

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

Ανάλυση μεταλλικών κοχλιωτών κόμβων
δοκού – υποστυλώματος σε συνήθειες και υψηλές
θερμοκρασίες

Μεταπτυχιακή Εργασία Ειδίκευσης
Μαργαρίτας Ζ. Γκουγκουλιά

Βόλος 2013

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας προς εκπλήρωση των προϋποθέσεων του Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης «Προσομοίωση Συστημάτων και Σχεδιασμός Έργων Πολιτικού Μηχανικού»

Επιβλέπων: Ευριπίδης Μυστακίδης. Καθηγητής Π.Θ

Μέλη τριμελούς εξεταστικής επιτροπής:

Ευριπίδης Μυστακίδης
Καθηγητής Π.Θ

Σπυρίδων Καραμάνος
Αναπληρωτής Καθηγητής Π.Θ

Ολυμπία Παναγούλη
Επίκουρος Καθηγήτρια Π.Θ

Στη μαμά μου,
που αποτελεί
πηγή έμπνευσης
και στον μπαμπά
μου, που είναι
πάντα εδώ.

Ευχαριστίες

Οι ευχαριστίες που παρατίθενται στη σελίδα αυτή αποτελούν μια ελάχιστη μόνον αναγνώριση προς τα πρόσωπα εκείνα που με στήριξαν επιστημονικά, ηθικά και οικονομικά κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες προς τον καθηγητή και επιβλέποντα την παρούσα διπλωματική εργασία, κ. Ευριπίδη Μυστακίδη, για την επιστημονική και ηθική του καθοδήγηση καθώς και τη συμπαράσταση που μου παρείχε κατά τη διάρκεια τόσο των μαθημάτων όσο και της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Στον διδάκτορα και φίλο Κωνσταντίνο Τζάρο, για την αμέριστη συμπαράσταση και βοήθειά του σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών.

Στην διδάκτορα Κυριακή Γεωργιάδη-Στεφανίδη και την υποψήφια διδάκτορα Δάφνη Παντούσα, για την υποστήριξη τους σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας καθώς και για το κλίμα συνεργασίας που είχα το προνόμιο να εργαστώ όλον αυτόν τον καιρό.

Στον διδάκτορα Μηνά Λεμονή, για την συμβολή του όπου και όποτε κρίθηκε απαραίτητο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Στους φίλους που με συντροφεύουν σε κάθε εύκολη και δύσκολη στιγμή.

Στην οικογένειά μου, που με στηρίζει σε κάθε μου βήμα.

Στον πατέρα μου, ιδιαίτερα, χωρίς την καθοδήγηση, τη συμπαράσταση και τη στήριξη του οποίου δε θα ήμουν ο άνθρωπος που είμαι σήμερα.

Σας ευχαριστώ.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	1
Abstract	2
1 Κατασκευές με διατομές από χάλυβα.....	3
1.1 Περί κόμβων δοκού-υποστυλώματος.....	3
1.2 Περιγραφή του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας.....	6
2 Κόμβοι δοκού-υποστυλώματος με μετωπική πλάκα	7
2.1 Εισαγωγή.....	7
2.2 Βασικές αρχές σχεδιασμού κόμβων - Κανονιστικό πλαίσιο	7
2.2.1 Αντοχή κόμβων	7
2.2.2 Παραδοχές σχεδιασμού	7
2.2.3 Συνδέσεις με κοχλίες.....	8
2.2.4 Μέθοδος βασικών στοιχείων.....	8
2.2.5 Κοχλιωτές συνδέσεις με μετωπικές πλάκες σε κόμβους δοκού-υποστυλώματος.....	11
2.3 Υπολογισμός στροφικής ικανότητας.....	12
2.3.1 Προσδιορισμός της καμπύλης M-φ.....	13
2.4 Απόκριση συνδέσεων βραχέος ταυ-Μηχανισμοί αστοχίας.....	15
2.5 Πειραματική βιβλιογραφία.....	17
2.5.1 Γενικά.....	17
2.5.2 Ταξινόμηση με βάση τα συνδεόμενα μέλη.....	17
2.5.3 Ταξινόμηση με βάση το υλικό.....	17
2.5.4 Ταξινόμηση με βάση την μορφολογία της σύνδεσης.....	18
2.5.5 Ταξινόμηση με βάση την φόρτιση.....	20
2.5.6 Ταξινόμηση με βάση την ιστορία της φόρτισης.....	21
2.5.7 Ταξινόμηση με βάση την θέση.....	22
2.5.8 Ταξινόμηση με βάση τον άξονα	23
3 Επιλογή πειραματικών δεδομένων-Δημιουργία προσομοιωμάτων.....	24

3.1	Κριτήρια επιλογής πειραματικών δεδομένων.....	24
3.2	Πειραματικές δοκιμές Coelho et al. (2004β).....	24
3.3	Επιλογή δεδομένων για τη δημιουργία των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων	30
3.4	Λογισμικό FEM και μετεπεξεργασία	31
3.5	Δημιουργία προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων.....	31
4	Εκτίμηση απόκρισης κόμβων δοκού-υποστυλώματος.....	37
4.1	Γενικά	37
4.2	Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 10 χιλιοστών	39
4.3	Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 15 χιλιοστών	43
4.4	Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 20 χιλιοστών	47
5	Σχεδιασμός συνδέσεων έναντι πυρκαγιάς.....	53
5.1	Γενικά	53
5.2	Θερμο-μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες.....	54
5.2.1	Θερμικές ιδιότητες του χάλυβα	54
5.2.2	Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα	57
5.3	Σχεδιασμός κοχλιωτών συνδέσεων έναντι πυρκαγιάς.....	61
5.3.1	Αντοχή σχεδιασμού κοχλιών σε διάτμηση.....	61
5.3.2	Αντοχή σχεδιασμού κοχλιών σε εφελκυσμό	62
6	Απόκριση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας	63
6.1	Γενικά	63
6.2	Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 10 χιλιοστών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.....	65
6.3	Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 15 χιλιοστών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.....	73
6.4	Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 20 χιλιοστών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας.....	80
7	Συμπεράσματα.....	87
7.1	Σύνοψη	87
7.2	Συμπεράσματα.....	88

Παράρτημα.....	89
Βιβλιογραφία.....	112
Ευρετήριο Σχημάτων.....	113
Ευρετήριο Πινάκων.....	116

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται μια συνεχώς αυξανόμενη αξιοποίηση του χάλυβα ως μέσου σε διάφορες κατασκευές υψηλής αισθητικής που συνδυάζουν άριστα αρχιτεκτονική και μηχανική συμπεριφορά. Στη δημιουργία αυτών των κατασκευών, σημαντική παράμετρο αποτέλεσε η ολοένα αυξανόμενη δυνατότητα αξιοποίησης της στρωφικής απόκρισης των κόμβων δοκού-υποστυλώματος. Τα οφέλη που προκύπτουν από την εκμετάλλευση της δυνατότητας αυτής, αφορούν τόσο την οικονομία των υλικών και την ταχύτητα ανέγερσης όσο και την αξιοποίηση της μεταλαστικής απόκρισης των κόμβων για την βελτίωση της αξιοπιστίας και αποτελεσματικότητας της κατασκευής.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρείται η διερεύνηση της συμπεριφοράς κόμβων δοκού – υποστυλώματος υπό καμπτική καταπόνηση της δοκού, με τη βοήθεια σύνθετων τρισδιάστατων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η καταπόνηση των κόμβων δοκού – υποστυλώματος από τις καμπτικές ροπές είναι κυρίαρχη και συνιστά καθοριστικό παράγοντα της απόκρισής τους. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στις κοχλιοτές συνδέσεις με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα. Οι συγκεκριμένοι κόμβοι τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής σε κατασκευές πλαισίων, είναι ιδιαίτερα απλοί στην κατασκευή, καθώς δεν απαιτούν την εκτέλεση συγκολλήσεων στο εργοτάξιο, συμβάλλοντας έτσι στην ευκολία και στην ταχύτητα ανέγερσης, καθώς και στην αξιοπιστία της κατασκευής. Επίσης, είναι σε θέση να εξασφαλίσουν υψηλή αρχική δυσκαμψία, αντοχή και στρωφική ικανότητα. Η αντοχή και η αρχική δυσκαμψία είναι τα δύο μεγέθη της απόκρισης που στο παρελθόν συγκέντρωσαν το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη αναλυτικών μεθόδων εκτίμησης. Τα τελευταία, όμως, χρόνια εμφανίζεται μία ενίσχυση των προσπαθειών για τον προσδιορισμό της μη γραμμικής απόκρισης των κόμβων αυτών, που μπορεί να επιτευχθεί από μία καμπύλη ροπής-στροφής, μέσω της οποίας συσχετίζεται η καμπτική ροπή που ασκείται στον κόμβο από την δοκό, με την στρόφη που αναπτύσσεται μεταξύ των συνδεόμενων μελών.

Παρά το γεγονός ότι μεγάλος αριθμός αναλυτικών ερευνών έχουν διεξαχθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των κόμβων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, λίγες ερευνητικές εργασίες έχουν διεξαχθεί σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μεγάλο αριθμό παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να περιγραφθεί η συμπεριφορά του κόμβου στη φωτιά. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα διπλωματική εργασία, γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστεί η καμπύλη ροπής-στροφής των κόμβων δοκού-υποστυλώματος που εξετάζονται, τόσο σε συνθήκες περιβάλλοντος όσο και σε συνθήκες πυρκαγιάς. Η αποτελεσματικότητα της προσπάθειας αυτής, αξιολογείται βάσει διαθέσιμων πειραματικών δοκιμών από τη βιβλιογραφία καθώς και όσων προβλέπουν οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003).

Abstract

In recent years, there is an increasing use of steel in various structures combining aesthetics and excellent architecture and mechanical behavior. The possibility to take into account the rotational behavior of beam-to-column joints in the analysis and design of steel structures becomes more and more prominent. The resultant benefits extend to both material savings and erection speed and also to the utilization of the post-elastic joint response, in order to enhance the reliability and the effectiveness of the structures.

The present dissertation attempts to look into the behavior of beam to column joints, using complex three-dimensional finite element models. In most cases, the flexural loading of the beam is dominant and determinant of the joint's response. The focus of the research is devoted to bolted connections with extended endplate. These joints are widely used in frames, they are particularly simple to manufacture, they do not require the execution of welds at the construction site, thus contributing to the ease and speed of erection, and the reliability of the construction. Furthermore, they are able to ensure high initial stiffness, strength and rotation capacity. Previously, the interest was focused on the development of analytical methods determining the strength and the initial stiffness. However, nowadays, there is an increasing effort to determine the nonlinear response of these joints through a moment-rotation curve which relates the bending moment applied on the joint from the beam to the rotation developed between the connected members.

Although a large number of detailed studies have been conducted to simulate the behavior of joints in room temperature, only a few studies have been conducted at elevated temperature. This is mainly due to the large number of parameters that should be taken into account in order to describe the behavior of joints in fire. This dissertation attempts to determine the moment-rotation curve of the analysed beam-to-column joints, both at room and elevated temperature. Finally, the effectiveness of this effort is evaluated based on the available experimental results found in the literature and the behavior of the joints predicted through Eurocode 3 (CEN 2003).

1 Κατασκευές με διατομές από χάλυβα

1.1 Περί κόμβων δοκού-υποστυλώματος

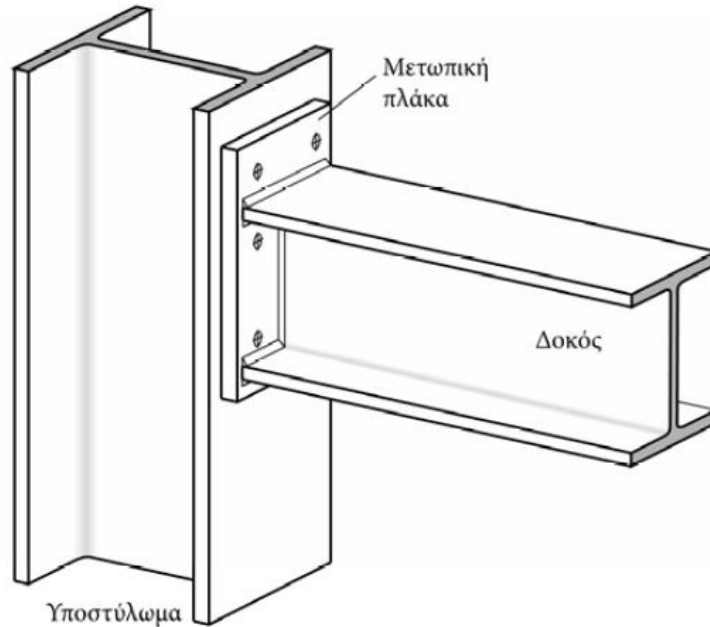
Το αντικείμενο που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς κόμβων δοκού-υποστυλώματος υπό καμπτική καταπόνηση της δοκού. Οι κόμβοι αποτελούν ένα κρίσιμο τμήμα μιας κατασκευής, καθώς από αυτούς εξαρτάται η μεταβίβαση εντατικών μεγεθών μεταξύ των διαφόρων μελών, για την μεταφορά των εξωτερικών φορτίων, από τα σημεία επιβολής τους προς το έδαφος. Μέσω των κόμβων δοκού-υποστυλώματος μεταβιβάζονται καμπτικές ροπές, διατμητικές δυνάμεις, αξονικές δυνάμεις και στρεπτικές ροπές από τις δοκούς που συντρέχουν σε αυτούς, προς το υποστύλωμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η καταπόνηση των κόμβων δοκού-υποστυλώματος από τις καμπτικές ροπές είναι κυρίαρχη, και συνιστά τον καθοριστικό παράγοντα της απόκρισής τους.

Η συμπεριφορά των κόμβων σε μία κατασκευή καθορίζεται από την αλληλεπίδραση ενός αριθμού διακριτών σωμάτων, τα οποία στο σύνολο τους διαμορφώνουν την γεωμετρία του κόμβου. Η αλληλεπίδραση αυτή προκαλεί την εμφάνιση φαινομένων όπως επαφή, αποκόλληση ή ολίσθηση μεταξύ των σωμάτων, και μεταβάλλεται με την εξέλιξη της φόρτισης, αποτελώντας την αιτία για μια από τις πιο σύνθετες, μη γραμμικές μορφές της απόκρισής τους. Η μη γραμμικότητα χαρακτηρίζει την συμπεριφορά των κόμβων, καθώς πέραν των φαινομένων από την αλληλεπίδραση διακριτών σωμάτων, υπεισέρχεται η μη γραμμικότητα υλικού, εξ' αιτίας της μεγάλης πλαστιμότητας και μετελαστικής αντοχής του χάλυβα, και ενδεχομένως η μη γραμμικότητα γεωμετρίας, ως αποτέλεσμα σημαντικών μετακινήσεων και στροφών που μπορούν να αναπτυχθούν. Οι μη γραμμικότητες, σε συνδυασμό με την πολύπλοκη γεωμετρική διαμόρφωση, καθιστούν την προσπάθεια εκτίμησης της απόκρισης δυσχερή. Για τον λόγο αυτό, εισάγονται απλοποιητικές παραδοχές προκειμένου να προσεγγισθούν με αναλυτικά μέσα ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη της απόκρισης. Για ερευνητικούς σκοπούς, η μόνη εναλλακτική επιλογή, για τον ακριβή προσδιορισμό της συμπεριφοράς των κόμβων, είναι η εκτέλεση πειραματικών δοκιμών ή η προσομοίωση με σύνθετα τρισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων.

Η αντοχή και η αρχική δυσκαμψία είναι τα δύο μεγέθη της απόκρισης που στο παρελθόν συγκέντρωναν το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη αναλυτικών μεθόδων εκτίμησης. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια εμφανίζεται μία ενίσχυση των προσπαθειών για τον προσδιορισμό της μη γραμμικής απόκρισης των κόμβων. Στην περίπτωση των κόμβων δοκού-υποστυλώματος, με κυρίαρχη καμπτική καταπόνηση, η περιγραφή της μη γραμμικής απόκρισης μπορεί να επιτευχθεί από μία καμπύλη ροπής-στροφής, μέσω της οποίας συσχετίζεται η καμπτική ροπή που ασκείται στον κόμβο από την δοκό, με την στροφή που αναπτύσσεται μεταξύ των συνδεδεμένων μελών. Η δυνατότητα υπολογισμού της καμπύλης ροπής-στροφής των κόμβων, με αναλυτικές μεθόδους, αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την συμμετοχή των κόμβων στον σχεδιασμό και την ανάλυση των κατασκευών με τρόπο ανάλογο με τα μέλη. Σύμφωνα με την συνήθη πρακτική σχεδιασμού, που εφαρμόζεται ως επί των πλείστων ακόμα και σήμερα, οι κόμβοι θεωρούνται και διαστασιολογούνται είτε ως άκαμπτοι, εξασφαλίζοντας μηδενική σχετική στροφή μεταξύ των συνδεδεμένων

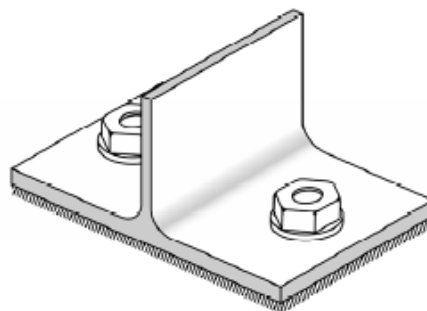
μελών ή ως αρθρωτοί, παρέχοντας συνθήκες απλής στήριξης, χωρίς μεταφορά ροπής. Με την συμμετοχή ωστόσο των κόμβων στον σχεδιασμό, αξιοποιώντας την καμπύλη ροπής-στροφής τους, παρέχεται αφενός το πλεονέκτημα ακριβέστερης προσομοίωσης της πραγματικής συμπεριφοράς, και αφετέρου η δυνατότητα βελτιστοποίησης της κατασκευής, με κριτήριο την μείωση του κόστους των υλικών και του χρόνου ανέγερσης. Επιπλέον, είναι δυνατόν να επαυξηθεί η πλαστιμότητα της κατασκευής, επιτρέποντας τον σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων στο εσωτερικό των κόμβων, ταυτόχρονα με τις δοκούς. Η παράμετρος της στροφικής ικανότητας των κόμβων θεωρείται κρίσιμη στην συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς από αυτήν εξαρτάται η έκταση της ανακατανομής εντατικών μεγεθών, μετά την έλευση της πλαστικοποίησης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται ο προσδιορισμός της καμπύλης ροπής-στροφής των κόμβων δοκού-υποστυλώματος που εξετάζονται και ιδιαίτερη έμφαση αποδίδεται στην ακριβή εκτίμηση της στροφικής ικανότητας, η οποία, όπως προαναφέρθηκε συνιστά μία κρίσιμη παράμετρο της αποτελεσματικότητας ενός κόμβου σε περιπτώσεις σχεδιασμού με απαιτήσεις υψηλής πλαστιμότητας. Οι κοχλιωτοί κόμβοι δοκού-υποστυλώματος με μετωπική πλάκα, όπως είναι και οι κόμβοι που εξετάζονται, γενικά χαρακτηρίζονται από πλάστιμη μετελαστική συμπεριφορά, εξασφαλίζοντας υψηλή διαθέσιμη στροφική ικανότητα. Επιπλέον, δεν απαιτούν την εκτέλεση συγκολλήσεων στο εργοτάξιο, συμβάλλοντας έτσι στην ευκολία και στην ταχύτητα ανέγερσης, καθώς και στην αξιοπιστία της κατασκευής. Στο Σχήμα 1-1 παρουσιάζεται αυτή η διαμόρφωση κοχλιωτού κόμβου. Οι συγκεκριμένοι κόμβοι τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής σε κατασκευές πλαισίων, είναι ιδιαίτερα απλοί στην κατασκευή, και είναι σε θέση να εξασφαλίσουν υψηλή αρχική δυσκαμψία, αντοχή και στροφική ικανότητα.

Στους κοχλιωτούς κόμβους δοκού-υποστυλώματος, όπως είναι και οι κόμβοι που εξετάζονται στην παρούσα διπλωματική, η πλέον καθοριστική και κρίσιμη για την μετελαστική συμπεριφορά περιοχή, είναι η εφελκυστική ζώνη, όπου πραγματοποιείται η μεταβίβαση δυνάμεων, από το εφελκυσμένο πέλμα της δοκού προς το υποστύλωμα. Η ζώνη αυτή διαθέτει, υπό ορισμένες προϋποθέσεις, σημαντική μετελαστική αντοχή και εύρος πλαστικού κλάδου, συνιστώντας την κύρια πηγή πλαστικής στροφής ολόκληρου του κόμβου. Για αυτόν τον λόγο, θεωρείται ότι η διερεύνηση της συμπεριφοράς της εφελκυστικής ζώνης, και η ανάπτυξη αποτελεσματικών μεθόδων προσομοίωσής της, εναρμονίζεται με τον στόχο αξιόπιστης εκτίμησης της καμπύλης ροπής-στροφής των κόμβων που προαναφέρθηκε.



Σχήμα 1-1 Κόμβος με μετωπική πλάκα

Η συμπεριφορά της εφελκόμενης ζώνης, μπορεί να προσεγγισθεί από εκείνη ισοδύναμων συνδέσεων βραχέος T. Η συγκεκριμένη προσέγγιση υιοθετείται ευρέως στην βιβλιογραφία, για την εκτίμηση της απόκρισης των κοχλιωτών κόμβων, και έχει εφαρμοσθεί στο κανονιστικό κείμενο του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003), για τον σχεδιασμό κατασκευών από χάλυβα στον ευρωπαϊκό χώρο. Η σύνδεση βραχέος T, αν και απλούστερη από την πραγματική εφελκόμενη ζώνη του κόμβου, παραμένει ένα σύνθετο σύστημα αλληλεπίδρασης διακριτών σωμάτων, με ανάπτυξη φαινομένων επαφής και σύνθετη τρισδιάστατη γεωμετρία. Η εκτίμηση της μη γραμμικής απόκρισης της συγκεκριμένης σύνδεσης με αναλυτικά μέσα είναι δυσχερής, και απαιτεί σημαντικές απλοποιητικές παραδοχές. Στο Σχήμα 1-2 απεικονίζεται η σύνδεση βραχέος T. Ο αξιόπιστος προσδιορισμός της μη γραμμικής απόκρισης της σύνδεσης βραχέος T, θεωρείται αποφασιστικός, για την επιτυχή εκτίμηση της καμπύλης ροπής- στροφής των κοχλιωτών κόμβων.



Σχήμα 1-2 Σύνδεση βραχέος T

1.2 Περιγραφή του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος εξετάζεται η συμπεριφορά κόμβων δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα με κυρίαρχη την καμπτική καταπόνηση της δοκού. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η επιλογή συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος που έχουν εξετασθεί και πειραματικά ώστε να είναι ευφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από την ανάλυση. Οι πειραματικές διατάξεις που επιλέγονται, προσομοιώνονται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Αναπτύσσονται σύνθετα τρισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων από την ανάλυση των οποίων οι καμπύλες ροπής-στροφής των εξεταζόμενων κόμβων για 3 διαφορετικά πάχη μετωπικής πλάκας. Οι καμπύλες ροπής-στροφής που προκύπτουν συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες που είναι διαθέσιμες στην πειραματική δημοσίευση. Μελετάται επίσης η μορφή αστοχίας του κάθε κόμβου και συγκρίνεται με τη μορφή αστοχίας του αντίστοιχου κόμβου της πειραματικής δοκιμής. Τα αποτελέσματα που αφορούν στην αντοχή του κάθε κόμβου συγκρίνονται επίσης και με την αναμενόμενη αντοχή τους σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Ο υπολογισμός της αντοχής σχεδιασμού σε ροπή του κάθε κόμβου, γίνεται με τη βοήθεια του εμπορικού προγράμματος STEELCON.

Στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας, διερευνάται η συμπεριφορά των προηγούμενων προσομοιωμάτων υπό καμπτική καταπόνηση της δοκού σε συνθήκες πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιούνται αναλύσεις για θερμοκρασίες από 20 (κανονικές συνθήκες) έως και 1000 βαθμούς Κελσίου και από τα αποτελέσματα που προκύπτουν παράγονται οι καμπύλες ροπής-στροφής για καμπτική καταπόνηση της δοκού για θερμοκρασίες 200, 400, 600, 800 και 1000 βαθμούς Κελσίου. Στις αναλύσεις αυτές λαμβάνεται υπόψη η αλλαγή των ιδιοτήτων του χάλυβα για κάθε μία από τις θερμοκρασίες που εξετάζονται, σύμφωνα με όσα προβλέπει ο Ευρωκώδικας 3. Επίσης μελετάται και σε αυτό το μέρος της διπλωματικής εργασίας η μορφή αστοχίας των κόμβων για κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιείται η ανάλυση.

Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων του πρώτου και του δεύτερου μέρους της διπλωματικής, μελετάται δηλαδή η διαφοροποίηση της συμπεριφοράς των εξεταζόμενων κόμβων υπό καμπτική καταπόνηση σε συνθήκες δωματίου και σε συνθήκες πυρκαγιάς. Πιο συγκεκριμένα συγκρίνεται η αντοχή των κόμβων σε κανονικές συνθήκες και σε συνθήκες πυρκαγιάς καθώς και η μορφή αστοχίας των κόμβων στις δύο αυτές περιπτώσεις.

2 Κόμβοι δοκού-υποστύλωματος με μετωπική πλάκα

2.1 Εισαγωγή

Στο πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας μελετάται η απόκριση κόμβων δοκού-υποστύλωματος μεταφοράς ροπής. Συγκεκριμένα το ενδιαφέρον εστιάζεται στους κοχλιωτούς κόμβους και ιδιαίτερα στους κόμβους με σύνδεση μετωπικής πλάκας. Οι κόμβοι με σύνδεση μετωπικής πλάκας είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι στον ευρωπαϊκό χώρο, καθώς επιτρέπουν την εύκολη ανέγερση της κατασκευής χωρίς να απαιτούν την εκτέλεση συγκολλήσεων στο εργοτάξιο. Επιπλέον είναι σε θέση να εξασφαλίσουν υψηλή δυσκαμψία και αντοχή, εάν αυτό απαιτείται από τον σχεδιασμό, διαθέτοντας παράλληλα υψηλά μεγέθη πλαστιμότητας.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία του κανονισμού και της διαθέσιμης βιβλιογραφίας στον τομέα των μεταλλικών κόμβων δοκού-υποστύλωματος με σύνδεση μετωπικής πλάκας. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στον υπολογισμό της στρωφικής ικανότητας των κόμβων που αποτελεί αντικείμενο μεγάλου ερευνητικού ενδιαφέροντος, με σημαντικές πρακτικές εφαρμογές.

2.2 Βασικές αρχές σχεδιασμού κόμβων - Κανονιστικό πλαίσιο

2.2.1 Αντοχή κόμβων

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003) για το σχεδιασμό κόμβων δοκού-υποστύλωματος:

- Η αντοχή ενός κόμβου πρέπει να προσδιορίζεται με βάση τις αντοχές των συστατικών μερών του (μέθοδος ‘‘βασικών στοιχείων’’).
- Για το σχεδιασμό των κόμβων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελαστική ή ελαστοπλαστική ανάλυση.

2.2.2 Παραδοχές σχεδιασμού

Οι κόμβοι πρέπει να σχεδιάζονται στην βάση μιας λογικής παραδοχής για την κατανομή των εντατικών μεγεθών. Για τον προσδιορισμό της κατανομής πρέπει να χρησιμοποιούνται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Υπάρχει ισορροπία μεταξύ των εντατικών μεγεθών που υπολογίζονται στην ανάλυση και των δυνάμεων και ροπών που ασκούνται στους κόμβους.
- Κάθε στοιχείο του κόμβου παραλαμβάνει με ασφάλεια τα εντατικά μεγέθη.
- Οι παραμορφώσεις που προκύπτουν από την κατανομή των εντατικών μεγεθών δεν υπερβαίνουν την ικανότητα παραμόρφωσης των μέσων σύνδεσης ή των συγκολλήσεων και των συνδεόμενων μερών.
- Η κατανομή των εντατικών μεγεθών που υιοθετείται πρέπει να συμφωνεί λογικά με τη σχετική κατανομή δυσκαμψιών στο εσωτερικό του κόμβου. Οι παραμορφώσεις που υιοθετούνται από οποιοδήποτε προσομοίωμα σχεδιασμού ελαστοπλαστικής ανάλυσης πρέπει να βασίζονται σε εφικτές στροφές στερεού σώματος και/ή εντός επιπέδου μετακινήσεις.

2.2.3 Συνδέσεις με κοχλίες

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003), παράγραφος 1-8, οι κοχλιωτές συνδέσεις διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

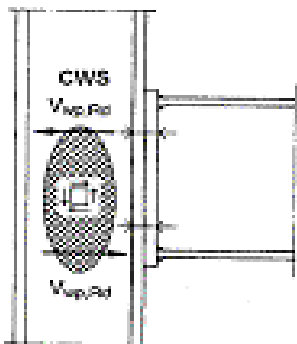
- Συνδέσεις διάτμησης: Κοχλιωτές συνδέσεις που υπόκεινται σε διάτμηση.
- Συνδέσεις εφελκυσμού: Κοχλιωτές συνδέσεις που υπόκεινται σε εφελκυσμό.

2.2.4 Μέθοδος βασικών στοιχείων

Η μέθοδος επίλυσης των παραπάνω τύπων συνδέσεων στηρίζεται, όπως έχει αναφερθεί, στην μέθοδο των "βασικών στοιχείων" δηλαδή η συνολική αντοχή της σύνδεσης βρίσκεται μέσω της αντοχής των επιμέρους βασικών στοιχείων που την αποτελούν. Τα "βασικά στοιχεία" για τους παραπάνω τύπους είναι τα εξής:

A. Κορμός υποστυλώματος σε διάτμηση

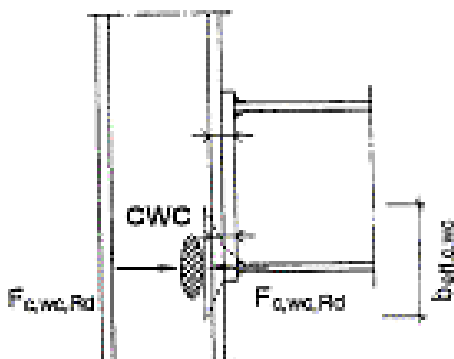
Για μονόπλευρο ή αμφίπλευρο κόμβο, για τον οποίο ισχύει η προϋπόθεση ότι τα ύψη των δοκών είναι ίδια ή παρόμοια, η αντοχή σε τέμνουσα του κορμού του υποστυλώματος δίνεται από τον τύπο (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-8, παράγραφος 6.2.6.1):



$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9 f_{y,wc} A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

B. Κορμός υποστυλώματος σε θλίψη

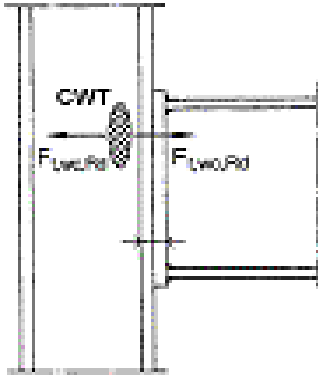
Η αντοχή ενός μη ενισχυμένου κορμού υποστυλώματος σε θλίψη δίνεται από τον τύπο (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-8, παράγραφος 6.2.6.2) :



$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc} k_{wc}}{\gamma_{M0}}$$

Γ. Κορμός υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό

Η αντοχή σχεδιασμού ενός μη ενισχυμένου κορμού υποστυλώματος σε εγκάρσιο εφελκυσμό πρέπει να προσδιορίζεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (Μέρος 1-8, παράγραφος 6.2.6.3) από τη σχέση:



$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$$

Όπου:

ω είναι ένας μειωτικός συντελεστής με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η αλληλεπίδραση με τη διάτμηση στον κορμό του υποστυλώματος, ενώ το ενεργό πλάτος $b_{eff,t,wc}$ του κορμού του υποστυλώματος σε εφελκυσμό λαμβάνεται ίσο με το ενεργό μήκος ενός ισοδύναμου βραχέος T που αντιστοιχεί στο πέλμα του υποστυλώματος.

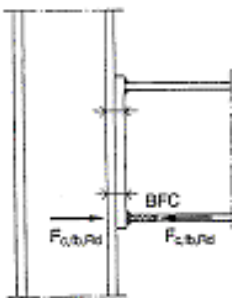
Δ. Πέλμα υποστυλώματος σε εγκάρσια κάμψη και μετωπική πλάκα σε κάμψη

Η αντοχή σχεδιασμού ενός μη ενισχυμένου πέλματος υποστυλώματος και μιας μετωπικής πλάκας σε κάμψη σε συνδυασμό με τους κοχλίες σε εφελκυσμό προσδιορίζεται με βάση ένα ισοδύναμο βραχύ T και για τις εξής περιπτώσεις :

- Για κάθε μεμονωμένη σειρά κοχλιών που απαιτείται να παραλάβει εφελκυσμό
- Για κάθε ομάδα σειρών κοχλιών που απαιτείται να παραλάβει εφελκυσμό

Ε. Κορμός και πέλμα δοκού σε θλίψη

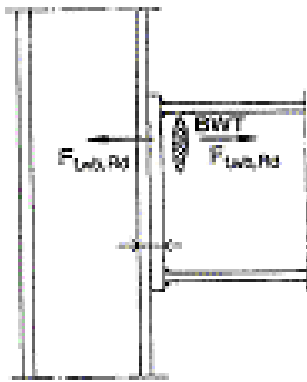
Η αντοχή σε θλίψη του πέλματος και της συνεργαζόμενης θλιβόμενης ζώνης της δοκού δίνεται από τον τύπο (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-8, παράγραφος 6.2.6.7):



$$F_{c,fb,Rd} = M_{b,Rd} / (h - t_{Fb})$$

ΣΤ. Κορμός δοκού σε εφελκυσμό

Σε μια κοχλιωτή σύνδεση με μετωπική πλάκα, η αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό του κορμού της δοκού πρέπει να υπολογίζεται από τη σχέση (Ευρωκώδικας 3, παράγραφος 6.2.6.8):



$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb} / \gamma_{M0}$$

Το ενεργό πλάτος $b_{eff,t,wb}$ του κορμού της δοκού σε εφελκυσμό πρέπει να λαμβάνεται ίσο με το ενεργό μήκος ενός ισοδύναμου βραχέος T που αντιστοιχεί στη μετωπική πλάκα σε κάμψη.

2.2.5 Κοχλιωτές συνδέσεις με μετωπικές πλάκες σε κόμβους δοκού-υποστυλώματος

Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003), η αντοχή σχεδιασμού σε ροπή $M_{j,Rd}$ ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος με μια κοχλιωτή σύνδεση με μετωπική πλάκα μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd}$$

Όπου:

$F_{tr,Rd}$ είναι η ενεργός αντοχή σε εφελκυσμό της σειράς κοχλιών r

h_r είναι η απόσταση της σειράς κοχλιών r από το κέντρο θλίψης

r είναι ο αριθμός των σειρών κοχλιών

Σημειώνεται ότι σε μία κοχλιωτή σύνδεση με περισσότερες από μία σειρές κοχλιών σε εφελκυσμό, η αρίθμηση των σειρών κοχλιών αρχίζει από την πλέον απομακρυσμένη από το κέντρο θλίψης. Σε κοχλιωτές συνδέσεις με μετωπική πλάκα, το κέντρο θλίψης πρέπει να θεωρείται στο μέσο του θλιβόμενου πέλματος του συνδεδεμένου μέλους. Η ενεργός αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $F_{tr,Rd}$ σε κάθε σειρά κοχλιών πρέπει να προσδιορίζεται διαδοχικά ξεκινώντας από τη σειρά κοχλιών 1, την πλέον απομακρυσμένη από το κέντρο θλίψης και συνεχίζοντας με τη σειρά κοχλιών 2 κλπ. Όταν υπολογίζεται η τιμή $F_{tr,Rd}$ για τη σειρά κοχλιών r πρέπει να αγνοείται η ενεργός αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό όλων των κοχλιών που βρίσκονται πλησιέστερα στο κέντρο θλίψης. Η ενεργός αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $F_{tr,Rd}$ της σειράς κοχλιών r πρέπει να λαμβάνεται ίση με την αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό $F_{t,Rd}$ της σειράς κοχλιών, θεωρώντας τη ως μεμονωμένη και απομειωμένη. Συγκεκριμένα πρέπει να λαμβάνεται ίση με τη μικρότερη τιμή των αντοχών σχεδιασμού σε εφελκυσμό των επόμενων βασικών συστατικών μερών με μια σειρά κοχλιών:

- κορμός υποστυλώματος σε εφελκυσμό $F_{t,wc,Rd}$
- πέλμα υποστυλώματος σε κάμψη $F_{t,fc,Rd}$
- μετωπική πλάκα σε κάμψη $F_{t,ep,Rd}$
- κορμός δοκού σε εφελκυσμό $F_{t,wb,Rd}$

2.3 Υπολογισμός στροφικής ικανότητας

Το κυριότερο στοιχείο της απόκρισης, με το οποίο χαρακτηρίζεται η στροφική συμπεριφορά ενός κόμβου, είναι η καμπύλη ροπής-στροφής. Εφόσον είναι διαθέσιμη η καμπύλη ροπής-στροφής, ο κόμβος μπορεί να συμμετέχει στην καθολική ανάλυση της κατασκευής, λαμβάνοντας υπόψη την συμβολή του στην παραμορφωσιμότητα της. Παραδοσιακά, οι κόμβοι δοκού-υποστυλώματος θεωρούνταν είτε άκαμπτοι, εξασφαλίζοντας μηδενική σχετική στροφή μεταξύ των συνδεόμενων μελών ή αρθρωτοί, παρέχοντας συνθήκες απλής στήριξης, χωρίς μεταφορά ροπής. Ωστόσο, οι δύο ακραίες αυτές εξιδανικευμένες θεωρήσεις δεν μπορούν να υλοποιηθούν στην πραγματικότητα. Είναι αναμενόμενο ότι σε κάθε κοχλιωτό κόμβο δοκού-υποστυλώματος θα εκδηλωθεί σχετική στροφή μεταξύ των συνδεόμενων μελών, έστω και αν ο κόμβος θεωρείται άκαμπτος και παράλληλα θα αναπτυχθεί ροπή, έστω και αν ο κόμβος θεωρείται αρθρωτός. Συμπεριλαμβάνοντας την πραγματική συμπεριφορά του κόμβου στην διαδικασία ανάλυσης και σχεδιασμού, παρέχεται αφενός το πλεονέκτημα ακριβέστερης προσομοίωσης και αφετέρου η δυνατότητα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού της κατασκευής, με κριτήριο την μείωση του κόστους των υλικών και του χρόνου ανέγερσης (Weynand et al 1998).

Η εκτίμηση της καμπύλης ροπής-στροφής με υπολογιστικά μέσα, συνιστά ένα δύσκολο και πολυσύνθετο εγχείρημα. Το πλήθος των διαθέσιμων μορφολογιών συνδέσεων, παρέχει ευχέρεια επιλογής στον μελετητή της πλέον κατάλληλης λύσης για την κάλυψη των λειτουργικών, οικονομικών, κατασκευαστικών και αισθητικών απαιτήσεων του σχεδιασμού, αλλά παράλληλα εμποδίζει την συστηματική διερεύνηση και την γενικότητα στις μεθοδολογίες εκτίμησης της συμπεριφοράς κάθε περίπτωσης μορφολογίας. Επίσης, η γεωμετρική πολυπλοκότητα που χαρακτηρίζει τους κόμβους δοκού-υποστυλώματος, και κατά συνέπεια ο αυξημένος αριθμός ανεξάρτητων παραμέτρων που επηρεάζει την συμπεριφορά τους, δυσχεραίνει την προσπάθεια αναλυτικής περιγραφής της απόκρισης και επιδρά σε βάρος του βαθμού εποπτείας που μπορεί να επιτευχθεί. Το γεγονός ότι η γεωμετρία είναι τρισδιάστατη επιβαρύνει ακόμα περισσότερο την πολυπλοκότητα στον τομέα αυτόν. Επιπλέον, στην συμπεριφορά των κοχλιωτών κόμβων δοκού-υποστυλώματος, κυρίαρχη παράμετρο συνιστά η ύπαρξη πολλαπλών μη γραμμικοτήτων. Πέραν της μη γραμμικότητας υλικού, λόγω της μεγάλης πλαστιμότητας του χάλυβα, και της μη γραμμικότητας γεωμετρίας, εμφανίζονται επίσης μη γραμμικότητες που προέρχονται από την ασυνέχεια του υλικού, λόγω των πολλαπλών σωμάτων που συμμετέχουν στην σύνδεση και την επαφή μεταξύ των σωμάτων αυτών.

Η εκτίμηση με υπολογιστικά μέσα της στροφικής απόκρισης των κόμβων δοκού-υποστυλώματος αποτελεί ένα αντικείμενο με μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον. Οι διαθέσιμες μεθοδολογίες μπορούν να διακριθούν στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- Απλοποιημένα αναλυτικά προσομοιώματα
- Μηχανικά προσομοιώματα
- Προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων

Από άποψη πολυπλοκότητας, περισσότερο σύνθετα είναι τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, ενώ στο αντίθετο άκρο βρίσκονται τα απλοποιημένα αναλυτικά προσομοιώματα. Μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία ενός τέτοιου τρισδιάστατου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.

2.3.1 Προσδιορισμός της καμπύλης M-φ

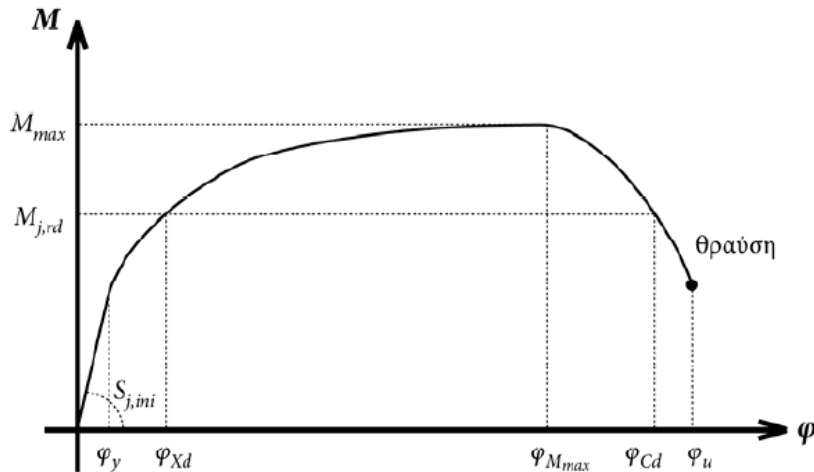
Η στροφική ικανότητα των κόμβων δοκού-υποστυλώματος αποτελεί ένα χαρακτηριστικό της απόκρισης, το οποίο τα τελευταία χρόνια θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμο, για τον σχεδιασμό πλάστιμων πλαισιακών κατασκευών, με πλεονεκτήματα στην σεισμική συμπεριφορά και την αξιοπιστία. Στους κύριους στόχους της διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνεται η δυνατότητα εκτίμησης της στροφικής απόκρισης των κόμβων δοκού-υποστυλώματος.

Η καμπύλη ροπής-στροφής αποτελεί απεικόνιση της σχέσης της ροπής που μεταφέρεται από τον κόμβο σε σχέση με τη στροφή που αποκτά η σύνδεση. Κάθε προσπάθεια να περιγραφεί η καμπύλη ροπής-στροφής με μαθηματικές εκφράσεις, πρέπει να είναι ικανή να αποδώσει την τυπική μορφή ενός αρχικά σχεδόν γραμμικού τμήματος ακολουθούμενου από μία περιοχή βαθμιαίας απομειούμενης κλίσης που καταλήγει τελικά σε ένα σχεδόν οριζόντιο τμήμα. Το αρχικό γραμμικό τμήμα περιγράφει τη σχέση ροπής-στροφής όσο ο κόμβος δοκού-υποστυλώματος παραμένει ακόμα στην ελαστική περιοχή, ενώ ο σχεδόν οριζόντιος κλάδος του διαγράμματος προκύπτει όταν ο κόμβος δοκού-υποστυλώματος έχει πλέον υποστεί εκτεταμένη πλαστικοποίηση.

Στο Σχήμα 2-1 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη ροπής M-στροφής φ ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος. Με φ_y συμβολίζεται η στροφή του κόμβου κατά την εμφάνιση της πρώτης διαρροής. Η στροφή φ_{Xd} αντιστοιχεί στην στροφή του κόμβου, για ροπή ίση με την ροπή αντοχής σχεδιασμού $M_{j,Rd}$. Ο προσδιορισμός της στροφής φ_{Xd} εξαρτάται από την σύμβαση που υιοθετείται, για την θέση του σημείου πλαστικοποίησης στην καμπύλη, ωστόσο μπορεί να θεωρηθεί, ότι ποιοτικά αποτελεί το όριο μεταξύ του αρχικού, σχεδόν γραμμικού κλάδου της καμπύλης, και του κλάδου της πλαστικής περιοχής, όπου η κράτυνση του υλικού είναι ο καθαρικός παράγοντας δυσκαμψίας του κόμβου. Στον Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003), η τιμή της στροφής φ_{Xd} ορίζεται συμβατικά ως εξής:

$$\varphi_{Xd} = \frac{M_{j,Rd}}{S_{j,ini} / \eta}$$

όπου ο συντελεστής η τίθεται ίσος με 3,0 για κόμβους με μετωπική πλάκα.



Σχήμα 2-1 Καμπύλη ροπής-στροφής κόμβου δοκού-υποστυλώματος

Η στροφή του κόμβου, όταν η ροπή που παραλαμβάνει είναι μέγιστη, συμβολίζεται με $\varphi_{M_{max}}$. Μετά το σημείο αυτό της καμπύλης, η θραύση του υλικού ή η εμφάνιση λυγισμού σε κάποια συστατικά μέρη, οδηγεί στον καθοδικό κλάδο της καμπύλης $M-\varphi$, και την πτώση της ροπής που μπορεί να παραλάβει ο κόμβος. Η στροφή φ_{Cd} αντιστοιχεί στο σημείο της καμπύλης $M-\varphi$, όπου η ροπή έχει μειωθεί στην τιμή της ροπής σχεδιασμού $M_{j,rd}$. Η διαθέσιμη πλαστική στροφή του κόμβου, δηλαδή το εύρος στροφής, στο οποίο ο κόμβος μπορεί να παραλαμβάνει την ροπή σχεδιασμού $M_{j,rd}$, είναι:

$$\varphi_{pl} = \varphi_{Cd} - \varphi_{Xd}$$

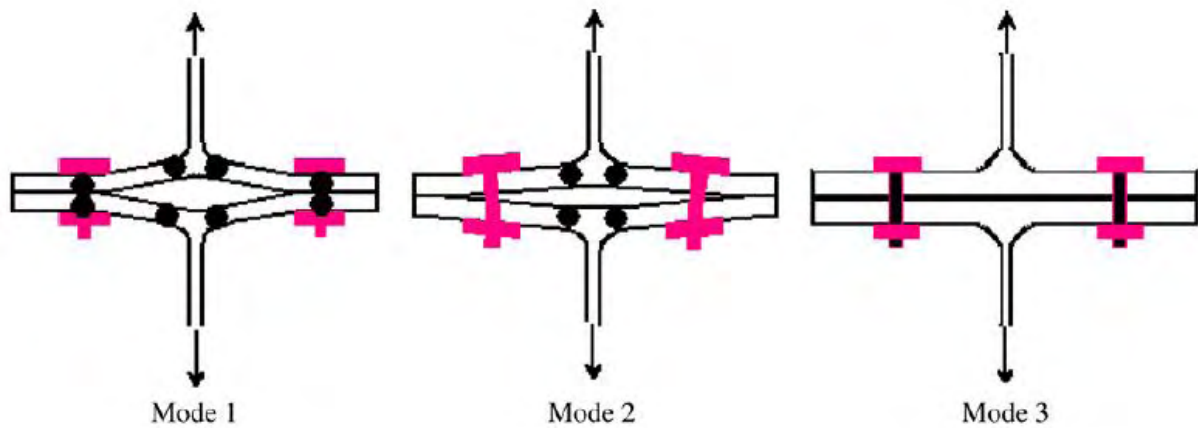
Ο καθοδικός κλάδος της απόκρισης, πέραν της στροφής φ_{Cd} , καταλήγει στην τελική αστοχία του κόμβου, για στροφή φ_u . Η εκτίμηση της στροφής φ_{Cd} και της φ_{pl} είναι χρήσιμη για τον σχεδιασμό της κατασκευής με εφαρμογή πλαστικής ή ελαστικής-ιδεατώς πλαστικής ανάλυσης, καθώς από αυτήν εξαρτάται η δυνατότητα ανακατανομής φορτίου, στην περίπτωση σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων, στους κόμβους στατικά αόριστων κατασκευών. Κόμβοι με μεγάλη πλαστική στροφή φ_{pl} , μπορούν να αξιοποιηθούν ως θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων. Για σχεδιασμό της κατασκευής με εφαρμογή μη γραμμικής ανάλυσης, η εκτίμηση της καμπύλης $M-\varphi$ μέχρι την στροφή $\varphi_{M_{max}}$ είναι απαραίτητη. Ο προσδιορισμός του καθοδικού κλάδου της καμπύλης μπορεί να ενδιαφέρει, αν επιχειρείται υπέρβαση οριακού σημείου της απόκρισης της κατασκευής, ωστόσο σε αυτήν την περίπτωση, απαιτείται η εφαρμογή εξελιγμένων αλγορίθμων μη γραμμικής επίλυσης. Αντίθετα, σε όλες τις περιπτώσεις μη γραμμικής ανάλυσης, όπου ενδιαφέρει ο υπολογισμός της απόκρισης μέχρι το οριακό σημείο, ο προσδιορισμός του καθοδικού κλάδου της καμπύλης $M-\varphi$ του κόμβου, δεν είναι αναγκαίος.

2.4 Απόκριση συνδέσεων βραχέος ταυ-Μηχανισμοί αστοχίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η απόκριση της εφελκόμενης ζώνης κοχλιωτών κόμβων δοκού-υποστυλώματος μπορεί να προσεγγισθεί από εκείνη των ισοδύναμων βραχέων ταυ. Η αστοχία μεμονωμένης σύνδεσης βραχέος ταυ πραγματοποιείται με την πλαστικοποίηση του πέλματος, των κοχλιών ή και των δύο ταυτόχρονα. Πιο συγκεκριμένα μπορούν να εμφανιστούν οι παρακάτω 3 μηχανισμοί αστοχίας:

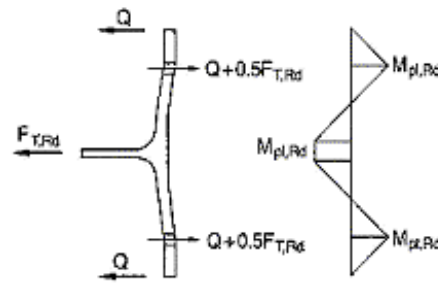
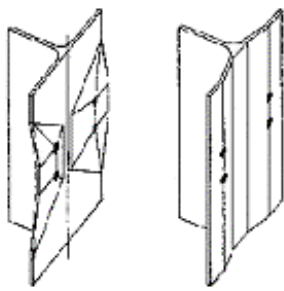
- 1ος μηχανισμός: πλήρης πλαστικοποίηση του πέλματος με τον σχηματισμό τεσσάρων πλαστικών αρθρώσεων, δύο πλησίον της συναρμογής με τον κορμό και δύο στην θέση των κοχλιών.
- 2ος μηχανισμός: πλαστικοποίηση του πέλματος με σχηματισμό δύο πλαστικών αρθρώσεων, πλησίον της συναρμογής με τον κορμό και αστοχία των δύο κοχλιών.
- 3ος μηχανισμός: αστοχία των δύο κοχλιών μόνο, με πλήρη αποκόλληση του πέλματος.

Οι τρεις μηχανισμοί αστοχίας απεικονίζονται στο Σχήμα 2-2



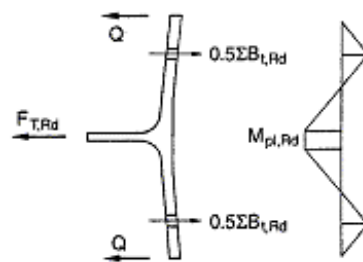
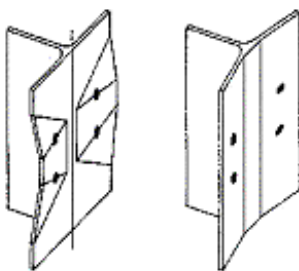
Σχήμα 2-2 Μηχανισμοί κατάρρευσης για την σύνδεση βραχέος ταυ

A. Αστοχία πέλματος βραχέος ταυ



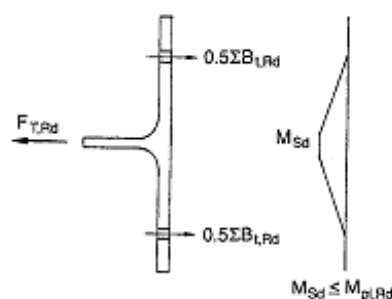
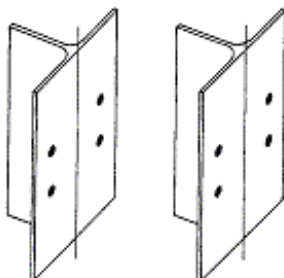
$$F_{T,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,Rd}}{m}$$

B. Αστοχία των κοχλιών ταυτόχρονα με την αστοχία του πέλματος



$$F_{T,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl2,Rd} + n \cdot \Sigma B_{t,Rd}}{m + n}$$

Γ. Αστοχία των κοχλιών



$$F_{T,Rd} = \Sigma B_{t,Rd}$$

2.5 Πειραματική βιβλιογραφία

2.5.1 Γενικά

Το πεδίο της πειραματικής έρευνας μεταλλικών κόμβων είναι αφενός ευρύ, περιλαμβάνοντας πολλαπλές περιπτώσεις μορφολογίας, φόρτισης κλπ., και αφετέρου μεταβαλλόμενο με την εξέλιξη των τεχνολογικών δυνατοτήτων. Η ταξινόμηση των διαφόρων πειραματικών αποτελεσμάτων μεταλλικών κόμβων σε κατηγορίες, ώστε να είναι περισσότερο ευχερής η αναφορά τους, μπορεί να διευκολυνθεί με την διατύπωση ορισμένων βασικών κριτηρίων. Αυτά τα κριτήρια περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

2.5.2 Ταξινόμηση με βάση τα συνδεδεμένα μέλη

Οι παραλλαγές μεταλλικών κόμβων, αναφορικά με τα μέλη που συνδέουν, είναι πολυάριθμες, και μάλλον αδύνατον να κατηγοριοποιηθούν αποτελεσματικά. Στις κατασκευές πλαισίων οι πλέον κοινές περιπτώσεις είναι οι εξής:

- Κόμβοι δοκού-υποστυλώματος με διατομές I
- Κόμβοι δοκού-δοκού με διατομές I
- Βάσεις υποστυλωμάτων
- Κόμβοι μεταξύ κλειστών διατομών

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία το ενδιαφέρον περιορίζεται στην περίπτωση κόμβων δοκού-υποστυλώματος, με διατομές συνδεδεμένων μελών μορφής διπλού ταυ. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις κόμβων δοκού-δοκού, όπως για παράδειγμα κόμβους με μετωπική πλάκα, η μορφολογία της σύνδεσης δεν διαφέρει από εκείνη δοκού-υποστυλώματος.

