

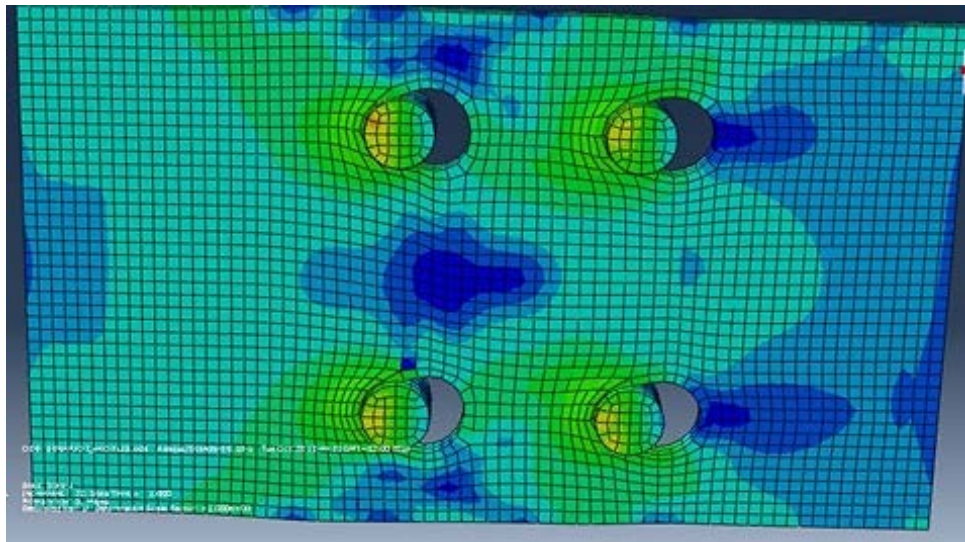


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

## ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΚΟΧΛΙΩΤΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λυκουσάς Ιωάννης

Παναγάκης Πέτρος

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Οκτώβριος 2014

ΕΜΚ ΔΕ 2014/19

Λυκουσάς Ι. Π. - Παναγάκης Π. Π. (2014).  
Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς κοχλιωτών συνδέσεων σε διάτμηση  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2014/19  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Lykousas I. P - Panagakis P. P. (2014).  
Experimental study of bolted shear connections  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2014/19  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

# Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	4	
Abstract	5	
Ευχαριστίες	6	
1	Εισαγωγή	7
1.1	Συνδέσεις	7
2	Κανονιστικές διατάξεις	9
2.1	Άντοχή σε σύνθλιψη άντοχης	9
2.2	Επιτρεπόμενες αποστάσεις μεταξύ των κοχλιών και από τα άκρα	10
3	Πειράματα	14
3.1	Εισαγωγή	14
3.2	Έλεγχος ποιότητας υλικού	14
3.3	Επίλυση σύμφωνα με τον EN-1993-1-8	21
3.4	Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών και στήσιμο πειράματος	22
3.5	Συμπεράσματα	30
4	Αριθμητικές αναλύσεις κοχλιωτών συνδέσεων	34
4.1	Εισαγωγή	34
4.2	Ανάλυση φορέων πεπερασμένων στοιχείων – Γενικά	34
4.3	Έλεγχος ποιότητας υλικού	35
4.3.1	Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων	35
4.3.2	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	39
4.4	Προσομοίωση σύνδεσης με ένα κοχλία	40
4.4.1	Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων	40
4.4.2	Σύγκριση αποτελεσμάτων Abaqus - EC3 - Πειραμάτων	44
4.5	Προσομοίωση συνδέσεων με 4 & 5 κοχλίες	47
4.5.1	Σχολιασμός και σύγκριση αποτελεσμάτων Abaqus- EC3	67
5	Συμπεράσματα	70
6	Βιβλιογραφία	71

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2014/19

Λυκουσάς Ι. Π. - Παναγάκης Π. Π.  
(Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της συμπεριφοράς κοχλιωτών συνδέσεων σε σύνθλιψη άντυγας. Ειδικότερα εξετάζονται οι συνδέσεις σε λοξή διάταξη για τις οποίες έγιναν πειραματικές δοκιμές στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π και περαιτέρω αριθμητικές αναλύσεις, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus v6.10.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο φαινόμενο της σύνθλιψης άντυγας σε κοχλιωτές συνδέσεις και δίνονται παραδείγματα συνδέσεων.

Το δεύτερο κεφάλαιο αποτελεί μία εκτεταμένη αναφορά των κανονιστικών διατάξεων του Ευρωκώδικα 3 (EN 1993-1-8) πάνω στις συνδέσεις άντυγας και ειδικότερα σε συνδέσεις λοξής διάταξης. Δίδονται οι υπολογισμοί και τα αποτελέσματα βάσει του κανονισμού για τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα και στις αριθμητικές αναλύσεις.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η διαδικασία και τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν. Πραγματοποιήθηκαν δύο φάσεις πειραμάτων, η πρώτη αφορούσε την εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού, ενώ η δεύτερη πειράματα με το συγκεκριμένο υλικό και επιλεγμένες διατάξεις με σκοπό τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αναλύσεων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται αρχικά γενικά στοιχεία για την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και για το ABAQUS, το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας. Επιπλέον γίνεται αναφορά στο προσομοίωμα των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκε και δίδονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συγκρίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα με αυτά των αριθμητικών αναλύσεων καθώς και αυτά που προέκυψαν από τις αναλυτικές σχέσεις των ισχύουσων κανονιστικών διατάξεων.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα συμπεράσματα όλων των αναλύσεων και πρόταση για περαιτέρω έρευνα επί του θέματος.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔE 2011/04

Experimental study of bolted shear connections

Lykousas I. P - Panagakis P. P.  
(supervised by Vayas I.)

Abstract

The purpose of the present diploma thesis is the behavior analysis of bolted connections in bearing. Initially are described bolted connections with staggered rows for which were made up experiments at the Institute of Steel Structures NTUA and further numerical analysis using the finite element program Abaqus v6.10.

In the first chapter, the bearing effect on bolted connections is considered and are being presented examples of connections.

The second chapter is an extensive report of the regulations of Eurocode 3 (EN 1993-1-8) on bearing connections and especially on bolted connections with staggered rows. A detailed summary of the results is given according to Eurocode 3 for the same materials which have been used in the experiments and the numerical analysis.

In the third chapter, the experiment process and results are considered. There were two phases of experiments, the first one was concerned with finding the mechanical features of the materials and the second experiment, with the same material and selected regulations, for the purpose of checking the results from the numerical analysis.

In the fourth chapter, global figures on the finite element method and on Abaqus, the finite element program which is used in the present diploma thesis, are considered. Initially is described the model, which is used and the results from the numerical analysis are being presented.

In the fifth chapter, a comparison between numerical analysis and experiment results is considered, as well as with the results from the analytical solution of Eurocode 3.

In the sixth section, the conclusions which arose from the all above analyses are being presented and suggestions for further research on this subject are being proposed.

## Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον κύριο Ιωάννη Βάγια, καθηγητή στην Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την ανάθεση του θέματος της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, ευχαριστούμε θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Ανδρέα Σπηλιόπουλο για την πολύτιμη του καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας αλλά και για το χρόνο που μας παρείχε για την παρακολούθηση της πορείας της.

Ευχαριστίες και στην υποψήφια διδάκτορα Μαρία-Ελένη Δασίου για την πολύτιμη βοήθεια που μας παρείχε στην εκμάθηση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus.

Τέλος, ευχαριστούμε τόσο τους φίλους μας όσο και τις οικογένειες μας για την συμπαράσταση και στήριξη που μας προσφέρουν τόσα χρόνια.

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Συνδέσεις

Οι συνδέσεις αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι των μεταλλικών κατασκευών. Μια μεταλλική κατασκευή αποτελείται από επιμέρους τμήματα που συνδέονται μηχανικά μεταξύ τους, με σκοπό τη μόρφωση του τελικού φορέα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της αποκατάστασης της συνέχειας, της διαμόρφωσης και σύνδεσης μεταξύ μελών.

Οι συνδέσεις με κριτήριο τον τρόπο σύνδεσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- συνδέσεις με μηχανικά μέσα ( κοχλίες , πείρους κλπ)
- συγκολλητές

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα επικεντρωθούμε στις κοχλιωτές συνδέσεις, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, οι οποίες σήμερα χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά στις συνήθεις σιδηρές κατασκευές. Βασικό πλεονέκτημά τους είναι η συναρμολόγηση στο χώρο του εργοταξίου εν αντιθέσει με τις συγκολλήσεις που απαιτούν την ύπαρξη κατάλληλου περιβάλλοντος κάτι που παρέχεται από το χώρο του εργοστασίου.

Οι κοχλιωτές συνδέσεις διακρίνονται σε κατηγορίες, ανάλογα με τη διεύθυνση της προς μεταφορά δύναμης. Έτσι, υπάρχουν οι συνδέσεις διάτμησης, όπου η δύναμη είναι κάθετη προς τον άξονα του κοχλία και οι συνδέσεις εφελκυσμού, όπου η δύναμη είναι παράλληλη προς τον άξονα του κοχλία.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η συμπεριφορά λοξής διάταξης κοχλιώσεων σε διάτμηση. Οι κοχλιωτές συνδέσεις που υπόκεινται σε διάτμηση χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες ως εξής :

- Κατηγορία A- Κοχλιώσεις σύνθλιψης άντυγας
- Κατηγορία B - Κοχλιώσεις ανθεκτικές σε ολίσθηση στην ΟΚΛ
- Κατηγορία C - Κοχλιώσεις ανθεκτικές σε ολίσθηση στην ΟΚΑ

Οι απαιτούμενοι έλεγχοι με σκοπό την εύρεση της αντοχής των παραπάνω κατηγοριών συνδέσεων φαίνονται στον πίνακα 1.1.

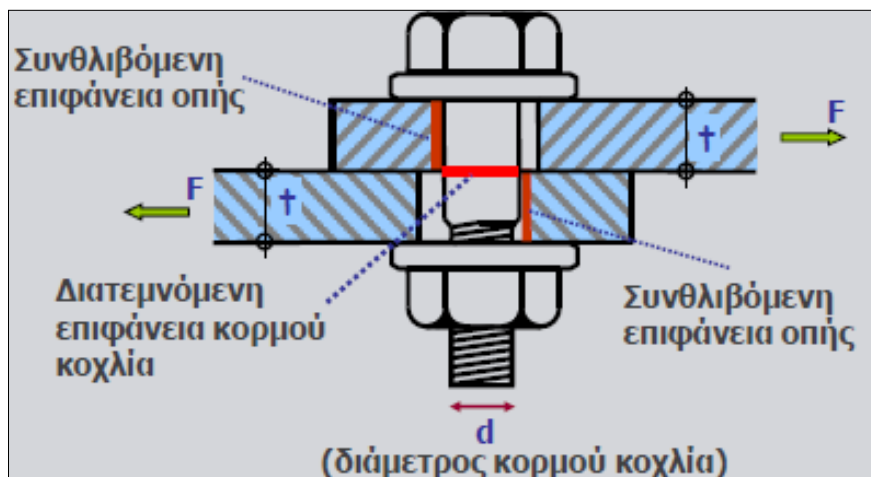
Πίνακας 1.1: Απαιτούμενοι έλεγχοι για τις κατηγορίες κοχλιωτών συνδέσεων σε διάτμηση

Κατηγορία	A Άντυγας	B Ανθεκτικές σε ολίσθηση στην ΟΚΛ	C Ανθεκτικές σε ολίσθηση στην ΟΚΑ
Κριτήρια	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$

Στην κατηγορία A ο μηχανισμός μεταφοράς των δυνάμεων πραγματοποιείται μέσω επαφής της άντυνας του ελάσματος με τον κορμό του κοχλίου. Πραγματοποιείται μικρή σχετική μετακίνηση των συνδεόμενων ελασμάτων κατά την φορά των ασκούμενων δυνάμεων, ώστε να έρθει σε επαφή ο κορμός του κοχλίου με τις άντυνας των οπών. Στο σχήμα 1.1 δίνεται η απεικόνιση του μηχανισμού λειτουργίας της συγκεκριμένης κατηγορίας κοχλιώσεων.

Στην κατηγορία B, η μεταφορά των διατμητικών δυνάμεων γίνεται μέσω της αναπτυσσόμενης τριβής των συνδεόμενων ελασμάτων, η οποία οφείλεται στη δύναμη προέντασης των κοχλιών. Έτσι οι κοχλιώσεις του τύπου αυτού ονομάζονται κοχλιώσεις τριβής. Από ένα σημείο και μετά η τριβή υπερνικάται και λαμβάνει χώρα ολίσθηση μεταξύ των ελασμάτων. Από τότε και μετά η κοχλίωση συμπεριφέρεται ως κοχλίωση άντυνας τύπου A. Οι κοχλιώσεις κατηγορίας B λειτουργούν ως κοχλιώσεις τριβής για δυνάμεις λειτουργικότητας και ως κοχλιώσεις άντυνας για τις δυνάμεις αστοχίας. Συνεπώς η διατμητική δύναμη σχεδιασμού δεν πρέπει να ξεπερνά την αντοχή σχεδιασμού σε ολίσθηση στην ΟΚΛ και η μέγιστη διατμητική δύναμη σχεδιασμού δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση ούτε την αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυνας.

Τέλος, οι κοχλιώσεις της κατηγορίας C λειτουργούν ως κοχλιώσεις τριβής και συνεπώς δεν επιτρέπεται η εμφάνιση ολίσθησης στην οριακή κατάσταση αστοχίας. Η μέγιστη διατμητική δύναμη σχεδιασμού δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή σε ολίσθηση και την αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας [1-2, 5].



Σχήμα 1.1 : Μηχανισμός λειτουργίας κοχλιώσεων - Κατηγορίας A



## 2 Κανονιστικές διατάξεις

### 2.1 Αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας

Σύμφωνα με τον EN 1993-1-8 η αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας<sup>1,2,3</sup> προσδιορίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο :

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad [7] \quad (2.1.1)$$

όπου  $k_1$  και  $a_b$  συντελεστές που λαμβάνουν υπ' όψιν τη θέση του κοχλίου, τις γεωμετρικές παραμέτρους και τη διεύθυνση της διατμητικής δύναμης.

- κατά τη διεύθυνση μεταφοράς του φορτίου

$$a_b = \min \left( a_d ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right) \quad (2.1.2)$$

όπου

$$a_d = \frac{e_1}{3d_0} \quad \text{για τελευταία σειρά κοχλίων} \quad (2.1.3)$$

$$a_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \quad \text{για εσωτερικούς κοχλίες} \quad (2.1.4)$$

- κάθετα στη διεύθυνση μεταφοράς της δύναμης

$$k_1 = \min \left( 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \text{ ή } 2,5 \right) \quad \text{για πλευρικά ακραίους κοχλίες} \quad (2.1.5)$$

$$k_1 = \min \left( 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \text{ ή } 2,5 \right) \quad \text{για εσωτερικούς κοχλίες} \quad (2.1.6)$$

Οι παράμετροι που εμφανίζονται στις εξισώσεις (2.1.1) έως (2.1.6) προσδιορίζονται ως εξής :

$f_y, f_u, f_{ub}$	όριο διαρροής χάλυβα, εφελκυστική αντοχή χάλυβα, εφελκυστική αντοχή κοχλίου
$e_1, p_1$	απόσταση από άκρο και βήμα κοχλίου παράλληλα με τη διεύθυνση του φορτίου
$e_2, p_2$	απόσταση από άκρο και βήμα κοχλίου κάθετα στη διεύθυνση του φορτίου
$d, d_0$	διάμετρος κοχλίου και διάμετρος οπής
$t$	πάχος ελάσματος
$\gamma_{M2}$	συντελεστής ασφαλείας του χάλυβα σε θραύση

<sup>1</sup> Η αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας  $F_{b,Rd}$  κοχλίων σε υπερμεγέθεις οπές είναι το 80% της αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας σε κανονικές οπές ενώ σε επιμήκειες οπές, όπου ο διαμήκης άξονας είναι της οπής είναι κάθετος στη διεύθυνση μεταφοράς του φορτίου, είναι το 60% της αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας κοχλίων σε κανονικές οπές

<sup>2</sup> Για κοχλίες βυθισμένης κεφαλής η αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας  $F_{b,Rd}$  πρέπει να υπολογίζεται με βάση πάχος ελάσματος  $t$  ίσο με το πλάτος του συνδεδεμένου ελάσματος μείον το μισό της βύθισης.

<sup>3</sup> Όταν το φορτίο σε έναν κοχλίο δεν είναι παράλληλο προς την ακμή του μέλους, η αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας μπορεί να ελέγχεται χωριστά για τις συνιστώσες του φορτίου που είναι παράλληλες και κάθετες στην ακμή.

Συνεπώς με βάση τα παραπάνω η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας εξαρτάται από την θέση του κοχλία. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με την εργασία των P.Moze και D.Beg για συνδέσεις με ένα κοχλία, οι βασικοί παράμετροι που καθορίζουν την αντοχή είναι οι  $e_1$  και η αντοχή των ελασμάτων σε εφελκυσμό. Στον παραπάνω τύπο υπεισέρχονται ακόμη οι παράμετροι  $e_2$  και  $p_2$  (αποστάσεις κάθετα στην διεύθυνση του φορτίου). Αυτές πιθανότατα εισήχθησαν στη σχέση (2.1.1) προκειμένου να ελεγχθεί η καθαρή διατομή του ελάσματος (net cross-section) και η διατμητική αντοχή. Οι P.Moze και D.Beg παρατήρησαν πως οι παράμετροι αυτοί μειώνουν ασκόπως την αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυγας σε σημαντικό βαθμό. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε πως αρχικά η σχέση (2.1.1) αξιοποιούταν στατιστικά και χωρίς την παράμετρο  $k_1$ . Είχε επίσης προταθεί πως δεν χρειαζόταν απομείωση λόγω μικρών αποστάσεων από το άκρο. Ωστόσο ο συντελεστής  $k_1$  εισήχθη στον τελικό τύπο καθώς δεν υπήρχαν πολλές πειραματικές αναλύσεις. Τέλος, προτείνεται πως η αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυγας, για χάλυβα ποιότητας S235 μπορεί να τροποποιηθεί σε μια λιγότερο συντηρητική, από αυτή του EC3 .

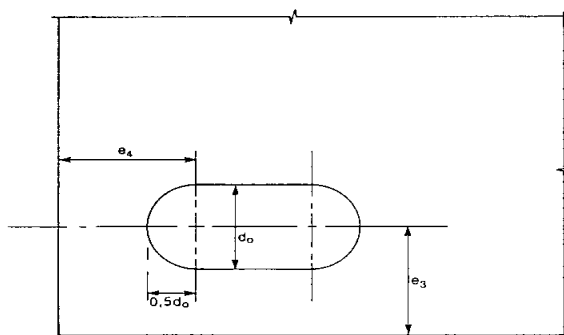
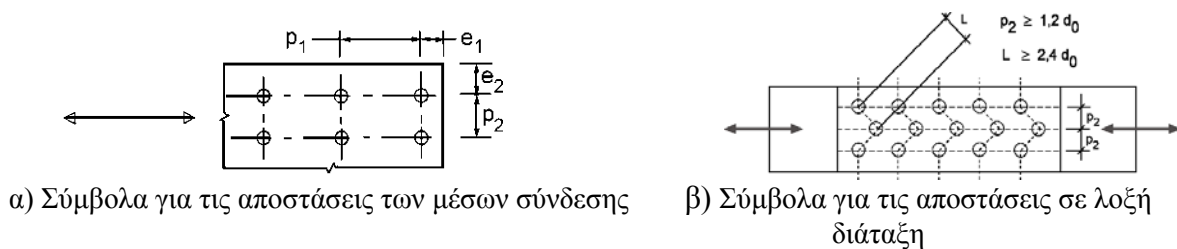
## 2.2 Επιτρεπόμενες αποστάσεις μεταξύ των κοχλιών και από τα άκρα

Όπως φάνηκε από την προηγούμενη παράγραφο η θέση των κοχλιών στα ελάσματα αποδεικνύεται ιδιαίτερα κρίσιμη καθώς καθορίζει σε μεγάλο ποσοστό την αντοχή σχεδιασμού έναντι σύνθλιψης άντυγας. Έτσι σύμφωνα με τον EN 1993-1-8 κατά τον σχεδιασμό της διάταξης των κοχλιών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ορισμένες ελάχιστες και μέγιστες αποστάσεις, τόσο μεταξύ τους, όσο και από τα άκρα των ελασμάτων [7]. Στόχος των ελάχιστων αποστάσεων είναι να μη μειωθεί πολύ η αντοχή του ελάσματος σε σύνθλιψη άντυγας, αλλά και να μην δυσχεραίνεται η σύσφιξη των κοχλιών. Στόχος των μέγιστων αποστάσεων είναι να υπάρχει επαρκής επαφή μεταξύ των ελασμάτων ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος οξειδωσης και να αποφεύγεται ο τοπικός λυγισμός των ελασμάτων μεταξύ των οπών σε περίπτωση θλιπτικών δυνάμεων. Οι μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ κοχλιών και από τα άκρα, για χάλυβα εκτεθειμένο σε καιρικές συνθήκες ή άλλα διαβρωτικά μέσα, συνοψίζονται στον πίνακα 2.1. Ακόμη στο σχήμα 2.1 γίνεται διάκριση των αποστάσεων από τα άκρα και των βημάτων.

Πίνακας 2.1: Μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις

Αποστάσεις	Απόσταση από άκρο $e_1$	Απόσταση από άκρο $e_2$	Απόσταση $e_3$ σε επιμήκεις οπές	Απόσταση $e_4$ σε επιμήκεις οπές	Βήμα $p_1$	Βήμα $P_2$
Ελάχιστη	$1,2d_o$	$1,2d_o$	$1,5d_o$	$1,5d_o$	$2,2d_o$	$2,4d_o$
Μέγιστη <sup>4</sup>	$4t+40$ mm	$4t+40$ mm			min ( $14t;200$ mm)	min ( $14t;200$ mm)

<sup>4</sup> t το πάχος του λεπτότερου εξωτερικά συνδεόμενου μέλους



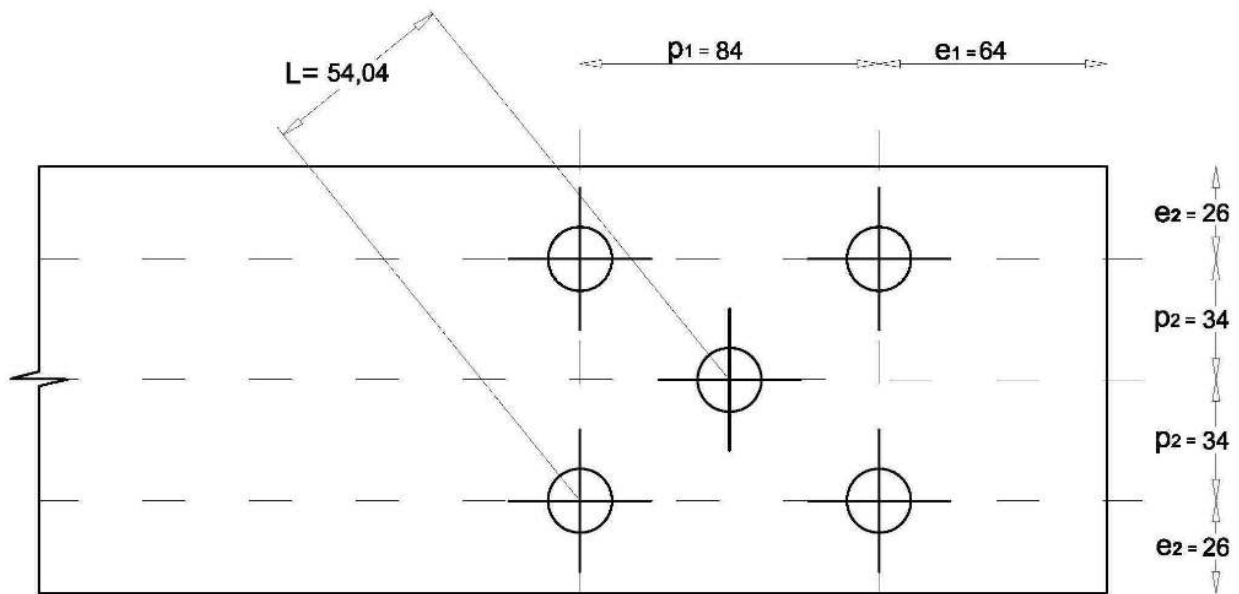
Σχήμα 2.1 : Σύμβολα για τις αποστάσεις από τα άκρα και τις αποστάσεις μεταξύ των μέσων σύνδεσης

Συγκεκριμένα στον EN 1993-1-8 γίνεται ειδική αναφορά για τα μέσα σύνδεσης τοποθετημένα σε λοξή διάταξη, πράγμα που αποτελεί και αντικείμενο έρευνας στη παρούσα διπλωματική εργασία. Σύμφωνα με αυτή η ελάχιστη απόσταση  $p_2$  μεταξύ των γραμμών κοχλίωσης μπορεί να είναι ίση με  $1,2d_o$  όταν η απόσταση  $L$  μεταξύ δύο οποιωνδήποτε μέσων σύνδεσης είναι μεγαλύτερη από  $2,4d_o$ . Πρακτικά η απόσταση  $L$  εξαρτάται από το  $p_1$  και από το  $p_2$ . Ακόμη σε μέσα σύνδεσης τοποθετημένα σε λοξή διάταξη με  $n$  κοχλίες παρατηρείται πως η αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυνας είναι μικρότερη από ότι σε μέσα σύνδεσης με  $n-1$  κοχλίες τοποθετημένους σε κανονική διάταξη. Για το λόγο αυτό προτρέξαμε σε πρόχειρους υπολογισμούς με βάση τον EN 1993-1-8 (χωρίς συντελεστές ασφαλείας) για να συγκρίνουμε 2 διαφορετικούς τύπους συνδέσεων με τα παρακάτω δεδομένα καθώς και τα δεδομένα του πίνακα 2.2. Οι υπολογισμοί έγιναν για κοχλίες M16 8.8, για ελάσματα 400.120.6 (mm) και για ποιότητα χάλυβα που προέκυψε από το πείραμα για την εύρεση της καμπύλης του υλικού.

Πίνακας 2.2: Δεδομένα υπολογισμών

Διάμετρος κοχλία ( $d$ )	Ανοχή οπών ( $a$ )	Διάμετρος οπών ( $d_o$ )	Εφελκυστική Αντοχή Κοχλία ( $f_{u,b}$ )	Εφελκυστική Αντοχή Ελασμάτων ( $f_u$ )	Πάχος Ελασμάτων ( $t$ )
16	2.0	18	80.0	45.075	6.0
(mm)	(mm)	(mm)	(kN/cm <sup>2</sup> )	(kN/cm <sup>2</sup> )	(mm)

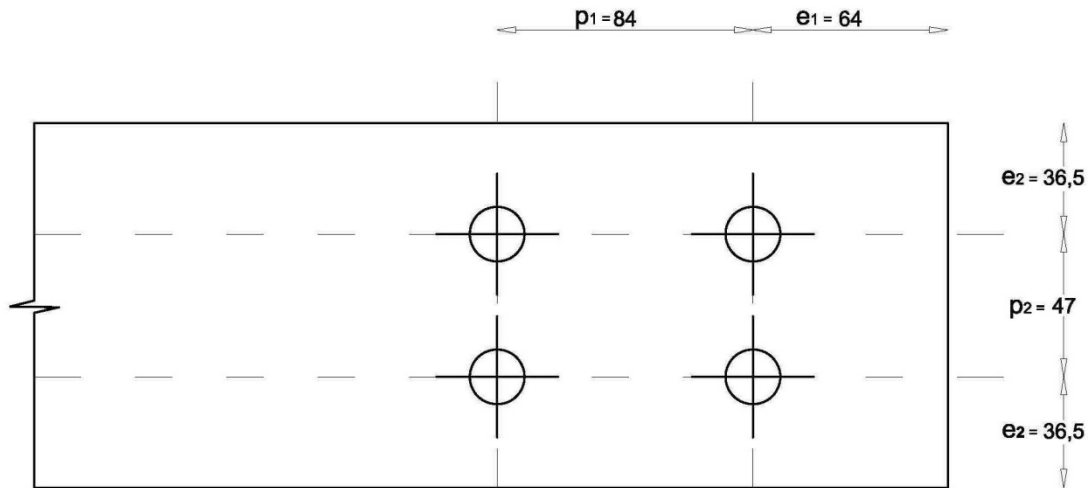
Ο ένας τύπος είναι με 4 κοχλίες τοποθετημένους σε κανονική διάταξη, ενώ ο άλλος με 5 κοχλίες τοποθετημένους σε λοξή διάταξη. Οι δύο αυτοί τύποι σύνδεσης παρατίθεται στα σχήματα 2.2.a και 2.2.b. Για την σύνδεση με τους 5 κοχλίες οι μέγιστες αποστάσεις, κάθετα στην διεύθυνση του φορτίου, προκύπτουν και από την ανάγκη να χωρούν οι κοχλίες στο πλάτος των 120 mm. Δηλαδή πρέπει  $2e_2+2p_2=120$ . Ακόμη, για την ίδια σύνδεση αλλά για τις ελάχιστες αποστάσεις  $minp_2=38.4\text{ mm}$  ( $2.13d_0$ ) διότι και εδώ πρέπει  $2e_2+2p_2=120$  και προκύπτει  $L>2.4d_0$ .



