



ARISTOTLE UNIVERSITY
OF THESSALONIKI

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Μέθοδοι υπολογισμού συγκολλήσεων κατά IIW

1η Εργασία - Ανάλυση Συγκολλητών Κατασκευών

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΠΑΠΑΜΙΧΑΗΛ

LMEMD Laboratory of
Machine Elements &
Machine Design
Aristotle University of Thessaloniki

Υπεύθυνος: Γάκιος Χρήστος
Email: vasilepi@meng.auth.gr
ΑΕΜ: 6920

25 Απριλίου 2025

Περιεχόμενα

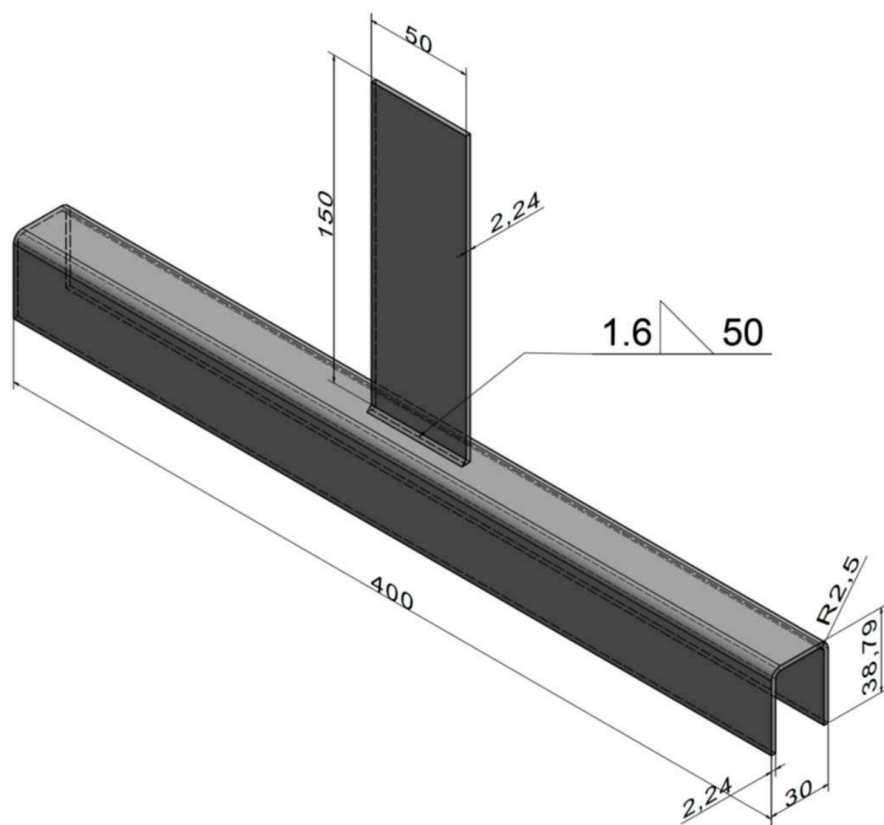
1	Εισαγωγή	1
1.1	Παρουσίαση προβλήματος	1
1.2	Στατιστική ανάλυση	2
2	Υπολογισμοί συγκόλλησης	2
2.1	Συντελεστές διόρθωσης	2
2.2	Μέθοδος Ονομαστικής Τάσης	3
2.3	Μέθοδος Κατασκευαστικής Τάσης	3
2.4	Μέθοδος Ενεργής Τάσης Εγκοπής	6
3	Αποτελέσματα Και Συζήτηση	6

1 Εισαγωγή

1.1 Παρουσίαση προβλήματος

Η παρόν εργασία εκτελείται στα πλαίσια του μαθήματος Ανάλυση Συγκολλητών Κατασκευών του ΤΜΜ του ΑΠΘ. Σκοπός της μελέτης είναι η ανάλυση κόπωσης μιας συγκολλητής κατασκευής, ακολουθώντας τις οδηγίες του ΠW.

Η κατασκευή προς μελέτη φαίνεται παρακάτω. Τα δεδομένα που δόθηκαν ήταν σε μορφή εύρους και μέσης τιμής φόρτισης και κύκλων διάρκειας ζωής της κατασκευής. Επίσης, δόθηκε και η μορφή αστοχίας της κατασκευής. Μόνο δύο εκ των δοκιμών αστόχησαν με διαφορετικό τρόπο. Τα συγκεκριμένα δύο δοκίμια δεν μελετήθηκαν καθόλου κατά την ανάλυση για αυτόν ακριβώς το λόγο.



