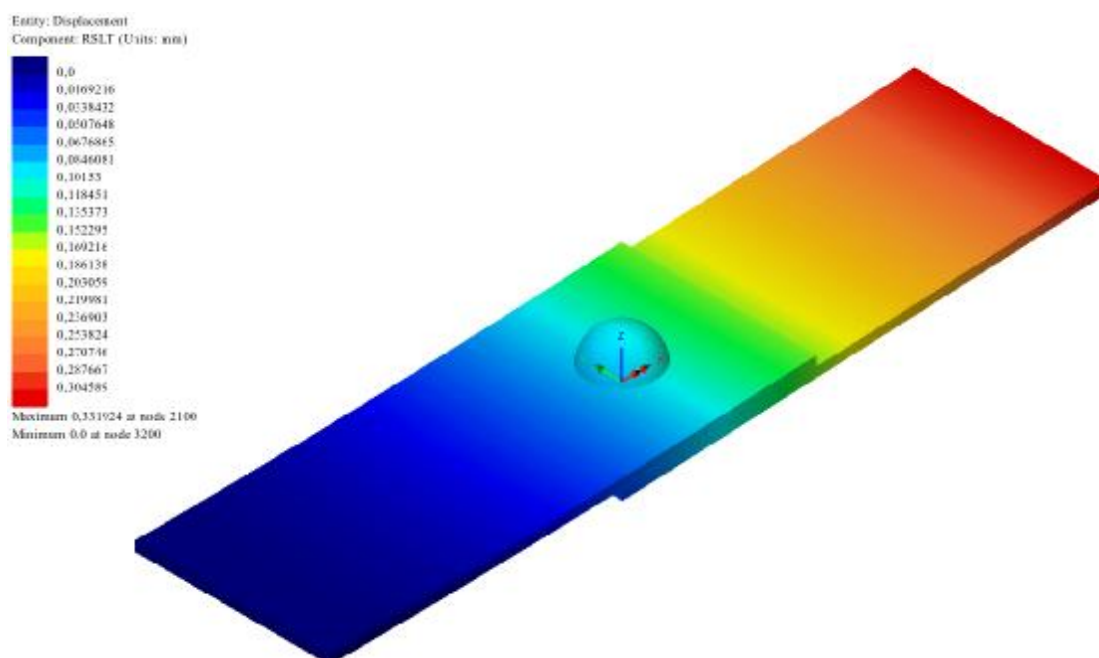


ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΜΕ
ΗΛΟΥΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ:
ΚΑΟΥΡΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ Ι. ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2014

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή: Ο κάτωθι υπογεγραμμένος σπουδαστής έχω επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνω υπεύθυνα ότι είμαι συγγραφέας αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, έχω δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μου όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποίησα και έλαβα ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνω επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχω ενσωματώσει στην εργασία μου προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχω πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχω αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Ο σπουδαστής

(Ονοματεπώνυμο)

.....

(Υπογραφή)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στην αριθμητική πρόβλεψη της στατικής μηχανικής συμπεριφοράς ανάμεσα σε δυο μέταλλα που είναι ενωμένα με έναν ή με δυο ήλους, με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Ευχαριστούμε θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Δρ Γιαννόπουλο Γεώργιο, επιστημονικό συνεργάτη του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση και ιδέες που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα εργασία προτείνεται η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ώστε να μάθουμε την διατμητική ικανότητα που έχουν δυο μέταλλα τα όποια είναι ενωμένα με ένα η με δύο ήλους, αλλά και να μάθουμε που θα δεχθεί την μεγαλύτερη πίεση το μέταλλο και ο ήλος. Η ανάλυση αυτή, βασίζεται στη χρήση πεπερασμένων στοιχείων όγκου. Στα μοντέλα που προκύπτουν επιβάλλονται κατάλληλες συνοριακές συνθήκες στήριξης, φόρτισης και επαφής που ανταποκρίνονται στις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος ήλωσης. Από τις μελέτες που λαμβάνουν χώρα προκύπτουν ποιοτικά συμπεράσματα που αφορούν τις συγκεντρώσεις τάσεων στο ήλο αλλά και στα ελάσματα σύνδεσης.

Η παρούσα πτυχιακή είναι οργανωμένη σε κεφάλαια όπως αναλύεται παρακάτω.

Στην πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια γενική και σύντομη παρουσίαση των συνδέσεων , μόνιμων και λυόμενων συνδέσεων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται λόγος για το τι είναι διάτμηση αλλά και το πώς ένας ήλος ή πολύ ήλοι μπορούν να καταπονηθούν σε διάτμηση.

Στο τρίτο κεφάλαιο αποσαφηνίζεται ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η προτυποποίηση των συγκεκριμένων προβλημάτων στον υπολογιστή.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται ομαδοποιημένα τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα μας που προέκυψαν από την όλη μελετητική προσπάθεια κατά την παρούσα πτυχιακή..

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ/ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ	ΣΕΛ.
Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστή	ii
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	iii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	iv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	v
1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ	1
1.1 ΓΙΑ ΤΙΣ ΛΥΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΘΑ ΑΝΑΦΕΡΘΟΥΜΕ ΣΤΟΥΣ ΚΟΧΛΙΕΣ.....	1
1.2 ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΘΑ ΑΝΑΦΕΡΘΟΥΜΕ ΑΡΧΙΚΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ	3
1.3 ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΘΑ ΑΝΑΦΕΡΘΟΥΜΕ ΣΤΙΣ ΗΛΩΣΕΙΣ ..	4
1.3.1 ΗΛΟΙ – ΗΛΩΣΕΙΣ	4
1.3.2 ΕΙΔΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ.....	6
1.3.3 ΕΙΔΗ ΗΛΩΝ.....	9
1.3.4 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΩΝ.....	10
1.3.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΣ ΣΚΟΠΟΣ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ-ΧΡΗΣΗΣ ΗΛΩΣΕΩΝ.....	13
1.3.6 ΥΛΙΚΑ ΗΛΩΝ	13
1.3.7 ΟΠΗ ΤΟΥ ΗΛΟΥ	14
1.3.8 ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΩΝ	15
1.3.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΗΛΩΝ.....	16
1.3.10 ΟΠΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΗΛΟΥ	17
1.3.11 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΩΣΕΩΝ	17
1.3.12 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΩΣΕΩΝ.....	18
2. ΔΙΑΤΜΗΣΗ	19
2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	19
2.2 ΔΙΑΤΜΗΣΗ – ΨΑΛΙΔΙΣΜΟΣ-ΤΜΗΣΗ	20
2.3 ΗΛΩΣΕΙΣ	21
2.4 ΑΣΤΟΧΙΑ ΗΛΟΥ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ.....	23
2.5 ΑΠΟΚΟΠΗ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΗΛΩΣΗΣ.....	24
2.6 ΑΣΤΟΧΙΑ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΠΟΣΧΙΣΗ	25
2.7 ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΠΙΕΣΗ	26
2.8 ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΩΝ ΣΕ ΣΧΗΜΑ ΡΟΜΒΟΥ	27
2.9 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗΣ.....	28
2.10 ΘΕΡΜΕΣ ΗΛΩΣΕΙΣ	28
2.11 ΑΝΤΟΧΗ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΗΛΩΣΕΙΣ.....	30
3.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	31
3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	31
3.2 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ.....	33
3.3 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	34
3.3.1 Προεπεξεργασία.....	36
3.3.2 Επίλυση του προβλήματος.....	38
3.3.3 Μετεπεξεργασία.....	39
3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΩΣΕΩΝ	41
3.4.1 Γεωμετρία	41
3.4.2 Διακριτοποίηση.....	43
3.4.3 Υλικά.....	45
3.4.4 Συνοριακές συνθήκες.....	45

3.4.5 Επαφή.....	46
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	48
4.1 ΜΟΝΗ ΗΛΩΣΗ	48
4.2 ΔΙΠΛΗ ΗΛΩΣΗ	55
4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64

1. ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

Οι συνδέσεις σε μια κατασκευή έχουν σκοπό τη συνένωση των διαφόρων μερών της και τη μεταβίβαση των αναπτυσσόμενων δυνάμεων μεταξύ των δομικών στοιχείων. Υπάρχουν δύο κατηγορίες συνδέσεων οι μόνιμες συνδέσεις και οι λυόμενες συνδέσεις.

ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

Στις συνδέσεις αυτές τα συνδεόμενα τεμάχια ενώνονται κατά μόνιμο τρόπο. Χαρακτηριστικό στις μη λυόμενες συνδέσεις είναι ότι για να αποσυναρμολογηθούν τα συνδεόμενα μέρη πρέπει να καταστραφεί το μέσον που χρησιμοποιήθηκε για την ένωσή τους [1].

ΛΥΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

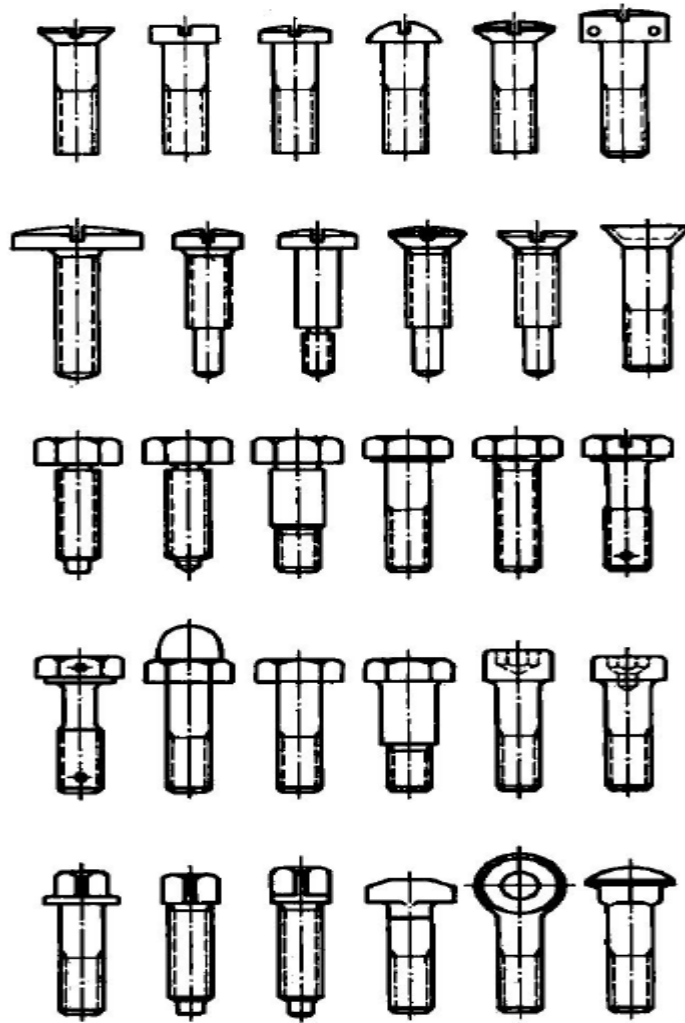
Στις συνδέσεις αυτές τα συνδεόμενα μέρη ενώνονται κατά τέτοια τρόπο ώστε να είναι εύκολη η αποσυναρμολόγησή τους χωρίς να καταστρέφεται το μέσον συνδέσεώς τους. Αποσυναρμολογούνται και συναρμολογούνται τα συνδεόμενα τεμάχια όσες φορές το απαιτεί η ζωή της μηχανής, με δυνατότητα κάθε φορά ελέγχου ενδεχομένων φθορών τους που επιβάλλουν την αντικατάστασή τους.

Ανάλογα με το είδος της συνδέσεως που θέλουμε να πραγματοποιήσουμε, χρησιμοποιούμε και το κατάλληλο μέσο συνδέσεως. Έτσι, για τις λυόμενες συνδέσεις χρησιμοποιούμε κοχλίες και σφήνες. Για τις μη λυόμενες χρησιμοποιούμε καρφιά (ήλους).

Εκτός όμως από τους δυο τρόπους που είδαμε παραπάνω, υπάρχει και τρίτος τρόπος συνδέσεως κομματιών. Ο τρόπος αυτός είναι με τις συγκολλήσεις που στην πραγματικότητα ανήκουν στις μη λυόμενες συνδέσεις.

1.1 ΓΙΑ ΤΙΣ ΛΥΟΜΕΝΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΘΑ ΑΝΑΦΕΡΘΟΥΜΕ ΣΤΟΥΣ ΚΟΧΛΙΕΣ

Ο κοχλίας, (βίδα ή μπουλόνι), είναι το στοιχείο που χρησιμοποιείται περισσότερο από κάθε άλλο στις κατασκευές. Με τους κοχλίες όχι μόνο συναρμολογούμε μηχανές, αλλά και συνδέουμε προσωρινά και μόνιμα μεταλλικά κομμάτια και στις δομικές κατασκευές (όπως στέγες, γέφυρες κλπ). Στο Σχήμα 1.1 φαίνονται τα περισσότερα είδη από τους κοχλίες που χρησιμοποιούμε.

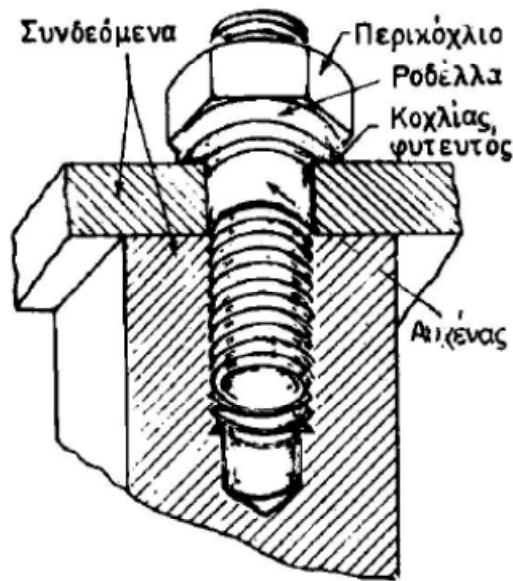


Σχήμα 1.1: Είδη από κοχλίες

Κάθε κοχλίας αποτελείται από τον κυλινδρικό κορμό και την κεφαλή. Στον κορμό διακρίνομε δυο μέρη: το αυλακωτό τμήμα, δηλαδή το τμήμα που φέρει την αυλάκωση, και το τμήμα που δεν φέρει αυλάκωση που λέγεται αυχέννας. Ο αυχέννας βρίσκεται κάτω από την κεφαλή. Μερικοί κοχλίες δεν έχουν αυχένα (Σχήμα 1.1).

Ο κοχλίας πολύ συχνά συνοδεύεται και από ένα περικόχλιο (παξιμάδι) που είναι απαραίτητο για τη στερέωσή του. Πρέπει να σημειώσουμε ότι υπάρχουν και κοχλίες που δεν έχουν κεφαλή, ο δε αυχέννας τους βρίσκεται στο μέσο του κορμού τους. Αυτοί λέγονται φυτευτοί κοχλίες ή διαφορετικά μπουζόνια (Σχήμα 1.2).

Για να κατασκευασθούν κοχλίες είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν όλα τα συνήθη μέταλλα” π.χ. χάλυβας, χαλκός, μπρούντζος, αλουμίνιο κ.α. Η κοχλίωση είναι μια λυόμενη σύνδεση.



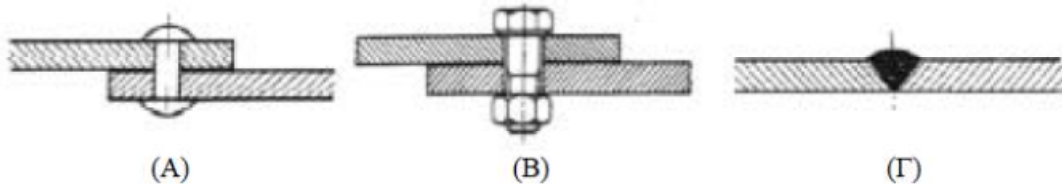
Σχήμα 1.2: Φυτευτός κοχλίας

1.2 ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΘΑ ΑΝΑΦΕΡΘΟΥΜΕ ΑΡΧΙΚΑ ΣΤΙΣ ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΕΙΣ

Στην καθημερινή πρακτική των διαφόρων τεχνολογικών εφαρμογών (αμαξώματα, δεξαμενές, μεταλλικές γέφυρες κτλ.), χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι σύνδεσης μεταλλικών κομματιών . Οι περισσότερο χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι:

- Οι ηλώσεις (καρφωτές ή πριτσινωτές)
- Οι κοχλιωτές συνδέσεις (βιδωτές)
- Οι συγκολλήσεις (διάφορες μέθοδοι)

Κάθε μία από τις παραπάνω μεθόδους σύνδεσης μεταλλικών κομματιών του σχήματος 1.3 έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η μέθοδος της συγκόλλησης παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων, για αυτό προτιμάται στη σύνδεση μεταλλικών τεμαχίων, εκτός ειδικών περιπτώσεων που δεν μπορεί να εφαρμοστεί.



Σχήμα 1.3: Μέθοδοι σύνδεσης μεταλλικών τεμαχίων
(Α)Με ήλωση ,(Β)Κοχλιωτή σύνδεση,(Γ)Με συγκόλληση

Μερικά από τα πλεονεκτήματα της συγκόλλησης έναντι των άλλων μεθόδων:

- Δημιουργεί συνδέσεις αντοχής.
 - Δημιουργεί συνδέσεις που έχουν καλή εμφάνιση (καλαισθησία).
 - Οι συσκευές και τα υλικά συγκολλήσεως είναι μικρού κόστους.
 - Το κόστος της σύνδεσης, συνήθως, είναι πολύ μικρότερο σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους (είναι η φθηνότερη μέθοδος).
 - Στις σύγχρονες βιομηχανικές εγκαταστάσεις συγκόλλησης, οι διαδικασίες των συγκολλήσεων γίνονται αυτόματα, με ρομποτισμό. Έτσι κατεβαίνει σημαντικά το κόστος παραγωγής, ενώ προκύπτει άριστη ποιότητα. Απαιτεί όμως υψηλού επιπέδου εκπαίδευση του προσωπικού.
- Υπάρχουν όμως πολλές περιπτώσεις που δεν είναι δυνατή η εφαρμογή της συγκόλλησης. Τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι:
- Η σύνδεση κομματιών τα οποία θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να αποσυνδέονται και να επανασυνδέονται (λυόμενες κατασκευές).
 - Όταν η συγκόλληση δεν είναι τεχνικά δυνατή, ή όταν το αποτέλεσμα της δεν είναι ασφαλές..
 - Όταν οι συνδέσεις είναι τέτοιες, ώστε η εφαρμογή της συγκόλλησης να απαιτεί ειδικές εγκαταστάσεις και την αγορά συσκευών μεγάλου κόστους, η απόσβεση των οποίων ανεβάζει πολύ το κόστος των συγκολλήσεων που πραγματοποιούνται. Σ' αυτές τις περιπτώσεις, προτιμούνται άλλες μέθοδοι σύνδεσης, εκτός και αν υπάρχουν ειδικοί λόγοι που επιβάλλουν τη συγκόλληση.
 - Γενικά, η συγκόλληση προϋποθέτει μεταλλικά τεμάχια από το ίδιο ή από παρεμφερές υλικό. Έτσι, σε περιπτώσεις σύνδεσης ελασμάτων από διαφορετικό υλικό (π.χ. σίδηρο με αλουμίνιο), δεν μπορεί να εφαρμοστεί η συγκόλληση.

1.3 ΓΙΑ ΤΙΣ ΜΟΝΙΜΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΘΑ ΑΝΑΦΕΡΘΟΥΜΕ ΣΤΙΣ ΗΛΩΣΕΙΣ

1.3.1 ΗΛΟΙ – ΗΛΩΣΕΙΣ

Μια κατηγορία στοιχείων μηχανών είναι τα στοιχεία σύνδεσης. Στις περισσότερες συνδέσεις για να ενωθούν δύο κομμάτια χρησιμοποιείται ένα τρίτο στοιχείο που ονομάζεται μέσο σύνδεσης. Τα συνηθέστερα μέσα σύνδεσης είναι οι ήλοι, οι κοχλίες, οι σφήνες, τα συγκολλητικά υλικά, τα

ελατήρια και τα στοιχεία προέντασης. Οι ηλώσεις θεωρούνται μόνιμοι συνδετήρες, οι οποίες ουσιαστικά είναι καρφωμένες αρθρώσεις. Έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, συμπεριλαμβανομένων της ναυπηγικής βιομηχανίας, λέβητες, δοχεία πίεσης, γέφυρες και κτίρια κλπ. Οι ήλοι είναι μερικές φορές φθηνότεροι από ότι οι άλλες επιλογές, αλλά απαιτούνται υψηλότερα επίπεδα δεξιοτήτων και μεγαλύτερη πρόσβαση και στις δύο πλευρές του αρμού [1].

Ήλος είναι μια μόνιμη μηχανική συνδετήρα. Πριν από την εγκατάσταση, ένα πριτσίνι αποτελείται από ένα λείο κυλινδρικό άξονα με μια κεφαλή στο ένα άκρο. Το άκρο απέναντι από την κεφαλή ονομάζεται ουρά. Σχετικά με την εγκατάσταση το πριτσίνι τοποθετείται σε μία οπή, και η ουρά παραμορφώνεται, έτσι ώστε να επεκτείνεται σε περίπου 1,5 φορές την αρχική διάμετρο του άξονα, κρατώντας το πριτσίνι στη θέση του. Αν γίνει διάκριση μεταξύ των δύο άκρων του ήλου, η αρχική κεφαλή καλείται η κεφαλή του εργοστασίου και το παραμορφωμένο άκρο καλείται η ουρά.