2.5.3 Ταξινόμηση με βάση το υλικό

Με βάση το υλικό, οι μεταλλικοί κόμβοι μπορούν να διακριθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Κόμβοι χάλυβα
- Σύμμικτοι κόμβοι χάλυβα-σκυροδέματος
- Κόμβοι αλουμινίου

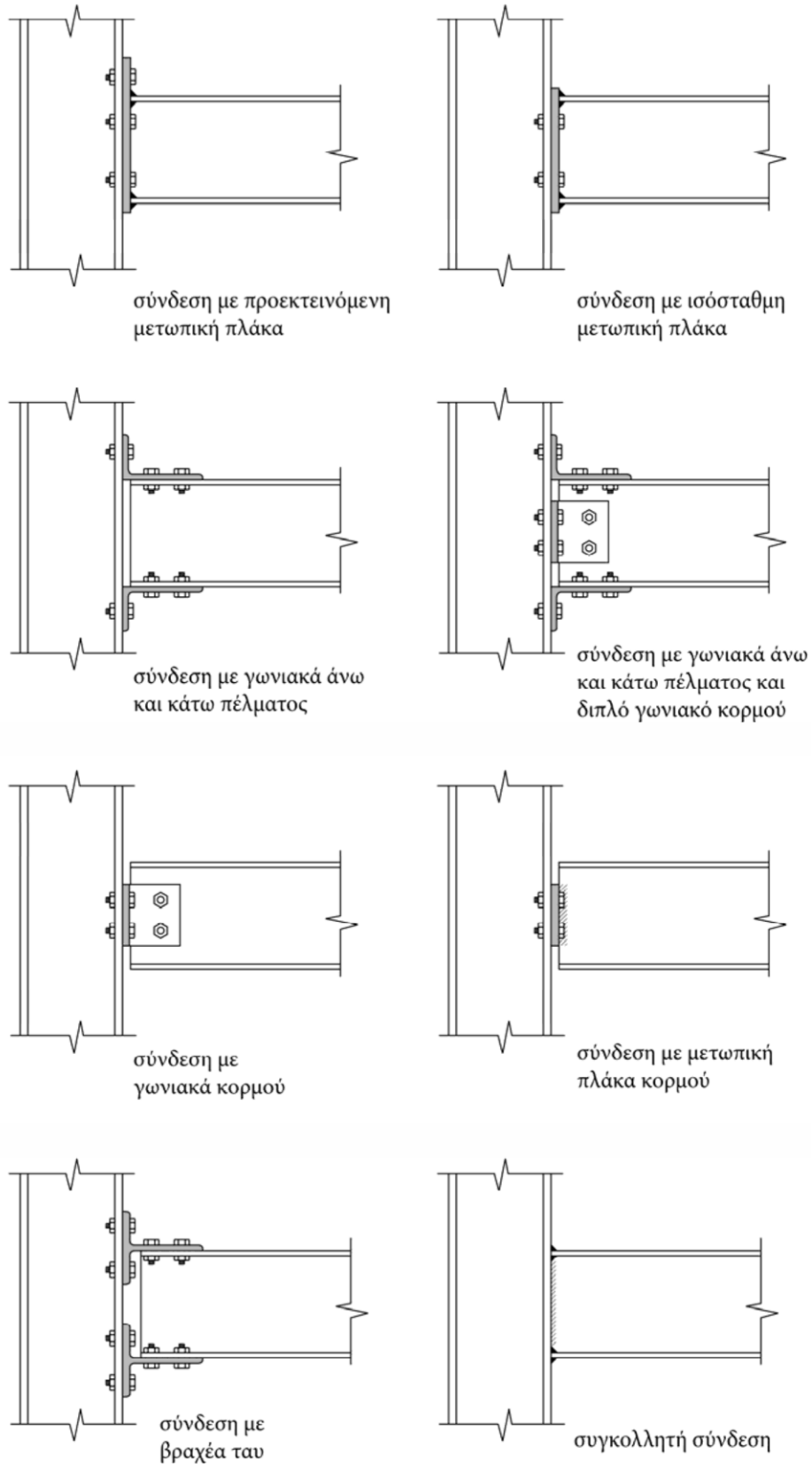
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διερευνώνται αποκλειστικά οι κόμβοι χάλυβα.

2.5.4 Ταξινόμηση με βάση την μορφολογία της σύνδεσης

Περιορίζοντας το ενδιαφέρον στους κόμβους χάλυβα, δοκού-υποστυλώματος, με διατομές διπλού ταυ, οι βασικές μορφολογίες συνδέσεων που απαντώνται στις σύγχρονες μεταλλικές κατασκευές, και οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κριτήριο ταξινόμησης των κόμβων είναι οι εξής:

- Συνδέσεις με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα (extended end-plate)
- Συνδέσεις με ισόσταθμη μετωπική πλάκα (flush end-plate)
- Συνδέσεις με γωνιακά άνω και κάτω πέλματος (top/seat angles)
- Συνδέσεις με γωνιακά άνω και κάτω πέλματος και διπλό γωνιακό κορμού (top/seat angles and double web angle)
- Συνδέσεις με μονό ή διπλό γωνιακό κορμού (single/double web angle)
- Συνδέσεις με μετωπική πλάκα κορμού (header plate)
- Συνδέσεις με βραχέα ταυ (T-stub)
- Συγκολλητές συνδέσεις (welded)

Στο Σχήμα 2-3 φαίνονται οι διάφορες μορφολογίες συνδέσεων, που αναφέρονται στην παράγραφο αυτήν.



Σχήμα 2-3 Μορφολογίες συνδέσεων κόμβων δοκού-υποστύλωματος

Στις παραπάνω κατηγορίες δεν αναφέρονται οι διάφορες ενισχύσεις, που μπορούν να εφαρμοσθούν στην σύνδεση, όπως για παράδειγμα λοξά τεμάχια ταυ στο κάτω ή και στα δύο πέλματα της δοκού, νευρώσεις, ενισχυτικά ελάσματα υποστυλώματος κλπ. Επίσης, δεν περιλαμβάνονται αρκετές κατηγορίες υβριδικής χρήσης συγκόλλησης και κοχλίωσης, όπως για παράδειγμα υβριδικές συνδέσεις με γωνιακά κορμού, κοχλιωμένα στην δοκό και συγκολλημένα στο υποστύλωμα. Με την προσθήκη αυτών των διαμορφώσεων, οι διαθέσιμες κατηγορίες πολλαπλασιάζονται, γεγονός που καταδεικνύει την μεγάλη ποικιλομορφία που χαρακτηρίζει τους κόμβους δοκού-υποστυλώματος. Επιπλέον, οι παραπάνω κατηγορίες καλύπτουν τις συνήθεις πλαισιακές κατασκευές, και όχι περιπτώσεις στις οποίες ειδικές απαιτήσεις μπορεί να επιβάλλουν πρωτότυπο σχεδιασμό των κόμβων.

Οι κόμβοι με μονό ή διπλό γωνιακό κορμού καθώς και οι κόμβοι με μετωπική πλάκα κορμού αποτελούν περιπτώσεις κόμβων μεταφοράς τέμνουσας μόνο, και συνεπώς εφαρμόζονται σε περιπτώσεις, όπου από τον σχεδιασμό του φορέα απαιτείται απλή έδραση της δοκού. Όλες οι άλλες κατηγορίες αντίθετα, είναι ικανές να παραλάβουν ροπή, και με εξαίρεση τις συγκολλητές συνδέσεις, συνιστούν το κύριο αντικείμενο έρευνας της διατριβής.

2.5.5 Ταξινόμηση με βάση την φόρτιση

Στην περίπτωση κόμβων παραλαβής ροπής, εμφανίζονται οι ακόλουθες μορφές κυρίαρχης φόρτισης της δοκού, οι οποίες μεταβιβάζονται στον κόμβο:

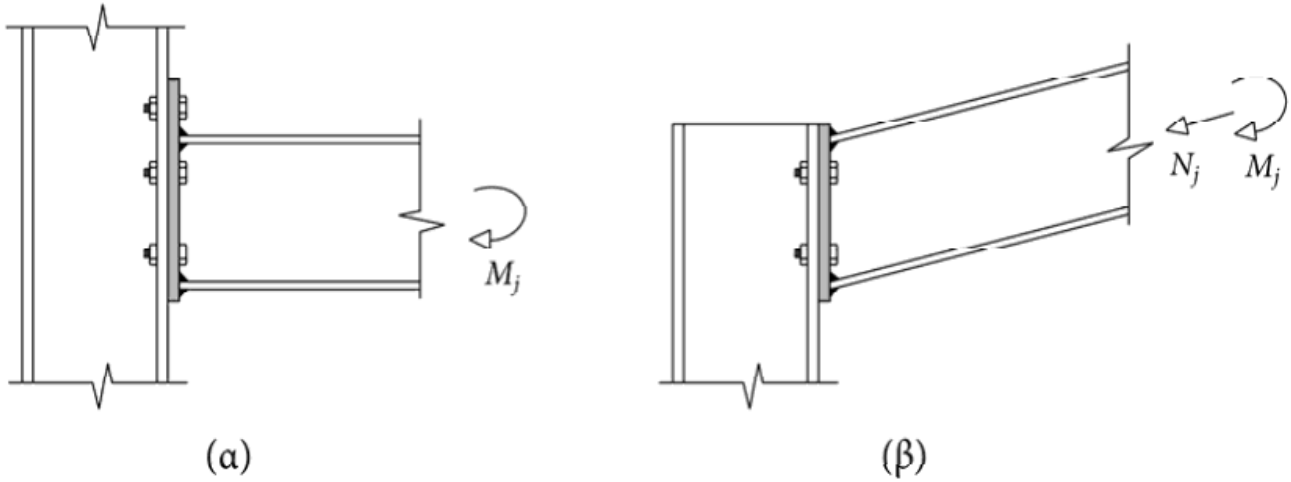
- Κόμβοι με κυρίαρχη κάμψη της δοκού
- Κόμβοι με ταυτόχρονη κάμψη και αξονική δύναμη στην δοκό

Στην πρώτη περίπτωση, η αξονική δύναμη της δοκού είναι μικρή ή ανύπαρκτη. Το όριο για την αξονική δύναμη που θέτει ο Ευρωκώδικας 3, ώστε η επίδραση της να θεωρηθεί μικρή και πρακτικά αμελητέα, ήταν αρχικά 10% (CEN 1997) της αξονικής αντοχής της δοκού, και στην νεότερη έκδοση αναθεωρήθηκε σε 5% (CEN 2003). Το όριο 5% προκύπτει πάντως από εμπειρικές παρατηρήσεις, και όχι βάσει κάποιου θεωρητικά θεμελιωμένου υπόβαθρου. Για περιπτώσεις μεγαλύτερης αξονικής δύναμης, δεν παρέχονται οδηγίες σχεδιασμού, παρά μόνο το ακόλουθο μακροσκοπικό και συντηρητικό κριτήριο:

$$\frac{M_j}{M_{j,rd}} + \frac{N_j}{N_{j,rd}} \leq 1$$

όπου M_j , N_j η δρώσα ροπή και αξονική στον κόμβο αντίστοιχα και $M_{j,rd}$, $N_{j,rd}$ οι αντοχές σχεδιασμού του κόμβου, αποκλειστικά σε ροπή και αξονική δύναμη αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζεται μία συνήθης περίπτωση κόμβου δοκού-υποστυλώματος, όπου εμφανίζεται αλληλεπίδραση καμπτικής ροπής με αξονική δύναμη στον κόμβο. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η αλληλεπίδραση ροπής-αξονικής δεν αποτελεί αντικείμενο έρευνας.



Σχήμα 2-4 Κόμβοι δοκού-υποστυλώματος με (β) ή χωρίς (α) αξονική δύναμη στην δοκό

2.5.6 Ταξινόμηση με βάση την ιστορία της φόρτισης

Η ταξινόμηση των πειραματικών δοκιμών κόμβων, με βάση την ιστορία της φόρτισης μπορεί να γίνει στις ακόλουθες τρεις κατηγορίες:

- Μονοτονική ψευδό-στατική φόρτιση
- Ανακυκλιζόμενη ψευδό-στατική φόρτιση
- Σεισμική φόρτιση

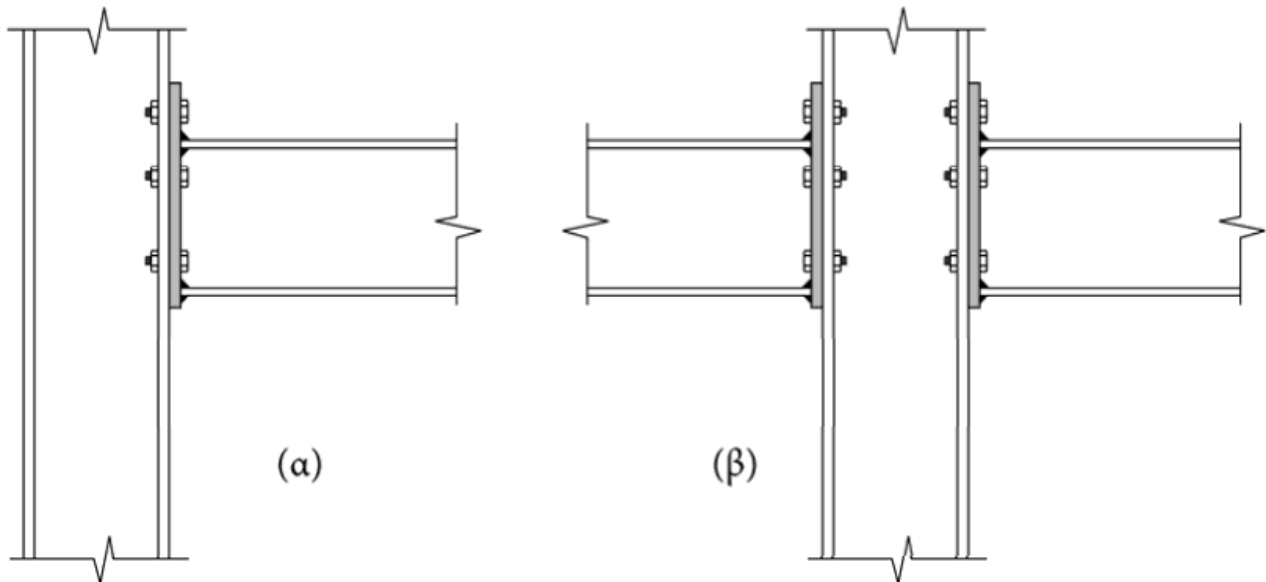
Η περίπτωση μονοτονικής φόρτισης θεωρείται η πλέον απλή στην προετοιμασία και εκτέλεση. Αποτελεί συνήθη πρακτική, στο αρχικό στάδιο της πειραματικής δοκιμής, η φόρτιση να επιβάλλεται μέχρι ενός επιπέδου της ελαστικής περιοχής της απόκρισης, και στην συνέχεια να ακολουθεί πλήρης αποφόρτιση. Με αυτόν τον αρχικό κύκλο εκδηλώνονται διάφορες μικρό-μετακινήσεις μεταξύ των συνδεδεμένων μελών, οι οποίες οφείλονται σε κατασκευαστικές ατέλειες, και η επίδραση τους στην συμπεριφορά του κόμβου είναι ανελαστική και σε μεγάλο βαθμό τυχηματική. Μετά τον αρχικό κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης, ακολουθεί η τελική φάση επιβολής της φόρτισης. Σε προκαθορισμένα χρονικά σημεία, η διαδικασία επιβολής μπορεί να διακόπτεται για μερικά λεπτά, έτσι ώστε να εκδηλώνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις του υλικού σε συνθήκες ηρεμίας.

2.5.7 Ταξινόμηση με βάση την θέση

Με κριτήριο την θέση, διακρίνονται δύο κατηγορίες κόμβων δοκού-υποστυλώματος:

- Εξωτερικοί κόμβοι
- Εσωτερικοί κόμβοι

Στην πρώτη κατηγορία αντιστοιχούν κόμβοι εξωτερικών υποστυλωμάτων, όπου πραγματοποιείται σύνδεση δοκού μόνο από την μία πλευρά του υποστυλώματος. Αντίθετα, στην δεύτερη κατηγορία αντιστοιχούν κόμβοι εσωτερικών υποστυλωμάτων, με συνδεόμενες δοκούς και στις δύο πλευρές. Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα συμμετρικής ή αντισυμμετρικής φόρτισης των δύο εκατέρωθεν κόμβων. Στο Σχήμα 2-5 παρουσιάζεται από μία περίπτωση εξωτερικού και εσωτερικού κόμβου. Στην παρούσα διατριβή ενδιαφέρουν και οι δύο περιπτώσεις.



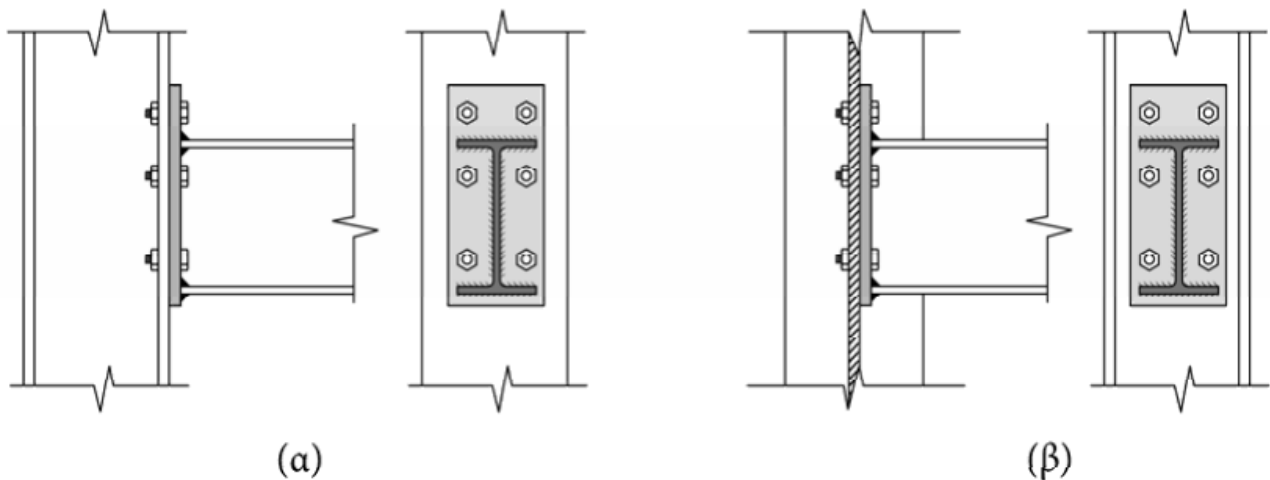
Σχήμα 2-5 Διάταξη εξωτερικού κόμβου (α) και εσωτερικού κόμβου (β)

2.5.8 Ταξινόμηση με βάση τον άξονα

Στους κόμβους δοκού-υποστυλώματος, με διατομές συνδεόμενων μελών μορφής διπλού ταυ, διακρίνονται οι ακόλουθες δύο κατηγορίες, σε σχέση με τον άξονα σύνδεσης της δοκού στο υποστύλωμα:

- Κόμβοι με σύνδεση δοκού στον κύριο άξονα του υποστυλώματος
- Κόμβοι με σύνδεση δοκού στον ασθενή άξονα του υποστυλώματος

Στο Σχήμα 2-6 που ακολουθεί, φαίνονται οι δύο διαφορετικές περιπτώσεις διάταξης του κόμβου, σε σχέση με τον άξονα του υποστυλώματος. Στην διατριβή ενδιαφέρει η περίπτωση κόμβων στον κύριο άξονα.



Σχήμα 2-6 Κόμβοι δοκού-υποστυλώματος στον ισχυρό (α) και ασθενή (β) άξονα

3 Επιλογή πειραματικών δεδομένων-Δημιουργία προσομοιωμάτων

3.1 Κριτήρια επιλογής πειραματικών δεδομένων

Από τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, είναι απαραίτητη μια διαδικασία επιλογής των πλέον πρόσφορων, με τα οποία εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της σύγκρισης με τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων. Τα κριτήρια, τα οποία είναι επιθυμητό να πληρούν τα πειραματικά δεδομένα, συνοψίζονται στις ακόλουθες βασικές αρχές:

- Πληρότητα ιδιοτήτων υλικών
- Πληρότητα γεωμετρικών ιδιοτήτων και πειραματικής διάταξης
- Πληρότητα αποτελεσμάτων

Σε ότι αφορά τις ιδιότητες υλικών, είναι επιθυμητό να παρέχονται οι νόμοι τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων, από δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού, για όλα τα μέλη της σύνδεσης και για τους κοχλίες. Ένα ακόμη κριτήριο για την επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων πειραματικών δοκιμών, είναι η πληρότητα στην περιγραφή των γεωμετρικών παραμέτρων και της πειραματικής διάταξης. Κατά κανόνα, οι συγκεκριμένες πληροφορίες περιγράφονται επαρκώς σε κάθε πειραματική δημοσίευση. Σε ότι αφορά την πληρότητα των αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητο να δημοσιεύεται η πλήρης καμπύλη ροπής-στροφής του κόμβου. Χρήσιμο είναι επίσης, να περιγράφεται η αιτία αστοχίας του κόμβου καθώς και ο τρόπος υπολογισμού των μεγεθών της ροπής και της στροφής από τις μετρήσεις των οργάνων.

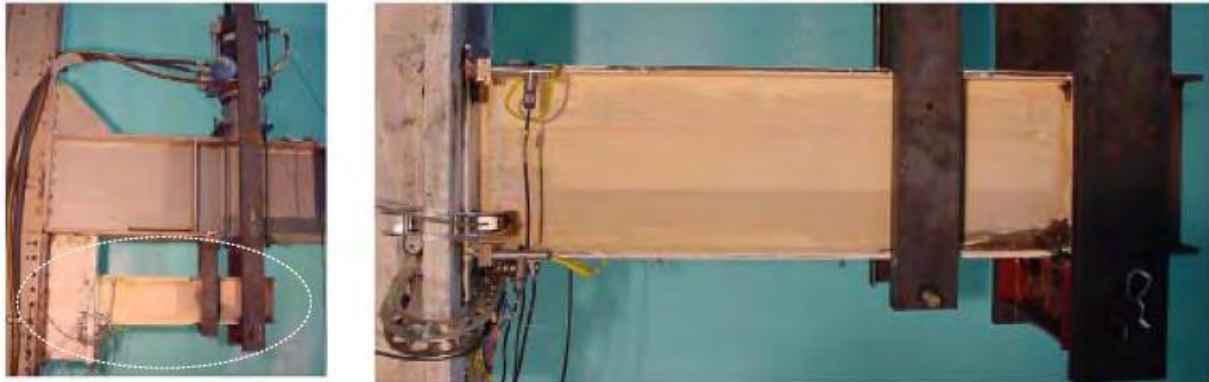
Βάσει των παραπάνω κριτηρίων, έγινε η επιλογή της πειραματικής δημοσίευσης των Coelho et al. (2004β), που αφορούν συνδέσεις με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφονται με λεπτομέρεια οι πειραματικές δοκιμές που επιλέχθηκαν.

3.2 Πειραματικές δοκιμές Coelho et al. (2004β)

Το 2004 η Coelho πραγματοποίησε 8 πειραματικές δοκιμές κόμβων δοκού-υποστυλώματος, με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα, υπό μονοτονική φόρτιση, στα πλαίσια εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής της. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δημοσιεύθηκαν έπειτα σε διεθνές περιοδικό (Coelho et al. 2004β). Τόσο η διατριβή όσο και η δημοσίευση είναι διαθέσιμες.

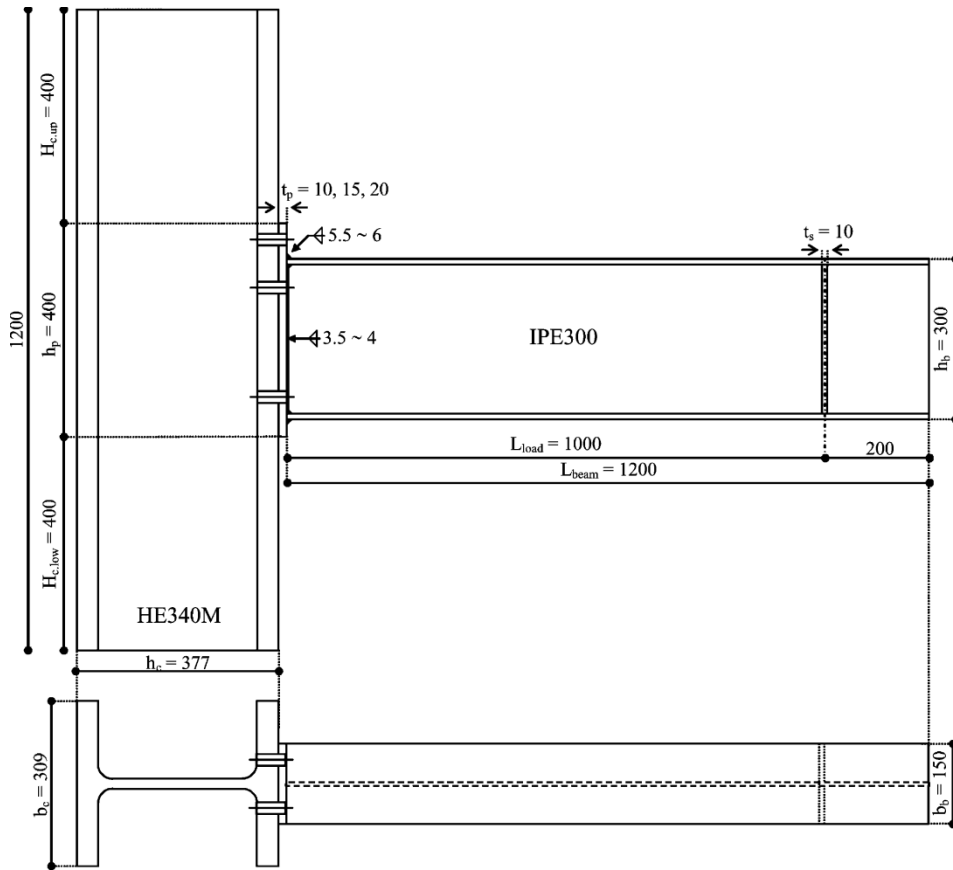
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στις φωτογραφίες του σχήματος Σχήμα 3-1. Πρόκειται για μονόπλευρη διαμόρφωση κόμβου, με μία δοκό, η οποία συνδέεται μέσω τριών σειρών κοχλίωσης σε ισχυρό υποστύλωμα, κοχλιωμένο επί τοίχου αντίδρασης (reaction wall). Η φόρτιση εφαρμόζεται στο άκρο της δοκού, μέσω ειδικής κατασκευής και με έλεγχο των επιβαλλόμενων μετακινήσεων. Η επιβολή της φόρτισης γίνεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση επιβάλλεται φορτίο μέχρι η ροπή στον κόμβο να φτάσει την τιμή $\frac{2}{3} M_{j,rd}$, όπου $M_{j,rd}$ η πλαστική αντοχή σχεδιασμού του κόμβου, κατά τον Ευρωκώδικα 3. Στην συνέχεια, ακολουθεί πλήρης αποφόρτιση. Στην δεύτερη φάση επιβάλλεται φορτίο μέχρι

την θραύση, με ενδιάμεσες παύσεις τριών λεπτών, ώστε να εκδηλώνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις υπό στατικές συνθήκες. Η πλευρική εκτροπή της δοκού παρεμποδίζεται μέσω πλευρικών οδηγών.

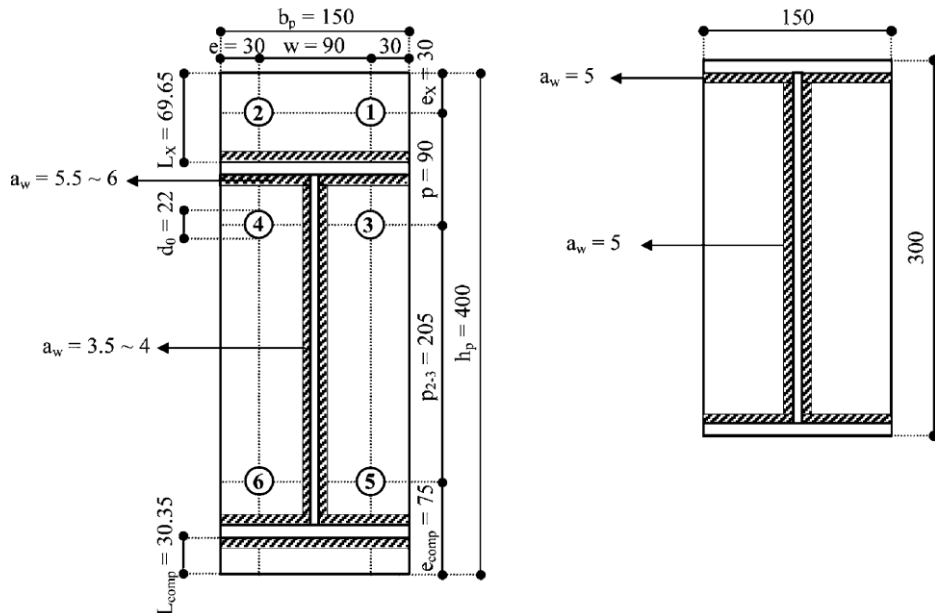


Σχήμα 3-1 Πειραματική διάταξη από Coelho et al. (2004β)

Οι δοκιμές αφορούν 4 διαφορετικές διαμορφώσεις κόμβων. Για κάθε μία διαμόρφωση πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές. Οι γεωμετρικές ιδιότητες της πειραματικής διάταξης παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-2. Σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε πρότυπη διατομή δοκού IPE300 και υποστύλωματος HE340M. Σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν κοχλίες M20, χωρίς προένταση, με σπείρωμα σε όλο το μήκος του κορμού. Οι παράμετροι που διερευνηθήκαν με τις πειραματικές δοκιμές είναι το πάχος της μετωπικής πλάκας και η ποιότητα του υλικού της. Στο Σχήμα 3-2 φαίνονται οι γεωμετρικές λεπτομέρειες της σύνδεσης προεκτεινόμενης μετωπικής πλάκας, οι οποίες παραμένουν κοινές για όλες τις δοκιμές. Οι διάφορες διαστάσεις, που εμφανίζονται στα σχήματα Σχήμα 3-2 και Σχήμα 3-3, αντιστοιχούν στις ονομαστικές τιμές των διαστάσεων και όχι στις πραγματικές. Στις πρωτότυπες δημοσιεύσεις, αναφέρονται για κάθε δοκιμή οι πραγματικές τιμές, που προέκυψαν από επι τόπου μετρήσεις όλων των γεωμετρικών μεγεθών.



Σχήμα 3-2 Γεωμετρικές ιδιότητες πειραματικής διάταξης των Coelho et al (2004β)
(διαστάσεις σε mm)



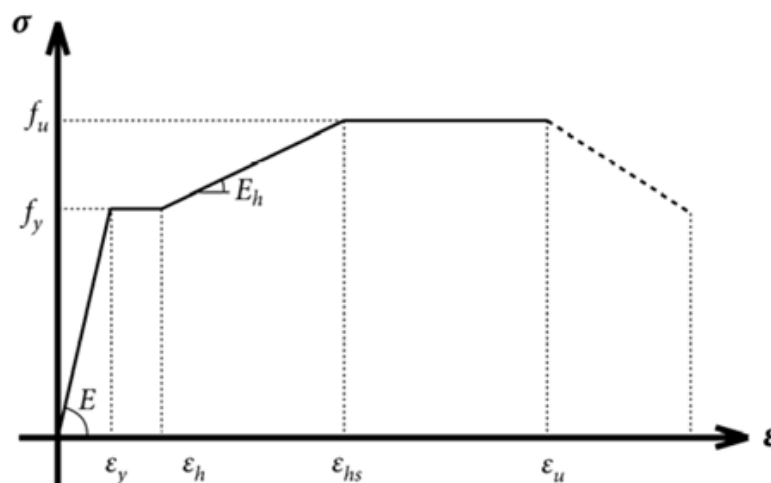
Σχήμα 3-3 Γεωμετρικές ιδιότητες σύνδεσης προεκτεινόμενης μετωπικής πλάκας
των δοκιμών των Coelho et al (2004β), (διαστάσεις σε mm)

Στον πίνακα 3-1 φαίνονται οι ονομαστικές και οι πραγματικές τιμές του πάχους της μετωπικής πλάκας, σε κάθε πειραματική δοκιμή. Η ονοματολογία των δοκιμών έχει την μορφή FSxy, όπου ο όρος x παίρνει τιμές από 1 έως 3, και υποδηλώνει τις 3 διαφορετικές διαμορφώσεις κόμβων, ενώ ο όρος y παίρνει τιμές a ή b, και χαρακτηρίζει τις δύο δοκιμές που εκτελέστηκαν για κάθε διαμόρφωση.

Πίνακας 3-1 Πάχη μετωπικής πλάκας πειραματικών δοκιμών

	Ονομαστική Τιμή (mm)	Πραγματική Τιμή (mm)
FS1a	10.00	10.40
FS1b	10.00	10.40
FS2a	15.00	15.01
FS2b	15.00	15.01
FS3a	20.00	20.02
FS3b	20.00	20.02

Οι νόμοι των υλικών των διαφόρων μελών που συμμετέχουν στην σύνδεση προέκυψαν με δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού. Δυστυχώς όμως, τα πρωτογενή αποτελέσματα των δοκιμών αυτών δεν παρέχονται με την μορφή γραφικών παραστάσεων, αλλά αντίθετα δίνονται χαρακτηριστικές παράμετροι της σχέσης τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων του υλικού. Για την δοκό και τις μετωπικές πλάκες, οι χαρακτηριστικές παράμετροι που αναφέρονται, αντιστοιχούν στον πολυγραμμικό νόμο του σχήματος Σχήμα 3-4.



Σχήμα 3-4 . Εξιδανίκευση νόμου υλικού για δοκό και μετωπική πλάκα

Στον πίνακα 3-2 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας E , του μέτρου κράτυνσης E_n , του ορίου διαρροής f_y , του ορίου θραύσης f_u και της μέγιστης ανηγμένης παραμόρφωσης ϵ_u . Η τάση στο σημείο μέγιστης ανηγμένης παραμόρφωσης δεν δίνεται. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη του νόμου του σχήματος 3-4 μπορούν να υπολογισθούν από τα προαναφερόμενα μεγέθη.

Σημειώνεται ότι ο νόμος του σχήματος 3-4, και οι τιμές του πίνακα 3-2, αντιστοιχούν σε συμβατικές τάσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις. Επειδή σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τμήματα της ίδιας δοκού, ο νόμος υλικού για την δοκό δεν διαφοροποιείται σε κάθε δοκιμή. Επίσης, όπως φαίνεται στον πίνακα 3-2, για την δοκό έχουν γίνει δοκιμές υλικού, τόσο για τα πέλαμα, όσο και για τον κορμό, έτσι ώστε να εξακριβωθεί η επίδραση της παραμένουσας έντασης, λόγω της θερμικής κατεργασίας, στις τελικές μηχανικές ιδιότητες. Για το υποστύλωμα δεν πραγματοποιήθηκε δοκιμή του υλικού, καθώς λόγω της ισχυρής διατομής του συμπεριφέρεται ελαστικά.

Πίνακας 3-2 Ιδιότητες νόμου υλικού μετωπικής πλάκας και δοκού των πειραματικών δοκιμών

	Μετωπική πλάκα			Δοκός	
	FS1	FS2	FS3	Πέλαμα	Κορμός
Κατηγορία	S355	S355	S355	S235	S235
E (Mpa)	209900	208500	208600	209500	208300
E_n (Mpa)	2264	2901	2771	1933	1856
f_y (Mpa)	340.1	342.8	342.6	316.2	299.1
f_u (Mpa)	480.5	504.9	502.6	462.3	446.3
ϵ_u	0.224	0.198	0.196	0.235	0.235

Για το υλικό των κοχλιών πραγματοποιήθηκαν επίσης δοκιμές μονοαξονικού εφελκυσμού. Η κατηγορία του υλικού των κοχλιών είναι 8.8. Όπως αναφέρουν οι συγγραφείς, χρησιμοποίησαν κοχλίες από διαφορετικό κατασκευαστή για τη δοκιμή FS3b, εξαιτίας μιας διαταραχής στην εξέλιξη της φόρτισης στην πλαστική περιοχή. Η διαταραχή αυτή αποδίδεται από τους συγγραφείς στους κοχλίες και για το λόγο αυτό χρησιμοποίησαν διαφορετική παρτίδα κοχλιών στις δοκιμές που εκτελέστηκαν μετά από αυτή (δοκιμή FS3b).

Και σε αυτήν την περίπτωση, δεν παρέχονται γραφικές παραστάσεις των σχέσεων τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων, αλλά δίνονται οι τιμές χαρακτηριστικών μεγεθών, με βάση διγραμμική εξιδανίκευση. Οι τιμές των μεγεθών αυτών, για τις δύο ομάδες, κοχλιών δίνονται στον πίνακα 3-3.

Πίνακας 3-3 Ιδιότητες νόμου υλικού κοχλιών των πειραματικών δοκιμών

	Δοκιμές FS1a, FS1b,FS2a,FS2b,FS3a	Δοκιμή FS3b
E (Mpa)	223166	222982
f_y (Mpa)	857.33	854.31
f_u (Mpa)	913.78	916.81
ϵ_u	0.184	0.156

3.3 Επιλογή δεδομένων για τη δημιουργία των προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία δημιουργήθηκαν 3 τρισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων, 1 για κάθε πάχος της προεκτεινόμενης μετωπικής πλάκας που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές δοκιμές. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν δοκοί IPE300, υποστυλώματα HEM340, κοχλίες M20 και μετωπικές πλάκες πάχους 10, 15 και 20 χιλιοστών. Δημιουργήθηκαν 3 διαφορετικές διαμορφώσεις κόμβων που αντιστοιχούν στις πειραματικές δοκιμές FS1, FS2 και FS3. Η γεωμετρία της πειραματικής διάταξης αποδόθηκε πιστά από τα προσομοιώματα, ενώ στα πεπερασμένα στοιχεία των δοκών, των υποστυλωμάτων, των μετωπικών πλακών και των κοχλιών που προσομοιώθηκαν, δόθηκαν οι ίδιες ιδιότητες υλικών με τις ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές δοκιμές. Η προσομοίωση των συγκολλήσεων έγινε με τη βοήθεια της εντολής GLUE, που υπάρχει ως δυνατότητα στο πρόγραμμα MARC. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι ιδιότητες του νόμου του υλικού των μετωπικών πλακών, των δοκών, των υποστυλωμάτων και των κοχλιών που προσομοιώθηκαν.

Πίνακας 3-4 Ιδιότητες νόμου υλικού μετωπικής πλάκας και δοκού των προσομοιωμάτων

	Μετωπική πλάκα			Δοκός	
	1ο προσομοίωμα	2ο προσομοίωμα	3ο προσομοίωμα	Πέλμα	Κορμός
Κατηγορία	S355	S355	S355	S235	S235
E (Mpa)	209900	208500	208600	209500	208300
E _h (Mpa)	2264	2901	2771	1933	1856
f _y (Mpa)	340.1	342.8	342.6	316.2	299.1
f _u (Mpa)	480.5	504.9	502.6	462.3	446.3
ε _u	0.224	0.198	0.196	0.235	0.235

Πίνακας 3-5 Ιδιότητες νόμου υλικού κοχλιών προσομοιωμάτων

	1 ^ο και 2 ^ο προσομοίωμα	3 ^ο προσομοίωμα
E (Mpa)	223166	222982
f _y (Mpa)	857.33	854.31
f _u (Mpa)	913.78	916.81
ε _u	0.184	0.156

3.4 Λογισμικό FEM και μετεπεξεργασία

Για να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση των πειραματικών δοκιμών, απαιτούνται πολύπλοκες και απαιτητικές αναλύσεις, για τις οποίες χρειάζονται ακριβή αποτελέσματα εντατικών μεγεθών και παραμορφώσεων. Ο πλέον ορθός τρόπος για να πραγματοποιηθεί αυτό είναι η χρήση ενός καλού προγράμματος ανάλυσης με βάση πεπερασμένα στοιχεία. Η τεχνική των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί ένα από τα πλέον κατάλληλα εργαλεία παραμετρικής έρευνας. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η δυνατότητα προσομοίωσης πολύπλοκων γεωμετρικών και αντιμετώπισης των πολλαπλών μη γραμμικοτήτων που συνοδεύουν την απόκριση των κόμβων. Η χρησιμότητα της μεθόδου αναδεικνύεται περισσότερο στην ερευνητική διερεύνηση της συμπεριφοράς των κόμβων και ως εναλλακτική ή συμπληρωματική επιλογή της πειραματικής έρευνας, όπως συμβαίνει και στην παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς προυποθέτει εξειδικευμένο λογισμικό, είναι χρονοβόρα και δαπανηρή σε ανθρώπινους και υπολογιστικούς πόρους γεγονός που την καθιστά δύσχρηστη σε καθημερινές εφαρμογές σχεδιασμού και ανάλυσης κόμβων.. Λόγω της φύσεως της συγκεκριμένης έρευνας που απαιτεί πλήθος δοκιμών και τη δημιουργία τριών διαφορετικών προσομοιωμάτων, καταλληλότερο κρίθηκε το πρόγραμμα προσομοίωσης και ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία, MARC. Στη συνέχεια η ανάλυση των αποτελεσμάτων έγινε με τη βοήθεια λογιστικών φύλλων EXCEL όπου και δημιουργήθηκαν κατάλληλα διαγράμματα αλλά και πίνακες για να είναι ευφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων για τις διάφορες αναλύσεις.

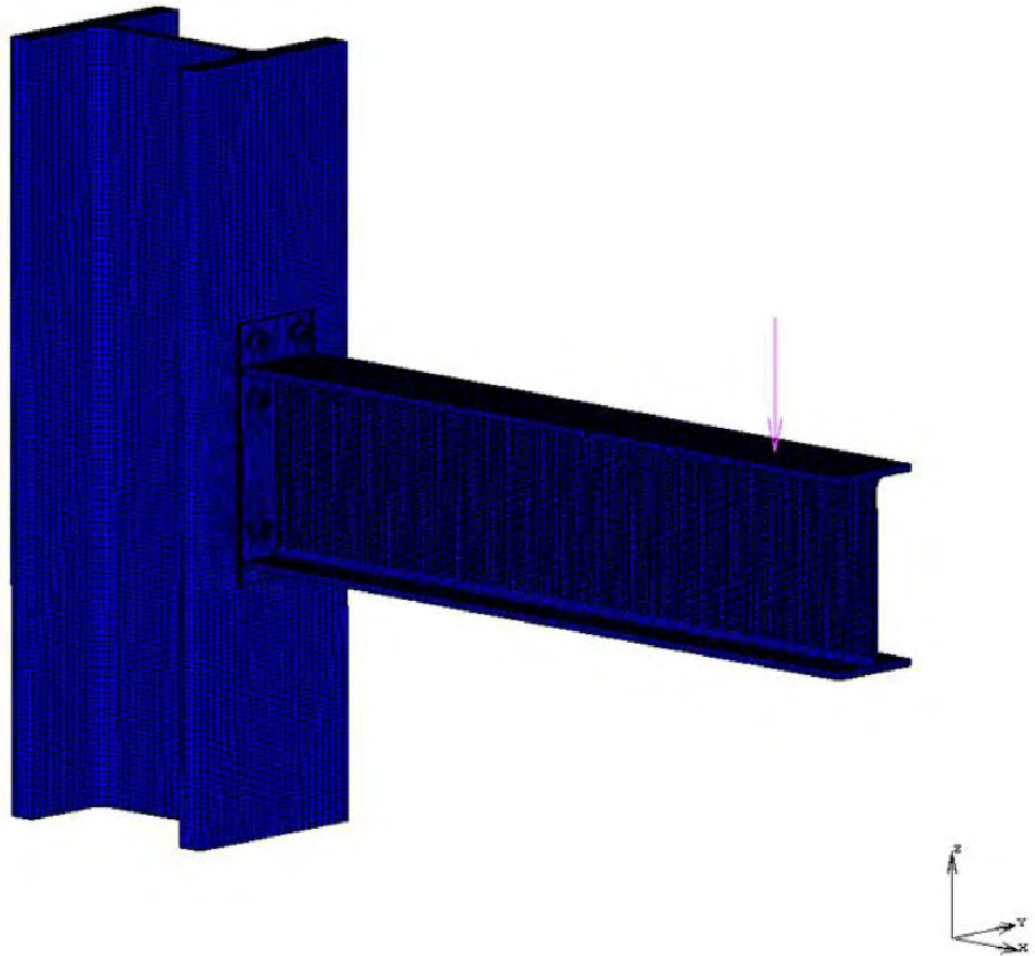
3.5 Δημιουργία προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας δημιουργήθηκαν 3 τρισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων. Προσομοιώθηκαν κόμβοι δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 10, 15 και 20 χιλιοστών. Για τη διακριτοποίηση όλων των μερών της σύνδεσης, χρησιμοποιήθηκαν ισοπαραμετρικά τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία 6 και 8 κόμβων. Για τους κοχλίες χρησιμοποιήθηκε διγραμμικός νόμος υλικού με κράτυνση στην πλαστική περιοχή, ενώ για τη μετωπική πλάκα και τη δοκό χρησιμοποιήθηκε ο πολυγραμμικός νόμος υλικού που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.2. Το υποστύλωμα θεωρήθηκε ότι συμπεριφέρεται ελαστικά λόγω ισχυρής διατομής. Στο πέλμα του υποστυλώματος που δεν έρχεται σε επαφή με τη σύνδεση, εφαρμόστηκαν συνοριακές συνθήκες πλήρους πάκτωσης, δεσμεύτηκαν δηλαδή όλοι οι βαθμοί ελευθερίας των κόμβων των πεπερασμένων στοιχείων από τα οποία αποτελείται. Κοντά στην περιοχή της σύνδεσης, όπου υπάρχει απαίτηση για όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση, χρησιμοποιήθηκε αρκετά πυκνή διακριτοποίηση με αποτέλεσμα τα τελικά μοντέλα να αποτελούνται από πολύ μεγάλο αριθμό πεπερασμένων στοιχείων. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε πολύπλοκες και χρονοβόρες αναλύσεις. Για εξοικονόμηση χρόνου, αποφασίστηκε η αξιοποίηση της συμμετρίας των προσομοιωμάτων. Πιο συγκεκριμένα, τα αρχικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν “κόπηκαν” κατά το επίπεδο συμμετρίας τους (επίπεδο xz) και στη θέση της τομής εφαρμόστηκαν συνθήκες συμμετρίας. Τέλος, η φόρτιση των προσομοιωμάτων έγινε με τη μορφή επιβαλλόμενης μετακίνησης σε απόσταση

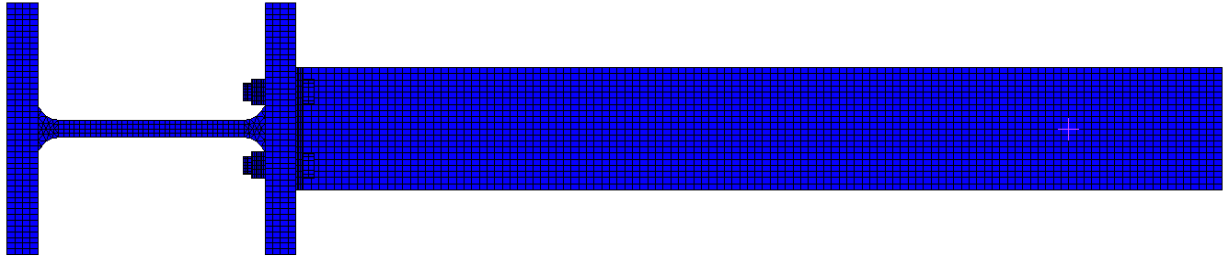
1000mm από τη σύνδεση και από τις αναλύσεις προέκυψαν οι καμπύλες ροπής-στροφής της σύνδεσης. Οι εν λόγω καμπύλες, δημιουργήθηκαν μετά από επεξεργασία των εξαγόμενων από το πρόγραμμα αποτελεσμάτων, καθώς δεν μπορούν να παραχθούν απευθείας από το MARC. Η επιβαλλόμενη μετακίνηση ασκήθηκε σταδιακά, σε έναν κόμβο του άξονα συμμετρίας Z της δοκού και σε απόσταση 1m από τη σύνδεση, με σταθερό ρυθμό που δόθηκε με τη βοήθεια πίνακα σε συνάρτηση με το χρόνο. Η επίλυση έγινε με τη βοήθεια της μεθόδου Newton-Raphson με παραδοχές μεγάλων μετακινήσεων και μεγάλων παραμορφώσεων.

Στο δεύτερο μέρος της διπλωματικής εργασίας, όπου μελετήθηκε η συμπεριφορά των προσομοιωμάτων σε συνθήκες πυρκαγιάς, δόθηκε πρώτα, με τη μορφή πίνακα, η αύξηση της θερμοκρασίας στα πεπερασμένα στοιχεία των μοντέλων και κατόπιν ξεκίνησε η σταδιακή επιβολή της μετακίνησης.

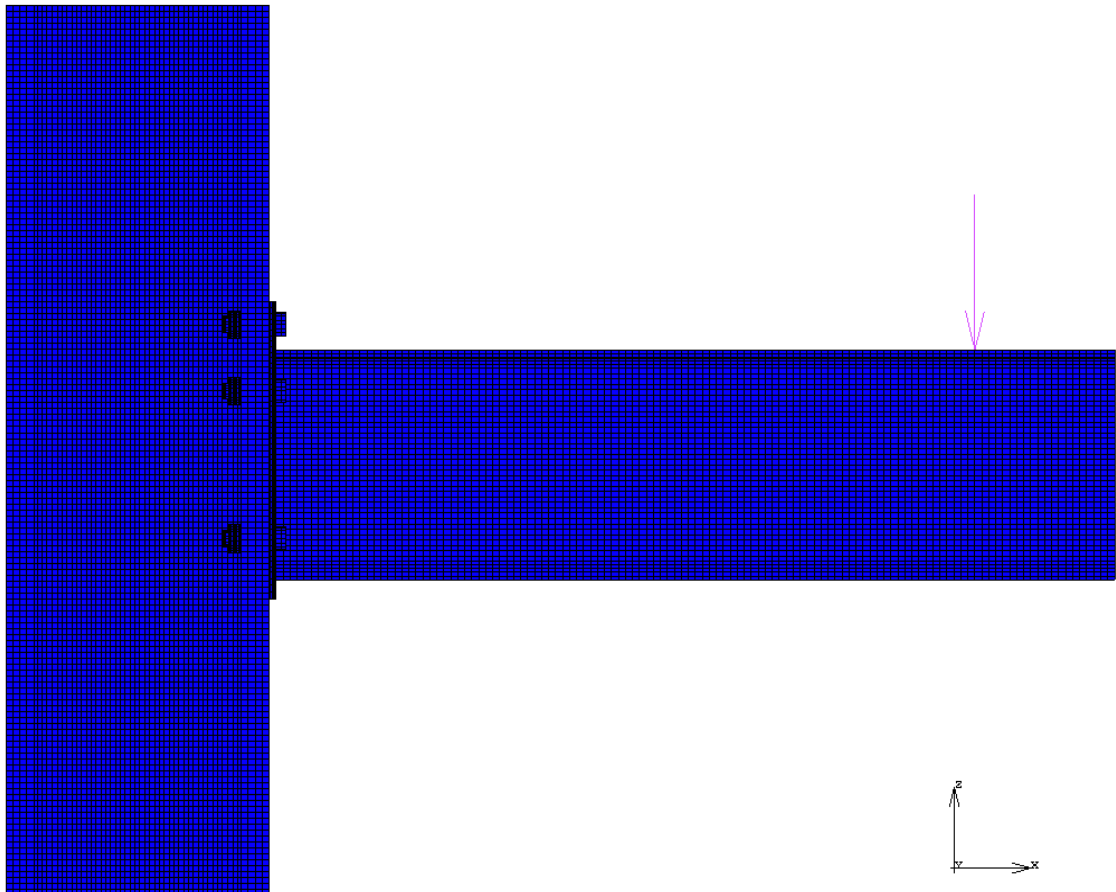
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται η αρχική μορφή των προσομοιωμάτων καθώς και η τελική μορφή που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις (μετά την αξιοποίηση της συμμετρίας). Συγκεκριμένα φαίνονται οι συνοριακές συνθήκες στήριξης και φόρτισης καθώς και η διακριτοποίηση στην περιοχή της σύνδεσης, που είναι και η περιοχή ενδιαφέροντος της διπλωματικής εργασίας.



