



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ  
ΣΕ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ  
ΒΑΣΕΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ**



**Αικατερίνη Νταϊφώτη**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας  
ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2014

ΕΜΚ ΔΕ 2014/ 28



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ  
ΣΕ ΠΥΛΩΝΕΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ  
ΒΑΣΕΙ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ**

**Αικατερίνη Νταϊφώτη**

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ

Συνεπιβλέπουσα: Κωνσταντίνα Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας  
ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2014

ΕΜΚ ΔΕ 2014/ 28

Νταϊφώτη Η. Α. (2014)  
Διερεύνηση της συμπεριφοράς συνδέσεων σε πυλώνες ανεμογεννητριών  
βάσει αριθμητικών προσομοιώσεων  
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2014/ 28  
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Ntaifoti I. A. (2014)  
Investigation of the behavior of wind turbine tower connections by numerical  
simulations  
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2014/ 28  
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Χάρη Γαντέ για την υποδειγματική καθοδήγησή του και την καθοριστική συμβολή του κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε να συνεργαστώ μαζί του πάνω στο θέμα αυτό.*

*Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την Υποψήφια Διδάκτορα ΕΜΠ, κ. Κωνσταντίνα Κουλάτσου για την πολύτιμη συνεισφορά της και τις χρήσιμες συμβουλές της κατά την χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων  
ADINA.*

*Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω ακόμα, στον Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό ΕΜΠ, κ. Ηλία Θανάσουλα για τον χρόνο τον οποίο μου διέθεσε και την ανεκτίμητη βοήθειά του σε προβλήματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.*







ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΕΜΚ ΔΕ 2014/ 28

## **Διερεύνηση της συμπεριφοράς συνδέσεων σε πυλώνες ανεμογεννητριών βάσει αριθμητικών προσομοιώσεων**

Αικατερίνη Η. Νταϊφώτη  
Επιβλέπων: Χ. Γαντές, Καθηγητής ΕΜΠ  
Συνεπιβλέπουσα: Κ. Κουλάτσου, Υποψήφια Διδάκτορας ΕΜΠ  
Νοέμβριος 2014

### **Περίληψη**

Με την πάροδο του χρόνου, η συνεχής αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας οδηγεί στην ανάγκη καλύτερης εκμετάλλευσης του αιολικού δυναμικού. Για τον σκοπό αυτό τα ύψη των σύγχρονων ανεμογεννητριών συνεχώς αυξάνονται και κατ' επέκταση και τα φορτία που τις καταπονούν. Λόγω της δυναμικής φύσης των φορτίων ανέμου, τα οποία αποτελούν το κρισιμότερο φορτίο μίας ανεμογεννήτριας, η κόπωση είναι το κυρίαρχο φαινόμενο αστοχίας μίας τέτοιας κατασκευής, γι' αυτό και η μελέτη των συνδέσεων μεταξύ διαδοχικών τμημάτων παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας στα 0,85 του ύψους του πυλώνα μία τυπικής ανεμογεννήτριας ονομαστικής ισχύος 1,5mW και ύψους πυλώνα 80m. Οι συνδέσεις αυτές υλοποιούνται μέσω δακτυλιοειδών ελασμάτων συγκολλημένων σε κάθε τμήμα του πυλώνα, τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες. Προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά αυτών των συνδέσεων δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά αριθμητικά προσομοιώματα και υποβλήθηκαν σε μη γραμμικές αναλύσεις υλικού και γεωμετρίας υπό στατικά φορτία, μέσω του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων ADINA. Μέσω των αναλύσεων αυτών επιχειρήθηκε να προσδιορισθεί το οριακό φορτίο αντοχής των συνδέσεων. Σε πρώτη φάση, προσομοιώθηκε ένα τμήμα μόνο της σύνδεσης μορφής βραχέος L, με τρισδιάστατα στοιχεία όγκου τόσο για το έλασμα και τον πυλώνα, όσο και για τον κοχλία, ενώ σε δεύτερη φάση, προσομοιώθηκε ολόκληρη η σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας καθώς επίσης και τμήμα του πυλώνα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και στοιχεία δοκού τύπου "bolt" για τους κοχλίες. Και για τα δύο αριθμητικά προσομοιώματα οι συνθήκες επαφής μεταξύ των ελασμάτων, της άντυγας του ελάσματος και του κορμού του κοχλίου και της κεφαλής του κοχλίου με το έλασμα λήφθηκαν υπόψη και προσομοιώθηκαν με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Η μη γραμμικότητα γεωμετρίας έγκειται στο γεγονός ότι το εξωτερικά επιβαλλόμενο φορτίο παραλαμβάνεται μέσω των αναπτυσσόμενων δυνάμεων επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων της σύνδεσης και είναι η κυρίαρχη μορφή μη γραμμικότητας του προβλήματος.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις και για τα δύο αριθμητικά προσομοιώματα, ώστε να αξιολογηθεί ο τρόπος που επηρεάζει η μεταβολή διαφόρων χαρακτηριστικών της σύνδεσης την συμπεριφορά της και την τιμή του οριακού φορτίου. Οι παράμετροι οι οποίες μελετήθηκαν ήταν η τιμή της δύναμης προέντασης του κοχλίου, η διάμετρος του κοχλίου, το πάχος των συνδεόμενων ελασμάτων της σύνδεσης καθώς επίσης και η ποιότητα του κοχλίου.





NATIONAL AND TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS  
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING  
DIVISION OF STRUCTURAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF STEEL STRUCTURES

DIPLOMA THESIS  
EMK ΔΕ 2014/ 28

## **Investigation of the behavior of wind turbine tower connections by numerical simulations**

Aikaterini I. Ntaifoti

Supervisor: Ch. Gantes, Professor N.T.U.A

Co-Supervisor: K. Koulatsou, PhD Candidate

November 2014

### **Abstract**

Nowadays, the fact of growing energy consumption results to an effort for better exploitation of the available wind resources. For this purpose, the height of modern wind turbines continuously increases and so do the wind loads acting on them. Due to the dynamic nature of the wind loads, which are the prevailing loads on wind turbines, fatigue is one of the most common types of structural failure. Thus, investigation of the connections between adjacent parts is of particular interest.

In the present diploma thesis, one such connection located at 85% of the tower height of a wind turbine of rated power 1.5mW with a tower height of 80m was investigated and it was attempted to determine its ultimate load. Such connections are realized by means of ring flanges that are pre-welded at each part of the tower and are bolted together with fully preloaded bolts. In order to describe these connections, two different numerical models were created. Due to material and geometrical non linearities, nonlinear analysis is performed with finite element program ADINA. Firstly, only a part of the L-shaped connection was simulated, using 3D solid elements both for the ring flange and the tower as well as the bolt. Then, the entire bolted ring flange connection, as well as parts of the tower, were simulated employing shell elements for the flange and "bolt" beam elements for the bolts. The interaction between flanges and bolts and between nuts and flanges was appropriately taken into account in both models using contact elements. Geometrical nonlinearity is due to the fact that the imposed load on the connection is resisted through the redistribution of the contact forces on the contact surfaces.

Finally, in order to evaluate the influence of different parameters to the connection's behavior and the value of the ultimate load, parametric analysis for both numerical simulations were performed. The parameters investigated were the value of pretension of the bolt, the diameter and the quality of the bolt, as well as the thickness of the ring flanges.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1</b>	<b>ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....</b>	<b>13</b>
1.1	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	13
1.2	ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ .....	15
1.3	Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ .....	20
1.3.1	Εισαγωγικά στοιχεία .....	20
1.3.2	Τύποι πυλώνων.....	20
1.3.3	Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες.....	24
1.3.4	Τεχνικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων.....	25
1.3.5	Θεμελίωση ανεμογεννητριών .....	29
<b>2</b>	<b>Η ΚΟΠΩΣΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ .....</b>	<b>31</b>
2.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	31
2.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ .....	33
2.2.1	Παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση.....	33
2.2.2	Αντοχή σε κόπωση.....	34
2.2.3	Η έννοια της συσσώρευσης βλάβης.....	35
2.3	ΕΥΡΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3 & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	36
2.4	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΥΡΟΥΣ ΤΑΣΕΩΝ .....	38
2.5	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ .....	43
2.5.1	Γενικά .....	43
2.5.2	Επιδράσεις μεγέθους στην αντοχή σε κόπωση .....	44
2.5.3	Επιρροή ύπαρξης οπών στην αντοχή σε κόπωση.....	44
2.6	ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ .....	45
<b>3</b>	<b>ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ .....</b>	<b>47</b>
3.1	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	47
3.2	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΓΚΟΥ .....	49
3.2.1	Περιγραφή αριθμητικού προσομοιώματος.....	49
3.2.2	Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης .....	53
3.2.3	Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων.....	59
<b>4</b>	<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L .....</b>	<b>67</b>
4.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΩΝ ΟΠΟΙΩΝ Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΜΕΛΕΤΑΤΑΙ .....	67
4.2	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ.....	68
4.2.1	Επιρροή της δύναμης προέντασης του κοχλία στην οριακή αντοχή.....	68

4.2.2	Επιρροή της δύναμης προέντασης σε χαρακτηριστικά μεγέθη .....	75
4.3	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ .....	83
4.3.1	Επιρροή της διαμέτρου του κοχλία στην οριακή αντοχή .....	83
4.3.2	Επιρροή της διαμέτρου του κοχλία σε χαρακτηριστικά μεγέθη .....	87
4.4	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ .....	97
4.4.1	Επιρροή του πάχους του δακτυλιοειδούς ελάσματος στην οριακή αντοχή .....	97
4.4.2	Επιρροή του πάχους του ελάσματος σε χαρακτηριστικά μεγέθη .....	102
4.5	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ.....	108
<b>5</b>	<b>ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ .....</b>	<b>117</b>
5.1	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	117
5.1.1	Περιγραφή του φορέα.....	117
5.1.2	Δρόμος ισορροπίας φορέα .....	123
5.1.3	Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων.....	130
<b>6</b>	<b>ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ .....</b>	<b>141</b>
6.1	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΦΟΡΕΑ.....	141
6.2	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ .....	142
6.3	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ .....	153
6.4	ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ .....	166
<b>7</b>	<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ &amp; ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>179</b>
7.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	179
7.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	180
7.3	ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ .....	181
	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>183</b>







# 1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

## 1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ

Με τον όρο αιολική ενέργεια εννοούμε την ενέργεια η οποία παράγεται από την εκμετάλλευση του πνέοντος ανέμου και η οποία προέρχεται από την μετακίνηση αέριων μαζών της ατμόσφαιρας. Αποτελεί μία καθαρή και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας μιας και δεν εκπέμπει ούτε προκαλεί ρύπους. Η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας ξεκινά χιλιάδες χρόνια πριν. Για τουλάχιστον 3000 χρόνια οι ανεμόμυλοι χρησιμοποίησαν την ενέργεια του ανέμου για το άλεσμα των σιτηρών και την άντληση νερού. Αλλά η αρχαιότερη μορφή εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας ήταν τα ιστία (πανιά) των πρώτων ιστιοφόρων πλοίων. Από τον 13<sup>ο</sup> αιώνα, οι ανεμόμυλοι οριζόντιου άξονα ήταν αναπόσπαστο τμήμα της αγροτικής οικονομίας και έπεσε σε δυσμένεια με την έλευση των κινητήρων φθηνού ορυκτού καυσίμου και αργότερα με την εξάπλωση της αγροτικής ηλεκτροδότησης. Οι σύγχρονοι ανεμόμυλοι ονομάζονται ανεμογεννήτριες, εξαιτίας της ιδιότητάς τους να μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική.

Αν και αρκετά χρόνια πριν, στα πλαίσια ερευνών δημιουργήθηκαν διάφορα μοντέλα ανεμογεννητριών, στην Αμερική κυρίως, η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας χρονολογείται περί το 1973, ενώ η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας με συστηματικό τρόπο άρχισε την δεκαετία του 80. Το ερέθισμα για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας ήταν η τιμή του πετρελαίου και η ανησυχία για περιορισμένους πόρους ορυκτών καυσίμων. Η βασική αιτία όμως χρήσης των ανεμογεννητριών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι πολύ χαμηλές εκπομπές CO<sub>2</sub> και οι δυνατότητες της αιολικής ενέργειας να βοηθήσουν στον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής.

Επομένως, μόλις εντοπισθεί μία ανεμώδης περιοχή και αφού εκτελεσθούν οι απαιτούμενες μετρήσεις και μελέτες για την αξιοποίηση του αιολικού της δυναμικού, τοποθετούνται μερικές δεκάδες ανεμογεννήτριες οι οποίες απαρτίζουν ένα αιολικό πάρκο.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η αιολική ενέργεια προέρχεται από την μετακίνηση αέριων μαζών της ατμόσφαιρας. Οι μετακινήσεις του αέρα, 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 και προφανώς η μεγαλύτερη θέρμανση συμβαίνει κατά την διάρκεια της μέρας. Ο θερμός αέρας υψώνεται, αναμειγνύεται με την ατμόσφαιρα, για να βυθιστεί και πάλι στην επιφάνεια σε περιοχές με ψυχρότερο

κλίμα. Η προκύπτουσα, μεγάλης κλίμακας, κίνηση 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. Επιπλέον, η διαφορετική θερμική συμπεριφορά της στεριάς από τη θάλασσα, αλλά και η ανομοιομορφία του εδάφους (βουνά, κοιλάδες, κλπ) προκαλούν τοπικά φαινόμενα και ανέμους.

Από την πλευρά της αιολικής ενέργειας, το πιο εμφανές χαρακτηριστικό ενός αιολικού πάρκου είναι η μεταβλητότητά του. Διότι ο άνεμος ποικίλλει και γεωγραφικά και χρονικά. Επιπλέον, αυτή η μεταβλητότητα εξακολουθεί να υφίσταται με ένα ευρύ φάσμα, τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο.

Σε μία μεγάλη κλίμακα η χωρική μεταβλητότητα περιγράφει το γεγονός ότι υπάρχουν πολλές διαφορετικές κλιματικές περιοχές στον κόσμο, μερικές περισσότερο ανεμώδεις από άλλες. Αυτές οι περιοχές υπαγορεύονται από το γεωγραφικό πλάτος, το οποίο επηρεάζει το ποσοστό της ηλιακής ακτινοβολίας. Μέσα σε κάθε μία κλιματική περιοχή υπάρχει ένα σημαντικό ποσοστό ποικιλότητας σε μικρότερη κλίμακα, το οποίο υπαγορεύεται αρκετά από την φυσική γεωγραφία, την αναλογία στεριάς θάλασσας, το μέγεθος των μαζών γης και την παρουσία βουνών ή πεδιάδων για παράδειγμα. Ο τύπος της βλάστησης μπορεί επίσης να έχει μία σημαντική επιρροή στην απορρόφηση και αντανάκλαση της ηλιακής ακτινοβολίας, επηρεάζοντας την θερμοκρασία στην επιφάνεια και την υγρασία.

Περισσότερο τοπικά, η τοπογραφία έχει μία σημαντική επιρροή στο αιολικό κλίμα. Για παράδειγμα, περισσότερος άνεμος παρατηρείται σε κορυφές λόφων ή βουνών παρά στην υπήνεμη πλευρά του εδάφους ή σε προστατευμένες κοιλάδες. Πιο τοπικά ακόμα, οι ταχύτητες ανέμου μπορεί να μειωθούν σημαντικά από εμπόδια, όπως δέντρα και κτίρια.

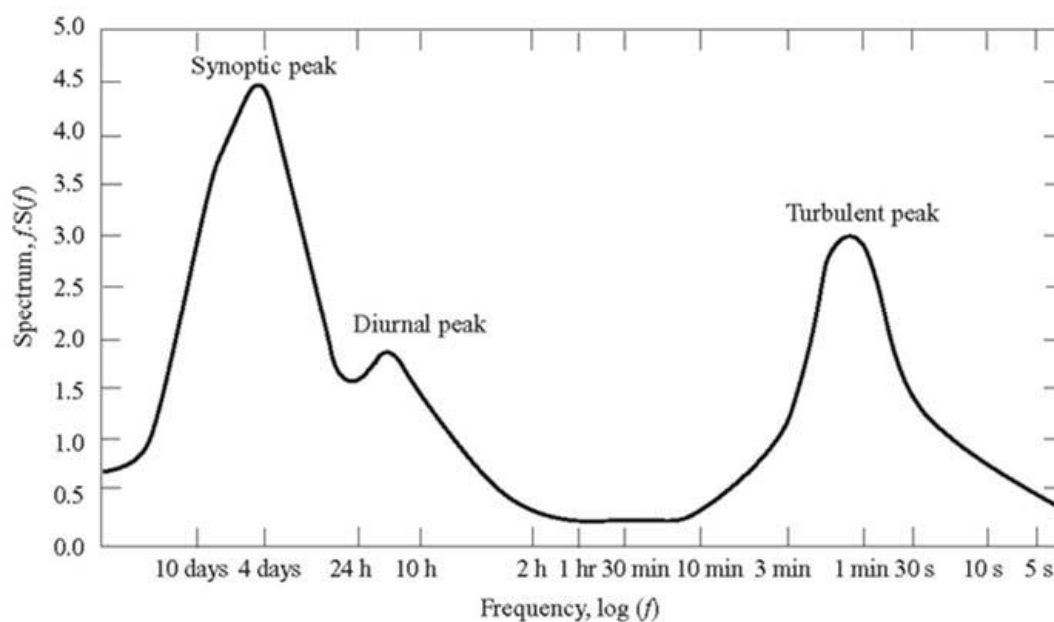
Σε μία δεδομένη τοποθεσία χρονική ποικιλότητα σε μεγάλη κλίμακα σημαίνει ότι το ποσοστό του ανέμου μπορεί να ποικίλλει από τον ένα χρόνο στον άλλο, με ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα ποικιλότητας για περιόδους δεκαετιών ή περισσότερο. Αυτές οι μακροπρόθεσμες ποικιλότητες δεν είναι πλήρως κατανοητές και μπορεί να καταστήσουν δύσκολη την ακριβή πρόβλεψη της οικονομικής βιωσιμότητας μίας συγκεκριμένης μελέτης, ενός αιολικού πάρκου για παράδειγμα.

Σε κλίμακα χρόνου 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 μέρες. Ανάλογα με την περιοχή μπορεί να υπάρχουν σημαντικές μεταβολές κατά την διάρκεια της ημέρας οι οποίες επίσης είναι συνήθως αρκετά προβλέψιμες (ημερήσιες μεταβολές). Σε αυτές τις χρονικές κλίμακες, η προβλεψιμότητα του ανέμου είναι σημαντική για την ενσωμάτωση μεγάλων ποσοτήτων αιολικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο ώστε να επιτρέψει στο άλλο εργοστάσιο παραγωγής που προμηθεύει το δίκτυο να οργανωθεί κατάλληλα.

Σε ακόμα μικρότερες κλίμακες χρόνου, μερικών λεπτών ή και δευτερολέπτων ή λιγότερο, οι μεταβολές στην ταχύτητα του ανέμου, γνωστές και ως τύρβη, μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά τον σχεδιασμό και την λειτουργία μίας μεμονωμένης ανεμογεννήτριας, καθώς επίσης και την ποιότητα της ενέργειας η οποία μεταφέρεται στο δίκτυο και να έχει επιπτώσεις στους καταναλωτές.

Ο Van der Hoven κατασκεύασε ένα φάσμα ταχυτήτων ανέμου στο οποίο είναι εμφανής η χρονική μεταβλητότητα του ανέμου (σχήμα 1-1).

Λόγω της μεταβλητότητας της αιολικής ενέργειας, γίνεται αντιληπτό ότι η κατανόηση των χαρακτηριστικών ενός αιολικού πάρκου είναι κρίσιμη για όλες τις πτυχές εκμετάλλευσης της αιολικής ενέργειας, από την ταυτοποίηση των κατάλληλων θέσεων εγκατάστασης του αιολικού πάρκου, τις προβλέψεις για την οικονομική βιωσιμότητα του αιολικού πάρκου ως τον σχεδιασμό των ίδιων των ανεμογεννητριών και τον προσδιορισμό της επιρροής τους στα δίκτυα κατανομής του ηλεκτρισμού και τους καταναλωτές. Γι' αυτό και η μελέτη ενός τέτοιου έργου απαιτεί την πραγματοποίηση πολλών διαφορετικών μελετών.



Σχήμα 1-1: φάσμα ταχυτήτων ανέμου στο Brookhaven της Ν. Υόρκης από τον Van der Hoven (1957) [2]

## 1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

Ο γενικός όρος ανεμογεννήτρια χρησιμοποιείται πλέον για μηχανές με περιστρεφόμενες λεπίδες που μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε χρήσιμη ενέργεια. Υπάρχουν διάφορα σχέδια ανεμογεννητριών, συμπεριλαμβανομένων οριζόντιου άξονα και κατακόρυφου άξονα, καθώς επίσης και ανεμογεννήτριες που είναι εφοδιασμένες με 1, 2, 3 ή και περισσότερες λεπίδες (σχήμα 1-4 & σχήμα 1-5).

Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες όπως εξελίχθηκαν, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως δυο ή τριών λεπίδων οριζόντιου άξονα και με προσήνεμους ρότορες. Σήμερα, η επιλογή ανάμεσα σε ανεμογεννήτριες δύο ή τριών λεπίδων είναι απλώς θέμα συντονισμού μεταξύ της αεροδυναμικής αποτελεσματικότητας, της πολυπλοκότητας, του κόστους, του θορύβου και της αισθητικής. Ενώ μέχρι σήμερα ήταν κυρίαρχες ανεμογεννήτριες με σταθερή ταχύτητα ρότορα, ανεμογεννήτριες με μεταβαλλόμενη ταχύτητα ρότορα γίνονται όλο και περισσότερο κοινές, σε μία προσπάθεια να βελτιστοποιήσουμε την σύλληψη ενέργειας, να μειώσουμε τα φορτία, να αποκτήσουμε καλύτερη ποιότητα ενέργειας και να έχουμε πιο εξελιγμένες πτυχές ελέγχου ενέργειας.

Για να περιορίσουμε να ανεπιθύμητο φαινόμενο μεγάλων φορτίων ανέμου και για να αυξήσουμε την αποτελεσματικότητά τους οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται με λιγότερες λεπίδες, πιο μακριές και πιο λιγυρές. Για να αντισταθμίσουν την λυγηρότητα των λεπίδων, οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες λειτουργούν σε υψηλότερες ταχύτητες ανέμου.

Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα (σχήμα 1-2) έχουν το πλεονέκτημα ότι το κιβώτιο ταχυτήτων και η γεννήτρια είναι στο έδαφος οπότε είναι πιο εύκολη η πρόσβαση και δεν χρειάζεται μηχανισμός εκτροπής. Ωστόσο, παρουσιάζουν μειονεκτήματα, όπως ότι έχουν ένα πολύ χαμηλότερο επίπεδο αποτελεσματικότητας, το γεγονός ότι η ανεμογεννήτρια χρειάζεται πλήρη αποσυναρμολόγηση για την αντικατάσταση του κύριου εδράνου και ότι ο ρότορας τοποθετείται σχετικά κοντά στο έδαφος όπου δεν υπάρχει πολύς άνεμος.

Αντίθετα, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα (σχήμα 1-3) αποτελούν τον πιο συχνό τύπο ανεμογεννήτριας σε χρήση στις μέρες μας. Στην πραγματικότητα, όλες οι εμπορικές ανεμογεννήτριες

που ανήκουν σε ένα δίκτυο ανεμογεννητριών σήμερα είναι σχεδιασμένες με ρότορα τύπου προπέλας τοποθετημένου σε ένα οριζόντιο άξονα στην κορυφή ενός κατακόρυφου πύργου.

Σε αντίθεση με τον τρόπο λειτουργίας των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα πρέπει να ευθυγραμμίζονται με την κατεύθυνση του ανέμου, επιτρέποντας έτσι στον αέρα να ρέει παράλληλα προς τον άξονα περιστροφής.

Όσον αφορά τις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα γίνεται διάκριση μεταξύ αυτών που έχουν προσήνεμους ρότορες και υπήνεμους. Οι προσήνεμοι ρότορες αντιμετωπίζουν τον άνεμο μπροστά από έναν κατακόρυφο πύργο και έτσι έχουν το πλεονέκτημα να αποφεύγουν κάπως την επίδραση της σκιάς του ανέμου από την παρουσία του πύργου. Ανεμογεννήτριες με προσήνεμους ρότορες χρειάζονται μηχανισμό εκτροπής ώστε να διατηρήσουν τον άξονα του ρότορα ευθυγραμμισμένο με την κατεύθυνση του ανέμου. Ωστόσο, στις ανεμογεννήτριες υπήνεμου ρότορα τα φορτία κόπωσης είναι μεγαλύτερα.



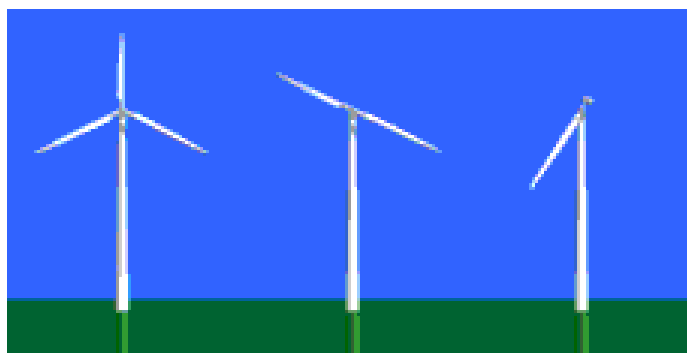
Σχήμα 1-2: ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα [4]



Σχήμα 1-3: ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα [2]



Σχήμα 1-4: ανεμογεννήτριες πολλαπλών λεπίδων [4]



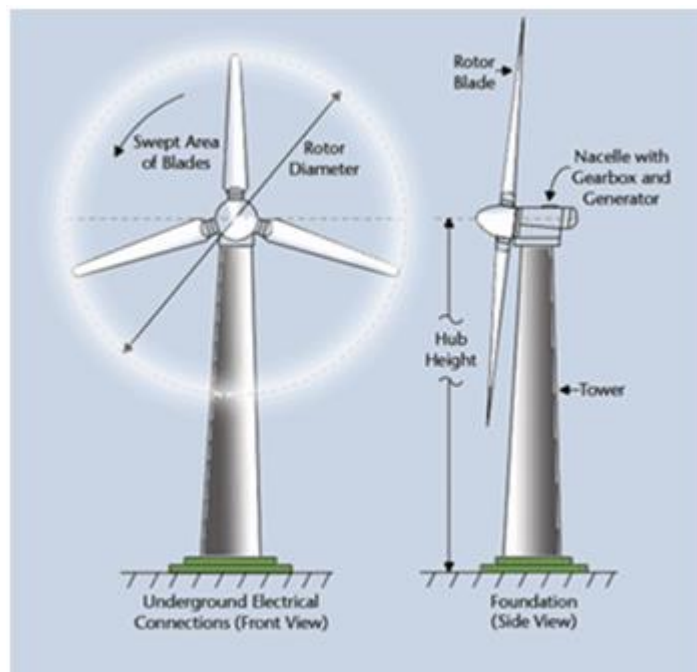
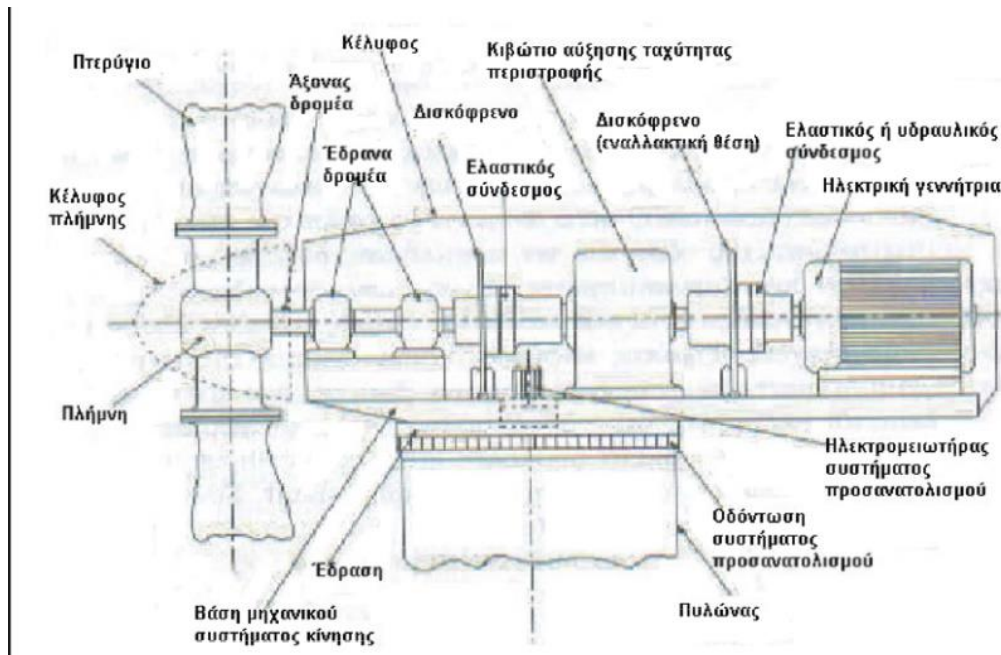
Σχήμα 1-5: ανεμογεννήτριες 1, 2 και 3 λεπίδων [4]

Όσον αφορά τον αριθμό των λεπίδων, στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες το πιο κοινό μοντέλο είναι αυτό των 3 λεπίδων. Τα μοντέλα με 1 ή 2 λεπίδες έχουν το πλεονέκτημα να εκπροσωπούν μία πιθανή εξοικονόμηση σε σχέση με το κόστος και το βάρος του ρότορα. Ωστόσο, η χρήση λιγότερου πλήθους λεπίδων συνεπάγεται ότι χρειάζεται υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής των λεπίδων ή μεγαλύτερη χορδή για να δώσει την ίδια ενέργεια εξόδου με μία γεννήτρια ίδιου μεγέθους αλλά 3 λεπίδων.

Οι ανεμογεννήτριες σχεδιάζονται για να παράγουν ηλεκτρισμό όσο πιο φθηνά γίνεται. Για τον σκοπό αυτό, οι ανεμογεννήτριες γενικά σχεδιάζονται για να δώσουν μέγιστη ισχύ εξόδου, σε ταχύτητες ανέμου γύρω στα 15m/s. Στην περίπτωση ισχυρότερων ανέμων, οι οποίοι ούτως ή άλλως είναι πολύ σπάνιοι, είναι χρήσιμο να σπαταλήσουμε την πλεονάζουσα ενέργεια έτσι ώστε να αποφύγουμε πιθανή βλάβη της ανεμογεννήτριας. Γι' αυτό το λόγο, η ανεμογεννήτρια χρειάζεται κάποιου είδους έλεγχο ισχύος. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται αυτό είναι μέσω ενός συστήματος ελέγχου κλίσης πτερυγίων (pitch control), ώστε τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας να στρίβουν κατάλληλα σε σχέση με την διεύθυνση του ανέμου.

Μια τυπική ανεμογεννήτρια οριζώντιου άξονα αποτελείται από τα παρακάτω κύρια μέρη (σχήμα 1-6):

- ❖ το δρομέα, που αποτελείται από δύο ή τρία πτερύγια από ενισχυμένο πολυεστέρα. Τα πτερύγια προσδένονται πάνω σε μια πλήμνη είτε σταθερά, είτε με τη δυνατότητα να περιστρέφονται γύρω από το διαμήκη άξονα τους μεταβάλλοντας το βήμα.
- ❖ το σύστημα μετάδοσης της κίνησης, αποτελούμενο από τον κύριο άξονα, τα έδρανα του και το κιβώτιο πολλαπλασιασμού στροφών, το οποίο προσαρμόζει την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα στη σύγχρονη ταχύτητα της ηλεκτρογεννήτριας. Η ταχύτητα περιστροφής παραμένει σταθερή κατά την κανονική λειτουργία της μηχανής.
- ❖ την ηλεκτρική γεννήτρια, σύγχρονη ή επαγωγική με 4 ή 6 πόλους η οποία συνδέεται με την έξοδο του πολλαπλασιαστή μέσω ενός ελαστικού ή υδραυλικού συνδέσμου και μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική και βρίσκεται συνήθως πάνω στον πύργο της ανεμογεννήτριας. Υπάρχει και το σύστημα πέδης το οποίο είναι ένα συνηθισμένο δισκόφρενο που τοποθετείται στον κύριο άξονα ή στον άξονα της γεννήτριας.
- ❖ το σύστημα προσανατολισμού, αναγκάζει συνεχώς τον άξονα περιστροφής του δρομέα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.
- ❖ τον πύργο, ο οποίος στηρίζει όλη την παραπάνω ηλεκτρομηχανολογική εγκατάσταση.
- ❖ τον ηλεκτρονικό πίνακα και τον πίνακα ελέγχου, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι στη βάση του πύργου. Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί, συντονίζει και ελέγχει όλες τις λειτουργίες της ανεμογεννήτριας, φροντίζοντας για την απρόσκοπτη λειτουργία της.



Σχήμα 1-6: κύρια συστατικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα (πηγή: [ape1epalsyrou.weebly.com](http://ape1epalsyrou.weebly.com) & [www.eac.com](http://www.eac.com))



### 1.3 Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΤΗΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ

#### 1.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Ο πυλώνας αποτελεί ένα πολύ βασικό στοιχείο της ανεμογεννήτριας, του οποίου ο σχεδιασμός απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Παρότι, μπορεί να θεωρηθεί μία συμβατική δομή όταν λαμβάνεται υπόψη μεμονωμένα, ο σωστός σχεδιασμός του απαιτεί την κατανόηση ενός σημαντικού ποσοστού του συνολικού συστήματος της ανεμογεννήτριας και της εφαρμογής του. Ο σχεδιασμός του πυλώνα, όπως και κάθε κατασκευής, πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις ασφάλειας και ανθεκτικότητας με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Πιο συγκεκριμένα, ο πυλώνας θα πρέπει να έχει το απαραίτητο ύψος, την απαιτούμενη δυσκαμψία και όσο το δυνατόν χαμηλότερη μάζα ώστε να μην επιβαρύνεται η κατασκευή. Και παράλληλα, να είναι εφικτή η κατασκευή του πυλώνα που θα προβλέπεται από τον σχεδιασμό. [1]

Στις μέρες μας, οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα συνήθως διαθέτουν ένα πολύ ψηλό πυλώνα. Αυτό μπορεί να είναι τόσο ένα πλεονέκτημα όσο και ένα μειονέκτημα. Διότι όσο το ύψος του πυλώνα αυξάνεται η μεταφορά, η συναρμολόγηση και η ανέγερσή του καθώς και η συντήρηση των συστατικών μερών της ανεμογεννήτριας γίνεται όλο και πιο δύσκολη και δαπανηρή. Το κόστος του πυλώνα, στην περίπτωση αυτή, μπορεί να ανέλθει σε έως και 20% του συνολικού κόστους της ανεμογεννήτριας, γεγονός το οποίο σίγουρα αποτελεί ένα μειονέκτημα. Από την άλλη μεριά, η ενεργειακή απόδοση της ανεμογεννήτριας επίσης αυξάνεται με το ύψος του πυλώνα, αφού η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται με το ύψος και γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

Θεωρητικά, το βέλτιστο ύψος πυλώνα βρίσκεται στο σημείο όπου οι δύο λειτουργίες, αύξησης του κόστους κατασκευής και ενεργειακής απόδοσης, τέμνονται. Ωστόσο, η εύρεση αυτού του σημείου τομής δεν είναι πάντοτε εφικτή. Διότι οι παράγοντες που υπεισέρχονται στην εύρεσή του είναι πολλοί και αντικρουόμενοι. Σε μεγάλες ανεμογεννήτριες, το κόστος κατασκευής αυξάνεται πιο γρήγορα με την αύξηση του ύψους του πυλώνα, απ' ό,τι σε μικρές ανεμογεννήτριες. Ακόμα πιο βασικό ρόλο παίζει η επιλογή του τόπου εγκατάστασης της ανεμογεννήτριας. Σε νησιωτικές περιοχές, δηλαδή σε περιοχές με υψηλό βαθμό επιφανειακής τραχύτητας, η ταχύτητα του ανέμου αυξάνεται πιο γρήγορα με το ύψος, απ' ό,τι σε χερσαίες περιοχές. Γι' αυτό το λόγο, σε νησιωτικές περιοχές η κατασκευή μεγάλων ανεμογεννητριών με ύψος πυλώνα από 80m και πάνω, είναι καθοριστικός παράγοντας για την οικονομική χρήση του αιολικού δυναμικού.

Η δεύτερη πιο σημαντική παράμετρος του σχεδιασμού είναι η δυσκαμψία του πυλώνα. Αυτή καθορίζει το υλικό που απαιτείται και τελικά το κόστος κατασκευής. Ο στόχος του σχεδιασμού του πυλώνα είναι να πετύχουμε το επιθυμητό ύψος πυλώνα με την απαιτούμενη δυσκαμψία στο 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 στην βάση του πυλώνα θα πρέπει να ξεπερνά τα 5m προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή αντοχή. Σ' αυτή την περίπτωση όμως, δεν θα είναι πλέον εφικτή η οδική μεταφορά των τμημάτων του πυλώνα στο χώρο του έργου. Αυτό αποτελεί ένα ισχυρό κίνητρο ώστε να βρεθούν καινοτόμες λύσεις στον σχεδιασμό πυλώνων.

#### 1.3.2 Τύποι πυλώνα

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι ανάλογα με την περιοχή και τις απαιτήσεις διαφοροποιείται ο τύπος πυλώνα που θα δώσει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Οι τεχνικές απαιτήσεις που τίθενται από το συνολικό σύστημα μπορούν να ικανοποιηθούν με σχεδόν οποιαδήποτε παραλλαγή, αλλά το οικονομικό βέλτιστο επιτυγχάνεται ταιριάζοντας κατάλληλα τον επιλεγμένο σχεδιασμό πυλώνα με τις απαιτήσεις που ορίζονται. Κάθε τύπος πυλώνα έχει κάποια πλεονεκτήματα και κάποια μειονεκτήματα. Εκτός από τις λειτουργικές πτυχές, δεν πρέπει να αγνοηθεί το γεγονός ότι ο πυλώνας, ακόμα περισσότερο από

την άτρακτο, καθορίζει την εξωτερική εμφάνιση μιας ανεμογεννήτριας. Δέουσα προσοχή θα πρέπει συνεπώς να δοθεί στην αισθητική του έργου, ακόμη κι αν αυτό συνεπάγεται ορισμένες πρόσθετες δαπάνες.

Οι παλαιότεροι τύποι ανεμογεννητριών, οι ανεμόμυλοι είχαν χαμηλό ύψος σε σχέση με την διάμετρο του ρότορα και ογκώδη κατασκευή, λόγω της λειτουργίας τους ως χώρος εργασίας, παρέχοντας έτσι την απαιτούμενη δυσκαμψία. Σύντομα όμως αναγνωρίστηκε το πλεονέκτημα του αυξανόμενου ύψους και έτσι ο μύλος άρχισε να γίνεται πιο λυγρός, μοιάζοντας περισσότερο με πύργο. Αλλά μόνο στις σύγχρονες ανεμογεννήτριες χρησιμοποιήθηκαν πυλώνες, η μόνη λειτουργία των οποίων έγκειται στην στήριξη του ρότορα και των μηχανικών εξαρτημάτων της κεφαλής του πυλώνα. Σαν συνέπεια αυτής της ανάπτυξης, σχεδιασμοί και υλικά πυλώνων παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία. Ο χάλυβας και το σκυρόδεμα πήραν τη θέση των ξύλινων κατασκευών των ανεμόμυλων και αποτελούν πλέον τα διαθέσιμα υλικά που έχουμε για τους διάφορους τύπους ανεμογεννητριών.

Δικτυωτοί πυλώνες: πρόκειται για ψηλούς και δύσκαμπτους πυλώνες των οποίων ο πύργος αποτελείται από δικτυώματα τριών διαστάσεων (σχήμα 1-7). Οι δικτυωτοί πυλώνες ήταν η προτιμώμενη μέθοδος σχεδιασμού των πρώτων πειραματικών ανεμογεννητριών. Καθώς επίσης, τα πρώτα χρόνια και των μικρότερων εμπορικών ανεμογεννητριών. Σήμερα, ο δικτυωτός πυλώνας αποτελεί εναλλακτική λύση του χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα, στην περίπτωση όπου έχουμε μεγάλες ανεμογεννήτριες με πολύ υψηλούς πυλώνες σε νησιωτικές περιοχές. Το κόστος παραγωγής δικτυωτών πυλώνων είναι χαμηλότερο ως και 20% από το κόστος των χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων. Αλλά δεν πρέπει να παραβλέπεται το γεγονός ότι το κόστος συναρμολόγησης και συντήρησης ενός δικτυωτού πυλώνα είναι μεγαλύτερο.

Πυλώνες από οπλισμένο σκυρόδεμα: αυτού του τύπου οι πυλώνες χρησιμοποιήθηκαν για τις πρώτες μεγάλες πειραματικές ανεμογεννήτριες στην Δανία (σχήμα 1-8). Αργότερα, οι χαλύβδινι πυλώνες κυριάρχησαν και στις εμπορικές ανεμογεννήτριες. Σήμερα, οι πυλώνες από σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται όταν το απαιτούμενο ύψος ξεπερνά τα 80m. Το μειονέκτημα αυτού του τύπου είναι ότι η συνολική μάζα αυξάνεται σημαντικά σε σχέση με τον τύπο του χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα. Αλλά το κόστος εδώ είναι εξαιρετικά χαμηλό, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται προκατασκευασμένα προεντεταμένα τμήματα από σκυρόδεμα.

Αυτόνομοι χαλύβδινι σωληνωτοί πυλώνες: αποτελεί τον πιο κοινό τύπο πυλώνα σε χρήση σήμερα. Δίνουν την δυνατότητα να μειώνεται η μάζα της κατασκευής, μιας και η δυσκαμψία σχεδιασμού είναι χαμηλότερη. Επομένως, και το κόστος μειώνεται λόγω μείωσης της μάζας.

Χαλύβδινι σωληνωτοί πυλώνες με αγκύρια: αυτοί είναι αγκυρωμένοι με χαλύβδινα καλώδια ή σε μερικές περιπτώσεις με δύσκαμπτα δικτυώματα ώστε να ενισχύσουν την απαιτούμενη καμπτική δυσκαμψία του πυλώνα (σχήμα 1-9). Η διάμετρος και η μάζα του πυλώνα μπορούν να μειωθούν σημαντικά με την χρήση αυτού του τύπου. Παρά την συγκριτικά χαμηλή συνολική τους μάζα όμως, οι αγκυρωμένοι πυλώνες δεν είναι αποδοτικοί από πλευράς κόστους. Τα αγκύρια και τα πρόσθετα απαιτούμενα θεμέλια αγκύρωσης που απαιτούνται διογκώνουν το συνολικό κόστος. Επιπλέον, σε αγροτικές περιοχές τα αγκύρια αυτά αποτελούν εμπόδια που περιορίζουν την πρόσβαση.



Σχήμα 1-7: δικτυωτός πυλώνας ανεμογεννήτριας Vestas V80 [1]



Σχήμα 1-8: πυλώνας από οπλισμένο σκυρόδεμα πειραματικής ανεμογεννήτριας [1]



Σχήμα 1-9: χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με αγκύρια [1]



Σχήμα 1-10: αυτόνομος χαλύβδινος σωληνωτός πυλώνας μίας ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα [1]

### 1.3.3 Αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες

Σήμερα, οι αυτόνομοι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες είναι μακράν ο προτιμώμενος τύπος κατασκευής εμπορικών ανεμογεννητριών. Ο κυριότερος λόγος που οδηγεί σ' αυτή την επιλογή είναι ο μικρός χρόνος που απαιτείται για την επιτόπια συναρμολόγηση και ανέγερση. Η προτίμηση όμως στους πυλώνες αυτού του τύπου, στηρίζεται επίσης και από το γεγονός ότι η τιμή του χάλυβα σήμερα είναι πολύ χαμηλή.

Οι χαμηλοί πυλώνες με ύψος μέχρι τα 20μ. μπορούν να κατασκευαστούν από ένα και μόνο τμήμα το οποίο κοχλιώνεται απλά στο θεμέλιο στον χώρο του έργου. Αντίθετα, για υψηλότερους πυλώνες με ύψος μέχρι 100μ. επειδή δεν είναι δυνατή η οδική μεταφορά ενός μόνο τμήματος, κατασκευάζονται από περισσότερα τμήματα. Τα τμήματα αυτά κοχλιώνονται μεταξύ τους, έτσι ώστε να μην απαιτούνται συγκολλήσεις στο χώρο του έργου.

Η διαστασιολόγηση ενός πυλώνα καθορίζεται από ένα αριθμό απαιτήσεων αντοχής και δυσκαμψίας. Οι παράμετροι οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό είναι:

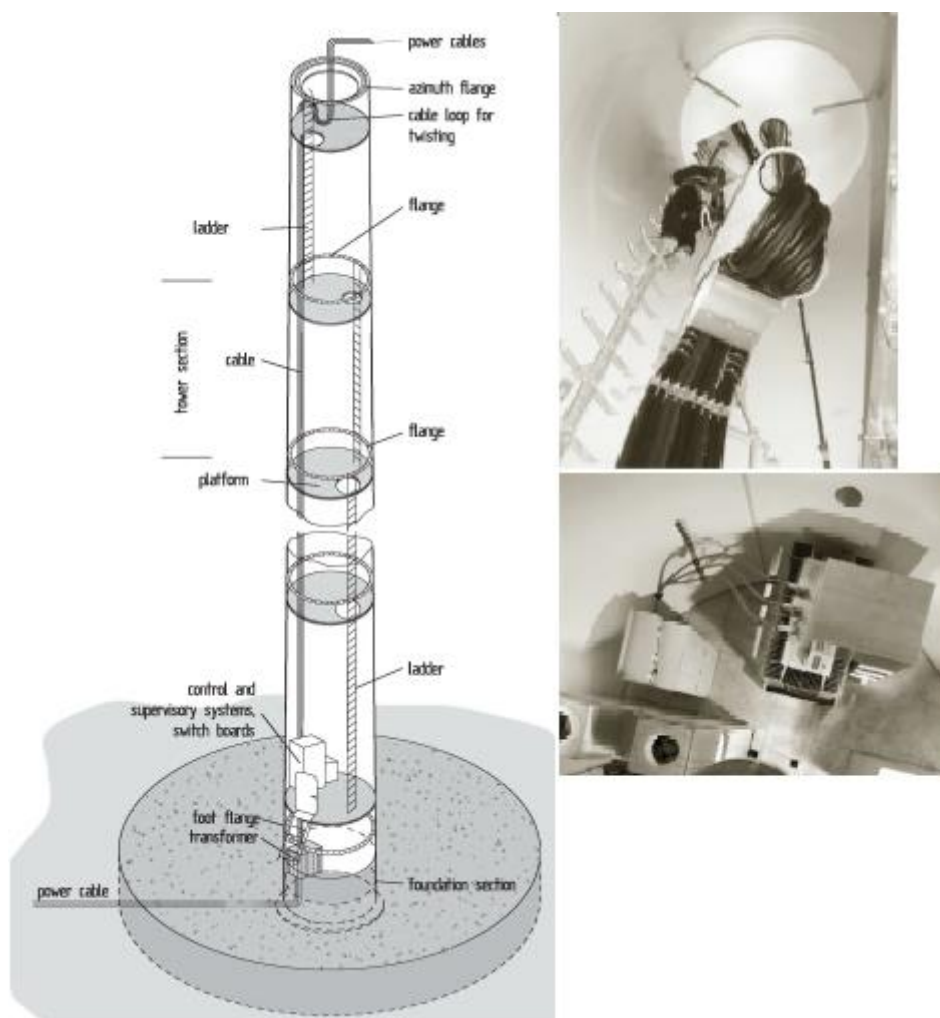
- Η αντοχή σε θραύση που απαιτείται ώστε να επιβιώσει τις ακραίες ταχύτητες ανέμου. Το στατικό φορτίο καθορίζεται από το βάρος της κεφαλής του πύργου, το ίδιο βάρος του πυλώνα και την αεροδυναμική ώθηση του ρότορα. Σημαντικό ρόλο στην τιμή αυτού του φορτίου παίζει το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων της ανεμογεννήτριας, pitch control ή stall control. Στην κλασσική περίπτωση, το φορτίο θραύσης είναι αυτό που θα δώσει την καμπτική ροπή που δρα στην βάση του πυλώνα.
- Η αντοχή σε κόπωση που απαιτείται για διάρκεια ζωής 20 έως 30 χρόνια λειτουργίας. Το δυναμικό φορτίο που προκαλείται από την ώθηση του ρότορα κατά την λειτουργία της ανεμογεννήτριας είναι καθοριστικό για την αντοχή σε κόπωση λυγρών πυλώνων. Επιπλέον, πρόσθετα φορτία που προκαλούνται από τυχόν δονητική συμπεριφορά της ανεμογεννήτριας σε περιπτώσεις συντονισμού πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη. Επομένως, μία αμιγώς στατική ανάλυση τάσεων στην περίπτωση της ανεμογεννήτριας δεν είναι επαρκής.
- Η απαιτούμενη δυσκαμψία του πυλώνα, η οποία εκτός από μερικές εξαιρέσεις είναι το σημαντικότερο κριτήριο για την διαστασιολόγηση του πυλώνα. Είναι αυτή που καθορίζει το απαραίτητο πάχος τοιχώματος.
- Η αντοχή σε λυγισμό. Σημαντικό κριτήριο για τους λεπτότοιχους κυρίως χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες είναι η αντίσταση σε τοπικό λυγισμό του τοίχους του πυλώνα. Η βελτιστοποίηση του αυξανόμενου βάρους στους σύγχρονους χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες έχει σαν αποτέλεσμα η αντοχή σε λυγισμό να είναι συχνά καθοριστική για την επιλογή του απαιτούμενου πάχους του τοίχους του πυλώνα.

Ο σχεδιασμός ενός δύσκαμπτου πυλώνα είναι πάντοτε η πιο απλή και ασφαλής λύση, αλλά η μάζα του πυλώνα που απαιτείται ώστε να επιτευχθεί αυτό αυξάνεται πολύ. Για ανεμογεννήτριες με ύψος πυλώνα άνω των 80μ. για οικονομικούς λόγους η δυσκαμψία πρέπει να διατηρείται τόσο χαμηλά όσο είναι τεχνικά εφικτό.

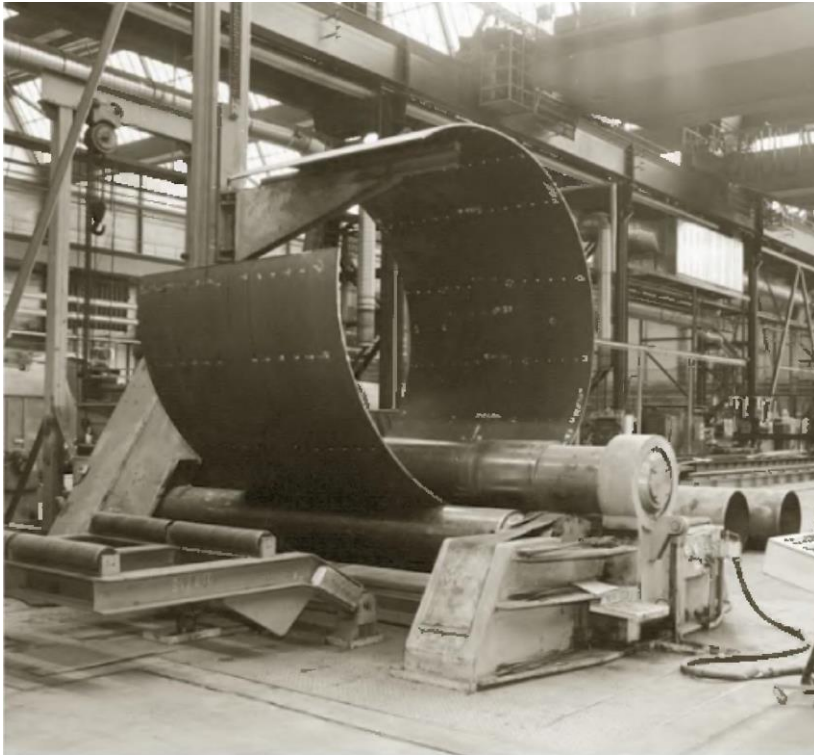
### 1.3.4 Τεχνικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων

Σήμερα, οι πυλώνες των μεγάλων ανεμογεννητριών, σχεδόν χωρίς εξαίρεση, έχουν ένα κωνικό σχήμα. Δηλαδή η διάμετρος του πυλώνα μειώνεται σταδιακά από την βάση ως την κεφαλή του. Διότι παρότι ένας αυτόνομος κυλινδρικός σωλήνας με σταθερό πάχος τοιχώματος μπορεί να είναι απλός στην κατασκευή, δεν είναι σε καμία περίπτωση ο βέλτιστος. Για τις δεδομένες απαιτήσεις ύψους και δυσκαμψίας, η συνολική μάζα μπορεί να μειωθεί αποφασιστικά με την επιλογή μίας κωνικής γεωμετρίας πυλώνα. Η διεύρυνση της βάσης ενός χαλύβδινου πυλώνα κωνικά, μας δίνει την δυνατότητα να διαθέτουμε την απαιτούμενη δυσκαμψία με μία μειωμένη συνολική μάζα.

Ο πυλώνας αποτελείται από έναν αριθμό προκατασκευασμένων τμημάτων με μήκος μέχρι 30μ. Τα τμήματα αυτά παράγονται από φύλλα ενός χαλύβδινου ελάσματος με πάχη 10mm-50mm. Τα φύλλα τα οποία έχουν πλάτος περίπου 2m, τυλίγονται σε ένα κυκλικό σχήμα σε μία κυλιόμενη βάση, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-12. Στην συνέχεια, τα τμήματα αυτά των 2m συγκολλούνται μεταξύ τους δημιουργώντας κάθε ένα από τα τμήματα πυλώνα. Στις περισσότερες περιπτώσεις για τις συγκολλήσεις αυτές χρησιμοποιούνται αυτόματοι συγκολλητές. Διότι οι συγκολλήσεις σε τέτοια έργα απαιτούν



Σχήμα 1-11: συστατικά μέρη ενός αυτόνομου χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα [1]



Σχήμα 1-12: κατασκευή τμημάτων πυλώνα πλάτους 2m [1]

ιδιαίτερη προσοχή. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, όπως υπέρηχοι, ακτίνες Χ αλλά και οπτικοί έλεγχοι για επιφανειακές ρωγμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητα των συγκολλήσεων.

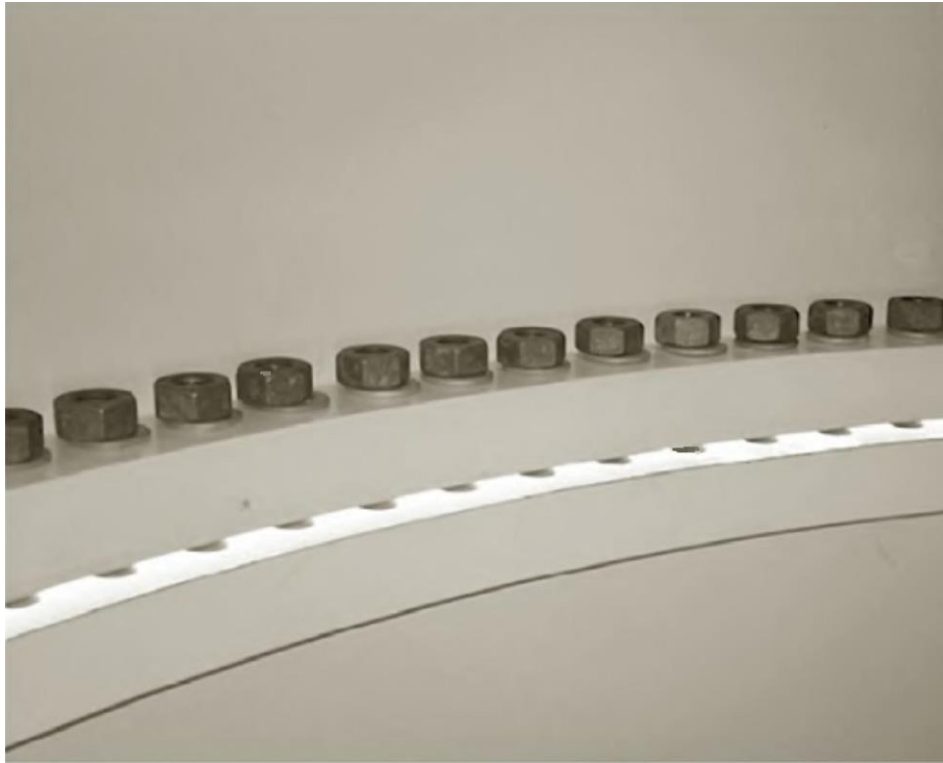
Στα άκρα του κάθε τμήματος πυλώνα συγκολλούνται οι εσωτερικές φλάντζες, οι οποίες κατασκευάζονται από χάλυβα υψηλής αντοχής. Και εδώ η διαμόρφωση και η συγκόλληση των δακτυλίων απαιτεί κάποια εξειδίκευση αφού τα συστατικά μέρη μπορούν εύκολα να παραμορφωθούν και αυτό θα 'χει σαν αποτέλεσμα οι δακτύλιοι να μην ταιριάζουν κατά την συναρμολόγηση. Τα προκύπτοντα κενά ανάμεσα στα τμήματα του πυλώνα είναι ένα ποιοτικό ελάττωμα το οποίο συναντάται συχνά σε χαλύβδινους σωληνωτούς πυλώνες.

Στο σχήμα 1-13 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο κοχλιώνονται δύο τμήματα πυλώνα μεταξύ τους. Είναι πολύ βασικό να τονίσουμε ότι οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται για την σύνδεση τμημάτων της ανεμογεννήτριας είναι πάντοτε προεντεταμένοι. Διότι μόνο έτσι μπορούμε να διασφαλίσουμε την απαιτούμενη αντοχή σε κόπωση. Οι δακτύλιοι στις περισσότερες περιπτώσεις είναι εσωτερικοί, μίας και οι διάμετροι πυλώνα των μεγάλων ανεμογεννητριών έχουν διαστάσεις που επιτρέπουν την παρουσία των τεχνικών στο εσωτερικό του πυλώνα και την πραγματοποίηση της σύνδεσης. Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός ότι οι κοχλίες τοποθετούνται ανάποδα στην σύνδεση, δηλαδή με την κεφαλή του κοχλία από κάτω και το περικόχλιο από πάνω. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, είναι για να αποφύγουμε τυχόν αστοχίες. Επειδή υπάρχει περίπτωση λόγω εναλλασσόμενης φόρτισης από τα φορτία ανέμου κάποιος κοχλίας να χαλαρώσει και να πέσει, μ' αυτή την τοποθέτηση αυτό θα γίνει αμέσως αντιληπτό κατά την συντήρηση.

Επομένως, κατά την ανέγερση της ανεμογεννήτριας πρώτα κατασκευάζεται το θεμέλιο. Έπειτα, το κατώτερο τμήμα του πυλώνα κοχλιώνεται στο τμήμα θεμελίωσης το οποίο κατασκευάζεται χωριστά και ενσωματώνεται μέσα στο θεμέλιο. Στη συνέχεια, το επόμενο τμήμα του πυλώνα σηκώνεται από τον γερανό και πραγματοποιείται η κοχλιωτή σύνδεση κοκ. (σχήμα 1-14) Τέλος, ο πύργος ενώνεται με την άτρακτο (nacelle). 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 σηκώνεται από τον γερανό και κοχλιώνεται στον ρότορα (σχήμα 1-15). Είτε τοποθετείται πρώτα η άτρακτος στον ρότορα και στη συνέχεια ένα ένα τα πτερύγια.



Σχήμα 1-13: κοχλιωτή σύνδεση των τμημάτων του πυλώνα [1]



Σχήμα 1-14: ανέγερση τμήματος πυλώνα (πηγή: [www.windlab.com](http://www.windlab.com) & [diamondtowerservice.com](http://diamondtowerservice.com))





Σχήμα 1-15: ανέγερση πτερυγίων (πηγή: [www.bigge.com](http://www.bigge.com))

Όπως σε κάθε μεταλλική κατασκευή μεγάλης σπουδαιότητας, η κατεργασία των επιφανειών είναι απαραίτητη για την ποιότητα των χαλύβδινων πυλώνων. Η διάβρωση θα πρέπει να αποτρέπεται μέσα στις δεκαετίες ακόμη και σε ένα επιθετικό περιβάλλον όπως είναι το παραθαλάσσιο. Μετά την αμμοβολή των τμημάτων του πυλώνα, καλύπτονται με θερμικά εφαρμοζόμενα επιστρώματα ψευδαργύρου. Τέλος, είναι απαραίτητη η εφαρμογή 2 έως 3 στρώσεων βαφής. Μερικές χώρες οι περιοχές έχουν κανονισμούς σχετικά με το χρώμα του πυλώνα.

Η κατασκευή χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων είναι μία συμβατική τεχνολογία η οποία δεν έχει ιδιαίτερες απαιτήσεις όσον αφορά τον εξοπλισμό των κατασκευαστών. Για ύψη πυλώνα άνω των 90μ. η διάμετρος της βάσης του είναι μεγαλύτερη των 4,5μ. και το απαιτούμενο πάχος του χάλυβα ξεπερνά τα 40mm. Όμως σ' αυτές τις περιπτώσεις το κουρμπάρισμα των φύλλων χάλυβα θα απαιτεί ειδικά μηχανήματα τα οποία δεν είναι διαθέσιμα σε κανονικές βιομηχανίες χάλυβα. Επιπλέον λόγω της μεγάλης διαμέτρου βάσης τα χαμηλότερα τμήματα του πυλώνα δεν θα μπορούν να μεταφερθούν οδικά.

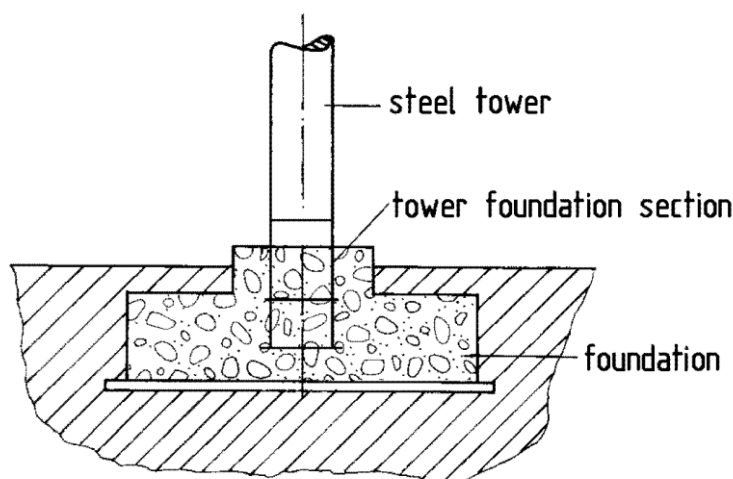
Ο πυλώνας πρέπει να παρέχει μία ασφαλή ανάβαση στην άτρακτο και επίσης να περιλαμβάνει κάποιες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ιδιαίτερα τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην βάση του πυλώνα. Αυτό απαιτεί ορισμένες εσωτερικές εγκαταστάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-11 δεξιά. Ανάλογα με το ύψος του πυλώνα ένας αριθμός από ενδιάμεσες πλατφόρμες είναι συνήθως τοποθετημένες, τυπικά μία πλατφόρμα για κάθε τμήμα του πυλώνα. Για ύψη μέχρι 60-70μ. απλές κάθετες σκάλες με αναρριχητική προστασία χρησιμοποιούνται για την ανάβαση. Αν απαιτείται από το χειριστή, απλοί ανελκυστήρες αναρρίχησης εγκαθίστανται σε πυλώνες ύψους άνω των 80μ.

Τα καλώδια για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας κρέμονται ελεύθερα με ένα βρόγχο στο άνω τμήμα του πυλώνα (σχήμα 1-11). Επιπλέον, εσωτερικός φωτισμός είναι υποχρεωτικός για τις εργασίες συντήρησης στον πυλώνα.

### 1.3.5 Θεμελίωση ανεμογεννητριών

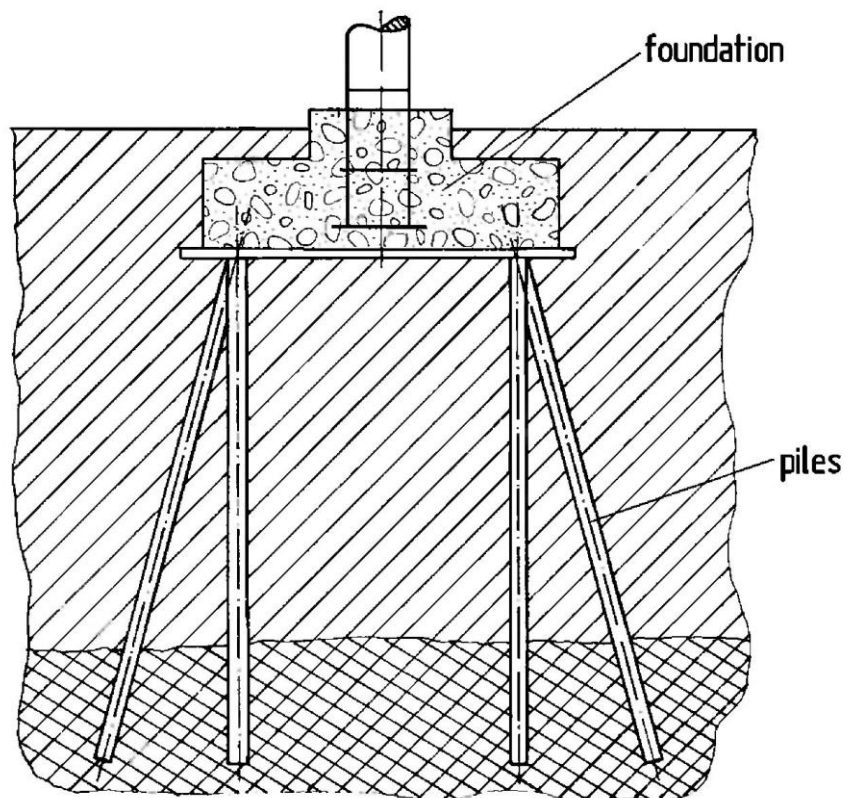
Η θεμελίωση ενός πυλώνα καθορίζεται από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και από τις τοπικές συνθήκες του εδάφους. Στο πλαίσιο αυτό, τα φορτία τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την διαστασιολόγηση είναι κατά κύριο λόγο τα υψηλότερα φορτία τα οποία δρουν στην ανεμογεννήτρια σε συνθήκες ακινητοποίησης. Η καθοριστική παράμετρος είναι η μέγιστη θεωρητική ταχύτητα ανέμου. Ωστόσο, κάποιο ρόλο παίζει και ο τεχνικός τρόπος λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Για παράδειγμα, σε μία ανεμογεννήτρια με σύστημα ελέγχου κλίσης πτερυγίων stall control δεν παρέχεται η δυνατότητα απάλυνσης των πτερυγίων και έτσι συγκριτικά μπορούν να εμφανιστούν μεγάλα στατικά φορτία στον σχεδιασμό, ένα γεγονός το οποίο έχει πολύ μεγάλη σημασία στην διαστασιολόγηση και κατ' επέκταση στην κοστολόγηση. Μια δεύτερη φορτιστική κατάσταση η οποία πρέπει να ελεγχθεί είναι αυτή στην οποία συμμετέχουν τα μέγιστα φορτία κατά την διάρκεια λειτουργίας της ανεμογεννήτριας. Κατά την λειτουργία, η μέγιστη ροπή ανατροπής για την θεμελίωση προσδιορίζεται με την ώθηση του ρότορα. Σε ανεμογεννήτριες με έλεγχο κλίσης πτερυγίων (pitch control) η ώθηση του ρότορα φτάνει την μέγιστη τιμή στην ονομαστική ισχύ ενώ σε ανεμογεννήτριες με stall control συνεχίζεται να αυξάνεται ακόμα κι όταν φτάσει την ονομαστική ισχύ. Η έγκριση σχεδιασμού και η πιστοποίηση ασφαλείας που απαιτούνται από τις αρχές στις περισσότερες περιπτώσεις βασίζονται σε αυτά τα στατικά φορτία. Οι υπολογισμοί αντοχής σε κόπωση οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη το δυναμικό φάσμα φορτίων κανονικά δεν ζητούνται. Αυτοί οι υπολογισμοί γίνονται υπ' ευθύνη του κατασκευαστή. Ανάλογα με τις γεωλογικές συνθήκες, η θεμελίωση που απαιτείται είναι είτε επιφανειακή θεμελίωση είτε θεμελίωση με πασσάλους. Ο καθοριστικός παράγοντας είναι το βάθος στο οποίο βρίσκονται στρώματα εδάφους τα οποία θα απορροφήσουν τα επιβαλλόμενα φορτία.

Η επιφανειακή θεμελίωση (σχήμα 1-16) είναι συνήθως κυκλικά, ορθογωνικά ή πολυγωνικά πέδιλα. Οι χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες αγκυρώνονται από ένα τμήμα θεμελίωσης το οποίο έχει ενταχθεί στον χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος του θεμελίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-18. Η απαιτούμενη μάζα και οι διαστάσεις της πλάκας καθορίζονται από την ροπή ανατροπής της κατασκευής.



Σχήμα 1-16: επιφανειακή θεμελίωση χαλύβδινου σωληνωτού πυλώνα [1]

Η θεμελίωση με πασσάλους (σχήμα 1-17) αποτελεί τον προτιμώμενο τύπο θεμελίωσης για αδύναμα εδάφη. Περιλαμβάνει μία πλάκα έδρασης η οποία στηρίζεται πάνω στους πασσάλους και μεταφέρει τα φορτία σε φέροντα στρώματα του εδάφους. Η ενσωμάτωση του τμήματος θεμελίωσης στο οποίο κοχλιώνεται ο δακτύλιος της βάσης του πυλώνα απαιτεί κάποια εμπειρία. Η φλάντζα του τμήματος θεμελίωσης πρέπει να τοποθετείται σε οριζόντια και επίπεδη θέση με πολύ μικρή ανοχή από την ευθυγραμμία, ώστε να αποτρέψουμε τυχόν κλίση στον πυλώνα.



Σχήμα 1-17: θεμελίωση με πασσάλους [1]



Σχήμα 1-18: θεμελίωση μεγάλης εμπορικής ανεμογεννήτριας [1]

## 2 Η ΚΟΠΩΣΗ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΛΛΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ

### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

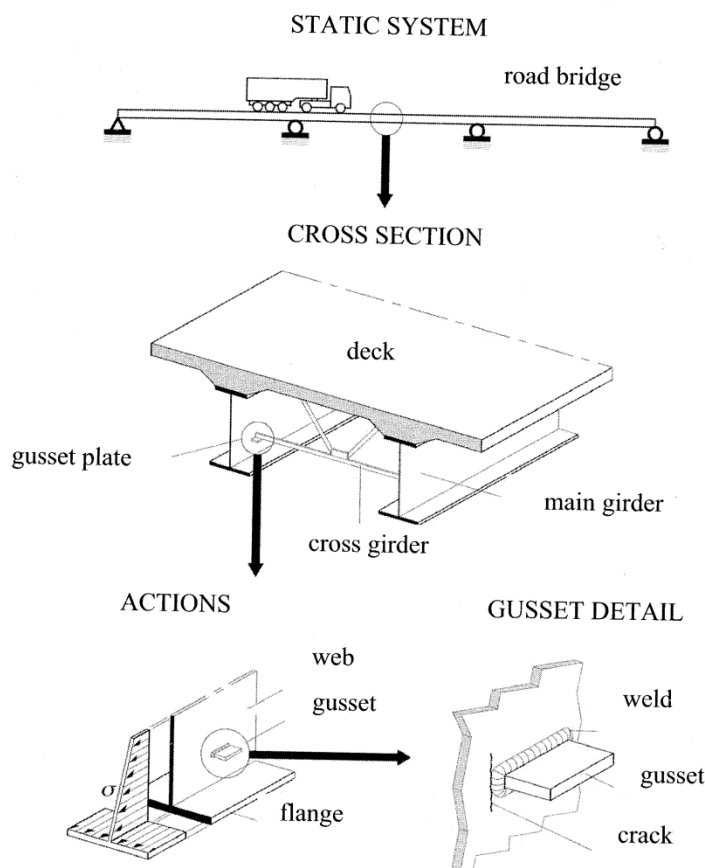
Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μία εκτενής αναφορά στο φαινόμενο της κόπωσης και στο πώς πρέπει να γίνεται ο έλεγχος έναντι κόπωσης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, για οποιαδήποτε μεταλλική κατασκευή όπως η ανεμογεννήτρια. Συγκεκριμένα, πρόκειται να παρουσιασθούν στη συνέχεια κάποιες βασικές έννοιες, οι παράμετροι που σχετίζονται με το φαινόμενο της κόπωσης, αλλά και τα μέρη του Ευρωκώδικα στα οποία πρέπει να ανατρέξει κανείς για την εκτέλεση ενός ελέγχου έναντι κόπωσης. Στη συνέχεια, θα αναφερθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση και ποιες απ' αυτές πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη. Ακόμα, ακολουθούν τα εντατικά μεγέθη που προκαλούν την κόπωση και πώς μπορούν να υπολογισθούν, αλλά και πως θα προσδιορισθεί η αντοχή σε κόπωση, προκειμένου εν τέλει να εκτελεσθεί ο έλεγχος έναντι κόπωσης.

Μέχρι παλιότερα, η ενημέρωση για το πρόβλημα της κόπωσης ήταν ελάχιστη και αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να μην γίνονται καν έλεγχοι έναντι κόπωσης κατά τον σχεδιασμό των κατασκευών εκτός από πολύ εμφανείς περιπτώσεις. Με τον καιρό οι αστοχίες που προκλήθηκαν λόγω κόπωσης στις κατασκευές οδήγησαν στο να αναπτυχθούν οι πρώτες προτάσεις περί το 1985 μόλις. Με την εξέλιξη των υλικών και των κατασκευαστικών μεθόδων ο τρόπος ελέγχου άλλαξε σταδιακά, γίνονταν προσαρμογές και προσθήκες και έτσι καταλήξαμε στα σύγχρονα κείμενα του Ευρωκώδικα που δίνουν λεπτομερείς οδηγίες για την εκτέλεση ενός πλήρους ελέγχου έναντι κόπωσης ανάλογα με την περίπτωση.

Η κόπωση αποτελεί μαζί με την διάβρωση μία από τις κύριες παραμέτρους που προκαλούν βλάβες σε μέλη μεταλλικών κατασκευών. Πρόκειται για ένα φαινόμενο το οποίο λαμβάνει χώρα όταν το μέλος υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση λόγω της δράσης κυμαινόμενων τάσεων. Η εκδήλωση του φαινομένου της κόπωσης γίνεται ορατή με την εμφάνιση κάποιων ρωγμών οι οποίες αναπτύσσονται σε συγκεκριμένες θέσεις στην κατασκευή. Σε γενικές γραμμές, κατασκευές οι οποίες υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενα κυκλικά φορτία μπορεί να υποστούν προοδευτική βλάβη η οποία γίνεται εμφανής μέσω της διάδοσης αυτών των ρωγμών. Η βλάβη αυτή ονομάζεται κόπωση των κατασκευών και το αποτέλεσμα από την δράση αυτού του φαινομένου είναι να χάνεται η αντίσταση της κατασκευής με το χρόνο.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως οι θέσεις στις οποίες αναπτύσσονται οι ρωγμές λόγω κόπωσης είναι συγκεκριμένες. Η ρωγμάτωση αυτή σπάνια θα εμφανισθεί στο μητρικό υλικό μακριά από κάποια

κατασκευαστική λεπτομέρεια, συγκολλήσεις ή συνδέσεις. Ακόμα κι αν η αντοχή της σύνδεσης είναι μεγαλύτερη απ' αυτή των συνδεόμενων μελών, κρίσιμη για την κόπωση παραμένει η σύνδεση. Για να γίνει το γεγονός αυτό περισσότερο κατανοητό παρατίθεται το σχήμα 1.1. Το σχήμα αυτό απεικονίζει το παράδειγμα μίας οδικής γέφυρας με μεταλλικό φορέα και πλάκα καταστρώματος η οποία υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενη κυκλική φόρτιση λόγω της διέλευσης των οχημάτων. Οι τάσεις που αναπτύσσονται από την διέλευση κάθε οχήματος επηρεάζονται από την παρουσία προσαρμογών, όπως αυτών που συνδέουν τις κύριες δοκούς με τις δευτερεύουσες. Στον κορμό της κύριας δοκού εκεί όπου συγκολλείται το έλασμα προκειμένου να επιτευχθεί η σύνδεση λαμβάνει χώρα μία συγκέντρωση τάσεων λόγω της απότομης αλλαγής στη γεωμετρία γι' αυτό και η ρωγμή λόγω κόπωσης θα εμφανισθεί στην θέση αυτή και συγκεκριμένα στο πόδι της συγκόλλησης. Ακόμα κι αν οι επιβαλλόμενες τάσεις παραμένουν αρκετά χαμηλότερα από το όριο διαρροής του υλικού, η συνδυασμένη δράση συγκέντρωσης τάσεων και ασυνεχειών είναι αυτές που προκαλούν τον σχηματισμό και την διάδοση μίας ρωγμής λόγω κόπωσης.



Σχήμα 2-1: Πιθανή θέση ρωγμής λόγω κόπωσης σε οδική γέφυρα [3]

Σε γενικές γραμμές, μία ρωγμή αναπτύσσεται μέσω ασυνεχειών που υπάρχουν εξ' αρχής στο μητρικό υλικό και έχουν βάθος μόλις μερικά δέκατα του χιλιοστού. Η διάδοση μίας τέτοιας ρωγμής μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία μέσω διαρροής της καθαρής διατομής ή ψαθυρής θραύσης γεγονός το οποίο εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά του υλικού, την γεωμετρία ενός μέλους, την θερμοκρασία και τον ρυθμό καταπόνησης της διατομής. Επομένως, αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι ένα έργο που υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενα κυκλικά φορτία πρέπει να γίνεται με προσεκτικό σχεδιασμό και κατασκευή των επιμέρους μερών του και των κατασκευαστικών λεπτομερειών έτσι ώστε να αποφεύγουμε την αστοχία από κόπωση. Γενικά, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι αξιολόγησης ποιότητας που μπορούν να γίνουν και να εγγυηθούν ότι ο αριθμός και οι διαστάσεις των αρχικών ασυνεχειών παραμένουν εντός των ορίων ανοχής.

## 2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Κόπωση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο εξαντλείται η αντίσταση της κατασκευής με το χρόνο. Η αντοχή σε κόπωση ενός μέλους ή μίας κατασκευαστικής λεπτομέρειας που υποβάλλεται σε επαναλαμβανόμενα κυκλικά φορτία ορίζεται ως ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που αντέχει πριν την αστοχία. Την αντοχή σε κόπωση επηρεάζουν τέσσερις βασικές παράμετροι τις οποίες και θα εξετάσουμε αναλυτικά στη συνέχεια.

### 2.2.1 Παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση

#### Η διαφορά των τάσεων

Στο σχήμα 2-2 παρουσιάζεται η εξέλιξη των τάσεων συναρτήσει του χρόνου για ένα σταθερό εύρος φόρτισης οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ  $\sigma_{min}$  και  $\sigma_{max}$ . Δοκιμές που έχουν γίνει κατά καιρούς έχουν δείξει ότι αυτή είναι η κυριότερη παράμετρος που επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση λεπτομερειών συγκολλήσεων.

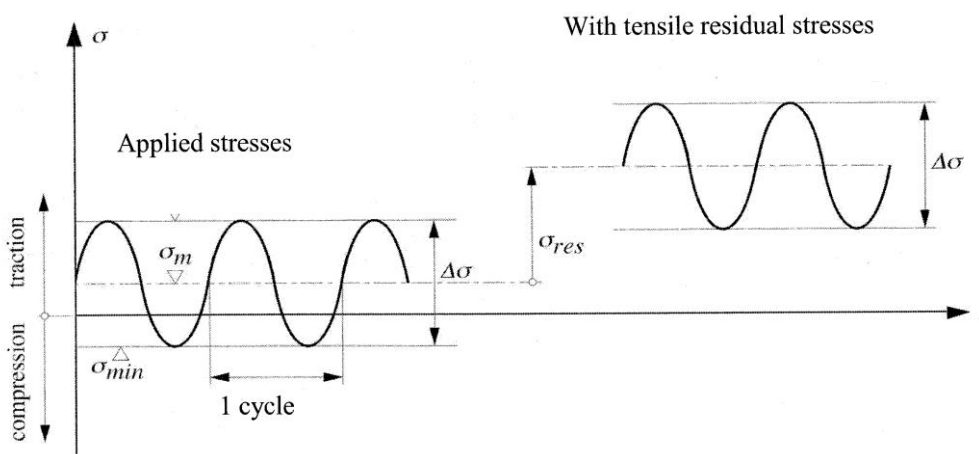
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \tag{2-1}$$

Όπου:

$\sigma_{max}$ : η μέγιστη τιμή των τάσεων

$\sigma_{min}$ : η ελάχιστη τιμή των τάσεων

είναι σημαντική η διαφορά μεταξύ των εννοιών της διαφοράς των τάσεων και του εύρους των τάσεων. Το εύρος τάσεων είναι ίση με το μισό της διαφοράς των τάσεων. Ωστόσο, αυτή η παράμετρος δεν σχετίζεται με την αντοχή σε κόπωση.



Σχήμα 2-2: προσδιορισμός των τάσεων και επιρροή των εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων [3]

Γενικά, θα μπορούσε να πει κανείς ότι η αντοχή σε κόπωση αυξάνεται όταν μέρος του κύκλου των τάσεων είναι σε θλίψη. Το γεγονός αυτό όμως δεν ισχύει στην περίπτωση που έχουμε συγκολλημένα μέλη λόγω της ύπαρξης παραμενουσών τάσεων.

Η συμπεριφορά μίας ρωγμής στην πραγματικότητα επηρεάζεται από των άθροισμα των επιβαλλόμενων και των παραμενουσών τάσεων. Ωστόσο, η αντοχή σε κόπωση μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας τις θλιπτικές παραμένουσες τάσεις μέσω της εφαρμογής μεθόδων βελτίωσης των συγκολλήσεων ή και επεμβάσεων μετά την συγκόλληση.

#### Η γεωμετρία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας

Η παράμετρος αυτή είναι καθοριστική για την θέση όπου θα σχηματιστούν οι ρωγμές λόγω κόπωσης αλλά και για τον ρυθμό με τον οποίο αυτές διαδίδονται. Υπάρχουν τρεις βασικές κατηγορίες γεωμετρικών επιρροών:

- Επιρροή της γεωμετρίας της κατασκευής π.χ. ο τύπος της διατομής
- Επιρροή της συγκέντρωσης τάσεων π.χ. λόγω της σύνδεσης
- Επιρροή της ύπαρξης ασυνεχειών στις συγκολλήσεις

Οι δύο πρώτες κατηγορίες μπορούν να επηρεαστούν θετικά για την κόπωση μέσω ενός καλού σχεδιασμού. Η τρίτη παράμετρος μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας επαρκείς μεθόδους κατασκευής και ελέγχου που να μπορούν να εγγυηθούν ότι οι ασυνέχειες αυτές δεν θα ξεπεράσουν τα όρια τα οποία ορίζονται από τον κανονισμό. Και γενικότερα ότι οι ασυνέχειες αυτές προέρχονται από ατέλειες των οργάνων και γενικά των συνθηκών κατά την συγκόλληση.

### Τα χαρακτηριστικά του υλικού

Τα χαρακτηριστικά του υλικού επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση υπό την έννοια ότι ένα υλικό με καλύτερη ποιότητα θα έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και επομένως θα συμπεριφέρεται καλύτερα διότι αυξάνεται η φάση κατά την οποία σχηματίζονται οι ρωγμές λόγω κόπωσης.

Το πλεονέκτημα αυτό δεν υφίσταται στην περίπτωση συγκολλημένων μελών. Διότι σ' αυτά υπάρχουν ήδη οι ρωγμές που προέρχονται από ατέλειες της συγκόλλησης και επομένως η φάση η οποία κυριαρχεί σε αυτά είναι φάση διάδοσης των ρωγμών.

### Το περιβάλλον

Η παράμετρος αυτή σχετίζεται άμεσα με το φαινόμενο της διάβρωσης. Σίγουρα η διάβρωση παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αντοχή σε κόπωση γι' αυτό και σε ειδικές περιπτώσεις θα πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα προστασίας. Οι παράκτιες περιοχές καθώς και οι εγκαταστάσεις με χημικά απόβλητα είναι μερικές μόνο από τις ειδικές περιπτώσεις όπου η εφαρμογή ειδικών μέτρων προστασίας είναι αναγκαία αλλά και πολύτιμη.

### 2.2.2 Αντοχή σε κόπωση

Όλες αυτές οι παράμετροι οι οποίες αναφέρθηκαν παραπάνω και επηρεάζουν την αντοχή σε κόπωση μπορούν να συμπτυχθούν σε μία μόνο σχέση η οποία και περιγράφει την αντοχή σε κόπωση ενός μέλους.

$$N = C \times \Delta\sigma^{-m} \quad (2-2)$$

Όπου:

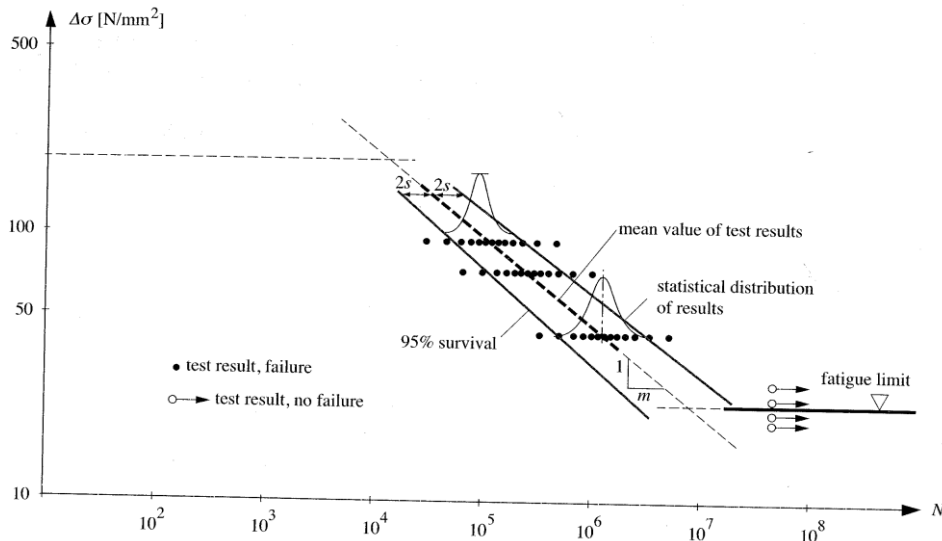
N: ο αριθμός των κύκλων που αντέχει για διαφορά τάσεων  $\Delta\sigma$

C: σταθερά η οποία λαμβάνει υπόψη την γεωμετρία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας της οποία αναζητείται η αντοχή σε κόπωση

$\Delta\sigma$ : διαφορά των τάσεων σταθερού εύρους

m: συντελεστής που εκφράζει την κλίση της μέσης γραμμής του διαγράμματος που προκύπτει από πειραματικά δεδομένα (σχήμα 2-3)

Προκειμένου η εξίσωση 2-2 να έχει την γραμμική μορφή του σχήματος 2-3 θα πρέπει οι συντελεστές της σχέσης να λογαριθμηθούν.



Σχήμα 2-3: αποτελέσματα πειραματικών ελέγχων σε κόπωση σε κατασκευαστικά χαλύβδινα μέλη σε διπλή λογαριθμική κλίμακα τα οποία εκτελεσθήκαν υπό σταθερού εύρους φόρτισης [3]

**2.2.3 Η έννοια της συσσώρευσης βλάβης**

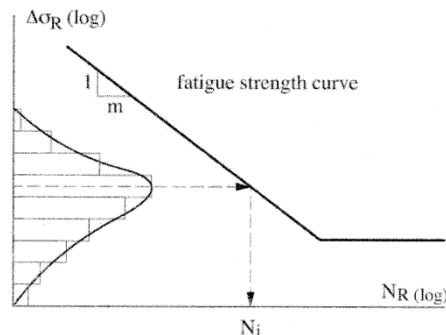
Η αξιολόγηση της βλάβης που μπορεί να υποστεί μία κατασκευή λόγω κόπωσης κατά την διάρκεια ζωής της είναι ένα πολύ δύσκολο εγχείρημα. Δεδομένου ότι είναι αδύνατο προσδιορισθεί η πραγματική φόρτιση στην οποία θα υποβληθεί το έργο καθώς και η συχνότητα των φορτίων. Έχουν επινοηθεί κάποια μοντέλα φόρτισης τα οποία όμως δεν μπορούν να αποδώσουν απόλυτα τα πραγματικά φορτία. Επομένως, αν δεν είναι εφικτό να προσδιορισθεί η πραγματική φόρτιση δεν μπορεί κατ' επέκταση να αξιολογηθεί η προκύπτουσα βλάβη λόγω κόπωσης, η οποία μάλιστα σχετίζεται με εναλλασσόμενα φορτία.

Για το λόγο αυτό εφαρμόζεται ένας απλός γραμμικός νόμος, ο νόμος των Palmgren-Miner, προκειμένου να προσδιορισθεί η συσσώρευση βλάβης λόγω κόπωσης D. Όταν μία κατασκευή υπόκειται σε μία φόρτιση με διαφορετικές διαφορές τάσεων Δσ, οι οποίες εμφανίζονται n<sub>i</sub> φορές κατά την διάρκεια ζωής του έργου, τότε ορίζεται μία μερική βλάβη ίση με τον λόγο n<sub>i</sub>/N<sub>i</sub> όπου το N<sub>i</sub> αντιπροσωπεύει των αριθμών κύκλων φόρτισης που αντέχει μέχρι την αστοχία υπό την διαφορά τάσεων Δσ<sub>i</sub>. Επομένως, η συνολική βλάβη, σύμφωνα με τον νόμο των Palmgren-Miner, δίνεται από την σχέση:

$$D_{tot} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum_{i=1}^{n_{tot}} \frac{n_i}{N_i} = \int \frac{dn}{N} \tag{2-3}$$

Προκειμένου να μην επέλθει αστοχία λόγω κόπωσης στην κατασκευή θα πρέπει:

$$D_{tot} \leq 1.0$$



Σχήμα 2-4: damage accumulation scheme [3]



## 2.3 ΕΥΡΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 3 & ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Στο σχήμα 2-5 παρουσιάζεται το σύνολο των μερών του Ευρωκώδικα 3 που αφορούν τον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών. Το μέρος 1-9 και 1-10 του EN 1993 (EN 1993-1-9:2005 & EN 1993-1-10:2005) σχετίζονται με την κόπωση και την ψαθυρή θραύση.

Κατασκευές για τις οποίες είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός έναντι κόπωσης είναι:

- Χαλύβδινες κατασκευές, γενικοί κανόνες και έλεγχοι που πρέπει να ικανοποιούνται για κτίρια (EN1993-1-1)
- Χαλύβδινες γέφυρες (EN 1993-2)
- Πύργοι και καπνοδόχοι (EN 1993-3)
- Σιλό και δεξαμενές (EN 1993-4)
- Δοκοί κυλίσεως γερανογεφυρών

Στο μέρος 3 του EN1993 ανήκει και ο σχεδιασμός έναντι κόπωσης μίας ανεμογεννήτριας. Δεδομένου ότι ο φορέας της ανεμογεννήτριας υποβάλλεται σε εναλλασσόμενα φορτία λόγω της επαναλαμβανόμενης δράσης του ανέμου, οι συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας των τμημάτων του πυλώνα της είναι πολύ ευαίσθητες στο φαινόμενο της κόπωσης. Κρίσιμη φόρτιση για την περίπτωση της ανεμογεννήτριας είναι η κόπωση και απαιτεί τον σχεδιασμό ισχυρών συνδέσεων και απαραίτητως ισχυρή προένταση των κοχλιών.