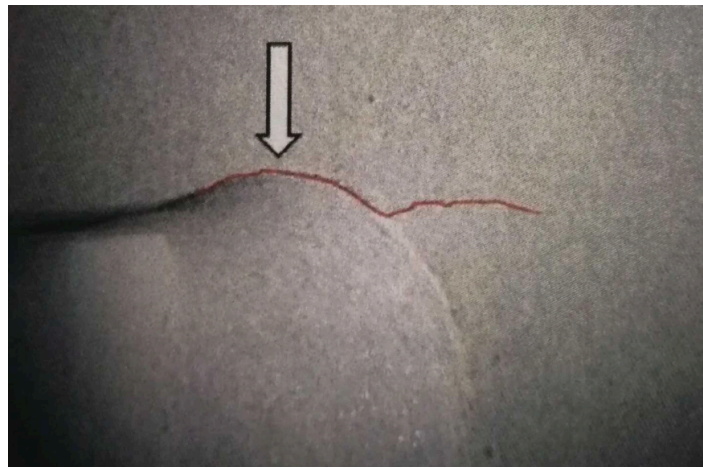
Σχήμα 1: Συγκολλητή κατασκευή προς μελέτη.

Τα πειραματικά δεδομένα που έχουν δοθεί είναι για λόγο $R = 0$. Παρακάτω παρουσιάζονται τα δεδομένα για τον τύπο αστοχίας που φαίνεται στο Σχ. 2. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα υπόλοιπα δύο δοκίμια και τα αποτελέσματά τους δεν λήφθηκαν υπόψη.

Για κάθε μία από τις μεθόδους, θα υπολογίζεται το εύρος τάσης για το κάθε δοκίμιο που ελέγχθηκε. Έπειτα, το εύρος αυτό θα συγκρίνεται με την αντίστοιχη καμπύλη διάρκειας ζωής σύμφωνα με τον οδηγό. Τα ζεύγη $(\Delta\sigma, N)$ που θα προκύπτουν θα αναφέρονται σε πιθανότητα επιβίωσης 50%. Επομένως, είναι αναγκαία και η μετατροπή σε πιθανότητα 97.7% ώστε να μπορεί να γίνει η σύγκριση σύμφωνα με τον οδηγό ΠW.

Spec No.	F_m [kN]	F_a [kN]	N
DI-01	28,2	27,9	89.000
DI-02	37,6	37,3	29.000
DI-03	34,2	33,9	41.000
DI-04	31,2	30,9	73.000
DI-05	40,2	39,9	23.000
DI-06	22,1	22,0	190.000
DI-08	18,1	18,0	603.000
DI-09	20,1	20,0	453.000
DI-10	21,1	21,0	575.000
DI-11	26,2	26,0	167.000
DI-12	16,5	16,4	1.470.000
DI-13	23,2	23,0	335.000
DI-15	24,2	24,0	246.000

Πίνακας 1: Πειραματικά δεδομένα δοκιμής κόπωσης στη συγκολλητή κατασκευή.



Σχήμα 2: Μορφή αστοχίας πλειοψηφίας δοκιμών.

1.2 Στατιστική ανάλυση

Για τη δημιουργία της καμπύλης 97.7% θα πρέπει να υπολογιστεί η τυπική απόκλιση s . Ορίζοντας ως:

$$\hat{y} = \log_{10} N \quad (1)$$

$$\hat{x} = \log_{10} \Delta \sigma \quad (2)$$

Σύμφωνα με τους πίνακες της κανονικής κατανομής για να μετατραπούν τα σημεία στη ζητούμενη πιθανότητα αρκεί:

$$\hat{y}_{97.7\%} = \hat{y}_{50\%} - 2.27s \quad (3)$$

Από τα σημεία υπολογίζονται, κάθε φορά, οι συντελεστές α, β ως:

$$\beta = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\sum y}{n} - \beta \frac{\sum x}{n} \quad (5)$$

Έπειτα, υπολογίζεται η τυπική απόκλιση ως:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (y(\bar{x}) - \bar{y})^2}{n}} \quad (6)$$

2 Υπολογισμοί συγκόλλησης

2.1 Συντελεστές διόρθωσης

Οι συντελεστές διόρθωσης που εφαρμόστηκαν τόσο στη μέθοδο της ονομαστικής τάσης, όσο και στη κατασκευαστική τάση, έχουν να κάνουν με τη διόρθωση της τυποποιημένης καμπύλης για την αξιολόγηση της διάρκειας

