του softening modulus, τόσο πιο αργά παραμορφώνεται το υλικό. Το 'softening modulus' αποτελεί ένα μέτρο της «ολκιμότητας» του υλικού και προσδιορίζεται κυρίως με πειραματικές δοκιμές. Ωστόσο, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, υπάρχουν ορισμένες αναλύσεις κατά τις οποίες με την εισαγωγή των ιδιοτήτων θραυστομηχανικής του SFRM, δεν είναι δυνατή η αριθμητική σύγκλιση, όπως συμβαίνει με την χρήση της 3<sup>ης</sup> μεθοδολογίας.

Τα πυράντοχα υλικά, όπως έχει ήδη αναφερθεί, εμφανίζουν μικρή εφελκυστική αντοχή. Έχει παρατηρηθεί από πειραματικές δοκιμές ότι SFRMs της ίδιας κατηγορίας μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες. Ως παράδειγμα αξίζει να αναφερθεί το πείραμα που πραγματοποιήθηκε από τους Kar Tean Tan, Christofer C. White και Donald L. Huston, (Kar Tean Tan, White, C.C, Hunston, D.(2010)). οι οποίοι εξέτασαν την αντοχή προσκόλλησης μεταλλικών ελασμάτων σε SFRMs διαφορετικής σύστασης. Στο συγκεκριμένο πείραμα χρησιμοποιήθηκαν δύο SFRMs της ίδιας κατηγορίας που ήταν χαμηλής πυκνότητας και αποτελούνταν από γύψο. Τα δύο αυτά πυράντοχα υλικά παρουσίασαν διαφορετικό τρόπο συμπεριφοράς κατά την πειραματική διαδικασία. Συγκεκριμένα, το πρώτο έδειξε ότι αντέχει μεγαλύτερη καταπόνηση του χάλυβα χωρίς να αστοχήσει η διεπιφάνεια αλλά με μικρότερη σχετική μετακίνηση, ενώ το δεύτερο παρουσίασε αντοχή που αντιστοιχεί σε μικρότερη δύναμη αλλά με μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση. Το γεγονός αυτό, ωστόσο, δεν προκάλεσε έκπληξη καθώς υπάρχουν διαφορετικοί τύποι και συγκεντρώσεις που χρησιμοποιούνται ως ενισχύσεις στα πυράντοχα υλικά. Επομένως, επιπλέον παράμετροι των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν, ήταν η εφελκυστική αντοχή των πυράντοχων υλικών αλλά και οι αντοχές που εμφανίζει η

διεπιφάνεια οι οποίες χωρίζονται στην ορθή και διατμητική αντοχή.

Τέλος, σε όλες τις αναλύσεις ως φόρτιση θεωρήθηκε σταθερή μετακίνηση ίση με 1,9 mm η οποία ασκείται στο άκαμπτο σώμα. Ως τρόποι στήριξης, στις μεθοδολογίες 1 και 3, ο χάλυβας πακτώθηκε μόνο στη βάση του, ενώ στη 2<sup>η</sup> μεθοδολογία ο χάλυβας πακτώθηκε πλήρως. Οι αντίστοιχες αναπαραστάσεις των συνοριακών συνθηκών στήριξης των προσομοιωμάτων δεν απεικονίζονται για λόγους αισθητικής.

Στη συνέχεια ακολουθούν οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν ανά κατηγορία, ο σχολιασμός τους καθώς και οι συγκρίσεις τους με τα πειραματικά δεδομένα.

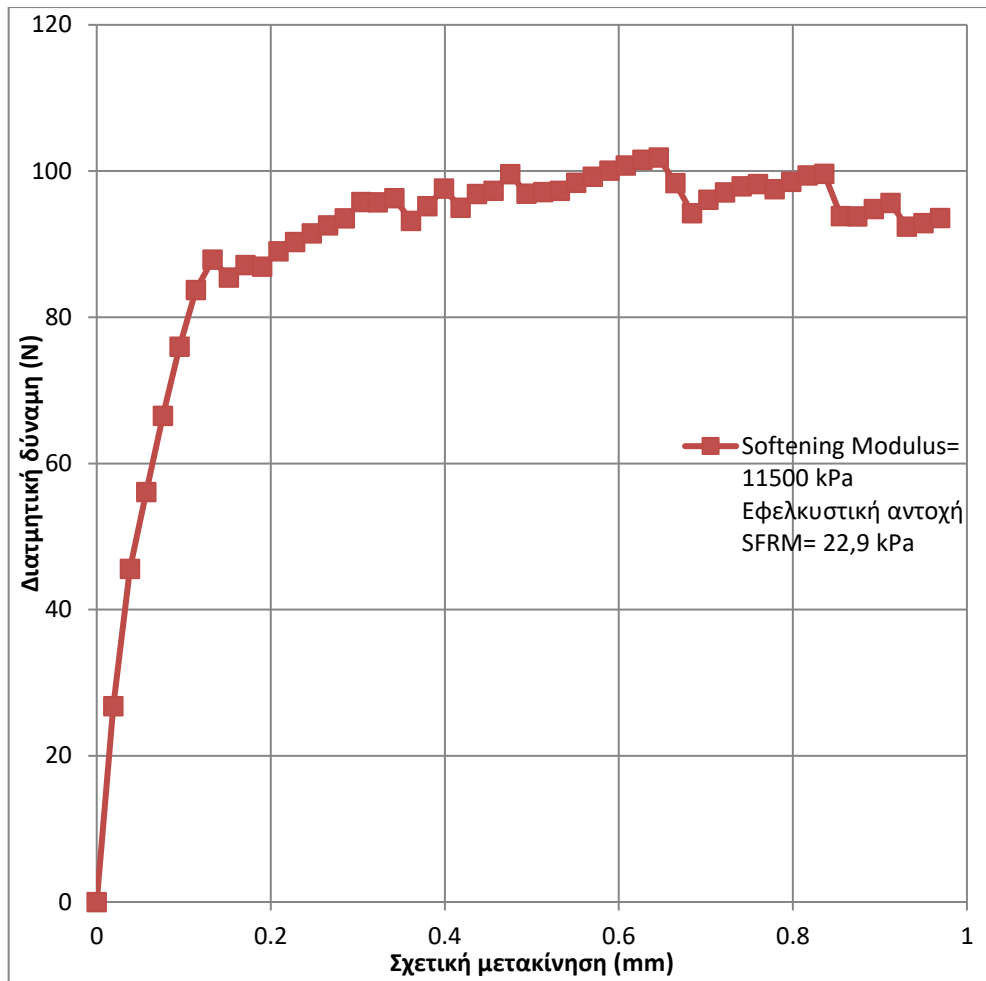
### 6.1.2. Αναλύσεις βάσει κριτηρίου τάσεων Yamada – Sun

Η πρώτη κατηγορία αναλύσεων που διεξήχθησαν αφορά το κριτήριο τάσεων Yamada – Sun. Ο τρόπος συμπεριφοράς της διεπιφάνειας ακολουθεί τον παρακάτω τύπο. Όταν ο παρακάτω τύπος γίνει ίσος με τη μονάδα, τότε αποδεσμεύεται ένα ζεύγος κόμβων στη διεπιφάνεια και υπάρχει σχετική ολίσθηση.

$$\left(\frac{\sigma_n}{S_n}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_t}{S_t}\right)^2 \leq 1$$

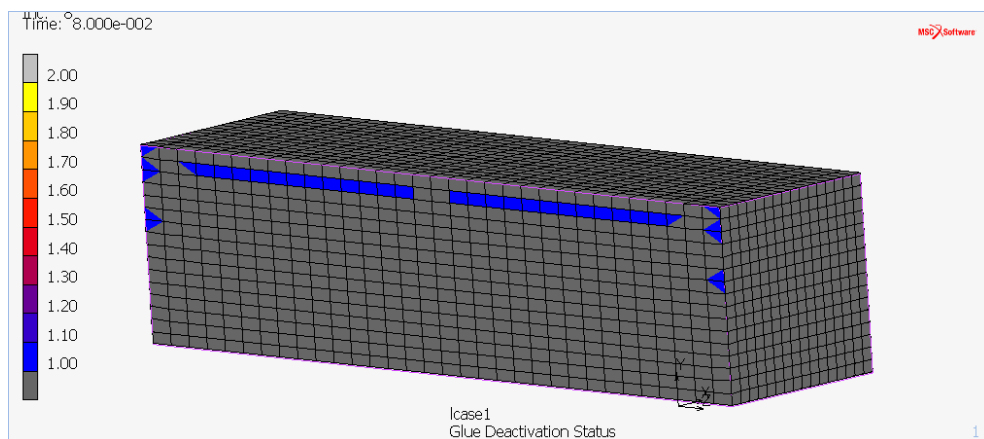
#### ➤ 1<sup>η</sup> Ανάλυση

Στην πρώτη ανάλυση που πραγματοποιήθηκε θεωρήθηκε αρχικά ότι το softening modulus είναι ίσο με το μέτρο ελαστικότητας του SFRM, δηλαδή ίσο με 11500 kPa. Επίσης, η ορθή διεπιφανειακή αντοχή ορίζεται ίση με 22.9 kPa, ενώ η διατμητική διεπιφανειακή αντοχή ίση με 49.6 kPa. Η εφελκυστική αντοχή του SFRM, για αρχή καθορίστηκε ίση με την ορθή διεπιφανειακή τάση, δηλαδή ίση με 22.9 kPa. Το διάγραμμα που προέκυψε απεικονίζεται παρακάτω.



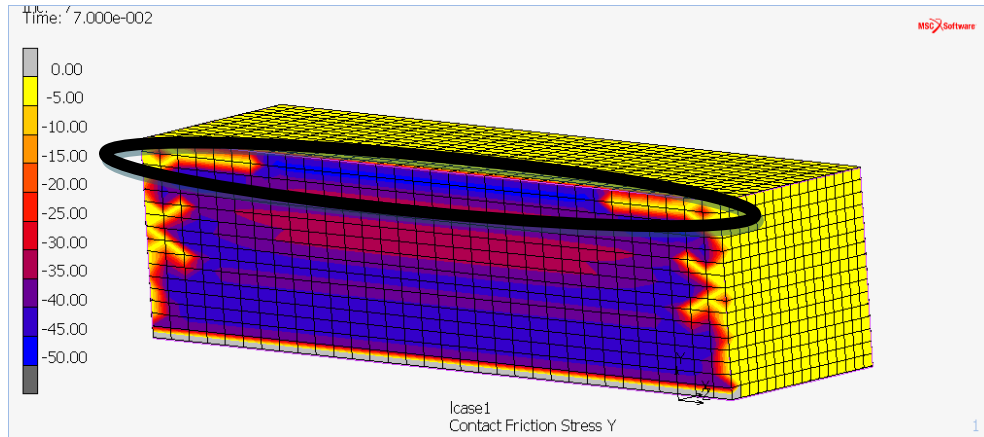
Διάγραμμα 6.1.2.1.: Διάγραμμα διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται, καταρχάς, ότι η διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια αυξάνεται διαρκώς έως τη στιγμή που η σχετική μετακίνηση φτάσει την τιμή 0.133 mm. Λίγο μετά από αυτή τη μετακίνηση ένα μικρό τμήμα του SFRM χάνει την επαφή με το μεταλλικό δομικό μέλος. Αυτό φαίνεται από την παρακάτω εικόνα (Εικόνα 48) στην οποία, επειδή εφαρμόζεται η διαδικασία του κριτηρίου τάσεων Yamada – Sun, όποιο πεπερασμένο στοιχείο έχει πάρει την τιμή 1, έχει χάσει την επαφή.

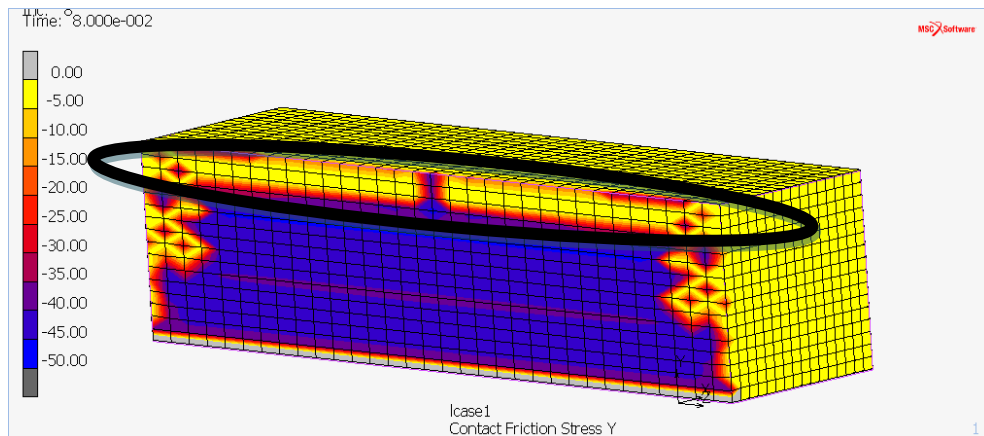


Εικόνα 48: Στιγμιότυπο 1<sup>ης</sup> απώλειας επαφής

Η παραπάνω εικόνα (Εικόνα 48) ερμηνεύεται καλύτερα έχοντας το αντίστοιχο στιγμιότυπο των διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων (Εικόνα 50), αφού πρόκειται για καθαρή διάτμηση. Ωστόσο, θεωρήθηκε απαραίτητο να απεικονισθεί το στιγμιότυπο των διατμητικών τάσεων στο προηγούμενο βήμα (Εικόνα 49) προκειμένου να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά της διεπιφάνειας.



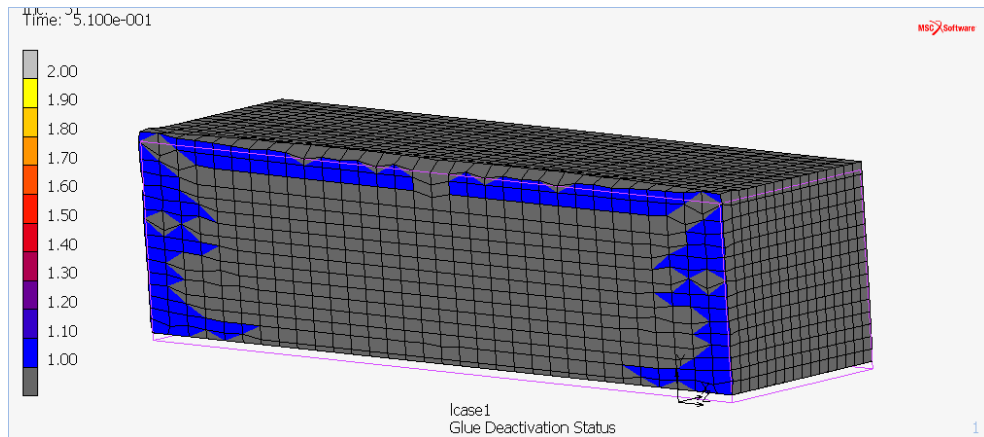
**Εικόνα 49:** Στιγμιότυπο των διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων ένα βήμα πριν την 1<sup>η</sup> απόλεια επαφής



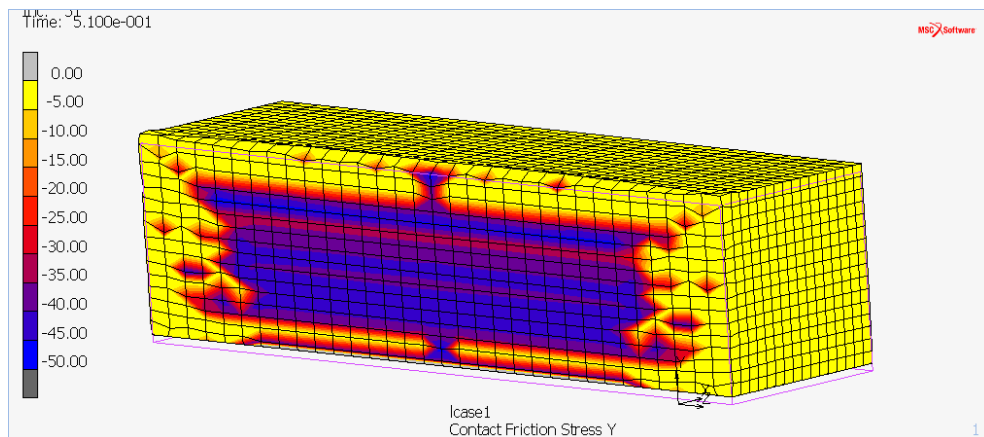
**Εικόνα 50:** Στιγμιότυπο των διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων κατά την 1<sup>η</sup> απόλεια επαφής

Από τις παραπάνω εικόνες (Εικόνες 49, 50) παρατηρείται ότι η περιοχή του SFRM που σημειώνεται (περιοχή μέσα στον κύκλο) αφού έχει αποκτήσει τη μέγιστη διατμητική της τάση, στη συνέχεια η τάση μειώνεται δεδομένης και της απόλεια επαφής όπως φαίνεται από την Εικόνα 50. Όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς από το αρχικό διάγραμμα διατμητικής δύναμης – σχετικής μετακίνησης, στη συνέχεια η διεπιφάνεια παρουσιάζει σχετικά την ίδια συμπεριφορά με ορισμένες μικρές αυξομειώσεις μέχρι η σχετική μετακίνηση να γίνει ίση με 0.969 mm και η αντίστοιχη διατμητική δύναμη ίση με 93,58 N. Εκείνη τη στιγμή της καταπόνησης που αποτελεί και το τέλος της 1<sup>ης</sup> ανάλυσης, τα στιγμιότυπα της κατάστασης επαφής και των διατμητικών τάσεων είναι τα παρακάτω (Εικόνες 51, 52).





Εικόνα 51: Στιγμιότυπο απώλειας επαφής στο τέλος της 1<sup>ης</sup> ανάλυσης



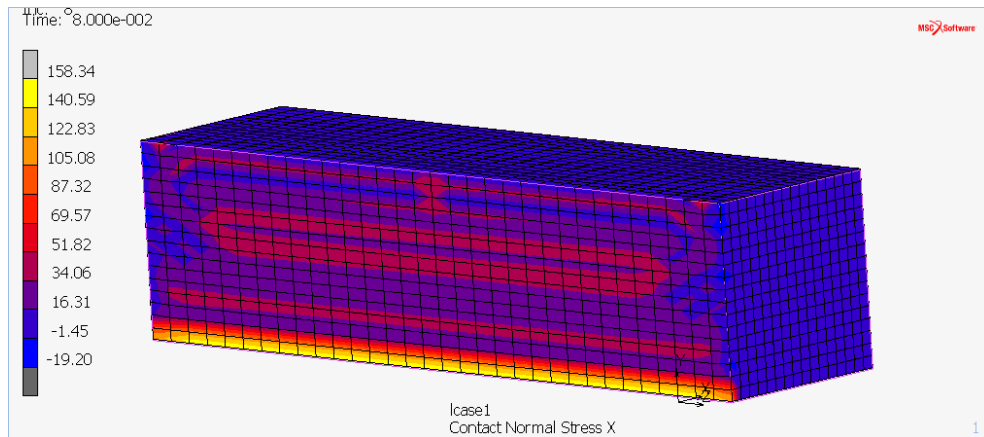
Εικόνα 52: Στιγμιότυπο διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων στο τέλος της 1<sup>ης</sup> ανάλυσης

Τα παραπάνω στιγμιότυπα (Εικόνες 51, 52) δείχνουν ότι στο τέλος της ανάλυσης, ένα μεγάλο τμήμα του πυράντοχου έχει διατηρήσει την επαφή, δεν ισχύει όμως το ίδιο για την περιμετρική περιοχή η οποία όπως φαίνεται έχει χάσει τη φερουσα ικανότητά της, αφού έχει πολύ μικρές έως μηδενικές τάσεις.

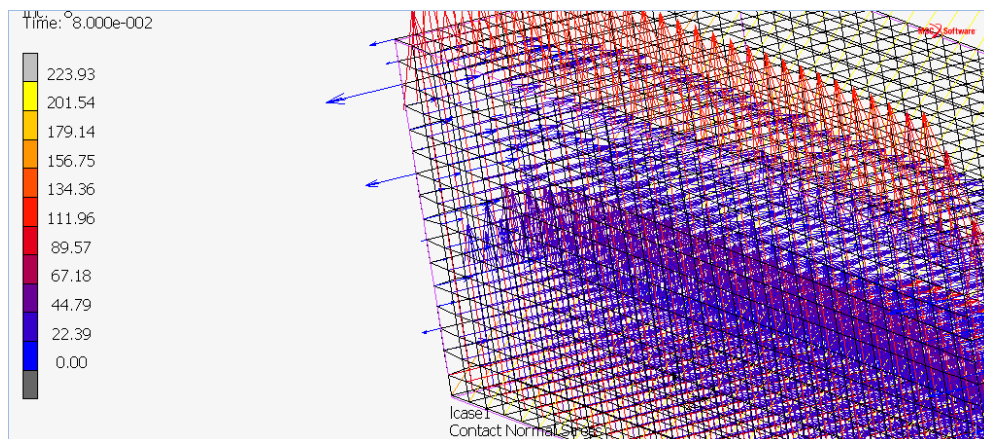
Πριν πραγματοποιηθεί σύγκριση με την καμπύλη συμπεριφοράς του διαγράμματος που προέκυψε από το πείραμα, διερευνάται η ορθή τάση στη διεπιφάνεια στα στιγμιότυπα που διερευνήθηκε και η διατμητική.

- 1<sup>η</sup> Απώλεια επαφής

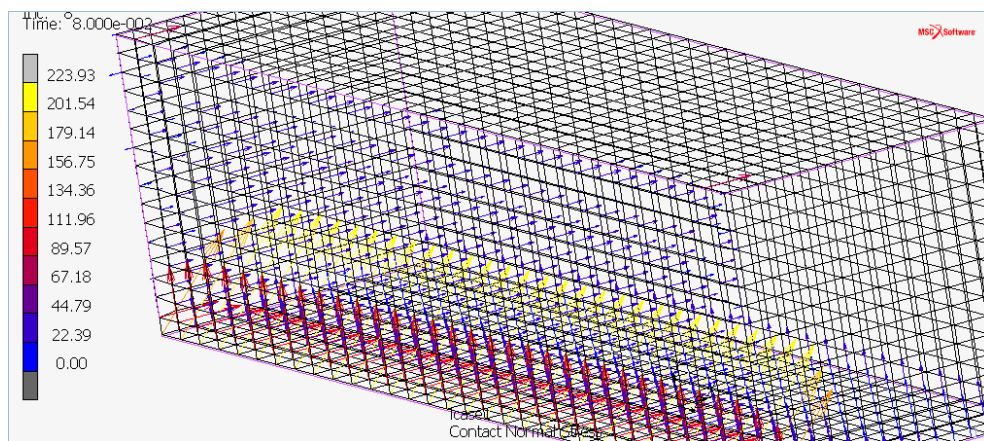
Κατά την 1<sup>η</sup> απώλεια επαφής, τα στιγμιότυπα των ορθών τάσεων απεικονίζεται παρακάτω (Εικόνα 53).



Εικόνα 53: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων κατά την 1η απώλεια επαφής

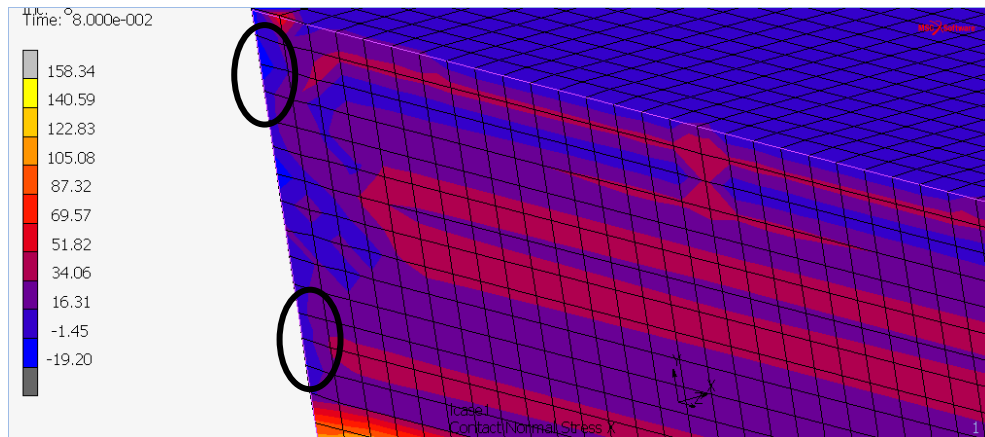


Εικόνα 54: Φορά των ορθών τάσεων κατά την 1η απώλεια επαφής (Λεπτομέρεια)



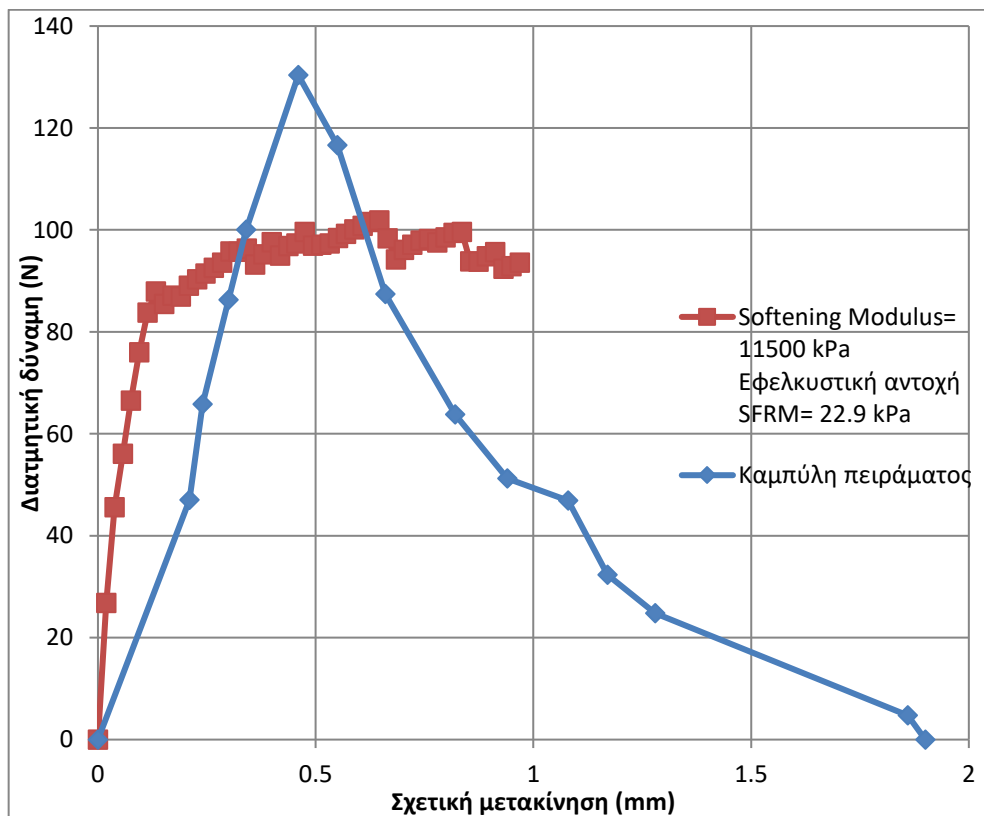
Εικόνα 55: Φορά των ορθών τάσεων κατά την 1<sup>η</sup> απώλεια επαφής

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι τη στιγμή της 1<sup>ης</sup> απώλειας επαφής, οι ορθές τάσεις που ασκούνται είναι θλιπτικές σύμφωνα με τα διανύσματα των Εικόνας 54 και 55. Αυτό συμβαίνει καθώς με την αύξηση της καταπόνησης δημιουργείται ένας μικρός μοχλοβραχίονας με αποτέλεσμα το SFRM να θλίβεται. Εντοπίζονται, όμως, ορισμένες εφελκυστικές τάσεις οι οποίες σημειώνονται στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 56). Στο σημείο αυτό, όπως αποδεικνύεται από το παρακάτω σχήμα, η διεπιφάνεια έχει αναπτύξει σχεδόν την μέγιστη ορθή της τάση.