Σχήμα 2.2.a : Σύνδεση πέντε κοχλιών σε λοξή διάταξη - Μέγιστες θέσεις

Πίνακας 2.3: Εύρεση αντοχής σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυγας σύνδεσης με 5 κοχλίες

Διάταξη κοχλιών	$e_1$ (mm)	$e_2$ (mm)	$p_1$ (mm)	$p_2$ (mm)	L (mm)	$2.4d_0$ (mm)	$a_b$	k	$F_{b,rd}$ (kN)	$\Sigma F_{b,rd}$ (kN)
Ελάχιστες Θέσεις	21.6	21.6	39.6	38.4	43.204	43.20	0.40	1.29	22.27	111.35
Μέγιστες Θέσεις	64.0	26.0	84.0	34.0	54.04	43.20	1.00	0.94	40.87	204.34
Ενδιάμεσες Θέσεις	30.0	25.0	65.0	35.0	47.76	43.20	0.56	1.02	24.57	122.87



Σχήμα 2.2.b : Σύνδεση τεσσάρων κοχλιών σε κανονική διάταξη - Μέγιστες θέσεις

Πίνακας 2.4: Εύρεση αντοχής σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυγας σύνδεσης με 4 κοχλίες

Διάταξη κοχλιών	$e_1$ (mm)	$e_2$ (mm)	$p_1$ (mm)	$p_2$ (mm)	$a_b$	$k$	$F_{b,rd}$ (kN)	$\Sigma F_{b,rd}$ (kN)
Ελάχιστες Θέσεις	21.6	21.6	39.6	43.2	0.40	1.66	28.73	114.93
Μέγιστες Θέσεις	64.0	36.5	84.0	47.0	1.00	1.96	84.62	338.48
Ενδιάμεσες Θέσεις	30.0	25.0	65.0	70.0	0.56	2.19	52.62	210.48

Όπως φαίνεται από τους υπολογισμούς στους πίνακες 2.3 και 2.4 η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας των 4 κοχλιών του πρώτου τύπου σύνδεσης είναι μεγαλύτερη από αυτήν του δεύτερου τύπου για όλες τις αποστάσεις. Καθώς οι αποστάσεις  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $p_1$  και  $p_2$  αυξάνουν παρατηρούμε ότι ο πρώτος τύπος σύνδεσης έχει αρκετά μεγαλύτερη αντοχή από τον δεύτερο. Ειδικά για τις μέγιστες και επιλεγμένες ενδιάμεσες θέσεις του κοχλία η διαφορά αυτή είναι αισθητά μεγάλη, κάτι το οποίο μας προβλημάτισε και πραγματοποιήσαμε πειράματα και αριθμητικές αναλύσεις. Τέλος, βλέπουμε ότι και για τους δύο τύπους συνδέσεων ο συντελεστής  $a_b$  είναι ίδιος σε όλες τις αποστάσεις ενώ ο συντελεστής  $k$  στον δεύτερο τύπο σύνδεσης είναι, για όλες τις θέσεις που φαίνονται στους δύο πίνακες, μικρότερος. Συνεπώς, η αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυγας στον τύπο σύνδεσης με τους 5 κοχλίες μειώνεται πολύ, και ίσως άσκοπα, από τον συντελεστή  $k$  (και κατ' επέκταση από τα  $e_2$ ,  $p_2$  κάτι το οποίο συμφωνεί και με την εργασία των Moze και Beg).

## 3 Πειράματα

### 3.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι δύο φάσεις των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π. Σκοπός του πρώτου πειράματος είναι η εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού ενώ το δεύτερο αφορούσε τον έλεγχο της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη δεύτερη πειραματική διαδικασία, με αυτά των αριθμητικών επιλύσεων σύμφωνα με τον EN 1993 -1- 8 .

### 3.2 Έλεγχος ποιότητας υλικού

Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών και χρησιμοποιήθηκε η μηχανή Instron 300LX. Πρόκειται για μία υδραυλική μηχανή με δυνατότητα επιβολής φορτίου έως και 300 kN. Αποτελείται από δύο κεφαλές των 120 kg εκ των οποίων η μία είναι πακτωμένη και συνδεδεμένη με τη δυναμοκυψέλη<sup>7</sup> ενώ η άλλη έχει τη δυνατότητα κίνησης καθ' ύψος. Κάθε κεφαλή διαθέτει ένα ζευγάρι από αρπάγιες διαφόρων διαστάσεων ανά περίπτωση που σκοπό έχουν την ακινητοποίηση των άκρων του δοκιμίου. Η μηχανή είναι συνδεδεμένη με Η/Υ και ο χειρισμός της γίνεται από εκεί, δίνεται στο σχήμα 3.1 μία εικόνα της μηχανής .

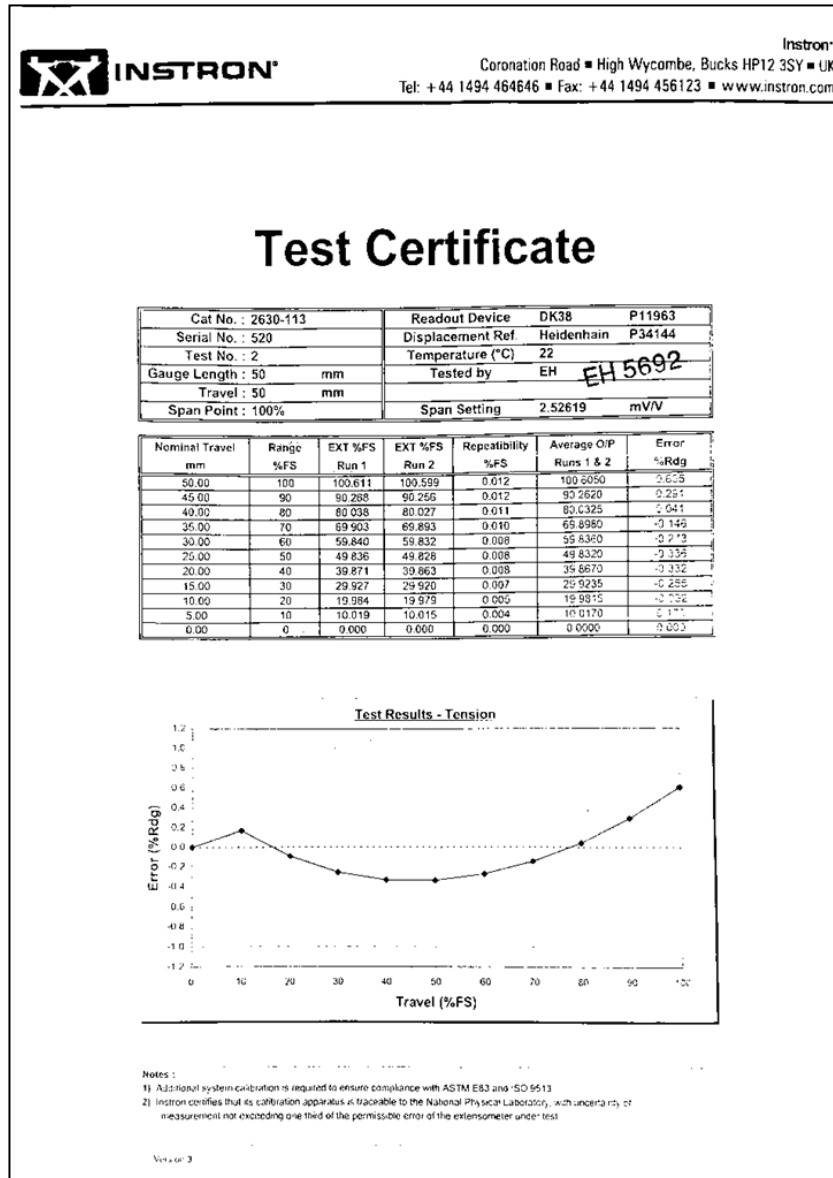


Σχήμα 3.1 : Μηχανή Instron 300 LX

---

<sup>7</sup> Δυναμοκυψέλη η αλλιώς στην ξενόγλωσση *Load Cell* .

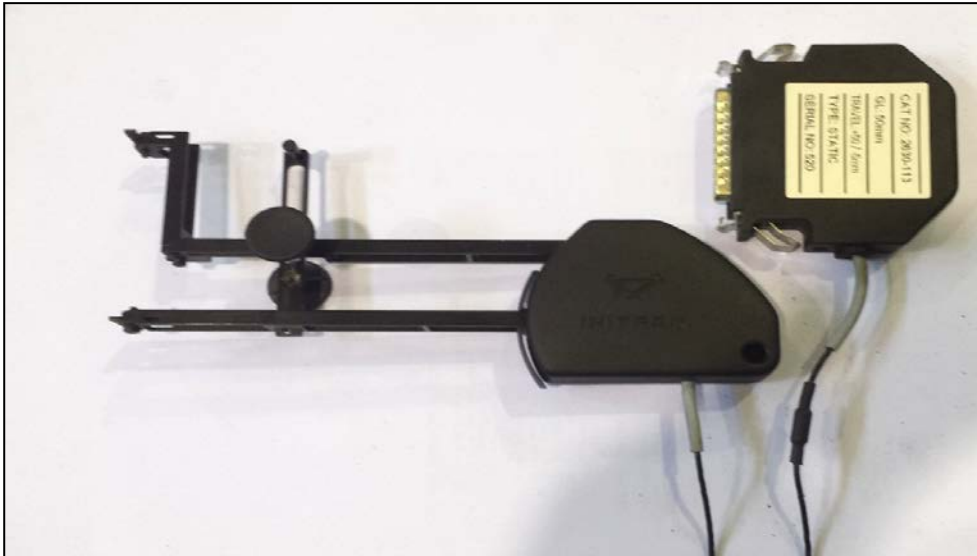
Τέλος, η κατασκευάστρια εταιρεία παρέχει σε μορφή διαγράμματος τις αποκλίσεις της μηχανής κατά την διάρκεια των μετρήσεων σε ποσοστιαίο σφάλμα το οποίο παρατίθεται στο σχήμα 3.2. Το σφάλμα της μηχανής μεταβάλλεται σε σχέση την μετατόπιση και παίρνει θετικές αλλά και αρνητικές τιμές όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



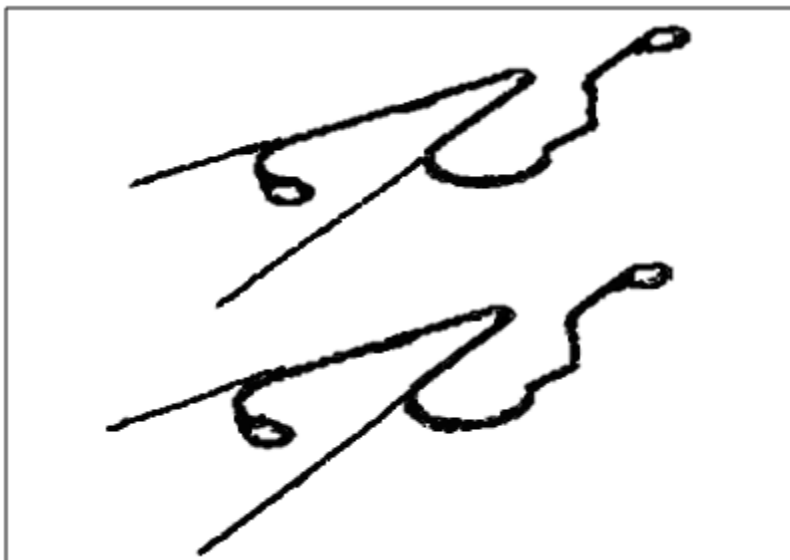
Σχήμα 3.2 : Πιστοποίηση μηχανής Instron 300LX

Αξίζει να σημειωθεί ότι κατά την επεξεργασία των μετρήσεων έγιναν οι απαραίτητες διορθώσεις βάσει του παραπάνω διαγράμματος και έτσι δεν υπάρχει περίπτωση απόκλισης των μετρήσεων λόγω μηχανής.

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκε επιμηκυστόμετρο της εταιρείας Instron με εργοστασιακό αριθμό 2630-113 με το οποίο επιτεύχθηκε η, όσο το δυνατόν, μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων κατά την διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Οι δυνατότητες μέτρησης του συγκεκριμένου επιμηκυστόμετρου φτάνουν μέχρι και τα 50 mm επιμήκυνσης με ακρίβεια στο χιλιοστό του χιλιοστού. Ανάλογα με το πάχος του προς μέτρηση ελάσματος επιλέγονται και τα αντίστοιχα τσιμπίδια που σκοπό έχουν την τοποθέτηση του επιμηκυστόμετρου πάνω στο έλασμα. Συγκεκριμένα εδώ επιλέχθηκαν τσιμπίδια για πάχος ελάσματος 6mm. Στο σχήμα 3.3.a και 3.3.b δίνονται φωτογραφίες του επιμηκυστόμετρου και των λοιπών εξαρτημάτων του αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3.a: Επιμηκυστόμετρο Instron



Σχήμα 3.3.b: Εξαρτήματα επιμηκυστόμετρου - Τσιμπίδια



Πέραν της πειραματικής μηχανής εφελκυσμού, χρησιμοποιήθηκε η πριονοκορδέλα μετάλλου της εταιρείας IMET με κωδικό μοντέλου BS280/60 με την οποία έγιναν όλες οι απαραίτητες κοπές και τέλος για την διάνοιξη των οπών χρησιμοποιήθηκε το φρεζοδράπανο που βρίσκεται στο χώρο του εργαστηρίου. Η διαδικασία της κοπής και διαμόρφωσης της σύνδεσης έγινε με τη βοήθεια του προσωπικού του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών. Στο σχήμα 3.4 δίδονται φωτογραφίες των συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 3.4.a : Φρεζοδράπανο για την διάνοιξη των οπών

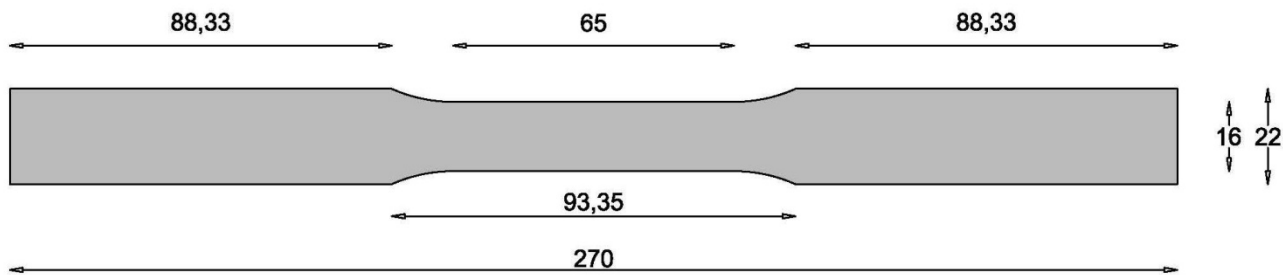


Σχήμα 3.4.b : Πριονοκορδέλα IMET BS280/60

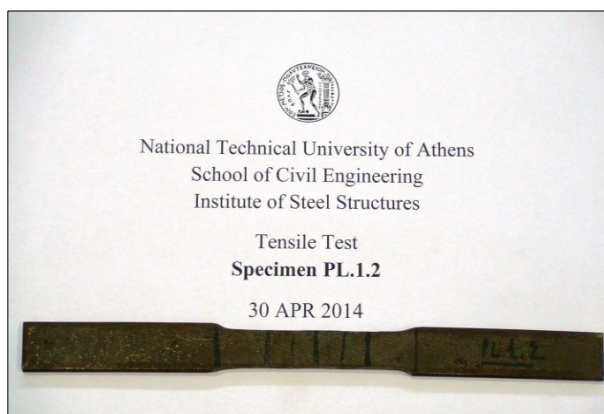
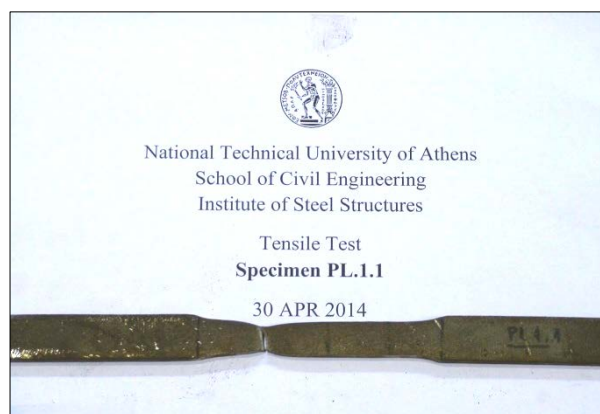
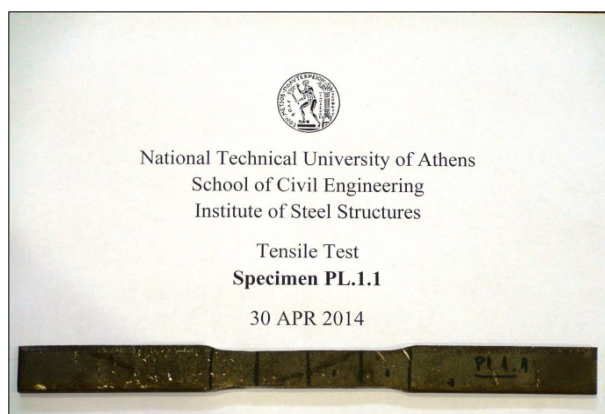
Σχήμα 3.4 : Φωτογραφίες των μηχανών του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών

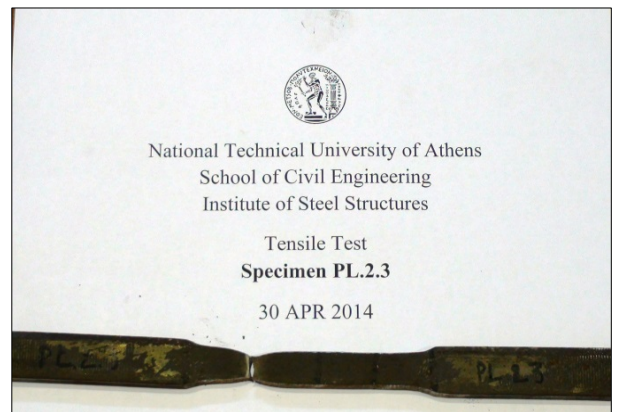
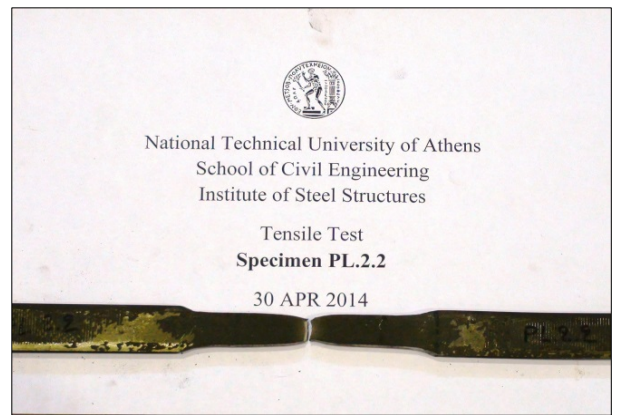
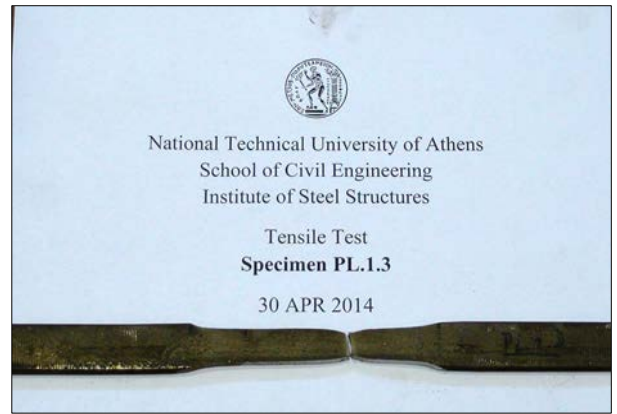
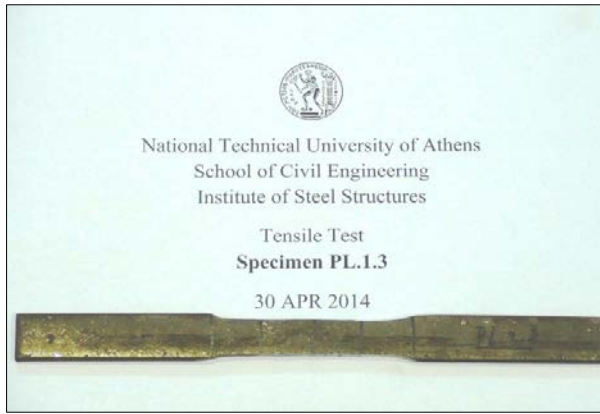
Για την εύρεση των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού χρησιμοποιήθηκαν δύο ελάσματα διαστάσεων  $400 \times 120 \times 8^8$  και  $400 \times 100 \times 8^8$ . Από τα δύο αυτά ελάσματα προέκυψαν, ύστερα από κοπή, έξι δοκίμια διαστάσεων  $22 \times 270^8$  σε σχήμα παπιγιόν. Τα ελάσματα κόπηκαν σε αυτή την προκαθορισμένη μορφή ούτως ώστε κατά την διάρκεια του πειράματος εφελκυσμού να εξασφαλίζεται η ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων παράλληλα με τη διεύθυνση του φορτίου στο μέσο τμήμα του ελάσματος και επιπρόσθετα η αστοχία να περιορίζεται στο τμήμα αυτό. Στο σχήμα 3.5.a και 3.5.b δίνονται οι εικόνες των δοκιμών σε σχήμα παπιγιόν και των έξι δοκιμών με τις ονομασίες τους τη στιγμή της αστοχίας αντίστοιχα.

<sup>8</sup>Όλες οι διαστάσεις σε mm .



Σχήμα 3.5.α : Διαστάσεις παπιγιών

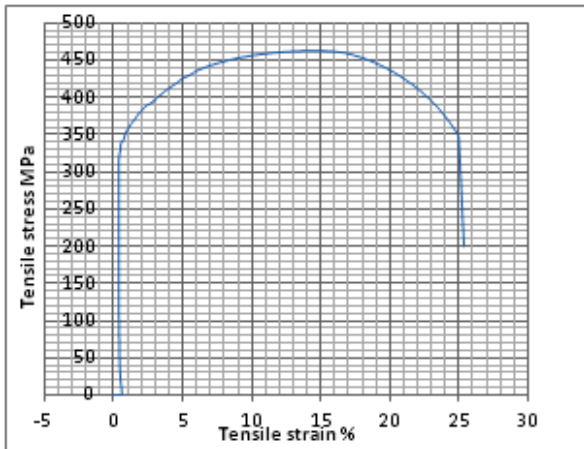




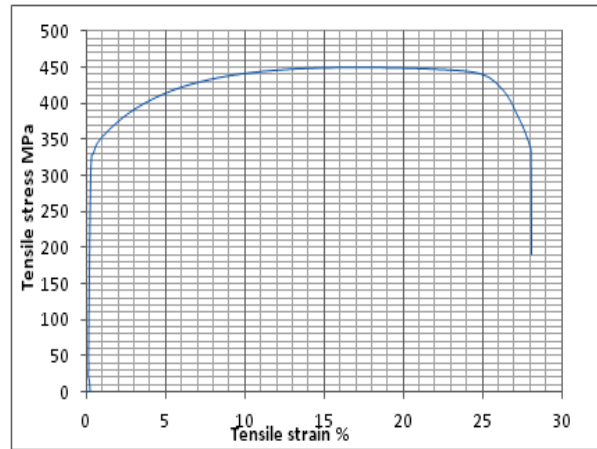
Σχήμα 3.5.b : Εικόνες των δοκιμίων πριν και μετά την αστοχία

Μετά το πέρας των πειραματικών δοκιμών έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις αποκλίσεις της μηχανής *Instron 300LX* βάσει κατασκευαστή, όπως προαναφέρθηκε και στην αρχή της παραγράφου. Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζονται τα τελικά αποτελέσματα υπό τη μορφή διαγραμμάτων για τα πέντε από τα έξι δοκίμια. Συγκεκριμένα για το δοκίμιο με την ονομασία PL.2.1 δεν δίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα

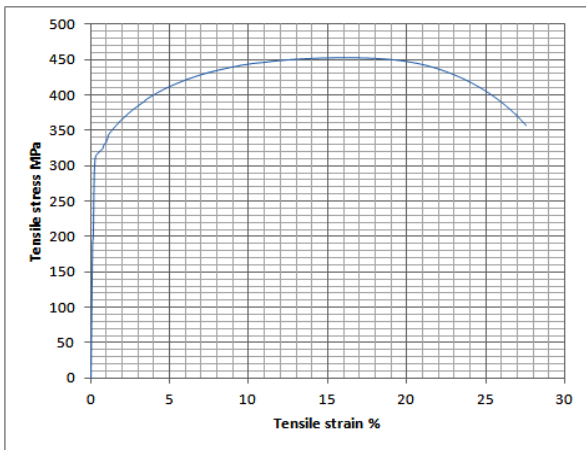
δυνάμεως - μετατόπισης μιας και έχει απορριφθεί από την πρώτη στιγμή λόγω γλιστρήματος του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της πειραματικής δοκιμής από τις σιαγόνες συγκράτησης της μηχανής.



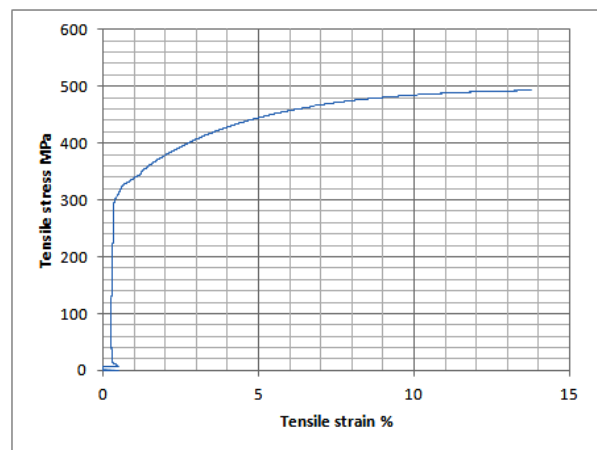
α) Δοκίμιο P.L.1.1



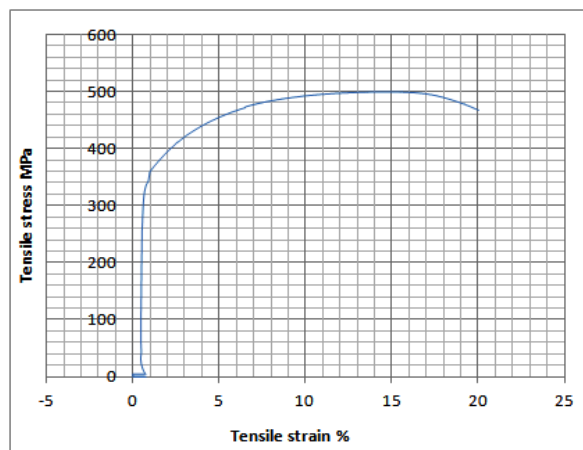
β) Δοκίμιο P.L.1.2



γ) Δοκίμιο P.L.1.3



δ) Δοκίμιο P.L.2.2



ε) Δοκίμιο P.L.2.3

Σχήμα 3.6 : Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης των πέντε δοκιμίων

Από τα παραπάνω διαγράμματα του σχήματος 3.6 προκύπτουν συνολικά σε πινακοποιημένη μορφή, πίνακας 3.1, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων.

Πίνακας 3.1 : Μηχανικά χαρακτηριστικά

Ονομασία δοκιμίου	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_u$ (N/mm <sup>2</sup> )
PL.1.1	200000	341.35	462.69
PL.1.2	180000	328.5	450.75
PL.1.3	185000	323.4	453.03
PL.2.2	200000	327.9	492.03
PL.2.3	200000	338.5	499.97

Από τον παραπάνω πίνακα μπορούμε να συμπεράνουμε πως όλα τα δοκίμια έχουν περίπου τα ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον από τα πιο πάνω διαγράμματα φαίνεται πως οι καμπύλες των PL.1 σχεδόν ταυτίζονται μεταξύ τους, όπως και αυτά των PL.2. Τα δοκίμια με πάχος 6 mm (PL.1) παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις μεταξύ τους στο μέτρο ελαστικότητας  $E$  καθώς και στα  $f_y$  και  $f_u$ . Από τα όρια διαρροής των δοκιμίων αυτών συμπεραίνουμε πως ο χάλυβας μας κατατάσσεται ανάμεσα στην κατηγορία S275 και S355. Ακόμη τα δοκίμια PL.2 με πάχος 8 mm παρουσιάζουν και αυτά με την σειρά τους περίπου ίδια μηχανικά χαρακτηριστικά με ακόμη μικρότερες αποκλίσεις από αυτά των 6 mm. Και σε αυτή την περίπτωση ο χάλυβας κατατάσσεται στην κατηγορία S275.

### 3.3 Επίλυση σύμφωνα με τον EN 1993-1-8

Στα πλαίσια των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών έγιναν παράλληλα και επιλύσεις βάσει του EN 1993-1-8 ούτως ώστε να γίνει σύγκριση αυτών με τα αποτελέσματα των πειραμάτων αλλά και των αριθμητικών αναλύσεων. Για τον υπολογισμό των αντοχών χρησιμοποιήθηκαν κοινοί κοχλίες διαμέτρου 16 mm (M16) και ποιότητας 8.8 υψηλής αντοχής. Στον πίνακα 3.2 δίνονται οι ονομαστικές τιμές του ορίου διαρροής  $f_{yb}$  και της εφελκυστικής αντοχής  $f_{ub}$  για διάφορους τύπους κοχλιών.

Πίνακας 3.2: Ονομαστικές τιμές του ορίου διαρροής  $f_{yb}$  και της εφελκυστικής αντοχής  $f_{ub}$  κοχλιών

Κατηγορία κοχλία	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	240	300	480	640	900
$f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	400	500	600	800	1000

Για τις συνδέσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο ειδών ελάσματα , διαστάσεων 400.120.6 και 400.100.8. Οι ποιότητες των ελασμάτων προσδιορίστηκαν μέσω πειραματικών δοκιμών όπως προαναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 3.2.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τη σχέση (2.1.1) του Ευρωκώδικα και επιπλέον την εναλλακτική σχέση  $F_{b,Rd} \leq 1,5 f_u d t$  [7]. Κατά τους υπολογισμούς της αντοχής δεν λήφθηκε υπ' όψιν ο συντελεστής ασφαλείας,  $\gamma_{M2}$  και επιπλέον ως  $f_u$  έχει ληφθεί ο μέσος όρος των τιμών της εφελκυστικής αντοχής που προέκυψε από τις πειραματικές δοκιμές. Όσον αφορά την ελάχιστη απόσταση  $e_1$  υπολογίστηκε βάσει των θεωρητικών τιμών του Ευρωκώδικα, ενώ για τη μέγιστη επιλέχθηκε απόσταση ίση με 55 mm λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων της πειραματικής μηχανής. Στον πίνακα 3.3 δίνονται οι τιμές των αντοχών έναντι σύνθλιψης άντυνας για πάχος ελάσματος  $t=6$  mm με  $e_{1min}=21.6$  mm ,  $e_{1max}= 55$  mm αλλά και για ενδιάμεσες τιμές με βήμα 10 mm. Τέλος, για κάθε θέση επιλέγεται η ελάχιστη εκ των δύο αντοχών που προέκυψαν από τους υπολογισμούς.

Πίνακας 3.3: Τιμές αντοχής έναντι σύνθλιψης άντυνας για έλασμα  $t=6$  mm .