Επειδή υπάρχει ουσιαστικά μια κεφαλή σε κάθε άκρο του εγκατεστημένου ήλου που μπορεί να υποστηρίξει τα φορτία εφελκυσμού (φορτία παράλληλα προς τον άξονα της ατράκτου) ωστόσο, είναι πολύ πιο ικανό να υποστηρίξει φορτία διάτμησης (φορτία κάθετα προς τον άξονα της ατράκτου). Μπουλόνια και βίδες είναι καλύτερα κατάλληλα για εφαρμογές σε ένταση.

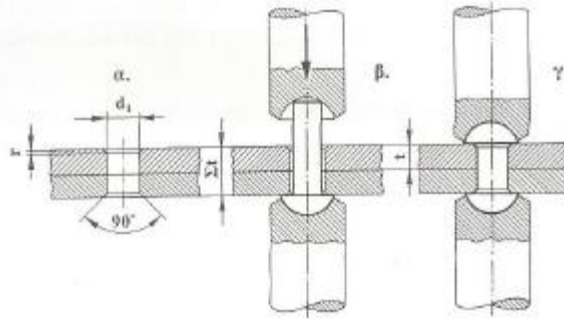
Γενικά η ήλωση θεωρείται ως απόλυτα ασφαλής σύνδεση και χρησιμοποιείται ιδιαίτερα στις ελαφρές κατασκευές. Ένας ήλος (Σχήμα 1.4) αποτελείται από τον κορμό και την κεφαλή. Προτιμάται η ημιστρογγυλή κεφαλή, ενώ άλλα είδη κεφαλών χρησιμοποιούνται μόνο σε ειδικές περιπτώσεις.

Το υλικό των ήλων και των προς σύνδεση τεμαχίων πρέπει κατά κανόνα να είναι το ίδιο ή παραπλήσιο. Χαλύβδινοι ήλοι μέχρι $d_s = 8 \text{ mm}$ καθώς και όλοι οι μη χαλύβδινοι ήλοι καρφώνονται εν ψυχρώ. Ήλοι από $d_s = 10 \text{ mm}$ και άνω τοποθετούνται μετά από ερυθροπύρωση τους σε θερμοκρασία 1000°C περίπου.



Σχήμα 1.4: Συνήθεις χαλύβδινοι ήλοι : (α) ημιστρόγγυλος ήλος για σιδηρές κατασκευές κατά DIN124, (β) ήλος φρεζάτης κεφαλής κατά DIN302, (γ) ημιστρόγγυλος ήλος κατά DIN660, (δ) ήλος φρεζάτης κεφαλής κατά DIN661 (ε) ήλος τύπου φακής κατά DIN622, (στ) ήλος στρογγυλοεπίπεδος κατά DIN674

Η αρχική κεφαλή (κάτω) συγκρατείται με ένα αντιστήριγμα και η άνω κεφαλή (κλειώμενη) διαμορφώνεται κατόπιν σε μια μηχανή ήλωσης υπό ομοιόμορφη πίεση ή με χτυπήματα μέσω μιας αερόσφυρας (Σχήμα 1.5).

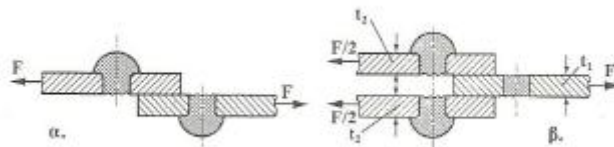


Σχήμα 1.5: Κατασκευή μιας σύνδεσης με ήλους: (α) διαμόρφωση της οπής, (β) πριν από το κλείσιμο, (γ) μετά το κλείσιμο μιας ημιστρόγγυλης κεφαλής

Τα ελάσματα συμπιέζονται ανάμεσα στις δύο κεφαλές των ήλων, ιδιαίτερα στην εν θερμώ ήλωση ο κορμός του ήλου με τη συστολή του κατά την ψύξη νύεται μέχρι το όριο ροής και δημιουργεί σταθερές συνδέσεις.

Για τη διαμόρφωση μιας τέλει κλειόμενης κεφαλής πρέπει το μήκος του ήλου να είναι κατά ένα ορισμένο μήκος l_u (βλέπε πιο κάτω) μεγαλύτερο μήκος σύνδεσης σε οπές ανοίγονται με τρυπάνι ή με εργαλείο στην πρέσα, τα δε χείλη διευρύνονται λίγο (Σχήμα 1.5).

Σε περίπτωση καταστροφής μιας σύνδεσης με ήλους, τότε τα ηλωμένα τεμάχια θα κόψουν τον κορμό του ήλου αν προηγουμένως δεν έχουν σπάσει. Ανάλογα με τον αριθμό των τομών διακρίνουμε συνδέσεις μίας τομής ή περισσότερων τομών (Σχήμα 1.6).



Σχήμα 1.6 : Σύνδεση με ήλους που καταστράφηκε βίαια α. μιας τομής, β. δύο τομών

1.3.2 ΕΙΔΗ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ

Υπάρχουν δύο είδη συνδέσεων: οι μόνιμες και οι λυόμενες συνδέσεις. Μόνιμες συνδέσεις ονομάζονται οι συνδέσεις κατά τις οποίες τα συνδεόμενα τεμάχια ενώνονται κατά μόνιμο τρόπο και για να αποσυναρμολογηθούν πρέπει να καταστραφεί το μέσον που χρησιμοποιήθηκε για την ένωση τους, π.χ. καρφουσυνδέσεις, συγκολλήσεις, συνδέσεις σύσφιξης και θηλειαστές συνδέσεις. Χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει ανάγκη τα συνδεόμενα μέρη να αποσυνδεθούν συχνά. Όταν φθαρούν από τη συχνή συναρμολόγηση αποσυναρμολόγηση, μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν, γιατί η μαζική παραγωγή τους τα καθιστά φθηνά.

Λυόμενες συνδέσεις ονομάζονται οι συνδέσεις κατά τις οποίες τα συνδεόμενα μέρη ενώνονται με τέτοια τρόπο ώστε να είναι εύκολη η αποσυναρμολόγησή τους, χωρίς να καταστρέφεται το μέσο σύνδεσής τους, όσες φορές το απαιτεί η ζωή της μηχανής, με δυνατότητα ελέγχου, κάθε φορά, ενδεχόμενων φθορών που επιβάλλουν την αντικατάστασή τους, π.χ. κοχλιοσυνδέσεις, σφηνωτές συνδέσεις, ελαστικές συνδέσεις με ελατήρια και συνδέσεις με στοιχεία προέντασης. Χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει ανάγκη στεγανότητας της κατασκευής π.χ. για την κατασκευή δεξαμενής. Για αυτές τις συνδέσεις χρησιμοποιούνται ήλοι ή συγκολλήσεις. Η συγκόλληση όμως είναι ένας ειδικός τρόπος μη λυόμενης σύνδεσης, γιατί αυτό που επιτυγχάνει τη συγκόλληση είναι η θερμότητα. Με τις συνδέσεις επιτυγχάνεται η μεταβίβαση δυνάμεων ή ροπών από ένα κομμάτι στο άλλο και η διατήρηση σταθερής μορφής του φορέα, εκτός βέβαια από τις μικροπαραμορφώσεις εξαιτίας των φορτίσεων.

Οι ήλοι διακρίνονται σε κατηγορίες :

α) Σύμφωνα με την κεφαλή τους κατατάσσονται ως εξής:

1) Ημιστρόγγυλους

2) Φακοειδείς (βυθισμένους και ημιβυθισμένους)

Η κεφαλή τους είναι λιγότερο καμπυλωτή από αυτή των ημιστρόγγυλων και μοιάζει με φακό. Η κεφαλή των φακοειδών ήλων μπορεί να είναι βυθισμένη στα κομμάτια που συνδέει ή ημιβυθισμένη. Στην πρώτη περίπτωση ο ήλος λέγεται βυθισμένος, ενώ στη δεύτερη ημιβυθισμένος.

3) Πλατυκέφαλους ή επιπεδοκάμπυλους. Η κεφαλή τους είναι μεγάλη και καμπυλωτή.

4) Σωληνωτούς (πριτσίνια).

β) Ανάλογα με τη διάμετρο του κορμού τους διακρίνονται σε:

1) Ήλους με διάμετρο μικρότερη από 10 mm ($d < 10 > \text{mm}$)

Πίνακας 1.1: DIN: Deutsche Industrie Normen (Γερμανικά Βιομηχανικά Πρότυπα)

ΗΜΙΣΤΡΟΓΓΥΛΟΙ	DIN 660,663	D=1mm~9mm
ΒΥΘΙΣΜΕΝΟΙ	DIN 661,664	D=1mm~9mm
ΗΜΙΒΥΘΙΣΜΕΝΟΙ	DIN 662	D=1mm~8mm
ΕΠΙΠΕΔΟΚΑΜΠΥΛΟΙ	DIN 674	D=1,6mm~8,4mm
ΠΡΙΤΣΙΝΙΑ	DIN 675	D=1mm~3mm

Πίνακας 1.2: ΗΛΟΙ ΣΙΔΗΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ: Μήκος κορμού σε σχέση με το πάχος των ελασμάτων

Αρχική διάμετρος κορμού d mm	Αρχική κεφαλή: ημισφαιρική							Δευτέρα κεφαλή: ημισφαιρική									
	10	12	14	16	18	20	22	d	10	12	14	16	18	20	22	24	(27)
πάχος ελασμάτων s mm	Μήκος ελασμάτων l mm							s	Μήκος ελασμάτων l mm								
6	20							22	40	40	42	45	48	50	52	55	
7	22							24	42	42	45	48	50	52	55	58	
8	24	24						26	45	45	48	50	52	55	58	60	62
9	24	26						28	48	48	50	52	55	58	60	62	65
10	26	28	28					30	50	50	52	55	58	60	62	65	68
11	26	28	28					32	50	52	55	58	60	62	65	68	70
12	26	28	30	32				34	52	55	58	60	62	65	68	70	72
13	28	30	32	32				36	55	58	60	62	65	68	70	72	75
14	28	30	32	34	36			38	58	60	62	65	68	70	72	75	78
15	30	32	34	36	38			40	60	62	65	68	70	72	75	78	80
16	32	34	36	38	38	40		42	62	65	65	68	70	72	75	78	80
17	32	34	36	38	40	42		44		65	68	70	72	75	78	80	82
18	34	36	38	40	42	45	48	46		68	70	72	75	78	80	82	85
19	36	38	40	42	45	48	48	48		70	72	75	78	80	82	85	85
20	38	38	40	42	45	48	50	50		75	78	80	82	85	85	90	

Πίνακας 1.3: Ήλοι με διάμετρο μεγαλύτερη από 10 mm ($d > 10 \text{ mm}$), που είναι γνωστοί ως λεβητόκαρφα

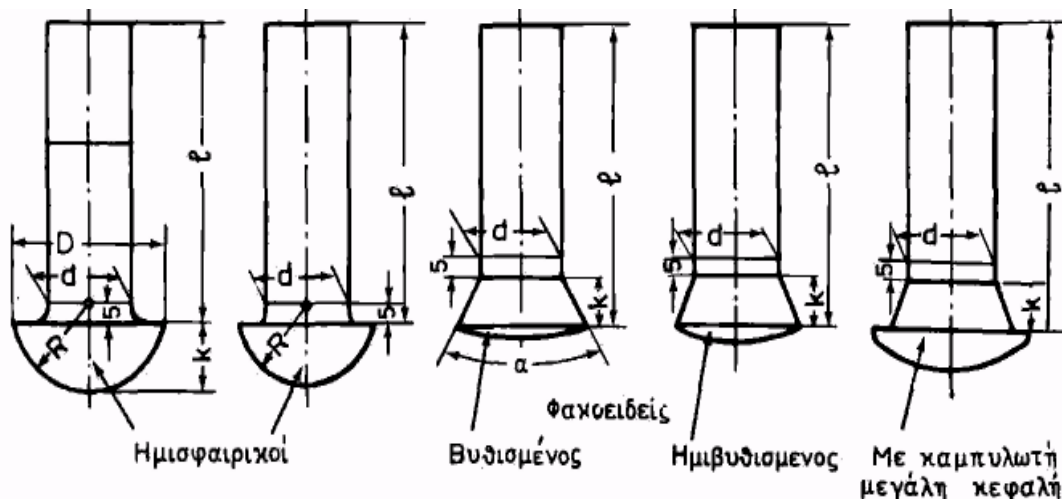
ΗΜΙΣΤΡΟΓΓΥΛΟΙ (ΔΟΧΕΙΑ)	DIN 123	D=10mm~35mm
ΗΜΙΣΤΡΟΓΓΥΛΟΙ (ΣΙΔΕΡΟΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ)	DIN 124	D=10mm~36mm
ΒΥΘΙΣΜΕΝΟΙ	DIN 302	D=10mm~36mm
ΗΜΙΒΥΘΙΣΜΕΝΟΙ	DIN 301	D=10mm~36mm

Πίνακας 1.4: ΗΛΟΙ ΛΕΒΗΤΩΝ :Μήκος κορμού σε σχέση με το πάχος των ελασμάτων

Άρχική κεφαλή: ημισφαιρική								Διαμορφωμένη κεφαλή: ημισφαιρική										
Άρχική διάμετρος κορμού d mm	10	12	14	16	18	20	22	d	10	12	14	16	18	20	22	24	(27)	
μήκος ελασμάτων s mm	Μήκος κορμού / mm							s	Μήκος κορμού / mm									
6	24							22	45	48	50	52	55	58	62	65		
7	26							24	48	50	52	55	58	60	65	68		
8	26	28						26	50	52	55	58	60	62	68	70	72	
9	28	30						28	52	55	58	60	62	65	70	72	75	
10	28	32	34					30	55	58	60	62	65	68	72	75	78	
11	30	34	36					32	58	60	62	65	68	70	75	78	80	
12	32	34	38	40				34	60	62	65	68	72	72	78	80	83	
13	32	36	38	40				36	62	65	68	70	75	75	80	80	85	
14	34	36	40	42	45			38		68	70	72	78	78	80	85	85	
15	34	38	40	42	45			40		70	72	76	78	80	85	85	90	
16	36	40	42	45	48	50		42		72	75	75	80	80	85	90	90	
17	38	40	42	45	50	52		44		75	75	80	85	85	90	90	95	
18	38	42	45	48	50	55	55	46			78	80	90	90	90	95	95	
19	40	45	45	48	52	55	58	48			80	85	90	90	95	95	95	
20	42	45	48	50	52	55	60	50			85	90	95	95	95	100	100	

1.3.3 ΕΙΔΗ ΗΛΩΝ

Η κατηγοριοποίηση των ήλων γίνεται βάσει της μορφής της κεφαλής τους (Σχήμα 1.7) και της διαμέτρου d του κορμού τους. Πιο συγκεκριμένα, βάσει της μορφής της κεφαλής τους χωρίζονται σε: Ημισφαιρικούς ((στρογγυλοκέφαλοι) – κεφαλή σχεδόν ημισφαιρική), Φακοειδείς (κεφαλή λιγότερο καμπυλωτή (όπως είναι οι φακοί)) και σε Καρφιά με καμπυλωτή μεγάλη κεφαλή ενώ βάσει του πάχους τους σε καρφιά με: διάμετρο < 10 mm και διάμετρο από 10 έως 43 mm (λεβητόκαρφα) [2].



Σχήμα 1.7: Είδη ήλων

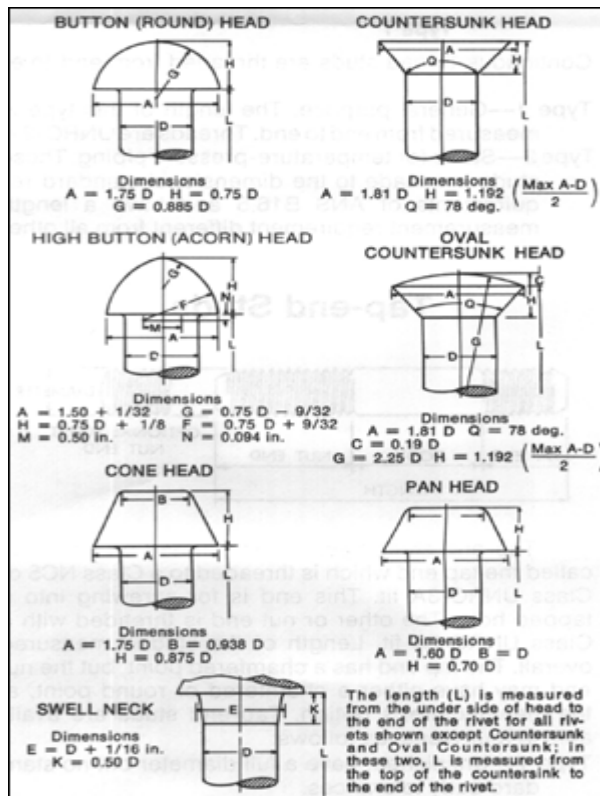
Οι φακοειδείς ήλοι διαχωρίζονται περαιτέρω σε βυθισμένους (φρεζάτοι) που η κεφαλή τους έχει τέτοιο σχήμα, ώστε να μπορεί να βυθίζεται, δηλαδή να χωνεύει, στο ένα από τα δύο συνδεόμενα κομμάτια και σε ημιβυθισμένους όπου μόνο ένα τμήμα της κεφαλής τους βυθίζεται στο ένα από τα συνδεόμενα τεμάχια, ενώ το υπόλοιπο εξέχει.

1.3.4 ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΩΝ

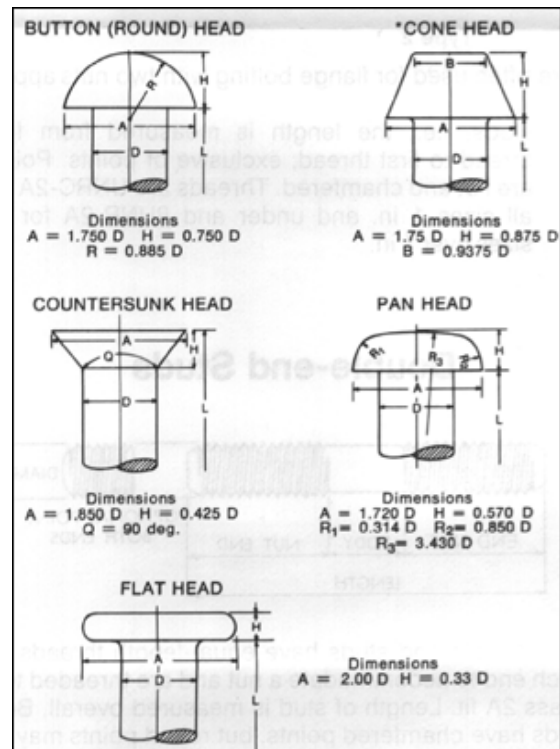
Οι ήλοι ανάλογα με τη χρήση τους διακρίνονται σε ήλους (α) σιδηρών κατασκευών, (β) λεβητοποιίας και (γ) ελαφρών κατασκευών. Η τυποποίηση στις διαμέτρους τους είναι από 1 έως 12 mm ανά 1 mm, από 12 έως 24 mm ανά 2 mm, από 24 έως 45 mm ανά 3 mm και από 45 mm και πάνω ανά 5 mm. Για την προμήθεια ενός ήλου θα πρέπει να δώσουμε την ονομασία του ήλου ,τη διάμετρο του, το μήκος του κορμού , το υλικό κατασκευής του καθώς και το φύλλο του DIN σύμφωνα με τους Γερμανικούς κανονισμούς , στο οποίο βρίσκεται η μορφή του. Π.χ. ο συμβολισμός << 18x70 DIN 124 >> σημαίνει ημιστρόγγυλος ήλος ,με διάμετρο 18mm και μήκος 70mm.,

Παρακάτω θα δούμε διάφορες τυποποιήσεις για ήλους.

- Εδώ βλέπουμε την τυποποίηση για ήλους της AMERICAN FASTENERS την οποία χρησιμοποιήσαμε και στην δική μας ήλωση ,όπου εξαρτάτε από την διάμετρο του κορμού του ήλου για τους μικρούς και τους μεγάλους ήλους (Σχήμα 1.8 και 1.9) [3].



Σχήμα 1.8: μικρά πριτσίνια [3]

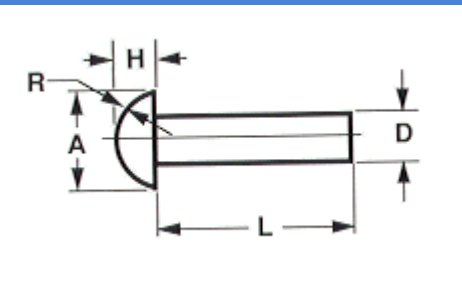


Σχήμα 1.9: μεγάλα πριτσίνια [3]

- Εδώ θα δούμε τυποποίηση για ένα άλλο είδος ήλου, διότι είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο και είναι της εταιρίας JC since 1948. Οι τυποποίηση που βλέπουμε παρακάτω είναι ο πίνακας 3.6 που αφορά τον ήλο με στρογγυλή κεφαλή.