Εικόνα 56: Εφελκυστικές ορθές τάσεις κατά την 1<sup>η</sup> απόλεια επαφής (Λεπτομέρεια της Εικόνας 53)

Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση του διαγράμματος της διατμητικής δύναμης στη διεπιφάνεια σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση όπως προέκυψε από την 1<sup>η</sup> ανάλυση με το διάγραμμα του πειράματος σε διάτμηση που πραγματοποιήθηκε.



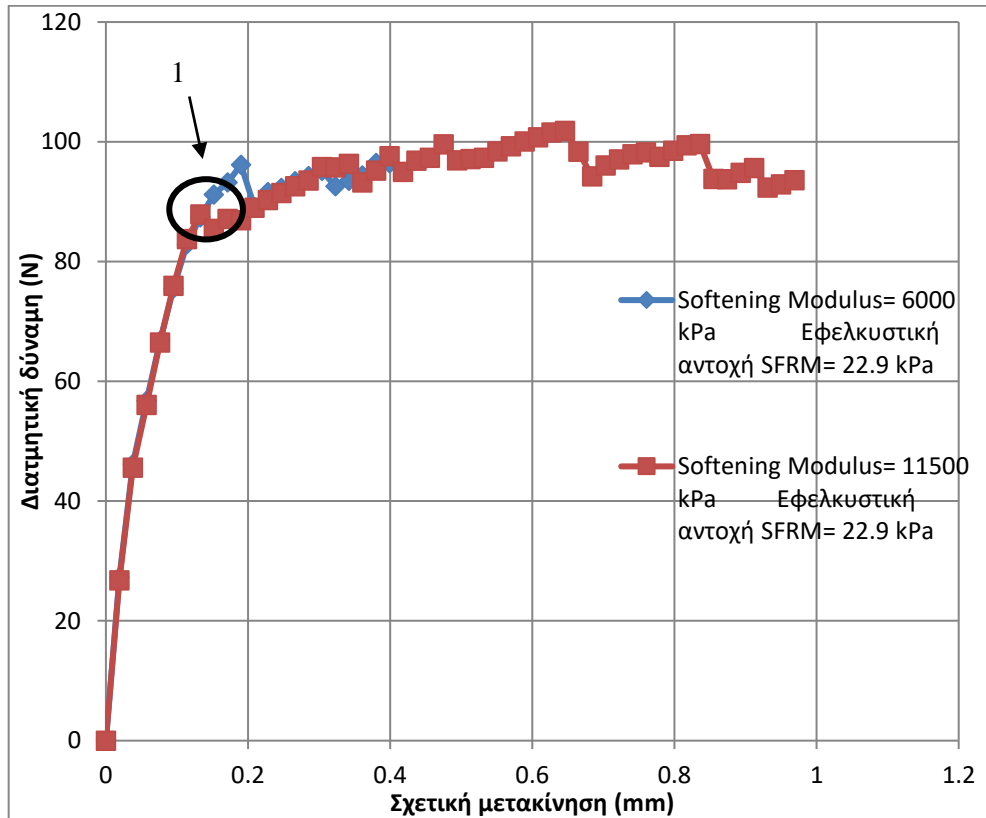
Διάγραμμα 6.1.2.2: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 1<sup>ης</sup> ανάλυσης - πειράματος

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούνται αρκετές σημαντικές διαφορές της 1<sup>ης</sup> ανάλυσης με το πείραμα. Πρώτα απ' όλα, διαφέρει η αρχική δυσκαμψία της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, ενώ από τη μέγιστη δύναμη και μετά η συμπεριφορά που παρουσιάζει η διεπιφάνεια μένει περίπου σταθερή.

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις μεταβάλλοντας τόσο το softening modulus όσο και την εφελκυστική αντοχή του SFRM προκειμένου να γίνει διερεύνηση για το πώς επιδρά η αλλαγή των μεγεθών αυτών στη συμπεριφορά της διεπιφάνειας και να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα.

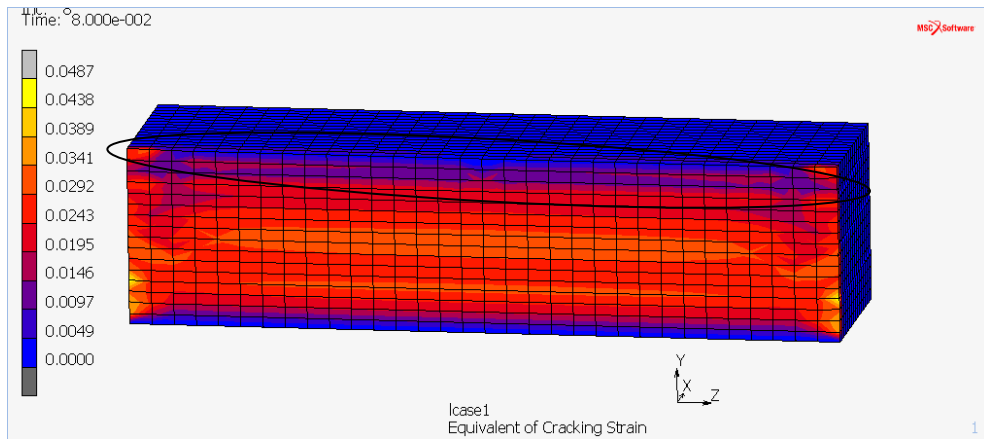
## ➤ 2<sup>η</sup> Ανάλυση

Στη δεύτερη ανάλυση μεταβάλλεται το softening modulus από την τιμή 11500 kPa στη τιμή 6000 kPa. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μένουν ίδια. Το διάγραμμα που προέκυψε από τη 2<sup>η</sup> ανάλυση είναι το παρακάτω και συγκρίνεται με το διάγραμμα της 1<sup>ης</sup> ανάλυσης.

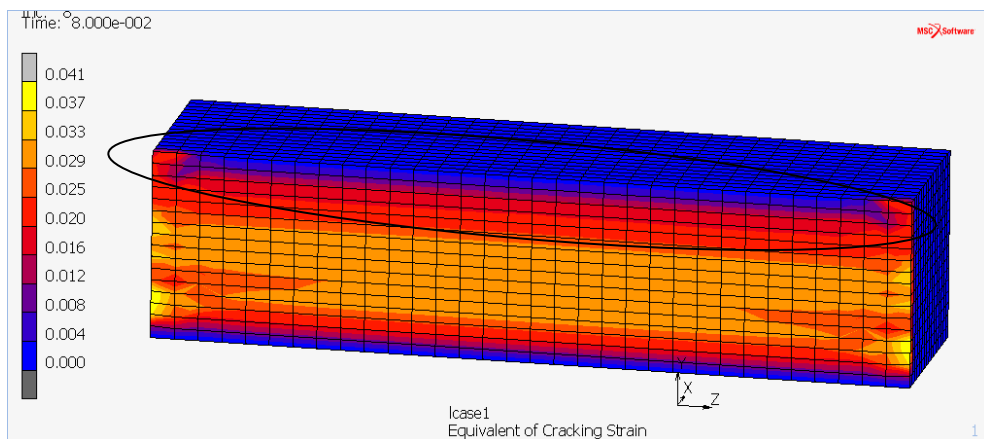


Διάγραμμα 6.1.2.3.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> ανάλυσης

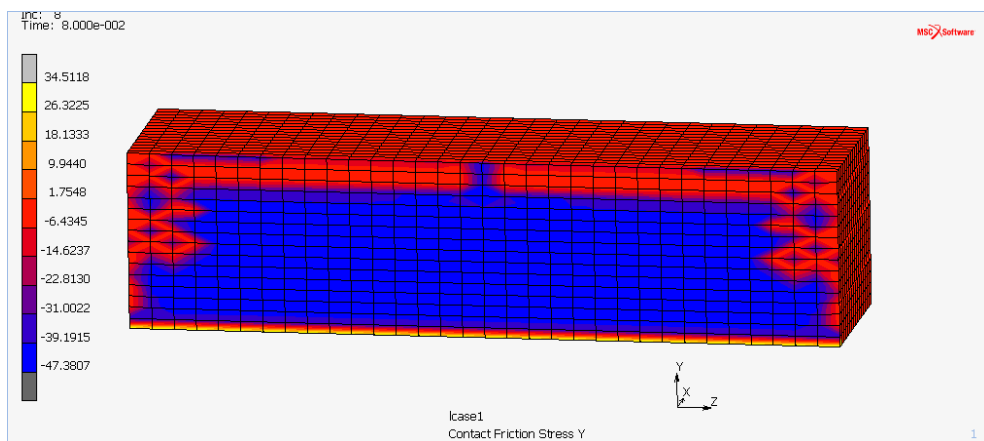
Μέσω του παραπάνω διαγράμματος προκύπτει, ότι μειώνοντας το softening modulus από την τιμή των 11500 kPa στη τιμή των 6000 kPa, δεν παρατηρείται κάποια σημαντική διαφορά, καθώς όπως φαίνεται η συμπεριφορά της διεπιφάνειας είναι παρόμοια. Η μόνη διαφορά βρίσκεται στην περιοχή μέχρι την οποία αυξάνεται η διατμητική δύναμη. Συγκεκριμένα, όταν το SFRM έχει softening modulus ίσο με 6000, η σχετική μετακίνηση μέχρι την οποία φτάνει η μέγιστη διατμητική δύναμη είναι λίγο μεγαλύτερη και συγκεκριμένη ίση με 0,19 mm σε αντίθεση με τα 0,133 mm που ίσχυε στην πρώτη ανάλυση. Στη 2<sup>η</sup> ανάλυση το SFRM συμπεριφέρεται έχοντας μεγαλύτερο περιθώριο παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση προκειμένου η διεπιφάνεια να χάσει ένα ποσό της φέρουσας ικανότητάς της. Επίσης, όπως φαίνεται από την Εικόνα 57, στο σημείο 1 στην περίπτωση που το SFRM έχει softening modulus= 11500 kPa υπάρχει μεγαλύτερο μέρος της διεπιφάνειας που έχει χάσει τη φέρουσα ικανότητα, γι' αυτό και δεν έχει την δυνατότητα να παραλάβει άλλη διατμητική δύναμη, όπως φαίνεται στις Εικόνες 57 και 59.



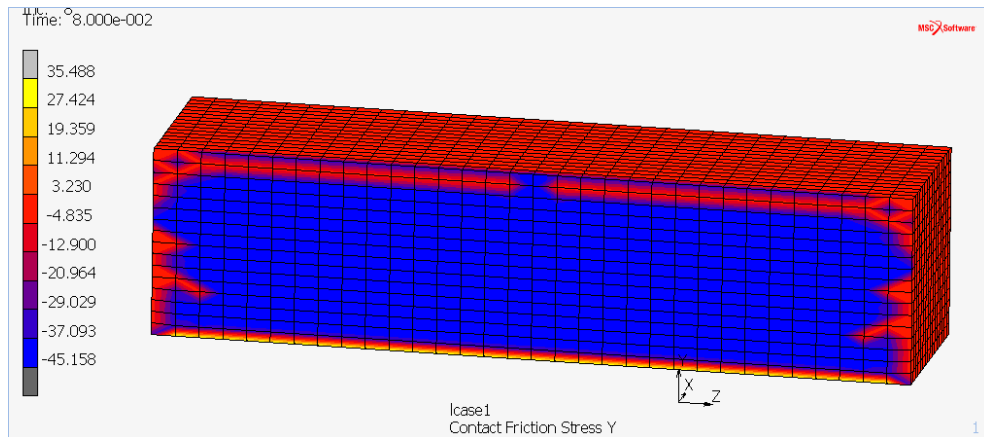
Εικόνα 57: Παραμόρφωση SFRM στο σημείο 1 όταν το SFRM έχει softening modulus= 11500 kPa



Εικόνα 58: Παραμόρφωση SFRM στο σημείο 1 όταν το SFRM έχει softening modulus= 6000 kPa



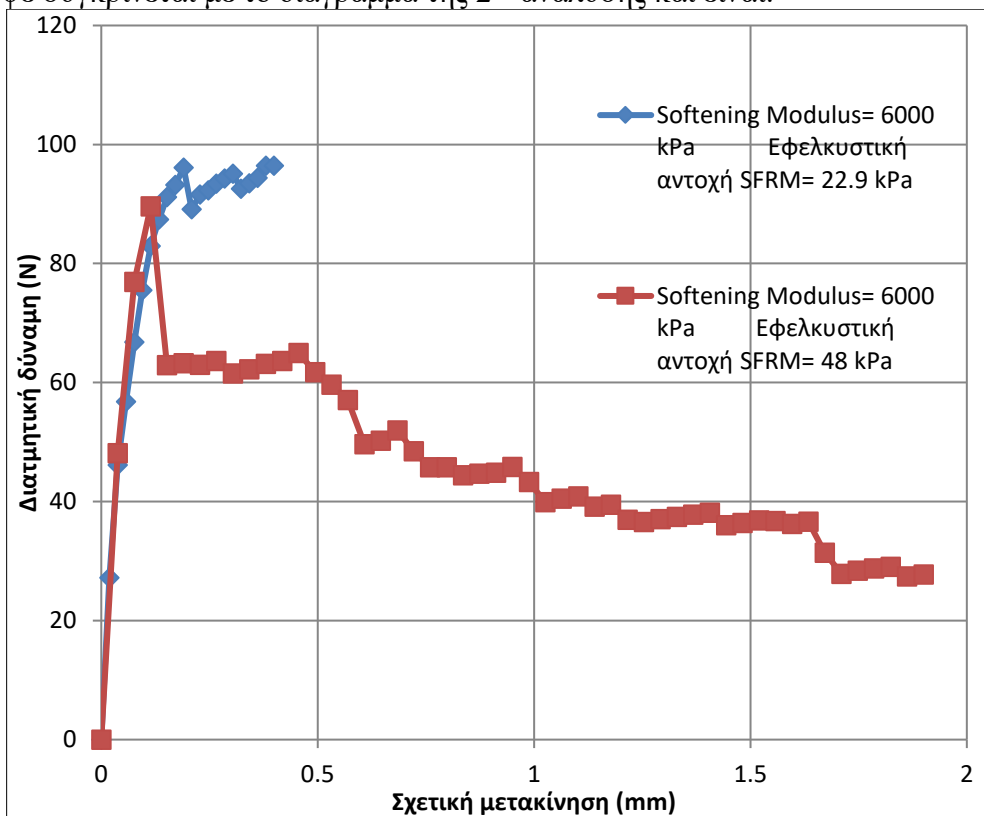
Εικόνα 59: Στιγμιότυπο διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων στο σημείο 1 όταν το SFRM έχει softening modulus= 11500 kPa



Εικόνα 60: Στιγμιότυπο διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων στο σημείο 1 όταν το SFRM έχει softening modulus= 6000 kPa

### ➤ 3<sup>η</sup> Ανάλυση

Στην 3<sup>η</sup> ανάλυση προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση με το διάγραμμα που προέκυψε από τη 2<sup>η</sup> ανάλυση, το softening modulus παρέμεινε ίδιο, δηλαδή ίσο με 6000 kPa, ενώ μεταβλήθηκε η εφελκυστική αντοχή του SFRM η οποία αυξήθηκε και τέθηκε ίση με 48 kPa από 22,9 kPa που ήταν προηγουμένως. Το διάγραμμα που προέκυψε συγκρίνεται με το διάγραμμα της 2<sup>ης</sup> ανάλυσης και είναι:

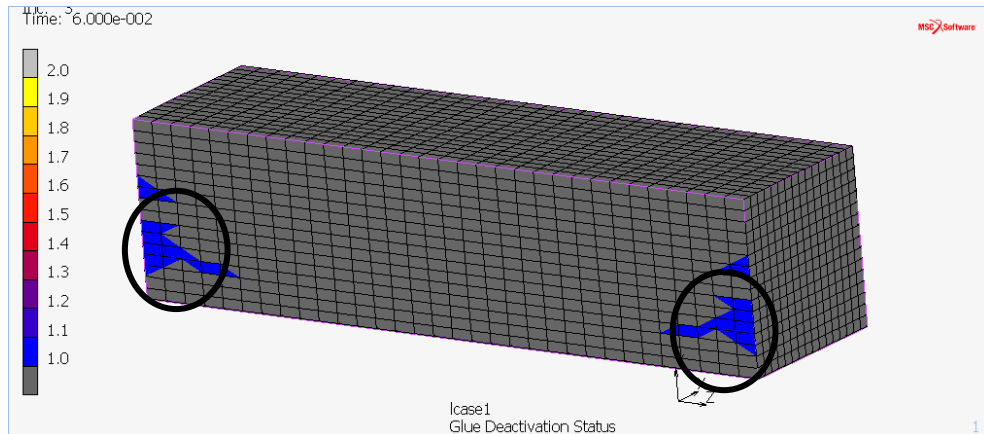


Διάγραμμα 6.1.2.4.: Σύγκριση διατμητικής διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> ανάλυσης

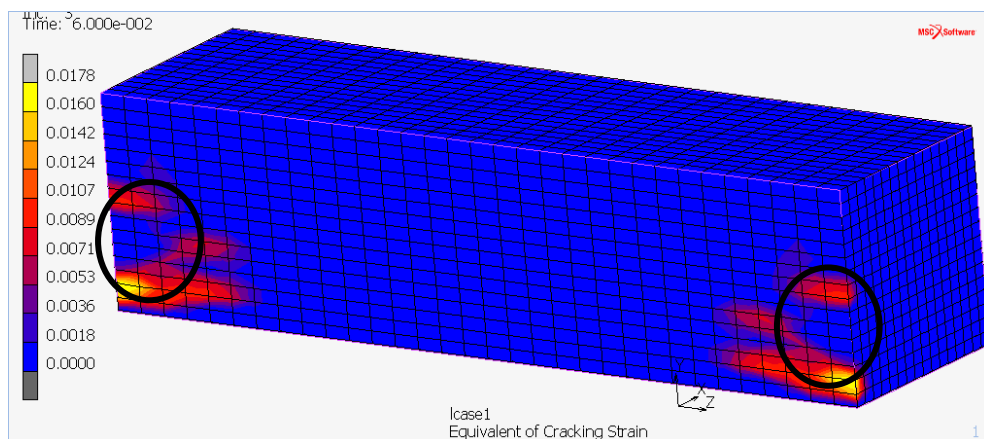
Με την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής του SFRM, παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στο τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται η διεπιφάνεια. Αρχικά, η επαφή μεταξύ των δύο υλικών ξεκινάει να χάνεται (Εικόνα 61) σε μικρότερη σχετική μετακίνηση ίση με 0,114 mm απ' ότι στη 2η ανάλυση που συνέβη σε σχετική μετακίνηση ίση με 0,19 mm και η μέγιστη διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια μειώνεται. Επίσης, δεδομένου ότι η εφελκυστική αντοχή του SFRM γίνεται



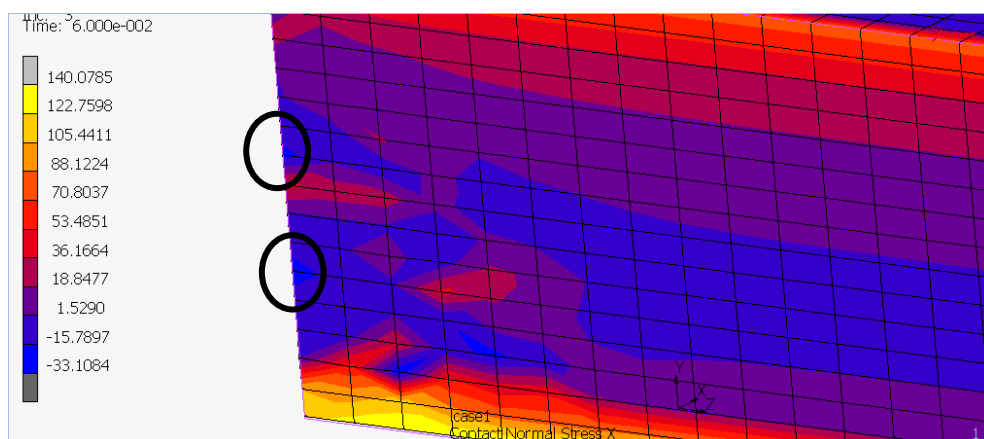
μεγαλύτερη από την ορθή αντοχή της διεπιφάνειας, πρώτα αστοχεί ένα μέρος της διεπιφάνειας, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διατμητική δύναμη που μπορεί να παραλάβει η διεπιφάνεια. Εκείνη τη στιγμή, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 62 το SFRM δεν έχει υποστεί παραμόρφωση στις περιοχές που βρίσκονται σε κύκλο. Τα παραπάνω φαίνονται από τις Εικόνες 62, 63 και 64.



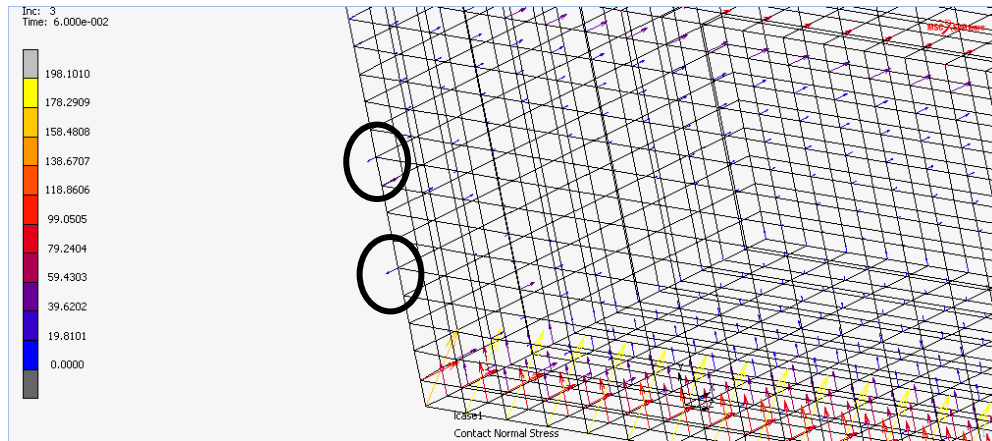
Εικόνα 61: 1<sup>η</sup> απόλεια επαφής



Εικόνα 62: Παραμόρφωση SFRM τη στιγμή της 1<sup>ης</sup> απόλειας επαφής

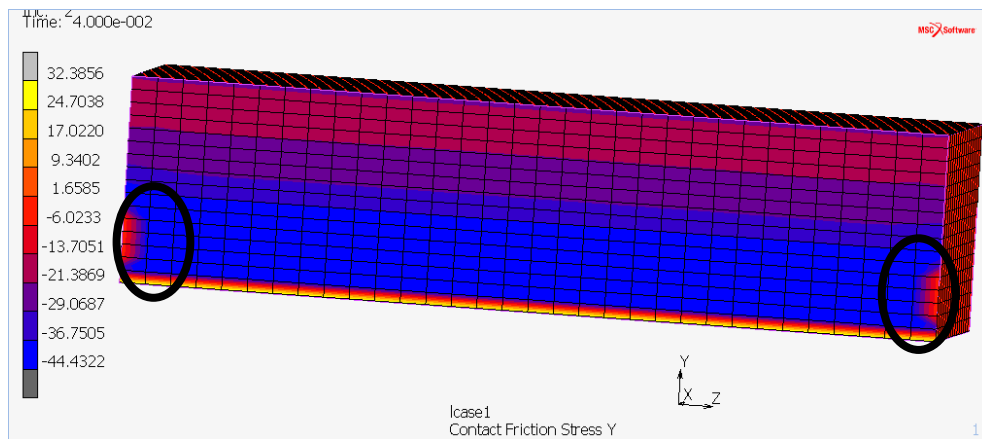


Εικόνα 63: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων τη στιγμή της 1<sup>ης</sup> απόλειας επαφής

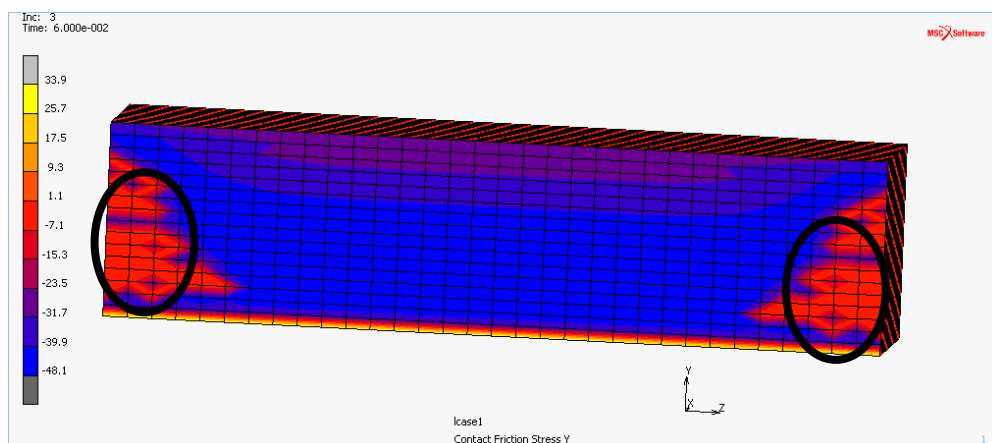


Εικόνα 64: Φορά των ορθών τάσεων στη διεπιφάνεια κατά την 1<sup>η</sup> απώλεια επαφής

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στιγμιότυπα των διατμητικών τάσεων λίγο πριν (Εικόνα 65) και κατά τη στιγμή της πρώτης απώλειας επαφής (Εικόνα 66) στη σχετική μετακίνηση των 0,114 mm.