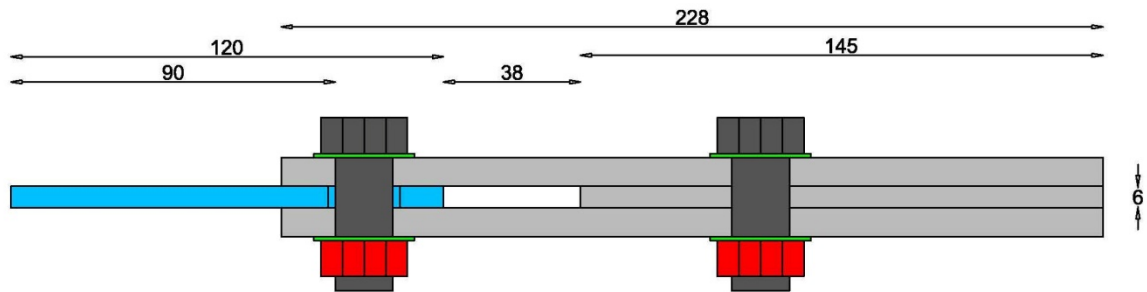
$e_1$ (mm)	$e_2$ (mm)	$a_b$	$k_1$	$F_{b,Rd}$ (kN)	$F_{b,Rd}^*$ (kN)	min $F_{b,Rd}$ (kN)
21.6	60.0	0.40	2.5	43.28	64.91	43.28
31.6	60.0	0.58	2.5	62.75	64.91	62.75
41.6	60.0	0.77	2.5	83.31	64.91	64.91
51.6	60.0	0.96	2.5	103.86	64.91	64.91
55.0	60.0	1.00	2.5	108.19	64.91	64.91

### 3.4 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών και στήσιμο πειράματος

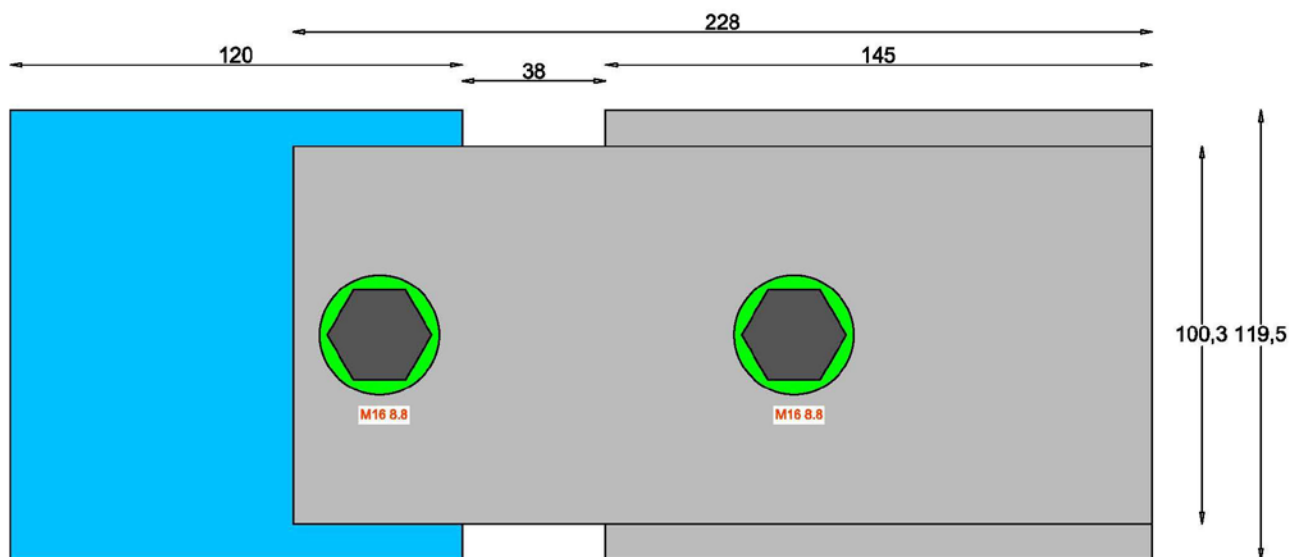
Τα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν, από πλευράς γεωμετρικής, ήταν δύο κατηγοριών 400x120x6 και 400x100x8. Για τις ανάγκες του πειράματος κατασκευάστηκε σύνδεση τύπου *σάντουιτς* της οποίας το σταθερό μέλος αποτελείται από δύο εξωτερικά ελάσματα των 8 mm και ένα εσωτερικό έλασμα των 6 mm. Τα τρία αυτά ελάσματα συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός κοχλία διαμέτρου M16, ποιότητας 8.8. Η οπή που έχει διανοιχθεί, στο σταθερό μέλος της σύνδεσης δεν έχει κατασκευαστεί με την απαραίτητη ανοχή σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς, δηλαδή η διάμέτρός της είναι ίση με την διάμετρο του κορμού του κοχλία M16.

Το υπόλοιπο τμήμα της σύνδεσης αποτελείται από ένα έλασμα των 6 mm όπου η απόσταση της οπής από το ελεύθερο άκρο του ελάσματος μεταβάλλεται ανά περίπτωση και συνδέεται με το υπόλοιπο τμήμα της σύνδεσης με κοχλία M16 ποιότητας 8.8. Εδώ κατά την διάνοιξη της οπής έχει ληφθεί υπ' όψιν η ανοχή, η οποία για κοχλία M16

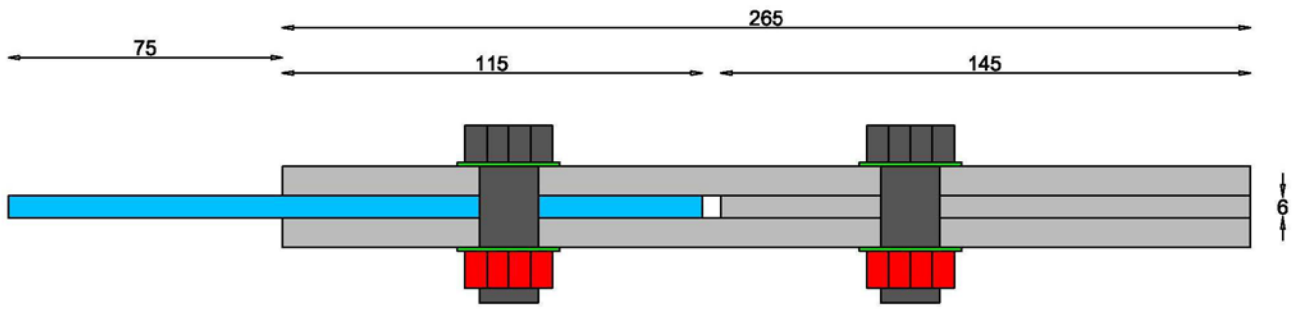
αντιστοιχεί στη τιμή των δύο mm σύμφωνα με τον EN 1993-1-8. Στο σχήμα 3.4 δίνεται η μορφολογία της σύνδεσης για αποστάσεις  $e_{min}$  και  $e_{max}$  αντίστοιχα.



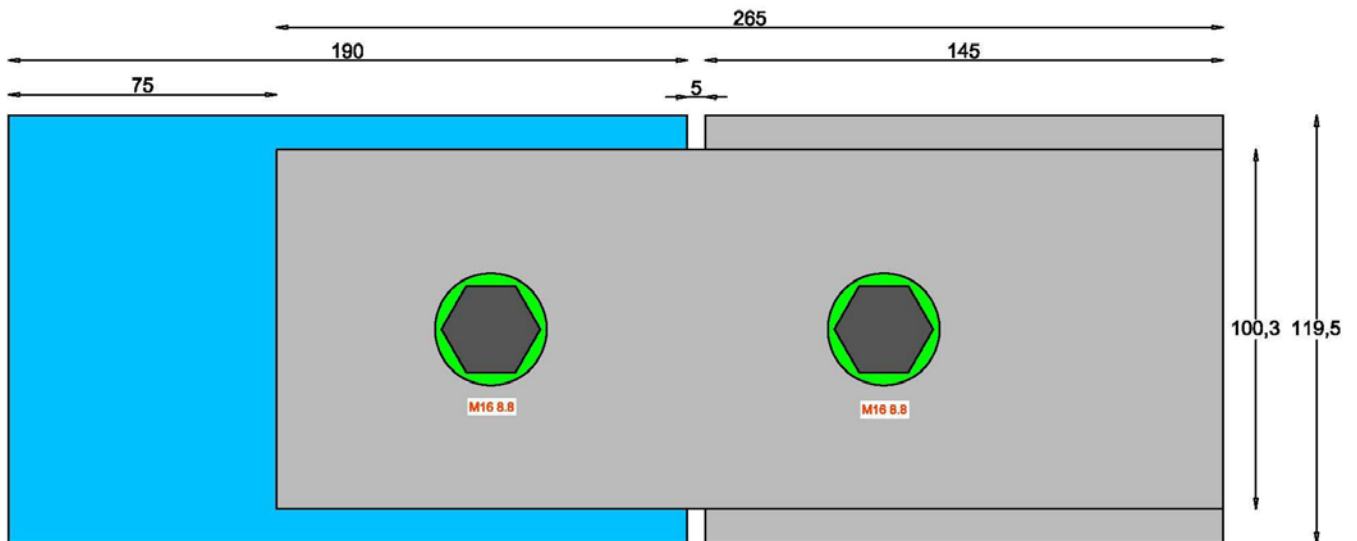
α) Οριζόντια τομή σύνδεσης για απόσταση  $e_{min}$



β) Πλάγια όψη σύνδεσης για απόσταση  $e_{min}$



γ) Οριζόντια τομή σύνδεσης για απόσταση  $e_{max}$



δ) Πλάγια όψη σύνδεσης για απόσταση  $e_{max}$

Σχήμα 3.4 : Μορφολογία σύνδεσης για αποστάσεις  $e_{min}$  και  $e_{max}$

Η επιλογή των συγκεκριμένων κοχλιών έγινε κατόπιν υπολογισμών. Κρίθηκε απαραίτητο κατά τους υπολογισμούς, όπως έχει προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 2.2, η αντοχή σε διάτμηση, για την παραπάνω μορφολογία της σύνδεσης να είναι αρκετά μεγαλύτερη, τουλάχιστον μιάμιση φορά, από την αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας ούτως ώστε να μην υπάρχει κανένας κίνδυνος αστοχίας σε διάτμηση του κοχλία κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Οι παραπάνω υπολογισμοί σύμφωνα με τις ισχύουσες διατάξεις παρατίθενται στον πίνακα 3.4 .



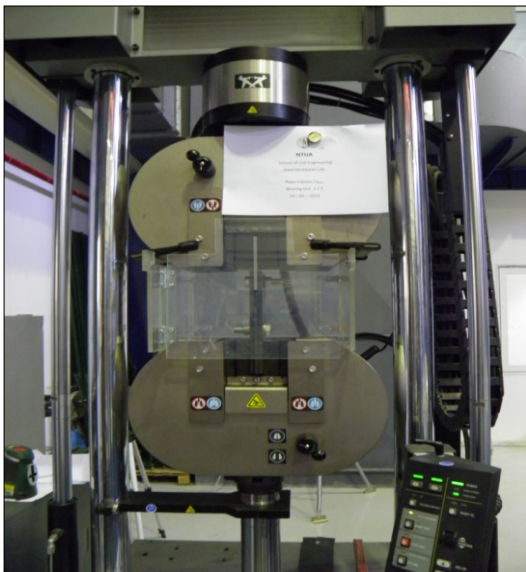
Πίνακας 3.4: Τιμές αντοχής έναντι σύνθλιψης άντυγας και διάτμησης για κοχλίες M16 και M20 ποιότητας 8.8 για πάχος ελάσματος  $t=6\text{mm}$ .

Διάμετρος κοχλία (mm)	Ποιότητα Κοχλία	$F_{b,Rd}$ (kN)	$F_{v,Rd}$ (kN)	$F_{b,Rd} / F_{v,Rd}$
16	8.8	108.19	193.06	1.78
20	8.8	135.24	301.44	2.23

Σύμφωνα με τον παραπάνω πίνακα, για κοχλία M16 ποιότητας 8.8 το πηλίκο  $F_{b,Rd} / F_{v,Rd}$  ισούται με 1.78, το οποίο ικανοποιεί την αρχική μας απαίτηση, η αντοχή σε διάτμηση να είναι τουλάχιστον μιάμιση φορά μεγαλύτερη από την αντοχή σύνθλιψη άντυγας.

Μετά την ολοκλήρωση της μορφολογίας της σύνδεσης, ενεργοποιείται η μηχανή μέσω του H/Y, με τον οποίο είναι συνδεδεμένη. Πραγματοποιείται, αρχικά, η επιλογή της μεθόδου που θα ακολουθηθεί και εν προκειμένω, η διαδικασία του εφελκυσμού καθώς και η δήλωση του ονόματος του δοκιμίου. Πριν την εισαγωγή των διαστάσεων του δοκιμίου επιλέγεται η μορφή αυτού, στην περίπτωση μας σχήμα *παπιγιόν* και μετά δηλώνονται τα μήκος, πλάτος και πάχος.

Κατόπιν αυτού τοποθετήθηκε το δοκίμιο πάνω στην πειραματική μηχανή και ακινητοποιείται μέσω των σιαγόνων, *αρπάγιες*. Όπως έχει προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 3.2 τοποθετήθηκε επιμηκυνσιόμετρο της εταιρείας *Instron* πάνω στο δοκίμιο αφού πρώτα επιλέχθηκαν τα κατάλληλα τσιμπίδια σε σχέση με το πάχος του δοκιμίου. Προτού ξεκινήσει η διαδικασία είχε τοποθετηθεί επιπλέον ένα προστατευτικό κάλυμμα από *plexiglass* προς αποφυγήν τυχόν τραυματισμού και ελήφθησαν φωτογραφίες. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται το στήσιμο του δοκιμίου πάνω στην πειραματική μηχανή πριν την έναρξη του πειράματος.



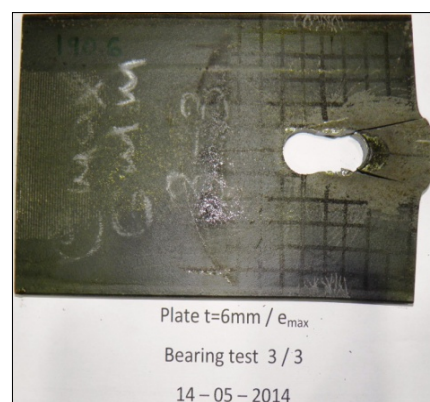
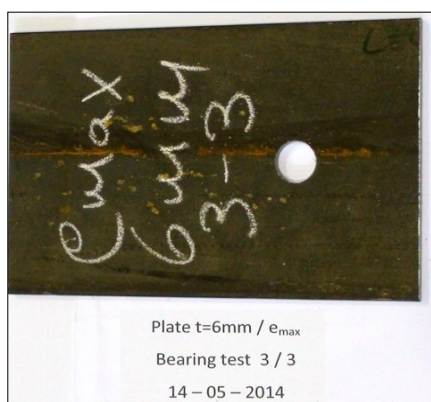
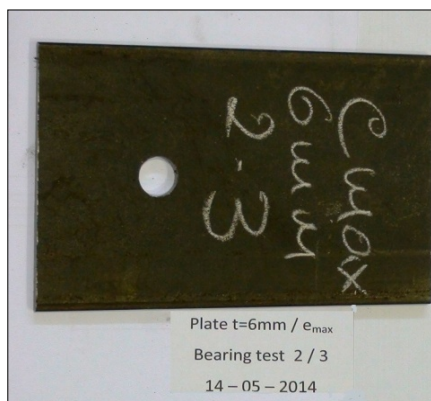
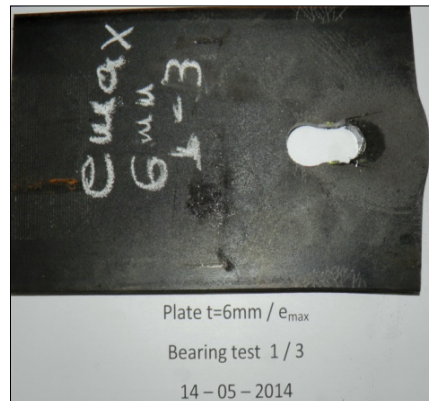
α) Πειραματική μηχανή Instron 300LX



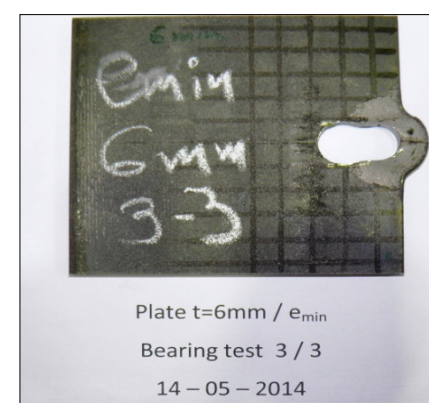
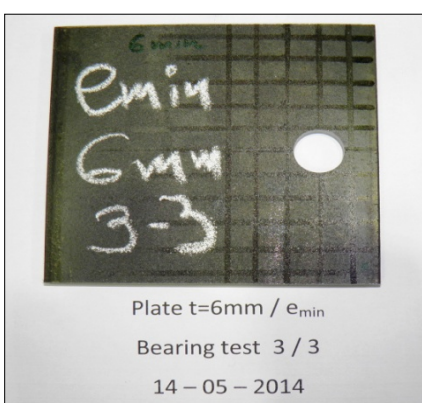
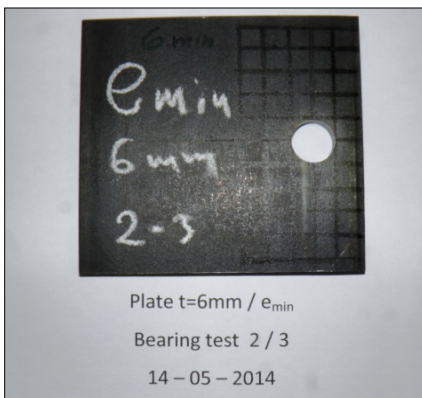
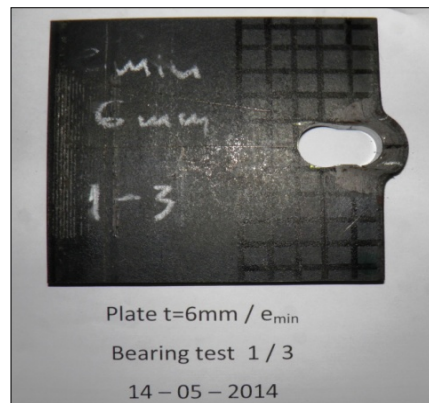
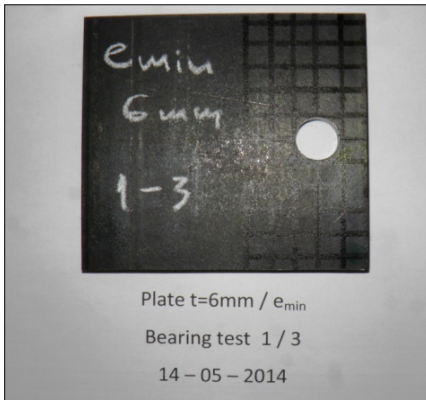
β) Σύνδεση τύπου *σάντουιτς* σε πλάγια όψη

Σχήμα 3.5 : Εικόνα της πειραματικής μηχανής ακριβώς πριν την έναρξη του πειράματος και της σύνδεσης τύπου *σάντουιτς*

Ξεκινά λοιπόν η διαδικασία, η οποία παρακολουθείται μέσω του Η/Υ μέχρις ότου το δοκίμιο να αστοχήσει. Συλλέγονται τα δεδομένα που προέκυψαν και δίνονται προς επεξεργασία σε μορφή λογιστικού φύλλου *Excel*. Αφού γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις, προκύπτει για κάθε δοκίμιο ένα διάγραμμα δυνάμεων – παραμορφώσεων. Στο σχήμα 3.6.a και 3.6.b παρατίθενται φωτογραφίες των πειραματικών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για αποστάσεις  $e_{max}$  και  $e_{min}$  αντίστοιχα.

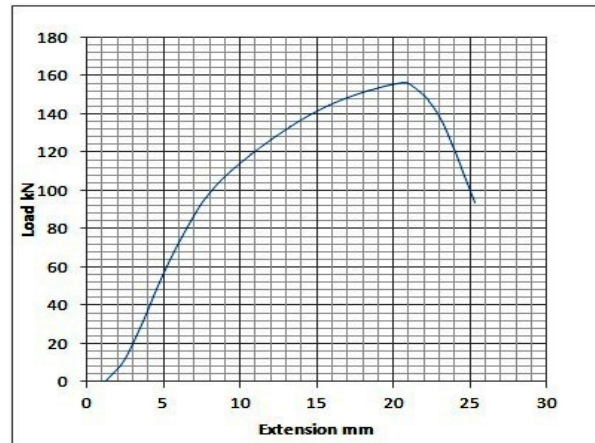


Σχήμα 3.6.a : Φωτογραφίες των τριών δοκιμών για απόσταση  $e_{max}$  πριν και μετά την αστοχία

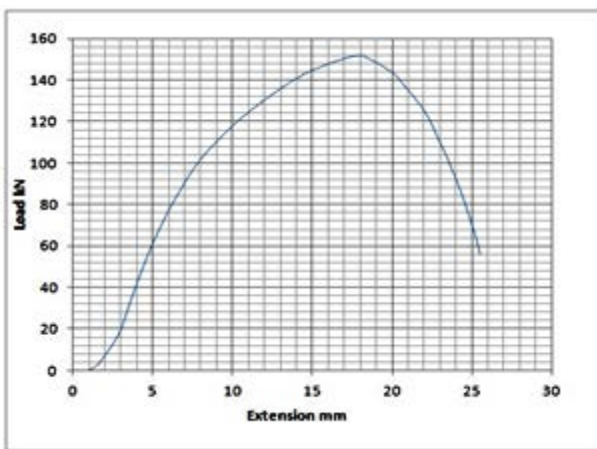


Σχήμα 3.6.b : Φωτογραφίες των τριών δοκιμών για απόσταση  $e_{min}$  πριν και μετά την αστοχία

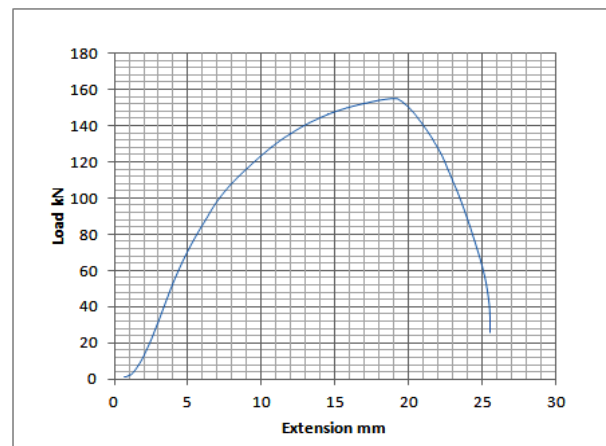
Κατόπιν επεξεργασίας σε λογιστικό φύλλο *Excel* παρατίθενται τα αποτελέσματα για κάθε δοκίμιο υπό τη μορφή διαγραμμάτων Δύναμης - Μετατόπισης στο σχήμα 3.7.a .



α) Δοκίμιο 1-3 για απόσταση  $e_{max}$

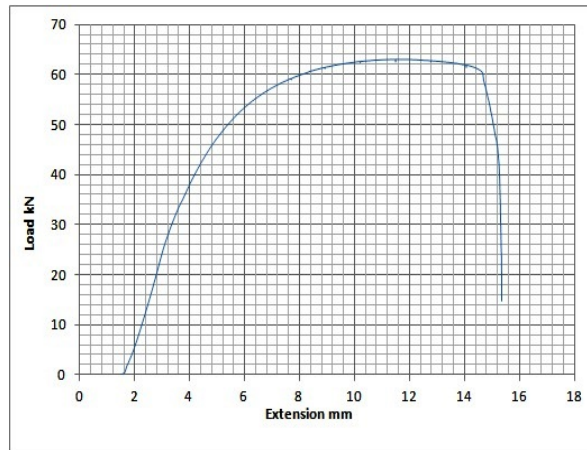


β) Δοκίμιο 2-3 για απόσταση  $e_{max}$

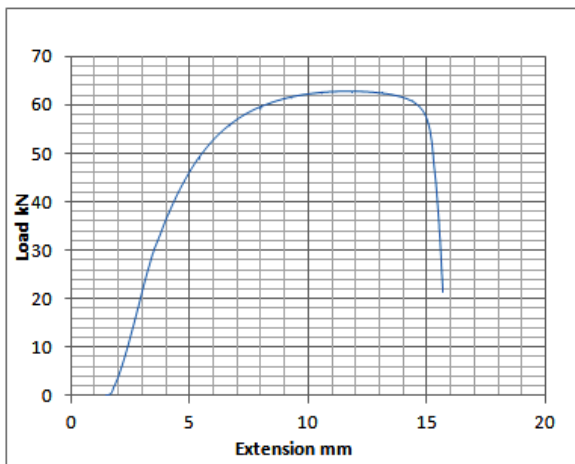


γ) Δοκίμιο 3-3 για απόσταση  $e_{max}$

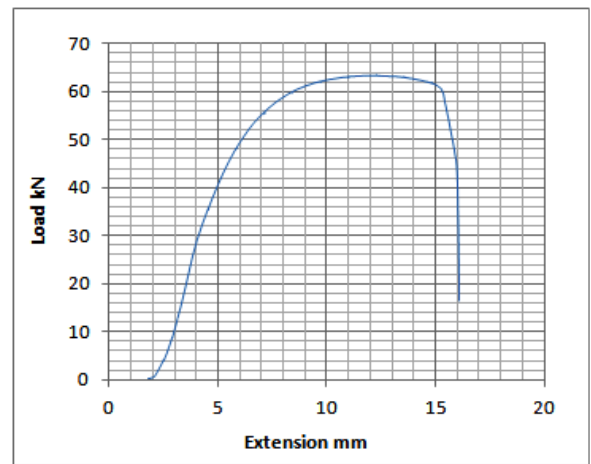
Σχήμα 3.7.a : Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης των τριών δοκιμίων για απόσταση  $e_{max}$



α) Δοκίμιο 1-3 για απόσταση  $e_{min}$



β) Δοκίμιο 2-3 για απόσταση  $e_{min}$



γ) Δοκίμιο 3-3 για απόσταση  $e_{min}$

Σχήμα 3.7.b : Διαγράμματα δύναμης - μετατόπισης των τριών δοκιμίων για απόσταση  $e_{min}$

Από τα παραπάνω διαγράμματα προκύπτουν σε πινακοποιημένη μορφή, πίνακας 3.5, οι τιμές Φορτίου Αστοχίας - Μετατόπισης για όλα τα δοκίμια του πειράματος.

Πίνακας 3.5: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας και μετατόπισης για τα 6 δοκίμια

Αποστάσεις	Δοκίμιο 1-3 $F_{b,Rd}$ (kN) - Extension (mm)	Δοκίμιο 2-3 $F_{b,Rd}$ (kN) - Extension (mm)	Δοκίμιο 3-3 $F_{b,Rd}$ (kN) - Extension (mm)
$e_{min}$	63.69 -11.50	62.82 -11.79	63.64 -12.30
$e_{max}$	156.27 -20.76	151.77 -18.00	155.19 -19.05

Όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 3.5 οι τιμές των συνδέσεων για  $e_{min}$  συγκλίνουν μεταξύ τους στην τιμή 63 kN και μετατόπιση 12 mm. Και οι τιμές των συνδέσεων για  $e_{max}$  έχουν την ίδια συμπεριφορά, μιας δεν έχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις και συγκλίνουν στα 155 kN και 19 mm. Πέρα από αυτά, στο τέλος των πειραμάτων και από την δεδομένη μορφή αστοχίας των δοκιμίων προκύπτουν και διάφορα άλλα συμπεράσματα. Βάσει των υπολογισμών που πραγματοποιήθηκαν (πίνακας 3.4) κρίσιμος έλεγχος στο πείραμα είναι η αστοχία σε σύνθλιψη άντυγας και όχι σε διάτμηση του κοχλία.

### 3.5 Συμπεράσματα

Από το πείραμα παρατηρούμε ότι έχουμε αστοχία έναντι σύνθλιψης άντυγας όπως προβλέφθηκε από το σχεδιασμό. Στην πρώτη περίπτωση λόγω του ότι η απόσταση  $e_1=55$  mm, κατά την διάρκεια της φόρτισης, το υλικό του ελάσματος που βρίσκεται εξωτερικά του κοχλία και προς το πλησιέστερο άκρο, άρχισε να συσσωρεύεται μπροστά από την οπή και σε δύναμη  $F=155$  kN είχαμε την αναμενόμενη αστοχία της σύνδεσης. Από τις εικόνες των δοκιμίων μετά την αστοχία παρατηρείται διατμητική αστοχία του υλικού μπροστά από την οπή καθώς και το ότι το υλικό, σε μορφή σφήνας τείνει να φύγει εκτός ελάσματος. Επιπλέον είναι ευδιάκριτη και η ροή των τάσεων η οποία γύρω από την οπή σχηματίζει γωνία  $45^0$  περίπου σε σχέση με την διεύθυνση του φορτίου.

Όσον αφορά τις συνδέσεις με  $e=21.6$  mm είναι ευδιάκριτη η εκτόπιση του υλικού, μπροστά από την οπή, και στα τρία δοκίμια. Εδώ δεν έχουμε την εμφάνιση διατμητικής αστοχίας του υλικού αλλά καμπτικής, αντίθετα με την περίπτωση του  $e_{max}$ . Η ροή των τάσεων σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζει μικρότερη γωνία, περίπου  $30^0$  σε σχέση με την διεύθυνση της φόρτισης, αντίθετα με το  $e_{max}$ , κάτι που είναι λογικό μιας και δεν υπάρχει πολύ υλικό μπροστά από την οπή.