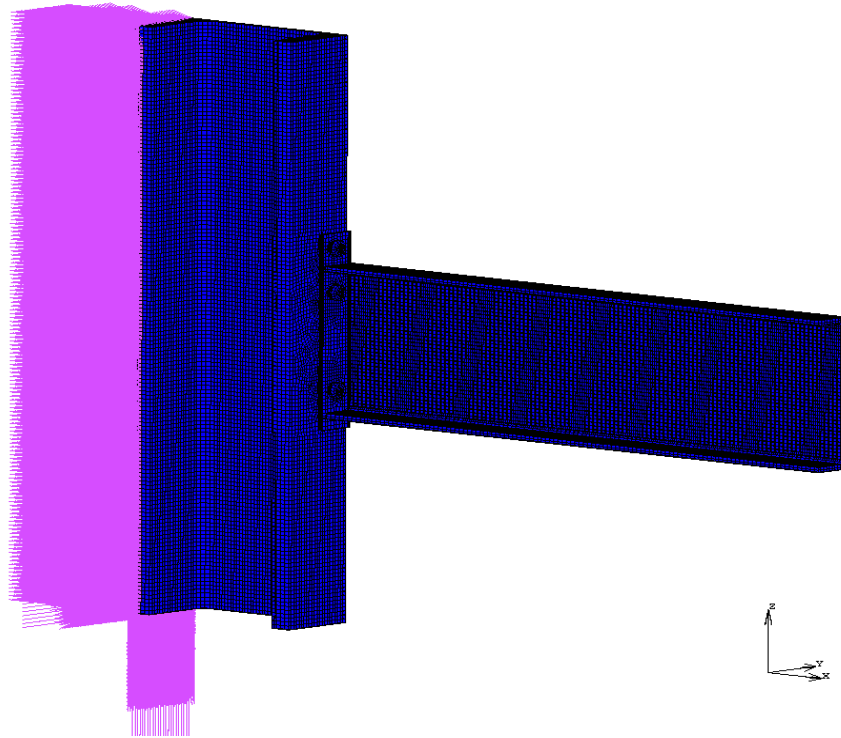
Σχήμα 3-5 Αρχική μορφή προσομοιώματος



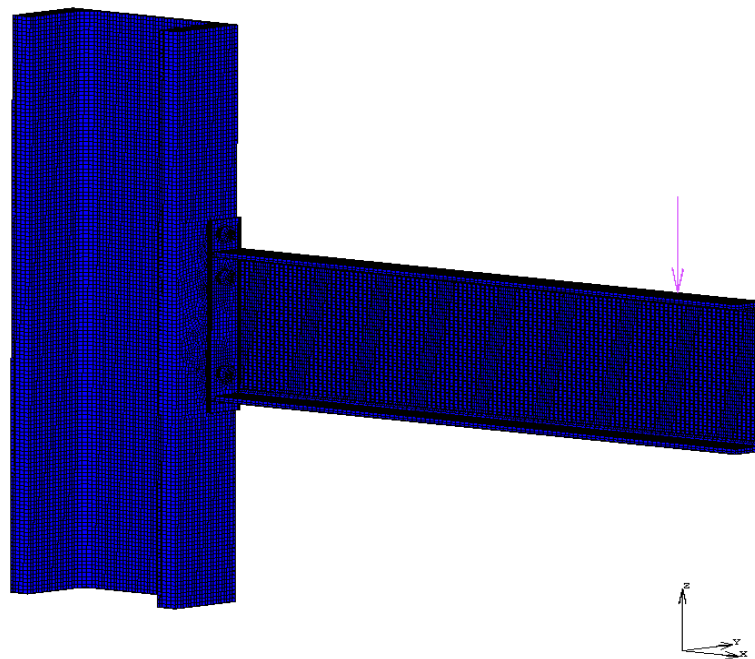
Σχήμα 3-6 Κάτοψη μοντέλου



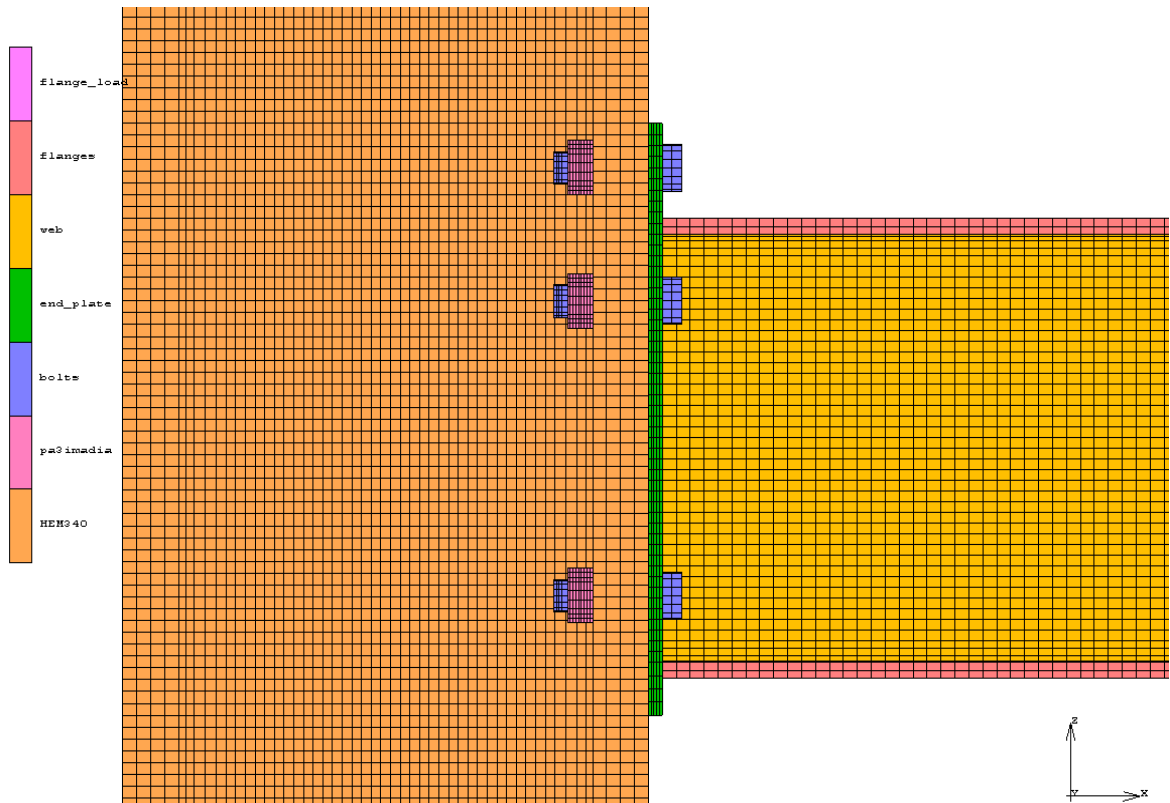
Σχήμα 3-7 Πλάγια όψη μοντέλου



Σχήμα 3-8 Συνοριακές συνθήκες στήριξης προσομοιώματος
(μοντέλο μετά την αξιοποίηση της συμμετρίας του φορέα)



Σχήμα 3-9 Συνοριακές συνθήκες φόρτισης
(μοντέλο μετά την αξιοποίηση της συμμετρίας του φορέα)



Σχήμα 3-10 Κόμβος δοκού-υποστυλώματος

4 Εκτίμηση απόκρισης κόμβων δοκού-υποστυλώματος

4.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση των 3 προσομοιωμάτων κόμβου δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 10, 15 και 20 χιλιοστών αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα παράγονται τα διαγράμματα μετακίνησης-δύναμης, για επιβαλλόμενη μετακίνηση τέτοια ώστε κάποιο από τα συστατικά μέρη του κόμβου να φθάσει την οριακή του παραμόρφωση. Από περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων, παράγονται, επίσης, οι καμπύλες ροπής-στροφής του κάθε κόμβου που εξετάζεται και συγκρίνονται με τις αντίστοιχες καμπύλες των πειραματικών δοκιμών. Έμφαση δίνεται και στη μορφή αστοχίας του κάθε κόμβου. Από την ανάλυση προκύπτει, επίσης, η αντοχή σε ροπή κάθε κόμβου, που συγκρίνεται με την αντίστοιχη αναμενόμενη αντοχή σχεδιασμού σε ροπή, όπως αυτή υπολογίζεται βάσει του Ευρωκώδικα 3.

Η ροπή M που ασκείται στον κόμβο, ισούται με τη δύναμη αντίδρασης που προκαλείται από την επιβαλλόμενη σε απόσταση 1000 mm μετακίνηση ($L_{\text{ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ}}$), επί την απόσταση μεταξύ του σημείου εφαρμογής της μετακίνησης και πλευράς της μετωπικής πλάκας που έρχεται σε επαφή με τη δοκό. Η δύναμη αντίδρασης ισούται κατ' απόλυτη τιμή με το φορτίο P που θα μπορούσε να προκαλέσει την ίδια μετακίνηση στη δοκό. Λόγω συμμετρίας του φορέα, η ροπή M που ασκείται στον κόμβο του αρχικού μοντέλου (πριν την αξιοποίηση της συμμετρίας) ισούται με:

$$M = 2 * P \times L_{\text{ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ}}$$

Η στροφή Φ του κόμβου, ισούται με το άθροισμα της διατμητικής παραμόρφωσης της ζώνης γ του κορμού του υποστυλώματος και της στροφής φ της σύνδεσης. Ως στροφή της σύνδεσης ορίζεται η μεταβολή της γωνίας μεταξύ άξονα της δοκού και του άξονα του υποστυλώματος φ_{beam} και φ_{column} αντίστοιχα (Σχήμα 4.1) :

$$\Phi = \varphi_{\text{beam}} - \varphi_{\text{column}}$$

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, το υποστυλώμα δεν παραμορφώνεται σχεδόν καθόλου εξαιτίας της ισχυρής του διατομής οπότε και θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ως άκαμπτο στοιχείο. Σε αυτήν την περίπτωση, τόσο η διατμητική παραμόρφωση της ζώνης γ του κορμού του υποστυλώματος όσο και η γωνία φ_{column} θεωρούνται μηδέν οπότε :

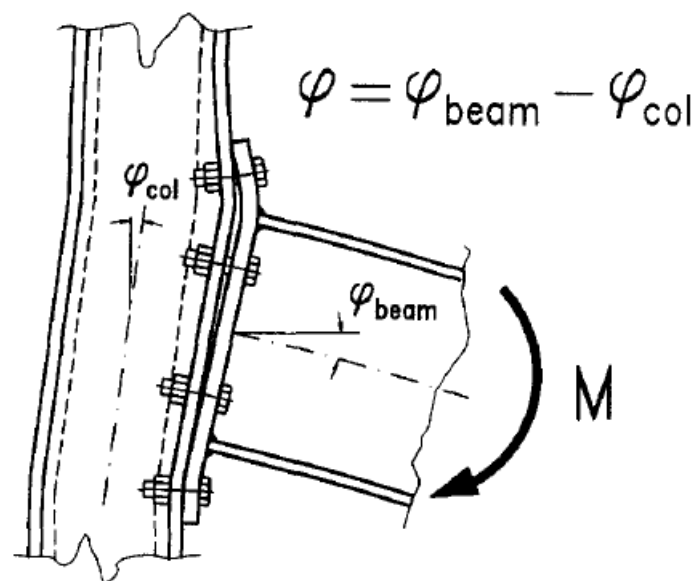
$$\Phi = \varphi = \varphi_{\text{beam}}$$

Η στροφή της δοκού ισούται με :

$$\varphi_{\text{beam}} = \arctan \delta_{\text{ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ}} / L_{\text{ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ}} - \theta_{\text{b,el}}$$

όπου $\delta_{\text{ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ}}$ είναι η κατακόρυφη μετακίνηση της δοκού στο σημείο επιβολής της μετακίνησης και $\theta_{\text{b,el}}$ είναι η ελαστική στροφή της δοκού που ισούται με :

$$\theta_{\text{b,el}} = - \frac{P}{(EI)} * \left(\frac{L_{\text{ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ}}^2}{6} - \frac{L_{\text{ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ}}^2}{2} \right)$$



Σχήμα 4-1 Ορισμός της στροφής του κόμβου

4.2 Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 10 χιλιοστών

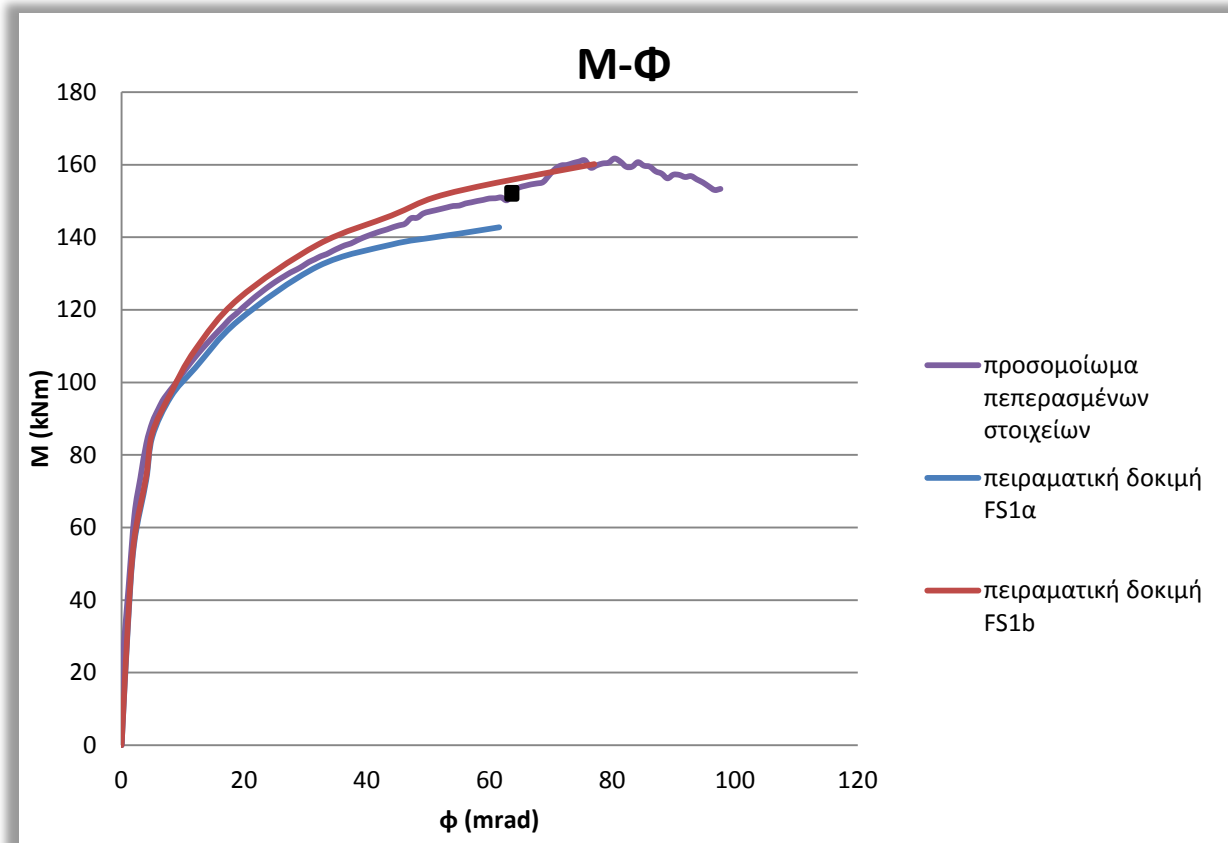
Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 10 χιλιοστών. Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών της καμπύλης ροπής - στροφής του εξεταζόμενου κόμβου, όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση του προσομοιώματος καθώς και οι αντίστοιχες τιμές της από τις πειραματικές δοκιμές των Coelho et al. Συγκεκριμένα δίνονται οι τιμές της μέγιστης ροπής M_{max} και της στροφής που αντιστοιχεί σε αυτή καθώς και οι τιμές της πλαστικής αντοχής σχεδιασμού $M_{j,rd}$, όπως υπολογίστηκε από τις πειραματικές δοκιμές, από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αλλά και όπως υπολογίζεται βάσει των διατάξεων του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Τέλος, παρουσιάζονται οι καμπύλες ροπής - στροφής της πειραματικής δοκιμής και του προσομοιώματος. Να διευκρινίσουμε πως η μέγιστη ροπή και στροφή του κόμβου αντιστοιχούν στο σημείο εκείνο της ανάλυσης όπου ένα ή περισσότερα από τα συστατικά μέρη της σύνδεσης φθάνουν την οριακή τους παραμόρφωση. Στο σημείο αυτό θεωρούμε πως έχουμε και την αστοχία της σύνδεσης. Η μέγιστη ροπή και στροφή, δηλαδή, που παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν δεν ταυτίζονται απαραίτητα με τη μέγιστη ροπή και στροφή του διαγράμματος $M-\phi$ αλλά εξαρτώνται από την αστοχία του κόμβου βάσει της κατανομής των πλαστικών παραμορφώσεων των συστατικών του μερών.

Πίνακας 4-1 Κύρια χαρακτηριστικά καμπύλης ροπής – στροφής (μετωπική πλάκα 10mm)

Δοκιμή	Πειραματική Δοκιμή				Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων			
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$\Phi_{M,Rd}$ (mrad)	M_{max} (kNm)	Φ_{max} (mrad)	$M_{j,rd}$ (kNm)	$\Phi_{M,Rd}$ (mrad)	M_{max} (kNm)	Φ_{max} (mrad)
FS1a	105.60	5.81	142.76	61.55	109	6.5	148.83	60.01
FS1b	109.30	6.49	161.17	77.05	109	6.5	148.83	60.01

Πίνακας 4-2 Σύγκριση των τιμών της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$ του πειραματικού κόμβου FS1 και του αντίστοιχου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με τις διατάξεις του EC3

Δοκιμή	Πειραματική Δοκιμή	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων	EC3
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)
FS1	105.60-109.30	109	76.83

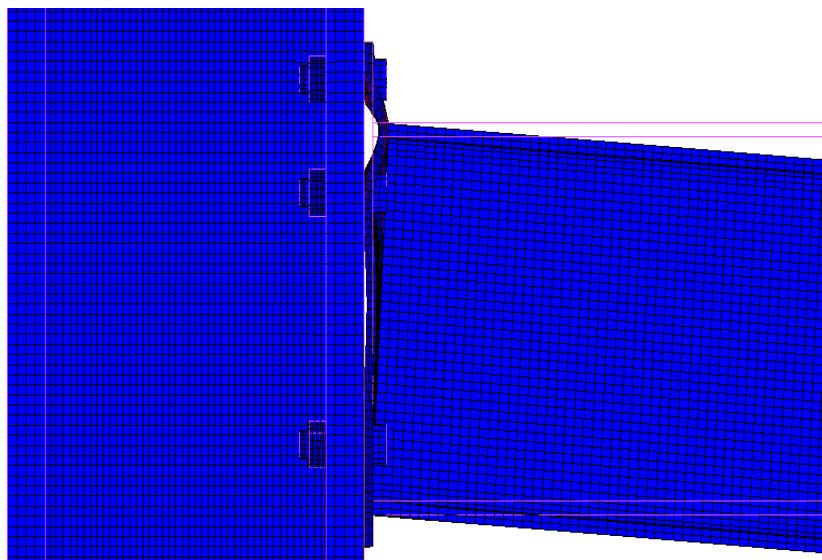


Διάγραμμα 4-1 Καμπύλη ροπής-στροφής δοκιμής FS1 (πειραματική δοκιμή και προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων)

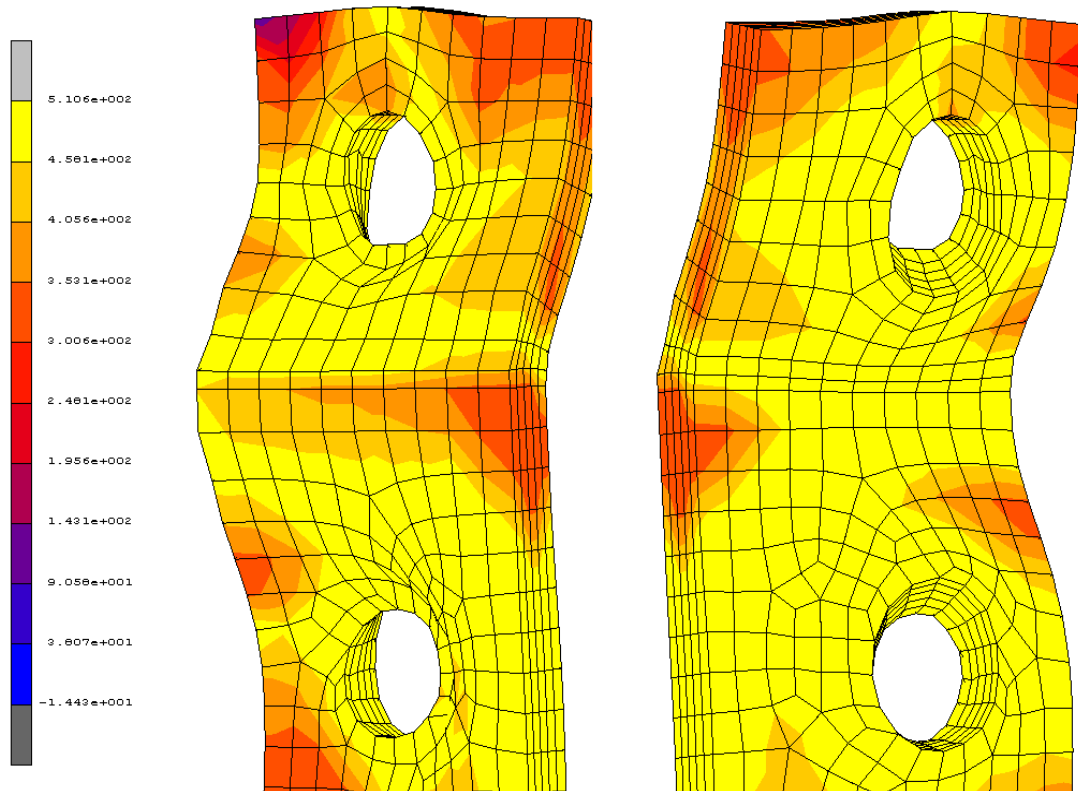
Ένα αρχικό συμπέρασμα αφορά τις αποκλίσεις που παρατηρούνται στις καμπύλες ροπής – στροφής του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων και των πειραματικών δοκιμών, αποκλίσεις ιδιαίτερα μικρές τόσο στο αρχικό στάδιο της απόκρισης όσο και σε προχωρημένο στάδιο. Τόσο ο κόμβος των πειραματικών δοκιμών όσο και του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, με τα κύρια χαρακτηριστικά τους, όπως η πλαστική ροπή αντοχής $M_{j,rd}$ και η μέγιστη ροπή M_{max} να κυμαίνονται σε παραπλήσιες τιμές. Σχετικά με τον υπολογισμό της αντοχής, προκύπτει ότι οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003) υποεκτιμούν σημαντικά τόσο τις πειραματικές τιμές όσο και τις τιμές της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα ο Ευρωκώδικας 3 υπολογίζει την πλαστική αντοχή σχεδιασμού στο 70% περίπου της αντίστοιχης τιμής των πειραματικών κόμβων των Coelho et al. και του κόμβου του προσομοιώματος. Η απόκλιση αυτή οφείλεται κατά το μεγαλύτερο μέρος στην σημαντική κράτυνση του χάλυβα, μετά την αρχική πλαστικοποίηση του, η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη από τον Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003).

Ενδιαφέρον, επίσης, παρουσιάζει η σύγκριση των μορφών αστοχίας των πειραματικών κόμβων και του κόμβου του προσομοιώματος. Από τις πειραματικές δοκιμές των Coelho et al. προκύπτει πως η αστοχία του κόμβου με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 10 χιλιοστών, οφείλεται σε αστοχία της μετωπικής πλάκας, γεγονός αναμενόμενο καθώς, λόγω του μικρού της πάχους, είναι καθοριστικής σημασίας για την απόκριση στην πλαστική περιοχή. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και από την ανάλυση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, για επιβαλλόμενη μετακίνηση 62 mm που αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενη φόρτιση 148,83 kN ($M = 148,83\text{kNm}$), η μετωπική πλάκα φθάνει την μέγιστη αντοχή της σε εφελκυσμό ($f_u = 480,49\text{ MPa}$) και την οριακή της παραμόρφωση ($\epsilon_u = 0,224$). Με εφαρμογή της διαδικασίας που περιγράφεται στον Ευρωκώδικα 3 για τον υπολογισμό της αντοχής της σύνδεσης σε ροπή (προσδιορισμός της $M_{j,Rd}$), συμπεραίνουμε πως η αστοχία του εξεταζόμενου κόμβου οφείλεται, επίσης, σε αστοχία της μετωπικής πλάκας. Μπορούμε, επίσης, να προσδιορίσουμε τη μορφή αστοχίας για κάθε μεμονωμένη σειρά κοχλιών που καλείται να παραλάβει εφελκυστικές δυνάμεις. Από τη θεώρηση του ισοδύναμου βραχέος T συμπεραίνουμε πως και στις δύο σειρές κοχλιών της εφελκυσόμενης ζώνης εμφανίζεται ο 1^{ος} μηχανισμός αστοχίας, γεγονός που επιβεβαιώνεται τόσο από τις πειραματικές δοκιμές των Coelho et al. όσο και από το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων.

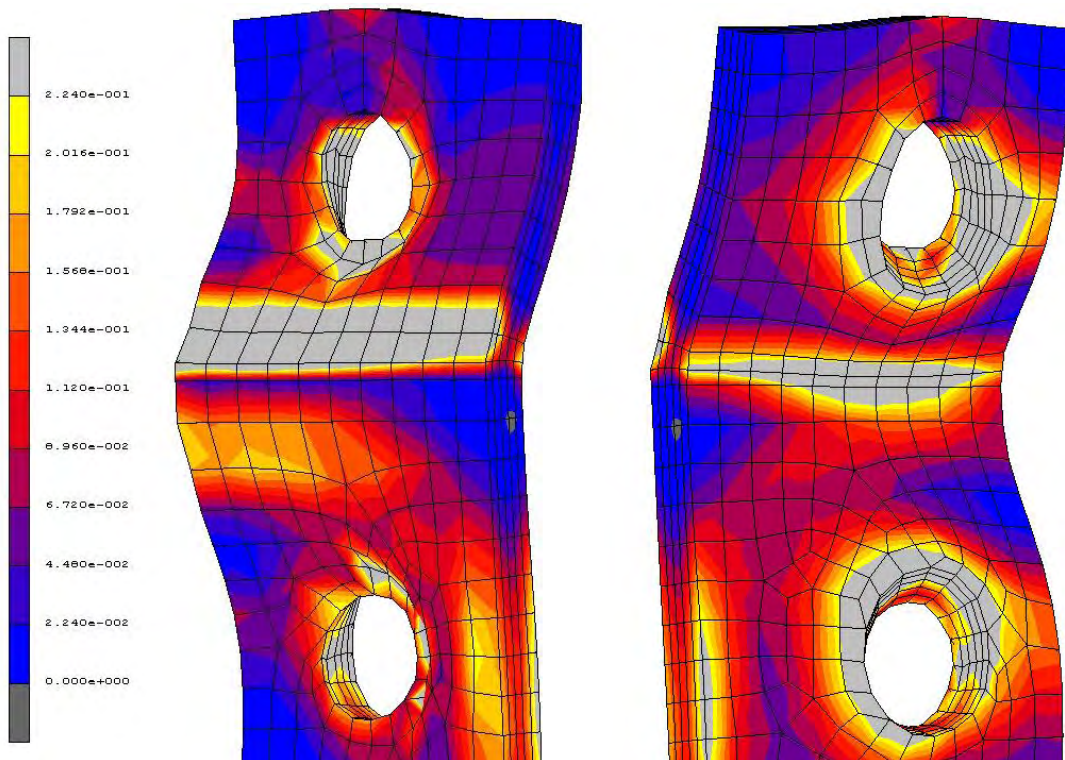
Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται η παραμόρφωση του κόμβου πεπερασμένων στοιχείων για ροπή στον κόμβο ίση με τη M_{max} στην οποία παρατηρείται η αστοχία της μετωπικής πλάκας, η κατανομή της τάσης von Mises καθώς και η κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην μετωπική πλάκα για την ίδια ροπή. Στο παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος της εργασίας, παρουσιάζονται εικόνες της κατανομής των πλαστικών παραμορφώσεων και σε στάδια της ανάλυσης πριν και μετά την εμφάνιση της αστοχίας της μετωπικής πλάκας.



Σχήμα 4-2 Παραμορφωμένη θέση του 1^{ου} προσομοιώματος για $M_{max} = 148,83\text{ kNm}$



Σχήμα 4-3 Κατανομή της τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος (για $M_{max}= 148,83\text{kNm}$)



Σχήμα 4-4 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος (για $M_{max}= 148,83\text{ kNm}$)

4.3 Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 15 χιλιοστών

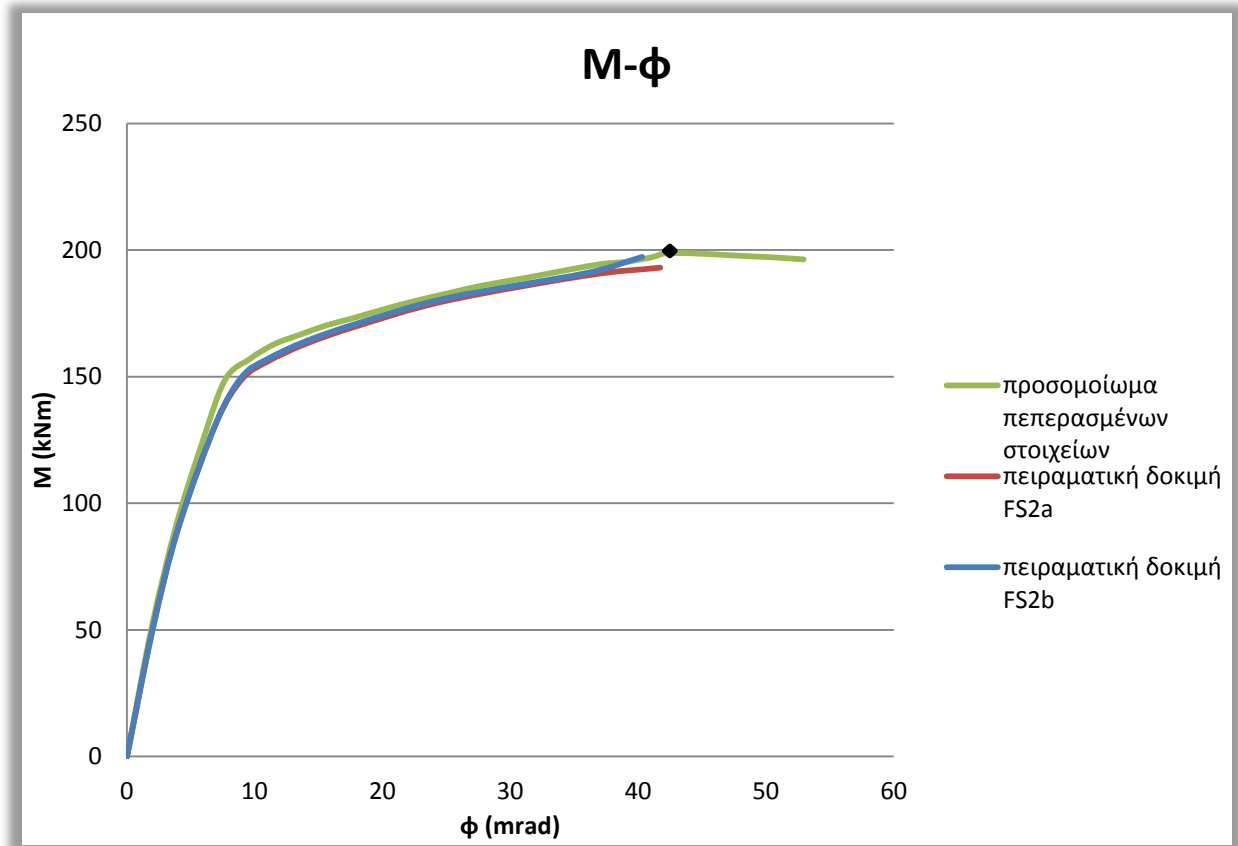
Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 15 χιλιοστών. Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών της καμπύλης ροπής - στροφής του εξεταζόμενου κόμβου, όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση του μοντέλου καθώς και οι αντίστοιχες τιμές της από τις πειραματιές δοκιμές των Coelho et al. Δίνονται επίσης οι τιμές της πλαστικής ροπής αντοχής, $M_{j,rd}$, όπως υπολογίστηκε από τις πειραματικές δοκιμές, από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αλλά και όπως υπολογίζεται βάσει των διατάξεων του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Η μέγιστη ροπή και στροφή του κόμβου δίνονται στο σημείο εκείνο της ανάλυσης όπου ένα ή περισσότερα συστατικά μερών της σύνδεσης, φθάνει την οριακή του παραμόρφωση. Τέλος, παρουσιάζονται οι καμπύλες ροπής - στροφής της πειραματικής δοκιμής και του προσομοιώματος.

Πίνακας 4-3 Κύρια χαρακτηριστικά καμπύλης ροπής – στροφής (μετωπική πλάκα 15mm)

Δοκιμή	Πειραματική Δοκιμή				Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων			
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$\Phi_{M,Rd}$ (mrad)	M_{max} (kNm)	Φ_{max} (mrad)	$M_{j,rd}$ (kNm)	$\Phi_{M,Rd}$ (mrad)	M_{max} (kNm)	Φ_{max} (mrad)
FS2a	165.65	7.08	193.06	41.72	170	7.5	198.75	44.06
FS2b	170.22	7.74	197.31	40.30	170	7.5	198.75	44.06

Πίνακας 4-4 Σύγκριση των τιμών της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$ του πειραματικού κόμβου FS2 και του αντίστοιχου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με τις διατάξεις του EC3

Δοκιμή	Πειραματική Δοκιμή	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων	EC3
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)
FS2	165.65-170.22	170	132.53

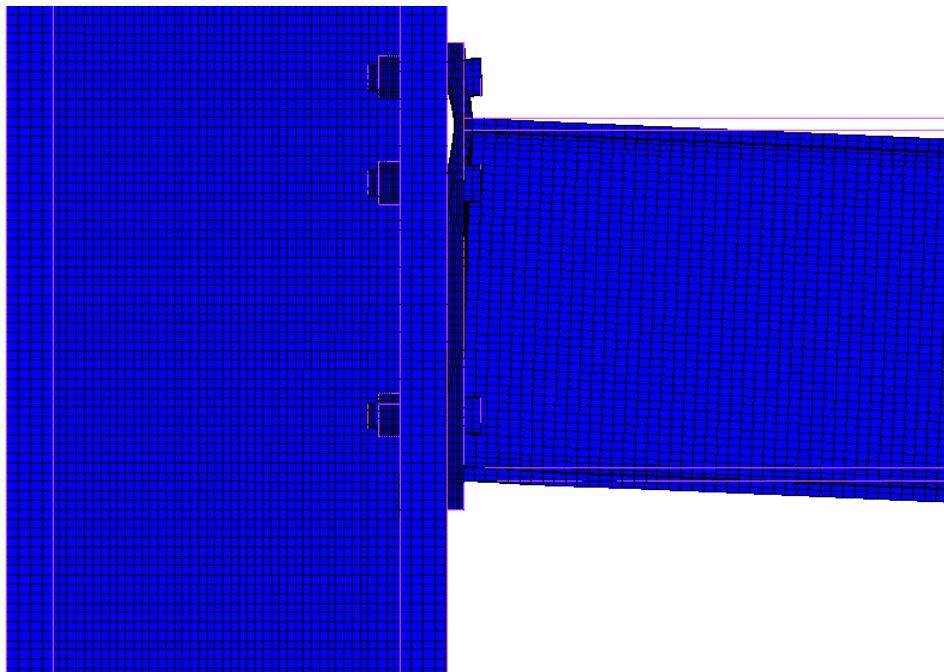


Σχήμα 4-5 Καμπύλη ροπής-στροφής δοκιμής FS2 (πειραματική δοκιμή και προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων)

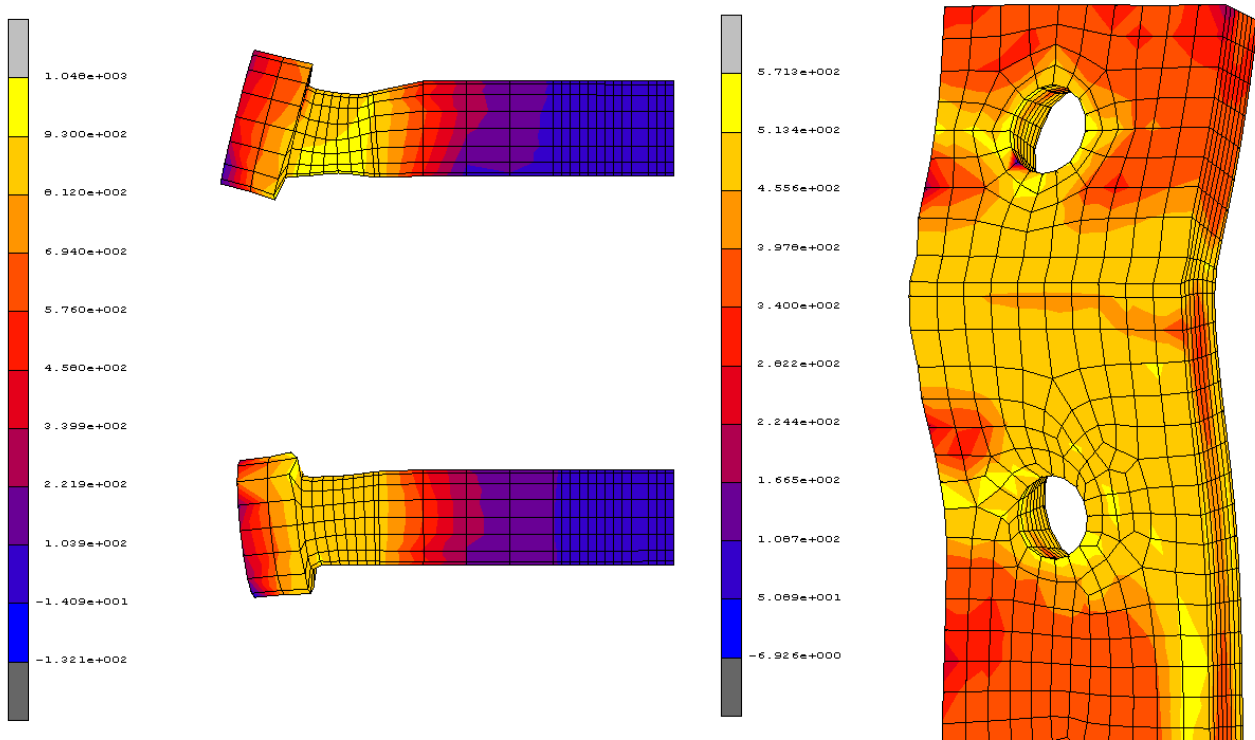
Και σε αυτήν την περίπτωση οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στις καμπύλες ροπής – στροφής του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων και της πειραματικής δοκιμής είναι ιδιαίτερα μικρές τόσο στο αρχικό στάδιο της απόκρισης όσο και σε προχωρημένο στάδιο. Τόσο ο κόμβος της πειραματικής δοκιμής όσο και του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, με τα κύρια χαρακτηριστικά τους, όπως η πλαστική ροπή αντοχής $M_{j,rd}$ και η μέγιστη ροπή M_{max} να κυμαίνονται σε παραπλήσιες τιμές. Ανάλογα είναι και τα αποτελέσματα σχετικά με τον υπολογισμό της αντοχής βάσει των διατάξεων του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Και σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ότι ο Ευρωκώδικας 3 υποεκτιμά σημαντικά τόσο τις πειραματικές τιμές όσο και τις τιμές της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα ο Ευρωκώδικας 3 υπολογίζει την πλαστική αντοχή σχεδιασμού στο 78% περίπου της αντίστοιχης τιμής του πειραματικού κόμβου των Coelho et al. και του κόμβου του προσομοιώματος, απόκλιση που οφείλεται επίσης στην σημαντική κράτυνση του χάλυβα, μετά την αρχική πλαστικοποίησή του, η οποία δεν λαμβάνεται υπόψη από τον Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Παρατηρούμε, επίσης, πως η μέγιστη ροπή M_{max} , η ροπή δηλαδή για την οποία έχουμε την αστοχία της σύνδεσης, στην περίπτωση του 2^{ου} προσομοιώματος, ταυτίζεται με τη μέγιστη ροπή στο διάγραμμα M-φ.

Αντίθετα με την προηγούμενη περίπτωση, όπου στην αστοχία του κόμβου οδήγησε η αστοχία της προεκτεινόμενης μετωπικής πλάκας, καθοριστική για τη συμπεριφορά του κόμβου, αυτή τη φορά, είναι η συμπεριφορά των κοχλιών. Από την πειραματική δοκιμή των Coelho et al. προκύπτει πως η αστοχία του κόμβου με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 15 χιλιοστών, οφείλεται κυρίως σε αστοχία των κοχλιών της εφελκυσμένης ζώνης. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και από την ανάλυση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, για επιβαλλόμενη μετακίνηση 46 mm που αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενη φόρτιση 198,75 kN ($M = 198,75 \text{ kNm}$), οι κοχλίες της εφελκυσμένης ζώνης φθάνουν την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό ($f_u = 913,78 \text{ MPa}$) και την οριακή τους παραμόρφωση ($\epsilon_u = 0,184$) ενώ παρατηρείται και πλαστική παραμόρφωση στη μετωπική πλάκα ($\epsilon_u = 0,198$) σε πολύ μικρή, όμως, έκταση. Από τη θεώρηση του ισοδύναμου βραχέος T συμπεραίνουμε πως στην πρώτη σειρά κοχλιών της εφελκυσμένης ζώνης εμφανίζεται ο 1^{ος} μηχανισμός αστοχίας, ενώ στη δεύτερη σειρά κοχλιών εμφανίζεται ο 2^{ος} μηχανισμός αστοχίας.

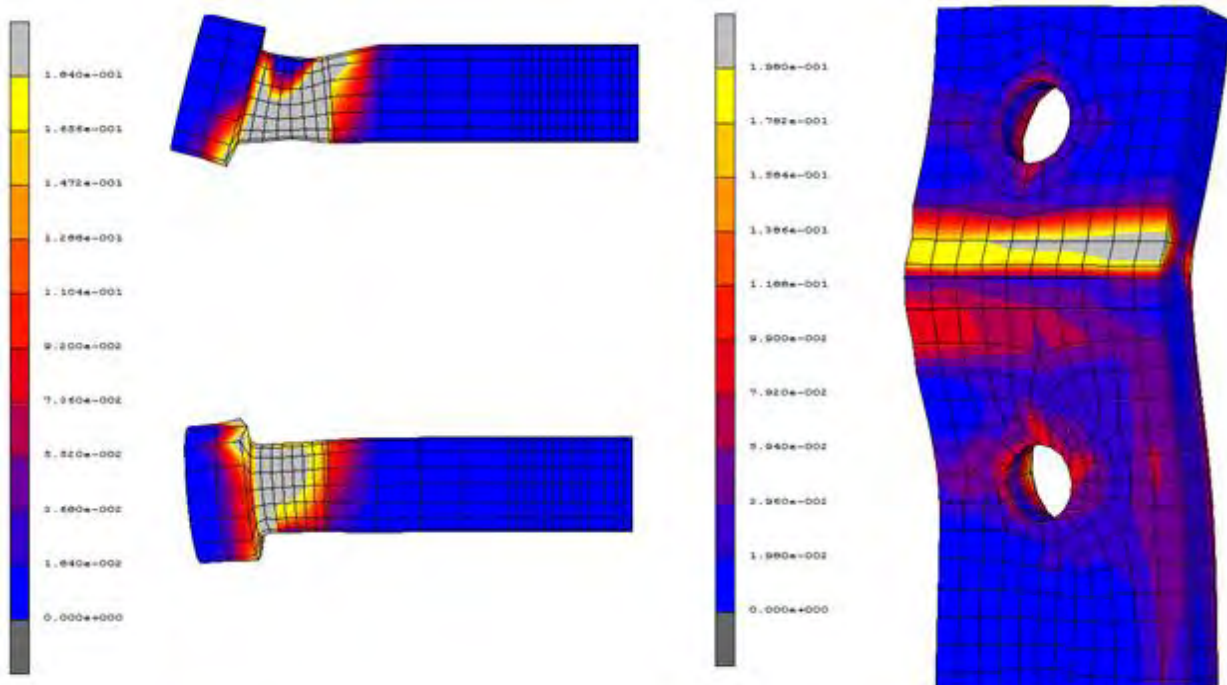
Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται η παραμόρφωση του κόμβου πεπερασμένων στοιχείων για επιβαλλόμενη μετακίνηση 46mm στην οποία και παρατηρείται η αστοχία των κοχλιών, η κατανομή των τάσεων von Mises καθώς και η κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στους κοχλίες που αστοχούν για την ίδια μετακίνηση. Στο παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος της εργασίας, παρουσιάζονται εικόνες της κατανομής των πλαστικών παραμορφώσεων και σε στάδια της ανάλυσης πριν και μετά την εμφάνιση της αστοχίας των κοχλιών της εφελκυσμένης ζώνης.



Σχήμα 4-6 Παραμορφωμένη θέση του 2^{ου} προσομοιώματος για $M_{max} = 198,75 \text{ kNm}$



Σχήμα 4-7 Κατανομή της τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος (για Mmax = 198,75 kNm)



Σχήμα 4-8 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος (για Mmax = 198,75 kNm)

4.4 Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 20 χιλιοστών

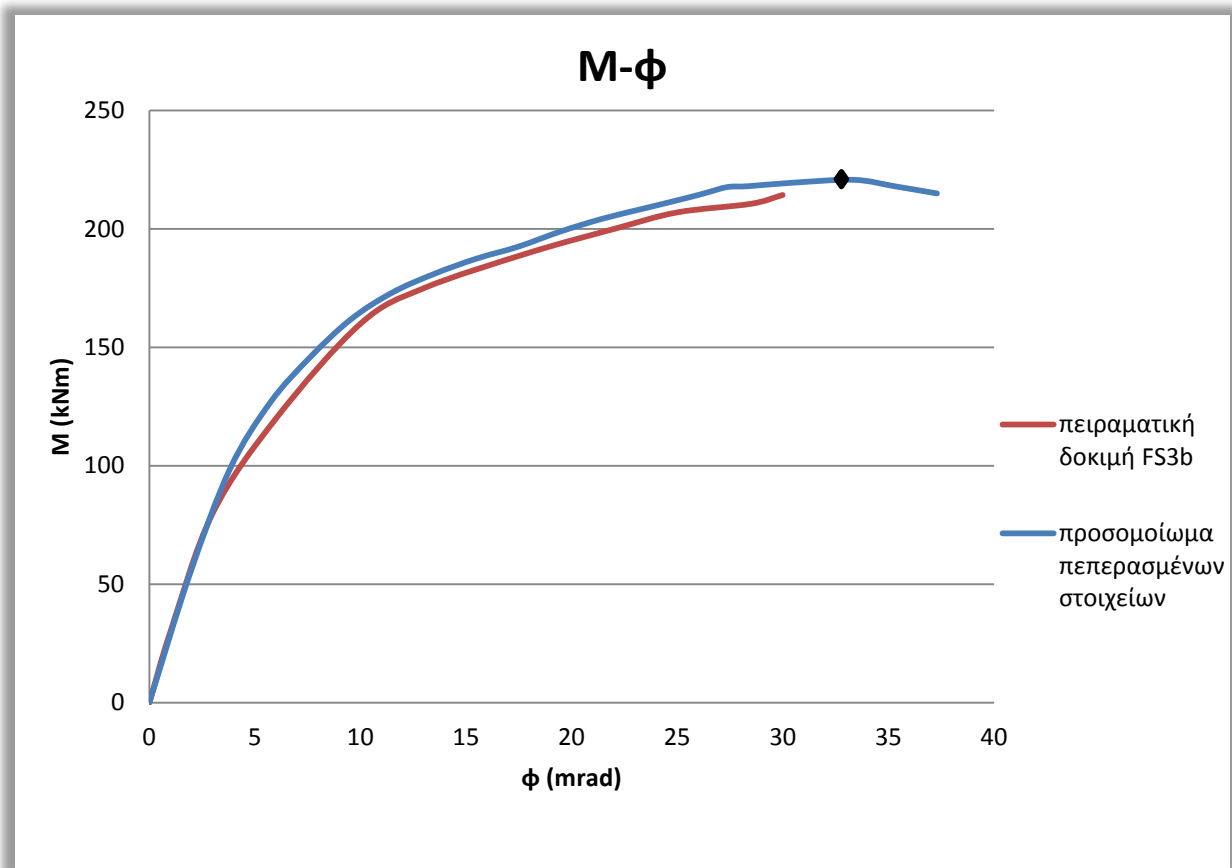
Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 20 χιλιοστών. Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών της καμπύλης ροπής - στροφής του εξεταζόμενου κόμβου, όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση του μοντέλου καθώς και οι αντίστοιχες τιμές της από την πειραματική δοκιμή των Coelho et al (χρησιμοποιήθηκε μόνο η δοκιμή FS3b καθώς τα αποτελέσματα της δοκιμής FS3a κρίθηκαν αναξιόπιστα εξαιτίας της διαταραχής που παρουσιάστηκε στην εξέλιξη της φόρτισης στην πλαστική περιοχή). Δίνονται επίσης οι τιμές της πλαστικής αντοχής σχεδιασμού, $M_{j,rd}$, όπως υπολογίστηκε από την πειραματική δοκιμή, από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αλλά και όπως υπολογίζεται βάσει των διατάξεων του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Τέλος, παρουσιάζονται οι καμπύλες ροπής - στροφής της πειραματικής δοκιμής και του προσομοιώματος. Η μέγιστη ροπή και στροφή του κόμβου δίνονται στο σημείο εκείνο της ανάλυσης όπου ένα ή περισσότερα συστατικά μερών της σύνδεσης, φθάνει την οριακή του παραμόρφωση.

