



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΣΥΓΚΟΛΜΗΣΗΣ
ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΠΥΛΩΝΩΝ
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Κωνσταντίνος Θεοχάρης

ΕΜΚ ΔΕ 2015 30

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΣΥΓΚΟΛΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΒΡΑΧΕΟΣ L ΠΥΛΩΝΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ



Διπλωματική Εργασία
Κωνσταντίνος Θεοχάρης

ΕΜΚ ΔΕ 2015 30

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2015

Copyright © Κωνσταντίνος Θεοχάρης, 2015
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

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

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

Copyright © Konstantinos Theocharis, 2015
All Rights Reserved

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

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

Κωνσταντίνος Θεοχάρης (2015)

Αξιολόγηση εναλλακτικών τρόπων συγκόλλησης σε συνδέσεις βραχέος L πυλώνων ανεμογεννητριών
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2015 30
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Konstantinos Theocharis (2015)

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2015 30
Evaluation of alternative welding details for L-stub connections in wind turbine towers
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή μου κ. Χάρη Γαντέ για την υποδειγματική καθοδήγηση και την απεριόριστη βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας. Η παρουσία του ήταν η βέλτιστη δυνατή, δίνοντάς μου πάντα το κίνητρο και τα απαραίτητα εφόδια για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που προέκυψαν κατά την διάρκεια της εργασίας μου. Η προθυμία, το ήθος και η εμπιστοσύνη που μου έδειξε τον καθιστούν πρότυπο δασκάλου.

Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω και στον Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π. κ. Ηλία Θανάσουλα. Η βοήθεια που μου προσέφερε και ο χρόνος που πρόθυμα αφιέρωσε ήταν καθοριστικής σημασίας για την διεκπεραίωση της εργασίας μου.

Θέλω να ευχαριστήσω την Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό Ε.Μ.Π. Αικατερίνη Νταϊφώτη, η διπλωματική εργασία της οποίας αποτέλεσε την βάση της εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον συμφοιτητή και φίλο μου Μωρίς. Η παρουσία του στην φοιτητική μου ζωή μου χάρισε ανεκτίμητες στιγμές.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΕΜΚ ΔΕ 2015 30

Αξιολόγηση εναλλακτικών τρόπων συγκόλλησης σε συνδέσεις βραχέος L πυλώνων ανεμογεννητριών

Κωνσταντίνος Θεοχάρης

Επιβλέπων: Χάρης Γαντές, Δρ. Πολιτικός Μηχανικός, Καθηγητής ΕΜΠ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση εναλλακτικών τρόπων συγκόλλησης σε συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας του σωληνωτού περιβλήματος μιας ανεμογεννήτριας για καταπόνηση από φορτία κόπωσης. Οι υπό μελέτη εναλλακτικοί τρόποι σύνδεσης είναι οι: φλάντζα με ορισμένες επιφάνειες επαφής, φλάντζα προσυγκόλλησης, φλάντζα με προέκταση και φλάντζα εξωραφής, για σύνδεση στο 0,85 του ύψους του πυλώνα μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, ονομαστικής ισχύος 1,5mW και ύψους πυλώνα 80m.

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς κάθε εναλλακτικού τρόπου σύνδεσης προσομοιώνεται ένα κομμάτι της σύνδεσης βραχέος L με τρισδιάστατα στοιχεία όγκου, το οποίο περιλαμβάνει έναν κοχλία, τις συνδεόμενες δακτυλιοειδείς φλάντζες και ένα κομμάτι του ελάσματος του πυλώνα. Τα αριθμητικά προσομοιώματα, τα οποία αντιστοιχούν στον πλέον εφελκόμενο κοχλία, δέχονται εφελκυστική δύναμη περί τα 100kN. Πραγματοποιούνται μη γραμμικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA v9.0.0, οι οποίες επικεντρώνονται στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των ραφών στους διάφορους εναλλακτικούς τρόπους συγκόλλησης. Στις αναλύσεις δεν λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού, δεδομένου ότι η αστοχία στις εν λόγω συνδέσεις αναμένεται να προέλθει μέσω κόπωσης, η οποία πραγματοποιείται με τις τάσεις να παραμένουν στην ελαστική περιοχή.

Για κάθε εναλλακτικό τρόπο συγκόλλησης γίνονται αναλύσεις για δύο συστήματα συνοριακών συνθηκών. Το πρώτο περιλαμβάνει πάκτωση στην βάση του κοχλία και στην κάτω φλάντζα και δέσμευση της μετακίνησης κατά την εφαπτομενική διεύθυνση στον άξονα συμμετρίας. Το δεύτερο περιλαμβάνει τις ίδιες συνοριακές συνθήκες με το πρώτο και έχει σαν επιπρόσθετη συνθήκη την δέσμευση της μετακίνησης κατά την εφαπτομενική διεύθυνση στις ακραίες παρειές του προσομοιώματος, προσομοιώνοντας έτσι καλύτερα την συνέχεια του υλικού στο φυσικό πρόβλημα.

Για κάθε εναλλακτικό τρόπο συγκόλλησης παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε αυτή σε διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου. Μέσω του τρισδιάστατου προσομοιώματος επιτυγχάνεται η απεικόνιση της κατανομής των τάσεων με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον προσδιορισμό σε κάθε συγκόλληση των περιοχών που παραμένουν σχετικά πιο ανενεργές και των περιοχών που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων. Τέλος, γίνεται σύγκριση των τεσσάρων αυτών εναλλακτικών τρόπων σύνδεσης.



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

DIPLOMA THESIS
EMK ΔΕ 2015 30

Evaluation of alternative welding details for L-stub connections in wind turbine towers

Konstantinos Theocharis

Supervisor: Charis Gantes, Dr. Civil Engineer, Professor N.T.U.A.

ABSTRACT

The present diploma thesis deals with the evaluation of alternative welding details for splicing connections of the tubular body of wind turbines under fatigue loads due to wind. The alternative connections discussed are: flange with defined contact area, pre-welding flange, flange with extension and external stitching flange, for a connection at 85% of the total height of the tower of a typical horizontal axis wind turbine, with rated power 1.5mW and total tower height of 80m.

For the evaluation of the behaviour of every alternative connection technique, a typical L-stub connection is simulated, using 3D solid elements, which includes a bolt, the ring-like connecting flanges and a part of the tower's shell. The numerical models are subjected to a tensile force of approximately 100kN. Non linear analysis is performed using the finite element program ADINA v9.0.0, focusing on the welding's behavior for each different solution. Material non linearities are not taken into consideration as failure of the particular connections is expected to be due to fatigue, which takes place with the stresses remaining in the elastic area.

For each alternative welding detail, analyses are carried out for two sets of boundary conditions. The first includes fixing for x, y and z translation at the base of the bolt and the lower flange and of translation in the tangential direction of all nodes on the symmetry axis. The second includes the same boundary conditions as the first and the additional condition of restriction of the translation in the tangential direction of the edges of the model, thus simulating better the continuity of the flanges and shell in the physical problem.

For every alternative welding solution, the stress distribution is presented in different stages of the load imposition. Through the 3D-simulation the stress distribution is depicted with high accuracy. This results in the recognition of the areas that remain relatively inactive and those where high stress concentrations are encountered for each welding alternative. Finally, a comparison of the four alternative connections is presented.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	1
1.1 ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ.....	1
1.2 ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	3
1.3 Ο ΠΥΛΩΝΑΣ ΜΙΑΣ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ.....	8
1.3.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	8
1.3.2 Τύποι πυλώνων.....	8
1.3.3 Αυτόνομοι χαλύβδινοι πυλώνες.....	12
1.3.4 Τεχνικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων.....	13
1.3.5 Θεμελίωση ανεμογεννητριών.....	17
2 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΣΩΛΗΝΩΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ.....	19
2.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ.....	19
2.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	19
2.1.2 Γεωμετρία της σύνδεσης.....	21
2.1.3 Παρουσίαση των μεθόδων αποκατάστασης της συνέχειας.....	22
2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΒΡΑΧΕΟΣ L.....	25
2.2.1 Περιγραφή αριθμητικού προσομοιώματος.....	25
2.2.2 Shear locking και hourglassing.....	26
3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΜΕ ΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΕΠΑΦΗΣ.....	29
3.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ.....	29
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ.....	35
4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΠΡΟΣΥΓΚΟΛΛΗΣΗΣ.....	39
4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ.....	39
4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ.....	44
5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΚΤΑΣΗ.....	49
5.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ.....	49
5.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ.....	53

6	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΕΞΩΡΑΦΗΣ.....	57
6.1	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ.....	57
6.2	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ.....	64
7	ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	69
7.1	ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	69
7.2	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	70
7.3	ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	71
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	72

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^ο 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 CO₂ 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.

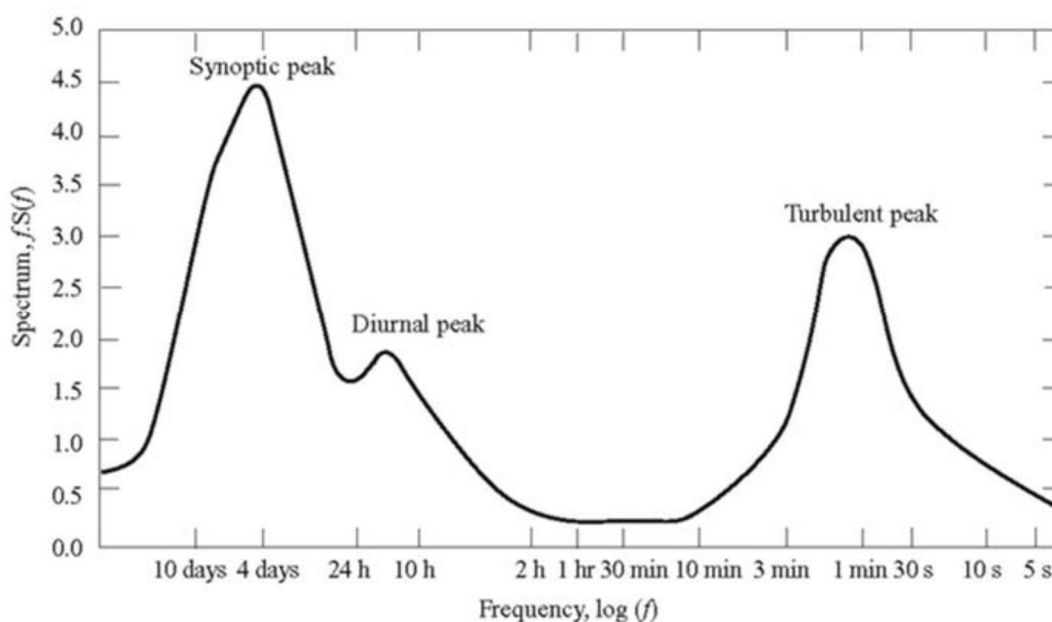
Σε μία δεδομένη τοποθεσία χρονική ποικιλότητα σε μεγάλη κλίμακα σημαίνει ότι το ποσοστό του ανέμου μπορεί να ποικίλλει από τον ένα χρόνο στον άλλο, με ακόμα μεγαλύτερη κλίμακα ποικιλότητας για περιόδους δεκαετιών ή περισσότερο. Αυτές οι μακροπρόθεσμες ποικιλότητες δεν είναι πλήρως κατανοητές και μπορεί 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 οπότε 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.



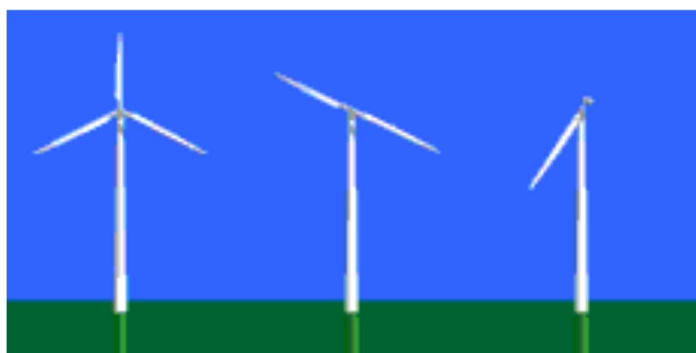
Σχήμα 1-2: ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα [3]



Σχήμα 1-3: ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα [2]



Σχήμα 1-4: ανεμογεννήτριες πολλαπλών λεπίδων [3]



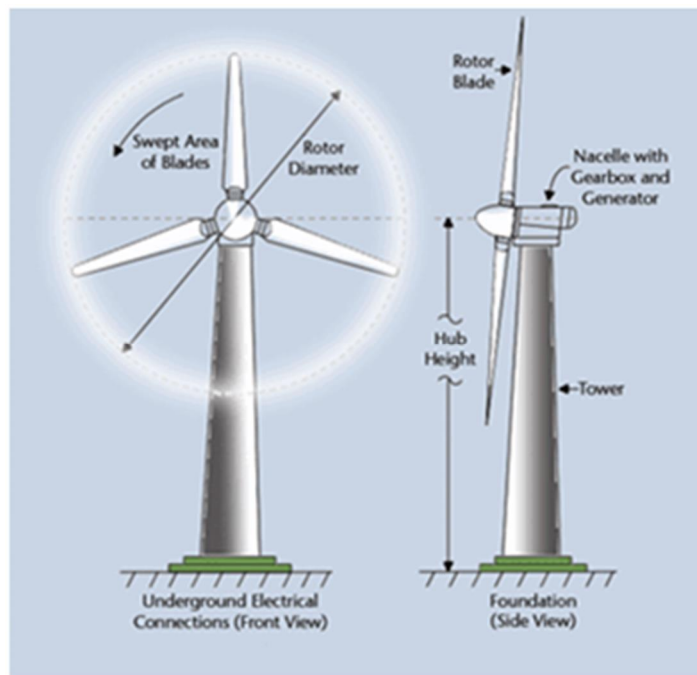
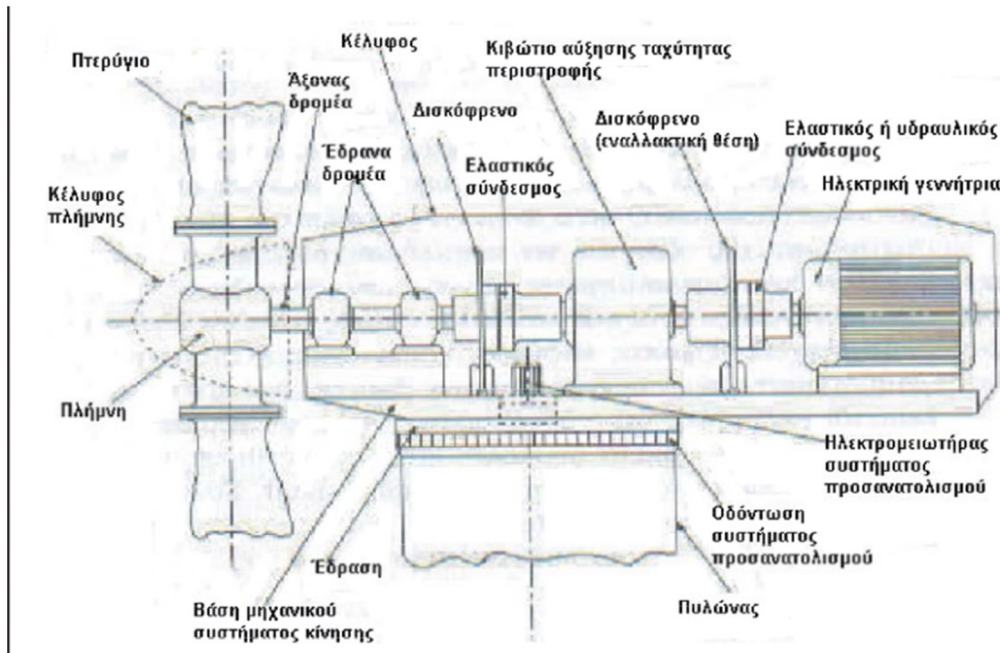
Σχήμα 1-5: ανεμογεννήτριες 1, 2 και 3 λεπίδων [3]

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 μίας ανεμογεννήτριας οριζώντιου άξονα (πηγή: ape1epalsyrou.weebly.com & 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 πληρεί 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 χαλύβδινοι 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 χαλύβδινοι 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.

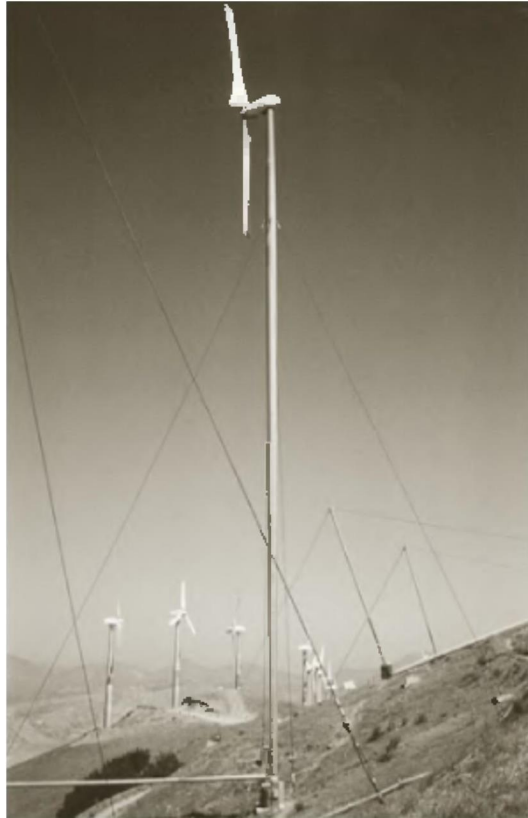
Χαλύβδινοι σωληνωτοί πυλώνες με αγκύρια: αυτοί είναι αγκυρωμένοι με χαλύβδινα καλώδια ή σε μερικές περιπτώσεις με δύσκαμπτα δικτυώματα ώστε να ενισχύσουν την απαιτούμενη καμπτική δυσκαμψία του πυλώνα (σχήμα 1-9). Η διάμετρος και η μάζα του πυλώνα μπορούν να μειωθούν σημαντικά με την χρήση αυτού του τύπου. 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:

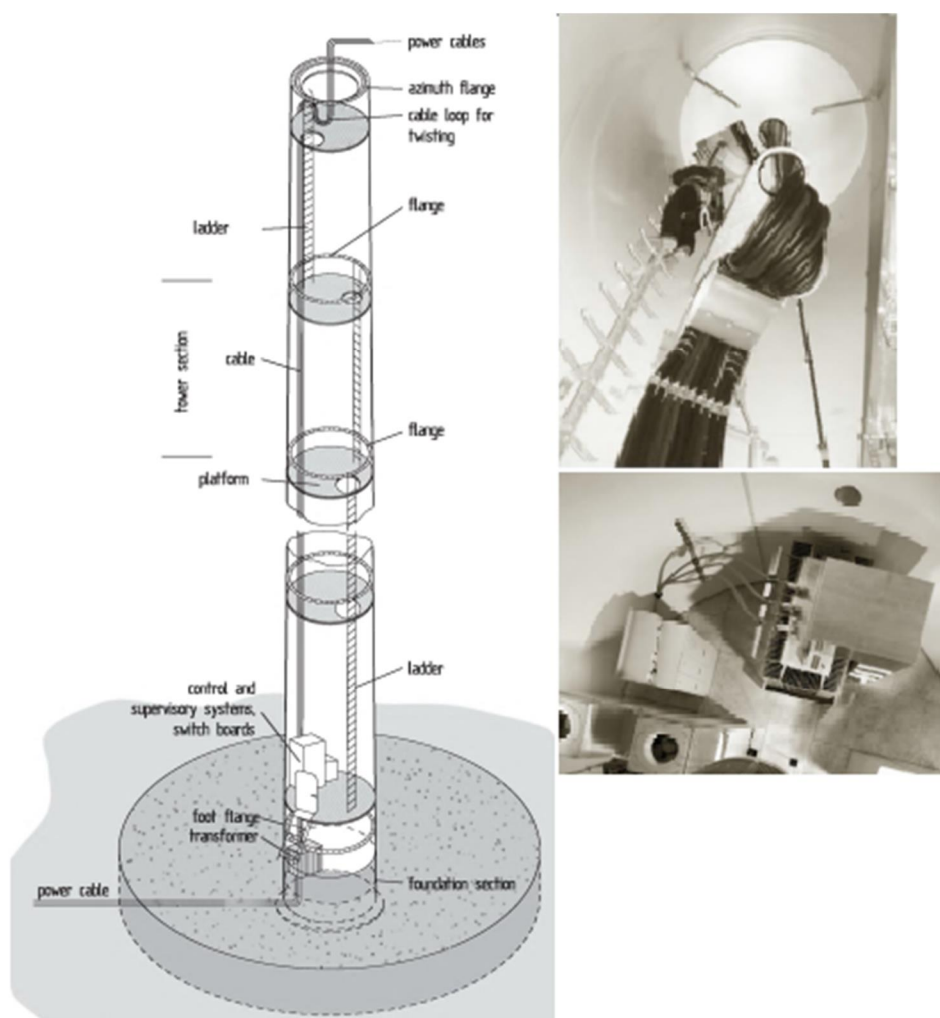
- Η αντοχή σε θραύση που απαιτείται ώστε να επιβιώσει τις ακραίες ταχύτητες ανέμου. Το στατικό φορτίο καθορίζεται από το βάρος της κεφαλής του πύργου, το ίδιο βάρος του πυλώνα και την αεροδυναμική ώθηση του ρότορα. Σημαντικό ρόλο στην τιμή αυτού του φορτίου παίζει το σύστημα ελέγχου των πτερυγίων της 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 λυγηρών 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.

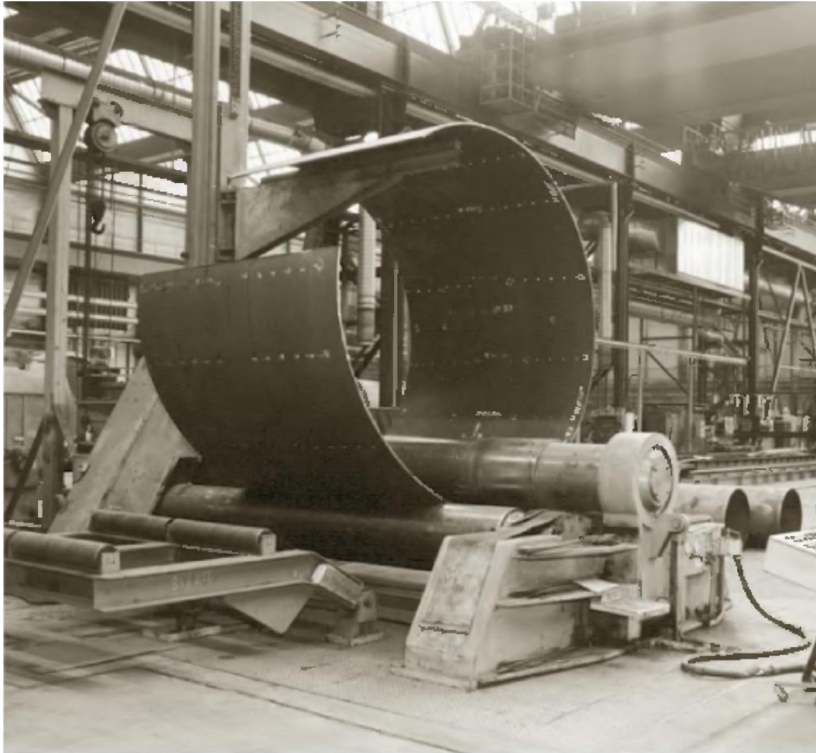
1.3.4 Τεχνικές παραγωγής και κατασκευής χαλύβδινων σωληνωτών πυλώνων

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]

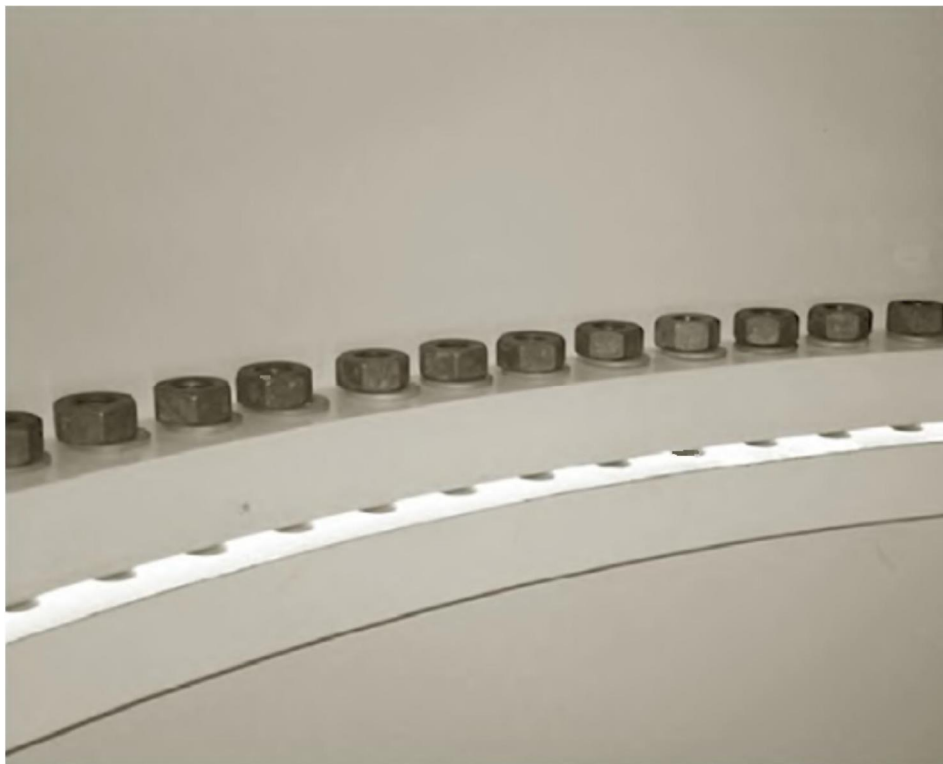
ιδιαίτερη προσοχή. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, όπως υπέρηχοι, ακτίνες X αλλά και οπτικοί έλεγχοι για επιφανειακές ρωγμές, οι οποίες χρησιμοποιούνται ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητα των συγκολλήσεων.

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 & diamondtowerservice.com)



Σχήμα 1-15: ανέγερση πτερυγίων (πηγή: 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 αμβολή 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.