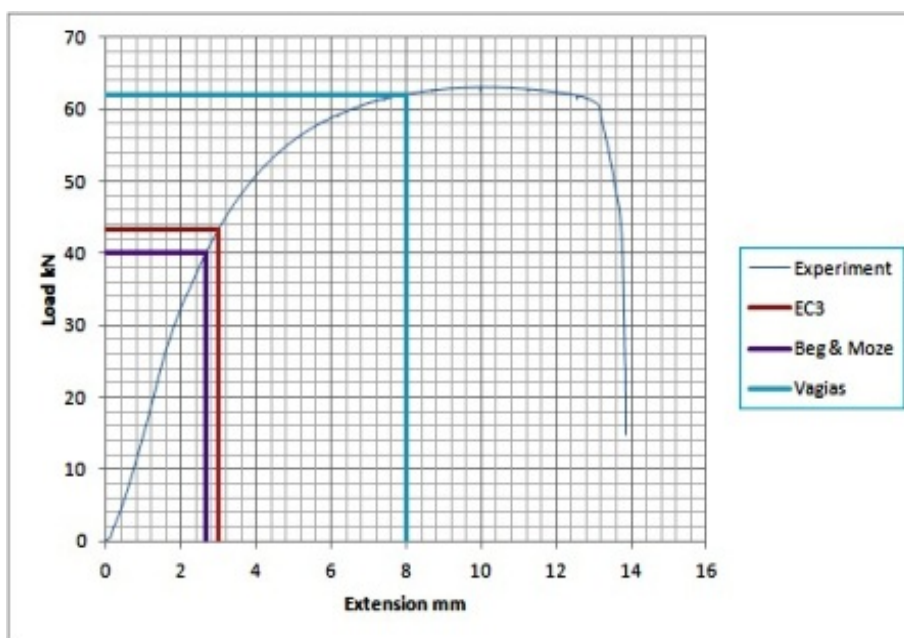
Στο στάδιο αυτό μπορούμε να κάνουμε μία πρώτη σύγκριση των αποτελεσμάτων του πειράματος με τα αποτελέσματα που δίνει ο EN 1993-1-8. Οι υπολογισμοί με τον Ευρωκώδικα, όπως προαναφέρθηκε, έγιναν με ίδιες γεωμετρίες και ίδιες αντοχές με αυτές των πειραμάτων. Επιπλέον οι αντοχές με βάση τον Ευρωκώδικα έχουν υπολογιστεί χωρίς συντελεστή ασφαλείας. Θεωρούμε από τα πειράματα που έγιναν, τόσο για το  $e_{max}$  όσο και για το  $e_{min}$ , τιμές αστοχίας στα 155 kN και 63 kN αντιστοίχως. Η σύγκριση δίνεται στον πίνακα 3.6.

Πίνακας 3.6: Σύγκριση τιμών αντοχής πειράματος και Ευρωκώδικα

Αποστάσεις	Πείραμα ( $F_1$ )	EN 1993-1-8 ( $F_2$ )	Λόγος ( $F_1 / F_2$ )
$e_{min}$	63 kN	43.28 kN	1.46
$e_{max}$	155 kN	64.91 kN	2.39

Παρατηρούμε ότι η διαφορά είναι μεγάλη. Συγκεκριμένα ο λόγος των δύο αντοχών είναι 1.46 για την σύνδεση με  $e_{min}$  και 2.39 για την σύνδεση με  $e_{max}$ . Δηλαδή στην πράξη η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας για την σύνδεση με ένα κοχλία για απόσταση  $e_{min}$  είναι περίπου 50% μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα. Εάν συμπεριληφθεί και ο συντελεστής ασφαλείας,  $\gamma_{M2}$ , στους υπολογισμούς τότε παρατηρείται και επιπλέον αύξηση κατά 30%. Για τη σύνδεση με απόσταση  $e_{max}$  η απόκλιση των τιμών αντοχής πειράματος και Ευρωκώδικα είναι ακόμα μεγαλύτερη φτάνοντας σε ποσοστό 240%, ενώ εάν συμπεριληφθεί και ο συντελεστής ασφαλείας,  $\gamma_{M2}$ , αγγίζει το 300%. Συνεπώς παρατηρούμε πως ο EC3 ίσως είναι κάτι παραπάνω από συντηρητικός, συμπέρασμα στο οποίο κατέληξαν και οι Moze και Beg [4]. Αυτό θα το εξετάσουμε περαιτέρω και στο επόμενο κεφάλαιο, όπου θα γίνουν αριθμητικές αναλύσεις για τις αποστάσεις  $e_{min}$  και  $e_{max}$  αλλά και για συνδέσεις με τέσσερις και πέντε κοχλίες.

Στο σχήμα 3.8 δίνεται το διάγραμμα Δύναμης - Μετατόπισης για το δοκίμιο 1-3 και για απόσταση  $e_{min}$ .



Σχήμα 3.8 : Καμπύλη Δύναμης - Μετατόπισης Δοκίμιου 1-3 για απόσταση  $e_{min}$

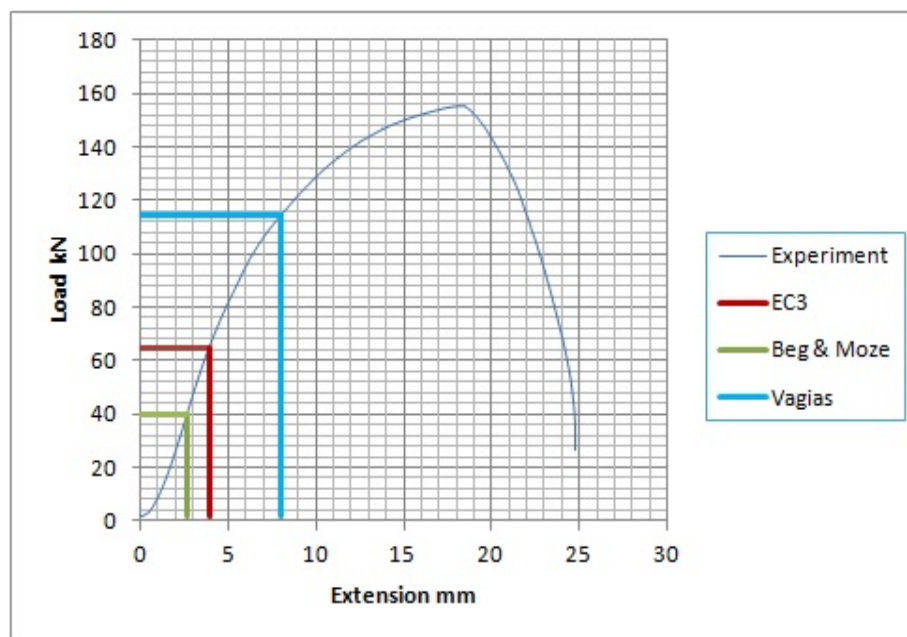
Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας :

Πίνακας 3.7: Ζεύγη τιμών Δύναμης - μετατόπισης

Τιμές	$F_{b,Rd}$ (KN)	$\delta$ (mm)
Beg & Moze	40,00	2,67
EC3	43,28	3,00
I.Βάγιας	62,04	8,00

Παρατηρούμε πως ο υπολογισμός της αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας με βάση τον Ευρωκώδικα αντιστοιχεί σε μετακίνηση 3 mm. Σύμφωνα, όμως, με την εργασία των Moze και Beg μια ικανοποιητική μετακίνηση της άντυγας της οπής για φορτία λειτουργίας είναι η τιμή  $d/6$  που αντιστοιχεί σε 2,67 mm. Τα δύο ζεύγη τιμών είναι πολύ κοντά μεταξύ τους. Κάτι τέτοιο μας οδηγεί στην σκέψη πως ο Ευρωκώδικας οδηγεί σε συντηρητική τιμή αντοχής λόγω παραμόρφωσης. Από την άλλη σύμφωνα με τον Ιωάννη Κ. Βάγια προτείνεται οριακή παραμόρφωση  $\delta_v=d/2$  για κοχλίες M16, δηλαδή παραμόρφωση ίση με 8 mm, για την αστοχία [2]. Βλέπουμε πως η τιμή της αντοχής που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση αυτή είναι 62KN και αποκλίνει ελάχιστα από την τιμή της αστοχίας που προέκυψε από το πείραμα.

Στην συνέχεια δίδεται το σχήμα 3.9 με τις τιμές δύναμης – μετακίνησης για την σύνδεση με τον ένα κοχλία για απόσταση  $e_{max}$ .



Σχήμα 3.9 : Καμπύλη Δύναμης - Μετατόπισης Δοκιμίου 3-3 για απόσταση  $e_{max}$

Σύμφωνα με το παραπάνω σχήμα προκύπτει ο παρακάτω πίνακας :

Πίνακας 3.8 : Ζεύγη τιμών Δύναμης - μετατόπισης

Τιμές	$F_{b,Rd}$ (KN)	$\delta$ (mm)
Beg & Moze	40,00	2,67
EC3	64,91	3,93
Ι.Βάγιας	114,92	8



Στην περίπτωση της σύνδεσης αυτής η τιμή της αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας προκύπτει 64.92 KN σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε παραμόρφωση ίση με 3,93 mm, δηλαδή 30% μεγαλύτερη σε σχέση με την σύνδεση για  $e_{min}$ . Ομοίως, σύμφωνα με την εργασία των Moze και Beg, για παραμόρφωση της άντυγας ίση με  $d/6=2,67$  mm η τιμή της αντοχής είναι 40 KN, δηλαδή ακριβώς ίδια με την προηγούμενη περίπτωση [4]. Ακόμα σύμφωνα με το βιβλίο *Σιδηρές Κατασκευές* η παραμόρφωση αστοχίας για κοχλίες M16, που είναι  $d/2=8$  mm, αντιστοιχεί σε περίπου 115 KN και είναι 25% μικρότερη από την τιμή της αστοχίας [2].

Ο Ευρωκώδικας είναι μεν συντηρητικός στον υπολογισμό της αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας, αλλά απ' όσο φαίνεται είναι συντηρητικός σε επίπεδο παραμορφώσεων κάτι που φαίνεται να απασχόλησε και τους Moze και Beg. Οι τελευταίοι εισάγουν μία αποδεκτή τιμή παραμόρφωσης για φορτία λειτουργίας σε αντίθεση με το βιβλίο *Σιδηρές Κατασκευές* ο οποίος εισάγει μία αποδεκτή τιμή για την παραμόρφωση αστοχίας. Στα πειράματα που κάναμε, τα δοκίμια αστόχησαν όλα σε παραμορφώσεις μεγαλύτερες των 11 mm, τιμή που προφανώς δεν είναι αποδεκτή για κατασκευαστικά έργα. Ουσιαστικά μπορούμε να συμπεράνουμε πως η αλήθεια βρίσκεται κάπου στη μέση, τόσο για φορτία λειτουργίας αλλά και για φορτία αστοχίας. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα θεωρηθεί ως παραμόρφωση αστοχίας η τιμή  $d/5=3.2$  mm.

## 4 Αριθμητικές αναλύσεις

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus που χρησιμοποιήθηκε για τις αριθμητικές αναλύσεις στην παρούσα διπλωματική εργασία. Γίνεται παρουσίαση του μοντέλου των πειραματικών δοκιμών και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τις δύο φάσεις των πειραματικών δοκιμών. Εκτός αυτών προχωρήσαμε και σε δύο περαιτέρω αριθμητικές αναλύσεις. Η πρώτη αφορούσε τη σύνδεση τεσσάρων κοχλιών σε κανονική διάταξη, ενώ η δεύτερη σύνδεση πέντε κοχλιών σε λοξή διάταξη. Τέλος, σχολιάζονται τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω αναλύσεων και δίδονται κάποια αρχικά συμπεράσματα.

### 4.2 Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία- Γενικά

Για τη μελέτη ενός φαινομένου στη φύση με σύγχρονα υπολογιστικά μέσα ακολουθούμε δύο στάδια : α) τη μαθηματική διατύπωση του φαινομένου, κατά τη ν οποία βασιζόμαστε σε παραδοχές χαρακτηριστικές του φαινομένου που εξετάζεται και β) την αριθμητική ανάλυση του μαθηματικού προσομοιώματος, όπου μέσω του υπολογιστή επιχειρείται να δοθεί λύση στο πρόβλημα. Στη περίπτωση αυτή, όπου η ακριβής εξεύρεση της λύσης καθίσταται αδύνατη, οι προσεγγιστικές λύσεις αποτελούν ένα εναλλακτικό τρόπο επίλυσης του προβλήματος. Γνωστές προσεγγιστικές μέθοδοι για την αντιμετώπιση προβλημάτων της μηχανικής αποτελούν οι μέθοδοι των μεταβολών, μέθοδος Rayleigh-Ritz, και οι μέθοδοι των σταθμικών υπολοίπων, μέθοδος Galerkin.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων θεωρείται μία ειδική διατύπωση των μεθόδων Rayleigh-Ritz και σταθμικών υπολοίπων. Όμως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιλύει ευκολότερα πολύπλοκες γεωμετρίες και προγραμματίζεται ευχερέστερα στον υπολογιστή. Τα *πεπερασμένα στοιχεία* είναι απλά υποπεδία που αντικαθιστούν το γεωμετρικά σύνθετο πεδίο του προβλήματος, που επιθυμούμε την επίλυση. Τα πεπερασμένα στοιχεία εφάπτονται μεταξύ τους, χωρίς να αφήνουν κενά και συνδέονται με κόμβους στα σύνορα των στοιχείων. *Δίκτυο* ή *πλέγμα* ονομάζεται το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων και *διακριτοποίηση* του φορέα ονομάζεται η προσομοίωση του φορέα με δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων διατυπώθηκε ουσιαστικά το 1944 από τον Ιωάννη Αργύρη, αν και είχαν γίνει ήδη από το 1941 αντίστοιχες απόπειρες. Ο Ι. Αργύρης επινόησε τη μέθοδο, με σκοπό να προσομοιώσει τη γεωμετρία των πτερυγίων των τότε μαχητικών αεροσκαφών. Με τη μέθοδο αυτή καταλήγουμε σε τόσες αλγεβρικές εξισώσεις, όσοι και οι βαθμοί ελευθερίας του προβλήματος, το οποίο επιλύεται με τη χρήση H/Y. Παρόλο που η μέθοδος επινοήθηκε με σκοπό τη στατική ανάλυση φορέων, χρησιμοποιείται ευρέως για την αντιμετώπιση μεγάλου φάσματος προβλημάτων που απασχολούν τον μηχανικό, όπως για παράδειγμα στη ρευστομηχανική, στον ηλεκτρομαγνητισμό κλπ [6].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει χρήση του προγράμματος Abaqus v6.10. Το Abaqus είναι ένα εξελιγμένο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων , που μπορεί

να εφαρμοσθεί σε μεγάλο εύρος προβλημάτων μηχανικού. Πρωταρχικά σχεδιάστηκε για την προσομοίωση στερεών σχημάτων και κατασκευών, οι οποίες βρίσκονται υπό την επίδραση εξωτερικώς ασκούμενων φορτίων. Η λέξη Abaqus προέρχεται από την ελληνική λέξη *άβαξ*, που ήταν η πινακίδα στην οποία οι αρχαίοι Έλληνες έκαναν μαθηματικές πράξεις και πρόχειρους υπολογισμούς.

Το πρόγραμμα Abaqus διαθέτει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Έχει την ικανότητα αντιμετώπισης και στατικών, αλλά και δυναμικών προβλημάτων.
- Είναι ικανό να προσομοιώσει επιτυχώς απότομες αλλαγές στη γεωμετρία των στερεών σχημάτων , τόσο στις δύο όσο και στις τρεις διαστάσεις.
- Δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης των προβλημάτων με μία μεγάλη ποικιλία πεπερασμένων στοιχείων, όπως συνεχή στοιχεία, στοιχεία δοκού, στοιχεία κελύφους και πλάκας κλπ.
- Διαθέτει την επιλογή προσομοίωσης του τρόπου αλληλεπίδρασης μεταξύ των διαφόρων στερεών σχημάτων, από τα οποία αποτελείται ο φορέας.
- Χρησιμοποιεί μία εξελιγμένη *βιβλιοθήκη* υλικών, η οποία συμπεριλαμβάνει, εκτός των συνήθων ελαστικών και ελαστοπλαστικών υλικών, υλικά αφρώδη, σκυροδέματος, εδάφους κλπ.
- Έχει δυνατότητες προσομοίωσης ενός σημαντικού αριθμού φαινομένων, όπως αλληλεπίδραση ρευστών με στερεά στοιχεία, ακουστική, προβλήματα λυγισμού κλπ.

Το Abaqus δημιουργήθηκε από τους Hibbitt, Karlsson και Sorensen το 1978. Σήμερα χρησιμοποιείται από αρκετές βιομηχανίες, όπως βιομηχανίες αεροσκαφών και αυτοκινήτων, πετρελαϊκές εταιρείες, καθώς και σε εθνικά εργαστήρια και έρευνες πανεπιστημίων σε ολόκληρο τον κόσμο [3].

### 4.3 Έλεγχος ποιότητας υλικού

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του προσομοιώματος του ελάσματος σε σχήμα *παπιγιόν* και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

#### 4.3.1 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

Η προσομοίωση του ελάσματος έγινε με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία και έγινε μία αριθμητική ανάλυση για το έλασμα μορφής *παπιγιόν*. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του *παπιγιόν* είναι ίδια με αυτά που έχουν προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 3.2 και συνοπτικά παρατίθενται οι διαστάσεις του :

➤ Μήκος περιοχής ελέγχου	:	65	mm
➤ Πλάτος περιοχής ελέγχου	:	16	mm
➤ Εμβαδό περιοχής ελέγχου	:	96	mm <sup>2</sup>
➤ Μήκος	:	270	mm
➤ Πλάτος	:	22	mm

➤ Εμβαδό : 132 mm<sup>2</sup>

Για τον ελαστικό κλάδο της καμπύλης που θα προκύψει οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας  $E$  και του αριθμού Poisson  $\nu$  που χρησιμοποιήθηκαν είναι :

➤ Μέτρο Ελαστικότητας : 210000 N/mm<sup>2</sup>  
➤ Αριθμός Poisson : 0.3

Το μέτρο ελαστικότητας προέκυψε από τα διαγράμματα τάσεων - παραμορφώσεων του ελάσματος. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας υπολογίστηκε 200000 N/mm<sup>2</sup>, αλλά επειδή δεν υπήρξε καμία ουσιαστική διαφορά κατά την ανάλυση με το πρόγραμμα Abaqus επιλέξαμε την τιμή 210000 N/mm<sup>2</sup>.

Για τον πλαστικό κλάδο χρησιμοποιήσαμε, πέρα από τις χαρακτηριστικές τιμές διαρροής και αστοχίας του ελάσματος, άλλα εννέα εσωτερικά ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης. Στον πίνακα 4.1 δίνονται και έντεκα ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης.

Πίνακας 4.1: Ζεύγη τιμών τάσης-παραμόρφωσης

Ζεύγη Τιμών	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
Τάση	319.16	350	390	410	436	453	455	459	461	462	465
Παρα-μόρφωση	0.0000	0.006	0.016	0.0195	0.033	0.049	0.05	0.07	0.09	0.10	0.15

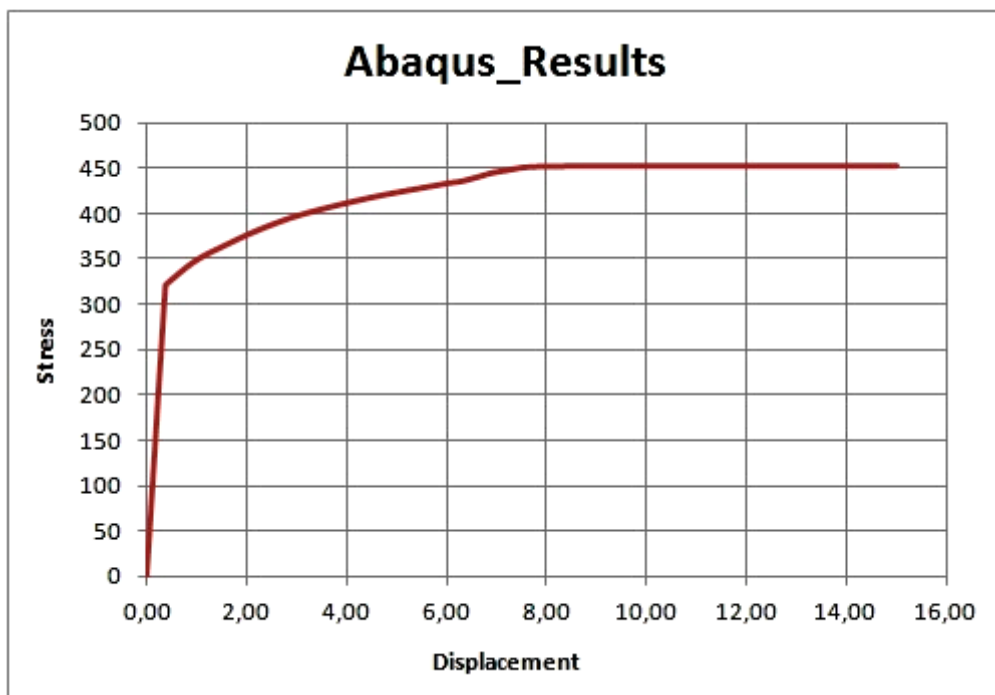
Στη συνέχεια διαχωρίσαμε το έλασμα σε τμήματα, αφού πρώτα ορίσαμε το δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων ως ανεξάρτητο. Αποφασίσαμε να χωρίσουμε το έλασμα σε πέντε τμήματα για καλλίτερη ανάλυση.

Έπειτα γίνεται εισαγωγή των φορτίων και των συνοριακών συνθηκών. Στο ένα άκρο του ελάσματος μηδενίσαμε όλους τους βαθμούς ελευθερίας, δηλαδή εφαρμόσαμε πάκτωση, ενώ στο άλλο επιβάλλαμε οριζόντια μετατόπιση 15 mm μηδενίζοντας τους υπόλοιπους βαθμούς ελευθερίας.

Το επόμενο βήμα ήταν να ορίσουμε το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων. Για διακριτοποίηση επιλέχθηκε όλο το έλασμα και ορίστηκε το μέγεθος πεπερασμένων στοιχείων στα 2 mm. Έτσι, δημιουργήσαμε ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων πλήθους 3.645 στοιχείων.

Τέλος, αφού δημιουργήσαμε φάκελο εργασίας στο πρόγραμμα, υποβάλλαμε το μοντέλο σε ανάλυση, της οποίας τα αποτελέσματα και εικόνες παρατίθενται στο σχήμα 4.1 και 4.2 αντίστοιχα.

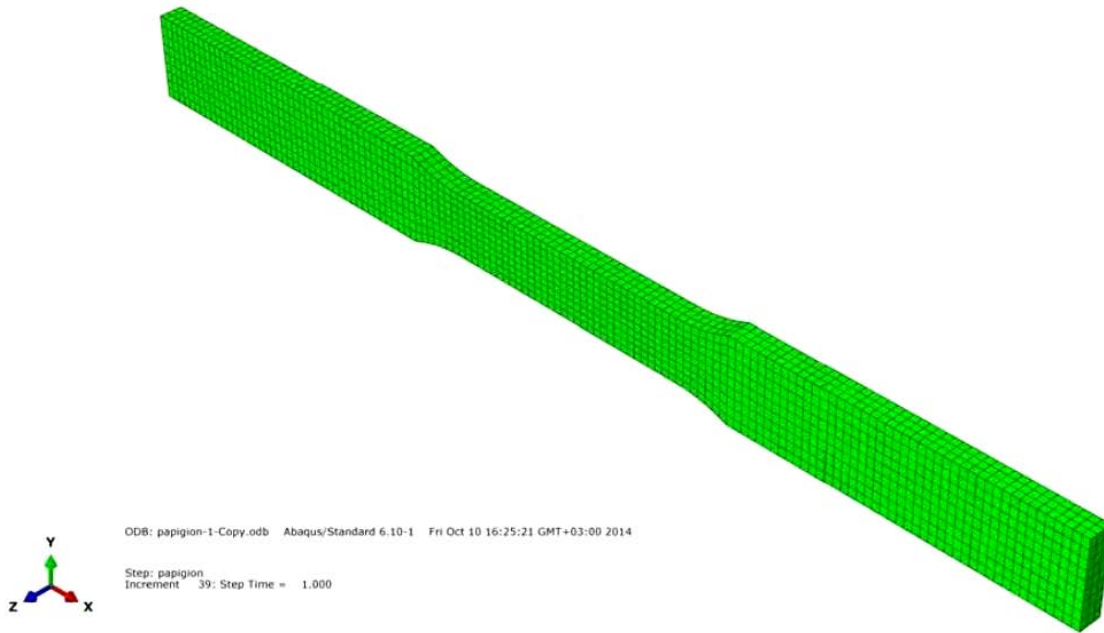
Για να προκύψει η καμπύλη τάσεων - μετακινήσεων ορίσαμε στο έλασμα την περιοχή που μας ενδιαφέρει. Επιλέχθηκε ένα συγκεκριμένο στοιχείο, στο κέντρο της περιοχής αστοχίας και προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά, τα εισαγάγαμε σε υπολογιστικό φύλλο *Excel* όπου και έγινε μετατροπή της μετατόπισης από ποσοστό σε πραγματική τιμή. Έτσι προέκυψε η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων.



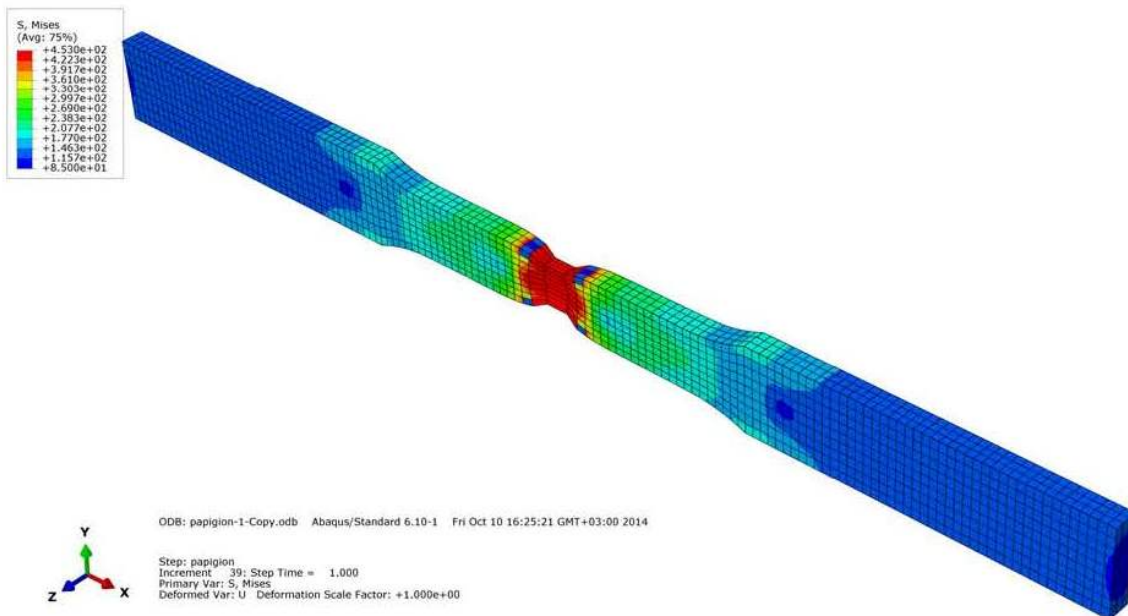
Σχήμα 4.1 : Διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν οι τιμές διαρροής και αστοχίας με τις αντίστοιχες μετατοπίσεις τους. Αυτές είναι :

- $(f_y, \delta_y)$  : (321.36 , 0.38)
- $(f_u, \delta_u)$  : (453.00 , 9.12)



Σχήμα 4.2.a : Εικόνα δοκίμιου πριν την επιβολή φορτίου

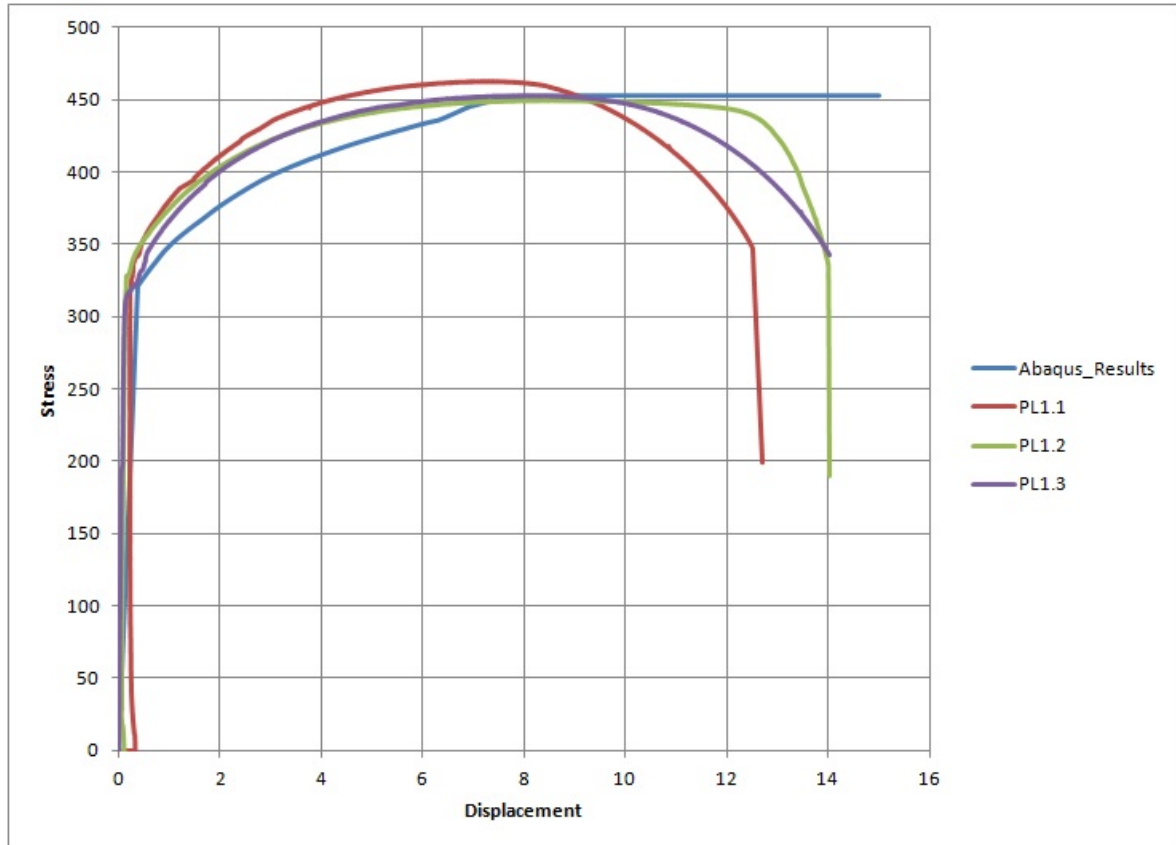


Σχήμα 4.2.b : Εικόνα δοκίμιου κατά την αστοχία

Σχήμα 4.2 : Εικόνες δοκίμιου πριν και μετά την αστοχία

### 4.3.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στο σχήμα 4.4 δίδονται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων όλων των δοκιμίων, με πάχος 6 mm, και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το Abaqus.