Πίνακας 1.5 Τυποποίηση αλουμινένιου στρογγυλής κεφαλής ήλου της εταιρίας JC since 1948

Γύρος επικεφαλής Αλουμινίου Στερεά Πριτσίνια

		A	H	E
Ονομαστική διάμετρος (D)				
Κλάσμα	Δεκαδικός	Διάμετρο της κεφαλής	Επικεφαλής Ύψος	Επικεφαλής Ακτίνα
3/32	0.094	0.187	0.070	0.098
1/8	0.125	0.250	0.094	0.130
5/32	0.156	0.312	0.117	0.163
3/16	0.187	0.375	0.141	0.195
1/4	0.250	0.500	0.188	0.260
5/16	0.312	0.625	0.234	0.326
3/8	0.375	0.750	0.281	0.391

Κατά προσέγγιση διαστάσεις: $A = 2.00 \times DH - 0,75 \times DR = 1.042 \times D$

1.3.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΣ ΣΚΟΠΟΣ-ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ-ΧΡΗΣΗΣ ΗΛΩΣΕΩΝ

Ηλώσεις είναι οι μόνιμες συνδέσεις με ήλους , εφαρμόζονται στις συνδέσεις ελασμάτων και ράβδων κανονικών διατομών για την κατασκευή δοχείων και σιδηροκατασκευών. Επειδή οι ηλώσεις είναι βαριές κατασκευές , αρκετά δύσκολες στην εκτέλεση τους και χρονοβόρες προτιμούνται για μόνιμες συνδέσεις ή συγκολλήσεις. Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις που οι ηλώσεις ως μέσο μόνιμης σύνδεσης κομματιών , είναι αναντικατάστατες. Τέτοιες περιπτώσεις είναι :

- Συνδέσεις κομματιών που δεν επιδέχονται συγκόλληση.
- Όταν η σύνδεση καταπονείται σε κρουστικά ή δυναμικά φορτία.
- Όταν υπάρχει κίνδυνος τα συνδεδεμένα κομμάτια να χάσουν την αντοχή τους , εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που προκαλείται κατά τη συγκόλληση.

Επίσης σοβαρά πλεονεκτήματα των ηλώσεων είναι το ότι :

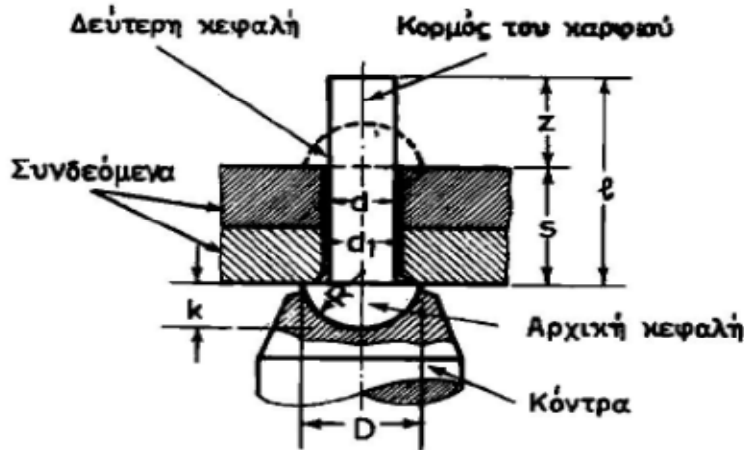
- Δεν δημιουργούνται τάσεις στα συνδεόμενα κομμάτια.
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου δεν υπάρχει ηλεκτρικό ρεύμα.
- Μπορεί οι συγκολλητές συνδέσεις να είναι συνήθως φθηνότερες από τις ηλώσεις, αλλά αυτές είναι πιο ασφαλείς και μπορεί να ελεγχθεί εύκολα η ποιότητα τους.

1.3.6 ΥΛΙΚΑ ΗΛΩΝ

Οι ήλοι μπορούν να κατασκευαστούν από διαφορετικά υλικά κοινό χαρακτηριστικό των οποίων είναι πάντα η ολκιμότητά τους, η οποία είναι αναγκαία για την κατασκευή της δεύτερης κεφαλής του ήλου. Το υλικό των συνδεόμενων ελασμάτων και των ήλων πρέπει να είναι το ίδιο. Σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει κίνδυνος να δημιουργηθεί σκουριά και φθορά των μετάλλων από την εμφάνιση διμεταλλικών τάσεων στα σημεία επαφής ήλου και ελασμάτων. Στις σιδηρές κατασκευές από St 33, St 37 και St 52 χρησιμοποιούνται κυρίως ήλοι από χαλυβοκράματα TU St 34 με αντοχή από 34 έως και 41 kP/mm² και MR St 44 σε εξαιρετικές περιπτώσεις με αντοχή μεγαλύτερη από 44 kP/mm² .Στη λεβητοποιία ανάλογα με το υλικό των ελασμάτων χρησιμοποιούνται ήλοι από TU St 36, MR St 36 και MR St 44.Τέλος, στις κατασκευές από ελαφρά μέταλλα χρησιμοποιούνται ήλοι από AlCuMg1F40, AlMgSi1F23 και AlMg3F23.

1.3.7 ΟΠΗ ΤΟΥ ΗΛΟΥ

Στο σημείο που θα γίνει το κάρφωμα, πρώτα ανοίγεται μια τρύπα, είτε με ζουμπά, είτε με τρυπάνι και μετά εφαρμόζεται ο ήλος. Η διάμετρος της τρύπας που συμβολίζεται με το γράμμα (d_1) (βλέπε Σχήμα 1.10)



Σχήμα 1.10: η οπή που γίνεται για την τοποθέτηση του ήλου

Πίνακας 1.6: Διαστάσεις ήλων

Διάμετρος κορμού		d	10	12	(14)	16	(18)	20	22	24	27	30	(33)	36
Διάμετρος οπής καρφιού		d_1	11	13	15	17	19	21	23	25	28	31	34	37
Κοχλίας που ταιριάζει στην τρύπα καρφιού			M10	M12	—	M16	—	M20	—	M24	—	M30	—	M36
Ήλοι λεβήτων	Διάμετρος κεφαλής	D	18	22	25	28	32	36	40	43	48	53	58	64
	Ύψος κεφαλής	k	7	9	10	11,5	13	14	16	17	19	21	23	25
	Ακτίνα καμπύλ. κεφαλής	R	9,5	11	13	14,5	16,5	18,5	20,5	22	24,5	27	30	33
	Στρογγύλεμα	r	1	1,6	1,6	2	2	2	2	2,5	2,5	3	3	4
Ήλοι σιδερωκατασκευών	Διάμετρος κεφαλής	D	16	19	22	25	28	32	36	40	43	48	53	58
	Ύψος κεφαλής	k	6,5	7,5	9	10	11,5	13	14	16	17	19	21	23
	Ακτίνα καμπύλ. κεφαλής	R	8	9,5	11	13	14,5	16,5	18,5	20,5	22	24,5	27	30
	Στρογγύλεμα	r	0,5	0,6	0,6	0,8	0,8	1	1	1,2	1,2	1,6	1,6	2
Ήλοι βυθισμένοι	Διάμετρος κεφαλής	D	14,5	18	21,5	26	30	31,5	34,5	38	42	42,5	46,5	51
	Ύψος κεφαλής	k	3	4	5	6,5	8	10	11	12	13,5	15	16,5	18
	Ακτίνα καμπύλ. κεφαλής	R	27	41	58	85	113	124,5	75,5	91	111	114	136	164
	Γωνία βυθίσσεως	a	75°			60°			45°					

λαμβάνεται σύμφωνα με τους κανονισμούς, μεγαλύτερη κατά ένα χιλιοστό (1 mm) από τη διάμετρο (d) του ήλου που θα δεχθεί.

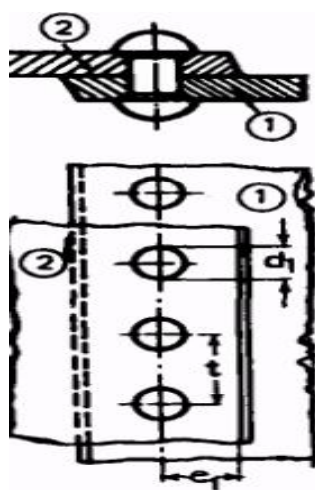
Η δαπάνη για τη διάνοιξη της τρύπας με ζουμπά είναι βέβαια μικρότερη από τη δαπάνη για τη διάνοιξη της με τρυπάνι. Οι τρύπες όμως που ανοίγονται με το ζουμπά, έχουν το μειονέκτημα ότι δεν είναι απόλυτα κυλινδρικές, και ότι η εσωτερική κυλινδρική επιφάνειά τους παρουσιάζει λεπτές ρωγμές που ελαττώνουν πολύ την αντοχή της συνδέσεως. Για το λόγο

αυτό στους λέβητες και στις σιδηροκατασκευές, πάντοτε προβλέπεται οι τρύπες να ανοίγονται με τρυπάνι.

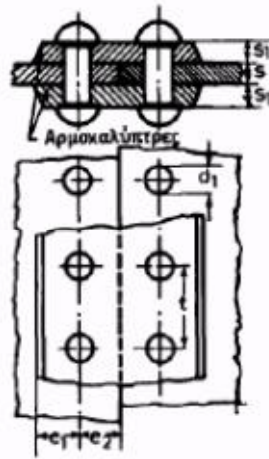
Συνιστάται επίσης οι τρύπες να ανοίγονται ταυτόχρονα σ' όλα τα ελάσματα που πρόκειται να συνδεθούν μεταξύ τους.

1.3.8 ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΩΝ

Ως διάταξη ήλων ορίζεται ο τρόπος με τον οποίο είναι τοποθετημένα τα συνδεόμενα μέρη το ένα σε σχέση με το άλλο. Οι καρφοσυνδέσεις, λοιπόν, βάσει της διάταξής τους διακρίνονται σε καρφοσυνδέσεις: με επικάλυψη: τα ελάσματα 1 και 2 υπερκαλύπτουν κατά ένα ποσοστό το ένα το άλλο και συνδέονται με μια, δυο ή και τρεις σειρές ήλων. Στις ραφές με επικάλυψη, τόσο οι ήλοι όσο και τα ελάσματα υποφέρουν σύνθετα στο τμήμα της επικάλυψης με αρμοκαλύπτρες: τα ελάσματα έρχονται σε επαφή μετωπικά και ο διαχωριστικός αρμός καλύπτεται με ένα ή δυο ελάσματα, που ονομάζονται αρμοκαλύπτρες. Οι αρμοκαλύπτρες καρφώνονται με τα συνδεόμενα μέρη και πραγματοποιούν έτσι τη σύνδεση μεταξύ τους. Η ήλωση με διπλή αρμοκαλύπτρα έχει σημαντικό πλεονέκτημα έναντι των ηλώσεων με μια αρμοκαλύπτρα γιατί η καταπόνηση στους ήλους μειώνεται στο μισό.



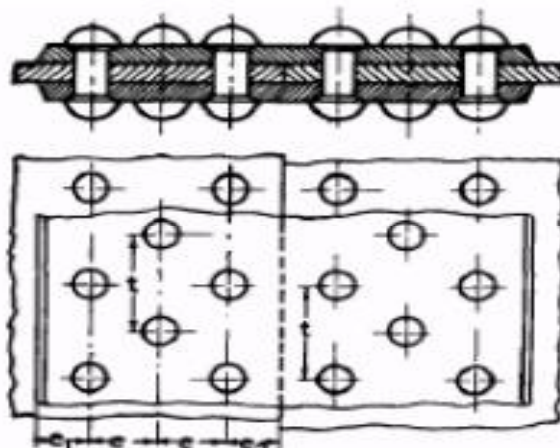
Σχήμα 1.11: Ηλώσεις με επικάλυψη



Σχήμα 1.12 : Ηλώσεις με αρμολαύπτρα

1.3.9 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΗΛΩΝ

Η τοποθέτηση των ήλων μπορεί να γίνει σε μια ή περισσότερες σειρές, ανάλογα με την επιθυμητή αντοχή και η ήλωση ονομάζεται, αντίστοιχα, απλής ή διπλής κ.ο.κ. σειράς ήλων. Οι ήλοι διπλανών σειρών μπορούν να είναι ο ένας απέναντι στον άλλον ή σε τριγωνική διάταξη (ζίκζάκ). Η απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών ήλων της ίδιας σειράς ονομάζεται βήμα της ήλωσης (t). Άλλες αποστάσεις που διακρίνονται στο Σχήμα 1.13 είναι: η απόσταση (e) μεταξύ δυο παραλλήλων σειρών καρφιών και η απόσταση (e_1) της ακραίας σειράς καρφιών από την άκρη του ελάσματος. Η απόσταση αυτή έχει σημασία τόσο για τη στεγανότητα όσο και για την αντοχή της ήλωσης. Ιδιαίτερα στις ηλώσεις με αρμολαύπτρες ο αριθμός των σειρών αναφέρεται δεξιά ή αριστερά του αρμού και όχι συνολικά και ορίζεται ακόμα η απόσταση (e_2) του άξονα των ήλων από τον αρμό, η οποία λαμβάνεται συνήθως λίγο μικρότερη της e_1 .



Σχήμα 1.13: Ηλώσεις τριπλής σειράς ζίκζάκ με διπλή αρμολαύπτρα

1.3.10 ΟΠΗ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗΣ ΗΛΟΥ

Στο σημείο που θα γίνει η ήλωση, ανοίγεται αρχικά η οπή, είτε με ζουμπά, είτε με τρυπάνι και μετά εφαρμόζεται ο ήλος. Συνιστάται οι τρύπες να ανοίγονται ταυτόχρονα σε όλα τα ελάσματα που πρόκειται να συνδεθούν μεταξύ τους. Οι άκρες της τρύπας πρέπει να φρεζάρονται ώστε να μπορεί να πατήσει ο ήλος στο έλασμα. Κάθε τεμάχιο στερεώνεται με 2 τουλάχιστον ήλους και δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν περισσότεροι από 6 ήλοι στη σειρά κατά τη διεύθυνση της ασκούμενης δύναμης. Αν η φόρτιση είναι εναλλασσόμενη τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν το πολύ 5 ήλοι στη σειρά.

Τέλος, αν πρόκειται για ήλωση με αρμοκαλύπτρα, το έλασμα πρέπει να έχει πάχος μεγαλύτερο από 4 mm και καλό είναι να έχει το ίδιο μέσο πάχος με τα προς σύνδεση ελάσματα. Μια ήλωση μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε εν ψυχρώ είτε εν θερμό. Συγκεκριμένα, χαλύβδινοι ήλοι διαμέτρου μέχρι 8 mm τοποθετούνται εν ψυχρώ, ενώ ήλοι με διαμέτρους μεγαλύτερες των 10 mm τοποθετούνται μετά από ερυθροπύρωση τους σε θερμοκρασία 1000°C .

1.3.11 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΗΛΩΣΕΩΝ

Οι ηλώσεις χρησιμοποιούνται ως ενώσεις μεταφοράς δυνάμεων στεγανές (σε λέβητες, σωληνώσεις και δοχεία με υπερπίεση) ή όχι (σε κατασκευές από χάλυβα όπως κτίρια, γεφυροποιία, γερανοκατασκευές), απλά ως στεγανές ενώσεις σε δοχεία, καπνοδόχους από λαμαρίνες (χωρίς υπερπίεση) και τέλος, ως ενώσεις για επενδύσεις με έλασμα (κατασκευή οχημάτων και αεροπλάνων).

Ανάλογα με το σκοπό και τις απαιτήσεις που προορίζονται οι ηλώσεις διακρίνονται σε :

1. Σταθερές ηλώσεις :Χρησιμοποιούνται ως ενώσεις μεταφοράς δυνάμεων στις κατασκευές από χάλυβα και ελαφρά μέταλλα (κτίρια, γέφυρες ,γερανούς). Χρησιμοποιούνται ακόμη στην γενική κατασκευή μηχανών.
2. Στεγανές ηλώσεις :Χρησιμοποιούνται για την επίτευξη στεγανότητας στην κατασκευή δοχείων.
3. Σταθερές και στεγανές ηλώσεις (στερεοστεγανές) :Χρησιμοποιούνται σε ατμολέβητες και κλειστά δοχεία με μεγάλη εσωτερική πίεση , όπου επιθυμούμε στεγανότητα και μεταφορά δυνάμεων.
4. Ηλώσεις προσκολλησεως :Χρησιμοποιούνται ως ένωση για επενδύσεις μεταλλικών σκελετών με ελάσματα (λεωφορεία, αεροπλάνα κλπ).

1.3.12 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΗΛΩΣΕΩΝ

Όλο και περισσότερο οι ηλώσεις αντικαθίστανται από τις συγκολλήσεις, παρόλα αυτά η ήλωση πλεονεκτεί ως προς το ότι μπορεί να συνδέσει διαφορετικά μεταξύ τους υλικά και δεν προκαλεί δυσμενείς επιρροές στο υλικό όπως η συγκόλληση, λόγω θερμοκρασίας. Επίσης, μπορεί να ελεγχθεί εύκολα η ποιότητά μιας ήλωσης είτε οπτικά είτε ηχητικά και εξασφαλίζει σχετικά εύκολη αποσύνδεση των τεμαχίων. Όσον αφορά στα μειονεκτήματα της ήλωσης συμπεριλαμβάνεται η αύξηση βάρους της κατασκευής, κυρίως λόγω των αρμοκαλυπτρών. Τελικά, ηλώσεις χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα σε κατασκευές που καταπονούνται από δυναμικά ή ισχυρά κρουστικά φορτία, σε κατασκευές από κράματα ελαφρών μετάλλων (αλουμινίου, μαγνησίου, κ.α.), σε συνδέσεις στοιχείων από υλικά που δεν μπορούν να συγκολληθούν ή αποτελούνται από ετερογενή υλικά και σε ογκώδεις σιδηρές κατασκευές.

2. ΔΙΑΤΜΗΣΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Όλοι γνωρίζουμε ότι σε μια διατομή ενός καταπονούμενου φορέα ενδέχεται να συναντήσουμε ορθές εσωτερικές δυνάμεις ή τέμνουσες εσωτερικές δυνάμεις ή και τις δύο ταυτόχρονα.

Η τέμνουσα δύναμη Q κείται στο επίπεδο της δίστομης και ονομάζεται ακόμη εγκάρσια ή διατμητική δύναμη. Εξαιτίας της τέμνουσας δύναμης Q έχουμε την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων τ , που και αυτές δρουν πάνω στο επίπεδο της διατομής.

Εάν υποθέσουμε, κάτι που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα, ότι οι διατμητικές τάσεις τ είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες επάνω στη διατομή τότε ισχύει:

$$\tau_{xy} = \frac{Q}{A} \quad (2.1)$$

Στην περίπτωση των διατμητικών τάσεων, οι παραμορφώσεις είναι γωνιακές γ και μεταξύ T και γ ισχύει ο νόμος του Hooke :

$$T_{xy} = \gamma_{xy} \cdot G \quad (2.2)$$

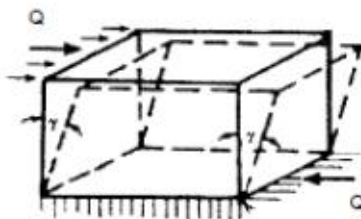
όπου G : το μέτρο διάτμησης ή μέτρο ολίσθησης.

Μεταξύ G και E ισχύει:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (2.3)$$

όπου ν : ο συντελεστής Poisson που για τα μέταλλα είναι $\nu = 0,3$ και επομένως:

$$G = 0,385 E. \quad (2.4)$$



Σχήμα 2.1 : Γωνιακή παραμόρφωση

Μια κατασκευή που καταπονείται σε διάτμηση για να μην αστοχεί θα πρέπει να προκύπτει :

$$t = \frac{Q}{A} \leq t_{ep} \quad (2.5)$$

Η επιτρεπόμενη διατμητική τάση καθώς και η διατμητική τάση θραύσεως μπορούν για ευκολία μας να προσδιορισθούν από τις σχέσεις :

$$t_u = 0.8 \cdot s_u \quad (2.6)$$

$$t_{ek} \approx 0.8 \cdot s_{ek} \quad (2.7)$$

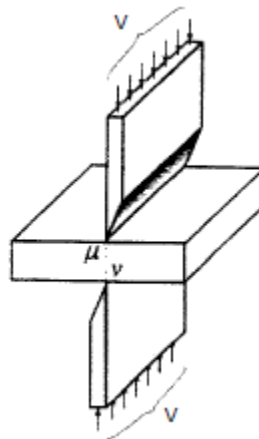
για τα όλκιμα υλικά, ενώ για τον χυτοσίδηρο :

$$t_u = 1.1 \cdot s_u \quad (2.8)$$

2.2 ΔΙΑΤΜΗΣΗ – ΨΑΛΙΔΙΣΜΟΣ-ΤΜΗΣΗ

Εμείς στο εργαστήριο θα μελετήσουμε την απλή καταπόνηση σε διάτμηση όπως αυτή εμφανίζεται σε συνδέσεις ελασμάτων ή ξύλινων κατασκευών με ήλους, κοχλίες, πείρους σύνδεσης καθώς και σε ενώσεις με συγκολλήσεις και σε σφήνες. -

Οι όροι τμήση ή ψαλιδισμός χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την περίπτωση διάτμησης όπου ενεργεί μόνο τέμνουσα δύναμη και δεν αναπτύσσεται καμπτική ροπή [4].



