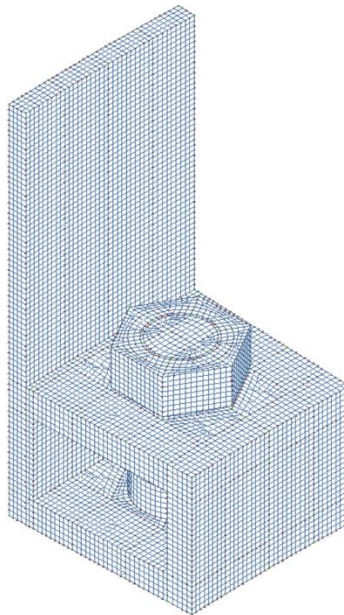




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ



Διπλωματική Εργασία  
Νικόλαος Μιχόπουλος

ΕΜΚ ΔΕ 2022 26

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ  
Συνεπιβλέπων: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας ΕΜΠ

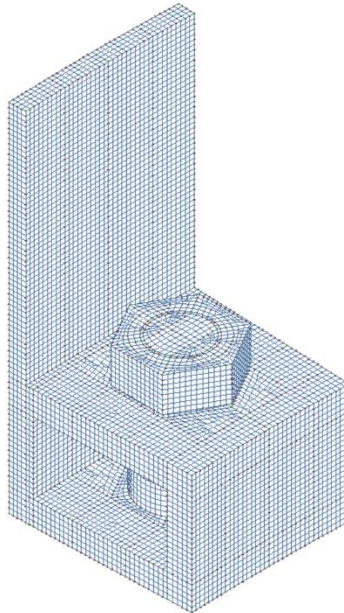
Αθήνα, Οκτώβριος 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

# ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ



Διπλωματική Εργασία  
Νικόλαος Μιχόπουλος

ΕΜΚ ΔΕ 2022 26

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ  
Συνεπιβλέπων: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2022





Copyright © Νικόλαος Μιχόπουλος, 2022  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια του συγγραφέα. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Nikolaos Michopoulos, 2022  
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Νικόλαος Μιχόπουλος (2022)

Αριθμητική προσομοίωση δακτυλιοειδών συνδέσεων πυλώνων ανεμογεννητριών με χρήση κοίλων διατομών

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2022 26

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Nikolaos Michopoulos (2022)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2022 26

Numerical simulation of ring flange connections in wind turbine towers using hollow sections

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

## Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ για την καθοδήγηση και τη συνεχή του στήριξη.

Θα ήθελα, επιπλέον, να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα Κωνσταντίνα Κουλάτσου για τη σημαντική συνεισφορά της.



*Στην οικογένεια μου,*





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2022 26

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΩΝ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΚΟΙΛΩΝ ΔΙΑΤΟΜΩΝ**

Νικόλαος Μιχόπουλος

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπων: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας ΕΜΠ

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στις μέρες μας, προκειμένου να αξιοποιηθεί περισσότερο αιολικό δυναμικό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες δέχονται περισσότερα φορτία καθώς γίνονται μεγαλύτερες. Η κατάσταση αυτή τείνει στη χρήση μεγαλύτερων συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας με αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής των συνδέσεων να αυξάνεται σημαντικά. Το κόστος παραγωγής των συνδέσεων αυτών αυξάνεται λόγω της περισσότερης χρήσης υλικού χάλυβα, αλλά κυρίως λόγω της δυσκολίας παραγωγής τους σύμφωνα με τις σημερινές δυνατότητες των βιομηχανιών παραγωγής χάλυβα. Επιδιώκοντας τη μείωση του κόστους, μελετάται η συμπεριφορά κοίλης ορθογωνικής διατομής ως σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η σύνδεση στο 85% του ύψους του πυλώνα μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων και ισχύος 1.5MW. Αρχικά, χρειάζεται να μελετηθεί η συμβατική περίπτωση βραχέος L διατομής PL 60x130 μέσω αριθμητικών αναλύσεων και πειραμάτων ώστε να εκτιμηθεί η αντοχή της σύνδεσης και να κατανοηθεί η απόκρισή της, όπου παράλληλα, στόχος είναι και η βέλτιστη προσομοίωσή της. Έπειτα, διερευνάται η συμπεριφορά κοίλης ορθογωνικής διατομής RHS 80x120x8 χωρίς και με ενίσχυση 4mm περί τον κοχλία. Μέσω παραμετρικών αναλύσεων, εξετάζονται η επιρροή του πάχους της διατομής χωρίς και με παρουσία της ενίσχυσης, καθώς και η επιρροή της ενίσχυσης και του πάχους της. Επιπλέον, εξετάζονται η επιρροή του ύψους, του πλάτους, της ποιότητας του χάλυβα, της βέλτιστης τοποθέτησης του κοχλία, της δύναμης προέντασης, της τοποθέτησης οριζόντιας ενίσχυσης στο μέσον της διατομής και η επιρροή της διαμέτρου του κοχλία. Προσομοιώνεται το τμήμα σύνδεσης βραχύ L στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA με χρήση 1ης τάξεως στοιχεία. Η χρήση μη γραμμικών υλικών για τον κοχλία και τη σύνδεση, καθώς και η προσομοίωση της επαφής μεταξύ των επιφανειών, καθιστούν το πρόβλημα μη γραμμικό απαιτώντας αντίστοιχες μη γραμμικές μεθόδους επίλυσης. Συμπερασματικά, προκύπτει πως οι κοίλες ορθογωνικές διατομές, για αυξημένα μηχανικά χαρακτηριστικά, πλησιάζουν ικανοποιητικά τη συμπεριφορά του συμβατικού βραχέος L. Ειδικότερα, με την παρουσία της ενίσχυσης περί τον κοχλία, αυξάνεται ακόμη περισσότερο η δυσκαμψία και η αντοχή βελτιώνοντας, παράλληλα, την απόκρισή της.







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

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2022 26

**NUMERICAL SIMULATION OF RING FLANGE CONNECTIONS IN WIND  
TURBINE TOWERS USING HOLLOW SECTIONS**

Nikolaos Michopoulos

Supervisor: Charis Gantes, Professor NTUA

Co-supervisor: Konstantina Koulatsou, PhD Candidate NTUA

**ABSTRACT**

Nowadays, in order to harness more wind potential for electricity generation, wind turbines are receiving more loads as they get larger. This situation tends to lead to the use of larger connections with the result that the cost of producing these connections is growing significantly. The production cost of these connections is increasing due to the increased use of steel material, but mainly to the difficulty of producing them according to the current capabilities of the steel production industries. In pursuit of cost reduction, the behavior of a hollow rectangular section is studied as a connection. Specifically, the connection at 85% of the pylon height of a typical three-blade horizontal axis wind turbine with a power of 1.5MW is considered. Initially, the conventional case of the L-stub PL 60x130 section is studied in order to estimate its strength and to understand its response through numerical analyses and experiments, where the aim is the optimal simulation of the structure. Also, the behavior of a hollow rectangular RHS 80x120x8 section with and without 4mm reinforcement around the bolt is investigated. Furthermore, the influence of the section thickness with and without the presence of the reinforcement around the bolt, as well as the influence of the reinforcement and its thickness are examined through numerical analyses. The influence of height, width, steel quality, optimum bolt placement, prestressing force, the placement of horizontal reinforcement in the middle of the section and the diameter of the bolt are also considered. The L-stub connection part is simulated in the ADINA finite element program using 1st order elements. The use of non-linear materials for the bolt and the section, as well as the simulation of the contact between the surfaces, create a non-linear problem, requiring its corresponding solution methods. In summary, it is shown that the hollow rectangular sections for increased mechanical characteristics sufficiently approximate the behavior of the conventional L-stub connection. In addition to the presence of the reinforcement around the bolt, the stiffness and strength are further increased while improving its response.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	17
1.1	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ .....	17
1.2	ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....	19
1.3	ΚΥΡΙΑ ΜΕΡΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....	22
2	ΠΥΛΩΝΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ .....	25
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	25
2.2	ΤΥΠΟΙ ΠΥΛΩΝΑ .....	26
2.3	ΑΥΤΟΝΟΜΟΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΙ ΣΩΛΗΝΩΤΟΙ ΠΥΛΩΝΕΣ .....	29
2.4	ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	30
2.5	ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ .....	32
2.6	ΑΝΕΓΕΡΣΗ .....	34
2.7	ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ .....	35
2.8	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΜΕ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗ ΠΕΛΜΑΤΑ .....	36
3	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	37
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	37
3.2	ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	37
3.3	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	40
3.4	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	43
3.5	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....	47
4	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	57
4.1	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	57
4.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	57
4.3	ΕΠΙΡΡΟΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	79
4.4	ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΝΔΟΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΕΠΑΦΗΣ .....	80
4.5	ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΟΧΛΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	81
4.6	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΚΟΧΛΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L ...	84
4.7	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΙΩΝ ΕΠΑΦΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....	88
5	ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	91
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	91
5.2	ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	92
5.3	ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΣΩΛΗΝΑ ΠΕΡΙ ΤΟΝ ΚΟΧΛΙΑ .....	93
5.4	ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΑΙ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ .....	93

5.5	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΜΕ ΚΟΙΛΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ .....	94
5.6	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ.....	96
5.7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ .....	100
6	ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	105
6.1	ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	105
6.2	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	105
6.3	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΧΟΥΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ.....	142
6.4	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΧΟΥΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ.....	144
6.5	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΧΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	149
6.6	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΒΡΑΧΕΟΣ L.	155
6.7	ΕΠΙΡΡΟΗ ΥΨΟΥΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	157
6.8	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	160
6.9	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΥΒΑ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	163
6.10	ΕΠΙΡΡΟΗ ΘΕΣΗΣ ΚΟΧΛΙΑ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	168
6.11	ΕΠΙΡΡΟΗ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	170
6.12	ΕΠΙΡΡΟΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ.....	174
6.13	ΕΠΙΡΡΟΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΟΧΛΙΑ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ .....	178
7	ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	185
7.1	ΣΥΝΟΨΗ.....	185
7.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	186
7.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ .....	189
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	191

# 1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## 1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η ενέργεια, προερχόμενη από την εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, ονομάζεται αιολική ενέργεια. Είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, αφού είναι ανεξάντλητη όσο υπάρχει ο άνεμος. Με τη χρήση της παράγονται, συγκριτικά, λιγότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) συμβάλλοντας στην απομείωση του ανθρακικού αποτυπώματος.

Η εκμετάλλευσή της χρονολογείται χιλιάδες χρόνια πριν. Αρχικά, μία πρώιμη μορφή εκμετάλλευσης ήταν στα ιστία των πλοίων. Μετά από αρκετά χρόνια, η εκμετάλλευσή της γινόταν μέσω ανεμόμυλων για το άλεσμα των σιτηρών και την άντληση του νερού όπου συνέβαλλε σημαντικά στην αγροτική οικονομία. Η εξέλιξη των ανεμόμυλων είναι οι σημερινές ανεμογεννήτριες, των οποίων ο ρόλος τους είναι να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της μετατροπής της κινητικής ενέργειας του ανέμου. Η αναγκαιότητα της μετάβασης αυτής προήλθε από την ανησυχία της εξάντλησης των ορυκτών πόρων και της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος, μέσω της καύσης τους, λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η δημιουργία του ανέμου οφείλεται στην ανομοιογενή θέρμανση της ατμόσφαιρας. Η ύπαρξη της διαφοράς αυτής έγκειται στην ηλιακή ακτινοβολία. Η ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα του χρόνου προσβάλλει με διαφορετική ένταση κάθε περιοχή. Συγκεκριμένα, οι άνεμοι προέρχονται από τις μεταβολές και τις διαφορετικές, από τόπο σε τόπο, τιμές της ατμοσφαιρικής πίεσης. Οι διαφορετικές αυτές τιμές της πίεσης οφείλονται στη διαφορετική θέρμανση (απορρόφηση ενέργειας) της ατμόσφαιρας κάθε τόπου από τον ήλιο. Η θέρμανση είναι πιο έντονη σε μάζες γης κοντά στον ισημερινό με τη μεγαλύτερη θέρμανση να συμβαίνει κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ο θερμός αέρας υψώνεται, αναμιγνύεται με την ατμόσφαιρα, για να βυθιστεί και πάλι στην επιφάνεια σε περιοχές με ψυχρότερο κλίμα. Η προκύπτουσα, μεγάλης κλίμακας, κίνησης του αέρα επηρεάζεται έντονα από τις δυνάμεις Coriolis λόγω περιστροφής της Γης. Η ημερήσια περιστροφή της Γης προκαλεί την εκτροπή των ανέμων και περιπλέκει την κυκλοφορία της ατμόσφαιρας.

Κατά αυτή τη διαδικασία, ο άνεμος μπορεί να ποικίλει τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Όσον αφορά τη χωρική ποικιλότητα, άνεμοι και τοπικά φαινόμενα μπορεί να προκληθούν λόγω της ανομοιομορφίας του εδάφους. Η ανομοιομορφία αυτή, προκύπτει, για παράδειγμα, με εναλλαγές βουνών, βλάστησης και θάλασσας, οι οποίες οδηγούν αντίστοιχα στην απορρόφηση ή αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας. Η στεριά

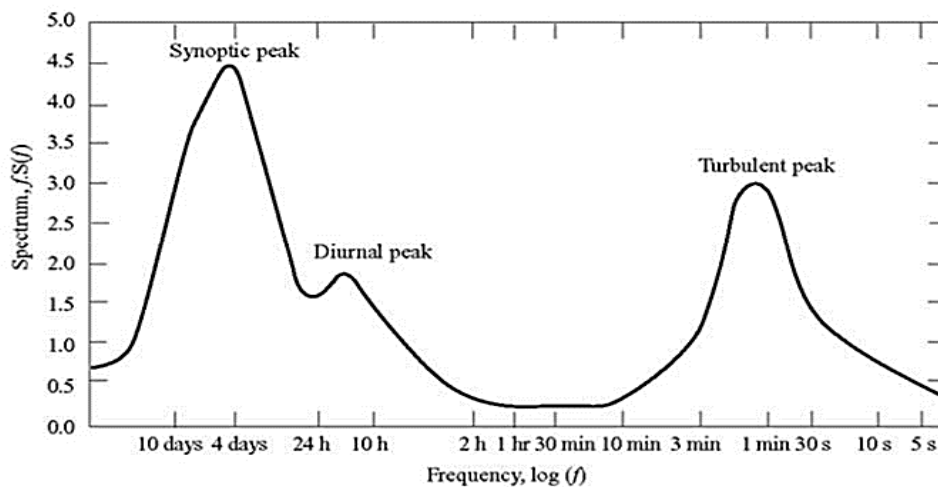
παρουσιάζει χαμηλή θερμοχωρητικότητα σε σχέση με τη θάλασσα και έχει ως αποτέλεσμα να ψύχεται και να θερμαίνεται πιο γρήγορα. Οι ψυχρότερες αέριες μάζες μετακινούνται από τη θάλασσα προς τη στεριά για να αντικαταστήσουν τις θερμές μάζες, αφού η στεριά την ημέρα είναι θερμότερη. Ενώ, το αντίθετο συμβαίνει κατά τη διάρκεια της νύχτας, καθώς η θάλασσα είναι θερμότερη από την ξηρά.

Όσον αφορά τη χρονική ποικιλότητα σε συγκεκριμένο τόπο, ο άνεμος μπορεί να ποικίλει από τον έναν χρόνο στον άλλο ή, σε ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα, να μεταβάλλεται ανάμεσα σε δεκαετίες ή περισσότερο. Αυτές οι μακροπρόθεσμες ποικιλότητες δεν είναι πλήρως κατανοητές και μπορεί να καταστήσουν δύσκολη την ακριβή πρόβλεψη της οικονομικής βιωσιμότητας μιας συγκεκριμένης μελέτης, όπως για παράδειγμα, ενός αιολικού πάρκου. Σε χρονική κλίμακα μικρότερη του ενός έτους, εποχιακές διακυμάνσεις είναι πολύ περισσότερο προβλέψιμες. Αν και υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις στις συντομότερες χρονικές κλίμακες, οι οποίες αν και είναι περισσότερο κατανοητές, συχνά, δεν είναι πολύ προβλέψιμες για διάστημα περισσότερο από μερικές ημέρες. Ανάλογα με την περιοχή μπορεί να υπάρχουν σημαντικές μεταβολές κατά τη διάρκεια της ημέρας (ημερήσιες μεταβολές), οι οποίες επίσης είναι συνήθως αρκετά προβλέψιμες.

Σε αυτές τις χρονικές κλίμακες, η προβλεψιμότητα του ανέμου είναι σημαντική για πιο αξιόπιστο και βέλτιστο σχεδιασμό στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ακόμα μικρότερες κλίμακες χρόνου, μερικών λεπτών, δευτερολέπτων ή λιγότερο, οι μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, γνωστές και ως τύρβη, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία μιας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας, καθώς και την ποιότητα της ενέργειας, η οποία μεταφέρεται στο δίκτυο.

Ο Van der Hoven (1957) κατασκεύασε ένα φάσμα ταχυτήτων ανέμου, στο οποίο αποτυπώνεται η διακύμανση του ανέμου συναρτήσει της χρονικής μεταβλητότητάς του (σχήμα 1-1).

Λόγω της μεταβλητότητας της αιολικής ενέργειας, γίνεται αντιληπτό ότι η κατανόηση των χαρακτηριστικών ενός αιολικού πάρκου είναι κρίσιμη για την αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Για αυτό, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου απαιτούν την πραγματοποίηση πολλών διαφορετικών μελετών.



Σχήμα 1-1: Φάσμα ταχυτήτων ανέμου από Van der Hoven (1957), Brookhaven, Νέα Υόρκη [2]

## 1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

Ανεμογεννήτριες καλούνται οι μηχανές με περιστρεφόμενα πτερύγια, οι οποίες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από το ύψος της ανεμογεννήτριας και το μήκος των πτερυγίων. Με άλλα λόγια, η απόδοσή της είναι συνάρτηση του μεγέθους του δρομέα και της ταχύτητας του ανέμου. Στις μέρες μας, οι κανονισμοί και οι απαιτήσεις για αύξηση της ασφάλειας, της αποδοτικότητας μέσω του αεροδυναμικού σχεδιασμού, της αισθητικής με ταυτόχρονη μείωση του κόστους και του θορύβου είναι ζητήματα βελτιστοποίησης, στα οποία υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες για τον τελικό σχεδιασμό.

Οι ανεμογεννήτριες μπορεί να ταξινομηθούν σε δύο κύριες κατηγορίες του οριζώντιου άξονα και του κατακόρυφου άξονα εφοδιασμένες με ένα, δύο, τρία ή περισσότερα πτερύγια, λόγω διαφορετικής διάταξης και λειτουργίας των στροβίλων. Οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες ανεμογεννήτριες είναι τύπου οριζώντιου άξονα με προσήνεμους δρομείς, με δύο ή τρία πτερύγια και με σταθερή ταχύτητα δρομέα. Βέβαια, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες λειτουργούν σε διάφορες ταχύτητες, όπου χρησιμοποιούν μεταβαλλόμενο φάσμα ταχυτήτων λειτουργίας, βελτιώνοντας την αεροδυναμική απόδοση και παράγοντας περισσότερη ενέργεια.

Μια άλλη ταξινόμηση ανεμογεννητριών είναι η εγκατάστασή τους, είτε σε χερσαία, είτε σε παράκτια περιοχή. Συγκριτικά, οι ανεμογεννήτριες εγκατεστημένες σε παράκτια περιοχή έχουν καλύτερο δυναμικό για την παραγωγή ενέργειας. Ειδικότερα, σε παράκτια περιοχή, η ανάπτυξη του ανέμου γίνεται μέγιστη δυνατή, αφού δεν υπάρχουν φυσικά εμπόδια, που περιορίζουν την ανάπτυξη της ταχύτητας των ανέμων. Επιδιώκεται, επομένως, οι ανεμογεννήτριες να είναι υψηλότερες με μεγάλο μήκος πτερύγια συμβάλλοντας στην καλύτερη εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού.

Εντούτοις, προσπαθώντας να περιοριστεί το φαινόμενο των μεγάλων φορτίων ανέμου, καθώς και να αυξηθεί η αποδοτικότητα των ανεμογεννητριών, χρειάζεται να συμπεριληφθεί και ο αεροδυναμικός σχεδιασμός των πτερυγίων. Συνήθως, επιλέγονται τρία πτερύγια μεγάλου μήκους με αποτέλεσμα να είναι πιο λυγηρά, σε συνδυασμό με την αύξηση του ύψους των πυλώνων για την καλύτερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Τα πτερύγια είναι σε μεγάλο βαθμό αυτόνομα στοιχεία όσον αφορά τον σχεδιασμό τους, τη λειτουργία τους και τις χρησιμοποιούμενες τεχνικές κατασκευής.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (σχήμα 1-2), έχουν τον άξονα περιστροφής τους κάθετα στο έδαφος με τον μηχανολογικό εξοπλισμό να βρίσκεται στη βάση τους. Τα κύρια πλεονεκτήματα του, είναι πως ο σχεδιασμός του επιτρέπει να δέχεται άνεμο από οποιαδήποτε κατεύθυνση, η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων τοποθετούνται στο έδαφος και έτσι είναι πιο εύκολα προσβάσιμα χωρίς να απαιτείται μηχανισμός περιστροφής. Τα μειονεκτήματά του, είναι ότι η αποδοτικότητα δεν είναι ικανοποιητική, σε σχέση με αντίστοιχη ανεμογεννήτρια οριζώντιου άξονα, εξαιτίας της θέσης του δρομέα κοντά στο έδαφος, όπου δεν υπάρχει πολύς άνεμος, τη δυσκολία εκκίνησης, που απαιτεί ειδικό εξοπλισμό για να ξεκινήσει η περιστροφή, καθώς και το φαινόμενο των οπισθελκουσών δυνάμεων από την περιστροφή των πτερυγίων της.



(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 1-2: Ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα, (α) [1], (β) [1],

(γ) (πηγή: <https://www.anthropocenemagazine.org/2017/03/new-model-could-help-make-vertical-wind-turbine-farms-practical/>)

Οι ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα (σχήμα 1-3), αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τύπο ανεμογεννητριών σε χρήση στις μέρες μας, με όλες τις εμπορικές ανεμογεννήτριες που συνδέονται με το δίκτυο να είναι σχεδιασμένες με δρομείς τύπου έλικα. Ο έλικας τοποθετείται σε έναν οριζόντιο άξονα στην κορυφή του κατακόρυφου πύργου χρησιμοποιώντας σύστημα προσανατολισμού για τη μέγιστη απόδοση, όταν προσπίπτει ο άνεμος.



Σχήμα 1-3: Ανεμογεννήτριες οριζώντιου άξονα [1]



Μια διάκριση μεταξύ των ανεμογεννητριών οριζώντιου άξονα είναι πως οι δρομείς τους μπορεί να είναι είτε προσήνεμοι είτε υπήνεμοι. Οι υπήνεμοι δρομείς τοποθετούνται στην υπήνεμη πλευρά του πύργου και χρειάζονται μηχανισμό εκτροπής, ώστε να διατηρήσουν τον άξονα του δρομέα ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση του ανέμου. Ένα κύριο μειονέκτημα είναι η διακύμανση του ανέμου, ιδιαίτερα όταν προκαλείται τύρβη, η οποία οδηγεί σε αυξημένα φορτία κόπωσης. Οι προσήνεμοι δρομείς αντιμετωπίζουν τον άνεμο μπροστά από έναν κατακόρυφο πύργο, εξασφαλίζοντας καλύτερης ποιότητας άνεμο με λιγότερη ένταση τύρβης. Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης, προτείνεται ο άξονας του δρομέα να μπορεί να περιστρέφεται περί τον διαμήκη άξονα, ώστε να διατηρείται παράλληλα στην κατεύθυνση του ανέμου.

Όσον αφορά τον αριθμό των πτερυγίων στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες, το πιο κοινό μοντέλο είναι αυτό των τριών πτερυγίων. Ο σχεδιασμός με ένα ή δύο πτερύγια μπορεί να συμβάλει σε εξοικονόμηση του κόστους και του βάρους του δρομέα (σχήμα 1-4). Ωστόσο, η χρήση λιγότερου πλήθους πτερυγίων οδηγεί σε υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής πτερυγίων ή μεγαλύτερου μήκους πτερυγίων για να δώσει την ίδια απόδοση με έναν στρόβιλο ίδιων διαστάσεων με τρία πτερύγια. Επί της διάταξης αυτής προκαλούνται μεγαλύτερα κυμαινόμενα φορτία λόγω της μεταβαλλόμενης αδράνειας στη στιγμιαία θέση του πτερυγίου. Από την άλλη, σε περίπτωση χρήσης περισσότερων των τριών πτερυγίων (σχήμα 1-5), η απόδοση μειώνεται λόγω των οπισθελκουσών δυνάμεων.



(a)

(β)

(γ)

Σχήμα 1-4: Ανεμογεννήτριες ενός, δύο και τριών πτερυγίων οριζώντιου άξονα

(a) (πηγή: <http://www.wind-works.org/cms/index.php?id=543>)

(β) (πηγή: <https://www.freeimages.com/photo/windmill-1593905>)

(γ) (πηγή: <https://www.freeimages.com/photo/wind-turbine-1233505>)



(α)

(β)

Σχήμα 1-5: Ανεμογεννήτριες πολλαπλών πτερυγίων

(α) (πηγή: <https://www.freeimages.com/photo/windmill-1375806>)(β) (πηγή: <https://www.freeimages.com/photo/windmill-2-1515273>)

Σε περίπτωση ισχυρών ανέμων, η ταχύτητα ανέμου τείνει να υπερβεί το όριο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Τότε, κρίνεται αναγκαίο να διακοπεί η λειτουργία της ή να σπαταληθεί περίσσεια ενέργεια που δημιουργείται, ώστε να αποφευχθεί πιθανή της βλάβη. Οι πιο συχνές μέθοδοι αντιμετώπισης μεταφοράς ισχύος είναι είτε σταματώντας τη λειτουργία της, είτε με αλλαγή της κλίσης των πτερυγίων. Κατά τη μέθοδο που σταματά η λειτουργία της, όταν ισχυροί άνεμοι που προσπίπτουν φθάσουν το όριο λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, ο άνεμος περνά από τα πτερύγια και δημιουργεί τυρβώδης ροή και ο δρομέας σταμάτα να περιστρέφεται. Η παύση της λειτουργίας της ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται με ειδικό εξοπλισμό τύπου φρένου στο πίσω μέρος των πτερυγίων, ο οποίος αναστέλλει τη λειτουργία του δρομέα ωστόσο η ταχύτητα του ανέμου βρεθεί πάλι στα επιτρεπτά όρια. Κατά τη μέθοδο αλλαγής της κλίσης, κάθε πτερύγιο μπορεί να περιστραφεί κατά τη διαμήκη διεύθυνση του, ώστε η κλίση τους να αλλάζει με τη διαφορά της ταχύτητας του ανέμου αλλάζοντας την αεροδυναμική απόδοση του δρομέα και περιορίζοντας την ενέργεια που παράγει η ανεμογεννήτρια [3].

### 1.3 ΚΥΡΙΑ ΜΕΡΗ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

**Δρομέας:** Αποτελείται από τα πτερύγια και την πλήμνη, τα οποία συντρέχουν μεταξύ τους και είναι από ενισχυμένο πολυεστέρα δεσμεύοντας την ένταση του ανέμου και μετατρέποντάς τη σε μηχανική ενέργεια. Τα πτερύγια συνδέονται πάνω στην πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από τον διαμήκη άξονα.

**Σύστημα μετάδοσης κίνησης:** Αποτελείται από τον κύριο άξονα, τα έδρανά του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο πολλαπλασιάζει τις στροφές, ώστε να προσαρμόζεται στον αντίστοιχο τύπο γεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής. Στον κύριο άξονα υπάρχει σύστημα πέδησης το οποίο αποτελείται από απλού τύπου δισκόφρενο για να εμποδίζει την κίνηση του δρομέα, είτε σε περίπτωση υπέρβασης του ορίου ταχύτητας, είτε κατά τη

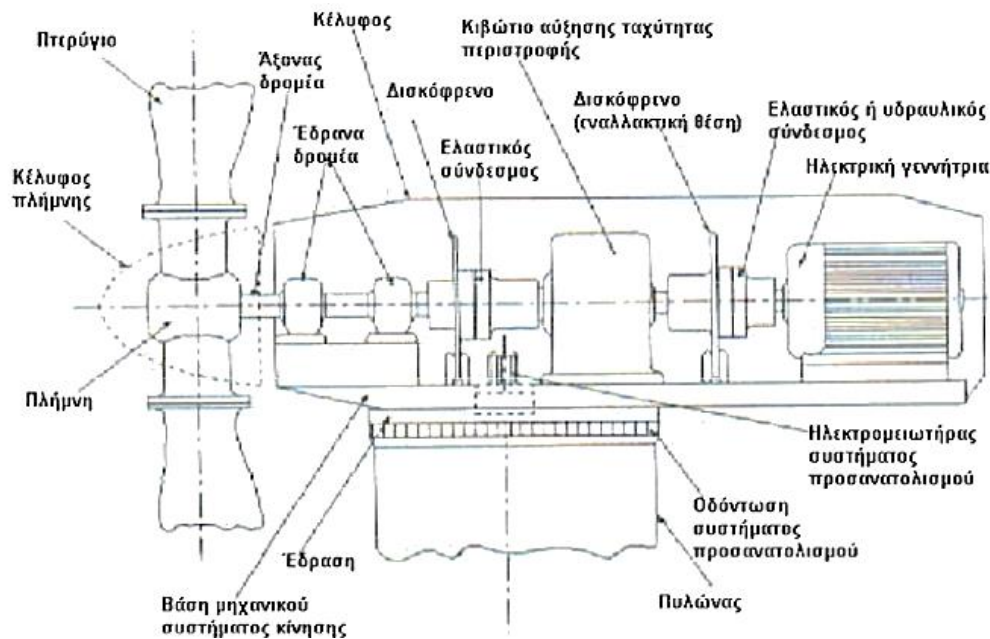
συντήρηση. Το σύστημα πέδησης τοποθετείται είτε στο σύστημα μετάδοσης κίνησης, είτε στην ηλεκτρική γεννήτρια.

Ηλεκτρική γεννήτρια: Μπορεί να είναι σύγχρονη ή επαγωγική με τέσσερις ή έξι πόλους. Συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου μετατρέποντας τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, καθώς βρίσκεται, συνήθως, πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας.

Σύστημα προσανατολισμού: Διατηρεί συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα παράλληλο στην κατεύθυνση του ανέμου.

Πύργος: Υποστηρίζει την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση και η μορφή του μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις.

Ηλεκτρονικός πίνακας και πίνακας ελέγχου: Τοποθετούνται στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας διασφαλίζοντας την ακέραια λειτουργία της.



Σχήμα 1-6: Κύρια συστατικά μέρη μίας ανεμογεννήτριας οριζώντιου άξονα (πηγή:

<http://ape1epalsyrou.weebly.com/alphaneupsilonmuomicrongammaepsilonnu942taurhoiotaepsilonsigmaf.html>)



## 2 ΠΥΛΩΝΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο πυλώνας υποστηρίζει τον ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό και αποτελεί βασικό στοιχείο για τον σχεδιασμό μιας ανεμογεννήτριας. Για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του, απαιτείται κατανόηση της δομικής του λειτουργίας και των παραγόντων που τον επηρεάζουν, ειδικά όσον αφορά το κόστος, το οποίο ανέρχεται στο 20-30% του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας. Όταν το ύψος του πυλώνα αυξάνεται, η μεταφορά, η συναρμολόγηση και η ανέγερση γίνονται πιο δύσκολες και πιο ακριβές. Από την άλλη, όσο αυξάνεται το ύψος, αυξάνεται και η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου, παράγοντας περισσότερη ενέργεια. Θεωρητικά, το βέλτιστο ύψος του πυλώνα είναι το σημείο τομής των δύο λειτουργιών της αύξησης του κόστους κατασκευής και της ενεργειακής απόδοσης. Ωστόσο, η εύρεση αυτού του σημείου δεν μπορεί να καθοριστεί σε καμία γενικά εφαρμόσιμη μορφή, διότι οι παράγοντες που υπεισέρχονται στην εύρεσή του είναι πολλοί και αντικρουόμενοι.

Βασικό ρόλο στον σχεδιασμό έχει η επιλογή του τόπου εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Στις χερσαίες περιοχές, δηλαδή σε περιοχές με υψηλό βαθμό τραχύτητας της επιφάνειας, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πιο αργά με την αύξηση του ύψους από ότι στις παράκτιες περιοχές. Σχετικά με το μέγεθος της ανεμογεννήτριας, το κόστος αυξάνεται παράλληλα με την αύξηση του ύψους του πυλώνα. Η κατασκευή μεγάλων ανεμογεννητριών με ύψος πυλώνα 80m και άνω αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την οικονομική αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού. Πολύ σημαντικός παράμετρος σχεδιασμού του πυλώνα είναι και η δυσκαμψία. Αυτή καθορίζει το υλικό που απαιτείται και τελικά, το κόστος κατασκευής. Ο στόχος του σχεδιασμού του πυλώνα είναι να επιτευχθεί το επιθυμητό ύψος πύργου με την απαιτούμενη ακαμψία και με το χαμηλότερο δυνατό κόστος κατασκευής. Η μεταφορά και η διαδικασία ανέγερσης εξελίσσεται σε ένα αυξανόμενο πρόβλημα για την τελευταία γενιά ανεμογεννητριών μεγάλης ισχύος. Όταν το απαιτούμενο ύψος του πυλώνα ξεπερνά τα 100m και το βάρος της κεφαλής του πυλώνα τις μερικές εκατοντάδες τόνους, τότε, η διάμετρος στη βάση του πυλώνα θα πρέπει να ξεπερνά τα 5m με συνέπεια να μην είναι, πλέον, εφικτή η οδική μεταφορά. Αυτό αποτελεί ισχυρό κίνητρο, ώστε να βρεθούν καινοτόμες λύσεις στον σχεδιασμό των πυλώνων.

## 2.2 ΤΥΠΟΙ ΠΥΛΩΝΑ

Ο σχεδιασμός του πυλώνα οφείλει να πληροί συγκεκριμένες τεχνικές απαιτήσεις στο χαμηλότερο δυνατό κόστος. Οι τεχνικές απαιτήσεις μπορούν να ικανοποιηθούν από κάθε τύπο πυλώνα, ωστόσο το κόστος μπορεί να διαφέρει σημαντικά και κατασταλτικά, ώστε να μην είναι, τελικά, επιτρεπτή κάθε πιθανή διάταξη πυλώνα.

Κάθε τύπος πυλώνα έχει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα, ο οποίος ανάλογα με τις συνθήκες που επικρατούν, χρειάζεται μελέτη, ώστε να βρεθεί κάθε φορά ποια είναι η προσφορότερη μορφή. Οι παλαιότεροι τύποι ανεμογεννητριών, οι ανεμόμυλοι, έχουν χαμηλό ύψος σε σχέση με τη διάμετρο του δρομέα και ογκώδη κατασκευή, οι οποίοι λειτουργούσαν ως χώροι εργασίας, παρέχοντας την απαιτούμενη δυσκαμψία. Σύντομα, όμως, αναγνωρίστηκε το πλεονέκτημα του αυξανόμενου ύψους και έτσι, ο μύλος άρχισε να γίνεται πιο λυγηρός μοιάζοντας περισσότερο με πύργο. Αλλά, μόνο στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιήθηκαν πυλώνες, η μόνη λειτουργία των οποίων έγκειται στη στήριξη του δρομέα και των μηχανικών εξαρτημάτων της κεφαλής των πυλώνων. Ως συνέπεια αυτής της ανάπτυξης, ο τρόπος σχεδιασμού και τα υλικά των πυλώνων παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Ο χάλυβας και το σκυρόδεμα αντικατέστησαν τους ξύλινους ανεμόμυλους και αποτελούν, πλέον, τα διαθέσιμα υλικά που έχουμε για τους διάφορους τύπους ανεμογεννητριών.

Δικτυωτοί πυλώνες: Ο κορμός αυτού του είδους πυλώνα αποτελείται από χωροδικτυώματα (σχήμα 2-1). Είναι δύσκαμπτα και η θεμελίωση είναι επιτεύξιμη και σε υπάρχουσα κλίση εδάφους. Ο σχεδιασμός του βελτιστοποιείται, καθώς υπάρχει δυνατότητα αλλαγής στο χάλυβα και στη διάταξη στον χώρο για να εξυπηρετηθούν οι αντίστοιχες ανάγκες. Η μεταφορά είναι απλή, αφού απαρτίζεται από κοχλιωτά μέλη. Αντίθετα, λόγω του μεγάλου αριθμού των μελών, και επομένως, των συνδέσεων, αυξάνεται το συνολικό κόστος.

Πυλώνες από σκυρόδεμα: Ο πυλώνας αποτελείται από σκυρόδεμα (σχήμα 2-2). Το κόστος του είναι χαμηλό συγκρίνοντάς τον με χαλύβδινου τύπου, ειδικά αν είναι από προκατασκευασμένα τμήματα. Επιτρέπεται να εγκατασταθεί πάνω του μεγαλύτερος δρομέας. Το κάθε τμήμα δεν ξεπερνά τα 4m και επομένως, έχει ευκολότερη μεταφορά. Δεν υπάρχουν κοχλιωτές συνδέσεις, όπως στου χαλύβδινου τύπου, και άρα, έχει μειωμένο κόστος συναρμολόγησης. Από την άλλη, το ίδιο βάρος αυξάνεται κατά πολύ σε σχέση με το ύψος, ενώ η ανέγερση δεν είναι άμεση.

Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες: Αποτελούνται από χάλυβα και δίνουν τη δυνατότητα για μείωση της συνολικής μάζας της κατασκευής, καθώς η δυσκαμψία είναι χαμηλότερη και επομένως, το κόστος μειώνεται (σχήμα 2-3). Καθ' ύψος του πυλώνα γίνεται βαθμιαία απομείωση της διαμέτρου και του πάχους του κελύφους.

Χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με αγκύρια: Στους σωληνωτούς πυλώνες και στους δικτυωτούς πυλώνες χρησιμοποιούνται αγκύρια ή καλώδια (σχήμα 2-4). Κατά αυτό τον τρόπο, μπορεί να μειωθεί ο όγκος του αντίστοιχου πυλώνα συμβάλλοντας στη μείωση του κόστους, ενώ λόγω της πρόσθετης αυτής διάταξης, είτε με αγκύρια, είτε με καλώδια, είτε με δικτυώματα, το κόστος της συνολικής κατασκευής αυξάνεται. Σε αγροτικές περιοχές τα αγκύρια αυτά αποτελούν εμπόδια.

Υβριδικοί πυλώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα και χάλυβα: Ο κορμός του πυλώνα αποτελείται από σκυρόδεμα και χάλυβα (σχήμα 2-5). Σκοπός του συνδυασμού αυτού είναι να αξιοποιηθούν τα πλεονεκτήματα των δύο υλικών κατά την απόκριση της κατασκευής. Είναι ιδανικοί για υψηλότερες ανεμογεννήτριες και συνήθως, χρησιμοποιούνται σε χώρες όπου το κόστος του χάλυβα είναι υψηλό. Η μεταφορά γίνεται ευκολότερη, αφού το μεταλλικό μέρος έχει μικρότερες διαστάσεις. Ωστόσο, υπάρχει επιπλέον κόστος λόγω της ειδικής σύνδεσης του χάλυβα με το σκυρόδεμα και επομένως, λόγω του αυξημένου συνολικού βάρους που προκύπτει.



Σχήμα 2-1: Ανεμογεννήτριες με πυλώνα από χωροδικτυώματα [1]

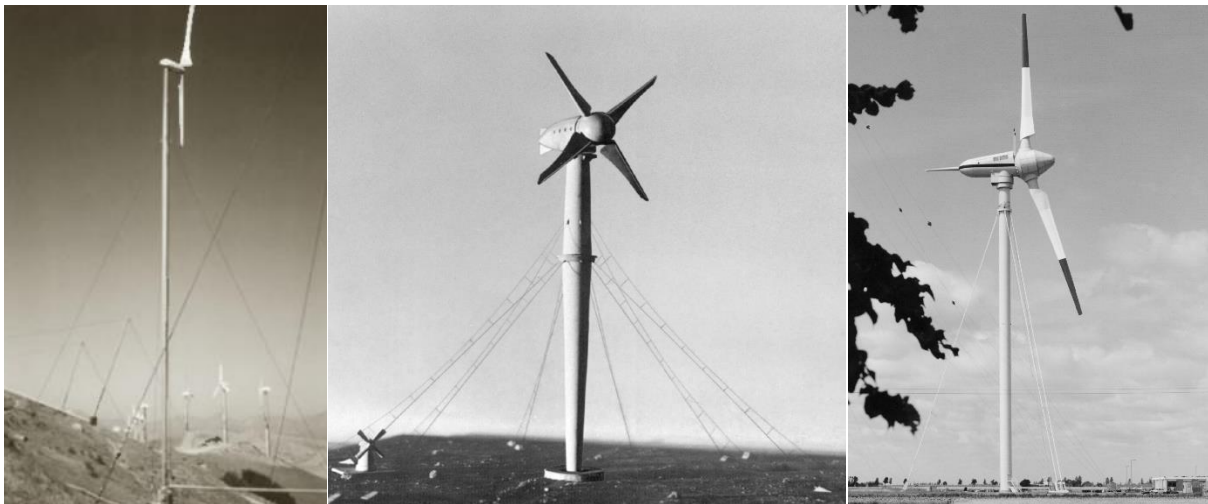


Σχήμα 2-2: Ανεμογεννήτριες με πυλώνα από οπλισμένο σκυρόδεμα

(πηγή: <http://www.steelwindtower.com/wind-turbine-tower-comparison-pros-and-cons-explained/>)



Σχήμα 2-3: Ανεμογεννήτριες με αυτόνομο χαλύβδινο σωληνωτό πυλώνα [1]



Σχήμα 2-4: Ανεμογεννήτριες χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα με αγκύρια [1]





(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 2-5: Υβριδικοί πυλώνες ανεμογεννητριών από οπλισμένο σκυρόδεμα και χάλυβα

(α) (πηγή: <http://www.steelwindtower.com/wind-turbine-tower/>)

(β) (πηγή <https://www.financialexpress.com/industry/countrys-tallest-hybrid-concrete-tubular-wind-turbine-generator-commissioned-by-suzlon/1335944/>)

(γ) (πηγή <https://www.evwind.es/2015/07/30/nordex-has-achieved-a-wind-energy-market-share-in-germany-of-11-8-percent/53586>)

### 2.3 ΑΥΤΟΝΟΜΟΙ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΙ ΣΩΛΗΝΩΤΟΙ ΠΥΛΩΝΕΣ

Οι αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες είναι οι πιο κοινοί τύποι πυλώνα στην κατασκευή σύγχρονων ανεμογεννητριών. Ο κυριότερος λόγος που οδηγεί σε αυτήν την επιλογή είναι η άμεση, επιτόπια συναρμολόγηση και ανέγερση σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος του χάλυβα στις μέρες μας. Οι χαμηλοί πυλώνες με ύψος μέχρι τα 20m μπορούν να κατασκευαστούν από ένα μόνο τμήμα το οποίο κοχλιώνεται απλά στο θεμέλιο στο χώρο του έργου. Ενώ, για υψηλότερους πυλώνες με ύψος μέχρι τα 100m, κατασκευάζονται από περισσότερα τμήματα. Τα τμήματα αυτά κοχλιώνονται μεταξύ τους, έτσι ώστε να μην απαιτούνται συγκολλήσεις στο χώρο του έργου. Κατά τη διαστασιολόγηση του πυλώνα, ένας απλός και ασφαλής σχεδιασμός είναι η επιδίωξη μεγάλης δυσκαμψίας η οποία οδηγεί σε απαίτηση μεγάλης συνολικής μάζας. Σε ανεμογεννήτριες με ύψος πυλώνα άνω των 80m, για τη μείωση του κόστους, η δυσκαμψία πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα, εφόσον είναι τεχνικά εφικτό.

Για αυτό, λοιπόν, κατά τη διαστασιολόγηση, χρειάζεται να ληφθούν οι εξής παράμετροι σχεδιασμού:

**Η αντοχή σε θραύση:** που απαιτείται, ώστε να μην αστοχήσει στις ακραίες ταχύτητες ανέμου. Το στατικό φορτίο καθορίζεται από το βάρος της κεφαλής του πύργου, το ίδιο βάρος του πυλώνα και την αεροδυναμική ώθηση του δρομέα. Σημαντικό ρόλο στην τιμή αυτού του φορτίου αποκτά το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας. Συνήθως, το φορτίο θραύσης είναι αυτό που θα δώσει την καμπτική ροπή που δρα στη βάση του πυλώνα.

**Η αντοχή σε κόπωση:** που απαιτείται για διάρκεια ζωής 20 έως 30 χρόνια λειτουργίας. Η δυναμική φόρτιση που προκαλείται από την ώθηση του δρομέα κατά τη λειτουργία, έχει σαφή αντίκτυπο στη διάρκεια ζωής

λόγω κόπωσης λυγηρών πυλώνων. Πρέπει, επίσης, να λαμβάνονται υπόψη τα πρόσθετα φορτία που προκαλούνται από τη δονητική συμπεριφορά σε περιπτώσεις συντονισμού. Ως εκ τούτου, μια καθαρά στατική ανάλυση, που συνήθως απαιτείται από τους συμβατικούς κανονισμούς, δεν είναι επαρκής για όλες τις κατασκευές πύργων μιας ανεμογεννήτριας.

Η απαιτούμενη δυσκαμψία: συνήθως, αποτελεί το σημαντικότερο κριτήριο για τη διαστασιολόγηση του πυλώνα, καθώς σύμφωνα με την οποία καθορίζεται το απαραίτητο πάχος κελύφους.

Η αντοχή σε λυγισμό: ή αλλιώς, η αντίσταση σε τοπικό λυγισμό του κελύφους του πυλώνα αποτελεί σημαντικό κριτήριο για τους λεπτότοιχους, κυρίως χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες. Η απαίτηση της μείωσης του βάρους στους σύγχρονους χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες συμβάλλει στην αντοχή του λυγισμού να είναι, συχνά, ο καθοριστικός παράγοντας της διαστασιολόγησης του απαιτούμενου πάχους του κελύφους.

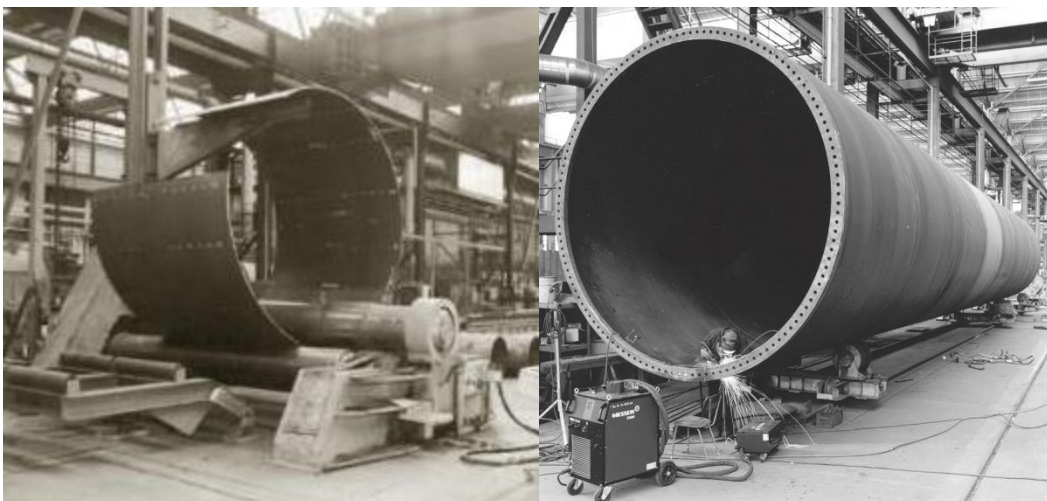
Η μετατόπιση της κορυφής: Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετατόπιση της κορυφής του πύργου τίθεται στο 0,1% του ύψους του πυλώνα για την αποφυγή φαινομένων κόπωσης, λειτουργικότητας και δευτερευουσών ροπών, κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας.

Η θεμελιώδης ιδιοσυχνότητα: της κατασκευής πρέπει να απέχει από τις συχνότητες διέγερσης, στη φάση λειτουργίας της ανεμογεννήτριας, για την αποφυγή φαινομένων συντονισμού.

## 2.4 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Στις μέρες μας, οι μεγάλες ανεμογεννήτριες αποκτούν κωνική μορφή επιδιώκοντας τη βέλτιστοποίηση του σχεδιασμού του πυλώνα. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχει σταδιακή απομείωση της διαμέτρου καθ' ύψος του πυλώνα από τη βάση ως την κεφαλή του. Κατά αυτή τη διάταξη, επιτυγχάνεται η απαιτούμενη δυσκαμψία με μια συνολική απομειούμενη μάζα πυλώνα. Ο σχεδιασμός με σταθερό πάχος πυλώνα αυξάνει σημαντικά τη συνολική μάζα της κατασκευής και επομένως, το κόστος της.

Ο πυλώνας αποτελείται από προκατασκευασμένα τμήματα μήκους μέχρι 30m. Τα τμήματα αυτά παράγονται από φύλλα ενός χαλύβδινου ελάσματος με πάχη 10 - 50mm. Τα φύλλα τα οποία έχουν πλάτος περίπου 2m, τυλίγονται σε ένα κυκλικό σχήμα σε μία κυλιόμενη βάση (σχήμα 2-6). Στη συνέχεια, τα τμήματα αυτά των 2m συγκολλούνται μεταξύ τους δημιουργώντας κάθε ένα από τα τμήματα του πυλώνα.



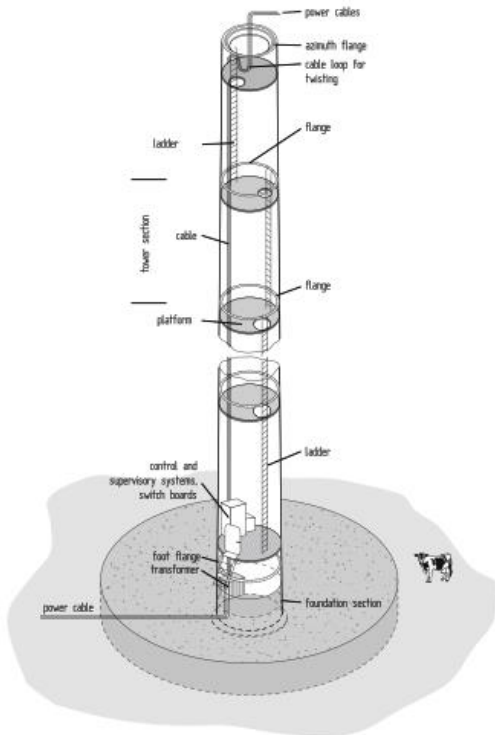
Σχήμα 2-6: Κατασκευή τμημάτων πυλώνα πλάτους 2m [1]

Στις περισσότερες περιπτώσεις για τις συγκολλήσεις αυτές χρησιμοποιούνται αυτόματοι συγκολλητές, διότι οι συγκολλήσεις σε τέτοια έργα απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, όπως υπέρηχοι, ακτίνες Χ, αλλά και οπτικοί έλεγχοι για επιφανειακές ρωγμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα των συγκολλήσεων. Στα άκρα του κάθε τμήματος πυλώνα, συγκολλούνται τα εσωτερικά πέλματα, τα οποία κατασκευάζονται από χάλυβα υψηλής αντοχής. Και εδώ, η διαμόρφωση και η συγκόλληση των δακτυλίων απαιτούν κάποια εξειδίκευση, αφού τα συστατικά μέρη μπορούν εύκολα να παραμορφωθούν και αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα οι δακτύλιοι να μην ταιριάζουν κατά τη συναρμολόγηση. Τα προκύπτοντα κενά ανάμεσα στα τμήματα του πυλώνα είναι ένα ποιοτικό ελάττωμα, το οποίο συναντάται, συχνά, σε χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες.

Σε κάθε μεταλλική κατασκευή μεγάλης σπουδαιότητας, η κατεργασία των επιφανειών είναι απαραίτητη για την ποιότητα των χαλύβδινων πυλώνων. Η διάβρωση θα πρέπει να αποτρέπεται στη διάρκεια ζωής του έργου, ακόμη και σε ένα επιθετικό περιβάλλον, όπως είναι το παραθαλάσσιο. Μετά την αμμοβολή των τμημάτων του πυλώνα, τα τμήματα αυτά καλύπτονται με θερμικά εφαρμοζόμενα επιστρώματα ψευδαργύρου, των οποίων είναι απαραίτητη η εφαρμογή δύο έως τριών στρώσεων βαφής.

Ο πυλώνας πρέπει να παρέχει μια ασφαλή ανάβαση στην άτρακτο και επίσης, να περιλαμβάνει κάποιες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ιδιαιτέρως τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στη βάση του πυλώνα. Αυτό απαιτεί ορισμένες εσωτερικές εγκαταστάσεις (σχήμα 2-7).

Ανάλογα με το ύψος του πυλώνα, ένας αριθμός από ενδιάμεσες πλατφόρμες είναι συνήθως τοποθετημένες, τυπικά μία πλατφόρμα για κάθε τμήμα του πυλώνα. Για ύψη μέχρι 60 - 70m, απλές κάθετες σκάλες με αναρριχητική προστασία χρησιμοποιούνται για την ανάβαση. Αν απαιτείται από τον χειριστή, απλοί ανελκυστήρες αναρρίχησης εγκαθίστανται σε πυλώνες ύψους άνω των 80m.



Σχήμα 2-7: Συστατικά μέρη ενός αυτόνομου χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα [1]

Τα καλώδια για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας "κρέμονται ελεύθερα" με έναν βρόγχο στο άνω τμήμα του πυλώνα (σχήμα 2-7). Επιπλέον, ο εσωτερικός φωτισμός είναι υποχρεωτικός για τις εργασίες συντήρησης στον πυλώνα.

Η κατασκευή χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων είναι μια συμβατική τεχνολογία, η οποία δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις όσον αφορά τον εξοπλισμό των κατασκευαστών. Για ύψη πυλώνων άνω των 90m, η διάμετρος της βάσης του είναι μεγαλύτερη των 4.5m και το απαιτούμενο πάχος του χάλυβα ξεπερνά τα 40mm. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το κουρμπάρισμα των φύλλων χάλυβα θα απαιτούσε ειδικά μηχανήματα τα οποία δεν είναι διαθέσιμα σε συνήθεις βιομηχανίες χάλυβα. Ακόμα, λόγω της μεγάλης διαμέτρου βάσης, τα χαμηλότερα τμήματα του πυλώνα δεν θα μπορούν να μεταφερθούν οδικά. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις πυλώνων που κατασκευάζονται από ένα τμήμα, εάν, φυσικά, το επιτρέπουν οι μεταφορικές και οι χωρικές συνθήκες.

## 2.5 ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ

Η θεμελίωση του πυλώνα καθορίζεται από τις αντίστοιχες φορτιστικές καταστάσεις που καλείται να αναλάβει, καθώς και από τις εδαφικές συνθήκες που επικρατούν.

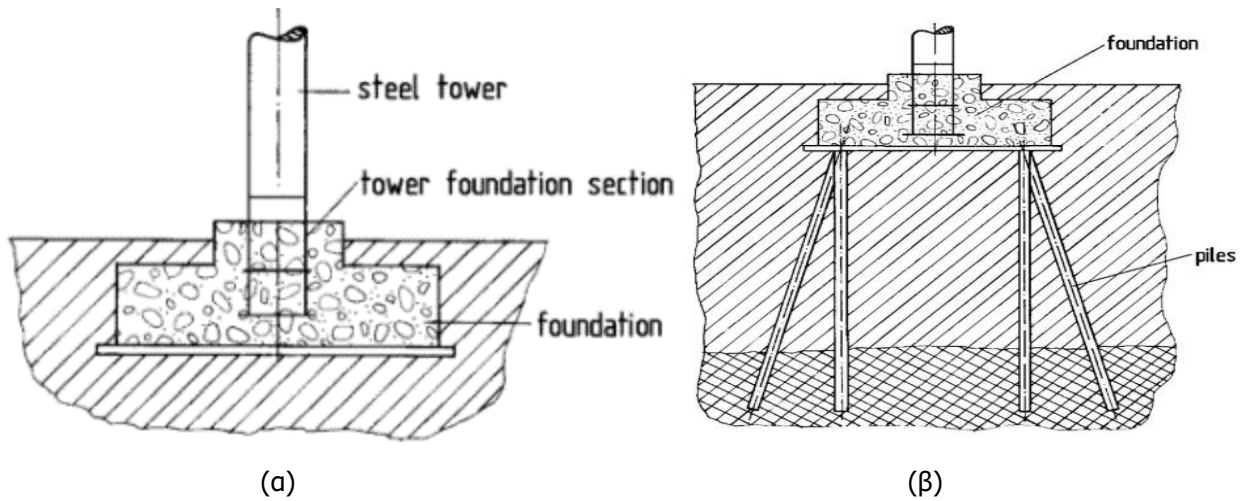
Μια αρχική φορτιστική κατάσταση που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι τα υψηλότερα φορτία που δρουν στην ανεμογεννήτρια σε συνθήκες ακινητοποίησης. Η καθοριστική παράμετρος είναι η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα ανέμου, ενώ σημαντική επιρροή έχει και ο τεχνικός τρόπος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Στις ανεμογεννήτριες που δε διαθέτουν έλεγχο κλίσης πτερυγίων, η ώθηση του δρομέα φθάνει στο μέγιστο της ονομαστικής του ισχύος εμφανίζοντας μεγάλα στατικά φορτία κατά τον σχεδιασμό.

Μια δεύτερη φορτιστική κατάσταση, η οποία χρειάζεται να ελεγχθεί, αφορά στη συμμετοχή των μέγιστων φορτίων κατά τη λειτουργία της ανεμογεννήτριας. Κατά τη λειτουργία, η μέγιστη ροπή ανατροπής για τη θεμελίωση προσδιορίζεται με την ώθηση του δρομέα. Σε ανεμογεννήτριες που διαθέτουν έλεγχο κλίσης πτερυγίων, η ώθηση του δρομέα φθάνει τη μέγιστη τιμή της ονομαστικής ισχύος, ενώ σε ανεμογεννήτριες οι οποίες απλώς αναστέλλουν τη λειτουργία τους, συνεχίζει να αυξάνεται ακόμα και όταν φθάσει την ονομαστική ισχύ. Η έγκριση του σχεδιασμού βασίζεται, κυρίως, στα στατικά φορτία του προβλήματος. Για την εύρεση, όμως, της αντοχής σε κόπωση, απαιτούνται δυναμικές αναλύσεις, λόγω της φύσης των φορτίων ανέμου, και γίνονται υπό την ευθύνη του κατασκευαστή.

Οι εδαφικές συνθήκες έχουν σημαντικό ρόλο για τον τύπο και τις διαστάσεις της θεμελίωσης. Η θεμελίωση μπορεί να είναι είτε επιφανειακή είτε με πασσάλους (σχήμα 2-8). Η επιφανειακή θεμελίωση είναι, συνήθως, κυκλικά, ορθογωνικά ή πολυγωνικά πέδιλα (σχήματα 2-9 και 2-10). Οι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες αγκυρώνονται από ένα τμήμα θεμελίωσης, το οποίο έχει ενταχθεί στον χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος του θεμελίου. Η ροπή ανατροπής της κατασκευής καθορίζεται από την απαιτούμενη μάζα και τις διαστάσεις της πλάκας. Σε αυτό αντιστέκονται η κεφαλή του πυλώνα, ο πυλώνας και το ίδιο το θεμέλιο. Η θεμελίωση με πασσάλους περιλαμβάνει μία πλάκα έδρασης, η οποία στηρίζεται πάνω στους πασσάλους. Κρίνεται απαραίτητη η επιλογή τους, όταν στο έδαφος υπάρχουν ασθενείς σχηματισμοί με χαμηλή φέρουσα ικανότητα. Σκοπός της θεμελίωσης με πασσάλους είναι να μεταβιβασθούν τα φορτία της κατασκευής σε πιο ανθεκτικούς εδαφικούς σχηματισμούς.

Επιπλέον, πρέπει να ληφθούν υπόψη η ροή του νερού στο έδαφος και των υπόγειων υδάτων, των οποίων η παρουσία δημιουργεί άνοση στα θεμέλια. Η φλάντζα του τμήματος θεμελίωσης πρέπει να τοποθετείται σε οριζόντια και επίπεδη θέση με μικρή μόνο ανοχή, ώστε να αποφευχθεί η τυχόν κλίση του πυλώνα και συνεπώς, οι επιπλέον εντάσεις.





Σχήμα 2-8: (α) Επιφανειακή θεμελίωση και (β) Θεμελίωση με πασσάλους χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα [1]



Σχήμα 2-9: Θεμελίωση σταυροειδούς μορφής ανεμογεννήτριας [1]



Σχήμα 2-10: Θεμελίωση κυκλικής μορφής ανεμογεννήτριας [1]

## 2.6 ΑΝΕΓΕΡΣΗ

Η ανέγερση τελείται υπό την ευθύνη του κατασκευαστή τους. Στις συνήθεις συμβάσεις αγοράς περιλαμβάνονται η μεταφορά και η συναρμολόγηση. Η πρώτη απαίτηση στο πεδίο είναι η κατάλληλη θεμελίωση στην τοποθεσία και η βάση για τον γερανό. Η κατασκευή της θεμελίωσης εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και σε κάποιο βαθμό, από τη φύση του εδάφους. Καθοριστικοί παράγοντες είναι το ύψος του πυλώνα, τα βάρη που πρέπει να ανυψωθούν και ο διαθέσιμος εξοπλισμός ανύψωσης. Η προσβασιμότητα στον χώρο εγκατάστασης για βαρέα οχήματα έχει επίσης σημαντικό ρόλο. Για τη συναρμολόγηση της ίδιας της ανεμογεννήτριας χρησιμοποιούνται πολλές διαφορετικές μέθοδοι.

Παρακάτω, αναλύεται ο πιο συνήθης τρόπος ανέγερσης από άποψη ασφάλειας και κόστους. Κατά την ανέγερση της ανεμογεννήτριας, κατασκευάζεται πρώτα το θεμέλιο. Έπειτα, το κατώτερο τμήμα του πυλώνα τοποθετείται στο τμήμα της θεμελίωσης. Στο τμήμα της θεμελίωσης ενσωματώνονται τα αγκύρια, στα οποία κοχλιώνεται το κατώτερο τμήμα του πυλώνα πραγματοποιώντας τη μεταξύ τους σύνδεση. Στη συνέχεια, το επόμενο τμήμα του πυλώνα ανυψώνεται από τον γερανό και πραγματοποιείται η κοχλιωτή σύνδεση κοκ (σχήμα 2-11). Τέλος, ο πύργος ενώνεται με την άτρακτο που φέρει τα πτερύγια. Όσον αφορά την τοποθέτηση των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, υπάρχουν δύο πιθανοί τρόποι τοποθέτησης: είτε κοχλιώνονται όλα τα πτερύγια στην άτρακτο στο έδαφος και στη συνέχεια όλο το σύστημα αυτό ανυψώνεται από τον γερανό και κοχλιώνεται στον δρομέα (σχήμα 2-11), είτε τοποθετούνται πρώτα η άτρακτος στον δρομέα και στη συνέχεια, ένα-ένα τα πτερύγια.



Σχήμα 2-11 Ανέγερση τμήματος πυλώνα, ατράκτου και δρομέα [1]

## 2.7 ΤΡΟΠΟΣ ΚΑΙ ΡΟΛΟΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

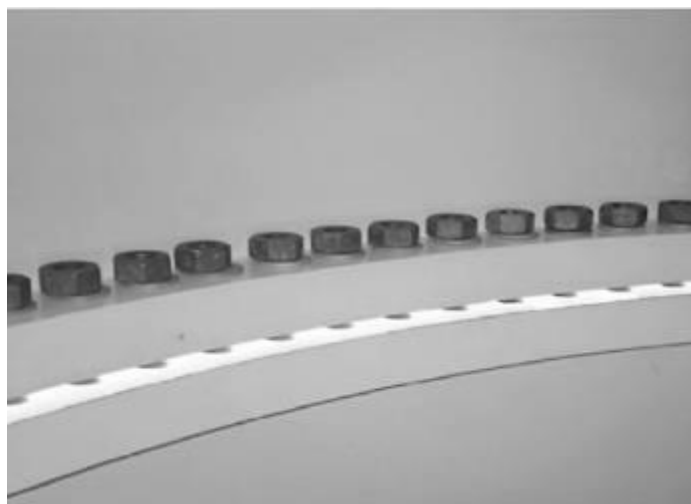
Ένας πυλώνας ανεμογεννήτριας αποτελείται από επιμέρους προκατασκευασμένα τμήματα, τα οποία συνδέονται κατάλληλα μεταξύ τους στο έργο μέσω ειδικής διάταξης. Η ειδική διάταξη είναι μια σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας πλήρους αντοχής. Σκοπός της σύνδεσης είναι η μεταβίβαση των ροπών και των δυνάμεων από το ένα τμήμα του πυλώνα στο άλλο, ώστε να μεταφερθούν στη θεμελίωση.

Η θέση σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας αποτελεί κόμβο με τα επιμέρους τμήματά του να είναι επαρκώς δύσκαμπτα. Τότε, μπορεί να θεωρηθεί ότι ο κόμβος είναι ιδεατά άκαμπτος, οπότε δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των σχετικών στροφών στα άκρα των τμημάτων που συνδέονται. Η σύνδεση αυτή αποτελείται από δακτυλιοειδή πέλματα, τα οποία συγκολλούνται στην παρειά του τμήματος του πυλώνα.

Η σύνδεση μεταξύ των τμημάτων πραγματοποιείται μέσω των κοχλιών (σχήμα 2-12). Οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται είναι πάντοτε προεντεταμένοι υψηλής αντοχής. Η σύσφιξη πραγματοποιείται από την πλευρά του περικόχλιου, ενώ ο κορμός χρειάζεται να προεξέχει πέρα από το περικόχλιο, τουλάχιστον ένα βήμα του σπειρώματος μετά τη σύσφιξη [6].

Οι κοχλίες οφείλουν να είναι προεντεταμένοι, γιατί μόνο κατά αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η απαιτούμενη αντοχή σε κόπωση. Οι δακτύλιοι, στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι εσωτερικοί, μιας και οι διάμετροι του πυλώνα των μεγάλων ανεμογεννητριών έχουν διαστάσεις που επιτρέπουν την παρουσία των τεχνικών στο εσωτερικό του πυλώνα και την πραγματοποίηση της σύνδεσης. Ακόμα, οι κοχλίες τοποθετούνται ανάποδα στη σύνδεση, δηλαδή με την κεφαλή του κοχλία προς τα κάτω και το περικόχλιο προς τα πάνω. Η διάταξη αυτή είναι για την αποφυγή τυχόν αστοχιών, όπως της κόπωσης. Τα φορτία ανέμου, λόγω της δυναμικής τους φύσης, δημιουργούν εναλλασσόμενη φόρτιση, με αποτέλεσμα κάποιος κοχλίας να χαλαρώσει. Κατά τη συντήρηση, λοιπόν, μπορεί να γίνει αμέσως αντιληπτό, ειδικά στην περίπτωση που φύγει από τη θέση του. Η χρήση μη προεντεταμένων κοχλιών πρέπει να αποφεύγεται για λόγους κόπωσης, διότι ο κορμός μη προεντεταμένων κοχλιών υπόκειται σε διακύμανση τάσεων περίπου κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από αυτή των προεντεταμένων [7].

Λόγω της μορφής της σύνδεσης, οι κοχλίες παραλαμβάνουν έκκεντρα τις ροπές και τις δυνάμεις που αναπτύσσονται, με αποτέλεσμα να υπόκεινται σε συνδυασμό εφελκυστικών και διατμητικών δυνάμεων. Η μεταβίβαση των εφελκυστικών δυνάμεων γίνεται μέσω του κορμού του κοχλία, ενώ η μεταβίβαση των διατμητικών δυνάμεων, όταν οι συνδέσεις πραγματοποιούνται με προεντεταμένους κοχλίες, επιτυγχάνεται μέσω της αναπτυσσόμενης τριβής των συνδεόμενων πελμάτων.

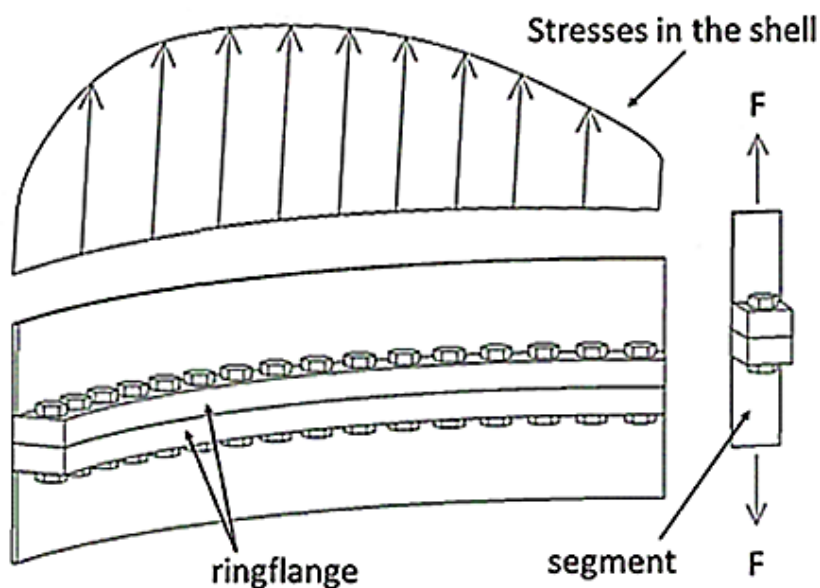


Σχήμα 2-12: Κοχλιωτή σύνδεση των τμημάτων του πυλώνα [1]

## 2.8 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΜΕ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΗ ΠΕΛΜΑΤΑ

Η σύνδεση των πυλώνων πραγματοποιείται μέσω των δακτυλιοειδών πελμάτων. Τα δακτυλιοειδή πέλματα αποτελούνται από καμπυλωμένες φλάντζες, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους μέσω των προεντεταμένων κοχλιών. Στον κάθε κοχλία αντιστοιχεί τμήμα των δακτυλιοειδών πελμάτων που ορίζεται μέσω της ζώνης επιρροής τους. Λόγω συμμετρίας της σύνδεσης, μπορεί να εξεταστεί μεμονωμένα ένα τυπικό τμήμα σύνδεσης που θα αποτελείται από τον κοχλία, το τμήμα πέλματος και το τμήμα πυλώνα που του αντιστοιχεί (σχήμα 2-13).

Κατά αυτόν τον τρόπο, αξιοποιώντας τη συμμετρία της σύνδεσης μπορεί να πραγματοποιηθούν αναλύσεις για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του τμήματος. Μια μέθοδος για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς είναι μέσω αριθμητικών αναλύσεων. Με την αξιοποίηση των δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών, μπορεί να εκτιμηθεί η απόκριση του φορέα για διάφορες και περίπλοκες συνθήκες σε μικρό χρονικό διάστημα. Τέτοιες συνθήκες είναι δύσκολα επιτεύξιμες στα εργαστήρια λόγω του αυξημένου κόστους και των ειδικών διατάξεων. Από την άλλη, έχοντας τη δυνατότητα να κατασκευαστεί το τμήμα σύνδεσης ως δοκίμιο, μπορεί να γίνουν πειραματικές αναλύσεις με τις οποίες θα μπορεί να περιγραφεί η συμπεριφορά του φορέα υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Για τη δημιουργία του δοκιμίου υπό κλίμακα ακολουθούνται κανόνες ομοιότητας. Μέσων των πειραμάτων, μπορεί να διερευνηθεί η συμπεριφορά της σύνδεσης πιο λεπτομερώς, περιγράφοντας με πιο επαρκή τρόπο τους κρίσιμους παράγοντες για τη συνολική απόκριση της κατασκευής.



Σχήμα 2-13: Συσχέτιση βραχέος L με δακτυλιοειδή πέλματα



# 3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L

## 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατά τον σχεδιασμό, οι κατασκευές οφείλουν να αναλυθούν μέσω των ισχυόντων συμβατικών κανονισμών. Σε αρκετές περιπτώσεις, η συμπεριφορά των μη συμβατικών κατασκευών δεν είναι εκ των προτέρων προβλέψιμη, με αποτέλεσμα ο τελικός σχεδιασμός να γίνεται αντιοικονομικός ή μη ασφαλής. Υπό αυτή την οπτική, κρίνεται σκόπιμο κατά την ανάλυση να χρησιμοποιούνται μέθοδοι που να καθιστούν τέτοιου είδους κατασκευές ασφαλείς και οικονομικές. Οι απαιτήσεις αυτές ικανοποιούνται επαρκώς μέσω αριθμητικών αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων. Με την κατάλληλη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων αποκτώνται, σε ικανοποιητικό βαθμό, οι κρίσιμοι συντελεστές για τον τελικό σχεδιασμό. Κατά τη μετάβαση στις αριθμητικές αναλύσεις, ο φορέας που προσομοιώνεται χρειάζεται να αναλυθεί και να μεταφραστεί σε επίπεδο γεωμετρίας, υλικών και συμπεριφοράς που πρόκειται να ακολουθήσει. Δηλαδή, τα χαρακτηριστικά αυτά που ορίζουν τη συμπεριφορά της εκάστοτε κατασκευής.

## 3.2 ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

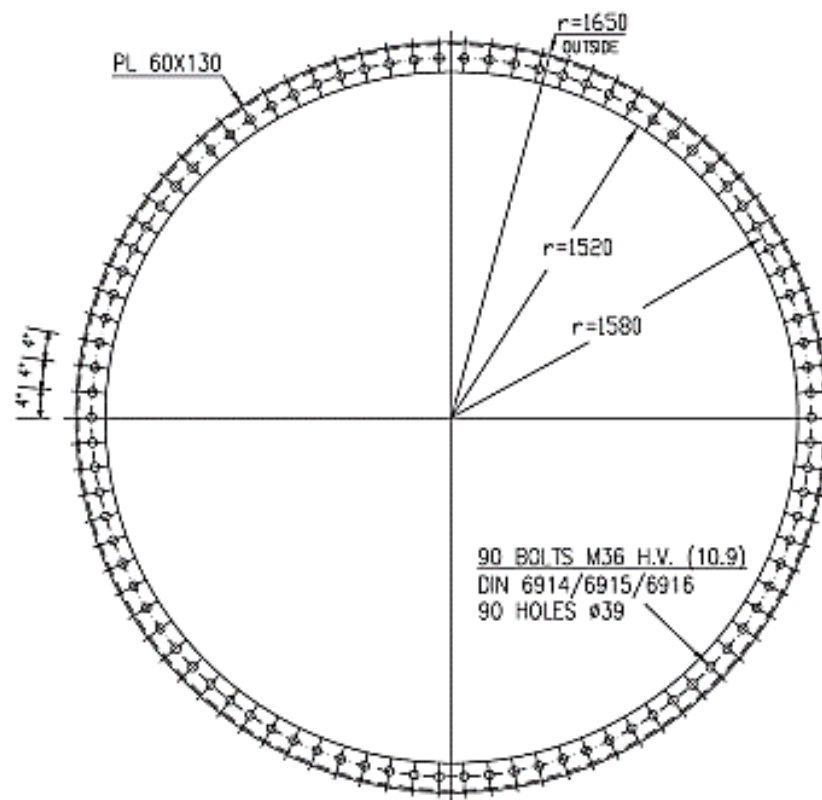
Παρακάτω, περιγράφεται η τυπική σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας διαδοχικών τμημάτων ενός πυλώνα ανεμογεννήτριας. Η σύνδεση πραγματοποιείται με δακτυλιοειδή πέλματα και προεντεταμένους κοχλίες, η οποία ανήκει σε μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων και ισχύος 1.5MW, με χαρακτηριστικά τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 1-1.

Η σύνδεση που μελετάται και παρουσιάζεται στο σχήμα 3-1, θεωρείται ότι βρίσκεται στο 85% του ύψους του πυλώνα της ανεμογεννήτριας. Η εξωτερική διάμετρος των δακτυλιοειδών πελμάτων είναι 3300mm (ακτίνα 1650mm) και η εσωτερική διάμετρος τους είναι 3040mm (ακτίνα 1520mm), ενώ το πάχος των πελμάτων είναι 60mm και το πάχος του κελύφους του πυλώνα είναι 11mm. Το υλικό των πελμάτων και του πυλώνα της ανεμογεννήτριας είναι από χάλυβα ποιότητας S355, του οποίου ο καταστατικός νόμος που χρησιμοποιείται στα αριθμητικά προσομοιώματα παρουσιάζεται στο σχήμα 3-2. Οι κοχλίες τοποθετούνται σε διάμετρο 3160mm (ακτίνα 1580mm) ανά 4° μοίρες. Συνολικά στη σύνδεση, τοποθετούνται 90 κοχλίες M36 ποιότητας 10.9 με διάμετρο 36mm. Ο καταστατικός νόμος του

υλικού των κοχλιών που χρησιμοποιείται στα αριθμητικά προσομοιώματα παρουσιάζεται στο σχήμα 3-3. Το κέλυφος του πυλώνα και τα δακτυλιοειδή πέλματα συγκολλούνται μεταξύ τους στην παρειά των πελμάτων μέσω αμφίπλευρης εσωραφής πλήρους διεύθυνσης.

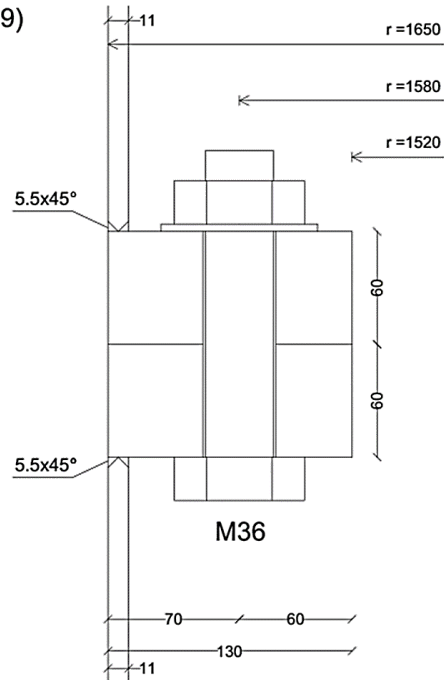
Πίνακας 1-1: Χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Ύψος πυλώνα (m)	82.39m
Διάμετρος θεωρητικού δίσκου πτερυγίων (m)	70.0m
Μέγιστη εξωτερική διάμετρος πυλώνα (m)	5.625m
Ελάχιστη εξωτερική διάμετρος πυλώνα (m)	2.831m
Μάζα πυλώνα (kg)	123003.39kg
Μάζα ενός πτερυγίου (kg)	3912.59kg
Μάζα δρομέα (kg)	15148.0kg
Μάζα ατράκτου (kg)	51170.0kg
Μάζα ρότορα (kg)	26885.77kg
Συνολική μάζα στην κορυφή του πυλώνα (kg)	78055.77kg
Συνολική μάζα ανεμογεννήτριας (kg)	201059.16kg



(a)

90 BOLTS M36 H.V. (10.9)  
DIN 6914/6915/6916  
90 HOLES  $\Phi 39$

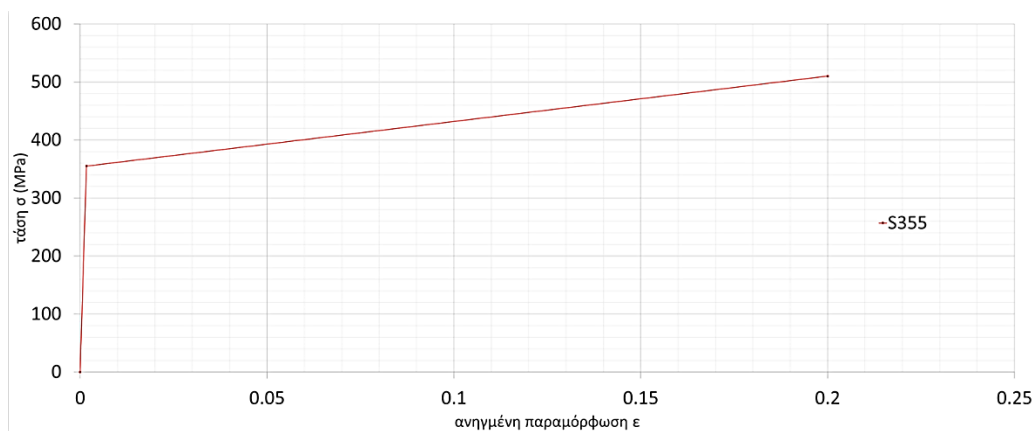


(β)

Σχήμα 3-1: Υπό μελέτη σύνδεση στο 85% του ύψους του πυλώνα της ανεμογεννήτριας  
(α) όψη σύνδεσης ανεμογεννήτριας [7], (β) τομή σύνδεσης ανεμογεννήτριας

Για χάλυβα S355:

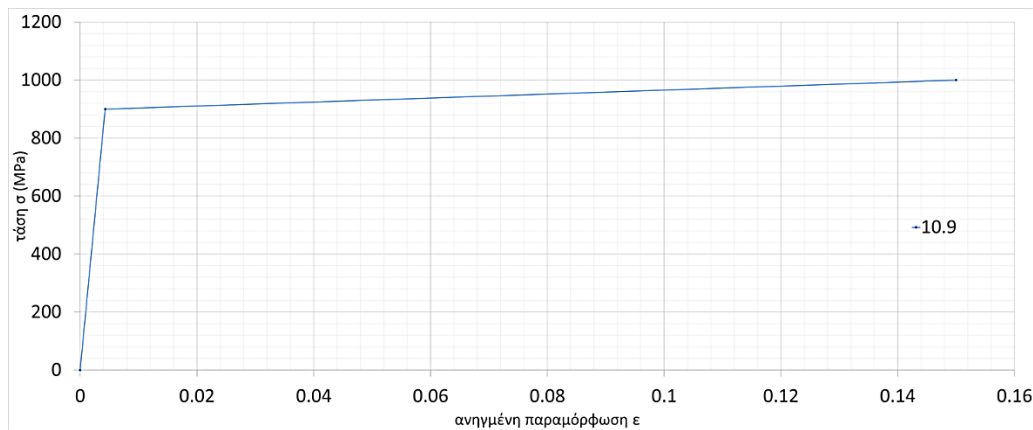
- μέτρο ελαστικότητας:  $E=210000\text{MPa}$
- όριο διαρροής:  $f_y=355\text{MPa}$
- όριο θραύσης:  $f_u=510\text{MPa}$



Σχήμα 3-2: Καταστατικός νόμος υλικού κελύφους πυλώνα και δακτυλιοειδών πελμάτων S355 που χρησιμοποιείται στα αριθμητικά προσομοιώματα

Για ποιότητα κοχλία 10.9:

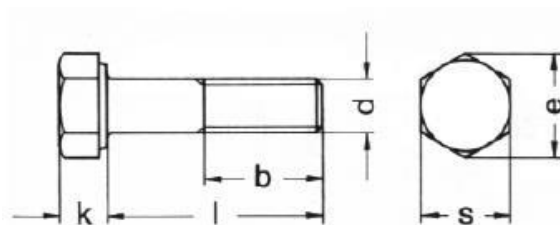
- μέτρο ελαστικότητας:  $E=210000\text{MPa}$
- όριο διαρροής:  $f_y=900\text{MPa}$
- όριο θραύσης:  $f_u=1000\text{MPa}$



Σχήμα 3-3: Καταστατικός νόμος υλικού κοχλίων 10.9 που χρησιμοποιείται στα αριθμητικά προσομοιώματα

Οι ακριβείς διαστάσεις του κοχλία M36 λαμβάνονται σύμφωνα με τον κανονισμό DIN6914 [8] και με τον συμβολισμό του σχήματος 3-4, αυτές είναι:

- διάμετρος κοχλία:  $d=36\text{mm}$
- διάμετρος οπής:  $d_0=36\text{mm}+3\text{mm}=39\text{mm}$
- διάμετρος εγγεγραμμένου κύκλου κεφαλής κοχλία:  $s=60\text{mm}$
- πάχος κεφαλής κοχλία:  $k=23\text{mm}$



Σχήμα 3-4: Διαστάσεις κοχλία [8]

### 3.3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

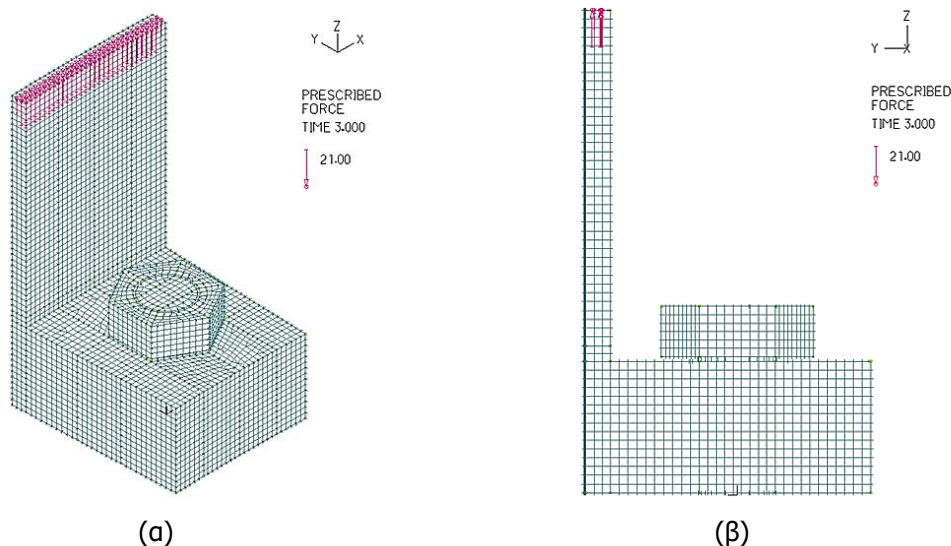
Κατά την αριθμητική προσομοίωση, προσομοιώνεται το τμήμα σύνδεσης που αντιστοιχεί στον περισσότερο εφελκυσμένο κοχλία. Το τμήμα της σύνδεσης αποτελείται από τον κοχλία, το τμήμα που του αντιστοιχεί από τα δακτυλιοειδή πέλματα και το έλασμα του πυλώνα. Αξιοποιώντας και τη συμμετρία του φορέα, στο προσομοίωμα περιλαμβάνονται ο κοχλίας, το άνω πέγμα και το κέλυφος του πυλώνα. Τα μέρη αυτά προσομοιώνονται με πεπερασμένα στοιχεία όγκου 8 κόμβων 1ης τάξεως με συμμετρικό πλέγμα, έναντι των ακριβέστερων 20 και 27 κόμβων ανωτέρας τάξεως για αποφυγή υπολογιστικού κόστους. Ακόμα, προσομοιώνεται το επίπεδο συμμετρίας ως τμήμα απείρους ακαμψίας, το οποίο θεωρείται ακλόνητο. Ο

κοχλίας προσομοιώνεται με ειδική υποκατηγορία στοιχείων όγκου, η οποία ονομάζεται bolt και μέσω αυτής μπορεί να γίνει η εισαγωγή της προέντασης. Η προένταση αντιστοιχεί σε δύναμη ίση με 571.9kN, η οποία ισούται με το 70% της εφελκυστικής αντοχής κοχλία M36 (εξίσωση 3.1):

$$F_{p,c} = 0.7 \times A_s \times f_{ub} = 0.7 \times 8.17\text{cm}^2 \times 100\text{kN/cm}^2 = 571.9\text{kN} \quad (3.1)$$

Η φύση του προβλήματος είναι έντονα μη γραμμική, λόγω της ύπαρξης των μη γραμμικών υλικών και της υπάρχουσας γεωμετρίας, αλλά κυρίως, λόγω της παραλαβής του εξωτερικώς επιβαλλόμενου φορτίου μέσω των δυνάμεων επαφής που αναπτύσσονται μεταξύ των επιφανειών. Οι επαφές που προκύπτουν κατά τη φόρτιση είναι: (α) η κάτω επιφάνεια του κοχλία με την άνω επιφάνεια του πέλματος, (β) ο κορμός του κοχλία με την άντυγα του πέλματος, (γ) η κάτω επιφάνεια του πέλματος με το επίπεδο συμμετρίας. Οι επαφές προσομοιώνονται με κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία επαφής (contact elements). Η ύπαρξη αυτού του είδους στοιχείων καθιστούν εξ' αρχής το πρόβλημα μη γραμμικό.

Στο σχήμα 3-5 παρουσιάζεται το προσομοίωμα για διατομή PL 60x130.



Σχήμα 3-5: Προσομοίωμα τμήματος σύνδεσης με πεπερασμένα στοιχεία για διατομή PL 60x130, (α) αξονομετρική άποψη, (β) πλάγια όψη

Επίσης, χρησιμοποιείται συντελεστής τριβής με τιμή 0.5 στις επιφάνειες επαφής. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στον συντελεστή ολίσθησης για προεντεταμένους κοχλίες, ο οποίος λαμβάνεται σύμφωνα με τον κανονισμό EN 1993-1-8 πιν. 3.7 [13]. Ειδικότερα, όταν η τιμή ισούται με 0.5, τότε η κατηγορία της επιφάνειας τριβής θεωρείται ότι έχει προκύψει από αμμοβολή. Όσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η τιμή αυτή (πρακτικά η μέγιστη τιμή είναι ίση με 0.5), τόσο αυξάνεται και το κόστος παραγωγής, αφού χρειάζεται διαφορετικός εξοπλισμός για να υλοποιηθεί. Ο συντελεστής τριβής δημιουργεί ένα είδος ευστάθειας κατά την επιβολή της φόρτισης και αναλόγως αυξάνει την αντοχή της διατομής και ιδιαίτερα την μεταφορά της διάτμησης.

Οι συνοριακές συνθήκες που λαμβάνονται υπόψη είναι: (α) η δέσμευση των κόμβων της κάτω επιφάνειας του κοχλία, (β) η παράβλεψη της προσομοίωσης συνέχειας της βάσης για πιο απλοποιημένη προσομοίωση και αποφυγή του υπολογιστικού κόστους. Στο άνω τμήμα του κελύφους δεσμεύονται όλοι οι περιφερειακοί κόμβοι, ώστε να ακολουθούν την παραμόρφωση των κόμβων που επιβάλλεται από το φορτίο. Έτσι, η

επιβολή της φόρτισης δρα πιο ομοιόμορφα. Ειδικότερα, στο κέλυφος δρα δύναμη ίση με 420kN, η οποία διανέμεται στους άνω κόμβους του κελύφους με βάση την αντίστοιχη ζώνη επιρροής τους. Οι κινηματικές συνθήκες ακολουθούν τη θεωρία μικρών παραμορφώσεων για μια αρχική εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Χρησιμοποιείται χάλυβας βάσης S355 και ποιότητα κοχλία 10.9.

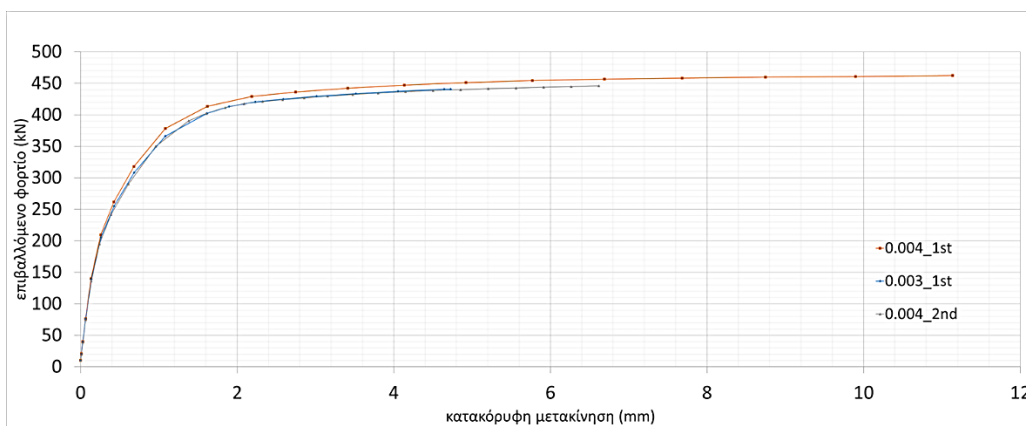
Η ανάλυση τελείται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο, κλείνουν τα κενά μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Τα κενά που επιλέγονται είναι 2mm από την άνω επιφάνεια της διατομής με την κάτω επιφάνεια του κοχλία και 1mm από την κάτω επιφάνεια της διατομής με το επίπεδο συμμετρίας. Στο δεύτερο στάδιο, εισάγεται η προένταση και στο τρίτο στάδιο, τελείται η ανάλυση collapse, κατά την οποία εκτιμώνται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, κατά τη διάρκεια της φόρτισης, και αποκτώνται δρόμοι ισορροπίας.

Η μέθοδος collapse ανήκει στην οικογένεια αλγορίθμων arc-length και μπορεί να υπολογίσει το φορτίο κατάρρευσης της κατασκευής, υπολογίζοντας εκ νέου το μητρώο στιβαρότητας του φορέα σε κάθε βήμα κατά την παραμόρφωση του φορέα [14].

Όσον αφορά την εξαγωγή αποτελεσμάτων, προκειμένου τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων να είναι επαρκώς αξιόπιστα, χρειάζεται να δημιουργηθεί πυκνό δίκτυο με τον κατάλληλο τύπο πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι τα αποτελέσματα να έχουν το λιγότερο δυνατόν σφάλμα λόγω της διακριτοποίησης του φορέα. Τότε, ο φορέας θα μπορεί να ακολουθήσει πιο πιστά τις παραμορφώσεις που πρόκειται να αναπτυχθούν κατά την εξωτερική επιβολή της φόρτισης, καθώς, και την ανάπτυξη φαινομένων, όπως του λυγισμού και της επαφής μεταξύ των επιφανειών.