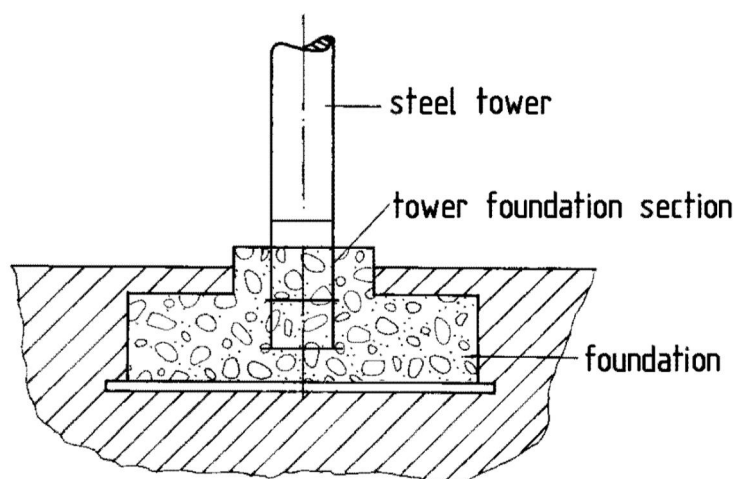
Ο πυλώνας πρέπει να παρέχει μία ασφαλή ανάβαση στην άτρακτο και επίσης να περιλαμβάνει κάποιες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, ιδιαίτερα τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην βάση του πυλώνα. Αυτό απαιτεί ορισμένες εσωτερικές εγκαταστάσεις, όπως φαίνεται στο σχήμα 1-11 δεξιά. Ανάλογα με το ύψος του 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

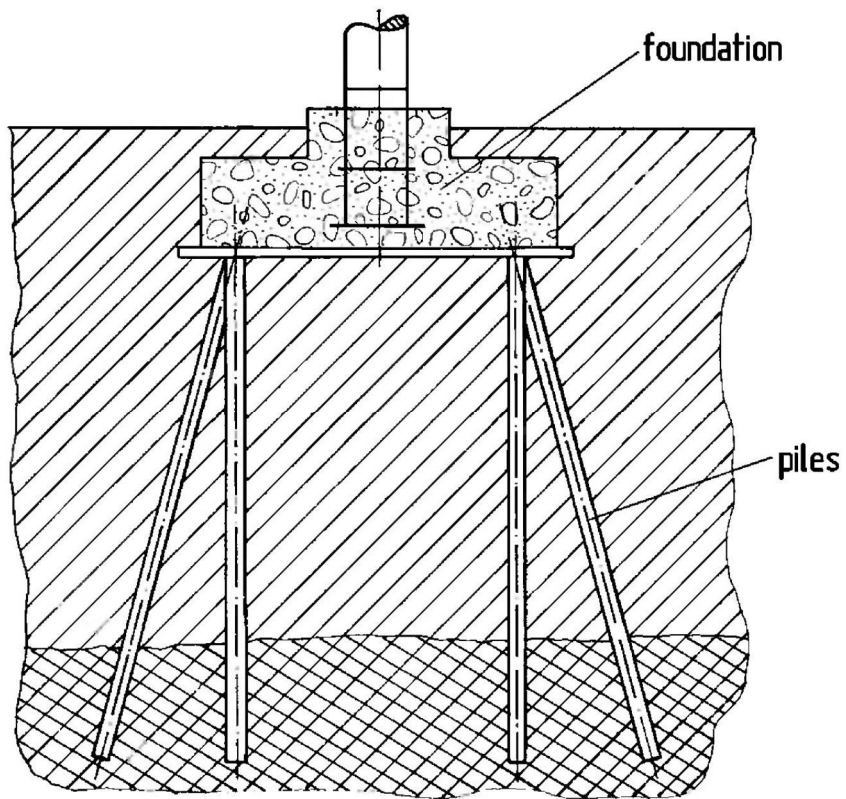
Η θεμελίωση ενός πυλώνα καθορίζεται από το μέγεθος της ανεμογεννήτριας και από τις τοπικές συνθήκες του εδάφους. Στο πλαίσιο αυτό, τα φορτία τα οποία πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την διαστασιολόγηση είναι κατά κύριο λόγο τα υψηλότερα φορτία τα οποία δρουν στην ανεμογεννήτρια σε συνθήκες ακινητοποίησης. 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 ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΔΙΝΟΥ ΣΩΛΗΝΩΤΟΥ ΠΥΛΩΝΑ

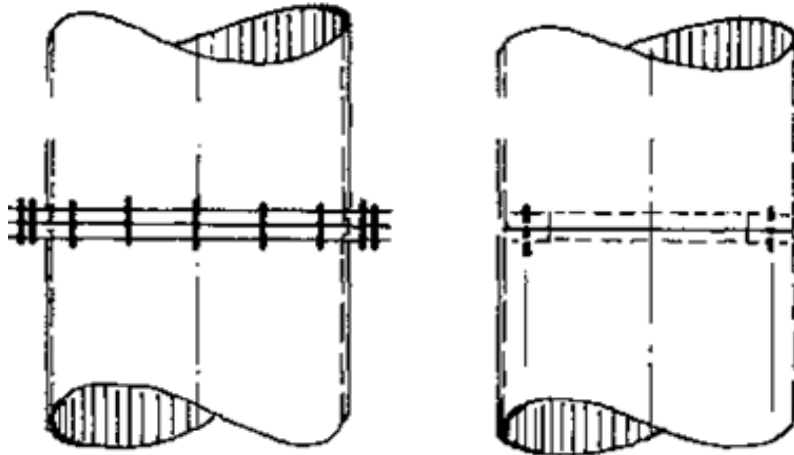
2.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΗΣ

2.1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Ο αυτόνομος χαλύβδινος σωληνωτός πυλώνας της ανεμογεννήτριας, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά 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 δακτυλίων. Οι κυκλικοί αυτοί δακτύλιοι (φλάντζες) συγκολλούνται στα τμήματα του πυλώνα στο εργοστάσιο και μεταφέρονται στο εργοτάξιο με την μορφή του σχήματος 2-1. 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. Για πυργοειδή οικοδομήματα συστημάτων δόμησης σωληνωτού περιβλήματος, όπως οι πυλώνες ανεμογεννητριών, επιλέγονται κατά προτίμηση μονόπλευρες συνδέσεις σε δακτυλιοειδείς φλάντζες (σχήμα 2-2). Ο λόγος γι αυτό είναι τα οικονομικά οφέλη κατά την κατασκευή και την τοποθέτηση. Οι φλάντζες συνδέονται μέσω προεντεταμένων κοχλιών υψηλής αντοχής ποιότητας 10.9.

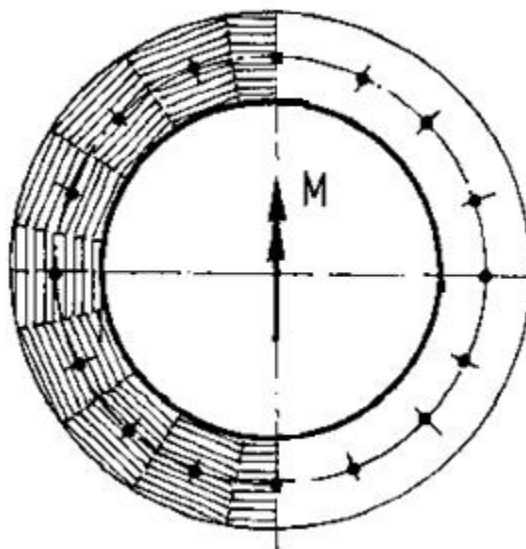


Σχήμα 2-1: κυκλικοί δακτύλιοι τμημάτων πυλώνα (πηγή: www.sustainablemfr.com)



Σχήμα 2-2: εξωτερική και εσωτερική δακτυλιοειδής φλάντζα κατά Petersen [4]

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. Η φόρτιση του ανέμου στα πτερύγια της ανεμογεννήτριας μεταφράζεται ως μία καμπτική ροπή στον πυλώνα, με διεύθυνση εγκάρσια στην διεύθυνση της φοράς του ανέμου. Η καμπτική αυτή ροπή ισοδυναμεί με ορθές τάσεις στο κέλυφος του πυλώνα, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας ουδέτερος άξονας, ο οποίος οριοθετεί την ζώνη όπου ασκούνται εφελκυστικές ορθές τάσεις με την ζώνη όπου ασκούνται θλιπτικές ορθές τάσεις. Στην εφελκυσόμενη περιοχή οι φλάντζες της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας απομακρύνονται και οι κοχλίες δέχονται εφελκυσμό, σε αντίθεση με την θλιβόμενη περιοχή όπου οι φλάντζες έρχονται σε επαφή και οι κοχλίες παραμένουν ανενεργοί. Στο σχήμα 2-3 φαίνεται η εφελκυστική και η θλιπτική ζώνη στην φλάντζα της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας.

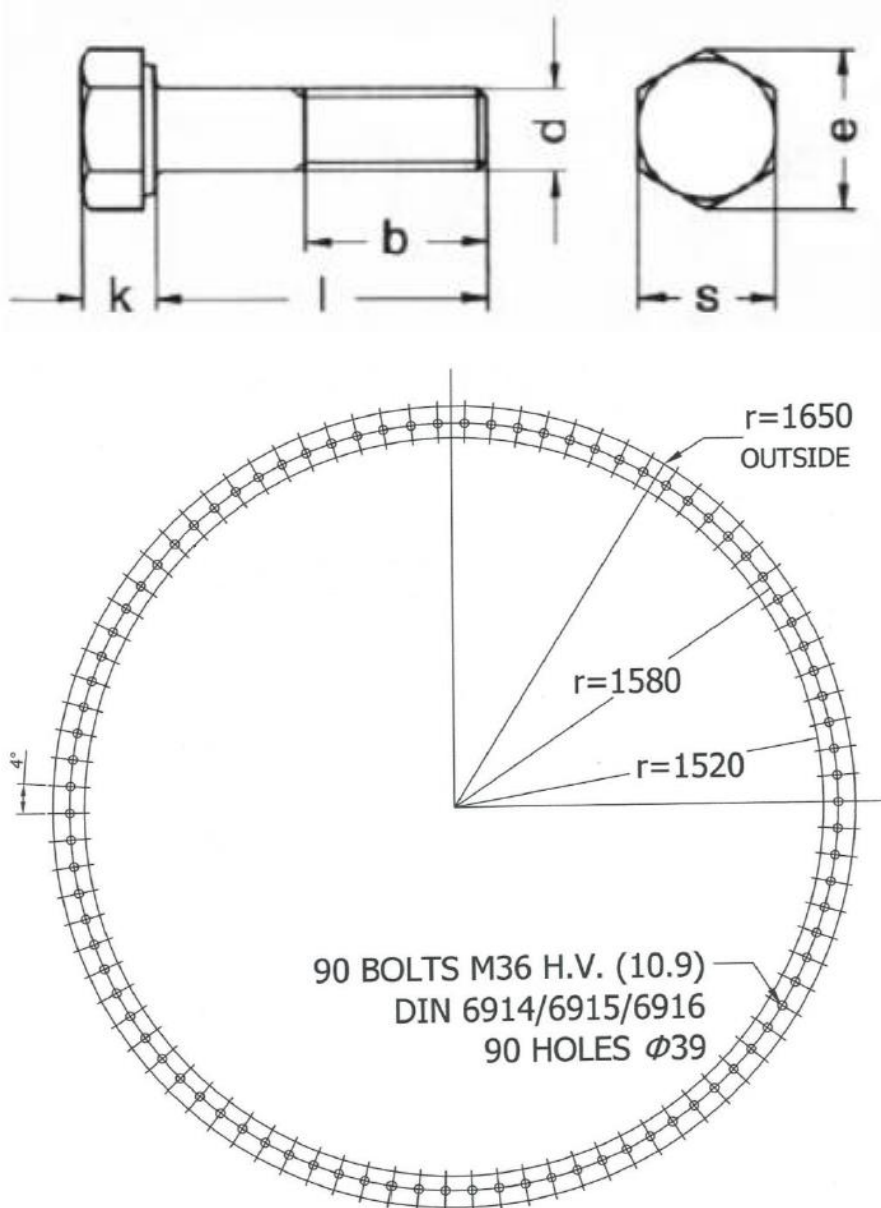


Σχήμα 2-3: εφελκυστική και θλιπτική ζώνη κατά Petersen [4]

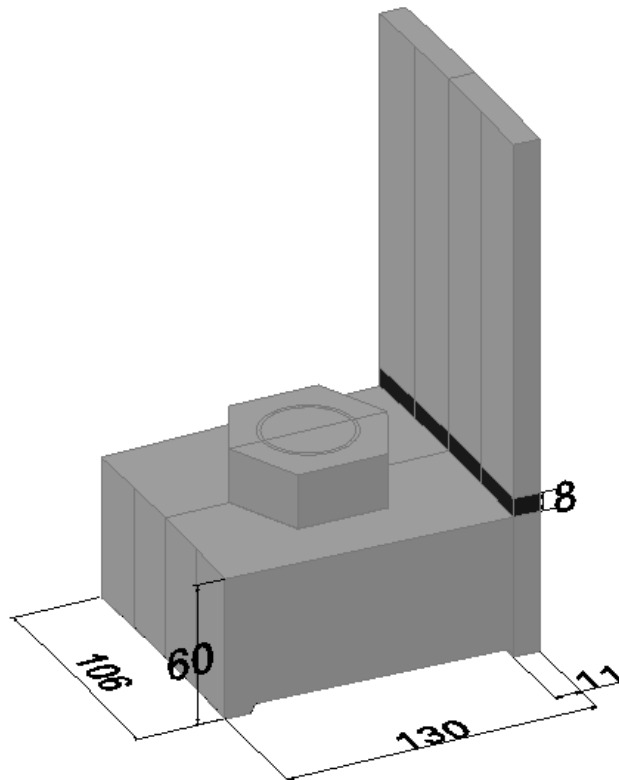
2.1.2 Γεωμετρία της σύνδεσης

Στα σχήματα 2-4 και 2-5 (ενδεικτικά ως προς τον τρόπο συνδεσης) φαίνονται αναλυτικά οι διαστάσεις της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας. Πρόκειται για μια 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 της φλάντζας λήφθηκε ίσο με 60mm. Η σύνδεση είναι κατηγορίας E συνδέσεων εφελκυσμού και οι επιφάνειες των ελασμάτων λήφθηκαν ως αμβολισμένες με κανονικές οπές. Οι κοχλίες της σύνδεσης είναι διαμέτρου M36. Στο υπό μελέτη προσομοίωμα δεν έχει ληφθεί υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού για λόγους που αναφέρονται στην συνέχεια. Οι τάσεις δεν έχουν ξεπεράσει τα αντίστοιχα όρια διαρροής του χάλυβα του ελάσματος και του κοχλία.

Για τον ακριβή σχεδιασμό του κοχλία, οι διαστάσεις ελήφθησαν από τον κανονισμό DIN6914 [5].



Σχήμα 2-4: κάτοψη της σύνδεσης αποκατάστασης συνέχειας



Σχήμα 2-5: γεωμετρία του προσομοιώματος

Για κοχλία M36:

$k=23\text{mm}$

$e=66.44\text{mm}$

$s=60\text{mm}$

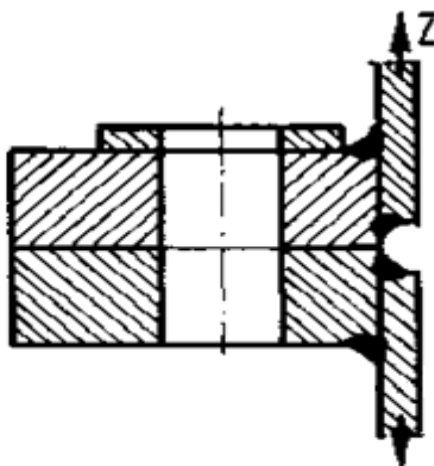
Όσον αφορά την ανοχή της οπής, εξαρτάται από την διάμετρο του κοχλία.

Διάμετρος οπής : $d_o = d + a = 36\text{mm} + 3\text{mm} = 39\text{mm}$, όπου $a = 3\text{mm}$ για κοχλία M36

2.1.3 Παρουσίαση των μεθόδων αποκατάστασης της συνέχειας

Στην βιβλιογραφία προτείνονται τέσσερις τρόποι αποκατάστασης της συνέχειας των τμημάτων του πυλώνα. Οι τρεις πραγματοποιούνται με συγκόλληση εσωραφής της φλάντζας στο κέλυφος του πυλώνα, ενώ ο τέταρτος με δύο συγκολλήσεις εξωραφής. Οι τρόποι συγκόλλησης με εσωραφή διαφοροποιούνται ως προς την γεωμετρία των δακτυλιοειδών ελασμάτων.

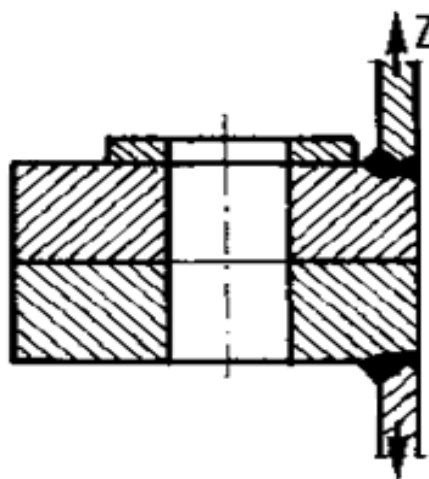
1. Φλάντζα εξωραφής



Σχήμα 2-6: φλάντζα εξωραφής κατά Petersen [4]

Ο τύπος που παρουσιάζεται στο σχήμα 2-6 αποτελεί την πιο συνηθισμένη επιλογή για την αποκατάσταση της συνέχειας σε έκκεντρα καταπονούμενες συνδέσεις με δακτυλιοειδής φλάντζες. Η σύνδεση φλάντζας-ελάσματος εξασφαλίζεται με δύο εξωραφές, με την βοήθεια των οποίων επιτυγχάνεται ιδιαίτερα εύκολα η τοξοειδής μορφή του σωληνωτού περιβλήματος και ο ορθογώνιος προσανατολισμός του σε σχέση με τις φλάντζες. Στα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου συγκαταλέγεται η απλή γεωμετρία του. Παρόλο που στον DIN [5] 4133 αξιολογείται αυτή η σύνδεση ως " λιγότερο καλή " και προτείνει για την λαμαρίνα του κελύφους $\Delta\sigma_R = 45 \text{ N/mm}^2$, η συγκεκριμένη διαμόρφωση της φλάντζας συνήθως επιλέγεται.

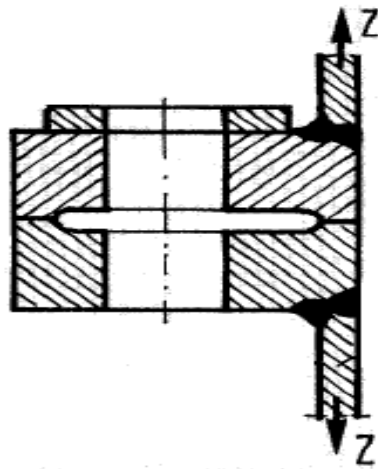
2. Φλάντζα προσυγκόλλησης



Σχήμα 2-7: φλάντζα προσυγκόλλησης κατά Petersen [4]

Στο σχήμα 2-7 παρουσιάζεται ο δεύτερος τρόπος σύνδεσης της φλάντζας με το έλασμα του κελύφους. Η σύνδεση επιτυγχάνεται με μία εσωραφή πλήρους διείσδυσης. Στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι απαραίτητη υψηλή ακρίβεια στην κοπή της λαμαρίνας και στον αμοιβαίο προσανατολισμό του σωλήνα και της φλάντζας.

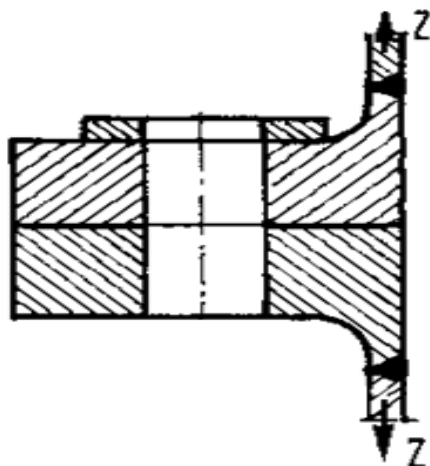
3. Φλάντζα με ορισμένες επιφάνειες επαφής



Σχήμα 2-8: φλάντζα με ορισμένες επιφάνειες επαφής κατά Petersen [4]

Ο τρίτος τύπος αποκατάστασης της συνέχειας παρουσιάζεται στο σχήμα 2-8. Σε αυτή την περίπτωση οι δύο φλάντζες των συνδεόμενων τμημάτων δεν βρίσκονται εξ' ολοκλήρου σε επαφή παρά μόνο σε δύο τμήματα. Με τον τρόπο αυτό επιβάλλεται συγκεκριμένη διαδρομή που μπορεί να ακολουθήσει η πορεία των τάσεων. Στον DIN [5] 4133 αξιολογείται αυτή η διαμόρφωση φλάντζας ως "καλή" και προτείνει για την λαμαρίνα του κελύφους $\Delta\sigma_R = 90 \text{ N/mm}^2$.

4. Φλάντζα με προέκταση



Σχήμα 2-9: φλάντζα με προέκταση κατά Petersen [4]

Στην περίπτωση της φλάντζας με προέκταση (σχήμα 2-9) έχει γίνει επέκταση της φλάντζας, ενσωματώνοντας ένα επιπρόσθετο κομμάτι χάλυβα κάνοντας έτσι πιο ομαλή την αλλαγή στην μετάβαση γεωμετρίας από την φλάντζα στον πυλώνα. Συνέπεια αυτής της διαμόρφωσης είναι η συγκόλληση εσωραφής να μην βρίσκεται στην αλλαγή της γεωμετρίας, με αποτέλεσμα την μικρότερη συγκέντρωση τάσεων.

Το πιο ευνοϊκό θα ήταν ένας συνδυασμός του τρίτου και τέταρτου τύπου φλάντζας, το οποίο όμως θα οδηγούσε σε δυσανάλογα υψηλό κόστος, δεδομένου ότι τελικά σε όλους τους προαναφερθέντες τύπους φλάντζας οι κοχλίες είναι το πιο αδύναμο τμήμα. Ως εκ τούτου η διαμόρφωση της σύνδεσης σε συνηθισμένες κατασκευές σύμφωνα με τον τύπο της φλάντζας εξωραφής αποτελεί κατάλληλη λύση αναφορικά με την αντοχή έναντι κόπωσης συνολικά της κατασκευής.

2.2 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΒΡΑΧΕΟΣ L

2.2.1 Περιγραφή αριθμητικού προσομοιώματος

Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των τεσσάρων τρόπων σύνδεσης αποκατάστασης της συνέχειας πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA v9.0.0 [7], αφού προηγουμένως είχε δημιουργηθεί το πλέγμα στο πρόγραμμα FEMAP v11.0.1 [6]. Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε σε τρισδιάστατη μορφή ένα κομμάτι της κοχλιωτής σύνδεσης το οποίο αντιστοιχεί σε έναν κοχλία και περιλαμβάνει έναν κοχλία, τις δύο φλάντζες της σύνδεσης, την εκάστοτε μορφή συγκόλλησης και ένα μικρό κομμάτι του πυλώνα. Η προσομοίωση του κοχλία, της άνω φλάντζας, του ελάσματος του πυλώνα και της εκάστοτε συγκόλλησης έγινε με 3D solid πεπερασμένα στοιχεία, ενώ χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία για την κάτω φλάντζα.

Τα solid πεπερασμένα στοιχεία δεν έχουν στροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Άρα οι βαθμοί ελευθερίας του συστήματος είναι 3 και αντιστοιχούν στις μετακινήσεις στις τρεις διευθύνσεις. Όσον αφορά τις συνοριακές συνθήκες, έγινε χρήση δύο συστημάτων συνοριακών συνθηκών. Στο πρώτο είναι δεσμευμένη η μετακίνηση και στις 3 διευθύνσεις στο κάτω έλασμα και στη βάση του κοχλία και επίσης λόγω συμμετρίας του προσομοιώματος δεσμεύθηκε η πλευρική μετακίνηση του ελάσματος στον άξονα συμμετρίας. Το δεύτερο περιλαμβάνει τις ίδιες συνοριακές συνθήκες με το πρώτο και έχει σαν επιπρόσθετη συνθήκη την δέσμευση της μετακίνησης κατά την εφαπτομενική διεύθυνση στις ακραίες παρειές του προσομοιώματος, προσομοιώνοντας έτσι καλύτερα την συνέχεια του υλικού στο φυσικό πρόβλημα.

Οι επιφάνειες οι οποίες έρχονται σε επαφή κατά την φόρτιση είναι οι δύο φλάντζες, η άνω επιφάνεια της άνω φλάντζας με την κεφαλή του κοχλία καθώς και ο κορμός του κοχλία με την άντυγα της φλάντζας. Στο προσομοίωμα των αριθμητικών αναλύσεων έχουν ληφθεί υπόψη οι επαφές αυτές με κατάλληλα στοιχεία επαφής. Επίσης, έγινε χρήση της εντολής glue mesh για την σύνδεση της συγκόλλησης με τον πυλώνα και την φλάντζα.

Στις αναλύσεις δεν λήφθηκε υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού, δεδομένου ότι η αστοχία στις εν λόγω συνδέσεις αναμένεται να προέλθει μέσω κόπωσης, η οποία πραγματοποιείται με τις τάσεις να παραμένουν στην ελαστική περιοχή. Πιο συγκεκριμένα όλες οι αναλύσεις χωρίστηκαν σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση ασκείται βράχυνση του κοχλία μεγέθους 0,4mm, έτσι ώστε να κλείσουν τα κενά των ανοχών μεταξύ των φλάντζων και της κεφαλής του κοχλία με το έλασμα. Στην δεύτερη φάση αρχικά εισάγεται η προένταση στους κοχλίες και μόλις ολοκληρωθεί ασκείται σταδιακά το φορτίο. Ο φορέας υποβάλλεται σε αξονικό εφελκυστικό φορτίο 100kN κατά μήκος του πυλώνα και η δύναμη προεντάσεως του κοχλία επιλέχθηκε 300kN.

Η μέγιστη δύναμη προεντάσεως του κοχλία είναι :

$$F_{p,c} = 0.7 * f_{ub} * A_s, \text{ όπου } f_{ub} \text{ είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και } A_s \text{ το εμβαδόν του σπειρώματος.}$$

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

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

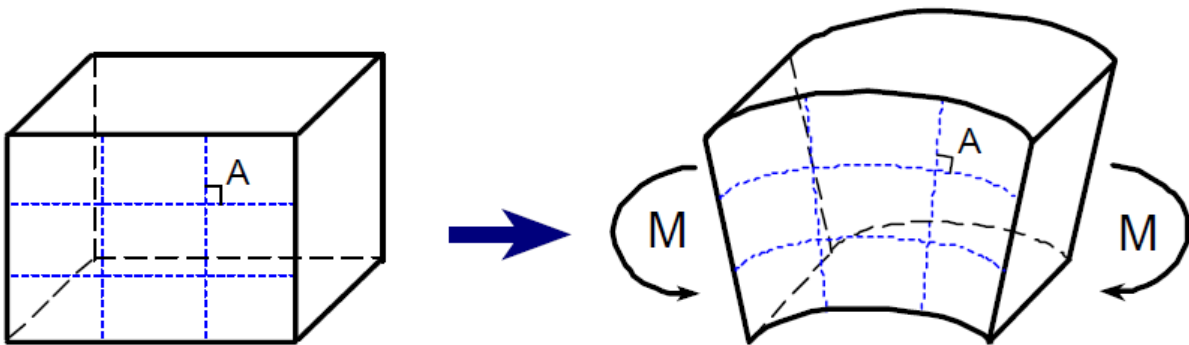
Οπότε $F_{p,c}=571.9\text{kN}$

2.2.2 Shear locking και hourglassing

Σε αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων οι οποίες περιλαμβάνουν κάμψη και χρησιμοποιούν fully integrated στοιχεία πρώτης τάξης το shear locking και το hourglassing αποτελούν σημαντικά αριθμητικά προβλήματα. Η παράβλεψη τους μπορεί να οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα σε ορισμένες περιπτώσεις. Παρακάτω γίνεται μια εισαγωγή στα προαναφερθέντα προβλήματα.

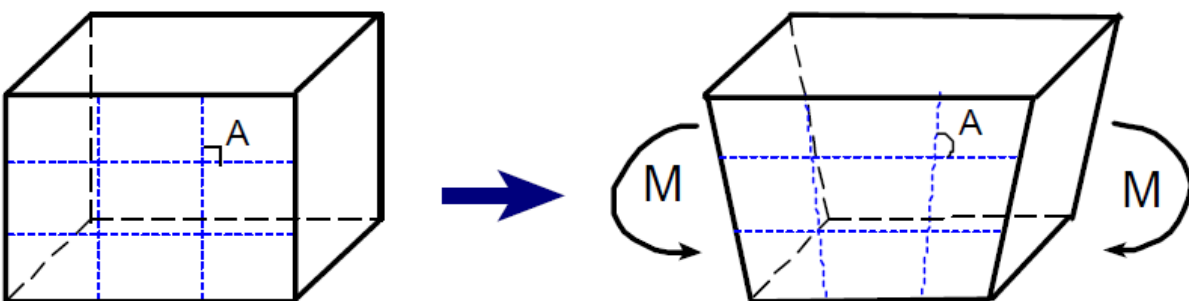
- Shear locking

Σε μία εξιδανικευμένη περίπτωση ένα κομμάτι υλικού το οποίο υποβάλλεται σε καθαρή κάμψη αποκτά ένα καμπύλο σχήμα (σχήμα 2-10). Υποθέτουμε ότι υπάρχουν οι ευθείες διακεκομμένες γραμμές στην επιφάνεια του κομματιού, πριν την κάμψη όπως φαίνεται στο σχήμα 2-10. Μετά την κάμψη οι οριζόντιες ευθείες διακεκομμένες γραμμές θα μετατραπούν σε καμπύλες, ενώ οι κατακόρυφες ευθείες διακεκομμένες γραμμές παραμένουν ευθείες με την γωνία A να παραμένει ορθή.



Σχήμα 2-10: αλλαγή σχήματος σε κομμάτι υλικού υποβαλλόμενο σε καθαρή κάμψη κατά Eric Qiuli Sun [8]

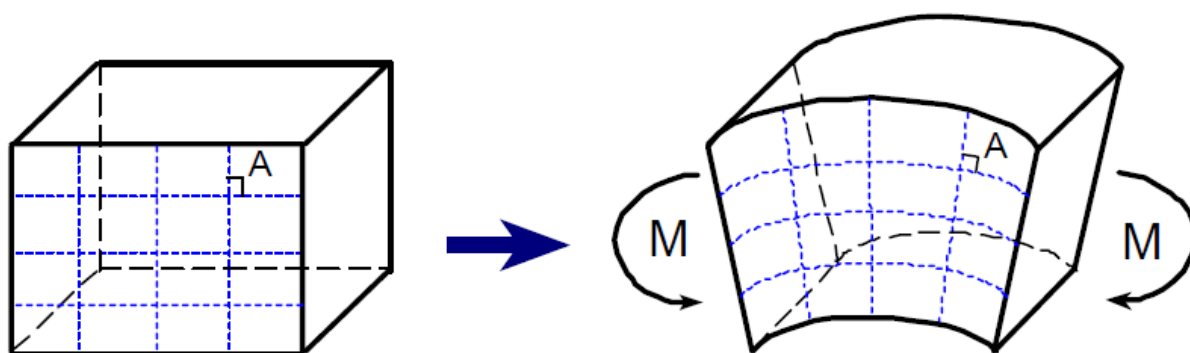
Για να μοντελοποιηθεί σωστά αυτή η αλλαγή σχήματος, το στοιχείο θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να πάρει αυτήν την καμπύλη μορφή. Οι άκρες όμως από τα fully integrated στοιχεία πρώτης τάξης δεν είναι ικανά να μετατραπούν σε καμπύλες. Το σχήμα μετά την επιβολή της κάμψης θα είναι όπως στο σχήμα 2-11. Η άνω επιφάνεια αναπτύσσει εφελκυστική ένταση και η κάτω επιφάνεια θλιπτική ένταση. Όλες οι ευθείες διακεκομμένες γραμμές παραμένουν ευθείες, με αποτέλεσμα η γωνία A να μην παραμένει ορθή (σχήμα 2-11).