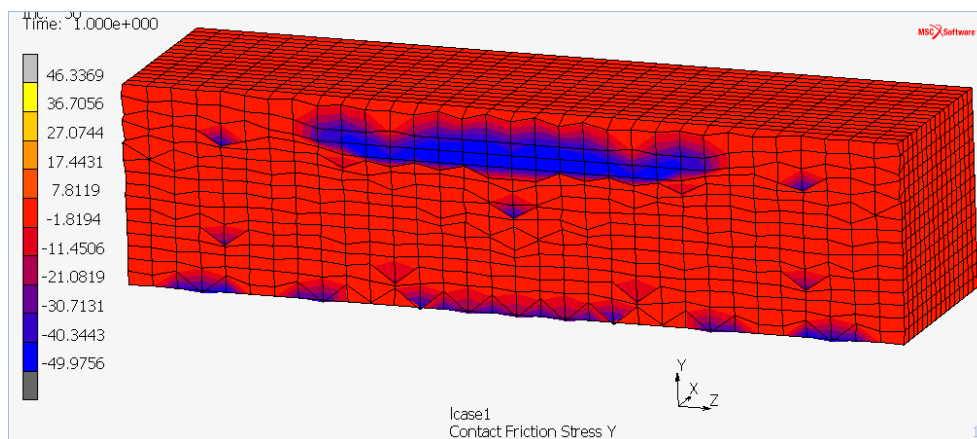


Εικόνα 65: Στιγμιότυπο διατμητικών τάσεων ένα βήμα πριν την 1<sup>η</sup> απώλεια επαφής



Εικόνα 66: Στιγμιότυπο διατμητικών τάσεων κατά την 1<sup>η</sup> απώλεια επαφής

Τα παραπάνω στιγμιότυπα (Εικόνες 65 και 66) δείχνουν ότι τα τμήματα που είναι μέσα στις κυκλικές περιοχές έχουν αναπτύξει αρχικά τη μέγιστη τάση τους και στη συνέχεια οι διατμητικές τάσεις αρχίζουν να μειώνονται. Στη συνέχεια δίνεται το στιγμιότυπο των διατμητικών τάσεων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης (Εικόνα 67).



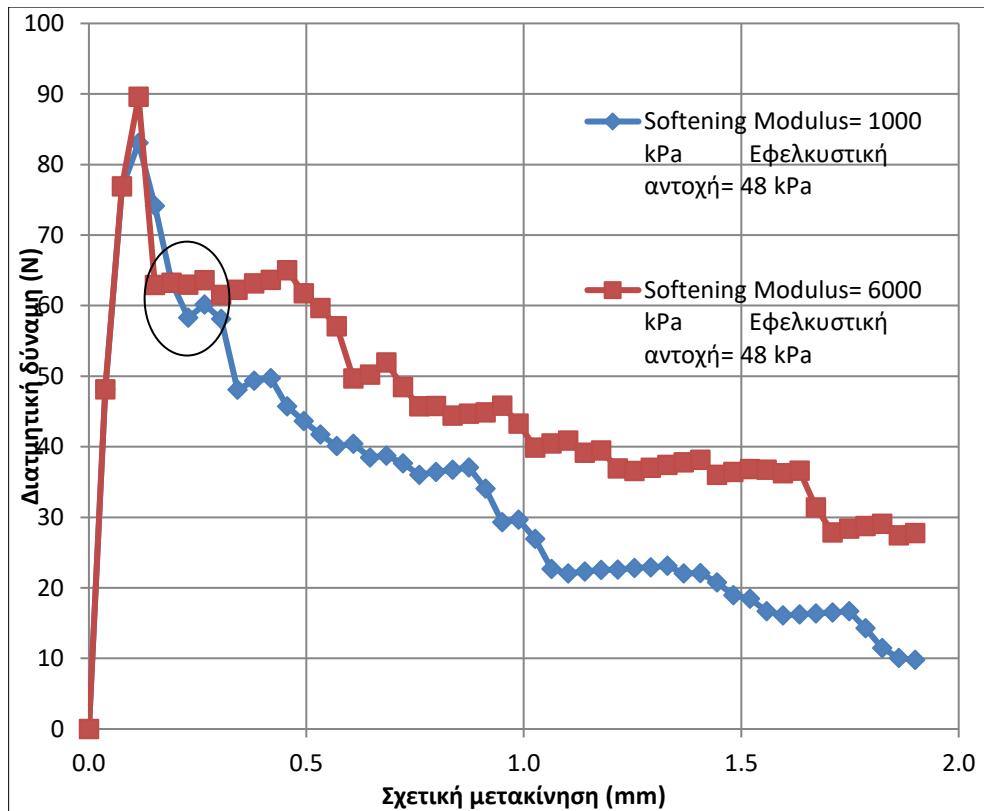
**Εικόνα 67: Στιγμιότυπο διατμητικών τάσεων στο τελευταίο βήμα της ανάλυσης**

Όπως φαίνεται από την παραπάνω εικόνα (Εικόνα 67), το μεγαλύτερο μέρος της διεπιφάνειας έχει χάσει τη φέρουσα ικανότητά του, αποτέλεσμα που αντιπροσωπεύει τη μεγάλη μείωση της διατμητικής δύναμης της διεπιφάνειας στο αρχικό διάγραμμα.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις θέτοντας μικρότερο softening modulus, προκειμένου να ελεγχθεί πως επηρεάζεται η συμπεριφορά της διεπιφάνειας. Στις επόμενες δύο αναλύσεις, ορίστηκαν softening modulus= 1000 kPa και εφελκυστική αντοχή SFRM 22,9 kPa και 48 kPa, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της 4<sup>ης</sup> ανάλυσης που ακολουθεί συγκρίνονται αρχικά με την 2<sup>η</sup> ανάλυση. Στη συνέχεια συγκρίνονται τα αποτελέσματα της.

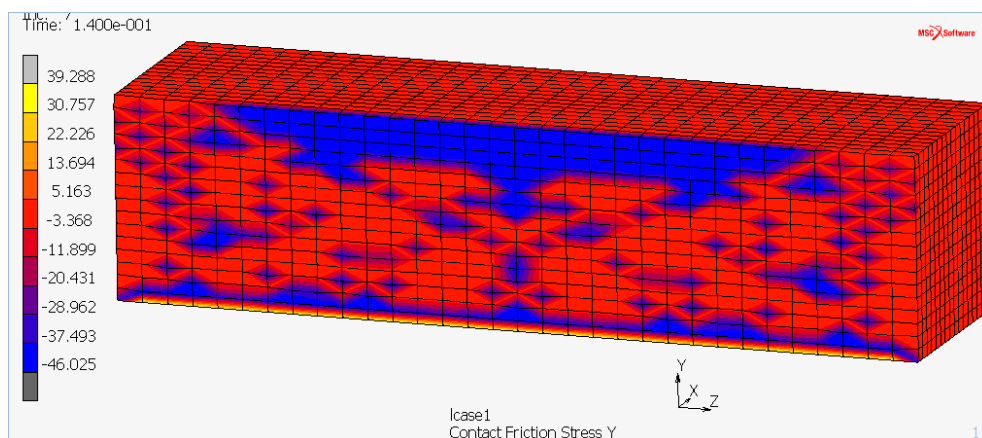
➤ 4<sup>η</sup> Ανάλυση

Στην 4<sup>η</sup> ανάλυση ορίστηκε softening modulus= 1000 kPa και εφελκυστική αντοχή του SFRM ίση με 48 kPa. Το παρακάτω σχήμα συγκρίνει τα διαγράμματα της 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> ανάλυσης.

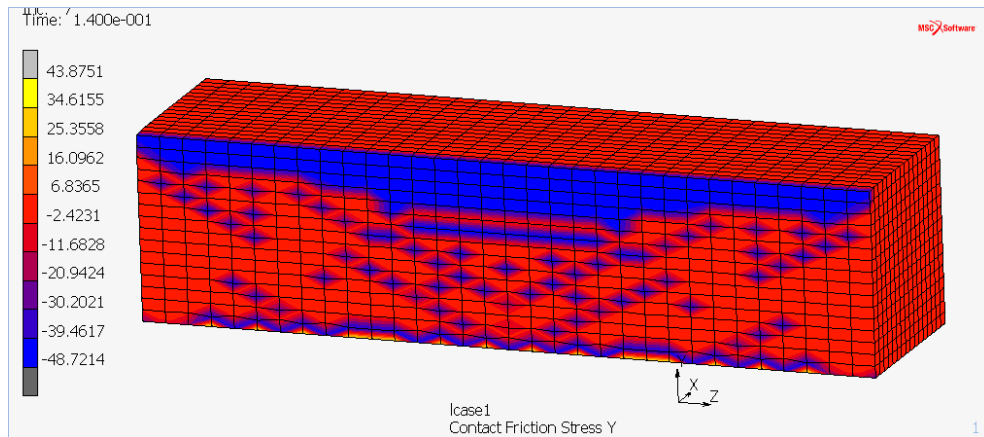


Διάγραμμα 6.1.2.5.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> ανάλυσης

Με τη μείωση του softening modulus από τα 6000 kPa στα 1000 kPa, παρατηρείται ότι η διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια μειώνεται με μεγαλύτερο ρυθμό. Αυτό συμβαίνει, καθώς όπως φαίνεται και από τις Εικόνες 68 και 69, στην περίπτωση που το SFRM έχει softening modulus= 6000 kPa, υπάρχει μεγαλύτερο μέρος της διεπιφάνειας που μπορεί να παραλάβει τη διατμητική δύναμη.



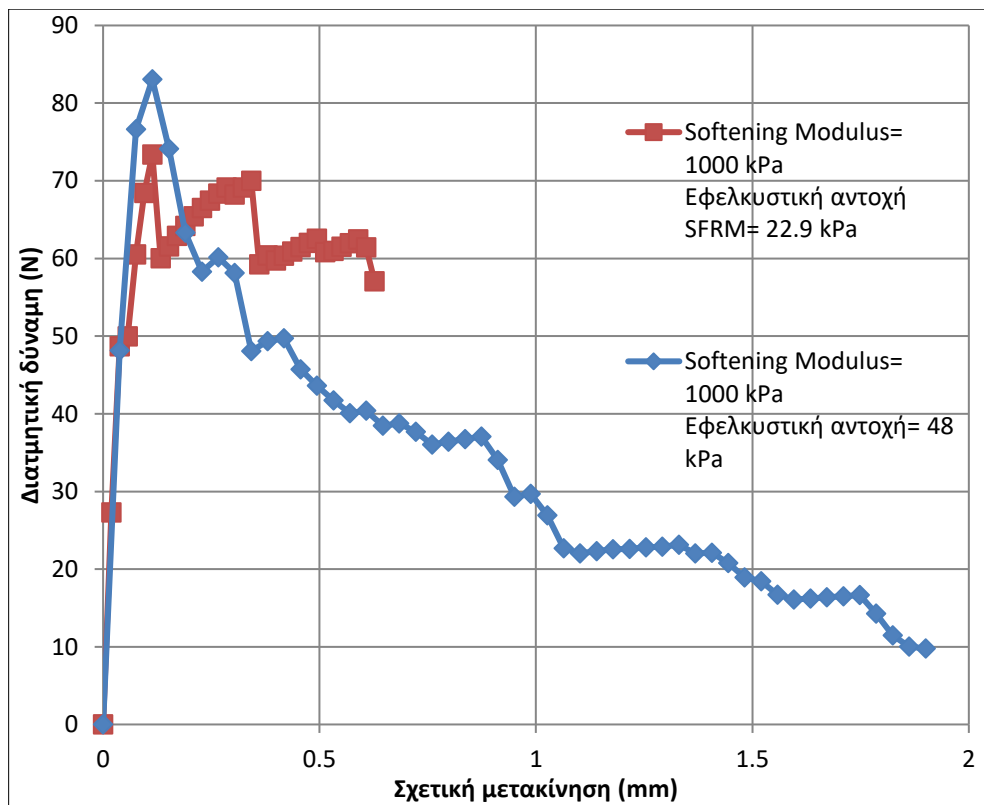
Εικόνα 68: Στιγμιότυπο διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων στο σημείο που βρίσκεται σε κύκλο όταν softening modulus= 6000 kPa



Εικόνα 69: Στιγμιότυπο διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων στο σημείο που βρίσκεται σε κύκλο όταν softening modulus= 1000 kPa

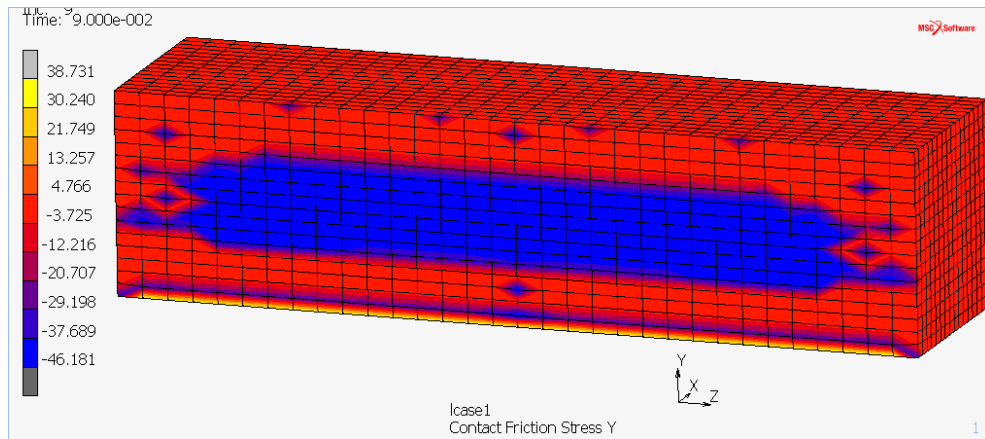
➤ 5<sup>η</sup> Ανάλυση

Στην 5<sup>η</sup> ανάλυση χρησιμοποιήθηκε softening modulus= 1000 kPa και εφελκυστική αντοχή του SFRM ίση με 22,9 kPa. Τα συγκριτικά διαγράμματα απεικονίζονται παρακάτω.

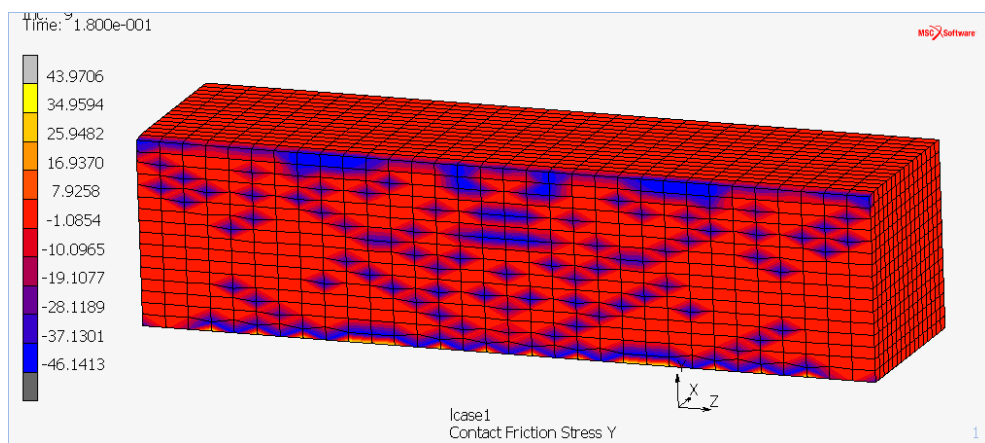


Διάγραμμα 6.1.2.6.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 4<sup>ης</sup> και 5<sup>ης</sup> ανάλυσης

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει, ότι μειώνοντας την εφελκυστική αντοχή του SFRM, η διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια μειώνεται. Σύμφωνα με τις Εικόνες 70 και 71, παρατηρείται ότι στο σημείο τομής των δύο καμπυλών, όταν το SFRM έχει εφελκυστική αντοχή ίση με 22,9 kPa, υπάρχει μεγαλύτερο τμήμα του SFRM που είναι σε επαφή με το χάλυβα, που σημαίνει ότι η διεπιφάνεια μπορεί να παραλάβει περισσότερη διατμητική δύναμη. Ωστόσο, η σχετική μετακίνηση είναι πολύ μικρότερη από αυτή που προέκυψε από την προηγούμενη ανάλυση.



**Εικόνα 70: Στιγμιότυπο διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων στο κοινό σημείο των δύο καμπυλών όταν η εφελκυστική αντοχή του SFRM είναι ίση με 22,9 kPa**

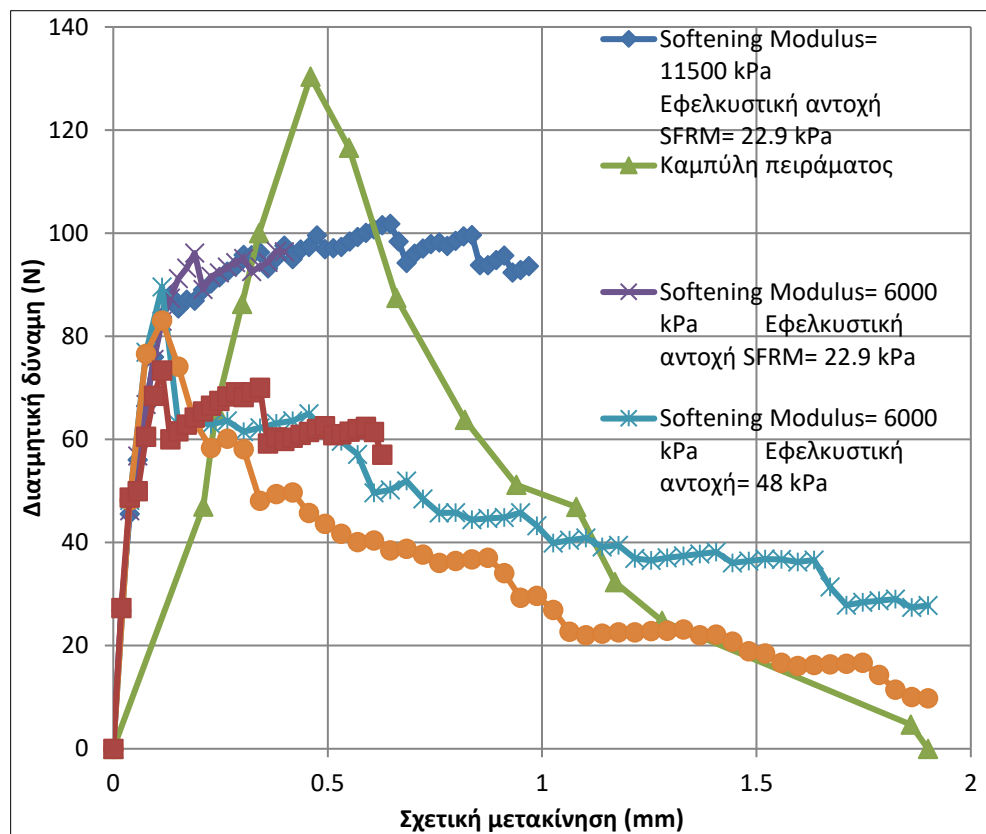


**Εικόνα 71: Στιγμιότυπο διεπιφανειακών διατμητικών τάσεων στο κοινό σημείο των δύο καμπυλών όταν η εφελκυστική αντοχή του SFRM είναι ίση με 48 kPa.**

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα της 1<sup>ης</sup> μεθοδολογίας με



το διάγραμμα του πειράματος.



Διάγραμμα 6.1.2.7.: Σύγκριση αποτελεσμάτων αναλύσεων 1<sup>ης</sup> μεθοδολογίας με το διάγραμμα του πειράματος

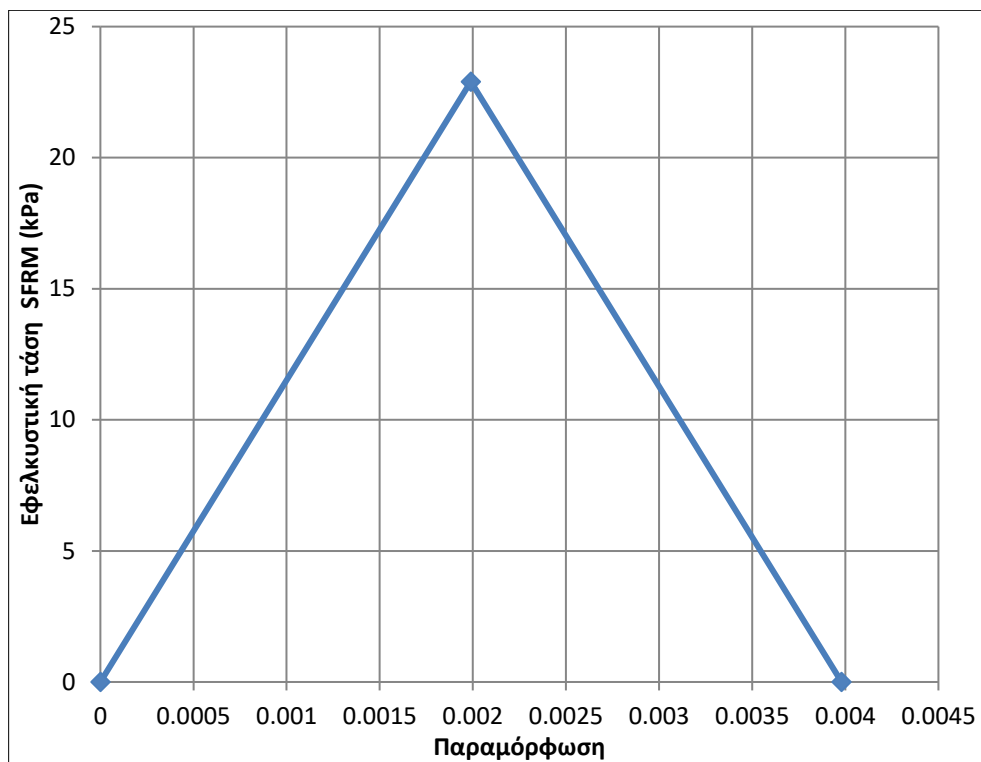
Από το παραπάνω σχήμα προκύπτει, ότι ο τρόπος προσομοίωσης της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας βάσει της 1<sup>ης</sup> μεθοδολογίας, αποκλίνει σημαντικά από την καμπύλη του πειράματος. Συνεπώς, στη συνέχεια θα πραγματοποιηθούν αναλύσεις βάσει της 2<sup>ης</sup> μεθοδολογίας.

### 6.1.3. Αναλύσεις βάσει κριτηρίου αστοχίας διεπιφάνειας μέσω παραμόρφωσης του SRFM

Σύμφωνα με τη δεύτερη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών θεωρήθηκε ότι η φέρουσα ικανότητα της διεπιφάνειας αρχίζει να μειώνεται λόγω της παραμόρφωσης του SRFM. Για τις ανάγκες της ανάλυσης και προκειμένου να ληφθούν πιο ακριβή αποτελέσματα, η κάτω ίνα του SRFM διακριτοποιήθηκε σε περισσότερα πεπερασμένα ώστε να προσεγγιστεί όσο τον δυνατόν περισσότερο η παραμόρφωση μετά την ελαστική περιοχή. Επίσης, στη συγκεκριμένη μεθοδολογία ως στήριξη χρησιμοποιήθηκε πάκτωση σε όλο το έλασμα του χάλυβα.

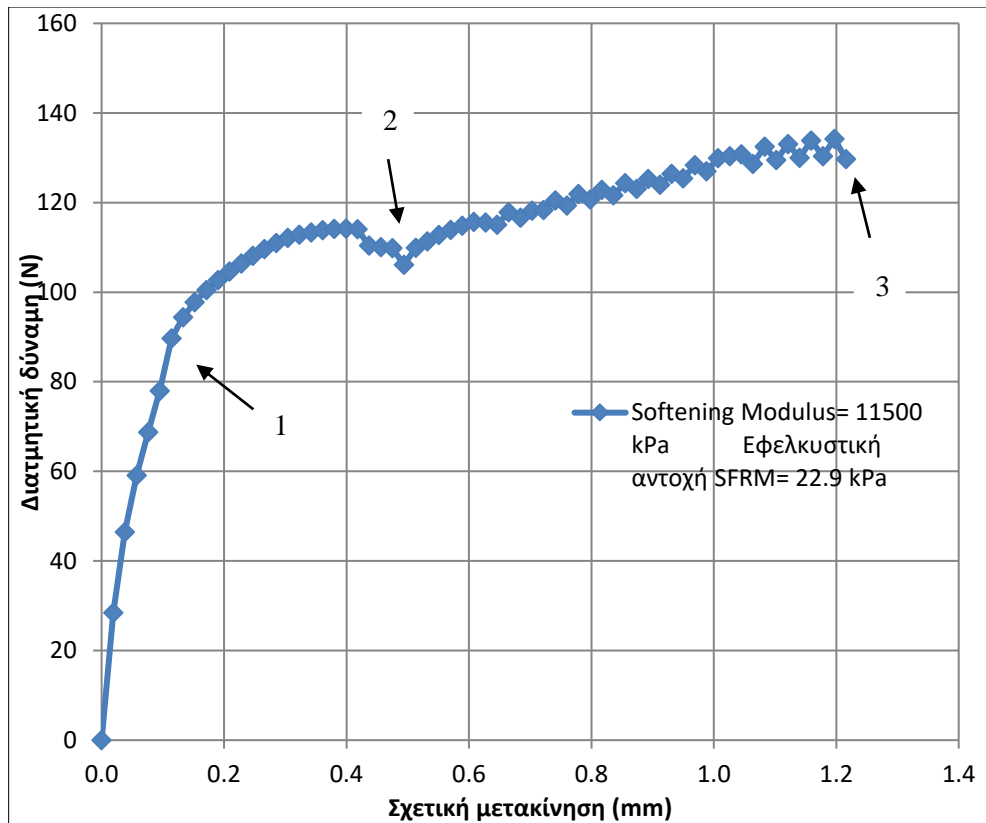
➤ 1<sup>η</sup> Ανάλυση

Στην 1<sup>η</sup> ανάλυση θεωρήθηκε softening modulus ίσο με το μέτρο ελαστικότητας του SFRM και η εφελκυστική αντοχή του SFRM ίση με 22,9 kPa. Το διάγραμμα που απεικονίζει τη συμπεριφορά του SFRM είναι:



Διάγραμμα 6.1.3.1.: Νόμος συμπεριφοράς SFRM

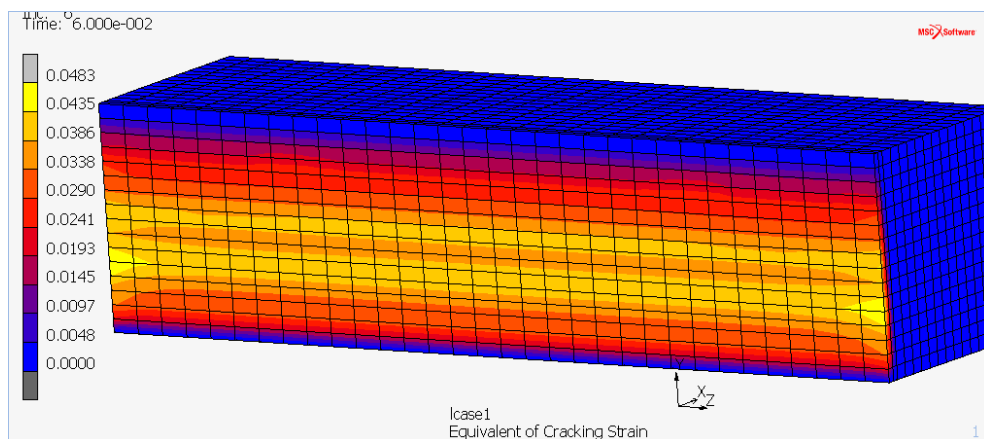
Το διάγραμμα που προσδιορίζει τη διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση είναι το παρακάτω.