Ακόμα, είναι γνωστό πως τα πεπερασμένα στοιχεία ανώτερης τάξεως υπολογίζουν με περισσότερη ακρίβεια τις μεταβολές των τάσεών τους, καθώς μπορούν να παραμορφωθούν μέσω συναρτήσεων σχήματος οι οποίες περιγράφουν πιο πιστά το πεδίο μετακινήσεων. Εντούτοις, το υπολογιστικό κόστος της εφαρμογής τους δεν είναι αμελητέο. Για την αποφυγή της χρήσης τους, εξετάζεται η βαθμιαία πύκνωση του δικτύου με στοιχεία 1ης τάξεως για τις περιπτώσεις μεγέθους στοιχείων 0.004m και 0.003m, ενώ εξετάζεται και η περίπτωση με στοιχεία ανώτερης τάξεως για μέγεθος στοιχείων 0.004m.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 3-6 είναι οι δρόμοι ισορροπίας της διατομής PL 60x130 για τα διάφορα μεγέθη πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιούνται. Μέσω του σχήματος 3-6 μπορεί να παρατηρηθεί πως η περίπτωση 0.004m 1ης τάξεως στοιχείων προκύπτει με σχετικά μεγαλύτερη δυσκαμψία, σε σύγκριση με τις περιπτώσεις 0.003m 1ης τάξεως και 0.004m ανώτερης τάξεως, οι οποίες ταυτίζονται και δίνουν σχετικά πιο εύκαμπτο φορέα. Χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφορές, οι δρόμοι ισορροπίας ταυτίζονται. Έτσι, για τις προσομοιώσεις επιλέγονται 1ης τάξεως στοιχεία με μέγεθος 0.004m, όπου είναι εφικτό.



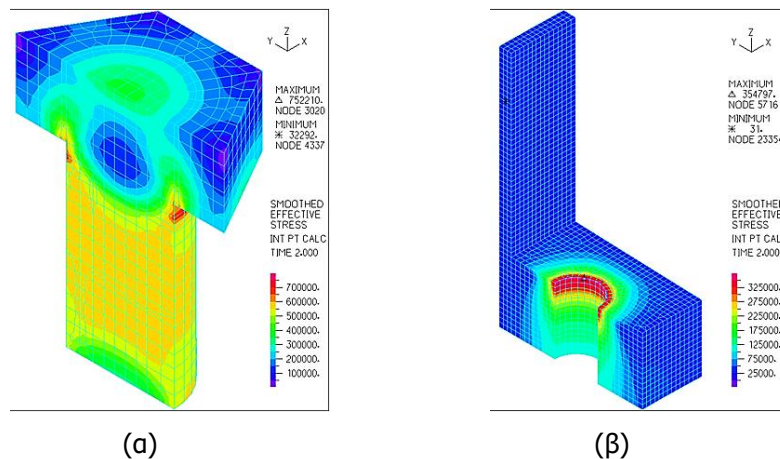
Σχήμα 3-6: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 για μέγεθος στοιχείων 0.004m, 0.003m 1ης τάξεως στοιχεία και για μέγεθος 0.004m ανώτερης τάξεως στοιχεία

### 3.4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

Παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα για τη βασική περίπτωση βραχέος L διατομής PL 60x130 και με κοχλία M36. Τα κύρια αποτελέσματα που αναλύονται είναι ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης, οι ισοδύναμες τάσεις και οι παραμορφώσεις σε χαρακτηριστικά σημεία για τον κοχλία και τη διατομή, καθώς και η δύναμη προέντασης τη στιγμή που εισάγεται στον κοχλία. Ακόμα, παρουσιάζονται η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση. Ειδικότερα, η θέση υπολογισμού της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στη συγκόλληση βρίσκεται στη συναρμογή του κελύφους με τη διατομή εσωτερικά της σύνδεσης στον άξονα συμμετρίας.

Κατά τη στιγμή της προέντασης, η δύναμη που επιβάλλεται στον κοχλία εισάγεται βαθμιαία ωστόσο επιτευχθεί σύγκλιση. Η δύναμη που επιδιώκεται να εισαχθεί, εφόσον χρησιμοποιείται κοχλίας M36 ποιότητας 10.9, ανέρχεται στο 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία και είναι ίση με 571.9kN. Η βαθμιαία εισαγωγή της προέντασης κρίνεται σκόπιμη, αφού δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων το ποσοστό της προέντασης που μπορεί να φέρει η διατομή. Παρουσιάζονται οι ισοδύναμες τάσεις και οι παραμορφώσεις του κοχλία και της διατομής στο τελευταίο βήμα κατά την εισαγωγή της προέντασης (σχήμα 3-7). Μπορεί να παρατηρηθεί πως οι αναπτυσσόμενες τάσεις του κοχλία είναι ομοιόμορφες, ενώ παράλληλα, λόγω της επαφής της κεφαλής του κοχλία με της βάσης, ο κοχλίας εντείνεται περισσότερο στη περιοχή της επαφής.

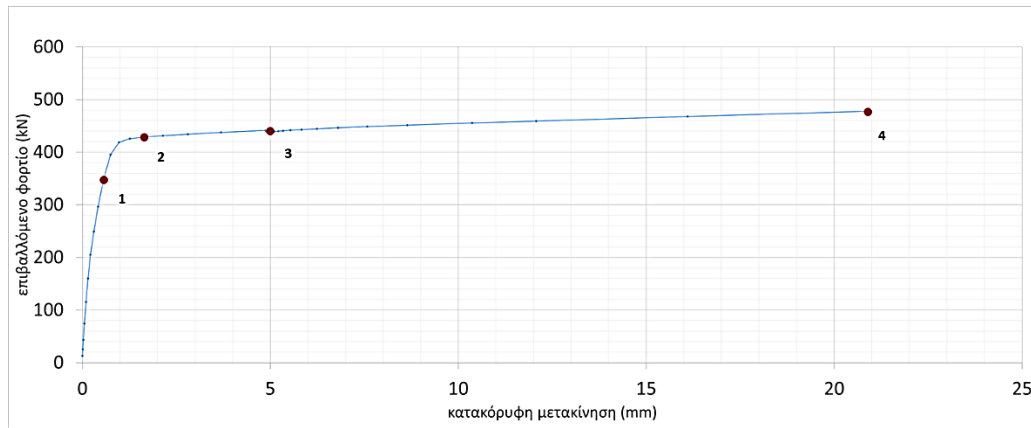
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



Σχήμα 3-7: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή

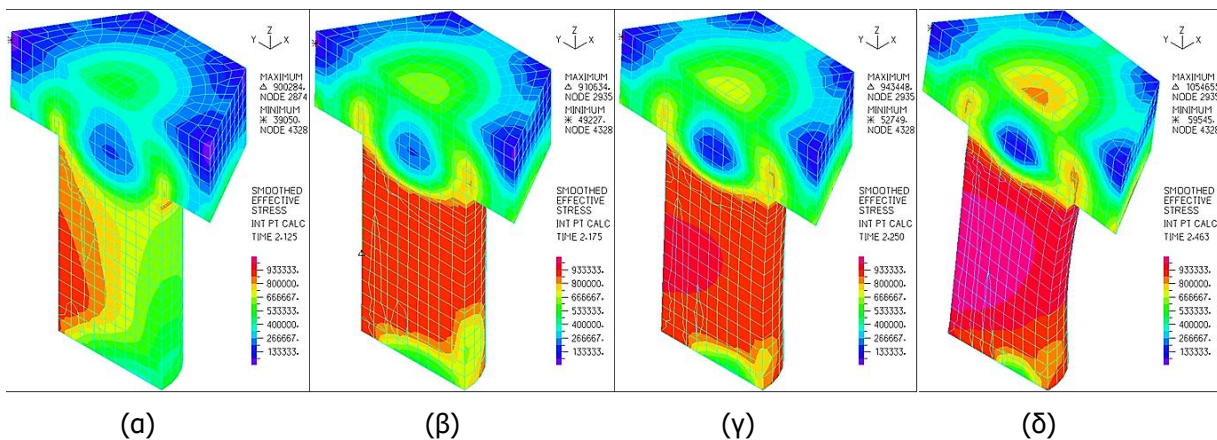
Έπειτα, παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης (σχήμα 3-8). Ο δρόμος ισορροπίας χρησιμοποιείται προκειμένου να εκτιμηθούν η αντοχή, η μεταβολή της δυσκαμψίας, η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να φθάσει η σύνδεση και αν ο μετελαστικός κλάδος του φορέα είναι ευσταθής. Για την εύρεση του δρόμου ισορροπίας, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος collapse για μέγιστη μετατόπιση 18mm και αρχική διέγερση ίση με 0.00001m στον μεσαίο κόμβο της άνω επιφάνειας του κελύφους [12]. Για την κατανόηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης κατά την παραμόρφωση, παρουσιάζονται οι ισοδύναμες τάσεις και οι παραμορφώσεις του κοχλία και της διατομής σε χαρακτηριστικά σημεία (σχήματα 3-9 και 3-10).





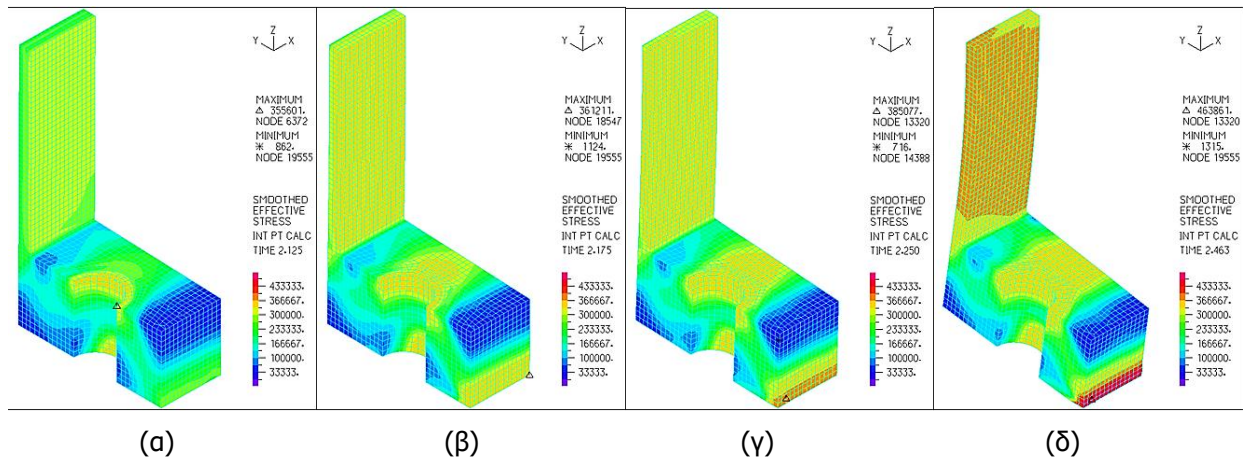
Σχήμα 3-8: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36

Μέσω χαρακτηριστικών σημείων μπορούν να κατανοηθούν καλύτερα η ανακατανομή των τάσεων και ο μηχανισμός ανάληψης του εξωτερικώς επιβαλλόμενου φορτίου. Έτσι, στο σημείο 1, η σύνδεση εξακολουθεί να έχει σημαντική δυσκαμψία, καθώς βρίσκεται πριν τη διαρροή. Στο σημείο 2, υπάρχει έντονη μείωση της δυσκαμψίας. Αυτό οφείλεται στη τοπική διαρροή της διατομής και ακολούθως, στη διαρροή του κοχλία. Στο σημείο 3, η δυσκαμψία διατηρείται έχοντας μεταλυγισμική αντοχή μετά τη διαρροή και επομένως, ο κλάδος χαρακτηρίζεται ως ευσταθής [14]. Η μεταλυγισμική αντοχή προκύπτει λόγω της κράτυνσης του υλικού του κοχλία και της διατομής. Στο σημείο 4, που αποτελεί το τελευταίο βήμα της ανάλυσης, καθορίζεται η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η σύνδεση, η οποία μπορεί να είναι είτε η αστοχία της διατομής ή του κοχλία, είτε πως ο φορέας έφθασε στην προβλεπόμενη μετατόπιση που ζητήθηκε από τον χρήστη ή και λόγω δυσκολίας στη σύγκληση του προβλήματος. Ειδικότερα, όσον αφορά την ανακατανομή των τάσεων κατά την επιβολή της εξωτερικής φόρτισης, η δύναμη του κοχλία μεταβιβάζεται στη σύνδεση εντεινοντας, αρχικά, την περιοχή γύρω από τον κοχλία. Ακολουθεί ο εφελκυσμός της πλευράς του κοχλία προς την πλευρά του κελύφους.



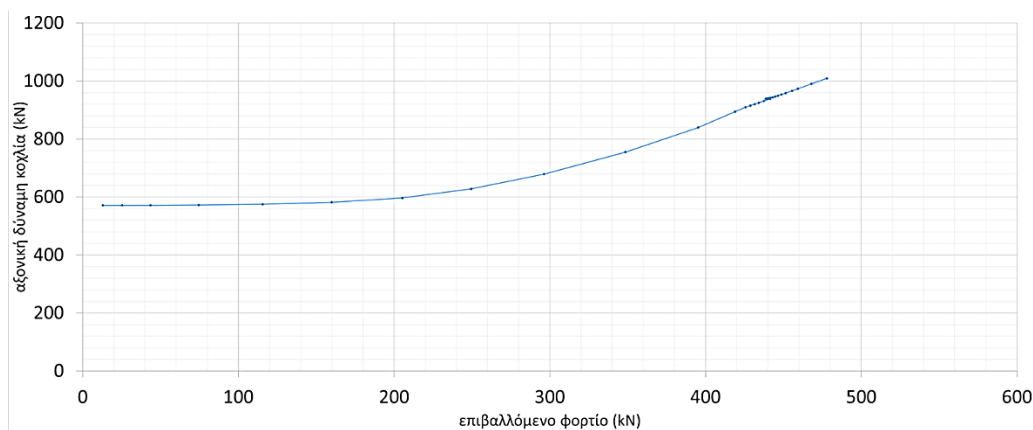
Σχήμα 3-9: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4





Σχήμα 3-10: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

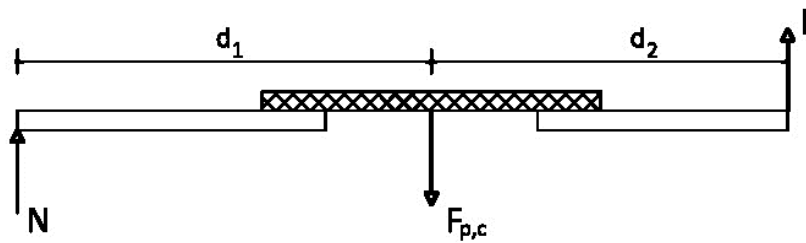
Στο σχήμα 3-11 παρουσιάζεται η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία. Η δύναμη που αναπτύσσεται έχει άμεση συσχέτιση με τη δύναμη προέντασης που εισάγεται. Όση είναι η δύναμη προέντασης, τόση είναι και η αρχική αξονική δύναμη του κοχλία. Κατά την επιβολή της φόρτισης, η μεταβολή της αξονικής δύναμης είναι γραμμική περί τα 100kN. Μετά τη γραμμική μεταβολή, η αξονική δύναμη του κοχλία φθάνει σε τιμή τέτοια, ώστε ο φορέας να ισορροπεί με το τελικό εξωτερικώς επιβαλλόμενο φορτίο.



Σχήμα 3-11: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [17], [18] μπορεί να γίνει προσεγγιστικός αναλυτικός υπολογισμός της αξονικής δύναμης του κοχλία. Για την πιστότητα των αριθμητικών αναλύσεων είναι σκόπιμο να ελέγχονται τα αποτελέσματα μέσω αναλυτικών αναλύσεων, οι οποίες θα εκτιμούν ένα άνω ή και κάτω όριο των αποτελεσμάτων. Έτσι, τα αποτελέσματα της αξονικής δύναμης του κοχλία ελέγχονται μέσω του συστήματος πέλματος και κοχλία, όπου:

- $F_{p,c}$  η αξονική δύναμη του κοχλία η οποία στην αρχή είναι ίση με τη δύναμη της προέντασης  
 $F$  το επιβαλλόμενο φορτίο και  
 $N$  η αντίδραση μεταξύ των πελμάτων



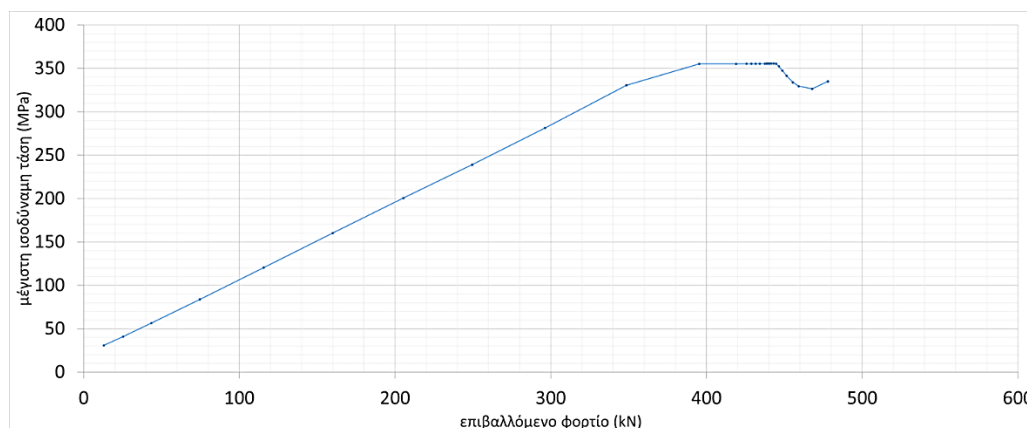
Σχήμα 3-12: Ισορροπία συστήματος πέλματος και κοχλία

Η ακριβής θέση του μοχλοβραχίονα της αντίδρασης  $N$  δεν είναι γνωστή. Για μεγάλο επιβαλλόμενο φορτίο  $F$  ή για μικρή δύναμη προέντασης, η δύναμη  $N$  βρίσκεται στο άκρο του πέλματος, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3-12. Από την ισορροπία του πέλματος και με αντικατάσταση των τιμών, όταν το επιβαλλόμενο φορτίο είναι ίσο με  $F = 420\text{kN}$ , προκύπτει (εξίσωση 3.2):

$$F_{p,c} \times d_1 = F \times (d_1 + d_2) \rightarrow F_{p,c} \times 60\text{mm} = 420\text{kN} \times 130\text{mm} \rightarrow F_{p,c} = 910\text{kN} \quad (3.2)$$

Από το διάγραμμα της αξονικής δύναμης του κοχλία και του επιβαλλόμενου φορτίου του σχήματος 3-11, η αξονική δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται, όταν το επιβαλλόμενο φορτίο είναι ίσο με  $F = 420\text{kN}$ , είναι περίπου ίση με  $920\text{kN}$ . Επομένως, διαπιστώνεται πολύ καλή προσέγγιση σε σύγκριση με τα αριθμητικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, όσον αφορά τη περίπτωση (iv) της παραγράφου 4.2 με τις πιο ακριβείς συννοριακές συνθήκες. Για μικρότερη επιβαλλόμενη δύναμη  $F$  ή για μεγαλύτερη δύναμη προέντασης, ο μοχλοβραχίονας της αντίδρασης πρέπει να μειωθεί, ώστε τα αποτελέσματα να γίνουν πιο ακριβή.

Στο σχήμα 3-13 παρουσιάζεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση. Η θέση της συγκόλλησης που μελετάται βρίσκεται στη συναρμογή του κελύφους με τη διατομή. Είναι γνωστό, πως συνήθως, η αστοχία της σύνδεσης συμβαίνει στην περιοχή της συγκόλλησης, συγκεκριμένα, στη συναρμογή του κελύφους, λόγω κόπωσης. Έτσι, κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση της μέγιστης ισοδύναμης τάσης. Αρχικά, παρατηρείται γραμμική αύξηση των τάσεων, ωστόσο αρχίζει να διαρρέει για αυξημένο πλέον επιβαλλόμενο φορτίο.



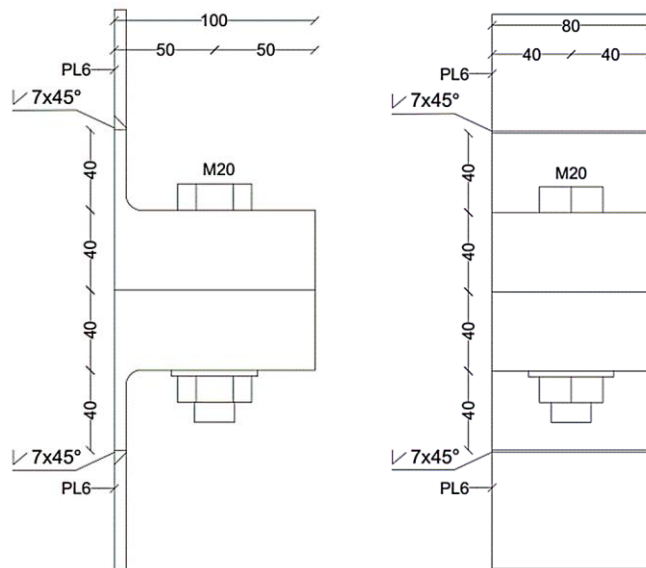
Σχήμα 3-13: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

### 3.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Για την περαιτέρω διερεύνηση των δακτυλιοειδών συνδέσεων μιας τυπικής ανεμογεννήτριας, εξετάζεται η συμπεριφορά τους μέσω δοκιμών υπό κλίμακα. Σκοπός της διερεύνησης είναι ο καθορισμός της αντοχής τους μέσω στατικής φόρτισης. Το δοκίμιο που χρησιμοποιείται για τα πειράματα αποτελεί ένα μέρος της συνολικής σύνδεσης, η οποία περιλαμβάνει έναν κοχλία, το τμήμα που του αντιστοιχεί από τα δακτυλιοειδή πέλματα και το έλασμα του πυλώνα (σχήμα 3-1(a)), όπως το αριθμητικό προσομοίωμα που περιγράφηκε στην παράγραφο 3.3.

Οι διαστάσεις του δοκιμίου προέκυψαν υπό κλίμακα από μια πραγματική σύνδεση πυλώνα ανεμογεννήτριας. Το τμήμα σύνδεσης προς δοκιμή (σχήμα 3-14), αποτελείται από πέλματα πάχους 40mm, πλάτους 100mm και μήκους 80mm. Το έλασμα του πυλώνα έχει πάχος 6mm και ο χάλυβας είναι ποιότητας S275. Ο κοχλίας είναι διαμέτρου M20 και ποιότητας 10.9, ο οποίος προεντάθηκε με ροπή σύσφιξης 600Nm.

Για τη στήριξη του δοκιμίου διαμορφώθηκε μια διάταξη (σχήμα 3-15), στην οποία το άνω τμήμα του δοκιμίου είναι συνδεδεμένο σε μια παχιά πλάκα μέσω διπλών πελμάτων και 4 προεντεταμένων κοχλιών M20 8.8 (ροπή προέντασης 300Nm), ώστε να θεωρείται ακλόνητο, ενώ το κάτω τμήμα είναι συνδεδεμένο με τα αντίστοιχα ελάσματα στο έμβολο. Το άνω και το κάτω μέρος της διάταξης συνδέονται μεταξύ τους με ντίζες διαμέτρου  $\varnothing 33$ , οι οποίες είναι πυκνά εξασφαλισμένες για την αποφυγή λυγισμού τους κατά τη διάρκεια επιβολής της δύναμης.



Σχήμα 3-14: Διαστάσεις τμήματος σύνδεσης προς δοκιμή

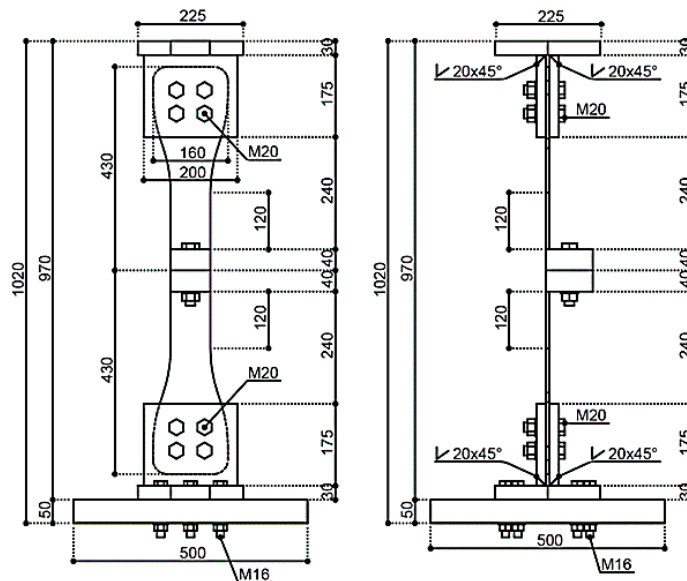


Σχήμα 3-15: Πειραματική διάταξη

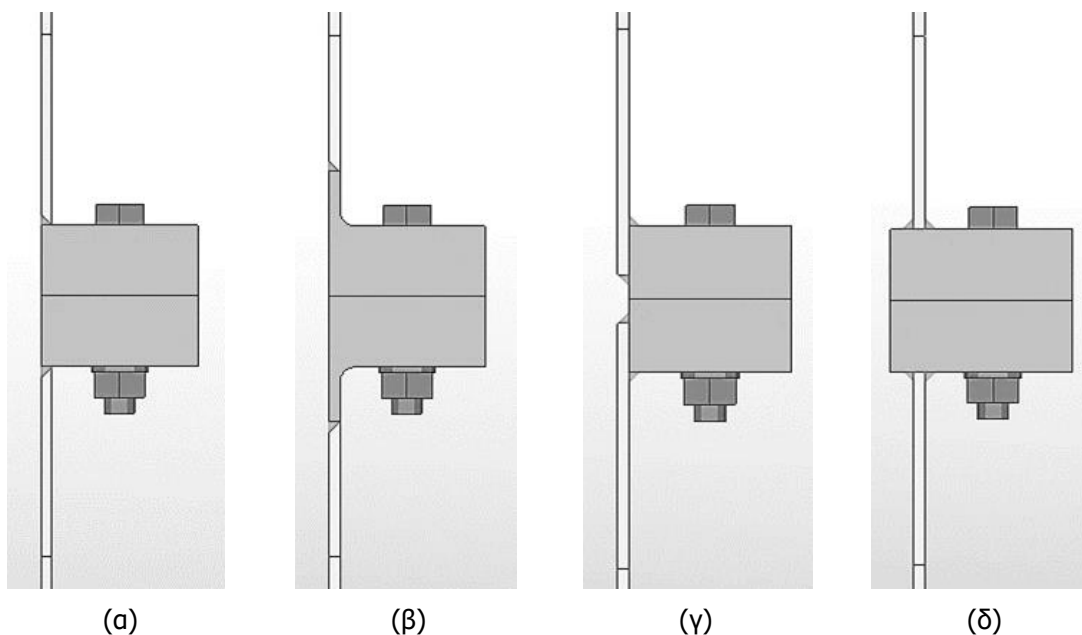
Για τη διαμόρφωση της σύνδεσης του δοκιμίου με το έμβολο και με την άνω πλάκα, το έλασμα του πυλώνα διευρύνθηκε ομαλά προκειμένου να διαμορφωθεί χώρος για τη σύνδεση, αλλά και για να ομαλοποιηθεί η μεταφορά των τάσεων (σχήμα 3-16). Το συνολικό ύψος της πειραματικής διάταξης πάνω από το έμβολο είναι περίπου 1m, το συνολικό ύψος κάθε τμήματος του δοκιμίου μαζί με τη διεύρυνση είναι 430mm, ενώ η διεύρυνση ξεκινά 120mm πάνω από το πέλμα. Το πλάτος των τμημάτων αυτών διευρύνεται από 80mm στα 160mm.

Για την υλοποίηση της σύνδεσης υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι συγκόλλησης, όπως της απλής εσωραφής, της εσωραφής με προέκταση του ελάσματος του πέλματος, της διπλής εξωραφής και της εξωραφής με

προεξοχή του πέλματος (σχήμα 3-17). Ο τρόπος συγκόλλησης του εξεταζόμενου δοκιμίου έχει γίνει για εσωραφή με προέκταση του ελάσματος του πέλματος, ο οποίος αποτελεί τον πιο συνήθη τρόπο κατασκευής των δακτυλιοειδών συνδέσεων.



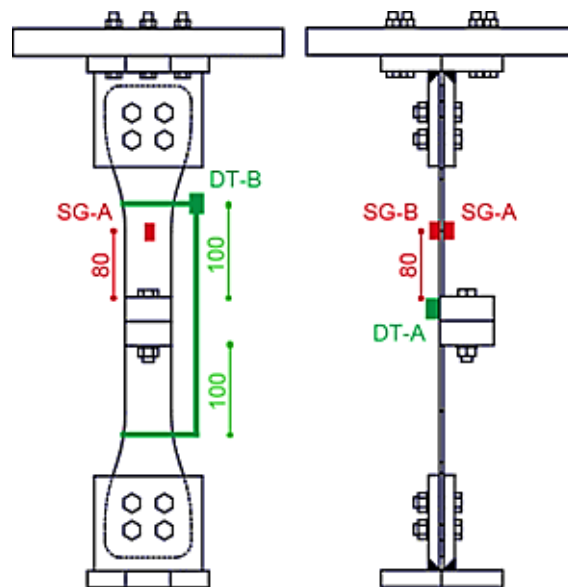
Σχήμα 3-16: Διαστάσεις πειραματικού δοκιμίου



Σχήμα 3-17: Διαφορετικοί τύποι δοκιμίων με βάση τον τρόπο συγκόλλησης, (α) απλή εσωραφή, (β) εσωραφή με προέκταση πέλματος, (γ) διπλή εξωραφή, (δ) εξωραφή με προεξοχή πέλματος [7]

Στα πειράματα στατικής φόρτισης, προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή, τα δοκίμια υποβάλλονται σε εφελκυσμό μέχρι να αστοχήσει η συγκόλληση, ο κοχλίας ή το έλασμα. Για την καταγραφή των μετρήσεων των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο μετρητές τάσεων (strain gauges), οι οποίοι τοποθετήθηκαν στο

εμπρός (SG-A) και πίσω μέρος (SG-B) του ελάσματος του πυλώνα του άνω τμήματος του δοκιμίου, 80mm πάνω από το πέλμα (σχήμα 3-18). Η τοποθέτηση των δύο μετρητών τάσεων στο ίδιο ύψος αλλά στις διαφορετικές παρειές του ελάσματος του πυλώνα κρίθηκε σκόπιμο να γίνει, έτσι ώστε να αποτυπωθεί κατά πόσο στο δοκίμιο επιβάλλεται και στροφή λόγω κάμψης. Για την καταγραφή των μετακινήσεων, τοποθετήθηκαν δύο επιμηκυσσιόμετρα, ένα στο πίσω μέρος του πέλματος (DT-A), το οποίο αποτυπώνει το άνοιγμα μεταξύ των δύο πελμάτων, και ένα στο άνω τμήμα του δοκιμίου (DT-B), 100mm πάνω από το πέλμα, το οποίο αποτυπώνει τη μετακίνηση του ενός τμήματος του δοκιμίου σε σχέση με το άλλο.



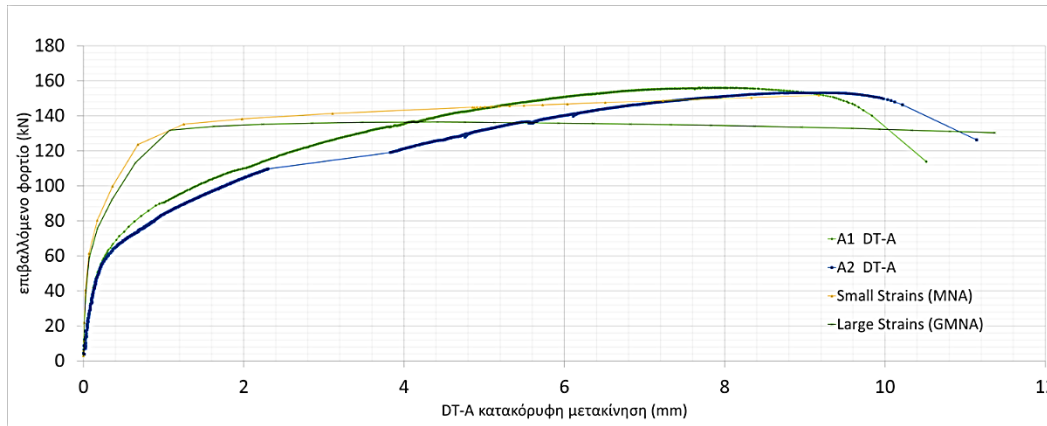
Σχήμα 3-18: Στοιχεία μέτρησης τάσεων και επιμηκυσσιόμετρα

Επιδιώκοντας να υπάρχει ταύτιση της αριθμητικής προσομοίωσης με των πειραμάτων, συγκρίνονται τα αποτελέσματά τους. Έπειτα, γίνονται παραμετρικές αναλύσεις με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι σε διάγραμμα φορτίου – μετατόπισης στις θέσεις των επιμηκυσσιόμετρων DT-A και DT-B και αφορούν τις εξής παραμετρικές αναλύσεις: (α) θεωρία μικρών και μεγάλων παραμορφώσεων, (β) διαφορετική χρήση υλικού χάλυβα στη βάση ποιότητας S235, S275, S355 και τύπου DNV, (γ) συντελεστή ενδοσιμότητας στις επιφάνειες επαφής.

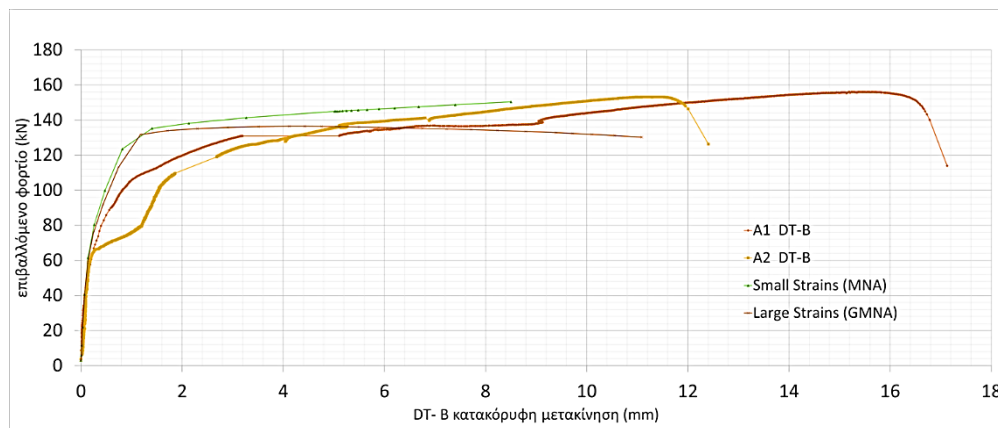
#### α) θεωρία μικρών και μεγάλων παραμορφώσεων

Εξετάζεται η επιρροή της θεωρίας μικρών (small strains) και μεγάλων (large strains) παραμορφώσεων. Η θεωρία μικρών παραμορφώσεων λαμβάνει υπόψη την ισορροπία του φορέα στην απαραμόρφωτη κατάσταση (μέθοδος ανάλυσης MNA), ενώ η θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων λαμβάνει την ισορροπία του φορέα στην παραμορφωμένη κατάσταση (μέθοδος ανάλυσης GMNA). Για τις αριθμητικές προσομοιώσεις χρησιμοποιείται χάλυβας S355 για τη βάση και ποιότητα κοχλίας 10.9. Στις επιφάνειες επαφής χρησιμοποιείται συντελεστής ενδοσιμότητας  $1 \times 10^{-9}$ .

Συγκρίνοντας τους δρόμους ισορροπίας (σχήματα 3-19 και 3-20) των αριθμητικών προσομοιωμάτων φαίνεται πως η θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων δίνει σχετικά μικρότερη δυσκαμψία με σχετικά μειούμενη αντοχή. Για μεγαλύτερη εποπτεία στη σύγκριση, παρουσιάζονται μαζί και τα αποτελέσματα των δοκιμών A1, A2. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται η θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων στα προσομοιώματα, αφού λόγω τις διάταξης του φορέα, πρόκειται να δημιουργηθούν σημαντικές μετακινήσεις.



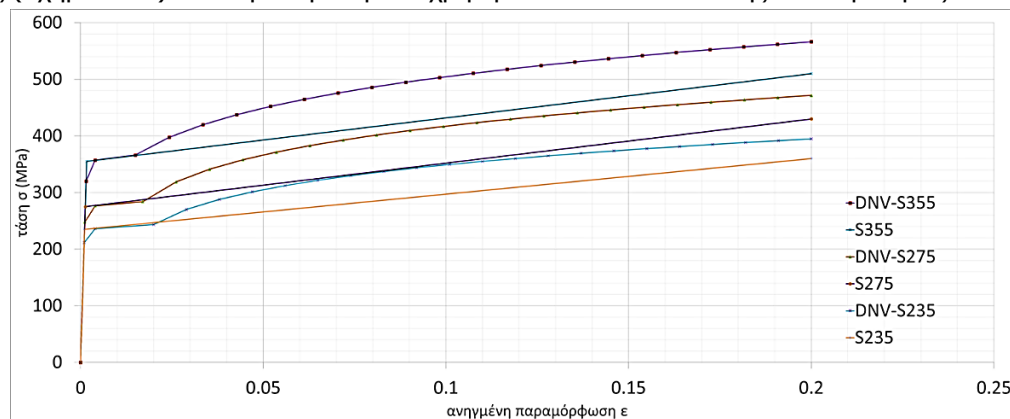
Σχήμα 3-19: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για θεωρία μικρών (MNA) και μεγάλων παραμορφώσεων (GMNA) στη θέση DT-A



Σχήμα 3-20: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για θεωρία μικρών (MNA) και μεγάλων παραμορφώσεων (GMNA) στη θέση DT-B

β) διαφορετική χρήση υλικού χάλυβα στη βάση

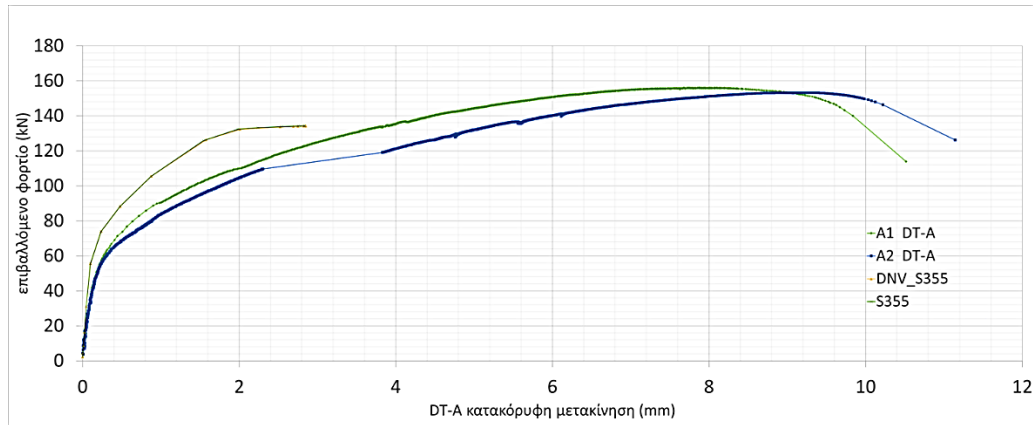
Για την εύρεση της πραγματικής αντοχής του υλικού των δοκιμών A1 και A2 εξετάζονται υλικά χάλυβα για τη βάση της σύνδεσης μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι χάλυβας ποιότητας S235, S275 και S355 όπως προκύπτουν από τον κανονισμό EN1993-1-1 (πιν. 3.1) [21] και υλικά χάλυβα τύπου DNV, που περιγράφονται με μεγαλύτερη ακρίβεια από τον αντίστοιχο καταστατικό νόμο κάθε ποιότητας (σχήμα 3-21). Στα προσομοιώματα χρησιμοποιείται συντελεστής ενδοσιμότητας  $3 \times 10^{-9}$ .



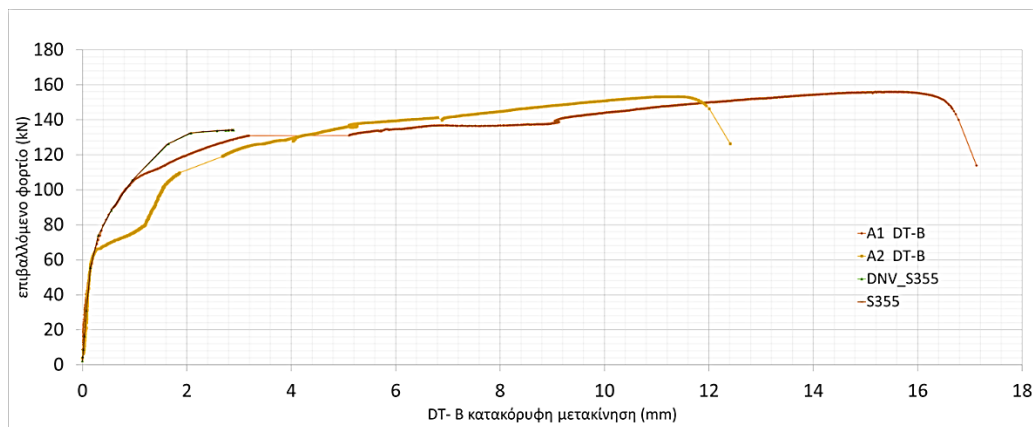
Σχήμα 3-21: Καταστατικός νόμος υλικών χάλυβα τύπου DNV και ποιότητας S355, S275 και S235



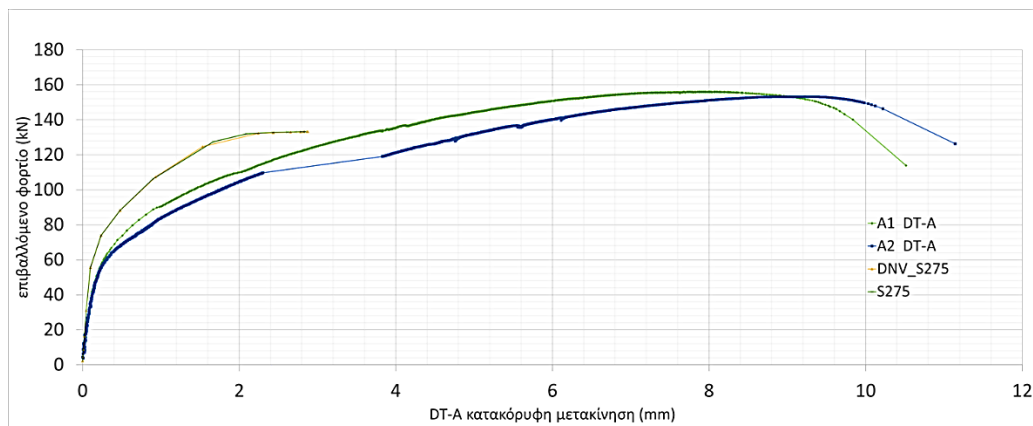
Συγκρίνοντας τους δρόμους ισορροπίας για κάθε ποιότητα χάλυβα (σχήματα 3-22 έως 3-27), μπορεί να παρατηρηθεί πως οι δρόμοι ισορροπίας ουσιαστικά ταυτίζονται. Για την περίπτωση DNV(S235), όμως, το υλικό φαίνεται να προσαρμόζεται καλύτερα στην παραμόρφωση των δοκιμών.



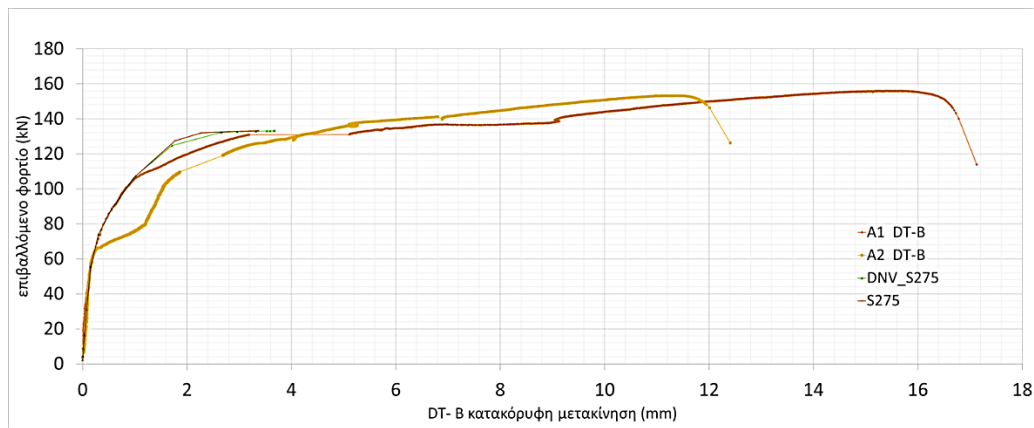
Σχήμα 3-22: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για χάλυβα ποιότητας S355 και τύπου DNV(S355) στη θέση DT-A



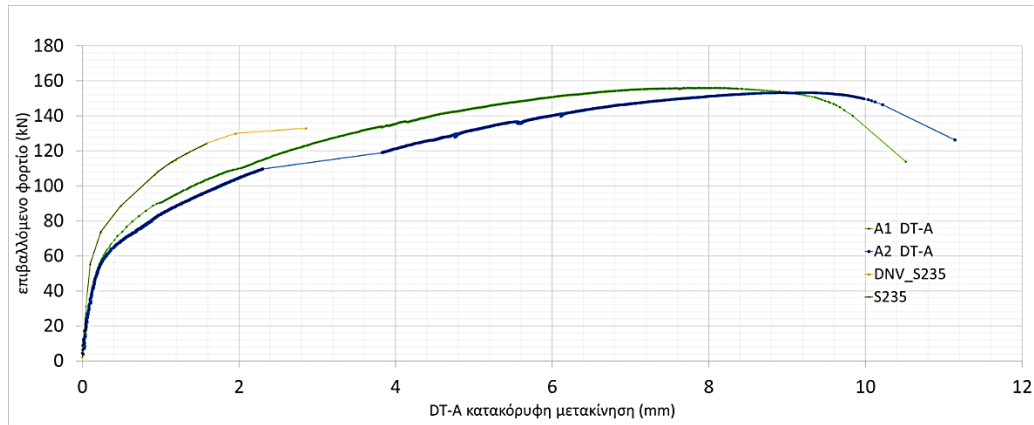
Σχήμα 3-23: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για χάλυβα ποιότητας S355 και τύπου DNV(S355) στη θέση DT-B



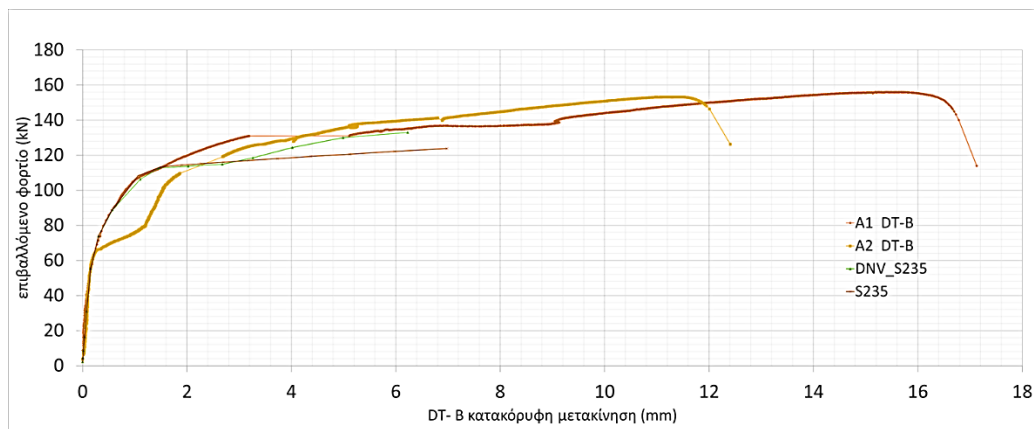
Σχήμα 3-24: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για χάλυβα ποιότητας S275 και τύπου DNV(S275) στη θέση DT-A



Σχήμα 3-25: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για χάλυβα ποιότητας S275 και τύπου DNV(S275) στη θέση DT-B



Σχήμα 3-26: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για χάλυβα ποιότητας S235 και τύπου DNV(S235) στη θέση DT-A



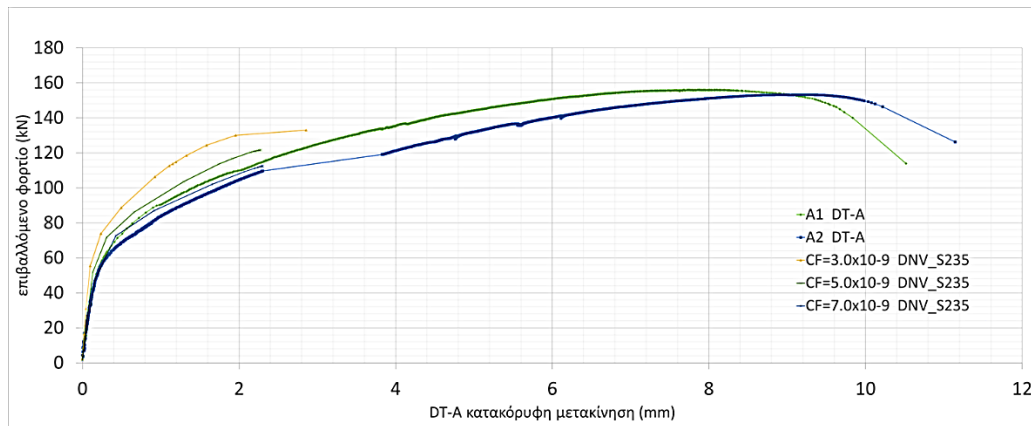
Σχήμα 3-27: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για χάλυβα ποιότητας S235 και τύπου DNV(S235) στη θέση DT-B



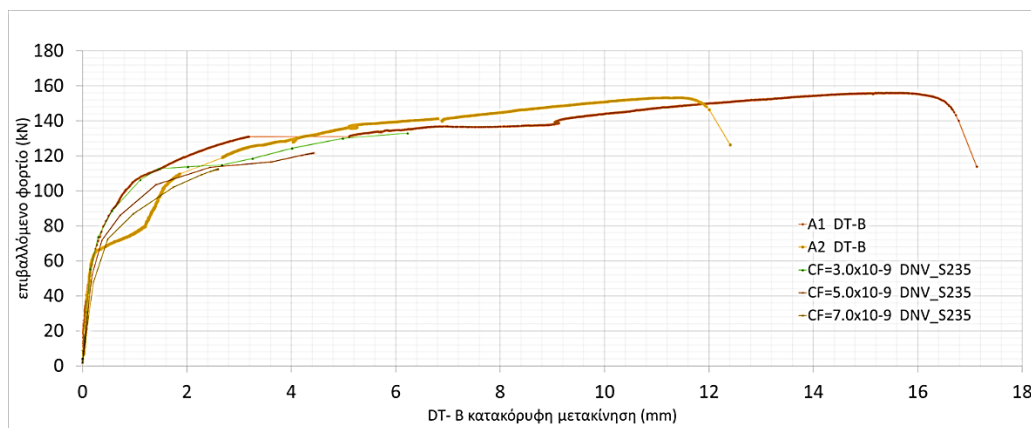
γ) συντελεστής ενδοσιμότητας στις επιφάνειες επαφής

Χρησιμοποιώντας συντελεστή ενδοσιμότητας στις επιφάνειες επαφής το πρόβλημα γίνεται πιο εύκαμπτο. Έτσι, εξετάζεται η επιρροή του για τιμές  $3 \times 10^{-9}$ ,  $5 \times 10^{-9}$  και  $7 \times 10^{-9}$  με χάλυβα ποιότητας DNV(S235).

Συγκρίνοντας τους δρόμους ισορροπίας (σχήματα 3-28 και 3-29) προκύπτει για συντελεστή ενδοσιμότητας  $7 \times 10^{-9}$  να προσαρμόζονται καλύτερα τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων πάνω σε εκείνα των δοκιμών.



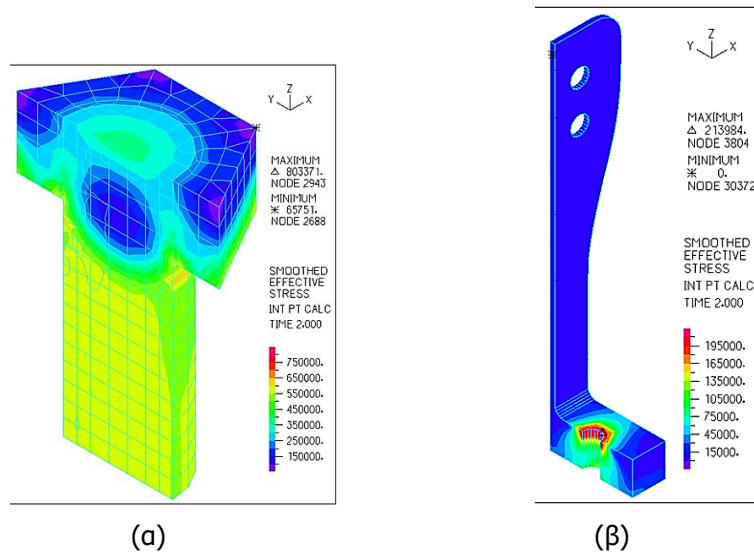
Σχήμα 3-28: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για συντελεστή ενδοσιμότητας  $3 \times 10^{-9}$ ,  $5 \times 10^{-9}$  και  $7 \times 10^{-9}$  στη θέση DT-A



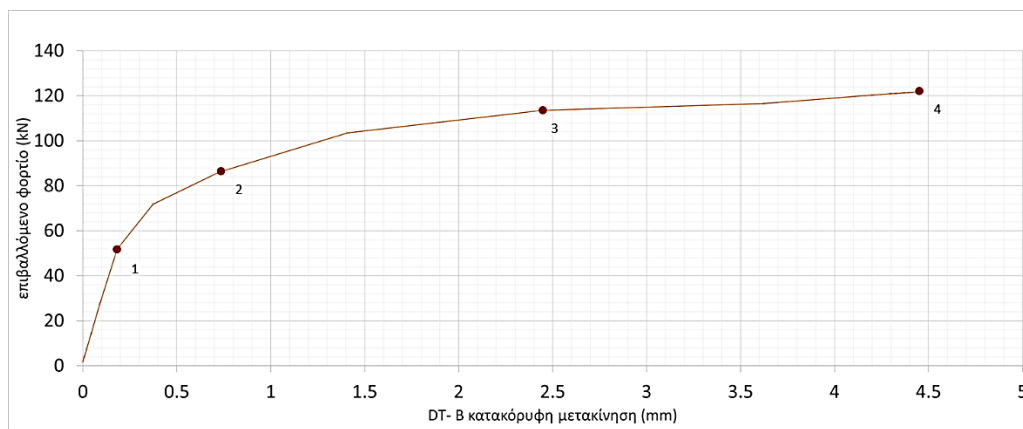
Σχήμα 3-29: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 40x100 δοκιμών A1, A2 και αριθμητικών προσομοιώσεων για συντελεστή ενδοσιμότητας  $3 \times 10^{-9}$ ,  $5 \times 10^{-9}$  και  $7 \times 10^{-9}$  στη θέση DT-B

Ακόμα, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά τη στιγμή της προέντασης (σχήμα 3-30), του δρόμου ισορροπίας (σχήμα 3-31) για χαρακτηριστικά σημεία των τάσεων και των παραμορφώσεων του κοιλία και της διατομής (σχήματα 3-32 και 3-33), της αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στον κοιλία (σχήμα 3-34) και της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στη συγκόλληση (σχήμα 3-35). Τα αποτελέσματα αναφέρονται σε προσομοίωμα με υλικά DNV(S235) στη βάση και ποιότητα 10.9 για τον κοιλία με συντελεστή ενδοσιμότητας  $CF=5 \times 10^{-9}$ .

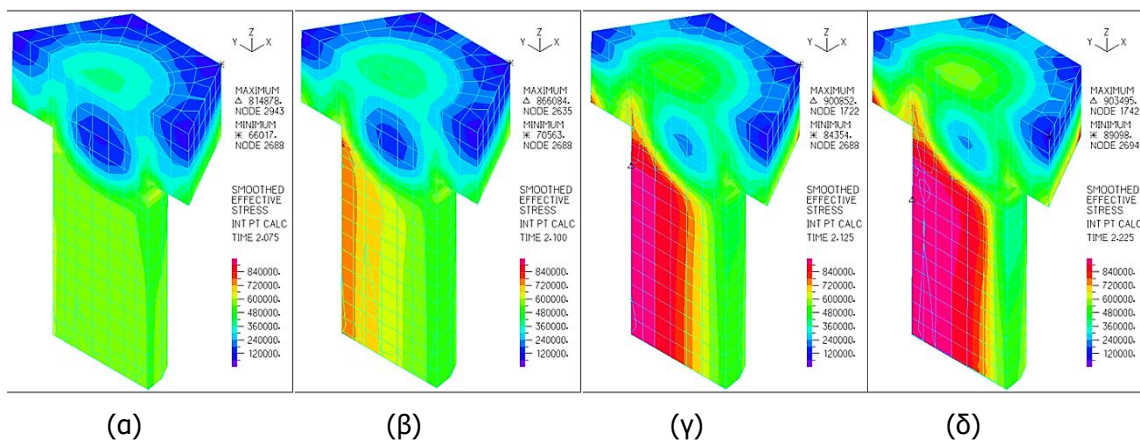
Διατομή PL 40x100, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 171.5\text{kN}$



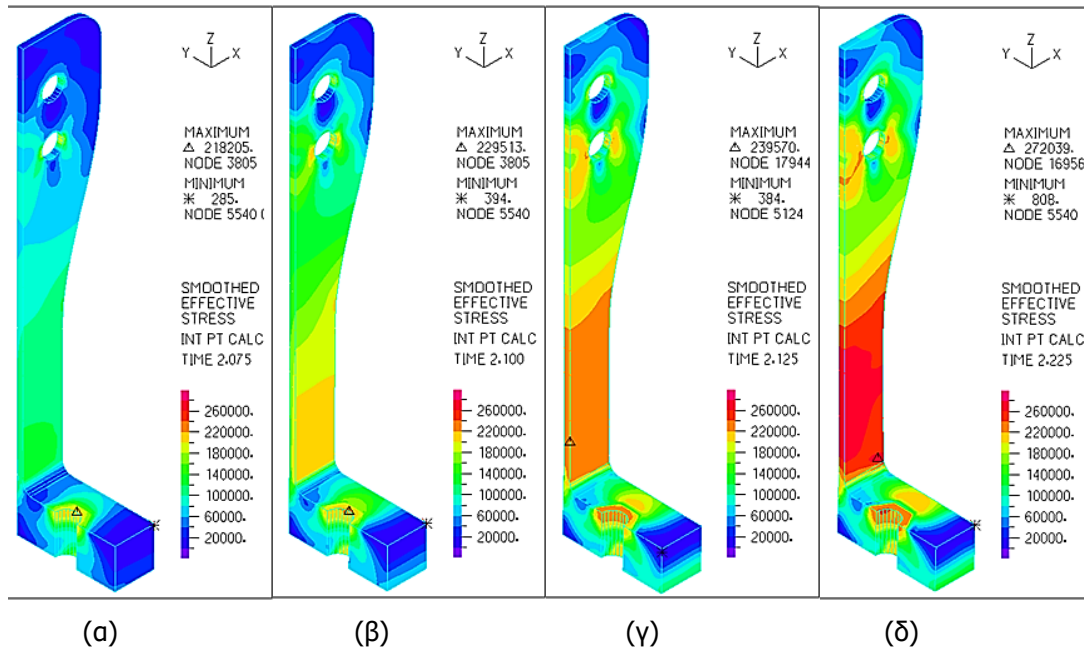
Σχήμα 3-30: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 171.5\text{kN}$  για (α) κοχλία M20 σε τομή και (β) διατομή PL 40x100 σε τομή



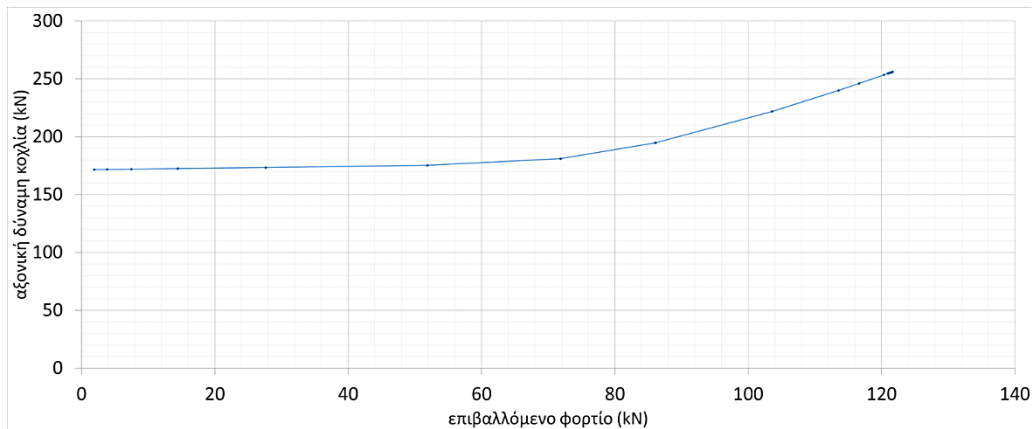
Σχήμα 3-31: δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 40x100 με κοχλία M20



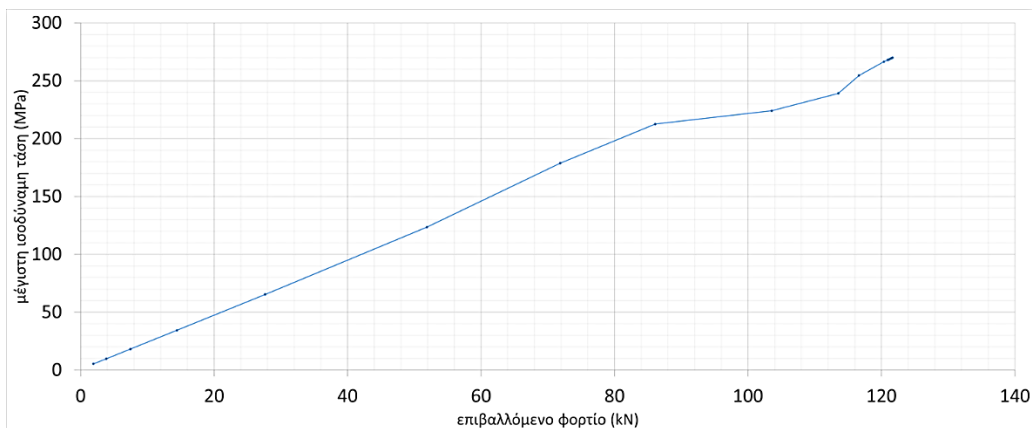
Σχήμα 3-32: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 40x100, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 3-33: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 40x100, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 3-34: Αξονική δύναμη κοχλία M20 για διατομή PL 40x100



Σχήμα 3-35: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση του κελύφους για διατομή PL 40x100



## 4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L

### 4.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του συμβατικού βραχέος L με διατομή PL 60x130 και κοχλία M36, γίνονται παραμετρικές αναλύσεις με σκοπό την πιστότερη προσομοίωση της σύνδεσης, ώστε να ανταποκρίνεται στο φυσικό πρόβλημα που περιγράφει. Έτσι, εξετάζονται οι ακόλουθες περιπτώσεις για:

→ επιρροή της θεωρίας μικρών (small strains) και μεγάλων (large strains) παραμορφώσεων,

→ επιρροή του συντελεστή ενδοσιμότητας με τιμές  $CF=0$  και  $CF=10^{-9}$ ,

→ επιρροή των συνοριακών συνθηκών του κοχλία και της βάσης,

→ επιρροή του υλικού χάλυβα της βάσης και του κοχλία, όπου:

(α) για τη βάση χρησιμοποιείται χάλυβας DNV(S355), S355, S275, S235 και

(β) για τον κοχλία χρησιμοποιείται χάλυβας ποιότητας 10.9 με και χωρίς κράτυνση, και ποιότητας 8.8

→ επιρροή της τριβής στις επιφάνειες επαφής με τιμή συντελεστή 0.5, 0.4 και 0.2.

### 4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμετρικών αναλύσεων του συμβατικού βραχέος L διατομής PL 60x130 για κάθε περίπτωση σύμφωνα με τις αντίστοιχες κατηγορίες της παραγράφου 4.1 (σχήματα 4-1 έως 4-60). Επισημαίνεται, πως τα αποτελέσματα παρουσιάζονται εφόσον έχουν προκύψει όμοια με αυτά της βασικής περίπτωσης στην παράγραφο 3.4. Σε περίπτωση διαφορετικών αποτελεσμάτων, η περιγραφή τους γίνεται στην αντίστοιχη παραμετρική κατηγορία.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στον δρόμο ισορροπίας της σύνδεσης, στις ισοδύναμες τάσεις και στις παραμορφώσεις σε χαρακτηριστικά σημεία για τον κοχλία και τη διατομή, καθώς και στη δύναμη προέντασης τη στιγμή που εισάγεται στον κοχλία. Ακόμα, παρουσιάζονται η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση. Ειδικότερα, η θέση υπολογισμού της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στη συγκόλληση βρίσκεται στη συναρμογή του κελύφους με τη διατομή, εσωτερικά της σύνδεσης πάνω στον άξονα συμμετρίας.

Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι περιπτώσεις κατά την προσομοίωση με τις εξής διαφορές της διατομής PL 60x130:

i) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=0/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου πάκτωση, βάση=χωρίς προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S355 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

ii) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου πάκτωση, βάση=χωρίς προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S355 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

iii) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=χωρίς προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S355 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

iv) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S355 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

v) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=DNV(S355) και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

vi) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S275 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

vii) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S235 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

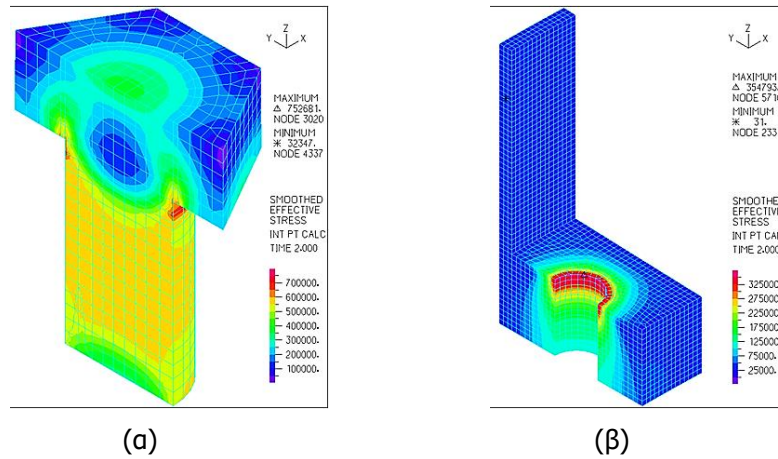
viii) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=DNV(S355) και κοχλίας=10.9 χωρίς κράτυνση

ix) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=DNV(S355) και κοχλίας=10.9 χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια

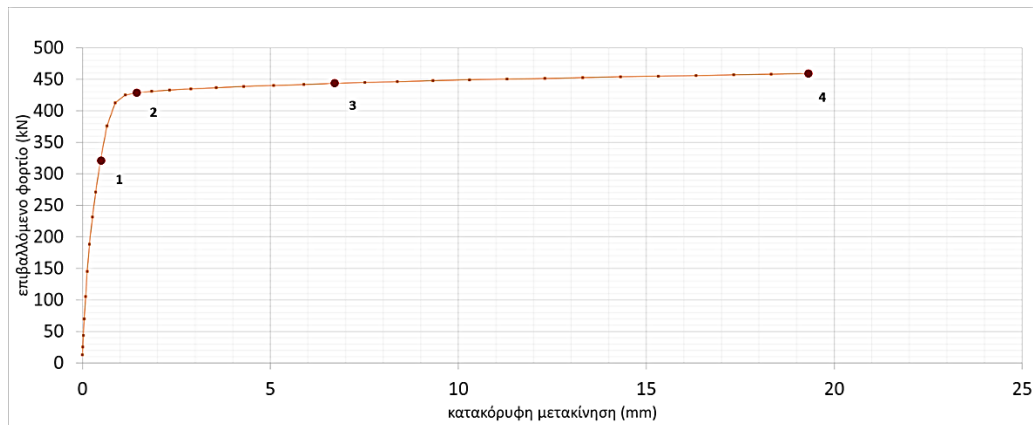
x) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}/$  συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=DNV(S355) και κοχλίας=8.8

ι) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=0$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου πάκτωση, βάση=χωρίς προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S355 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

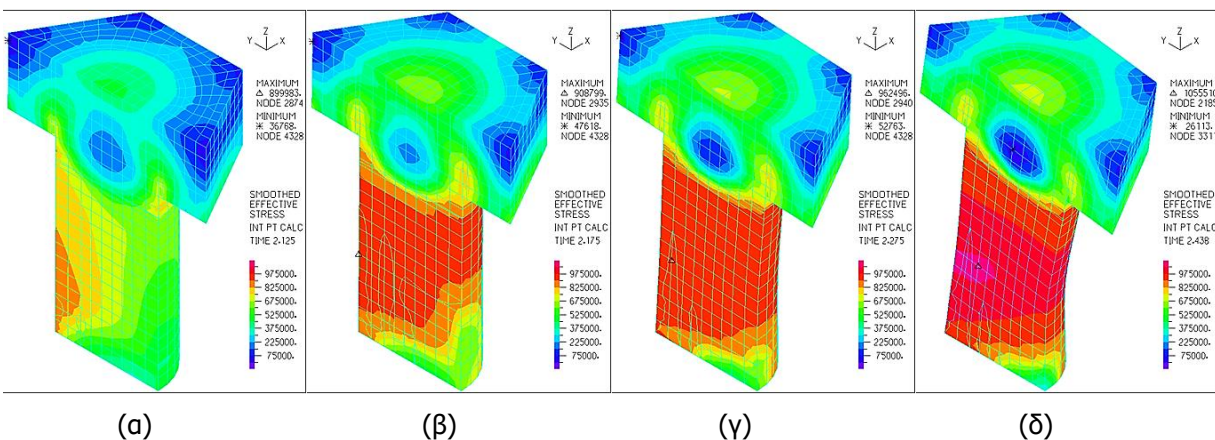
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



Σχήμα 4-1: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή

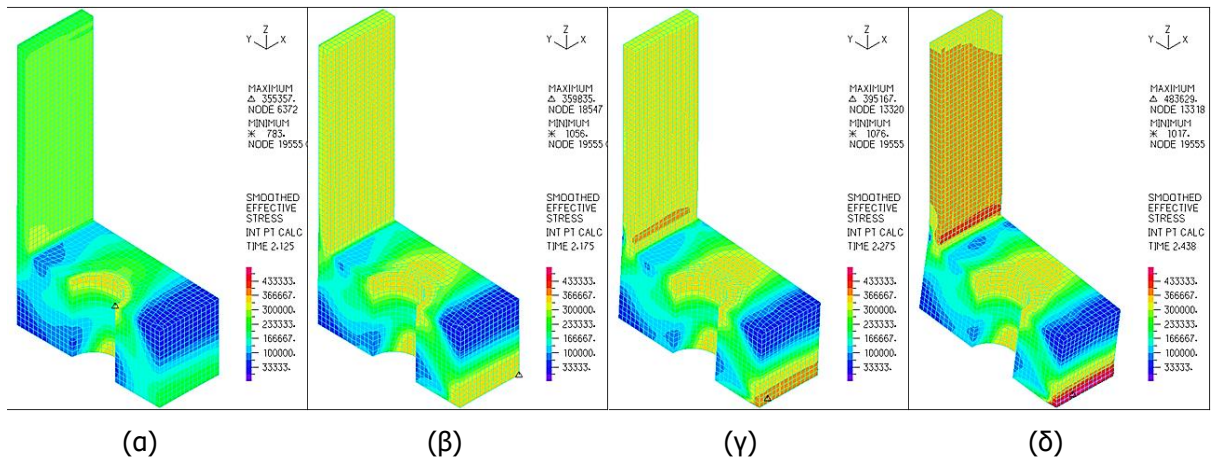


Σχήμα 4-2: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36

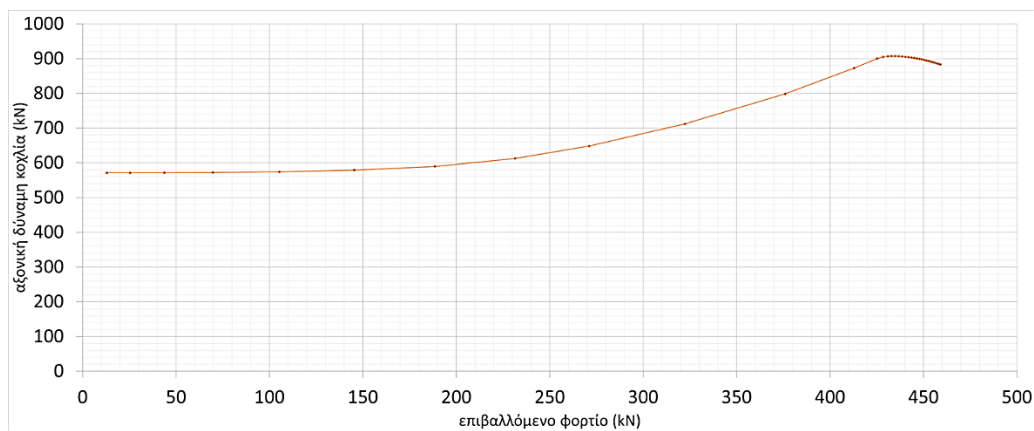


Σχήμα 4-3: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

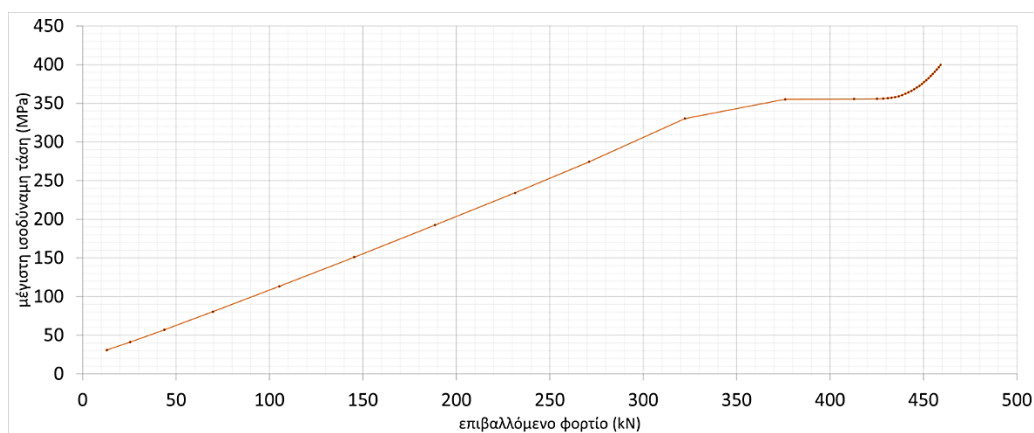




Σχήμα 4-4: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-5: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130

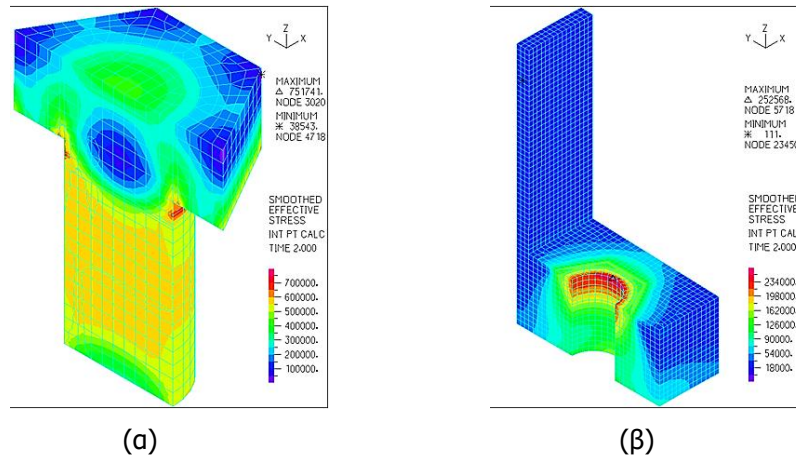


Σχήμα 4-6: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

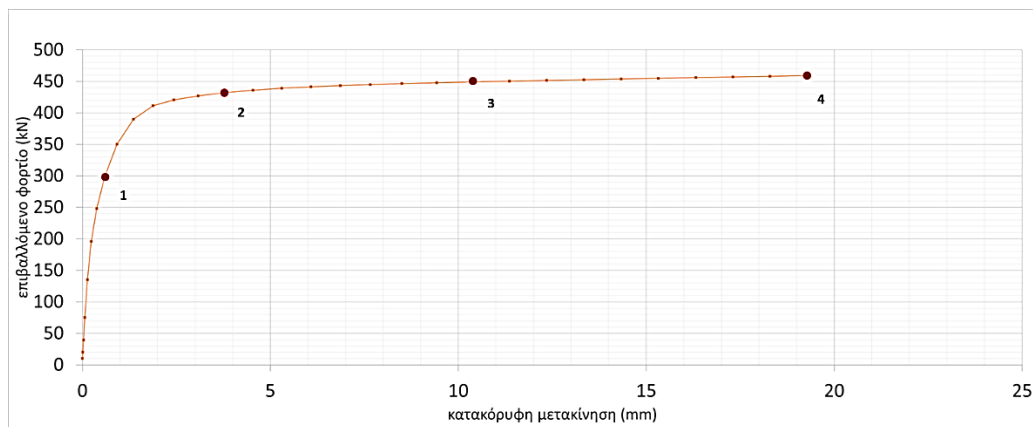


ii) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου πάκτωση, βάση=χωρίς προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S355 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

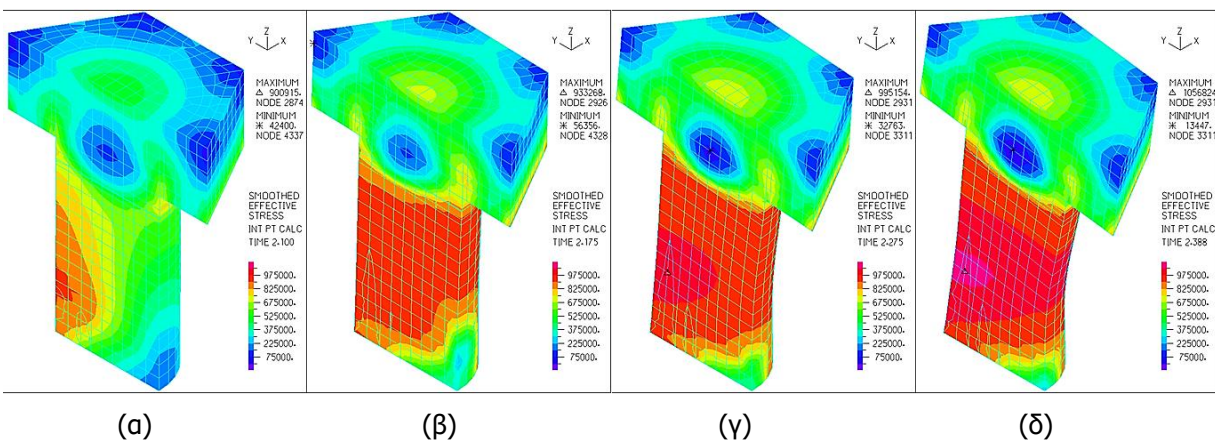
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



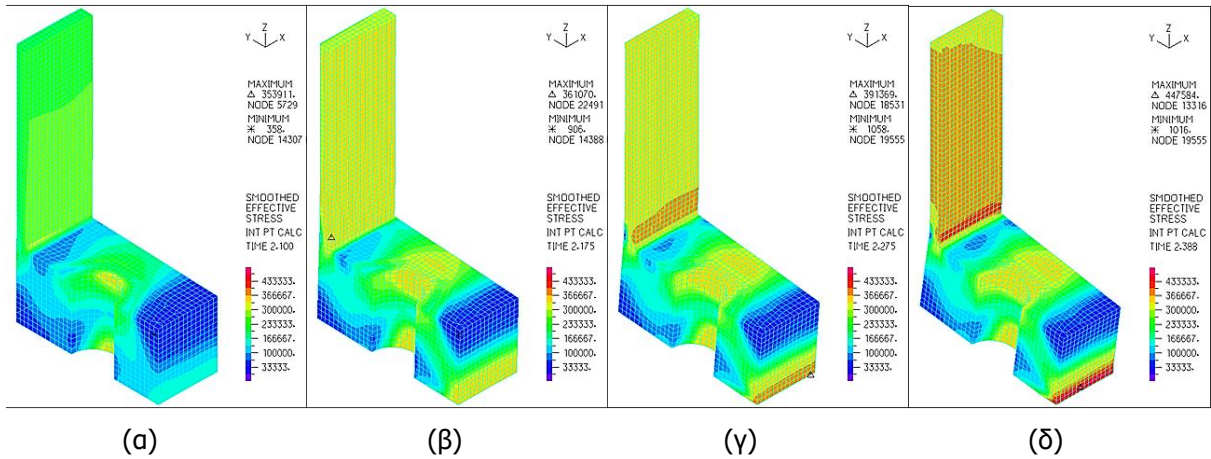
Σχήμα 4-7: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή



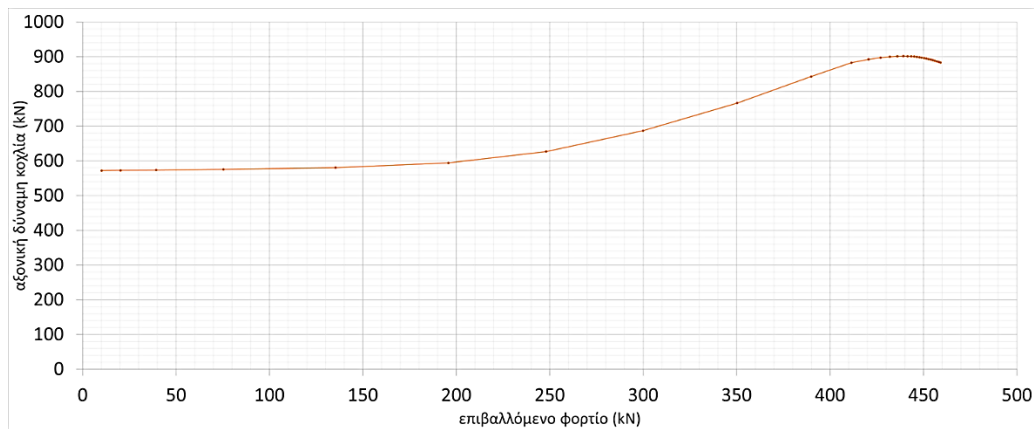
Σχήμα 4-8: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36



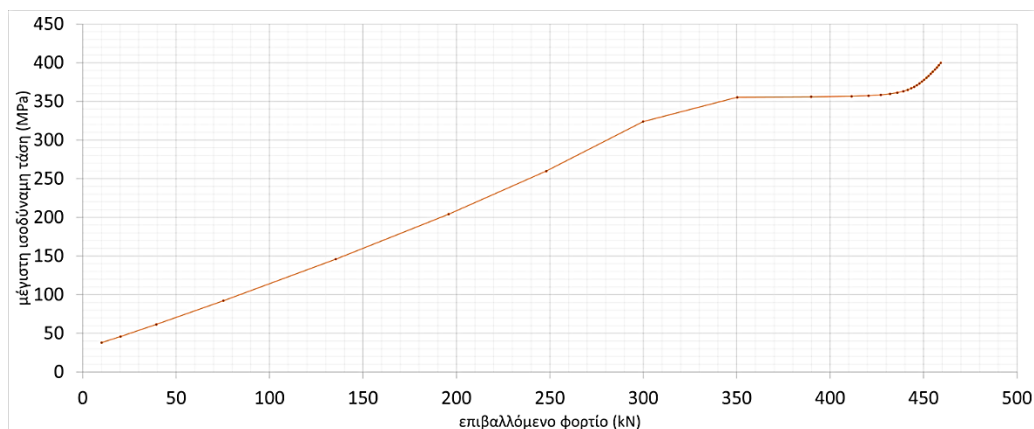
Σχήμα 4-9: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-10: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



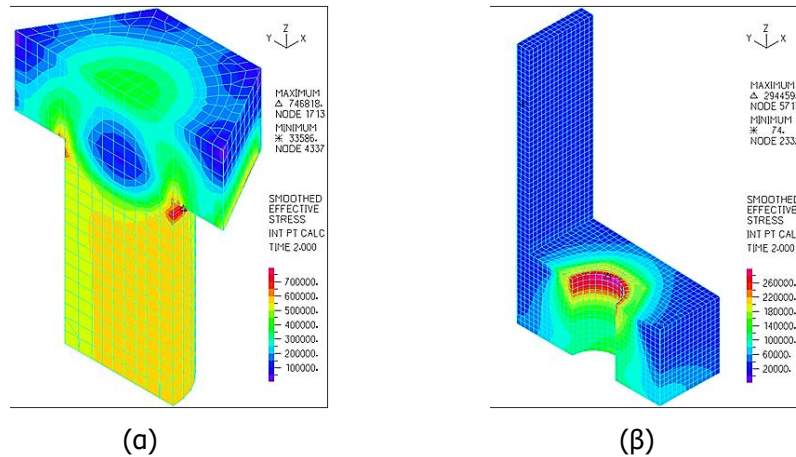
Σχήμα 4-11: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130



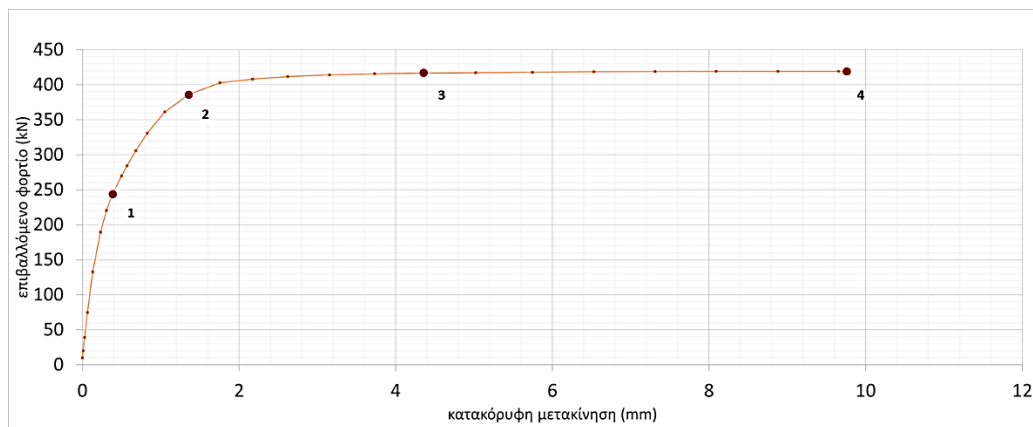
Σχήμα 4-12: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

iii) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=χωρίς προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S355 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

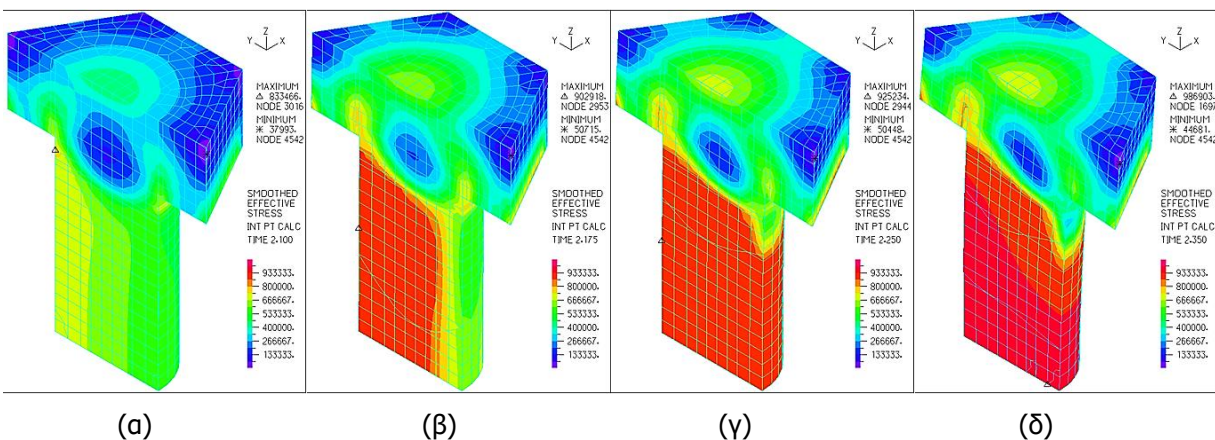
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



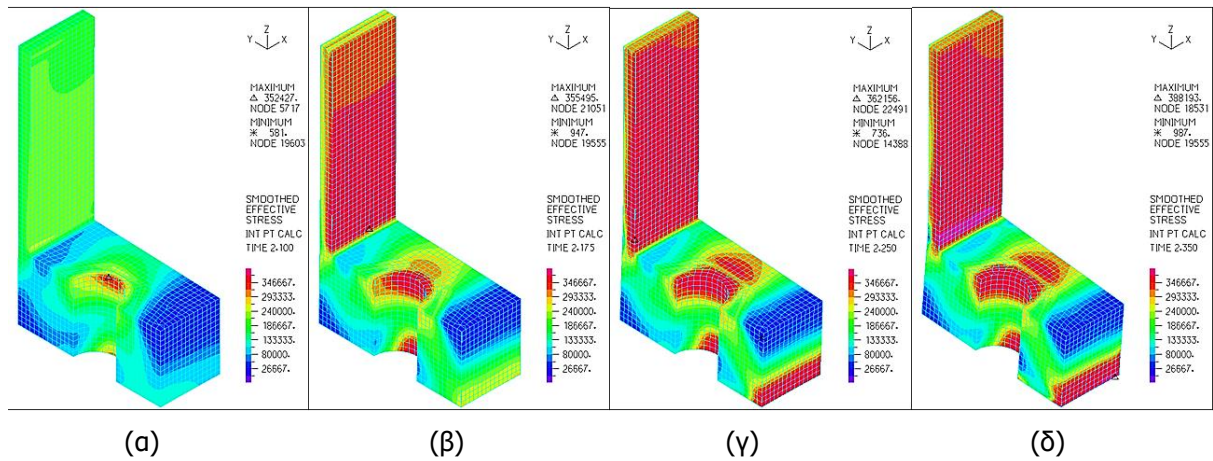
Σχήμα 4-13: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή



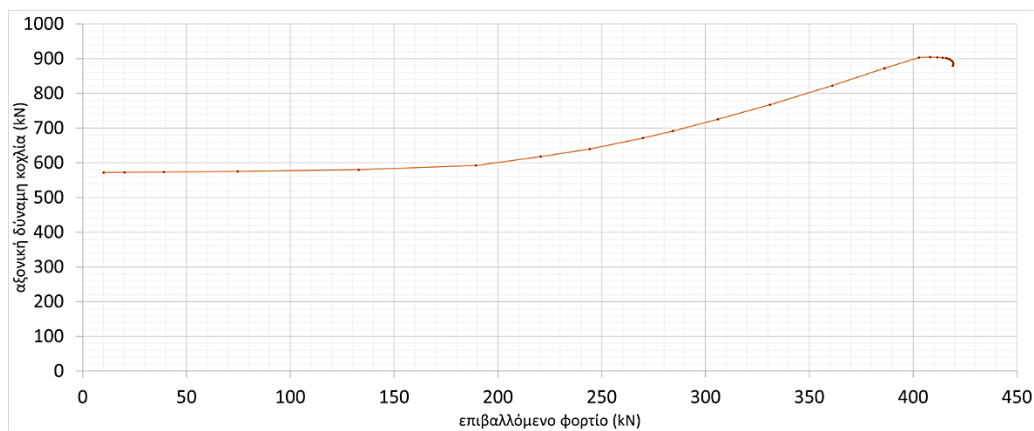
Σχήμα 4-14: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36



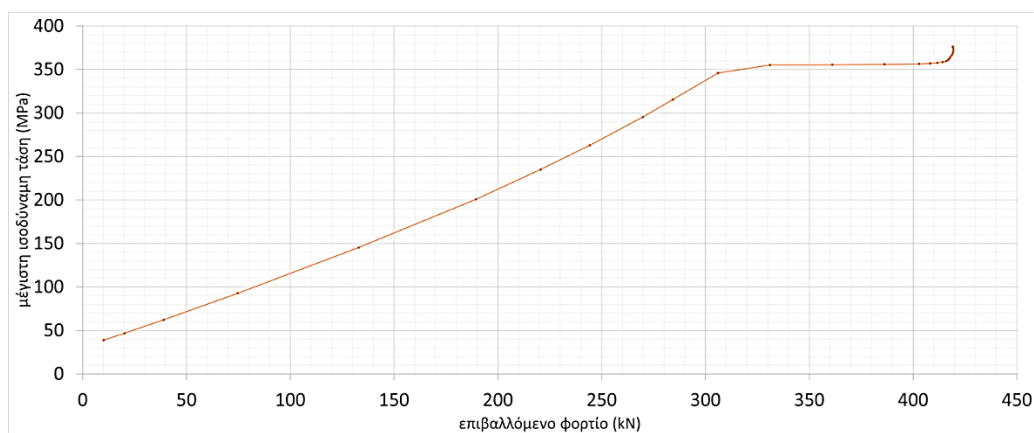
Σχήμα 4-15: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-16: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-17: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130