Γενικά, οι κανόνες του EN 1993 εφαρμόζονται σε κατασκευές με κανονικές ατμοσφαιρικές συνθήκες και προστασία σε διάβρωση επαρκή με τακτική συντήρηση. Περιπτώσεις στις οποίες δεν μπορεί να εφαρμοσθεί ο κανονισμός είναι:

- ❖ Σε περιπτώσεις όπου η κατασκευή αστοχεί λόγω κόπωσης, ύστερα από λίγους κύκλους φόρτισης (π.χ. στην περίπτωση ενός σεισμού)
- ❖ Όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τους 150 °C
- ❖ Όταν στην περιοχή του έργου το περιβάλλον είναι διαβρωτικό
- ❖ Όταν το διαθέσιμο υλικό δεν είναι όλκιμο και δεν συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις ανθεκτικότητας του EN 1993-1-10
- ❖ Σε παράκτιες κατασκευές
- ❖ Κατασκευές που υπόκεινται σε μονή κρούση
- ❖ Όταν έχουμε ενίσχυση με σκυρόδεμα και ράβδους χάλυβα

Στη συνέχεια θα αναφερθούν κάποιες βασικές παράμετροι οι οποίες υπό προϋποθέσεις μπορεί να επηρεάσουν την εφαρμοσιμότητα του EN1993.

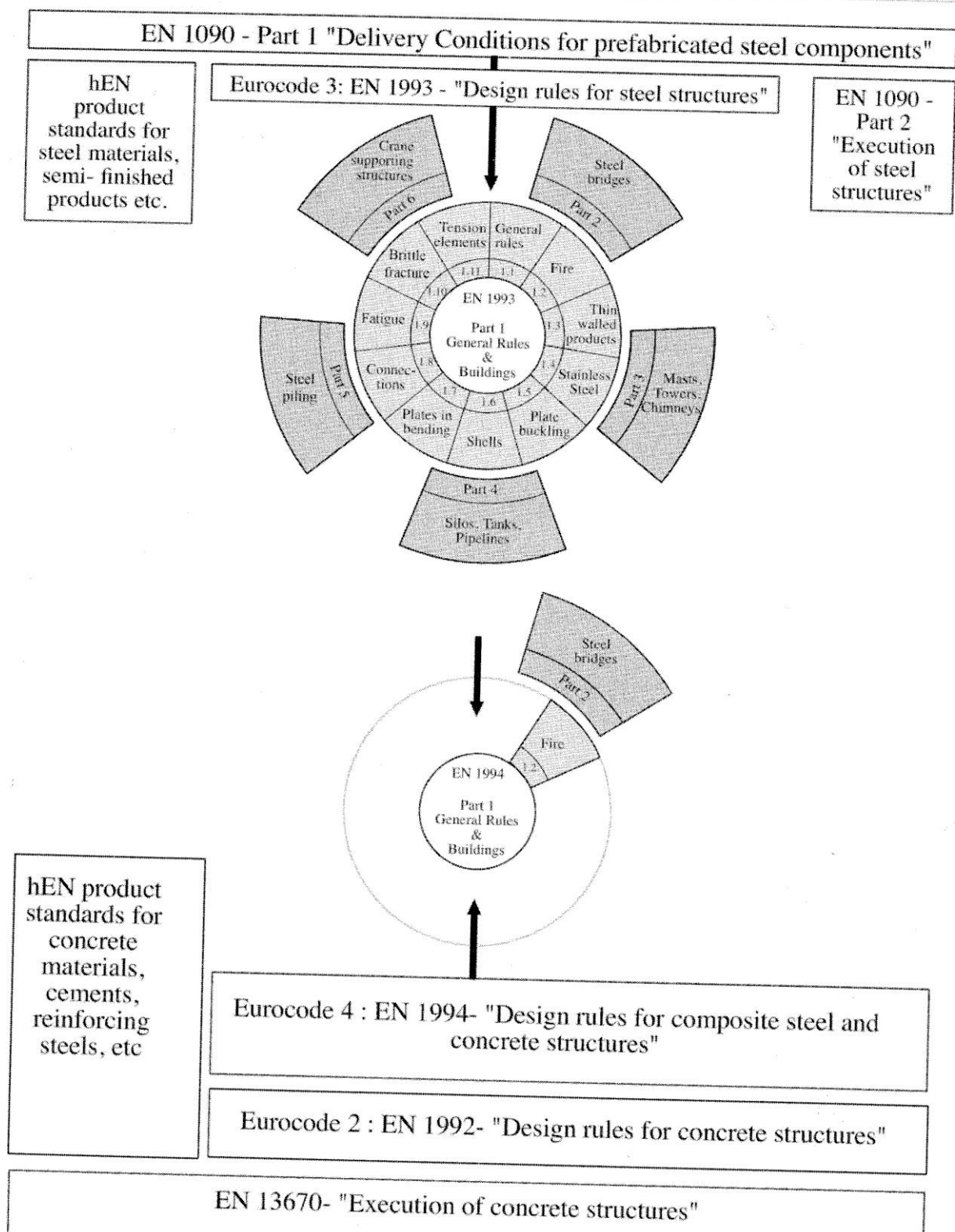
### Επιρροή του υλικού

Όσον αφορά το υλικό, πειράματα έχουν δείξει ότι, υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχουμε διαβρωτικό περιβάλλον, ανεξάρτητα από την ποιότητα του χάλυβα μπορούν να εφαρμοστούν οι κανόνες του Ευρωκώδικα. Επομένως, αμελείται η επιρροή του υλικού στην αντοχή σε κόπωση σε σύγκριση με τυχόν ατέλειες στην λεπτομέρεια της σύνδεσης.

### Επιρροή διαβρωτικού περιβάλλοντος

Οι κανονικές ποιότητες χάλυβα πρέπει να έχουν επαρκή προστασία σε διάβρωση. Αυτή περιλαμβάνει: σύστημα βαφής πιστοποιημένο, εν θερμώ γαλβανισμό των επιφανειών, καθοδική προστασία, στρώματα αυτοπροστασίας.

Ωστόσο, θα πρέπει να τονισθεί ότι η ύπαρξη συγκολλήσεων σε συνδυασμό με την διάβρωση μειώνει δραματικά την αντοχή σε κόπωση για κάθε τύπο χάλυβα.



Σχήμα 2-5: σύστημα τυποποίησης για χαλύβδινες κατασκευές και σύμμικτες κατασκευές από χάλυβα και σκυρόδεμα [3]

### Επιρροή της θερμοκρασίας

Σε γενικές γραμμές, η θερμοκρασία δεν επηρεάζει το ποσοστό αύξησης των ρωγμών κόπωσης για θερμοκρασίες ως  $-50^{\circ}\text{C}$  εκτός κι αν η ψαθυρή θραύση διέπει τον τρόπο διάδοσης της ρωγμής. Γενικά, για κατασκευές από χάλυβα μία καλή ποιότητα υλικού για την αποφυγή ψαθυρής θραύσης, επαρκεί και έτσι δεν λαμβάνονται υπόψη οι χαμηλές θερμοκρασίες.

Υψηλές θερμοκρασίες άνω των  $150^{\circ}\text{C}$  δεν λαμβάνονται υπόψη μιας και δεν περιλαμβάνονται στο μέρος 1-9 του EN1993. Γενικά, η επιρροή των υψηλών θερμοκρασιών εξαρτάται από το υλικό και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Επειδή είναι πιθανόν να προκληθεί μείωση της αντοχής σε κόπωση όταν η θερμοκρασία ξεπερνά τους  $100^{\circ}\text{C}$  γενικά συνιστάται συντηρητική προσέγγιση σχεδιασμού. Επιπλέον, υπάρχουν κατάλληλες σχέσεις με σκοπό να λάβουν υπόψη την μείωση αυτή της αντοχής.

### Επιρροή της συχνότητας του φορτίου

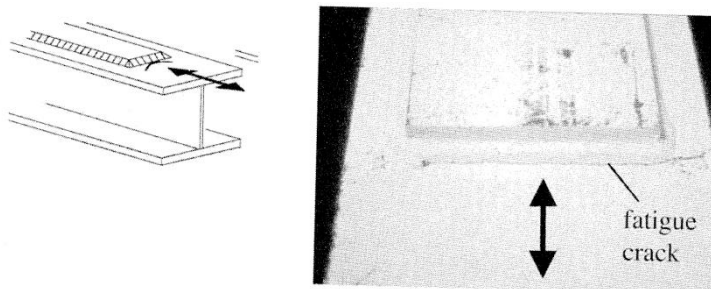
Συχνότητα φορτίου έως  $100\text{Hz}$  δεν επηρεάζει την αντοχή σε κόπωση. Η συχνότητα του φορτίου μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην περίπτωση συνδυασμένης επιρροής διάβρωσης, κυκλικής φόρτισης καθώς και υψηλών θερμοκρασιών. Ο συνδυασμός τέτοιων παραμέτρων δεν περιλαμβάνεται ωστόσο, στο πεδίο εφαρμογής του EN 1993-1-9.

## 2.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΕΥΡΟΥΣ ΤΑΣΕΩΝ

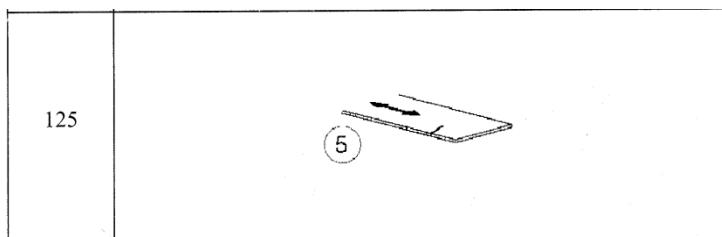
Το πρώτο βήμα για την εκτέλεση ενός ελέγχου έναντι κόπωσης είναι ο υπολογισμός της διαφοράς των τάσεων  $\Delta\sigma$ . Προκειμένου να γίνει αυτό θα πρέπει πρώτα να προσδιορισθεί το φορτίο λόγω κόπωσης. Ανάλογα με το είδος της κατασκευής το φορτίο λόγω κόπωσης εκφράζεται ως κινητό φορτίο (π.χ. ένα φορτηγό διερχόμενο από μία μεταλλική γέφυρα) ή σαν ένα εύρος φόρτισης που ενεργεί σε σταθερή θέση (π.χ. φόρτιση λόγω ανέμου σε κατακόρυφο ιστό).

Ο Ευρωκώδικας δίνει για κάθε τύπο κατασκευής τα μοντέλα φόρτισης που πρέπει να εφαρμοσθούν στην περίπτωση της κόπωσης. Έπειτα, με αυτά τα φορτία πραγματοποιείται ελαστικός υπολογισμός του φορέα ώστε να προσδιορισθούν τα μέγιστα και ελάχιστα δρώντα εντατικά μεγέθη και κατ' επέκταση η διαφορά των εντατικών μεγεθών. Για να υπολογισθούν οι ζητούμενες διαφορές τάσεων όμως θα πρέπει να προσδιορισθούν οι θέσεις του φορέα που είναι κρίσιμες για την κόπωση.

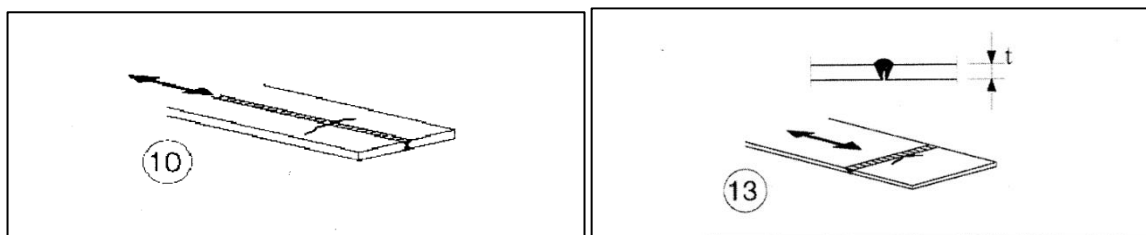
Κρίσιμες θέσεις είναι εκείνες στις οποίες θα εμφανισθούν πρώτα οι ρωγμές λόγω κόπωσης. Ο Ευρωκώδικας 3 περιέχει πίνακες με όλες τις πιθανές κατηγορίες κατασκευαστικών λεπτομερειών που είναι κρίσιμες για τον έλεγχο σε κόπωση. Δίπλα σε κάθε κατασκευαστική λεπτομέρεια αναγράφεται και το εύρος τάσεων  $\Delta\sigma$  που η λεπτομέρεια αυτή αντέχει. Στις περισσότερες περιπτώσεις πιθανή θέση ρωγμής είναι στο μητρικό υλικό γειτονικά σε κάποιες μορφής συγκέντρωση τάσεων (π.χ. οπή, γωνία ελάσματος, συγκόλληση και γενικότερα σε θέσεις όπου έχουμε απότομη αλλαγή της γεωμετρίας). Στο σχήμα 2-6 παρατηρείται ότι η ρωγμή εμφανίζεται στο τέλος της πλάκας κάλυψης στο μητρικό υλικό για την συγκεκριμένη διεύθυνση φόρτισης. Στο σχήμα 2-7 έχουμε την περίπτωση ρωγμής σε γωνία ελάσματος και τέλος στο σχήμα 2-8 ρωγμές σε συγκολλήσεις.



Σχήμα 2-6: παράδειγμα λεπτομέρειας (από EN 1993-1-9, πίνακας 8.5, λεπτομέρεια 6), ρωγμή στο τέλος πλάκας κάλυψης [3]



Σχήμα 2-7: θέση ρωγμής λόγω κόπωσης σε γωνία ελάσματος (πίνακας 8.1, λεπτομέρεια 5 EN1993-1-9) [3]



Σχήμα 2-8: ρωγμές λόγω κόπωσης σε συγκολλήσεις (EN 1993-1-9 πίνακας 8.2 λεπτομέρεια 10 και πίνακας 8.3 λεπτομέρεια 13 αντίστοιχα [3])

Για κάθε λεπτομέρεια η θέση και η διεύθυνση στην οποία υπολογίζεται η τάση υποδεικνύεται από το βέλος. Το επίπεδο στο οποίο υπολογίζεται η τάση είναι κάθετο στο τόξο και παράλληλο βέβαια στην ρωγμή που αναπτύσσεται. Επομένως, το μόνο το οποίο χρειάζεται είναι να επιλέξουμε σωστά την κατασκευαστική λεπτομέρεια η οποία αντιστοιχεί στην περίπτωση την οποία εξετάζουμε.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, συνήθως οι σχετικές ονομαστικές τάσεις από φορτία κόπωσης υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το ίδιο στατικό σύστημα μοντέλου όπως και για την στατική ανάλυση του εκάστοτε φορέα. Εκτός εάν ορίζεται διαφορετικά στους πίνακες των λεπτομερειών του EN1993-1-9, τότε η τάση βασίζεται πάντοτε στην καθαρή διατομή.

Όσον αφορά τις κοχλιωτές συνδέσεις υπάρχει διάκριση ανάμεσα στις λεπτομέρειες κοχλιών και κοχλιωτών συνδέσεων. Στις κοχλιωτές συνδέσεις υπολογίζουμε τις ονομαστικές τάσεις στα στοιχεία που απαρτίζουν την σύνδεση. Εάν οι κοχλίες είναι προεντεταμένοι τότε ο υπολογισμός των τάσεων γίνεται στην μεικτή διατομή. Όταν έχουμε κοινούς κοχλίες (δηλαδή μη προεντεταμένους) η σύνδεση μπορεί να γλιστρήσει σε σημαντικό ποσοστό οπότε πρέπει να εξασφαλίσουμε ότι παραμένει σε επαφή όλη την ώρα και έτσι δεν επιτρέπονται ανατροπές στο φορτίο.

Υπάρχει συχνά πιθανότητα να εμφανίζεται συγκέντρωση τάσεων όχι σε κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της εκάστοτε λεπτομέρειας αλλά σε οπές, γωνίες, εκκεντρότητες και κακές ευθυγραμμίσεις οι οποίες δεν λήφθησαν υπόψη αρχικά. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη αυτή η συγκέντρωση τάσεων, για τον υπολογισμό των τάσεων στις θέσεις αυτές χρησιμοποιείται ένας συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων λόγω κόπωσης  $k_f$ . Επομένως, πολλαπλασιάζοντας τις ονομαστικές τάσεις με τον συντελεστή αυτό αυξάνονται οι υπολογιζόμενες τάσεις. Οι τάσεις που προκύπτουν από τον πολλαπλασιασμό αυτό ονομάζονται τροποποιημένες ονομαστικές τάσεις. Η τροποποίηση αυτή των ονομαστικών τάσεων μπορεί να ληφθεί υπόψη μειώνοντας την κατηγορία αντοχής της λεπτομέρειας και κατ' επέκταση την αντοχή σε κόπωση.

$$\sigma_{mod} = k_f \times \sigma_{nom} \tag{2-4}$$

Ο γενικός τύπος ο οποίος δίνει το εύρος τάσεων  $\Delta\sigma$  είναι:

$$\Delta\sigma_{Ed} \times (\gamma_{Ff} \times Q_k) = \sigma_{Ed,max} \times (\gamma_{Ff} \times Q_k) - \sigma_{Ed,min} \times (\gamma_{Ff} \times Q_k) \quad (2-5)$$

Για την απλοποιημένη επαλήθευση κόπωσης με τους συντελεστές ασφαλείας  $\gamma$  το μοντέλο φόρτισης της κόπωσης τοποθετείται στις δύο πιο αντίθετες θέσεις ώστε να προκύψουν τα  $\sigma_{max}$  και  $\sigma_{min}$ . Αντίστοιχη σχέση με την 2-5 ισχύει και για την περίπτωση διατμητικών τάσεων.

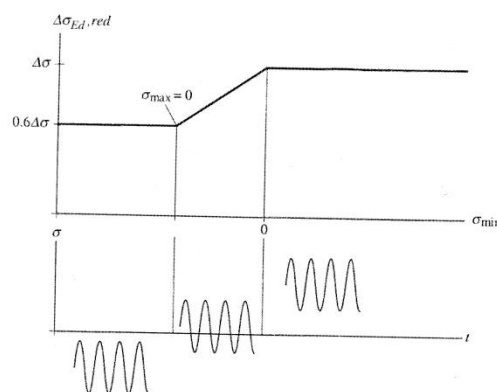
### Εύρος τάσεων σε λεπτομέρειες χωρίς συγκολλήσεις

Σε λεπτομέρειες χωρίς συγκόλληση μπορούμε να κάνουμε την υπόθεση ότι δεν υπάρχουν παραμένουσες τάσεις και επομένως να επωφεληθούμε από τις προνομιακές επιδράσεις που έχουν οι ασκούμενες θλιπτικές τάσεις στην συμπεριφορά έναντι κόπωσης. Γι' αυτό και οι σχέσεις για την εύρεση των  $\Delta\sigma$  αλλάζουν σ' αυτή την περίπτωση. Μ' αυτόν τον τρόπο το  $\Delta\sigma$  μπορεί να μειωθεί ως και 40% όταν έχουμε λεπτομέρειες υπό θλίψη πάντα. Αυτή η μείωση μπορεί να εκφραστεί και ως αύξηση της αντοχής σε κόπωση. Η μείωση αυτή όμως δεν ισχύει στην περίπτωση εξέτασης των διατμητικών τάσεων. Στο σχήμα 2-9 έχουμε την σχηματική απεικόνιση των σχέσεων αυτών.

$$\Delta\sigma_{Ed,red} = \sigma_{Ed,max} - \sigma_{Ed,min} \quad \text{όταν: } \sigma_{Ed,min} \geq 0$$

$$\Delta\sigma_{Ed,red} = \sigma_{Ed,max} - 0,6 \times \sigma_{Ed,min} \quad \text{όταν: } \sigma_{Ed,min} < 0 \quad \text{και} \quad \sigma_{Ed,max} \geq 0$$

$$\Delta\sigma_{Ed,red} = 0,6 \times (\sigma_{Ed,max} - \sigma_{Ed,min}) \quad \text{όταν: } \sigma_{Ed,max} < 0$$



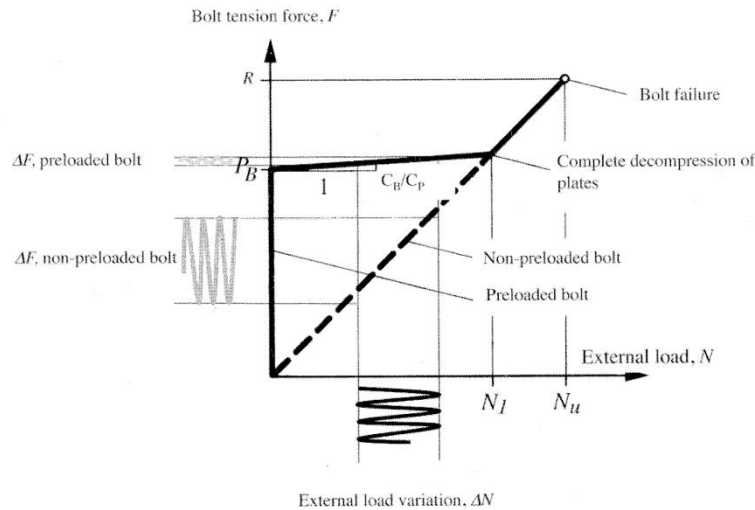
Σχήμα 2-9: παρουσίαση του μειωμένου εύρους τάσεων για λεπτομέρειες χωρίς συγκολλήσεις [3]

### Εύρος τάσεων σε κοχλιωτές συνδέσεις

Όσον αφορά τις κοχλιωτές συνδέσεις υπάρχουν τρεις κατηγορίες φορτίου στις οποίες μπορεί να υποβάλλονται οι κοχλίες: προεντεταμένοι κοχλίες σε διάτμηση, προεντεταμένοι κοχλίες σε εφελκυσμό και απλοί κοχλίες σε διάτμηση. Ακόμα μπορεί να έχουμε προεντεταμένους κοχλίες σε συνδυασμένη διάτμηση και εφελκυσμό.

Στην περίπτωση ενός κοχλία σε εφελκυσμό η αντοχή σε κόπωση σε αντίθεση με την στατική του αντοχή είναι χαμηλή λόγω συγκέντρωσης τάσεων στα σπειρώματα. Πιο κρίσιμη φορτιστική κατάσταση για τον κοχλία είναι ο εφελκυσμός και όχι η διάτμηση. Γι' αυτό το λόγο όταν έχουμε κοχλίες σε εφελκυσμό υπό κυκλική φόρτιση η προέντασή τους είναι απαραίτητη (όπως π.χ. συμβαίνει

και στις κοχλιωτές συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας των τμημάτων του πυλώνα μίας ανεμογεννήτριας, στην οποία ο άνεμος είναι κυρίαρχη φόρτιση). Διότι το στέλεχος και το σπείρωμα ενός μη προεντεταμένου κοχλία υποβάλλονται σε τάσεις  $\Delta\sigma$  που είναι μίας τάξης μεγέθους μεγαλύτερες απ' ότι ενός προεντεταμένου. Στο σχήμα 2-10 φαίνεται η μεταβολή στον τρόπο δράσης ενός κοχλία λόγω της προέντασης.



Σχήμα 2-10: σύγκριση του εύρους τάσεων μεταξύ μίας μη προεντεταμένης και μίας προεντεταμένης κοχλιωτής σύνδεσης [3]

Η αρχική αυξημένη δυσκαμψία μίας προεντεταμένης σύνδεσης προέρχεται από το γεγονός ότι η δυσκαμψία του συνδεδεμένου ελάσματος  $c_p$  και η αξονική δυσκαμψία του κοχλία  $c_b$  δρουν μαζί ώστε να αντέξουν το εξωτερικό επιβαλλόμενο φορτίο της σύνδεσης ή την διαφορά φορτίου  $\Delta N$ . Το μεγαλύτερο κομμάτι του φορτίου δαπανάται για την αποσυμπίεση των ελασμάτων ενώ ένα πολύ μικρό κομμάτι του φορτίου παραλαμβάνεται από τους κοχλίες. Το κομμάτι του φορτίου το οποίο παραλαμβάνεται από τους κοχλίες προσδιορίζεται μέσω της σχέσης:

$$\Delta F = \Delta N' \times \frac{C_B}{C_B + C_P} = p \times \Delta N'$$

Όπου:

$\Delta F$ : διαφορά φορτίου στον κοχλία

$\Delta N'$ : η συνολική εξωτερική δύναμη της κοχλιωτής σύνδεσης

$C_B$ : αξονική δυσκαμψία κοχλία

$C_p$ : αξονική δυσκαμψία συνδεδεμένου ελάσματος

Ωστόσο, στην παραπάνω σχέση δεν είναι γνωστές οι αξονικές δυσκαμψίες κοχλία και ελάσματος και δεν είναι δυνατό ούτε οικονομικό να πραγματοποιηθεί μία λεπτομερή ανάλυση της σύνδεσης προκειμένου να προσδιορισθεί ο λόγος αυτών των δυσκαμψιών. Για τον συντελεστή κατανομής του φορτίου  $p$  υπάρχουν διάφορες μέθοδοι υπολογισμού διαθέσιμες στην βιβλιογραφία.

Οι σχέσεις κατά Petersen (2000) για τον υπολογισμό των δυσκαμψιών για ένα κομμάτι μορφής L μίας κοχλιωτής σύνδεσης δακτυλίων σε εφελκυσμό είναι οι ακόλουθες:

$$\Delta N' = \frac{e \times s \times \Delta \sigma_{shell} \times \left(\frac{b-s}{2}\right) \times \left(1 + \frac{a + \frac{s}{2}}{b'}\right)}{\left(\frac{b}{2} + a\right)}$$

$$C_B = \frac{E \times \pi \times D^2 / 4}{2 \times t_f + 2 \times t_{was}}$$

$$C_{p,f} = \frac{E}{2 \times t_f} \times \frac{\pi}{4} \times \left[ \left( d_a + \frac{2 \times t_f}{10} \right)^2 - d_i^2 \right]$$

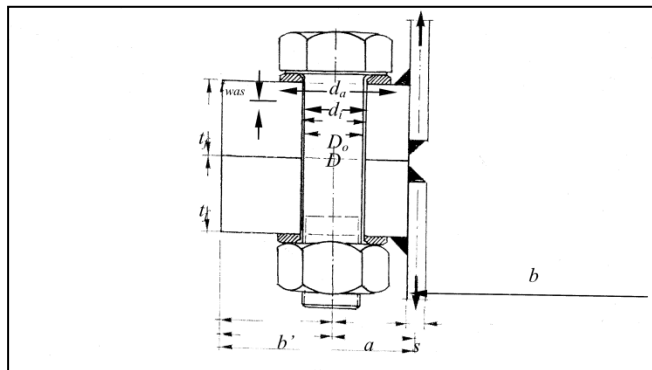
$$C_{p,was} = \frac{E}{t_{was}} \times \frac{\pi}{4} \times (d_a^2 - d_i^2)$$

Όπου:

$\Delta\sigma_{shell}$ : το εύρος τάσεων στο κέλυφος του πυλώνα το οποίο προκύπτει από τον λόγο της καμπτικής ροπής στην θέση ελέγχου και της ροπής αντίστασης της διατομής

$C_{p,f}$ : αξονική δυσκαμψία του δακτυλίου της σύνδεσης (φλάντζας)

$C_{p,was}$ : αξονική δυσκαμψία περικοχλίου



Σχήμα 2-11: γεωμετρία και συμβολισμοί για ένα κομμάτι μίας κοχλιωτής σύνδεσης δακτυλίων μορφής βραχέος L [3]

Επομένως, η προκύπτουσα δυσκαμψία της σύνδεσης δίνεται από την σχέση:

$$C_p = \frac{1}{\frac{1}{C_{p,f}} + \frac{2}{C_{p,was}}}$$

Τελικά, ο συντελεστής κατανομής φορτίου προκύπτει:

$$p = \frac{C_B}{C_B + C_p}$$

Το ποσοστό  $p$  του φορτίου το οποίο παραλαμβάνεται από τον κοχλία πηγαινει στο σπείρωμα, γι' αυτό για τον υπολογισμό του εύρους τάσεων στον κοχλία η διαφορά φορτίου στον κοχλία  $\Delta F$  διαιρείται με το εμβαδόν του σπειρώματος  $A_s$ .

$$\Delta\sigma_E = \frac{\Delta F}{A_s}$$

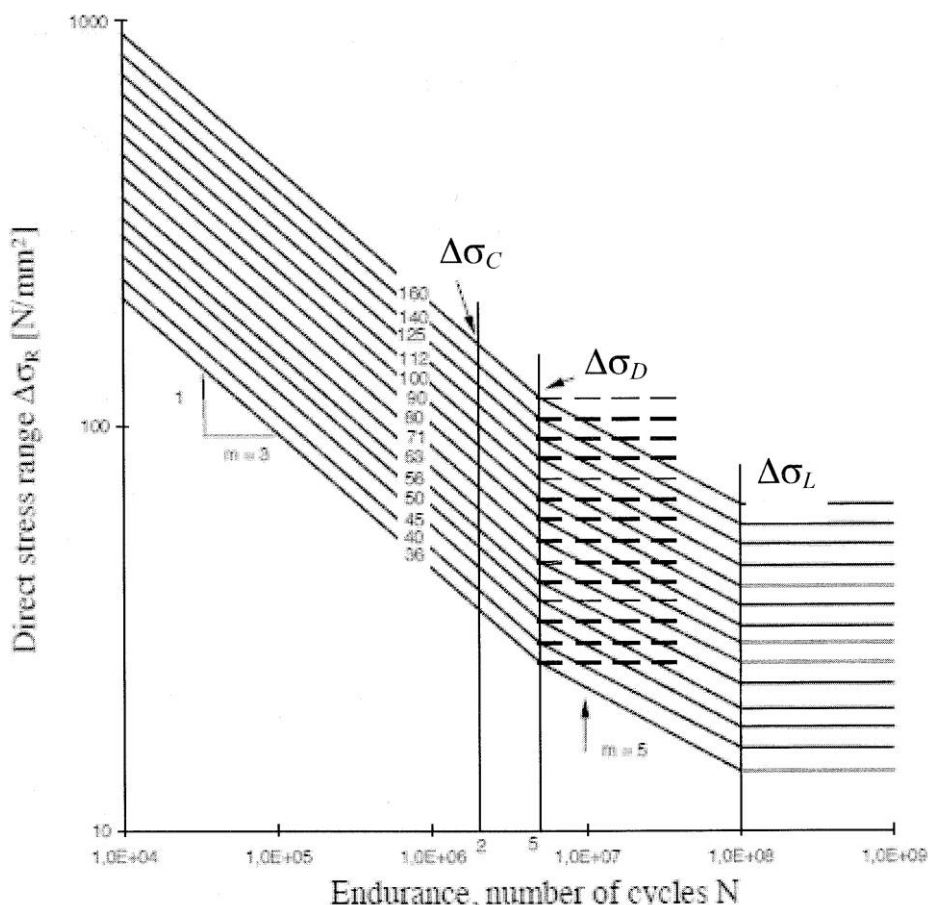
## 2.5 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

### 2.5.1 Γενικά

Θα πρέπει τώρα μετά τον υπολογισμό των επιβαλλόμενων τάσεων να προσδιορισθεί η αντοχή σε κόπωση προκειμένου να εκτελεσθεί ο έλεγχος σε κόπωση της εκάστοτε κατασκευής και να εξασφαλισθεί η αποφυγή της αστοχίας λόγω των επαναλαμβανόμενων φορτίων της κόπωσης.

Σε προηγούμενη υποενότητα δόθηκε η εξίσωση με την οποία υπολογίζεται ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που αντέχει η θέση ελέγχου, καθώς επίσης και το διάγραμμα της σχέσης αυτής. Μετά από πλήθος δοκιμών σε διαφορετικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες παρατηρήθηκε ότι οι καμπύλες αυτές αντοχής σε κόπωση είναι λίγο πολύ παράλληλες μεταξύ τους (σχήμα 2-12). Οπότε, η αντοχή σε κόπωση είναι μόνο συνάρτηση της σταθεράς C που η τιμή της είναι συγκεκριμένη για κάθε κατασκευαστική λεπτομέρεια.

$$\log N = \log C - m \times \log_{10}(\Delta\sigma)$$



Σχήμα 2-12: καμπύλες αντοχής σε κόπωση για διάφορα εύρη ορθών τάσεων [3]

Γενικά, υπάρχουν πολλές διαφορετικές λεπτομέρειες άρα και πολλές διαφορετικές καμπύλες γεγονός το οποίο δεν βοηθά στον σχεδιασμό. Η λύση η οποία βρέθηκε στο πρόβλημα αυτό είναι η κατηγοριοποίηση των διαφορετικών κατασκευαστικών λεπτομερειών με ένα αντίστοιχο σύνολο καμπυλών αντοχής σε κόπωση. Κάθε κατηγορία λεπτομέρειας των πινάκων του EN 1993 αντιστοιχεί σε μία S-N καμπύλη (σχήμα 2-12) όπου  $\Delta\sigma$  είναι συνάρτηση του αριθμού των κύκλων φόρτισης σε



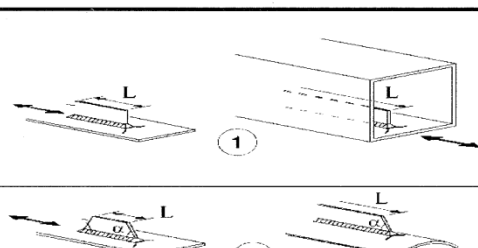
λογαριθμική κλίμακα. Σε κάθε λεπτομέρεια του Ευρωκώδικα αναγράφεται το εύρος τάσεων  $\Delta\sigma_c$  που αυτή αντέχει.

Οπότε, όταν είναι δυνατή η διαμόρφωση μίας κατασκευαστικής λεπτομέρειας σύμφωνα με κάποια από αυτές των πινάκων του Ευρωκώδικα 3, και αντιστοιχούν σωστά η περιγραφή και οι απαιτήσεις, τότε η αντοχή σε κόπωση μπορεί να προέρχεται από την αντίστοιχη καμπύλη του κανονισμού.

Οι κύκλοι που αντιστοιχούν σε εύρος τάσεων χαμηλότερο από το όριο αποκοπής  $\Delta\sigma_L$  αμελούνται εντελώς και δεν προστίθενται καν στον υπολογισμό της συνολικής βλάβης λόγω κόπωσης. Όταν η τιμή του εύρους τάσεων που έχουν υπολογισθεί σύμφωνα με την προηγούμενη υποενοότητα δεν ξεπερνούν το  $\Delta\sigma_D$  (CAFL-constant amplitude fatigue limit) τότε η μπορεί να θεωρηθεί ότι η αντοχή σε κόπωση είναι άπειρη.

### 2.5.2 Επιδράσεις μεγέθους στην αντοχή σε κόπωση

Η αντοχή και κατ' επέκταση και η κατηγορία της κατασκευαστικής λεπτομέρειας μπορεί να διαφοροποιηθεί λόγω ποικίλων διαστάσεων ενός ή δύο συστατικών μερών της λεπτομέρειας. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2-13 ανάλογα με το μήκος της προσαρμογής διαφοροποιείται το εύρος τάσεων που αντέχει. Όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος της η αντοχή σε κόπωση μειώνεται.

Detail category	Constructional detail		Description
80	$L \leq 5 \text{ m}$		<u>Longitudinal attachments:</u> 1) The detail category varies according to the length of the attachment L. 2) Longitudinal attachments to plate or tube.
71	$50 < L \leq 80 \text{ mm}$		
63	$80 < L \leq 100 \text{ mm}$		
56	$L > 100 \text{ mm}$		
71	$L > 100 \text{ mm}$ $\alpha < 45^\circ$		

Σχήμα 2-13: επιρροή του μήκους μίας διαμήκου προσαρμογής στην κατηγορία της λεπτομέρειας [3]

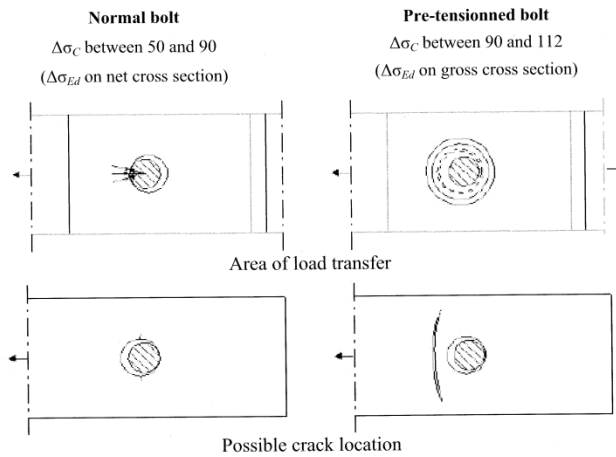
### 2.5.3 Επιρροή ύπαρξης οπών στην αντοχή σε κόπωση

Σε λεπτομέρειες χωρίς συγκολλήσεις συνήθως οι ρωγμές ξεκινούν οι σε ανωμαλίες της επιφάνειας ή στις γωνίες της διατομής ή σε θέσεις οπών. Όσον αφορά τις κοχλιωτές συνδέσεις η αστοχία ξεκινά από την άκρη της οπής και διαδίδεται κατά μήκος της καθαρής διατομής. Ωστόσο, μπορεί να αρχίσει και από τον ίδιο τον κοχλία. Σε συνδέσεις όπου οι κοχλίες επιλέγονται έτσι ώστε να έχουν υψηλή αντοχή σε τριβή αυτές οι μορφές αστοχίας περιορίζονται μέσω της προέντασης των κοχλιών. Σ' αυτήν την περίπτωση η αστοχία μπορεί να ξεκινήσει στην επιφάνεια κοντά στο σύνορο του δακτυλίου συμπίεσης λόγω διάβρωσης κάτω από επαναλαμβανόμενη φόρτιση. Σε κοχλιωτές συνδέσεις που φορτίζονται σε εφελκυσμό ή σε συνδυασμένη δράση εφελκυσμού και διάτμησης, ρωγμές λόγω κόπωσης συνήθως ξεκινούν από την ρίζα του σπειρώματος. Εναλλακτικά, μπορεί να εμφανισθεί αμέσως κάτω από την κεφαλή του κοχλία.

Επίσης, η αντοχή σε κόπωση μπορεί να μειωθεί ανάλογα με την διάμετρο του κοχλία στην θέση της οπής. Όταν η διάμετρος του κοχλία ξεπερνά την διάμετρο αναφοράς  $\phi_o = 30 \text{ mm}$  τότε η αντοχή σε κόπωση είναι μειωμένη  $\Delta\sigma_{red}$ :

$$\frac{\Delta\sigma_{red}}{\Delta\sigma_c} = \left(\frac{\phi_o}{\phi}\right)^n$$

Όπου  $n$  εκθέτης ο οποίος είναι συνάρτηση της συγκέντρωσης τάσεων και κυμαίνεται από 0,1 έως 0,33 ανάλογα με τον τύπο του σπειρώματος.



Σχήμα 2-14: κοχλιωτές συνδέσεις σε διάτμηση, περιοχή διάδοσης φόρτισης και πιθανές θέσεις ρωγμών λόγω κόπωσης για απλούς και προεντεταμένους κοχλίες [3]

## 2.6 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Υπάρχουν τρεις μορφές εκτέλεσης του ελέγχου αντοχής έναντι του φαινομένου της κόπωσης.

- Επαλήθευση χρησιμοποιώντας το όριο κόπωσης

$$\max(\Delta\sigma_{Ed,i}) \leq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}}$$

Όπου:

$\max(\Delta\sigma_{Ed,i})$ : μέγιστη τιμή του εύρους τάσεων (από τον σχεδιασμό)

$$\Delta\sigma_{Ed,i} = \gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_i$$

$\Delta\sigma_D$ : αντοχή σε κόπωση, το CAFL της εκάστοτε λεπτομέρειας

$\gamma_{Mf}$ : μερικός συντελεστής για την αντοχή σε κόπωση

Ο έλεγχος σε κόπωση πραγματοποιείται με την χρησιμοποίηση του εύρους των τάσεων όταν ο συνολικός αριθμός των κύκλων φόρτισης είναι πολύ μεγάλος, δηλαδή ξεπερνά τους  $10^8$  κύκλους φόρτισης. Ο συνολικός αριθμός των κύκλων φόρτισης δίνεται από την σχέση:

$$N_v = 2 \times T \times n_{y,1} \times \varepsilon_o \times \left(\frac{v_{crit,1}}{v_o}\right)^2 \times e^{\left(-\left(\frac{v_{crit,1}}{v_o}\right)^2\right)}$$

- Επαλήθευση χρησιμοποιώντας τον διορθωτικό συντελεστή  $\lambda$

Ο διορθωτικός συντελεστής  $\lambda$  εισάγεται με στόχο να προσαρμόσει τα φορτιστική κατάσταση η οποία προκύπτει από τα μοντέλα φόρτισης του κανονισμού για την κόπωση στην πραγματική.

$$\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2} \leq \frac{\Delta\sigma_c}{\gamma_{Mf}}$$

Όπου:

$$\gamma_{Ff} \times \Delta\sigma_{E,2} = \lambda \times \Delta\sigma(\gamma_{Ff} \times Q_k)$$

- Επαλήθευση χρησιμοποιώντας τον συντελεστή βλάβης D

$$D_d = \sum D_i = \sum \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \leq D_{max}$$

Στην περίπτωση του φορέα της ανεμογεννήτριας ο έλεγχος σε κόπωση πραγματοποιείται είτε με τον πρώτο τρόπο, στην περίπτωση μεγάλου αριθμού των κύκλων φόρτισης είτε με τον τρίτο τρόπο. Γενικότερα, ανάλογα με την κατασκευή και τα διαθέσιμα δεδομένα επιλέγεται ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος αντοχής της σε κόπωση.

# 3 ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ

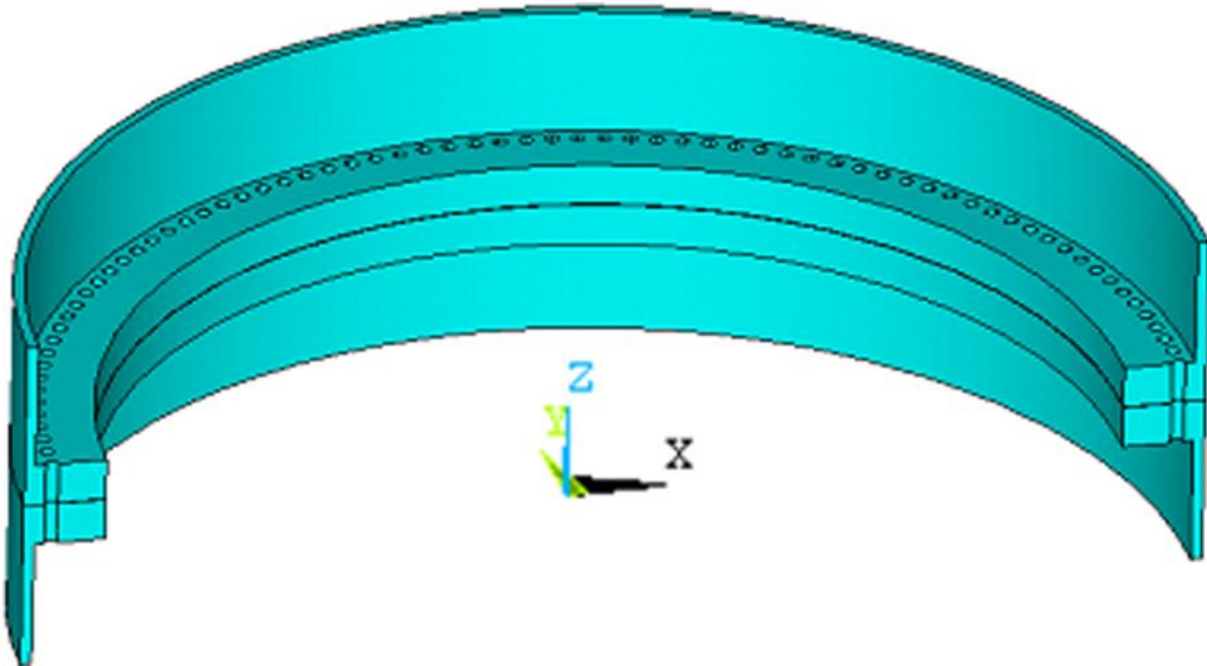
## 3.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

Ο αυτόνομος χαλύβδινος σωληνωτός πυλώνας της ανεμογεννήτριας, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά και στο κεφάλαιο 1, αποτελείται από έναν αριθμό προκατασκευασμένων τμημάτων τα οποία μεταφέρονται στο χώρο του έργου και συνδέονται μεταξύ τους με προεντεταμένους κοχλίες μέσω κυκλικών δακτύλιων. Οι κυκλικοί αυτοί δακτύλιοι συγκολλούνται στα τμήματα του πυλώνα στο εργοστάσιο και μεταφέρονται στο εργοτάξιο με την μορφή του σχήματος 3-1. Στην συνέχεια κατά την ανέγερση οι δύο φλάντζες τοποθετούνται η μία πάνω απ' την άλλη και γίνεται η σύνδεση με τους κοχλίες. Αμέσως μετά την τοποθέτηση των κοχλιών ακολουθεί η προέντασή τους από ένα τεχνικό.

Η κυρίαρχη φόρτιση του φορέα της ανεμογεννήτριας είναι η φόρτιση του ανέμου. Εξαιτίας της δυναμικής φύσης των ανεμοπιέσεων και της κυκλικής φόρτισης η προένταση των κοχλιών αυξάνει την αντοχή τους και αποτρέπει πιθανή αστοχία της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας λόγω του φαινομένου της κόπωσης, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2.

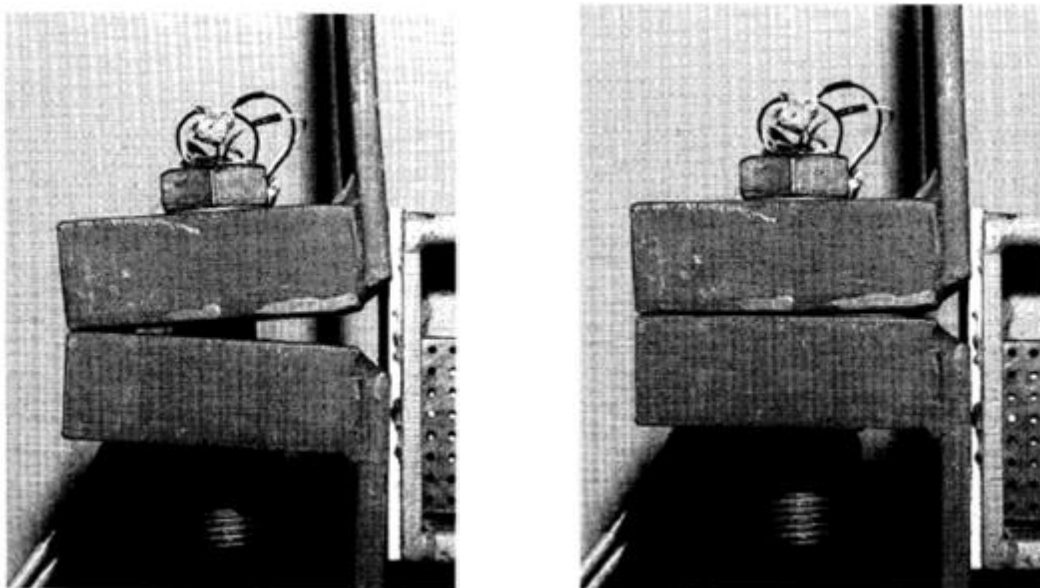


Σχήμα 3-1: κυκλικοί δακτύλιοι τμημάτων πυλώνα (πηγή: [www.sustainablemfr.com](http://www.sustainablemfr.com))



Σχήμα 3-2: σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας τμημάτων πυλώνα (πηγή: [pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org](http://pressurevesseltech.asmedigitalcollection.asme.org))

Η φόρτιση του ανέμου στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας μεταφράζεται ως μία καμπτική ροπή στον πυλώνα περί την εγκάρσια διεύθυνση της φοράς του ανέμου. Επομένως, το φορτίο το οποίο φτάνει στην σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας είναι η κατανομή δυνάμεων στο κέλυφος (τοιχώμα) του πυλώνα. Η καμπτική αυτή ροπή (δηλαδή η καμπτική ροπή περί τον άξονα  $y$  του σχήματος 3-2) χωρίζει την σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας μέσω ενός ουδέτερου άξονα. Απ' την μία μεριά του ουδέτερου άξονα οι κοχλίες εφελκύνονται και τα ελάσματα των δακτυλίων της σύνδεσης απομακρύνονται μεταξύ τους. Αντίθετα, στην θλιβόμενη παρειά της σύνδεσης, τα ελάσματα έρχονται σε επαφή και οι κοχλίες παραμένουν αδρανείς. Στο σχήμα 3-3 αριστερά είναι η εικόνα της εφελκυόμενης παρειάς της σύνδεσης κατά την φόρτιση του πυλώνα ενώ δεξιά της θλιβόμενης παρειάς,

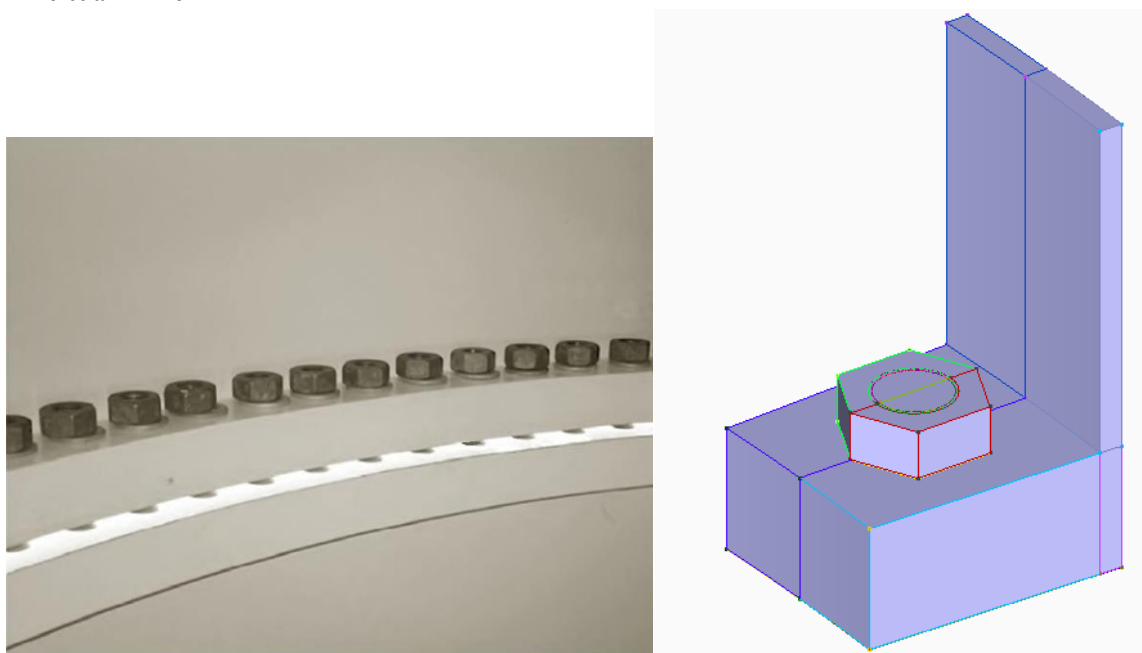


Σχήμα 3-3: εφελκυόμενη και θλιβόμενη ζώνη της σύνδεσης αντίστοιχα κατά Petersen [7]

## 3.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΓΚΟΥ

### 3.2.1 Περιγραφή αριθμητικού προσομοιώματος

Προκειμένου να αξιολογηθεί η αντοχή σε κόπωση του φορέα είναι απαραίτητο να μελετηθεί διεξοδικά η σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας μεταξύ των τμημάτων του πυλώνα, τόσο από πλευράς κοχλιωτής σύνδεσης των ελασμάτων όσο και των συγκολλήσεων των φλαντζών στα άκρα κάθε τμήματος. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA v9.0.0 [8]. Σε μία πρώτη προσπάθεια προσέγγισης του προβλήματος, επιχειρήθηκε η προσομοίωση της σχέσης αλληλεπίδρασης που υπάρχει μεταξύ του κοχλία και των συνδεόμενων ελασμάτων λόγω της επαφής που αναπτύσσεται μεταξύ τους. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε σε τρισδιάστατη μορφή ένα κομμάτι της κοχλιωτής σύνδεσης το οποίο περιλαμβάνει ένα μόνο κοχλία, τα 2 ελάσματα της σύνδεσης και ένα μικρό μέρος του πυλώνα ύψους 16cm (σχήμα 3-4).



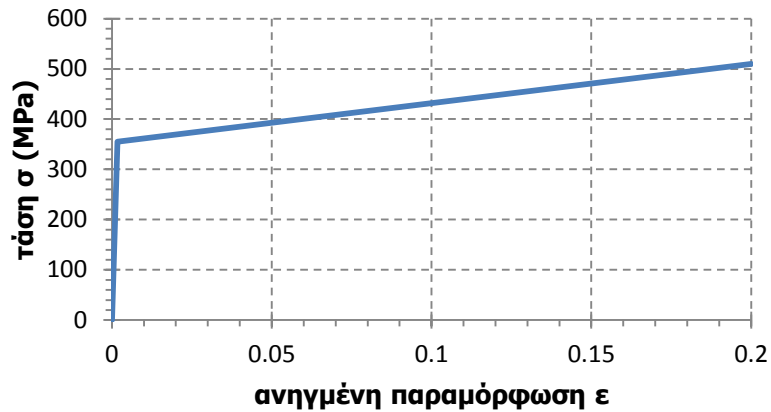
Σχήμα 3-4: τμήμα της κοχλιωτής σύνδεσης που προσομοιώθηκε

Πιο αναλυτικά, στο προσομοίωμα του σχήματος 3-4 λήφθηκε υπόψη ο κοχλίας, το άνω έλασμα της σύνδεσης και ο πυλώνας με πεπερασμένα στοιχεία τύπου 3D solid και η άνω επιφάνεια του κάτω ελάσματος ως επιφανειακό στοιχείο. Το κάτω έλασμα δεν προσομοιώθηκε ολόκληρο σε τρισδιάστατη μορφή λόγω της συμμετρίας του προβλήματος, αλλά και λόγω των συνοριακών συνθηκών που λαμβάνονται υπόψη. Οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος είναι 3 και αντιστοιχούν στις μετακινήσεις στις 3 διευθύνσεις. Στροφικοί βαθμοί ελευθερίας δεν υπάρχουν στο συγκεκριμένο προσομοίωμα λόγω της τρισδιάστατης απεικόνισης του φορέα. Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες, είναι δεσμευμένη η μετακίνηση και στις 3 διευθύνσεις του κάτω ελάσματος και της βάσης του κοχλία. Επιπλέον, λόγω συμμετρίας δεσμεύθηκε η πλευρική μετακίνηση του ελάσματος.

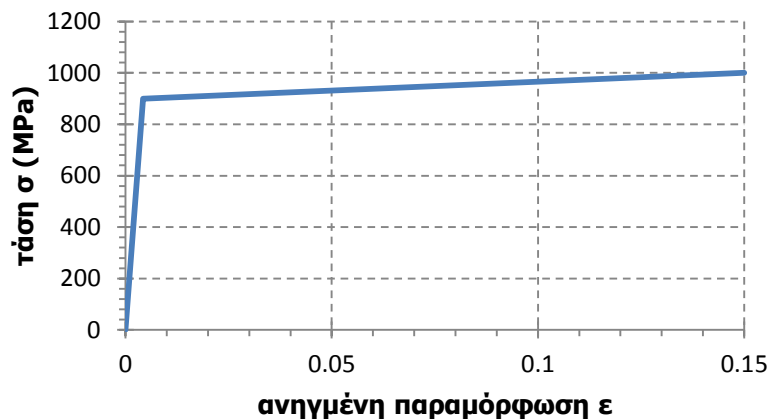
Η συμπεριφορά του συστήματος είναι έντονα μη γραμμική εξ' αιτίας της παραλαβής του εξωτερικά επιβαλλόμενου φορτίου μέσω δυνάμεων επαφής οι οποίες αναπτύσσονται μεταξύ των επιφανειών. Οι επιφάνειες οι οποίες έρχονται σε επαφή κατά την φόρτιση είναι: τα 2 ελάσματα που ενώνονται, η άνω επιφάνεια του άνω ελάσματος με την κεφαλή του κοχλία καθώς και ο κορμός του κοχλία με την άντυγα του ελάσματος. Στο προσομοίωμα των αριθμητικών αναλύσεων έχουν ληφθεί υπόψη οι επαφές αυτές, με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Επίσης, έχει ληφθεί υπόψη και η μη γραμμικότητα του υλικού, παρά το γεγονός ότι δεν είναι η κρίσιμη όπως θα δούμε στην συνέχεια.

Όσον αφορά την γεωμετρία του φορέα στην επόμενη σελίδα (σχήμα 3-7 και 3-8) παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαστάσεις της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας. Πρόκειται για μία πραγματική σύνδεση η οποία βρίσκεται στα 0,85 του ύψους του πυλώνα μίας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα ονομαστικής ισχύος 1500kW. Η εξωτερική διάμετρος του κυκλικού δακτυλίου είναι 3300mm ενώ η εσωτερική 3040mm. Το πάχος των συνδεόμενων ελασμάτων λήφθηκε ίσο με 60mm. Η σύνδεση είναι κατηγορίας E συνδέσεων εφελκυσμού και οι επιφάνειες των ελασμάτων λήφθηκαν ως αμμοβολισμένες με κανονικές οπές. Οι κοχλίες της σύνδεσης είναι διαμέτρου M36.

Ο χάλυβας των ελασμάτων και του πυλώνα είναι S355 (σχήμα 3-5) ενώ ο κοχλίας είναι ποιότητας 10.9 (σχήμα 3-6).

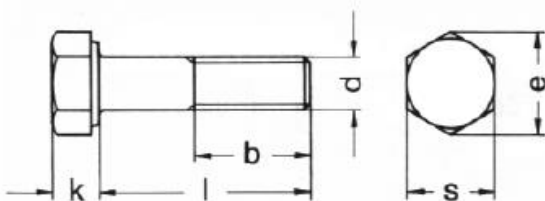


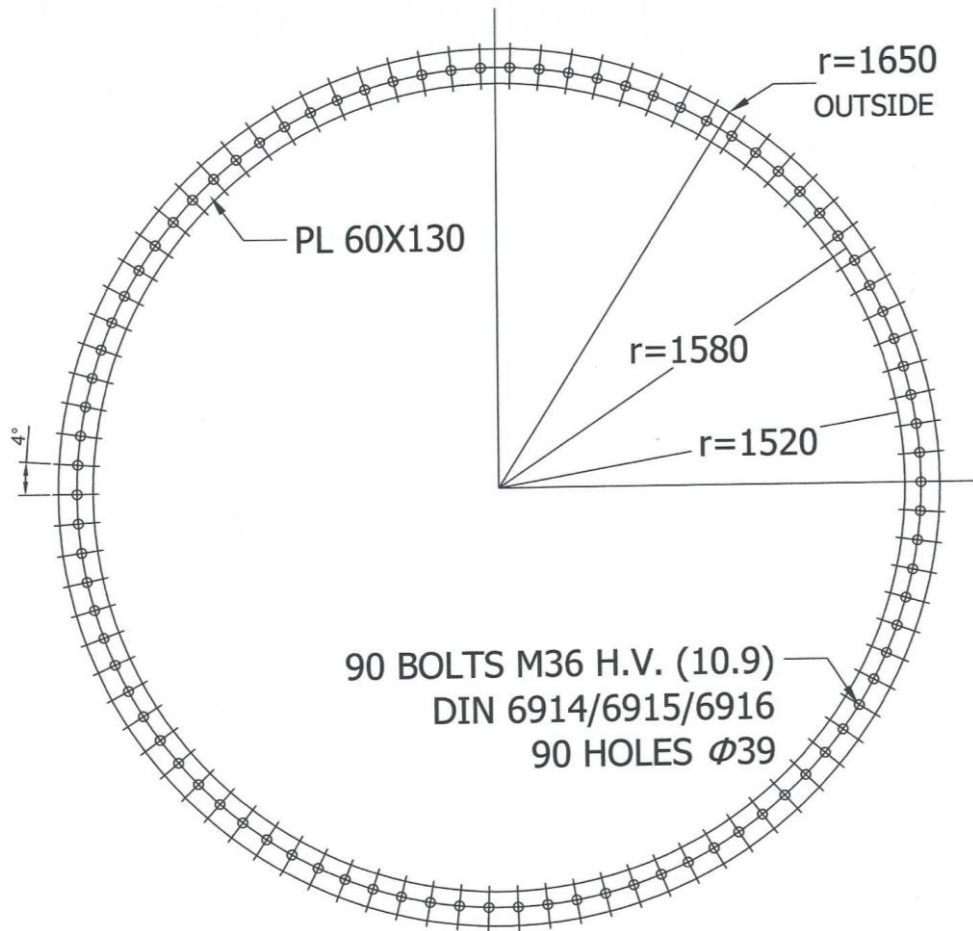
Σχήμα 3-5: καταστατικός νόμος του υλικού για χάλυβα S355



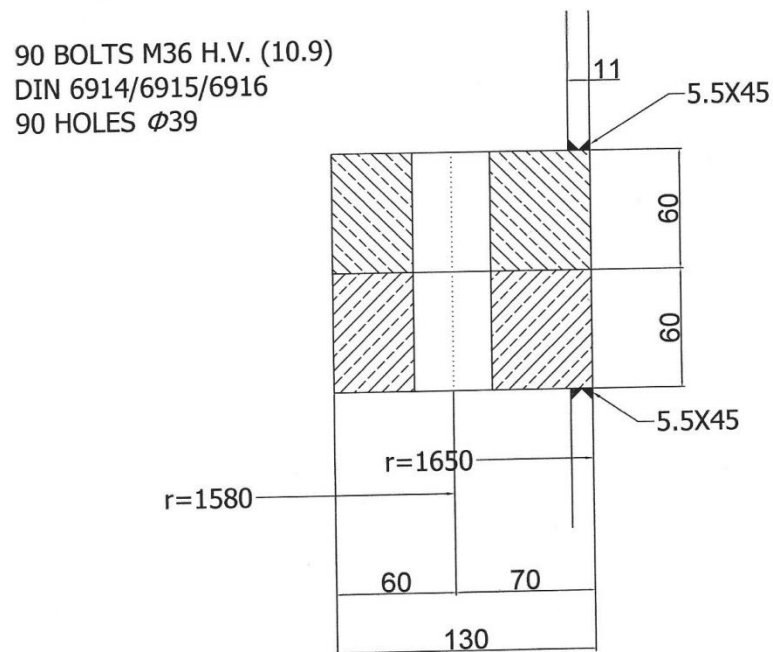
Σχήμα 3-6: καταστατικός νόμος του υλικού για κοχλία 10.9

Για τον ακριβή σχεδιασμό του κοχλία, οι ακριβείς διαστάσεις του ελήφθησαν από τον κανονισμό DIN6914 [6].





Σχήμα 3-7: κάτοψη της σύνδεσης σε κλίμακα 1/20



Σχήμα 3-8: τομή της σύνδεσης σε κλίμακα 1/2,5



Για κοχλία M36:

$k=23\text{mm}$

$e=66.44\text{mm}$

$s=60\text{mm}$

Όσον αφορά την ανοχή της οπής, εξαρτάται από την διάμετρο του κοχλία.

Διάμετρος οπής:  $d_o = d + a = 36\text{mm} + 3\text{mm} = 39\text{mm}$

Όπου  $a=3\text{mm}$  για κοχλία M36

Επίσης, η δύναμη προέντασης του κοχλία λήφθηκε ως η μέγιστη δυνατή, ίση με το 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία.

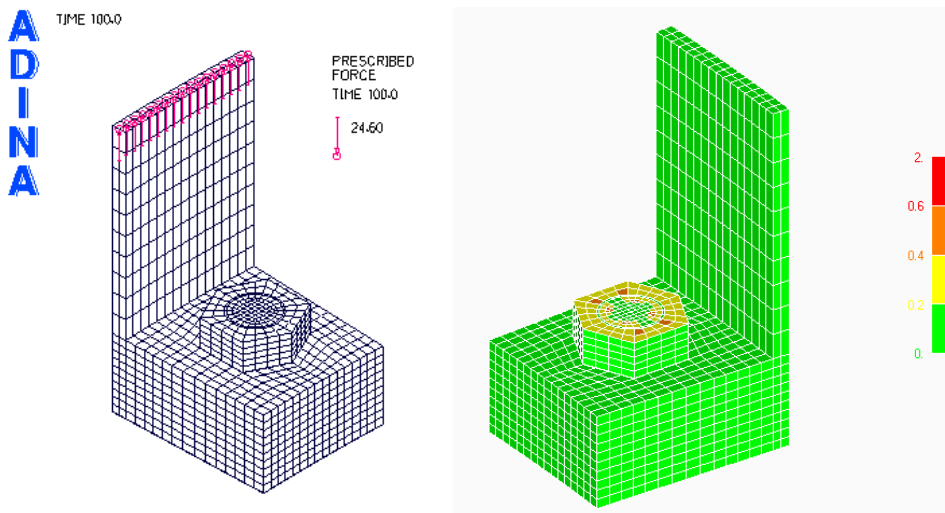
$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s$$

Όπου:  $f_{ub}$  είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και  $A_s$  το εμβαδόν σπειρώματος, Για ποιότητα κοχλία 10.9:  $f_{ub}=1000\text{MPa}$

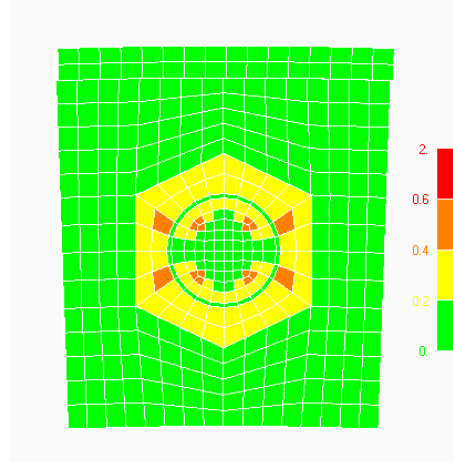
Για κοχλία M36:  $A_s=8,17\text{cm}^2$

Οπότε,  $F_{p,c} = 0.7 \times \frac{1000000\text{kN}}{10000\text{cm}^2} \times 8.17\text{cm}^2 = 571.9\text{kN}$

Στα σχήματα 3-9 και 3-10 παρουσιάζεται η μορφή του αριθμητικού προσομοιώματος του οποίου η συμπεριφορά μελετήθηκε αλλά και η ποιότητα του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων. Η διακριτοποίηση του πλέγματος έγινε με το πρόγραμμα FEMAP v11.0.1 [9].



Σχήμα 3-9: διακριτοποίηση προσομοιώματος και ποιότητα πλέγματος

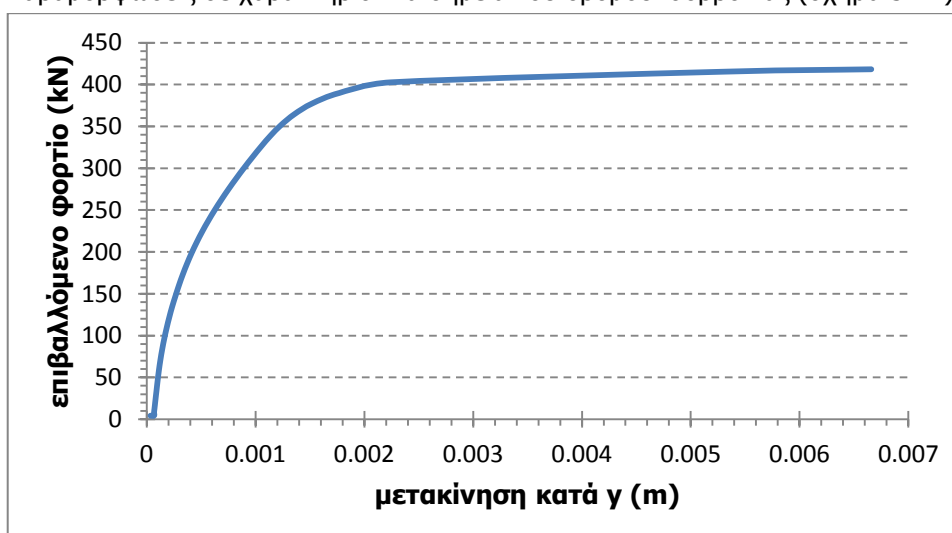


Σχήμα 3-10: ποιότητα πλέγματος σε κάτοψη

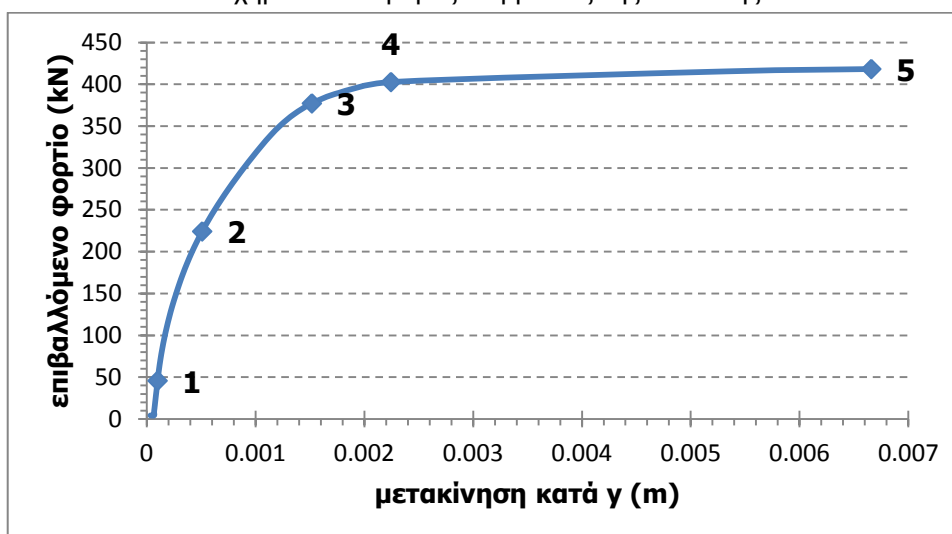
### 3.2.2 Δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης

Στην πρώτη φάση των αναλύσεων που εκτελέστηκαν προκειμένου να εξετασθεί η συμπεριφορά του παραπάνω προσομοιώματος, ασκείται μετακίνηση μεγέθους 0,4mm προκειμένου να κλείσουν τα κενά των ανοχών μεταξύ των 2 ελασμάτων και της κεφαλής του κοχλίου με το έλασμα. Στην δεύτερη φάση των αναλύσεων αρχικά εισάγεται η προένταση στους κοχλίες και μόλις ολοκληρωθεί ασκείται σταδιακά το φορτίο. Ο φορέας υποβάλλεται σε αξονικό εφελκυστικό φορτίο κατά μήκος της κορυφής του πυλώνα. Το φορτίο αυτό αντιστοιχεί σε 24,6kN ανά κόμβο και επομένως σε συνολικό φορτίο 418,2kN.

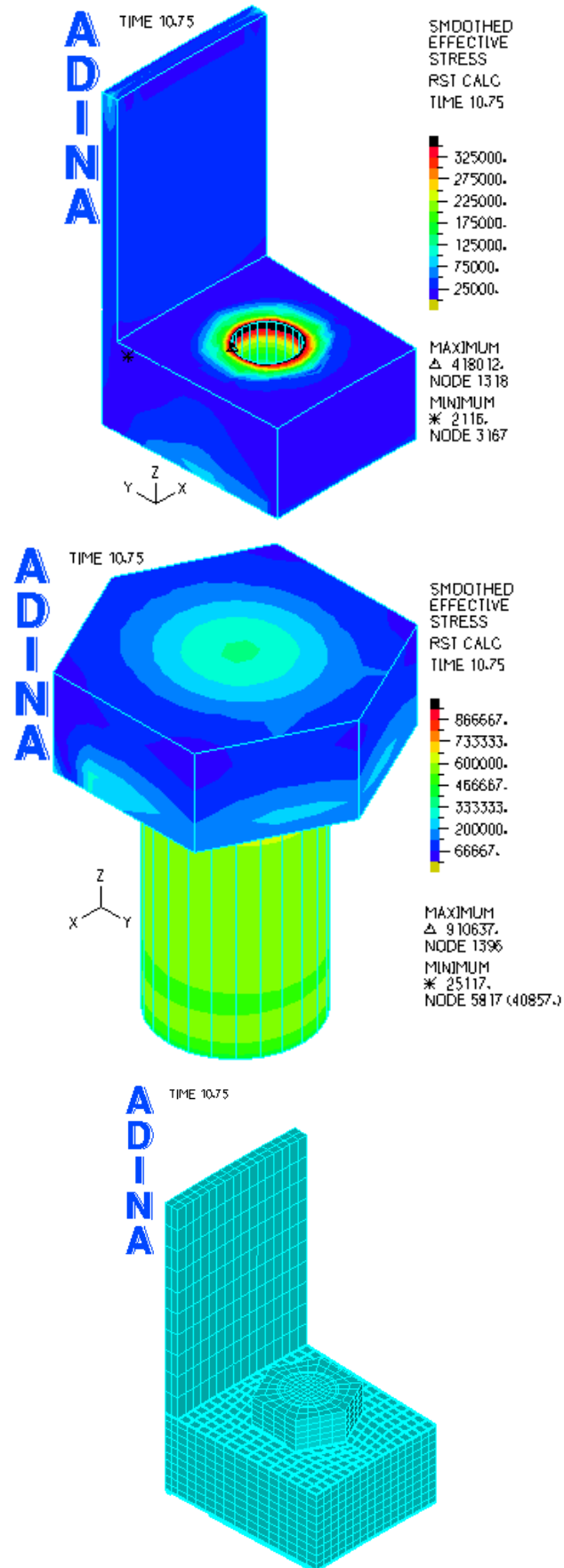
Από την εκτέλεση των μη γραμμικών αναλύσεων προέκυψε ο δρόμος ισορροπίας του σχήματος 3-11. Σ' αυτόν έχουμε στον οριζόντιο άξονα την μετακίνηση κατά  $y$  ενός σημείου στην κορυφή του πυλώνα εκεί όπου ασκείται το φορτίο και στον κατακόρυφο άξονα το επιβαλλόμενο φορτίο. Από το διάγραμμα αυτό, παρατηρείται ότι η αρχική δυσκαμψία της σύνδεσης είναι αρκετά μεγάλη μιας και η αρχική κλίση του διαγράμματος είναι υψηλή. Παρατηρείται μία έντονη πτώση της κλίσης του δρόμου ισορροπίας από κάποια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου και έπειτα η οποία συνεπάγεται πτώση της δυσκαμψίας της σύνδεσης. Ωστόσο, ακόμη και σε αυτή την περίπτωση το επιβαλλόμενο φορτίο συνεχώς αυξάνεται. Προκειμένου να αξιολογηθεί καλύτερα η συμπεριφορά αυτή θα πρέπει να εξετάσουμε τάσεις και παραμορφώσεις σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας (σχήμα 3-12).



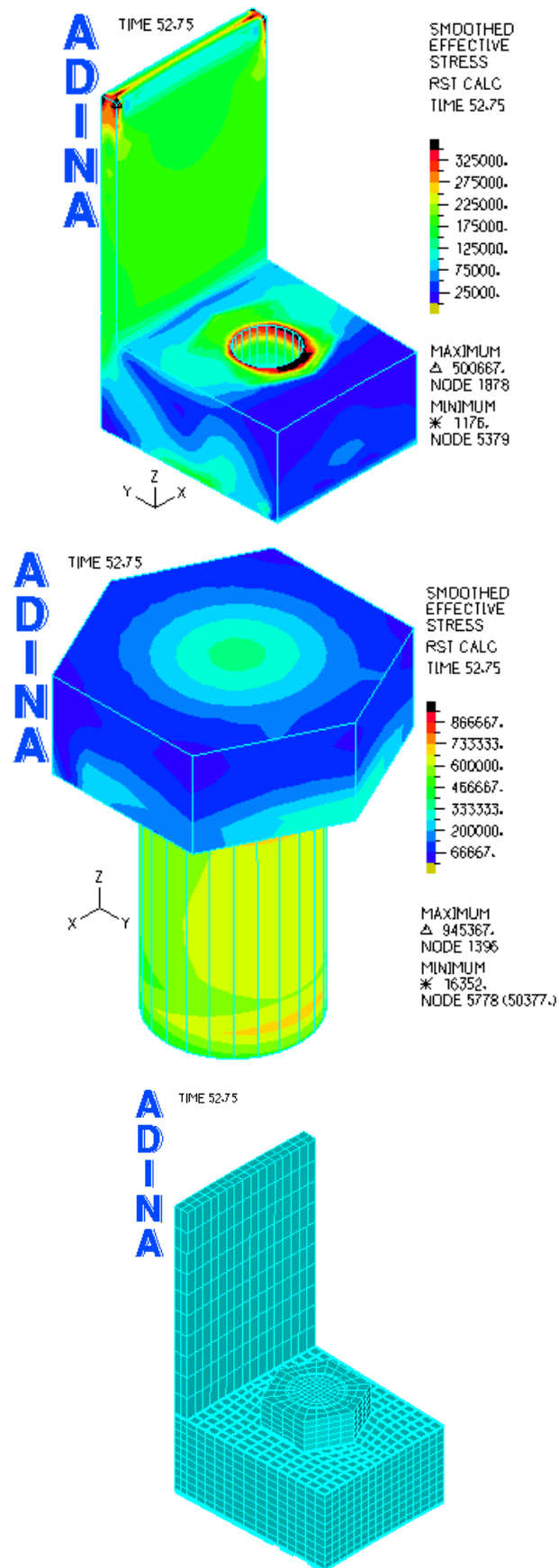
Σχήμα 3-11: δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης



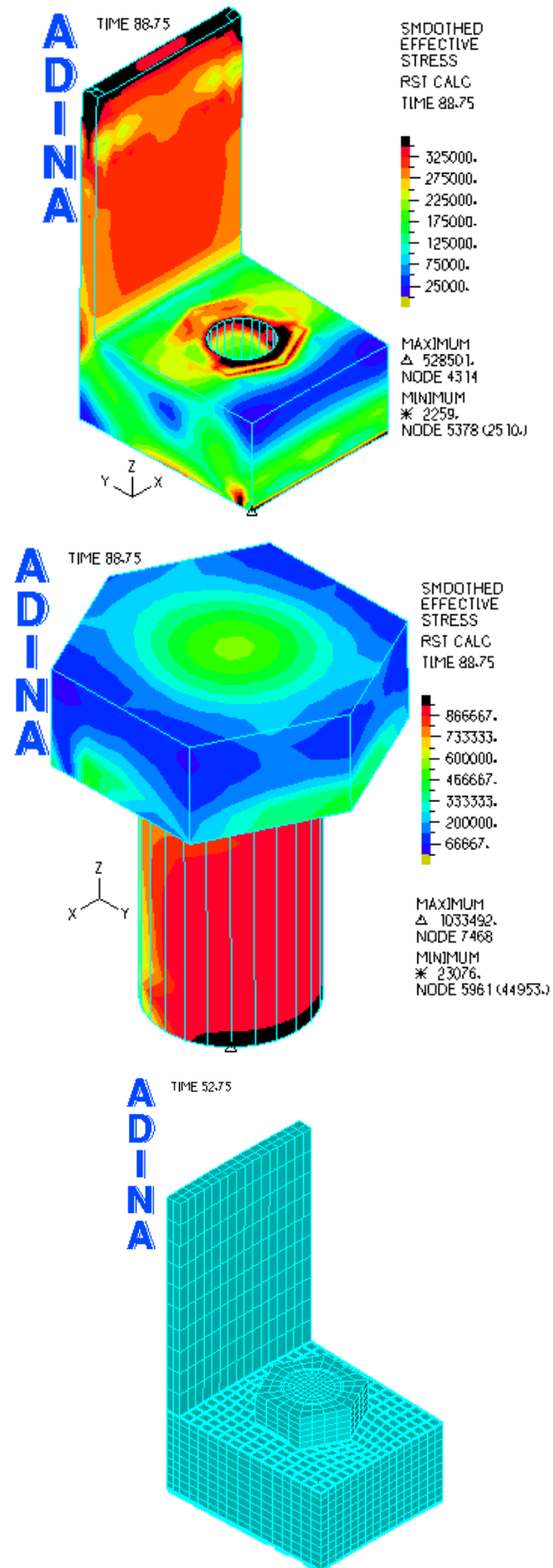
Σχήμα 3-12: χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας



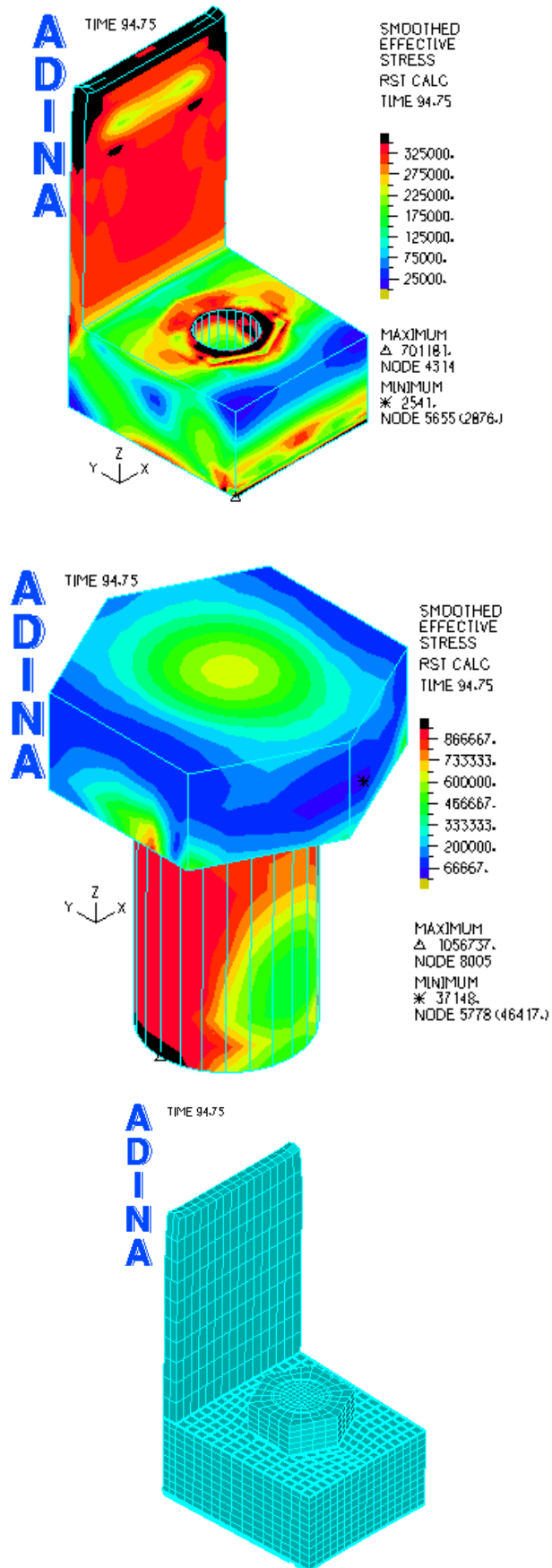
Σχήμα 3-13: ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις στο σημείο 1 του δρόμου ισορροπίας



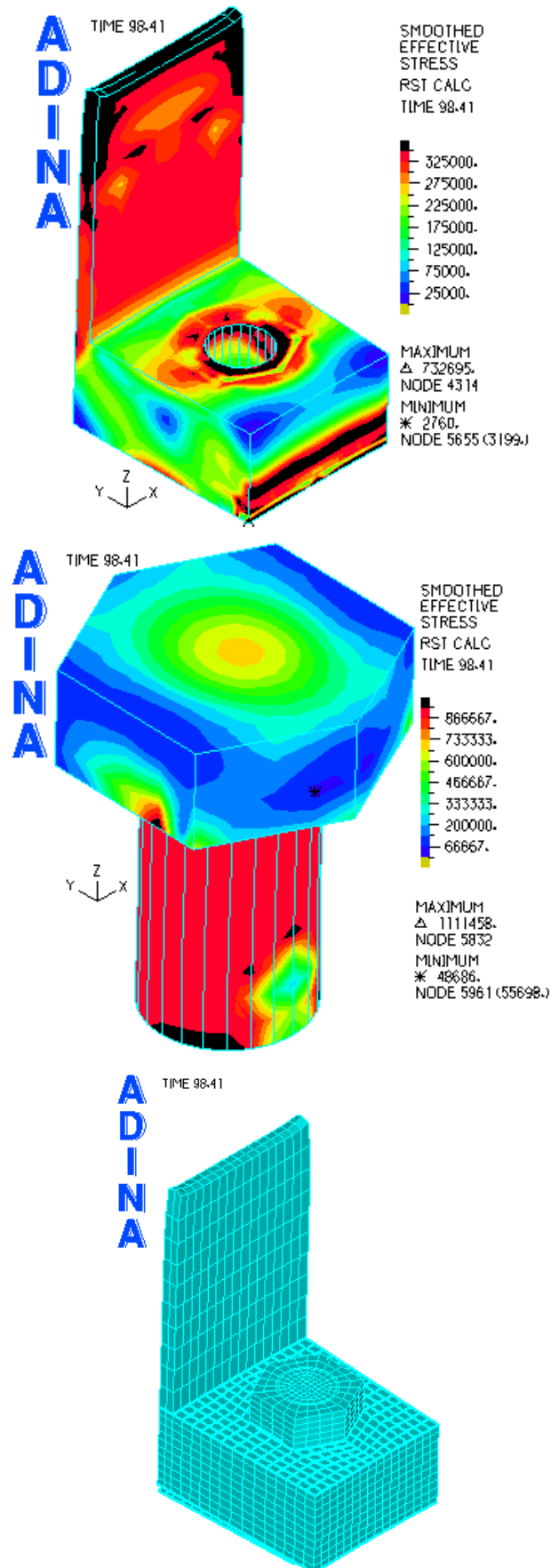
Σχήμα 3-14: Ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις στο σημείο 2 του δρόμου ισορροπίας



Σχήμα 3-15: ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις στο σημείο 3 του δρόμου ισορροπίας



Σχήμα 3-16: ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις στο σημείο 4 του δρόμου ισορροπίας

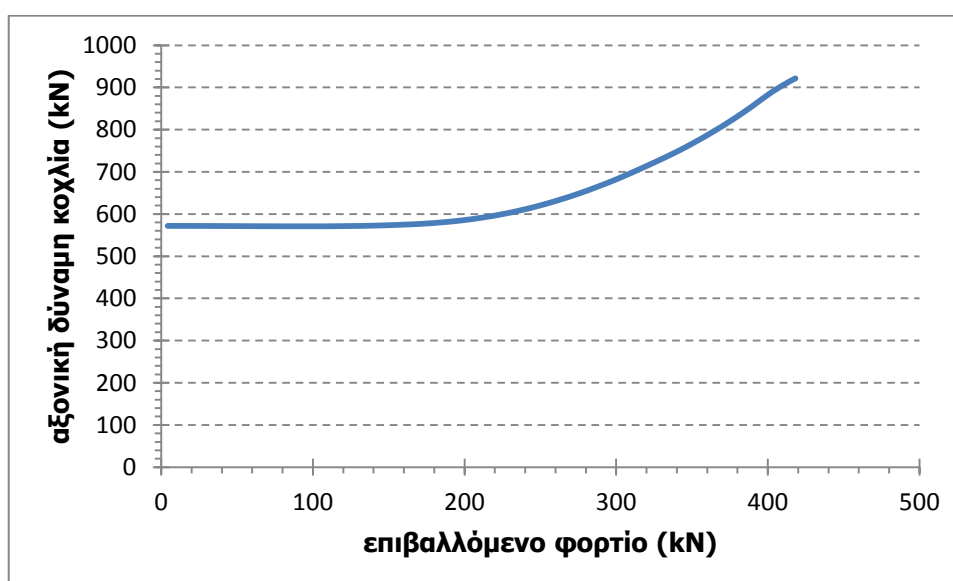


Σχήμα 3-17: ισοδύναμες τάσεις και παραμορφώσεις στο σημείο 5 του δρόμου ισορροπίας

Από την μορφή του δρόμου ισορροπίας συμπεραίνεται ότι η συμπεριφορά της σύνδεσης είναι εξ' αρχής μη γραμμική πριν την διαρροή του υλικού, λόγω της μη γραμμικής φύσης της επαφής. Στα σημεία 1 και 2 του δρόμου ισορροπίας δεν έχει εκδηλωθεί ακόμα η μη γραμμικότητα του υλικού. Υπάρχει μία τοπική υπέρβαση του ορίου διαρροής εκεί όπου ασκείται το φορτίο και στο πάνω μέρος της άντυγας του ελάσματος η οποία όμως είναι μικρή και αρκετά τοπική. Πιθανότατα δεν επηρεάζει την συμπεριφορά του συστήματος γι' αυτό και η κλίση του δρόμου ισορροπίας στα σημεία αυτά δεν παρουσιάζει έντονη πτώση. Επιπλέον, η υπέρβαση του ορίου διαρροής του υλικού τοπικά, ήδη από τα σημεία 1 και 2 οφείλεται στο γεγονός ότι η αρχική δύναμη προέντασης του κοχλίου είναι πολύ υψηλή. Και όπως θα δούμε αναλυτικά στη συνέχεια σε αυτές τις περιπτώσεις το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται μέσω της ανακατανομής τάσεων στο έλασμα. Επομένως, η διαρροή ξεκινά νωρίς στην περίπτωση της μεγάλης δύναμης προέντασης και στη συνέχεια γίνεται η ανακατανομή. Στο σημείο 3, λίγο πριν την σημαντική μείωση της δυσκαμψίας της σύνδεσης έχει διαρρεύσει ένα κομμάτι του πυλώνα και του ελάσματος αλλά οι παραμορφώσεις του φορέα δεν είναι ακόμα ορατές. Στο σημείο 4, λίγο μετά την σημαντική μείωση της δυσκαμψίας της σύνδεσης η διαρροή επεκτείνεται σε μεγαλύτερο κομμάτι του ελάσματος και του πυλώνα αλλά και σε ένα μικρό κομμάτι του κοχλίου. Τέλος, στο σημείο 5 οι παραμορφώσεις είναι αρκετά μεγάλες και είναι πλέον ορατή η απομάκρυνση των ελασμάτων στην εφελκυσμένη μεριά.

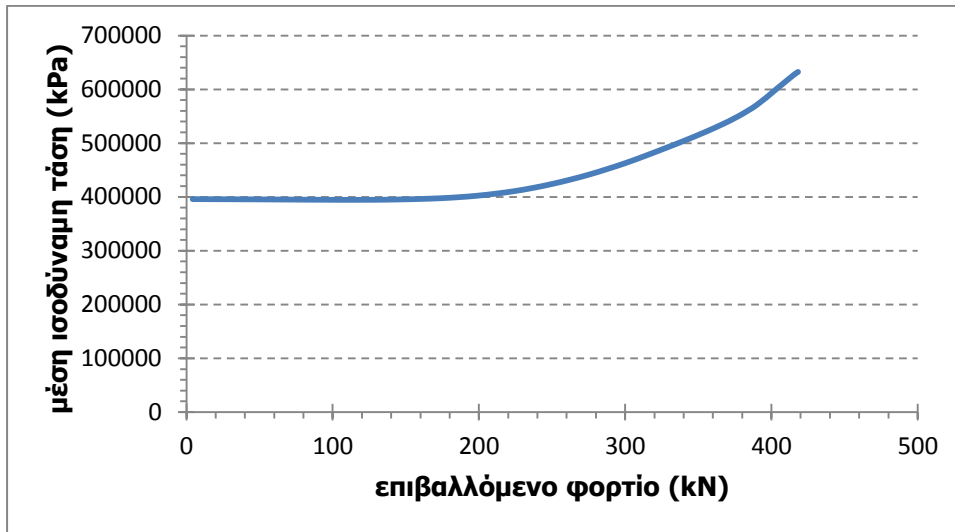
### 3.2.3 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Εκτός από τον δρόμο ισορροπίας, υπάρχουν και άλλα στοιχεία τα οποία θα συμβάλλουν στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την συμπεριφορά της κοχλιωτής σύνδεσης. Αυτά τα στοιχεία είναι: η τιμή της αξονικής δύναμης στην οποία φτάνει ο κοχλίας, η μέγιστη ισοδύναμη τάση στον κοχλίο, οι δυνάμεις επαφής που αναπτύσσονται μεταξύ των επιφανειών αλλά και η μέγιστη ισοδύναμη τάση που αναπτύσσεται στην θέση της συγκόλλησης. Είναι σημαντικό να τονισθεί το γεγονός ότι η συγκόλληση των δακτυλιοειδών ελασμάτων στα άκρα των τμημάτων του πυλώνα που ενώνονται, δεν λαμβάνεται υπόψη με κάποιο τρόπο στο προσομοίωμα οπότε δεν είναι γνωστό το αν επηρεάζει τα αποτελέσματα. Αλλά είναι δυνατό να προσδιορισθούν τα εντατικά μεγέθη στην θέση αυτή.