Σχήμα 4.4 : Σύγκριση καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων για  $t=6\text{mm}$

Αρχικά συμπεραίνουμε πως οι καμπύλες των πειραμάτων συγκλίνουν σε βαθμό πέραν του ικανοποιητικού με την καμπύλη του Abaqus. Πιο συγκεκριμένα είναι εμφανές πως το όριο διαρροής και για τις 4 δοκιμές είναι σχεδόν ίδιο. Έπειτα και το μέτρο ελαστικότητας και για τις 4 περιπτώσεις προσεγγίζει την τιμή 210000 MPA με ελάχιστες αποκλίσεις. Τέλος, όσον αφορά στο όριο εφελκυστικής αντοχής του ελάσματος, οι τιμές για τα δοκίμια PL1.2, PL1.3 και το Abaqus είναι σχεδόν πανομοιότυπες και προσεγγίζουν την τιμή 453 MPA, ενώ το μόνο δοκίμιο που αποκλίνει σε σχέση με τα άλλα είναι το PL1.1 το οποίο αστόχησε στα 462 MPA. Ουσιαστικά όμως, η απόκλιση του με τα υπόλοιπα είναι στο 2% και άρα πετυχαίνεται και εδώ πολύ καλή συσχέτιση.

## 4.4 Προσομοίωση σύνδεσης με ένα κοχλία

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του προσομοιώματος της σύνδεσης με ένα κοχλία και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων.

### 4.4.1 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων

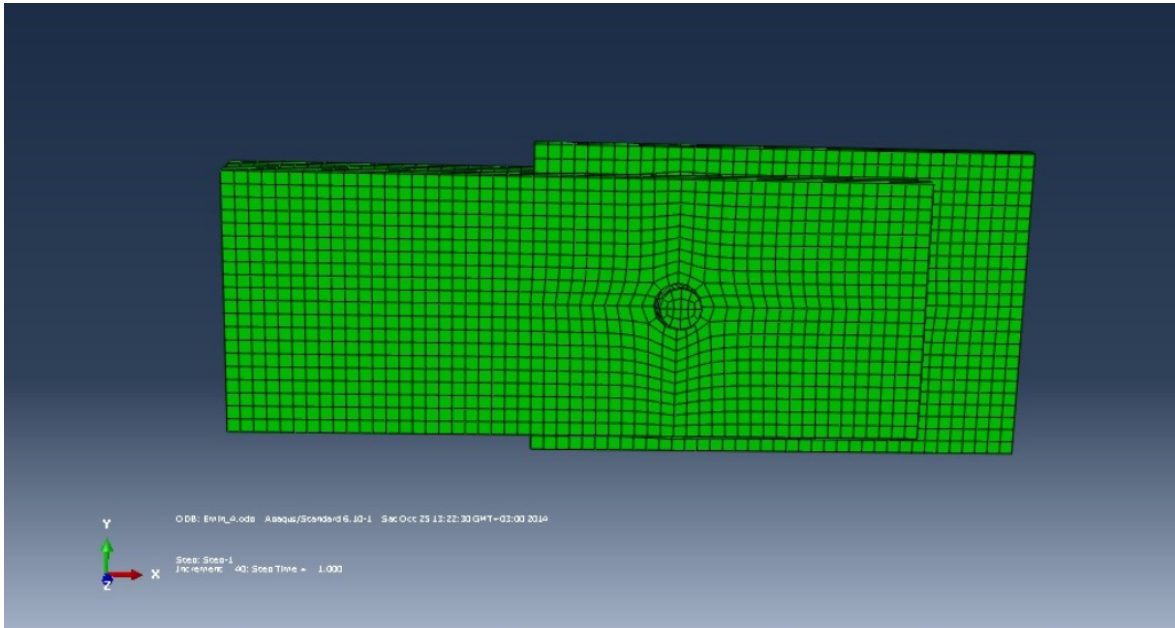
Η προσομοίωση της σύνδεσης έγινε με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία και έγιναν πέντε αριθμητικές αναλύσεις. Οι αναλύσεις αυτές έγιναν για πέντε διαφορετικές αποστάσεις  $e_1$  κατ' αντιστοιχία με τις αναλυτικές επιλύσεις βάσει EC3 που έχουν γίνει στο κεφάλαιο 3.3, πίνακας 3.3. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης είναι ίδια με αυτά που έχουν προαναφερθεί στο υποκεφάλαιο 3.3, ενώ τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού που λάβαμε υπ' όψιν είναι όμοια με αυτά που προέκυψαν από το πείραμα του ελάσματος μορφής *παπιγιόν*.

Η σύνδεση αποτελείται από δύο εξωτερικές πλάκες πάχους 8 mm, που χωρίστηκαν σε έξι τμήματα η κάθε μία, μία εσωτερική πάχους 6 mm η οποία χωρίστηκε σε τέσσερα τμήματα και ενός κοχλία. Στο συγκεκριμένο προσομοίωμα υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των τριών πλακών και μεταξύ των πλακών και το κοχλία. Ο τύπος αλληλεπίδρασης είναι η επαφή μεταξύ των επιφανειών αλληλεπίδρασης και η τιμή του συντελεστή τριβής μεταξύ των χαλύβδινων επιφανειών είναι 0.2.

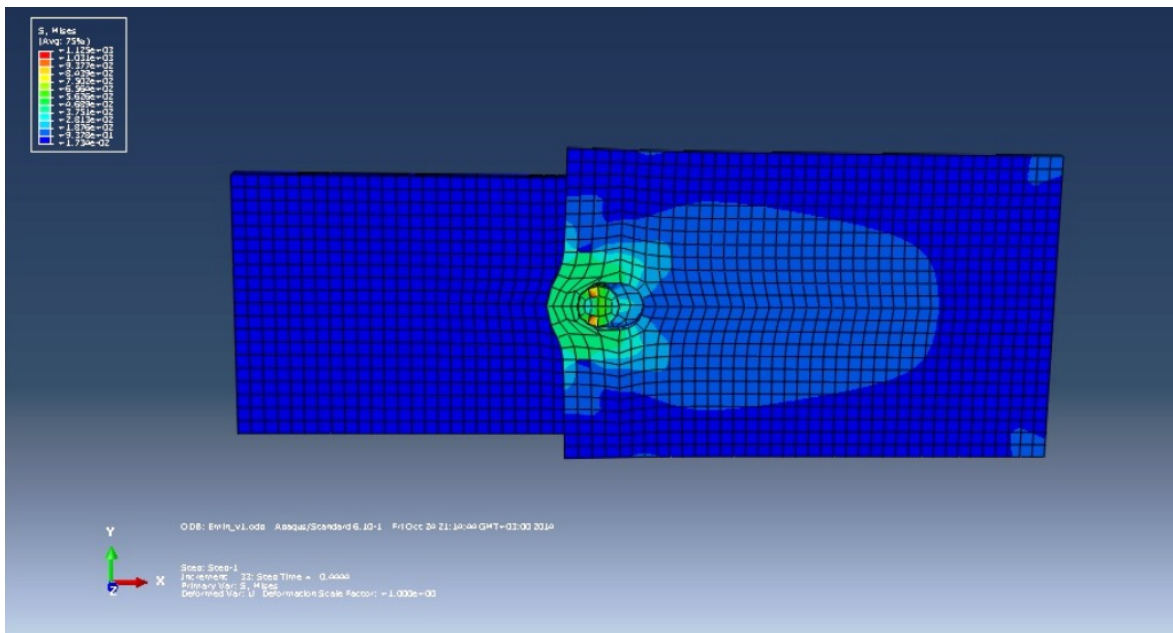
Η φόρτιση που ορίστηκε ήταν μετακίνηση 25 mm κατά τη θετική φορά του άξονα x, στο ελεύθερο άκρο της εσωτερικής πλάκας πάχους 6 mm. Τέλος, οι συνοριακές συνθήκες που ορίστηκαν ήταν πάκτωση στα ελεύθερα άκρα των δύο εξωτερικών πλακών και ελεύθερη μεταφορική κίνηση στο ελεύθερο άκρο της εσωτερικής πλάκας των 6 mm με δέσμευση όλων των άλλων βαθμών ελευθερίας.

Το επόμενο βήμα ήταν ο ορισμός του μεγέθους των πεπερασμένων στοιχείων. Για διακριτοποίηση επιλέχθηκε όλη σύνδεση και δημιουργήθηκε ένα δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων πλήθους 6.192 στοιχείων. Τέλος, αφού δημιουργήσαμε φάκελο εργασίας στο πρόγραμμα, υποβάλλαμε το μοντέλο σε ανάλυση και για τις πέντε διαφορετικές τιμές απόστασης  $e_1$ , της οποίας τα αποτελέσματα και ενδεικτικές εικόνες κατά την αστοχία παρατίθενται στο σχήματα 4.5 - 4.11.

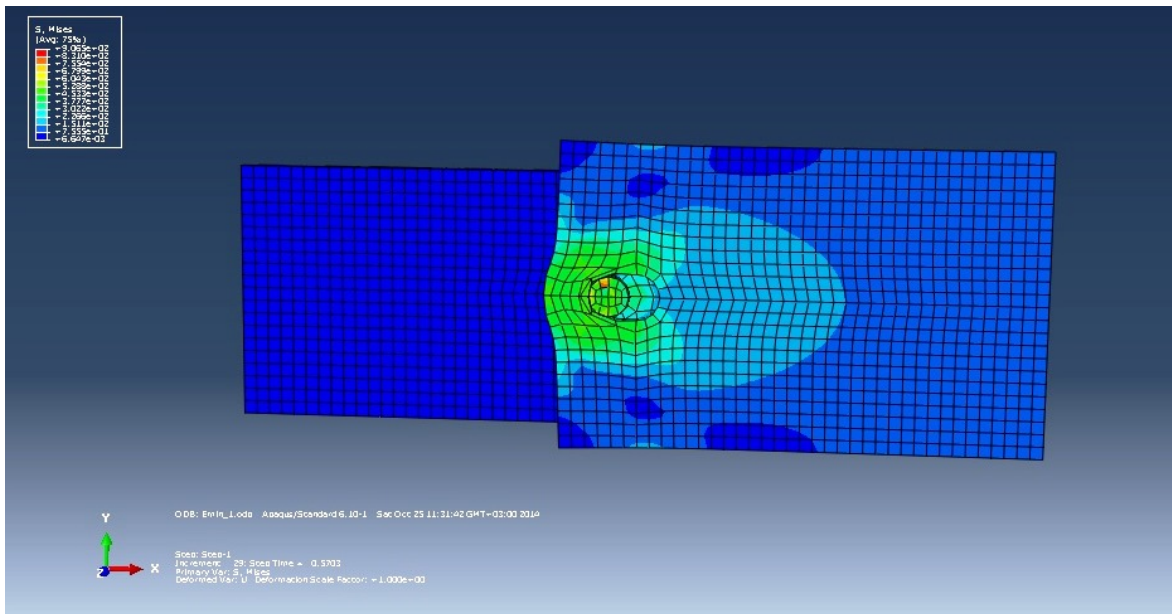




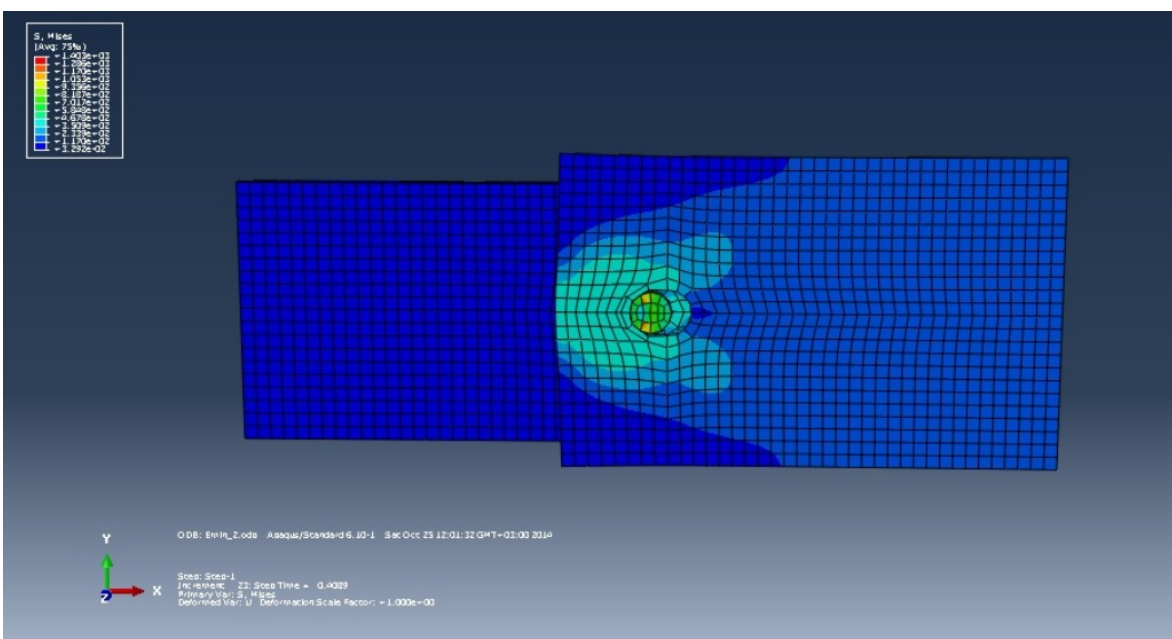
Σχήμα 4.5 : Εικόνα σύνδεσης πριν την αστοχία



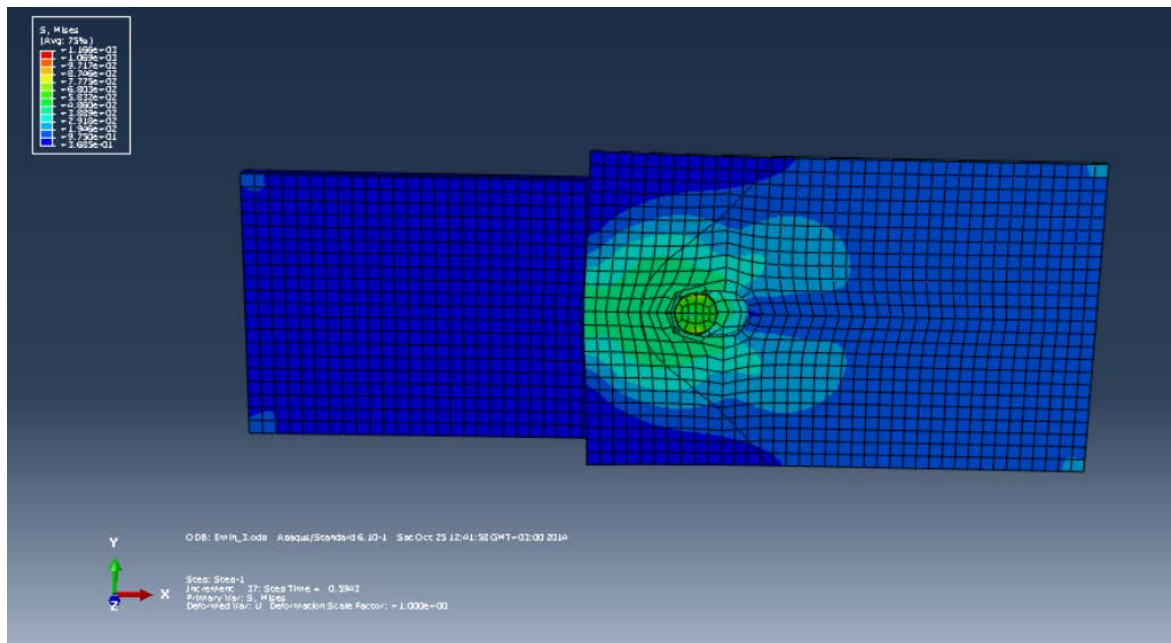
Σχήμα 4.6 : Εικόνα σύνδεσης κατά την αστοχία –  $e_1=21.6$  mm



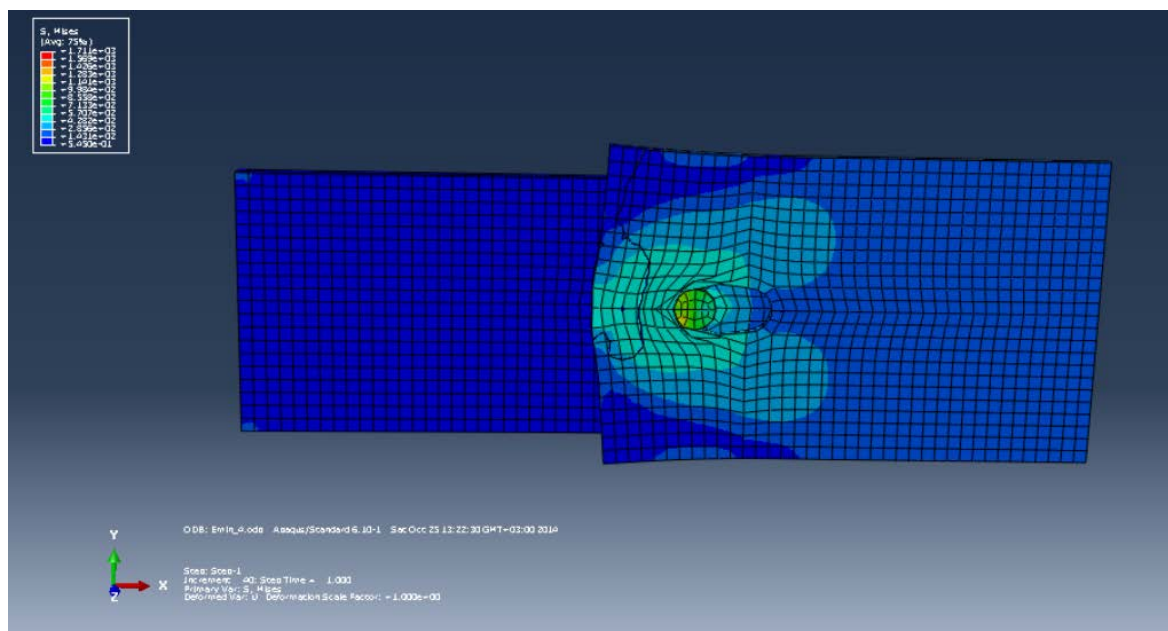
Σχήμα 4.7 : Εικόνα σύνδεσης κατά την αστοχία –  $e_1=31.6$  mm



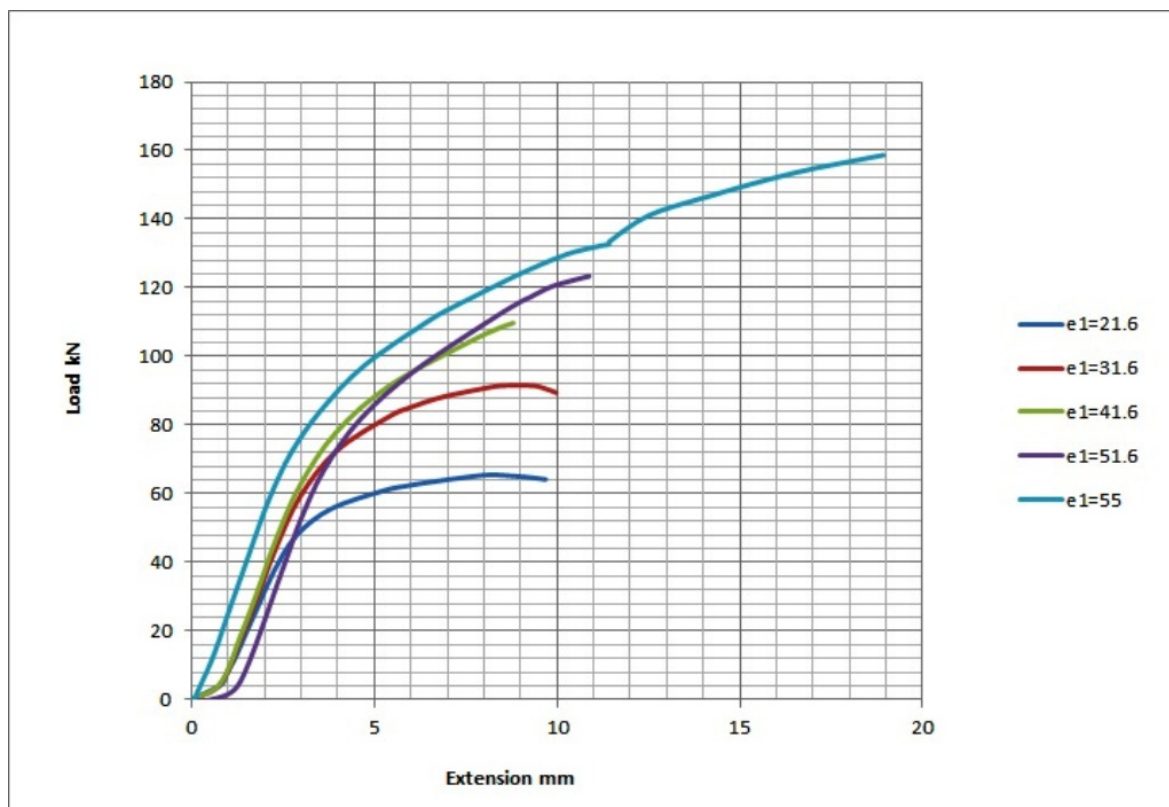
Σχήμα 4.8 : Εικόνα σύνδεσης κατά την αστοχία –  $e_1=41.6$  mm



Σχήμα 4.9 : Εικόνα σύνδεσης κατά την αστοχία –  $e_1=51.6$  mm



Σχήμα 4.10 : Εικόνα σύνδεσης κατά την αστοχία –  $e_1=55$  mm



Σχήμα 4.11 : Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης για τις 5 αποστάσεις  $e_1$

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις συνοψίζονται στον πίνακα 4.2 .

Πίνακας 4.2: Τιμές αντοχής έναντι σύνθλιψης άντυνας.

Αποστάσεις $e_1$ (mm)	21.6	31.6	41.6	51.6	55
Φορτίο Αστοχίας (kN)	65.50	91.52	109.74	123.34	158.65

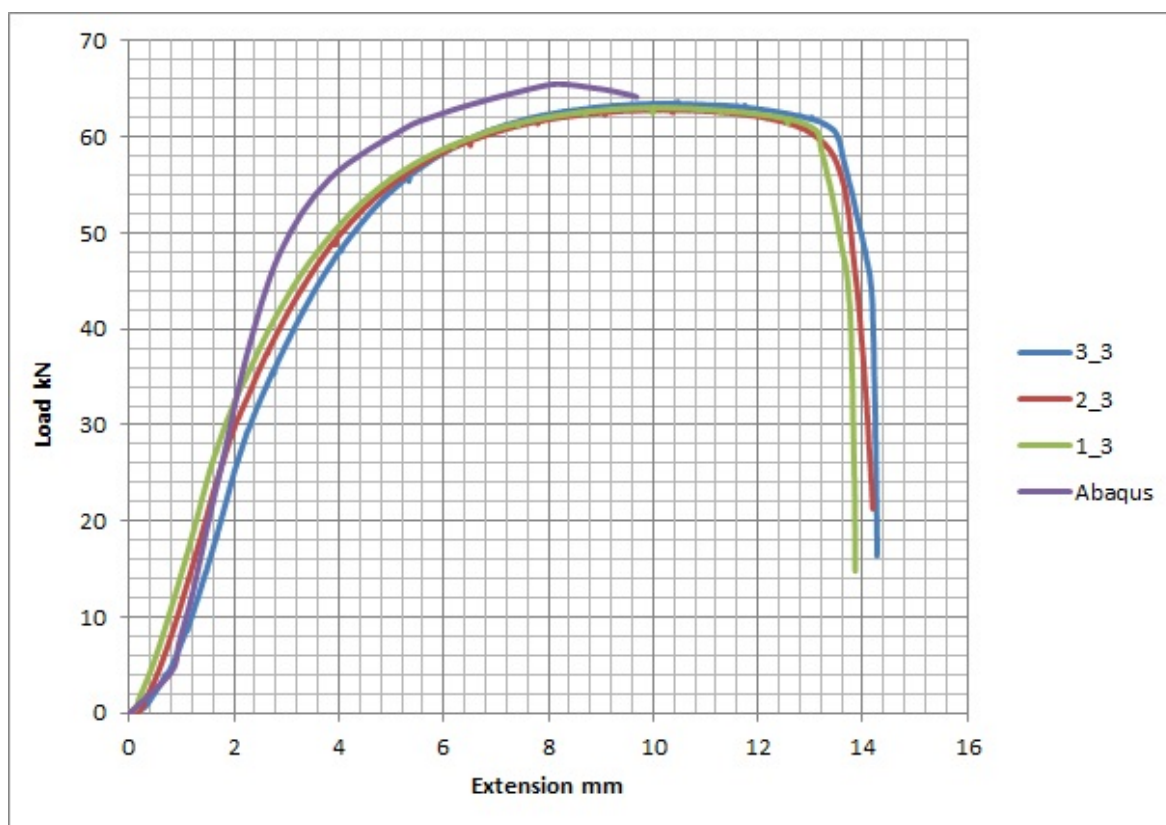
#### 4.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων - EC3 - πειραμάτων

Στο υποκεφάλαιο αυτό γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων, όσον αφορά το φορτίο αστοχίας που προέκυψε από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων και των αναλυτικών επιλύσεων με τον EC3. Στον πίνακα 4.3 παρατίθενται τα παραπάνω αποτελέσματα.

Πίνακας 4.3: Τιμές αντοχής έναντι σύνθλιψης άντυνας.

Αποστάσεις $e_1$ (mm)	21.6	31.6	41.6	51.6	55
Abaqus	65.50	91.52	109.74	123.34	158.65
EC3	43.28	62.75	64.91	64.91	64.91
Λόγος	1.51	1.46	1.69	1.90	2.44

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι ο Ευρωκώδικας είναι συντηρητικός στον υπολογισμό της αντοχής έναντι σύνθλιψης άντυνας. Για τις ελάχιστες αποστάσεις οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν μεγαλύτερη αντοχή σε ποσοστό περίπου 50% ενώ για τις μέγιστες αποστάσεις το ποσοστό αγγίζει τα 150%. Πιο συγκεκριμένα για αποστάσεις  $e_1=21.6$  mm και  $e_1=55$  mm γίνεται σύγκριση μεταξύ πειραματικών δοκιμών και αριθμητικών αναλύσεων στα σχήματα 4.12 και 4.13 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.12 : Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης για απόσταση  $e_{min}$

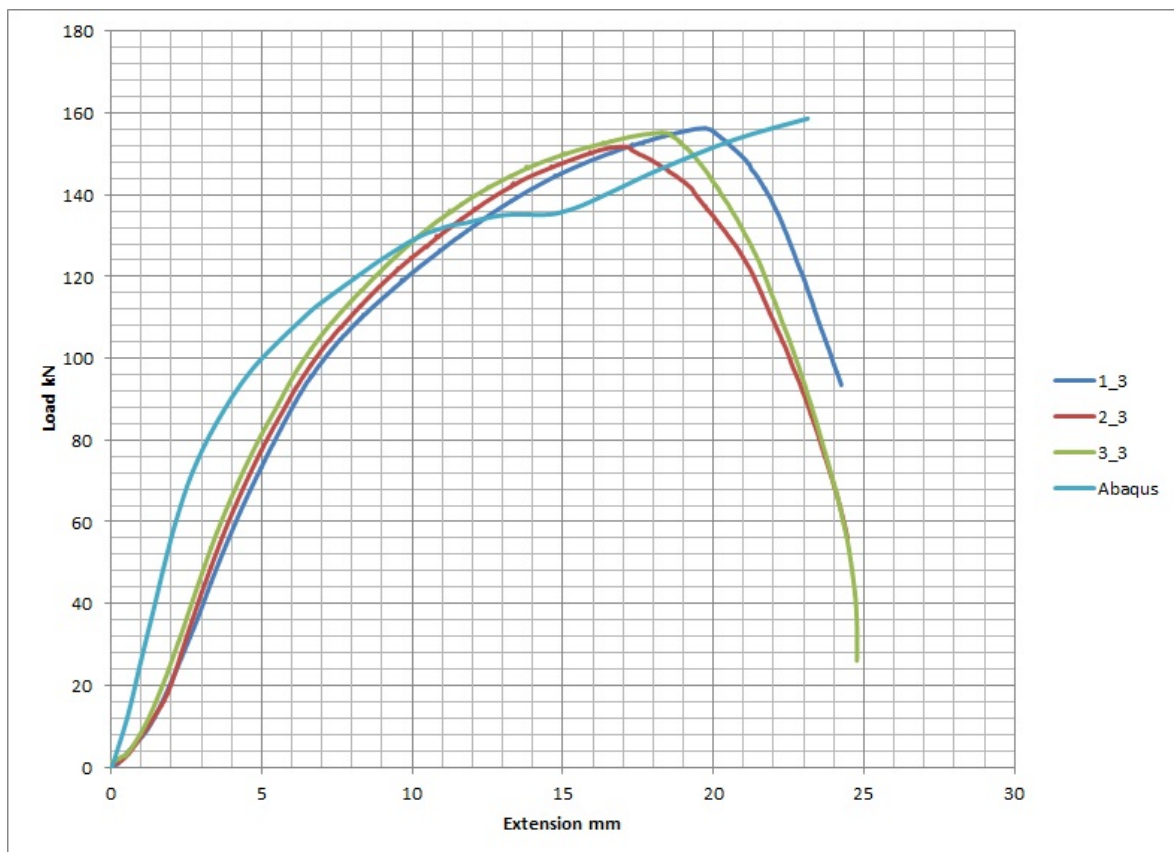
Από το παραπάνω σχήμα παρατηρείται ότι υπάρχει ικανοποιητική συσχέτιση του αποτελέσματος των αριθμητικών αναλύσεων με αυτά των πειραμάτων κάτι το οποίο φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4.4: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας

Αποστάσεις	Δοκίμιο 1-3 $F_{b,Rd}$ (kN)	Δοκίμιο 2-3 $F_{b,Rd}$ (kN)	Δοκίμιο 3-3 $F_{b,Rd}$ (kN)	Abaqus $F_{b,Rd}$ (kN)
$e_{min}$	63.69	62.82	63.64	65.50

Ειδικότερα παρατηρείται ικανοποιητική προσέγγιση των τιμών αντοχής των πειραμάτων σε σχέση με αυτή του προγράμματος σε βαθμό μεγαλύτερο του 95% .

Παρόμοια ικανοποιητικά αποτελέσματα παρατηρήθηκαν και για τις συνδέσεις με απόσταση  $e_1=55$  mm όπως φαίνεται στο σχήμα 4.13 και πίνακα 4.5.