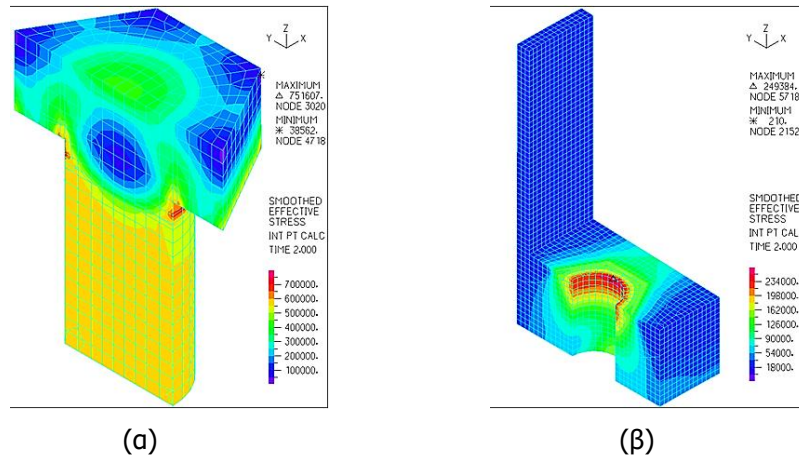


Σχήμα 4-18: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

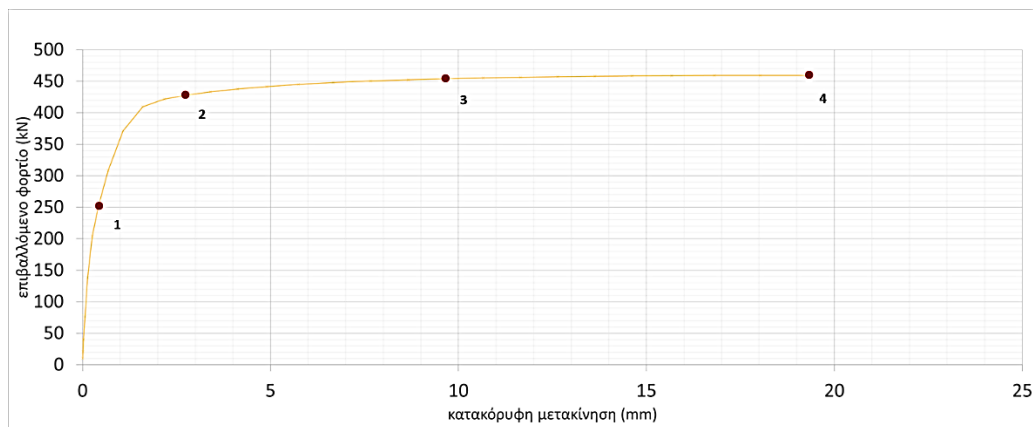


iv) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S355 και κοχλίας=10.9 με κράτυση

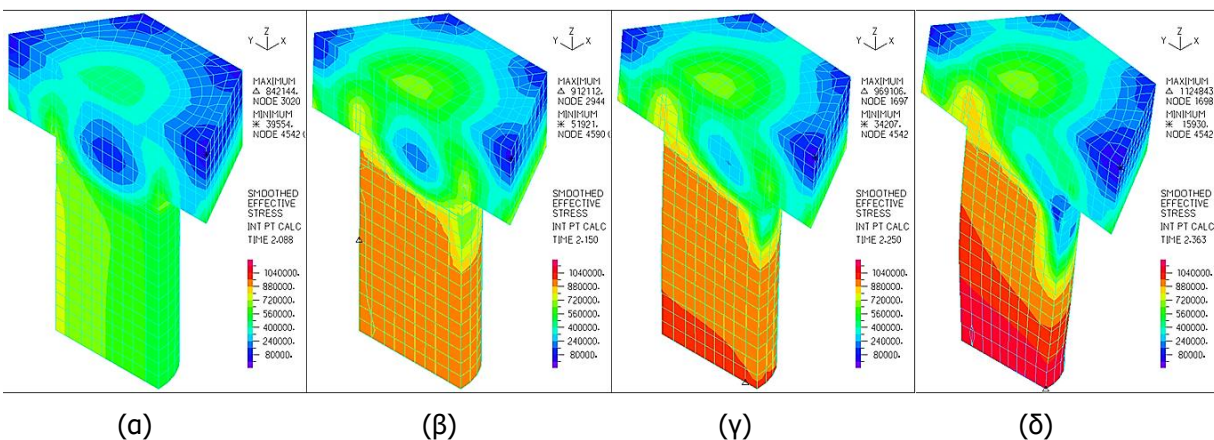
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



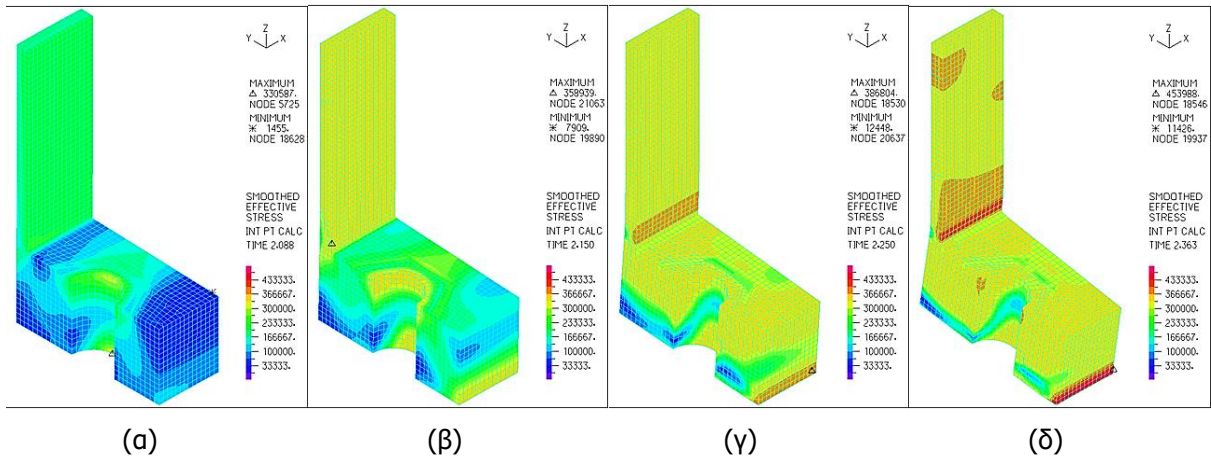
Σχήμα 4-19: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή



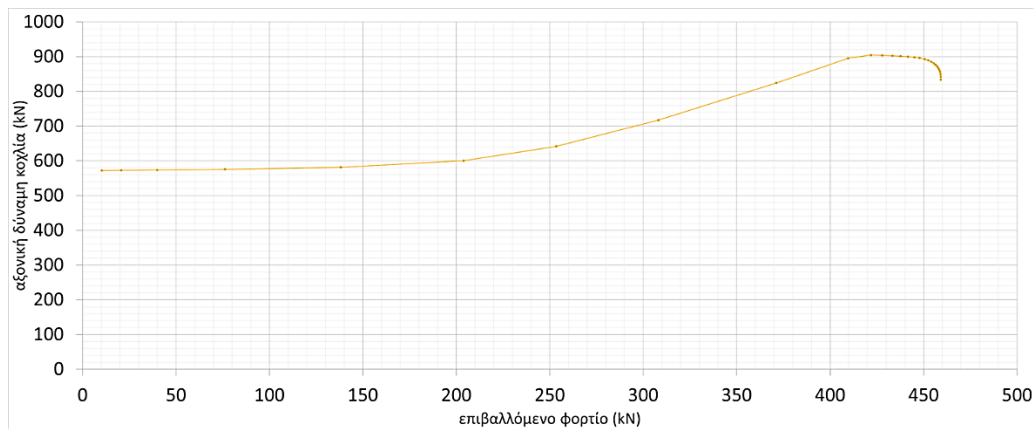
Σχήμα 4-20: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36



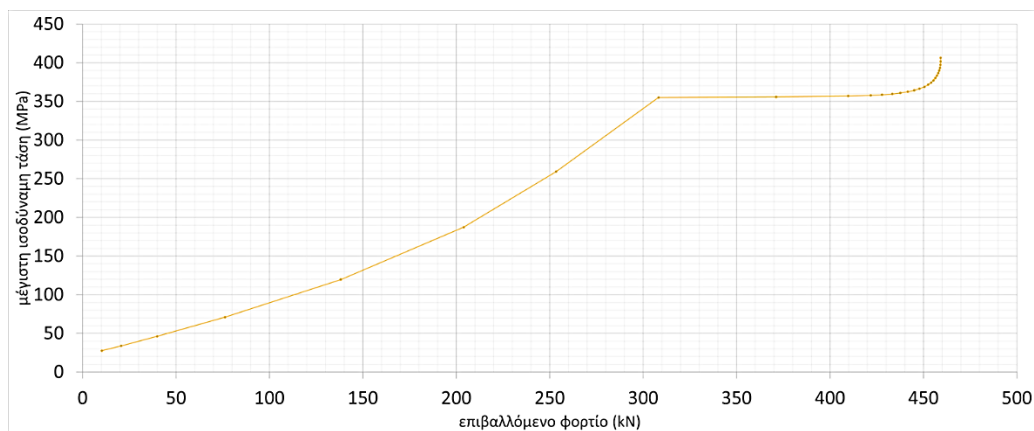
Σχήμα 4-21: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-22: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



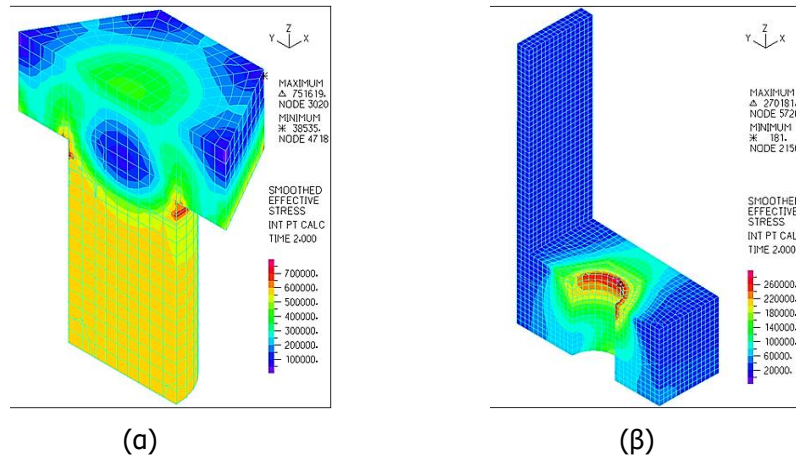
Σχήμα 4-23: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130



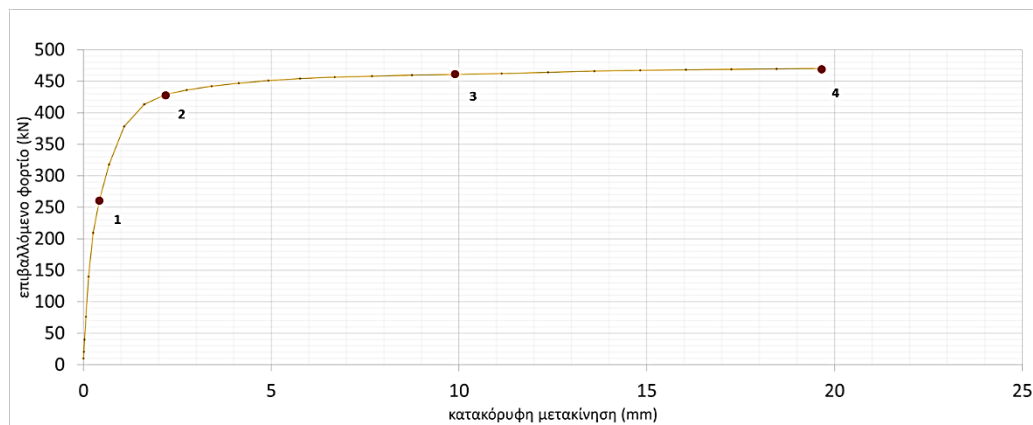
Σχήμα 4-24: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

ν) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=DNV(S355) και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

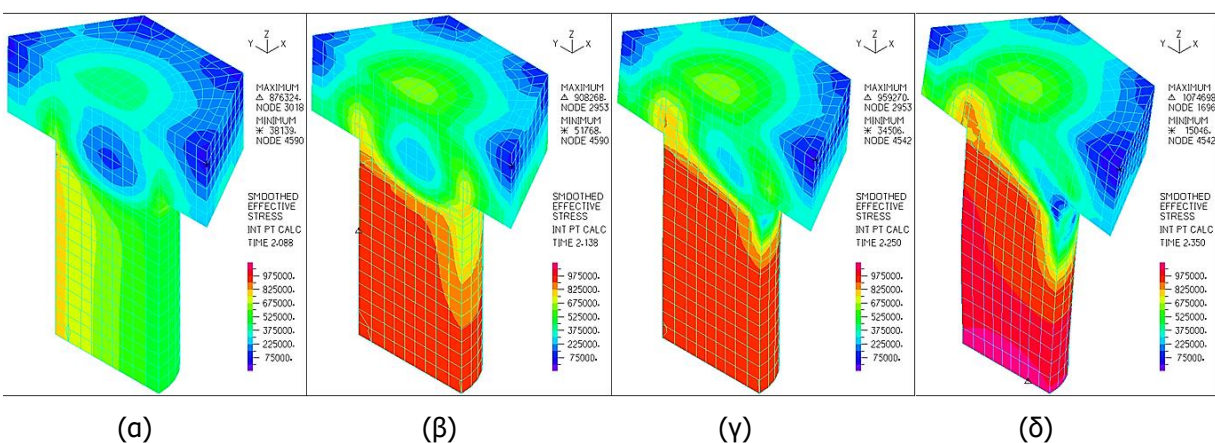
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



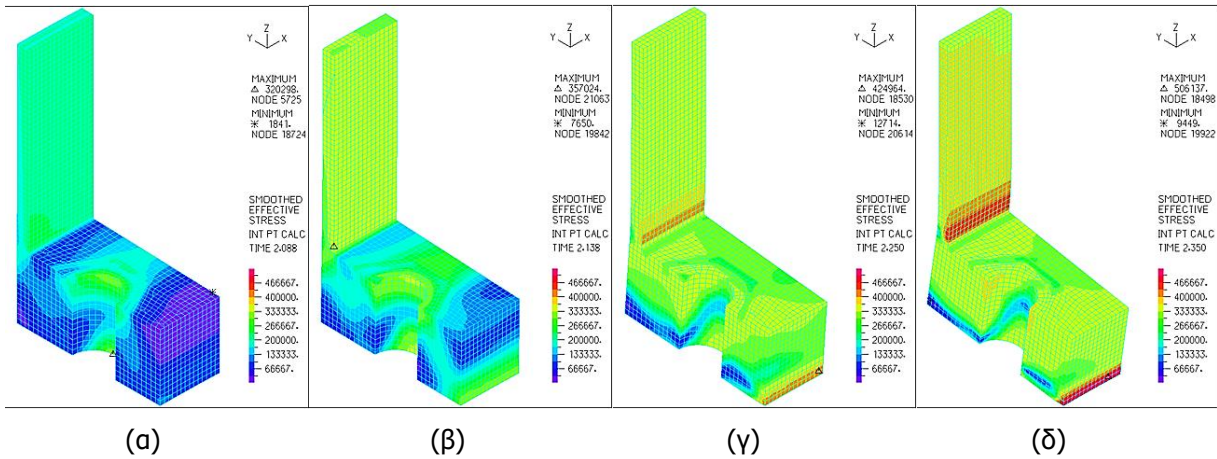
Σχήμα 4-25: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή



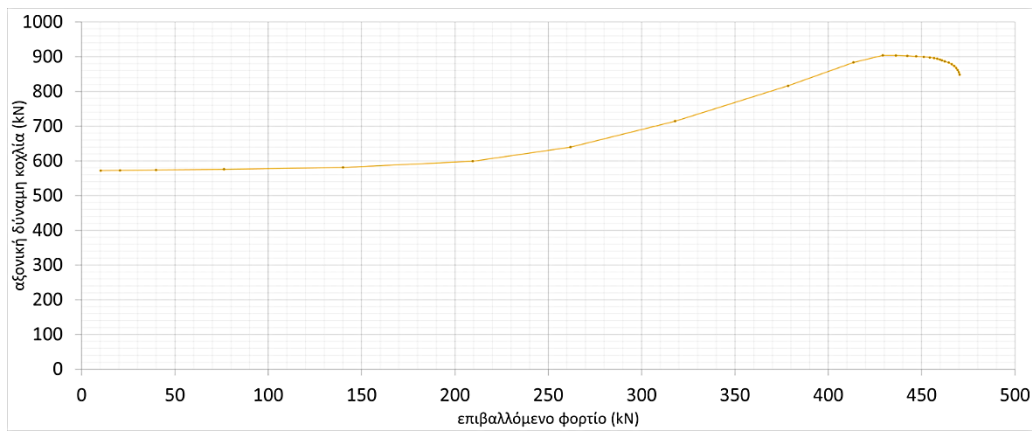
Σχήμα 4-26: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36



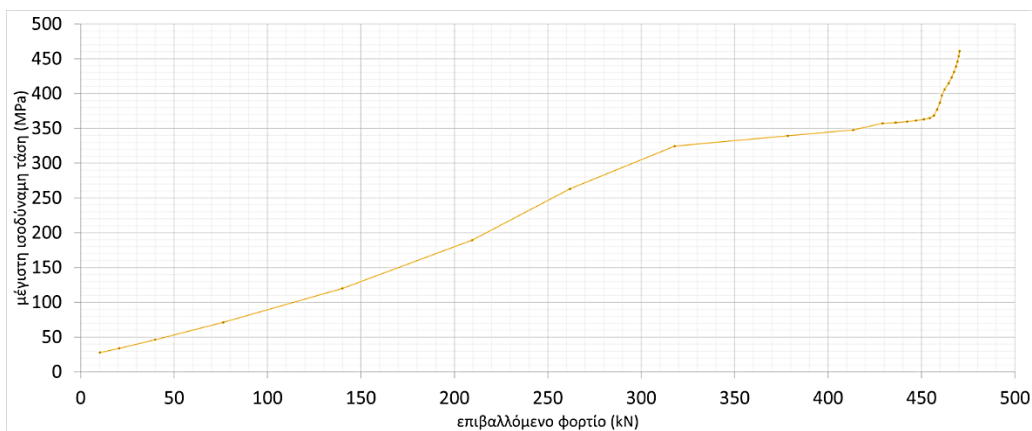
Σχήμα 4-27: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-28: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-29: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130

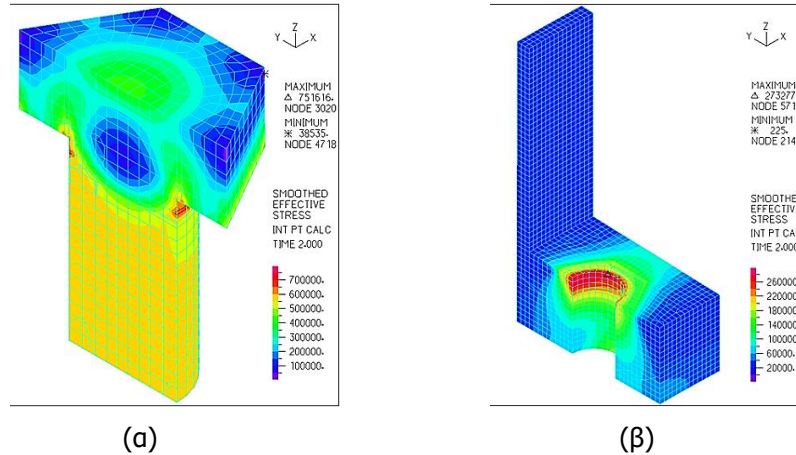


Σχήμα 4-30: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

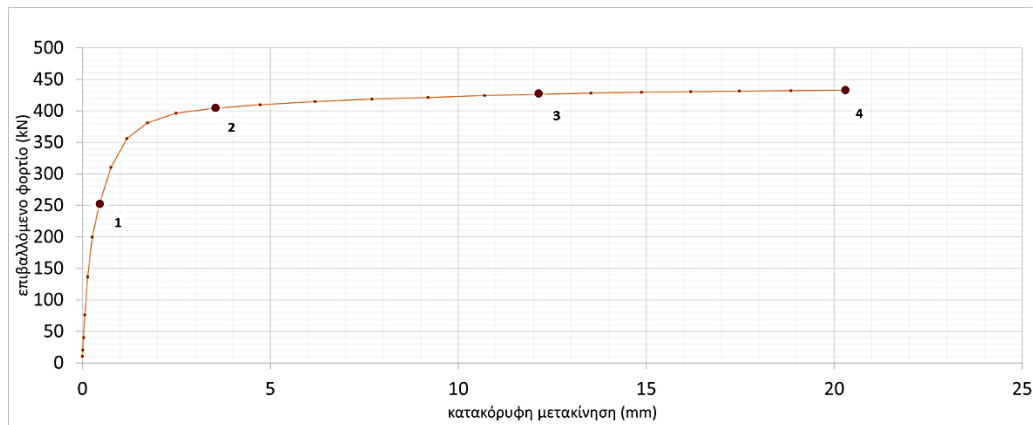


νι) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S275 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

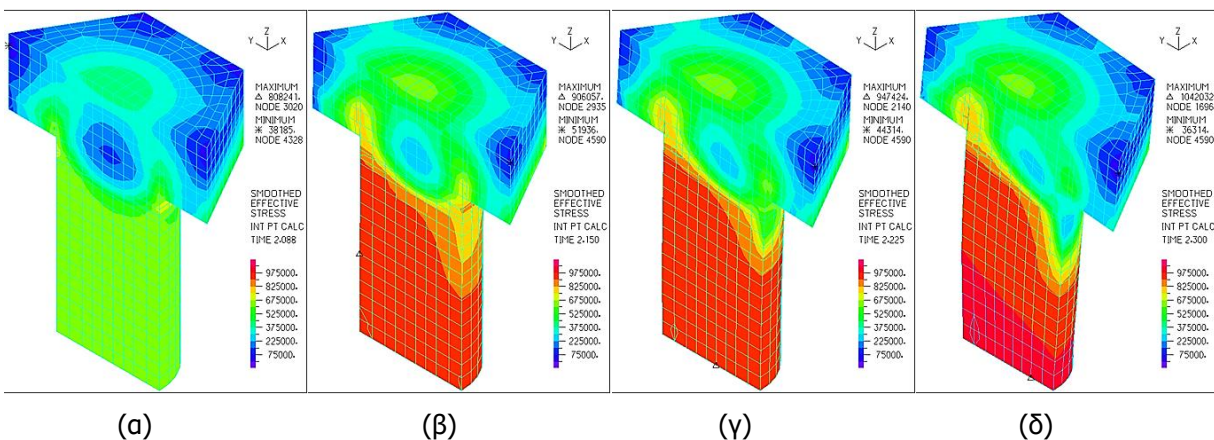
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



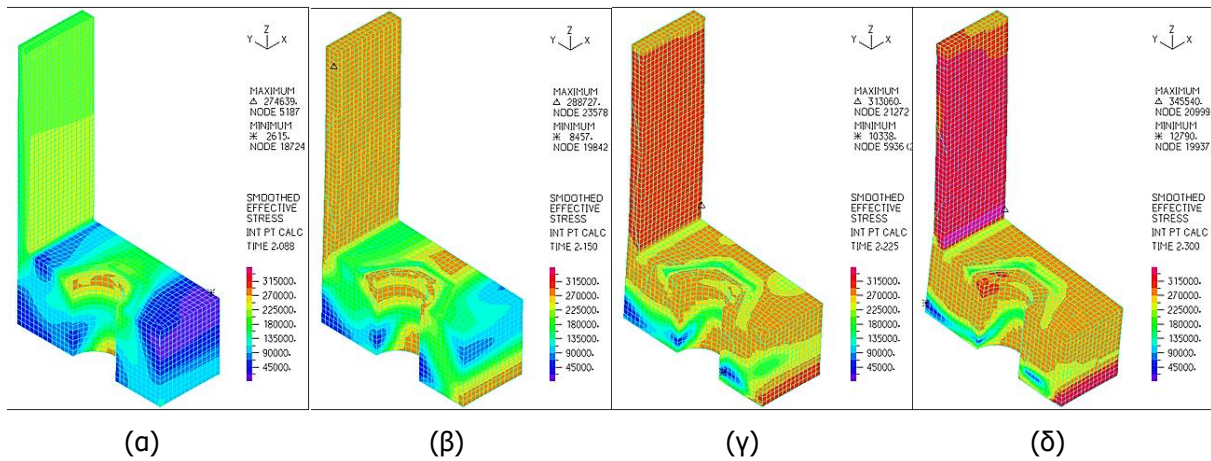
Σχήμα 4-31: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή



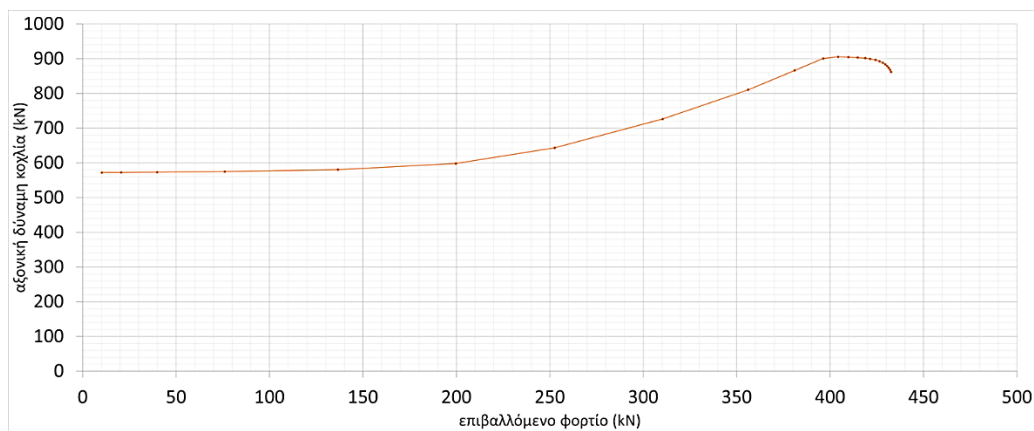
Σχήμα 4-32: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36



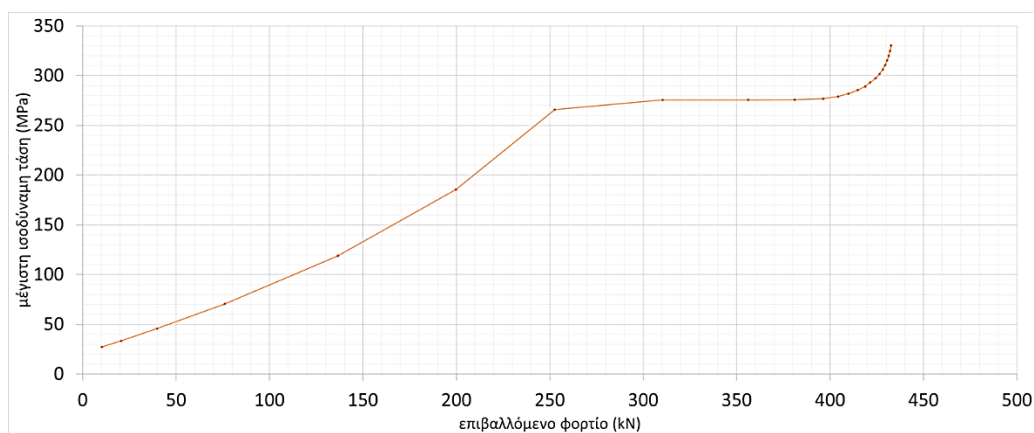
Σχήμα 4-33: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-34: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



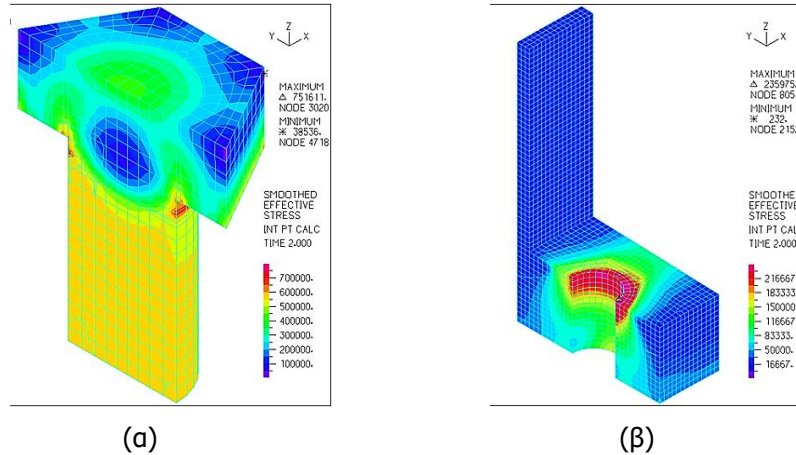
Σχήμα 4-35: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130



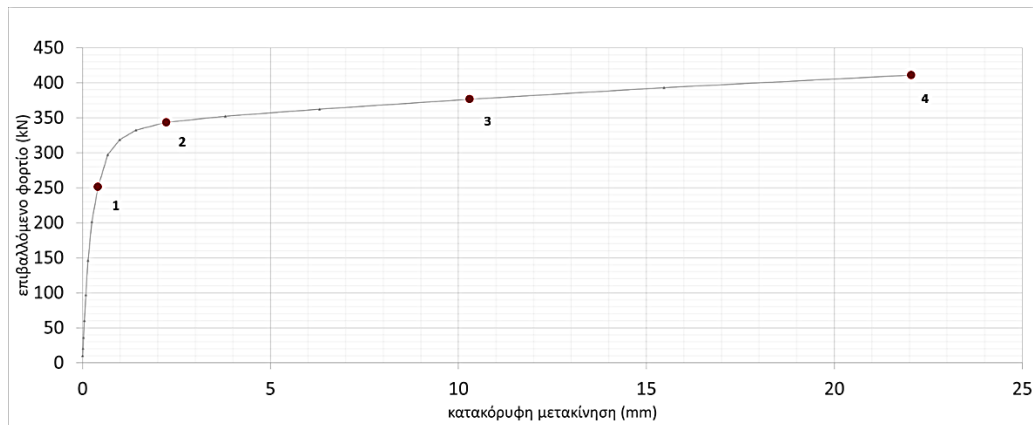
Σχήμα 4-36: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

vii) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=S235 και κοχλίας=10.9 με κράτυνση

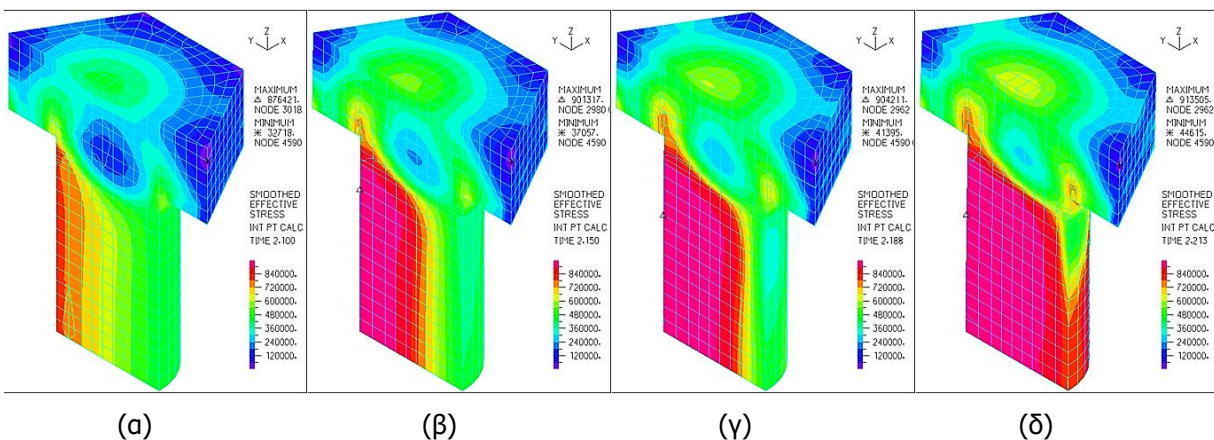
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



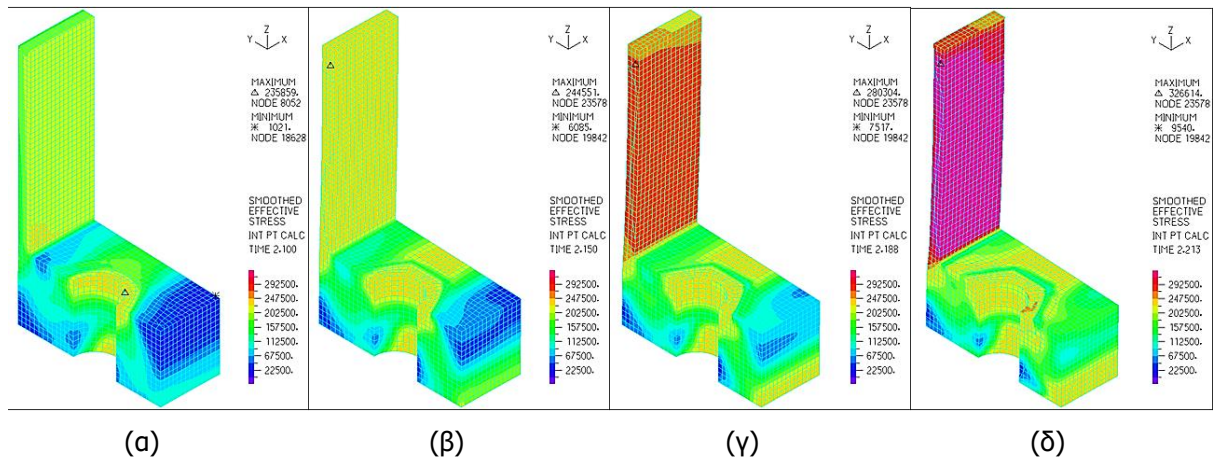
Σχήμα 4-37: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή



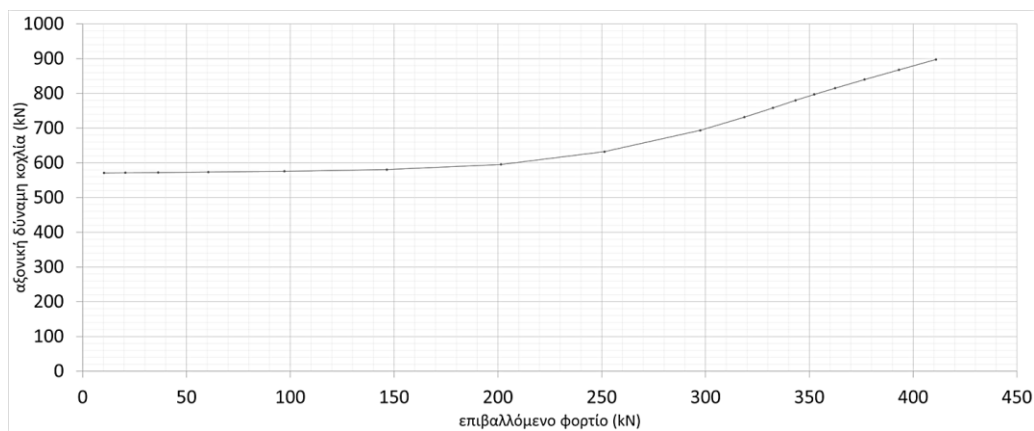
Σχήμα 4-38: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36



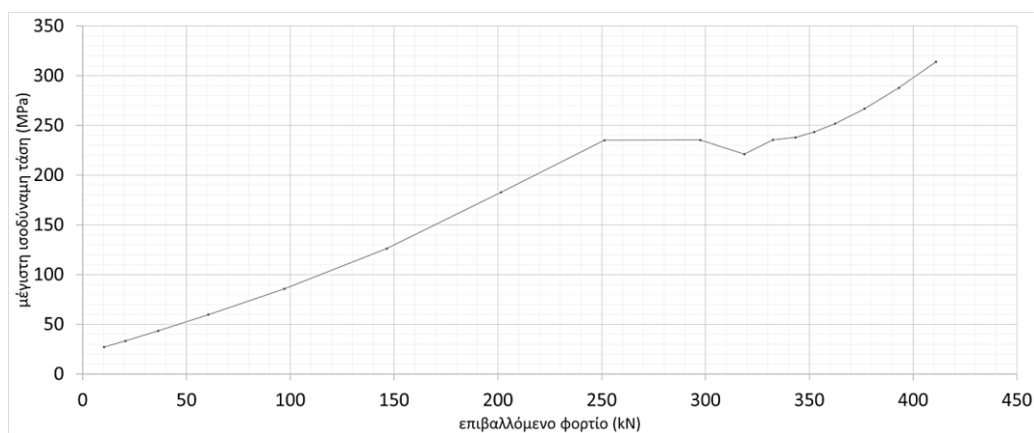
Σχήμα 4-39: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-40: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-41: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130

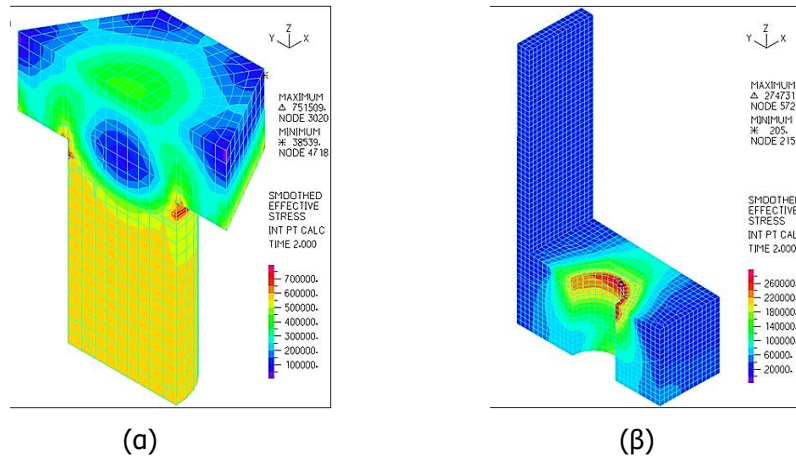


Σχήμα 4-42: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

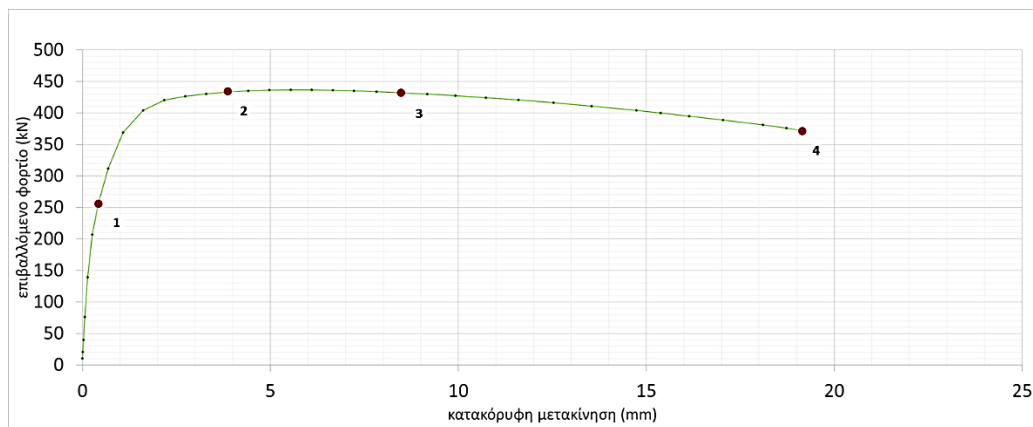


viii) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=DNV(S355) και κοχλίας=10.9 χωρίς κράτηση

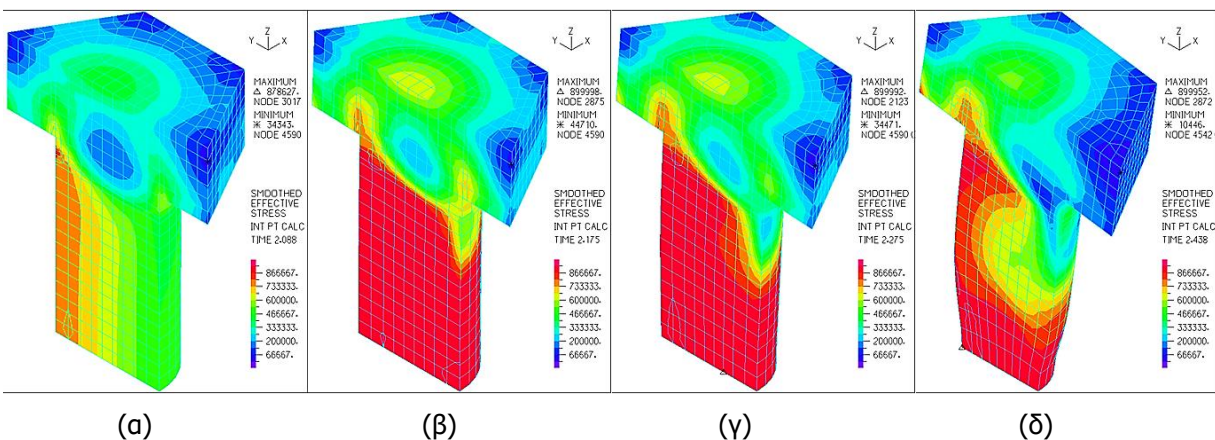
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



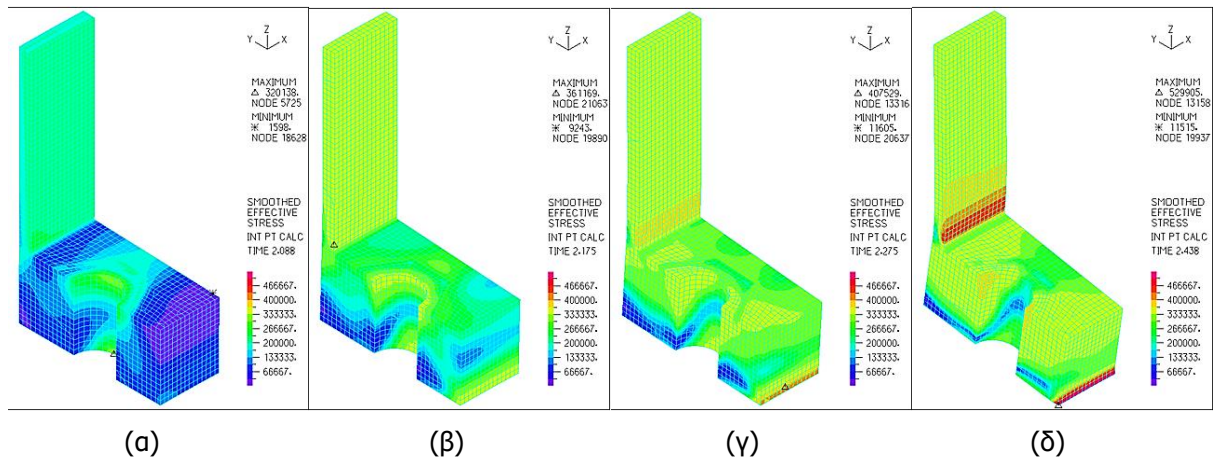
Σχήμα 4-43: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή



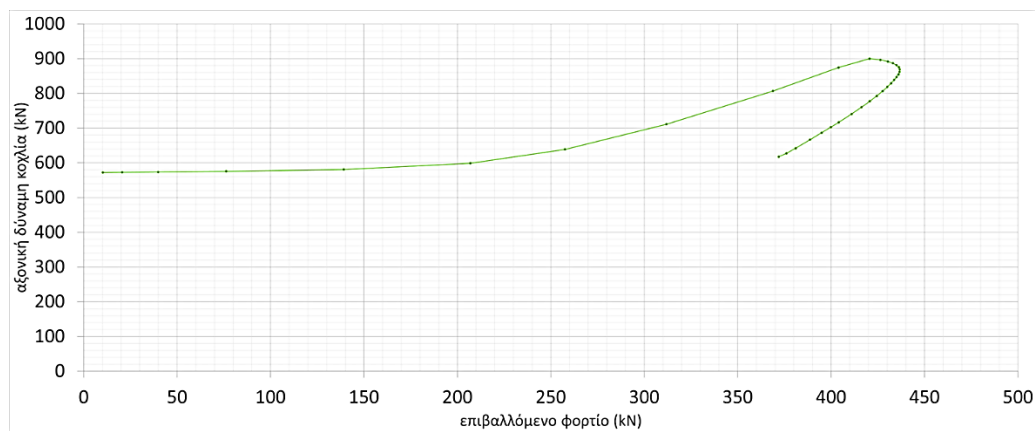
Σχήμα 4-44: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36



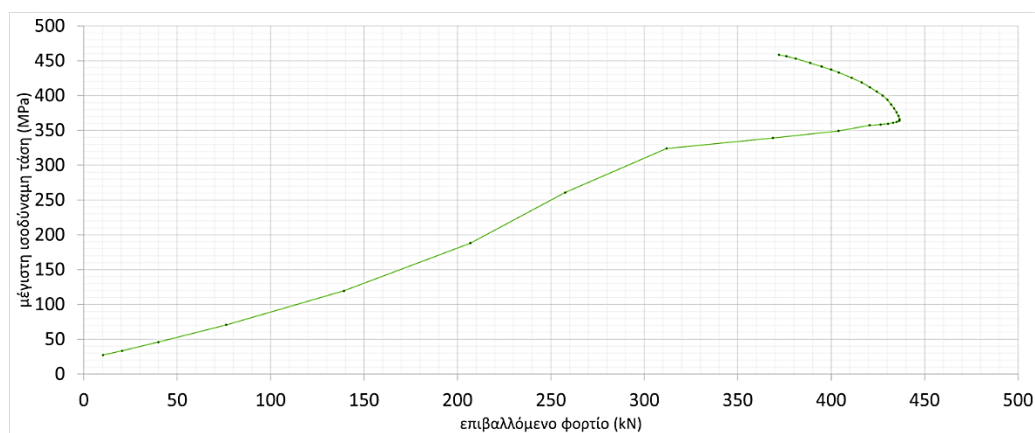
Σχήμα 4-45: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-46: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



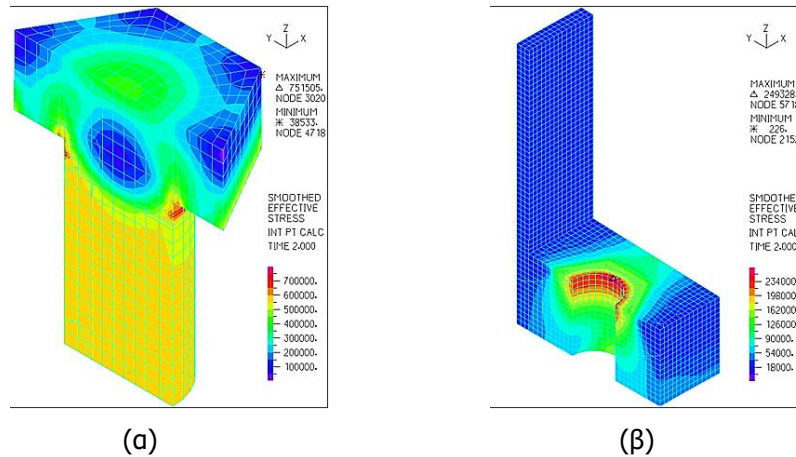
Σχήμα 4-47: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130



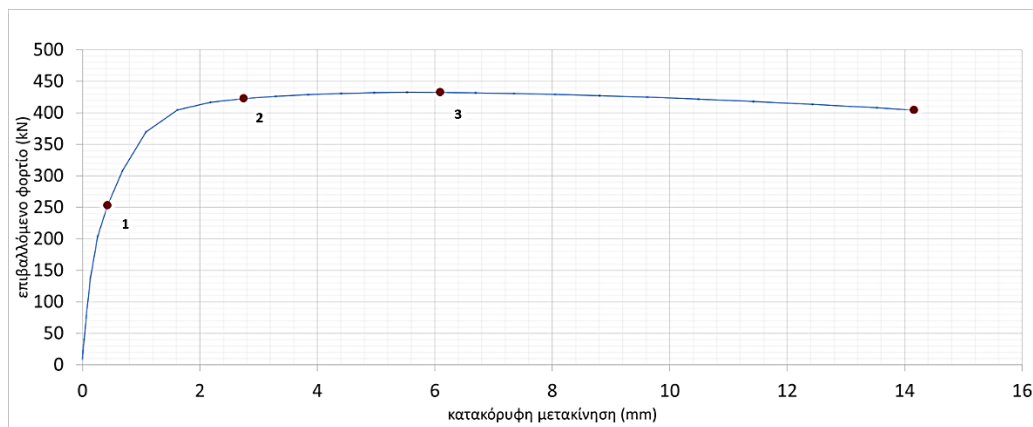
Σχήμα 4-48: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

ix) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=DNV(S355) και κοχλίας=10.9 χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια

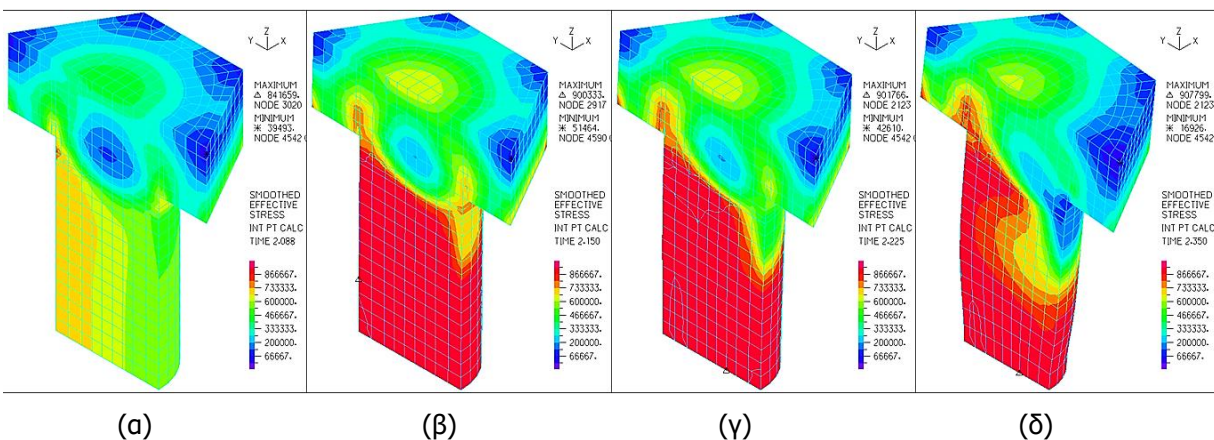
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



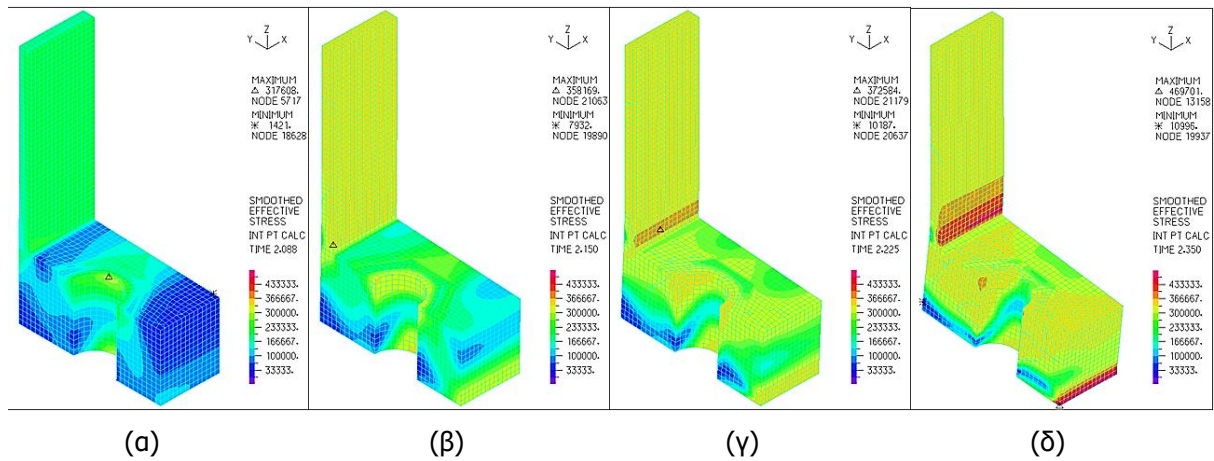
Σχήμα 4-49: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή



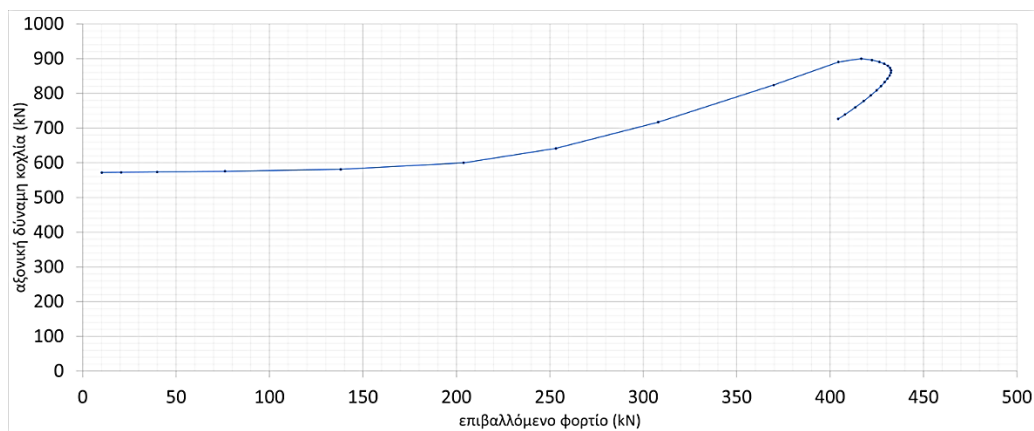
Σχήμα 4-50: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36



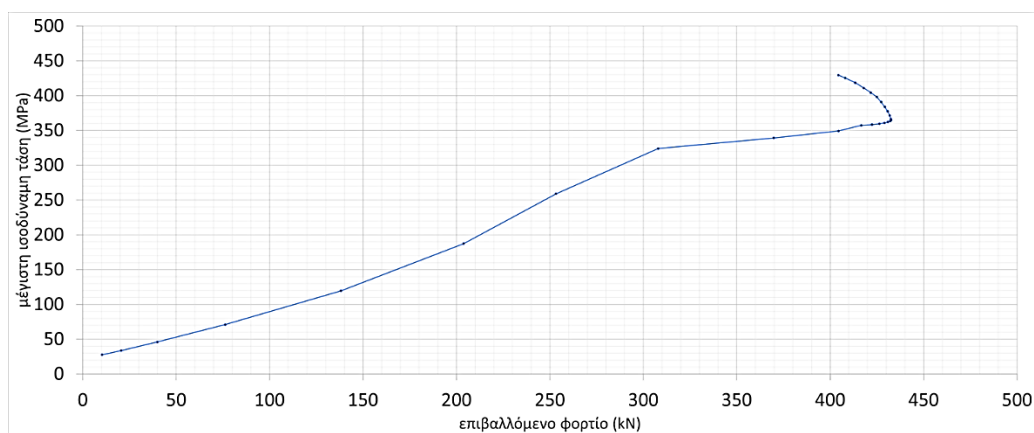
Σχήμα 4-51: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-52: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-53: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130

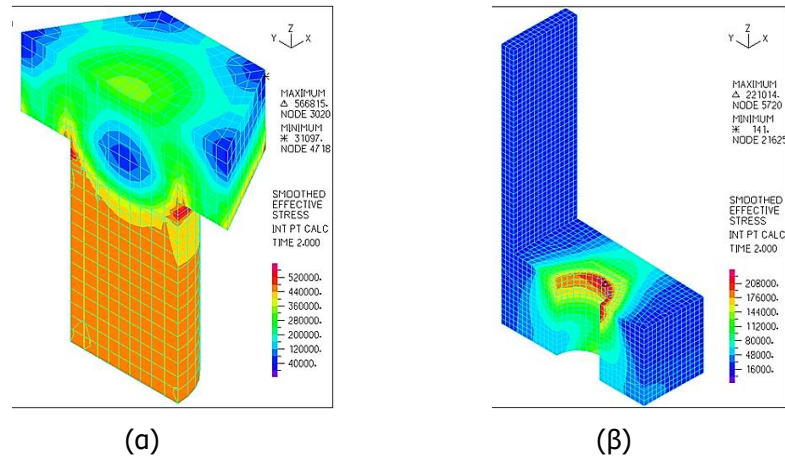


Σχήμα 4-54: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

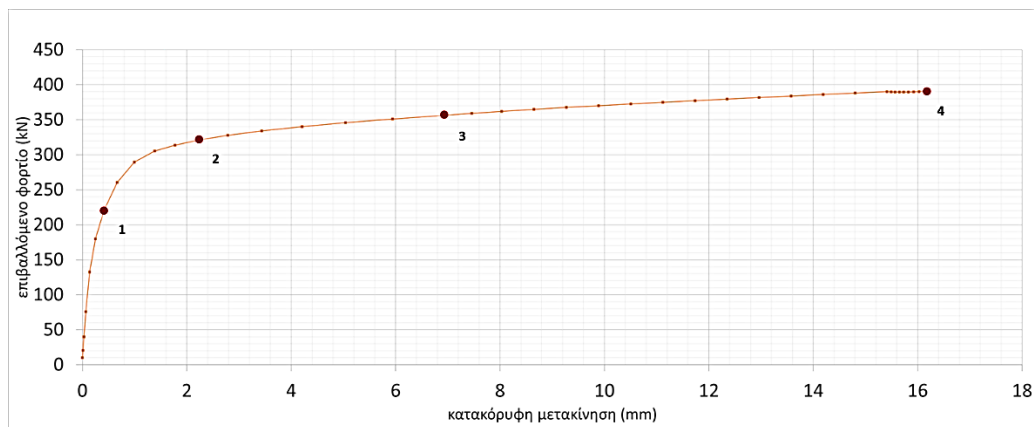


χ) θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων/ συντελεστής ενδοσιμότητας  $CF=10^{-9}$ / συνοριακές συνθήκες: κοχλίας=στήριξη τύπου κύλιση, βάση=με προσομοίωση συνέχειας/ υλικά: βάση=DNV(S355) και κοχλίας=8.8

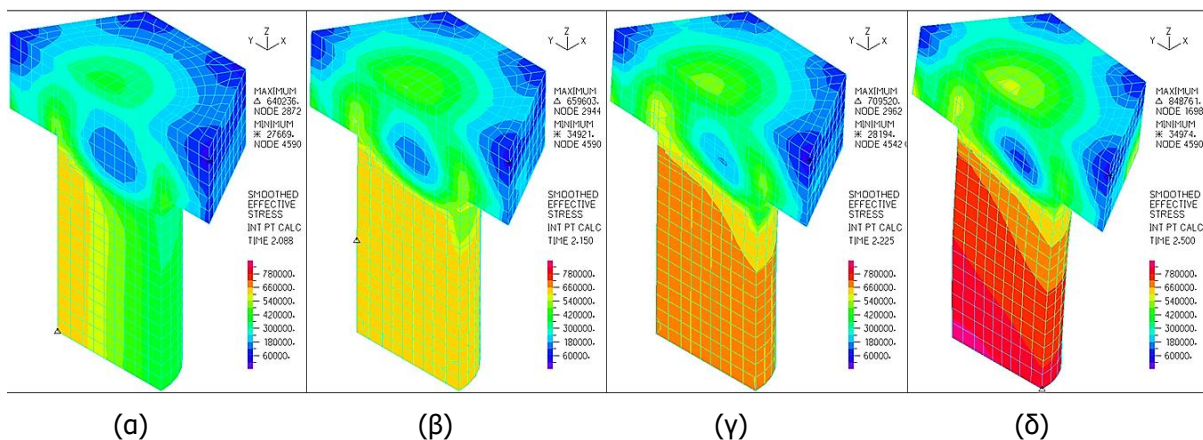
Διατομή PL 60x130, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 457.52\text{kN}$



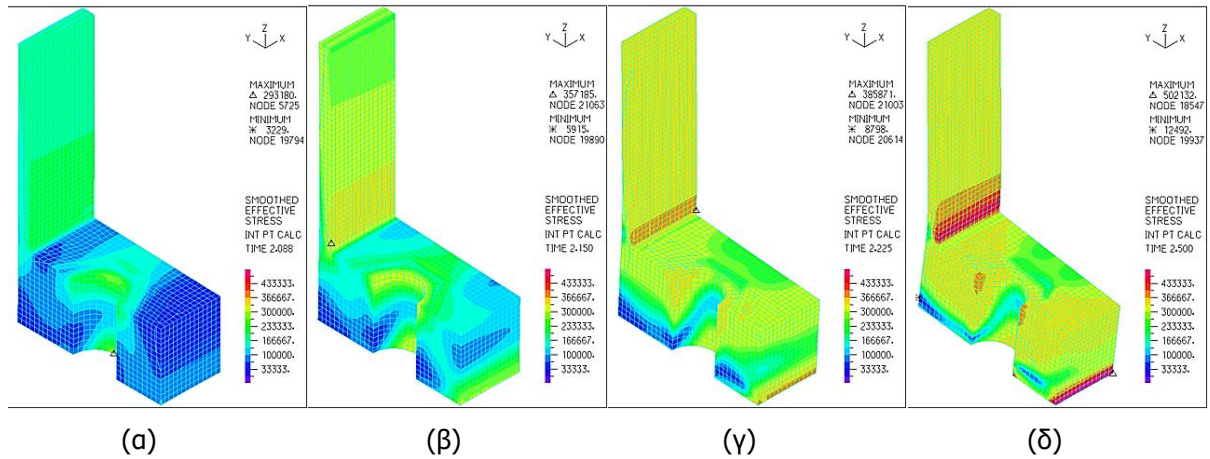
Σχήμα 4-55: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 457.52\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή PL 60x130 σε τομή



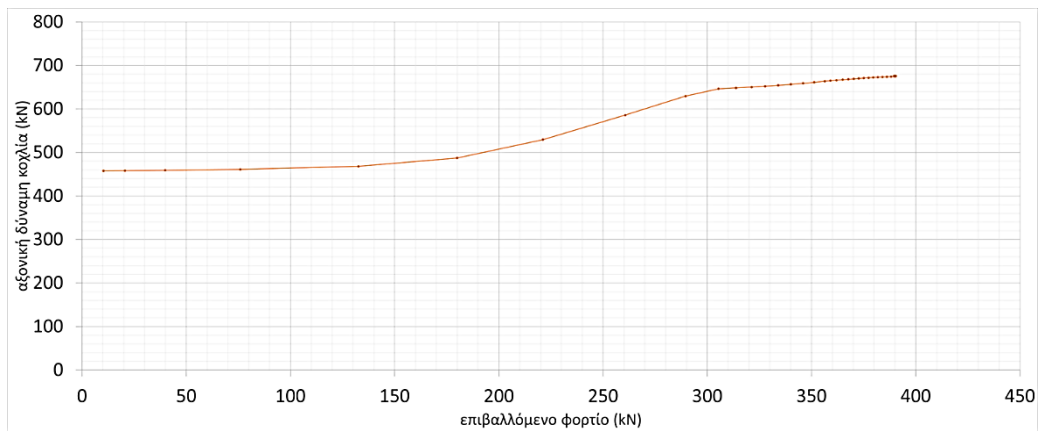
Σχήμα 4-56: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης PL 60x130 με κοχλία M36



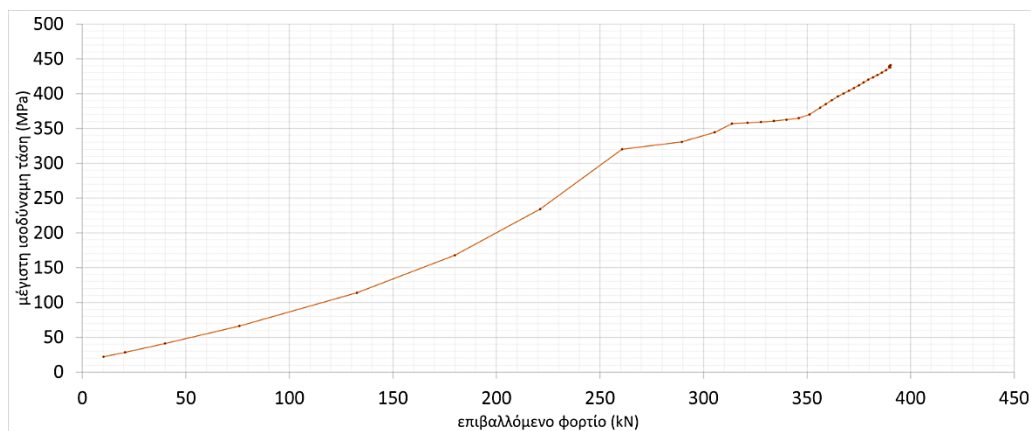
Σχήμα 4-57: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλίας σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-58: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή PL 60x130, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 4-59: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή PL 60x130



Σχήμα 4-60: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή PL 60x130

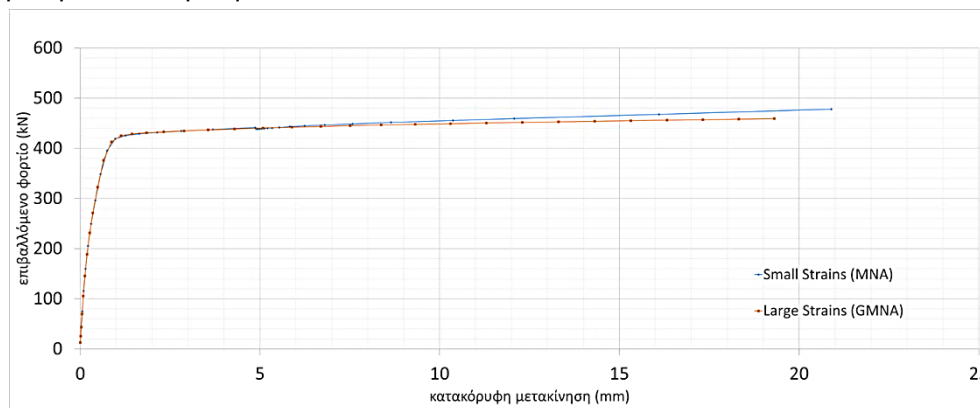
### 4.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΜΙΚΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΓΑΛΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

Εξετάζεται η επιρροή της θεωρίας μικρών (small strains) και μεγάλων (large strains) παραμορφώσεων για τη διατομή PL 60x130 και κοχλία M36. Η θεωρία μικρών παραμορφώσεων λαμβάνει υπόψη την ισορροπία του φορέα στην απαραμόρφωτη κατάσταση, ενώ παράλληλα, μπορεί να ληφθεί υπόψη η ενδεχόμενη διαρροή του υλικού. Η μέθοδος ανάλυσης που μπορεί να θεωρηθεί, σε αυτή την περίπτωση, είναι η μη γραμμική ανάλυση υλικού (MNA). Η θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων λαμβάνει υπόψη την ισορροπία του φορέα στην παραμορφωμένη κατάσταση, ενώ συγχρόνως, μπορεί να ληφθεί υπόψη και η ενδεχόμενη διαρροή του υλικού. Η μέθοδος ανάλυσης που μπορεί να θεωρηθεί, σε αυτή την περίπτωση, είναι η μη γραμμική ανάλυση γεωμετρίας και υλικού (GMNA).

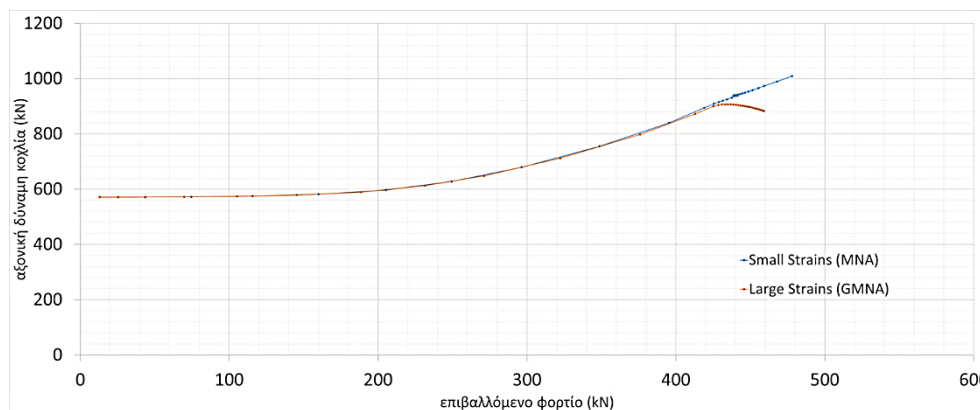
Συγκρίνοντας τους δρόμους ισορροπίας (σχήμα 4-61), μπορεί να παρατηρηθεί ότι για μικρές μετακινήσεις τα αποτελέσματα και των δύο θεωριών ταυτίζονται, ενώ για μεγαλύτερες μετακινήσεις η θεωρία των μεγάλων παραμορφώσεων ανταποκρίνεται καλύτερα δίνοντας σχετικά χαμηλότερη αντοχή.

Ο ρυθμός που η αξονική δύναμη του κοχλία αναπτύσσεται (σχήμα 4-62) ταυτίζεται και για τις δύο θεωρήσεις μέχρι την πλήρη εφαρμογή του επιβαλλόμενου φορτίου σε τιμή 420kN.

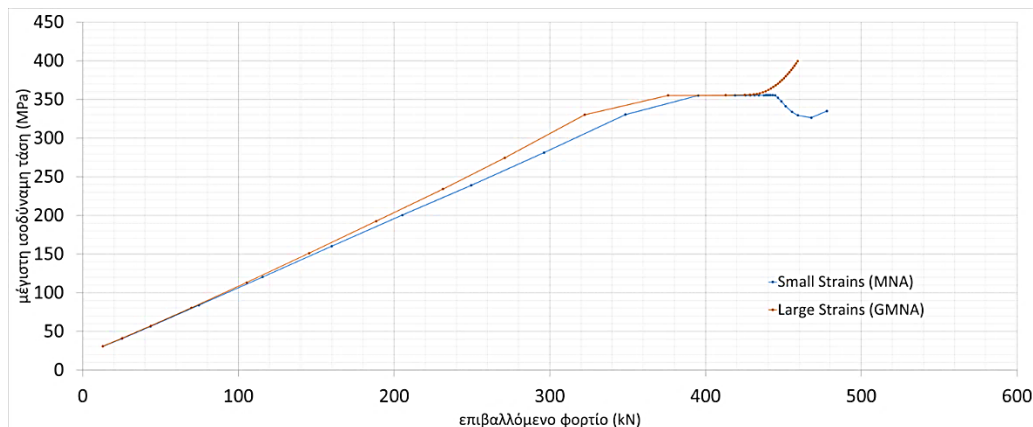
Η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση (σχήμα 4-63) ταυτίζεται ομοίως για επιβαλλόμενο φορτίο περί τα 200kN, ενώ, μέχρι την πλήρη επιβολή της φόρτισης στα 420kN, η μεταξύ τους διαφορά προκύπτει αμελητέα.



Σχήμα 4-61: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 60x130 για θεωρία μικρών (MNA) και μεγάλων παραμορφώσεων (GMNA)



Σχήμα 4-62: Αξονική δύναμη κοχλία M36 σύνδεσης PL 60x130 για θεωρία μικρών (MNA) και μεγάλων παραμορφώσεων (GMNA)



Σχήμα 4-63: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους σύνδεσης PL 60x130 για θεωρία μικρών (MNA) και μεγάλων παραμορφώσεων (GMNA)

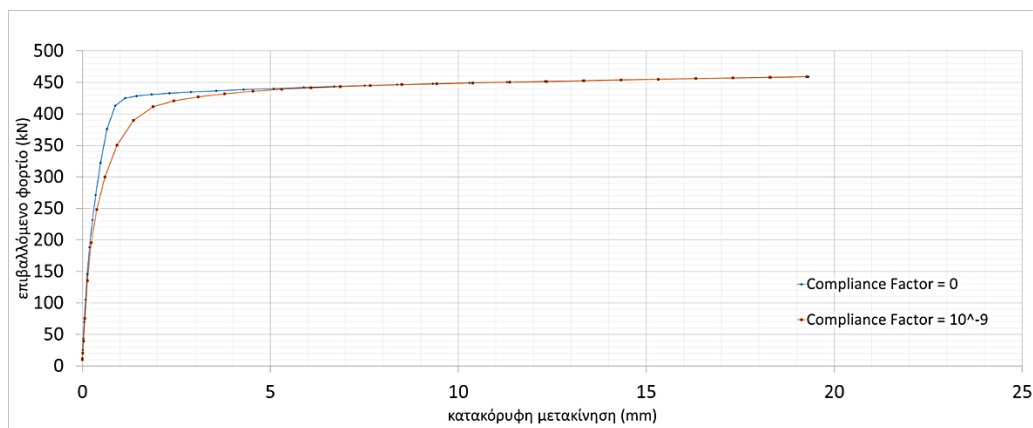
#### 4.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΝΔΟΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΕΠΑΦΗΣ

Με τη χρήση του συντελεστή ενδοσιμότητας, το πρόβλημα γίνεται πιο εύκαμπτο και συγκλίνει πιο γρήγορα, αφού αφαιρούνται οι διπλές εξισώσεις των επαφών κατά την επίλυση του αντίστοιχου μητρώου τους. Από την άλλη, επηρεάζονται οι τάσεις στην περιοχή της διείσδυσης αλλάζοντας σχετικά τα αποτελέσματά τους, τα οποία χρειάζεται να εκτιμηθούν με προσοχή, ώστε να ανταποκρίνονται στο φυσικό πρόβλημα [11].

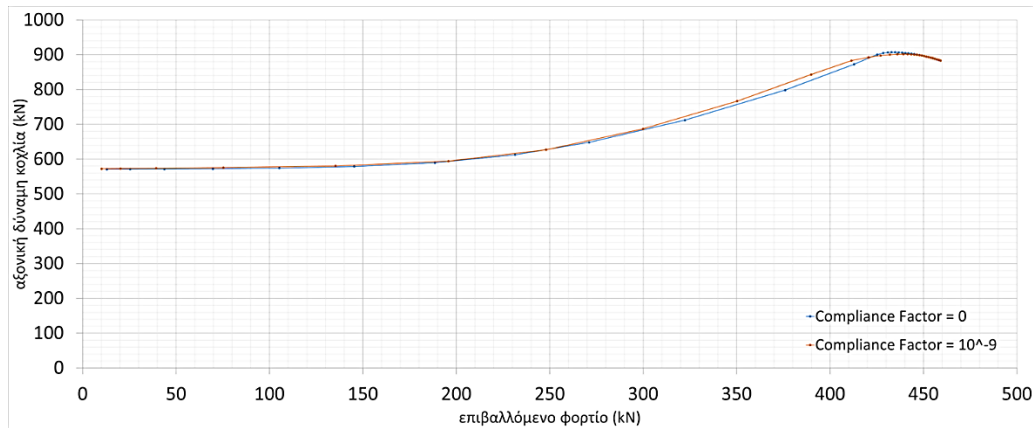
Σύμφωνα με τους δρόμους ισορροπίας (σχήμα 4-64), με συντελεστή ενδοσιμότητας  $CF=0$  και  $CF=10^{-9}$  μπορεί να παρατηρηθεί πως για συντελεστή  $CF=10^{-9}$ , ο φορέας προκύπτει πιο εύκαμπτος, αφού διαρρέει σταδιακά μέχρι να φθάσει την πλήρη αντοχή του. Για μετατόπιση 5-18mm, οι δρόμοι ισορροπίας ταυτίζονται.

Ο ρυθμός που αναπτύσσεται η αξονική δύναμη του κοχλία (σχήμα 4-65) ταυτίζεται και για τους δύο συντελεστές ενδοσιμότητας.

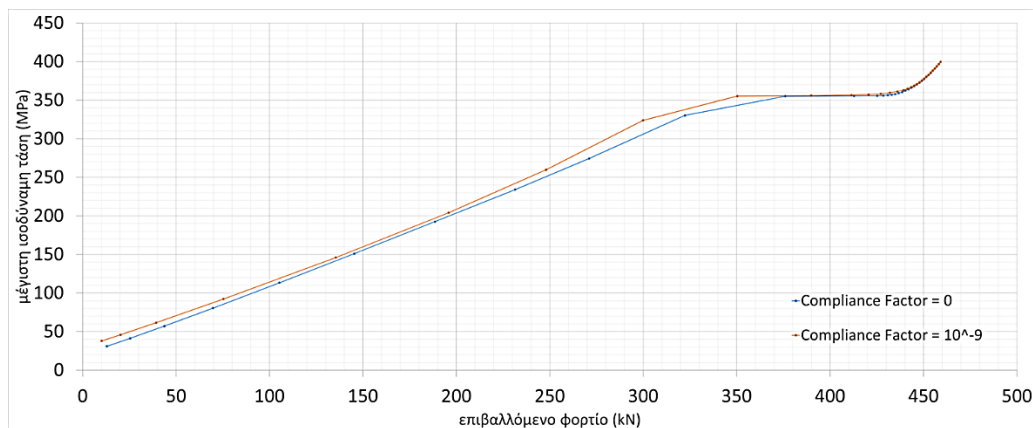
Η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση (σχήμα 4-66), ουσιαστικά, ταυτίζεται καθόλη την εφαρμογή του επιβαλλόμενου φορτίου, ενώ η μέγιστη μεταξύ τους διαφορά μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.



Σχήμα 4-64: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 60x130 για συντελεστή ενδοσιμότητας  $CF=0$  και  $CF=10^{-9}$



Σχήμα 4-65: Αξονική δύναμη κοχλία M36 σύνδεσης PL 60x130 για συντελεστή ενδοσιμότητας  $CF=0$  και  $CF=10^{-9}$



Σχήμα 4-66: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους σύνδεσης PL 60x130 για συντελεστή ενδοσιμότητας  $CF=0$  και  $CF=10^{-9}$

#### 4.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΚΟΧΛΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

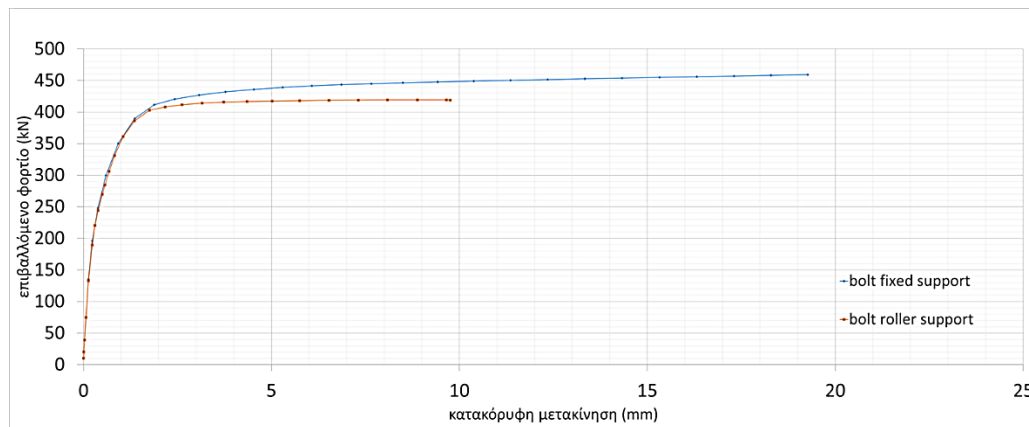
Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες του κοχλία, προσομοιώνεται η κάτω επιφάνεια του κοχλία με πλήρη δέσμευση (fixed support) και αντίστοιχα, με δέσμευση κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (roller support). Οι συνοριακές συνθήκες εισάγονται με δέσμευση των αντίστοιχων βαθμών ελευθερίας των κόμβων της κάτω επιφάνειας του κοχλία.

Σύμφωνα με το σχήμα 4-67, μπορεί να παρατηρηθεί πως αρχικά οι δρόμοι ισορροπίας έχουν την ίδια δυσκαμψία. Λόγω της δέσμευσης κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (roller support), η βάση του κοχλία μετατοπίζεται προς το εσωτερικό της σύνδεσης, δίνοντας λιγότερη αντοχή περί τα 420kN και διαρρέοντας σε μετατόπιση 1-2mm. Ακόμα, λόγω της προσομοίωσης ως κύλισης (roller support), μπορεί να παρατηρηθεί στένωση στη βάση του κοχλία, η οποία αποδίδεται στην εκδήλωση του φαινομένου Poisson λόγω του υλικού χάλυβα (παράγραφος 4.2 περιπτώσεις iii έως x). Εφόσον οι παραμορφώσεις ακολουθούν πιο πιστά την αναμενόμενη παραμόρφωση του φορέα και αφού οι τάσεις υπολογίζονται από τις παραμορφώσεις αυτές, τότε τα αποτελέσματα γίνονται αντίστοιχα πιο ακριβή.

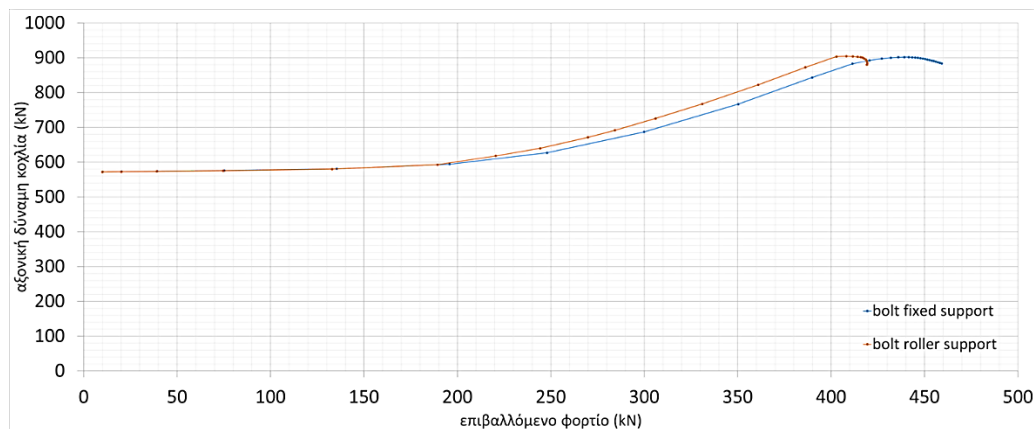
Η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία (σχήμα 4-68) ταυτίζεται και για τις δύο τύπου στηρίξεις μέχρι τα 200kN επιβαλλόμενου φορτίου. Μετά τα 200kN, η αξονική δύναμη του κοχλία για την προσομοίωση

της βάσης του ως κύλιση, αυξάνεται πιο γρήγορα, αφού λόγω της στήριξής του αποκτά περισσότερη ευκαμψία.

Η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση (σχήμα 4-69), ουσιαστικά, ταυτίζεται καθόλη την εφαρμογή του επιβαλλόμενου φορτίου και για τις δύο τύπου στηρίξεις.

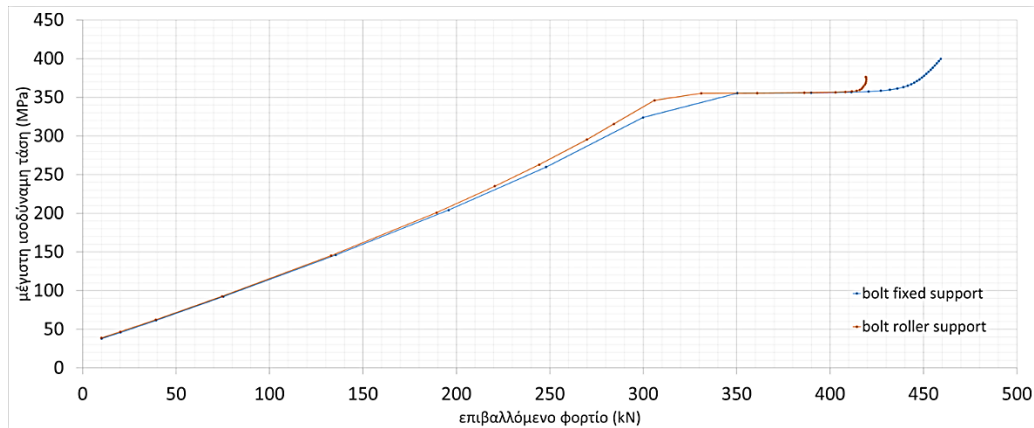


Σχήμα 4-67: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 60x130 για συνοριακές συνθήκες κοχλία τύπου πάκτωση (fixed support) και τύπου κύλιση (roller support)



Σχήμα 4-68: Αξονική δύναμη κοχλία M36 σύνδεσης PL 60x130 για συνοριακές συνθήκες κοχλία τύπου πάκτωση (fixed support) και τύπου κύλιση (roller support)



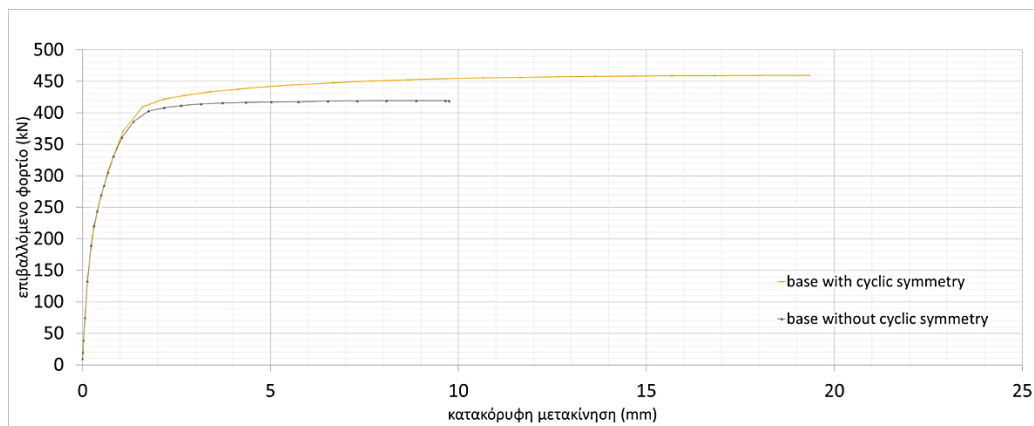


Σχήμα 4-69: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους σύνδεσης PL 60x130 για συνοριακές συνθήκες κοχλία τύπου πάκτωση (fixed support) και τύπου κύλιση (roller support)

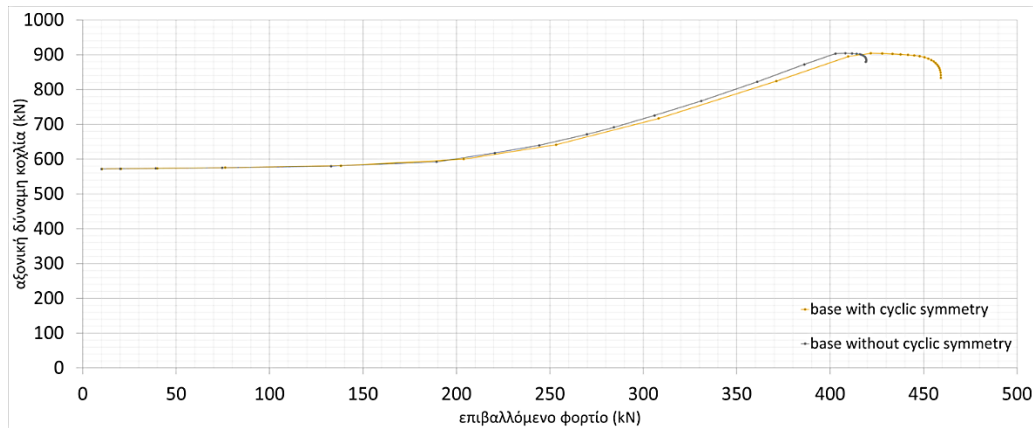
Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες της βάσης, προσομοιώνεται η συνέχεια της, αφού αποτελεί τμήμα της δακτυλιοειδούς σύνδεσης. Για την προσομοίωση της συνέχειας γίνεται δέσμευση της περιφέρειας του τμήματος κατά την εφαπτομενική διεύθυνση. Η προσομοίωση αυτή επιτυγχάνεται με την εισαγωγή τοπικού συστήματος [16].

Σύμφωνα με το σχήμα 4-70, μπορεί να παρατηρηθεί πως η χρήση της συνέχειας βοηθά στην αύξηση της αντοχής και στην ευστάθεια του προβλήματος, έχοντας περισσότερη δυσκαμψία κατά τη διαρροή και προσφέροντας συνολική αντοχή κοντά στα 460kN.

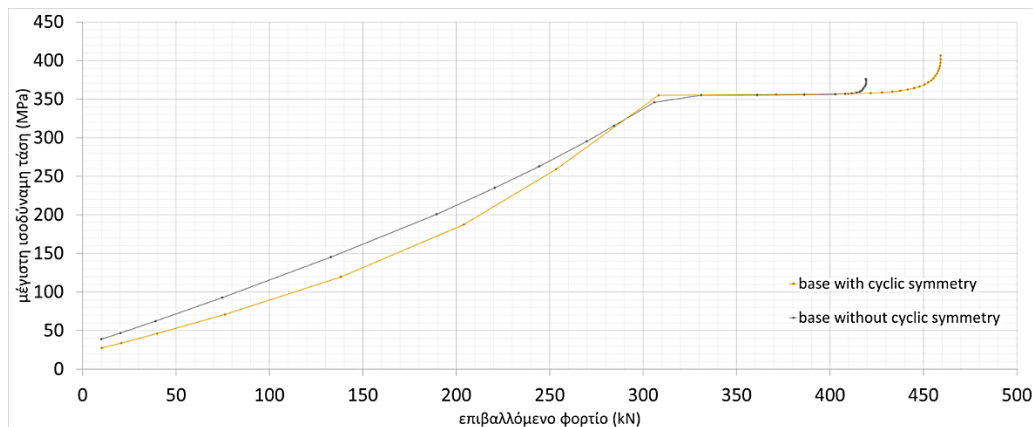
Η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία (σχήμα 4-71) ταυτίζεται και για τις δύο τύπου στηρίξεις. Η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση (σχήμα 4-72) ταυτίζεται και για τις δύο τύπου προσομοιώσεις μετά τα 300kN. Οι αρχικές τάσεις, ωστόσο, της περίπτωσης που προσφέρεται πλευρική στήριξη, αναπτύσσονται με πιο αργό ρυθμό και είναι μικρότερες λόγω της παραπάνω δυσκαμψίας.



Σχήμα 4-70: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 60x130 για συνοριακές συνθήκες βάσης με και χωρίς προσομοίωση της συνέχειας



Σχήμα 4-71: Αξονική δύναμη κοχλία M36 σύνδεσης PL 60x130 για συνοριακές συνθήκες βάσης με και χωρίς προσομοίωση της συνέχειας



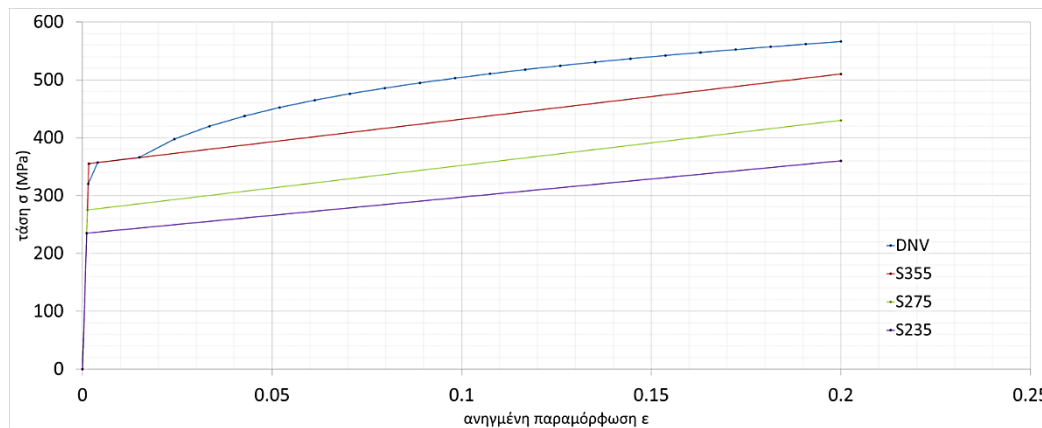
Σχήμα 4-72: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους σύνδεσης PL 60x130 για συνοριακές συνθήκες βάσης με και χωρίς προσομοίωση της συνέχειας

#### 4.6 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΚΟΧΛΙΑ ΚΑΙ ΒΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

Για την επιπλέον διερεύνηση της απόκρισης της σύνδεσης, εξετάζεται η επιρροή του υλικού χάλυβα της βάσης και του κοχλία. Όσον αφορά τη χρήση υλικού χάλυβα της βάσης, χρησιμοποιείται χάλυβας DNV(S355), καθώς και διγραμμικά υλικά S355, S275 και S235. Οι καταστατικοί νόμοι των οποίων φαίνονται στο σχήμα 4-73.

Σύμφωνα με το σχήμα 4-74, μπορεί να παρατηρηθεί πως με τη χρήση ακριβέστερου καταστατικού νόμου χάλυβα DNV(S355), έναντι του διγραμμικού νόμου χάλυβα S355 για τη βάση, η σύνδεση αποκτά μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία. Για την περίπτωση όπου χρησιμοποιείται χάλυβας S275, η αντοχή της φθάνει σε χαμηλότερη αντοχή στα 400-430kN για μετακίνηση 7-18mm. Από την άλλη, για την περίπτωση χρήσης χάλυβα S235, η διαρροή συμβαίνει πρώτα στη βάση, συγκεκριμένα στο κέλυφος, δίνοντας αντοχή στα 350kN για μετακίνηση περί τα 3mm.

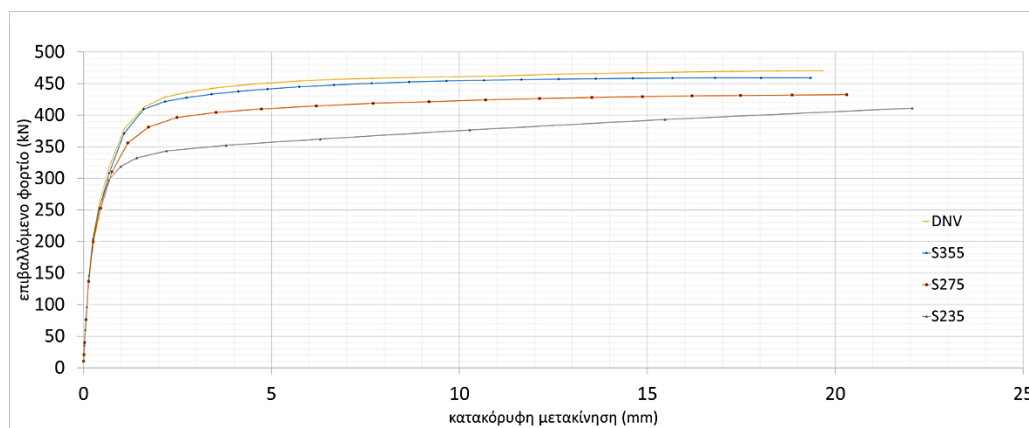




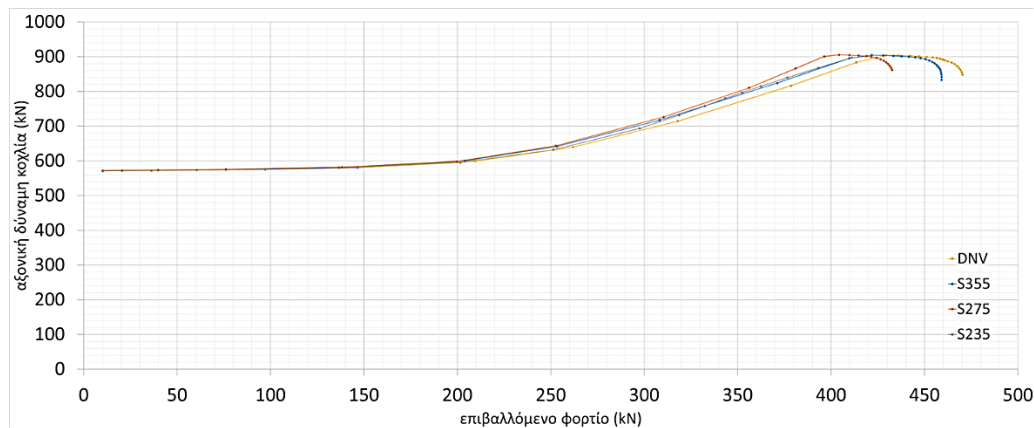
Σχήμα 4-73: Καταστατικός νόμος υλικών DNV(S355), S355, S275 και S235 για τη βάση της σύνδεσης PL 60x130

Η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία (σχήμα 4-75), ουσιαστικά, ταυτίζεται για τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Οι τυχόν μεταξύ τους διαφορές ανέρχονται περί τα 10-40kN και μπορεί να θεωρηθούν αμελητέες. Από την άλλη, μπορεί να παρατηρηθεί πως για καλύτερη ποιότητα χάλυβα, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία είναι αντίστοιχα μικρότερη. Όμοια συμπεριφορά προκύπτει στη σύγκριση του υλικού DNV(S355) με του S355, όπου το υλικό DNV(S355) περιγράφει με ακριβέστερο τρόπο τον καταστατικό νόμο του υλικού χάλυβα σε αντίθεση με του διγραμμικού S355.

