

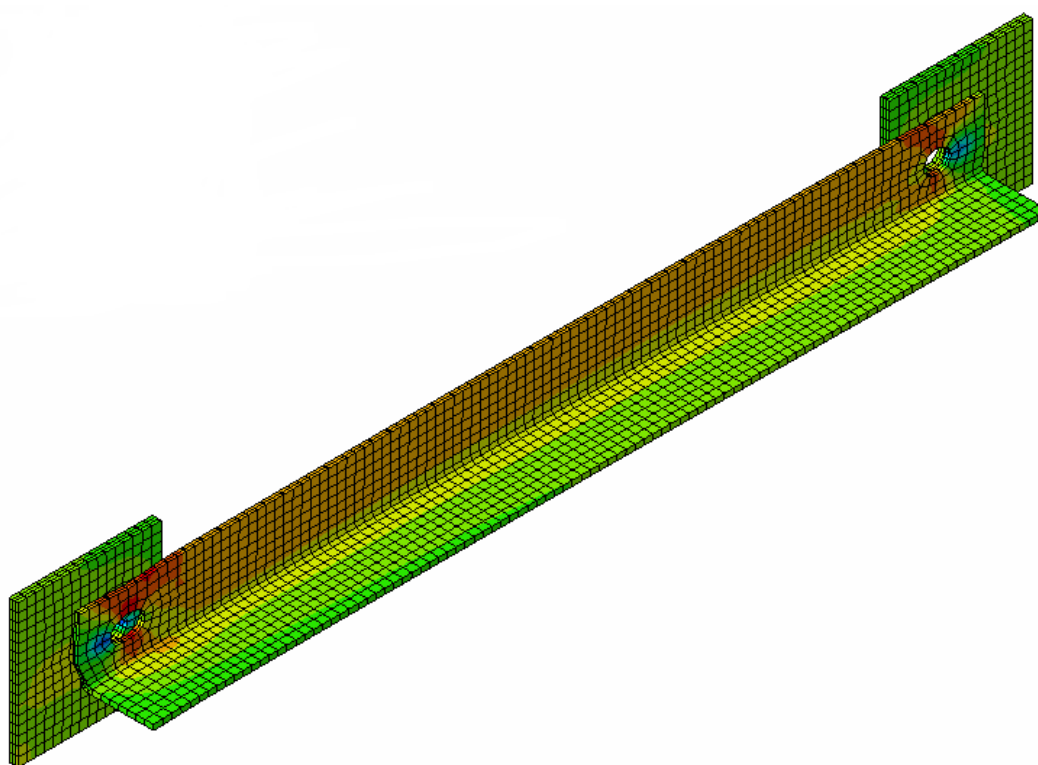


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Δ.Π.Μ.Σ. Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Αντοχές μελών από γωνιακά ψυχρής έλασης
που χρησιμοποιούνται σε δικτυωτούς φορείς



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαγδαληνή Μπρούσαλη

Επιβλέπων: Ιωάννης Ραυτογιάννης

Αθήνα, Ιούνιος 2013

ΕΜΚ ΜΕ 2013/18

Μπούσαλη Μ. Κ. (2013).
Αντοχές μελών από γωνιακά ψυχρής έλασης που χρησιμοποιούνται σε δικτυωτούς
φορείς
Μεταπτυχιακή Εργασία ΕΜΚ ΜΕ 2013/18
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Brousali M. K. (2013).
Resistances of the cold-formed members of angle sections used in trusses
Master Thesis ΕΜΚ ΜΕ 2013/18
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Πίνακας περιεχομένων.....	3
Περίληψη	5
Abstract.....	6
Ευχαριστίες.....	7
1 Εισαγωγή.....	8
2 Διαμόρφωση υπολογιστικού προσομοιώματος με το Abaqus 6.10-1	11
2.1 Εισαγωγή.....	11
2.3 Διατομή γωνιακού	12
2.4 Διαστάσεις πλακών	13
2.5 Διαστάσεις κοχλιών.....	13
2.5.1 Κεφαλή και κορμός κοχλία.....	14
2.5.2 Περικόχλιο	14
2.5.3 Δακτύλιος.....	16
2.6 Τύπος στοιχείων προσομοίωσης	16
2.7 Υλικά.....	17
2.8 Συνοριακές συνθήκες	18
2.9 Διακριτοποίηση	19
3 Αποτελέσματα ανάλυσης για εφελκυσμό	20
3.1 Εισαγωγή.....	20
3.2 Γωνιακό KL35x35x3 σε εφελκυσμό	20
3.3 Γωνιακό KL40x40x3 σε εφελκυσμό	25
3.3.1 Γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 σε εφελκυσμό	25
3.3.2 Γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 MC σε εφελκυσμό	30
3.4 Γωνιακό KL50x50x3 σε εφελκυσμό	31
3.5 Γωνιακό KL60x60x3 σε εφελκυσμό	34
3.6 Γωνιακό KL41x41x4 σε εφελκυσμό	37
3.7 Γωνιακό KL51x51x4 σε εφελκυσμό	40
3.8 Γωνιακό KL61x61x4 σε εφελκυσμό	43
3.9 Γωνιακό KL71x71x4 σε εφελκυσμό	46
3.10 Γωνιακό KL81x81x4 σε εφελκυσμό	49
4 Αποτελέσματα ανάλυσης για θλίψη	53
4.1 Εισαγωγή.....	53
4.2 Γωνιακό KL35x35x3 σε θλίψη	53
4.3 Γωνιακό KL40x40x3 σε θλίψη	58
4.3.1 Γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 σε θλίψη.....	58
4.3.2 Γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 MC σε θλίψη	63
4.4 Γωνιακό KL50x50x3 σε θλίψη	64
4.5 Γωνιακό KL60x60x3 σε θλίψη	67
4.6 Γωνιακό KL41x41x4 σε θλίψη	70
4.7 Γωνιακό KL51x51x4 σε θλίψη	73
4.8 Γωνιακό KL61x61x4 σε θλίψη	76
4.9 Γωνιακό KL71x71x4 σε θλίψη	79

4.10 Γωνιακό KL81x81x4 σε θλίψη	82
5 Εφελκυστική αντοχή των γωνιακών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3	86
5.1 Εισαγωγή.....	86
5.2 Γωνιακά που συνδέονται με το ένα σκέλος υπό εφελκυσμό	86
5.3 Κατηγορία κοχλιωτών συνδέσεων	87
5.4 Διάταξη οπών για κοχλίες	87
5.5 Αντοχή σχεδιασμού μεμονωμένων μέσων σύνδεσης.....	89
5.6 Χαρακτηριστικά των γωνιακών διατομών και των κοχλιών	90
5.7 Έλεγχος των αποστάσεων των οπών από τα άκρα.....	91
5.8 Υπολογισμός εφελκυστικής αντοχής των γωνιακών	91
6 Θλιπτική αντοχή των γωνιακών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3	94
6.1 Εισαγωγή.....	94
6.2 Κατάταξη γωνιακών διατομών.....	94
6.3 Επιρροή στρογγυλεμένων γωνιών.....	95
6.4 Ενεργός διατομή.....	97
6.5 Καθαρή θλίψη	98
6.5.1 Καμπτικός λυγισμός λόγω αξονικής θλιπτικής δύναμης.....	98
6.5.2 Στρεπτικός λυγισμός και στρεπτοκαμπτικός λυγισμός.....	98
6.5.3 Αντοχή σε λυγισμό	101
6.6 Συνδυασμός κάμψης και αξονικής θλίψης.....	103
6.6.1 Υπολογισμός ροπών.....	103
6.6.2 Συνδυασμός κάμψης και αξονικής θλίψης σύμφωνα με τον EC3 Μέρος 1-3	105
6.6.3 Συνδυασμός κάμψης και αξονικής θλίψης σύμφωνα με τον EC3 Μέρος 1-1	109
7 Συμπεράσματα	120
8 Βιβλιογραφία	121

**Αντοχές μελών από γωνιακά ψυχρής έλασης που χρησιμοποιούνται
σε δικτυωτούς φορείς**

Μπρούσαλη Μ. Κ. (Επιβλέπων: Ραυτογιάννης Ι.)

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετώνται μέλη από γωνιακές διατομές ψυχρής έλασης της σειράς KL, οι οποίες έχουν το χαρακτηριστικό γνώρισμα ότι έχουν μεγάλο πλάτος σε σχέση με το πάχος τους. Τέτοιου τύπου διατομές χρησιμοποιούνται σε δικτυωτούς φορείς, όπως στους πυλώνες της ΔΕΗ.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εξετάζονται η εφελκυστική και η θλιπτική αντοχή αυτών των μελών. Διαμορφώνονται υπολογιστικά προσομοιώματα των μελών για εννέα διαφορετικές διατομές, με τη χρήση του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, τα οποία υποβάλλονται σε εφελκυσμό και θλίψη υπό πραγματικές συνθήκες. Στην συνέχεια υπολογίζονται οι αντοχές των μελών σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3.

Από τη σύγκριση των αντοχών που προκύπτουν από τις αναλύσεις σε σχέση με αυτές που προκύπτουν από τον Ευρωκώδικα 3, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα. Βασικό συμπέρασμα από την εκπόνηση αυτής της εργασίας είναι ότι οι διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 αποδεικνύονται συντηρητικές για των υπολογισμό των αντοχών αυτών των μελών.

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

MASTER THESIS
EMK ME 2013/18

**Resistances of the cold-formed members of angle sections used in
trusses**

Brousali M. K. (supervised by Rautogiannis I.)

Abstract

In this Master Thesis, the cold-formed members of angle sections of the KL series are investigated. The basic characteristic of these members is their large width to thickness ratio. Steel members with this type of sections are being used in trusses such as the pylons of the Greek Public Electricity Company (DEH).

Within the frame of this thesis, the tensile and compression resistance of these members are examined using finite element analysis. More specifically, calculational models of steel members of 9 different sections are simulated using the software Abaqus and then they are subjected to tensile and compression load under real-life conditions.

The resistances of the members are also calculated according Eurocode 3 and are compared with the results from the finite element analyses. From this comparison some useful conclusions can be reached. The main conclusion is that Eurocode 3 is proved to be conservative for calculating the resistance of this kind of steel members.

Ευχαριστίες

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας, κύριο Ραυτογιάννη Ιωάννη, για την καθοδήγηση, την βοήθεια καθώς και το χρόνο που αφιέρωσε για τη δημιουργία της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω την διδάκτορα Μαρία-Ελένη Δασίου, για την πολύτιμη βοήθεια της στην εκμάθηση του προγράμματος Abaqus. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την διαρκή υποστήριξη της, που μου επέτρεψε την επιτυχή διεκπεραίωση των σπουδών μου.

1 Εισαγωγή

Τα μέλη ψυχρής έλασης που εξετάζουμε είναι από γωνιακές διατομές υψηλής αντοχής, της σειράς KL. Αυτές οι διατομές είναι λεπτότοιχες, δηλαδή έχουν μεγάλο πλάτος σε σχέση με το πάχος τους. Εξετάζονται εννέα διαφορετικές διατομές γωνιακών, οι οποίες είναι οι ακόλουθες: KL35x35x3, KL40x40x3, KL50x50x3, KL60x60x3, KL41x41x4, KL51x51x4, KL61x61x4, KL71x71x4 και KL81x81x4.

Στις παρακάτω εικόνες μπορούμε να δούμε κάποιους δικτυωτούς φορείς, συγκεκριμένα πυλώνες της ΔΕΗ, που χρησιμοποιούνται μέλη από τέτοιου τύπου διατομές.

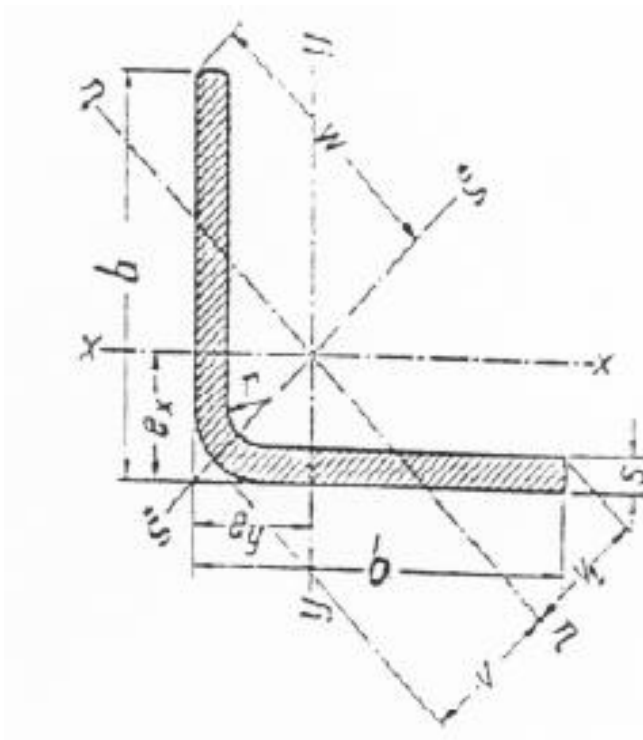


Σχήμα 1.1: Πυλώνες της ΔΕΗ.



Σχήμα 1.2: Πυλώνες της ΔΕΗ.

Στο Σχήμα 1.3 μπορούμε να δούμε την διατομή των γωνιακών που εξετάζουμε και στους Πίνακες 1.1 και 1.2 τα χαρακτηριστικά των γωνιακών διατομών.



Σχήμα 1.3: Διατομή γωνιακού KL.

Πίνακας 1.1: Χαρακτηριστικά των γωνιακών διατομών.

Designation	Dimension			Cross section	Distance of axes			
	b	s	r		F	$e_x=e_y$	w	v
(mm)x(mm)x(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(cm ²)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
KL								
35x35x3	35	3	3	1,95	1,01	2,48	1,18	1,25
40x40x3	40	3	3	2,26	1,14	2,83	1,36	1,43
50x50x3	50	3	3	2,85	1,39	3,53	1,71	1,78
60x60x3	60	3	3	3,45	1,64	4,24	2,07	2,14
41x41x4	41	4	4	3,00	1,20	2,88	1,37	1,46
51x51x4	51	4	4	3,80	1,45	3,59	1,72	1,82
61x61x4	61	4	4	4,60	1,70	4,30	2,08	2,17
71x71x4	71	4	4	5,40	1,95	5,00	2,43	2,53
81x81x4	81	4	4	6,20	2,20	5,71	2,78	2,88

Πίνακας 1.2: Αδρανειακά χαρακτηριστικά των γωνιακών διατομών.

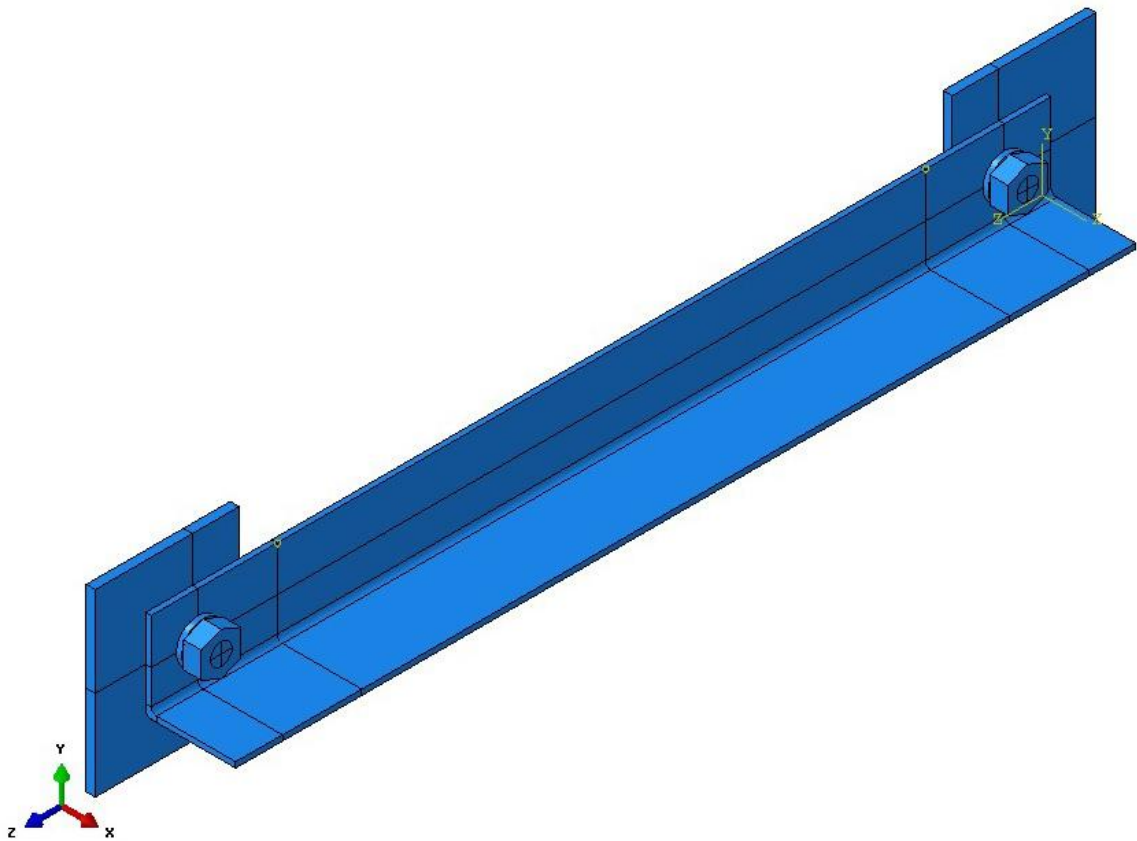
Designation	for the bending axis					
	ξ-ξ			η-η		
KL	J_ξ	$W_\xi(\text{min})$	i_ξ	J_η	$W_\eta(\text{min})$	i_η
(mm)x(mm)x(mm)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)	(cm ⁴)	(cm ³)	(cm)
35x35x3	3,77	1,52	1,39	0,85	0,68	0,66
40x40x3	5,69	2,01	1,59	1,31	0,92	0,76
50x50x3	11,40	3,22	2,00	2,67	1,50	0,97
60x60x3	20,00	4,72	2,41	4,75	2,22	1,17
41x41x4	7,29	2,70	1,61	1,87	1,21	0,77
51x51x4	15,50	4,32	2,02	3,54	1,97	0,97
61x61x4	27,10	6,31	2,43	6,35	2,92	1,18
71x71x4	43,40	8,68	2,84	10,30	4,04	1,38
81x81x4	65,20	11,40	3,24	15,50	5,39	1,58

Τα κεφάλαια που απαρτίζουν την παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι επτά. Το πρώτο κεφάλαιο είναι η εισαγωγή. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η διαμόρφωση των υπολογιστικών προσομοιώματων των γωνιακών με το Abaqus. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για εφελκυσμό. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων για θλίψη. Στο πέμπτο κεφάλαιο υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή των γωνιακών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Στο έκτο κεφάλαιο υπολογίζεται η θλιπτική αντοχή των γωνιακών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Στο έβδομο κεφάλαιο εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

2 Διαμόρφωση υπολογιστικού προσομοιώματος με το Abaqus 6.10-1

2.1 Εισαγωγή

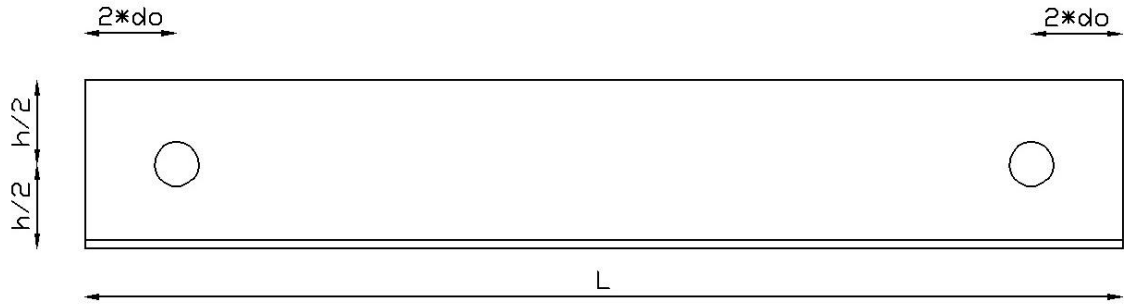
Τα υπολογιστικά προσομοιώματα των γωνιακών διατομών διαμορφώνονται με τη χρήση του προγράμματος Abaqus 6.10-1, μέσω του οποίου πραγματοποιούνται μη γραμμικές αναλύσεις με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Το υπολογιστικό προσομοίωμα για καθεμία από τις γωνιακές διατομές αποτελείται από το γωνιακό μέλος στο οποίο υπάρχουν δύο οπές (μία οπή στο δεξί και μία στο αριστερό του άκρο) και δύο πλάκες με μια οπή η καθεμία, οι οποίες συνδέονται με το γωνιακό μέλος μέσω κοχλιών.



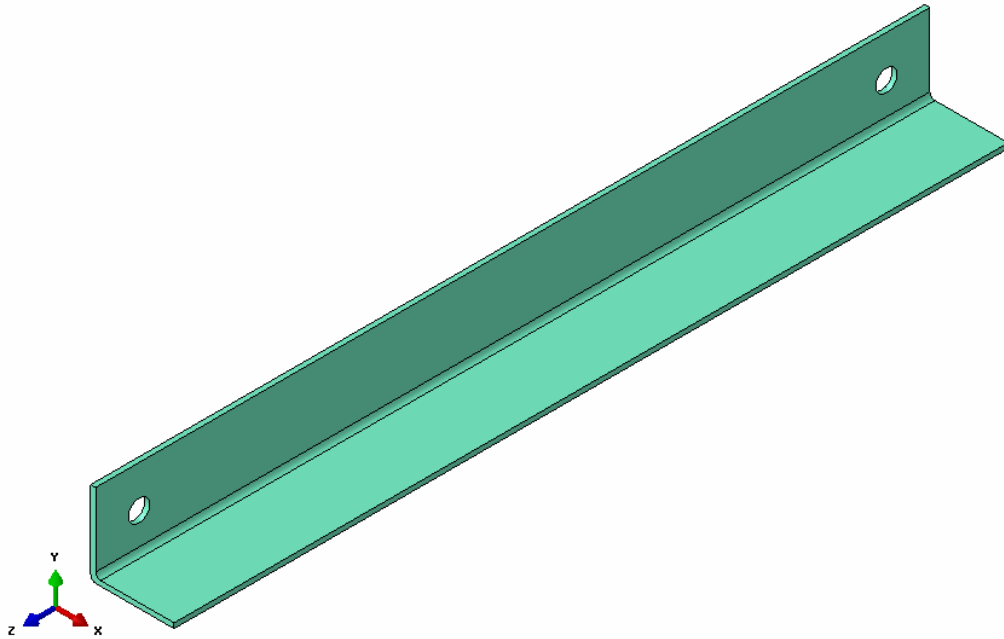
Σχήμα 2.1: Υπολογιστικό προσομοίωμα στο Abaqus 6.10-1.

2.2 Διαστάσεις γωνιακού

Για την περίπτωση που το προσομοίωμα υποβάλλεται σε εφελκυσμό το συνολικό μήκος του γωνιακού μέλους είναι $L=0,50\text{m}$, ενώ για την περίπτωση που το προσομοίωμα υποβάλλεται σε θλίψη είναι $L=1,00\text{m}$. Οι οπές απέχουν από το αριστερό και δεξί άκρο του γωνιακού απόσταση ίση με $2*d_0$ (όπου d_0 η διάμετρος της οπής που αντιστοιχεί στο εκάστοτε γωνιακό). Το κέντρο των οπών βρίσκεται στο μέσο του ύψους των γωνιακών.



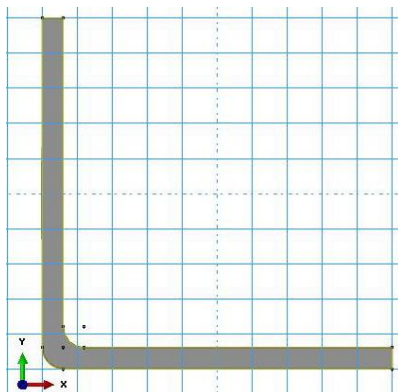
Σχήμα 2.2: Διάταξη οπών στο γωνιακό.



Σχήμα 2.3: Προσομοίωση γωνιακού μέλους στο Abaqus 6.10-1.

2.3 Διατομή γωνιακού

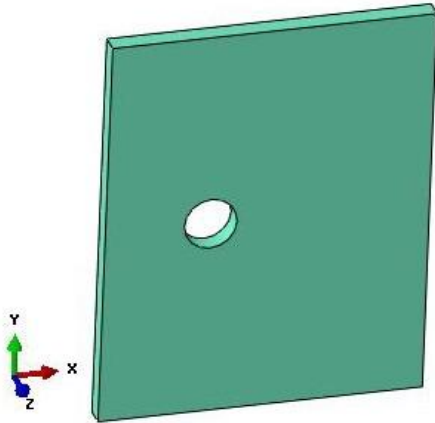
Η διατομή του γωνιακού προσομοιώνεται λεπτομερώς καθώς σχεδιάζονται και οι στρογγυλεμένες γωνίες της διατομής, χρησιμοποιώντας τις ακτίνες προσαρμογής.



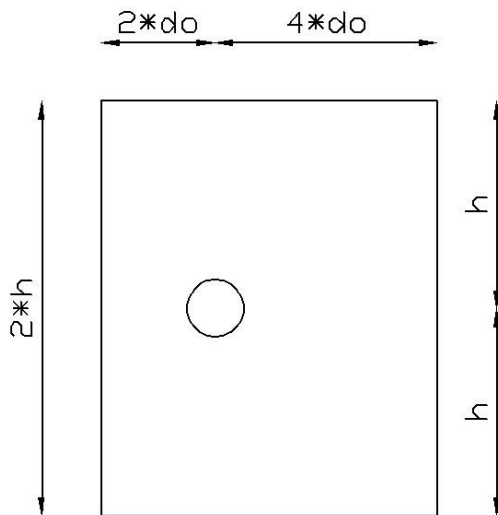
Σχήμα 2.4: Διατομή γωνιακού.

2.4 Διαστάσεις πλακών

Οι πλάκες (ελάσματα στήριξης) που διαμορφώνουν το προσομοίωμα επιλέγονται να έχουν ύψος ίσο με το διπλάσιο ύψος του αντίστοιχου γωνιακού ($h_{\text{πλ}}=2*h$), πάχος ίσο με το πάχος του αντίστοιχου γωνιακού αυξημένο κατά 2mm ($t_{\text{πλ}}=t+2$) και πλάτος περίπου ίσο με $6*d_o$ (όπου d_o η διάμετρος της οπής που αντιστοιχεί στο εκάστοτε γωνιακό). Η επιλογή των διαστάσεων της πλάκας γίνεται με κριτήριο έτσι ώστε να προηγηθεί η αστοχία του γωνιακού από την αστοχία της πλάκας.



Σχήμα 2.5: Προσομοίωση πλάκας στο Abaqus 6.10-1.



Σχήμα 2.6: Διαστάσεις πλάκας.

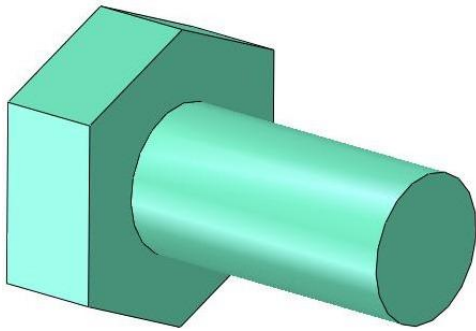
2.5 Διαστάσεις κοχλιών

Στο υπολογιστικό προσομοίωμα έχουν προσομοιωθεί ο κοχλίας που αποτελείται από τον κορμό και την κεφαλή, καθώς και τα εξαρτήματά του, τα οποία είναι, το περικόχλιο και οι δακτύλιοι. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι M12 για τις διατομές KL35x35x3, KL40x40x3, KL50x50x3,

KL60x60x3, KL41x41x4, KL51x51x4 και M20 για τις διατομές KL61x61x4, KL71x71x4 και KL81x81x4. Η ανοχή για τους κοχλίες M12 είναι $\alpha=1\text{mm}$ και η ανοχή για τους κοχλίες M20 είναι $\alpha=2\text{mm}$. Οι διαστάσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον κοχλία και τα εξαρτήματα του είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του DIN18 800.

2.5.1 Κεφαλή και κορμός κοχλία

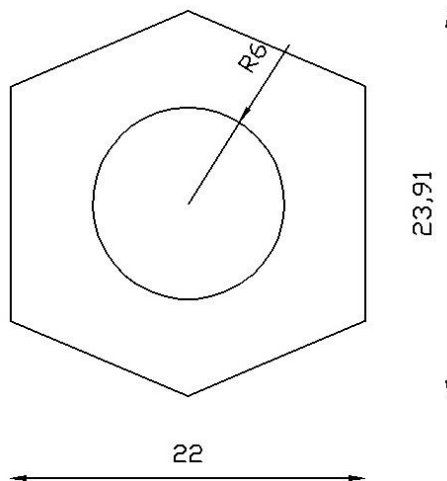
Η κεφαλή του κοχλία είναι εξαγωνική. Για κοχλίες M12 η κεφαλή έχει πάχος $t=8\text{mm}$, πλάτος $s=22\text{mm}$ και μέγιστο ύψος $e=23,91\text{mm}$. Αντίστοιχα για κοχλίες M20 η κεφαλή έχει πάχος $t=13\text{mm}$, πλάτος $s=32\text{mm}$ και μέγιστο ύψος $e=35,03\text{mm}$. Ο κορμός έχει κυκλική διατομή διαμέτρου $d=12\text{mm}$ για κοχλίες M12, ενώ για τους κοχλίες M20 η διάμετρος είναι $d=20\text{mm}$.



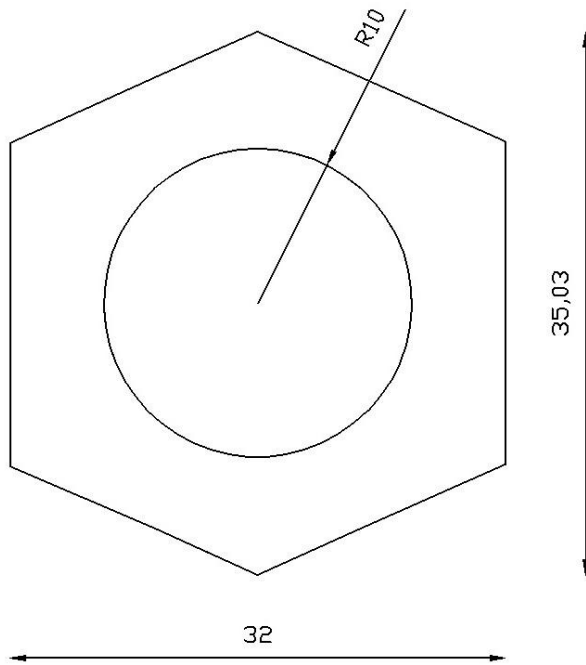
Σχήμα 2.7: Προσομοίωση κεφαλής και κορμού κοχλία στο Abaqus 6.10-1.

2.5.2 Περικόχλιο

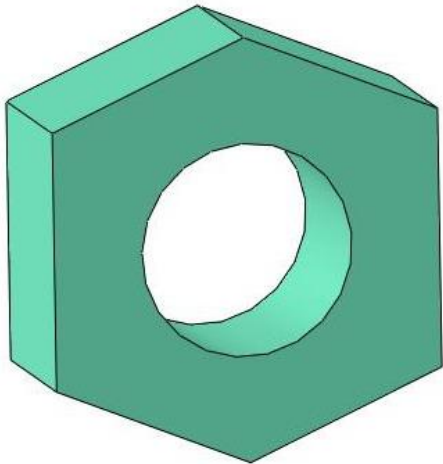
Το περικόχλιο είναι εξαγωνικό. Για κοχλίες M12 το περικόχλιο έχει πάχος $t=10\text{mm}$, πλάτος $s=22\text{mm}$, μέγιστο ύψος $e=23,91\text{mm}$ και διάμετρο οπής $R=12\text{mm}$. Αντίστοιχα για κοχλίες M20 το περικόχλιο έχει πάχος $t=16\text{mm}$, πλάτος $s=32\text{mm}$, μέγιστο ύψος $e=35,03\text{mm}$ και διάμετρο οπής $R=20\text{mm}$.



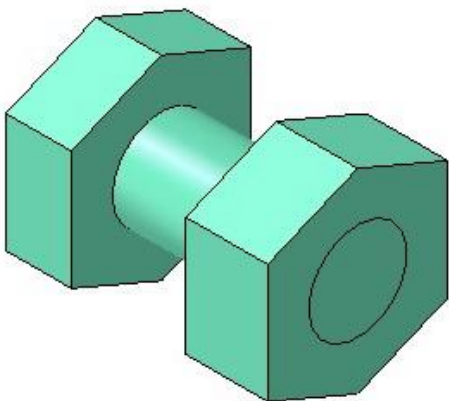
Σχήμα 2.8: Διαστάσεις περικοχλίου για κοχλίες M12.



Σχήμα 2.9: Διαστάσεις περικογλίου για κοχλίες M20.



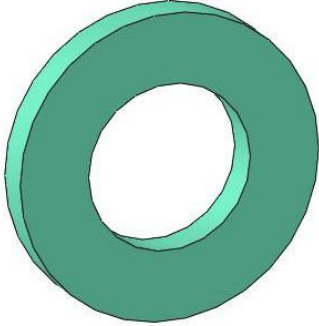
Σχήμα 2.10: Προσομοίωση περικογλίου στο Abaqus 6.10-1.



Σχήμα 2.11: Προσομοίωση κοχλίας και περικογλίου στο Abaqus 6.10-1.

2.5.3 Δακτύλιος

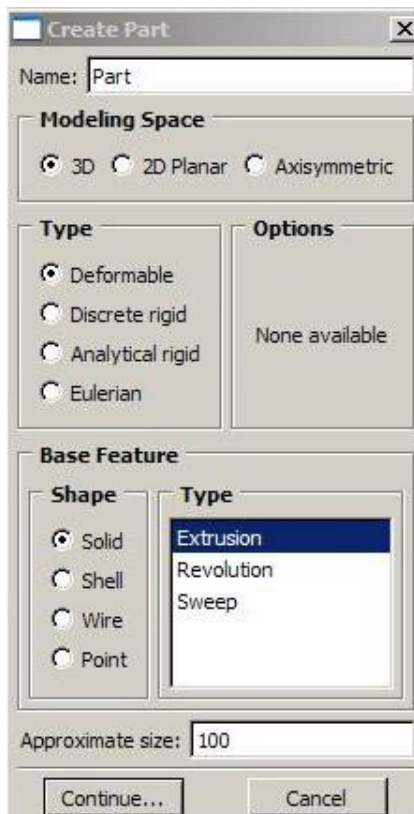
Οι δακτύλιοι παρεμβάλλονται μεταξύ του περικοχλίου και των ελασμάτων και μεταξύ των ελασμάτων και της κεφαλής του κοχλία. Για κοχλίες M12 ο δακτύλιος έχει πάχος $t=3\text{mm}$, εξωτερική διάμετρο $D_{εξ}=24\text{mm}$ και εσωτερική διάμετρο $D_{εσ}=13\text{mm}$. Αντίστοιχα για κοχλίες M20 ο δακτύλιος έχει πάχος $t=4\text{mm}$, εξωτερική διάμετρο $D_{εξ}=37\text{mm}$ και εσωτερική διάμετρο $D_{εσ}=22\text{mm}$.



Σχήμα 2.12: Προσομοίωση δακτυλίου στο Abaqus 6.10-1.

2.6 Τύπος στοιχείων προσομοίωσης

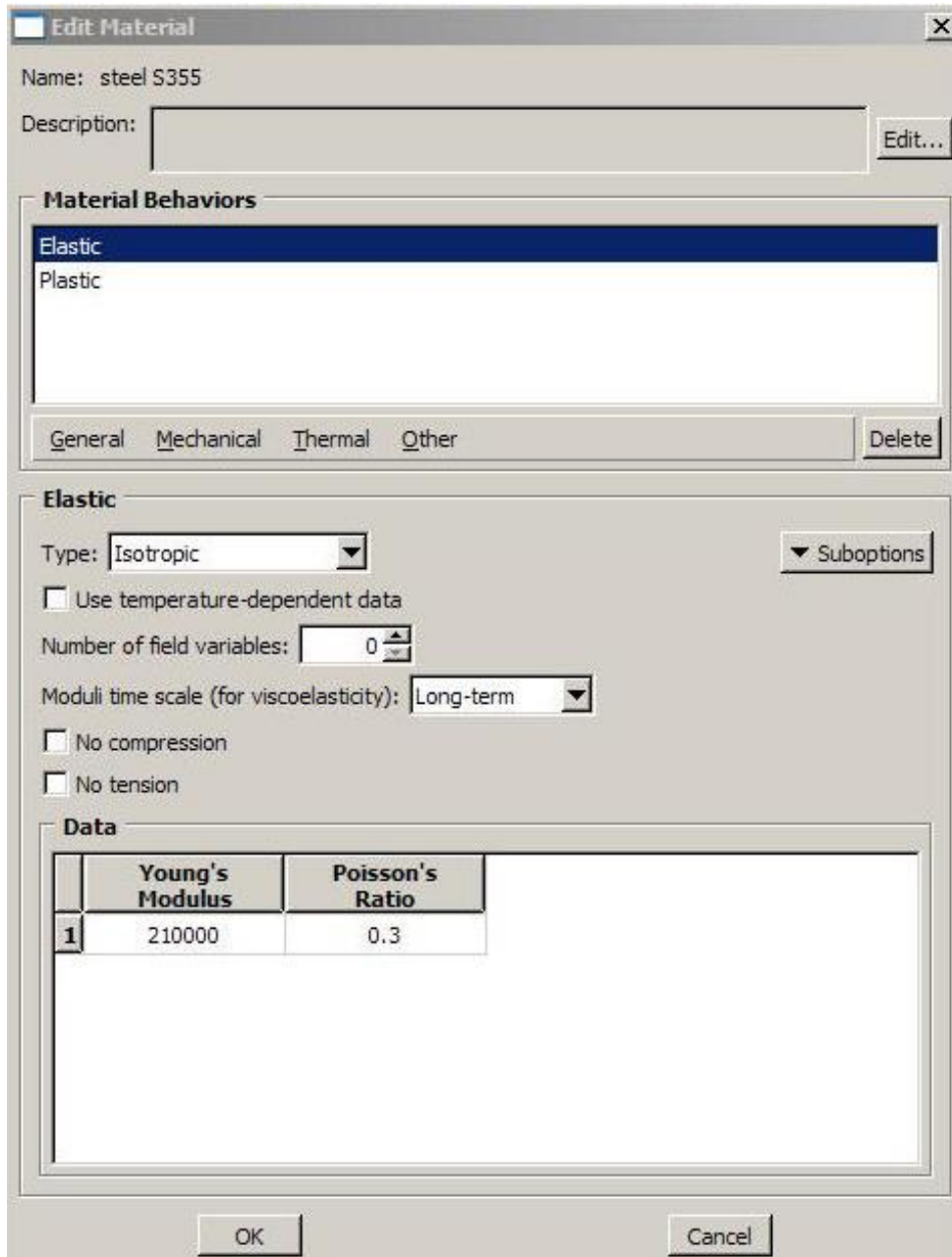
Για την προσομοίωση χρησιμοποιούνται τρισδιάστατα παραμορφώσιμα στερεά στοιχεία (τύπου 3D Deformable Solid Extrusion).



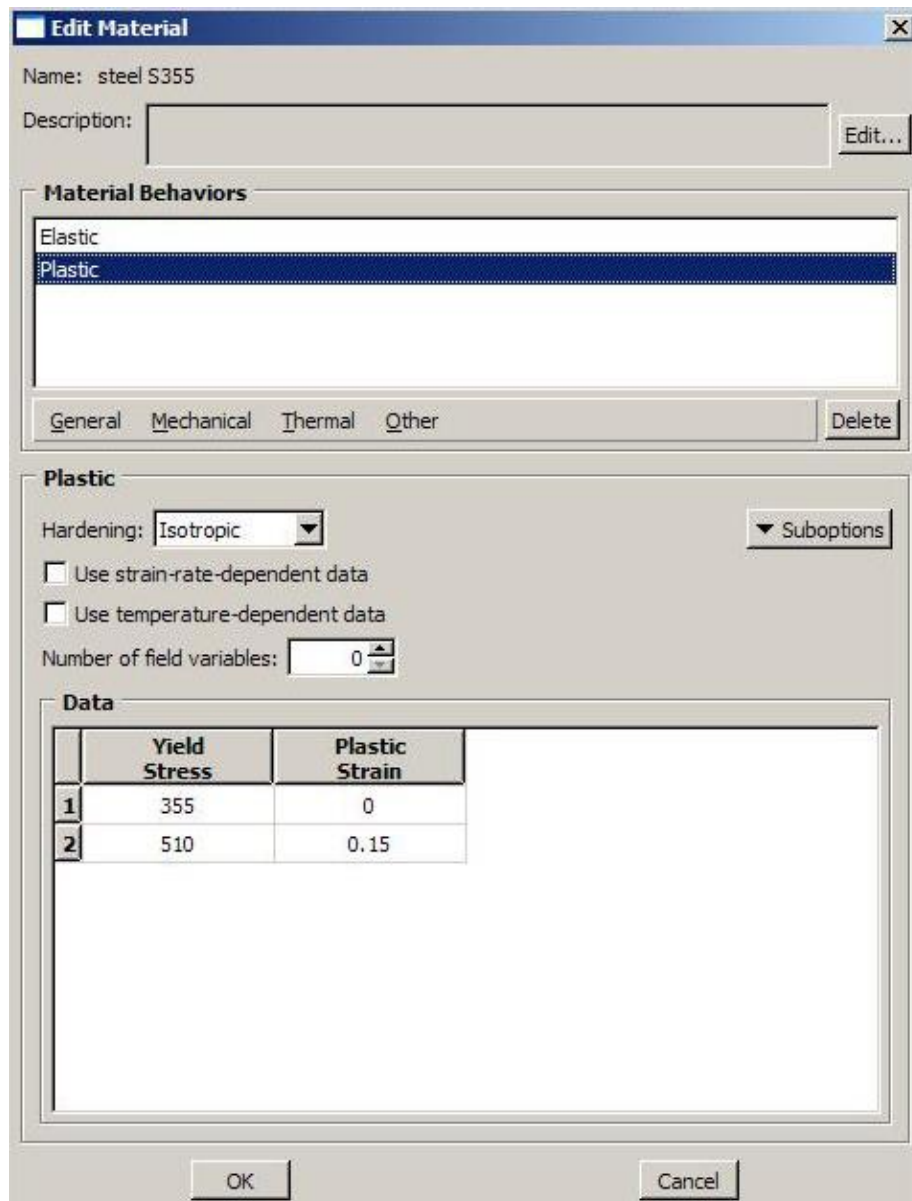
Σχήμα 2.13: Τύπος στοιχείων προσομοίωσης στο Abaqus 6.10-1.

2.7 Υλικά

Ο χάλυβας των ελασμάτων (των πλακών και των γωνιακών) είναι ποιότητας S355 με όριο διαρροής $f_y=355\text{MPa}$ και αντοχή θραύσης $f_u=510\text{MPa}$. Για το γωνιακό KL40x40x3 εξετάζεται και η περίπτωση που ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 MC με όριο διαρροής $f_y=355\text{MPa}$ και αντοχή θραύσης $f_u=430\text{MPa}$. Αντίστοιχα ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8 με όριο διαρροής $f_{yb}=640\text{MPa}$ και εφελκυστική αντοχή $f_{ub}=800\text{MPa}$. Το μέτρο ελαστικότητας λαμβάνεται $E=210000\text{MPa}$, το μέτρο διάτμησης $G=81000\text{MPa}$ και ο λόγος του poisson $\nu=0,3$.



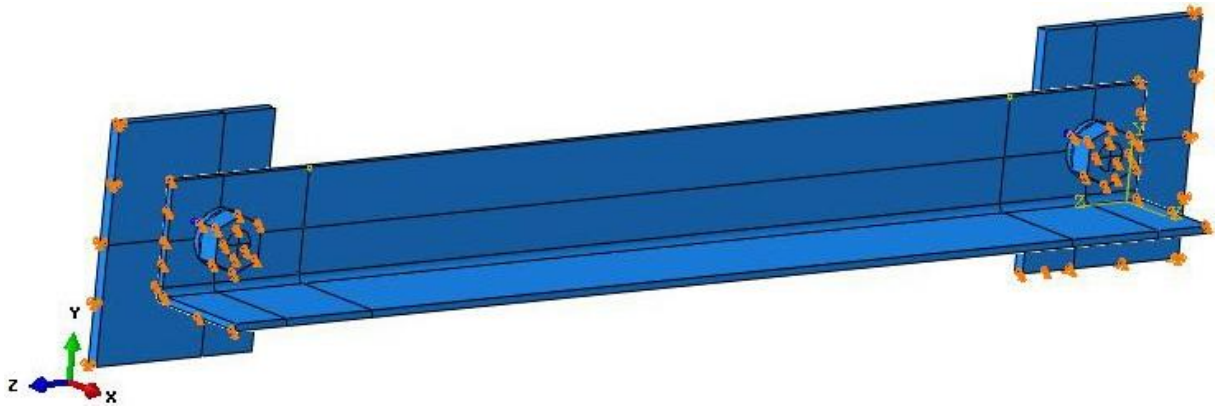
Σχήμα 2.14: Ιδιότητες υλικού S355 στο Abaqus 6.10-1.



Σχήμα 2.15: Ιδιότητες υλικού S355 στο Abaqus 6.10-1.

2.8 Συνοριακές συνθήκες

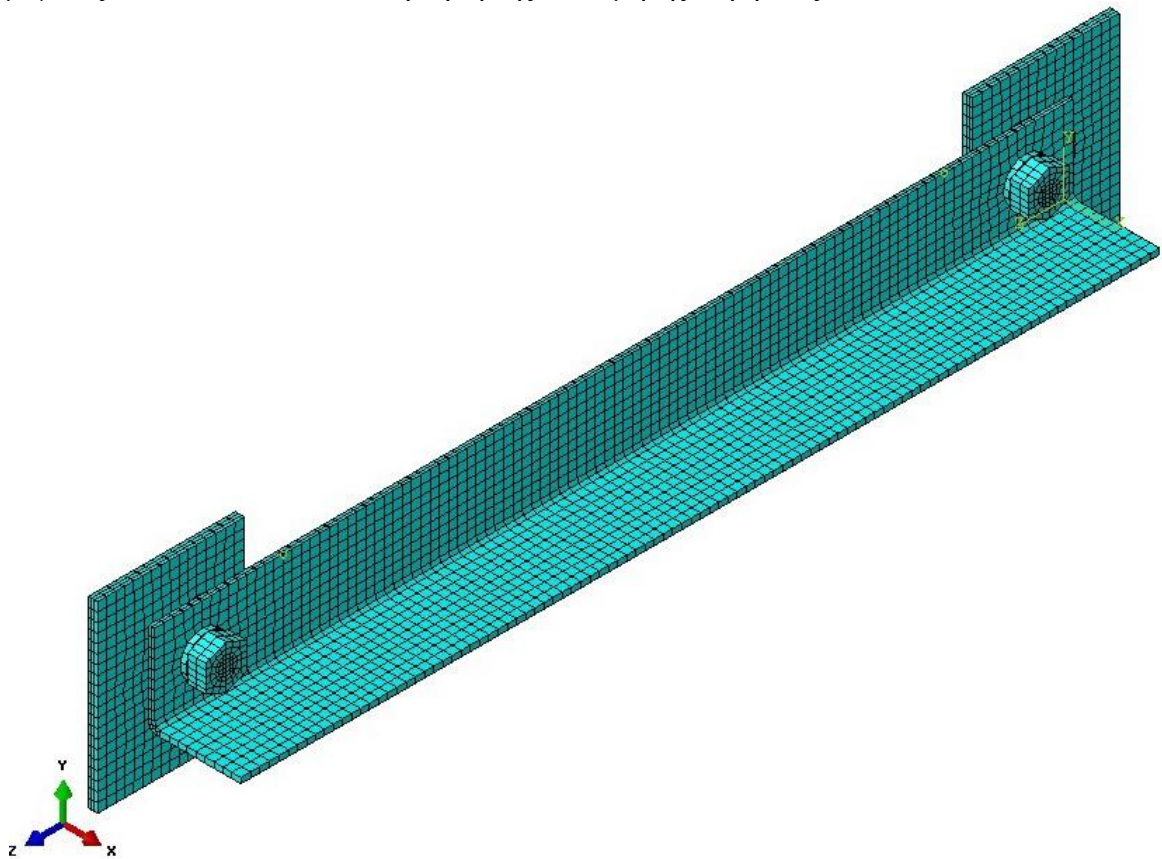
Η επιβολή του εφελκυσμού στο υπολογιστικό προσομοίωμα γίνεται με τον ακόλουθο τρόπο: Πακτώνεται το αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας και επιβάλλεται μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z και με κατεύθυνση τον αρνητικό άξονα z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας του προσομοιώματος. Για τη σωστή λειτουργία του προσομοιώματος δεσμεύονται επιπλέον οι μετακινήσεις κατά x και y του δεξιού και του αριστερού άκρου του γωνιακού, της κάτω πλευράς της αριστερής πλάκας (στην οποία επιβάλλεται η μετακίνηση) και των άκρων των κοχλιών. Η επιβολή της θλίψης στο υπολογιστικό ομοίωμα γίνεται με τον ίδιο τρόπο με τη διαφορά ότι επιβάλλεται μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z και με κατεύθυνση τον θετικό άξονα z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας του προσομοιώματος.