Σχήμα 4.13 : Διάγραμμα Φορτίου – Μετατόπισης για απόσταση  $e_{max}$

Πίνακας 4.4: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας

Αποστάσεις	Δοκίμιο 1-3 $F_{b,Rd}$ (kN)	Δοκίμιο 2-3 $F_{b,Rd}$ (kN)	Δοκίμιο 3-3 $F_{b,Rd}$ (kN)	Abaqus $F_{b,Rd}$ (kN)
$e_{max}$	156.27	151.77	155.19	158.65

Από τον πίνακα επιτυγχάνεται ικανοποιητική προσέγγιση της τιμής του φορτίου αστοχίας σε βαθμό, και πάλι, μεγαλύτερη του 95%. Βέβαια από το σχήμα 4.13 παρατηρείται ότι η καμπύλη που προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις, ενώ στην αρχή προσεγγίζει σε καλό βαθμό αυτές των πειραμάτων, για μετατόπιση άνω των 13 mm παρεκκλίνει. πράγμα το οποίο δεν μας ανησυχεί καθώς πρόκειται για πολύ μεγάλη τιμή μετατόπισης.

Συνολικά, με βάση τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι όλα τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τη σύνδεση με τον ένα κοχλία συσχετίζονται σε ικανοποιητικό βαθμό με αυτά των αριθμητικών αναλύσεων. Αντίθετα, είναι εμφανές ότι οι τιμές αντοχής με βάση τον EC3 για τα ίδια γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού κινούνται σε αρκετά χαμηλότερες τιμές σε σχέση με αυτές των αριθμητικών αναλύσεων αλλά και των πειραμάτων. Βέβαια τόσο στις αριθμητικές αναλύσεις όσο και στα πειράματα για τις τιμές αντοχής σε απόσταση  $e_{min}=21.6$  mm η μετακίνηση ξεπερνά την τιμή των 10 mm . Στην περίπτωση  $e_{max}=55$  mm η μετακίνηση ξεπερνά την τιμή των 15 mm. Προφανώς οι τιμές αυτές των μετακινήσεων είναι μεγάλες και μη αποδεκτές σε κατασκευαστικά έργα. Βάσει αυτής της παρατήρησης, ίσως ο EC3 περιορίζεται σε μικρές μετακινήσεις οι οποίες ταυτόχρονα αντιστοιχούν και σε μικρές τιμές αντοχής έναντι σύνθλιψης άντυνας.

#### 4.5 Προσομοίωση συνδέσεων με 4 & 5 κοχλίες

Το προσομοίωμα που θα αναλυθεί είναι σύνδεση μιας πλάκας πάχους 6 mm με 4 και 5 κοχλίες που υποβάλλεται σε εφελκυσμό. Στο προσομοίωμα αυτό, δημιουργήθηκαν στο Abaqus τα αντικείμενα. Συγκεκριμένα τα ελάσματα με τις αντίστοιχες οπές εισήχθησαν στο πρόγραμμα από αρχείο Autocad μορφής dxf. Όσον αφορά τους κοχλίες αμελήθηκε απλοποιητικά το σπείρωμα ούτως ώστε να μειώσουμε την πολυπλοκότητα, υποθέτοντας ότι ο ρόλος του θα ήταν μηδαμινός στα τελικά αποτελέσματα, ενώ η ποιότητας τους θεωρήθηκε 10.9 ώστε να εξασφαλίσουμε αστοχία σε σύνθλιψη άντυνας.

Πραγματοποιήθηκαν τέσσερις αναλύσεις για κάθε ένα έλασμα 4 και 5 κοχλιών αντίστοιχα. Τα δεδομένα καθώς και οι διαστάσεις τους στα τέσσερα πειράματα που προσομοιώσαμε για έλασμα με 4 κοχλίες είναι :

- Δοκιμή 1 :  $e_1 = 3.56d_0$  ;  $p_1 = 4.16d_0$  ;  $e_2 = 2.13d_0$  ;  $p_2 = 2.40d_0$
- Δοκιμή 2 :  $e_1 = 3.56d_0$  ;  $p_1 = 3.69d_0$  ;  $e_2 = 1.80d_0$  ;  $p_2 = 3.07d_0$
- Δοκιμή 3 :  $e_1 = 3.56d_0$  ;  $p_1 = 3.02d_0$  ;  $e_2 = 1.47d_0$  ;  $p_2 = 3.73d_0$
- Δοκιμή 4 :  $e_1 = 3.56d_0$  ;  $p_1 = 2.20d_0$  ;  $e_2 = 1.20d_0$  ;  $p_2 = 4.27d_0$

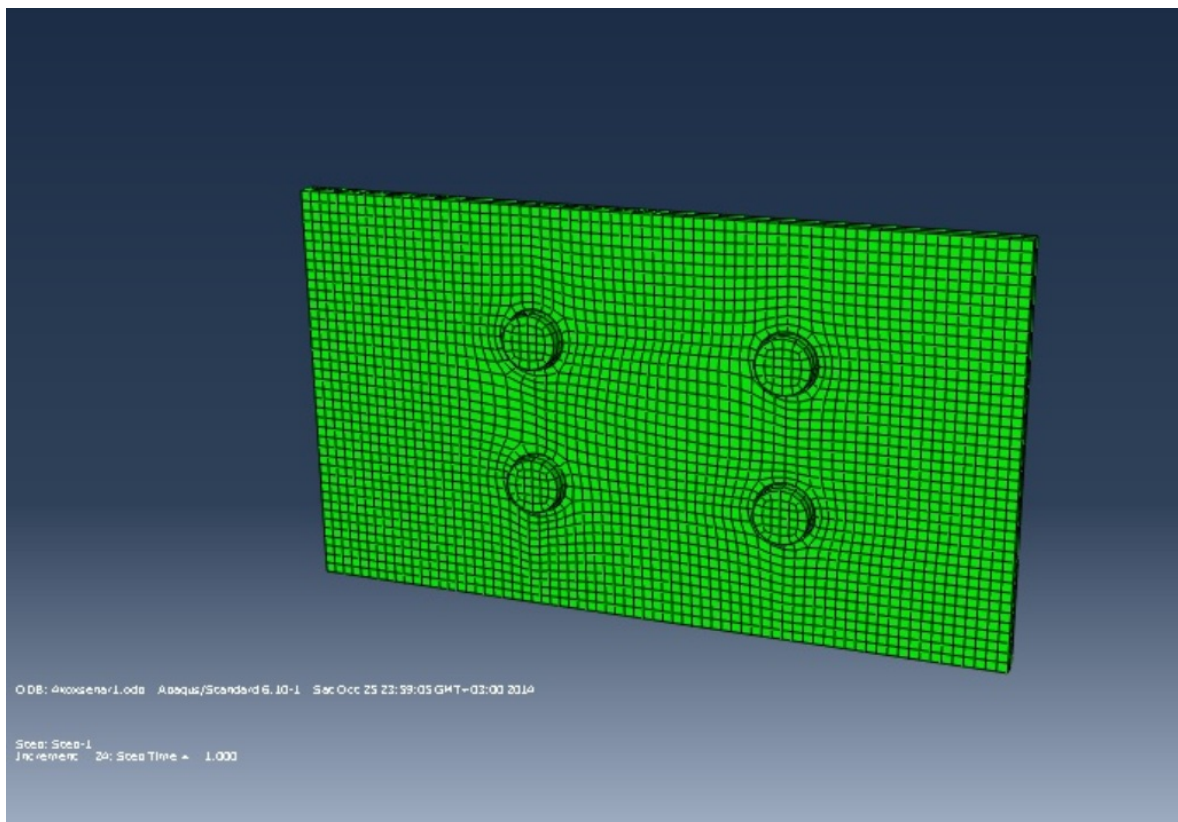
Ενώ για το έλασμα με 5 κοχλίες οι διαστάσεις είναι οι εξής :

- Δοκιμή 1 :  $e_1 = 3.56d_0$  ;  $p_1 = 4.16d_0$  ;  $e_2 = 2.13d_0$  ;  $p_2 = 1.20d_0$
- Δοκιμή 2 :  $e_1 = 3.56d_0$  ;  $p_1 = 3.69d_0$  ;  $e_2 = 1.80d_0$  ;  $p_2 = 1.54d_0$
- Δοκιμή 3 :  $e_1 = 3.56d_0$  ;  $p_1 = 3.02d_0$  ;  $e_2 = 1.47d_0$  ;  $p_2 = 1.87d_0$
- Δοκιμή 4 :  $e_1 = 3.56d_0$  ;  $p_1 = 2.20d_0$  ;  $e_2 = 1.20d_0$  ;  $p_2 = 2.13d_0$

Όσον αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού του ελάσματος επιλέχθηκε ποιότητα χάλυβα S235 και μέτρο ελαστικότητας 210 GPa. Έπειτα ορίσαμε τον τύπο της αλληλεπίδρασης των επιφανειών ανάμεσα στους κοχλίες και στο έλασμα. Ως τύπος αλληλεπίδρασης επιλέχθηκε η επαφή μεταξύ των επιφανειών και ως συντελεστής τριβής μεταξύ των ελασμάτων και κοχλιών ορίστηκε η τιμή 0.2

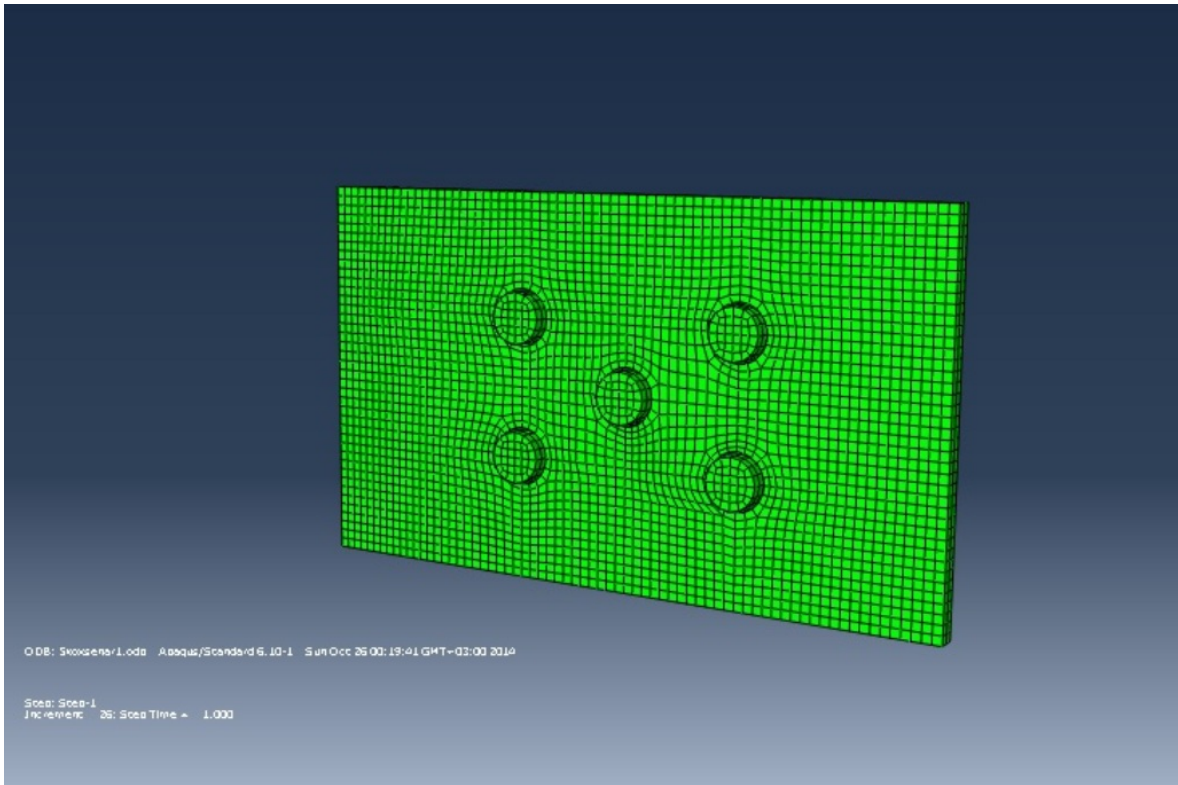
Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλαμε ήταν μετακίνηση 8 mm κατά την διεύθυνση y με δέσμευση των υπολοίπων μετακινήσεων. Επιπλέον, δεσμεύσαμε όλους τους βαθμούς ελευθερίας σε όλους τους κοχλίες.

Έπειτα υποβάλαμε τα μοντέλα σε αριθμητικές αναλύσεις. Εικόνες πριν την αστοχία δίνονται ενδεικτικά στα σχήματα 4.14 και 4.15. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνονται στα σχήματα 4.16 - 4.19.

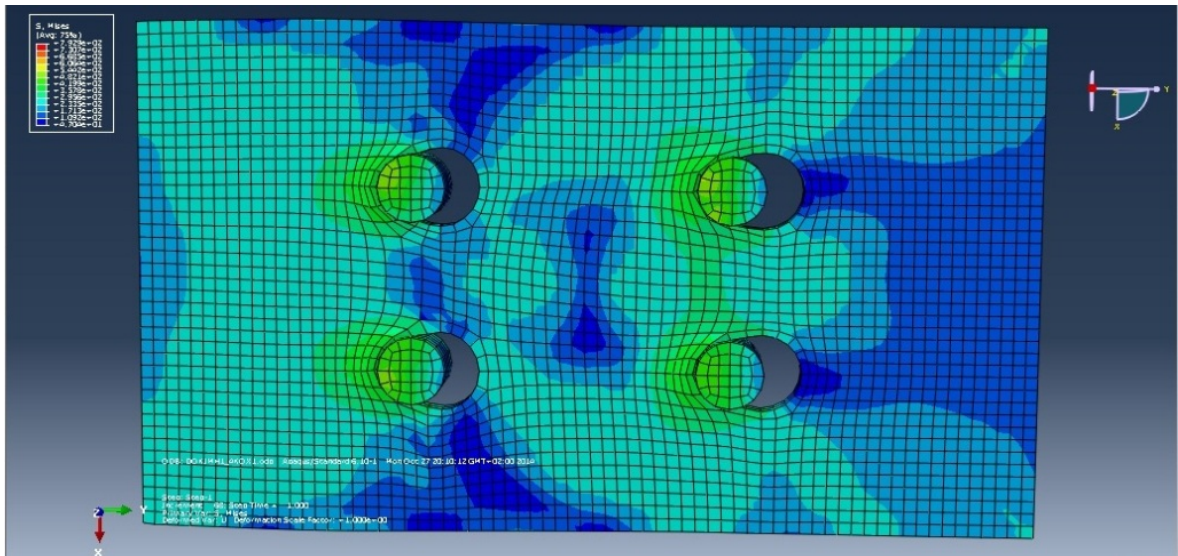


Σχήμα 4.14 : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών πριν την αστοχία

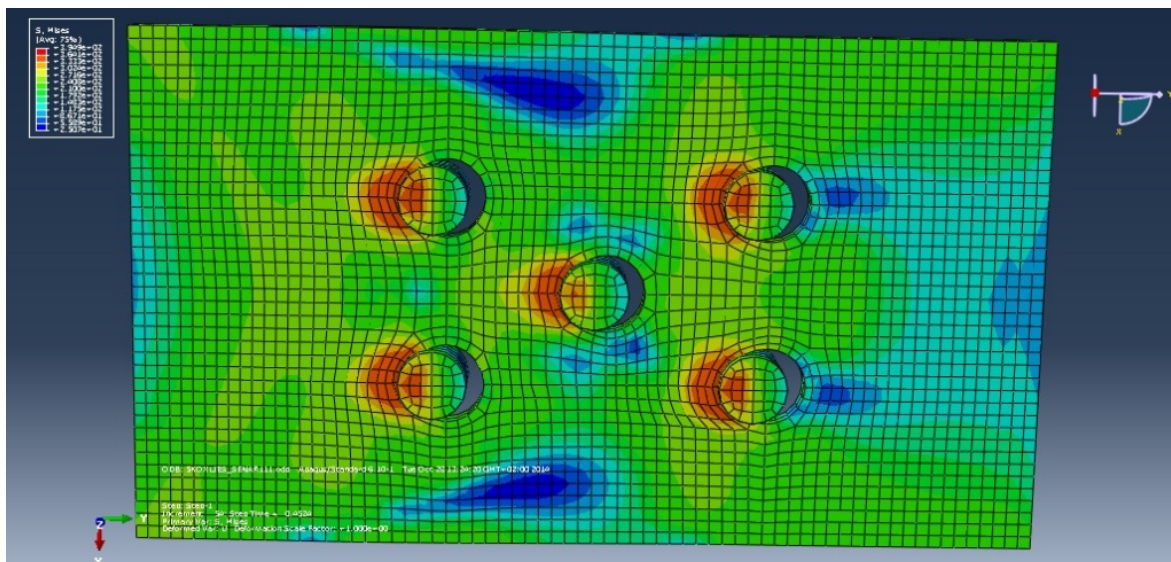




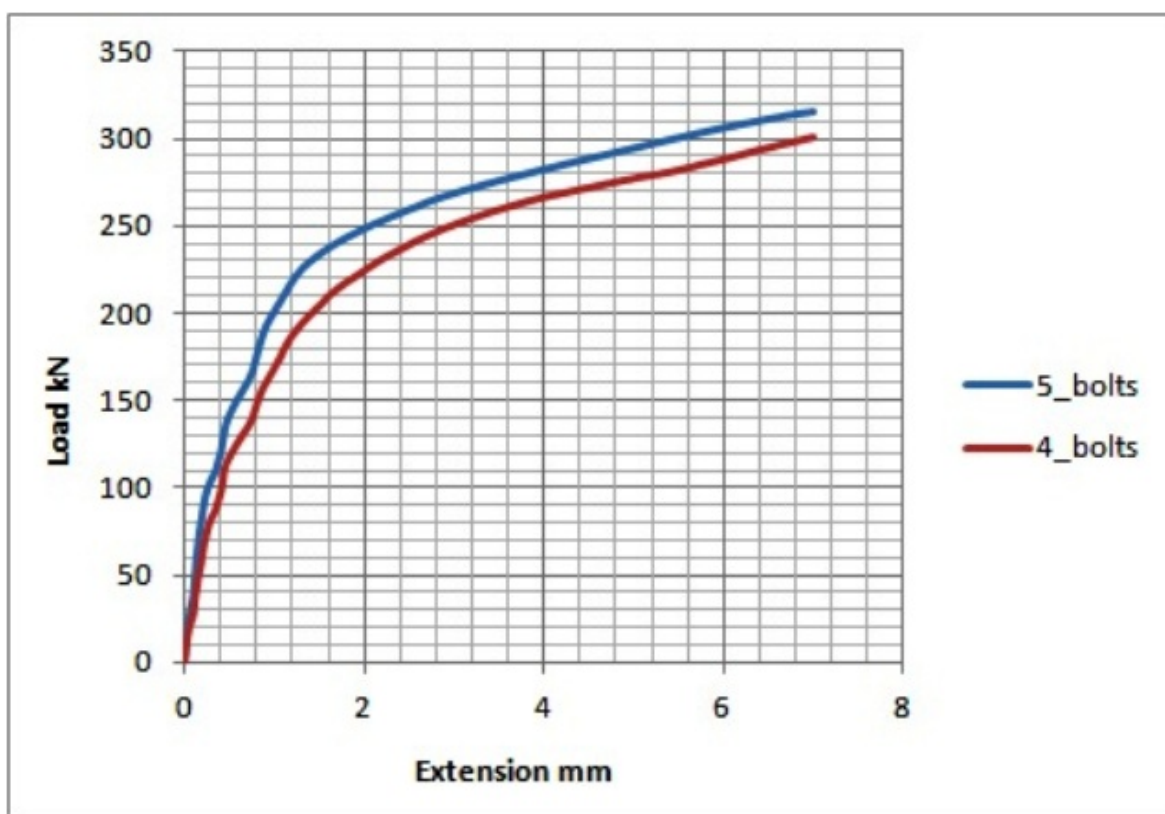
Σχήμα 4.15 : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών πριν την αστοχία



Σχήμα 4.16.a : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 1<sup>η</sup>



Σχήμα 4.16.b : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 1<sup>η</sup>

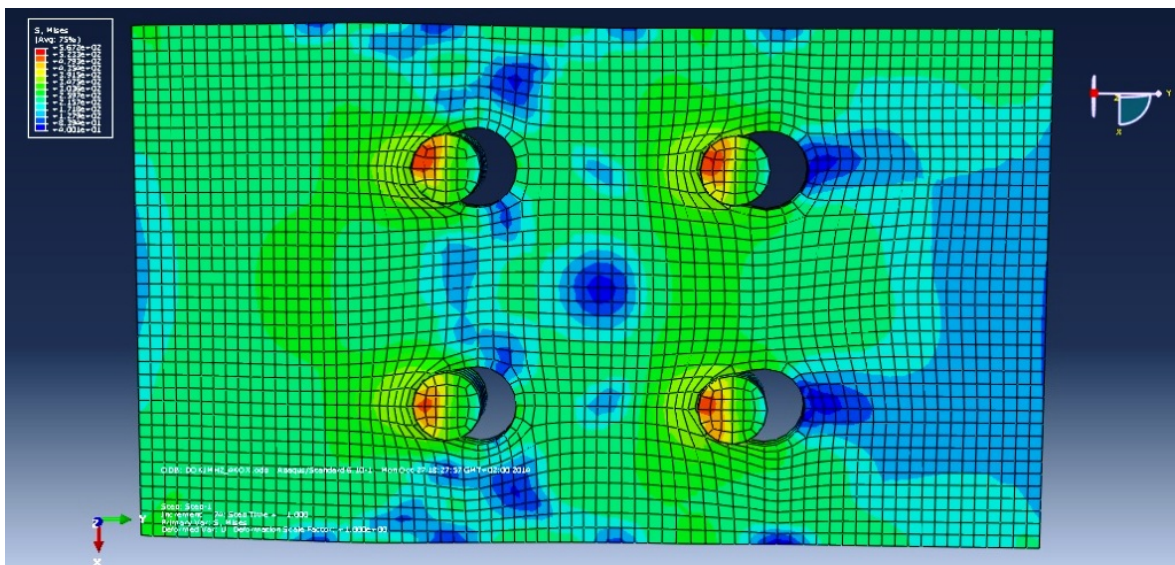


Σχήμα 4.16.c : Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για Δοκιμή 1<sup>η</sup>

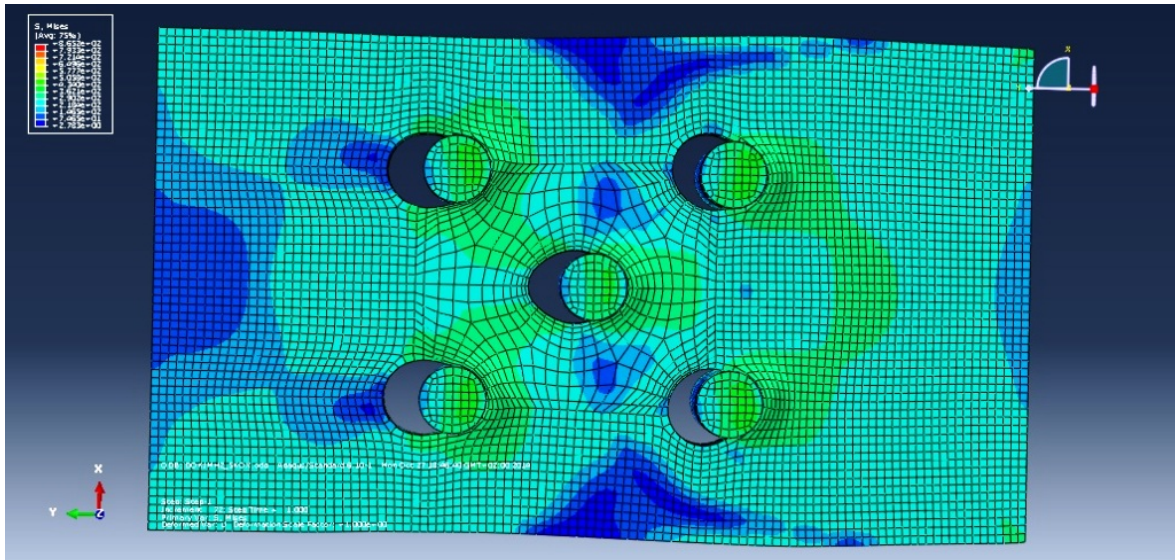
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι αντοχές έναντι σύνθλιψης άντυνας για τα ελάσματα των 4 και 5 κοχλιών που προέκυψαν από το διάγραμμα Δύναμης - Μετατόπισης για την Δοκιμή 1. Επίσης δίνονται οι αντίστοιχες τιμές αντοχής για προτεινόμενη μετακίνηση αστοχίας  $d/5 = 3.2 \text{ mm}$  σύμφωνα με την παράγραφο 3.5.

**Πίνακας 4.5: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας- Δοκιμή 1<sup>η</sup>**

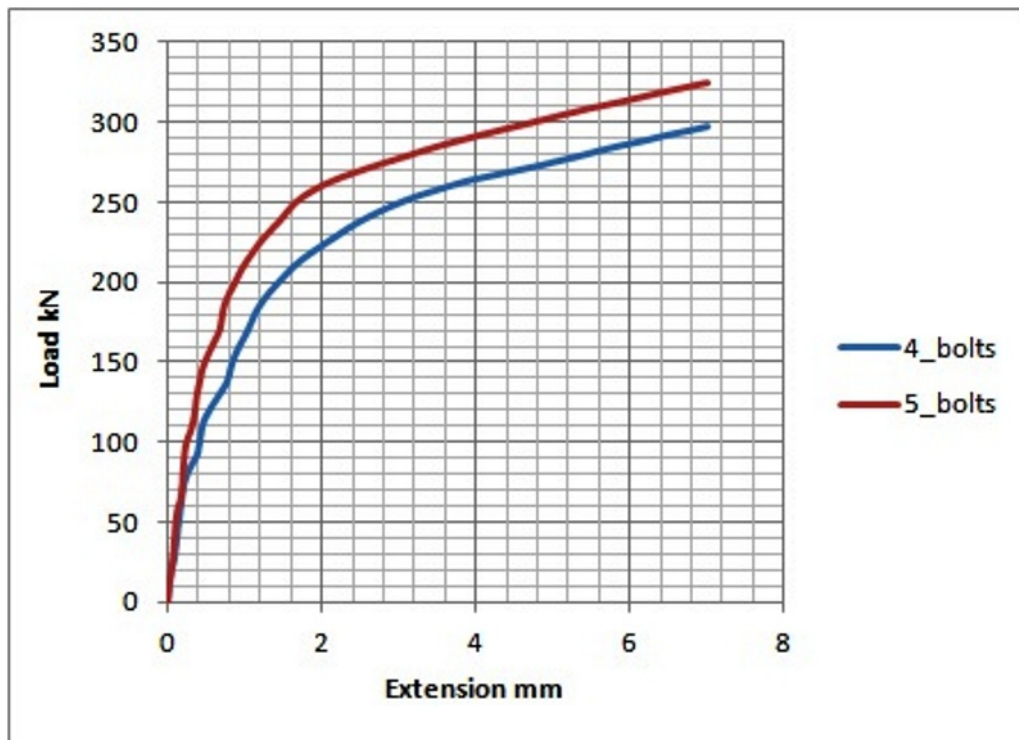
Δοκιμή 1 <sup>η</sup>	4 Κοχλίες	5 Κοχλίες
$F_{b,Rd}$ (d/5)	254.00 kN	272.00 kN



Σχήμα 4.17.a : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 2<sup>η</sup>



Σχήμα 4.17.b : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 2<sup>η</sup>

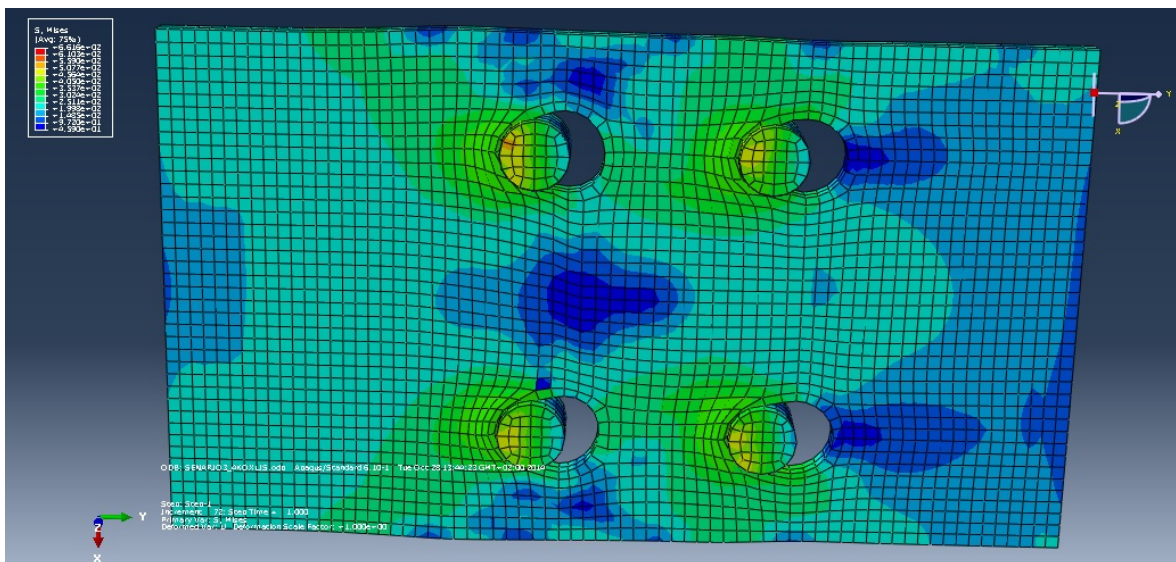


Σχήμα 4.17.c : Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για Δοκιμή 2<sup>η</sup>

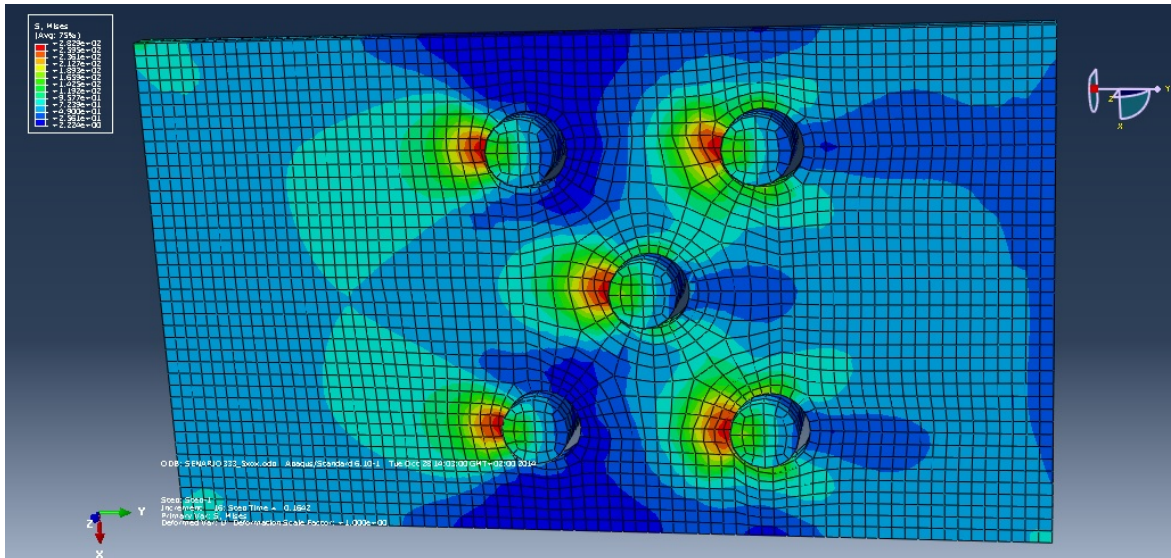
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι αντοχές έναντι σύνθλιψης άντυγας για τα ελάσματα των 4 και 5 κοχλιών που προέκυψαν από το διάγραμμα Δύναμης - Μετατόπισης για την Δοκιμή 2.