Σχήμα 2-11: αλλαγή σχήματος σε fully integrated τρισδιάστατο στοιχείο όγκου πρώτης τάξης κατά Eric Qiuli Sun [8]

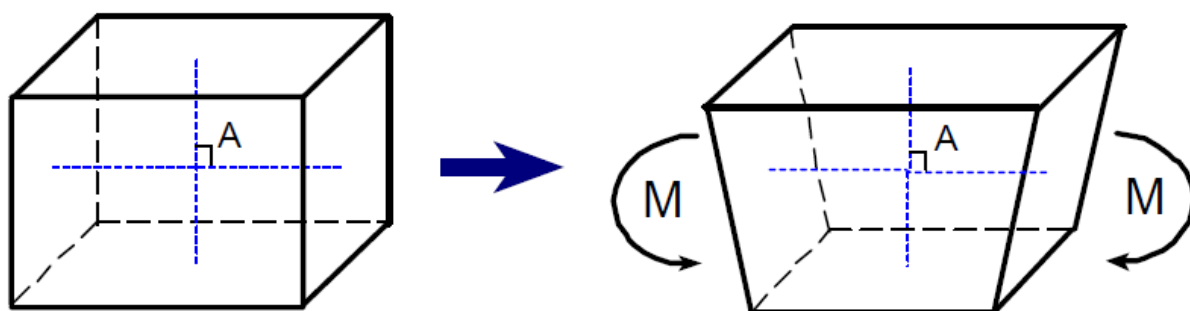
Για να προκληθεί αυτή η αλλαγή στην γωνία A υπό καθαρή κάμψη, εισείχθει μια λάθος τεχνητή διατμητική ένταση. Επίσης, η ενέργεια παραμόρφωσης του στοιχείου μεταφράζεται σε διατμητική παραμόρφωση αντί για καμπτική παραμόρφωση. Το συνολικό αποτέλεσμα είναι ότι τα fully integrated στοιχεία πρώτης τάξης “κλειδώνουν” ή αλλιώς γίνονται πολύ δύσκαμπτα όταν δέχονται κάμψη. Το κλειδωμα αυτό μπορεί να οδηγήσει σε λάθος μετακινήσεις, δυνάμεις και τάσεις λόγω του ότι δεν έχει ληφθεί υπόψη η κάμψη.

Τα fully integrated στοιχεία δεύτερης τάξης συμπεριφέρονται διαφορετικά, δεδομένου ότι οι άκρες τους είναι ικανές να μετατραπούν σε καμπύλες. Κάτω από συνθήκες, λοιπόν, καθαρής κάμψης το σχήμα του στοιχείου θα αποκτήσει την μορφή του κομματιού του υλικού, όπως στο σχήμα 2-12. Η γωνία A παραμένει ορθή μετά από την κάμψη. Δεν εισάγεται καμία τεχνητή διατμητική ένταση και το στοιχείο από είναι σε θέση να προσομοιώσει κατάλληλα την συμπεριφορά του κομματιού του υλικού. Δεν παρατηρείται επομένως shear locking σε αυτού του είδους τα στοιχεία.



Σχήμα 2-12: αλλαγή σχήματος σε fully integrated τρισδιάστατο στοιχείο όγκου δεύτερης τάξης κατά Eric Qiuli Sun [8]

Για να αποφευχθεί το shear locking χρησιμοποιούνται επίσης τα reduced integrated στοιχεία πρώτης τάξης τα οποία επίσης αντιμετωπίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό το shear locking υπερτερώντας σε υπολογιστικό φόρτο. Τα reduced integrated στοιχεία όγκου πρώτης τάξης χρησιμοποιούν μόνο ένα σημείο ολοκλήρωσης, σε αντίθεση με τα full integrated που χρησιμοποιούν οκτώ σημεία. Στο σχήμα 2-13 φαίνεται η παραμόρφωση του εν λόγω στοιχείου υπό καθαρή κάμψη.



Σχήμα 2-13: αλλαγή σχήματος σε reduced integrated τρισδιάστατο στοιχείο όγκου πρώτης τάξης κατά Eric Qiuli Sun [8]

- Hourglassing

Οι οριζόντιες και κάθετες διακεκομμένες γραμμές όπως επίσης και η γωνία A παραμένουν αμετάβλητες. Αυτό σημαίνει ότι τόσο οι ορθές όσο και οι διατμητικές τάσεις είναι μηδέν στο σημείο ολοκλήρωσης του στοιχείου και δεν υπάρχει ενέργεια παραμόρφωσης από την παραμόρφωσή του, γεγονός το οποίο δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Το αριθμητικό αυτό πρόβλημα ονομάζεται hourglassing και εμφανίζεται αυξημένο στα αραιά πλέγματα. Ουσιαστικά το πρόβλημα εντοπίζεται στην ιδιαίτερη χαμηλή δυσκαμψία που παρουσιάζει το στοιχείο. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε λάθος αποτελέσματα. Για την αποφυγή του hourglassing πρέπει να χρησιμοποιούνται τουλάχιστον 4 σειρές στοιχείων.

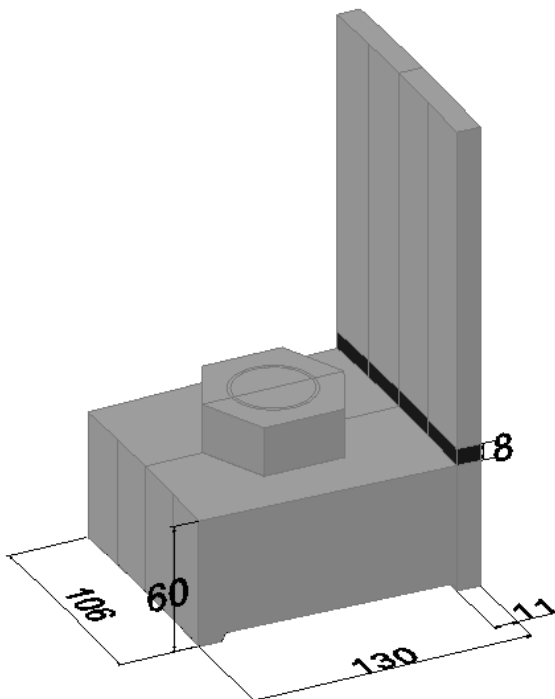
- Πώς αντιμετωπίζεται το shear locking και το hourglassing στο λογισμικό ADINA

Στα αριθμητικά προσομοιώματα χρησιμοποιήθηκαν 8-κομβικά πεπερασμένα στοιχεία τύπου 3D solid πρώτης τάξης καθώς και επιφανειακά στοιχεία. Το MANUAL του λογισμικού ADINA [7] αναφέρει ότι τα συγκεκριμένα στοιχεία όταν χρησιμοποιούνται σε αναλύσεις όπου η επίδραση της κάμψης είναι σημαντική, θα πρέπει να γίνεται χρήση του incompatible modes element. Αυτή η επιλογή βελτιώνει την ευκαμψία έναντι κάμψης που παρουσιάζουν τα fully integrated 3D solid στοιχεία πρώτης τάξης. Προστίθενται επιπρόσθετοι μετακινησιακοί βαθμοί ελευθερίας μέσα στο στοιχείο, οι οποίοι δεν συσχετίζονται με τους μετακινησιακούς βαθμούς ελευθερίας των κόμβων. Έτσι, αυτοί οι επιπρόσθετοι βαθμοί ελευθερίας αυξάνουν την ευκαμψία του στοιχείου, ιδιαίτερα έναντι κάμψης, μειώνοντας έτσι σε κανονποιητικό βαθμό την επίδραση του shear locking. Χρησιμοποιήθηκαν κατ' ελάχιστον παντού 4 σειρές στοιχείων για την ελαχιστοποίηση της επίδρασης του hourglassing.

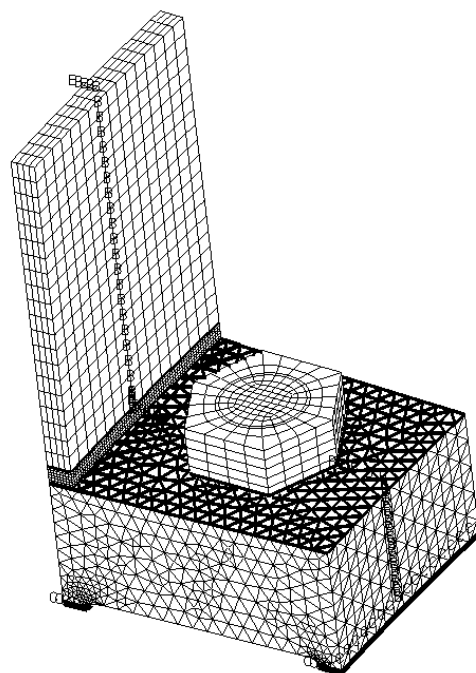
3 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΜΕ ΟΡΙΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ ΕΠΑΦΗΣ

3.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ

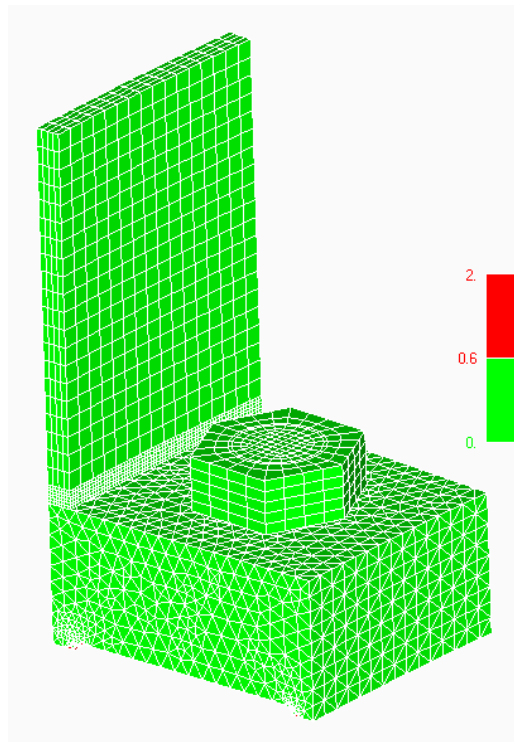
Στα σχήματα 3-1 και 3-2 παρουσιάζεται το αριθμητικό προσομοίωμα το οποίο μελετήθηκε. Επίσης στο σχήμα 3-3 φαίνεται η ποιότητα του πλέγματος, όπως αυτή προέκυψε μετά την διακριτοποίηση του προσομοιώματος στο λογισμικό FEMAP v11.0.1 [6].



Σχήμα 3-1: γεωμετρία του προσομοιώματος



Σχήμα 3-2: διακριτοποίηση του προσομοιώματος

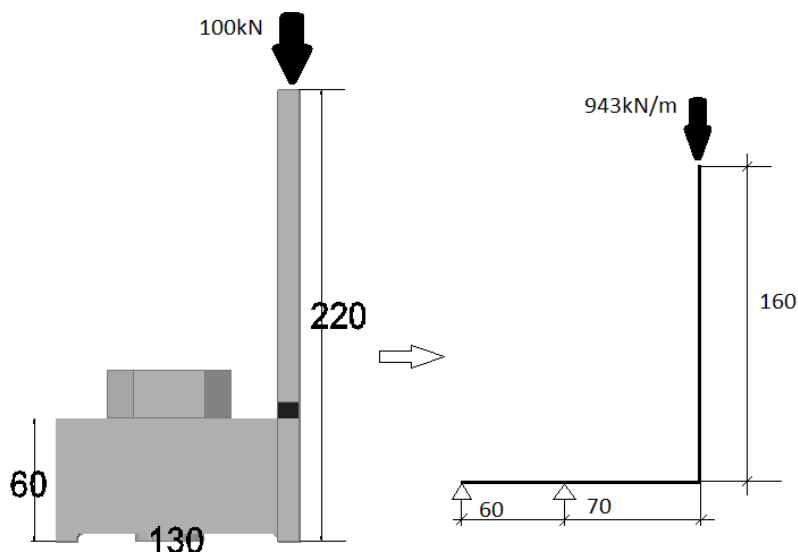


Σχήμα 3-3: ποιότητα πλέγματος

Το κριτήριο για την τελική επιλογή πλέγματος ήταν αφενός το προσεγγιστικά λογικό μέγεθος των τάσεων σε μέρη του προσομοιώματος, όπως η συγκόλληση και ο κοχλίας και αφετέρου η σύγκλιση των τάσεων στα πλέγματα που δοκιμάστηκαν, τόσο όσον αφορά την γενική κατανομή τους όσο και ως προς το μέγεθός τους.

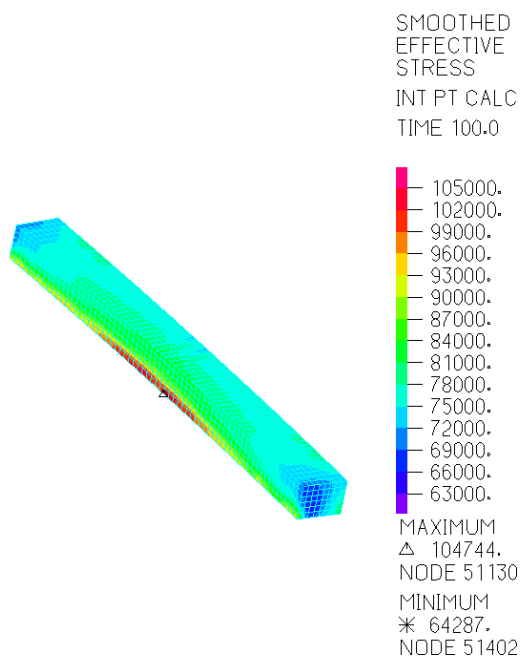
- Προσεγγιστικά λογικό μέγεθος τάσεων

Το προσομοίωμα επιλύθηκε απλοποιητικά στο χέρι. Στην συνέχεια εμφανίζονται οι απλοποιητικοί αυτοί υπολογισμοί και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των αναλύσεων. Η απλοποιητική προσομοίωση παρουσιάζεται στο σχήμα 3-4.

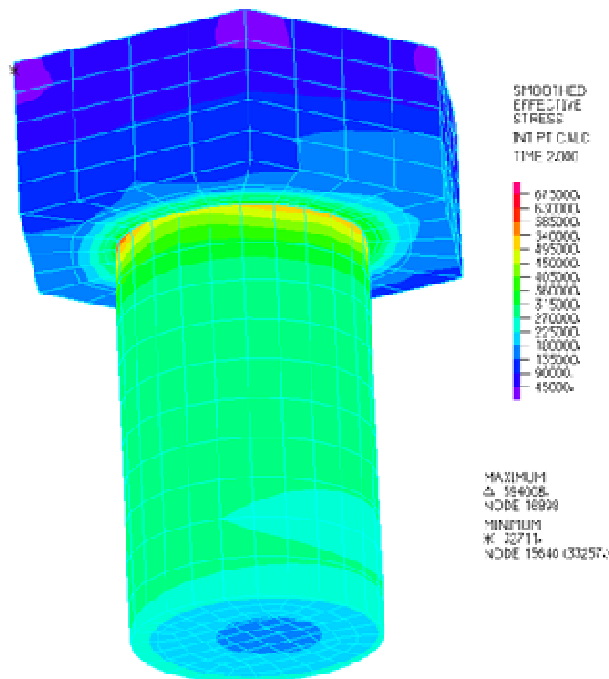


Σχήμα 3-4: απλοποιητική προσομοίωση

Το συνολικό φορτίο είναι 100kN και ασκείται στην κορυφή του πυλώνα. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το ισοδύναμο φορτίο ανά μέτρο πλάτους 943kN/μέτρο πλάτους. Από την επίλυση του φορέα προκύπτει ότι η συγκόλληση καταπονείται από αξονική δύναμη 943kN, η οποία δημιουργεί τάση von Mises $\sigma = 85,7\text{MPa}$. Τα αποτελέσματα του ADINA φαίνονται στο σχήμα 3-5. Από αυτά προκύπτει ότι η μέγιστη τιμή της von Mises τάσης, χωρίς να ληφθούν υπόψη οι ιδιαίτερα υψηλές σημειακές συγκεντρώσεις, κυμαίνεται γύρω στα 88MPa τιμή αρκετά κοντά σε αυτήν που υπολογίστηκε.



Σχήμα 3-5: τάσεις στην συγκόλληση από την αριθμητική προσομοίωση

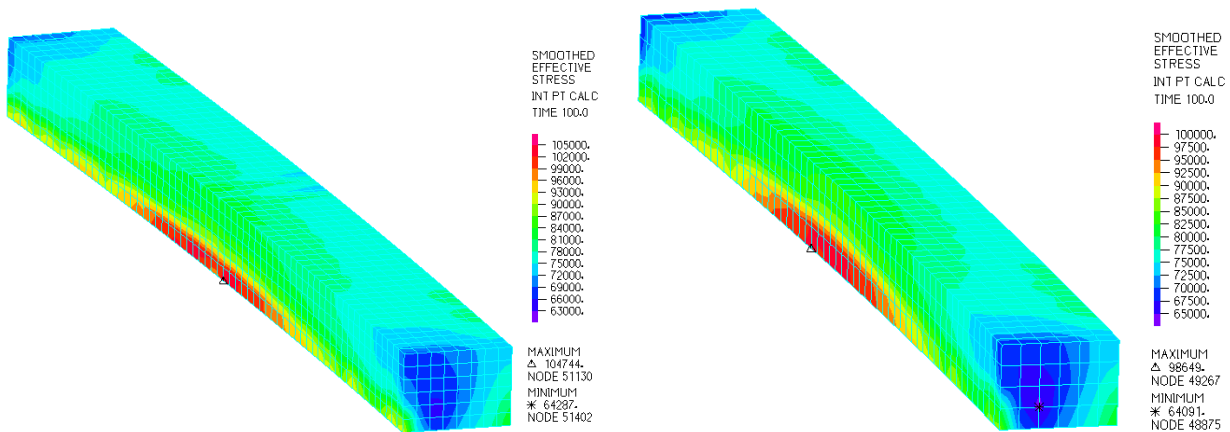


Σχήμα 3-6: τάσεις στον κοχλία από την αριθμητική προσομοίωση

Επίσης, σαν κριτήριο σύγκλισης χρησιμοποιήθηκαν και οι τάσεις που αναπτύχθηκαν στον κοχλία μετά την επιβολή της προέντασης. Το απλοποιητικό προσομοίωμα που χρησιμοποιήθηκε είναι μια μονόπακτη δοκός καταπονούμενη σε εφελκυστική δύναμη 300kN, οπότε αναπτύσσει ορθή τάση ίση με $\sigma = 300\text{kN}/8.17\text{cm}^2 = 367\text{MPa}$ και συμπίπτει με την αντίστοιχη von Mises. Τα αποτελέσματα του ADINA για τις τάσεις von Mises που αναπτύσσονται στον κοχλία αμέσως μετά την επιβολή της προέντασης δίνονται στο σχήμα 3-6, από το οποίο φαίνεται μέγιστη τάση γύρω στα 380MPa αμελώντας τις υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων.

- Σύγκλιση τάσεων στα πλέγματα που δοκιμάστηκαν

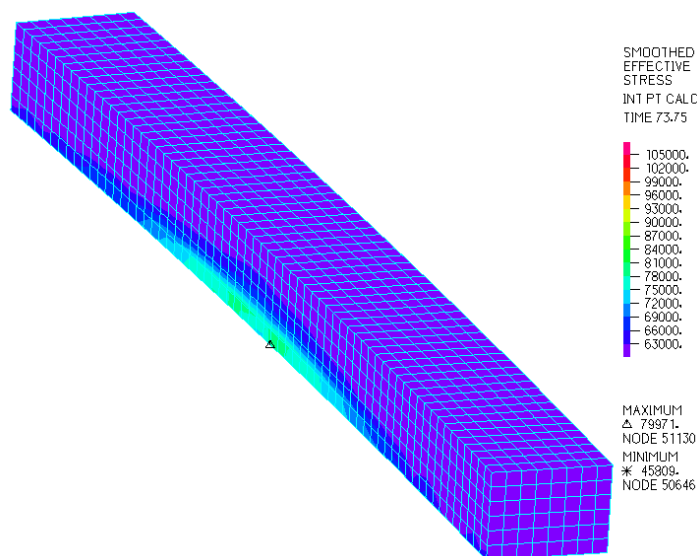
Στο Σχήμα 3-7 φαίνονται τα αποτελέσματα των τάσεων στη συγκόλληση στο τέλος της φόρτισης στο αρεό (α) και πυκνό (β) πλέγμα. Τόσο από το μέγεθος όσο και από την γενική εικόνα της κατανομής των τάσεων στην συγκόλληση συμπεραίνουμε ότι υπάρχει σύγκλιση.



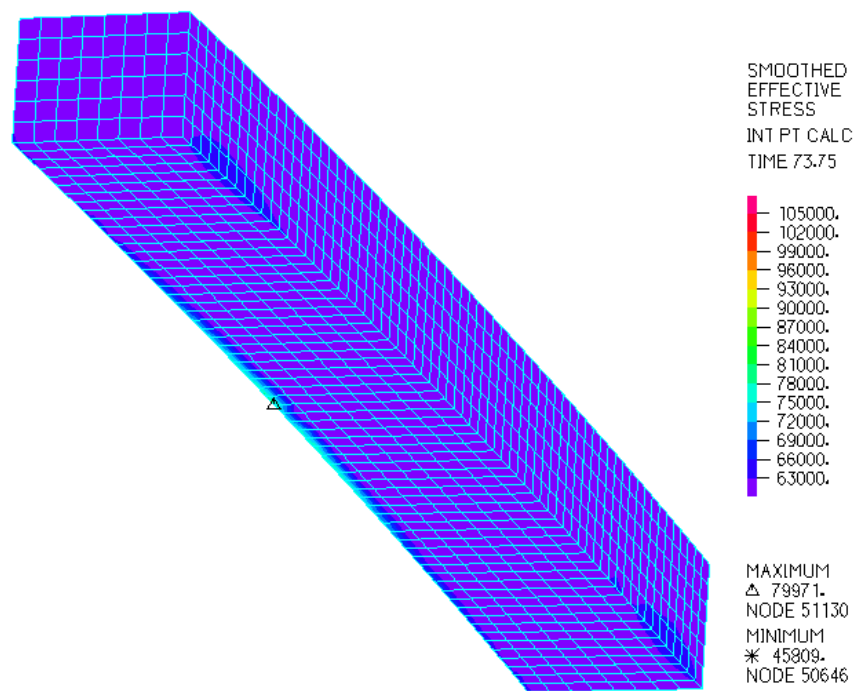
Σχήμα 3-7α: Κατανομή τάσεων στη συγκόλληση στο αραιό πλέγμα

Σχήμα 3-7β: Κατανομή τάσεων στη συγκόλληση στο πυκνό πλέγμα

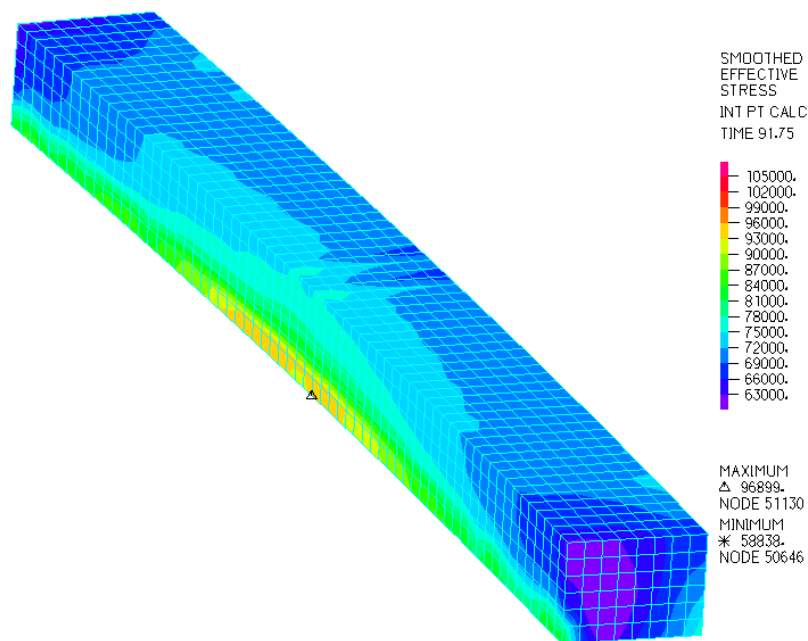
Για να αξιολογηθεί ο συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσης αναφορικά με την συγκόλληση, στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε αυτή σε διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου από δύο οπτικές γωνίες για κάθε φορτίο. Πρέπει να σημειωθεί ότι για το δεδομένο φορτίο δεν ξεπεράστηκαν πουθενά τα αντίστοιχα όρια διαρροής του χάλυβα. Στα σχήματα 3-8α και 3-8β παρατηρούμε ότι οι τάσεις αυξάνονται στο κέντρο της συγκόλλησης, στην αριστερή παρειά της, δηλαδή στο εσωτερικό του πυλώνα, και πιο συγκεκριμένα στην ένωση της συγκόλλησης με την δακτυλιοειδή φλάντζα. Οι παρατηρήσεις αυτές ενισχύονται και από την κατανομή των τάσεων στα σχήματα 3-9α, 3-9β, 3-10α και 3-10β. Η ένωση της συγκόλλησης με την φλάντζα αποτελεί σημείο αλλαγής γεωμετρίας, οπότε και η παρατηρούμενη συγκέντρωση τάσεων είναι λογική. Επίσης, η παρουσία του κοχλία, ο οποίος λειτουργεί σαν επιπρόσθετη στήριξη, όπως και η συνοριακή συνθήκη στον άξονα συμμετρίας της διατομής αποτελούν παράγοντες που συμβάλλουν στην συγκεκριμένη κατανομή. Από τα σχήματα 3-10α και 3-10β παρατηρούμε ότι οι περιοχές της συγκόλλησης που βρίσκονται στο εσωτερικό και το εξωτερικό του πυλώνα παρουσιάζουν λίγο μεγαλύτερες τάσεις σε σύγκριση με την περιοχή που βρίσκεται στην μέση κατά την εγκάρσια έννοια. Τέλος, από τα σχήματα 3-10α και 3-10β παρατηρείται σχετική ομοιομορφία στα μεγέθη των τάσεων με μικρές διαφοροποιήσεις στην έκταση της συγκόλλησης.