Πίνακας 4-5 Κύρια χαρακτηριστικά καμπύλης ροπής – στροφής (μετωπική πλάκα 20mm)

Δοκιμή	Πειραματική Δοκιμή				Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων			
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$\Phi_{M,Rd}$ (mrad)	M_{max} (kNm)	Φ_{max} (mrad)	$M_{j,rd}$ (kNm)	$\Phi_{M,Rd}$ (mrad)	M_{max} (kNm)	Φ_{max} (mrad)
FS3b	192.66	8.94	214.35	29.99	185	8.5	220.748	33.34

Πίνακας 4-6 Σύγκριση των τιμών της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$ του πειραματικού κόμβου FS3 και του αντίστοιχου προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με τις διατάξεις του EC3

Δοκιμή	Πειραματική Δοκιμή	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων	EC3
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)
FS3	192.66	185	176.11

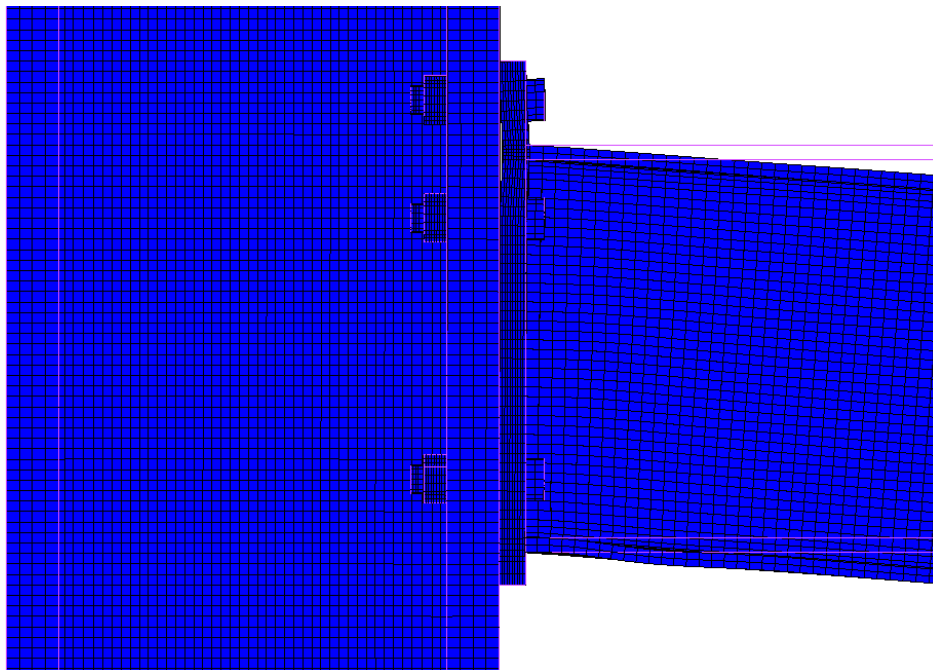


Σχήμα 4-9 Καμπύλη ροπής-στροφής δοκιμής FS3 (πειραματική δοκιμή και προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων)

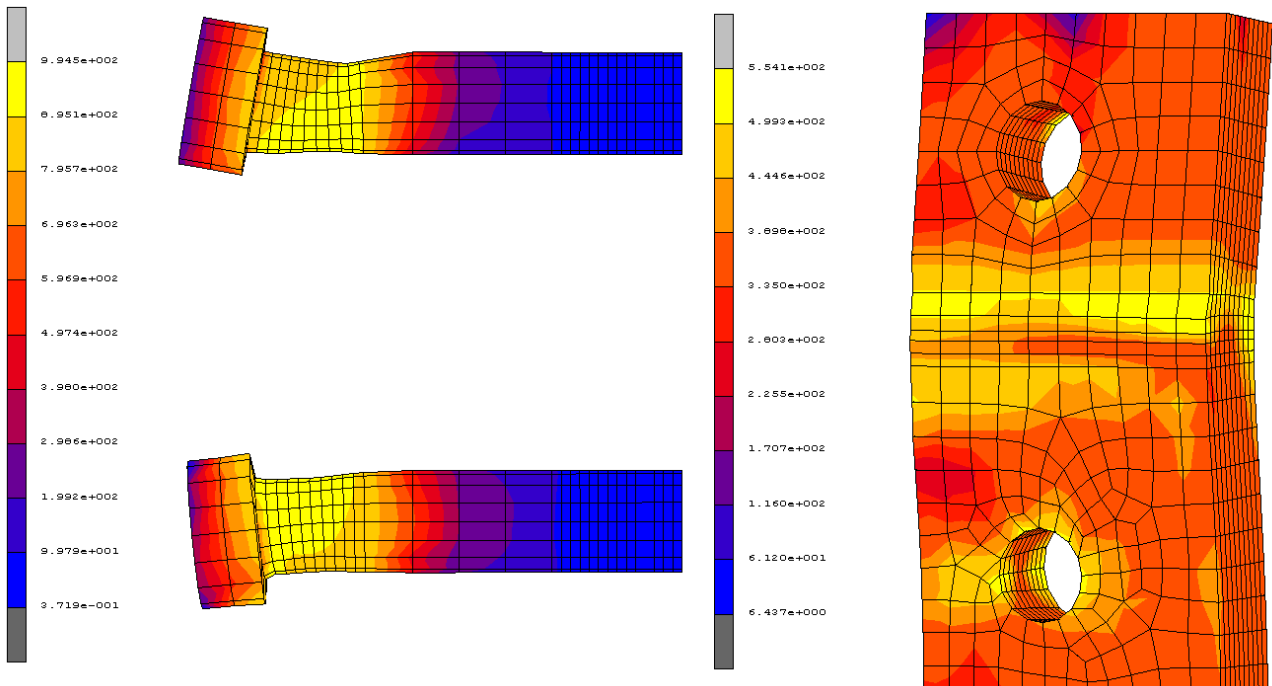
Στην τρίτη και τελευταία περίπτωση, οι αποκλίσεις που παρατηρούνται στις καμπύλες ροπής – στροφής του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων και της πειραματικής δοκιμής είναι επίσης μικρές τόσο στο αρχικό στάδιο της απόκρισης όσο και σε προχωρημένο στάδιο. Τόσο ο κόμβος της πειραματικής δοκιμής όσο και του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων εμφανίζουν παρόμοια συμπεριφορά, με τα κύρια χαρακτηριστικά τους, όπως η πλαστική ροπή αντοχής $M_{j,rd}$ και η μέγιστη ροπή M_{max} να κυμαίνονται σε παραπλήσιες τιμές. Διαφορά σε σχέση με τις προηγούμενες περιπτώσεις παρατηρείται στα αποτελέσματα σχετικά με τον υπολογισμό της αντοχής βάσει των διατάξεων του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ότι τόσο οι πειραματικές τιμές της πλαστικής αντοχής σχεδιασμού όσο και οι αντίστοιχες τιμές της προσομοίωσης, σχεδόν ταυτίζονται με αυτές που υπολογίζονται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Συγκεκριμένα η πλαστική ροπή αντοχής βάσει του Ευρωκώδικα 3 υπολογίζεται στο 95% περίπου της αντίστοιχης τιμής του πειραματικού κόμβου των Coelho et al. και του κόμβου του προσομοιώματος. Και σε αυτό το προσομοίωμα, η μέγιστη ροπή M_{max} του κόμβου, όπου θεωρούμε την αστοχία της σύνδεσης, ταυτίζεται με τη μέγιστη ροπή του διαγράμματος M-φ.

Αντίθετα με την πρώτη περίπτωση, όπου στην αστοχία του κόμβου οδήγησε η αστοχία της προεκτεινόμενης μετωπικής πλάκας, και κατ' αναλογία της δεύτερης περίπτωσης, καθοριστική για τη συμπεριφορά του κόμβου είναι η συμπεριφορά των κοχλιών, γεγονός αναμενόμενο λόγω του μεγάλου πάχους της μετωπικής πλάκας. Από την πειραματική δοκιμή των Coelho et al. προκύπτει πως η αστοχία του κόμβου με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 20 χιλιοστών, οφείλεται σε αστοχία των κοχλιών της εφελκυσμένης ζώνης. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουμε και από την ανάλυση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων. Συγκεκριμένα, για επιβαλλόμενη μετακίνηση 36mm που αντιστοιχεί σε επιβαλλόμενη φόρτιση 220,748 kN ($M = 220,748 \text{ kNm}$), οι κοχλίες της εφελκυσμένης ζώνης φθάνουν την μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό ($f_u = 913,78 \text{ MPa}$) και την οριακή τους παραμόρφωση ($\epsilon_u = 0,156$), ενώ εμφάνιση πλαστικής παραμόρφωσης στην μετωπική πλάκα ($\epsilon_u = 0,196$) παρατηρείται σε μικρή, όμως, έκταση. Από τη θεώρηση του ισοδύναμου βραχέος T συμπεραίνουμε πως εμφανίζεται ο 2^{ος} μηχανισμός αστοχίας και στις δύο σειρές κοχλιών της εφελκυσμένης ζώνης.

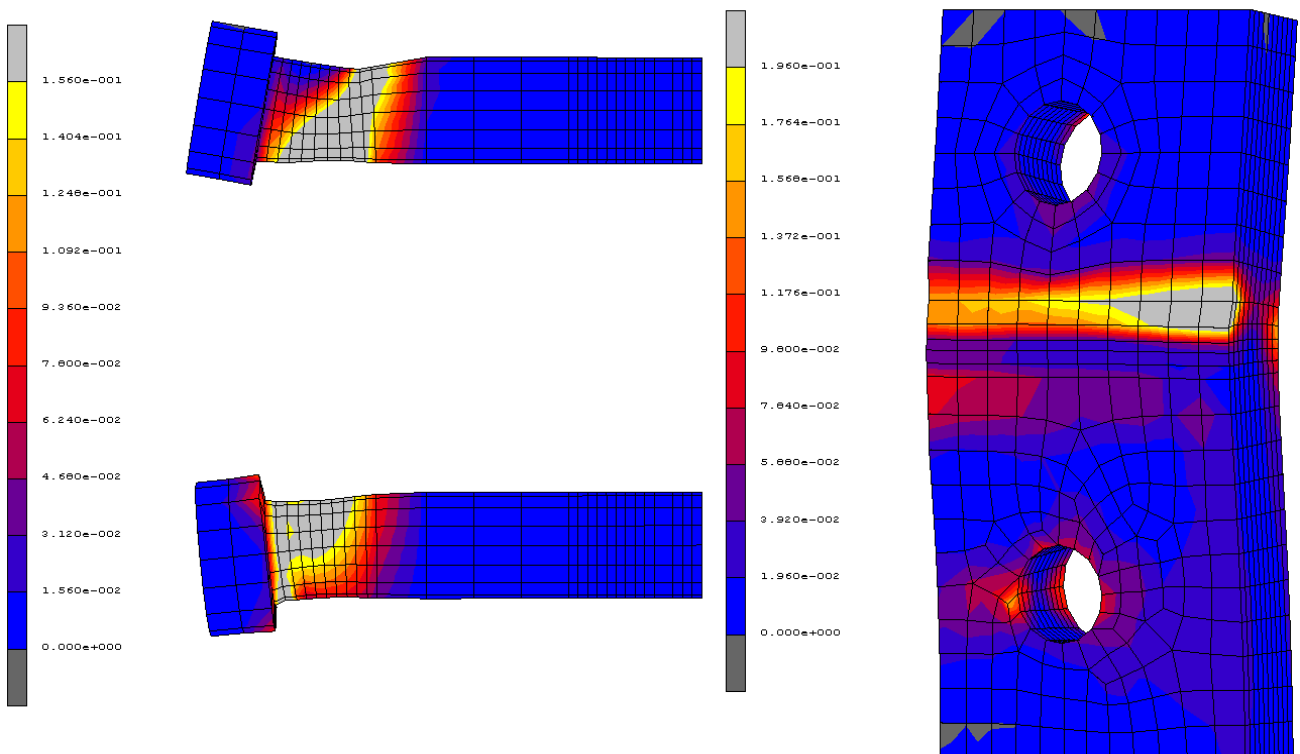
Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται η παραμόρφωση του κόμβου πεπερασμένων στοιχείων για επιβαλλόμενη μετακίνηση 36mm στην οποία και παρατηρείται η αστοχία των κοχλιών, η κατανομή των τάσεων von Mises καθώς και η κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στους κοχλίες που αστοχούν για την ίδια μετακίνηση. Στο παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος της εργασίας, παρουσιάζονται εικόνες της κατανομής των πλαστικών παραμορφώσεων και σε στάδια της ανάλυσης πριν και μετά την εμφάνιση της αστοχίας των κοχλιών της εφελκυσμένης ζώνης.



Σχήμα 4-10 Παραμορφωμένη θέση του μοντέλου για $M_{max} = 220,748 \text{ kNm}$



Σχήμα 4-11 Κατανομή της τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 3^{ου} προσομοιώματος (για $M_{max} = 220,748$ kNm)



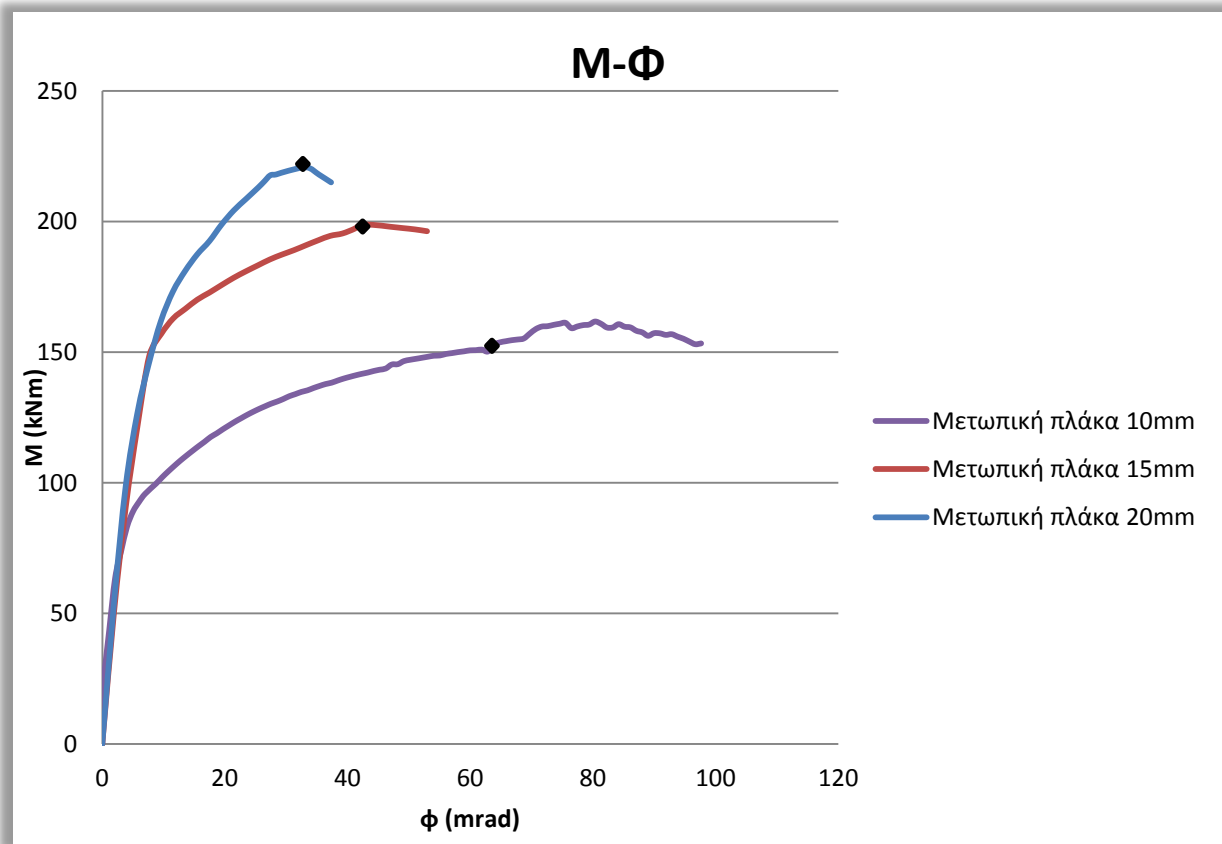
Σχήμα 4-12 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 3^{ου} προσομοιώματος (για $M_{max} = 220,748$ kNm)

Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των 3 προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων για μετωπική πλάκα 10, 15 και 20 χιλιοστών και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών και των υπολογισμών βάσει του Ευρωκώδικα 3, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 4-7 Σύγκριση των τιμών της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$ των 3 πειραματικών κόμβων και των 3 αντίστοιχων προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων με τις διατάξεις του EC3

Δοκιμή	Πειραματική Δοκιμή	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων	EC3	EC3/ πειραματική δοκιμή	EC3/ προσομοίωμα	Προσομοίωμα/ πειραματική δοκιμή
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)			
FS1	105.60-109.30	109	76.83	0.71	0.70	0.99-1.03
FS2	165.65-170.22	170	132.53	0.80	0.78	0.99-1.02
FS3	192.66	185	176.11	0.96	0.95	0.96

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, δίνονται οι καμπύλες ροπής – στροφής των 3 προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 4-13 Καμπύλες ροπής – στροφής 3 προσομοιωμάτων

Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι :

- Τόσο στις πειραματικές δοκιμές 2 και 3 όσο και στα αντίστοιχα προσομοιώματα, η αστοχία της σύνδεσης οφείλεται κυρίως σε αστοχία των κοχλιών ενώ για την πειραματική δοκιμή 1 και το αντίστοιχο προσομοίωμα, καθοριστική για τη συμπεριφορά του κόμβου είναι η προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα λόγω μικρού πάχους.
- Η παραμόρφωση της μετωπικής πλάκας αυξάνει για μικρότερες τιμές του πάχους της.
- Η αντοχή των κόμβων αυξάνεται για μεγαλύτερες τιμές της μετωπικής πλάκας.
- Η απόκλιση της πλαστικής αντοχής σχεδιασμού των προσομοιωμάτων και των πειραματικών δοκιμών των Coelho et al. από την προβλεπόμενη αντοχή σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, μειώνεται όσο αυξάνεται το πάχος της μετωπικής πλάκας, λόγω της κράτυνσης του χάλυβα μετά την αρχική πλαστικοποίησή του, γεγονός που αγνοείται από τον Ευρωκώδικα ενώ συνυπολογίζεται τόσο στις πειραματικές δοκιμές όσο και στις προσομοιώσεις.
- Σε κάθε περίπτωση, η αστοχία των εξεταζόμενων κόμβων οφείλεται σε αστοχία της μετωπικής πλάκας ή/και των κοχλιών της εφελκυσόμενης ζώνης

5 Σχεδιασμός συνδέσεων έναντι πυρκαγιάς

5.1 Γενικά

Οι ιδιότητες των μεταλλικών κατασκευών, όπως η ικανότητα μεταφοράς φορτίου, μειώνονται ραγδαία σε περίπτωση πυρκαγιάς λόγω της μείωσης τόσο της δυσκαμψίας όσο και της αντοχής του υλικού. Παρά το γεγονός ότι ένας μεγάλος αριθμός αναλυτικών ερευνών έχουν διεξαχθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των κόμβων σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, λίγες ερευνητικές εργασίες έχουν διεξαχθεί σε συνθήκες πυρκαγιάς. Αυτό οφείλεται κυρίως στο μεγάλο αριθμό παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να περιγραφεί η συμπεριφορά του κόμβου στη φωτιά.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά τον σχεδιασμό μεταλλικών συνδέσεων σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται αναφορά στις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 που αφορούν στην αλλαγή των θερμο-μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα όταν εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες, ιδιότητες όπως η θερμική διαστολή, η ειδική θερμότητα, η θερμική αγωγιμότητα, η δυσκαμψία και η οριακή αντοχή του χάλυβα. Η μείωση των μηχανικών κυρίως ιδιοτήτων του χάλυβα, λόγω της έκθεσής του σε υψηλές θερμοκρασίες, έχει ως αποτέλεσμα την ταυτόχρονη μείωση της αντοχής της σύνδεσης. Επίσης, παρουσιάζονται οι διατάξεις εκείνες του Ευρωκώδικα 3 (Μέρος 1-2) που αφορούν στο σχεδιασμό συνδέσεων έναντι πυρκαγιάς.

5.2 Θερμο-μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες

Ο χάλυβας χαρακτηρίζεται από μείωση της τάσης διαρροής, της τάσης πλήρους πλαστικοποίησης και του μέτρου ελαστικότητας με την έκθεσή του σε υψηλές θερμοκρασίες. Σε συνδυασμό με τη θερμική διαστολή του χάλυβα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι μεταλλικοί κόμβοι να φθάνουν γρήγορα στη διαρροή σε συνθήκες πυρκαγιάς.

5.2.1 Θερμικές ιδιότητες του χάλυβα

Η θερμική διαστολή του χάλυβα μπορεί να προσδιορισθεί από τις ακόλουθες σχέσεις (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2, παράγραφος 3.4.1.1) :

- για $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 750^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4}$$

- για $750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 860^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta l/l = 1,1 \times 10^{-2}$$

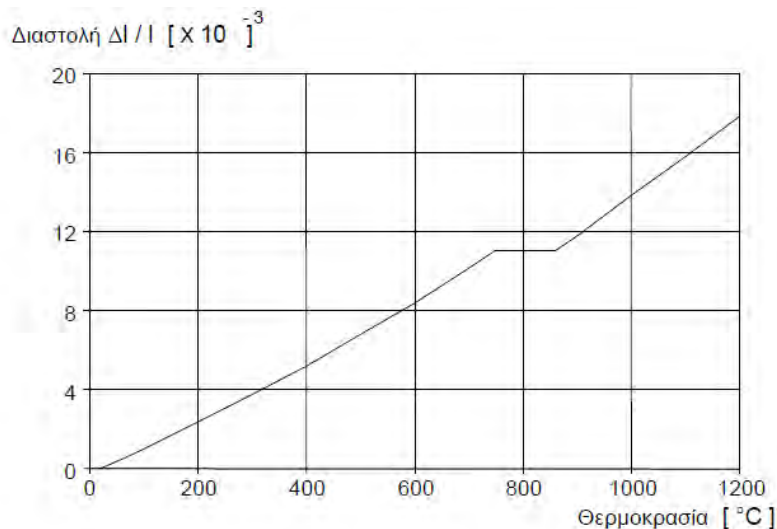
- για $860^{\circ}\text{C} < \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3}$$

Όπου:

l	είναι	το μήκος στους 20°C ,
Δl	είναι	η διαστολή λόγω της θερμοκρασίας,
θ_a	είναι	η θερμοκρασία του χάλυβα [$^{\circ}\text{C}$].

Η μεταβολή της θερμικής διαστολής με τη θερμοκρασία φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 5-1)



Σχήμα 5-1 Θερμική διαστολή ανοξείδωτων χαλύβων συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η ειδική θερμότητα του χάλυβα c_a προσδιορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2, παράγραφος 3.4.1.2):

- για $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \text{ J/kgK}$$

- για $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK}$$

- για $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK}$$

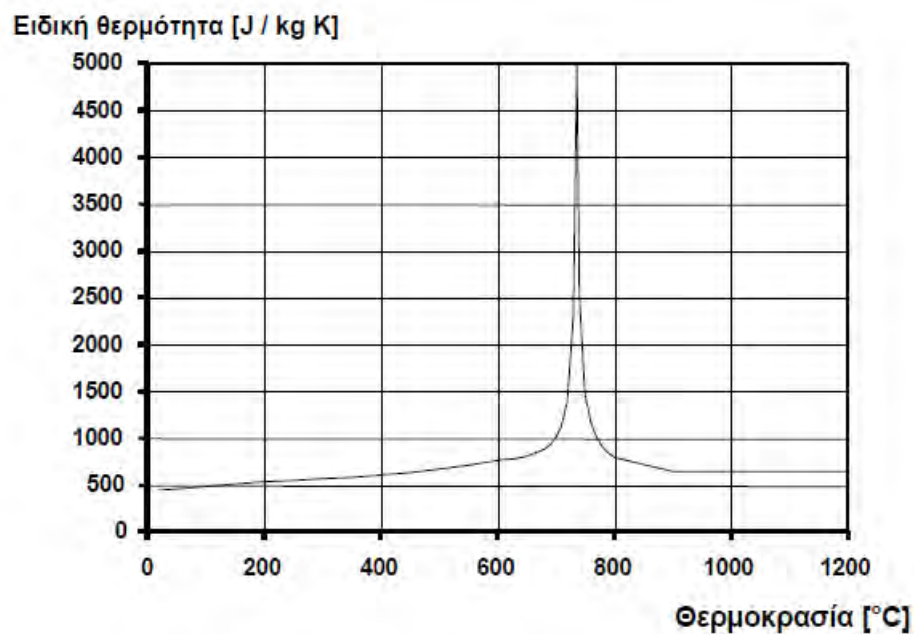
- για $900^\circ\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^\circ\text{C}$:

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

όπου:

θ_a είναι η θερμοκρασία του χάλυβα [$^\circ\text{C}$].

Η μεταβολή της ειδικής θερμότητας με τη θερμοκρασία δίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5-2 Ειδική θερμότητα συνήθους χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας

Η θερμική αγωγιμότητα του χάλυβα προσδιορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2, παράγραφος 3.4.1.3) :

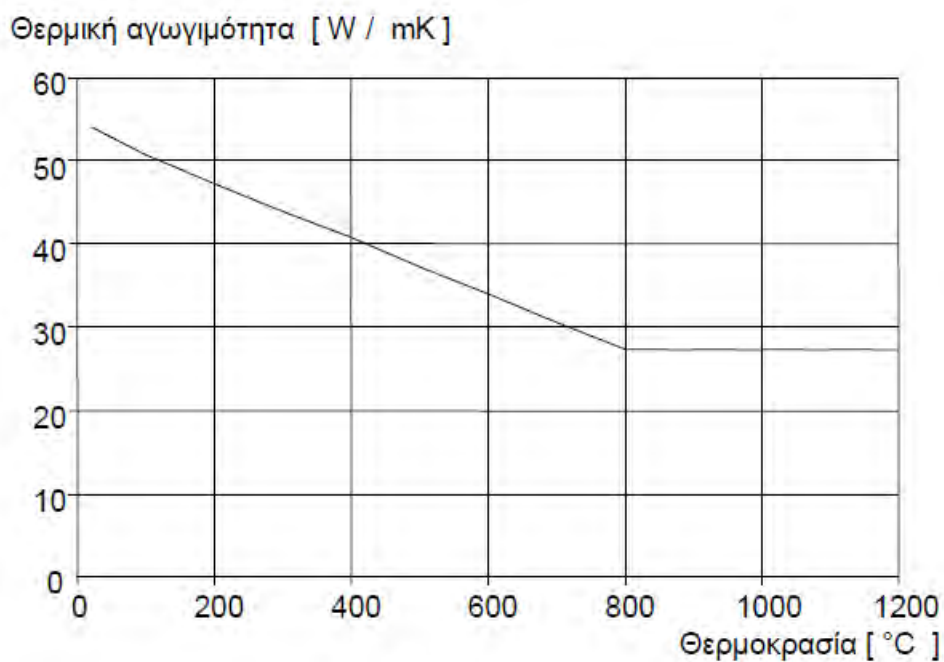
- για $20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK}$$

- για $800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C}$:

$$\lambda_a = 27,3 \text{ W/mK}$$

Η μεταβολή της θερμικής αγωγιμότητας με τη θερμοκρασία φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5-3 Θερμική αγωγιμότητα συνήθους χάλυβα συναρτήσει της θερμοκρασίας

5.2.2 Μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα

Η μείωση της δυσκαμψίας του χάλυβα ξεκινάει σε θερμοκρασία περίπου 200°C ενώ η αντοχή του (τάση διαρροής) ξεκινάει να μειώνεται στους 500°C περίπου. Στον πίνακα που ακολουθεί δίνονται οι μειωτικοί συντελεστές για τις ιδιότητες του χάλυβα (σε υψηλές θερμοκρασίες) που συνδέονται με το διάγραμμα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων. Οι παραπάνω μειωτικοί συντελεστές ορίζονται ως εξής (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1.2, παράγραφος 3.2) :

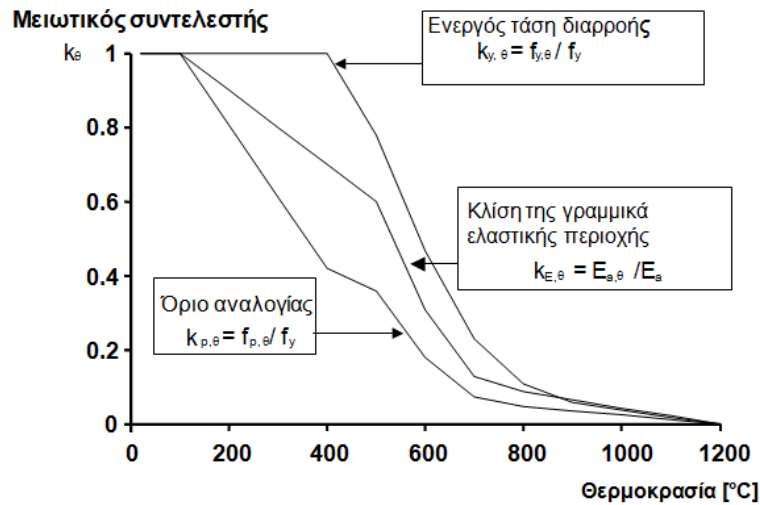
- ενεργός τάση διαρροής ως προς την τάση διαρροής σε 20°C: $k_{y,0} = f_{y,0} / f_y$
- όριο αναλογίας ως προς την τάση διαρροής σε 20°C: $k_{p,0} = f_{p,0} / f_y$
- κλίση της γραμμικά ελαστικής περιοχής ως προς την κλίση στους 20°C: $k_{E,0} = E_{a,0} / E_a$

Πίνακας 5-1 Μειωτικοί συντελεστές για τις ιδιότητες του χάλυβα που συνδέονται με το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων, σε υψηλές θερμοκρασίες

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

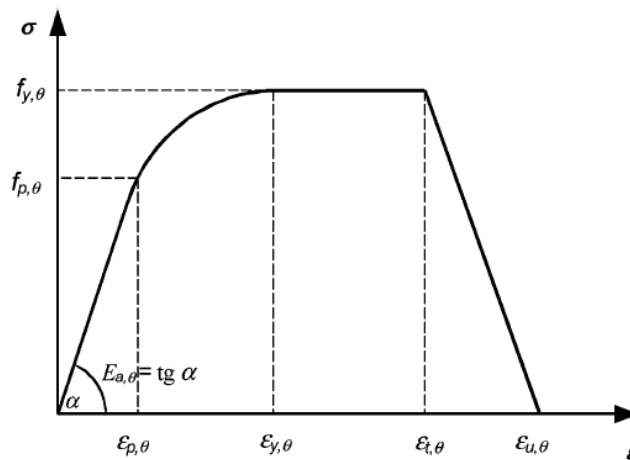
ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Για ενδιάμεσες τιμές της θερμοκρασίας του χάλυβα, μπορεί να χρησιμοποιείται γραμμική παρεμβολή.

Η μεταβολή των παραπάνω συντελεστών συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5-4 Μειωτικοί συντελεστές για τις ιδιότητες συνήθων χαλύβων που συνδέονται με το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων, σε υψηλές θερμοκρασίες

Το αντίστοιχο διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων του χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες δίνεται στο Σχήμα 5-5



Σχήμα 5-5 Διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων χάλυβα σε υψηλές θερμοκρασίες

Όπου:

- $f_{y,\theta}$ ενεργός τάση διαρροής,
- $f_{p,\theta}$ όριο αναλογίας,
- $E_{a,\theta}$ κλίση της γραμμικά ελαστικής περιοχής,
- $\varepsilon_{p,\theta}$ παραμόρφωση αντιστοιχούσα στο όριο αναλογίας,
- $\varepsilon_{y,\theta}$ παραμόρφωση διαρροής, ($\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$)
- $\varepsilon_{t,\theta}$ μέγιστη παραμόρφωση στη στάθμη διαρροής, ($\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$)
- $\varepsilon_{u,\theta}$ οριακή παραμόρφωση ($\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$)

Εναλλακτικά, για θερμοκρασίες μικρότερες των 400°C, η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων μπορεί να επεκταθεί με τις παραμορφώσεις κράτνσης που δίδονται παρακάτω, υπό την προϋπόθεση ότι τοπικός ή καθολικός λυγισμός δεν οδηγεί σε πρόωρη αστοχία (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2, Παράρτημα Α).

- για $0,02 < \varepsilon < 0,04$:

$$\sigma_a = 50(f_{u,\theta} - f_{y,\theta})\varepsilon + 2f_{y,\theta} - f_{u,\theta}$$

- για $0,04 \leq \varepsilon \leq 0,15$:

$$\sigma_a = f_{u,\theta}$$

- για $0,15 < \varepsilon < 0,20$:

$$\sigma = f_{u,\theta}[1 - 20(\varepsilon - 0,15)]$$

- για $\varepsilon \geq 0,20$:

$$\sigma_a = 0,00$$

Όπου :

$f_{u,\theta}$ είναι η οριακή αντοχή, σε υψηλή θερμοκρασία, λαμβάνοντας υπόψη την κράτνση.

Η οριακή αντοχή, σε υψηλή θερμοκρασία, λαμβάνοντας υπόψη την κράτνση, προσδιορίζεται ως εξής:

- για $\theta_a < 300^\circ\text{C}$:

$$f_{u,\theta} = 1,25f_{y,\theta}$$

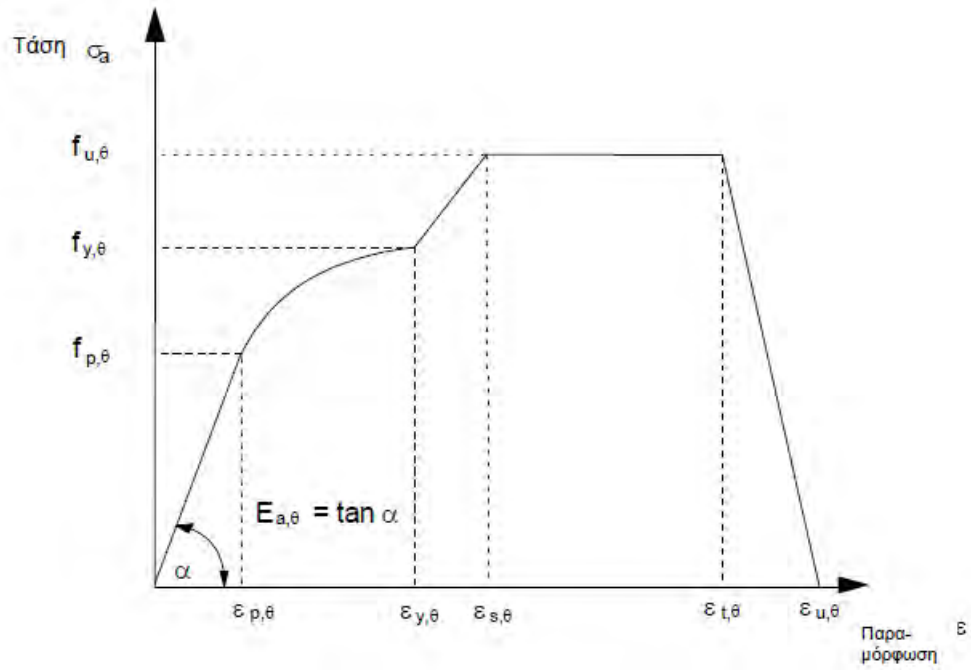
- για $300^\circ\text{C} \leq \theta_a < 400^\circ\text{C}$:

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta}(2 - 0,0025\theta_a)$$

- για $\theta_a \geq 400^\circ\text{C}$:

$$f_{u,\theta} = f_{y,\theta}$$

Η μεταβολή του εναλλακτικού διαγράμματος τάσεων – παραμορφώσεων συναρτήσει της θερμοκρασίας φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 5-6 Εναλλακτική σχέση τάσεων – παραμορφώσεων στην οποία λαμβάνεται υπόψη η κράτωση του υλικού

5.3 Σχεδιασμός κοχλιωτών συνδέσεων έναντι πυρκαγιάς

5.3.1 Αντοχή σχεδιασμού κοχλιών σε διάτμηση

Η αντοχή σχεδιασμού κοχλιών καταπονούμενων σε διάτμηση προσδιορίζεται από τη σχέση (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2, Παράρτημα D):

$$F_{v,t,Rd} = F_{v,Rd} k_{b,2} \gamma_{M2} / \gamma_{M,fi}$$

Όπου:

$k_{b,2}$ είναι ο μειωτικός συντελεστής προσδιοριζόμενος για την κατάλληλη θερμοκρασία κοχλία από τον Πίνακα D.1,

$F_{v,Rd}$ είναι η αντοχή σχεδιασμού σε τέμνουσα του κοχλία ανά επίπεδο διάτμησης, υπολογιζόμενη με την υπόθεση ότι το επίπεδο διάτμησης διέρχεται από το σπείρωμα του κοχλία (παράγραφος 6.5.5 του EN 1993-1-1),

γ_{M2} είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας σε συνήθη θερμοκρασία,

$\gamma_{M,fi}$ είναι ο επιμέρους συντελεστής ασφαλείας για συνθήκες πυρκαγιάς.

Η αντοχή σχεδιασμού κοχλιών σε σύνθλιψη άντυνας σε πυρκαγιά προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_{b,t,Rd} = F_{b,Rd} k_{b,2} \gamma_{M2} / \gamma_{M,fi}$$

Όπου:

$F_{b,Rd}$ προσδιορίζεται από την παράγραφο 6.5.5 του EN1993-1-1,

$k_{b,2}$ είναι ο μειωτικός συντελεστής προσδιοριζόμενος για την κατάλληλη θερμοκρασία κοχλία από τον Πίνακα 5-2.

5.3.2 Αντοχή σχεδιασμού κοχλιών σε εφελκυσμό

Η αντοχή σχεδιασμού σε εφελκυσμό ενός μεμονωμένου κοχλία σε πυρκαγιά προσδιορίζεται από τη σχέση (Ευρωκώδικας 3, Μέρος 1-2, Παράρτημα D):

$$F_{ten,t,Rd} = F_{t,Rd} k_{b,2} \gamma_{M2} / \gamma_{M,fi}$$

Όπου:

$F_{t,Rd}$ προσδιορίζεται από την παράγραφο 6.5.5 του EN1993-1-1

$k_{b,2}$ είναι ο μειωτικός συντελεστής προσδιοριζόμενος για την κατάλληλη θερμοκρασία κοχλία από τον Πίνακα 5.2

Πίνακας 5-2 Συντελεστές μείωσης της αντοχής για κοχλίες και συγκολλήσεις

Θερμοκρασία θ_a	Μειωτικός συντελεστής για κοχλίες, $k_{b,2}$ (Εφελκυσμός και διάτμηση)	Μειωτικός συντελεστής για συγκολλήσεις, k_w
20	1,000	1,000
100	0,968	1,000
150	0,952	1,000
200	0,935	1,000
300	0,903	1,000
400	0,775	0,876
500	0,550	0,627
600	0,220	0,378
700	0,100	0,130
800	0,067	0,074
900	0,033	0,018
1000	0,000	0,000

6 Απόκριση προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας

6.1 Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μη γραμμική ανάλυση των 3 προσομοιωμάτων κόμβου δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 10, 15 και 20 χιλιοστών αντίστοιχα, σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας (πυρκαγιά). Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιούνται αναλύσεις για θερμοκρασίες από 20 (συνθήκες περιβάλλοντος) έως και 1000 βαθμούς Κελσίου και από τα αποτελέσματα που προκύπτουν παράγονται οι καμπύλες ροπής-στροφής για καμπτική καταπόνηση της δοκού για θερμοκρασίες 20, 200, 400, 600, 800 και 1000 βαθμούς Κελσίου με την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε και στο πρώτο μέρος της διπλωματικής εργασίας (παράγραφος 4.1). Στις αναλύσεις αυτές λαμβάνεται υπόψη η αλλαγή των ιδιοτήτων του χάλυβα για κάθε μία από τις θερμοκρασίες που εξετάζεται, σύμφωνα με όσα προβλέπει ο Ευρωκώδικας 3. Επίσης μελετάται και σε αυτό το μέρος της διπλωματικής εργασίας η μορφή αστοχίας των κόμβων για κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιείται η ανάλυση.

Για να είναι εφικτή η γενίκευση των αποτελεσμάτων, στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο δεύτερο αυτό μέρος της εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν οι ονομαστικές τιμές των ιδιοτήτων του χάλυβα και όχι οι πειραματικές. Επίσης, υπολογίστηκε η πλαστική ροπή αντοχής $M_{j,Rd}$ κάθε κόμβου που εξετάστηκε σύμφωνα με όσα προβλέπει ο Ευρωκώδικας 3 και οι τιμές που προέκυψαν συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές από τις αναλύσεις των προσομοιωμάτων με το πρόγραμμα MARC.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι μειωμένες μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που συνδέονται με το διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων σε υψηλές θερμοκρασίες, για τα επιμέρους τμήματα της σύνδεσης των προσομοιωμάτων που εξετάζονται.

Πίνακας 6-1 Ιδιότητες χάλυβα που συνδέονται με το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων για υψηλές θερμοκρασίες (δοκός IPE300, μετωπική πλάκα 10,15 και 20mm και κοχλίες)

	1ο, 2ο και 3ο προσομοίωμα S235						
	Θερμοκρασία	T=20°C	T=200°C	T=400°C	T=600°C	T=800°C	T=1000°C
Κορμός/Πέλμα S235	E_{α,θ} (Mpa)	210000	189000	147000	65100	18900	9450
	f_{y,θ} (Mpa)	235	235	235	110.45	25.85	9.4
	f_{p,θ} (Mpa)	235	189.645	98.7	42.3	11.75	5.875
Μετωπική πλάκα S355	E_{α,θ} (Mpa)	210000	189000	147000	65100	18900	9450
	f_{y,θ} (Mpa)	355	355	355	166.85	39.05	14.2
	f_{p,θ} (Mpa)	355	286.485	149.1	63.9	17.75	8.875
Κοχλίες 8.8	E_{α,θ} (Mpa)	210000	189000	147000	65100	18900	9450
	f_{y,θ} (Mpa)	640	640	640	300.8	70.4	25.6
	f_{p,θ} (Mpa)	640	516.48	268.8	115.2	32	16

6.2 Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 10 χιλιοστών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας

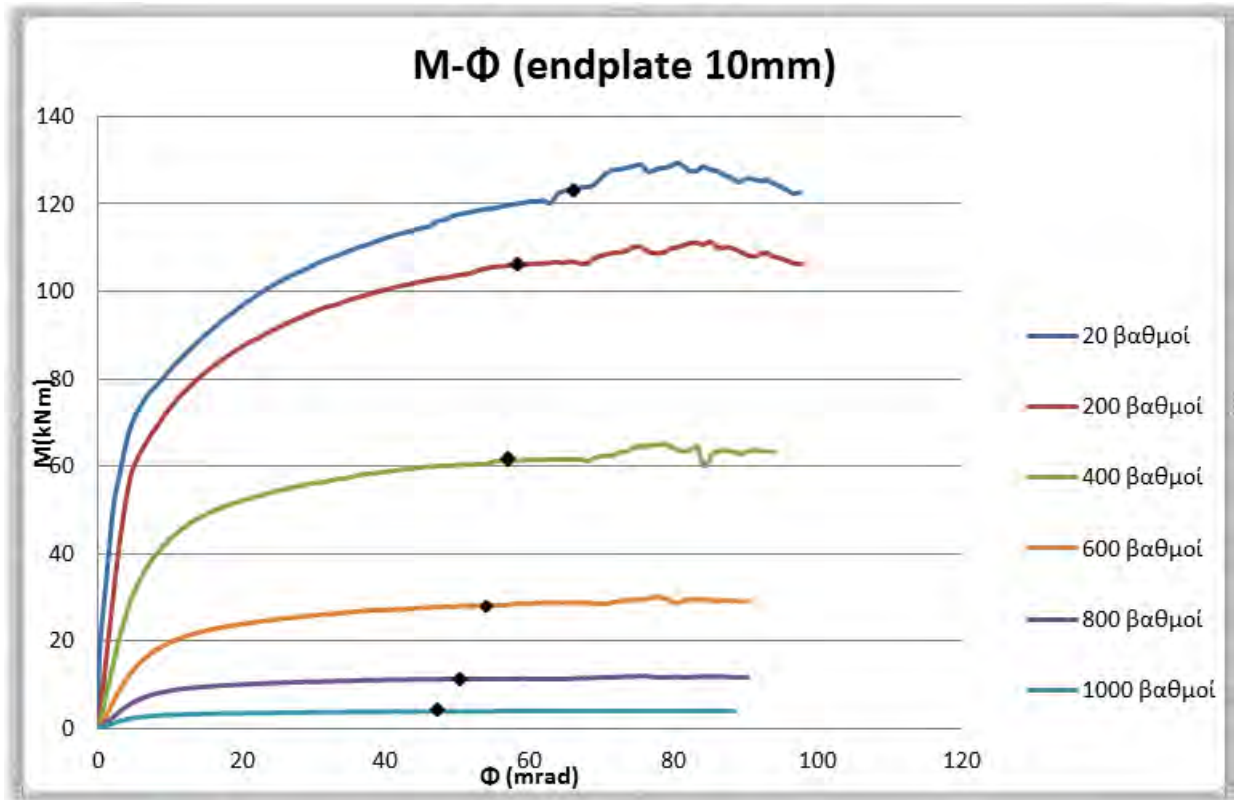
Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 10 χιλιοστών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιούνται αναλύσεις για θερμοκρασίες από 20 (συνθήκες περιβάλλοντος) έως και 1000 βαθμούς Κελσίου και από τα αποτελέσματα που προκύπτουν παράγονται οι καμπύλες ροπής-στροφής για καμπτική καταπόνηση της δοκού για θερμοκρασίες 200, 400, 600, 800 και 1000 βαθμούς Κελσίου. Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών της καμπύλης ροπής - στροφής του εξεταζόμενου κόμβου, όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση του μοντέλου καθώς επίσης και οι τιμές της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αλλά και όπως υπολογίζεται βάσει των διατάξεων του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Να διευκρινίσουμε πως η μέγιστη ροπή και στροφή του κόμβου αντιστοιχούν στο σημείο εκείνο της ανάλυσης όπου ένα ή περισσότερα από τα συστατικά μέρη της σύνδεσης φθάνουν την οριακή τους παραμόρφωση. Στο σημείο αυτό θεωρούμε πως έχουμε και την αστοχία της σύνδεσης. Η μέγιστη ροπή και στροφή, δηλαδή, που παρουσιάζονται στους πίνακες που ακολουθούν δεν ταυτίζονται απαραίτητα με τη μέγιστη ροπή και στροφή του διαγράμματος M-φ αλλά εξαρτώνται από την αστοχία του κόμβου βάσει της κατανομής των πλαστικών παραμορφώσεων των συστατικών του μερών. Τέλος, μελετάται η μορφή αστοχίας του κόμβου για κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιείται η ανάλυση.

Πίνακας 6-2 Κύρια χαρακτηριστικά καμπύλης ροπής – στροφής (μετωπική πλάκα 10mm)

Δοκιμή FS1	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων			
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$\Phi_{M,Rd}$ (mrad)	M_{max} (kNm)	Φ_{max} (mrad)
T=20°C	96	6.82	120.3	65.99
T=200°C	79	13.34	105.57	54.93
T=400°C	43	10.35	61.19	55.17
T=600°C	18	8.05	28.04	51.14
T=800°C	5	6.62	11.37	50.40
T=1000°C	2.2	13.54	3.82	45.33

Πίνακας 6-3 Σύγκριση των τιμών της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$ του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων FS1 με τις διατάξεις του EC3

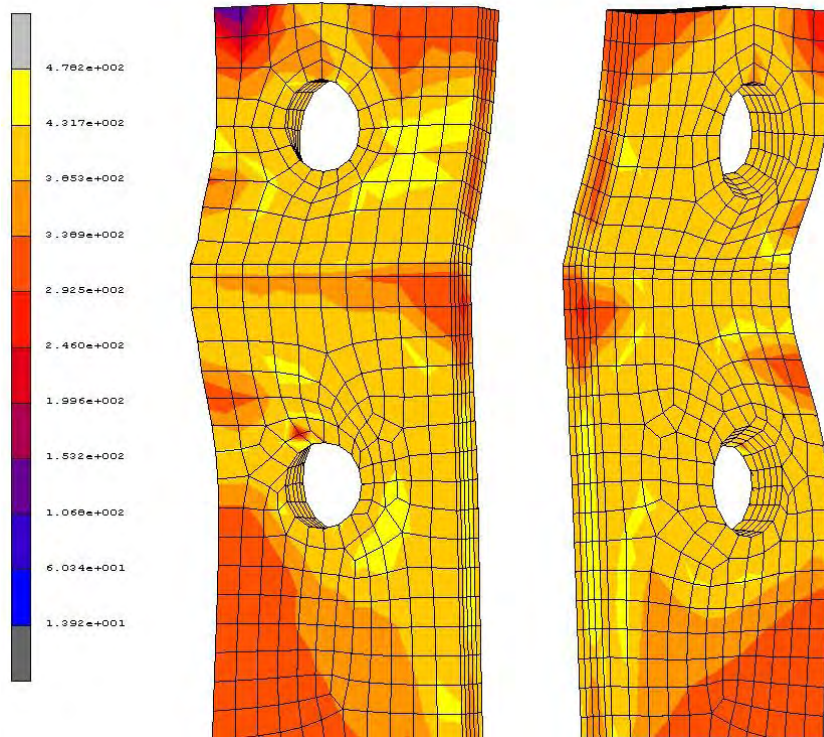
Δοκιμή FS1	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων	EC3	Λόγος
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)	
T=20°C	96	76.83	0.8
T=200°C	77	61.7	0.8
T=400°C	43	33.74	0.79
T=600°C	18	14.27	0.8
T=800°C	5	3.85	0.79
T=1000°C	2.2	1.81	0.8



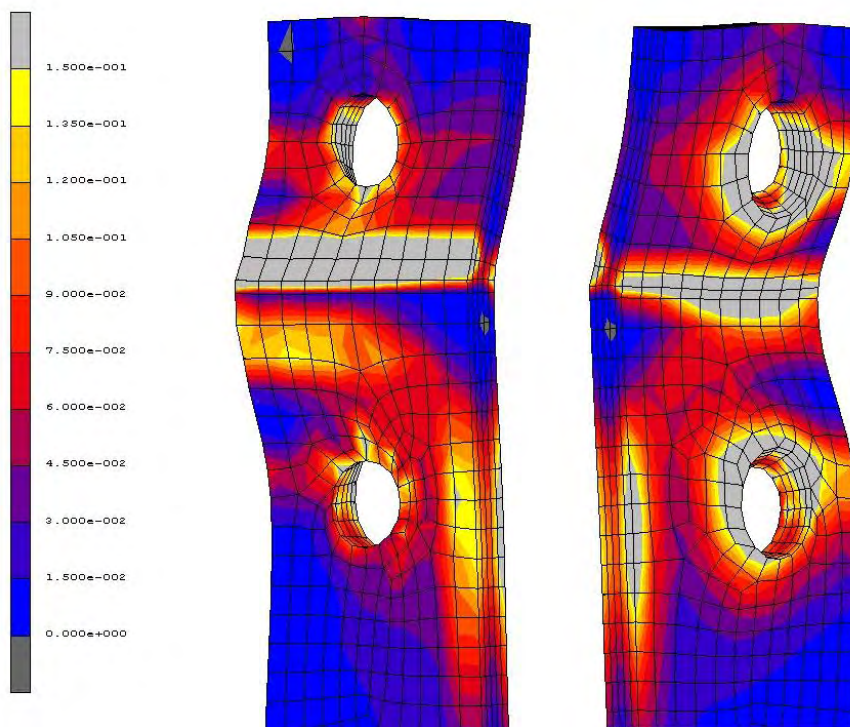
Σχήμα 6-1 Καμπύλες ροπής-στροφής δοκιμής FS1 για κάθε θερμοκρασία

Στο σημείο εκείνο της ανάλυσης, όπου οποιοδήποτε από τα συστατικά μέρη του κόμβου φθάσει την οριακή του παραμόρφωση, υπολογίζεται η ροπή που εμφανίζεται στον κόμβο η οποία ισούται με τη μέγιστη ροπή M_{max} . Επίσης προσδιορίζεται η στροφή του κόμβου που αντιστοιχεί στη μέγιστη ροπή. Ένα πρώτο συμπέρασμα αφορά στη μείωση της αντοχής του κόμβου με την αύξηση της θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασία 400°C ο κόμβος έχει ήδη χάσει λίγο λιγότερο από από τη μισή του αντοχή, ενώ σε θερμοκρασία 1000°C η αντοχή του έχει φθάσει στο 2,2% της αρχικής του αντοχής. Σχετικά με τον υπολογισμό της αντοχής, προκύπτει ότι οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003) υποεκτιμούν και σε αυτή την περίπτωση τις τιμές της προσομοίωσης, λιγότερο όμως από την περίπτωση που η ανάλυση πραγματοποιείται σε συνθήκες περιβάλλοντος, δεδομένου ότι στο δεύτερο αυτό μέρος της διπλωματικής εργασίας, δε λαμβάνεται υπόψη η κράτυνση του χάλυβα μετά την αρχική πλαστικοποίηση του. Πιο συγκεκριμένα ο Ευρωκώδικας 3 υπολογίζει την πλαστική ροπή αντοχής στο 80% περίπου της αντίστοιχης τιμής του του κόμβου του προσομοιώματος. Η αντίστοιχη απόκλιση σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι επίσης στο 80%.

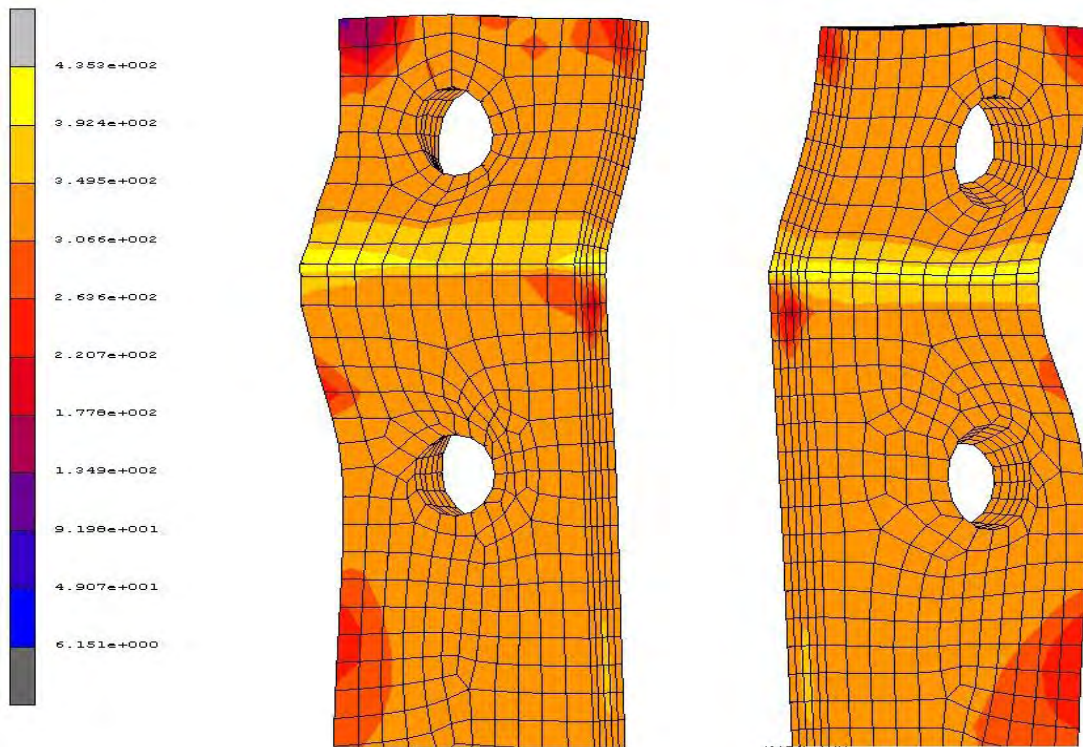
Τέλος, προκύπτει πως η αστοχία του κόμβου με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 10 χιλιοστών, οφείλεται σε αστοχία της μετωπικής πλάκας, σε κάθε θερμοκρασία που εξετάζεται, γεγονός αναμενόμενο καθώς, λόγω του μικρού της πάχους, είναι καθοριστικής σημασίας για την απόκριση στην πλαστική περιοχή. Σε κάθε περίπτωση δηλαδή, η μετωπική πλάκα φθάνει την οριακή της παραμόρφωση ($\epsilon_u = 0,15$). Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται η κατανομή της τάσης von Mises και η κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στο σημείο εκείνο της ανάλυσης όπου εμφανίζεται η μέγιστη ροπή M_{max} , σημείο που θεωρούμε ότι εμφανίζεται αστοχία της σύνδεσης λόγω της αστοχίας κάποιου εκ των συστατικών μερών της σύνδεσης (στην προκειμένη περίπτωση, της μετωπικής πλάκας). Στο παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος της εργασίας, παρουσιάζονται εικόνες της κατανομής των πλαστικών παραμορφώσεων και σε στάδια της ανάλυσης πριν και μετά την εμφάνιση της αστοχίας της μετωπικής πλάκας.