Διάγραμμα 6.1.3.2.: Διατμητική δύναμη σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια

Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει ότι η διατμητική δύναμη της διεπιφάνειας συνεχώς αυξάνεται. Για να διερευνηθεί η συγκεκριμένη συμπεριφορά, παρακάτω αναπαριστώνται τα στιγμιότυπα των παραμορφώσεων του SFRM και των διατμητικών τάσεων της διεπιφάνειας στα χαρακτηριστικά σημεία του παραπάνω διαγράμματος.

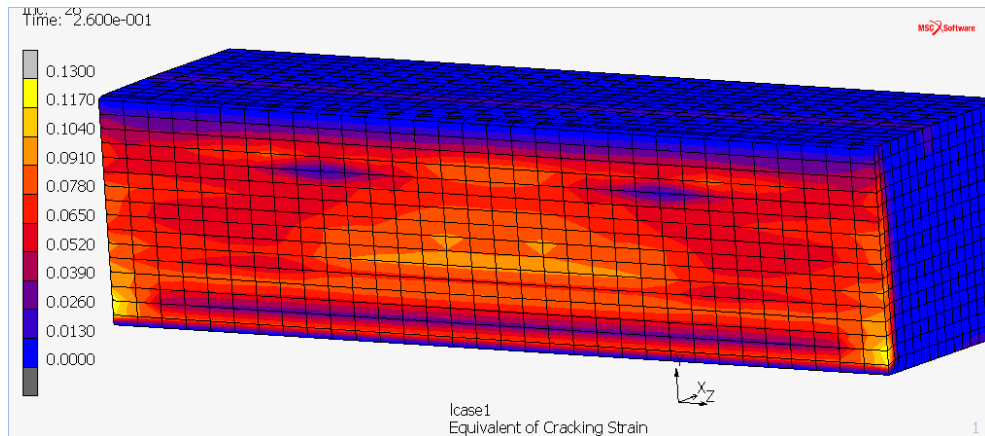
- Σημείο 1



Εικόνα 72: Στιγμιότυπο παραμορφώσεων στο SFRM στο σημείο 1

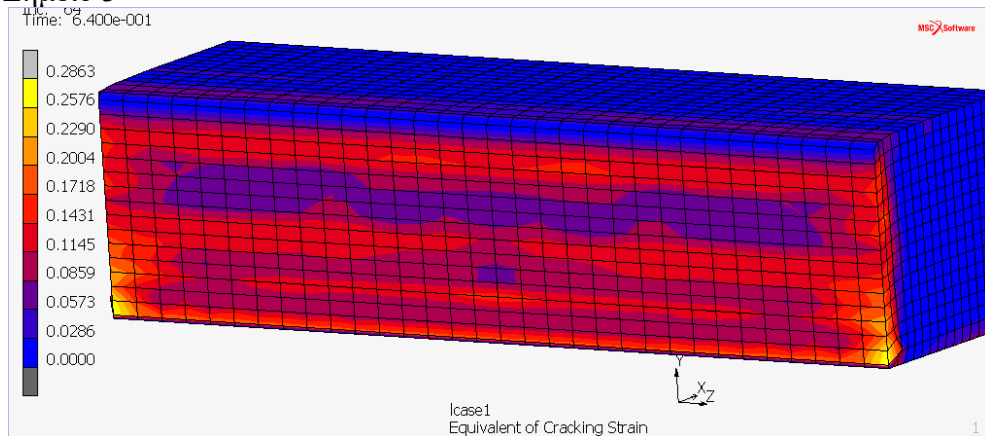
Από την παραπάνω εικόνα (Εικόνα 72) παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο μέρος του SFRM έχει αναπτύξει μεγαλύτερη παραμόρφωση από αυτή που έχει υπολογιστεί. Αυτό συμβαίνει διότι το υλικό μπορεί να έχει παραμορφωθεί πέρα από την τιμή που τελειώνει ο φθίνων κλάδος του διαγράμματος των τάσεων.

- Σημείο 2



**Εικόνα 73: Στιγμιότυπο παραμορφώσεων στο SFRM στο σημείο 2**

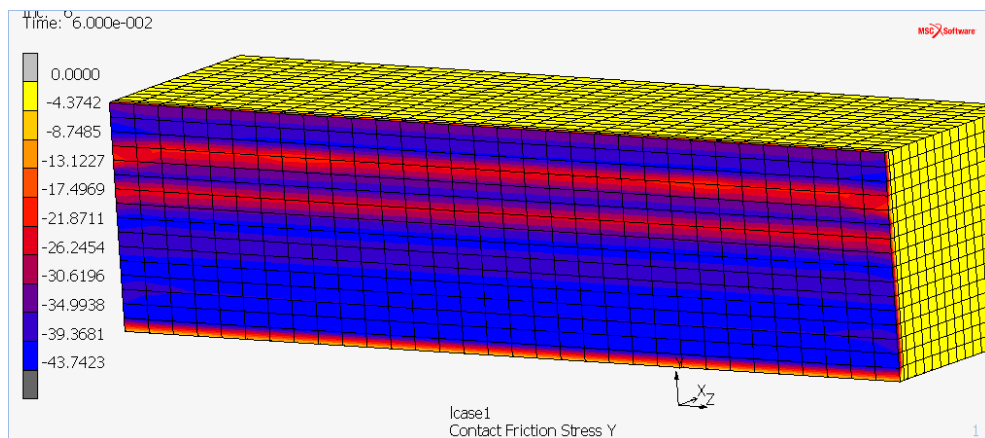
- Σημείο 3



**Εικόνα 74: Στιγμιότυπο παραμορφώσεων στο SFRM στο σημείο 3**

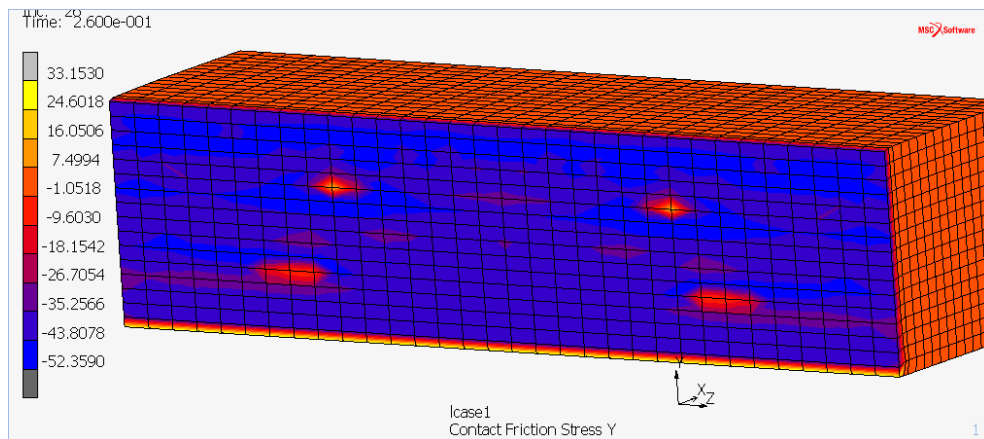
Τα παραπάνω στιγμιότυπα (Εικόνες 73 και 74) δείχνουν ότι η διεπιφάνεια, παρά την παραμόρφωση του SFRM, συνεχίζει να αναπτύσσει διατμητική δύναμη. Ακολουθούν τα στιγμιότυπα των διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων για τα τρία παραπάνω σημεία (Εικόνες 75, 76 και 77).

- Σημείο 1



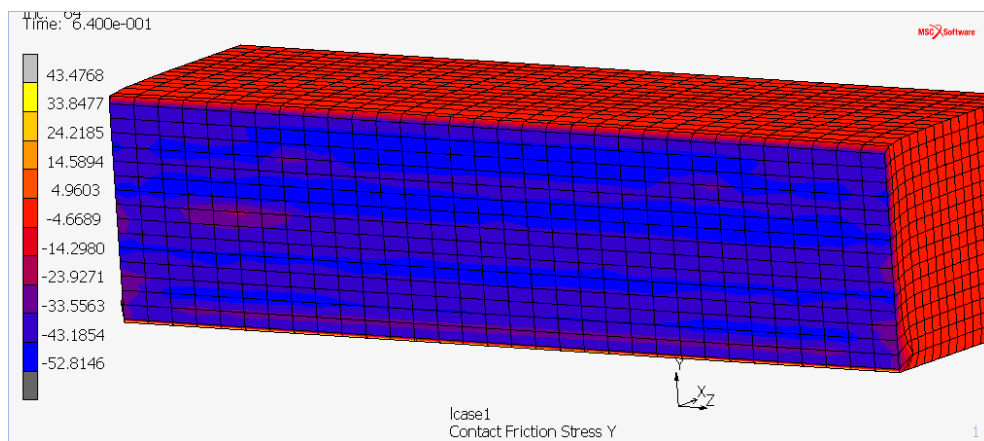
**Εικόνα 75: Στιγμιότυπο διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων στο σημείο 1**

- Σημείο 2



Εικόνα 76: Στιγμιότυπο διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων στο σημείο 2

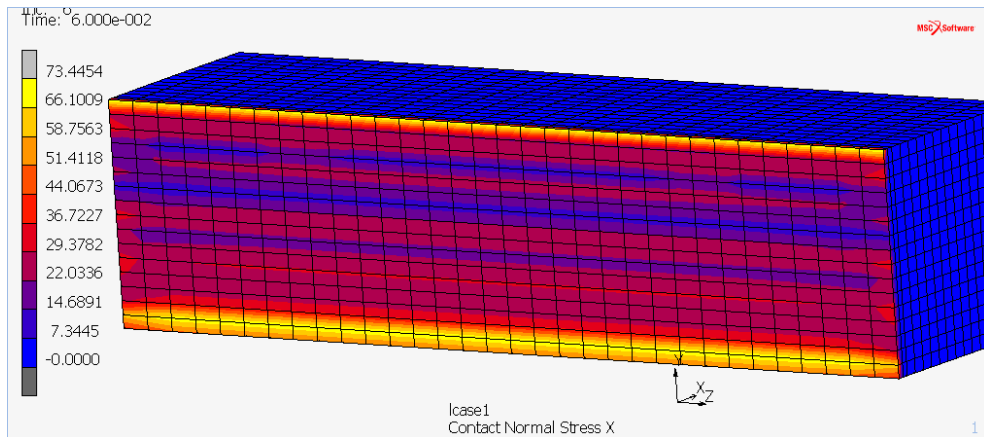
- Σημείο 3



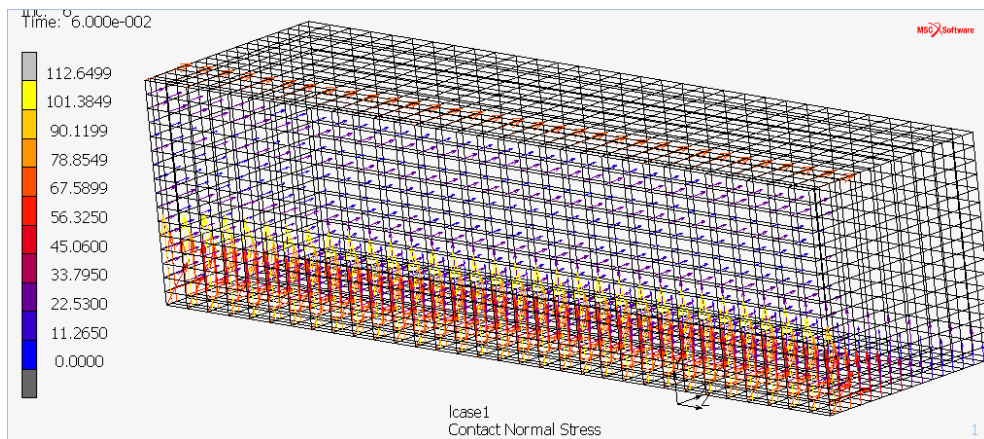
Εικόνα 77: Στιγμιότυπο διατμητικών διεπιφανειακών τάσεων στο σημείο 3

Από τις παραπάνω εικόνες (Εικόνες 75, 76, 77) παρατηρείται ότι μέχρι και το τελευταίο βήμα της ανάλυσης, οι διατμητικές διεπιφανειακές τάσεις συνεχώς αυξάνονται, γεγονός που δείχνει ότι η διεπιφάνεια δεν έχει χάσει τη φέρουσα ικανότητά της. Στη συνέχεια απεικονίζονται τα στιγμιότυπα των ορθών τάσεων.

- ❖ Στιγμιότυπα ορθών τάσεων
- Σημείο 1

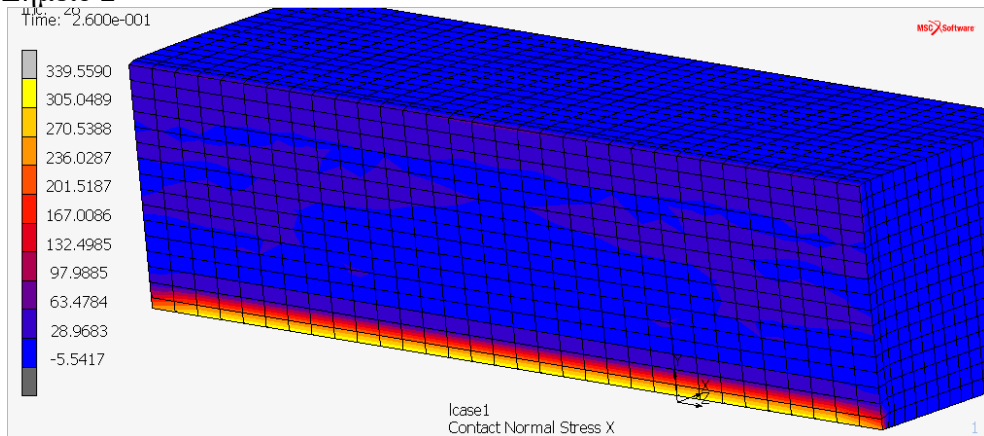


Εικόνα 78: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων για το Σημείο 1



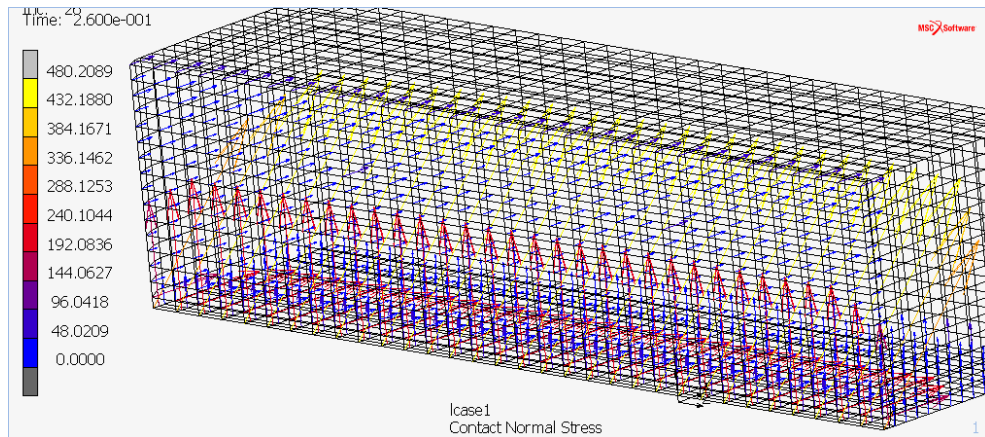
Εικόνα 79: Φορά των ορθών τάσεων για το Σημείο 1

- Σημείο 2



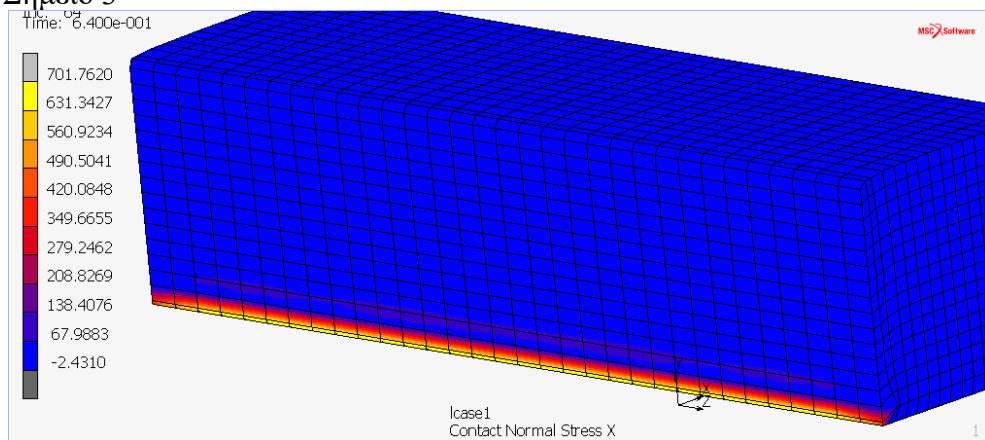
Εικόνα 80: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων για το Σημείο 2



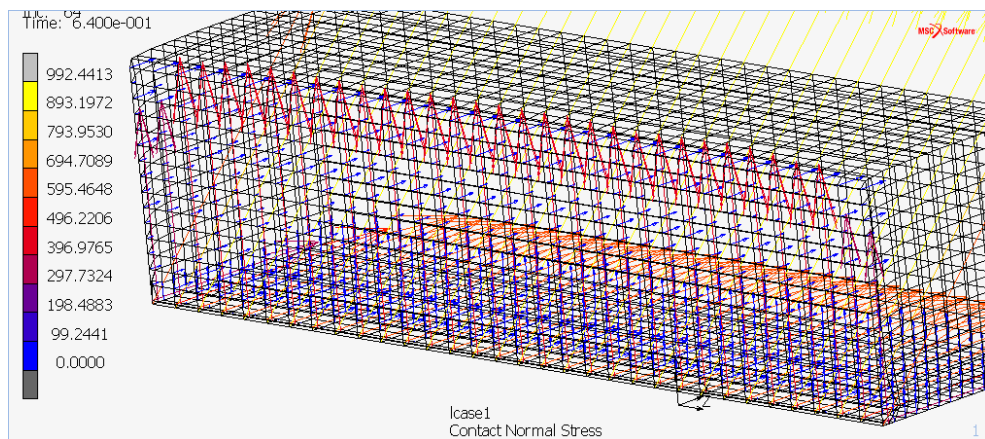


Εικόνα 81: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων για το Σημείο 2

- **Σημείο 3**



Εικόνα 82: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων για το Σημείο 3



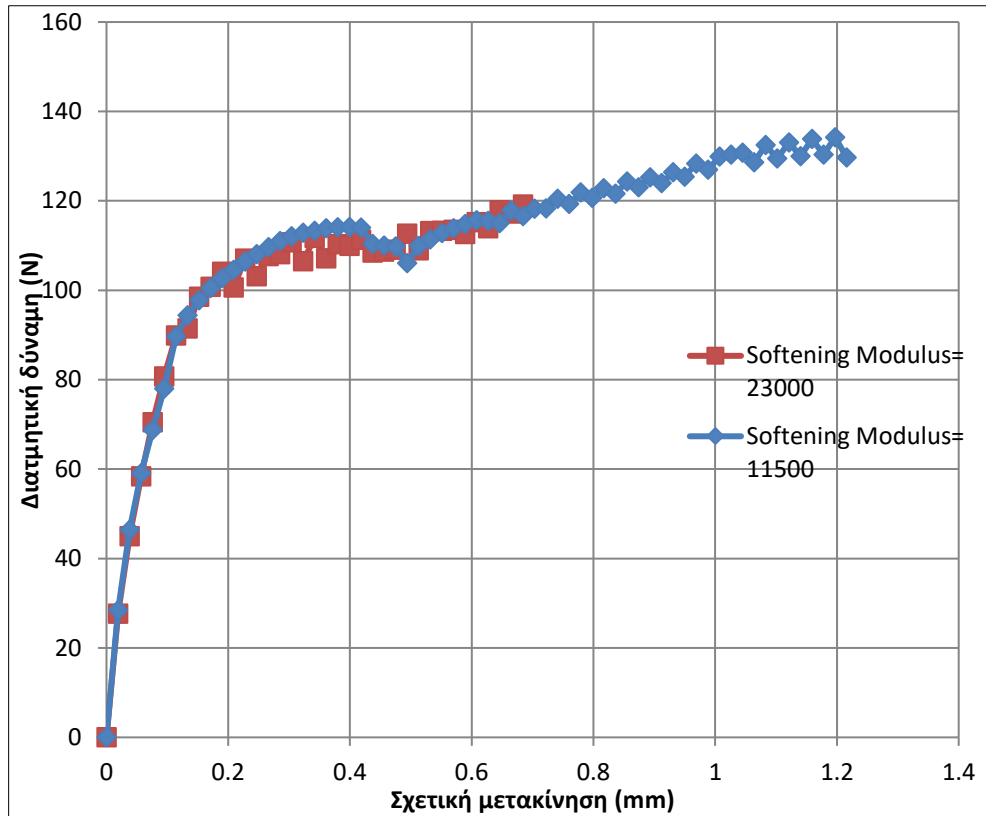
Εικόνα 83: Φορά των ορθών τάσεων για το Σημείο 3

Από τα στιγμιότυπα των ορθών τάσεων, παρατηρείται ότι καθ' όλη τη διάρκεια της καταπόνησης εμφανίζονται θλιπτικές τάσεις στο SFRM.

Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε 2<sup>η</sup> ανάλυση ώστε να αξιολογηθεί πως επιδρά η αύξηση του softening modulus του SFRM στη συμπεριφορά της διεπιφάνειας.

### ➤ 2<sup>η</sup> Ανάλυση

Στη 2<sup>η</sup> ανάλυση χρησιμοποιήθηκε softening modulus= 23000 kPa και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά ήταν ίδια με την 1<sup>η</sup> ανάλυση. Το διάγραμμα της διατμητικής δύναμης στη διεπιφάνεια σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση που προέκυψε συγκρίνεται με το διάγραμμα της 1<sup>ης</sup> ανάλυσης.

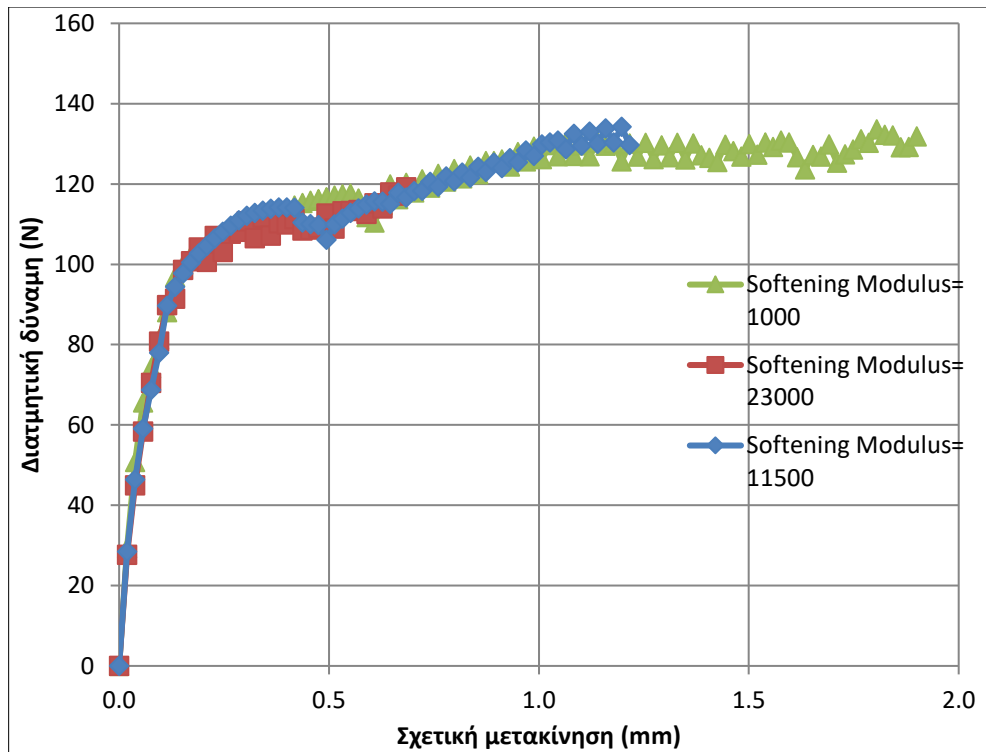


Διάγραμμα 6.1.3.3.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση για τη διεπιφάνεια 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> ανάλυσης

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται παρόμοια συμπεριφορά της διεπιφάνειας με τη διαφορά ότι όταν το SFRM έχει softening modulus= 11500 kPa, παρουσιάζεται μεγαλύτερη σχετική μετακίνηση. Στην 3<sup>η</sup> ανάλυση που υλοποιήθηκε χρησιμοποιήθηκε αρκετά μικρό softening modulus και συγκεκριμένα ίσο με 1000.

