

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ** τμημα μηχανικών παραγώγης και διοικήσης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΔΡΕΑ Κ. ΚΑΛΟΓΕΡΟΠΟΥΛΟΥ** Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης

# ΘΕΜΑ : ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΟΧΛΙΩΤΟΥ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

**XANIA 2011** 

Η εργασία ολοκληρώθηκε τον Μάρτιο του 2011 στο Εργαστήριο Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης του Πολυτεχνείου Κρήτης υπό την επίβλεψη του καθηγητή Γ.Ε. Σταυρουλάκη.

# ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά για την βοήθεια που μου προσέφεραν στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας:

Τον κ. Σταυρουλάκη Γεώργιο, Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, για την συνεργασία μας και την υποδειγματική καθοδήγηση που μου προσέφερε σε όλες τις φάσεις διεκπεραίωσης της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

Τον κ. Δροσόπουλο Γεώργιο, Ερευνητικό Συνεργάτη του Εργαστηρίου Υπολογιστικής Μηχανικής και Βελτιστοποίησης, για τις πολύτιμες γνώσεις του και την καταλυτική βοήθειά που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ		σελ (	5
----------	--	-------	---

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1	ПАРС	ΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΗΝ
	ANA	ΔΥΣΗ σελ 12
	1.1.1	Τρισδιάστατη Απεικόνιση Στοιχείων Κατασκευής σελ 12
	1.1.2	Παρουσίαση διάταξης δοκιμής σε πραγματικές εικόνες από το
		πειραμα που εγινε στο πανεπιστημιο του J.U.S.I σελ 1/
	1.1.3	Απεικόνιση συναρμολογημένης διάταξης μετά την διακριτοποίηση με
		πεπερασμενα στοιχεια (mesning) σελ 19

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ σελ 23
2.1.1 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης για το μηχανικό πρόβλημα με χρήση
του τυπικού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων σελ 23
2.1.2 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης για το μηχανικό πρόβλημα με χρήση
τοπικής πύκνωσης του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων σελ 27
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ σελ 28
2.2.1 Περιγραφή θερμικού προβλήματος και βασικά στοιχεία
μοντελοποίησης αυτούσελ 28
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ σελ 34
2.3.1 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης του μηχανικού προβλήματος ώστε
να συνδυαστεί με το θερμικόσελ 34
ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ σελ 35
2.4.1 Παρουσίαση των βασικών θερμικών ιδιοτήτων που
χρησιμοποιήθηκαν σελ 35
ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ σελ 36
2.5.1 Σενάρια για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων σελ 36
2.5.2 Σενάρια για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων
στοιχείων σελ 38

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	σελ 40
	Τρισδιάστατη απεικόνιση παραμορφωμένης διάταξης για τα διάφορα σενάρια	σελ 40
3.1.1	Αποτελέσματα ανάλυσης για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων	
	στοιχείων	σελ 40
	3.1.1.1 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 1α	. σελ 40
	3.1.1.2 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 1β	. σελ 49
	3.1.1.3 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 2α	. σελ 52
	3.1.1.4 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 2β	. σελ 62
	3.1.1.5 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 3	. σελ 72

	3.1.1.6 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 4α	σελ 82
	3.1.1.7 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 4β	σελ 92
3.1.2	Αποτελέσματα ανάλυσης για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμ	ιένων
	στοιχείων	σελ 102
	3.1.2.1 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 5α	σελ 102
	3.1.2.2 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 5β	σελ 111
	3.1.2.3 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 6	σελ 114
	3.1.2.4 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 7	σελ 124
	3.1.2.5 Αποτελέσματα ανάλυσης για το Σενάριο 8	σελ 134
3.2	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	σελ 144
3.2.1	Διαγράμματα μετατόπισης φόρτισης για το τυπικό δίκτυο πεπερασμ	ένων
	στοιχείων	σελ 144
	3.2.1.1 Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης Περίπτωση 1	σελ 144
	3.2.1.2 Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης Περίπτωση 2	σελ 145
	3.2.1.3 Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης Περίπτωση 3	σελ 146
	3.2.1.4 Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης Περίπτωση 4	σελ 147
	3.2.1.5 Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης Περίπτωση 5	σελ 148
	3.2.1.6 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης για τις	
	Περιπτώσεις 1-5	σελ 149
3.2.2	Διαγράμματα μετατόπισης φόρτισης για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυ	00
	πεπερασμένων στοιχείων	σελ 149
	3.2.2.1 Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης Περίπτωση 6	σελ 149
	3.2.2.2 Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης Περίπτωση 7	σελ 150
	3.2.2.3 Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης Περίπτωση 8	σελ 151
	3.2.2.4 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης για τις	
	Περιπτώσεις 6-8	σελ 151

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1	ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΜΕΙΩΜΕΝΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ
	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣσελ 152
4.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΑ
	ΜΕΙΩΜΕΝΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ σελ 153
	Τρισδιάστατη απεικόνιση παραμορφωμένης διάταξης για τις νέες
	επιλύσεις σελ 153
	4.2.1 Αποτελέσματα ανάλυσης για την νέα επίλυση του Σεναρίου 6. σελ 153
	4.2.2 Αποτελέσματα ανάλυσης για την νέα επίλυση του Σεναρίου 7. σελ 160
4.3	ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ
	ΕΠΙΛΥΣΕΙΣσελ 167
	4.3.1 Διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης για τις νέες επιλύσεις των
	σεναρίων 6 και 7 σελ 167
	4.3.2 Συγκεντρωτικό διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης για τις
	Περιπτώσεις του τοπικά πυκνωμένου δικτύου πεπερασμένων
	στοιχείων με τις νέες επιλύσεις σελ 168
4.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ σελ 168
4.5	ΓΕΝΙΚΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ σελ 169
ΒΙΒΛ	ΙΟΓΡΑΦΙΑ σελ 170

# <u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>

#### Λίγα λόγια για την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί πλέον ένα ισχυρό εργαλείο για την αριθμητική επίλυση ενός μεγάλου φάσματος προβλημάτων για τους μηγανικούς. Οι εφαρμογές της εκτείνονται από την παραμόρφωση και ανάλυση τάσεων σε αυτοκίνητα, αεροπλάνα, κτίρια και γέφυρες, μέχρι την ανάλυση πεδίων ροής θερμότητας, ροής υγρών, μαγνητικής ροής, υπόγειας ροής και άλλων προβλημάτων ροής [1]. Με τις εξελίξεις στην τεχνολογία των Η/Υ και των συστημάτων CAD, σύνθετα προβλήματα μπορούν να μοντελοποιηθούν πολύ εύκολα. Διάφορες εναλλακτικές συνθέσεις μπορούν να δοκιμαστούν σε έναν Η/Υ πριν κατασκευαστεί το πρώτο πρωτότυπό τους με κύριο στόγο την τελειοποίηση του προϊόντος. Όπως αντιλαμβανόμαστε αυτό καθιστά την μέθοδο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ιδιαίτερα σημαντική και μας υποδεικνύει την ανάγκη να κατανοήσουμε την βασική θεωρία της μεθόδου και φυσικά να αντιληφθούμε τις τεχνικές μοντελοποίησης και τις υπολογιστικές έννοιές της. Κατά την μέθοδο της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, μια περίπλοκη περιοχή, η οποία ορίζει ένα συνεχές διακριτοποιείται σε απλά γεωμετρικά σχήματα, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements). Οι εκάστοτε ιδιότητες των υλικών και οι διέπουσες σχέσεις που χρειαζόμαστε για την ανάλυσή μας θεωρούνται πάνω σε αυτά τα στοιχεία και εκφράζονται σε όρους των άγνωστων τιμών στις γωνίες των στοιχείων. Μια διαδικασία σύνθεσης, η οποία καταλλήλως θεωρεί τα φορτία και τους περιορισμούς, έχει ως αποτέλεσμα ένα σύνολο εξισώσεων. Η λύση αυτών των εξισώσεων γίνεται από το υπολογιστικό σύστημα και δίνει την κατά προσέγγιση συμπεριφορά του συνεχούς.

#### Σκοπός Εργασίας.

Η παρούσα εργασία σκοπεύει στο να παρουσιάσει την συνδυασμένη Μηχανική και Θερμική ανάλυση μεταλλικού φορέα, κάνοντας χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων με κατάλληλο λογισμικό σε Η/Υ.

Βασικός μας στόχος είναι να προσομοιώσουμε την συμπεριφορά μεταλλικών κατασκευών σε συνθήκες φόρτισης που προέρχονται ενδεχομένως από κάποια σεισμική δραστηριότητα ενώ παράλληλα να έχουμε και την σε συνδυασμό επενέργεια της θερμότητας από πιθανή φωτιά που έχει ξεσπάσει [7]. Θα διερευνήσουμε αναλυτικά δύο βασικούς τομείς: 1) Το κατά πόσο η αντοχή της κατασκευής μας επηρεάζεται από την επενέργεια της φωτιάς, οδηγώντας ενδεχομένως σε μια πρόωρη κατάρρευση της κατασκευής μας καθώς πλέον δεν μπορεί να αντέξει τα ίδια ποσά φόρτισης που θα ήταν σε θέση να φέρει σε περίπτωση απουσίας των θερμικών φορτίων (οριακή αντοχή του συστήματός μας, υπό την επειδραση φορτίου) και 2) θα γίνει μια διερεύνηση της συμπεριφοράς του φορέα στην περιοχή της σύνδεσης.

#### Λίγα λόγια για την παρούσα εργασία

Στην παρούσα εργασία το πρόβλημα της προσομοίωσης της συμπεριφοράς του φορέα επιλύθηκε για τρία βασικά διαφορετικά σενάρια συνδυασμού Θερμικών -Μηγανικών φορτίσεων και για δύο διακριτοποιήσεις, πρώτα για ένα τυπικό δίκτυο και στην συνέγεια για τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων στοιγείων. Θεωρήθηκαν ελαστοπλαστικές ιδιότητες των υλικών και μεγάλες μετακινήσεις (γεωμετρική μη γραμμικότητα) στο Μηγανικό μέρος και θερμικές ιδιότητες υλικών στο Θερμικό σκέλος της μοντελοποίησης [8]. Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο σενάριο εφαρμόζουμε τα θερμικά αποτελέσματα στο ίδιο βήμα με την επιβολή των μηγανικών φορτίων, κατά το δεύτερο σενάριο εφαρμόζουμε τα θερμικά αποτελέσματα σε ξεχωριστό βήμα αμέσως μετά την επιβολή του ιδίου βάρους του φορέα μας και πριν την επιβολή σε αυτόν του φορτίου που θα προκαλέσει την βασική του καταπόνηση, στο τελευταίο σενάριο κάνουμε χρήση μιας αλληλουχίας φορτίσεων εφαρμόζοντας ξανά τα θερμικά αποτελέσματα σε ξεχωριστό βήμα από τις μηχανικές φορτίσεις [9]. Τα σενάρια που χρησιμοποιήσαμε θα αναλυθούν εκτενέστερα στην συνέχεια της εργασίας. Τέλος παρουσιάζονται δύο γαρακτηριστικές επιλύσεις στις οποίες λαμβάνεται επιπλέον των προηγουμένων και θερμική εξάρτηση των μηγανικών ιδιοτήτων των υλικών προσεγγίζοντας με αυτόν τον τρόπο περισσότερο τις πραγματικές συνθήκες.

#### Λίγα λόγια για την σύνδεση και το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων

Η εργασία της μεταλλικής σύνδεσης βασίζεται σε αντίστοιχη πειραματική διερεύνηση (από το πανεπιστήμιο της Ιορδανίας) [2]. Σύμφωνα με αυτήν, ένας μεταλλικός στύλος διατομής διπλού ταυ συνδέεται με μια μεταλλική δοκό με την χρήση μεταλλικών κοχλιών. Σε κάποιο καθορισμένο σημείο κοντά στο ελεύθερο άκρο της δοκού, ασκείται κατακόρυφο συγκεντρωμένο φορτίο [6]. Στην προσπάθειά μας για επέκταση της πειραματικής διερεύνησης ασκούμε θερμικό φορτίο σε συγκεκριμένες επιφάνειες του στύλου και της δοκού, ορίζοντας επίσης και κάποια σημεία με σταθερές θερμοκρασίες, στην βάση, στο κέντρο και στο ελεύθερο άκρο της κατασκευής μας.

Τα αποτελέσματα της συνδυασμένης επιβολής θερμικών και μηχανικών φορτίων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της καθαρά μηχανικής ανάλυσης ως προς την συμπεριφορά της διεπιφάνειας (άνοιγμα αυτής και πόσο), ως προς την μορφή του φορέα κατά την αστοχία (πλαστικοποίηση μεταλλικών στοιχείων, τοπικός λυγισμός στύλου) και κυρίως ως προς την μορφή του διαγράμματος φορτίου – μετατόπισης.

Από τις σημαντικότερες παρατηρήσεις της εργασίας είναι το άνοιγμα (με πιθανή μικρή ολίσθηση) της διεπιφάνειας που δημιουργείται στην ένωση του στύλου με το δοκάρι. Για την προσομοίωση τέτοιων φαινομένων, απαιτείται η εισαγωγή στην περιοχή της διεπιφάνειας, νόμου επαφής – τριβής καθώς φυσικά και του νόμου της θερμικής αγωγιμότητας μεταξύ επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή.