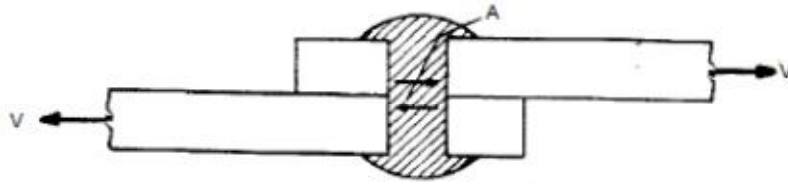
Σχήμα 2.2 Τμήση ή ψαλιδισμός

Στο (Σχήμα 2.2) φαίνεται μια περίπτωση τμήσης ή ψαλιδισμού. Με ένα μηχανικό ψαλίδι επιβάλλουμε σε έλασμα ίσες και αντίθετες εγκάρσιες δυνάμεις προοδευτικά αυξανόμενες, σε πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους. Όταν η τιμή της δύναμης v υπερβεί κάποια χαρακτηριστική τιμή το έλασμα θα

υποστεί τμήση ή ψαλιδισμό, δηλαδή θα κοπεί παράλληλα στη διεύθυνση των δυνάμεων V .

Στην επιφάνεια τομής θα αναπτυχθούν τάσεις διατμητικές που η κατανομή τους είναι αρκετά πολύπλοκη. Για το λόγο αυτό υπολογίζουμε τη μέση διατμητική τάση t_m :

$$t_m = \frac{V}{A} \quad (2.9)$$



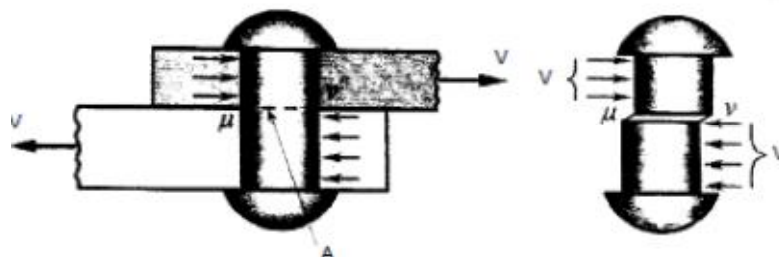
Σχήμα 2.4: Περίπτωση σύνδεσης ελασμάτων με ήλο

Με αναφορά στο (Σχήμα 2.4) παρατηρούμε ότι:

- ο κορμός του ήλου καταπονείται σε διάτμηση
- οι κεφαλές σε εφελκυσμό
- τα τοιχώματα (ή άντυγα) σε θλίψη επιφάνειας

2.3 ΗΛΩΣΕΙΣ

Όπως έχουμε αναφέρει πιο πάνω, οι ήλοι είναι σύνδεσμοι που συγκροτούν ενωμένα μεταξύ τους δύο ή περισσότερα ελάσματα. Ο κορμός του ήλου είναι ένα στοιχείο που καταπονείται σε διάτμηση.



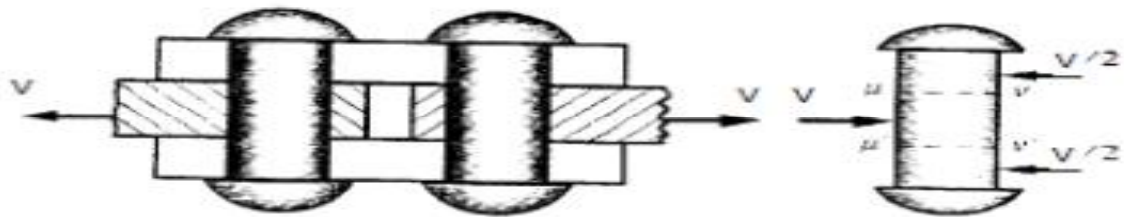
Σχήμα 2.5: Μονόμητος ήλος που συνδέει δύο ελάσματα που εφελκύνονται με μια δύναμη v το καθένα

Η κρίσιμη διατμητική επιφάνεια του ήλου είναι η $\mu - v$ η οποία βρίσκεται στη διαχωριστική επιφάνεια των δύο ελασμάτων. Στην επιφάνεια αυτή προφανώς θα αναπτυχθεί μια τάση διατμητική (τ) της οποίας δεν γνωρίζουμε την κατανομή και γι' αυτό μιλάμε για μέση διατμητική τάση στο μονόμητο ήλο

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (2.10)$$

, όπου: A το εμβαδόν της διατομής $\mu - \nu$ του ήλου.

Στο (Σχήμα 2.6) εικονίζεται ένας δίτητος ήλος. Τα δύο ελάσματα που εφελκύνονται με μια δύναμη V το καθένα, συνδέονται μεταξύ τους με ήλους χρησιμοποιώντας ελάσματα επικάλυψης ή αρμοκαλύπτρες.

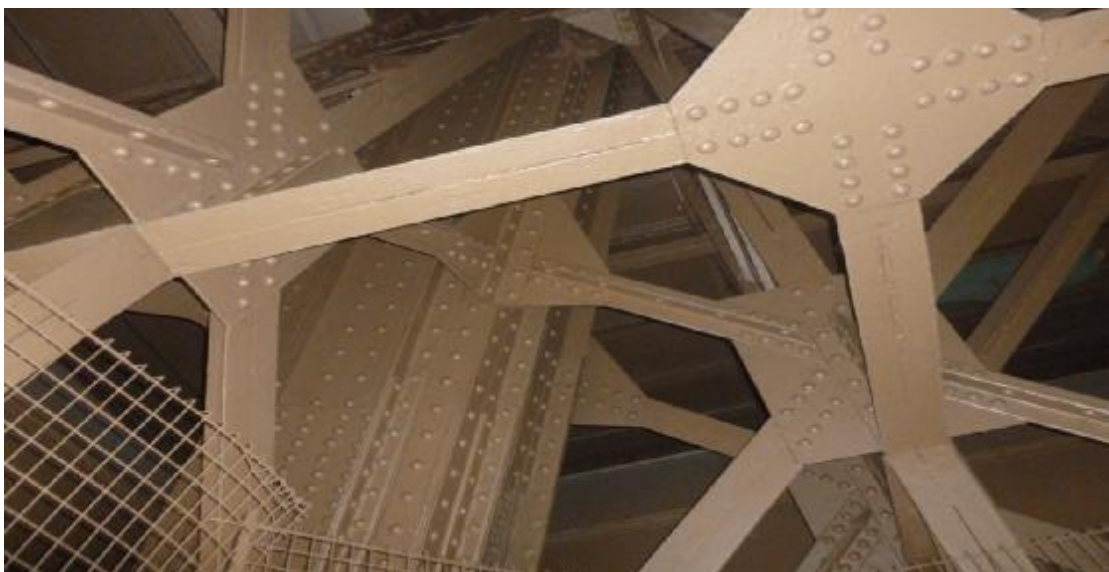


Σχήμα 2.6: Δίτητος ήλος

Στην περίπτωση αυτή υπάρχουν δύο επιφάνειες (δύο διατομές του κορμού του ήλου) που καταπονούνται σε διάτμηση $\mu - \nu$ και $\mu' - \nu'$, γι' αυτό και ο ήλος ονομάζεται δίτητος. Η τέμνουσα δύναμη που καταπονεί κάθε μια από τις δύο αυτές επιφάνειες είναι $\frac{V}{2}$ οπότε και ορίζεται η μέση διατμητική τάση στο δίτητο ήλο :

$$t = \frac{V}{2 \cdot A} \quad (2.12)$$

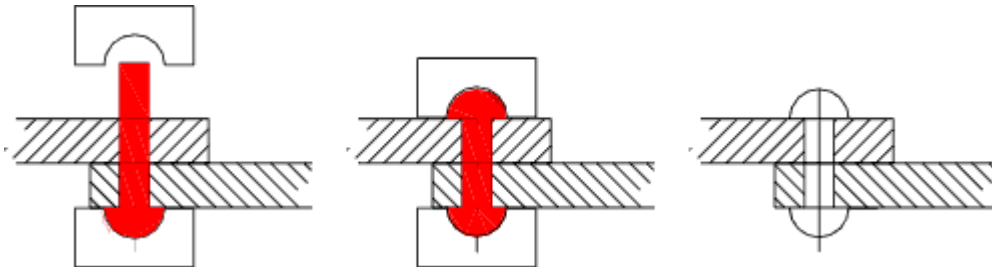
Ότι ακριβώς είπαμε για τους ήλους ισχύουν και για τους κοχλίες σύνδεσης. Στο Σχήμα 2.7 έχουμε ένα παράδειγμα μιας μεταλλικής κατασκευής με ήλους που καταπονούνται σε διάτμηση.



Σχήμα 2.7: Κατασκευή με ήλους που καταπονούνται σε διάτμηση

2.4 ΑΣΤΟΧΙΑ ΗΛΟΥ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ

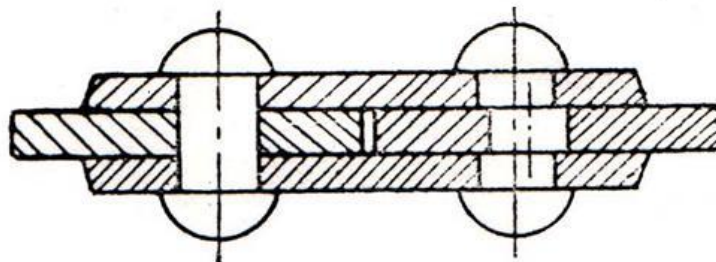
Έστω η σύνδεση του σχήματος που φορτίζεται δύναμη F . Αν ο ήλος έχει διάμετρο d , υπάρχουν στη σύνδεση n ήλοι, και m καταπονούμενες διατομές (στο σχήμα φαίνεται μόνο μία) η εξίσωση σχεδιασμού είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 2.8: Απλή σύνδεση δύο ελασμάτων

$$t = \frac{4 \cdot F}{n \cdot m \cdot p \cdot d^2} \leq \left(\frac{S_{sy}}{N} \right)_{\text{ΗΛΟΥ}} = \left(\frac{S_y}{2 \cdot N} \right)_{\text{ΗΛΟΥ}} \quad (2.13)$$

όπου S_{sy} και S_y τα όρια ροής σε διάτμηση και εφελκυσμό του υλικού του ήλου και N ο συντελεστής ασφάλειας. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται μια σύνδεση δύο ελασμάτων με διπλή αρμοκαλύπτρα, όπου κάθε ήλος έχει δύο διατομές που παραλαμβάνουν διατμητικό φορτίο [5].



Σχήμα 2.9: Σύνδεση δύο ελασμάτων με διπλή αρμοκαλύπτρα

Παραδείγματα αστοχίας πλακών με ήλωση σε διάφορες περιπτώσεις (Σχήμα 2.10).

ΑΣΤΟΧΙΑ ΠΛΑΚΩΝ
 Η ΚΑΘΕ ΜΙΑ ΑΠΟ ΤΙΣ ΣΥΝΔΕΟΜΕΝΕΣ ΠΛΑΚΕΣ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ
 ΑΣΤΟΧΗΣΕΙ ΛΟΓΩ:

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ



ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ



ΣΥΝΘΛΙΨΗΣ ΑΝΤΥΓΑΣ

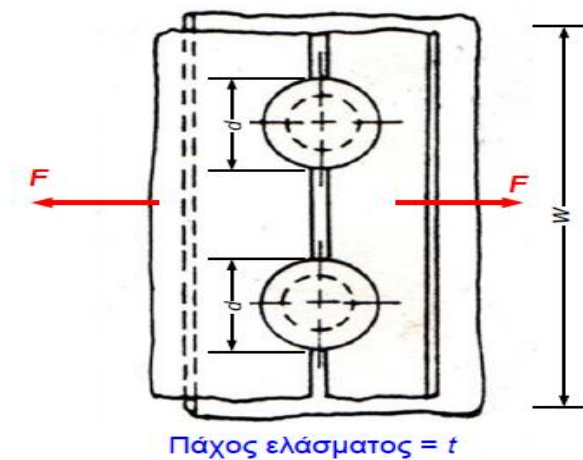


Σχήμα 2.10: Αστοχία πλακών με ήλο

2.5 ΑΠΟΚΟΠΗ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΗΣ ΗΛΩΣΗΣ

Εκτός από την αστοχία του ήλου ενδεχομένως να αστοχήσει το έλασμα. Μια μορφή αστοχίας του ελάσματος είναι η αποκοπή του ελάσματος κατά μήκος της ήλωσης. Αυτή η μορφή αστοχίας του ελάσματος συμβαίνει συχνότερα από τις άλλες που θα περιγράψουμε πιο κάτω. Η αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση στο έλασμα θα είναι:

$$s_t = K_t \cdot \frac{F}{(W - n \cdot d) \cdot t} \leq \left(\frac{S_Y}{N} \right)_{\text{ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ}} \quad (2.14)$$



Σχήμα 2.11 Αστοχία ελάσματος σε αποκοπή

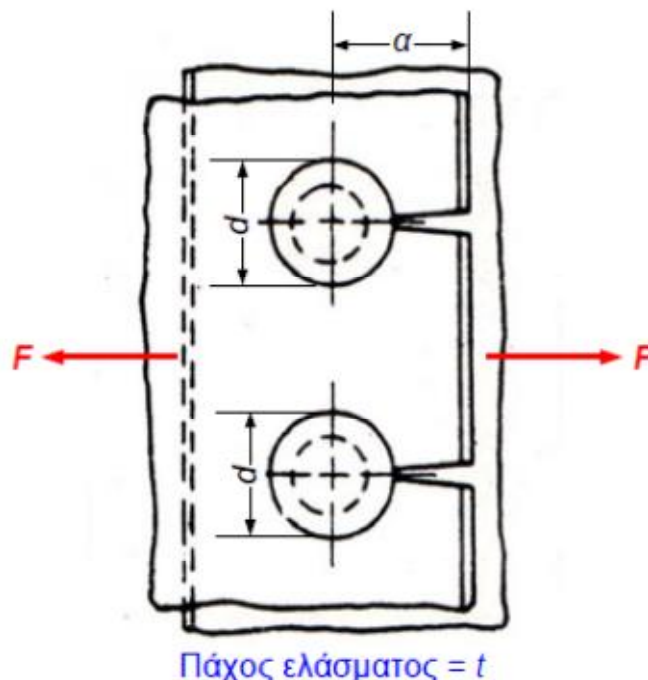
Όπου F η δύναμη που εφελκύνει το έλασμα, w το πλάτος του, d η διάμετρος της οπής, n ο αριθμός των οπών, t το πάχος του ελάσματος, K_t ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων λόγω της οπής στο έλασμα λαμβανόμενος υπόψη σε δυναμικές καταπονήσεις ή σε έλασμα από ψαθυρό υλικό, S_y το όριο ροής σε εφελκυσμό του υλικού του ελάσματος και N ο συντελεστής ασφάλειας.

2.6 ΑΣΤΟΧΙΑ ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΠΟΣΧΙΣΗ

Το έλασμα ενδέχεται να αστοχήσει σε απόσχιση. Αν a η απόσταση του κέντρου του ήλου από το άκρο του ελάσματος, και t το πάχος του τότε αν η διατμητική τάση απόσχισης υπερβεί την επιτρεπόμενη διατμητική τάση του υλικού του ελάσματος τότε θα έχουμε αστοχία σε απόσχιση. Η τάση απόσχισης δίνεται από τη σχέση:

$$t_t = K_t \cdot \frac{F}{2 \cdot a \cdot t} \leq \left(\frac{S_{SY}}{N} \right)_{\text{ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ}} \quad (2.15)$$

όπου a η απόσταση του κέντρου του ήλου από το άκρο του ελάσματος στη διεύθυνση της δύναμης. Η δύναμη F στην πιο πάνω σχέση αντιστοιχεί σε έναν ήλο. Όταν υπάρχουν περισσότεροι το φορτίο μοιράζεται σ' αυτούς.

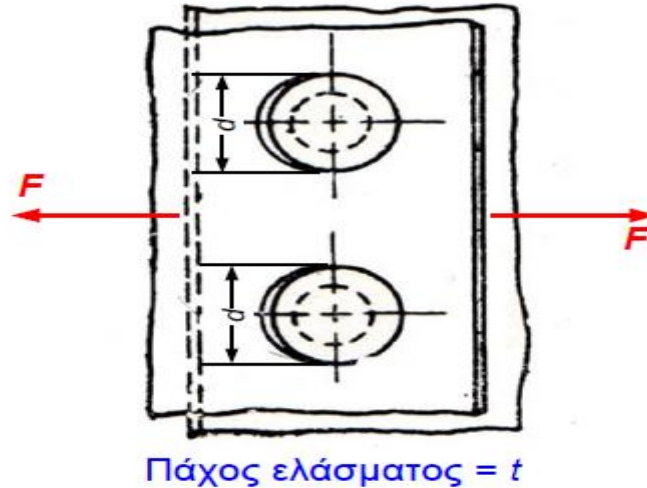


Σχήμα 4.12: Αστοχία ελάσματος σε απόσχιση

Αν δεν υπάρχουν στοιχεία για τον συντελεστή συγκέντρωσης τάσεων, τότε $S_{sy} = 0.3 S_y$. Η απόσταση των ήλων μεταξύ τους πρέπει να είναι $3d$, ενώ η απόστασή τους από τα άκρα $2d$.

2.7 ΑΣΤΟΧΙΑ ΣΕ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΗ ΠΙΕΣΗ

Άλλη μια μορφή αστοχίας του ελάσματος (ή του ήλου αν $S_b \text{ ήλου} < S_b \text{ ελάσματος}$) συμβαίνει όταν η επιφανειακή πίεση σ_b υπερβεί την επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση του υλικού ή του ήλου.



Σχήμα 2.13: Αστοχία ελάσματος ή ήλου σε επιφανειακή πίεση

Η τάση εδώ είναι ίση προς τη δύναμη ως προς την προβολή της επιφάνειας επαφής σε κάθετο επίπεδο. Δηλαδή:

$$s_b = \frac{p}{t \cdot d} \leq \left(\frac{S_b}{N} \right)_{\text{ΕΛΑΣΜΑΤΟΣ}} \quad (2.16)$$

ή

$$s_b = \frac{P}{t \cdot d} \leq \left(\frac{S_b}{N} \right)_{\text{ΗΛΟΥ}} \quad (2.17)$$

όπου a_b η επιφανειακή τάση, και S_b η επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση. Αν δεν έχουμε άλλα στοιχεία τότε :

$$S_b = \frac{S_y}{0.9} \quad (2.18)$$

2.8 ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΩΝ ΣΕ ΣΧΗΜΑ ΡΟΜΒΟΥ

Στο Σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η σύνδεση δύο ελασμάτων, απλής υπέρθεσης και διπλής επικάλυψης, με πολλαπλούς ήλους. Η διάταξη που προτιμάται είναι αυτή του ρόμβου. Οι διάμετροι των ήλων είναι ίσες. Η δύναμη F στο εφελκόμενο έλασμα μειώνεται μετά κάθε σειρά ήλων, ενώ αυξάνεται στο συνδεδεμένο έλασμα. Σε μια τυχαία διατομή aa η δύναμη θα είναι:

$$F_t = \frac{n-h}{n} \cdot F \quad (2.19)$$

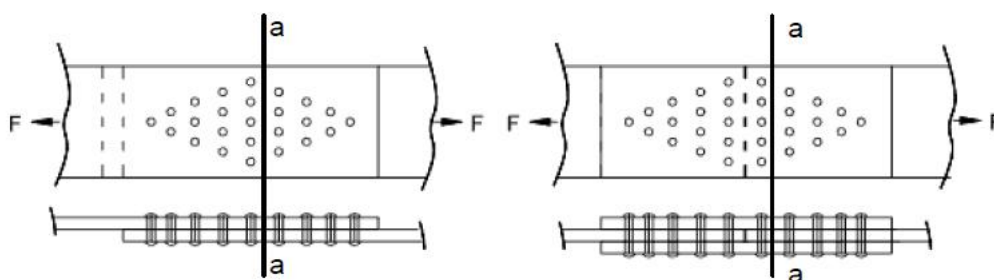
Όπου n ο συνολικός αριθμός ήλων και h ο αριθμός των ήλων δεξιά από την aa , πχ στο αριστερό σχήμα.

$$F_t = \frac{(25-10)}{25} \cdot F = \frac{3}{5} \cdot F \quad (2.20)$$

Η δύναμη αυτή καταπονεί το κάτω έλασμα ανάμεσα στην 4^η και την 5^η σειρά ήλων.

Στη δεύτερη σύνδεση με τη διπλή επικάλυψη, όπου h είναι εδώ ο αριθμός των ήλων που συνδέουν το δεξιό έλασμα, η πιο πάνω σχέση θα γίνει:

$$F_t = \frac{(15-10)}{15} \cdot F = \frac{1}{3} \cdot F \quad (2.21)$$



Σχήμα 2.14: Η δύναμη περνά από το ένα έλασμα στο άλλο σταδιακά μέσω των ήλων

Τα ανωτέρω ισχύουν όταν δεχθούμε ότι οι ήλοι παραλαμβάνουν ισομερώς τη δύναμη, παραδοχή που συχνά χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό ηλώσεων. Στην πραγματικότητα αποδεικνύεται ότι οι ήλοι στα άκρα παραλαμβάνουν μεγαλύτερο ποσοστό από τους ενδιάμεσους.