### ➤ 3<sup>η</sup> Ανάλυση

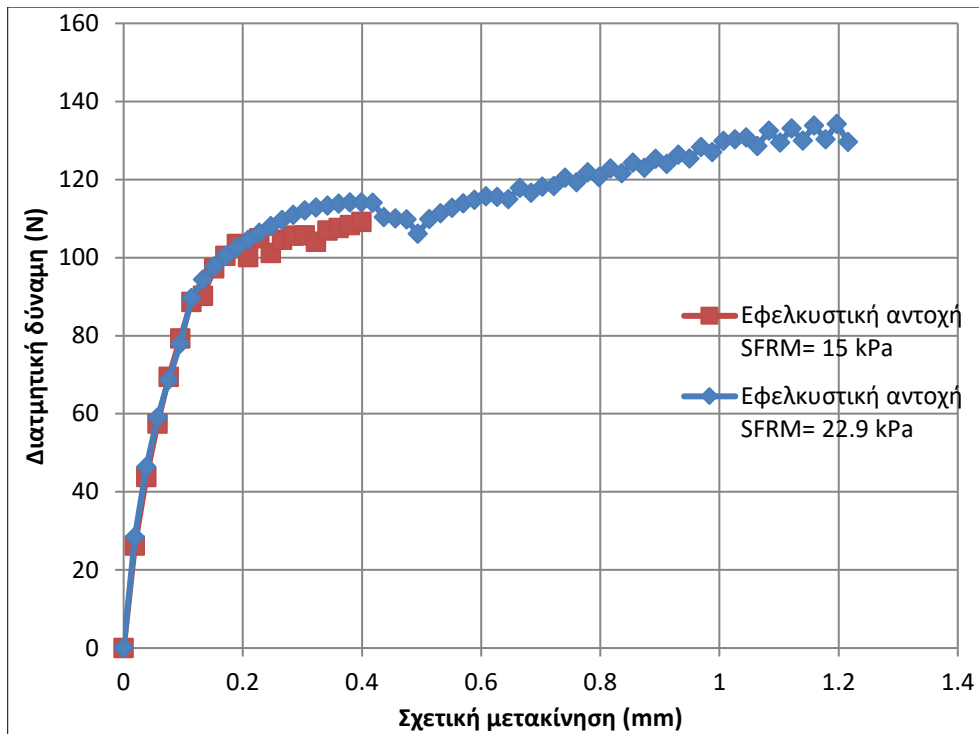
Το διάγραμμα που προέκυψε σε αυτή την περίπτωση είναι το παρακάτω και συγκρίνεται με τα διαγράμματα των δύο προηγούμενων αναλύσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν, ότι η μεταβολή του softening modulus δεν επηρεάζει γενικά τον τρόπο συμπεριφοράς της διεπιφάνειας. Επηρεάζει μόνο τη σχετική μετακίνηση μεταξύ των δύο υλικών. Αυτό συμβαίνει καθώς το SFRM, με την αύξηση του softening modulus παρουσιάζει μεγαλύτερο περιθώριο παραμόρφωσης, αποτέλεσμα που αυξάνει και τη σχετική μετακίνηση μεταξύ των δύο υλικών.



Διάγραμμα 6.1.3.4.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 1<sup>ης</sup>, 2<sup>ης</sup> και 3<sup>ης</sup> ανάλυσης

➤ 4<sup>η</sup> Ανάλυση

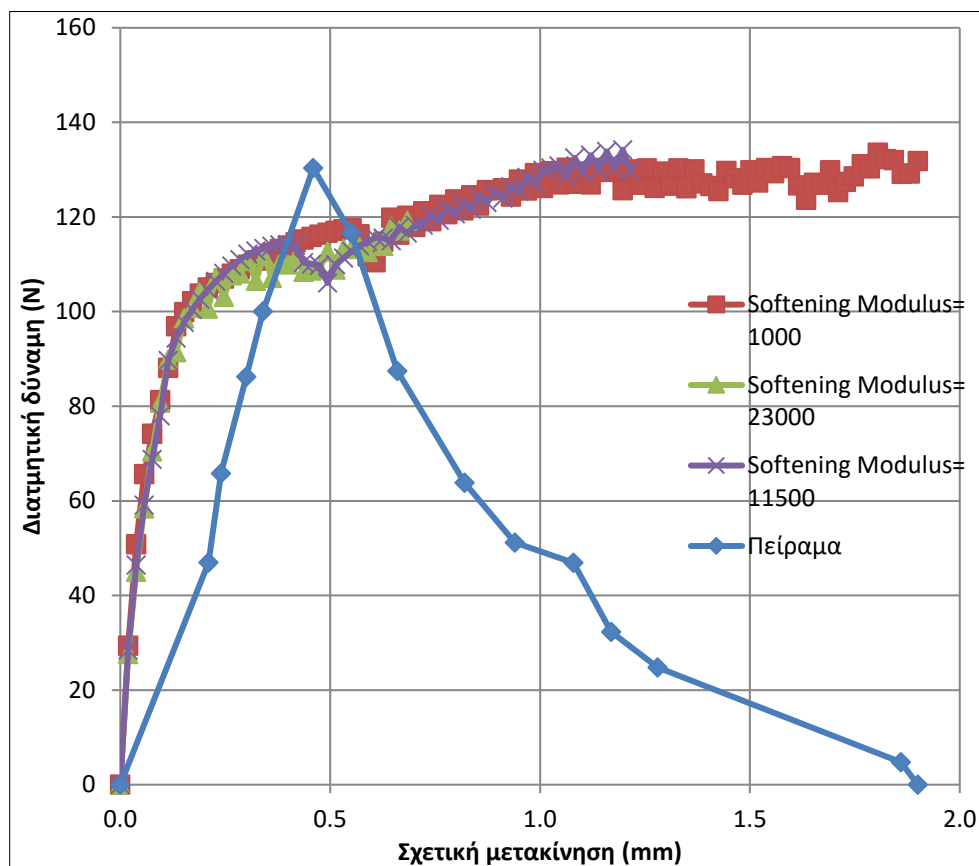
Πραγματοποιήθηκε μία ακόμη ανάλυση στη 2<sup>η</sup> μεθοδολογία συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, στην οποία γίνεται μείωση της εφελκυστικής αντοχής του SFRM από 22,9 kPa σε 15 kPa, έχοντας softening modulus= 11500, ώστε να διερευνηθεί η επιρροή της εφελκυστικής αντοχής του SFRM στον τρόπο που συμπεριφέρεται η διεπιφάνεια σε διάτμηση. Το διάγραμμα που προέκυψε απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα το οποίο συγκρίνεται με το διάγραμμα που διεξήχθη από την 1<sup>η</sup> ανάλυση.



Διάγραμμα 6.1.3.5.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια όταν το SFRM έχει softening modulus= 11500 kPa και εφελκυστική αντοχή 15 kPa και 22.9 kPa, αντίστοιχα

Όπως δείχνει το παραπάνω διάγραμμα, δεν προέκυψε κάποια σημαντική διαφορά στον τρόπο συμπεριφοράς της διεπιφάνειας. Η μόνη διαφορά βρίσκεται, όπως και στις προηγούμενες αναλύσεις, στη σχετική μετακίνηση που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο σωμάτων η οποία έχει μειωθεί όταν μειώνεται η εφελκυστική αντοχή του SFRM.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις 1, 2 και 3 με το διάγραμμα του πειράματος.

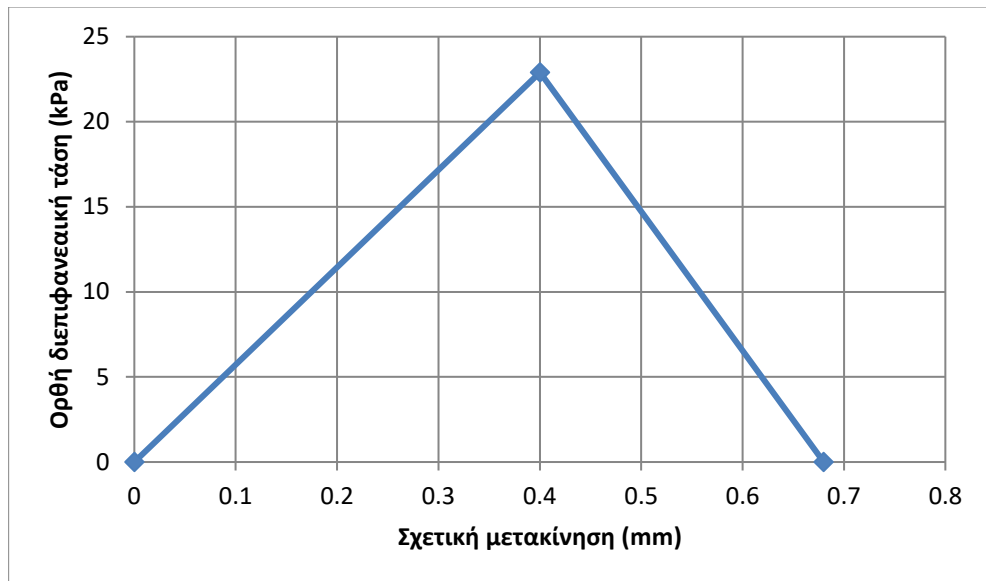


Διάγραμμα 6.1.3.6.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια των αναλύσεων της 2<sup>ης</sup> μεθοδολογίας σε σχέση με το διάγραμμα του πειράματος

Το παραπάνω διάγραμμα αποδεικνύει ότι τα διαγράμματα που προέκυψαν με βάση τη 2<sup>η</sup> μεθοδολογία, αποκλίνουν αρκετά από το διάγραμμα που προέκυψε από το πείραμα. Συνεπώς, εξετάζεται παρακάτω η καταλληλότητα της 3<sup>ης</sup> μεθοδολογίας.

#### 6.1.4. Αναλύσεις βάσει νόμων συμπεριφοράς ορθής και διατμητικής διεπιφανειακής τάσης

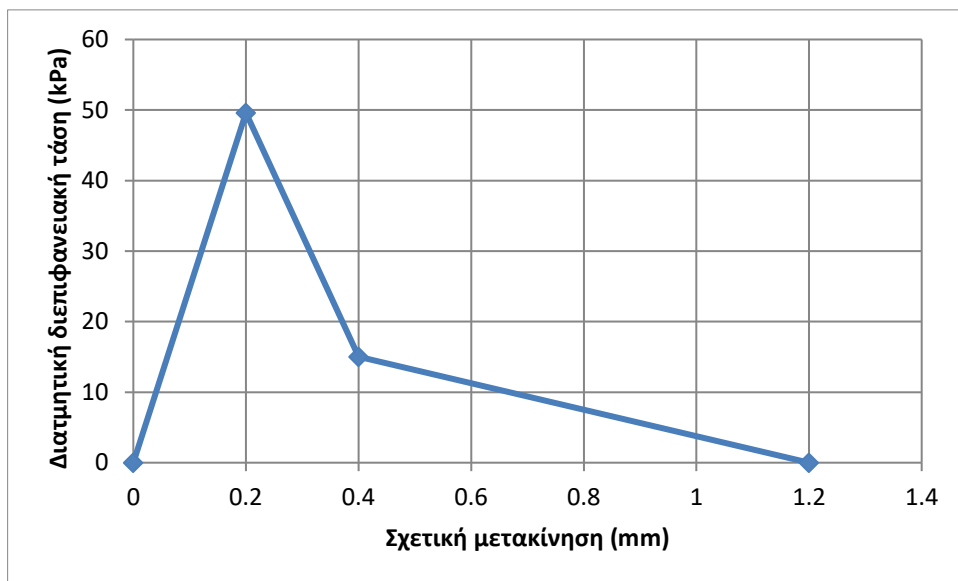
Ο τρίτος τρόπος που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο υλικών, βασίζεται στην εισαγωγή νόμων συμπεριφοράς βάσει των οποίων καθορίζονται οι τιμές της ορθής και διατμητικής διεπιφανειακής τάσης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση των δύο σωμάτων. Η διεπιφάνεια θεωρείται ως μία απειροστά μικρή επιφάνεια η οποία συμπεριφέρεται βάσει των νόμων που εισάγονται. Σε όλες τις αναλύσεις που υλοποιήθηκαν με βάση αυτή τη μεθοδολογία, ο νόμος συμπεριφοράς της ορθής διεπιφανειακής τάσης ήταν ο ίδιος, δεδομένου ότι πρόκειται για ανάλυση καθαρής διάτμησης. Επίσης, για τη συμπεριφορά της διατμητικής διεπιφανειακής τάσης χρησιμοποιήθηκε τριγωνικός νόμος. Ο νόμος συμπεριφοράς της ορθής διεπιφανειακής τάσης είναι ο ακόλουθος:



Διάγραμμα 6.1.4.1.: Νόμος συμπεριφοράς της ορθής διεπιφανειακής τάσης

➤ 1<sup>η</sup> Ανάλυση

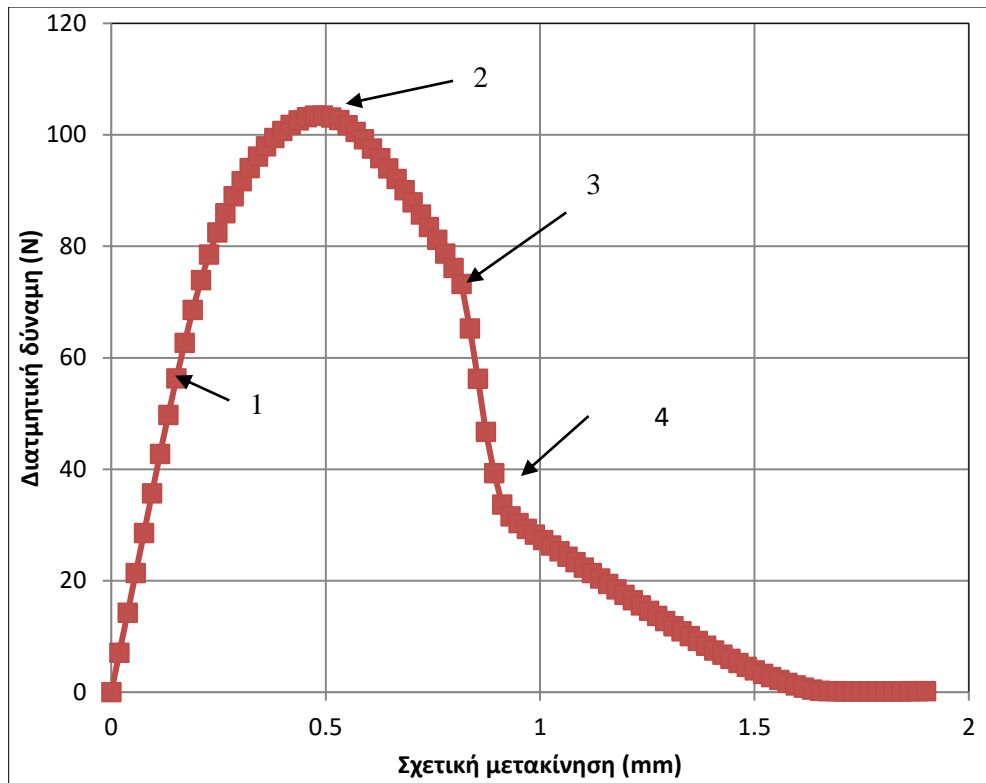
Όσον αφορά τον νόμο συμπεριφοράς της διατμητικής διεπιφανειακής τάσης, για αρχή έγινε δοκιμή του εξής νόμου:



Διάγραμμα 6.1.4.2.: Νόμος συμπεριφοράς της διατμητικής διεπιφανειακής τάσης

Το διάγραμμα της διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση που προέκυψε βάσει του παραπάνω νόμου συμπεριφοράς, απεικονίζεται στη συνέχεια.



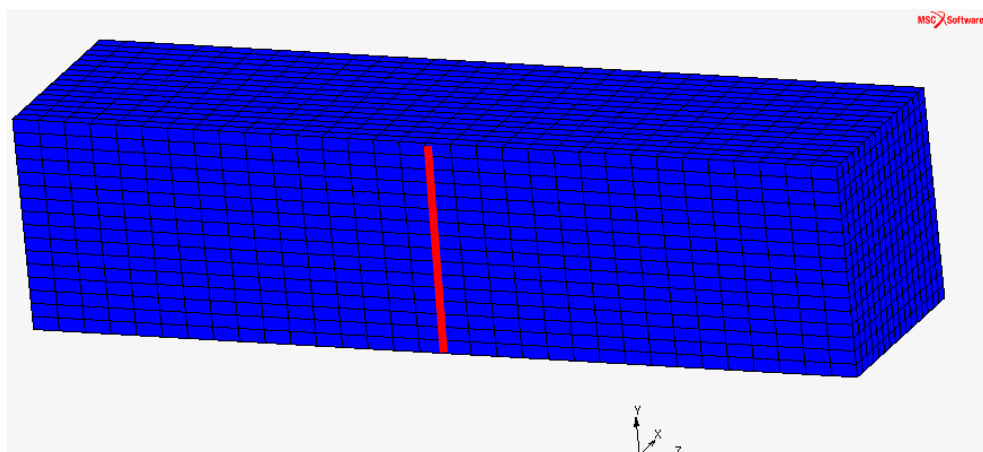


Διάγραμμα 6.1.4.3.: Διατμητική δύναμη σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια

Το παραπάνω σχήμα χαρακτηρίζεται από τέσσερα κύρια τμήματα που είναι τα παρακάτω:

- Μέχρι το σημείο 1 η συμπεριφορά της διεπιφάνειας είναι γραμμική.
- Στο σημείο 2 η διεπιφάνεια φτάνει τη μέγιστη διατμητική της δύναμη.
- Από το σημείο 3 και μετά διατμητική δύναμη πέφτει απότομα.
- Στο σημείο 4 ο ρυθμός μείωσης της διατμητικής δύναμης της διεπιφάνειας γίνεται πιο ομαλός.

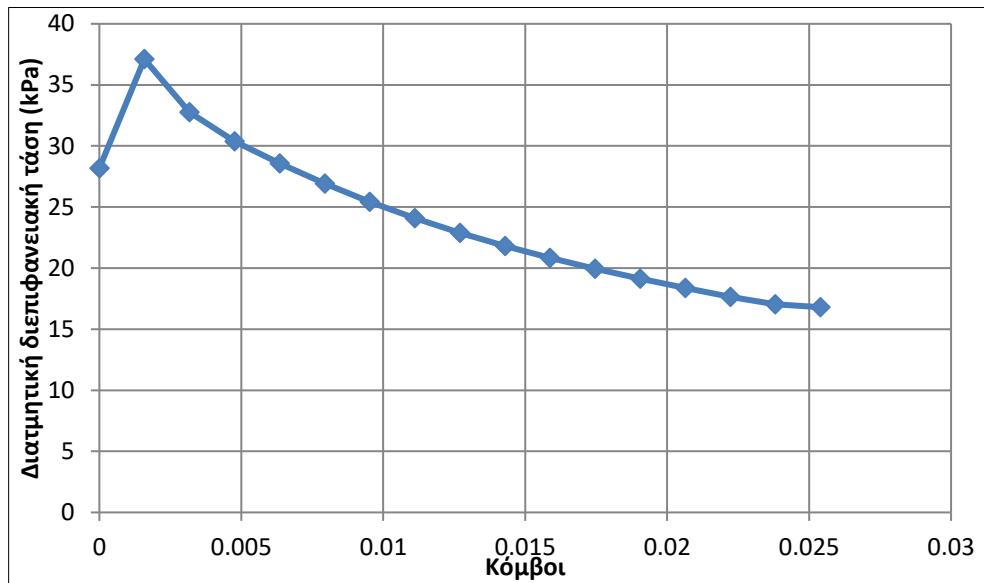
Στη συνέχεια, γίνεται επιλογή μιας σειράς κόμβων (Εικόνα 84) προκειμένου να απεικονισθεί η κατανομή των τάσεων των κόμβων αυτών στα παραπάνω χαρακτηριστικά σημεία. Επίσης, παρουσιάζονται και τα διαγράμματα που αναπαριστούν τις τάσεις σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση των κόμβων αυτών προκειμένου να αποδειχθεί ότι εφαρμόστηκαν οι νόμοι συμπεριφοράς που ορίστηκαν.



Εικόνα 84: Επιλογή κόμβων

Η κατανομή των τάσεων, συνεπώς, είναι:

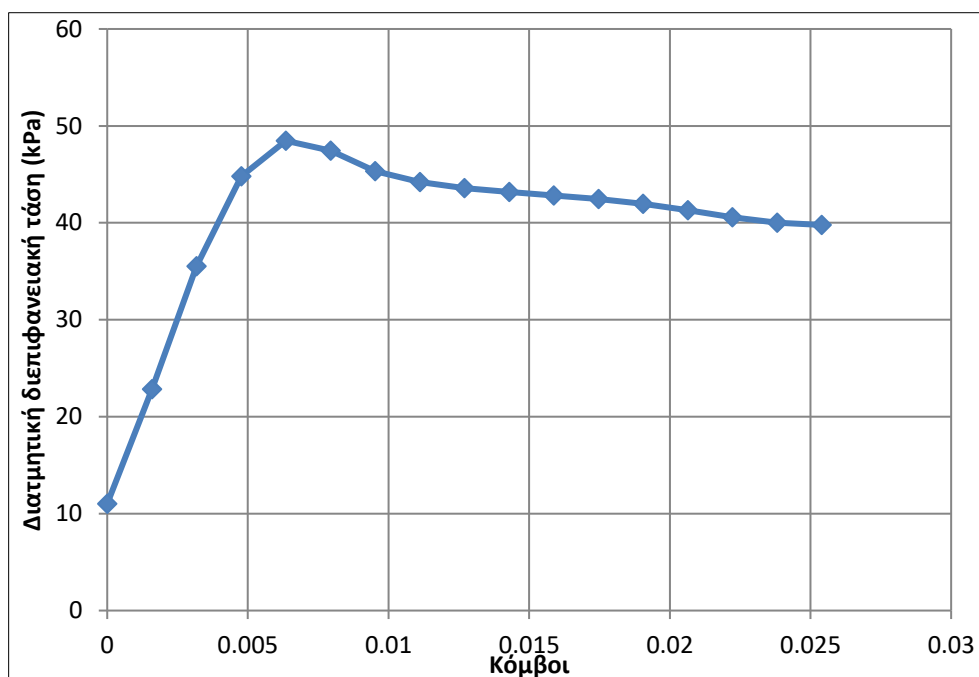
➤ Σημείο 1



Διάγραμμα 6.1.4.4.: Κατανομή διατμητικών τάσεων στους επιλεγμένους κόμβους στο σημείο 1

Παρατηρείται ότι ο πρώτος κόμβος που βρίσκεται στο σημείο επιβολής της μετακίνησης εμφανίζει διατμητική τάση ίση με 28,18 kPa. Ακολουθεί η ο δεύτερος κόμβος με τάση ίση με 37,11 kPa και στους υπόλοιπους κόμβους η τάση αρχίζει να μειώνεται. Άρα, στο σημείο αυτό, η διατμητική τάση στη διεπιφάνεια δεν έχει φτάσει στη μέγιστη τιμή της.

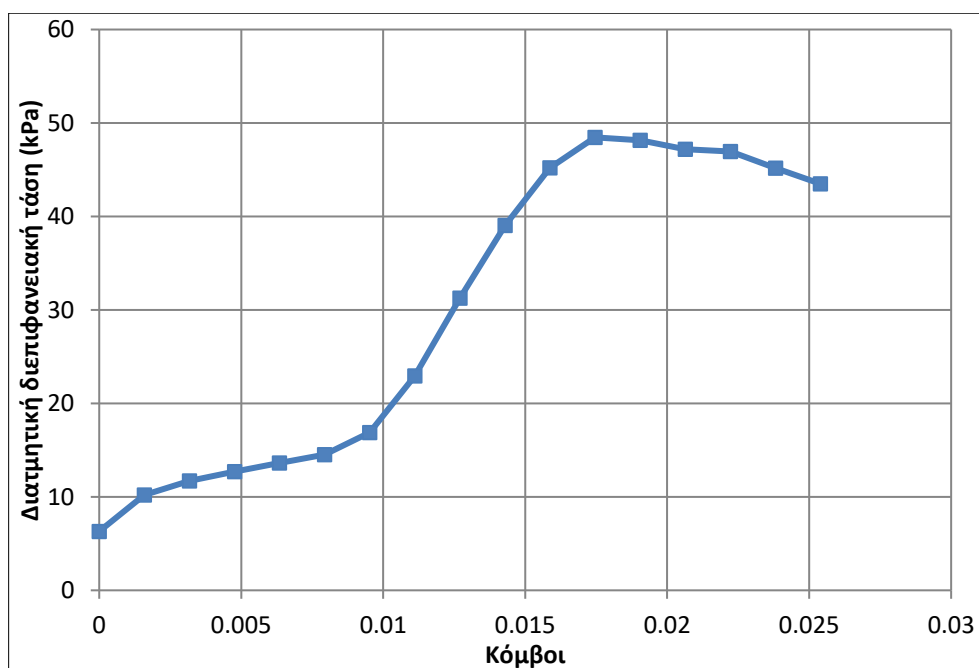
➤ Σημείο 2



Διάγραμμα 6.1.4.5.: Κατανομή διατμητικών τάσεων στους επιλεγμένους κόμβους στο σημείο 2

Όταν η διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια φτάσει τη μέγιστη τιμή της, παρατηρείται ότι και ο δεύτερος κόμβος από το σημείο επιβολής της μετακίνησης φτάνει σχεδόν τη μέγιστη διατμητική τάση που είναι ίση με 47,01 kPa.

➤ Σημείο 3

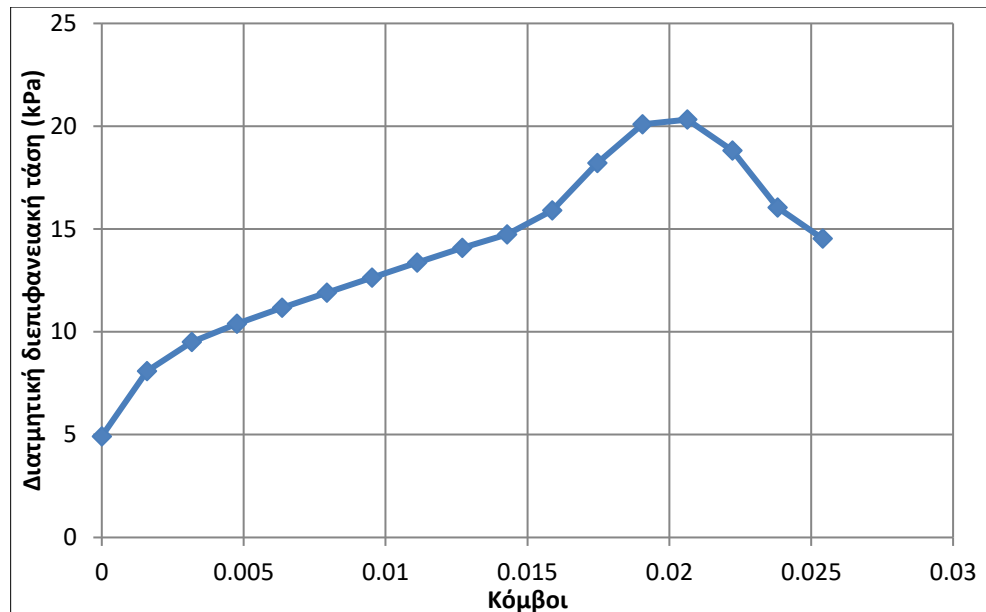


Διάγραμμα 6.1.4.6.: Κατανομή διατμητικών τάσεων στους επιλεγμένους κόμβους στο σημείο 3

Στο σημείο μετά το οποίο η διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια αρχίζει να μειώνεται απότομα, παρατηρείται ότι οι πρώτοι κόμβοι έχουν χάσει τη φέρουσα

ικανότητά τους ενώ οι κόμβοι που βρίσκονται πιο μετά έχουν αναπτύξει την μέγιστη τάση που είναι ίση με 49,22 kPa.