Πίνακας 4.5: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας- Δοκιμή 2<sup>η</sup>

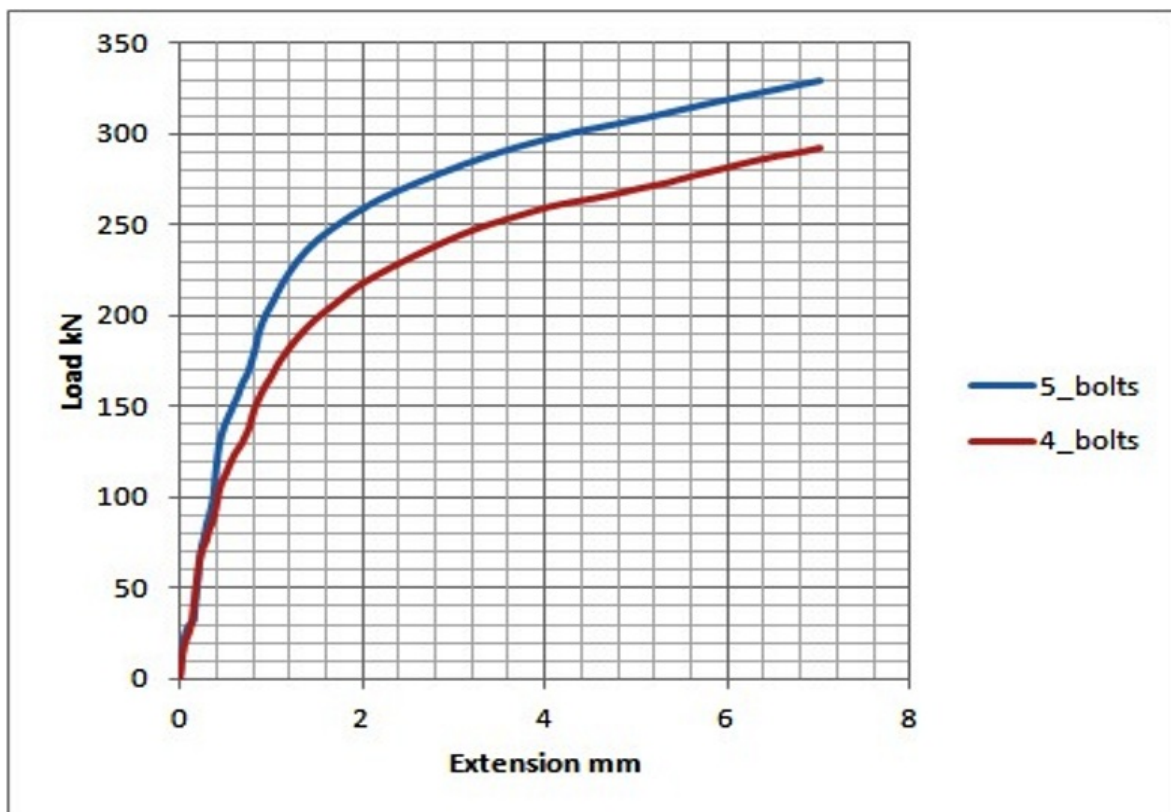
Δοκιμή 2 <sup>η</sup>	4 Κοχλίες	5 Κοχλίες
$F_{b,Rd}$ (d/5)	252.00 kN	280.00 kN



Σχήμα 4.18.a : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 3<sup>η</sup>



Σχήμα 4.18.b : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 3<sup>η</sup>

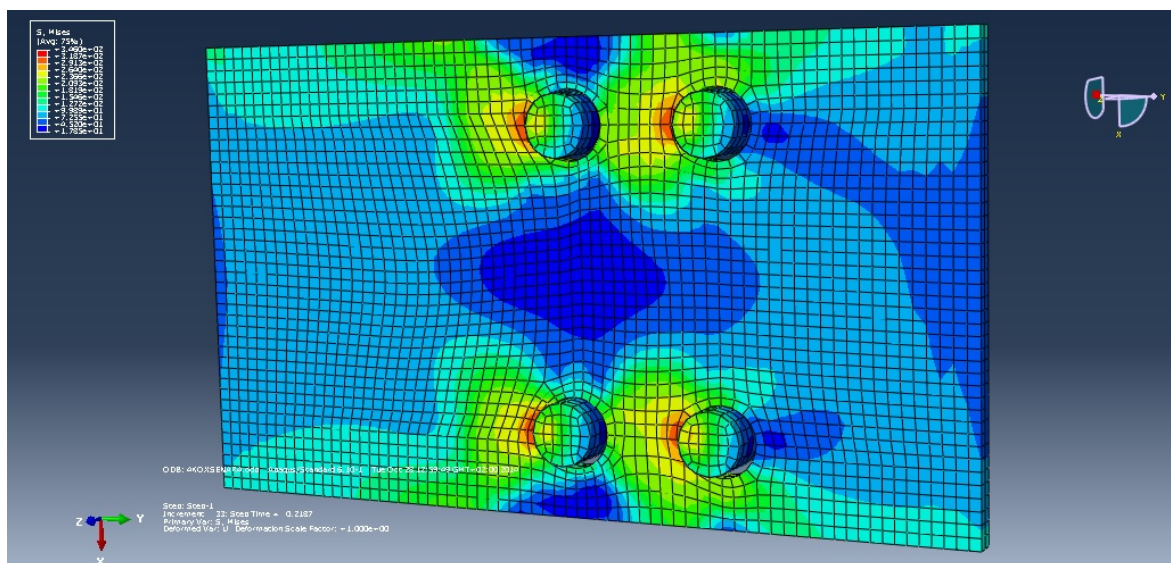


Σχήμα 4.18.c : Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για Δοκιμή 3

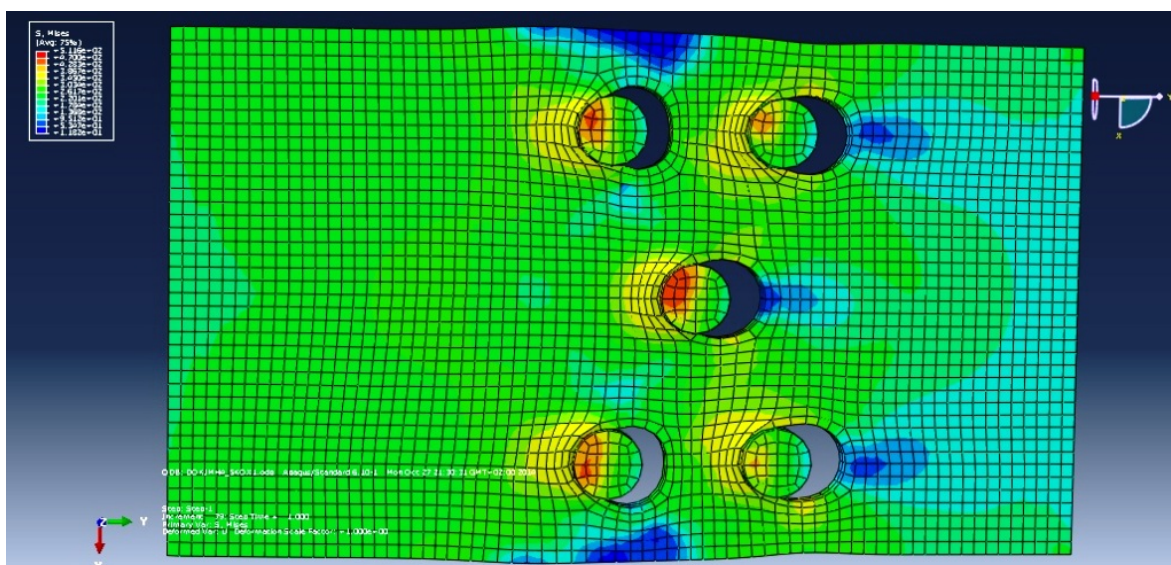
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι αντοχές έναντι σύνθλιψης άντυνας για τα ελάσματα των 4 και 5 κοχλιών που προέκυψαν από το διάγραμμα Δύναμης - Μετατόπισης για την Δοκιμή 3.

**Πίνακας 4.5: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας- Δοκιμή 3<sup>η</sup>**

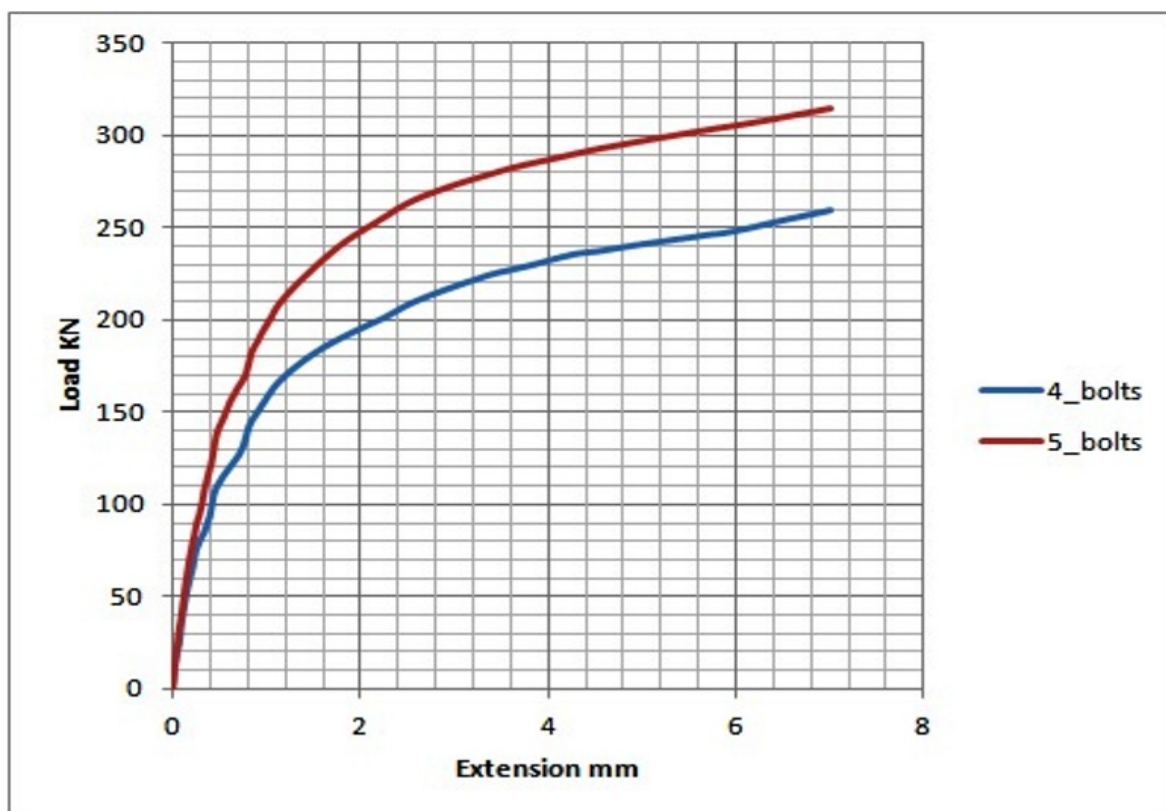
Δοκιμή 3 <sup>η</sup>	4 Κοχλίες	5 Κοχλίες
$F_{b,Rd}$ (d/5)	248.00 kN	284.00 kN



Σχήμα 4.19.a : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 4<sup>η</sup>



Σχήμα 4.19.b : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 4<sup>η</sup>



Σχήμα 4.19.c : Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για Δοκιμή 4



Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι αντοχές έναντι σύνθλιψης άντυνας για τα ελάσματα των 4 και 5 κοχλιών που προέκυψαν από το διάγραμμα Δύναμης - Μετατόπισης για την Δοκιμή 4.

Πίνακας 4.5: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας- Δοκιμή 4<sup>η</sup>

Δοκιμή 4 <sup>η</sup>	4 Κοχλίες	5 Κοχλίες
$F_{b,Rd}$ (d/5)	221.00 kN	276.00 kN

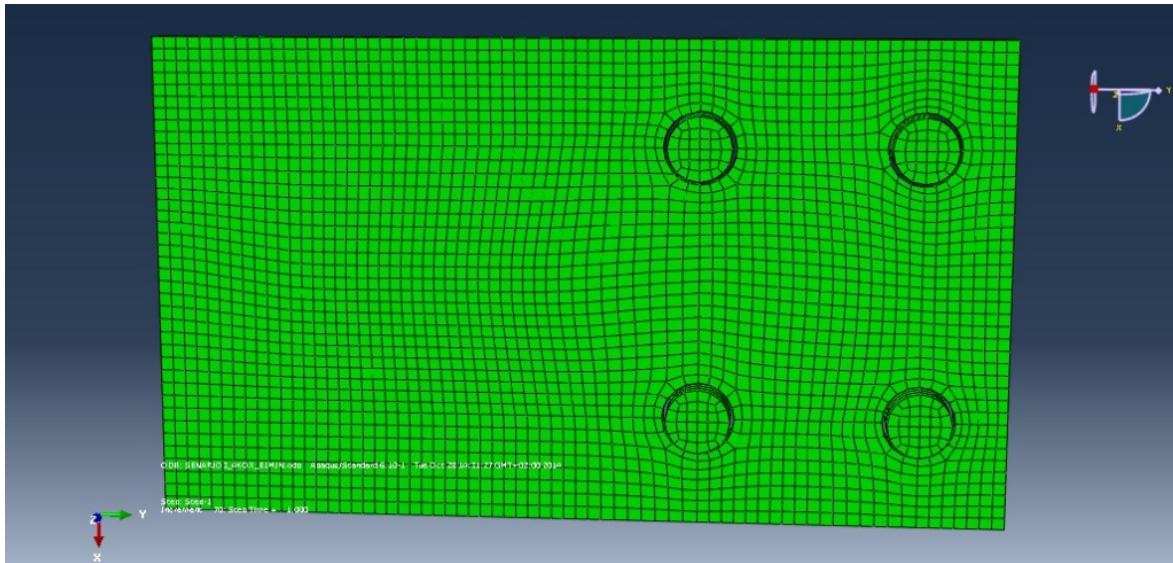
Πέραν του σεναρίου για απόσταση  $e_1=3.56d_0$  πραγματοποιήθηκαν άλλες τέσσερις αναλύσεις για τις συνδέσεις με 4 & 5 κοχλίες για απόσταση  $e_1=1.20d_0$ . Τα δεδομένα καθώς και οι διαστάσεις τους στα τέσσερα πειράματα που προσομοιώσαμε για έλασμα με 4 κοχλίες είναι :

- Δοκιμή 1 :  $e_1 = 1.20d_0$ ;  $p_1 = 4.16d_0$  ;  $e_2 = 2.13d_0$  ;  $p_2 = 2.40d_0$
- Δοκιμή 2 :  $e_1 = 1.20d_0$ ;  $p_1 = 3.69d_0$  ;  $e_2 = 1.80d_0$  ;  $p_2 = 3.07d_0$
- Δοκιμή 3 :  $e_1 = 1.20d_0$ ;  $p_1 = 3.02d_0$  ;  $e_2 = 1.47d_0$  ;  $p_2 = 3.73d_0$
- Δοκιμή 4 :  $e_1 = 1.20d_0$ ;  $p_1 = 2.20d_0$  ;  $e_2 = 1.20d_0$  ;  $p_2 = 4.27d_0$

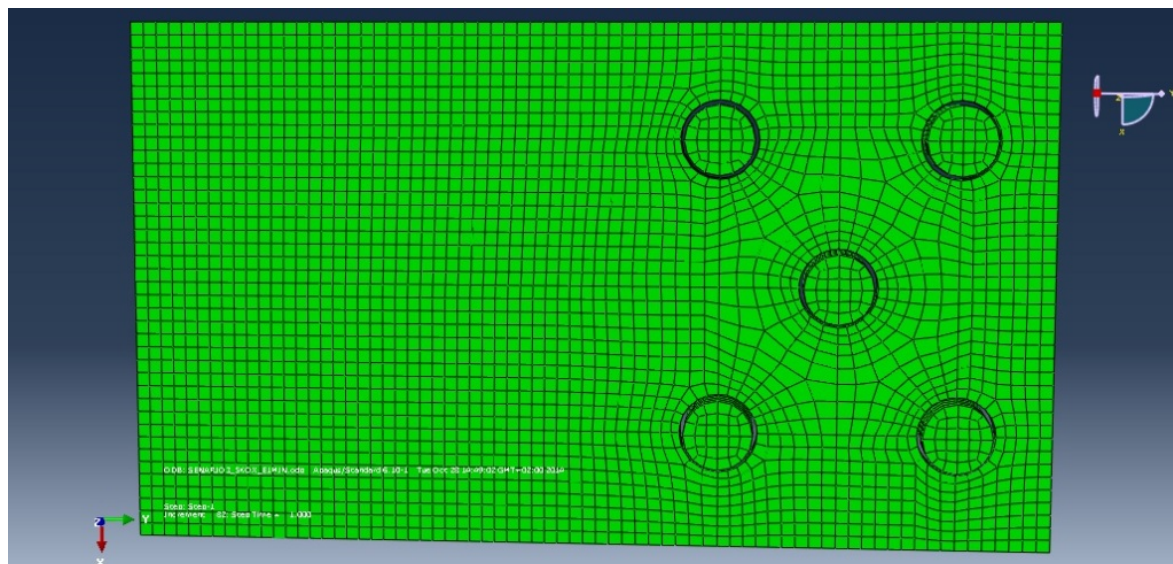
Ενώ για το έλασμα με 5 κοχλίες οι διαστάσεις είναι οι εξής :

- Δοκιμή 1 :  $e_1 = 1.20d_0$ ;  $p_1 = 4.16d_0$  ;  $e_2 = 2.13d_0$  ;  $p_2 = 1.20d_0$
- Δοκιμή 2 :  $e_1 = 1.20d_0$ ;  $p_1 = 3.69d_0$  ;  $e_2 = 1.80d_0$  ;  $p_2 = 1.54d_0$
- Δοκιμή 3 :  $e_1 = 1.20d_0$ ;  $p_1 = 3.02d_0$  ;  $e_2 = 1.47d_0$  ;  $p_2 = 1.87d_0$
- Δοκιμή 4 :  $e_1 = 1.20d_0$ ;  $p_1 = 2.20d_0$  ;  $e_2 = 1.20d_0$  ;  $p_2 = 2.13d_0$

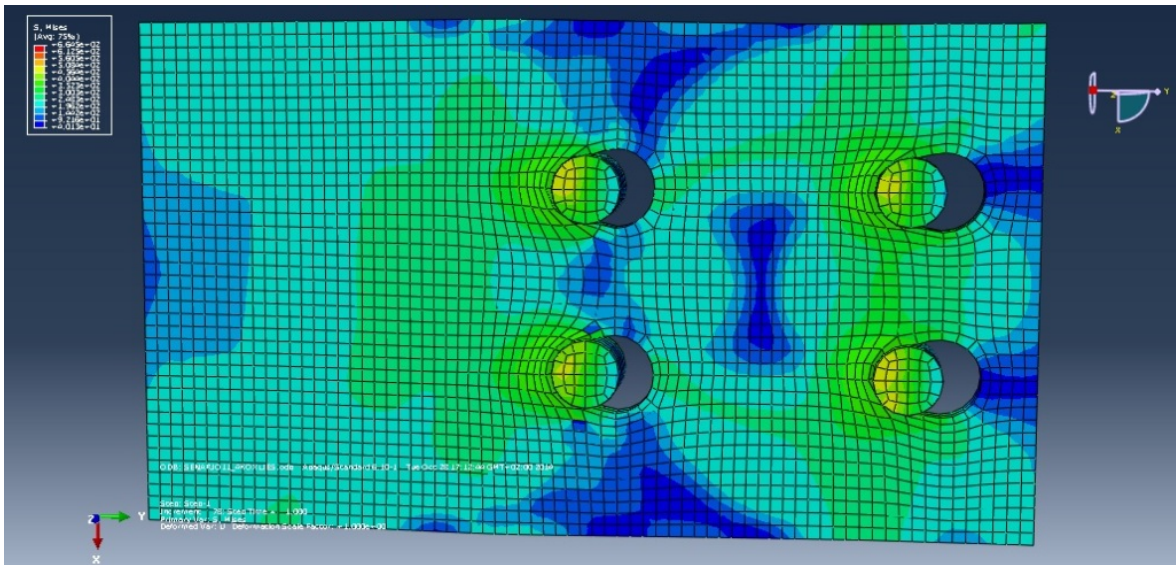
Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνονται στα σχήματα 4.20 - 4.24.



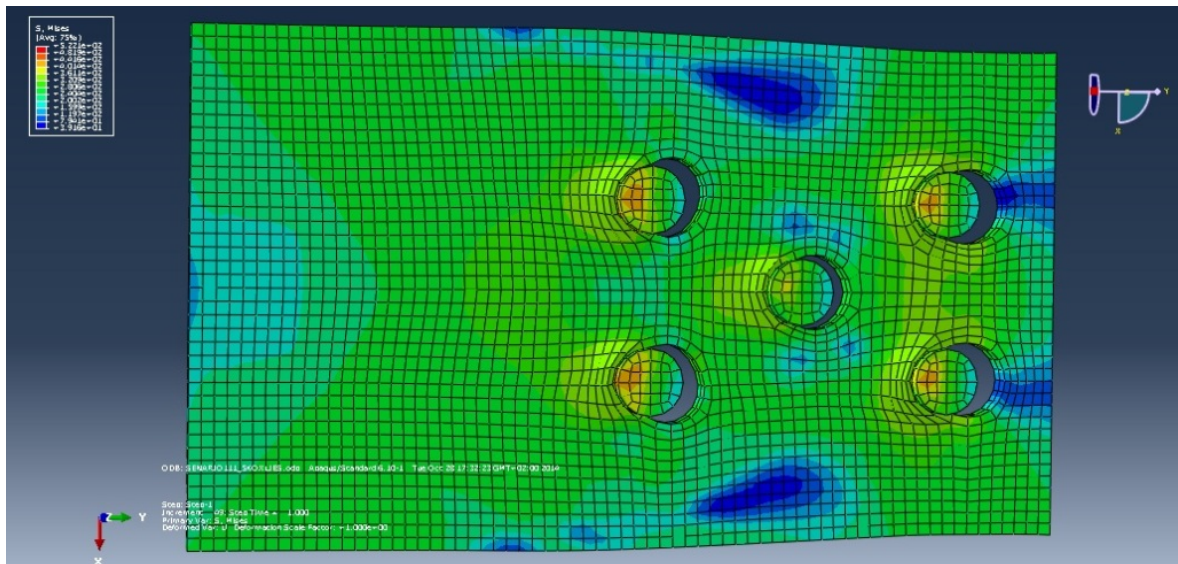
Σχήμα 4.20.a : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών πριν την αστοχία



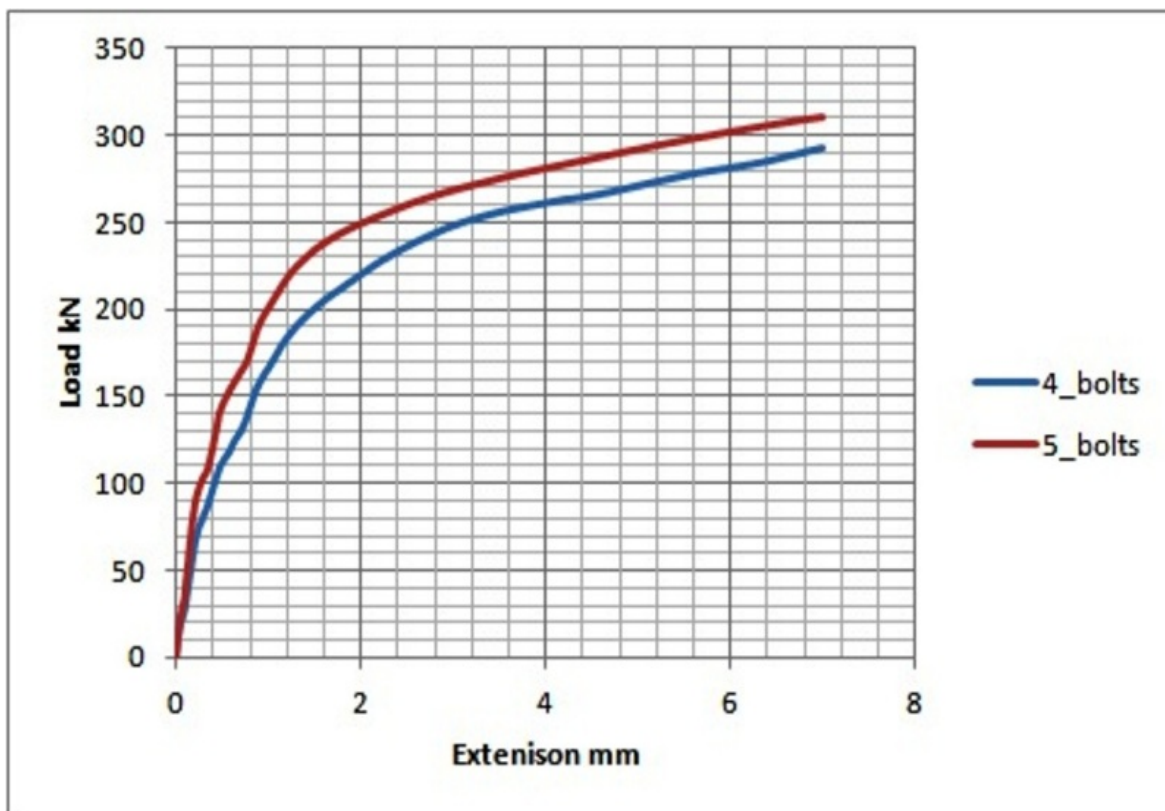
Σχήμα 4.20.b : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών πριν την αστοχία



Σχήμα 4.21.a : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 1<sup>η</sup>



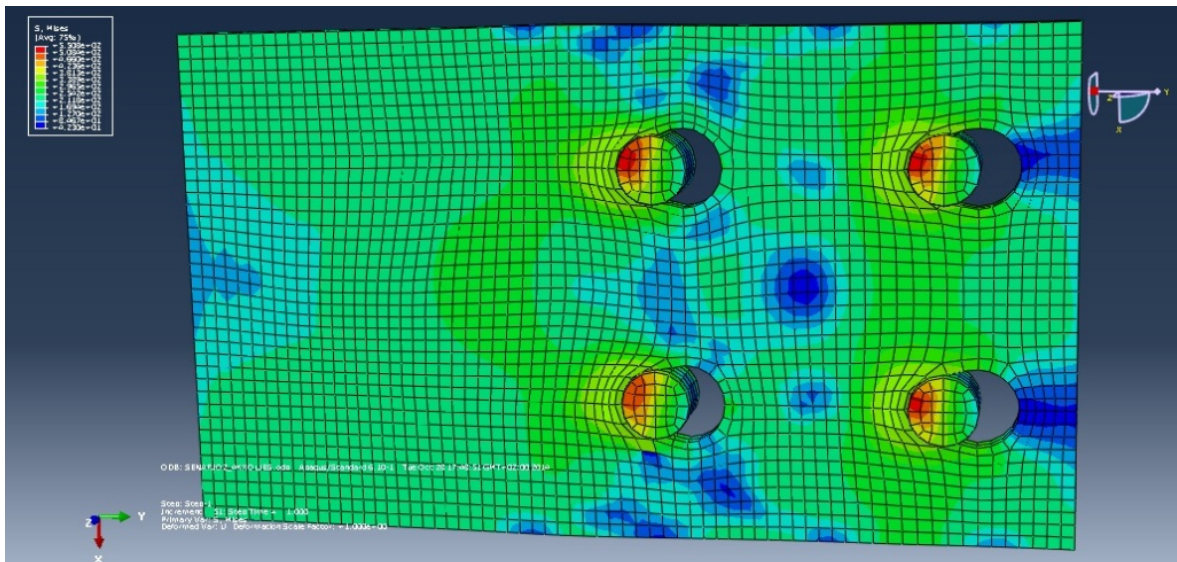
Σχήμα 4.21.b : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 1<sup>η</sup>



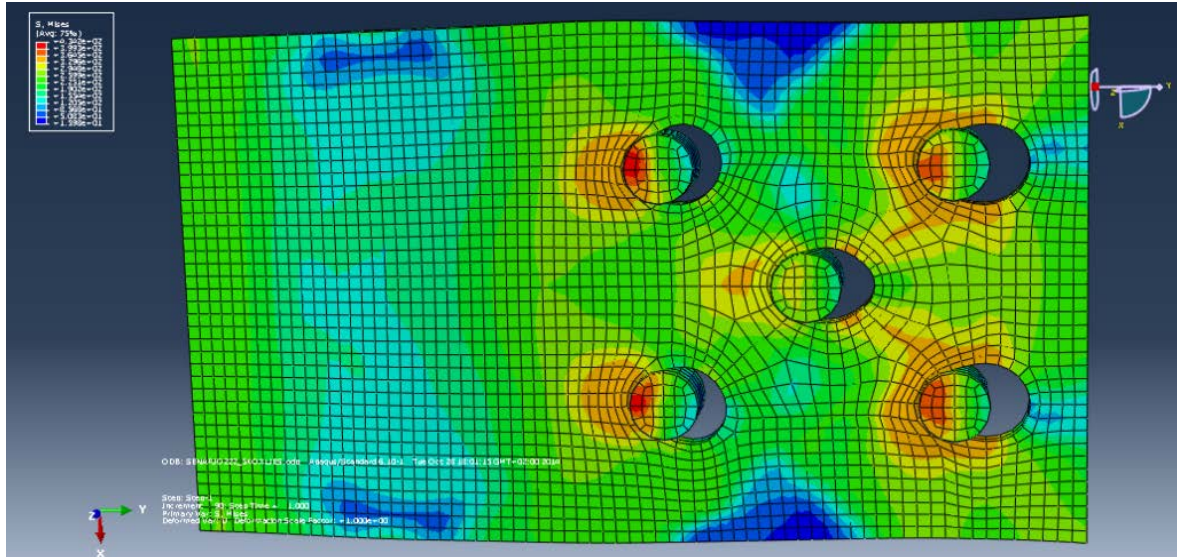
Σχήμα 4.21.c : Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για Δοκιμή 1

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι αντοχές έναντι σύνθλιψης άντυνας για τα ελάσματα των 4 και 5 κοχλιών που προέκυψαν από το διάγραμμα Δύναμης - Μετατόπισης για την Δοκιμή 1.