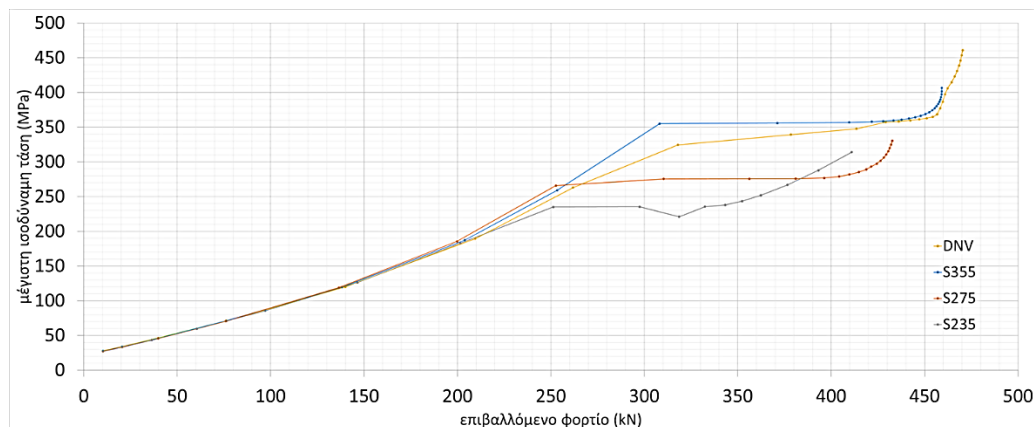
Η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση (σχήμα 4-76) ταυτίζεται για επιβολή φορτίου μέχρι τα 200kN. Για μεγαλύτερη επιβολή φόρτισης, η διαρροή συμβαίνει στη συναρμογή του κελύφους και της βάσης, με τα υλικά να φθάνουν στην αντίστοιχη ονομαστική τους αντοχή. Εξαιρεση αποτελεί το υλικό DNV(S355), στο οποίο, λόγω της μεγαλύτερης κράτυνσης που διαθέτει έναντι του υλικού S355, αναπτύσσονται σχετικά μικρότερες τάσεις.



Σχήμα 4-74: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 60x130 για χρήση υλικών DNV(S355), S355, S275, S235 στη βάση



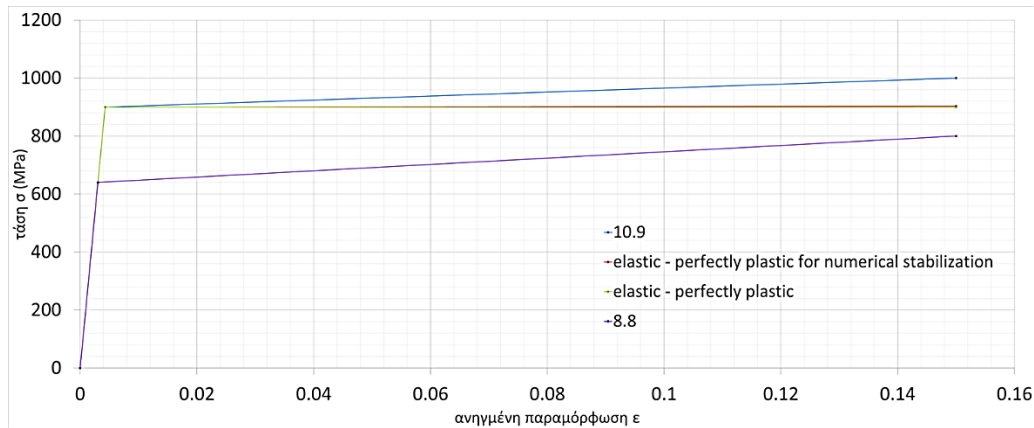
Σχήμα 4-75: Αξονική δύναμη κοχλία M36 σύνδεσης PL 60x130 για χρήση υλικών DNV(S355), S355, S275 και S235 στη βάση



Σχήμα 4-76: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους σύνδεσης PL 60x130 για χρήση υλικών DNV(S355), S355, S275, S235 στη βάση

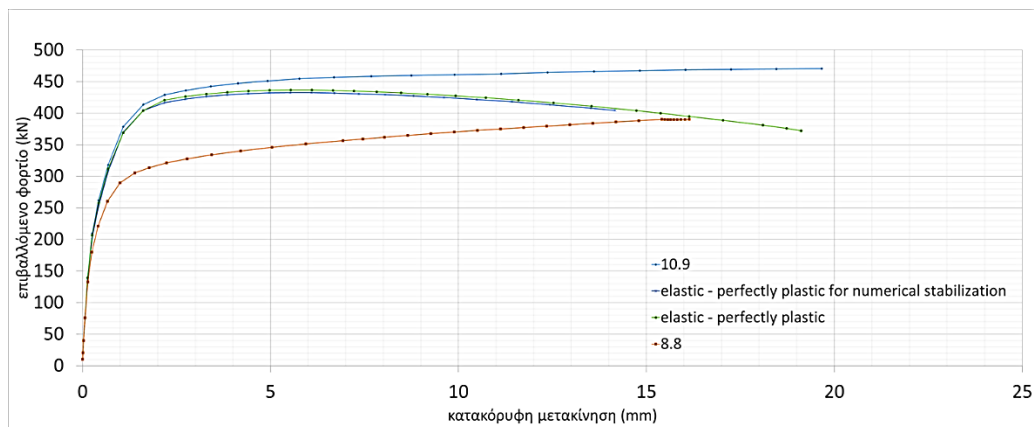
Όσον αφορά τη χρήση υλικού χάλυβα του κοχλία, χρησιμοποιείται χάλυβας ποιότητας 10.9 με κράτυνση, χωρίς κράτυνση, χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 (σχήμα 4-77). Το υλικό για αριθμητική ευστάθεια έχει μια ελάχιστη κράτυνση με εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας  $E_T = E/10000$ , το οποίο χρησιμοποιείται, κυρίως, για να βελτιωθεί η σύγκλιση του προβλήματος και ουσιαστικά, ταυτίζεται με υλικό ελαστικό τελείως πλαστικό (elastic – perfectly plastic). Επισημαίνεται πως για χρήση ποιότητας κοχλία 8.8, η δύναμη προέντασης προκύπτει (εξίσωση 4.1):

$$F_{p,c} = 0.7 \times A_s \times f_{ub} = 0.7 \times 8.17 \text{cm}^2 \times 80 \text{kN/cm}^2 = 457.52 \text{kN} \quad (4.1)$$



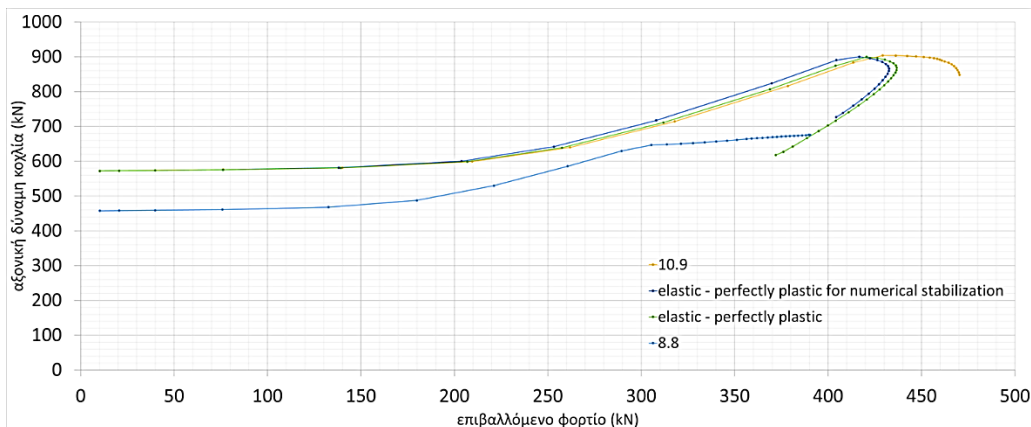
Σχήμα 4-77: Καταστατικός νόμος υλικών ποιότητας 10.9 με κράτυνση, χωρίς κράτυνση, χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 για τον κοχλία της σύνδεσης PL 60x130

Σύμφωνα με το σχήμα 4-78, μπορεί να παρατηρηθεί πως η χρήση υλικού χάλυβα ποιότητας 10.9 χωρίς κράτυνση δημιουργεί καθοδικό μεταελαστικό κλάδο και επομένως, εμφάνιση οριακού σημείου [14]. Από την άλλη, υπάρχει σημαντική απομένουσα αντοχή, αφού η απομείωση γίνεται σταδιακά. Οι δρόμοι ισορροπίας των υλικών χωρίς κράτυνση, ουσιαστικά, ταυτίζονται με μια ελάχιστη αντοχή να προσδίδεται από το υλικό που διαθέτει ελάχιστη κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια. Για χρήση υλικού χάλυβα ποιότητας 8.8, η αντοχή είναι μικρότερη, αφού θα διαρρέει νωρίτερα ο κοχλίας. Ωστόσο, λόγω της κράτυνσης του υλικού, η αντοχή φθάνει σε ικανοποιητική τιμή για αντιστοίχως μεγαλύτερη μετακίνηση.

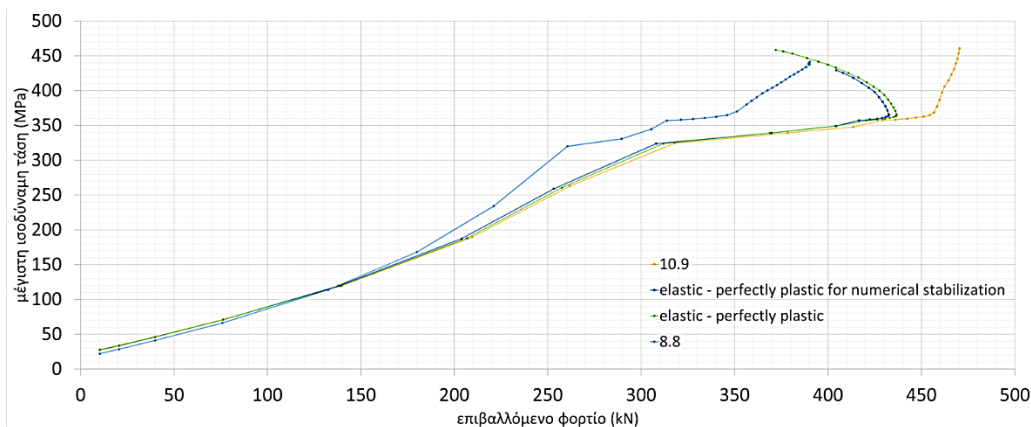


Σχήμα 4-78: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 60x130 για χάλυβα ποιότητας 10.9 με κράτυνση, χωρίς κράτυνση, χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 στον κοχλία

Ο ρυθμός που αναπτύσσεται η αξονική δύναμη του κοχλίας (σχήμα 4-79) ταυτίζεται για τη χρήση χάλυβα ποιότητας 10.9 με και χωρίς κράτυνση. Για χρήση χάλυβα ποιότητας 8.8, η αξονική δύναμη που μπορεί να αναπτύξει ο κοχλίας είναι αντιστοίχως μικρότερη με αρχική τιμή τη δύναμη προέντασης ίση με 457.52kN. Η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση (σχήμα 4-80) ταυτίζεται καθόλη την εφαρμογή του επιβαλλόμενου φορτίου μέχρι τα 420kN για χρήση χάλυβα ποιότητας 10.9 με και χωρίς κράτυνση. Για χρήση χάλυβα ποιότητας 8.8, η μέγιστη ισοδύναμη τάση αρχικά αυξάνεται όπως και για την ποιότητα υλικού 10.9. Ενώ, για επιβαλλόμενο φορτίο στα 200kN, ο ρυθμός αύξησής της είναι μεγαλύτερος.



Σχήμα 4-79: Αξονική δύναμη κοχλίας M36 σύνδεσης PL 60x130 για χάλυβα ποιότητας 10.9 με κράτυνση, χωρίς κράτυνση, χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 στον κοχλία



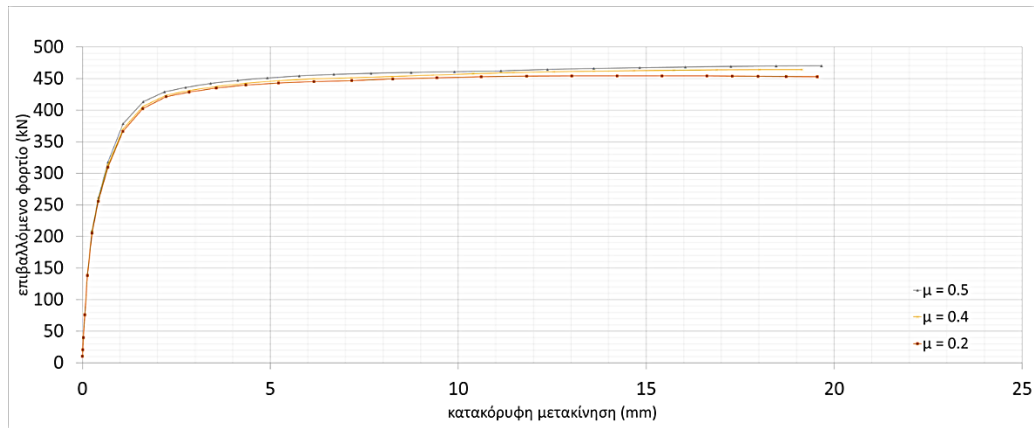
Σχήμα 4-80: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους σύνδεσης PL 60x130 για χάλυβα ποιότητας 10.9 με κράτυνση, χωρίς κράτυνση, χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 στον κοχλία

#### 4.7 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΡΙΒΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΕΠΙΦΑΝΙΩΝ ΕΠΑΦΗΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

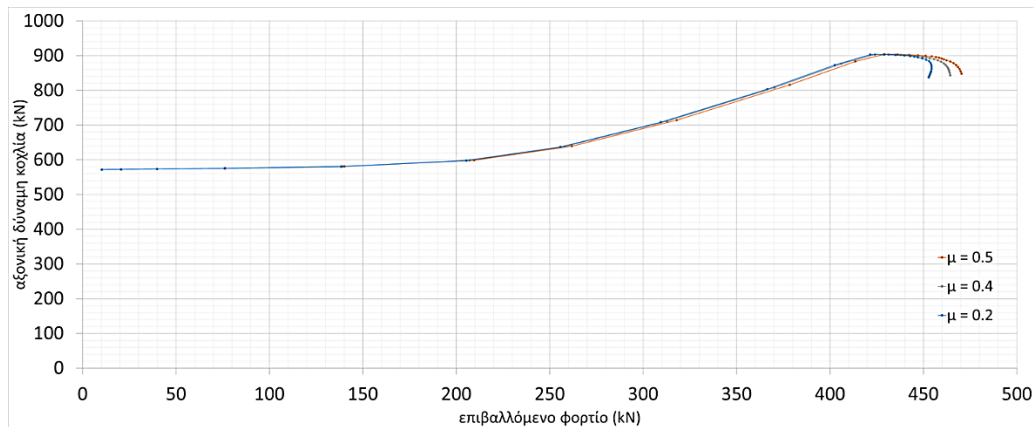
Για την προσομοίωση της τριβής στις επιφάνειες επαφής χρησιμοποιούνται οι συντελεστές 0.5, 0.4 και 0.2, οι οποίοι έχουν ληφθεί με βάση τον κανονισμό EN 1993-1-8 (πιν. 3.7) [13].

Σύμφωνα με το σχήμα 4-81, οι δρόμοι ισορροπίας με μεγαλύτερο συντελεστή τριβής φθάνουν αναλόγως σε μεγαλύτερη δυσκαμψία και αντοχή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη δύναμη που μπορεί να μεταφερθεί μέσω των επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Η ύπαρξη της τριβής δημιουργεί ευστάθεια για την μεταφερόμενη δύναμη. Σε επίπεδο προσομοίωσης, η ύπαρξη της τριβής και η ανάλογη αύξηση της τιμής της δυσκολεύει τη σύγκληση του προβλήματος.

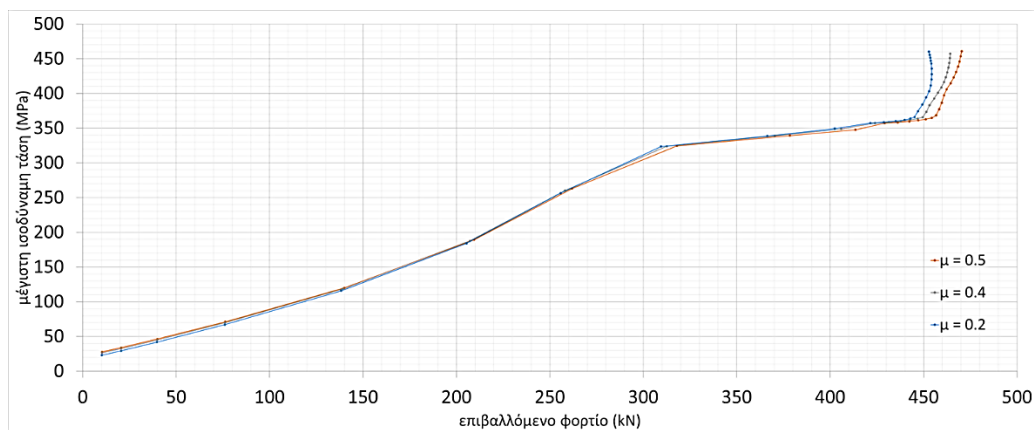
Η αξονική δύναμη του κοχλίας αναπτύσσεται με τον ίδιο ρυθμό και για τους τρεις συντελεστές τριβής (σχήμα 4-82). Αντίστοιχα, όμοια συμπεριφορά προκύπτει και για τη μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συναρμογή του κελύφους (σχήμα 4-83).



Σχήμα 4-81: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης PL 60x130 για συντελεστή τριβής 0.5, 0.4 και 0.2 μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή



Σχήμα 4-82: Αξονική δύναμη κοχλία M36 σύνδεσης PL 60x130 για συντελεστή τριβής 0.5, 0.4 και 0.2 μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή



Σχήμα 4-83: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους σύνδεσης PL 60x130 για συντελεστή τριβής 0.5, 0.4 και 0.2 μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή



# 5 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

## 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τις σημερινές απαιτήσεις σχεδιασμού των ανεμογεννητριών, οι ανεμογεννήτριες γίνονται ψηλότερες, προκειμένου να αξιοποιούν περισσότερο διαθέσιμο αιολικό δυναμικό, παράγοντας περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια. Κατά αυτό τον τρόπο, οι ανεμογεννήτριες καταπονούνται περισσότερο μέσω της αυξημένης προσβαλλόμενης επιφάνειας και του πυλώνα και των πτερυγίων από τον άνεμο. Συνεπώς, οι συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας οφείλουν να είναι επαρκώς σχεδιασμένες, ώστε να μεταφέρουν με ασφάλεια τα φορτία από το ένα τμήμα του πυλώνα προς το άλλο.

Μια εφαρμοσμένη μέθοδος για την επίτευξη του κριτηρίου αυτού, είναι η αύξηση των διαστάσεων των συνδέσεων, δηλαδή, των δακτυλιοειδών πελμάτων. Ένα από τα αποτελέσματα είναι ότι τα δακτυλιοειδή πέλαμα γίνονται πιο ακριβά. Ο λόγος είναι η προφανής αύξηση των διαστάσεων και επομένως, της χρήσης υλικού χάλυβα, αλλά κυρίως της κατασκευαστικής δυσκολίας υλοποίησης του μεγέθους τους με τις σημερινές δυνατότητες των βιομηχανιών.

Μια πρώτη ιδέα για τη μείωση του κόστους είναι η αντικατάσταση των δακτυλιοειδών πελμάτων με πρότυπες κοίλες ορθογωνικές διατομές. Η χρήση αυτής της μορφής σύνδεσης προϋποθέτει να ικανοποιούνται επαρκώς όλες οι απαιτήσεις που καθορίζονται από τους κανονισμούς σε επίπεδο ασφάλειας, αντοχής, δυσκαμψίας, κόστος κοκ. Κατά αυτόν τον τρόπο, γίνεται εξοικονόμηση του συνολικού κόστους μέσω της μείωσης του υλικού και μέσω της τεχνογνωσίας που υπάρχει για την παραγωγή των συνδέσεων αυτών.

Παράλληλα, τα μηχανικά χαρακτηριστικά είναι αυτά που καθορίζουν την απόκριση των συνδέσεων. Ένα από τα σημαντικά χαρακτηριστικά αυτά είναι και η ροπή αδράνειας. Ως μια πρώτη προσέγγιση, επιδιώκεται η ροπή αδράνειας της συμπαγούς ορθογωνικής και της κοίλης ορθογωνικής διατομής να είναι ίσες. Η ροπή αδράνειας της συμπαγούς ορθογωνικής διατομής υπολογίζεται (εξίσωση 5.1):

$$I_{PL} = (b \times h^3) / 12 \quad (5.1)$$

Ενώ, η ροπή αδράνειας της κοίλης ορθογωνικής διατομής υπολογίζεται προσεγγιστικά (εξίσωση 5.2):

$$I_{RHS} = (b \times h^3) / 12 - ((b - 2t) \times (h - 2t)^3) / 12 \quad (5.2)$$

Αρχικά, προκειμένου να είναι ίσες οι ροπές αδράνειας, επιλέγεται αύξηση του ύψους της κοίλης ορθογωνικής διατομής για την ανάλυσή της μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων.

## 5.2 ΤΡΟΠΟΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Η μέθοδος κατασκευής που χρειάζεται να εφαρμοστεί πρέπει να ανταποκρίνεται στις δυνατότητες των βιομηχανιών παραγωγής και στην ελαχιστοποίηση του κόστους. Ο τρόπος κατασκευής είναι, από ποιοτικής πλευράς, όμοιος με την παραγωγή των συμβατικών δακτυλιοειδών συνδέσεων. Ειδικότερα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ίδια τεχνολογία με τις αντίστοιχες προσαρμοσμένες αλλαγές για την παραγωγή των κοίλων ορθογωνικών συνδέσεων. Πιο προσιτή μέθοδος υλοποίησης της σύνδεσης είναι αυτή της συγκόλλησης πελμάτων, εκτός της περίπτωσης που υπάρχουν πρότυπες διατομές με τις αντίστοιχες διαστάσεις. Σε αυτήν την περίπτωση, προτιμώνται οι πρότυπες διατομές.

Στη συναρμογή του κελύφους με την κοίλη ορθογωνική διατομή, επιδιώκεται το πάχος της διατομής να είναι τουλάχιστον ίσο ή μεγαλύτερο από αυτό του κελύφους. Σκοπός της απαίτησης αυτής είναι η επιδίωξη ομαλής ροής των τάσεων κατά τη μεταβίβαση των εντάσεων από το ένα τμήμα μέλους προς το άλλο. Έτσι, αποφεύγονται φαινόμενα συσσώρευσης τάσεων και επομένως, μειώνεται σημαντικά η κόπωση αυξάνοντας τη συνολική αντοχή της σύνδεσης. Ακόμα, σε περίπτωση όπου το πάχος κελύφους είναι μεγαλύτερο του πάχους της κοίλης ορθογωνικής διατομής, υπάρχει κίνδυνος αποκόλλησης στη συρραφή λόγω διάτμησης. Σε περίπτωση που στη συναρμογή της κοίλης ορθογωνικής διατομής με του κελύφους, το πάχος διατομής προκύπτει μεγαλύτερο από το προβλεπόμενο, κατά τη μελέτη πάχους του κελύφους, τότε τα παραπάνω φαινόμενα καθίστανται αμελητέα.

Έπειτα, όπως και στις συμβατικές συνδέσεις τμήματος βραχέος L τύπου πέλματος, οι κοχλίες οφείλουν να είναι προεντεταμένοι, ώστε να αυξηθεί η αντοχή της σύνδεσης σε κόπωση. Επισημαίνεται, ακόμα, για λόγους συντήρησης, ο κοχλίας να τοποθετείται ανάποδα, ώστε σε περίπτωση που χαλαρώσει και φύγει από τη σύνδεση να γίνει γρήγορα αντιληπτός και να αποκατασταθεί.

Στην περίπτωση που χρειάζεται να συγκολληθούν λάμες για τη δημιουργία κοίλων ορθογωνικών διατομών, οι συγκολλήσεις που θα χρησιμοποιηθούν οφείλουν να ακολουθήσουν συγκεκριμένη διαδικασία παραγωγής. Η διαδικασία παραγωγής θα πρέπει να τελείται από πιστοποιημένο προσωπικό. Συνήθως, όταν η συγκόλληση καλείται να φέρει ροπή λόγω κάμψης και αξονική δύναμη κάθετα στο επίπεδο της ραφής, ο τρόπος συγκόλλησης που χρησιμοποιείται είναι η εσωραφή πλήρους διείδυσης. Η εσωραφή πλήρους διείδυσης μπορεί να εξασφαλίσει ομοιόμορφες τάσεις κατά την επιβολή της φόρτισης. Χρειάζεται, όμως, κατάλληλη προετοιμασία που αντιστοιχεί σε αύξηση του κόστους παραγωγής. Αν τα συνδεδόμενα τμήματα προκύπτουν μεγάλα και ομοίως το εμβαδόν της συγκόλλησης, τότε, οι παραμένουσες τάσεις που μπορεί να δημιουργηθούν κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης αυξάνονται. Σε κάθε περίπτωση όπου το εμβαδόν της συγκόλλησης προκύπτει μεγάλο, η εσωραφή γίνεται σε στρώσεις. Η μορφή που μπορεί να έχει η συγκόλληση είναι τύπου "Μισό Χ" ή και "Μισό V", για μικρά πάχη πελμάτων, αναλόγως την τεχνολογία που διατίθεται σε κάθε περίπτωση. Για μεγαλύτερα πάχη, προτιμάται η συγκόλληση τύπου "Μισό U" δεδομένου ότι για τη διαμόρφωση της διάταξης υπάρχει πρόσβαση για τη συγκόλληση από εξωτερικά της διατομής.

Μια άλλη μέθοδος συγκόλλησης είναι η εσωραφή μερικής διείδυσης, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί όταν δεν μεταφέρονται ροπές και εφελκυστικές δυνάμεις κάθετες στη διεύθυνση της ραφής [19]. Η εσωραφή μερικής διείδυσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη συγκόλληση της ενίσχυσης περί τον κοχλία. Έτσι, εξασφαλίζεται σημαντική οικονομία και υλικού κατά την προετοιμασία και χρόνου, ο οποίος εκφράζεται



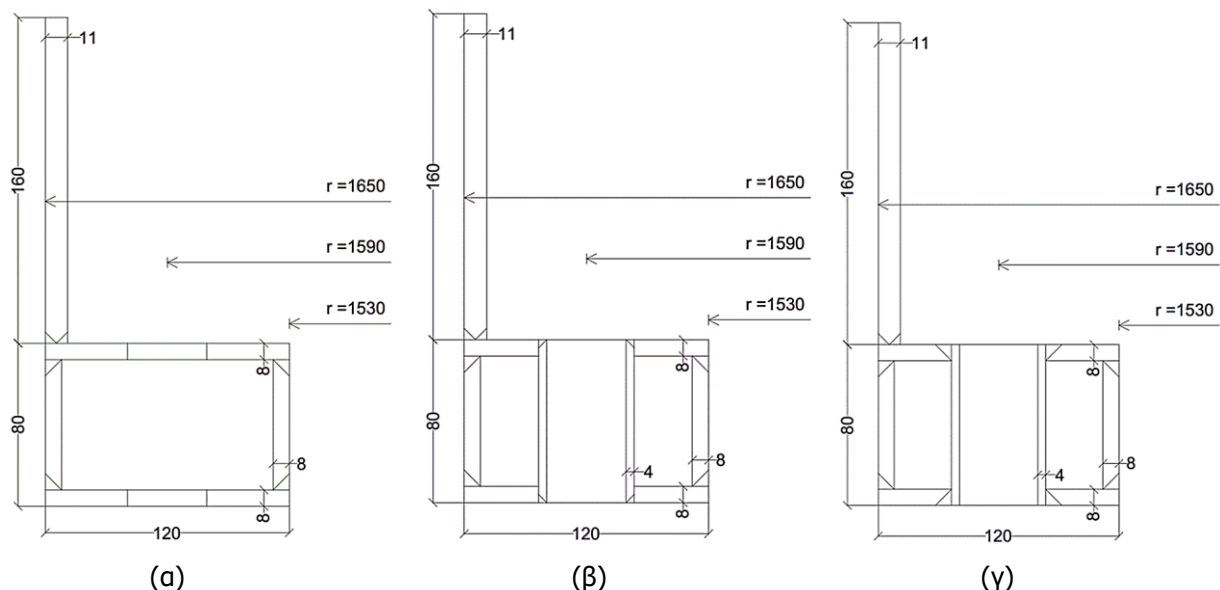
μέσω της ταχύτητας παραγωγής της κατασκευής. Για κάθε μέθοδο συγκόλλησης κρίνεται σκόπιμη η διερεύνησή της μέσω πειραμάτων και αριθμητικών προσομοιώσεων πριν την τελική εφαρμογή τους.

### 5.3 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΣΩΛΗΝΑ ΠΕΡΙ ΤΟΝ ΚΟΧΛΙΑ

Μια καθοριστική μέθοδος για τη βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών της σύνδεσης είναι η ενίσχυση περί τον κοχλία. Η τοποθέτηση της ενίσχυσης πραγματοποιείται μέσω συγκόλλησης και είναι κυλινδρικής μορφής. Κατά αυτόν τον τρόπο, τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κοίλης ορθογωνικής διατομής βελτιώνονται σημαντικά. Έτσι, βελτιώνεται η δυσκαμψία και επομένως, αυξάνεται η αντοχή της σύνδεσης. Ουσιαστικά, με την τοποθέτηση της ενίσχυσης περί τον κοχλία αλλάζει η ροή των τάσεων, συμβάλλοντας σε καλύτερη ανακατανομή και απόκριση της σύνδεσης. Η ανακατανομή βοηθά στην εσωτερική μεταφορά των εντάσεων που δημιουργούνται από το εξωτερικώς επιβαλλόμενο φορτίο. Με την ανακατανομή, η αστοχία του υλικού της διατομής ή και του κοχλία καθυστερεί, βελτιώνοντας τελικώς τη συμπεριφορά της σύνδεσης.

### 5.4 ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΑΙ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

Στο σχήμα 5-1 παρουσιάζονται οι κοίλες ορθογωνικές διατομές RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση και αντίστοιχα με ενίσχυση 4mm περί τον κοχλία. Παράλληλα, προτείνονται κάποιες πιθανές θέσεις συγκολλήσεων στοχεύοντας σε χαμηλότερο κατασκευαστικό κόστος και επιδιώκοντας μεγαλύτερη αντοχή έναντι κόπωσης. Υπενθυμίζεται πως οι διατομές αυτές μελετώνται με σκοπό την εφαρμογή τους ως διάταξη για σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας σε ανεμογεννήτριες και επομένως, λαμβάνονται υπόψη τα ίδια χαρακτηριστικά της τυπικής ανεμογεννήτριας που μελετήθηκε στην παράγραφο 3.2.



Σχήμα 5-1: Τομή σύνδεσης διατομής RHS 80x120 με πάχος διατομής 8mm,  
 (α) χωρίς ενίσχυση περί τον κοχλία,  
 (β) με ενίσχυση 4mm περί τον κοχλία εσωραφής μερικής διείσδυσης,  
 (γ) με ενίσχυση 4mm περί τον κοχλία εσωραφής πλήρους διείσδυσης

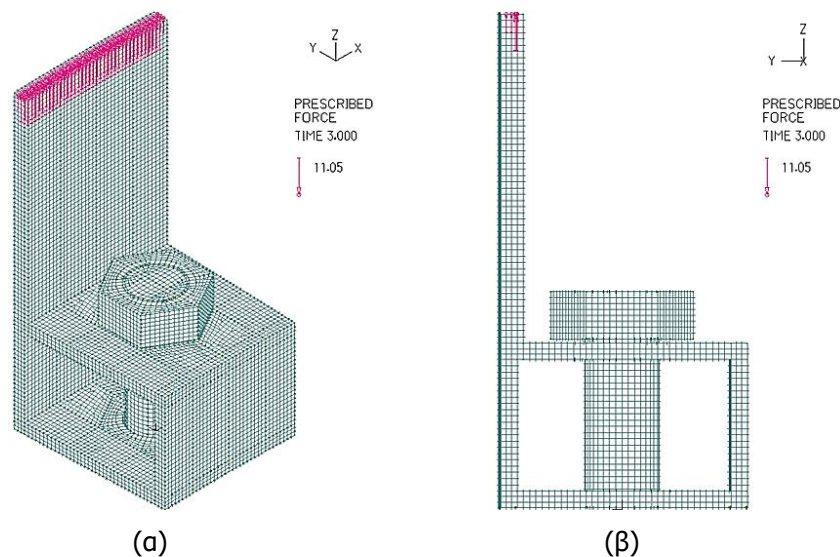
## 5.5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΙΩΣΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΜΕ ΚΟΙΛΗ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗ ΔΙΑΤΟΜΗ

Κατά την αριθμητική προσομοίωση, προσομοιώνεται το τμήμα σύνδεσης που αντιστοιχεί στον περισσότερο εφελκυσμένο κοχλία. Το τμήμα της σύνδεσης αποτελείται από τον κοχλία, το τμήμα που του αντιστοιχεί από τα δακτυλιοειδή πέλματα και το έλασμα του πυλώνα. Αξιοποιώντας και τη συμμετρία του φορέα, στο προσομοίωμα περιλαμβάνονται ο κοχλίας, το άνω πέλμα και το κέλυφος του πυλώνα. Συγκεκριμένα, τα μέρη αυτά προσομοιώθηκαν με πεπερασμένα στοιχεία όγκου 8 κόμβων 1ης τάξεως με συμμετρικό πλέγμα, έναντι τον ακριβέστερων 20 και 27 κόμβων ανωτέρας τάξεως για αποφυγή του υπολογιστικού κόστους. Ακόμα, προσομοιώνεται και το επίπεδο συμμετρίας ως τμήμα απείρους ακαμψίας, το οποίο θεωρείται ακλόνητο. Ο κοχλίας προσομοιώνεται με ειδική υποκατηγορία στοιχείων όγκου, η οποία ονομάζεται bolt και μέσω αυτής μπορεί να γίνει η εισαγωγή της προέντασης. Η προένταση αντιστοιχεί σε δύναμη ίση με 571.9kN, η οποία ισούται με το 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία M36 (εξίσωση 5.3):

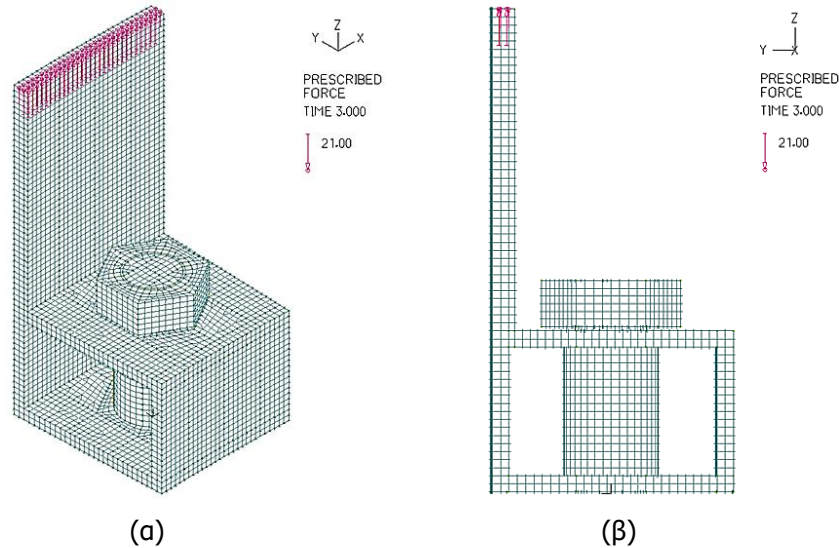
$$F_{p,c} = 0.7 \times A_s \times f_{ub} = 0.7 \times 8.17\text{cm}^2 \times 100\text{kN/cm}^2 = 571.9\text{kN} \quad (5.3)$$

Η φύση του προβλήματος είναι έντονα μη γραμμική, λόγω της ύπαρξης των μη γραμμικών υλικών και της υπάρχουσας γεωμετρίας, αλλά κυρίως, λόγω της παραλαβής του εξωτερικώς επιβαλλόμενου φορτίου μέσω των δυνάμεων επαφής που αναπτύσσονται μεταξύ των επιφανειών. Οι επαφές που προκύπτουν κατά τη φόρτιση είναι: (α) η κάτω επιφάνεια του κοχλία με την άνω επιφάνεια του πέλματος, (β) ο κορμός του κοχλία με την άντυγα του πέλματος, (γ) η κάτω επιφάνεια του πέλματος με το επίπεδο συμμετρίας. Οι επαφές προσομοιώνονται με κατάλληλα πεπερασμένα στοιχεία επαφής (contact elements). Η ύπαρξη αυτού του είδους στοιχείων καθιστούν εξ' αρχής το πρόβλημα μη γραμμικό.

Στα σχήματα 5-2 και 5-3 παρουσιάζονται τα προσομοιώματα για τη διατομή RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση και με ενίσχυση 4mm αντίστοιχα.



Σχήμα 5-2: Προσομοίωμα τμήματος σύνδεσης με πεπερασμένα στοιχεία για διατομή RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση, (α) αξονομετρική άποψη, (β) πλάγια όψη



Σχήμα 5-3: Προσομοίωμα τμήματος σύνδεσης με πεπερασμένα στοιχεία για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 4mm, (α) αξονομετρική άποψη, (β) πλάγια όψη

Επίσης, χρησιμοποιείται συντελεστής τριβής με τιμή 0.5 στις επιφάνειες επαφής. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί στον συντελεστή ολίσθησης για προεντεταμένους κοχλίες, ο οποίος λαμβάνεται σύμφωνα με τον κανονισμό EN 1993-1-8 πιν. 3.7 [13]. Ειδικότερα, όταν η τιμή ισούται με 0.5, τότε η κατηγορία της επιφάνειας τριβής θεωρείται ότι έχει προκύψει από αμμοβολή. Όσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η τιμή αυτή (πρακτικά η μέγιστη τιμή είναι ίση με 0.5), τόσο αυξάνεται και το κόστος παραγωγής, αφού χρειάζεται διαφορετικός εξοπλισμός για να υλοποιηθεί. Ο συντελεστής τριβής δημιουργεί ένα είδος ευστάθειας κατά την επιβολή της φόρτισης, αυξάνοντας, αναλόγως, την αντοχή της διατομής και ιδιαίτερα, τη μεταφορά της διάτμησης.

Οι συνοριακές συνθήκες, που λαμβάνονται υπόψη, είναι: (α) η δέσμευση κατά κατακόρυφο άξονα Z των κάτω κόμβων του κοχλία, καθώς και (β) η δέσμευση κατά άξονα X των κάτω μεσαίων κατά μήκος του άξονα Y κόμβων του κοχλία για λόγους ευστάθειας. Επειδή το πέλμα αποτελεί τμήμα του δακτυλιοειδούς πέλματος, η προσομοίωση της συνέχειάς του γίνεται με εφαπτομενική δέσμευση στις περιφέρειές του. Η συνθήκη αυτή εισάγεται μέσω τοπικού συστήματος [16]. Στο άνω τμήμα του κελύφους, δεσμεύονται όλοι οι περιφερειακοί κόμβοι, ώστε να ακολουθούν την παραμόρφωση των κόμβων που επιβάλλεται από το φορτίο. Έτσι, η επιβολή της φόρτισης δρα πιο ομοιόμορφα. Ειδικότερα, στο κέλυφος δρα δύναμη ίση με 420kN, η οποία διανέμεται στους άνω κόμβους του κελύφους με βάση την αντίστοιχη ζώνη επιρροής τους. Οι κινηματικές συνθήκες ακολουθούν τη θεωρία μεγάλων παραμορφώσεων, ωστόσο επέλθει η αστοχία του κοχλία, του πέλματος ή του κελύφους. Χρησιμοποιείται χάλυβας DNV(S355) και ποιότητα κοχλία 10.9.

Με τη χρήση του συντελεστή ενδοσιμότητας, το πρόβλημα γίνεται πιο εύκαμπτο και συγκλίνει πιο γρήγορα, αφού αφαιρούνται οι διπλές εξισώσεις των επαφών κατά την επίλυση του αντίστοιχου μητρώου τους. Από την άλλη, επηρεάζονται οι τάσεις στην περιοχή της διεσόδου αλλάζοντας σχετικά τα αποτελέσματά τους, τα οποία χρειάζεται να εκτιμηθούν με προσοχή, ώστε να ανταποκρίνονται στο φυσικό πρόβλημα [11].

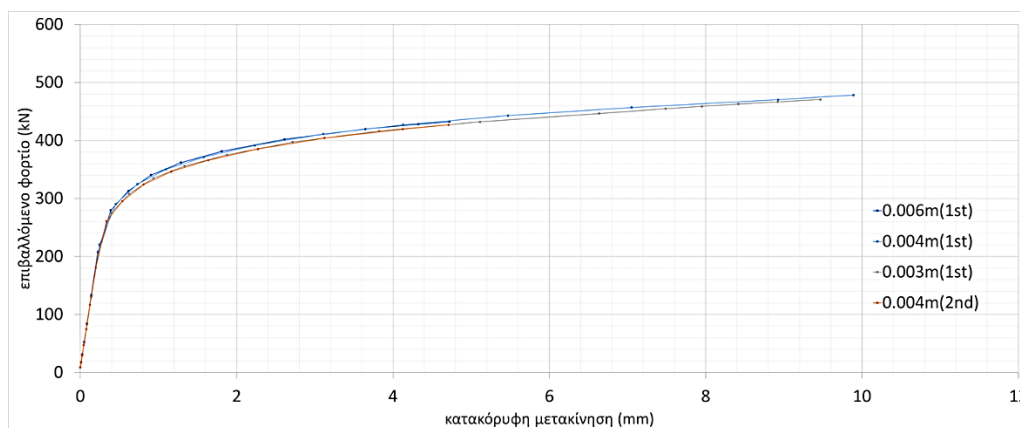
Η ανάλυση τελείται σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο, κλείνουν τα κενά μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Τα κενά που επιλέγονται είναι 2mm από την άνω επιφάνεια της διατομής με την κάτω επιφάνεια του κοχλία και 1mm από την κάτω επιφάνεια της διατομής με το επίπεδο συμμετρίας. Στο δεύτερο στάδιο, εισάγεται η προένταση και στο τρίτο στάδιο, τελείται η ανάλυση collapse, κατά την οποία εκτιμώνται οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, κατά τη διάρκεια της φόρτισης, και αποκτώνται δρόμοι ισορροπίας.

Η μέθοδος collapse ανήκει στην οικογένεια αλγορίθμων arc-length και μπορεί να υπολογίσει το φορτίο κατάρρευσης της κατασκευής, υπολογίζοντας εκ νέου το μητρώο στιβαρότητας του φορέα σε κάθε βήμα κατά την παραμόρφωση του φορέα [14].

Όσον αφορά την εξαγωγή αποτελεσμάτων, προκειμένου τα αποτελέσματα των προσομοιωμάτων να είναι επαρκώς αξιόπιστα, χρειάζεται να δημιουργηθεί πυκνό δίκτυο με τον κατάλληλο τύπο πεπερασμένων στοιχείων. Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι τα αποτελέσματα να έχουν το λιγότερο δυνατόν σφάλμα λόγω της διακριτοποίησης του φορέα. Τότε, ο φορέας θα μπορεί να ακολουθήσει πιο πιστά τις παραμορφώσεις που πρόκειται να αναπτυχθούν κατά την εξωτερική επιβολή της φόρτισης, καθώς, και την ανάπτυξη φαινομένων, όπως του λυγισμού και της επαφής μεταξύ των επιφανειών.

Ακόμα, είναι γνωστό πως τα πεπερασμένα στοιχεία ανώτερης τάξεως υπολογίζουν με περισσότερη ακρίβεια τις μεταβολές των τάσεων τους, καθώς μπορούν να παραμορφωθούν μέσω συναρτήσεων σχήματος που περιγράφουν πιο πιστά το πεδίο μετακινήσεων. Εντούτοις, το υπολογιστικό κόστος της εφαρμογής τους δεν είναι αμελητέο. Για την αποφυγή της χρήσης τους, εξετάζεται η βαθμιαία πύκνωση του δικτύου με στοιχεία 1ης τάξεως για τις περιπτώσεις μεγέθους στοιχείων 0.006, 0.004m και 0.003m, ενώ εξετάζεται και η περίπτωση με στοιχεία ανώτερης τάξεως για μέγεθος στοιχείων 0.004m.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι οι δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120 σταθερού τυχαίου πάχους. Σύμφωνα με το σχήμα 5-4, παρατηρείται πως στις περιπτώσεις 0.006m και 0.004m 1ης τάξεως στοιχεία οι δρόμοι ισορροπίας ταυτίζονται, και ομοίως, στις περιπτώσεις 0.003m 1ης τάξεως και 0.004m ανώτερης τάξεως, οι οποίες δίνουν σχετικά πιο εύκαμπτο φορέα. Χωρίς να υπάρχουν σημαντικές διαφορές, όμως, οι δρόμοι ισορροπίας ταυτίζονται. Έτσι, για τις προσομοιώσεις επιλέγονται 1ης τάξεως στοιχεία με μέγεθος 0.004m όπου είναι εφικτό.



Σχήμα 5-4: Δρόμοι ισορροπίας σύνδεσης RHS 80x120 σταθερού τυχαίου πάχους για μέγεθος στοιχείων 0.006m, 0.004m, 0.003m 1ης τάξεως στοιχεία και για μέγεθος 0.004m ανώτερης τάξεως στοιχεία

## 5.6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

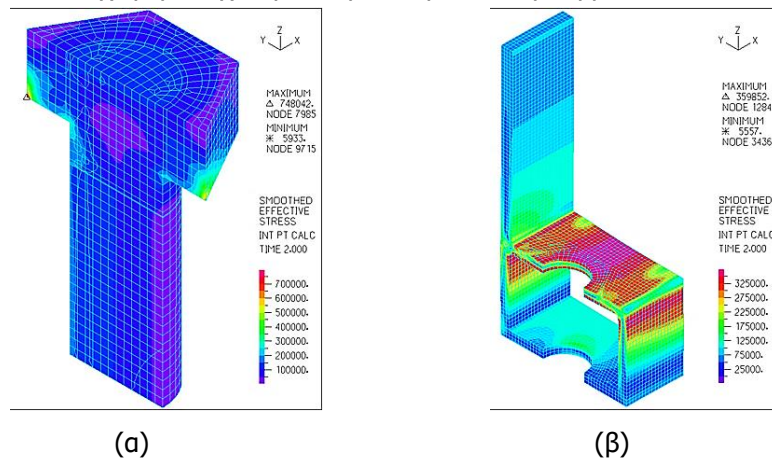
Σε αυτήν την παράγραφο, έμφαση δίνεται στην παρουσίαση και στην περιγραφή των αποτελεσμάτων για την αρχική περίπτωση βραχέος L κοίλης ορθογωνικής διατομής RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση. Η διατομή αυτή έχει περίπου ίση ροπή αδράνειας με τη συμβατική περίπτωση βραχέος L διατομής PL 60x130. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στον δρόμο ισορροπίας της σύνδεσης, στις ισοδύναμες τάσεις και στις παραμορφώσεις σε χαρακτηριστικά σημεία για τον κοχλία και τη διατομή, καθώς και στη

δύναμη προέντασης τη στιγμή που εισάγεται στον κοχλία. Ακόμα, παρουσιάζονται η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση. Ειδικότερα, η θέση υπολογισμού της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στη συγκόλληση, βρίσκεται στη συναρμογή του κελύφους με τη διατομή, εσωτερικά της σύνδεσης πάνω στον άξονα συμμετρίας.

Κατά τη στιγμή της προέντασης, η δύναμη που επιβάλλεται στον κοχλία εισάγεται βαθμιαία, ωστόσο επιτευχθεί σύγκλιση. Η δύναμη που επιδιώκεται να εισαχθεί, αφού χρησιμοποιείται κοχλίας M36 ποιότητας 10.9, ανέρχεται στο 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία και είναι ίση με 571.9kN. Η βαθμιαία εισαγωγή της προέντασης κρίνεται σκόπιμη, αφού δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων το ποσοστό της προέντασης που μπορεί να φέρει η κοίλη ορθογωνική διατομή, η οποία εμφανίζει διαρροή τοπικά γύρω από την περιοχή του κοχλία. Ενώ, ταυτόχρονα, δημιουργείται λυγισμός των τοιχωμάτων προσπαθώντας να μεταβιβαστεί η δύναμη προέντασης προς τη βάση, την κάτω επιφάνεια της επαφής, με το επίπεδο συμμετρίας.

Παρουσιάζονται στο σχήμα 5-5, οι ισοδύναμες τάσεις και οι παραμορφώσεις του κοχλία και της διατομής για το τελευταίο βήμα κατά την εισαγωγή της προέντασης. Μπορεί να παρατηρηθεί, πως οι αναπτυσσόμενες τάσεις του κοχλία είναι ομοιόμορφες, ενώ παράλληλα, λόγω της επαφής της κεφαλής του κοχλία με της βάσης, ο κοχλίας εντείνεται περισσότερο στη περιοχή της επαφής. Ενώ, λόγω της χρήσης του συντελεστή ενδοσιμότητας, οι τάσεις στη περιοχή της διείσδυσης επηρεάζονται αλλάζοντας σχετικά τα αποτελέσματά τους, τα οποία χρειάζεται να εκτιμηθούν με προσοχή, ώστε να ανταποκρίνονται στο φυσικό πρόβλημα.

Διατομή RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 100kN$



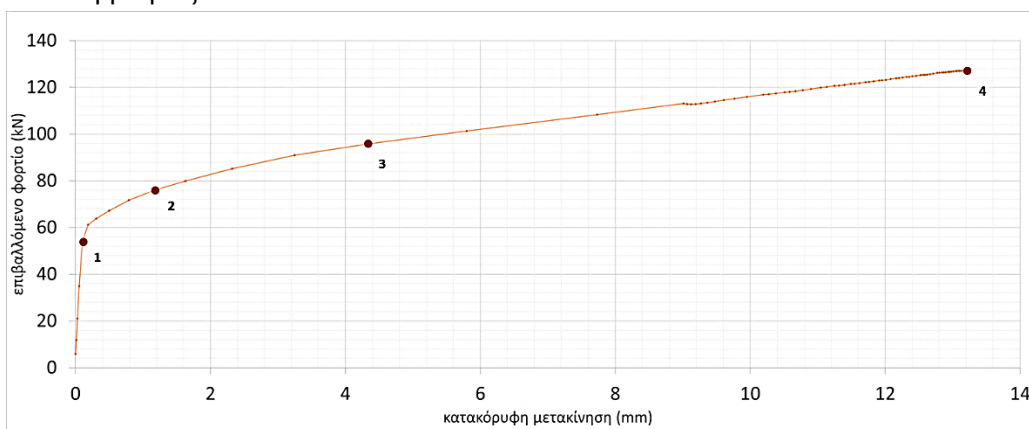
Σχήμα 5-5: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 100kN$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση σε τομή

Έπειτα, παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης (σχήμα 5-6). Ο δρόμος ισορροπίας χρησιμοποιείται προκειμένου να εκτιμηθούν η αντοχή, η μεταβολή της δυσκαμψίας, η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να φθάσει η σύνδεση και αν ο μεταελαστικός κλάδος του φορέα είναι ευσταθής. Για την εύρεση του δρόμου ισορροπίας, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος collapse για μέγιστη μετατόπιση 18mm και αρχική διέγερση ίση με 0.00001m στον μεσαίο κόμβο της άνω επιφάνειας του κελύφους [12]. Για την κατανόηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης κατά την παραμόρφωση, παρουσιάζονται οι ισοδύναμες τάσεις και οι παραμορφώσεις του κοχλία και της διατομής σε χαρακτηριστικά σημεία (σχήματα 5-7 και 5-8).

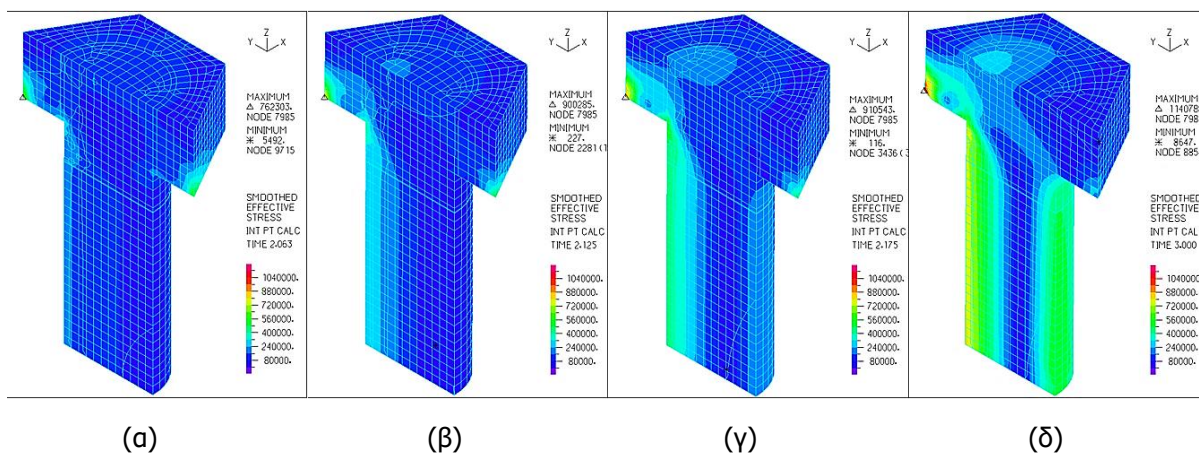
Μέσω των χαρακτηριστικών σημείων, μπορούν να κατανοηθούν καλύτερα η ανακατανομή των τάσεων και ο μηχανισμός ανάληψης του εξωτερικώς επιβαλλόμενου φορτίου. Έτσι, στο σημείο 1, η σύνδεση εξακολουθεί να έχει σημαντική δυσκαμψία, καθώς βρίσκεται πριν τη διαρροή. Στο σημείο 2, υπάρχει έντονη



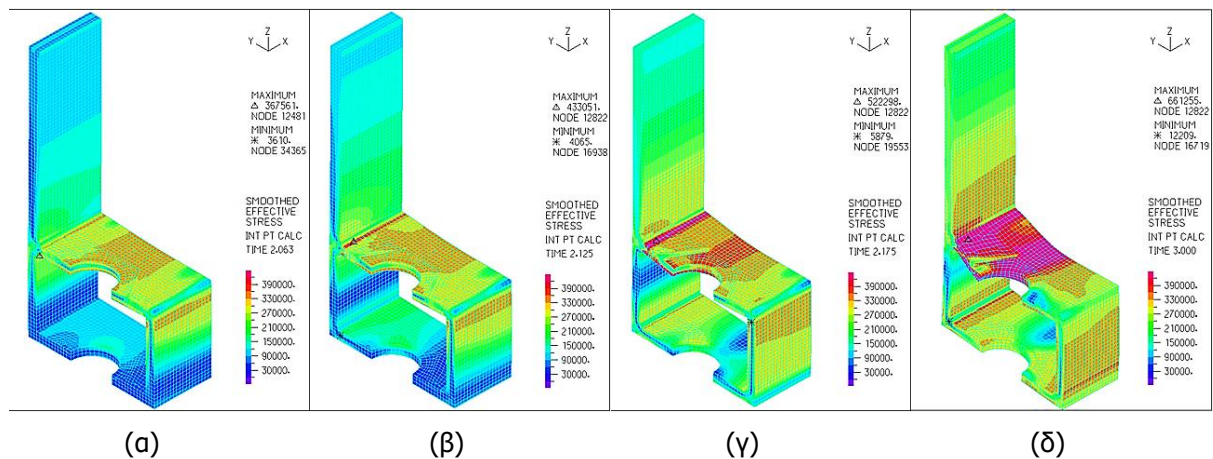
μείωση της δυσκαμψίας. Αυτό οφείλεται στη διαρροή της κοίλης ορθογωνικής διατομής, η οποία διαρρέει πρώτη έναντι του κοχλία. Στο σημείο 3, η δυσκαμψία διατηρείται έχοντας μεταλυγισμική αντοχή μετά τη διαρροή και επομένως, ο κλάδος χαρακτηρίζεται ως ευσταθής [14]. Η μεταλυγισμική αντοχή προκύπτει λόγω της κράτυνση του υλικού της διατομής και του κοχλία. Στο σημείο 4, που αποτελεί το τελευταίο βήμα της ανάλυσης, καθορίζεται η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η σύνδεση, η οποία μπορεί να είναι είτε η αστοχία της διατομής ή του κοχλία, είτε πως ο φορέας έφθασε στην προβλεπόμενη μετατόπιση που ζητήθηκε από τον χρήστη ή και λόγω δυσκολίας στη σύγκληση του προβλήματος. Ειδικότερα, όσον αφορά την ανακατανομή των τάσεων κατά την επιβολή της εξωτερικής φόρτισης, η δύναμη του κοχλία μεταβιβάζεται στη σύνδεση, εντείνοντας αρχικά, την περιοχή γύρω από τον κοχλία. Ακολουθεί, έπειτα, ο εφελκυσμός της πλευράς του κοχλία προς την πλευρά του κελύφους, ενώ η βάση του κοχλία κείται στο επίπεδο συμμετρίας. Παράλληλα, κατά την τελική επιβολή της εξωτερικής φόρτισης, παρουσιάζεται στένωση στη βάση του κοχλία, το οποίο οφείλεται στο φαινόμενο Poisson του υλικού. Από την άλλη, η κοίλη ορθογωνική διατομή μετά τη στιγμή της προέντασης, μεταβιβάζει τις εντάσεις που αναπτύσσονται μέσω των τοιχωμάτων, διανέμοντάς τες τελικά, στην κάτω επιφάνεια εσωτερικά της σύνδεσης, δηλαδή, εκεί που γίνεται η επαφή της κάτω επιφάνειας του πέλματος και του επιπέδου συμμετρίας. Επιπλέον, κατά την εξωτερική επιβολή του φορτίου, η περιοχή που καταπονείται περισσότερο είναι στην περιοχή της συναρμογής του κελύφους, καθώς και της κάτω εσωτερικής επιφάνειας της διατομής, όπου γίνεται η επαφή με το επίπεδο συμμετρίας.



Σχήμα 5-6: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση

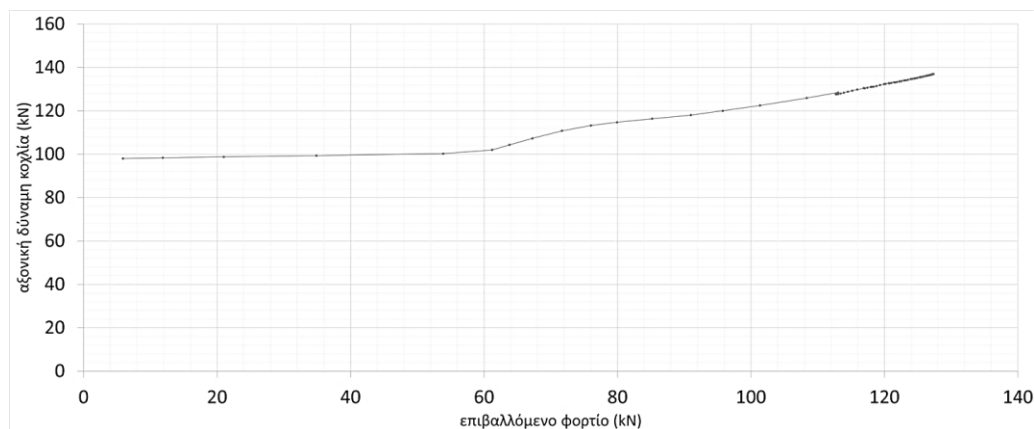


Σχήμα 5-7: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 5-8: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

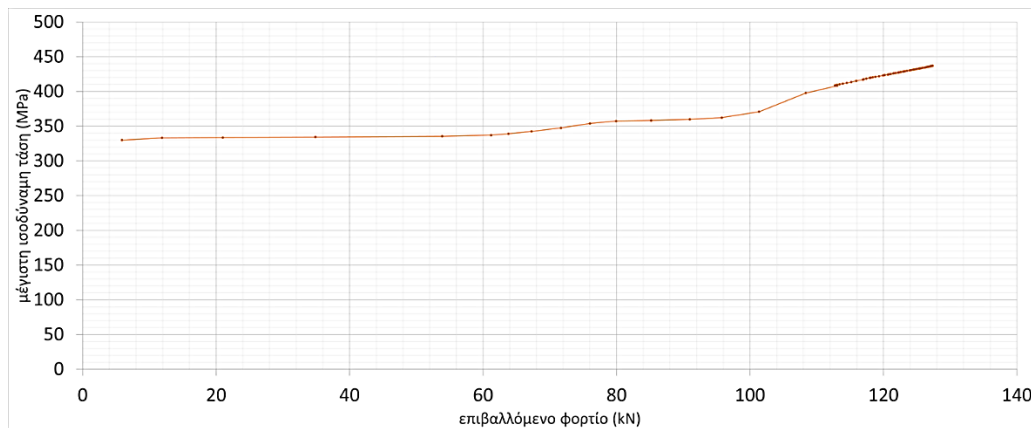
Στο σχήμα 5-9, παρουσιάζεται η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία. Η δύναμη που αναπτύσσεται έχει άμεση συσχέτιση με τη δύναμη προέντασης που εισάγεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης, τόσο είναι και η αρχική αξονική δύναμη του κοχλία. Κατά την επιβολή της φόρτισης, η μεταβολή της αξονικής δύναμης είναι γραμμική περί τα 100kN. Μετά τη γραμμική μεταβολή, η αξονική δύναμη του κοχλία φθάνει σε τιμή τέτοια, ώστε ο φορέας να ισορροπεί με το τελικό εξωτερικώς επιβαλλόμενο φορτίο.



Σχήμα 5-9: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση

Στο σχήμα 5-10, παρουσιάζεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση. Η θέση της συγκόλλησης που μελετάται βρίσκεται στη συναρμογή του κελύφους με τη διατομή. Είναι γνωστό, πως συνήθως η αστοχία της σύνδεσης συμβαίνει στην περιοχή της συγκόλλησης, συγκεκριμένα, στη συναρμογή του κελύφους λόγω κόπωσης. Έτσι, κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση της μέγιστης ισοδύναμης τάσης, η οποία αρχικά παρατηρείται να είναι αυξημένη κοντά στη διαρροή, ωστόσο αρχίζει να διαρρέει για αυξημένο πλέον επιβαλλόμενο φορτίο. Οι αυξημένες τάσεις οφείλονται στη χαμηλή δυσκαμψία της διατομής.





Σχήμα 5-10: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση

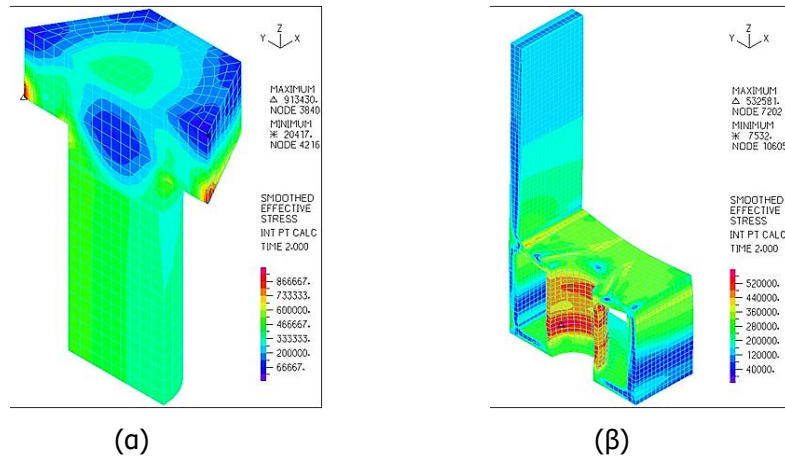
## 5.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

Σε αυτήν την παράγραφο, έμφαση δίνεται στην παρουσίαση και περιγραφή των αποτελεσμάτων για την περίπτωση βραχέος L κοίλης ορθογωνικής διατομής RHS 80x120x8 με ενίσχυση 4mm. Η διατομή αυτή έχει περίπου ίση ροπή αδράνειας με τη συμβατική περίπτωση βραχέος L διατομής PL 60x130. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται, επικεντρώνονται στον δρόμο ισορροπίας της σύνδεσης, στις ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις σε χαρακτηριστικά σημεία για τον κοχλία και τη διατομή, καθώς και στη δύναμη προέντασης τη στιγμή που εισάγεται στον κοχλία. Ακόμα, παρουσιάζονται η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση. Ειδικότερα, η θέση υπολογισμού της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στη συγκόλληση, βρίσκεται στη συναρμογή του κελύφους με τη διατομή, εσωτερικά της σύνδεσης πάνω στον άξονα συμμετρίας.

Κατά τη στιγμή της προέντασης, η δύναμη που επιβάλλεται στον κοχλία εισάγεται βαθμιαία, ωστόσο επιτευχθεί σύγκλιση. Η δύναμη που επιδιώκεται να εισαχθεί, αφού χρησιμοποιείται κοχλίας M36 ποιότητας 10.9, ανέρχεται στο 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίας και είναι ίση με 571.9kN. Η βαθμιαία εισαγωγή της προέντασης κρίνεται σκόπιμη, αφού δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων το ποσοστό της προέντασης που μπορεί να φέρει η κοίλη ορθογωνική διατομή. Στη περίπτωση, όμως, που υπάρχει ενίσχυση περί τον κοχλία, η δύναμη προέντασης εντείνει σημαντικά την ενίσχυση, ωστόσο συμβάλει στην αύξηση της αντοχής της. Αν η ενίσχυση δεν έχει σημαντική δυσκαμψία, τότε δεν μπορεί να εισαχθεί η πλήρης προένταση που επιδιώκεται, αφού δημιουργείται τοπικός λυγισμός των τοιχωμάτων της ενίσχυσης. Η μεταβίβαση της δύναμης προέντασης επιτυγχάνεται κυρίως μέσω της ενίσχυσης, η οποία μεταφέρεται προς βάση, την κάτω επιφάνεια της επαφής, με το επίπεδο συμμετρίας.

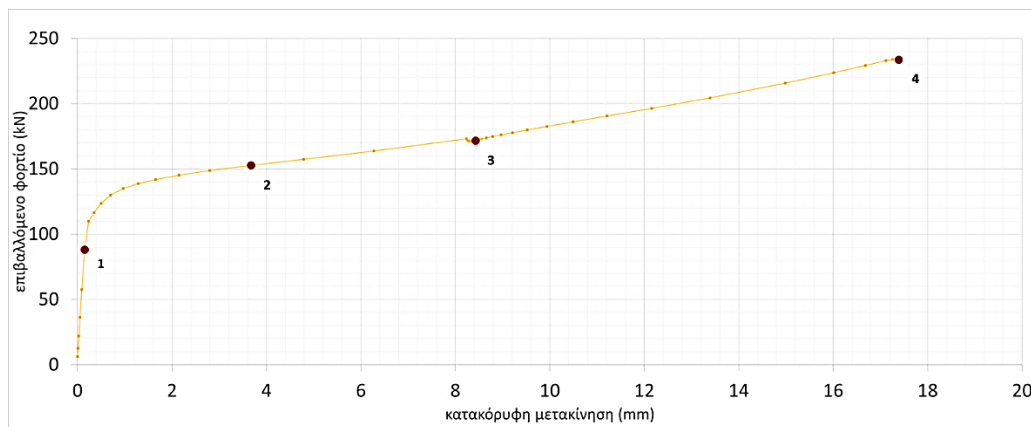
Παρουσιάζονται στο σχήμα 5-11, οι ισοδύναμες τάσεις και οι παραμορφώσεις του κοχλία και της διατομής για το τελευταίο βήμα, κατά την εισαγωγή της προέντασης. Μπορεί να παρατηρηθεί, πως οι αναπτυσσόμενες τάσεις του κοχλία είναι ομοιόμορφες, ενώ παράλληλα, λόγω της επαφής της κεφαλής του κοχλία με της βάσης, ο κοχλίας εντείνεται περισσότερο στη περιοχή της επαφής. Ενώ, ανάλογα εντείνεται και η ενίσχυση. Από την άλλη, λόγω της χρήσης του συντελεστή ενδοσιμότητας, οι τάσεις στη περιοχή της διείσδυσης επηρεάζονται αλλάζοντας σχετικά τα αποτελέσματά τους, τα οποία χρειάζεται να εκτιμηθούν με προσοχή, ώστε να ανταποκρίνονται στο φυσικό πρόβλημα.

Διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 4mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 430\text{kN}$



Σχήμα 5-11: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 430\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 4mm σε τομή

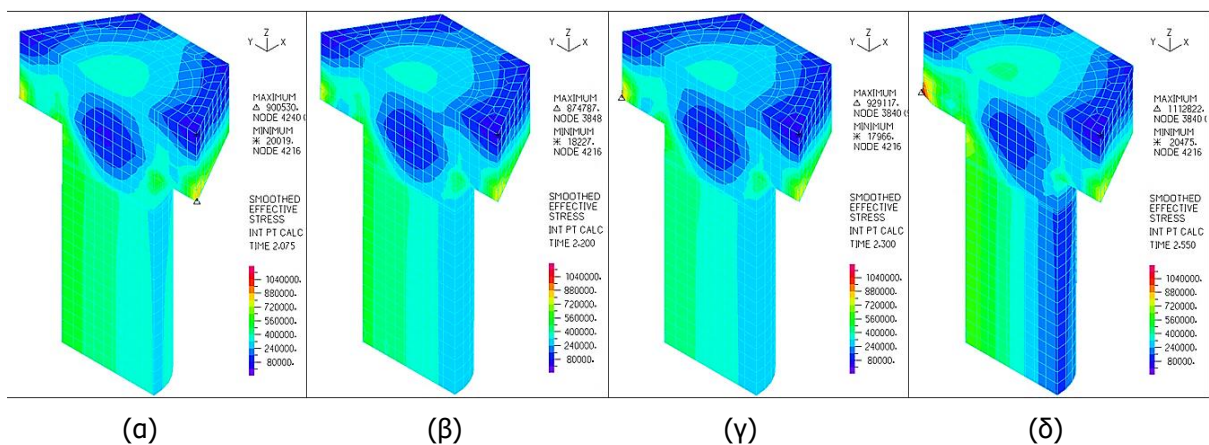
Έπειτα, παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης (σχήμα 5-12). Ο δρόμος ισορροπίας χρησιμοποιείται προκειμένου να εκτιμηθούν η αντοχή, η μεταβολή της δυσκαμψίας, η μέγιστη μετατόπιση που μπορεί να φθάσει η σύνδεση και αν ο μετελαστικός κλάδος του φορέα είναι ευσταθής. Για την εύρεση του δρόμου ισορροπίας, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος collapse για μέγιστη μετατόπιση 18mm και αρχική διέγερση ίση με 0.00001m στον μεσαίο κόμβο της άνω επιφάνειας του κελύφους [12]. Για την κατανόηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης κατά την παραμόρφωση, παρουσιάζονται οι ισοδύναμες τάσεις και οι παραμορφώσεις του κοχλία και της διατομής σε χαρακτηριστικά σημεία (σχήματα 5-13 και 5-14).



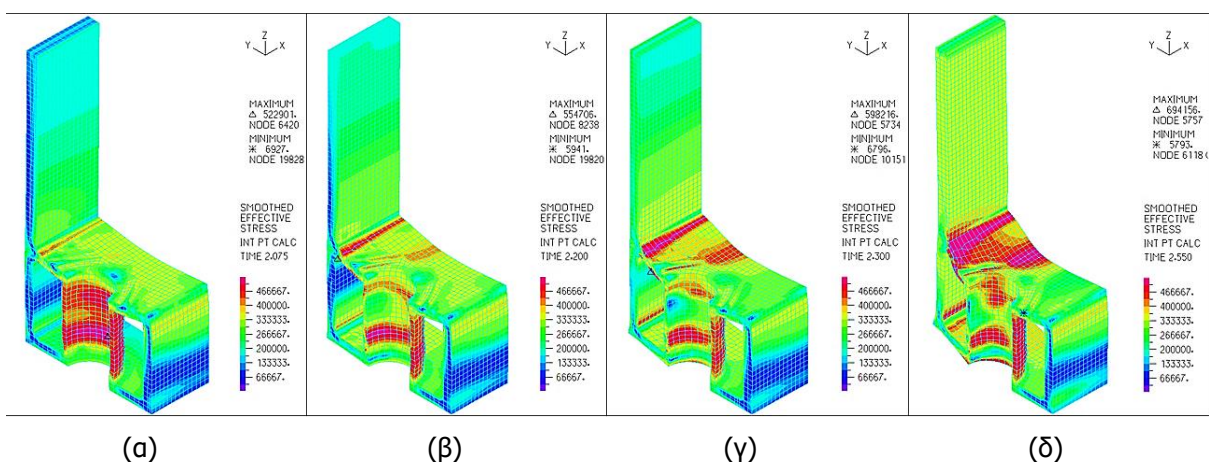
Σχήμα 5-12: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x8 με ενίσχυση 4mm

Μέσω των χαρακτηριστικών σημείων, μπορούν να κατανοηθούν καλύτερα η ανακατανομή των τάσεων και ο μηχανισμός ανάληψης του εξωτερικώς επιβαλλόμενου φορτίου μέσω των τάσεων επαφών του κοχλία και της διατομής. Έτσι, στο σημείο 1, η σύνδεση εξακολουθεί να έχει σημαντική δυσκαμψία, καθώς βρίσκεται πριν τη διαρροή. Στο σημείο 2, υπάρχει έντονη μείωση της δυσκαμψίας. Αυτό οφείλεται στη διαρροή της κοίλης ορθογωνικής διατομής, η οποία διαρρέει πρώτη έναντι του κοχλία. Στο σημείο 3, η δυσκαμψία διατηρείται έχοντας μεταλυγισμική αντοχή μετά τη διαρροή και επομένως, ο κλάδος χαρακτηρίζεται ως

ευσταθής [14]. Η μεταλυγισμική αντοχή προκύπτει λόγω της κράτυνση του υλικού της διατομής και του κοχλία. Στο σημείο 4, όπου είναι το τελευταίο βήμα της ανάλυσης, καθορίζεται η κατάσταση στην οποία βρίσκεται η σύνδεση, είτε σε αστοχία της διατομής ή του κοχλία, είτε πως ο φορέας έφθασε στην προβλεπόμενη μετατόπιση που ζητήθηκε από τον χρήστη ή και λόγω δυσκολίας στη σύγκληση του προβλήματος. Ειδικότερα, όσον αφορά την ανακατανομή των τάσεων κατά την επιβολή της εξωτερικής φόρτισης, η δύναμη του κοχλία μεταβιβάζεται στη σύνδεση εντείνοντας αρχικά, την περιοχή γύρω από τον κοχλία. Ακολουθεί, έπειτα, ο εφελκυσμός της πλευράς του κοχλία προς την πλευρά του κελύφους, ενώ η βάση του κοχλία κείται στο επίπεδο συμμετρίας. Παράλληλα, κατά την τελική επιβολή της εξωτερικής φόρτισης, παρουσιάζεται στένωση στη βάση του κοχλία, το οποίο οφείλεται στο φαινόμενο Poisson του υλικού. Από την άλλη, η κοίλη ορθογωνική διατομή μετά τη στιγμή της προέντασης μεταβιβάζει τις εντάσεις που αναπτύσσονται μέσω των τοιχωμάτων και της ενίσχυσης, διανέμοντάς τες, τελικά, στην κάτω επιφάνεια εσωτερικά της σύνδεσης, δηλαδή, εκεί που γίνεται η επαφή της κάτω επιφάνειας πέλματος και του επιπέδου συμμετρίας. Επιπλέον, κατά την εξωτερική επιβολή του φορτίου, η περιοχή που καταπονείται περισσότερο είναι στην περιοχή της συναρμογής του κελύφους, καθώς και της κάτω εσωτερικής επιφάνειας της διατομής που γίνεται η επαφή με το επίπεδο συμμετρίας.



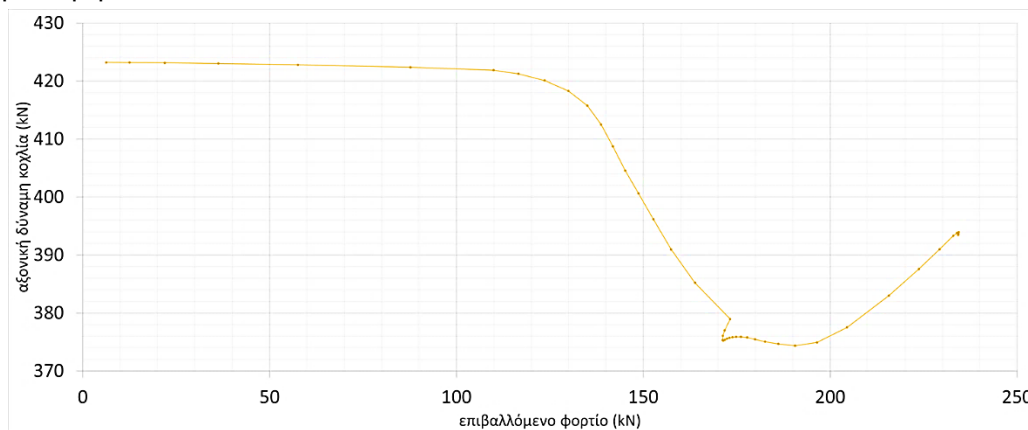
Σχήμα 5-13: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 5-14: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

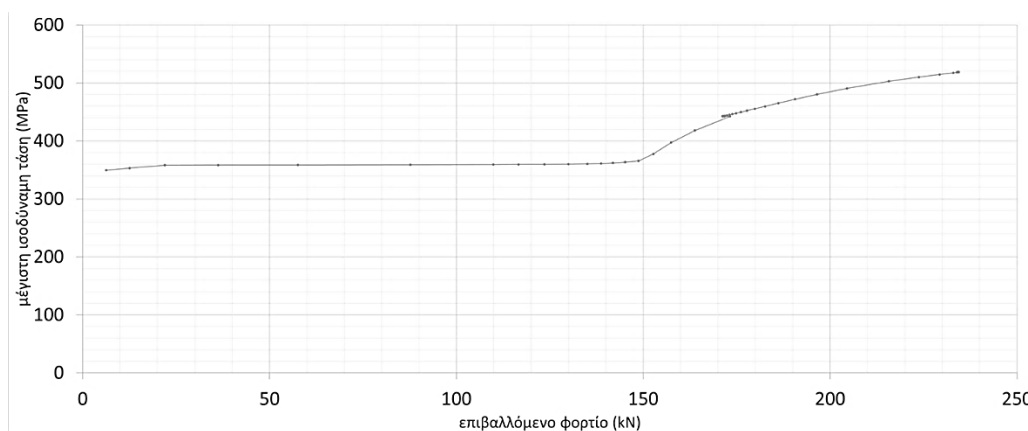
Επισημαίνεται ότι, στην περίπτωση που υπάρχει ενίσχυση περί τον κοχλία, μεταβάλλονται οι τροχιές των τάσεων. Η ανακατανομή γίνεται και μέσω της ενίσχυσης. Συγκεκριμένα, κατά τον εφελκυσμό του κελύφους, η ενίσχυση αποσυμπιέζεται προς το μέρος του κελύφους, ενώ από την άλλη πλευρά της ενίσχυσης, λόγω των αυξημένων θλιπτικών τάσεων, εμφανίζεται τοπικός λυγισμός. Σε κάθε περίπτωση, όμως, η ύπαρξη της ενίσχυσης συμβάλλει σε ικανοποιητική αύξηση της συνολικής αντοχής της σύνδεσης.

Στο σχήμα 5-15, παρουσιάζεται η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία. Η δύναμη που αναπτύσσεται έχει άμεση συσχέτιση με τη δύναμη προέντασης που εισάγεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης, τόσο είναι και η αρχική αξονική δύναμη του κοχλία. Κατά την επιβολή της φόρτισης, η μεταβολή της αξονικής δύναμης είναι γραμμική περί τα 100kN. Μετά τη γραμμική μεταβολή, η αξονική δύναμη του κοχλία φθάνει σε τιμή τέτοια, ώστε ο φορέας να ισορροπεί με το τελικό εξωτερικώς επιβαλλόμενο φορτίο.



Σχήμα 5-15: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 4mm

Στο σχήμα 5-16, παρουσιάζεται η μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση. Η θέση της συγκόλλησης που μελετάται, βρίσκεται στη συναρμογή του κελύφους με τη διατομή. Είναι γνωστό, πως συνήθως η αστοχία της σύνδεσης συμβαίνει στην περιοχή της συγκόλλησης, συγκεκριμένα, στη συναρμογή του κελύφους λόγω κόπωσης. Έτσι, κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση της μέγιστης ισοδύναμης τάσης, η οποία αρχικά παρατηρείται να είναι αυξημένη κοντά στη διαρροή, ωστόσο αρχίζει να διαρρέει για αυξημένο πλέον επιβαλλόμενο φορτίο. Οι αυξημένες τάσεις οφείλονται στη χαμηλή δυσκαμψία της διατομής.



Σχήμα 5-16: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 4mm



# 6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

## 6.1 ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης βραχέος L κοίλης ορθογωνικής διατομής, εξετάζονται οι εξής παραμετρικές αναλύσεις:

- επιρροή πάχους διατομής χωρίς ενίσχυση και με ενίσχυση περί τον κοχλία
- επιρροή της ενίσχυσης και του πάχους της
- επιρροή ύψους, πλάτους, ποιότητας χάλυβα βάσης και κοχλία για διατομή χωρίς και με ενίσχυση
- επιρροή διαμέτρου, δύναμης προέντασης και απόστασης του κοχλία
- επιρροή οριζόντιας ενίσχυσης στο μέσον της διατομής

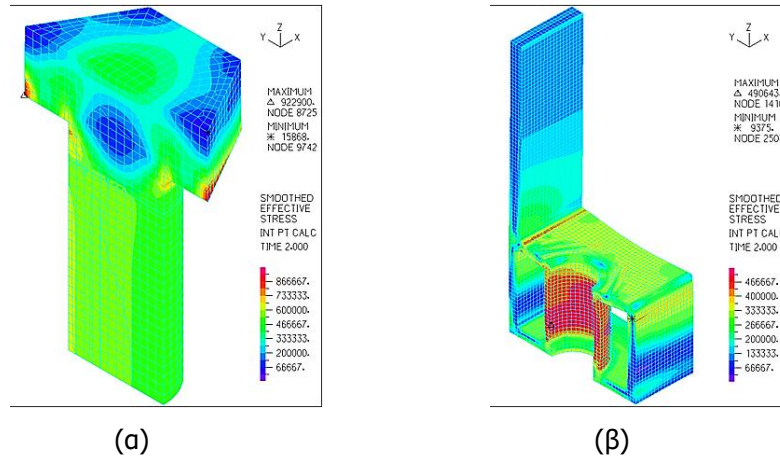
Επισημαίνεται ότι, για να υπάρχει πιο πλήρης εποπτεία των αποτελεσμάτων και των συμπερασμάτων, οι αναλύσεις με ενίσχυση διαφορετικού πάχους έχουν γίνει και για διαφορετικό πάχος διατομής. Παράλληλα, παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα για τα προσομοιώματα αυτά ξεχωριστά, τα οποία συγκρίνονται με βάση τις παραπάνω παραμετρικές κατηγορίες όπου ανήκουν.

## 6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

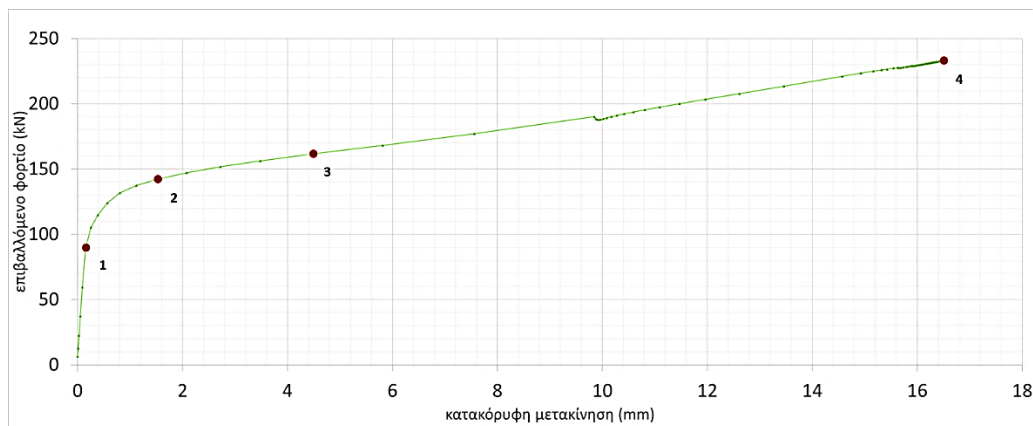
Η σειρά με την οποία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (σχήματα 6-1 έως 6-108) είναι, αρχικά, για τη διατομή RHS 80x120x8 χωρίς και με ενίσχυση για αυξανόμενο πάχος ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm. Ίδια σειρά παρουσίασης ακολουθούν και οι διατομές με πάχος διατομής 12mm, 16mm και 18mm. Ωστόσο, τα αποτελέσματα για τις διατομές RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση και με ενίσχυση 4mm έχουν περιγραφεί αναλυτικά στις παραγράφους 5.6 και 5.7 αντίστοιχα, οπότε και παραλείπονται. Ακόμα, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά, αφού προκύπτει όμοια συμπεριφορά για τις διατομές χωρίς ενίσχυση με εκείνη της παραγράφου 5.6 και για τις διατομές με ενίσχυση με εκείνη της παραγράφου 5.7. Αναλυτική σύγκριση των διατομών παρουσιάζεται στις επόμενες παραγράφους.