 $\Omega$ ς προς τον ορισμό των διεπιφανειών του προβλήματος σημαντικότερη θεωρήθηκε η διεπιφάνεια της ένωσης στύλου – δοκού, η οποία όπως αναφέραμε προσομοιώνεται με τον νόμο επαφής – τριβής σύμφωνα και με αντίστοιχες εργασίες που έχουν γίνει

[3]. Για την τριβή από το λογισμικό με το οποίο και έγινε η επίλυση μας δόθηκαν δύο δυνατότητες: α) η μέθοδος Lagrange multipliers και β) η μέθοδος Penalty. Η πρώτη μέθοδος είναι σημαντικά ακριβέστερη αλλά περισσότερο βαριά υπολογιστικά, καθώς εισάγονται επιπλέον άγνωστοι, σαν βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος της τριβής. Η δεύτερη μέθοδος είναι λιγότερο ακριβής, αλλά με μικρότερο υπολογιστικό κόστος, και με μεγαλύτερη πιθανότητα ολοκλήρωσης του προβλήματος χωρίς πιθανότητα σύγκλισης σε λύση. Στην εργασία μας γίνεται προσομοίωση της συμπεριφοράς του φορέα με την χρήση και των δύο μεθόδων ορισμού του νόμου επαφής – τριβής αποτελέσματα των οποίων μπορείτε να δείτε στην σχετική παράγραφο. Πέραν όμως από την διεπιφάνεια στύλου – δοκού που προαναφέραμε έχουμε και τις διεπιφάνειες ένωσης των κεφαλών των κοχλιών με τα μέρη του στύλου και της δοκού, στην περιοχή της σύνδεσης. Για μείωση του υπολογιστικού κόστους προχωρήσαμε σε προσομοίωση αυτών των διεπιφανειών με άρρηκτη σύνδεση (tie connection), η οποία δεν επιτρέπει άνοιγμα – ολίσθηση.

Για την δημιουργία του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων, απαιτούνται επίσης οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών, δηλαδή των μεταλλικών στοιχείων του στύλου, της δοκού και των κοχλιών. Τα προαναφερθέντα δίνονται από την πειραματική εργασία εκτός φυσικά των θερμικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων των υλικών πράγμα που διερευνάται στην εργασία μας. Για την αστοχία των μεταλλικών στοιχείων, γίνεται χρήση του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises που εν συντομία αναλύεται παρακάτω.

#### Tάση von Mises.

Η τάση von Mises χρησιμοποιείται ως κριτήριο στον προσδιορισμό της έναρξης της αστοχίας σε ελατά υλικά [1]. Το κριτήριο αστοχίας ορίζει ότι η τάση von Mises σ<sub>VM</sub> πρέπει να είναι μικρότερη από την τάση διαρροής σ<sub>Y</sub> του υλικού. Σε μορφή ανισότητας, το κριτήριο μπορεί να τεθεί ως:

 $\sigma_{VM}\!\le\!\sigma_{Y}$ 

Η τάση von Mises  $\sigma_{VM}$ δίνεται από

$$\sigma_{VM} = \sqrt{I_1^2 - 3I_2}$$

όπου  $I_1$  και  $I_2$  είναι οι δύο πρώτες αμετάβλητες του τανυστή τάσης. Για τη γενική κατάσταση της τάσης, η οποία δίνεται από την παραπάνω εξίσωση, οι  $I_1$  και  $I_2$  δίνονται από

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$
  

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2 - \tau_{xy}^2$$

Οι δύο αμετάβλητες μπορούν να γραφούν συναρτήσει των κυρίων τάσεων  $\sigma_1, \sigma_2$  και  $\sigma_3, \omega_5$ 

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$
$$I_2 = \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1$$

Είναι εύκολο να ελεγχθεί ότι η τάση von Mises μπορεί πλέον να εκφραστεί από τον τύπο

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}$$

Για την κατάσταση της επίπεδης τάσης έχουμε

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y$$
$$I_2 = \sigma_x + \sigma_y - \tau_{xy}^2$$

και για την επίπεδη παραμόρφωση έχουμε

$$I_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$
  

$$I_2 = \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2$$
  

$$\delta \pi \text{ou } \sigma_z = v(\sigma_x + \sigma_y)$$

#### Θερμομηχανική ανάλυση

#### Γενικές πληροφορίες.

Η θερμομηχανική ανάλυση αναφέρεται στην επίδραση που θα έχει στη μηχανική (στατική) συμπεριφορά των φορέων η αύξηση της θερμοκρασίας αυτών, παραδείγματος χάριν λόγω εκδήλωσης πυρκαγιάς. Βασικό στόχο αποτελεί η εύρεση των μηχανικών ιδιοτήτων των φορέων μετά την εκδήλωση της φωτιάς έτσι ώστε να είναι δυνατή η εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας αυτών σε παρόμοιες καταστάσεις. Συνεπώς κατά την διερεύνηση του φαινομένου διακρίνει κανείς τρείς κατηγορίες μελέτης: α) Μηχανική ανάλυση, β) Θερμική ανάλυση και γ) Θερμομηχανική ανάλυση η οποία και αποτελεί συνδυασμό των α και β.

Ενδεικτικά διατυπώνεται παράδειγμα θερμομηχανικής ανάλυσης: Απλός γραμμικός μεταλλικός φορέας φορτίζεται στατικά, με συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσο αυτού. Εάν εφαρμοσθεί στο υλικό κατάλληλος νόμος υλικού, τότε είναι δυνατό να υπολογιστεί η φέρουσα ικανότητα του φορέα, δηλαδή η μέγιστη δύναμη την οποία μπορεί αυτός να αναλάβει πριν την κατάρρευσή του. Στην οριακή όπως ονομάζεται κατάσταση του φορέα, διακρίνονται στην μάζα αυτού τάσεις, μετατοπίσεις παραμορφώσεις και γενικά όλα τα μηχανικά χαρακτηριστικά τη στιγμή λίγο πριν την κατάρρευση. Όταν λόγω της φωτιάς αυξηθεί η θερμοκρασία του χώρου πλησίον του φορέα, τότε η μηχανική συμπεριφορά αυτού αναμένεται να μεταβληθεί. Η παράλληλη δράση της συγκεντρωμένης δύναμης και της θερμότητας (διαμέσου της αύξησης της θερμοκρασίας ή θερμικών φορτίων που προσπίπτουν στον φορέα). αναμένεται να μεταβάλει χαρακτηριστικά αυτού όπως η μέγιστη δύναμη πριν την κατάρρευση, οι αντίστοιχες μετατοπίσεις και οι τάσεις. Αυτή την μεταβολή προσπαθεί να καταγράψει η θερμομηγανική ανάλυση (τουλάγιστον σε μακροσκοπική θεώρηση καθώς υπάρχει και η θεώρηση σε επίπεδο μικροδομής όπου μελετώνται οι μεταβολές στους καταστατικούς νόμους του υλικού λόγω της επίδρασης της θερμότητας).

Η Θερμομηχανική ανάλυση σύμφωνα με τις δυνατότητες που μας δίνονται από το λογισμικό της ανάλυσης μπορεί να γίνει με τους παρακάτω τρόπους.

- A) Uncoupled heat transfer analysis
- B) Sequentially coupled thermal stress analysis
- C) Fully coupled thermal stress analysis

Επεξηγώντας.

A) Uncoupled heat transfer analysis: Αποτελεί ουσιαστικά την καθαρά θερμική ανάλυση που προαναφέραμε. Ουσιαστικά επιλύει το πρόβλημα μεταφοράς της θερμότητας, το οποίο αποσκοπεί μόνο στην μελέτη της μετάδοσης της θερμότητας και διάχυσης της θερμοκρασίας σε έναν φορέα, χωρίς να λαμβάνονται υπ' όψιν τα κλασικά μηχανικά χαρακτηριστικά του φορέα (μέτρο ελαστικότητας, νόμος διαρροής – πλαστικοποίησης υλικού). Έτσι ο φορέας μορφώνεται αποκλειστικά «σε όρους θερμοκρασίας» : θερμομηχανικές ιδιότητες υλικού, θερμοκρασιακό φορτίο, θερμοκρασιακές συνθήκες, δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων θερμοκρασίας, θερμομηχανική επίλυση.

B) Sequentially coupled thermal – stress analysis: Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται η επίδραση της θερμοκρασιακής μεταβολής στη μηχανική συμπεριφορά του φορέα. Για να γίνει το παραπάνω πρέπει προηγουμένως να έχει ολοκληρωθεί η θερμική επίλυση του προβλήματος (uncoupled heat transfer analysis) και στην συνέχεια με χρήση της θερμικής επίλυσης να υπολογιστεί η επίδραση αυτής στο μηχανικό πρόβλημα (εισαγωγή αποτελεσμάτων θερμικής επίλυσης στο μηχανικό πρόβλημα). Σημειώνεται ότι εδώ δεν περιλαμβάνεται το αντίστροφο πρόβλημα, δηλαδή η περίπτωση επίδρασης των μηχανικών χαρακτηριστικών στην θερμοκρασία (π.χ. ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών εξαιτίας δυνάμεων τριβής σε σύστημα πέδησης αυτοκινήτων, όπου η επαφή – τριβή των τμημάτων θα αυξήσει την θερμοκρασία).

C) Fully coupled thermal – stress analysis: Στην τελευταία αυτή περίπτωση περιλαμβάνεται επιπλέον και το αντίστροφο πρόβλημα το οποίο δεν συμπεριλαμβανόταν στην sequentially coupled thermal – stress analysis, δηλαδή μελετάται η ταυτόχρονη και αμφίδρομη επίδραση των μηχανικών στα θερμικά χαρακτηριστικά. Η χρήση αυτής της μεθόδου γίνεται όταν έχουμε ισχυρή αλληλεπίδραση μεταξύ μηχανικής και θερμικής επίλυσης καθώς επίσης και σε περιπτώσεις επαναληπτικών θερμικών – μηχανικών αλληλεπιδράσεων.

#### Μέθοδος που επιλέξαμε για την ανάλυσή μας

Στην παρούσα εργασία επιλέξαμε να γίνουν προσομοιώσεις της συμπεριφοράς του φορέα κάνοντας χρήση της δεύτερης μεθόδου (Sequentially coupled thermal – stress analysis). Αρχικά δημιουργήσαμε και προχωρήσαμε σε επίλυση ενός «καθαρού» προβλήματος θερμότητας και στην συνέχεια προωθήσαμε την λύση του προβλήματος της θερμότητας σαν «predefined field» δηλαδή σαν προκαθορισμένο πεδίο, στο πρόβλημα της μηχανικής έτσι ώστε να εξάγουμε τα απαραίτητα αποτελέσματα.

#### Γιατί επιλέξαμε την διερεύνηση Θερμικών – Μηχανικών φορτίσεων

Η φωτιά η οποία στην δική μας μελέτη εμφανίζεται με την μορφή θερμικών φορτίων και αυξημένων θερμοκρασιών μπορεί να προκληθεί από πολλούς λόγους αλλά όπως επιβεβαιώνει και η παγκόσμια εμπειρία και έρευνες οι οποίες έχουν γίνει, ο σεισμός αποτελεί έναν από τους βασικούς λόγους εκδήλωσης φωτιάς. Αν αναλογιστεί κανείς επίσης ότι η φωτιά όταν ακολουθεί μετά από σεισμική δραστηριότητα μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση στην διάρκεια ζωής και στις ιδιότητες των μεταλλικών κατασκευών λειτουργώντας σαν πρόσθετη καταπόνηση στην ήδη καταστροφική επενέργεια που έχει ο σεισμός, καθίσταται μια αρκετά σημαντική απειλή για τα μεταλλικά κτίρια. Αφετέρου ακόμη και να μην προκληθεί πυρκαγιά αμέσως μετά από κάποιο σεισμό, η πιθανότητα για μετέπειτα εκδήλωσή της θα πρέπει να ληφθεί σημαντικά στα υπ' όψιν καθώς οι ζημιές που προκαλούνται στην κατασκευή μας από τον σεισμό την κάνουν αρκετά πιο ευάλωτη σε τέτοια φαινόμενα. Το να εναποθέσουμε τις ελπίδες μας σε πυροσβεστικά συστήματα και σε άλλων ειδών τρόπους καταπολέμησης της φωτιάς δεν αποτελεί και την πλέον ενδεδειγμένη λύση καθώς τέτοιου είδους συστήματα εξαρτώνται από το πολύ ευάλωτο σε σεισμικές δραστηριότητες υδραυλικό και ηλεκτρικό δίκτυο. Έτσι λοιπόν σύμφωνα και με τις οδηγίες ευρωπαϊκών οργανισμών (European Commission) οι μεταλλικές κατασκευές πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε σε περίπτωση που ξεσπάσει φωτιά, η φέρουσα ικανότητα της κατασκευής μας να μπορεί να διατηρηθεί για μια συγκεκριμένη χρονικά περίοδο, η δημιουργία και η εξάπλωση της φωτιάς και του καπνού μέσα στην κατασκευή μας να είναι περιορισμένη έτσι ώστε το εργαζόμενο προσωπικό που βρίσκεται εντός του κτιρίου να έχει τον απαιτούμενο χρόνο για να απομακρυνθεί από αυτό με ασφάλεια η ακόμη και να υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος για διάσωσή τους από κάποια συνεργεία διάσωσης [4].

## <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</u>

#### 1.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΦΟΡΕΑ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η κατασκευή που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία μας αποτελείται από δεκατέσσερα κομμάτια. Αυτά είναι η οριζόντια δοκός, ο κάθετος στύλος, οι τρείς δοκοί συγκράτησης (δεξιά δοκός, αριστερή δοκός και πίσω δοκός συγκράτησης), οι οκτώ κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνδεση της δοκού με τον στύλο και η απαραμόρφωτη επιφάνεια. Τα παραπάνω στοιχεία παρουσιάζονται σε τρισδιάστατη μορφή στην συνέχεια.