Σχήμα 2.16: Επιφάνειες στις οποίες εφαρμόζονται συνοριακές συνθήκες στο Abaqus 6.10-1.

2.9 Διακριτοποίηση

Η διακριτοποίηση του προσομοιώματος γίνεται με τρισδιάστατα εξαεδρικά στοιχεία με μέγιστη διάσταση 5mm. Πύκνωση του καννάβου πραγματοποιείται γύρω από τις οπές. Για το μέγεθος που πρέπει να έχουν τα πεπερασμένα στοιχεία δεν υπάρχει κανόνας. Το προσομοίωμα διακριτοποιείται σε πεπερασμένα στοιχεία, το μέγεθος των οποίων είναι συνάρτηση της επιθυμητής ακρίβειας.



Σχήμα 2.17: Διακριτοποίηση του προσομοιώματος στο Abaqus 6.10-1.

3 Αποτελέσματα ανάλυσης για εφελκυσμό

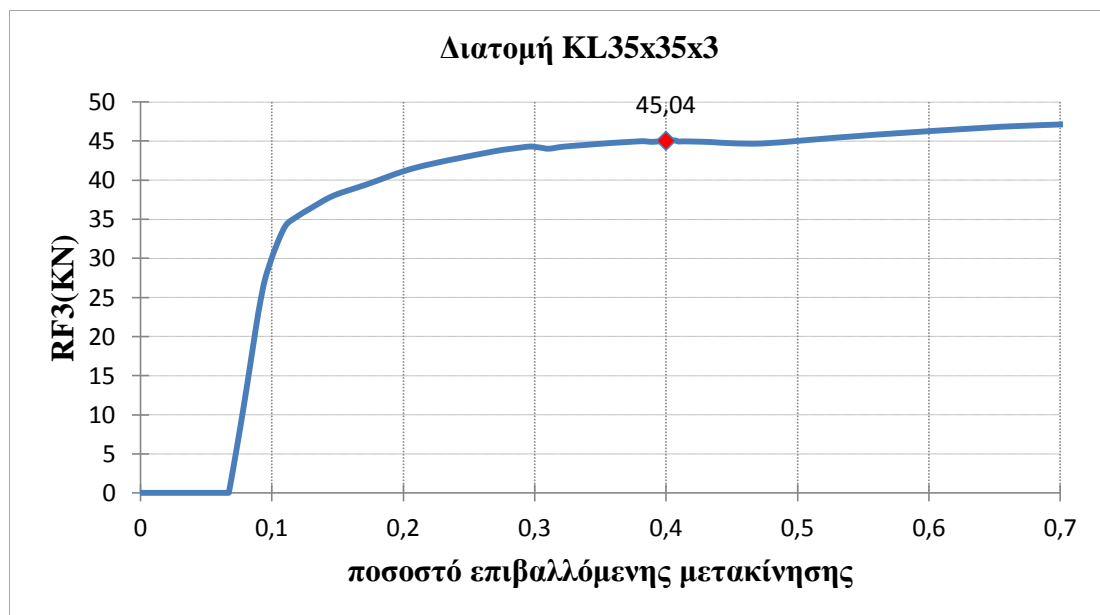
3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται για κάθε διατομή γωνιακού που εξετάζουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης του προσομοιώματος στο Abaqus 6.10-1 για εφελκυσμό. Παρατίθενται τα διαγράμματα αντίδρασης στην πάκτωση-μετακίνησης, καθώς και κατανομές των αναπτυσσόμενων τάσεων στο εκάστοτε γωνιακό.

3.2 Γωνιακό KL35x35x3 σε εφελκυσμό

Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL35x35x3 μήκους $L=0,50\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\pi\lambda}=70\text{mm}$, πλάτους $b_{\pi\lambda}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\pi\lambda}=5\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

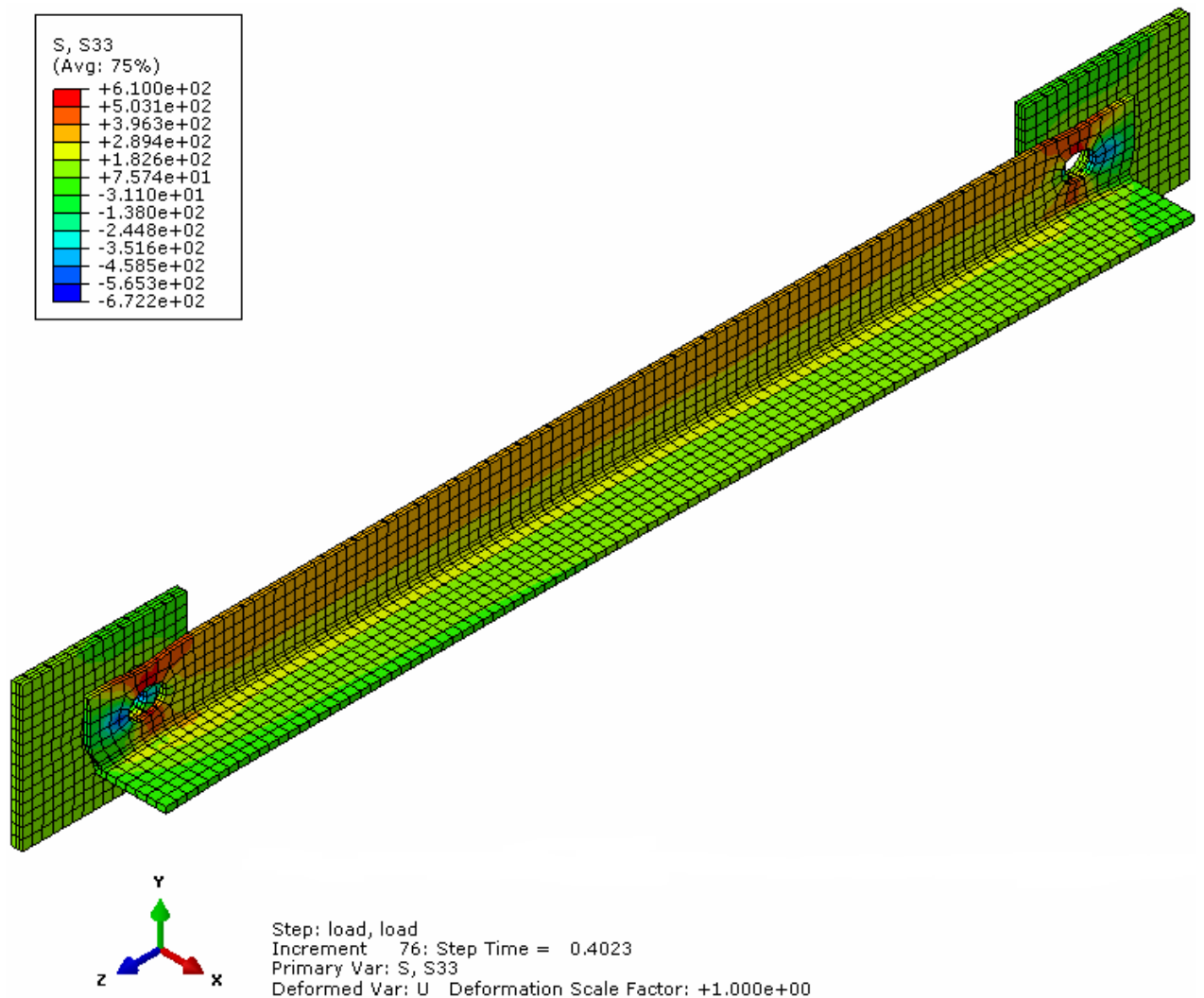
Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-30\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 70% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (21mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 47 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 40% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (όπου αρχίζει να σταθεροποιείται η κλίση του διαγράμματος αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης-ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης) και ισούται με $RF3=45,04\text{KN}$.



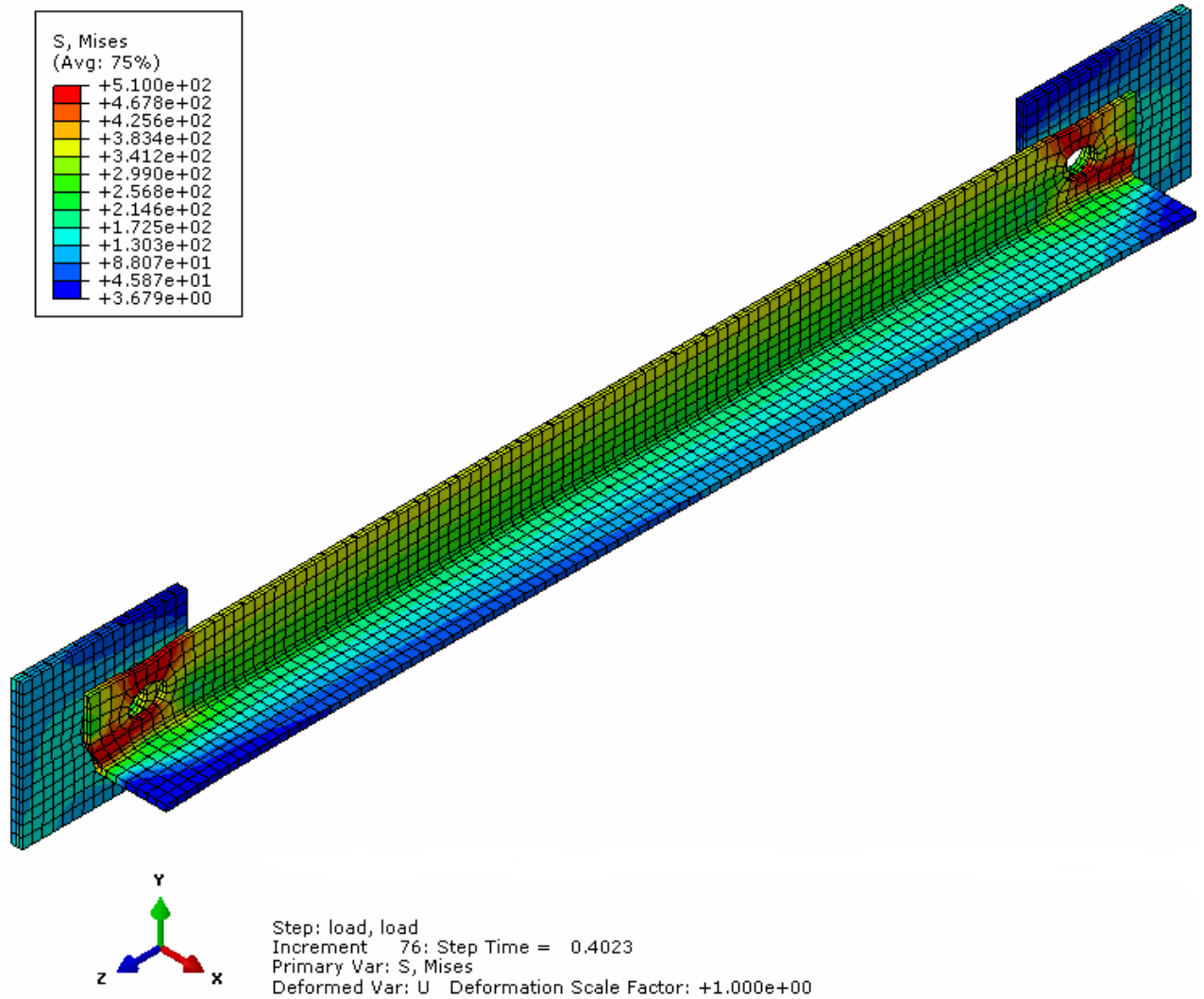
Σχήμα 3.1: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL35x35x3.

Στο παραπάνω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 6,7% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.

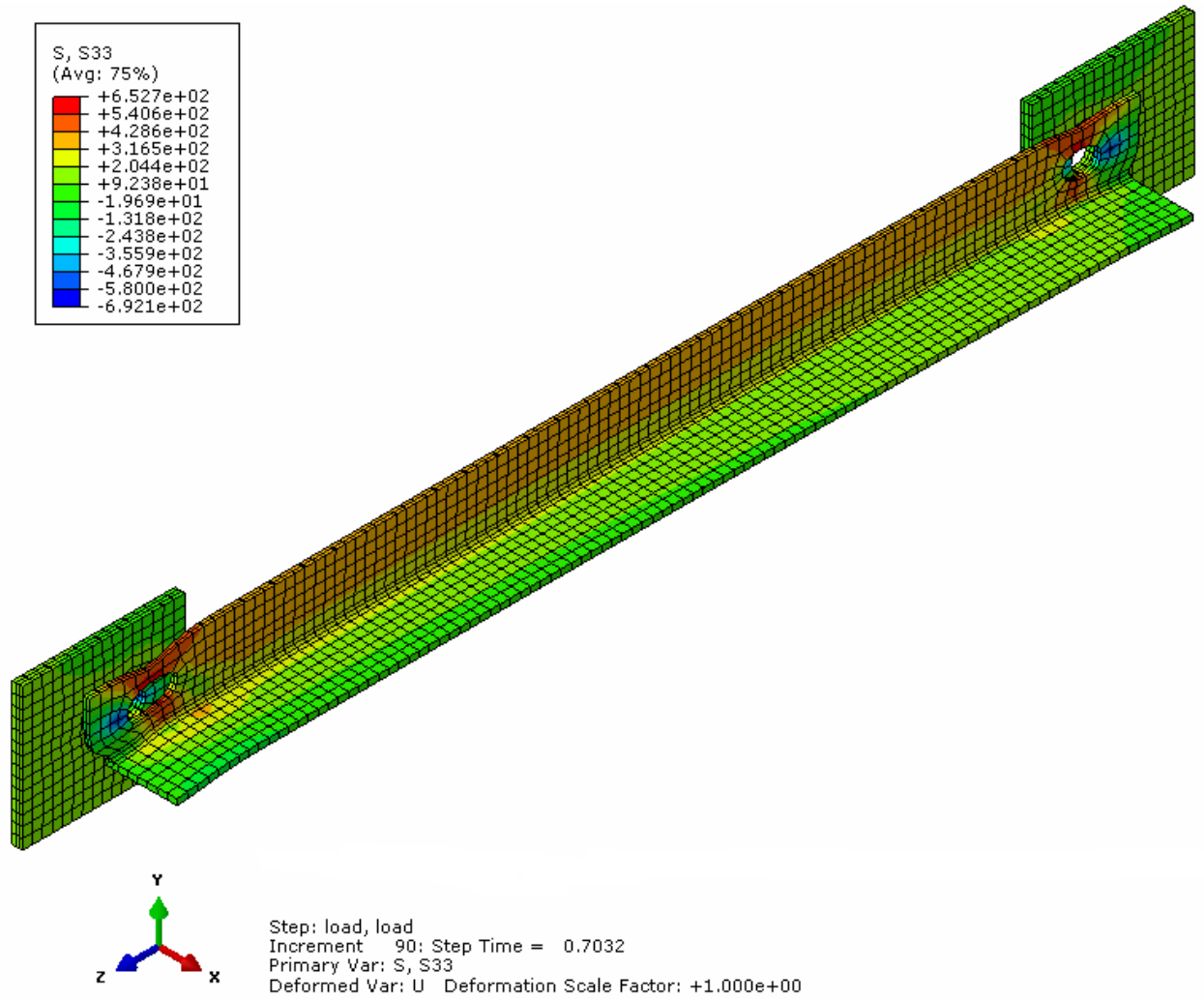
Στις παρακάτω εικόνες που απεικονίζονται οι κατανομές των τάσεων, έχουν αφαιρεθεί οι κοιλίες ώστε να υπάρχει καλύτερη εποπτεία των αναπτυσσόμενων τάσεων γύρω από τις οπές.



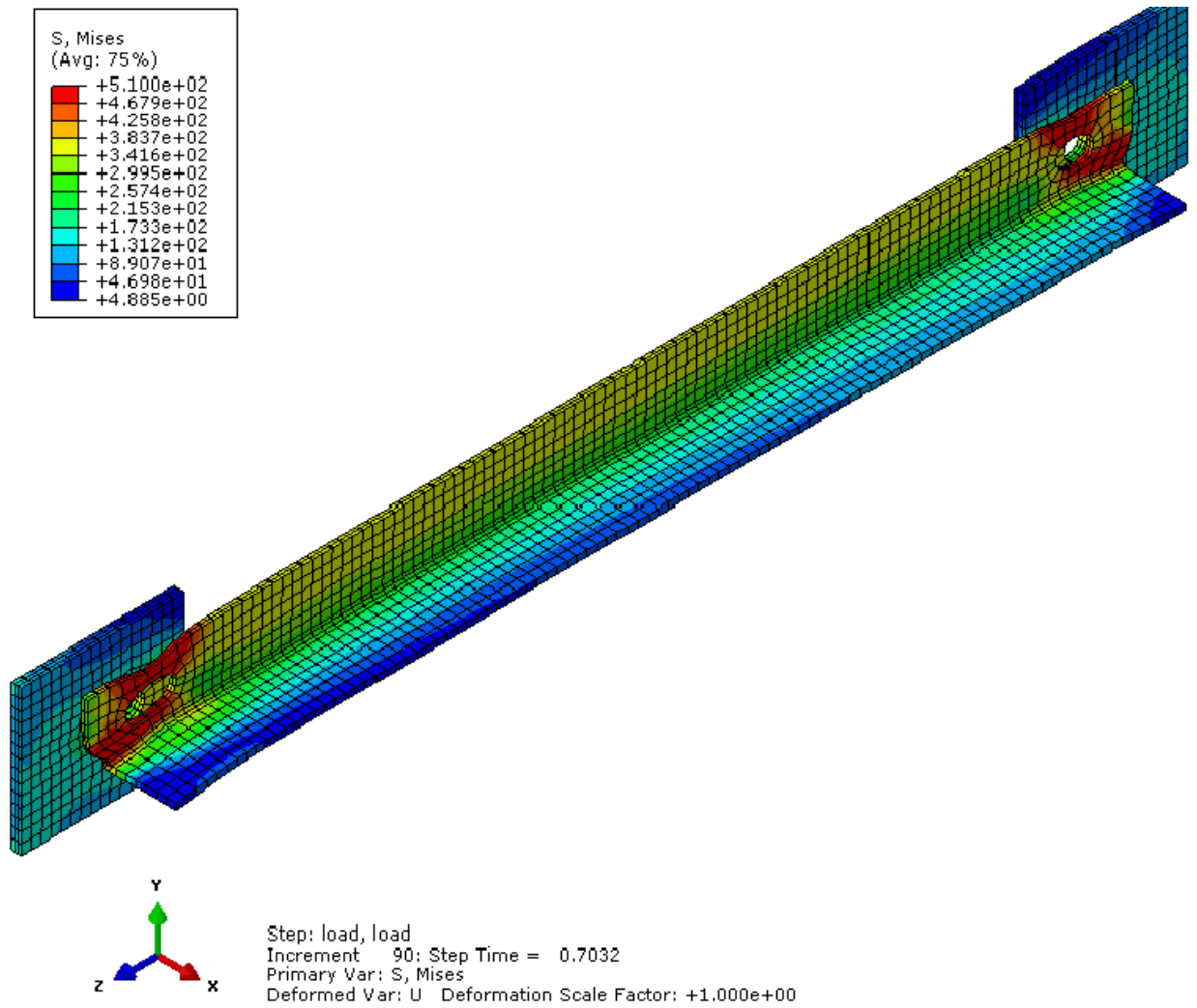
Σχήμα 3.2: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL35x35x3 για μετακίνηση $u_3=-12\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (40% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 3.3: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL35x35x3 για μετακίνηση $u_3=-12\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (40% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 3.4: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL35x35x3 για μετακίνηση $u_3=-21\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (70% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 3.5: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL35x35x3 για μετακίνηση $u_3=-21\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (70% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

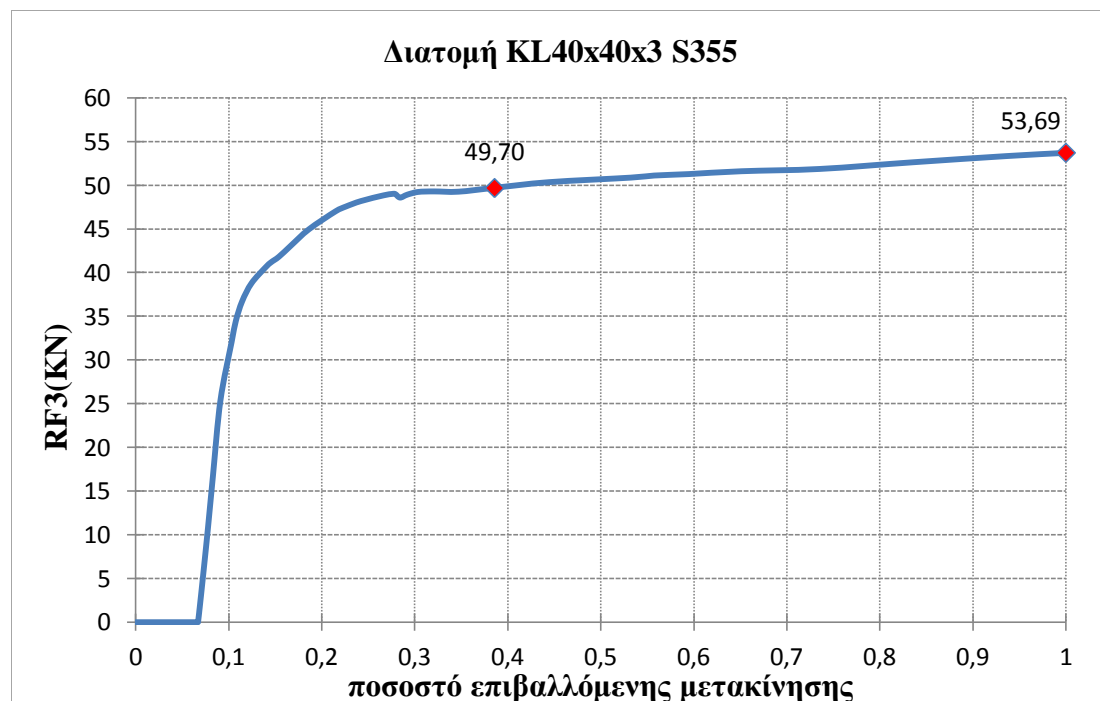
3.3 Γωνιακό KL40x40x3 σε εφελκυσμό

3.3.1 Γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 σε εφελκυσμό

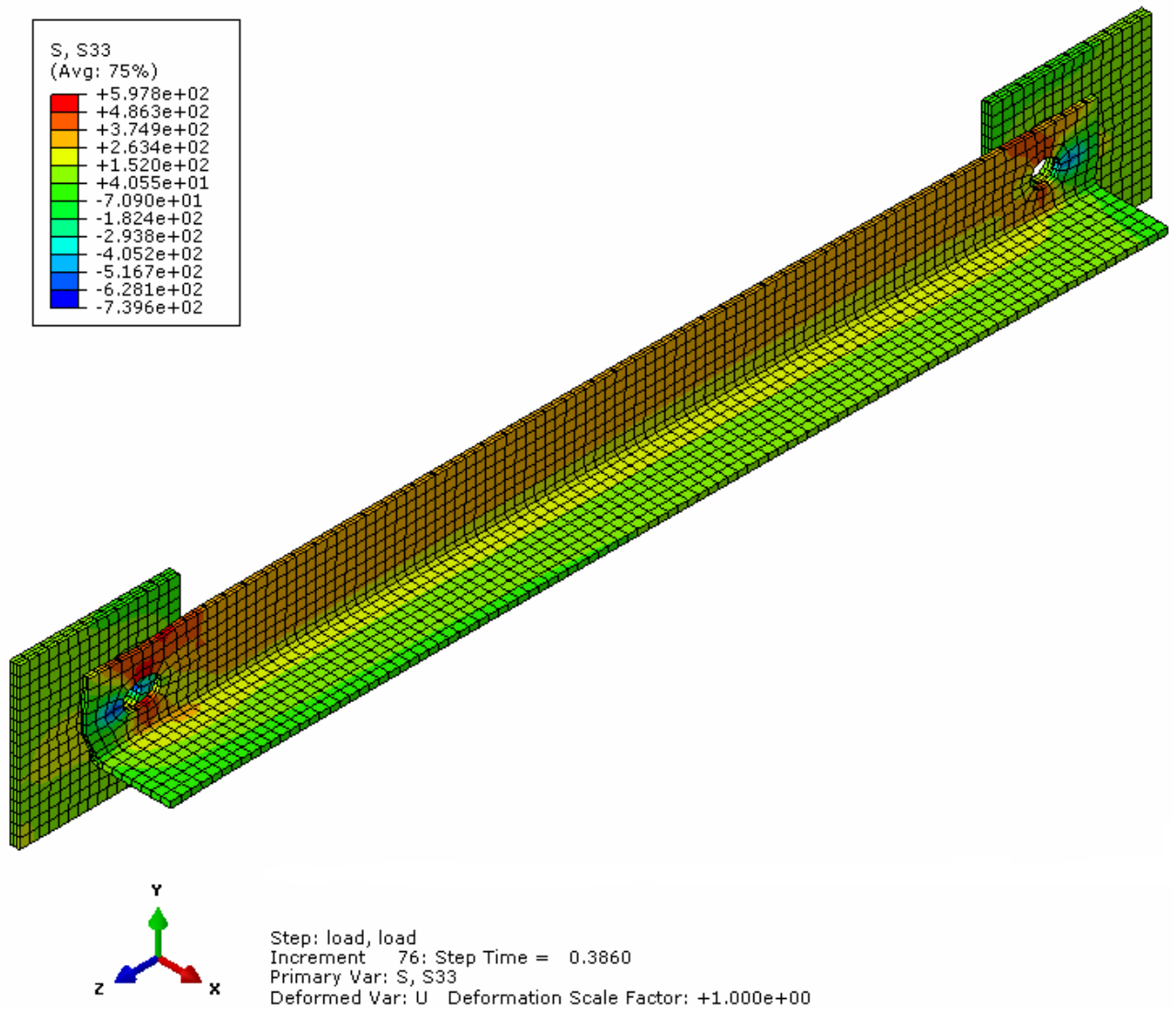
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL40x40x3 μήκους $L=0,50\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\pi\lambda}=80\text{mm}$, πλάτους $b_{\pi\lambda}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\pi\lambda}=5\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-30\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (30mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 53,69 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 38,6% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (11,60mm), όπου αρχίζει να σταθεροποιείται η κλίση του διαγράμματος αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης-ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης και ισούται με $RF3=49,70\text{ KN}$.

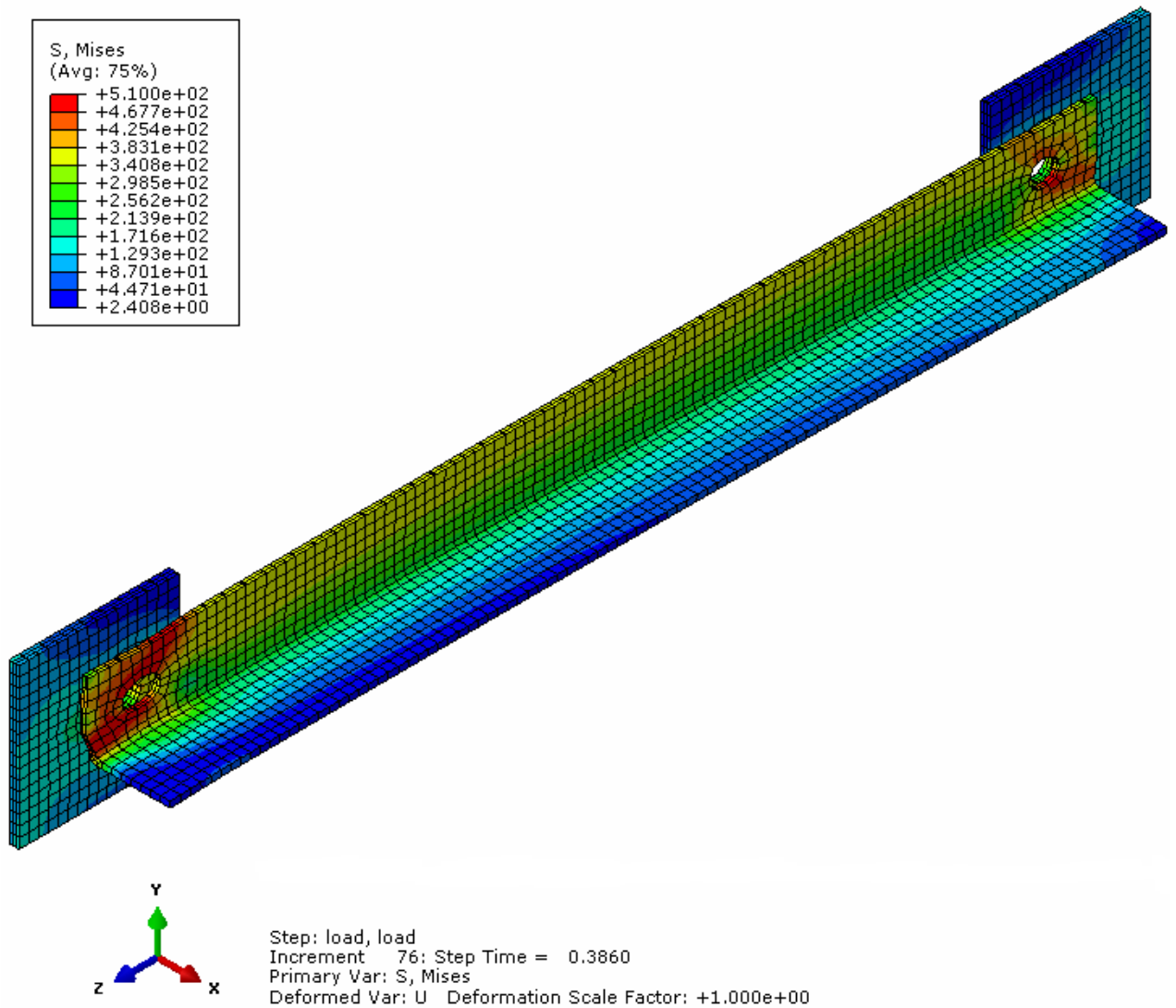
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 6,7% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



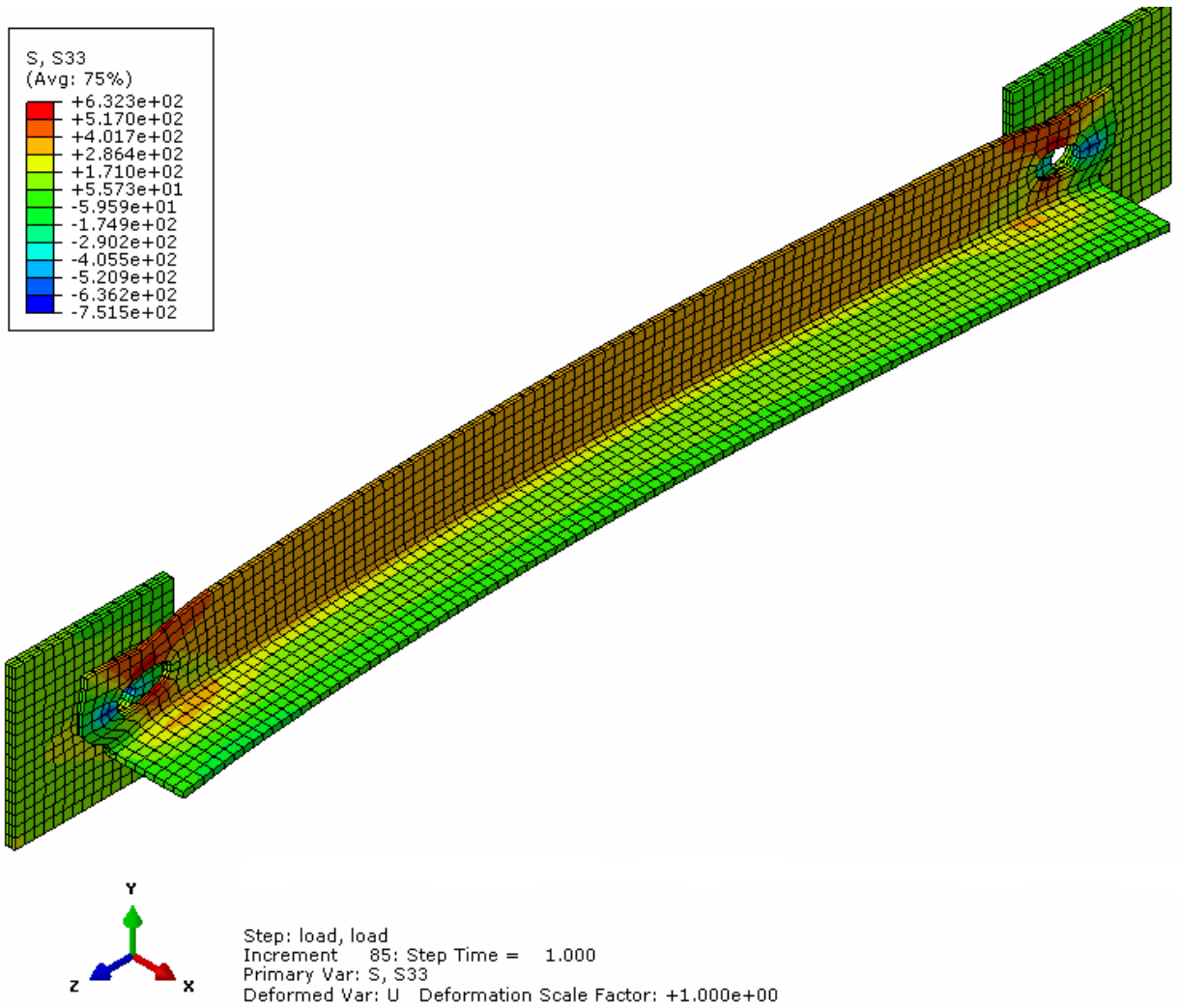
Σχήμα 3.6: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355.



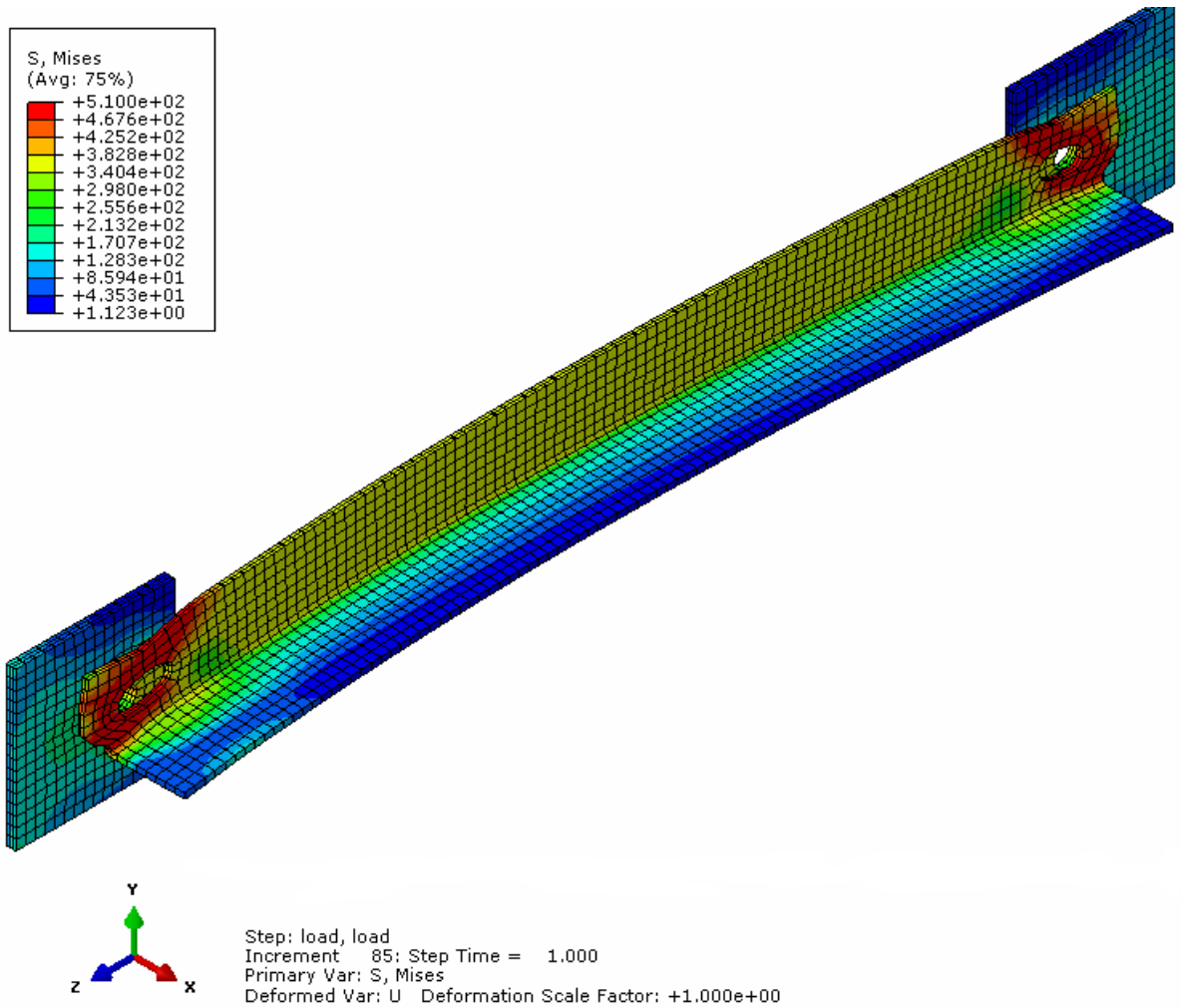
Σχήμα 3.7: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 για μετακίνηση $u_3=-11,60\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (38,6% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 3.8: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 για μετακίνηση $u_3=-11,60\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (38,6% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 3.9: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 για μετακίνηση $u_3=-30\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (100% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



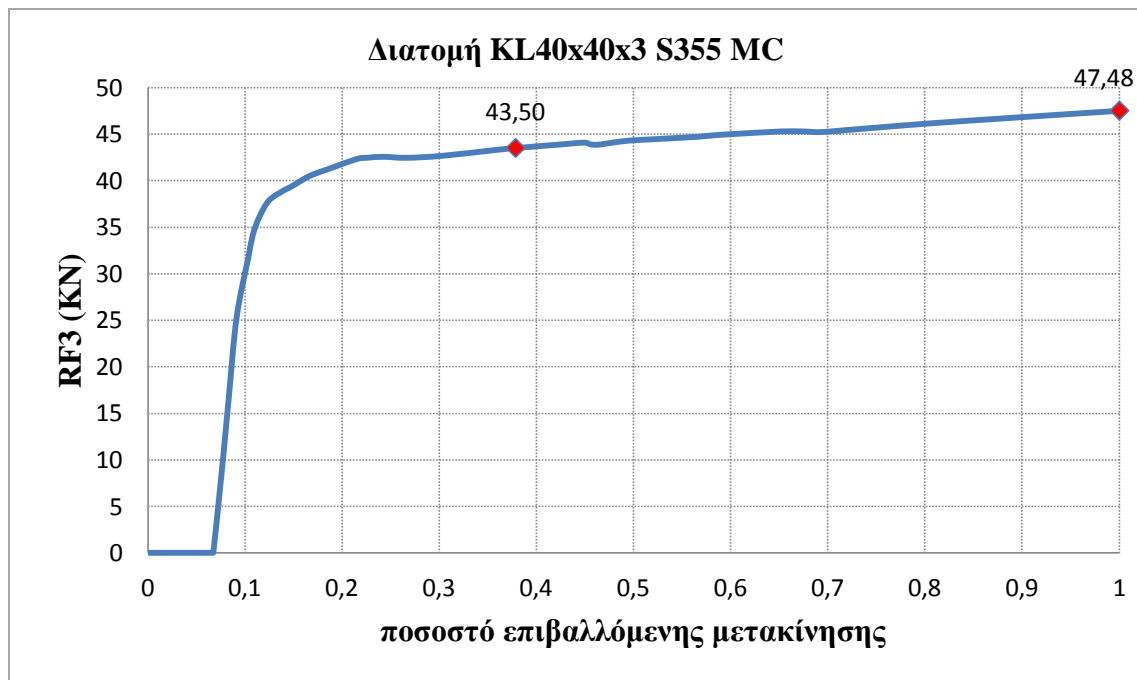
Σχήμα 3.10: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 για μετακίνηση $u_3=-30\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (100% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

3.3.2 Γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 MC σε εφελκυσμό

Το προσομοίωμα είναι ακριβώς το ίδιο με πριν με τη μόνη διαφορά ότι ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 MC με όριο διαρροής $f_y=355\text{MPa}$ και αντοχή θραύσης $f_u=430\text{MPa}$.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-30\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (30mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 47,52 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 38,6% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (11,60mm), όπου αρχίζει να σταθεροποιείται η κλίση του διαγράμματος αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης-ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης και ισούται με $RF3=43,50\text{KN}$. Επομένως λόγω της μείωσης της αντοχής θραύσης του χάλυβα των ελασμάτων, παρατηρείται μείωση της εφελκυστικής αντοχής του γωνιακού.

Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 6,7% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



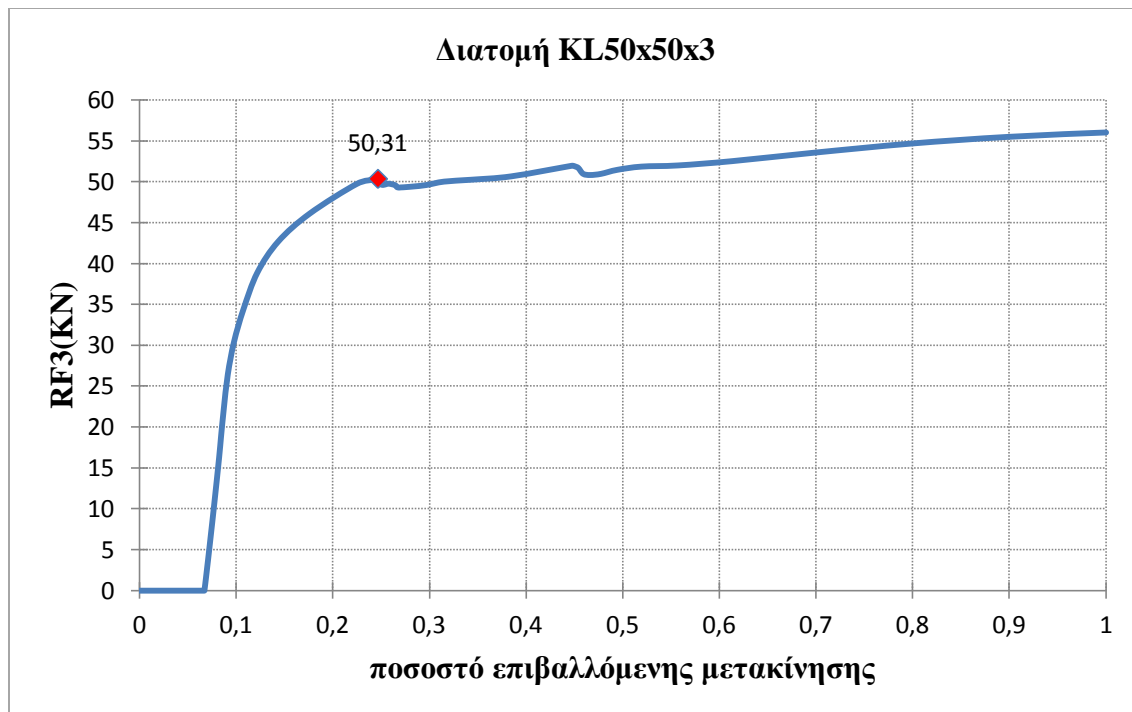
Σχήμα 3.11: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 MC.

3.4 Γωνιακό KL50x50x3 σε εφελκυσμό

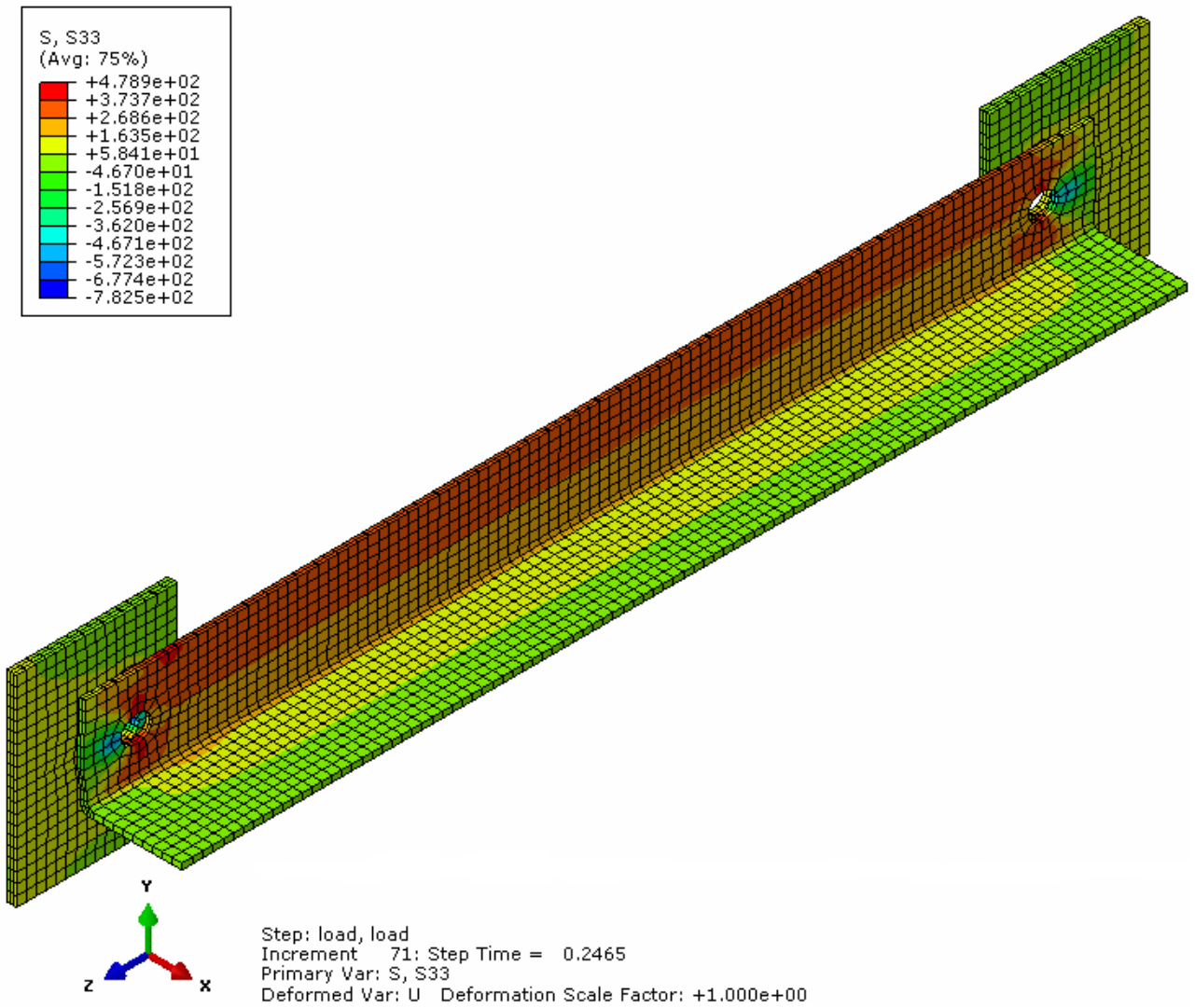
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL50x50x3 μήκους $L=0,50\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=100\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=5\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-30\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (30mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 56 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 24,65% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (7,40mm), όπου αρχίζει να σταθεροποιείται η κλίση του διαγράμματος αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης-ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης και ισούται με $RF3=50,31\text{KN}$.