2.9 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΕΞΑΣΘΕΝΙΣΗΣ

Συντελεστής εξασθένισης ορίζεται ο λόγος της μέγιστης δύναμης που ένα έλασμα με ήλους μπορεί να φέρει, προς την δύναμη που θα μπορούσε να παραλάβει αν δεν είχε τις οπές. Έστω P_t η μέγιστη δύναμη που το έλασμα μπορεί να παραλάβει, P_s η μέγιστη διατμητική δύναμη που ο ήλος μπορεί να παραλάβει και P_b η μέγιστη δύναμη που η επιτρεπόμενη επιφανειακή τάση επιτρέπει:

$$P_t = s_t \cdot (w - d) \cdot t \quad (2.22)$$

$$P_s = \frac{t_s \cdot p \cdot d^2}{4} \quad (2.23)$$

$$P_b = s_b \cdot d_t \quad (2.24)$$

και P η δύναμη που το έλασμα χωρίς οπές μπορεί να παραλάβει:

$$P = s_t \cdot w_t \quad (2.25)$$

τότε ο συντελεστής εξασθένισης n ορίζεται σαν:

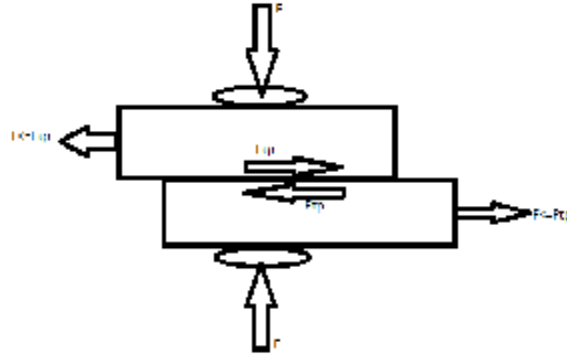
$$n = \frac{\min(P_t, P_s, P_b)}{P} \quad (2.26)$$

Κατανομή δυνάμεων σε διαδοχικούς ήλους: Σε μια ήλωση με n ήλους στη σειρά στη διεύθυνση του φορτίου F , η δύναμη P που εφελκύει το έλασμα μετά από i ήλους, είναι:

$$P = F \cdot \frac{(n - i)}{n} \quad (2.27)$$

2.10 ΘΕΡΜΕΣ ΗΛΩΣΕΙΣ

Όταν μία ήλωση γίνεται εν θερμό (Σχήμα 2.16), σε θερμοκρασία T_1 , τότε κατά την ψύξη του ήλου στην θερμοκρασία περιβάλλοντος T_a , ο ήλος υφίσταται βράχυνση $\Delta L = \alpha L \Delta T$, όπου α ο συντελεστής γραμμικής διαστολής του υλικού του ήλου, L το μήκος του ήλου και $\Delta T = T_1 - T_a$.



Σχήμα 2.16: Θερμή ήλωση

Επειδή σύμφωνα με τον νόμο του Hooke:

$$s = E \cdot e \quad (2.28)$$

Και

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.29)$$

Η αναπτυσσόμενη εφελκυστική τάση στον κορμό του ήλου θα είναι:

$$s = E \cdot e = E \cdot \frac{\Delta L}{L} = a \cdot E \cdot \Delta T \quad (2.30)$$

Οπότε η δύναμη που θα συμπιέζει τα ελάσματα της ήλωσης θα είναι:

$$F = s \cdot A = a \cdot E \cdot \Delta T \cdot \frac{\rho \cdot d^2}{4} \quad (2.31)$$

και η δύναμη που λόγω τριβής μπορεί να παραληφθεί από την ήλωση, αν ο συντελεστής τριβής είναι f :

$$F_{tr} = F \cdot f = f \cdot a \cdot E \cdot \Delta T \cdot \frac{\rho \cdot d^2}{4} \quad (2.32)$$

Αν δεχθούμε ότι το υλικό φθάνει κατά την ψύξη του το όριο ροής του, τότε

$$S_y = a \cdot E \cdot \Delta T \quad (2.33)$$

και επομένως:

$$F_{tr} = f \cdot S_y \cdot \frac{p \cdot d^2}{4} \quad (2.34)$$

Ή

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{tr}}{f \cdot p \cdot S_y}} \quad (2.35)$$

2.11 ΑΝΤΟΧΗ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΗΛΩΣΕΙΣ

Οι χρησιμοποιούμενοι ήλοι για μηχανολογικές- κατασκευαστικές εφαρμογές είναι γενικά από συνεκτικό μαλακό χάλυβα (χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα). Σε εφαρμογές όπου το βάρος, η διάβρωση έχουν σημαντικό ρόλο ή υπάρχουν περιορισμοί στη χρήση υλικών, οι ήλοι μπορούν να κατασκευάζονται από κράματα χαλκού ή αλουμινίου.

Τρείς αντοχές χρειαζόμαστε στις ηλώσεις. Την αντοχή σε εφελκυσμό των συνδεομένων ελασμάτων, τη αντοχή σε διάτμηση των ήλων και την επιτρεπόμενη επιφανειακή πίεση των ελασμάτων και των ήλων. Για ήλους κατασκευών και λεβητοποιίας κλπ. οι τάσεις σχεδιασμού καθορίζονται από τους αντίστοιχους κανονισμούς. Για ήλους χρησιμοποιούμενους στο μηχανολογικό σχεδιασμό, οι αντίστοιχες επιτρεπόμενες τιμές διατίθενται σε πίνακες υλικών όπως ο Πίνακας 2.1.

Σε εγχειρίδια μηχανολογίας αναφέρονται για τον όγκιμο (συνεκτικό) χάλυβα οι εξής επιτρεπόμενες τιμές, που μπορούν να χρησιμοποιούνται για τον αρχικό σχεδιασμό: Εφελκυσμός 75 MPa, διάτμηση 60 MPa και επιφανειακή πίεση 130 MPa.

Πίνακας 2.1: Τιμές αντοχής για ήλους διαφόρων κατηγοριών και φορτίσεων

Φόρτιση	Διάτμηση			Κάμψη			Εφελκυσμός		
	A284	A570	A572	A572	A570	A572	A284	A570	A572
	GrC	GrD	Gr50	Gr60	GrD	Gr50	GrC	GrD	Gr50
Στατική	140	180	225	280	360	440	70	90	110
Μεταβαλλόμενη	100	140	170	200	280	340	50	70	85
Εναλλασσόμενη	85	110	130	170	220	260	40	55	65

3.ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Υπάρχουν διαφορετικοί μέθοδοι (ή διαφορετικές φιλοσοφίες) για την ανάπτυξη της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων [6].

Στο παρόν βιβλίο αναπτύσσονται οι παρακάτω δύο μέθοδοι:

1. Η ενεργειακή μέθοδος, βασίζεται στην ολική δυναμική ενέργεια του σώματος (ή της κατασκευής) (total potential energy), μαζί με την μέθοδο των μετατοπίσεων, την οποία θα αναπτύξουμε στα επόμενα κεφάλαια. Η μέθοδος είναι απλή και δεν απαιτεί την επίλυση των διαφορικών εξισώσεων και χρησιμοποιείται σε όλα τα κεφάλαια.

Επίσης στα προβλήματα της μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιείται η ενεργειακή μέθοδος, όταν υπάρχει η εξίσωση της δυναμικής ενέργειας, η οποία μετονομάζεται και λέγεται συναρτησιακή ενέργεια (functional).

Η ενεργειακή μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όταν υπάρχει η δυνατότητα να εκφρασθεί η ολική δυναμική ενέργεια του προβλήματος στα στερεά ή η functional στα προβλήματα της μεταφοράς θερμότητας. Αν δεν γνωρίζουμε την ολική δυναμική ενέργεια, τότε χρησιμοποιούνται άλλοι μέθοδοι, όπως η μέθοδος του Galerkin.

2. Η μέθοδος του Galerkin ανήκει στην γενική κατηγορία των Σταθμικών Υπολοίπων (methods of Weighted Residuals). Η μέθοδος Galerkin είναι γενική, δυνατή και εφαρμόζεται απ' ευθείας στην επίλυση των διαφορικών εξισώσεων. Χρησιμοποιείται η μέθοδος του Galerkin για τον υπολογισμό των προβλημάτων της θερμότητας καθώς και του προβλήματος της στρέψης ράβδου με τυχαία διατομή.

Η χρήση των πεπερασμένων στοιχείων μας βοηθά, στην επίλυση προβλημάτων:

- στη μηχανική των κατασκευών (structural mechanics) και
- στη μηχανική των στερεών (solid mechanics).
- μελετάται επίσης η διάδοση της θερμότητας με αγωγιμότητα.

Ο τρόπος επιλύσεως προβλημάτων με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων είναι σχεδόν ο ίδιος σε όλες τις περιοχές που εφαρμόζεται. Για παράδειγμα για την επίλυση μιας κατασκευής σχεδιάζουμε πρώτα την κατασκευή κατόπιν την χωρίζουμε σε μικρά γεωμετρικά σχήματα π.χ. τρίγωνα ή τετράπλευρα, τα οποία λέγονται πεπερασμένα στοιχεία. Οι ιδιότητες του υλικού και οι εξισώσεις που χαρακτηρίζουν το υλικό εξετάζονται στα πεπερασμένα στοιχεία σαν συνάρτηση των αγνώστων μετατοπίσεων στις κορυφές του πεπερασμένου στοιχείου (μέθοδος των μετατοπίσεων). Λαμβάνουμε υπόψιν τις οριακές συνθήκες καθώς και τα φορτία (μηχανικά και θερμικά) και καταλήγουμε στις εξισώσεις ισορροπίας της κατασκευής. Η λύση του συστήματος των εξισώσεων ως προς τους αγνώστους, οι οποίοι είναι οι κομβικές μετατοπίσεις είναι η ζητούμενη προσεγγιστική λύση. Γνωστών των

κομβικών μετατοπίσεων υπολογίζονται στα διάφορα σημεία της κατασκευής οι τάσεις (σ), οι παραμορφώσεις (ϵ) και οι αντιδράσεις (R) των στηρίξεων.

Λόγοι ανάπτυξης της μεθόδου

Προβλήματα που δεν μπορούσαν να τα αγγίξουν οι επιστήμονες έως τώρα και τα θεωρούσαν άλυτα, με την χρήση του ηλεκτρονικού υπολογιστή (H/Y) και των υπολογιστικών μεθόδων όπως των πεπερασμένων στοιχείων τα λύνουν σε μικρό χρόνο.

Στις Ηνωμένες πολιτείες της Αμερικής, στην Ευρώπη, και στις ανεπτυγμένες χώρες, η βιομηχανία, ο στρατός και το κράτος χρηματοδοτούν τα ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα και τις ερευνητικές εταιρείες, με σκοπό την ανάπτυξη προγραμμάτων.

Η ανάγκη της βιομηχανίας και των προβλημάτων της πράξης, οδήγησε την ανάπτυξη γραφικών προγραμμάτων, τα οποία συνοδεύουν την ανάλυση-υπολογισμό που παρέχουν τα πεπερασμένα στοιχεία. Ο συνδυασμός των γραφικών με την ανάλυση-υπολογισμό των πεπερασμένων στοιχείων υψώνουν την επιστήμη, την απλοποιούν, την κάνουν προσιτή και δημιουργική (state of the art).

Προϊόν της συστηματικής εργασίας των ερευνητών είναι η ανάπτυξη των εμπορικών προγραμμάτων για τον H/Y. Τα εμπορικά προγράμματα αποτελούνται από δύο μεγάλα προγράμματα: Τα γραφικά και την ανάλυση.

α) Γραφικά προγράμματα

Τα γραφικά προγράμματα χρησιμοποιούνται πριν από την ανάλυση (Pre-processing) και μετά την ανάλυση (Post-processing).

- Pre-processing. Με την χρήση του γραφικού προγράμματος το σώμα ή η κατασκευή σχεδιάζεται και κατόπιν διακριτοποιείται στα πεπερασμένα στοιχεία.
- Post-processing. Μετά την ανάλυση γίνονται γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων όπως είναι η παραμόρφωση του σώματος, η διανομή των τάσεων εντός του σώματος και άλλων.

β) Πρόγραμμα για την ανάλυση-υπολογισμό

Το πρόγραμμα της ανάλυσης χρησιμοποιείται για την μελέτη ποικίλων προβλημάτων που μπορεί να αφορούν την μηχανική των στερεών ή των κατασκευών, στα ρευστά, στην θερμότητα, στην ακουστική, στην κατεργασία των μετάλλων, στον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες περιοχές.

Όλα τα ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα, η βιομηχανία, οι τεχνικές εταιρείες, οι μηχανικοί της πράξης, οι προ-πτυχιακοί και οι μεταπτυχιακοί φοιτητές, χρησιμοποιούν εμπορικά προγράμματα για τον H/Y όπως για παράδειγμα είναι τα παρακάτω:

ANSYS, ABAQUS, NASTRAN,
MARC, ADINA, SAP90 COSMOS

για την μοντελοποίηση (ή προσομοίωση) προβλημάτων. Τα προγράμματα παρέχουν υπορουτίνες (subroutines), ώστε ο χρήστης να μπορεί να προσθέσει το δικό του πρόγραμμα συνήθως σε γλώσσα προγραμματισμού FORTRAN ή C, για να προσθέσει πληροφορίες που δεν υπάρχουν στο εμπορικό

πρόγραμμα, όπως για παράδειγμα να τροποποιήσει, να βελτιώσει ή να προσθέσει νέες καταστατικές εξισώσεις (constitutive equations).

Υπάρχουν επίσης ειδικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων, όπως για παράδειγμα είναι τα παρακάτω:

HITCAN metal matrix composites analyzer) και CODSTRAN (polymer composites analyzer),

τα οποία έχουν αναπτυχθεί στο ερευνητικό κέντρο NASA Glenn (Lewis) Research Center, Cleveland, Ohio, USA υπό την επίβλεψη και δημιουργού αυτών Dr. Christos C. Chamis. Τα προγράμματα αυτά, χρησιμοποιούν τα πεπερασμένα στοιχεία και την μηχανική των συνθέτων υλικών (fiber composite materials).

Γιατί πρέπει να γνωρίζουμε τα πεπερασμένα στοιχεία;

Η θεωρητική γνώση των πεπερασμένων στοιχείων βοηθά να αναπτύξει ο φοιτητής, ο ερευνητής ή ο μηχανικός της πράξης την αυτοπεποίθηση και την ικανότητα να λύνει, να λειτουργεί και να ερμηνεύει σωστά τα αποτελέσματα που λαμβάνει από ένα πρόγραμμα, και αν χρειασθεί να γράψει το δικό του πρόγραμμα.

3.2 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το 1909 ο Γερμανός μαθηματικός Ritz ανέπτυξε τις αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1915 ο Ρώσος μαθηματικός Galerkin ανέπτυξε σε βάθος την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Η απουσία του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε την διάδοση και περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου και παρέμεινε στάσιμη μέχρις της ανακαλύψεως του υπολογιστή. Με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή η μέθοδος έγινε γνωστή και διαδόθηκε στους ερευνητές.

Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γεννήθηκε στην αεροναυπηγική από την ανάγκη της εύρεσης λύσης στα δύσκολα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών.

Το 1941 ο Hrenikoff εισήγαγε την καλούμενη framework method (μέθοδο του πλαισίου) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών.

Το 1943 ο Γερμανός μαθηματικός Courant έλυσε το πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελαχίστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy) και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Επειδή τότε δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί και ξεχάστηκε μέχρι που ανακαλύφθηκε ο υπολογιστής και οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν την μέθοδο.

Το 1955 ο Έλληνας Ι. Αργύρης έγραψε ένα βιβλίο με θέμα 'Ενεργειακά θεωρήματα και η μέθοδος των μητρώων' και εισήγαγε τις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1956 οι Αμερικανοί Clough, Martin και Top υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου και άλλων στοιχείων.

Το 1960 ο I. Αργύρης και ο Kelsey δημοσίευσαν την εργασία τους η οποία βασιζόταν στις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων.

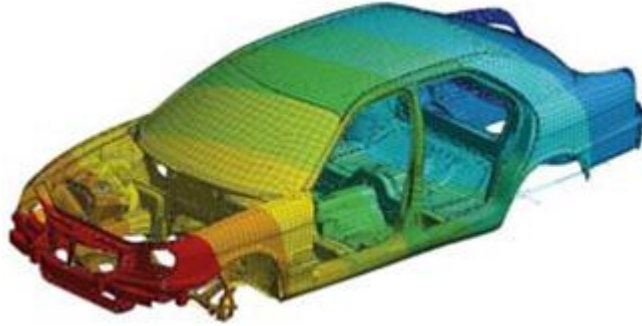
Το 1960 ο Clough καθηγητής του πανεπιστημίου 'University of California, Berkeley' της Αμερικής, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το όνομα 'Πεπερασμένα στοιχεία' (Finite elements) στην εργασία του και από τότε όλοι χρησιμοποιούν την παραπάνω ονομασία.

Το 1967 οι Zienkiewicz και Chung έγραψαν το πρώτο βιβλίο των πεπερασμένων στοιχείων.

Από τότε ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων και βιβλίων ακολούθησε με αντικείμενο την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στην μηχανική, στα ρευστά, τη θερμότητα, την ακουστική, την κατεργασία των μετάλλων, τον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες επιστήμες.

3.3 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Τα τελευταία σαράντα περίπου χρόνια η εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων (FEA), με την χρήση των μαθηματικών, της φυσικής, της εφαρμοσμένης μηχανικής και της πληροφορικής έχει ευρέως εφαρμοστεί στην οικοδομική, σε θερμικά προβλήματα καθώς και στη μελέτη διάδοσης ροής σε ρευστά και προβλήματα διάχυσης. Η διαδικασία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων συνίσταται σε τρεις σημαντικές φάσεις: (1) την προεπεξεργασία (pre-processing), στην οποία ορίζεται η γεωμετρία του προς επίλυση προβλήματος καθώς οι ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελείται η υπό ανάλυση κατασκευή, επίσης δημιουργείται το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων, καθώς και οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος (2) το στάδιο επίλυσης (solution), κατά τη διάρκεια του οποίου το πρόγραμμα επιλύει τις εξισώσεις του πεδίου των πεπερασμένων στοιχείων, και (3) την μετεπεξεργασία (post-processing), στην οποία ο αναλυτής έχει την δυνατότητα επεξεργασίας των αποτελεσμάτων με τη βοήθεια διαγραμμάτων και επιπλέον ελέγχει την ακρίβεια της λύσης με μεθόδους στατιστικής ανάλυσης, μελετάει τις τιμές των αρχικών ποσοτήτων (όπως οι μετατοπίσεις και οι τάσεις), και παράγει και εξετάζει τις πρόσθετες ποσότητες (όπως τις εξειδικευμένες τάσεις και τους δείκτες σφαλμάτων). Το Σχήμα 3.1 δείχνει τυπικά παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε μηχανολογικά εξαρτήματα. Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι πολυάριθμα και σημαντικά. Με τη βοήθεια της μεθόδου αυτής καθορίζεται η πραγματική συμπεριφορά ενός μηχανολογικού εξαρτήματος υπό την επίδραση διαφόρων συνθηκών φόρτισης, και μπορεί επομένως να βελτιωθεί κατασκευαστικά πριν από την κατασκευή του τελικού εξαρτήματος [7].



Σχήμα 3.1. Εφαρμογή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων στην ανάλυση μηχανολογικών κατασκευών.

Μετά την ανάπτυξη ενός λεπτομερειακού πρότυπου σχεδίου CAD το πρόγραμμα των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να διαχωρίσει το πρότυπο σε πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Μια υπάρχουσα κατασκευή η οποία απαιτείται να βελτιωθεί κατασκευαστικά, μπορεί να αναλυθεί με τη μέθοδο αυτή, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία εξέλιξης της και να επέλθει βελτίωση των μηχανικών της ιδιοτήτων με σύγχρονη μείωση του κόστους παραγωγής. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων FEA εφαρμόζεται σήμερα με επιτυχία σε μεγάλους τερματικούς σταθμούς υπολογιστών για την επίλυση πολύπλοκων κατασκευαστικών προβλημάτων.

Επίσης σημαντικό είναι να αναφερθούν οι περιορισμοί εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων σε πρακτικά προβλήματα. Παρόλο που η τιμή των εμπορικών πακέτων λογισμικού και του απαραίτητου υλικού (hardware) μειώνεται, αποτελούν ακόμη μια σημαντική επένδυση για την αριθμητική επίλυση μεγάλων κατασκευαστικών προβλημάτων π.χ. εφαρμογές στην αεροναυπηγική, οικοδομική κλπ. Η μέθοδος μπορεί να μειώσει την ανάγκη πειραματικής δοκιμής των προϊόντων, αλλά δεν μπορεί να την αντικαταστήσει εντελώς. Πιθανώς το σπουδαιότερο είναι ότι ένας άπειρος χρήστης μπορεί να καταλήξει σε ανακριβή αποτελέσματα, στα οποία και θα βασιστούν οι τελικές αποφάσεις ανάπτυξης της τελικής μορφής ενός προϊόντος. Τα προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων είναι απαιτητικά εργαλεία, δεδομένου ότι ο αναλυτής που χρησιμοποιεί τέτοια προγράμματα πρέπει να είναι γνώστης όχι μόνο της θεωρίας ελαστικότητας ή της μηχανικής ρευστών, αλλά επίσης να χειρίζεται με ευελιξία τα εφαρμοσμένα μαθηματικά, την πληροφορική, και να έχει πλήρη γνώση της θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων.