## 1.1.1 Τρισδιάστατη Απεικόνιση Στοιχείων Κατασκευής



Στοιχεία και τελική μορφή διάταξης:

Εικόνα 1:Οριζόντα δοκός διάταξης



Εικόνα 2:Κάθετος στύλος διάταξης



Εικόνα 3: Κοχλίας διάταξης



Εικόνα 4: Πίσω δοκός συγκράτησης



Εικόνα 5: Πλαϊνές δοκοί συγκράτησης



Εικόνα 6: Rigid Body (απαραμόρφωτη επιφάνεια)



Εικόνα 7: Συναρμολογημένη διάταξη



Εικόνα 8: Πλαϊνή προβολή Συναρμολογημένης διάταξης



Εικόνα 9: Κοντινή προβολή ένωσης δοκού – στύλου με χρήση κοχλιών

## 1.1.2 Παρουσίαση διάταξης δοκιμής σε πραγματικές εικόνες από το πείραμα που έγινε στο πανεπιστήμιο του J.U.S.T

Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες χαρακτηριστικές εικόνες από τον φορέα κατά την διάρκεια των πειραματικών δοκιμών σε μηχανική καθαρά φόρτιση όπως αυτές έγινες σε εργαστήριο του πανεπιστημίου της Ιορδανίας:



Εικόνα i: Πλήρης διάταξη κατά την διάρκεια των δοκιμών (Πανεπιστήμιο Ιορδανίας)



Εικόνα ii:Πλήρης διάταξη κατά την διάρκεια των δοκιμών (Πανεπιστήμιο Ιορδανίας)



Εικόνα iii: Πλήρης διάταξη παραμορφωμένη, κατά την διάρκεια των δοκιμών (Πανεπιστήμιο Ιορδανίας)



Εικόνα iv: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού – στύλου παραμορφωμένη, κατά την διάρκεια των δοκιμών (Πανεπιστήμιο Ιορδανίας)

## 1.1.3 Απεικόνιση συναρμολογημένης διάταξης μετά την διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (meshing)

Παρακάτω απεικονίζεται η συναρμολογημένη διάταξη από διάφορες γωνίες λήψεις μετά την διακριτοποίηση που έγινε με πεπερασμένα στοιχεία (περίπτωση τυπικής διακριτοποίησης).



Εικόνα 10: Απεικόνιση συναρμολογημένης διάταξης



Εικόνα 11: Κοντινή προβολή ένωσης δοκού - στύλου



Εικόνα 12: Κοντινή προβολή πίσω πλάγιας όψης σύνδεσης δοκού – στύλου



Εικόνα 13: Κοντινή προβολή κοχλιών και σύνδεσης δοκού - στύλου

Ακολουθεί η παρουσίαση της συναρμολογημένης διάταξης μετά την διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία με την μέθοδο της τοπικής πύκνωσης του δικτύου στην περιοχή που αναμένονται τα περισσότερα φαινόμενα μηχανικής συμπεριφοράς.



Εικόνα 14: Κοντινή προβολή πυκνού δικτύου κοντά στην περιοχή της σύνδεσης



Εικόνα 15: Κοντινή πλαϊνή προβολή τοπικά πυκνού δικτύου κοντά στην περιοχή της σύνδεσης



Εικόνα 16: Κοντινή πίσω πλάγια προβολή τοπικά πυκνού δικτύου

## <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</u>

#### 2.1 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

# 2.1.1 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης για το μηχανικό πρόβλημα με χρήση τυπικού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων

Ξεκινώντας την μοντελοποίηση του καθαρά Μηχανικού προβλήματος (αραιό δίκτυο) ορίσαμε δύο διαφορετικούς τύπους υλικών. Το πρώτο υλικό το ονομάσαμε Beams\_Column και ορίσαμε σε αυτό τα ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά του όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

Material Definition:

General  $\rightarrow$  Density Δίνοντας την τιμή στο Mass Density = 7,86

Mechanical  $\rightarrow$  Elasticity  $\rightarrow$  Elastic Δίνοντας την τιμή του Young Modulus E= 250GPa και Poisson's Ratio v=0,3

 $Mechanical \rightarrow Plasticity \rightarrow Plastic$ 

Δίνοντας τις αντιστοιχίες τιμών:

Yield Stress	Plastic Strain
314.000 KPa	0
452.000 KPa	0,058192

Αντίστοιχα ορίσαμε και το δεύτερο υλικό με όνομα Bolts με τα ακόλουθα ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά:

General → Density Δίνοντας την τιμή στο Mass Density = 7,86

Mechanical  $\rightarrow$  Elasticity  $\rightarrow$  Elastic Δίνοντας την τιμή του Young Modulus E= 200GPa και Poisson's Ratio v=0,3

 $Mechanical \rightarrow Plasticity \rightarrow Plastic$ 

Δίνοντας τις αντιστοιχίες τιμών:		
Yield Stress	Plastic Strain	
600.000 KPa	0	
800.000 KPa	0,026	

Section Properties Definition:

Σε αυτό το στάδιο δημιουργήσαμε δύο sections του τύπου solid, homogenous και τα ονομάσαμε αντίστοιχα beams – column και Bolts, αντιστοιχώντας τα παράλληλα με τα αντίστοιχα υλικά που ονομάσαμε παραπάνω με τα ίδιο ονόματα. Συνεχίζοντας κάναμε assign το κάθε section στα αντίστοιχα κομμάτια (parts) της κατασκευής μας έτσι ώστε να τους επιδώσουμε τις ιδιότητες των υλικών που έχουμε δημιουργήσει

(κάνουμε assign τους κοχλίες με το section bolts και τα υπόλοιπα parts με το section beams – column έτσι ώστε να επιδοθούν για παράδειγμα στους κοχλίες «bolts» τα χαρακτηριστικά του υλικού που ονομάσαμε «Bolts»).

#### Instances:

Έχοντας συναρμολογήσει την διάταξη της δοκιμής μας ορίζοντας κατάλληλα τις παραμέτρους στο λογισμικό του προγράμματος επιλέξαμε στον τύπο για τα instances το independent (επαναλαμβάνοντας την διαδικασία για όλα τα parts) έχοντας ως στόχο κατά την διακριτοποίηση να δημιουργήσουμε ένα ενιαίο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων και να μην προβούμε σε μια διαδικασία διακριτοποίησης σε κάθε part της κατασκευής μας μεμονωμένα.

#### Interactions:

Σε αυτό το σημείο ορίσαμε τις διεπιφάνειες του προβλήματος. Σημαντικότερη από αυτές όπως άλλωστε αναφέραμε θεωρήθηκε η διεπιφάνεια ένωσης στύλου – δοκού την οποία προσομοιώσαμε ορίζοντας την ως surface – to – surface contact δίνοντάς της το όνομα «int-1» και τις παρακάτω ιδιότητες:

Contact property option  $\rightarrow$  Tagential behavior  $\rightarrow E\pi\iota\lambda$ έγουμε isotropic και friction coefficient = 0, 4

Contact property option  $\rightarrow$  Normal behavior  $\rightarrow$  Αφήνουμε τις default του προγράμματος και επιλέγουμε hard contact στον τύπο.

Οι υπόλοιπες διεπιφάνειες ένωσης των κεφαλών των κοχλιών με τα μέρη του στύλου και της δοκού στην περιοχή της σύνδεσης προσομοιώθηκαν σαν άρρηκτες συνδέσεις (tie contact), οι οποίες δεν επιτρέπουν άνοιγμα – ολίσθηση. Στόχος μας για αυτή την παραδοχή που κάναμε ήταν η μείωση του υπολογιστικού φόρτου του προβλήματος.

#### Step Definition:

Σε αυτό το στάδιο είναι που θα ορίσουμε όλα τα φορτία που θα ασκηθούν στην κατασκευή μας και φυσικά τις συνοριακές συνθήκες που έχουμε.

Στο βασικό μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε έχουμε ορίσει δύο επιπλέον step πέραν του initial (αρχικό βήμα) το οποίο και ορίζεται σαν προεπιλογή από το πρόγραμμα.

Αρχικά κατά την δημιουργία των νέων step της επίλυσης ορίζουμε ότι η επίλυση που θα πραγματοποιηθεί έχει γεωμετρική μη γραμμικότητα (Non linear geometry επιλέγουμε on). Αυτό σημαίνει ότι αναμένουμε μεγάλες σχετικά μετατοπίσεις στο πρόβλημα, οι οποίες θα πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν στην κατά στην λύση του προβλήματος. Στον αρχικό step της ανάλυσης (initial step) ορίσαμε την διεπιφάνεια μεταξύ στύλου – δοκού όπως ακριβώς αναφέραμε στην παράγραφο για τα interactions.

Στην συνέχεια ορίζουμε τις πέντε βασικές συνοριακές συνθήκες (boundary conditions) που υπάρχουν στην κατασκευή μας. Οι τέσσερις πρώτες (BC1 – 4) δηλώνονται στις βάσεις των βοηθητικών δοκαριών και του στύλου επιλέγοντας σαν displacement – rotation στον τύπο τους (να επιτρέπουν δηλαδή μετατόπιση και περιστροφή). Η πέμπτη συνοριακή συνθήκη (BC5) ορίστηκε σαν:

Create boundary condition  $\rightarrow$  Symmetry, Antisymmetry, Encastre  $\rightarrow$  Ysymm. Η συγκεκριμένη συνοριακή συνθήκη περιορίζει την κίνηση της δοκού στον άξονα που τρέχει κάθετα στο μήκος της (δηλαδή στον άξονα Υ). Χωρίς αυτή την συνθήκη, εμφανίζεται μη συμμετρική μετακίνηση της δοκού κατά τον άξονα Υ, εξαιτίας μικροατελειών του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων πράγμα που θελήσαμε να αποφύγουμε.

Συνεχίσαμε δημιουργώντας το πρώτο step (step1) στο οποίο και δημιουργήσαμε το φορτίο του βάρους που ασκείται στον φορέα. Ονομάσαμε το φορτίο «Load1» και το δημιουργήσαμε με τον παρακάτω τρόπο:

Load1 → Type: gravity → ορίζουμε ότι θα εφαρμοσθεί στο step1 → επιλέγουμε το πλήρη συναρμολογημένη διάταξη → και ορίζουμε Component1, 2 = 0 και Component3 = -9,81

Στο step2 το οποίο είναι και το τελικό κατά την μηχανική μοντελοποίηση ορίζουμε το συγκεντρωμένο φορτίο που ασκείται στην δοκό. Ονομάσαμε το φορτίο «Load19» και το δημιουργήσαμε με τον παρακάτω τρόπο:

Load19  $\rightarrow$  Type: concentrated force  $\rightarrow$ ορίζουμε ότι θα εφαρμοσθεί στο step2  $\rightarrow$  επιλέγουμε το σημείο εφαρμογής της δύναμης RP (εικόνα)  $\rightarrow$  και ορίζουμε CF1,2 = 0 και CF3 = -200 kN.



Εικόνα 17: Σημείο εφαρμογής (RP με κόκκινη επισήμανση) συγκεντρωμένου φορτίου 200kN

#### <u>Meshing</u>:

Σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας της μοντελοποίησης γίνεται η διακριτοποίηση του φορέα μας με πεπερασμένα στοιχεία. Στην παρούσα έρευνα αποφασίσαμε να κάνουμε χρήση των 3D brick element (C3D8R) θεωρώντας τα ως τα καταλληλότερα για την ανάλυσή μας. Αρχικά μοντελοποιήσαμε τον φορέα με ένα ενιαίο μέγεθος δικτύου σε όλη την έκτασή του (εικόνες από την σχετική διακριτοποίηση παρουσιάζονται στην αντίστοιχη παράγραφο). Στην συνέχεια δοκιμάσαμε τοπική πύκνωση του δικτύου στην περιοχή που αναμένονται τα περισσότερα φαινόμενα μηχανικής συμπεριφοράς δηλαδή στην δική μας περίπτωση εννοούμε την περιοχή σύνδεσης δοκού – στύλου (εικόνες από την σχετική διακριτοποίηση παρουσιάζονται στην αντίστοιχη παράγραφο).

#### Creation and running the job:

Το τελευταίο στάδιο πριν υλοποιήσουμε τις πρώτες επιλύσεις του προβλήματος είναι να ορίσουμε το job (διαδικασία επίλυσης) δίνοντας του ένα όνομα και κάνοντας accept σε όλα τα default settings του προγράμματος βάζουμε το λογισμικό να τρέξει την διαδικασία της επίλυσης.

# 2.1.2 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης για το μηχανικό πρόβλημα με χρήση τοπικής πύκνωσης του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων

Ξεκινώντας εκ νέου την μοντελοποίηση του καθαρά Μηχανικού προβλήματος (τοπικά πυκνό δίκτυο) ορίσαμε δύο διαφορετικούς τύπους υλικών όπως ακριβώς και στην περίπτωση του αραιού δικτύου. Το πρώτο υλικό το ονομάσαμε Beams\_Column και ορίσαμε σε αυτό τα νέα ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά του όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

*Material Definition*:

General → Density Δίνοντας την τιμή στο Mass Density = 7,86

Mechanical  $\rightarrow$  Elasticity  $\rightarrow$  Elastic Δίνοντας την τιμή του Young Modulus E= 120GPa και Poisson's Ratio v=0,3

 $Mechanical \rightarrow Plasticity \rightarrow Plastic$ 

Δίνοντας τις αντιστοιχίες τιμών:

Yield Stress	Plastic Strain
314.000 KPa	0
420.000 KPa	0,0565
452.000 KPa	0,156233

Αντίστοιχα ορίσαμε και το δεύτερο υλικό με όνομα Bolts με τα ακόλουθα νέα ελαστοπλαστικά χαρακτηριστικά:

General → Density Δίνοντας την τιμή στο Mass Density = 7,86

Mechanical  $\rightarrow$  Elasticity  $\rightarrow$  Elastic Δίνοντας την τιμή του Young Modulus E= 120GPa και Poisson's Ratio v=0,3

Mechanical  $\rightarrow$  Plasticity  $\rightarrow$  Plastic  $\Delta$ ivovtac τις αντιστοιγίες τιμών:

Yield Stress	Plastic Strain
550.000 KPa	0
750.000 KPa	0,03125
800.000 KPa	0,09333

Τα υπόλοιπα στάδια της μοντελοποίησης ακολουθήθηκαν όπως ακριβώς έχει περιγραφεί στην ενότητα της περιγραφής της μοντελοποίησης για το αραιό δίκτυο με μόνη διαφοροποίηση στον τομέα του meshing όπου και προβήκαμε στην τοπική πύκνωση του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων κοντά στην περιοχή της σύνδεσης δοκού – στύλου.