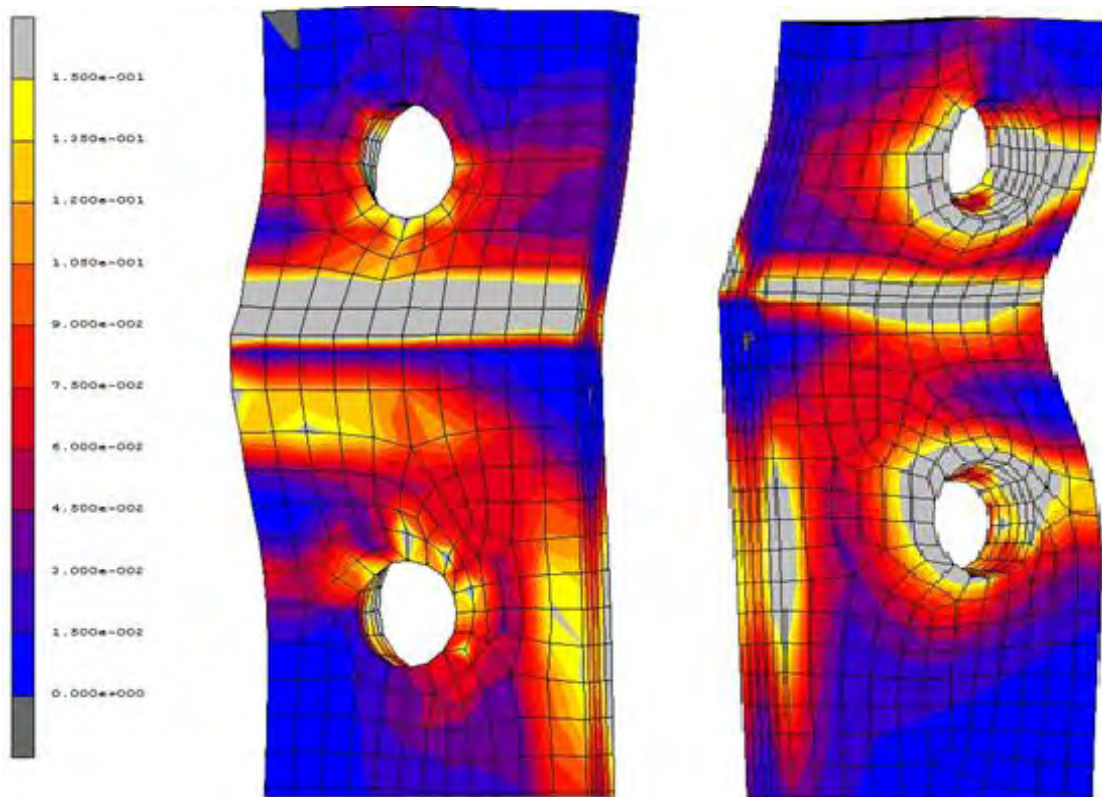
Σχήμα 6-2 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 200°C (για Mmax)



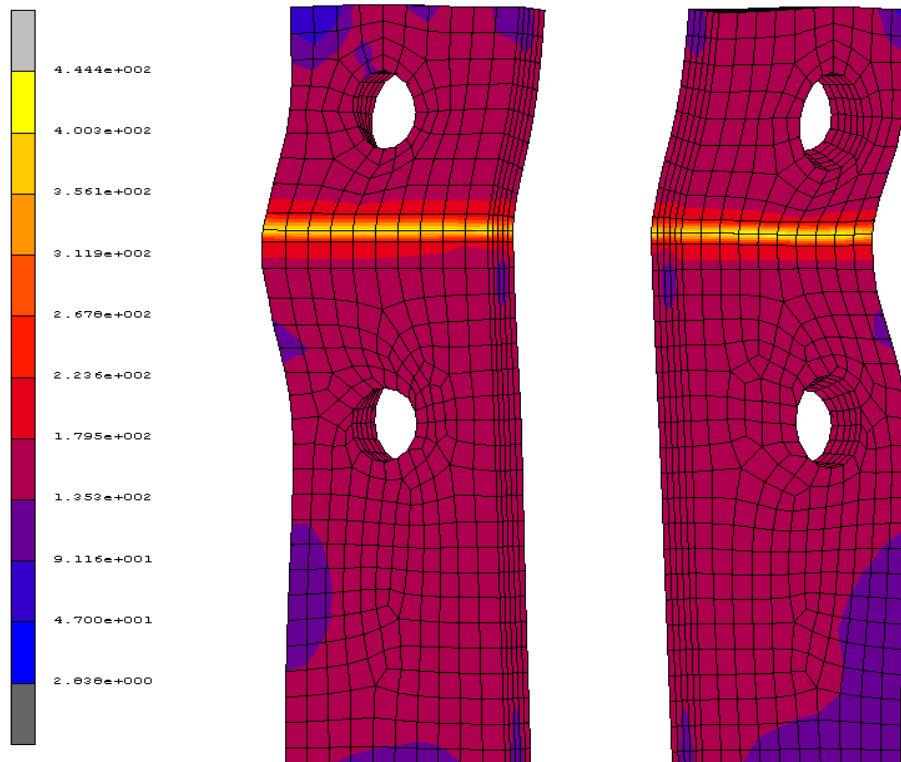
Σχήμα 6-3 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 200°C (για Mmax)



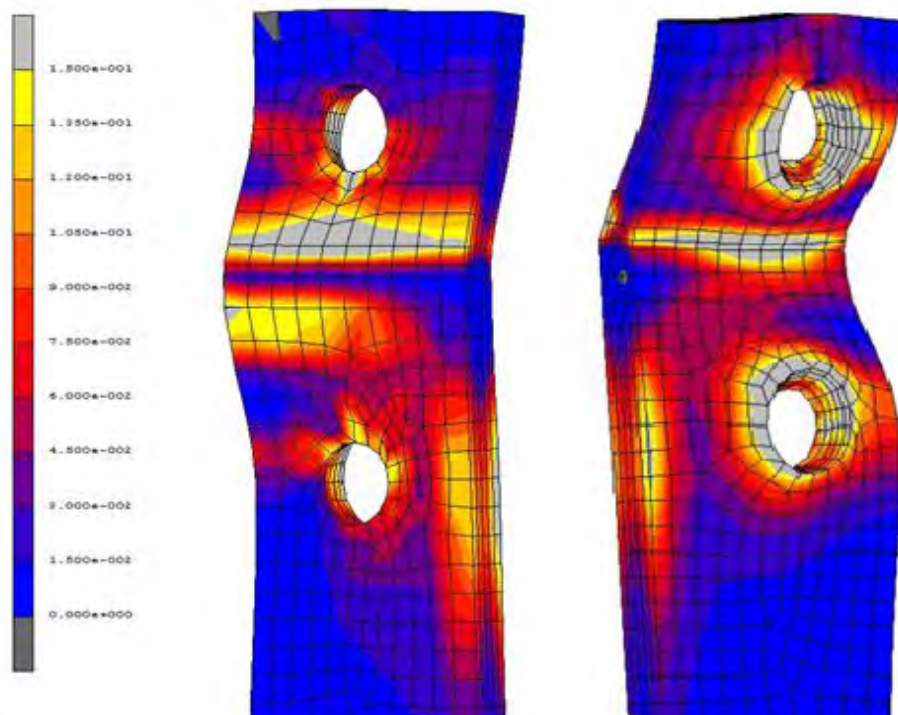
Σχήμα 6-4 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 400°C (για Mmax)



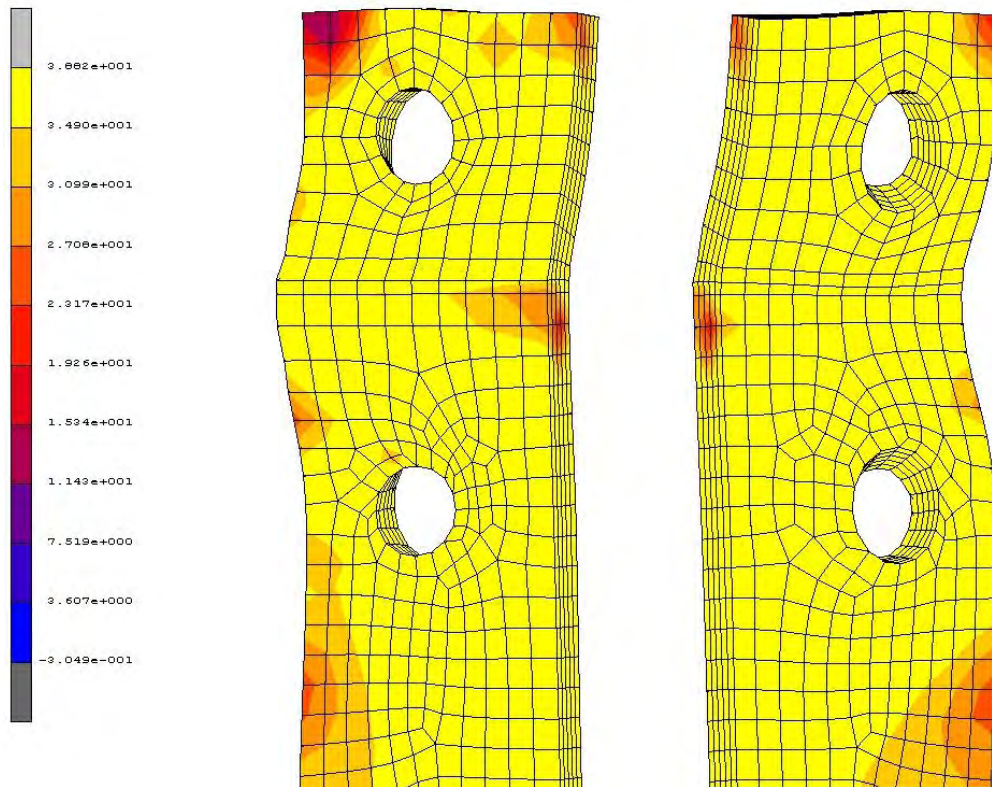
Σχήμα 6-5 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 400°C (για Mmax)



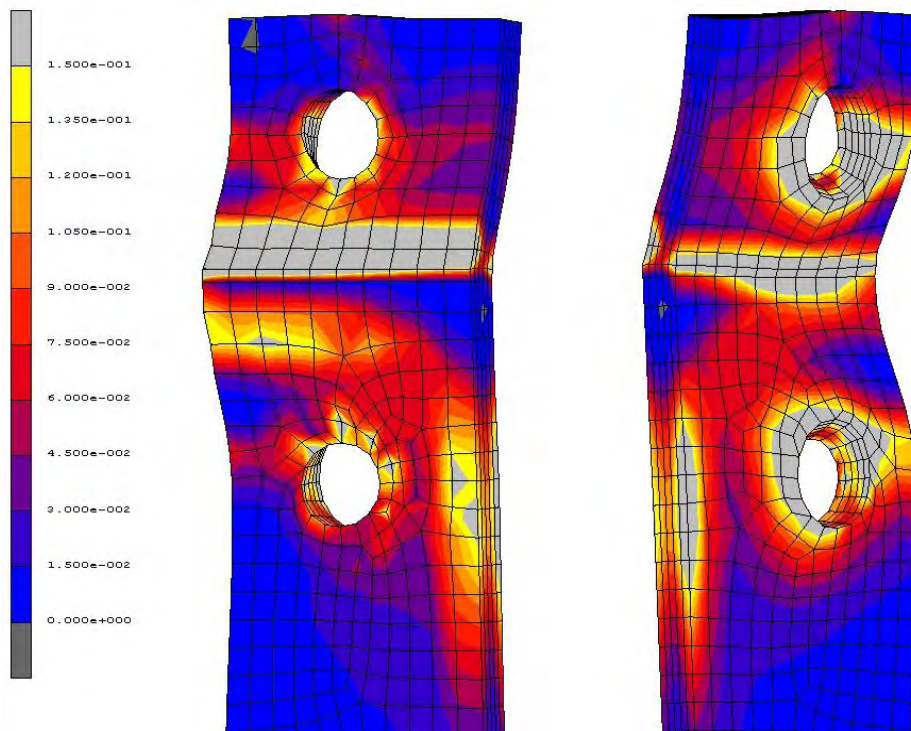
Σχήμα 6-6 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 600°C (για Mmax)



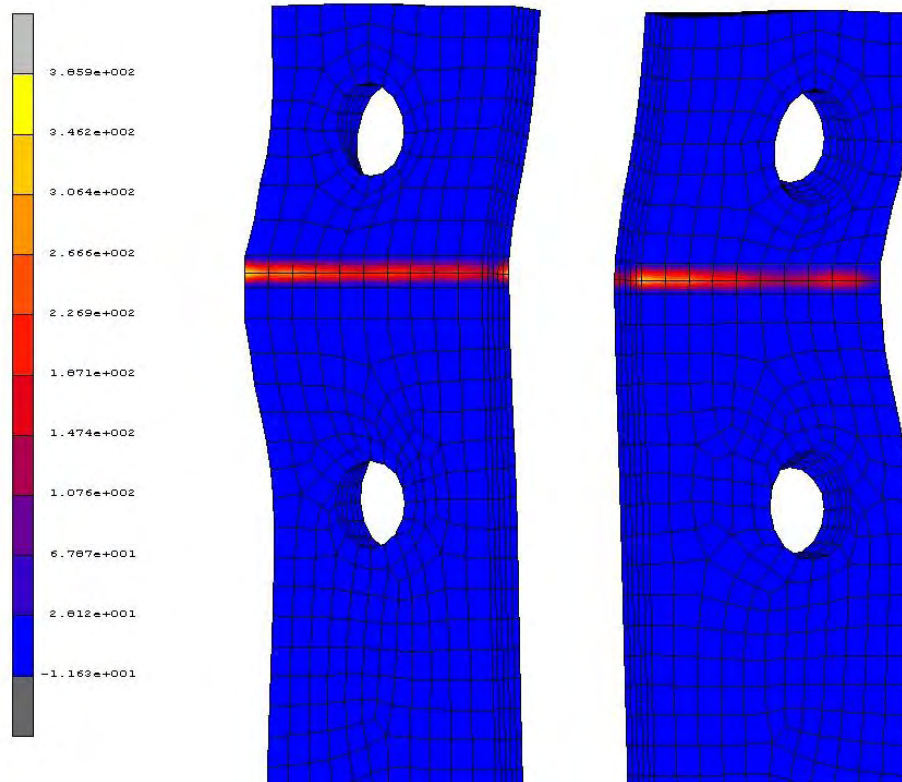
Σχήμα 6-7 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 600°C (για Mmax)



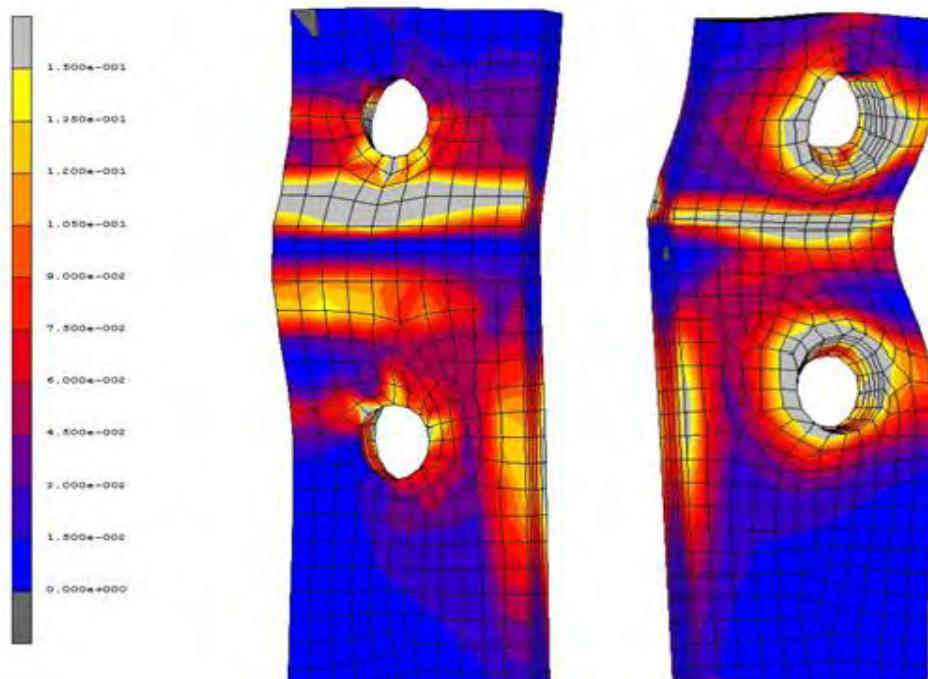
Σχήμα 6-8 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 800°C (για Mmax)



Σχήμα 6-9 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 800°C (για Mmax)



Σχήμα 6-10 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 1000°C (για Mmax)



Σχήμα 6-11 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 1^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 1000°C (για Mmax)

6.3 Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 15 χιλιοστών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας

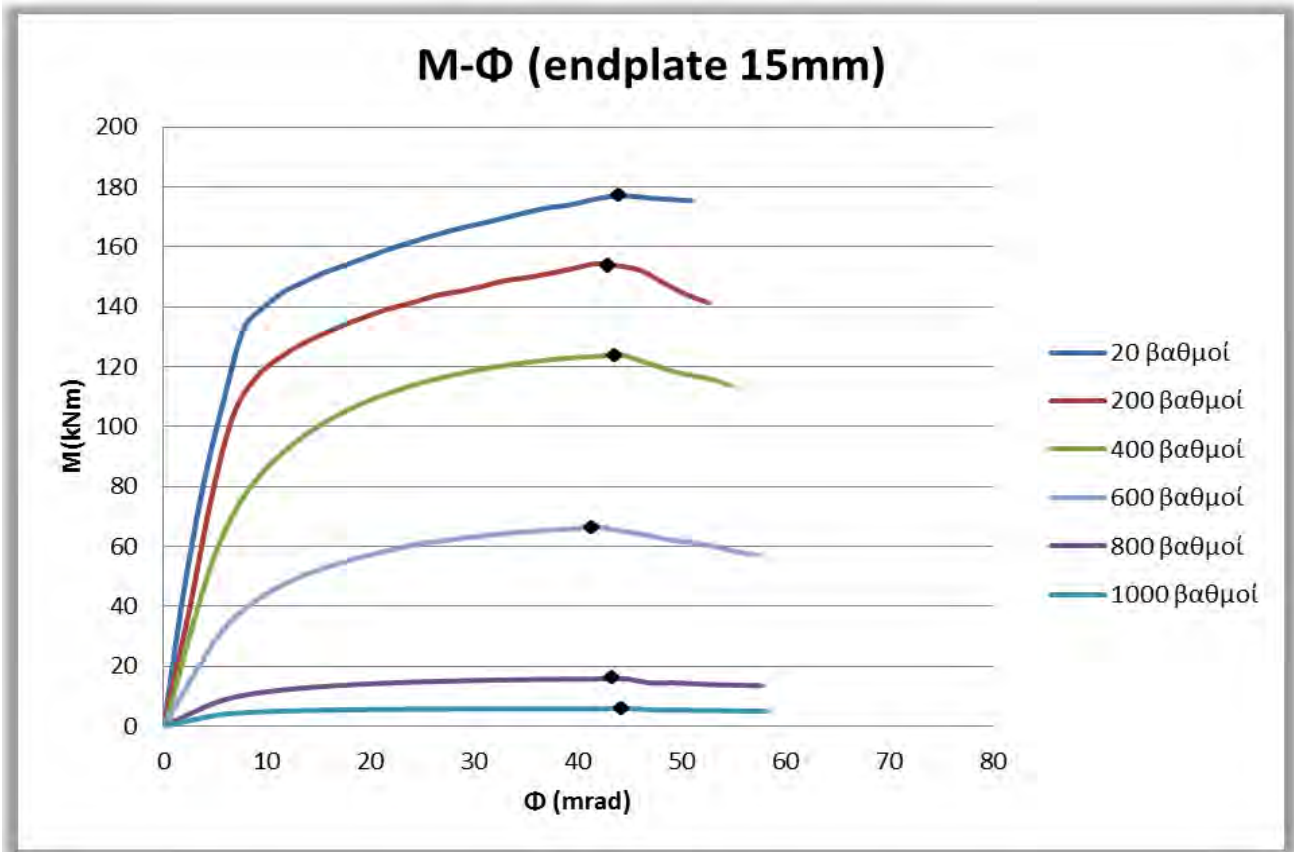
Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 15 χιλιοστών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιούνται αναλύσεις για θερμοκρασίες από 20 (συνθήκες περιβάλλοντος) έως και 1000 βαθμούς Κελσίου και από τα αποτελέσματα που προκύπτουν παράγονται οι καμπύλες ροπής-στροφής για καμπτική καταπόνηση της δοκού για θερμοκρασίες 20, 200, 400, 600, 800 και 1000 βαθμούς Κελσίου. Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών της καμπύλης ροπής - στροφής του εξεταζόμενου κόμβου, όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση του μοντέλου καθώς επίσης και οι τιμές της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αλλά και όπως υπολογίζεται βάσει των διατάξεων του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Επίσης μελετάται η μορφή αστοχίας του κόμβου για κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιείται η ανάλυση.

Πίνακας 6-4 Κύρια χαρακτηριστικά καμπύλης ροπής – στροφής (μετωπική πλάκα 15mm)

Δοκιμή FS2	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων			
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$\Phi_{M,Rd}$ (mrad)	M_{max} (kNm)	Φ_{max} (mrad)
T=20°C	151	8.0	176.88	45.31
T=200°C	120	11.02	154.38	43.81
T=400°C	80	9.16	123.96	43.94
T=600°C	34	7.32	66.34	42.03
T=800°C	9	5.49	15.75	44.44
T=1000°C	3.5	3.67	5.82	45.07

Πίνακας 6-5 Σύγκριση των τιμών της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$ του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων FS2 με τις διατάξεις του EC3

Δοκιμή FS2	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων	EC3	Λόγος
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)	
T=20°C	151	132.53	0.88
T=200°C	120	107.84	0.90
T=400°C	77	68.25	0.89
T=600°C	33	29.67	0.9
T=800°C	8.5	7.73	0.9
T=1000°C	3.5	3.17	0.91

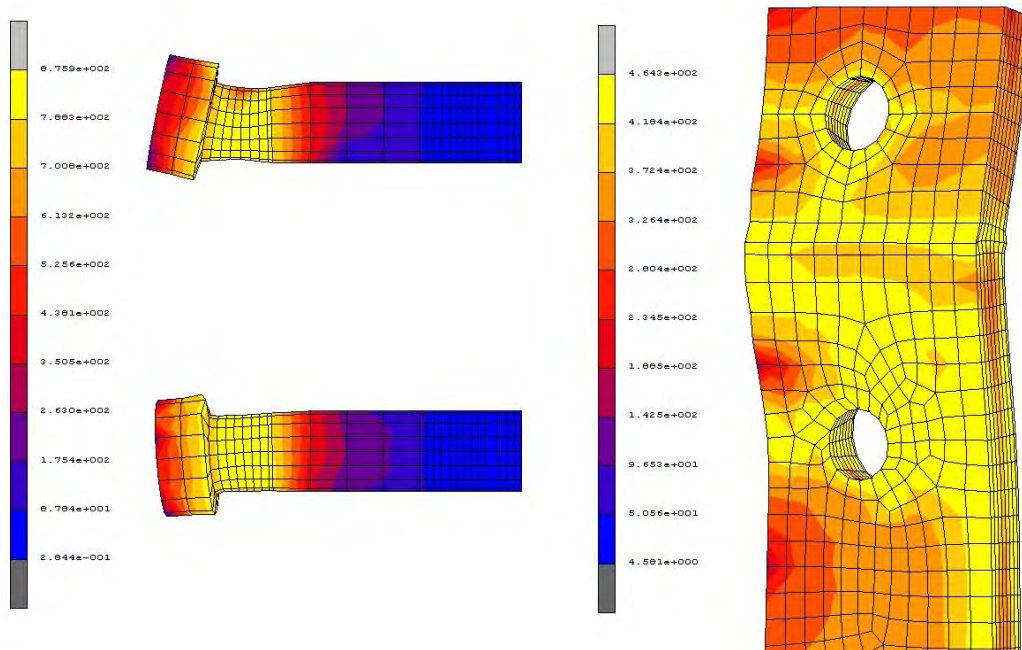


Σχήμα 6-12 Καμπύλες ροπής-στροφής δοκιμής FS2 για κάθε θερμοκρασία

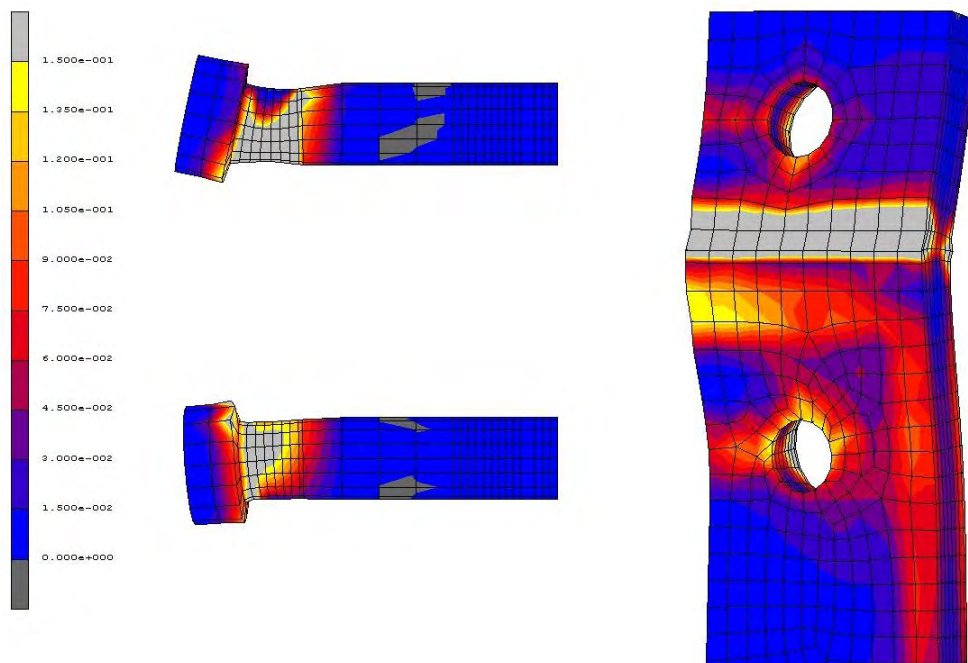
Και σε αυτή την περίπτωση, παρατηρείται ραγδαία μείωση της αντοχής του κόμβου με την αύξηση της θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασία 400°C ο κόμβος έχει ήδη χάσει το 51% της αντοχής, σε θερμοκρασία 600°C το 80% της αντοχής του ενώ σε θερμοκρασία 1000°C η αντοχή του έχει φθάσει στο 2.3% της αρχικής του αντοχής. Ο Ευρωκώδικας 3 υπολογίζει την πλαστική ροπή αντοχής στο 90% περίπου της αντίστοιχης τιμής του κόμβου του προσομοιώματος, τη στιγμή που η αντίστοιχη απόκλιση σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι στο 88%.

Αντίθετα με την προηγούμενη περίπτωση, όπου στην αστοχία του κόμβου οδήγησε η αστοχία της προεκτεινόμενης μετωπικής πλάκας, καθοριστική για τη συμπεριφορά του κόμβου, αυτή τη φορά, είναι η συμπεριφορά των κοχλιών. Από τις αναλύσεις προκύπτει πως η αστοχία του κόμβου με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 15 χιλιοστών, οφείλεται σε αστοχία των κοχλιών της εφελκυόμενης ζώνης για κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιείται η ανάλυση, ενώ εμφάνιση πλαστικών παραμορφώσεων στη μετωπική πλάκα έχουμε σε περιορισμένη έκταση, κυρίως στις υψηλότερες θερμοκρασίες (600°C και πάνω). Από τη θεώρηση του ισοδύναμου βραχέος T συμπεραίνουμε ότι εμφανίζεται ο 1^{ος} μηχανισμός αστοχίας στην πρώτη σειρά κοχλιών και ο 2^{ος} μηχανισμός αστοχίας στη δεύτερη σειρά κοχλιών. Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises και των πλαστικών παραμορφώσεων για ροπή ίση με τη M_{max} , που θεωρούμε ότι εμφανίζεται στο σημείο εκείνο της ανάλυσης που προκύπτει η αστοχία της σύνδεσης σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει και στην προηγούμενη ανάλυση, για κάθε θερμοκρασία που

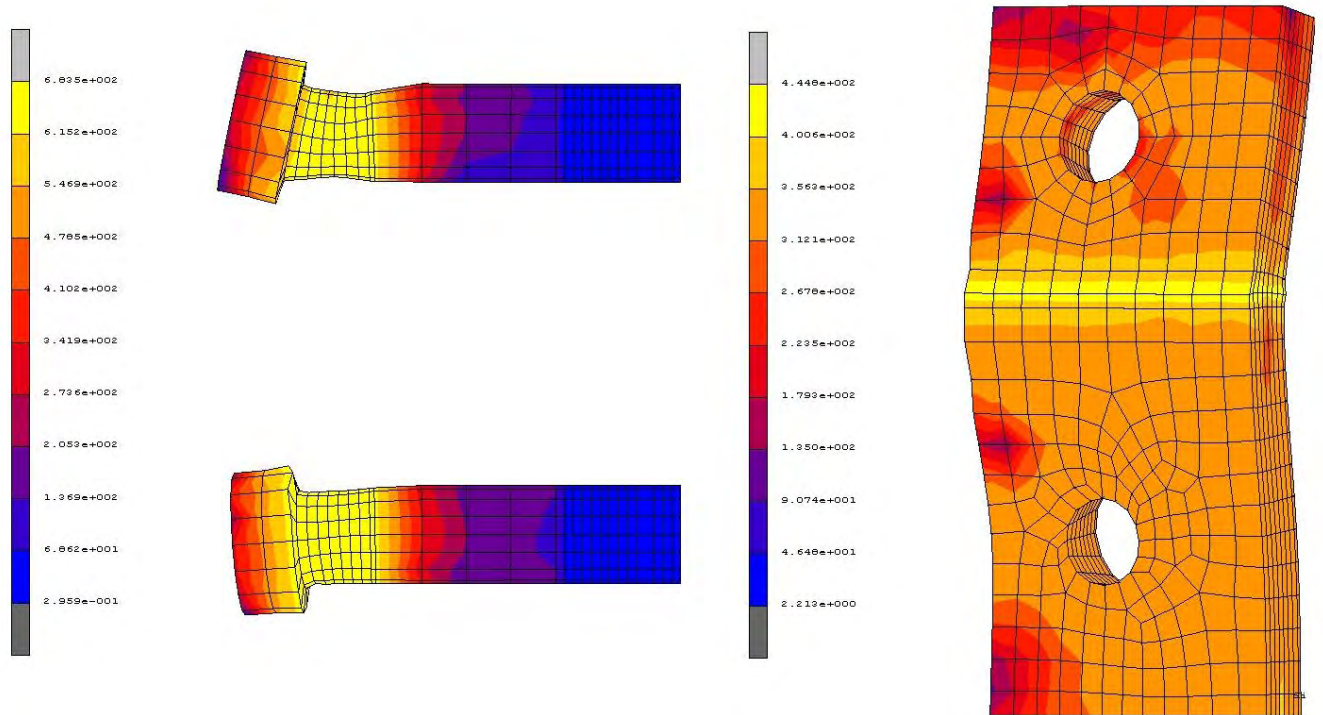
πραγματοποιείται η ανάλυση. Στο παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος της εργασίας, παρουσιάζονται εικόνες της κατανομής των πλαστικών παραμορφώσεων και σε στάδια της ανάλυσης πριν και μετά την εμφάνιση της αστοχίας των κοχλιών της εφελκόμενης ζώνης.



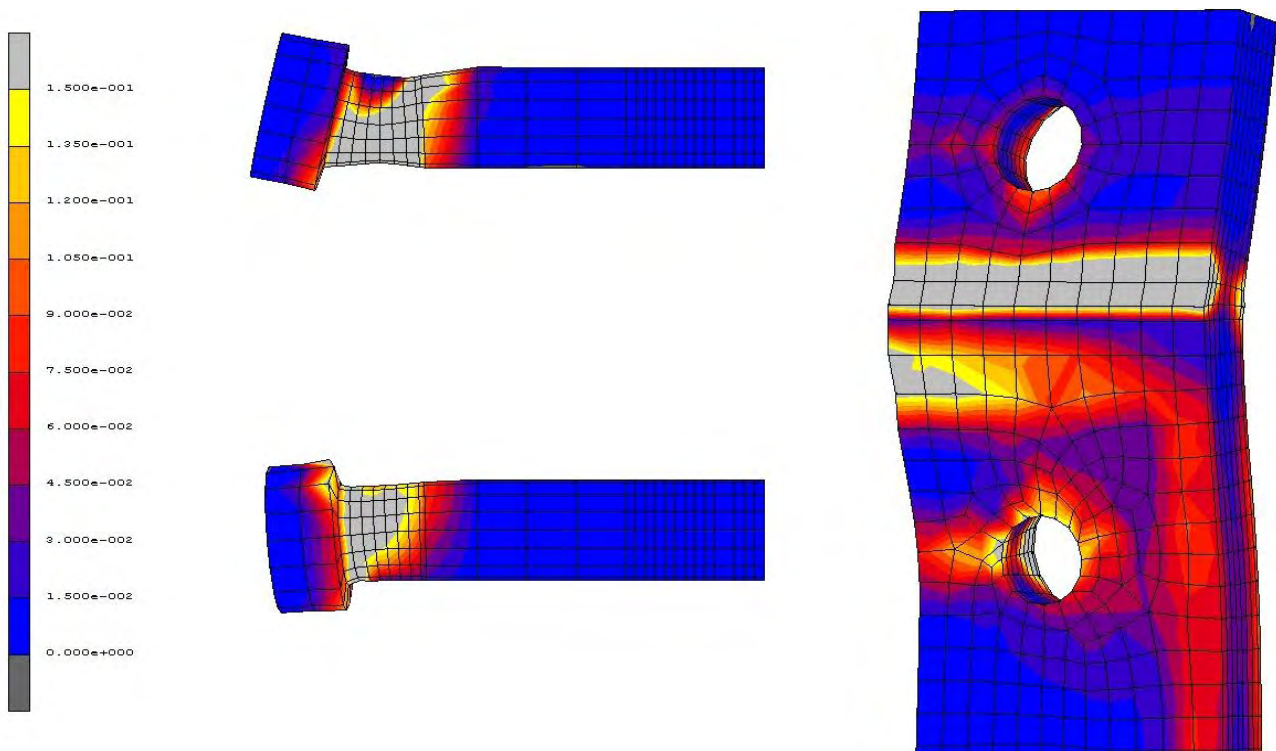
Σχήμα 6-13 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 200°C (για Mmax)



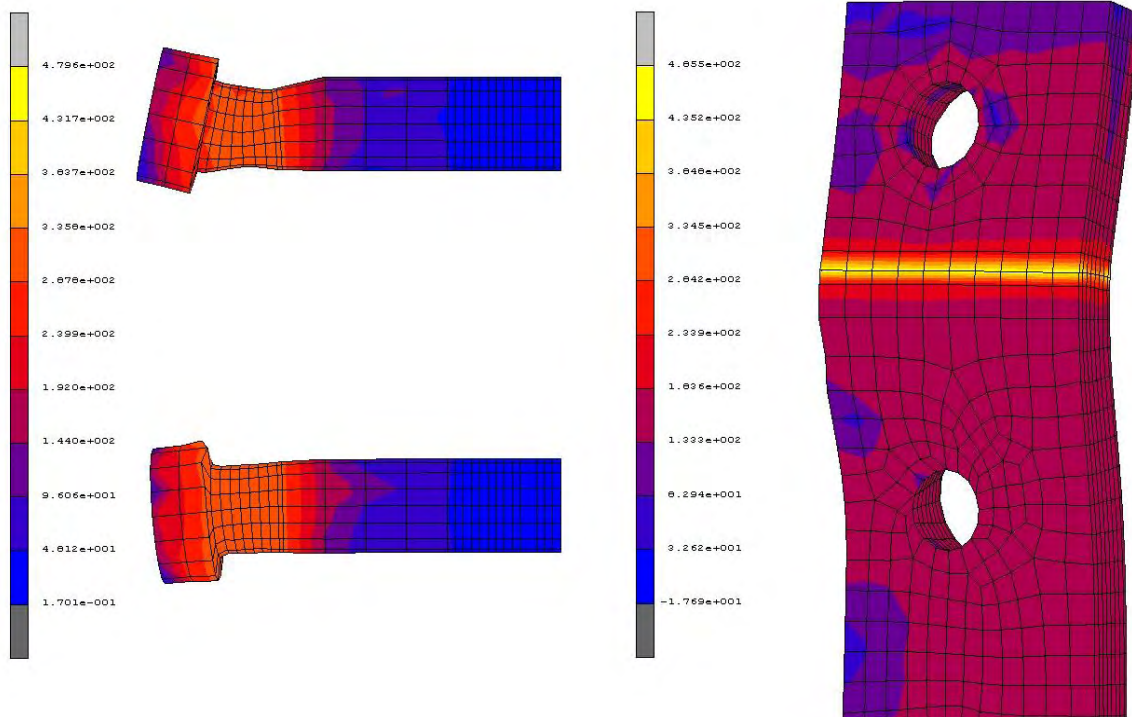
Σχήμα 6-14 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 200°C (για Mmax)



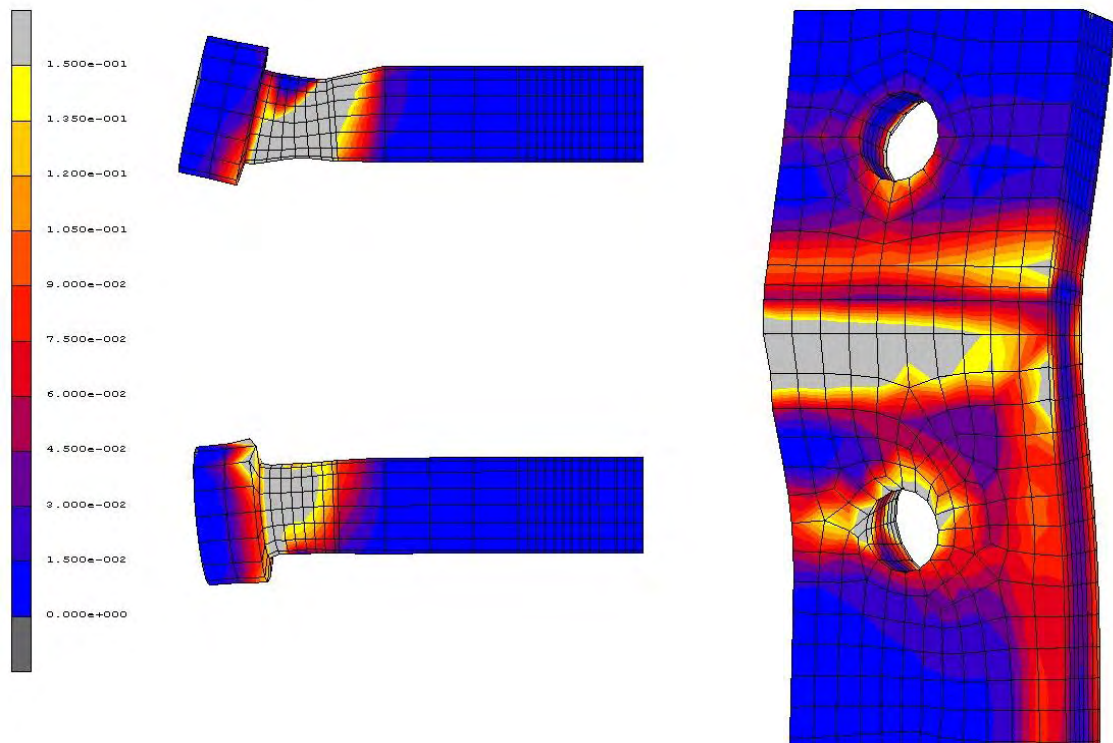
Σχήμα 6-15 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 400°C (για Mmax)



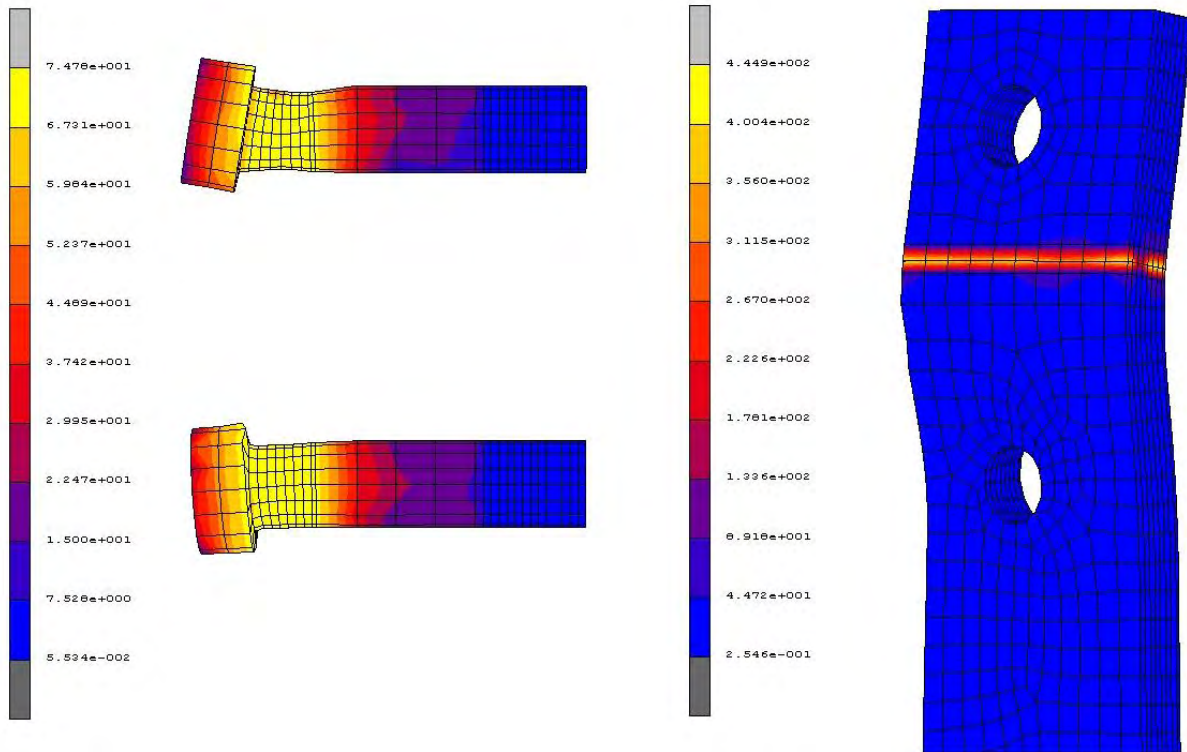
Σχήμα 6-16 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 400°C (για Mmax)



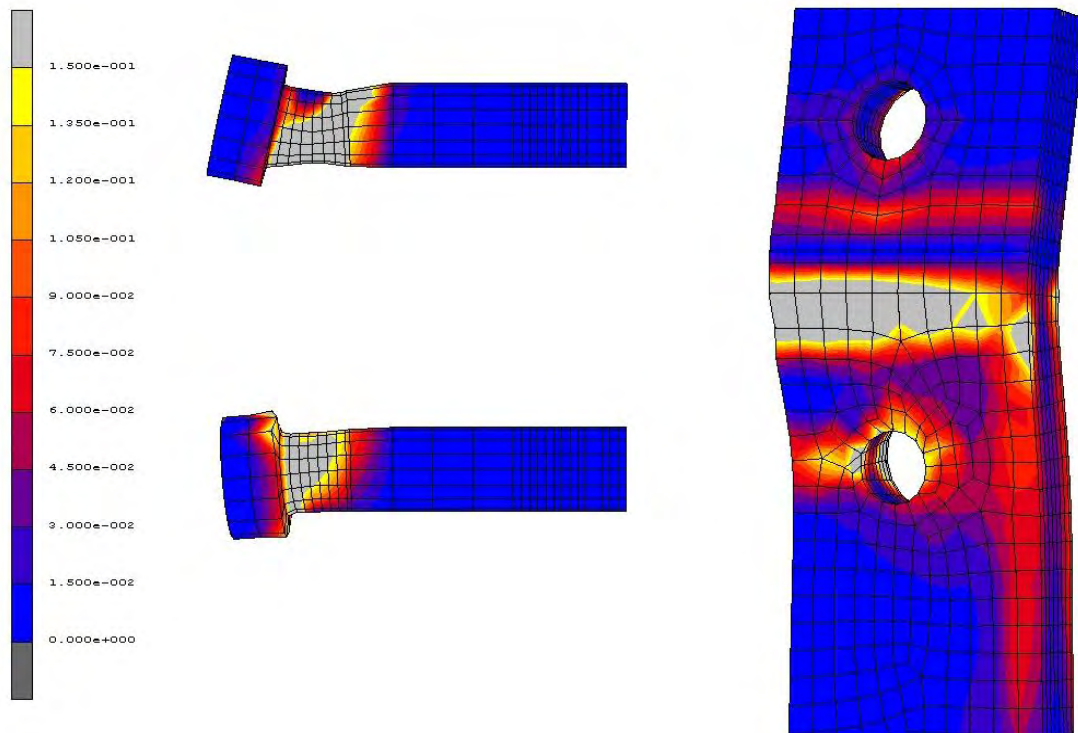
Σχήμα 6-17 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 600°C (για Mmax)



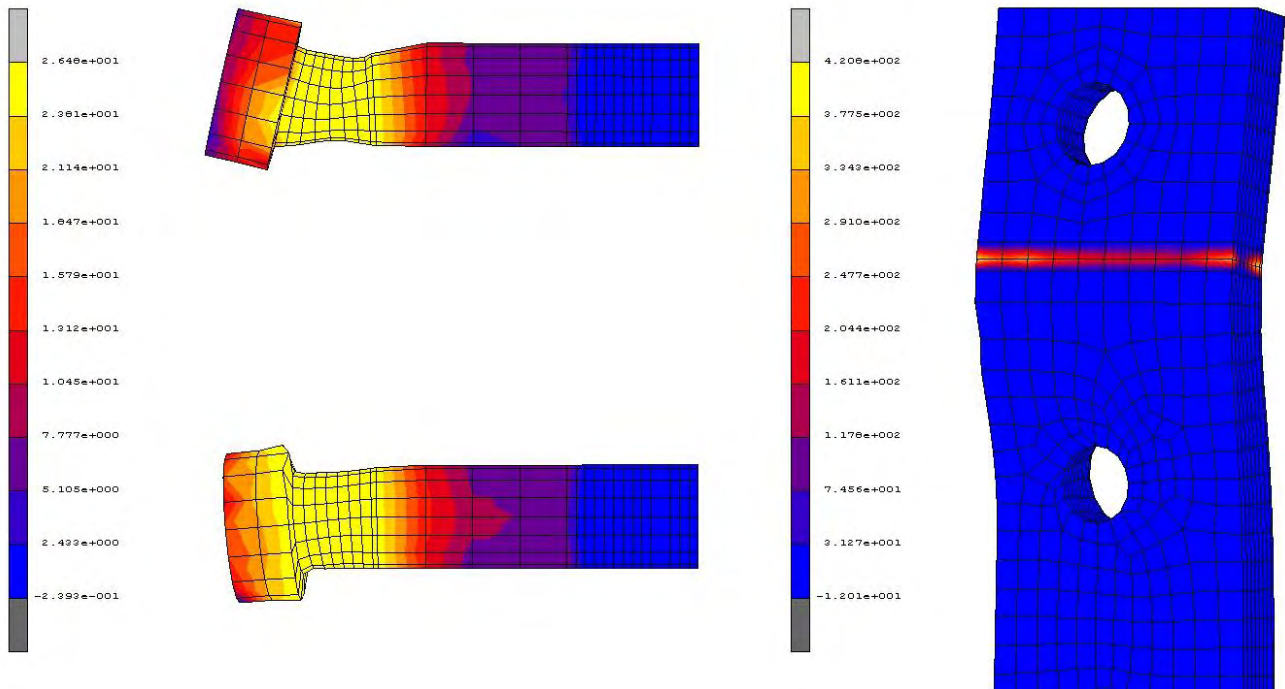
Σχήμα 6-18 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 600°C (για Mmax)



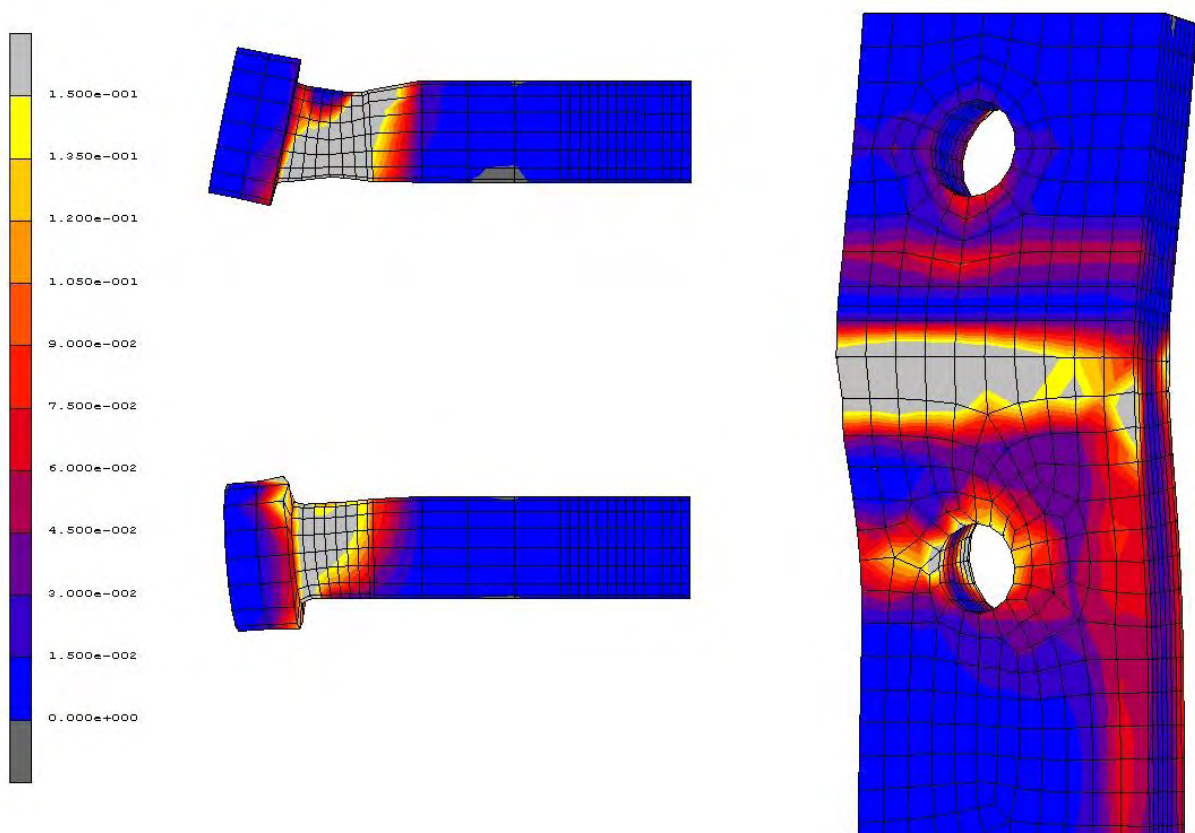
Σχήμα 6-19 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 800°C (για Mmax)



Σχήμα 6-20 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 800°C (για Mmax)



Σχήμα 6-21 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκυσμένη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 1000°C (για Mmax)



Σχήμα 6-22 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκυσμένη ζώνη της σύνδεσης του 2^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 1000°C (για Mmax)

6.4 Κόμβος δοκού-υποστυλώματος με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα πάχους 20 χιλιοστών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας

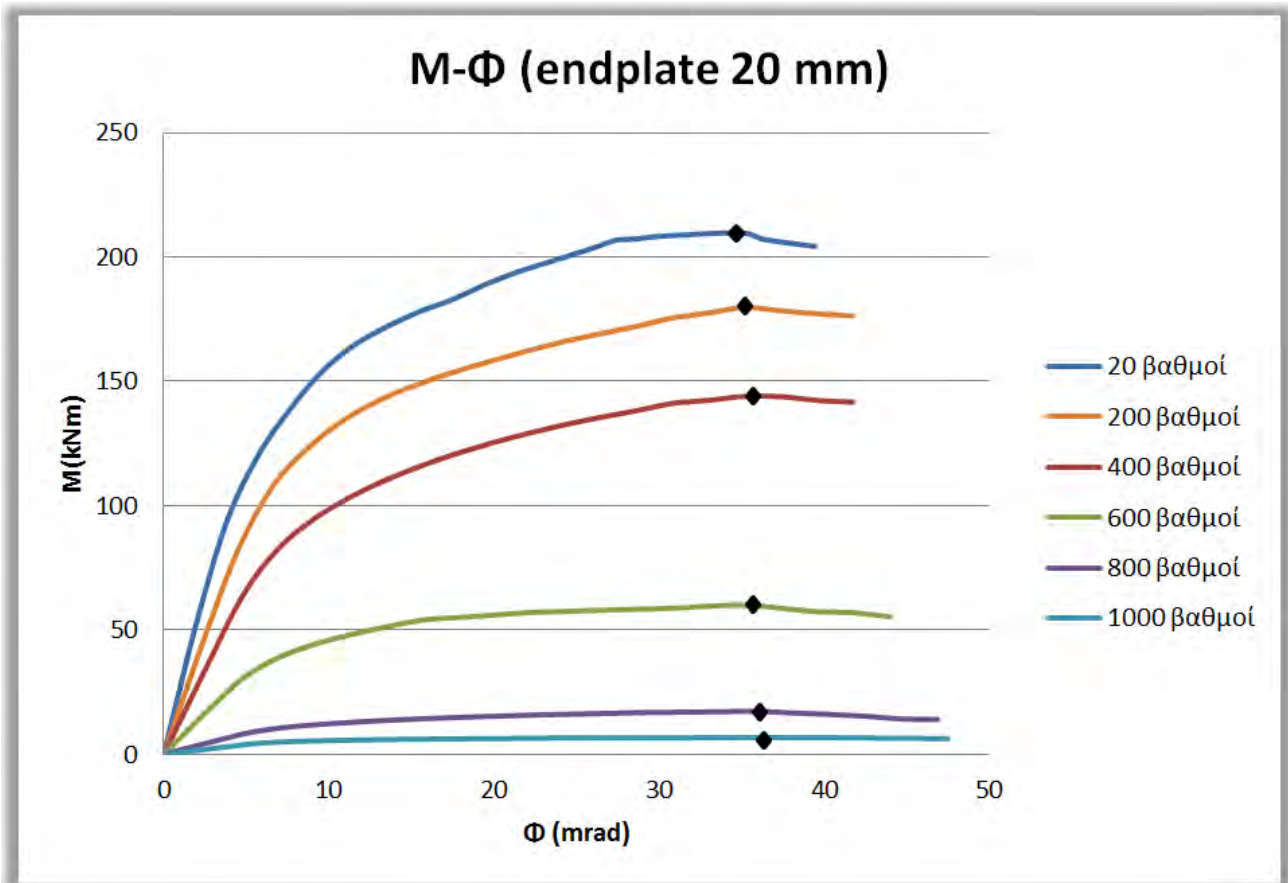
Στην παράγραφο αυτή, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 20 χιλιοστών σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιούνται αναλύσεις για θερμοκρασίες από 20 (συνθήκες περιβάλλοντος) έως και 1000 βαθμούς Κελσίου και από τα αποτελέσματα που προκύπτουν παράγονται οι καμπύλες ροπής-στροφής για καμπτική καταπόνηση της δοκού για θερμοκρασίες 20, 200, 400, 600, 800 και 1000 βαθμούς Κελσίου. Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται οι τιμές των κύριων χαρακτηριστικών της καμπύλης ροπής - στροφής του εξεταζόμενου κόμβου, όπως αυτές προέκυψαν από την ανάλυση του μοντέλου καθώς επίσης και οι τιμές της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$, όπως υπολογίστηκε από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αλλά και όπως υπολογίζεται βάσει των διατάξεων του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003). Επίσης μελετάται η μορφή αστοχίας του κόμβου για κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιείται η ανάλυση.