ζωής. Οι συντελεστές αυτοί αφορούν τον λόγο φόρτισης R και το πάχος του ελάσματος t προς συγκόλληση. Ο συντελεστής λόγου φόρτισης δηλώνει πως:

$$f(R) = -0.4 \cdot R + 1.2, \text{ for } -1 \leq R \leq 0.5 \quad (7)$$

Αντίστοιχα, ο συντελεστής πάχους υπολογίζεται για:

$$t_{eff} = \max\{0.5 \cdot L, t\}, \quad (8)$$

καθώς ισχύει ότι $L/t > 2$. Τελικά, ο συντελεστής δίνεται ως:

$$f(t) = \left(\frac{t_{ref}}{t_{eff}} \right)^n \quad (9)$$

Προκύπτει λοιπόν ότι ο συνολικός συντελεστής $f(tot) = f(R) \cdot f(t) = 1.2$. Έτσι, η κλάση (δηλαδή το όριο αντοχής στους $2 \cdot 10^6$ κύκλους φόρτισης) μετατοπίζεται προς τα πάνω στα αντίστοιχα διαγράμματα εύρους τάσης - διάρκειας ζωής:

$$FAT_{assess} = f(tot) \cdot FAT_{ref} \quad (10)$$

2.2 Μέθοδος Ονομαστικής Τάσης

Για τη μέθοδο της ονομαστικής τάσης, αρκεί ο υπολογισμός των ονομαστικών τάσεων από τις φορτίσεις της κατασκευής. Αυτές σύμφωνα με τον οδηγό υπολογίζονται ως:

$$\sigma = \frac{F}{A_w} \quad (11)$$

Στη περίπτωση της δύναμης κάθετα προς τη ραφή της συγκόλλησης ο οδηγός IIW αναφέρει ότι η διατομή που χρησιμοποιείται εξαρτάται από μήκος της συγκόλλησης και το πάχος της ως:

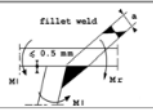
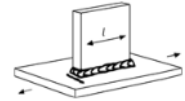
$$A_w = l \cdot a_w \quad (12)$$

Στη περίπτωση προς μελέτη ωστόσο, η ραφή είναι παράλληλη προς την διεύθυνση της δύναμης. Έτσι, σαν διατομή συγκόλλησης επιλέγεται η διατομή της βάσης της συγκόλλησης (του κύριου τεμαχίου σε σχήμα Π). Τέλος, υπολογίζεται το εύρος τάσης για κάθε διαφορετικό δοκίμιο ως:

$$\Delta\sigma = 2 \cdot \frac{F_a}{A_w} \quad (13)$$

Έχοντας υπολογίσει λοιπόν, τα σημεία $(\Delta\sigma, N)$, τα οποία εκφράζουν την 50% πιθανότητα επιβίωσης, εξάγονται τα σημεία και για την 97.7% πιθανότητα. Αυτό γίνεται, έτσι ώστε να συγκρίνονται όμοιες καμπύλες διάρκειας ζωής μεταξύ τους. Οι καμπύλες για την αξιολόγηση διάρκειας ζωής FAT εκφράζουν και αυτές την 97.7% σύμφωνα με τον IIW. Ο οδηγός αναφέρει ότι για την ανάλυση σε κόπωση με τη μέθοδο της ονομαστικής τάσης, πρέπει η καμπύλη διάρκειας ζωής να συγκριθεί με κάποια από τις τυποποιημένες καμπύλες FAT του οδηγού. Αρκεί λοιπόν, να επιλεγεί η κατάλληλη κλάση FAT ώστε να εκτιμηθεί η διάρκεια ζωής της κατασκευής.

Σύμφωνα με τον οδηγό, η κλάση τυποποιημένης καμπύλης διάρκειας ζωής που βρίσκεται πιο κοντά στη παρόν περίπτωση είναι η **FAT 71**. Το μήκος της συγκόλλησης είναι 50 mm και έτσι, η επιλεγμένη κλάση προέκυψε από τον παρακάτω πίνακα.

No.	Structural Detail	Description (St. = steel; Al. = aluminium)	FAT St.
515		Trapezoidal stiffener to deck plate, fillet or partial penetration weld, out of plane bending	71
521		Longitudinal fillet welded gusset of length l . Fillet weld around end $l < 50 \text{ mm}$ $l < 150 \text{ mm}$ $l < 300 \text{ mm}$ $l > 300 \text{ mm}$	80 71 63 50

Σχήμα 3: Κλάσεις τυποποιημένων καμπύλων αξιολόγησης διάρκειας ζωής, FAT, για διάφορες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, σύμφωνα με τη μέθοδο της ονομαστικής τάσης και του οδηγού IIW.

2.3 Μέθοδος Κατασκευαστικής Τάσης

Σκοπός της μεθόδου της κατασκευαστικής τάσης είναι να υπολογιστεί η τάση στο πόδι της συγκόλλησης, εκεί που αναμένεται η αστοχία. Αυτό γίνεται με διάφορους τρόπους. Στη παρόν μελέτη επιλέχθηκε η μέθοδος του extrapolation. Σύμφωνα με αυτήν, υπολογίζεται η κατασκευαστική τάση σε μερικά σημεία ενδιαφέροντος κοντά στο πόδι της συγκόλλησης και έπειτα μέσω αυτών καταλήγει κανείς στην κατασκευαστική τάση.