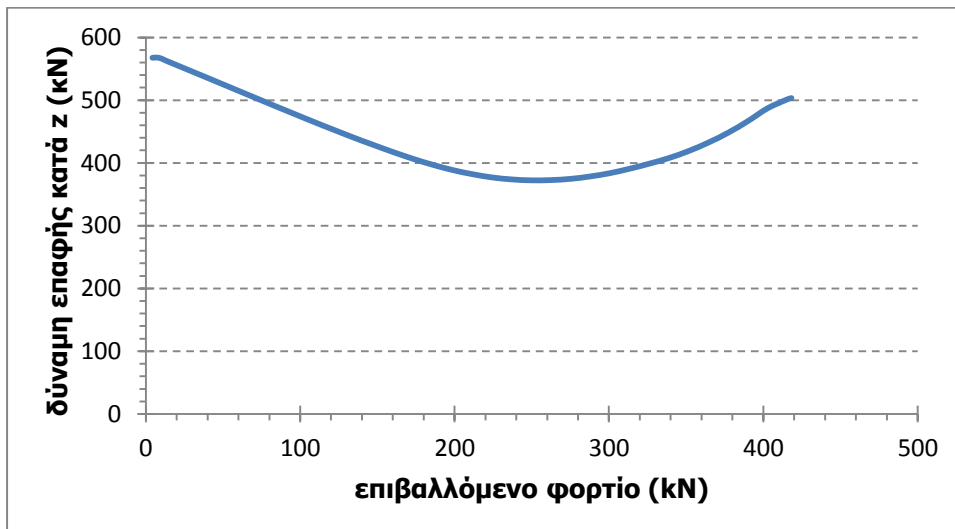


Σχήμα 3-18: δρόμος ισορροπίας αξονικής δύναμης κοχλίου





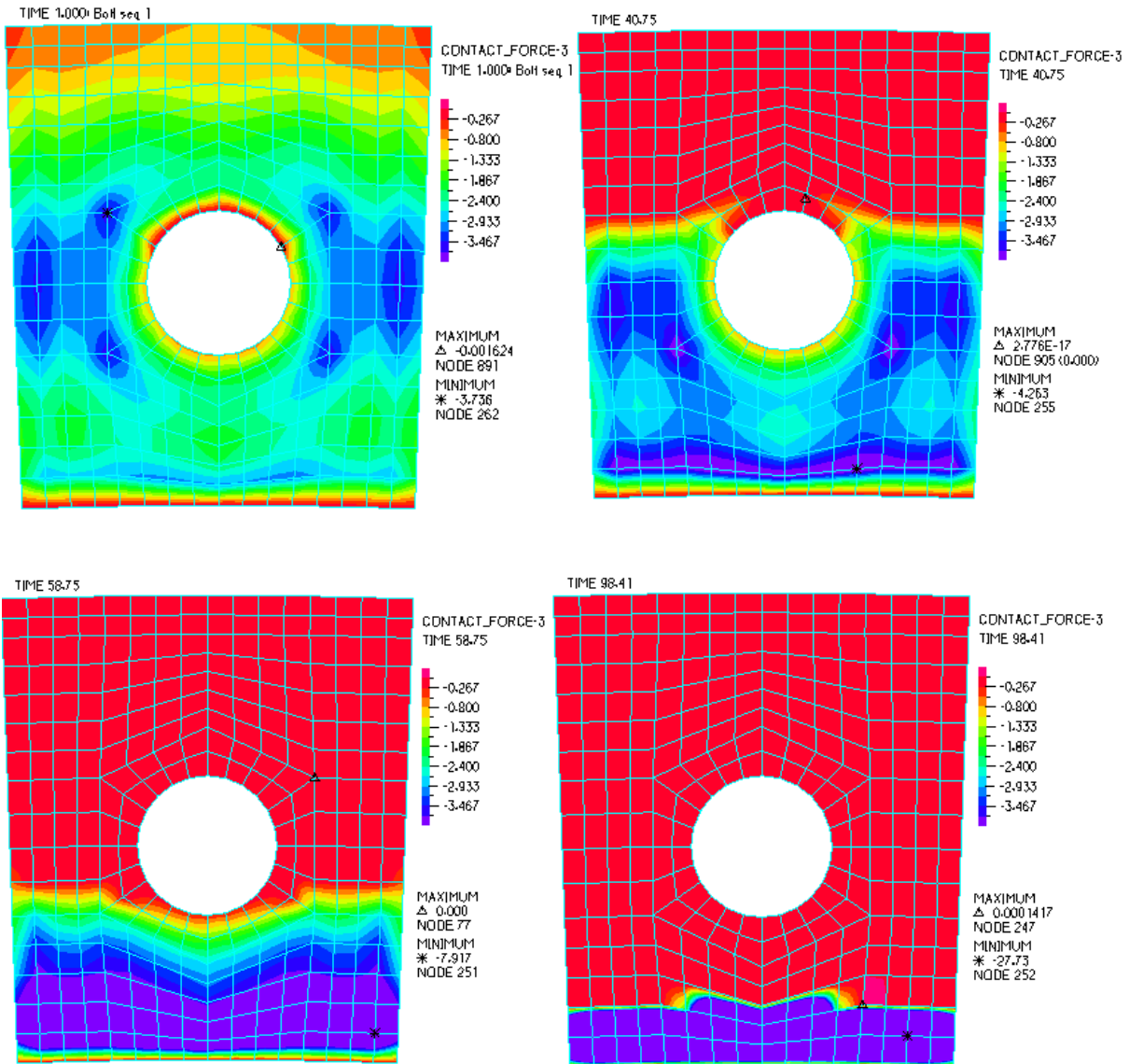
Σχήμα 3-19: δρόμος ισορροπίας μέσης ισοδύναμης τάσης στον κοχλία



Σχήμα 3-20: δρόμος ισορροπίας δυνάμεων επαφής κατά την εγκάρσια διεύθυνση στην διεπιφάνεια των 2 ελασμάτων

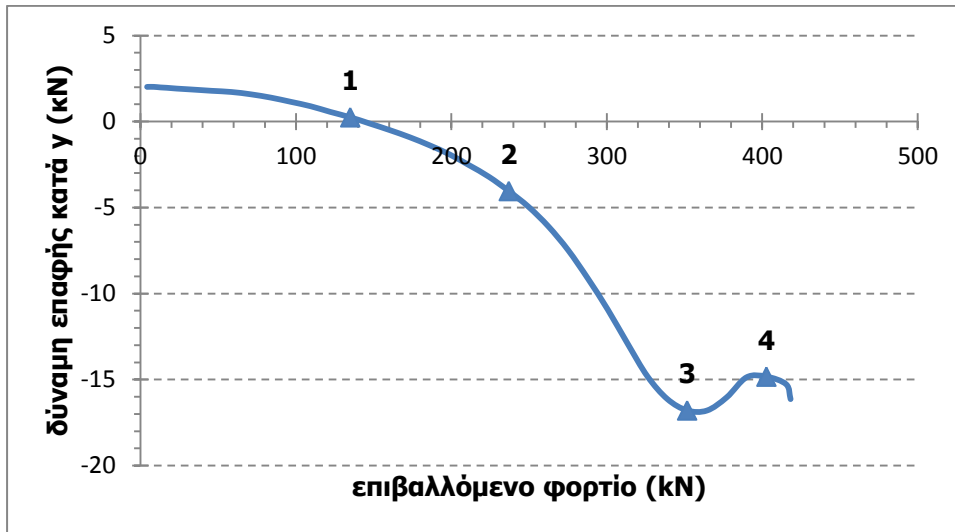
Στο σχήμα 3-18 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του κοχλία συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου ενώ στο σχήμα 3-20 ο δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων. Στο σχήμα 3-21 δίνεται η κατανομή των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στο έλασμα σε χαρακτηριστικές θέσεις των διαγραμμάτων 3-18 και 3-20. Η αρχική τιμή της αξονικής δύναμης του κοχλία είναι αυτή που αντιστοιχεί στην δύναμη προέντασής του για μηδενικό επιβαλλόμενο φορτίο. Στη συνέχεια, ενώ το φορτίο αυξάνεται σταδιακά η αξονική του κοχλία παραμένει σταθερή διότι στο διάστημα αυτό το φορτίο παραλαμβάνεται μέσω ανακατανομής των ορθών τάσεων στο έλασμα, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3-21. Στην πρώτη εικόνα έχουμε την κατανομή των εγκάρσιων δυνάμεων αμέσως μετά την προένταση των κοχλίων ενώ στη δεύτερη εικόνα για την χρονική στιγμή που αξονική δύναμη του κοχλία παύει πλέον να είναι σταθερή. Στο διάστημα αυτό το διάγραμμα των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων παρουσιάζει φθίνουσα πορεία. Στη συνέχεια, η αξονική δύναμη του κοχλία αρχίζει να αυξάνεται με ταυτόχρονη ανακατανομή των δυνάμεων στο έλασμα. Στην τρίτη εικόνα είναι η κατανομή των δυνάμεων στο σημείο του διαγράμματος 3-20 όπου οι δυνάμεις επαφής σταματούν να μειώνονται.

Στην θέση αυτή σταματά πλέον η ανακατανομή, οι επιφάνειες επαφής δεν μεταβάλλονται πια και το επιβαλλόμενο φορτίο παραλαμβάνεται αποκλειστικά και μόνο από τον κοχλία. Γι' αυτό και από εκείνη την χρονική στιγμή και έπειτα τόσο η αξονική δύναμη του κοχλία όσο και οι δυνάμεις επαφής των ελασμάτων αυξάνονται γραμμικά. Στην τέταρτη εικόνα του σχήματος 3-21 παρουσιάζεται η κατανομή των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στο τέλος της φόρτισης.

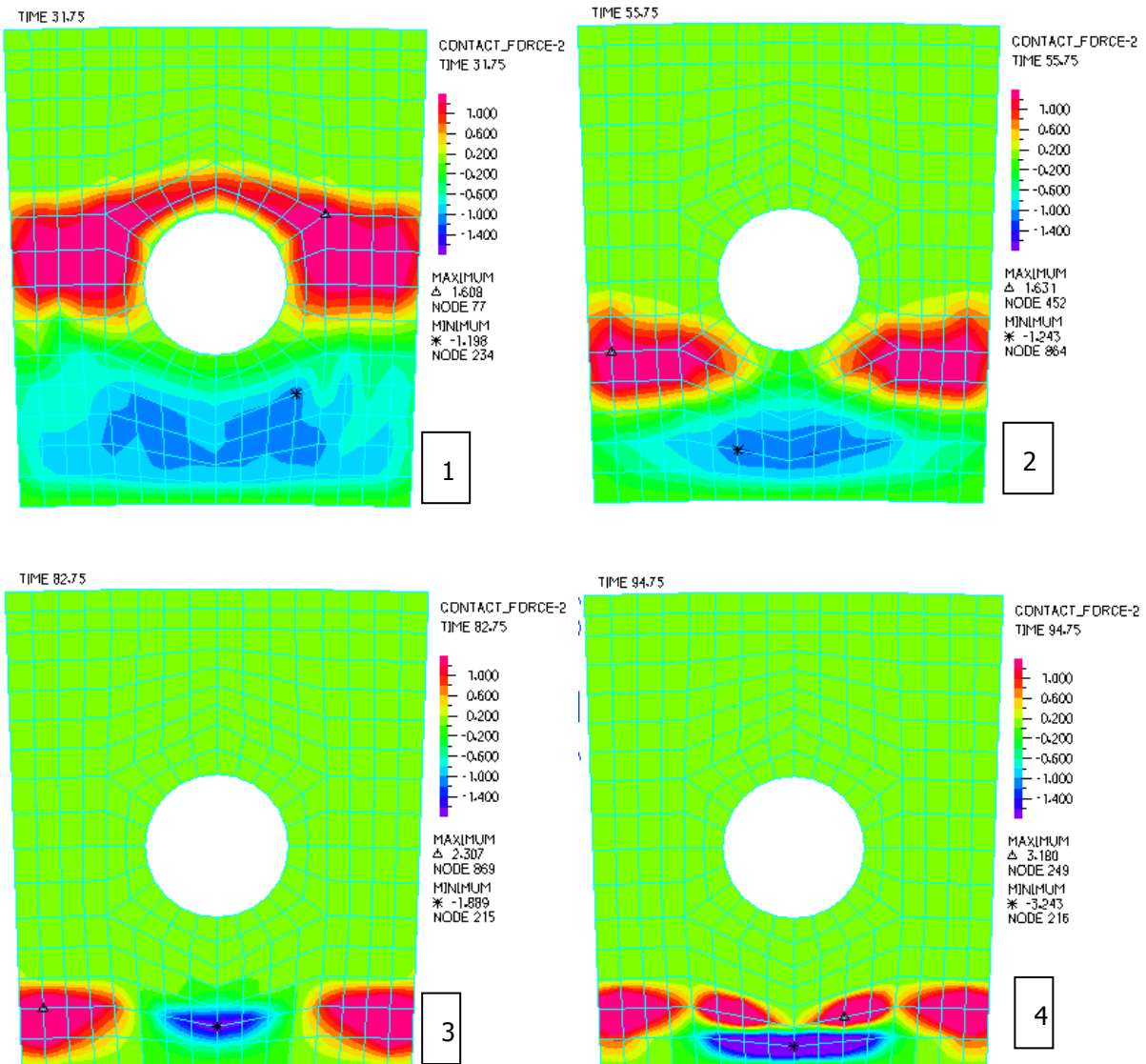


Σχήμα 3-21: παρουσίαση των κατακόρυφων δυνάμεων επαφής μεταξύ των 2 ελασμάτων

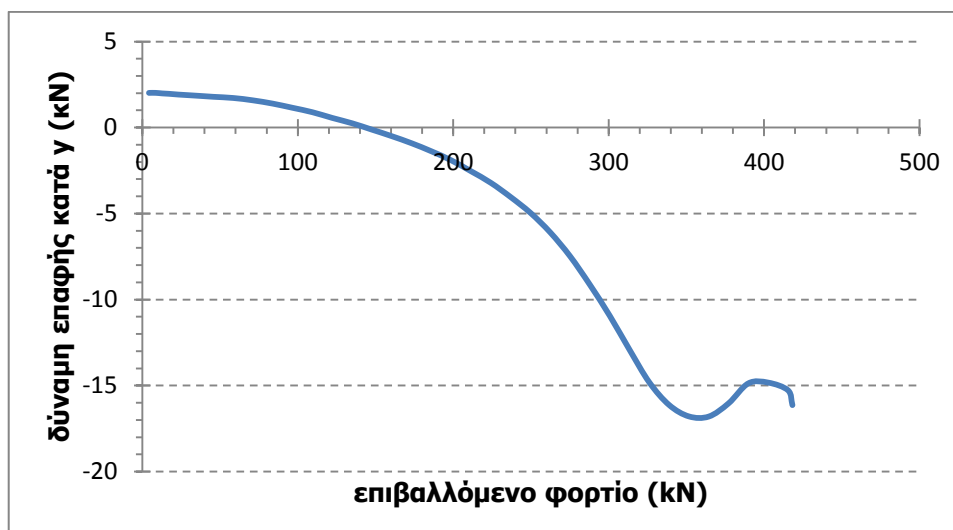
Όσον αφορά τις διαμήκειες δυνάμεις επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων στο σχήμα 3-22 παρατηρείται ότι το μέγεθός τους συνεχώς αυξάνεται. Το αρνητικό πρόσημο του διαγράμματος έχει να κάνει με το γεγονός ότι οι δυνάμεις επαφής είναι ετερόσημες όπως φαίνεται και στις εικόνες του σχήματος 3-23 και το πρόσημο εξαρτάται από το ποια φορά θα υπερισχύσει. Στο σχήμα 3-23 παρουσιάζονται εικονικά οι δυνάμεις επαφής του διαγράμματος 3-22 στα 4 χαρακτηριστικά σημεία που έχουν σημειωθεί. Στις εικόνες αυτές φαίνεται ότι οι διαμήκειες δυνάμεις επαφής έχουν θετικό πρόσημο από την μεριά όπου ασκείται το φορτίο και αρνητικό πρόσημο από την άλλη μεριά. Επειδή λοιπόν, καθώς ασκείται το φορτίο πιέζεται το έλασμα από την κάτω μεριά έχει υπερισχύσει το αρνητικό πρόσημο.



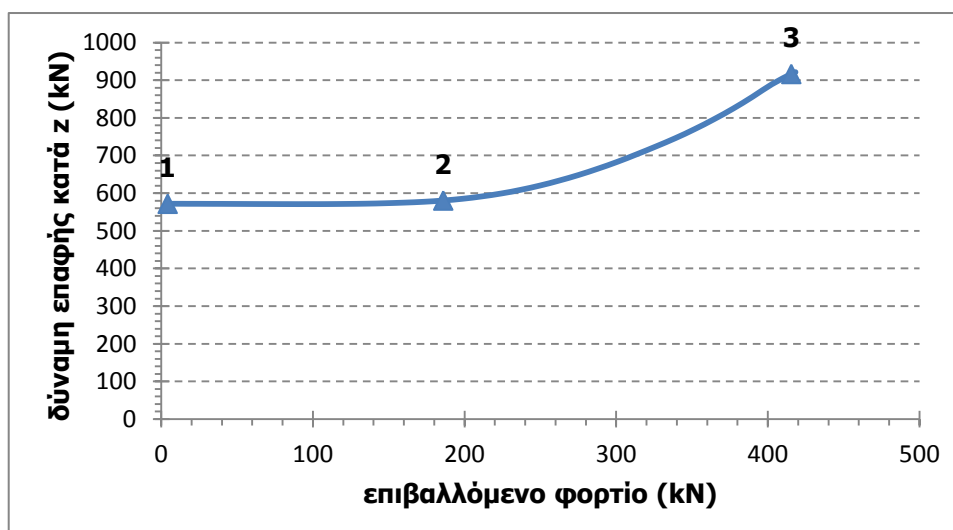
Σχήμα 3-22: δρόμος ισορροπίας δυνάμεων επαφής κατά την διαμήκη διεύθυνση στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων



Σχήμα 3-23: παρουσίαση των οριζόντιων δυνάμεων επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων



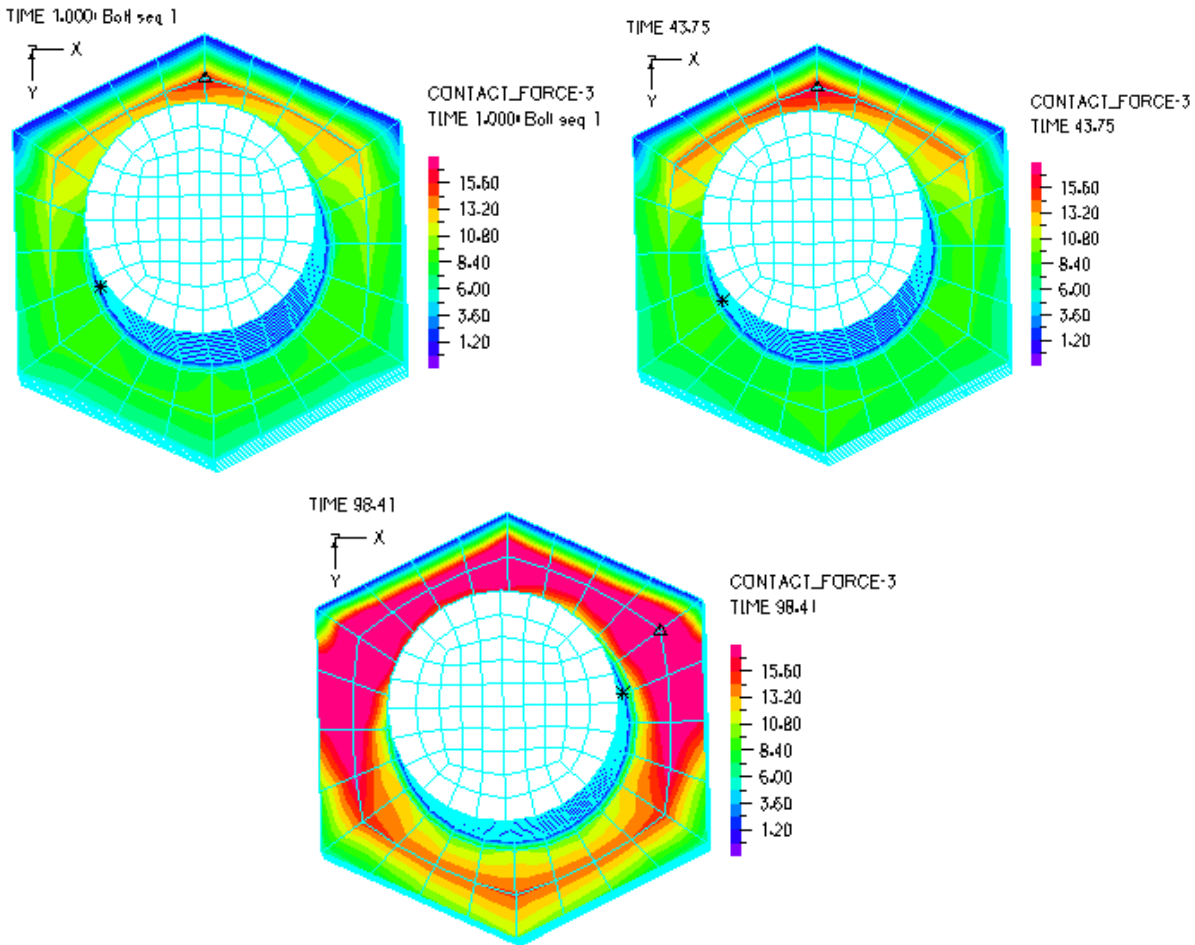
Σχήμα 3-24: δρόμος ισορροπίας δυνάμεων επαφής κατά την διαμήκη διεύθυνση μεταξύ του άνω ελάσματος και της κεφαλής του κοχλία



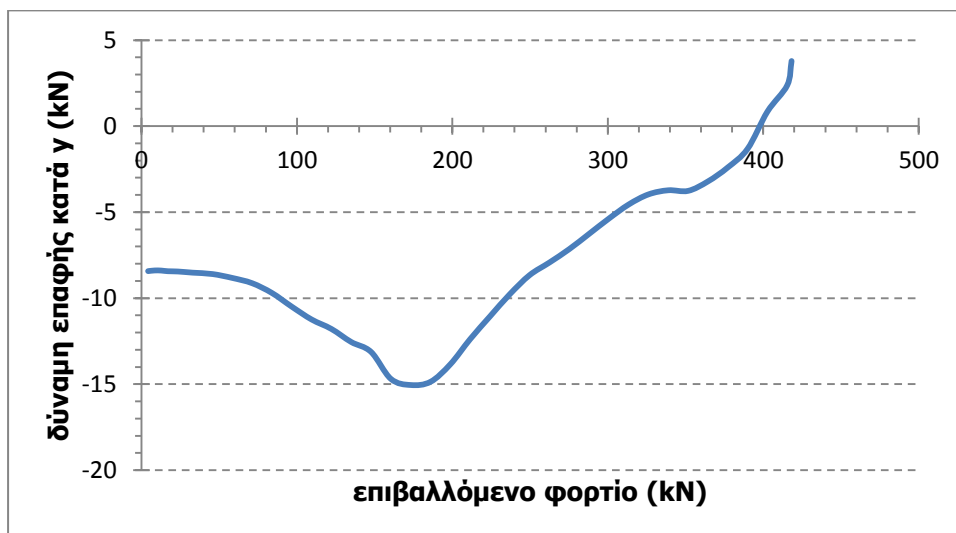
Σχήμα 3-25: δρόμος ισορροπίας δυνάμεων επαφής κατά την εγκάρσια διεύθυνση μεταξύ του άνω ελάσματος και της κεφαλής του κοχλία

Στα σχήματα 3-24 και 3-25 παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα των διαμηκών και εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια της κεφαλής του κοχλία με την άνω επιφάνεια του άνω ελάσματος. Παρατηρείται ότι το διάγραμμα των διαμηκών δυνάμεων επαφής μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και του άνω ελάσματος είναι ίδιο με το αντίστοιχο της διεπιφάνειας των δύο ελασμάτων.

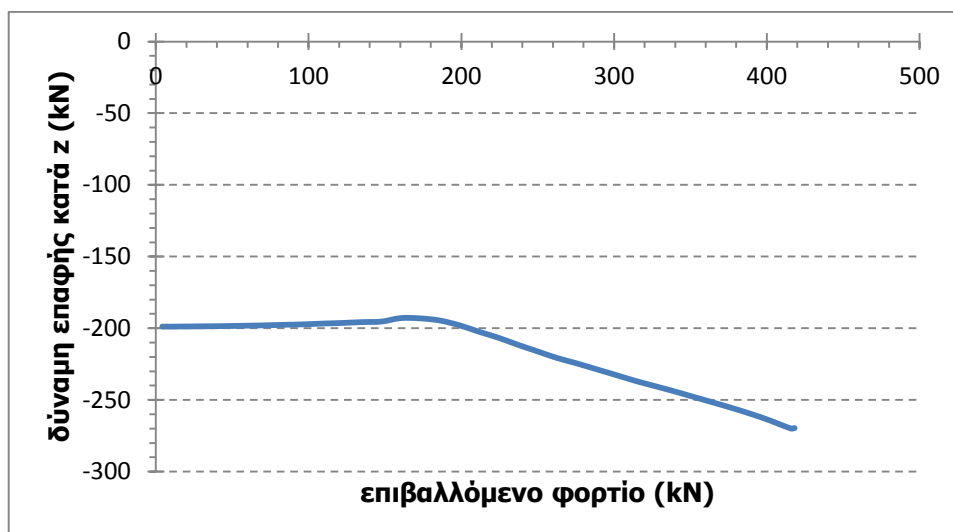
Όσον αφορά το σχήμα 3-25 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής, οι οποίες αρχικά είναι σταθερές και στην συνέχεια συνεχώς αυξάνονται. Στο σχήμα 3-26 απεικονίζεται η κατανομή αυτών των δυνάμεων επαφής στα τρία χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος 3-25.



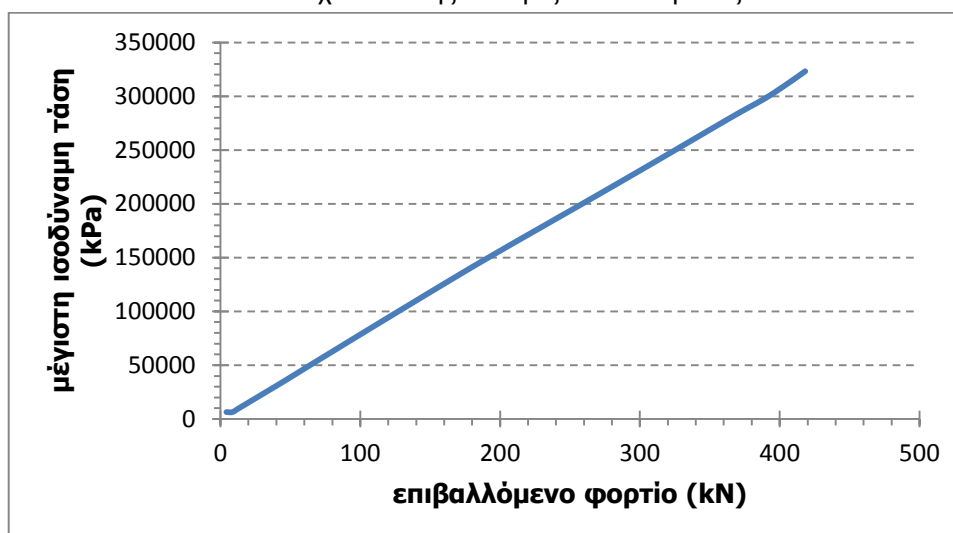
Σχήμα 3-26: παρουσίαση των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ του άνω ελάσματος και της κεφαλής του κοχλία



Σχήμα 3-27: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής κατά την διαμήκη διεύθυνση μεταξύ του κορμού του κοχλία και της άντυγας του ελάσματος



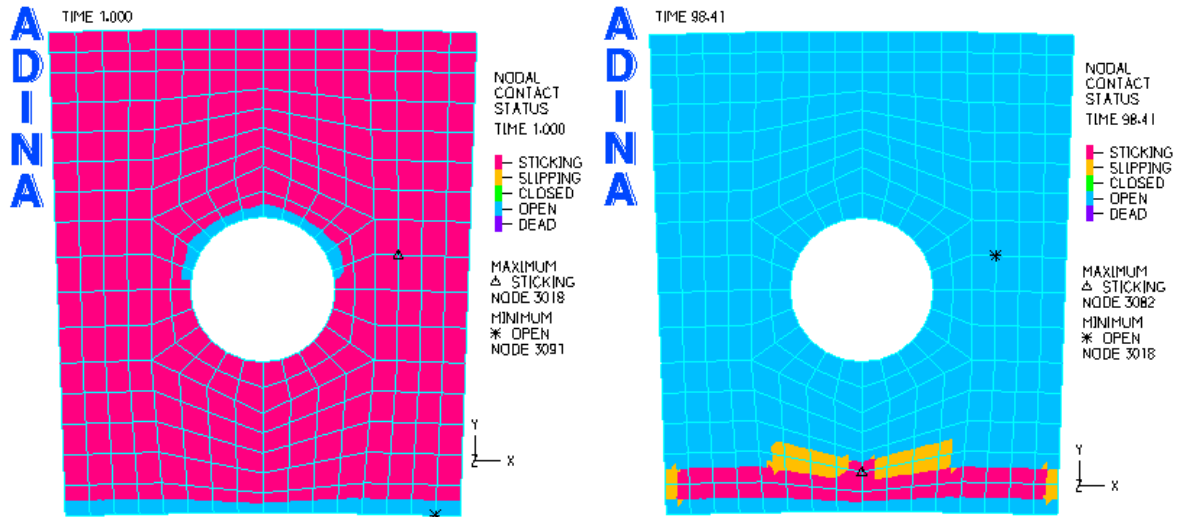
Σχήμα 3-28: δρόμος ισορροπίας δυνάμεων επαφής κατά την εγκάρσια διεύθυνση μεταξύ του κορμού του κοχλίου και της άντυγας του ελάσματος



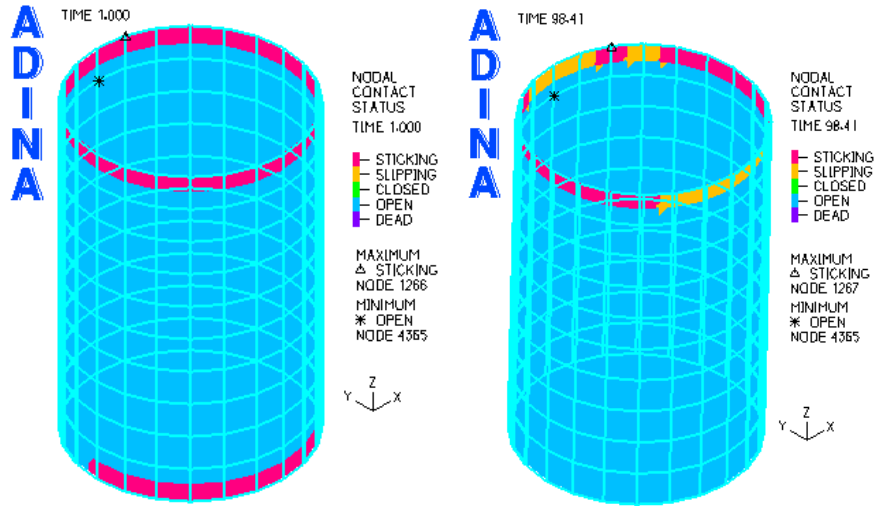
Σχήμα 3-29: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση

Τέλος στο σχήμα 3-29 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση ο οποίος είναι απόλυτα γραμμικός. Παρατηρείται το γεγονός ότι είναι αρκετά χαμηλή η μέγιστη ισοδύναμη τάση κάτω από το όριο διαρροής του υλικού. Πράγμα το οποίο είναι και λογικό μιας και λόγω της κόπωσης κρίσιμα είναι τα επαναλαμβανόμενα φορτία στα οποία υποβάλλεται.

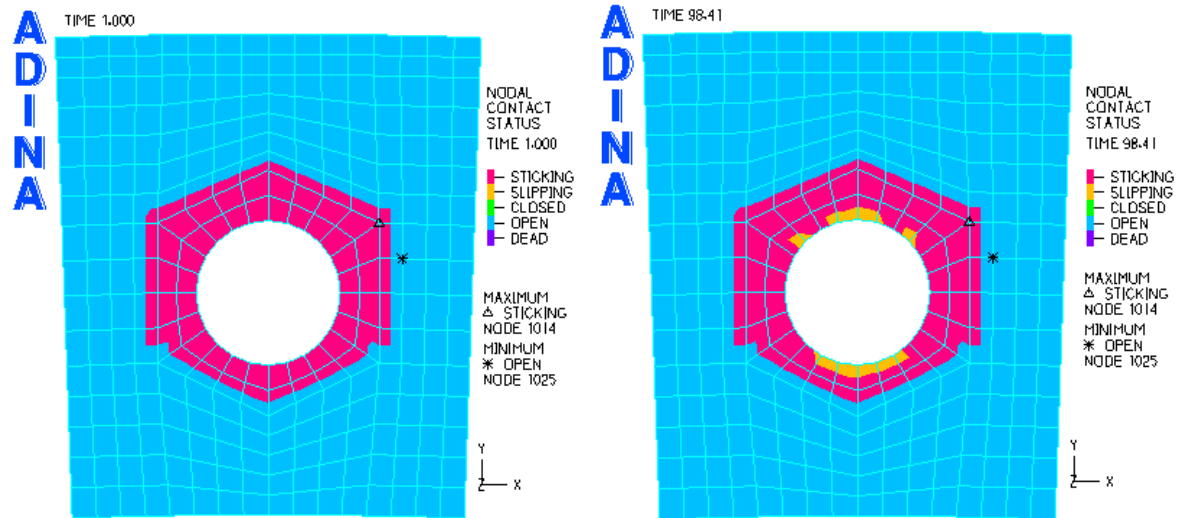
Καταλήγοντας στα σχήμα 3-30, 3-31 & 3-32 παρουσιάζονται οι εικόνες των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή κατά την φόρτιση της σύνδεσης. Με ροζ χρώμα εμφανίζονται οι περιοχές που βρίσκονται πλήρως σε επαφή, με κίτρινο εκείνες που έχουν ολισθήσει και με μπλε οι περιοχές που δεν είναι σε επαφή. Στο τέλος της πρώτης φάσης, αμέσως μετά την επιβολή της μετακίνησης τα δύο ελάσματα βρίσκονται πλήρως σε επαφή μεταξύ τους και έχουν κλείσει τα κενά. Ενώ στο τέλος της φόρτισης η μία πλευρά του ελάσματος έχει ανασηκωθεί και η επαφή έχει περιορισθεί σε ένα πολύ μικρό κομμάτι στην άλλη πλευρά. Όσον αφορά τον κορμό του κοχλίου η επαφή αναπτύσσεται σε ένα πολύ περιορισμένο κομμάτι στην κορυφή. Το γεγονός αυτό δημιουργεί προβληματισμούς σχετικά με το πόσο αξιόπιστα είναι τα αποτελέσματα των δυνάμεων επαφής στην άντυγα του ελάσματος. Πιθανόν εξαιτίας του πολύ μικρού τμήματος που βρίσκεται σε επαφή να έπρεπε να πυκνώσουμε το πλέγμα για να εξασφαλίσουμε σίγουρα αποτελέσματα.



Σχήμα 3-30: επιφάνειες επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων αμέσως μετά την προένταση και στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 3-31: επιφάνειες επαφής στον κορμό του κοχλίου αμέσως μετά την προένταση και στο τέλος της φόρτισης



Σχήμα 3-32: επιφάνειες επαφής στην άνω επιφάνεια του άνω ελασματος αμέσως μετά την προένταση και στο τέλος της φόρτισης

## 4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΑΤΙΚΟΥ ΒΡΑΧΕΟΣ L

### 4.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΓΕΘΩΝ ΤΩΝ ΟΠΟΙΩΝ Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΜΕΛΕΤΑΤΑΙ

Προκειμένου να αξιολογήσουμε την συμπεριφορά της σύνδεσης που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο θα προχωρήσουμε στην εκτέλεση κάποιων παραμετρικών αναλύσεων. Δηλαδή μεταβάλλοντας κάποια από τα χαρακτηριστικά και την γεωμετρία της σύνδεσης να εξετάσουμε τις μεταβολές στα αποτελέσματα και να εξαγάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

Η αρχική γεωμετρία του φορέα παραμένει αμετάβλητη και το μόνο που αλλάζει κάθε φορά είναι το μέγεθος του οποίου την επίδραση διερευνούμε. Τα χαρακτηριστικά των οποίων η επιρροή εξετάζεται στο παρόν κεφάλαιο είναι:

- ❖ Δύναμη προέντασης
- ❖ Διάμετρος κοχλία
- ❖ Πάχος ελάσματος
- ❖ Ποιότητα κοχλία

Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο η αρχική γεωμετρία της σύνδεσης που μελετήθηκε είναι: έλασμα πάχους 60mm, κοχλίας διαμέτρου M36, με δύναμη προέντασης ίση με το 70% της εφελκυστικής αντοχής του και ποιότητα κοχλία 10.9. Για την διερεύνηση της επιρροής της δύναμης προέντασης, μειώνεται σε 10%, 20%, 30%, 40%, 50% και 60% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία. Αντίστοιχα, για την διερεύνηση της επιρροής της διαμέτρου του κοχλία, εκτελέστηκαν αριθμητικές αναλύσεις για την ίδια γεωμετρία της σύνδεσης και κοχλία διαμέτρου M20, M24, M27 και M30. Όσον αφορά το πάχος του ελάσματος, η αρχική τιμή των 60mm, μειώνεται σε 35mm, 40mm, 45mm, 50mm και 55mm. Τέλος, προκειμένου να εκτιμηθεί η επιρροή της ποιότητας του κοχλία που χρησιμοποιείται, η αρχική ποιότητα κοχλία 10.9 μειώνεται σε 8.8. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας των τμημάτων του πυλώνα είναι κατηγορίας E συνδέσεων εφελκυσμού γι' αυτό και οι κοχλίες που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι υψηλής αντοχής δηλαδή ποιότητας 10.9 και 8.8. Δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοχλίες χαμηλότερης ποιότητας και διαμέτρου μικρότερης από M20. Γι' αυτό στις παραμετρικές που εκτελέστηκαν η μικρότερη διάμετρος κοχλία που μελετήθηκε ήταν M20 και η χαμηλότερη ποιότητα κοχλία 8.8.

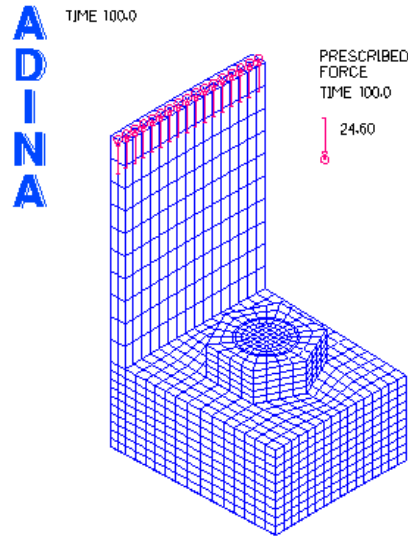
Στις αναλύσεις αυτές προκειμένου να εξετασθεί η επιρροή των μεγεθών αυτών τόσο στο φορτίο αντοχής όσο και στα γενικότερα χαρακτηριστικά της σύνδεσης το υλικό που χρησιμοποιείται είναι



ελαστοπλαστικό κρατυνόμενο τόσο για τα ελάσματα και τον πυλώνα όσο και για τους κοχλίες. Σε όλα τα αριθμητικά προσομοιώματα του κεφαλαίου αυτού, σε πρώτη φάση σε χρόνο 0 επιβάλλεται μετακίνηση μεγέθους 0,4mm προκειμένου να κλείσουν τα κενά των ανοχών μεταξύ των 2 ελασμάτων και του άνω ελάσματος με την κεφαλή του κοχλία. Σε δεύτερη φάση, σε χρόνο 1 επιβάλλεται η δύναμη προέντασης στον κοχλία η οποία ολοκληρώνεται στο ίδιο βήμα και στη συνέχεια από την χρονική στιγμή 1 έως την χρονική στιγμή 100 επιβάλλεται σταδιακά το φορτίο.

## 4.2 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ

### 4.2.1 Επιρροή της δύναμης προέντασης του κοχλία στην οριακή αντοχή



Σχήμα 4-1: αριθμητικό προσομοίωμα στο ADINA

Παρουσιάζεται ο αναλυτικός υπολογισμός των διαφόρων τιμών της δύναμης προέντασης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3.

- 10% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

$$F_{p,c} = 0.1 \times f_{ub} \times A_s = 0,1 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 81,7kN$$

Όπου:  $f_{ub}$  είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και  $A_s$  το εμβαδόν σπειρώματος  
Για κοχλία M36:  $A_s=8,17cm^2$

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

- 20% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

$$F_{p,c} = 0.2 \times f_{ub} \times A_s = 0,2 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 163,4kN$$

- 30% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

$$F_{p,c} = 0.3 \times f_{ub} \times A_s = 0,3 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 245,1kN$$

- 40% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

$$F_{p,c} = 0.4 \times f_{ub} \times A_s = 0,4 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 326,8kN$$

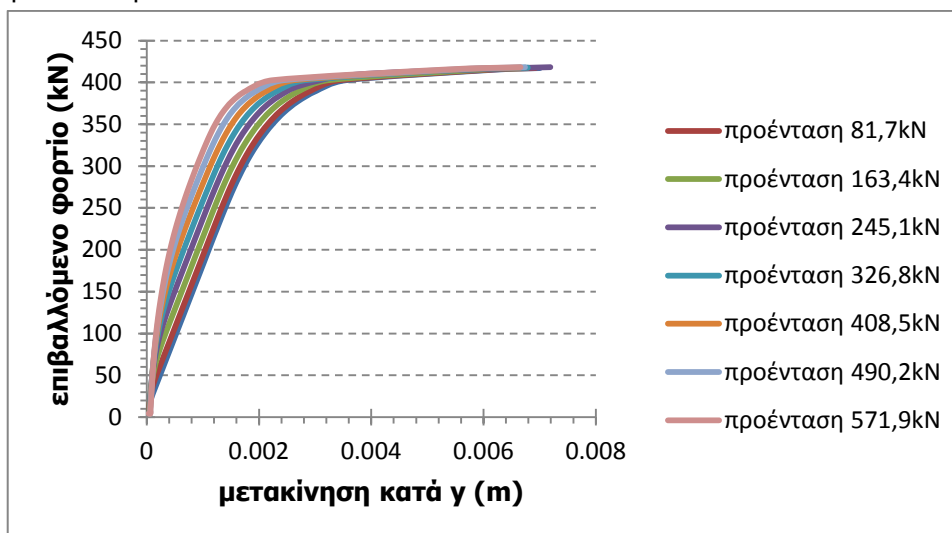
- 50% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

$$F_{p,c} = 0.5 \times f_{ub} \times A_s = 0,5 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 408,5kN$$

- 60% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

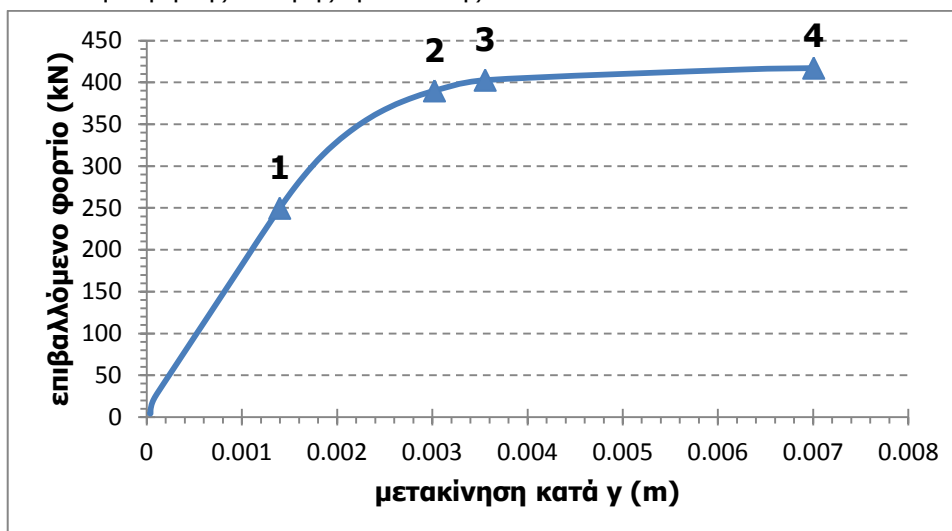
$$F_{p,c} = 0.6 \times f_{ub} \times A_s = 0,6 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 490,2kN$$

Το φορτίο το οποίο ασκείται στην κορυφή του τοιχώματος του πυλώνα είναι το φορτίο αντοχής το οποίο προσδιορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, 24,6kN ανά κόμβο, δηλαδή 418,2kN συνολικό φορτίο στην σύνδεση.



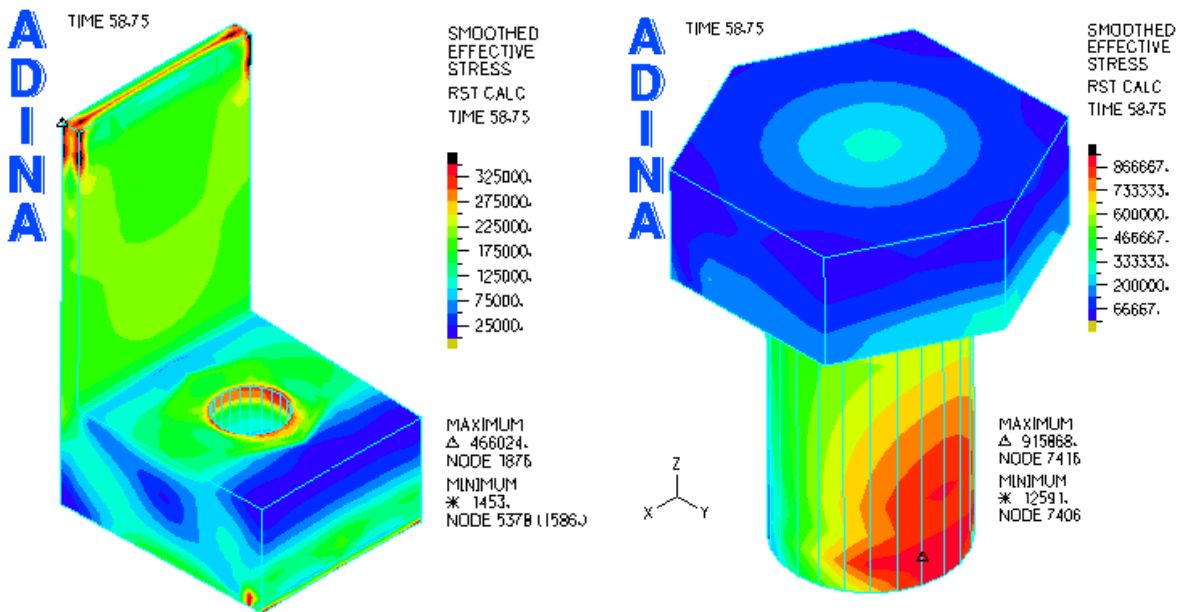
Σχήμα 4-2: δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

Στο σχήμα 4-2 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης. Το διάγραμμα αυτό συνδέει το επιβαλλόμενο φορτίο που ασκείται στο τοίχωμα του πυλώνα (σχήμα 4-1) με την μετακίνηση κατά την διεύθυνση  $y$  στο μέσον του αριθμητικού προσομοιώματος εκεί όπου επιβάλλεται το φορτίο. Από το σχήμα 4-2 γίνεται φανερό το γεγονός ότι η μεταβολή της δύναμης προέντασης δεν επηρεάζει το φορτίο αντοχής της σύνδεσης, ωστόσο επηρεάζει την αρχική δυσκαμψία του φορέα. Η αρχική κλίση στα διαγράμματα του σχήματος 4-2 συνεχώς μειώνεται όσο μειώνεται η δύναμη προέντασης. Επομένως, όσο μικρότερη είναι η τιμή της δύναμης προέντασης του κοχλία της σύνδεσης, τόσο μικρότερη είναι η δυσκαμψία του συστήματος. Βέβαια, είναι σημαντικό να τονισθεί ότι γενικότερα η αρχική κλίση του δρόμου ισορροπίας είναι αρκετά μεγάλη ακόμα και για την μικρότερη τιμή της δύναμης προέντασης. Σε κάθε περίπτωση, η ύπαρξη και μόνο προεντεταμένων κοχλιών έχει σαν αποτέλεσμα το φορτίο αντοχής της σύνδεσης να είναι το ίδιο ανεξάρτητα από την τιμή της δύναμης προέντασης.

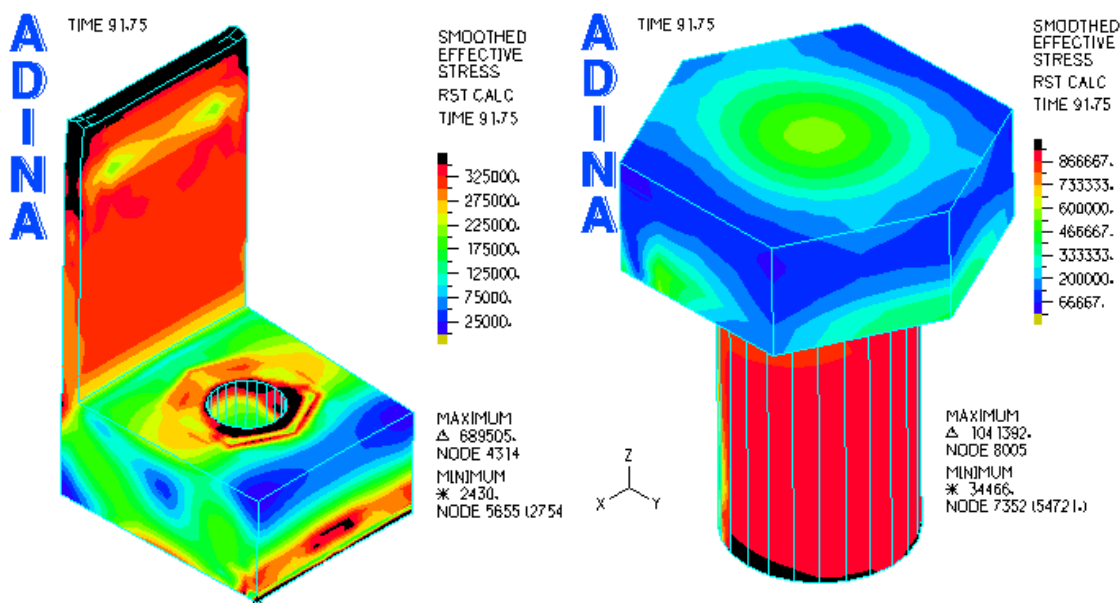


Σχήμα 4-3: δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για δύναμη προέντασης 81,7kN

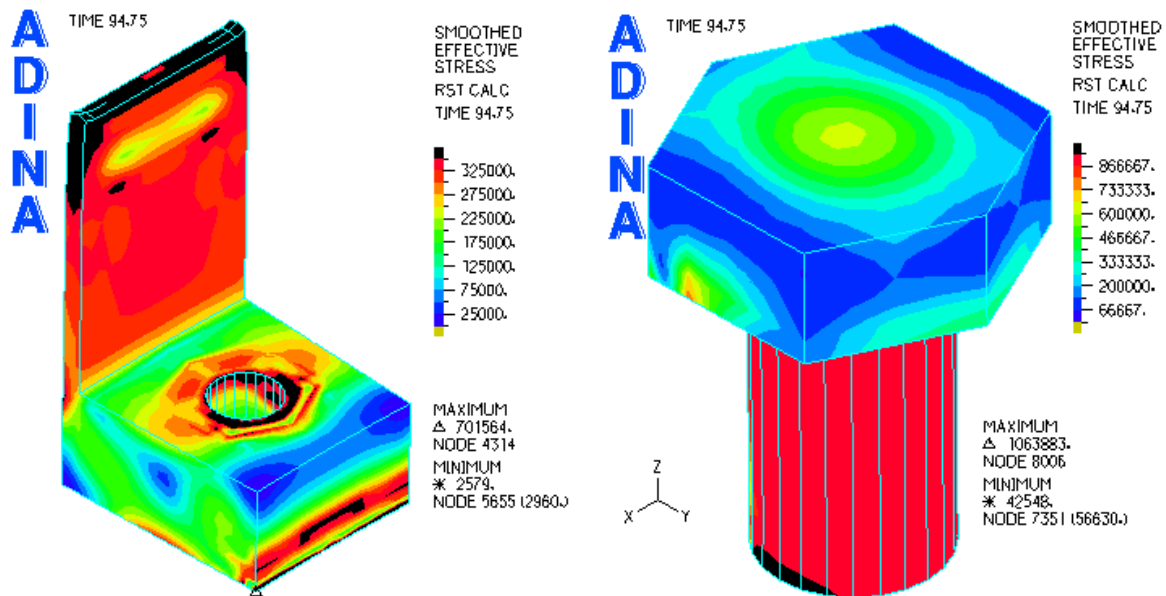
Προκειμένου να αξιολογηθεί καλύτερα η συμπεριφορά της σύνδεσης ανάλογα με το ποσοστό προέντασης του κοχλίου, είναι χρήσιμο να εξετασθεί πιο διεξοδικά ο δρόμος ισορροπίας των δύο ακραίων περιπτώσεων δύναμης προέντασης. Ο δρόμος ισορροπίας για την μέγιστη δυνατή τιμή της δύναμης προέντασης 571,9kN εξετάστηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο σχήμα 4-3 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για δύναμη προέντασης ίση με το 10% της εφελκυστικής αντοχής 81.7kN. Στα σχήματα 4-4 έως 4-7 απεικονίζεται η κατανομή των τάσεων στη σύνδεση στις 4 χαρακτηριστικές θέσεις του δρόμου ισορροπίας.



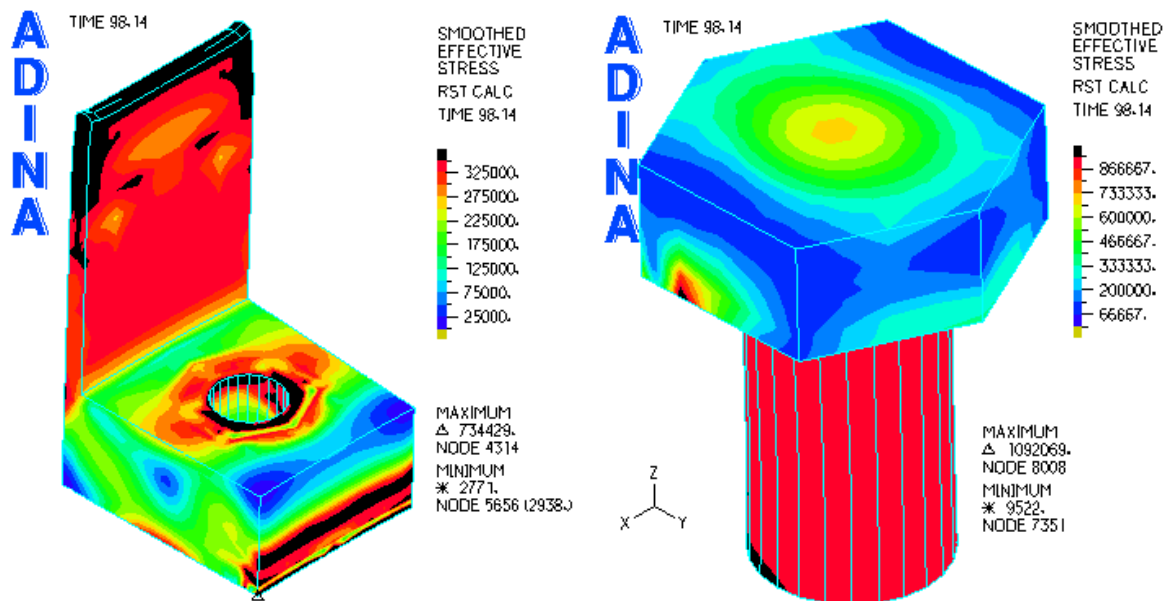
Σχήμα 4-4: κατανομή των ισοδύναμων τάσεων στο έλασμα και στον κοχλία στο σημείο 1 του δρόμου ισορροπίας για δύναμης προέντασης 81,7kN



Σχήμα 4-5: κατανομή των ισοδύναμων τάσεων στο έλασμα και στον κοχλία στο σημείο 2 του δρόμου ισορροπίας για δύναμη προέντασης 81,7kN



Σχήμα 4-6: κατανομή των ισοδύναμων τάσεων στο έλασμα και στον κοχλία στο σημείο 3 του δρόμου ισορροπίας για δύναμη προέντασης 81,7kN

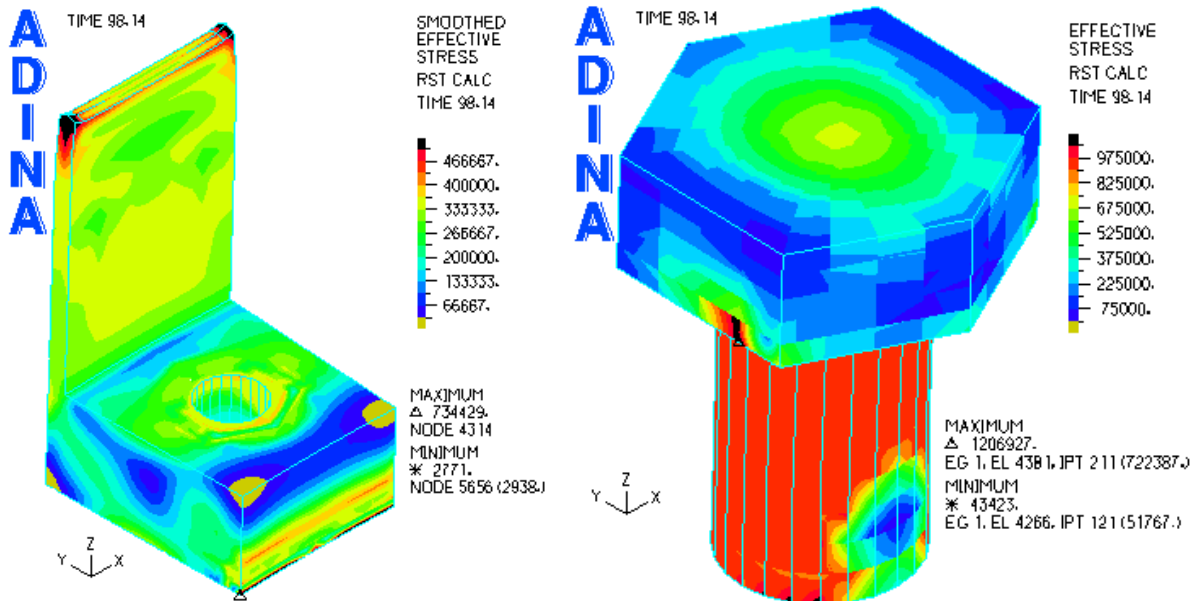


Σχήμα 4-7: κατανομή των ισοδύναμων τάσεων στο έλασμα και στον κοχλία στο σημείο 4 του δρόμου ισορροπίας για δύναμη προέντασης 81,7kN

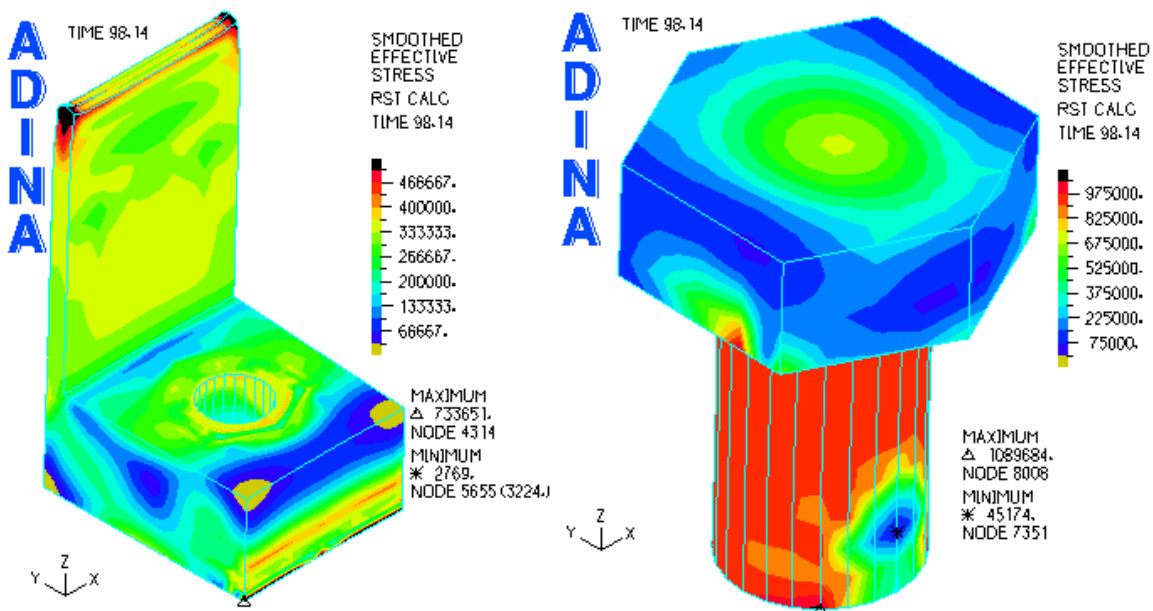
Στο σχήμα 4-3 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για δύναμη προέντασης 81,7kN. Το διάγραμμα αυτό είναι αρχικά γραμμικό μέχρι το σημείο 1 ενώ μετά το σημείο 1 αρχίζει να καμπυλώνεται και η δυσκαμψία μειώνεται λίγο. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-4 μέχρι το σημείο 1 δεν έχει διαρρέψει κανένα μέλος της σύνδεσης. Από το σημείο 1 και μετά ξεκινά η διαρροή η οποία εξαπλώνεται στο πάνω μέρος του τοιχώματος του πυλώνα και στο έλασμα γύρω από την οπή του κοχλία (σχήμα 4-5, σημείο 2 του δρόμου ισορροπίας). Στη συνέχεια μέχρι το σημείο 3 πραγματοποιείται η ανακατανομή των τάσεων στο έλασμα επομένως οι θέσεις στις οποίες έχει εμφανισθεί η διαρροή δεν μεταβάλλονται ιδιαίτερα. Ενώ από το σημείο 3 και μετά, όπου η κλίση του διαγράμματος παρουσιάζει πλέον έντονη πτώση, η διαρροή εξαπλώνεται και σε μεγαλύτερο μέρος του πυλώνα και του ελάσματος. Συγκεκριμένα, στο έλασμα η διαρροή εμφανίζεται γύρω από την οπή του

κοχλία εκεί όπου γίνεται η επαφή με την κεφαλή του κοχλία και στο κάτω μέρος του ελάσματος, εκεί όπου τα δύο ελάσματα έρχονται σε επαφή.

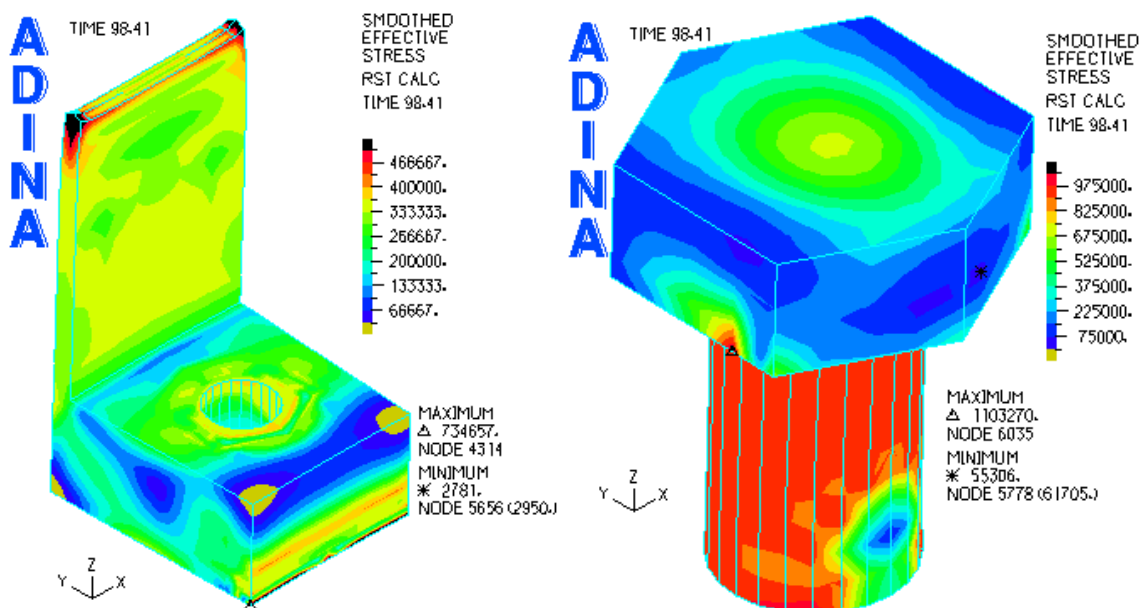
Στα σχήματα 4-8 έως 4-14 παρουσιάζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται στη σύνδεση για την οριακή τιμή του φορτίου για τις διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης. Το οριακό φορτίο αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου οι τάσεις είτε στο έλασμα είτε στον κοχλία είτε και στα δύο φτάνουν το όριο θραύσης του υλικού. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι οι μετακινήσεις που αντιστοιχούν στο οριακό φορτίο είναι αρκετά μικρές γεγονός το οποίο επιβεβαιώνει και την ισχυρή δυσκαμψία του συστήματος.



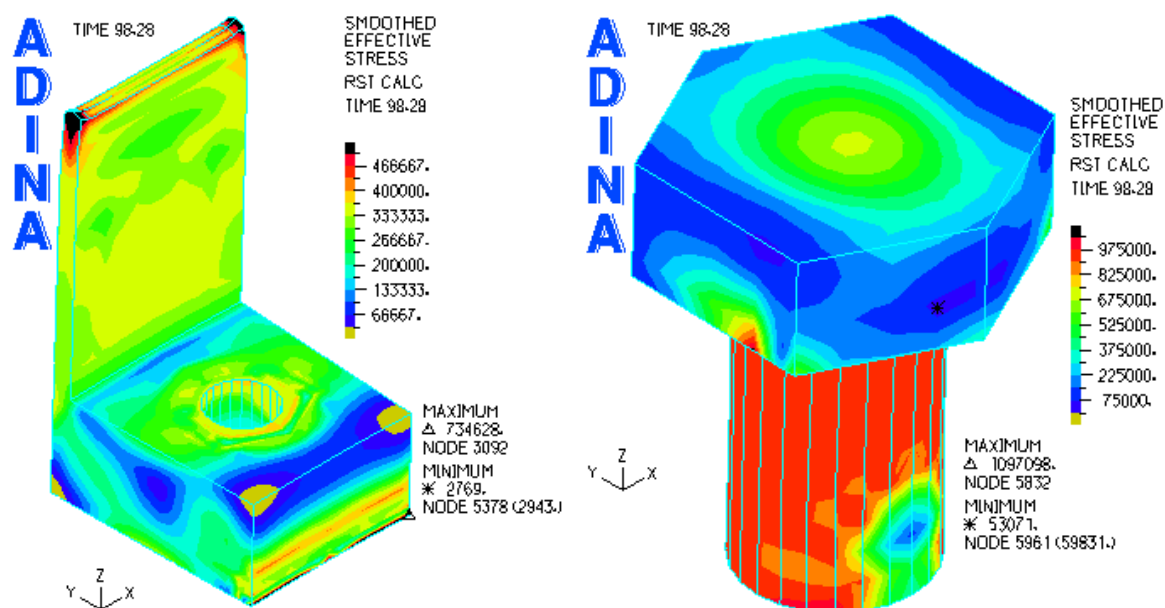
Σχήμα 4-8: τοπική υπέρβαση του ορίου θραύσης του υλικού για το οριακό φορτίο και για δύναμη προέντασης 81,7kN



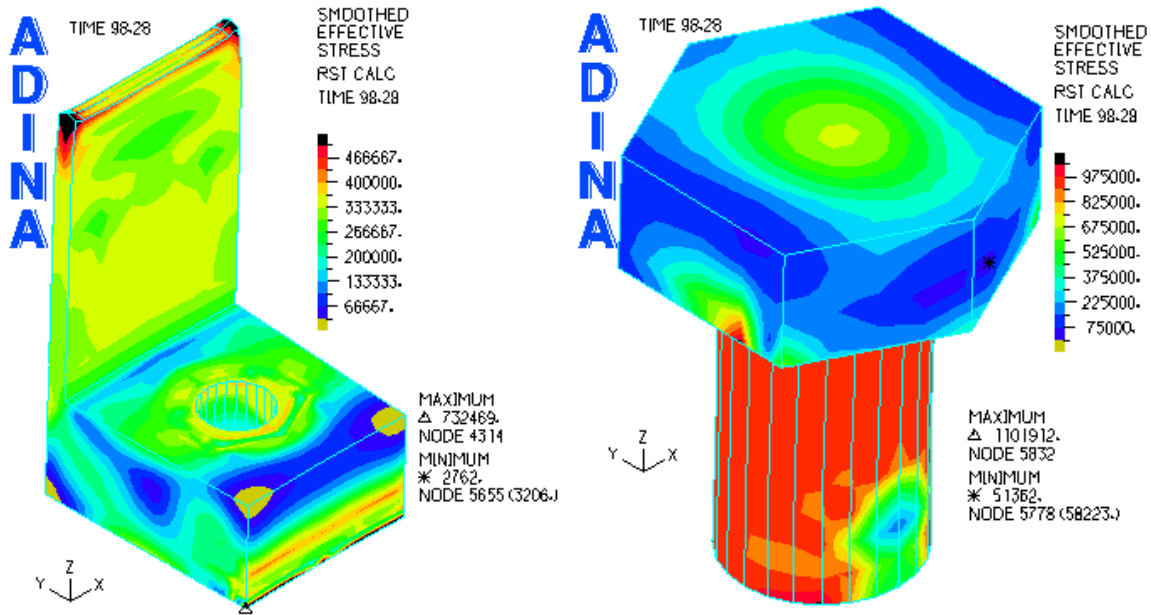
Σχήμα 4-9: τοπική υπέρβαση του ορίου θραύσης του υλικού για το οριακό φορτίο και για δύναμη προέντασης 163,4kN



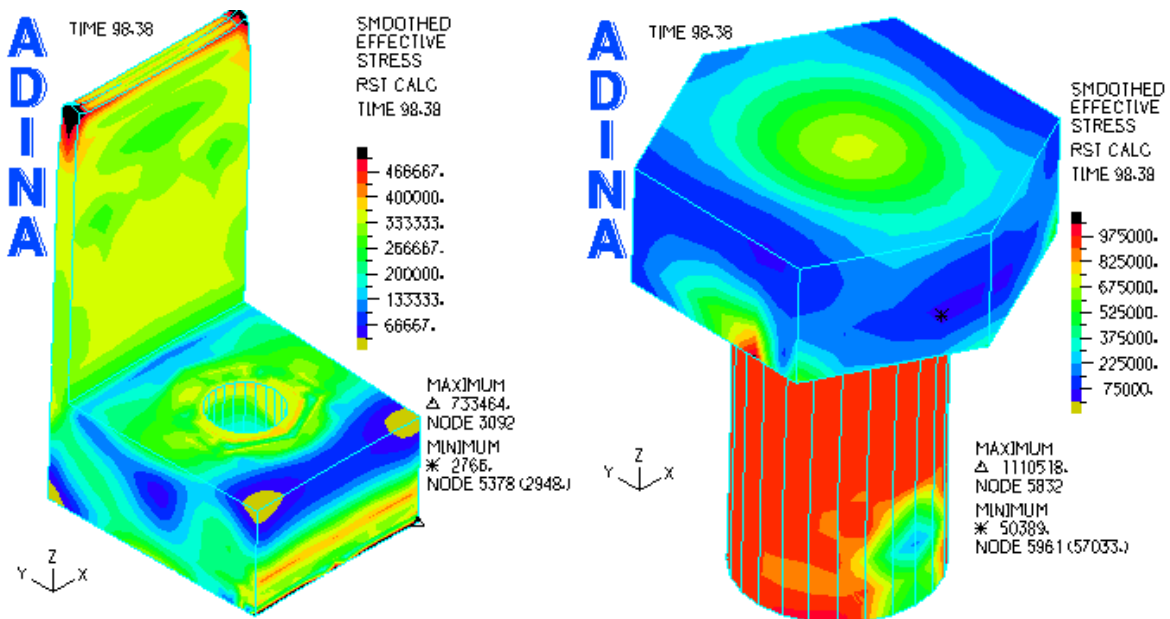
Σχήμα 4-10: τοπική υπέρβαση του ορίου θραύσης του υλικού για το οριακό φορτίο και για δύναμη προέντασης 245,1kN



Σχήμα 4-11: τοπική υπέρβαση του ορίου θραύσης του υλικού για το οριακό φορτίο και για δύναμη προέντασης 326,8kN

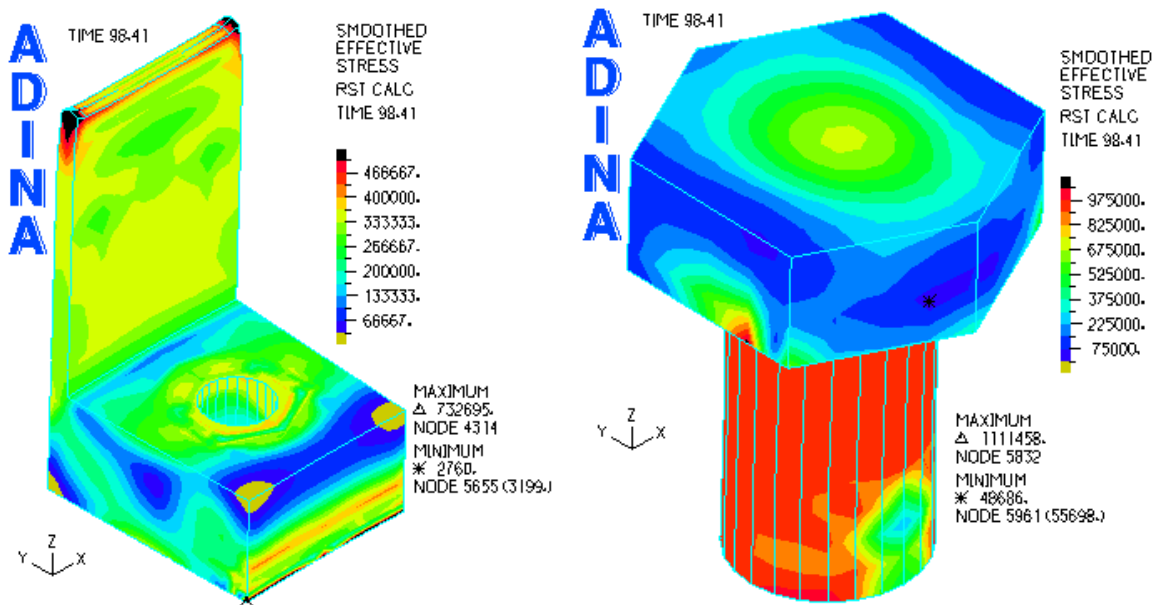


Σχήμα 4-12: τοπική υπέρβαση του ορίου θραύσης του υλικού για το οριακό φορτίο και για δύναμη προέκτασης 408,5kN



Σχήμα 4-13: τοπική υπέρβαση του ορίου θραύσης του υλικού για το οριακό φορτίο και για δύναμη προέκτασης 490,2kN





Σχήμα 4-14: τοπική υπέρβαση του ορίου διαρροής του υλικού για το οριακό φορτίο και για δύναμη προέντασης 571,9kN

Στα παραπάνω σχήματα παρατηρείται ότι όταν το φορτίο φτάσει την οριακή του τιμή στο έλασμα εκεί όπου τα 2 ελάσματα έρχονται σε επαφή και στον πυλώνα εκεί όπου επιβάλλεται το φορτίο, οι τάσεις ξεπερνούν το όριο θραύσης του χάλυβα S355. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι για όλες τις εξεταζόμενες τιμές της δύναμης προέντασης η κατανομή των τάσεων τόσο στο έλασμα όσο και στον κοχλία είναι η ίδια. Επομένως, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι το οριακό φορτίο αντοχής της σύνδεσης δεν επηρεάζεται από την αρχική τιμή της δύναμης προέντασης. Ανεξάρτητα από την τιμή αυτή, οι τάσεις που θα αναπτυχθούν τελικά στα ελάσματα είναι ίδιες. Αυτό που μεταβάλλεται είναι η ανακατανομή των τάσεων που λαμβάνει χώρα και η δυσκαμψία του συστήματος.

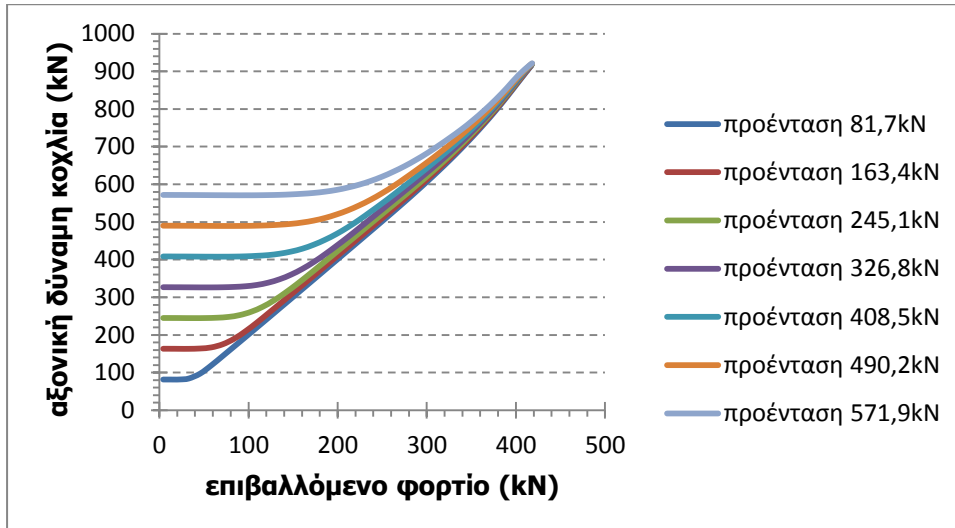
#### 4.2.2 Επιρροή της δύναμης προέντασης σε χαρακτηριστικά μεγέθη

Εκτός από την εξέταση της οριακής αντοχής της σύνδεσης ανάλογα με την προένταση του κοχλία, είναι σημαντικό να διερευνηθούν τυχόν μεταβολές και σε άλλα σημαντικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν το υπό μελέτη αριθμητικό προσομοίωμα. Τα μεγέθη αυτά είναι: η αξονική δύναμη που αναπτύσσεται στον κοχλία αλλά και η μέγιστη ισοδύναμη τάση του, η μέγιστη ισοδύναμη τάση στην συγκόλληση και οι δυνάμεις επαφής που αναπτύσσονται μεταξύ των 2 ελασμάτων, μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και του άνω ελάσματος αλλά και μεταξύ της άντυγας του ελάσματος και του κοχλία.

Στο σχήμα 4-15 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης που αναπτύσσεται στον κοχλία ανάλογα με την δύναμη προέντασης καθώς αυξάνεται το επιβαλλόμενο φορτίο. αρχικά, όλα τα διαγράμματα ξεκινούν από την τιμή της αντίστοιχης δύναμης προέντασης, η τιμή αυτή παραμένει σταθερή μέχρι κάποια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου και στη συνέχεια συνεχώς αυξάνεται. Η τελική τιμή της αξονικής δύναμης είναι ίδια ανεξάρτητα από το ποσοστό προέντασης του κοχλία. Αυτό το οποίο μεταβάλλεται η τιμή του φορτίου στην οποία σταματά το οριζόντιο πλατό του διαγράμματος. Πιο συγκεκριμένα, όσο μικρότερη είναι η τιμή της δύναμης προέντασης τόσο μικρότερη είναι η τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου στην οποία σταματά το οριζόντιο πλατό. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η αξονική δύναμη του κοχλία παραμένει σταθερή, παρουσιάζει δηλαδή το οριζόντιο πλατό του διαγράμματος, όταν λαμβάνει χώρα η ανακατανομή των τάσεων. Μόλις αυτή ολοκληρωθεί, το υπόλοιπο φορτίο παραλαμβάνεται από τον κοχλία και επομένως η αξονική του δύναμη αρχίζει να αυξάνεται. Συμπεραίνουμε λοιπόν, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης

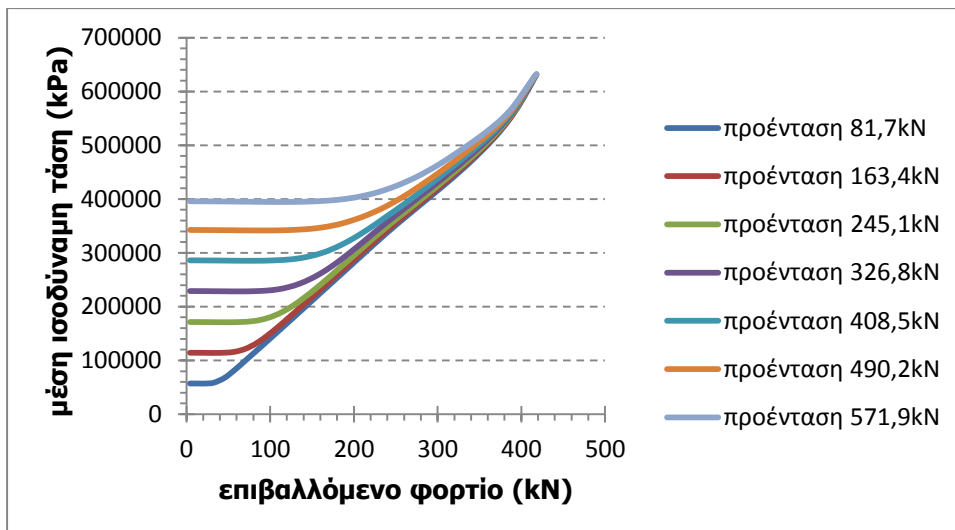


το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται μέσω ανακατανομής των δυνάμεων στο έλασμα. Ωστόσο, δεν αναιρείται το γεγονός ότι η τελική τιμή της αξονικής δύναμης του κοχλία για μεγάλη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου είναι ανεξάρτητη από την τιμή της δύναμης προέντασης.

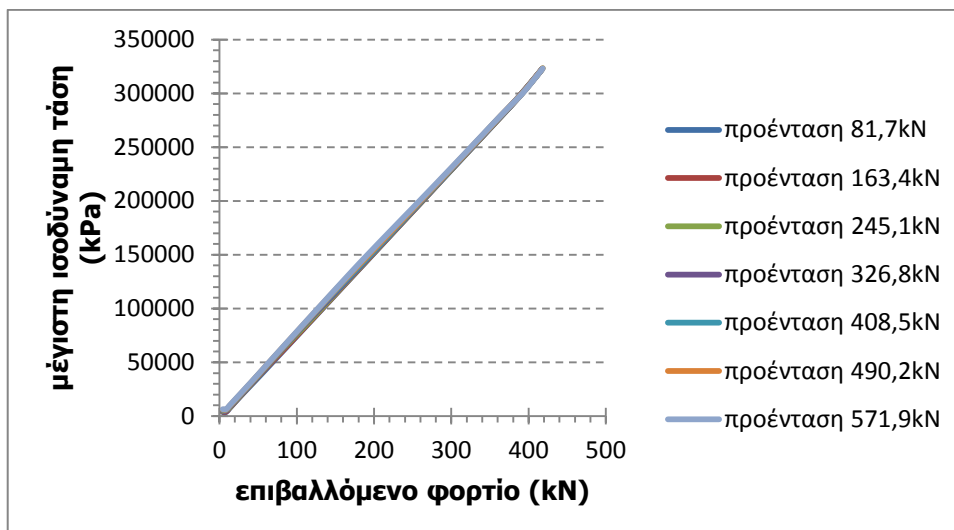


Σχήμα 4-15: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του κοχλία για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

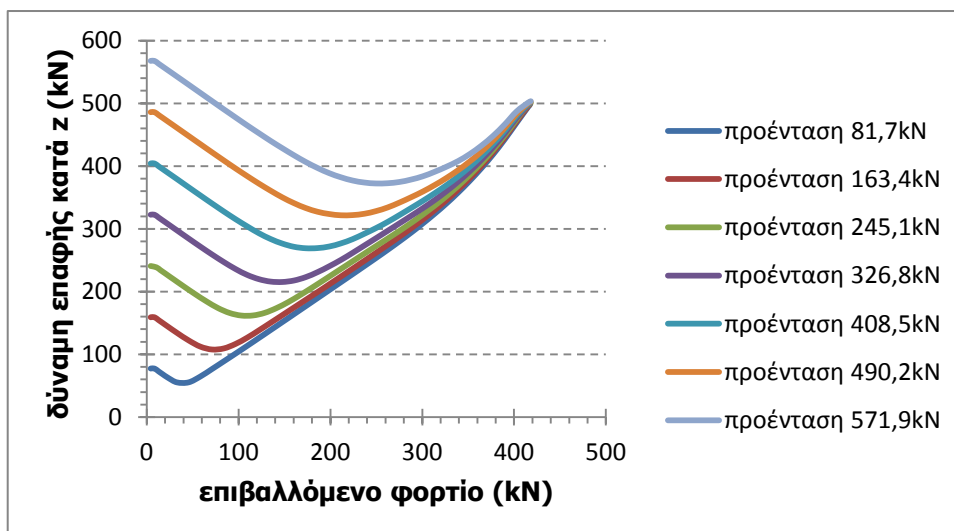
Στο σχήμα 4-16 παρουσιάζεται η μέση ισοδύναμη τάση του κοχλία συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου ανάλογα με την τιμή της δύναμης προέντασης. Η συμπεριφορά του διαγράμματος είναι ανάλογη με αυτή του δρόμου ισορροπίας της αξονικής δύναμης του κοχλία. Απλά το μέγεθος στον κατακόρυφο άξονα είναι πλέον η ισοδύναμη τάση στον κοχλία και όχι η αξονική του δύναμη.



Σχήμα 4-16: δρόμος ισορροπίας της μέσης ισοδύναμης τάσης στον κοχλία για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης



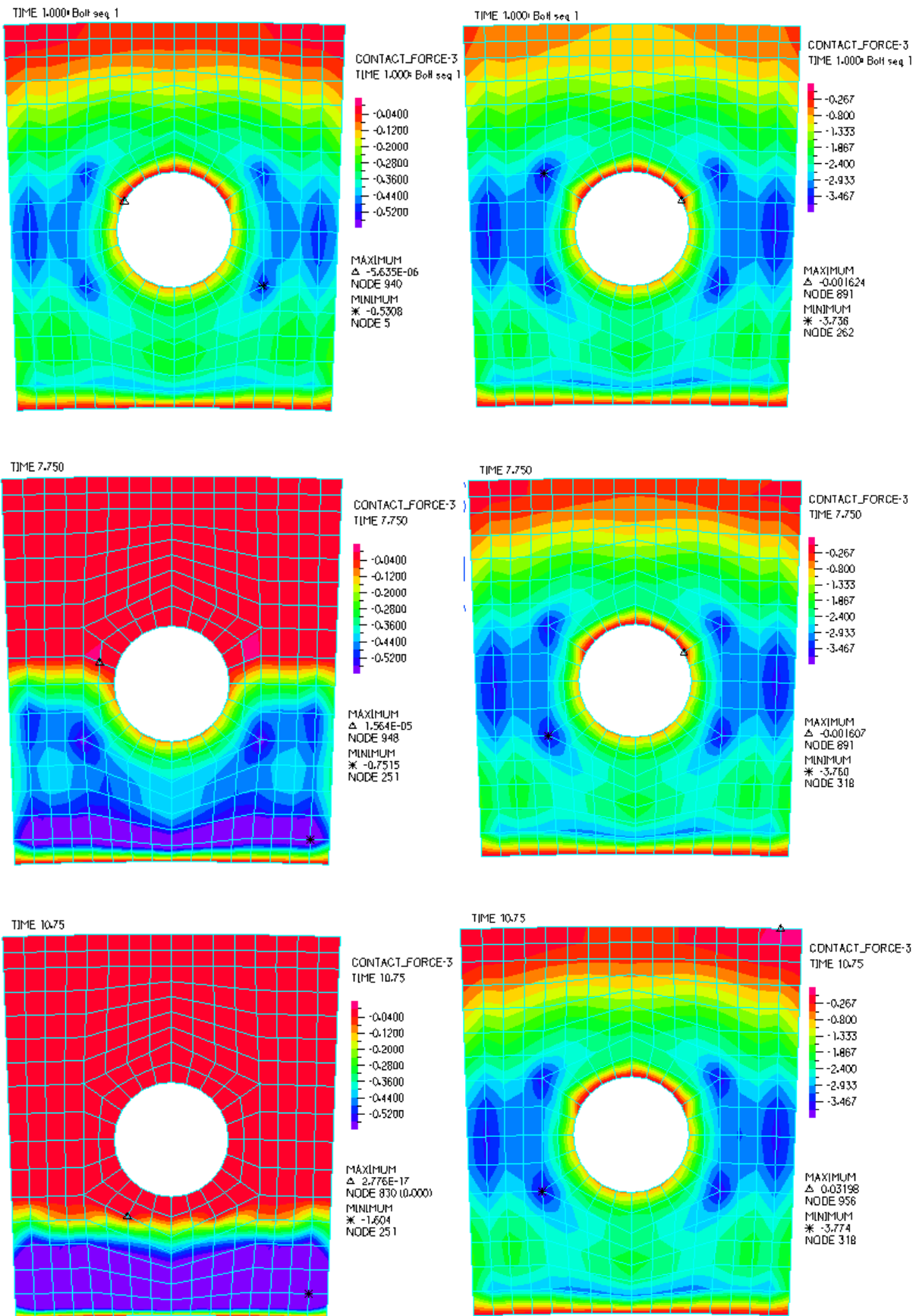
Σχήμα 4-17: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στη συγκόλληση για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

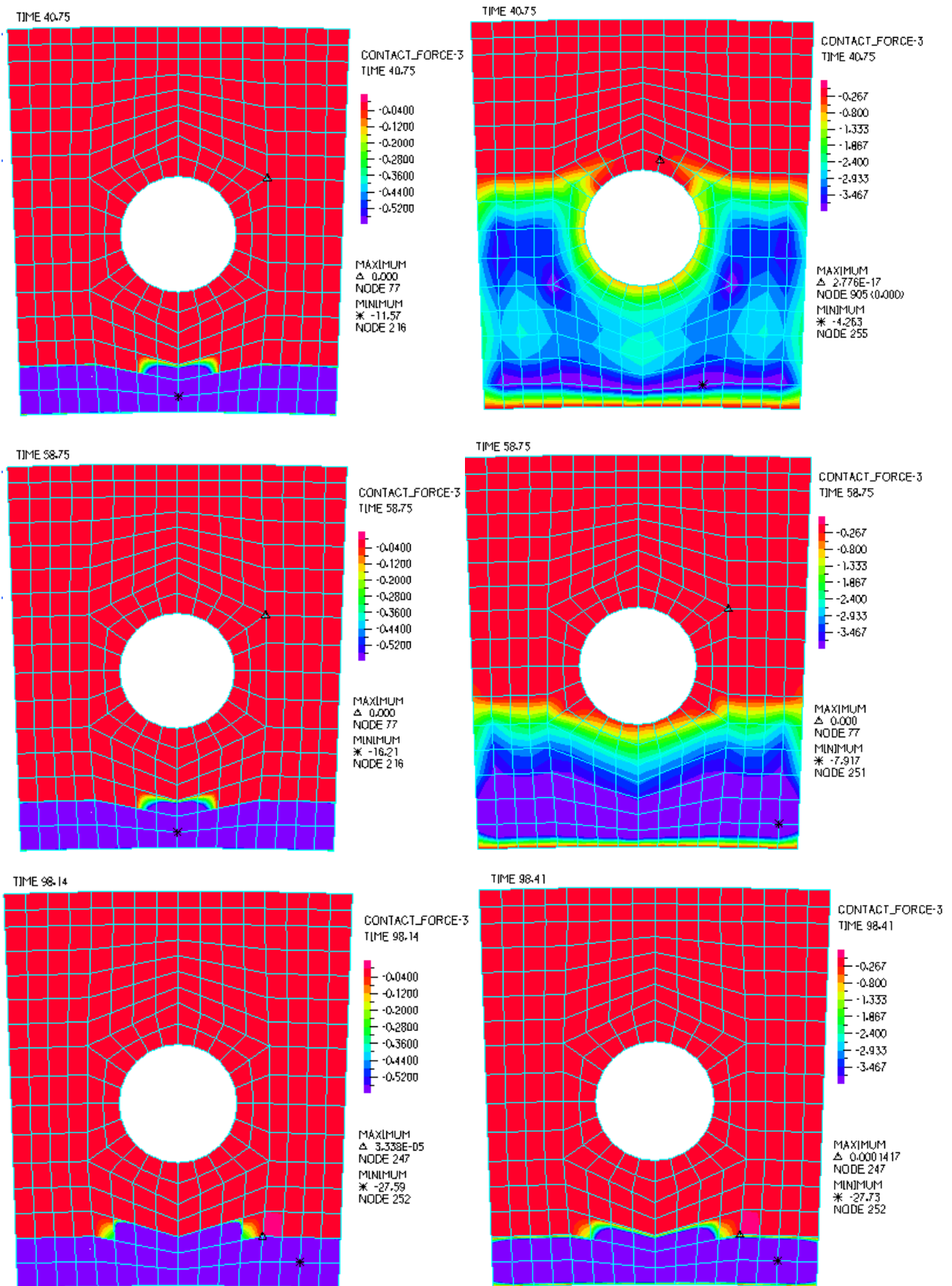


Σχήμα 4-18: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων κατά την εγκάρσια διεύθυνση για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

Στο σχήμα 4-17 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην θέση της συγκόλλησης ανάλογα με το ποσοστό προέντασης του κοχλία. Όλα τα διαγράμματα του σχήματος αυτού ταυτίζονται απόλυτα μεταξύ τους επομένως συμπεραίνεται ότι η δύναμη προέντασης είναι ανεξάρτητη από την τάση που θα αναπτυχθεί στην θέση της συγκόλλησης.