Πίνακας 6-6 Κύρια χαρακτηριστικά καμπύλης ροπής – στροφής (μετωπική πλάκα 20mm)

Δοκιμή FS3	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων			
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$\Phi_{M,Rd}$ (mrad)	M_{max} (kNm)	Φ_{max} (mrad)
T=20°C	177	9	209.71	35.00
T=200°C	140	10.98	179.67	35.13
T=400°C	100	9.13	143.35	35.17
T=600°C	43	2.72	60.00	35.25
T=800°C	11.5	7.62	17.28	35.88
T=1000°C	4.5	5.78	6.66	36.43

Πίνακας 6-7 Σύγκριση των τιμών της πλαστικής ροπής αντοχής $M_{j,rd}$ του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων FS3 με τις διατάξεις του EC3

Δοκιμή FS3	Προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων	EC3	Λόγος
	$M_{j,rd}$ (kNm)	$M_{j,rd}$ (kNm)	
T=20°C	177	176.11	0.99
T=200°C	140	137.36	0.98
T=400°C	100	96.56	0.97
T=600°C	43	40.91	0.95
T=800°C	11.5	11.08	0.96
T=1000°C	4.5	4.21	0.94

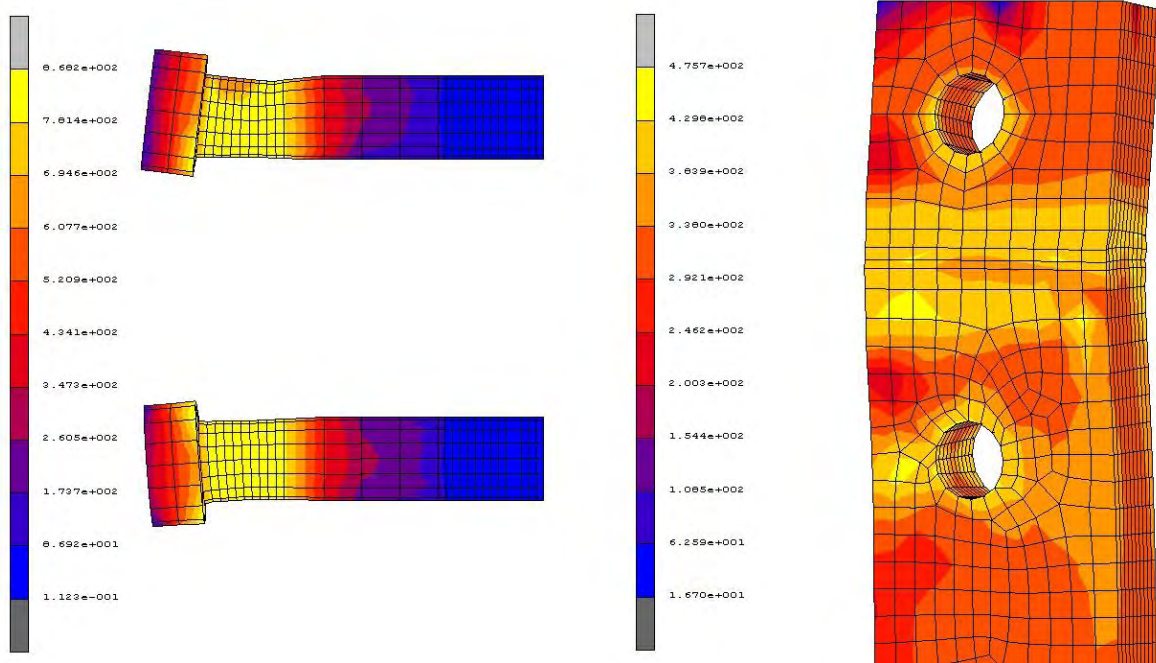


Σχήμα 6-23 Καμπύλες ροπής-στροφής δοκιμής FS3 για κάθε θερμοκρασία

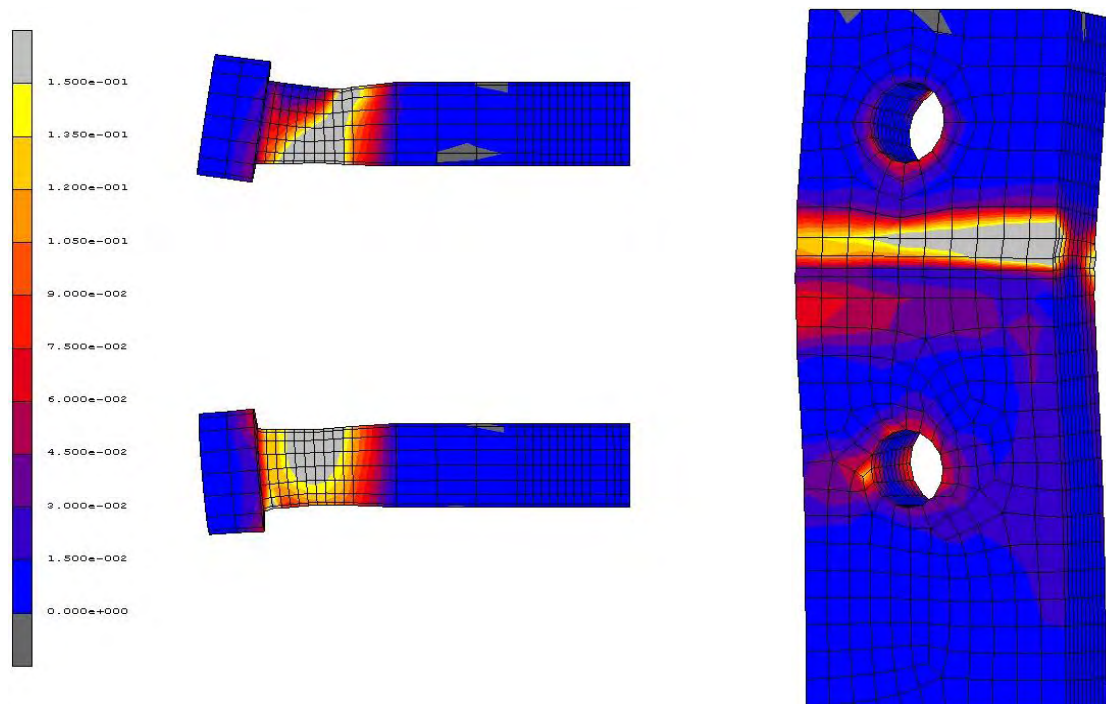
Και στην τελευταία περίπτωση κόμβου που εξετάζεται, παρατηρείται ραγδαία μείωση της αντοχής του κόμβου με την αύξηση της θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα σε θερμοκρασία 400°C ο κόμβος έχει ήδη χάσει το 40% της αντοχής, σε θερμοκρασία 600°C το 73% της αντοχής του ενώ σε θερμοκρασία 1000°C η αντοχή του έχει φθάσει στο 2,6% της αρχικής του αντοχής. Ο Ευρωκώδικας 3 υπολογίζει την πλαστική αντοχή σχεδιασμού στο 96% περίπου της αντίστοιχης τιμής του κόμβου του προσομοιώματος και ταυτίζεται με την ανάλογη τιμή που υπολογίστηκε από την ανάλυση του προσομοιώματος σε συνθήκες δωματίου. Παρατηρούμε δηλαδή πως σε αυτή την περίπτωση εμφανίζονται αισθητά μικρότερες αποκλίσεις σε σχέση με τις προηγούμενες δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Καθοριστική για τη συμπεριφορά του κόμβου, και αυτή τη φορά, είναι η συμπεριφορά των κοχλιών. Από τις αναλύσεις προκύπτει πως η αστοχία του κόμβου με προεκτεινόμενη μετωπική πλάκα 20 χιλιοστών, οφείλεται σε αστοχία των κοχλιών της εφελκυστικής ζώνης για κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιείται η ανάλυση, ενώ εμφανίζεται μικρός βαθμός πλαστικοποίησης στη μετωπική πλάκα, κυρίως στις υψηλότερες θερμοκρασίες (600°C και πάνω). Από τη θεώρηση του ισοδύναμου βραχέος T συμπεραίνουμε ότι εμφανίζεται ο 2^{ος} μηχανισμός αστοχίας και στις δύο σειρές κοχλιών της εφελκυστικής ζώνης για θερμοκρασίες 200°C και 1000°C ενώ για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες έχουμε την εμφάνιση του 1^{ου} μηχανισμού αστοχίας στην πρώτη σειρά κοχλιών και του 2^{ου} μηχανισμού αστοχίας στη δεύτερη σειρά κοχλιών της εφελκυστικής ζώνης. Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων von Mises και η κατανομή των πλαστικών

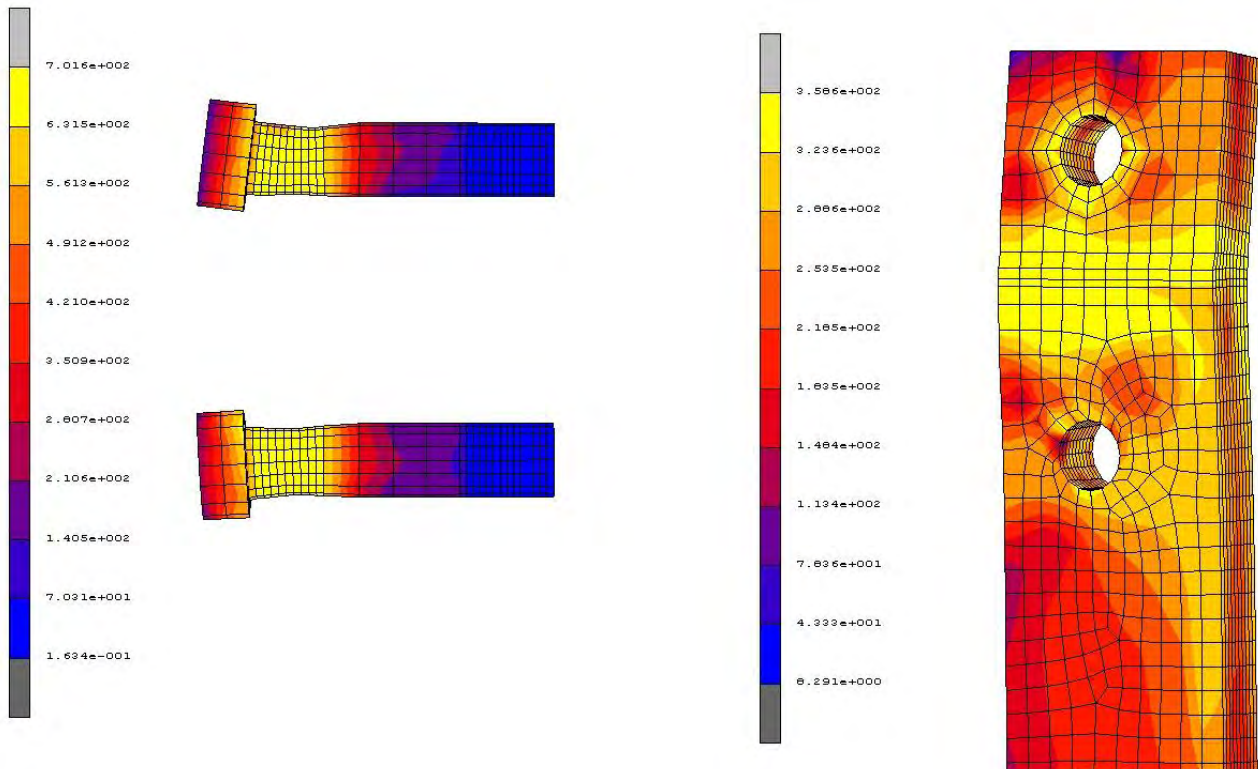
παραμορφώσεων για ροπή ίση με τη M_{max} για κάθε θερμοκρασία που πραγματοποιείται η ανάλυση. Στο παράρτημα που παρατίθεται στο τέλος της εργασίας, παρουσιάζονται εικόνες της κατανομής των πλαστικών παραμορφώσεων και σε στάδια της ανάλυσης πριν και μετά την εμφάνιση της αστοχίας των κοχλιών της εφελκόμενης ζώνης.



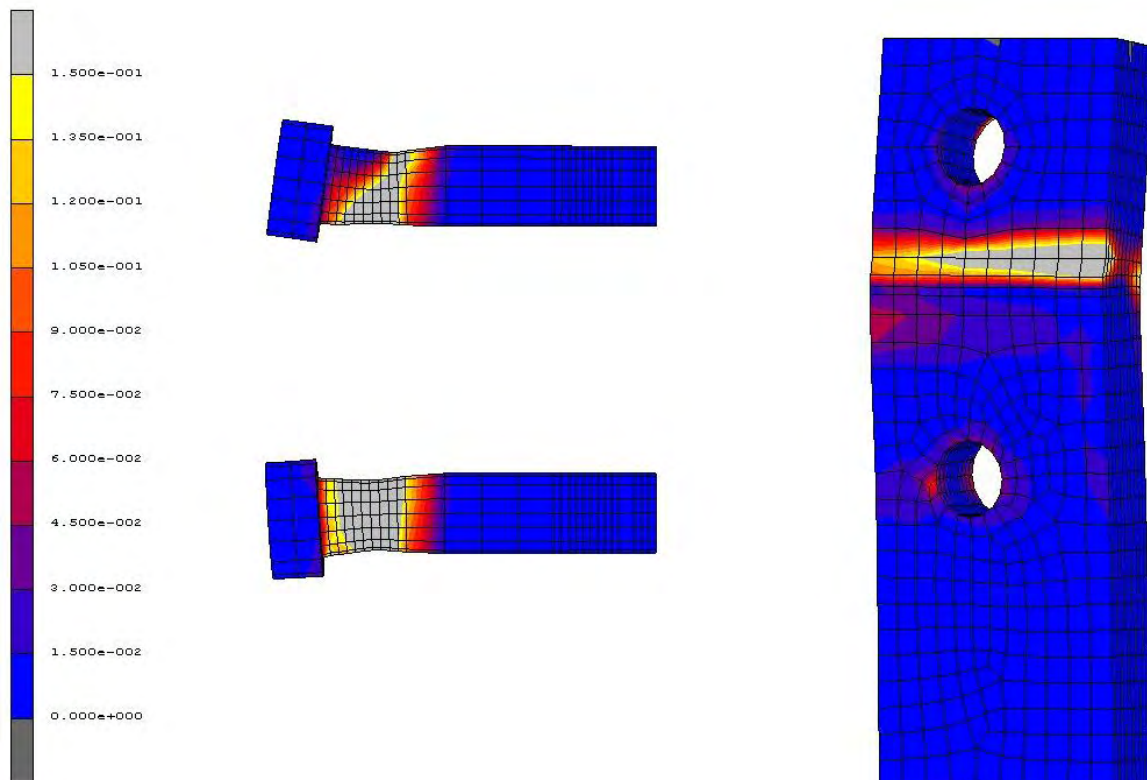
Σχήμα 6-24 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 200°C (για M_{max})



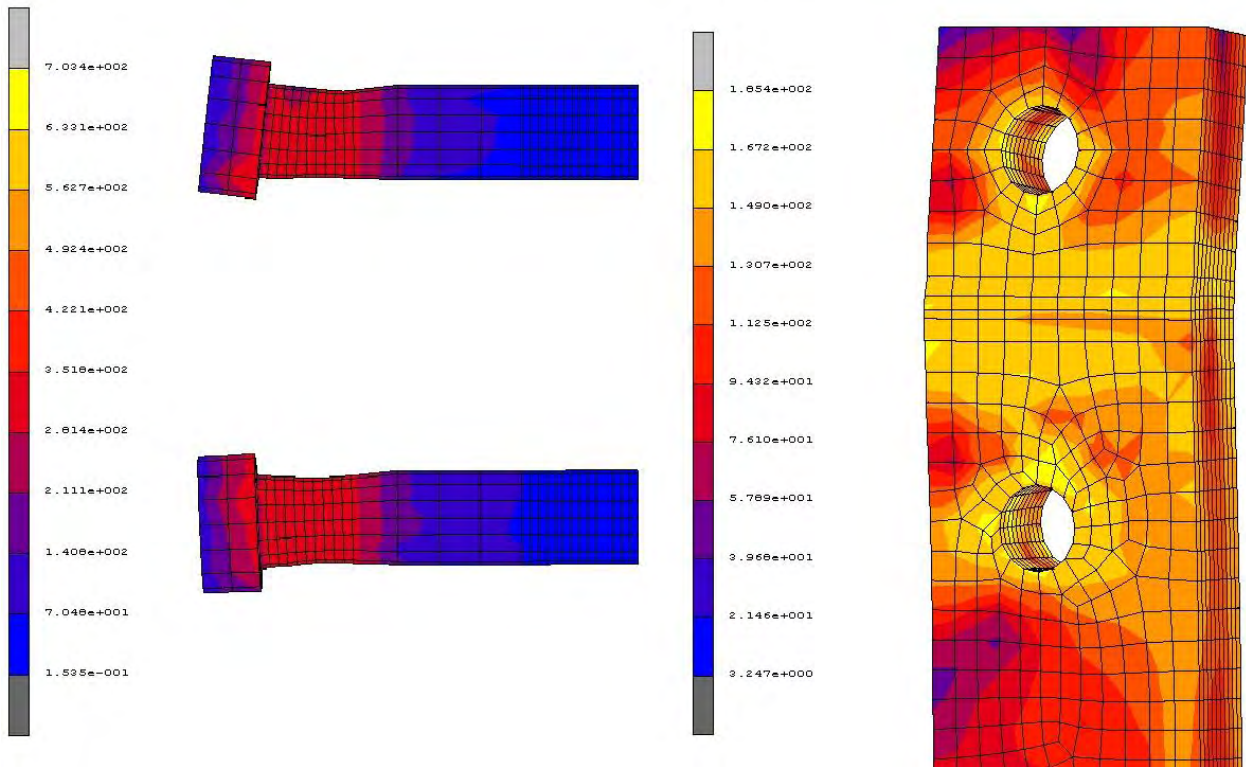
Σχήμα 6-25 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 200°C (για M_{max})



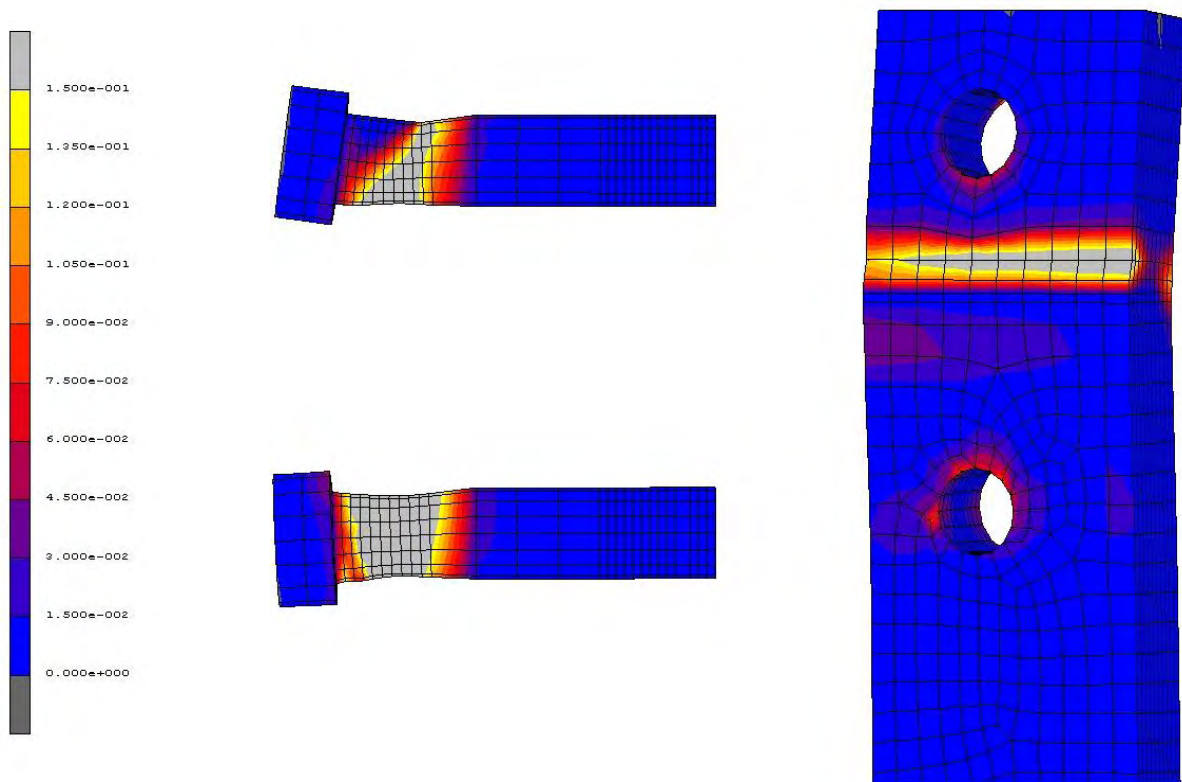
Σχήμα 6-26 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 400°C (για Mmax)



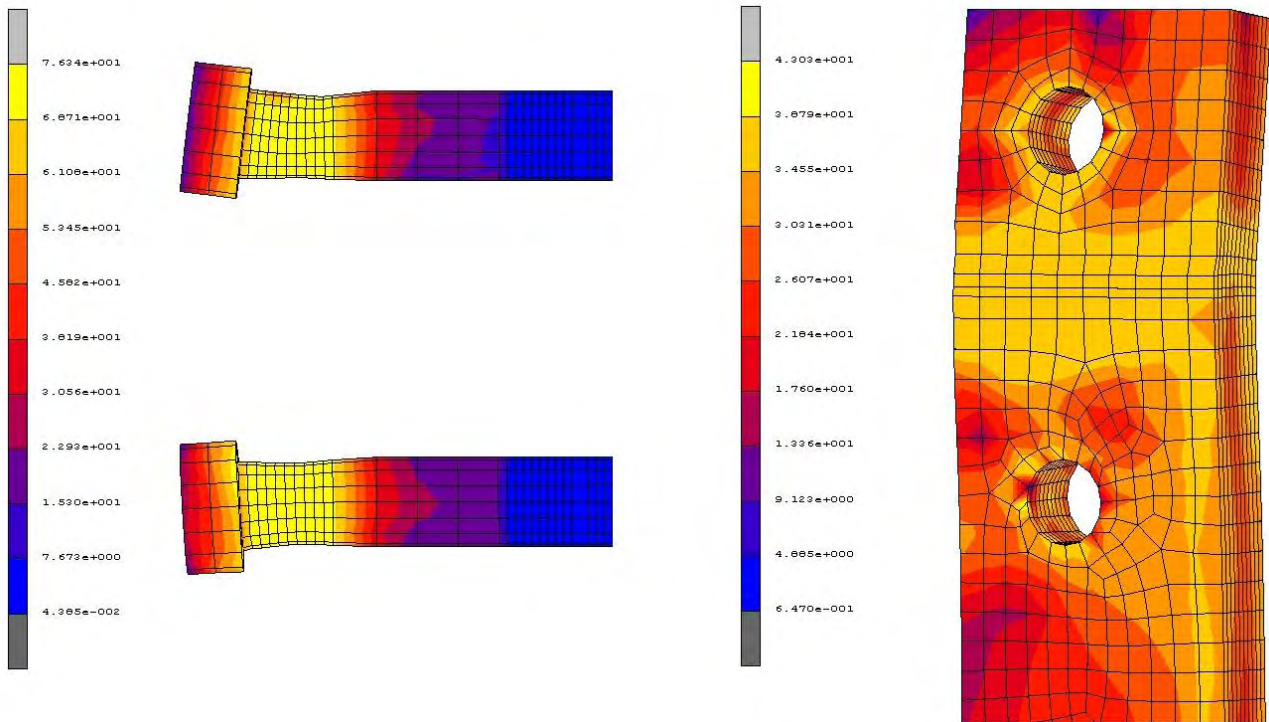
Σχήμα 6-27 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 400°C (για Mmax)



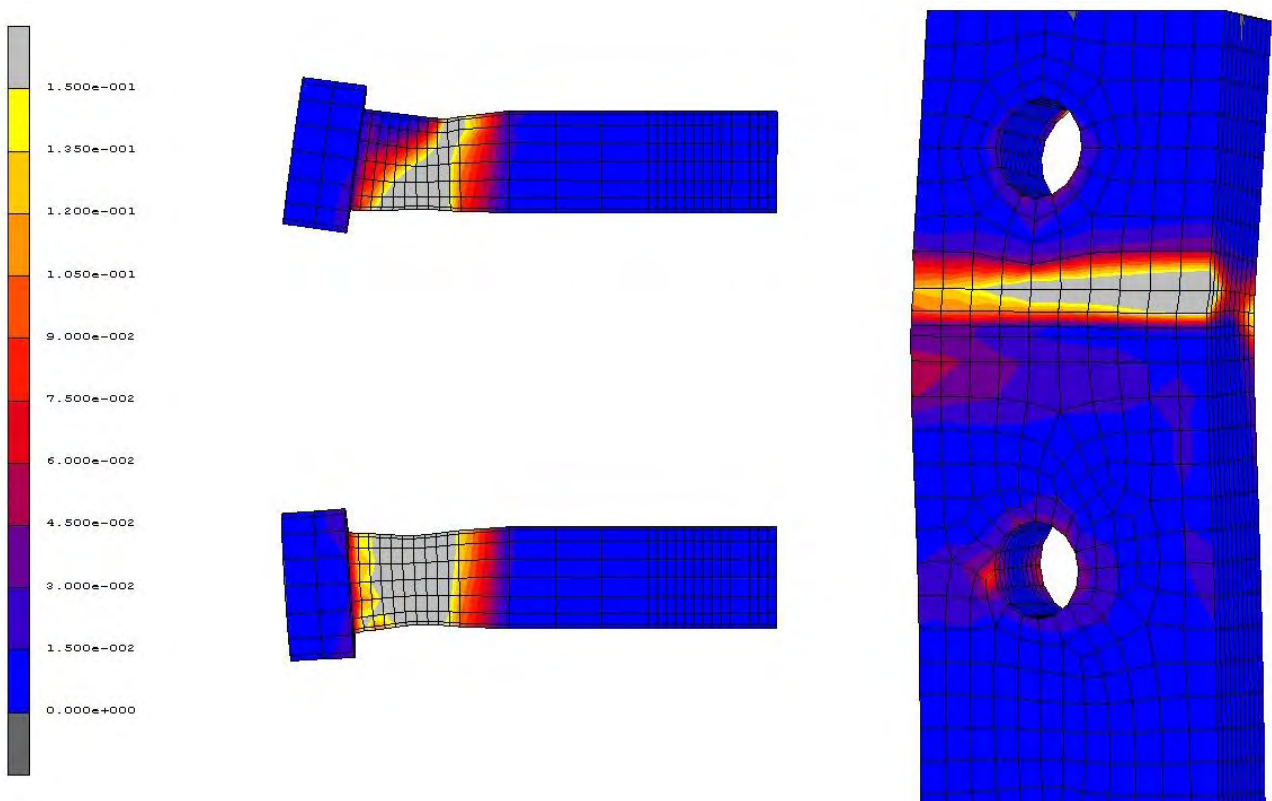
Σχήμα 6-28 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 600°C (για Mmax)



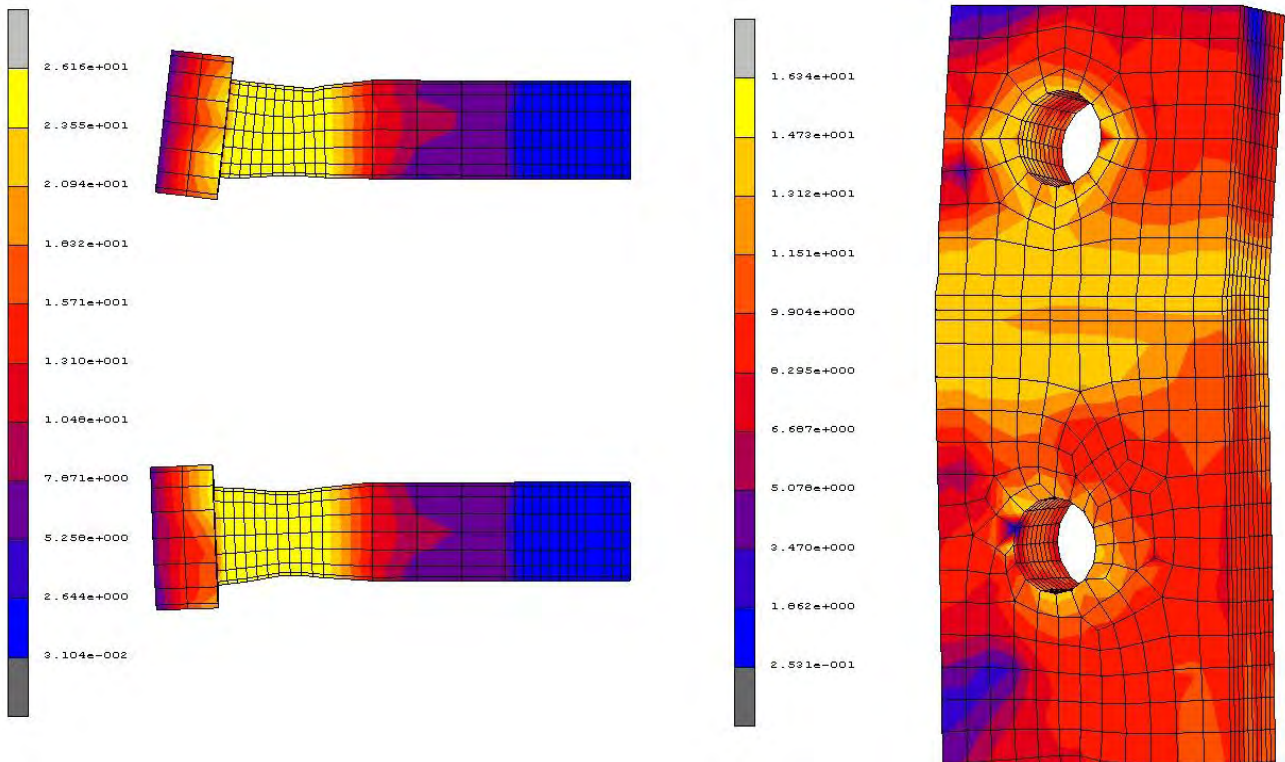
Σχήμα 6-29 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 600°C (για Mmax)



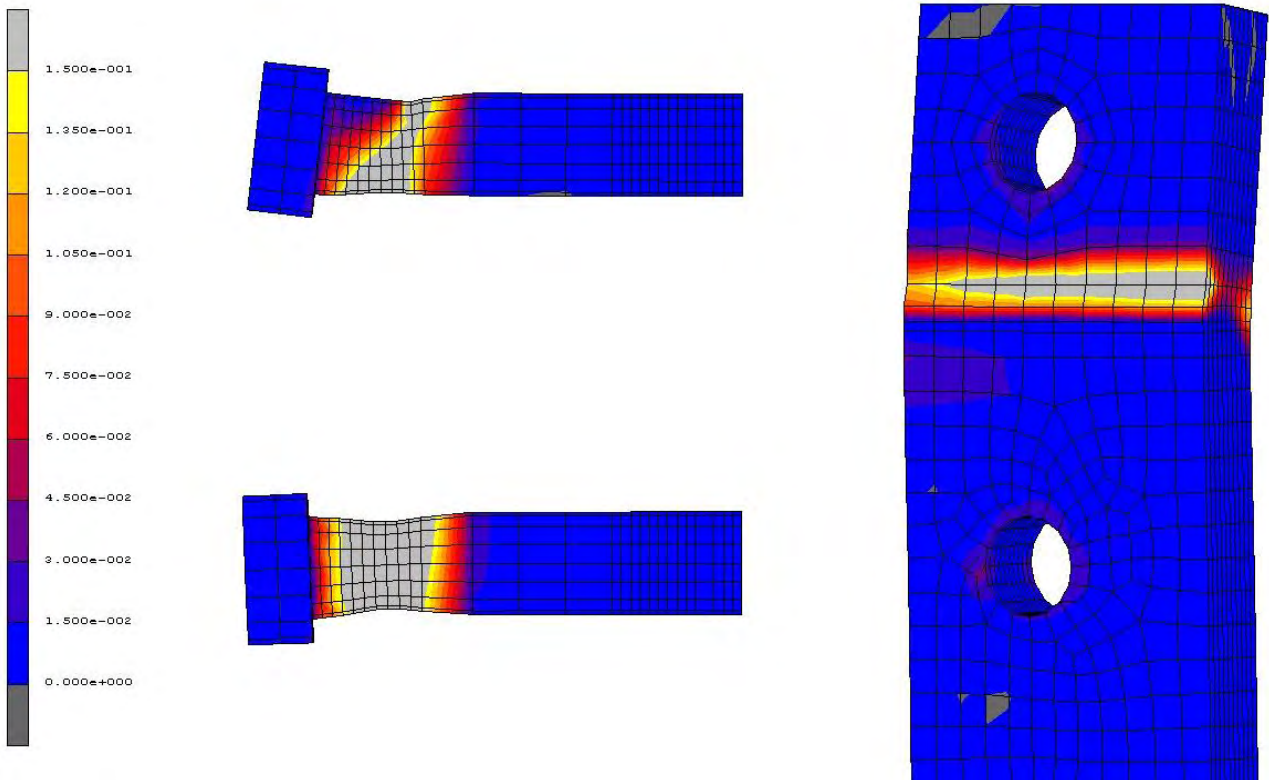
Σχήμα 6-30 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 800°C (για Mmax)



Σχήμα 6-31 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 800°C (για Mmax)



Σχήμα 6-32 Κατανομή τάσης von Mises στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 800°C (για Mmax)



Σχήμα 6-33 Κατανομή των πλαστικών παραμορφώσεων στην εφελκόμενη ζώνη της σύνδεσης του 3^{ου} προσομοιώματος σε θερμοκρασία 800°C (για Mmax)

7 Συμπεράσματα

7.1 Σύνοψη

Το κύριο αντικείμενο ενδιαφέροντος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ήταν η εκτίμηση της απόκρισης κόμβων δοκού-υποστυλώματος υπό καμπτική καταπόνηση της δοκού, τόσο σε συνήθεις θερμοκρασίες όσο και σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας. Η εκτίμηση αυτή επιχειρήθηκε μέσω του προσδιορισμού της καμπύλης ροπής - στροφής των κόμβων που εξετάστηκαν. Το ενδιαφέρον επικεντρώθηκε σε κοχλιωτούς κόμβους και ειδικότερα σε κόμβους με συνδέσεις μετωπικής πλάκας οι οποίοι τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής σε πλαισιακές κατασκευές, χάρη στην υψηλή πλαστιμότητα, αντοχή και δυσκαμψία που μπορούν να επιτύχουν και στην ευκολία κατασκευής και ανέγερσης που προσφέρουν. Η απόκριση των κοχλιωτών κόμβων καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την απόκριση της εφελκόμενης ζώνης και μπορεί να θεωρηθεί ότι από αυτήν κυρίως εξαρτάται η διαθέσιμη στροφική ικανότητα ενός κοχλιωτού κόμβου. Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς των κόμβων που εξετάστηκαν, τον προσδιορισμό, δηλαδή, της πλήρους καμπύλης ροπής – στροφής του κόμβου, δημιουργήθηκαν σύνθετα τρισδιάστατα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων. Η αποτελεσματικότητα των προσομοιωμάτων ελέγχθηκε με σύγκριση της απόκρισής τους με πειραματικά αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία καθώς και με σύγκριση με τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003) για το σχεδιασμό κόμβων σε συνήθεις και υψηλές θερμοκρασίες. Από τα αποτελέσματα προέκυψε πως τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν είναι σε θέση να προσδιορίσουν την πλήρη καμπύλη ροπής – στροφής των κόμβων που εξετάστηκαν καθώς και τα χαρακτηριστικά μεγέθη αυτής όπως η πλαστική αντοχή σχεδιασμού του κόμβου $M_{j,Rd}$, η στρόφη του κόμβου για ροπή ίση με τη ροπή αντοχής σχεδιασμού, η στρόφη του κόμβου φ_{max} όταν η ροπή που παραλαμβάνει είναι μέγιστη. Σε αυτό το σημείο να υπενθυμίσουμε πως, στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως σημείο αστοχίας της σύνδεσης θεωρήθηκε το σημείο εκείνο στο οποίο ένα ή περισσότερα από τα συστατικά μέρη της σύνδεσης να φθάνουν την οριακή τους παραμόρφωση ϵ_u .

7.2 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας σε σχέση με τη συμπεριφορά κόμβων δοκού – υποστυλώματος σε συνθήκες περιβάλλοντος και συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

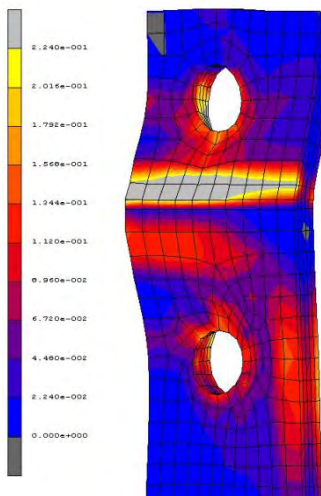
- Τα σύνθετα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων που δημιουργήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία αποδείχτηκαν ικανά να προσεγγίσουν τη συμπεριφορά των κόμβων που εξετάστηκαν. Σε σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία και με τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003) για το σχεδιασμό κόμβων σε συνθήκες και υψηλές θερμοκρασίες, προέκυψε πως τα προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπουν τον προσδιορισμό της πλήρους καμπύλης ροπής – στρωφής της σύνδεσης και των χαρακτηριστικών μεγεθών αυτής. Στην εκτίμηση της πλαστικής αντοχής σχεδιασμού $M_{j,Rd}$, διαπιστώθηκε μια σημαντική υπερεκτίμηση σε σχέση με τις προβλεπόμενες από τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 τιμές στα προσομοιώματα με μικρότερο πάχος μετωπικής πλάκας και μία πολύ μικρή υπερεκτίμηση στο προσομοίωμα με μεγαλύτερο πάχος μετωπικής πλάκας. Αυτό οφείλεται αφενός στο γεγονός ότι ο Ευρωκώδικας 3 δεν συνυπολογίζει τη σημαντική κράτυνση του χάλυβα μετά την αρχική του πλαστικοποίηση, που λαμβάνεται, όμως, υπόψη στις προσομοιώσεις σε συνθήκες θερμοκρασίες, και αφετέρου στο πάχος της προεκτεινόμενης μετωπικής πλάκας, που για μεγαλύτερες τιμές του, καθιστά τους κοχλίες, η συμπεριφορά των οποίων είναι περισσότερο προβλέψιμη από τα υπόλοιπα συστατικά μέρη της σύνδεσης, καθοριστικής σημασίας για τη συμπεριφορά του κόμβου.
- Οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 (CEN 2003) δίνουν ασφαλείς προσεγγίσεις για την εκτίμηση της συμπεριφοράς κοχλιωτών κόμβων δοκού – υποστυλώματος, όπως οι κόμβοι που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.
- Σε κάθε περίπτωση, η αστοχία των εξεταζόμενων κόμβων οφείλεται σε αστοχία της μετωπικής πλάκας ή/και των κοχλιών της εφελκυσόμενης ζώνης.
- Η παραμόρφωση της μετωπικής πλάκας είναι μεγαλύτερη για μικρότερες τιμές του πάχους της.
- Η αντοχή των κόμβων είναι μεγαλύτερη για μεγαλύτερες τιμές της μετωπικής πλάκας.
- Η αντοχή των κόμβων μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας προέκυψαν, γενικά, μηχανισμοί αστοχίας όμοιοι με εκείνους που προέκυψαν στον ίδιο κόμβο σε συνθήκες θερμοκρασίες.

Παράρτημα

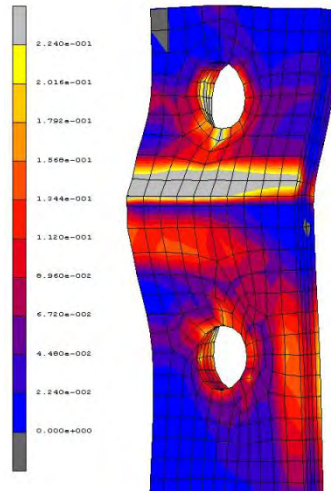
Στο παράρτημα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πλαστικών παραμορφώσεων σε διάφορα βήματα της ανάλυσης για τα τρία διαφορετικά προσομοιώματα και για όλες τις θερμοκρασίες που εξετάστηκαν.

Μετωπική πλάκα 10mm

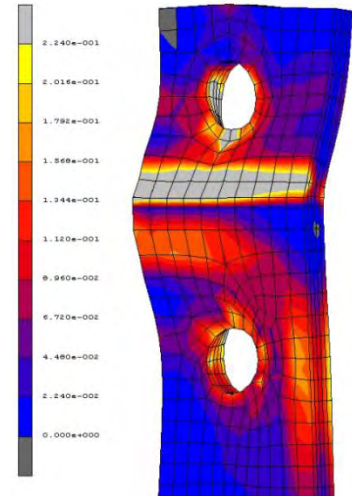
20 °C



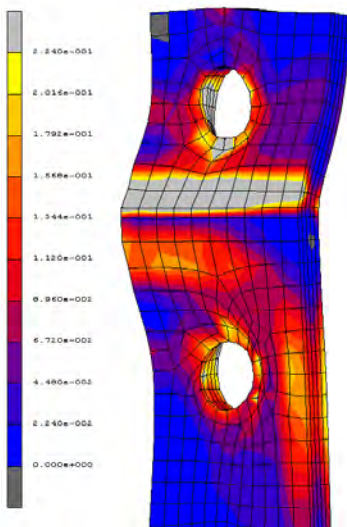
$\Phi=39.33\text{mrad}$ $M=139.87\text{kNm}$



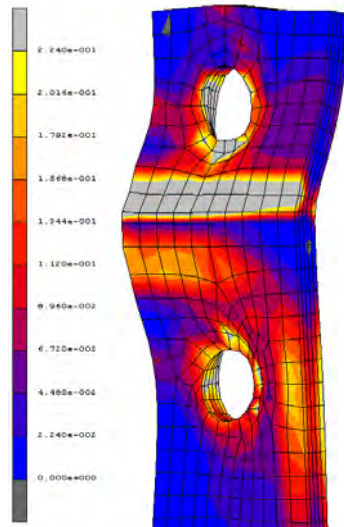
$\Phi=44.24\text{ mrad}$ $M=142.78\text{kNm}$



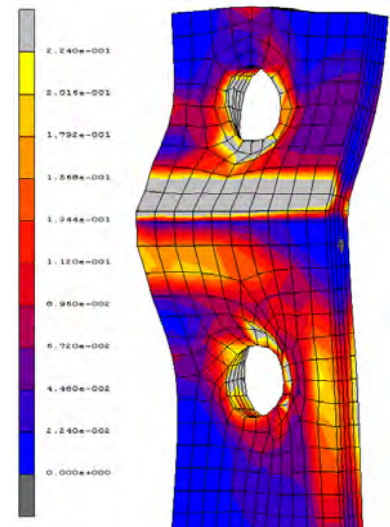
$\Phi=49.15\text{mrad}$ $M=145.55\text{kNm}$



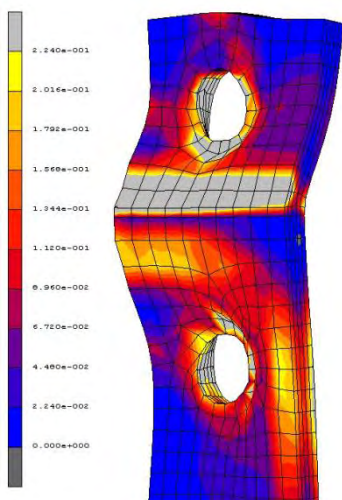
$\Phi=54.05\text{ mrad}$ $M=148.63\text{kNm}$



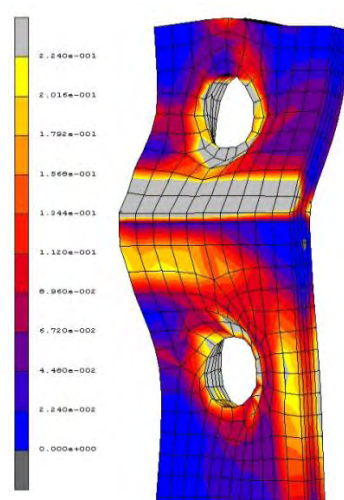
$\Phi=60.01\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=148.83\text{kNm}$



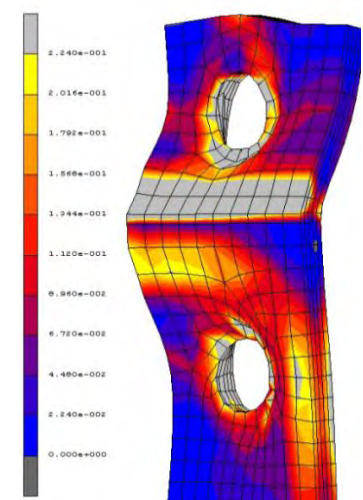
$\Phi=62.85\text{mrad}$ $M=150.23\text{kNm}$



$\Phi=68.71\text{mrad}$ $M=155.23\text{kNm}$

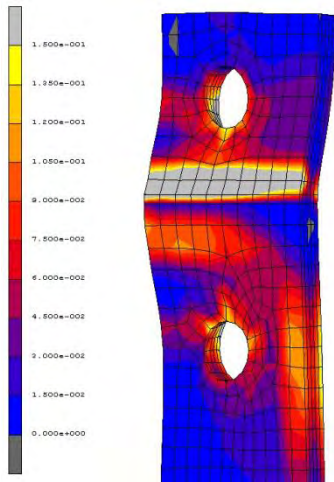


$\Phi=73.57\text{mrad}$ $M=160.45\text{kNm}$

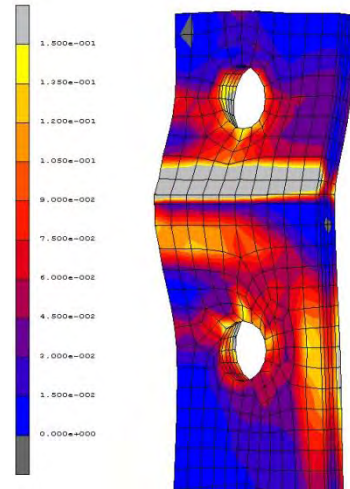


$\Phi=77.43\text{mrad}$ $M=160.17\text{kNm}$

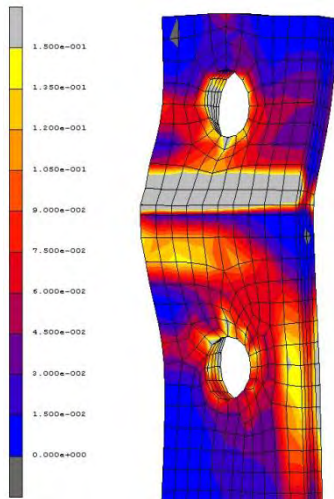
20°C
(EC3)



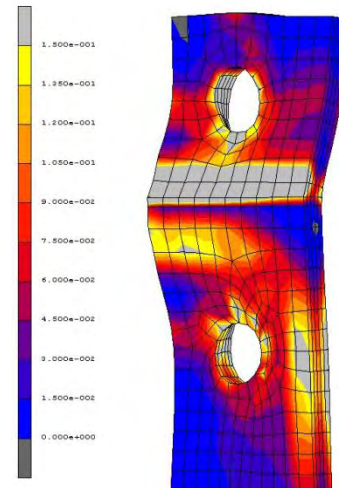
$\Phi=61.02\text{mrad}$ $M=119.88\text{kNm}$



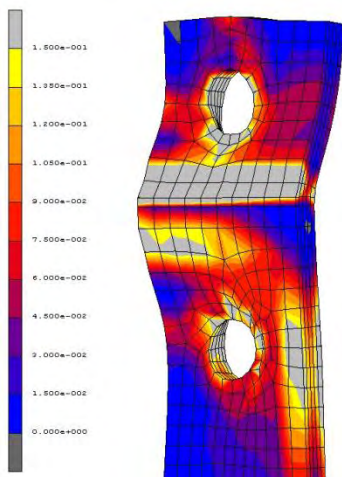
$\Phi=65.99\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=120.3\text{kNm}$



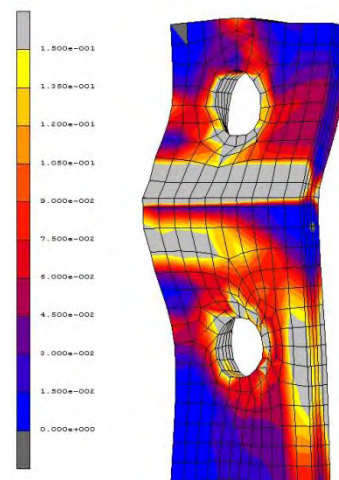
$\Phi=78.99\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=129.3\text{kNm}$



$\Phi=83.63\text{mrad}$ $M=125.12\text{kNm}$

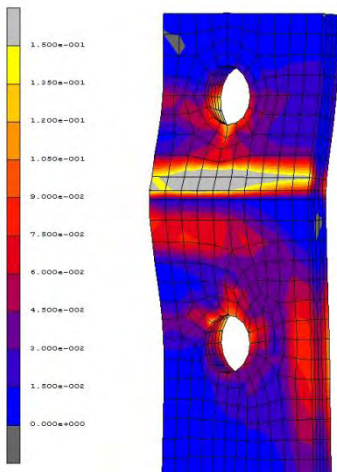


$\Phi=87.41\text{mrad}$ $M=127.2\text{kNm}$

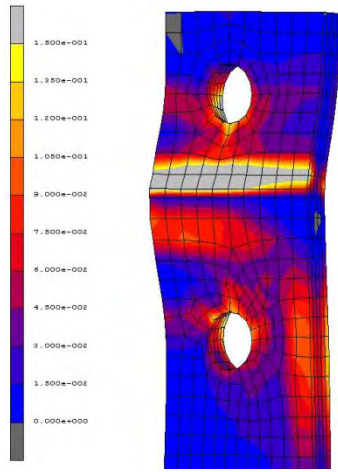


$\Phi=92.21\text{mrad}$ $M=122.31\text{kNm}$

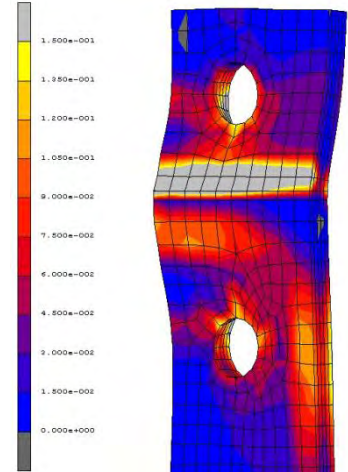
200 °C



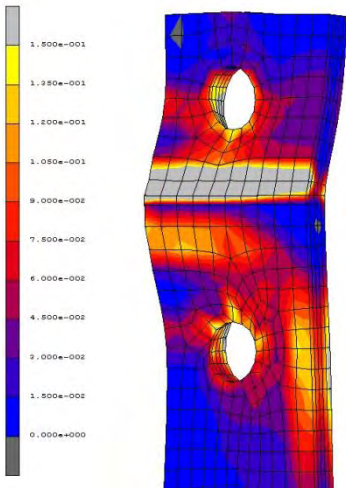
$\Phi=33.11\text{mrad}$ $M=96.93\text{kNm}$