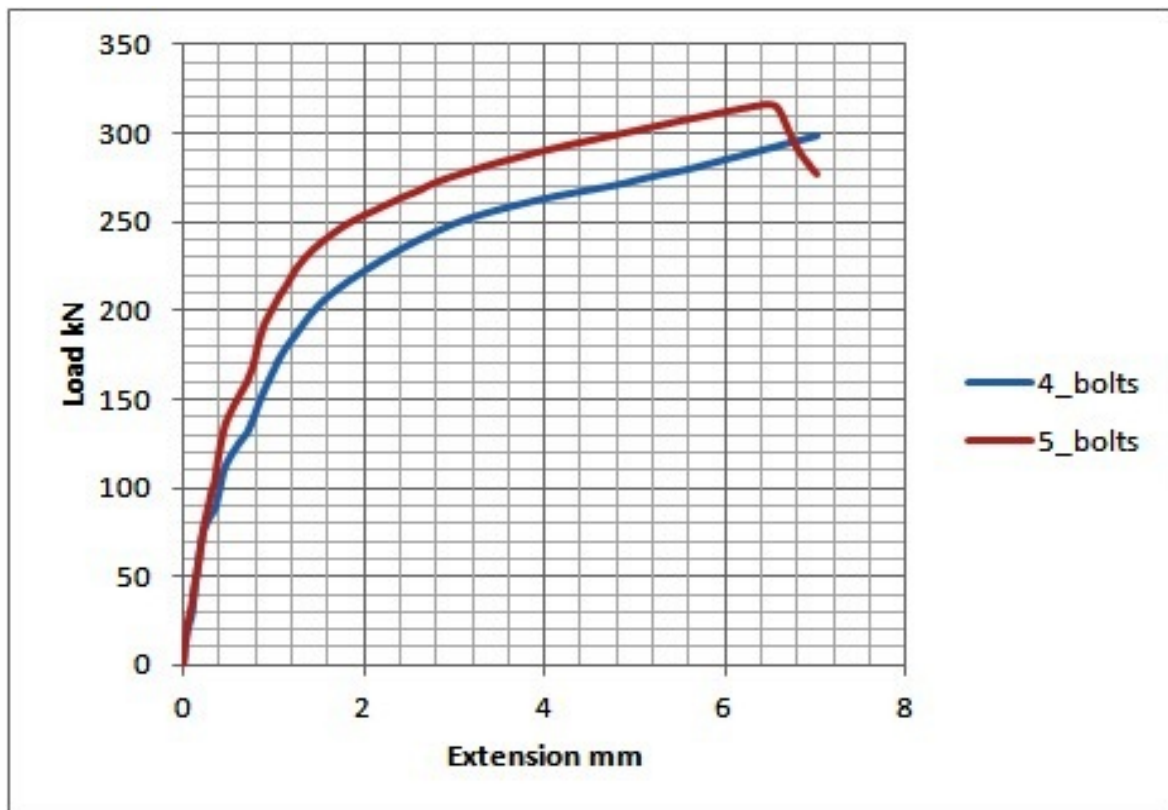
Πίνακας 4.6: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας- Δοκιμή 1 <sup>η</sup>		
Δοκιμή 4 <sup>η</sup>	4 Κοχλίες	5 Κοχλίες
$F_{b,Rd}$ (d/5)	253.00 kN	273.00 kN



Σχήμα 4.22.a : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 2<sup>η</sup>



Σχήμα 4.22.b : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 2<sup>η</sup>

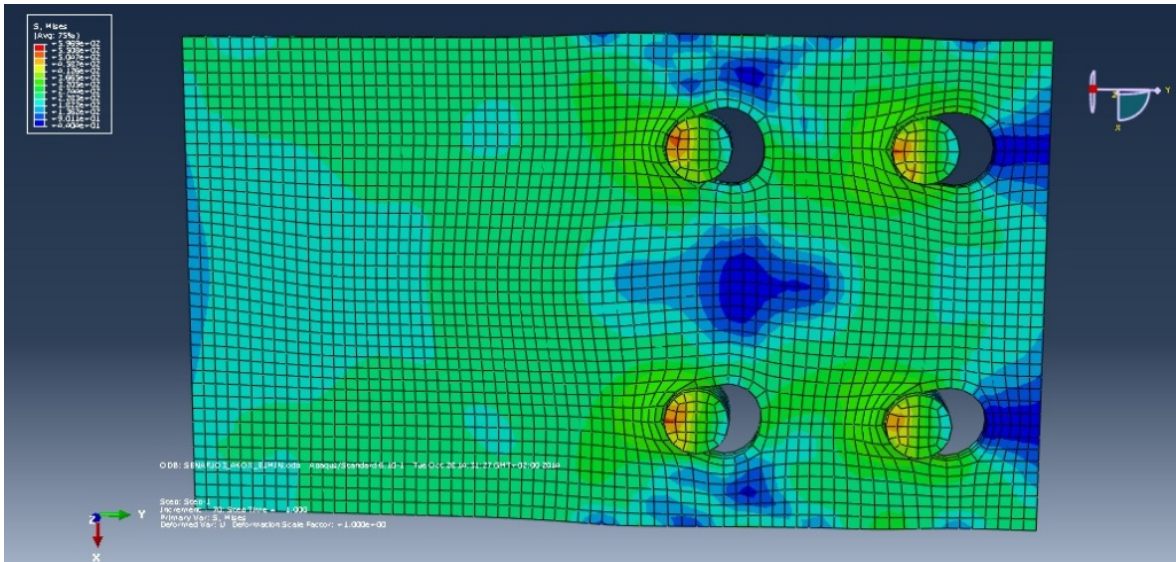


Σχήμα 4.22.c : Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για Δοκιμή 2

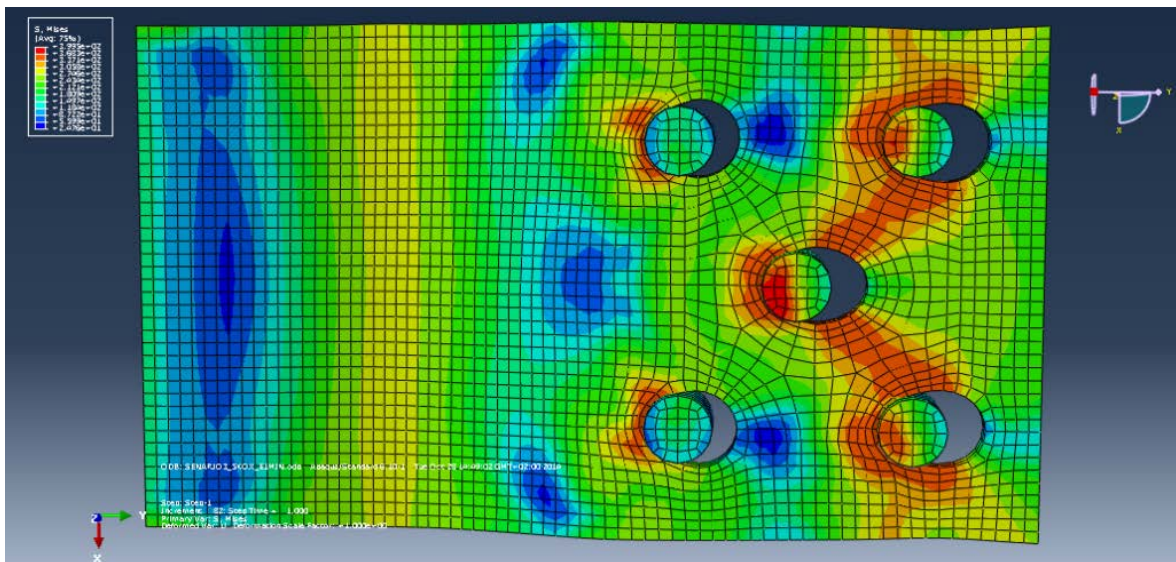
Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι αντοχές έναντι σύνθλιψης άντυνας για τα ελάσματα των 4 και 5 κοχλιών που προέκυψαν από το διάγραμμα Δύναμης - Μετατόπισης για την Δοκιμή 2.

Πίνακας 4.7: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας- Δοκιμή 2<sup>η</sup>

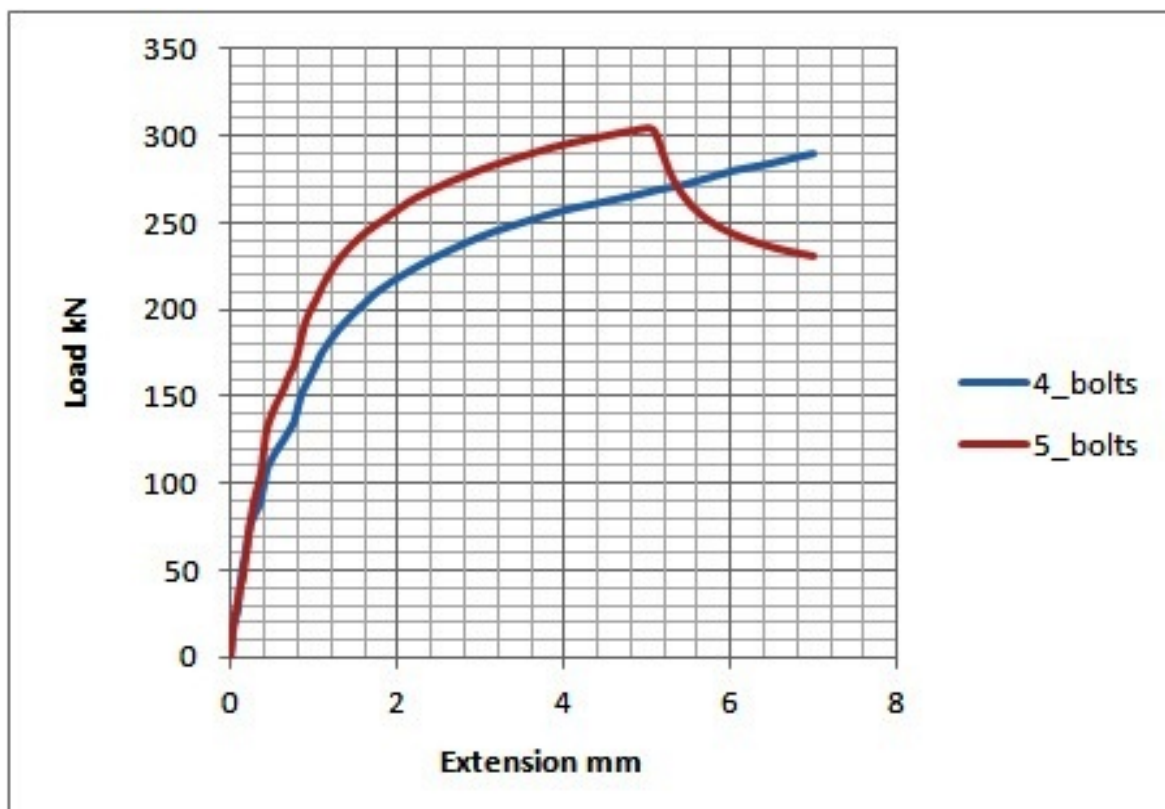
Δοκιμή 4 <sup>η</sup>	4 Κοχλίες	5 Κοχλίες
$F_{b,Rd}$ (d/5)	253.00 kN	280.00 kN



Σχήμα 4.23.a : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 3<sup>η</sup>



Σχήμα 4.23.b : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 3<sup>η</sup>



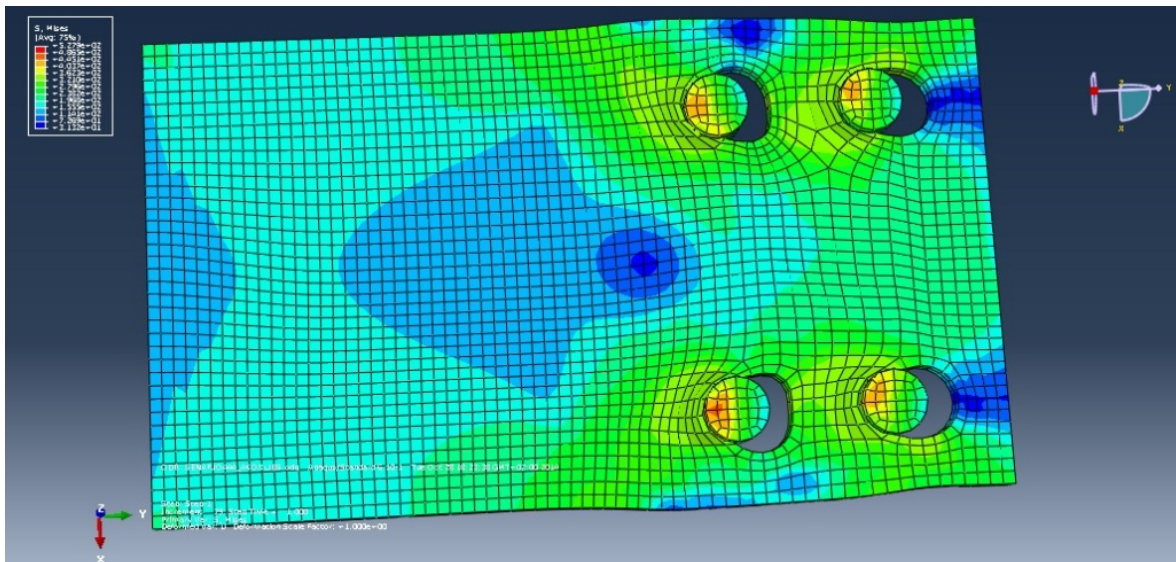
Σχήμα 4.23.c : Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για Δοκιμή 3

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι αντοχές έναντι σύνθλιψης άντυνας για τα ελάσματα των 4 και 5 κοχλιών που προέκυψαν από το διάγραμμα Δύναμης - Μετατόπισης για την Δοκιμή 3.

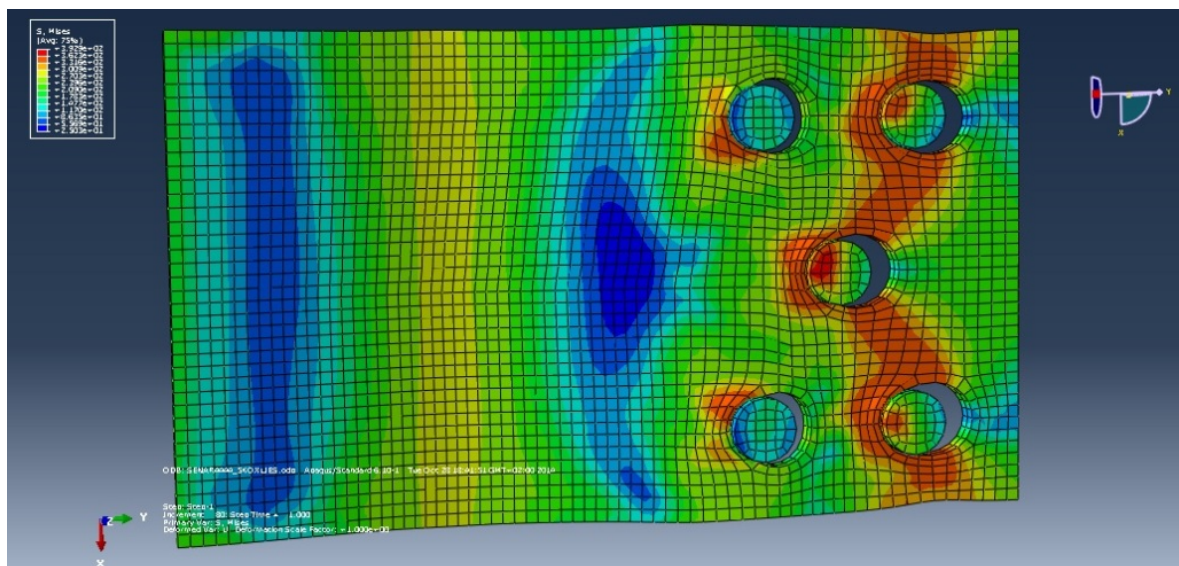
Πίνακας 4.8: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας- Δοκιμή 3<sup>η</sup>

Δοκιμή 4 <sup>η</sup>	4 Κοχλίες	5 Κοχλίες
$F_{b,Rd}$ (d/5)	245.00 kN	283.00 kN

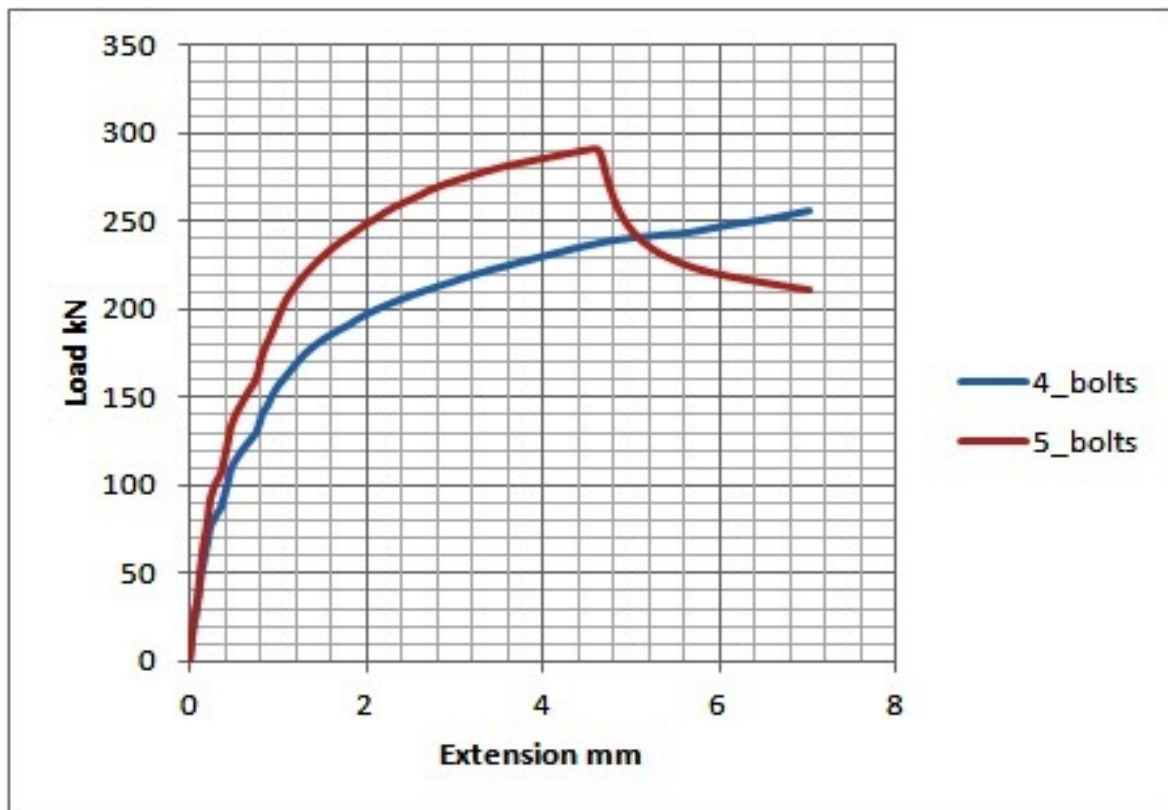




Σχήμα 4.24.a : Εικόνα ελάσματος 4 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 4<sup>η</sup>



Σχήμα 4.24.b : Εικόνα ελάσματος 5 κοχλιών κατά την αστοχία – Δοκιμή 4<sup>η</sup>



Σχήμα 4.24.c : Διάγραμμα Φορτίου - Μετατόπισης για Δοκιμή 4

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι αντοχές έναντι σύνθλιψης άντυνας για τα ελάσματα των 4 και 5 κοχλιών που προέκυψαν από το διάγραμμα Δύναμης - Μετατόπισης για την Δοκιμή 4.

Πίνακας 4.9: Τιμές αντοχής σε σύνθλιψη άντυνας- Δοκιμή 4<sup>η</sup>

Δοκιμή 4 <sup>η</sup>	4 Κοχλίες	5 Κοχλίες
$F_{b,Rd}$ (d/5)	220.00 kN	275.00 kN

#### 4.5.1 Σχολιασμός και σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με τον EC3

Όπως παρατηρήθηκε από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας στις συνδέσεις με 5 κοχλίες είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή των συνδέσεων με 4, για στοχευμένη μετακίνηση  $d/5$ . Στους πίνακες 4.10 - 4.11 φαίνονται οι ποσοστιαίες διαφορές ανάμεσα στις δύο αυτές συνδέσεις για όλους τους σχεδιασμούς.

Πίνακας 4.10 : Ποσοστιαία διαφορά αντοχών για  $d/5 - e_1 \max$

Σχεδιασμός	Ποσοστιαία Διαφορά (%)
1	+ 7
2	+ 11
3	+ 15
4	+ 25

Πίνακας 4.11 : Ποσοστιαία διαφορά αντοχών για  $d/5 - e_1 \min$

Σχεδιασμός	Ποσοστιαία Διαφορά (%)
1	+ 8
2	+ 11
3	+ 16
4	+ 25

Στη συνέχεια δίνονται οι πίνακες 4.12 - 4.13, στους οποίους γίνεται σύγκριση ανάμεσα στον EC3 και στο Abaqus σε επίπεδο ποσοστών για τις αντίστοιχες συνδέσεις και δοκιμές.

Πίνακας 4.12 : Ποσοστιαία διαφορά αντοχών για  $d/5 - e_1$  max

Σχεδιασμός	Abaqus	EC3
1	+ 7	*
2	+ 11	- 78
3	+ 15	- 53
4	+ 25	- 3.2

Πίνακας 4.13 : Ποσοστιαία διαφορά αντοχών για  $d/5 - e_1$  min

Σχεδιασμός	Abaqus	EC3
1	+ 8	*
2	+ 11	- 78
3	+ 16	- 53
4	+ 25	- 3.2

Όπως έχει παρατηρηθεί στο δεύτερο κεφάλαιο ο λόγος μείωσης της αντοχής σε σύνθλιψη άντυγας για συνδέσεις με κοχλίες σε λοξή διάταξη είναι ο συντελεστής  $k_1$  ο οποίος περιλαμβάνει τις αποστάσεις  $e_2$  και  $p_2$ . Στις συνδέσεις αυτές η απόσταση  $p_2$  λαμβάνεται η μισή, σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις, απ' ότι στις συνδέσεις με ένα λιγότερο κοχλία σε κανονική διάταξη.

Στην δοκιμή 1 παρατηρούμε ότι ο EC3 δεν δίνει τιμή. Αυτό συμβαίνει γιατί στην σύνδεση με τους πέντε κοχλίες σε λοξή διάταξη, μολονότι ικανοποιούνται οι περιορισμοί για την απόσταση  $L > 2,4d_0$  που μας δίνει το δικαίωμα η ελάχιστη τιμή του  $p_2$  να είναι ίση με  $1,2d_0$  από  $2,2 d_0$ , ο συντελεστής  $k_1$  παίρνει μηδενική τιμή [7]. Αντίθετα στο Abaqus η τιμή της αντοχής για την σύνδεση με 5 κοχλίες υπερτερεί κατά 7 % και 8% από αυτή με τους 4.

Στην δοκιμή 2, όπου το  $p_2$  αυξάνεται και το  $e_2$  μειώνεται παρατηρούμε πως οι αριθμητικές αναλύσεις δίνουν και πάλι θετική ποσοστιαία διαφορά. Αντίθετα ο κανονισμός δίνει αρνητική ποσοστιαία διαφορά της τάξης του 78%. Αυτό συμβαίνει γιατί το  $p_2$  παίρνει τιμή  $3.07d_0$  για τη σύνδεση των 4 κοχλιών και  $1.53d_0$  για τη σύνδεση με τους 5.

Τέλος, στις γεωμετρίες 3 και 4 όπου το  $p_2$  συνεχίζει να αυξάνεται και ταυτόχρονα το  $e_2$  συνεχίζει να μειώνεται, είναι εμφανές πως η ποσοστιαία διαφορά στις τιμές αντοχής με βάση τον κανονισμό για τις δύο συνδέσεις μειώνεται από 53% σε 3.2%. Βέβαια από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων η σύνδεση με τους 5 κοχλίες συνεχίζει να υπερτερεί έναντι της αντίστοιχης με τους 4 κοχλίες.

## 5 Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τις συνδέσεις με 5 κοχλίες συνδέσεων προκύπτει ότι η αντοχή έναντι σύνθλιψης άντυγας είναι πάντα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σύνδεση με τους τέσσερις κοχλίες, για όλες τις γεωμετρίες. Η ποσοστιαία διαφορά αντοχής κυμαίνεται από 7-25%.

Τα αποτελέσματα του EC3 δεν συμπίπτουν με αυτά των αριθμητικών αναλύσεων για κανένα σχεδιασμό. Ειδικότερα στην πρώτη γεωμετρία δεν δίνει τιμή μολονότι ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί, και αυτό γιατί ο συντελεστής  $k_1$  παίρνει μηδενική τιμή. Στον τελευταίο σχεδιασμό η διαφορά δείχνει να συρρικνώνεται στο -3,2%, μιας και η τιμή του  $p_2$  έγινε μέγιστη, για το έλασμα που χρησιμοποιήσαμε. Πάντως φαίνεται πως στο μόνο που υπάρχει συμφωνία ανάμεσα στον EC3 και στις αριθμητικές αναλύσεις είναι το γεγονός ότι από την γεωμετρία 1 έως την 4 συνεχώς αυξάνει η αντοχή της σύνδεσης με πέντε κοχλίες.

Συνοψίζοντας, φαίνεται ότι η τιμή αντοχής βάσει του κανονισμού για την σύνδεση με πέντε κοχλίες απομειώνεται λόγω του συντελεστή  $k_1$ . Αυτός αποτελείται από τρεις όρους, στους δύο εξ' αυτών εισάγεται η επιρροή των αποστάσεων που είναι κάθετες στην διεύθυνση του φορτίου, ενώ ο τρίτος είναι καθαρός αριθμός. Όπως παρατηρήθηκε, κρίσιμος για την τιμή του συντελεστή  $k_1$  ήταν ο όρος που εισήγαγε την απόσταση  $p_2$ , η οποία στις συνδέσεις με πέντε κοχλίες λαμβάνεται ως η μισή των αντιστοίχων με τέσσερις. Κάτι τέτοιο δεν προέκυψε από τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τις αντίστοιχες συνδέσεις και δοκιμές. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι οι ποσοστιαίες διαφορές τόσο για απόσταση  $e_{1\min}$  όσο και για  $e_{1\max}$  είναι ουσιαστικά ίδιες και για τις δύο μεθόδους.

Καταλήγοντας, αυτή η παρατήρηση αποτελεί μία ένδειξη ότι στον EN-1993-1-8 ο συντελεστής  $k_1$  απομειώνει, σε τέτοιο βαθμό, την αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας για κοχλιωτές συνδέσεις λοξής διάταξης που σε κάποιες περιπτώσεις δεν δίνει καν τιμή όπως στην δοκιμή 1.

## 6 Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Γ. (2006). «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα - Με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
2. Βάγιας Ι. (2003) «Σιδηρές Κατασκευές-Ανάλυση και Διαστασιολόγηση». Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα.
3. Παπαδρακάκης Μ. (2001) «Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα.
4. Primož Može , Darko Beg. (2013). "A complete study of bearing stress in single bolt connections" Journal of Constructional Steel Research, 95(14), 126-140.
5. Γαιντές Χ. (2012) « ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΟΡΟΦΩΝ ΥΠΟΣΤΕΓΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΕΚ3 - ΜΕΡΟΣ 4 - ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ » Ανάκτηση 30/06/2012 από [http://www.spolmik.org/downloads/News/04\\_pafos\\_presentation\\_syndeseis.pdf](http://www.spolmik.org/downloads/News/04_pafos_presentation_syndeseis.pdf)
6. Abaqus Tutorial, Ανάκτηση 7/10/2011 από <http://www.engin.brown.edu/courses/en175/abaqustut/abaqustut.ht>
7. EN 1993-1-8 : Eurocode 3. " Design of steel structures - Part 1-8 : Design of joints "



























## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	2
Abstract.....	3
Ευχαριστίες.....	4
1 Εισαγωγή.....	5
1.1 Συνδέσεις .....	5
2 Κανονιστικές διατάξεις.....	7
2.1 Αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας.....	7
2.2 Επιτρεπόμενες αποστάσεις μεταξύ των κοχλιών και από τα άκρα.....	8
3 Πειράματα.....	19
3.1 Εισαγωγή.....	19
3.2 Έλεγχος ποιότητας υλικού.....	19
3.3 Επίλυση σύμφωνα με τον EN-1993-1-8.....	19
3.4 Επιλογή γεωμετρικών χαρακτηριστικών και στήσιμο πειράματος με ένα κοχλία.....	20
3.5 Συμπεράσματα.....	28
4 Αριθμητικές αναλύσεις κοχλιωτών συνδέσεων.....	32
4.1 Εισαγωγή.....	32
4.2 Ανάλυση φορέων με πεπερασμένα στοιχεία - Γενικά.....	32
4.3 Έλεγχος ποιότητας υλικού.....	33
4.3.1 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.....	33
4.3.2 Σχολιασμός αποτελεσμάτων.....	33
4.4 Προσομοίωση σύνδεσης με ένα κοχλία.....	38
4.4.1 Περιγραφή προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων.....	38
4.4.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων - EC3 - πειραμάτων.....	42
4.5 Προσομοίωση συνδέσεων με 4 & 5 κοχλίες.....	45
4.5.1 Σχολιασμός και σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικών αναλύσεων με τον EC3.....	55
5 Συμπεράσματα.....	57