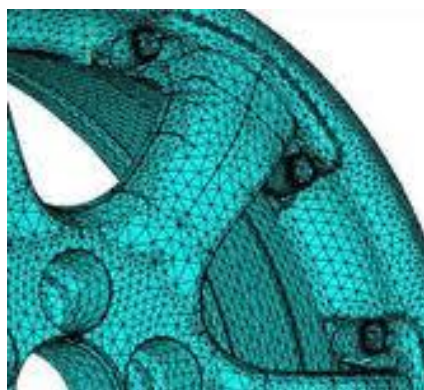
Ποιο όμως λογισμικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να χρησιμοποιήσει ο αναλυτής λεπτομερώς για την επίλυση ενός καθορισμένου προβλήματος; Η απάντηση του ερωτήματος έγκειται στον τύπο επίλυσης του υπό επίλυση προβλήματος και όχι στην προσωπική προτίμηση του, καθ' όσον τα υπάρχοντα εμπορικά λογισμικά προγράμματα είναι προορισμένα για την επίλυση ορισμένης κατηγορίας προβλημάτων, δηλαδή κάθε πρόγραμμα επιλύει με ακρίβεια μια ορισμένη ομάδα προβλημάτων π.χ. μερικά προγράμματα λύνουν προβλήματα ρευστομηχανικής, άλλα δε επιτυγχάνουν με ακρίβεια την στατική μελέτη των κτιρίων. Ο υπολογιστής ο οποίος θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από τον τύπο της ανάλυσης. Ένα τυπικό πρόβλημα πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί ένα γρήγορο, σύγχρονο υποσύστημα δίσκων για την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης. Οι

απαιτήσεις μνήμης εξαρτώνται από το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται κατά περίπτωση, αλλά προκειμένου να επιτευχθεί επαρκής απόδοση, ένας υπολογιστής με 128 έως 512 Mbytes μνήμης ανά χρήστη είναι μια αποδεκτή λύση. Καθ' όσον η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιλύει ένα πολύ μεγάλο αριθμό γραμμικών εξισώσεων πρέπει ο υπολογιστής να διαθέτει μεγάλη χωρητικότητα μνήμης για να μπορεί να αποθηκεύσει όλα τα δεδομένα του προβλήματος κατά το στάδιο της επεξεργασίας και ανάλυσης των αποτελεσμάτων. Εφ' όσον οι αριθμητικές αναλύσεις προβλημάτων με πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να διαρκούν αρκετές ώρες στα γρηγορότερα συστήματα, έτσι η υπολογιστική ισχύς είναι παράγοντας ουσιαστικής σημασίας.

3.3.1 Προεπεξεργασία

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία αποτελείται από τις φάσεις της προεπεξεργασίας, της επίλυσης και της μετεπεξεργασίας. Οι στόχοι είναι να αναπτυχθεί ένα κατάλληλο πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων, να οριστούν οι κατάλληλες ιδιότητες υλικού, και να εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες υπό μορφή περιορισμών και φορτίων.

Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων υποδιαιρεί τη γεωμετρία σε στοιχεία τα οποία συνδέονται μεταξύ τους στους κόμβους. Οι κόμβοι που είναι στην πραγματικότητα σημειακές θέσεις στο χώρο, βρίσκονται γενικά στα κορυφές των στοιχείων. Για μια δισδιάστατη (2D) ανάλυση, ή μια τρισδιάστατη (3D) ανάλυση λεπτού κελύφους, τα στοιχεία είναι ουσιαστικά 2D, αλλά μπορούν να στρεβλωθούν ελαφρώς για να προσαρμοστούν σε μια τρισδιάστατη επιφάνεια. Ένα παράδειγμα είναι το -γραμμικό τετράπλευρο στοιχείο επίπεδου λεπτού κελύφους. Ο όρος επίπεδο λεπτό κέλυφος αναφέρεται ουσιαστικά στην κλασική θεωρία των επίπεδων κελυφών, ο όρος γραμμικός καθορίζει την παρεμβολή των μαθηματικών ποσοτήτων δηλαδή γεωμετρικών συνιστωσών, μετατοπίσεων, παραμορφώσεων και τάσεων, κατά μήκος του στοιχείου, και ο όρος τετράπλευρος περιγράφει τη γεωμετρία του στοιχείου. Το Σχήμα 3.2 δείχνει τον διαχωρισμό ενός προτύπου σε πλέγμα τρισδιάστατων πεπερασμένων στοιχείων.



Σχήμα 3.2: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων

Για μια τρισδιάστατη στερεά ανάλυση, τα στοιχεία έχουν φυσικό πάχος στις τρεις διαστάσεις τους. Τα κοινά παραδείγματα περιλαμβάνουν το στερεό γραμμικό παραλληλεπίπεδο και τα στερεά παραβολικά τετραεδρικά στοιχεία. Επιπλέον, υπάρχουν πολλά ειδικά στοιχεία, όπως τα άξονο-συμμετρικά για τις περιπτώσεις όπου η γεωμετρία, οι ιδιότητες του υλικού και οι οριακές συνθήκες είναι συμμετρικές ως προς τον άξονα. Οι βαθμοί ελευθερίας του προτύπου ορίζονται στους κόμβους. Τα στερεά στοιχεία έχουν γενικά τρεις βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (δηλ. τρεις μετατοπίσεις). Οι περιστροφές ολοκληρώνονται μέσω των μετατοπίσεων ομάδων κόμβων σχετικά με άλλους κόμβους. Τα στοιχεία κελυφών, έχουν έξι βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο: τρεις μετατοπίσεις και τρεις περιστροφές. Η προσθήκη περιστροφικού βαθμού ελευθερίας επιτρέπει την αξιολόγηση των ποσοτήτων μέσω του επιπέδου κελύφους, όπως οι καμπτικές τάσεις λόγω της περιστροφής ενός κόμβου σχετικά με άλλο. Κατά συνέπεια, για τις δομές στις οποίες η κλασική θεωρία λεπτών κελυφών είναι μια έγκυρη προσέγγιση, η πρόσθεση ενός επιπλέον βαθμού ελευθερίας σε κάθε κόμβο, παρακάμπτει την ανάγκη της προτυποποίησης του φυσικού πάχους. Ο αριθμός των βαθμών ελευθερίας σε κάθε κόμβο εξαρτάται επίσης από τον τύπο της ανάλυσης. Για μια θερμική ανάλυση, παραδείγματος χάριν, μόνο η θερμοκρασία υπάρχει σε κάθε κόμβο, επομένως έχουμε ένα και μοναδικό βαθμό ελευθερίας για κάθε κόμβο.

Η ανάπτυξη του πλέγματος είναι συνήθως η πιο χρονοβόρα διαδικασία στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Στο παρελθόν, οι θέσεις των κόμβων καθορίζονταν χειροκίνητα ώστε να προσεγγιστεί η γεωμετρία. Η πιο σύγχρονη προσέγγιση είναι να αναπτυχθεί το πλέγμα άμεσα στη γεωμετρία CAD, η οποία μπορεί να είναι (1) δικτύωμα, με σημεία και καμπύλες να αντιπροσωπεύουν τα όρια της γεωμετρίας, (2) επιφανειακή, με επιφάνειες οι οποίες καθορίζουν τα όρια της γεωμετρίας, ή (3) στερεά, καθορίζοντας έναν όγκο ο οποίος συνθέτει τη γεωμετρία. Η στερεά γεωμετρία προτιμάται, αλλά συχνά η επιφανειακή γεωμετρία μπορεί να δημιουργήσει ένα σύνθετο μίγμα το οποίο δεν θα μπορέσει να αποδοθεί από τη στερεά γεωμετρία. Συγχρόνως με την ακριβή απόδοση της γεωμετρίας, θα πρέπει να εφαρμοστεί και μια απλούστευση της σε σημεία μη σημαντικά για τα τελικά αποτελέσματα, ώστε να εξοικονομηθεί χρόνος κατά την επίλυση του προβλήματος. Η εμπειρία των αναλυτών εδώ είναι ουσιαστική.

Η γεωμετρία διαχωρίζεται με έναν αλγόριθμο ταξινόμησης ή έναν αυτόματο αλγόριθμο ελεύθερου διαχωρισμού. Ο πρώτος ταξινομεί ένα ορθογώνιο πλέγμα επάνω σε μια γεωμετρική περιοχή, η οποία πρέπει να έχει το σωστό αριθμό πλευρών. Τα ταξινομημένα πλέγματα μπορούν να χρησιμοποιήσουν το ακριβές στερεό γραμμικό τρισδιάστατο στοιχείο παραλληλεπίπεδο, αλλά μπορούν να είναι πολύ χρονοβόρο, εάν όχι αδύνατο, να εφαρμοστούν για μια σύνθετη γεωμετρία. Ο ελεύθερος διαχωρισμός υποδιαιρεί αυτόματα τις περιοχές σε επιμέρους στοιχεία, με τα πλεονεκτήματα του γρήγορου διαχωρισμού, της εύκολης μεταβίβασης του μεγέθους του πλέγματος (για ένα πυκνότερο πλέγμα στις περιοχές μεγάλης κλίσης), και των προσαρμοστικών ικανοτήτων. Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν την παραγωγή τεράστιων προτύπων και την παραγωγή διαστρεβλωμένων στοιχείων. Είναι πάντα σημαντικό να ελεγχθεί η στοιχειώδης διαστρέβλωση πριν από την επίλυση. Τα αποδεκτά επίπεδα διαστρέβλωσης εξαρτώνται από τον επιλυτή που χρησιμοποιείται.

Οι ιδιότητες των υλικών που απαιτούνται ποικίλλουν με τον τύπο επίλυσης. Μια γραμμική στατική ανάλυση, παραδείγματος χάριν, θα απαιτήσει το μέτρο ελαστικότητας του υλικού, το λόγο Poisson και ίσως και την πυκνότητα υλικού. Κάποια παραδείγματα των περιορισμών δηλώνουν μια κομβική μετατόπιση ή μια θερμοκρασία. Τα φορτία περιλαμβάνουν τις δυνάμεις, τις πιέσεις και τη ροή θερμότητας. Είναι προτιμητέο να εφαρμοστούν οι οριακές συνθήκες στη γεωμετρία CAD, με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων να τις μεταφέρει στο πρότυπο, για να επιτρέψει την απλούστερη εφαρμογή των προσαρμοστικών αλγορίθμων και των αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

3.3.2 Επίλυση του προβλήματος

Ενώ οι φάσεις προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι χρονοβόρες για τον αναλυτή, η λύση είναι συνήθως μια μαζική επεξεργασία, και είναι απαιτητική σε υπολογιστικούς πόρους. Οι κύριες εξισώσεις συγκεντρώνονται και λύνονται αριθμητικά π.χ. με την μέθοδο (Gauss, Seidel, Jacobi κτλ) Η διαδικασία εξαρτάται όχι μόνο από τον τύπο ανάλυσης (π.χ. στατική ή δυναμική), αλλά και από τον τύπο και τις ιδιότητες των στοιχείων του προτύπου, τις ιδιότητες του υλικού και τις οριακές συνθήκες. Στην περίπτωση μιας γραμμικής στατικής και μιας δυναμικής χωρίς απόσβεση ανάλυσης, οι αντίστοιχες εξισώσεις των πεπερασμένων στοιχείων είναι της μορφής:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{f}\} \quad (3.1)$$

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{f}\} \quad (3.2)$$

όπου το $[\mathbf{K}]$ είναι το μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος, όπου το $[\mathbf{M}]$ είναι το μητρώο μάζας του συστήματος, $\{\mathbf{u}\}$ το διάνυσμα επικόμβιων μετατοπίσεων, $\{\ddot{\mathbf{u}}\}$ το διάνυσμα επικόμβιων επιταχύνσεων και το διάνυσμα $\{\mathbf{f}\}$ περιέχει επικόμβιες δυνάμεις. Η σχέση παραμόρφωσης-μετατόπισης μπορεί να εισαχθεί στην σχέση τάσης-παραμόρφωσης για να εκφράσει την τάση σαν συνάρτηση των μετατοπίσεων. Στις περιπτώσεις συμβατότητας των τάσεων και παραμορφώσεων, οι διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες, καθορίζουν την μοναδική λύση των άγνωστων μετατοπίσεων, η οποία καθορίζει τις παραμορφώσεις και τάσεις μέσα στο υλικό. Οι πιθανότητες της αναλυτικής επίλυσης των εξισώσεων της μηχανικής είναι μικρές ακόμη και για την πιο απλή γεωμετρία της κατασκευής, ως εκ τούτου παρουσιάζεται η ανάγκη της κατά προσέγγιση αριθμητικής επίλυσης των.

Ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχέση μετατόπισης-κομβικής μετατόπισης, η οποία, μέσω της μεθόδου της παρεμβολής καθορίζει τη μετατόπιση οπουδήποτε σε ένα στοιχείο όταν δίδονται οι τιμές των κομβικών βαθμών ελευθερίας. Εισάγοντας αυτήν την σχέση στη σχέση παραμορφώσεων-μετατοπίσεων, μπορούμε να εκφράσουμε την παραμόρφωση σα συνάρτηση των κομβικών μετατοπίσεων, με βάση τη

μέθοδο της παρεμβολής. Υπενθυμίζοντας ότι η έκφραση για την δυναμική ενέργεια ενός ελαστικού σώματος περιλαμβάνει ένα ολοκλήρωμα για την αποθηκευμένη ενέργεια παραμόρφωσης (εξαρτώμενη από το πεδίο των παραμορφώσεων) και τα ολοκληρώματα για το έργο που παράγεται από τις εξωτερικές δυνάμεις (εξαρτώμενα από τα πεδία των μετατοπίσεων), μπορούμε επομένως να εκφράσουμε τη δυναμική ενέργεια του συστήματος σε συνάρτηση των κομβικών μετατοπίσεων.

Εφαρμόζοντας την αρχή της ελάχιστης δυναμικής ενέργειας, θέτουμε με το μηδέν τη μερική παράγωγο της δυναμικής ενέργειας, αναφορικά με το διάνυσμα των κομβικών βαθμών ελευθερίας, οπότε προκύπτει ένα άθροισμα ολοκληρωμάτων ακαμψίας για κάθε στοιχείο, που πολλαπλασιάζεται με το κομβικό διάνυσμα μετατοπίσεων, είναι ίσο με το άθροισμα των ολοκληρωμάτων φόρτισης. Το κάθε ολοκλήρωμα ακαμψίας αποδίδει ένα μητρώο ακαμψίας κάθε στοιχείου, που αθροίζονται για να παραγάγουν το μητρώο ακαμψίας του συστήματος, και το άθροισμα των ολοκληρωμάτων των φορτίων παράγουν το εφαρμοσμένο διάνυσμα φόρτισης με αποτέλεσμα την σχέση (5.1). Στην πράξη, οι κανόνες ολοκλήρωσης εφαρμόζονται στα στοιχεία, τα φορτία εμφανίζονται στο διάνυσμα $\{f\}$, και οι κομβικοί βαθμοί ελευθερίας εμφανίζονται στο διάνυσμα $\{f\}$.

Οι μέθοδοι επίλυσης των εξισώσεων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων είναι άφθονες. Στην περίπτωση του γραμμικής στατικής εξίσωσης, η αντιστροφή του $[K]$ είναι υπολογιστικά δαπανηρή και αριθμητικά ασταθής. Μια καλύτερη τεχνική είναι η απαλοιφή Cholesky, μια μορφή της τεχνικής Gauss, και μια δευτερεύουσα παραλλαγή της απαλοιφής LDU.

Η δυναμική ανάλυση για πάρα πολλούς αναλυτές σημαίνει ανάλυση ιδιοσυχνοτήτων. Η γνώση των φυσικών ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών μιας κατασκευής μπορεί να είναι αρκετή στην περίπτωση μιας απλής δόνησης. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται για να ερευνήσει τις επιδράσεις της μάζας, ακαμψίας και απόσβεσης. Όταν ερευνάται ένα μελλοντικό προϊόν, ή ένα υπάρχον σχεδιασμένο υλικό με πολλαπλούς τρόπους διέγερσης, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η προσομοίωση μιας εξαναγκασμένης ταλάντωσης ώστε να εφαρμόσει την προσδοκούμετα μεταφορά ή την συχνότητα για να υπολογίσει τη μετατόπιση και ακόμη και τη δυναμική ενέργεια σε κάθε βήμα.

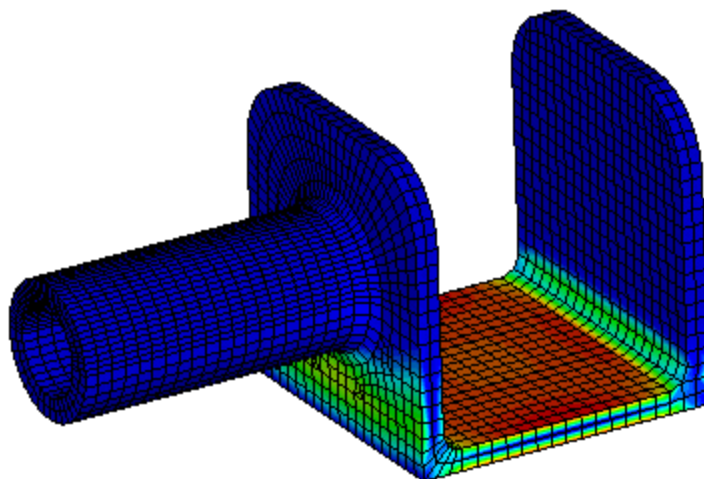
3.3.3 Μετεπεξεργασία

Αφότου έχει προετοιμαστεί ένα πρότυπο πεπερασμένων στοιχείων και έχει ελεγχθεί, αφότου έχουν εφαρμοστεί οι φορτίσεις και οι οριακές συνθήκες, και το πρόβλημα έχει επιλυθεί, το επόμενο βήμα είναι να ερευνηθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Αυτή η δραστηριότητα είναι γνωστή ως φάση μετεπεξεργασία της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μετεπεξεργασία αρχίζει με έναν λεπτομερή έλεγχο για τα προβλήματα που μπορεί να είχαν εμφανιστεί κατά τη διάρκεια της λύσης. Τα περισσότερα προγράμματα επίλυσης (solvers) παρέχουν ένα αρχείο το γνωστό log file, στο οποίο πρέπει να αναζητηθούν προειδοποιήσεις ή λάθη, και το οποίο θα παράσχει επίσης ένα ποσοτικό μέτρο για το πόσο σωστά

έγιναν οι διαδικασίες κατά τη διάρκεια της λύσης. Έπειτα, τα φορτία αντίδρασης στους περιορισμένους κόμβους πρέπει να αθροιστούν και να εξεταστούν ως "έλεγχος λογικότητας". Τα φορτία αντίδρασης που δεν ισορροπούν την συνισταμένη των εφαρμοσμένων φορτίων για μια γραμμική στατική ανάλυση πρέπει να δημιουργήσουν αμφιβολία για την ισχύ άλλων αποτελεσμάτων.

Μόλις ελεγχθεί η λύση ώστε να εξαλειφθούν τα αριθμητικά προβλήματα, μπορούν πλέον να εξεταστούν οι ποσότητες που παρέχουν ενδιαφέρον. Υπάρχουν διαθέσιμες πολλές επιλογές απεικόνισης, η επιλογή των οποίων εξαρτάται από τη μαθηματική μορφή της ποσότητας καθώς επίσης και φυσικής έννοιάς της. Παραδείγματος χάριν, η μετατόπιση του κόμβου ενός στερεού γραμμικού παραλληλεπιπέδου στοιχείου είναι ένα χωρικό διάνυσμα 3-συνιστωσών, και η ολική μετατόπιση του προτύπου απεικονίζεται συχνά με την ταυτόχρονη επίδειξη του παραμορφωμένου προτύπου πάνω στο αρχικό πρότυπο. Ένα παράδειγμα απεικόνισης των αποτελεσμάτων μιας ανάλυσης, φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Οι δυναμικές ικανότητες απεικόνισης και οι ικανότητες απεικόνισης με κίνηση βοηθούν πολύ στην κατανόηση του σχεδίου παραμόρφωσης. Τα κύρια διανύσματα τάσεων μπορούν να απεικονιστούν ως χρωματικά κωδικοποιημένα βέλη, απεικονίζοντας τόσο την κατεύθυνση όσο και το μέγεθος. Το μέγεθος της κύριων τάσεων ή το μέγεθος μιας τάσεως αστοχίας, όπως η τάση von Mises, μπορεί να απεικονιστεί στο πρότυπο ως χρωματικές ζώνες. Όταν αυτός ο τύπος επίδειξης αντιμετωπίζεται ως τρισδιάστατο αντικείμενο που υποβάλλεται σε πηγές φωτός, η προκύπτουσα εικόνα είναι γνωστή ως σκιασμένη απεικόνιση τάσεων. Το μέγεθος μετατοπίσεων μπορεί επίσης να απεικονιστεί από τις χρωματικές ζώνες, αλλά αυτό ενδεχομένως να οδηγήσει στην παρερμηνεία του ως απεικόνιση τάσεων.