Όσον αφορά τις δυνάμεις επαφής που αναπτύσσονται κατά την φόρτιση, στο σχήμα 4-18 δίνονται τα διαγράμματα των δυνάμεων επαφής κατά την εγκάρσια διεύθυνση στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για διάφορες τιμές προέντασης. Ενώ στο σχήμα 4-20 απεικονίζονται οι αντίστοιχες εικόνες κατανομής των δυνάμεων επαφής σε χαρακτηριστικές θέσεις των διαγραμμάτων για προένταση 81,7kN και 571,9kN αντίστοιχα. Οι μικρότερες τιμές των δυνάμεων επαφής απεικονίζονται με ροζ χρώμα ενώ οι μέγιστες με μωβ.





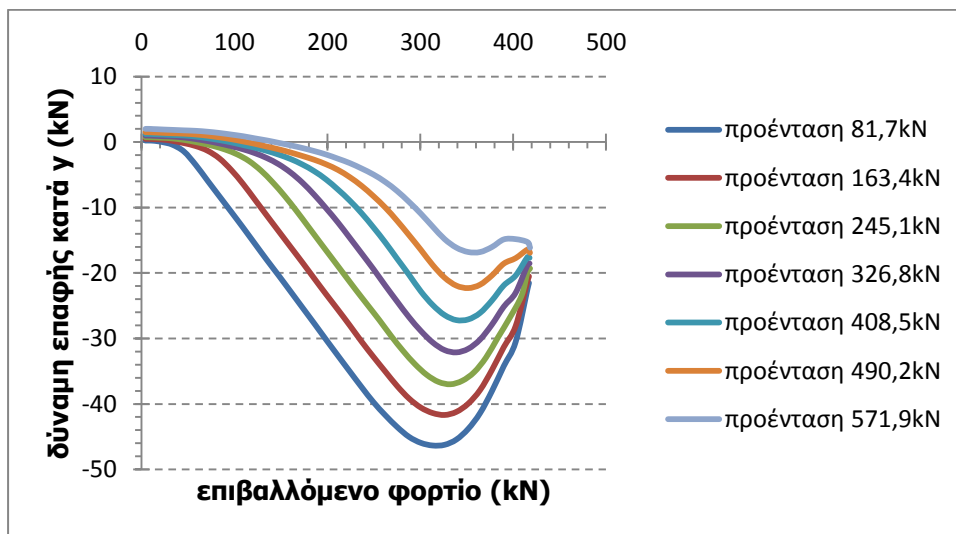
Σχήμα 4-19: κατανομή των κατακόρυφων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των 2 ελασμάτων για δύναμη προέντασης 81,7kN και 571,9kN αντίστοιχα

Όπως προαναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3, μέχρι την χρονική στιγμή που η αξονική δύναμη του κοχλία παύει πλέον να είναι σταθερή, το επιβαλλόμενο φορτίο παραλαμβάνεται μέσω ανακατανομής των τάσεων στο έλασμα. Γι' αυτό και οι εγκάρσιες δυνάμεις επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων μειώνονται στο διάστημα αυτό. Στη συνέχεια, η αξονική δύναμη του κοχλία αυξάνεται με ταυτόχρονη ανακατανομή των δυνάμεων το έλασμα οι οποίες εξακολουθούν να μειώνονται. Και τέλος, όταν σταματά η ανακατανομή το επιπλέον φορτίο παραλαμβάνεται μέσω του κοχλία. Γι' αυτό, τόσο η αξονική δύναμη του κοχλία όσο και οι εγκάρσιες δυνάμεις επαφής μεταξύ των ελασμάτων αυξάνονται γραμμικά.

Για να κατανοηθεί καλύτερα το πώς επηρεάζει η δύναμη προέντασης την συμπεριφορά της σύνδεσης στο σχήμα 4-19 παρουσιάζεται για τις ίδιες χρονικές στιγμές η κατανομή δυνάμεων επαφής στο έλασμα για την μικρότερη (αριστερά) και για την μεγαλύτερη τιμή της δύναμης προέντασης (δεξιά).

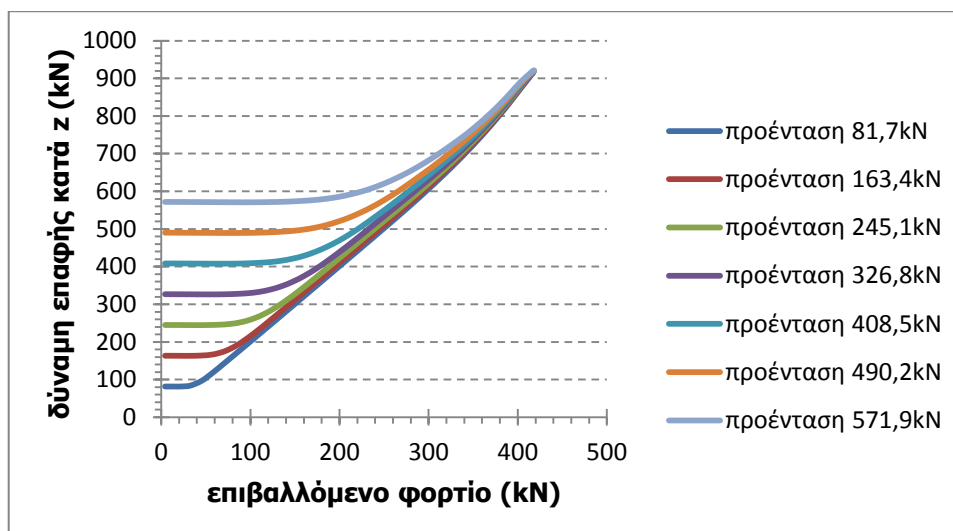
Η πρώτη εικόνα αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή αμέσως μετά την προένταση των κοχλιών και ia μηδενικό φορτίο, ενώ η δεύτερη αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή 7,75 και για τιμή επιβαλλόμενου φορτίου 32,94kN συνολικά σε όλους τους κόμβους. Η τιμή αυτή του φορτίου αντιστοιχεί στο σημείο του διαγράμματος 4-16 για δύναμη προέντασης 81,7 kN όπου η αξονική του κοχλία παύει να είναι σταθερή. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι την δεδομένη χρονική στιγμή ενώ για δύναμη προέντασης 81,7kN έχει πραγματοποιηθεί ένα μεγάλο μέρος της ανακατανομής των τάσεων, για προένταση 571,9kN η ανακατανομή σχεδόν δεν έχει ξεκινήσει. Η τρίτη εικόνα αντιστοιχεί στην χρονική στιγμή 10,75 όπου ολοκληρώνεται η ανακατανομή για προένταση 81,7kN και από εκεί και πέρα το φορτίο παραλαμβάνεται αποκλειστικά από τον κοχλία. Αντίθετα, για προένταση 571,9kN η ανακατανομή είναι ακόμη σε εξέλιξη. Οι επόμενες εικόνες αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά σημεία των διαγραμμάτων για προένταση 571,9kN. Όμως στις τελευταίες εικόνες του σχήματος 4-19 φαίνεται ότι τελικά οι δυνάμεις επαφής θα είναι οι ίδιες, ανεξάρτητα από την προένταση. Γεγονός που επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα 4-18.

Επομένως, όσο μικρότερη είναι η τιμή της δύναμης προέντασης τόσο μικρότερο είναι το φορτίο που παραλαμβάνεται μέσω ανακατανομής. Και όλο και μεγαλύτερο μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται από τον κοχλία. Ωστόσο, παραμένει το γεγονός ότι τα τελικά μεγέθη είναι ανεξάρτητα από την προένταση.

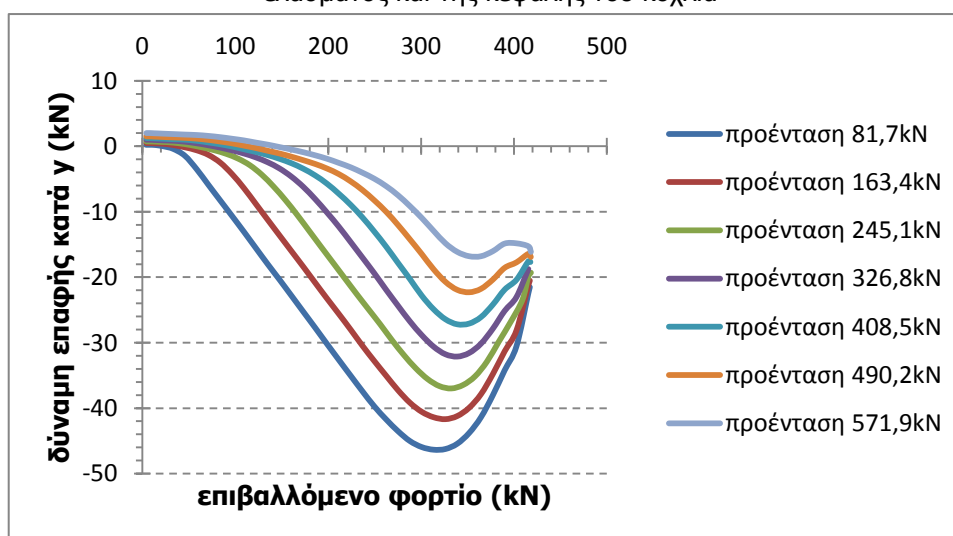


Σχήμα 4-20: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων κατά την διαμήκη διεύθυνση για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

Στο σχήμα 4-20 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας των διαμηκών δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων. Παρατηρείται γενικά ότι όσο μικρότερη είναι η προένταση τόσο μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή είναι οι συνολικές διαμήκεις δυνάμεις επαφής που θα αναπτυχθούν.

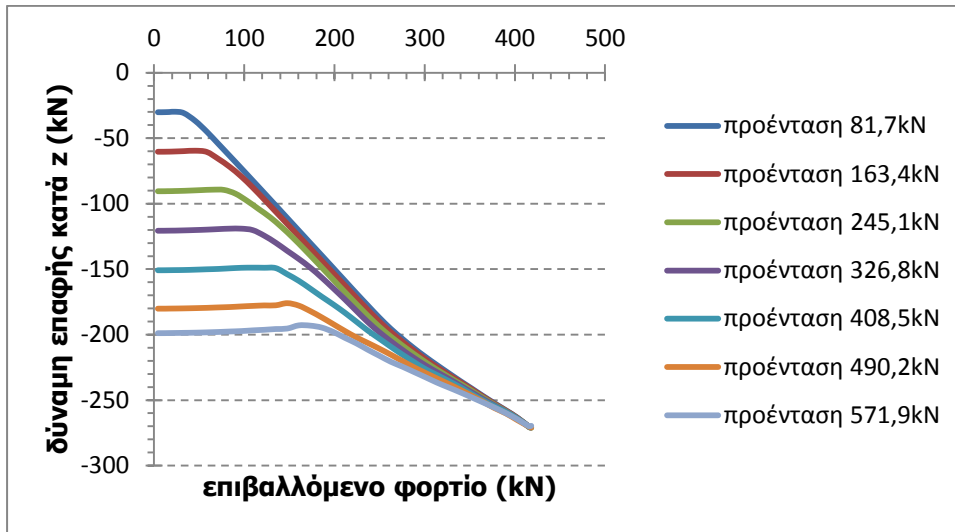


Σχήμα 4-21: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής κατά την εγκάρσια διεύθυνση μεταξύ του άνω ελάσματος και της κεφαλής του κοχλίου

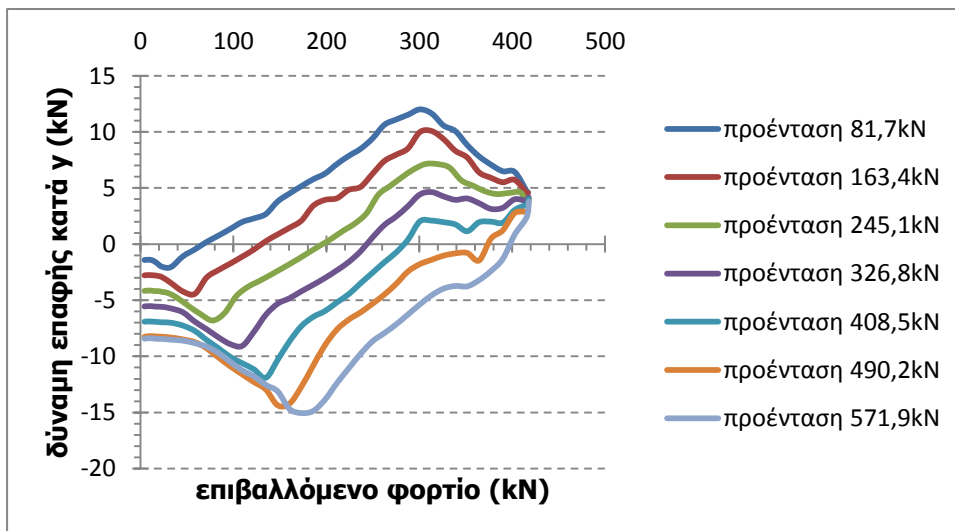


Σχήμα 4-22: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής κατά την διαμήκη διεύθυνση μεταξύ του άνω ελάσματος και της κεφαλής του κοχλίου

Αντίστοιχα, ακολουθούν τα σχήματα 4-21 και 4-22 τα διαγράμματα των δυνάμεων επαφής μεταξύ κεφαλής κοχλίου και άνω επιφάνειας του άνω ελάσματος με ανάλογη συμπεριφορά. Καθώς επίσης και τα διαγράμματα των δυνάμεων επαφής μεταξύ του κορμού του κοχλίου και της άντυγας του ελασματος στα σχήματα 4-23 και 4-24. Οι εικόνες των δυνάμεων για τις εν λόγω επαφές δεν παρατίθενται διότι δεν παρουσιάζουν κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό. Η συμπεριφορά τους είναι ίδια με αυτή που έχει αναφερθεί στα προηγούμενα.



Σχήμα 4-23: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής κατά την εγκάρσια διεύθυνση μεταξύ του κορμού του κοχλίου και της άντυνας του ελάσματος



Σχήμα 4-24: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής κατά την διαμήκη διεύθυνση μεταξύ του κορμού του κοχλίου και της άντυνας του ελάσματος

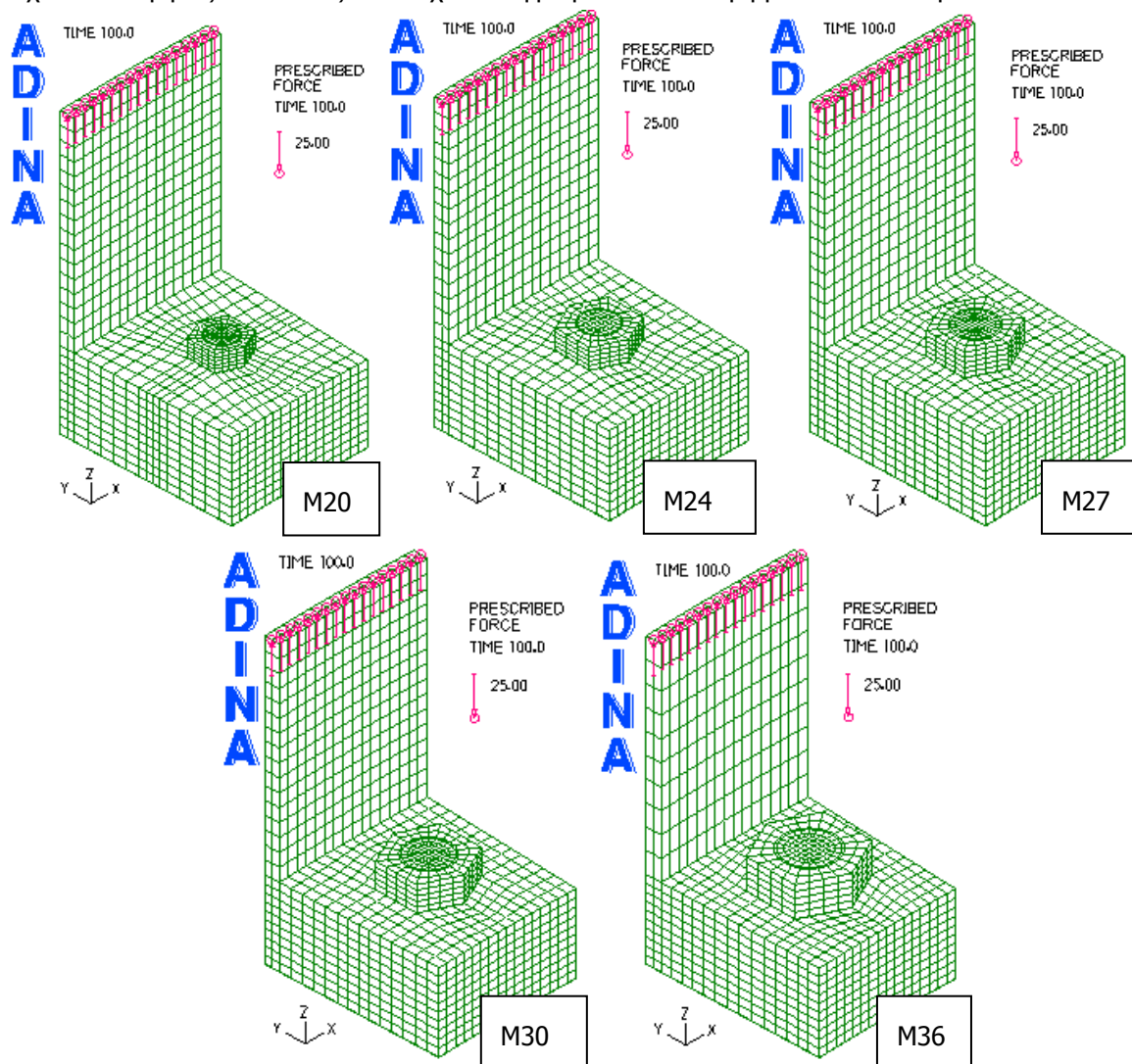
Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η δύναμη προέντασης είναι μία παράμετρος η οποία δεν επηρεάζει την αντοχή της σύνδεσης αλλά ούτε και τις τάσεις που θα αναπτυχθούν κατά την φόρτιση. Αυτό συμβαίνει στην περίπτωση που η τιμή του φορτίου είναι αρκετά υψηλή, δεδομένου ότι το φορτίο το οποίο ασκήθηκε στην σύνδεση ήταν το οριακό. Αυτό που επηρεάζεται είναι η συμπεριφορά της σύνδεσης κατά την διάρκεια της φόρτισης. Σε ενδιάμεσες τιμές του φορτίου παρουσιάζονται μεταβολές. Επομένως, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι η υψηλή προένταση η οποία εφαρμόζεται στις συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας των πυλώνων ανεμογεννητριών οφείλεται στα επαναλαμβανόμενα φορτία της κόπωσης. Το στατικό φορτίο που ασκήθηκε στα προσομοιώματα δεν επηρεάζει την αντοχή.



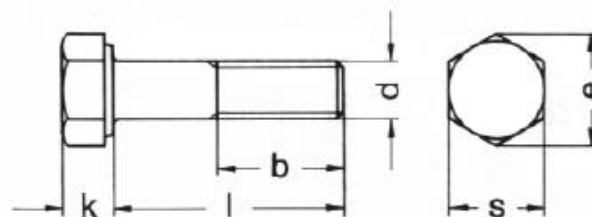
### 4.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ

#### 4.3.1 Επιρροή της διαμέτρου του κοχλία στην οριακή αντοχή

Προκειμένου να εξετασθεί η επιρροή τη διαμέτρου του κοχλία στην συμπεριφορά της σύνδεσης, δημιουργήθηκαν τα πέντε προσομοιώματα του σχήματος 4-25. Όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σύνδεσης παραμένουν ίδια με αυτά του αρχικού μοντέλου του κεφαλαίου 3. Το μόνο που αλλάζει είναι η διάμετρος του κοχλία και κατ' επέκταση και η γεωμετρία της κεφαλής του κοχλία. Οι ακριβείς διαστάσεις των κοχλιών λήφθηκαν από τον γερμανικό κανονισμό DIN6914.



Σχήμα 4-25: προσομοιώματα στο ADINA διαφόρων διαμέτρων κοχλία



Για κοχλία M20:  $k=13\text{mm}$ ,  $e=35.03\text{mm}$ ,  $s=32\text{mm}$

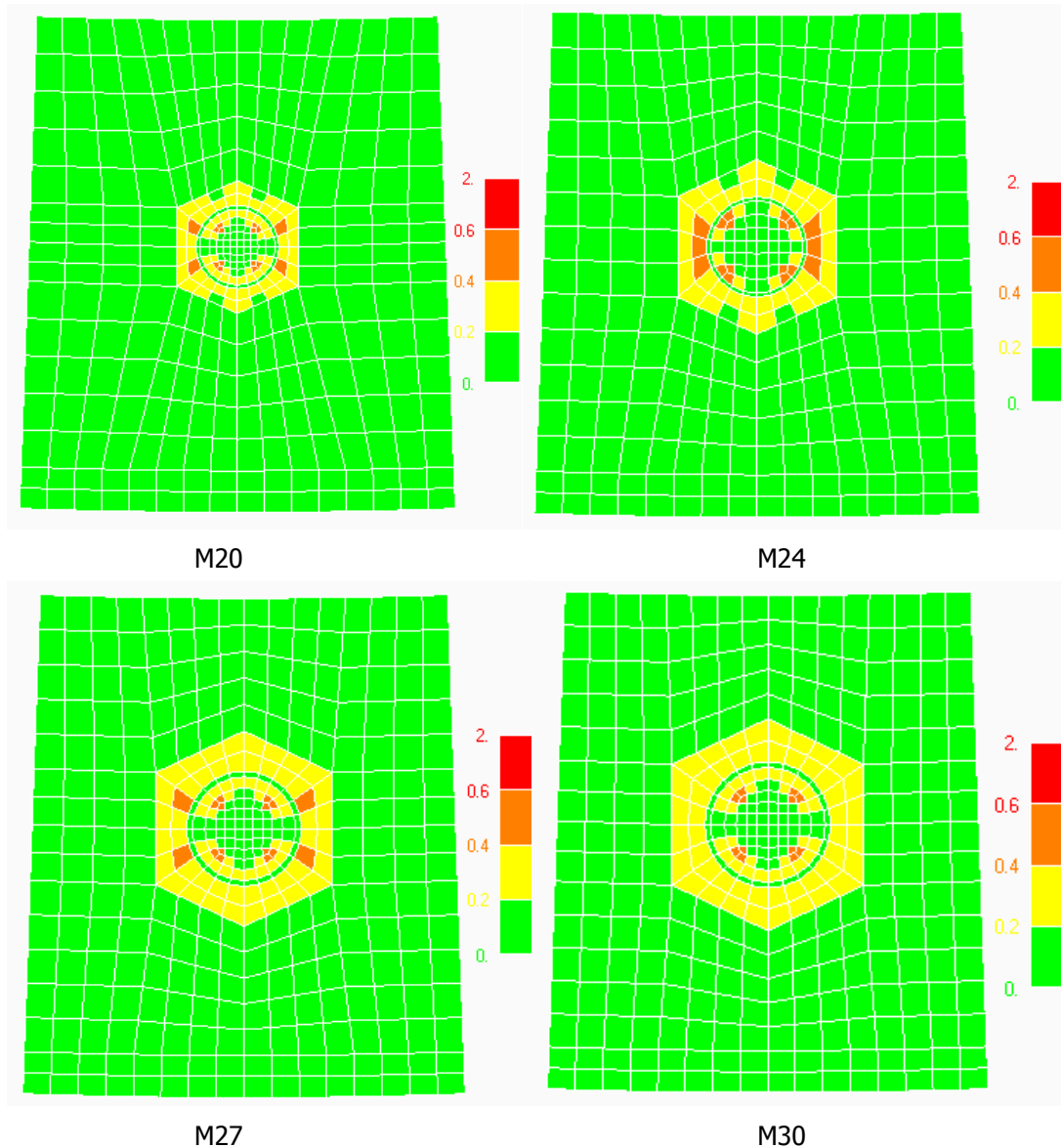
Για κοχλία M24:  $k=15\text{mm}$ ,  $e=45.20\text{mm}$ ,  $s=41\text{mm}$

Για κοχλία M27:  $k=17\text{mm}$ ,  $e=50.85\text{mm}$ ,  $s=46\text{mm}$



Για κοχλία M30:  $k=19\text{mm}$ ,  $e=55.37\text{mm}$ ,  $s=50\text{mm}$

Για διαφορετικές διαμέτρους κοχλίων αλλάζει και η ανοχή της οπής του ελάσματος. Σύμφωνα με τον EC3, για διάμετρο κοχλία μεταξύ M16 και M24 η ανοχή λαμβάνεται ίση με 2mm ενώ για διάμετρο κοχλία από M27 και άνω η ανοχή λαμβάνεται ίση με 3mm.



Σχήμα 4-26: ποιότητα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων για τις τέσσερις διαμέτρους κοχλίων

Η δύναμη προέντασης λαμβάνεται ίση με το 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία, όπως και στο αρχικό μοντέλο του κεφαλαίου 3. Όμως για κάθε διάμετρο κοχλία η δύναμη προέντασης είναι διαφορετική, αφού εξαρτάται από το εμβαδόν σπειρώματος  $A_s$ .

Για κοχλία M20:

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

Για κοχλία M24:

$$A_s = 3.53\text{cm}^2, \text{ οπότε } F_{p,C} = 0.7 \times 100 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 3.53\text{cm}^2 \rightarrow F_{p,C} = 247.1\text{kN}$$

Για κοχλία M27:

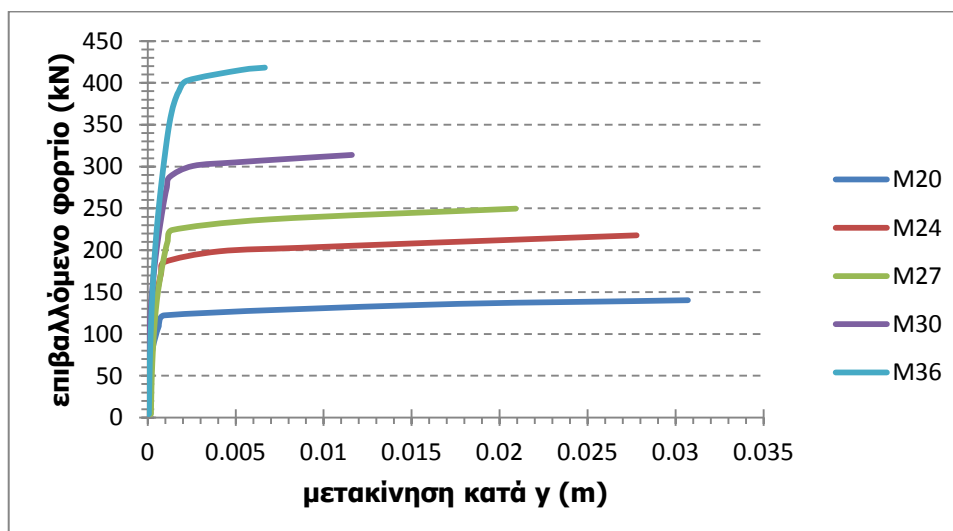
$$A_s = 4,59\text{cm}^2, \text{ οπότε } F_{p,c} = 0.7 \times 100 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 4,59\text{cm}^2 \rightarrow F_{p,c} = 321,3\text{kN}$$

Για κοχλία M30:

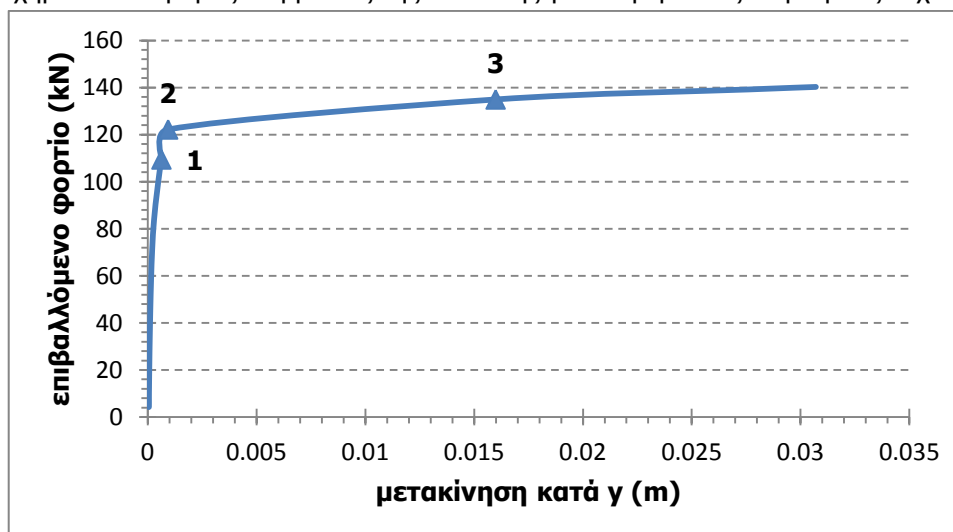
$$A_s = 5,61\text{cm}^2, \text{ οπότε } F_{p,c} = 0.7 \times 100 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \times 5,61\text{cm}^2 \rightarrow F_{p,c} = 392,7\text{kN}$$

Αρχικά, το υλικό το οποίο λαμβάνεται τόσο για τα ελάσματα όσο και για τον κοχλία είναι ελαστοπλαστικό, με ποιότητα αυτή του αρχικού μοντέλου (χάλυβας S355 και κοχλίας 10.9). Γενικότερα, όλες οι υπόλοιπες παράμετροι της ανάλυσης παραμένουν ίδιες. Το φορτίο το οποίο ασκείται στα πέντε προσομοιώματα είναι το οριακό φορτίο αντοχής του αρχικού μοντέλου, το οποίο προσδιορίστηκε στο κεφάλαιο 3.

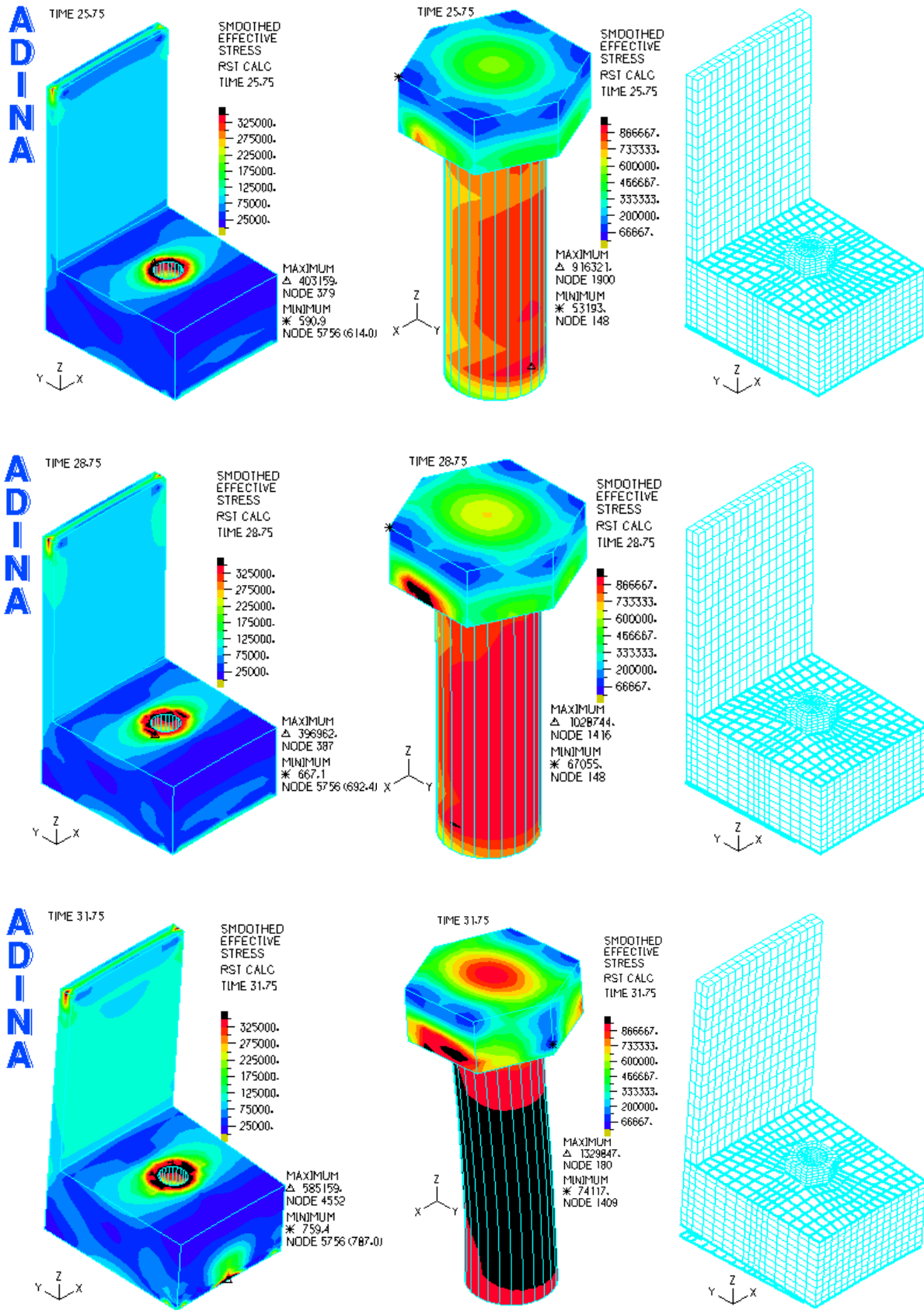
Οι δρόμοι ισορροπίας που προέκυψαν για τα πέντε προσομοιώματα διαφορετικής διαμέτρου με τα παραπάνω χαρακτηριστικά φαίνονται στο σχήμα 4-27. Παρατηρείται ότι ενώ η αρχική κλίση των διαγραμμάτων είναι ίδια στην συνέχεια το οριακό φορτίο της σύνδεσης αλλάζει ανάλογα με την διάμετρο του κοχλία. Συγκεκριμένα, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του κοχλία τόσο μικρότερο είναι το φορτίο αντοχής της σύνδεσης. Αλλά και οι παραμορφώσεις του φορέα είναι πολύ μεγαλύτερες.



Σχήμα 4-27: δρόμοι ισορροπίας της σύνδεσης για διαφορετικές διαμέτρους κοχλιών

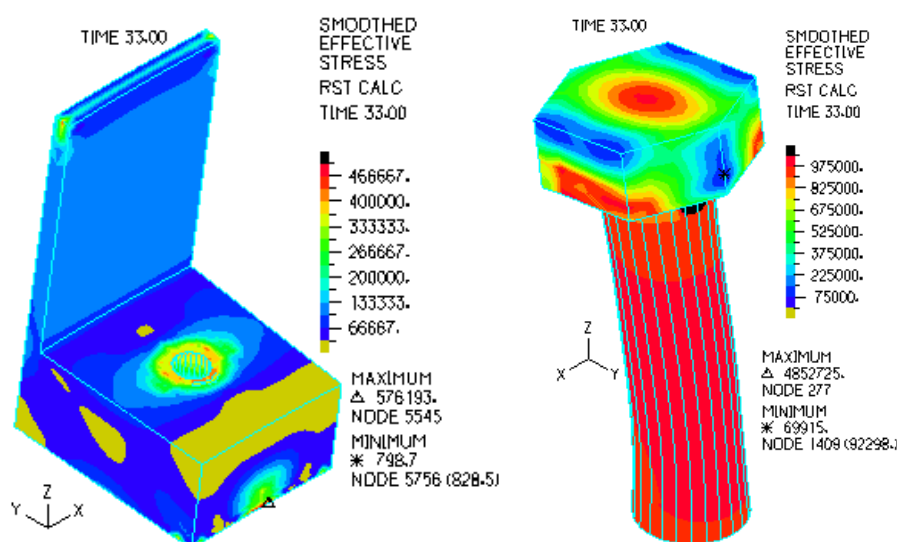


Σχήμα 4-28: δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για διάμετρο κοχλία M20



Σχήμα 4-29: κατανομή των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεις σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας για διάμετρο κοχλία M20

Στο σχήμα 4-28 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας για διάμετρο κοχλία M20 και στο σχήμα 4-29 οι εικόνες των ισοδύναμων τάσεων σε έλασμα, πυλώνα και κοχλία καθώς και οι παραμορφώσεις στα τρία κρίσιμα σημεία που έχουν ορισθεί στο διάγραμμα. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι για την μικρότερη διάμετρο κοχλία το φορτίο αντοχής είναι πολύ μικρότερο από εκείνο του αρχικού μοντέλου και επιπλέον, ενώ η αρχική κλίση του διαγράμματος είναι μεγάλη, η πτώση μετά την διαρροή είναι απότομη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η διάμετρος του κοχλία M20 είναι πολύ μικρή για το δεδομένο ύψος κοχλία που απαιτεί το πάχος ελάσματος που διαθέτουμε (60mm). Έτσι, από πολύ νωρίς οι τάσεις στον κοχλία είναι αυξημένες, δεδομένου και της ισχυρής προέντασης στην οποία υποβάλλεται η οποία είναι η μέγιστη δυνατή. Από πολύ νωρίς (σημείο 1) εμφανίζεται διαρροή στο έλασμα στην περιοχή γύρω από την οπή του κοχλία αλλά και οι τάσεις στον κοχλία είναι κοντά στο όριο διαρροής. Στο σημείο 3 η διαρροή στο έλασμα επεκτείνεται και στο κάτω μέρος εκεί όπου τα ελάσματα έρχονται σε επαφή αλλά και σε όλο και μεγαλύτερο μέρος του κορμού του κοχλία. Αλλά και οι παραμορφώσεις αυξάνονται απότομα. Όμως η αρχική κλίση των διαγραμμάτων είναι ίδια για όλες τις διαμέτρους κοχλία, επομένως η αρχική δυσκαμψία της σύνδεσης δεν επηρεάζεται από την διάμετρο.

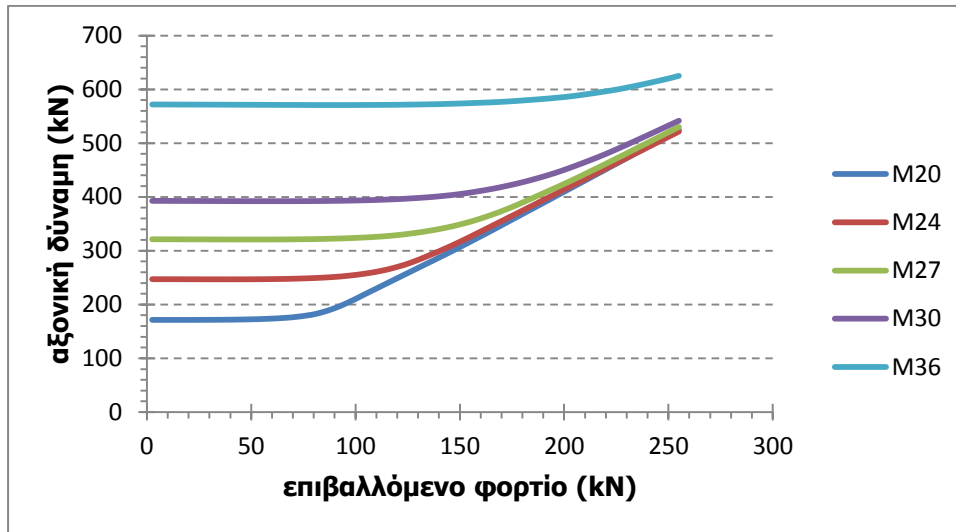


Σχήμα 4-30: τοπική υπέρβαση του ορίου θραύσης του υλικού για το οριακό φορτίο και για διάμετρο κοχλία M20

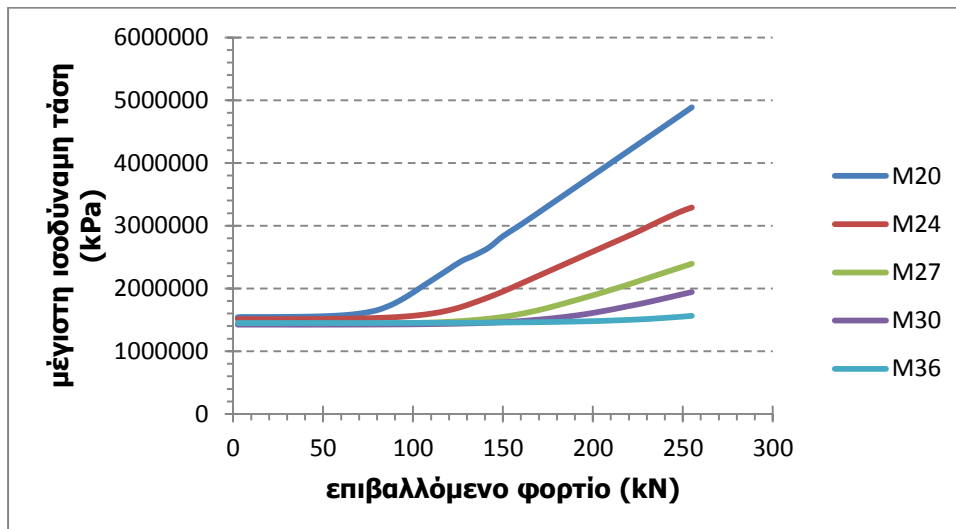
Στο σχήμα 4-30 απεικονίζονται οι θέσεις στις οποίες υπερβαίνεται το όριο θραύσης για το προσομοίωμα διαμέτρου κοχλία M20. Παρατηρείται ότι σε αυτήν την περίπτωση η αστοχία επέρχεται λόγω της εκτεταμένης μεγάλης αύξησης των τάσεων στον κοχλία πολύ κοντά στο όριο θραύσης. Ενώ την ίδια στιγμή οι τάσεις στο έλασμα και στον πυλώνα είναι πολύ περιορισμένες. Για την περίπτωση διαμέτρου κοχλία M36 παρουσιάστηκαν τα αντίστοιχα διαγράμματα στην προηγούμενη υποενότητα. Για διάμετρο κοχλία M36 η αστοχία επέρχεται λόγω της υπέρβασης του ορίου θραύσης στο έλασμα κυρίως και λιγότερο στον κοχλία. Για τις ενδιάμεσες διαμέτρους κοχλία υπέρβαση του ορίου θραύσης παρατηρείται και στο έλασμα αλλά και στον κοχλία. Γενικότερα, η μεγάλη λυγηρότητα του κοχλία διαμέτρου M20 καταστρέφει ουσιαστικά τον κοχλία και δεν βοηθά στην εκμετάλλευση του υλικού και της προέντασης. Οι τάσεις στο έλασμα παραμένουν εξαιρετικά χαμηλές.

#### 4.3.2 Επιρροή της διαμέτρου του κοχλία σε χαρακτηριστικά μεγέθη

Εξαιτίας του γεγονότος ότι το φορτίο αντοχής διαφέρει ανάλογα με την διάμετρο του κοχλία, για τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά μεγέθη της σύνδεσης χρησιμοποιήθηκε ελαστικό υλικό τόσο για το έλασμα όσο και για τον κοχλία και το ασκούμενο φορτίο περιορίστηκε σε 15kN ανά κόμβο.



Σχήμα 4-31: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του κοχλίου για διάφορες διαμέτρους κοχλίου

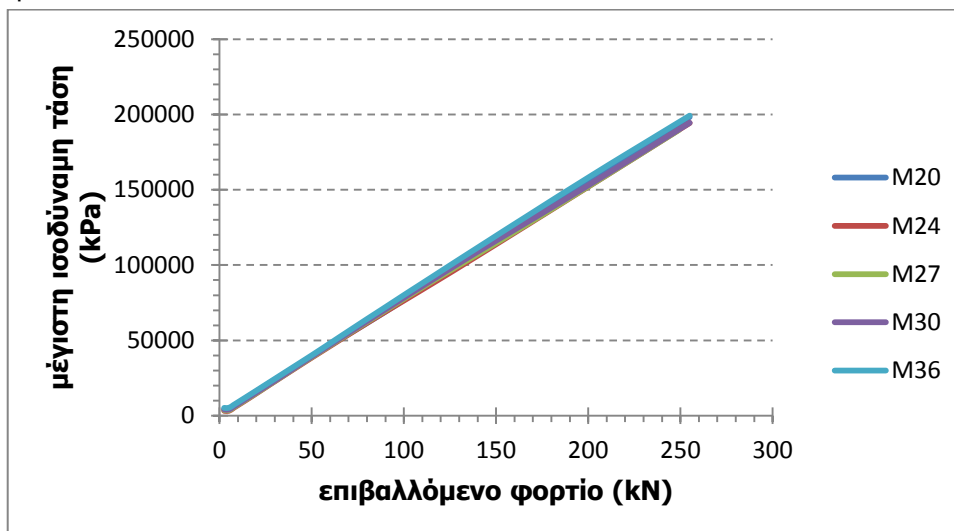


Σχήμα 4-32: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στον κοχλίου για διάφορες διαμέτρους κοχλίου

Στο σχήμα 4-31 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του κοχλίου ανάλογα με την διάμετρο του κοχλίου του προσομοιώματος. Παρατηρείται ότι η εξέλιξη της αξονικής του κοχλίου δεν διαφέρει από τα όσα έχουν αναφερθεί και στην προηγούμενη υποενότητα όπου εξετάστηκε η επιρροή της δύναμης προέντασης. Και παρότι για διάμετρο κοχλίου M36 το διάγραμμα δεν παρουσιάζει την ίδια τελική τιμή με τα υπόλοιπα, αν το φορτίο μεγάλωνε ακόμη περισσότερο, η αξονική του κοχλίου M36 θα αυξανόταν γραμμικά και θα έφταναν στην ίδια τιμή δύναμης. Ωστόσο, ο κοχλίας M20 δεν θα έφτανε ποτέ μία τέτοια τιμή φορτίου.

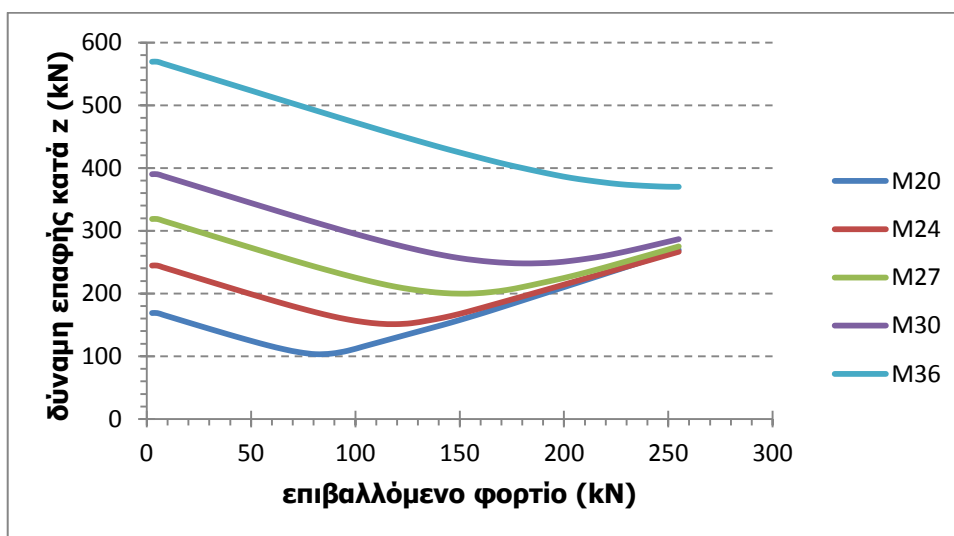
Στο σχήμα 4-32 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στον κοχλίου ανάλογα με την διάμετρο του κοχλίου. Αρχικά, όλα τα διαγράμματα ξεκινούν από την ίδια τιμή ισοδύναμης τάσης δεδομένου ότι και στα πέντε προσομοιώματα η προένταση που επιβάλλεται στους κοχλίες είναι η μέγιστη δυνατή, ίση με το 70% της εφελκυστικής αντοχής. Το γεγονός ότι οι διαμέτροι των κοχλίων είναι διαφορετικές επηρεάζει το διάγραμμα της αξονικής δύναμης, όχι όμως της ισοδύναμης τάσης. Διότι η τάση εξαρτάται από δύναμη και εμβαδόν, η αναλογία των οποίων διατηρείται σταθερή. Ωστόσο, καθώς το φορτίο σταδιακά αυξάνεται οι τάσεις οι οποίες θα αναπτυχθούν για την μικρότερη διάμετρο κοχλίου M20 είναι πολύ μεγαλύτερες από εκείνες του κοχλίου

M36. Και μάλιστα όσο η διάμετρος του κοχλία μειώνεται η αύξηση των τάσεων γίνεται όλο και μεγαλύτερη.



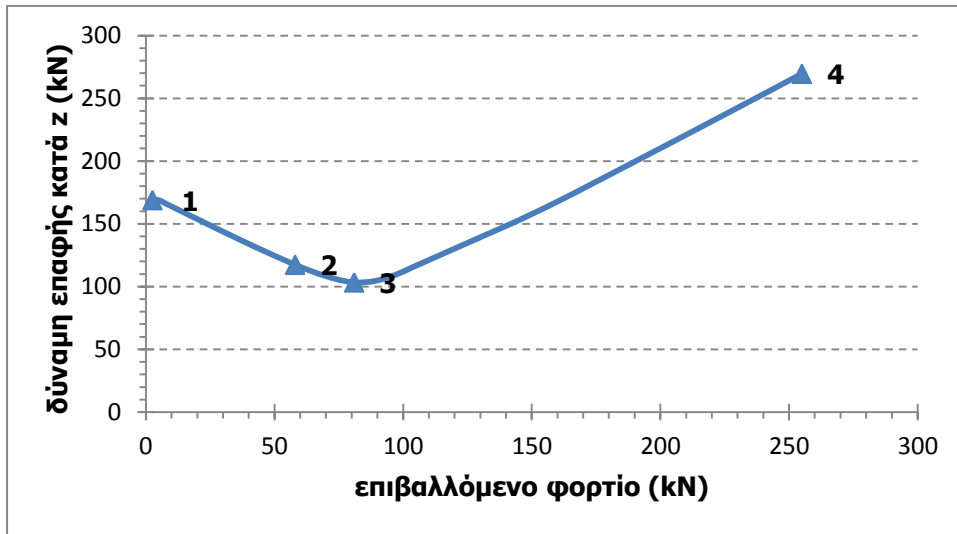
Σχήμα 4-33: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση για διάφορες διαμέτρους κοχλία

Και στην περίπτωση διερεύνησης της επίδρασης της διαμέτρου του κοχλία, η μέγιστη ισοδύναμη τάση στην συγκόλληση δεν επηρεάζεται. Ανεξάρτητα από την διάμετρο του κοχλία, για την ίδια τιμή επιβαλλόμενου φορτίου, η τάση στην συγκόλληση θα είναι ακριβώς η ίδια, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-33.

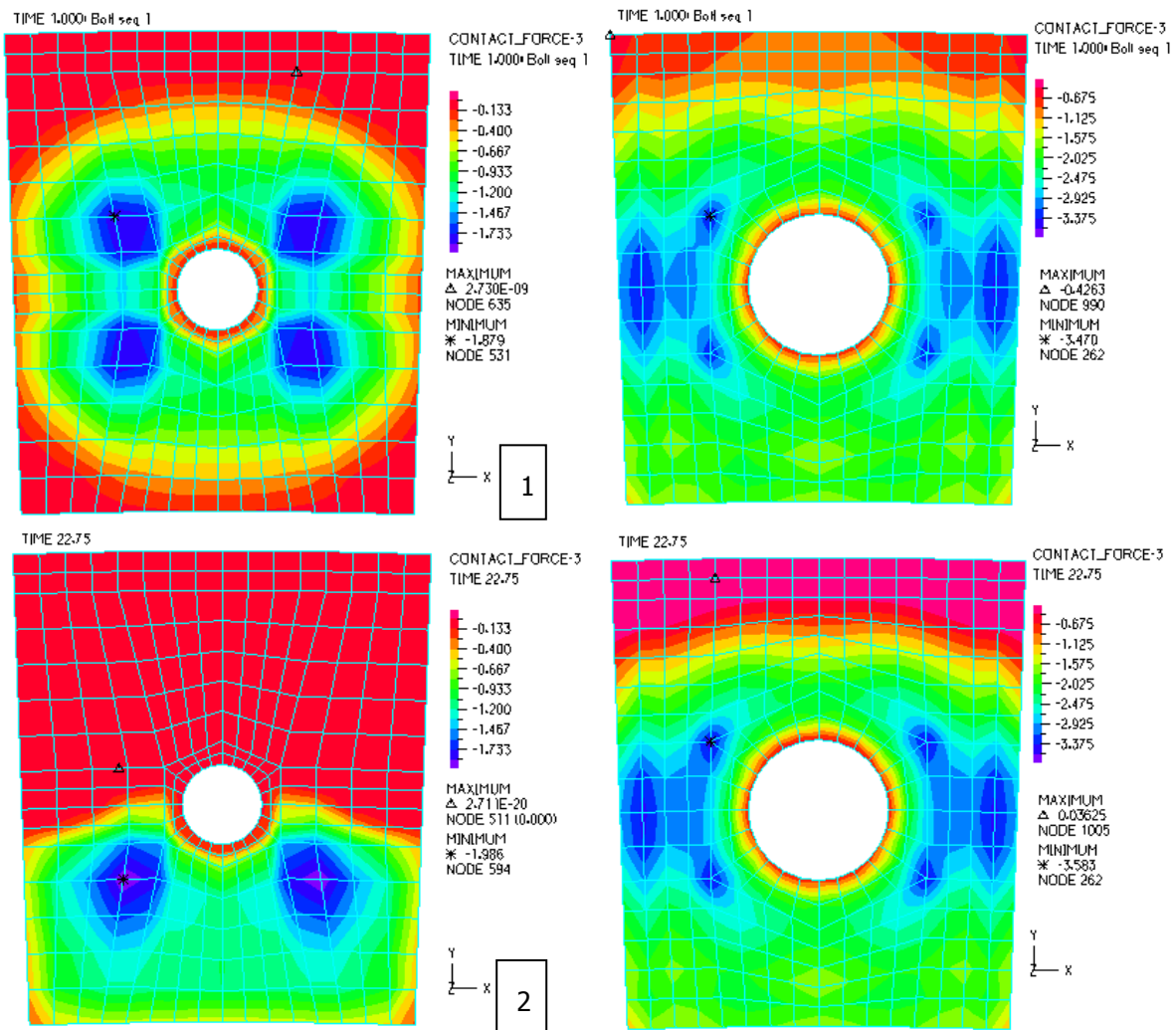


Σχήμα 4-34: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής στην εγκάρσια διεύθυνση στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για διάφορες διαμέτρους κοχλία

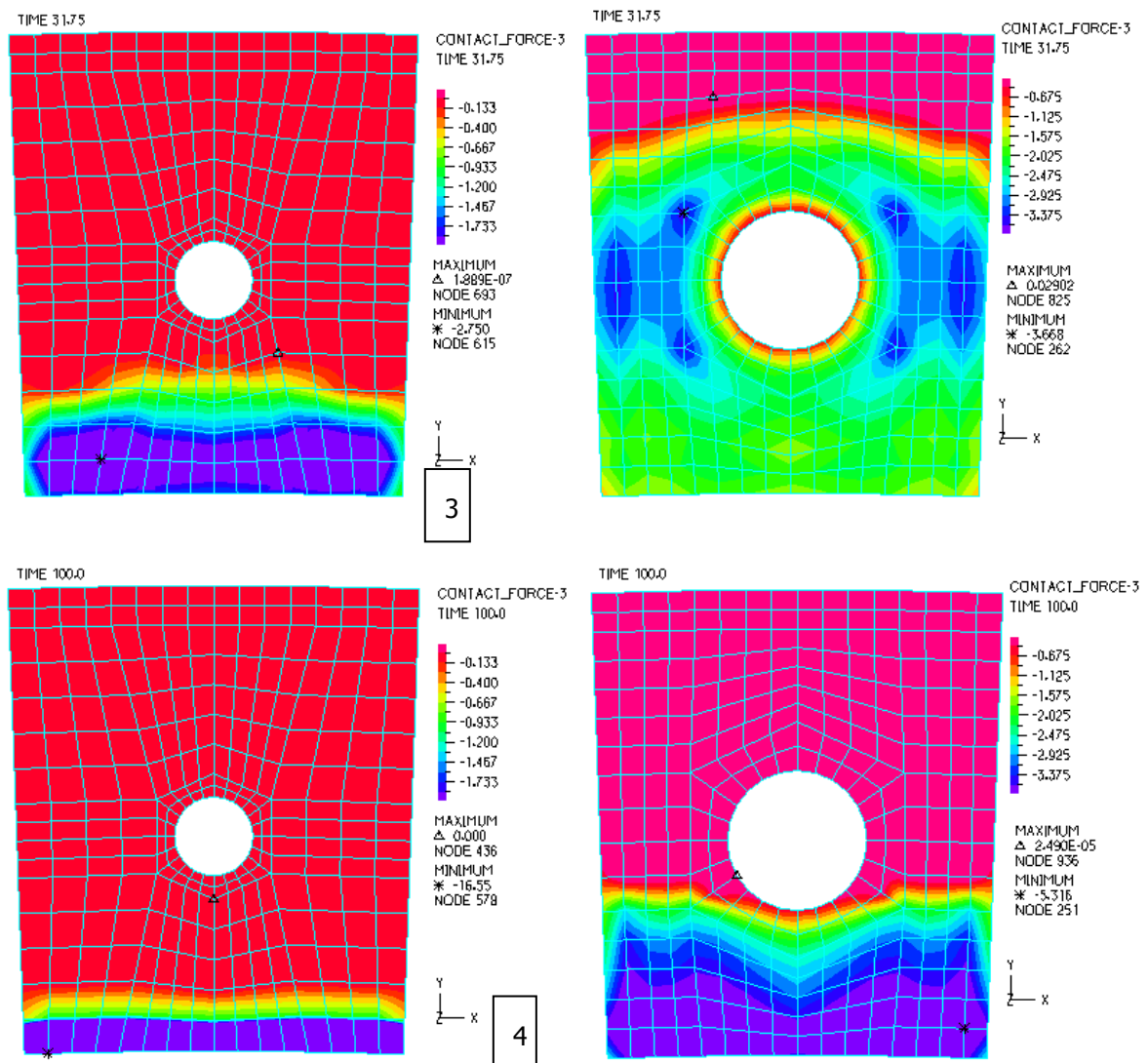
Στο σχήμα 4-34 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων για διάφορες τιμές της διαμέτρου του κοχλία, ενώ στο σχήμα 4-36 γίνεται σύγκριση των εικόνων κατανομής των δυνάμεων αυτών στο έλασμα, για τις δύο ακραίες διαμέτρους κοχλία. Από τις εικόνες αυτές συμπεραίνεται ότι ενώ η ανακατανομή ολοκληρώνεται για διάμετρο κοχλία M20 (3<sup>η</sup> εικόνα σχήματος 4-34), την ίδια χρονική στιγμή για διάμετρο κοχλία M36 η ανακατανομή είναι ακόμα σε αρχικό στάδιο. Ενώ στο τέλος της φόρτισης (4<sup>η</sup> εικόνα σχήματος 4-34), οι δυνάμεις επαφής έχουν περιορισθεί σε ένα μικρό κομμάτι του ελάσματος για διάμετρο M20, ενώ για διάμετρο κοχλία M36 μόλις έχει ολοκληρωθεί η ανακατανομή των τάσεων.



Σχήμα 4-35: δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για διάμετρο κοχλία M20





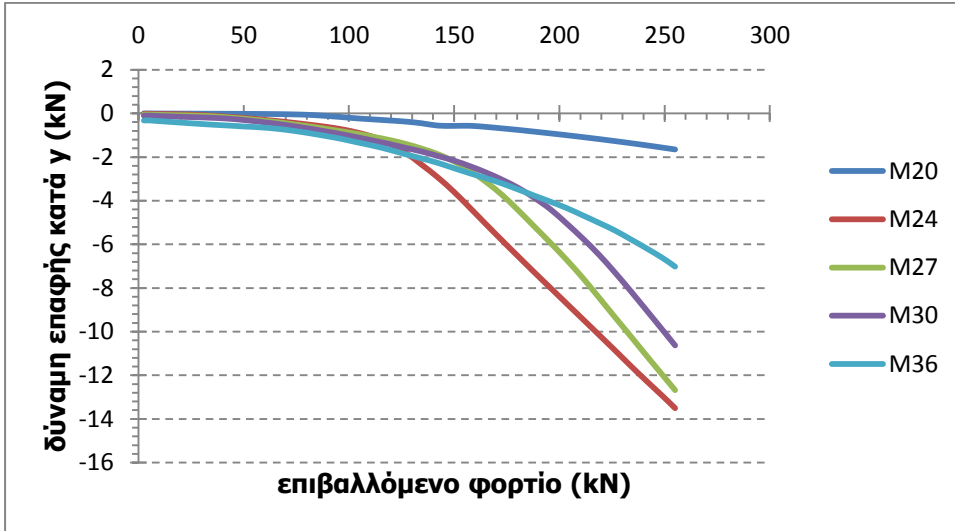


Σχήμα 4-36: κατανομή των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για διάμετρο κοχλία M20 (αριστερά) και M36 (δεξιά)

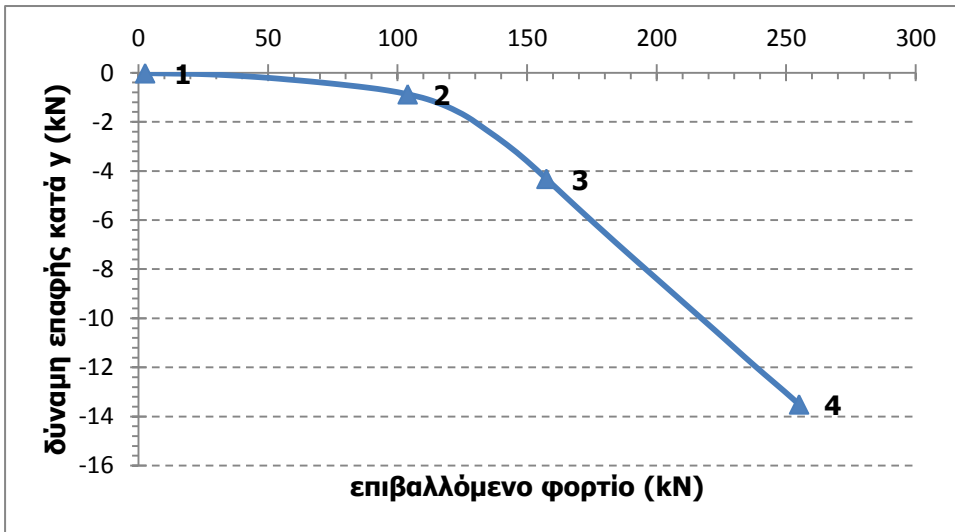
Στο σχήμα 4-36 αριστερά παρουσιάζονται οι εικόνες κατανομής των δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για κοχλία M20 στις τέσσερις χαρακτηριστικές θέσεις που σημειώνονται στο σχήμα 4-35. Στην δεξιά μεριά του σχήματος, απεικονίζονται οι αντίστοιχες δυνάμεις για την ίδια χρονική στιγμή αλλά για διάμετρο κοχλία M36.

Στο σχήμα 4-37 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας των διαμηκών δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια για διάφορες διαμέτρους κοχλία, ενώ ειδικά στο σχήμα 4-38 δίνεται το ίδιο διάγραμμα μόνο για διάμετρο κοχλία M24, με τα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία. Στο σχήμα 4-39 αριστερά είναι οι εικόνες των διαμηκών δυνάμεων επαφής στα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία για διάμετρο M24, ενώ δεξιά είναι οι αντίστοιχες εικόνες για την ίδια χρονική στιγμή και για διάμετρο κοχλία M36. Παρατηρείται ότι και εδώ η μεταβολή των δυνάμεων επαφής γίνεται πιο γρήγορα στην περίπτωση του κοχλία μικρότερης διαμέτρου. Και χαρακτηριστικά, στις εικόνες των σημείων 3 και 4 φαίνεται ότι ενώ για κοχλία M24 οι επιφάνειες επαφής έχουν οριστικοποιηθεί, για διάμετρο κοχλία M36 συνεχίζεται η ανακατανομή. Γενικά συμπεραίνεται ότι όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του κοχλία, οι προκύπτουσες διαμήκειες δυνάμεις επαφής θα είναι μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή, ενώ οι εγκάρσιες μειώνονται.

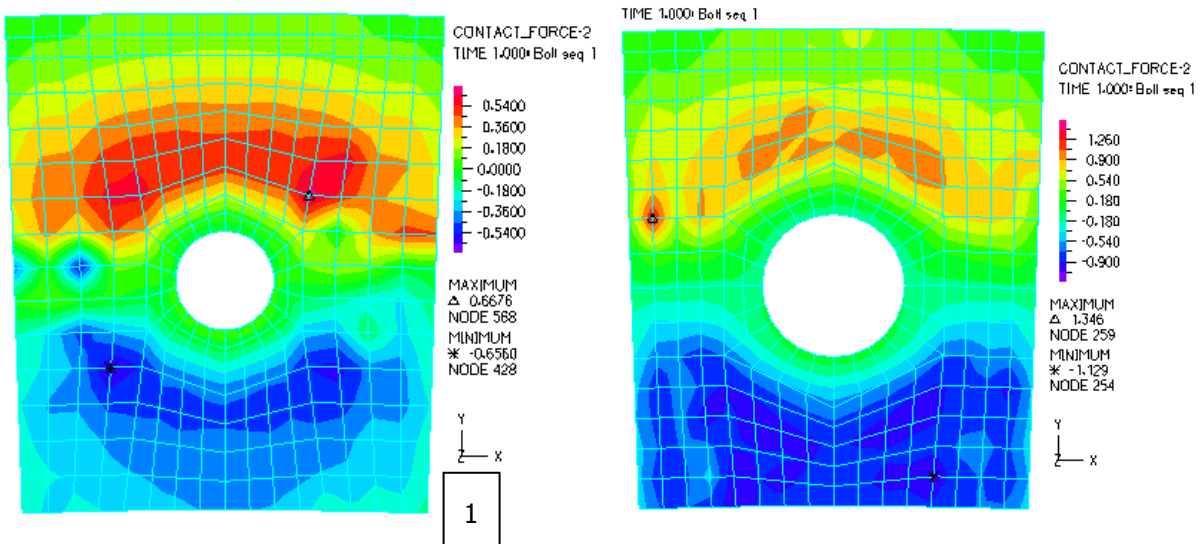


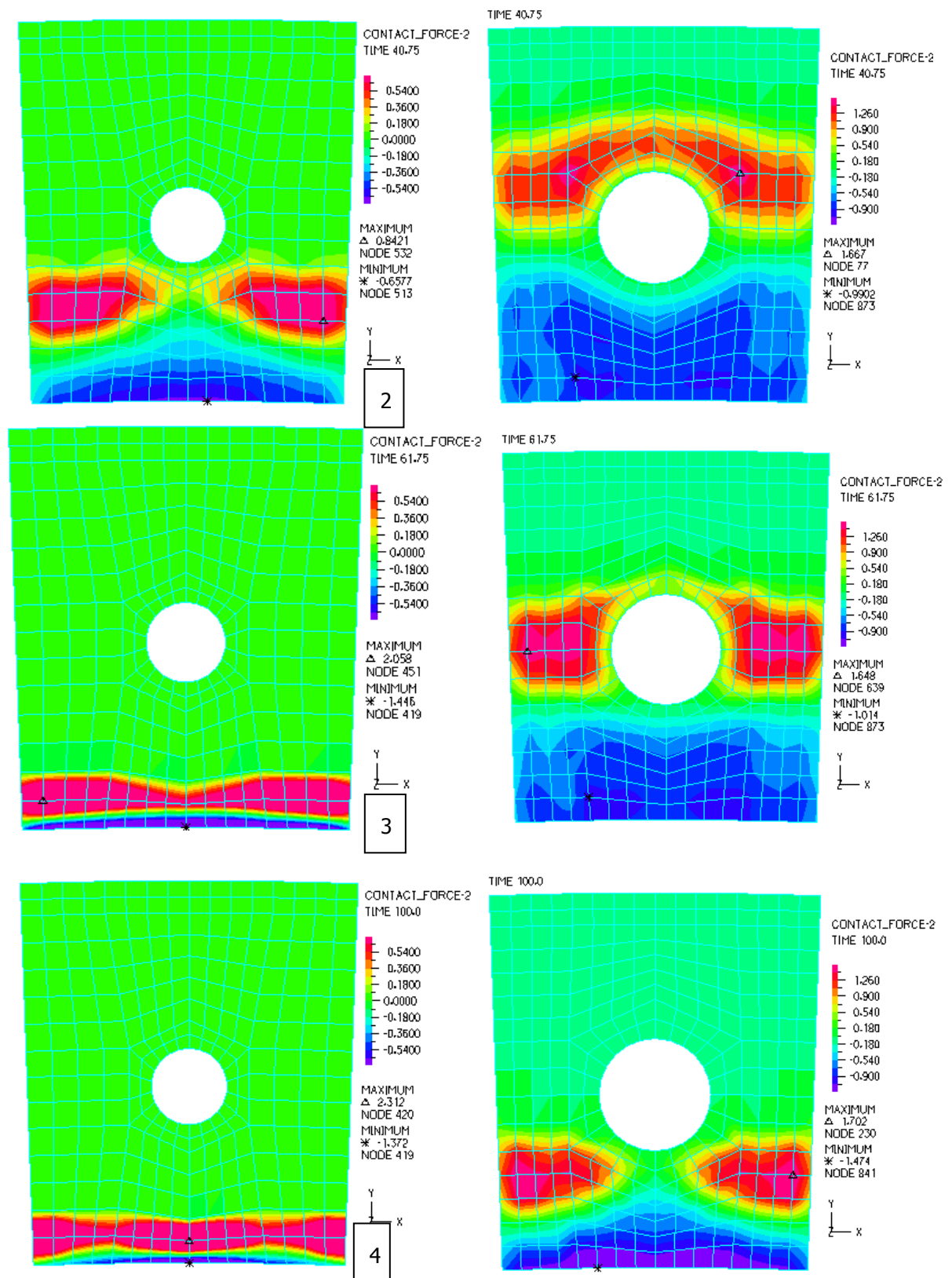


Σχήμα 4-37: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής στην διαμήκη διεύθυνση στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για διάφορες διαμέτρους κοχλίας

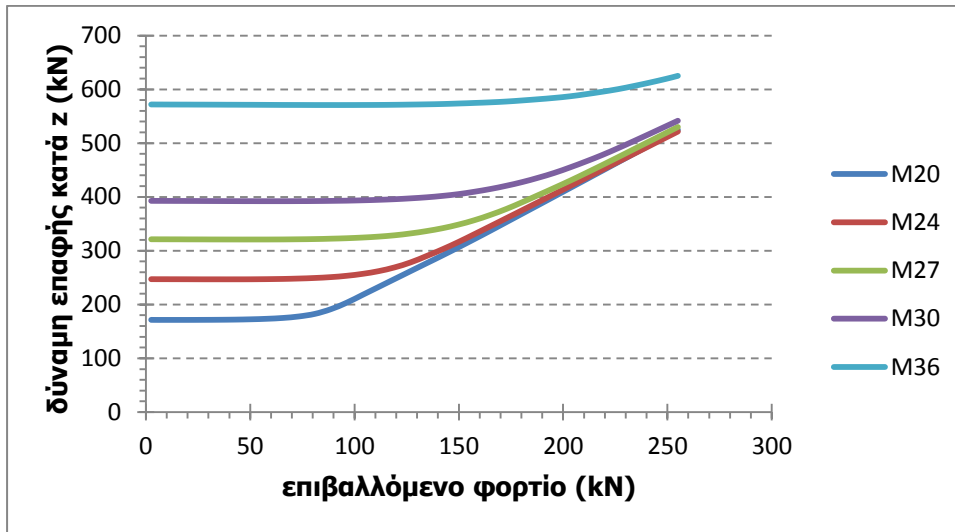


Σχήμα 4-38: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής στην διαμήκη διεύθυνση στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για διάμετρο κοχλίας M24

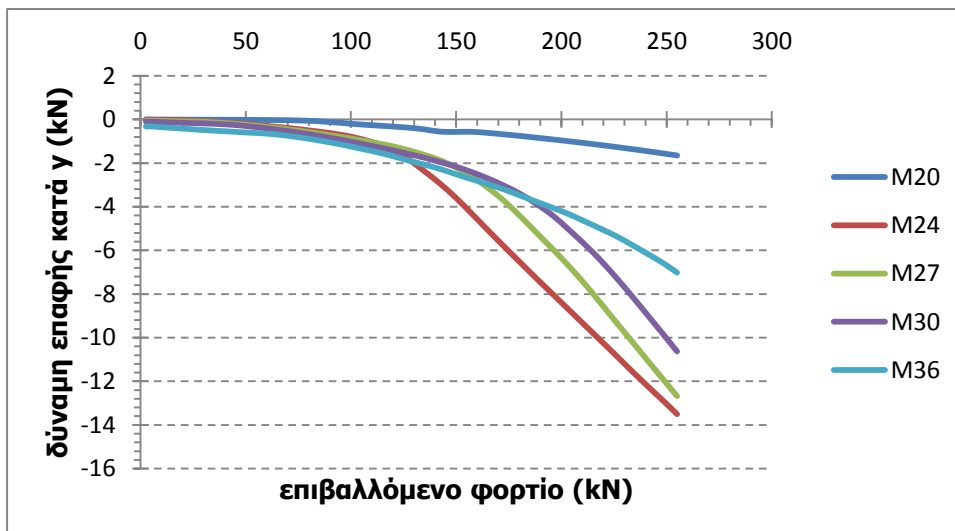




Σχήμα 4-39: κατανομή των διαμηκών δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για διάμετρο κοχλία M24 (αριστερά) και M36 (δεξιά)

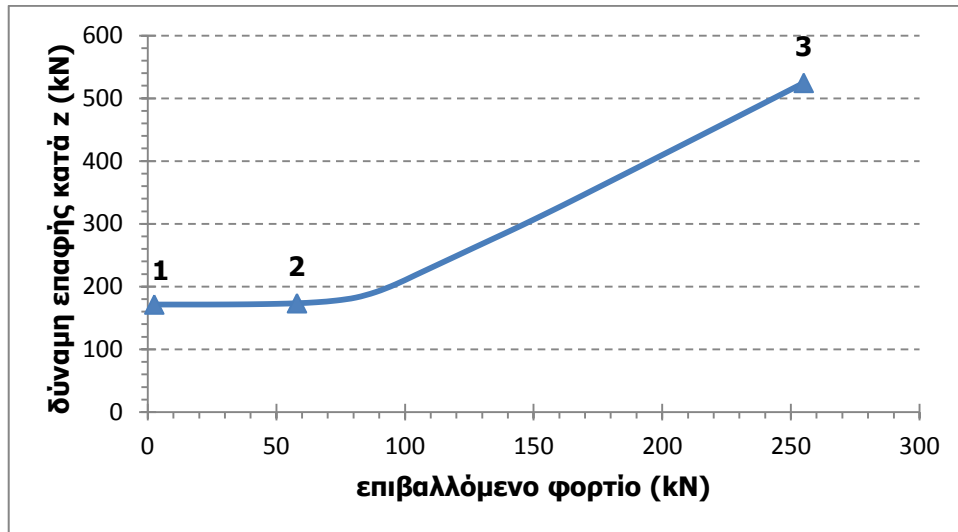


Σχήμα 4-40: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής κατά την εγκάρσια διεύθυνση μεταξύ της κεφαλής του κοχλίου και του άνω ελάσματος για διάφορες διαμέτρους κοχλίου

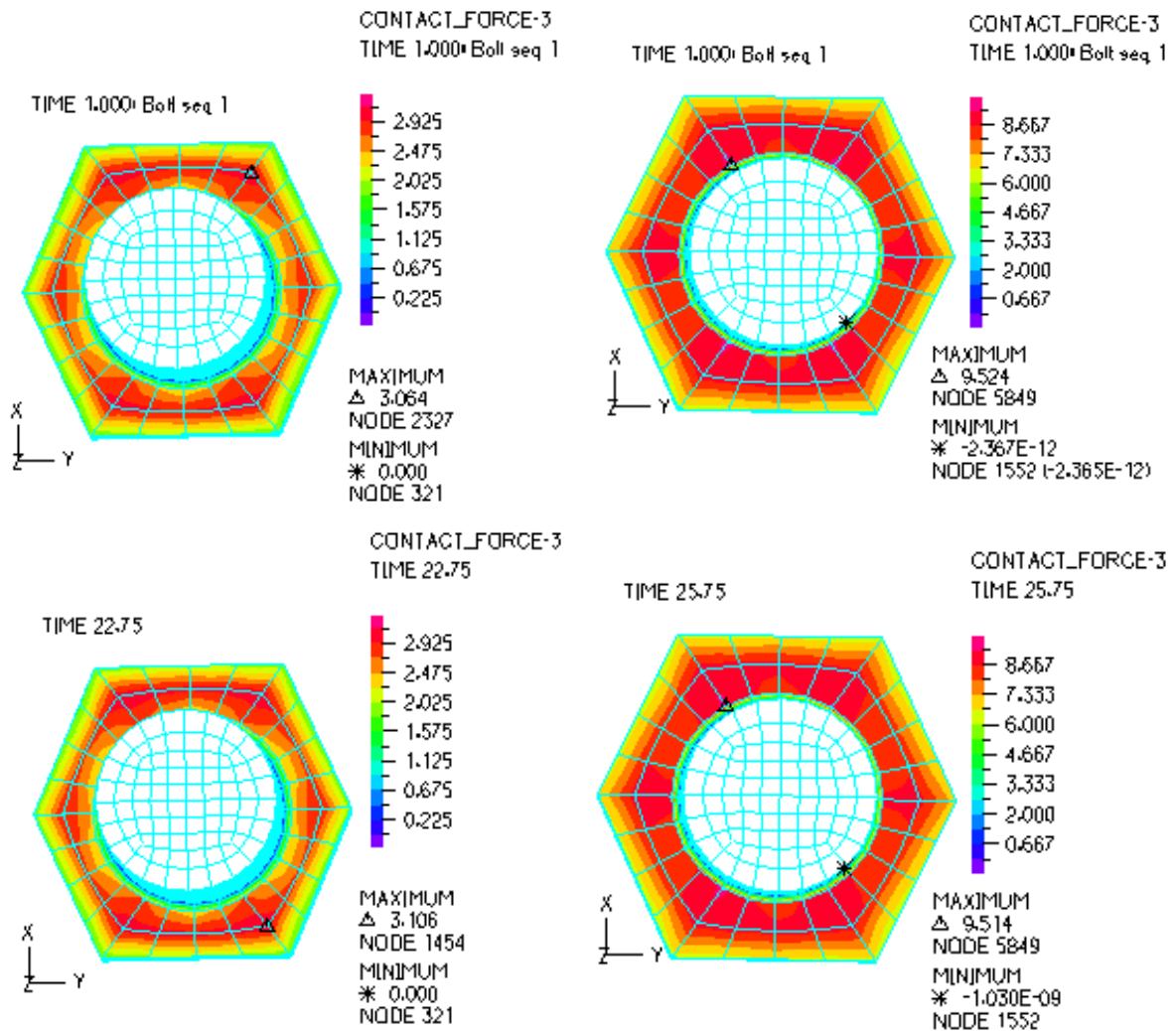


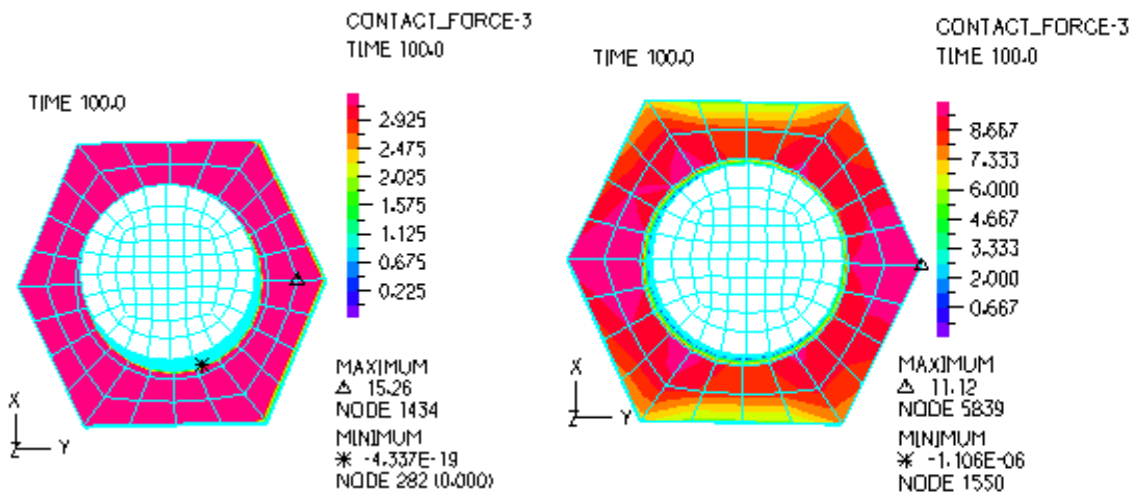
Σχήμα 4-41: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής κατά την διαμήκη διεύθυνση μεταξύ της κεφαλής του κοχλίου και του άνω ελάσματος για διάφορες διαμέτρους κοχλίου

Στο σχήμα 4-40 και 4-41 παρουσιάζονται τα ίδια διαγράμματα για την διεπαφή κεφαλής κοχλίου και άνω ελάσματος. Όπως αναμενόταν το διάγραμμα των διαμηκών δυνάμεων επαφής δεν εμφανίζει καμία διαφορά από εκείνο της διεπαφής των δύο ελασμάτων. Στο σχήμα 4-42 δίνεται το διάγραμμα των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής για διάμετρο κοχλίου M20 με τα χαρακτηριστικά σημεία στα οποία το διάγραμμα παρουσιάζει μεταβολές. Στο σχήμα 4-43 φαίνονται οι εικόνες των δυνάμεων επαφής κατά z για κοχλίου M20 στα αριστερά, στα χαρακτηριστικά σημεία του διαγράμματος, ενώ δεξιά είναι οι εικόνες για τις ίδιες χρονικές στιγμές αλλά για κοχλίου M36. Και εδώ η ανακατανομή γίνεται πιο γρήγορα στην μικρότερη διάμετρο κοχλίου, γι' αυτό και το οριζόντιο τμήμα του διαγράμματος 4-40 είναι μικρότερο. Για κοχλίου M36 η ανακατανομή μόλις που ολοκληρώνεται στο τέλος της φόρτισης, γι' αυτό και το ανοδικό κομμάτι του διαγράμματος για κοχλίου M36 είναι ελάχιστο.

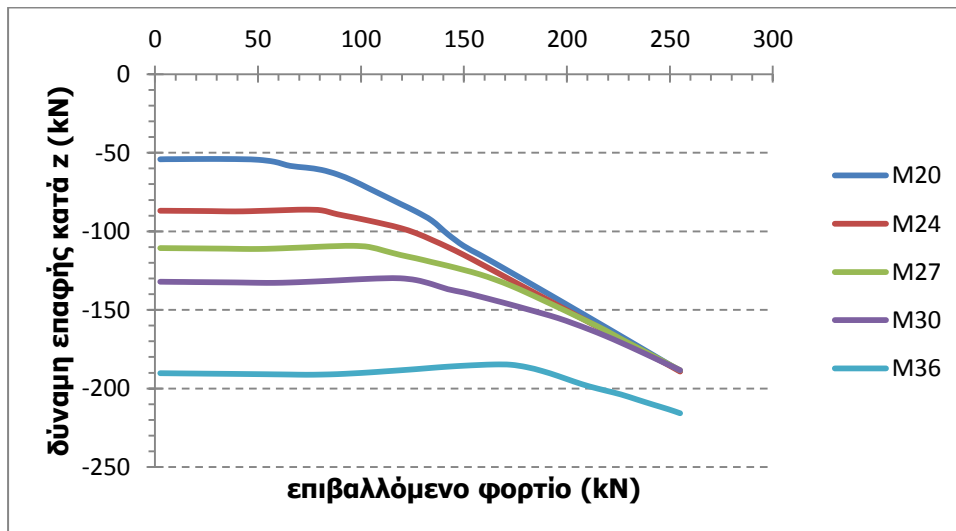


Σχήμα 4-42: δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ κεφαλής κοχλίας και άνω ελάσματος για διάμετρο κοχλίας M20





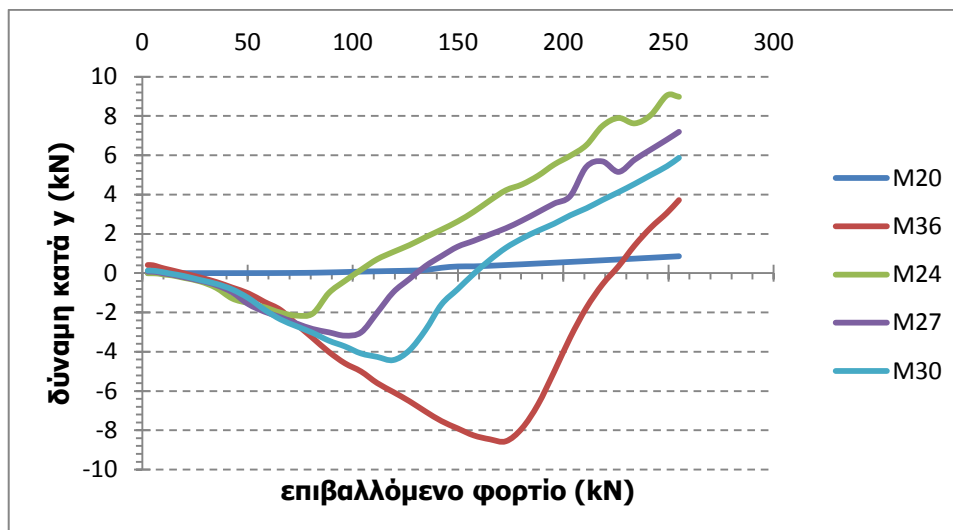
Σχήμα 4-43: κατανομή των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και της άνω επιφάνειας του άνω ελάσματος για διάμετρο κοχλία M20 (αριστερά) και M36 (δεξιά)



Σχήμα 4-44: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής κατά την εγκάρσια διεύθυνση μεταξύ της άντυγας του ελάσματος και ου κορμού του κοχλία για διάφορες διαμέτρους κοχλία

Τέλος, στα σχήματα 4-44 και 4-45 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των δυνάμεων επαφής μεταξύ κορμού του κοχλία και άντυγας του ελάσματος. Η συμπεριφορά και σε αυτό το διάγραμμα είναι ανάλογη με την διάμετρο κοχλία M36 να μην φτάνει στην ίδια τελική τιμή της εγκάρσιας δύναμης με τις υπόλοιπες διαμέτρους.

Αυτό που παρατηρείται σε όλα τα διαγράμματα αποτελεσμάτων για τον κοχλία διαμέτρου M36, όπου δεν παρουσιάζει την ίδια τελική τιμή με τις υπόλοιπες διαμέτρους οφείλεται στο ότι η τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου είναι σχετικά μικρή για την συγκεκριμένη διάμετρο. Το προσομοίωμα με διάμετρο κοχλία M36 είναι αρκετά ισχυρό και δύσκαμπτο και προκειμένου να αυξηθούν περισσότερο οι τιμές των χαρακτηριστικών διαγραμμάτων θα πρέπει να αυξηθεί ανάλογα το επιβαλλόμενο φορτίο, ώστε να γίνει ανεξάρτητο της δύναμης προέντασης. Διότι για κοχλία M36 συμπεραίνεται ότι το συγκεκριμένο φορτίο εξαρτάται από την τιμή της δύναμης προέντασης.