#### 2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

#### 2.2.1 Περιγραφή θερμικού προβλήματος και βασικά στοιχεία μοντελοποίησης αυτού

Αποφασίσαμε στην θερμική μας μοντελοποίηση του προβλήματος να προσδώσουμε σε τρείς περιοχές της συναρμολογημένης μας διάταξης σταθερές θερμοκρασίες (μια στα σημεία επαφής με το έδαφος, μία στο κέντρο της διάταξης κοντά στην περιοχή της σύνδεσης δοκού – στύλου και μία στο ακραίο τμήμα της δοκού). Επίσης στην προσπάθειά μας να κάνουμε το μοντέλο μας ακόμη πιο ρεαλιστικό (σε σχέση πάντα με την πραγματική επενέργεια της φωτιάς) φορτίσαμε κάποιες βασικές επιφάνειες της δοκού και του στύλου με ένα σταθερό θερμικό φορτίο στην προσπάθειά μας να παρατηρήσουμε την θερμοκρασιακή κατανομή στον φορέα μας μετά την επενέργεια αυτών των φαινομένων.

Αναλυτικότερα ορίσαμε τρία set θερμοκρασιών τα οποία και παρουσιάζονται στην συνέχεια:



Εικόνα 18: Πρώτο set θερμοκρασιών (GroundTemp) στις βάσεις της κατασκευής



Εικόνα 19:Δεύτερο set θερμοκρασιών (CentralTemp) κοντά στην περιοχή της σύνδεσης δοκού – στύλου



Εικόνα 20:Τρίτο set θερμοκρασιών (InsideTemp) στο ελεύθερο άκρο της δοκού

Στα παραπάνω set όπως ακριβώς αυτά φαίνονται στις εικόνες ορίσαμε τις ακόλουθες σταθερές θερμοκρασίες:

Πρώτο set (GroundTemp) → 273 °C (0 Kelvin) Δεύτερο set (CentralTemp) → 463 °C Τρίτο set (InsideTemp) → 623 °C

Οι παραπάνω θερμοκρασίες ορίζονται στην δημιουργία βημάτων της ανάλυσης (step definition) που ακολουθεί παρακάτω όπου και περιγράφονται τα βασικά στοιχεία της μοντελοποίησης που κάναμε.

Αντίστοιχα ορίσαμε και τις επιφάνειες πάνω στην δοκό και τον στύλο στις οποίες και αποφασίσαμε να ασκήσουμε Θερμικό φορτίο (Heat flux) της τάξης των 2 KW/m<sup>2</sup>. Οι επιφάνειες που επιλέχθηκαν είναι οι δύο μεγάλες καθαρές επιφάνειες της δοκού και οι 3 μεγάλες καθαρές επιφάνειες του στύλου (μπροστινή επιφάνεια και οι δύο πλάγιες). Οι υπόλοιπες επιφάνειες του φορέα μας θεωρήθηκαν μονωμένες. Επίσης αξίζει αναφοράς ότι σύμφωνα με το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήσαμε οποιαδήποτε συναλλαγή θερμότητας με το περιβάλλον γίνεται από τις περιοχές που έχουν οριστεί οι σταθερές θερμοκρασίες.



**Εικόνα 21:**Επιφάνειες της συναρμολογημένης διάταξης στις οποίες ασκήσαμε το θερμικό φορτίο

Για την σωστότερη προσομοίωση της συμπεριφοράς του φορέα μας κάτω από την επιβολή θερμικών φορτίσεων εφαρμόσαμε τους νόμους θερμικής αγωγιμότητας σε επαφή (για την διεπιφάνεια δοκού – στύλου), ορίζοντας ότι το φαινόμενο της αγωγής παύει να ισχύει όταν το διάκενο μεταξύ των δύο επιφανειών φτάσει και υπερβεί την τιμή των 5 χιλιοστών.

#### Material Definition:

Κατά την θερμική μοντελοποίηση του προβλήματος ορίζουμε ξανά δύο διαφορετικά υλικά τα οποία και ονομάσαμε Beams\_column και Bolts αντίστοιχα δίνοντας τους θερμικές ιδιότητες πλέον καθώς σε αυτό το τμήμα θα ασχοληθούμε με την μετάδοση της θερμότητας και όχι με τα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως στις κλασικές μοντελοποιήσεις προβλημάτων στατικής.

Έτσι για το υλικό Beams\_column ορίσαμε τα ακόλουθα δύο βασικά θερμικά χαρακτηριστικά του:

Thermal  $\rightarrow$  Conductivity Δίνοντας τιμή στο Thermal conductivity = = 45 (*W*/*m* °C)

Mechanical  $\rightarrow$  Expansion Δίνοντας την τιμή στο Expansion Coefficient alpha = 12 ( $10^{-6}$ /°C)

Αντίστοιχα για το υλικό Bolts ορίσαμε τα ακόλουθα θερμικά χαρακτηριστικά:

Thermal  $\rightarrow$  Conductivity Δίνοντας τιμή στο Thermal conductivity = = 45 (*W*/*m* °C)

Mechanical  $\rightarrow$  Expansion Δίνοντας την τιμή στο Expansion Coefficient alpha = 13 (10<sup>-6</sup> / °C)

Εδώ αξίζει να σημειωθεί μια υπόθεση που κάναμε, ότι δηλαδή ο συντελεστής θερμικής διαστολής alpha είναι ανεξάρτητος από τις αλλαγές της θερμοκρασίας και δεν επηρεάζεται από αυτές.

#### Sections:

Ακολουθώντας λοιπόν την ίδια λογική όπως και στην μηχανική μοντελοποίηση δημιουργήσαμε τα κατάλληλα section έτσι ώστε να προσδώσουμε στα parts της κατασκευής μας τις αντίστοιχες ιδιότητες των υλικών που επιθυμούσαμε.

#### Interactions:

Σε αυτό το σημείο ορίσαμε τις διεπιφάνειες του προβλήματος. Σημαντικότερη από αυτές όπως άλλωστε αναφέραμε θεωρήθηκε η διεπιφάνεια ένωσης στύλου – δοκού την οποία προσομοιώσαμε ορίζοντας την ως surface – to – surface contact δίνοντάς της, τις παρακάτω ιδιότητες:

Contact property option  $\rightarrow$  Thermal  $\rightarrow$  Thermal Conductance  $\rightarrow$  Επιλέγουμε use only clearance – dependency data και δίνουμε τις παρακάτω τιμές:

Conductivity	Clearance
45	0
0	0,005

#### <u>Assembly</u>:

Σε αυτό το στάδιο ορίσαμε τα προαναφερθέντα set που μας χρειάστηκαν για να ορίσουμε τις θερμοκρασίες καθώς φυσικά και τις επιφάνειες (surface) στις οποίες ασκείται το θερμικό φορτίο. Η δημιουργία των set έγινε με τον παρακάτω τρόπο:

Assembly  $\rightarrow$  Sets  $\rightarrow$  δίνουμε το όνομα που επιθυμούμε  $\rightarrow$  επιλέγουμε τις περιοχές που θέλουμε να οριστούν στο set (δείτε αντίστοιχες εικόνες)

Αντίστοιχα δουλεύουμε και για τον ορισμό των επιφανειών

Assembly  $\rightarrow$  Surface  $\rightarrow$  δίνουμε το όνομα που επιθυμούμε  $\rightarrow$  επιλέγουμε τις περιοχές που θέλουμε να οριστούν στην surface (δείτε αντίστοιχες εικόνες)

#### Step Definition:

Σε αυτό το στάδιο ορίζονται τα φορτία που θα ασκηθούν στον φορέα μας καθώς και οι συνοριακές συνθήκες της κατασκευής μας. Στο βασικό μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε έχουμε ορίσει ένα επιπλέον step πέραν του initial (αρχικό βήμα) το οποίο και ορίζεται σαν προεπιλογή από το πρόγραμμα. Στο αρχικό step (initial) ορίσαμε την διεπιφάνεια στύλου – δοκού με θερμικά χαρακτηριστικά όπως ακριβώς αναφέρθηκε παραπάνω.

Συνεχίζοντας δημιουργήσαμε το πρώτο και μοναδικό άλλωστε step που μας χρειάστηκε κατά την θερμική ανάλυση. Ονομάσαμε το παρών step ως «Heatstep» και το δημιουργήσαμε ως εξής:

Heatstep  $\rightarrow$  General  $\rightarrow$  Επιλέγοντας Heat Transfer και στο response το steady state  $\rightarrow$  Επιλέγουμε την περιοχή που θέλουμε να ορίσουμε την σταθερή θερμοκρασία (κάνοντας χρήση και των set που έχουμε δημιουργήσει σε προηγούμενο βήμα) και τέλος ορίζουμε την τιμή της θερμοκρασίας (για παράδειγμα στο set CentralTemp δώσαμε την τιμή 463 °C).

Στο ίδιο βήμα της ανάλυσης ορίσαμε και τις περιοχές με τις σταθερές θερμοκρασίες σαν συνοριακές συνθήκες κάνοντας χρήση των set που έχουμε ήδη ορίσει και αναφέρει στην αρχή της ανάλυσης.

Στην συνέχεια ορίσαμε σαν φόρτιση το θερμικό φορτίο που επιθυμούσαμε. Το ονομάσαμε «Heatflux» και το δημιουργήσαμε ως εξής:

Load  $\rightarrow$  Heatflux  $\rightarrow$  Επιλέγουμε σαν τύπο το Surface Heat Flux  $\rightarrow$  ορίζουμε τις επιφάνειες που θα ασκηθεί το θερμικό φορτίο (κάνοντας χρήση του surface που έχουμε ορίσει σε προηγούμενο βήμα) και τέλος δίνουμε την τιμή του θερμικού φορτίου στα 2 KW/m<sup>2</sup>.

#### <u>Meshing</u>:

Σε αυτό το στάδιο της διαδικασίας της μοντελοποίησης γίνεται η διακριτοποίηση του φορέα μας με πεπερασμένα στοιχεία. Στην παρούσα Θερμική μοντελοποίηση αποφασίσαμε να κάνουμε χρήση των 3D brick element (DC3D8) πεπερασμένων στοιχείων τα οποία αποτελούνται από οκτώ κόμβους και είναι κατάλληλα για θερμική μοντελοποίηση θεωρώντας τα ως τα καταλληλότερα για την ανάλυση που σκοπεύαμε να κάνουμε. Σημειώνεται ότι η απαραμόρφωτη επιφάνεια (rigid body) δεν επιδεχόταν θερμικής διακριτοποίησης με αποτέλεσμα να μην το συμπεριλάβουμε στην διακριτοποίηση την οποία κάναμε γεγονός βέβαια που δεν επηρεάζει την ανάλυση μας καθώς το συγκεκριμένο κομμάτι αποτελεί απλά ένα βοηθητικό τμήμα της κατασκευής μας και όχι κάποιο βασικό στοιχείο του οποίου την συμπεριφορά θα θέλαμε να μελετήσουμε. Καταλήγοντας, αντίστοιχα και στην Θερμική μοντελοποίηση όπως άλλωστε και στην μηχανική μοντελοποίηση δημιουργήσαμε αρχικά ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων με ενιαίο μέγεθος και στην συνέχεια κάναμε χρήση της μεθόδου τοπικής πύκνωσης του δικτύου για να βελτιώσουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσής μας.

#### Creation and running the job:

Το τελευταίο στάδιο πριν υλοποιήσουμε τις πρώτες επιλύσεις του προβλήματος είναι να ορίσουμε ξανά το job (διαδικασία επίλυσης) δίνοντας του ένα όνομα και κάνοντας accept σε όλα τα default settings του προγράμματος βάζουμε το λογισμικό να τρέξει την διαδικασία της θερμικής καθαρά επίλυσης.

#### 2.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

# 2.3.1 Βασικά στοιχεία μοντελοποίησης του μηχανικού προβλήματος ώστε να συνδυαστεί με το θερμικό

Η γενικότερη λογική που επικρατεί σε αυτού του είδους την ανάλυση είναι να επιλύεται αρχικά το Θερμικό πρόβλημα και στην συνέχεια τα αποτελέσματα του να εισάγονται σαν μιας μορφής προκαθορισμένο πεδίο στο Μηχανικό πρόβλημα για να ακολουθήσει η συνδυασμένη ανάλυση. Στο πρώτο βήμα γίνεται η πρόβλεψη της θερμοκρασιακής κατανομής μέσα στον φορέα υπό την επίδραση υψηλών θερμοκρασιών και θερμικών φορτίων επονομαζόμενη και ως θερμική ανάλυση (thermal analysis) και στο δεύτερο βήμα της ανάλυσης το οποίο ονομάζεται μηχανική ανάλυση (stress analysis) εκτιμάται η μηχανική συμπεριφορά του φορέα υπό την επίδραση στατικών και θερμικών φορτίσεων.

Για να επιτύχουμε την συνδυασμένη λειτουργία και επίλυση Θερμομηχανικών προβλημάτων πρέπει ουσιαστικά να προβούμε σε κάποιες αλλαγές στο καθαρά Μηχανικό πρόβλημα έτσι ώστε να ορίσουμε σαν επιπλέον δεδομένα εισόδου τα αποτελέσματα τις Θερμικής ανάλυσης. Αυτό γίνεται με τις παρακάτω τροποποιήσεις:

Αρχικά πέραν των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών που έχουμε στην κατασκευή μας ορίζουμε (μέσα στο Μηχανικό πρόβλημα) και τις Θερμικές ιδιότητες των υλικών που στην δική μας περίπτωση είναι η θερμική αγωγιμότητα και η θερμική διαστολή (thermal conductivity και expansion αντίστοιχα).

Στην συνέχεια πρέπει να οριστεί σε ποιο βήμα τις ανάλυσής μας επιθυμούμε να εισαχθούν τα αποτελέσματα της θερμικής ανάλυσης. Για παράδειγμα σε ένα από τα σενάρια που χρησιμοποιήσαμε εισαγάγαμε τα θερμικά αποτελέσματα στο step2 σε συνδυασμό δηλαδή με τη επιβολή των μηχανικών φορτίων (υπενθυμίζω από τη Μηχανική ανάλυση, στο step2 είναι που εφαρμόζεται το φορτίο των 200KN). Για να το επιτύχουμε αυτό δημιουργούμε στο step2 ένα predefined field ως εξής:

Step2 → Predefined field → Επιλέγουμε το Other στην κατηγορία και το Temperature στο Types of selected step → επιλέγουμε με προσοχή την περιοχή στην οποία θα εφαρμοστούν τα θερμικά αποτελέσματα (παραλείποντας το rigid body) → Στο edit Predefined field επιλέγουμε from output results or output database file και δίνουμε στην συνέχεια το όνομα του αρχείου των αποτελεσμάτων της Θερμικής ανάλυσης. Τέλος τροποποιούμε κατάλληλα τα αποτελέσματα της ανάλυσης έτσι ώστε να συμπεριλαμβάνονται και θερμικά χαρακτηριστικά και το πρόγραμμα είναι έτοιμο πλέον για να προχωρήσει στην Θερμομηχανική επίλυση.