Σχήμα 3.4: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία

Ένας τομέας της μετεπεξεργασίας που κερδίζει γρήγορα έδαφος είναι αυτός της προσαρμοστικής ανακατανομής του πλέγματος. Οι κανόνες λάθους όπως η ενεργειακή πυκνότητα παραμόρφωσης χρησιμοποιούνται ώστε να ανακατανείμουν το πλέγμα του προτύπου, τοποθετώντας ένα πυκνότερο πλέγμα στις περιοχές που χρειάζονται τη βελτίωση και ένα πιο

αραιό πλέγμα στους τομείς όπου δεν χρειάζεται. Η προσαρμοστικότητα απαιτεί μια συνειρμική σύνδεση μεταξύ του προτύπου και της γεωμετρίας CAD, και λειτουργεί καλύτερα εάν οι οριακές συνθήκες μπορούν να εφαρμοστούν άμεσα στη γεωμετρία.

Η βελτιστοποίηση είναι ένας άλλος τομέας ο οποίος απολαμβάνει την πρόσφατη πρόοδο. Με βάση τις τιμές των διάφορων αποτελεσμάτων, το πρότυπο τροποποιείται αυτόματα σε μία προσπάθεια να ικανοποιηθούν ορισμένα κριτήρια απόδοσης και επιλύεται πάλι. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιείται κάποιο κριτήριο σύγκλισης. Η βελτιστοποίηση μορφής είναι πιο σύνθετη, με τα όρια της γεωμετρίας του προτύπου να τροποποιούνται. Αυτό επιτυγχάνεται καλύτερα με τη χρησιμοποίηση των οδηγών διαστάσεων ως παραμέτρους βελτιστοποίησης, αλλά η ποιότητα πλέγματος σε κάθε επανάληψη μπορεί να μην είναι η ενδεικνυόμενη.

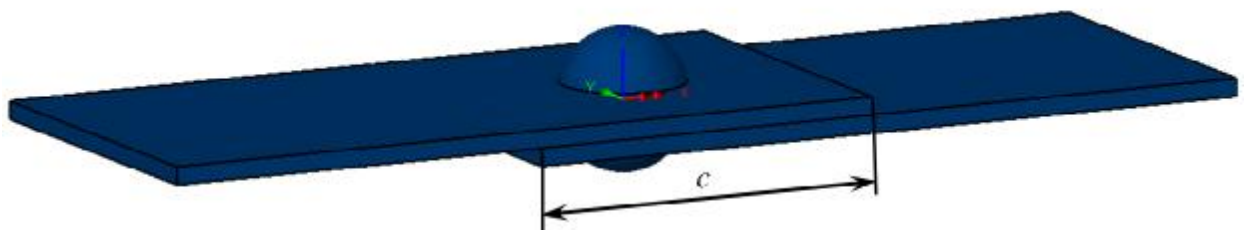
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια σχετικά πρόσφατη μέθοδος η οποία στις μέρες μας έχει εξελιχθεί αρκετά, ειδικά για τη δομική και θερμική ανάλυση. Οι δαπάνες για την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής στις καθημερινές μελέτες των εταιριών έχουν μειωθεί, ενώ οι ικανότητες των προγραμμάτων αυτών επεκτείνονται συνεχώς. Η μέθοδος δίνει τη δυνατότητα παραγωγής προϊόντων υψηλότερης ποιότητας σε μικρότερο χρονικό διάστημα και με μικρότερη πιθανότητα αστοχίας.

3.4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΩΣΕΩΝ

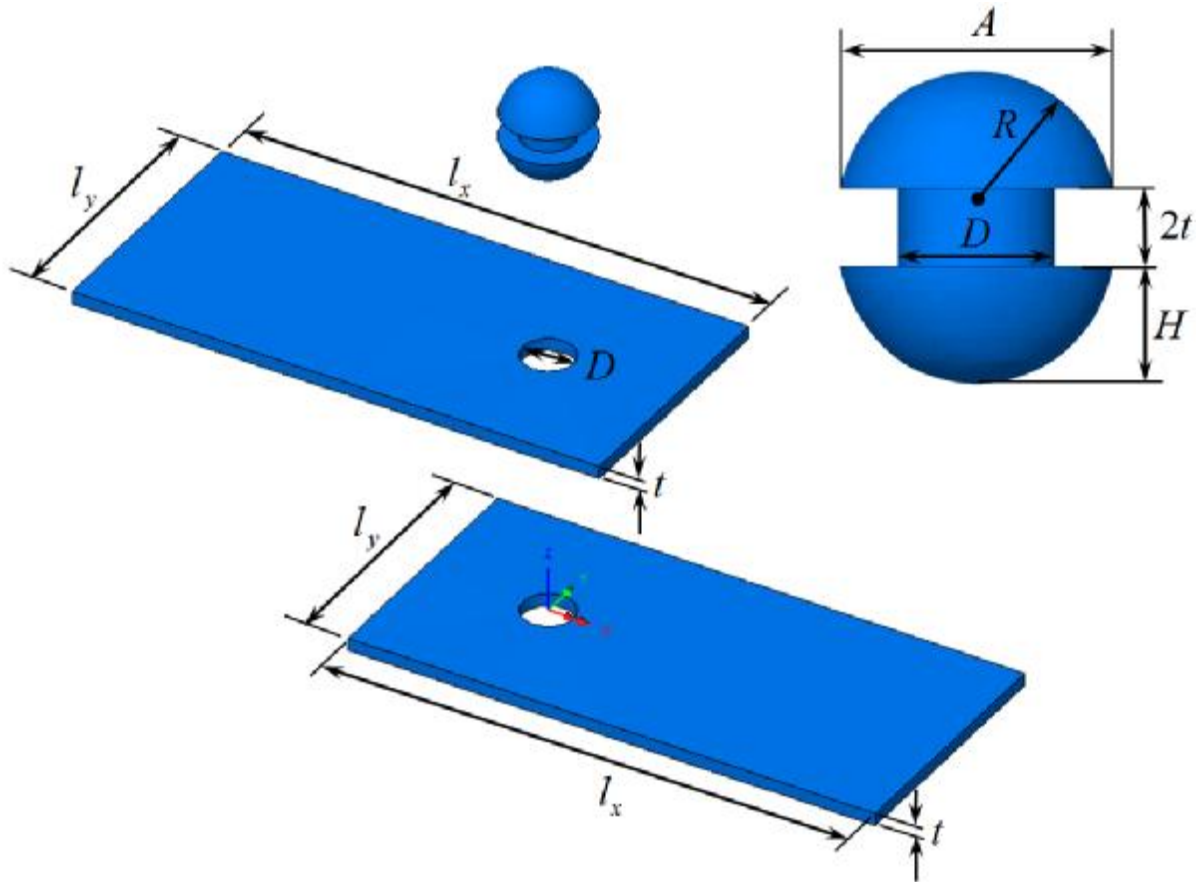
Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζεται η μοντελοποίηση των εξεταζόμενων ηλώσεων με τη βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Για την στατική ανάλυση των ηλώσεων χρησιμοποιήθηκε το εμπορικό λογισμικό πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Fea Lusas [7].

3.4.1 Γεωμετρία

Η γενική γεωμετρία του προβλήματος ήλωσης που αντιμετωπίζεται στην παρούσα πτυχιακή απεικονίζεται στο Σχήμα 3.5. Ενώ περισσότερες διαστασιολογικές λεπτομέρειες απεικονίζονται στο Σχήμα 3.6.



Σχήμα 3.5: Γενική γεωμετρία του προς μελέτη συστήματος ελασμάτων - ήλων



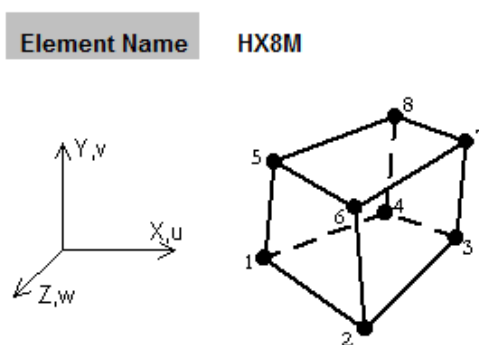
Σχήμα 3.6: Δικαιολόγηση στοιχείων του προς μελέτη συστήματος

Το πεδίο ορισμού του προβλήματος, το οποίο ορίζεται στο καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων x, y, z των Σχημάτων 3.5 και 3.6, αποτελείται από ένα άνω έλασμα ένα κάτω έλασμα και έναν ή δύο ήλους για την σύνδεση των δύο ελασμάτων. Η διεπιφάνεια μεταξύ των ελασμάτων θεωρείται ότι βρίσκεται στο επίπεδο x, y . Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης η διάμετρος κορμού του ήλου λαμβάνεται ίση με $D=10\text{mm}$. Επομένως σύμφωνα με την τυποποίηση, η ακτίνα κεφαλής ήλου που χρησιμοποιείται είναι $R=0.855D$, το ύψος κεφαλής $H=0.750D$ ενώ η διάμετρος της $A=1.750D$. Το συνολικό μήκος των ελασμάτων κατά τον άξονα x και y λαμβάνεται ίσο με $l_x=125\text{mm}$ και $l_y=50\text{mm}$, αντίστοιχα. Το μήκος επαφής των ελασμάτων κατά τον άξονα x είναι $c=50\text{mm}$. Τέλος το πάχος των ελασμάτων θεωρείται ίσο με $t=2.5\text{mm}$. Για την περίπτωση μονής ήλωσης η θέση του κέντρου της απαιτούμενης οπής ελασμάτων στο οριζόντιο επίπεδο επιλέγεται στο σημείο $(x, y)=(0,0)$. Για την περίπτωση της διπλής ήλωσης οι θέσεις των δύο κέντρων των απαιτούμενων οπών επιλέγονται στα σημεία $(x, y)=(0,-12.5\text{mm})$ και $(x, y)=(0,+12.5\text{mm})$.

3.4.2 Διακριτοποίηση

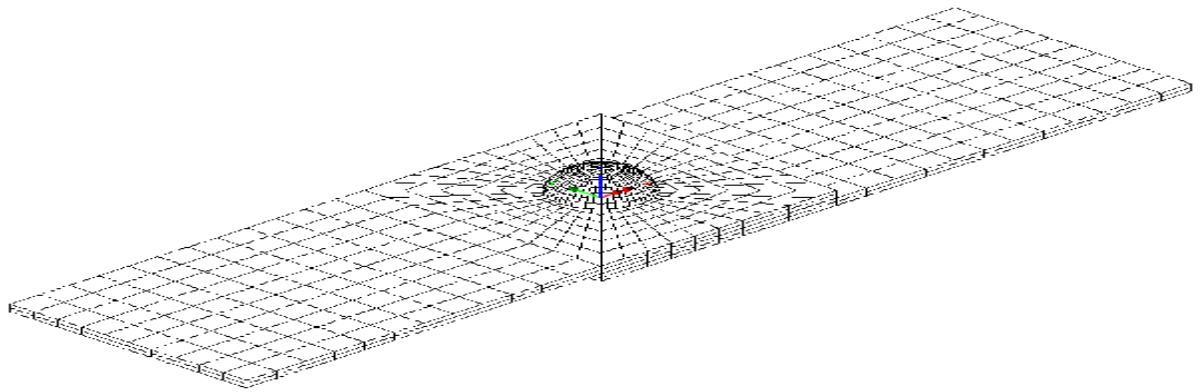
Στο αυτή τη παράγραφο παρατίθενται κάποιες πληροφορίες σχετικά με το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιήθηκε για κάθε μοντέλο.

Το πεδίου ορισμού του προβλήματος θα πρέπει να χωρισθεί σε ένα πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων. Ο όγκος των ελασμάτων και των ήλων διακριτοποιείται με τρισδιάστατα, γραμμικά, οκτάκομβα πεπερασμένα στοιχεία όγκου [7]. Τα στοιχεία αυτά διαθέτουν 3 βαθμούς ελευθερίας ανά κόμβο (3 μετατοπίσεις) και η μορφή τους απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7.

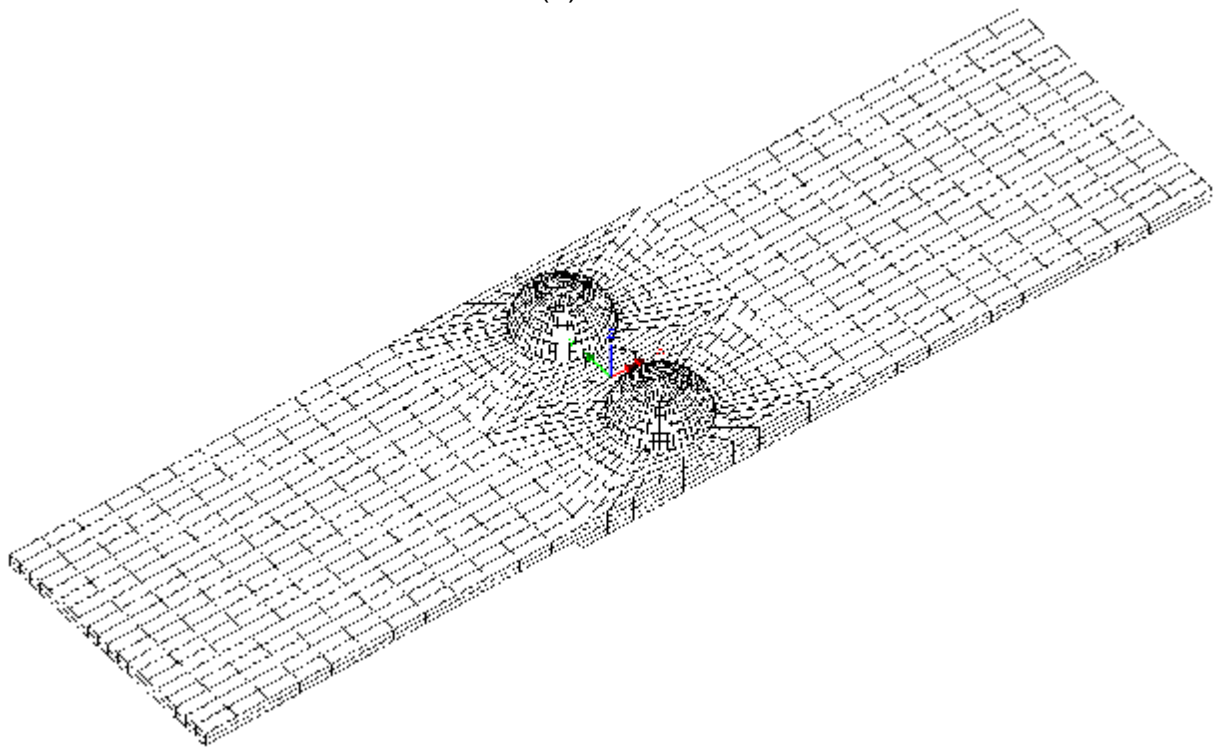


Σχήμα 3.7: Υιοθετούμενα πεπερασμένα στοιχεία όγκου

Τα Σχήματα 3.8α και β παρουσιάζουν την διακριτοποίηση των μοντέλων για τη περίπτωση μονής και διπλής ήλωσης αντίστοιχα.



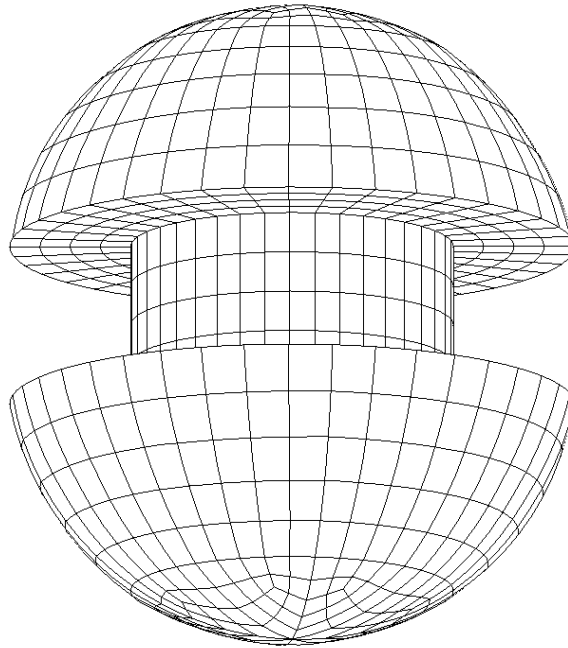
(α)



(β)

Σχήμα 3.8: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων για (α) μονή και (β) διπλή ήλωση

Το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων έκαστου ήλου φαίνεται καθαρότερα στο Σχήμα 3.9.



Σχήμα 3.9: Πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων ήλων

3.4.3 Υλικά

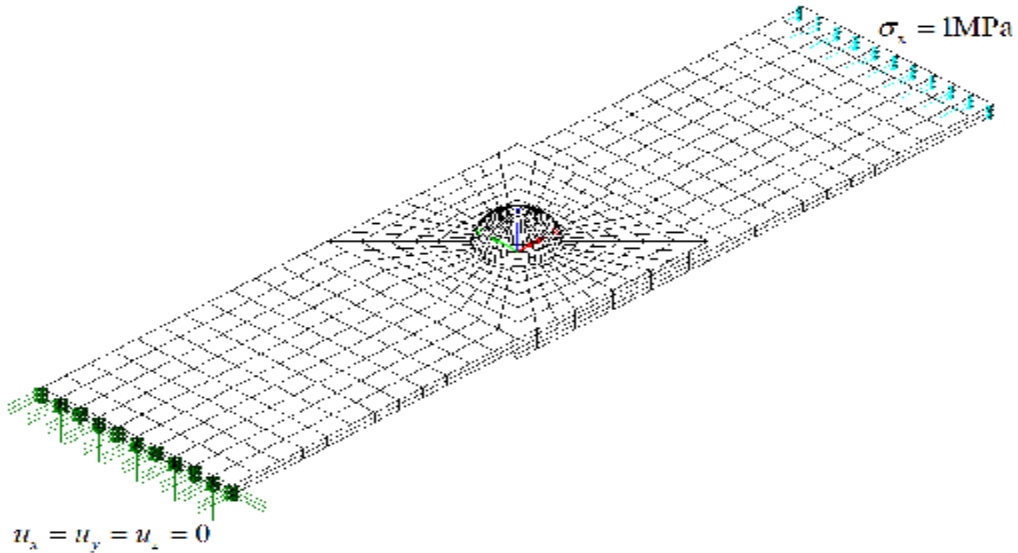
Το υλικό των συνδεδεμένων ελασμάτων και των ήλων πρέπει να είναι απαραίτητα το ίδιο. Σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει κίνδυνος να δημιουργηθεί σκουριά και φθορά των μετάλλων από την εμφάνιση διμεταλλικών τάσεων στα σημεία επαφής ήλου και ελασμάτων. Οι ήλοι κατασκευάζονται συνήθως από χάλυβα St 34 και St 38, με αντοχή 34 έως 41 kP/mm² και σε εξαιρετικές περιπτώσεις St 44, με αντοχή μεγαλύτερη από 44 kP/mm². Επομένως το βασικό υλικό που χρησιμοποιήθηκε για όλα τα συνεργαζόμενα στοιχεία είναι χάλυβας St 34 με μέτρο ελαστικότητας $E = 210 \times 10^3 \text{ MPa}$ και λόγο Poisson $\nu = 0.3$. Επίσης ο συντελεστής τριβής για το εν λόγω υλικό λήφθηκε σύμφωνα και με τη βιβλιογραφία ίσος με $m = 0.5$. Μόνο η ελαστική απόκριση του συστήματος μελετήθηκε καθώς το μεγαλύτερο ενδιαφέρον έγκειται στη συγκέντρωση τάσεων που παρουσιάζεται μέχρι το όριο διαρροής. Από εκεί και ύστερα η αστοχία θεωρείται δεδομένη

3.4.4 Συνοριακές συνθήκες

Στο αριστερό άκρο του άνω ελάσματος ($x = -100 \text{ mm}$) εφαρμόζεται πάκτωση που σημαίνει ότι δεσμεύονται οι μετατοπίσεις και στις τρεις διευθύνσεις, δηλαδή επιβάλλεται η συνθήκη $u_x = u_y = u_z = 0$. Στο δεξί άκρο του κάτω ελάσματος εφαρμόζεται μία μικρή ελαστική εφελκυστική τάση ίση με $s_x = 1 \text{ MPa}$. Η τάση αυτή αντιστοιχεί σε μια επιβαλλόμενη δύναμη ίση με:

$$s_x = \frac{F}{A_0} \Rightarrow F = s_x A_0 = s_x l_y t = 1 \text{MPa} \times 50 \text{mm} \times 2.5 \text{mm} = 125 \text{N} \quad (3.3)$$

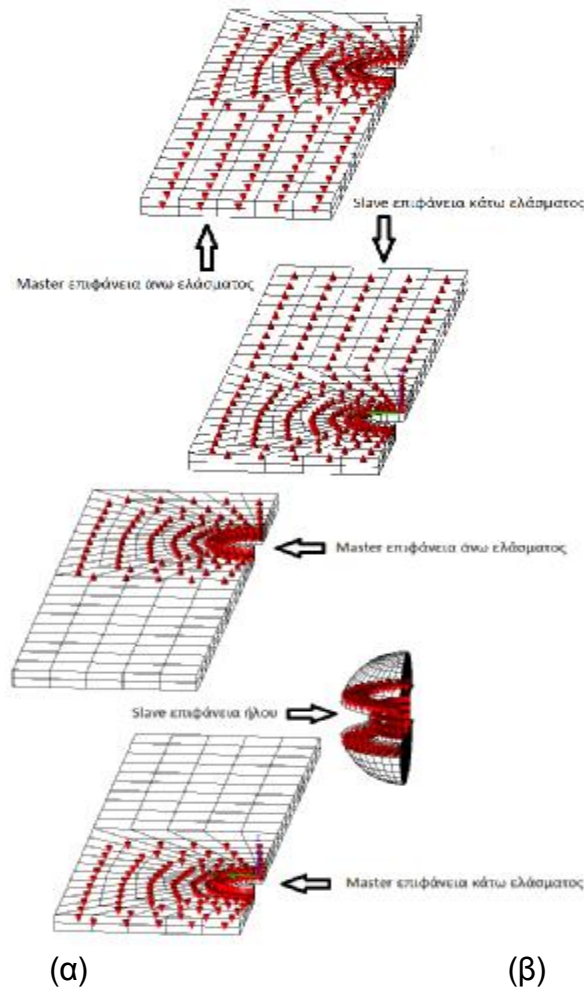
Οι επιβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες απεικονίζονται με σύμβολα-βέλη στο Σχήμα 3.10.