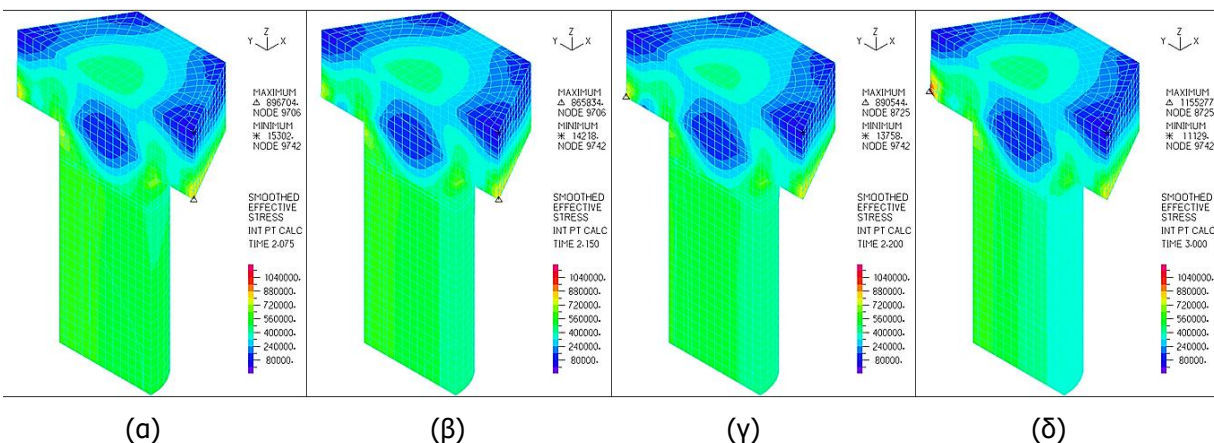
Διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 6mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 565\text{kN}$



Σχήμα 6-1: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 565\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 6mm σε τομή

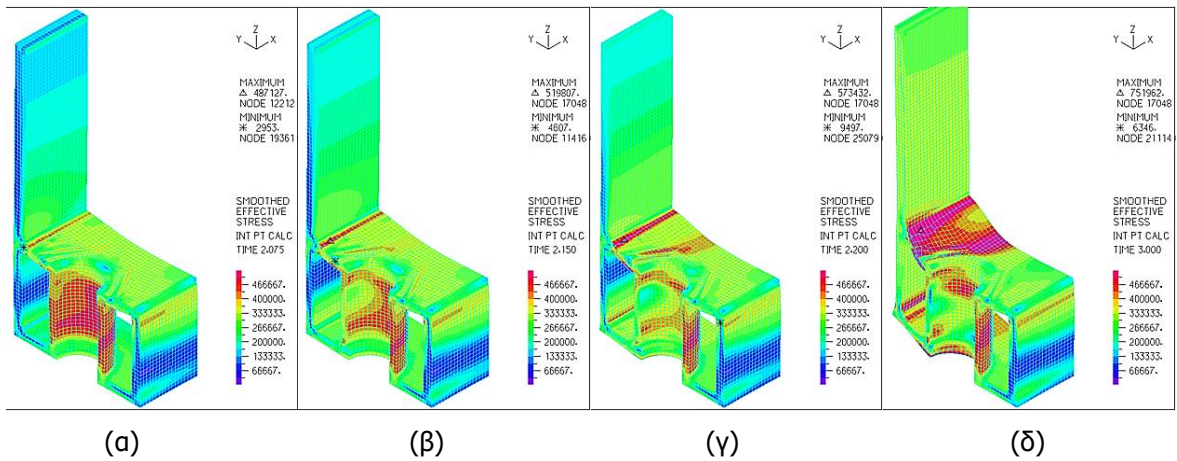


Σχήμα 6-2: Δρόμος ισοροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x8 με ενίσχυση 6mm

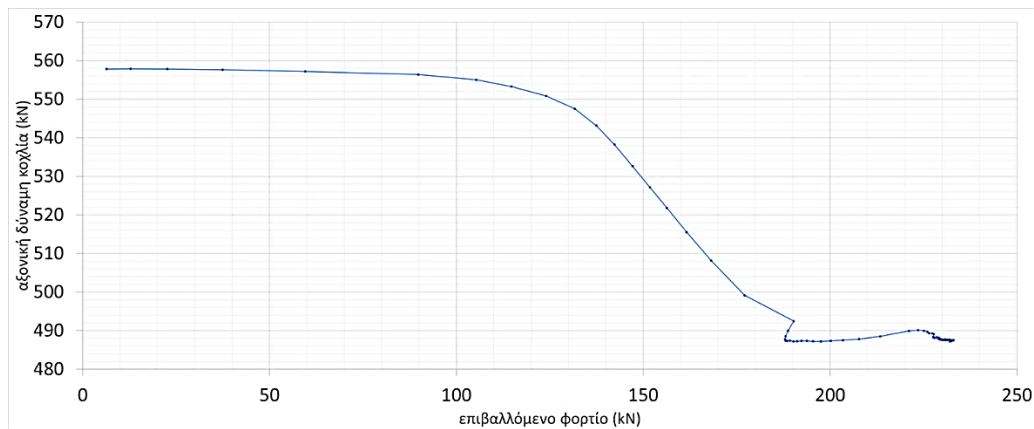


Σχήμα 6-3: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 6mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

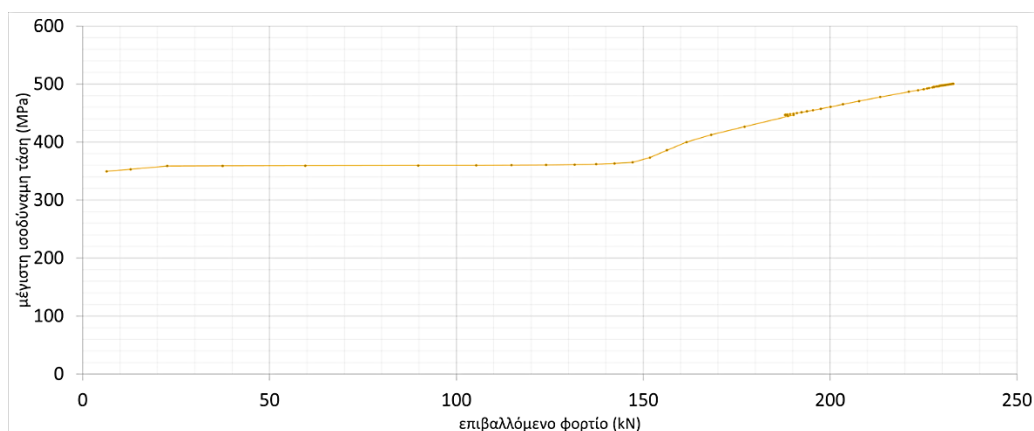




Σχήμα 6-4: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 6mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

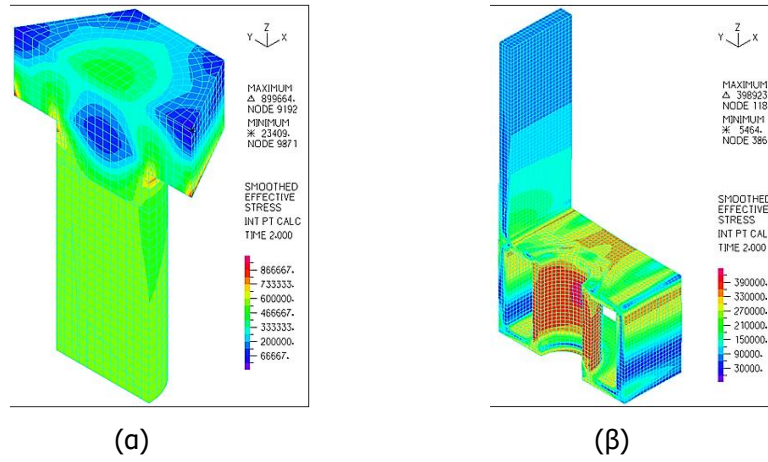


Σχήμα 6-5: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 6mm

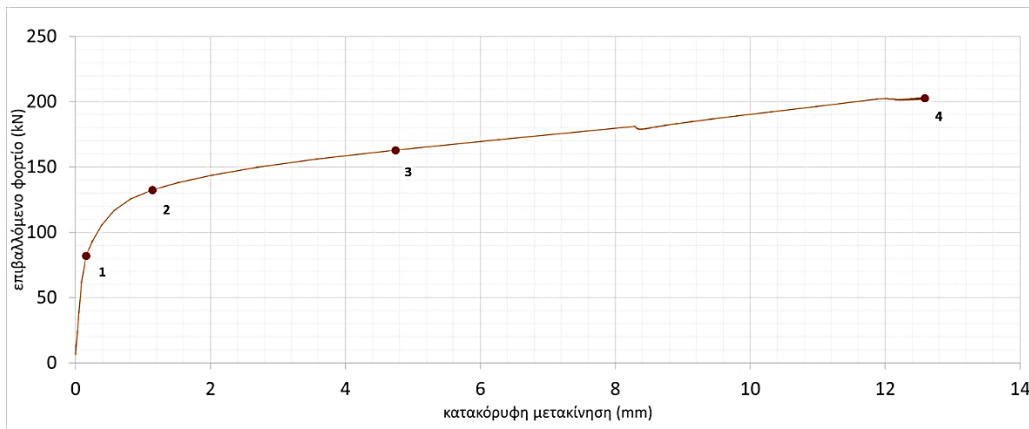


Σχήμα 6-6: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 6mm

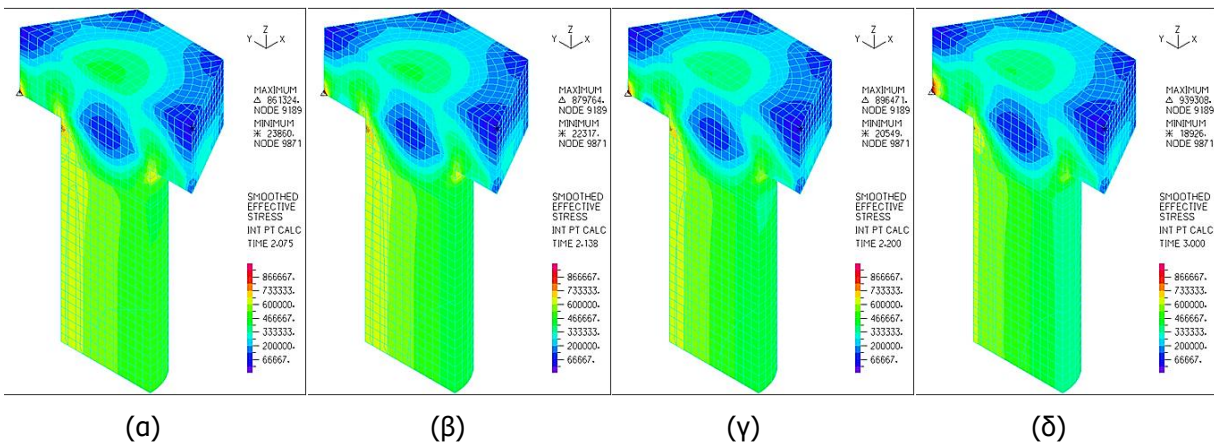
Διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 8mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



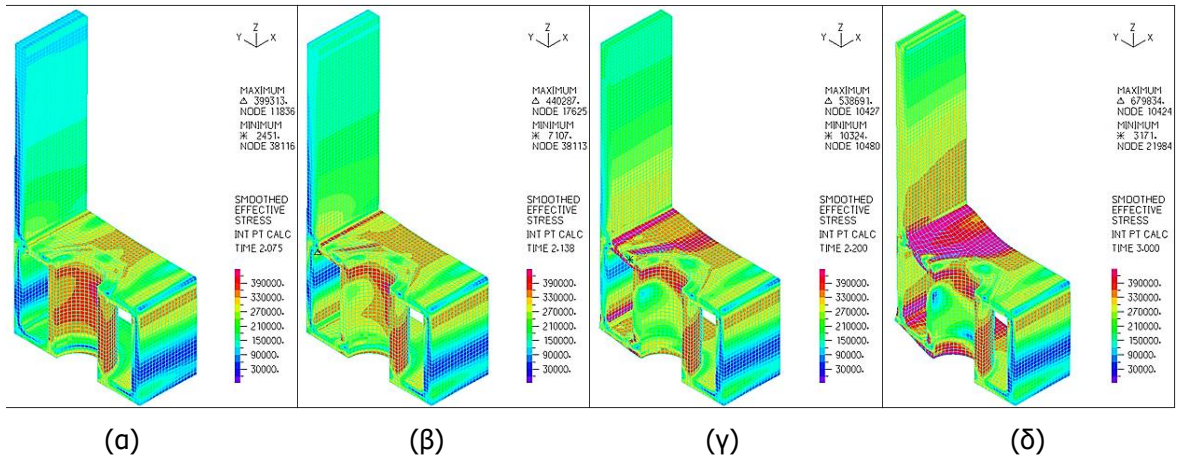
Σχήμα 6-7 Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 8mm σε τομή



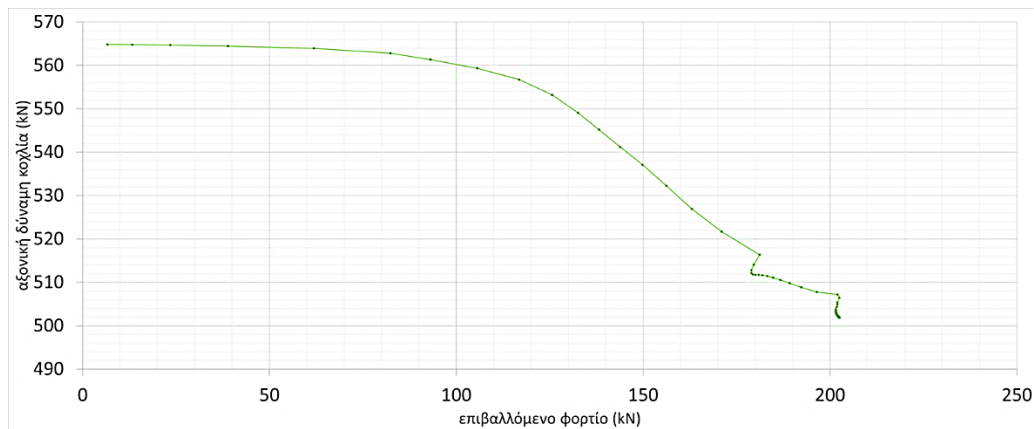
Σχήμα 6-8: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x8 με ενίσχυση 8mm



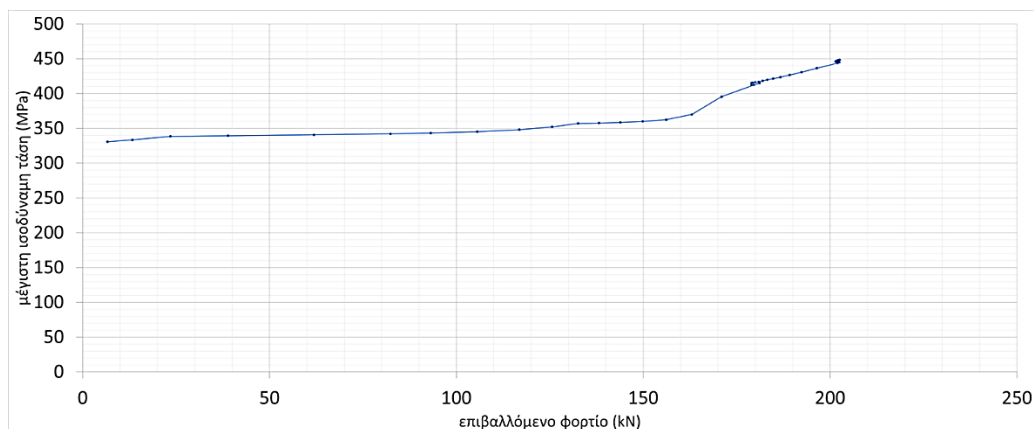
Σχήμα 6-9: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 8mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-10: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 8mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

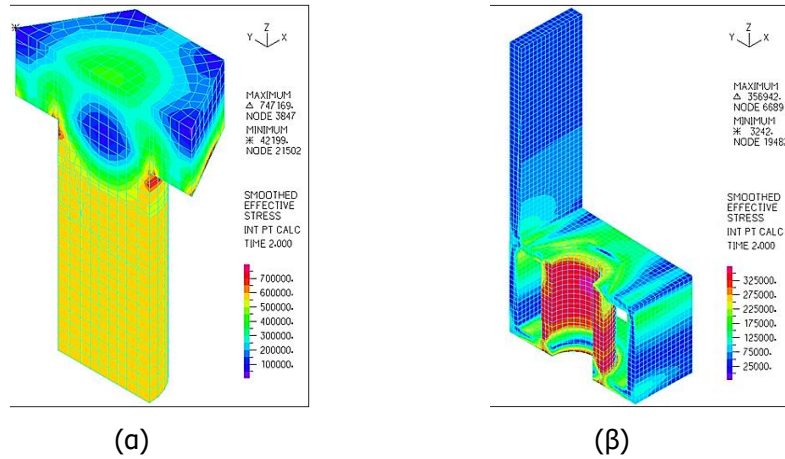


Σχήμα 6-11: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 8mm

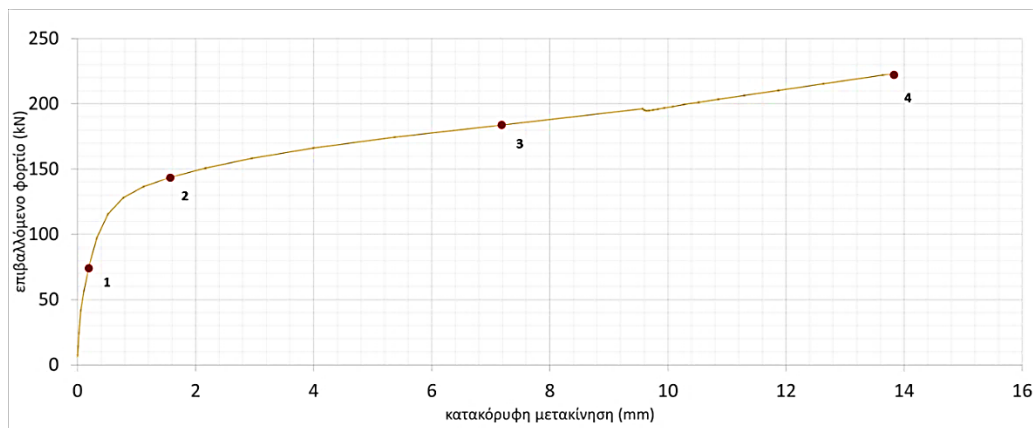


Σχήμα 6-12: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 8mm

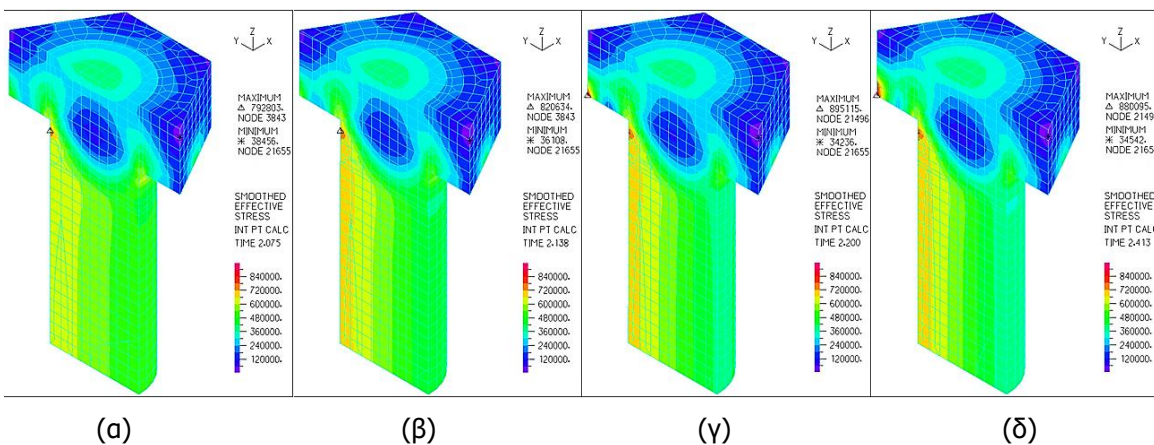
Διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 10mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



Σχήμα 6-13: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 10mm σε τομή

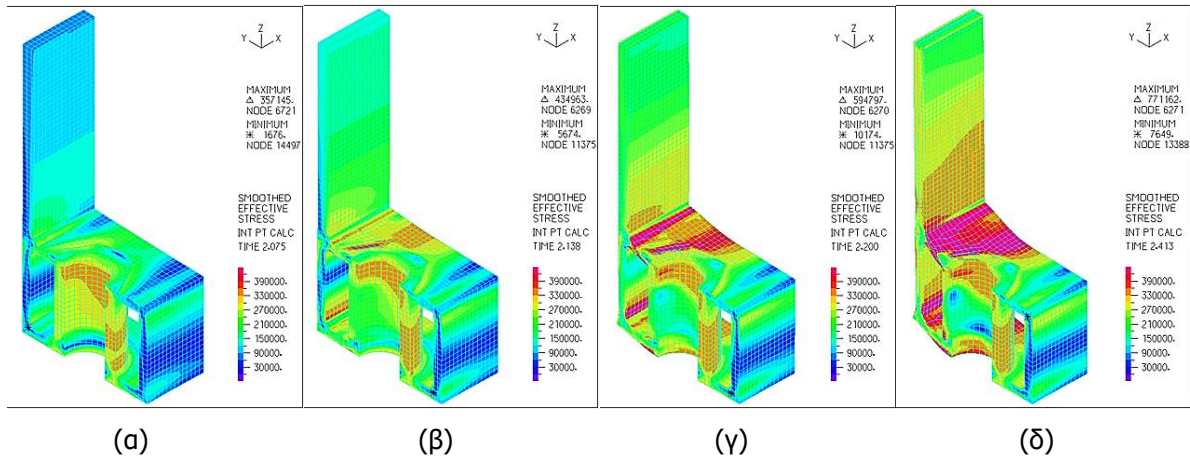


Σχήμα 6-14: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x8 με ενίσχυση 10mm

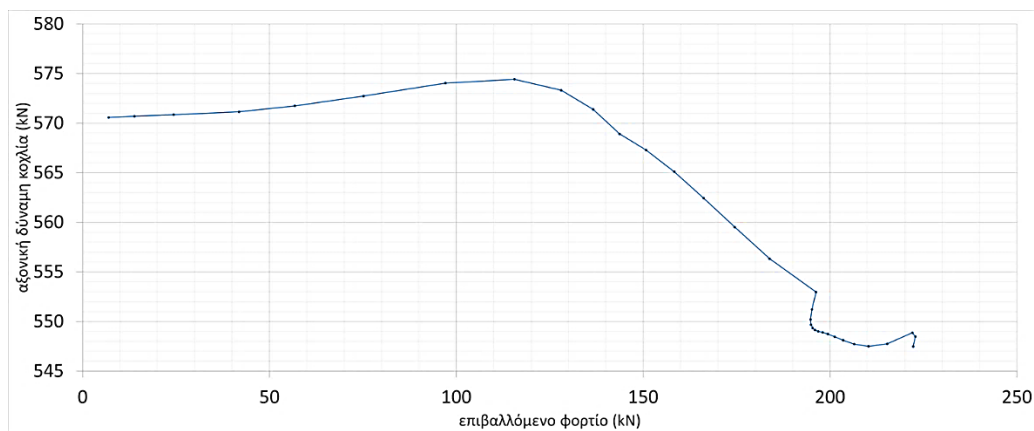


Σχήμα 6-15: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 10mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

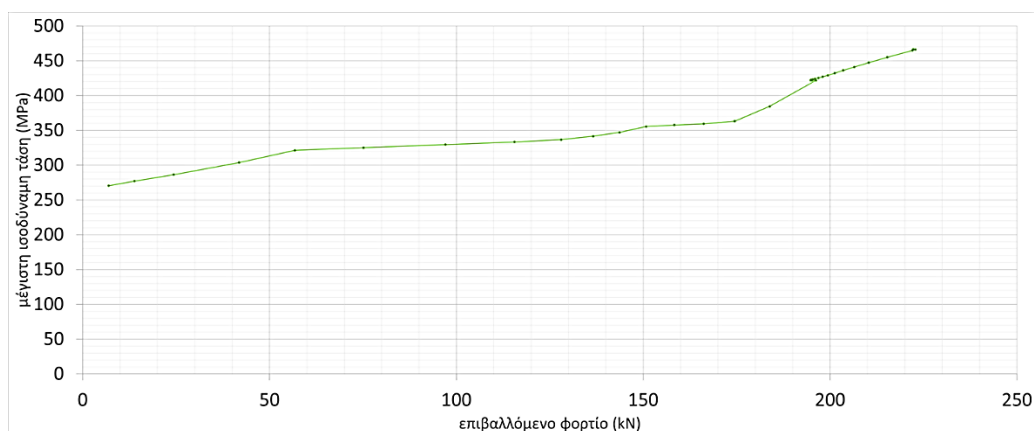




Σχήμα 6-16: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 10mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

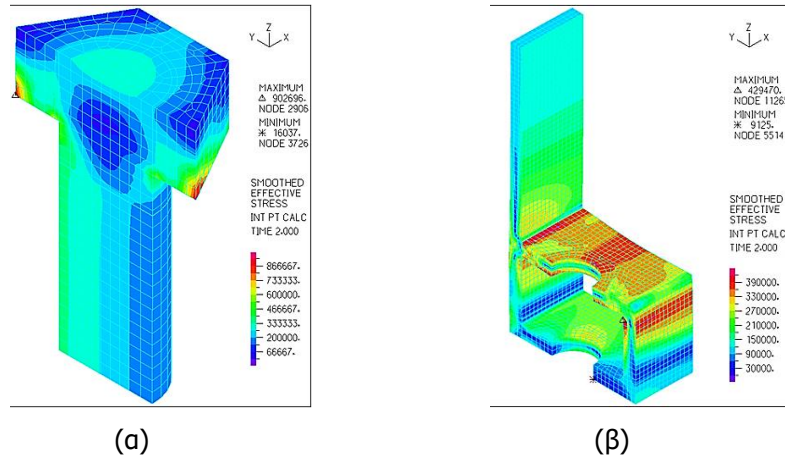


Σχήμα 6-17: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 10mm

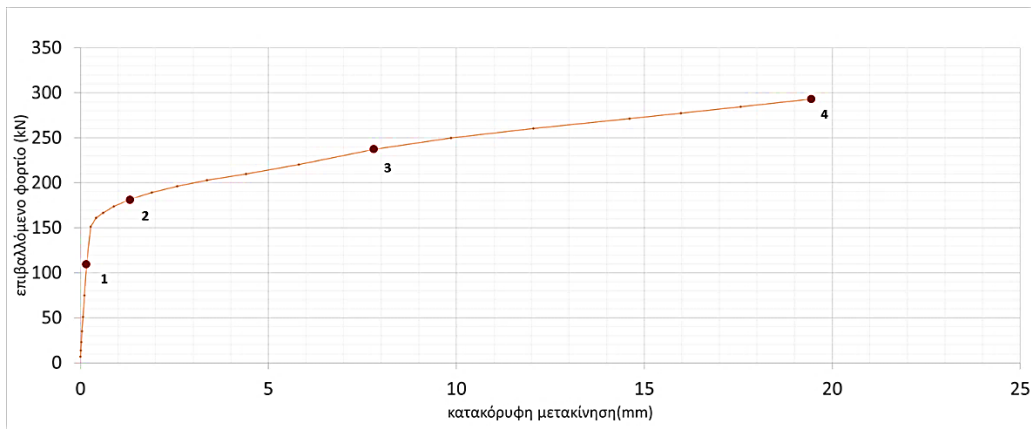


Σχήμα 6-18: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x8 με ενίσχυση 10mm

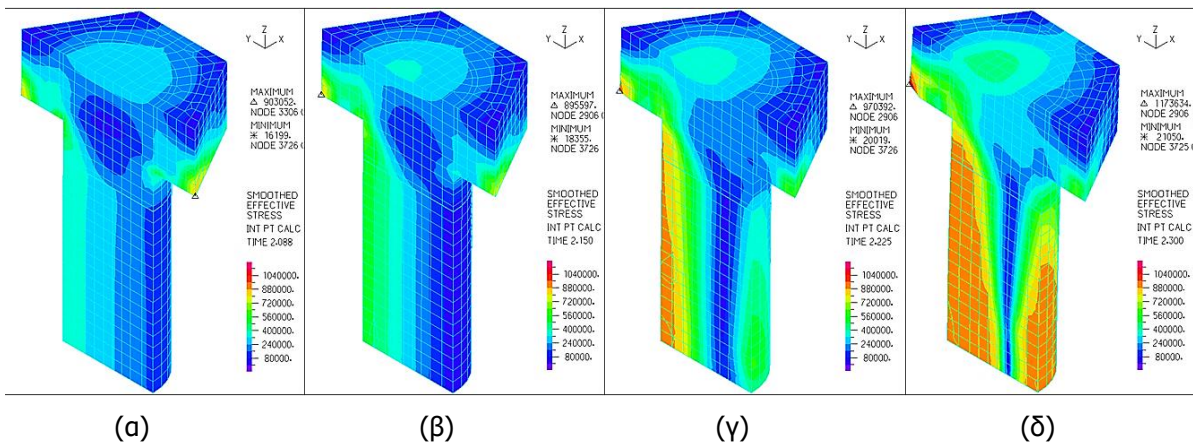
Διατομή RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 280\text{kN}$



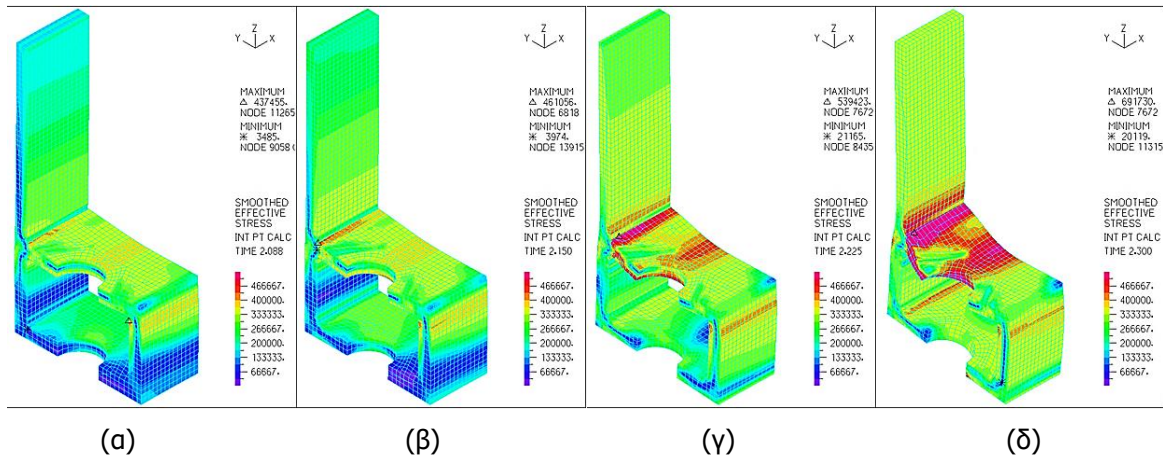
Σχήμα 6-19: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 280\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση σε τομή



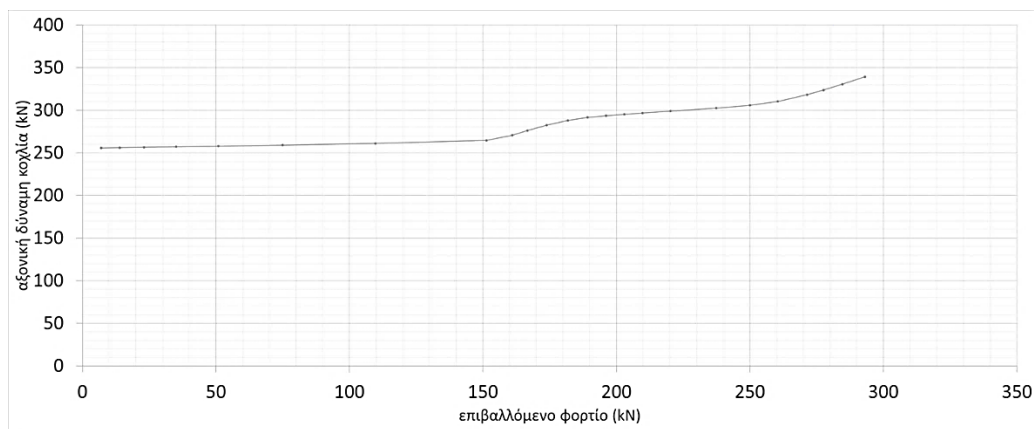
Σχήμα 6-20: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση



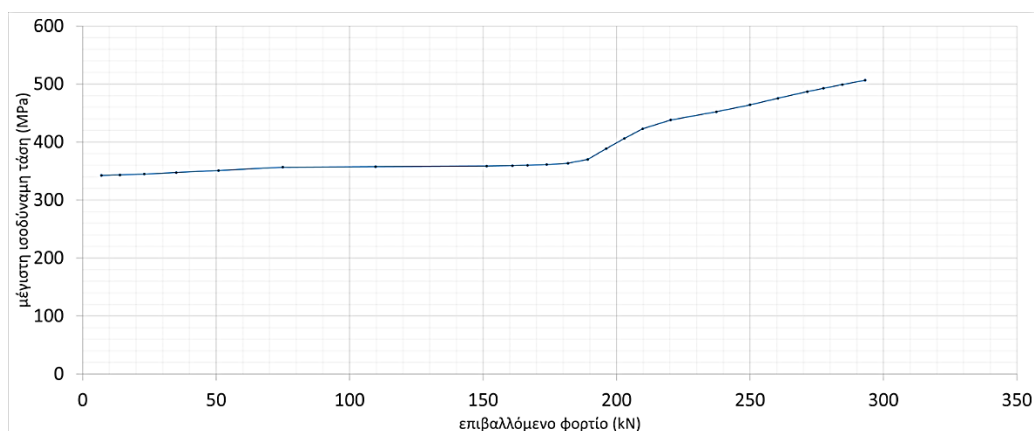
Σχήμα 6-21: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-22: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



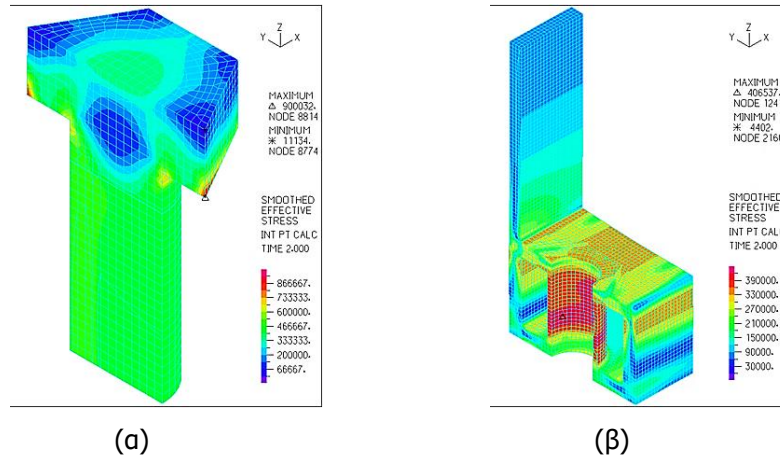
Σχήμα 6-23: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση



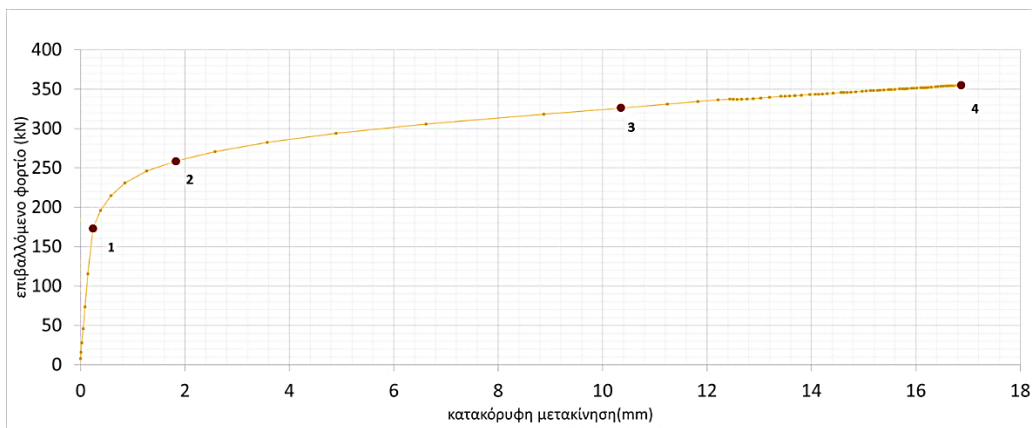
Σχήμα 6-24: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση



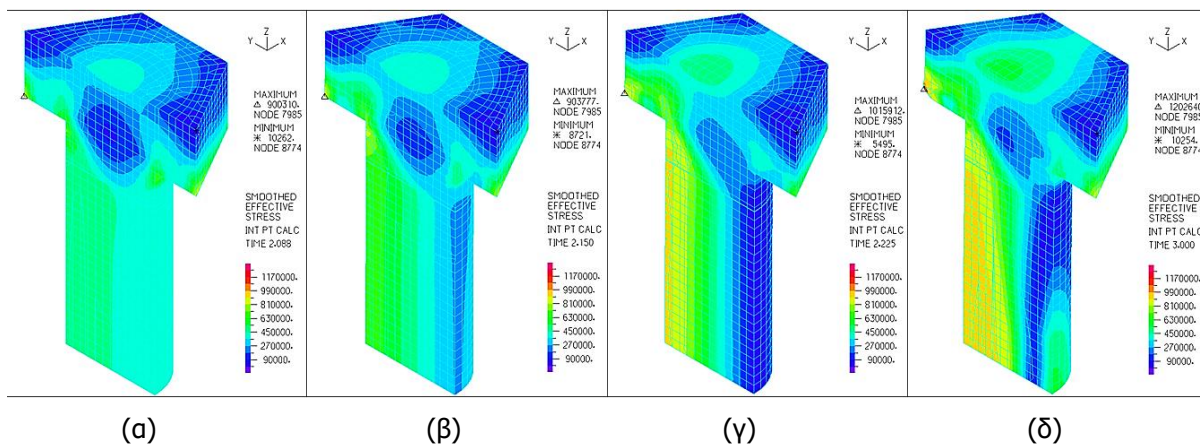
Διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 4mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 470\text{kN}$



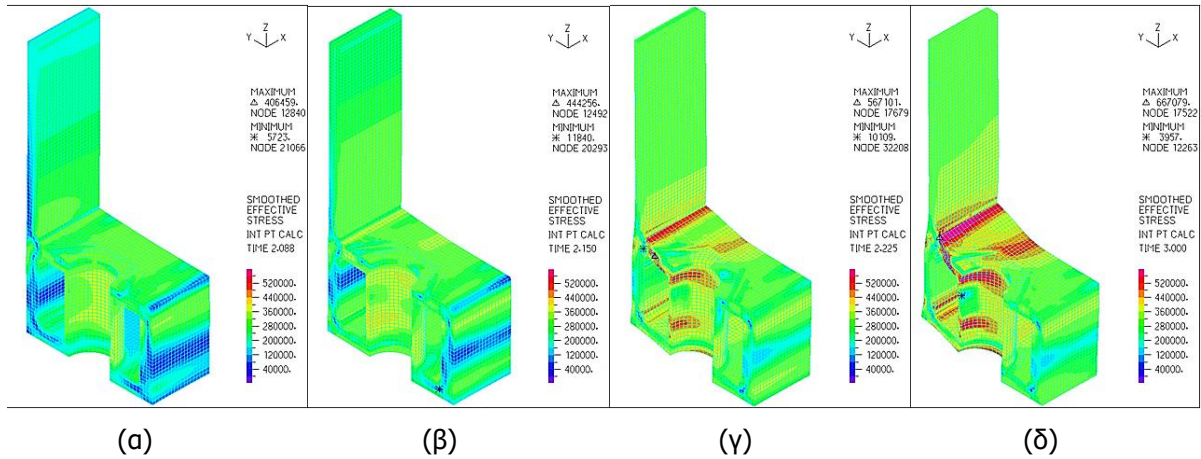
Σχήμα 6-25: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 470\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 4mm σε τομή



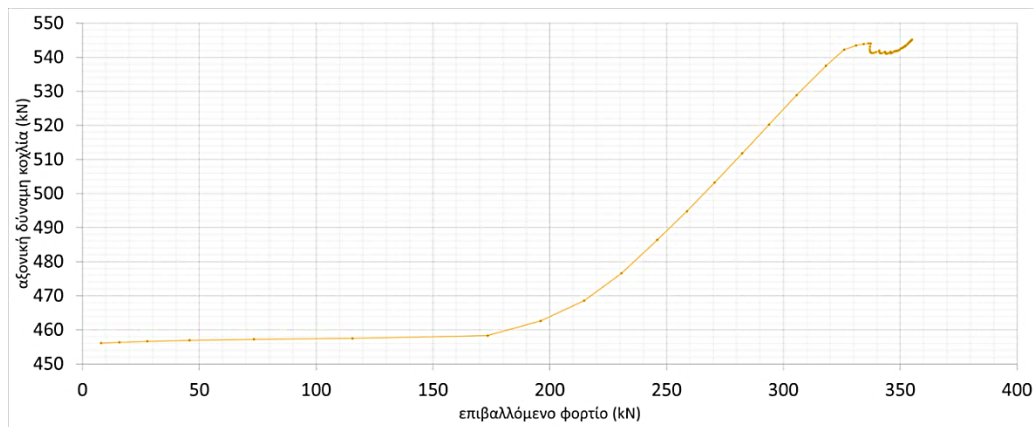
Σχήμα 6-26: Δρόμος ισοροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x12 με ενίσχυση 4mm



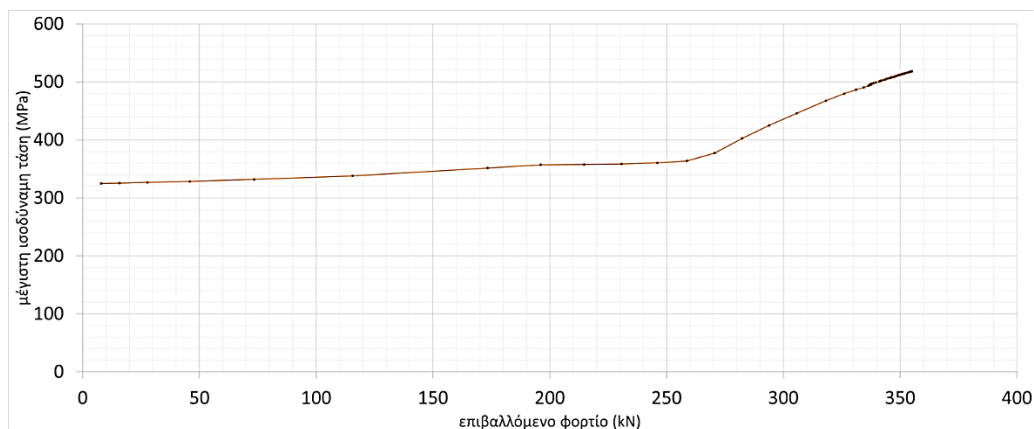
Σχήμα 6-27: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-28: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

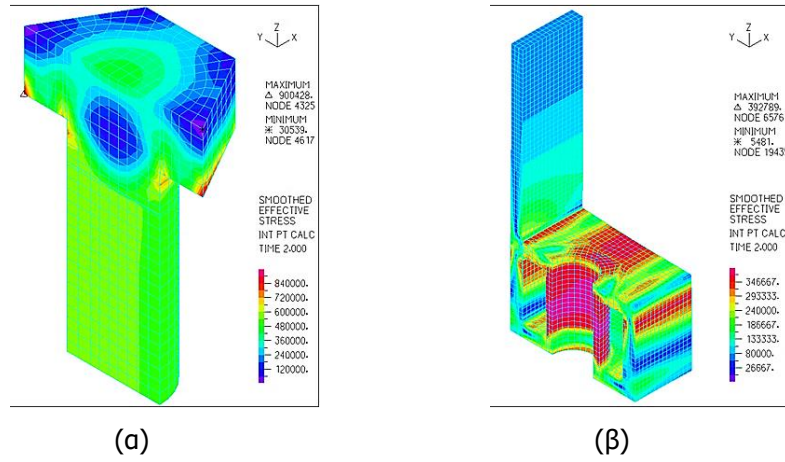


Σχήμα 6-29: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 4mm

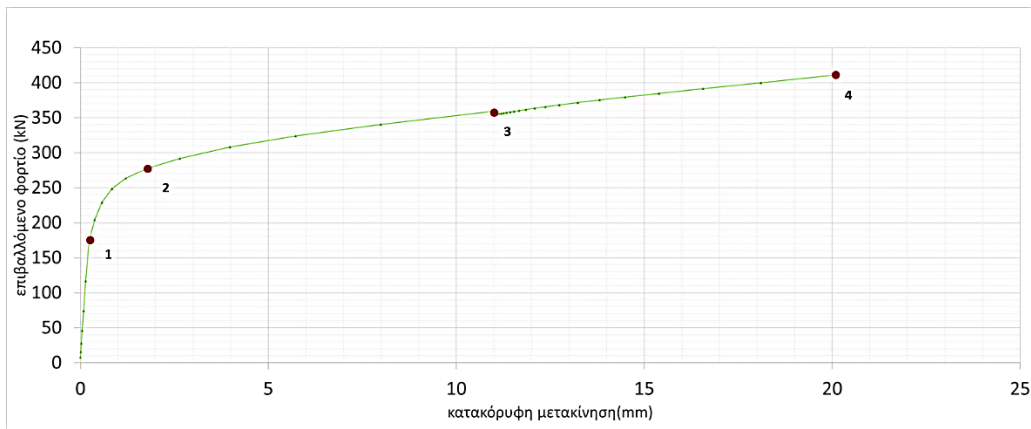


Σχήμα 6-30: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 4mm

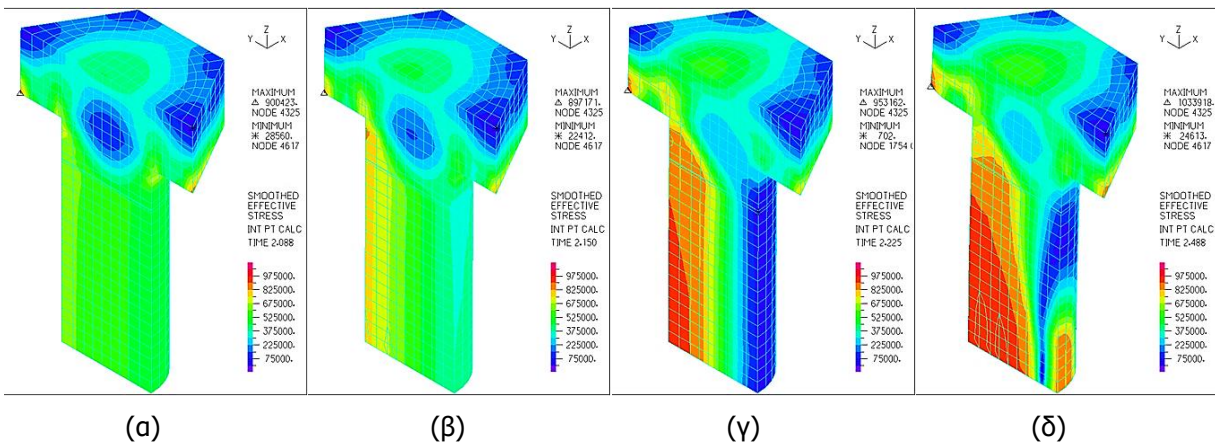
Διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 6mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



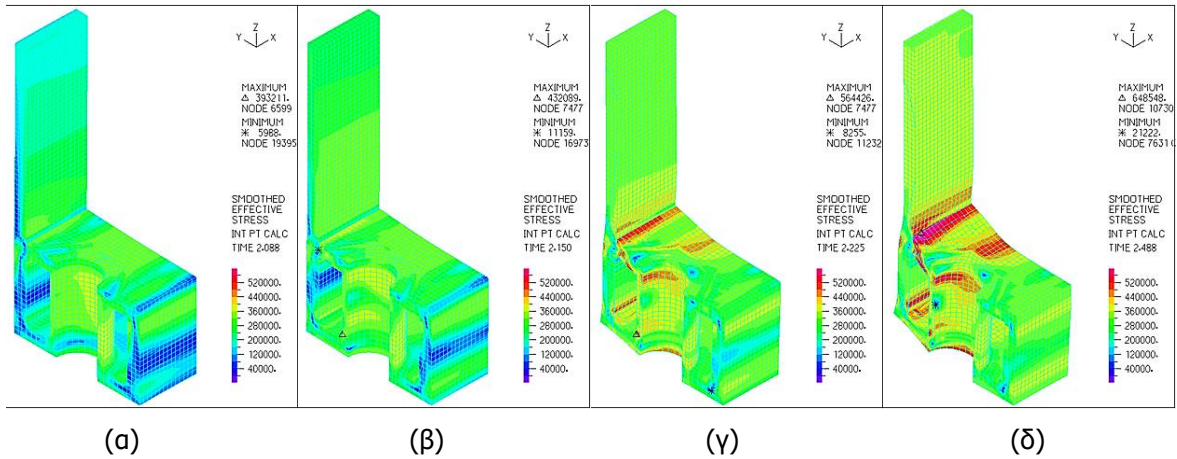
Σχήμα 6-31: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 6mm σε τομή



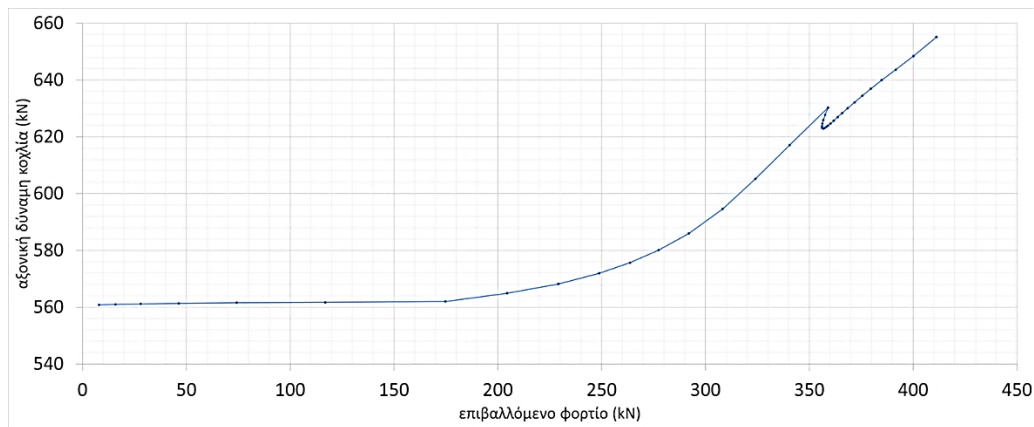
Σχήμα 6-32: Δρόμος ισοροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x12 με ενίσχυση 6mm



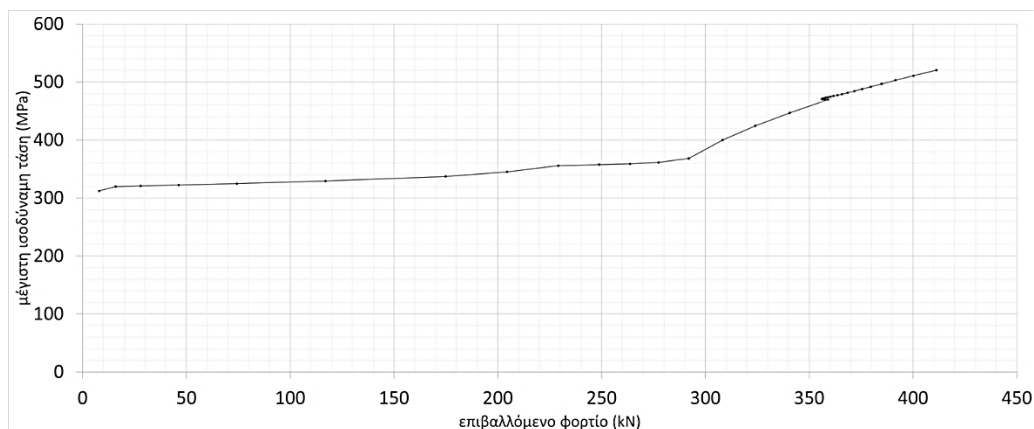
Σχήμα 6-33: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 6mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-34: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 6mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



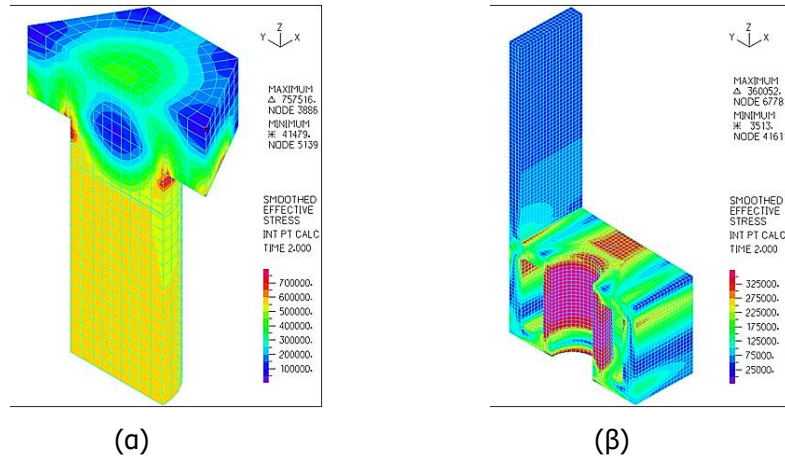
Σχήμα 6-35: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 6mm



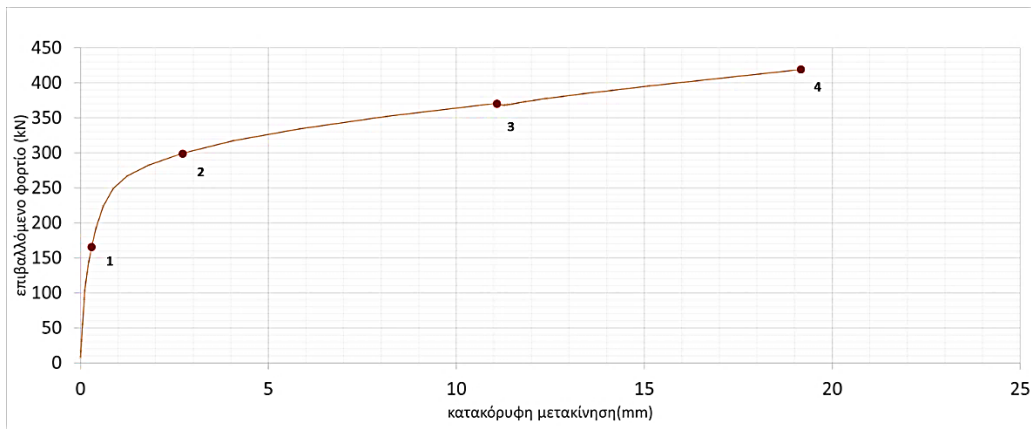
Σχήμα 6-36: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 6mm



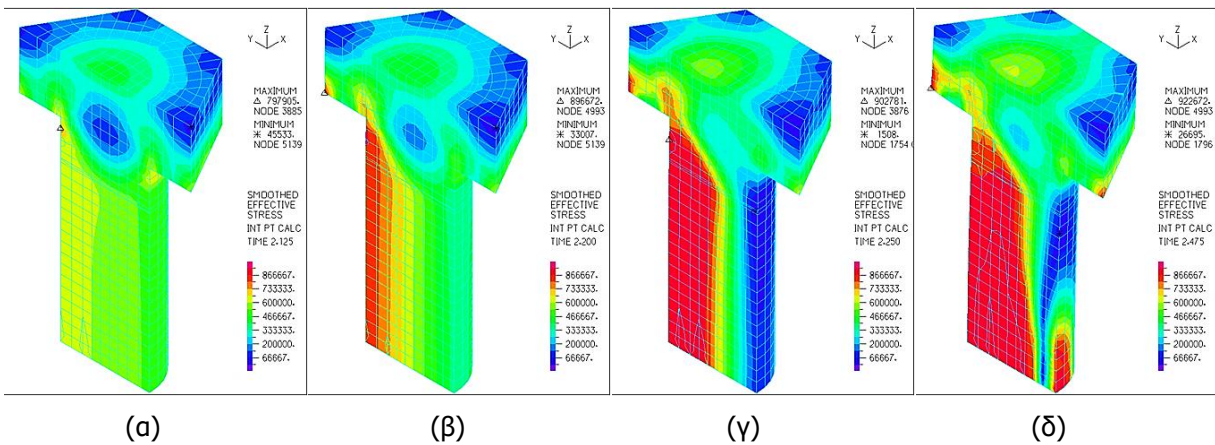
Διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 8mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



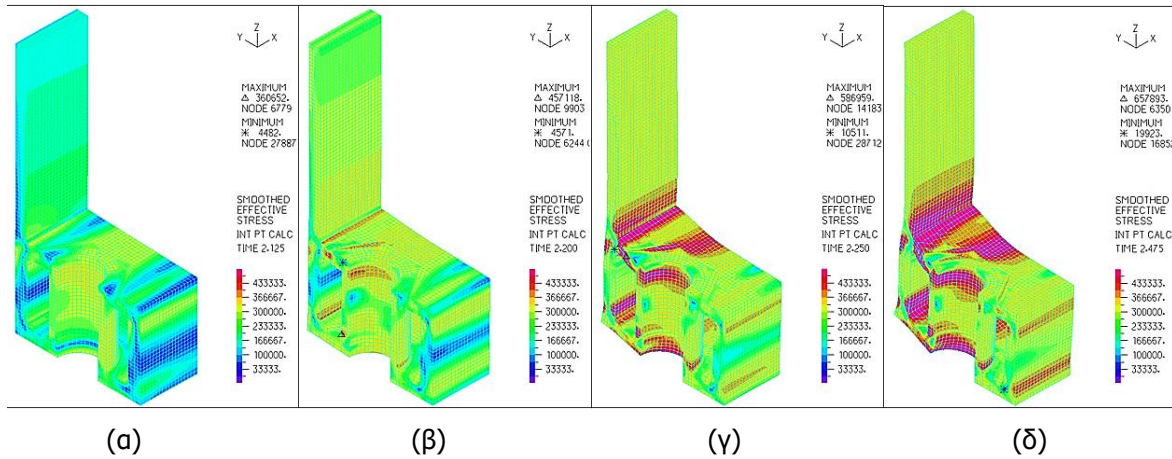
Σχήμα 6-37: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 8mm σε τομή



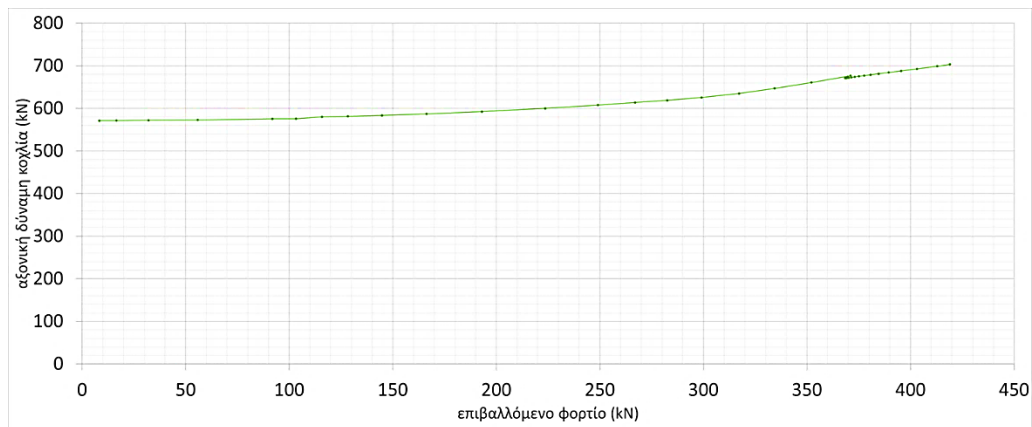
Σχήμα 6-38: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x12 με ενίσχυση 8mm



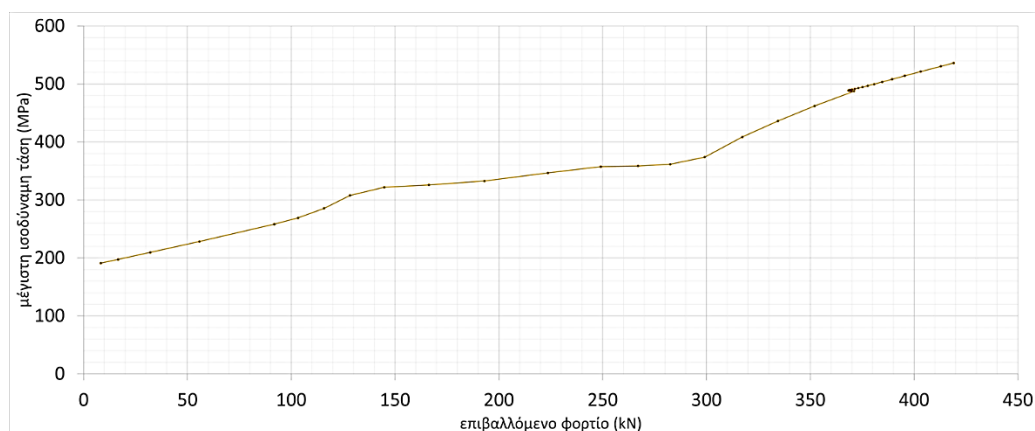
Σχήμα 6-39: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 8mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-40: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 8mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

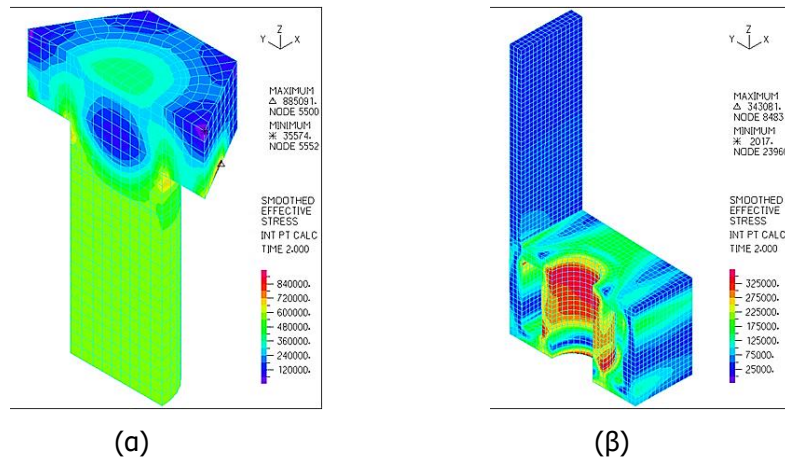


Σχήμα 6-41: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 8mm

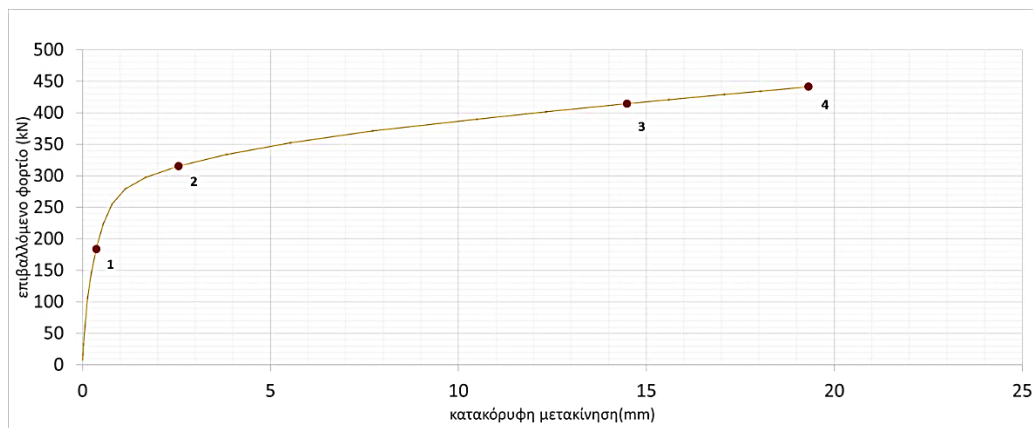


Σχήμα 6-42: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 8mm

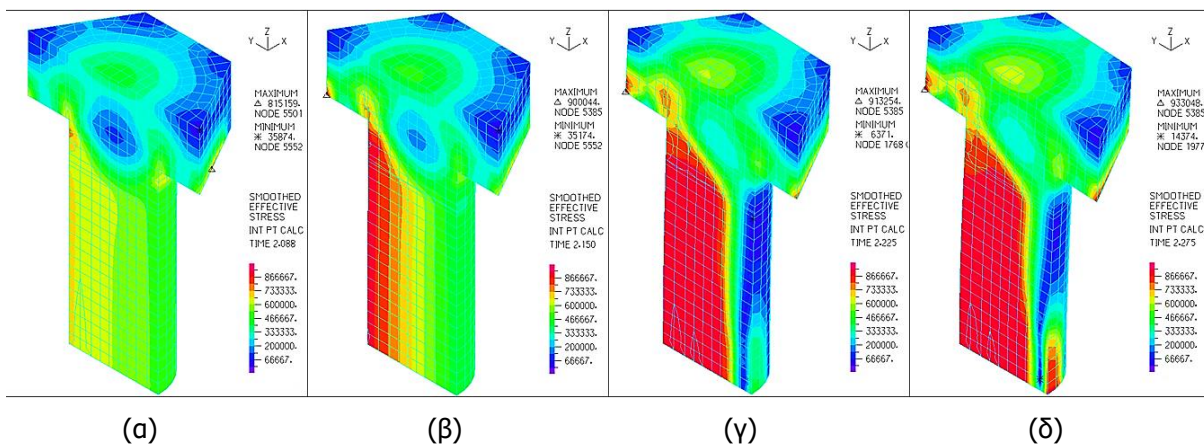
Διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 10mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9kN$



Σχήμα 6-43: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9kN$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 10mm σε τομή

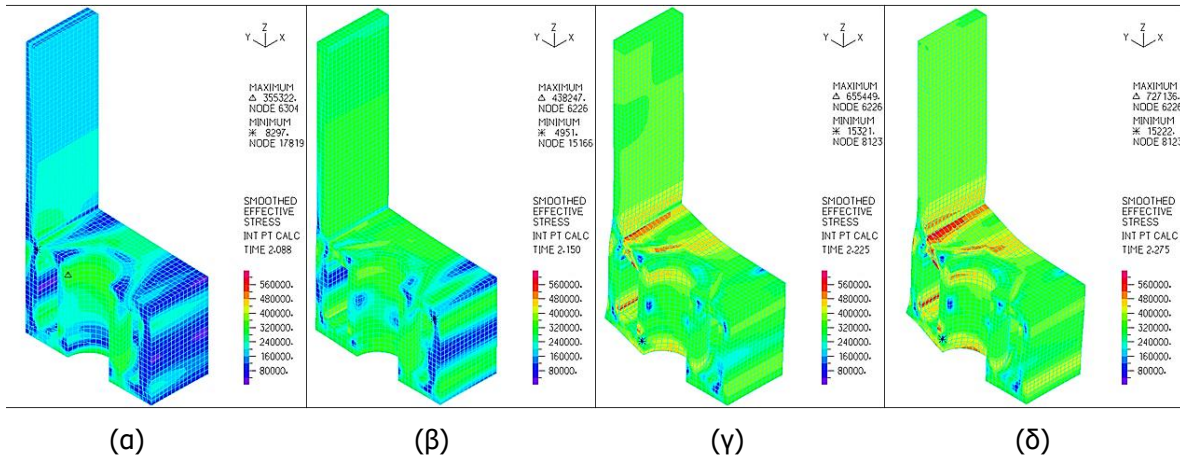


Σχήμα 6-44: δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x12 με ενίσχυση 10mm

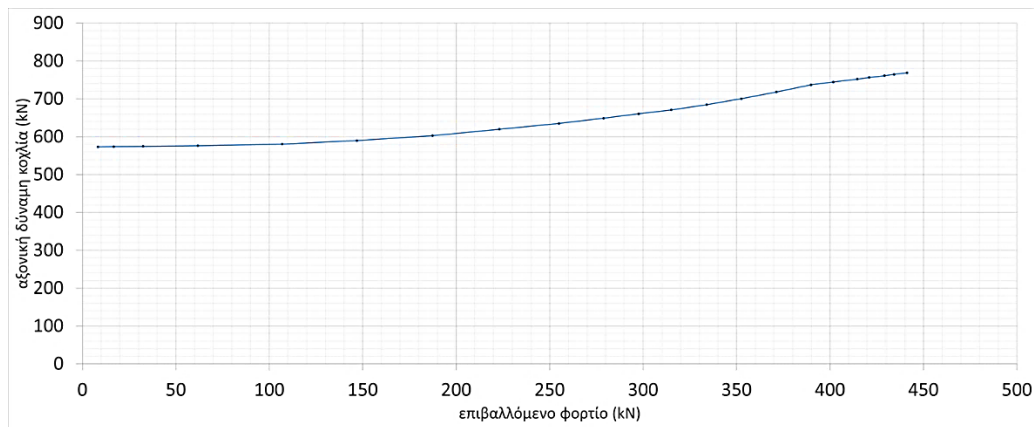


Σχήμα 6-45: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 10mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

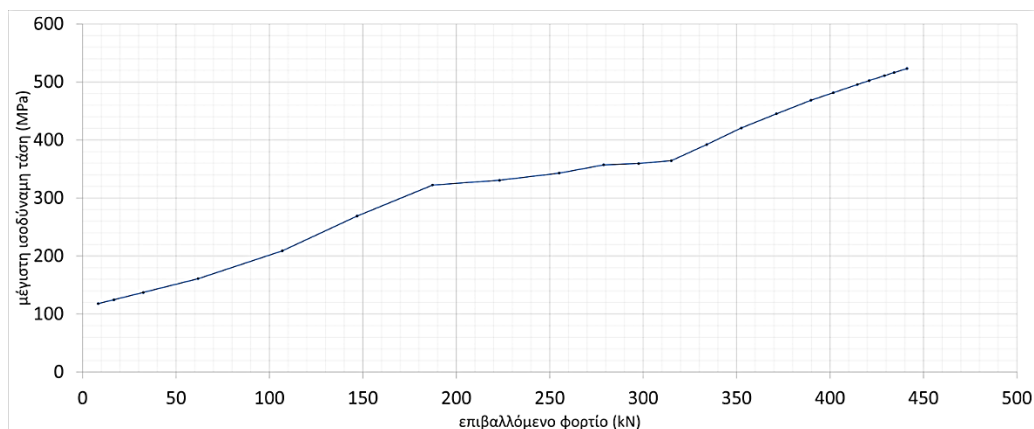




Σχήμα 6-46: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 10mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

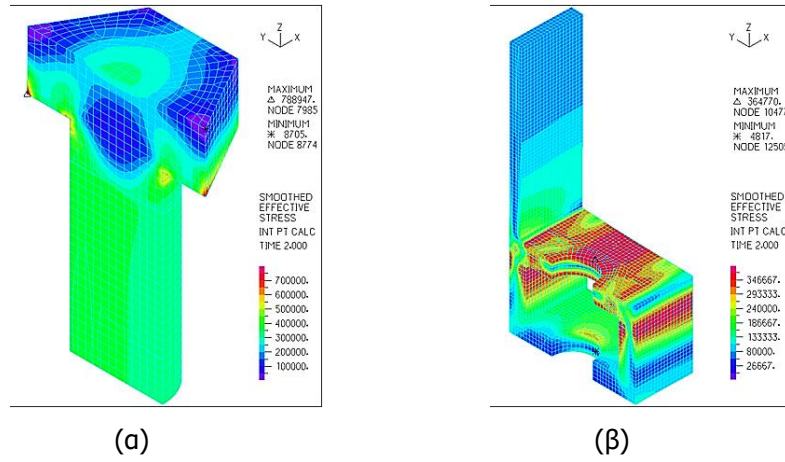


Σχήμα 6-47: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 10mm

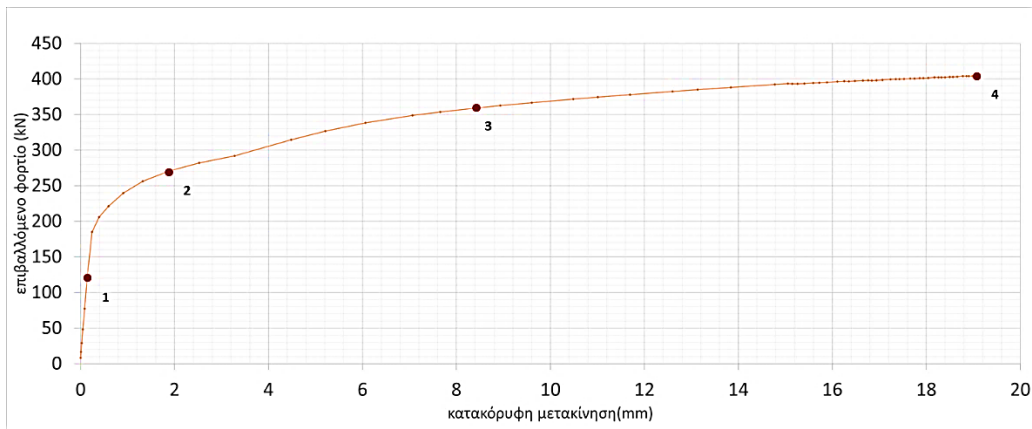


Σχήμα 6-48: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x12 με ενίσχυση 10mm

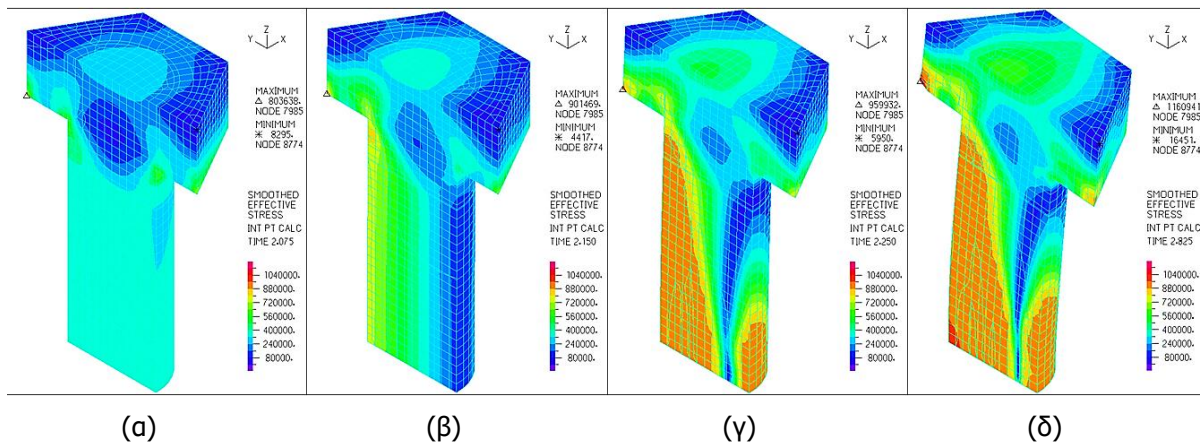
Διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 375\text{kN}$



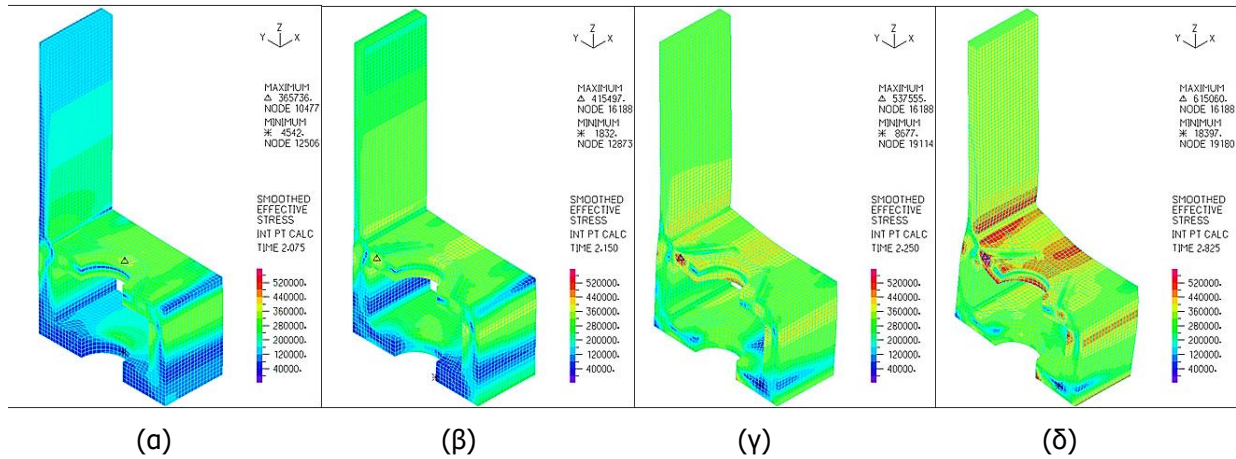
Σχήμα 6-49: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 375\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση σε τομή



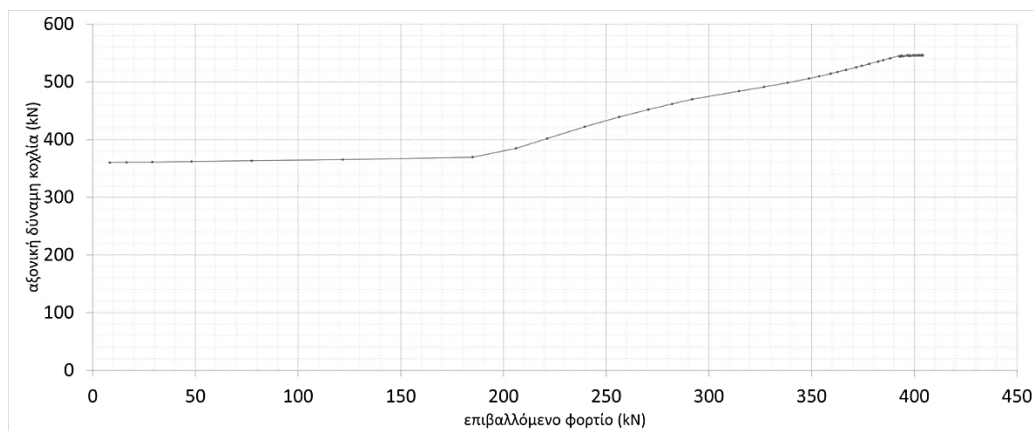
Σχήμα 6-50: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση



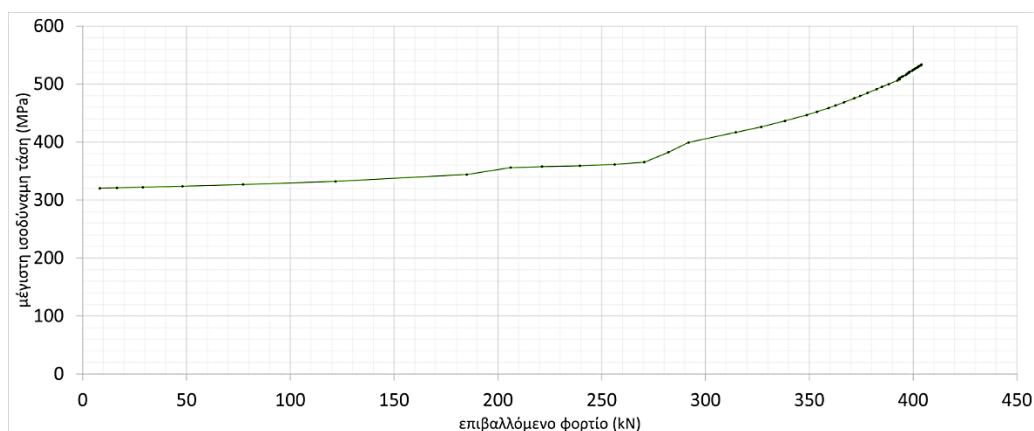
Σχήμα 6-51: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-52: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

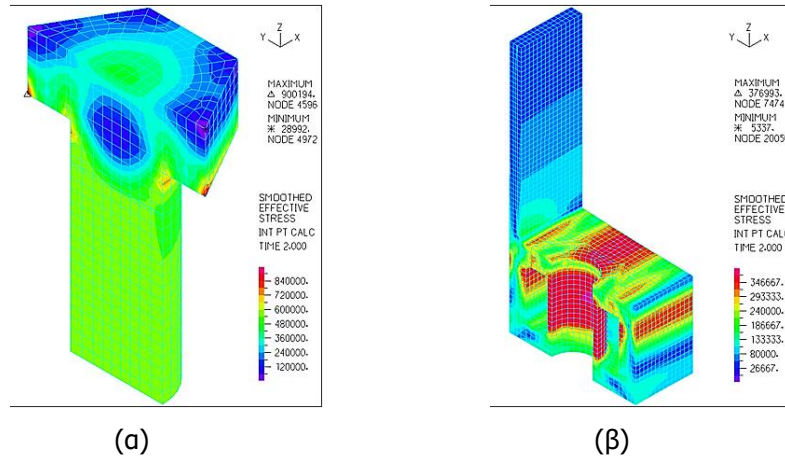


Σχήμα 6-53: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση

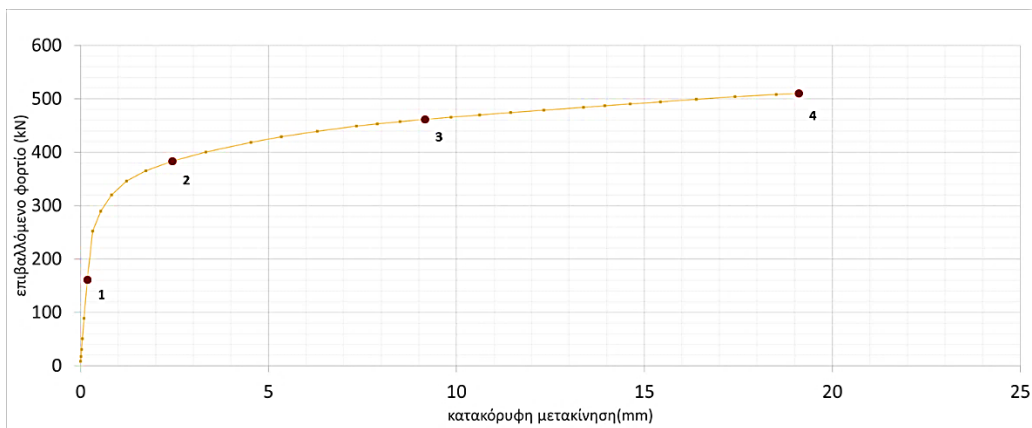


Σχήμα 6-54: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση

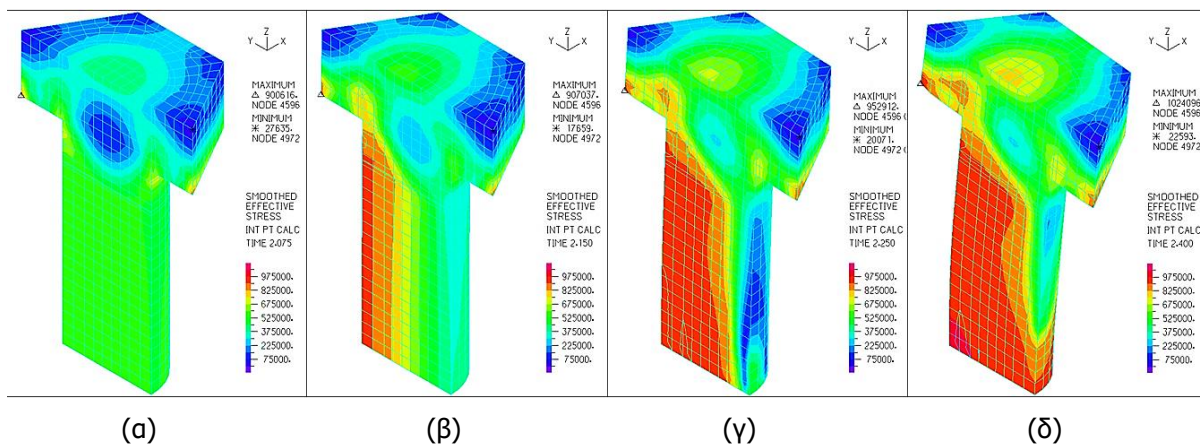
Διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



Σχήμα 6-55: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm σε τομή

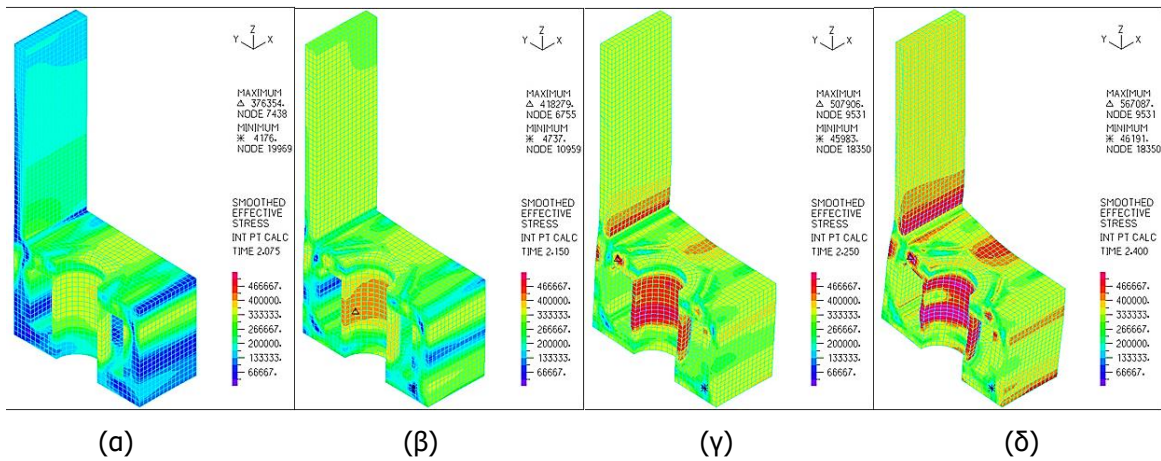


Σχήμα 6-56: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm

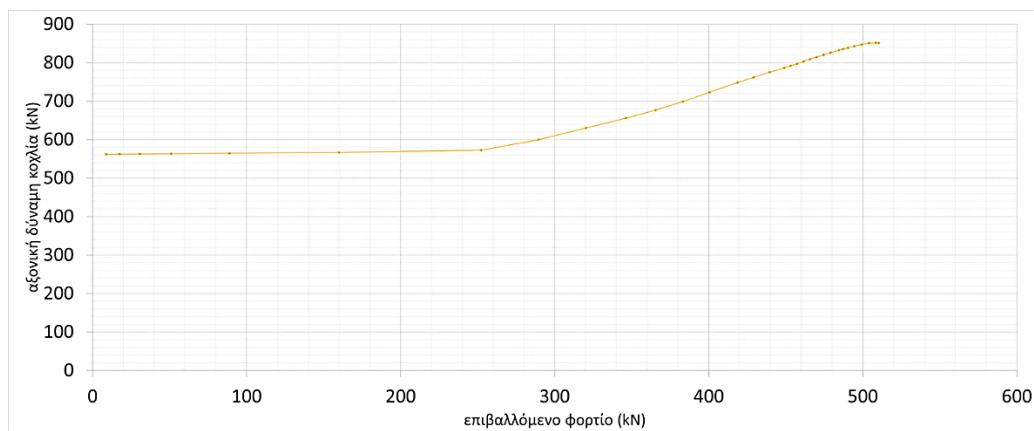


Σχήμα 6-57: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

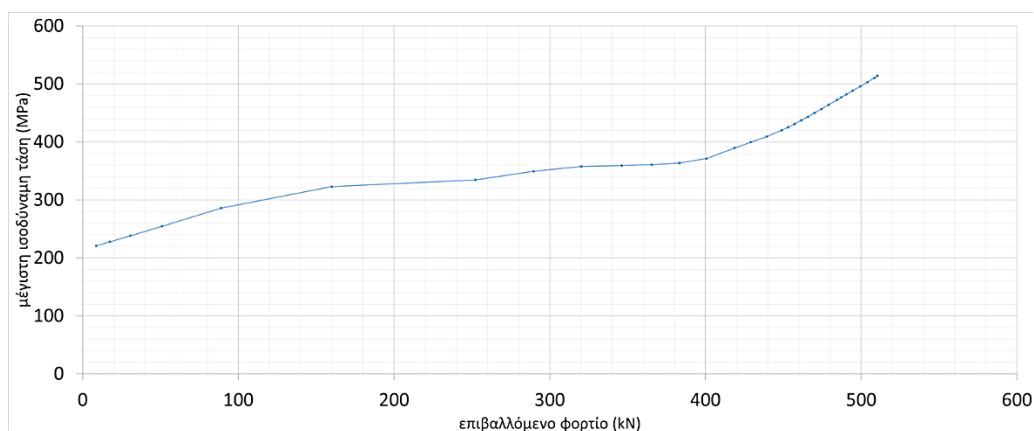




Σχήμα 6-58: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

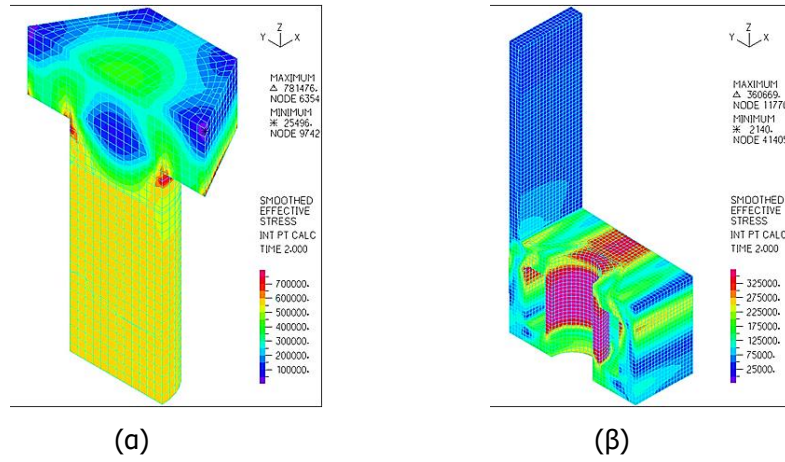


Σχήμα 6-59: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm

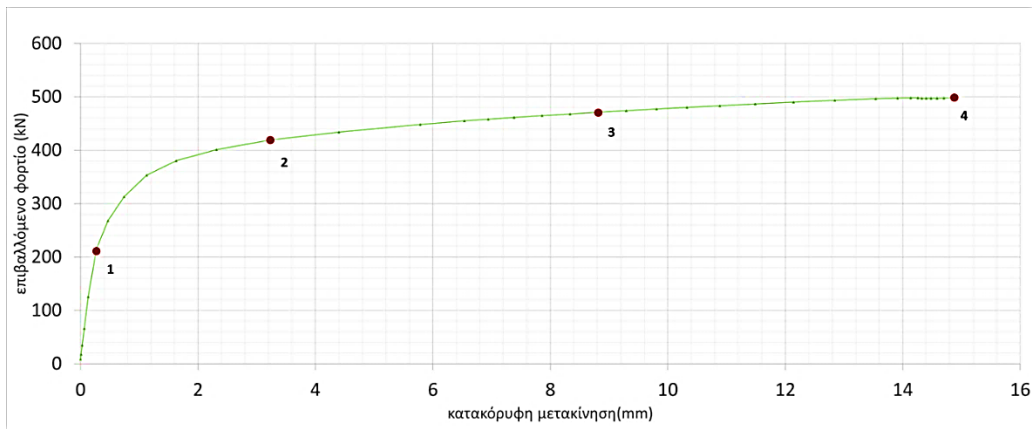


Σχήμα 6-60: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm

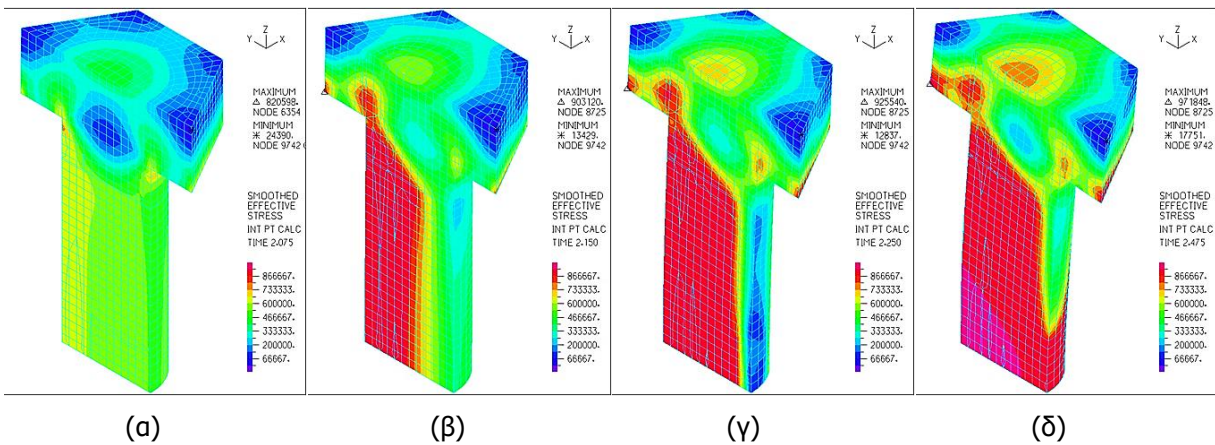
Διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



Σχήμα 6-61: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm σε τομή

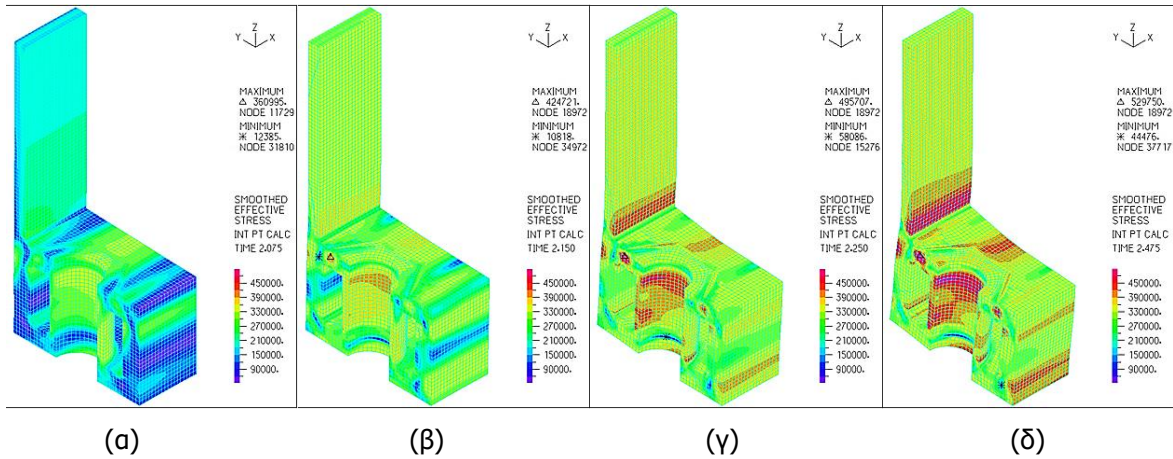


Σχήμα 6-62: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm

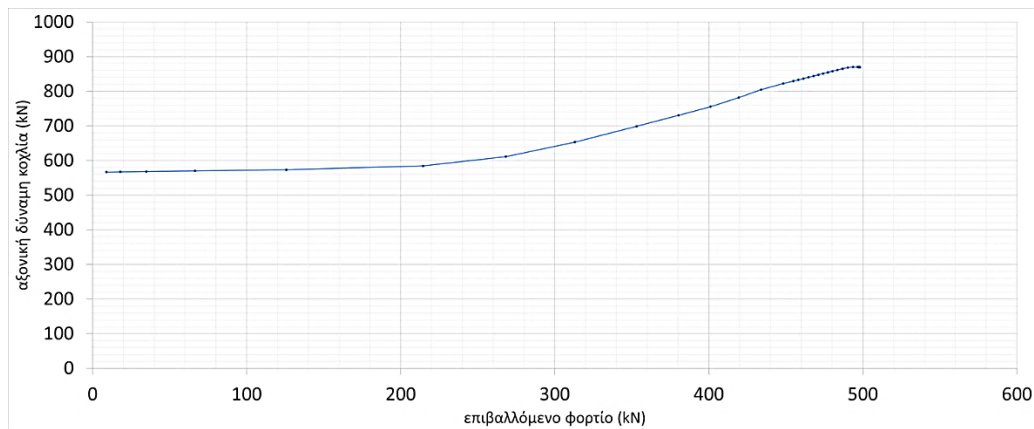


Σχήμα 6-63: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

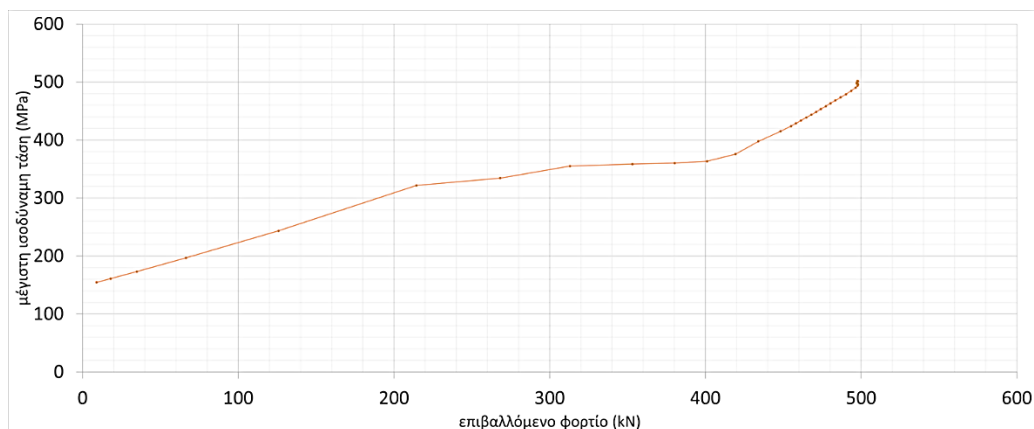




Σχήμα 6-64: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

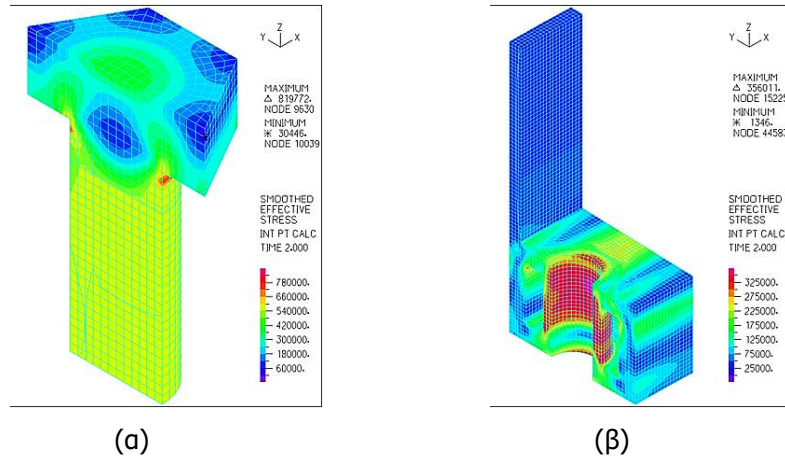


Σχήμα 6-65: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm

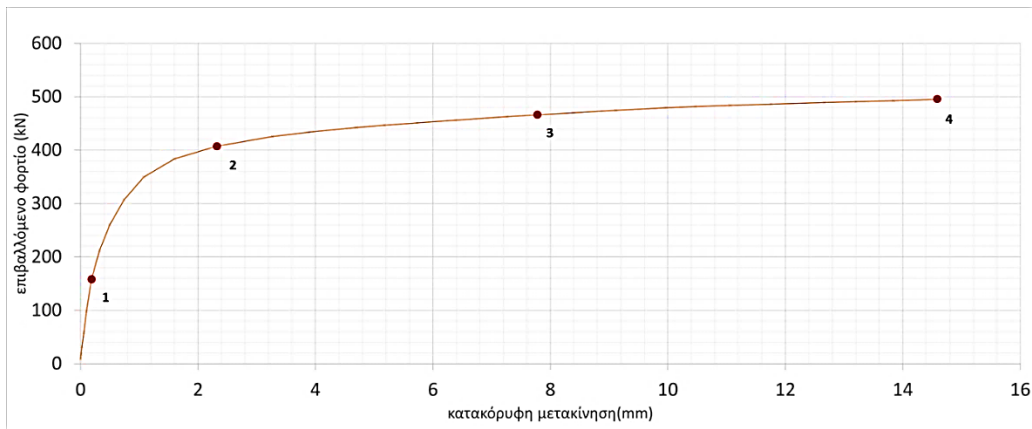


Σχήμα 6-66: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm

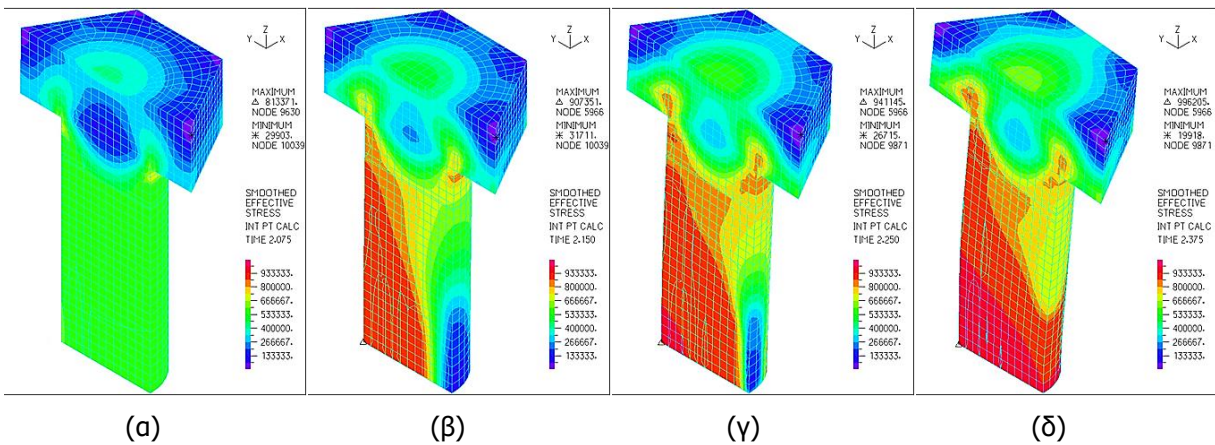
Διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 8mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