#### 2.4 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

#### 2.4.1 Παρουσίαση των βασικών θερμικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν

#### Θερμική αγωγιμότητα (Thermal conductivity):

Πρόκειται για την ιδιότητα των υλικών, κατά την οποία διαχέεται η θερμότητα στην μάζα αυτών. Η ιδιότητα αυτή εξαρτάται από την θερμοκρασία του υλικού. Για την περίπτωση του μετάλλου της κατασκευής μας (structural steel) ισχύει η παρακάτω σχέση που συνδέει την θερμική αγωγιμότητα με την θερμοκρασία:

$$\lambda_{\alpha} = \begin{cases} 54 - 3,33 \times 10^{-2} \,\theta_{\alpha} \\ 27,3 \end{cases}$$

με την πρώτη εξίσωση να ισχύει για θερμοκρασίες  $\theta_{\alpha}$  μεταξύ των 20 και των 800 βαθμών κελσίου και την δεύτερη για θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 200 βαθμούς της κλίμακας κελσίου.

Η συσχέτιση της θερμοκρασίας με την θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα παρουσιάζεται χαρακτηριστικά και από το παρακάτω διάγραμμα.



Θερμική διαστολή (Thermal expansion):

Πρόκειται για την ιδιότητα των υλικών κατά την οποία ο όγκος τους αλλάζει με αλλαγή της θερμοκρασίας. Η ιδιότητα αυτή εξαρτάται από την θερμοκρασία του υλικού. Χαρακτηριστικό στοιχείο της ιδιότητα αυτής αποτελεί ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας alpha. Αυτός ο συντελεστής περιγράφει πώς αλλάζει το μέγεθος ενός αντικειμένου με μία αλλαγή στην θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα υπολογίζει την αλλαγή στο κλάσμα του μεγέθους ανά βαθμό αλλαγής της θερμοκρασίας σε συνθήκες σταθερής πίεσης. Οι τιμές του συντελεστή alpha εντοπίζονται αντίστοιχους πίνακες.

### 2.5 ΣΕΝΑΡΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Παρακάτω παρατίθεται αναλυτική παρουσίαση των σεναρίων που χρησιμοποιήθηκαν και επιλύθηκαν από την παρούσα εργασία.

Τα βασικά σενάρια που κάνουν συνδυασμό Θερμικής – Μηχανικής επίλυσης είναι τρία όπως θα παρατηρήσει κανείς διαβάζοντας τα. Παρόλα αυτά πάνω στην προσπάθειά μας για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων τα σενάρια αυτά επεκτάθηκαν με κάποιες διαφορετικές μεθόδους επίλυσης και προσομοίωσης των διεπιφανειών όπως θα παρατηρήσετε. Επίσης η επιλύσεις διενεργήθηκαν αρχικά για μια τυπική διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων) και στην συνέχεια για αντίστοιχη τοπικά πυκνότερη (τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων).

### 2.5.1 Σενάρια για τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων:

#### <u>Σενάριο 1α:</u>

Αποτελεί ουσιαστικά την καθαρά μηχανική επίλυση του προβλήματος. Στην διάταξή μας ασκείται συγκεντρωμένο μηχανικό φορτίο μεγέθους 200kN (πέραν από το ίδιο βάρος της διάταξης που υπάρχει σε όλες τις περιπτώσεις των επιλύσεων). Πέραν αυτού δεν ασκείται στην διάταξη κανένα επιπλέον φορτίο θερμικής φύσεως. Η διακριτοποίηση έχει γίνει με ένα ενιαίο μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων σε ολόκληρο το μήκος του φορέα (τυπικό δίκτυο). Με αυτήν την επίλυση έχουμε ως στόχο να εξάγουμε αποτελέσματα τα οποία θα συγκριθούν με αυτά των αντίστοιχων συνδυασμένων Θερμομηχανικών ώστε να εξάγουμε τα απαραίτητα συμπεράσματα.

#### <u>Σενάριο 1β:</u>

Αποτελεί την καθαρά θερμική επίλυση του προβλήματος υπό την επιβολή του θερμικού φορτίου των 2 KW/m<sup>2</sup> και τον ορισμό των περιοχών σταθερής θερμοκρασίας όπως ακριβώς αυτό έχει περιγραφεί κατά την θερμική μοντελοποίηση. Η διακριτοποίηση στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι η τυπική με ένα ενιαίο μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων θερμικού τύπου σε ολόκληρο το μήκος του φορέα. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης επίλυσης είναι αυτά που θα εισαχθούν ως προκαθορισμένο πεδίο στο αντίστοιχο μηχανικό για να διενεργηθούν οι συνδυασμένες επιλύσεις.

#### <u>Σενάριο 2 (α και β):</u>

Αποτελεί μια Θερμομηχανική επίλυση με συνδυασμένη επιβολή των θερμικών αποτελεσμάτων (όπως αυτά έχουν προκύψει από την επίλυση του Σεναρίου1β) στο ίδιο βήμα (step2) με αυτό της επιβολής του μηχανικού φορτίου των 200kN. Από την παρούσα φόρτιση έχει προηγηθεί φυσικά η επιβολή του ιδίου βάρους της διάταξής μας. Η διακριτοποίηση έγινε με χρήση του τυπικού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων. Σχηματικά το παρόν σενάριο έχει την παρακάτω μορφή:

Step1 για την επιβολή του ίδιου βάρους της διάταξης → Step2 για την ταυτόχρονη επιβολή των Θερμικών αποτελεσμάτων και του φορτίου των 200kN

Σε αυτό το σενάριο προσπαθήσαμε να προσομοιώσουμε την περίπτωση όπου μια πυρκαγιά προκαλείται και ενεργεί ταυτόχρονα με μια σεισμική δραστηριότητα.
Αξίζει να σημειωθεί πως η επίλυση του συγκεκριμένου σεναρίου έγινε με την χρήση δύο μεθόδων ως προς τον ορισμό της διεπιφάνειας του προβλήματος η οποία όπως αναφέραμε προσομοιώνεται με τον νόμο επαφής – τριβής.

α)Επίλυση με την μέθοδο Lagrange multipliers και β)Επίλυση με την μέθοδος Penalty

Η μέθοδος penalty αν και λιγότερο ακριβής επιτρέπει στο πρόγραμμα να συνεχίσει την διαδικασία για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα από την αντίστοιχη μέθοδο Lagrange με αποτέλεσμα να εξάγονται συνήθως ιδιαίτερα χρήσιμα συμπεράσματα.

### <u>Σενάριο 3:</u>

Αποτελεί και αυτό μια Θερμομηχανική επίλυση κατά την οποία τα θερμικά αποτελέσματα (όπως αυτά έχουν προκύψει από την επίλυση του Σεναρίου1β) επιβάλλονται σε ξεχωριστό βήμα (step2) το οποίο ακολουθεί αυτό της επιβολής του ιδίου βάρους της διάταξής μας. Η διακριτοποίηση έγινε με χρήση του τυπικού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων. Σχηματικά το παρόν σενάριο έχει την παρακάτω μορφή:

Step1 για την επιβολή του ίδιου βάρους της διάταξης → Step2 για την επιβολή των Θερμικών αποτελεσμάτων → Step3 για την επιβολή του φορτίου των 200kN

Σε αυτό το σενάριο προσπαθήσαμε να προσομοιώσουμε την περίπτωση όπου μια πυρκαγιά προηγείται μιας σεισμικής δραστηριότητας.

### <u> Σενάριο 4 (α και β):</u>

Αποτελεί και αυτό μια Θερμομηχανική ανάλυση στην οποία όμως το μηχανικό φορτίο των 200kN δεν ασκείται συγκεντρωμένα στο τελευταίο στάδιο της ανάλυσης αλλά σε 2 ξεχωριστά στάδια. Επεξηγώντας, επιβάλλεται αρχικά ένα φορτίο μεγέθους 50kN αμέσως μετά το βήμα της επιβολής του ιδίου βάρους της διάταξης, ακολουθεί η επιβολή των θερμικών αποτελεσμάτων (όπως αυτά έχουν προκύψει από την επίλυση του Σεναρίου1β) και καταλήγουμε με την επενέργεια του υπόλοιπου φορτίου των 150kN στο τελικό στάδιο της διαδικασίας. Η διακριτοποίηση έγινε με χρήση του τυπικού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων. Σχηματικά το παρόν σενάριο έχει την παρακάτω μορφή:

Step1 για την επιβολή του ιδίου βάρους της διάταξης → Step2 για την επιβολή του φορτίου των 50kN → Step3 για την επιβολή των θερμικών αποτελεσμάτων → Step4 για την επιβολή του φορτίου των 150kN.

Σε αυτό το σενάριο το οποίο είναι θεωρητικά το χειρότερο προσπαθήσαμε να προσομοιώσουμε την περίπτωση όπου μια αρχική σεισμική δραστηριότητα επενεργεί στον φορέα με αποτέλεσμα να ξεσπάσει η φωτιά την οποία ακολουθεί μια μετασεισμική δραστηριότητα ισχυρότερου μεγέθους από την αρχική.

Αξίζει να σημειωθεί πως η επίλυση του συγκεκριμένου σεναρίου έγινε με την χρήση δύο μεθόδων ως προς τον ορισμό της διεπιφάνειας του προβλήματος η οποία όπως αναφέραμε προσομοιώνεται με τον νόμο επαφής – τριβής.

α)Επίλυση με την μέθοδο Lagrange multipliers και β)Επίλυση με την μέθοδος Penalty

Το παραπάνω δοκιμάστηκε καθώς όπως θα παρατηρήσετε κατά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε αυτό το τελευταίο σενάριο της περίπτωσης του τυπικού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων τα αποτελέσματα της μεθόδου Lagrange Multipliers τερματίζεται στο τελευταίο βήμα, χωρίς να επαναληφθεί κανένα τμήμα του φορτίου των 150kN. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας αριθμητικών ασταθειών που οφείλονται στην επίδραση των υψηλών θερμοκρασιών στον φορέα. Εξαιτίας αυτών συμβαίνουν διογκώσεις και παραμορφώσεις στον φορέα, οι οποίες σε συνδυασμό με το αρχικό φορτίο των 50kN το οποίο προϋπάρχει δεν αφήνουν την επίλυση να προχωρήσει.

Θεωρήσαμε λοιπόν σκόπιμο να εφαρμόσουμε την μέθοδο Penalty η οποία αν και λιγότερο ακριβής επιτρέπει στην διαδικασία να προχωρήσει την επίλυση για να εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

# 2.5.2 <u>Σενάρια για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων</u> <u>στοιχείων:</u>

Περνάμε τώρα και στα παρόμοια σενάρια για την περίπτωση όπου κάνουμε χρήση του τοπικά πυκνού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων:

### <u>Σενάριο 5α:</u>

Αποτελεί το αντίστοιχο του Σεναρίου1α με μοναδική διαφοροποίηση ότι η διακριτοποίηση έγινε με την χρήση τοπικά πυκνού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων κοντά στην περιοχή της σύνδεσης δοκού – στύλου.

### <u>Σενάριο 5β:</u>

Αποτελεί το αντίστοιχο του Σεναρίου1β με αντίστοιχη χρήση του τοπικά πυκνού δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων.

### <u>Σενάριο 6:</u>

Αποτελεί το αντίστοιχο του Σεναρίου2 με αντίστοιχη χρήση του τοπικά πυκνού δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων.

### <u>Σενάριο 7:</u>

Αποτελεί το αντίστοιχο του Σεναρίου3 με αντίστοιχη χρήση του τοπικά πυκνού δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων.

### Σενάριο 8:

Αποτελεί το αντίστοιχο του Σεναρίου4 με αντίστοιχη χρήση του τοπικά πυκνού δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων.

Αξίζει να αναφέρουμε ότι για τις επιλύσεις στην περίπτωση του τοπικά πυκνού δικτύου γίνεται χρήση μόνο της μεθόδου Penalty για την προσομοίωση της διεπιφάνειας του προβλήματος, καθώς η αντίστοιχη χρήση της μεθόδου Lagrange multipliers δεν αποτελεί την ενδεδειγμένη εξαιτίας του σημαντικά υψηλότερου υπολογιστικού φόρτου που δημιουργεί. Αρκεί να αναλογιστεί κανείς την ραγδαία αύξηση του υπολογιστικού φόρτου μόνο και μόνο με την χρήση πυκνότερου δικτύου πεπερασμένων στοιχείων στην ανάλυση μας (ο χρόνος επίλυσης αυξήθηκε τουλάχιστον κατά 8 ώρες για την κάθε επίλυση) για να καταλάβει γιατί δεν είναι εφικτή μια τέτοια προσέγγιση στην μοντελοποίηση της διεπιφάνειας του προβλήματος.