Προφανώς, για να επιτευχθεί αυτό έγκειται η ανάγκη της χρήσης της μεθόδου των ΠΣ. Επομένως, πρέπει να δημιουργηθεί το αντίστοιχο μοντέλο ΠΣ προς επίλυση. Σύμφωνα με τους κανονισμούς του οδηγού για τη μοντελοποίηση ΠΣ, επιλέγονται δισδιάστατα στοιχεία κελύφους για τα ελάσματα που έχουν συγκολληθεί. Τα στοιχεία αυτά επιβάλλεται να είναι δευτέρου βαθμού για μεγαλύτερη ακρίβεια. Σχετικά με το πλέγμα, για να υπολογιστεί η κατασκευαστική τάση πρέπει να δημιουργηθεί κατάλληλο πλέγμα στο μοντέλο. Πριν δημιουργηθεί αυτό είναι μεγάλης σημαντικότητας η επιλογή μερικών παραμέτρων για τη συγκόλληση.

Αρχικά, επιλέγεται ο τύπος hot-spot. Οι δύο διαφορετικοί τύποι είναι οι a, b, όπου ξεχωρίζουν σύμφωνα με τον οδηγό από το Σχ. 4. Για το συγκεκριμένο, υπό μελέτη δοκίμιο, επιλέγεται ο τύπος a.

Fig. 2.12 Types of hot spots

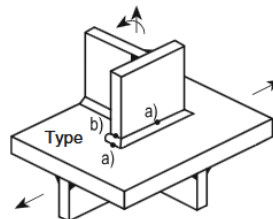
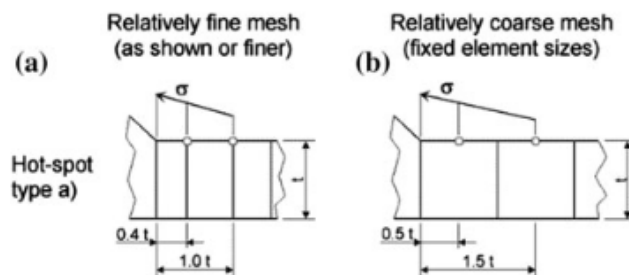


Table 2.2 : Types of hot spots

Type	Description	Determination
a	Weld toe on plate surface	FEA or measurement and extrapolation
b	Weld toe at plate edge	FEA or measurement and extrapolation

Σχήμα 4: Τύποι hot-spot σε συγκολλητές κατασκευές.

Έπειτα, επιλέγεται η πύκνωση του πλέγματος. Ανάλογα με αυτήν επιλέγονται και τα σημεία μέτρησης τάσης για τη μέθοδο του extrapolation. Εδώ, επιλέγονται δύο σημεία σύμφωνα με τη μοντελοποίηση με πυκνό πλέγμα, όπου τα στοιχεία κελύφους δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερα από $0.4t \times t$. Τα σημεία για το extrapolation βρίσκονται σε αποστάσεις $0.4t$ και $1.0t$, όπως φαίνεται παρακάτω.



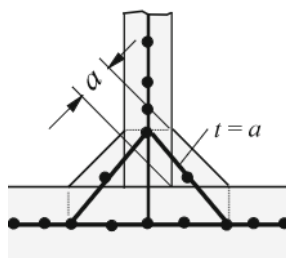
Σχήμα 5: Σημεία για extrapolation σύμφωνα με τη μέθοδο της κατασκευαστικής τάσης.

Από τα σημεία αυτά, υπολογίζεται η κατασκευαστική τάση ως:

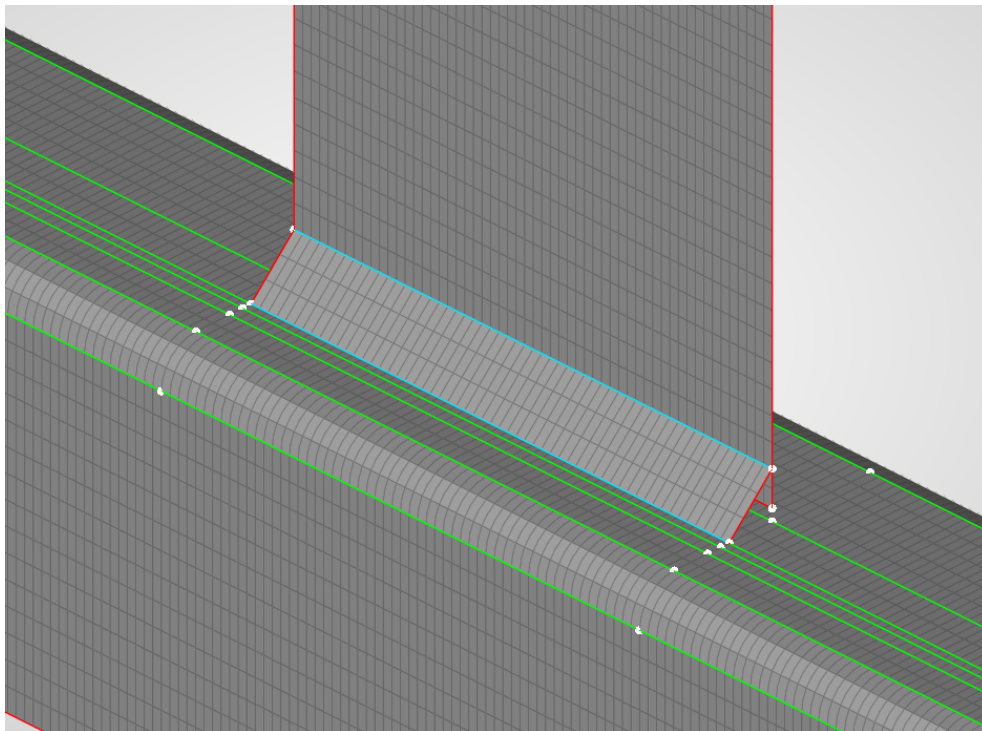
$$\sigma_{hs} = 1.67\sigma_{0.4t} - 0.67\sigma_{1.0t} \quad (14)$$

Επομένως, πρέπει το πλέγμα να φέρει τα αντίστοιχα σημεία κοντά στο πόδι της συγκόλλησης για τον υπολογισμό των τάσεων $\sigma_{0.4t}$, $\sigma_{1.0t}$.

Τέλος, η συγκόλληση μοντελοποιείται επίσης με στοιχεία κελύφους, πάχους όσο το πάχος της συγκόλλησης και γεωμετρικά στη μέση επιφάνεια της συγκόλλησης. Η επιφάνεια αυτή εκτείνεται έως ότου να τμήσει τα δύο τεμάχια προς συγκόλληση. Οι οδηγίες αυτές έχουν δοθεί προφανώς από τον οδηγό και η διαδικασία γίνεται πιο εύκολα κατανοητή από το Σχ. 6. Το τελικό πλέγμα προς επίλυση φαίνεται στο Σχ. 7.



Σχήμα 6: Μοντελοποίηση συγκόλλησης σύμφωνα με τον οδηγό IIW.



Σχήμα 7: Πλέγμα μοντέλου επίλυσης για τη μέθοδο της κατασκευαστικής τάσης σύμφωνα με τις οδηγίες του IIW.

Εν τέλει, υπολογίζονται για άλλη μία φορά τα εύρη τάσης ως:

$$\Delta\sigma_{hs} = \sigma_{hs,max} - \sigma_{hs,min}, \quad (15)$$

και μετατρέπονται πάλι στην αναγκαία πιθανότητα επιβίωσης για σύγκριση. Οι τάσεις που εξάγονται είναι οι μέγιστες κύριες στην άνω επιφάνεια μετρούμενες στη γωνία.

Όσο αναφορά την αξιολόγηση της διάρκειας ζωής, σύμφωνα με τον οδηγό, οι καμπύλες που χρησιμοποιούνται δίνονται από το Σχ. 8. Εδώ, επιλέγεται η FAT 100 για αξιολόγηση, η οποία τροποποιείται πάλι με βάση τους συντελεστές διόρθωσης.

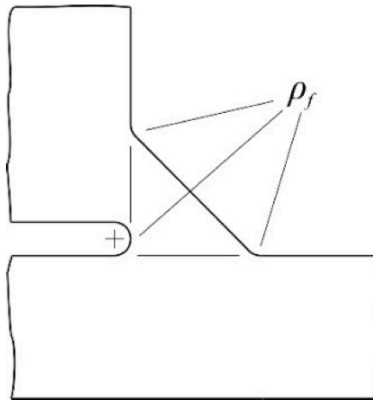
No.	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel
1		Butt joint	As welded, NDT	100
2		Cruciform or T-joint with full penetration K-butt welds	K-butt welds, no lamellar tearing	100
3		Non load-carrying fillet welds	Transverse non-load carrying attachment, not thicker than main plate, as welded	100
4		Bracket ends, ends of longitudinal stiffeners	Fillet welds welded around or not, as welded	100
5		Cover plate ends and similar joints	As welded	100
6		Cruciform joints with load-carrying fillet welds	Fillet welds, as welded	90
7		Lap joint with load carrying fillt welds	Fillet welds, as welded	90
8		Type "b" joint with short attachment	Fillet or full penetration weld, as welded	100
9		Type "b" joint with long attachment	Fillet or full penetration weld, as welded	90

Σχήμα 8: Κλάσεις τυποποιημένων καμπύλων αξιολόγησης διάρκειας ζωής, FAT, για διάφορες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, σύμφωνα με τη μέθοδο της κατασκευαστικής τάσης και του οδηγού IIW.