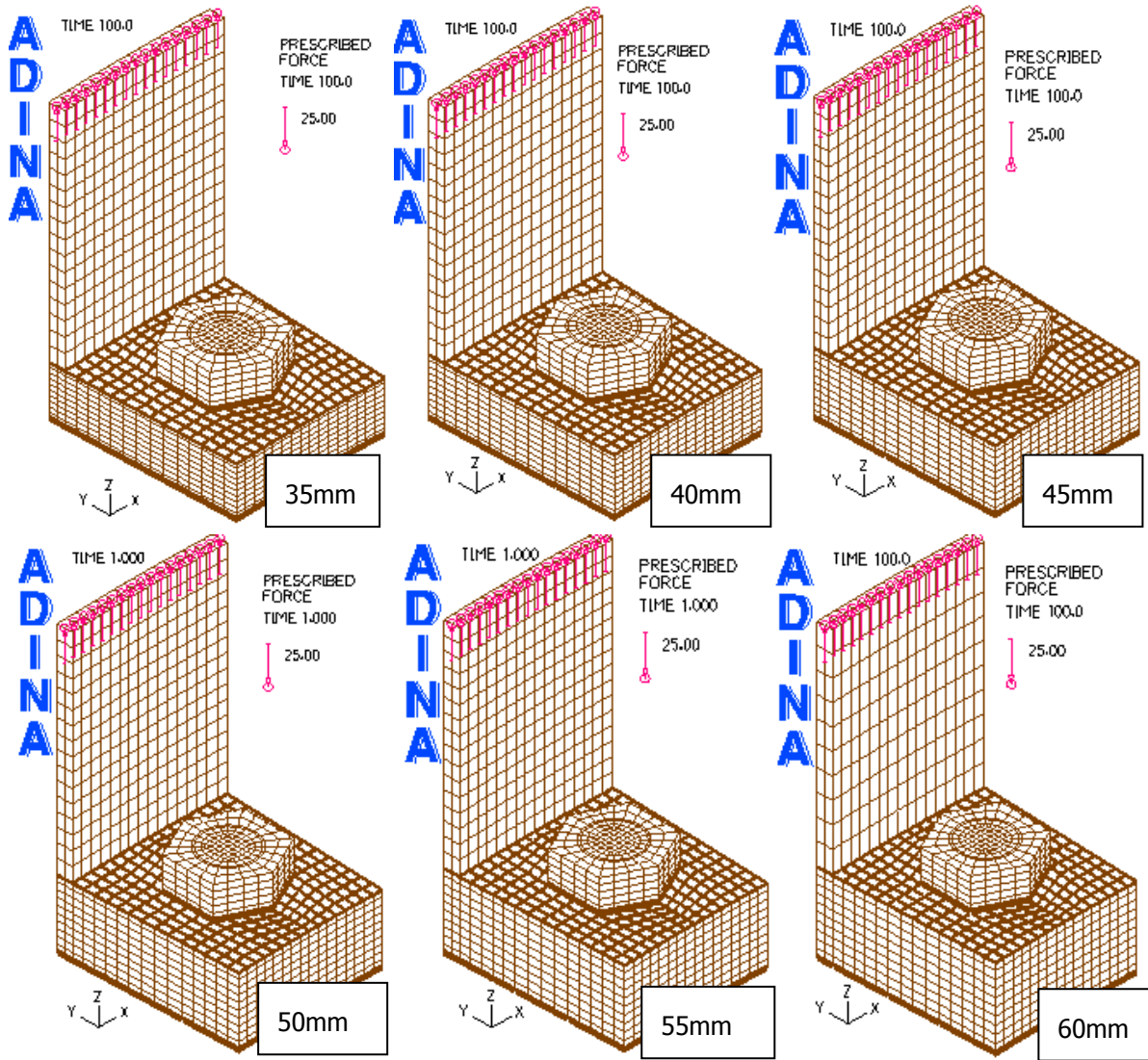
Σχήμα 4-45: δρόμος ισορροπίας των δυνάμεων επαφής κατά την διαμήκη διεύθυνση μεταξύ της άντυγας του ελάσματος και ου κορμού του κοχλία για διάφορες διαμέτρους κοχλία

#### 4.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΔΑΚΤΥΛΙΟΕΙΔΟΥΣ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

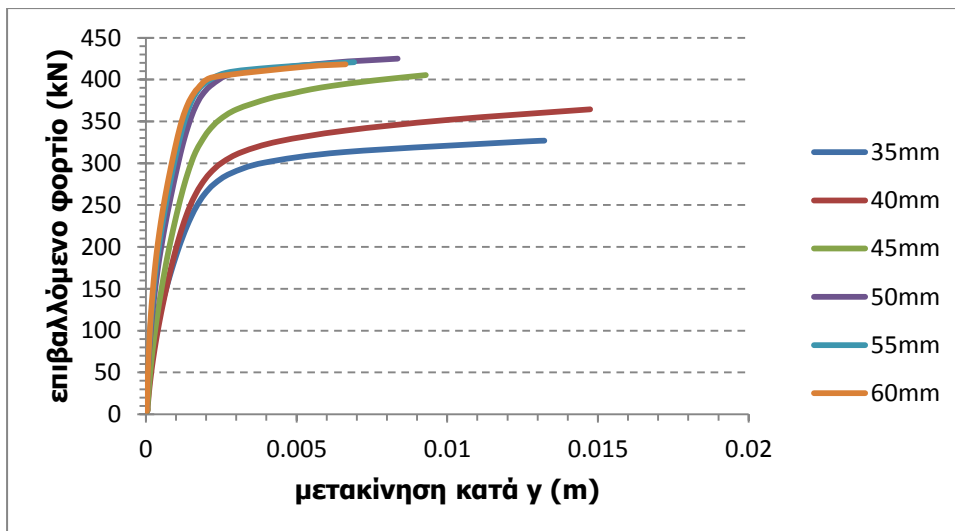
##### 4.4.1 Επιρροή του πάχους του δακτυλιοειδούς ελάσματος στην οριακή αντοχή

Στην ενότητα αυτή θα εξετασθεί το πώς επηρεάζει το πάχος των ελασμάτων της σύνδεσης την συμπεριφορά της. Τα προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν για τον σκοπό αυτό φαίνονται στο σχήμα 4-46 στα οποία το πάχος ελάσματος του αρχικού μοντέλου (60mm) μεταβάλλεται σε 35mm, 40mm, 45mm, 50mm και 55mm. Η διακριτοποίηση του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων είναι ίδια σε κάτοψη και για τα έξι προσομοιώματα, αυτό που αλλάζει είναι το πλήθος των στοιχείων καθ' ύψος ανάλογα με το πάχος του ελάσματος. Όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της σύνδεσης παραμένουν ίδια. Η δύναμη προέντασης του κοχλία ο οποίος είναι διαμέτρου M36 και για τα έξι προσομοιώματα, είναι η μέγιστη δυνατή. Αρχικά, προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση του πάχους του ελάσματος στην αντοχή της σύνδεσης το υλικό λήφθηκε ελαστοπλαστικό με ποιότητες αυτές του αρχικού μοντέλου. Το φορτίο το οποίο ασκείται στα αριθμητικά προσομοιώματα είναι κοινό, ίσο με το οριακό φορτίο της σύνδεσης του αρχικού μοντέλου.

Ο δρόμος ισορροπίας που προέκυψε από τις αριθμητικές αναλύσεις αυτών των προσομοιωμάτων φαίνεται στο σχήμα 4-47. Παρατηρείται ότι για τα τρία μεγαλύτερα πάχη ελάσματος (50mm, 55mm, 60mm) το οριακό φορτίο είναι ίδιο. Αυτό που αλλάζει είναι η κλίση του διαγράμματος. Γενικότερα, η αρχική κλίση των διαγραμμάτων δεν είναι ίδια γεγονός που σημαίνει ότι η δυσκαμψία της σύνδεσης επηρεάζεται από το πάχος του ελάσματος. Όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος ελάσματος η σύνδεση γίνεται όλο και πιο δύσκαμπτη. Η μείωση του πάχους μέχρι ένα σημείο δεν επηρεάζει την τιμή του οριακού φορτίου. Όμως η περαιτέρω μείωση του πάχους έχει επιπτώσεις και στην αντοχή της σύνδεσης, όχι μόνο στην δυσκαμψία (όπως φαίνεται από τους δρόμους ισορροπίας για πάχος ελάσματος 45mm, 40mm και 35mm). Ειδικά για τα δύο μικρότερα πάχη ελάσματος η αντοχή μειώνεται κατακόρυφα και η σύνδεση γίνεται ιδιαίτερα εύκαμπτη. Η χρησιμοποίηση ενός λεπτού ελάσματος στην σύνδεση έχει σαν αποτέλεσμα να εμφανίζεται πολύ γρήγορα η διαρροή στο έλασμα και να εξαπλώνεται ταχύτατα σε όλο και μεγαλύτερο μέρος του. Ουσιαστικά, η μικρότερη τιμή του φορτίου αντοχής για το λεπτότερο έλασμα οφείλεται στην διαρροή του ελάσματος και τελικά στην αποκόλλησή του από την σύνδεση.

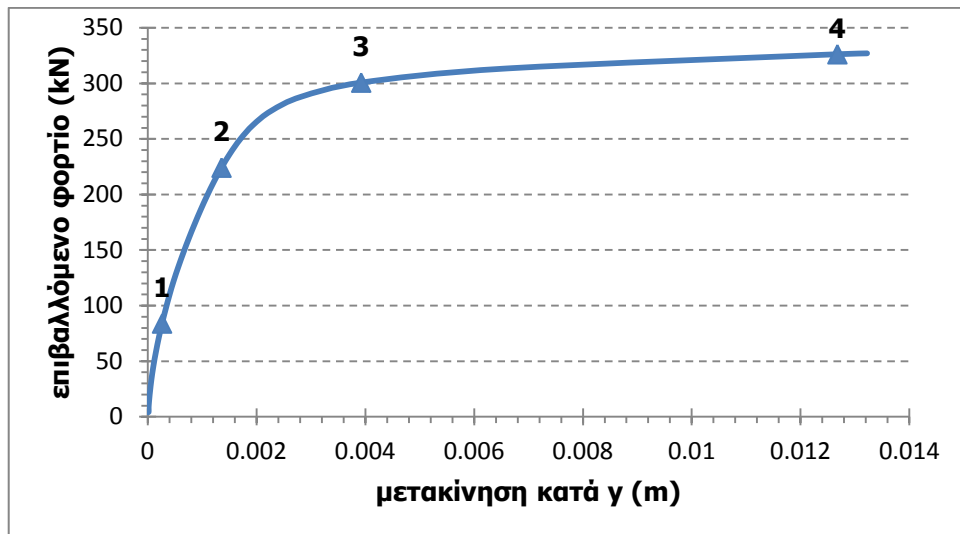


Σχήμα 4-46: προσομοιώματα στο ADINA διαφορετικού πάχους ελάσματος

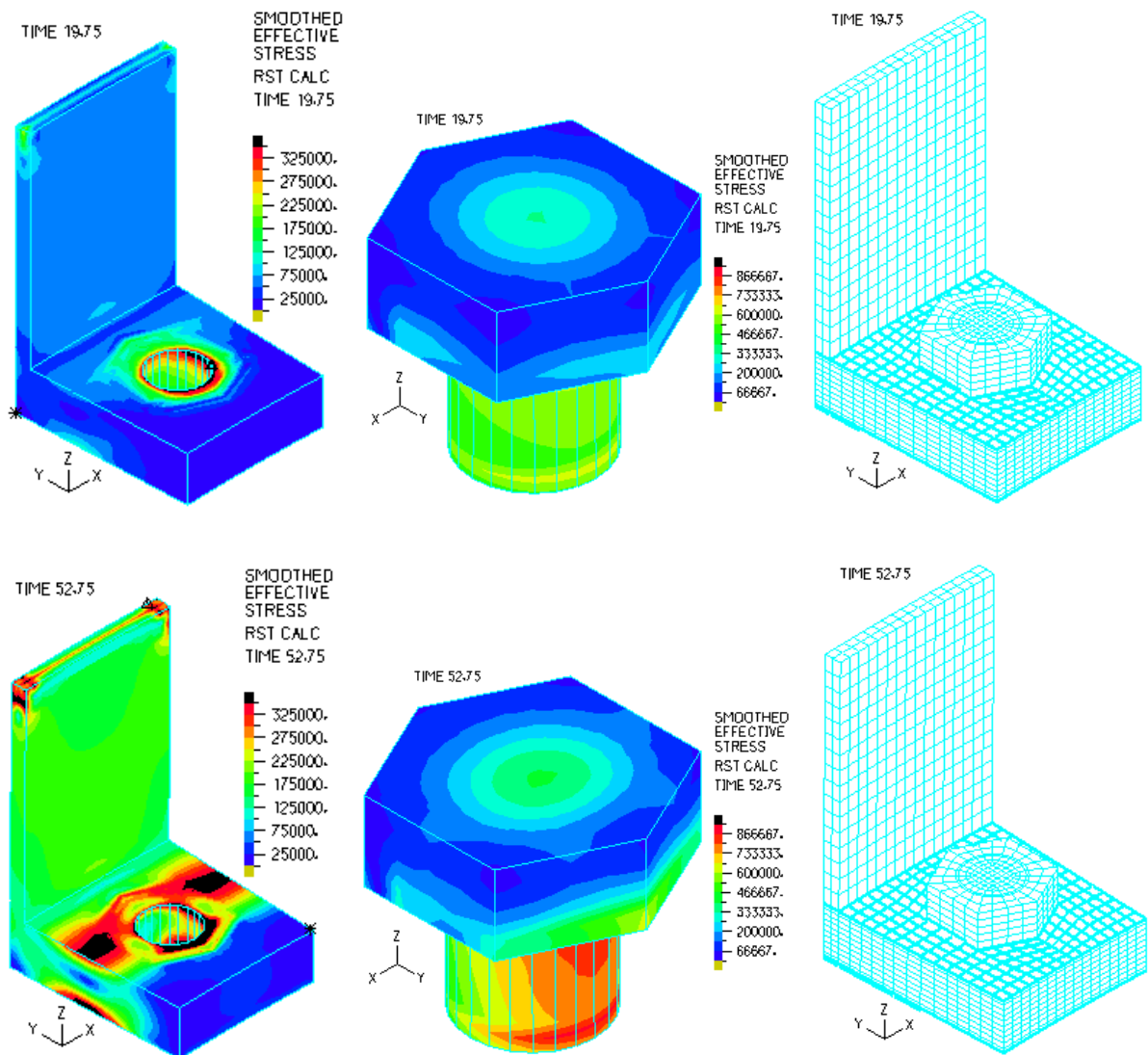


Σχήμα 4-47: δρόμος ισορροπίας για διάφορα πάχη ελάσματος

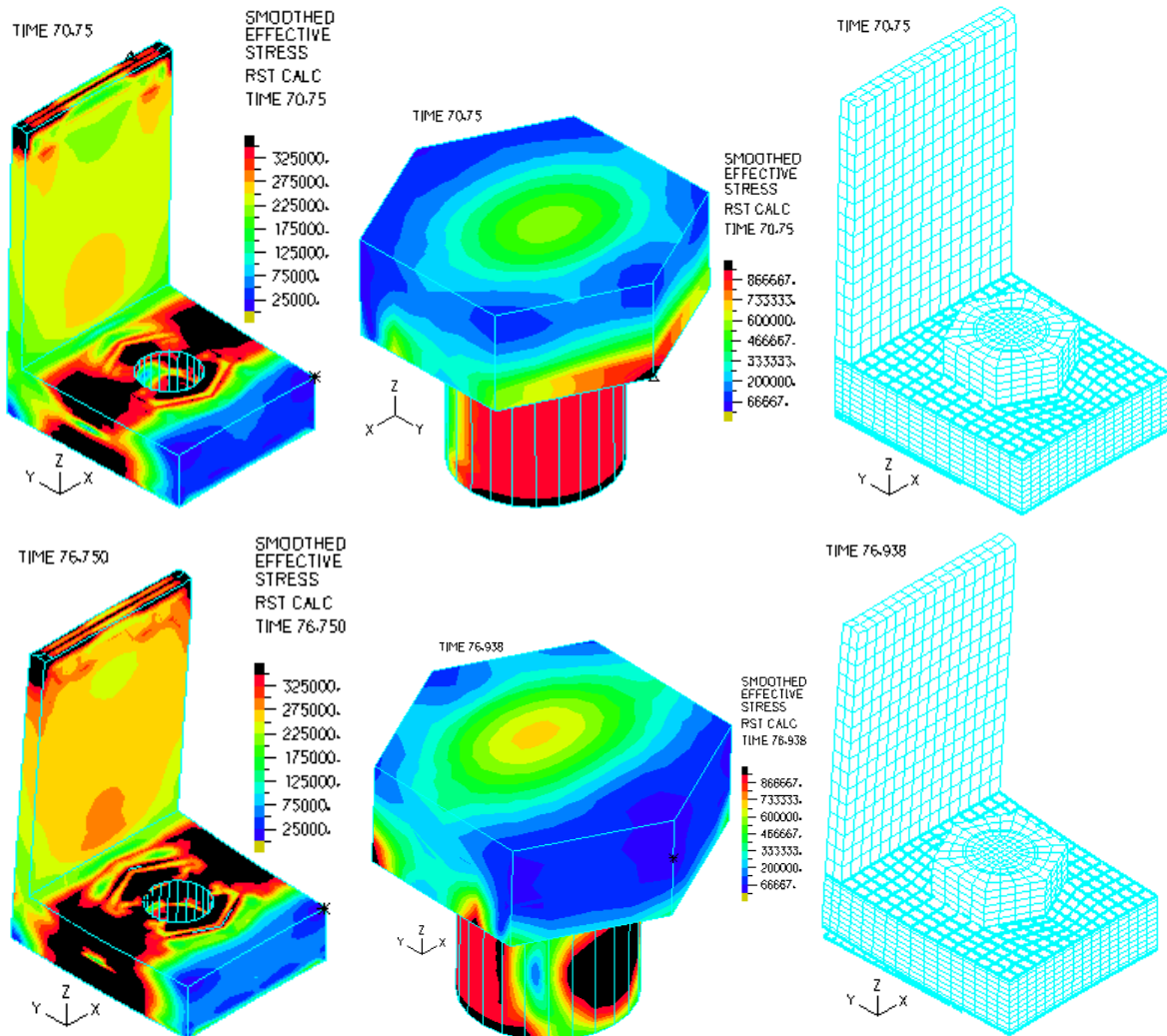




Σχήμα 4-48: δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για πάχος ελάσματος 35mm





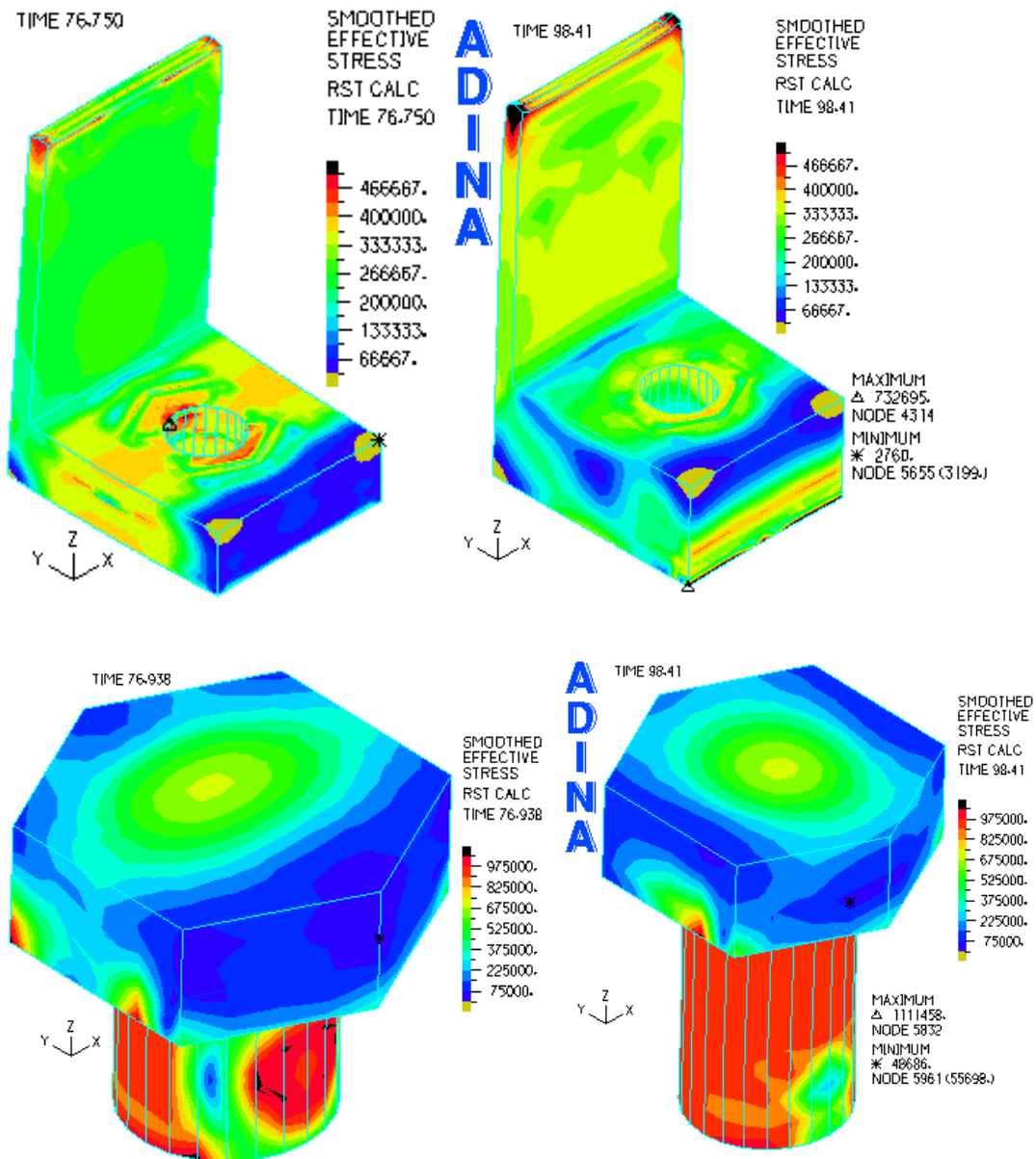


Σχήμα 4-49: εικόνες ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων στα τέσσερα χαρακτηριστικά σημεία του σχήματος 4-48 για πάχος ελάσματος 35mm

Στο σχήμα 4-48 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για το λεπτότερο πάχος ελάσματος. Είναι φανερή η μεγάλη πτώση της δυσκαμψίας η οποία κάνει την σύνδεση ιδιαίτερα εύκαμπτη. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4-49 για το σημείο 1 του σχήματος 4-48, πολύ νωρίς εμφανίζεται η διαρροή στο έλασμα γύρω από την οπή του κοχλίου λόγω της ισχυρής προέντασης. Η διαρροή εξαπλώνεται σε όλο και μεγαλύτερο μέρος του ελάσματος (σημείο 2) ενώ ο κοχλίας δεν έχει διαρρεύσει ακόμη. Στο σημείο 3 του δρόμου ισορροπίας όπου η πτώση της κλίσης του διαγράμματος είναι πλέον έντονη, η διαρροή στο έλασμα επεκτείνεται σε όλο το ύψος του γύρω απ' τον κοχλίο, αλλά και ο κοχλίας μπαίνει πλέον στην πλαστική περιοχή. Στο σημείο 4 είναι πλέον έντονα ορατή και η αποκόλληση του ελάσματος.

Στο σχήμα 4-50 είναι η κατανομή των τάσεων για τα δύο ακραία πάχη ελάσματος σε κλίμακα τέτοια ώστε να μαύρο εμφανίζονται οι περιοχές που έχουν ξεπεράσει το όριο θραύσης του υλικού. Στο τέλος της φόρτισης φαίνεται ότι ενώ το έλασμα πάχους 60mm εμφανίζει σε συγκεκριμένες περιοχές υπέρβαση του ορίου θραύσης, η υπέρβαση αυτή για το έλασμα των 35mm είναι πολύ τοπική. Ουσιαστικά, η αστοχία στο λεπτότερο έλασμα οφείλεται στην εκτεταμένη διαρροή του σε όλο το ύψος του. Ενώ το παχύτερο έλασμα παρουσιάζει την υπέρβαση σε συγκεκριμένες θέσεις και σε μεγάλο

μέρος του οι τάσεις διατηρούνται ιδιαίτερα χαμηλές. Επιπλέον, για το λεπτότερο πάχος ελάσματος ο κοχλίας υπερβαίνει το όριο θραύσης του σε μεγαλύτερο μέρος του.

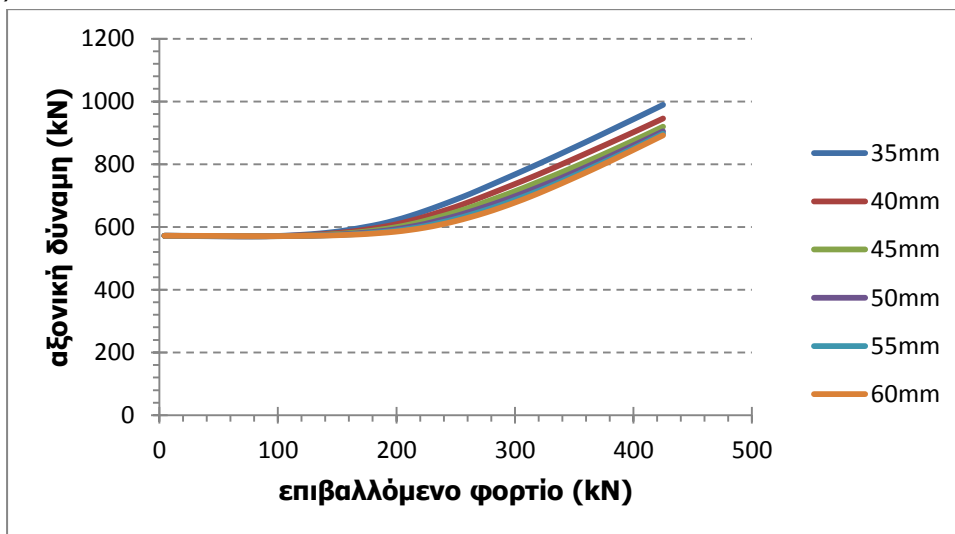


Σχήμα 4-50: τοπική υπέρβαση του ορίου θραύσης για το οριακό φορτίο για πάχος ελάσματος 35mm (αριστερά) και 60mm (δεξιά)

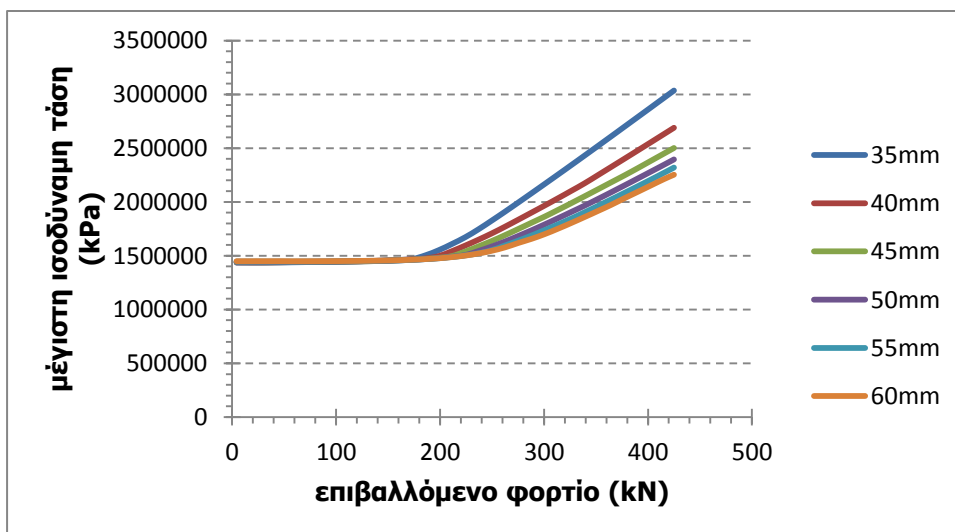
#### 4.4.2 Επιρροή του πάχους του ελάσματος σε χαρακτηριστικά μεγέθη

Για την αξιολόγηση της επιρροής του πάχους του ελάσματος στον τρόπο παραλαβής του φορτίου από την σύνδεση το υλικό λήφθηκε απείρως ελαστικό τόσο για το έλασμα όσο και για τους κοχλίες. Το επιβαλλόμενο φορτίο στην σύνδεση είναι 25kN ανά κόμβο, δηλαδή 425kN συνολικό φορτίο.

Στο σχήμα 4-51 δίνεται ο δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του κοχλία για διαφορετικά πάχη ελάσματος. Η αρχική τιμή του διαγράμματος που αντιστοιχεί σε μηδενικό επιβαλλόμενο φορτίο είναι κοινή για όλα τα διαφορετικά πάχη ελασμάτων, δεδομένου ότι όλα τα μοντέλα έχουν την ίδια τιμή δύναμης προέντασης. Το μέγεθος του φορτίου στο οποίο η αξονική δύναμη του κοχλία παύει να είναι σταθερή διαφέρει ανάλογα με το πάχος του ελάσματος. Όσο λεπτότερο είναι το έλασμα τόσο μικρότερη είναι η ανακατανομή τάσεων που λαμβάνει χώρα. Οι διαφορές βέβαια στην τιμή αυτή του φορτίου δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Επίσης, για μεγάλη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου η τιμή της αξονικής δύναμης που θα αναπτυχθεί στον κοχλία αυξάνεται όσο μικρότερο είναι το πάχος του ελάσματος.

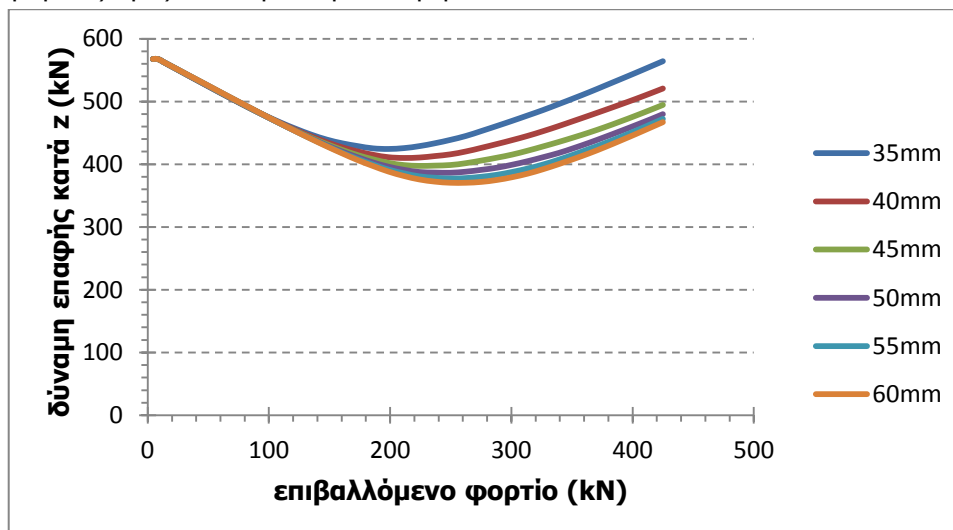


Σχήμα 4-51: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του κοχλία για διαφορετικά πάχη ελάσματος

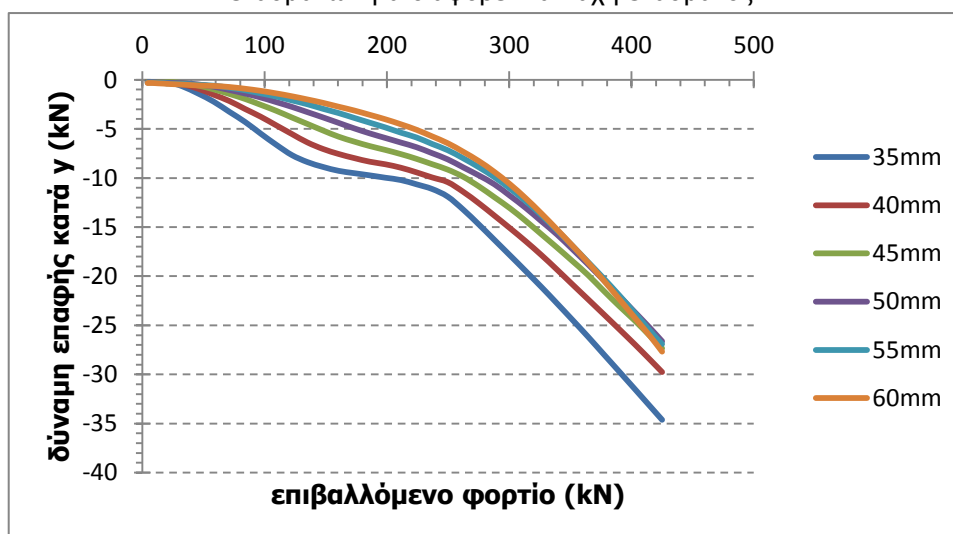


Σχήμα 4-52: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης του κοχλία για διαφορετικά πάχη ελάσματος

Στο σχήμα 4-52 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στον κοχλία για τα διαφορετικά πάχη ελάσματος ο οποίος έχει την ίδια μορφή με την αξονική δύναμη στον κοχλία. Όσο μικρότερο είναι το πάχος του ελάσματος τόσο μεγαλύτερη είναι η τάση που θα αναπτυχθεί στον κοχλία για μεγάλες τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου.

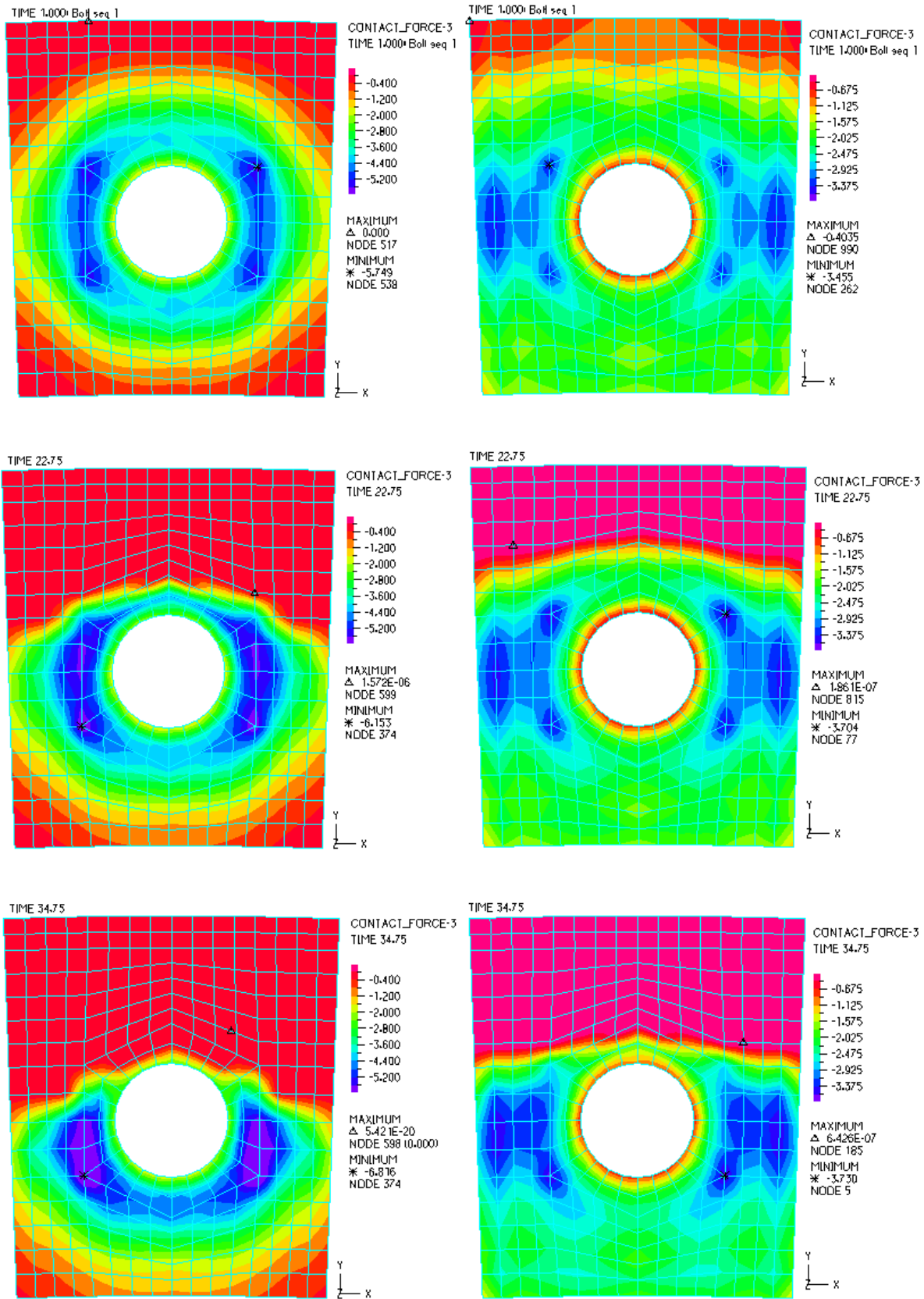


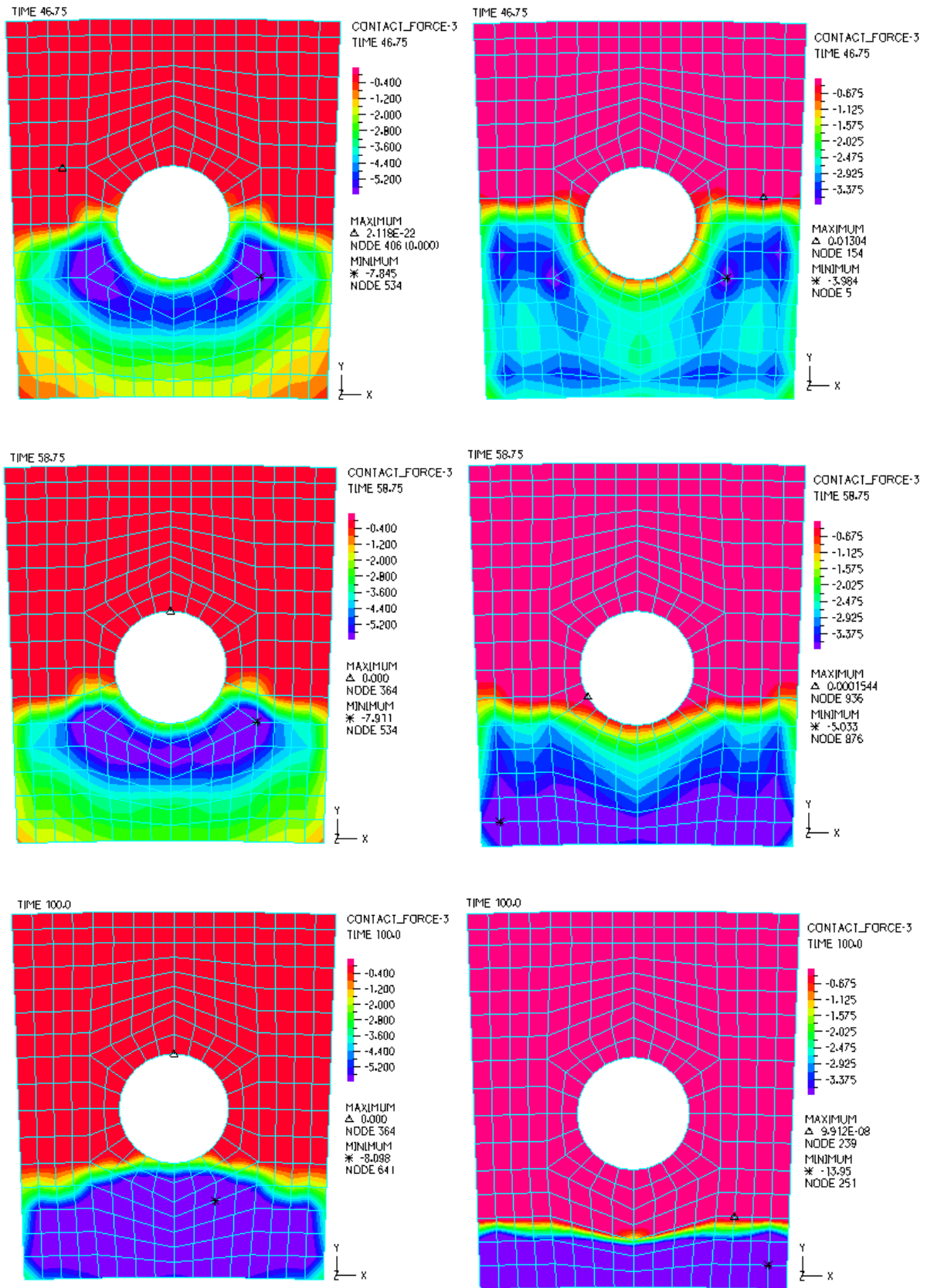
Σχήμα 4-53: δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για διαφορετικά πάχη ελάσματος



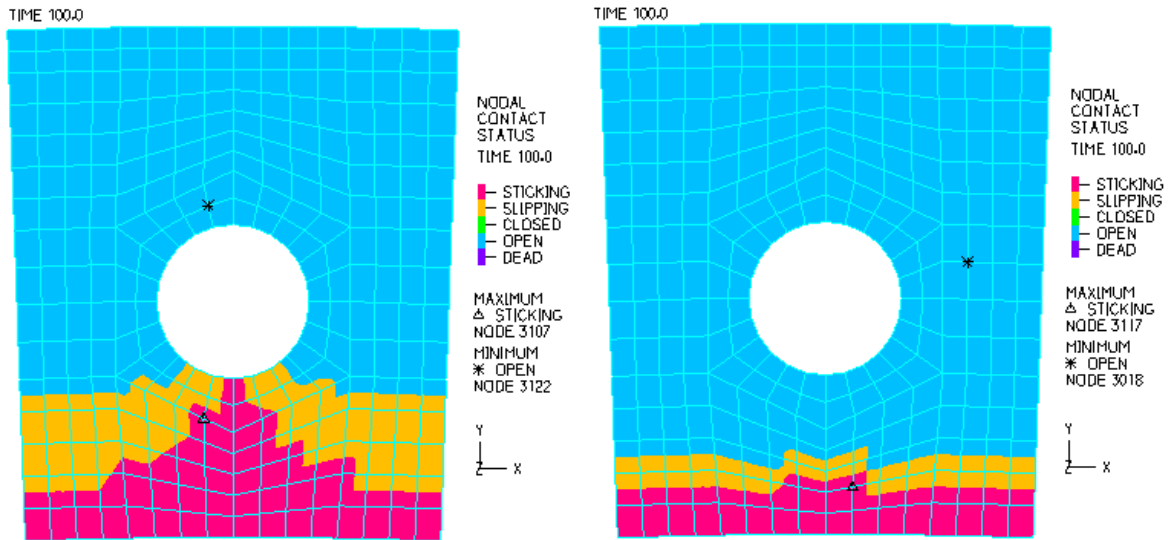
Σχήμα 4-54: δρόμος ισορροπίας των διαμηκών δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για διαφορετικά πάχη ελάσματος

Στο σχήμα 4-53 δίνεται το διάγραμμα των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου για τα διάφορα πάχη του ελάσματος. Από την μορφή των σχημάτων 4-51 και 4-53 συμπεραίνεται ότι για το μικρότερο πάχος ελάσματος η ανακατανομή που πραγματοποιείται για την παραλαβή του φορτίου είναι μικρή. Μεγαλύτερο μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται από τον κοχλία για πάχος ελάσματος 35mm απ' ότι για πάχος ελάσματος 60mm. Προκειμένου να γίνει αντιληπτό το γεγονός αυτό, στο σχήμα 4-55 είναι η παρουσίαση της κατανομής των δυνάμεων αυτών. Για τις ίδιες χρονικές στιγμές έχουμε αριστερά τις δυνάμεις για πάχος ελάσματος 35mm και δεξιά για πάχος ελάσματος 60mm. Από τις εικόνες αυτές παρατηρείται εκτός από το θέμα της ανακατανομής, ότι στο τέλος της φόρτισης το κομμάτι του ελάσματος που βρίσκεται σε επαφή είναι μεγαλύτερο για το λεπτότερο έλασμα. Στο σχήμα 4-56 φαίνονται με ροζ και κίτρινο χρώμα το τμήμα του ελάσματος που βρίσκεται σε επαφή.

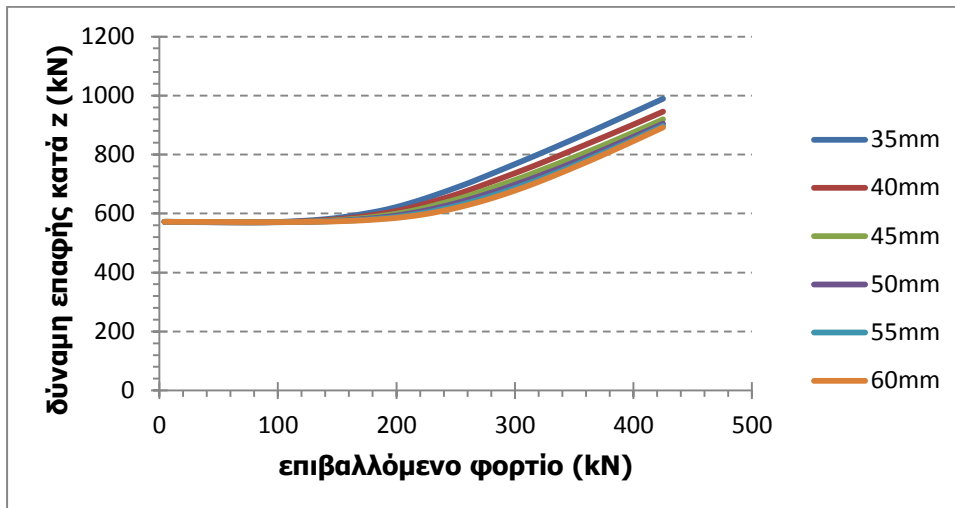




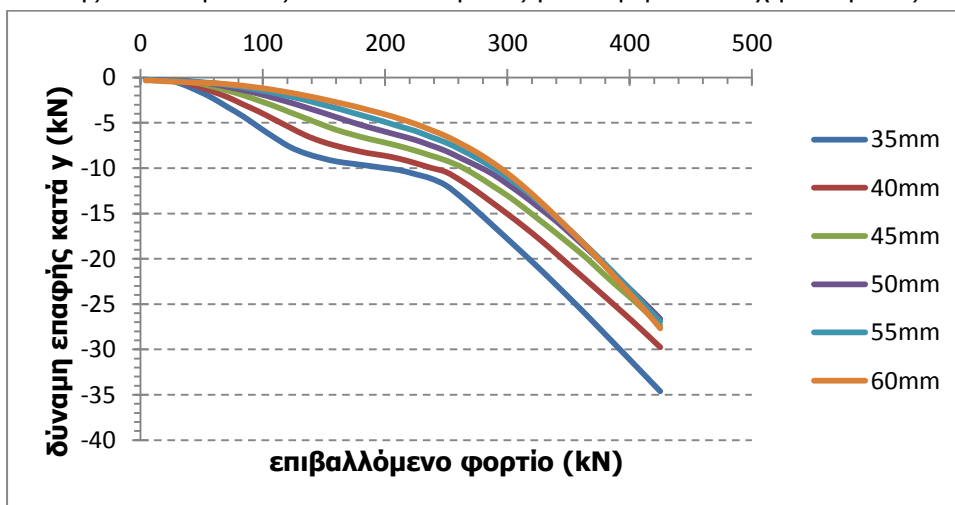
Σχήμα 4-55: εικονική κατανομή των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για πάχος ελάσματος 35mm (αριστερά) και 60mm (δεξιά)



Σχήμα 4-56: επιφάνειες επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων για πάχος ελάσματος 35mm (αριστερά) και 60mm (δεξιά)

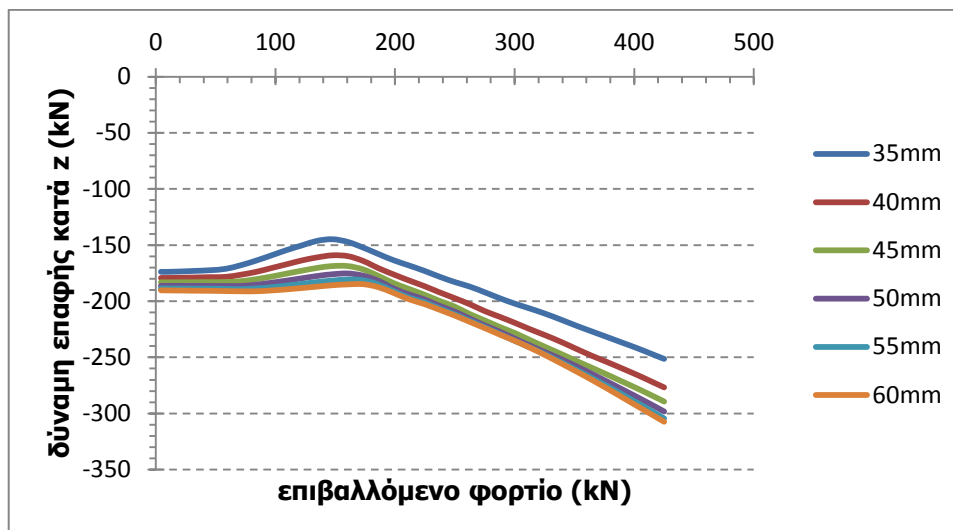


Σχήμα 4-57: δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και της άνω επιφάνειας του άνω ελάσματος για διαφορετικά πάχη ελάσματος

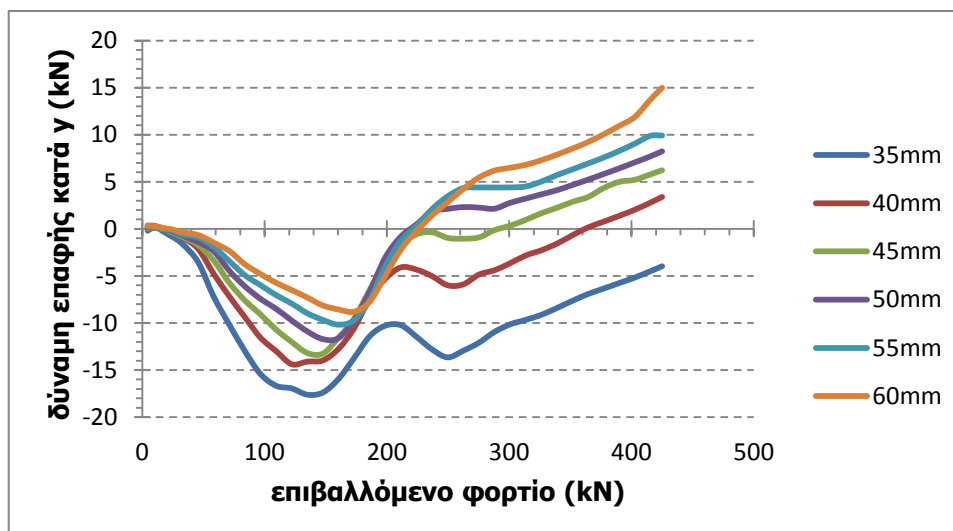


Σχήμα 4-58: δρόμος ισορροπίας των διαμηκών δυνάμεων επαφής μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και της άνω επιφάνειας του άνω ελάσματος για διαφορετικά πάχη ελάσματος





Σχήμα 4-59: δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ της άντυγας του ελάσματος και του κορμού του κοχλίου για διαφορετικά πάχη ελάσματος



Σχήμα 4-60: δρόμος ισορροπίας των διαμηκών δυνάμεων επαφής μεταξύ της άντυγας του ελάσματος και του κορμού του κοχλίου για διαφορετικά πάχη ελάσματος

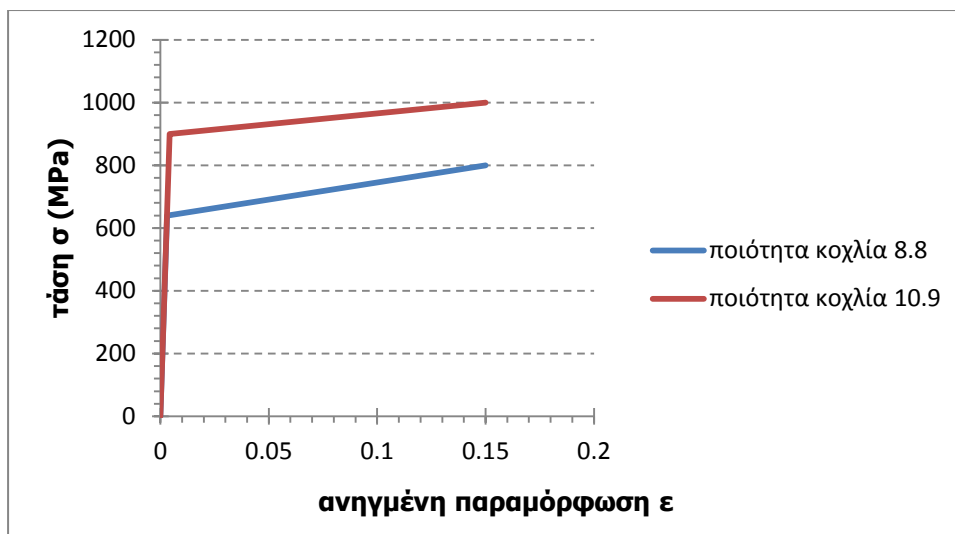
Στα σχήματα 4-57 έως και 4-60 είναι οι δυνάμεις επαφής της κεφαλής του κοχλίου με το έλασμα και της άντυγας του ελάσματος με τον κορμό. Παρατηρείται γενικά ότι όσο μικρότερο είναι το πάχος του ελάσματος τόσο μεγαλύτερες κατά απόλυτη τιμή είναι οι δυνάμεις που θα αναπτυχθούν και στις δύο διευθύνσεις για την διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων και της κεφαλής του κοχλίου με το έλασμα. Αυτό δεν ισχύει μόνο στην περίπτωση των εγκάρσιων δυνάμεων μεταξύ της άντυγας του ελάσματος και του κορμού του κοχλίου. Εκεί όσο μεγαλύτερο είναι το πάχος του ελάσματος τόσο μεγαλύτερες είναι οι συνολικές δυνάμεις επαφής που θα αναπτυχθούν.

Καταλήγοντας, το πάχος του ελάσματος είναι μία παράμετρος η οποία επηρεάζει τόσο την αντοχή της σύνδεσης όσο και τα τελικά μεγέθη των χαρακτηριστικών της σύνδεσης. Ωστόσο, τέτοιες μεταβολές επιφέρει μόνο η χρησιμοποίηση ελασμάτων πολύ μικρού πάχους. Για μεσαία πάχη ελάσματος οι μεταβολές δεν είναι τόσο έντονες.



#### 4.5 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ

Η σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας των τμημάτων του πυλώνα είναι κατηγορίας Ε συνδέσεων εφελκυσμού με προένταση. Στις κοινές συνδέσεις (χωρίς προένταση) η μεταφορά των δυνάμεων γίνεται μέσω επαφής της άντυγας του ελάσματος με τον κορμό του κοχλία. Σε αυτή την κατηγορία συνδέσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοχλίες ποιότητας από 4.6 μέχρι και 10.9 και δεν απαιτείται ειδική επεξεργασία των επιφανειών επαφής. Όμως στην περίπτωση των συνδέσεων των πυλώνων ανεμογεννητριών οι κοχλίες είναι πάντοτε προεντεταμένοι λόγω του φαινομένου της κόπωσης. Σε αυτή την περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοχλίες υψηλής ποιότητας μόνο, δηλαδή 8.8 ή 10.9. Και για αυτές τις δύο ποιότητες κοχλίες πραγματοποιήθηκαν οι παραμετρικές αυτής της κατηγορίας. Στο σχήμα 4-61 δίνεται ο καταστατικός νόμος του υλικού με την τάση διαρροής και θραύσης και τις αντίστοιχες ανηγμένες παραμορφώσεις για τις δύο ποιότητες κοχλία.



Σχήμα 4-61: καταστατικός νόμος του υλικού για τις δύο ποιότητες κοχλία

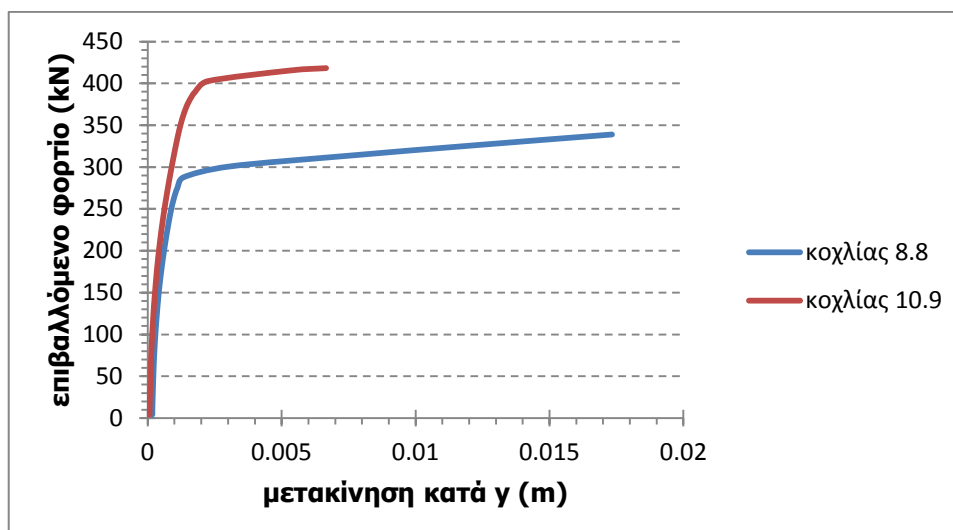
Η δύναμη προέντασης θα είναι διαφορετική δεδομένου ότι αλλάζει η εφελκυστική αντοχή του κοχλία  $f_{ub}$ .

Για ποιότητα κοχλία 8.8:  $F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s = 0.7 \times 80 \frac{kN}{cm^2} \times 8.17cm^2 \rightarrow F_{p,c} = 457.52kN$

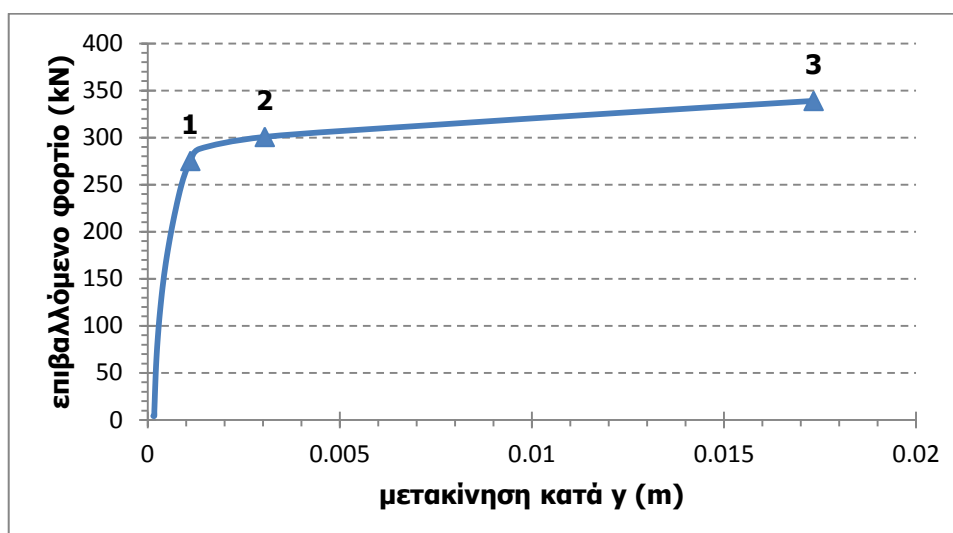
Για ποιότητα κοχλία 10.9:  $F_{p,c} = 571.9kN$

Το φορτίο το οποίο ασκείται στην σύνδεση είναι το οριακό και το μόνο που αλλάζει είναι η ποιότητα κοχλία και κατ' επέκταση και η δύναμη προέντασης.

Στο σχήμα 4-62 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για τις δύο εξεταζόμενες ποιότητες κοχλία. από το διάγραμμα αυτό φαίνεται ότι η ποιότητα του κοχλία επηρεάζει την τιμή του οριακού φορτίου της σύνδεσης. Η αρχική δυσκαμψία της σύνδεσης δεν μεταβάλλεται και γενικά η συμπεριφορά μέχρι την διαρροή του κοχλία είναι ίδια. Όσο όμως μειώνεται η ποιότητα του κοχλία η αντοχή της σύνδεσης μειώνεται και αυτή. Και οι παραμορφώσεις της σύνδεσης αυξάνονται δυσανάλογα. Στο σχήμα 4-63 ακολουθεί ο δρόμος ισορροπίας για ποιότητα κοχλία 8.8 με τα χαρακτηριστικά σημεία στα οποία θα εξετασθούν οι εικόνες των ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων.

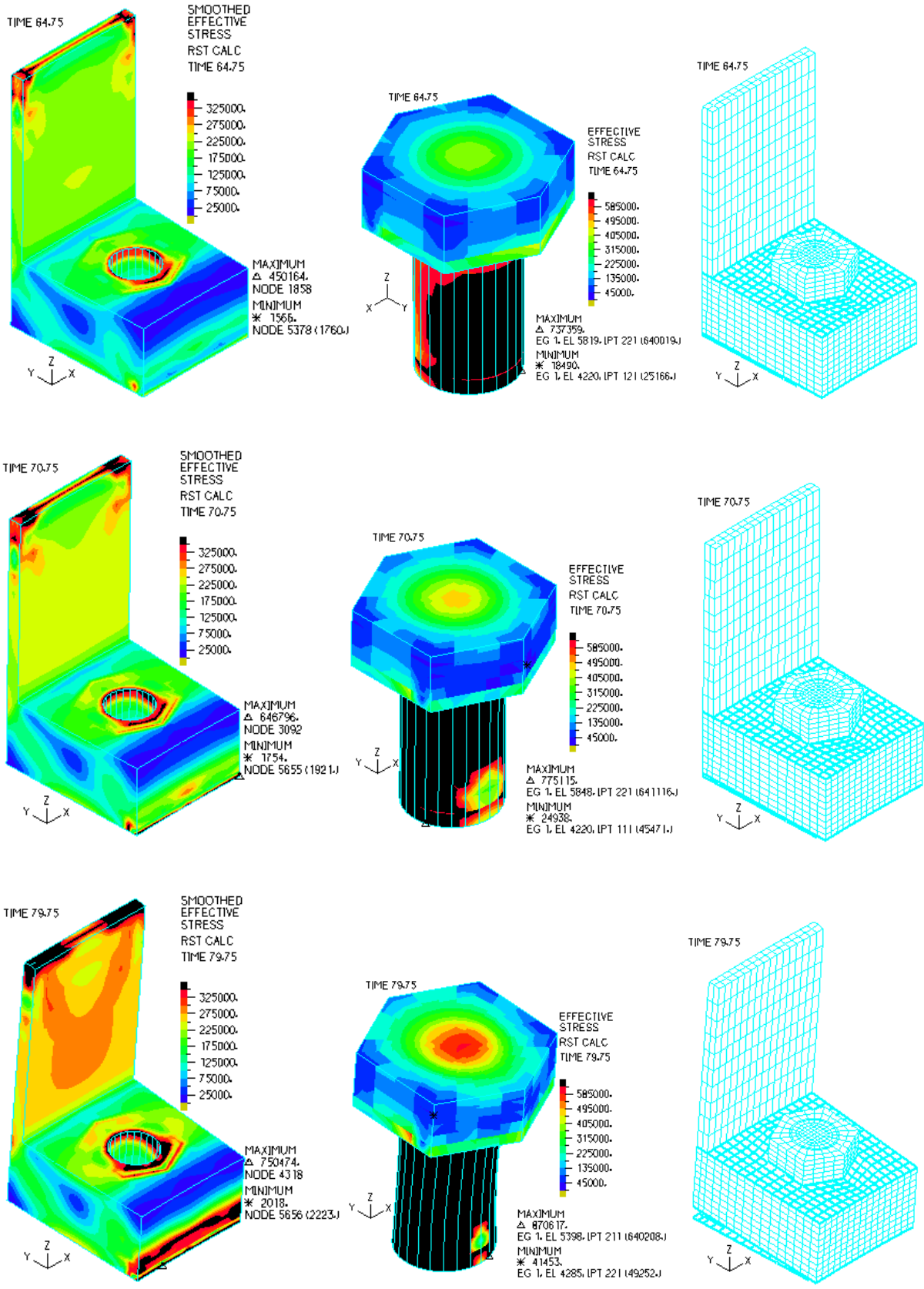


Σχήμα 4-62: δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για ποιότητα κοχλίας 8.8 και 10.9

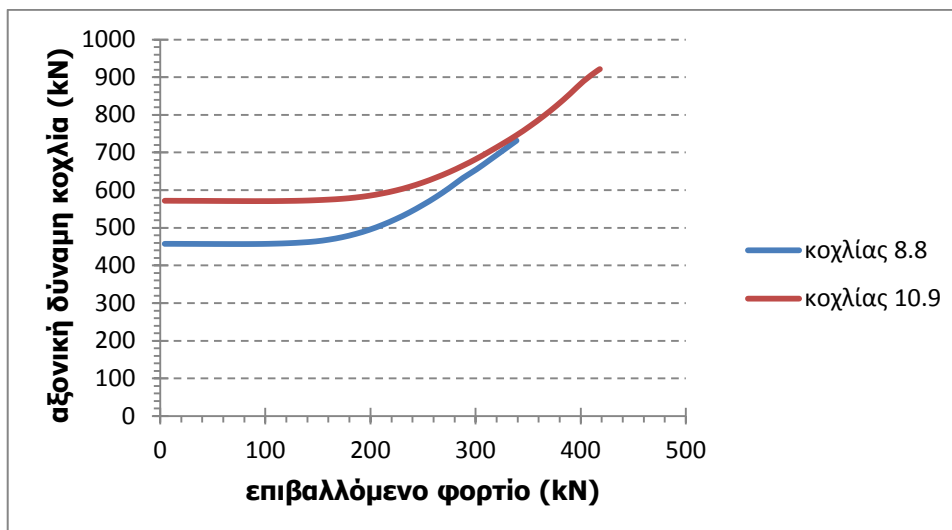


Σχήμα 4-63: δρόμος ισορροπίας της σύνδεσης για ποιότητα κοχλίας 8.8

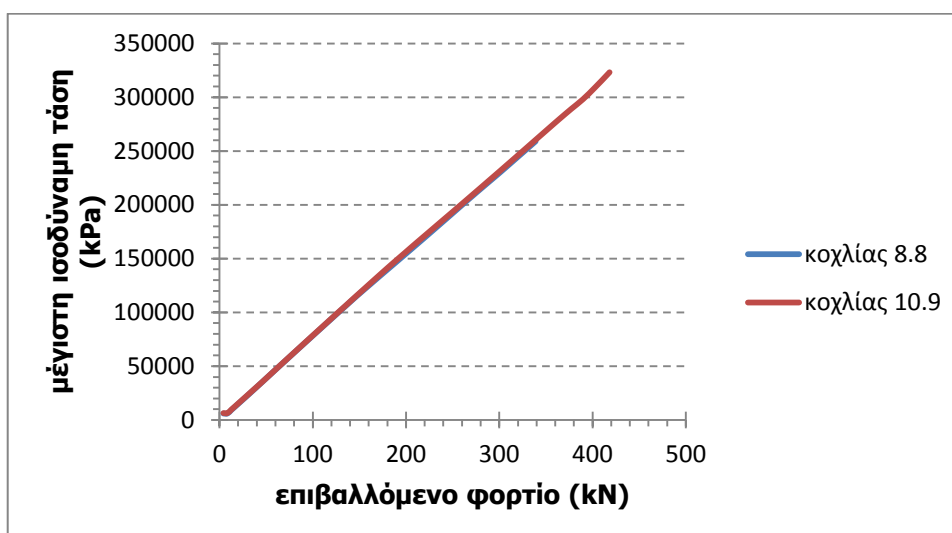
Οι εικόνες του σχήματος 4-64 δείχνουν ότι η διαρροή εμφανίζεται πρώτα στον κοχλία. Οι τάσεις στο έλασμα και στον πυλώνα είναι ίδιες με αυτές του αρχικού μοντέλου. Όμως ήδη από το σημείο 1 του δρόμου ισορροπίας για ποιότητα κοχλίας 8.8 ο κορμός του κοχλίας έχει διαρρεύσει ο μισός ενώ μέχρι το σημείο 2 η διαρροή έχει επεκταθεί σχεδόν σε όλο το ύψος του. Γι' αυτό και στο σημείο 2 η κλίση του δρόμου ισορροπίας πέφτει κατακόρυφα και τέλος στο σημείο 3 είναι έντονες και οι παραμορφώσεις της σύνδεσης. Μεγαλύτερες και από εκείνες που αναπτύχθηκαν για ποιότητα κοχλίας 10.9 για το οριακό φορτίο.



Σχήμα 4-64: εικόνες ισοδύναμων τάσεων και παραμορφώσεων στα τρία χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας για ποιότητα κοχλίας 8.8



Σχήμα 4-65: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του κοχλία για ποιότητα κοχλία 8.8 και 10.9



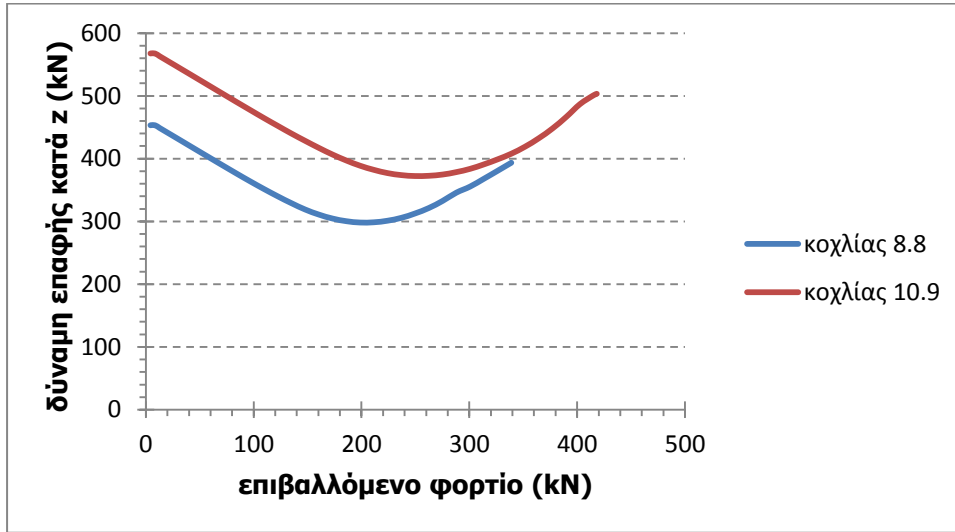
Σχήμα 4-66: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση για ποιότητα κοχλία 8.8 και 10.9

Στο σχήμα 4-65 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του κοχλία. τα δύο διαγράμματα ξεκινούν από διαφορετικές τιμές δεδομένου ότι διαφέρει η δύναμη προέντασης του κοχλία, όμως τελικά συμπίπτουν οι τιμές των δυνάμεων. Αν η σύνδεση άντεχε το ίδιο φορτίο για διαφορετική ποιότητα κοχλία τότε η αξονική δύναμη του κοχλία θα ήταν ίδια ανεξάρτητα από την ποιότητα του κοχλία. και είναι λογικό, αφού για μεγάλη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου η αξονική του κοχλία είναι ανεξάρτητη από την δύναμη προέντασης.

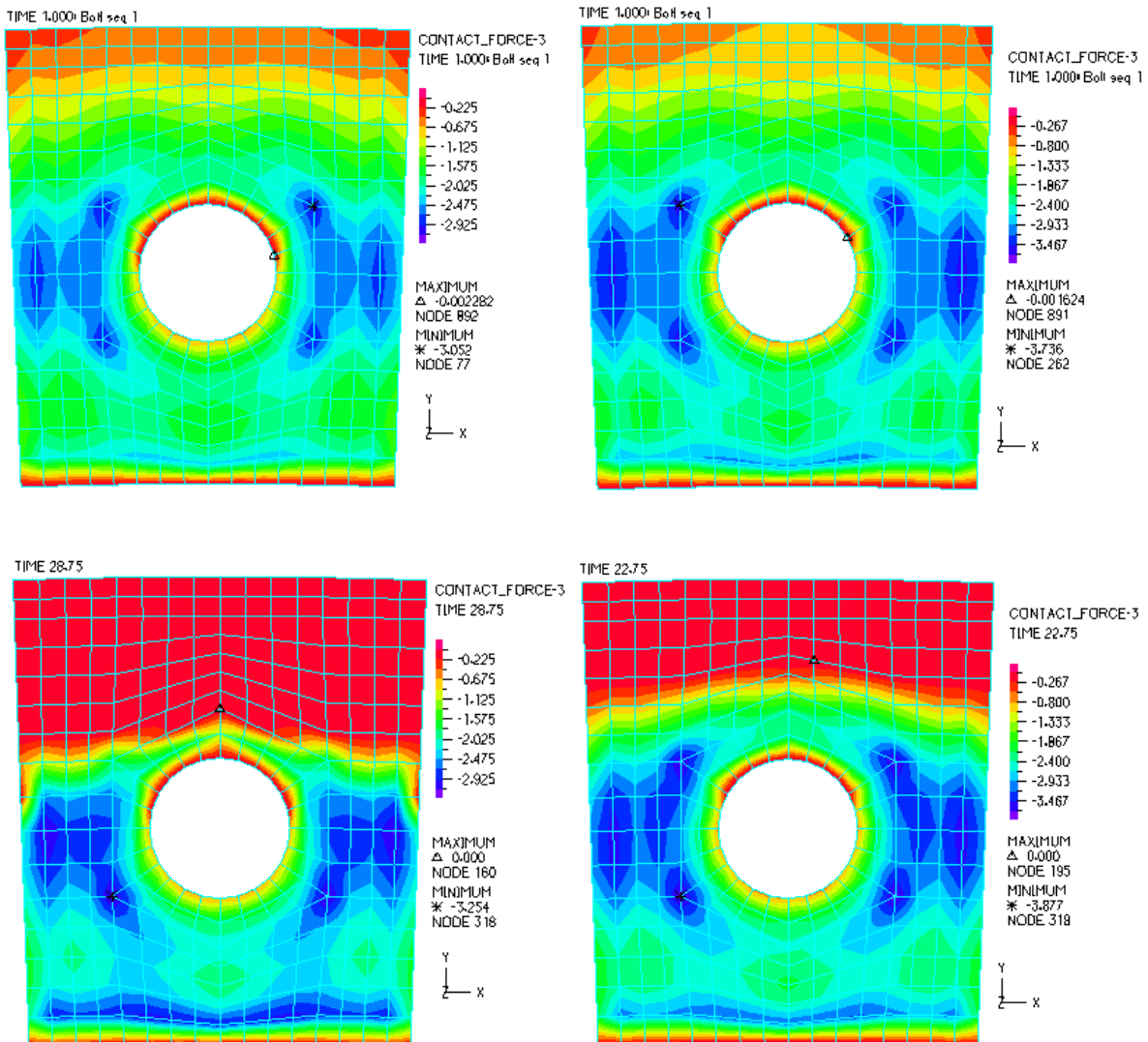
Στο σχήμα 4-66 εμφανίζεται ο δρόμος ισορροπίας της ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση, όπου φαίνεται ότι είναι ανεξάρτητη από την ποιότητα του κοχλία. οι τάσεις που θα αναπτυχθούν στον κοχλία είναι ακριβώς ίδιες για ίδια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου.

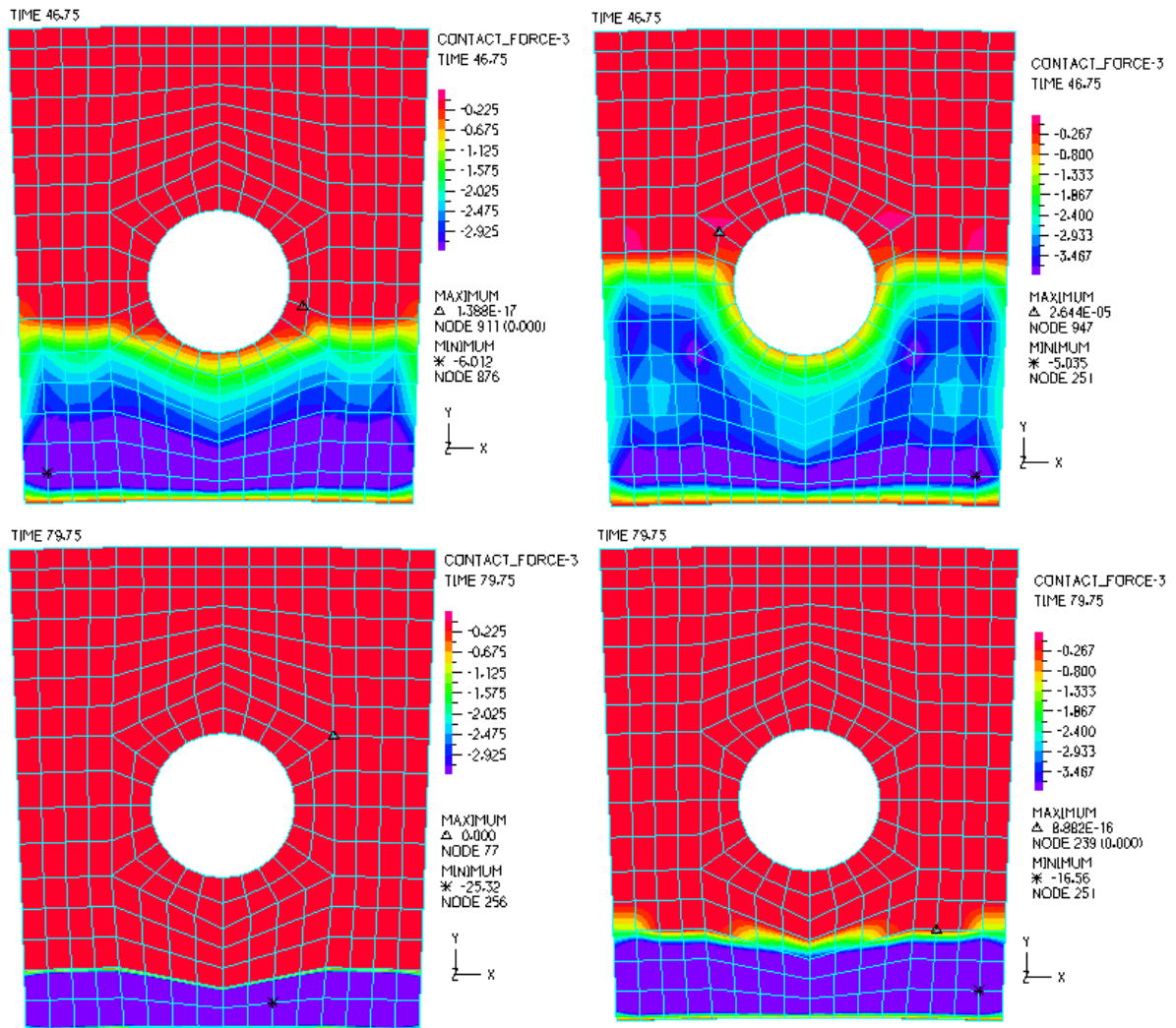
Στο σχήμα 4-67 ακολουθεί το διάγραμμα των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων και στο σχήμα 4-68 οι εικόνες των εγκάρσιων αυτών δυνάμεων σε χαρακτηριστικές θέσεις του διαγράμματος. Παρατηρείται ότι η ανακατανομή για την χαμηλότερη ποιότητα κοχλία ολοκληρώνεται για μικρότερη τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου απ' ότι για την υψηλότερη. Και στο σχήμα 4-67 φαίνεται ότι οι τελικές τιμές του διαγράμματος είναι ανεξάρτητες από την ποιότητα του

κοχλία στην υποθετική περίπτωση βέβαια που το φορτίο για ποιότητα κοχλία 8.8 μπορούσε να αυξηθεί περαιτέρω.

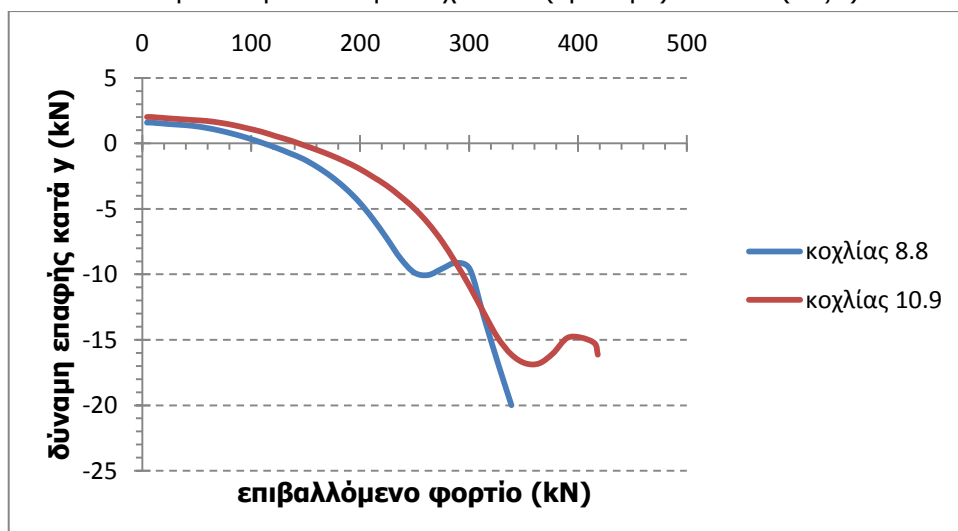


Σχήμα 4-67: δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για ποιότητα κοχλία 8.8 και 10.9

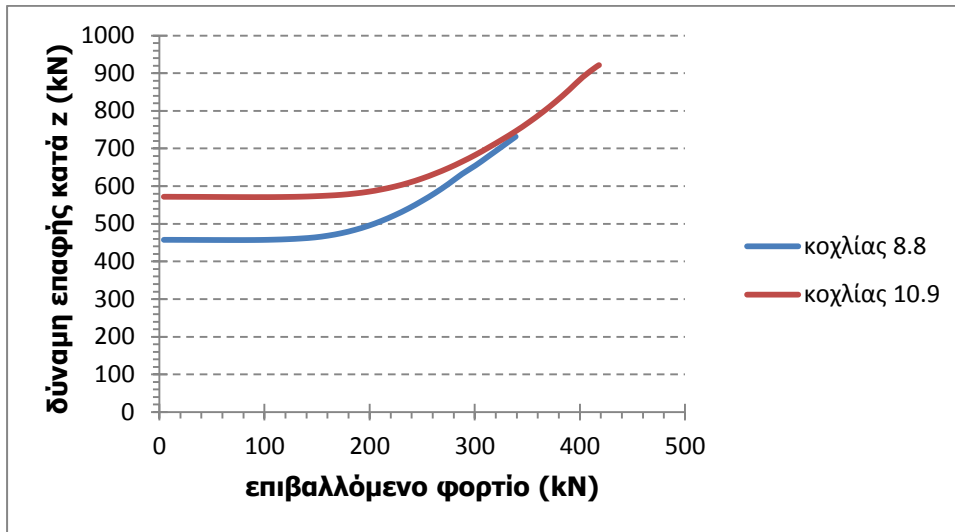




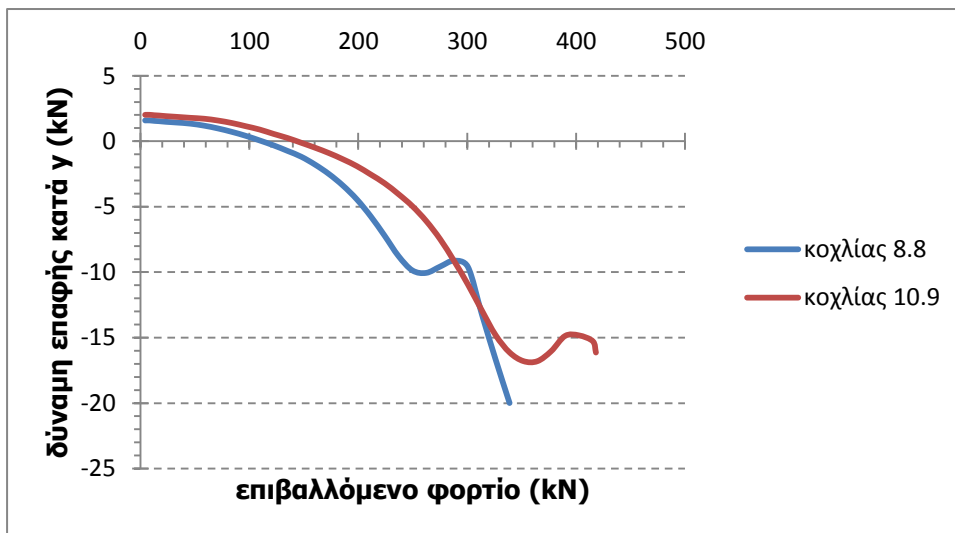
Σχήμα 4-68: εικονική παρουσίαση των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για ποιότητα κοχλίας 8.8 (αριστερά) και 10.9 (δεξιά)



Σχήμα 4-69: δρόμος ισορροπίας διαμηκών δυνάμεων επαφής στην διεπιφάνεια των δύο ελασμάτων για ποιότητα κοχλίας 8.8 και 10.9



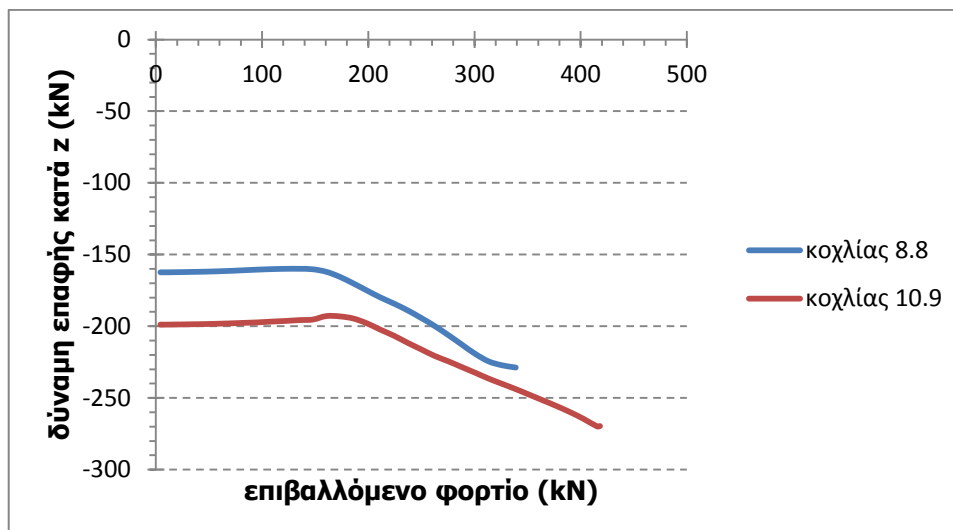
Σχήμα 4-70: δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και της άνω επιφάνειας του άνω ελάσματος για ποιότητα κοχλία 8.8 και 10.9



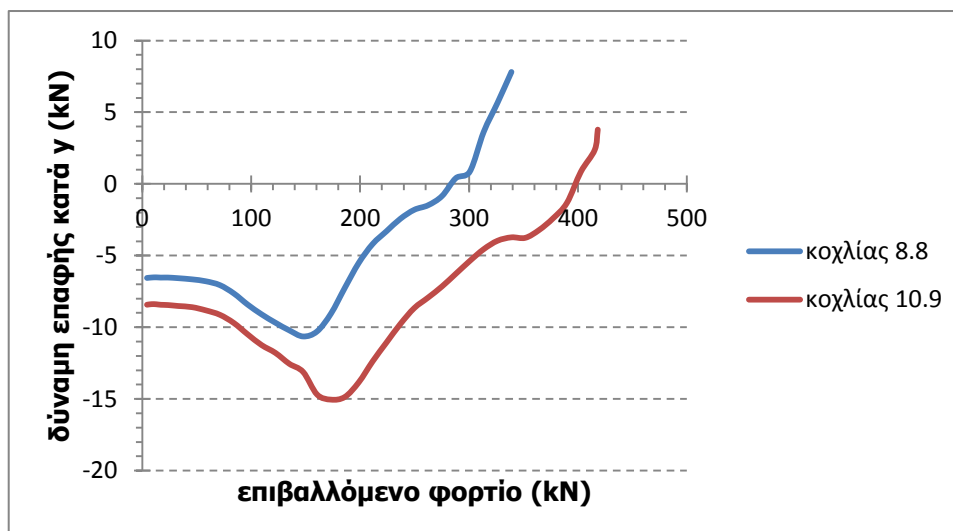
Σχήμα 4-71: δρόμος ισορροπίας των διαμηκών δυνάμεων επαφής μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και της άνω επιφάνειας του άνω ελάσματος για ποιότητα κοχλία 8.8 και 10.9

Στο σχήμα 4-69 είναι το διάγραμμα των διαμηκών δυνάμεων επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων, όπου παρατηρείται ότι για την χαμηλότερη ποιότητα κοχλία οι δυνάμεις που θα αναπτυχθούν θα είναι λίγο μεγαλύτερες, ωστόσο τα δύο διαγράμματα δεν διαφέρουν ιδιαίτερα μεταξύ τους.

Στα σχήματα 4-70 και 4-71 ακολουθούν οι δυνάμεις επαφής μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και της άνω επιφάνειας του άνω ελάσματος.



Σχήμα 4-72: δρόμος ισορροπίας των εγκάρσιων δυνάμεων επαφής μεταξύ της άντυνας του ελάσματος και του κορμού του κοχλίας για ποιότητα κοχλίας 8.8 και 10.9



Σχήμα 4-73: δρόμος ισορροπίας των διαμηκών δυνάμεων επαφής μεταξύ της άντυνας του ελάσματος και του κορμού του κοχλίας για ποιότητα κοχλίας 8.8 και 10.9





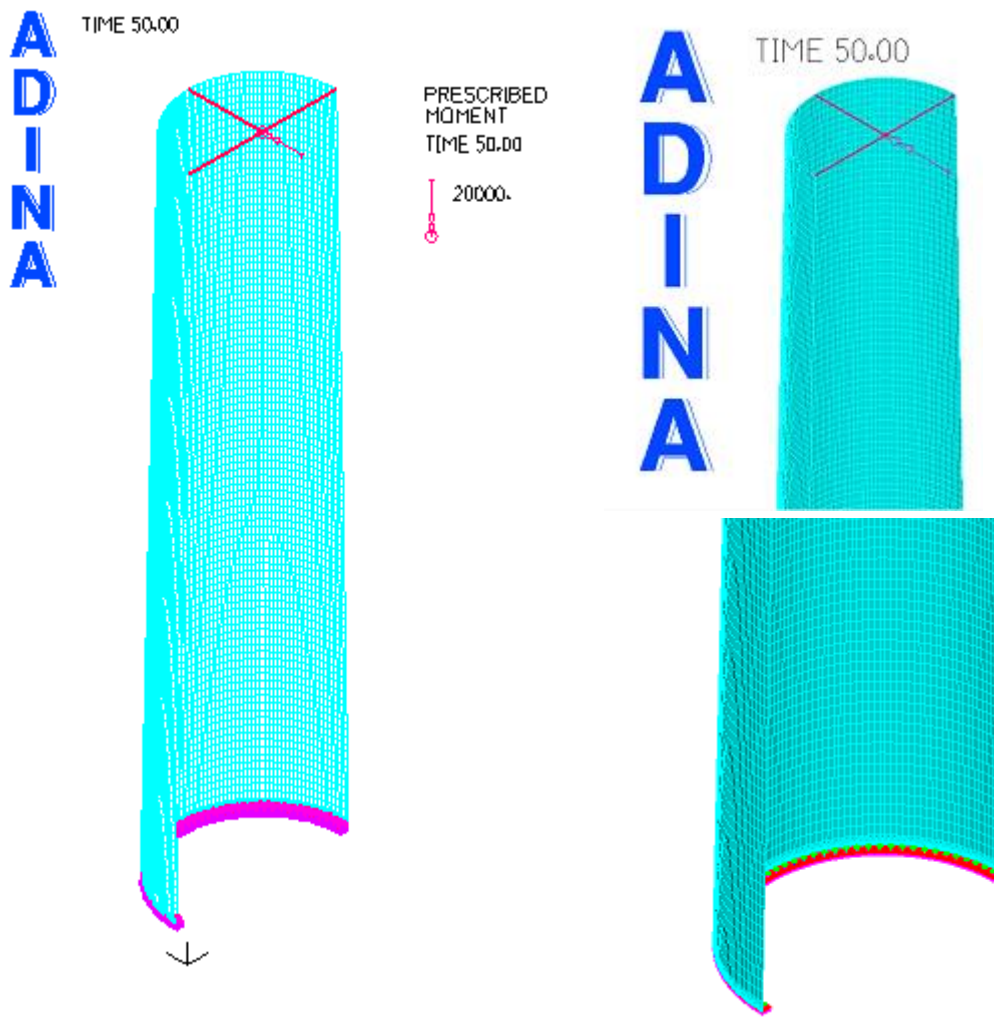
# 5 ΟΡΙΑΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ

## 5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΟΛΟΚΛΗΡΗΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΜΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

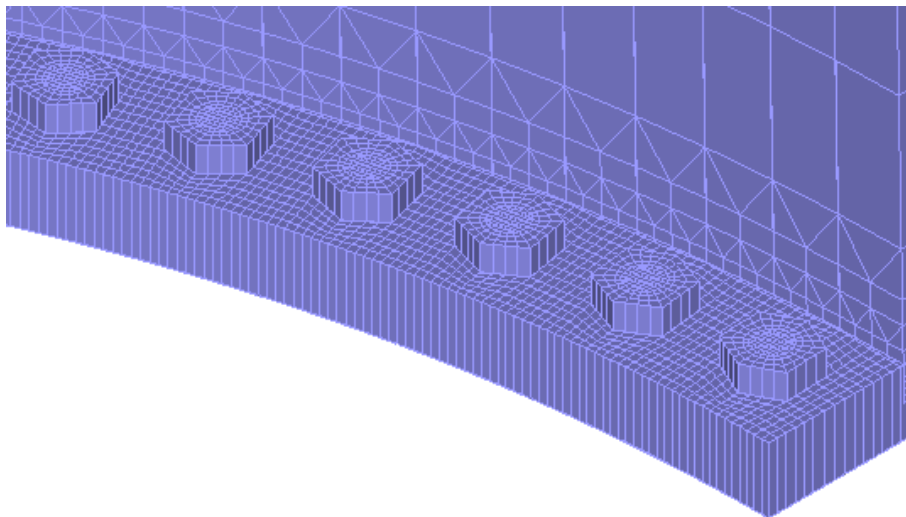
### 5.1.1 Περιγραφή του φορέα

Στα κεφάλαια 3 και 4 έγινε προσπάθεια διερεύνησης της συμπεριφοράς ενός τμήματος μόνο της σύνδεσης που περιελάμβανε ένα μόνο κοχλία και την αλληλεπίδραση αυτού με τα ελάσματα σύνδεσης. Στο παρόν κεφάλαιο προχωράμε στην προσομοίωση ολόκληρης της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας καθώς και μέρους του πυλώνα. Η προσομοίωση των ελασμάτων, της κεφαλής των κοχλιών και του πυλώνα έγινε με στοιχεία κελύφους, ενώ η προσομοίωση του κορμού των κοχλιών με στοιχεία δοκού. Οι αριθμητικές αναλύσεις εκτελέστηκαν με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA 9.0, ενώ η διακριτοποίηση του φορέα πραγματοποιήθηκε στο FEMAP v11.0.1.