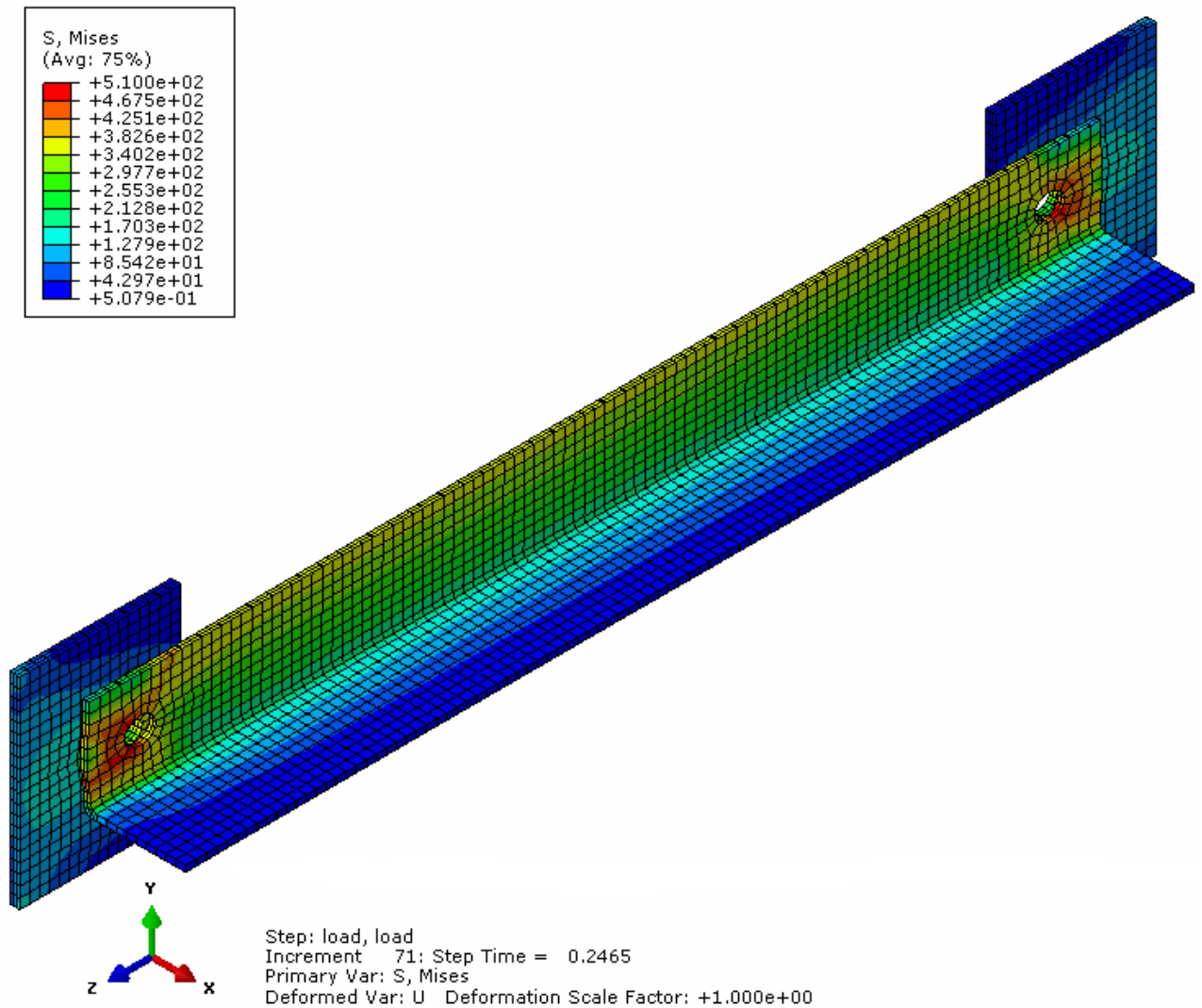
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 6,7% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 3.12: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL50x50x3.



Σχήμα 3.13: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL50x50x3 για μετακίνηση $u_3 = -7,40\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (24,65% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



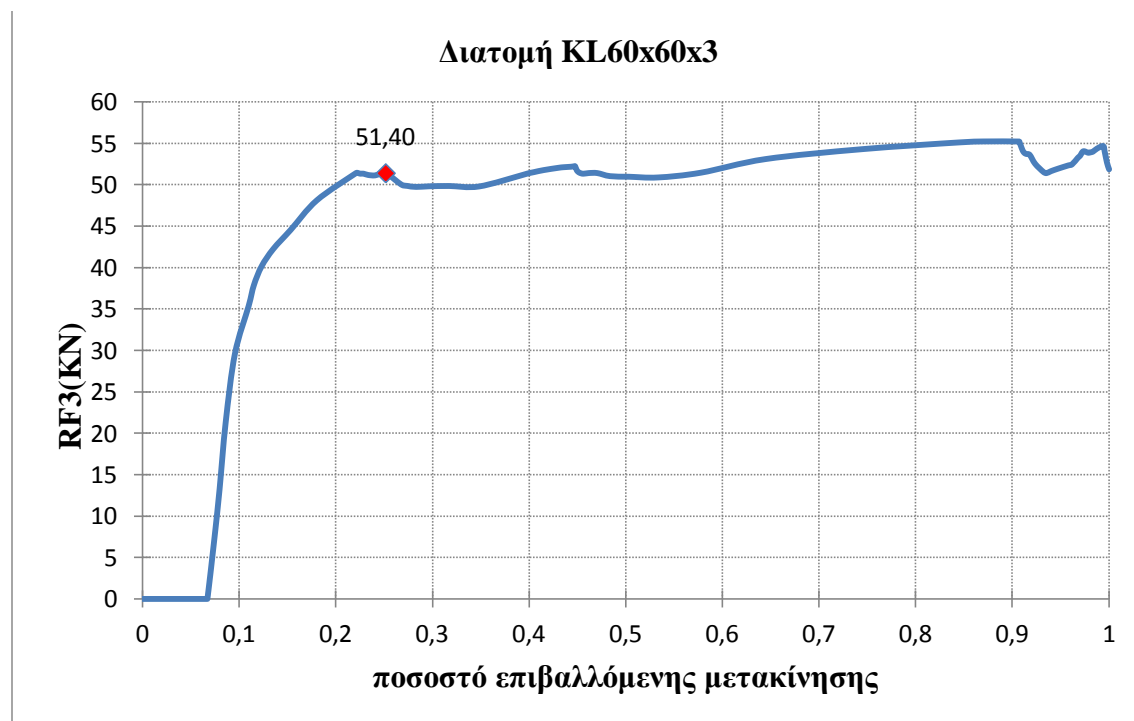
Σχήμα 3.14: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL50x50x3 για μετακίνηση $u_3 = -7,40\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (24,65% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

3.5 Γωνιακό KL60x60x3 σε εφελκυσμό

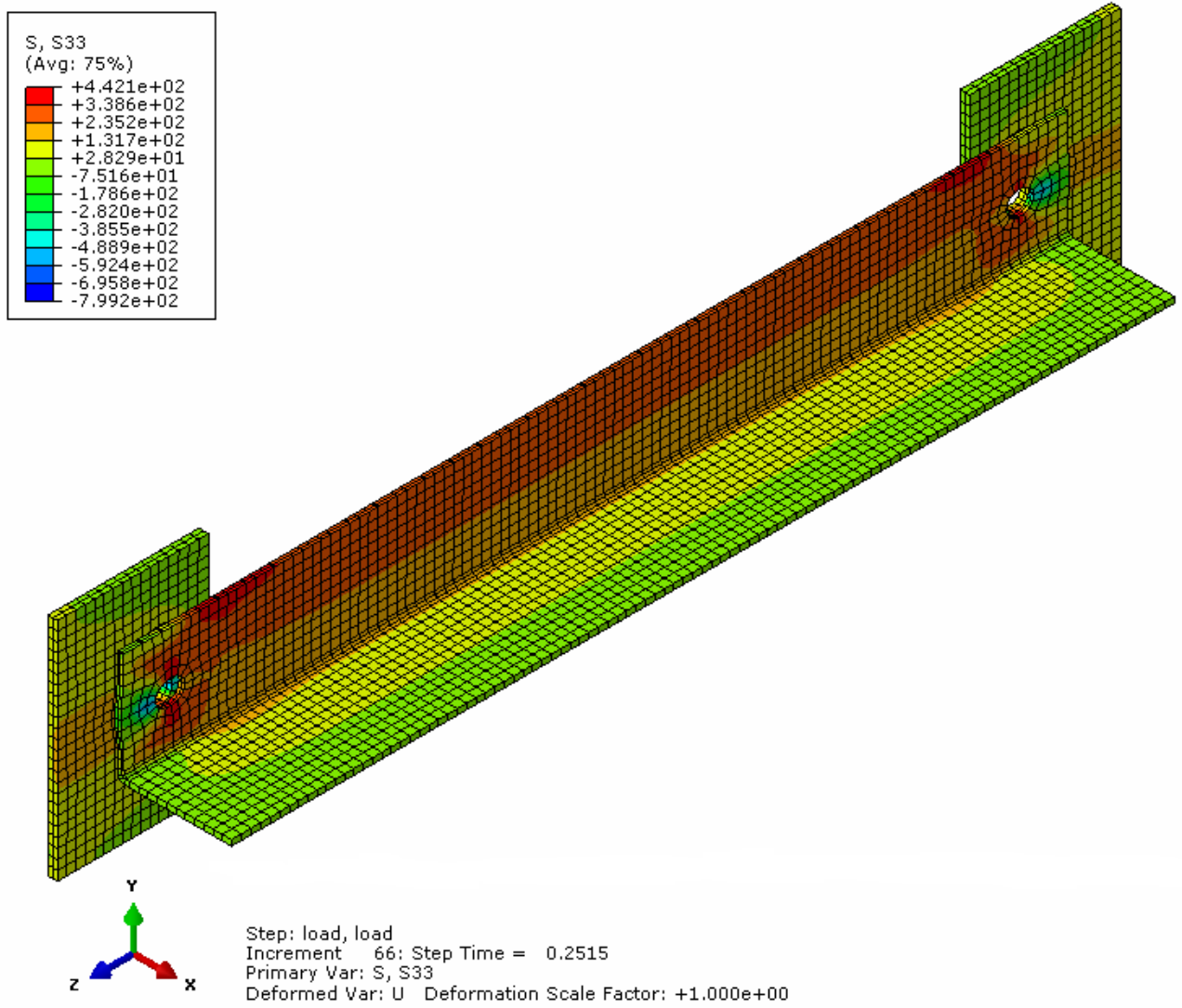
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL60x60x3 μήκους $L=0,50\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=120\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=5\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-30\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (30mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 51,88 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 25% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (7,50mm), όπου αρχίζει να σταθεροποιείται η κλίση του διαγράμματος αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης-ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης και ισούται με $\text{RF3}=51,40\text{ KN}$.

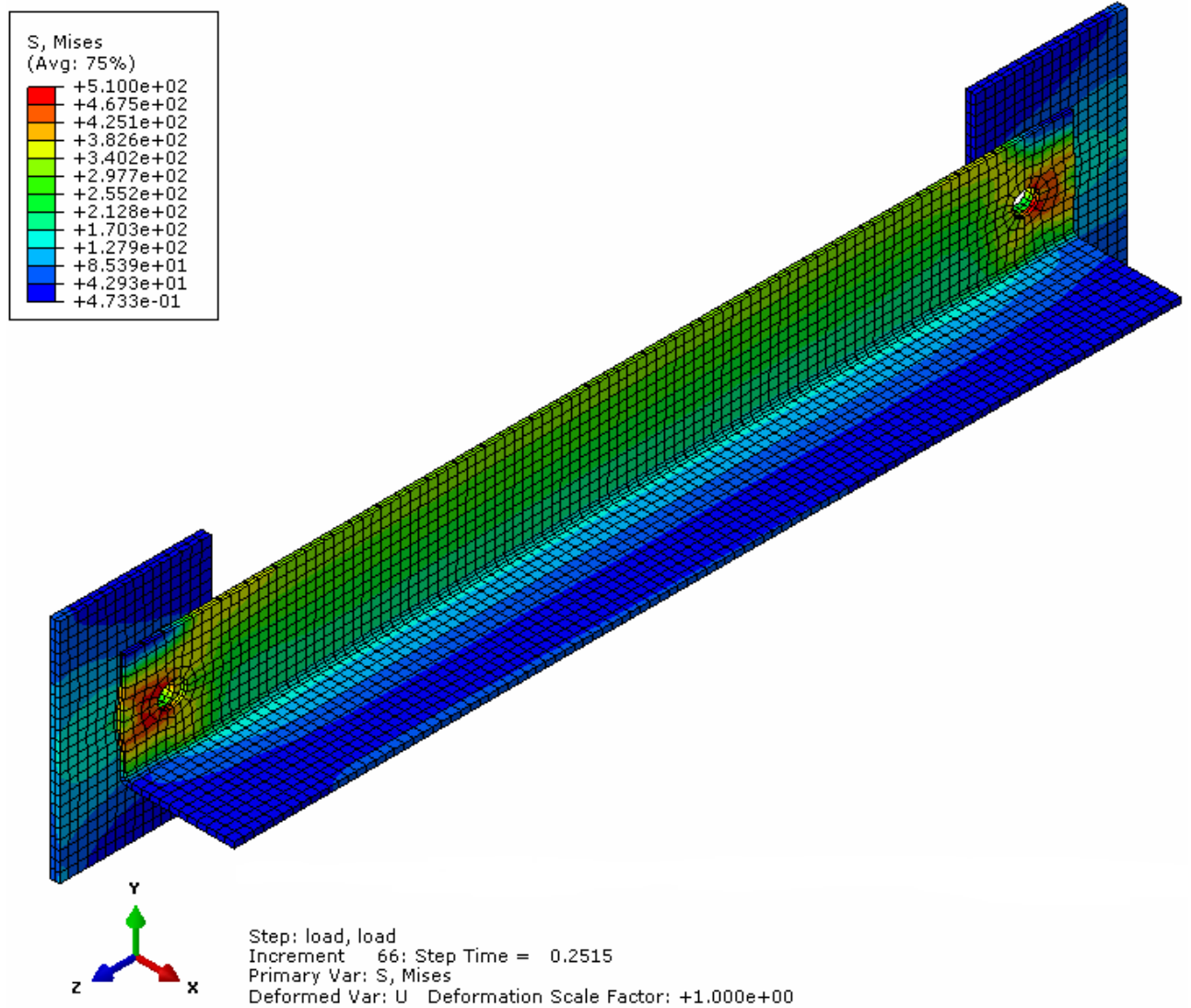
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 6,7% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 3.15: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL60x60x3.



Σχήμα 3.16: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL60x60x3 για μετακίνηση $u_3 = -7,50\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (25% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



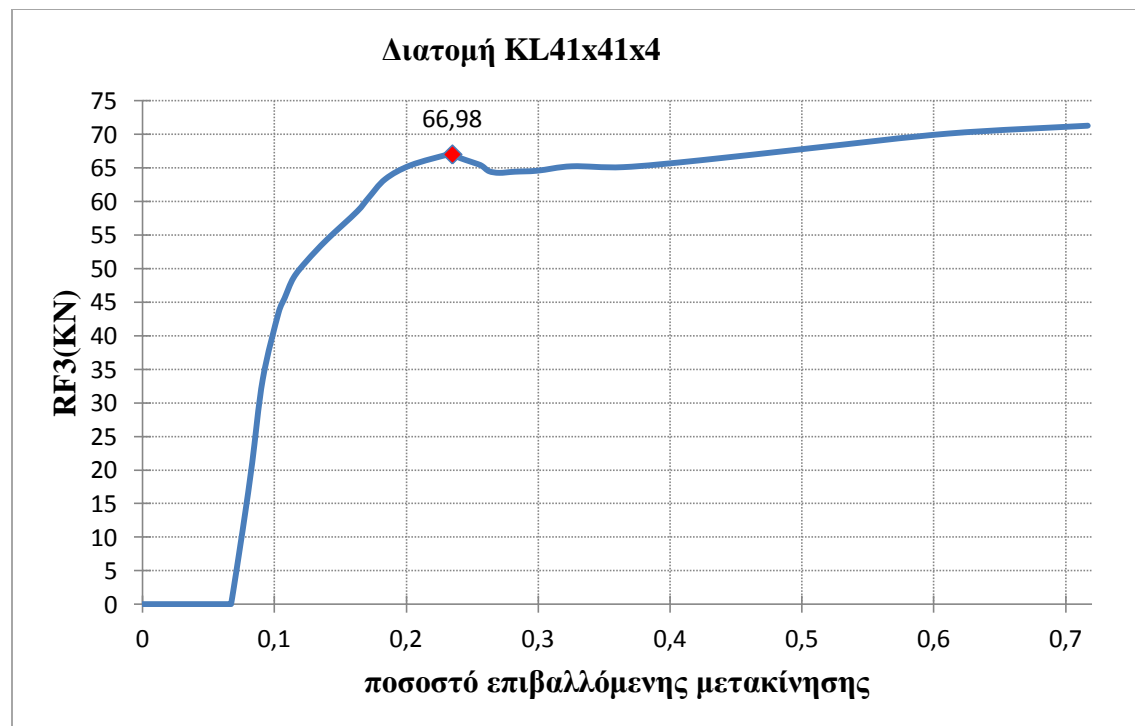
Σχήμα 3.17: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL60x60x3 για μετακίνηση $u_3=-7,50\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (25% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

3.6 Γωνιακό KL41x41x4 σε εφελκυσμό

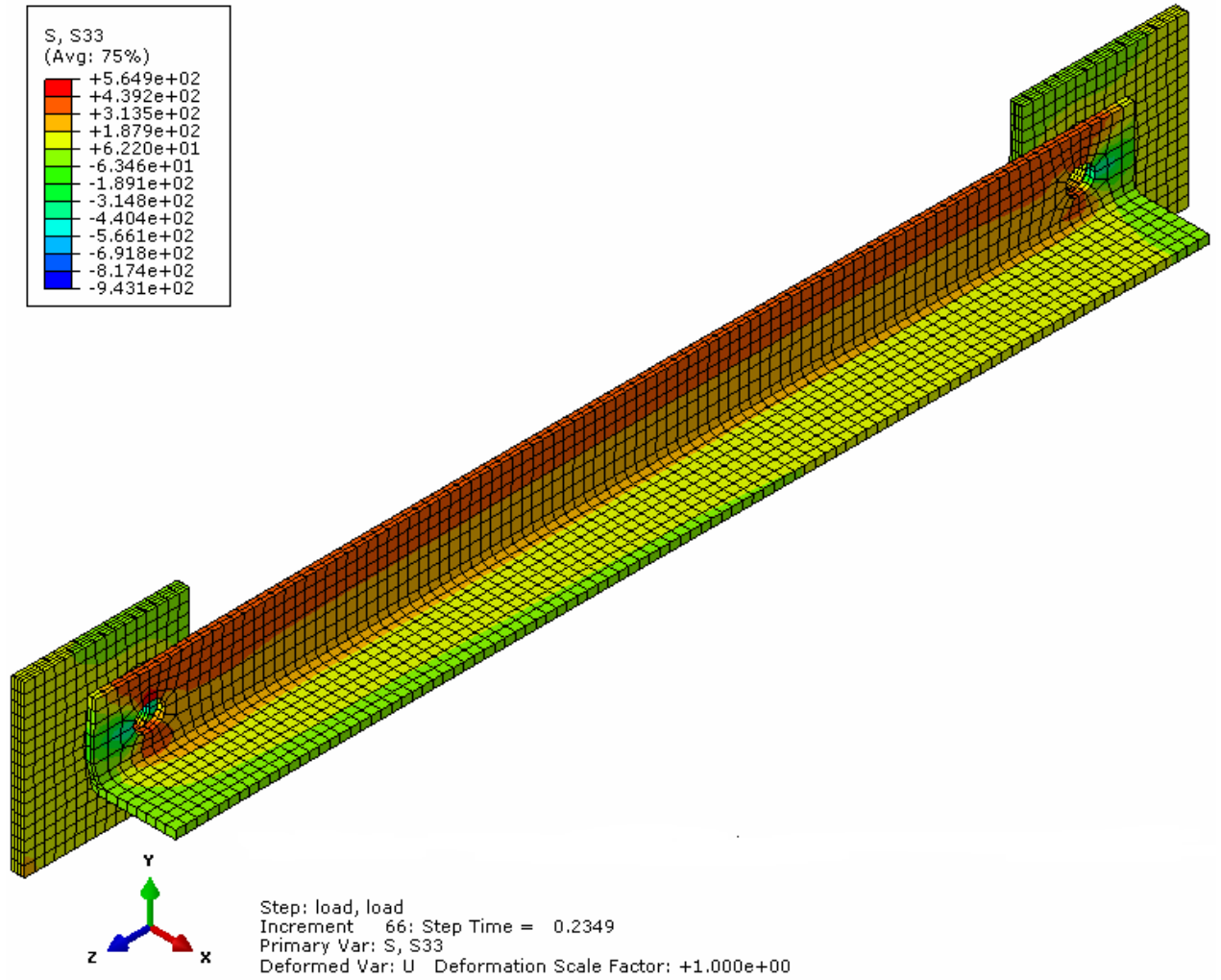
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL41x41x4 μήκους $L=0,50\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=80\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-30\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 71,7% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (21,51mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 71,27 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 23,5% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (7,00mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=66,98\text{ KN}$.

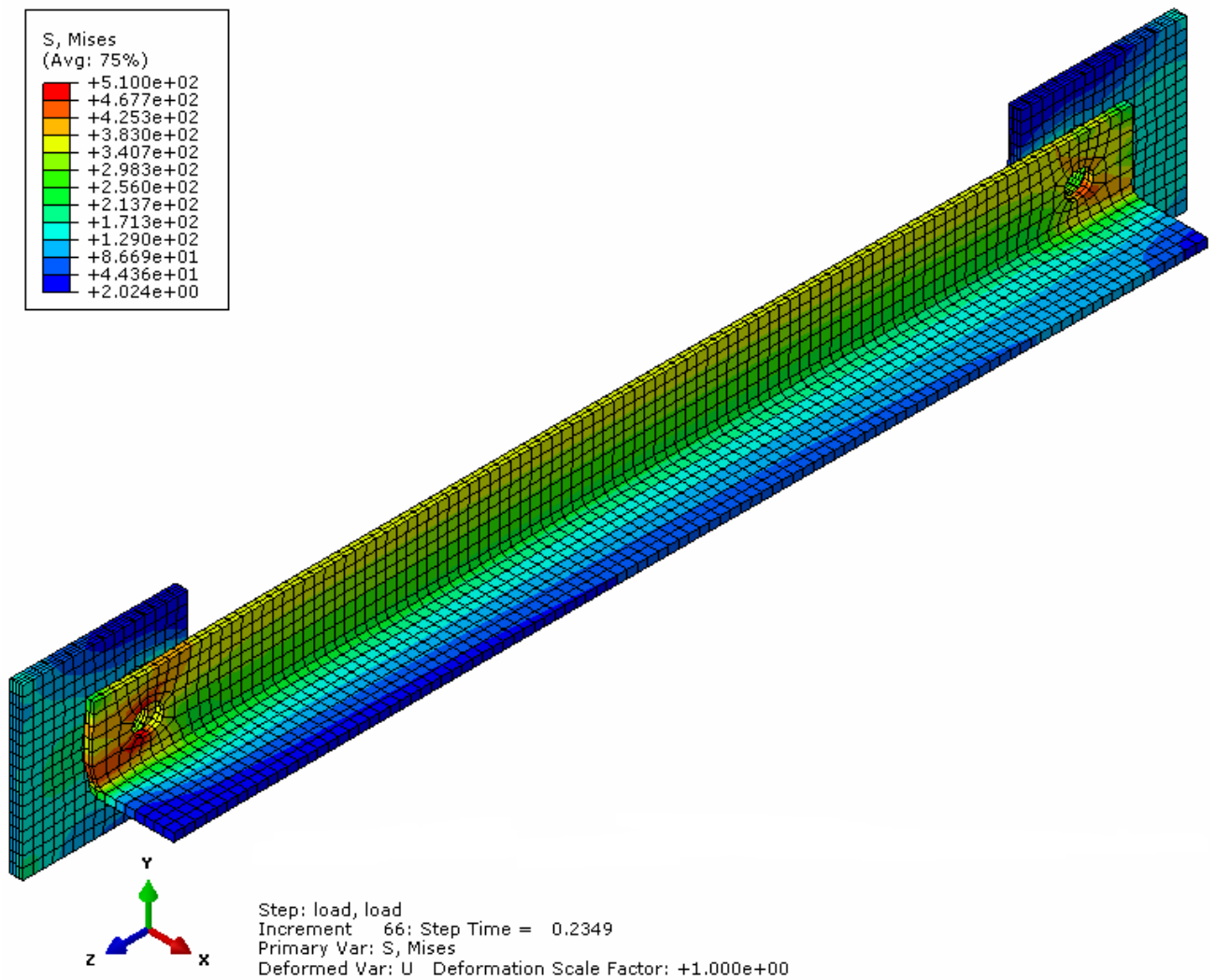
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 6,7% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 3.18: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL41x41x4.



Σχήμα 3.19: Κατανομή ορθής τάσης S_{33} (MPa) για το γωνιακό KL41x41x4 για μετακίνηση $u_3=-7\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (23,5% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



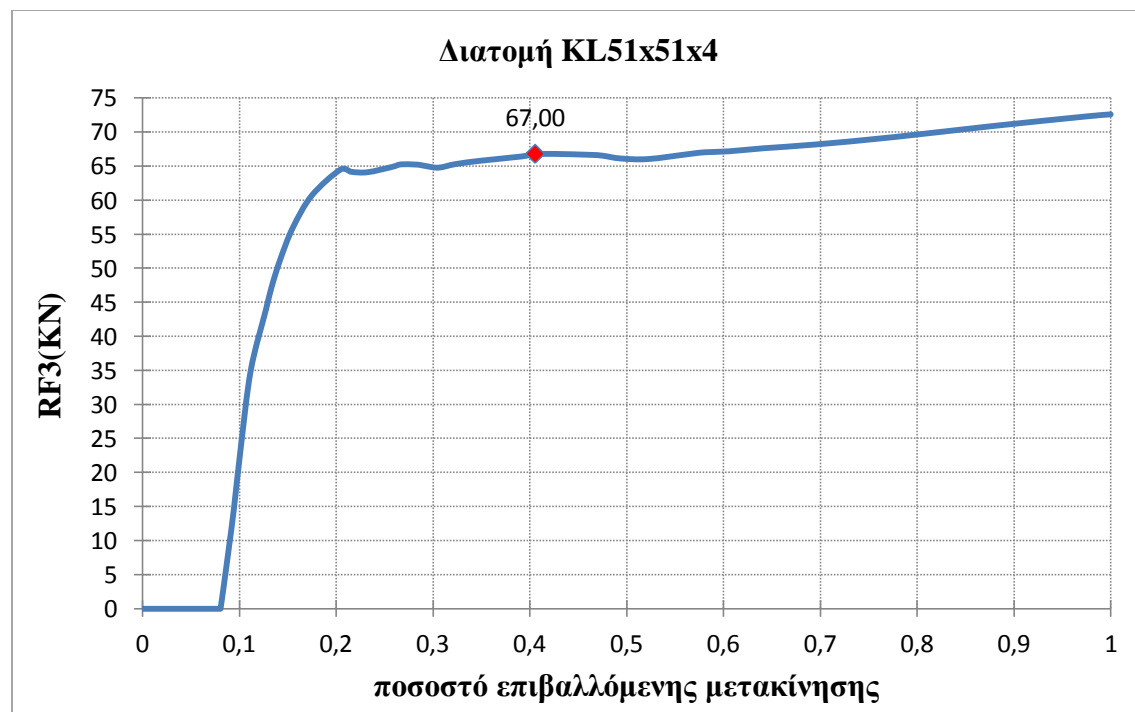
Σχήμα 3.20: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL41x41x4 για μετακίνηση $u_3=-7\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (23,5% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

3.7 Γωνιακό KL51x51x4 σε εφελκυσμό

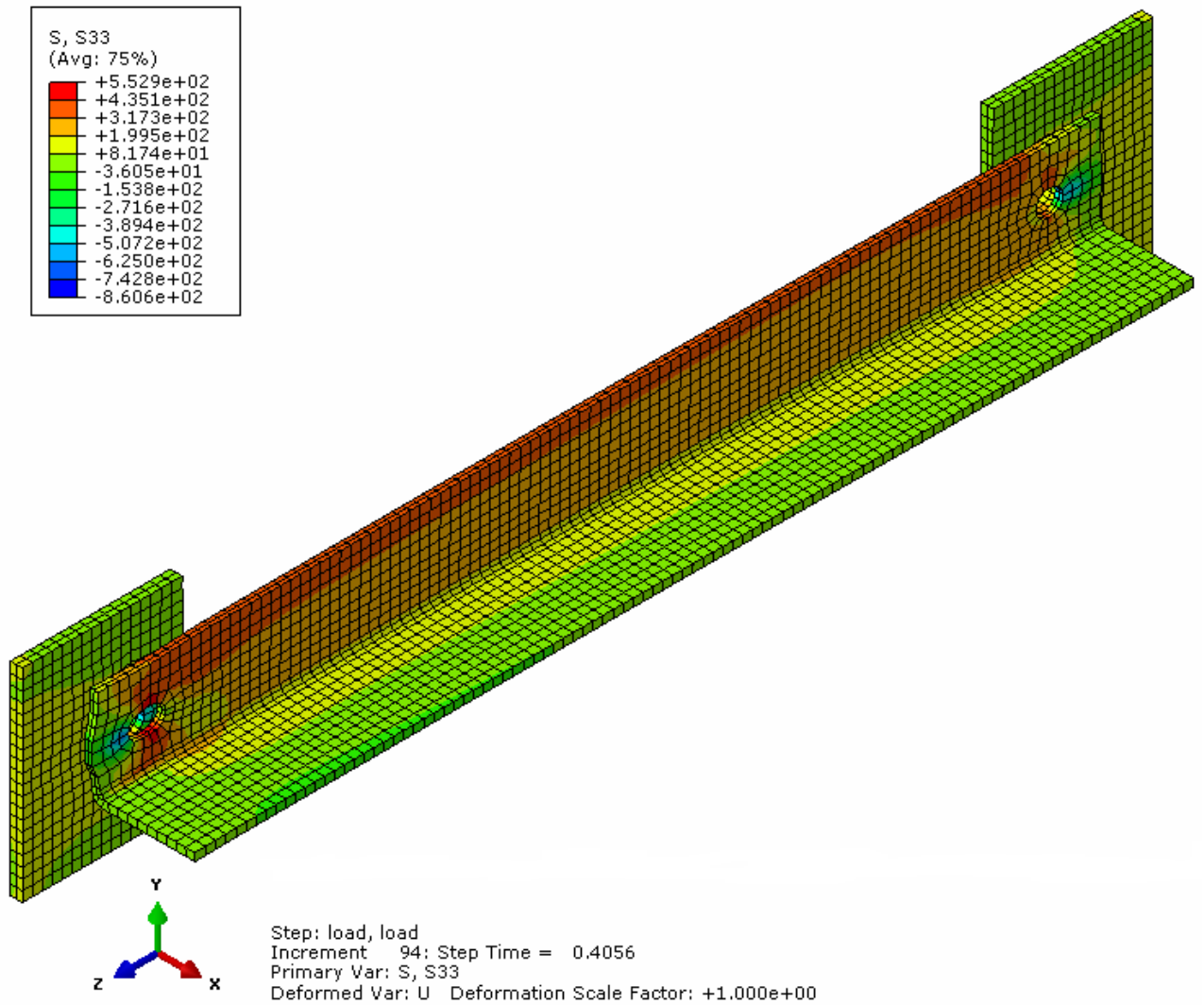
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL51x51x4 μήκους $L=0,50\text{m}$, δύο πλάκες ύψους $h_{\pi\lambda}=100\text{mm}$, πλάτους $b_{\pi\lambda}=130\text{mm}$ και πάχους $t_{\pi\lambda}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-25\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (25mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 72,62 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 40% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (12,00mm), (όπου αρχίζει να σταθεροποιείται η κλίση του διαγράμματος αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης-ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης) και ισούται με $RF3=67,00\text{ KN}$.

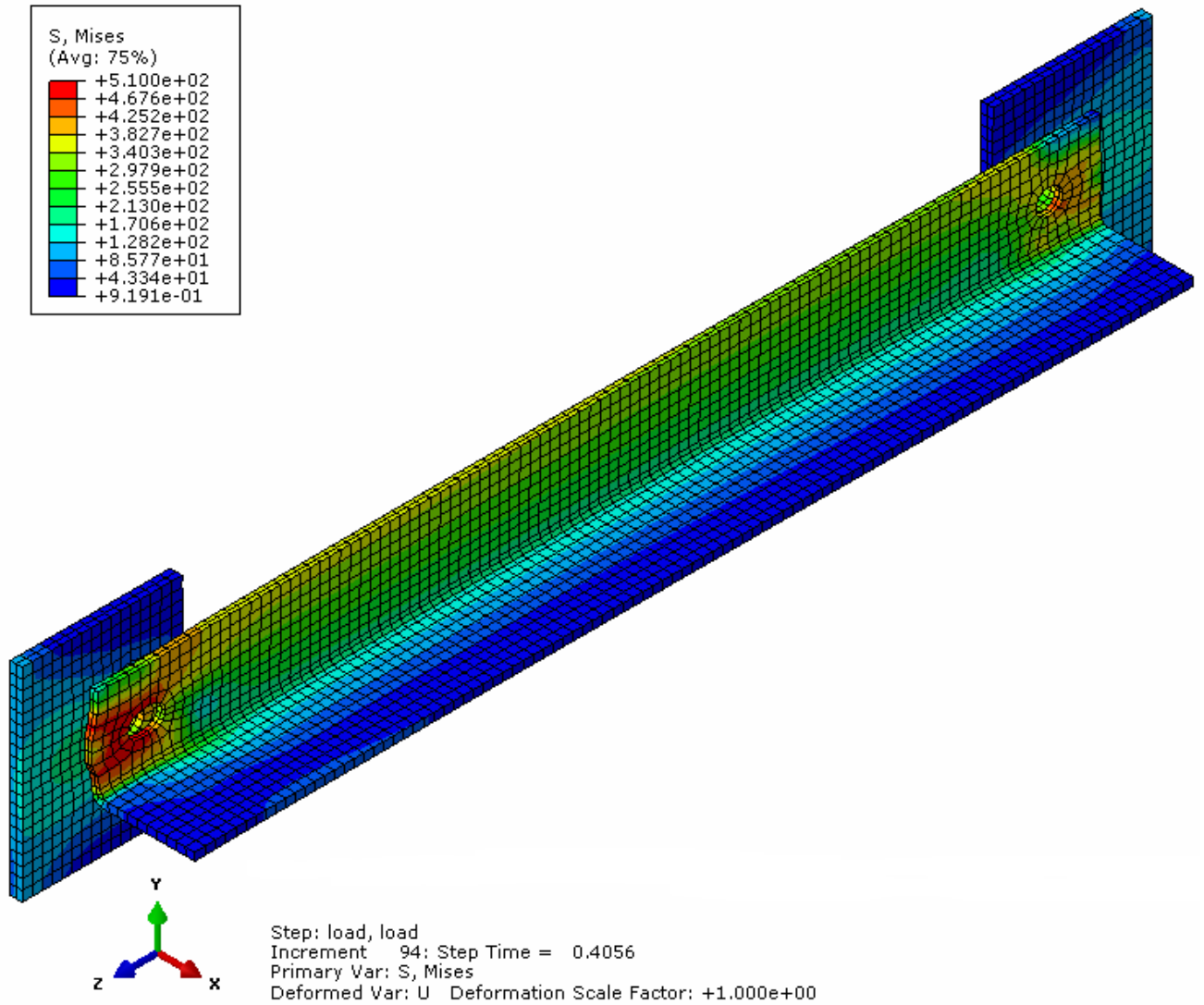
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 6,7% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 3.21: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL51x51x4.



Σχήμα 3.22: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL51x51x4 για μετακίνηση $u_3=-12\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (40% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



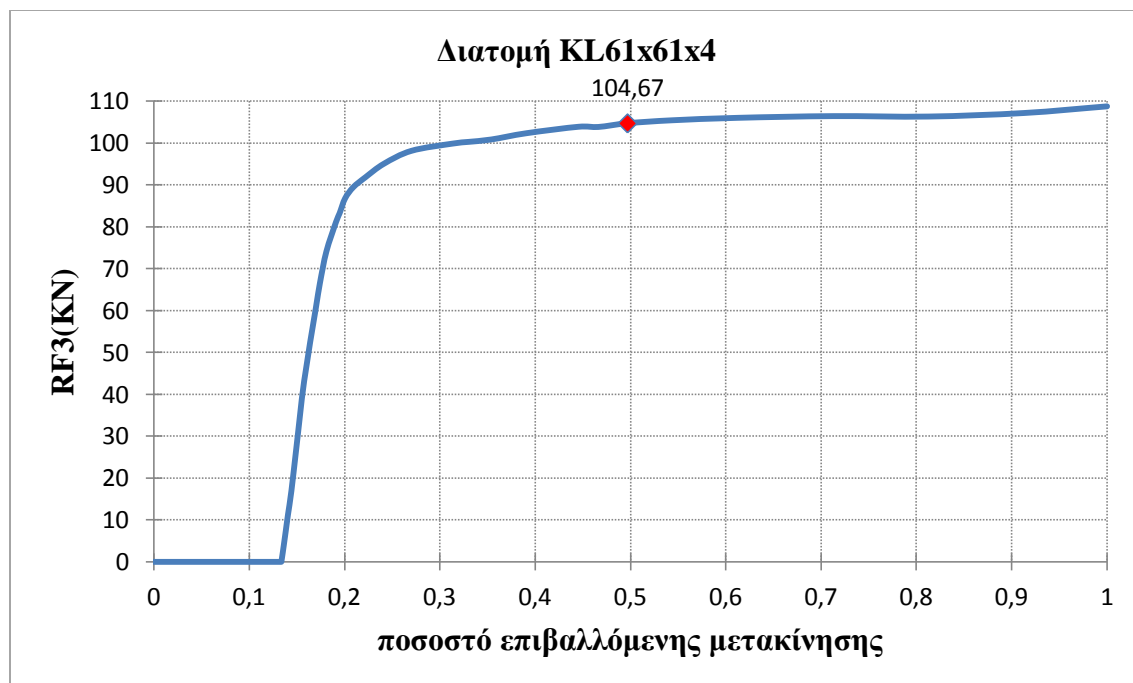
Σχήμα 3.23: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL51x51x4 για μετακίνηση $u_3=-12\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (40% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

3.8 Γωνιακό KL61x61x4 σε εφελκυσμό

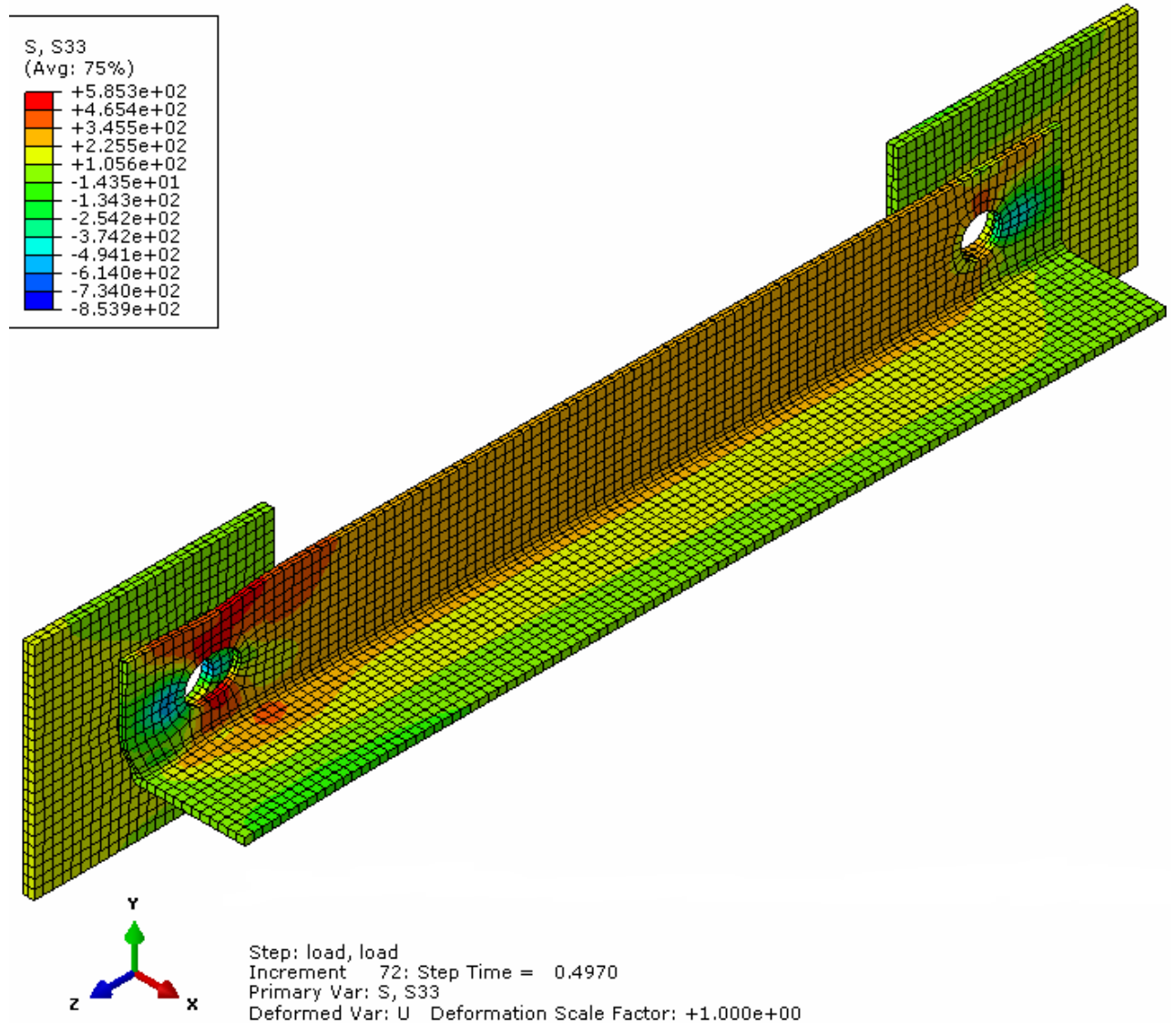
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL61x61x4 μήκους $L=0,50\text{m}$, δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=120\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=130\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες είναι κατηγορίας M20 και οι οπές έχουν διάμετρο $d_o=22\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-30\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (30mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 108,71 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 50% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (15,00mm), (όπου αρχίζει να σταθεροποιείται η κλίση του διαγράμματος αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης-ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης) και ισούται με $RF3=104,67\text{KN}$.

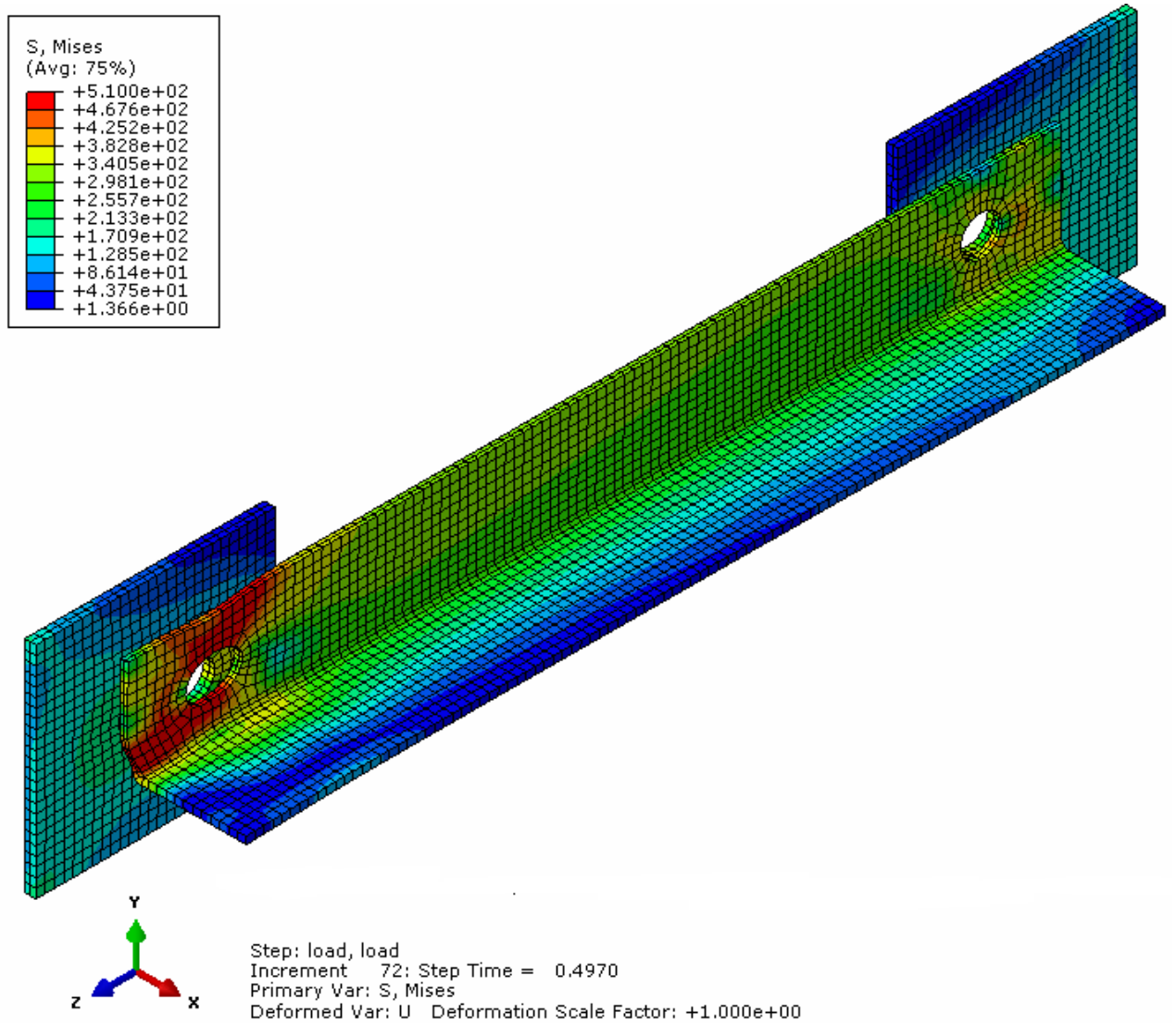
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 13,33% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 3.24: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL61x61x4.