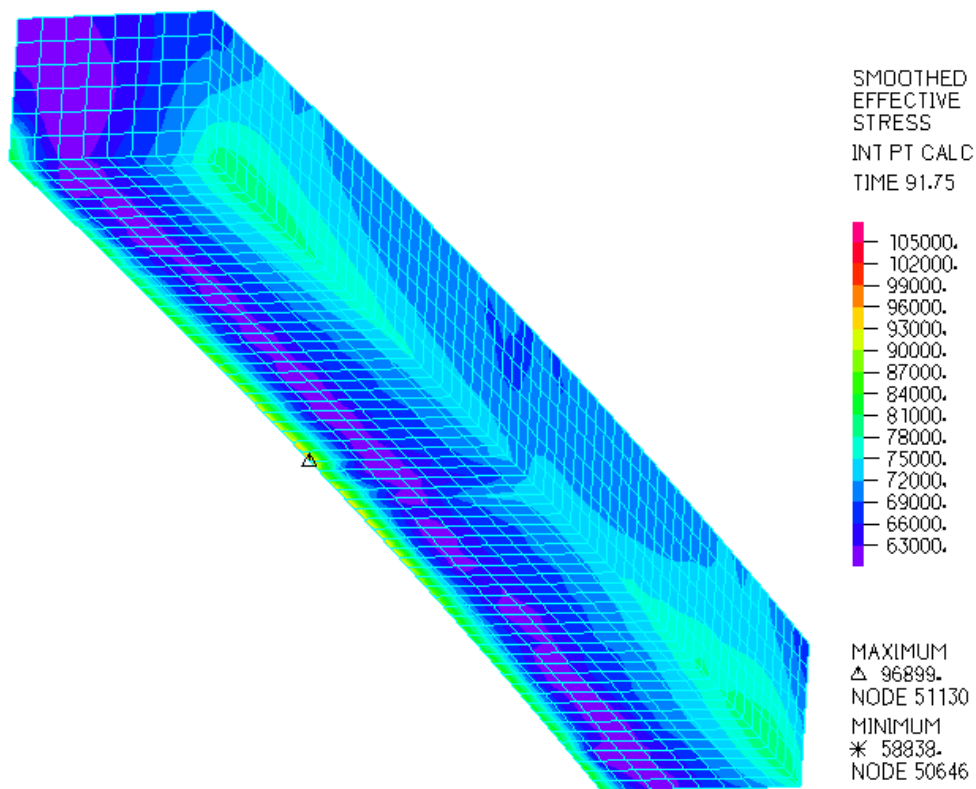
Σχήμα 3-8α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 74kN



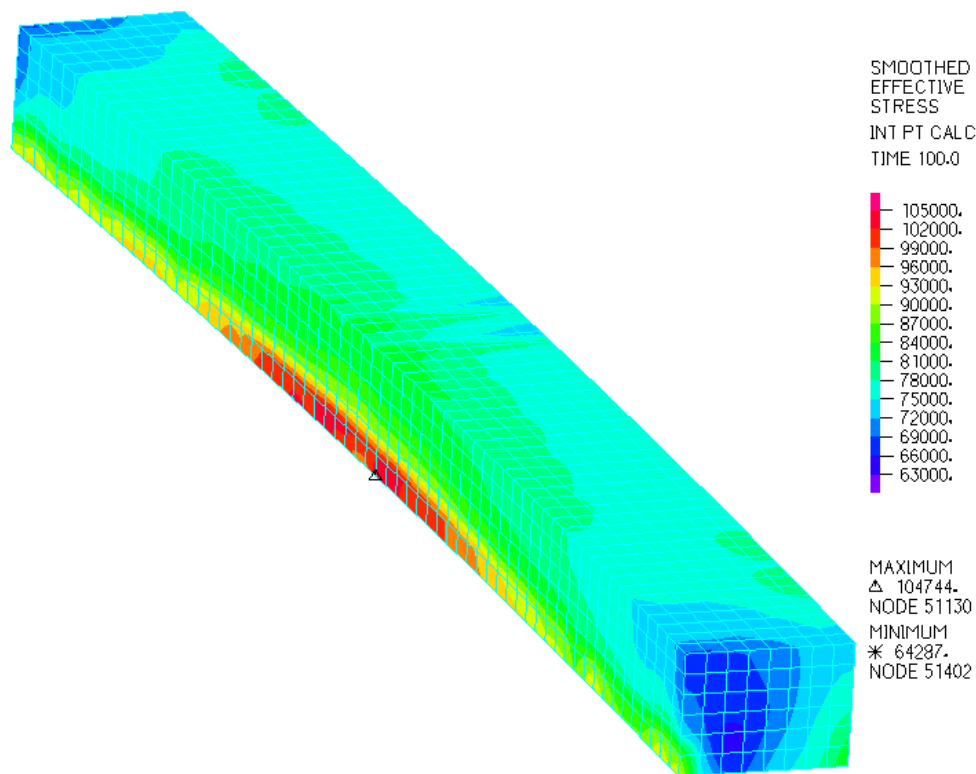
Σχήμα 3-8β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 74kN



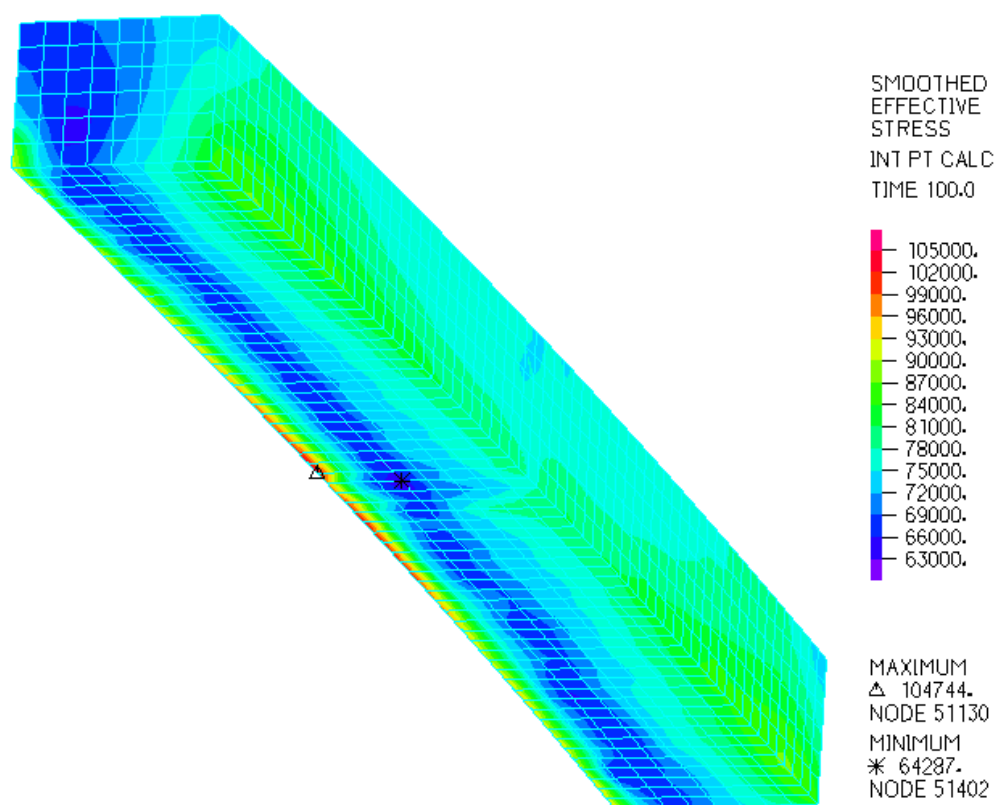
Σχήμα 3-9α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 92kN



Σχήμα 3-9β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 92kN



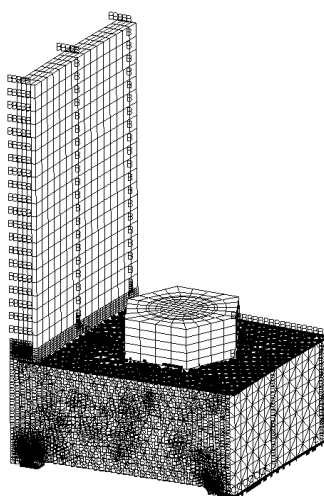
Σχήμα 3-10α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 100kN



Σχήμα 3-10β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 100kN

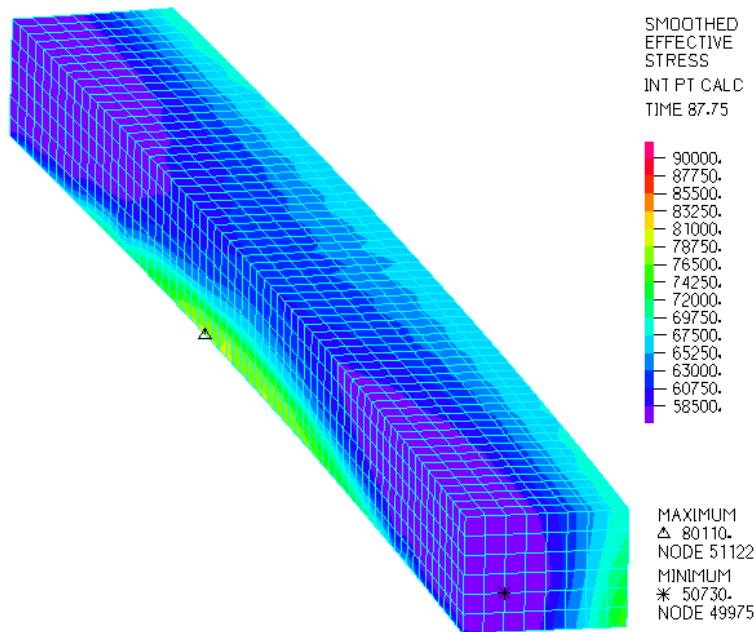
3.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ

Στο σχήμα 3-11 παρουσιάζεται το προσομοίωμα που μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο με την πρόσθετη συνοριακή συνθήκη της δέσμευσης της μετακίνησης στην εφαπτομενική διεύθυνση. Η συνοριακή αυτή συνθήκη προστέθηκε θεωρώντας ότι το προηγούμενο προσομοίωμα δεν λαμβάνει υπόψη την συνέχεια του υλικού στις ακραίες παρειές, γεγονός που θα του περιόριζε την μετακίνηση στην εφαπτομενική διεύθυνση.

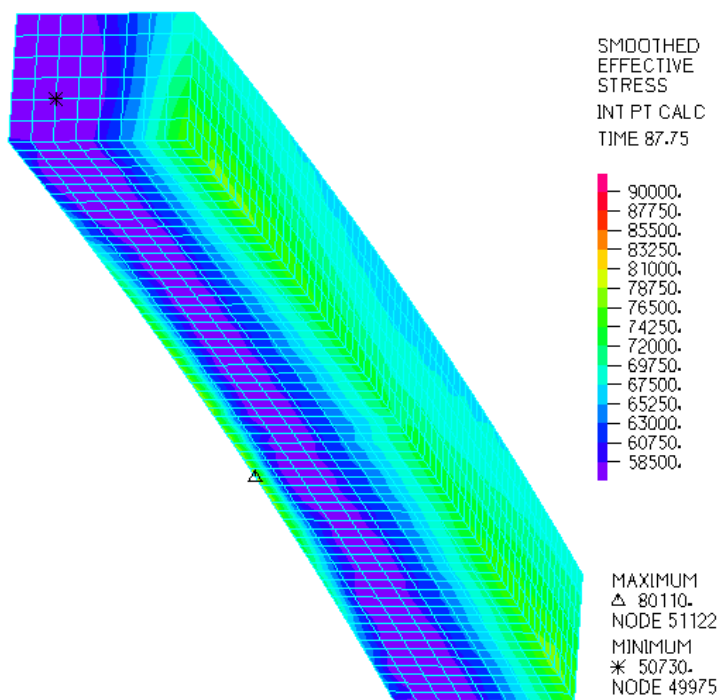


Σχήμα 3-11: υπό μελέτη προσομοίωμα με πρόσθετη συνοριακή συνθήκη

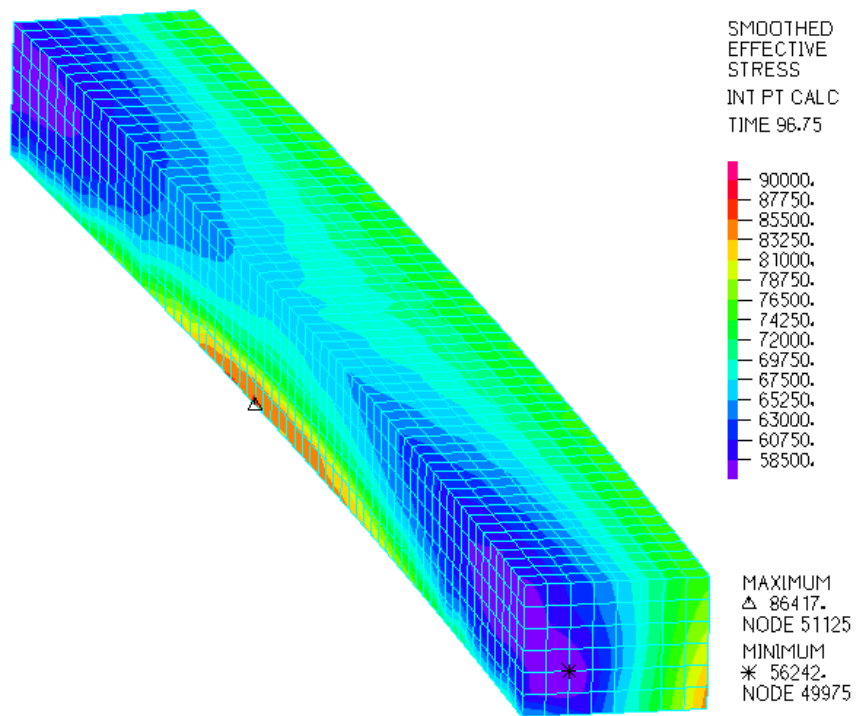
Στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου, από δύο οπτικές γωνίες για κάθε φορτίο. Από τα σχήματα 3-12α και 3-12β παρατηρούμε ότι η δεξιά παρειά της συγκόλλησης η οποία βρίσκεται στο εξωτερικό του πυλώνα εμφανίζει υψηλές τάσεις σε όλης την έκταση. Επίσης, το κέντρο της παρειάς που βρίσκεται στο εσωτερικό του πυλώνα εμφανίζει επίσης υψηλές τάσεις. Οι παρατηρήσεις αυτές ενισχύονται από την εικόνα της κατανομής και στα σχήματα 3-13α, 3-13β, 3-14α και 3-14β. Και σε αυτή την περίπτωση το μέγεθος των τάσεων όπως φαίνεται από τα σχήματα 3-14α και 3-14β δεν παρουσιάζει κάποια έντονη ανομοιομορφία. Το προσομοίωμα με τις επιπρόσθετες συνοριακές συνθήκες εμφανίζει λίγο μικρότερες τάσεις, της τάξης των 20MPa.



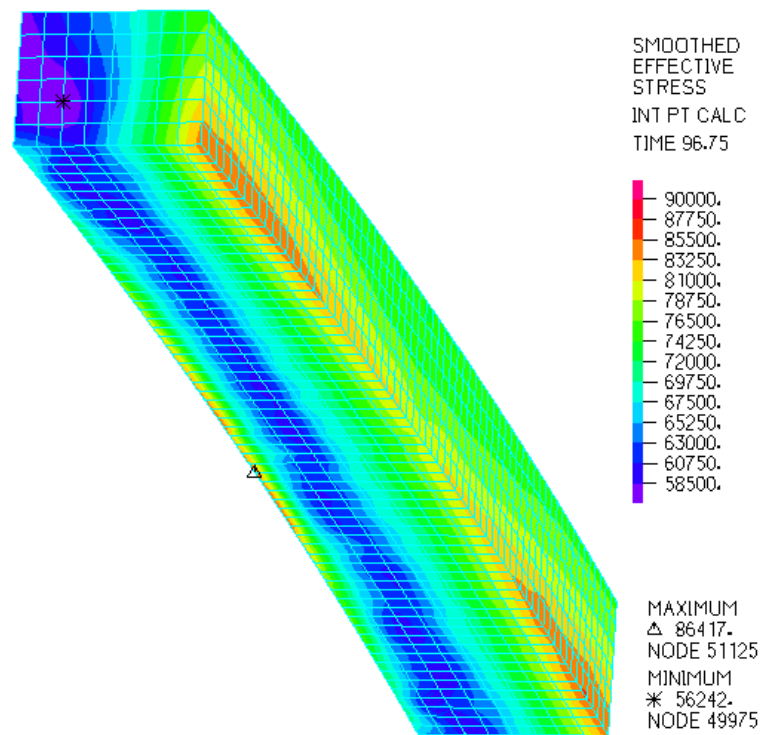
Σχήμα 3-12α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 88kN



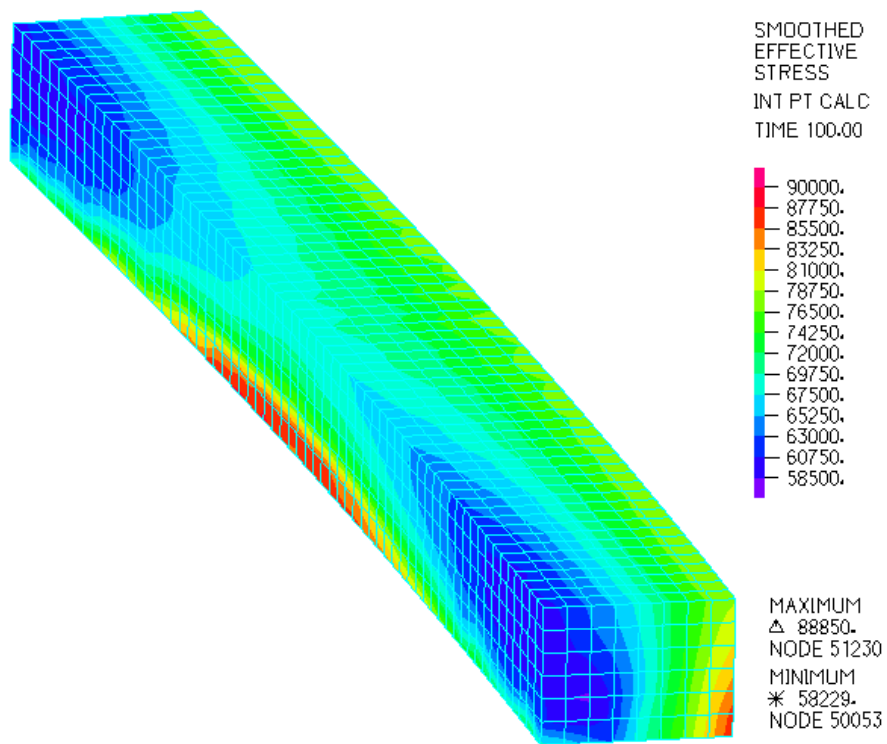
Σχήμα 3-12β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 88kN



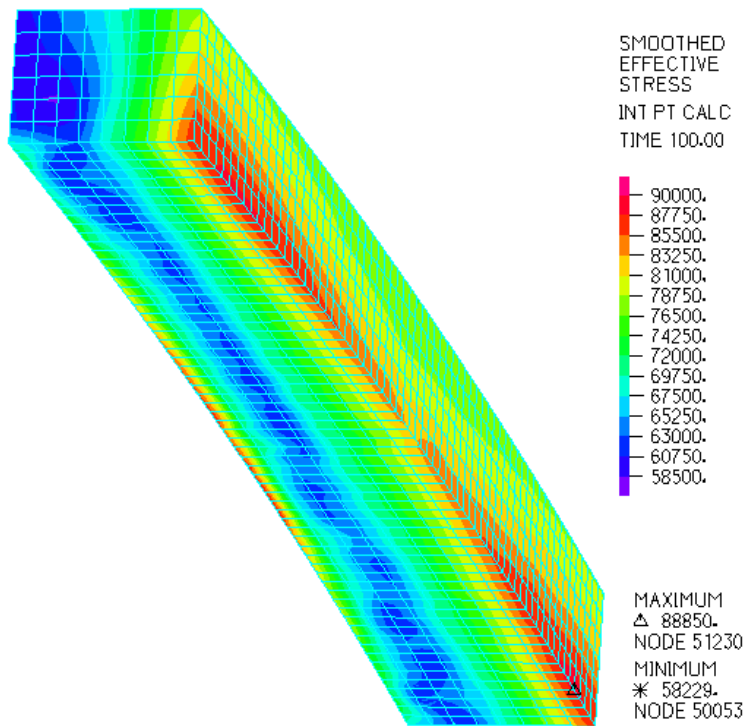
Σχήμα 3-13α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 97kN



Σχήμα 3-13β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 97kN



Σχήμα 3-14α: κατανομή τάσεων για φορτίο 100kN

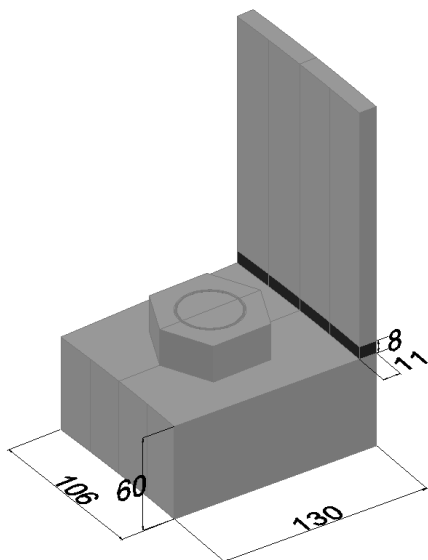


Σχήμα 3-14β: κατανομή τάσεων για φορτίο 100kN

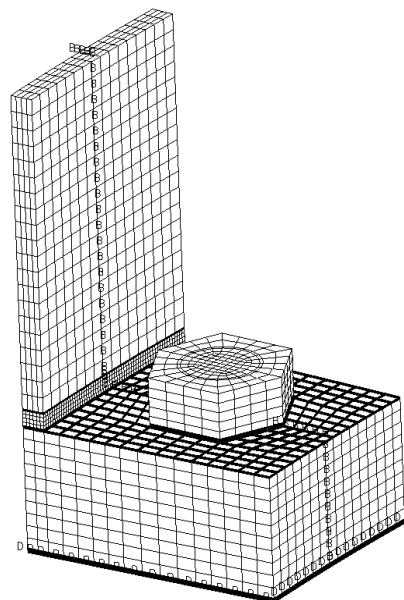
4 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΠΡΟΣΥΓΚΟΛΗΣΗΣ

4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΣ

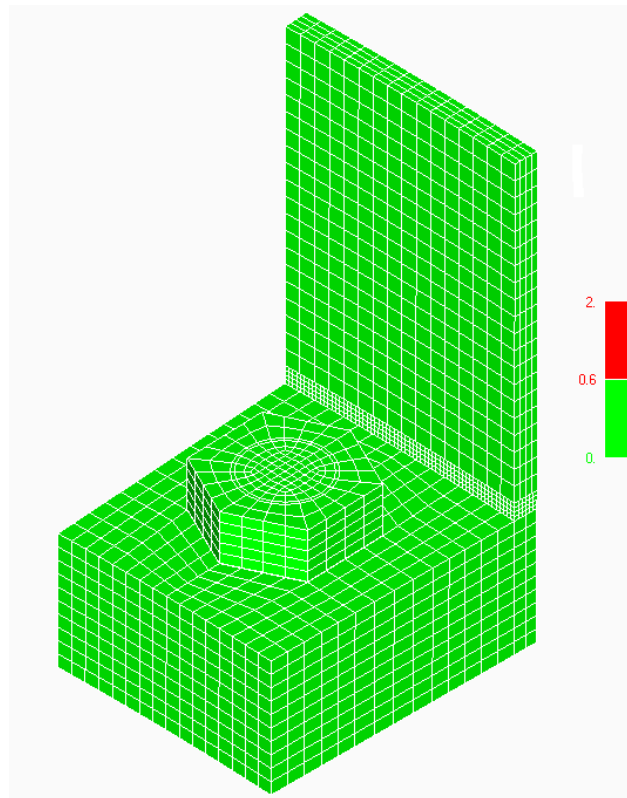
Η γεωμετρία του αριθμητικού προσομοιώματος της φλάντζας προσυγκόλλησης φαίνεται στο σχήμα 4-1. Το τελικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε καθώς και η ποιότητά του φαίνονται στα σχήματα 4-2 και 4-3 αντίστοιχα. Τα κριτήρια επιλογής του τελικού πλέγματος είναι τα ίδια με τα αντίστοιχα του κεφαλαίου 3.



Σχήμα 4-1: γεωμετρία του προσομοιώματος

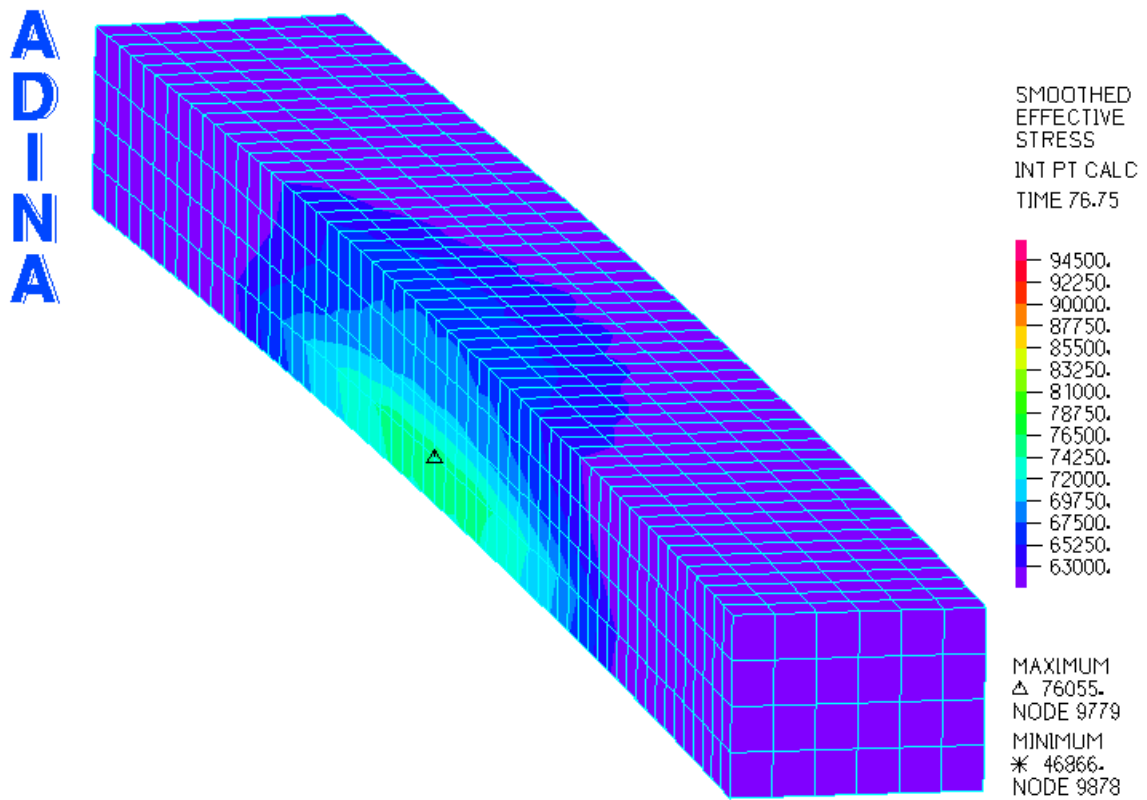


Σχήμα 4-2: διακριτοποίηση του προσομοιώματος

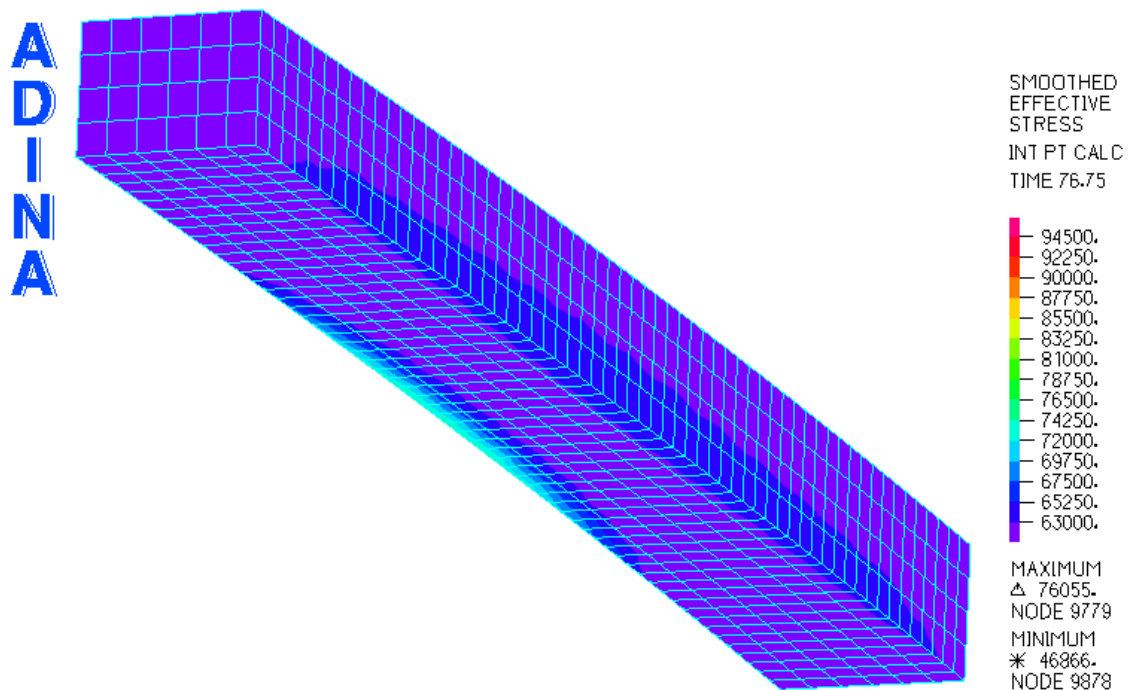


Σχήμα 4-3: ποιότητα πλέγματος

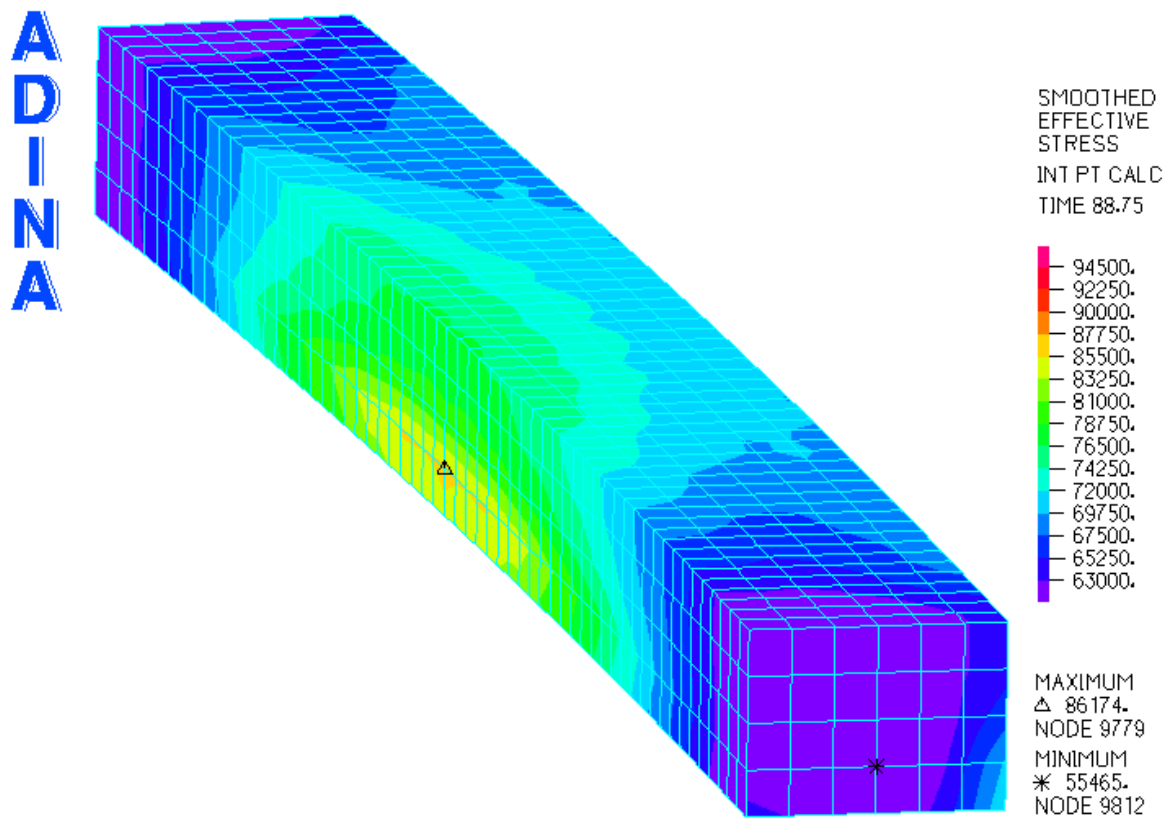
Για να αξιολογηθεί ο συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσης αναφορικά με την συγκόλληση, στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε αυτή σε διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου, από δύο οπτικές γωνίες για κάθε φορτίο. Από τα σχήματα 4-4α και 4-4β φαίνεται ότι οι τάσεις μεγιστοποιούνται στο κέντρο της συγκόλλησης, πιο συγκεκριμένα στην αριστερή παρειά και όσον αφορά την καθ' ύψος κατανομή κοντά στην επαφή της συγκόλλησης με την φλάντζα. Η κατανομή αυτή ενισχύεται και από τα σχήματα 4-5α, 4-5β, 4-6α και 4-6β. Οι αιτίες για αυτό είναι πιθανότατα οι ίδιες με το προσομοίωμα του προηγούμενου κεφαλαίου, δηλαδή η αλλαγή της γεωμετρίας για την καθ' ύψος κατανομή και η συνοριακή συνθήκη σε συνδυασμό με την παρουσία του κοχλία για την συγκέντρωση των τάσεων στο κέντρο. Και πάλι παρατηρούμε ότι οι περιοχές της συγκόλλησης οι οποίες βρίσκονται στο εσωτερικό και στο εξωτερικό του πυλώνα καταπονούνται από λίγο μεγαλύτερες τάσεις. Από τα σχήματα 4-6α και 4-6β συμπεραίνουμε ότι και αυτός ο τύπος συγκόλλησης δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη ανομοιομορφία στα μεγέθη των τάσεων.