# <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</u>

# 3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

## Τρισδιάστατη απεικόνιση παραμορφωμένης διάταξης για τα διάφορα σενάρια

## 3.1.1.1 Σενάριο Ια (Για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος:



Εικόνα 22: Εικόνα διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 23: Κοντινή προβολή διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



**Εικόνα 24:** Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $5,964*10^{-1}$  KPa)



Εικόνα 25: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού – στύλου (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5$ KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,964\* $10^{-1}$ KPa)



Εικόνα 26: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,559\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 3,156\*10 $^2\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 27: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,559\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 3,156\*10 $^2)$ 



Εικόνα 28: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,559\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 3,156\*10 $^2\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 29: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,964\*10<sup>-1</sup> KPa)



Εικόνα 30: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,964\*10<sup>-1</sup> KPa)



Εικόνα 31: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,964\*10<sup>-1</sup> KPa)



Εικόνα 32: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,964\*10<sup>-1</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 33: Κοχλίας 4 (Μέγιστη καταπόνηση 7,903\*10 $^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,618\*10 $^5$  KPa)



Εικόνα 34: Κοχλίας 10 (Μέγιστη καταπόνηση 8,000\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,640\*10 $^5\,{\rm KPa}$ )

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 35: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 36: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κάθετο άξονα

Η παρακάτω εικόνα δίνει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:



Εικόνα 37: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στην παρακάτω εικόνα με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 38: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

## 3.1.1.2 Σενάριο 1β(Για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στον φορέα και στα σημεία ένωσης του στύλου με την δοκό:



Εικόνα 39: Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη (Μέγιστη Θερμοκρασία 2.132 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 272,9 °C)



Εικόνα 40: Κοντινή προβολή θερμοκρασιακής κατανομής στην διεπιφάνεια

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην δοκό και στον στύλο. Αξίζει να παρατηρήσουμε την θερμοκρασιακή κατανομή στις περιοχές που ενώνονται μεταξύ τους για να αντιληφθούμε ότι η θερμότητα μεταδόθηκε και διαμέσου της επαφής όπως ακριβώς στοχεύαμε από την μοντελοποίηση που κάναμε:



**Εικόνα 41:** Κατανομή θερμοκρασίας στην οριζόντια δοκό (Μέγιστη Θερμοκρασία 2.132 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 463 °C)



**Εικόνα 42:** Κατανομή θερμοκρασίας στον κάθετο στύλο (Μέγιστη Θερμοκρασία 1.547 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 273 °C)



**Εικόνα 43:** Κατανομή θερμοκρασίας στον κάθετο στύλο (Μέγιστη Θερμοκρασία 1.547 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 273 °C)

Παρουσιάζουμε χαρακτηριστικά και την εικόνα ενός κοχλία από την διάταξή μας όπου και εδώ φαίνεται έντονα το πώς λειτούργησε η αγωγιμότητα στα σημεία της επαφής δοκού – στύλου:



**Εικόνα 44:** Κατανομή θερμοκρασίας σε κοχλία της σύνδεσης (Μέγιστη Θερμοκρασία 923,4 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 827 °C)

# 3.1.1.3 Σενάριο 2α(Για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος:



Εικόνα 45: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 46: Κοντινή προβολή διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία. Όπως παρατηρούμε στο συγκεκριμένο σενάριο όπου έχουμε ταυτόχρονη επενέργεια των θερμικών και των μηχανικών φορτίων οι υψηλότερες θερμοκρασίες φθάνουν μέχρι και τους 866 °C περίπου και ο φορέας αστοχεί με την επίδραση των δύο φορτίσεων.



Εικόνα 47: Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von.Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 49: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση 8\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,992\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 50: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,479\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 2,621\*10<sup>3</sup> KPa)



Εικόνα 51: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,479\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 2,621\*10<sup>3</sup> KPa)



Εικόνα 52: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,479\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 2,621\*10<sup>3</sup> KPa)



Εικόνα 53: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,304\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,992\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 54: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,304\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,992\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 55:** Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,304\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,992\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 56:** Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,304\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,992\*10<sup>2</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 57: Κοχλίας 4 (Μέγιστη καταπόνηση 6,598\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 3,896\*10 $^4\,{\rm KPa})$ 



Εικόνα 58: Κοχλίας 10 (Μέγιστη καταπόνηση  $8{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση $9{,}144{}^{*}10^{4}\,{\rm KPa})$ 

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 59: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 60: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κάθετο άξονα

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:



Εικόνα 61: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στις παρακάτω εικόνες με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 62: Περιοχές στις οποίες έχει διαρρεύσει ο φορέας μας



Εικόνα 63: Περιοχές στις οποίες έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

## 3.1.1.4 Σενάριο 2β(Για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος:



Εικόνα 64: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 65: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία. Όπως παρατηρούμε στο συγκεκριμένο σενάριο όπου έχουμε ταυτόχρονη επενέργεια των θερμικών και των μηχανικών φορτίων (μέθοδος penalty), οι υψηλότερες θερμοκρασίες φθάνουν μέχρι και τους 1062 °C περίπου και ο φορέας αστοχεί με την επίδραση των δύο φορτίσεων.



Εικόνα 66: Θερμοκρασιακή κατανομή στην πλήρη διάταξη

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von.Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 67: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $1,871*10^2$  KPa)



Εικόνα 68: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού – στύλου (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5$ KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,871\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 69: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,609\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 2,318\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 70: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,609\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 2,318\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 71: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,609\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 2,318\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 72: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,871\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 73: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,871\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 74: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,871\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 75: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,871\*10<sup>2</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 76: Κοχλίας 8 (Μέγιστη καταπόνηση 7,517\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,667\*10 $^5\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 77: Κοχλίας 10 (Μέγιστη καταπόνηση  $8{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,199{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa})$ 

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 78: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 79: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:



Εικόνα 80: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στις παρακάτω εικόνες με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 81:Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας



Εικόνα 82:Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

# 3.1.1.5 Σενάριο 3(Για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος:



Εικόνα 83: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 84: Κοντινή προβολή διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση
Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία για την περίπτωση που το θερμικό φορτίο εξασκείται σε ξεχωριστό βήμα το οποίο προηγείται της μηχανικής φόρτισης η οποία και εξασκείται στο αμέσως επόμενο στάδιο. Σύμφωνα με αυτήν, οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην διάταξή μας φθάνουν περίπου μέχρι τους 2.132 °C και εντοπίζονται κυρίως στην οριζόντια δοκό.



Εικόνα 85: Θερμοκρασιακή κατανομή στην πλήρη διάταξη

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 86: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $5,141*10^2\,{\rm KPa})$ 







**Εικόνα 88:** Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,002\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 2,821\*10<sup>3</sup> KPa)



Εικόνα 89: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,002\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 2,821\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 90: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,002\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 2,821\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



**Εικόνα 91:** Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 3,970\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,141\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 92:** Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση  $3,970*10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $5,141*10^2$  KPa)



**Εικόνα 93:** Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 3,970\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,141\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 94:** Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 3,970\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,141\*10<sup>2</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 95: Κοχλίας 8 (Μέγιστη καταπόνηση 6,713\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 4,103\*10 $^4\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 96: Κοχλίας 10 (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,786*10^5\,{\rm KPa})$ 

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 97: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 98: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:

Εικόνα 99: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στις παρακάτω εικόνες με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 100: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας



Εικόνα 101:Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

## 3.1.1.6 Σενάριο 4α(Για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 102: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 103: Κοντινή προβολή διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία. Όπως παρατηρούμε στο συγκεκριμένο σενάριο όπου και έχουμε αρχικά την επενέργεια ενός μηχανικού φορτίου της τάξης των 50kN, στην συνέχεια σε ξεχωριστό βήμα την θερμική φόρτιση και τέλος την μηχανική ξανά φόρτιση με το φορτίο των 150kN, οι υψηλότερες θερμοκρασίες που εντοπίζονται είναι της τάξης των 2.132 °C.



Εικόνα 104: Θερμοκρασιακή κατανομή στην πλήρη διάταξη

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 105: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 6,002 ${}^{*}10^{2}\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 106: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού – στύλου (Μέγιστη καταπόνηση  $8{}^{*}10^{5}{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 6,002 ${}^{*}10^{2}{\rm \,KPa}$ )



Εικόνα 107: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,005\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,035\*10<sup>3</sup> KPa)



**Εικόνα 108:** Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,005\*10 $^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,035\*10 $^3$  KPa)



**Εικόνα 109:** Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,005\*10 $^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,035\*10 $^3$  KPa)



**Εικόνα 110:** Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 3,589\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 6,002\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 111:** Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 3,589\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 6,002\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 112: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 3,589\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 6,002\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 113: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 3,589\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 6,002\*10<sup>2</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 114: Κοχλίας 8 (Μέγιστη καταπόνηση 6,677\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 3,517\*10 $^4\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 115: Κοχλίας 10 (Μέγιστη καταπόνηση  $8{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1{,}427{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa})$ 

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 116: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 117: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:



Εικόνα 118: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στις παρακάτω εικόνες με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 119: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας



Εικόνα 120:Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

## 3.1.1.7 Σενάριο 4β(Για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος:



Εικόνα 121: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 122: Κοντινή προβολή διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία. Όπως παρατηρούμε στο συγκεκριμένο σενάριο όπου και έχουμε αρχικά την επενέργεια ενός μηχανικού φορτίου της τάξης των 50kN, στην συνέχεια σε ξεχωριστό βήμα την θερμική φόρτιση και τέλος την μηχανική ξανά φόρτιση με το φορτίο των 150kN (μέθοδος penalty), οι υψηλότερες θερμοκρασίες που εντοπίζονται είναι της τάξης των 2.132 °C.



Εικόνα 123: Θερμοκρασιακή κατανομή στην πλήρη διάταξη

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 124: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,468 $*10^2$  KPa)



Εικόνα 125: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση 8\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,468\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 126: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,003\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 4,249\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



**Εικόνα 127:** Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,003\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 4,249\*10<sup>3</sup> KPa)



**Εικόνα 128:** Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,003\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 4,249\*10<sup>3</sup> KPa)



Εικόνα 129: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,468\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 130:** Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,468\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 131: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,468\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 132:** Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,468\*10<sup>2</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 133: Κοχλίας 8 (Μέγιστη καταπόνηση 7,425\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,471\*10 $^5\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 134: Κοχλίας 10 (Μέγιστη καταπόνηση  $8{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,087{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa})$ 

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 135: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 136: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα



Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:

Εικόνα 137: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στις παρακάτω εικόνες με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 138: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας



Εικόνα 139: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

## 3.1.2.1 Σενάριο 5α(Για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος:



Εικόνα 140: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 141: Κοντινή προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 142: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,590\*10<sup>-1</sup> KPa)



**Εικόνα 143:** Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού - στύλου (Μέγιστη καταπόνηση  $8,001*10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $5,590*10^{-1}$  KPa)



Εικόνα 144: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού - στύλου (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,590\*10<sup>-1</sup> KPa)



Εικόνα 145: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 4,782\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 146: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 4,782\*10 $^2\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 147: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 4,782\*10 $^2\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 148: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,590\*10<sup>-1</sup> KPa)



Εικόνα 149: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,590\*10<sup>-1</sup> KPa)



Εικόνα 150: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 5,590\*10 $^{-1}\,{\rm KPa}$ )



**Εικόνα 151:** Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,590\*10<sup>-1</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 152: Κοχλίας 6 (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,021\*10 $^5\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 153: Κοχλίας 8 (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,555\*10<sup>5</sup> KPa)
Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 154: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 155: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κάθετο άξονα

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:



Εικόνα 156: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στην παρακάτω εικόνα με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 157: Περιοχές στις οποίες έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

#### 3.1.2.2 Σενάριο 5β(Για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στον φορέα και στα σημεία ένωσης του στύλου με την δοκό:



Εικόνα 158:Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη (Μέγιστη Θερμοκρασία 2.192 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 272,5 °C)



Εικόνα 159: Προβολή θερμοκρασιακής κατανομής στην περιοχή της σύνδεσης

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή της θερμοκρασίας στην δοκό και στον στύλο. Αξίζει να παρατηρήσουμε την θερμοκρασιακή κατανομή στις περιοχές που ενώνονται μεταξύ τους για να αντιληφθούμε ότι η θερμότητα μεταδόθηκε και διαμέσου της επαφής:



**Εικόνα 160:**Θερμοκρασιακή κατανομή στην δοκό (Μέγιστη Θερμοκρασία 2.192 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 463 °C)



**Εικόνα 161:** Θερμοκρασιακή κατανομή στον στύλο (Μέγιστη Θερμοκρασία 1.562 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 273 °C)



**Εικόνα 162:** Θερμοκρασιακή κατανομή στον στύλο (Μέγιστη Θερμοκρασία 1.562°C και ελάχιστη θερμοκρασία 273 °C)

Παρουσιάζουμε χαρακτηριστικά και την εικόνα ενός κοχλία από την διάταξή μας όπου και εδώ φαίνεται έντονα το πώς λειτούργησε η αγωγιμότητα στα σημεία της επαφής δοκού – στύλου:



**Εικόνα 163:** Κατανομή θερμοκρασίας σε κοχλία της σύνδεσης (Μέγιστη Θερμοκρασία 1.030 °C και ελάχιστη θερμοκρασία 924,4 °C)

#### 3.1.2.3 Σενάριο 6(Για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος:



Εικόνα 164: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 165: Κοντινή προβολή διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία. Όπως παρατηρούμε στο συγκεκριμένο σενάριο όπου έχουμε ταυτόχρονη επενέργεια των θερμικών και των μηχανικών φορτίων στο ίδιο βήμα οι υψηλότερες θερμοκρασίες φθάνουν μέχρι και τους 1.809 °C περίπου και ο φορέας αστοχεί με την επίδραση των δύο φορτίσεων.



Εικόνα 166: Θερμοκρασιακή κατανομή στην πλήρη διάταξη

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



**Εικόνα 167:** Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $3,356*10^2$  KPa)



**Εικόνα 168:** Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $3,356*10^2$  KPa)



Εικόνα 169: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού – στύλου (Μέγιστη καταπόνηση 8\*10<sup>5</sup>KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,356\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 170: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,956\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 171: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,956\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 172: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,956\*10<sup>3</sup> KPa)



Εικόνα 173: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 3,356\*10 $^2\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 174: Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,356\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 175:** Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,356\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 176:** Κατακόρυφος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,356\*10<sup>2</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 177: Κοχλίας 6 (Μέγιστη καταπόνηση  $8{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1,177{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa})$ 



Εικόνα 178: Κοχλίας 8 (Μέγιστη καταπόνηση  $8{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση  $1{,}535{}^{*}10^{5}\,{\rm KPa})$ 

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 179: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 180: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κάθετο άξονα

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:



Εικόνα 181: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στην παρακάτω εικόνα με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 182: Περιοχές στις οποίες έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

# 3.1.2.4 Σενάριο 7(Για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος:



Εικόνα 183: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 184: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στην εικόνα παρακάτω φαίνεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία για την περίπτωση που το θερμικό φορτίο εξασκείται σε ξεχωριστό βήμα το οποίο προηγείται της μηχανικής φόρτισης η οποία και εξασκείται στο αμέσως επόμενο στάδιο. Σύμφωνα με αυτήν, οι υψηλότερες θερμοκρασίες στην διάταξή μας φθάνουν περίπου μέχρι τους 2.192 °C και εντοπίζονται κυρίως στην οριζόντια δοκό.