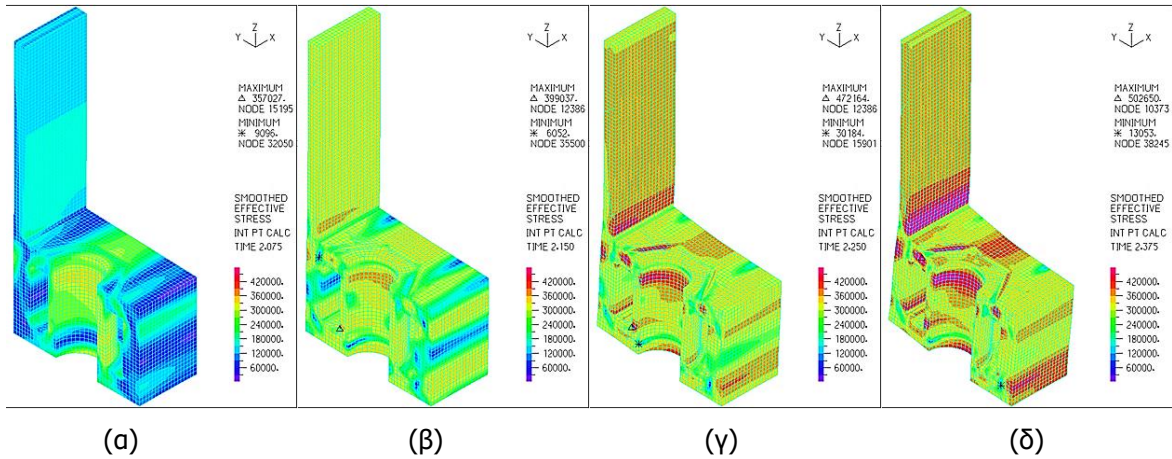
Σχήμα 6-67: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 8mm σε τομή



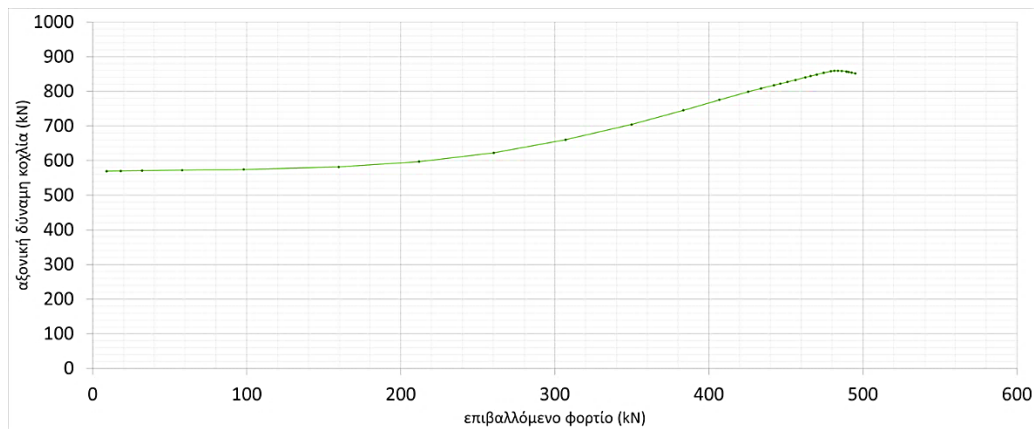
Σχήμα 6-68: Δρόμος ισοροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 με ενίσχυση 8mm



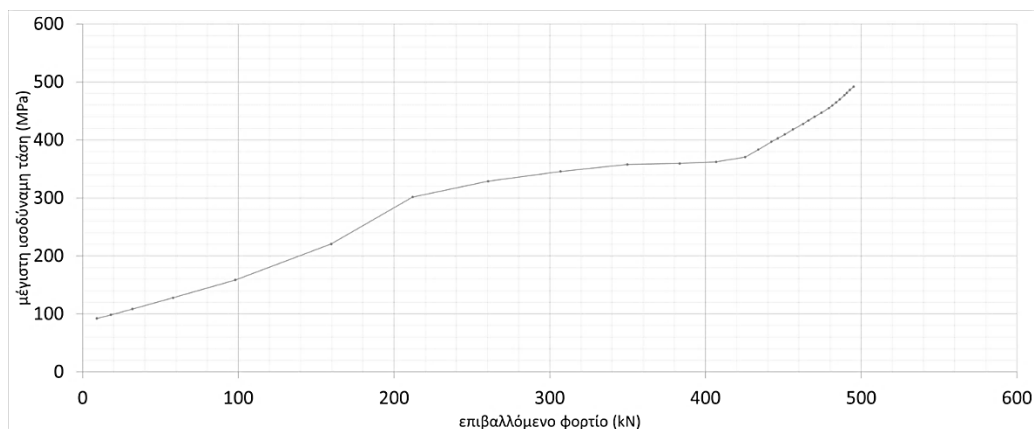
Σχήμα 6-69: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 8mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-70: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 8mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

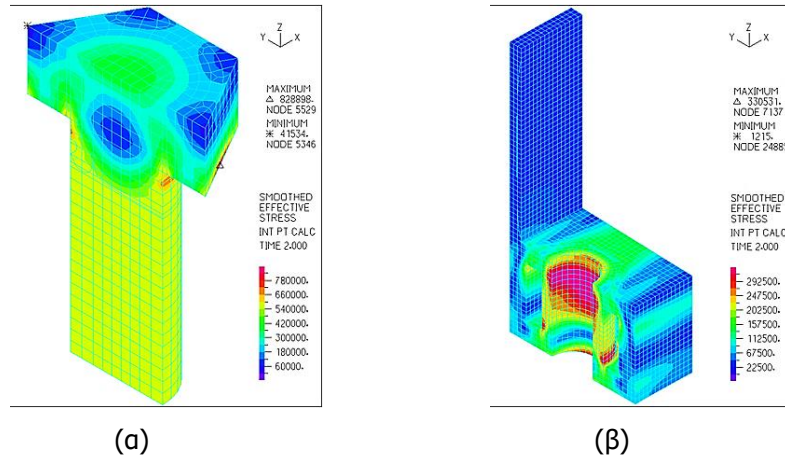


Σχήμα 6-71: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 8mm

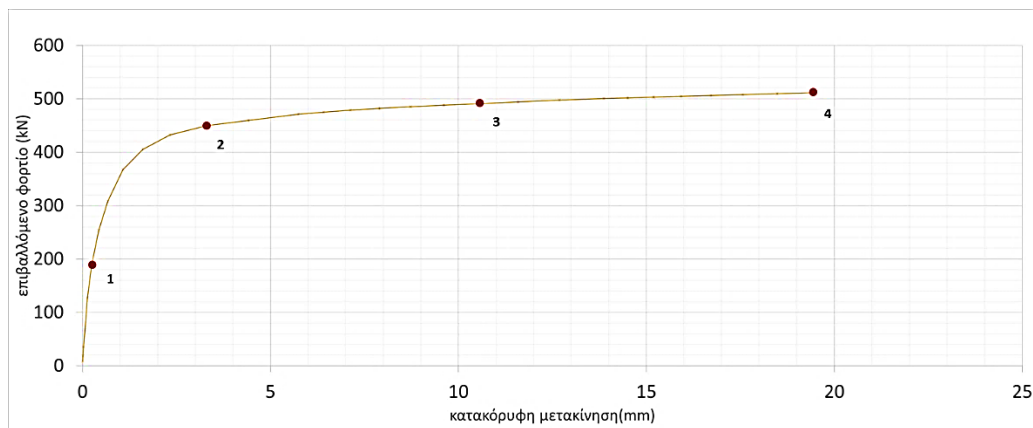


Σχήμα 6-72: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 8mm

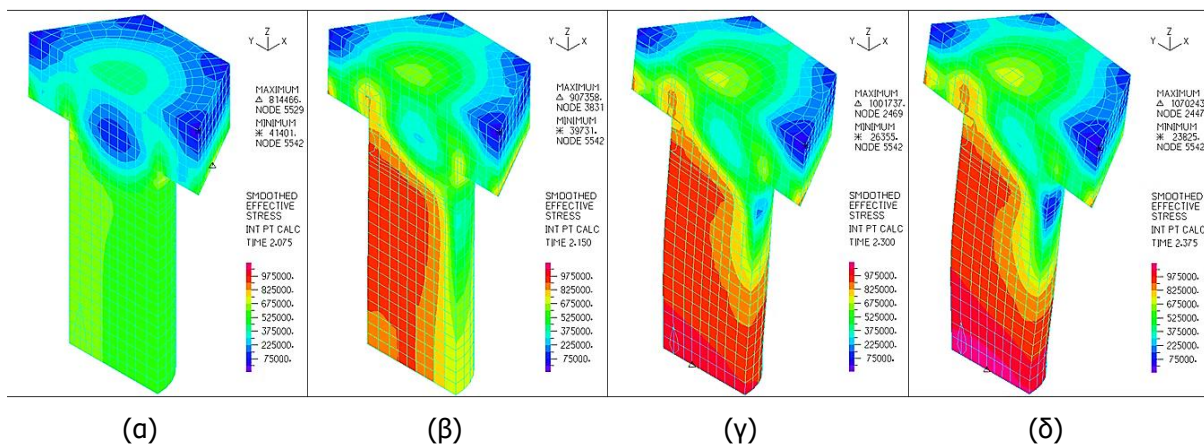
Διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 10mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9kN$



Σχήμα 6-73: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9kN$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 10mm σε τομή

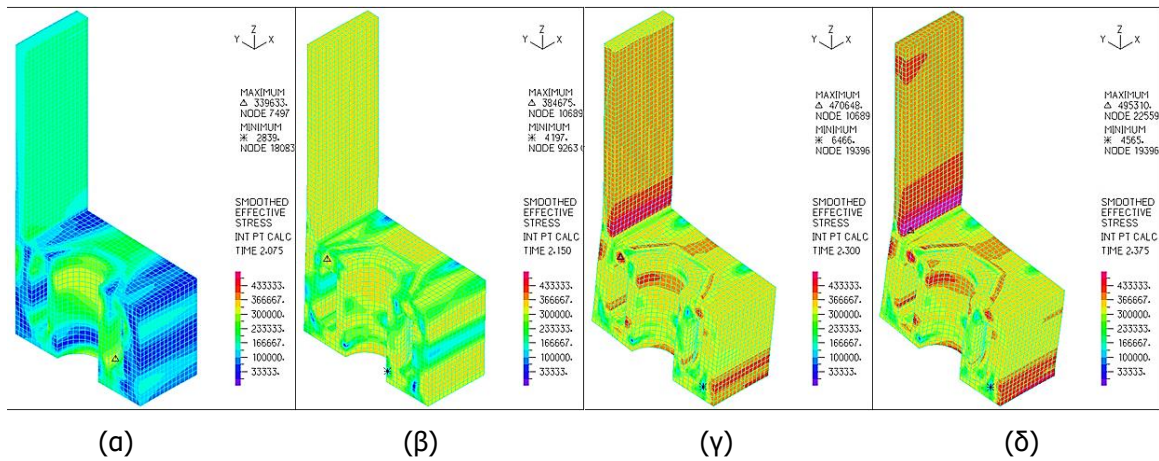


Σχήμα 6-74: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 με ενίσχυση 10mm

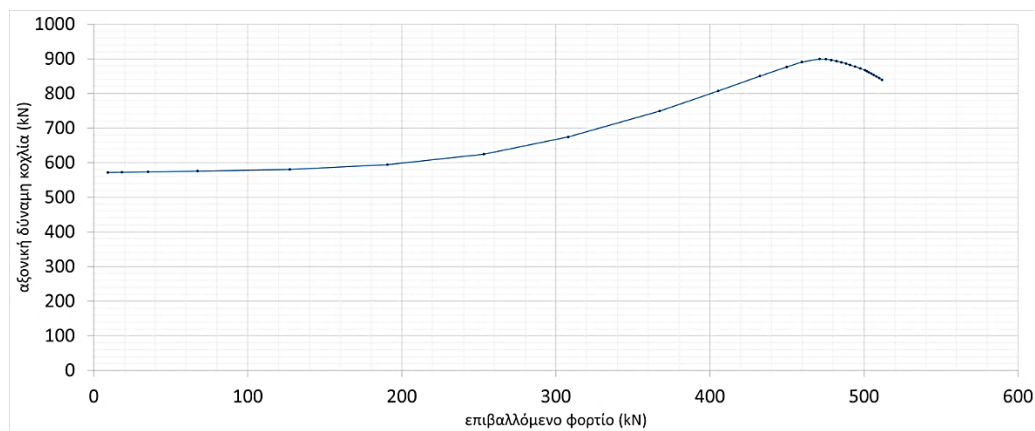


Σχήμα 6-75: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 10mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

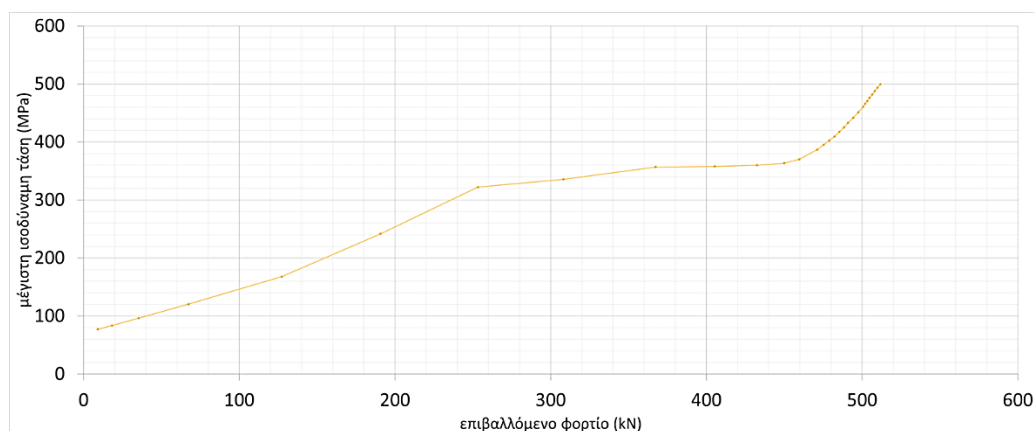




Σχήμα 6-76: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 10mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

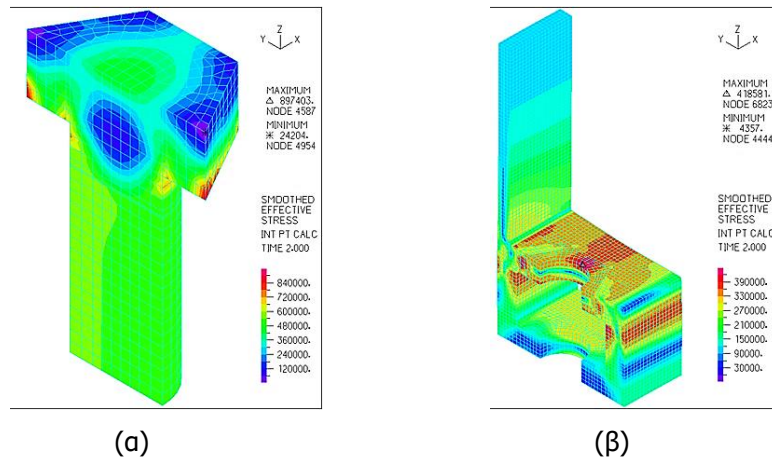


Σχήμα 6-77: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 10mm

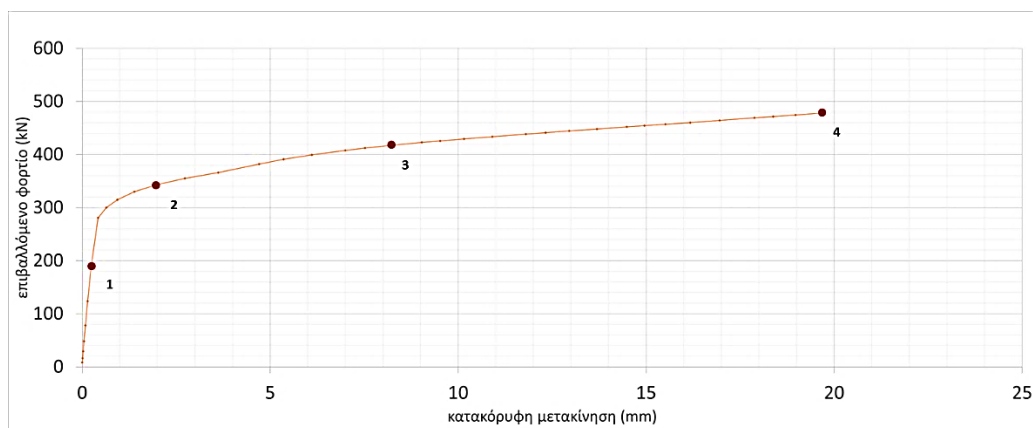


Σχήμα 6-78: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 10mm

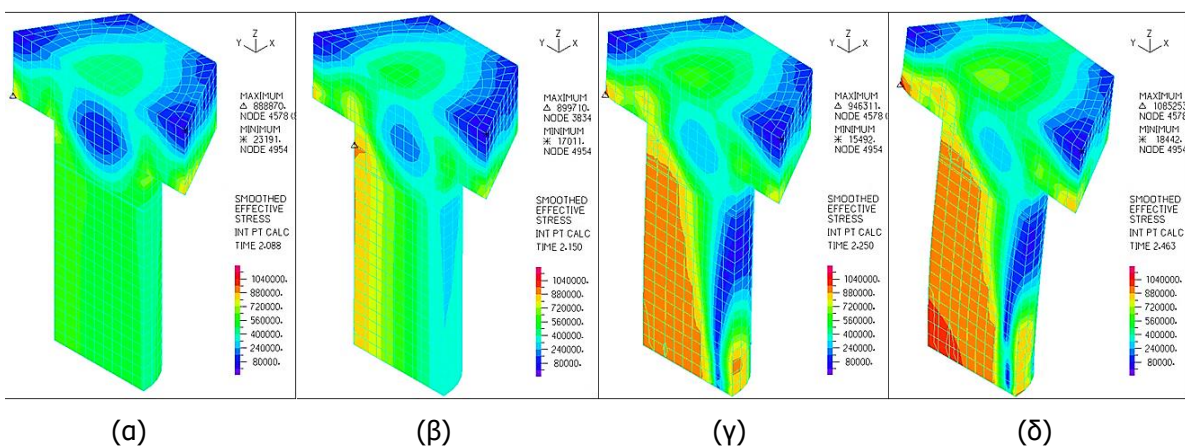
Διατομή RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



Σχήμα 6-79: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση σε τομή

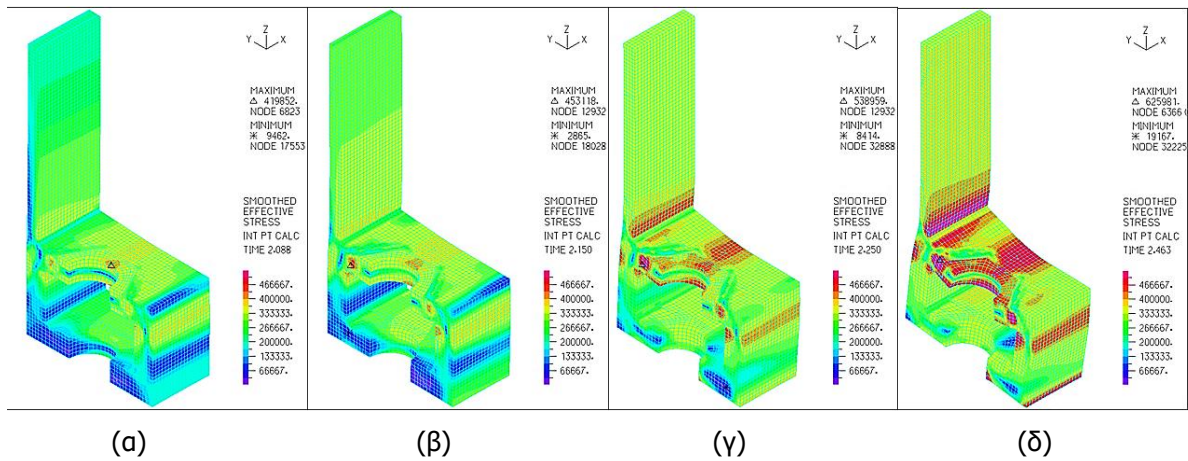


Σχήμα 6-80: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση

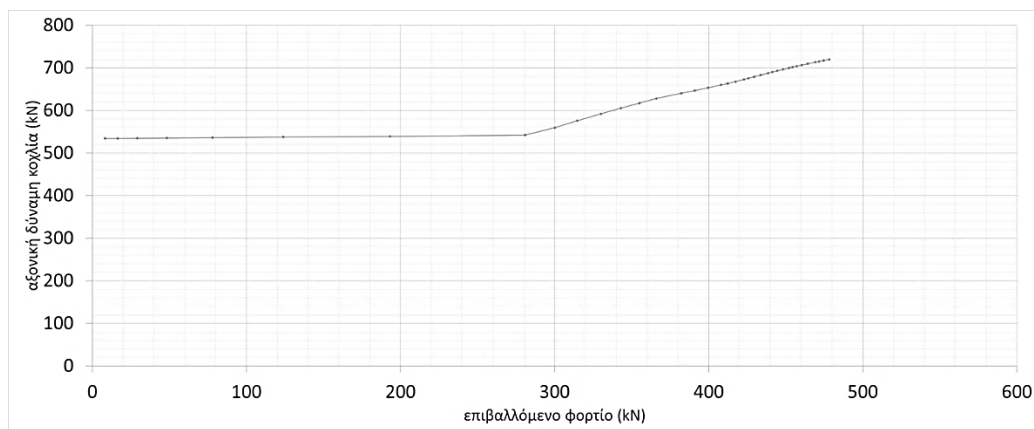


Σχήμα 6-81: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

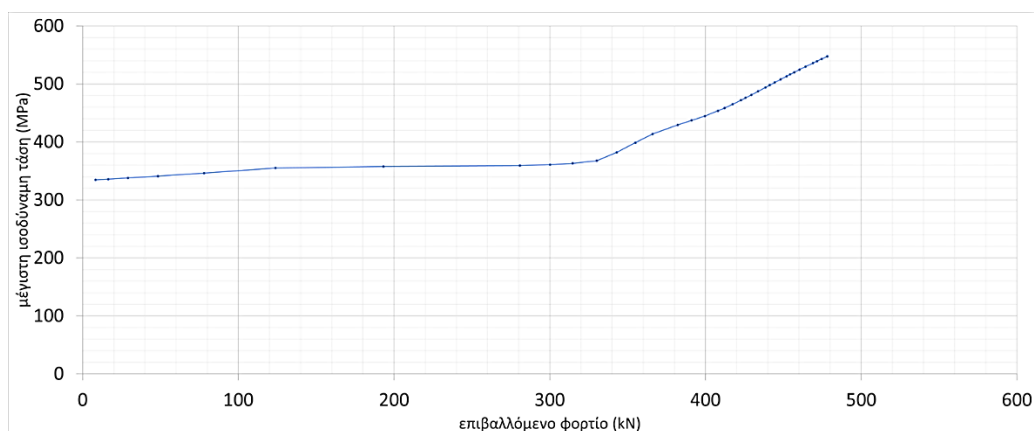




Σχήμα 6-82: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

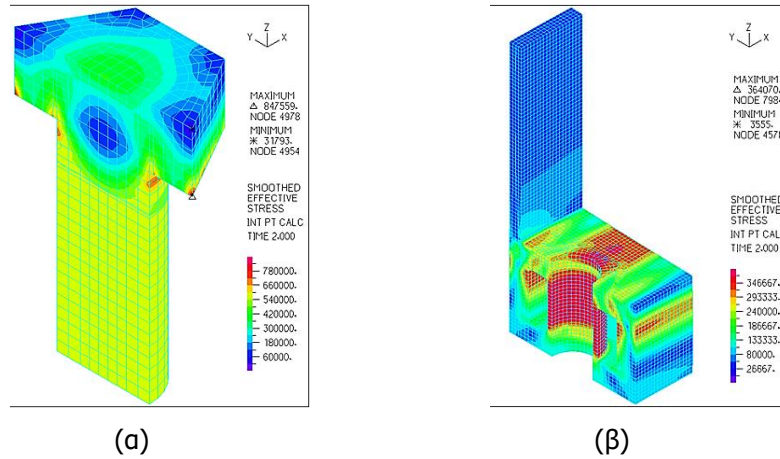


Σχήμα 6-83: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση

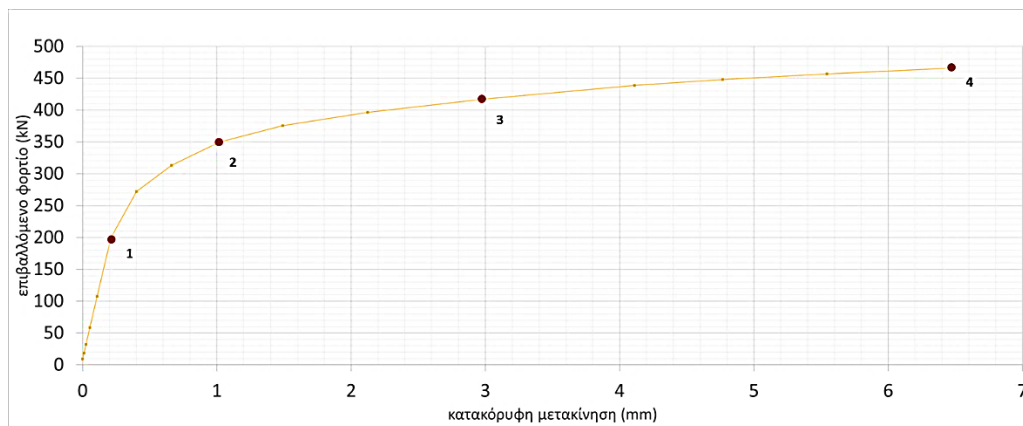


Σχήμα 6-84: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση

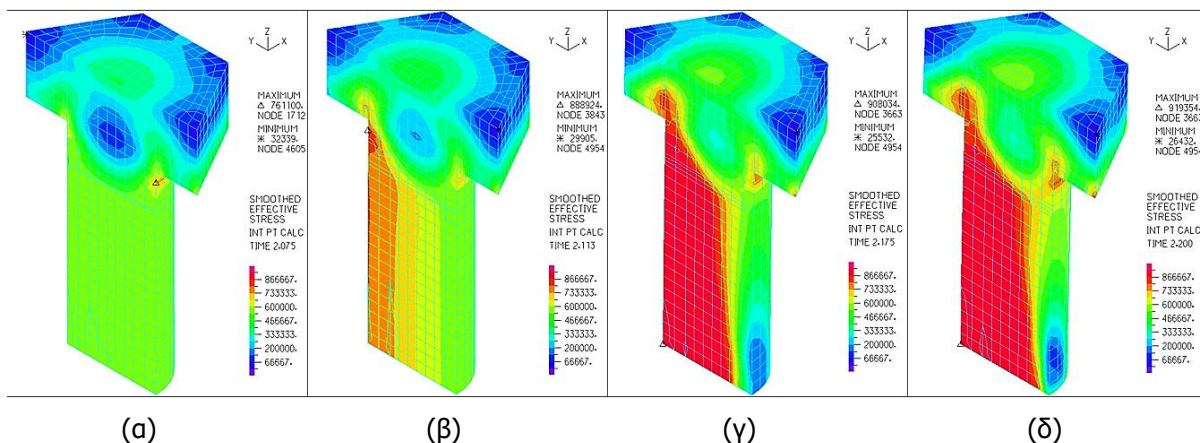
Διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 4mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



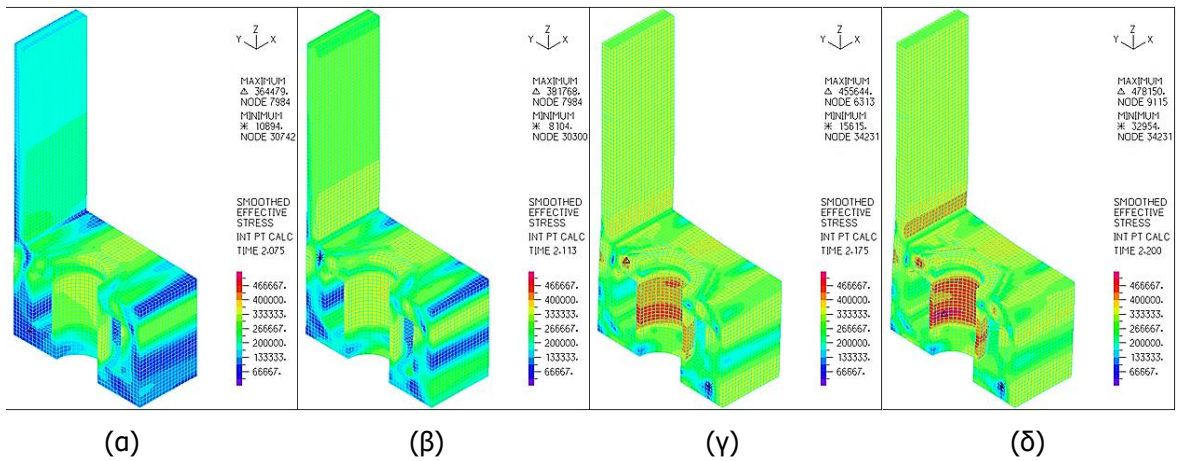
Σχήμα 6-85: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 4mm σε τομή



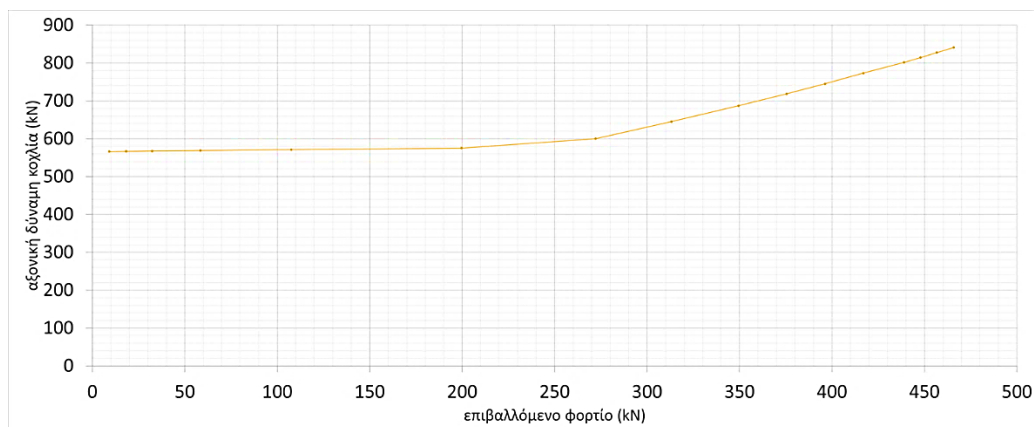
Σχήμα 6-86: Δρόμος ισοροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x18 με ενίσχυση 4mm



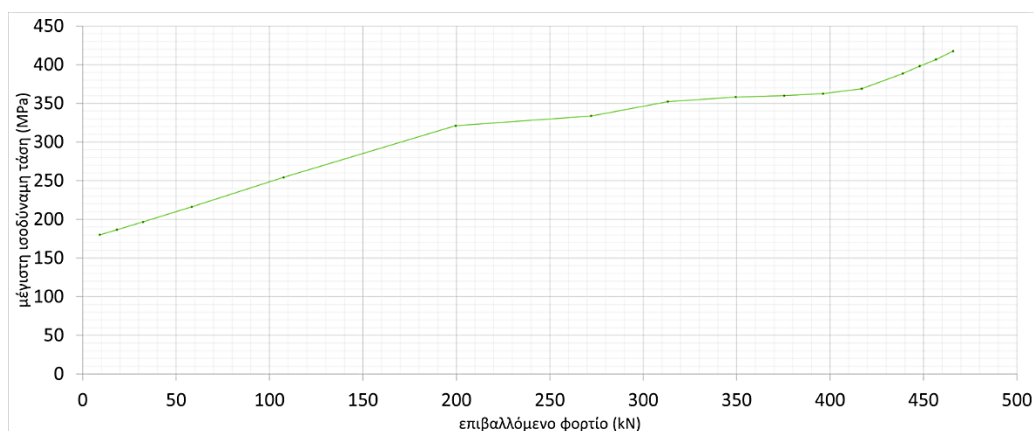
Σχήμα 6-87: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-88: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

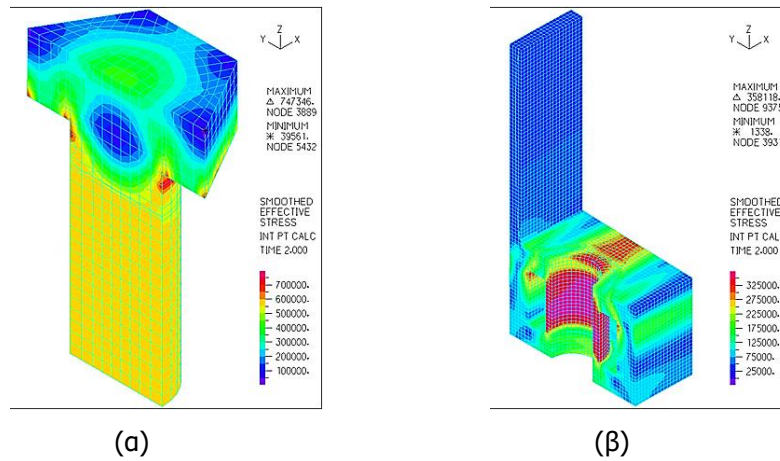


Σχήμα 6-89: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 4mm

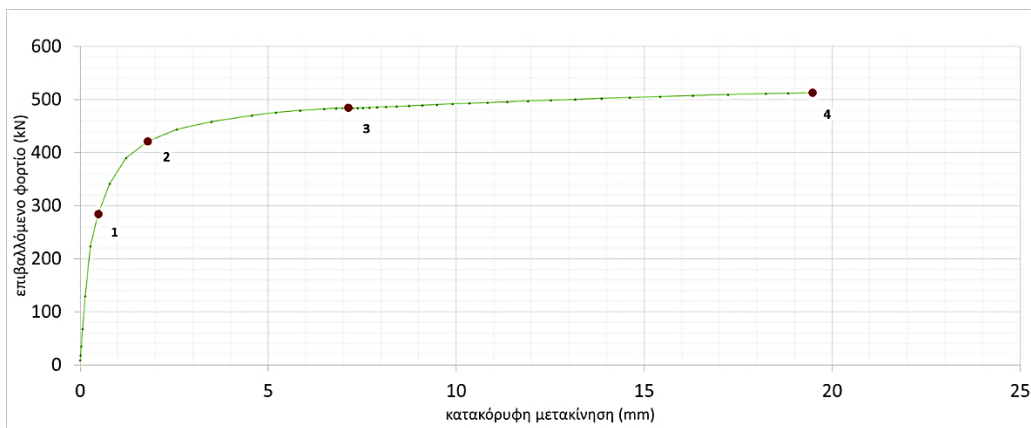


Σχήμα 6-90: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 4mm

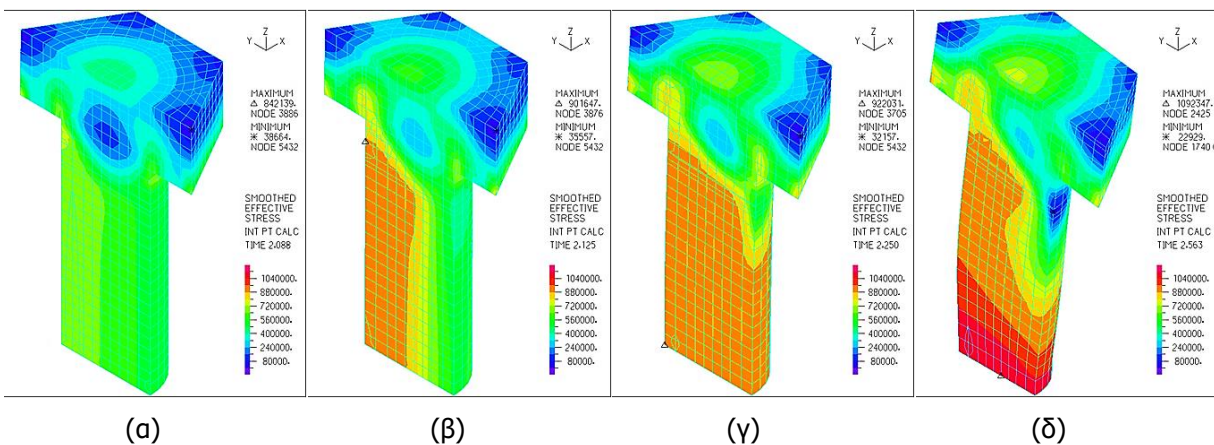
Διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 6mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



Σχήμα 6-91: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 6mm σε τομή

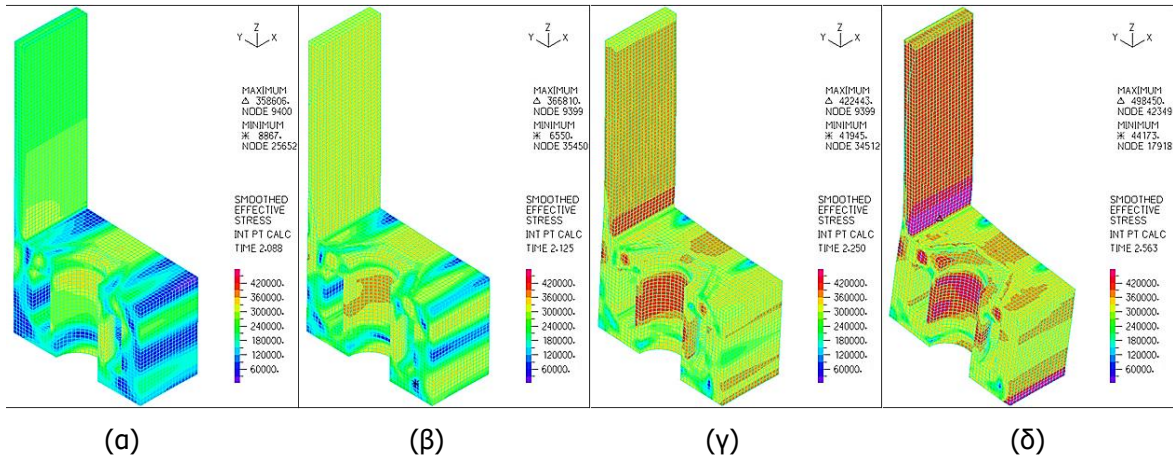


Σχήμα 6-92: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x18 με ενίσχυση 6mm

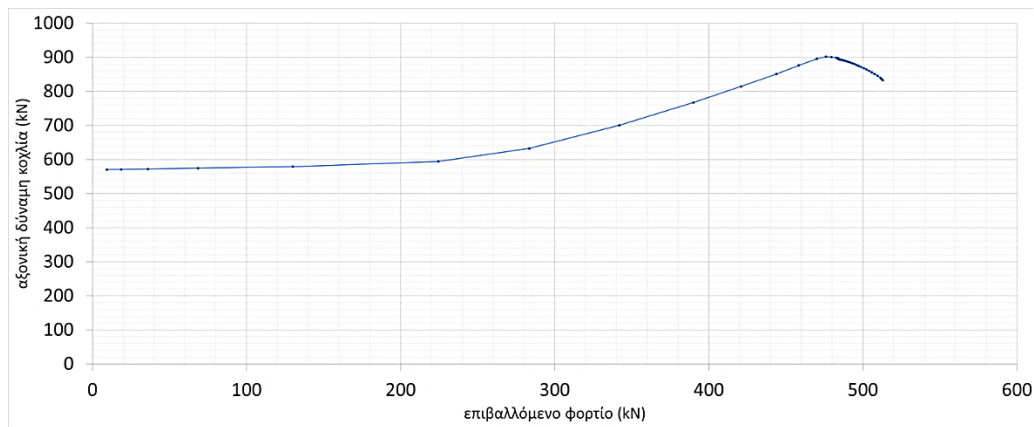


Σχήμα 6-93: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 6mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

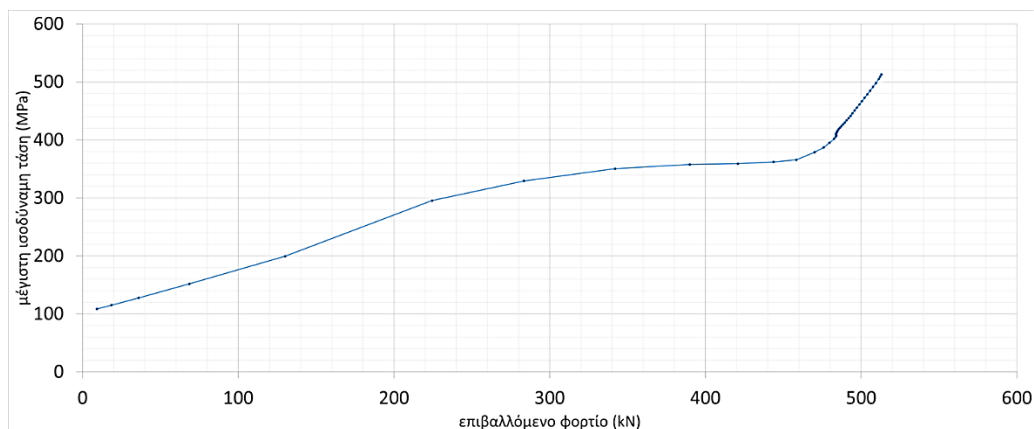




Σχήμα 6-94: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 6mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

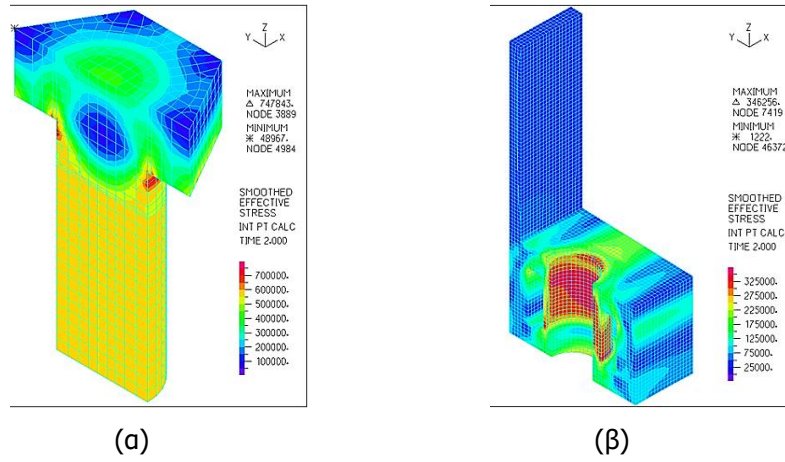


Σχήμα 6-95: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 6mm

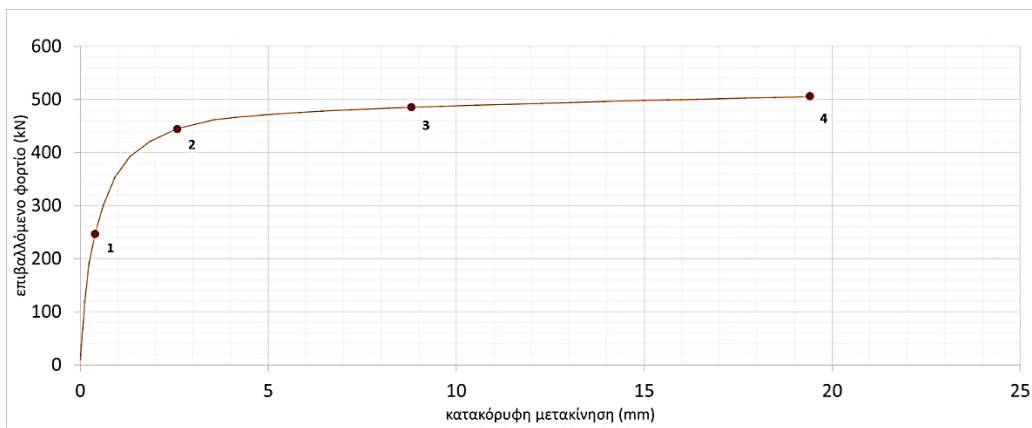


Σχήμα 6-96: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 6mm

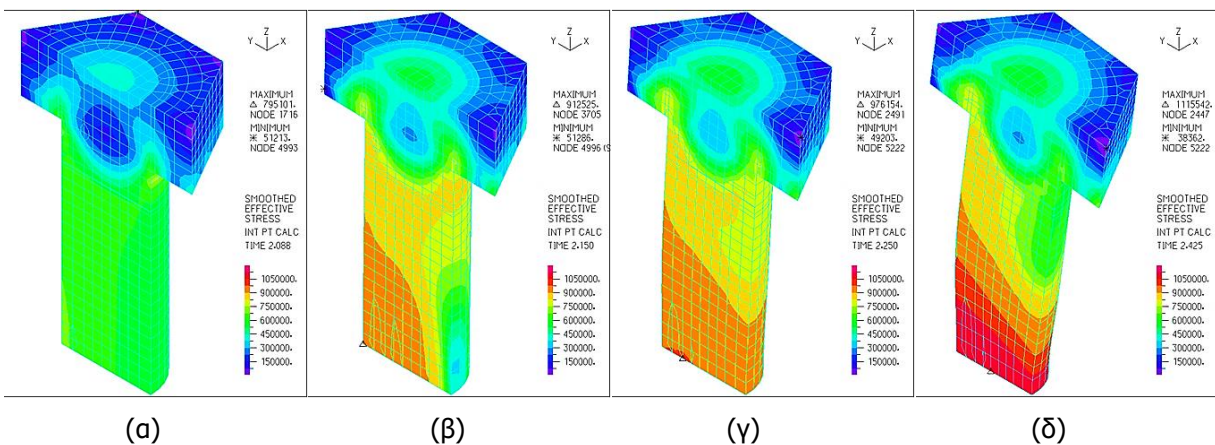
Διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 8mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



Σχήμα 6-97: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 8mm σε τομή

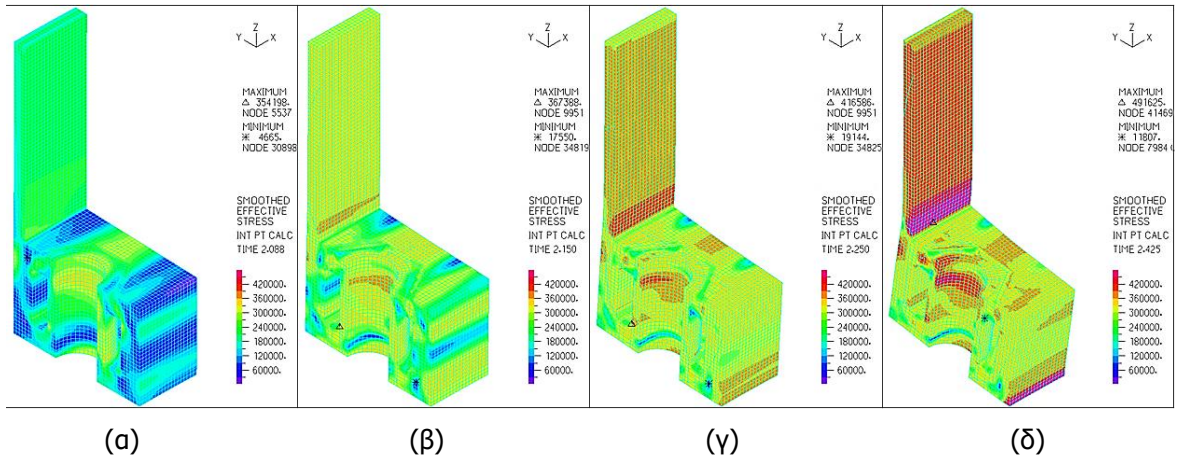


Σχήμα 6-98: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x18 με ενίσχυση 8mm

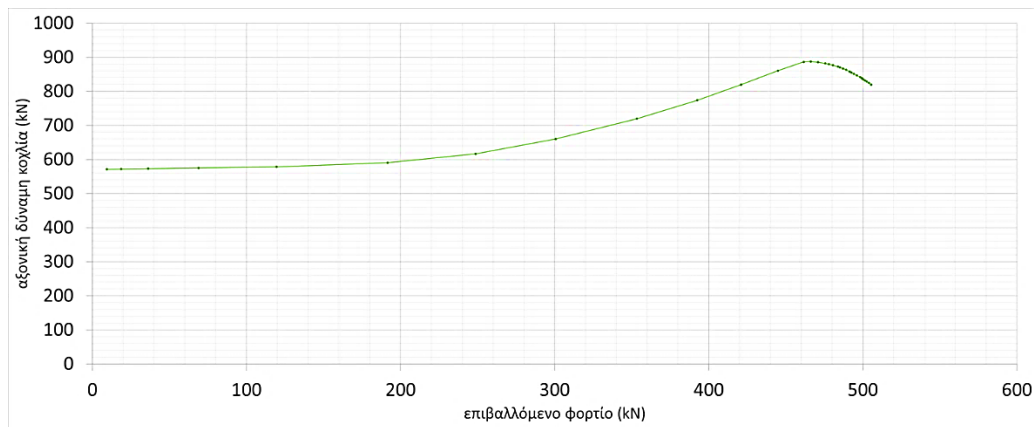


Σχήμα 6-99: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 8mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

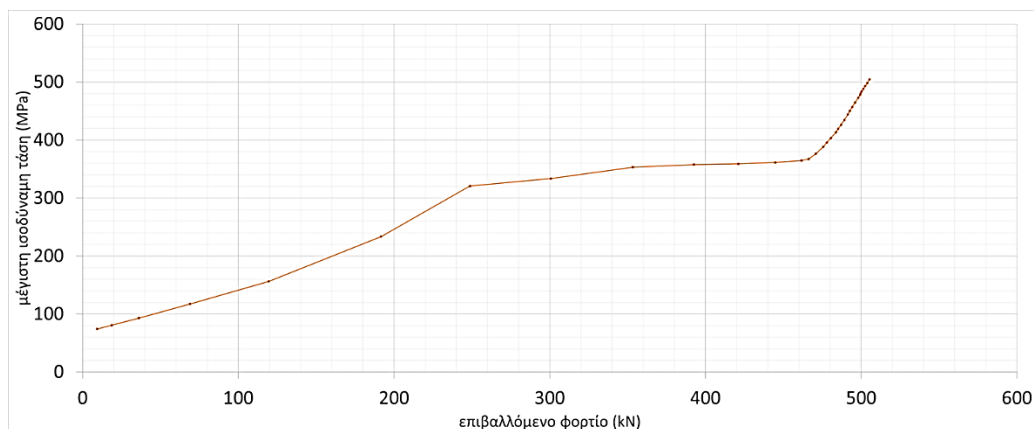




Σχήμα 6-100: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 8mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

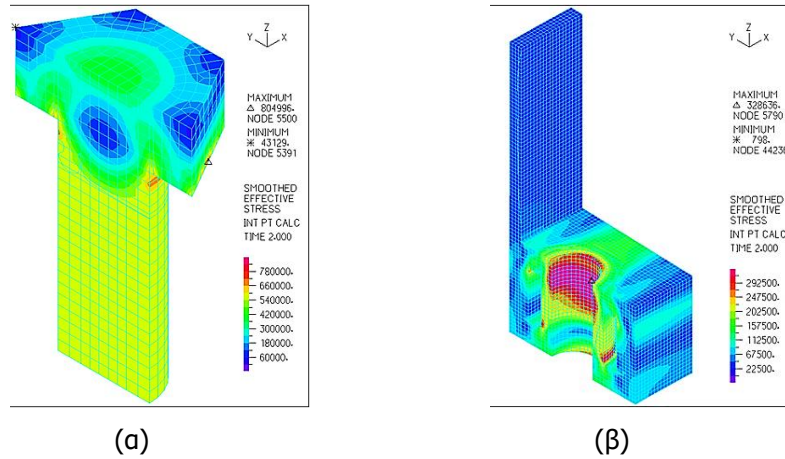


Σχήμα 6-101: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 8mm

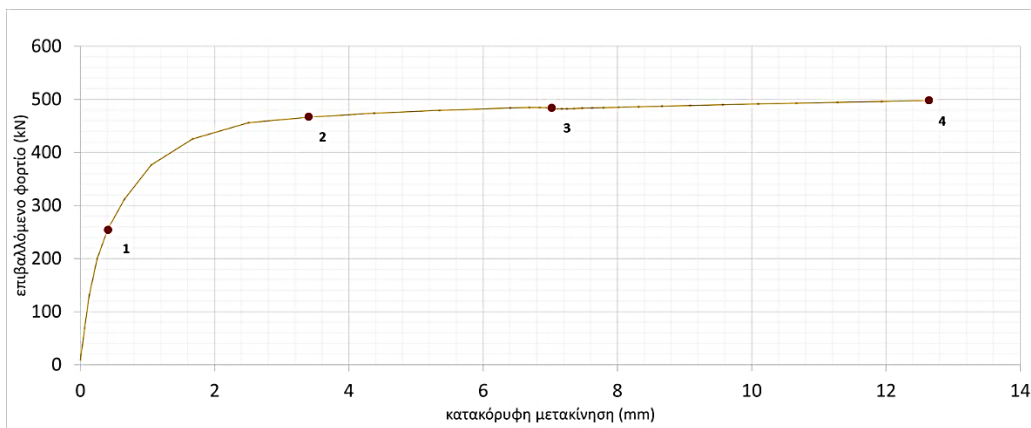


Σχήμα 6-102: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 8mm

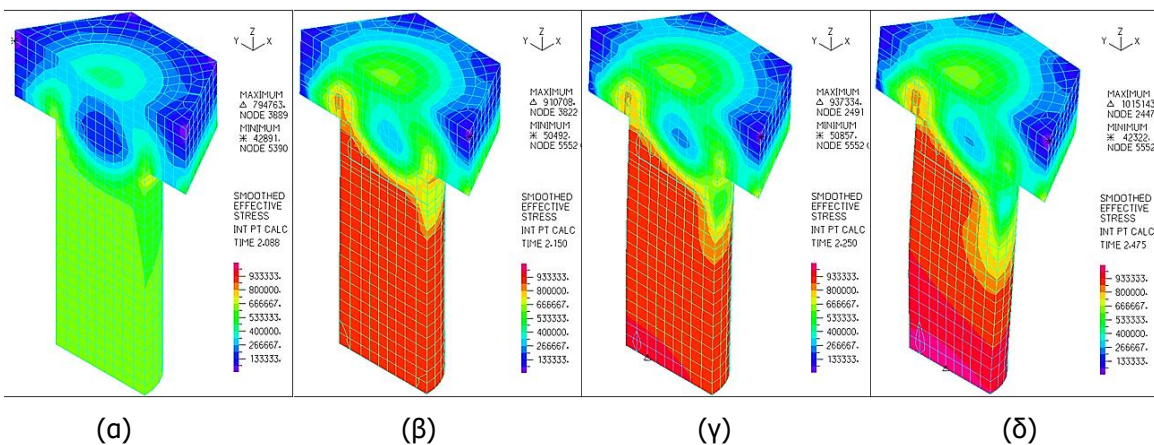
Διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 10mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$



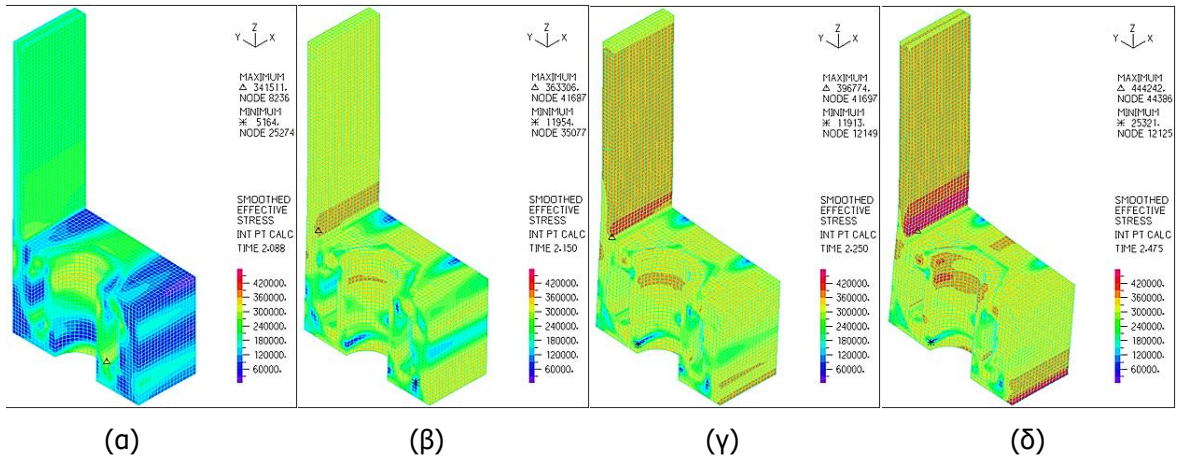
Σχήμα 6-103: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 571.9\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 10mm σε τομή



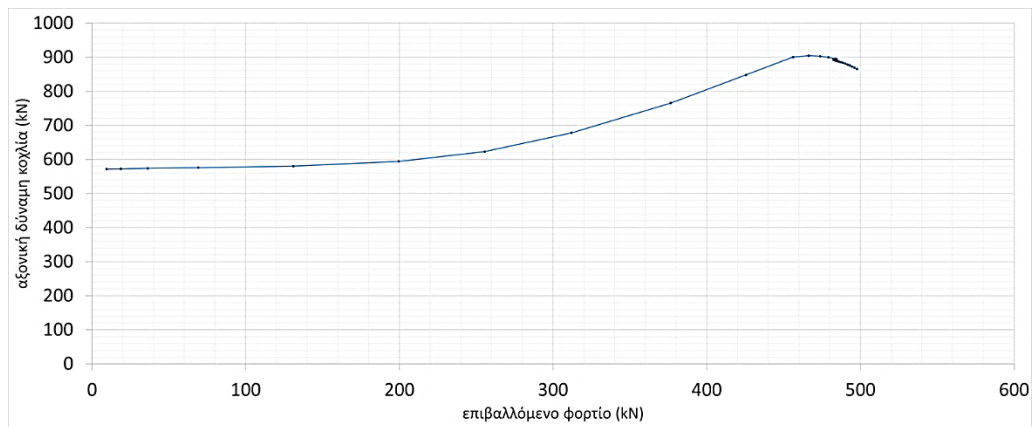
Σχήμα 6-104: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x18 με ενίσχυση 10mm



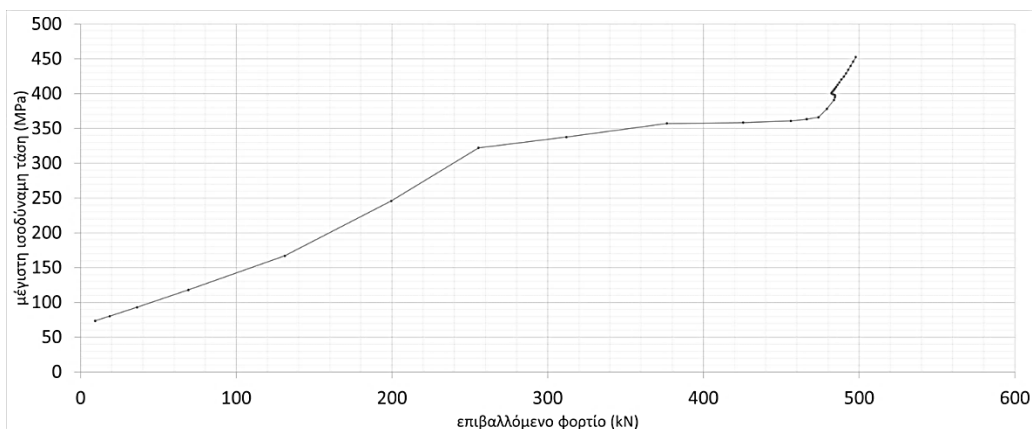
Σχήμα 6-105: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 10mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-106: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 10mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



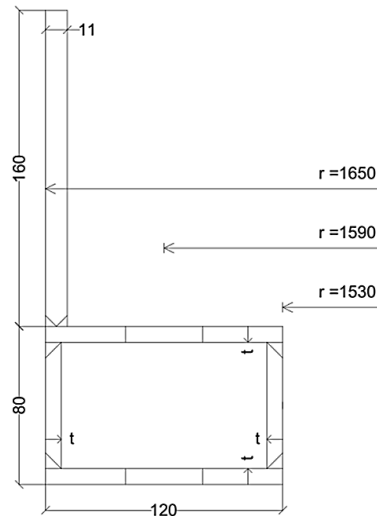
Σχήμα 6-107: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 10mm



Σχήμα 6-108: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x18 με ενίσχυση 10mm

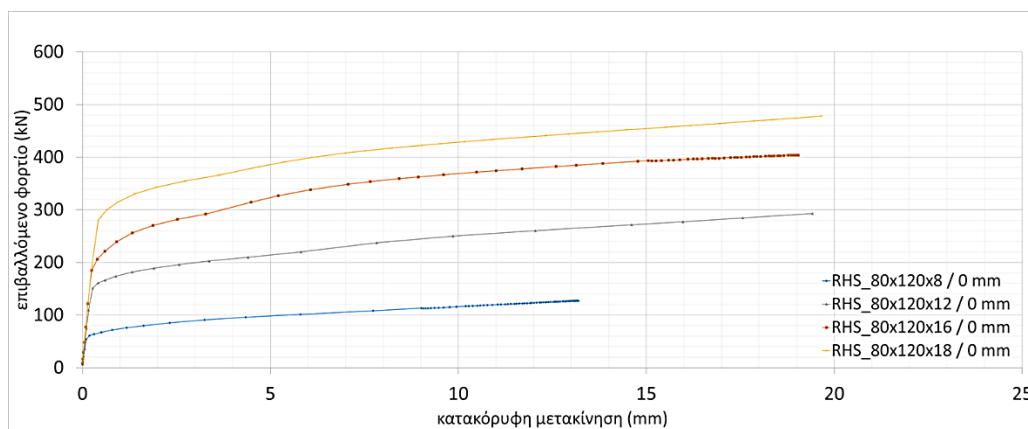
### 6.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΧΟΥΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΧΩΡΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

Τα αποτελέσματα των διατομών που συγκρίνονται έχουν αναλυθεί ξεχωριστά για την κάθε σύνδεση στην παράγραφο 6.2. Σε αυτήν την παράγραφο, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των κοίλων ορθογωνικών διατομών για διαφορετικό πάχος διατομής χωρίς ενίσχυση. Τα αποτελέσματα που αναλύονται για τη μεταξύ τους σύγκριση είναι ο δρόμος ισορροπίας, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους. Παρουσιάζονται, επιπλέον, στο σχήμα 6-109, οι βασικές διαστάσεις της σύνδεσης με μεταβλητή την εξεταζόμενη παράμετρο πάχους διατομής  $t$  για τη διατομή χωρίς ενίσχυση περί τον κοχλία.



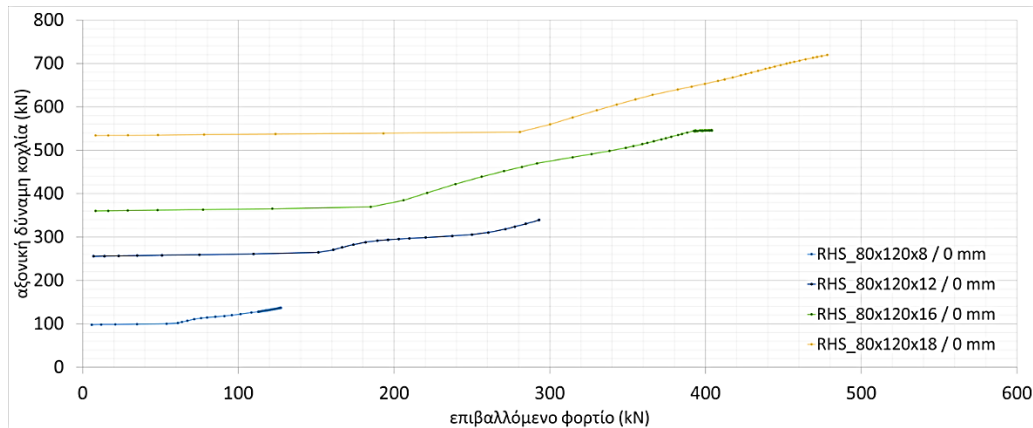
Σχήμα 6-109: Τομή σύνδεσης RHS 80x120 με μεταβλητή το πάχος διατομής  $t$  για διατομή χωρίς ενίσχυση περί τον κοχλία

Όσον αφορά τους δρόμους ισορροπίας (σχήμα 6-110), μπορεί να παρατηρηθεί πως η αύξηση του πάχους της διατομής συμβάλλει σε σημαντική αύξηση της αντοχής. Η αύξηση της αντοχής οφείλεται στην αύξηση της δυσκαμψίας. Η αρχική δυσκαμψία αυξάνεται με την αύξηση του πάχους της διατομής διατηρώντας, παράλληλα, σημαντική μετελαστική αντοχή.



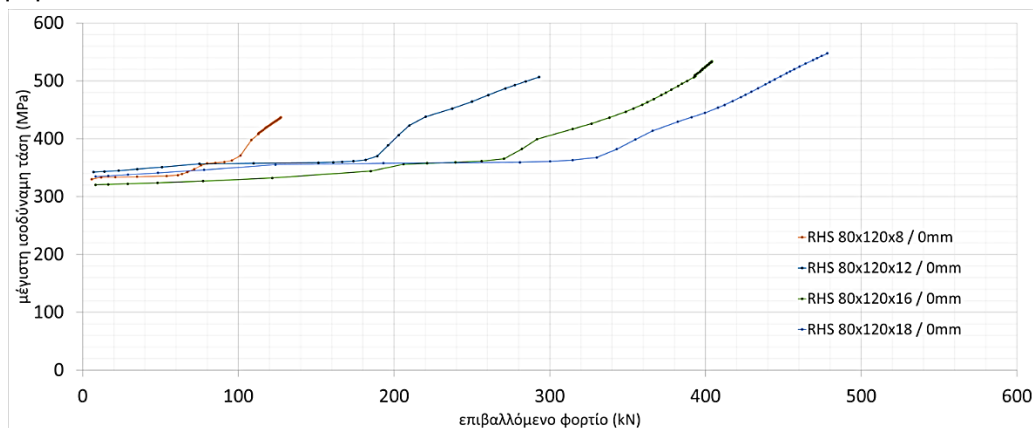
Σχήμα 6-110: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm χωρίς ενίσχυση

Όσον αφορά την αξονική δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται (σχήμα 6-111), παρατηρείται πως η αρχική αξονική δύναμη του κοχλία αντιστοιχεί στην προένταση που εισάγεται για κάθε διατομή. Συγκεκριμένα, η αρχική τιμή της αξονικής δύναμης αντιστοιχεί στην προένταση που μπορεί να φέρει η διατομή, η οποία χρειάζεται να μεταφερθεί μέσω των τοιχωμάτων της διατομής. Κατά την εφαρμογή του επιβαλλόμενου φορτίου, για αυξανόμενο πάχος διατομής, η αξονική δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται διατηρείται σταθερή περί τα 100kN. Μετά τα 100kN, υπάρχει σχετική αύξηση της αξονικής δύναμης. Γενικά, για αύξηση του πάχους διατομής, η αξονική δύναμη του κοχλία διατηρείται σταθερή για μεγαλύτερη επιβολή της φόρτισης. Επισημαίνεται ότι, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία έχει άμεση συσχέτιση με την ισορροπία του συστήματος κοχλία και πέλματος, το οποίο πρέπει να ισορροπεί κατά την εφαρμογή της εξωτερικής φόρτισης.



Σχήμα 6-111: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm χωρίς ενίσχυση

Όσον αφορά τη μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση, συγκεκριμένα στη συναρμογή του κελύφους (σχήμα 6-112), προκύπτει ότι για αυξανόμενο πάχος διατομής, οι αρχικές τάσεις που αναπτύσσονται στη συναρμογή κατά τη στιγμή της προέντασης, είναι σχετικά μικρότερες λόγω της αυξημένης δυσκαμψίας της διατομής. Κατά την εφαρμογή της προέντασης, η ανακατανομή των τάσεων γίνεται μέσω των τοιχωμάτων της διατομής, ενώ παράλληλα, κατά την εφαρμογή της εξωτερικής φόρτισης, η ένταση καλείται να μεταφερθεί μέσα από τη συναρμογή του κελύφους με τη διατομή, όπου βρίσκεται η συγκόλληση.



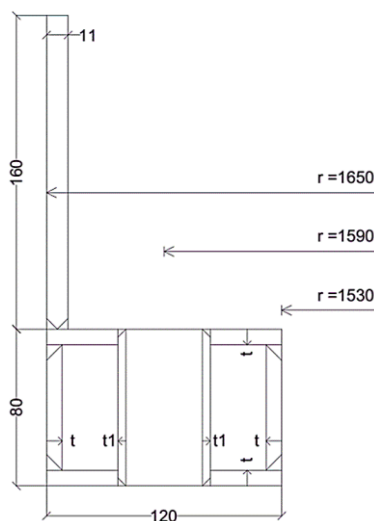
Σχήμα 6-112: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm χωρίς ενίσχυση



Έτσι, η συγκόλληση εντείνεται σημαντικά. Ειδικότερα, κατά την αύξηση της εξωτερικής φόρτισης, οι τάσεις αυξάνονται γραμμικά, ωστόσο αρχίζει το υλικό να διαρρέει τοπικά ακολουθώντας τον καταστατικό νόμο του υλικού. Επισημαίνεται πως η συγκόλληση δεν έχει προσομοιωθεί ως θερμομηχανικό πρόβλημα λόγω της πολυπλοκότητας της προσομοίωσης της συγκόλλησης και του επερχόμενου υπολογιστικού κόστους. Λόγω της φύσης της συγκόλλησης, θα έπρεπε να υπάρχουν αρχικές παραμένουσες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης [19]. Οι αρχικές παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή σε κόπωση, που είναι καθοριστικός παράγοντας σε αστοχίες ανεμογεννητριών.

#### 6.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΧΟΥΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΕΝΙΣΧΥΣΗ

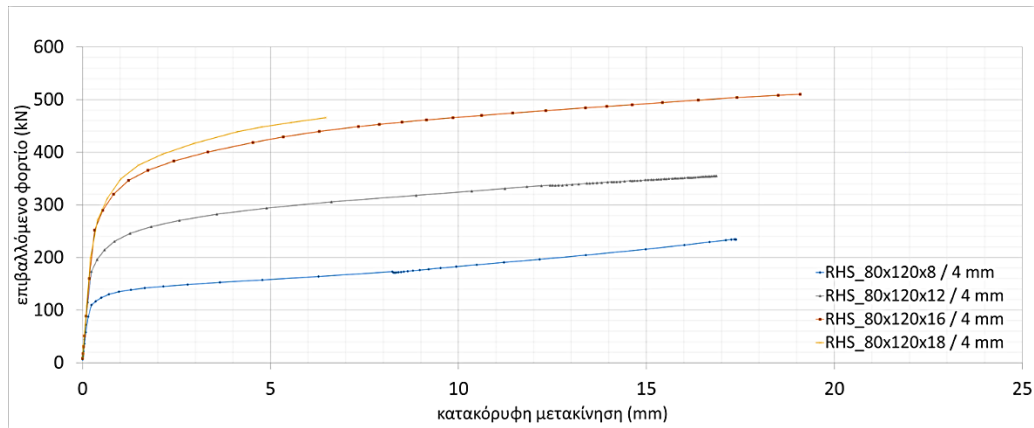
Τα αποτελέσματα των διατομών που συγκρίνονται έχουν αναλυθεί ξεχωριστά για την κάθε σύνδεση στην παράγραφο 6.2. Σε αυτήν την παράγραφο, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των κοίλων ορθογωνικών διατομών για διαφορετικό πάχος διατομής, όταν υπάρχει ενίσχυση περί τον κοχλία. Τα αποτελέσματα που αναλύονται για τη μεταξύ τους σύγκριση είναι ο δρόμος ισορροπίας, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους. Παρουσιάζονται, επιπλέον, στο σχήμα 6-113, οι βασικές διαστάσεις της σύνδεσης με μεταβλητή την εξεταζόμενη παράμετρο πάχους διατομής  $t$  για διατομή σταθερού πάχους ενίσχυσης  $t_1$  περί τον κοχλία.



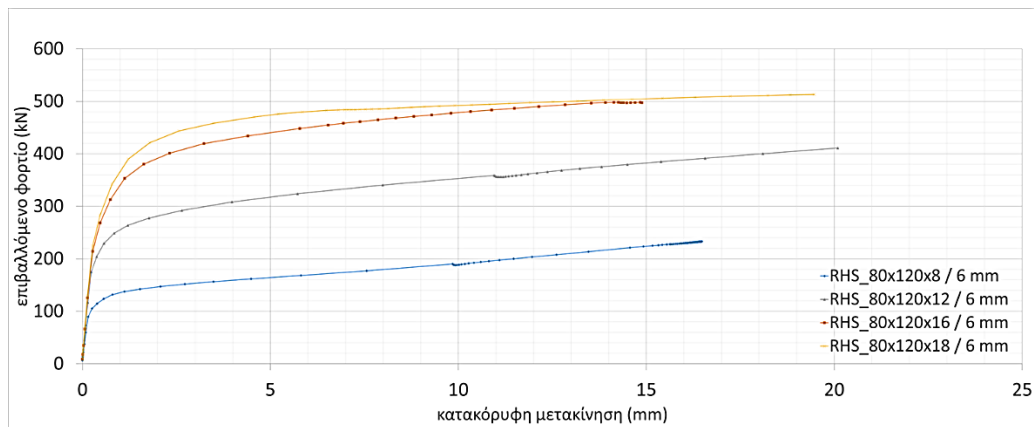
Σχήμα 6-113: Τομή σύνδεσης RHS 80x120 με μεταβλητή το πάχος διατομής  $t$  για διατομή σταθερού πάχους ενίσχυσης  $t_1$  περί τον κοχλία

Όσον αφορά τους δρόμους ισορροπίας (σχήματα 6-114 έως 6-117), μπορεί να παρατηρηθεί πως η αύξηση του πάχους της διατομής, όταν υπάρχει ενίσχυση περί τον κοχλία, συμβάλλει σε μεγαλύτερη αύξηση της αντοχής. Έτσι, στις διατομές αυτές, η διαρροή συμβαίνει είτε στη συναρμογή του κελύφους, είτε στον κοχλία, δεδομένου πως για μεγαλύτερο πάχος διατομής η σύνδεση προκύπτει αρκετά πιο δύσκαμπτη. Η αρχική δυσκαμψία των διατομών μεγαλύτερου πάχους διατομής, όταν υπάρχει ενίσχυση περί τον κοχλία, δείχνει να διατηρείται για μεγαλύτερο επιβαλλόμενο φορτίο αξιοποιώντας για περισσότερο διάστημα την διατιθέμενη αντοχή που προσφέρεται από τη σύνδεση κατά την παραμόρφωση.

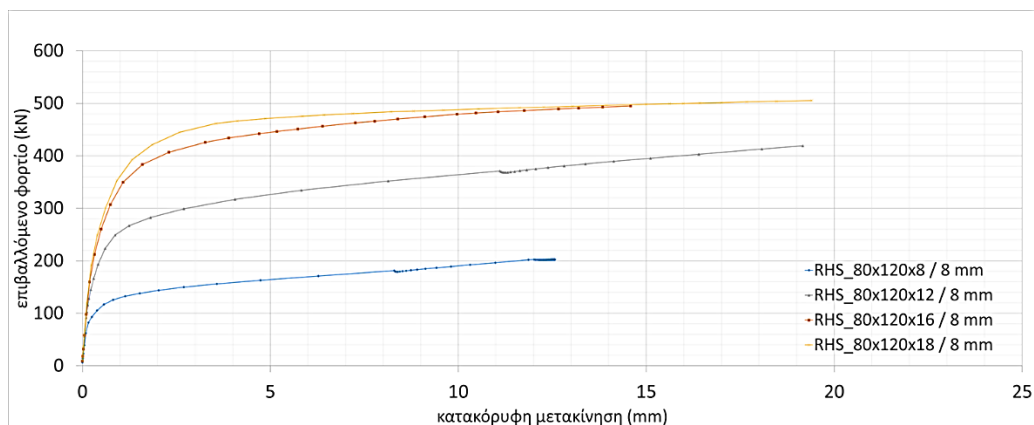




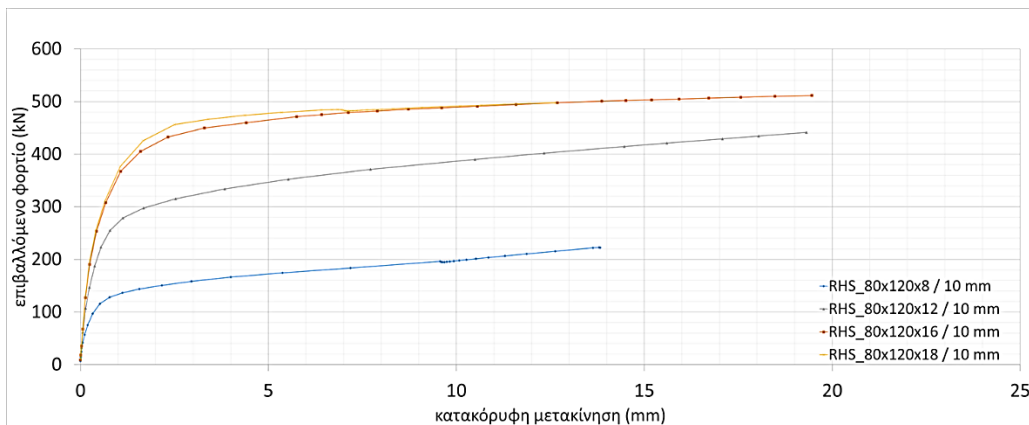
Σχήμα 6-114: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 4mm



Σχήμα 6-115: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 6mm

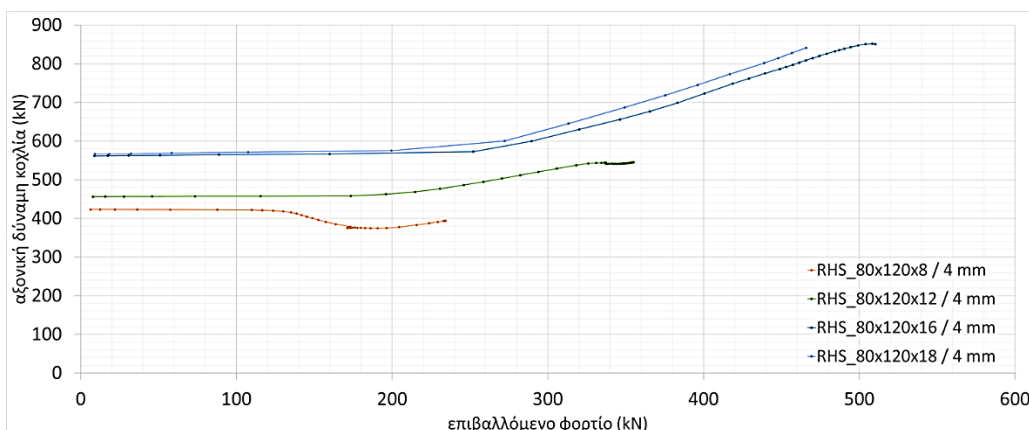


Σχήμα 6-116: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 8mm

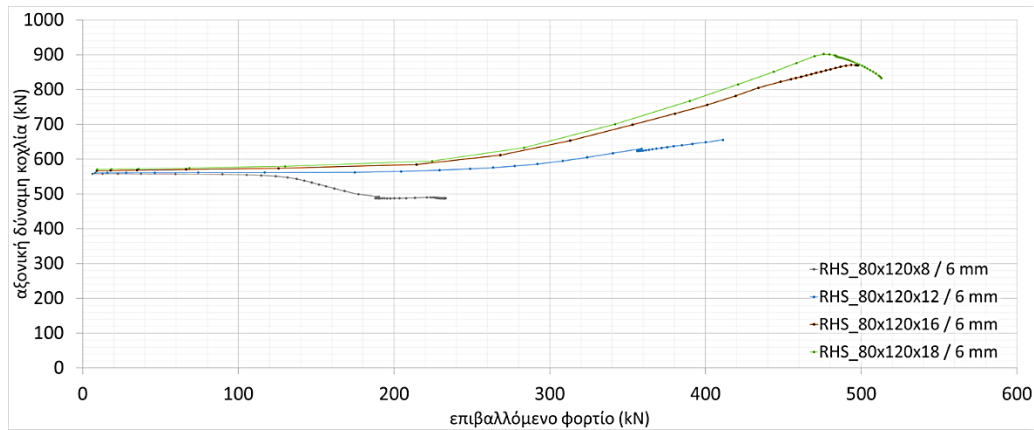


Σχήμα 6-117: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 10mm

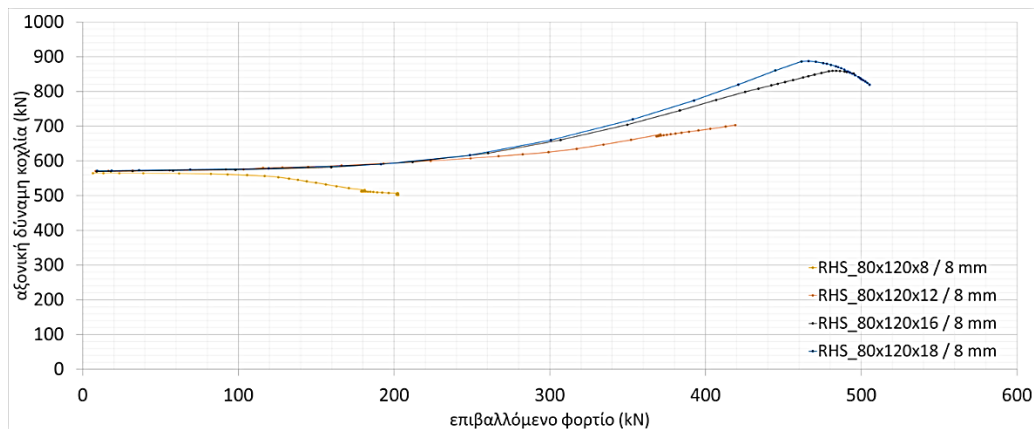
Όσον αφορά την αξονική δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται (σχήματα 6-118 έως 6-121), παρατηρείται πως η αρχική αξονική δύναμη του κοχλία αντιστοιχεί στην προένταση που εισάγεται για κάθε διατομή. Συγκεκριμένα, η αρχική τιμή της αξονικής δύναμης αντιστοιχεί στην προένταση που μπορεί να φέρει η διατομή. Η παρουσία της ενίσχυσης δρα καθοριστικά στην αύξηση της προέντασης. Κατά την επιβολή της προέντασης, οι τροχιές των τάσεων ακολουθούν αντίστοιχες τροχιές με την ελάχιστη δυνατή ενέργεια, ώστε να υπάρχει ισορροπία εξωτερικών και εσωτερικών εντατικών μεγεθών. Ακόμα, με την παρουσία της ενίσχυσης περί τον κοχλία, η σύνδεση γύρω από τον κοχλία γίνεται πιο δύσκαμπτη. Έτσι, η διατομή εντείνεται λιγότερο έχοντας περιθώριο για περισσότερη εφαρμογή προέντασης, εφόσον προβλέπεται και είναι επιθυμητό. Ταυτόχρονα, με την αύξηση του πάχους της διατομής, η αξονική δύναμη που μπορεί να αναπτύξει ο κοχλίας διατηρείται, ενώ σε μεγαλύτερη επιβολή της φόρτισης, η αξονική δύναμη αυξάνεται σημαντικά. Κατά την εφαρμογή του επιβαλλόμενου φορτίου για αυξανόμενο πάχος ενίσχυσης, η αξονική δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται διατηρείται σταθερή περί τα 100kN. Μετά τα 100kN, υπάρχει σχετική αύξηση της αξονικής δύναμης. Η αύξηση του πάχους της διατομής αποτελεί παράγοντα για την αύξηση της αξονικής δύναμης του κοχλία. Εξαιρεση αποτελεί η σύνδεση με πάχος διατομής 8mm, όπου μετά τα 100kN, η αξονική δύναμη του κοχλία σχετικά μειώνεται. Επισημαίνεται ότι η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία, έχει άμεση συσχέτιση με την ισορροπία του συστήματος κοχλία και πέλματος, το οποίο πρέπει να ισορροπεί κατά την εφαρμογή της εξωτερικής φόρτισης.



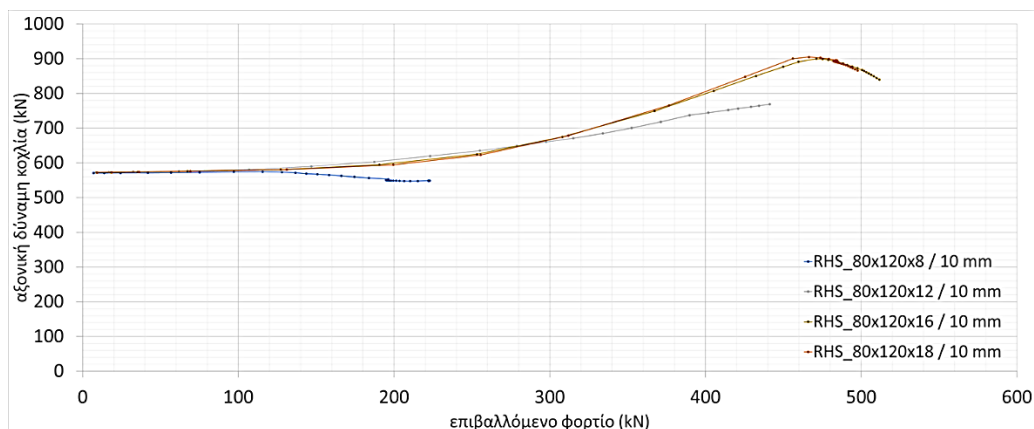
Σχήμα 6-118: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 4mm



Σχήμα 6-119: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 6mm

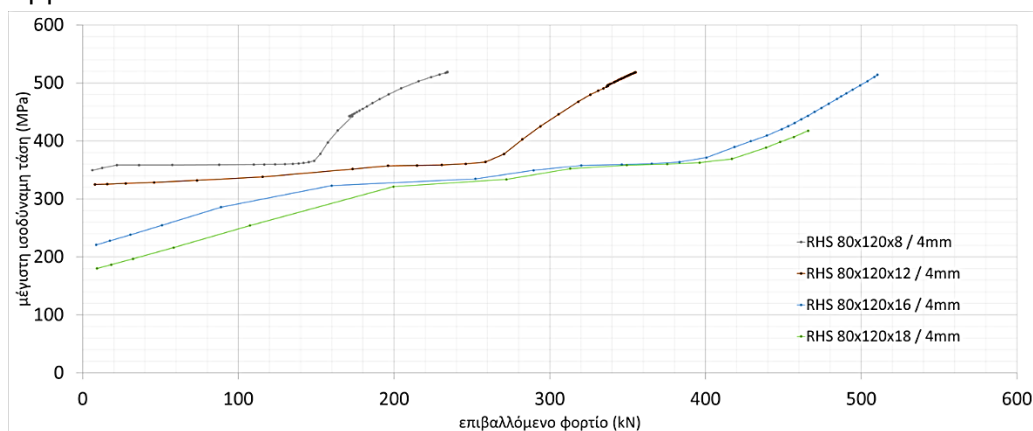


Σχήμα 6-120: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 8mm

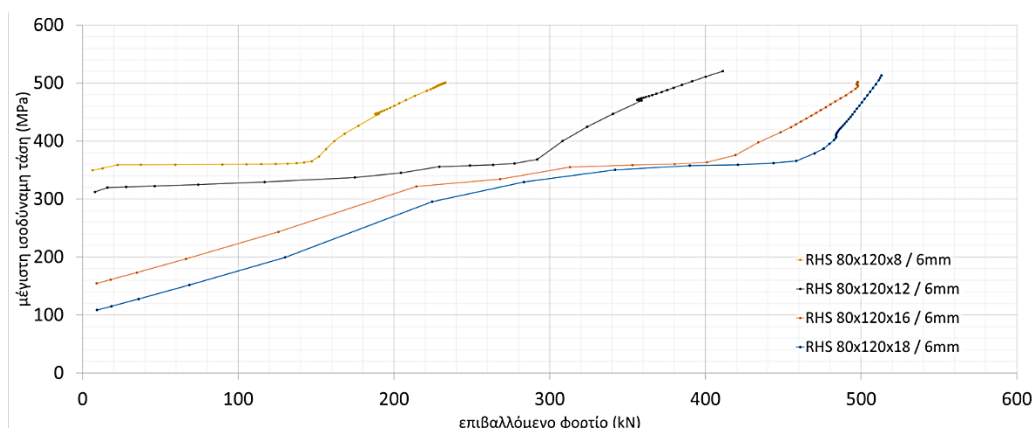


Σχήμα 6-121: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 10mm

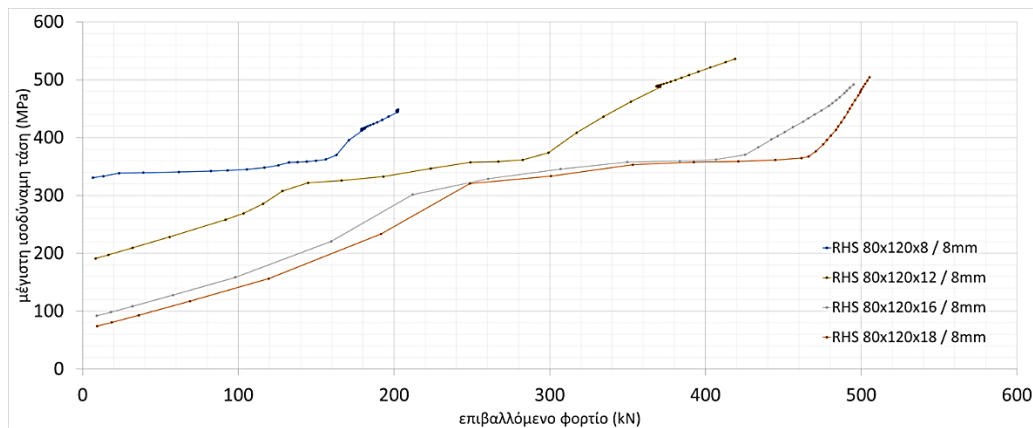
Όσον αφορά τη μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση, συγκεκριμένα στη συναρμογή του κελύφους (σχήματα 6-122 έως 6-125), προκύπτει ότι για αυξανόμενο πάχος διατομής με παρουσία ενίσχυσης περί τον κοχλία, οι αρχικές τάσεις που αναπτύσσονται στη συναρμογή, κατά τη στιγμή της προέντασης, είναι σχετικά μικρότερες λόγω της αυξημένης δυσκαμψίας της διατομής που προκύπτει. Η παρουσία της ενίσχυσης μειώνει σημαντικά τις αρχικές αναπτυσσόμενες τάσεις στη συναρμογή του κελύφους. Εφόσον υπάρχει η ενίσχυση κατά την εφαρμογή της προέντασης, η ανακατανομή των τάσεων γίνεται και μέσω της ενίσχυσης, με αποτέλεσμα να αποσυμπιέζονται τα τοιχώματα της διατομής. Όμως, κατά την πλήρη εφαρμογή της φόρτισης, η αστοχία θα επέλθει στη συναρμογή του κελύφους, όπου βρίσκεται η συγκόλληση, αφού μέσω της συναρμογής, καλείται να μεταβιβαστεί το εξωτερικώς επιβαλλόμενο φορτίο. Η αύξηση του πάχους της διατομής αυξάνει τη δυσκαμψία και προσδίδει ομαλότερη κατανομή των τάσεων στην περιοχή της συναρμογής εντείνοντάς την λιγότερο. Ειδικότερα, κατά την αύξηση της εξωτερικής φόρτισης, οι τάσεις αυξάνονται γραμμικά, ωστόσο αρχίζει το υλικό να διαρρέει τοπικά ακολουθώντας τον καταστατικό νόμο του υλικού. Επισημαίνεται πως η συγκόλληση δεν έχει προσομοιωθεί ως θερμομηχανικό πρόβλημα λόγω της πολυπλοκότητας της προσομοίωσης της συγκόλλησης και του επερχόμενου υπολογιστικού κόστους. Λόγω της φύσης της συγκόλλησης, θα έπρεπε να υπάρχουν αρχικές παραμένουσες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης [19]. Οι αρχικές παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή σε κόπωση, που είναι καθοριστικός παράγοντας σε αστοχίες ανεμογεννητριών.