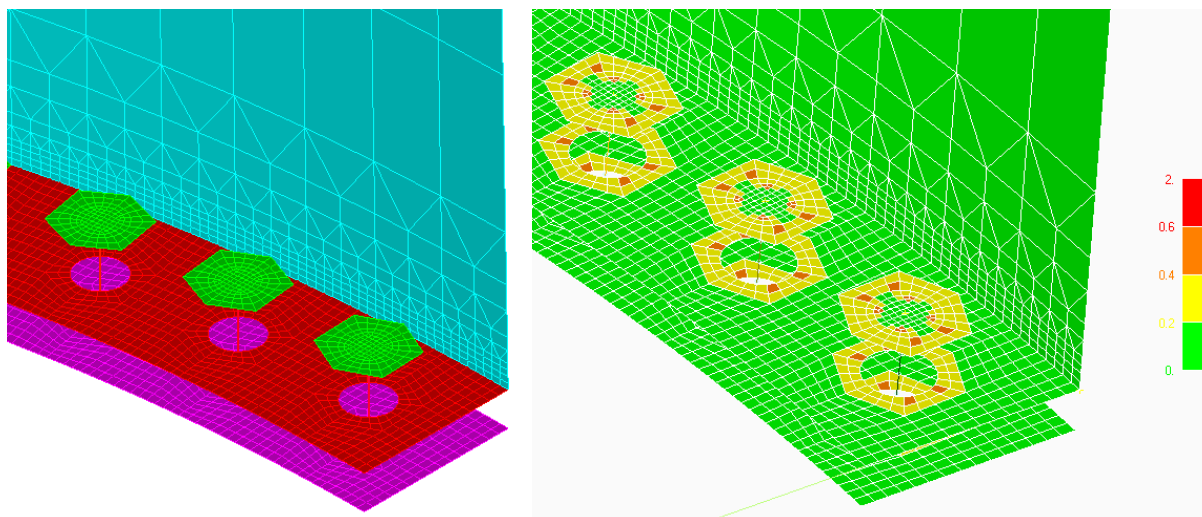
Η γεωμετρία η οποία προσομοιώθηκε περιλαμβάνει την κοχλιωτή σύνδεση των ελασμάτων στο υψηλότερο τμήμα του πυλώνα (στα 0,85 του ύψους του πυλώνα) κοντά στην κορυφή, καθώς επίσης και ένα μέρος του πυλώνα. Το ύψος αυτό του πυλώνα πρέπει να είναι μεγαλύτερο του  $3D$ , όπου  $D$  η διάμετρος του πυλώνα στο ύψος της σύνδεσης, προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή του. Στο σχήμα 5-1 παρουσιάζεται το προσομοίωμα σε τρισδιάστατη μορφή έτσι όπως εισήχθη στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων. Ενώ στο σχήμα 5-2 παρουσιάζεται η ποιότητα του πλέγματος η οποία επιτεύχθηκε. Δεξιά βλέπουμε την κλίμακα ποιότητας, όπου με πράσινο χρώμα παρουσιάζεται η καλύτερη πυκνότητα πλέγματος, ενώ με κόκκινο η χειρότερη. Θεωρητικά, θα μπορούσαμε να πυκνώσουμε κι άλλο το πλέγμα, ώστε να πετύχουμε καλύτερη ποιότητα όμως αυτό θα σήμαινε μεγάλο υπολογιστικό κόστος.



Σχήμα 5-1: προσομοίωμα στο ADINA κοχλιωτής σύνδεσης και μέρους του πυλώνα



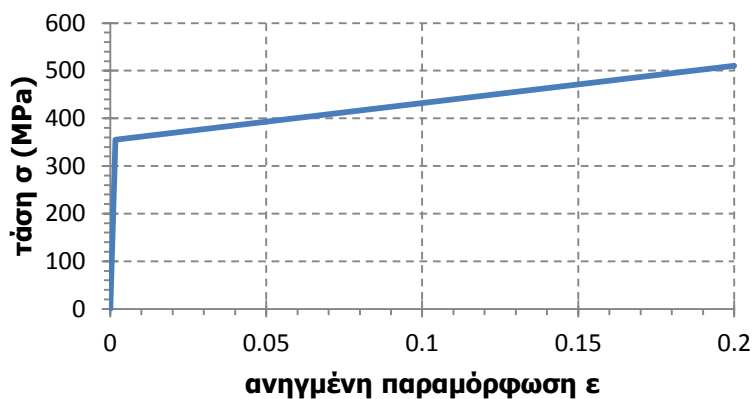
Σχήμα 5-1β: λεπτομέρεια του προσομοιώματος στο ADINA της κοχλιωτής σύνδεσης και μέρους του πυλώνα με τις πραγματικές τους διαστάσεις



Σχήμα 5-2: ποιότητα πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Η γεωμετρία του πυλώνα του προσομοιώματος είναι κωνική με διάμετρο στο κάτω μέρος, δηλαδή στην θέση της σύνδεσης 3,3m και διάμετρο στην κορυφή 2.83m. Ενώ το ύψος πυλώνα του προσομοιώματος είναι 12,36m. Στο σχήμα 5-5 παρουσιάζεται η κάτοψη της κοχλιωτής σύνδεσης με τις απαιτούμενες διαστάσεις, ενώ στο σχήμα 5-6 μία τομή του κοχλία και των ελασμάτων. Η εξωτερική διάμετρος του πυλώνα είναι 3,3m και η εσωτερική 3.04m. Το πάχος των ελασμάτων είναι 60mm και το πάχος του πυλώνα είναι 11mm. Τα 2 ελάσματα κοχλιώνονται με 90 προεντεταμένους κοχλίες M36 ποιότητας 10.9 ανά 4°. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για τα ελάσματα και τον πυλώνα είναι ελαστοπλαστικό με κράτυνση για χάλυβα ποιότητας S355 (σχήμα 5-3). Για τους κοχλίες ελήφθη υλικό απείρως ελαστικό.

	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]	$\epsilon_u$ [%]
S235	235	360	25
S275	275	430	23,5
S355	355	510	22
S420	420	520	
S460	460	540	



Σχήμα 5-3: καταστατικός νόμος του υλικού για χάλυβα S355

Η δύναμη προέντασης των κοχλιών είναι η μέγιστη, η οποία σύμφωνα με τον EC3 είναι ίση με το 70% της εφελκυστικής αντοχής, δηλαδή:

$$F_{p,c} = 0.7 \times f_{ub} \times A_s$$

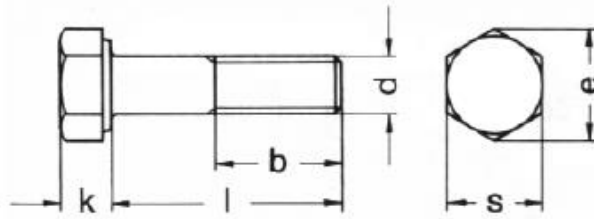
Όπου:  $f_{ub}$  είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και  $A_s$  το εμβαδόν σπειρώματος

Για κοχλία M36:  $A_s=8,17cm^2$

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

Οπότε,  $F_{p,c} = 0.7 \times \frac{1000000kN}{10000cm^2} \times 8.17cm^2 = 571.9kN$

Η γεωμετρία του κοχλία δίνεται αναλυτικά από τον κανονισμό DIN6914.



Για κοχλία M36:

$$k=23\text{mm}$$

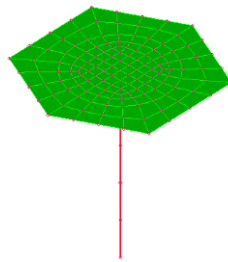
$$e=66.44\text{mm}$$

$$s=60\text{mm}$$

Όσον αφορά την ανοχή της οπής, εξαρτάται από την διάμετρο του κοχλία.

$$\text{Διάμετρος οπής: } d_o = d + a = 36\text{mm} + 3\text{mm} = 39\text{mm}$$

Όπου  $a=3\text{mm}$  για κοχλία M36



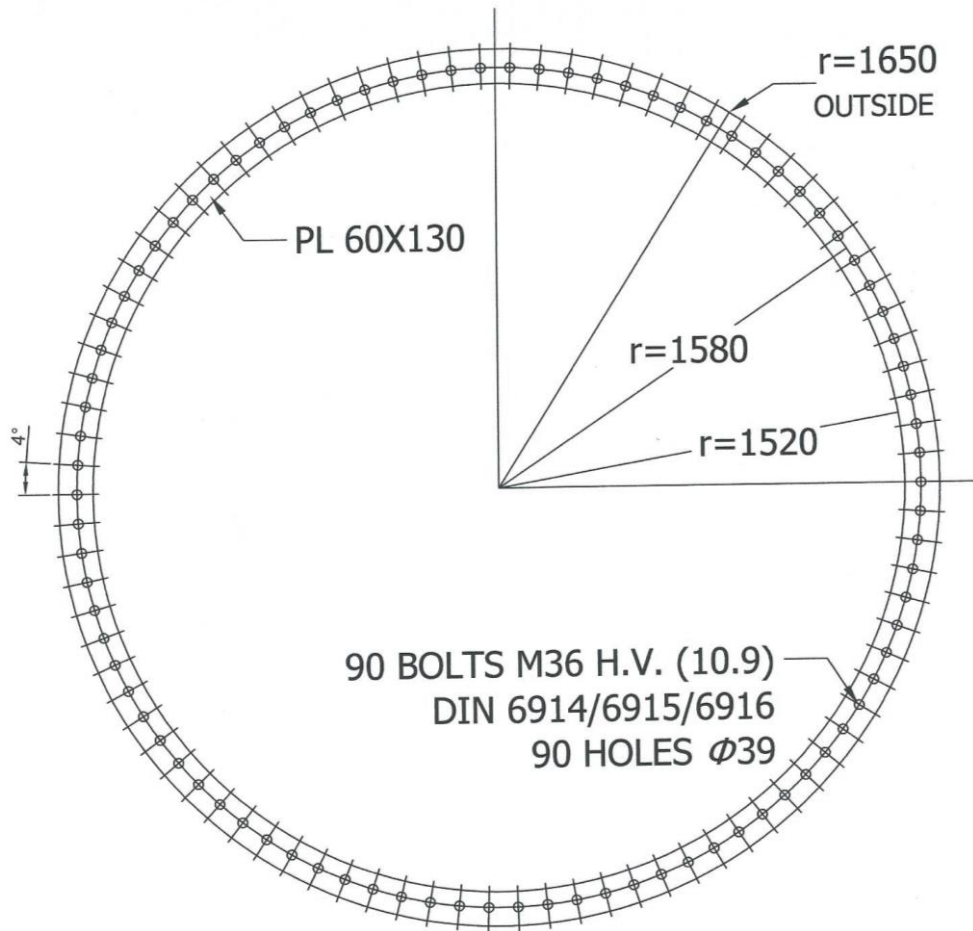
Σχήμα 5-4: προσομοίωμα κοχλία στο ADINA

Στο ADINA εισήχθησαν το πάνω και το κάτω έλασμα, η κεφαλή των κοχλιών και ο πυλώνας ως επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία (shell elements), ενώ ο κορμός των κοχλιών ως στοιχεία δοκού (beam elements). Στο σχήμα 5-2 αριστερά, εμφανίζεται με διαφορετικό χρώμα κάθε ένα από τα επιφανειακά στοιχεία που αναφέραμε. Οι επιφάνειες οι οποίες έχουν προσομοιωθεί είναι οι μέσες επιφάνειες των στοιχείων και επομένως οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι ίσες με το μισό πάχος του στοιχείου συν την ανοχή που υπάρχει μεταξύ τους.

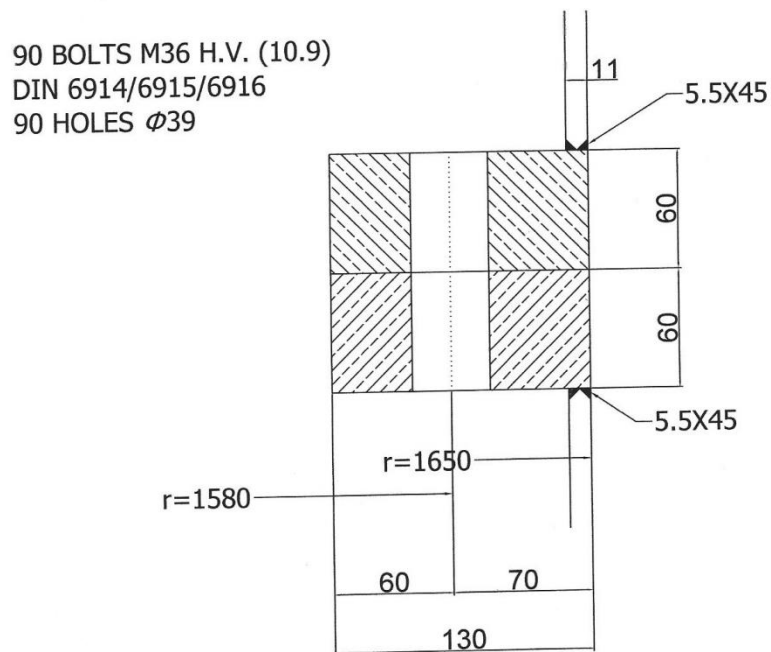
Επομένως, η απόσταση μεταξύ του επιφανειακού στοιχείου της κεφαλής του κοχλία και της μέσης επιφάνειας του άνω ελάσματος είναι ίση με:  $\frac{23\text{mm}}{2} + \frac{60\text{mm}}{2} + a = 41.7\text{mm}$ , όπου  $a=0,2\text{mm}$

Για το κάτω έλασμα η επιφάνεια του προσομοιώματος δεν είναι η μέση αλλά η άνω επιφάνεια, λόγω του ότι είναι πακτωμένη η βάση οπότε δεν παίζει ρόλο πια επιφάνεια του ελάσματος θα επιλεχθεί.

Γι' αυτό και η απόσταση μεταξύ των επιφανειών των 2 ελασμάτων είναι ίση με:  $\frac{60\text{mm}}{2} + a = 30.1\text{mm}$ , όπου  $a=0,1\text{mm}$ .



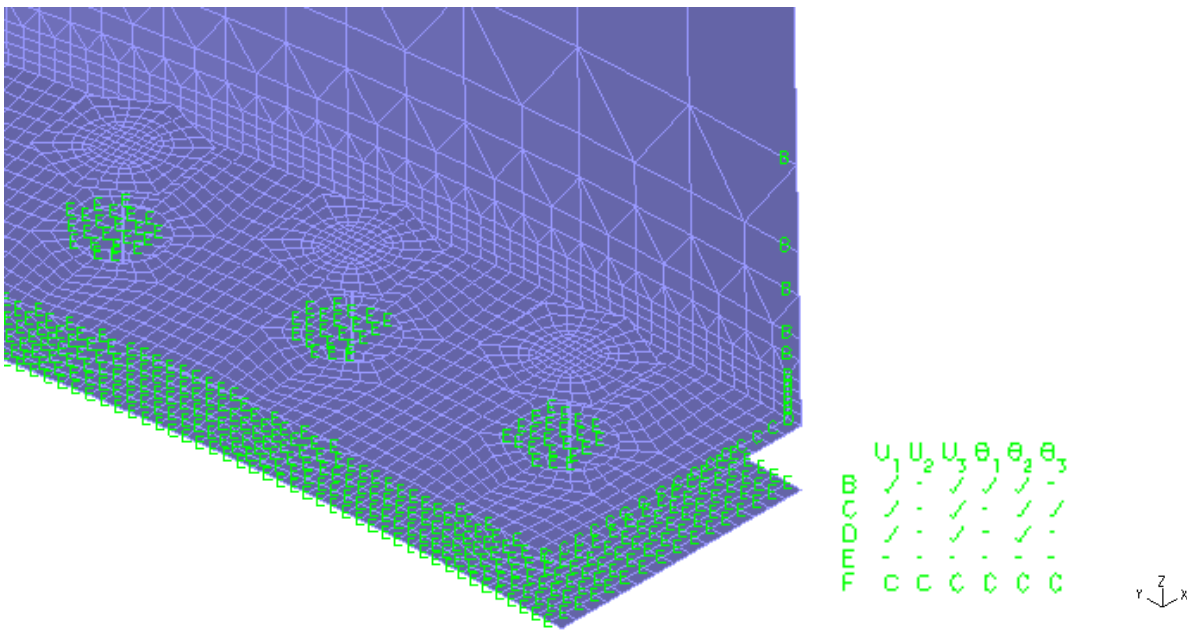
Σχήμα 5-5: κάτοψη της σύνδεσης σε κλίμακα 1/20



Σχήμα 5-6: τομή της σύνδεσης σε κλίμακα 1/2,5

Οι επαφές οι οποίες ελήφθησαν υπόψη στο προσομοίωμα είναι αυτές της κεφαλής του κοχλία με το άνω έλασμα και της διεπιφάνειας των 2 ελασμάτων. Η επαφή του κορμού του κοχλία με την άντυγα του ελάσματος δεν είναι δυνατό να ληφθεί υπόψη λόγω της προσομοίωσης του κορμού του κοχλία ως στοιχείο δοκού.

Όσον αφορά, τις συνοριακές συνθήκες έχει πακτωθεί το κάτω έλασμα μιας κα αποτελεί την βάση του πυλώνα στο προσομοίωμα καθώς και οι κάτω κόμβοι των κοχλιών. Οι υπόλοιπες συνοριακές συνθήκες έχουν ως στόχο να λάβουν υπόψη τις συνθήκες συμμετρίας. Δηλαδή καθ' ύψος του πυλώνα έχει δεσμευθεί η μετακίνηση κατά  $y$  και η στροφή περί τον άξονα  $z$  (σχήμα 5-7).

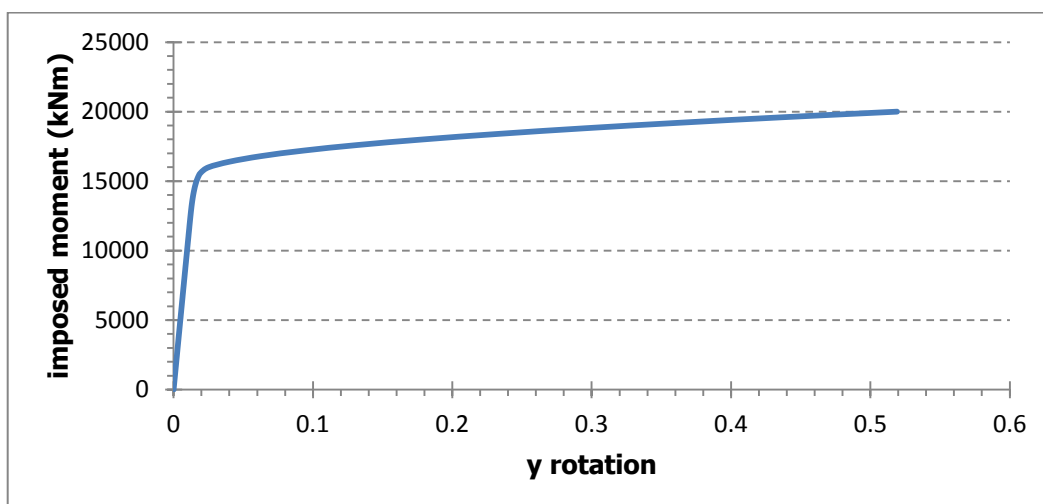


Σχήμα 5-7: συνοριακές συνθήκες προσομοιώματος

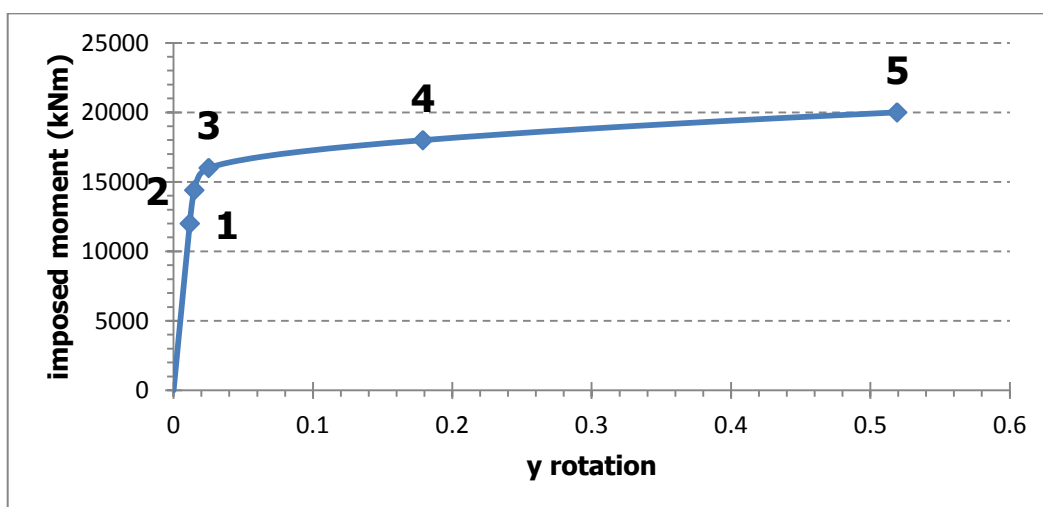
### 5.1.2 Δρόμος ισορροπίας φορέα

Η σύνδεση ελέγχθηκε σε κάμψη για φόρτιση του πυλώνα κατά την κυρίαρχη διεύθυνση του ανέμου και έγιναν προσπάθειες να προσδιορισθεί το μέγιστο στατικό φορτίο το οποίο αντέχει. Η ροπή ασκείται με rigid link στην κορυφή του πυλώνα. Αρχικά, στο βήμα 0 εισάγεται η προένταση στους κοχλίες και στη συνέχεια το φορτίο αυξάνεται σταδιακά ως το βήμα 50. Στο σχήμα 5-8 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας του φορέα για ροπή περί τον άξονα  $y$  στην κορυφή του πυλώνα 20000kNm. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι ο δρόμος αυτός προέκυψε λαμβάνοντας υπόψη τις επαφές μεταξύ των επιφανειών καθώς και την μη γραμμικότητα του υλικού για τον πυλώνα και τα ελάσματα μόνο. Όχι όμως για τον κοχλία. Ο δρόμος ισορροπίας δίνει την στροφή περί τον άξονα  $y$  στην κορυφή του πυλώνα στον κόμβο όπου ασκείται η ροπή συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής. Γίνεται φανερό ότι η συμπεριφορά της σύνδεσης είναι αρχικά γραμμική με μεγάλη αρχική δυσκαμψία μέχρι την τιμή των 15000 kNm, ενώ μετά όσο αυξάνεται περαιτέρω η ροπή η δυσκαμψία μειώνεται σημαντικά και οι παραμορφώσεις φτάνουν σε πολύ μεγάλες τιμές (0.5m). Προκειμένου να αξιολογήσουμε την συμπεριφορά της σύνδεσης καθώς αυξάνεται το φορτίο θα πρέπει να εξετάσουμε τάσεις και παραμορφώσεις σε χαρακτηριστικά σημεία του δρόμου ισορροπίας.

Στις εικόνες των τάσεων που ακολουθούν με μαύρο χρώμα παρουσιάζονται οι περιοχές οι οποίες έχουν διαρρεύσει.

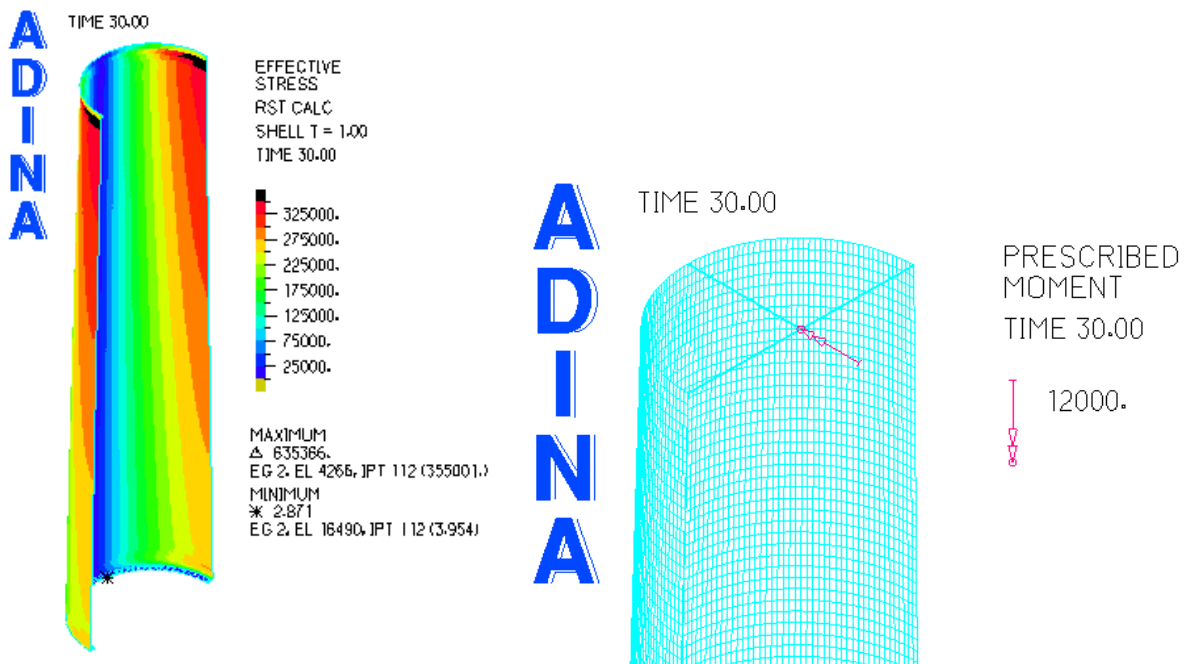


Σχήμα 5-8: δρόμος ισορροπίας φορέα



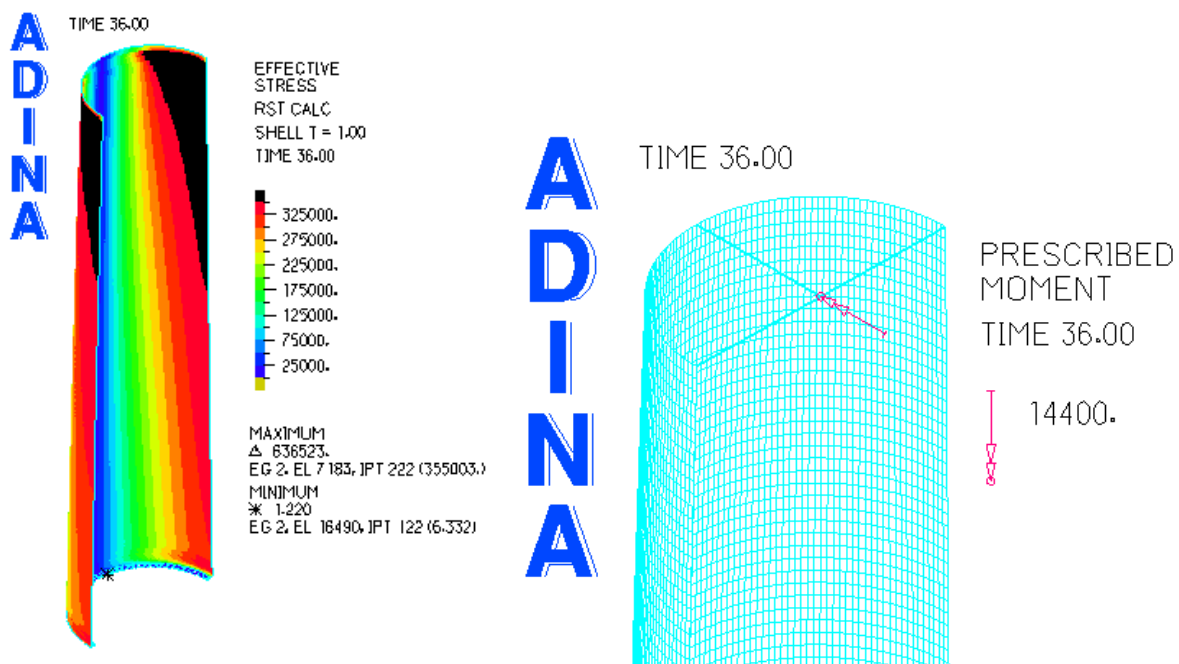
Σχήμα 5-9: χαρακτηριστικά σημεία δρόμου ισορροπίας



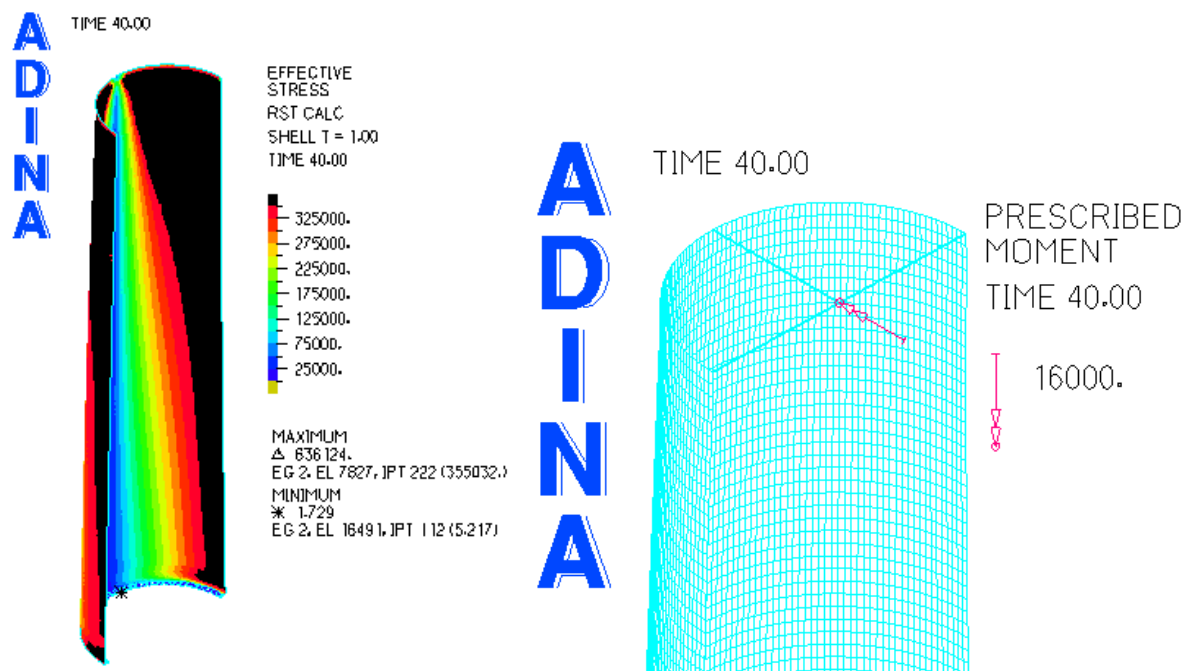


Σχήμα 5-10: τάσεις και παραμορφώσεις στον πυλώνα στο σημείο 1 του δρόμου ισορροπίας

Παρατηρείται ότι στο σημείο 1 του δρόμου ισορροπίας παρότι ο δρόμος ισορροπίας είναι γραμμικός έχει διαρρέυσει ένα πολύ μικρό κομμάτι κοντά στην κορυφή του πυλώνα (σχήμα 5-10) αλλά και η περιοχή των εφελκόμενων κοχλίων κοντά στις οπές (σχήμα 5-15). Η υπέρβαση του ορίου διαρροής ωστόσο είναι μικρή και αρκετά τοπική σε σχέση με τις διαστάσεις του φορέα ώστε δεν επηρεάζει την γραμμικότητα του συστήματος. Τονίζεται το γεγονός ότι οι τάσεις στην θλιβόμενη παρειά του ελάσματος δεν μεταβάλλονται.



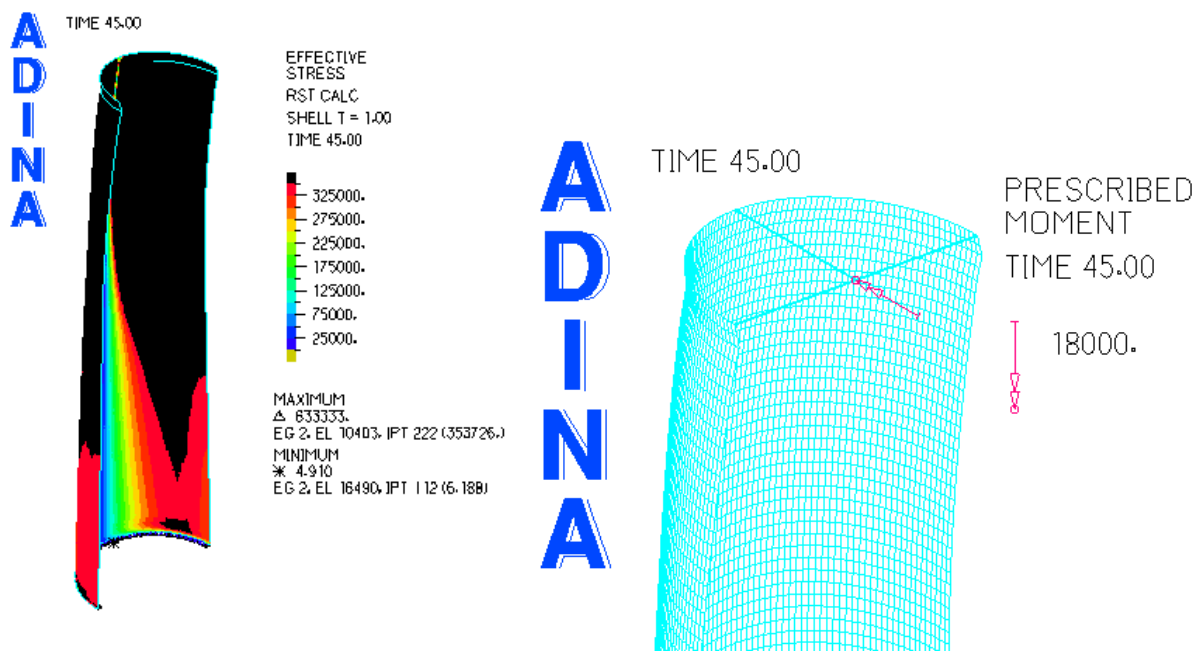
Σχήμα 5-11: τάσεις και παραμορφώσεις στον πυλώνα στο σημείο 2 του δρόμου ισορροπίας



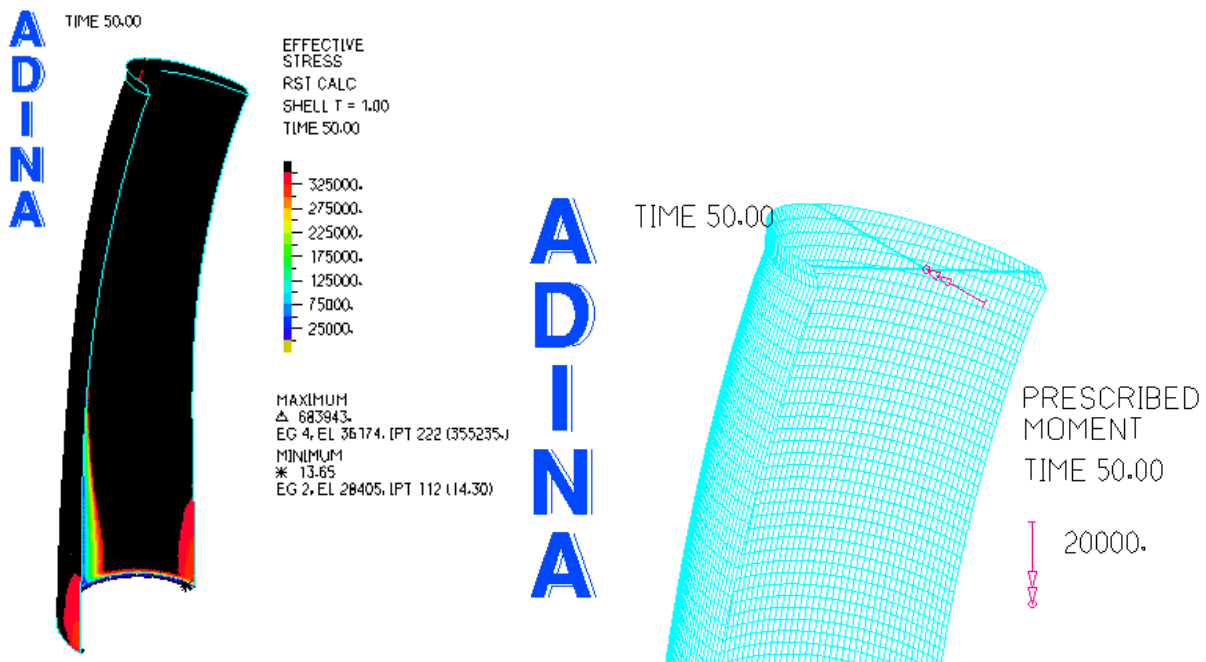
Σχήμα 5-12: τάσεις και παραμορφώσεις στον πυλώνα στο σημείο 3 του δρόμου ισορροπίας

Στο σημείο 2 όπου ο δρόμος ισορροπίας αρχίζει να καμπυλώνεται η διαρροή στον πυλώνα έχει επεκταθεί σε μεγαλύτερο κομμάτι κοντά στην κορυφή αλλά η αύξηση των τάσεων είναι μικρή (σχήμα 5-11). Το ίδιο όμως και στην επιφάνεια του άνω ελάσματος στην ακραία εφελκυσόμενη περιοχή.

Στο σημείο 3 όπου η δυσκαμψία του φορέα μειώνεται απότομα η διαρροή στον πυλώνα έχει φτάσει ως την βάση, ενώ στο έλασμα καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της εφελκυσόμενης πλευράς.



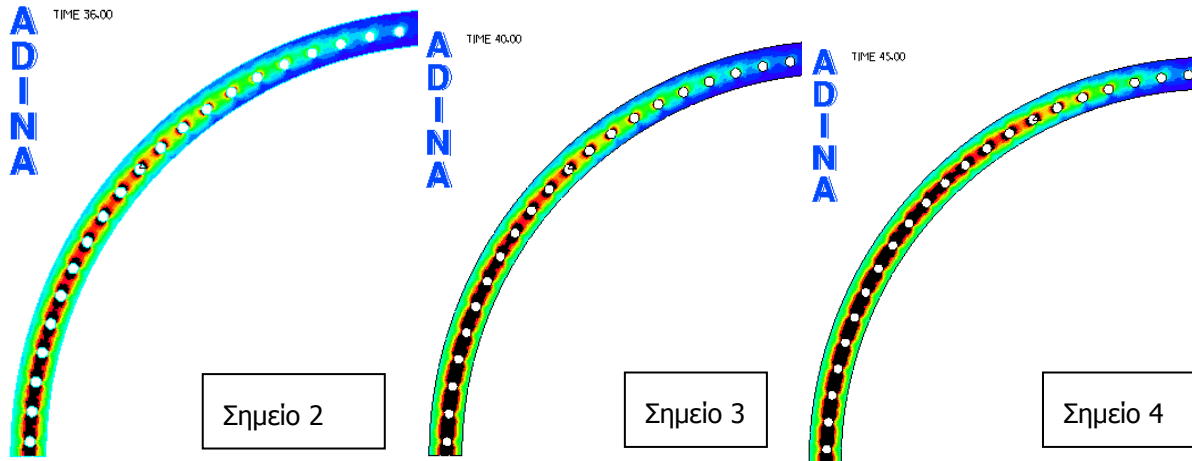
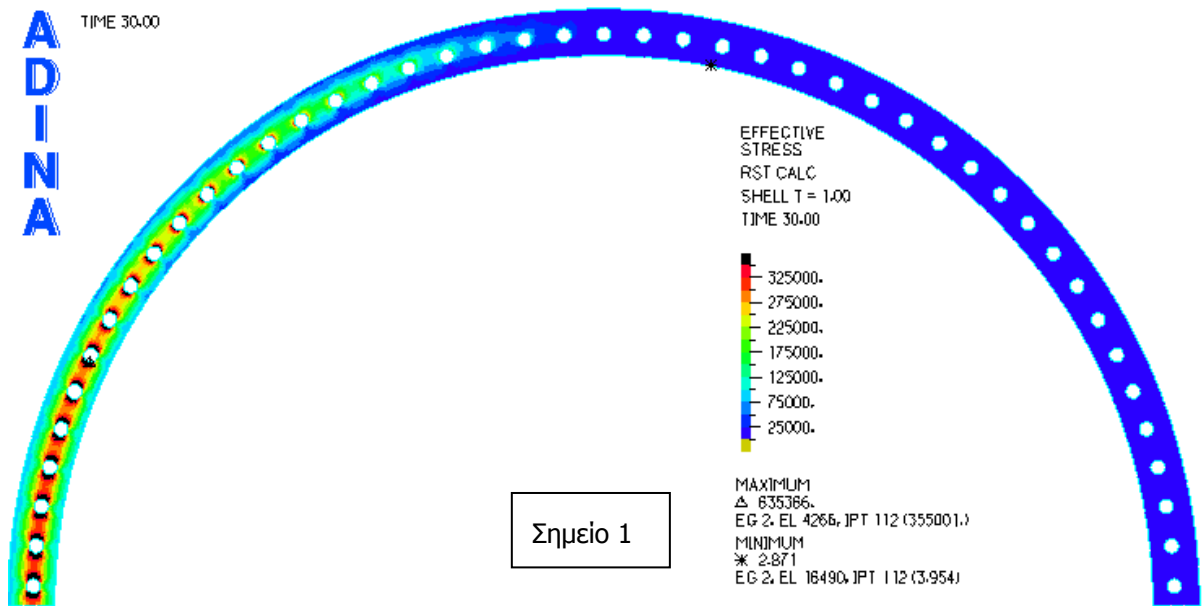
Σχήμα 5-13: τάσεις και παραμορφώσεις στον πυλώνα στο σημείο 4 του δρόμου ισορροπίας



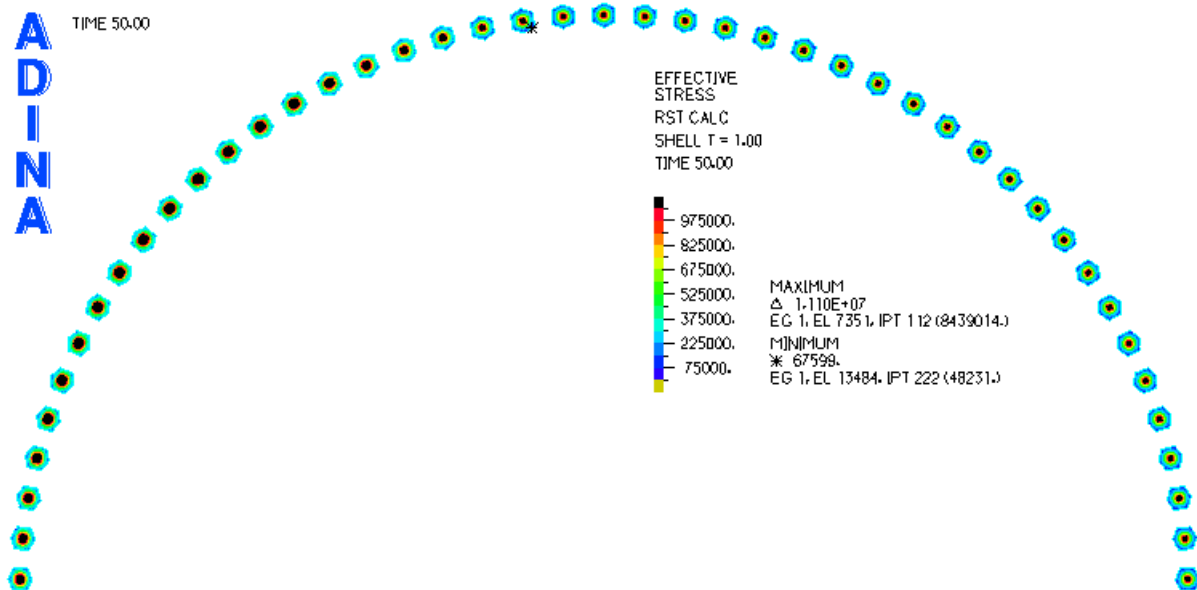
Σχήμα 5-14: τάσεις και παραμορφώσεις στον πυλώνα στο σημείο 5 του δρόμου ισορροπίας

Στο σημείο 4 οι εικόνες τάσεων και παραμορφώσεων επιβεβαιώνουν την μικρή αύξηση του φορτίου με παράλληλη μεγάλη αύξηση των παραμορφώσεων. Η διαρροή στον πυλώνα εξελίσσεται προς τα μέσα και σε όλο και μεγαλύτερο κομμάτι του ελάσματος.

Παρότι το υλικό των κοχλιών ελήφθη ελαστικό στο προσομοίωμα, είναι σκόπιμο να ελέγξουμε τις τάσεις στην κεφαλή των κοχλιών. Βλέπουμε ότι υπάρχει μία μεγάλη υπέρβαση η οποία μάλιστα καλύπτει μεγάλο τμήμα της κεφαλής.

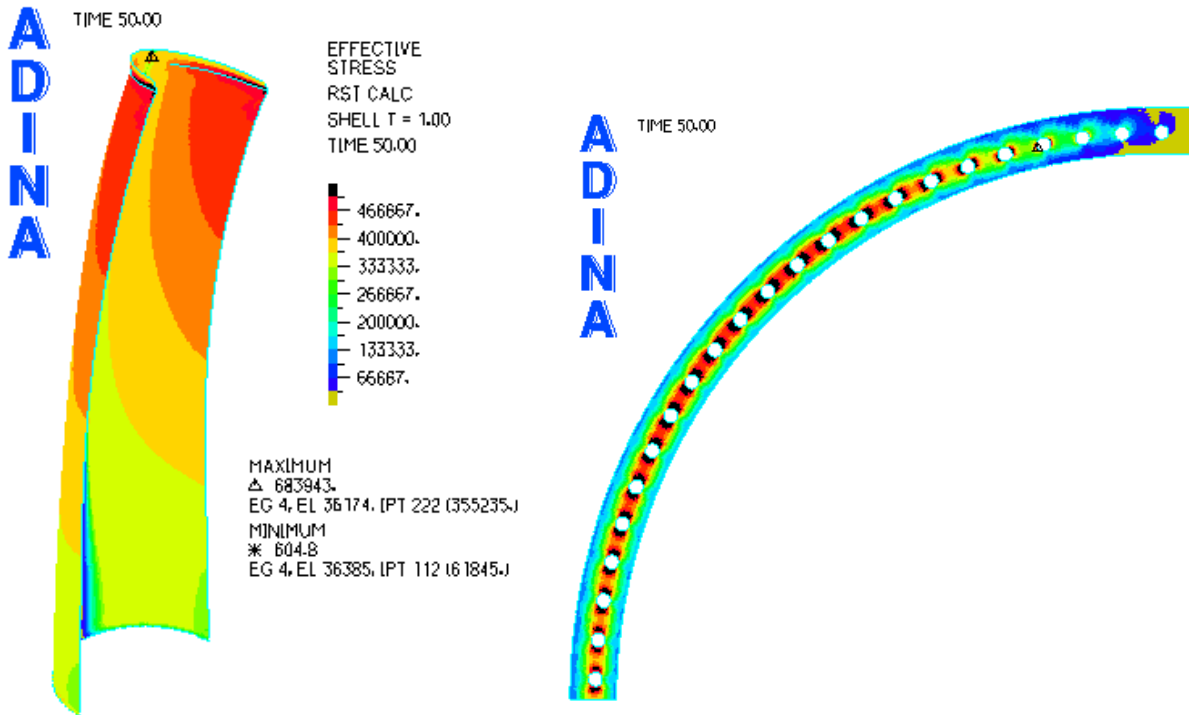


Σχήμα 5-15: τάσεις στο έλασμα στα σημεία του δρόμου ισορροπίας

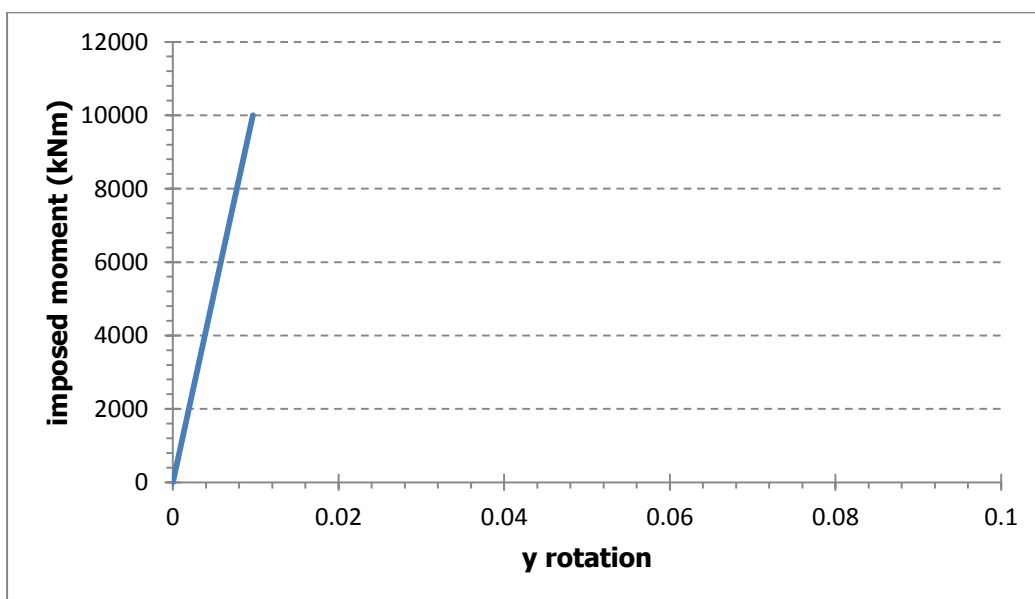


Σχήμα 5-16: τάσεις στην κεφαλή των κοχλιών

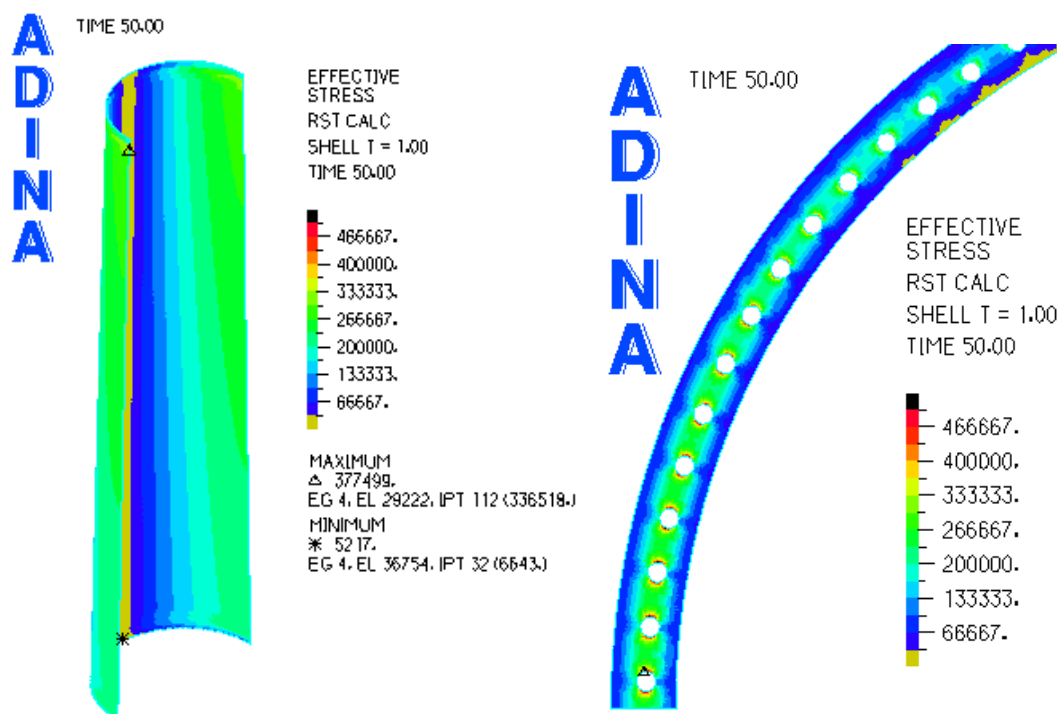
Ωστόσο, ο δρόμος ισορροπίας για ροπή 20000kNm φτάνει σε παραμορφώσεις πολύ μεγάλες και μη ρεαλιστικές και όπως φαίνεται και στο σχήμα 5-17 οι τάσεις που έχουν αναπτυχθεί ξεπερνούν το όριο θραύσης του υλικού. Ύστερα από έλεγχο των τάσεων παρατηρείται ότι προκειμένου να μην έχουμε υπέρβαση του ορίου θραύσης η ροπή θα πρέπει να μειωθεί σε τιμή 10000kNm η οποία όμως δίνει γραμμικό δρόμο ισορροπίας, όπως φαίνεται στο σχήμα 5-18. Στο σχήμα 5-19 παρουσιάζονται οι τάσεις στον πυλώνα και στο έλασμα οι οποίες δεν παρουσιάζουν καμία υπέρβαση του ορίου διαρροής γεγονός το οποίο δικαιολογεί τον γραμμικό δρόμο ισορροπίας.



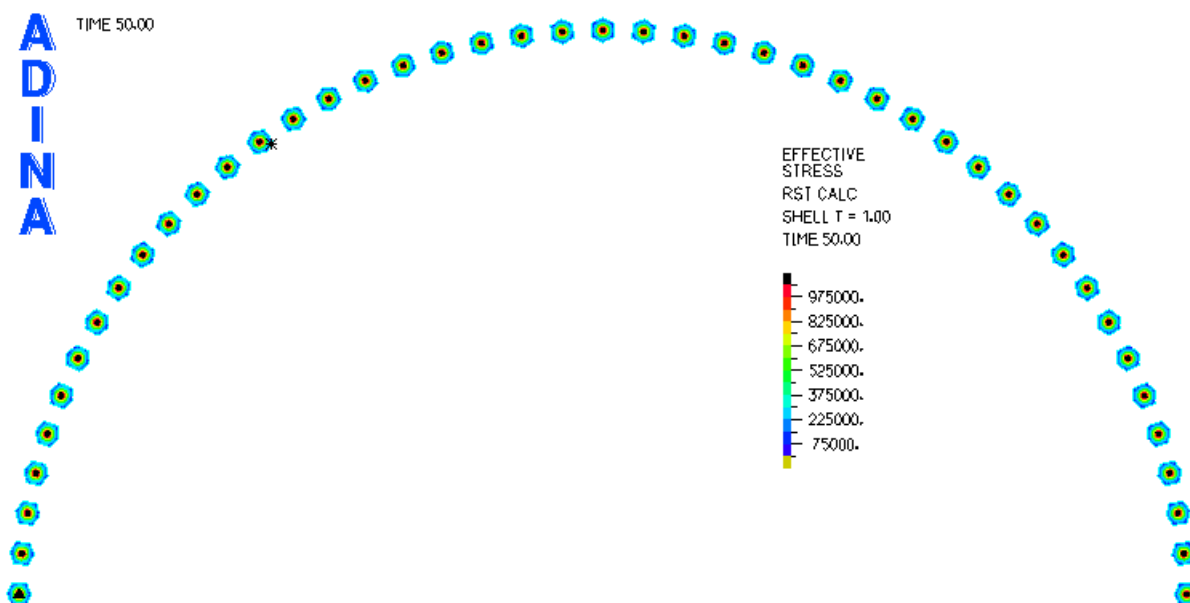
Σχήμα 5-17: τάσεις στον πυλώνα και στο έλασμα για ροπή 20000kNm, υπέρβαση του ορίου θραύσης



Σχήμα 5-18: δρόμος ισορροπίας για ροπή 10000kNm

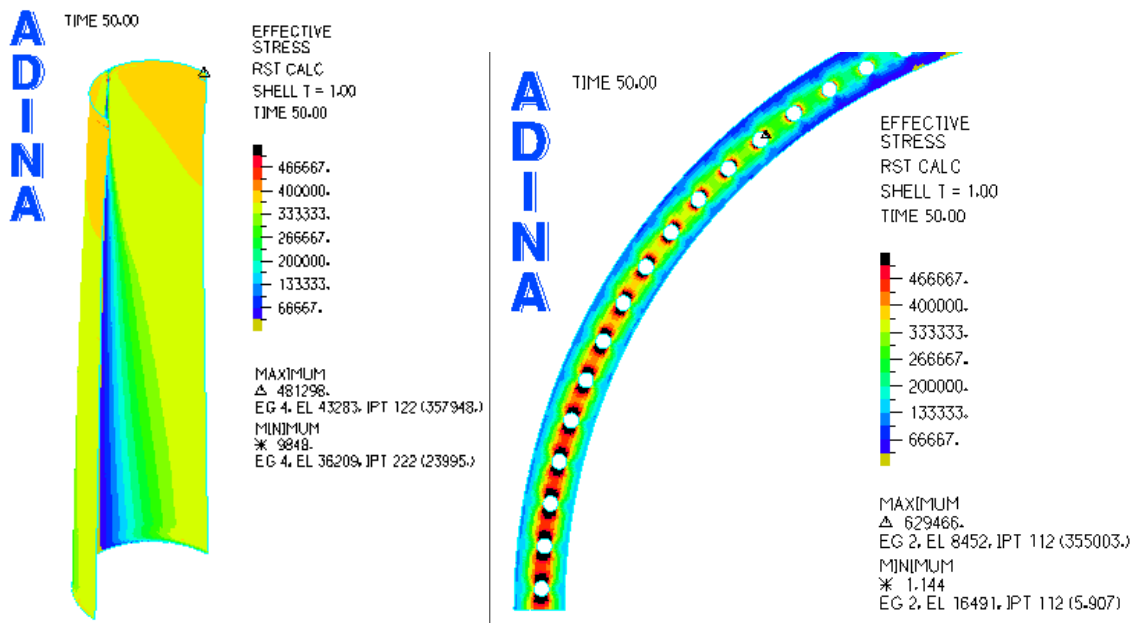


Σχήμα 5-19: τάσεις στον πυλώνα και στο έλασμα για ροπή 10000kNm

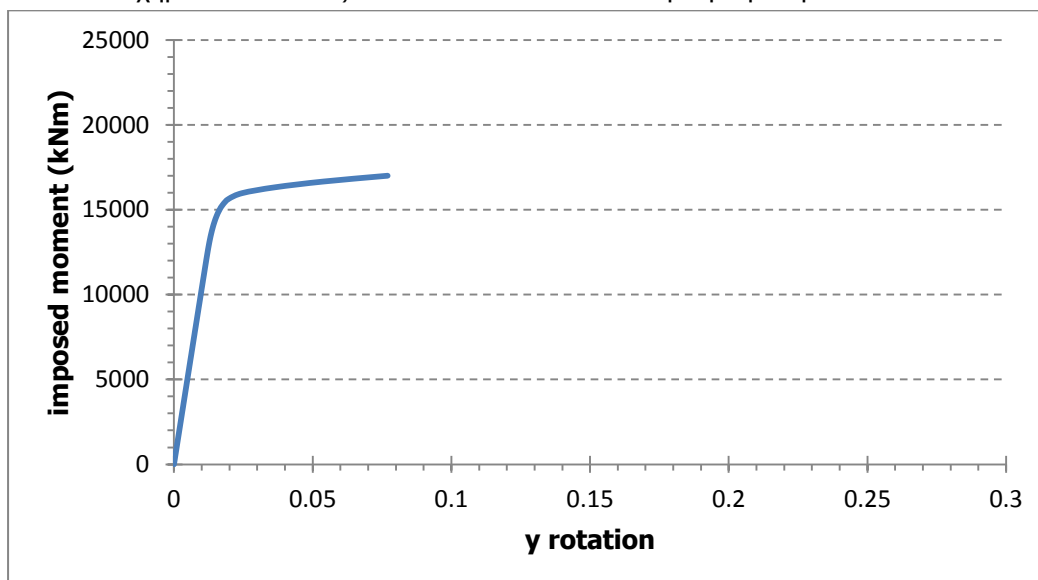


Σχήμα 5-20: τάσεις στην κεφαλή των κοχλιών για ροπή 10000kNm

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5-20 ακόμα και για ροπή 10000kNm η οποία δίνει γραμμικό δρόμο ισορροπίας η υπέρβαση των τάσεων στην κεφαλή των κοχλιών εξακολουθεί να υφίσταται αλλά είναι αρκετά τοπική και άρα αμελητέα. Τελικά, καταλήγουμε σε μία ροπή στην κορυφή του πυλώνα 17000kNm η οποία οδηγεί σε καμπυλωμένο δρόμο ισορροπίας αλλά με μικρή υπέρβαση του ορίου θραύσης τοπικά γύρω από τις οπές του άνω ελάσματος (σχήμα 5-21).



Σχήμα 5-21: τάσεις στον πυλώνα και στο έλασμα για ροπή 17000kNm



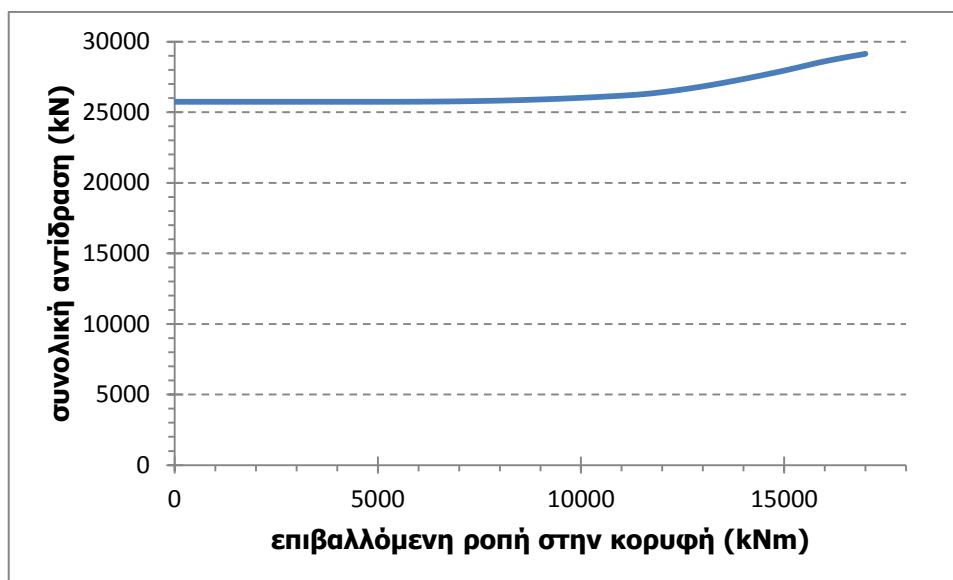
Σχήμα 5-22: δρόμος ισορροπίας για ροπή 17000kNm

### 5.1.3 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

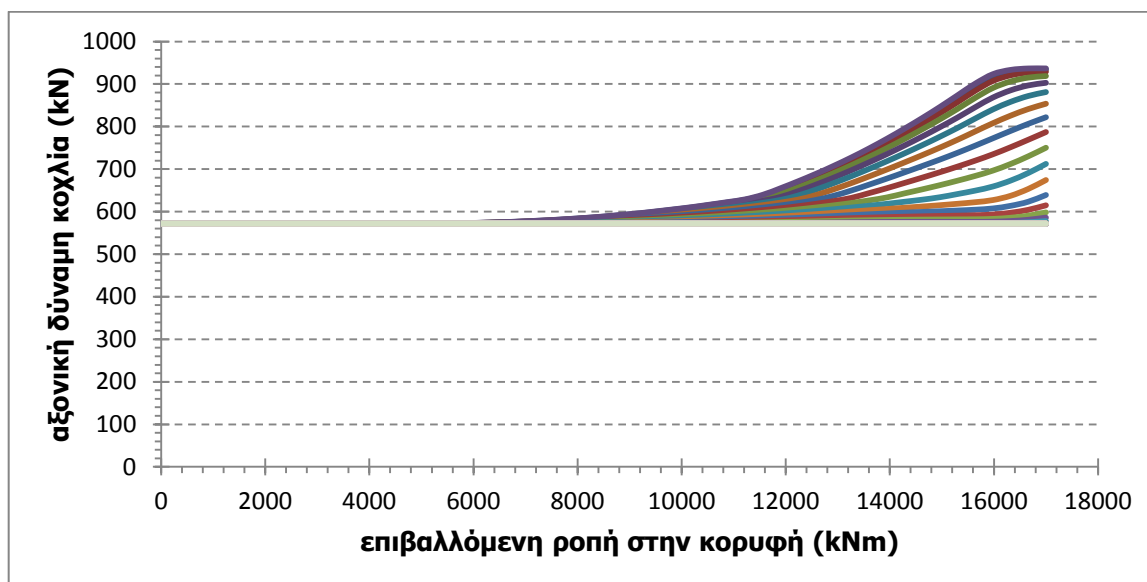
Από το προσομοίωμα που περιγράφηκε παραπάνω, εκτός από τον δρόμο ισορροπίας και την εξέλιξη παραμόρφωσης του φορέα με την αύξηση του φορτίου, μπορούν να ληφθούν και άλλα χρήσιμα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτά, τα οποία θα παρουσιαστούν στην υποενότητα αυτά έχουν προκύψει για ροπή στην κορυφή του πυλώνα 17000kNm. Σημαντικά στοιχεία τα οποία θα παρουσιαστούν είναι η εξέλιξη της αξονικής δύναμης των κοχλιών καθώς αυξάνεται το φορτίο, η συνολική αντίδραση του κάτω ελάσματος, η τάση στη συγκόλληση η οποία αποτελεί κι αυτή ένα κρίσιμο σημείο όπως και η κοχλίωση αλλά και η θέση του ουδέτερου άξονα ο οποίος διαχωρίζει τους εφελκόμενους από τους θλιβόμενους κοχλίες.

Στο σχήμα 5-23 παρουσιάζεται η εξέλιξη των κατακόρυφων δυνάμεων επαφής μεταξύ των 2 ελασμάτων η οποία ταυτίζεται με την συνολική αντίδραση του κάτω ελάσματος. Η αρχική τιμή του διαγράμματος αυτού αντιστοιχεί στην συνολική δύναμη από την προένταση των 45 κοχλιών ( $45 \cdot 571,9 \text{kN} = 25735,5 \text{kN}$ ). Παρατηρούμε ότι η συνολική αντίδραση αρχικά και για ένα μεγάλο κομμάτι

της φόρτισης είναι σταθερή και μετά αυξάνεται γραμμικά. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι τάσεις στον πυλώνα λόγω της ροπής αρχικά παραλαμβάνονται μέσω ανακατανομής της έντασης λόγω της επαφής και στην συνέχεια παραλαμβάνεται από τους εφελκόμενους κοχλίες. Γι' αυτό και η απόκριση μετά την ανακατανομή είναι γραμμική, αφού οι επιφάνειες επαφής δεν μεταβάλλονται πια και η επιπλέον δύναμη παραλαμβάνεται μέσω των εφελκόμενων κοχλιών.



Σχήμα 5-23: δρόμος ισορροπίας συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος



Σχήμα 5-24: δρόμος ισορροπίας αξονικής δύναμης κοχλιών

Στο σχήμα 5-24 παρουσιάζεται η εξέλιξη της αξονικής δύναμης των κοχλιών συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής. Οι καμπύλες είναι 45, όσοι και οι κοχλίες της σύνδεσης. Αρχικά, για ροπή 0 η αξονική δύναμη του κοχλίου είναι ίση με την δύναμη προέντασής του και μετά με την αύξηση του φορτίου αυξάνεται η αξονική δύναμη μόνο των εφελκόμενων κοχλιών. Για τους θλιβόμενους κοχλίες η αξονική δύναμη δεν μεταβάλλεται οποιαδήποτε κι αν είναι η τιμή της επιβαλλόμενης ροπής. Και είναι λογικό, μιας και στην θλιβόμενη παρειά τα ελάσματα είναι αυτά τα οποία έρχονται σε επαφή, αλλά ο κοχλίας δεν θα επηρεασθεί καθόλου. Αντίθετα, στην εφελκόμενη παρειά, η αξονική δύναμη



μεταβάλλεται και μάλιστα αρκετά, ανάλογα με την δύναμη προέντασης. Όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης του κοχλία τόσο λιγότερο θα αυξηθεί η αξονική του δύναμη. Γι' αυτό και στους ελέγχους έναντι κόπωσης είναι απαραίτητη η προένταση των κοχλιών ώστε να μην έχουμε μεγάλη διακύμανση των τάσεων και κατ' επέκταση μεγάλο εύρος τάσεων Δσ.

Μέσω του διαγράμματος της αξονικής δύναμης των κοχλιών εξηγείται πλέον το γεγονός ότι στις εικόνες των τάσεων στο έλασμα στα διάφορα σημεία του δρόμου ισορροπίας μεταβολή των τάσεων παρατηρείται μόνο στην περιοχή των εφελκόμενων κοχλιών. Όσο μεγαλώνει η δύναμη που παραλαμβάνουν τόσο αυξάνονται οι τάσεις στο άνω έλασμα στην περιοχή αυτή. Αντίθετα, στην περιοχή των θλιβόμενων κοχλιών των οποίων η αξονική δύναμη είναι σταθερή και ίση με την δύναμη προέντασης οι τάσεις στο έλασμα είναι κι αυτές σταθερές καθ' όλη την διάρκεια της φόρτισης. Από μηδενική τιμή ροπή ως την μέγιστη τιμή της, οι τάσεις έχουν μία σταθερή τιμή.

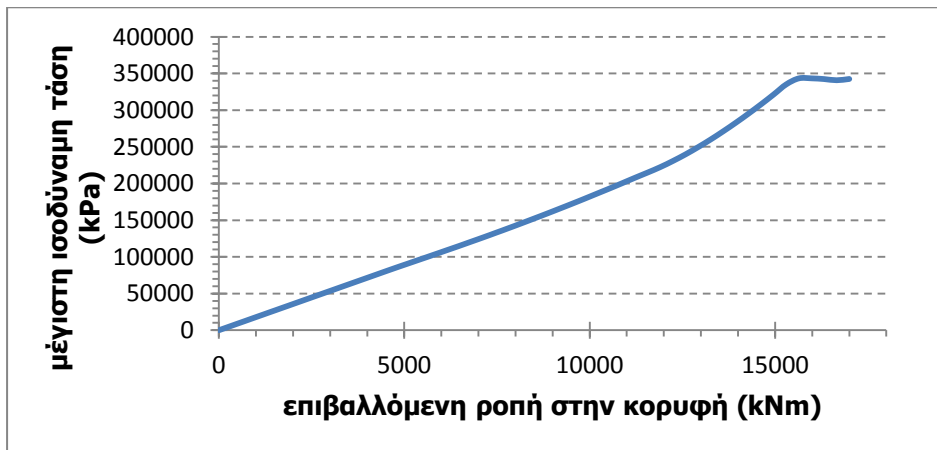
Στον πίνακα που ακολουθεί αναγράφεται η αρχική και η τελική αξονική δύναμη για κάθε ένα κοχλία ξεχωριστά. Ο κοχλίας 1 είναι ο ακραίος εφελκόμενος κοχλίας, ενώ ο κοχλίας 2 είναι ο ακραίος θλιβόμενος.

Κοχλίας	Αρχική δύναμη (kN)	Τελική δύναμη (kN)
1	571,9	936.67
2	571,9	934.39
3	571,9	928.93
4	571,9	918.74
5	571,9	902.89
6	571,9	881.14
7	571,9	853.70
8	571,9	821.92
9	571,9	787.16
10	571,9	750.29
11	571,9	712.29
12	571,9	674.32
13	571,9	639.17
14	571,9	614.90
15	571,9	598.18
16	571,9	585.95
17	571,9	577.82
18	571,9	573.29
19	571,9	571.91
20	571,9	571.92
21	571,9	571.91

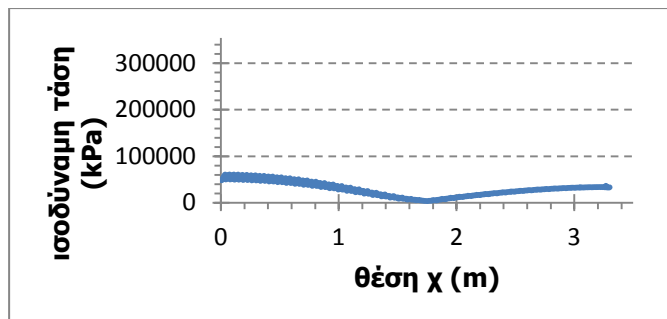
22	571,9	571.90
23	571,9	571.90
24	571,9	571.90
25	571,9	571.90
26	571,9	571.90
27	571,9	571.90
28	571,9	571.90
29	571,9	571.90
30	571,9	571.90
31	571,9	571.90
32	571,9	571.90
33	571,9	571.90
34	571,9	571.90
35	571,9	571.90
36	571,9	571.90
37	571,9	571.90
38	571,9	571.90
39	571,9	571.90
40	571,9	571.90
41	571,9	571.90
42	571,9	571.90
43	571,9	571.90
44	571,9	571.90
45	571,9	571.90

Στο σχήμα 5-25 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στα κατώτερα στοιχεία του πυλώνα συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής στην κορυφή. Το διάγραμμα αυτό δίνει την μέγιστη τάση στην συγκόλληση ακόμα κι αν το στοιχείο στο οποίο εμφανίζεται η τάση αυτή μεταβάλλεται. Ενώ στο σχήμα 5-26 δίνεται η ισοδύναμη τάση στην συγκόλληση σε κάθε ένα από τα στοιχεία του πυλώνα για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης ροπής. Στον κατακόρυφο άξονα είναι η ισοδύναμη τάση ενώ στον οριζόντιο άξονα είναι η θέση του κάθε στοιχείου κατά μήκος της διαμέτρου του πυλώνα (διάμετρος πυλώνα 3,3m).

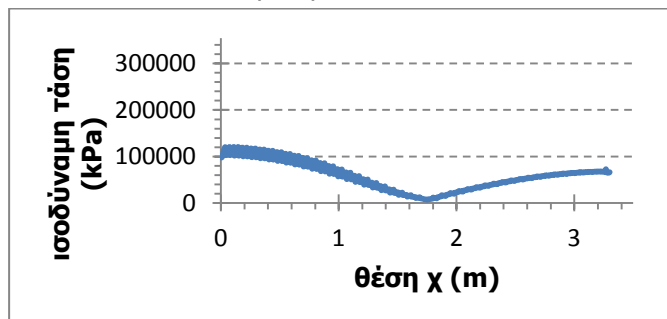
Επειδή, ωστόσο, η τιμή της ισοδύναμης τάσης δεν βοηθά ιδιαίτερα στην εξαγωγή συμπερασμάτων, είναι πιο χρήσιμη η απεικόνιση των ορθών τάσεων  $\sigma_{zz}$  (σχήμα 5-27).



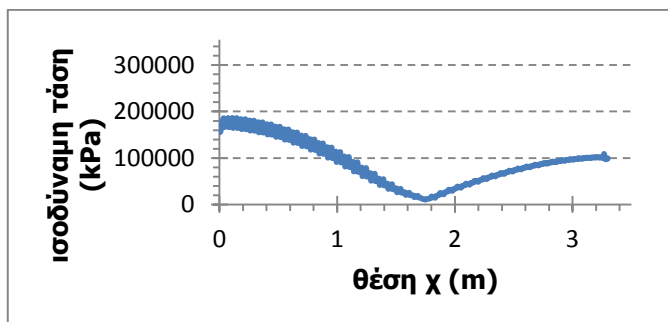
Σχήμα 5-25: δρόμος ισορροπίας μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση



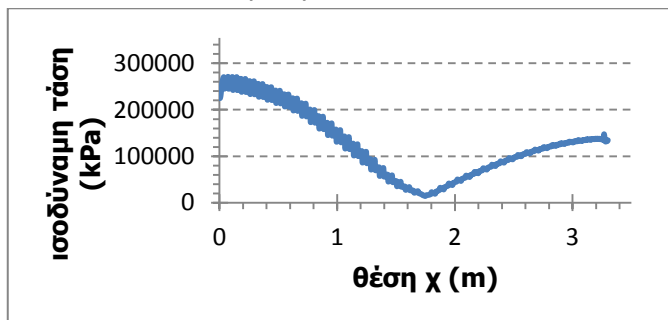
Για ροπή  $M=3400\text{kNm}$



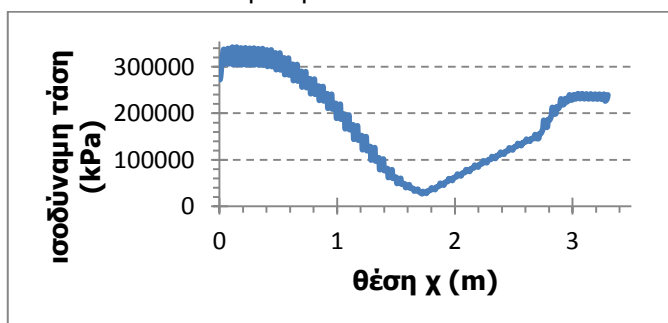
Για ροπή  $M=6800\text{kNm}$



Για ροπή  $M=10200\text{kNm}$

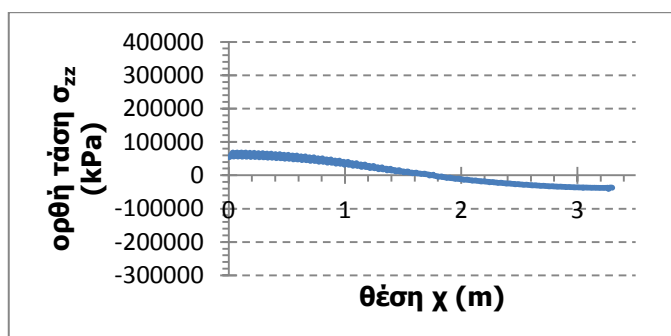


Για ροπή  $M=13600\text{kNm}$

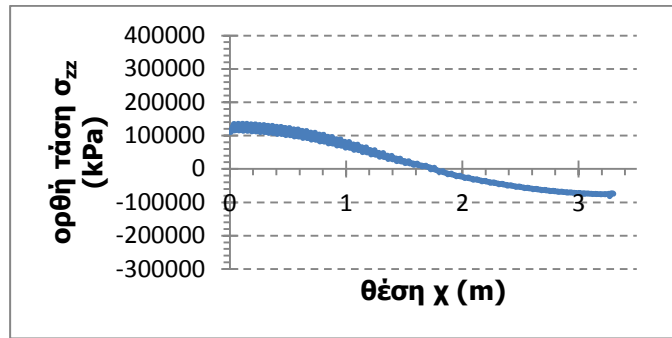


Για ροπή  $M=17000\text{kNm}$

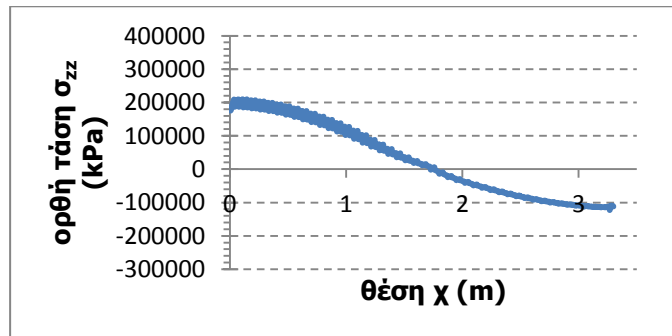
Σχήμα 5-26: κατανομή ισοδύναμων τάσεων στον πυλώνα για διάφορες τιμές επιβαλλόμενης ροπής



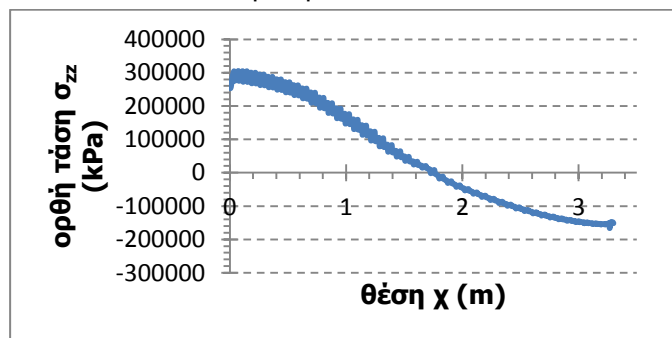
Για ροπή  $M=3400\text{kNm}$



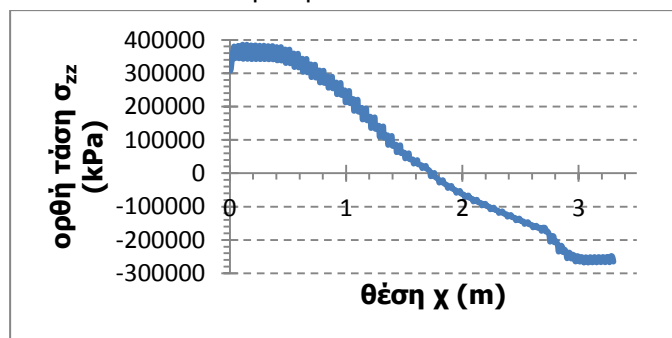
Για ροπή  $M=6800\text{kNm}$



Για ροπή  $M=10200\text{kNm}$



Για ροπή  $M=13600\text{kNm}$

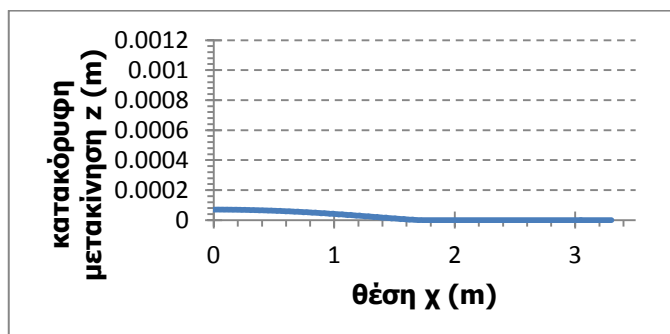


Για ροπή  $M=17000\text{kNm}$

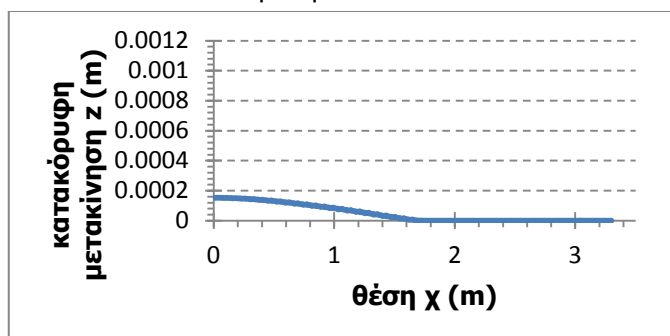
Σχήμα 5-27: κατανομή ορθών τάσεων στον πυλώνα για διάφορες τιμές επιβαλλόμενης ροπής

Από το σχήμα 5-27 βλέπουμε ότι στην εφελκυσόμενη περιοχή, αριστερά του ουδέτερου άξονα η τάση στον πυλώνα έχει κατεύθυνση προς τα πάνω. Καθώς πλησιάζουμε προς την θέση του ουδέτερου άξονα η τάση αυτή συνεχώς μειώνεται έως ότου μηδενίζεται στη θέση του ουδέτερου άξονα. Ενώ στην θλιβόμενη περιοχή, δεξιά του ουδέτερου άξονα οι τάσεις έχουν αντίθετη κατεύθυνση προς τα κάτω γι' αυτό και οι τιμές των ορθών τάσεων εκεί είναι αρνητικές.

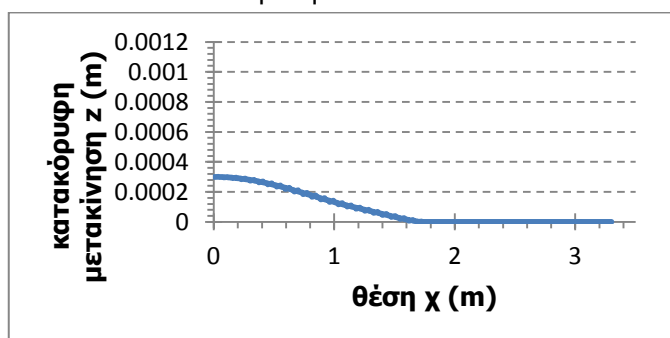
Πολύ σημαντικό ρόλο στην συμπεριφορά της σύνδεσης παίζει η θέση του ουδέτερου άξονα ο οποίος διαχωρίζει τους εφελκόμενους κοχλίες από τους θλιβόμενους. Στο σχήμα 5-28 παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετακινήσεις του άνω ελάσματος σε θέσεις κατά μήκος της διαμέτρου του πυλώνα. Η θέση του ουδέτερου άξονα είναι εκεί όπου μηδενίζονται οι κατακόρυφοι μετακινήσεις.



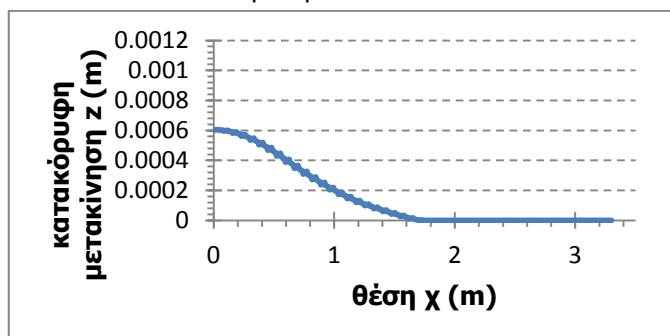
Για ροπή  $M=3400\text{kNm}$



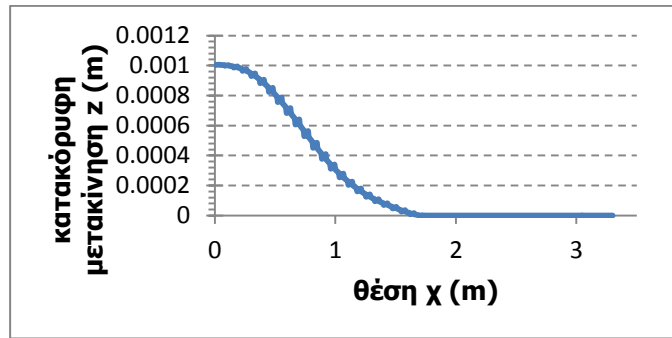
Για ροπή  $M=6800\text{kNm}$



Για ροπή  $M=10200\text{kNm}$



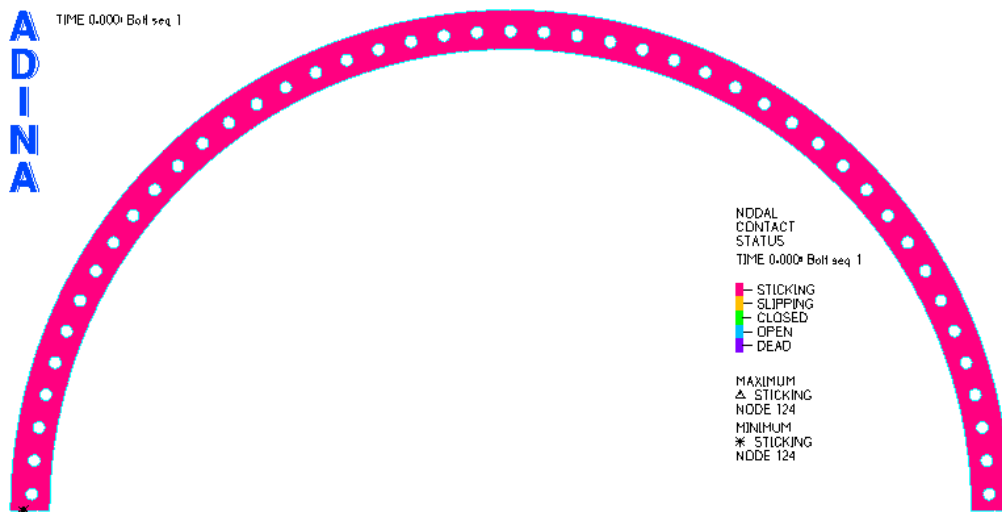
Για ροπή  $M=13600\text{kNm}$



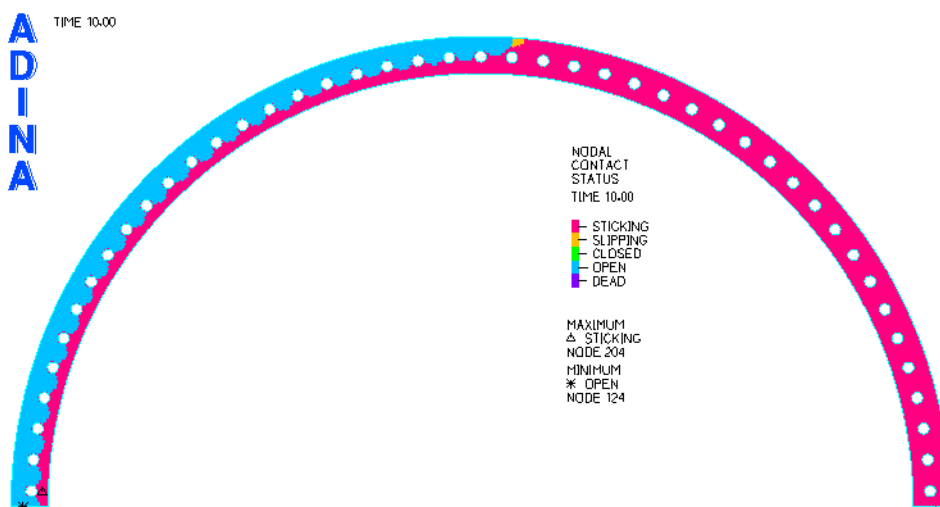
Για ροπή  $M=17000\text{kNm}$

Σχήμα 5-28: κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων άνω ελάσματος για διάφορες τιμές επιβαλλόμενης ροπής

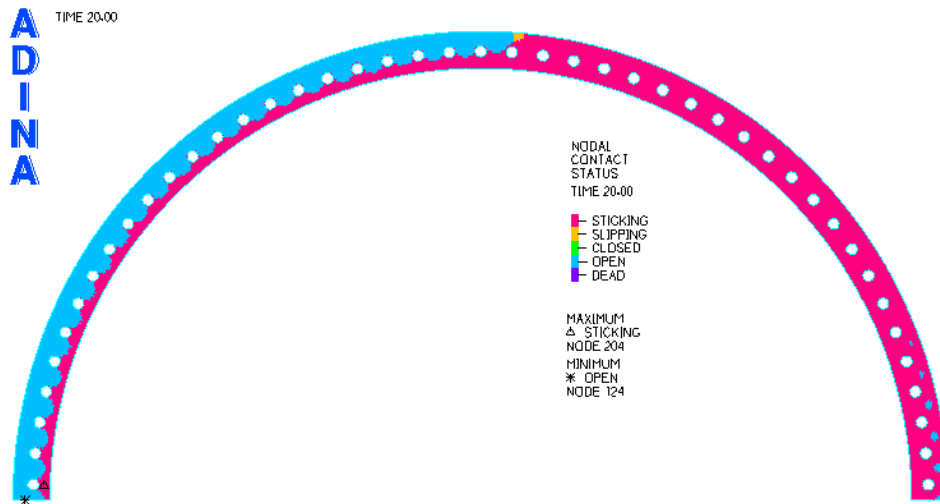
Δεξιά του ουδέτερου άξονα τα 2 ελάσματα έρχονται σε επαφή και λόγω του ότι το κάτω έλασμα είναι πακτωμένο δεν υπάρχει η δυνατότητα περαιτέρω μετακίνησης γι' αυτό και όλες οι τιμές του διαγράμματος στην θλιβόμενη περιοχή είναι μηδενικές. Η μέγιστη μετακίνηση παρατηρείται για την θέση του ακραίου εφελκυόμενου κοχλία και μειώνεται προς την θέση του ουδέτερου άξονα. Όσο μεγαλύτερη η τιμή της επιβαλλόμενης ροπής τόσο μεγαλύτερη η μετακίνηση.