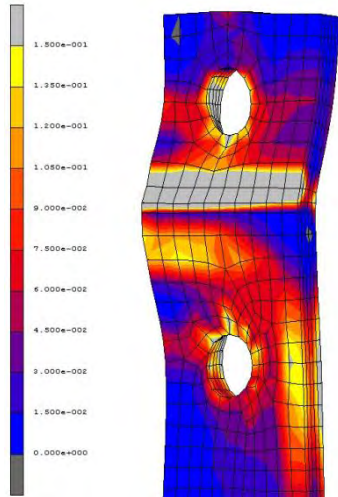
$\Phi=37.49\text{mrad}$ $M=99.29\text{ kNm}$



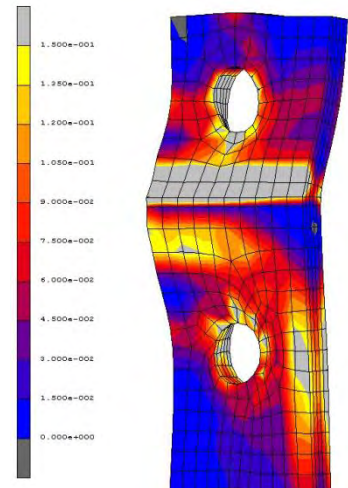
$\Phi=41.86\text{mrad}$ $M=101.2\text{ kNm}$



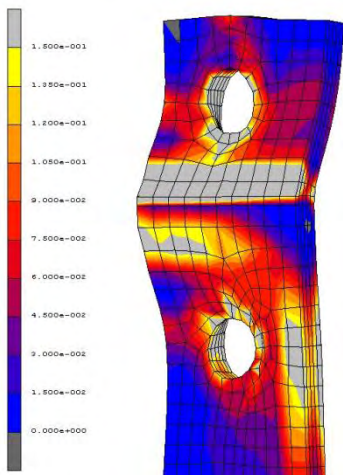
$\Phi=50.57\text{mrad}$ $M=103.85\text{kNm}$



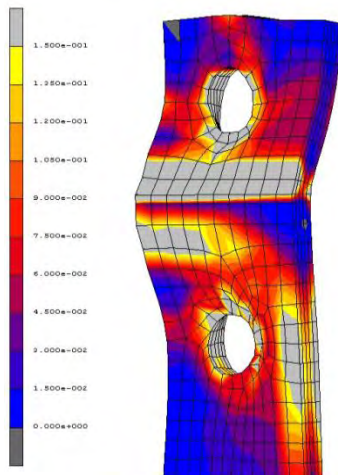
$\Phi=54.93\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=105.57\text{kNm}$



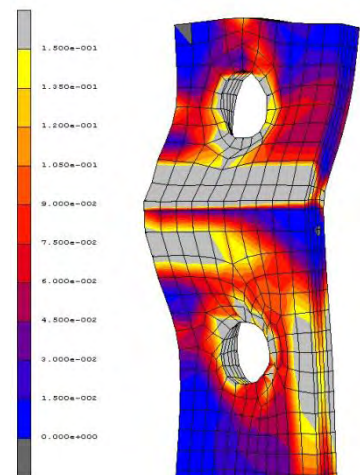
$\Phi=59.27\text{mrad}$ $M=106.12\text{kNm}$



$\Phi=63.61\text{mrad}$ $M=106.73\text{kNm}$

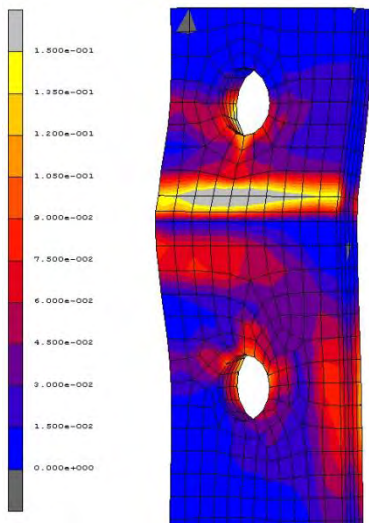


$\Phi=67.93\text{mrad}$ $M=106.34\text{ kNm}$

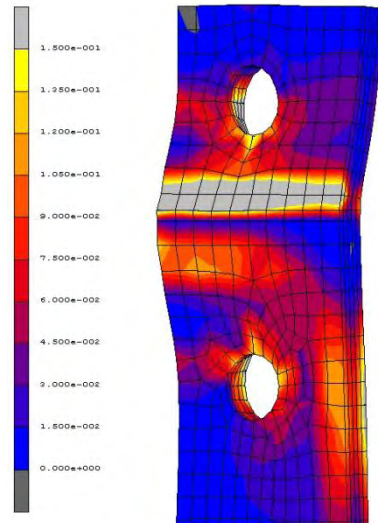


$\Phi=80.93\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=110.57\text{kNm}$

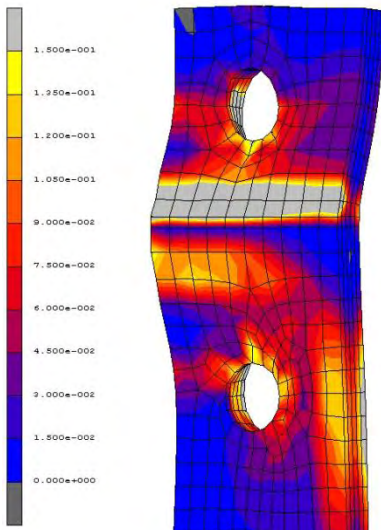
400 °C



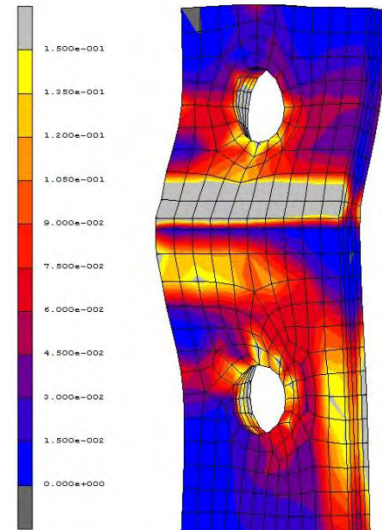
$\Phi=44.32\text{mrad}$ $M=59.66\text{kNm}$



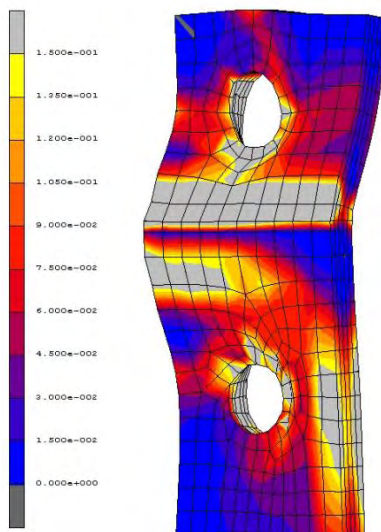
$\Phi=48.67\text{mrad}$ $M=60.19\text{kNm}$



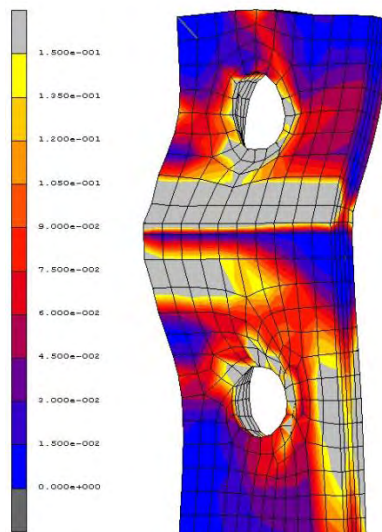
$\Phi=51.92\text{mrad}$ $M=60.38\text{ kNm}$



$\Phi=55.17\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=61.19\text{kNm}$

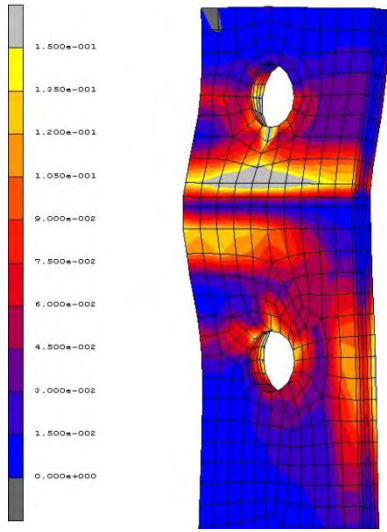


$\Phi=59.51\text{mrad}$ $M=61.45\text{kNm}$

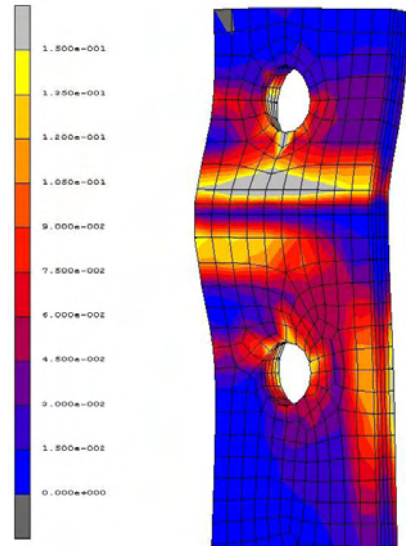


$\Phi=63.84\text{mrad}$ $M=61.57\text{kNm}$

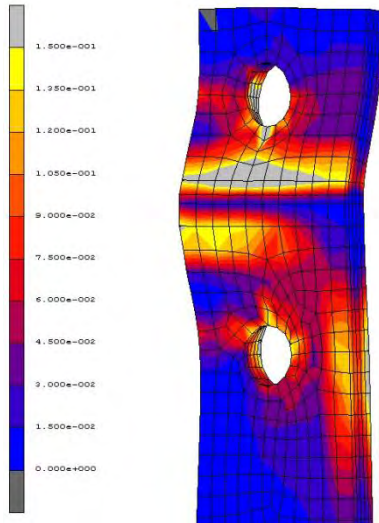
600 °C



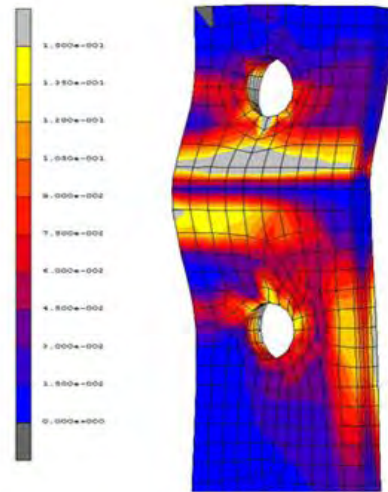
$\Phi=44.61\text{mrad}$ $M=27.64\text{kNm}$



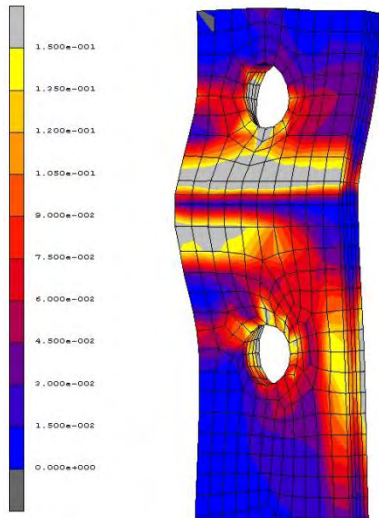
$\Phi=46.78\text{mrad}$ $M=27.83\text{kNm}$



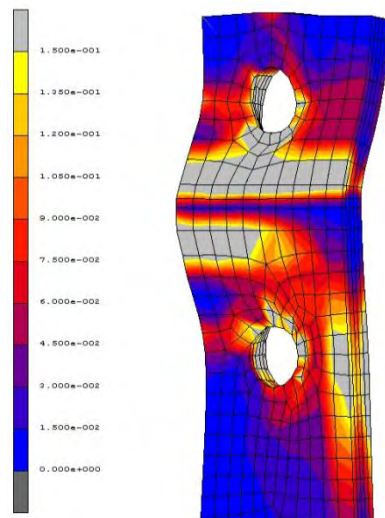
$\Phi=48.95\text{mrad}$ $M=27.98\text{kNm}$



$\Phi=51.14\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=28.04\text{kNm}$

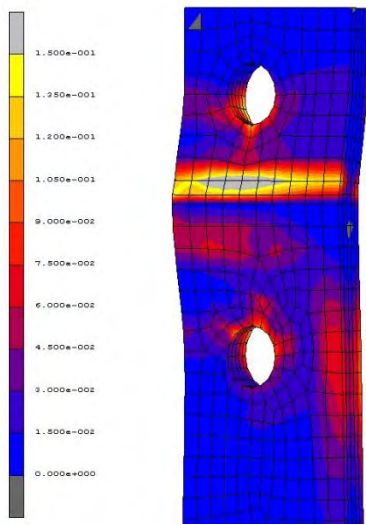


$\Phi=55.48\text{mrad}$ $M=28.16\text{kNm}$

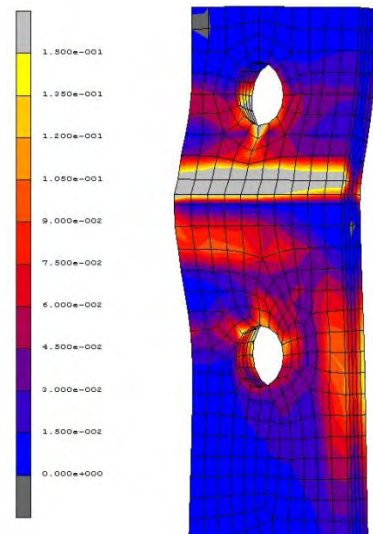


$\Phi=64.15\text{mrad}$ $M=28.82\text{kNm}$

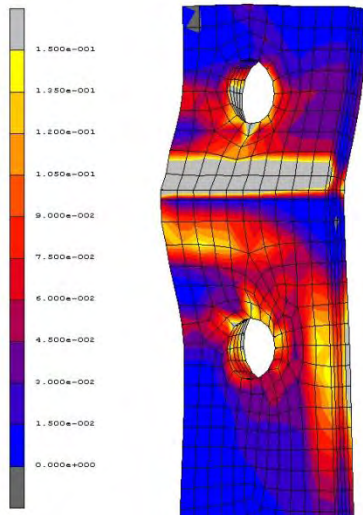
800 °C



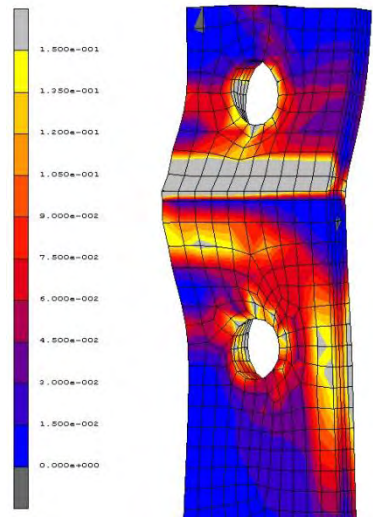
$\Phi=28.54\text{mrad}$ $M=10.69\text{kNm}$



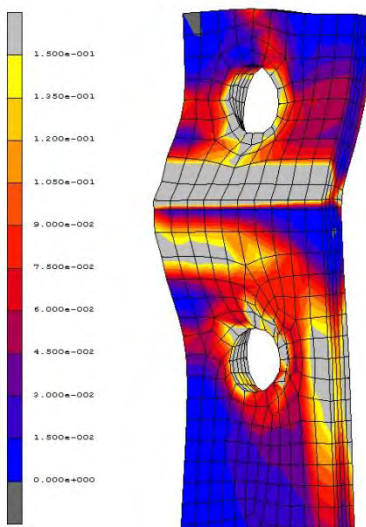
$\Phi=38.41\text{mrad}$ $M=11.1\text{kNm}$



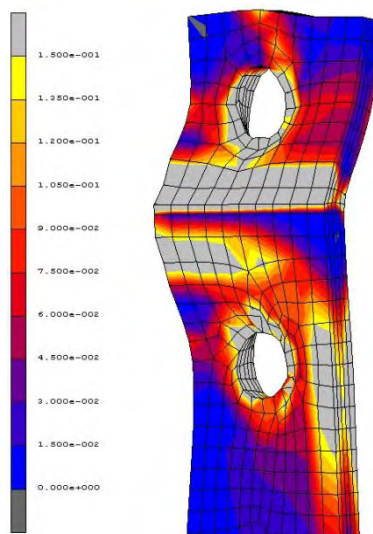
$\Phi=48.22\text{mrad}$ $M=11.34\text{kNm}$



$\Phi=50.40\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=11.37\text{kNm}$

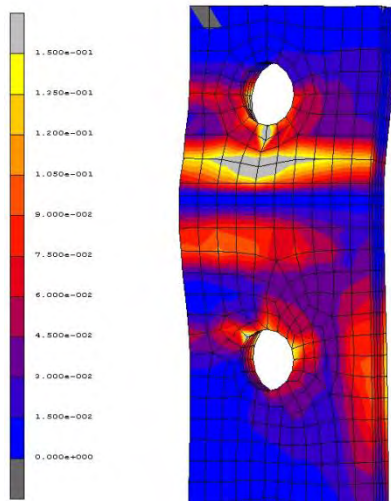


$\Phi=62.31\text{mrad}$ $M=11.34\text{kNm}$

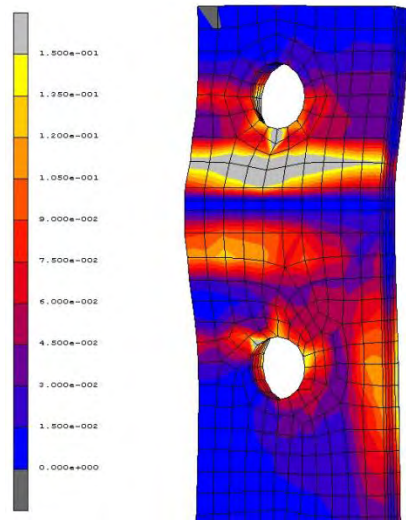


$\Phi=77.42\text{mrad}$ $M=11.75\text{kNm}$

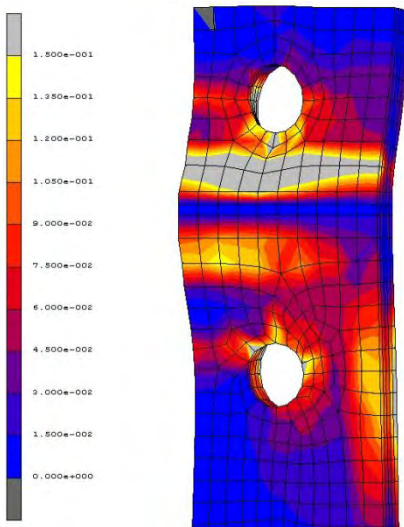
1000 °C



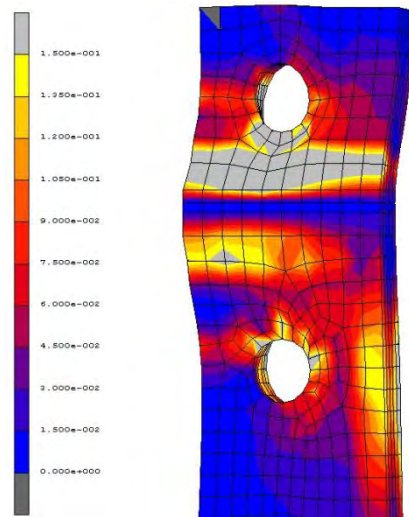
$\Phi=34.4\text{mrad}$ $M=3.815\text{kNm}$



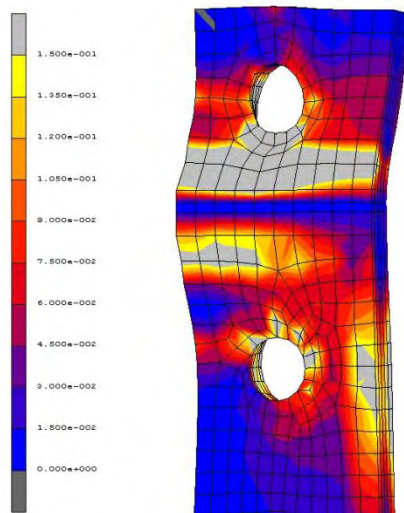
$\Phi=39.87\text{mrad}$ $M=3.819\text{kNm}$



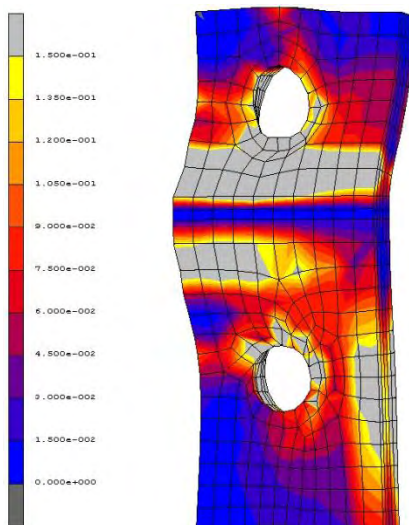
$\Phi=45.33\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=3.82\text{kNm}$



$\Phi=50.76\text{mrad}$ $M=3.94\text{kNm}$



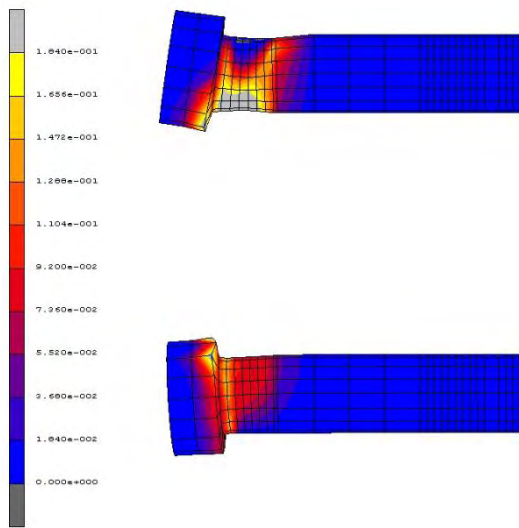
$\Phi=56.18\text{mrad}$ $M=4.01\text{kNm}$



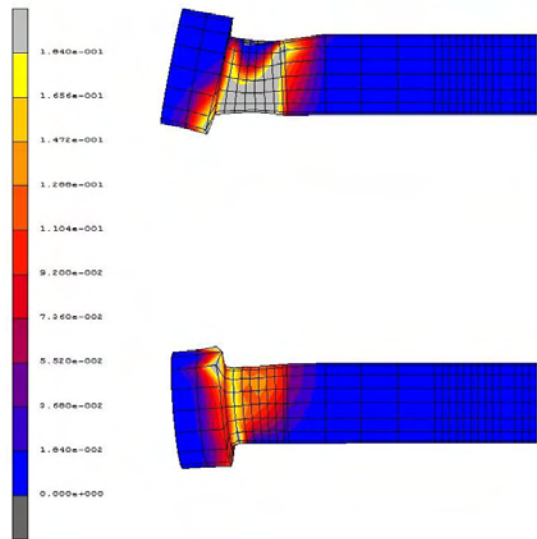
$\Phi=64.84\text{mrad}$ $M=4.00\text{kNm}$

Μετωπική πλάκα 15mm

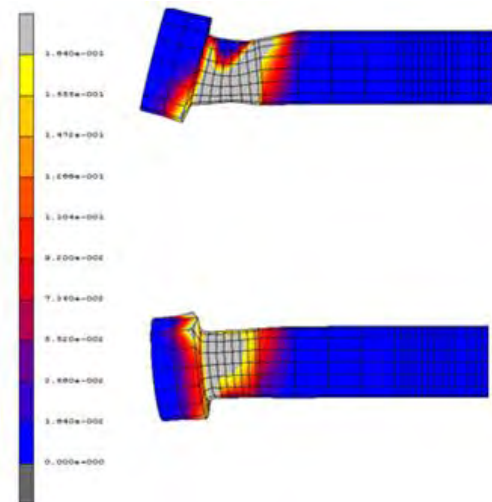
20°C



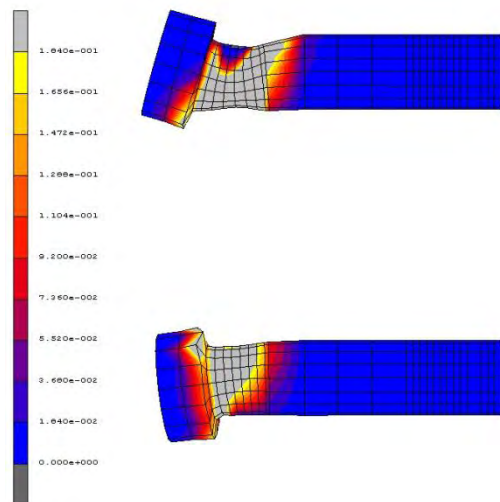
$\Phi=27.3\text{mrad}$ $M=185.47\text{kNm}$



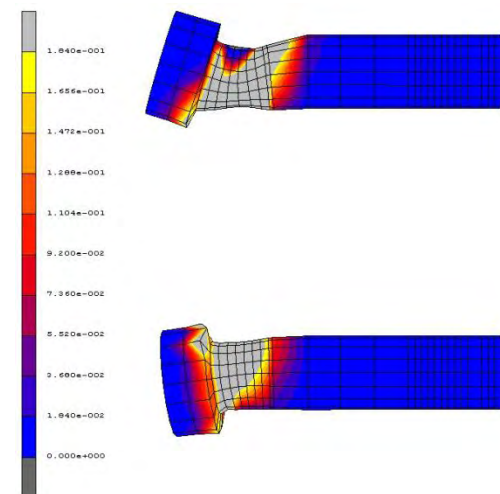
$\Phi=35.19\text{mrad}$ $M=192.83\text{kNm}$



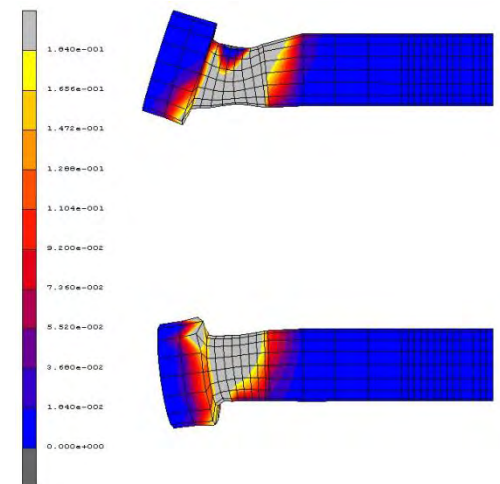
$\Phi=44.06\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=198.75\text{kNm}$



$\Phi=46.86\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=197.9\text{kNm}$

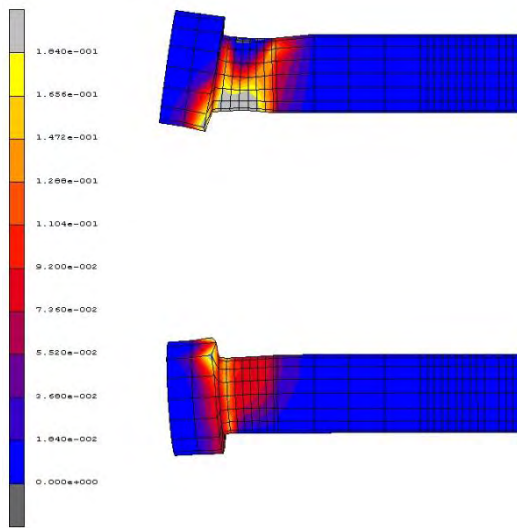


$\Phi=48.99\text{mrad}$ $M=197.5\text{kNm}$

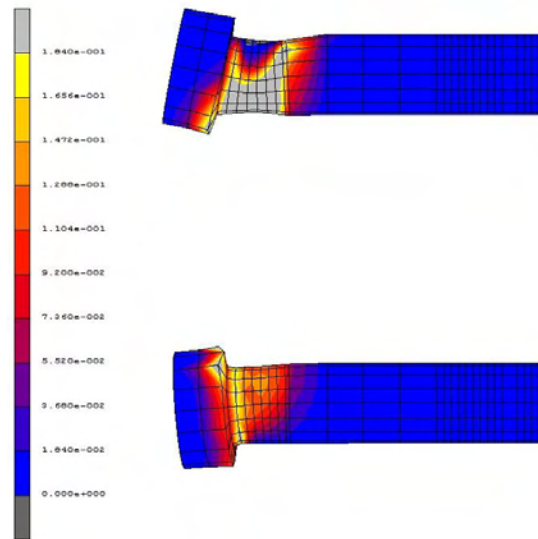


$\Phi=52.93\text{mrad}$ $M=196.3\text{kNm}$

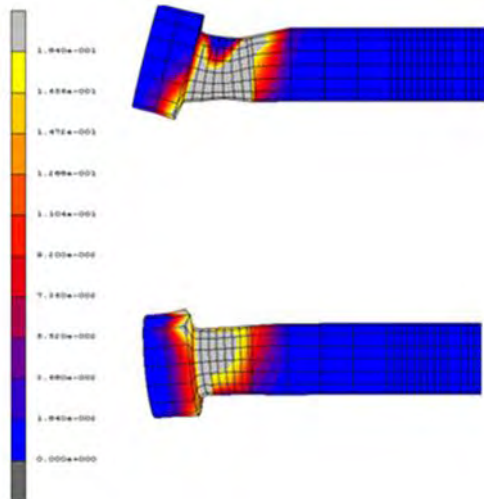
20 °C
(EC3)



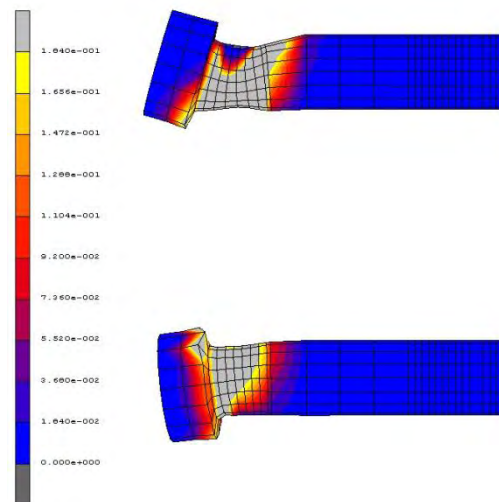
$\Phi=37.3\text{mrad}$ $M=165.47\text{kNm}$



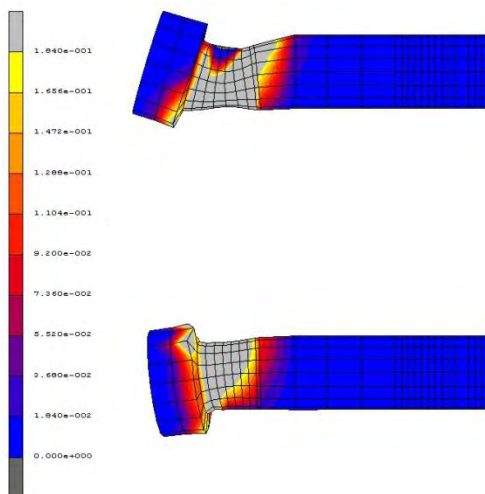
$\Phi=40.19\text{mrad}$ $M=172.83\text{kNm}$



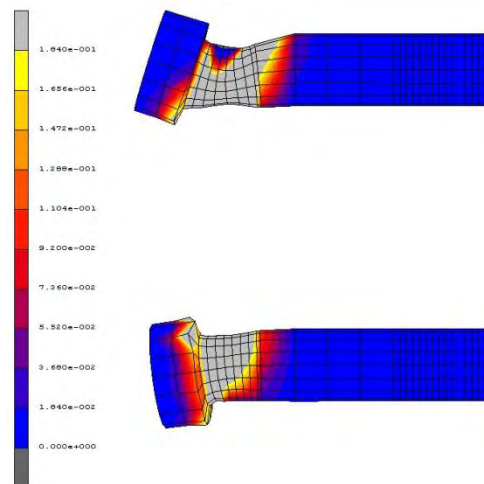
$\Phi=45.31\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=176.88\text{kNm}$



$\Phi=46.86\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=173.9\text{kNm}$

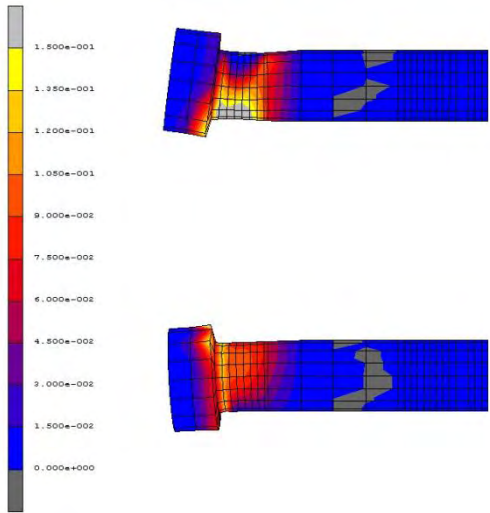


$\Phi=48.99\text{mrad}$ $M=171.5\text{kNm}$

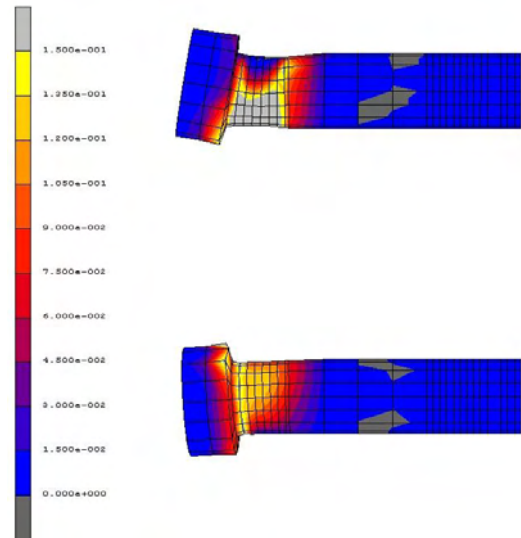


$\Phi=50.93\text{mrad}$ $M=169.93\text{kNm}$

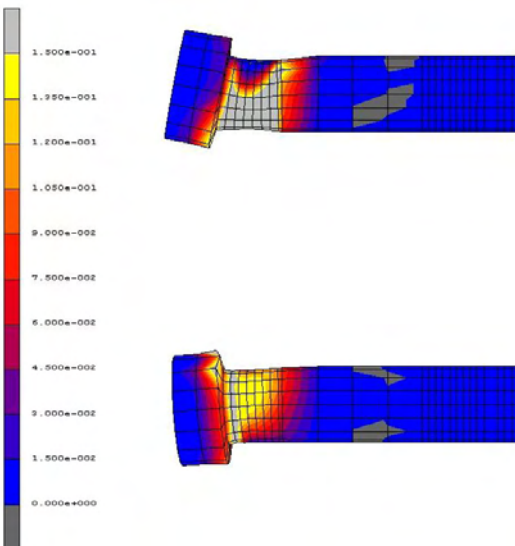
200 °C



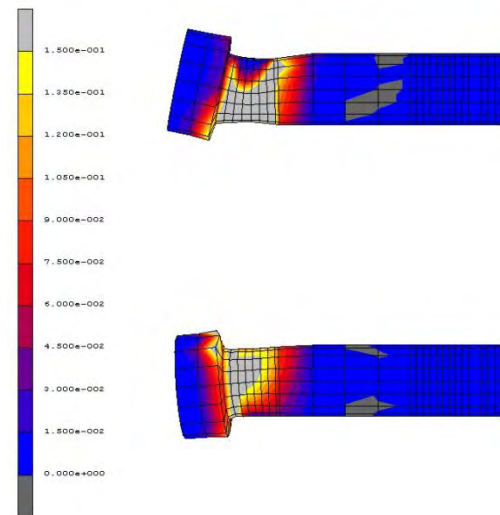
$\Phi=24.11\text{mrad}$ $M=141.47\text{kNm}$



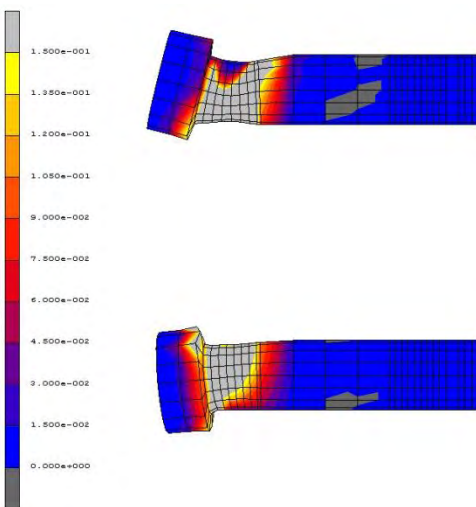
$\Phi=28.49\text{mrad}$ $M=145.06\text{kNm}$



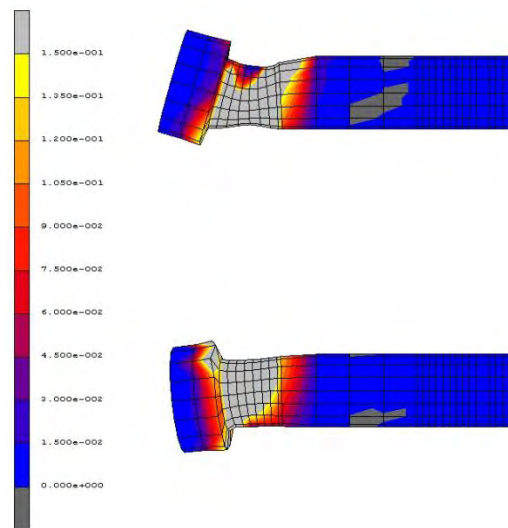
$\Phi=32.87\text{mrad}$ $M=148.68\text{kNm}$



$\Phi=43.81\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=154.38\text{kNm}$

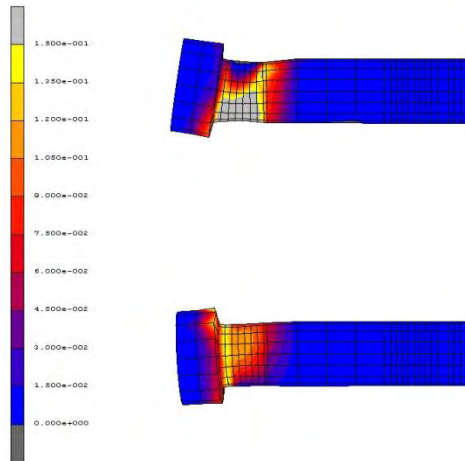


$\Phi=45.99\text{mrad}$ $M=152.12\text{kNm}$

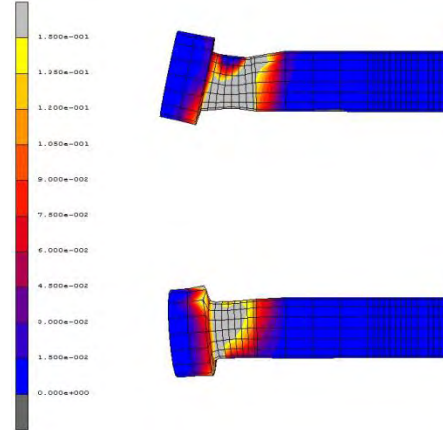


$\Phi=48.17\text{mrad}$ $M=146.32\text{kNm}$

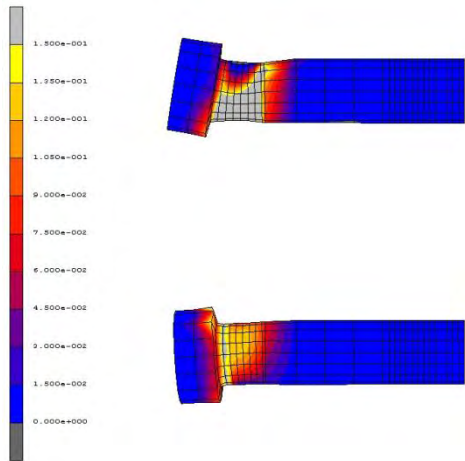
400 °C



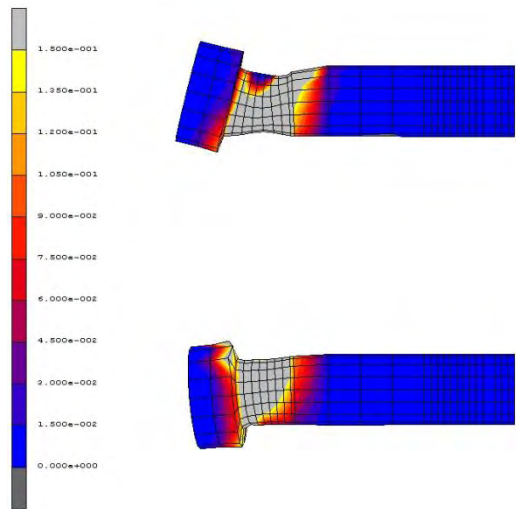
$\Phi=22.17\text{mrad}$ $M=111.73\text{kNm}$



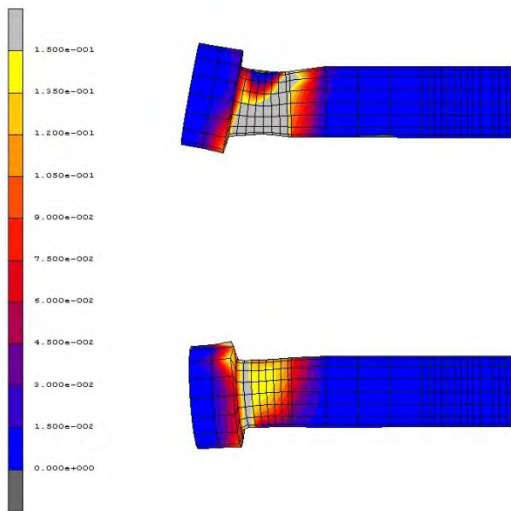
$\Phi=28.69\text{mrad}$ $M=117.80\text{kNm}$



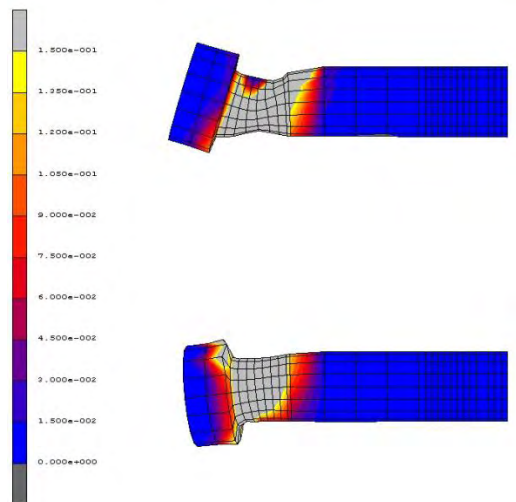
$\Phi=35.23\text{mrad}$ $M=121.48\text{kNm}$



$\Phi=43.94\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=123.96\text{kNm}$

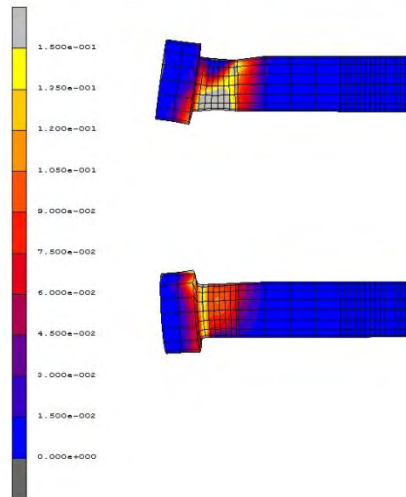


$\Phi=46.12\text{mrad}$ $M=121.81\text{kNm}$

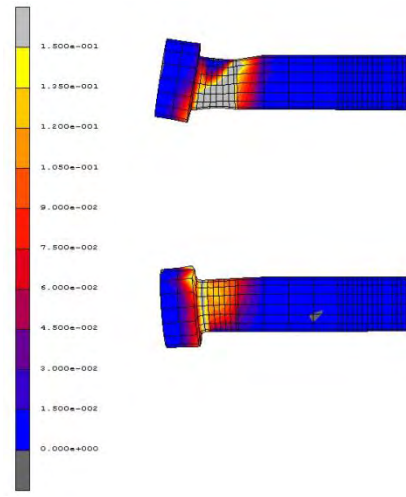


$\Phi=48.3\text{mrad}$ $M=119.08\text{kNm}$

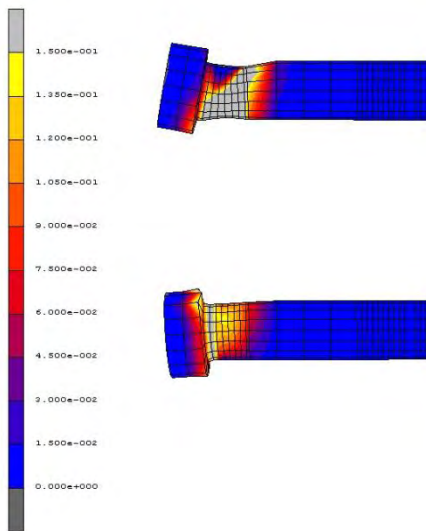
600 °C



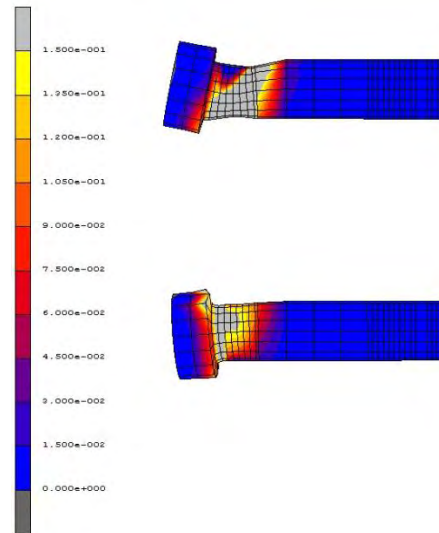
$\Phi=26.81\text{mrad}$ $M=61.11\text{kNm}$



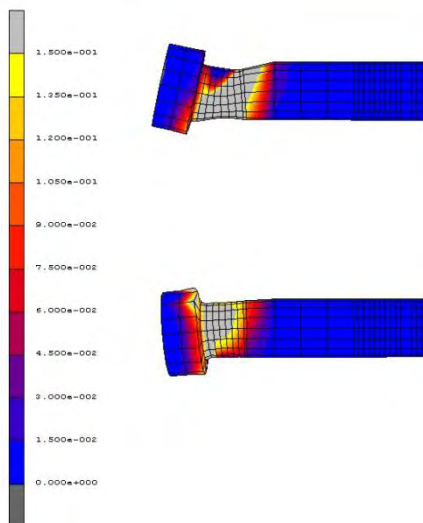
$\Phi=31.16\text{mrad}$ $M=63.65\text{kNm}$



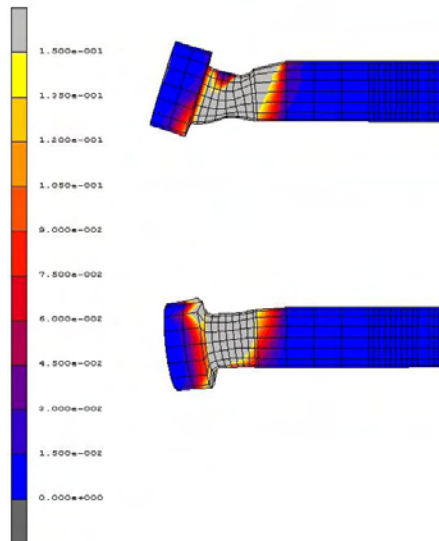
$\Phi=33.33\text{mrad}$ $M=64.42\text{kNm}$



$\Phi=37.68\text{mrad}$ $M=65.55\text{kNm}$

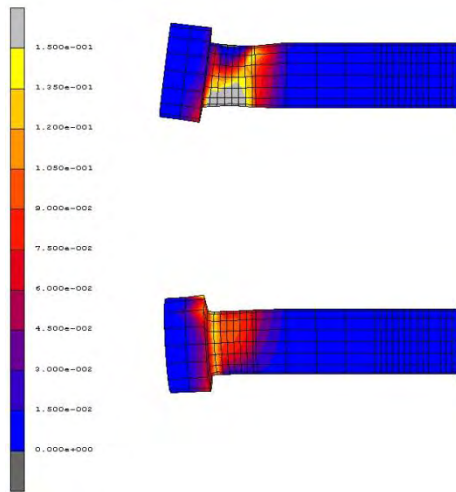


$\Phi=42.036\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=66.34\text{kNm}$

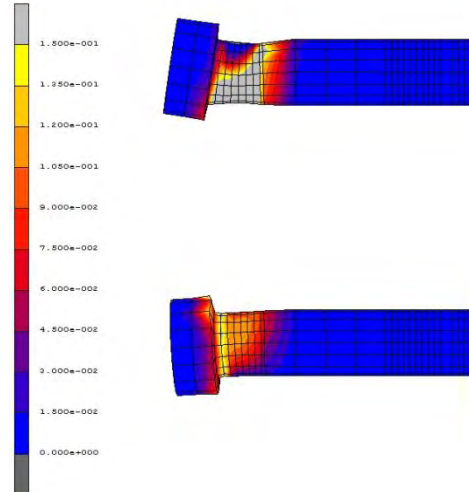


$\Phi=57.24\text{mrad}$ $M=57.11\text{kNm}$

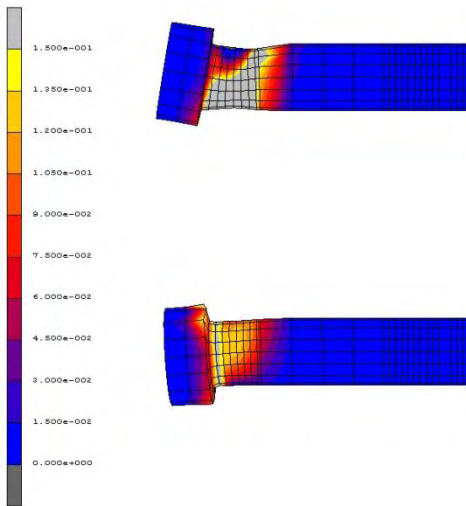
800 °C



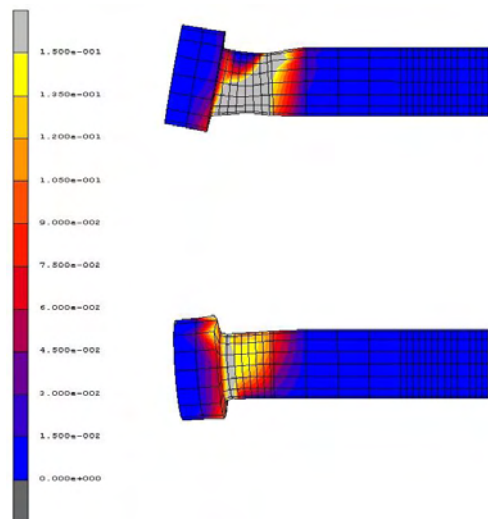
$\Phi=25.02\text{mrad}$ $M=14.79\text{kNm}$



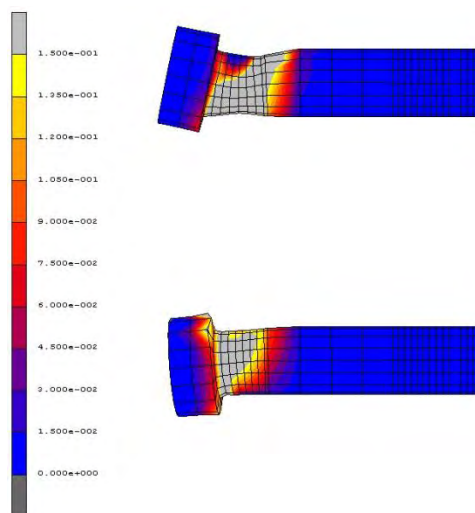
$\Phi=27.2\text{mrad}$ $M=15\text{kNm}$



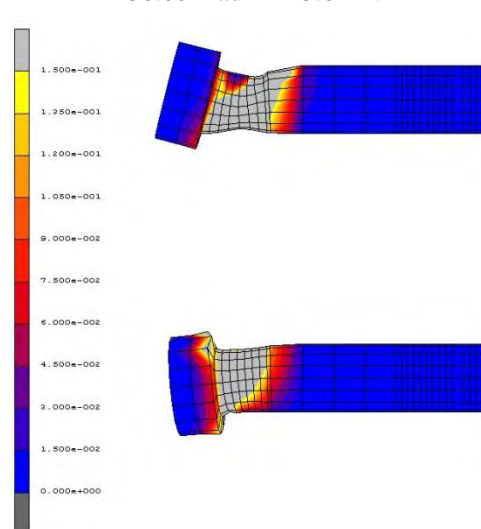
$\Phi=31.56\text{mrad}$ $M=15.33\text{kNm}$



$\Phi=38.00\text{mrad}$ $M=15.64\text{kNm}$

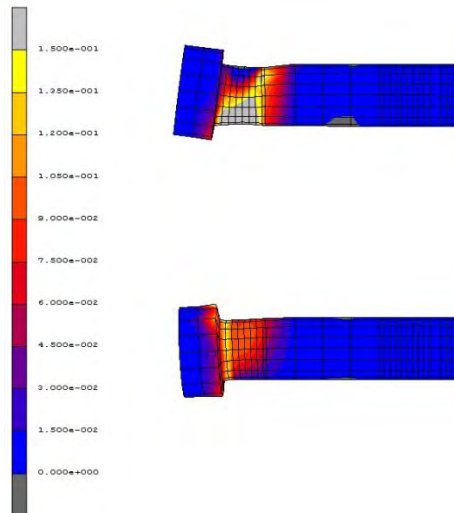


$\Phi=44.64\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=15.75\text{kNm}$