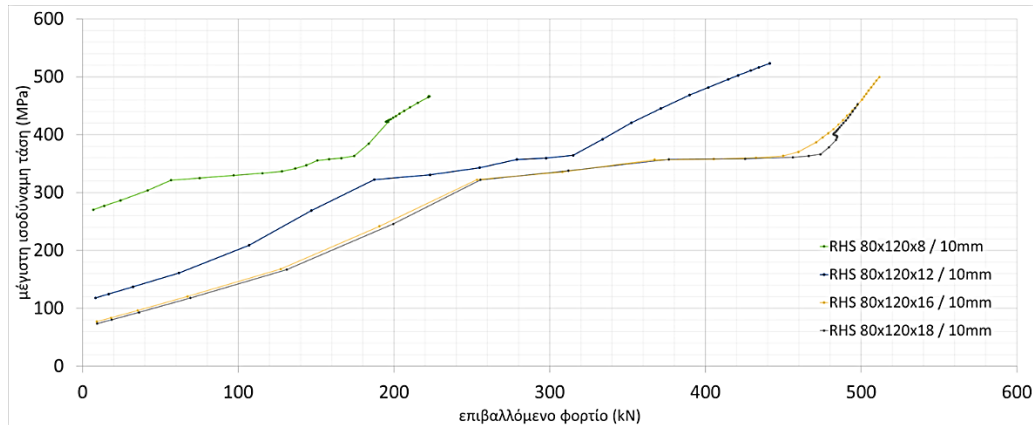
Σχήμα 6-122: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 4mm



Σχήμα 6-123: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 6mm



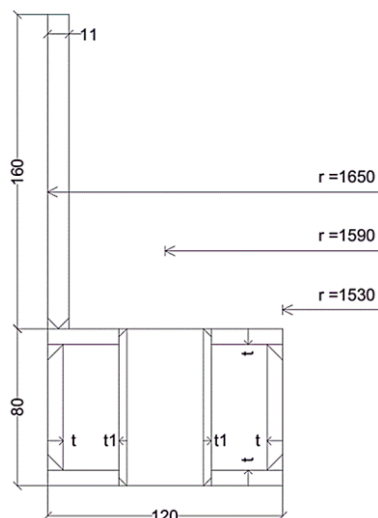
Σχήμα 6-124: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 8mm



Σχήμα 6-125: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120 με πάχη 8mm, 12mm, 16mm και 18mm με ενίσχυση 10mm

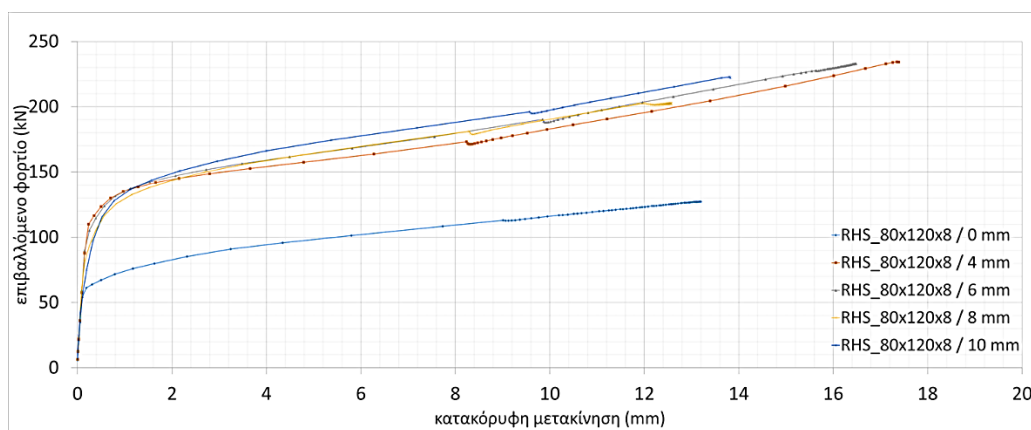
## 6.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΧΟΥΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Τα αποτελέσματα των διατομών που συγκρίνονται έχουν αναλυθεί ξεχωριστά για την κάθε σύνδεση στην παράγραφο 6.2. Σε αυτήν την παράγραφο, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των κοίλων ορθογωνικών διατομών για διαφορετικό πάχος ενίσχυσης περί τον κοχλία. Για λόγους πληρότητας συγκρίνεται και η αντίστοιχη διατομή χωρίς ενίσχυση. Τα αποτελέσματα που αναλύονται για τη μεταξύ τους σύγκριση είναι ο δρόμος ισορροπίας, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση της συναρμογής του κελύφους. Παρουσιάζονται, επιπλέον, στο σχήμα 6-126, οι βασικές διαστάσεις της σύνδεσης με μεταβλητή την εξεταζόμενη παράμετρο πάχους ενίσχυσης  $t_i$  περί τον κοχλία για διατομή σταθερού πάχους  $t$ .



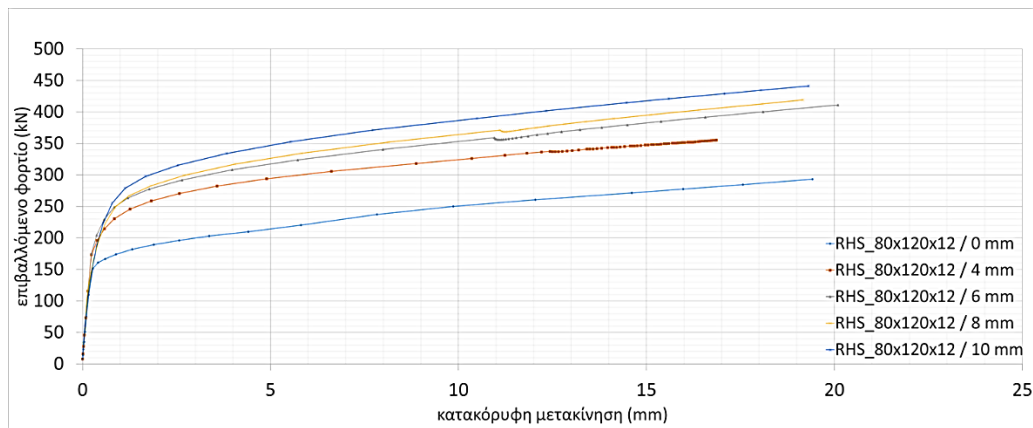
Σχήμα 6-126: Τομή σύνδεσης RHS 80x120 με μεταβλητή το πάχος ενίσχυσης  $t_1$  για διατομή σταθερού πάχους  $t$

Όσον αφορά τους δρόμους ισορροπίας (σχήματα 6-127 έως 6-130), μπορεί να παρατηρηθεί πως η παρουσία της ενίσχυσης συμβάλλει καθοριστικά στην αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας της σύνδεσης. Η αύξηση του πάχους της ενίσχυσης περί τον κοχλία αυξάνει τη δυσκαμψία της σύνδεσης περαιτέρω, συμβάλλοντας, παράλληλα, στην αύξηση της αντοχής της. Η αύξηση της αντοχής που προσδίδεται, αν και με μικρή συνεισφορά σε αντοχή, εξασφαλίζει ικανοποιητική μεταλυγισμική αντοχή. Από την άλλη, ενώ με την αύξηση του πάχους της ενίσχυσης η αντοχή της σύνδεσης αυξάνεται, παρατηρείται σχετική μείωση της αρχικής δυσκαμψίας, παρόλο που, τελικώς, η αύξηση του πάχους προσδίδει περισσότερη αντοχή. Στις περιπτώσεις που εφαρμόζεται πάχος ενίσχυσης 6mm ή 8mm περί τον κοχλία, τα αποτελέσματα σχεδόν ταυτίζονται. Εντούτοις, στην περίπτωση της ενδεχόμενης αύξησης της ενίσχυσης περί τον κοχλία και με αντίστοιχη αύξηση του πάχους της διατομής, η αντοχή της σύνδεσης θα καθορίζεται, είτε από τη διαρροή της συναρμογής του κελύφους, είτε από τη διαρροή του κοχλία. Παράλληλα, παρατηρείται πως η σύνδεση θα μπορεί να αξιοποιεί την αντοχή που διαθέτει για μεγαλύτερο διάστημα κατά την παραμόρφωση, λόγω της αυξημένης δυσκαμψίας που προσδίδεται.

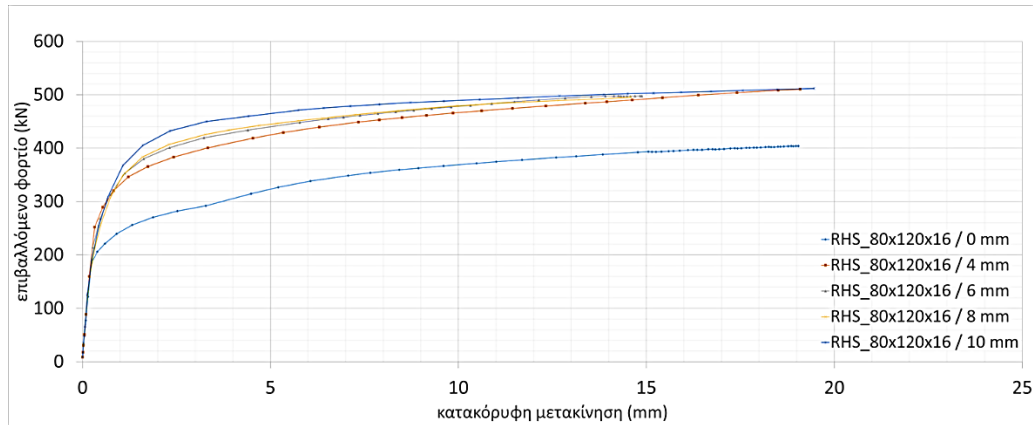


Σχήμα 6-127: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm

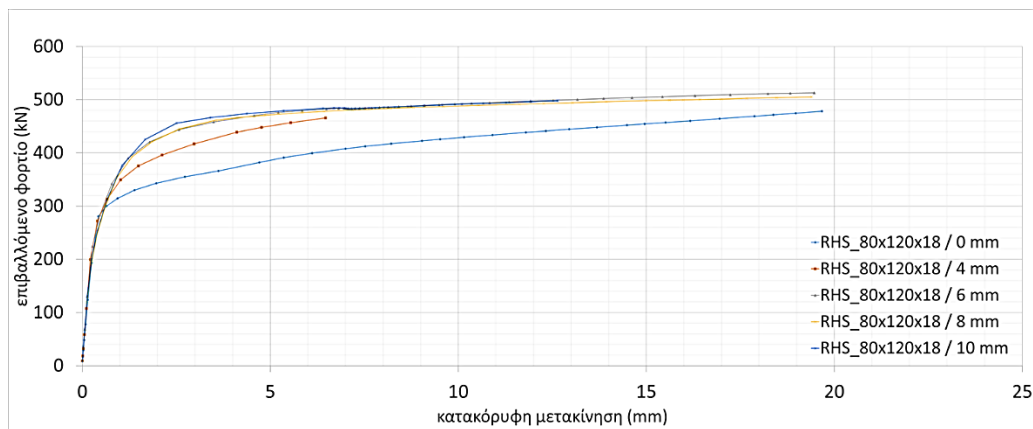




Σχήμα 6-128: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm

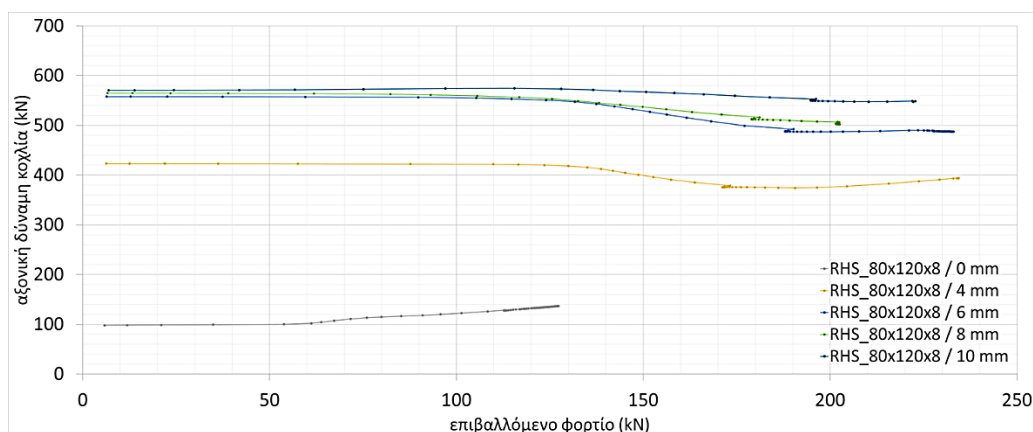


Σχήμα 6-129: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm

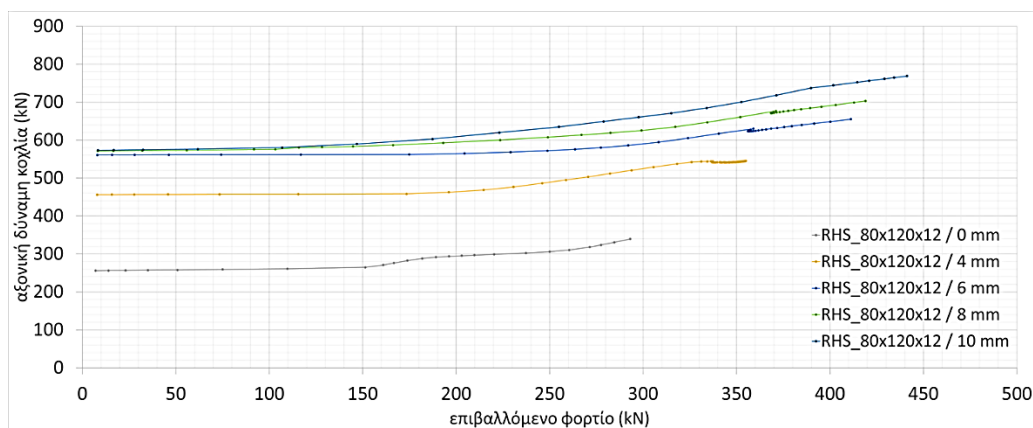


Σχήμα 6-130: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm

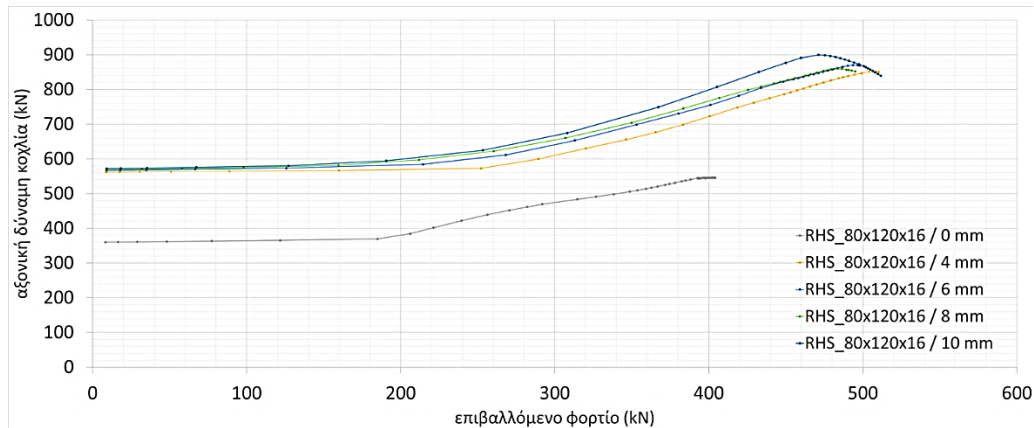
Όσον αφορά την αξονική δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται (σχήματα 6-131 έως 6-134), παρατηρείται πως η αρχική αξονική δύναμη του κοχλία αντιστοιχεί στην προένταση που εισάγεται για κάθε διατομή. Συγκεκριμένα, η αρχική τιμή της αξονικής δύναμης αντιστοιχεί στην προένταση που μπορεί να φέρει η διατομή. Η παρουσία της ενίσχυσης δρα καθοριστικά στην αύξηση της προέντασης. Κατά την επιβολή της προέντασης, οι τροχιές των τάσεων ακολουθούν αντίστοιχες τροχιές με την ελάχιστη δυνατή ενέργεια, ώστε να υπάρχει ισορροπία εξωτερικών και εσωτερικών εντατικών μεγεθών. Ακόμα, όταν αυξάνεται το πάχος της ενίσχυσης, η σύνδεση γύρω από τον κοχλία γίνεται πιο δύσκαμπτη. Έτσι, η διατομή εντείνεται λιγότερο έχοντας περιθώριο για περισσότερη εφαρμογή προέντασης, εφόσον προβλέπεται και είναι επιθυμητό. Κατά την εφαρμογή του επιβαλλόμενου φορτίου, για αυξανόμενο πάχος ενίσχυσης, η αξονική δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται διατηρείται σταθερή περί τα 100kN. Μετά τα 100kN, υπάρχει σχετική αύξηση της αξονικής δύναμης. Για μεγαλύτερα πάχη διατομών, η αύξηση του πάχους ενίσχυσης συμβάλλει σε μικρότερη αύξηση της αξονικής δύναμης του κοχλία, τείνοντας, τελικώς, να ταυτίζονται μεταξύ τους. Εξάιρεση αποτελεί η περίπτωση της σύνδεσης με πάχος διατομής 8mm χωρίς και με ενίσχυση περί τον κοχλία για αυξανόμενο πάχος και μετά το πέρας επιβολής της εξωτερικής φόρτισης στα 100kN, κατά την οποία η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία ακολουθεί σχετική μείωση. Επισημαίνεται ότι, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία έχει άμεση συσχέτιση με την ισορροπία του συστήματος κοχλία και πέλματος, το οποίο πρέπει να ισορροπεί κατά την εφαρμογή της εξωτερικής φόρτισης.



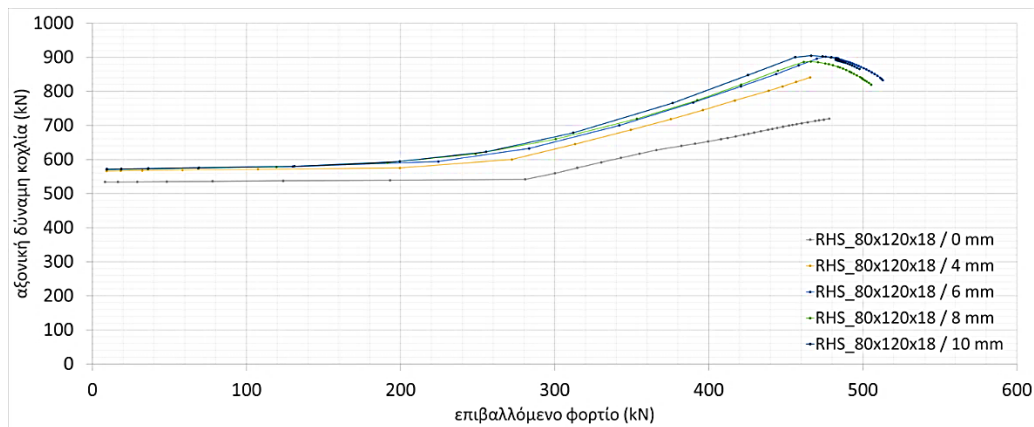
Σχήμα 6-131: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm



Σχήμα 6-132: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm

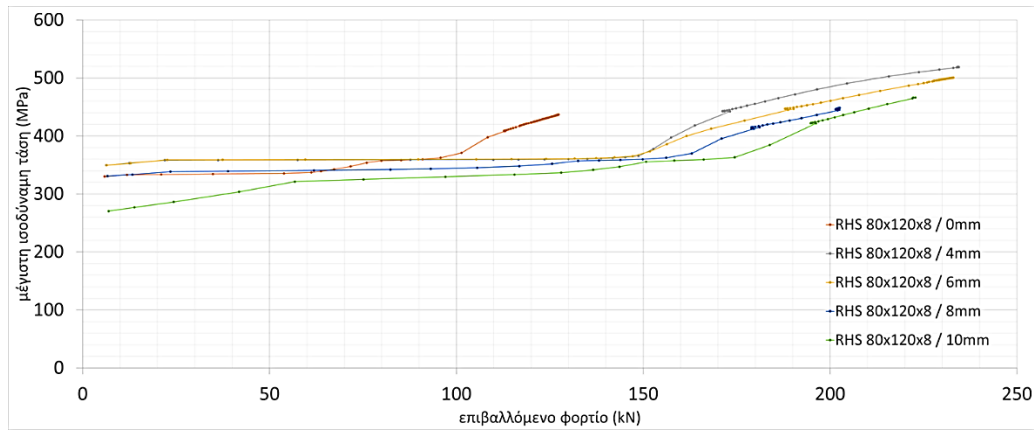


Σχήμα 6-133: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm

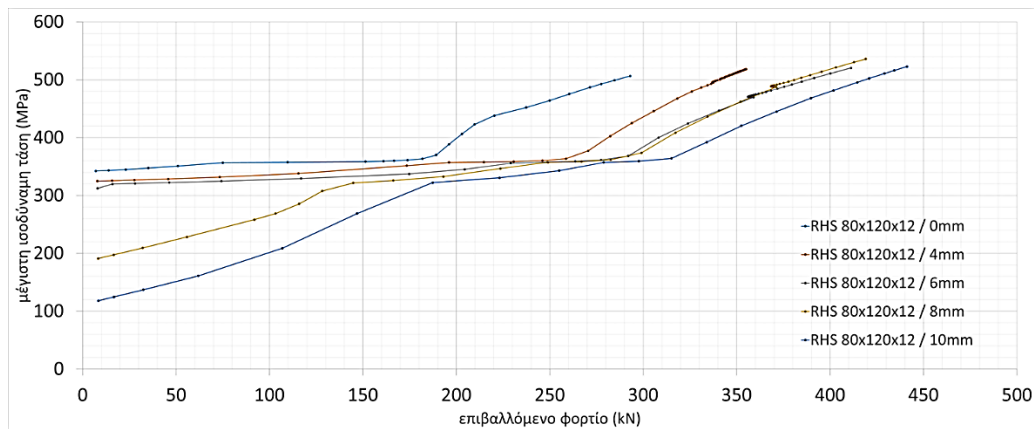


Σχήμα 6-134: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm

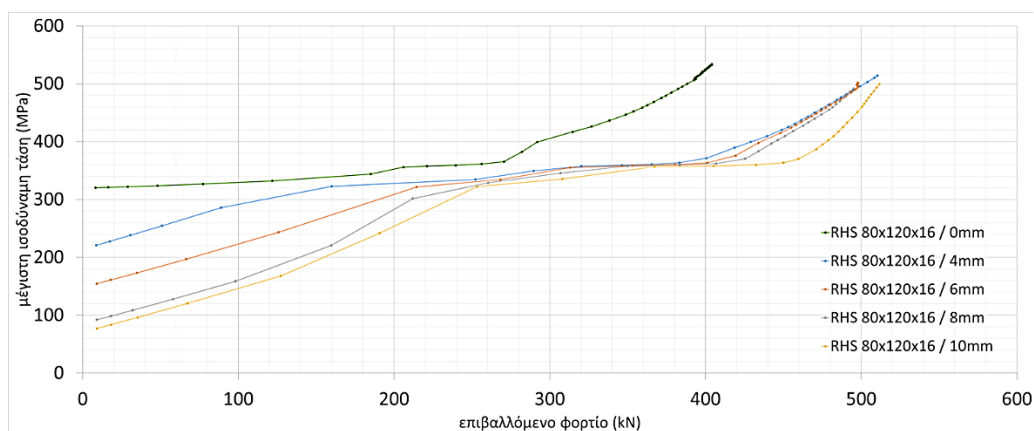
Όσον αφορά τη μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση, συγκεκριμένα, στη συναρμογή του κελύφους (σχήματα 6-135 έως 6-138), προκύπτει ότι για αυξανόμενο πάχος ενίσχυσης περί τον κοχλία, οι αρχικές τάσεις που αναπτύσσονται στη συναρμογή κατά τη στιγμή της προέντασης είναι σχετικά μικρότερες λόγω της αυξημένης δυσκαμψίας της διατομής που προκύπτει. Η παρουσία της ενίσχυσης μειώνει σημαντικά τις αρχικές αναπτυσσόμενες τάσεις στη συναρμογή του κελύφους. Εφόσον υπάρχει ενίσχυση, κατά την εφαρμογή της προέντασης, η ανακατανομή των τάσεων γίνεται και μέσω της ενίσχυσης, με αποτέλεσμα να αποσυμπιέζονται τα τοιχώματα της διατομής. Όμως, κατά την πλήρη εφαρμογή της φόρτισης, η αστοχία θα επέλθει στη συναρμογή του κελύφους όπου βρίσκεται η συγκόλληση, αφού μέσω της συναρμογής, καλείται να μεταβιβαστεί το εξωτερικώς επιβαλλόμενο φορτίο. Ειδικότερα, κατά την αύξηση της εξωτερικής φόρτισης, οι τάσεις αυξάνονται γραμμικά, ωστόσο αρχίζει το υλικό να διαρρέει τοπικά ακολουθώντας τον καταστατικό νόμο του υλικού. Επισημαίνεται πως η συγκόλληση δεν έχει προσομοιωθεί ως θερμομηχανικό πρόβλημα λόγω της πολυπλοκότητας της προσομοίωσης της συγκόλλησης και του επερχόμενου υπολογιστικού κόστους. Λόγω της φύσης της συγκόλλησης, θα έπρεπε να υπάρχουν αρχικές παραμένουσες τάσεις στην περιοχή της συγκόλλησης [19]. Οι αρχικές παραμένουσες τάσεις επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή σε κόπωση, που είναι καθοριστικός παράγοντας σε αστοχίες ανεμογεννητριών.



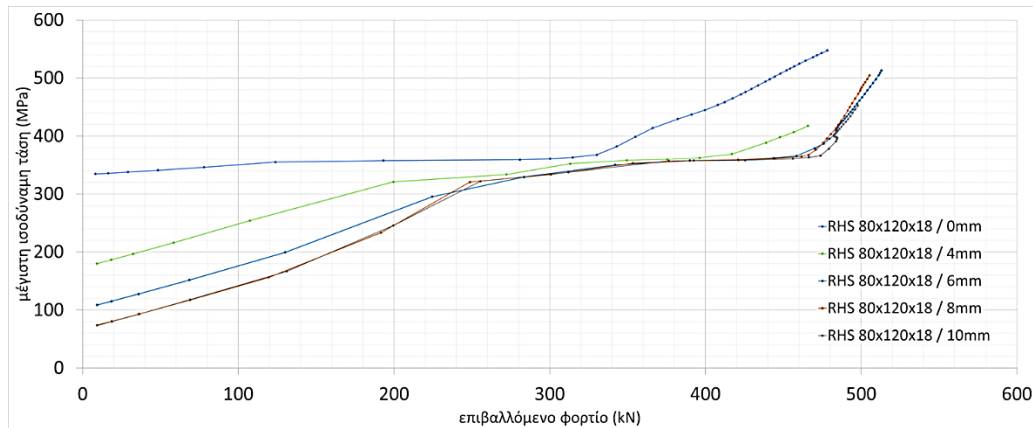
Σχήμα 6-135: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120x8 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm



Σχήμα 6-136: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120x12 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm



Σχήμα 6-137: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm

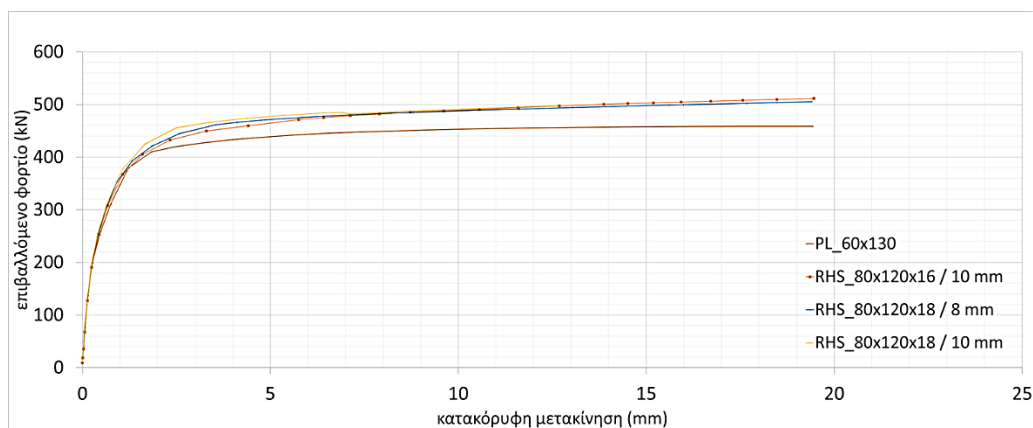


Σχήμα 6-138: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120x18 χωρίς ενίσχυση και με πάχη ενίσχυσης 4mm, 6mm, 8mm και 10mm

## 6.6 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΒΡΑΧΕΟΣ L

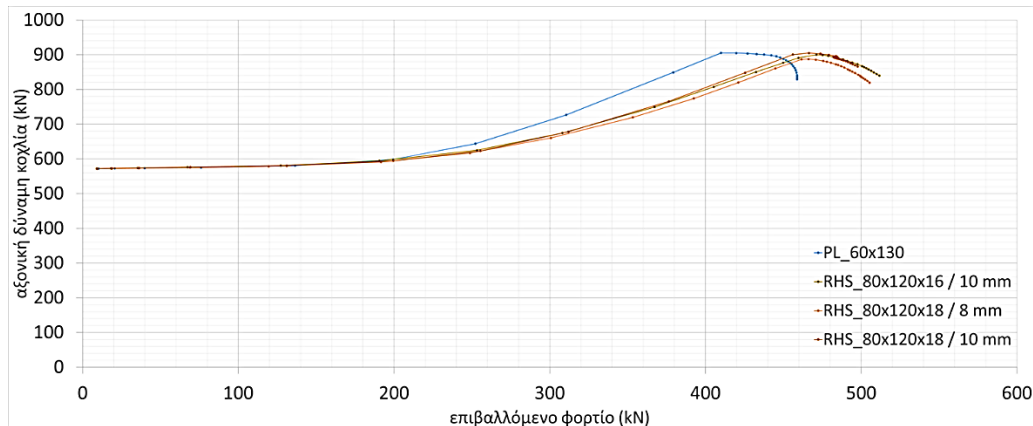
Τα αποτελέσματα των διατομών που συγκρίνονται έχουν αναλυθεί ξεχωριστά για τη σύνδεση με διατομή PL 60x130 στην παράγραφο 4.2 και για τις κοίλες ορθογωνικές διατομές RHS 80x120x16 με πάχος ενίσχυσης 10mm, RHS 80x120x18 με πάχος ενίσχυσης 8mm και 10mm αντίστοιχα, στην παράγραφο 6.2. Τα αποτελέσματα που περιγράφονται είναι ο δρόμος ισορροπίας, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους.

Όσον αφορά τους δρόμους ισορροπίας (σχήμα 6-139), μπορεί να παρατηρηθεί πως η αρχική δυσκαμψία των διατομών ταυτίζεται για μετακίνηση περί τα 2mm, με τη διατομή PL 60x130 να διαρρέει πρώτη έχοντας αντοχή 420kN, ενώ οι υπόλοιπες διατομές διαρρέουν ακολούθως, έχοντας, συγκριτικά, μεγαλύτερη αντοχή. Λόγω της συγκεκριμένης γεωμετρίας και του υλικού τους, οι διατομές παρουσιάζουν μεταλαστικό κλάδο, ο οποίος για τη διατομή PL 60x130 προσδίδει σχετικά μικρότερη αντοχή, έναντι των κοίλων ορθογωνικών διατομών, οι οποίες παρουσιάζουν σταθερή αύξηση της αντοχής μετά τη διαρροή. Παράλληλα, για μετακίνηση από 7 - 20mm, οι δρόμοι ισορροπίας των κοίλων ορθογωνικών διατομών ταυτίζονται. Για μετακίνηση από 2 - 7mm, οι κοίλες ορθογωνικές διατομές παρουσιάζουν διαφορετική δυσκαμψία, η οποία οφείλεται στην επιρροή του πάχους της διατομής και του πάχους της ενίσχυσης περί τον κοχλία.



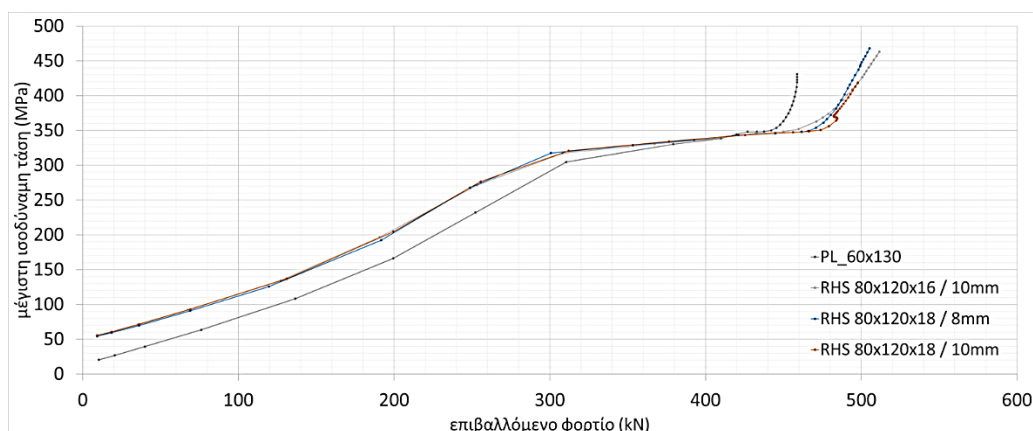
Σχήμα 6-139: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές PL 60x130, RHS 80x120x16 με πάχος ενίσχυσης 10mm, RHS 80x120x18 με πάχος ενίσχυσης 8mm και 10mm

Όσον αφορά την αξονική δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται (σχήμα 6-140), παρατηρείται πως η αρχική αξονική δύναμη του κοχλία αντιστοιχεί στην προένταση που εισάγεται για κάθε διατομή. Συγκεκριμένα, η αρχική τιμή της αξονικής δύναμης αντιστοιχεί στην προένταση που μπορεί να φέρει η διατομή. Η αξονική δύναμη του κοχλία που αναπτύσσει η σύνδεση PL 60x130 φθάνει στην προβλεπόμενη αξονική δύναμη περί τα 910kN για επιβαλλόμενο φορτίο 420kN. Ομοίως, και οι κοίλες ορθογωνικές διατομές παρουσιάζουν αξονική δύναμη περί τα 910kN για επιβαλλόμενο φορτίο περί τα 450kN. Η καμπύλη της αξονικής δύναμης του κοχλία ταυτίζεται για τις συνδέσεις μέχρι τα 200kN. Ο κοχλίας της σύνδεσης PL 60x130 αυξάνεται με γρηγορότερο ρυθμό στην προβλεπόμενη αξονική δύναμη, έναντι των κοίλων ορθογωνικών διατομών. Το γεγονός αυτό, δηλώνει πως οι τάσεις αναπτύσσονται πιο γρήγορα στον κοχλία της σύνδεσης PL 60x130 επιταχύνοντας τη διαρροή και την ενδεχόμενη αστοχία του.



Σχήμα 6-140: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές PL 60x130, RHS 80x120x16 με πάχος ενίσχυσης 10mm, RHS 80x120x18 με πάχος ενίσχυσης 8mm και 10mm

Όσον αφορά τη μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση, συγκεκριμένα στη συναρμογή του κελύφους (σχήμα 6-141), προκύπτει ότι οι αρχικές τάσεις που αναπτύσσονται στη συναρμογή κατά τη στιγμή της προέντασης είναι σχετικά αμελητέες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αυξημένη δυσκαμψία που υπάρχει και της επακόλουθης ανακατανομής που συμβαίνει στην περιοχή γύρω από τον κοχλία.



Σχήμα 6-141: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές PL 60x130, RHS 80x120x16 με πάχος ενίσχυσης 10mm, RHS 80x120x18 με πάχος ενίσχυσης 8mm και 10mm

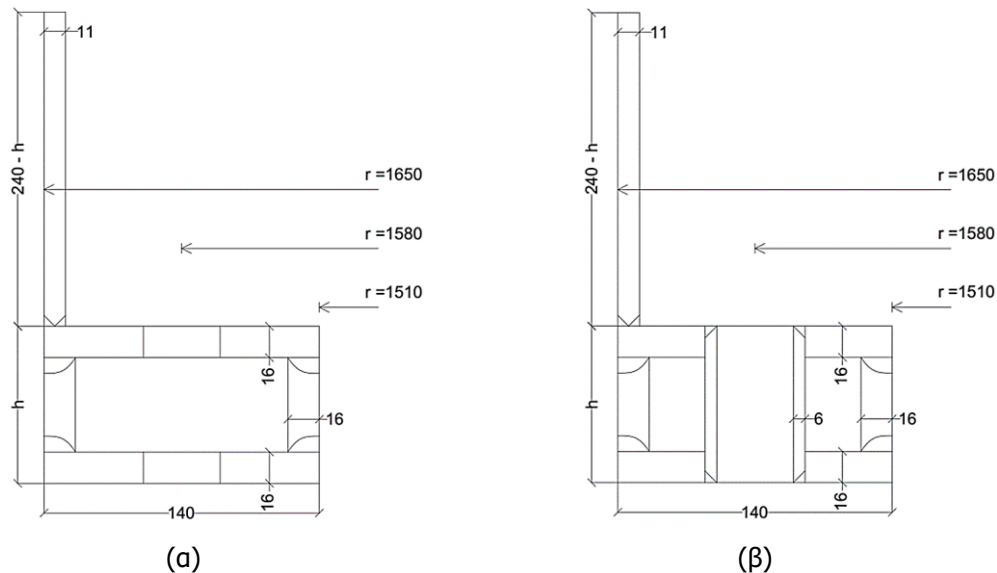
Όμως, κατά την πλήρη εφαρμογή της φόρτισης, η αστοχία θα επέλθει στη συναρμογή του κελύφους όπου βρίσκεται η συγκόλληση, αφού μέσω της εφαρμογής καλείται να μεταβιβαστεί το εξωτερικώς επιβαλλόμενο φορτίο. Ειδικότερα, κατά την αύξηση της εξωτερικής φόρτισης, οι τάσεις αυξάνονται γραμμικά ωστόσο



αρχίσει το υλικό να διαρρέει τοπικά ακολουθώντας τον καταστατικό νόμο του υλικού. Οι τάσεις ταυτίζονται για μεγαλύτερο επιβαλλόμενο φορτίο, ωστόσο φθάσουν τη διαρροή. Ενώ, οι αρχικές τάσεις της διατομής PL 60x130 είναι σχετικά μικρότερες έναντι των κοίλων διατομών.

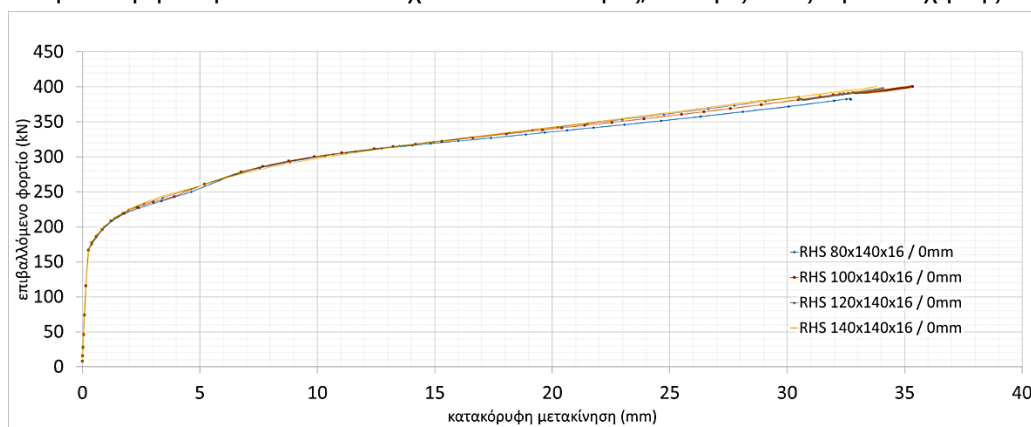
## 6.7 ΕΠΙΡΡΟΗ ΥΨΟΥΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Για την εύρεση της επιρροής του ύψους της σύνδεσης, χρησιμοποιείται η διατομή RHS 80x140x16 χωρίς και με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλία, στην οποία το ύψος αυξάνεται διαδοχικά ανά 20mm μέχρι ύψος διατομής 140mm. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στους δρόμους ισορροπίας, στην αξονική δύναμη κοχλία και στη μέγιστη ισοδύναμη τάση της συγκόλλησης. Παρουσιάζονται, επιπλέον, στα σχήματα 6-142(α) και 6-142(β), οι διαστάσεις της σύνδεσης με μεταβλητή την παράμετρο ύψους  $h$ .

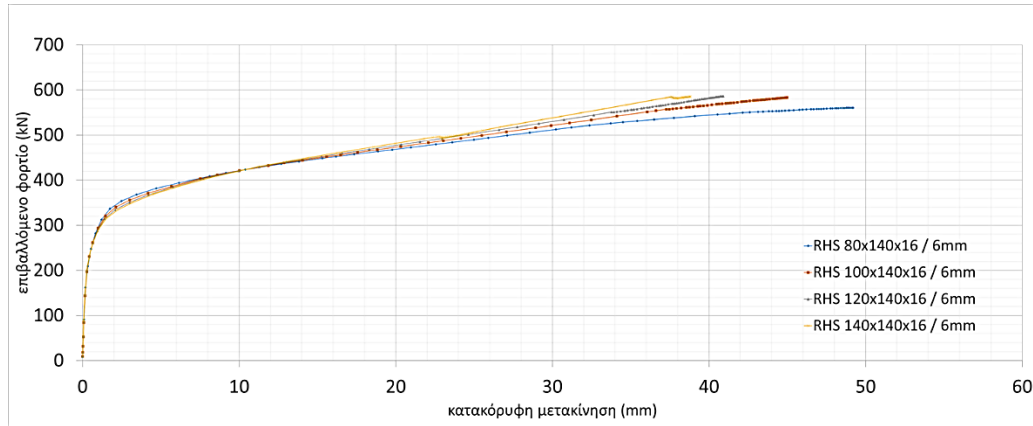


Σχήμα 6-142: Τομή σύνδεσης RHS 80x140x16 με μεταβλητή ύψος  $h$ , (α) χωρίς ενίσχυση, (β) με ενίσχυση 6mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-143 και 6-144, για αύξηση του ύψους της διατομής, οι δρόμοι ισορροπίας δείχνουν να ταυτίζονται. Υπάρχει μια ελάχιστη μείωση στη δυσκαμψία καθώς διαρρέει η σύνδεση, όμως για μεγαλύτερη μετακίνηση, αυξάνεται αντίστοιχα η αντοχή της. Παρόλο που αυξάνεται το ύψος της διατομής, δε φαίνεται να μεταβάλλεται η περιοχή της αρχικής διαρροής και η ενδεχόμενη αστοχίας της, η οποία συμβαίνει στη διατομή ανάμεσα από τον κοχλία και το κέλυφος, καθορίζοντας την αντοχή της σύνδεσης.

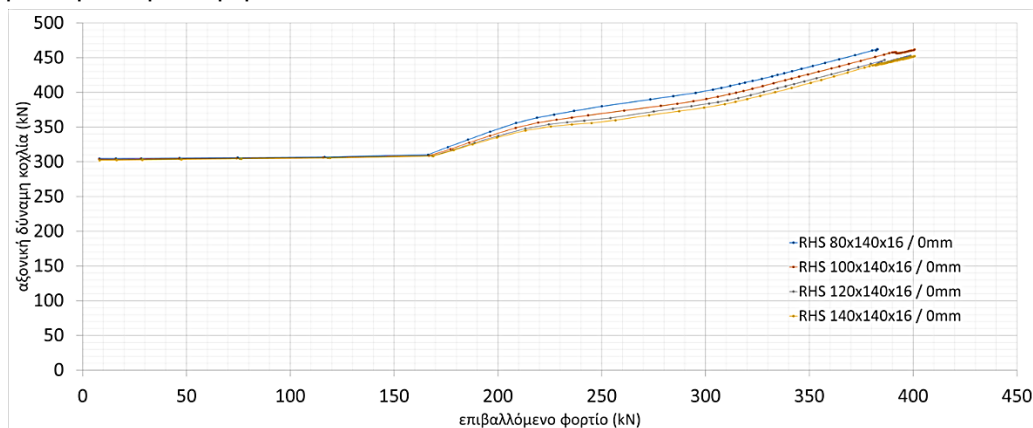


Σχήμα 6-143: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x140x16, RHS 100x140x16, RHS 120x140x16 και RHS 140x140x16 χωρίς ενίσχυση

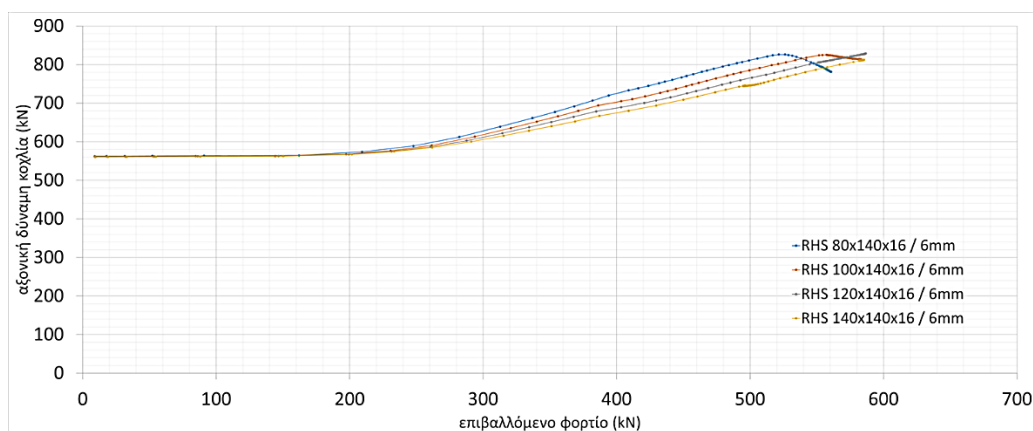


Σχήμα 6-144: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x140x16, RHS 100x140x16, RHS 120x140x16 και RHS 140x140x16 με ενίσχυση 6mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-145 και 6-146, για αύξηση του ύψους της διατομής, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία είναι ίση στις εξεταζόμενες περιπτώσεις για μικρό επιβαλλόμενο φορτίο. Εντούτοις, οι διατομές για αυξανόμενο ύψος παρουσιάζουν αύξηση της αξονικής δύναμης του κοχλία για μεγαλύτερο επιβαλλόμενο φορτίο.

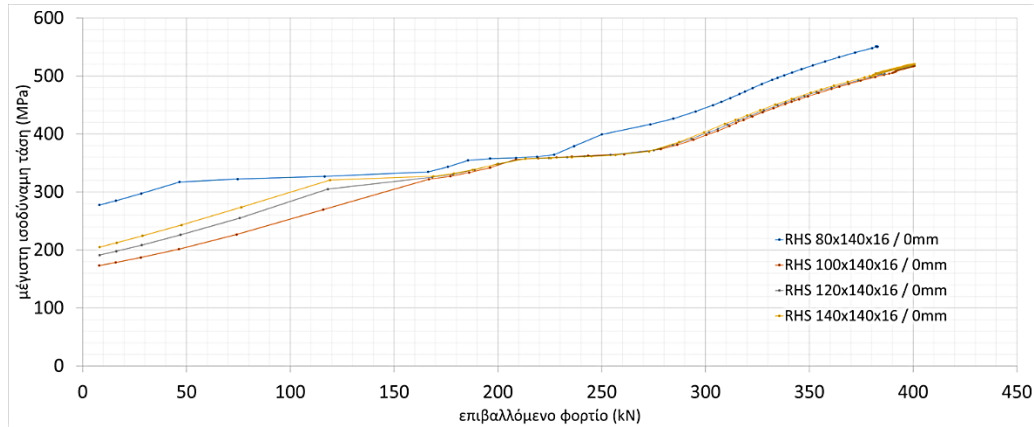


Σχήμα 6-145: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x140x16, RHS 100x140x16, RHS 120x140x16 και RHS 140x140x16 χωρίς ενίσχυση

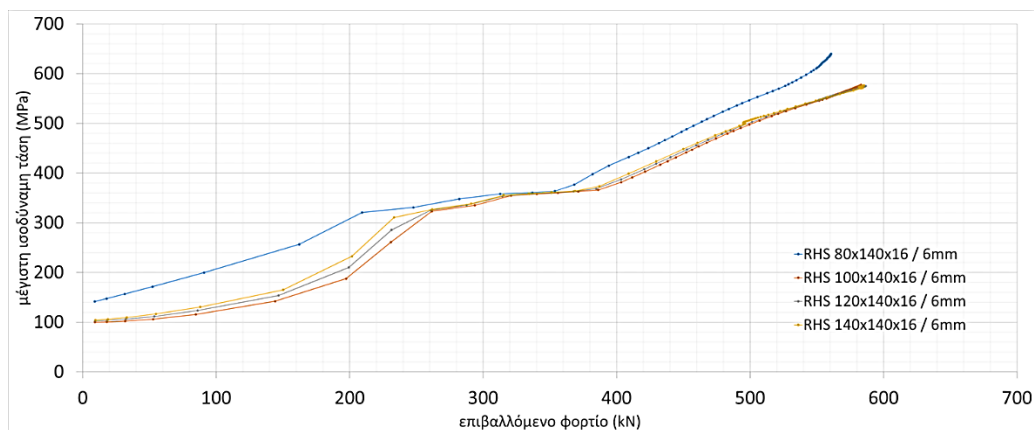


Σχήμα 6-146: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x140x16, RHS 100x140x16, RHS 120x140x16 και RHS 140x140x16 με ενίσχυση 6mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-147 και 6-148, για αύξηση του ύψους της διατομής, η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση, ουσιαστικά, ταυτίζεται στα προσομοιώματα χωρίς και με ενίσχυση για επιβαλλόμενο φορτίο μετά τα 250kN. Για αυξανόμενο ύψος διατομής και για μικρότερο επιβαλλόμενο φορτίο, οι αρχικές τάσεις είναι σχετικά μεγαλύτερες, καθώς αυξάνουν και με γρηγορότερο ρυθμό.



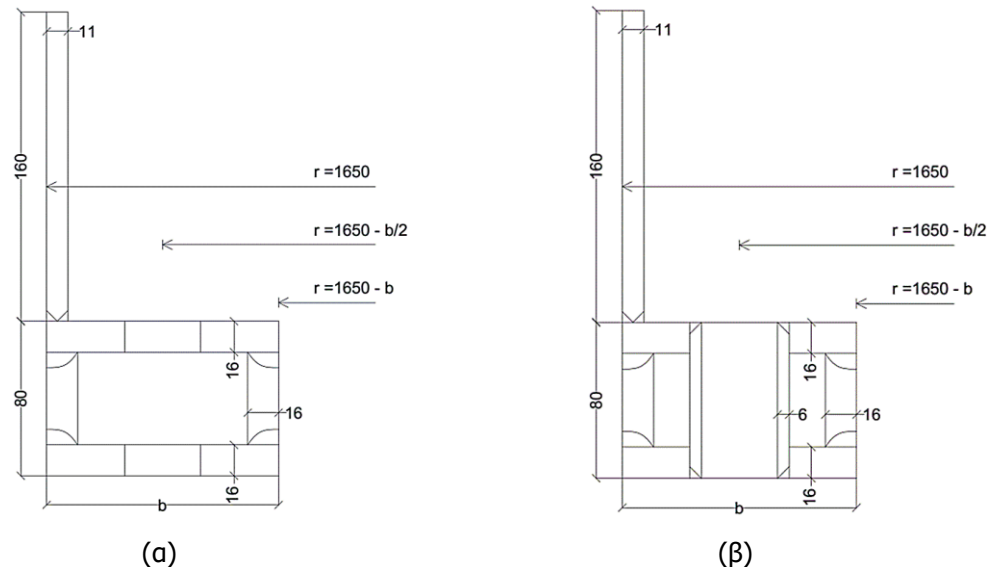
Σχήμα 6-147: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x140x16, RHS 100x140x16, RHS 120x140x16 και RHS 140x140x16 χωρίς ενίσχυση



Σχήμα 6-148: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x140x16, RHS 100x140x16, RHS 120x140x16 και RHS 140x140x16 με ενίσχυση 6mm

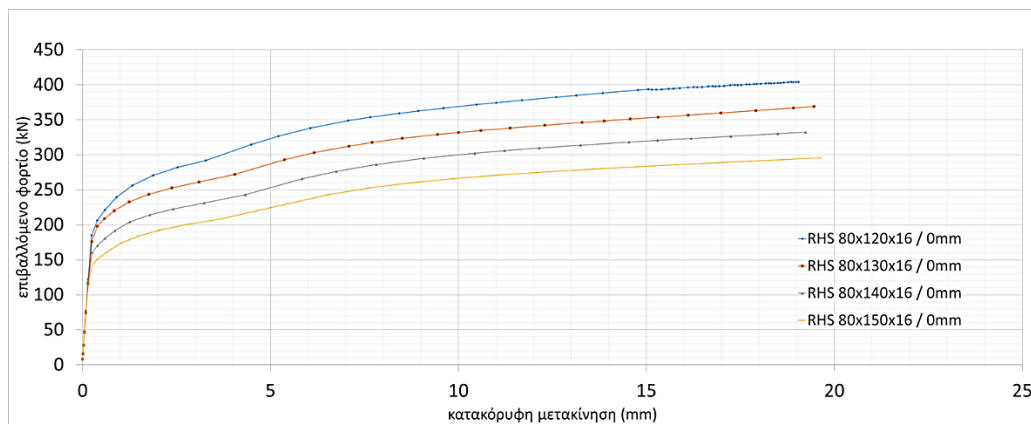
## 6.8 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΛΑΤΟΥΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Για την εύρεση της επιρροής του πλάτους της σύνδεσης, χρησιμοποιείται η διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση και με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλία, όπου αυξάνεται διαδοχικά το πλάτος της ανά 10mm μέχρι πλάτος διατομής 150mm προς το εσωτερικό του πυλώνα. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στους δρόμους ισορροπίας, στην αξονική δύναμη κοχλία και στη μέγιστη ισοδύναμη τάση της συγκόλλησης. Παρουσιάζονται, επιπλέον, στα σχήματα 6-149(a) και 6-149(β), οι βασικές διαστάσεις της σύνδεσης με μεταβλητή την εξεταζόμενη παράμετρο πλάτους  $b$ .

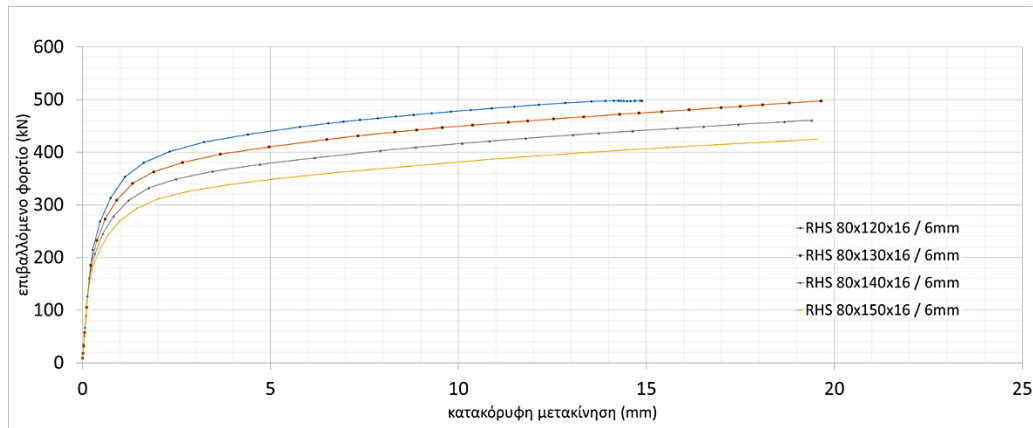


Σχήμα 6-149: Τομή σύνδεσης RHS 80x120x16 με μεταβλητή πλάτος  $b$ , (α) χωρίς ενίσχυση, (β) με ενίσχυση 6mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-150 και 6-151, για αύξηση του πλάτους της διατομής, οι δρόμοι ισορροπίας προκύπτουν με μειωμένη αντοχή. Εφόσον ο κοχλίας τοποθετείται στο μέσον της διατομής, η δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται, αντισταθμίζοντας την εξωτερική φόρτιση, θα είναι ίδια σε κάθε προσομοίωμα. Η αντοχή της σύνδεσης καθορίζεται από τη δυσκαμψία των μελών της. Όταν αυξάνεται το μήκος των οριζώντιων τμημάτων της διατομής, τα τμήματα αυτά γίνονται πιο λυγηρά, αποκτώντας μεγαλύτερη ευκαμψία και προσδίδοντας στη σύνδεση μικρότερη αντοχή.

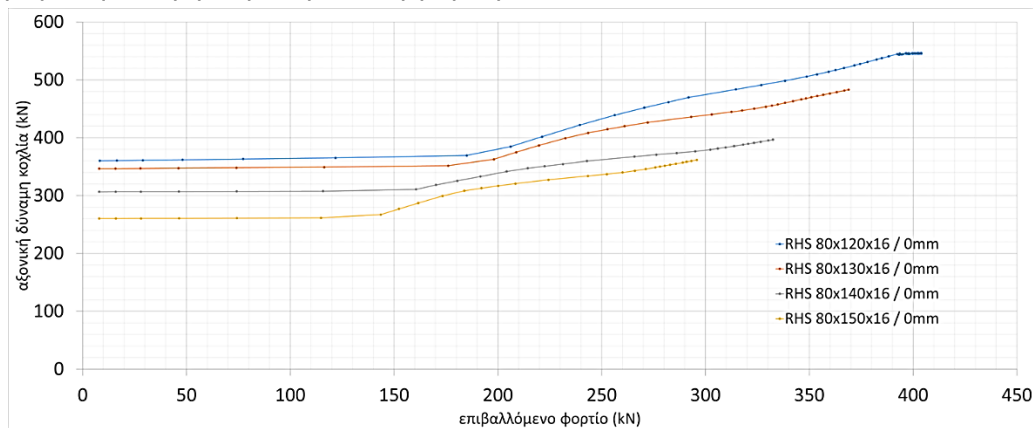


Σχήμα 6-150: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120x16, RHS 80x130x16, RHS 80x140x16 και RHS 80x150x16 χωρίς ενίσχυση

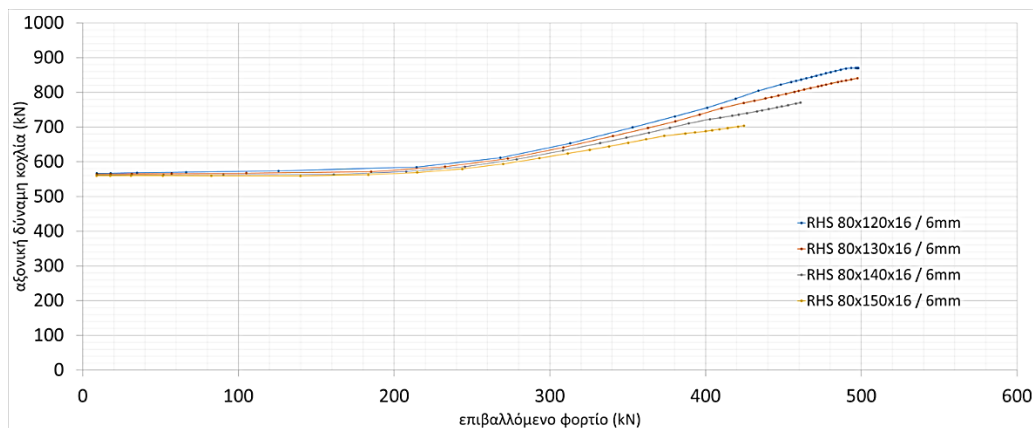


Σχήμα 6-151: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομές RHS 80x120x16, RHS 80x130x16, RHS 80x140x16 και RHS 80x150x16 με ενίσχυση 6mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-152 και 6-153, για αύξηση του πλάτους της διατομής, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία σχετικά μειώνεται. Παράλληλα, η δύναμη προέντασης που μπορούν να φέρουν οι διατομές χωρίς ενίσχυση μειώνεται. Για αύξηση του πλάτους διατομής και για αυξανόμενο επιβαλλόμενο φορτίο, η αξονική δύναμη αυξάνει με πιο αργό ρυθμό.

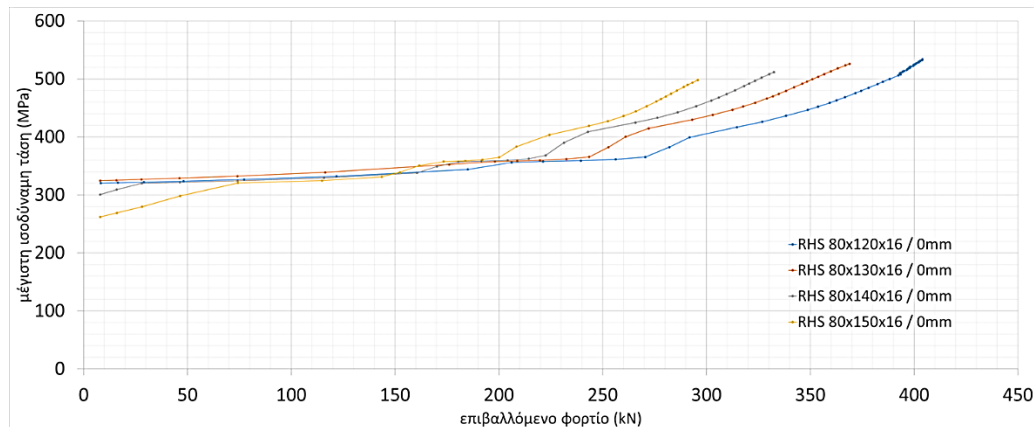


Σχήμα 6-152: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120x16, RHS 80x130x16, RHS 80x140x16 και RHS 80x150x16 χωρίς ενίσχυση

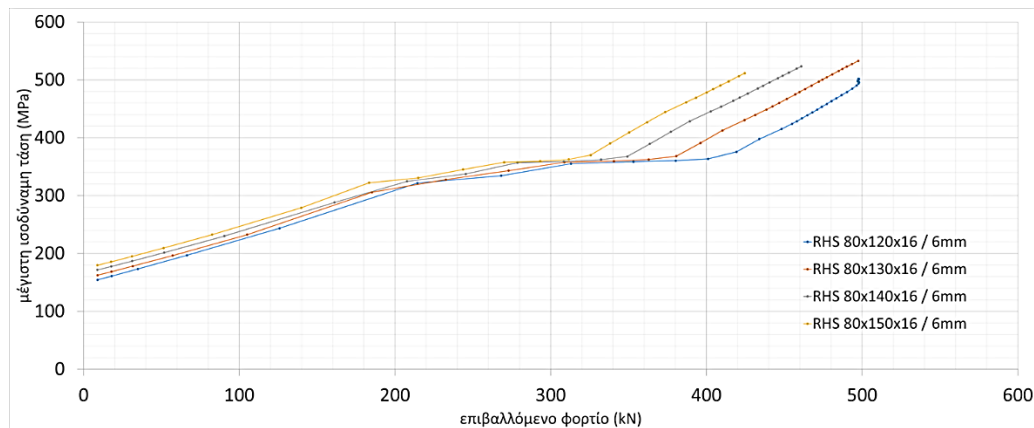


Σχήμα 6-153: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομές RHS 80x120x16, RHS 80x130x16, RHS 80x140x16 και RHS 80x150x16 με ενίσχυση 6mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-154 και 6-155, για αύξηση του πλάτους της διατομής, η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση, ουσιαστικά, ταυτίζεται και στα προσομοιώματα χωρίς ενίσχυση και στα προσομοιώματα με ενίσχυση για μικρότερο επιβαλλόμενο φορτίο. Για αυξανόμενο επιβαλλόμενο φορτίο και για τις διατομές με αυξανόμενο πλάτος διατομής, η συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους με τη διατομή φθάνει πιο γρήγορα σε διαρροή.



Σχήμα 6-154: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120x16, RHS 80x130x16, RHS 80x140x16 και RHS 80x150x16 χωρίς ενίσχυση



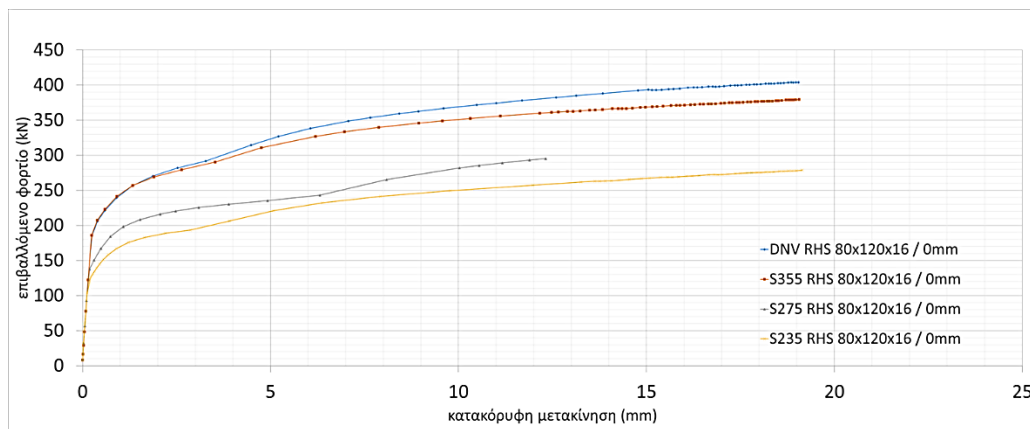
Σχήμα 6-155: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομές RHS 80x120x16, RHS 80x130x16, RHS 80x140x16 και RHS 80x150x16 με ενίσχυση 6mm



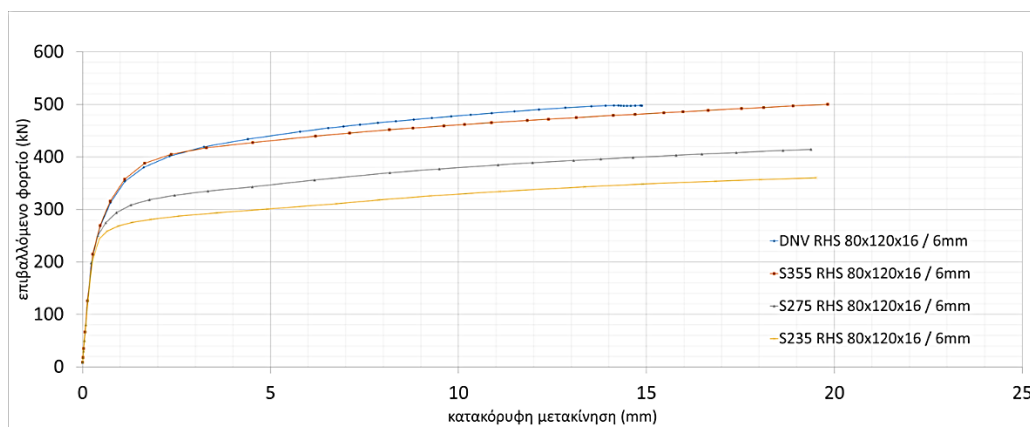
## 6.9 ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΧΑΛΥΒΑ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Για την εύρεση της επιρροής του υλικού χάλυβα της βάσης, χρησιμοποιείται ποιότητα υλικών S355, S275, S235 και υλικό DNV(S355) στη διατομή RHS 80x120x16 χωρίς και με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλία. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στους δρόμους ισορροπίας, στην αξονική δύναμη κοχλία και στη μέγιστη ισοδύναμη τάση της συγκόλλησης. Οι καταστατικοί νόμοι των υλικών που χρησιμοποιούνται είναι οι αντίστοιχοι με της ενότητας 4.6.

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-156 και 6-157, για χρήση καλύτερης ποιότητας χάλυβα, οι δρόμοι ισορροπίας προκύπτουν με αυξημένη δυσκαμψία φθάνοντας σε μεγαλύτερη αντοχή, όπως και του αντίστοιχου υλικού που χρησιμοποιείται. Μπορεί να παρατηρηθεί πως η ποιότητα του υλικού που χρησιμοποιείται έχει καθοριστική σημασία στην αντοχή της διατομής. Ακόμα, οι δρόμοι ισορροπίας του υλικού DNV(S355) και S355 είναι σχετικά κοντά με μεγαλύτερη αντοχή να προσδίδει ο πιο ακριβής καταστατικός νόμος υλικού DNV(S355) έναντι του διγραμμικού S355. Όμοια συμπεριφορά παρουσιάζουν και τα προσομοιώματα με ενίσχυση περί τον κοχλία.

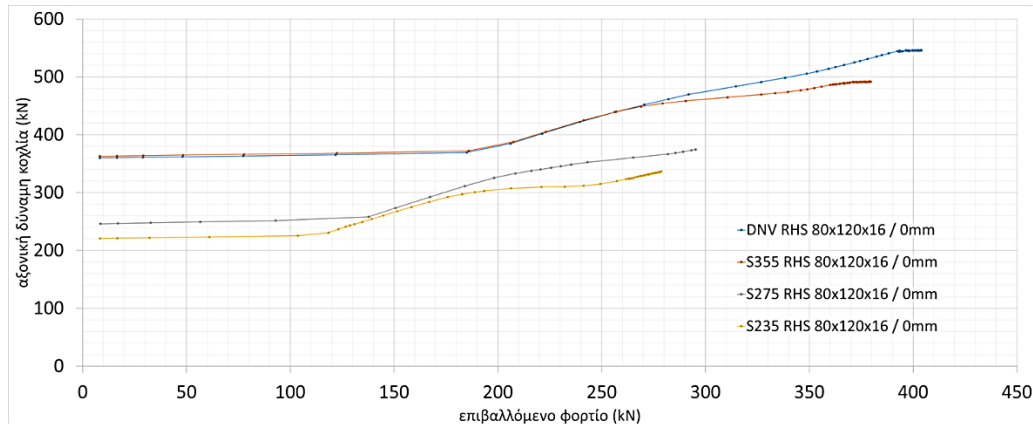


Σχήμα 6-156: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση και χρήση υλικού χάλυβα DNV(S355), S355, S275 και S235

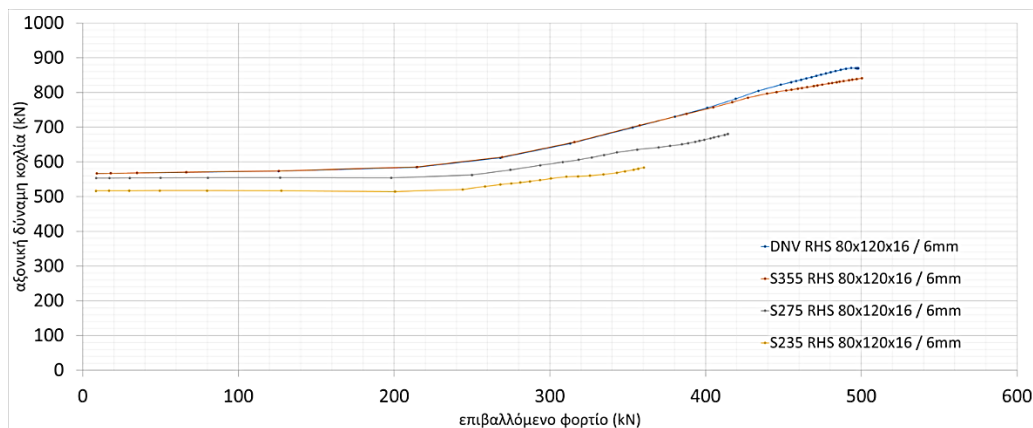


Σχήμα 6-157: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm και χρήση υλικού χάλυβα DNV(S355), S355, S275 και S235

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-158 και 6-159, για χρήση καλύτερης ποιότητας χάλυβα, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία προκύπτει αντιστοίχως μεγαλύτερη και είναι αρχικά σταθερή με τιμή ίση με την αρχική προένταση που εφαρμόζεται στο αντίστοιχο προσομοίωμα. Για επιβαλλόμενο φορτίο μετά τα 200kN, η αξονική δύναμη αυξάνεται σχετικά. Στα προσομοιώματα με υλικά DNV(S355) και S355, η αξονική δύναμη κοχλία ταυτίζεται μεταξύ τους μέχρι και για αυξημένο επιβαλλόμενο φορτίο, με τον κοχλία του προσομοιώματος με υλικό DNV(S355) να παρουσιάζει, παράλληλα, σχετική αύξηση.

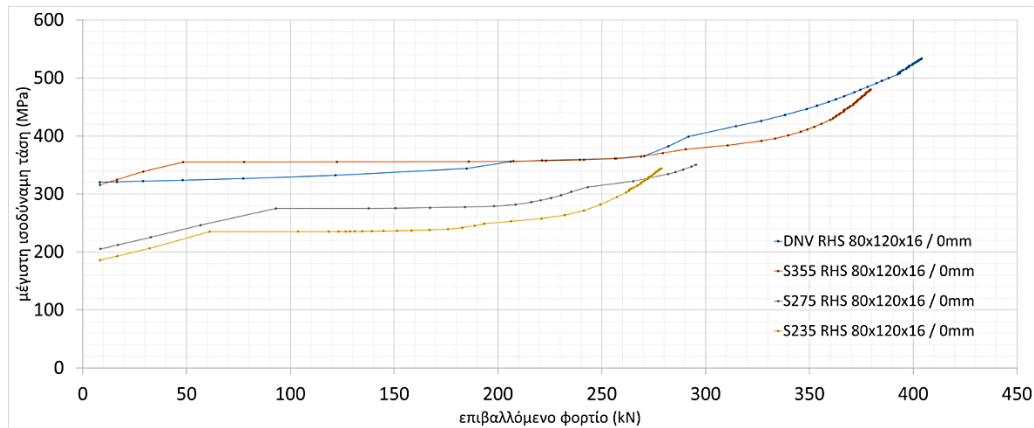


Σχήμα 6-158: Αξονική δύναμη κοχλία για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση και χρήση υλικού χάλυβα DNV(S355), S355, S275 και S235

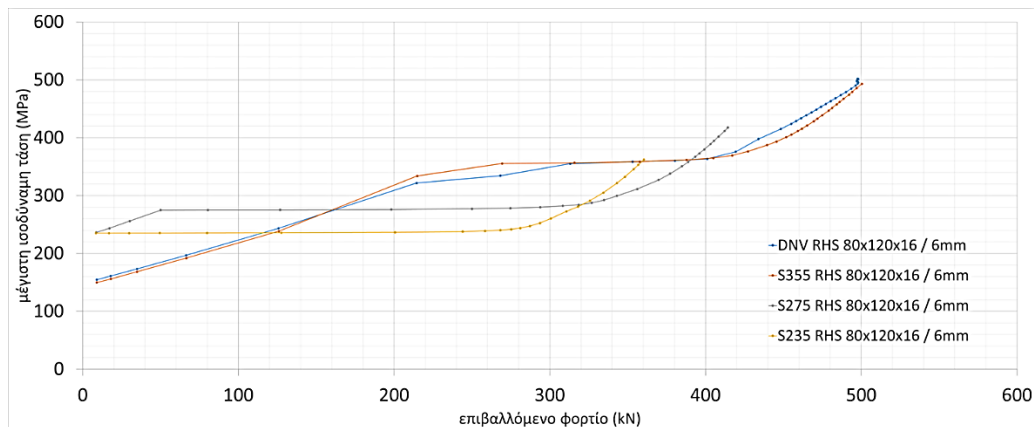


Σχήμα 6-159: Αξονική δύναμη κοχλία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm και χρήση υλικού χάλυβα DNV(S355), S355, S275 και S235

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-160 και 6-161, για χρήση καλύτερης ποιότητας χάλυβα, η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση είναι αρχικά αυξημένη κοντά στη διαρροή, ενώ για αυξανόμενο επιβαλλόμενο φορτίο η συγκόλληση διαρρέει. Ομοίως, στα προσομοιώματα με ενίσχυση και σε εκείνα με υλικά DNV(S355) και S355, οι αρχικές τάσεις που αναπτύσσονται στη συγκόλληση προκύπτουν μικρότερες λόγω τις αυξημένης αντοχής που διαθέτουν.



Σχήμα 6-160: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση και χρήση υλικού χάλυβα DNV(S355), S355, S275 και S235

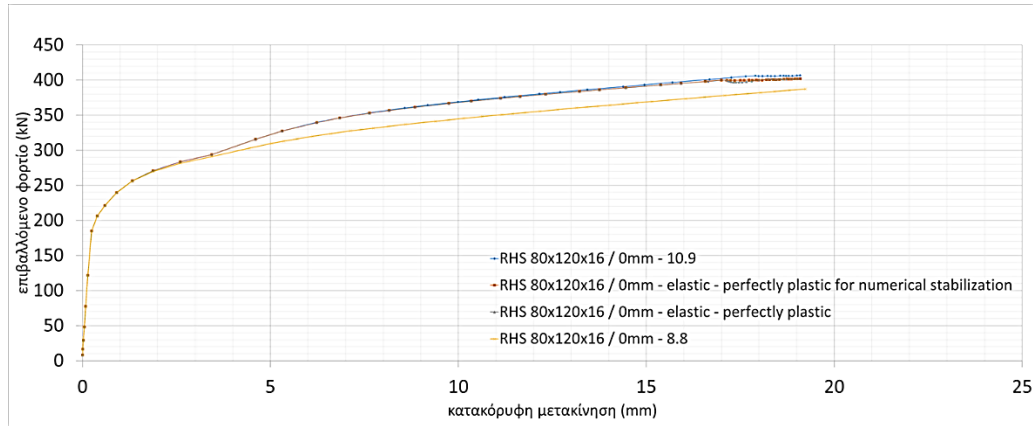


Σχήμα 6-161: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm και χρήση υλικού χάλυβα DNV(S355), S355, S275 και S235

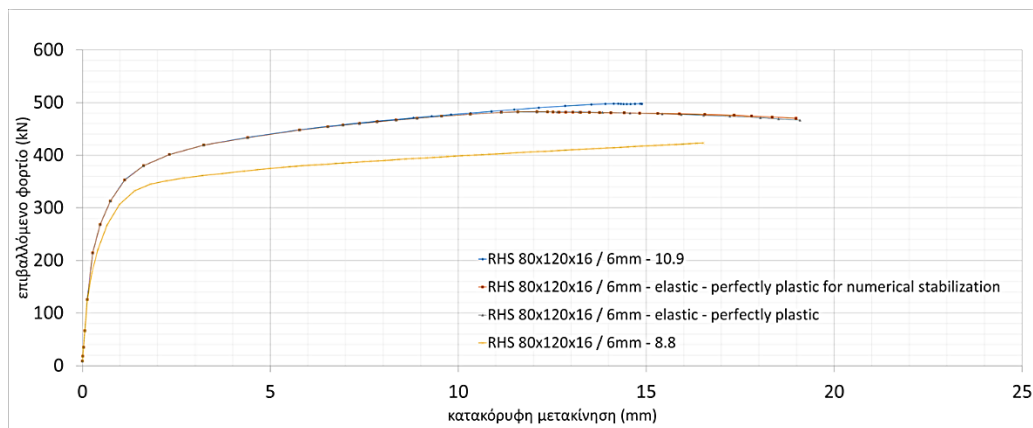
Για την εύρεση της επιρροής του υλικού χάλυβα του κοχλία χρησιμοποιείται ποιότητα υλικών 10.9 με κράτυνση, χωρίς κράτυνση, χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητα 8.8 στη διατομή RHS 80x120x16 χωρίς και με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλία. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στους δρόμους ισορροπίας, στην αξονική δύναμη κοχλία και στη μέγιστη ισοδύναμη τάση της συγκόλλησης. Οι καταστατικοί νόμοι των υλικών που χρησιμοποιούνται είναι οι αντίστοιχοι με της ενότητας 4.6. Επισημαίνεται πως για χρήση ποιότητας 8.8, η δύναμη προέντασης προκύπτει (εξίσωση 6.1):

$$F_{p,c} = 0.7 \times A_s \times f_{ub} = 0.7 \times 8.17\text{cm}^2 \times 80\text{kN/cm}^2 = 457.52\text{kN} \quad (6.1)$$

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-162 και 6-163, για χρήση χάλυβα ποιότητας 10.9, είτε με κράτυνση, είτε χωρίς κράτυνση, οι δρόμοι ισορροπίας τους ταυτίζονται έχοντας σχετικά μικρή διαφορά σε σύγκριση με της ποιότητας 8.8 για τη σύνδεση χωρίς ενίσχυση περί τον κοχλία. Η ταύτιση των δρόμων ισορροπίας οφείλεται στη διαρροή της διατομής για τις συνδέσεις με ποιότητα κοχλία 10.9. Όμοια συμπεριφορά παρουσιάζει και η σύνδεση με ενίσχυση, στην οποία η διαφορά με χρήση ποιότητας 8.8 είναι αρκετά μεγαλύτερη. Εφόσον παρατηρείται διαχωρισμός των δρόμων ισορροπίας μετά από σημαντική μετακίνηση, πρέπει να προσδίδεται μετελαστική αντοχή μέσω της κράτυνσης του κοχλία. Στην περίπτωση με ενίσχυση της διατομής, παρουσιάζεται η σύνδεση να διαρρέει σχετικά νωρίτερα, λόγω της μικρότερης αντοχής που προσφέρεται από την ποιότητα 8.8.

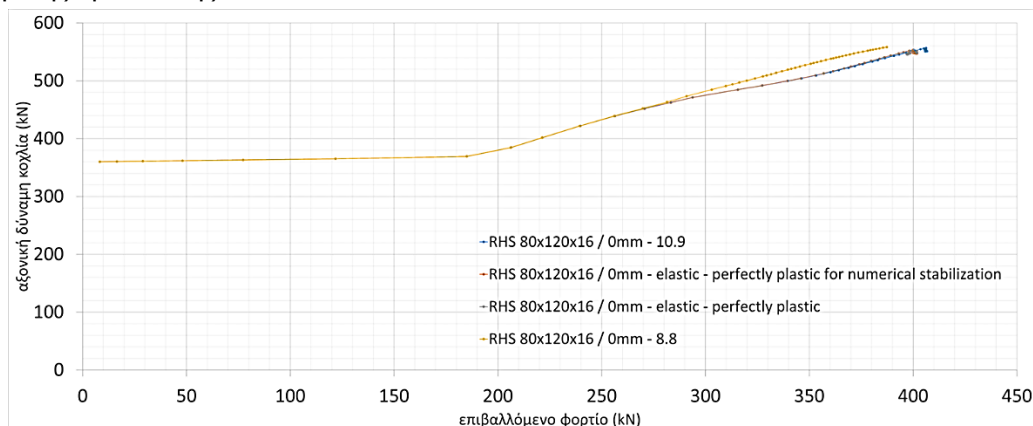


Σχήμα 6-162: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση για χάλυβα ποιότητας 10.9 με κράτυνση, χωρίς κράτυνση, χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 στον κοχλία

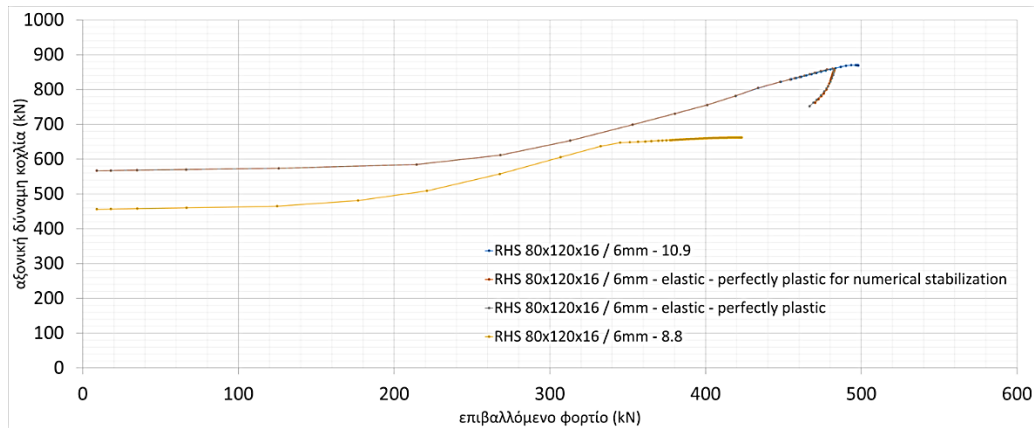


Σχήμα 6-163: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm για χάλυβα ποιότητας 10.9 με κράτυνση, χωρίς κράτυνση, χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 στον κοχλία

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-164 και 6-165, για χρήση χάλυβα ποιότητας 10.9, είτε με κράτυνση, είτε χωρίς κράτυνση, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία ταυτίζεται έχοντας αμελητέα διαφορά με τη χρήση ποιότητας 8.8 για αυξημένο επιβαλλόμενο φορτίο και για την περίπτωση της σύνδεσης χωρίς ενίσχυση. Ενώ, για την περίπτωση των συνδέσεων με ενίσχυση, η διαφορά έγκειται λόγω της αυξημένης επιβαλλόμενης προέντασης.

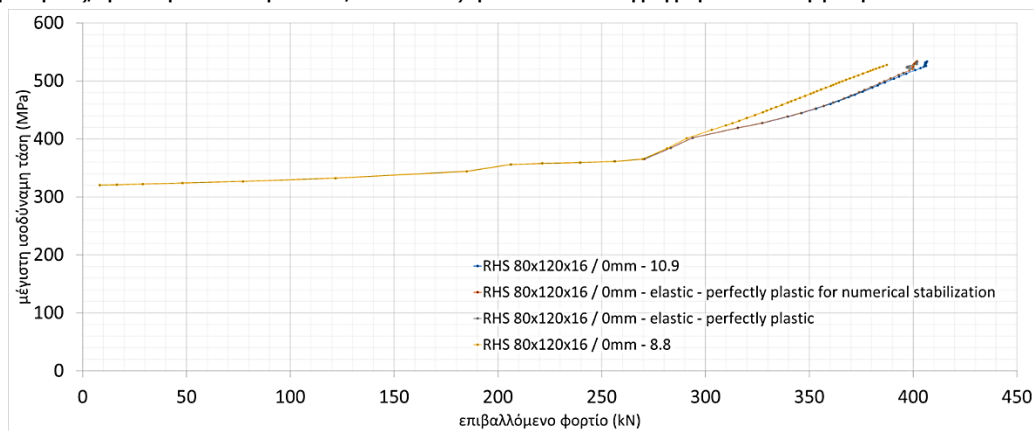


Σχήμα 6-164: Αξονική δύναμη κοχλία M36 σύνδεσης RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση για χάλυβα ποιότητας 10.9 με κράτυνση, χωρίς κράτυνση, χωρίς κράτυνση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 στον κοχλία

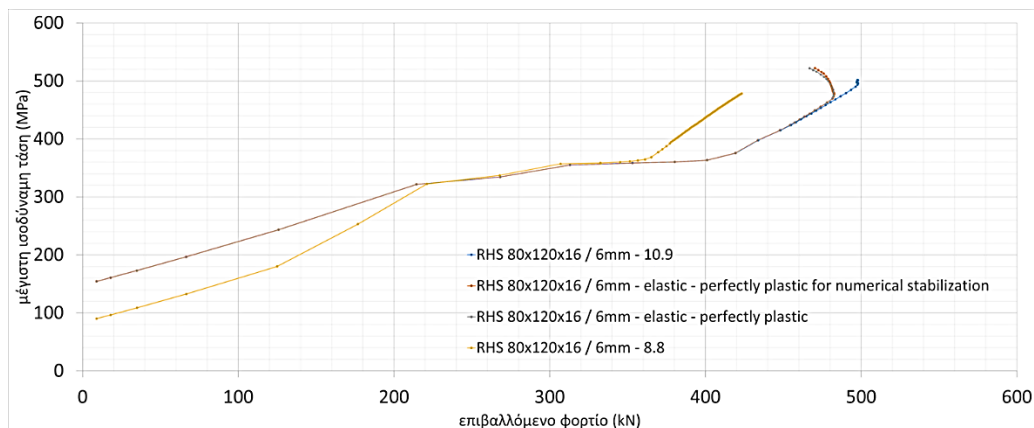


Σχήμα 6-165: Αξονική δύναμη κοχλία M36 σύνδεσης RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm για χάλυβα ποιότητας 10.9 με κράντωση, χωρίς κράντωση, χωρίς κράντωση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 στον κοχλία

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-166 και 6-167, για χρήση χάλυβα ποιότητας 10.9, είτε με κράντωση, είτε χωρίς, η μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση αναπτύσσεται με τον ίδιο ρυθμό για τις διατομές με και χωρίς ενίσχυση. Όμως, για την ποιότητα 8.8, οι τάσεις φθάνουν πιο γρήγορα σε διαρροή.



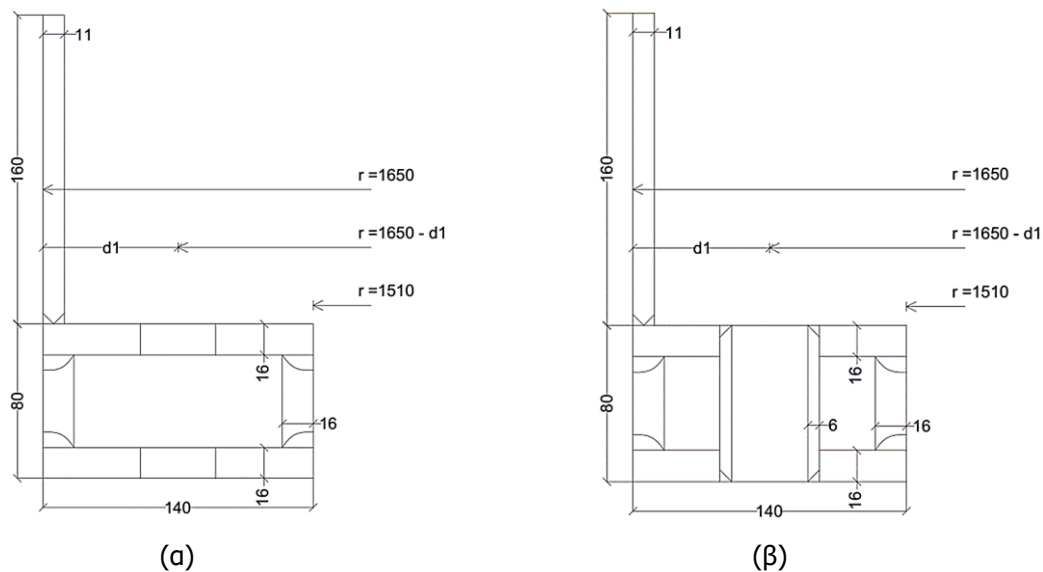
Σχήμα 6-166: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους σύνδεσης RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση για χάλυβα ποιότητας 10.9 με κράντωση, χωρίς κράντωση, χωρίς κράντωση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 στον κοχλία



Σχήμα 6-167: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους σύνδεσης RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm για χάλυβα ποιότητας 10.9 με κράντωση, χωρίς κράντωση, χωρίς κράντωση για αριθμητική ευστάθεια και ποιότητας 8.8 στον κοχλία

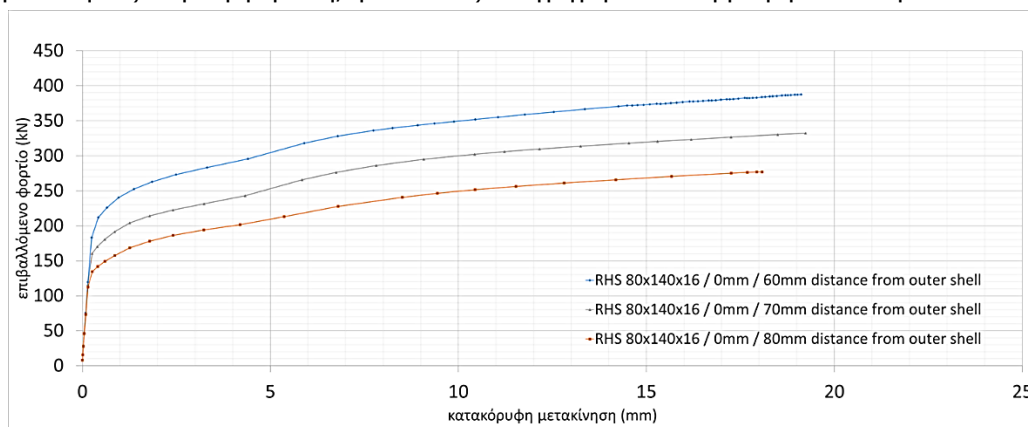
### 6.10 ΕΠΙΡΡΟΗ ΘΕΣΗΣ ΚΟΧΛΙΑ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Για την εύρεση της επιρροής της θέσης του κοχλία της σύνδεσης, χρησιμοποιείται η διατομή RHS 80x140x16 χωρίς και με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλία. Οι θέσεις όπου τοποθετείται ο κοχλίας είναι για 60mm, 70mm και 80mm απόσταση από την εξωτερική επιφάνεια του κελύφους. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στους δρόμους ισορροπίας, στην αξονική δύναμη κοχλία και στη μέγιστη ισοδύναμη τάση της συγκόλλησης. Παρουσιάζονται, επιπλέον, στα σχήματα 6-168(α) και 6-168(β), οι βασικές διαστάσεις της σύνδεσης με μεταβλητή την εξεταζόμενη παράμετρο απόσταση  $d_1$  του κοχλία από την εξωτερική παρειά του κελύφους.



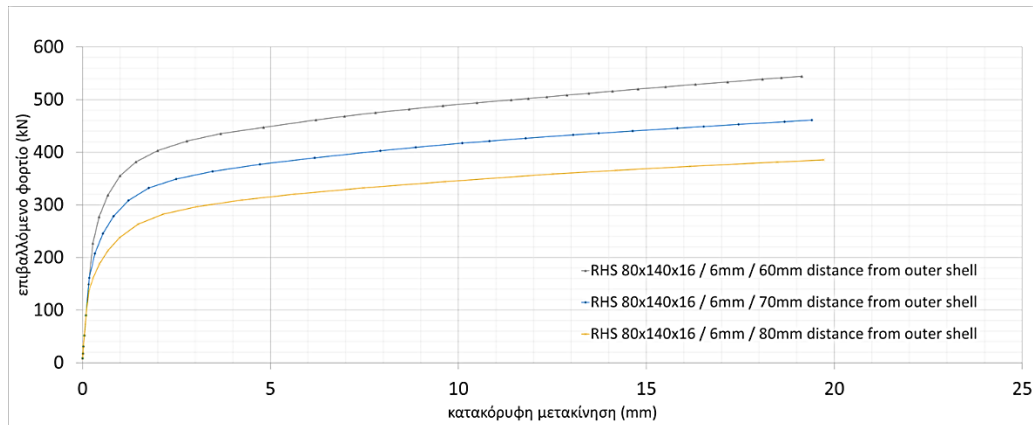
Σχήμα 6-168: Τομή σύνδεσης RHS 80x140x16 με μεταβλητή απόσταση  $d_1$  του κοχλία από την εξωτερική παρειά του κελύφους, (α) χωρίς ενίσχυση, (β) με ενίσχυση 6mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-169 και 6-170, για τοποθέτηση του κοχλία πιο κοντά προς το κέλυφος, οι δρόμοι ισορροπίας παρουσιάζουν αυξημένη δυσκαμψία και αντοχή. Η αύξηση της αντοχής έχει άμεση συσχέτιση με την ισορροπία του συστήματος κοχλία και πέλματος, το οποίο πρέπει να ισορροπεί κατά την εφαρμογή της εξωτερικής φόρτισης. Στη περίπτωση που ο κοχλίας απέχει περισσότερο από το κέλυφος, ο μοχλοβραχίονάς του γίνεται μικρότερος. Επομένως, χρειάζεται να αναπτύξει μεγαλύτερη δύναμη για να αντισταθμίσει την εξωτερική φόρτιση, φθάνοντας πιο γρήγορα σε διαρροή η σύνδεση.