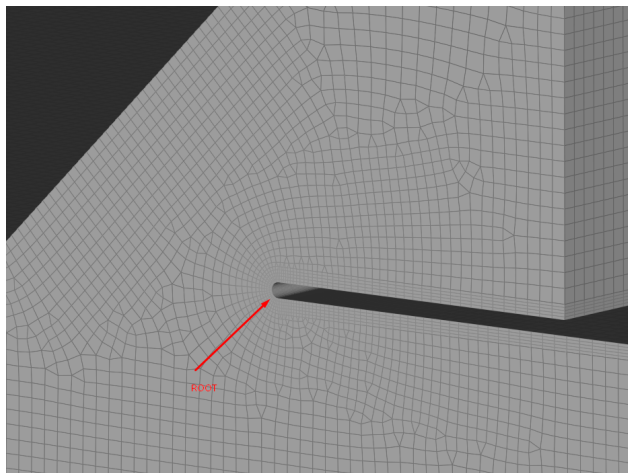
2.4 Μέθοδος Ενεργής Τάσης Εγκοπής

Αναφορικά με την ενεργή τάση εγκοπής, αυτή ορίζεται ως η τάση στη ρίζα της συγκόλλησης. Λόγω της δυσκολίας υπολογισμού αυτής της τάσης, ο οδηγός ορίζει την ενεργή τάση εγκοπής για την αξιολόγηση της διάρκειας ζωής της συγκολλητικής κατασκευής.

Η τάση αυτή υπολογίζεται μέσω επίλυσης μοντέλου ΠΣ. Το μοντέλο αυτό έχει πολύ συγκεκριμένες προδιαγραφές. Ο οδηγός αναφέρει μεθόδους μοντελοποίησης για κατασκευές με πάχος μεγαλύτερου των 5 χιλιοστών. Κάτι τέτοιο, δεν αρμόζει στη παρόν μελέτη. Ωστόσο, πρόσφατες μελέτες έχουν κατά κάποιο τρόπο επεκτείνει τη μεθοδολογία του οδηγού και σε κατασκευές με μικρότερα πάχη. Μια εξ αυτών αναγράφεται στην [1]. Εδώ, αναφέρεται ότι για λεπτόπαχα ελάσματα πρέπει να χρησιμοποιείται ακτίνα καμπυλότητας $\rho = 0.05 \text{ mm}$ για τη μοντελοποίηση της ρίζας και κλίση $\text{FAT } m = 5$. Επίσης, σύμφωνα με την [2], δίνεται η μορφή του μοντέλου ΠΣ και της ρίζας με διευρυμένο διάκενο προς την πλευρά αποκλειστικά του συνδεόμενου ελάσματος. Αναγράφεται επίσης, ότι η αξιολόγηση διάρκειας ζωής γίνεται σύμφωνα με το όριο $\text{FAT } 630$ για εξαγωγή αποτελεσμάτων μέγιστης κύριας τάσης. Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε, ακολουθώντας τις αρχές των δύο αναφορών, είχε εξαεδρικά στοιχεία δευτέρου βαθμού μειωμένης ολοκλήρωσης. Το μοντέλο φαίνεται παρακάτω. Η μεθοδολογία μοντελοποίησης φαίνεται στο Σχ. 9.



Σχήμα 9: Μοντελοποίηση γεωμετρίας σύμφωνα με αναφορές.