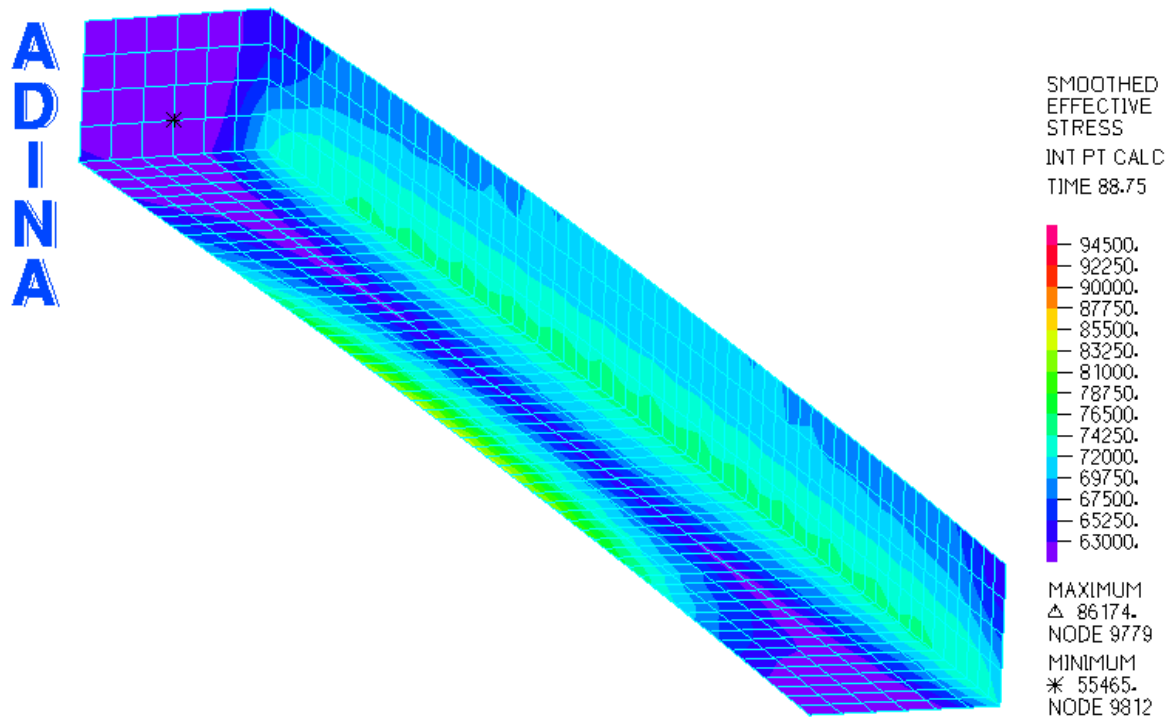
Σχήμα 4-4α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 77kN



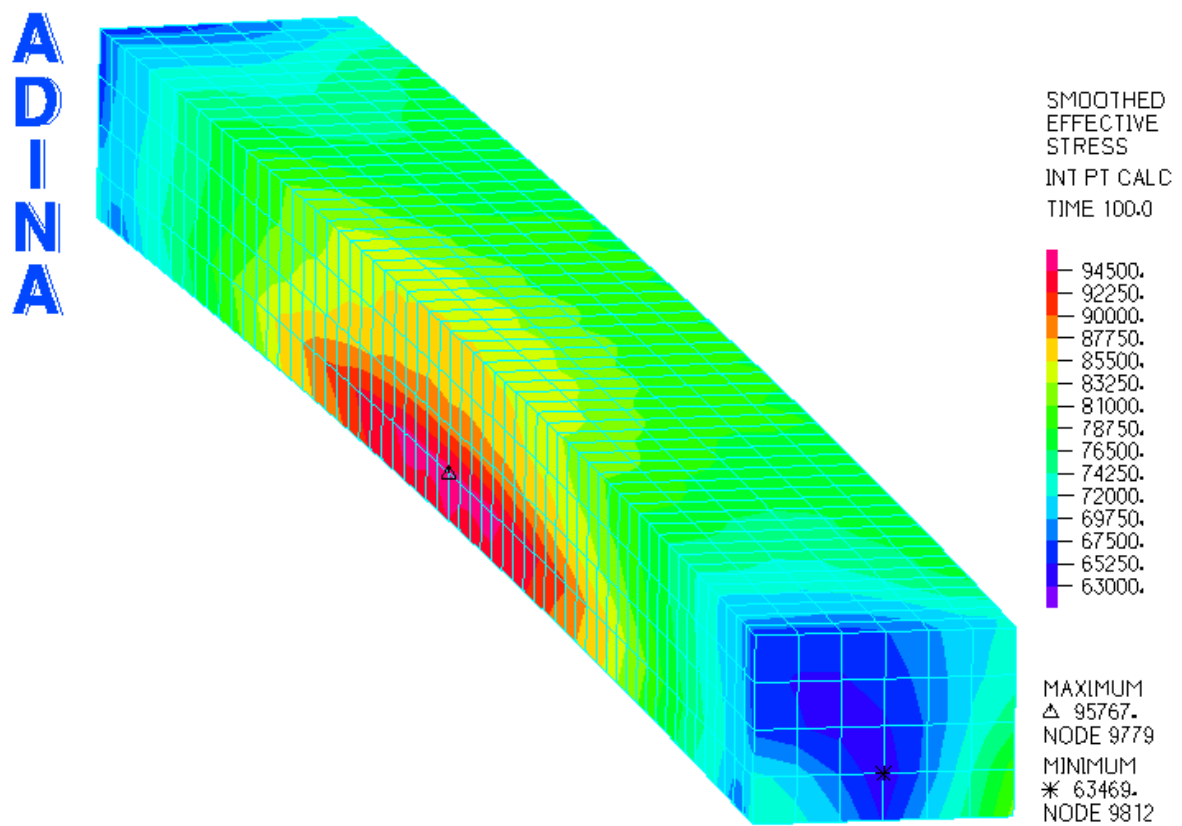
Σχήμα 4-4β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 77kN



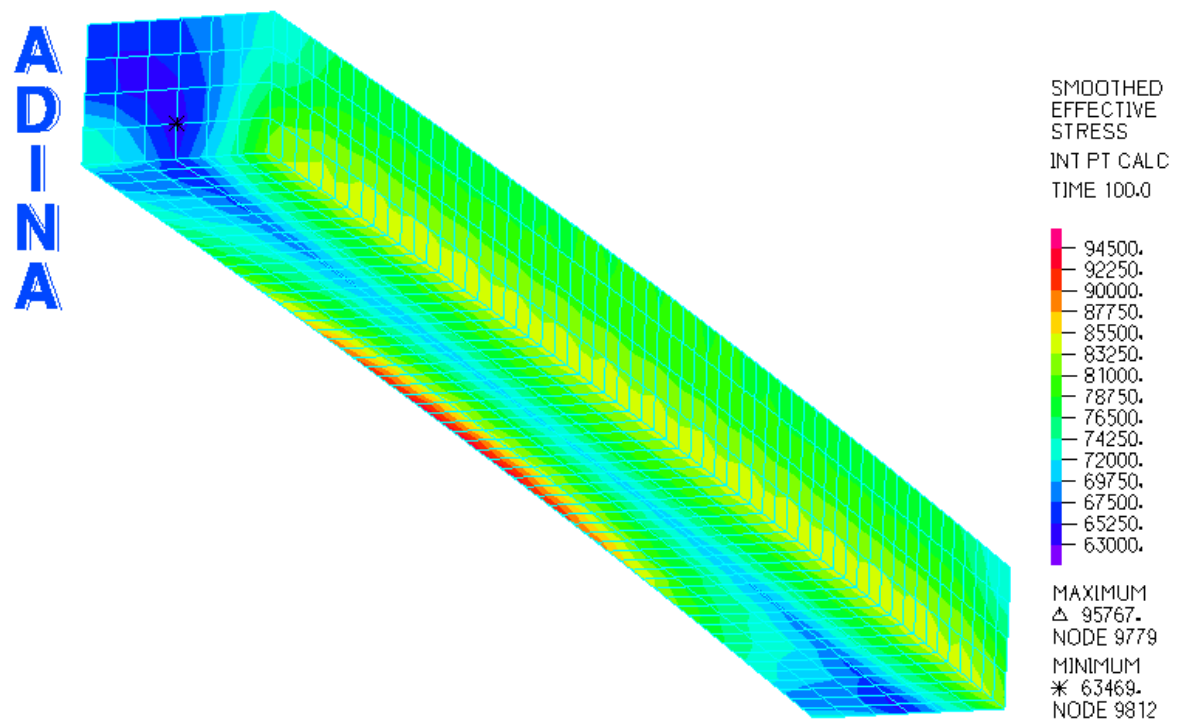
Σχήμα 4-5α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 89kN



Σχήμα 4-5β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 89kN



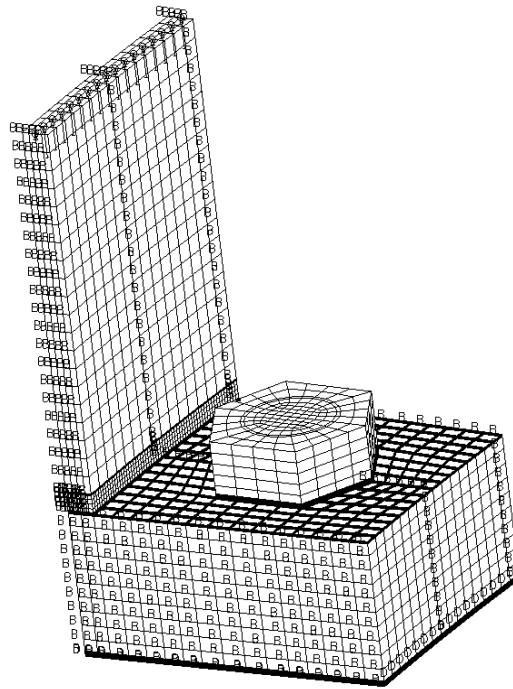
Σχήμα 4-6α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 100kN



Σχήμα 4-6β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 100kN

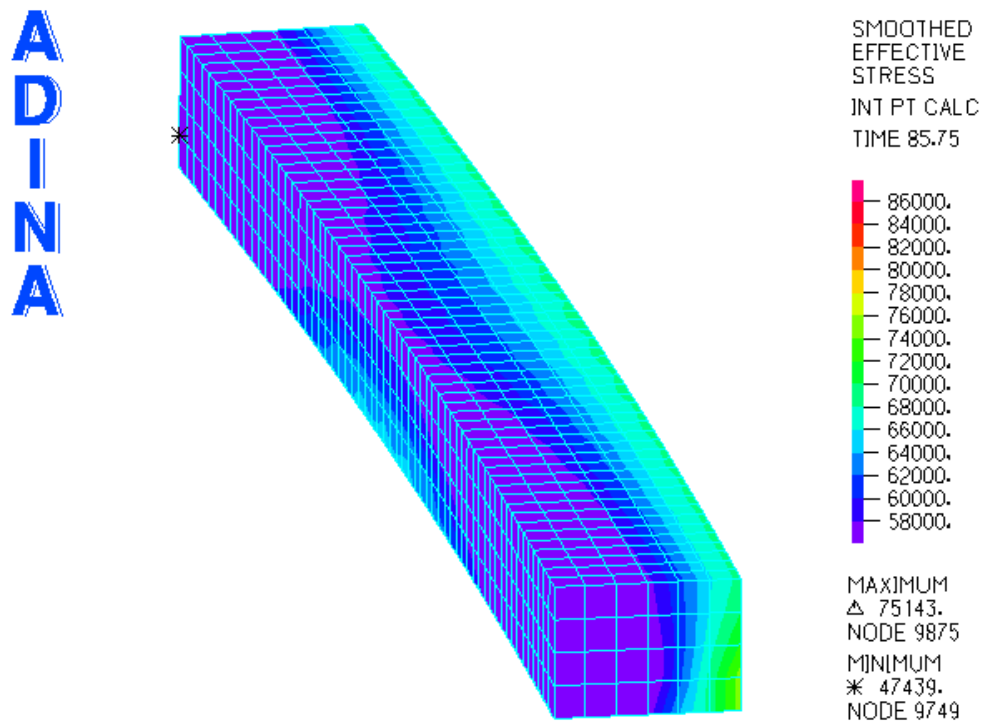
4.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ

Στο σχήμα 4-8 παρουσιάζεται το υπό μελέτη προσομοίωμα με τις επιπρόσθετες συνοριακές συνθήκες που δεσμεύουν την μετακίνηση κατά την εφαπτομενική διεύθυνση στις ακραίες παρειές.

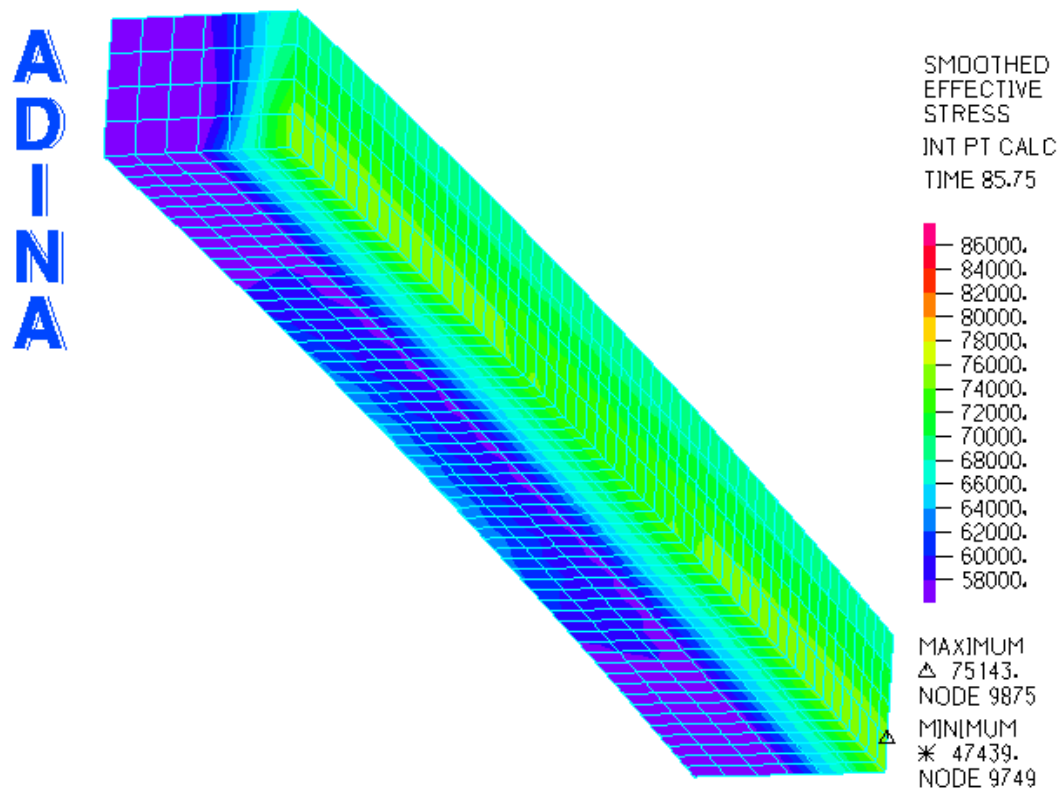


Σχήμα 4-7: υπό μελέτη προσομοίωμα με πρόσθετη συνοριακή συνθήκη

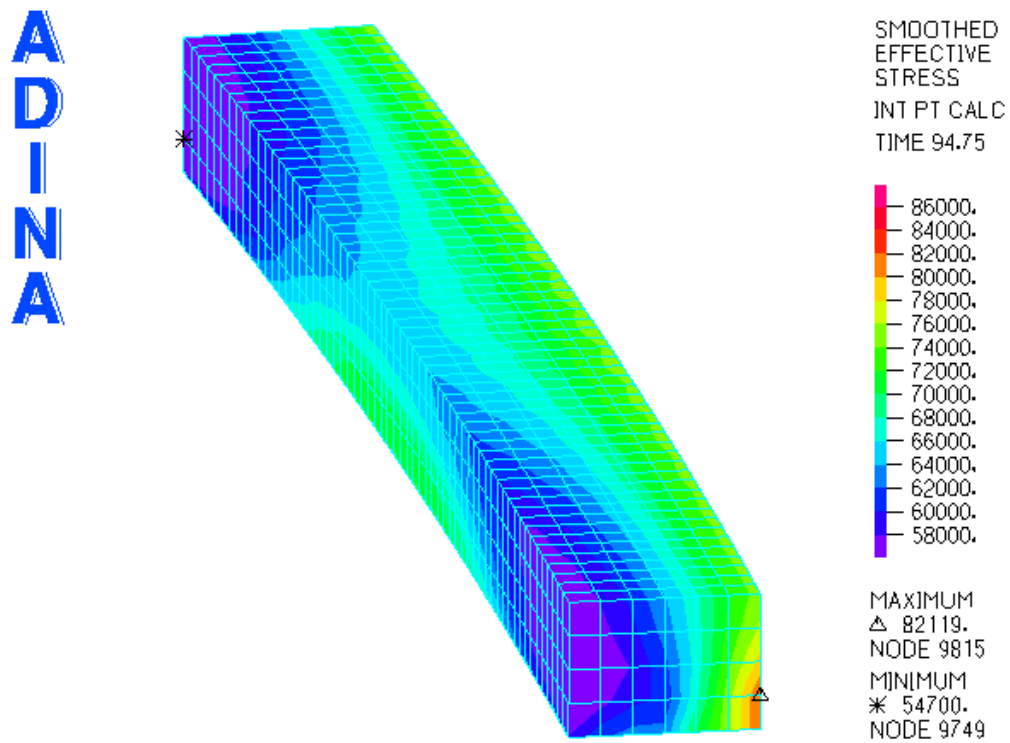
Στα σχήματα που ακολουθούν καταγράφεται η πορεία των τάσεων στην συγκόλληση σε διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου. Και πάλι παρατηρείται μια συμπεριφορά αρκετά ίδια με τον τρόπο συγκόλλησης του κεφαλαίου 3. Από τα σχήματα 4-8α και 4-8β φαίνεται ξεκάθαρα ότι η περιοχή της συγκόλλησης η οποία βρίσκεται δεξιά, δηλαδή προς το εξωτερικό του πυλώνα, εμφανίζει υψηλότερες τάσεις από την υπόλοιπη συγκόλληση. Η κατανομή αυτή ενισχύεται και από τα σχήματα 4-9α, 4-9β, 4-10α και 4-10β. Και πάλι εμφανίζονται υψηλότερες τάσεις προς το κέντρο της συγκόλλησης, όπως μπορεί κανείς να παρατηρήσει από την κατανομή στα σχήματα 4-10α και 4-10β. Τέλος, οι τάσεις δεν παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση ως προς το μέγεθός τους.



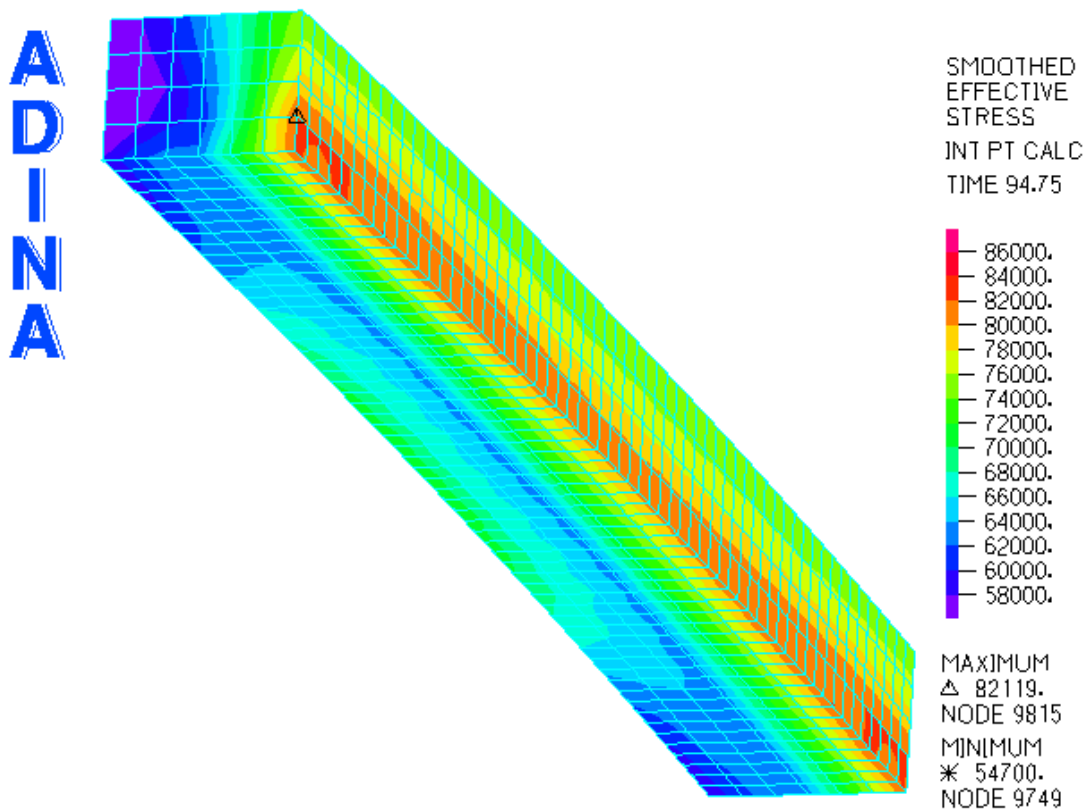
Σχήμα 4-8α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 86kN



Σχήμα 4-8β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 86kN

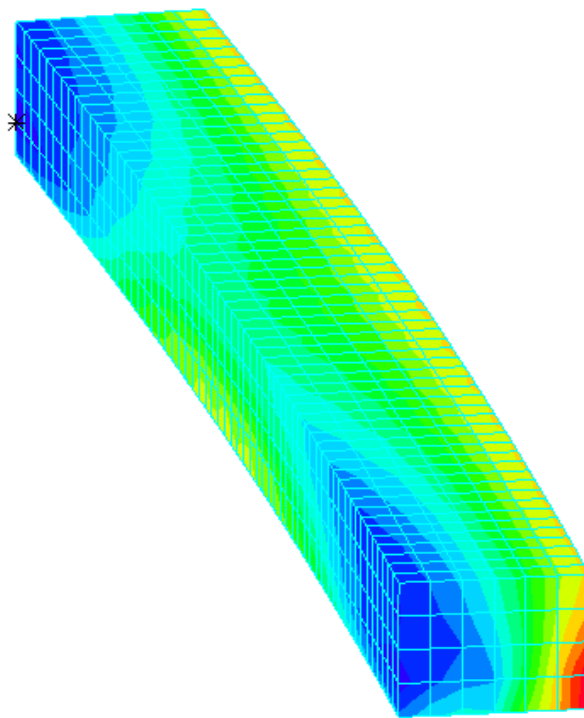


Σχήμα 4-9α: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 95kN



Σχήμα 4-9β: κατανομή τάσεων στην συγκόλληση για φορτίο 95kN

**A
D
I
N
A**



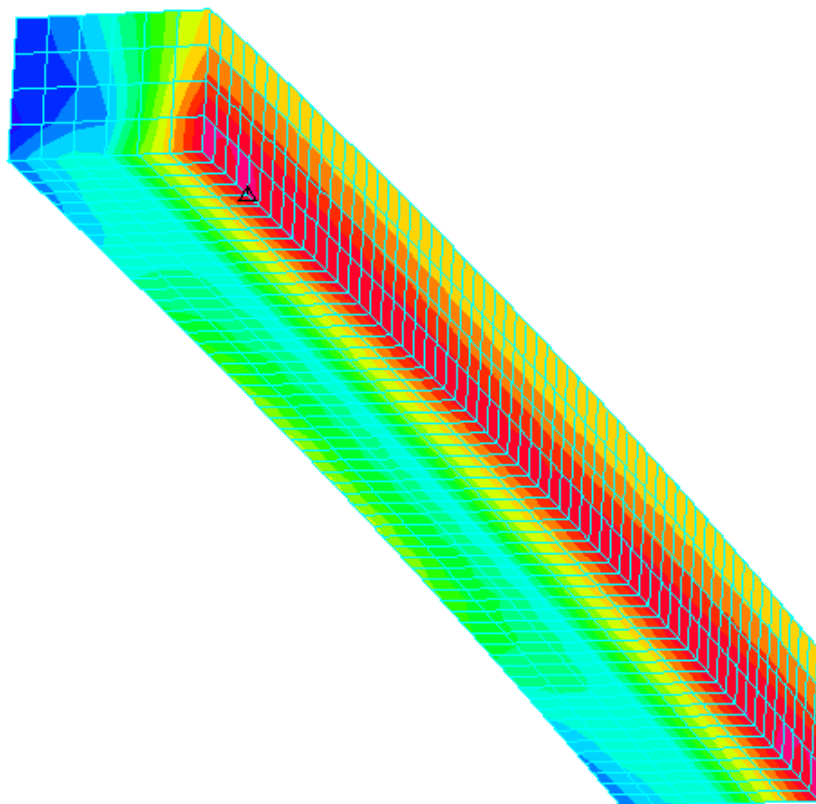
SMOOTHED
EFFECTIVE
STRESS
INT PT CALC
TIME 100.0



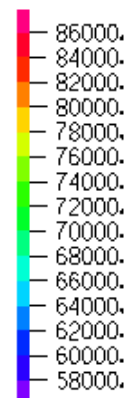
MAXIMUM
△ 86165.
NODE 10246
MINIMUM
* 59115.
NODE 9749

Σχήμα 4-10α: κατανομή τάσεων για φορτίο 100kN

**A
D
I
N
A**



SMOOTHED
EFFECTIVE
STRESS
INT PT CALC
TIME 100.0



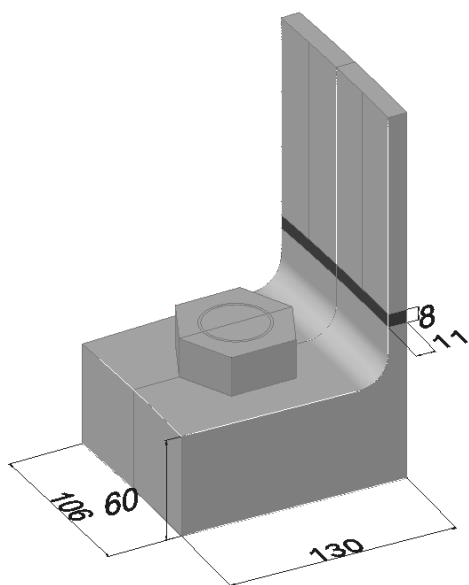
MAXIMUM
△ 86165.
NODE 10246
MINIMUM
* 59115.
NODE 9749

Σχήμα 4-10β: κατανομή τάσεων για φορτίο 100kN

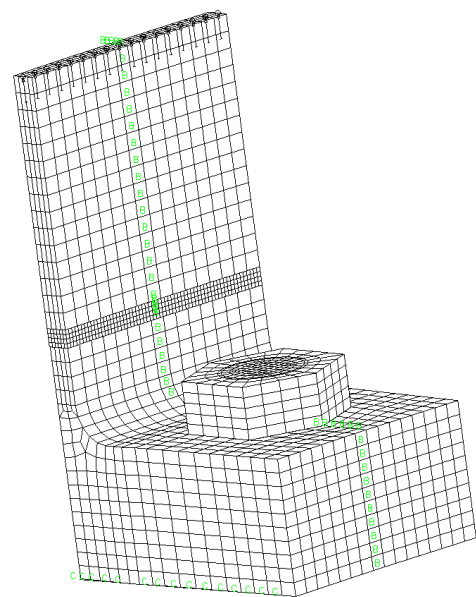
5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΜΕ ΠΡΟΕΚΤΑΣΗ