Σχήμα 3.25: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL61x61x4 για μετακίνηση $u_3=-15\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (50% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



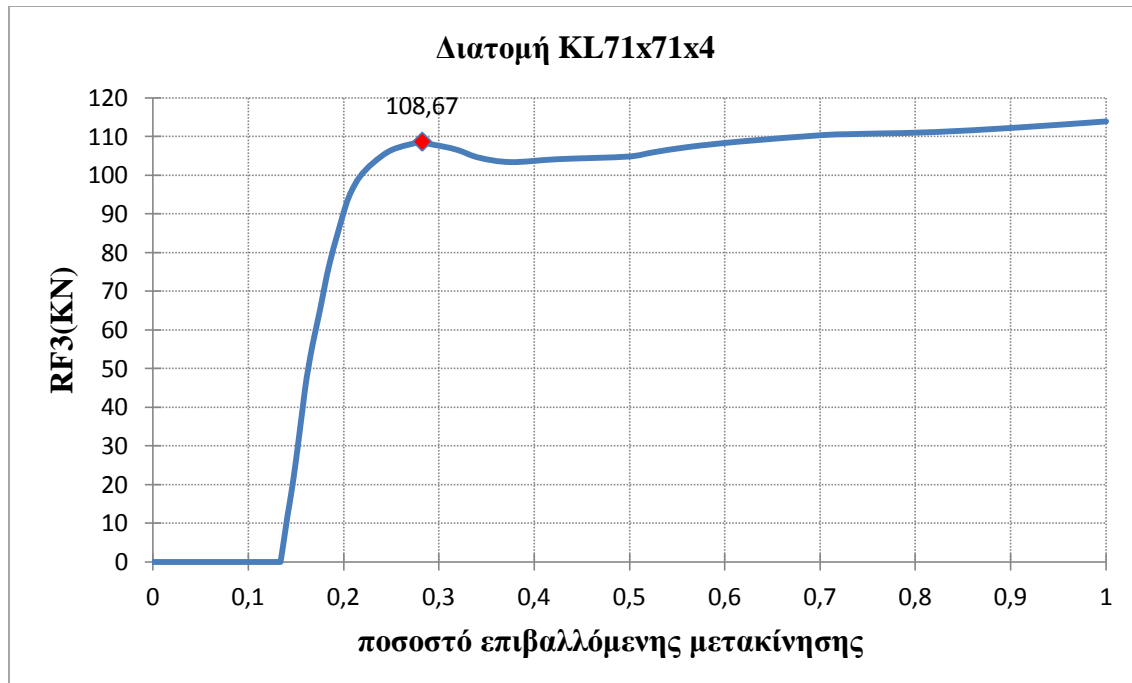
Σχήμα 3.26: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL61x61x4 για μετακίνηση $u_3=-15\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (50% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

3.9 Γωνιακό KL71x71x4 σε εφελκυσμό

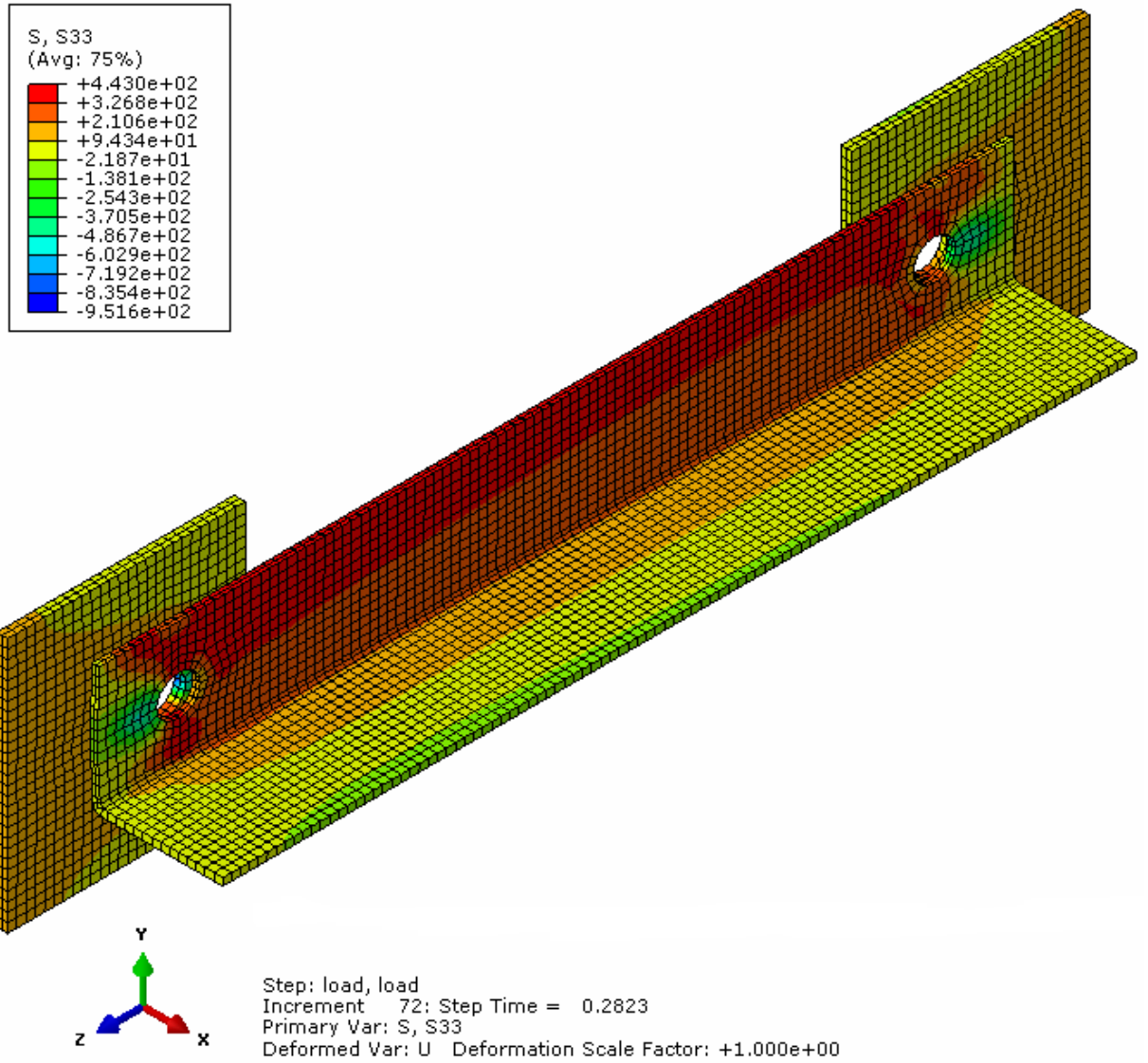
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL71x71x4 μήκους $L=0,50\text{m}$, δύο πλάκες ύψους $h_{\pi\lambda}=140\text{mm}$, πλάτους $b_{\pi\lambda}=130\text{mm}$ και πάχους $t_{\pi\lambda}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες είναι κατηγορίας M20 και οι οπές έχουν διάμετρο $d_o=22\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-30\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (30mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 113,89 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 28% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (8,40mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=108,67\text{ KN}$.

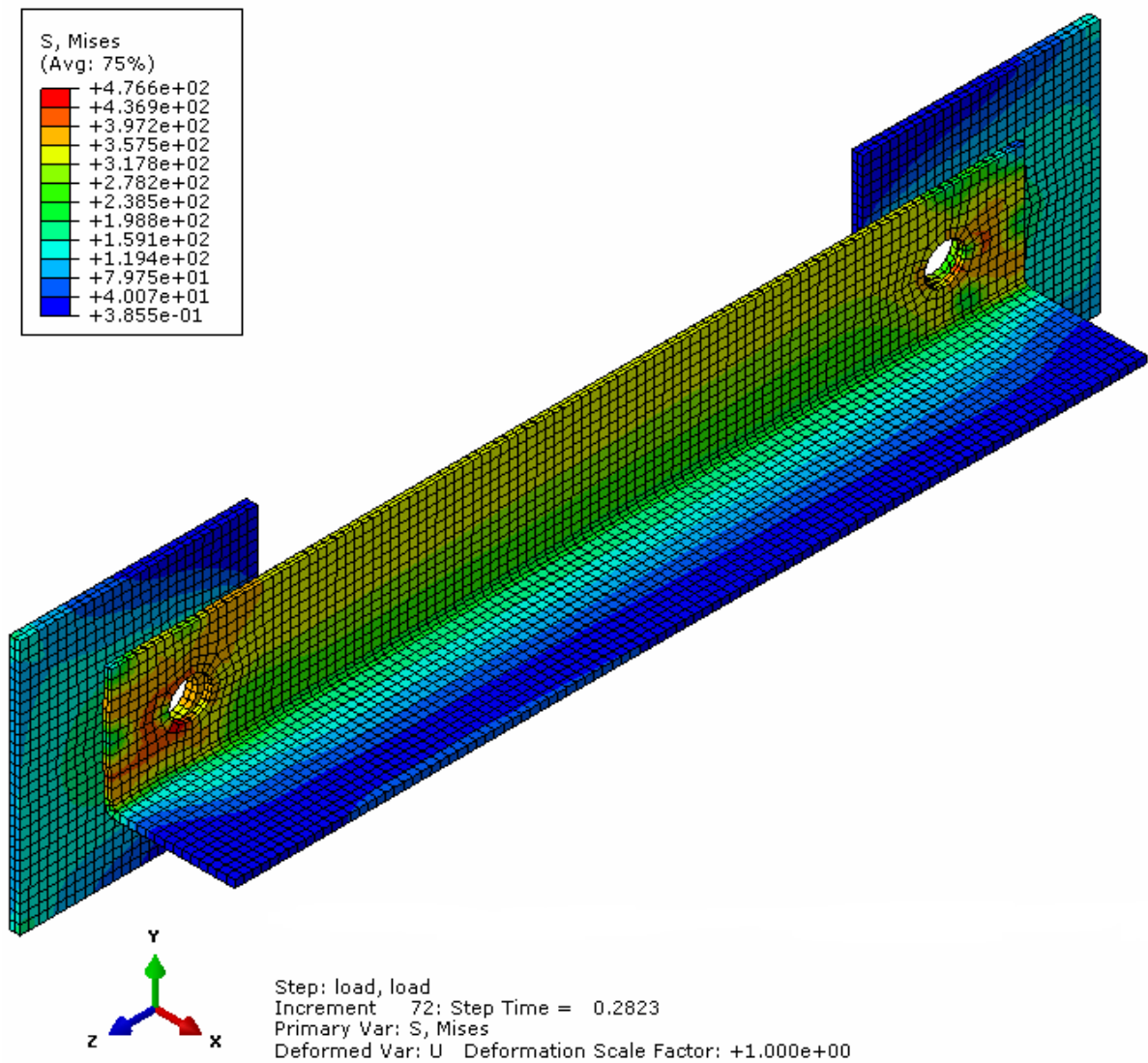
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 13,33% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 3.27: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL71x71x4.



Σχήμα 3.28: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL71x71x4 για μετακίνηση $u_3=-8,40\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (28% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



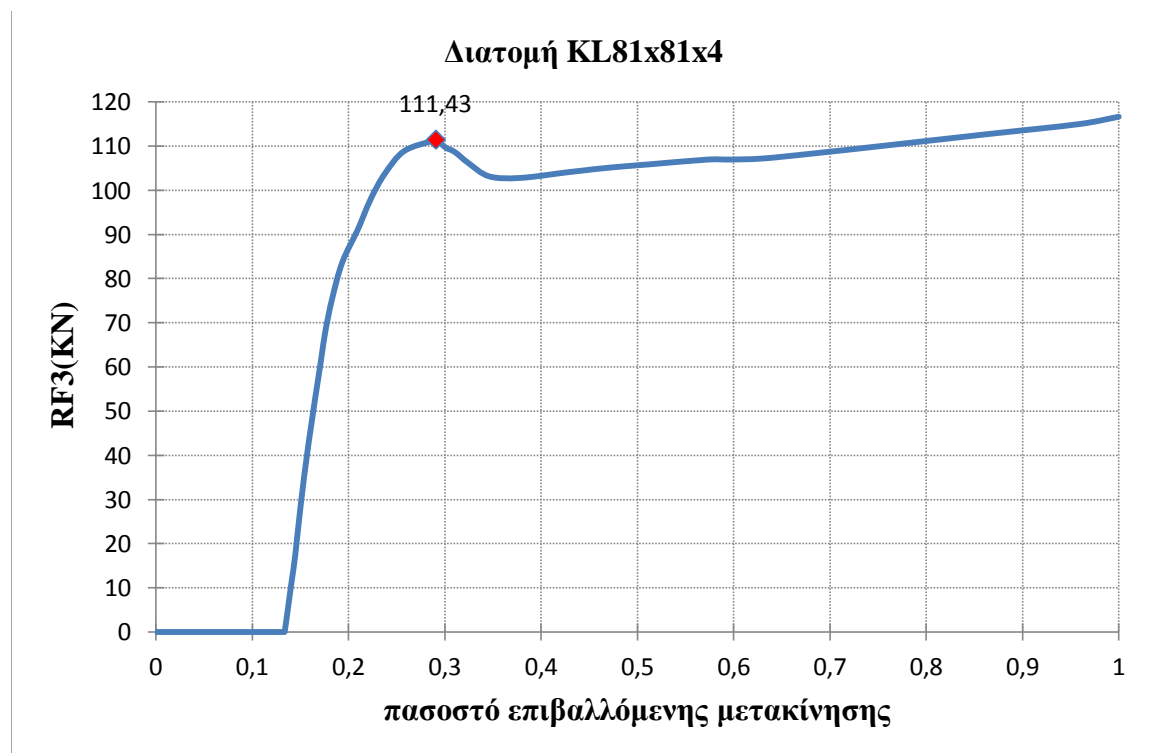
Σχήμα 3.29: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL71x71x4 για μετακίνηση $u_3 = -8,40\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (28% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

3.10 Γωνιακό KL81x81x4 σε εφελκυσμό

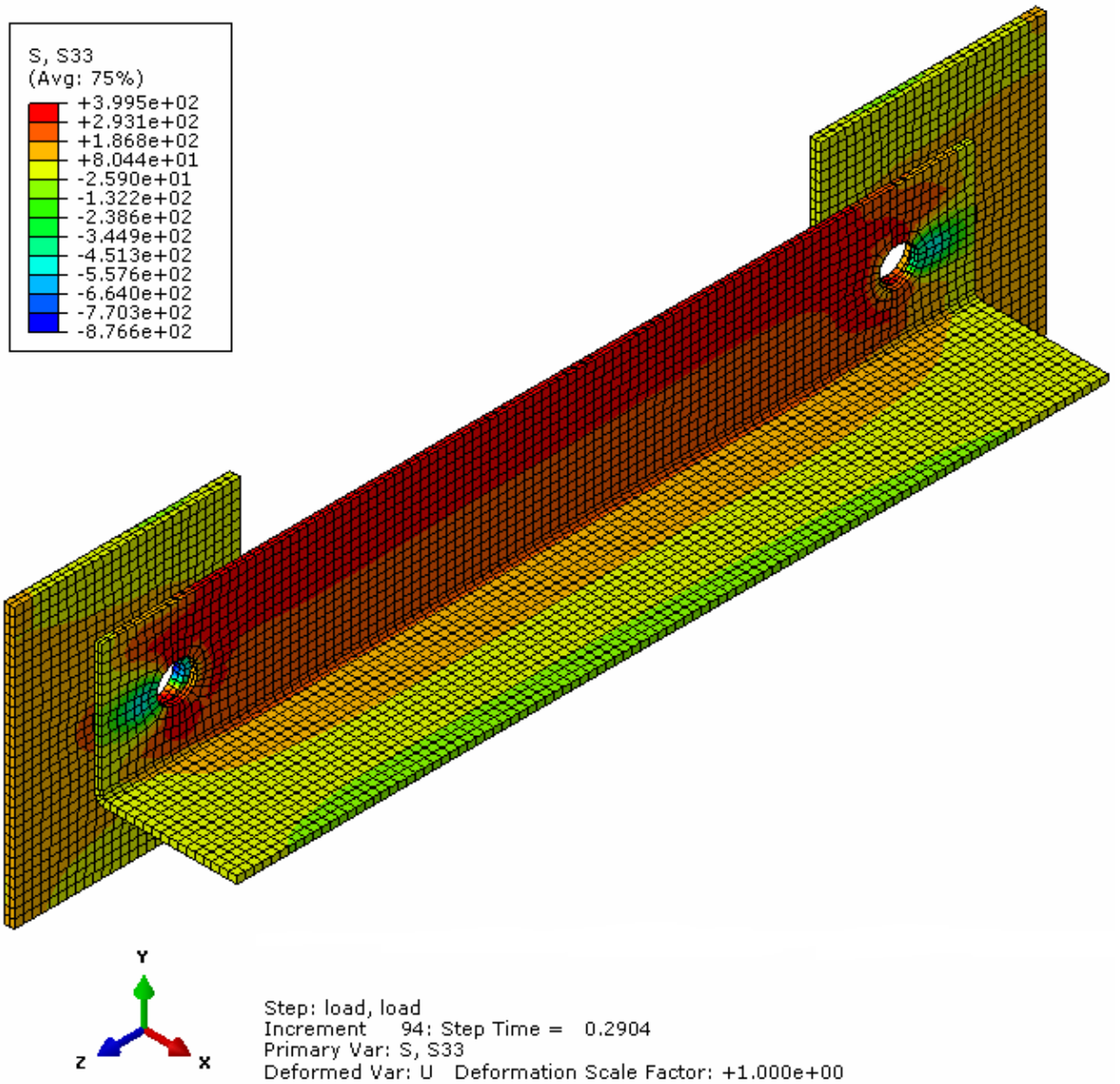
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL81x81x4 μήκους $L=0,50\text{m}$, δύο πλάκες ύψους $h_{\pi\lambda}=160\text{mm}$, πλάτους $b_{\pi\lambda}=130\text{mm}$ και πάχους $t_{\pi\lambda}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες είναι κατηγορίας M20 και οι οπές έχουν διάμετρο $d_o=22\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί εφελκυσμό στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=-30\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (30mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 116,60 KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε εφελκυσμό θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 29% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (8,70mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=111,43\text{ KN}$.

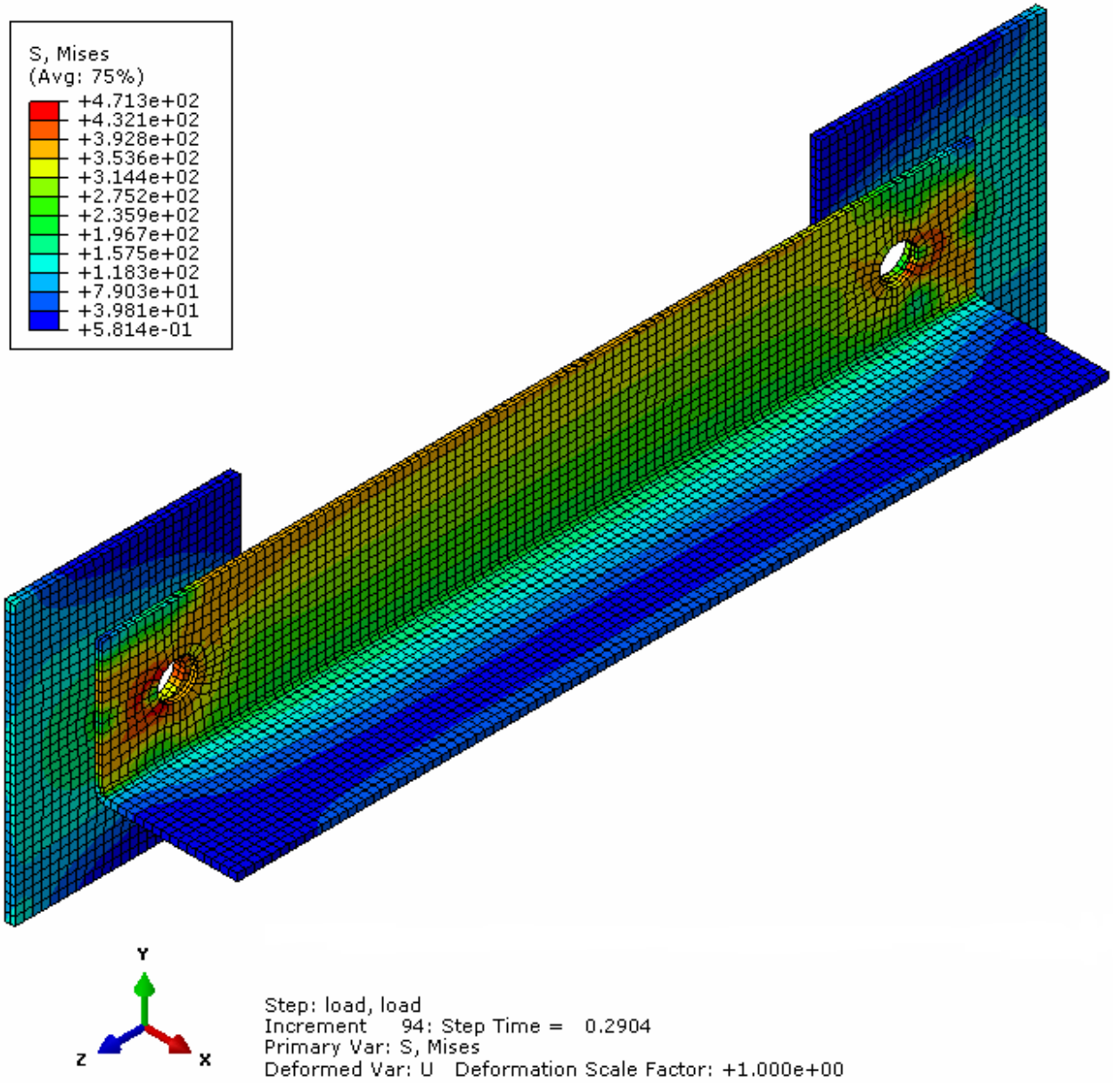
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 13,33% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 3.30: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL81x81x4.



Σχήμα 3.31: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL81x81x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=-8,70\text{mm}$ (29% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 3.32: Κατανομή τάσης Von Mises (MPa) για το γωνιακό KL81x81x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3 = -8,70\text{mm}$ (29% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

Στον παρακάτω πίνακα έχουν συγκεντρωθεί οι εφελκυστικές αντοχές των γωνιακών διατομών οι οποίες έχουν προκύψει από τις αναλύσεις των υπολογιστικών προσομοιωμάτων στο Abaqus 6.10-1.

Πίνακας 3.1: Εφελκυστικές αντοχές γωνιακών διατομών στο Abaqus 6.10-1.

Διατομή γωνιακού	Εφελκυστική αντοχή στο Abaqus(KN)
KL35x35x3	45,04
KL40x40x3 S355	49,70
KL40x40x3 S355 MC	43,50
KL50x50x3	50,31
KL60x60x3	51,40
KL41x41x4	66,98
KL51x51x4	67,00
KL61x61x4	104,67
KL71x71x4	108,67
KL81x81x4	111,43

4 Αποτελέσματα ανάλυσης για θλίψη

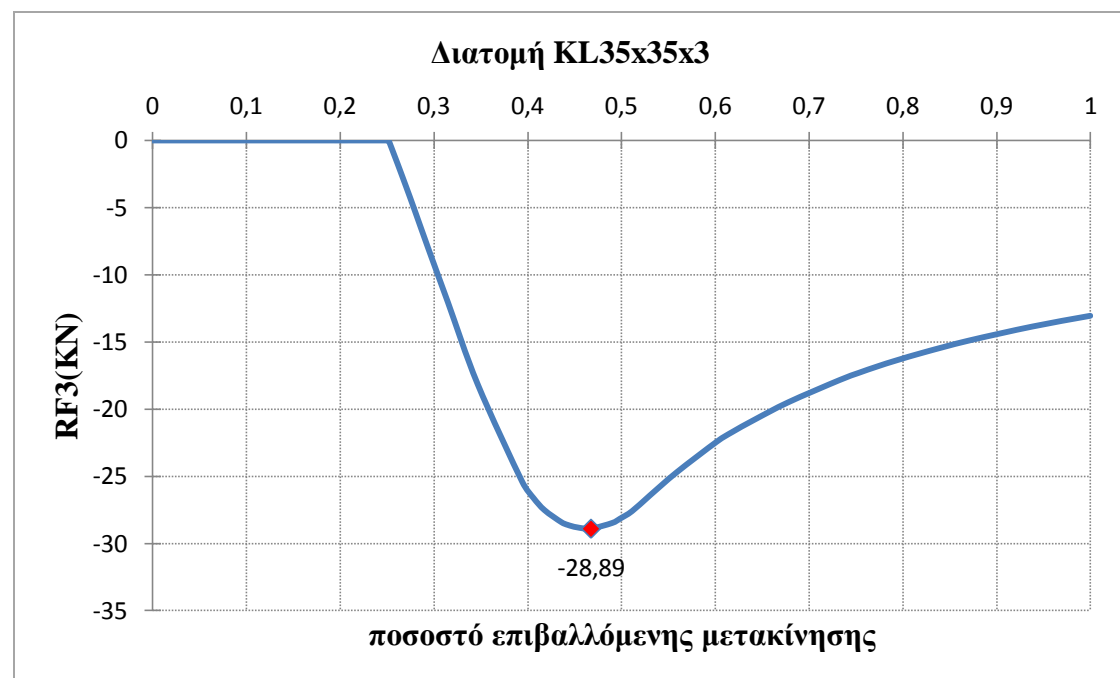
4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται για κάθε διατομή γωνιακού που εξετάζουμε τα αποτελέσματα της ανάλυσης του προσομοιώματος στο Abaqus 6.10-1 για θλίψη. Παρατίθενται τα διαγράμματα αντίδρασης στην πάκτωση-μετακίνησης, καθώς και κατανομές των αναπτυσσόμενων τάσεων στο εκάστοτε γωνιακό.

4.2 Γωνιακό KL35x35x3 σε θλίψη

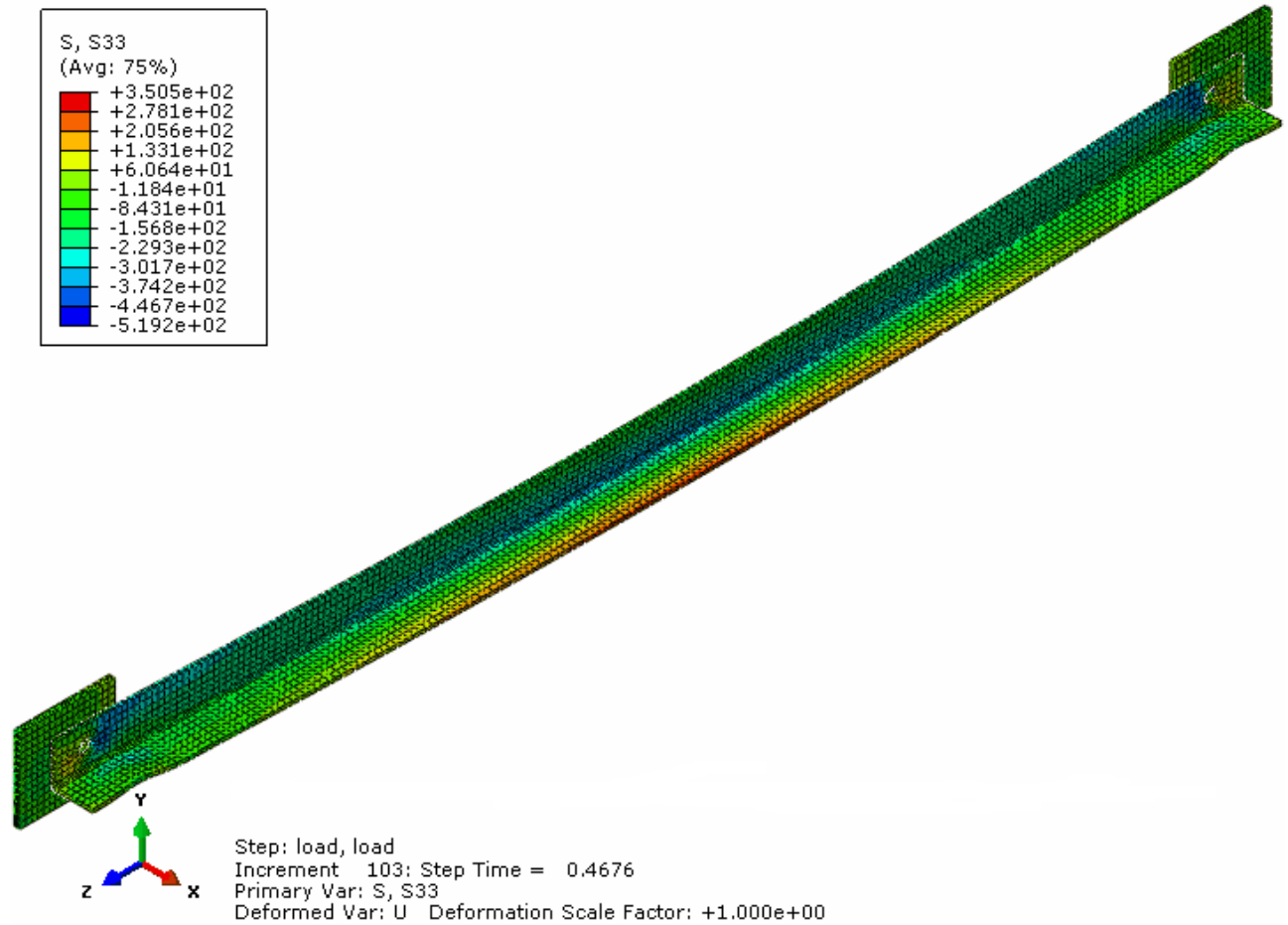
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL35x35x3 μήκους $L=1,00\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\pi\lambda}=70\text{mm}$, πλάτους $b_{\pi\lambda}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\pi\lambda}=5\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=8\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (8mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 13,05KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 47% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (3,76mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=28,89\text{KN}$.

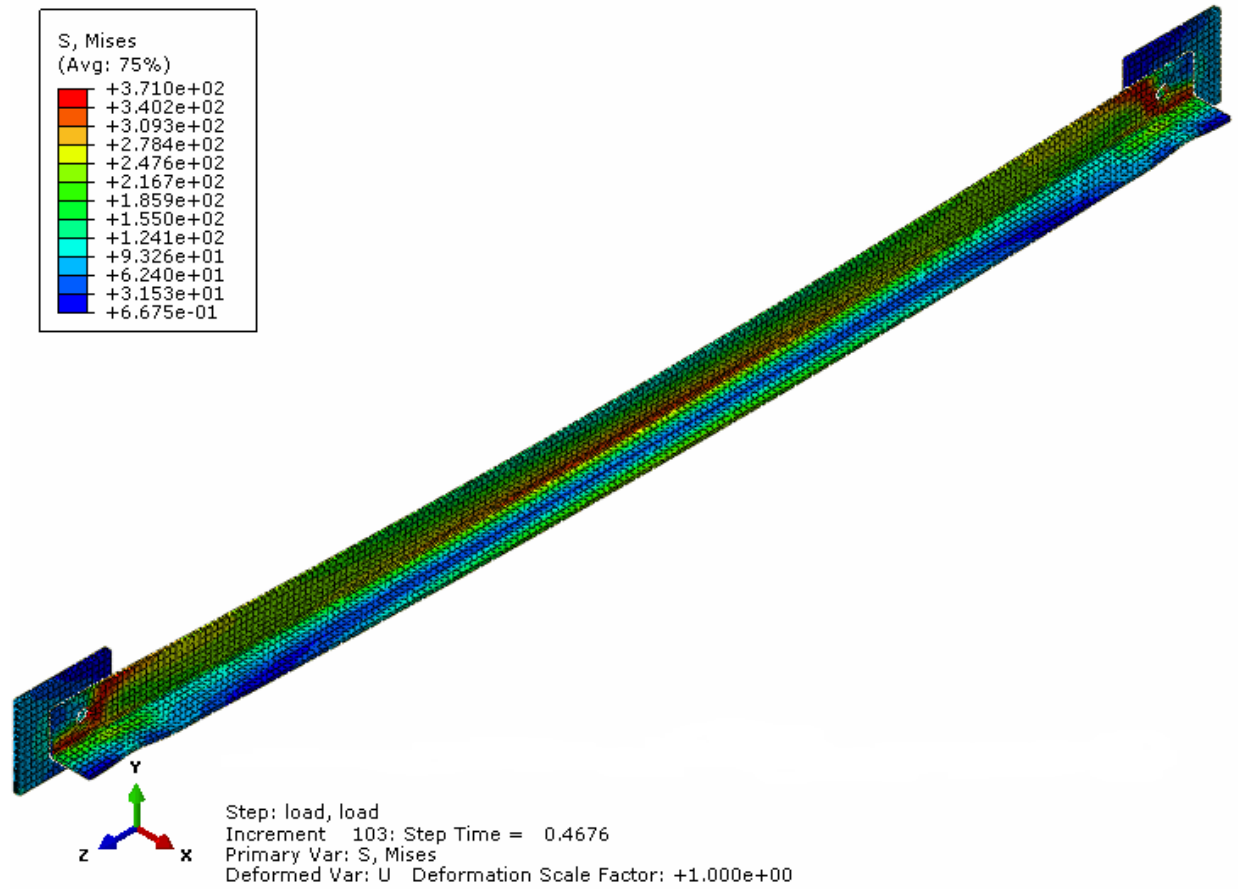


Σχήμα 4.1: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL35x35x3.

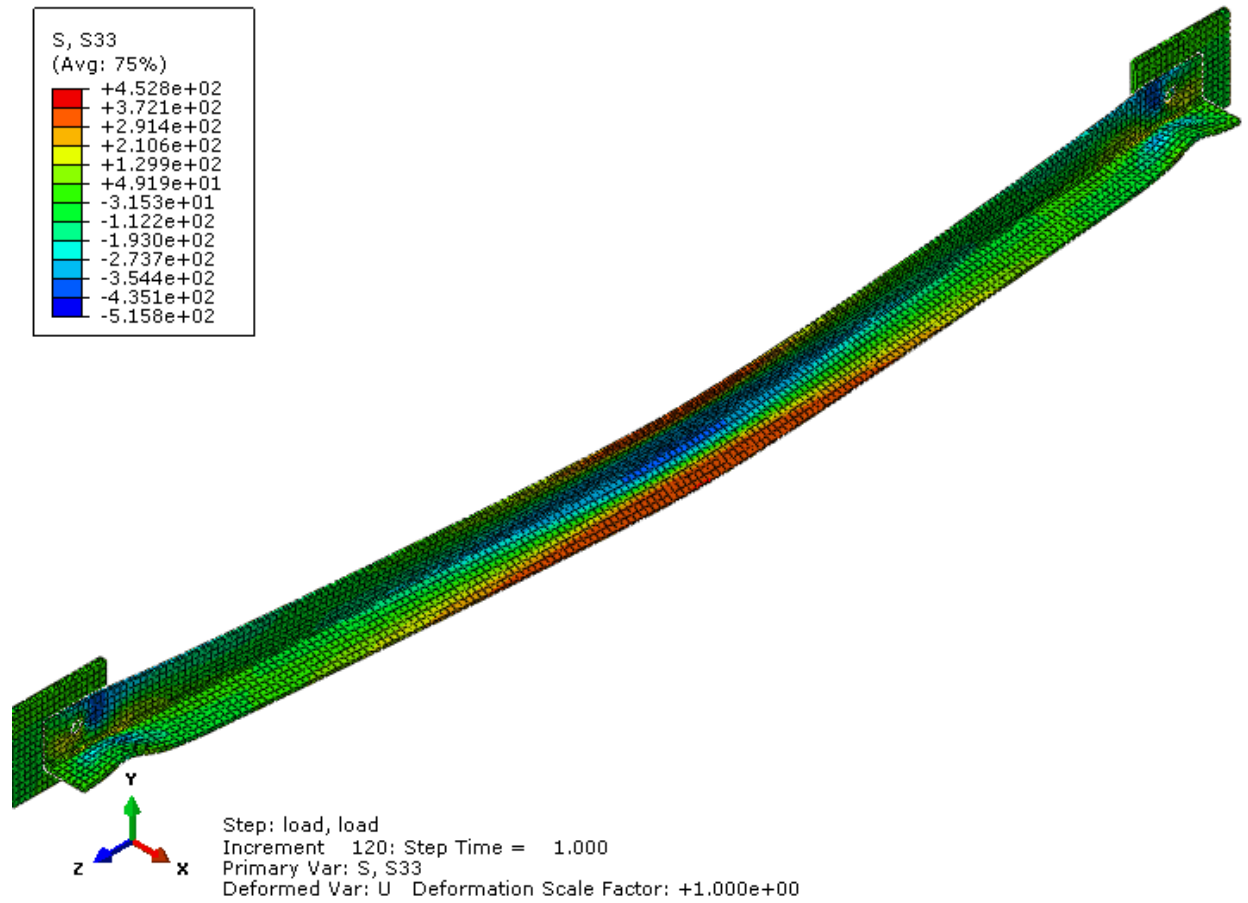
Στο παραπάνω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 25% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



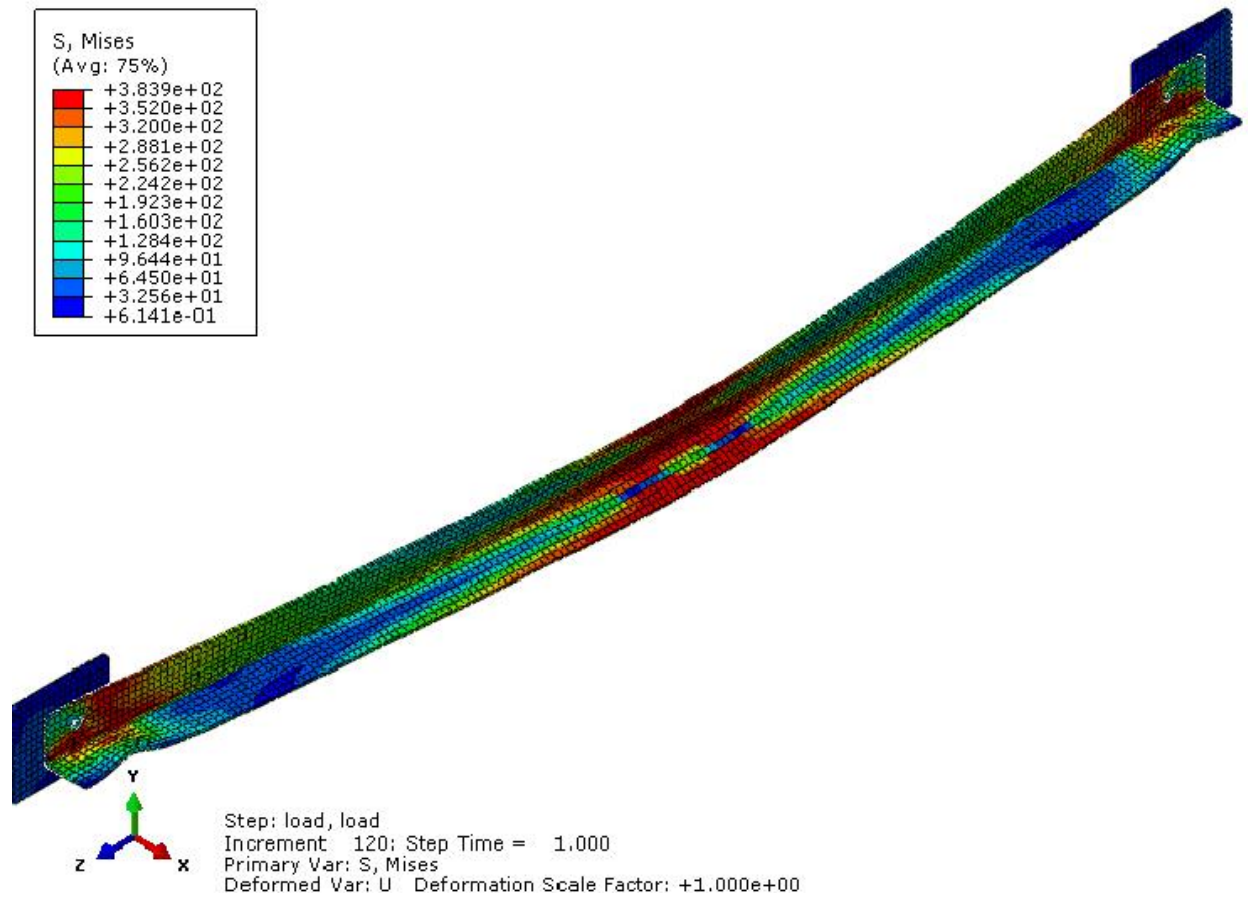
Σχήμα 4.2: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL35x35x3 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=3,76\text{mm}$ (47% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 4.3: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL35x35x3 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=3,76\text{mm}$ (47% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 4.4: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL35x35x3 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=8\text{mm}$ (100% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 4.5: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL35x35x3 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=8\text{mm}$ (100% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

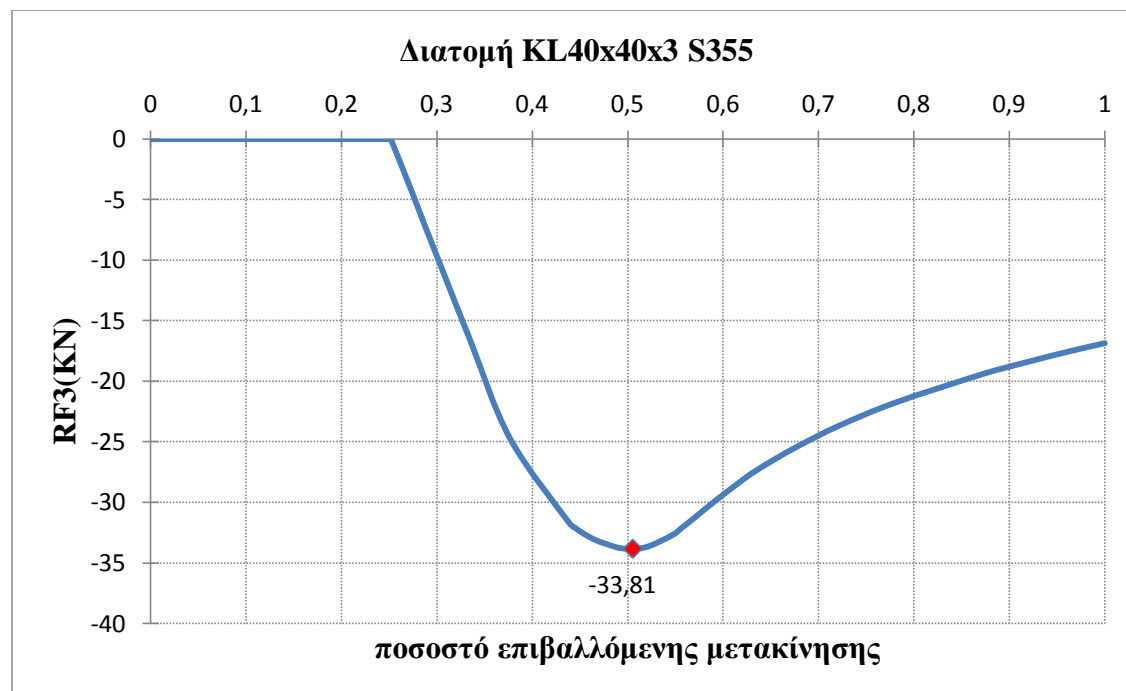
4.3 Γωνιακό KL40x40x3 σε θλίψη

4.3.1 Γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 σε θλίψη

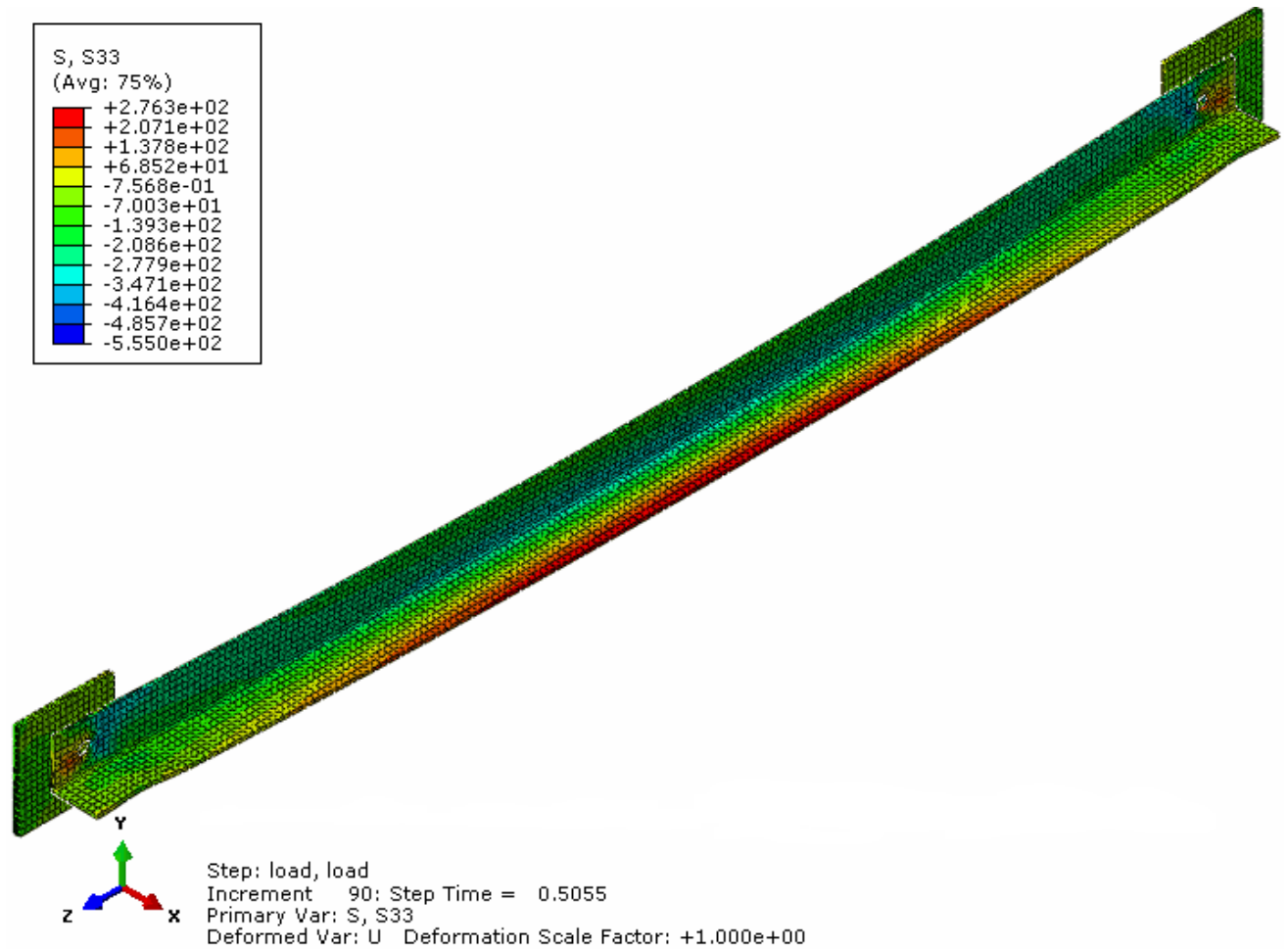
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL40x40x3 μήκους $L=1,00\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\pi\lambda}=80\text{mm}$, πλάτους $b_{\pi\lambda}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\pi\lambda}=5\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=8\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (8mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 16,86kN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 50% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=33,81\text{kN}$.