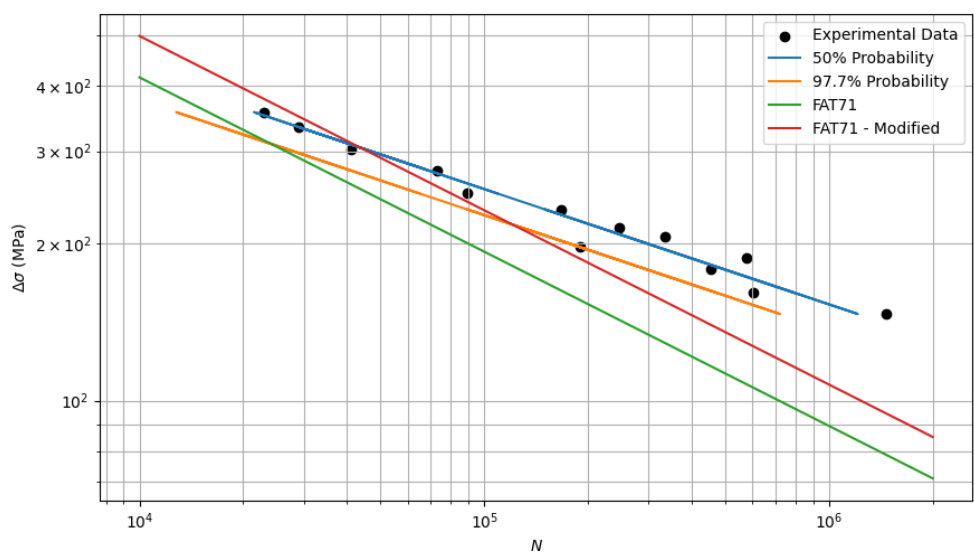
Σχήμα 10: Πλέγμα μοντέλου κατασκευής για την επίλυση με τη μέθοδο της ενεργής τάσης εγκοπής.

3 Αποτελέσματα Και Συζήτηση

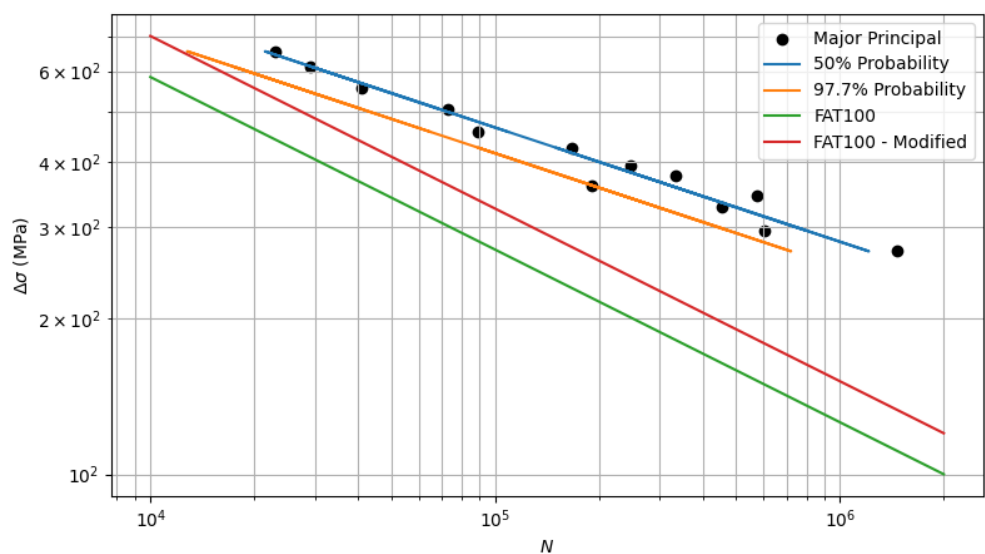
Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα αλλά και οι συγκρίσεις με τις καμπύλες αξιολόγησης διάρκειας ζωής. Η μεθοδολογία που έχει ακολουθηθεί για κάθε μέθοδο έχει αναλυθεί παραπάνω. Να σημειωθεί ότι λόγω περιορισμού υπολογιστικής ισχύς, το μοντέλο που επιλύθηκε για τη μέθοδο της ενεργούς τάσης, είχε πιο αραιό πλέγμα από αυτό που παρουσιάζεται στο Σχ. 10. Έτσι, τα αποτελέσματα από αυτή τη μέθοδο δεν έχουν μεγάλο βαθμό εμπιστοσύνης.

Παρατηρείται γενικά ότι η κατασκευή φαίνεται να αποδίδει καλύτερα με τη μέθοδο της κατασκευαστικής τάσης παρά με τη μέθοδο της ονομαστικής. Αυτό φαίνεται διότι, η καμπύλη διάρκειας ζωής με τη μέθοδο της ονομαστικής τάσης βρίσκεται πιο χαμηλά σε ορισμένα σημεία από τη καμπύλη της τροποποιημένης $\text{FAT } 71$. Φαίνεται λοιπόν πως η μέθοδος της ονομαστικής τάσης είναι πιο συντηρητική. Επίσης, ακόμη και με το πιο αραιό πλέγμα του