5.1 ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΣ

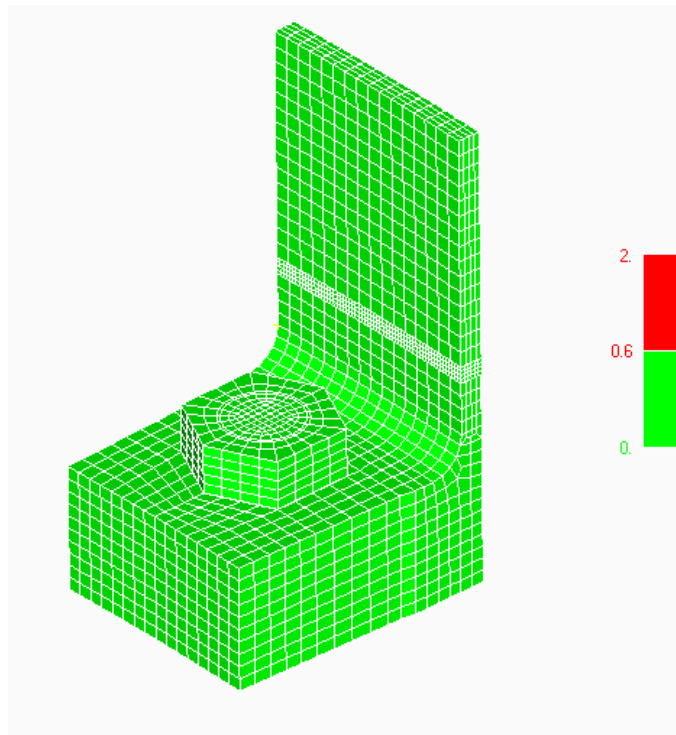
Στο σχήμα 5-1 παρουσιάζεται η γεωμετρία του προσομοιώματος που μελετήθηκε. Το τελικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 5-2, καθώς και η ποιότητα του στο σχήμα 5-3. Το τελικό αυτό πλέγμα επιλέχθηκε με κριτήριο αφενός το λογικό μέγεθος των τάσεων σε χαρακτηριστικά σημεία του προσομοιώματος και αφετέρου από την σύγκριση των τάσεων στο παρών πλέγμα με πλέγμα μικρότερης πυκνότητας, ακριβώς όπως και στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 5-1: γεωμετρία του προσομοιώματος

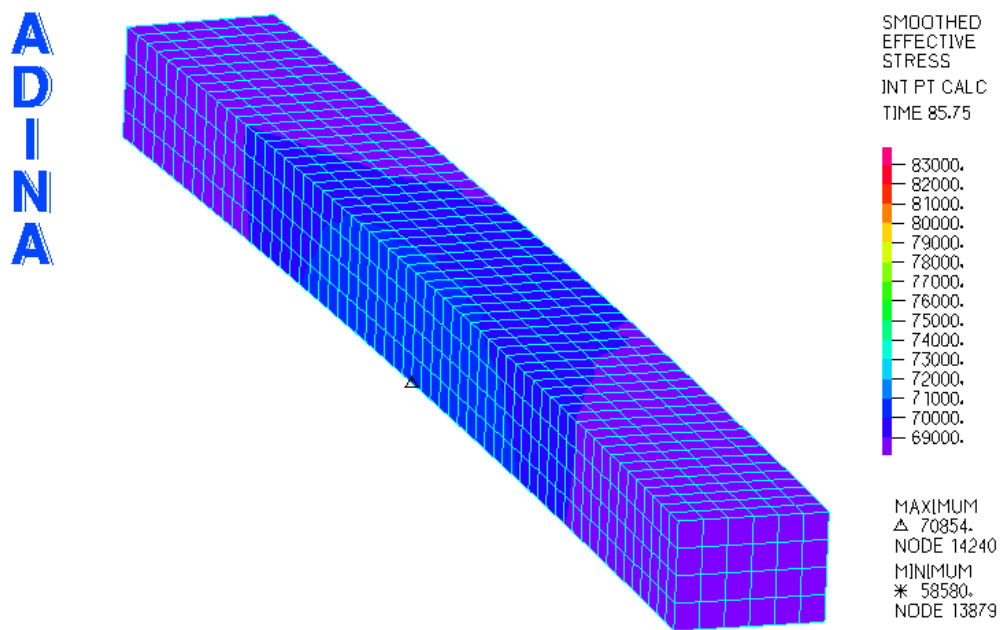


Σχήμα 5-2: διακριτοποίηση του προσομοιώματος

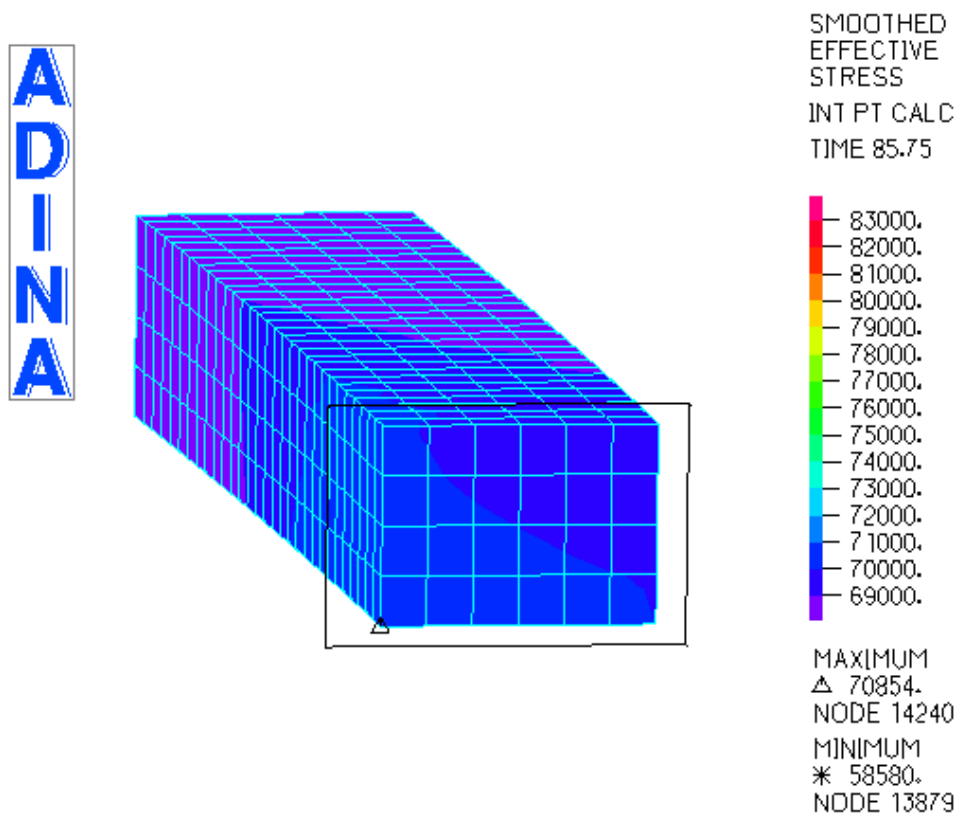


Σχήμα 5-3: ποιότητα πλέγματος

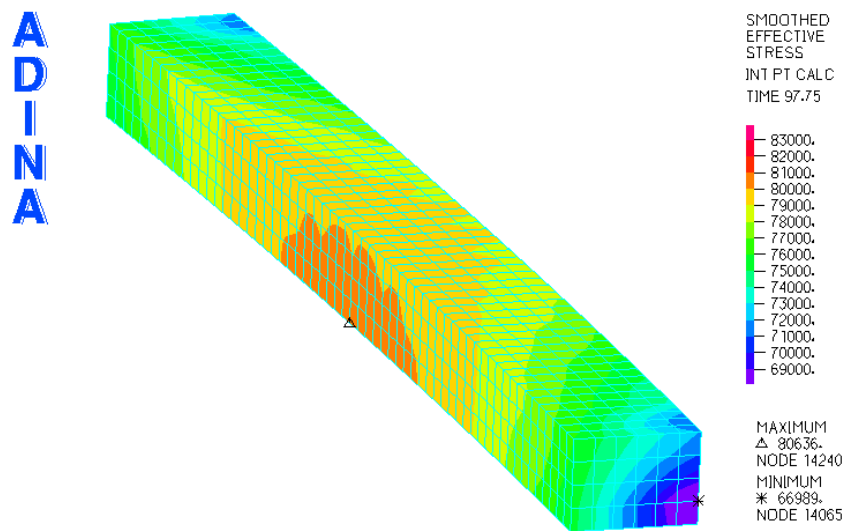
Για να αξιολογηθεί ο συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσης αναφορικά με την συγκόλληση, στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε αυτή σε διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου. Για κάθε στάδιο φόρτισης παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε ολόκληρη την συγκόλληση καθώς και σε τομή της. Από τα σχήματα 5-4α και 5-4β παρατηρούμε ότι οι τάσεις αναπτύσσονται συμμετρικά ως προς το κέντρο της συγκόλλησης, παρουσιάζοντας μεγαλύτερες τιμές όσο πιο κοντά στο κέντρο βρισκόμαστε. Οι λόγοι γι αυτό, όπως έχει αναλυθεί και στο κεφάλαιο 3, είναι η συνοριακή δέσμευση στον άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης και η παρουσία του προενταταμένου κοχλίου. Σε αντίθεση με τους προηγούμενους εναλλακτικούς τρόπους σύνδεσης, στον υπο εξέταση τρόπο η καθ' ύψος κατανομή των τάσεων είναι σχεδόν σταθερή, όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα σχήματα 5-5α, 5-5β και 5-6. Αυτό πιθανότατα συμβαίνει λόγω του ότι πάνω και κάτω από την εσωραφή δεν υπάρχει αλλαγή στην γεωμετρία του βραχέος L. Παρατηρούμε την μεγαλύτερη ομοιομορφία του μεγέθους των τάσεων που παρουσιάζεται σε αυτό το προσομοίωμα σε σύγκριση με τους εναλλακτικούς τρόπους σύνδεσης των κεφαλαίων 3 και 4.



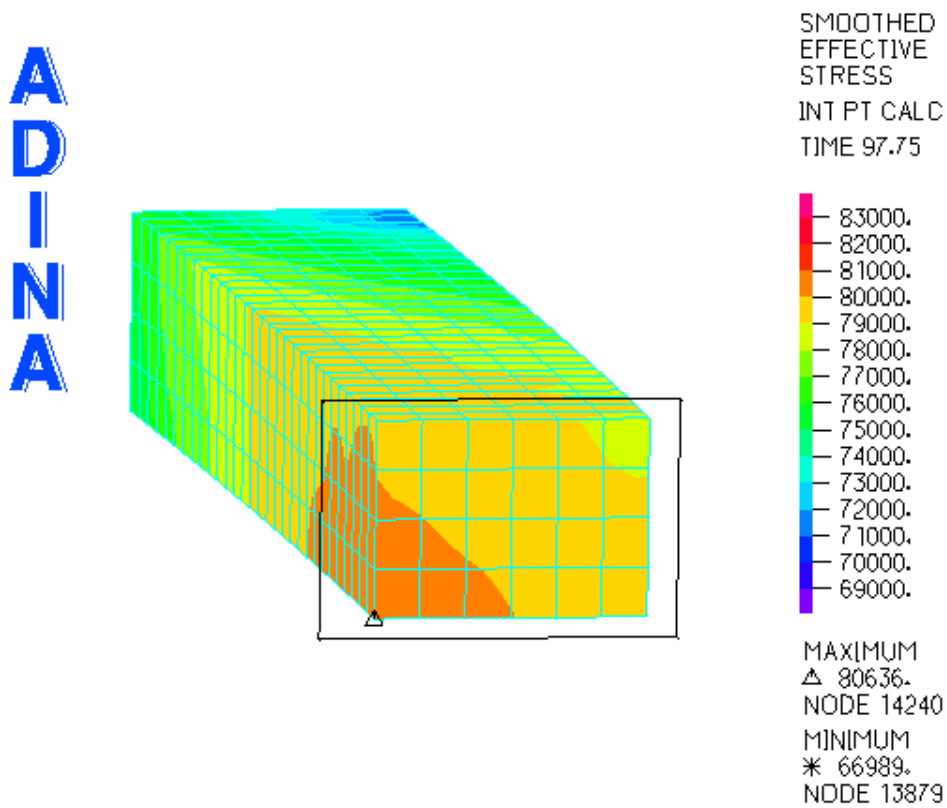
Σχήμα 5-4α: κατανομή τάσεων σε ολόκληρη την συγκόλληση για φορτίο 86kN



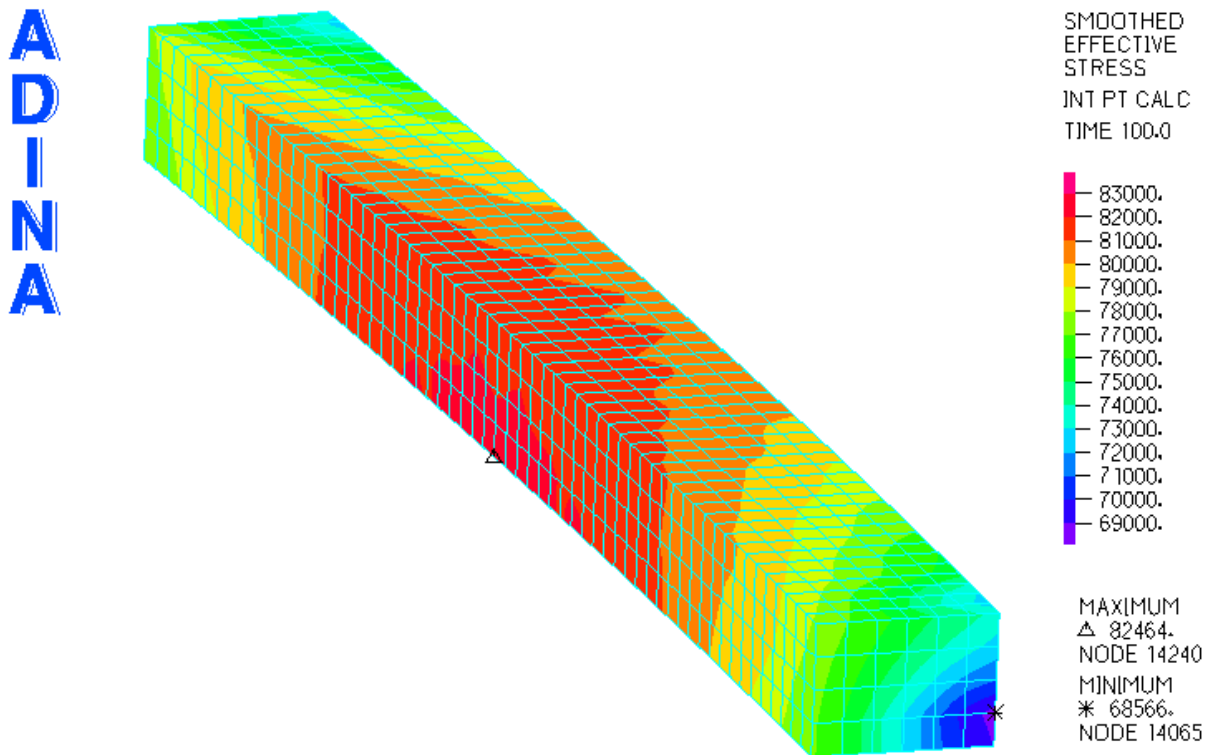
Σχήμα 5-4β: κατανομή τάσεων στην μισή συγκόλληση για φορτίο 86kN



Σχήμα 5-5α: κατανομή τάσεων σε ολόκληρη την συγκόλληση για φορτίο 98kN



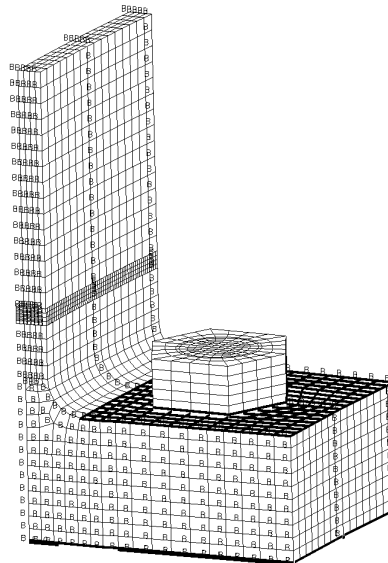
Σχήμα 5-5β: κατανομή τάσεων στην μισή συγκόλληση για φορτίο 98kN



Σχήμα 5-6: κατανομή τάσεων σε ολόκληρη την συγκόλληση για φορτίο 100kN

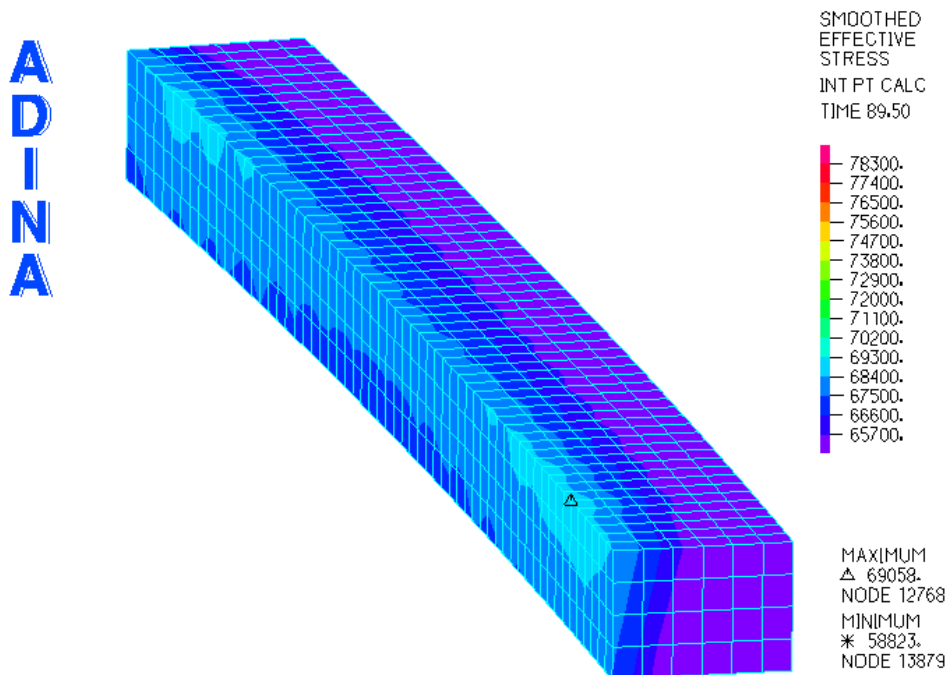
5.2 ΠΡΟΣΟΜΙΩΜΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ

Στο σχήμα 5-7 παρουσιάζεται το προσομοίωμα που μελετήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο με την πρόσθετη συνοριακή συνθήκη της δέσμευσης της μετακίνησης στην εφαπτομενική διεύθυνση. Η συνοριακή αυτή συνθήκη προστέθηκε θεωρώντας ότι το προηγούμενο προσομοίωμα δεν λαμβάνει υπόψη την συνέχεια του υλικού στις ακραίες παρειές, γεγονός που θα του περιόριζε την μετακίνηση στην εφαπτομενική διεύθυνση.

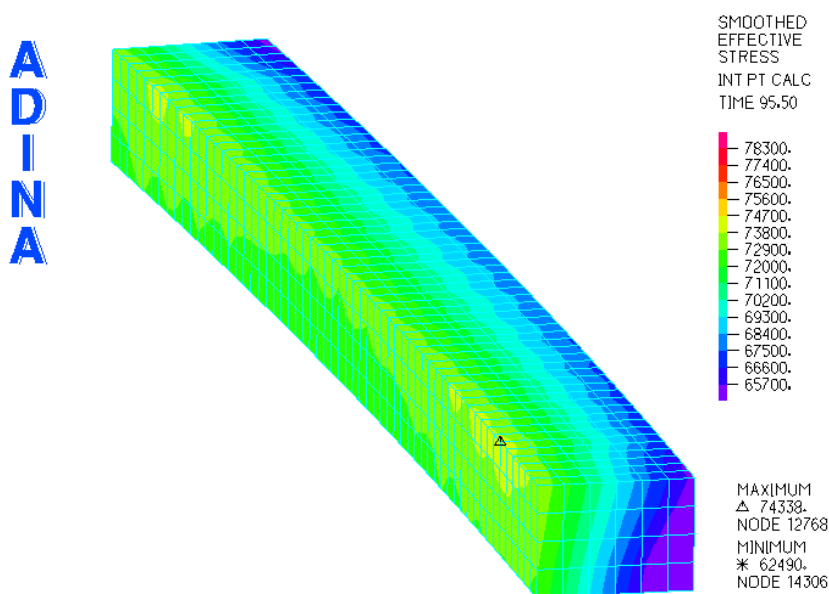


Σχήμα 5-7: υπό μελέτη προσομοίωμα με πρόσθετη συνοριακή συνθήκη

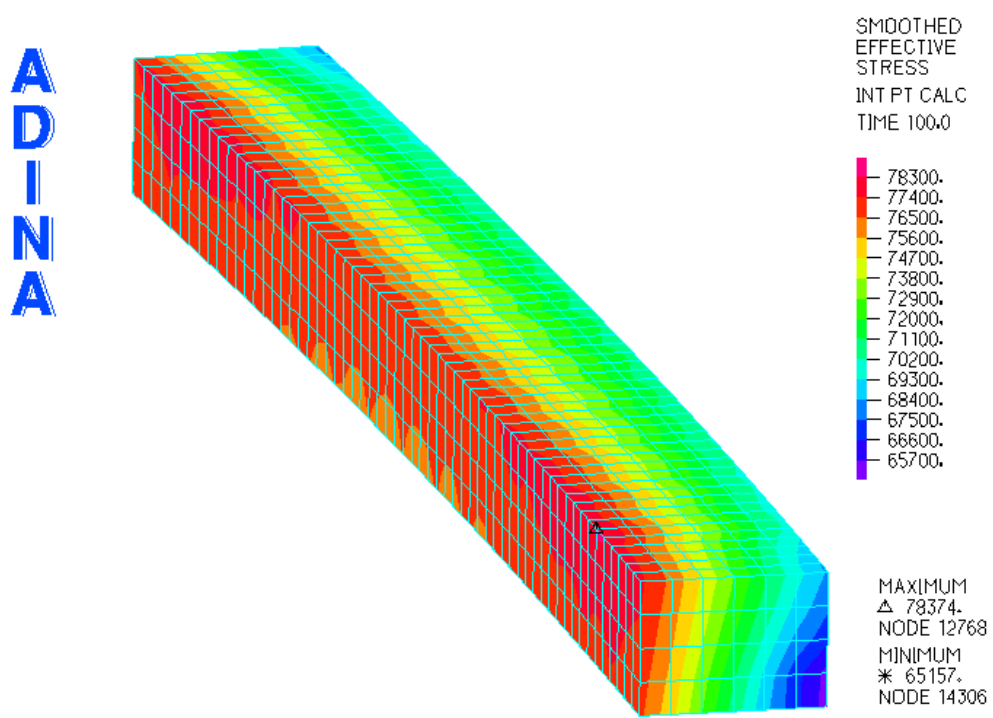
Για να αξιολογηθεί ο συγκεκριμένος τρόπος σύνδεσης αναφορικά με την συγκόλληση, στην συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε αυτήν σε διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου. Κρίθηκε σκόπιμο να παρουσιαστεί η κατανομή των τάσεων μόνο σε όλο το μήκος της συγκόλλησης λόγω της ομοιομορφίας της. Όπως φαίνεται από το σχήμα 5-8 οι τάσεις παραμένουν σχεδόν σταθερές σε κατά μήκος τομές της συγκόλλησης, σε αντίθεση με την προηγούμενη παράγραφο στην οποία οι τάσεις αυξάνονταν κοντά στο κέντρο. Το προσομοίωμα αυτό παρουσιάζει την μεγαλύτερη ομοιομορφία ως προς το μέγεθος των εμφανιζόμενων τάσεων, γεγονός που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό από την ομοιομορφία της γεωμετρίας πάνω και κάτω από την εσωραφή καθώς και από τις συνοριακές συνθήκες που προστέθηκαν στις παρούσες αναλύσεις.



Σχήμα 5-8: κατανομή τάσεων σε ολόκληρη την συγκόλληση για φορτίο 90kN



Σχήμα 5-9: κατανομή τάσεων σε ολόκληρη την συγκόλληση για φορτίο 96kN

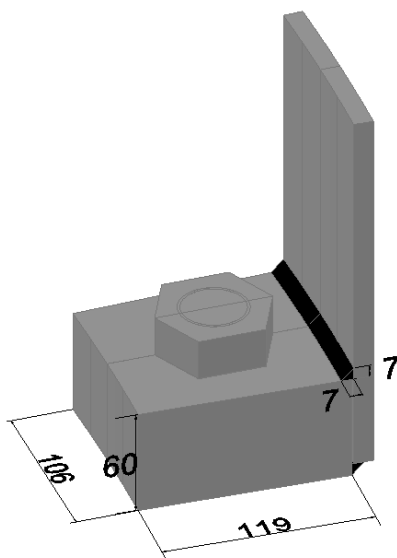


Σχήμα 5-10: κατανομή τάσεων σε ολόκληρη την συγκόλληση για φορτίο 100kN

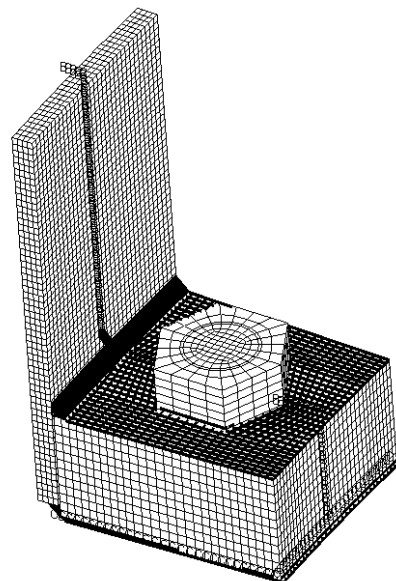
6 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΦΛΑΝΤΖΑΣ ΕΞΩΡΑΦΗΣ

6.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ

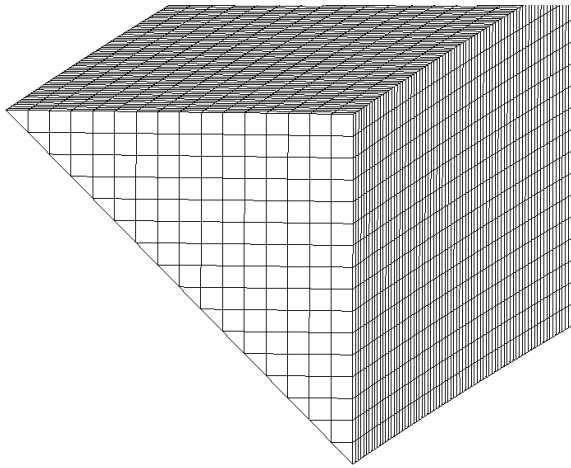
Το σχήμα 6-1 παρουσιάζει τα γεωμετρικά στοιχεία του τέταρτου τύπου σύνδεσης, όπου η σύνδεση μεταξύ φλάντζας και ελάσματος πυλώνα εξασφαλίζεται με δύο εξωραφές. Στην συνέχεια παρουσιάζεται το τελικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε (σχήμα 6-2), λεπτομέρεια της συγκόλλησης (σχήμα 6-3) και η ποιότητά του από το λογισμικό FEMAP v11.0.1 [6] (σχήμα 6-4).