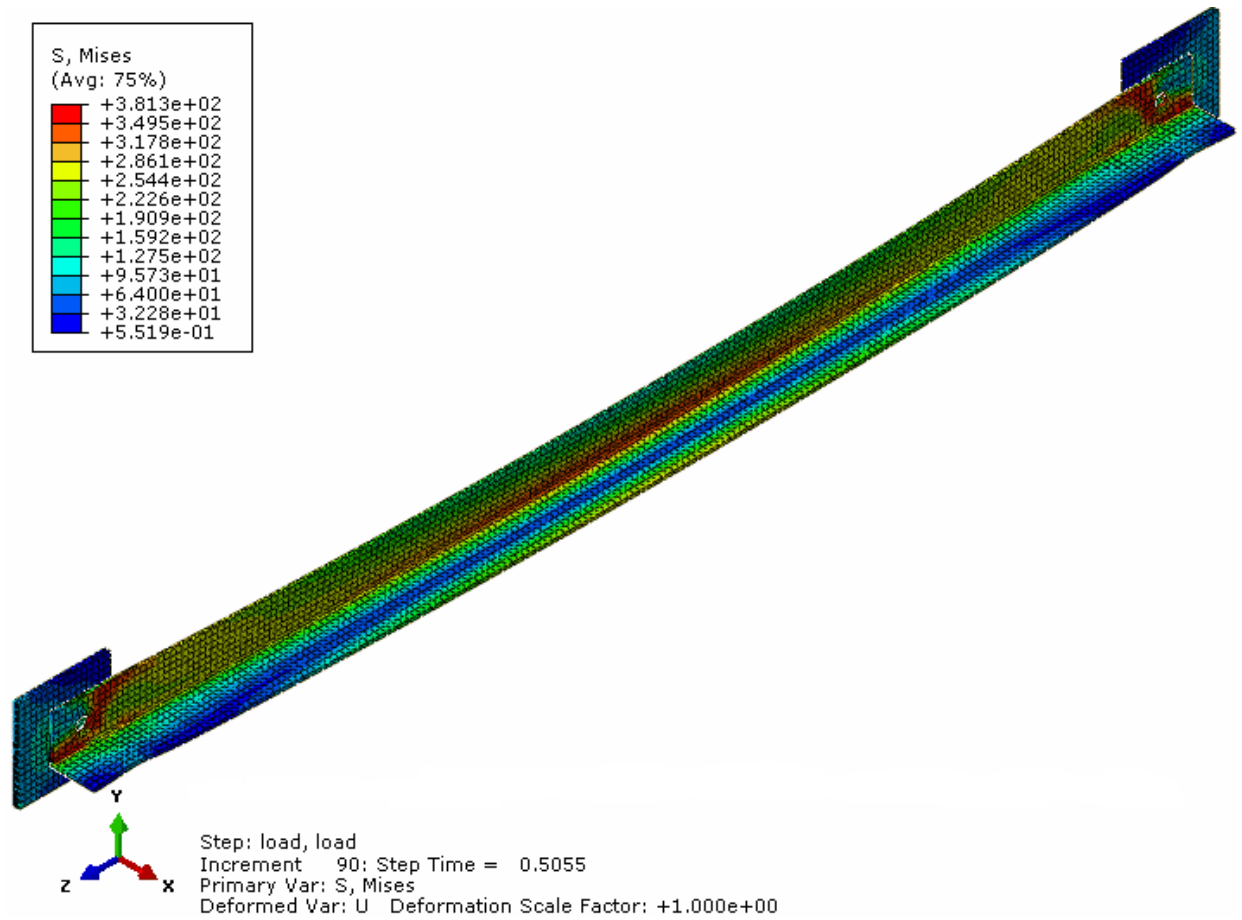
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 25% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



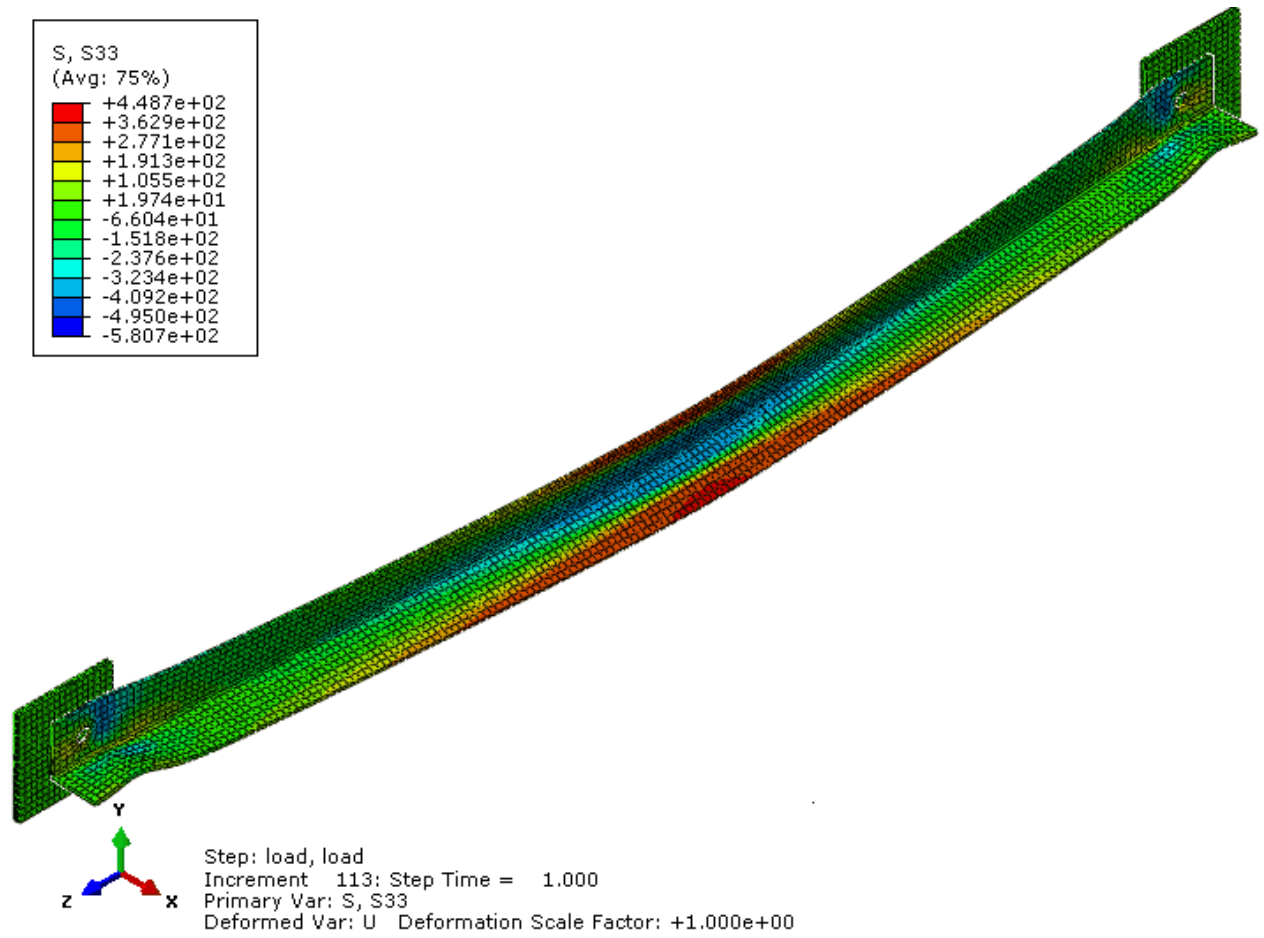
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355.



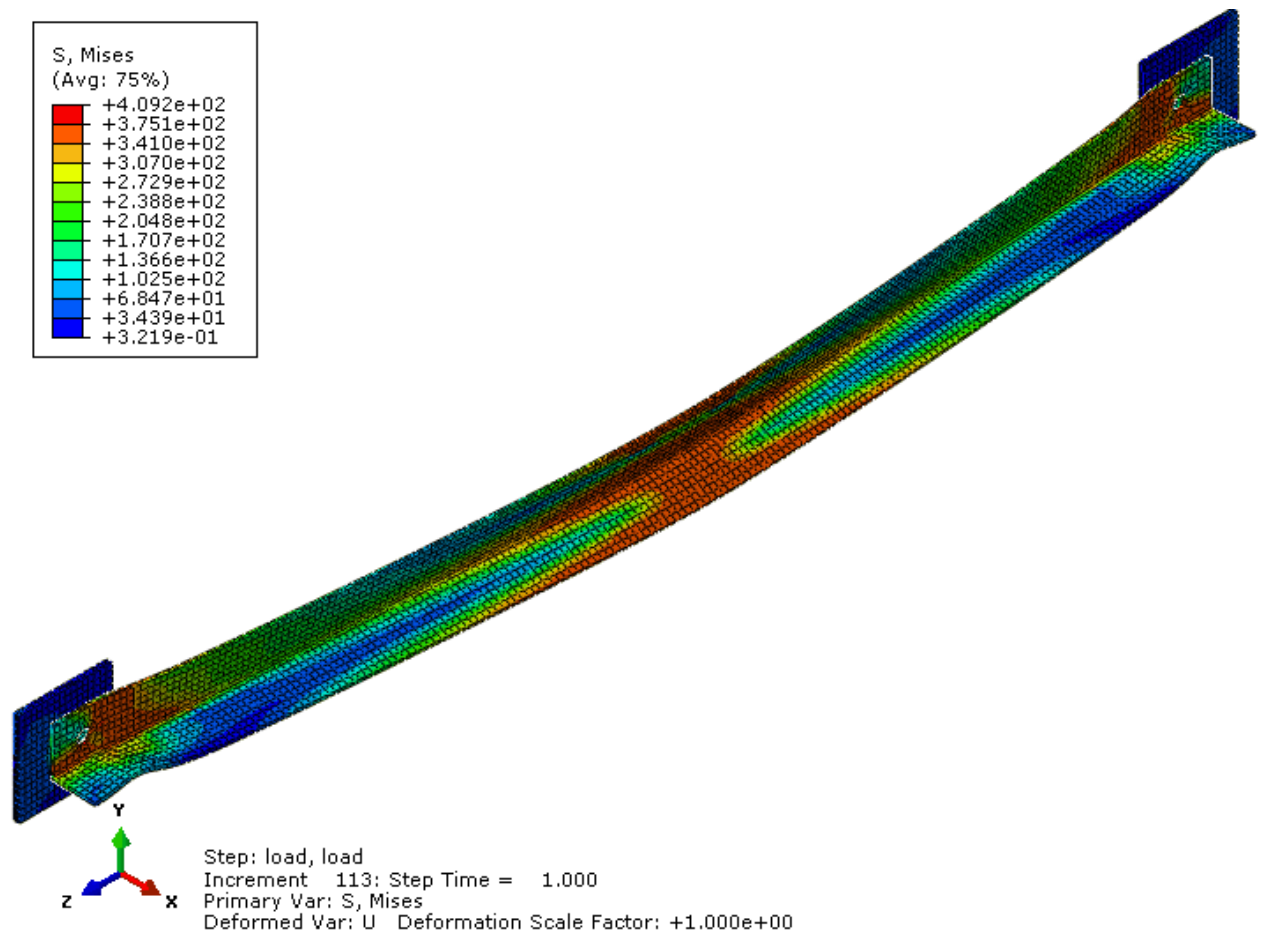
Σχήμα 4.7: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=4\text{mm}$ (50% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 4.8: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=4\text{mm}$ (50% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 4.9: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 για μετακίνηση $u_3=8\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (100% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



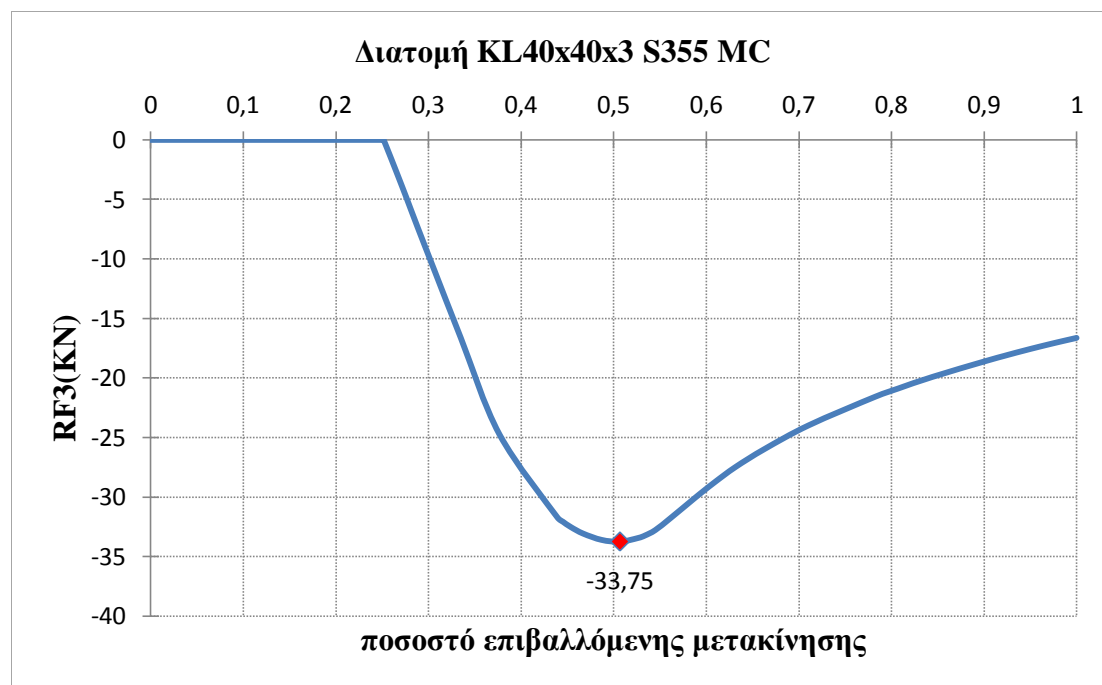
Σχήμα 4.10: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 για μετακίνηση $u_3=8\text{mm}$ στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας (100% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

4.3.2 Γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 MC σε θλίψη

Το προσομοίωμα είναι ακριβώς το ίδιο με πριν με τη μόνη διαφορά ότι ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 MC με όριο διαρροής $f_y=355\text{MPa}$ και αντοχή θραύσης (εφελκυστική αντοχή) $f_u=430\text{MPa}$.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=8\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (8mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 16,63KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 50% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=33,75\text{KN}$. Διαπιστώνουμε ότι λόγω της μείωσης της αντοχής θραύσης του χάλυβα των ελασμάτων, δεν παρατηρείται μείωση της θλιπτικής αντοχής του γωνιακού.

Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 25% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



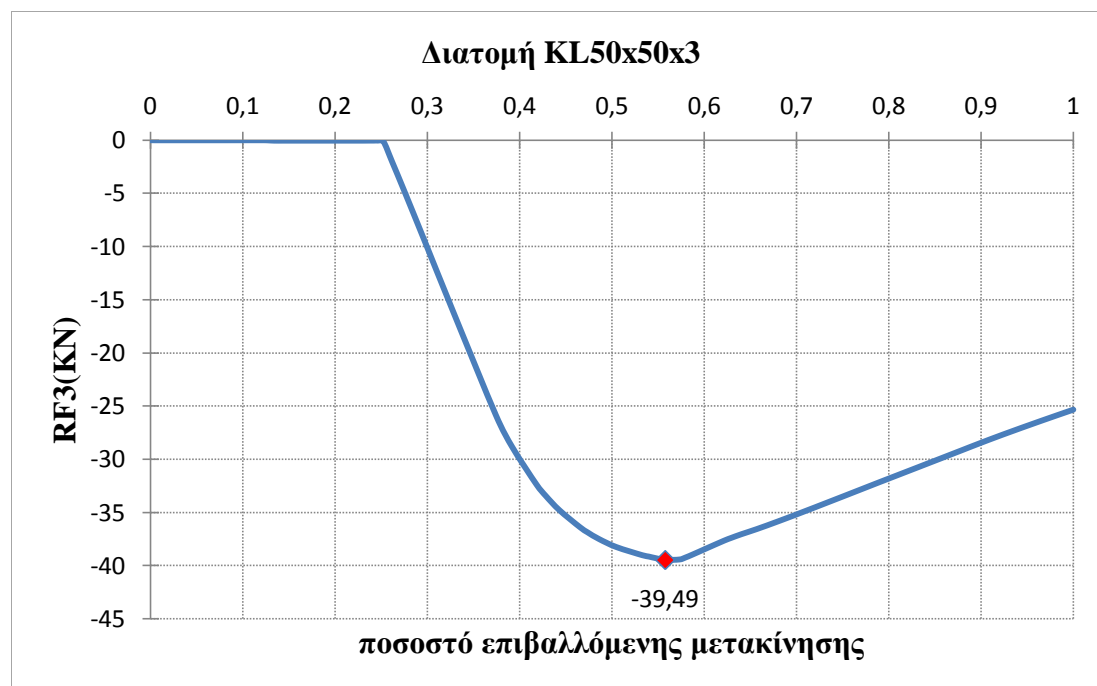
Σχήμα 4.11: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL40x40x3 ποιότητας S355 MC.

4.4 Γωνιακό KL50x50x3 σε θλίψη

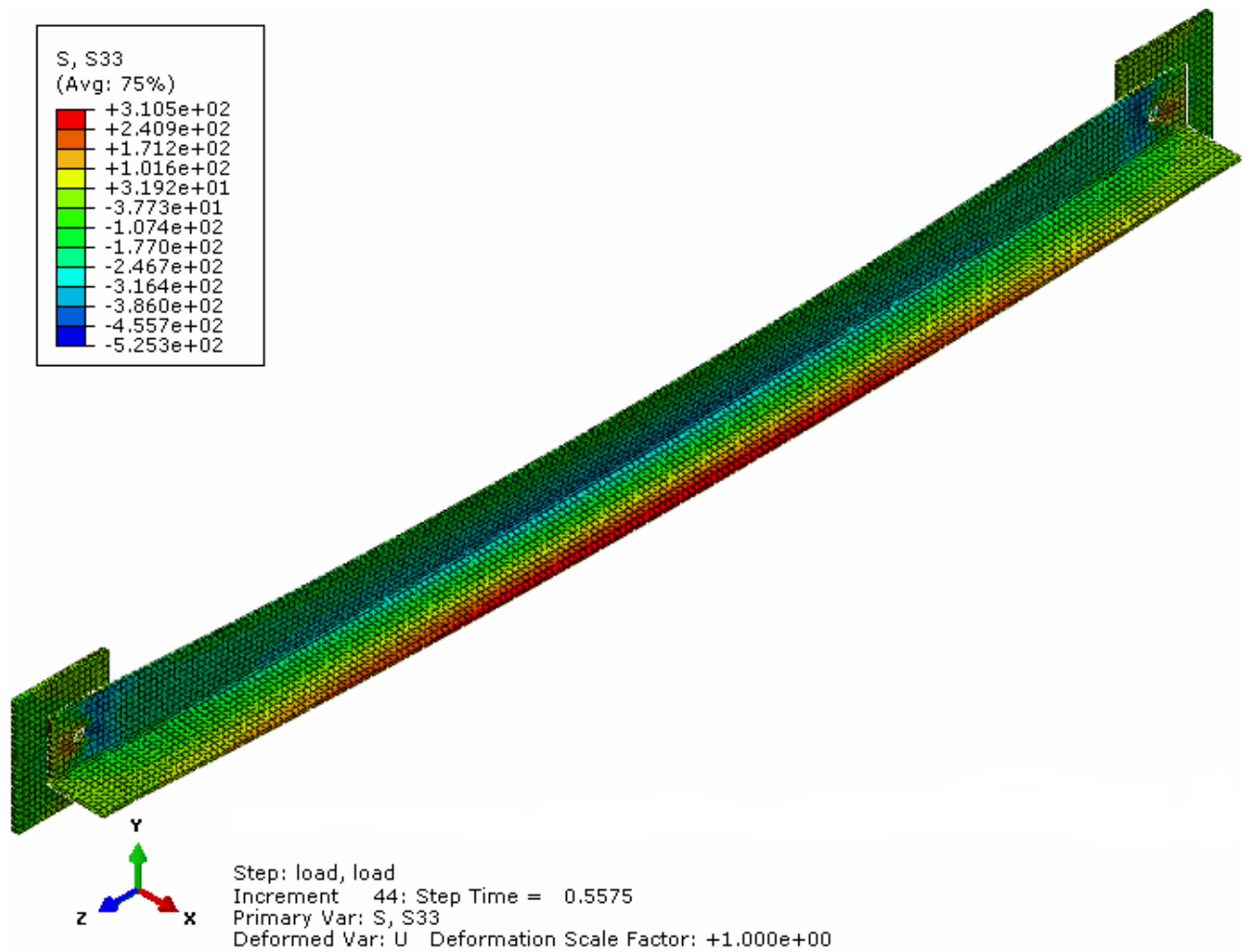
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL50x50x3 μήκους $L=1,00\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=100\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=5\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=8\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (8mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 25,36KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 55% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4,40mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=39,49\text{KN}$.

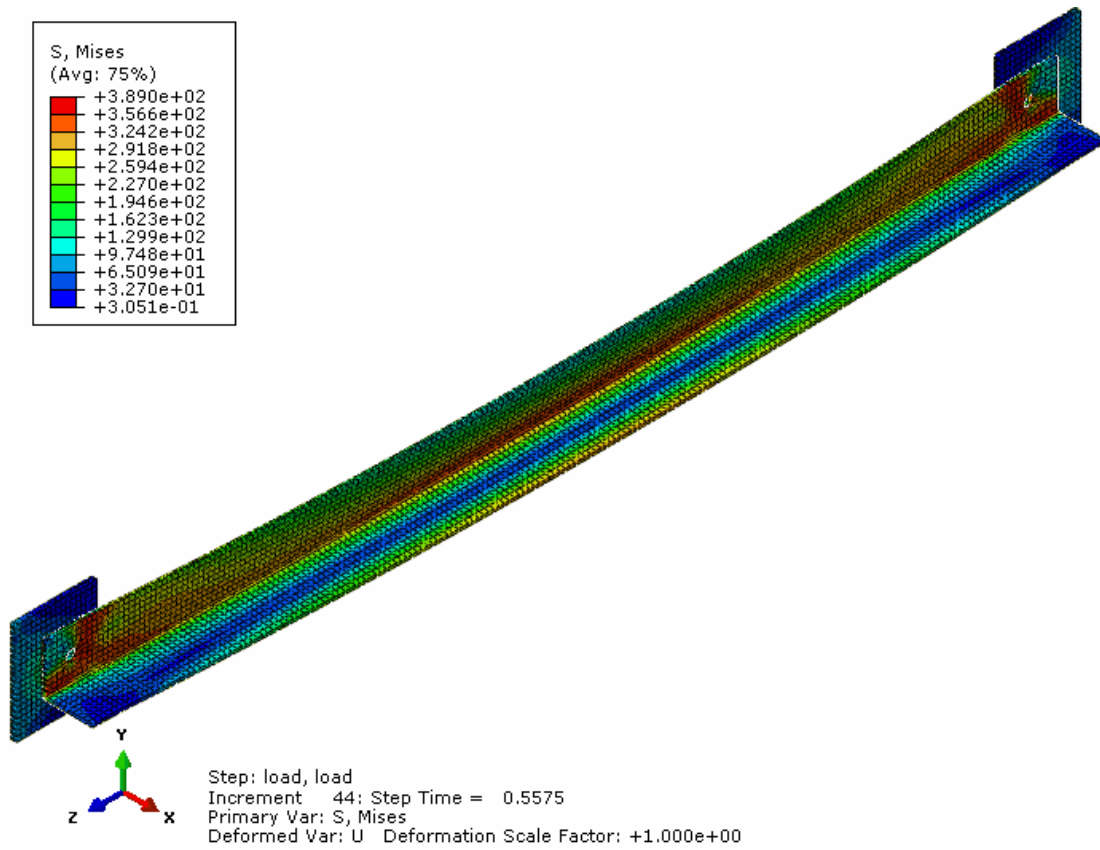
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 25% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL50x50x3.



Σχήμα 4.13: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL50x50x3 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=4,40\text{mm}$ (55% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



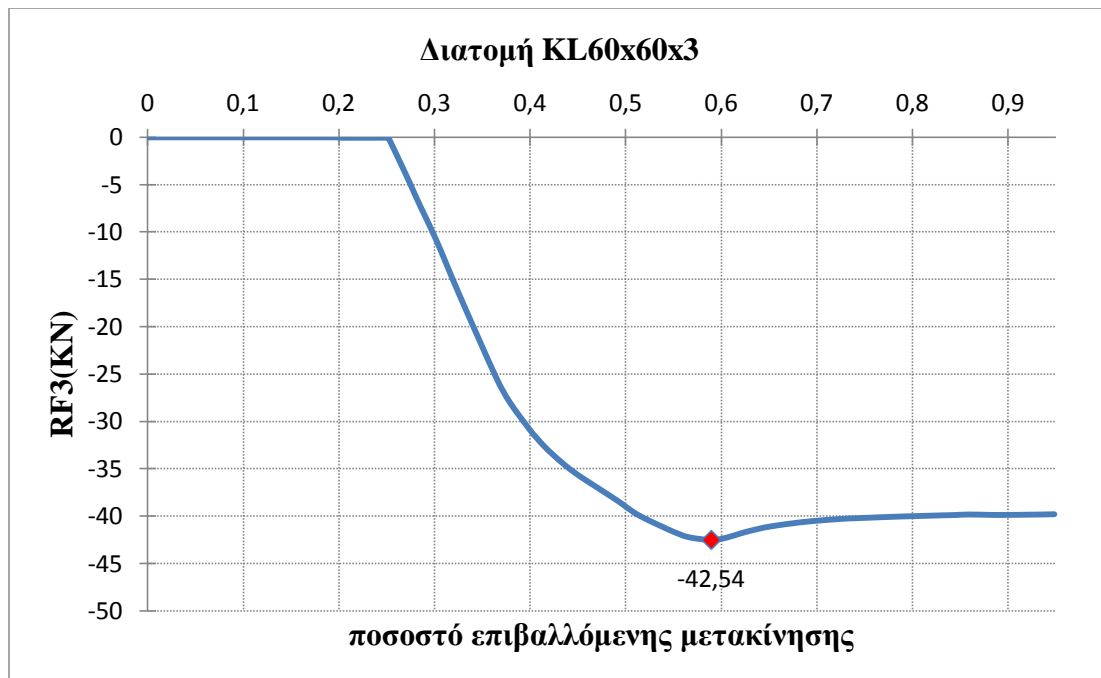
Σχήμα 4.14: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL50x50x3 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=4,40\text{mm}$ (55% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

4.5 Γωνιακό KL60x60x3 σε θλίψη

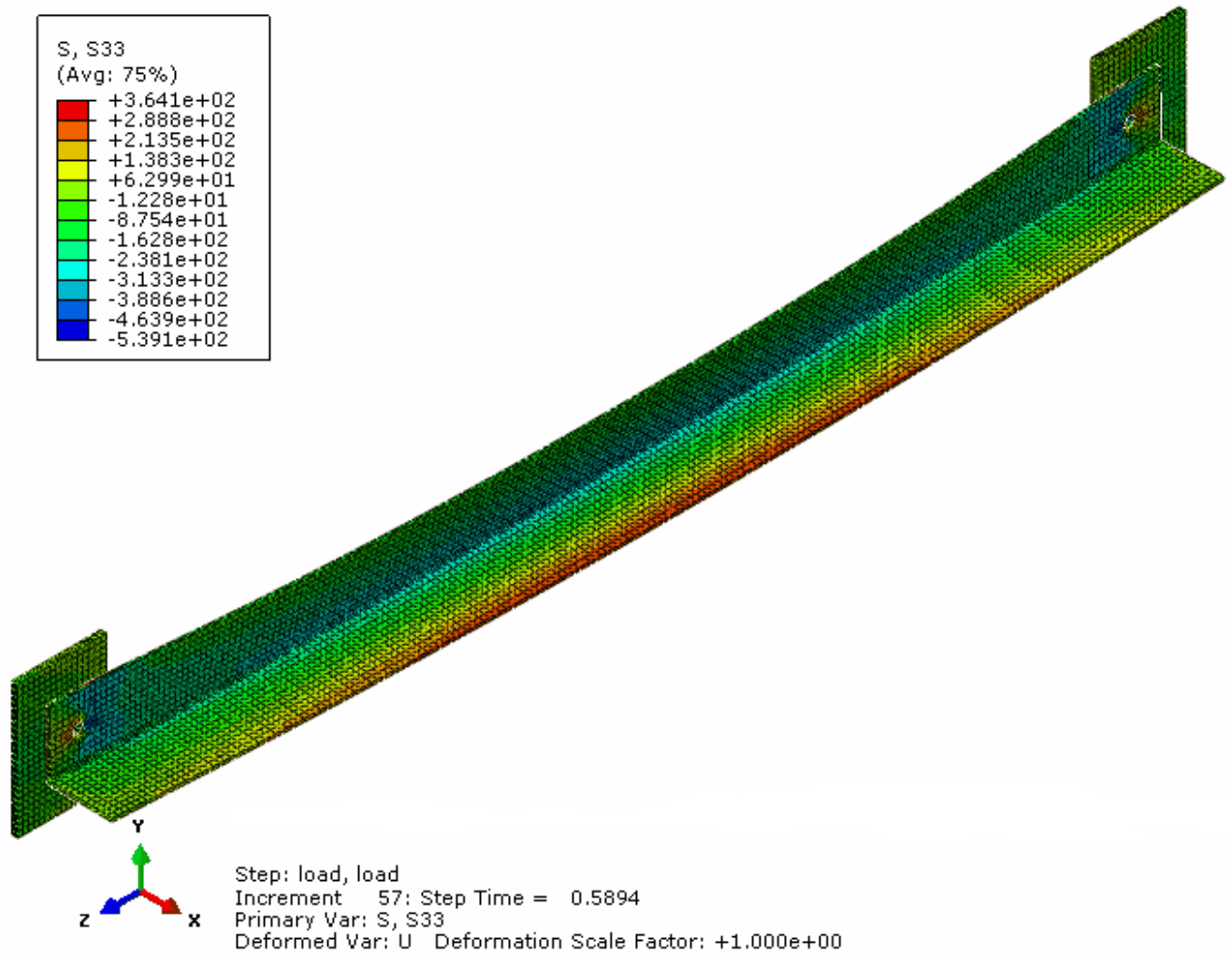
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL60x60x3 μήκους $L=1,00\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=120\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=5\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=8\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 95% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (7,6mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 39,80KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 59% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4,72mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=42,54\text{KN}$.

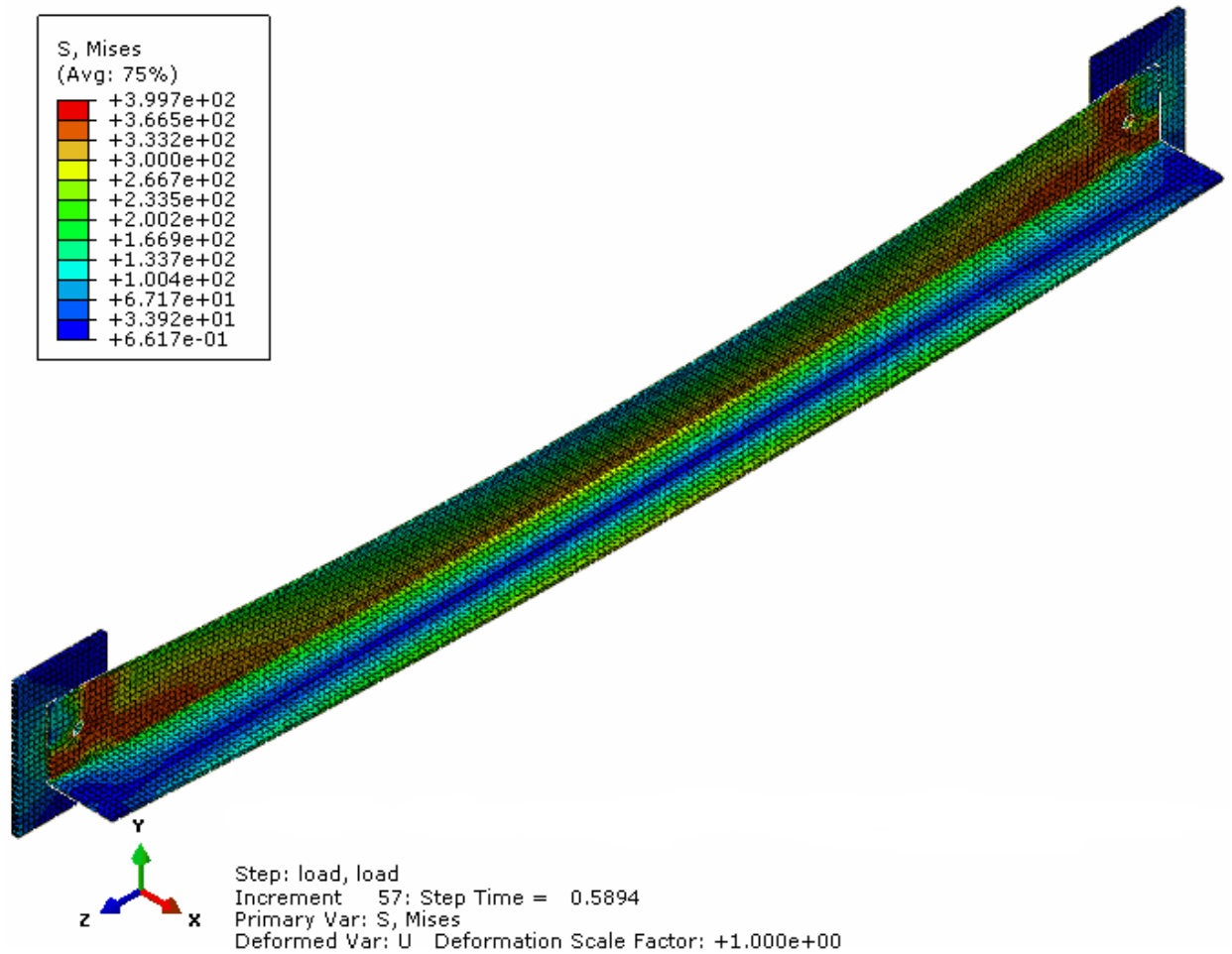
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 25% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 4.15: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL60x60x3.



Σχήμα 4.16: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL60x60x3 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=4,72\text{mm}$ (59% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



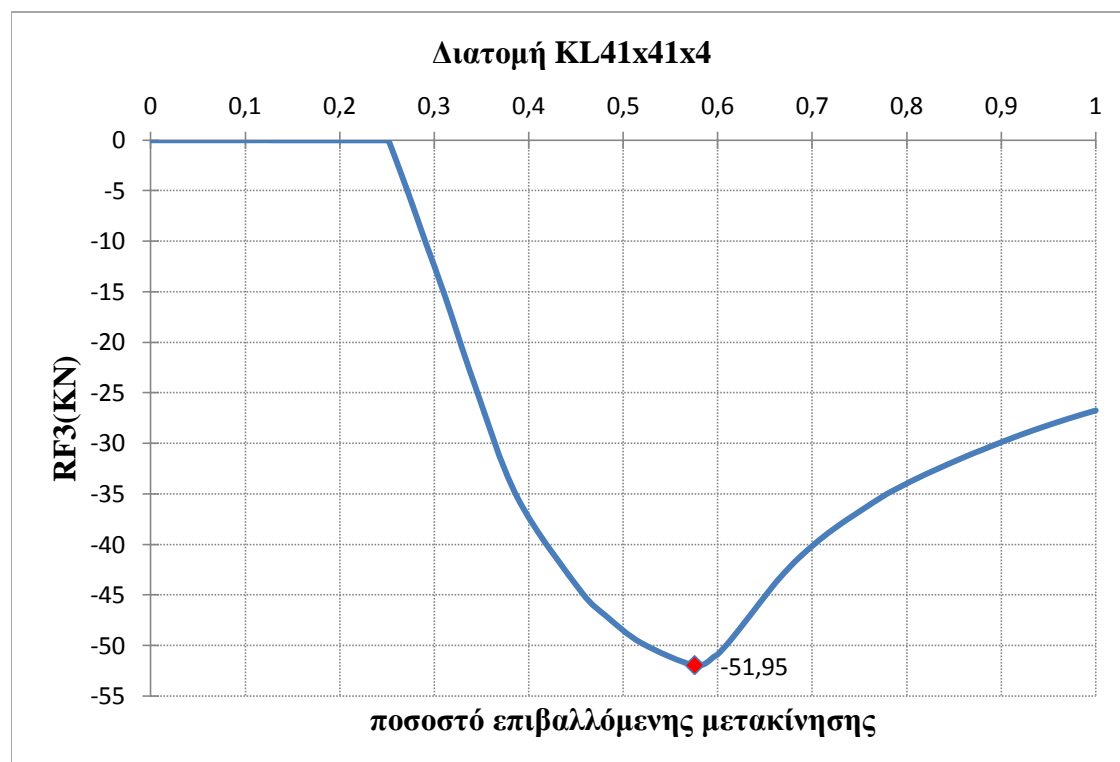
Σχήμα 4.17: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL60x60x3 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=4,72\text{mm}$ (59% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

4.6 Γωνιακό KL41x41x4 σε θλίψη

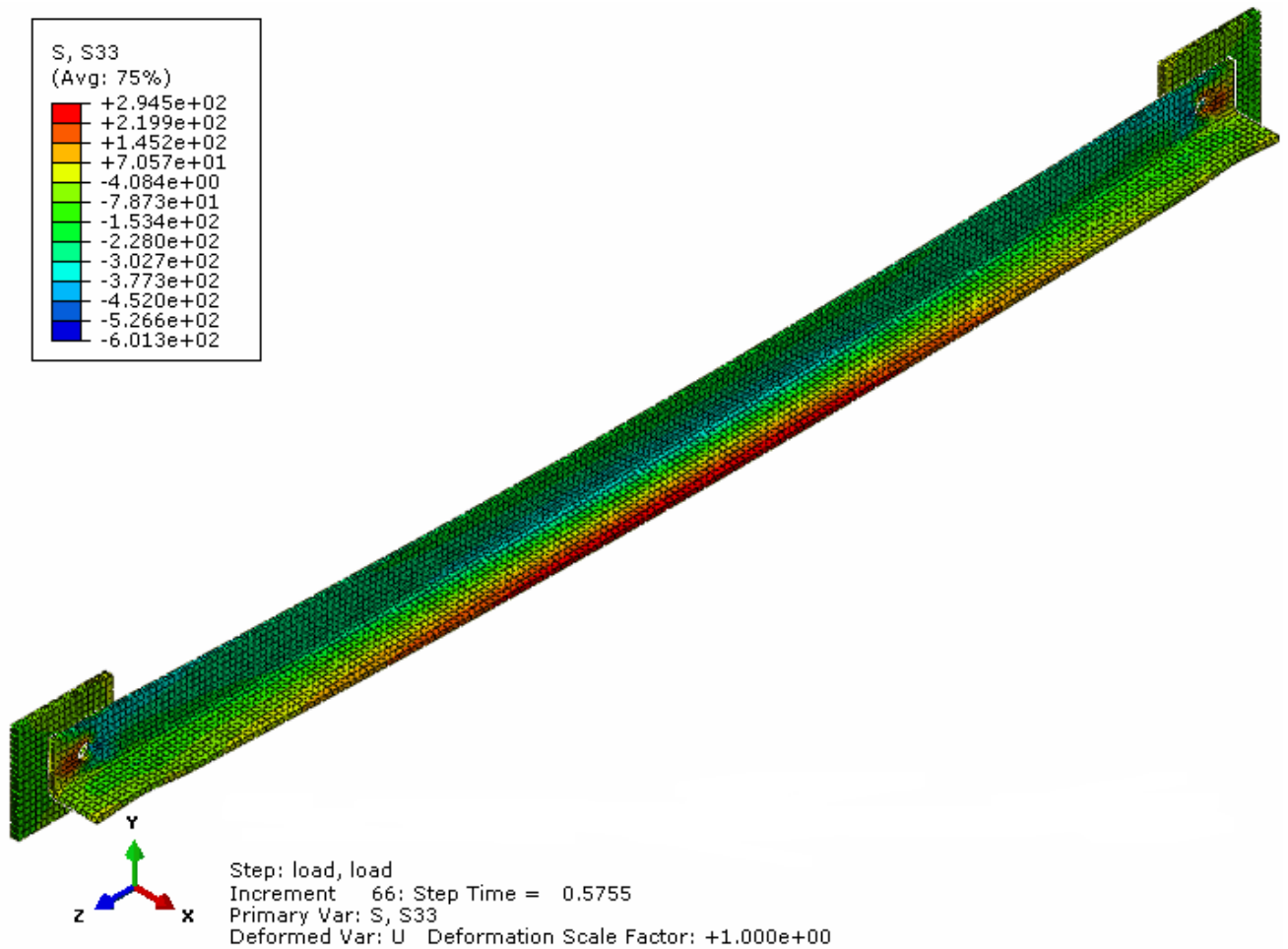
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL41x41x4 μήκους $L=1,00\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=80\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=8\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (8mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 26,73KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 57,5% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4,60mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=51,95\text{KN}$.

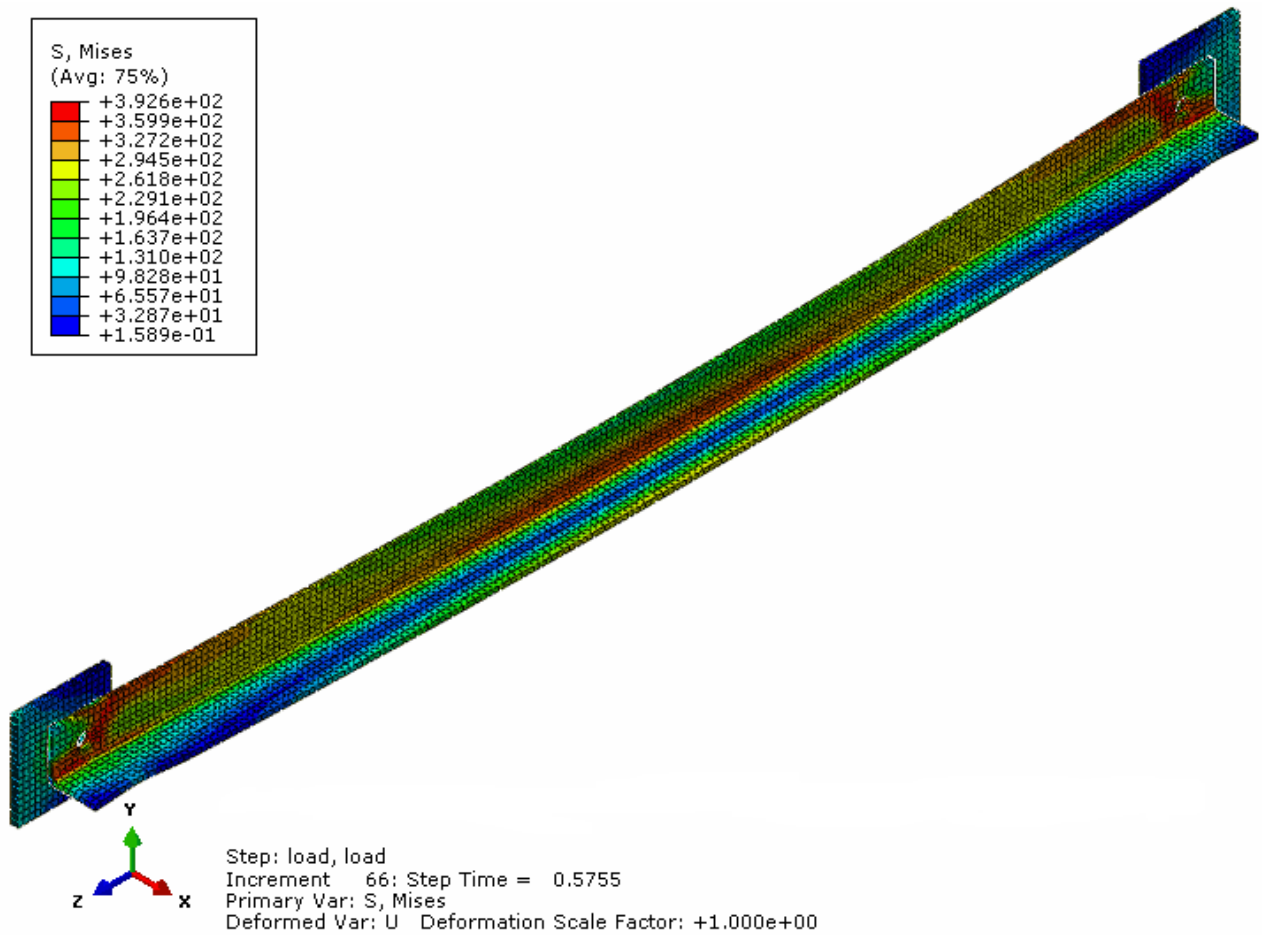
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 25% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL41x41x4.



Σχήμα 4.19: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL41x41x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=4,60\text{mm}$ (57,5% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



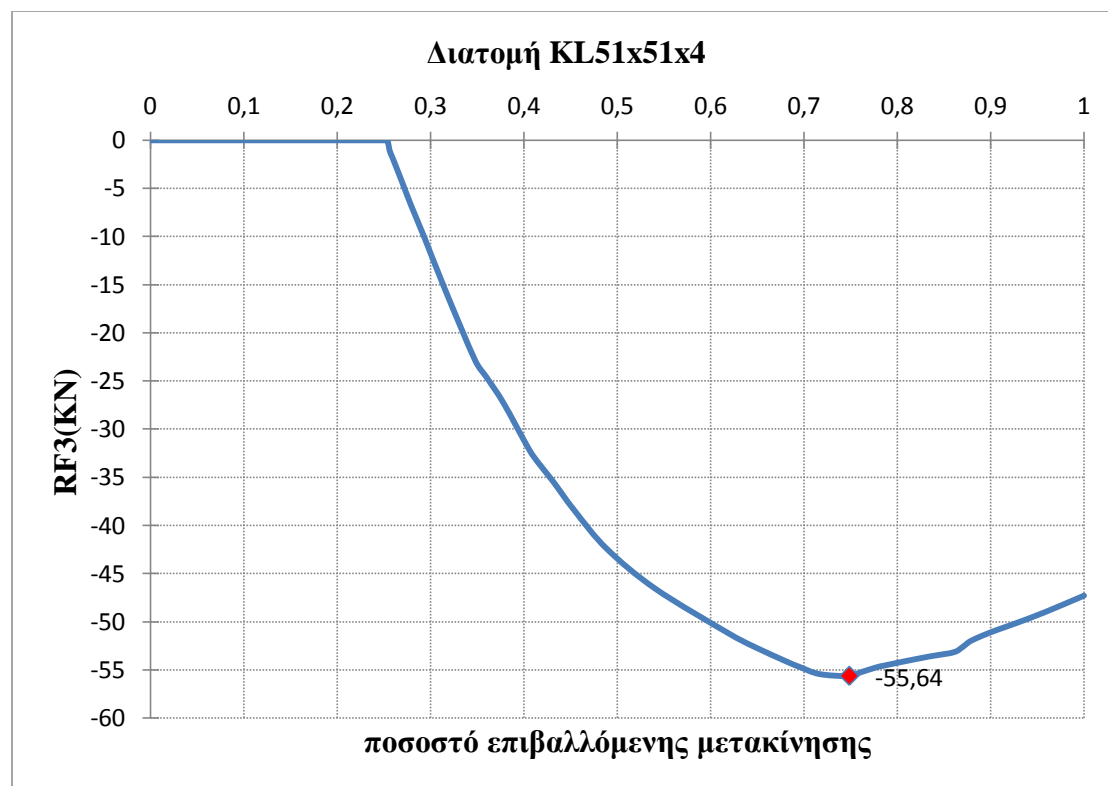
Σχήμα 4.20: Κατανομή ορθής τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL41x41x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=4,60\text{mm}$ (57,5% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

4.7 Γωνιακό KL51x51x4 σε θλίψη

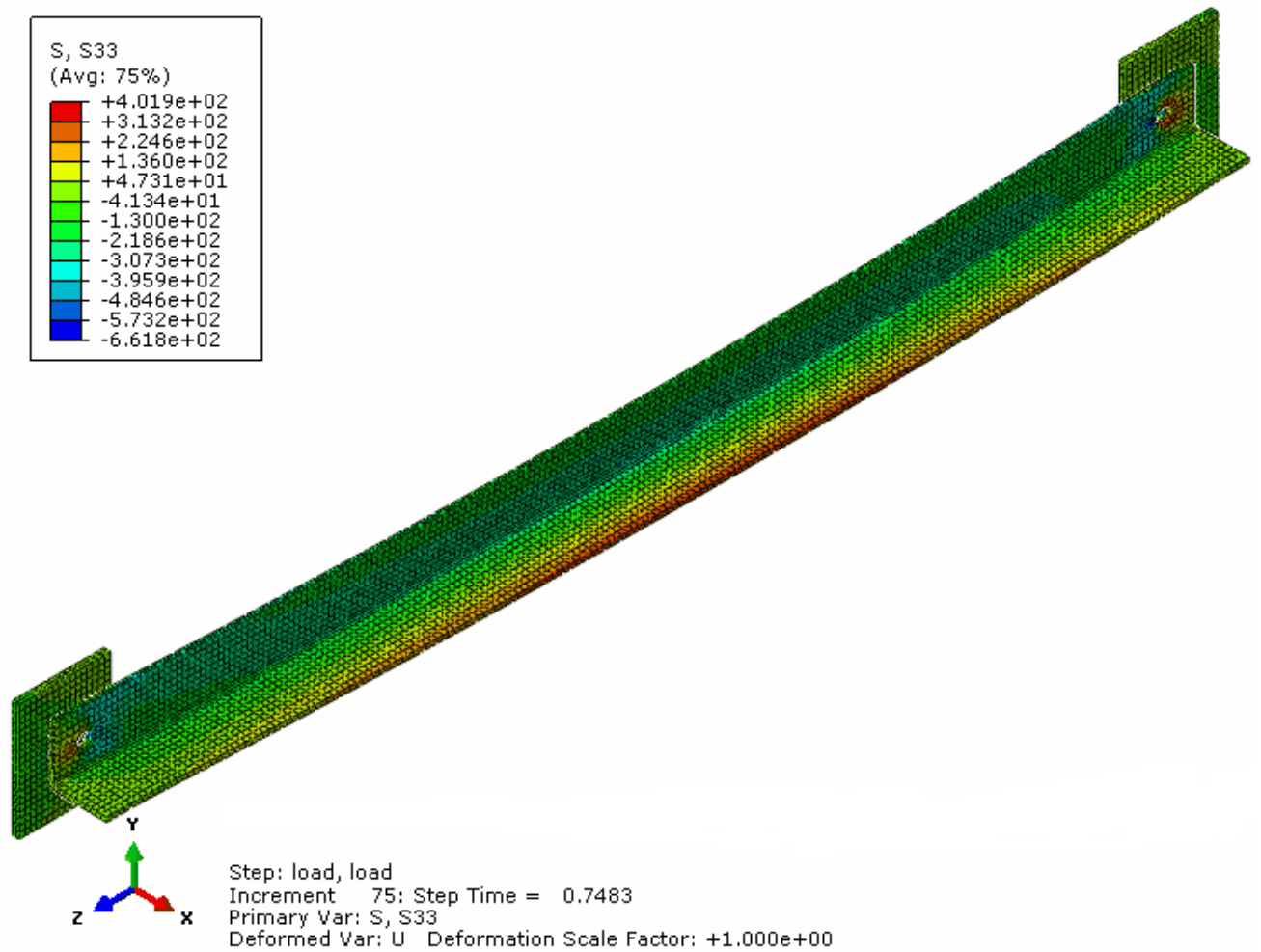
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL51x51x4 μήκους $L=1,00\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=100\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=80\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M12 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=13\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=8\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (8mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 47,28KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 74,8% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (5,98mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=55,64\text{KN}$.