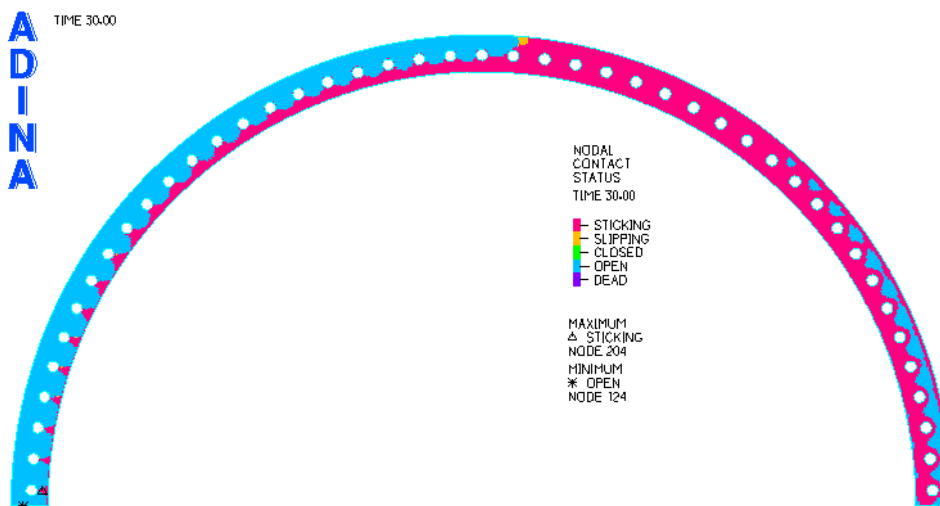
Σχήμα 5-29: επιφάνειες επαφής αμέσως μετά την προένταση των κοχλιών, για ροπή 0kNm



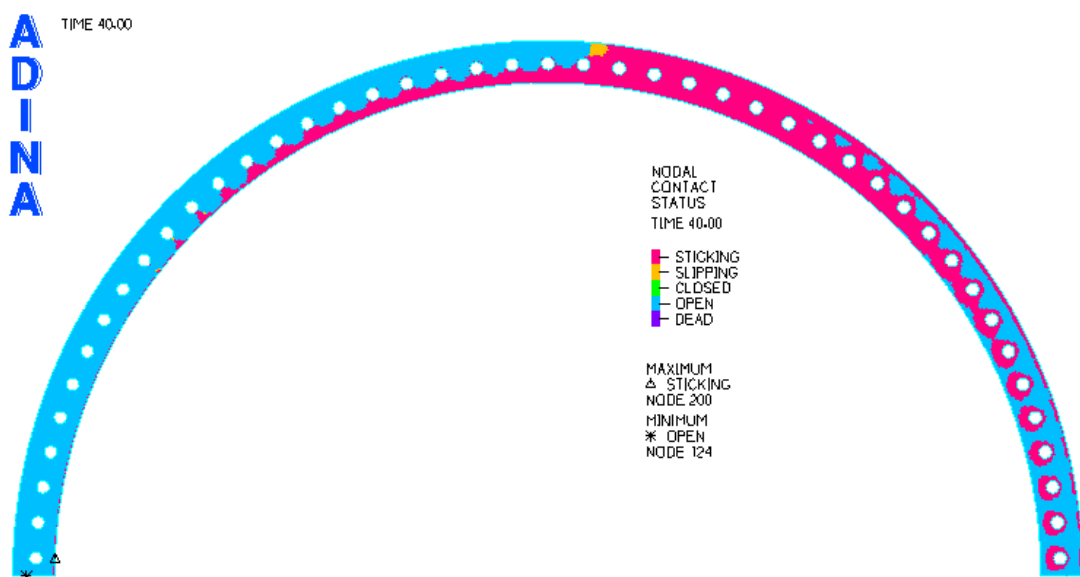
Σχήμα 5-30: επιφάνειες επαφής για ροπή 3400kNm



Σχήμα 5-31: επιφάνειες επαφής για ροπή 6800kNm

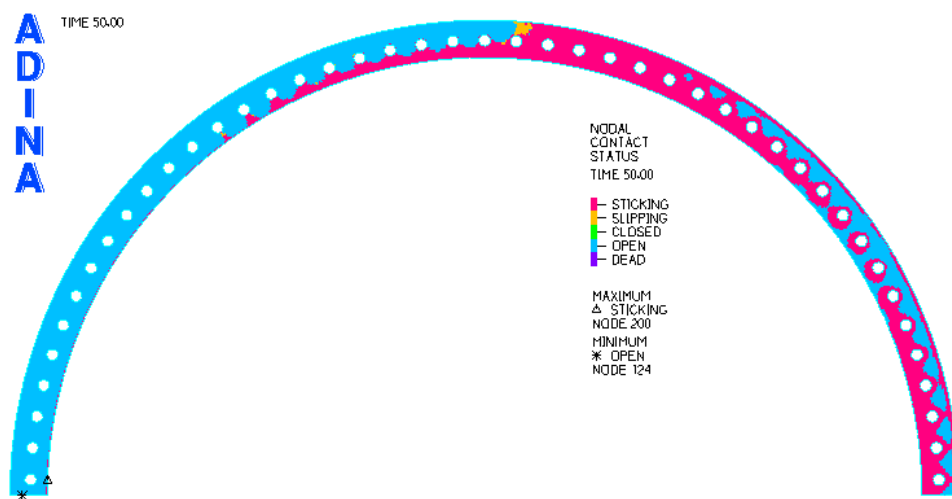


Σχήμα 5-32: επιφάνειες επαφής για ροπή 10200kNm



Σχήμα 5-33: επιφάνειες επαφής για ροπή 13600kNm





Σχήμα 5-34: επιφάνειες επαφής για ροπή 17000kNm

Στα σχήματα 5-29 έως 5-34 παρουσιάζεται εικονικά η θέση του ουδέτερου άξονα μέσω των επιφανειών που έρχονται σε επαφή. Με ροζ χρώμα εμφανίζονται οι επιφάνειες οι οποίες έχουν έρθει σε επαφή ενώ με μπλε οι περιοχές στις οποίες τα ελάσματα έχουν αποκολληθεί και δεν υπάρχει καμία επαφή. Προφανώς, αμέσως μετά την προένταση του κοχλία κλείνουν τα κενά και τα 2 ελάσματα βρίσκονται πλήρως σε επαφή. Η θέση του ουδέτερου άξονα είναι προς την θλιβόμενη παρειά, αλλά όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης ο ουδέτερος άξονας μετατοπίζεται προς τον άξονα συμμετρίας της διατομής. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η δύναμη προέντασης είναι η μέγιστη δυνατή, γι' αυτό και η θέση του ουδέτερου άξονα όπως φαίνεται τόσο απ' τα διαγράμματα όσο και από τις εικόνες είναι πολύ κοντά στον άξονα συμμετρίας.

# 6 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ ΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ

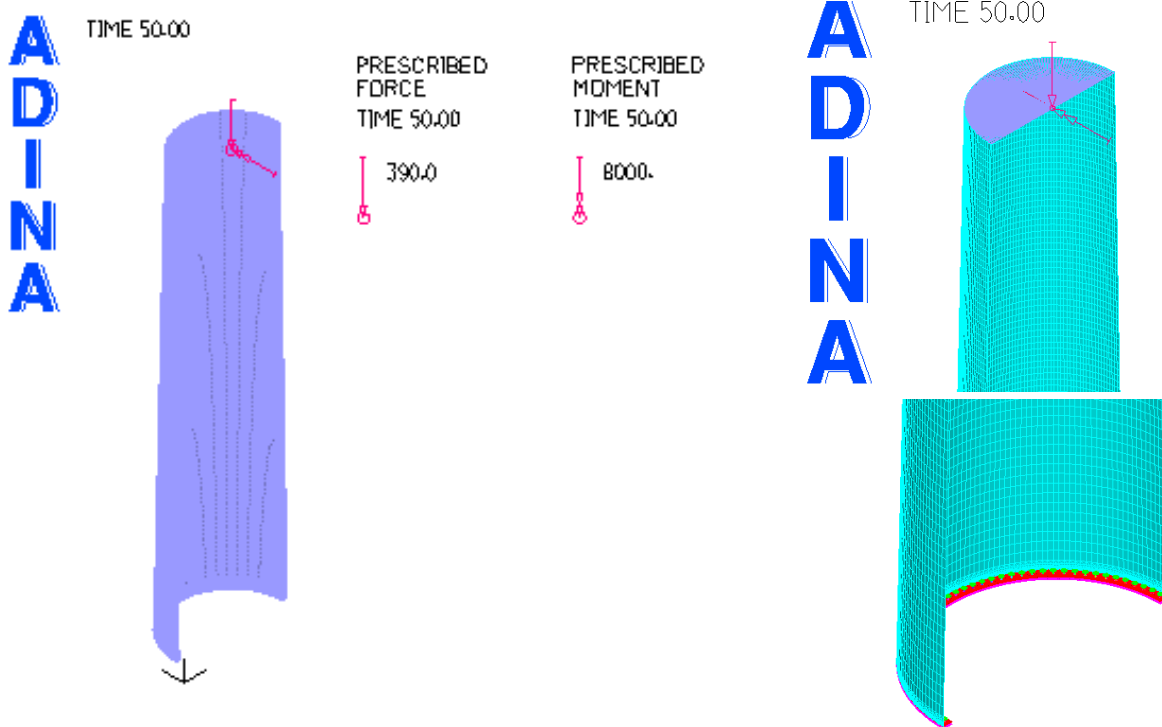
## 6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ ΦΟΡΕΑ

Στο κεφάλαιο αυτό πρόκειται να εκτελεσθούν οι ίδιες παραμετρικές αναλύσεις με αυτές του κεφαλαίου 4, για το αριθμητικό προσομοίωμα της σύνδεσης με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία. Τα μεγέθη των οποίων η επιρροή εξετάζεται είναι τα ίδια.

Οι αναλύσεις εκτελέστηκαν με την παραδοχή απείρως ελαστικού υλικού τόσο για τον χάλυβα των ελασμάτων και του πυλώνα όσο και για τους κοχλίες. Εκτός από το υλικό όλες οι υπόλοιπες παράμετροι του προσομοιώματος παραμένουν ακριβώς οι ίδιες. Το φορτίο στο οποίο υποβάλλεται ο φορέας περιλαμβάνει εκτός από την καμπτική ροπή και μία αξονική δύναμη στην κορυφή του πυλώνα θλιπτική ίση με 390kN. Η δύναμη αυτή αντιπροσωπεύει το φορτίο από το βάρος του ρότορα και των πτερυγίων. Επιπλέον, στα προσομοιώματα αυτά, λαμβάνεται υπόψη το ίδιο βάρος του πυλώνα και ολόκληρης της σύνδεσης του προσομοιώματος. Το μέγεθος της επιβαλλόμενης καμπτικής ροπής είναι 8000kNm. Αρχικά, την χρονική στιγμή 0 εισάγεται η δύναμη προέντασης στους κοχλίες και στην συνέχεια σε 50 βήματα ασκείται το αξονικό θλιπτικό φορτίο και το ίδιο βάρος ως μία σταθερή φόρτιση ενώ η καμπτική ροπή ως ένα γραμμικό φορτίο σταδιακά αυξανόμενο από την τιμή 0 ως την τιμή των 8000kNm.

Η δύναμη προέντασης στο αρχικό μοντέλο ήταν η μέγιστη δυνατή, ίση με το 70% της εφελκυστικής αντοχής. Για την διερεύνηση της επιρροής της τιμής της δύναμης προέντασης διατηρείται ίδια η γεωμετρία του φορέα και η δύναμη προέντασης μειώνεται σε 10, 20%, 30%, 40%, 50% και 60% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλίου. Όσον αφορά τις παραμετρικές αναλύσεις για την διάμετρο του κοχλίου, η διάμετρος κοχλίου του αρχικού μοντέλου (M36) μειώνεται σε M20, M24, M27 και M30. Τέλος, το πάχος του ελάσματος μεταβάλλεται από 60mm που ήταν αρχικά σε 20mm, 30mm, 40mm και 50mm.

## 6.2 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ



Σχήμα 6-1: προσομοίωμα φορέα στο ADINA

Η τιμή της δύναμης προέντασης στα προσομοιώματα των οποίων την συμπεριφορά θα δούμε στην συνέχεια είναι:

- 10% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

$$F_{p,c} = 0.1 \times f_{ub} \times A_s = 0,1 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 81.7kN$$

Όπου:  $f_{ub}$  είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και  $A_s$  το εμβαδόν σπειρώματος

Για κοχλία M36:  $A_s=8,17cm^2$

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

- 20% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

$$F_{p,c} = 0.2 \times f_{ub} \times A_s = 0,2 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 163,4kN$$

- 30% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

$$F_{p,c} = 0.3 \times f_{ub} \times A_s = 0,3 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 245,1kN$$

- 40% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

$$F_{p,c} = 0.4 \times f_{ub} \times A_s = 0,4 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 326,8kN$$

- 50% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

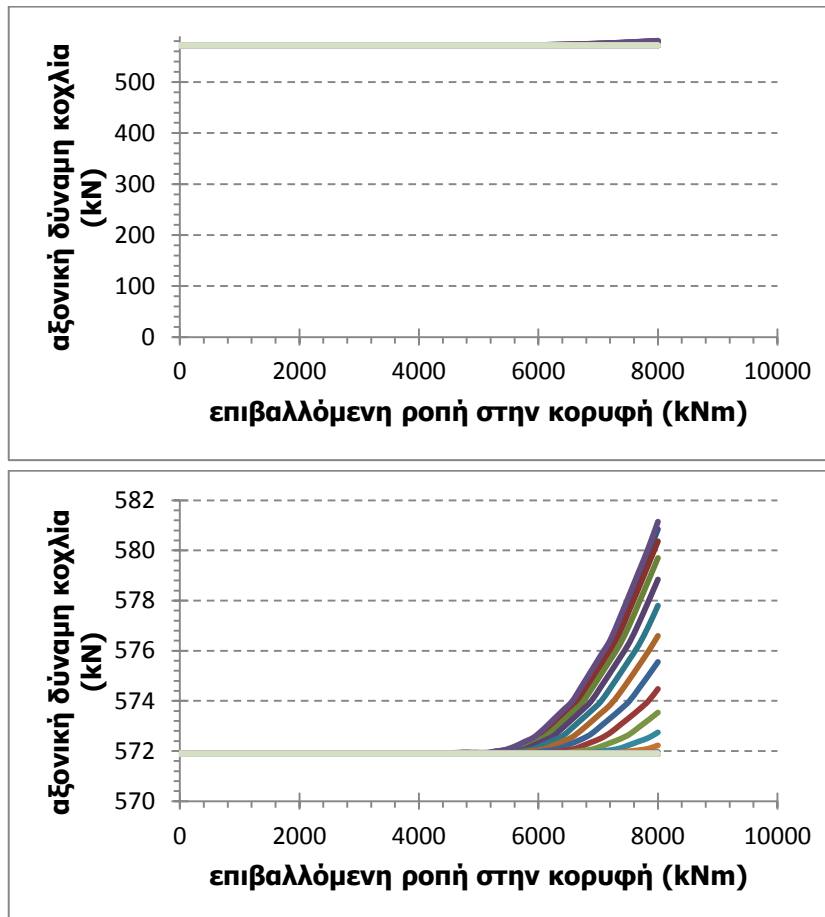
$$F_{p,c} = 0.5 \times f_{ub} \times A_s = 0,5 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 408,5kN$$

- 60% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία:

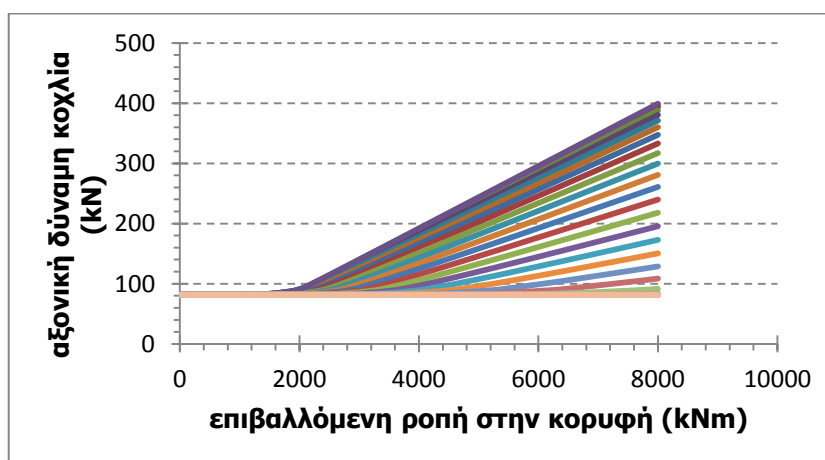
$$F_{p,c} = 0.6 \times f_{ub} \times A_s = 0,6 \times 817kN \rightarrow F_{p,c} = 490,2kN$$

Στο σχήμα 6-2 παρουσιάζεται το διάγραμμα της αξονικής δύναμης των 45 κοχλιών της σύνδεσης για την μέγιστη δύναμη προέντασης (70% της εφελκυστικής αντοχής) ενώ στο σχήμα 6-3 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για δύναμη προέντασης ίση με το 10% της εφελκυστικής αντοχής. Παρατηρείται το γεγονός ότι όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης του κοχλία τόσο μεγαλύτερο

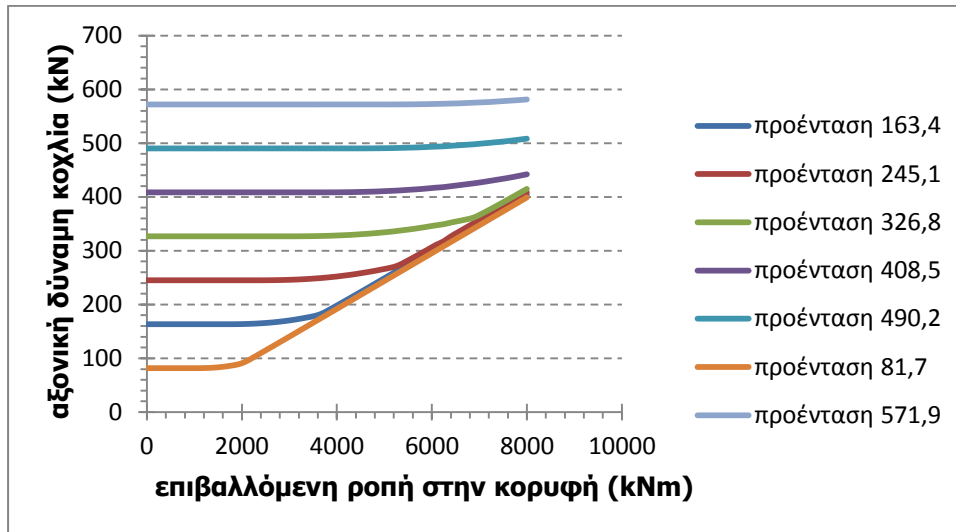
είναι το οριζόντιο πλατό το οποίο δημιουργείται στο διάγραμμα. Επομένως, η αξονική δύναμη του κοχλία για προένταση 70% της εφελκυστικής αντοχής παραμένει σταθερή για μεγαλύτερο μέγεθος ροπής απ' ότι για προένταση 10%. Αλλά και οι εφελκυσόμενοι κοχλίες είναι λιγότεροι σε πλήθος απ' ότι για προένταση 10%. Όταν η δύναμη προέντασης είναι μικρή το φορτίο παραλαμβάνεται άμεσα μέσω των κοχλιών και η ανακατανομή που λαμβάνει χώρα στην αρχή της φόρτισης είναι μικρή.



Σχήμα 6-2: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης των κοχλιών για προένταση 571,9kN



Σχήμα 6-3: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης των κοχλιών για προένταση 81,7kN



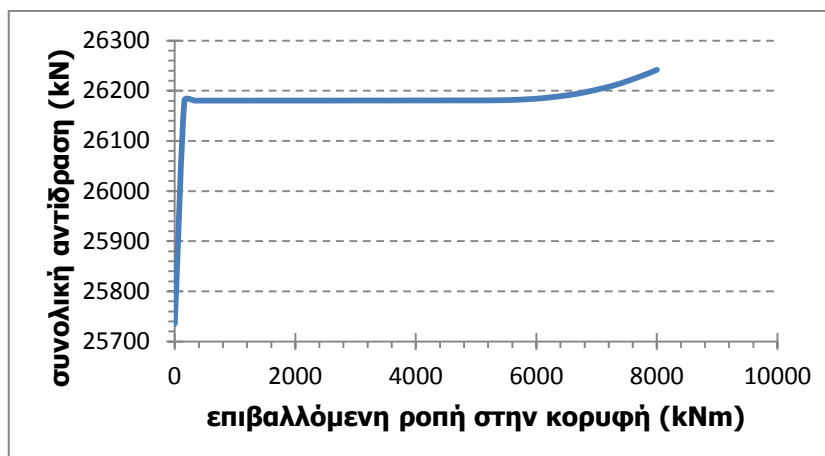
Σχήμα 6-4: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του ακραίου εφελκυόμενου κοχλία για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

Στο σχήμα 6-4 έχουμε συγκεντρωτικά τον δρόμο ισορροπίας της αξονικής δύναμης του ακραίου κοχλία της σύνδεσης στην εφελκυόμενη παρειά, η αξονική δύναμη του οποίου είναι και η μέγιστη όλων των κοχλιών. Παρατηρείται ότι όσο πιο μικρή είναι η τιμή της δύναμης προέντασης των κοχλιών σε σχέση πάντα με το επιβαλλόμενο φορτίο, η αξονική δύναμη των κοχλιών είναι ανεξάρτητη από την αρχική δύναμη προέντασης. Συγκεκριμένα, για τιμές της δύναμης προέντασης 10%, 20%, 30%, 40% και 50% τα διαγράμματα καταλήγουν στην ίδια τιμή αξονικής δύναμης για μέγεθος ασκούμενης ροπής στην κορυφή του πυλώνα 8000kNm. Το μόνο που μεταβάλλεται είναι το οριζόντιο πλατό το οποίο μειώνεται όσο μειώνεται η δύναμη προέντασης. Τα διαγράμματα που αντιστοιχούν σε δύναμη προέντασης ίση με το 60% και 70% της εφελκυστικής αντοχής παρουσιάζουν πολύ μικρή απόκλιση από την ευθυγραμμία, δηλ. η αξονική δύναμη του κοχλία είναι πολύ κοντά στην δύναμη προέντασης. Η αύξηση της αξονικής δύναμης του ακραίου κοχλία είναι ελάχιστη και αυτό γιατί οι τιμές αυτές προέντασης είναι τόσο υψηλές ώστε το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται μέσω ανακατανομής της έντασης και δεν είναι απαραίτητη η παραλαβή μεγάλου μέρους του φορτίου από τους κοχλίες.

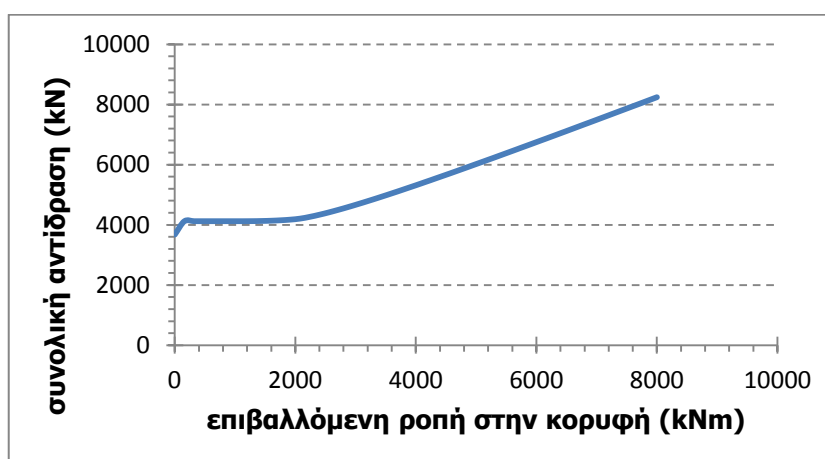
Δύναμη προέντασης (%)	Αρχική δύναμη (kN)	Τελική δύναμη (kN)
10	81,7	399,10
20	163,4	403,40
30	245,1	408,50
40	326,8	414,92
50	408,5	442,06
60	490,2	508,31
70	571,9	581,15

Στον παραπάνω πίνακα έχουμε συγκεντρωτικά τις τιμές της αξονικής δύναμης του ακραίου εφελκυόμενου κοχλία ανάλογα με την δύναμη προέντασης του αμέσως μετά την προένταση (αρχική δύναμη) και στο τέλος της φόρτισης (τελική δύναμη). Παρατηρείται το γεγονός ότι για δύναμη προέντασης 70% της εφελκυστικής αντοχής η αξονική δύναμη μεταβάλλεται ελάχιστα. Όσο μειώνεται

το ποσοστό της δύναμης προέντασης όμως η μεταβολή αυτή γίνεται όλο και μεγαλύτερη, τόσο ώστε η αρχική δύναμη προέντασης να μην παίζει πλέον ρόλο στην τιμή της αξονικής.



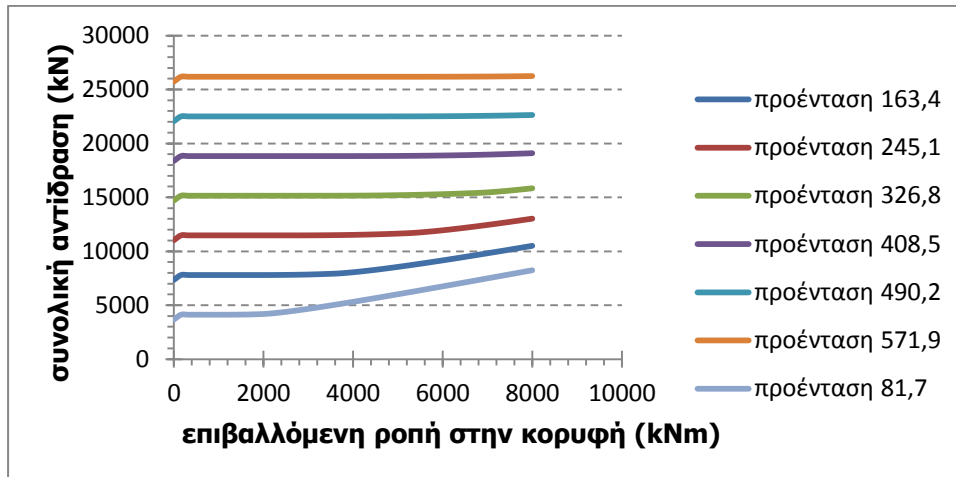
Σχήμα 6-5: συνολική αντίδραση κάτω ελάσματος για δύναμη προέντασης 571,9kN



Σχήμα 6-6: συνολική αντίδραση κάτω ελάσματος για δύναμη προέντασης 81,7kN

Στο σχήμα 6-5 παρουσιάζεται το διάγραμμα των κατακόρυφων δυνάμεων επαφής μεταξύ των 2 ελασμάτων για την μέγιστη τιμή της δύναμης προέντασης. Η αρχική τιμή του διαγράμματος αντιστοιχεί όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο στην συνολική δύναμη προέντασης των κοχλιών. Επειδή σε εκείνη την χρονική στιγμή δεν έχει αρχίσει ακόμη η επιβολή των φορτίων. Στη συνέχεια, αμέσως μετά την προένταση των κοχλιών, ασκείται σε χρόνο 0 το κατακόρυφο αξονικό φορτίο και το ίδιο βάρος του φορέα ως ένα σταθερό φορτίο γι' αυτό και η συνολική αντίδραση αυξάνεται απότομα και φτάνει κοντά στα 26200kN. Έπειτα, λόγω της υψηλής τιμής της δύναμης προέντασης η συνολική αντίδραση μένει σταθερή για μία αρκετά υψηλή τιμή της ασκούμενης καμπτικής ροπής και τέλος αυξάνεται γραμμικά ως την τελική της τιμή.

Στο σχήμα 6-6 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα για δύναμη προέντασης 10% της εφελκυστικής αντοχής. Η μορφή του διαγράμματος είναι ίδια. Το μόνο που αλλάζει είναι τα μεγέθη, καθώς εδώ το μεγαλύτερο μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται μέσω της αύξησης της αξονικής δύναμης των κοχλιών.

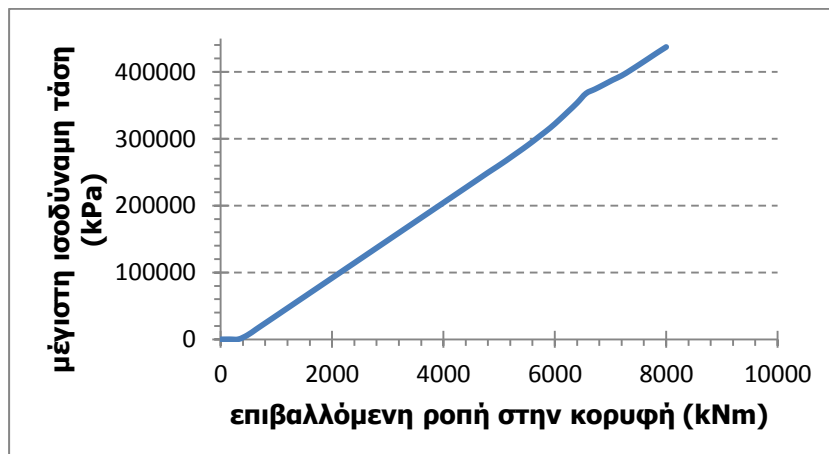


Σχήμα 6-7: συνολική αντίδραση κάτω ελάσματος για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

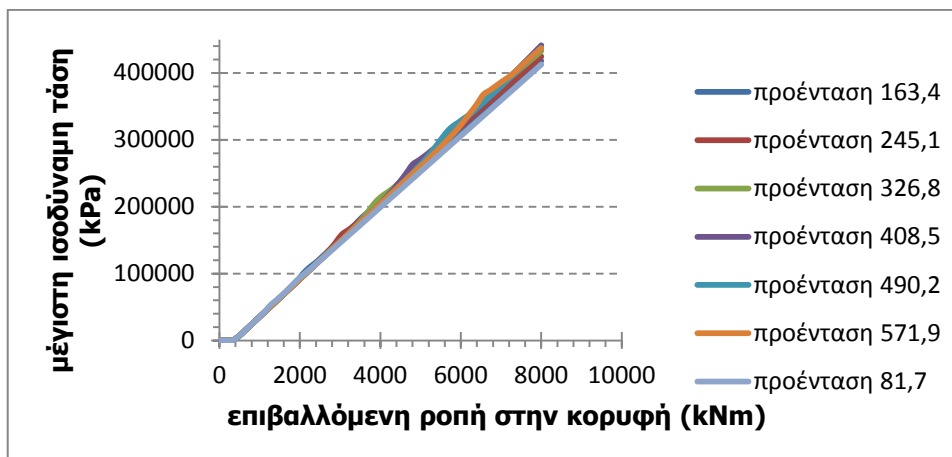
Στο σχήμα 6-7 απεικονίζεται το ίδιο διάγραμμα το οποίο όμως περιλαμβάνει τις καμπύλες για όλες τις περιπτώσεις δύναμης προέντασης. Όπως είναι λογικό οι καμπύλες βρίσκονται σε διαφορετικό επίπεδο μεταξύ τους μιας και η διαφορετική δύναμη προέντασης αλλάζει το σημείο από το οποίο ξεκινά η κάθε καμπύλη. Αυτό όμως που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι όσο μικρότερη είναι η δύναμη προέντασης η συνολική αντίδραση αυξάνεται πιο πολύ σε σχέση με την αρχική της τιμή, και το γραμμικό κομμάτι του διαγράμματος είναι μεγαλύτερο. Ενώ όσο μεγαλώνει η δύναμη προέντασης η απόκλιση από το οριζόντιο πλατό είναι ελάχιστη και άρα δεν αυξάνεται ιδιαίτερα η συνολική αντίδραση συγκρινόμενη πάντα με την αρχική της τιμή.

Δύναμη προέντασης (kN)	Αρχική τιμή συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος (kN)	Τιμή συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος μετά την επιβολή αξονικού φορτίου (kN)	Τελική τιμή συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος (kN)
81,7	3676,5	4121,3	8240,99
571,9	25735,5	26180,3	26241,6

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται το γεγονός ότι η συνολική αντίδραση για προένταση 571,9kN μεταβάλλεται μόλις κατά 61,3kN λόγω καμπτικής ροπής, ενώ για προένταση 81,7kN μεταβάλλεται κατά 4119,69kN.



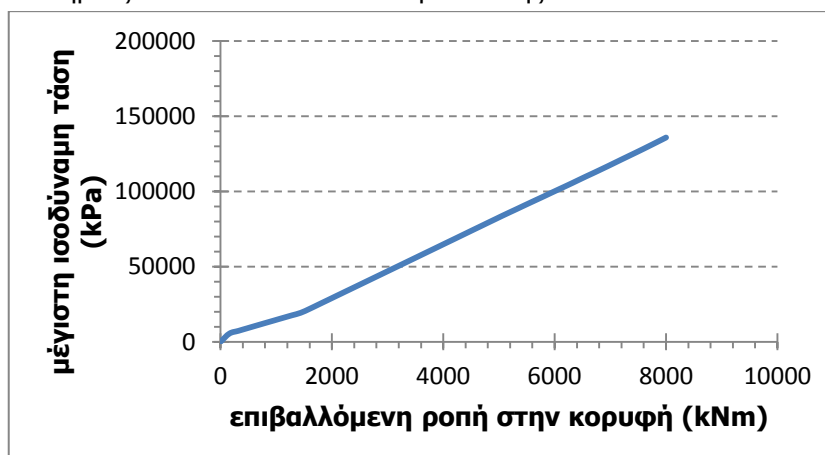
Σχήμα 6-8: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην άνω επιφάνεια του άνω ελάσματος για δύναμη προέντασης 571,9kN



Σχήμα 6-9: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην άνω επιφάνεια του άνω ελάσματος για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

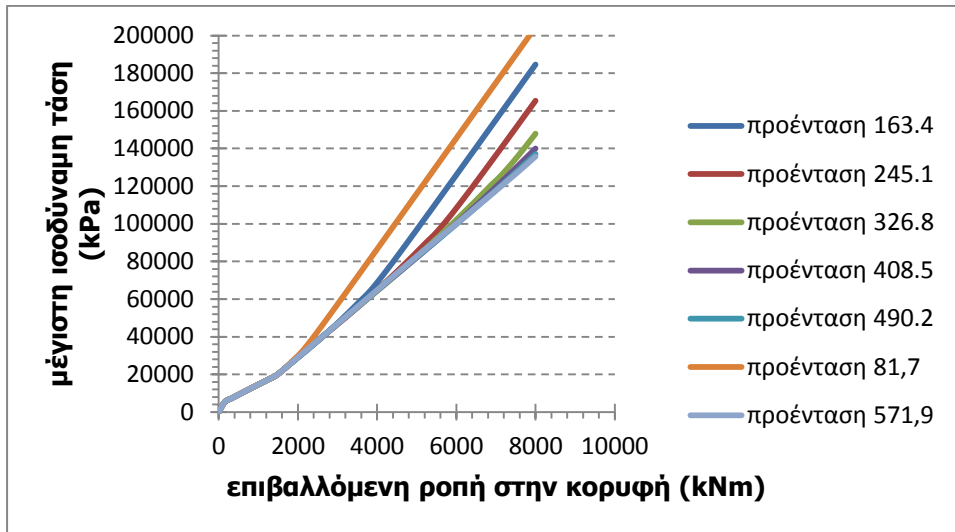
Στο σχήμα 6-8 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στο άνω έλασμα συναρτήσει της επιβαλλόμενης ροπής για την μέγιστη δύναμη προέντασης. Αρχικά, η τάση είναι πολύ μικρή και σταθερή για ροπή ως 400kNm και ίση με την τάση λόγω της προέντασης των κοχλιών. Στην συνέχεια η τάση αυξάνεται σχεδόν γραμμικά με το επιβαλλόμενο φορτίο. Στο σχήμα 6-9 έχουμε το ίδιο διάγραμμα για διάφορες τιμές τα δύναμης προέντασης. Παρατηρείται ότι η μέγιστη ισοδύναμη τάση στο άνω έλασμα είναι ανεξάρτητη από την δύναμη προέντασης. Γενικά, οι μεγαλύτερες τάσεις εμφανίζονται για την μέγιστη δύναμη προέντασης, όμως οι διαφορές μεταξύ των καμπυλών είναι ελάχιστες.

Η θέση στην οποία το μέγεθος της ισοδύναμης τάσης επηρεάζεται από την δύναμη προέντασης είναι στην συγκόλληση. Στο σχήμα 6-10 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση για την μέγιστη δύναμη προέντασης. Η σχέση της ισοδύναμης τάσης με το επιβαλλόμενο φορτίο εξελίσσεται γραμμικά. Στο σχήμα 6-11 γίνεται φανερό ότι όσο μικρότερη είναι η δύναμη προέντασης τόσο μεγαλύτερη είναι η ισοδύναμη τάση στη συγκόλληση, και μάλιστα η αύξηση γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη. Δηλαδή η κλίση του διαγράμματος αυξάνεται πιο γρήγορα. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι για μικρές τιμές της επιβαλλόμενης ροπή τα διαγράμματα τόσο στο σχήμα 6-9 όσο και στο σχήμα 6-11 ταυτίζονται απόλυτα. Επομένως, οι ισοδύναμες τάσεις οι οποίες θα αναπτυχθούν τόσο στα ελάσματα όσο και στον πυλώνα είναι ανεξάρτητες από την τιμή της δύναμης προέντασης για μικρότερες τιμές του φορτίου. Αντίθετα, όλα τα αποτελέσματα τα οποία είδαμε παραπάνω επηρεάζονταν από το ποσοστό προέντασης.

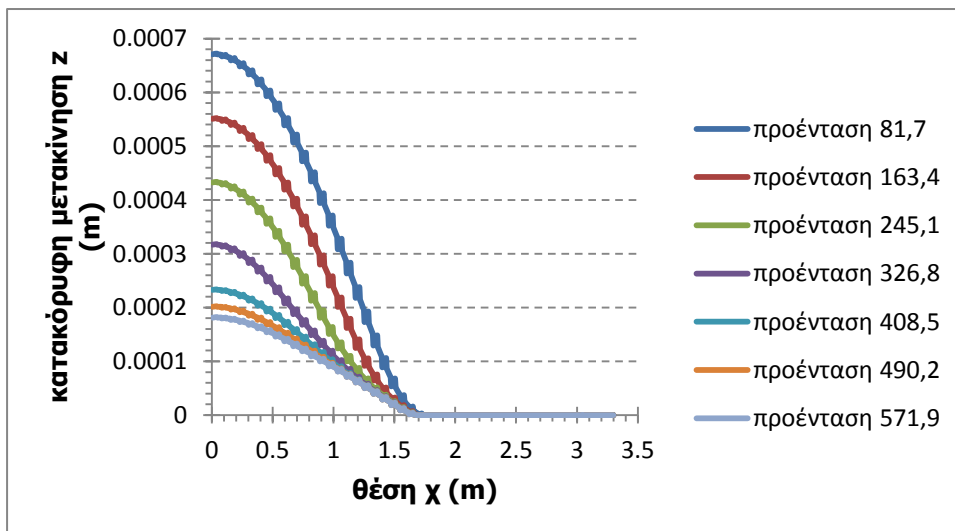


Σχήμα 6-10: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση για δύναμη προέντασης 571,9kN



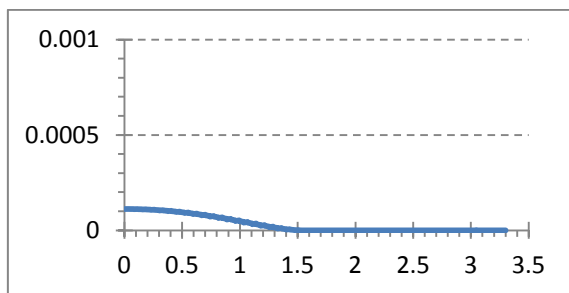
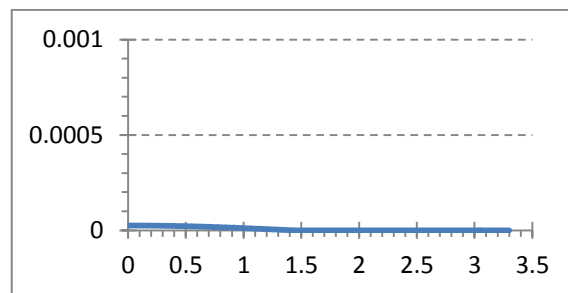
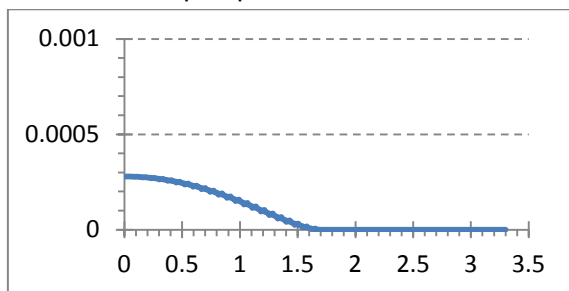
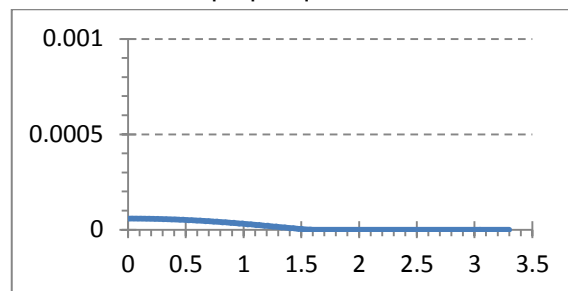
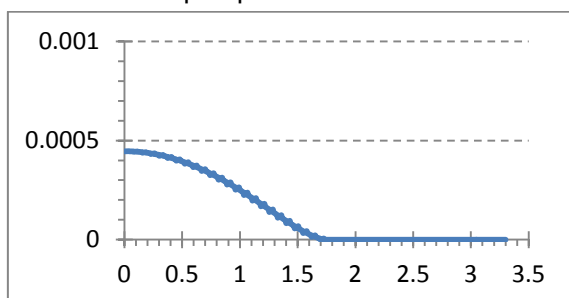
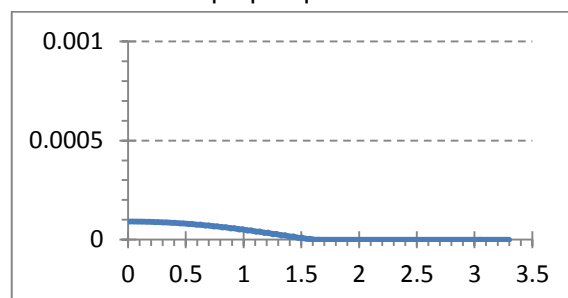
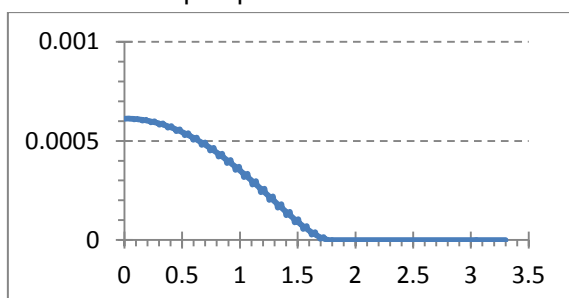
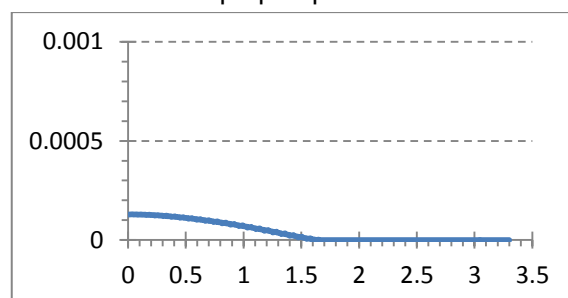
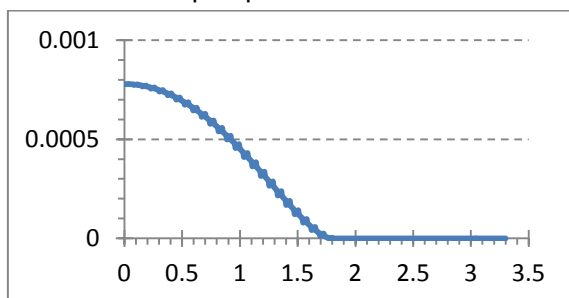
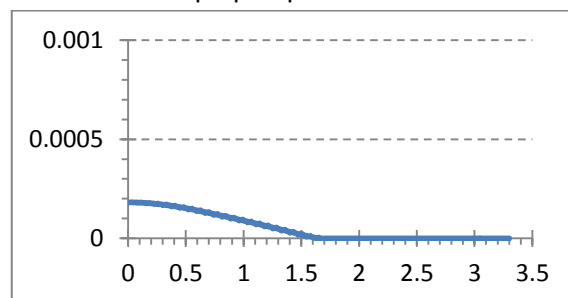


Σχήμα 6-11: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

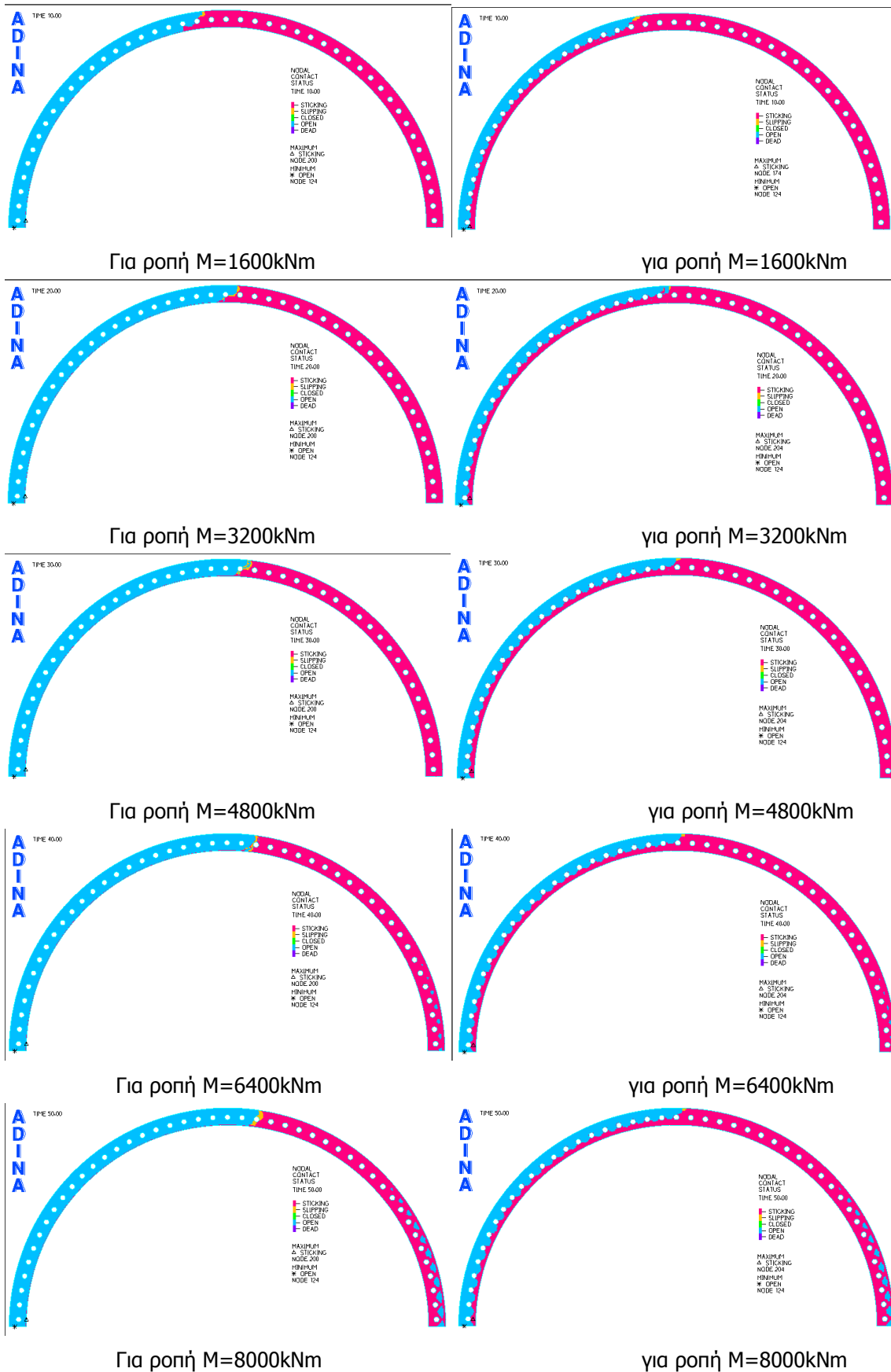


Σχήμα 6-12: κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων στο άνω έλασμα για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης

Στο σχήμα 6-12 παρουσιάζεται η θέση του ουδέτερου άξονα για διάφορες τιμές της δύναμης προέντασης και για μέγεθος καμπτικής ροπής 8000kNm. Βλέπουμε ότι η θέση του ουδέτερου άξονα δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από την δύναμη προέντασης. Ωστόσο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το σχήμα 6-13 όπου αριστερά έχουμε την θέση του ουδέτερου άξονα για χρήση μη προεντεταμένων κοχλιών στην σύνδεση και δεξιά για προεντεταμένους κοχλίες με την μέγιστη δύναμη προέντασης. Στα διαγράμματα αυτά η θέση του ουδέτερου άξονα μεταβάλλεται και μάλιστα χωρίς την προένταση ο ουδέτερος άξονας μετατοπίζεται προς την μεριά των θλιβόμενων κοχλιών. Επομένως, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η τιμή της δύναμης προέντασης δεν επηρεάζει και πολύ την θέση του ουδέτερου άξονα όμως η παρουσία και μόνο της προέντασης μετατοπίζει τον ουδέτερο άξονα της σύνδεσης προς το κέντρο συμμετρίας της. Τέλος, βλέπουμε ότι για απλούς κοχλίες ο ουδέτερος άξονας βρίσκεται προς την πιο δύσκαμπτη περιοχή, δηλαδή την θλιβόμενη.

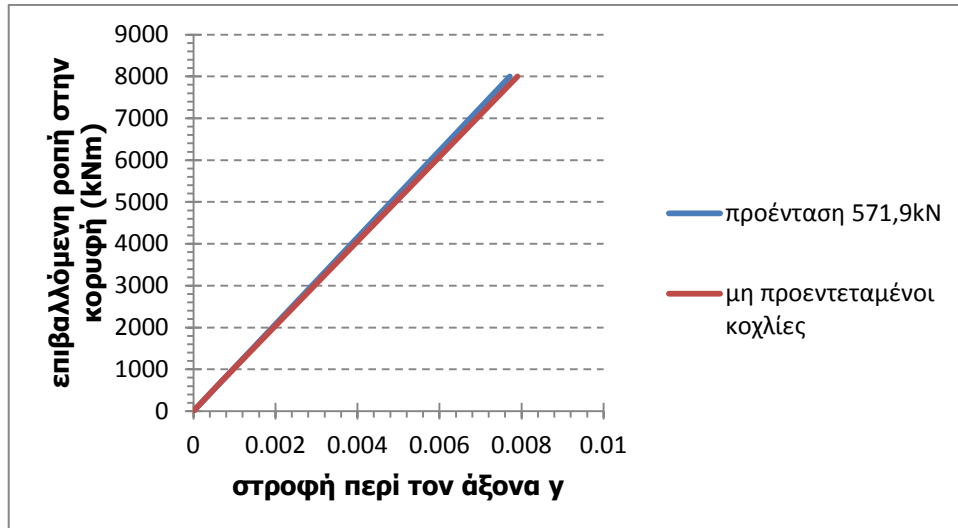
Για ροπή  $M=1600\text{kNm}$ για ροπή  $M=1600\text{kNm}$ Για ροπή  $M=3200\text{kNm}$ για ροπή  $M=3200\text{kNm}$ Για ροπή  $M=4800\text{kNm}$ για ροπή  $M=4800\text{kNm}$ Για ροπή  $M=6400\text{kNm}$ για ροπή  $M=6400\text{kNm}$ Για ροπή  $M=8000\text{kNm}$ για ροπή  $M=8000\text{kNm}$ 

Σχήμα 6-13: κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων άνω ελάσματος για διάφορες τιμές επιβαλλόμενης ροπής για απλούς κοχλίες αριστερά και για προεντεταμένους κοχλίες δεξιά

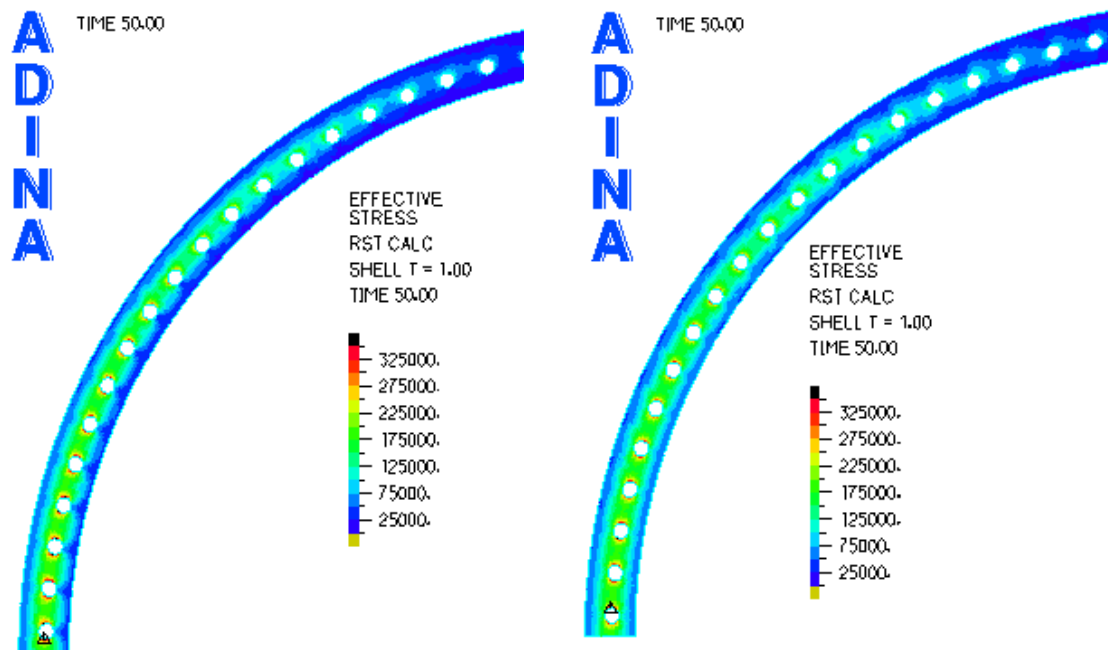


Σχήμα 6-14: επιφάνειες επαφής για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης ροπής για απλούς κοχλίες αριστερά και για προεντεταμένους κοχλίες δεξιά

Τέλος, είναι σημαντικό να τονισθεί ότι οι παραπάνω αριθμητικές αναλύσεις εκτελέστηκαν με την παραδοχή απείρως ελαστικού υλικού, επομένως και ο δρόμος ισορροπίας του φορέα είναι γραμμικός (σχήμα 6-15). Θα πρέπει, ωστόσο να ελέγξουμε ότι οι τάσεις παραμένουν χαμηλές, κάτω από το όριο διαρροής του υλικού για χάλυβα S355 και επομένως ήταν ορθή η παραδοχή ελαστικού υλικού και δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα.



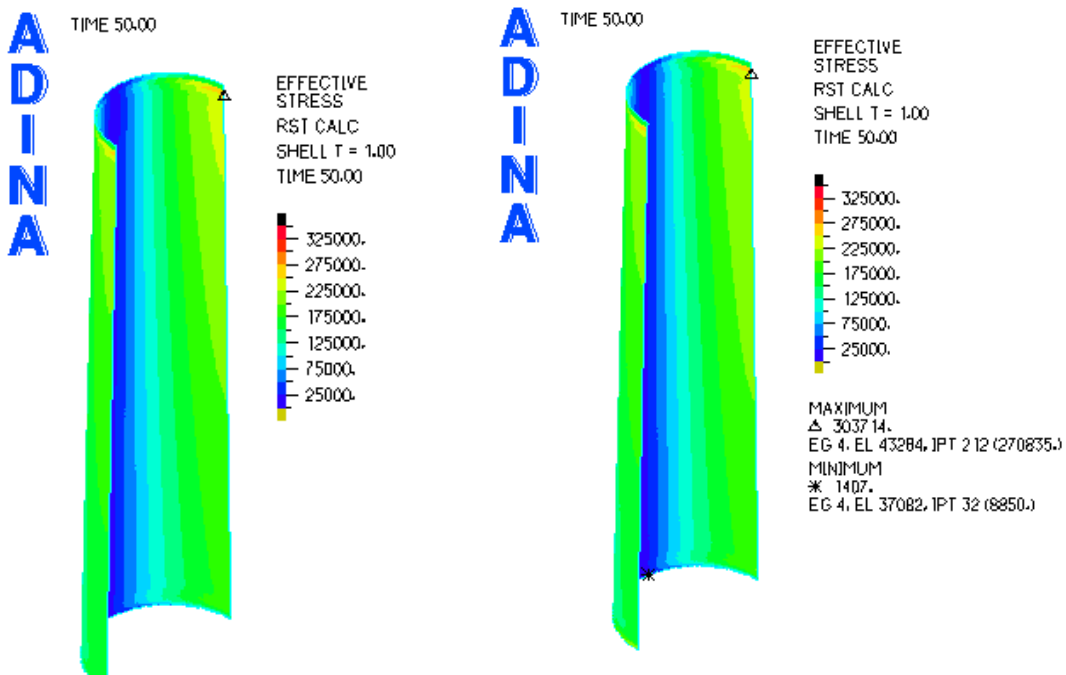
Σχήμα 6-15: δρόμος ισορροπίας φορέα για προεντεταμένους και απλούς κοχλίες



Προεντεταμένοι κοχλίες

Απλοί κοχλίες

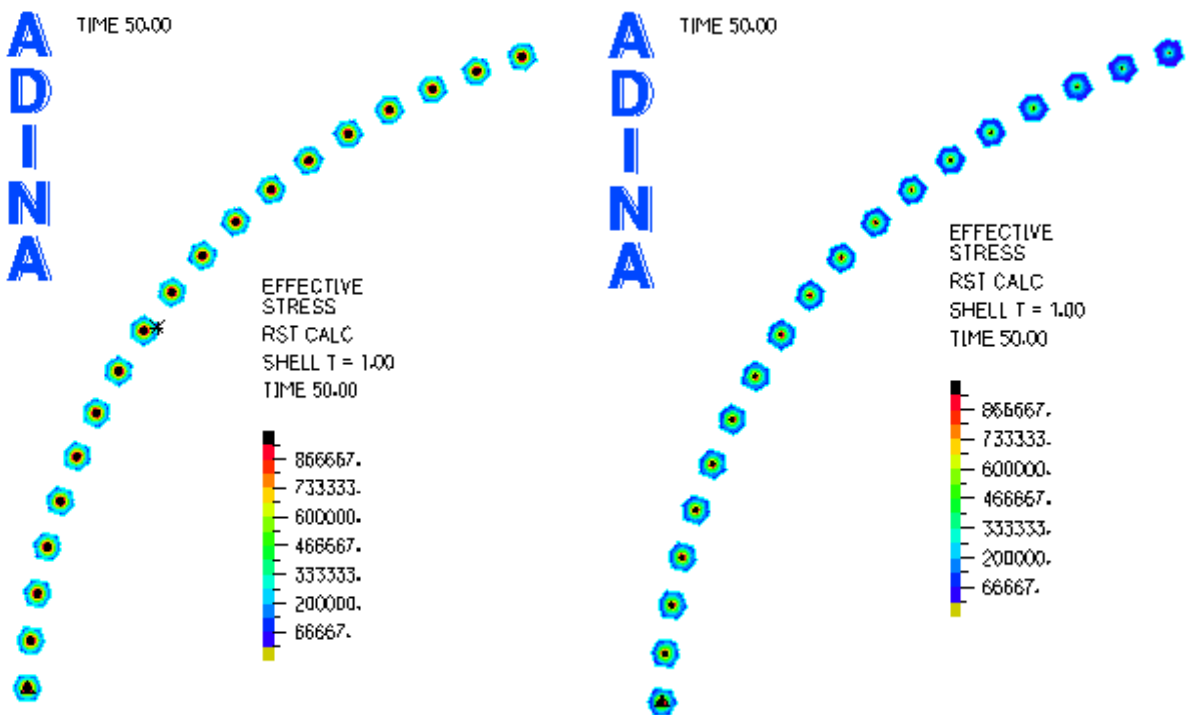
Σχήμα 6-16: τάσεις στο άνω έλασμα για ροπή 8000kNm για προεντεταμένους και απλούς κοχλίες αντίστοιχα



Προεντεταμένοι κοχλίες

Απλοί κοχλίες

Σχήμα 6-17: τάσεις στον πυλώνα για ροπή 8000kNm για προεντεταμένους και απλούς κοχλίες αντίστοιχα



Προεντεταμένοι κοχλίες

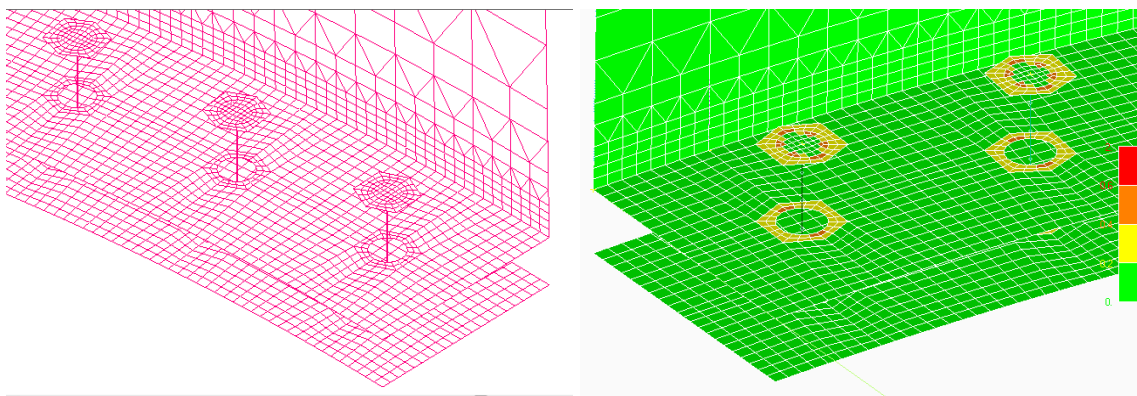
Απλοί κοχλίες

Σχήμα 6-18: τάσεις στην κεφαλή των κοχλιών για ροπή 8000kNm για προεντεταμένους και απλούς κοχλίες αντίστοιχα

Από τον δρόμο ισορροπίας του φορέα για απλούς και προεντεταμένους κοχλίες καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η προένταση των κοχλιών δεν προσφέρει κάτι στην αντοχή του φορέα σε στατικό φορτίο. Είτε έχουμε προεντεταμένους κοχλίες είτε όχι η σύνδεση αντέχει το ίδιο φορτίο και οι τάσεις που αναπτύσσονται δεν διαφέρουν. Εκείνο που διαφέρει όμως και είναι πολύ σημαντικό είναι οι μεταβολές των μεγεθών. Για χαμηλές τιμές της δύναμης προέντασης η αξονική δύναμη των κοχλιών και κατ' επέκταση οι τάσεις στους κοχλίες αλλά και οι τάσεις στην συγκόλληση έχουν μεγάλες μεταβολές μεταξύ μηδενικού και πλήρους φορτίου. Η έντονη αυτή διακύμανση των τάσεων, η οποία μάλιστα δεν παρατηρείται στην περίπτωση μεγάλης προέντασης, είναι επικίνδυνη σε περιπτώσεις ελέγχου φορέων σε κόπωση. Επομένως, από άποψη αντοχής του φορέα σε στατικά φορτία η προένταση δεν προσφέρει κάτι (ίσως λίγο μικρότερες μετακινήσεις) αλλά από άποψη αντοχής σε κόπωση η προένταση των κοχλιών είναι απαραίτητη.

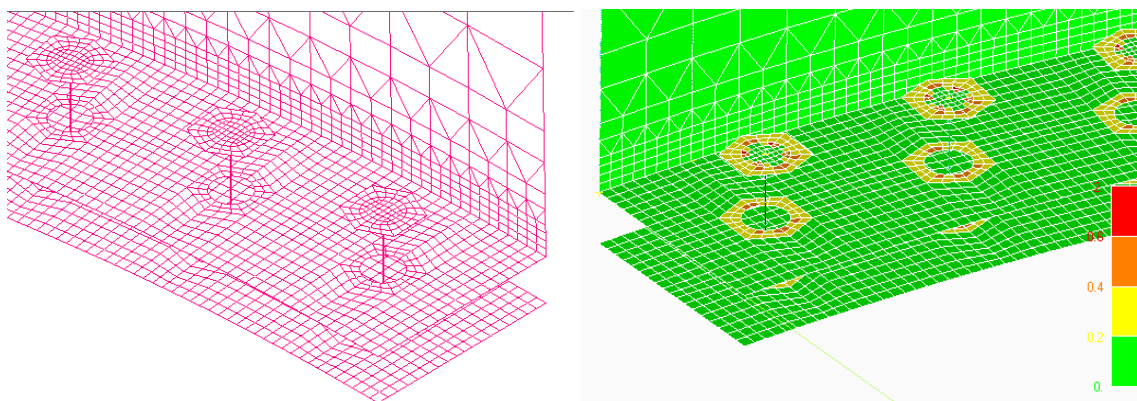
### 6.3 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΔΙΑΜΕΤΡΟΥ ΤΟΥ ΚΟΧΛΙΑ

- Κοχλίας M20



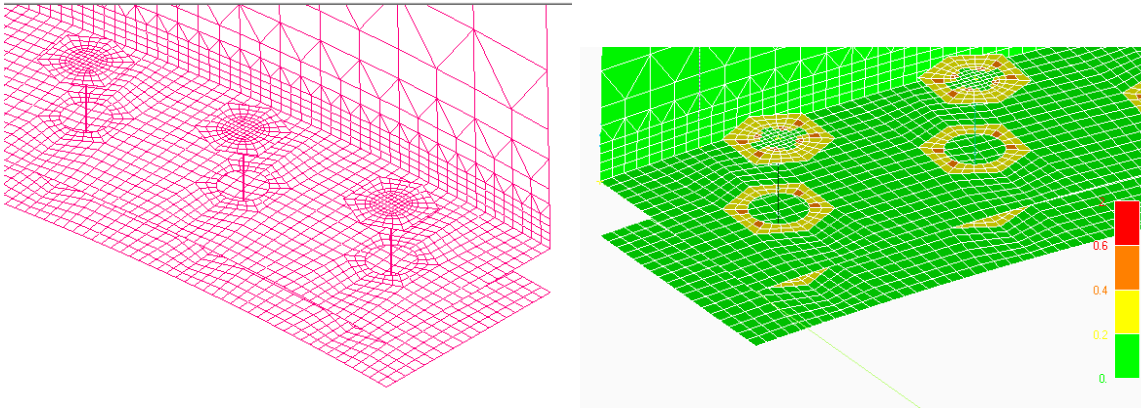
Σχήμα 6-19: προσομοίωμα φορέα στο ADINA και ποιότητα πλέγματος για κοχλία M20

- Κοχλίας M24



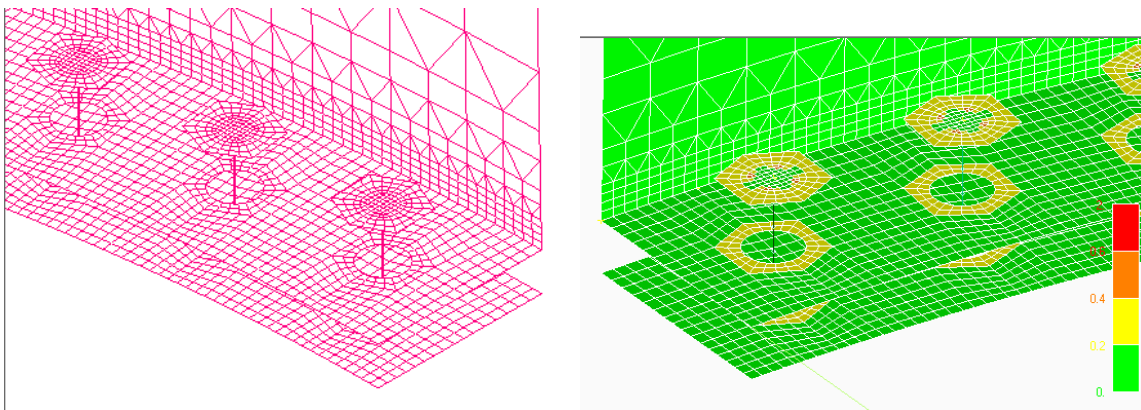
Σχήμα 6-20: προσομοίωμα φορέα στο ADINA και ποιότητα πλέγματος για κοχλία M24

- Κοχλίας M27

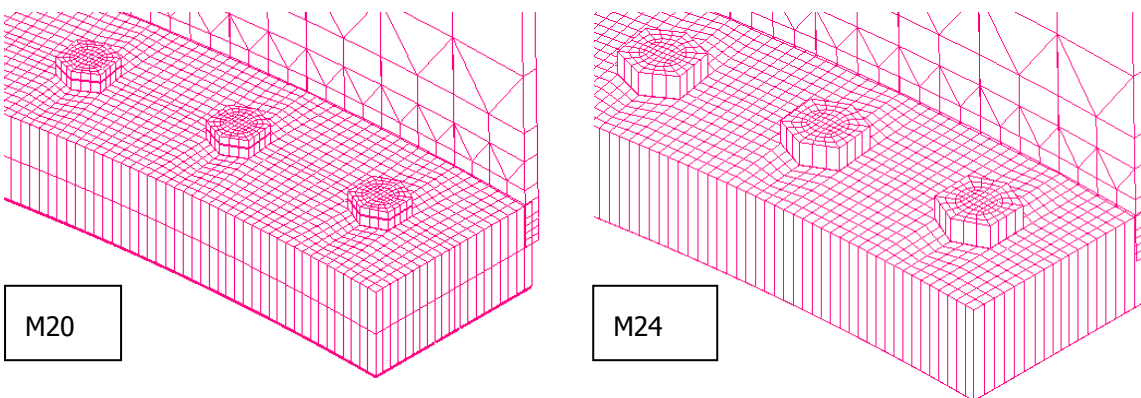


Σχήμα 6-21: προσομοίωμα φορέα στο ADINA και ποιότητα πλέγματος για κοχλία M27

- Κοχλίας M30



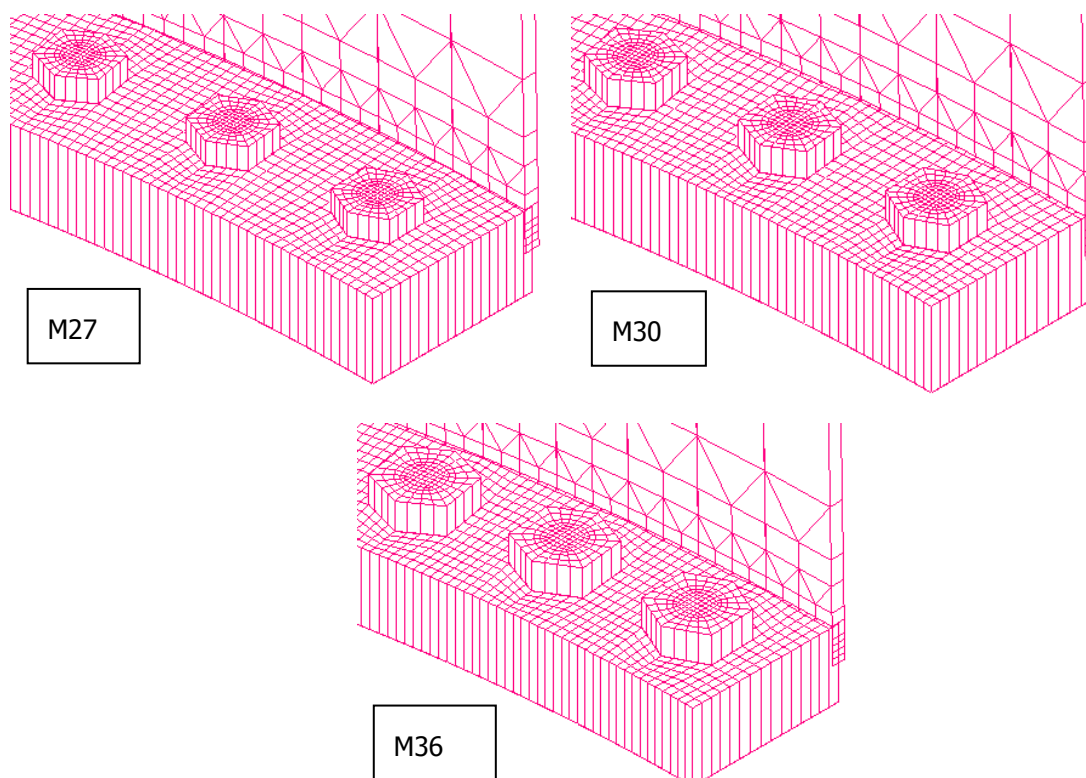
Σχήμα 6-22: προσομοίωμα φορέα στο ADINA και ποιότητα πλέγματος για κοχλία M30



M20

M24





Σχήμα 6-23: πραγματικές διαστάσεις σύνδεσης για τις διάφορες διαμέτρους κοχλιών

Η δύναμη προέντασης λαμβάνεται ίση με το 70% της εφελκυστικής αντοχής του κοχλία. Όμως για κάθε διάμετρο κοχλία η δύναμη προέντασης είναι διαφορετική, αφού εξαρτάται από το εμβαδόν σπειρώματος  $A_s$ .

Για κοχλία M20:

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

Για κοχλία M24:

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

Για κοχλία M27:

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

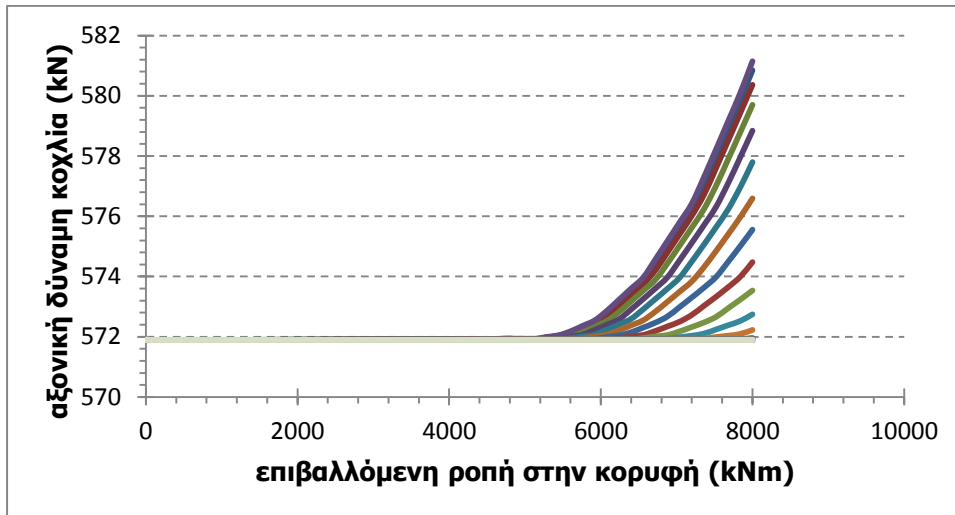
Για κοχλία M30:

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

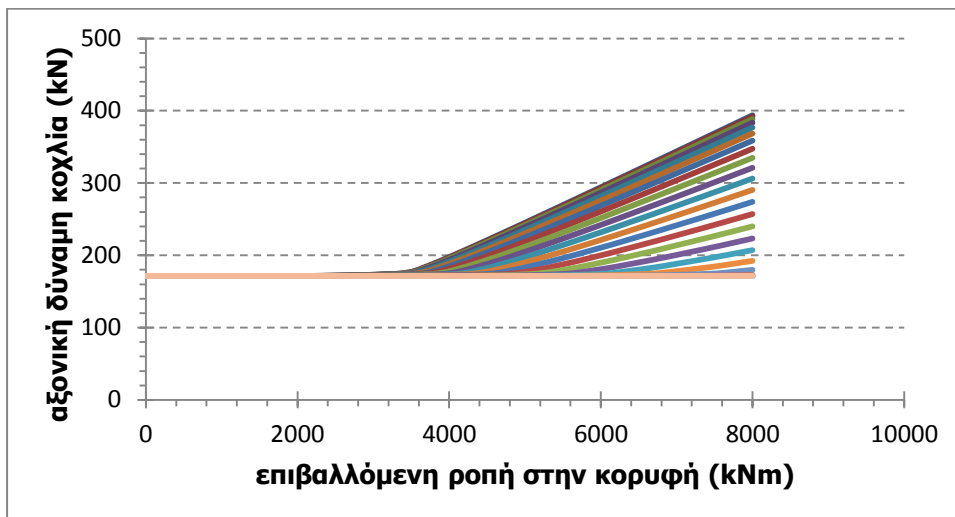
Εκτός από την δύναμη προέντασης, για διαφορετικές διαμέτρους κοχλιών αλλάζει και η ανοχή της οπής του ελάσματος. Σύμφωνα με τον EC3, για διάμετρο κοχλία μεταξύ M16 και M24 η ανοχή λαμβάνεται ίση με 2mm ενώ για διάμετρο κοχλία από M27 και άνω η ανοχή λαμβάνεται ίση με 3mm.

Τέλος, η γεωμετρία και οι διαστάσεις για κάθε διάμετρο κοχλία δίνονται από τον κανονισμό DIN6914.

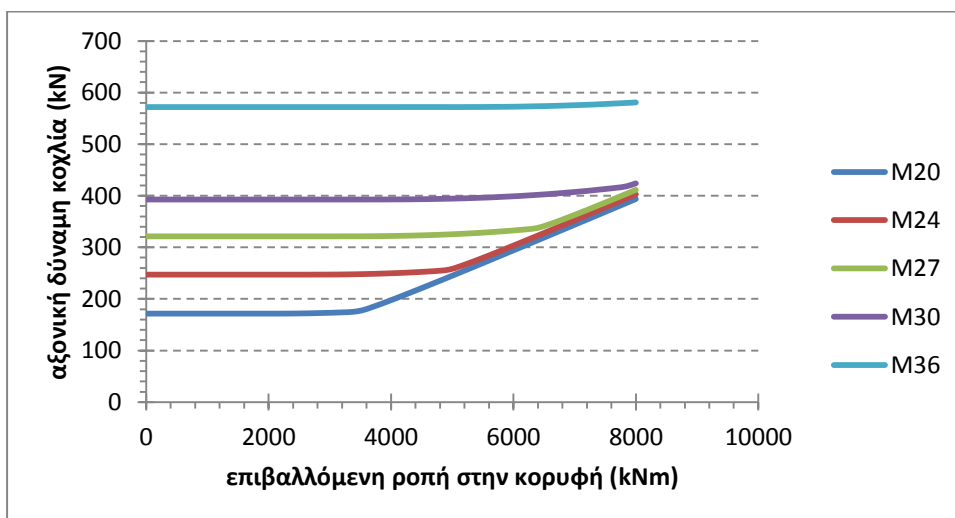




Σχήμα 6-24: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης των κοχλιών για διάμετρο κοχλίου M36



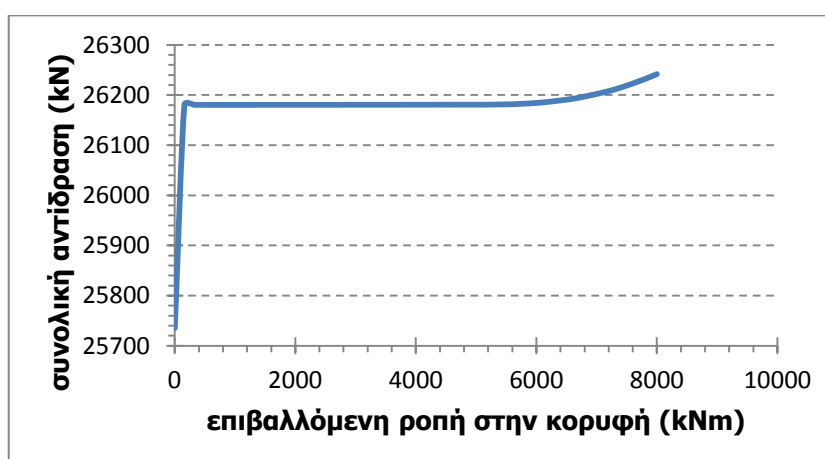
Σχήμα 6-25: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης των κοχλιών για διάμετρο κοχλίου M20



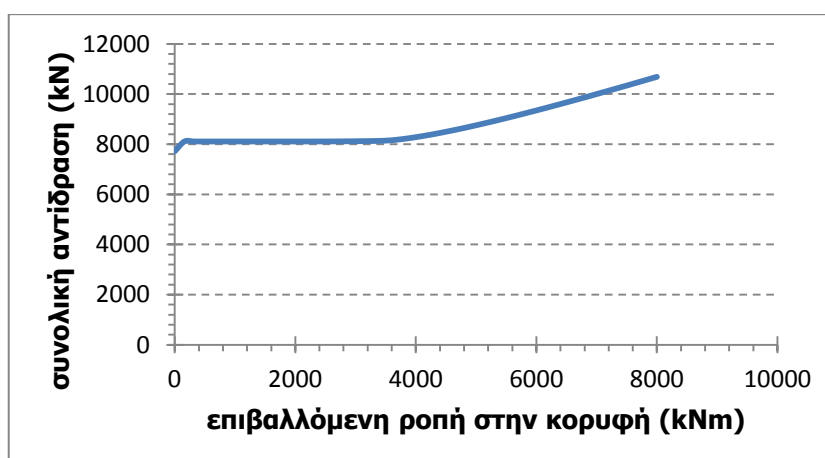
Σχήμα 6-26: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης του ακραίου εφελκυσμένου κοχλίου για διάφορες διαμέτρους κοχλιών

Η επίδραση της διαμέτρου των κοχλιών στην εξέλιξη της αξονικής δύναμης των κοχλιών, όπως φαίνεται και στα σχήματα 6-24, 6-25 και 6-26 είναι ανάλογη με την επίδραση της δύναμης προέντασης. Δηλαδή όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του κοχλία σε σχέση με την επιβαλλόμενη ροπή η αξονική δύναμη κοχλία είναι ανεξάρτητη απ' την αρχική δύναμη προέντασης. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται συγκεντρωτικά, η αρχική αξονική δύναμη και η τελική αξονική δύναμη του ακραίου εφελκυσόμενου κοχλία για τις διαφορετικές διαμέτρους κοχλιών.

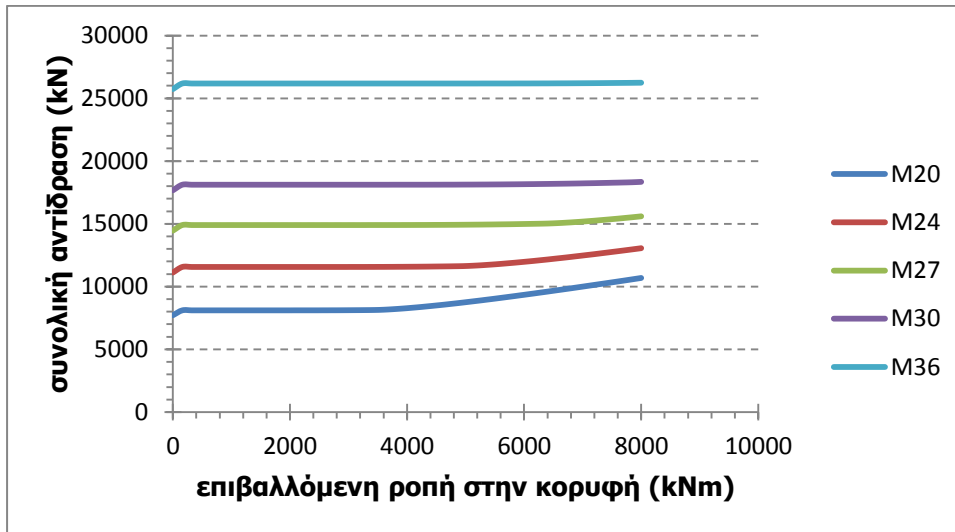
Διάμετρος κοχλία (mm)	Αρχική δύναμη (kN)	Τελική δύναμη (kN)
20	171,5	321,04
24	247,1	330,18
27	321,3	347,87
30	392,7	401,93
36	571,9	581,15



Σχήμα 6-27: συνολική αντίδραση κάτω ελάσματος για διάμετρο κοχλία M36



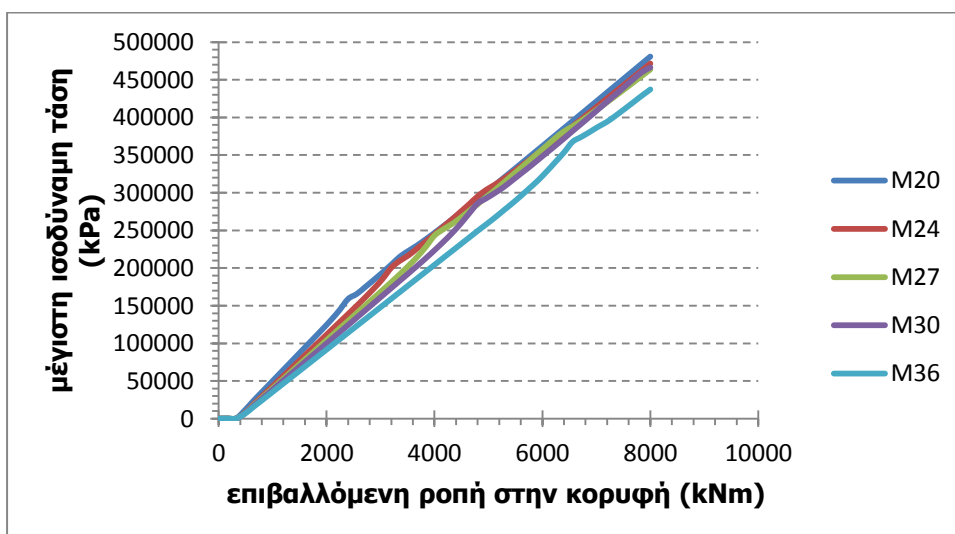
Σχήμα 6-28: συνολική αντίδραση κάτω ελάσματος για διάμετρο κοχλία M20



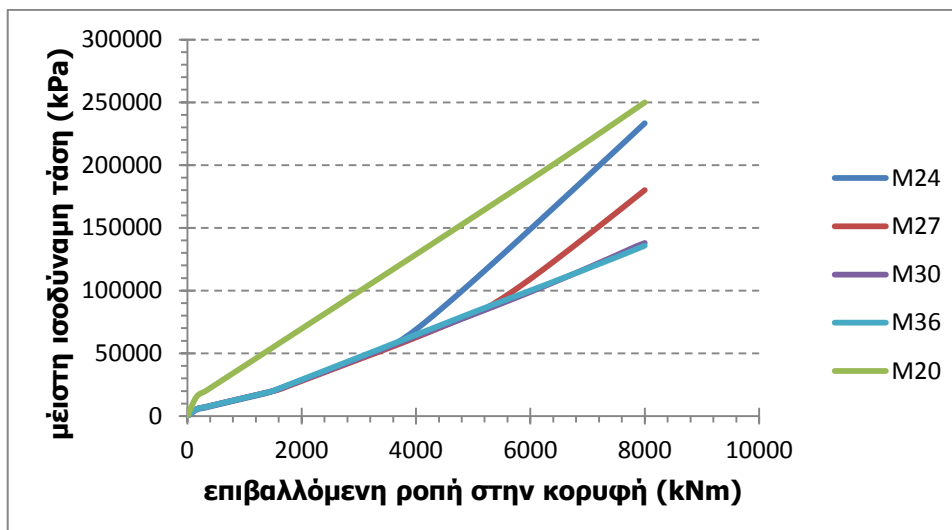
Σχήμα 6-29: συνολική αντίδραση κάτω ελάσματος για διαφορετικές διαμέτρους κοχλιών

Διάμετρος κοχλία (mm)	Αρχική τιμή συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος (kN)	Τιμή συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος μετά την επιβολή αξονικού φορτίου (kN)	Τελική τιμή συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος (kN)
20	7717.5	8107.49	10685.60
36	25735,5	26180,3	26241,6

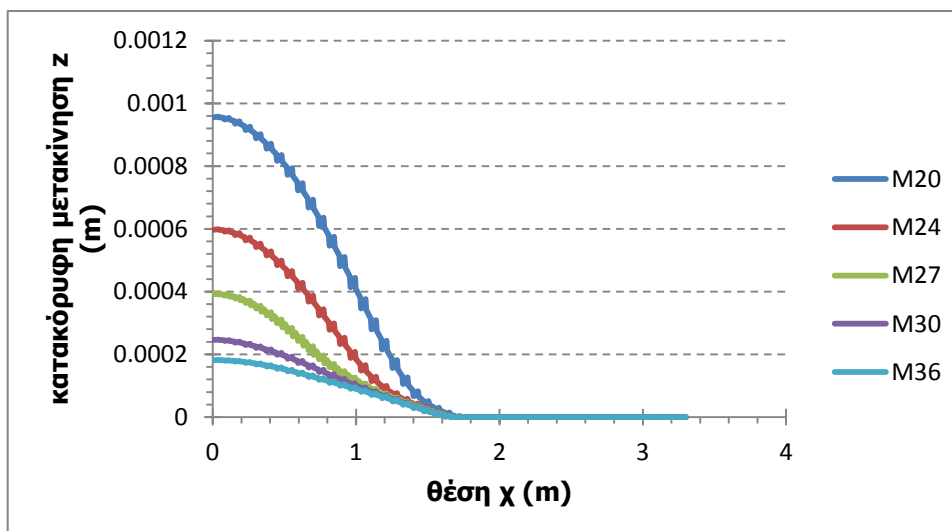
Από τον παραπάνω πίνακα καταλήγουμε στο ότι η μεταβολή των κατακόρυφων δυνάμεων επαφής μεταξύ των 2 ελασμάτων για διάμετρο κοχλία M20 είναι μεγάλη και ισούται με 2578,11kN, ενώ για διάμετρο κοχλία M36 είναι μόλις 61,3kN. Και στην περίπτωση διερεύνησης της συνολικής αντίδρασης του κάτω ελάσματος για διαφορετικές διαμέτρους κοχλιών, η συμπεριφορά είναι αντίστοιχη με τις παραμετρικές για την δύναμη προέντασης.



Σχήμα 6-30: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην άνω επιφάνεια του άνω ελάσματος για διαφορετικές διαμέτρους κοχλιών



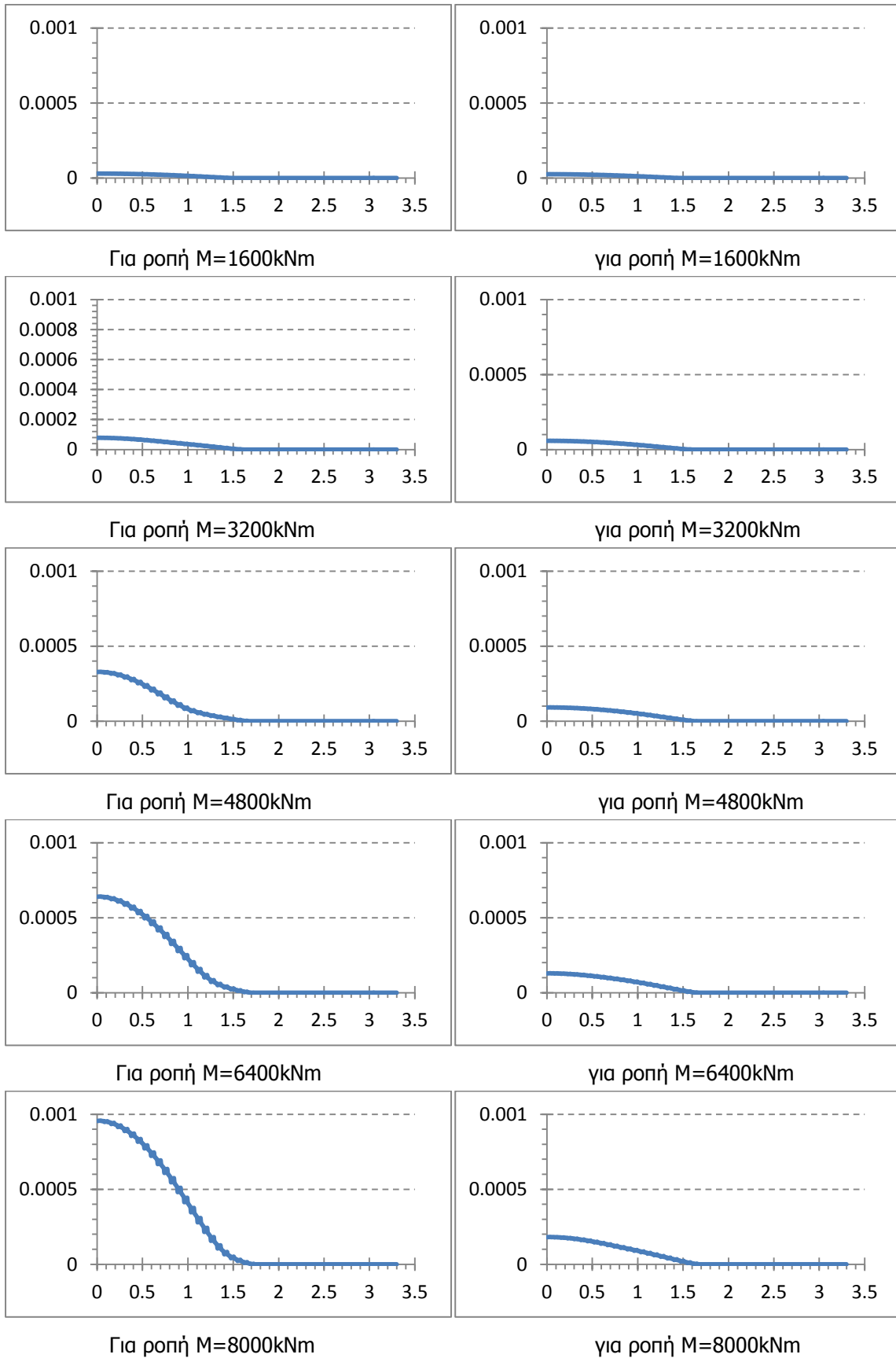
Σχήμα 6-31: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση για διαφορετικές διαμέτρους κοχλιών



Σχήμα 6-32: κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων στο άνω έλασμα για διαφορετικές διαμέτρους κοχλιών

Στα σχήματα 6-30 και 6-31 παρουσιάζεται η εξέλιξη της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στο άνω έλασμα και στην συγκόλληση για διάφορες διαμέτρους κοχλιών. Παρατηρείται ότι ενώ η απόκριση είναι ίδια όσον αφορά συνολικά το διάγραμμα με την διερεύνηση της επιρροής της δύναμης προέντασης, υπάρχει μία σημαντική διαφορά. Ενώ στις παραμετρικές για την τιμή της δύναμης προέντασης τα διαγράμματα για μικρές τιμές της επιβαλλόμενης ροπής ταυτίζονταν απόλυτα, στις παραμετρικές για την διάμετρο του κοχλία έχουν διαφορετική κλίση ακόμα και για μικρότερες τιμές του φορτίου. Δηλαδή, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του κοχλία η οποία θα χρησιμοποιηθεί, τόσο μεγαλύτερες θα είναι οι τάσεις οι οποίες θα αναπτυχθούν σε έλασμα και πυλώνα.