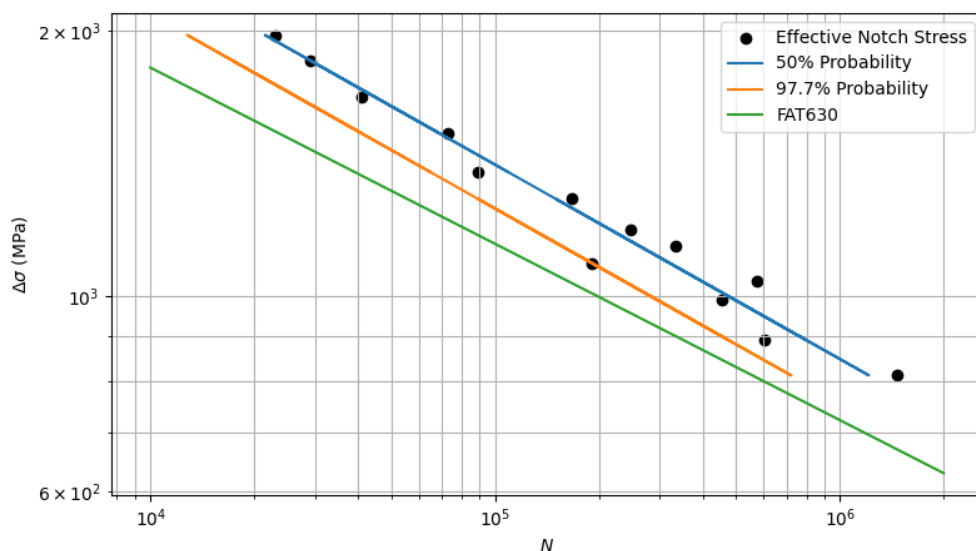
μοντέλου της ενεργής τάσης, παρατηρείται ότι η καμπύλη διάρκειας ζωής βρίσκεται εξ ολοκλήρου πάνω από την κλάση FAT 630.



Σχήμα 11: Αποτελέσματα διάρκειας ζωής κατασκευής σύμφωνα με τη μέθοδο της ονομαστικής τάσης.



Σχήμα 12: Αποτελέσματα διάρκειας ζωής κατασκευής σύμφωνα με τη μέθοδο της κατασκευαστικής τάσης.



Σχήμα 13: Αποτελέσματα διάρκειας ζωής κατασκευής σύμφωνα με τη μέθοδο της ενεργής τάσης εγκοπής.

Κατάλογος σχημάτων

1	Συγκολλητή κατασκευή προς μελέτη.	1
2	Μορφή αστοχίας πλειοψηφίας δοκιμών.	2
3	Κλάσεις τυποποιημένων καμπύλων αξιολόγησης διάρκειας ζωής, FAT, για διάφορες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, σύμφωνα με τη μέθοδο της ονομαστικής τάσης και του οδηγού IIW.	3
4	Τύποι hot-spot σε συγκολλητές κατασκευές.	4
5	Σημεία για extrapolation σύμφωνα με τη μέθοδο της κατασκευαστικής τάσης.	4
6	Μοντελοποίηση συγκόλλησης σύμφωνα με τον οδηγό IIW.	4
7	Πλέγμα μοντέλου επίλυσης για τη μέθοδο της κατασκευαστικής τάσης σύμφωνα με τις οδηγίες του IIW.	5
8	Κλάσεις τυποποιημένων καμπύλων αξιολόγησης διάρκειας ζωής, FAT, για διάφορες κατασκευαστικές λεπτομέρειες, σύμφωνα με τη μέθοδο της κατασκευαστικής τάσης και του οδηγού IIW.	5
9	Μοντελοποίηση γεωμετρίας σύμφωνα με αναφορές.	6
10	Πλέγμα μοντέλου κατασκευής για την επίλυση με τη μέθοδο της ενεργής τάσης εγκοπής.	6
11	Αποτελέσματα διάρκειας ζωής κατασκευής σύμφωνα με τη μέθοδο της ονομαστικής τάσης.	7
12	Αποτελέσματα διάρκειας ζωής κατασκευής σύμφωνα με τη μέθοδο της κατασκευαστικής τάσης.	7
13	Αποτελέσματα διάρκειας ζωής κατασκευής σύμφωνα με τη μέθοδο της ενεργής τάσης εγκοπής.	8

Κατάλογος πινάκων

1	Πειραματικά δεδομένα δοκιμής κόπωσης στη συγκολλητή κατασκευή.	2
---	--	---

Αναφορές

- [1] Jörg Baumgartner, Adolf F. Hobbacher και Roland Rennert. "Fatigue assessment of welded thin sheets with the notch stress approach – Proposal for recommendations". Στο: *International Journal of Fatigue* 140 (2020), σ. 105844. ISSN: 0142-1123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.105844>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112320303753>.
- [2] Μιχαήλ Μ. Μαλικουτσάκης. "Πειραματική και θεωρητική διερεύνηση και ανάπτυξη αναλυτικού μοντέλου προσδιορισμού διάρκειας ζωής συγκολλητών κατασκευών σε κόπωση". Στο: *Διδακτορική διατριβή* (2014).