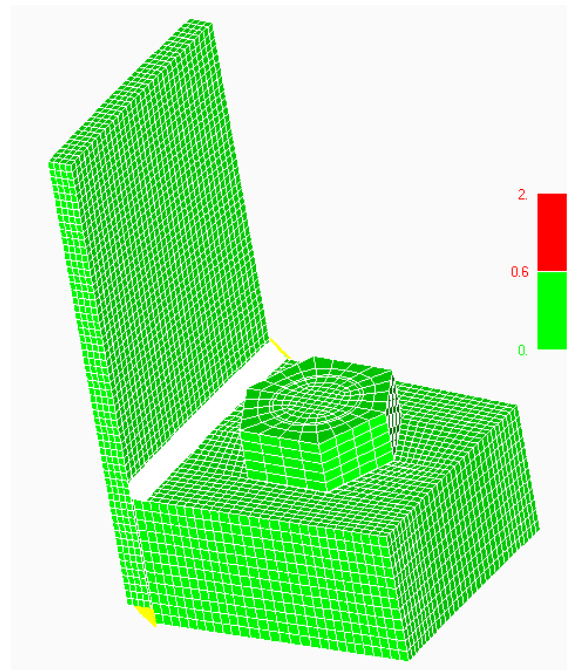
Σχήμα 6-1: γεωμετρία του προσομοιώματος



Σχήμα 6-2: διακριτοποίηση του προσομοιώματος



Σχήμα 6-3: λεπτομέρεια της συγκόλλησης

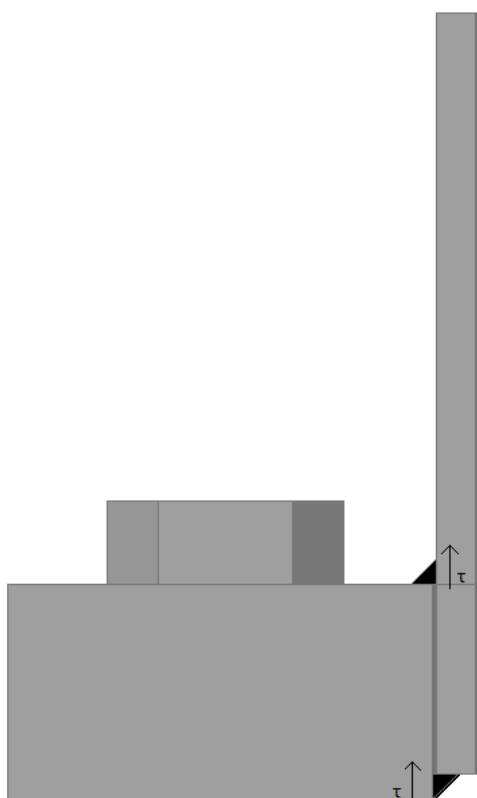
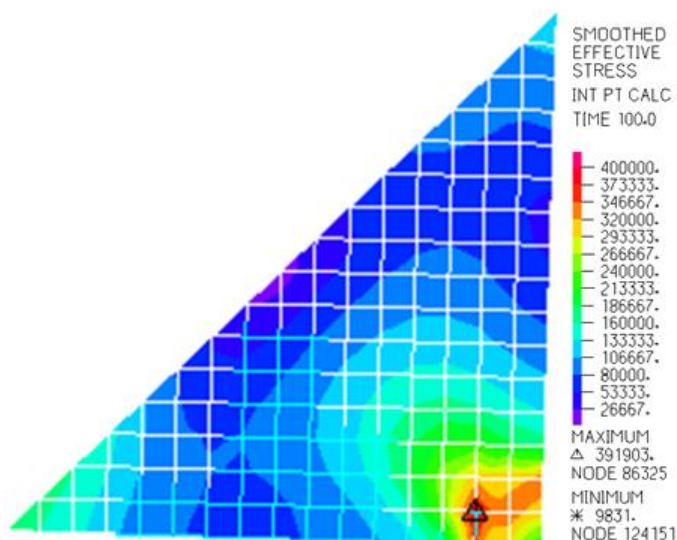


Σχήμα 6-4: ποιότητα πλέγματος

Στην παρούσα μορφή σύνδεσης η επιλογή τελικού πλέγματος ήταν ιδιαίτερα δύσκολη. Το παραπάνω πλέγμα επιλέχθηκε ως τελικό με τα ίδια κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν και στα προηγούμενα πλέγματα.

- Προσεγγιστικά λογικό μέγεθος τάσεων

Το απλοποιητικό προσομοίωμα παραμένει ίδιο, οπότε η συγκόλληση καταπονείται από αξονική δύναμη 943kN. Η αξονική αυτή δύναμη δημιουργεί διατμητική τάση σε κάθε συγκόλληση ίση με $\tau = 67\text{MPa}$ (σχήμα 6-5), δηλαδή ισοδύναμη τάση von Miseses 116MPa. Τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης για τις von Miseses τάσεις της άνω συγκόλλησης, στην οποία εμφανίζονται τα μεγαλύτερα μεγέθη, φαίνονται στο σχήμα 6-6 με το μέγεθος των τάσεων να είναι κοντά σε αυτήν που υπολογίστηκε. Παρατηρείται μια ιδιαίτερα υψηλή συγκέντρωση τάσεων στις γωνίες της συγκόλλησης και κυρίως στην ρίζα, της τάξης των 390MPa, η οποία όμως δεν θεωρείται ιδιαίτερα αντιπροσωπευτική λόγω της περιορισμένης έκτασής της. Παρόλα αυτά λόγω αυτών των υψηλών συγκεντρώσεων η συγκεκριμένη μορφή σύνδεσης αξιολογείται ως 'λιγότερο καλή' (συνέχεια στο κεφάλαιο 7).

Σχήμα 6-5: διατμητική τάση τ 

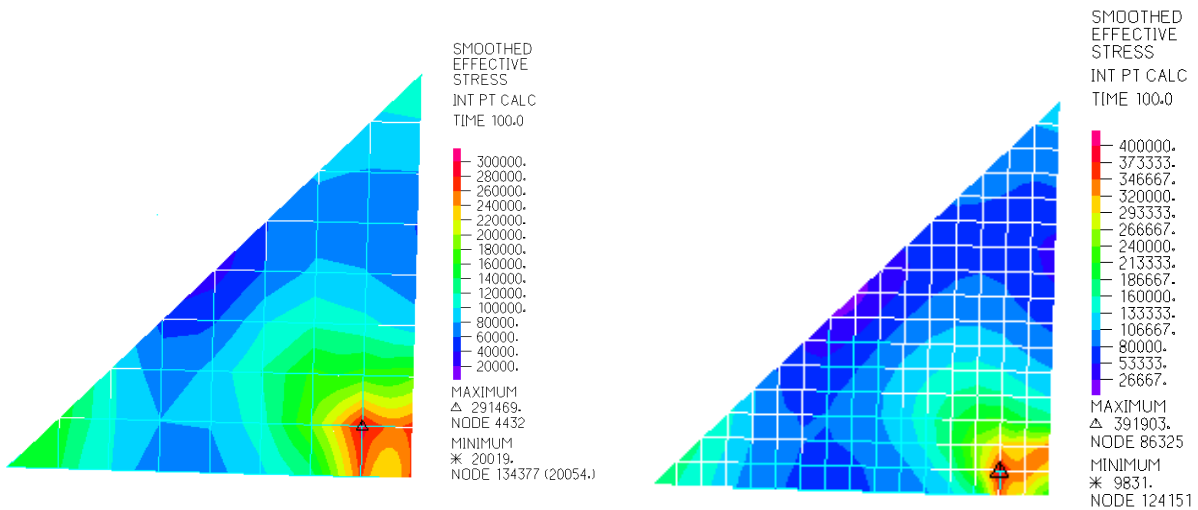
Σχήμα 6-6: τάσεις von Mises στην άνω συγκόλληση από αριθμητική προσομοίωση

Όσον αφορά τις τάσεις στον κοχλία, το κριτήριο χρησιμοποιήθηκε ακριβώς όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 3.

- Σύγκλιση τάσεων στα πλέγματα που δοκιμάστηκαν

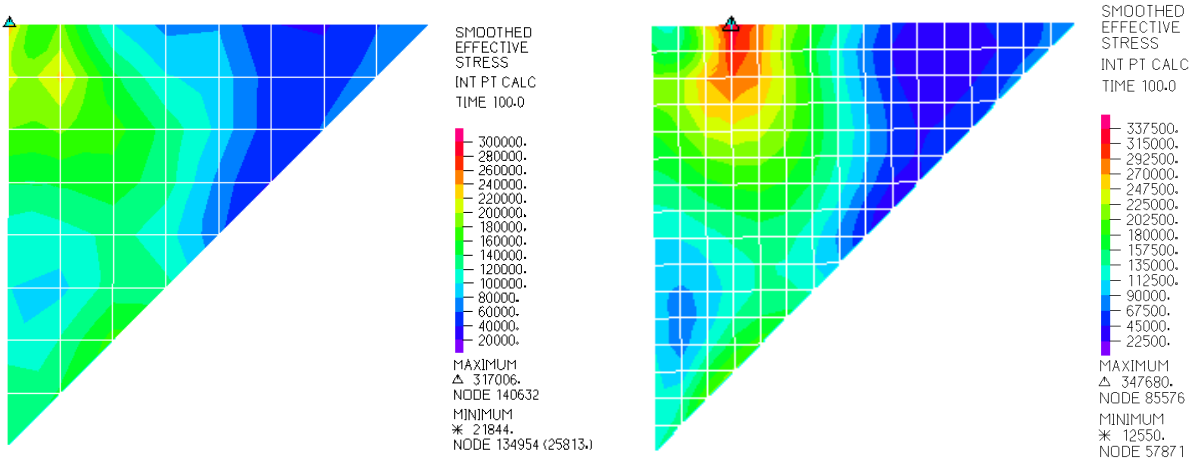
Στο σχήμα 6-7α φαίνονται τα αποτελέσματα των τάσεων στην άνω συγκόλληση του αραιού πλέγματος και στο σχήμα 6-7β του πυκνού πλέγματος. Η μέγιστη τάση διαφέρει κατά περίπου 100MPa, διαφορά αρκετά μεγάλη. Όμως, από την σύγκριση των δύο πλεγμάτων προκύπτει ότι η συγκεκριμένη διαφορά δεν είναι αντιπροσωπευτική λόγω της περιορισμένης έκτασής της. Από την σύγκριση των δύο πλεγμάτων σε όλη τους την έκταση, παρατηρούμε ότι το πυκνότερο παρουσιάζει τάσεις μεγαλύτερες κατά 50MPa περίπου, διαφορά σημαντική ειδικά για συνδέσεις με έντονα φαινόμενα κόπωσης. Η κατανομή των τάσεων στην άνω συγκόλληση είναι παρόμοια και στα δύο πλέγματα.

Η διαφορά των τάσεων στην κάτω συγκόλληση ανάμεσα στα δύο πλέγματα είναι σημαντικά μικρότερη και παρουσιάζεται στα σχήματα 6-8α και 6-8β. Οι εμφανιζόμενες μέγιστες τιμές διαφέρουν κατά 30MPa, ενώ στην υπόλοιπη έκταση της συγκόλλησης παρατηρούνται πολύ μικρότερες διαφορές, οπότε και θεωρούμε ότι επιτεύχθηκε σύγκλιση.



Σχήμα 6-7α: Κατανομή τάσεων στην άνω συγκόλληση του αραιού πλέγματος

Σχήμα 6-7β: Κατανομή τάσεων στην άνω συγκόλληση του πυκνού πλέγματος



Σχήμα 6-8α: κατανομή τάσεων στην κάτω συγκόλληση του αραιού πλέγματος

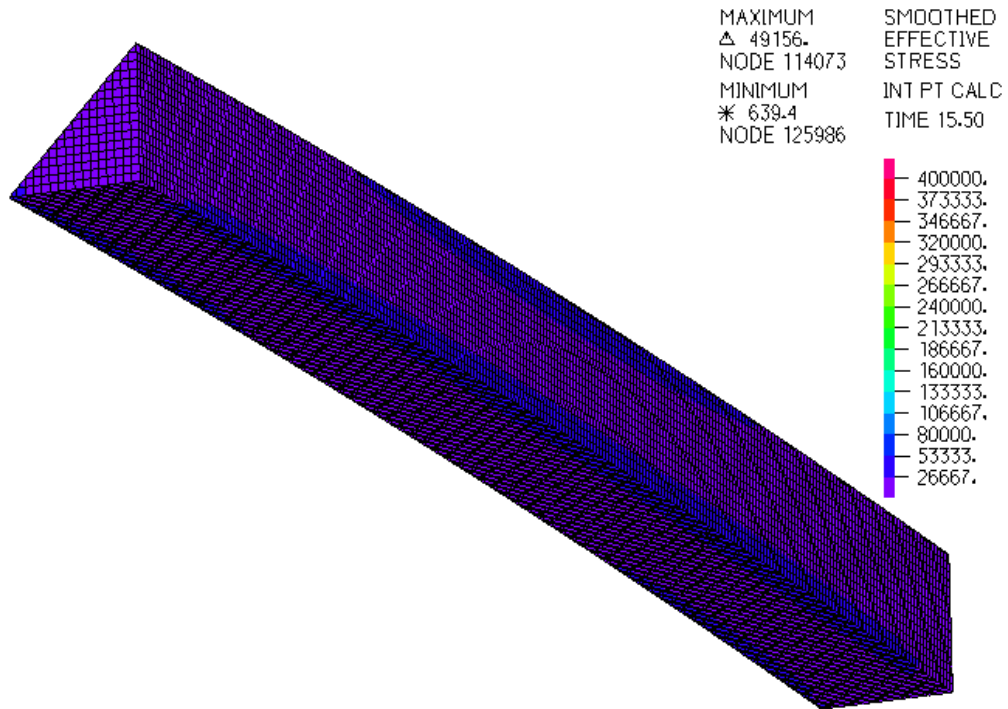
Σχήμα 6-8β: κατανομή τάσεων στην κάτω συγκόλληση του πυκνού πλέγματος

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η εικόνα των von Mises τάσεων στην άνω και κάτω συγκόλληση σε διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου. Στα σχήματα 6-10α, 6-10β, 6-11α και 6-11β έχει αφαιρεθεί το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων για να φαίνεται καλύτερα η κατανομή των τάσεων.

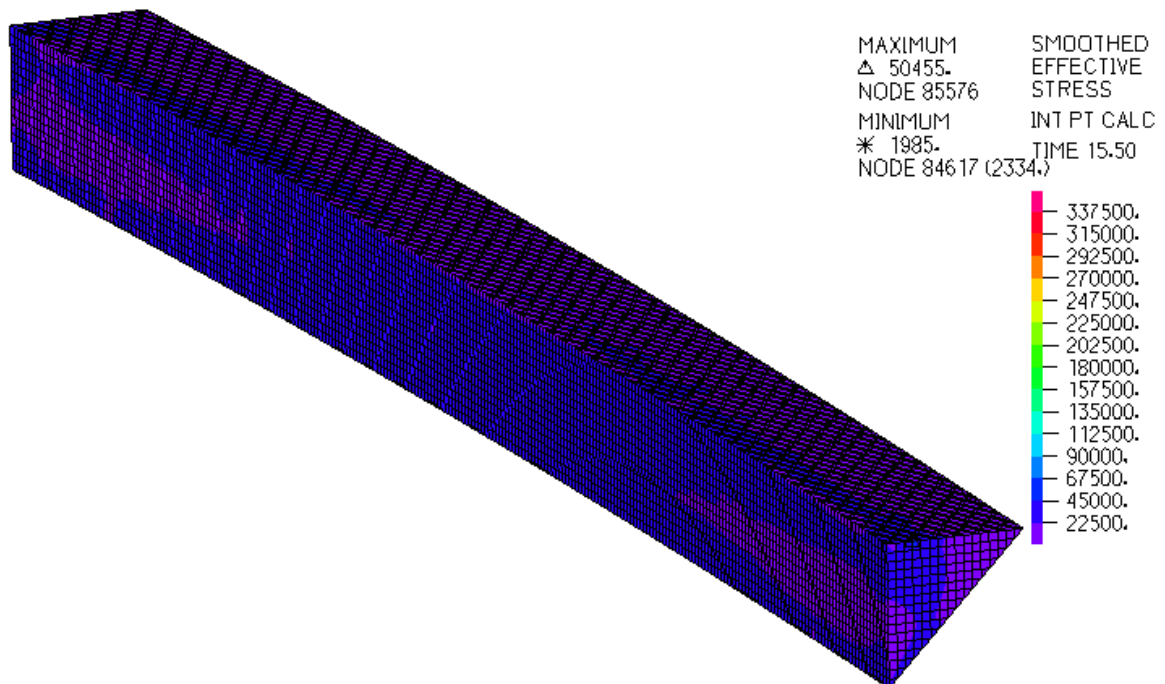
Όπως φαίνεται από το σχήμα 6-9α, η άνω συγκόλληση εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλές τάσεις σε όλο το μήκος στην περιοχή της ρίζας της εξωραφής για αρκετά χαμηλό φορτίο. Η κατανομή των τάσεων στα σχήματα 6-10α και 6-11α, υποδεικνύει ότι οι περιοχές που βρίσκονται κοντά στις άλλες δύο γωνίες της άνω συγκόλλησης εμφανίζουν συγκέντρωση τάσεων με μέγεθος όμως πιο χαμηλό συγκριτικά με την ρίζα. Οι υπόλοιπες περιοχές της άνω συγκόλλησης εμφανίζουν σημαντικά μικρότερες τάσεις.

Από το σχήμα 6-9β παρατηρούμε επίσης ότι και η κάτω συγκόλληση καταπονείται από υψηλές τάσεις για χαμηλό φορτίο, με την περιοχή της εξωραφής που συνδέεται με το έλασμα να παρουσιάζει τα μεγαλύτερα μεγέθη των τάσεων και πιο συγκεκριμένα κοντά στην ρίζα. Η περιοχή της κάτω συγκόλλησης που βρίσκεται δεξιά, δηλαδή κοντά στην εξωτερική ακτίνα του πυλώνα, δέχεται την μικρότερη καταπόνηση (σχήματα 6-10β και 6-11β). Όπως φαίνεται από τις εικόνες της κατανομής των

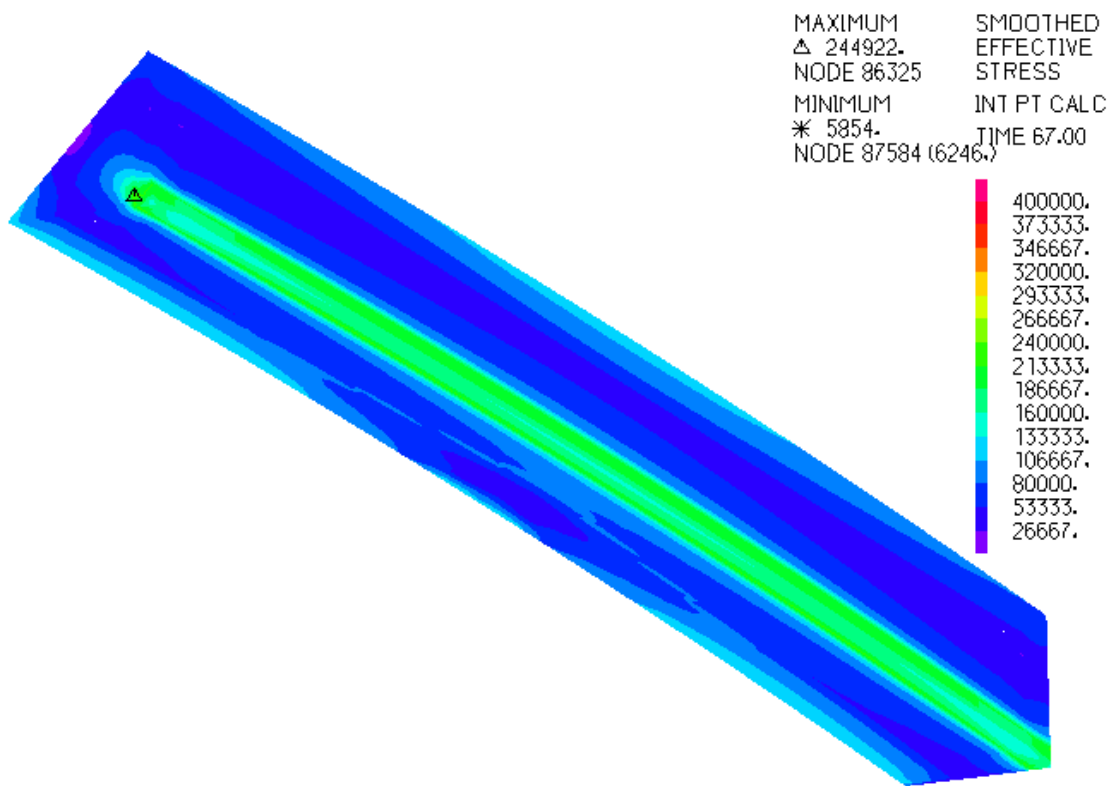
τάσεων για φορτίο 100kN, ο συγκεκριμένος τύπος σύνδεσης παρουσιάζει έντονη ανομοιομορφία και μεγάλες συγκεντρώσεις ως προς την κατανομή των τάσεων τόσο για την κάτω όσο και για την άνω συγκόλληση.



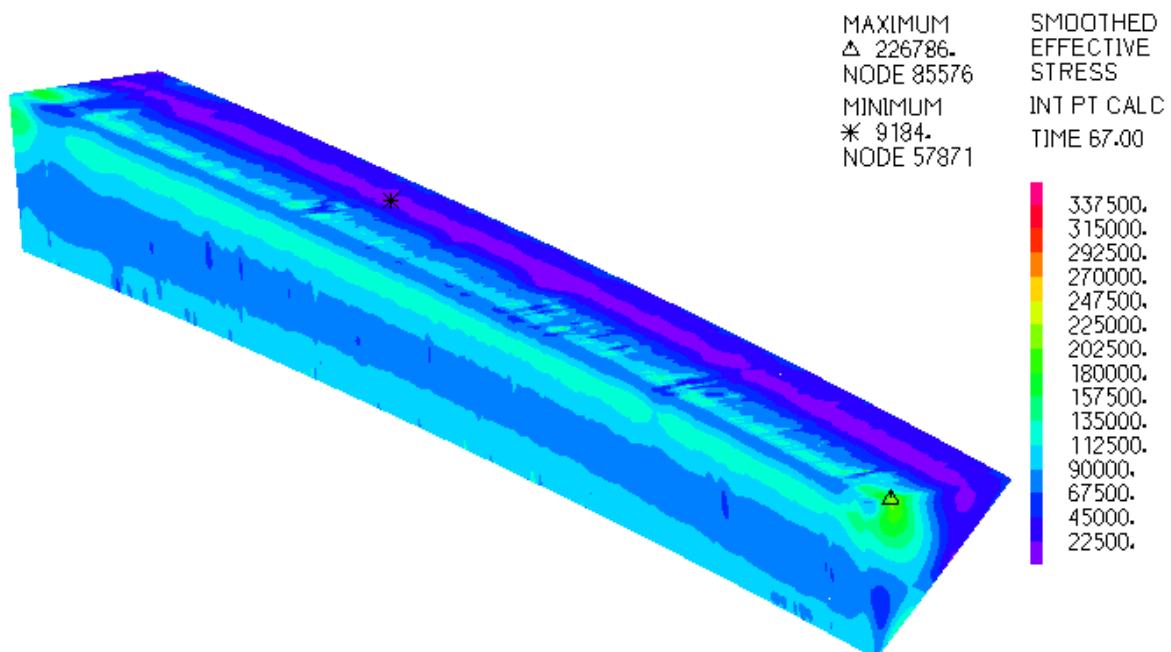
Σχήμα 6-9α: κατανομή τάσεων στην άνω συγκόλληση για φορτίο 16kN



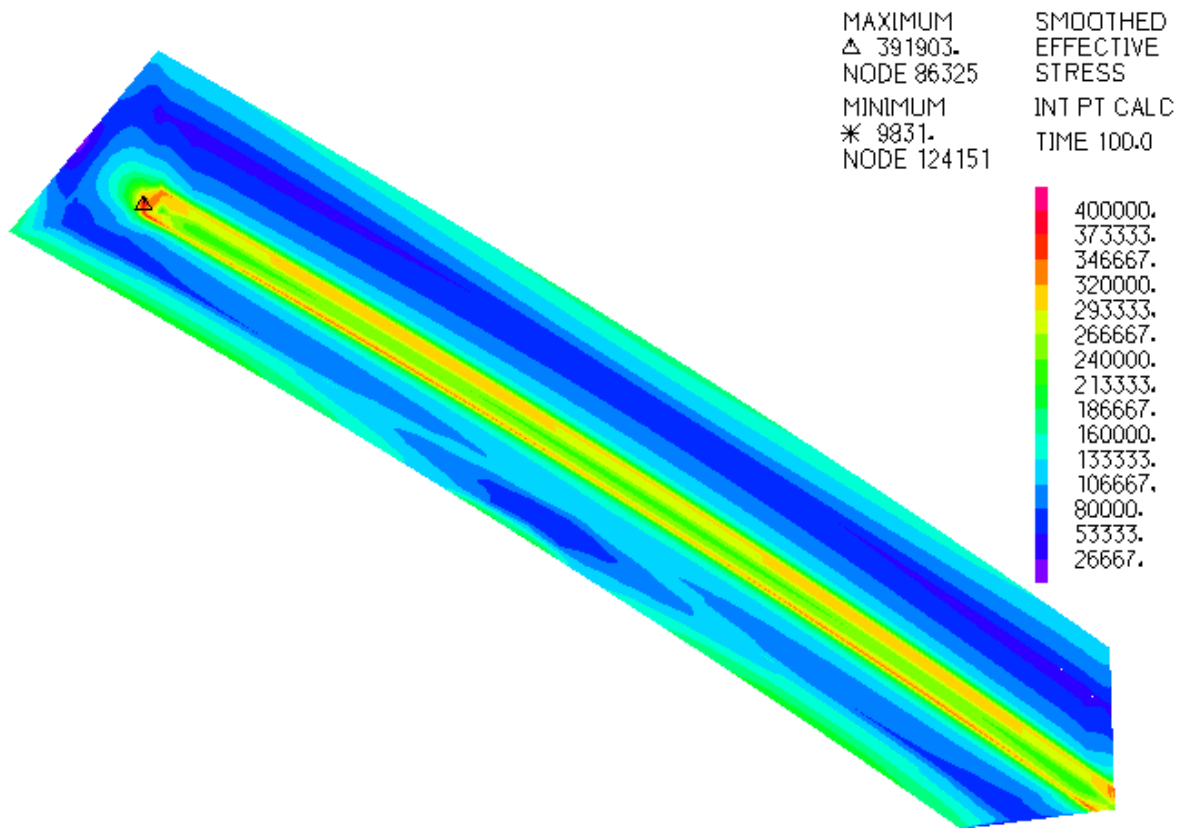
Σχήμα 6-9β: κατανομή τάσεων στην κάτω συγκόλληση για φορτίο 16kN



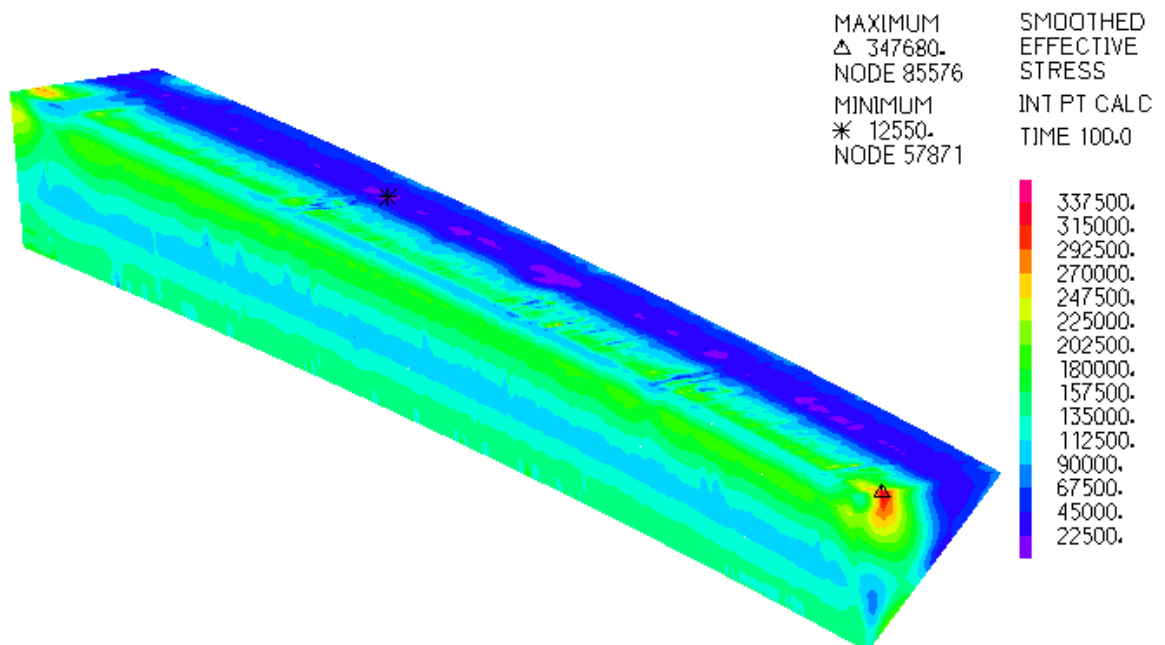
Σχήμα 6-10α: κατανομή τάσεων στην άνω συγκόλληση για φορτίο 68kN



Σχήμα 6-10β: κατανομή τάσεων στην κάτω συγκόλληση για φορτίο 68kN



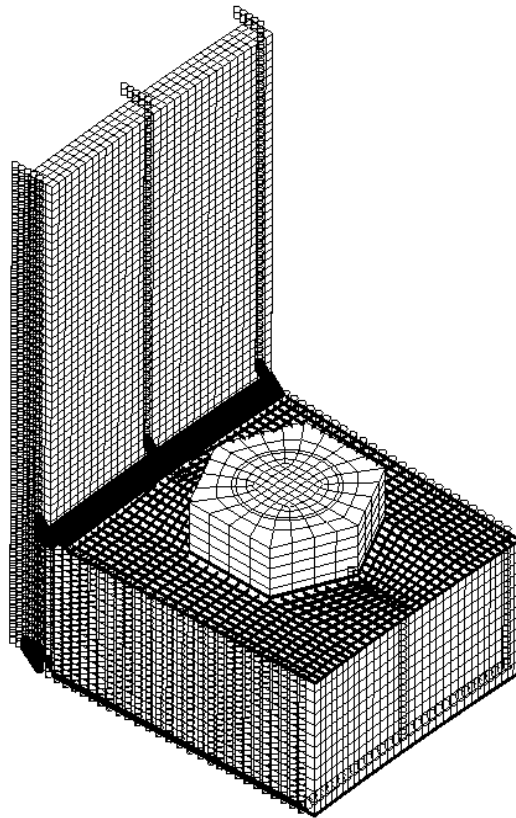
Σχήμα 6-11α: κατανομή τάσεων στην άνω συγκόλληση για φορτίο 100kN



Σχήμα 6-11β: κατανομή τάσεων στην κάτω συγκόλληση για φορτίο 100kN

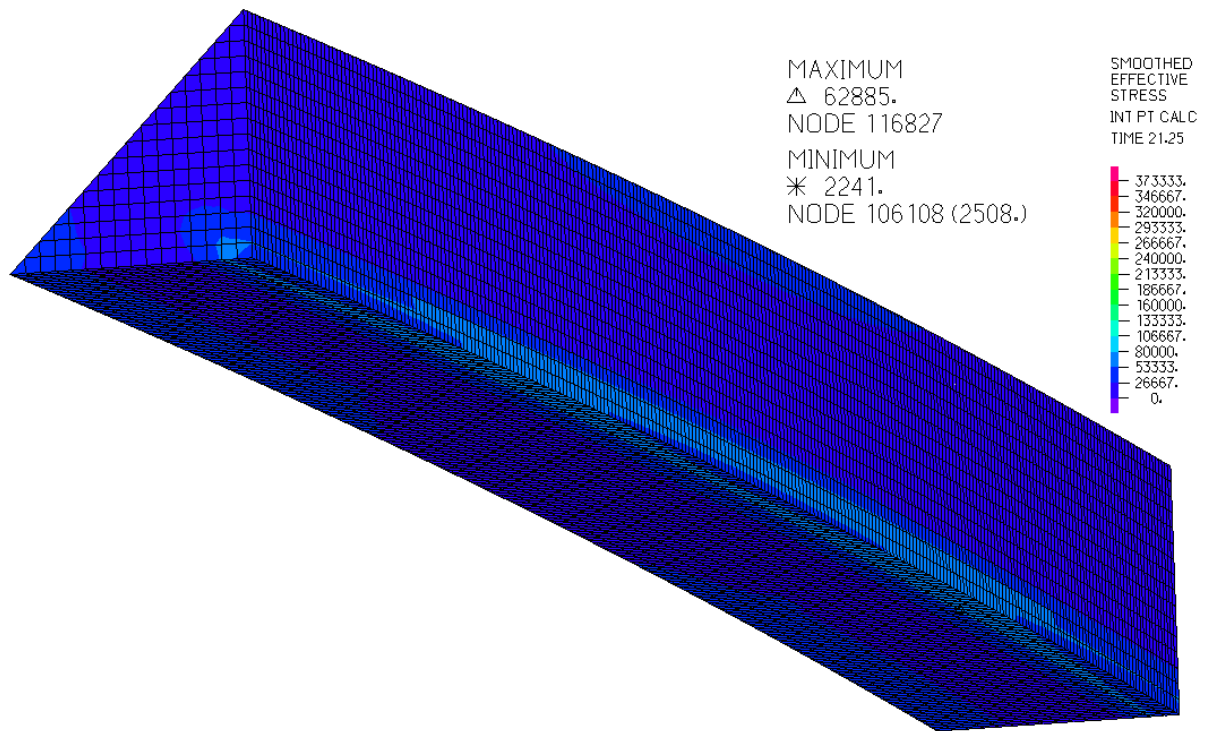
6.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑ ΜΕ ΔΕΣΜΕΥΜΕΝΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΣΤΗΝ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΣΤΙΣ ΑΚΡΑΙΕΣ ΠΑΡΕΙΕΣ

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το προσομοίωμα με τις επιπρόσθετες συνοριακές συνθήκες. Το προσομοίωμα αυτό φαίνεται στο σχήμα 6-12.