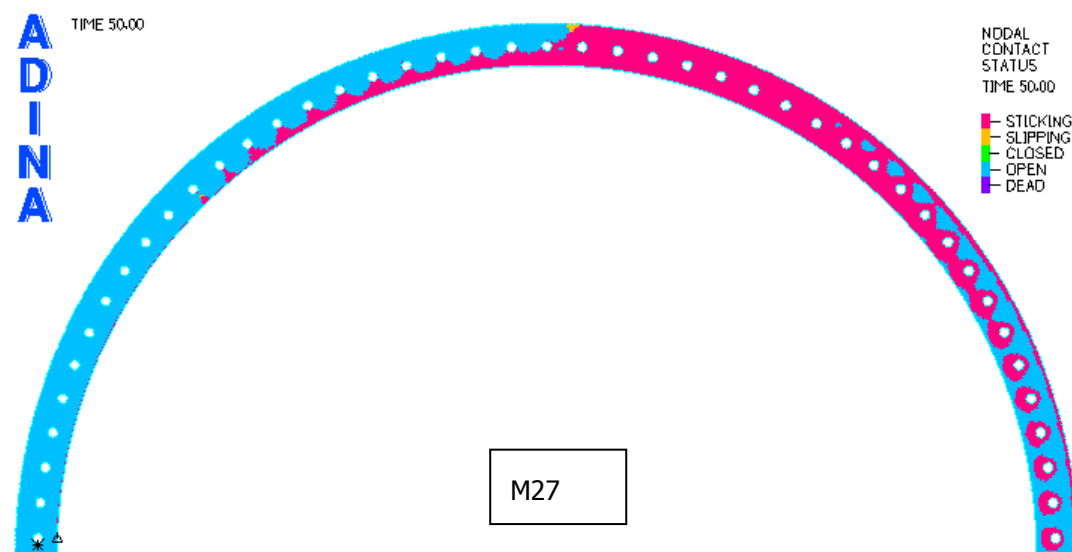
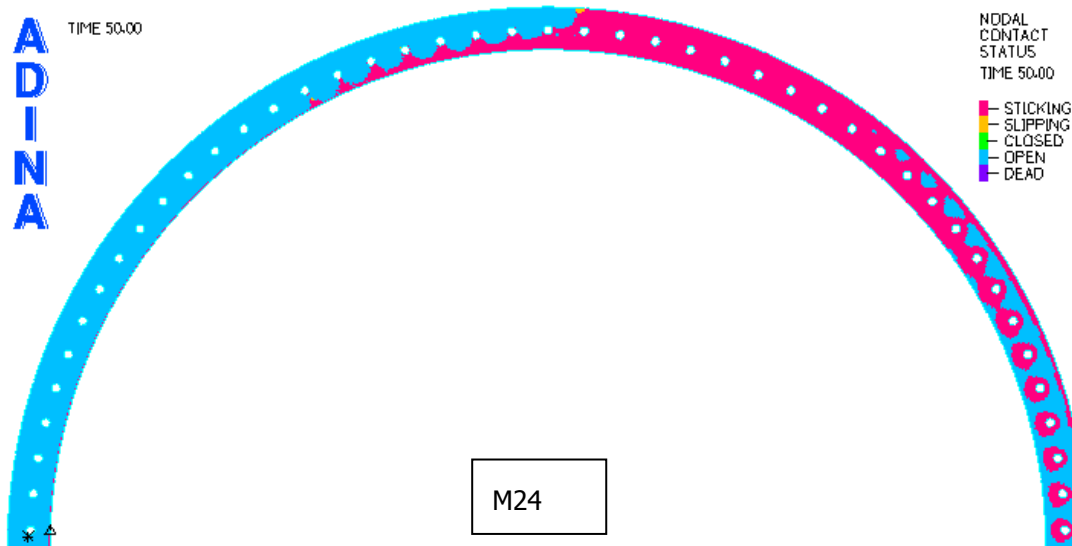
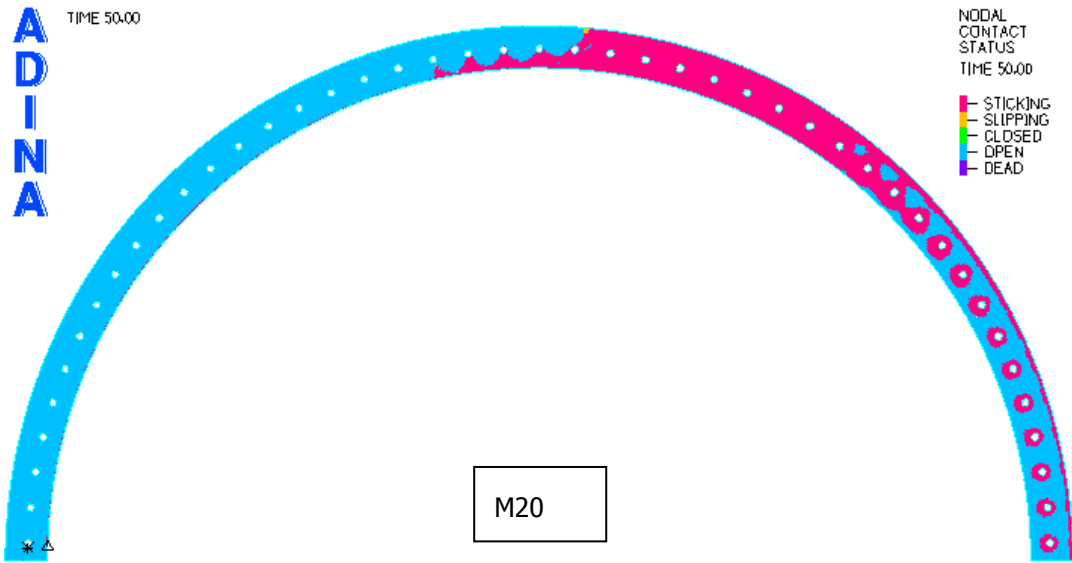
Στο σχήμα 6-33 βλέπουμε την θέση του ουδέτερου άξονα της σύνδεσης για διάμετρο κοχλία M20 και M36. Παρατηρούμε ότι η θέση του ουδέτερου άξονα μεταβάλλεται λίγο λόγω αλλαγής διαμέτρου των κοχλιών, όπως και λόγω αλλαγής της δύναμης προέντασης. Επομένως, και εδώ καταλήγουμε στο ίδιο συμπέρασμα. Δηλαδή διάμετρος κοχλία και δύναμη προέντασης είναι 2 παράμετροι με τα ίδια αποτελέσματα.

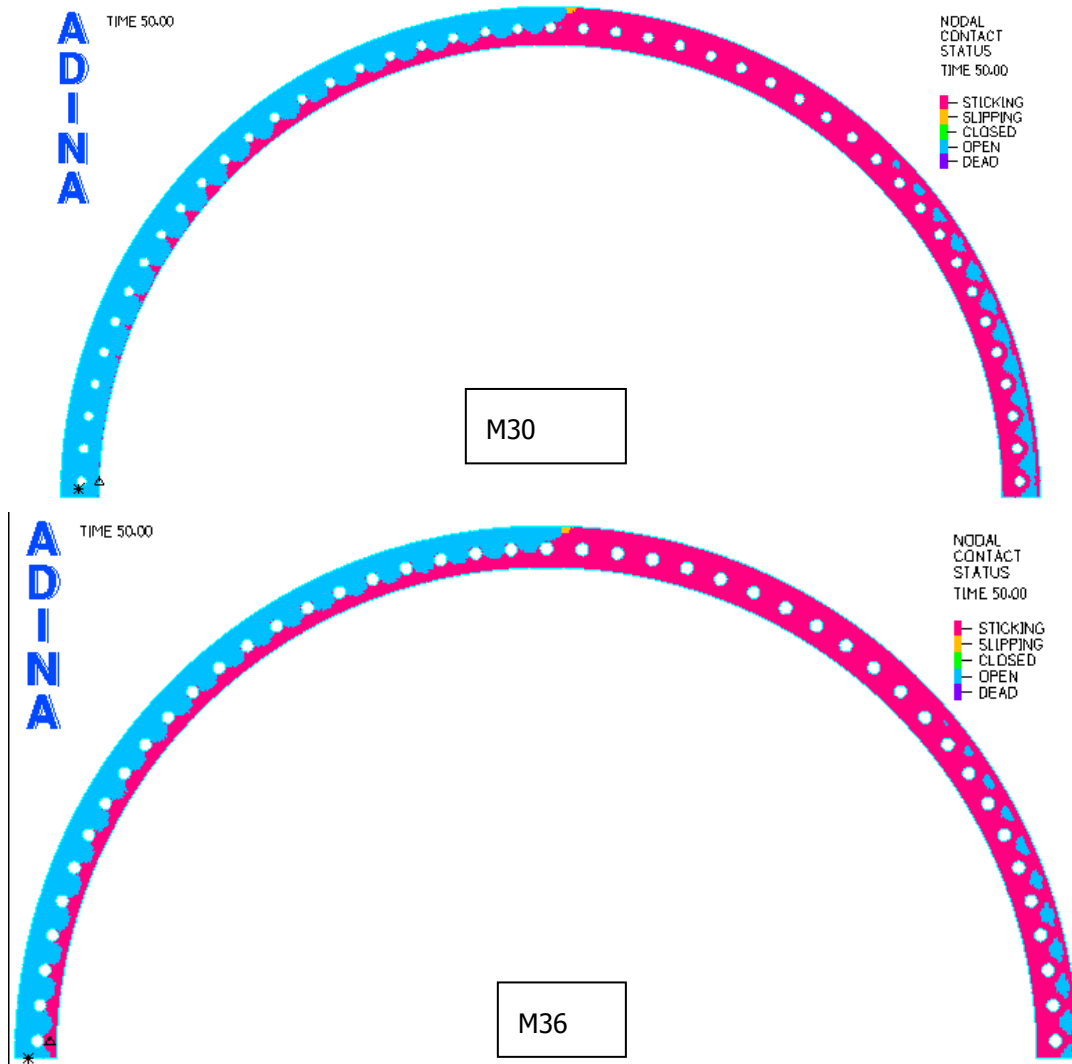


Σχήμα 6-33: κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων άνω ελάσματος για διάφορες τιμές επιβαλλόμενης ροπής για κοχλίες διαμέτρου M20 αριστερά και M36 δεξιά

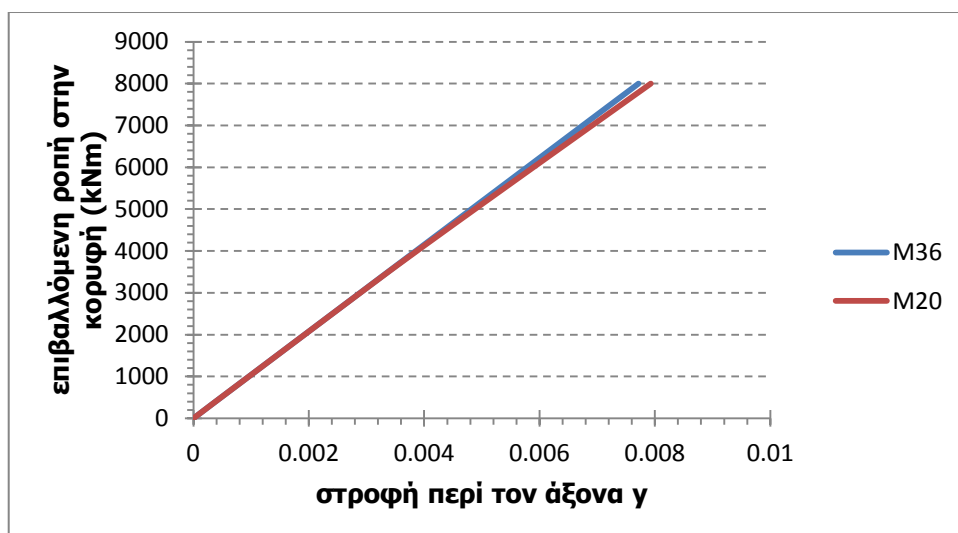


Σχήμα 6-34: επιφάνειες επαφής για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης ροπής για κοχλίες διαμέτρου M20 αριστερά και M36 δεξιά



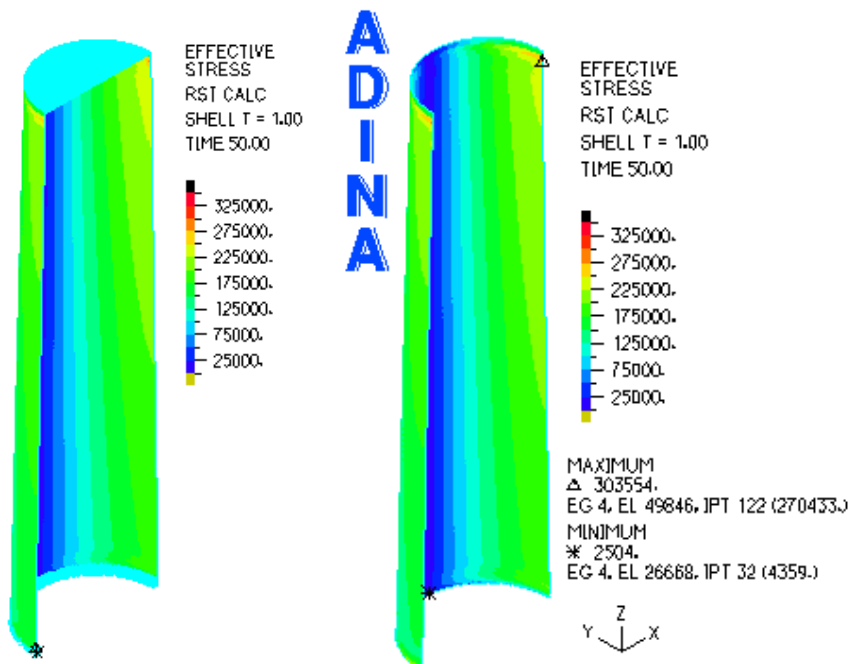


Σχήμα 6-35: επιφάνειες επαφής μεταξύ των 2 ελασμάτων για διαφορετικές διαμέτρους κοχλία

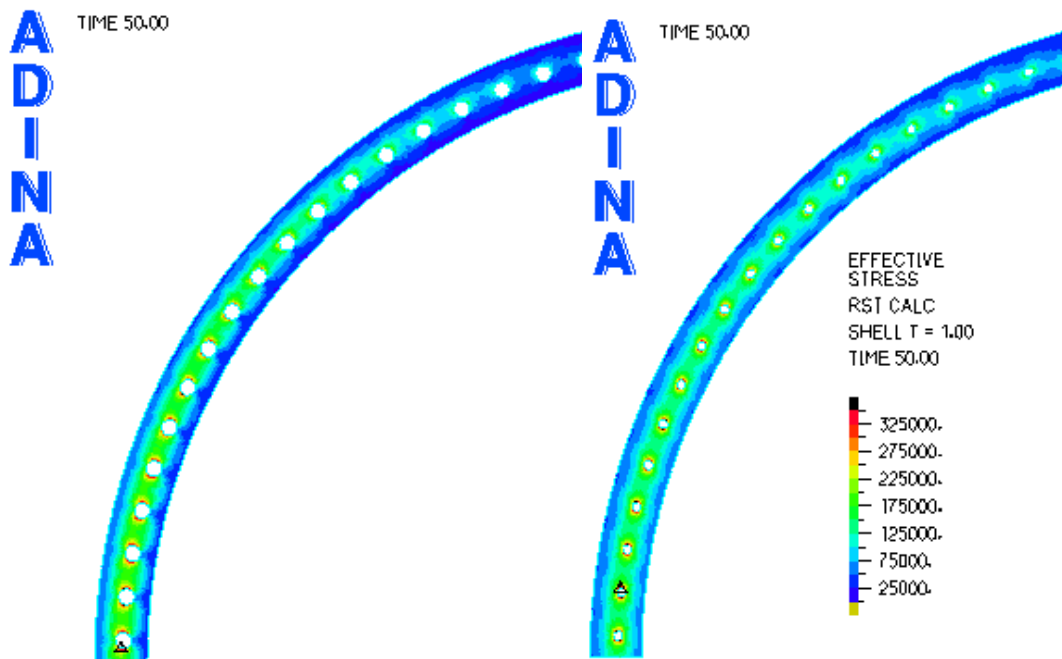


Σχήμα 6-36: δρόμος ισορροπίας φορέα για διάμετρο κοχλία M20 και M36

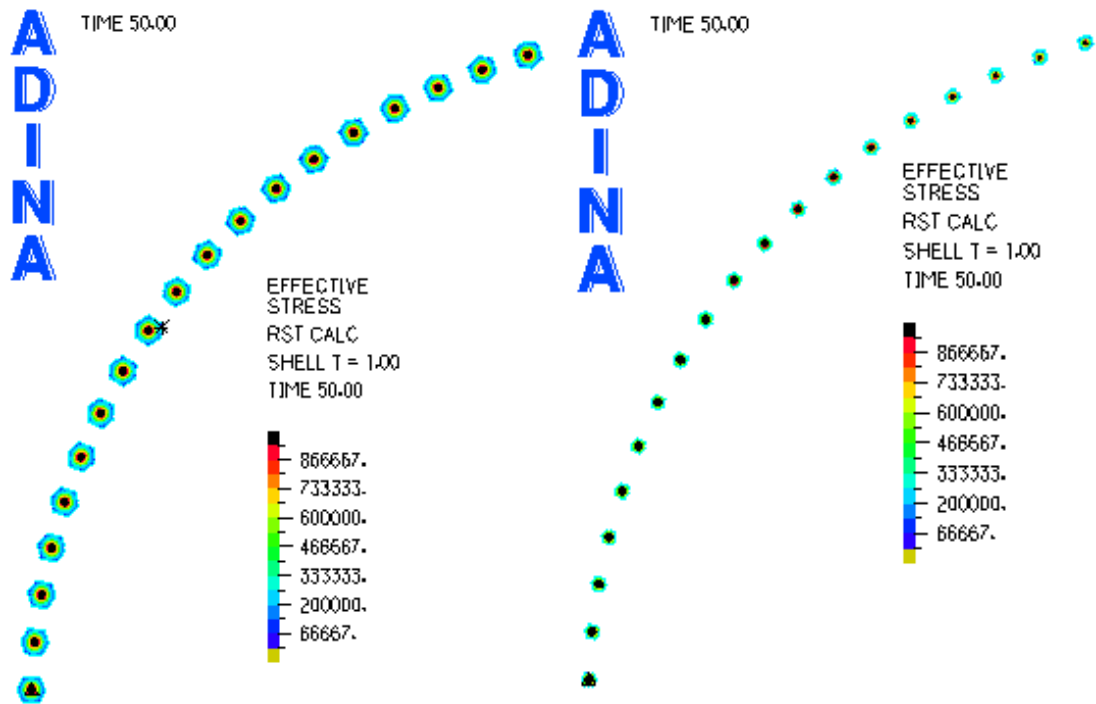




Σχήμα 6-37: τάσεις στον πυλώνα για μέγεθος επιβαλλόμενης ροπής 8000kNm και για διάμετρο κοχλία M36 αριστερά και M20 δεξιά

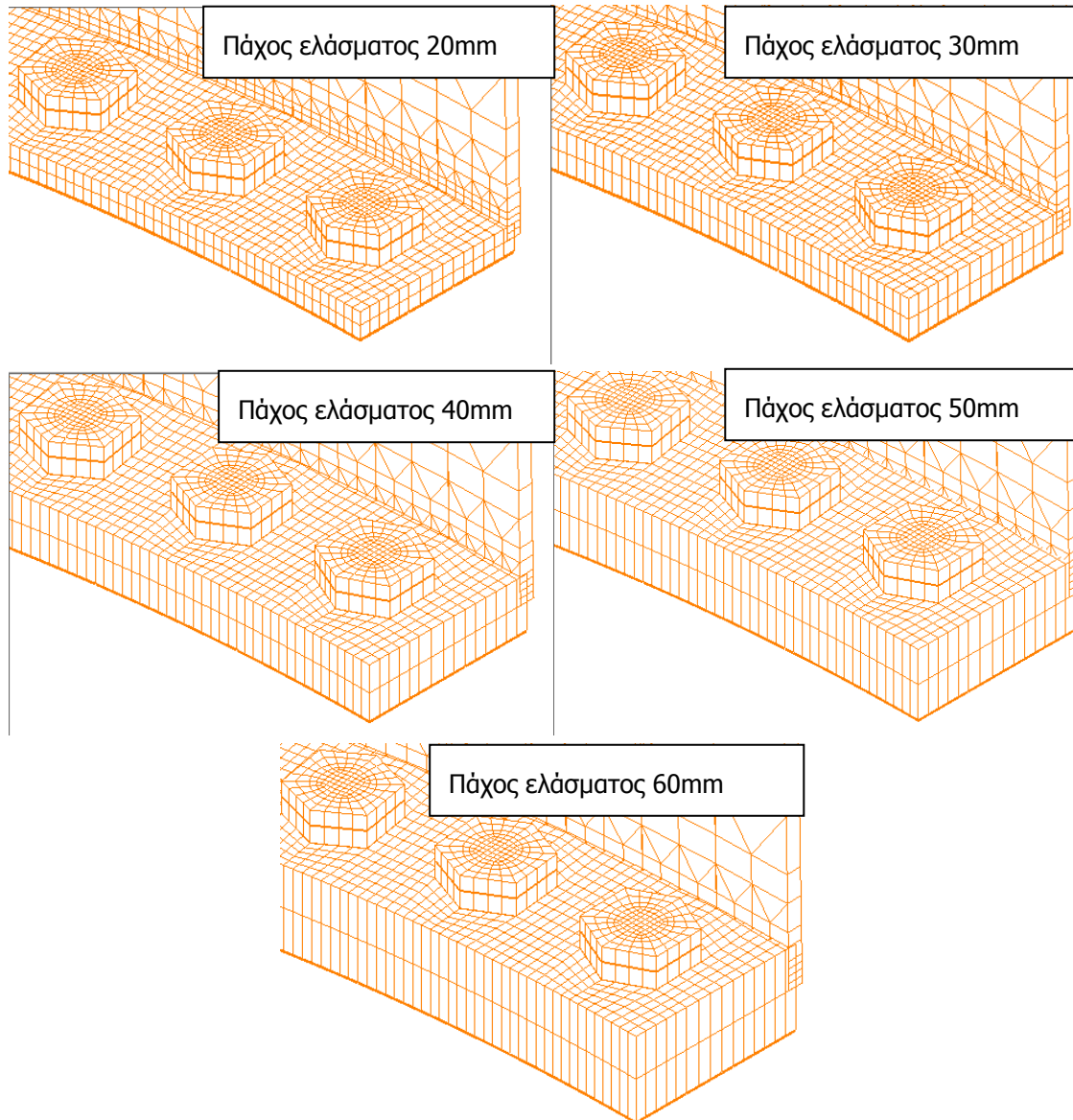


Σχήμα 6-38: τάσεις στο άνω έλασμα για μέγεθος επιβαλλόμενης ροπής 8000kNm και για διάμετρο κοχλία M36 αριστερά και M20 δεξιά



Σχήμα 6-39: τάσεις στην κεφαλή των κοχλιών για μέγεθος επιβαλλόμενης ροπής 8000kNm και για διάμετρο κοχλία M36 αριστερά και M20 δεξιά

#### 6.4 ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ

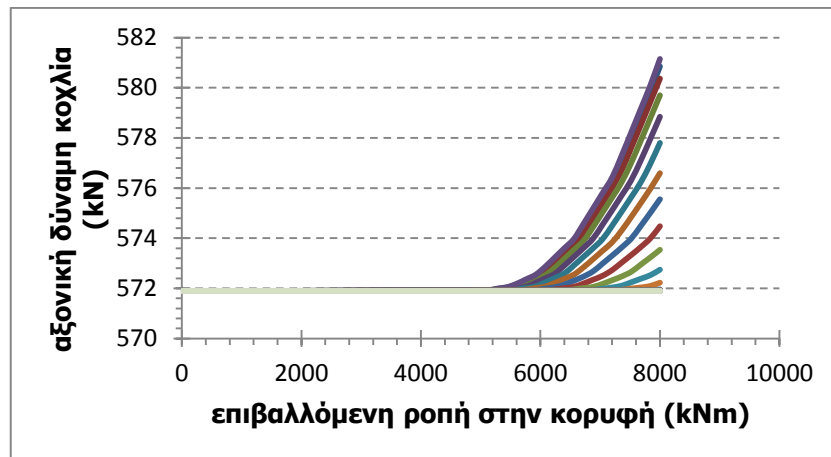


Σχήμα 6-40: πραγματικές διαστάσεις σύνδεσης για διάφορα πάχη ελασμάτων

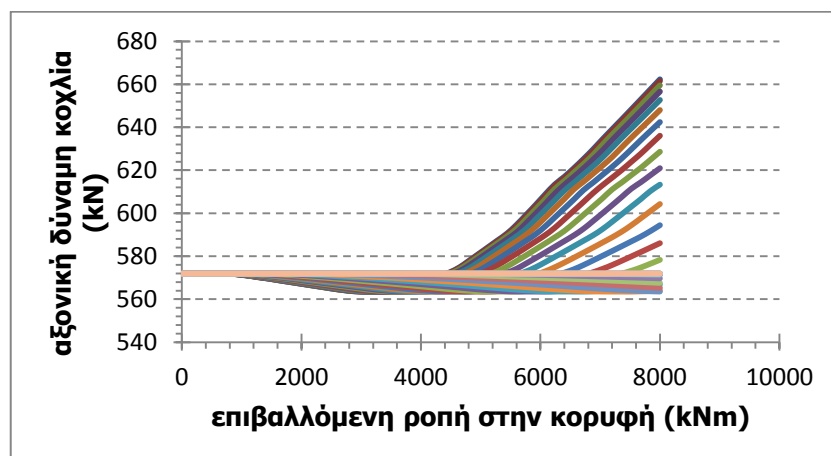
Για τις αριθμητικές αναλύσεις αυτές, οι παράμετροι της ανάλυσης παραμένουν ίδιες και το μόνο που αλλάζει είναι το πάχος του ελάσματος. Οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν σε όλα τα προσομοιώματα είναι M36 και επομένως η δύναμη προέντασής τους η οποία είναι η μέγιστη δυνατή θα είναι ίση με 571,9kN.

Στα σχήματα 6-41 και 6-42 παρουσιάζεται ο δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης των κοχλιών για πάχος ελάσματος 60mm και 20mm αντίστοιχα. Παρατηρείται το γεγονός ότι όσο το πάχος της φλάντζας μειώνεται το οριζόντιο πλατό του διαγράμματος το οποίο επεκτείνεται για ένα μεγάλο κομμάτι της φόρτισης για πάχος ελάσματος 60mm, παύει να υφίσταται. Αντίθετα, για πάχος ελάσματος 20mm η αξονική δύναμη του κοχλία ενώ αρχικά είναι σταθερή στην συνέχεια μειώνεται ως την τιμή 3000kNm της επιβαλλόμενης ροπής και μετά αυξάνεται συνεχώς. Η μείωση αυτή της τιμής της αξονικής δύναμης δεν έχει ιδιαίτερο πρακτικό νόημα, μιας και λόγω της προέντασης η αξονική δύναμη

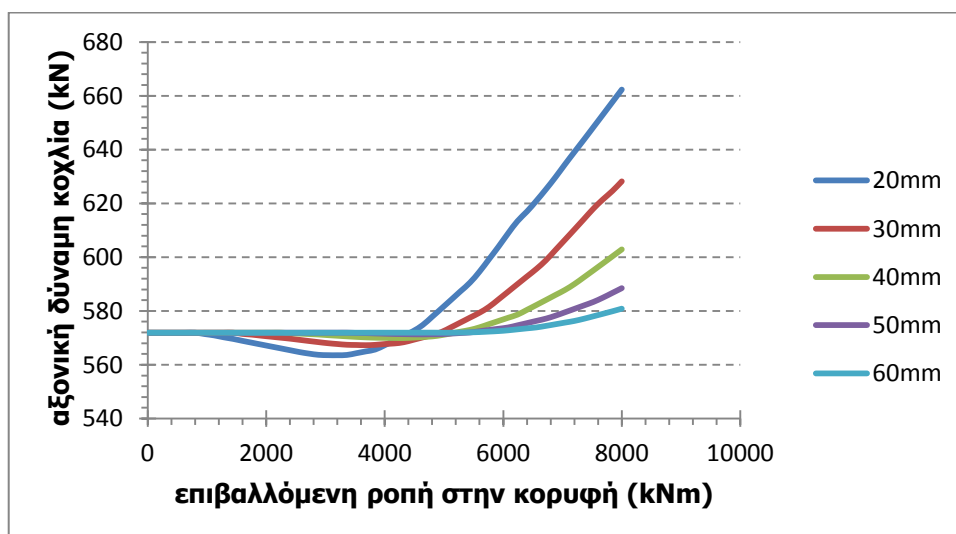
του κοχλία δεν μπορεί να μειωθεί κάτω από την τιμή της δύναμης προέντασης και πιθανότατα οφείλεται σε αδυναμία του μοντέλου λόγω της χρήσης ενός εξαιρετικά λεπτού ελάσματος.



Σχήμα 6-41: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης των κοχλιών για πάχος ελάσματος 60mm



Σχήμα 6-42: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης των κοχλιών για πάχος ελάσματος 20mm

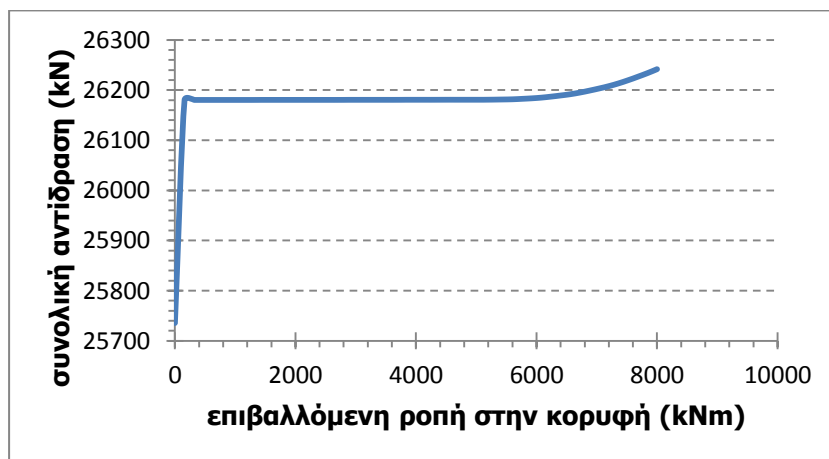


Σχήμα 6-43: δρόμος ισορροπίας της αξονικής δύναμης των κοχλιών για διαφορετικά πάχη ελασμάτων

Στο σχήμα 6-43 έχουμε συγκεντρωτικά τους δρόμους ισορροπίας της αξονικής δύναμης του ακραίου εφελκυσμένου κοχλία για διαφορετικά πάχη ελασμάτων. Παρατηρείται το γεγονός ότι όλα τα διαγράμματα ξεκινούν από το ίδιο σημείο μιας και η αρχική τιμή της αξονικής δύναμης του κοχλία είναι ίση με την τιμή της δύναμης προέντασης του η οποία είναι ίδια για όλα τα πάχη ελασμάτων. Όσο μειώνεται το πάχος του ελάσματος αυτή η πτώση της αξονικής δύναμης είναι πιο έντονη, αν και σε γενικές γραμμές το μέγεθος αυτής της πτώσης δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλο.

Στον παρακάτω πίνακα έχουμε την αρχική και την τελική αξονική δύναμη του ακραίου εφελκυσμένου κοχλία. Παρατηρείται ότι για όλα τα πάχη ελασμάτων η αύξηση της αξονικής δύναμης του κοχλία δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Συγκρινόμενες οι καμπύλες μεταξύ τους βλέπουμε ότι όσο μικρότερο είναι το πάχος του ελάσματος τόσο μεγαλύτερη είναι η αύξηση της αξονικής δύναμης. Όμως, οι τιμές δεν συγκρίνονται με τις αντίστοιχες που είδαμε στην περίπτωση διερεύνησης της επίδρασης της δύναμης προέντασης και της διαμέτρου των κοχλιών. Οπότε, θα μπορούσαμε να πούμε σε γενικές γραμμές ότι το πάχος του ελάσματος δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την αξονική δύναμη των κοχλιών.

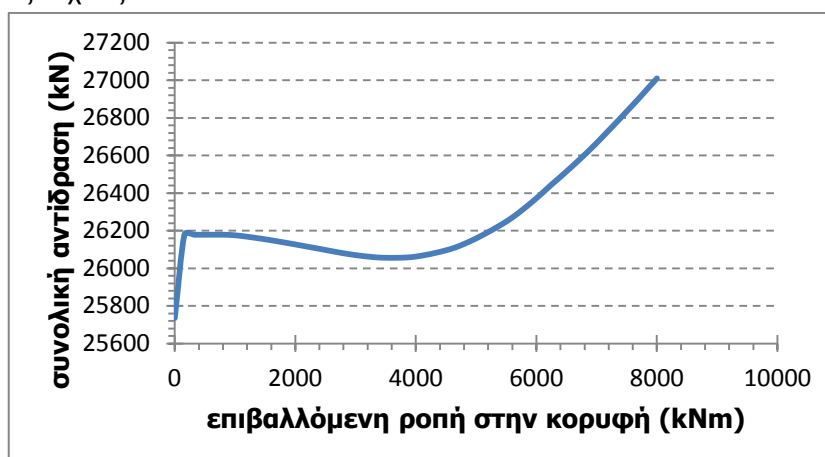
Πάχος ελάσματος (mm)	Αρχική δύναμη (kN)	Τελική δύναμη (kN)
20	571,9	620,97
30	571,9	594,60
40	571,9	580,93
50	571,9	575,50
60	571,9	581,15



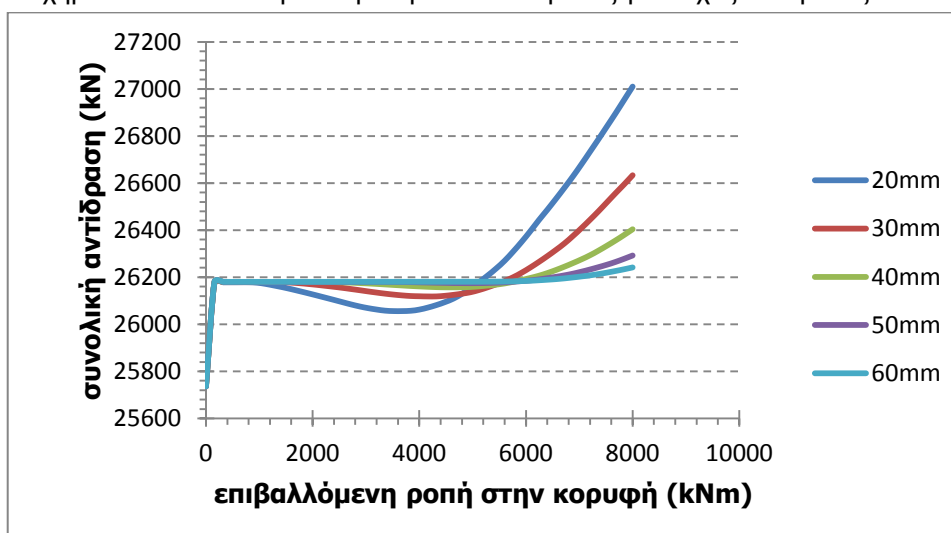
Σχήμα 6-44: συνολική αντίδραση κάτω ελάσματος για πάχος ελάσματος 60mm

Στα σχήματα 6-44 και 6-45 παρουσιάζονται οι δρόμοι ισορροπίας της συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος για πάχος ελάσματος 60 mm και 20mm αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι ενώ για πάχος ελάσματος 60mm, μετά την επιβολή της αξονικής θλιπτικής δύναμης και του ίδιου βάρους, οι δυνάμεις επαφής στην διεπιφάνεια των 2 ελασμάτων παραμένουν σταθερές για ένα μεγάλο κομμάτι της τιμής της επιβαλλόμενης ροπής, στην περίπτωση πάχους ελάσματος 20mm οι δυνάμεις επαφής παρουσιάζουν μία πτώση στο σημείο αυτό. Η πτώση αυτή εμφανίζεται για την ίδια τιμή επιβαλλόμενης ροπής όπως και στην περίπτωση της αξονικής δύναμης των κοχλιών και επομένως πρέπει να οφείλεται στον ίδιο λόγο. Ωστόσο, η πτώση αυτή πρέπει να μεταφράζεται μέσω μίας ανακατανομής της έντασης

στο έλασμα. Δηλαδή, αρχικά η επιβαλλόμενη ροπή παραλαμβάνεται μέσω ανακατανομής των τάσεων στο έλασμα και έπειτα η συνολική αντίδραση συνεχώς αυξάνεται μιας και το επιπλέον φορτίο παραλαμβάνεται από τους κοχλίες. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι για τιμή της επιβαλλόμενης ροπής 3600kNm, εκεί όπου σταματά η μείωση της τιμής της συνολικής αντίδρασης ξεκινά η αύξηση της τιμής της αξονικής δύναμης του κοχλία, γεγονός το οποίο υποδηλώνει την παραλαβή του επιπλέον φορτίου από τους κοχλίες.



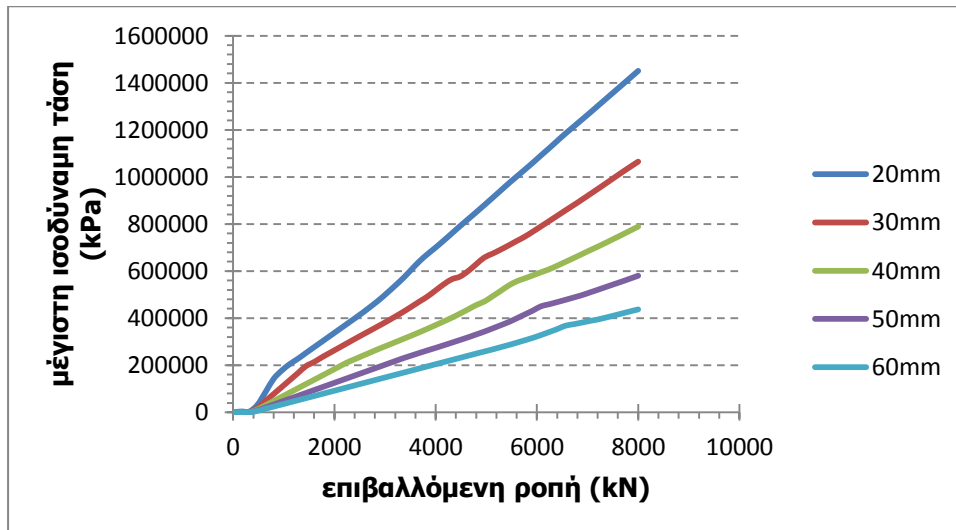
Σχήμα 6-45: συνολική αντίδραση κάτω ελάσματος για πάχος ελάσματος 20mm



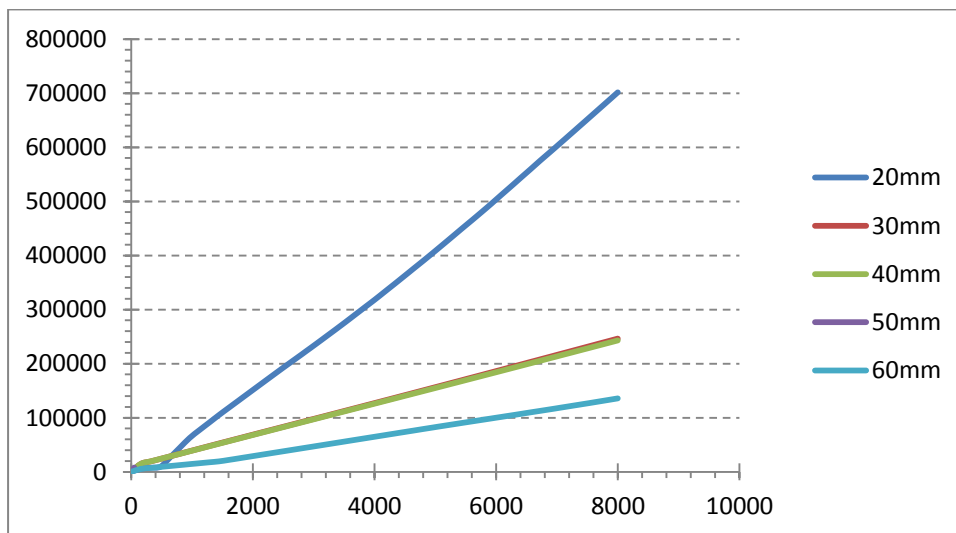
Σχήμα 6-46: συνολική αντίδραση κάτω ελάσματος για διαφορετικά πάχη ελασμάτων

Πάχος ελάσματος (mm)	Αρχική τιμή συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος (kN)	Τιμή συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος μετά την επιβολή αξονικού φορτίου (kN)	Τελική τιμή συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος (kN)
20	25735,5	26178,4	27010
30	25735,5	26178,9	26633,2
40	25735,5	26179,4	26403,7
50	25735,5	26179,8	26292,2
60	25735,5	26180,3	26241,6

Στο σχήμα 6-46 έχουμε συγκεντρωτικά την εξέλιξη της συνολικής αντίδρασης κάτω ελάσματος συναρτήσει του επιβαλλόμενου φορτίου για διάφορες τιμές του πάχους ελάσματος. Για μικρές τιμές της επιβαλλόμενης ροπής η συνολική αντίδραση του κάτω ελάσματος είναι ανεξάρτητη από το πάχος του ελάσματος. Για μεγαλύτερες τιμές της επιβαλλόμενης ροπής η συνολική αντίδραση συνεχώς αυξάνεται όσο μικρότερο είναι το πάχος του ελάσματος. Στον πίνακα παραπάνω βλέπουμε την αύξηση της τελικής τιμής της συνολικής αντίδρασης του κάτω ελάσματος ανάλογα με το πάχος του ελάσματος.



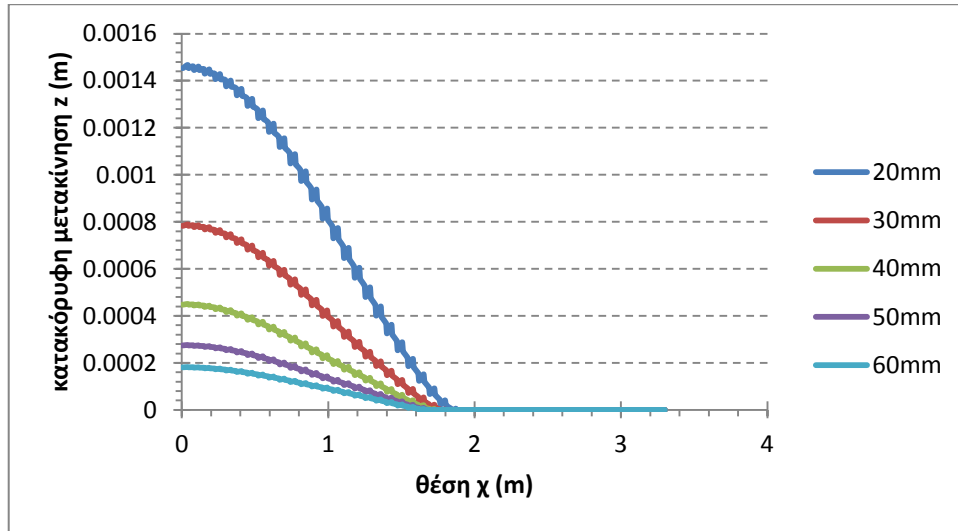
Σχήμα 6-47: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην άνω επιφάνεια του άνω ελάσματος για διαφορετικά πάχη ελασμάτων



Σχήμα 6-48: δρόμος ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση για διαφορετικά πάχη ελασμάτων

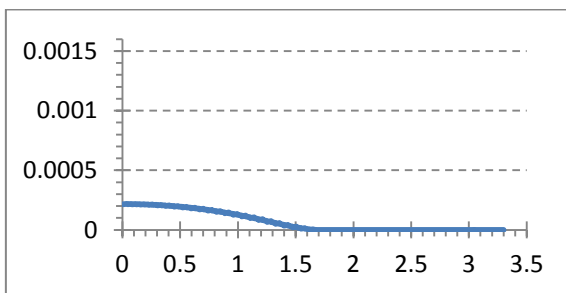
Το πάχος του ελάσματος είναι μία παράμετρος η οποία επηρεάζει τόσο τις ισοδύναμες τάσεις στο άνω έλασμα όσο και στη συγκόλληση. Σε αντίθεση με την δύναμη προέντασης και την διάμετρο του κοχλία οι οποίες επηρέαζαν μόνο την τάση στην συγκόλληση αλλά όχι στο άνω έλασμα. Στην περίπτωση του πάχους του ελάσματος όσο το πάχος μειώνεται, οι τάσεις αυξάνονται και μάλιστα εκθετικά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το διάγραμμα 6-48 όπου για πάχος ελάσματος 30mm, 40mm και 50mm οι

δρόμοι ισορροπίας της μέγιστης ισοδύναμης τάσης στην συγκόλληση ταυτίζονται. Αντίθετα, όταν το πάχος ελάσματος μειωθεί πολύ (20mm) οι τάσεις αυξάνονται δυσανάλογα. Ενώ για πάχος ελάσματος 60mm οι τάσεις γίνονται πιο ευνοϊκές.

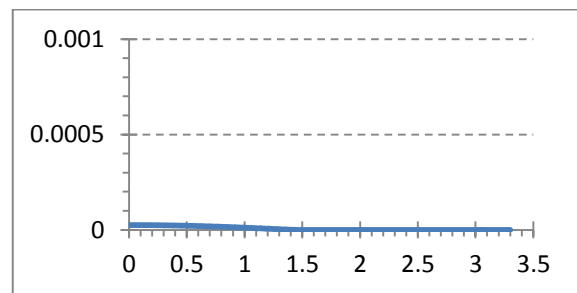


Σχήμα 6-49: κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων στο άνω έλασμα για διαφορετικά πάχη ελάσματος

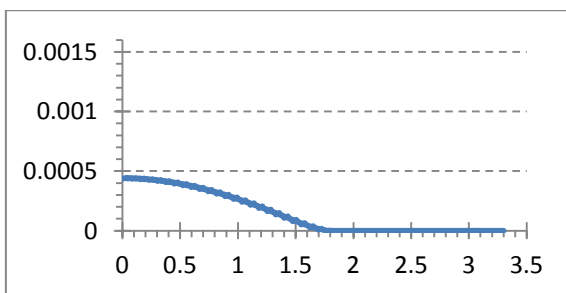
Στο σχήμα 6-49 έχουμε συγκεντρωτικά την θέση του ουδέτερου άξονα για διαφορετικά πάχη ελασμάτων κατά μήκος της διαμέτρου του πυλώνα. Παρατηρείται ότι η θέση του ουδέτερου άξονα μετατοπίζεται προς τα δεξιά, προς την θλιβόμενη παρειά, καθώς το πάχος του ελάσματος μειώνεται. Επομένως, και το πάχος του ελάσματος είναι μία παράμετρος η οποία επηρεάζει την θέση του ουδέτερου άξονα. Ακολουθούν διαγράμματα με την θέση του ουδέτερου άξονα για διάφορες τιμές επιβαλλόμενης ροπής για πάχος ελάσματος 20mm και 60mm αντίστοιχα.



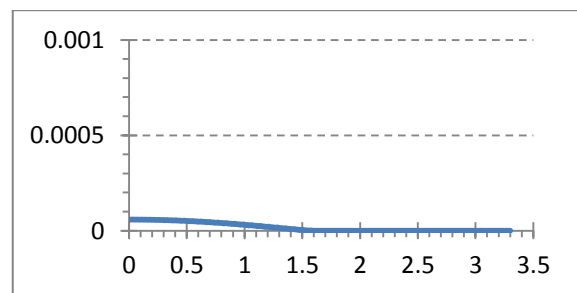
Για ροπή  $M=1600\text{kNm}$



για ροπή  $M=1600\text{kNm}$

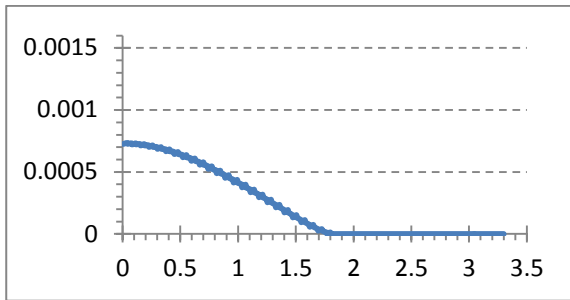


Για ροπή  $M=3200\text{kNm}$

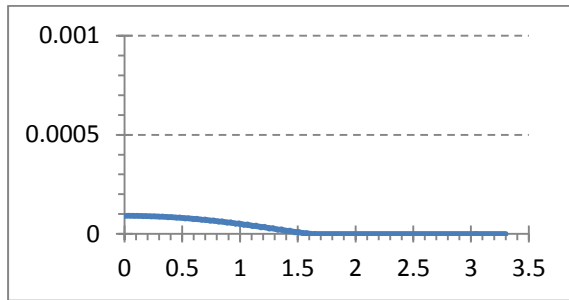


για ροπή  $M=3200\text{kNm}$

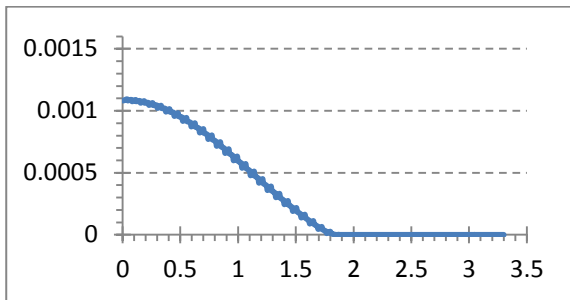




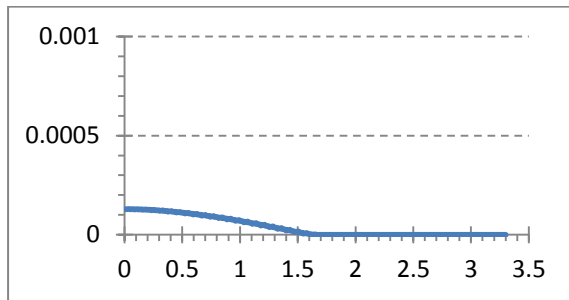
Για ροπή M=4800kNm



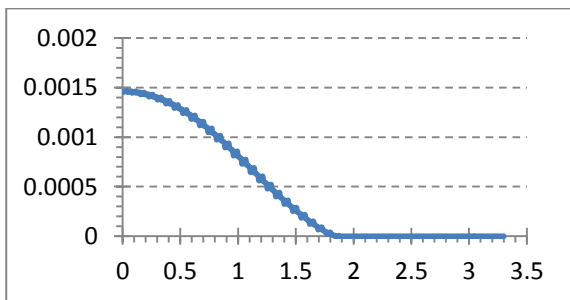
για ροπή M=4800kNm



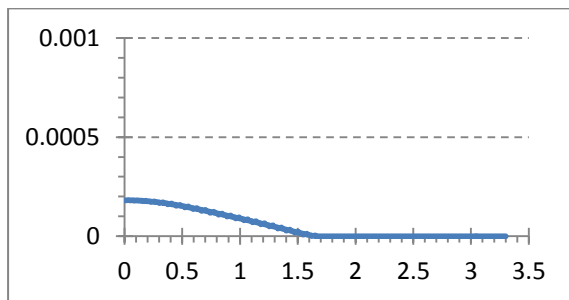
Για ροπή M=6400kNm



για ροπή M=6400kNm

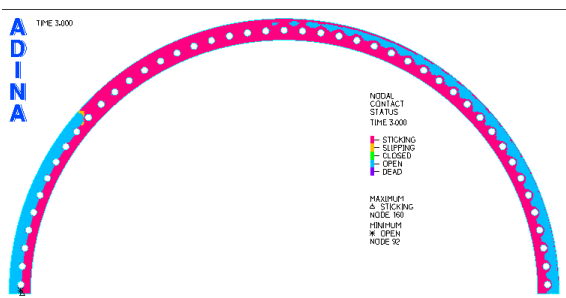


Για ροπή M=8000kNm

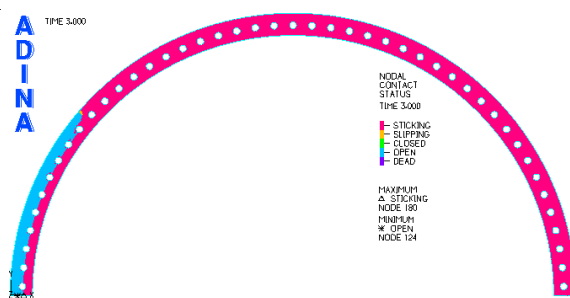


για ροπή M=8000kNm

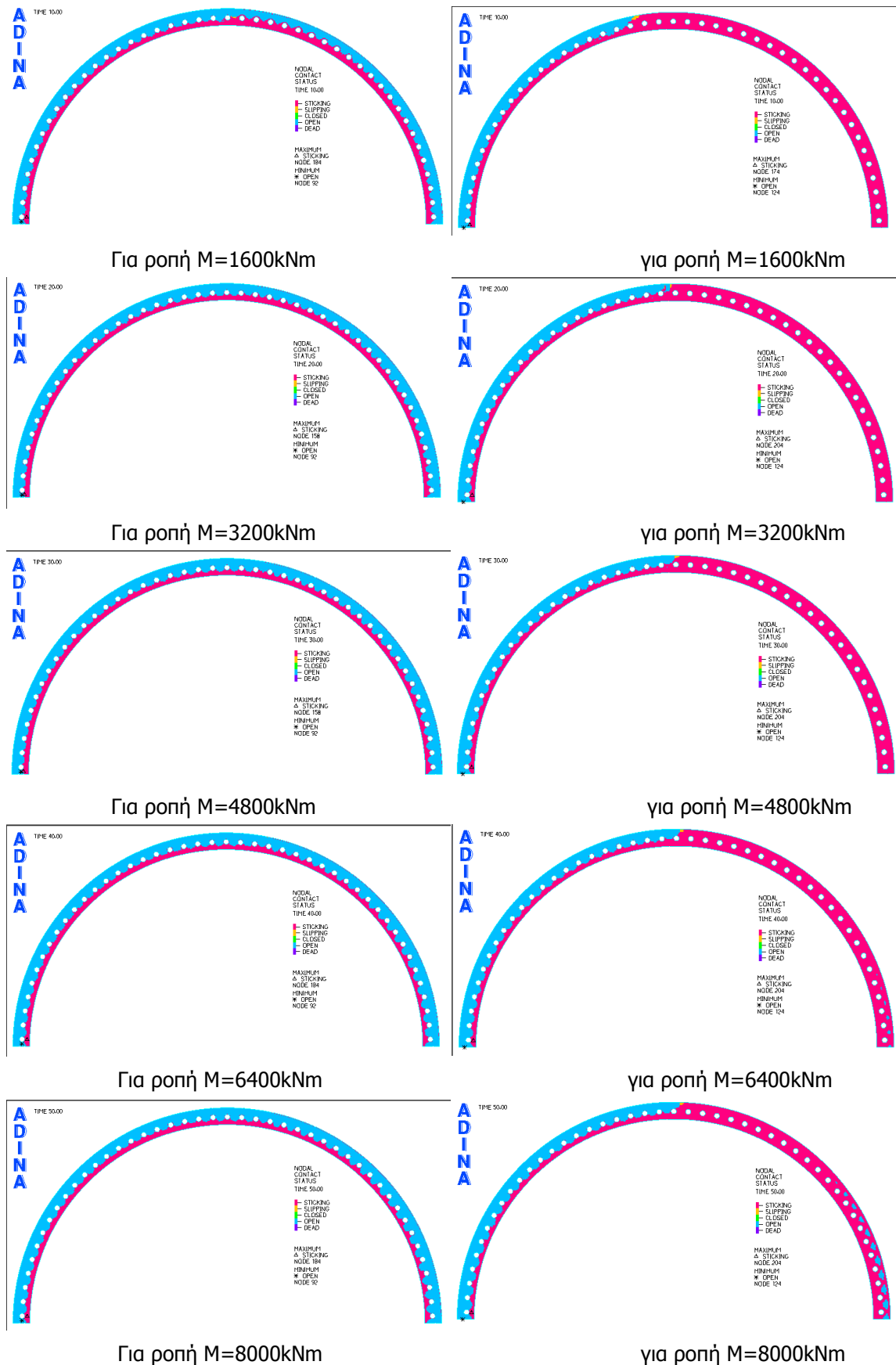
Σχήμα 6-50: κατανομή κατακόρυφων μετακινήσεων άνω ελάσματος για διάφορες τιμές επιβαλλόμενης ροπής για 20mm πάχος ελάσματος και 60mm πάχος ελάσματος



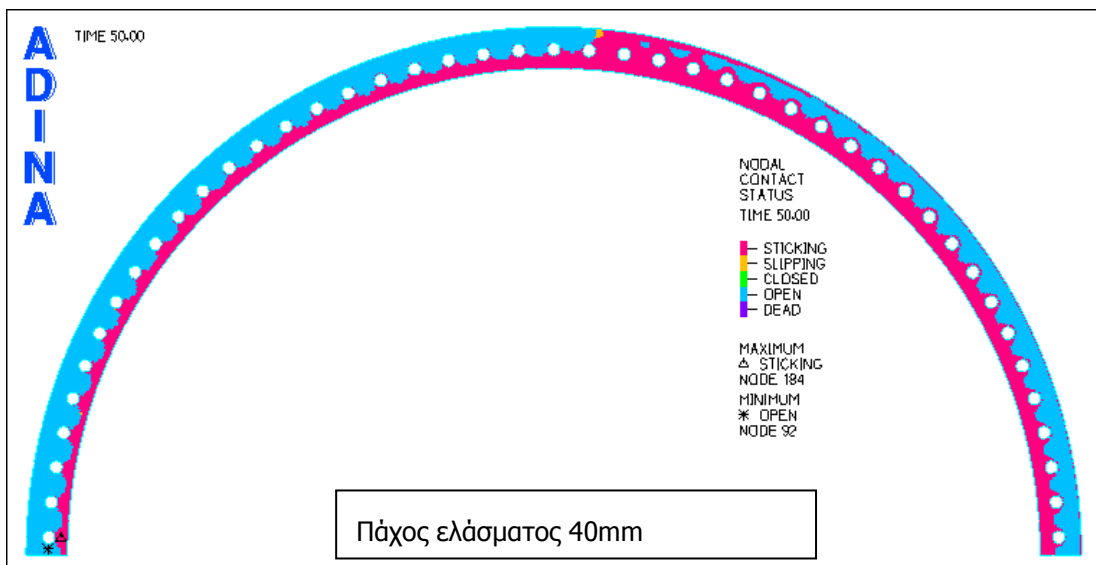
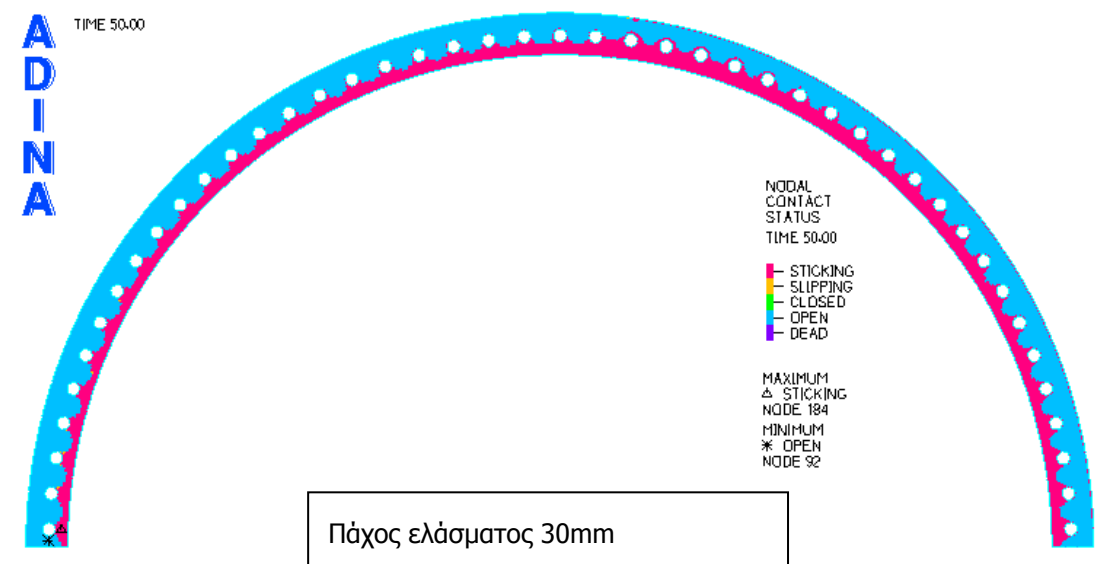
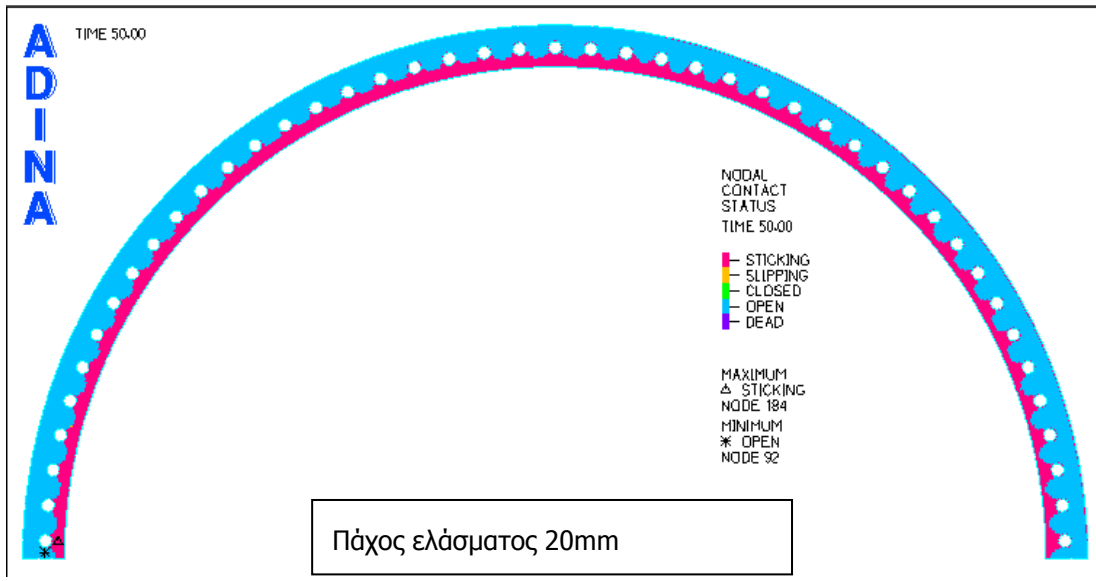
Για ροπή 480kNm

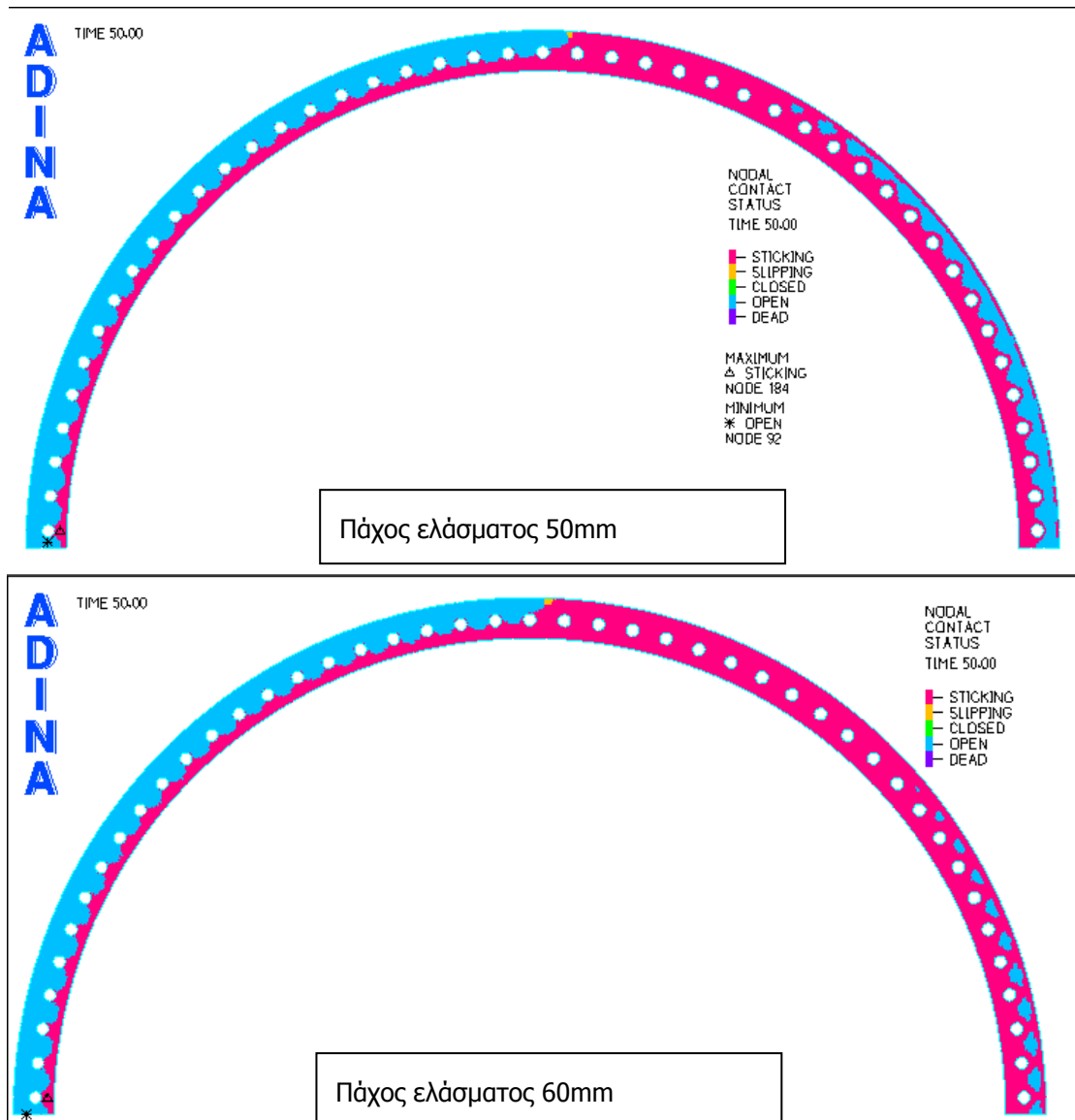


για ροπή 480kNm

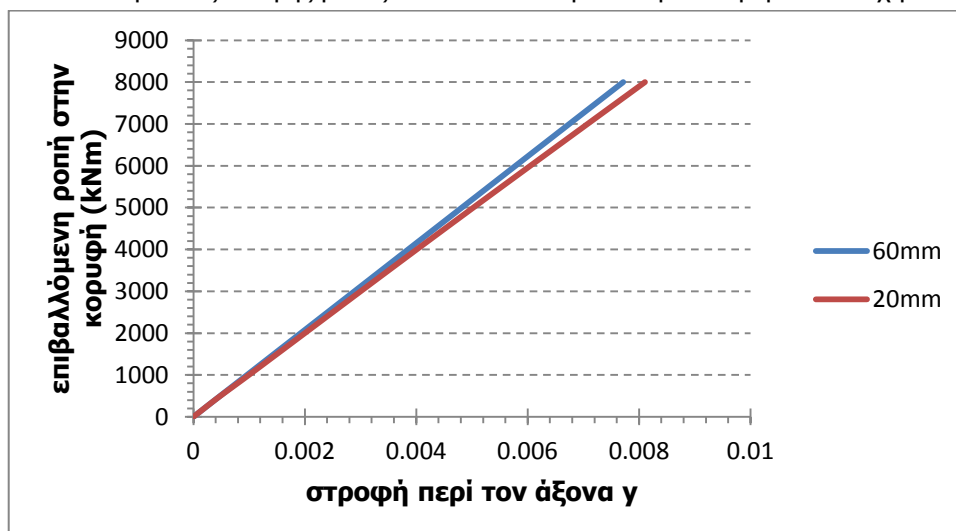


Σχήμα 6-51: επιφάνειες επαφής για διάφορες τιμές της επιβαλλόμενης ροπής για 20mm πάχος ελάσματος και 60mm πάχος ελάσματος

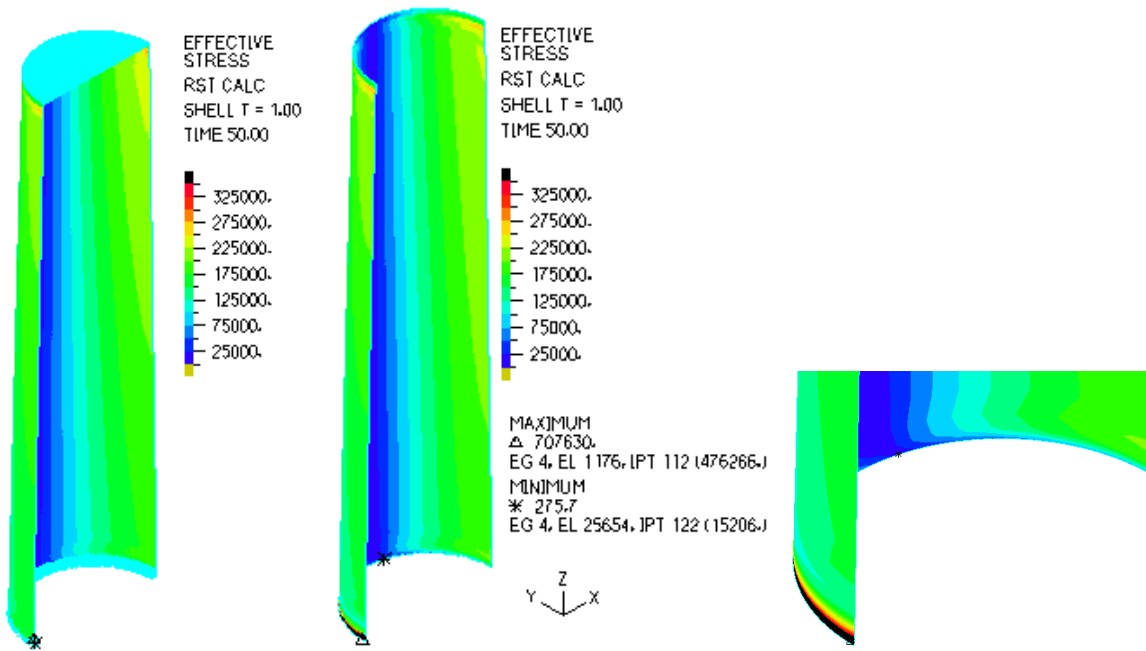




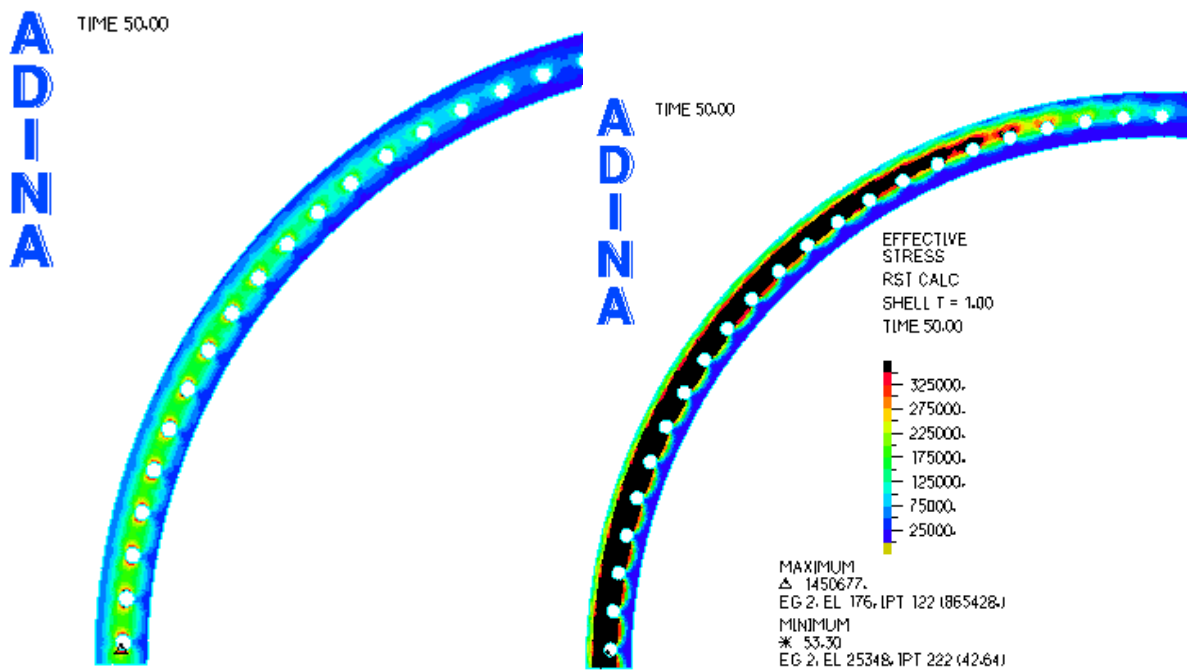
Σχήμα 6-52: επιφάνειες επαφής μεταξύ των δύο ελασμάτων για διαφορετικά πάχη ελάσματος



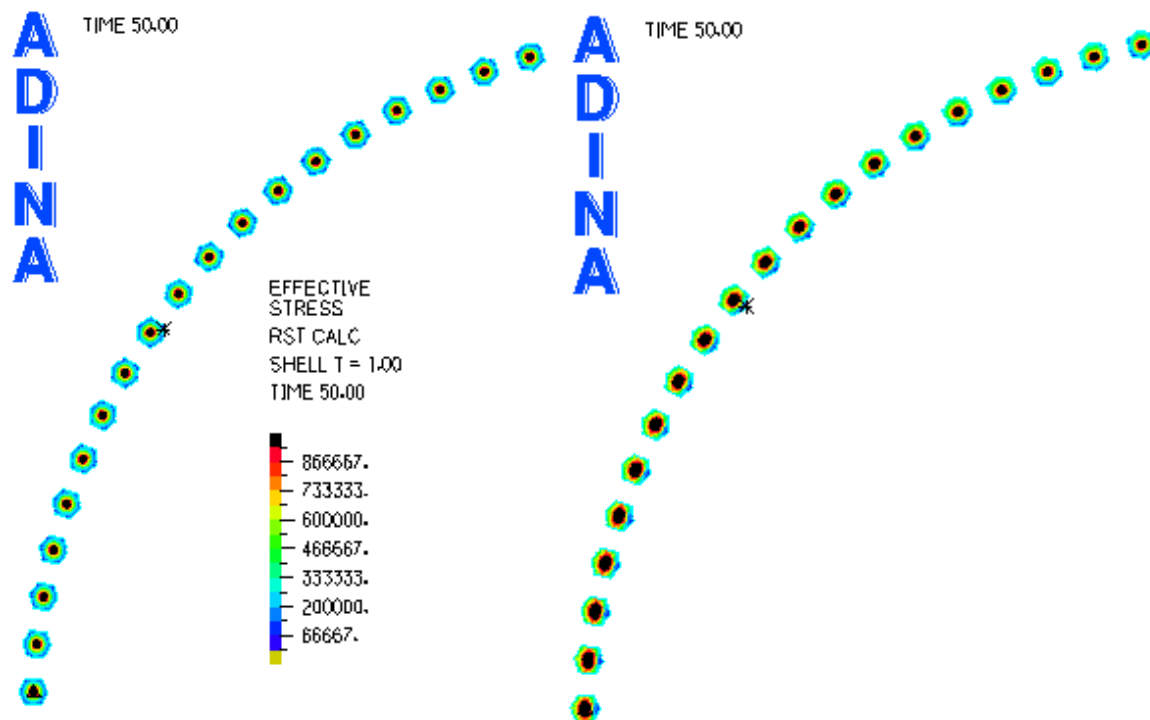
Σχήμα 6-53: δρόμος ισορροπίας φορέα για πάχος ελάσματος 60mm και 20mm



Σχήμα 6-54: τάσεις στον πυλώνα για μέγεθος επιβαλλόμενης ροπής 8000kNm και για πάχος ελάσματος 60mm αριστερά και 20mm δεξιά



Σχήμα 6-55: τάσεις στο άνω έλασμα για μέγεθος επιβαλλόμενης ροπής 8000kNm και για πάχος ελάσματος 60mm αριστερά και 20mm δεξιά



Σχήμα 6-56: τάσεις στην κεφαλή των κοχλιών για μέγεθος επιβαλλόμενης ροπής 8000kNm και για πάχος ελάσματος 60mm αριστερά και 20mm δεξιά

Όπως φαίνεται στα σχήματα 6-54,6-55 και 6-56 για πάχος ελάσματος 20mm παρατηρείται υπέρβαση του ορίου διαρροής κυρίως στο άνω έλασμα αλλά και στο κάτω μέρος του πυλώνα στην μεριά των εφελκόμενων κοχλιών. Επομένως, παρότι οι δρόμοι ισορροπίας είναι γραμμικοί λόγω της θεώρησης ελαστικού υλικού, στην πραγματικότητα το έλασμα των 20mm έχει διαρρεύσει.



# 7 ΠΕΡΙΛΗΨΗ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

## 7.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν οι συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας του σωληνωτού πυλώνα μίας ανεμογεννήτριας. Για μία τυπική ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα, ονομαστικής ισχύος 1,5mW και ύψους πυλώνα 80m μελετήθηκε η συμπεριφορά της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας κοντά στην κορυφή και συγκεκριμένα στα 0,85 του ύψους του πυλώνα.

Για την αρχική γεωμετρία της σύνδεσης μελετήθηκαν δύο διαφορετικά αριθμητικά προσομοιώματα. Σε πρώτη φάση προσομοιώθηκε ένα κομμάτι μόνο της σύνδεσης μορφής βραχέος L με τρισδιάστατα στοιχεία όγκου, το οποίο περιλαμβάνει ένα μόνο κοχλία, τα συνδεδεμένα δακτυλιοειδή ελάσματα και ένα μικρό τμήμα του τοιχώματος του πυλώνα. Στην συνέχεια, προσομοιώθηκε ολόκληρη η σύνδεση αποκατάστασης συνέχειας καθώς και τμήμα του πυλώνα με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και στοιχεία δοκού για τους κοχλίες. Για τα δύο αυτά αριθμητικά προσομοιώματα πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA v9.0.0, λαμβάνοντας υπόψη τόσο την μη γραμμικότητα του υλικού όσο και την μη γραμμικότητα της γεωμετρίας. Μέσω των αναλύσεων αυτών έγιναν προσπάθειες προσδιορισμού του οριακού φορτίου αντοχής της σύνδεσης. Για την τιμή αυτή του φορτίου, μελετήθηκαν τα διάφορα χαρακτηριστικά της σύνδεσης και προέκυψαν χρήσιμα συμπεράσματα. Το τρισδιάστατο προσομοίωμα βοηθά στην κατανόηση της συμπεριφοράς της σύνδεσης και στον τρόπο παραλαβής του φορτίου. Και δίνει πληροφορίες οι οποίες δεν είναι εύκολο να εντοπισθούν μέσω του πιο γενικού προσομοιώματος ολόκληρης της σύνδεσης. Το προσομοίωμα ολόκληρης της σύνδεσης με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και στοιχεία δοκού δίνει μία εποπτεία ολόκληρης της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας και βοηθά στον προσδιορισμό της οριακής τιμής της καμπτικής ροπής αντοχής του πυλώνα στην θέση της σύνδεσης. Μέσω του προσομοιώματος αυτού είναι επίσης δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα της σύνδεσης, ο οποίος διαχωρίζει τους εφελκόμενους κοχλίες από τους αδρανείς, εκείνους δηλαδή που βρίσκονται στην θλιβόμενη περιοχή.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις και για τα δύο αριθμητικά προσομοιώματα ώστε να αξιολογηθεί ο τρόπος που επηρεάζει η μεταβολή διαφόρων χαρακτηριστικών της σύνδεσης την συμπεριφορά της και την τιμή του οριακού φορτίου. Οι παράμετροι οι οποίες μελετήθηκαν ήταν η τιμή της δύναμης προέντασης του κοχλία, η διάμετρος του κοχλία, το πάχος των συνδεδόμενων ελασμάτων της σύνδεσης καθώς επίσης και η ποιότητα του κοχλία.



## 7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την μελέτη της αρχικής γεωμετρίας της σύνδεσης τόσο για το πρώτο αριθμητικό προσομοίωμα όσο και για το δεύτερο, συμπεραίνεται ότι η ροπή αντοχής της σύνδεσης είναι πολύ μεγαλύτερη σε μέγεθος από τις τυπικές τιμές καμπτικής ροπής που αναμένεται να εμφανισθούν κατά την διάρκεια ζωής του έργου. Δηλαδή η σύνδεση αυτή είναι υπερδιαστασιολογημένη για τα στατικά φορτία. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το φαινόμενο που ευθύνεται για τον σχεδιασμό τόσο ισχυρών και δύσκαμπτων συνδέσεων είναι η κόπωση. Δεδομένου ότι η κυρίαρχη φόρτιση στην οποία υποβάλλονται τέτοιοι πυλώνες είναι οι ανεμοπιέσεις, η μεγάλη διακύμανση αυτών των φορτίων καθιστά το φαινόμενο της κόπωσης την κύρια παράμετρο που καθορίζει την αστοχία της κατασκευής.

Όσον αφορά το προσομοίωμα μορφής βραχέος L με 3D solid στοιχεία (στοιχεία όγκου) στο οποίο επιχειρείται η διερεύνηση της σχέσης αλληλεπίδρασης μεταξύ κοχλία και ελάσματος μέσω συνθηκών επαφής, οι παραμετρικές αναλύσεις έδειξαν ότι:

- Η δύναμη προέντασης είναι μία παράμετρος η οποία δεν επηρεάζει ιδιαίτερα την αντοχή της σύνδεσης και την τιμή του οριακού φορτίου, ωστόσο επηρεάζει τον τρόπο παραλαβής του φορτίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης τόσο μικρότερη είναι η αύξηση της αξονικής δύναμης του κοχλία και όλο και μεγαλύτερο μέρος του φορτίου παραλαμβάνεται μέσω ανακατανομής εντάσεων στο έλασμα λόγω των συνθηκών επαφής που υφίστανται μεταξύ κοχλία και ελάσματος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση όπου το ασκούμενο φορτίο είναι και το οριακό, ακόμα και για την μέγιστη τιμή της δύναμης προέντασης υπάρχει μία αύξηση της αξονικής δύναμης που θα αναπτύξει ο κοχλίας. Όμως, ένα χαμηλότερο φορτίο πιο κοντά στα πραγματικά δεν θα επηρέαζε καθόλου τον κοχλία για την μέγιστη προένταση και όλο το φορτίο θα παραλαμβάνονταν μέσω ανακατανομής. Επιπλέον, όσο μικρότερη είναι η δύναμη προέντασης, τόσο μικρότερη είναι η δυσκαμψία της σύνδεσης.
- Η διάμετρος του κοχλία επηρεάζει τόσο το οριακό φορτίο της σύνδεσης όσο και τα επιμέρους χαρακτηριστικά της. Για μικρές διαμέτρους κοχλία, το φορτίο αντοχής μειώνεται κατακόρυφα και παράλληλα αυξάνονται οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις. Η μικρή διάμετρος του κοχλία σε συνδυασμό με το μεγάλο απαιτούμενο ύψος του (το οποίο καθορίζεται από το πάχος του ελάσματος το οποίο είναι σταθερό) έχει σαν αποτέλεσμα την διαρροή του κοχλία για χαμηλές σχετικά τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου και τελικά την αστοχία. Ενώ για την μέγιστη διάμετρο κοχλία η αστοχία επέρχεται στο έλασμα πρώτα, για την ελάχιστη η αστοχία επέρχεται στον κοχλία ενώ οι τάσεις στο έλασμα είναι ακόμα χαμηλές. Η δυσκαμψία της σύνδεσης ωστόσο δεν επηρεάζεται από την διάμετρο του κοχλία όπως επίσης και η μέγιστη ισοδύναμη τάση στην θέση της συγκόλλησης.
- Το πάχος του δακτυλιοειδούς ελάσματος από την άλλη μεταβάλλει τόσο το οριακό φορτίο όσο και την δυσκαμψία του συστήματος. Το λεπτότερο πάχος ελάσματος προκαλεί την εκτεταμένη διαρροή του ελάσματος καθ' ύψος και τελικά παρατηρείται μία τμηματική αποκόλληση του ελάσματος. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της σύνδεσης ωστόσο δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από το μέγεθος του πάχους του ελάσματος.
- Η ποιότητα του κοχλία, τέλος, μεταβάλλει το οριακό φορτίο όχι όμως και την δυσκαμψία η οποία παραμένει ίδια.

Όσον αφορά το αριθμητικό προσομοίωμα ολόκληρης της σύνδεσης με επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία και στοιχεία δοκού, παρατηρήθηκε ότι ο δρόμος ισορροπίας είναι γραμμικός πριν την διαρροή του υλικού, σε αντίθεση με το πρώτο αριθμητικό προσομοίωμα, στο οποίο ο δρόμος ισορροπίας ήταν εξ' αρχής μη γραμμικός. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το πρώτο προσομοίωμα είναι πιο λεπτομερές και τοπικό και η μη γραμμική συμπεριφορά του προέρχεται από τις συνθήκες επαφής μεταξύ κοχλία και ελάσματος, οι οποίες και καθιστούν το πρόβλημα μη γραμμικό.

Επίσης, παρατηρείται ότι για την μέγιστη τιμή της δύναμης προέντασης η αξονική δύναμη των κοχλιών παραμένει σχεδόν σταθερή ακόμα και για τους εφελκυσμένους κοχλίες. Αντίθετα, όσο η δύναμη προέντασης των κοχλιών μειώνεται, η αξονική δύναμη των κοχλιών αυξάνεται όλο και περισσότερο σε σχέση πάντα με την τιμή της δύναμης προέντασης και μάλιστα αυξάνεται και το πλήθος των εφελκυσμένων κοχλιών. Το γεγονός αυτό σχετίζεται και με την θέση του ουδέτερου άξονα. Ο ουδέτερος άξονας της σύνδεσης, ο οποίος διαχωρίζει τους εφελκυσμένους κοχλίες από τους αδρανείς της θλιβόμενης παρειάς, βρίσκεται προς την πιο δύσκαμπτη πλευρά, επομένως προς την θλιβόμενη. Όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης ο ουδέτερος άξονας μετατοπίζεται προς το κέντρο συμμετρίας της διατομής. Η διάμετρος του κοχλία είναι μία παράμετρος η οποία επιφέρει αλλαγές στην συμπεριφορά της σύνδεσης ανάλογες με αυτές της δύναμης προέντασης αλλά σε μικρότερο βαθμό. Δηλαδή, η αξονική δύναμη του ακραίου εφελκυσμένου κοχλία αυξάνεται για την μικρότερη διάμετρο κοχλία, αλλά όχι τόσο πολύ όσο στην περίπτωση της προέντασης. Αντίστοιχα, ισχύουν τα ίδια και για τα υπόλοιπα μεγέθη. Τέλος, το πάχος του ελάσματος, όταν μειωθεί πολύ, οδηγεί σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις την σύνδεση. Ουσιαστικά για το μικρότερο πάχος ελάσματος χάνεται η επαφή και προκαλείται κάποιου είδους αποκόλληση, ενώ και οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην συγκόλληση αυξάνονται δυσανάλογα.

### 7.3 ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΜΕΛΕΤΗ

Καταλήγοντας, τα αριθμητικά προσομοιώματα τα οποία αναπτύχθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία θα ήταν χρήσιμο να υποβληθούν σε δυναμικά φορτία προκειμένου να αξιολογηθεί η αντοχή τους στην περίπτωση του φαινομένου της κόπωσης. Θα είναι έτσι δυνατή και η πληρέστερη αξιολόγηση της επίδρασης του φαινομένου της κόπωσης στην αντοχή των συνδέσεων αποκατάστασης συνέχειας των τμημάτων πυλώνα μίας ανεμογεννήτριας. Επίσης, μέσα από αυτές τις αναλύσεις μπορεί να προσδιορισθεί η συνολική βλάβη λόγω κόπωσης που αναμένεται να εμφανισθεί σε μία τυπική ανεμογεννήτρια, όπως αυτή της εργασίας, για δεδομένο χρονικό διάστημα, καθώς επίσης και η διάρκεια ζωής της.

Για την μεγαλύτερη ακρίβεια των παραπάνω προσομοιωμάτων θα μπορούσαν ακόμα να διερευνηθούν μοντέλα τα οποία να λαμβάνουν υπόψη την συγκόλληση των δακτυλιοειδών ελασμάτων στο κολουροκωνικό κέλυφος του πυλώνα, αλλά και τον τρόπο συγκόλλησης (εσωρραφή, εξωρραφή, σε ποιο ύψος γίνεται η συγκόλληση) και να μελετηθεί πιθανή επιρροή που υπάρχει στα αποτελέσματα. Έτσι, θα ήταν ακριβέστερος ο υπολογισμός των ορθών και διατμητικών τάσεων στην θέση αυτή, γεγονός το οποίο είναι χρήσιμο δεδομένου ότι έλεγχος κόπωσης πραγματοποιείται για τους κοχλίες και τη συγκόλληση.



---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Erich Hau. "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics" 2<sup>nd</sup> edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006
- [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] Alain Nussbaumer, Luis Borges, Laurence Davaine, Fatigue design of steel and composite structures, ECCS – European Convention for Constructional Steelwork, 1<sup>st</sup> Edition, 2011.
- [4] "Guidelines for Design of Wind Turbines, 2<sup>nd</sup> Edition" Det Norske Veritas, Copenhagen (Wind.Turbine.Certification@dnv.com) and Wind Energy Department, Risø National Laboratory (Certification@risoe.dk) 2002.
- [5] EN 1993-1-8: 2005, Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-8: Design of joints, European Committee for Standardization, 2005.
- [6] DIN 6914, High Strength hexagon head bolts, Deutsche Norm, 1989
- [7] C. Petersen, Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Vieweg, 1993.
- [8] ADINA System 9.0, Release Notes ADINA R&D Inc, 71 Elton Avenue, Watertown, USA, 2013.
- [9] FEMAP 101, Introduction to Femap with NX Nastran Student Guide, Version 10.1.1, Siemens PLM Software, 2010
- [10] Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι, Ιωαννίδης Γ, Σχεδιασμός Δομικών Έργων από Χάλυβα, με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων. Εκδόσεις Κλειδάριθμος 2005