Εικόνα 185: Θερμοκρασιακή κατανομή στην πλήρη διάταξη

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 186: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,609\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 187: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού – στύλου (Μέγιστη καταπόνηση  $8,001*10^5$ KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $3,609*10^2$ KPa)



Εικόνα 188: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού – στύλου (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,609\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 189:** Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 2,142\*10<sup>3</sup> KPa)



Εικόνα 190: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 2,142\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



**Εικόνα 191:** Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση 2,142\*10 $^3$  KPa)



Εικόνα 192: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 3,609\*10 $^2\,{\rm KPa}$ )



**Εικόνα 193:** Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,609\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 194: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,609\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 195: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,609\*10<sup>2</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 196: Κοχλίας 6 (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,145\*10 $^5\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 197: Κοχλίας 8 (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,545\*10 $^5\,{\rm KPa}$ )

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 198: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 199: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:



Εικόνα 200: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στην παρακάτω εικόνα με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 201: Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

# 3.1.2.5 Σενάριο 8(Για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων):

Στις εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος:



Εικόνα 202: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 203: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στην Εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών στον φορέα μας κατά την αστοχία. Όπως παρατηρούμε στο συγκεκριμένο σενάριο όπου και έχουμε αρχικά την επενέργεια ενός μηχανικού φορτίου της τάξης των 50kN, στην συνέχεια σε ξεχωριστό βήμα την θερμική φόρτιση και τέλος την μηχανική ξανά φόρτιση με το φορτίο των 150kN, οι υψηλότερες θερμοκρασίες που εντοπίζονται είναι της τάξης των 2.192 °C.



Εικόνα 204: Θερμοκρασιακή κατανομή στην πλήρη διάταξη

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 205: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,793\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 206: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού – στύλου (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,793\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 207: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,793\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 208:** Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 2,041\*10<sup>3</sup> KPa)



Εικόνα 209: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 2,041\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 210: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 2,041\*10 $^3\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 211: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,793\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 212: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,793\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 213: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,793\*10<sup>2</sup> KPa)



Εικόνα 214: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 4,520\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,793\*10<sup>2</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζονται παρακάτω δύο κοχλιώσεις όπως αυτές παραμορφώθηκαν κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 215: Κοχλίας 6 (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,155\*10 $^5\,{\rm KPa}$ )



Εικόνα 216: Κοχλίας 8 (Μέγιστη καταπόνηση 8,001\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 1,519\*10 $^5\,{\rm KPa}$ )

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται η ολίσθηση της διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο και κατά τον κατακόρυφο άξονα:



Εικόνα 217: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον οριζόντιο άξονα



Εικόνα 218: Ολίσθηση διεπιφάνειας επαφής κατά τον κατακόρυφο άξονα

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το μέγεθος του ανοίγματος της διεπιφάνειας:



Εικόνα 219: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

Στην παρακάτω εικόνα με κόκκινη επισήμανση παρουσιάζονται οι περιοχές όπου ο φορέας έχει διαρρεύσει, εξαιτίας του ελαστοπλαστικού μοντέλου v.Mises:



Εικόνα 220:Περιοχές όπου έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

# 3.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ – ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Στην προσπάθειά μας για ανάλυση και σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα σενάρια της συνδυασμένης θερμικής – μηχανικής φόρτισης και της καθαρά μηχανικής φόρτισης παρουσιάζουμε τα παρακάτω διαγράμματα μετατόπισης φόρτισης. Για κάθε σενάριο στο οποίο γίνεται χρήση της θερμομηγανικής ανάλυσης παρουσιάζουμε και το αντίστοιγο διάγραμμα μετατόπισης – φόρτισης στο οποίο πάντα εμπεριέχουμε και το γράφημα για την περίπτωση της καθαρά μηχανικής φόρτισης (περίπτωση όπου στον φορέα μας εξασκείται μόνο το μηχανικό φορτίο των 200kN), έτσι ώστε να προκύπτουν άμεσα τα συμπεράσματα και οι συγκρίσεις για την συμπεριφορά του φορέα μας. Αρχικά διενεργήθηκαν επιλύσεις για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων. Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που των χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές ήταν ενδεικτικές, καθώς στόχος αυτών των επιλύσεων ήταν μια πρώτη ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου. Στην συνέγεια έγιναν επιλύσεις με τοπική πύκνωση του δικτύου (κοντά στην περιοχή της σύνδεσης). Οι τιμές των μηγανικών ιδιοτήτων που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις επιλύσεις ήταν διαφοροποιημένες, καθώς προήλθαν από πραγματικές πειραματικές μετρήσεις των υλικών, που διενεργήθηκαν στο πλαίσιο της πειραματικής διερεύνησης υπό τον κ. Abdalla.

# 3.2.1 <u>Διαγράμματα μετατόπισης φόρτισης για το τυπικό δίκτυο πεπερασμένων</u> <u>στοιχείων</u>

#### 3.2.1.1 <u>Περίπτωση 1<sup>η</sup></u>

Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζουμε τις περιπτώσεις όπου:

α) Στον φορέα μας ασκείται μόνο το φορτίο των 200kN (Σενάριο 1α στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται ουσιαστικά από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Χωρίς Θερμότητα».

β) Στον φορέα μας επιβάλλεται ταυτόχρονη θερμική και μηχανική φόρτιση στο ίδιο βήμα και η προσομοίωση της διεπιφάνειας επαφής στύλου – δοκού γίνεται με την μέθοδο Lagrange (Σενάριο 2α στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Με Θερμότητα στο ίδιο βήμα με το φορτίο».


#### 3.2.1.2 <u>Περίπτωση 2<sup>η</sup></u>

Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζουμε τις περιπτώσεις όπου:

α) Στον φορέα μας ασκείται μόνο το φορτίο των 200kN (Σενάριο 1α στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται ουσιαστικά από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Χωρίς Θερμότητα».

β) Στον φορέα μας επιβάλλεται ταυτόχρονη θερμική και μηχανική φόρτιση στο ίδιο βήμα και η προσομοίωση της διεπιφάνειας επαφής στύλου – δοκού γίνεται με την μέθοδο Penalty (Σενάριο 2β στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Με Θερμότητα στο ίδιο βήμα με το φορτίο Penalty method».



#### 3.2.1.3 <u>Περίπτωση 3<sup>η</sup></u>

Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζουμε τις περιπτώσεις όπου:

α) Στον φορέα μας ασκείται μόνο το φορτίο των 200kN (Σενάριο 1α στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται ουσιαστικά από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Χωρίς Θερμότητα».

β) Στον φορέα μας επιβάλλεται θερμική φόρτιση σε ξεχωριστό βήμα αμέσως μετά την επιβολή του ιδίου βάρους του φορέα και αμέσως πριν την επιβολή της μηχανικής φόρτισης σε αυτόν, με το φορτίο των 200kN. (Σενάριο 3 στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται ουσιαστικά από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Με Θερμότητα σε νέο βήμα ανάμεσα στο ίδιο βάρος και στο φορτίο».



## 3.2.1.4 <u>Περίπτωση 4<sup>η</sup></u>

Σε αυτό το διάγραμμα παρουσιάζουμε τις περιπτώσεις όπου:

α) Στον φορέα μας ασκείται μόνο το φορτίο των 200kN (Σενάριο 1α στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται ουσιαστικά από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Χωρίς Θερμότητα».

β) Στον φορέα μας επιβάλλεται αρχικά ένα φορτίο μεγέθους 50KN αμέσως μετά το βήμα της επιβολής του ιδίου βάρους της διάταξης, ακολουθεί η επιβολή των θερμικού φορτίου σε ξεχωριστό νέο βήμα και καταλήγουμε με την επενέργεια του υπόλοιπου φορτίου των 150KN στο τελικό βήμα της διαδικασίας. Επίσης η προσομοίωση της διεπιφάνειας επαφής στύλου – δοκού γίνεται με την μέθοδο Lagrange (Σενάριο 4α στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται ουσιαστικά από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Με Θερμότητα σε νέο βήμα και νέα φορτία (50 και 150kN)».



#### 3.2.1.5 <u>Περίπτωση 5<sup>η</sup></u>

Αποτελεί την αντίστοιχη της περίπτωσης 4 με μοναδική διαφορά ότι η δεύτερη καμπύλη έχει προκύψει με χρήση της μεθόδου Penalty (Σενάριο 4β στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια).



3.2.1.6 Ακολουθεί ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα που παρουσιάζει τις παραπάνω περιπτώσεις στο σύνολό τους σε μια προσπάθεια σύγκρισης μεταξύ τους:



# 3.2.2 <u>Διαγράμματα μετατόπισης φόρτισης για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο</u> <u>πεπερασμένων στοιχείων</u>

Ακολουθούν οι αντίστοιχες περιπτώσεις των διαγραμμάτων μετατόπισης – φόρτισης για τις περιπτώσεις των επιλύσεων που έγιναν για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων. Στο συγκεκριμένο σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι τα διαγράμματα μετατόπισης – φόρτισης για τα σενάρια του τυπικού δικτύου πεπερασμένων στοιχείων καθώς και αυτών του τοπικά πυκνωμένου δικτύου δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα διότι με σκοπό την διερεύνηση παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές ιδιότητες υλικού μεταξύ αυτών. ( Κεφάλαιο 2, σελ 23-27)

#### 3.2.2.1 <u>Περίπτωση 6<sup>η</sup></u>

Αποτελεί την αντίστοιχη της Περίπτωσης 1 με μόνη διαφορά, ότι πλέον αναφερόμαστε στην πυκνή διακριτοποίηση (Σενάρια 5α και 6 στην αντίστοιχη παράγραφο για τα σενάρια του τοπικά πυκνωμένου δικτύου πεπερασμένων στοιχείων).



#### 3.2.2.2 <u>Περίπτωση 7<sup>η</sup></u>

Αποτελεί την αντίστοιχη της Περίπτωσης 3 με μόνη διαφορά, ότι πλέον αναφερόμαστε στην πυκνή διακριτοποίηση (Σενάρια 5α και 7 στην αντίστοιχη παράγραφο για τα σενάρια του τοπικά πυκνωμένου δικτύου πεπερασμένων στοιχείων).



#### 3.2.2.3 <u>Περίπτωση 8<sup>η</sup></u>

Αποτελεί την αντίστοιχη της Περίπτωσης 4 με μόνη διαφορά, ότι πλέον αναφερόμαστε στην πυκνή διακριτοποίηση (Σενάρια 5α και 8 στην αντίστοιχη παράγραφο για τα σενάρια του τοπικά πυκνωμένου δικτύου πεπερασμένων στοιχείων).



3.2.2.4 Ακολουθεί ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα που παρουσιάζει τις παραπάνω περιπτώσεις για το τοπικά πυκνωμένο δίκτυο στο σύνολό τους:



# <u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</u>

#### 4.1 ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΜΕΙΩΜΕΝΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ

Στην προσπάθειά μας οι Θερμομηχανικές προσομοιώσεις που κάναμε να προσεγγίσουν περισσότερο την πραγματικότητα αποφασίσαμε να παρουσιάσουμε και δύο νέες χαρακτηριστικές επιλύσεις του προβλήματος της φόρτισης του φορέα μας με θερμικά – μηχανικά φορτία προσθέτοντας επιπλέον, θερμική εξάρτηση στα μηχανικά χαρακτηριστικά του.

Σε όλες τις επιλύσεις που έγιναν στα προηγούμενα κεφάλαια είχαμε προβεί σε παραδοχές που είχαν ως στόχο την παράληψη γεγονότων, όπως της μείωσης του μέτρου ελαστικότητας και της τάσης διαρροής με την αύξηση της θερμοκρασίας. Πολύ εύκολα μπορεί κάποιος να αντιληφθεί τις προφανώς χαμηλότερες αντοχές που έχει για παράδειγμα ένας φορέας κατασκευασμένος από χάλυβα όταν αυτός βρίσκεται σε μια θερμοκρασία της τάξης των 700 °C σε σχέση πάντα με τις αντίστοιχες αντοχές του σε μια θερμοκρασία 20 °C.

Για να επιτύχουμε την θερμική εξάρτηση των μηχανικών χαρακτηριστικών και τις μειώσεις αυτών από την αύξηση της θερμοκρασίας λάβαμε υπόψη τις μειώσεις που θεωρεί ο Ευρωκώδικας [5].



Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα τάσεων – τροπών με τις μειωμένες τιμές όπως αυτά δίνονται από αντίστοιχους πίνακες του Ευρωκώδικα 3:

Αυτά τα διαγράμματα εισήχθησαν στο λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε και έγιναν δύο νέες επιλύσεις για τα Σενάρια 6 και 7 (όπως αυτά περιγράφονται στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια).

#### 4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΑ ΜΕΙΩΜΕΝΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ

#### Τρισδιάστατη απεικόνιση παραμορφωμένης διάταξης για τις νέες επιλύσεις

#### 4.2.1 Νέα επίλυση για το Σενάριο 6:

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών κατά την αστοχία για την περίπτωση που μηχανικό και θερμικό φορτίο εφαρμόζονται ταυτόχρονα (Σενάριο 6). Σύμφωνα με αυτήν, οι υψηλότερες θερμοκρασίες φθάνουν περίπου μέχρι τους 786 °C και ο φορέας αστοχεί με την επίδραση των δύο ειδών φορτίσεων.