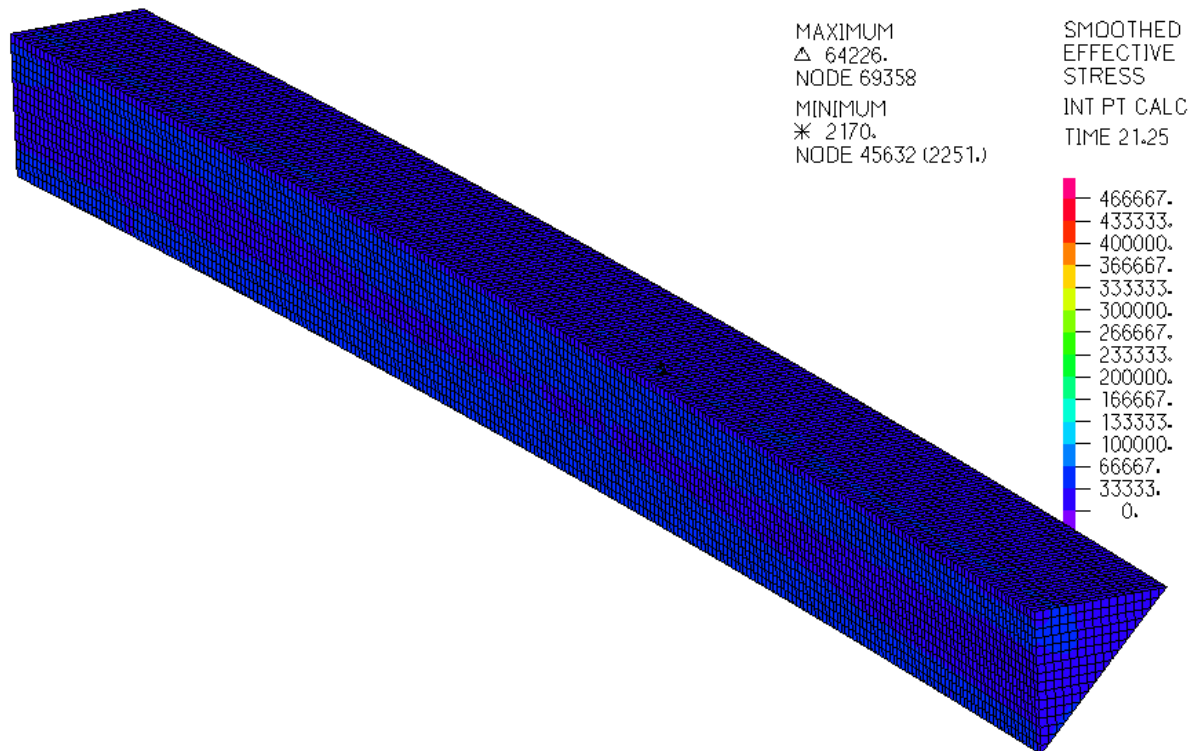


Σχήμα 6-12: υπό μελέτη προσομοίωμα με πρόσθετη συνοριακή συνθήκη

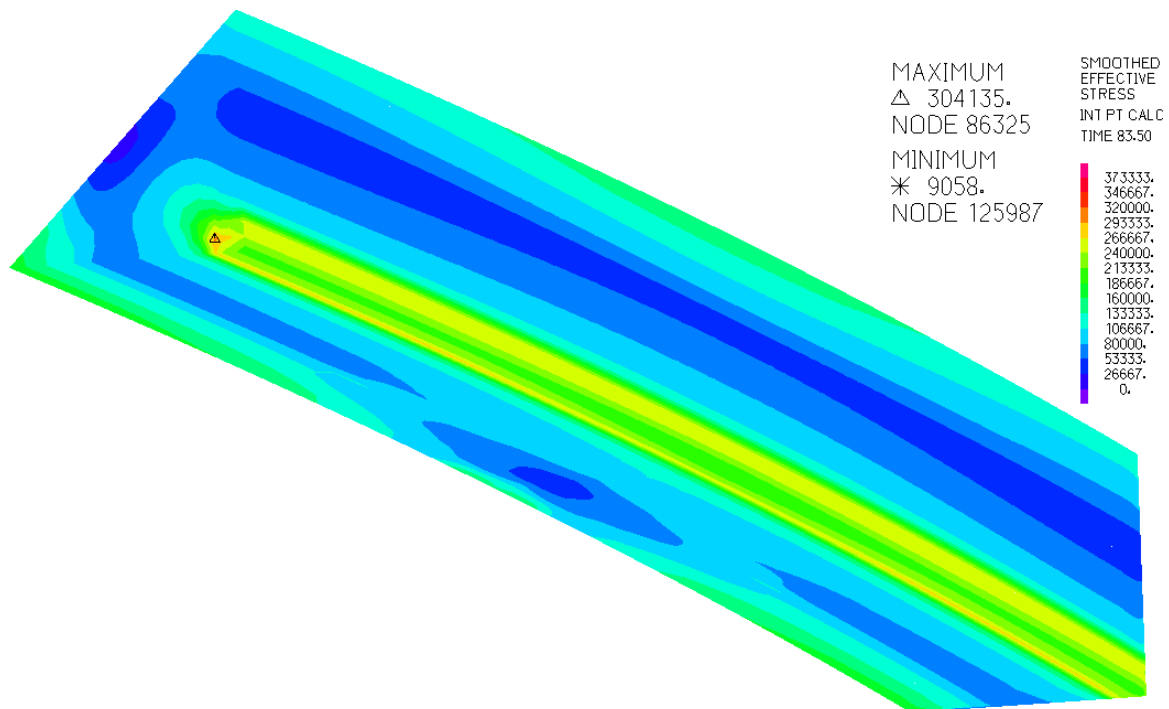
Στα σχήματα 6-13, 6-14 και 6-15 παρουσιάζεται η κατανομή των von Mises τάσεων στην άνω και κάτω συγκόλληση για φορτίο 22kN, 84kN και 100kN αντίστοιχα. Στα σχήματα 6-14α, 6-14β, 6-15α και 6-15β έχει αφαιρεθεί το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων για να φαίνεται καλύτερα η κατανομή των τάσεων. Η κατανομή των τάσεων τόσο στην άνω όσο και στην κάτω συγκόλληση παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με αυτήν του προσομοιώματος χωρίς τις επιπρόσθετες συνοριακές συνθήκες. Η μονή διαφορά που θα μπορούσε να σημειωθεί είναι οι λίγο μικρότερες σε μέγεθος τάσεις του προσομοιώματος με τις επιπρόσθετες συνοριακές, της τάξης των 20MPa για την άνω συγκόλληση και 70MPa για την κάτω.



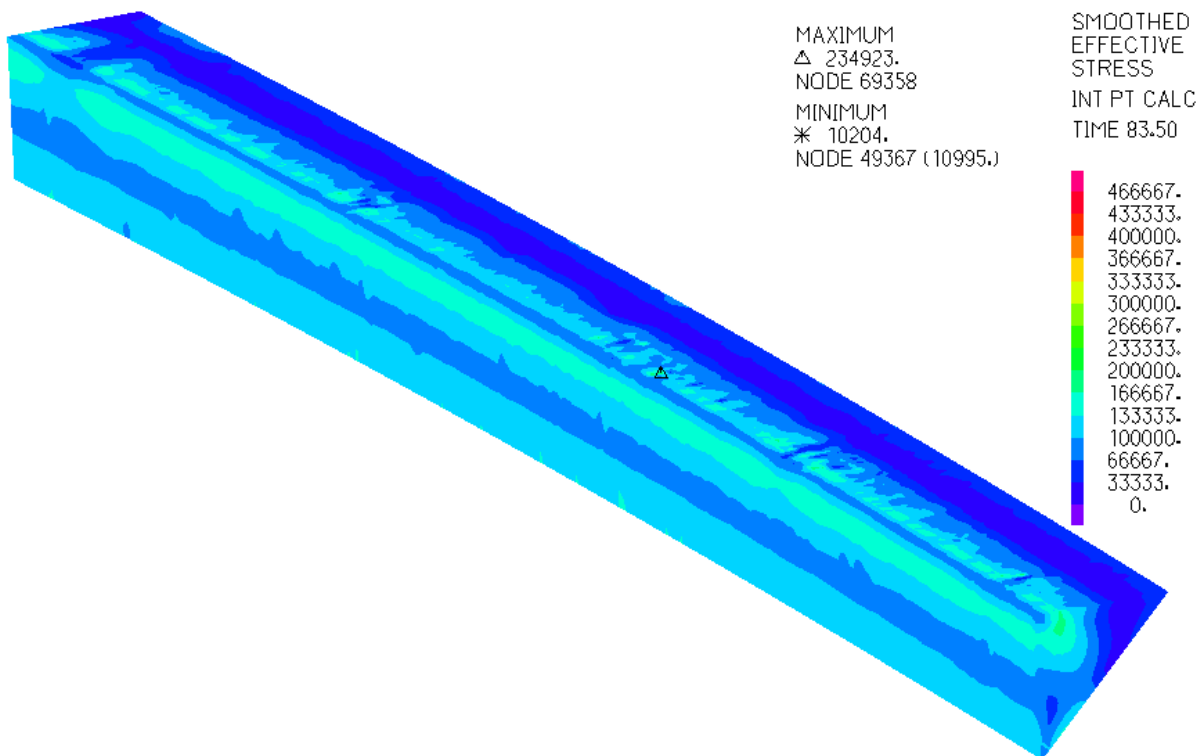
Σχήμα 6-13α: κατανομή τάσεων στην άνω συγκόλληση για φορτίο 22kN



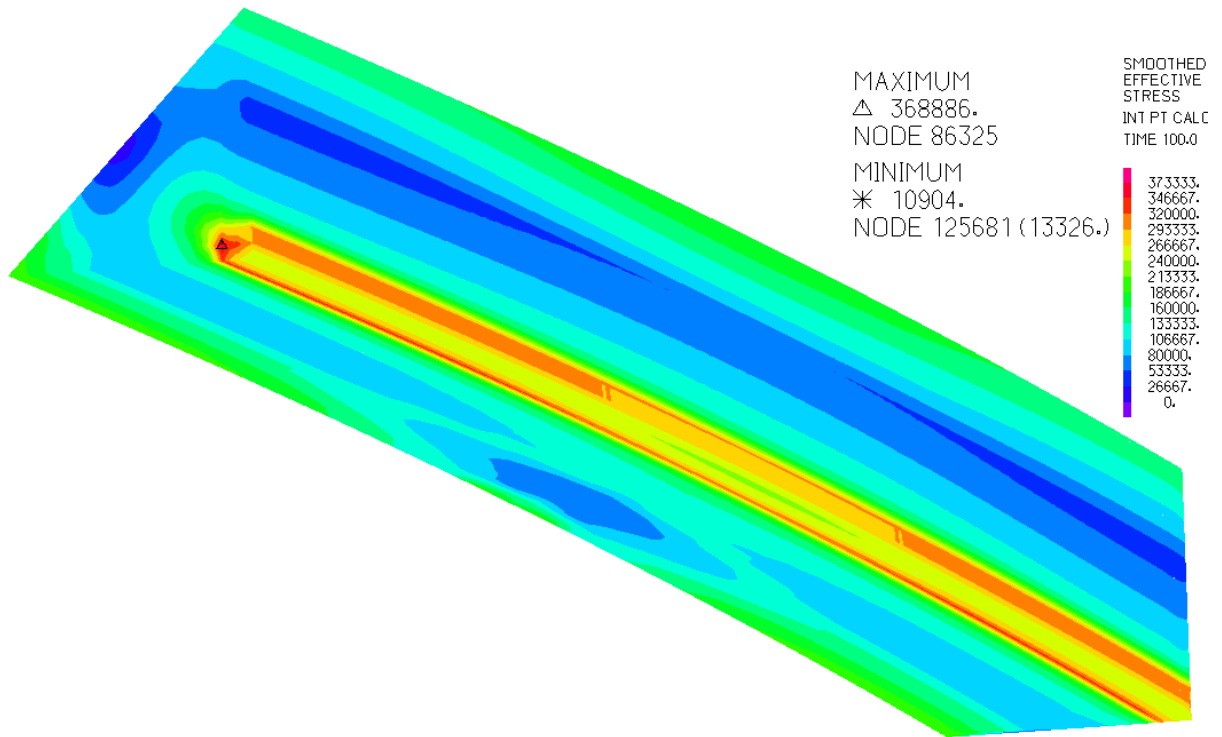
Σχήμα 6-13β: κατανομή τάσεων στην κάτω συγκόλληση για φορτίο 22kN



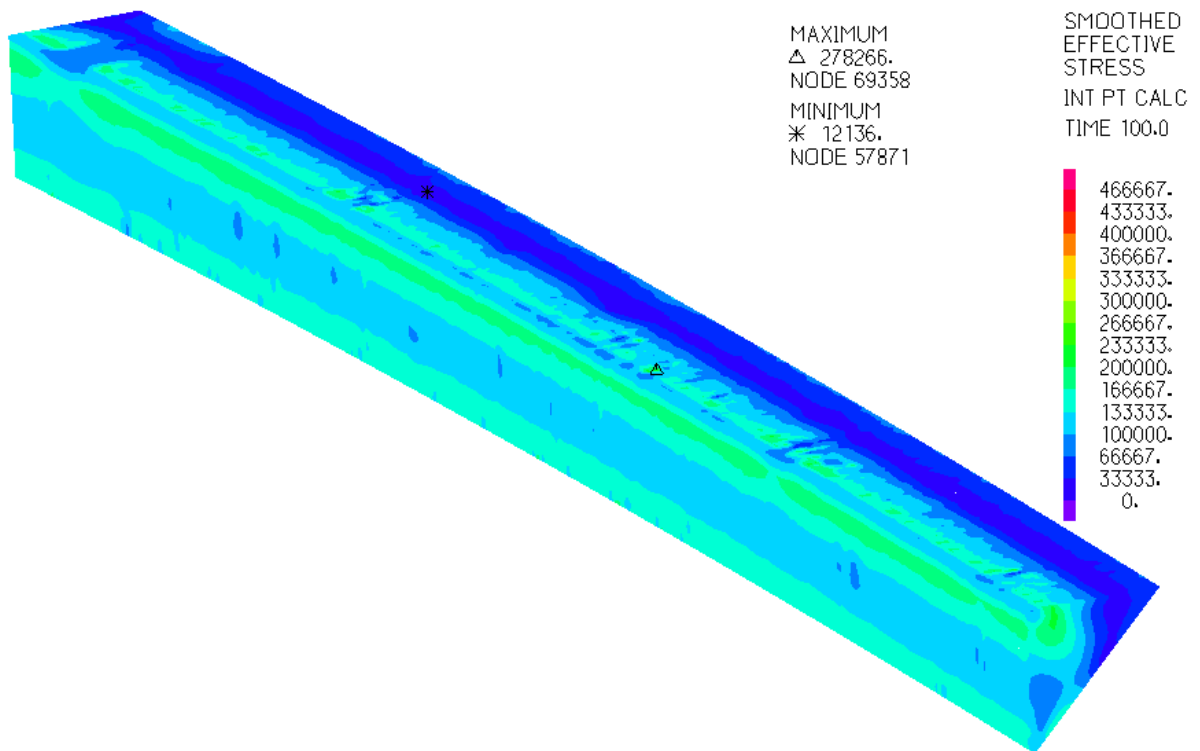
Σχήμα 6-14α: κατανομή τάσεων στην άνω συγκόλληση για φορτίο 84kN



Σχήμα 6-14β: κατανομή τάσεων στην κάτω συγκόλληση για φορτίο 84kN



Σχήμα 6-15α: κατανομή τάσεων στην άνω συγκόλληση για φορτίο 100kN



Σχήμα 6-15β: κατανομή τάσεων στην κάτω συγκόλληση για φορτίο 100kN

7 ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση εναλλακτικών τρόπων συγκόλλησης σε συνδέσεις αποκατάστασης συνέχειας του σωληνωτού περιβλήματος μιας ανεμογεννήτριας για καταπόνηση από φορτία κόπωσης. Οι υπό μελέτη εναλλακτικοί τρόποι σύνδεσης είναι οι: φλάντζα με ορισμένες επιφάνειες επαφής, φλάντζα προσυγκόλλησης, φλάντζα με προέκταση και φλάντζα εξωραφής. Οι τρεις πρώτοι περιλαμβάνουν συγκόλληση εσωραφής, ενώ ο τελευταίος πραγματοποιείται με εξωραφή. Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι ο σχεδιασμός των κατάλληλων προσομοιωμάτων μέσω των οποίων θα συγκριθούν οι τάσεις που αναπτύσσονται στις συγκολλήσεις στους εναλλακτικούς τρόπους σύνδεσης, με απώτερο σκοπό την αξιολόγηση και σύγκρισή τους.

Συγκεκριμένα μελετήθηκε η σύνδεση στο 0,85 του ύψους του πυλώνα μιας τυπικής ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα, ονομαστικής ισχύος 1,5mW και ύψους πυλώνα 80m. Για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς κάθε εναλλακτικού τρόπου σύνδεσης προσομοιώθηκε ένα κομμάτι της σύνδεσης βραχέος L με τρισδιάστατα στοιχεία όγκου, το οποίο περιλαμβάνει έναν κοχλία, τις συνδεδεμένες δακτυλιοειδείς φλάντζες και ένα κομμάτι του ελάσματος του πυλώνα. Το τελικό πλέγμα για κάθε τρόπο σύνδεσης προέκυψε αφενός με τον απλοποιητικό έλεγχο του μεγέθους των αναπτυσσομένων τάσεων στις συγκολλήσεις και στον κοχλία και αφετέρου με την σύγκλιση των τάσεων στα πλέγματα που δοκιμάστηκαν τόσο όσον αφορά την γενική εικόνα της κατανομής τους όσο και ως προς το μέγεθός τους. Πρέπει να σημειωθεί ότι στις αναλύσεις που έγιναν λήφθηκαν υπόψη οι συνθήκες επαφής ανάμεσα στις δύο φλάντζες, στην άνω επιφάνεια της άνω φλάντζας με την κεφαλή του κοχλία καθώς και στον κορμό του κοχλία με την άντυγα της φλάντζας. Η συγκόλληση στο αριθμητικό προσομοίωμα πραγματοποιήθηκε με χρήση της εντολής 'glue mesh' του λογισμικού ADINA v9.0.0. Η κυρίαρχη φόρτιση του πυλώνα της ανεμογεννήτριας είναι η φόρτιση του ανέμου στα πτερύγιά της, η οποία μεταφράζεται ως μία καμπτική ροπή στον πυλώνα με διεύθυνση εγκάρσια στην διεύθυνση της φοράς του ανέμου. Η καμπτική αυτή ροπή ισοδυναμεί με ορθές τάσεις στο κέλυφος του πυλώνα. Έτσι λοιπόν τα αριθμητικά προσομοιώματα, τα οποία αντιστοιχούν στον πλέον εφελκόμενο κοχλία, δέχονται εφελκυστική δύναμη περί τα 100kN. Πραγματοποιήθηκαν μη γραμμικές αναλύσεις χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ADINA v9.0.0, οι οποίες επικεντρώθηκαν στον προσδιορισμό της συμπεριφοράς των ραφών στους διάφορους εναλλακτικούς τρόπους συγκόλλησης. Στις αναλύσεις δεν λήφθηκε υπόψη η μη γραμμικότητα του υλικού, δεδομένου ότι η αστοχία στις εν λόγω συνδέσεις

αναμένεται να προέλθει μέσω κόπωσης, η οποία πραγματοποιείται με τις τάσεις να παραμένουν στην ελαστική περιοχή. Για κάθε εναλλακτικό τρόπο συγκόλλησης έγιναν αναλύσεις για δύο συστήματα συνοριακών συνθηκών. Το πρώτο περιλαμβάνει πάκτωση στην βάση του κοχλία και στην κάτω φλάντζα και δέσμευση της μετακίνησης κατά την εφαπτομενική διεύθυνση στον άξονα συμμετρίας. Το δεύτερο περιλαμβάνει τις ίδιες συνοριακές συνθήκες με το πρώτο και έχει σαν επιπρόσθετη συνθήκη την δέσμευση της μετακίνησης κατά την εφαπτομενική διεύθυνση στις ακραίες παρειές του προσομοιώματος, προσομοιώνοντας έτσι καλύτερα την συνέχεια του υλικού στο φυσικό πρόβλημα. Για κάθε εναλλακτικό τρόπο συγκόλλησης παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων σε αυτή σε διάφορα στάδια επιβολής του φορτίου και γίνεται προσπάθεια επεξήγησης των αποτελεσμάτων στα αντίστοιχα κεφάλαια και συγκεντρωτικά στην επόμενη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου. Μέσω του τρισδιάστατου προσομοιώματος επιτυγχάνεται η απεικόνιση της κατανομής των τάσεων με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον προσδιορισμό σε κάθε συγκόλληση των περιοχών που παραμένουν σχετικά πιο ανενεργές και των περιοχών που παρουσιάζουν υψηλές συγκεντρώσεις τάσεων. Τέλος, γίνεται σύγκριση των τεσσάρων αυτών εναλλακτικών τρόπων σύνδεσης στην δεύτερη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου.

7.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα κύρια συμπεράσματα μέσα από την σύγκριση των εναλλακτικών τρόπων συγκόλλησης που εξετάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια είναι τα εξής:

- Όπως φαίνεται από τις κατανομές των τάσεων για τους τρόπους σύνδεσης της φλάντζας με ορισμένες επιφάνειες επαφής και της φλάντζας προσυγκόλλησης, οι δύο αυτοί τρόποι σύνδεσης παρουσιάζουν αρκετά παρόμοια συμπεριφορά, όσον αφορά τα μεγέθη των μέγιστων τάσεων καθώς και την κατανομή που παρουσιάζουν.
- Η παρουσία του προεντεταμένου κοχλία και η δέσμευση της μετακίνησης στην εφαπτομενική διεύθυνση στον άξονα συμμετρίας του βραχέος L έχουν σαν αποτέλεσμα την συγκέντρωση τάσεων στο κέντρο των εσωραφών.
- Ο τρόπος σύνδεσης της φλάντζας με προέκταση παρουσιάζει την μεγαλύτερη ομοιομορφία ως προς τα μεγέθη των τάσεων που εμφανίζονται, γεγονός που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό από την ομοιομορφία της γεωμετρίας πάνω και κάτω από την εσωραφή.
- Οι επιπρόσθετες συνοριακές συνθήκες της δέσμευσης της μετακίνησης κατά την εφαπτομενική διεύθυνση στις δύο ακραίες παρειές του προσομοιώματος, έχουν σαν αποτέλεσμα την ενεργοποίηση μεγαλύτερου μέρους της εσωραφής στους σχετικούς τρόπους συγκόλλησης. Επίσης, παρατηρείται και μια μικρή μείωση του μεγέθους των τάσεων.
- Η φλάντζα εξωραφής παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερες τάσεις σε σύγκριση με τους υπόλοιπους τρόπους σύνδεσης. Επίσης, η κατανομή των τάσεων στις συγκολλήσεις εξωραφής χαρακτηρίζεται από έντονη ανομοιομορφία και μεγάλες συγκεντρώσεις σε αντίθεση με τις εσωραφές όπου δεν παρατηρείται σημαντική διακύμανση του μεγέθους των τάσεων. Από τα προαναφερθέντα συμπεράσματα δικαιολογείται ο χαρακτηρισμός της σύνδεσης με φλάντζα εξωραφής στον DIN 4133 ως 'λιγότερο καλή'. Επίσης στην φλάντζα εξωραφής δεν παρατηρείται κάποια ιδιαίτερη αλλαγή ως προς την κατανομή των τάσεων λόγω των πρόσθετων συνοριακών συνθηκών.

7.3 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο για την καλύτερη αποτίμηση της συμπεριφοράς των εναλλακτικών τρόπων συγκόλλησης, η επέκταση των αναλύσεων για δυναμικά φορτία, τα οποία αποτελούν την κυρίαρχη μορφή φόρτισης σε πυλώνες ανεμογεννητριών.

Επίσης, κρίνεται σκόπιμη η ακόμα πιο ρεαλιστική απεικόνιση των συγκολλήσεων στα μοντέλα (για παράδειγμα η εισαγωγή ατελειών). Έτσι, θα μπορούμε να εκτιμήσουμε με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική αντοχή σε κόπωση κάθε εναλλακτικού τρόπου συγκόλλησης.

Ο σχεδιασμός κατάλληλων πειραματικών διατάξεων για τους εναλλακτικούς τρόπους συγκόλλησης που εξετάστηκαν και η διεξαγωγή των ανάλογων πειραμάτων κρίνονται απαραίτητα για τον έλεγχο της συμπεριφοράς που προέκυψε από τα αριθμητικά προσομοιώματα.

Τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιωμάτων θα ήταν ακόμα πιο ακριβή αν είχε εισαχθεί μη γραμμικότητα υλικού. Έτσι, θα μπορούσε να ασκηθεί όλη η δύναμη προεντάσεως του κοχλία, γεγονός που θα οδηγούσε σε διαρροή στον χαμηλότερης ποιότητας χάλυβα του ελάσματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Erich Hau. "Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics" 2nd 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] "Guidelines for Design of Wind Turbines, 2nd Edition" Det Norske Veritas, Copenhagen (Wind.Turbine.Certification@dnv.com) and Wind Energy Department, Risø National Laboratory (Certification@risoe.dk) 2002.
- [4] C. Petersen, Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, Vieweg, 1993.
- [5] DIN 6914, High Strength hexagon head bolts, Deutsche Norm, 1989
- [6] FEMAP 101, Introduction to Femap with NX Nastran Student Guide, Version 10.1.1, Siemens PLM Software, 2010
- [7] ADINA System 9.0, Release Notes ADINA R&D Inc, 71 Elton Avenue, Watertown, USA, 2013.
- [8] Eric Qiuli Sun, Shear Locking and Hourglassing in MSC Nastran, ABAQUS and ANSYS
- [9] Νταιϊφώτη Αικατερίνη, "Διερεύνηση της συμπεριφοράς συνδέσεων σε πυλώνες ανεμογεννητριών βάσει αριθμητικών προσομοιώσεων" , Διπλωματική Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Νοέμβριος 2014
- [10] Ηλίας Θανάσουλας, "Κόπωση Συνδέσεων σε Πυλώνες Ανεμογεννητριών", Μεταπτυχιακή Εργασία, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2014