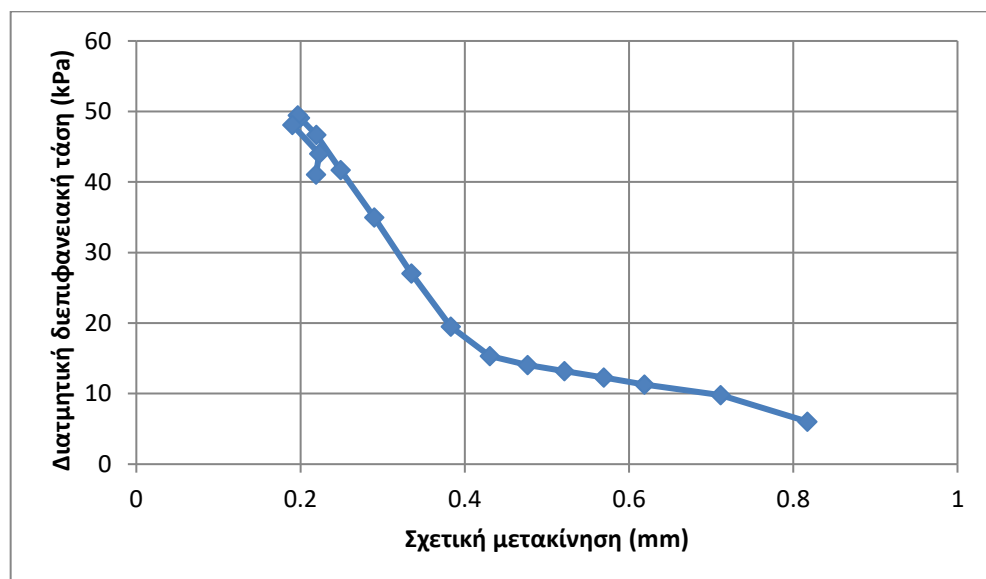
➤ Σημείο 4



Διάγραμμα 6.1.4.7.: Κατανομή διαμητικών τάσεων στους επιλεγμένους κόμβους στο σημείο 4

Όταν η διαμητική δύναμη μειωθεί σημαντικά, παρατηρείται ότι οι κόμβοι έχοντας αναπτύξει στα προηγούμενα στάδια τη μέγιστη τάση τους, τελικά έχουν χάσει μεγάλο ποσοστό της φέρουσας ικανότητάς τους.

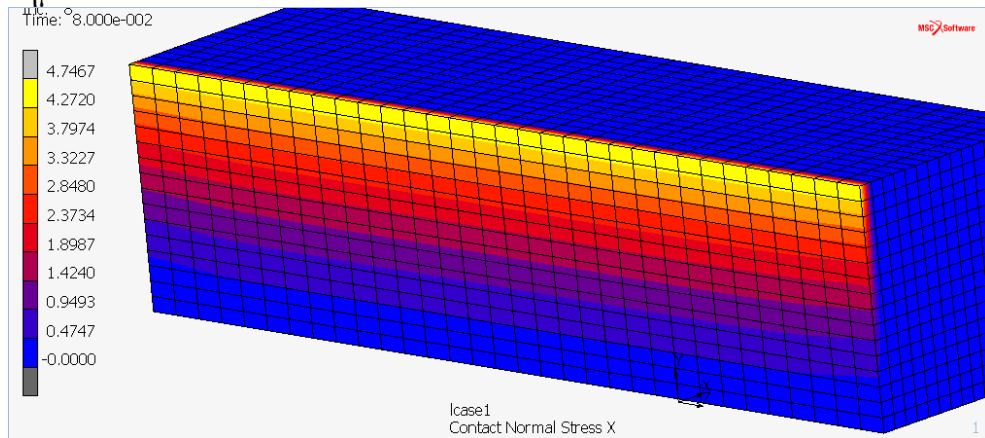
Σημαντικό είναι να επαληθευτεί ότι η διαμητική διεπιφανειακή τάση επαληθεύει το νόμο συμπεριφοράς που ορίστηκε. Αυτό το επαληθεύει το παρακάτω διάγραμμα.



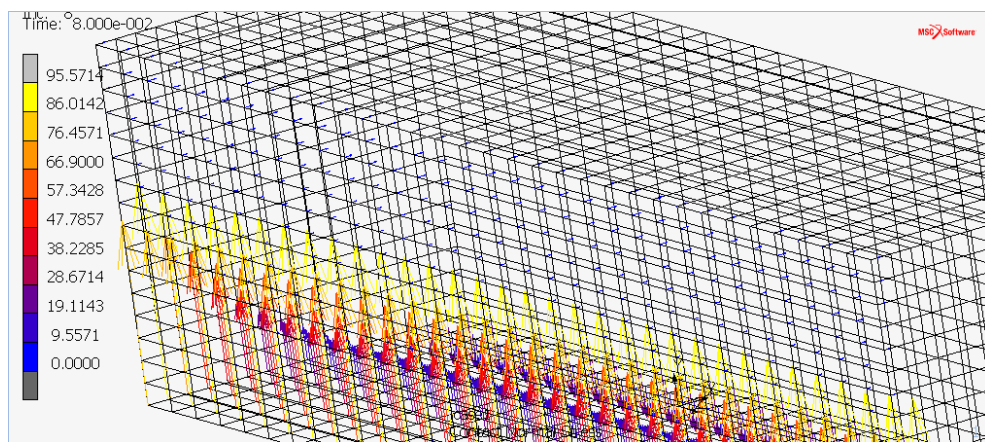
Διάγραμμα 6.1.4.8.: Επαλήθευση του νόμου συμπεριφοράς της διαμητικής διεπιφανειακής τάσης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση

Στη συνέχεια ακολουθούν τα στιγμιότυπα των ορθών διεπιφανειακών τάσεων.

- **Σημείο 1**

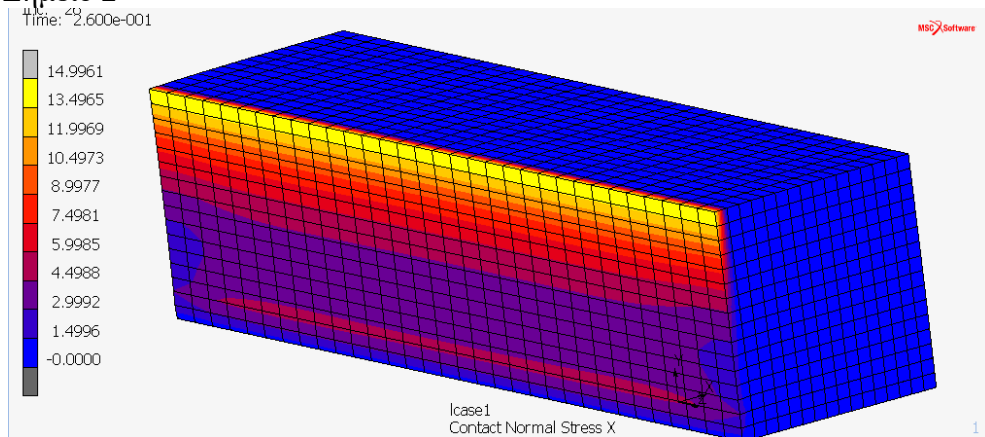


**Εικόνα 85: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων για το Σημείο 1**

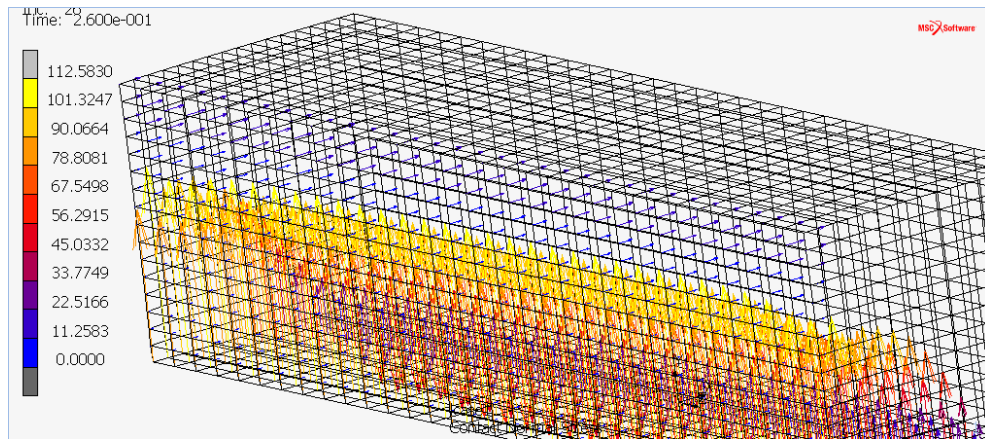


**Εικόνα 86: Φορά ορθών τάσεων για το Σημείο 1**

- **Σημείο 2**

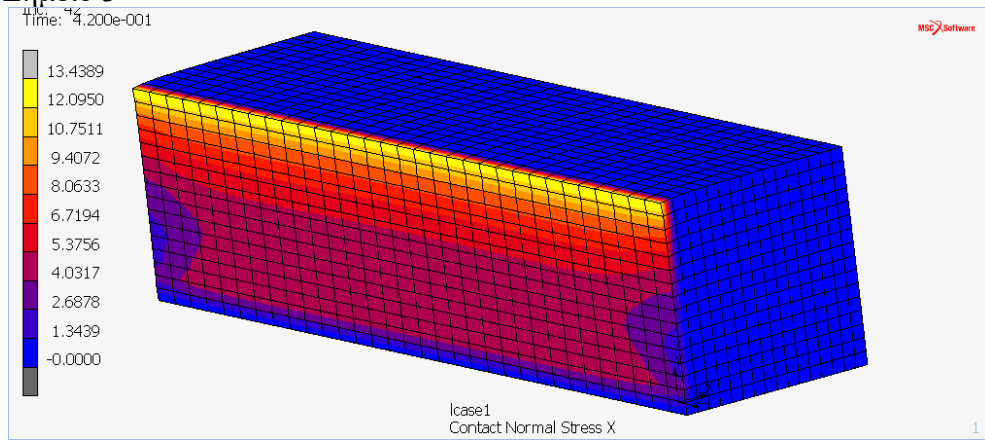


**Εικόνα 87: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων για το Σημείο 2**

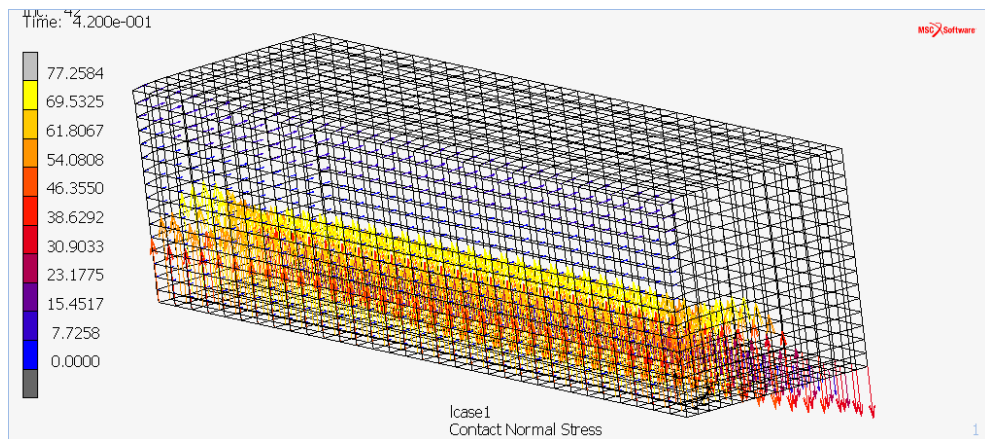


Εικόνα 88: Φορά των ορθών τάσεων για το Σημείο

- Σημείο 3



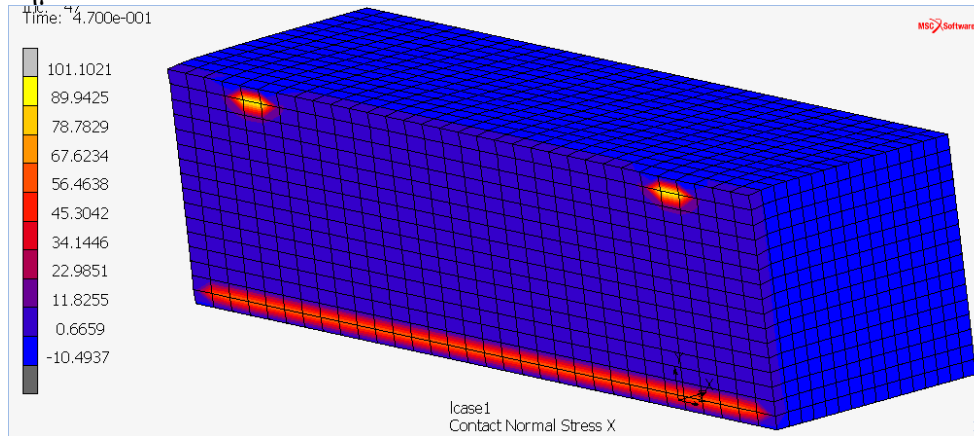
Εικόνα 89: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων για το Σημείο 3



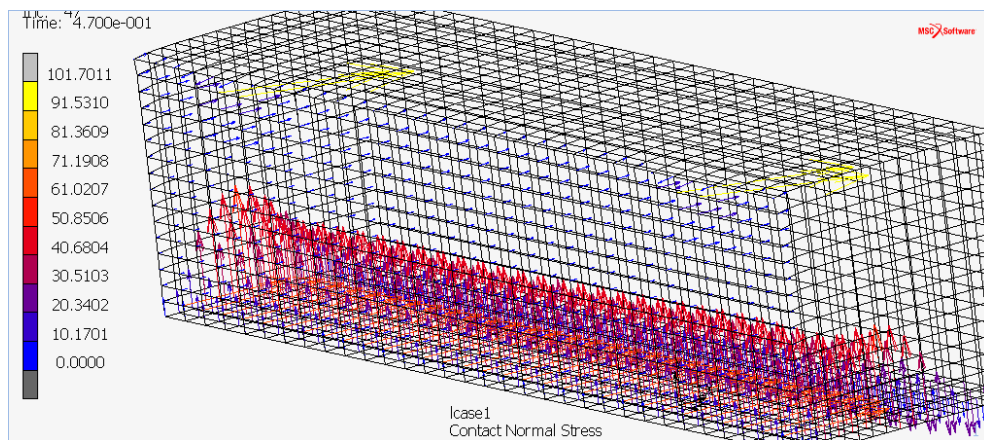
Εικόνα 90: Φορά των ορθών τάσεων για το Σημείο 3



- **Σημείο 4**

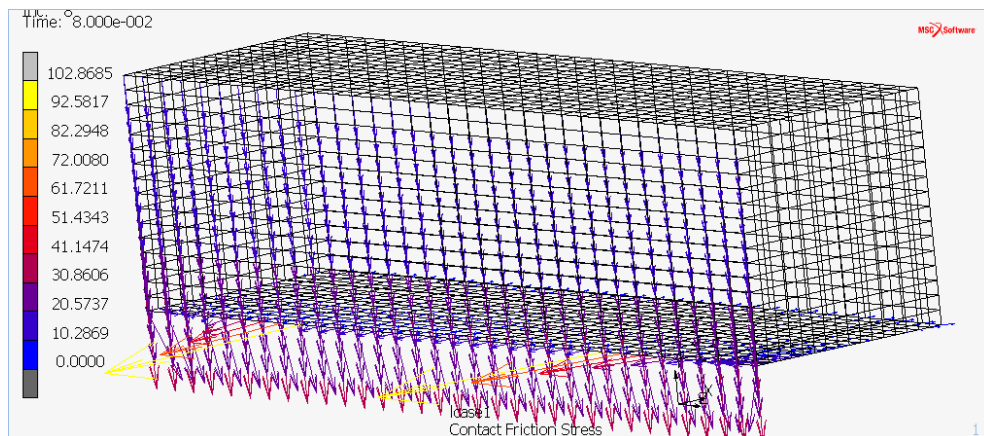


**Εικόνα 91: Στιγμιότυπο ορθών τάσεων για το Σημείο 4**



**Εικόνα 92: Φορά των ορθών τάσεων για το Σημείο 4**

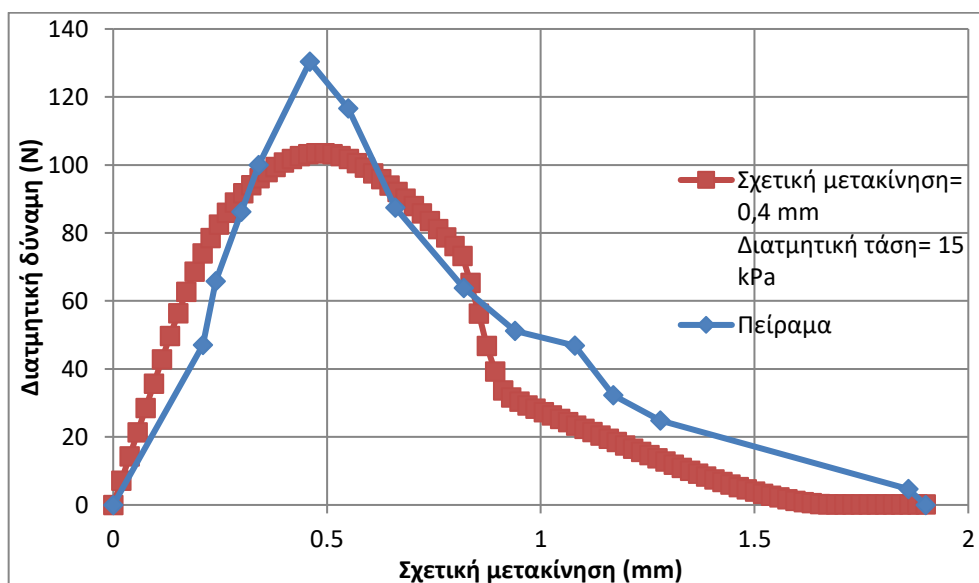
Οι παραπάνω εικόνες δείχνουν ότι οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται είναι θλιπτικές. Εφελκυστικές τάσεις εμφανίζονται μόνο στην πάνω περιοχή του SFRM και είναι περίπου ίσες με 10 kPa. Παρακάτω απεικονίζεται το στιγμιότυπο των διατμητικών τάσεων στο βήμα 8 από το οποίο παρατηρείται η έντονη ανάπτυξη των διατμητικών τάσεων. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο καθώς πρόκειται για φαινόμενο καθαρής διάτμησης και για το λόγο αυτό οι διατμητικές τάσεις υπερσχύουν.



**Εικόνα 93: Φορά των διατμητικών τάσεων για το Σημείο 1**

Τέλος, συγκρίνεται το διάγραμμα διατμητικής δύναμης – σχετικής μετακίνησης που προέκυψε από τη συγκεκριμένη αριθμητική προσομοίωση με αυτή του

πειράματος.

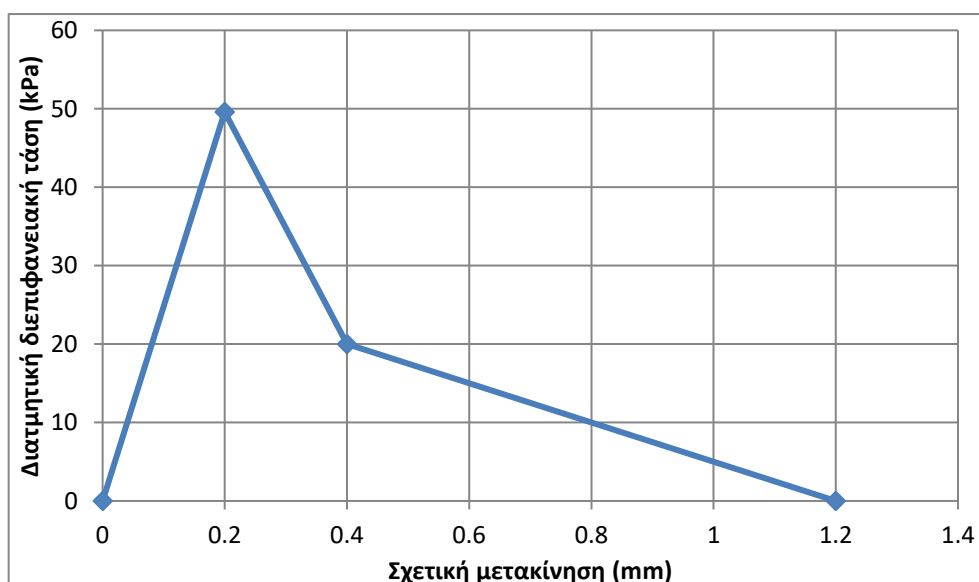


Διάγραμμα 6.1.4.9.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια της 1<sup>ης</sup> ανάλυσης με το πείραμα

Βάσει του παραπάνω διαγράμματος, φαίνεται ότι η τρίτη μεθοδολογία προσομοίωσης της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας, προσεγγίζει περισσότερο την καμπύλη του διαγράμματος σε σχέση με τα διαγράμματα που προέκυπταν από τις δύο προηγούμενες μεθοδολογίες.

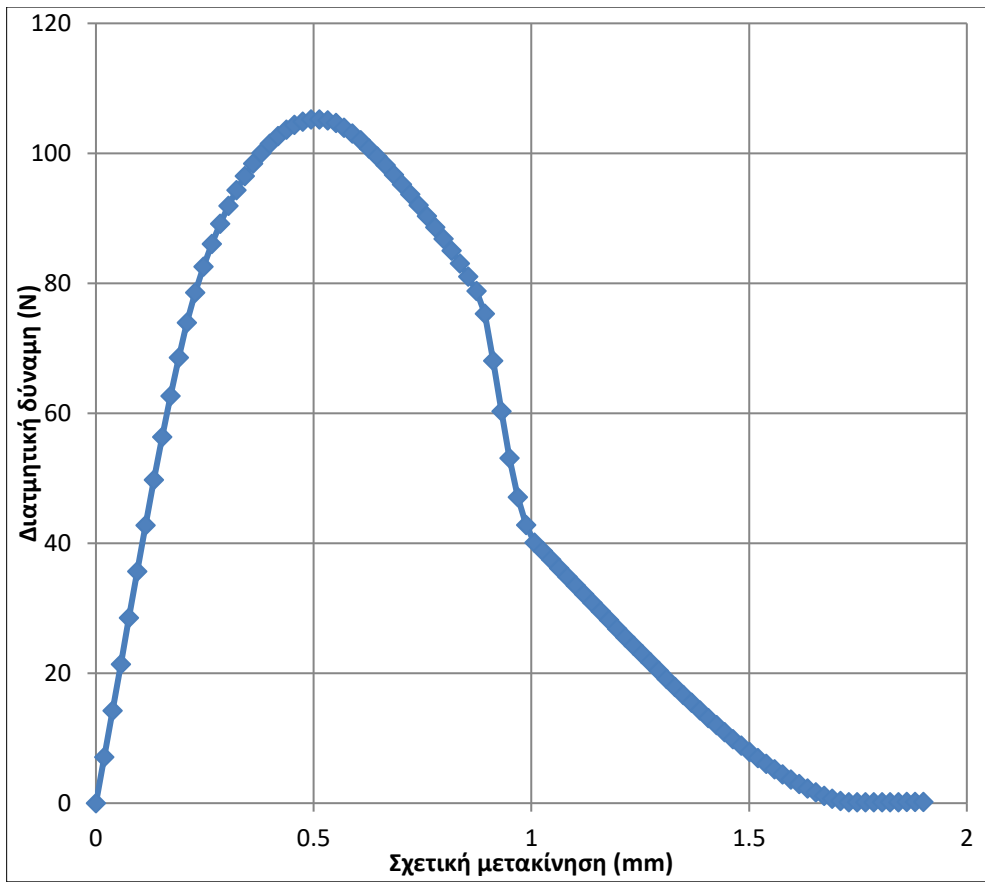
➤ 2<sup>η</sup> Ανάλυση

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται δοκιμή εισάγοντας τον παρακάτω νόμο συμπεριφοράς της διεπιφανειακής διατμητικής τάσης στον οποίο αυξάνεται η τάση στη σχετική μετακίνηση των 0,4 mm από τα 15 kPa στα 20 kPa.