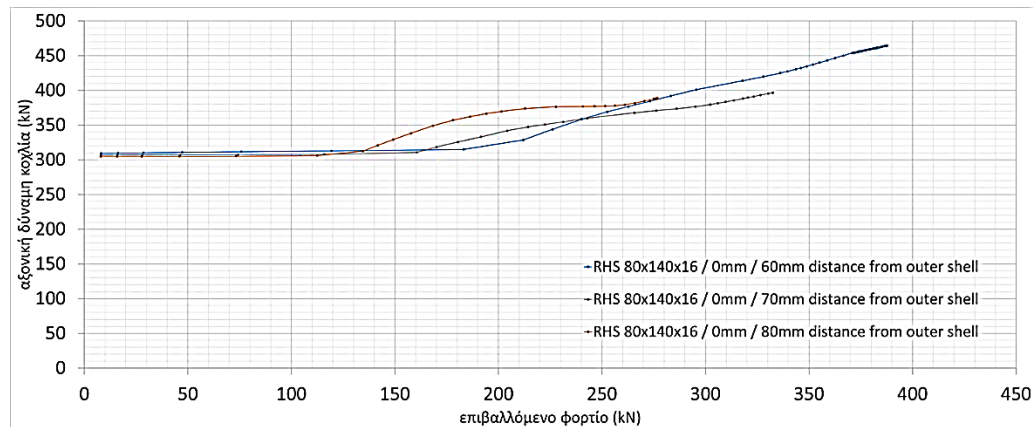
Σχήμα 6-169: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομή RHS 80x140x16 χωρίς ενίσχυση και με απόσταση κοχλία από το κέλυφος 60mm, 70mm και 80mm



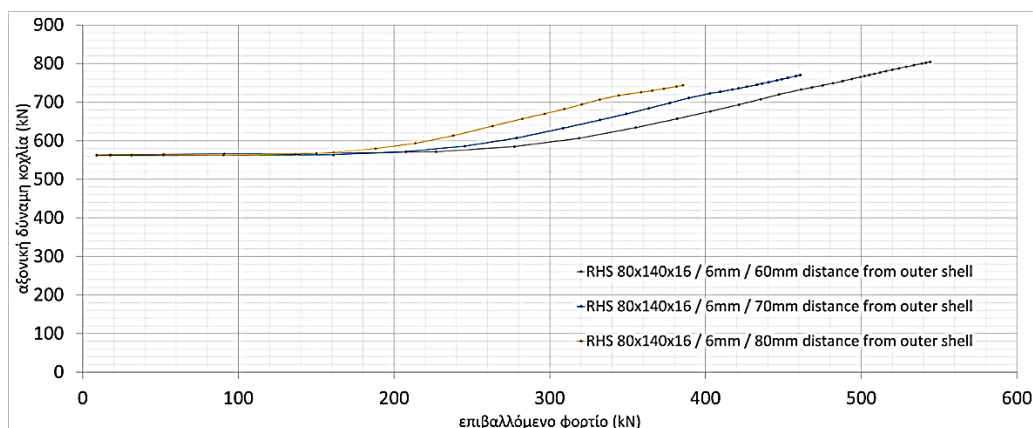


Σχήμα 6-170: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομή RHS 80x140x16 με ενίσχυση 6mm και με απόσταση κοχλία από το κέλυφος 60mm, 70mm και 80mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-171 και 6-172, για τοποθέτηση του κοχλία πιο κοντά προς το κέλυφος, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία αντιστοιχεί στη δύναμη προέντασης που εισάγεται, καθώς ισούται με 325kN για τα προσομοιώματα χωρίς ενίσχυση και με 571.9kN για τα προσομοιώματα με ενίσχυση περί τον κοχλία. Για αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου, η αξονική δύναμη του κοχλία αυξάνει με πιο αργό ρυθμό, όταν ο κοχλίας βρίσκεται πιο κοντά προς το κέλυφος.

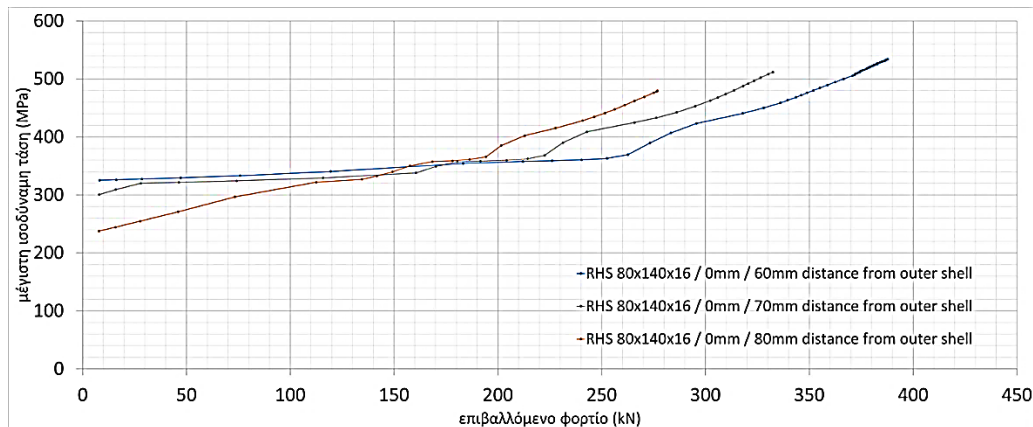


Σχήμα 6-171: Αξονική δύναμη κοχλία για διατομή RHS 80x140x16 χωρίς ενίσχυση και με απόσταση κοχλία από το κέλυφος 60mm, 70mm και 80mm

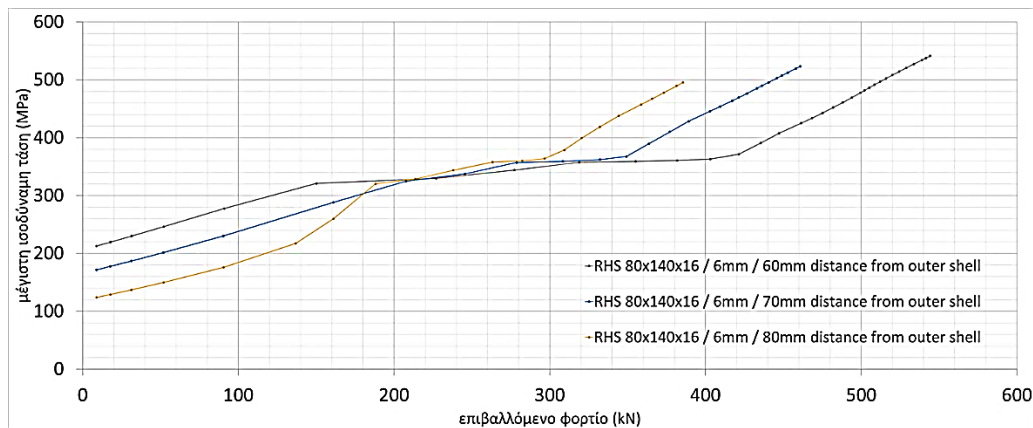


Σχήμα 6-172: Αξονική δύναμη κοχλία για διατομή RHS 80x140x16 με ενίσχυση 6mm και με απόσταση κοχλία από το κέλυφος 60mm, 70mm και 80mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-173 και 6-174, για τοποθέτηση του κοχλίας πιο κοντά προς το κέλυφος, η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση είναι αρχικά γραμμική, ωστόσο η συγκόλληση αρχίζει να διαρρέει για μεγαλύτερο επιβαλλόμενο φορτίο περί τα 200kN. Για αυξανόμενο επιβαλλόμενο φορτίο, οι τάσεις στη συγκόλληση αυξάνουν με πιο αργό ρυθμό, όταν ο κοχλίας τοποθετείται πιο κοντά προς το κέλυφος έχοντας, όμως, σχετικά μεγαλύτερες αρχικές τάσεις.



Σχήμα 6-173: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x140x16 χωρίς ενίσχυση και με απόσταση κοχλίας από το κέλυφος 60mm, 70mm και 80mm



Σχήμα 6-174: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x140x16 με ενίσχυση 6mm και με απόσταση κοχλίας από το κέλυφος 60mm, 70mm και 80mm

### 6.11 ΕΠΙΡΡΟΗ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Για την εύρεση της επιρροής της δύναμης προέντασης, χρησιμοποιείται η διατομή RHS 80x120x16 χωρίς και με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλία. Συγκεκριμένα, για τη διατομή χωρίς ενίσχυση εισάγεται προένταση σε ποσοστό 10%, 20%, 30% και 40% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίας M36. Αντιστοίχως, για τη διατομή με ενίσχυση εισάγεται προένταση σε ποσοστό 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% και 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίας M36. Ο κοχλίας που χρησιμοποιείται είναι ποιότητας 10.9.

Οι τιμές της δύναμης προέντασης υπολογίζονται:

$$10\% \text{ της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίου: } F_{p,c} = 0.1 \times f_{ub} \times A_s = 0.1 \times 817 \text{ kN} \rightarrow F_{p,c} = 81.7 \text{ kN}$$

$$20\% \text{ της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίου: } F_{p,c} = 0.2 \times f_{ub} \times A_s = 0.2 \times 817 \text{ kN} \rightarrow F_{p,c} = 163.4 \text{ kN}$$

$$30\% \text{ της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίου: } F_{p,c} = 0.3 \times f_{ub} \times A_s = 0.3 \times 817 \text{ kN} \rightarrow F_{p,c} = 245.1 \text{ kN}$$

$$40\% \text{ της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίου: } F_{p,c} = 0.4 \times f_{ub} \times A_s = 0.4 \times 817 \text{ kN} \rightarrow F_{p,c} = 326.8 \text{ kN}$$

$$50\% \text{ της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίου: } F_{p,c} = 0.5 \times f_{ub} \times A_s = 0.5 \times 817 \text{ kN} \rightarrow F_{p,c} = 408.5 \text{ kN}$$

$$60\% \text{ της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίου: } F_{p,c} = 0.6 \times f_{ub} \times A_s = 0.6 \times 817 \text{ kN} \rightarrow F_{p,c} = 490.2 \text{ kN}$$

$$70\% \text{ της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίου: } F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s = 0.7 \times 817 \text{ kN} \rightarrow F_{p,c} = 571.9 \text{ kN}$$

όπου:  $f_{ub}$  είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλίου και

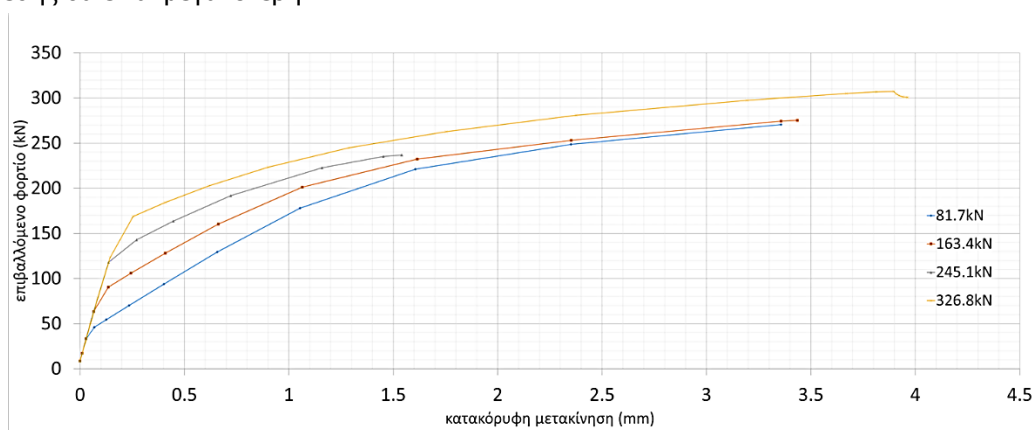
$A_s$  το εμβαδόν σπειρώματος

Για κοχλία M36:  $A_s = 8.17 \text{ cm}^2$

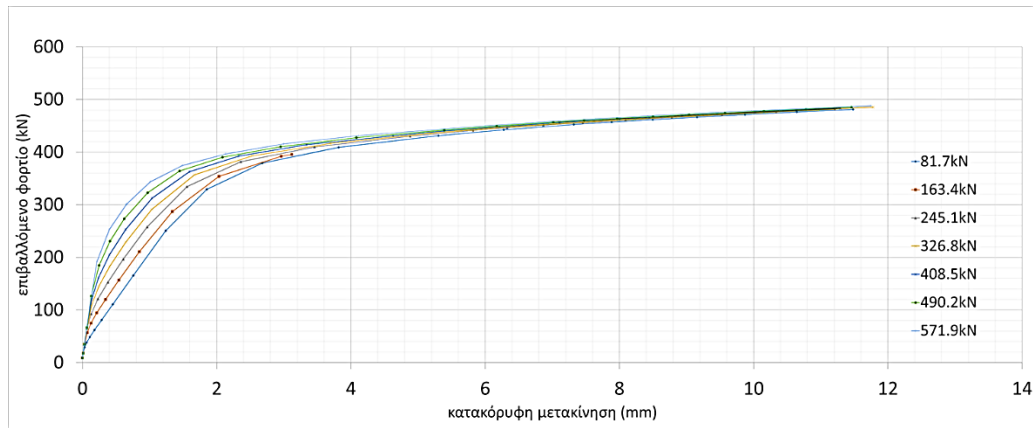
Για ποιότητα κοχλία 10.9:  $f_{ub} = 1000 \text{ MPa}$

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στους δρόμους ισορροπίας, στην αξονική δύναμη κοχλίου και στη μέγιστη ισοδύναμη τάση της συγκόλλησης.

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-175 και 6-176, για αυξανόμενη τιμή προέντασης, ο δρόμος ισορροπίας αποκτά μεγαλύτερη αρχική δυσκαμψία. Η αντοχή που προσδίδεται συγκλίνει στη μέγιστη διατιθέμενη, η οποία καθορίζεται από την ισορροπία του συστήματος κοχλίου και πέλματος. Εφόσον για μεγαλύτερη δύναμη προέντασης η αξονική δύναμη του κοχλίου μεταβάλλεται με πιο αργό ρυθμό, η αντίστοιχη αρχική δυσκαμψία της σύνδεσης θα είναι μεγαλύτερη.

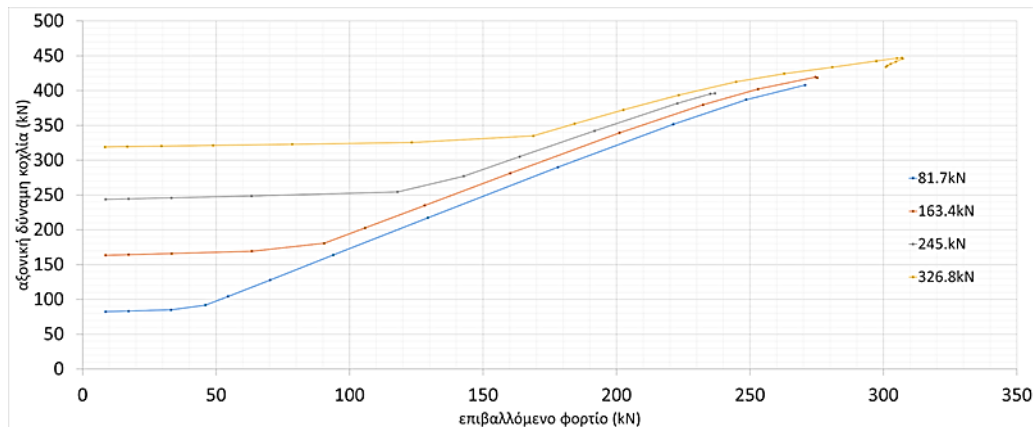


Σχήμα 6-175: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση για διάφορες τιμές προέντασης

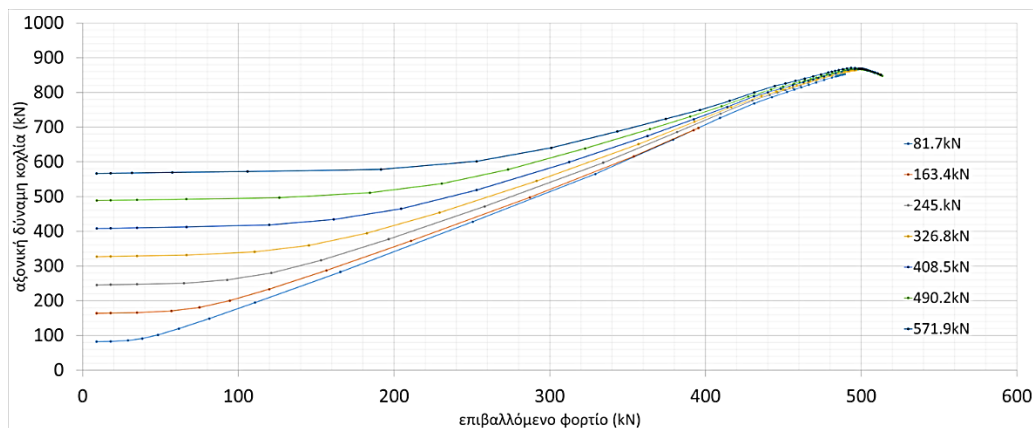


Σχήμα 6-176: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm για διάφορες τιμές προέντασης

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-177 και 6-178, για αυξανόμενη δύναμη προέντασης, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία είναι αρχικώς σταθερή με τιμή ίση με την εισαγόμενη προένταση. Κατά την επιβολή της εξωτερικής φόρτισης και για μεγαλύτερη δύναμη προέντασης, η αξονική δύναμη του κοχλία μεταβάλλεται με πιο αργό ρυθμό. Τότε, η διακύμανση των τάσεων του κοχλία θα είναι μικρότερη, και άρα, η αντοχή σε κόπωση μεγαλύτερη.

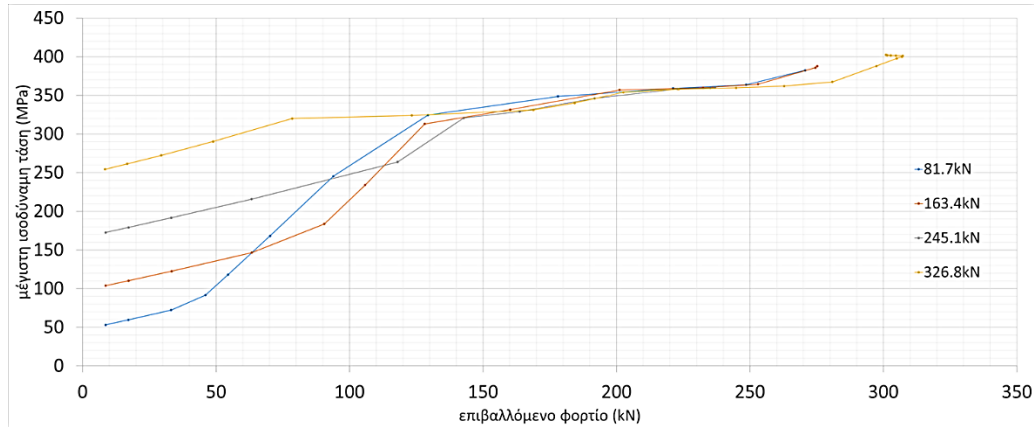


Σχήμα 6-177: Αξονική δύναμη κοχλία της σύνδεσης για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση για διάφορες τιμές προέντασης

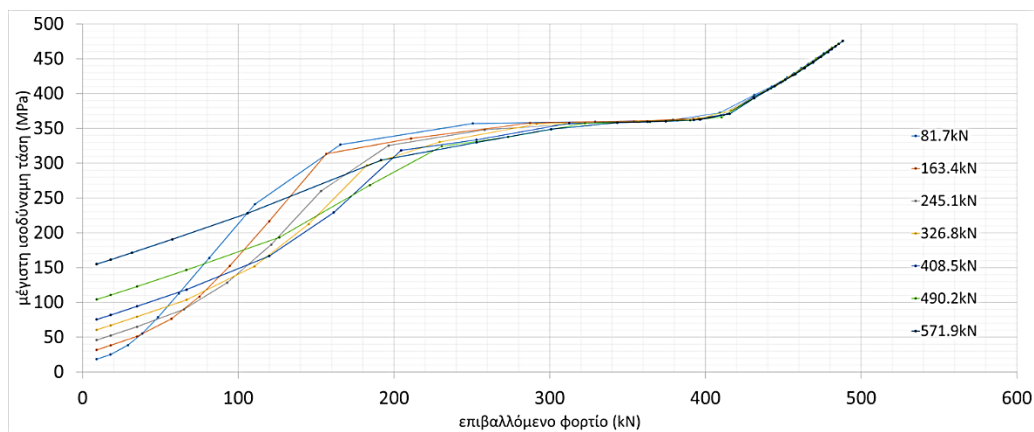


Σχήμα 6-178: Αξονική δύναμη κοχλία της σύνδεσης για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm για διάφορες τιμές προέντασης

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-179 και 6-180, για αυξανόμενη τιμή προέντασης, η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση αποκτά μεγαλύτερη αρχική ένταση. Για αυξανόμενο επιβαλλόμενο φορτίο και για αυξανόμενη δύναμη προέντασης, ο ρυθμός αύξησης των τάσεων είναι πιο ομαλός. Έπειτα, οι τάσεις συγκλίνουν προς τη διαρροή τους ωστόσο διαρρέουν για αυξανόμενο πλέον επιβαλλόμενο φορτίο.



Σχήμα 6-179: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση για διάφορες τιμές προέντασης

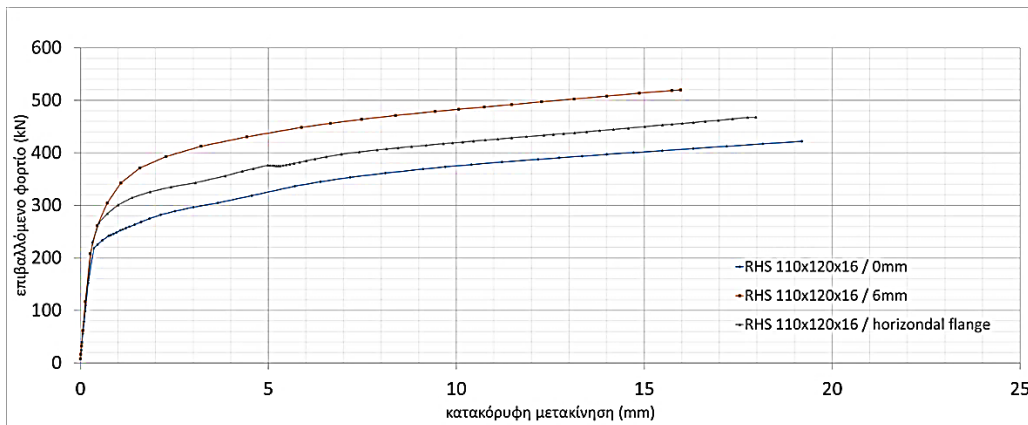


Σχήμα 6-180: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 6mm για διάφορες τιμές προέντασης

## 6.12 ΕΠΙΡΡΟΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

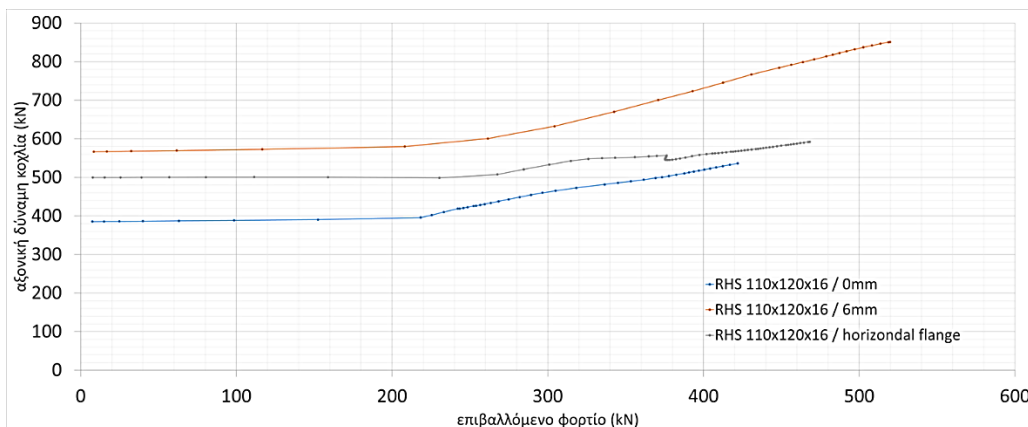
Για την εύρεση της επιρροής οριζόντιας ενίσχυσης τοποθετείται στο μέσον της κοίλης ορθογωνικής διατομής RHS 110x120x16 φλάντζα πάχους 16mm ίσο με το πάχος της διατομής. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στους δρόμους ισορροπίας, στην αξονική δύναμη κοχλία και στη μέγιστη ισοδύναμη τάση της συγκόλλησης.

Σύμφωνα με το σχήμα 6-181, για οριζόντια ενίσχυση στο μέσον της διατομής, ο δρόμος ισορροπίας προκύπτει με μεγαλύτερη αντοχή από την αντίστοιχη διατομή χωρίς ενίσχυση, ενώ προκύπτει με μικρότερη αντοχή από τη διατομή με ενίσχυση περί τον κοχλία.



Σχήμα 6-181: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διατομή RHS 110x120x16 χωρίς ενίσχυση, με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλία και με οριζόντια ενίσχυση 16mm

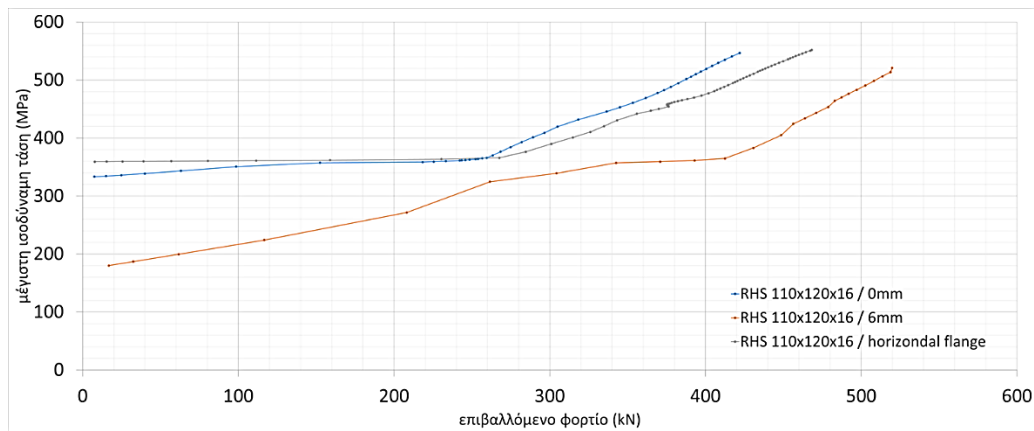
Σύμφωνα με το σχήμα 6-182, για οριζόντια ενίσχυση στο μέσον της διατομής, η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία ταυτίζεται αρχικά με την αρχική δύναμη προέντασης, η οποία προκύπτει 500kN παραμένοντας σταθερή για επιβαλλόμενο φορτίο μέχρι 250kN. Για μεγαλύτερο επιβαλλόμενο φορτίο υπάρχει σχετική αύξηση και στην αξονική δύναμη του κοχλία.



Σχήμα 6-182: Αξονική δύναμη κοχλία για διατομή RHS 110x120x16 χωρίς ενίσχυση, με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλία και με οριζόντια ενίσχυση 16mm

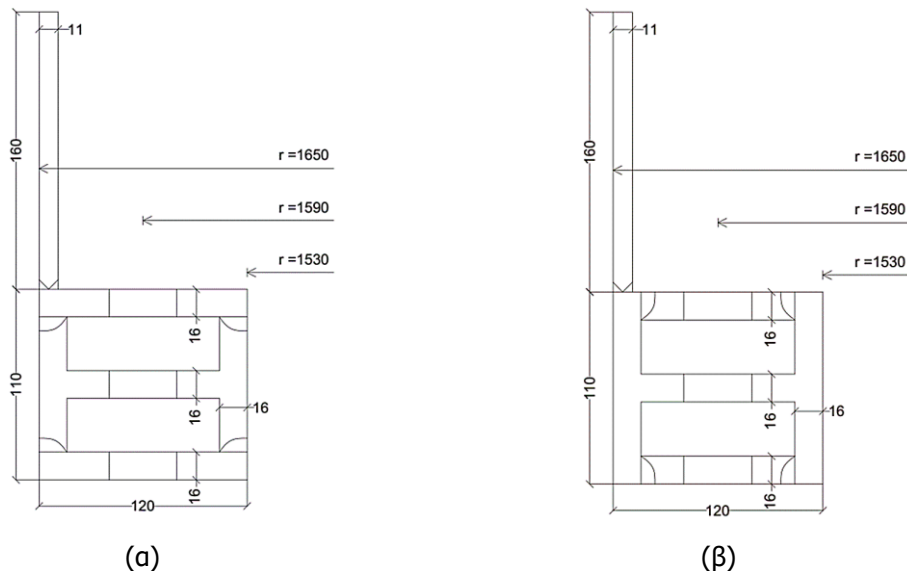


Σύμφωνα με το σχήμα 6-183, για οριζόντια ενίσχυση στο μέσον της διατομής, η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στη συγκόλληση ακολουθεί όμοια συμπεριφορά με τη διατομή χωρίς ενίσχυση.



Σχήμα 6-183: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 110x120x16 χωρίς ενίσχυση, με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλία και με οριζόντια ενίσχυση 16mm

Παρουσιάζονται, επιπλέον, στα σχήματα 6-184(α) και 6-184(β), οι βασικές διαστάσεις της σύνδεσης με οριζόντια ενίσχυση στο μέσον της διατομής.



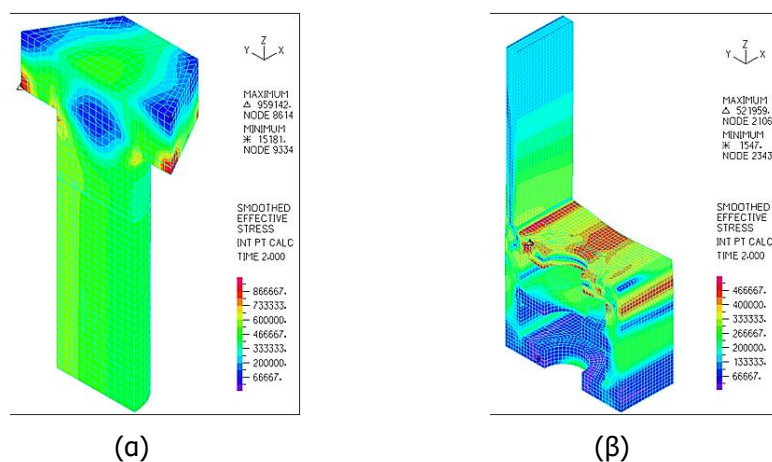
Σχήμα 6-184: Τομή σύνδεσης RHS 110x120x16 με οριζόντια ενίσχυση στο μέσον της διατομής, (α) 1<sup>ος</sup> τρόπος πιθανής συγκόλλησης, (β) 2<sup>ος</sup> τρόπος πιθανής συγκόλλησης

Ακόμα, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά τη στιγμή της προέντασης (σχήμα 6-185), ο δρόμος ισορροπίας (σχήμα 6-186) για χαρακτηριστικά σημεία με τις αντίστοιχες τάσεις και τις παραμορφώσεις του κοχλία και της διατομής (σχήματα 6-187 και 6-188), η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία (σχήμα 6-189) και η μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη

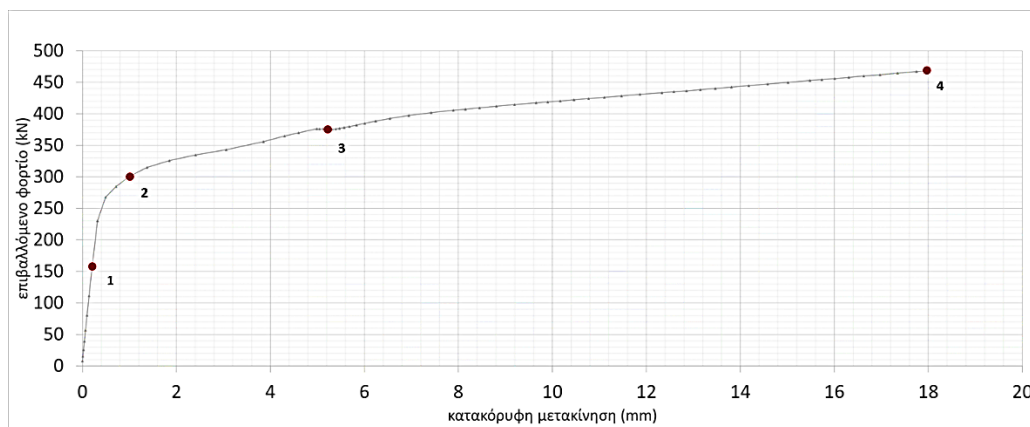
συναρμογή του κελύφους (σχήμα 6-190). Τα αποτελέσματα προκύπτουν πανομοιότυπα με της παραγράφου 5.6 για κοίλη ορθογωνική διατομή χωρίς ενίσχυση περί τον κοχλία.

Επισημαίνεται πως η συγκεκριμένη διάταξη οριζόντιας ενίσχυσης θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μεγαλύτερες ανεμογεννήτριες, δεδομένου πως οι κοίλες ορθογωνικές διατομές χωρίς ενίσχυση πληρούν τα κριτήρια αντοχής, ασφάλειας, διατάξεις κανονισμών και παράλληλα, να έχουν χαμηλό κόστος και σύντομο διάστημα παραγωγής για την τελική εφαρμογή τους. Η εφαρμογή της οριζόντιας ενίσχυσης προσδίδει πιο ενιαία συμπεριφορά έναντι της αντίστοιχης διατομής πέλματος, η οποία δημιουργείται συγκολλώντας δύο μικρότερες αντίστοιχες διατομές πέλματος μεταξύ τους για να την υλοποιήσουν. Η ανάγκη αυτή προκύπτει λόγω των μεγάλων διαστάσεων για τις διατομές πέλματος, οι οποίες είναι δύσκολα κατασκευάσιμες.

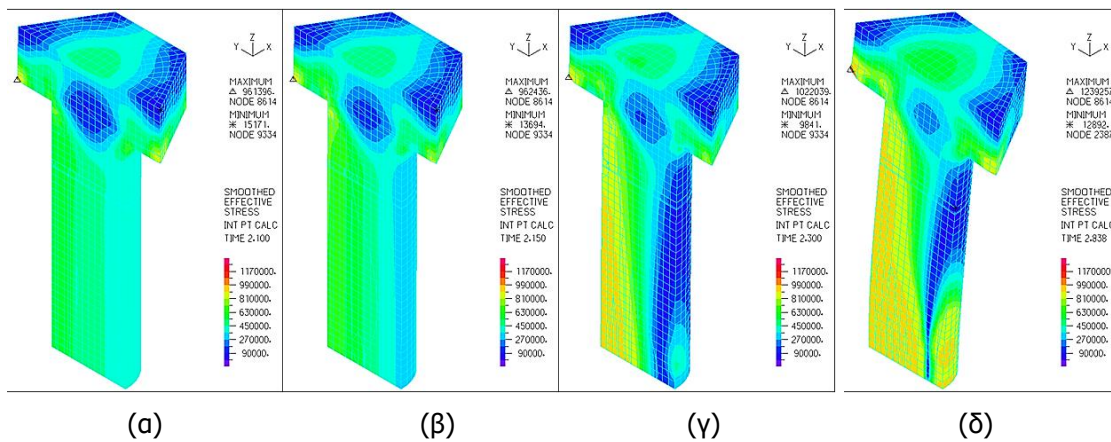
Διατομή RHS 110x120x16 με οριζόντια ενίσχυση 16mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 500\text{kN}$



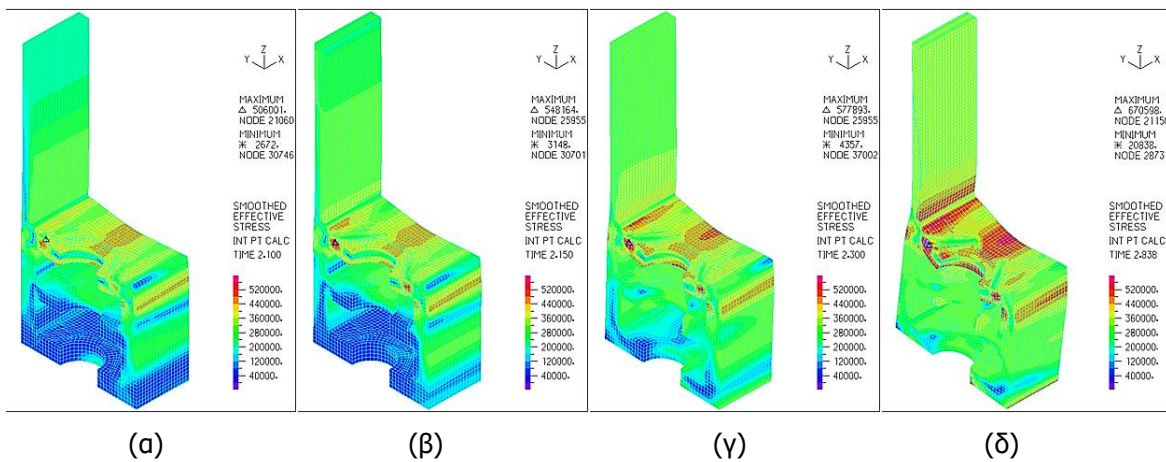
Σχήμα 6-185: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 500\text{kN}$  για (α) κοχλία M36 σε τομή και (β) διατομή RHS 110x120x16 με οριζόντια ενίσχυση 16mm σε τομή



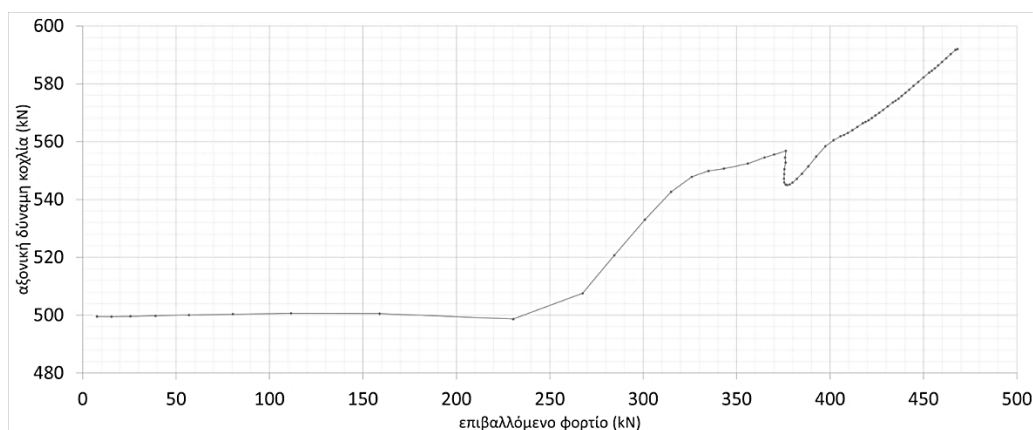
Σχήμα 6-186: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 110x120x16 με οριζόντια ενίσχυση 16mm



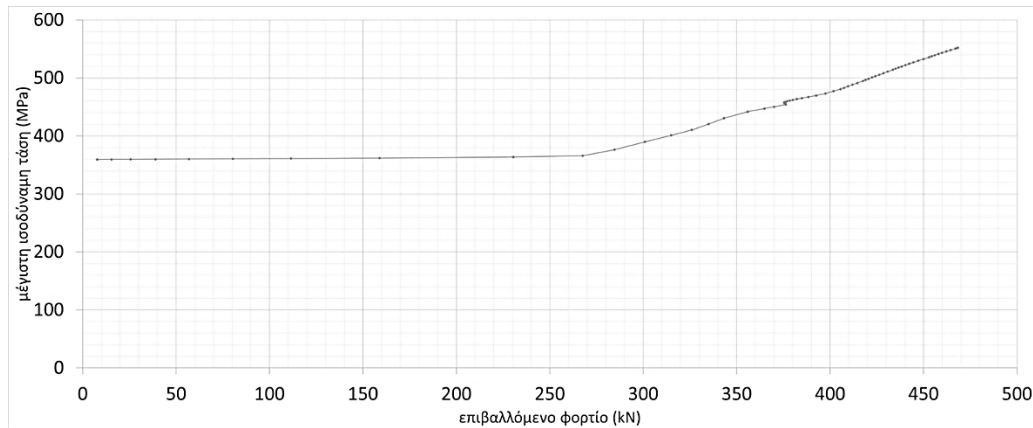
Σχήμα 6-187: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 110x120x16 με οριζόντια ενίσχυση 16mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-188: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 110x120x16 με οριζόντια ενίσχυση 16mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-189: Αξονική δύναμη κοχλία M36 για διατομή RHS 110x120x16 με οριζόντια ενίσχυση 16mm



Σχήμα 6-190: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους για διατομή RHS 110x120x16 με οριζόντια ενίσχυση 16mm

### 6.13 ΕΠΙΡΡΟΗ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΚΟΧΛΙΑ ΚΟΙΛΗΣ ΟΡΘΟΓΩΝΙΚΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Για την εύρεση της επιρροής της διαμέτρου του κοχλία, χρησιμοποιείται η διατομή RHS 80x120x16 χωρίς και με ενίσχυση 4mm περί τον κοχλία για κοχλίες M36, M30, M27, M24 και M20. Χρησιμοποιείται υλικό βάσης DNV(S355) και ποιότητα κοχλία 10.9. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται επικεντρώνονται στους δρόμους ισορροπίας, στην αξονική δύναμη κοχλία και στη μέγιστη ισοδύναμη τάση της συγκόλλησης. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά των κοχλιών που χρησιμοποιούνται έχουν ληφθεί με βάση τον κανονισμό DIN6914 [8]. Επίσης, υπολογίζεται η δύναμη προέντασης, η οποία επηρεάζεται από το εμβαδόν σπειρώματος του κοχλία  $A_s$ .

Για κοχλία M36:  $k = 23\text{mm}$ ,  $s = 60\text{mm}$ ,  $A_s = 8.17\text{cm}^2$ , με δύναμη προέντασης:

$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s = 0.7 \times 100\text{kN/cm}^2 \times 8.17\text{cm}^2 \rightarrow F_{p,c} = 571.9\text{kN}$$

Για κοχλία M30:  $k = 19\text{mm}$ ,  $s = 50\text{mm}$ ,  $A_s = 5.61\text{cm}^2$ , με δύναμη προέντασης:

$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s = 0.7 \times 100\text{kN/cm}^2 \times 5.61\text{cm}^2 \rightarrow F_{p,c} = 392.7\text{kN}$$

Για κοχλία M27:  $k = 17\text{mm}$ ,  $s = 46\text{mm}$ ,  $A_s = 4.59\text{cm}^2$ , με δύναμη προέντασης:

$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s = 0.7 \times 100\text{kN/cm}^2 \times 4.59\text{cm}^2 \rightarrow F_{p,c} = 321.3\text{kN}$$

Για κοχλία M24:  $k = 15\text{mm}$ ,  $s = 41\text{mm}$ ,  $A_s = 3.53\text{cm}^2$ , με δύναμη προέντασης:

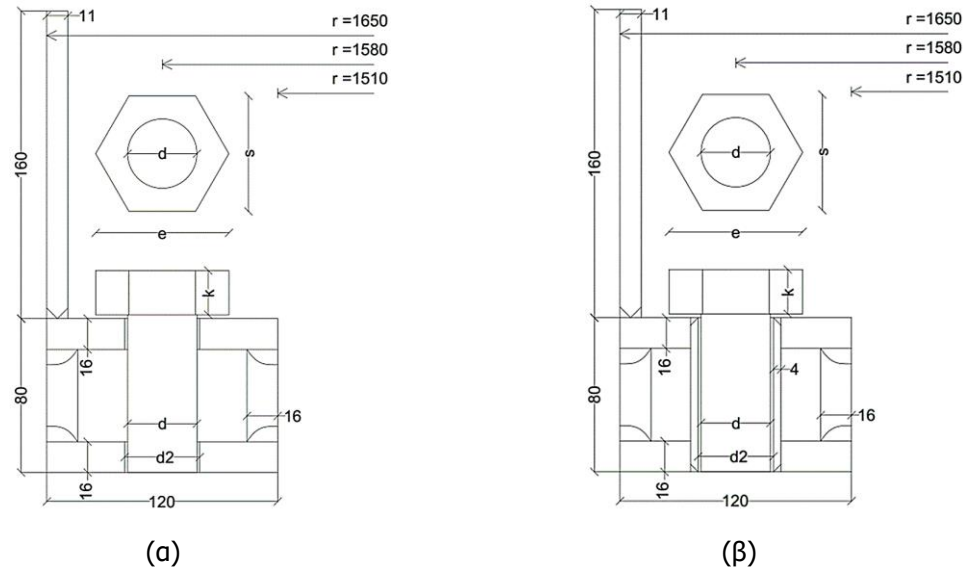
$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s = 0.7 \times 100\text{kN/cm}^2 \times 3.53\text{cm}^2 \rightarrow F_{p,c} = 247.1\text{kN}$$

Για κοχλία M20:  $k = 13\text{mm}$ ,  $s = 32\text{mm}$ ,  $A_s = 2.45\text{cm}^2$ , με δύναμη προέντασης:

$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s = 0.7 \times 100\text{kN/cm}^2 \times 2.45\text{cm}^2 \rightarrow F_{p,c} = 171.5\text{kN}$$

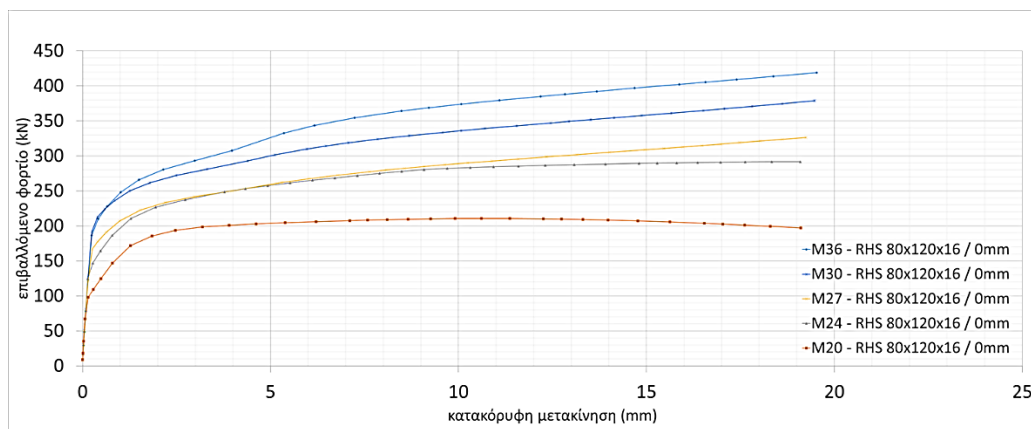
Επισημαίνεται πως για τη διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση και για τους κοχλίες M36 και M30 εφαρμόζεται προένταση 375kN. Ακόμα, σύμφωνα με τον κανονισμό EK3, η ανοχή που μπορεί να έχει μια οπή είναι 3mm για κοχλία M36, M30 και M27, ενώ 2mm για κοχλία M24 και M20.

Παρουσιάζεται, επιπλέον, στα σχήματα 6-191(α) και 6-191(β), η σύνδεση RHS 80x120x16 χωρίς και με ενίσχυση 4mm, με μεταβλητές τις βασικές διαστάσεις του κοχλία σε τομή και άνω όψη. Οι μεταβλητές είναι: η διάμετρος κοχλία  $d$ , η διάμετρος οπής  $d_2$ , η διάμετρος εγγεγραμμένου κύκλου κεφαλής κοχλία  $s$  και το πάχος κεφαλής κοχλία  $k$ .

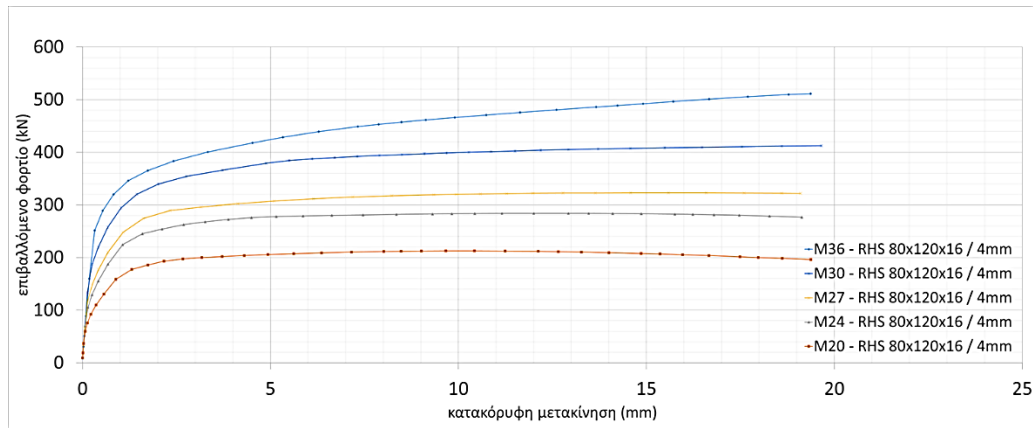


Σχήμα 6-191: Τομή σύνδεσης RHS 80x120x16 με μεταβλητές διαστάσεις κοχλία (α) χωρίς ενίσχυση, (β) με ενίσχυση 4mm

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-192 και 6-193, για αύξηση της διαμέτρου του κοχλία, οι δρόμοι ισορροπίας προκύπτουν με μεγαλύτερη δυσκαμψία και αντοχή. Ο μοχλοβραχίονας του κοχλία μένει σταθερός, αφού η αύξηση του μεγέθους του κοχλία δε μεταβάλλει τη θέση του κέντρου του. Η δύναμη που θα αναπτυχθεί στον κοχλία θα είναι η ίδια, όμως οι αντίστοιχες τάσεις θα διαφέρουν. Επομένως, για σταθερή δύναμη κοχλία και για αυξανόμενη διάμετρο κοχλία, οι τάσεις που θα αναπτύσσονται στον κοχλία θα είναι μικρότερες, προσδίδοντας παραπάνω διατιθέμενη αντοχή και δυσκαμψία στη σύνδεση.

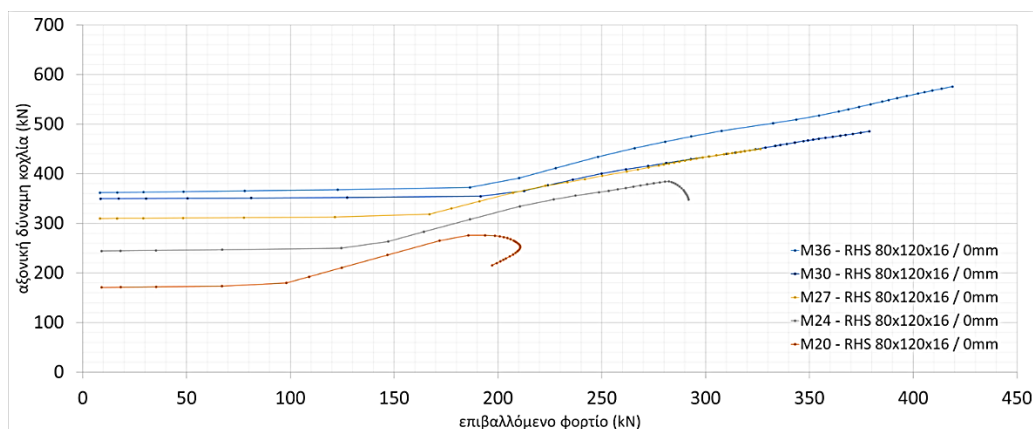


Σχήμα 6-192: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση για κοχλία M36, M30, M27, M24 και M20

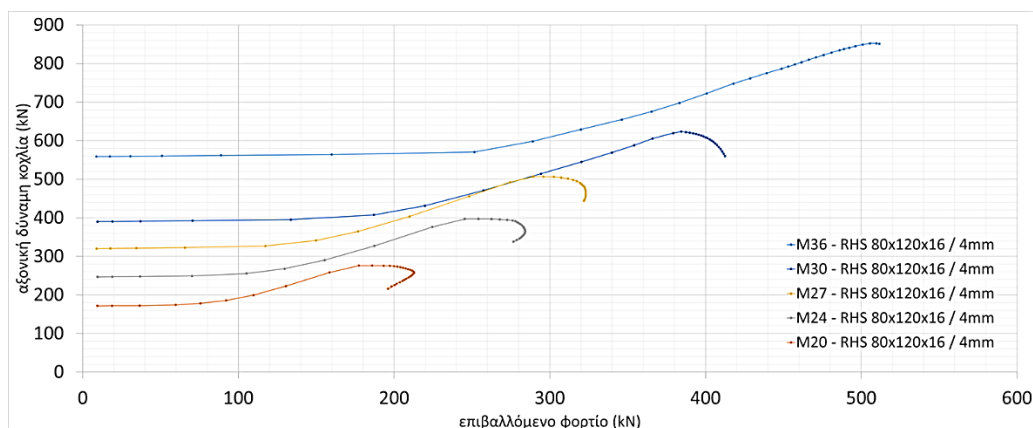


Σχήμα 6-193: Δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm για κοχλία M36, M30, M27, M24 και M20

Σύμφωνα με τα σχήματα 6-194 και 6-195, για αύξηση της διαμέτρου του κοχλίου, η αξονική δύναμη που μπορεί να αναπτύξει ο κοχλίας είναι μεγαλύτερη. Αρχικά, η αξονική δύναμη ταυτίζεται με τη δύναμη προέντασης που εφαρμόζεται. Για αυξημένο επιβαλλόμενο φορτίο, η αξονική δύναμη σχετικά αυξάνεται.



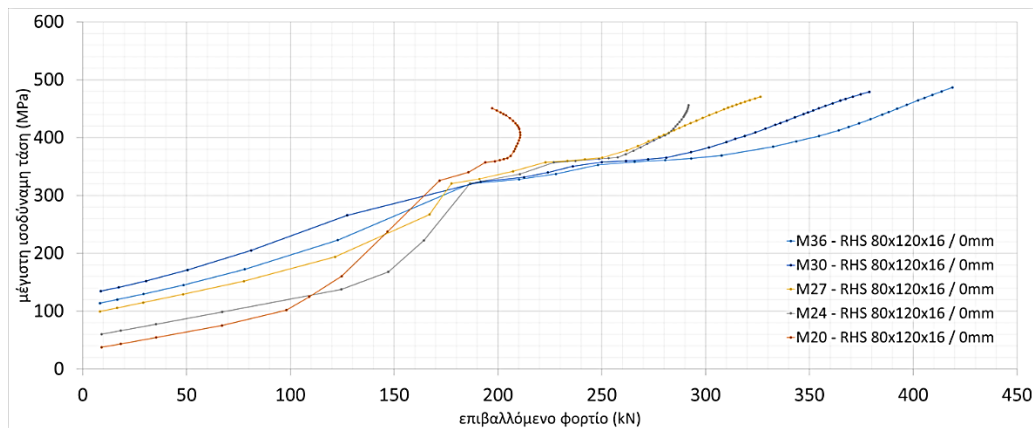
Σχήμα 6-194: Αξονική δύναμη κοχλίου της διατομής RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση για κοχλία M36, M30, M27, M24 και M20



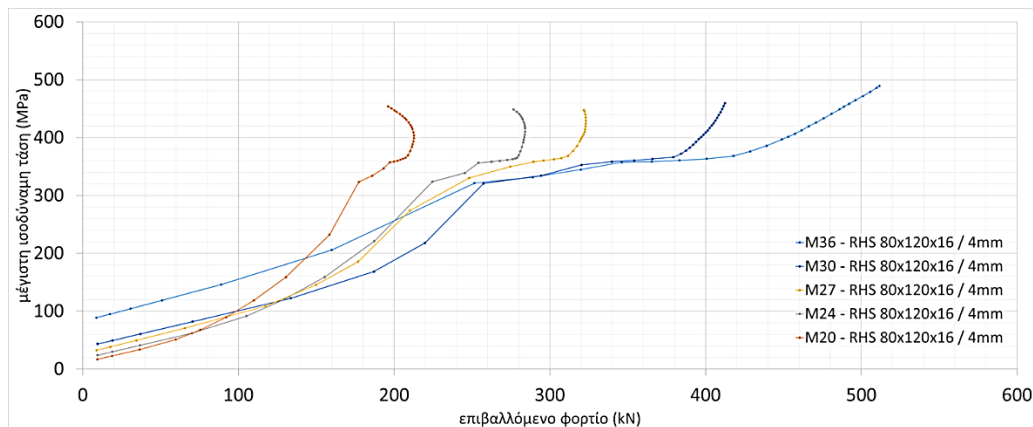
Σχήμα 6-195: Αξονική δύναμη κοχλίου της διατομής RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm για κοχλία M36, M30, M27, M24 και M20



Σύμφωνα με τα σχήματα 6-196 και 6-197, για αύξηση της διαμέτρου του κοχλία, η μέγιστη ισοδύναμη τάση φθάνει με πιο αργό ρυθμό. Ενώ, για την περίπτωση της διατομής RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση, οι αρχικές τάσεις στη συγκόλληση προκύπτουν μεγαλύτερες έναντι της διατομής με ενίσχυση περί τον κοχλία.



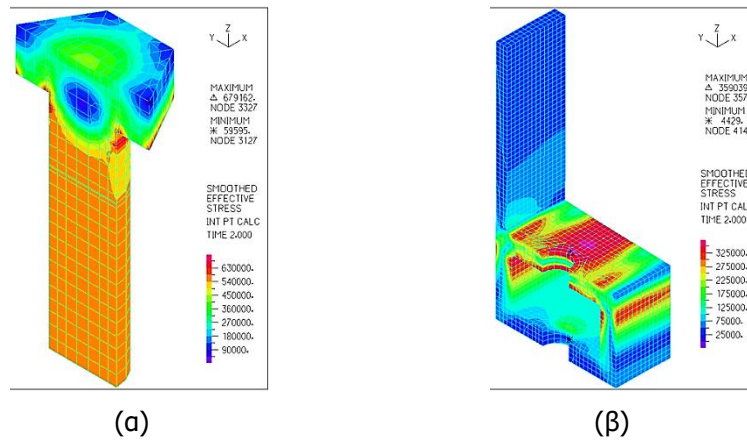
Σχήμα 6-196: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους της διατομής RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση για κοχλία M36, M30, M27, M24 και M20



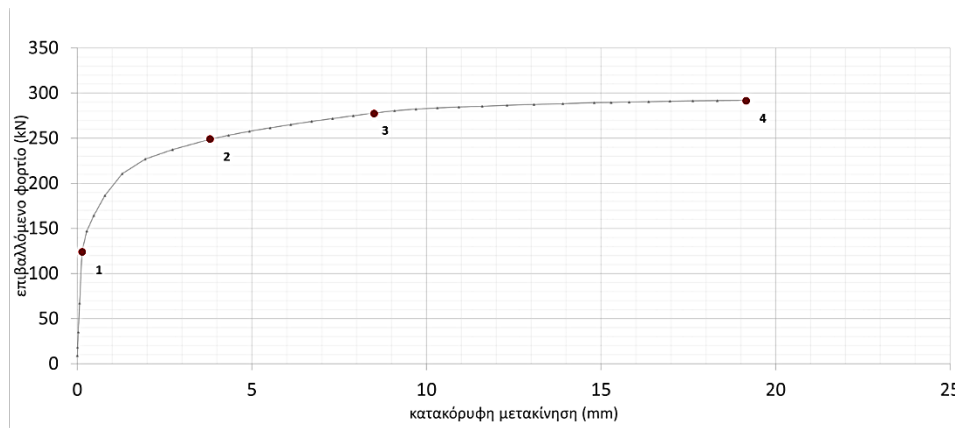
Σχήμα 6-197: Μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση στη συναρμογή του κελύφους της διατομής RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm για κοχλία M36, M30, M27, M24 και M20

Ακόμα, παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα των τάσεων και των παραμορφώσεων κατά τη στιγμή της προέκτασης, του δρόμου ισορροπίας για χαρακτηριστικά σημεία των τάσεων και των παραμορφώσεων του κοχλία και της διατομής, της αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στο κοχλία και της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στη συγκόλληση για κοχλία M24 με διατομή RHS 80x120x16 χωρίς και με ενίσχυση 4mm, οι οποίες δείχνουν να έχουν όμοια συμπεριφορά, όπως στις παραγράφους 5.6 και 5.7 αντίστοιχα (σχήματα 6-198 έως 6-205).

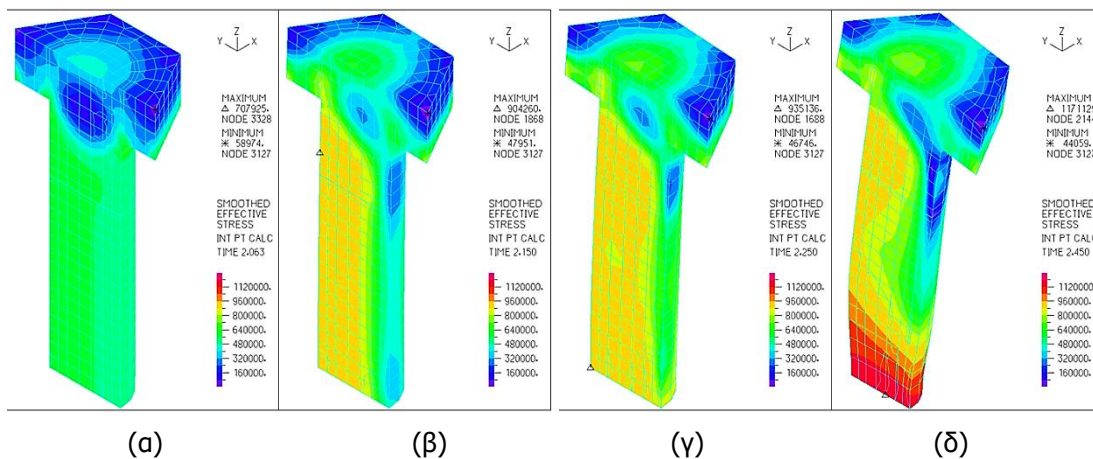
Διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση και κοχλία M24, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 247.1\text{kN}$



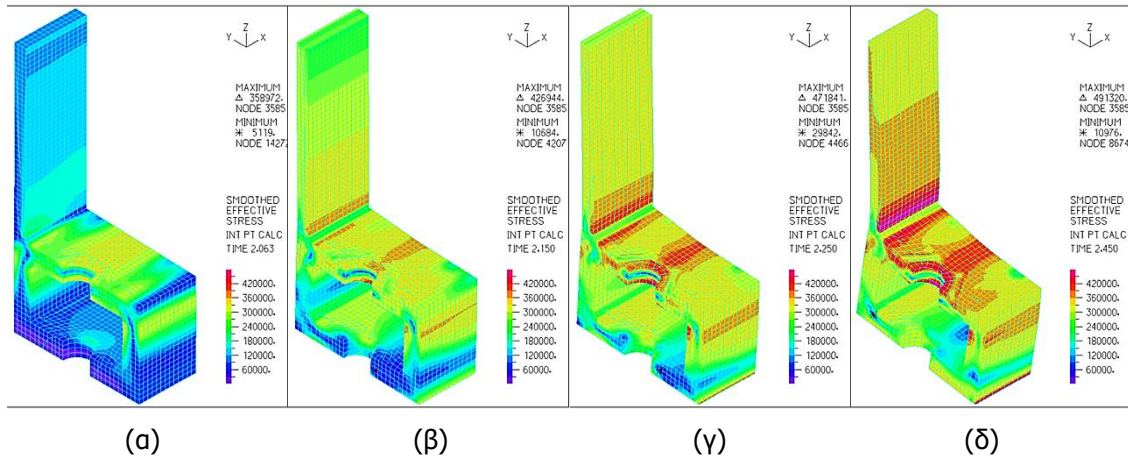
Σχήμα 6-198: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 247.1\text{kN}$  για (α) κοχλία M24 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση



Σχήμα 6-199: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση

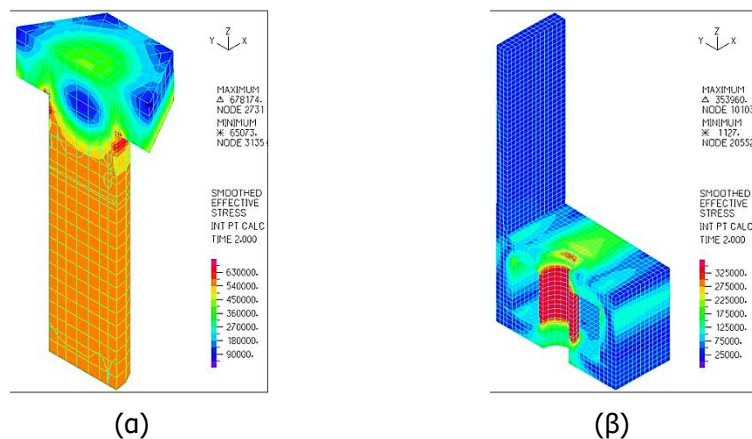


Σχήμα 6-200: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία M24 σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

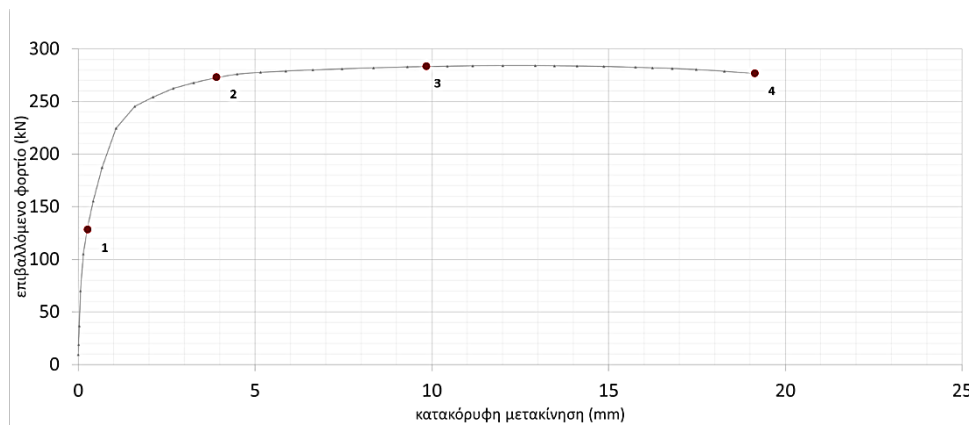


Σχήμα 6-201: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 χωρίς ενίσχυση, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

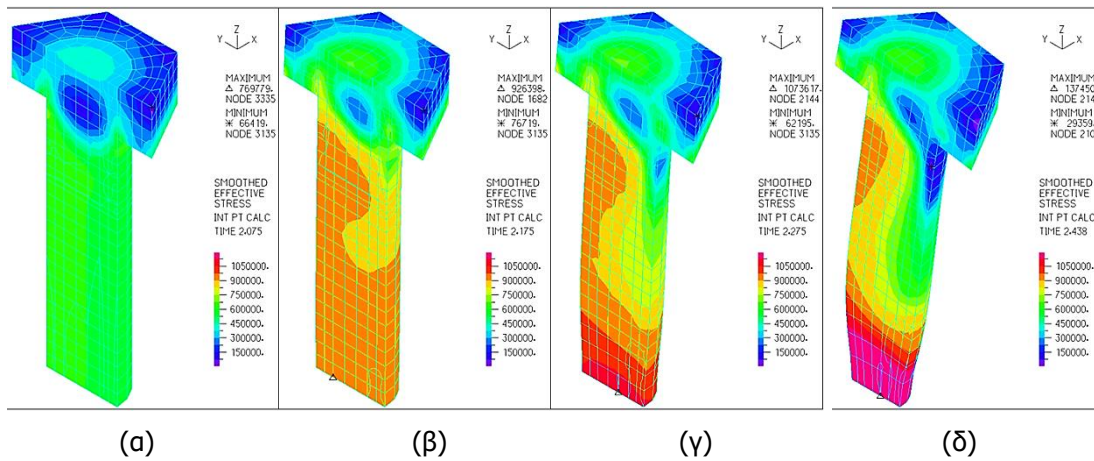
Διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm, εισάγεται προένταση ίση με  $F_{p,c} = 247.1\text{kN}$



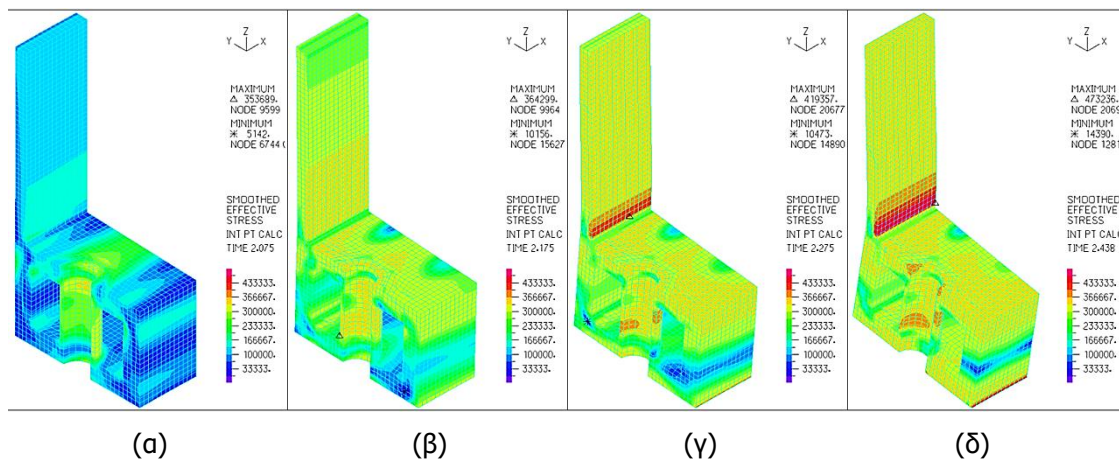
Σχήμα 6-202: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις για προένταση ίση με  $F_{p,c} = 247.1\text{kN}$  για (α) κοχλία M24 σε τομή και (β) διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm σε τομή



Σχήμα 6-203: Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm



Σχήμα 6-204: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις κοχλία M24 σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4



Σχήμα 6-205: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις βάσης σύνδεσης σε τομή σε χαρακτηριστικά σημεία για διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 4mm, (α) σημείο 1, (β) σημείο 2, (γ) σημείο 3, (δ) σημείο 4

# 7 ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

## 7.1 ΣΥΝΟΨΗ

Στις μέρες μας, προκειμένου να αξιοποιηθεί περισσότερο αιολικό δυναμικό για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι ανεμογεννήτριες δέχονται περισσότερα φορτία, καθώς γίνονται μεγαλύτερες. Η κατάσταση αυτή, τείνει στη χρήση μεγαλύτερων συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας, με αποτέλεσμα το κόστος παραγωγής των συνδέσεων να αυξάνεται σημαντικά. Το κόστος παραγωγής των συνδέσεων αυτών αυξάνεται λόγω της περισσότερης χρήσης υλικού χάλυβα, αλλά κυρίως, λόγω της δυσκολίας παραγωγής τους σύμφωνα με τις σημερινές δυνατότητες των βιομηχανιών παραγωγής χάλυβα. Επιδιώκοντας τη μείωση του κόστους, μελετάται η συμπεριφορά κοίλης ορθογωνικής διατομής ως σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η σύνδεση στο 85% του ύψους του πυλώνα μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα τριών πτερυγίων και ισχύος 1.5MW.

Αρχικά, χρειάζεται να κατανοηθεί η συμπεριφορά της συμβατικής περίπτωσης βραχέος L. Για τον σκοπό αυτόν, διερευνάται η συμπεριφορά της σύνδεσης με διατομή PL 60x130, για την οποία εξετάζονται η επιρροή της θεωρίας μικρών και μεγάλων παραμορφώσεων, η επιρροή του συντελεστή ενδοσιμότητας, η επιρροή των συνοριακών συνθηκών του κοχλίου ως κύλιση και της βάσης με προσομοίωση της συνέχειάς της, η επιρροή του χάλυβα που χρησιμοποιείται στη βάση για υλικά DNV(S355), S355, S275, S235 και αντίστοιχα, στον κοχλίο για υλικά ποιότητας 10.9 με και χωρίς κράτυνση και ποιότητας 8.8, καθώς και η επιρροή της τριβής στις επιφάνειες επαφής για τιμές 0.5, 0.4 και 0.2.

Στη συνέχεια, διερευνάται η συμπεριφορά των κοίλων ορθογωνικών διατομών RHS 80x120 με πάχος διατομής 8mm, 12mm, 16mm και 18mm, χωρίς ενίσχυση και με ενίσχυση περί τον κοχλίο. Παράλληλα, διερευνάται η παρουσία της ενίσχυσης και του πάχους της για πάχη 4mm, 6mm, 8mm και 10mm. Ακόμα, διερευνάται η διατομή RHS 80x120x16 χωρίς και με ενίσχυση 6mm περί τον κοχλίο, για αυξανόμενο πλάτος διατομής ανά 10mm προς το εσωτερικό του πυλώνα μέχρι τα 150mm. Μελετάται, επίσης, για ποιότητα χάλυβα DNV(S355), S355, S275 και S235 στη βάση της σύνδεσης και για ποιότητα 10.9 με και χωρίς κράτυνση και ποιότητα 8.8 στον κοχλίο. Έπειτα, εξετάζεται για δύναμη προέντασης σε αυξανόμενο ποσοστό ανά 10%, αναλόγως τη φέρουσα ικανότητα της σύνδεσης. Χρησιμοποιείται η διατομή RHS 80x120x16 χωρίς και με ενίσχυση 4mm για αυξανόμενη διάμετρο κοχλίου όπως είναι οι M36, M30, M27, M24 και M20. Επίσης, χρησιμοποιείται η διατομή RHS 80x140x16 χωρίς και με ενίσχυση 6mm για αυξανόμενο ύψος διατομής ανά 20mm μέχρι τα 140mm, καθώς και για την επιρροή της απόστασης του κοχλίου, η οποία είναι για 60mm,

70mm και 80mm από την εξωτερική επιφάνεια του κελύφους. Εξετάζεται η διατομή RHS 110x120x16, με οριζόντια ενίσχυση στο μέσον της έχοντας πάχος ίσο με 16mm, όπως και της διατομής.

Τα αποτελέσματα που αναλύονται επικεντρώνονται στους δρόμους ισορροπίας, στις τάσεις και στις παραμορφώσεις του κοχλία και της διατομής, στη δύναμη του κοχλία που αναπτύσσεται και στις τάσεις της συγκόλλησης της συναρμογής του κελύφους με τη διατομή. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα για την εύρεση της επιρροής των παραμέτρων και τελικά, συγκρίνονται κοίλες ορθογωνικές διατομές με τη συμβατική περίπτωση βραχέος L, για τις οποίες προκύπτει όμοια και βελτιωμένη συμπεριφορά. Τα προσομοιώματα έχουν δημιουργηθεί στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA με χρήση 1<sup>ης</sup> τάξεως στοιχεία και συμμετρικό πλέγμα. Η χρήση μη γραμμικών υλικών για τον κοχλία και τη σύνδεση, καθώς και η προσομοίωση των επιφανειών που έρχονται σε επαφή ως στοιχεία επαφής (contact elements), καθιστούν το πρόβλημα μη γραμμικό. Η μέθοδος της προσομοίωσης αυτής κρίνεται απαραίτητη για την περιγραφή φαινομένων, που καθορίζουν την απόκριση της σύνδεσης.

## 7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σύμφωνα, με τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τη σύνδεση PL 60x130, μπορούν να εξαχθούν τα εξής συμπεράσματα:

→ Για μικρές παραμορφώσεις, οι δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης ταυτίζονται λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία μικρών (small strains) και μεγάλων (large strains) παραμορφώσεων. Για μεγαλύτερες μετακινήσεις, η θεωρία των μεγάλων παραμορφώσεων περιγράφει πιο ικανοποιητικά τη συμπεριφορά της σύνδεσης, αφού λόγω των επαφών, πρόκειται να δημιουργηθούν μεγάλες μετακινήσεις.

→ Με τη χρήση του συντελεστή ενδοσιμότητας, ο φορέας προκύπτει πιο εύκαμπτος διαρρέοντας σταδιακά και φθάνοντας στην ίδια αντοχή όταν δεν χρησιμοποιείται συντελεστής ενδοσιμότητας. Εντούτοις, λόγω της διείσδυσης που επιτρέπει, επηρεάζονται οι τάσεις των επαφών αλλάζοντας τα αποτελέσματα, τα οποία χρειάζεται να εκτιμηθούν με προσοχή, ώστε να ανταποκρίνονται στο φυσικό πρόβλημα.

→ Όταν η κάτω επιφάνεια του κοχλία προσομοιώνεται ως κύλιση, η διαρροή της σύνδεσης συμβαίνει για ίδια μετακίνηση δίνοντας, όμως, σχεδόν οριζόντιο μετελαστικό κλάδο με σχετικά χαμηλότερη αντοχή. Παράλληλα, παρουσιάζεται στένωση της βάσης του κοχλία, η οποία οφείλεται στο φαινόμενο Poisson.

→ Όταν προσομοιώνεται η βάση με συνέχεια, καθώς αποτελεί τμήμα της δακτυλιοειδούς σύνδεσης, η αντοχή της σύνδεσης αυξάνεται λόγω του ευσταθούς μετελαστικού κλάδου που δημιουργείται.

→ Κατά τη χρήση των υλικών χάλυβα S355, S275 και S235 στη βάση της σύνδεσης, η αντοχή της είναι αντίστοιχα αυξημένη σύμφωνα με το υλικό που εφαρμόζεται. Ομοίως, και με τη χρήση ακριβέστερου καταστατικού νόμου, όπως του υλικού DNV(S355) έναντι του διγραμμικού S355, για την οποία η αντοχή της σύνδεσης προκύπτει αντίστοιχα μεγαλύτερη.

→ Η χρήση χάλυβα ποιότητας 10.9 με και χωρίς κράτυνση του κοχλία καθορίζει σημαντικά τη μετελαστική αντοχή της σύνδεσης. Για χάλυβα με κράτυνση προκύπτει ευσταθής μετελαστικός κλάδος δίνοντας παράλληλα, αυξημένη αντοχή. Εντούτοις, για υλικό χάλυβα χωρίς κράτυνση προκύπτει οριακό σημείο στον δρόμο ισορροπίας της σύνδεσης και επομένως, δημιουργείται καθοδικός μετελαστικός κλάδος. Παράλληλα, η απομείωση της αντοχής γίνεται σταδιακά έχοντας κάποια απομένουσα αντοχή. Για ποιότητα κοχλία 8.8, η δυσκαμψία και η αντοχή της σύνδεσης προκύπτουν μικρότερες, αφού διαρρέει η σύνδεση για χαμηλότερο επιβαλλόμενο φορτίο.

→ Η χρήση μεγαλύτερου συντελεστή τριβής αυξάνει την ευστάθεια και αναλόγως την αντοχή της σύνδεσης.



→ Σε όλες τις περιπτώσεις, τα αποτελέσματα της αξονικής δύναμης του κοχλία και της μέγιστης ισοδύναμης τάσης που αναπτύσσεται στη συναρμογή του κελύφους με τη βάση, ουσιαστικά, δείχνουν να ταυτίζονται. Πρακτικά, οι διαφορές μεταξύ τους μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Για τις συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας, η χρήση κοίλων ορθογωνικών διατομών επιτυγχάνει σημαντική οικονομία στο χάλυβα που χρησιμοποιείται, καθώς η διαθέσιμη τεχνογνωσία για την παραγωγή τους είναι αρκετά εξελιγμένη, ώστε να ανταποκρίνεται στις κατασκευαστικές απαιτήσεις. Ακόμα, οι κοίλες ορθογωνικές διατομές για αυξημένα μηχανικά χαρακτηριστικά, δείχνουν να έχουν όμοια και βελτιωμένη απόκριση όπως στις συμβατικές συνδέσεις τύπου πέλματος. Επισημαίνεται πως για την τελική εφαρμογή τους σε έργα χρειάζεται να ικανοποιούνται επαρκώς όλες οι απαιτήσεις που προβλέπουν οι κανονισμοί. Σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, μπορούν να προκύψουν τα εξής συμπεράσματα, καθώς και από την επιπλέον σύγκρισή τους με τη συμβατική σύνδεση βραχέος L.

Έτσι, τα κυριότερα συμπεράσματα για τη χρήση κοίλων ορθογωνικών διατομών που μπορούν να εξαχθούν είναι τα εξής:

→ Η αύξηση του πάχους της διατομής συμβάλει σε σημαντική αύξηση της δυσκαμψίας και της αντοχής.

→ Η παρουσία της ενίσχυσης αυξάνει τη δυσκαμψία και επομένως, την αντοχή της σύνδεσης.

→ Κατά την προένταση στις κοίλες ορθογωνικές διατομές, η μεταφορά των εντάσεων γίνεται μέσω των τοιχωμάτων της διατομής, ενώ με την παρουσία της ενίσχυσης περί τον κοχλία, η μεταφορά των εντάσεων γίνεται και μέσω της ενίσχυσης αποφορτίζοντας τα τοιχώματα της διατομής.

→ Η παρουσία της ενίσχυσης περί τον κοχλία αυξάνει τη δύναμη προέντασης. Με την αύξηση του πάχους της ενίσχυσης, η προένταση που μπορεί να εισαχθεί αντιστοίχως αυξάνεται.

→ Η αύξηση του πάχους της ενίσχυσης συμβάλλει σε ελάχιστη μείωση της αρχικής δυσκαμψίας, παρόλο που τελικώς, προσδίδεται μεγαλύτερη αντοχή. Η μείωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα.

→ Για αυξανόμενο πάχος ενίσχυσης περί τον κοχλία και για μεγαλύτερο πάχος διατομών, η αντοχή των συνδέσεων τείνει να ταυτίζεται, αφού για μεγαλύτερες μετακινήσεις, είτε θα διαρρεύσει η περιοχή της συναρμογής του κελύφους, είτε θα διαρρεύσει ο κοχλίας. Αυτό οφείλεται στην αρκετά πιο δύσκαμπτη διατομή που δημιουργείται, για την οποία η δυσκαμψία της σύνδεσης θα διατηρείται για μεγαλύτερο διάστημα κατά την παραμόρφωση προσδίδοντας τη διατιθέμενη αντοχή της.

→ Η αρχική τιμή της αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στον κοχλία αντιστοιχεί στην προένταση που μπορεί να φέρει η διατομή.

→ Για αυξανόμενο πάχος της διατομής, η αξονική δύναμη του κοχλία διατηρείται σταθερή για μεγαλύτερο διάστημα επιβολής της φόρτισης.

→ Για αυξανόμενο πάχος ενίσχυσης, η αξονική δύναμη του κοχλία αυξάνεται σχετικά.

→ Κατά την προένταση σε κοίλες ορθογωνικές διατομές, η δύναμη του κοχλία μεταβιβάζεται μέσω των τοιχωμάτων της διατομής. Λόγω του ενδεχόμενου τοπικού λυγισμού της ενίσχυσης, αδυνατεί να εισαχθεί η πλήρης προένταση, παρά μόνο αν είναι επαρκώς δύσκαμπτη η ενίσχυση.

→ Κατά την εφαρμογή της προέντασης για αυξανόμενο πάχος διατομής, λόγω αυξημένης δυσκαμψίας, οι αρχικές τάσεις στη συγκόλληση της συναρμογής του κελύφους παρουσιάζονται μειωμένες. Παράλληλα, με παρουσία της ενίσχυσης και της ενδεχόμενης αύξησης του πάχους της, οι αρχικές τάσεις στη συναρμογή προκύπτουν ακόμα μικρότερες.

→ Κατά την επιβολή της εξωτερικής φόρτισης, η αστοχία συμβαίνει, είτε στη συγκόλληση της συναρμογής του κελύφους με τη διατομή, είτε στον κοχλία, όταν η διατομή προκύπτει αρκετά πιο δύσκαμπτη. Από την άλλη, σε περίπτωση που προκύπτει αρκετά πιο εύκαμπτη, η αστοχία της διατομής συμβαίνει, συνήθως, ανάμεσα στην περιοχή του κοχλία και του κελύφους.

Επιπλέον, μέσω της σύγκρισης των κοίλων ορθογωνικών διατομών, όπως για παράδειγμα, η διατομή RHS 80x120x16 με ενίσχυση 10mm, οι διατομές RHS 80x120x18 με ενίσχυση 8 και 10mm αντίστοιχα, με τη συμβατική σύνδεση τύπου πέλματος PL 60x130, προκύπτουν τα εξής:

→ Για αυξημένα μηχανικά χαρακτηριστικά των κοίλων ορθογωνικών διατομών, δηλαδή, με αύξηση του πάχους της διατομής και με την παρουσία της ενίσχυσης περί τον κοχλία, αποκτούν ίδια αρχική δυσκαμψία με τη συμβατική περίπτωση σύνδεσης PL 60x130. Ενώ, κατά τη διαρροή τους, παρουσιάζουν μεγαλύτερη κράτυνση από αυτή της συμβατικής σύνδεσης.

→ Για τις κοίλες διατομές αυτές, η αξονική δύναμη που μπορεί να αναπτυχθεί αρχικά ταυτίζεται με τη συμβατική περίπτωση. Ενώ, για αυξημένο επιβαλλόμενο φορτίο, η αξονική δύναμη που αναπτύσσει ο κοχλίας της σύνδεσης PL 60x130 αυξάνεται με γρηγορότερο ρυθμό. Επομένως, θα φθάνει και στην ενδεχόμενη διαρροή του πιο γρήγορα, έναντι των συνδέσεων των κοίλων διατομών.

→ Οι αρχικές τάσεις στη συγκόλληση της συναρμογής του κελύφους, αν και προκύπτουν μεγαλύτερες για τις προαναφερθέντες κοίλες ορθογωνικές διατομές, ουσιαστικά, είναι αμελητέες. Ενώ, για αυξημένη επιβολή της φόρτισης, οι ισοδύναμες τάσεις των κοίλων διατομών ταυτίζονται με εκείνες της διατομής PL 60x130.

Παράλληλα, εξετάζοντας την επιρροή του ύψους, του πλάτους, της χρήσης υλικών χάλυβα, της θέσης του κοχλία, της δύναμης προέντασης, της οριζόντιας ενίσχυσης στο μέσον της κοίλης ορθογωνικής διατομής, καθώς και της διαμέτρου του κοχλία μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

→ Για αυξανόμενο ύψος διατομής, δείχνει να προσφέρεται κάποια αύξηση στην αντοχή με μεγαλύτερη μετακίνηση και σε διατομή με ενίσχυση περί τον κοχλία.

→ Για αυξανόμενο πλάτος διατομής υπάρχει μείωση της αντοχής, αφού η διατομή γίνεται πιο λυγηρή και επομένως, η σύνδεση πιο εύκαμπτη.

→ Για αυξανόμενο πλάτος διατομής, υπάρχει μείωση της αξονικής δύναμης του κοχλία. Η μείωση είναι πιο αισθητή για τις διατομές χωρίς ενίσχυση, όπου και η δύναμη προέντασης προκύπτει αντιστοίχως μικρότερη. Από την άλλη, οι τάσεις στη συγκόλληση αυξάνονται με γρηγορότερο ρυθμό τείνοντας στη διαρροή της σύνδεσης.

→ Για χρήση καλύτερης ποιότητας χάλυβα, η αντοχή της σύνδεσης καθορίζεται από την αντοχή του υλικού που χρησιμοποιείται. Ακόμα, η αξονική δύναμη του κοχλία προκύπτει μεγαλύτερη, ενώ οι τάσεις στη συγκόλληση έχουν αντίστοιχο περιθώριο μέχρι να φθάσει η συγκόλληση σε διαρροή.

→ Για τοποθέτηση του κοχλία πιο κοντά προς στο κέλυφος, η αντοχή, η οποία σχετίζεται με την ισορροπία του συστήματος κοχλία και πέλματος, αυξάνεται σημαντικά.

→ Για αυξανόμενη δύναμη προέντασης, η αρχική δυσκαμψία αυξάνεται προσδίδοντας, παράλληλα, αυξημένη αντοχή, ωστόσο συγκλίνει στη μέγιστη διατιθέμενη φέρουσα ικανότητα της σύνδεσης. Ομοίως, η αξονική δύναμη αυξάνεται ωστόσο συγκλίνει στη μέγιστη δύναμη που καθορίζεται από την ισορροπία του συστήματος κοχλία και πέλματος. Ενώ, η μέγιστη ισοδύναμη τάση στη συναρμογή του κελύφους θα αυξάνει πιο ομαλά μέχρι να διαρρεύσει το υλικό.

→ Για τοποθέτηση οριζόντιας ενίσχυσης στο μέσον της διατομής, η αντοχή προκύπτει μεγαλύτερη από τη διατομή χωρίς ενίσχυση και μικρότερη από τη διατομή με ενίσχυση περί τον κοχλία. Όμοια συμπεριφορά προκύπτει για την αξονική δύναμη του κοχλία και τις τάσεις στη συγκόλληση.

→ Για αυξανόμενο διάμετρο του κοχλία, προσδίδεται μεγαλύτερη δυσκαμψία και αντοχή, ενώ παράλληλα μπορεί να αναπτυχθεί αντίστοιχα μεγαλύτερη αξονική δύναμη.

### 7.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Εν συνεχεία, για περαιτέρω έρευνα των συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας με χρήση κοίλων διατομών, προτείνονται τα εξής θέματα για:

- την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού των συγκολλήσεων.
- την προσομοίωση των συγκολλήσεων ως θερμομηχανικό πρόβλημα, ώστε να υπάρχουν αρχικές παραμένουσες τάσεις και την ακόλουθη εύρεση της αντοχής τους σε κόπωση μέσω δυναμικών αναλύσεων.
- τη μελέτη συμπεριφοράς με παρουσία αρχικών ατελειών λόγω παραμορφωμένης γεωμετρίας, προερχόμενων κατά τη διαδικασία παραγωγής ή και κτυπήματος από τυχαίο γεγονός, εφαρμόζοντας, ουσιαστικά, μη γραμμικές αναλύσεις γεωμετρίας και υλικού με παρουσία αρχικών ατελειών. Σημαντική επιρροή θα υπάρχει όταν θα υπόκειται σε θλιπτικά φορτία.
- την εύρεση αντοχής μέσω μεθόδου θραυστομηχανικής για την ανάπτυξη ρωγμής σε κρίσιμα σημεία, όπως στον κοχλία, στο κέλυφος και στη συγκόλληση.
- την αντοχή των διατομών σε διάτμηση, όπως υπόκεινται κατά την μεταφορά τους στο εργοτάξιο.
- την πιστοποίηση των αριθμητικών προσομοιωμάτων μέσω πειραματικών δοκιμών.
- τη χρήση οριζόντιας ενίσχυσης στο μέσον κοίλης ορθογωνικής διατομής για αντίστοιχες παραμετρικές αναλύσεις.
- την απόκριση ολόκληρης της σύνδεσης του πυλώνα με παραμετρικές αναλύσεις.



## 8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Erich Hau. "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics" 2nd edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013

[2] Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E. (2001). "Wind energy handbook" John Wiley & Sons, Ltd Baffins Lane, Chichester West Sussex, PO19 1UD, England.

[3] <https://www.ni.com/en-us/innovations/white-papers/08/wind-turbine-control-methods.html#section--1829556288/>

[4] <http://www.steelwindtower.com/how-wind-turbine-work/>

[5] <https://www.iberdrola.com/sustainability/renewables-energy-wind-power>

[6] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι, Ιωαννίδης Γ, Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα, με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων, Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2005.

[7] Χάρης Ι. Γαντές, Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Κατερίνα Νταϊφώτη, «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΚΟΠΩΣΗΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ», Τελική Έκθεση του Προγράμματος με κωδικό ΕΛΚΕ 95/003800, Μάρτιος 2019

[8] DIN6914, "High Strength Hexagon Head Bolts", Deutsche Norm, 1989

[9] K.J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1982.

- [10] Μ. Παπαδρακάκης, "Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων", Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα, Ελλάδα, 2001.
- [11] ADINA System 9.4, Release Notes (for version 9.3.3), ADINA R&D Inc., 71 Elton Avenue, Watertown, USA, 2017.
- [12] Β. Μελισσιανός, Σ. Βερνάρδος, Η. Θανάσουλαι, "Οδηγίες Χρήσης Λογισμικού ADINA", Απρίλιος 2016.
- [13] EN 1993-1-8: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, European Committee for Standardization, 2005.
- [14] Γαντές Χ., "Μη γραμμική συμπεριφορά των κατασκευών" , Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, (www.kallipos.gr), Αθήνα 2015.
- [15] Κουνάδης Α.Ν., "Μη γραμμική θεωρία ελαστικής ευστάθειας" , Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2004.
- [16] Bucleam, M., & Bathe, K.J. "The Mechanics of Solids and Structures - Hierarchical Modeling and the Finite Element Solution", Springer - Verlag, Berlin Heidelberg, 2011
- [17] C. Petersen, "Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten", Stahlbau, Vieweg, 1993
- [18] C. Petersen, "Nachweis der Betriebsfestigkeit exzentrisch beanspruchter Ringflanschverbindungen", Stahlbau 67, Heft 3, 1998
- [19] Βάγιας Ι., "Σιδηρές Κατασκευές, Ανάλυση και διαστασιολόγηση", Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα, 2003.
- [20] Νταϊφώτη Αικατερίνη, "Διερεύνηση της συμπεριφοράς συνδέσεων σε πυλώνες ανεμογεννητριών βάσει αριθμητικών προσομοιώσεων", Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2014