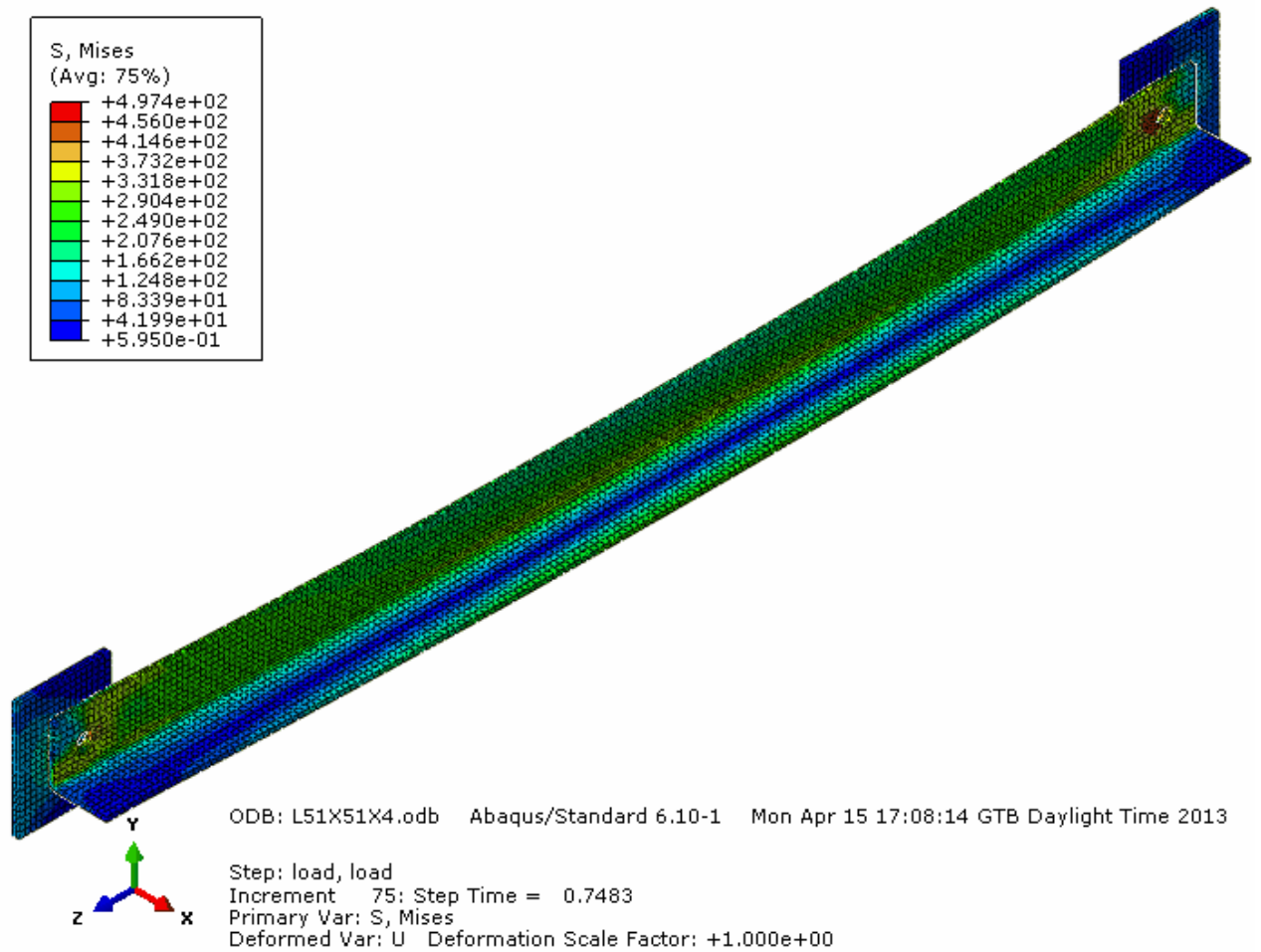
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 25% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (2mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL51x51x4.



Σχήμα 4.22: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL51x51x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=5,98\text{mm}$ (74,8% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



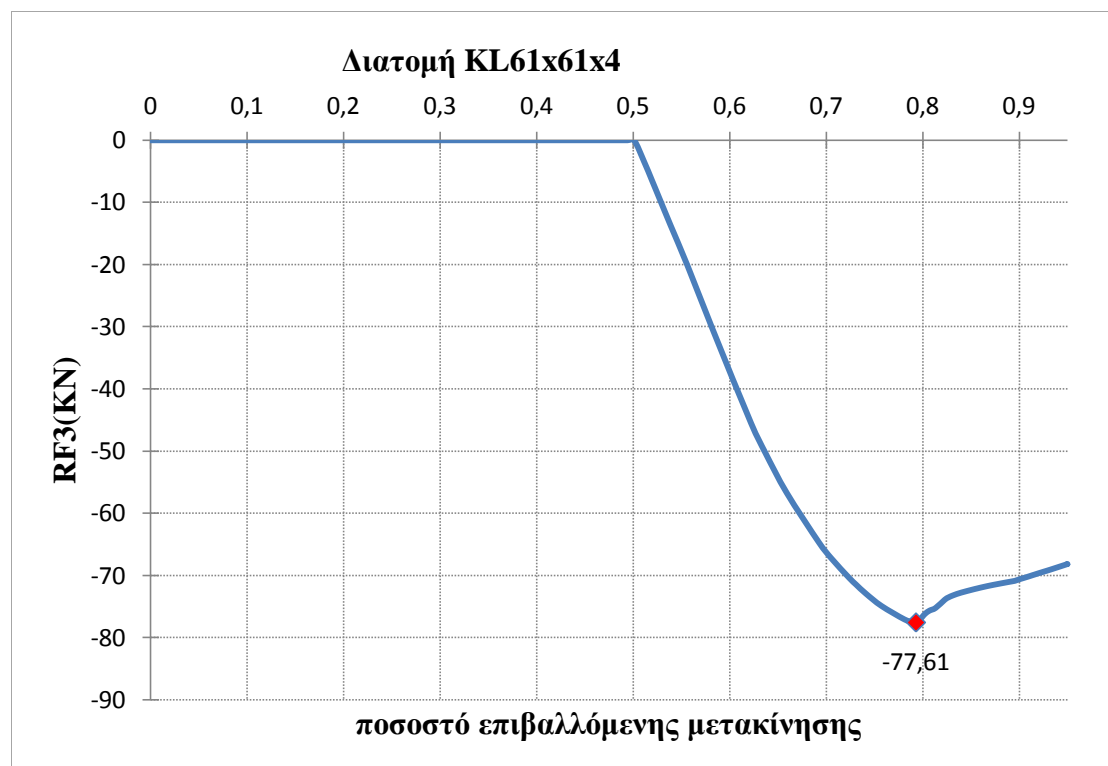
Σχήμα 4.23: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL51x51x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=5,98\text{mm}$ (74,8% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

4.8 Γωνιακό KL61x61x4 σε θλίψη

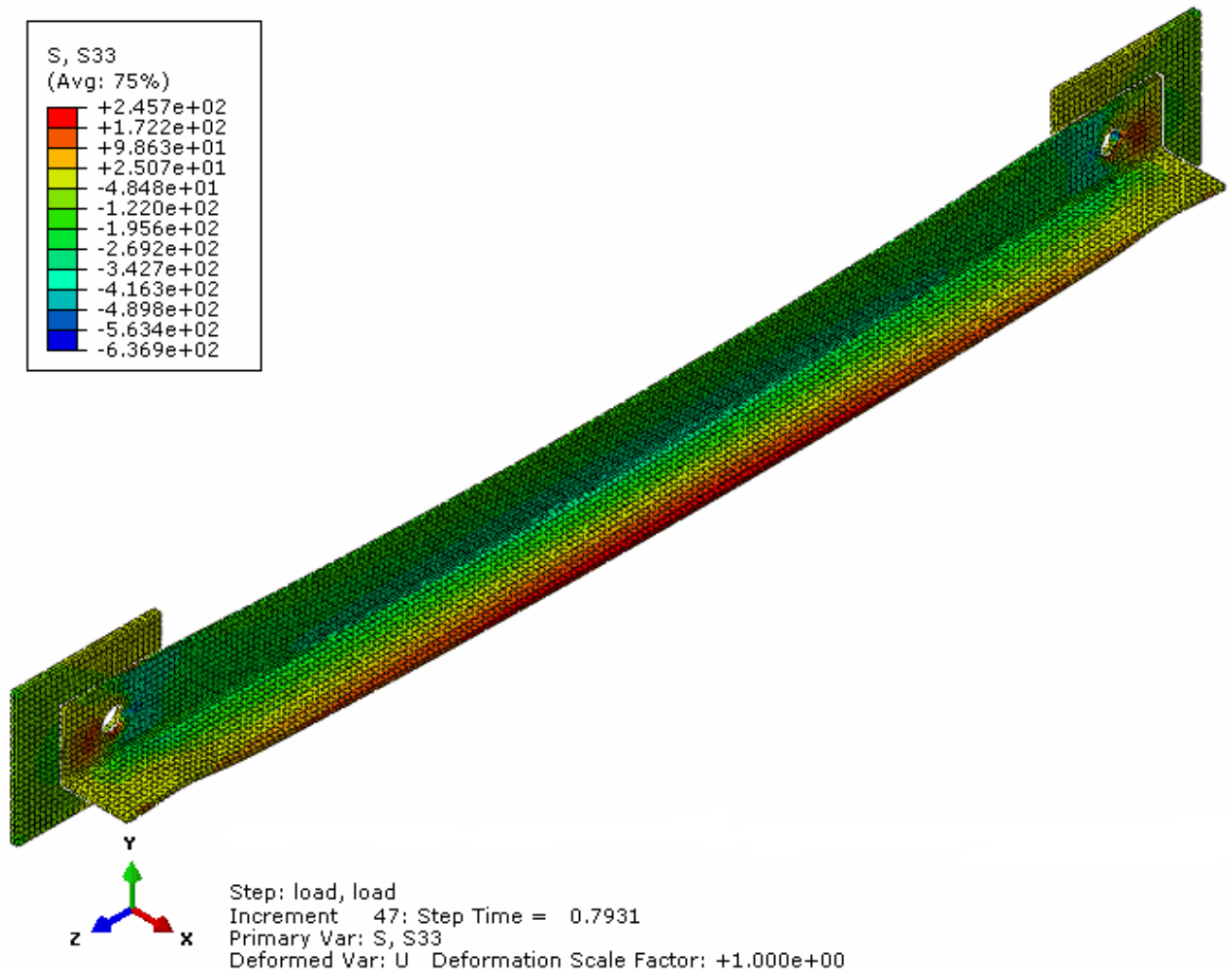
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL61x61x4 μήκους $L=1,00\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=120\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=130\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M20 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=22\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=8\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 95% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (7,60mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 68,19KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 79,3% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (6,34mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=77,61\text{KN}$.

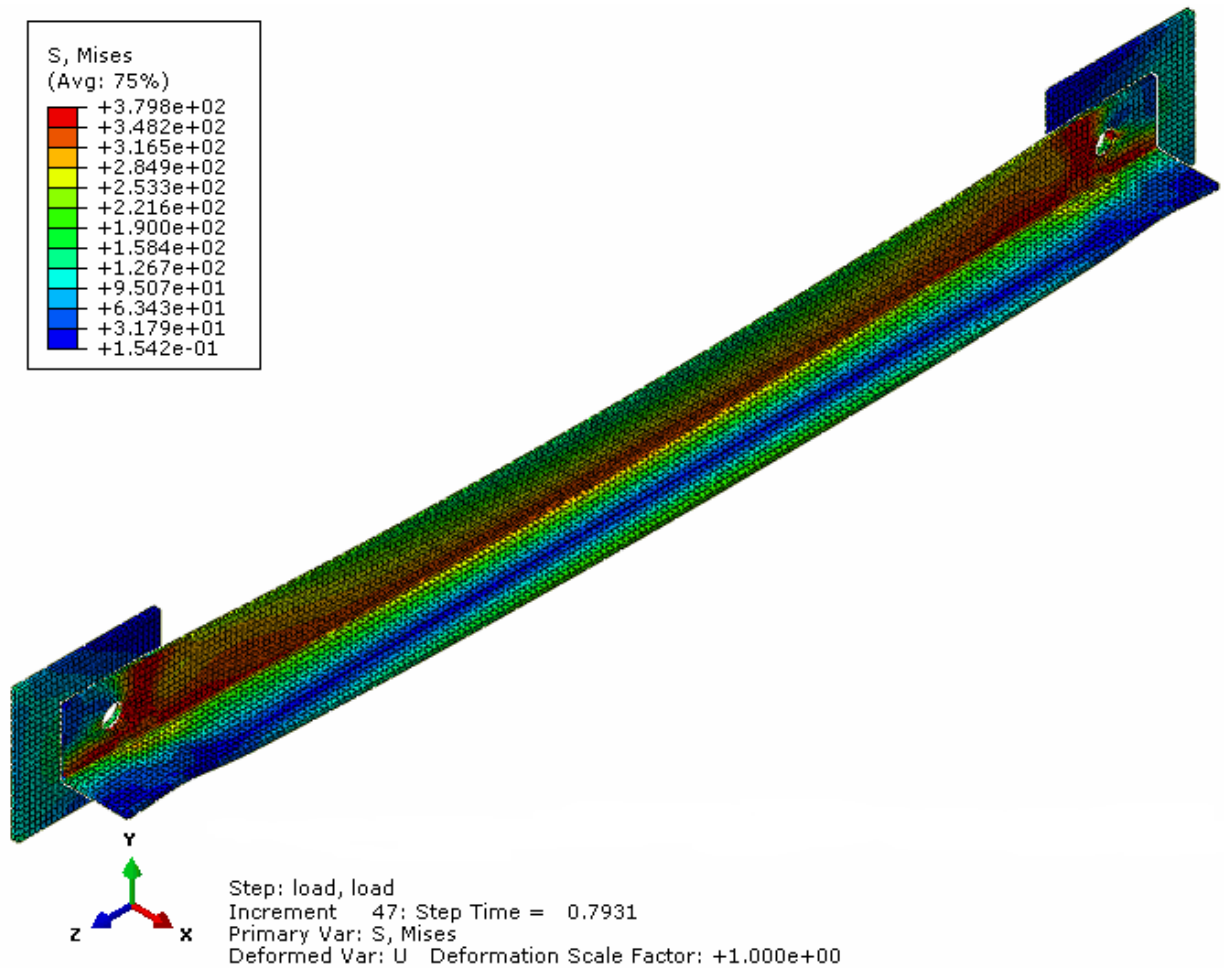
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 50% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 4.24: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL61x61x4.



Σχήμα 4.25: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL61x61x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=6,34\text{mm}$ (79,3% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



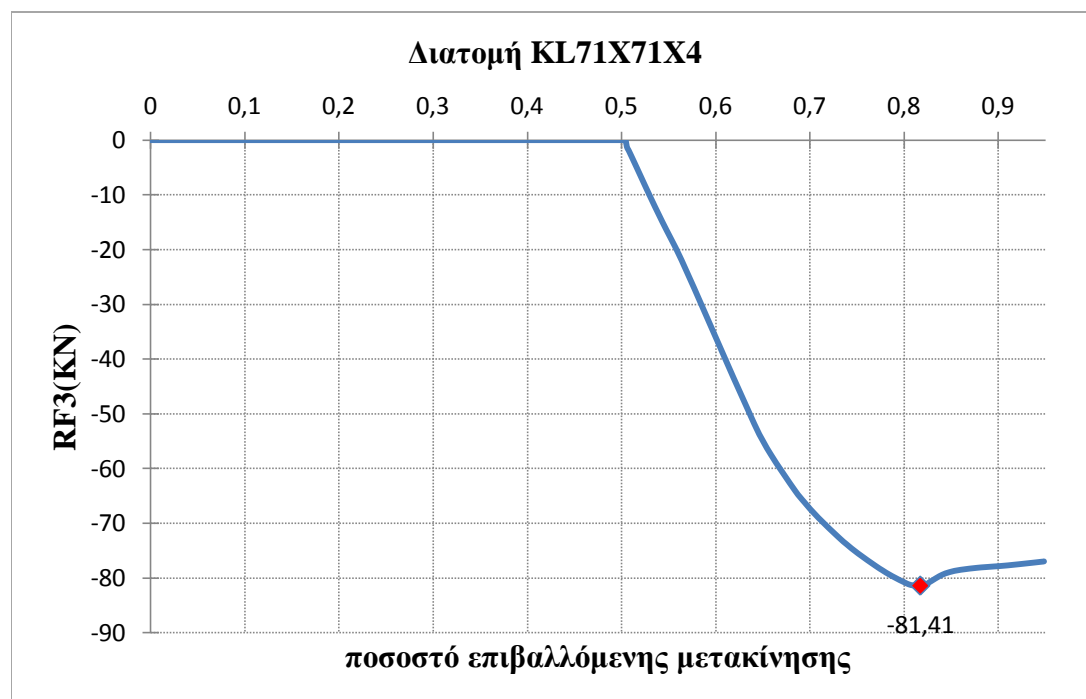
Σχήμα 4.26: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL61x61x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=6,34\text{mm}$ (79,3% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

4.9 Γωνιακό KL71x71x4 σε θλίψη

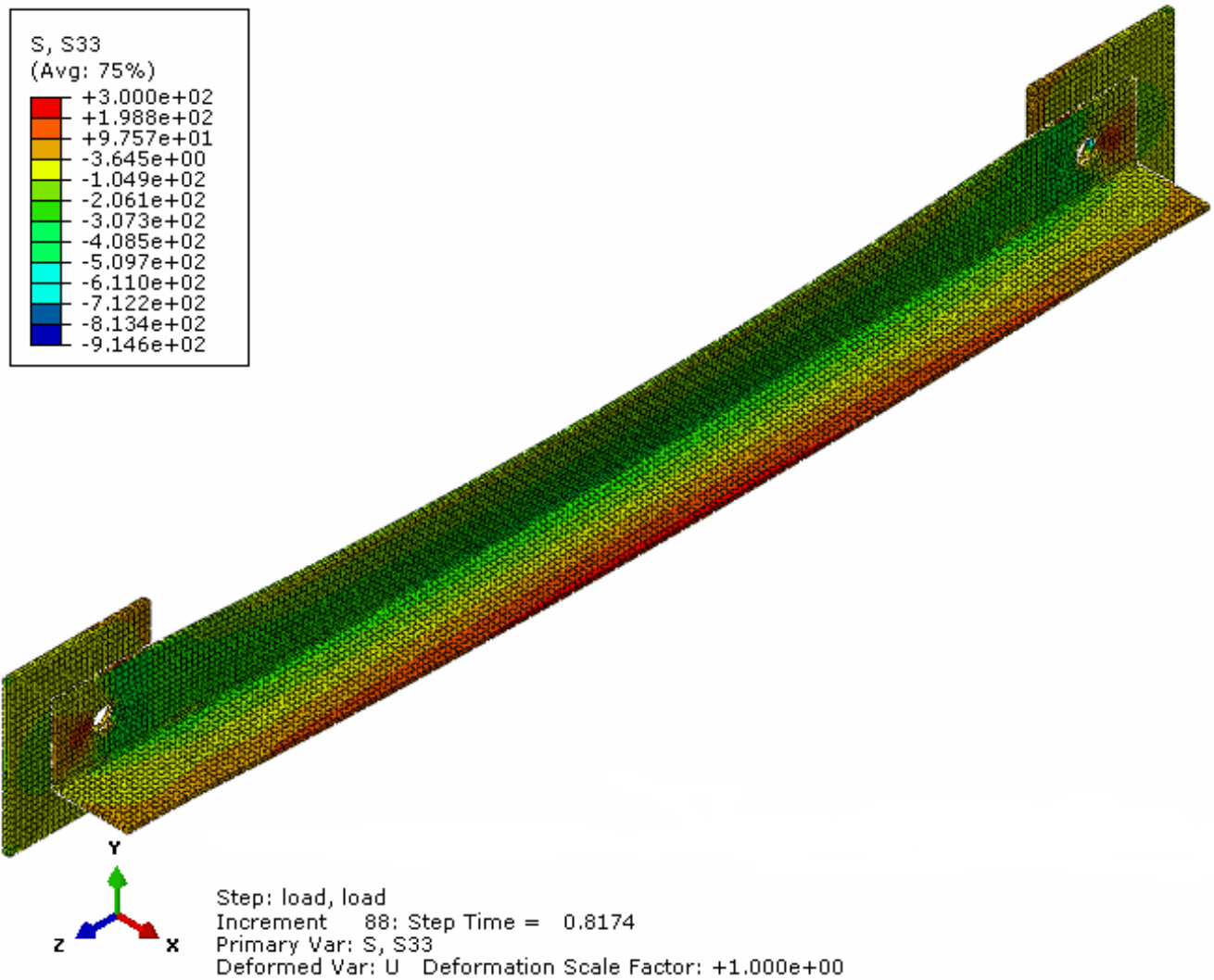
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL71x71x4 μήκους $L=1,00\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=140\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=130\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M20 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=22\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=8\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 95% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (7,60mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 76,98KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 81,7% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (6,54mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=81,41\text{KN}$.

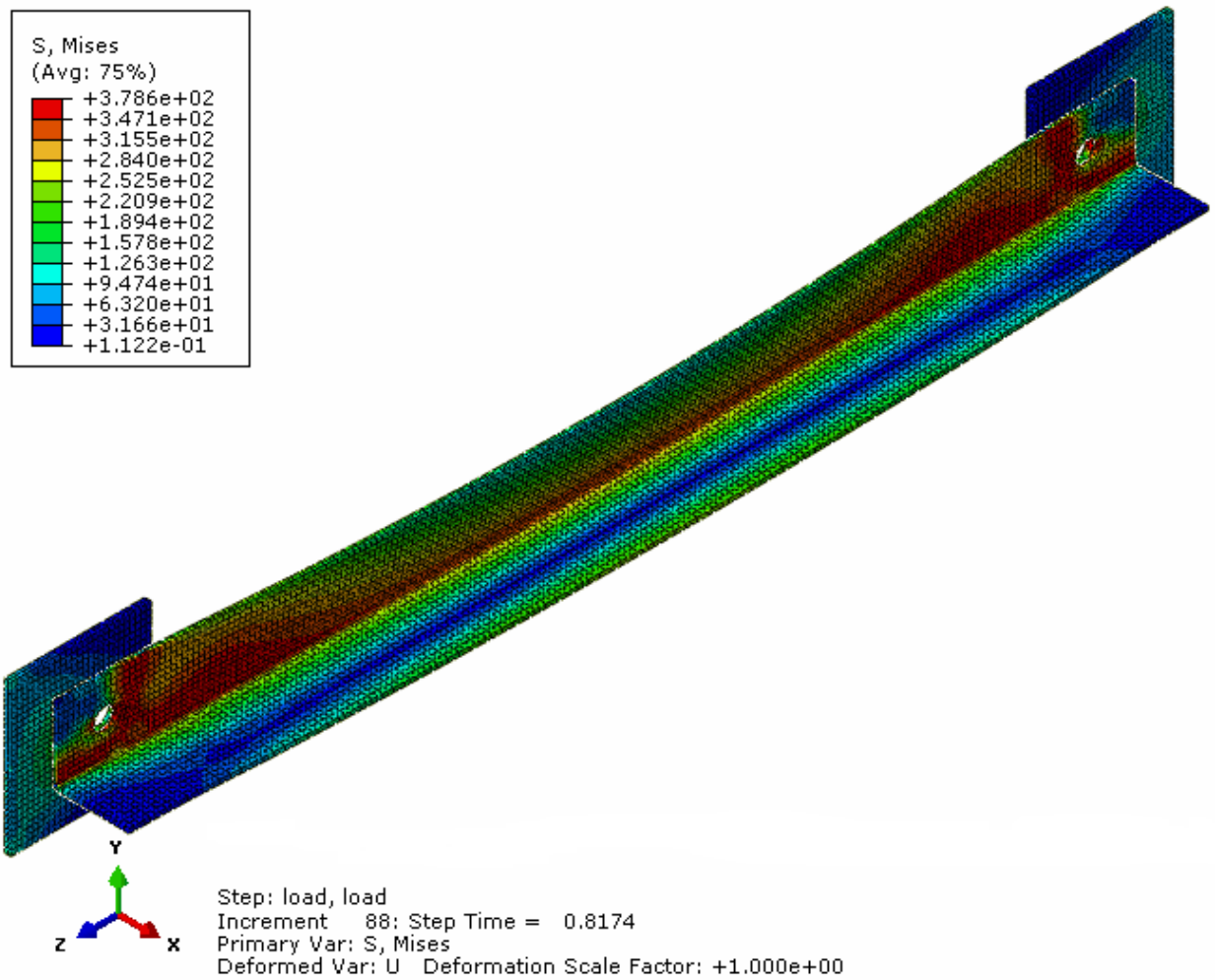
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 50% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 4.27: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL71x71x4.



Σχήμα 4.28: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL71x71x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=6,54\text{mm}$ (81,7% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



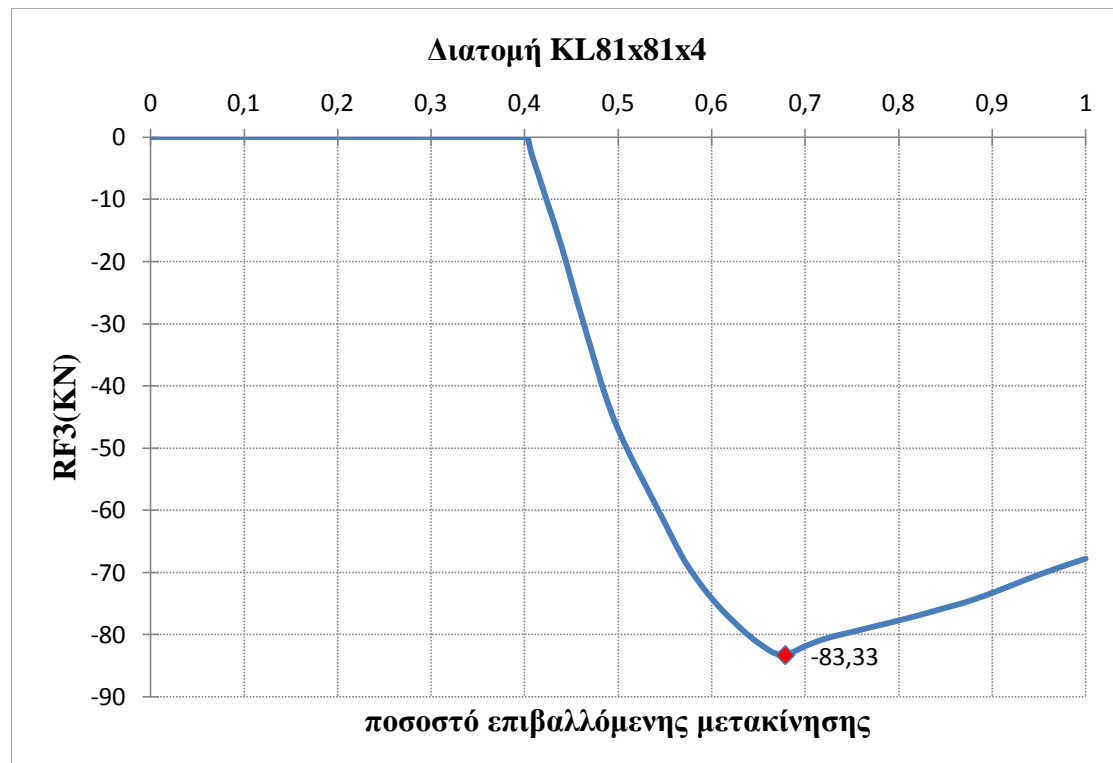
Σχήμα 4.29: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL71x71x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=6,54\text{mm}$ (81,7% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

4.10 Γωνιακό KL81x81x4 σε θλίψη

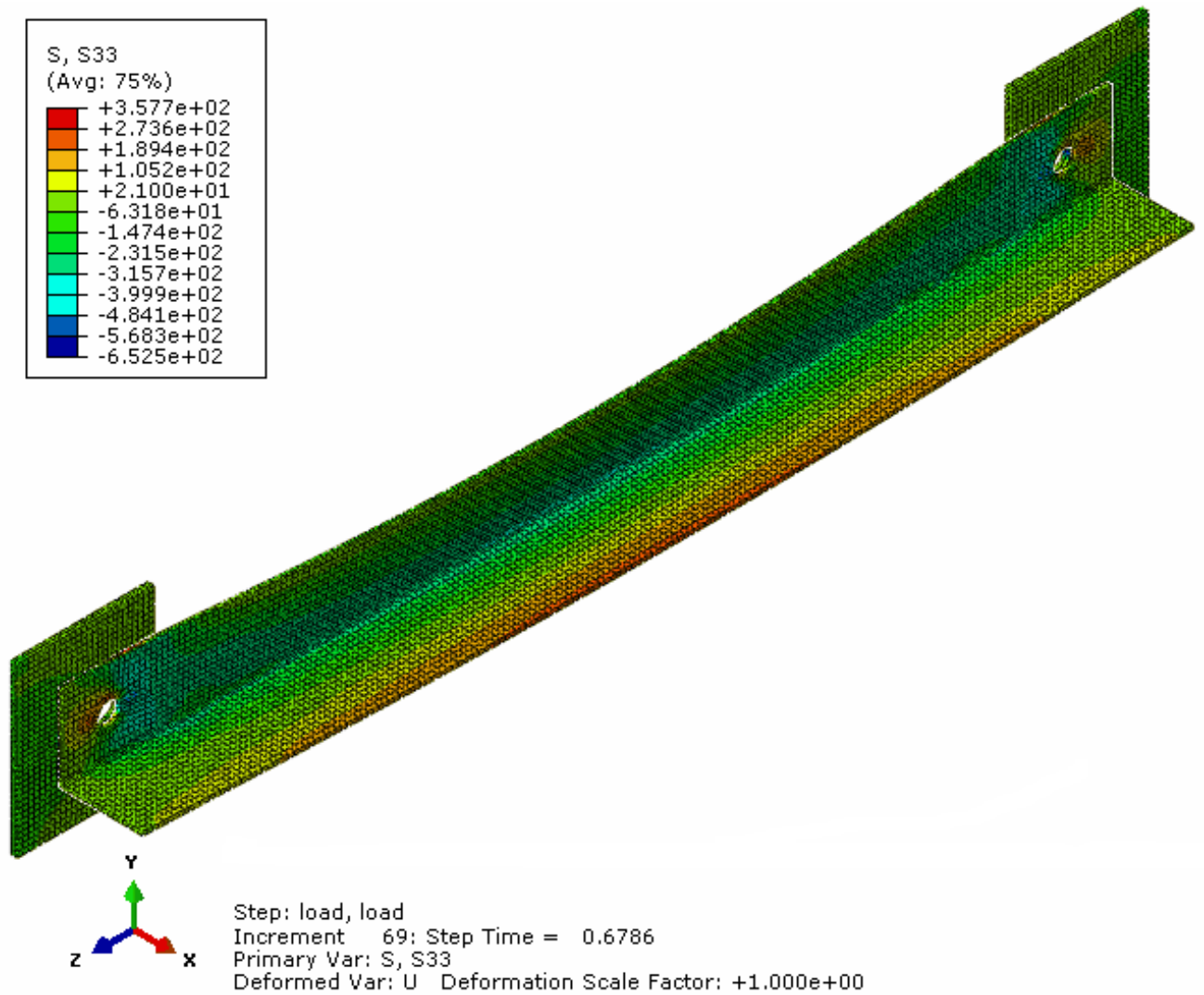
Το προσομοίωμα αποτελείται από ένα γωνιακό KL81x81x4 μήκους $L=1,00\text{m}$ και δύο πλάκες ύψους $h_{\text{πλ}}=160\text{mm}$, πλάτους $b_{\text{πλ}}=130\text{mm}$ και πάχους $t_{\text{πλ}}=6\text{mm}$. Οι κοχλίες που συνδέουν το γωνιακό με τις πλάκες είναι κατηγορίας M20 και οι οπές των ελασμάτων έχουν διάμετρο $d_o=22\text{mm}$. Ο χάλυβας των ελασμάτων είναι ποιότητας S355 και ο χάλυβας των κοχλιών είναι ποιότητας 8.8.

Η επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τη διεύθυνση z στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας που προκαλεί θλίψη στο προσομοίωμα έχει μέγεθος $u_3=10\text{mm}$. Η ανάλυση τερματίζει στο 100% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (10mm), όπου η αντίδραση RF3 που έχει αναπτυχθεί στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας στη θέση της πάκτωσης είναι 67,78KN. Σαν αντοχή του γωνιακού σε θλίψη θεωρώ αυτή που αναπτύσσεται στο 67,8% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (6,78mm), (όπου αρχίζει πτώση των τιμών της αντίδρασης RF3 στη θέση της πάκτωσης ενώ το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης συνεχίζει να αυξάνεται) και ισούται με $RF3=83,33\text{KN}$.

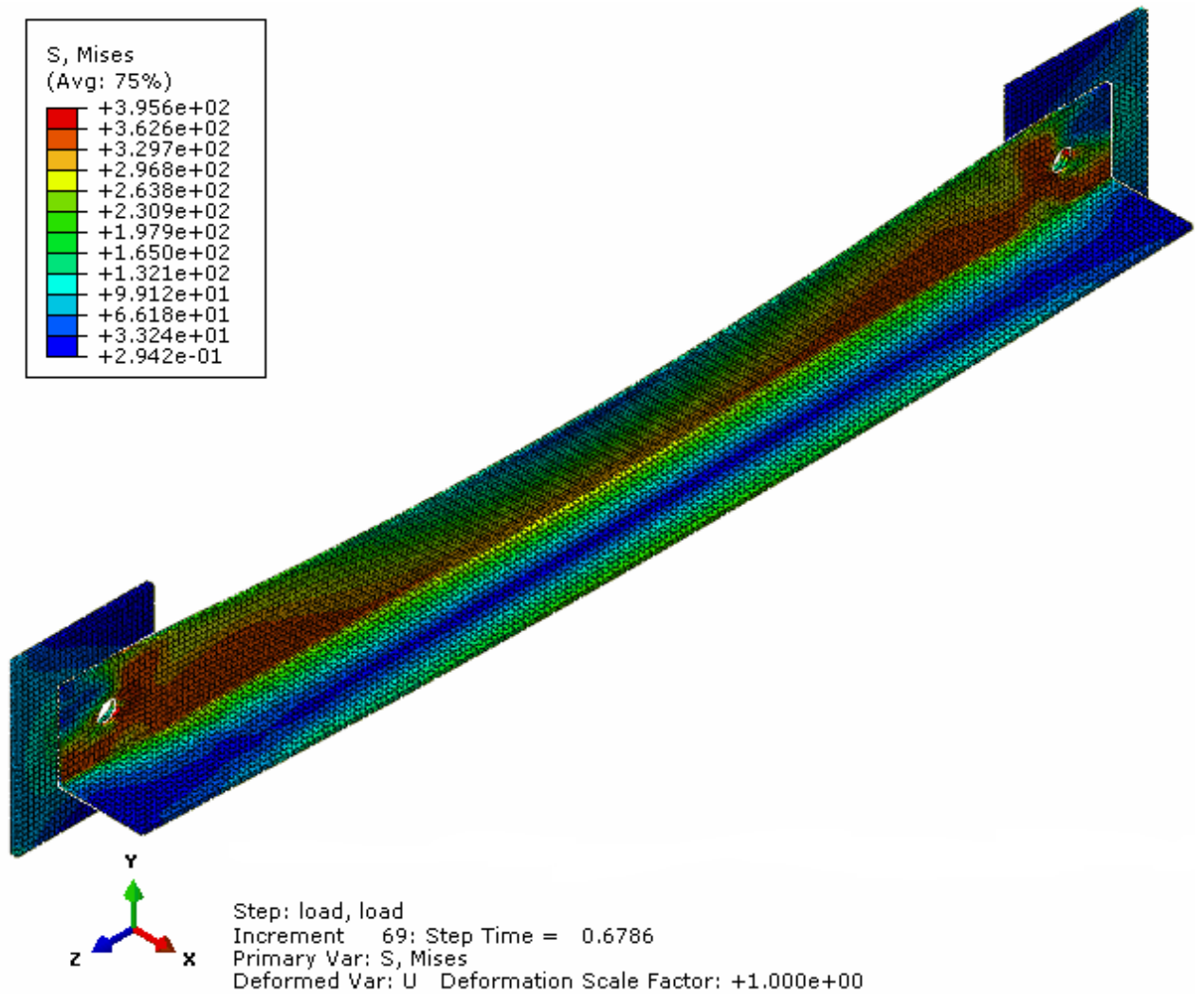
Στο παρακάτω διάγραμμα ο κατακόρυφος άξονας απεικονίζει την αντίδραση RF3 στο αριστερό άκρο της αριστερής πλάκας το οποίο είναι πακτωμένο και ο οριζόντιος άξονας το ποσοστό της επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας. Η αντίδραση RF3 αρχίζει να αναπτύσσεται στο 40% της επιβαλλόμενης μετακίνησης (4mm) εξαιτίας των ανοχών που υπάρχουν.



Σχήμα 4.30: Διάγραμμα αντίδρασης RF3 στο πακτωμένο άκρο της αριστερής πλάκας και ποσοστού επιβαλλόμενης μετακίνησης στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας για το γωνιακό KL81x81x4.



Σχήμα 4.31: Κατανομή ορθής τάσης S33(MPa) για το γωνιακό KL81x81x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=6,78\text{mm}$ (67,8% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).



Σχήμα 4.32: Κατανομή τάσης Von Mises(MPa) για το γωνιακό KL81x81x4 για μετακίνηση στο δεξί άκρο της δεξιάς πλάκας $u_3=6,78\text{mm}$ (67,8% της συνολικής επιβαλλόμενης μετακίνησης).

Στον παρακάτω πίνακα έχουν συγκεντρωθεί οι θλιπτικές αντοχές των γωνιακών διατομών οι οποίες έχουν προκύψει από τις αναλύσεις των υπολογιστικών ομοιωμάτων στο Abaqus 6.10-1.

Πίνακας 4.1: Θλιπτικές αντοχές γωνιακών διατομών στο Abaqus 6.10-1.

Διατομή γωνιακού	Θλιπτική αντοχή στο Abaqus(KN)
KL35x35x3	28,89
KL40x40x3	33,81
KL50x50x3	39,49
KL60x60x3	42,54
KL41x41x4	51,95
KL51x51x4	55,64
KL61x61x4	77,61
KL71x71x4	81,41
KL81x81x4	83,33

5 Εφελκυστική αντοχή των γωνιακών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο υπολογίζεται η εφελκυστική αντοχή των γωνιακών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 (Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα). Το μέρος του Ευρωκώδικα 3 που εφαρμόζεται είναι το Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια.

5.2 Γωνιακά που συνδέονται με το ένα σκέλος υπό εφελκυσμό

Ένα μεμονωμένο γωνιακό σε εφελκυσμό, το οποίο συνδέεται μέσω μίας σειράς κοχλιών στο ένα σκέλος, βλέπε Σχήμα 5.1 μπορεί να αντιμετωπίζεται ως κεντρικά φορτιζόμενο μέλος με μία ισοδύναμη καθαρή διατομή της οποίας η αντοχή σχεδιασμού στην οριακή κατάσταση αστοχίας προσδιορίζεται ως εξής:

$$\text{με 1 κοχλία: } N_{u,Rd} = \frac{2,0(e_2 - 0,5d_0)t f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.1)$$

$$\text{με 2 κοχλίες: } N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.2)$$

$$\text{με 3 ή περισσότερους κοχλίες: } N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5.3)$$

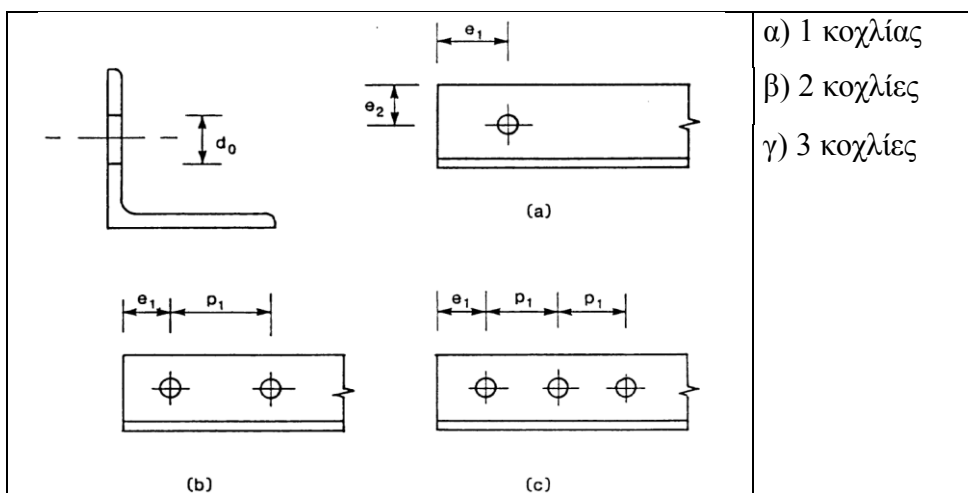
όπου:

β_2 και β_3 : μειωτικοί συντελεστές, οι οποίοι εξαρτώνται από το βήμα της κοχλίωσης p_1 και δίνονται στον Πίνακα 5.1. Για ενδιάμεσες τιμές του p_1 η τιμή του β μπορεί να προσδιοριστεί με γραμμική παρεμβολή.

A_{net} : η καθαρή επιφάνεια της διατομής του γωνιακού. Για ανισοσκελή γωνιακά συνδεόμενα με το μικρότερο σκέλος, η A_{net} πρέπει να λαμβάνεται ίση με την καθαρή επιφάνεια ενός ισοδύναμου ισοσκελούς γωνιακού με διάσταση σκέλους ίση με εκείνη του μικρότερου από τα δύο.

Πίνακας 5.1: Μειωτικοί συντελεστές β_2 και β_3 .

Βήμα	p_1	$\leq 2,5 d_0$	$\geq 5,0 d_0$
2 κοχλίες	β_2	0,4	0,7
3 κοχλίες ή περισσότεροι	β_3	0,5	0,7



Σχήμα 5.1: Γωνιακά συνδεόμενα με το ένα σκέλος.

5.3 Κατηγορία κοχλιωτών συνδέσεων

Οι κοχλιωτές συνδέσεις των γωνιακών που μελετάμε είναι συνδέσεις διάτμησης κατηγορίας A (συνδέσεις άντυγας). Σε αυτή την κατηγορία μπορούν να χρησιμοποιηθούν κοχλίες κατηγορίας 4.6 μέχρι και 10.9. Δεν απαιτείται προένταση ούτε ειδική επεξεργασία των επιφανειών επαφής. Η μέγιστη διατμητική δύναμη σχεδιασμού δεν πρέπει να υπερβαίνει την αντοχή σχεδιασμού σε διάτμηση ούτε την αντοχή σχεδιασμού σε σύνθλιψη άντυγας.

Πίνακας 5.2: Κατηγορία κοχλιωτών συνδέσεων.

Κατηγορία	Κριτήρια	Παρατηρήσεις
Συνδέσεις διάτμησης		
A άντυγας	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Δεν απαιτείται προένταση. Κατηγορίες κοχλιών από 4.6 μέχρι και 10.9.

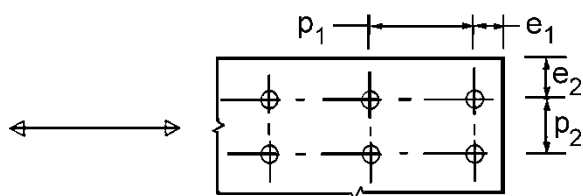
5.4 Διάταξη οπών για κοχλίες

Οι μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ κοχλιών και οι αποστάσεις από τα άκρα δίνονται στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ κοχλιών και ήλων και από τα άκρα.

Αποστάσεις, Βλέπε Σχήμα 5.2	Ελάχιστη	Μέγιστη ¹⁾		
		Κατασκευές από χάλυβες που συμφωνούν με το EN 10025 εκτός εκείνων που συμφωνούν με το EN 10025-5		Κατασκευές από χάλυβες που συμφωνούν με το EN 10025-5
		Χάλυβας εκτεθειμένος σε καιρικές συνθήκες ή άλλα διαβρωτικά περιβάλλοντα	Χάλυβας μη εκτεθειμένος	Χάλυβας χωρίς προστασία
Απόσταση από άκρο e_1	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		Η μεγαλύτερη από $8t$ ή 125 mm
Απόσταση από άκρο e_2	$1,2d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$		Η μεγαλύτερη από $8t$ ή 125 mm
Απόσταση e_3 σε επιμήκεις οπές	$1,5d_0$			
Απόσταση e_4 σε επιμήκεις οπές	$1,5d_0$			
Βήμα p_1	$2,2d_0$	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t_{\min}$ ή 175 mm
Βήμα $p_{1,0}$		Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm		
Βήμα $p_{1,i}$		Η μικρότερη από $28t$ ή 400 mm		
Βήμα p_2	$2,4d_0$	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t$ ή 200 mm	Η μικρότερη από $14t_{\min}$ ή 175 mm

¹⁾ t είναι το πάχος του λεπτότερου εξωτερικά συνδεόμενου μέρους.



Σχήμα 5.2: Σύμβολα για τις αποστάσεις των μέσων σύνδεσης.

5.5 Αντοχή σχεδιασμού μεμονωμένων μέσων σύνδεσης

Η αντοχή σχεδιασμού ενός μεμονωμένου κοχλία που υπόκειται σε διάτμηση δίνεται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Αντοχή σχεδιασμού μεμονωμένων μέσων σύνδεσης που υπόκεινται σε διάτμηση.