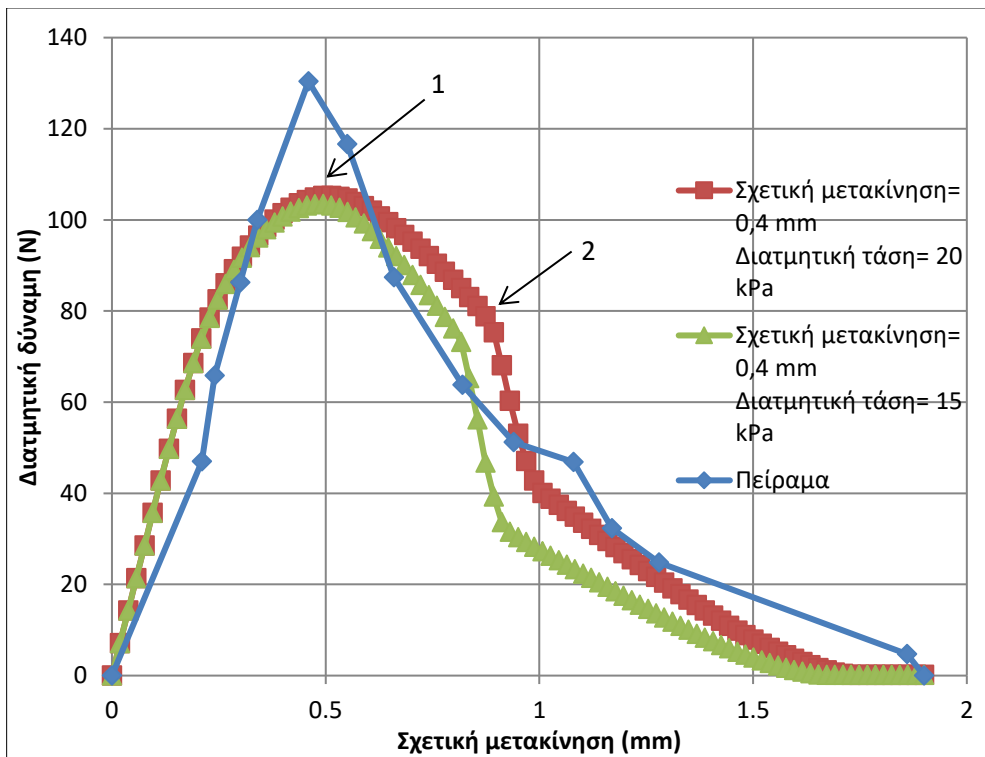
Διάγραμμα 6.1.4.10.: Νόμος συμπεριφοράς της διατμητικής διεπιφανειακής τάσης

Το διάγραμμα διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση που προέκυψε είναι:



Διάγραμμα 6.1.4.11.: Διάγραμμα διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 2<sup>ης</sup> ανάλυσης

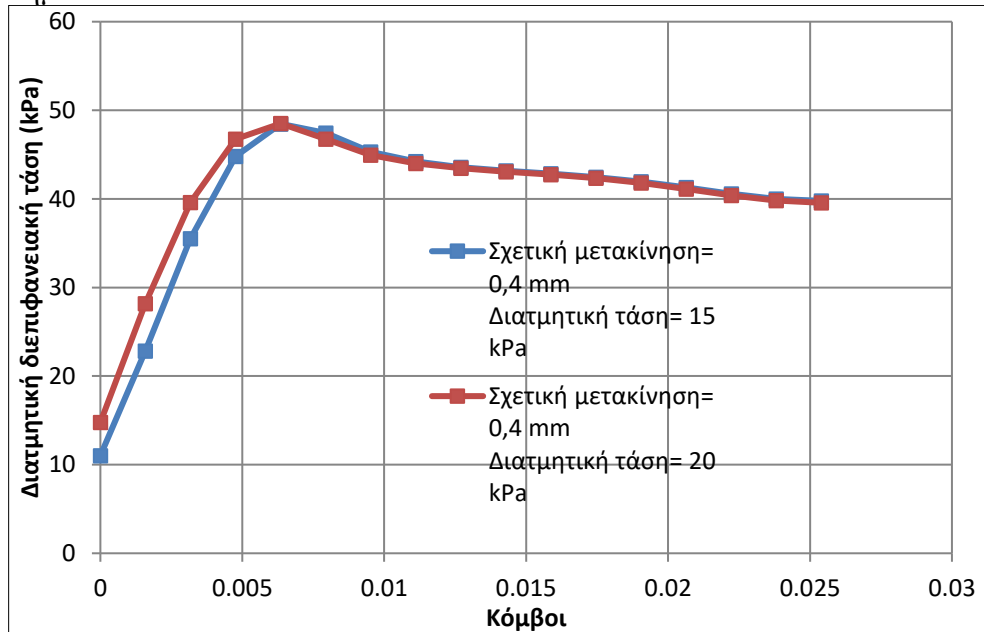
Συγκρίνοντας το παραπάνω σχήμα με το σχήμα της πρώτης ανάλυσης αλλά και το διάγραμμα του πειράματος, προκύπτει:



Διάγραμμα 6.1.4.12.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη μετακίνηση στη διεπιφάνεια 1<sup>ης</sup> ανάλυσης, 2<sup>ης</sup> ανάλυσης και πειράματος

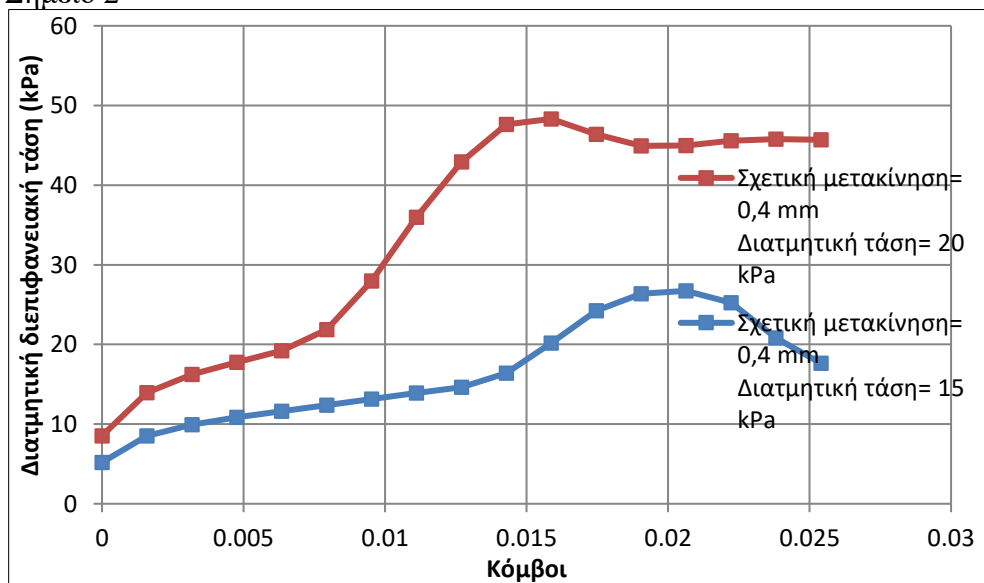
Το παραπάνω διάγραμμα δείχνει ότι με την αύξηση της τάσης στη σχετική μετακίνηση των 0,4 mm, η μέγιστη δύναμη αυξάνεται από την τιμή 103,48 N στην τιμή 105,225 N. Οι δύο καμπύλες συμπεριφοράς της διεπιφάνειας σε διάτμηση ξεκινούν έχοντας την ίδια κλίση. Ωστόσο, από το σημείο που φτάνουν τη μέγιστη διατμητική δύναμη και μετά ακολουθούν διαφορετική πορεία. Στη συνέχεια, θα αναπαρασταθούν διαγράμματα σύγκρισης της κατανομής των διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια στους κόμβους που είχαν επιλεγεί στην 1<sup>η</sup> ανάλυση της 3<sup>ης</sup> μεθοδολογίας για τα σημεία που φαίνονται στο παραπάνω διάγραμμα.

- Σημείο 1



Διάγραμμα 6.1.4.13.: Σύγκριση κατανομής διατμητικής διεπιφανειακής τάσης στους κόμβους 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> ανάλυσης για το σημείο 1

- Σημείο 2



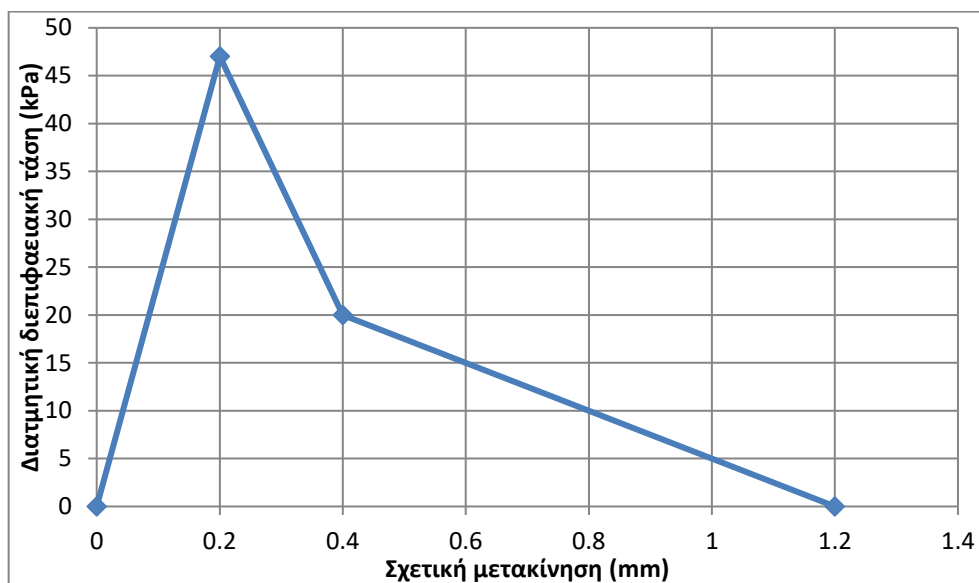
Διάγραμμα 6.1.4.14.: Σύγκριση κατανομής διατμητικής διεπιφανειακής τάσης στους κόμβους 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> ανάλυσης για το σημείο 2

Από το διάγραμμα του σημείου 2 παρατηρείται ότι με την αύξηση της διατμητικής τάσης στα 20 kPa, κάποιοι κόμβοι συνεχίζουν να έχουν τάσεις ίσες με τις

μέγιστες. Αυτό, όμως, ίσως επηρεάζεται από την τιμή της διατμητικής τάσης στη σχετική μετακίνηση των 0,2 mm. Στην επόμενη ανάλυση, επομένως, μειώνεται η διατμητική τάση από την τιμή των 49,6 kPa στην τιμή των 47 kPa, για να αξιολογηθεί πως επιδρά στη συμπεριφορά της διεπιφάνειας.

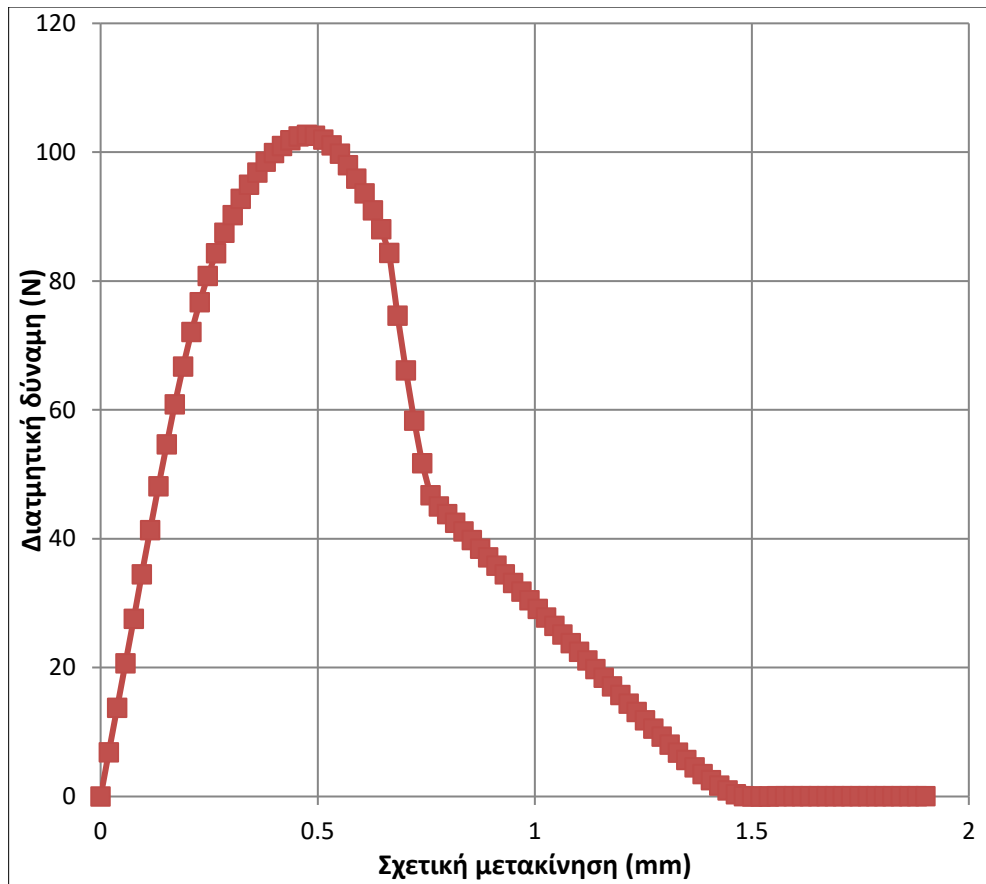
➤ 3<sup>η</sup> Ανάλυση

Στην 3<sup>η</sup> ανάλυση εισάγεται ο ακόλουθος νόμος της διατμητικής τάσης.



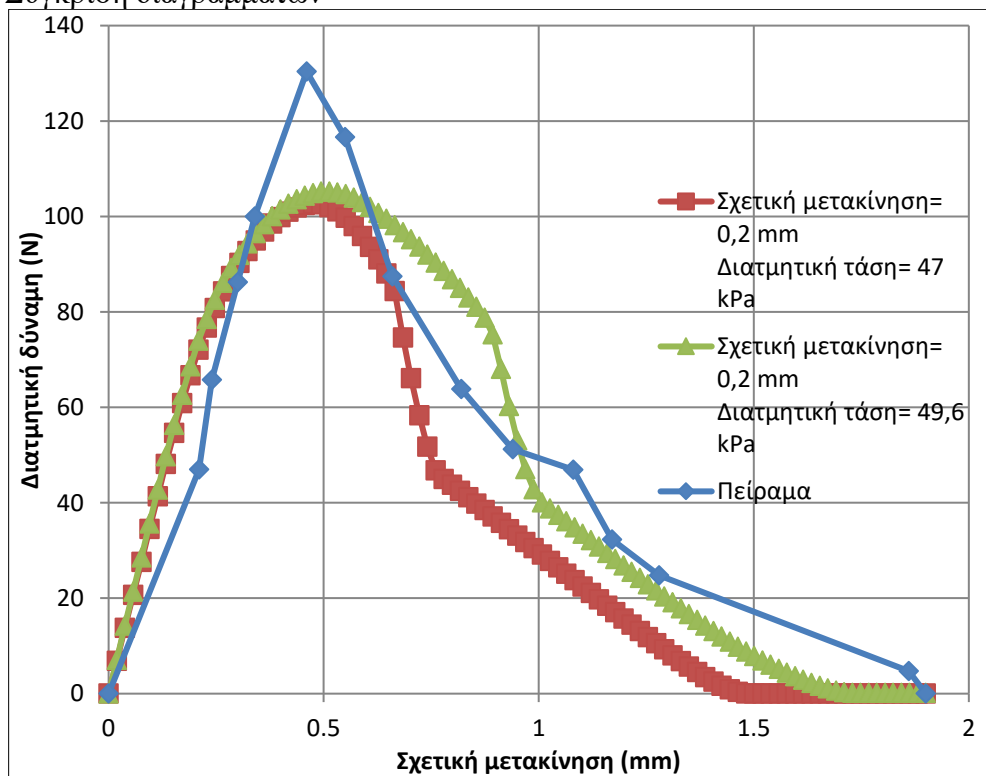
Διάγραμμα 6.1.4.15.: Νόμος συμπεριφοράς διατμητικής διεπιφανειακής

Το διάγραμμα διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση που προκύπτει σε αυτή την περίπτωση είναι:



Διάγραμμα 6.1.4.16.: Διατμητική δύναμη σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 3<sup>ης</sup> ανάλυσης

- Σύγκριση διαγραμμάτων



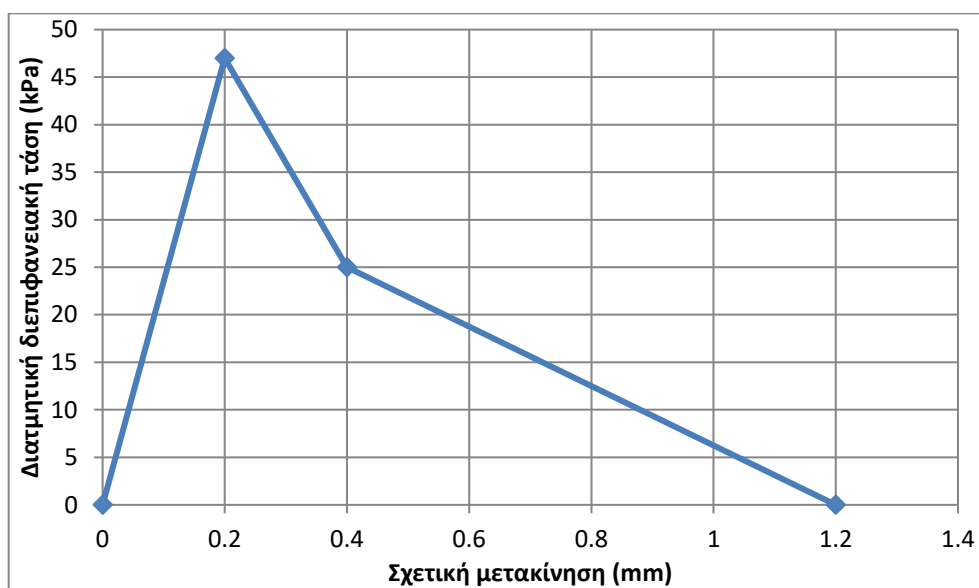
Διάγραμμα 6.1.4.17.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 2<sup>ης</sup> ανάλυσης, 3<sup>ης</sup> ανάλυσης και πειράματος



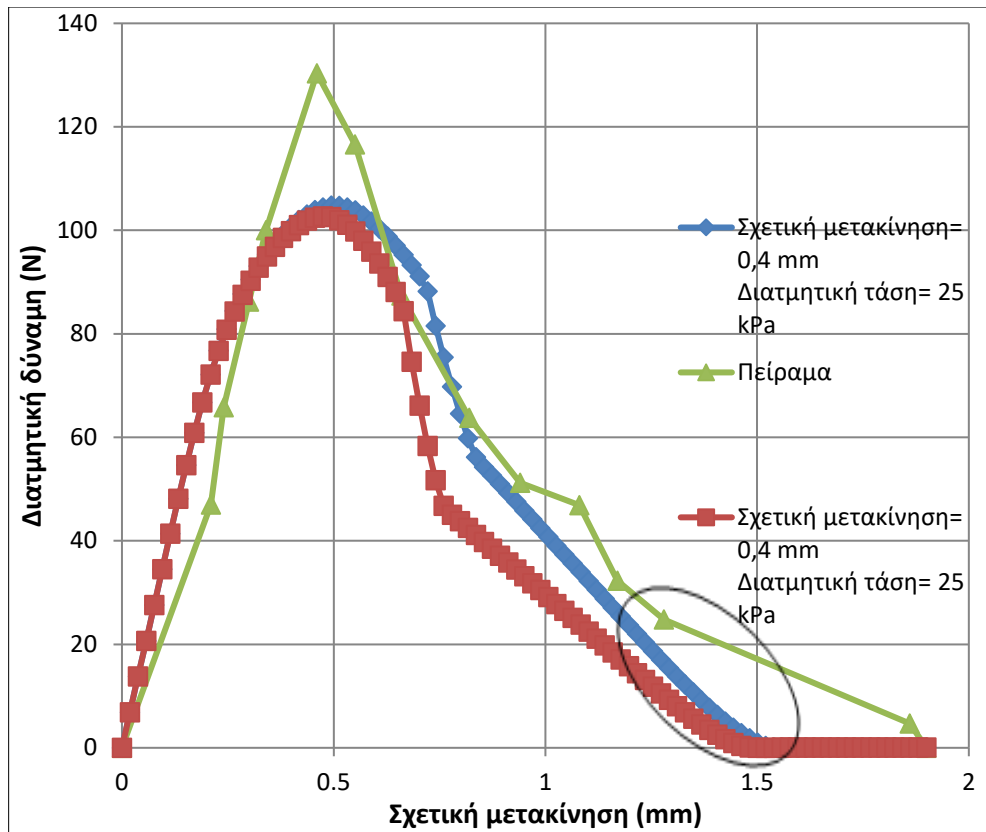
Με την αλλαγή της μέγιστης διατμητικής τάσης από την τιμή των 49,6 kPa στην τιμή των 47 kPa, παρατηρείται ότι η περιοχή μετά τη μέγιστη διατμητική δύναμη έχει προσεγγίσει σε αρκετά καλό βαθμό την καμπύλη συμπεριφοράς βάσει του πειράματος. Ωστόσο, στη συνέχεια παρατηρείται μεγαλύτερη απόκλιση σε σχέση με την προηγούμενη ανάλυση. Εφόσον με την εισαγωγή της μέγιστης διατμητικής τάσης ίσης με 47 kPa, επιτεύχθηκε μία πρώτη καλή προσέγγιση, οι επόμενες αναλύσεις που υλοποιήθηκαν είχαν ως μεταβλητή τη σχετική μετακίνηση και τη διατμητική τάση στο τμήμα του τριγωνικού νόμου μετά τη μέγιστη τάση.

➤ 4<sup>η</sup> Ανάλυση

Στην 4<sup>η</sup> ανάλυση, αυξήθηκε η διατμητική τάση στη σχετική μετακίνηση των 0,4 mm από τα 20 kPa στα 25 kPa. Η συγκεκριμένη αλλαγή έγινε, καθώς με την αύξηση της τάσης απαιτείται μεγαλύτερη διατμητική δύναμη από τη διεπιφάνεια κι έτσι μπορεί να επιτευχθεί καλύτερη σύγκλιση ως προς την καμπύλη του πειράματος. Παρακάτω απεικονίζονται τόσο ο νόμος συμπεριφοράς της διατμητικής τάσης όσο και το διάγραμμα της διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση που προέκυψε από την 4<sup>η</sup> ανάλυση. Το διάγραμμα συγκρίνεται με το διάγραμμα της 3<sup>ης</sup> ανάλυσης και το διάγραμμα του πειράματος, ώστε να αξιολογηθούν οι διαφορές που θα δημιουργηθούν.



Διάγραμμα 6.1.4.18.: Νόμος συμπεριφοράς της διατμητικής διεπιφανειακής τάσης

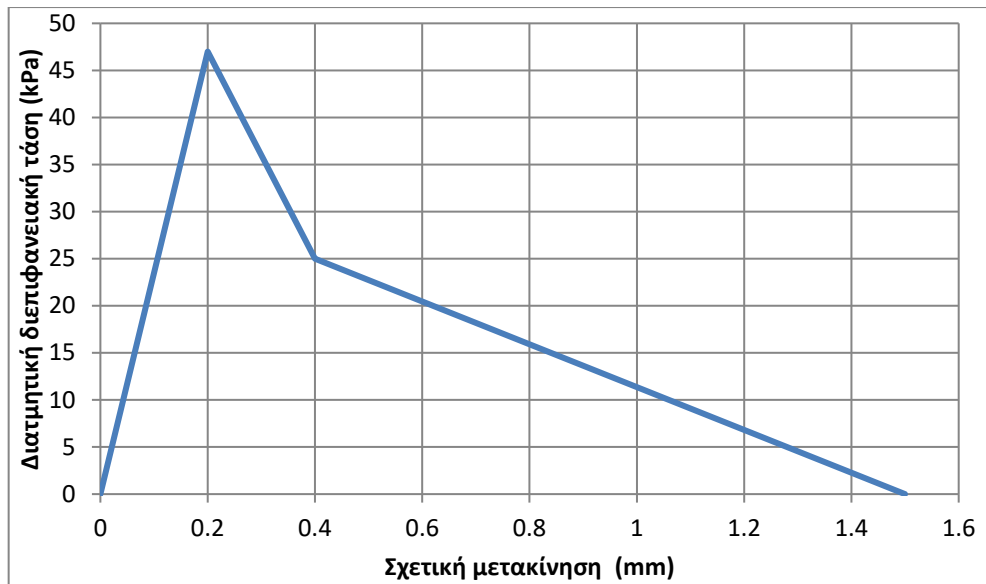


Διάγραμμα 6.1.4.19.: Σύγκριση διαμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 3<sup>ης</sup> ανάλυσης, 4<sup>ης</sup> ανάλυσης και πειράματος

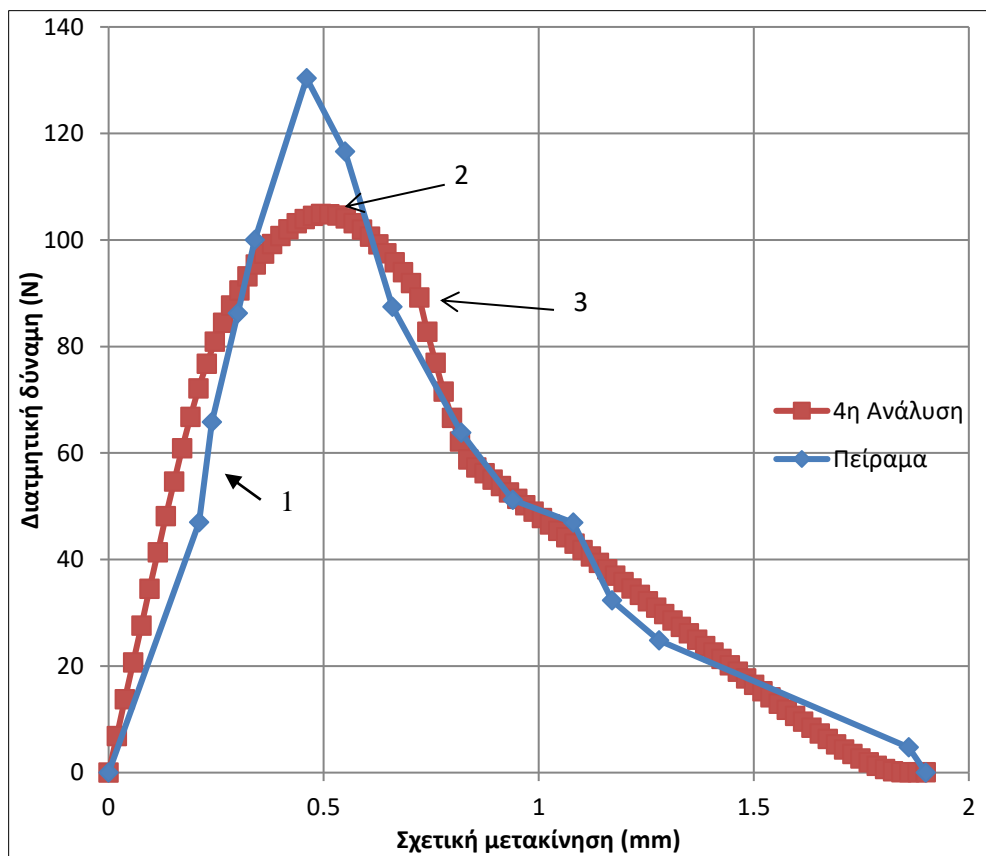
Μέσω της συγκεκριμένης αύξησης της διαμητικής τάσης των 20 kPa σε 25 kPa, παρατηρείται ότι η καμπύλη προσεγγίζει όλο και περισσότερο την καμπύλη του πειράματος. Ωστόσο, το τελευταίο τμήμα της καμπύλης δεν συγκλίνει. Αυτό συμβαίνει λόγω πρόωρου μηδενισμού της διαμητικής τάσης. Επόμενο βήμα, επομένως, αποτελεί η αλλαγή της σχετικής μετακίνησης των 0,12 mm στα 0,15 mm στα οποία θα μηδενίζεται η διαμητική τάση

➤ 5<sup>η</sup> Ανάλυση

Ο νόμος συμπεριφοράς της διαμητικής τάσης και το διάγραμμα που προέκυψε απεικονίζονται στη συνέχεια.