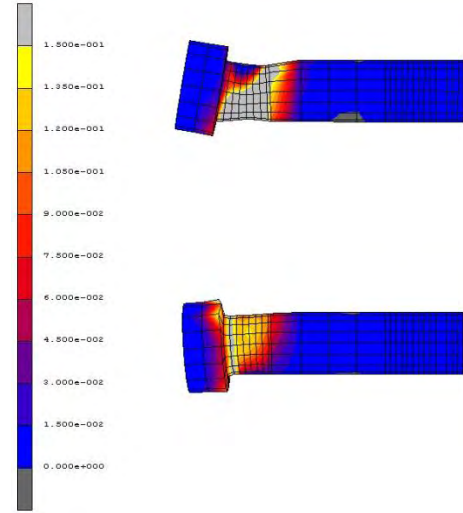


$\Phi=55.52\text{mrad}$ $M=13.65\text{kNm}$

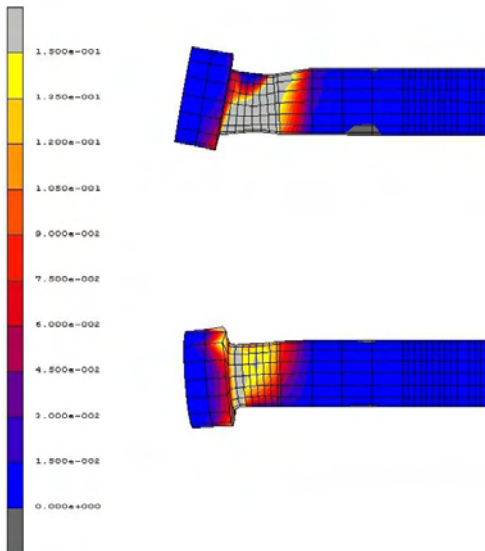
1000 °C



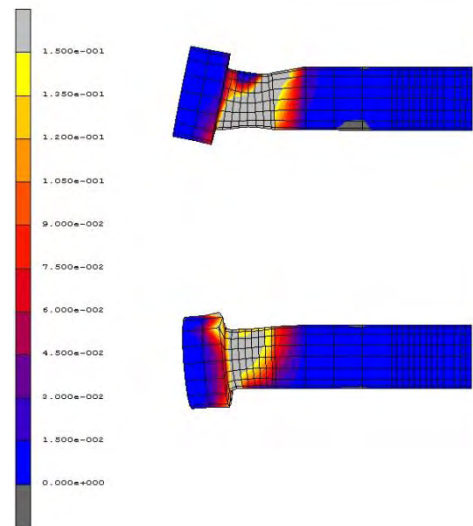
$\Phi=29.78\text{mrad}$ $M=5.74\text{kNm}$



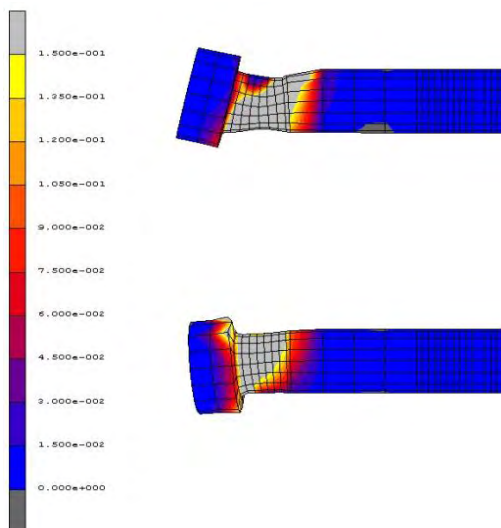
$\Phi=34.15\text{mrad}$ $M=5.78\text{kNm}$



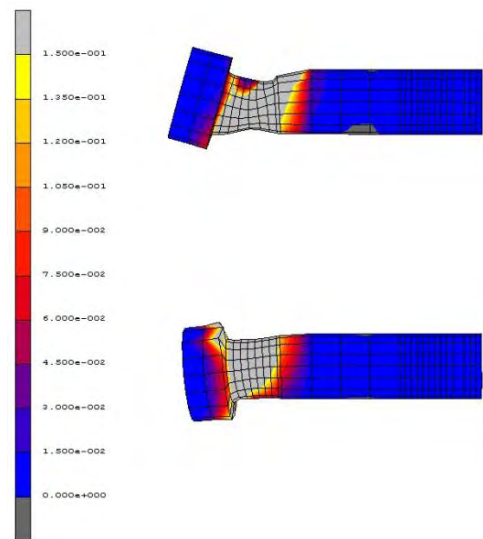
$\Phi=40.70\text{mrad}$ $M=5.80\text{kNm}$



$\Phi=45.07\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=5.82\text{kNm}$



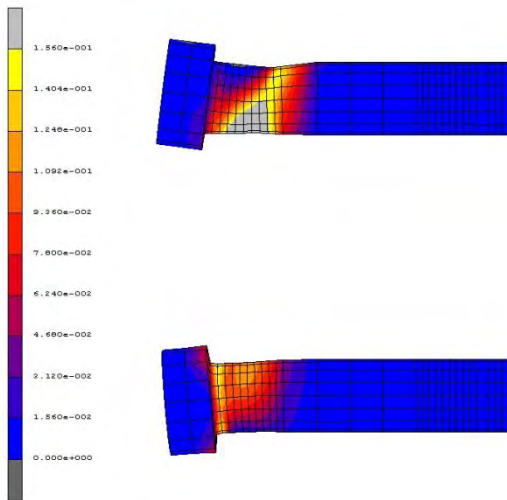
$\Phi=47.25\text{mrad}$ $M=5.40\text{kNm}$



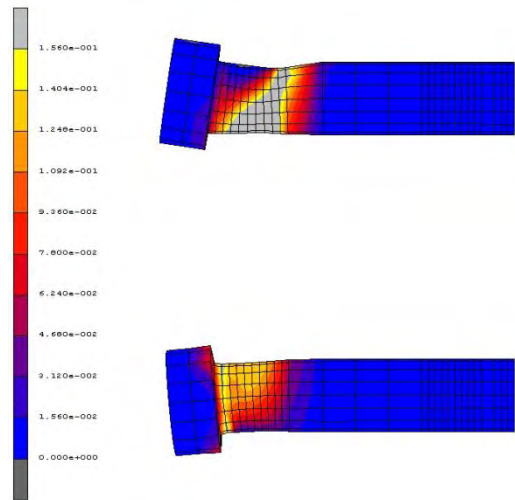
$\Phi=58.13\text{mrad}$ $M=4.95\text{kNm}$

Μετωπική πλάκα 20mm

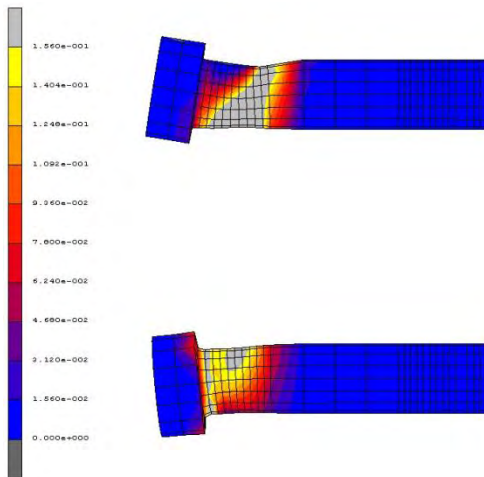
20°C



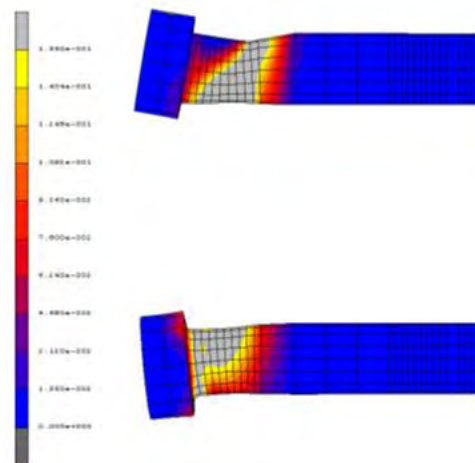
$\Phi=19.45\text{mrad}$ $M=198.88\text{kNm}$



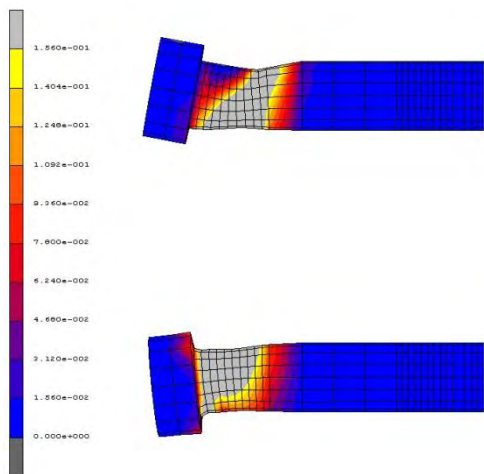
$\Phi=25.41\text{mrad}$ $M=213.014\text{kNm}$



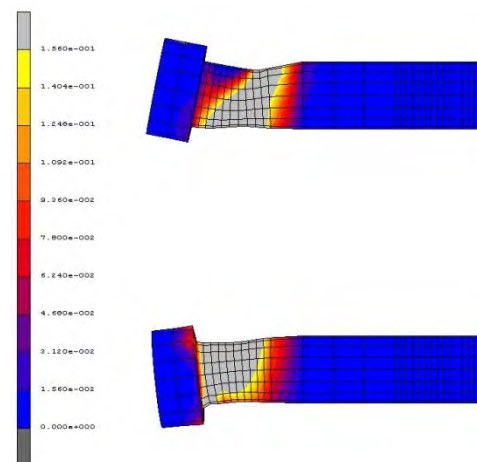
$\Phi=28.35\text{mrad}$ $M=218.05\text{kNm}$



$\Phi=33.34\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=220.748\text{kNm}$

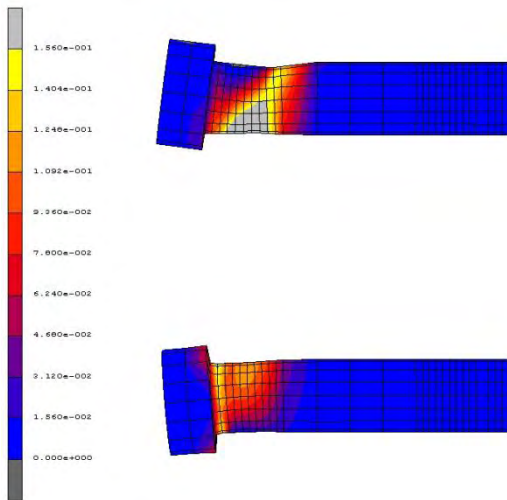


$\Phi=37.29\text{mrad}$ $M=218.32\text{kNm}$

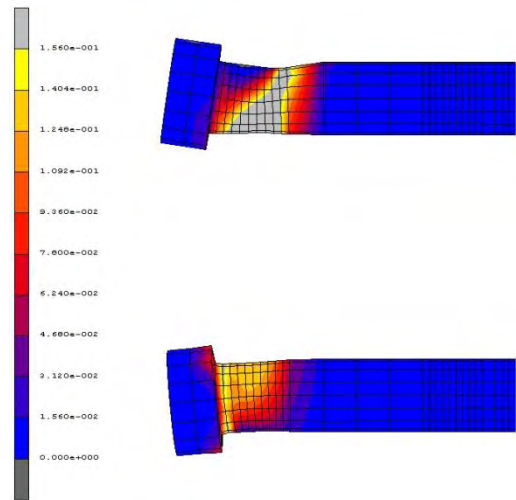


$\Phi=38.09\text{mrad}$ $M=215.64\text{kNm}$

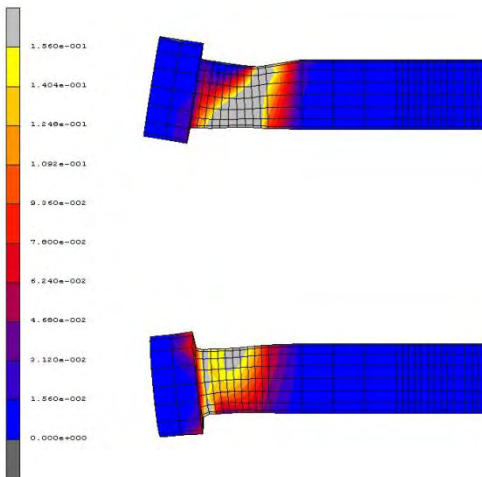
20 °C
(EC3)



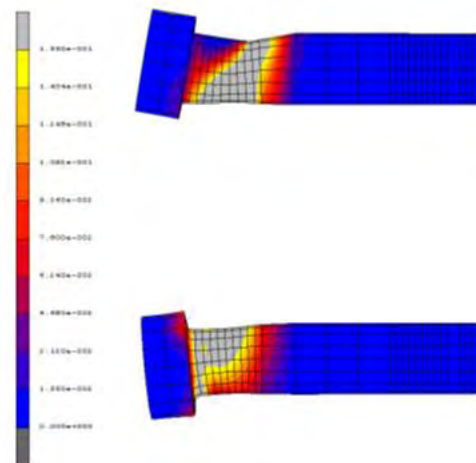
$\Phi=26.35\text{mrad}$ $M=203.63\text{kNm}$



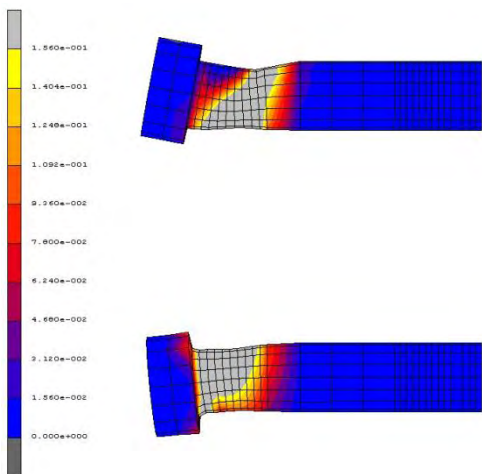
$\Phi=28.41\text{mrad}$ $M=205.014\text{kNm}$



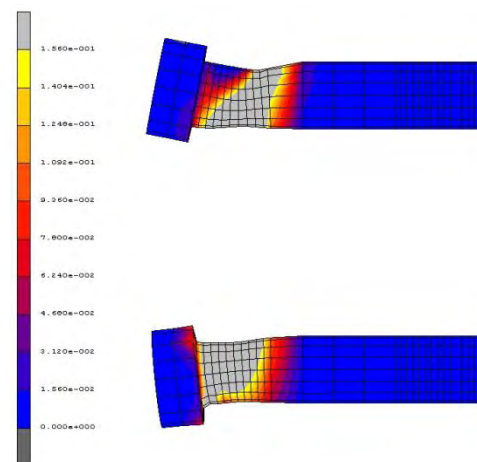
$\Phi=31.35\text{mrad}$ $M=207.05\text{kNm}$



$\Phi=35.00\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=209.71\text{kNm}$

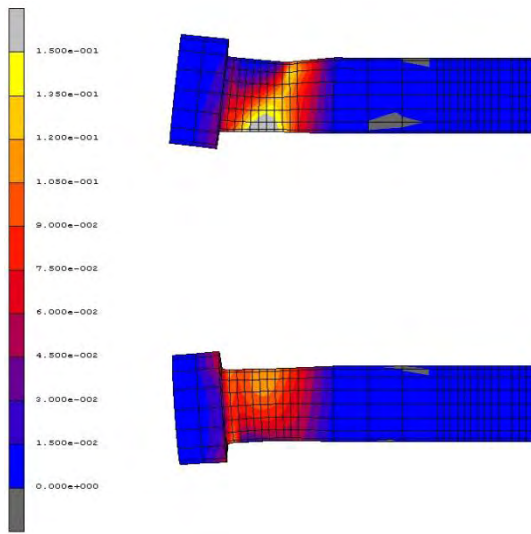


$\Phi=37.29\text{mrad}$ $M=208.32\text{kNm}$

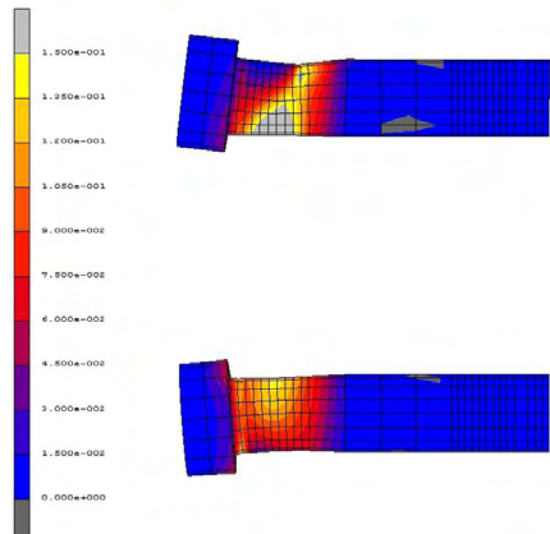


$\Phi=39.3\text{mrad}$ $M=206.64\text{kNm}$

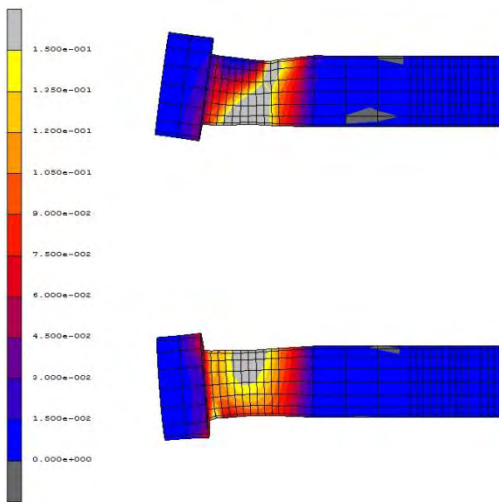
200 °C



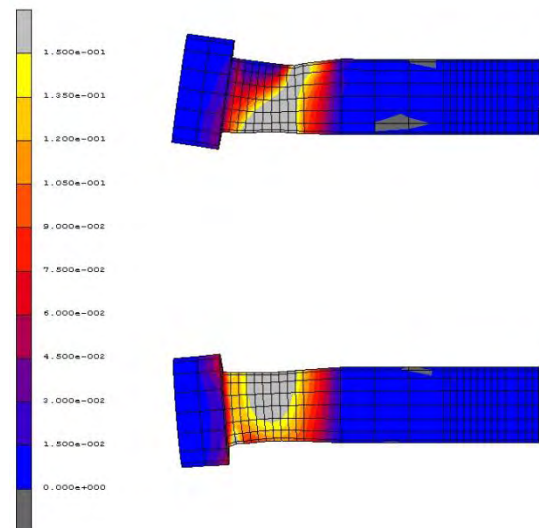
$\Phi=24.14\text{mrad}$ $M=165.85\text{kNm}$



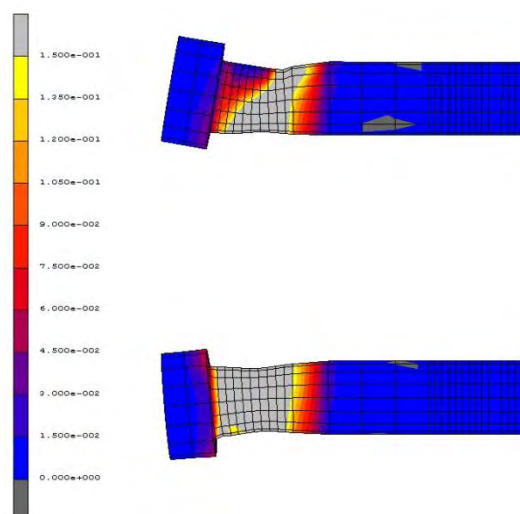
$\Phi=28.54\text{mrad}$ $M=172.00\text{kNm}$



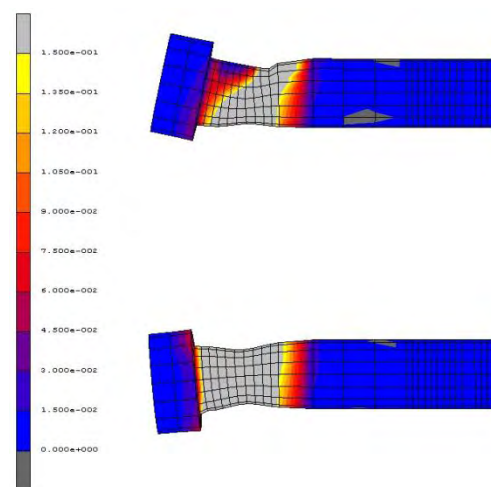
$\Phi=32.93\text{mrad}$ $M=175.46\text{kNm}$



$\Phi=35.13\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=179.67\text{kNm}$

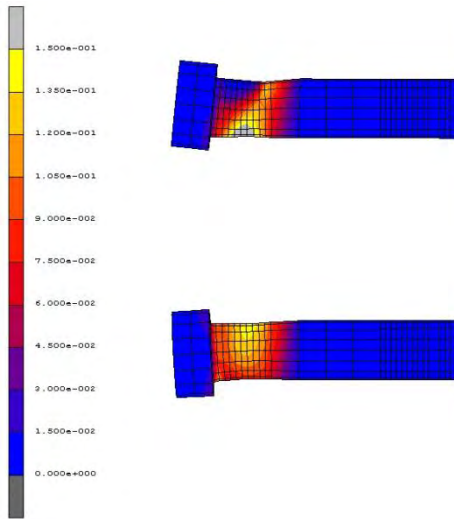


$\Phi=37.32\text{mrad}$ $M=178.42\text{kNm}$

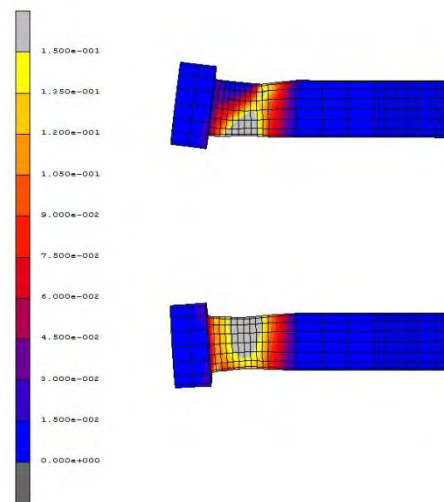


$\Phi=41.71\text{mrad}$ $M=176.31\text{kNm}$

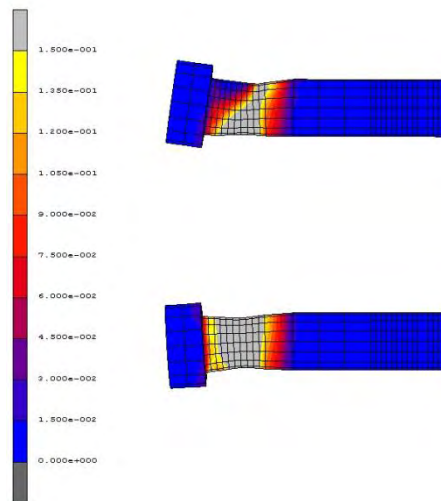
400 °C



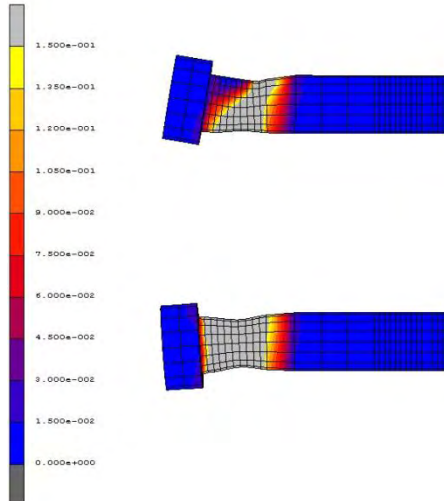
$\Phi=26.46\text{mrad}$ $M=135.59\text{kNm}$



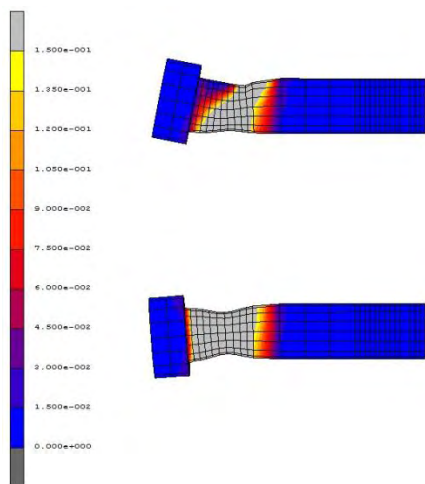
$\Phi=30.82\text{mrad}$ $M=141.15\text{kNm}$



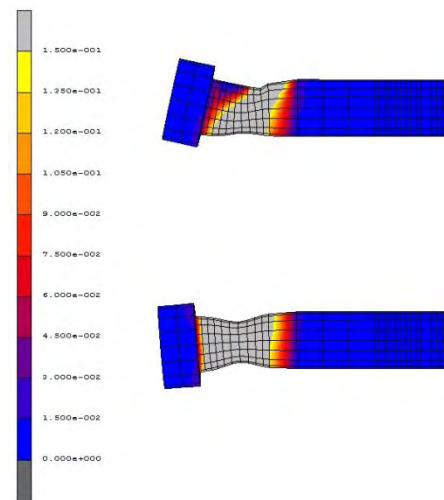
$\Phi=35.17\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=143.95\text{kNm}$



$\Phi=37.35\text{mrad}$ $M=143.81\text{kNm}$

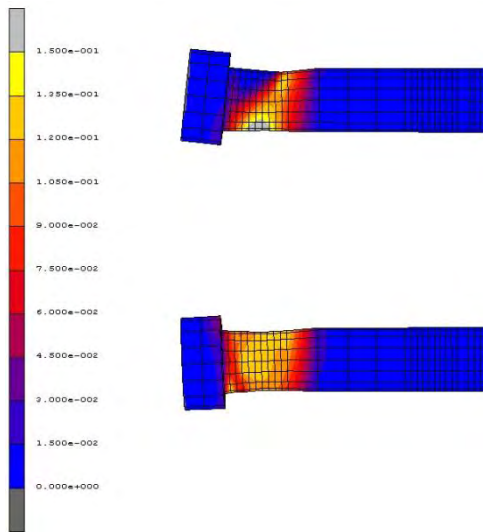


$\Phi=39.54\text{mrad}$ $M=142.35\text{kNm}$

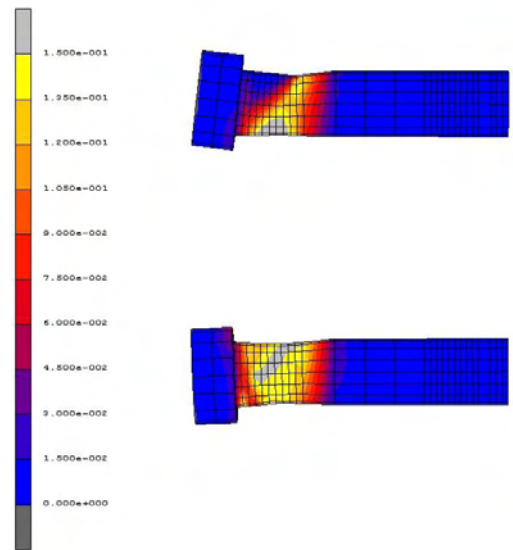


$\Phi=41.72\text{mrad}$ $M=141.62\text{kNm}$

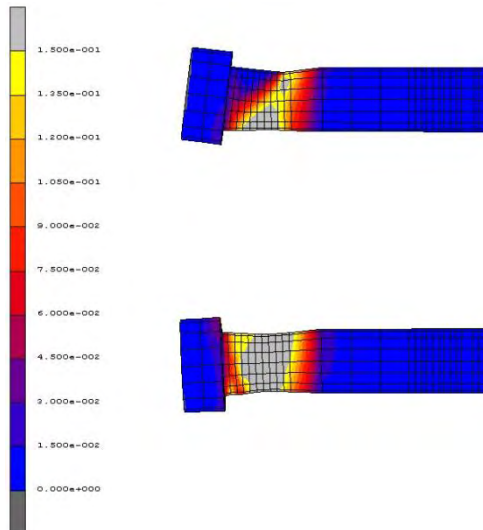
600 °C



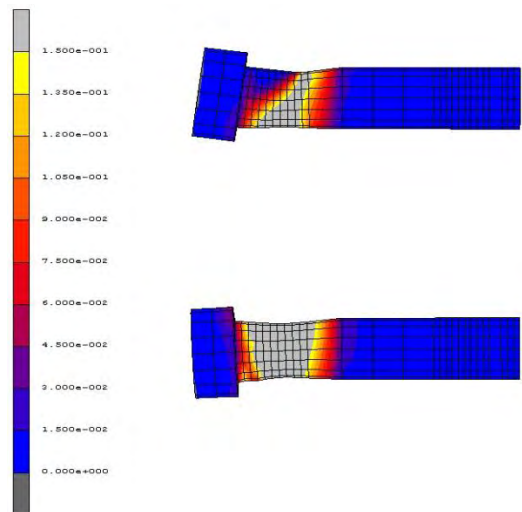
$\Phi=24.45\text{mrad}$ $M=57.5\text{kNm}$



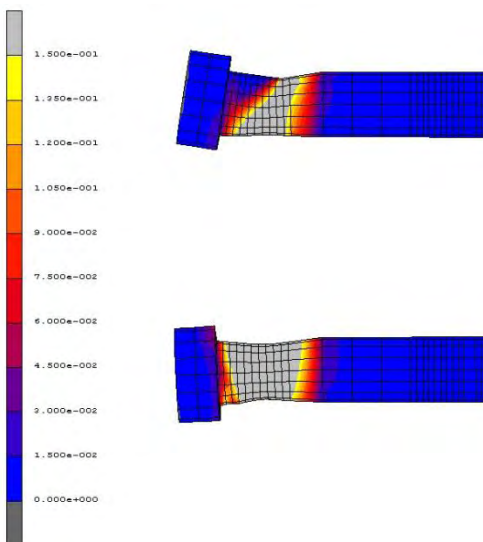
$\Phi=26.61\text{mrad}$ $M=58\text{kNm}$



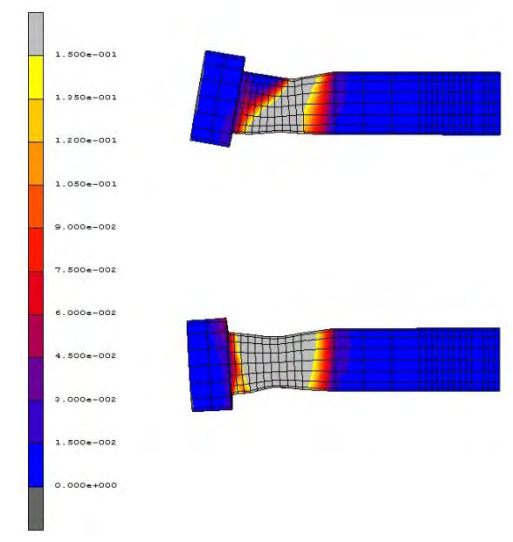
$\Phi=30.93\text{mrad}$ $M=58.8\text{kNm}$



$\Phi=35.25\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=60\text{kNm}$

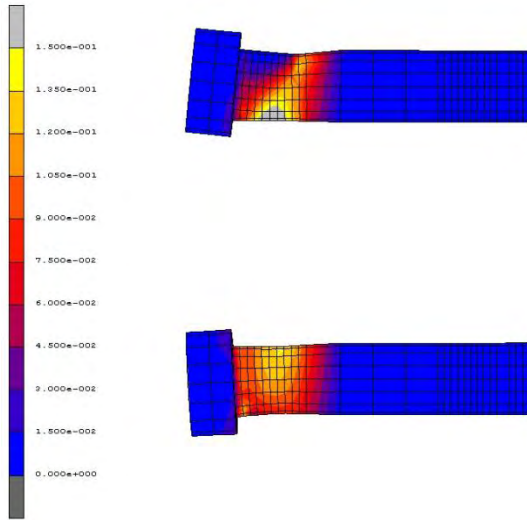


$\Phi=39.59\text{mrad}$ $M=57.32\text{kNm}$

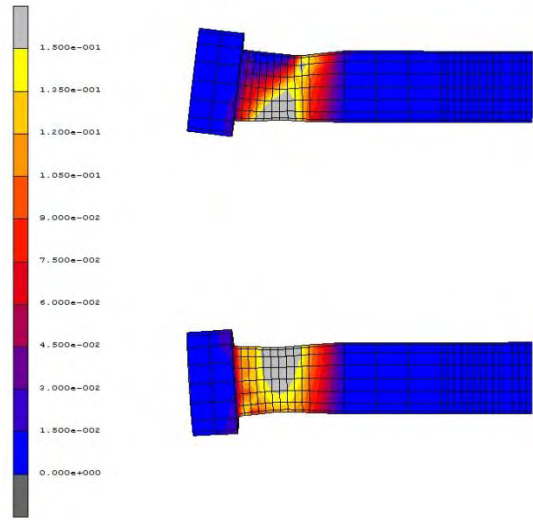


$\Phi=43.93\text{mrad}$ $M=55.31\text{kNm}$

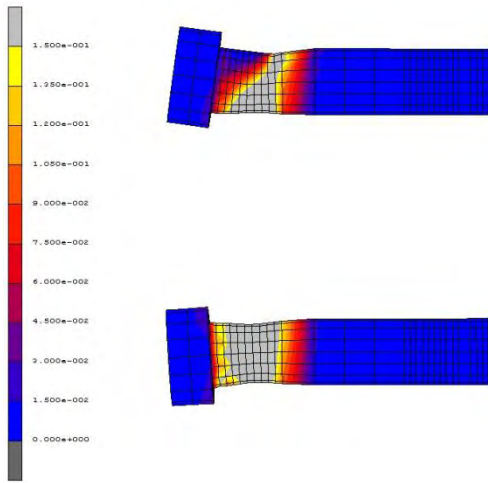
800 °C



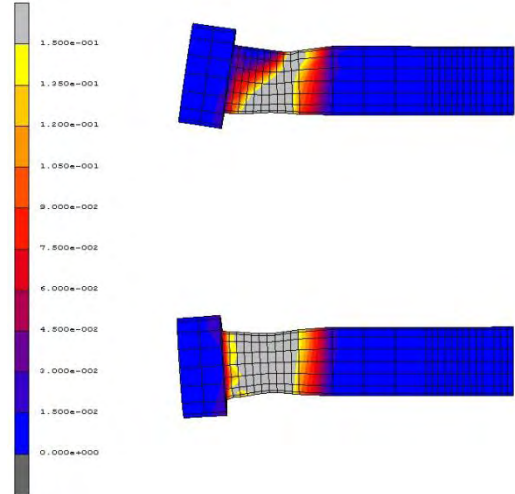
$\Phi=27.16\text{mrad}$ $M=16.47\text{kNm}$



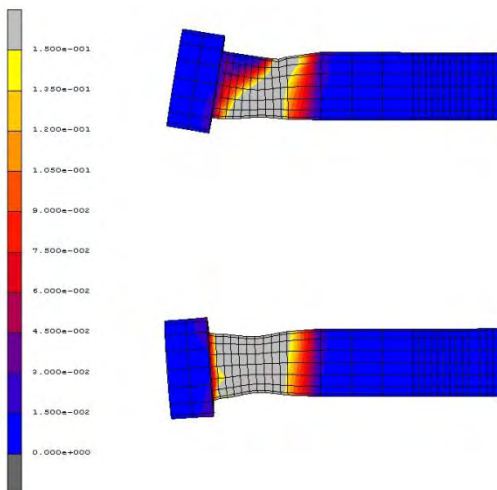
$\Phi=31.52\text{mrad}$ $M=16.95\text{kNm}$



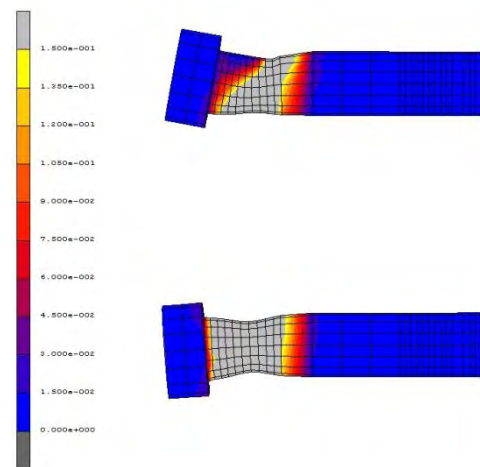
$\Phi=35.88\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=17.28\text{kNm}$



$\Phi=40.26\text{mrad}$ $M=16.03\text{kNm}$

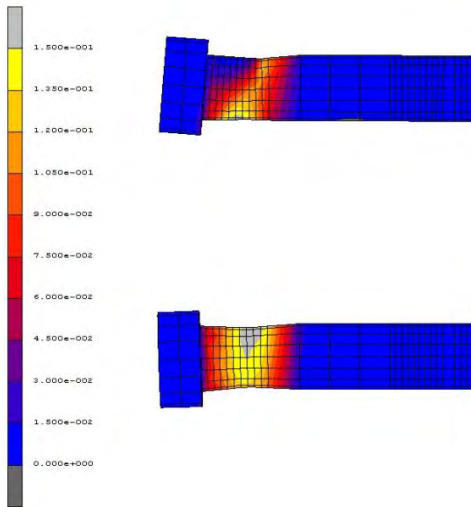


$\Phi=44.63\text{mrad}$ $M=14.21\text{kNm}$

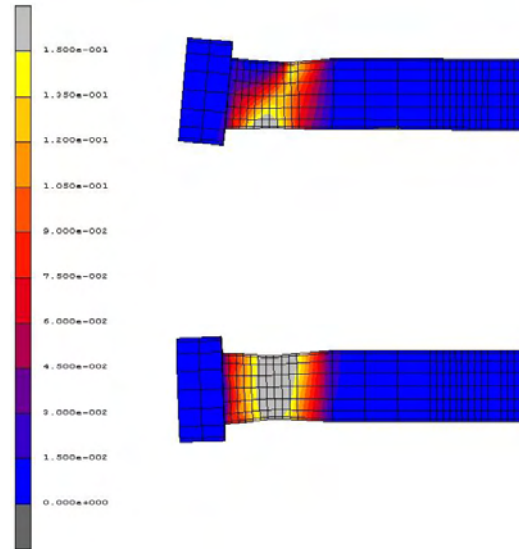


$\Phi=46.82\text{mrad}$ $M=13.95\text{kNm}$

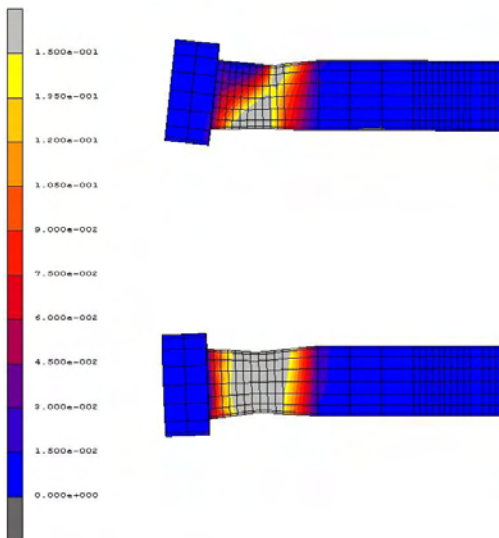
1000 °C



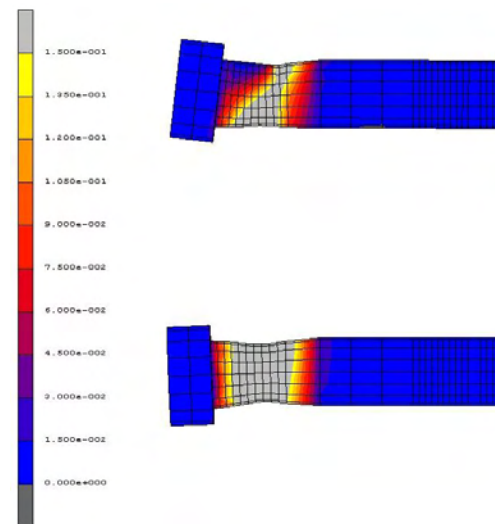
$\Phi=27.62\text{mrad}$ $M=6.58\text{kNm}$



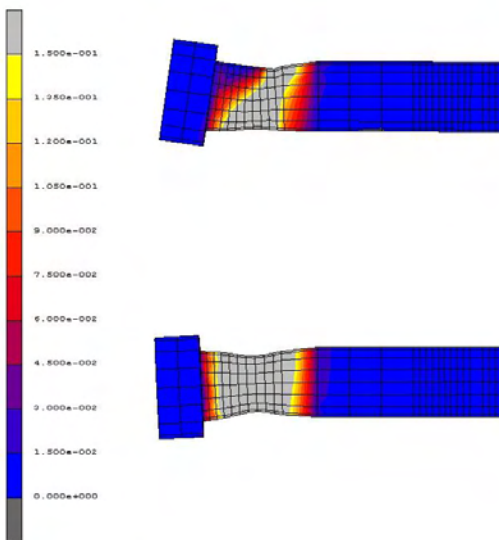
$\Phi=29.8\text{mrad}$ $M=6.62\text{kNm}$



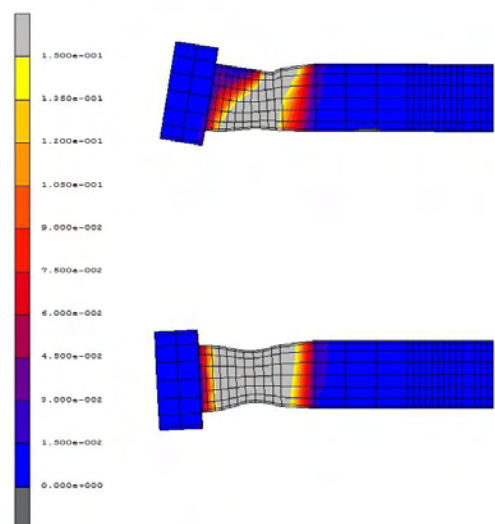
$\Phi=34.23\text{mrad}$ $M=6.65\text{kNm}$



$\Phi=36.43\text{mrad}$ $M_{\text{max}}=6.66\text{kNm}$



$\Phi=40.84\text{mrad}$ $M=6.63\text{kNm}$



$\Phi=47.44\text{mrad}$ $M=6.24\text{kNm}$

Βιβλιογραφία

Coelho AMG, Bijlaard FSK, Silva LS, (2004 β):

Experimental assessment of the ductility of extended end plate connections.
Engineering Structures, Elsevier, Vol.26, pp.1185-1206.

CEN - Comité Européen de Normalisation (2003):

Eurocode 3: Design of steel structures.
Part 1.8: Design of joints (prEN 1993-1-8:2003), Stage 49 Draft, Brussels, Belgium

CEN - Comité Européen de Normalisation (2003 β):

Eurocode 3: Design of steel structures.
Part 1.1: General rules and rules for buildings (prEN 1993-1-1:2003), Stage 49 Draft, Brussels, Belgium

CEN - Comité Européen de Normalisation (2003):

Eurocode 3: Design of steel structures.
Part 1.2: Structural fire design (prEN 1993-1-1:2003), Stage 49 Draft, Brussels, Belgium

Khalifa S. Al-Jabri, J. Buick Davison, Ian W. Burgess:

Performance of beam-to-column joints in fire – A review
Fire Safety Journal, Elsevier, Vol.43, pp.50-62.

N.H. Ramli-Sulong, A.Y. Elghazoul, B.A. Izzuddin:

Behaviour and design of beam-to-column connections under fire
Conditions
Fire Safety Journal, Elsevier, Vol.42, pp.437-451

Μηνάς Ε. Λεμονής:

Κόμβοι δοκού-υποστυλώματος σε μεταλλικά πλαίσια, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2006

Μπανιωτόπουλος ΧΚ (2004):

Συνδέσεις μεταλλικών κατασκευών στα πλαίσια των Ευρωκωδίκων 3 & 9. Αριστοτέλειο πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης - Πρόγραμμα συνεχιζόμενης εκπαίδευσης στις δομικές συνδέσεις CESTRUCO, επιμέλεια έκδοσης: Μπανιωτόπουλος ΧΚ. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη.

Ευρετήριο Σχημάτων

ΣΧΗΜΑ 1-1 ΚΟΜΒΟΣ ΜΕ ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΠΛΑΚΑ	5
ΣΧΗΜΑ 1-2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΒΡΑΧΕΟΣ Τ	5
ΣΧΗΜΑ 2-1 ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΟΠΗΣ-ΣΤΡΟΦΗΣ ΚΟΜΒΟΥ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ	14
ΣΧΗΜΑ 2-2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΔΕΣΗ ΒΡΑΧΕΟΣ ΤΑΥ	15
ΣΧΗΜΑ 2-3 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ.....	19
ΣΧΗΜΑ 2-4 ΚΟΜΒΟΙ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ (Β) Η ΧΩΡΙΣ (Α) ΑΞΟΝΙΚΗ ΔΥΝΑΜΗ ΣΤΗΝ ΔΟΚΟ.....	21
ΣΧΗΜΑ 2-5 ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΟΜΒΟΥ (Α) ΚΑΙ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΚΟΜΒΟΥ (Β)	22
ΣΧΗΜΑ 2-6 ΚΟΜΒΟΙ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ ΣΤΟΝ ΙΣΧΥΡΟ (Α) ΚΑΙ ΑΣΘΕΝΗ (Β) ΑΞΟΝΑ.....	23
ΣΧΗΜΑ 3-1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΑΠΟ COELHO ET AL. (2004B)	25
ΣΧΗΜΑ 3-2 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΤΩΝ COELHO ET AL (2004B)	26
ΣΧΗΜΑ 3-3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΠΡΟΕΚΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ.....	26
ΣΧΗΜΑ 3-4 . ΕΞΙΔΑΝΙΚΕΥΣΗ ΝΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΓΙΑ ΔΟΚΟ ΚΑΙ ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΠΛΑΚΑ	27
ΣΧΗΜΑ 3-5 ΑΡΧΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ.....	33
ΣΧΗΜΑ 3-6 ΚΑΤΟΨΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	34
ΣΧΗΜΑ 3-7 ΠΛΑΓΙΑ ΟΨΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	34
ΣΧΗΜΑ 3-8 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ	35
ΣΧΗΜΑ 3-9 ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	35
ΣΧΗΜΑ 3-10 ΚΟΜΒΟΣ ΔΟΚΟΥ-ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΟΣ	36
ΣΧΗΜΑ 4-1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ	38
ΣΧΗΜΑ 4-2 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ $M_{MAX} = 148,83 \text{ kNm}$	41
ΣΧΗΜΑ 4-3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ (ΓΙΑ $M_{MAX} = 148,83 \text{ kNm}$)	42
ΣΧΗΜΑ 4-4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ	42
ΣΧΗΜΑ 4-5 ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΟΠΗΣ-ΣΤΡΟΦΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ FS2 (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ)	44
ΣΧΗΜΑ 4-6 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ 2 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΓΙΑ $M_{MAX} = 198,75 \text{ kNm}$	45
ΣΧΗΜΑ 4-7 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ (ΓΙΑ $M_{MAX} = 198,75 \text{ kNm}$)	46
ΣΧΗΜΑ 4-8 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ (ΓΙΑ $M_{MAX} = 198,75 \text{ kNm}$).....	46
ΣΧΗΜΑ 4-9 ΚΑΜΠΥΛΗ ΡΟΠΗΣ-ΣΤΡΟΦΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ FS3 (ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ)	48
ΣΧΗΜΑ 4-10 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΜΕΝΗ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ $M_{MAX} = 220,748 \text{ kNm}$	49
ΣΧΗΜΑ 4-11 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 3 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ (ΓΙΑ $M_{MAX} = 220,748 \text{ kNm}$).....	50
ΣΧΗΜΑ 4-12 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 3 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ (ΓΙΑ $M_{MAX} = 220,748 \text{ kNm}$).....	50

ΣΧΗΜΑ 4-13 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΗΣ 3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ	51
ΣΧΗΜΑ 5-1 ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΑΝΟΞΕΙΔΩΤΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	54
ΣΧΗΜΑ 5-2 ΕΙΔΙΚΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ ΣΥΝΗΘΟΥΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ	55
ΣΧΗΜΑ 5-3 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ ΣΥΝΗΘΟΥΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ.....	56
ΣΧΗΜΑ 5-4 ΜΕΙΩΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΥΝΗΘΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ, ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ.....	58
ΣΧΗΜΑ 5-5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	58
ΣΧΗΜΑ 5-6 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΣΧΕΣΗ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΟΠΟΙΑ ΛΑΜΒΑΝΕΤΑΙ ΥΠΟΨΗ Η ΚΡΑΤΥΝΣΗ ΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ	60
ΣΧΗΜΑ 6-1 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΟΠΗΣ-ΣΤΡΟΦΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ FS1 ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	66
ΣΧΗΜΑ 6-2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 200°C (ΓΙΑ MMAX).....	68
ΣΧΗΜΑ 6-3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 200°C (ΓΙΑ MMAX).....	68
ΣΧΗΜΑ 6-4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 400°C (ΓΙΑ MMAX).....	69
ΣΧΗΜΑ 6-5 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 400°C (ΓΙΑ MMAX).....	69
ΣΧΗΜΑ 6-6 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 600°C (ΓΙΑ MMAX).....	70
ΣΧΗΜΑ 6-7 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 600°C (ΓΙΑ MMAX).....	70
ΣΧΗΜΑ 6-8 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 800°C (ΓΙΑ MMAX).....	71
ΣΧΗΜΑ 6-9 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 800°C (ΓΙΑ MMAX).....	71
ΣΧΗΜΑ 6-10 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 1000°C (ΓΙΑ MMAX).....	72
ΣΧΗΜΑ 6-11 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 1 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 1000°C (ΓΙΑ MMAX).....	72
ΣΧΗΜΑ 6-12 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΟΠΗΣ-ΣΤΡΟΦΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ FS2 ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	74
ΣΧΗΜΑ 6-13 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 200°C (ΓΙΑ MMAX).....	75
ΣΧΗΜΑ 6-14 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 200°C (ΓΙΑ MMAX).....	75
ΣΧΗΜΑ 6-15 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 400°C (ΓΙΑ MMAX).....	76
ΣΧΗΜΑ 6-16 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^ο Υ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 400°C (ΓΙΑ MMAX).....	76

ΣΧΗΜΑ 6-17 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 600°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	77
ΣΧΗΜΑ 6-18 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 600°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	77
ΣΧΗΜΑ 6-19 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 800°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	78
ΣΧΗΜΑ 6-20 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 800°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	78
ΣΧΗΜΑ 6-21 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 1000°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	79
ΣΧΗΜΑ 6-22 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 2 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 1000°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	79
ΣΧΗΜΑ 6-23 ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΡΟΠΗΣ-ΣΤΡΟΦΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ FS3 ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	81
ΣΧΗΜΑ 6-24 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 200°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	82
ΣΧΗΜΑ 6-25 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 200°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	82
ΣΧΗΜΑ 6-26 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 400°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	83
ΣΧΗΜΑ 6-27 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 400°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	83
ΣΧΗΜΑ 6-28 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 600°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	84
ΣΧΗΜΑ 6-29 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 600°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	84
ΣΧΗΜΑ 6-30 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 800°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	85
ΣΧΗΜΑ 6-31 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 800°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	85
ΣΧΗΜΑ 6-32 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΗΣ VON MISES ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 800°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	86
ΣΧΗΜΑ 6-33 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗ ΖΩΝΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ 3 ^{ΟΥ} ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΣΕ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ 800°C (ΓΙΑ M _{MAX}).....	86

Ευρετήριο Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1 ΠΑΧΗ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	27
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΚΑΙ ΔΟΚΟΥ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	28
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΟΧΛΙΩΝ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	29
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΜΕΤΩΠΙΚΗΣ ΠΛΑΚΑΣ ΚΑΙ ΔΟΚΟΥ ΤΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΚΟΧΛΙΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ	30
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΗΣ (ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΠΛΑΚΑ 10ΜΜ)	39
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ $M_{j,rd}$ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΚΟΜΒΟΥ FS1 ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ EC3	39
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΗΣ (ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΠΛΑΚΑ 15ΜΜ)	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ $M_{j,rd}$ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΚΟΜΒΟΥ FS2 ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ EC3	43
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-5 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΗΣ (ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΠΛΑΚΑ 20ΜΜ)	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ $M_{j,rd}$ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΚΟΜΒΟΥ FS3 ΚΑΙ ΤΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ EC3	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ $M_{j,rd}$ ΤΩΝ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΚΟΜΒΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ 3 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ EC3	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1 ΜΕΙΩΤΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ - ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ, ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΓΙΑ ΚΟΧΛΙΕΣ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΧΑΛΥΒΑ ΠΟΥ ΣΥΝΔΕΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ – ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΥΨΗΛΕΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ (ΔΟΚΟΣ ΙΡΕ300, ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΠΛΑΚΑ 10,15 ΚΑΙ 20ΜΜ ΚΑΙ ΚΟΧΛΙΕΣ)	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-2 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΗΣ (ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΠΛΑΚΑ 10ΜΜ)	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ $M_{j,rd}$ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ FS1 ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ EC3	65
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-4 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΗΣ (ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΠΛΑΚΑ 15ΜΜ)	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ $M_{j,rd}$ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ FS2 ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ EC3	73
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-6 ΚΥΡΙΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΡΟΠΗΣ – ΣΤΡΟΦΗΣ (ΜΕΤΩΠΙΚΗ ΠΛΑΚΑ 20ΜΜ)	80
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-7 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ $M_{j,rd}$ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ FS3 ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΤΟΥ EC3	80