Μηχανισμός αστοχίας	Κοχλίες
Αντοχή σε διάτμηση ανά επίπεδο διάτμησης	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ <ul style="list-style-type: none"> - όταν το επίπεδο διάτμησης διέρχεται από το σπείρωμα του κοχλία (A είναι η επιφάνεια ενεργού διατομής του κοχλία, A_s): - για κατηγορίες 4.6, 5.6 και 8.8: $\alpha_v = 0,6$ - για κατηγορίες 4.8, 5.8, 6.8 και 10.9: $\alpha_v = 0,5$ - όταν το επίπεδο διάτμησης διέρχεται από την πλήρη διατομή του κοχλία (A είναι η καθαρή επιφάνεια κοχλία): $\alpha_v = 0,6$
Αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}}, \text{ όπου } a_b \text{ το μικρότερο από } a_d \text{ ή } \frac{f_{ub}}{f_u} \text{ ή } 1,0$ <p>Κατά τη διεύθυνση μεταφοράς του φορτίου:</p>
	<ul style="list-style-type: none"> - για τελευταία σειρά κοχλιών: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}, \text{ για εσωτερικούς κοχλίες: } \alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$
	<ul style="list-style-type: none"> - για πλευρικά ακραίους κοχλίες: $k_1 \text{ το μικρότερο από } 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \text{ ή } 2,5$
	<ul style="list-style-type: none"> - για εσωτερικούς κοχλίες: $k_1 \text{ το μικρότερο από } 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \text{ ή } 2,5$

5.6 Χαρακτηριστικά των γωνιακών διατομών και των κοχλιών

Στον παρακάτω Πίνακα 5.5 παρατίθενται οι τιμές διάφορων χαρακτηριστικών των γωνιακών διατομών και των κοχλιών που συνδέουν τα γωνιακά. Αυτές οι τιμές είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των αντοχών τους. Με d συμβολίζεται η διάμετρος του κορμού του κοχλία, με d_o συμβολίζεται η διάμετρος των οπών των ελασμάτων, με t συμβολίζεται το πάχος του γωνιακού, με F συμβολίζεται το εμβαδόν της διατομής του γωνιακού, με F_{net} συμβολίζεται το εμβαδόν της καθαρής διατομής του γωνιακού ($F_{net}=F-d_o*t$) και με A συμβολίζεται το εμβαδόν της διατομής του κορμού του κοχλία.

Πίνακας 5.5: Χαρακτηριστικά των γωνιακών διατομών και των κοχλιών.

Διατομή	d (cm)	d_o (cm)	t (cm)	F (cm ²)	F_{net} (cm ²)	A (cm ²)
KL35x35x3	1,2	1,3	0,3	1,95	1,56	1,13
KL40x40x3	1,2	1,3	0,3	2,26	1,87	1,13
KL50x50x3	1,2	1,3	0,3	2,85	2,46	1,13
KL60x60x3	1,2	1,3	0,3	3,45	3,06	1,13
KL41x41x4	1,2	1,3	0,4	3	2,48	1,13
KL51x51x4	1,2	1,3	0,4	3,8	3,28	1,13
KL61x61x4	2	2,2	0,4	4,6	3,72	3,14
KL71x71x4	2	2,2	0,4	5,4	4,52	3,14
KL81x81x4	2	2,2	0,4	6,2	5,32	3,14

Στον παρακάτω Πίνακα 5.6 παρατίθενται το όριο διαρροής και η αντοχή θραύσης του χάλυβα των γωνιακών διατομών καθώς και το όριο διαρροής και η εφελκυστική αντοχή του χάλυβα των κοχλιών.

Πίνακας 5.6: Αντοχή του χάλυβα των γωνιακών και των κοχλιών.

Διατομή	f_y (KN/cm ²)	f_u (KN/cm ²)	f_{yb} (KN/cm ²)	f_{ub} (KN/cm ²)
KL35x35x3	35,5	51	64	80
KL40x40x3	35,5	51	64	80
KL40x40x3 S355 MC	35,5	43	64	80
KL50x50x3	35,5	51	64	80
KL60x60x3	35,5	51	64	80
KL41x41x4	35,5	51	64	80
KL51x51x4	35,5	51	64	80
KL61x61x4	35,5	51	64	80
KL71x71x4	35,5	51	64	80
KL81x81x4	35,5	51	64	80

5.7 Έλεγχος των αποστάσεων των οπών από τα άκρα

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται οι αποστάσεις των οπών από τα άκρα του γωνιακού καθώς και οι μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις που πρέπει να ικανοποιούνται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Με e_2 συμβολίζεται η απόσταση από το άνω άκρο του γωνιακού, ενώ με e_1 συμβολίζεται η απόσταση από το αριστερό και δεξί άκρο του γωνιακού. Οι μέγιστες και ελάχιστες αποστάσεις με υπόθεση διαβρωτικού περιβάλλοντος υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις που δίνει ο Πίνακας 5.3:

$$m_{\min} = 1,2 \cdot d_0 \quad (5.4)$$

$$m_{\max} = 40 + 4 \cdot t \quad (5.5)$$

Πίνακας 5.7: Αποστάσεις των οπών από τα άκρα του γωνιακού.

Διατομή	e_2 (cm)	e_1 (cm)	m_{\min} (cm)	m_{\max} (cm)
KL35x35x3	1,6	2,6	1,56	5,2
KL40x40x3	2	2,6	1,56	5,2
KL50x50x3	2,5	2,6	1,56	5,2
KL60x60x3	3	2,6	1,56	5,2
KL41x41x4	2,05	2,6	1,56	5,6
KL51x51x4	2,55	2,6	1,56	5,6
KL61x61x4	3,05	4,4	2,64	5,6
KL71x71x4	3,55	4,4	2,64	5,6
KL81x81x4	4,05	4,4	2,64	5,6

5.8 Υπολογισμός εφελκυστικής αντοχής των γωνιακών

Για τον υπολογισμό της αντοχής άντυνας οπής σε σύνθλιψη είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των συντελεστών k_I και a_b . Αυτοί οι συντελεστές εξαρτώνται από τη γεωμετρία της κοιλίωσης (αποστάσεις της οπής από τα όρια) και από τα υλικά.. Οι συντελεστές k_I και a_b για κοιλίωση με έναν κοιλία υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις που δίνει ο Πίνακας 5.4:

$$k_I = \min\left\{\frac{2,8e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right\} \quad (5.6)$$

$$a_b = \min\left\{1; \frac{f_{ub}}{f_u}; \frac{e_1}{3d_0}\right\} \quad (5.7)$$

Στον παρακάτω Πίνακα 5.8 παρατίθενται οι τιμές των συντελεστών k_I και a_b .

Πίνακας 5.8: Συντελεστές k_1 και a_b .

Διατομή	k_1	a_b
KL35x35x3	1,75	0,67
KL40x40x3	2,50	0,67
KL50x50x3	2,50	0,67
KL60x60x3	2,50	0,67
KL41x41x4	2,50	0,67
KL51x51x4	2,50	0,67
KL61x61x4	2,18	0,67
KL71x71x4	2,50	0,67
KL81x81x4	2,50	0,67

Στον παρακάτω Πίνακα 5.9 παρατίθενται οι αντοχές σε εφελκυσμό σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, σύμφωνα με το Abaqus 6.10-1, καθώς και ο λόγος αυτών των δύο αντοχών. Με $N_{u,Rd}$ συμβολίζεται η αντοχή σε οριακή κατάσταση αστοχίας για το γωνιακό, με $N_{pl,Rd}$ συμβολίζεται η αντοχή της πλήρους διατομής σε εφελκυσμό, με $F_{v,Rd}$ συμβολίζεται η αντοχή σε διάτμηση του κορμού του κοχλίου, με $F_{b,Rd}$ συμβολίζεται η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας, με N_{Rd} συμβολίζεται το ελάχιστο των προηγούμενων αντοχών $N_{Rd} = \min(N_{u,Rd}; N_{pl,Rd}; F_{v,Rd}; F_{b,Rd})$, με $RF3$ συμβολίζεται η εφελκυστική αντοχή των γωνιακών διατομών που έχει προκύψει από τις αναλύσεις στο Abaqus. Οι αντοχές έχουν υπολογιστεί ως εξής:

Η αντοχή σε οριακή κατάσταση αστοχίας $N_{u,Rd}$ υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (5.1).

Η αντοχή της πλήρους διατομής σε εφελκυσμό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.8)$$

Η αντοχή σε διάτμηση του κοχλίου με ένα επίπεδο διάτμησης υπολογίζεται από την σχέση που δίνει ο Πίνακας 5.4:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (\text{για κοχλίες ποιότητας 8.8 } \alpha_v=0,6) \quad (5.9)$$

Η αντοχή σε σύνθλιψη άντυγας υπολογίζεται από την σχέση που δίνει ο Πίνακας 5.4:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 a_b f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (5.10)$$

Να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό όλων των παραπάνω αντοχών οι συντελεστές ασφαλείας έχουν ληφθεί ίσοι με τη μονάδα, καθώς δεν μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε τις αντοχές σχεδιασμού.

Πίνακας 5.9: Αντοχές των γωνιακών σε εφελκυσμό σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, σύμφωνα με το Abaqus και ο λόγος αυτών των δύο.

Διατομή	$N_{u,Rd}$ (KN)	$N_{pl,Rd}$ (KN)	$F_{v,Rd}$ (KN)	$F_{b,Rd}$ (KN)	N_{Rd} (KN)	Εφελ.Αντοχή abaqus RF3(KN)	RF3/ N_{Rd}
KL35x35x3	29,07	69,23	54,26	21,37	21,37	45,04	2,11
KL40x40x3	41,31	80,23	54,26	30,60	30,60	49,70	1,62
KL40x40x3 S355 MC	34,83	80,23	54,26	25,80	25,80	42,40	1,64
KL50x50x3	56,61	101,18	54,26	30,60	30,60	50,31	1,64
KL60x60x3	71,91	122,48	54,26	30,60	30,60	51,40	1,68
KL41x41x4	57,12	106,50	54,26	40,80	40,80	66,98	1,64
KL51x51x4	77,52	134,90	54,26	40,80	40,80	67,00	1,64
KL61x61x4	79,56	163,30	150,72	59,35	59,35	104,67	1,76
KL71x71x4	99,96	191,70	150,72	68,00	68,00	108,67	1,60
KL81x81x4	120,36	220,10	150,72	68,00	68,00	111,43	1,64

Σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3, λόγω της μείωσης της αντοχής θραύσης του χάλυβα του γωνιακού KL40x40x3 από $f_u=510\text{MPa}$ σε $f_u=430\text{MPa}$, παρατηρείται μείωση της εφελκυστικής αντοχής του γωνιακού.

6 Θλιπτική αντοχή των γωνιακών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3

6.1 Εισαγωγή

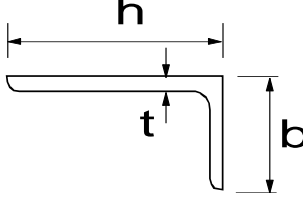
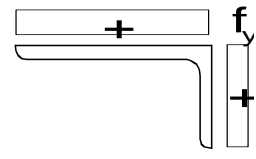
Σε αυτό το κεφάλαιο υπολογίζεται η θλιπτική αντοχή των γωνιακών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3. Τα μέρη του Ευρωκώδικα 3 που εφαρμόζονται είναι το Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, το Μέρος 1-3: Λεπτότοιχα μέλη ψυχρής έλασης και χαλυβδόφυλλα, το Μέρος 1.5: Μέλη από επίπεδα ελάσματα και το Μέρος 1-8: Σχεδιασμός κόμβων. Για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής των γωνιακών σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 εξετάζονται δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση θεωρώ ότι η θλίψη είναι καθαρή και αγνοώ τις ροπές που αναπτύσσονται λόγω έκκεντρης θλίψης και τις παρασιτικές ροπές που αναπτύσσονται λόγω της εκκεντρότητας του κεντροβαρικού άξονα της ενεργού διατομής. Στη δεύτερη περίπτωση δεν αγνοώ ότι η θλίψη είναι έκκεντρη και λαμβάνω υπόψη τις ροπές που αναπτύσσονται λόγω έκκεντρης θλίψης και τις παρασιτικές ροπές που αναπτύσσονται λόγω της εκκεντρότητας του κεντροβαρικού άξονα της ενεργού διατομής, επομένως στη δεύτερη περίπτωση εξετάζω συνδυασμό κάμψης και αξονικής δύναμης.

Να σημειωθεί ότι στις διατάξεις του Ευρωκώδικα 3 για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής των μελών δεν χρησιμοποιείται σε καμία έκφραση το όριο θραύσης του χάλυβα των ελασμάτων παρά μόνο το όριο διαρροής του. Επομένως το γωνιακό KL40x40x3 με ποιότητα χάλυβα S355 MC, έχει όμοια θλιπτική αντοχή με το γωνιακό KL40x40x3 με ποιότητα χάλυβα S355.

6.2 Κατάταξη γωνιακών διατομών

Ο ρόλος της κατάταξης των διατομών είναι να αναγνωρίσει την έκταση στην οποία η αντοχή και η ικανότητα στροφής των διατομών περιορίζεται από την αντοχή τους σε τοπικό λυγισμό. Η κατάταξη μιας διατομής εξαρτάται από τη σχέση πλάτους προς πάχος των τμημάτων της που υπόκεινται σε θλίψη. Τα θλιβόμενα τμήματα περιλαμβάνουν κάθε τμήμα μιας διατομής το οποίο θλίβεται εξ ολοκλήρου ή εν μέρει για τον υπό θεώρηση συνδυασμό φορτίων. Τα διάφορα θλιβόμενα τμήματα σε μια διατομή (όπως ο κορμός ή το πέλμα) μπορούν, γενικά, να ανήκουν σε διαφορετικές κατηγορίες. Μια διατομή κατατάσσεται σύμφωνα με την υψηλότερη κατηγορία (λιγότερο ευμενή) των θλιβόμενων τμημάτων της. Ένα τμήμα της διατομής που δεν ικανοποιεί τα όρια της κατηγορίας 3 πρέπει να κατατάσσεται στην κατηγορία 4.

Πίνακας 6.1: Μέγιστοι λόγοι πλάτους προς πάχος για θλιβόμενα τμήματα.

<p>Αναφορά επίσης στα “Προεξέχοντα πέλματα” (βλέπε φύλο 2 από 3)</p>		<p>Γωνιακά</p> 		<p>Δεν ισχύει για γωνιακά σε συνεχή επαφή με άλλα στοιχεία</p>		
Κατηγορία	Διατομή σε θλίψη					
Κατανομή τάσεων στη διατομή (θλίψη θετική)						
3	$h/t \leq 15\varepsilon : \frac{b+h}{2t} \leq 11,5\varepsilon$					
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Πίνακας 6.2: Κατάταξη γωνιακών διατομών.

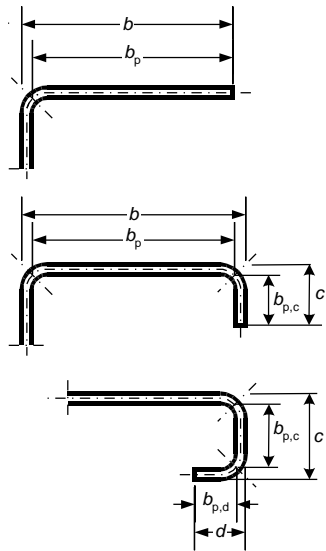
Διατομή	h(cm)	b(cm)	t(cm)	ε	h/t	15 ε	(b+h)/(2t)	11,5 ε	Κατηγορία
KL35x35x3	3,50	3,50	0,30	0,81	11,67	12,15	11,67	9,32	4
KL40x40x3	4,00	4,00	0,30	0,81	13,33	12,15	13,33	9,32	4
KL50x50x3	5,00	5,00	0,30	0,81	13,33	12,15	13,33	9,32	4
KL60x60x3	6,00	6,00	0,30	0,81	13,33	12,15	13,33	9,32	4
KL41x41x4	4,10	4,10	0,40	0,81	10,25	12,15	10,25	9,32	4
KL51x51x4	5,10	5,10	0,40	0,81	12,75	12,15	12,75	9,32	4
KL61x61x4	6,10	6,10	0,40	0,81	15,25	12,15	15,25	9,32	4
KL71x71x4	7,10	7,10	0,40	0,81	17,75	12,15	17,75	9,32	4
KL81x81x4	8,10	8,10	0,40	0,81	20,25	12,15	20,25	9,32	4

Διατομές κατηγορίας 4 είναι εκείνες στις οποίες τοπικός λυγισμός θα συμβεί πριν την ανάπτυξη της τάσης διαρροής σε ένα ή περισσότερα μέρη της διατομής. Σε διατομές κατηγορίας 4, προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι μειώσεις στην αντοχή λόγω των επιδράσεων του τοπικού λυγισμού, χρησιμοποιούνται τα ενεργά πλάτη.

6.3 Επιρροή στρογγυλεμένων γωνιών

Σε διατομές με στρογγυλεμένες γωνίες, το ονομαστικό πλάτος b_p των επίπεδων τοιχωμάτων πρέπει να μετράται από το μέσο σημείο των γειτονικών τοιχωμάτων, όπως φαίνεται στο σχήμα 6.1. Σε διατομές με στρογγυλεμένες γωνίες, ο υπολογισμός των ιδιοτήτων της διατομής πρέπει να βασίζεται στην πραγματική γεωμετρία της διατομής. Πλην περιπτώσεων που χρησιμοποιούνται ακριβέστερες

μέθοδοι στον υπολογισμό των ιδιοτήτων της διατομής μπορεί να εκτελείται με βάση την ακόλουθη προσεγγιστική μεθοδολογία. Η επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών στην αντοχή της διατομής μπορεί να αγνοηθεί αν για εσωτερικές ακτίνες r ισχύουν οι σχέσεις $r \leq 5t$ και $r \leq 0.10b_p$. Η διατομή μπορεί τότε να θεωρηθεί ότι αποτελείται από επίπεδα τοιχώματα με αιχμηρές γωνίες (σύμφωνα με το σχήμα 5.2. Σημειώνεται ότι υπολογίζεται το πλάτος b_p για όλα τα επίπεδα τοιχώματα, συμπεριλαμβανομένων των επίπεδων τοιχωμάτων σε εφέλκυσμό). Στις αδρανειακές ιδιότητες της διατομής για τον υπολογισμό δυσκαμψίας η επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη.



Σχήμα 6.1 Ονομαστικά πλάτη επίπεδων στοιχείων b_p , ώστε να ληφθούν υπόψη κάμψεις.

Στις γωνιακές διατομές που εξετάζουμε, η επιρροή των στρογγυλεμένων γωνιών στην αντοχή της διατομής μπορεί να αγνοηθεί, καθώς όπως βλέπουμε και στον παρακάτω Πίνακα 6.3 ισχύουν οι σχέσεις $r < 5t$ και $r < 0.10b_p$.

Πίνακας 6.3: Επιρροή στρογγυλεμένων γωνιών.

Διατομή	b(cm)	bp(cm)	t(cm)	r(cm)	5*t(cm)	r/bp
KL35x35x3	3,5	3,35	0,3	0,3	1,5	0,09
KL40x40x3	4	3,85	0,3	0,3	1,5	0,08
KL50x50x3	5	4,85	0,3	0,3	1,5	0,06
KL60x60x3	6	5,85	0,3	0,3	1,5	0,05
KL41x41x4	4,1	3,9	0,4	0,4	2	0,10
KL51x51x4	5,1	4,9	0,4	0,4	2	0,08
KL61x61x4	6,1	5,9	0,4	0,4	2	0,07
KL71x71x4	7,1	6,9	0,4	0,4	2	0,06
KL81x81x4	8,1	7,9	0,4	0,4	2	0,05

6.4 Ενεργός διατομή

Οι ενεργές επιφάνειες των επίπεδων προεξέχοντων θλιβόμενων στοιχείων πρέπει να λαμβάνονται χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 6.4. Η ενεργός επιφάνεια της θλιβόμενης ζώνης ενός ελάσματος με πλήρη επιφάνεια διατομής A_c πρέπει να λαμβάνεται από:

$$A_{c,eff} = \rho A_c \quad (6.1)$$

όπου ρ είναι ο μειωτικός συντελεστής για την κύρτωση.

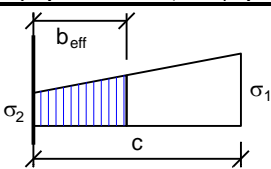
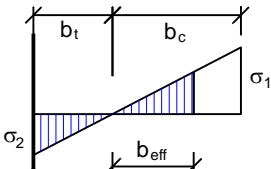
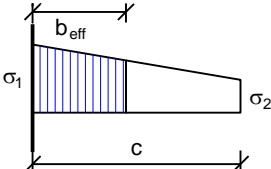
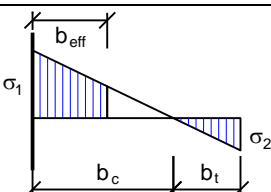
Ο μειωτικός συντελεστής ρ μπορεί να λαμβάνεται ως εξής:

$$\rho = \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\lambda_p} \right) \quad (6.2)$$

$$\text{όπου } \lambda_p = 1,052 \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{f_y}{EK_\sigma}} \quad (6.3)$$

που σημαίνει ότι για : $\lambda_p \leq 0,673$ $\rho=1$

Πίνακας 6.4: Συντελεστής κύρτωσης για προεξέχοντα θλιβόμενα στοιχεία.

Κατανομή τάσεων (θλίψη θετική)		Ενεργό πλάτος b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Συντελεστής κύρτωσης k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Συντελεστής κύρτωσης k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

Πίνακας 6.5: Ενεργός διατομή A_{eff} για καθαρή θλίψη.

Διατομή	$\bar{\lambda}_p$	ρ	$b_{eff}(cm)$	$A_{eff}(cm^2)$	$e_{eff}(cm)$
KL35x35x3	0,74	0,95	3,19	1,91	0,797
KL40x40x3	0,85	0,87	3,36	2,02	0,841
KL50x50x3	1,07	0,74	3,61	2,16	0,902
KL60x60x3	1,29	0,64	3,77	2,26	0,942
KL41x41x4	0,64	1,00	3,90	3,00	0,975
KL51x51x4	0,81	0,90	4,41	3,53	1,103
KL61x61x4	0,97	0,80	4,69	3,75	1,173
KL71x71x4	1,14	0,71	4,89	3,91	1,222
KL81x81x4	1,30	0,64	5,04	4,03	1,259

6.5 Καθαρή θλίψη

6.5.1 Καμπτικός λυγισμός λόγω αξονικής θλιπτικής δύναμης

Το ελαστικό κρίσιμο φορτίο N_{cr} καμπτικού λυγισμού βασισμένο στις ιδιότητες της πλήρους διατομής υπολογίζεται ως εξής:

Για καμπτικό λυγισμό περί τον ισχυρό άξονα ξ - ξ :

$$N_{cr,\xi} = \frac{\pi^2 EI_{\xi}}{L_{cr}^2} \quad (6.4)$$

Για καμπτικό λυγισμό περί τον ασθενή άξονα η - η :

$$N_{cr,\eta} = \frac{\pi^2 EI_{\eta}}{L_{cr}^2} \quad (6.5)$$

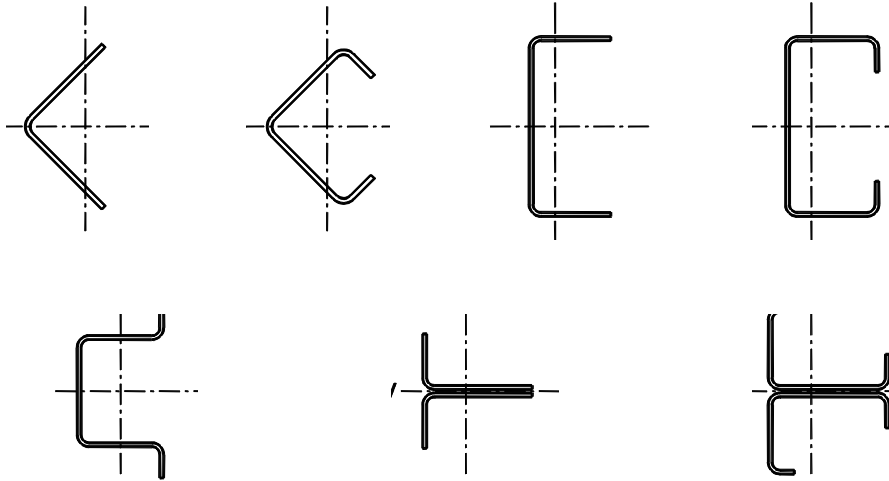
Όπου:

L_{cr} : είναι το ισοδύναμο μήκος λυγισμού στο υπό θεώρηση επίπεδο λυγισμού. Είναι το καθαρό μήκος του γωνιακού από το κέντρο της αριστερής οπής έως το κέντρο της δεξιάς οπής ($L_{cr} = L - 4d_0$).

I : είναι η ροπή αδρανείας περί τον αντίστοιχο άξονα, υπολογιζόμενη χρησιμοποιώντας τις ιδιότητες της πλήρους διατομής

6.5.2 Στρεπτικός λυγισμός και στρεπτοκαμπτικός λυγισμός

Για μέλη με μονοσυμμετρικές ανοικτές διατομές, βλέπε σχήμα 6.2, θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα η αντοχή του μέλους έναντι στρεπτοκαμπτικού λυγισμού να είναι μικρότερη από την αντοχή του έναντι καμπτικού λυγισμού.



Σχήμα 6.2: Μονοσυμμετρικές διατομές ευαίσθητες σε στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

Η ελαστική κρίσιμη δύναμη $N_{cr,T}$ στρεπτικού λυγισμού απλά εδραζόμενης δοκού υπολογίζεται ως εξής:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left(G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{L_T^2} \right) \quad (6.6)$$

$$\text{με: } i_o^2 = i_\xi^2 + i_\eta^2 + \xi_o^2 + \eta_o^2 \quad (6.7)$$

όπου:

G : το μέτρο διάτμησης;

I_t : η σταθερά στρέψης της πλήρους διατομής

I_w : η σταθερά στρέβλωσης της πλήρους διατομής

i_ξ : η ακτίνα αδράνειας της πλήρους διατομής ως προς τον άξονα $\xi - \xi$

i_η : η ακτίνα αδράνειας της πλήρους διατομής ως προς τον άξονα $\eta - \eta$

L_T : το μήκος λυγισμού του στοιχείου για στρεπτικό λυγισμό

ξ_o, η_o : οι συντεταγμένες του κέντρου διάτμησης ως προς το κέντρο βάρους της πλήρους διατομής

Για ανοιχτές λεπτότοιχες διατομές συντιθέμενες από επίπεδα ελάσματα, η σταθερά στρέψης είναι :

$$I_t = \frac{1}{3} \sum b_i t_i^3 \quad (6.8)$$

Όπου :

i : ο αριθμός των ελασμάτων

b_i, t_i : το μήκος και το πάχος του ελάσματος i

Για γωνιακές διατομές η σταθερά στρέβλωσης είναι : $I_w=0$.

Για διατομές συμμετρικές ως προς τον άξονα $\xi - \xi$ (δηλ. $\eta_o=0$), η ελαστική κρίσιμη δύναμη $N_{cr,TF}$ στρεπτοκαμπτικού λυγισμού μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,\xi}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,\xi}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,\xi}}\right)^2 + 4 \left(\frac{\xi_o}{i_o}\right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,\xi}}} \right] \quad (6.9)$$

$$\text{με: } \beta = 1 - \left(\frac{\xi_o}{i_o} \right)^2 \quad (6.10)$$

Το μήκος λυγισμού L_T για στρεπτικό ή στρεπτοκαμπτικό λυγισμό μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη το βαθμό περιορισμού της στρέψης και της στρέβλωσης σε κάθε ένα από τα δύο άκρα του μέλους. Στα γωνιακά που εξετάζουμε είναι $L_T = L_{cr}$.

Πίνακας 6.6: Αδρανειακά χαρακτηριστικά γωνιακών διατομών.

Διατομή	L_{cr} (cm)	I_{η} (cm ⁴)	I_{ξ} (cm ⁴)	I_t (cm ⁴)	i_{ξ} (cm)	i_{η} (cm)	i_o^2 (cm ²)	i_o (cm)	ξ_o (cm)	β
KL35x35x3	94,8	0,85	3,77	0,060	1,39	0,66	4,41	2,10	1,43	0,54
KL40x40x3	94,8	1,31	5,69	0,069	1,59	0,76	5,70	2,39	1,61	0,54
KL50x50x3	94,8	2,67	11,4	0,087	2	0,97	8,81	2,97	1,97	0,56
KL60x60x3	94,8	4,75	20	0,105	2,41	1,17	12,56	3,54	2,32	0,57
KL41x41x4	94,8	1,87	7,29	0,166	1,61	0,77	6,07	2,46	1,70	0,53
KL51x51x4	94,8	3,54	15,5	0,209	2,02	0,97	9,23	3,04	2,05	0,54
KL61x61x4	91,2	6,35	27,1	0,252	2,43	1,18	13,08	3,62	2,40	0,56
KL71x71x4	91,2	10,3	43,4	0,294	2,84	1,38	17,58	4,19	2,76	0,57
KL81x81x4	91,2	15,5	65,2	0,337	3,24	1,58	22,67	4,76	3,11	0,57

Πίνακας 6.7: Ελαστικά κρίσιμα φορτία καμπτικού, στρεπτικού και στρεπτοκαμπτικού λυγισμού

Διατομή	$N_{cr,\xi}$ (KN)	$N_{cr,\eta}$ (KN)	$N_{cr,T}$ (KN)	$N_{cr,TF}$ (KN)	$N_{cr,min}$ (KN)
KL35x35x3	86,86	19,58	110,49	57,69	19,58
KL40x40x3	131,09	30,18	98,11	66,67	30,18
KL50x50x3	262,64	61,51	80,08	69,21	61,51
KL60x60x3	460,78	109,43	67,74	63,40	63,40
KL41x41x4	167,95	43,08	221,60	112,65	43,08
KL51x51x4	357,10	81,56	183,02	141,05	81,56
KL61x61x4	674,62	158,07	155,48	139,43	139,43
KL71x71x4	1080,39	256,40	135,30	127,87	127,87
KL81x81x4	1623,07	385,85	120,07	116,24	116,24

Παρατηρούμε ότι σύμφωνα με τον EC3 οι διατομές KL35x35x3, KL40x40x3, KL50x50x3, KL41x41x4 και KL51x51x4, οι οποίες έχουν μικρό λόγο b/t είναι πιο ευαίσθητες στον καμπτικό λυγισμό περί τον ασθενή άξονα, ενώ οι διατομές KL60x60x3, KL61x61x4, KL71x71x4 και KL81x81x4 οι οποίες έχουν μεγαλύτερο λόγο b/t είναι πιο ευαίσθητες στον στρεπτοκαμπτικό λυγισμό.

6.5.3 Αντοχή σε λυγισμό

Από τις ελαστικές κρίσιμες δυνάμεις $N_{cr,\xi}$, $N_{cr,\eta}$, $N_{cr,T}$ και $N_{cr,TF}$ που έχουν υπολογιστεί πιο πάνω, υπολογίζουμε την ελάχιστη $N_{cr,min}$ για την οποία υπολογίζεται η ανηγμένη λυγηρότητα και ο μειωτικός συντελεστής.

$$N_{cr,min} = \min(N_{cr,\xi}, N_{cr,\eta}, N_{cr,T}, N_{cr,TF})$$

Για διατομές κατηγορίας 4 η ανηγμένη λυγηρότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr,min}}} \quad (6.11)$$

Σε μέλη υπό αξονική θλίψη, η τιμή του χ για την ανηγμένη λυγηρότητα $\bar{\lambda}$ καθορίζεται από την αντίστοιχη καμπύλη λυγισμού σύμφωνα με τη σχέση:

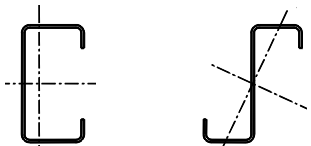
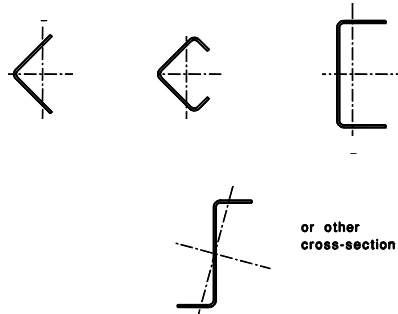
$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{αλλά } \chi \leq 1,0 \quad (6.12)$$

$$\text{Όπου : } \Phi = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (6.13)$$

α : είναι ένας συντελεστής ατελειών

Ο συντελεστής ατελειών α που αντιστοιχεί σε κάθε καμπύλη λυγισμού πρέπει να λαμβάνεται από τον Πίνακα 6.9. Για τα γωνιακά που εξετάζουμε η καμπύλη λυγισμού σύμφωνα με τον Πίνακα 6.8 είναι η c, επομένως ο συντελεστής ατελειών είναι $\alpha=0,49$.

Πίνακας 6.8: Κατάλληλη καμπύλη λυγισμού για διάφορους τύπους διατομών.

Τύπος διατομής	Λυγισμός περί τον άξονα	Καμπύλη λυγισμού
	Οποιοσδήποτε	b
 <p style="text-align: center;">or other cross-section ή άλλη διατομή</p>	Οποιοσδήποτε	c

Πίνακας 6.9: Συντελεστές ατελειών για καμπύλες λυγισμού

Καμπύλη λυγισμού	a ₀	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Η αντοχή ενός θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό πρέπει να λαμβάνεται ως:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 4} \quad (6.14)$$

Να σημειωθεί ότι για τον υπολογισμό της παραπάνω αντοχής ο συντελεστής ασφαλείας έχει ληφθεί ίσος με τη μονάδα, καθώς δεν μας ενδιαφέρει να υπολογίσουμε την αντοχή σχεδιασμού.

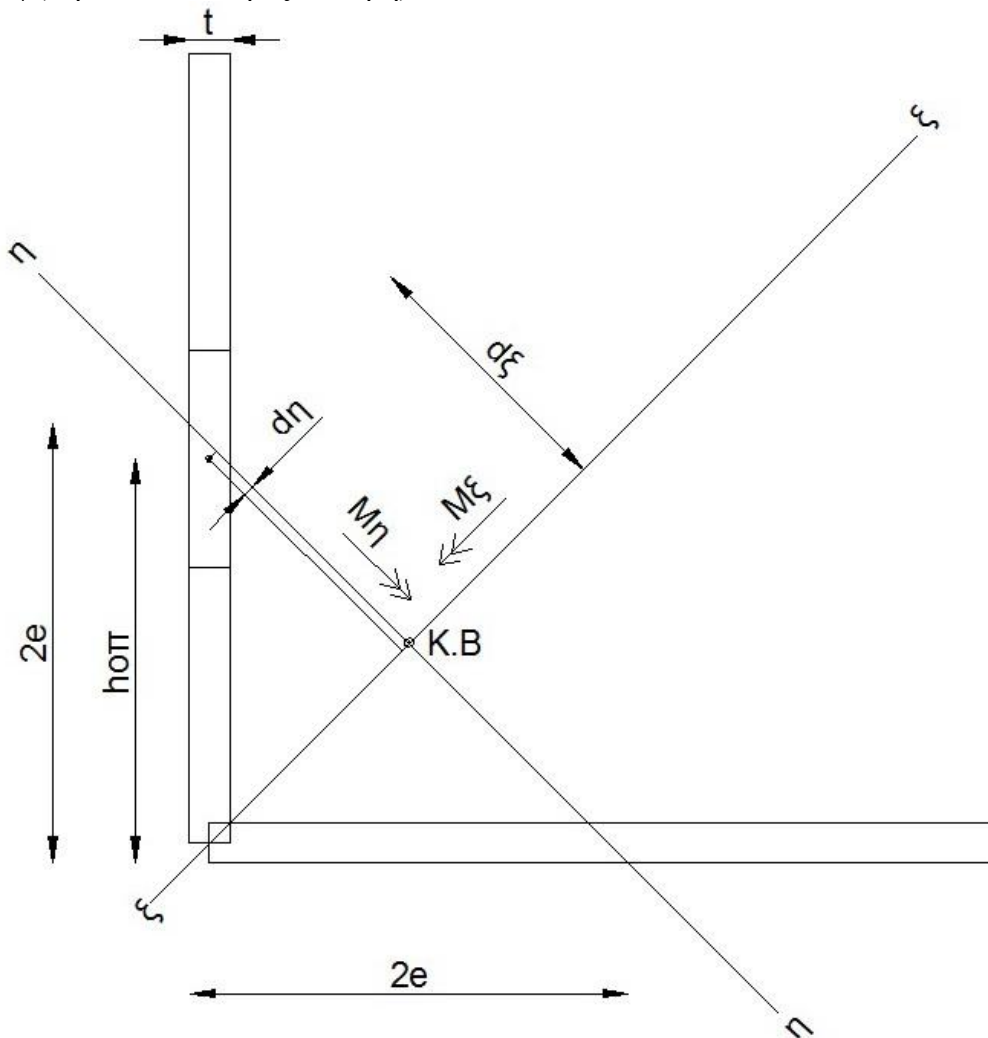
Πίνακας 6.10: Αντοχές των γωνιακών σε λυγισμό σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, σύμφωνα με το Abaqus και ο λόγος αυτών των δύο.

Διατομή	N _{cr,min} (KN)	$\bar{\lambda}$	Φ	χ	N _{b,Rd} (KN)	Θλιπτική αντοχή RF3abacus (KN)	RF3/Nb,Rd
KL35x35x3	19,58	1,86	2,64	0,22	15,04	28,89	1,92
KL40x40x3	30,18	1,54	2,02	0,30	21,62	33,81	1,56
KL50x50x3	61,51	1,12	1,35	0,47	36,50	39,49	1,08
KL60x60X3	63,40	1,13	1,36	0,47	37,81	42,54	1,13
KL41x41x4	43,08	1,57	2,07	0,29	31,12	51,95	1,67
KL51x51x4	81,56	1,24	1,52	0,42	52,04	55,64	1,07
KL61x61x4	139,43	0,98	1,17	0,55	73,69	77,61	1,05
KL71x71x4	127,87	1,04	1,25	0,52	71,64	81,41	1,14
KL81x81x4	116,24	1,11	1,34	0,48	68,57	83,33	1,22

6.6 Συνδυασμός κάμψης και αξονικής θλίψης

6.6.1 Υπολογισμός ροπών

Η έκκεντρη θλιπτική δύναμη N που έχει σημείο εφαρμογής το κέντρο της οπής, ισοδυναμεί με μια κεντρική θλιπτική δύναμη N που εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους του γωνιακού και δύο καμπτικές ροπές M_ξ (περί τον ισχυρό άξονα ξ - ξ) και M_η (περί τον ασθενή άξονα η - η).



Σχήμα 6.3: Ροπές M_η και M_ξ λόγω έκκεντρης θλίψης.

Για τον υπολογισμό των ροπών M_η και M_ξ , είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός των αποστάσεων του κέντρου της οπής από τους άξονες ξ - ξ και η - η .

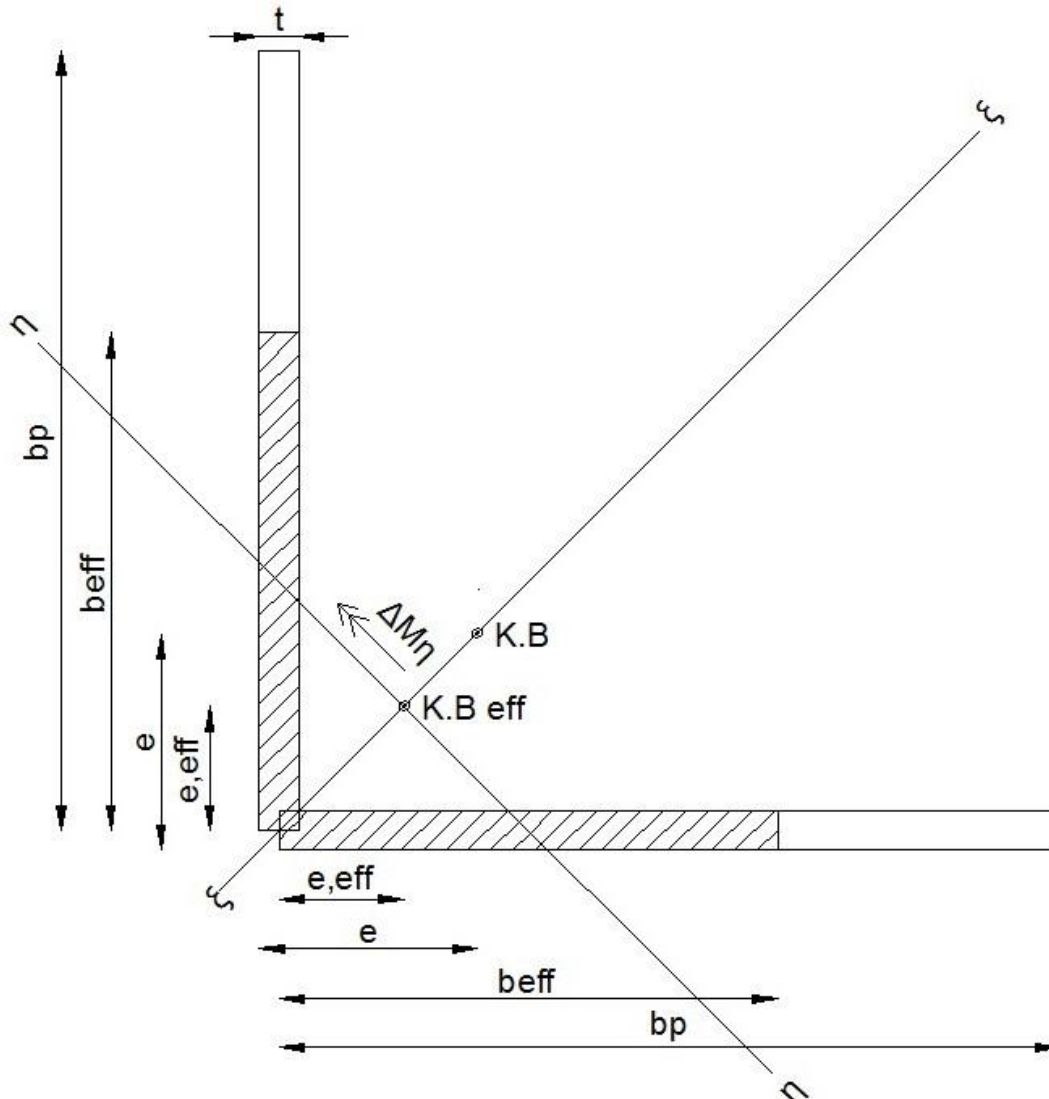
$$\text{Απόσταση κέντρου οπής από τον ισχυρό άξονα } \xi\text{-}\xi : d_\xi = \frac{h_{οπ} - 0,5t}{\sqrt{2}} \quad (6.15)$$

$$\text{Καμπτική ροπή περί τον ισχυρό άξονα } \xi\text{-}\xi : M_\xi = d_\xi N \quad (6.16)$$

$$\text{Απόσταση κέντρου οπής από τον ασθενή άξονα } \eta\text{-}\eta : d_\eta = \frac{2e - h_{οπ} - 0,5t}{\sqrt{2}} \quad (6.17)$$

$$\text{Καμπτική ροπή περί τον ασθενή άξονα } \eta\text{-}\eta : M_\eta = d_\eta N \quad (6.18)$$

Η μετατόπιση του κέντρου βάρους της ενεργούς διατομής, όπως φαίνεται και στο παρακάτω Σχήμα 6.4, δημιουργεί μια νέα παρασιτική ροπή ΔM_η περί τον ασθενή άξονα η - η , λόγω της μεταφοράς της αξονικής δύναμης N από το κέντρο βάρους της αρχικής διατομής στο κέντρο βάρους της ενεργούς διατομής, έτσι ώστε στην ενεργό διατομή η θλιπτική δύναμη N να δρα στο κέντρο βάρους της.



Σχήμα 6.4: Παρασιτική ροπή ΔM_η λόγω της μετατόπισης του κέντρου βάρους της ενεργούς διατομής.

Για τον υπολογισμό της παρασιτικής ροπής ΔM_η περί τον ασθενή άξονα η - η λόγω της μετατόπισης του κέντρου βάρους της ενεργούς διατομής, προσδιορίζεται η απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους της αρχικής διατομής και του κέντρου βάρους της ενεργούς διατομής.

$$\text{Απόσταση Κ.Β από Κ.Β}_{\text{eff}} : d\Delta\eta = \sqrt{2}(e - 0,5t - e_{\text{eff}}) \quad (6.19)$$

$$\text{Παρασιτική ροπή } \Delta M_\eta \text{ περί τον ασθενή άξονα } \eta\text{-}\eta : \Delta M_\eta = d\Delta\eta N \quad (6.20)$$

Πίνακας 6.11: Ροπές λόγω έκκεντρης θλίψης και παρασιτική ροπή

Διατομή	e (cm)	e _{ff} (cm)	h _{οπ} (cm)	t (cm)	d _η =M _η /N (cm)	d _ξ =M _ξ /N (cm)	dΔ _η =ΔM _η /N (cm)
KL35x35x3	1,01	0,80	1,9	0,3	-0,021	1,237	0,089
KL40x40x3	1,14	0,84	2	0,3	0,092	1,308	0,210
KL50x50x3	1,39	0,90	2,5	0,3	0,092	1,662	0,478
KL60x60x3	1,64	0,94	3	0,3	0,092	2,015	0,775
KL41x41x4	1,2	0,98	2,05	0,4	0,106	1,308	0,035
KL51x51x4	1,45	1,10	2,55	0,4	0,106	1,662	0,208
KL61x61x4	1,7	1,17	3,05	0,4	0,106	2,015	0,463
KL71x71x4	1,95	1,22	3,55	0,4	0,106	2,369	0,746
KL81x81x4	2,2	1,26	4,05	0,4	0,106	2,722	1,047

6.6.2 Συνδυασμός κάμψης και αξονικής θλίψης σύμφωνα με τον EC3 Μέρος 1-3

Σε αυτή την ενότητα εξετάζουμε τις γωνιακές διατομές για συνδυασμό κάμψης και θλίψης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-3: Λεπτότοιχα μέλη ψυχρής έλασης και χαλυβδόφυλλα.

Τα μέλη τα οποία υπόκεινται σε συνδυασμό κάμψης και αξονικής θλίψης θα πρέπει να ακολουθούν το ακόλουθο κριτήριο σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-3:

$$\frac{N_{sd}}{\chi_{\min} f_{yb} A_{eff} / \gamma_{M1}} + \frac{k_{\xi} M_{\xi, sd}}{f_{yb} W_{eff, \xi} / \gamma_{M1}} + \frac{k_{\eta} (M_{\eta, sd} + \Delta M_{\eta, sd})}{f_{yb} W_{eff, \eta} / \gamma_{M1}} \leq 1 \quad (6.21)$$

Για τον υπολογισμό του χ_{\min} προσδιορίζονται οι λυγηρότητες, οι ανηγμένες λυγηρότητες και οι μειωτικοί συντελεστές για αντοχή σε λυγισμό από τις παρακάτω σχέσεις :

$$\text{Λυγηρότητα περί τον άξονα } \xi\text{-}\xi : \lambda_{\xi} = L_{cr} / i_{\xi} \quad (6.22)$$

$$\text{Λυγηρότητα περί τον άξονα } \eta\text{-}\eta : \lambda_{\eta} = L_{cr} / i_{\eta} \quad (6.23)$$

$$\text{Οριακή λυγηρότητα : } \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (6.24)$$

$$\text{Μειωτικός συντελεστής : } \beta_A = A_{eff} / A_g \quad (6.25)$$

$$\text{Ανηγμένη λυγηρότητα περί τον άξονα } \xi\text{-}\xi : \bar{\lambda}_{\xi} = \frac{\lambda_{\xi}}{\lambda_1} \sqrt{\beta_A} \quad (6.26)$$

$$\text{Ανηγμένη λυγηρότητα περί τον άξονα } \eta\text{-}\eta : \bar{\lambda}_{\eta} = \frac{\lambda_{\eta}}{\lambda_1} \sqrt{\beta_A} \quad (6.27)$$

Μειωτικός συντελεστής για λυγισμό περί τον άξονα $\xi\text{-}\xi$:

$$\chi_{\xi} = \frac{1}{\Phi_{\xi} + \sqrt{\Phi_{\xi}^2 - \bar{\lambda}_{\xi}^2}} \quad (6.28)$$

$$\text{με } \Phi_{\xi} = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_{\xi} - 0,2) + \bar{\lambda}_{\xi}^2 \right] \quad (6.29)$$

Μειωτικός συντελεστής για λυγισμό περί τον άξονα η-η :

$$\chi_{\eta} = \frac{1}{\Phi_{\eta} + \sqrt{\Phi_{\eta}^2 - \bar{\lambda}_{\eta}^2}} \quad (6.30)$$

$$\text{με } \Phi_{\eta} = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda}_{\eta} - 0,2) + \bar{\lambda}_{\eta}^2 \right] \quad (6.31)$$

$$\chi_{\min} = \min \{ \chi_{\xi}; \chi_{\eta} \} \quad (6.32)$$

Πίνακας 6.12: Λυγηρότητες, ανηγμένες λυγηρότητες και μειωτικοί συντελεστές.