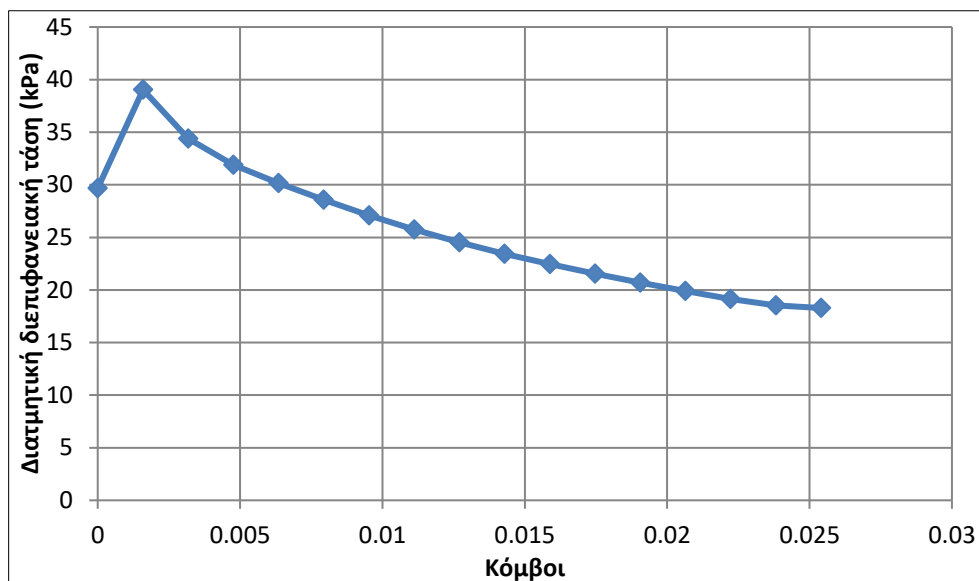
Διάγραμμα 6.1.4.20.: Νόμος συμπεριφοράς της διατμητικής διεπιφανειακής τάσης



Διάγραμμα 6.1.4.21.: Σύγκριση διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 4<sup>ης</sup> ανάλυσης και πειράματος

Όπως διαπιστώνει κανείς από το παραπάνω σχήμα, μέσω του νόμου της διατμητικής συμπεριφοράς που εισήχθη, έγινε η βέλτιστη προσέγγιση της καμπύλης που προέκυψε από το πείραμα. Στη συνέχεια θα αναπαρασταθούν τα διαγράμματα κατανομής των διατμητικών τάσεων στους κόμβους στα χαρακτηριστικά σημεία καθώς και η επαλήθευση του νόμου συμπεριφοράς.

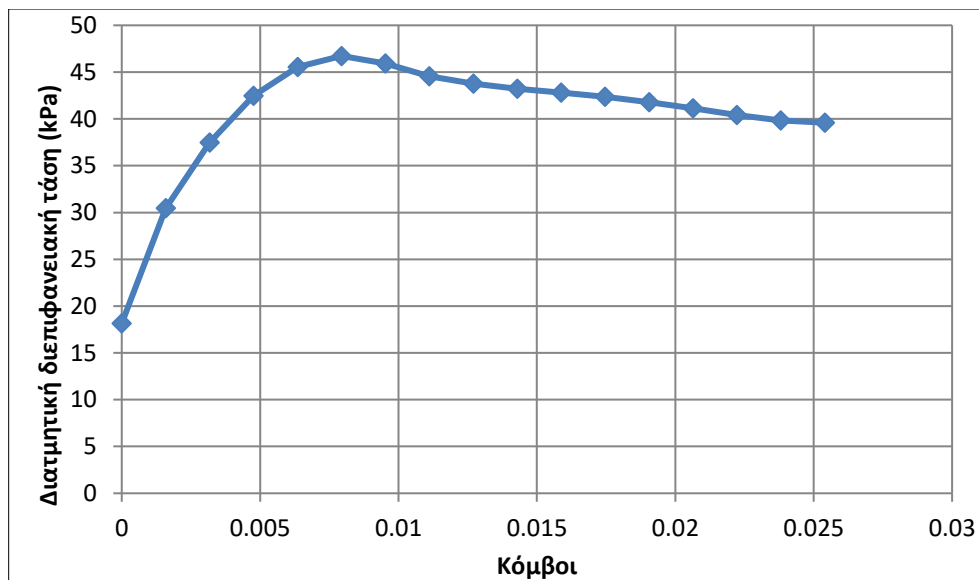
- Διαγράμματα κατανομής διατμητικών τάσεων στους κόμβους
- ❖ Σημείο 1



Διάγραμμα 6.1.4.22.: Κατανομή διατμητικής διεπιφανειακής τάσης στους κόμβους στο σημείο 1

Στο σημείο όπου τελειώνει η γραμμική περιοχή της καμπύλης, πρώτος κόμβος έχει διατμητική τάση ίση με 29,68 kPa, ο δεύτερος κόμβος ίση με 34,39 kPa και στη συνέχεια η διατμητική τάση μειώνεται στους υπόλοιπους κόμβους.

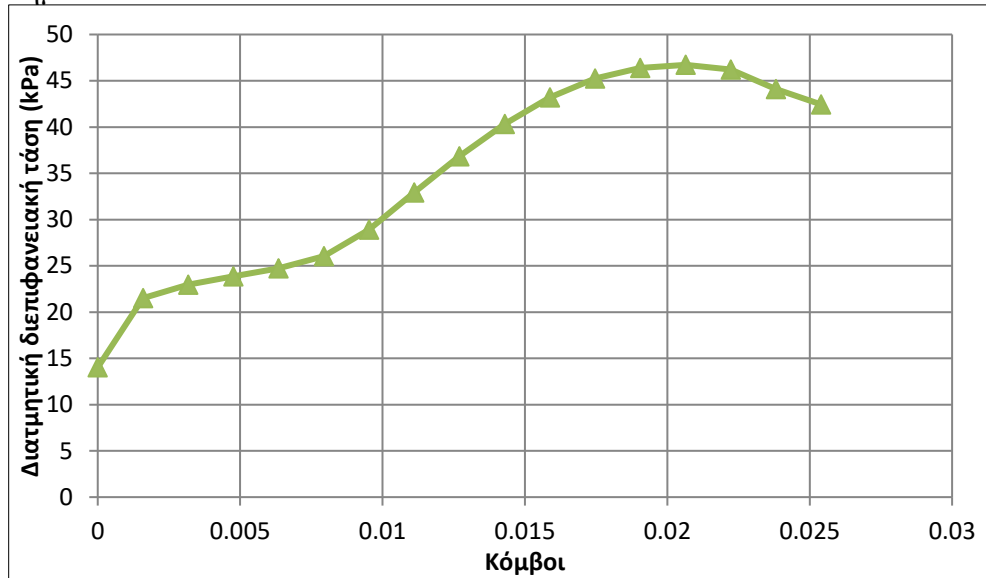
- ❖ Σημείο 2



Διάγραμμα 6.1.4.23.: Κατανομή διατμητικής διεπιφανειακής τάσης στους κόμβους στο σημείο 2

Στο σημείο όπου η διεπιφάνεια έχει αναπτύξει τη μέγιστη διατμητική της δύναμη, παρατηρείται ότι ο κόμβος 6 έχει αναπτύξει τη μέγιστη διατμητική τάση που είναι ίση με 46,73 kPa. Επίσης και οι υπόλοιποι κόμβοι έχουν αναπτύξει μεγάλο ποσοστό της διατμητικής τους τάσης.

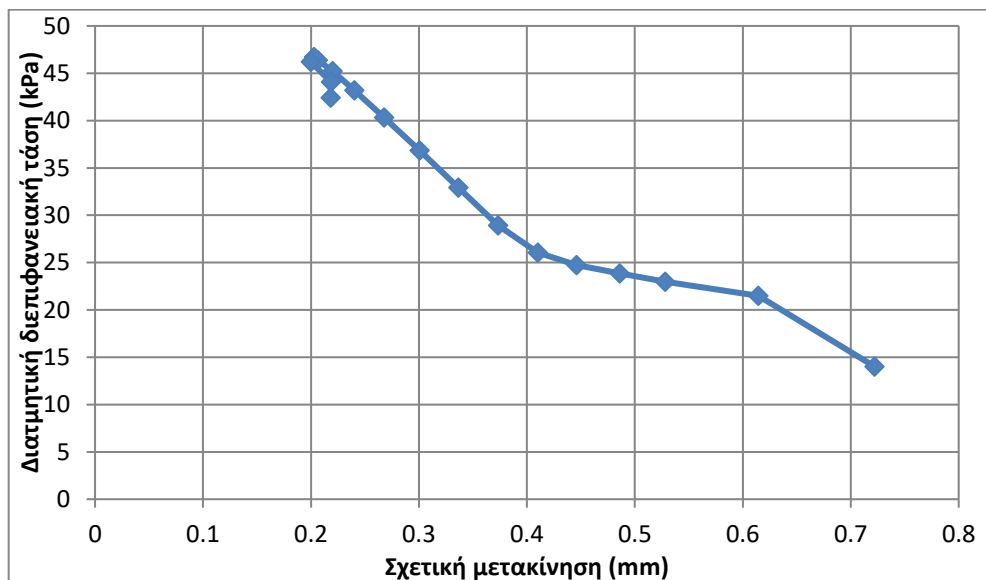
❖ Σημείο 3



Διάγραμμα 6.1.4.24.: Κατανομή διατμητικής διεπιφανειακής τάσης στους κόμβους στο σημείο 2

Στο σημείο 3 παρατηρείται ότι ένα μέρος της διεπιφάνειας κοντά στο σημείο επιβολής της μετακίνησης έχει χάσει τη φέρουσα ικανότητά του, και στην επιβαλλόμενη μετακίνηση αντιστέκεται το υπόλοιπο μέρος της διεπιφάνειας το οποίο όπως φαίνεται από το παραπάνω σχήμα έχει φτάσει σχεδόν στη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας. Στη συνέχεια μειώνεται σημαντικά η φέρουσα ικανότητα της διεπιφάνειας, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά και η διατμητική δύναμη.

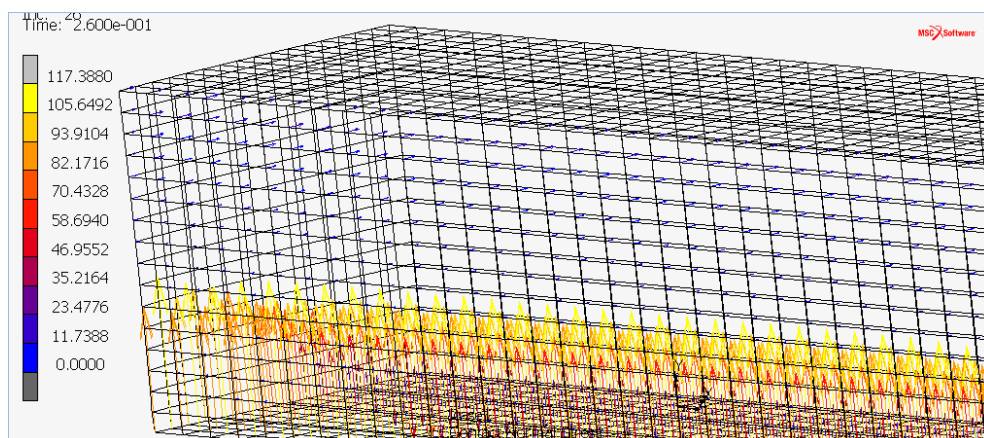
Ο νόμος συμπεριφοράς της διατμητικής τάσης επαληθεύεται μέσω του παρακάτω σχήματος που αφορά το χαρακτηριστικό σημείο 3.



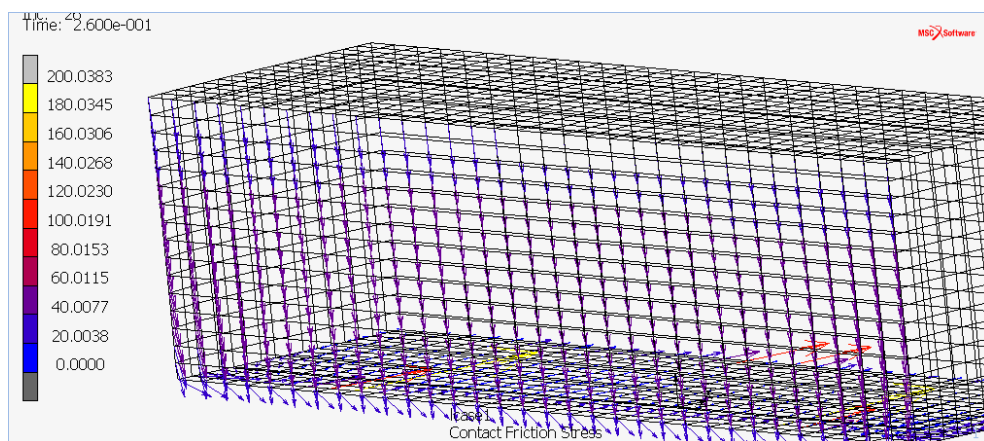
Διάγραμμα 6.1.4.25.: Επαλήθευση του νόμου συμπεριφοράς της διατμητικής διεπιφανειακής τάσης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση

Τέλος, σύμφωνα με τις εικόνες που ακολουθούν και αναφέρονται στο βήμα ανάπτυξης της μέγιστης διατμητικής δύναμης της διεπιφάνειας, παρατηρείται ότι οι διατμητικές τάσεις υπερσχύουν των ορθών τάσεων, καθώς οι ορθές τάσεις που αναπτύσσονται είναι θλιπτικές, ενώ οι διατμητικές αντιστέκονται στην επιβαλλόμενη

μετακίνηση.



Εικόνα 94: Φορά των ορθών τάσεων στο στάδιο ανάπτυξης της μέγιστης διατμητικής δύναμης

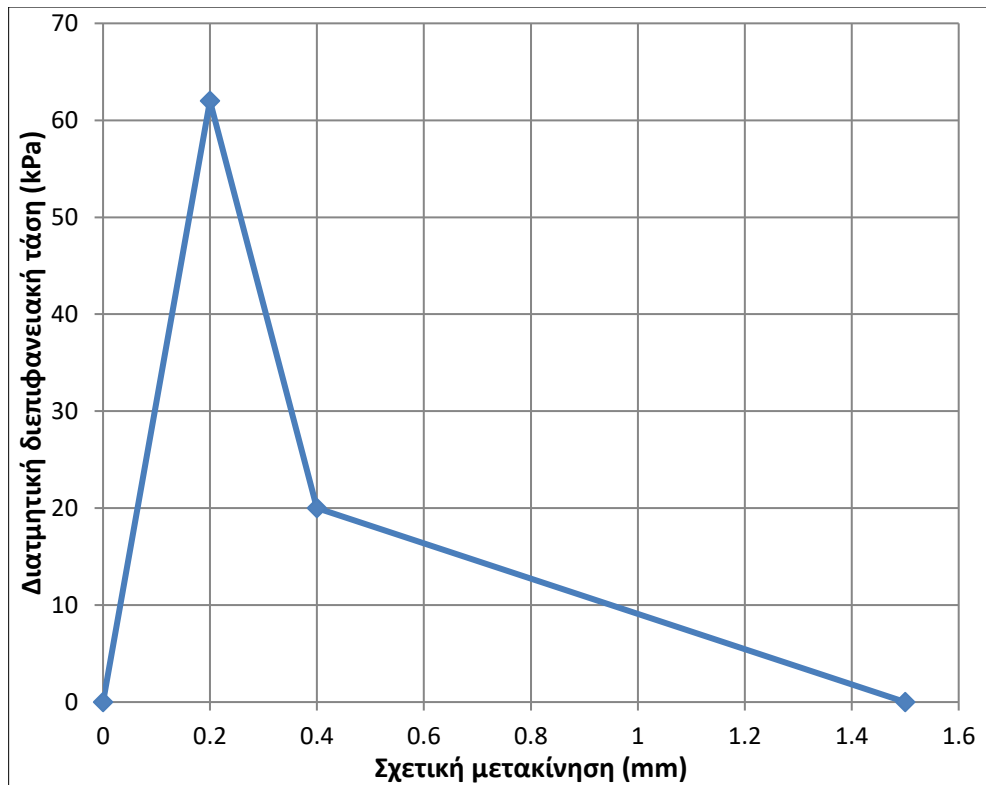


Εικόνα 95: Φορά των διατμητικών τάσεων στο στάδιο ανάπτυξης της μέγιστης διατμητικής δύναμης

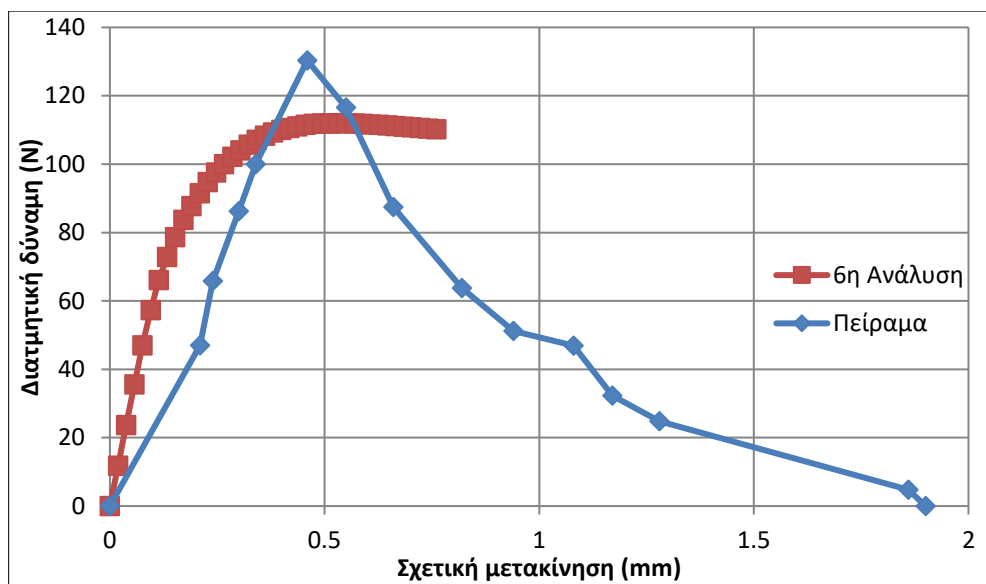
➤ 6<sup>η</sup> Ανάλυση

Πραγματοποιήθηκε και μια ακόμη ανάλυση με σκοπό την επίτευξη της προσέγγισης της μέγιστης διατμητικής δύναμης όπως προκύπτει από το πείραμα. Ωστόσο, αυτό αποδείχθηκε αδύνατο. Ο νόμος συμπεριφοράς της διατμητικής τάσης καθώς και το διάγραμμα που προέκυψε παρουσιάζεται στη συνέχεια.





Διάγραμμα 6.1.4.26.: Νόμος συμπεριφοράς της διατμητικής διεπιφανειακής τάσης



Διάγραμμα 6.1.4.27.: Σύγκριση διατμητικής διεπιφανειακής τάσης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια 6<sup>ης</sup> ανάλυσης και πειράματος

Ωστόσο, αποδείχθηκε, ότι βάζοντας υψηλότερη μέγιστη διατμητική τάση, η περιοχή μετά τη μέγιστη διατμητική δύναμη δεν μπορεί να συγκλίνει με την καμπύλη του πειράματος λόγω συμπεριφοράς του SFRM.

Συνεπώς, η βέλτιστη λύση αφορά τον νόμο συμπεριφοράς της διατμητικής τάσης όπως προσδιορίστηκε στη 5<sup>η</sup> ανάλυση.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

### 7.1. Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συμπεριφορά που παρουσιάζει η διεπιφάνεια μεταξύ του δομικού χάλυβα και του τσιμεντοειδούς εκτοξευόμενου πυράντοχου υλικού (SFRM) όταν υπόκειται σε διάτμηση. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις αναλύσεις συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πείραμα διάτμησης που πραγματοποιήθηκε από τους Amir Arablouei και Venkatesh Kodur, στο Michigan State University.

Αρχικά, προκειμένου να προσομοιωθεί αριθμητικά η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών, χρησιμοποιήθηκαν τρεις μεθοδολογίες οι οποίες βασίζονται στην μέθοδο της προσκολλημένης επαφής (glue condition). Προκειμένου το άκαμπτο σώμα (rigid) να δεχτεί μόνο την επιβαλλόμενη μετακίνηση, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της απλής επαφής (touching condition) σε σχέση με τον χάλυβα, ενώ για την επαφή του με το SFRM έγινε χρήση της μεθόδου προσκολλημένης επαφής και συγκεκριμένα της μόνιμης (glue permanent condition).

Η πρώτη μεθοδολογία προσομοίωσης της συμπεριφοράς της διεπιφάνειας πραγματοποιήθηκε βάσει του κριτηρίου τάσεων Yamada – Sun. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές το softening modulus του SFRM και η εφελκυστική αντοχή του, προκειμένου να διερευνηθεί πως επιδρά η κάθε μεταβολή στην συμπεριφορά της διατμητικής δύναμης σε συνάρτηση με τη σχετική μετακίνηση στη διεπιφάνεια. Όπως διαπιστώθηκε, οι διατμητικές τάσεις υπερσχύουν των ορθών, αφού εξετάζεται το φαινόμενο της καθαρής διάτμησης. Οι ορθές τάσεις ήταν στο μεγαλύτερο μέρος των αναλύσεων θλιπτικές, με εξαίρεση κάποια σημεία στα οποία ήταν εφελκυστικές και έφτασαν τη μέγιστη τάση τους. Ωστόσο, τα διάγραμμα που προέκυψαν αποκλίνουν σημαντικά από το διάγραμμα του πειράματος. Για το λόγο αυτό οι αναλύσεις συνεχίστηκαν βάσει της δεύτερης μεθοδολογίας.

Στη δεύτερη μεθοδολογία, κατά την οποία η συμπεριφορά της διεπιφάνειας σε διάτμηση βασίζεται στην παραμόρφωση του SFRM, χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές, όπως και στην πρώτη μεθοδολογία, το softening modulus και η εφελκυστική αντοχή του SFRM. Όπως αποδείχθηκε από τα διάγραμμα που διεξήχθησαν, παρόλο που το SFRM συνεχίζει την παραμόρφωσή του και μετά την τιμή που τελειώνει ο φθίνων κλάδος του, η διεπιφάνεια δεν χάνει τη φέρουσα ικανότητά της, αφού όπως παρατηρήθηκε σε όλες τις αναλύσεις, οι διατμητικές τάσεις δεν είχαν μέχρι το τελευταίο βήμα των αναλύσεων.

Στη τρίτη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε, η συμπεριφορά της διεπιφάνειας καθορίζεται βάσει των νόμων συμπεριφοράς ορθής και διατμητικής τάσης που εισήχθησαν. Στη συγκεκριμένη μεθοδολογία, στις αναλύσεις, που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό να προσεγγίσουν τη βέλτιστη λύση, χρησιμοποιήθηκαν ως μεταβλητές η σχετική μετακίνηση και η αντίστοιχη διατμητική τάση οι οποίες επαληθεύονταν σε κάθε ανάλυση. Ωστόσο, οι ορθές τάσεις που αναπτύχθηκαν ήταν θλιπτικές.

Μέσω της χρήσης των τριών μεθοδολογιών που χρησιμοποιήθηκαν, αποδείχτηκε ότι η τρίτη έδωσε το βέλτιστο αποτέλεσμα σε σύγκριση με το διάγραμμα. Η μόνη διαφορά υπήρξε στην προσέγγιση της μέγιστης διατμητικής δύναμης η οποία προέκυψε ίση με 104,84 N. Έγινε προσπάθεια ώστε να επιτευχθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η πραγματική τιμή των 130,36 N, ωστόσο, ήταν αδύνατο λόγω της συμπεριφοράς που παρουσιάζει το SFRM συνολικά.

## Βιβλιογραφία

- 1.Zografopoulou,K., Mistakidis, E.(2017). Numerical simulation of the behavior of steel members with damaged SFRM fire protection coatings at elevated temperatures. EUROSTEEL 2017, Denmark, September 13-15.
- 2.Kar Tean Tan, White, C.C, Hunston, D.(2010). An adhesion test method for spray-applied fire-resistive materials. Fire and Materials (2011), 35 pp 245-259.
- 3.Braxtan, N.L., Pessiki, S.(2011). Bond performance of SFRM on steel plates subjected to tensile yielding. Journal of Fire Protection Engineering, 21 pp 37-55.
- 4.Zhang, Q., Li, V.C. (2014). Adhesive bonding of fire-resistive engineered cementitious composites (ECC) to steel. Construction and Building Material (2014), 64 pp 431-439.
5. Zografopoulou,K., Mistakidis, E. Numerical Study of the thermal behavior of steel members with damaged SFRM coatings. Laboratory of Structural Analysis and Design, Department of Civil Engineering, University of Thessaly, Volow , Greece.
- 6.Braxtan, N.L, Pessiki, S.P.(2011).Postearthquake Fire Performance of Sprayed Fire-Resistive Material on Steel Moment Frames. Journal of Structural Engineering (2011), 137 pp 946-953.
- 7.Μίχαλτσου, Γ.Θ. (2009). Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές. Θεωρία και Εφαρμογές. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμεών.
- 8.Βάγιας, Ι., Ερμόπουλος, Ι., Ιωαννίδης, Γ. Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα. Αθήνα: Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
- 9.Πυροπροστασία  
<http://el.wikipedia.org/wiki/Πυροπροστασία> (τελευταία πρόσβαση στις 14/10/2018)
- 10.Τριανταφύλλου, Α. (2013). Δομικά Υλικά. Πάτρα: 10<sup>η</sup> ΕΚΔΟΣΗ
- 11.Πτώση δίδυμων πύργων  
<https://www.npress.gr/endaferonta/11i-septemvriou-2001-ptosi-ton-didymon-pyrgon/>  
(τελευταία πρόσβαση στις 14/10/2018)
- 12.Πυροπροστασία χάλυβα  
[www.firesecurity.gr/xalybas.html](http://www.firesecurity.gr/xalybas.html).