Εικόνα 221:Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη κατά την αστοχία

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι περιοχές πλαστικοποίησης του φορέα μας κατά την αστοχία:



Εικόνα 222: Περιοχές στις οποίες έχει διαρρεύσει ο φορέας μας

Στις εικόνες παρακάτω παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 223: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 224: Κοντινή προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 225: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5$  KPa , ελάχιστη καταπόνηση  $1,376*10^2$  KPa)



Εικόνα 226: Κοντινή προβολή σύνδεσης δοκού – στύλου (Μέγιστη καταπόνηση  $8*10^5$ KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,376\* $10^2$ KPa)





Εικόνα 228: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,078\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 4,678\*10 $^2)$ 



Εικόνα 229: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 3,078\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 4,678\*10 $^2)$ 



Εικόνα 230: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 3,140\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,376\*10<sup>2</sup> KPa)



**Εικόνα 231:** Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπόνηση 3,140\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 1,376\*10<sup>2</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζεται παρακάτω μία κοχλίωση όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



Εικόνα 232: Κοχλίας 8 (Μέγιστη καταπόνηση 8\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 2,185\*10 $^4\,{\rm KPa}$ )

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το άνοιγμα της διεπιφάνειας κατά την αστοχία:



Εικόνα 233: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας

#### 4.2.2 Νέα επίλυση για το Σενάριο 7:

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η ανάπτυξη των θερμοκρασιών κατά την αστοχία για την περίπτωση που το θερμικό φορτίο εξασκείται σε ξεχωριστό βήμα το οποίο προηγείται της μηχανικής φόρτισης (Σενάριο 7). Σύμφωνα με αυτήν, οι υψηλότερες θερμοκρασίες φθάνουν περίπου μέχρι τους 2192 °C σε αντίθεση με την προηγούμενη επίλυση όπου τα δύο είδη φόρτισης ασκούνταν ταυτόχρονα όπου και είχαμε σαν υψηλότερη θερμοκρασία αυτή των 786 °C.



Εικόνα 234: Θερμοκρασιακή κατανομή στην διάταξη κατά την αστοχία

Στα επόμενα δύο σχήματα παρουσιάζεται η εικόνα πλαστικοποίησης του φορέα, καθώς και η εικόνα ανοίγματος της διεπιφάνειας, μετά το τέλος επιβολής του θερμικού φορτίου και πριν ακόμη εφαρμοσθεί το μηχανικό φορτίο. Από το πρώτο σχήμα φαίνεται καθαρά πως ολόκληρο το δοκάρι βρίσκεται σε διαρροή πριν ακόμη εφαρμοσθεί το μηχανικό φορτίο. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των τάσεων που αναπτύσσονται στο φορέα λόγω υψηλών θερμοκρασιών. Στο δεύτερο σχήμα φαίνεται το άνοιγμα της διεπιφάνειας στο τέλος εφαρμογής του θερμικού φορτίου. Αυτό είναι της τάξης του 1mm (0,9mm για την ακρίβεια) και οφείλεται καθαρά στο φαινόμενο της θερμότητας. Η παρατήρηση αυτή είναι σημαντική, καθώς υποδηλώνει την επίδραση που μπορεί να έχει στην κρίσιμη περιοχή της διεπιφάνειας, η ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών, όταν στον φορέα ασκείται μόνο το ίδιο βάρος.



Εικόνα 235: Περιοχές στις οποίες έχει διαρρεύσει ο φορέας μας μετά το πέρας της εφαρμογής της θερμικής φόρτισης.



Εικόνα 236: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας μετά το πέρας της εφαρμογής της θερμικής φόρτισης.

Στα δύο σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η πλαστικοποίηση του φορέα καθώς και το άνοιγμα της διεπιφάνειας μετά το πέρας της εφαρμογής του μηχανικού φορτίου, κατά την αστοχία του φορέα μας. Από την παρατήρηση του πρώτου σχήματος, φαίνεται ότι η διαρροή στον φορέα μας μειώνεται στην περιοχή του δοκαριού, σε σχέση με την αντίστοιχη εικόνα που είχαμε μετά το βήμα με την θερμική φόρτιση και πριν την εφαρμογή της μηχανικής φόρτισης. Αυτό το φαινόμενο, της αποφόρτισης δηλαδή με μείωση των περιοχών πλαστικοποίησης ενώ παράλληλα οι εξωτερικές μετατοπίσεις του φορέα μας αυξάνονται το παρατηρήσαμε σε αυτές τις επιλύσεις. Σε κάποιες εκ των επιλύσεων, στο τέλος της ανάλυσης παρουσιάζεται ο φορέας χωρίς καμία περιοχή πλαστικοποίησης και πρέπει κανείς να ερευνήσει τα αμέσως προηγούμενα στάδια της ανάλυσης (χωρίς ουσιαστική διαφοροποίηση στη δύναμη και τη μετατόπιση), για να φανούν οι περιοχές πλαστικοποίησης.



**Εικόνα 237:** Περιοχές στις οποίες έχει διαρρεύσει ο φορέας μας μετά το πέρας της εφαρμογής και της μηχανικής φόρτισης.



Εικόνα 238: Μέγεθος ανοίγματος διεπιφάνειας μετά το πέρας της εφαρμογής και της μηχανικής φόρτισης.

Ενδεικτικά στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται με αχνό γκρίζο χρώμα η διάταξη του φορέα πριν την επενέργεια των φορτίων και με έντονο πράσινο η διάταξη του φορέα όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια του πειράματος.



Εικόνα 239: Προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση



Εικόνα 240: Κοντινή προβολή της διάταξης πριν και μετά την καταπόνηση

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η παραμόρφωση κατά von Mises της πλήρους διάταξης, καθώς και μεμονωμένα των διαφόρων κομματιών που την απαρτίζουν:



Εικόνα 241: Πλήρης διάταξη (Μέγιστη καταπόνηση 7,006\*10<sup>5</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 5,235\*10<sup>1</sup> KPa)



Εικόνα 242: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 8,117\*10<sup>4</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,597\*10<sup>2</sup>)



Εικόνα 243: Οριζόντια δοκός (Μέγιστη καταπόνηση 8,117\*10<sup>4</sup> KPa , ελάχιστη καταπόνηση 3,597\*10<sup>2</sup>)



Εικόνα 244: Κάθετος στύλος (Μέγιστη καταπό<br/>νηση 2,312\*10 $^5\,{\rm KPa}$ , ελάχιστη καταπόνηση 5,235\*10<sup>1</sup> KPa)

Ενδεικτικά παρουσιάζεται παρακάτω μία κοχλίωση όπως αυτή παραμορφώθηκε κατά την διάρκεια της ανάλυσης:



καταπόνηση 8,301\*10<sup>3</sup> KPa)

#### 4.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ – ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΤΑ ΜΕΙΩΜΕΝΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΦΩΤΙΑΣ

4.3.1 Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζουμε τις περιπτώσεις όπου:

α) Στον φορέα μας ασκείται μόνο το φορτίο των 200kN (Σενάριο 5α στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται ουσιαστικά από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Χωρίς Θερμότητα».

β) Στον φορέα μας επιβάλλεται ταυτόχρονη θερμική και μηχανική φόρτιση στο ίδιο βήμα (Σενάριο 6 στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Νέες ιδιότητες Με Θερμότητα στο ίδιο βήμα με το φορτίο των 200 kN».

γ) Στον φορέα μας επιβάλλεται θερμική φόρτιση σε ξεχωριστό βήμα αμέσως μετά την επιβολή του ιδίου βάρους του φορέα και αμέσως πριν την επιβολή της μηχανικής φόρτισης σε αυτόν, με το φορτίο των 200kN (Σενάριο 7 στην αντίστοιχη παράγραφο με τα σενάρια). Στο διάγραμμα αυτό, το παρόν σενάριο παρουσιάζεται ουσιαστικά από την καμπύλη που έχει ονομαστεί «Νέες ιδιότητες Με Θερμότητα σε νέο βήμα».



4.3.2 Ακολουθεί ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα που παρουσιάζει το σύνολο των περιπτώσεων σε μια προσπάθεια σύγκρισης μεταξύ τους. Με πράσινο και κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται οι δύο νέες επιλύσεις που έγιναν με τις μειωμένες μηχανικές ιδιότητες των υλικών ενώ οι υπόλοιπες γραφικές παραστάσεις αφορούν τις περιπτώσεις χωρίς θεώρηση των μειωμένων αντοχών στον φορέα.



## 4.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΝΕΕΣ ΕΠΙΛΥΣΕΙΣ

Από τις νέες αυτές επιλύσεις που έγιναν με χρήση των μειωμένων μηχανικών χαρακτηριστικών, εντοπίσαμε σημαντικές αλλαγές στην συμπεριφορά του φορέα μας, με κύριο χαρακτηριστικό την μειωμένη αντοχή μετά την επίδραση της φωτιάς.

Ο φορέας φτάνει και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις σε σημαντικές μετατοπίσεις σε σημαντικά έως δραματικά μικρότερο φορτίο. Στην πρώτη περίπτωση, όπου τα δύο είδη φόρτισης ασκούνται παράλληλα, η οριακή αντοχή μειώνεται αλλά διατηρείται σε σχετικά υψηλά επίπεδα. Στην δεύτερη περίπτωση όπου πρώτα εφαρμόζεται το θερμικό φορτίο και στην συνέχεια το μηχανικό, η μείωση της αντοχής είναι πολύ μεγάλη, καθώς συμβαίνει σημαντικά μεγαλύτερη αύξηση των θερμοκρασιών. Αντίθετα, στην πρώτη περίπτωση ο φορέας αστοχεί με την παράλληλη επίδραση και των δύο φαινομένων και πριν προλάβουν οι θερμοκρασίες να λάβουν την μέγιστη τιμή τους.

## 4.5 ΓΕΝΙΚΟΤΕΡΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στην ανάλυση που έγινε στην παρούσα εργασία προσεγγίσθηκε η μηχανική απόκριση κοχλιωτών συνδέσμων μεταλλικών κατασκευών, όταν σε αυτές ασκούμε θερμικά – μηχανικά φορτία λαμβάνοντας φυσικά υπόψη την ελαστοπλαστική συμπεριφορά καθώς και την θερμική εξάρτηση των υλικών. Καταλήγοντας λοιπόν είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως το παρόν μοντέλο θα μπορούσε να δώσει ακριβέστερα αποτελέσματα και να γίνει ακόμη πιο ρεαλιστικό με τους παρακάτω τρόπους:

- Προσομοιώνοντας την συμπεριφορά του φορέα μας όταν αυτός είναι πλέον συνδεδεμένος και με τα υπόλοιπα μέρη της μεταλλικής κατασκευής. Σε μια τέτοια περίπτωση θα δινόταν οι δυνατότητα σε κάποιον να εκτιμήσει την συνολική συμπεριφορά και την φέρουσα ικανότητα της μεταλλικής κατασκευής αναλύοντας ένα πολλαπλά πιο σύνθετο πρόβλημα μεταλλικών συνδέσεων, λαμβάνοντας υπόψη γεγονότα όπως για παράδειγμα φαινόμενα αποκόλλησης μεταξύ γειτονικών τμημάτων της σύνδεσης.
- Προχωρώντας σε μια νέα θερμομηχανική ανάλυση κάνοντας αυτή την φορά χρήση πυρίμαχων υλικών σαν επικάλυψη στα διάφορα τμήματα της μεταλλικής κατασκευής, εξετάζοντας έτσι το κατά πόσο αυτά συμβάλουν και ωφελούν στην αντοχή της μεταλλική μας κατασκευής.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Chandrupatla T.R., Belegundu A.D., "*Introduction to Finite Elements in Engineering*", . 3<sup>rd</sup> ed. Pearson education, 2002.

[2] Abdalla, K.M., Abu-Farhakh G.A.R., and Barakat S.A., "Experimental investigation of force-distribution in high-strength bolts in extended end-plate connections", *Steel and composite structures An International Journal* 7, (2007).

[3] Stavroulaki M.E., Stavroulakis G.E., "Unilateral contact applications using FEM software", *Int. J. Appl. Math. Coput. Sci* 12, (2002)

[4] Zaharia R., Pintea D. (2009). Fire after Earthquake Analysis of Steel Moment Resisting Frames. *International Journal of Steel Structures*, 9:4 (2009) 275-284.

[5] Eurocode 3: Design of steel structures part 1.2: general rules structural fire design ENV 1993-1-2:2001, Brussels (Belgium): European Committee for Standarization, 2001.

[6] Drosopoulos G.A., Samaras S., Stavroulakis G.E., Abdalla, K.M. "Nonlinear analysis of end – plate steel connections using 3D finite elements with contact and friction", *International Congress on Mechanics*, Limassol, Cyprus (2010).

[7] Hu Y., Davison B., Burgess, I., Plank R., "Component Modeling of Flexible End – plate Connections in Fire", *International Journal of Steel Structures* 9 (2009) 1-15.

[8] Lawson R.M., "Behaviour of steel beam-to-column connections in fire", *The Structural Engineer* 68 (1990).

[9] Al-Jabri K.S., Lennon T., Burgess I.W., Plank R.J., "Behaviour of steel and composite beam-column connections in fire", *Journal of Constructional Steel Research* 46 (1998)

[10] Spyrou S., Davison J., Burgess I.W., Plank R.J., Experimental and analytical investigation of the "compression zone" component within a steel joint at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research* 60 (2004)

[11] Spyrou S., Davison J., Burgess I.W., Plank R.J., Experimental and analytical investigation of the "tension zone" component within a steel joint at elevated temperatures, *Journal of Constructional Steel Research* 60 (2004)

[12] Yu H., Burgess I.W., Davison J.B., Plank R.J., Numerical simulation of bolted steel connections in fire using explicit dynamic analysis, *Journal of Constructional Steel Research* 64 (2008).

[13] Lien K.H., Chiou Y.J., Wang R.Z., Hsiao P.A., Nonlinear behaviour of steel structures considering the cooling phase of a fire, *Journal of Constructional Steel Research* 65 (2009).