Διατομή	λ_{ξ}	λ_{η}	λ_1	β_a	$\bar{\lambda}_{\xi}$	$\bar{\lambda}_{\eta}$	Φ_{ξ}	Φ_{η}	χ_{ξ}	χ_{η}	χ_{\min}
KL35x35x3	68,20	143,64	76,41	0,98	0,88	1,86	1,06	2,64	0,61	0,22	0,22
KL40x40x3	59,62	124,74	76,41	0,89	0,74	1,54	0,90	2,02	0,70	0,30	0,30
KL50x50x3	47,40	97,73	76,41	0,76	0,54	1,11	0,73	1,35	0,82	0,48	0,48
KL60x60x3	39,34	81,03	76,41	0,66	0,42	0,86	0,64	1,03	0,89	0,63	0,63
KL41x41x4	58,88	123,12	76,41	1,00	0,77	1,61	0,94	2,14	0,68	0,28	0,28
KL51x51x4	46,93	97,73	76,41	0,93	0,59	1,23	0,77	1,51	0,79	0,42	0,42
KL61x61x4	37,53	77,29	76,41	0,82	0,44	0,91	0,66	1,09	0,87	0,59	0,59
KL71x71x4	32,11	66,09	76,41	0,72	0,36	0,74	0,60	0,90	0,92	0,70	0,70
KL81x81x4	28,15	57,72	76,41	0,65	0,30	0,61	0,57	0,79	0,95	0,78	0,78

Οι συντελεστές k_{ξ} και k_{η} στην έκφραση θα πρέπει να λαμβάνονται από:

$$k_{\xi} = 1 - \frac{\mu_{\xi} N_{sd}}{\chi_{\xi} f_{yb} A_{eff}} \quad \text{αλλά } k_{\xi} \leq 1.50 \quad (6.33)$$

$$k_{\eta} = 1 - \frac{\mu_{\eta} N_{sd}}{\chi_{\eta} f_{yb} A_{eff}} \quad \text{αλλά } k_{\eta} \leq 1.50 \quad (6.34)$$

με

$$\mu_{\xi} = \bar{\lambda}_{\xi} (2\beta_{M\xi} - 4) \quad \text{αλλά } \mu_{\xi} \leq 1.50 \quad (6.35)$$

$$\mu_{\eta} = \bar{\lambda}_{\eta} (2\beta_{M\eta} - 4) \quad \text{αλλά } \mu_{\eta} \leq 1.50 \quad (6.36)$$

Όπου:

$\beta_{M\xi}$: είναι ο συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής για λυγισμό περί τον άξονα ξ-ξ

$\beta_{M\eta}$: είναι ο συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής για λυγισμό περί τον άξονα η-η

Οι συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής $\beta_{M\xi}$ και $\beta_{M\eta}$ θα πρέπει να βασίζονται στην μορφή του διαγράμματος ροπών περί τον αντίστοιχο άξονα μεταξύ σημείων τα οποία είναι δεσμευμένα στην αντίστοιχη διεύθυνση, όπως δίνεται στον Πίνακα 6.13. Οι ροπές κάμψης οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό θα συμπεριλαμβάνουν τις επιπρόσθετες ροπές $\Delta M_{\xi, sd}$ και $\Delta M_{\eta, sd}$.

Πίνακας 6.13: Συντελεστές ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής.

Διάγραμμα Ροπών	Συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής β_M
<p>Ροπές άκρων</p> <p style="text-align: center;">$-1 \leq \psi \leq 1$</p>	$\beta_{M\psi} = 1.8 - 0.7\psi$
<p>Ροπές λόγω εγκάρσιας φόρτισης</p>	$\beta_{MQ} = 1.3$ $\beta_{MQ} = 1.4$

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.13 για ομοιόμορφη ροπή είναι:

$$\psi=1, \beta_{M\xi}=1,8-0,7\psi \text{ και } \beta_{M\eta}=1,8-0,7\psi$$

Επομένως $\beta_{M\xi}=1,1$ και $\beta_{M\eta}=1,1$ για όλες τις γωνιακές διατομές που εξετάζουμε.

Για την απλοποίηση της έκφρασης έτσι ώστε να επιλυθεί ως προς N_{sd} , ορίζω τις μεταβλητές a_ξ και a_η . Όπου:

$$a_\xi = -\frac{\mu_\xi}{\chi_\xi f_{yb} A_{eff}} \quad (6.37)$$

$$a_\eta = -\frac{\mu_\eta}{\chi_\eta f_{yb} A_{eff}} \quad (6.38)$$

Εισάγοντας στους συντελεστές k_ξ και k_η , τις μεταβλητές a_ξ και a_η , οι σχέσεις (6.33) και (6.34) απλοποιούνται στις παρακάτω σχέσεις:

$$k_\xi = 1 + a_\xi N_{sd} \quad (6.39)$$

$$k_\eta = 1 + a_\eta N_{sd} \quad (6.40)$$

Αντικαθιστώντας στην έκφραση (6.21) τις σχέσεις (6.39) και (6.40), καταλήγουμε στην έκφραση (6.41):

$$\frac{N_{sd}}{\chi_{\min} f_{yb} A_{eff}} + \frac{(1 + \alpha_{\xi} N_{sd}) d_{\xi}}{f_{yb} W_{eff, \xi}} + \frac{(1 + \alpha_{\eta} N_{sd})(d\Delta\eta - d\eta) N_{sd}}{f_{yb} W_{eff, \eta}} \leq 1 \quad (6.41)$$

Με πράξεις καταλήγουμε στην έκφραση (6.42):

$$\frac{N_{sd}}{\chi_{\min} f_{yb} A_{eff}} + \frac{d_{\xi} N_{sd}}{f_{yb} W_{eff, \xi}} + \frac{\alpha_{\xi} d_{\xi} N_{sd}^2}{f_{yb} W_{eff, \xi}} + \frac{(d\Delta\eta - d\eta) N_{sd}}{f_{yb} W_{eff, \eta}} + \frac{\alpha_{\eta} (d\Delta\eta - d\eta) N_{sd}^2}{f_{yb} W_{eff, \eta}} \leq 1 \quad (6.42)$$

Με πράξεις καταλήγουμε στην έκφραση (6.43):

$$N_{sd} \left(\frac{1}{\chi_{\min} f_{yb} A_{eff}} + \frac{d_{\xi}}{f_{yb} W_{eff, \xi}} + \frac{(d\Delta\eta - d\eta)}{f_{yb} W_{eff, \eta}} \right) + N_{sd}^2 \left(\frac{\alpha_{\xi} d_{\xi}}{f_{yb} W_{eff, \xi}} + \frac{\alpha_{\eta} (d\Delta\eta - d\eta)}{f_{yb} W_{eff, \eta}} \right) \leq 1 \quad (6.43)$$

Για την επίλυση της έκφρασης ως προς N_{sd} , ορίζουμε τις μεταβλητές α , β και γ , όπου:

$$\alpha = \frac{\alpha_{\xi} d_{\xi}}{f_{yb} W_{eff, \xi}} + \frac{\alpha_{\eta} (d\Delta\eta - d\eta)}{f_{yb} W_{eff, \eta}} \quad (6.44)$$

$$\beta = \frac{1}{\chi_{\min} f_{yb} A_{eff}} + \frac{d_{\xi}}{f_{yb} W_{eff, \xi}} + \frac{(d\Delta\eta - d\eta)}{f_{yb} W_{eff, \eta}} \quad (6.45)$$

$$\gamma = -1 \quad (6.46)$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (6.43) τις μεταβλητές α , β και γ καταλήγουμε στην παρακάτω ανίσωση β' βαθμού με άγνωστο την N_{sd} .

$$\alpha N_{sd}^2 + \beta N_{sd} + \gamma \leq 0 \quad (6.47)$$

Στον παρακάτω Πίνακα 6.14 έχουν υπολογιστεί οι συντελεστές μ_{ξ} και μ_{η} , καθώς και οι μεταβλητές α_{ξ} και α_{η} , οι οποίες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό των μεταβλητών της δευτεροβάθμιας ανίσωσης.

Πίνακας 6.14: Συντελεστές μ_{ξ} και μ_{η} και μεταβλητές α_{ξ} και α_{η} .

Διατομή	μ_{ξ}	μ_{η}	α_{ξ}	α_{η}	W_{ξ}	W_{η}
KL35x35x3	-1,591	-3,352	0,038	0,223	1,52	0,68
KL40x40x3	-1,328	-2,777	0,026	0,129	2,01	0,92
KL50x50x3	-0,973	-2,007	0,015	0,055	3,22	1,50
KL60x60x3	-0,750	-1,545	0,011	0,031	4,72	2,22
KL41x41x4	-1,387	-2,900	0,019	0,097	2,70	1,21
KL51x51x4	-1,065	-2,219	0,011	0,042	4,32	1,97
KL61x61x4	-0,799	-1,644	0,007	0,021	6,31	2,92
KL71x71x4	-0,644	-1,325	0,005	0,014	8,68	4,04
KL81x81x4	-0,535	-1,096	0,004	0,010	11,40	5,39

Στον παρακάτω Πίνακα 6.15 έχουν υπολογιστεί οι μεταβλητές της δευτεροβάθμιας ανίσωσης, η διακρίνουσα Δ καθώς και η μέγιστη λύση της δευτεροβάθμιας ανίσωσης.

Πίνακας 6.15: Αντοχές των γωνιακών για συνδυασμό κάμψης και θλίψης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-3, σύμφωνα με το Abaqus και ο λόγος αυτών των δύο.

Διατομή	α	β	γ	Δ	N_{sd} (KN)	Θλιπτική αντοχή RF3abaqus (KN)	RF3/ N_{sd}
KL35x35x3	0,00190	0,09394	-1	0,01641	9,01	28,89	3,21
KL40x40x3	0,00095	0,06831	-1	0,00847	12,47	33,81	2,71
KL50x50x3	0,00062	0,04909	-1	0,00490	16,80	39,49	2,35
KL60x60x3	0,00039	0,04061	-1	0,00322	20,54	42,54	2,07
KL41x41x4	0,00010	0,04541	-1	0,00247	21,03	51,95	2,47
KL51x51x4	0,00018	0,03137	-1	0,00170	27,56	55,64	2,02
KL61x61x4	0,00013	0,02513	-1	0,00117	33,75	77,61	2,30
KL71x71x4	0,00010	0,02241	-1	0,00090	38,17	81,41	2,13
KL81x81x4	0,00007	0,02061	-1	0,00072	42,10	83,33	1,98

6.3.3 Συνδυασμός κάμψης και αξονικής θλίψης σύμφωνα με τον EC3 Μέρος 1-1

Σε αυτή την ενότητα εξετάζουμε τις γωνιακές διατομές για συνδυασμό κάμψης και θλίψης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια.

Μέλη που υπόκεινται σε συνδυασμένη κάμψη και θλίψη πρέπει να ικανοποιούν τα ακόλουθα κριτήρια:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{\xi} N_{Rk}} + k_{\xi\xi} \frac{M_{\xi,Ed}}{M_{\xi,Rk}} + k_{\xi\eta} \frac{M_{\eta,Ed} + \Delta M_{\eta,Ed}}{M_{\eta,Rk}} \leq 1 \quad (6.48)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{\eta} N_{Rk}} + k_{\eta\xi} \frac{M_{\xi,Ed}}{M_{\xi,Rk}} + k_{\eta\eta} \frac{M_{\eta,Ed} + \Delta M_{\eta,Ed}}{M_{\eta,Rk}} \leq 1 \quad (6.49)$$

Όπου:

N_{Ed} , $M_{\xi,Ed}$ και $M_{\eta,Ed}$: είναι οι τιμές σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης και των μεγίστων ροπών ως προς τους ξ - ξ και η - η άξονες κατά μήκος του μέλους, αντίστοιχα
 $\Delta M_{\eta,Ed}$: είναι η ροπή λόγω της μετατόπισης του κεντροβαρικού άξονα για διατομές κατηγορίας 4

χ_{ξ} and χ_{η} : είναι οι μειωτικοί συντελεστές λόγω καμπτικού λυγισμού

$k_{\xi\xi}$, $k_{\xi\eta}$, $k_{\eta\xi}$, $k_{\eta\eta}$: είναι οι συντελεστές αλληλεπίδρασης

$$M_{\zeta,Rk} = W_{eff,\zeta} f_y \quad (6.50)$$

$$M_{\eta,Rk} = W_{eff,\eta} f_y \quad (6.51)$$

Πίνακας 6.16: Συντελεστές αλληλεπίδρασης k_{ij}

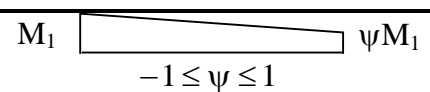
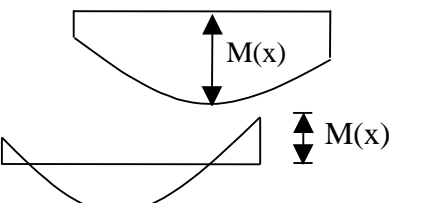
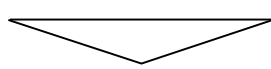

Συντελεστές αλληλεπίδρασης	Παραδοχές σχεδιασμού	
	ελαστικές ιδιότητες διατομής κατηγορία 3, κατηγορία 4	πλαστικές ιδιότητες διατομής κατηγορία 1, κατηγορία 2
k_{yy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}}$
k_{yz}	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{yz}} 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}}$
k_{zy}	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$	$C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}}$
k_{zz}	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$	$C_{mz} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} \frac{1}{C_{zz}}$
Βοηθητικοί συντελεστές		
$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$ $\mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}$ $w_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} \leq 1,5$ $w_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} \leq 1,5$ $n_{pl} = \frac{N_{Ed}}{N_{Rk} / \gamma_{M1}}$ $C_{my} \text{ βλέπε Πίνακα A.2}$	$C_{yy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max} - \frac{1,6}{w_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^{-2} \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ $\mu \epsilon b_{LT} = 0,5 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{\chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,z,Rd}}$ $C_{yz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{max}^{-2}}{w_z^5} \right) n_{pl} - c_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_z}{w_y}} \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ $\mu \epsilon c_{LT} = 10 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0^{-2}}{5 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$ $C_{zy} = 1 + (w_y - 1) \left[\left(2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{max}^{-2}}{w_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{w_y}{w_z}} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}$ $\mu \epsilon d_{LT} = 2 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z^{-4}} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}} \frac{M_{z,Ed}}{C_{mz} M_{pl,z,Rd}}$	

$a_{LT} = 1 - \frac{I_T}{I_y} \geq 0$	$C_{zz} = 1 + (w_z - 1) \left[\left(2 - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{w_z} C_{mz}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - e_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,z}}{W_{pl,z}}$ <p style="text-align: center;">με $e_{LT} = 1,7 a_{LT} \frac{\bar{\lambda}_0}{0,1 + \bar{\lambda}_z} \frac{M_{y,Ed}}{C_{my} \chi_{LT} M_{pl,y,Rd}}$</p>
---------------------------------------	--

Πίνακας 6.16 (συνέχεια)

$\bar{\lambda}_{\max} = \max \begin{cases} \bar{\lambda}_y \\ \bar{\lambda}_z \end{cases}$
$\bar{\lambda}_0 = \text{ανηγμένη λυγηρότητα για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό λόγω σταθερής καμπτικής ροπής, δηλ. } \psi_y = 1,0 \text{ στον Πίνακα A.2}$
$\bar{\lambda}_{LT} = \text{ανηγμένη λυγηρότητα για στρεπτοκαμπτικό λυγισμό}$
<p>Για $\bar{\lambda}_0 = 0$:</p> $C_{my} = C_{my,0}$ $C_{mz} = C_{mz,0}$ $C_{mLT} = 1,0$
<p>Για $\bar{\lambda}_0 > 0$:</p> $C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} a_{LT}}$ $C_{mz} = C_{mz,0}$ $C_{mLT} = C_{my}^2 \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crit,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{crit,T}}\right)}}$
$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 1, 2 και 3}$
$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{eff}}{W_{eff,y}} \quad \text{για διατομές κατηγορίας 4}$
$N_{crit,y} = \text{ελαστική δύναμη καμπτικού λυγισμού περί τον άξονα } y-y$
$N_{crit,z} = \text{ελαστική δύναμη καμπτικού λυγισμού περί τον άξονα } z-z$
$N_{crit,T} = \text{ελαστική δύναμη στρεπτικού λυγισμού}$
$I_T = \text{σταθερά στρέψης St. Venant}$
$I_y = \text{ροπή αδρανείας ως προς τον άξονα } y-y$

Πίνακας 6.17: Συντελεστές $C_{mi,0}$ ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής

Διάγραμμα ροπής	$C_{mi,0}$
	$C_{mi,0} = 0,79 + 0,21\psi_i + 0,36(\psi_i - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + \left(\frac{\pi^2 EI_i \delta_x }{L^2 M_{i,Ed}(x) } - 1 \right) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$ <p>$M_{i,Ed}(x)$ είναι η μέγιστη ροπή $M_{y,Ed}$ ή $M_{z,Ed}$ δ_x είναι η μέγιστη μετατόπιση του μέλους κατά το μήκος του</p>
	$C_{mi,0} = 1 - 0,18 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$
	$C_{mi,0} = 1 + 0,03 \frac{N_{Ed}}{N_{cr,i}}$

Στους παρακάτω υπολογισμούς θα επιλύσουμε ως προς N_{Ed} την σχέση (6.48) που αφορά λυγισμό ως προς τον ισχυρό άξονα ξ - ξ . Αντικαθιστώντας στην (6.48) τις σχέσεις (6.16), (6.18), (6.20), (6.50) και (6.51) καταλήγουμε στη σχέση (6.52).

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_{\xi} A_{eff} f_y}}{\gamma_{M1}} + k_{\xi\xi} \frac{\frac{(d\xi)N_{Ed}}{W_{eff,\xi} f_y}}{\gamma_{M1}} + k_{\xi\eta} \frac{\frac{(d\Delta\eta - d\eta)N_{Ed}}{W_{eff,\eta} f_y}}{\gamma_{M1}} \leq 1 \quad (6.52)$$

Για τη εύρεση των συντελεστών αλληλεπίδρασης χρησιμοποιείται η Μέθοδος 1 του κανονισμού.

Από τον Πίνακα 6.16 για διατομές κατηγορίας 4 ο συντελεστής αλληλεπίδρασης $k_{\xi\xi}$ είναι :

$$k_{\xi\xi} = C_{m\xi} \frac{\mu_{\xi}}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\xi}}} \quad (6.53)$$

Από τον Πίνακα 6.17 ο συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής $C_{m\xi}$ για ομοιόμορφη ροπή ($\psi = 1$) είναι:

$$C_{m\xi} = C_{m\xi,0} = 0,79 + 0,21 + 0,36(1 - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\xi}}$$

$$C_{m\xi} = 1 + \frac{0,24}{N_{cr,\xi}} N_{Ed} \rightarrow C_{m\xi} = 1 + aN_{Ed} \quad (6.54)$$

$$\text{Όπου } a = \frac{0,24}{N_{cr,\xi}} \quad (6.55)$$

Από τον Πίνακα 6.16 ο βοηθητικός συντελεστής μ_ξ είναι :

$$\mu_\xi = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\xi}}}{1 - \chi_\xi \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\xi}}} \rightarrow \mu_\xi = \frac{1 + \delta N_{Ed}}{1 + \beta N_{Ed}} \quad (6.56)$$

$$\text{Όπου } \beta = -\frac{\chi_\xi}{N_{cr,\xi}} \quad (6.57)$$

$$\text{και } \delta = -\frac{1}{N_{cr,\xi}} \quad (6.58)$$

Επομένως από τις σχέσεις (6.54), (6.56) και (6.58) ο συντελεστής αλληλεπίδρασης $k_{\xi\xi}$ παίρνει τη μορφή :

$$k_{\xi\xi} = \frac{(1 + aN_{Ed})(1 + \delta N_{Ed})}{(1 + \delta N_{Ed})(1 + \beta N_{Ed})} \rightarrow k_{\xi\xi} = \frac{(1 + aN_{Ed})}{(1 + \beta N_{Ed})} \quad (6.59)$$

Από τον Πίνακα 6.16 για διατομές κατηγορίας 4 ο συντελεστής αλληλεπίδρασης $k_{\xi\eta}$ είναι :

$$k_{\xi\eta} = c_{m\eta} \frac{\mu_\xi}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\eta}}}$$

(6.60)

Από τον Πίνακα 6.17 ο συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής $C_{m\eta}$ για ομοιόμορφη ροπή ($\psi = 1$) είναι :

$$C_{m\eta} = C_{m\eta,0} = 0,79 + 0,21 + 0,36(1 - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\eta}}$$

$$C_{m\eta} = 1 + \frac{0,24N_{Ed}}{N_{cr,\eta}} \rightarrow C_{m\eta} = 1 + \gamma N_{Ed} \quad (6.61)$$

$$\text{Όπου } \gamma = \frac{0,24}{N_{cr,\eta}} \quad (6.62)$$

Επομένως από τις σχέσεις (6.56) και (6.61) ο συντελεστής αλληλεπίδρασης $k_{\xi\eta}$ παίρνει τη μορφή :

$$k_{\xi\eta} = \frac{(1 + \gamma N_{Ed})(1 + \delta N_{Ed})}{(1 + \varepsilon N_{Ed})(1 + \beta N_{Ed})} \quad (6.63)$$

$$\text{Όπου } \varepsilon = -\frac{1}{N_{cr,\eta}} \quad (6.64)$$

Η σχέση (6.52) απλοποιείται στην ακόλουθη σχέση (6.65) :

$$K_1 N_{Ed} + K_2 \frac{(1 + aN_{Ed})}{(1 + \beta N_{Ed})} N_{Ed} + K_3 \frac{(1 + \gamma N_{Ed})(1 + \delta N_{Ed})}{(1 + \varepsilon N_{Ed})(1 + \beta N_{Ed})} N_{Ed} \leq 1 \quad (6.65)$$

Όπου :

$$K_1 = \frac{1}{\chi_{\xi} A_{eff} f_y} \quad (6.66)$$

$$K_2 = \frac{d_{\xi}^z}{W_{\xi} f_y} \quad (6.67)$$

$$K_3 = \frac{d\Delta\eta - d\eta}{W_{\eta} f_y} \quad (6.68)$$

Εκτελώντας τις πράξεις έχουμε τα ακόλουθα:

$$K_1(1 + \beta N_{Ed})(1 + \varepsilon N_{Ed})N_{Ed} + K_2(1 + aN_{Ed})(1 + \varepsilon N_{Ed})N_{Ed} + K_3(1 + \gamma N_{Ed})(1 + \delta N_{Ed})N_{Ed} \leq (1 + \varepsilon N_{Ed})(1 + \beta N_{Ed}) \rightarrow$$

$$K_1[N_{Ed} + (\varepsilon + \beta)N_{Ed}^2 + \beta\varepsilon N_{Ed}^3] + K_2[N_{Ed} + (\alpha + \varepsilon)N_{Ed}^2 + \alpha\varepsilon N_{Ed}^3] + K_3[N_{Ed} + (\gamma + \delta)N_{Ed}^2 + \gamma\delta N_{Ed}^3] - [1 + (\beta + \varepsilon)N_{Ed} + \beta\varepsilon N_{Ed}^2] \leq 0 \rightarrow$$

$$N_{Ed}(K_1 + K_2 + K_3 - \beta - \varepsilon) + N_{Ed}^2[K_1(\varepsilon + \beta) + K_2(\alpha + \varepsilon) + K_3(\gamma + \delta) - \beta\varepsilon] + N_{Ed}^3(K_1\beta\varepsilon + K_2\alpha\varepsilon + K_3\gamma\delta) \leq 1 \rightarrow$$

Η σχέση (6.69) στην οποία καταλήγουμε είναι μια τριτοβάθμια ανίσωση με άγνωστο την N_{Ed} .

$$AN_{Ed} + BN_{Ed}^2 + \Gamma N_{Ed}^3 \leq 1 \quad (6.69)$$

Όπου :

$$A = K_1 + K_2 + K_3 - \beta - \varepsilon \quad (6.70)$$

$$B = K_1(\varepsilon + \beta) + K_2(\alpha + \varepsilon) + K_3(\gamma + \delta) - \beta\varepsilon \quad (6.71)$$

$$\Gamma = K_1\beta\varepsilon + K_2\alpha\varepsilon + K_3\gamma\delta \quad (6.72)$$

Στον παρακάτω Πίνακα 6.18 έχουν υπολογιστεί οι μεταβλητές $K_1, K_2, K_3, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ και ε για λυγισμό ως προς τον ισχυρό άξονα ξ - ξ σύμφωνα με τις σχέσεις που έχουν οριστεί πιο πάνω.

Πίνακας 6.18: Μεταβλητές $K_1, K_2, K_3, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ και ε για λυγισμό ως προς τον ισχυρό άξονα ξ - ξ .

Διατομή	K1	K2	K3	α	β	γ	δ	ε
KL35x35x3	0,0242	0,0229	0,0046	0,0028	-0,0070	0,0123	-0,0115	-0,0511
KL40x40x3	0,0199	0,0183	0,0036	0,0018	-0,0054	0,0080	-0,0076	-0,0331
KL50x50x3	0,0159	0,0145	0,0072	0,0009	-0,0031	0,0039	-0,0038	-0,0163
KL60x60x3	0,0140	0,0120	0,0087	0,0005	-0,0019	0,0022	-0,0022	-0,0091
KL41x41x4	0,0138	0,0136	0,0016	0,0014	-0,0041	0,0056	-0,0060	-0,0232
KL51x51x4	0,0101	0,0108	0,0015	0,0007	-0,0022	0,0029	-0,0028	-0,0123
KL61x61x4	0,0086	0,0090	0,0034	0,0004	-0,0013	0,0015	-0,0015	-0,0063
KL71x71x4	0,0078	0,0077	0,0045	0,0002	-0,0009	0,0009	-0,0009	-0,0039
KL81x81x4	0,0074	0,0067	0,0049	0,0001	-0,0006	0,0006	-0,0006	-0,0026

Στον παρακάτω Πίνακα 6.19 έχουν υπολογιστεί οι συντελεστές A , B , Γ της τριτοβάθμιας ανίσωσης για λυγισμό ως προς τον ισχυρό άξονα ξ - ξ σύμφωνα με τις σχέσεις που έχουν οριστεί πιο πάνω. Στον ίδιο πίνακα παρουσιάζεται και η μέγιστη λύση της τριτοβάθμιας ανίσωσης, η οποία είναι η αντοχή των γωνιακών για συνδυασμό κάμψης και θλίψης για λυγισμό ως προς τον ισχυρό άξονα ξ - ξ .

Πίνακας 6.19: Συντελεστές τριτοβάθμιας ανίσωσης για λυγισμό ως προς τον ισχυρό άξονα ξ - ξ και μέγιστη λύση.

Διατομή	A	B	Γ	N_{Ed} (KN)
KL35x35x3	0,10973	-0,00287	4,7771E-06	15,15
KL40x40x3	0,08034	-0,00152	2,1944E-06	20,14
KL50x50x3	0,05703	-0,00058	4,8173E-07	23,68
KL60x60x3	0,04578	-0,00028	1,4858E-07	26,51
KL41x41x4	0,05635	-0,00077	7,9038E-07	29,52
KL51x51x4	0,03687	-0,0003	1,7275E-07	40,45
KL61x61x4	0,02865	-0,00013	4,2395E-08	44,25
KL71x71x4	0,02473	-6,9E-05	1,5469E-08	47,51
KL81x81x4	0,02218	-4,1E-05	6,6976E-09	50,48

Πίνακας 6.20: Συντελεστές αλληλεπίδρασης, ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής και βοηθητικός συντελεστής για λυγισμό ως προς τον ισχυρό άξονα ξ - ξ .

Διατομή	N_{Ed} (KN)	$C_{m\xi}$	μ_ξ	$k_{\xi\xi}$	$C_{m\eta}$	$k_{\xi\eta}$
KL35x35x3	15,15	1,04	0,92	1,17	0,81	3,32
KL40x40x3	20,14	1,04	0,95	1,16	0,84	2,39
KL50x50x3	23,68	1,02	0,98	1,10	0,91	1,45
KL60x60x3	26,51	1,01	0,99	1,07	0,94	1,23
KL41x41x4	29,52	1,04	0,94	1,18	0,84	2,48
KL51x51x4	40,45	1,03	0,97	1,13	0,88	1,70
KL61x61x4	44,25	1,02	0,99	1,08	0,93	1,28
KL71x71x4	47,51	1,01	1,00	1,05	0,96	1,17
KL81x81x4	50,48	1,01	1,00	1,04	0,97	1,11

Πίνακας 6.21: Όροι κριτηρίου για συνδυασμένη κάμψη και θλίψη για λυγισμό ως προς τον ισχυρό άξονα ξ - ξ .

Διατομή	N_{Ed} (KN)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_\xi N_{Rk}}$	$k_{\xi\xi} \frac{M_{\xi,Ed}}{M_{\xi,Rk}}$	$k_{\xi\eta} \frac{M_{\eta,Ed} + \Delta M_{\eta,Ed}}{M_{\eta,Rk}}$	άθροισμα
KL35x35x3	15,15	0,37	0,41	0,23	1,00
KL40x40x3	20,14	0,40	0,43	0,17	1,00
KL50x50x3	23,68	0,38	0,38	0,25	1,00
KL60x60x3	26,51	0,37	0,34	0,28	1,00
KL41x41x4	29,52	0,41	0,48	0,12	1,00

KL51x51x4	40,45	0,41	0,49	0,10	1,00
KL61x61x4	44,25	0,38	0,43	0,20	1,00
KL71x71x4	47,51	0,37	0,38	0,25	1,00
KL81x81x4	50,48	0,37	0,35	0,28	1,00

Στους παρακάτω υπολογισμούς θα επιλύσουμε ως προς N_{Ed} την σχέση (6.49) που αφορά λυγισμό ως προς τον ασθενή άξονα η-η. Αντικαθιστώντας στην (6.49) τις σχέσεις (6.16), (6.18), (6.20), (6.50) και (6.51) καταλήγουμε στη σχέση (6.73).

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{\eta} A_{eff} f_y} + k_{\eta\zeta} \frac{(d\zeta)N_{Ed}}{W_{eff,\zeta} f_y} + k_{\eta\eta} \frac{(d\Delta\eta - d\eta)N_{Ed}}{W_{eff,\eta} f_y} \leq 1 \quad (6.73)$$

$\gamma_{M1} \qquad \qquad \qquad \gamma_{M1} \qquad \qquad \qquad \gamma_{M1}$

Για τη εύρεση των συντελεστών αλληλεπίδρασης χρησιμοποιείται η Μέθοδος 1 του κανονισμού.

Από τον Πίνακα 6.16 για διατομές κατηγορίας 4 ο συντελεστής αλληλεπίδρασης $k_{\eta\zeta}$ είναι

$$k_{\eta\zeta} = C_{m\zeta} \frac{\mu_{\eta}}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\zeta}}} \quad (6.74)$$

Από τον Πίνακα 6.17 ο συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής $C_{m\zeta}$ για ομοιόμορφη ροπή ($\psi = 1$) είναι :

$$C_{m\zeta} = C_{m\zeta,0} = 0,79 + 0,21 + 0,36(1 - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\zeta}}$$

$$C_{m\zeta} = 1 + \frac{0,24}{N_{cr,\zeta}} N_{Ed} \rightarrow C_{m\zeta} = 1 + aN_{Ed} \quad (6.75)$$

$$\text{Όπου } a = \frac{0,24}{N_{cr,\zeta}} \quad (6.76)$$

Από τον Πίνακα 6.16 ο βοηθητικός συντελεστής μ_{η} είναι :

$$\mu_{\eta} = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\eta}}}{1 - \chi_{\eta} \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\eta}}} \rightarrow \mu_{\eta} = \frac{1 + \varepsilon N_{Ed}}{1 + \beta N_{Ed}} \quad (6.77)$$

$$\text{Όπου } \varepsilon = -\frac{1}{N_{cr,\eta}} \quad (6.78)$$

$$\text{και } \beta = -\frac{\chi_{\eta}}{N_{cr,\eta}} \quad (6.79)$$

Επομένως από τις σχέσεις (6.75) και (6.77) ο συντελεστής αλληλεπίδρασης $k_{\eta\zeta}$ παίρνει τη μορφή:

$$k_{\eta\zeta} = \frac{(1 + aN_{Ed})(1 + \varepsilon N_{Ed})}{(1 + \delta N_{Ed})(1 + \beta N_{Ed})} \quad (6.80)$$

$$\text{Όπου } \delta = -\frac{1}{N_{cr,\zeta}} \quad (6.81)$$

Από τον Πίνακα 6.16 για διατομές κατηγορίας 4 ο συντελεστής αλληλεπίδρασης $k_{\eta\eta}$ είναι :

$$k_{\eta\eta} = c_{mn} \frac{\mu_{\eta}}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\eta}}} \quad (6.82)$$

Από τον Πίνακα 6.17 ο συντελεστής ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής $C_{m\eta}$ για ομοιόμορφη ροπή ($\psi = 1$) είναι :

$$C_{m\eta} = C_{m\eta,0} = 0,79 + 0,21 + 0,36(1 - 0,33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,\eta}}$$

$$C_{mn} = 1 + \frac{0,24N_{Ed}}{N_{cr,\eta}} \rightarrow C_{mn} = 1 + \gamma N_{Ed} \quad (6.83)$$

$$\text{Όπου } \gamma = \frac{0,24}{N_{cr,\eta}} \quad (6.84)$$

Επομένως από τις σχέσεις (6.77), (6.78) και (6.83) ο συντελεστής αλληλεπίδρασης $k_{\zeta\eta}$ παίρνει τη μορφή :

$$k_{\eta\eta} = \frac{(1 + \gamma N_{Ed})(1 + \varepsilon N_{Ed})}{(1 + \varepsilon N_{Ed})(1 + \beta N_{Ed})} \rightarrow k_{\eta\eta} = \frac{(1 + \gamma N_{Ed})}{(1 + \beta N_{Ed})} \quad (6.85)$$

Η σχέση (6.73) απλοποιείται στην ακόλουθη σχέση (6.86):

$$K_1 N_{Ed} + K_2 \frac{(1 + aN_{Ed})(1 + \varepsilon N_{Ed})}{(1 + \delta N_{Ed})(1 + \beta N_{Ed})} N_{Ed} + K_3 \frac{(1 + \gamma N_{Ed})}{(1 + \beta N_{Ed})} N_{Ed} \leq 1 \quad (6.86)$$

Όπου :

$$K_1 = \frac{1}{\chi_{\eta} A_{eff} f_y} \quad (6.87)$$

$$K_2 = \frac{d\zeta}{W_{\zeta} f_y} \quad (6.88)$$

$$K_3 = \frac{d\Delta\eta - d\eta}{W_{\eta} f_y} \quad (6.89)$$

Εκτελώντας τις πράξεις έχουμε τα ακόλουθα :

$$K_1(1 + \beta N_{Ed})(1 + \delta N_{Ed})N_{Ed} + K_2(1 + aN_{Ed})(1 + \varepsilon N_{Ed})N_{Ed} +$$

$$+ K_3(1 + \gamma N_{Ed})(1 + \delta N_{Ed})N_{Ed} \leq (1 + \delta N_{Ed})(1 + \beta N_{Ed}) \rightarrow$$

$$K_1[N_{Ed} + (\delta + \beta)N_{Ed}^2 + \beta\delta N_{Ed}^3] + K_2[N_{Ed} + (\alpha + \varepsilon)N_{Ed}^2 + \alpha\varepsilon N_{Ed}^3] +$$

$$+ K_3[N_{Ed} + (\gamma + \delta)N_{Ed}^2 + \gamma\delta N_{Ed}^3] - [1 + (\beta + \delta)N_{Ed} + \beta\delta N_{Ed}^2] \leq 0 \rightarrow$$

$$N_{Ed}(K_1 + K_2 + K_3 - \beta - \delta) + N_{Ed}^2[K_1(\delta + \beta) + K_2(\alpha + \varepsilon) + K_3(\gamma + \delta) - \beta\delta] +$$

$$+ N_{Ed}^3(K_1\beta\delta + K_2\alpha\varepsilon + K_3\gamma\delta) \leq 1 \rightarrow$$

Η σχέση (6.90) στην οποία καταλήγουμε είναι μια τριτοβάθμια ανίσωση με άγνωστο την N_{Ed} .

$$AN_{Ed} + BN_{Ed}^2 + \Gamma N_{Ed}^3 \leq 1 \quad (6.90)$$

Όπου :

$$A = K_1 + K_2 + K_3 - \beta - \delta \quad (6.91)$$

$$B = K_1(\delta + \beta) + K_2(\alpha + \varepsilon) + K_3(\gamma + \delta) - \beta\delta \quad (6.92)$$

$$\Gamma = K_1\beta\delta + K_2\alpha\varepsilon + K_3\gamma\delta \quad (6.93)$$

Πίνακας 6.22: Μεταβλητές $K_1, K_2, K_3, \alpha, \beta, \gamma, \delta$ και ε για λυγισμό ως προς τον ασθενή άξονα η-η.

Διατομή	K1	K2	K3	α	β	γ	δ	ε
KL35x35x3	0,0665	0,0229	0,0046	0,0028	-0,0113	0,0123	-0,0115	-0,0511
KL40x40x3	0,0464	0,0183	0,0036	0,0018	-0,0100	0,0080	-0,0076	-0,0331
KL50x50x3	0,0273	0,0145	0,0072	0,0009	-0,0077	0,0039	-0,0038	-0,0163
KL60x60x3	0,0199	0,0120	0,0087	0,0005	-0,0057	0,0022	-0,0022	-0,0091
KL41x41x4	0,0334	0,0136	0,0016	0,0014	-0,0065	0,0056	-0,0060	-0,0232
KL51x51x4	0,0191	0,0108	0,0015	0,0007	-0,0051	0,0029	-0,0028	-0,0123
KL61x61x4	0,0127	0,0090	0,0034	0,0004	-0,0037	0,0015	-0,0015	-0,0063
KL71x71x4	0,0103	0,0077	0,0045	0,0002	-0,0027	0,0009	-0,0009	-0,0039
KL81x81x4	0,0090	0,0067	0,0049	0,0001	-0,0020	0,0006	-0,0006	-0,0026

Πίνακας 6.23: Συντελεστές τριτοβάθμιας ανίσωσης για λυγισμό ως προς τον ασθενή άξονα η-η και μέγιστη λύση.

Διατομή	A	B	Γ	N_{Ed} (KN)
KL35x35x3	0,11677	-0,0032	4,7771E-06	12,05
KL40x40x3	0,08592	-0,00172	2,1944E-06	16,18
KL50x50x3	0,06065	-0,00066	4,8173E-07	20,87
KL60x60x3	0,04849	-0,00031	1,4858E-07	24,25
KL41x41x4	0,06118	-0,00087	7,9038E-07	22,65
KL51x51x4	0,0393	-0,00034	1,7275E-07	34,15
KL61x61x4	0,03035	-0,00014	4,2395E-08	40,15
KL71x71x4	0,02607	-7,6E-05	1,5469E-08	44,02
KL81x81x4	0,02324	-4,5E-05	6,6976E-09	47,51

Πίνακας 6.24: Συντελεστές αλληλεπίδρασης, ισοδύναμης ομοιόμορφης ροπής και βοηθητικός συντελεστής για λυγισμό ως προς τον ασθενή άξονα η-η.

Διατομή	N_{Ed} (KN)	$C_{m\xi}$	μ_η	$k_{\eta\xi}$	$C_{m\eta}$	$k_{\eta\eta}$
KL35x35x3	12,05	1,03	0,45	0,53	0,85	0,99
KL40x40x3	16,18	1,03	0,55	0,65	0,87	1,04
KL50x50x3	20,87	1,02	0,79	0,87	0,92	1,10

KL60x60x3	24,25	1,01	0,90	0,97	0,95	1,10
KL41x41x4	22,65	1,03	0,56	0,66	0,87	1,03
KL51x51x4	34,15	1,02	0,70	0,80	0,90	1,09
KL61x61x4	40,15	1,01	0,88	0,95	0,94	1,11
KL71x71x4	44,02	1,01	0,94	0,99	0,96	1,09
KL81x81x4	47,51	1,01	0,97	1,01	0,97	1,07

Πίνακας 6.25: Όροι κριτηρίου για συνδυασμένη κάμψη και θλίψη για λυγισμό ως προς τον ασθενή άξονα η-η.

Διατομή	N_{Ed} (KN)	$\frac{N_{Ed}}{\chi_{\eta} N_{Rk}}$	$k_{\eta\zeta} \frac{M_{\zeta,Ed}}{M_{\zeta,Rk}}$	$k_{\eta\eta} \frac{M_{\eta,Ed} + \Delta M_{\eta,Ed}}{M_{\eta,Rk}}$	άθροισμα
KL35x35x3	12,05	0,80	0,15	0,05	1,00
KL40x40x3	16,18	0,75	0,19	0,06	1,00
KL50x50x3	20,87	0,57	0,26	0,17	1,00
KL60x60x3	24,25	0,48	0,28	0,23	1,00
KL41x41x4	22,65	0,76	0,21	0,04	1,00
KL51x51x4	34,15	0,65	0,29	0,05	1,00
KL61x61x4	40,15	0,51	0,34	0,15	1,00
KL71x71x4	44,02	0,45	0,34	0,21	1,00
KL81x81x4	47,51	0,43	0,32	0,25	1,00

Όπως ήταν αναμενόμενο το κριτήριο που αφορά λυγισμό ως προς τον ασθενή άξονα η-η δίνει δυσμενέστερα αποτελέσματα. Η μέγιστη N_{Ed} που προκύπτει από το κριτήριο για συνδυασμό κάμψης και θλίψης για λυγισμό ως προς τον ασθενή άξονα η-η, είναι η θλιπτική αντοχή των γωνιακών λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή της κάμψης.

Πίνακας 6.26: Αντοχές των γωνιακών για συνδυασμό κάμψης και θλίψης σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-1, σύμφωνα με το Abaqus και ο λόγος αυτών των δύο.

Διατομή	N_{Ed} (KN)	Θλιπτική αντοχή RF3abacus	RF3/ N_{Ed}
KL35x35x3	12,05	28,89	2,40
KL40x40x3	16,18	33,81	2,09
KL50x50x3	20,87	39,49	1,89
KL60x60x3	24,25	42,54	1,75
KL41x41x4	22,65	51,95	2,29
KL51x51x4	34,15	55,64	1,63
KL61x61x4	40,15	77,61	1,93
KL71x71x4	44,02	81,41	1,85
KL81x81x4	47,51	83,33	1,75

7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας, τα οποία είναι τα ακόλουθα:

1) Κατ' αρχήν αποδεικνύεται ότι οι διατάξεις του EC3 για τον υπολογισμό της αντοχής των λεπτοτοιχων γωνιακών σε εφελκυσμό και θλίψη είναι συντηρητικές, καθώς οι αντοχές που προέκυψαν σύμφωνα με τον EC3 είναι αρκετά μικρότερες από τις αντοχές που προέκυψαν από τις αναλύσεις στο πρόγραμμα Abaqus. Πιο συγκεκριμένα:

Η εφελκυστική αντοχή των γωνιακών που προέκυψε στο πρόγραμμα Abaqus είναι 1,60-2,11 φορές μεγαλύτερη από αυτή που πρόεκυψε σύμφωνα με τον EC3.

Η θλιπτική αντοχή των γωνιακών που προέκυψε στο πρόγραμμα Abaqus είναι 1,05-1,92 φορές μεγαλύτερη από αυτή που πρόεκυψε σύμφωνα με τον EC3 αγνοώντας τις ροπές λόγω έκκεντρης θλίψης και τις παρασιτικές ροπές.

Η θλιπτική αντοχή των γωνιακών που προέκυψε στο πρόγραμμα Abaqus είναι 2,02-3,21 φορές μεγαλύτερη από αυτή που πρόεκυψε σύμφωνα με τον EC3 Μέρος 1-3 λαμβάνοντας υπόψη τις ροπές λόγω έκκεντρης θλίψης και τις παρασιτικές ροπές.

Η θλιπτική αντοχή των γωνιακών που προέκυψε στο πρόγραμμα Abaqus είναι 1,63-2,40 φορές μεγαλύτερη από αυτή που πρόεκυψε σύμφωνα με τον EC3 Μέρος 1-1 λαμβάνοντας υπόψη τις ροπές λόγω έκκεντρης θλίψης και τις παρασιτικές ροπές.

2) Διαπιστώνεται ότι για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής των λεπτοτοιχων γωνιακών σύμφωνα με τον EC3 μπορούν να αγνοηθούν οι ροπές λόγω έκκεντρης θλίψης και οι παρασιτικές ροπές, καθώς η θεώρηση καθαρής θλίψης έναντι της θεώρησης συνδυασμού κάμψης και θλίψης, δίνει αντοχές που είναι πιο κοντά στις αντοχές που προέκυψαν από τις αναλύσεις στο Abaqus.

3) Αποδεικνύεται ότι το κριτήριο για συνδυασμό κάμψης και θλίψης που δίνει το Μέρος 1-3 (Γενικοί κανόνες- Συμπληρωματικοί κανόνες για λεπτότοιχα μέλη με έλαση εν ψυχρώ και επικαλύψεις) του EC3 είναι πιο συντηρητικό από το κριτήριο για συνδυασμό κάμψης και θλίψης που δίνει το Μέρος 1-1 (Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια) του EC3.

4) Διαπιστώνεται ότι οι διατάξεις του EC3 για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής των γωνιακών αποδεικνύονται αυστηρότερες για τις διατομές KL35x35x3 και KL41x41x4 (οι οποίες έχουν τους μικρότερους λόγους b/t), καθώς παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους λόγους θλιπτική αντοχή Abaqus / θλιπτική αντοχή EC3.

5) Διαπιστώνεται από τις αναλύσεις στο Abaqus αλλά και από τις διατάξεις του EC3 ότι η αντοχή θραύσης f_u του χάλυβα των ελασμάτων επηρεάζει μόνο την εφελκυστική αντοχή των γωνιακών και όχι την θλιπτική αντοχή τους.

8 Βιβλιογραφία

1. Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Ι., «Σχεδιασμός δομικών έργων από χάλυβα, με βάση τα τελικά κείμενα των Ευρωκωδίκων», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005
2. Βάγιας Ι, «Σιδηρές Κατασκευές, Ανάλυση και διαστασιολόγηση», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2003
3. Βάγιας Ι, Ερμόπουλος Ι., Ιωαννίδης Ι., «Σιδηρές Κατασκευές, Παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3, Τόμος Ι» Εκδόσεις Κλειδάριθμος, 2005
4. Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-1: Γενικοί κανόνες και κανόνες για κτίρια, CEN, EN 1993-1-1, 2005
5. Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-3: Γενικοί κανόνες- Συμπληρωματικοί κανόνες για λεπτότοιχα μέλη με έλαση εν ψυχρώ και επικαλύψεις, CEN, ENV 1993-1-3, 1996
6. Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-5: Μέλη από επίπεδα ελάσματα, CEN, EN 1993-1-5, 2006
7. Ευρωκώδικας 3: «Σχεδιασμός Κατασκευών από χάλυβα», Μέρος 1-8: Σχεδιασμός κόμβων, CEN, EN 1993-1-8, 2005
8. Μιχάλτσος Γ. «Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές, Μέθοδοι υπολογισμού», Εκδόσεις Συμεών, 2009
9. Μιχάλτσος Γ. «Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές Θεωρία και Εφαρμογές», Εκδόσεις Συμεών, 2008