Σχήμα 3.10 : Επιβαλλόμενες συνοριακές συνθήκες

3.4.5 Επαφή

Στο πρόβλημα που αναλύεται στη παρούσα πτυχιακή εργασία υπάρχουν δύο περιπτώσεις επαφής. Η πρώτη επαφή υφίσταται μεταξύ των δύο ελασμάτων (Σχήμα 3.11α) ενώ η δεύτερη επαφή μεταξύ ήλου και ελασμάτων (Σχήμα 3.11β) . Για τη προσομοίωση και των δύο περιπτώσεων επαφής χρησιμοποιείται η επιλογή των slidelines που υποστηρίζει το Lusas. Έτσι λοιπόν ορίζονται δύο διαφορετικά ζεύγη slidelines. Έκαστο ζεύγος αποτελείται από την master επιφάνεια και την slave επιφάνεια. Εφόσον ολοκληρωθεί με τη σωστή παραμετροποίηση ο ορισμός των slidelines, τότε μεταξύ των master και slave επιφανειών είναι πιθανό να εμφανισθεί προσκόλληση ή και σχετική ολίσθηση ανάλογα με τη φόρτιση και τον συντελεστή τριβής. Σε κάθε περίπτωση απαγορεύεται η μεταξύ τους σχετική διείδυση.



Σχήμα 3.11: Ορισμός Master και Slave επιφανειών για την επαφή μεταξύ (α) άνω και κάτω ελάσματος και (β) ελασμάτων και ήλου

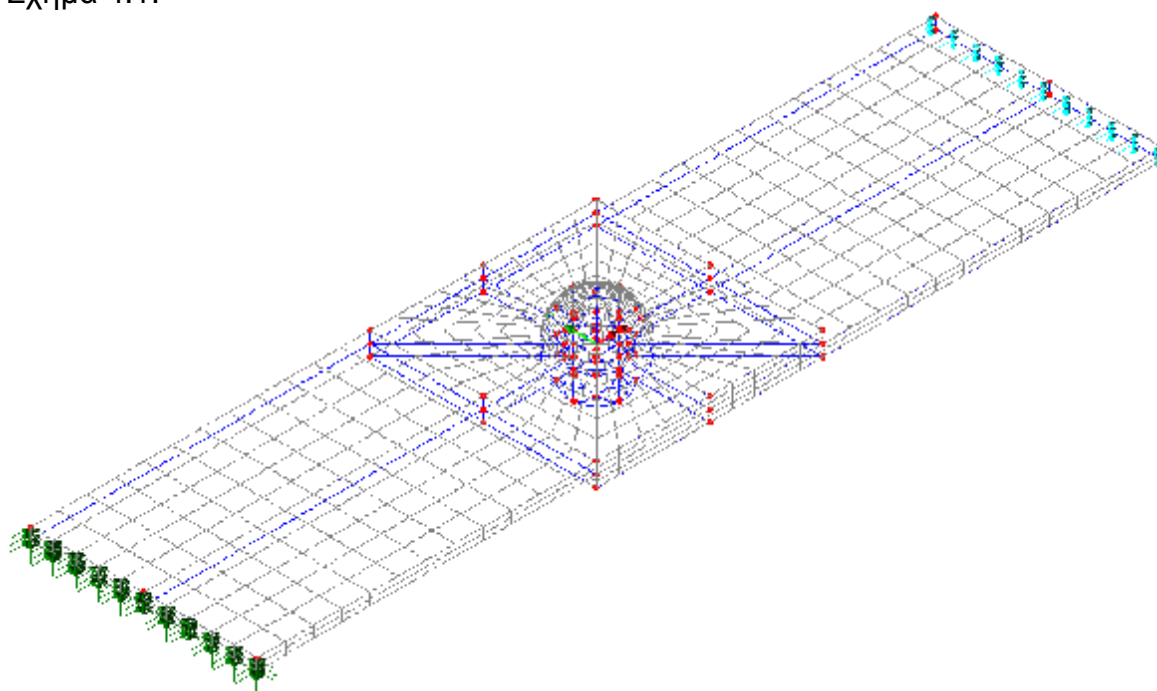
Να τονισθεί εδώ ότι επειδή το φαινόμενο της τριβής και εν γένει της επαφής είναι μη γραμμικό, για την επίλυση των εξισώσεων που προκύπτουν από τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιείται ο γνωστός επαναληπτικός αλγόριθμος Newton-Raphson. Η σύγκλιση της λύσης ελέγχεται κάθε φορά με τη βοήθεια ειδικών κριτηρίων και νόμων τον υπολογισμό των οποίων παρέχει αυτοματοποιημένα το πρόγραμμα.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μηχανική ελαστική συμπεριφορά των συστημάτων ελασμάτων-ήλων υπό την επίδραση στατικού εφελκυστικού φορτίου.

4.1 ΜΟΝΗ ΗΛΩΣΗ

Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων μονής ήλωσης απεικονίζεται στο Σχήμα 4.1.

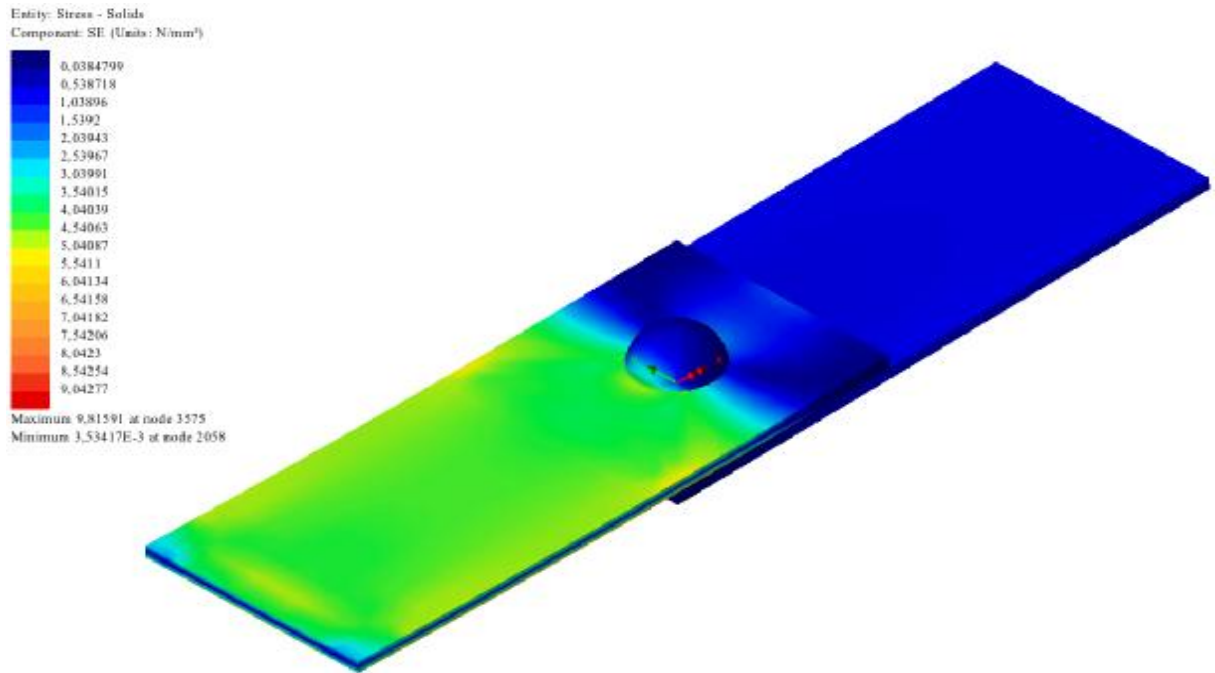


Σχήμα 4.1 : Μοντέλο μονής ήλωσης

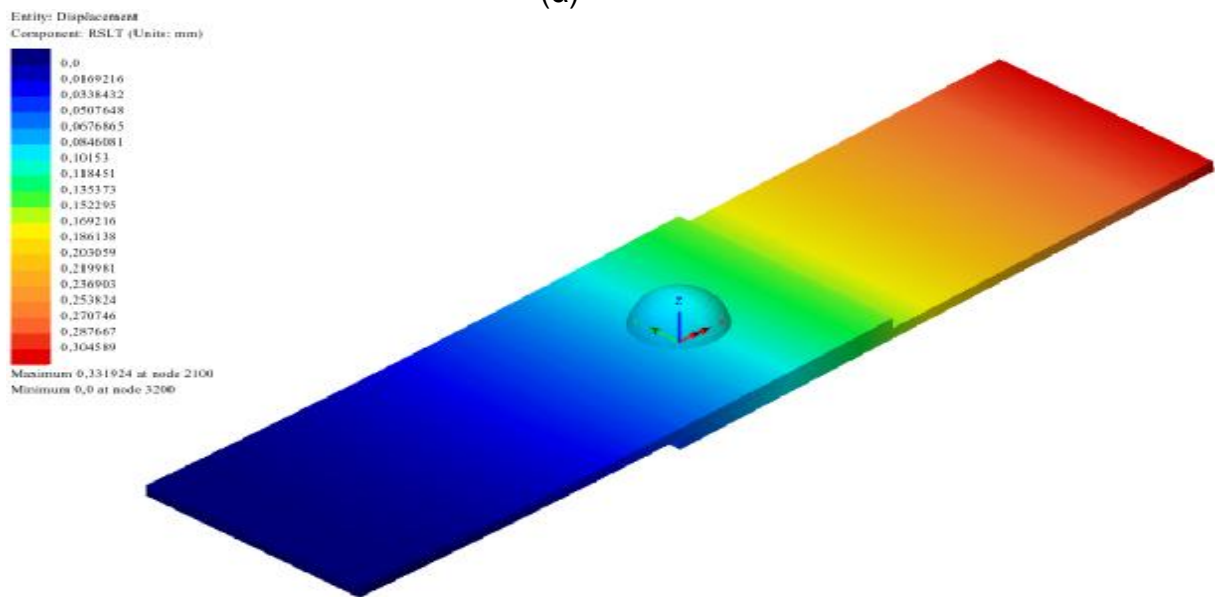
Τα φορτία θεωρήθηκαν μικρά σε μέτρο ώστε να μην προκύψουν φαινόμενα πλαστικότητας. Τα αποτελέσματα που αφορούν όλο το μοντέλο σε σχέση με την ισοδύναμη τάση von Mises (MPa) αλλά και το μέτρο τους συνισταμένου διανύσματος μετατόπισης (mm) παρουσιάζονται στα περιγράμματα του Σχήματος 4.2α και β, αντίστοιχα. Η ισοδύναμη τάση von Mises προκύπτει μέσω των ορθών τάσεων s_x, s_y, s_z και των διαμηθικών τάσεων t_{xy}, t_{yz}, t_{zx} και με τη βοήθεια της σχέσης:

$$s_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(s_x - s_y)^2 + (s_y - s_z)^2 + (s_z - s_x)^2 + 6(t_{xy}^2 + t_{yz}^2 + t_{zx}^2)]^{1/2} \quad (4.1)$$

Οι μετατοπίσεις των σωμάτων απεικονίζονται σε μεγέθυνση επί 20 για καλύτερη κατανόηση των παραμορφώσεων.



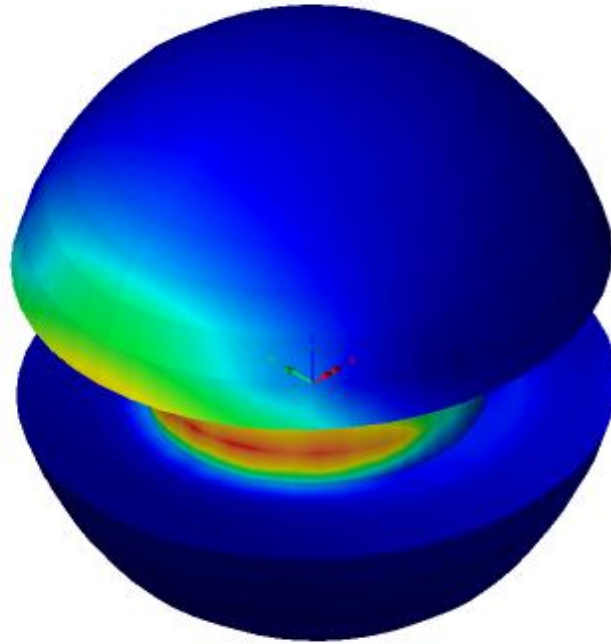
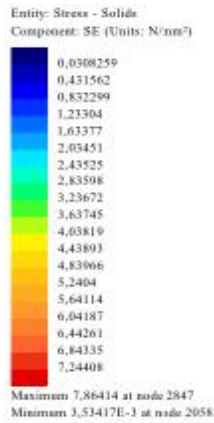
(α)



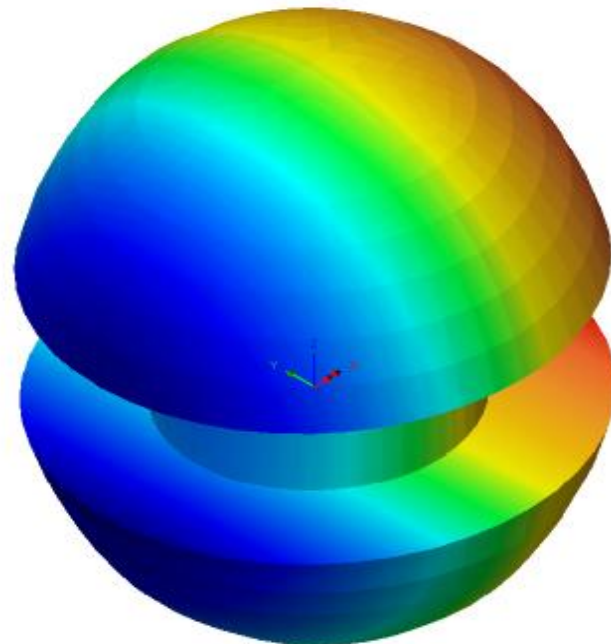
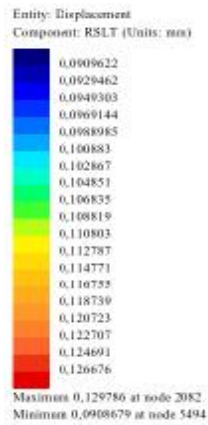
(β)

Σχήμα 4.2: Περιγράμματα (α) ισοδύναμης τάσης και (β) συνισταμένης μετατόπισης για όλο το σύστημα

Τα αποτελέσματα που αφορούν τον ήλο σε σχέση με την ισοδύναμη τάση von Mises (MPa) αλλά και το μέτρο του συνισταμένου διανύσματος μετατόπισης (mm) παρουσιάζονται στα περιγράμματα του Σχήματος 4.3α και β, αντίστοιχα.



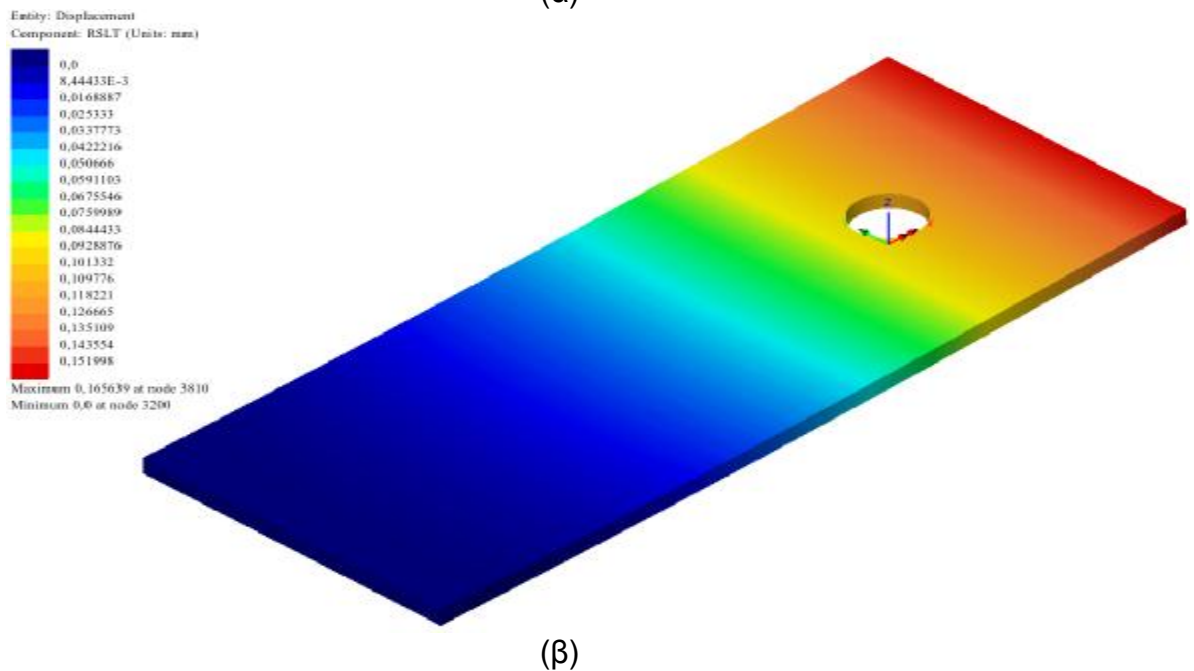
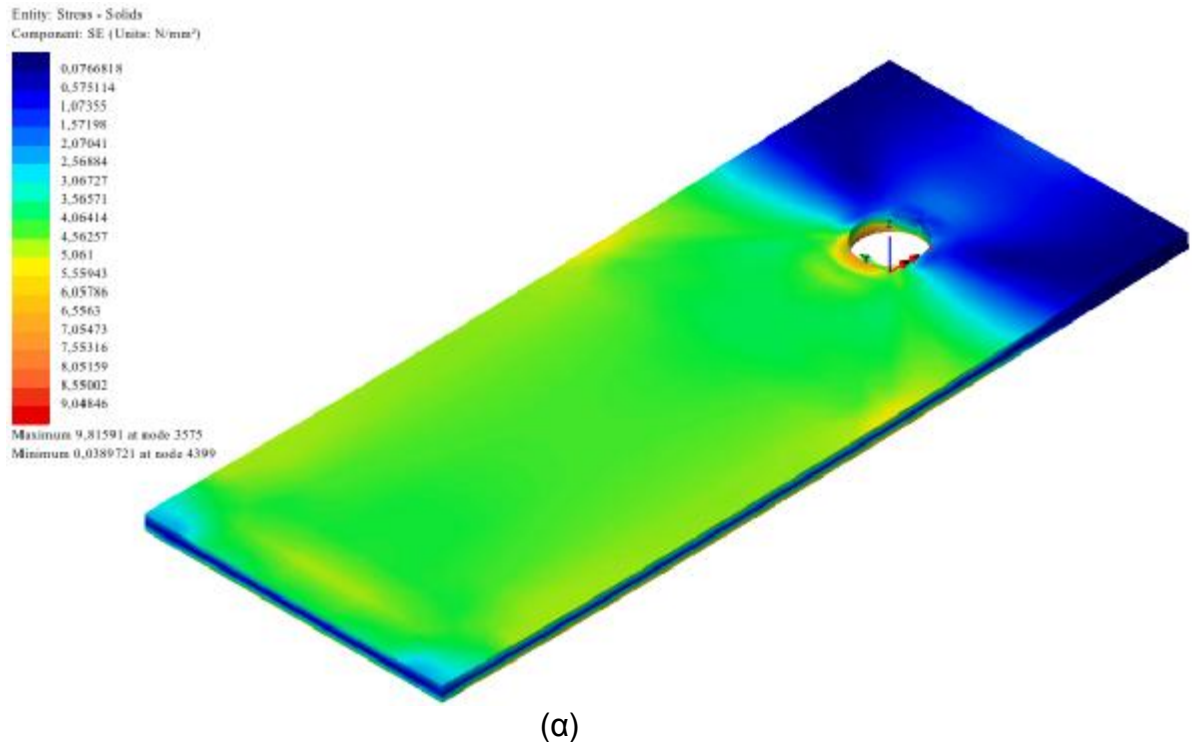
(α)



(β)

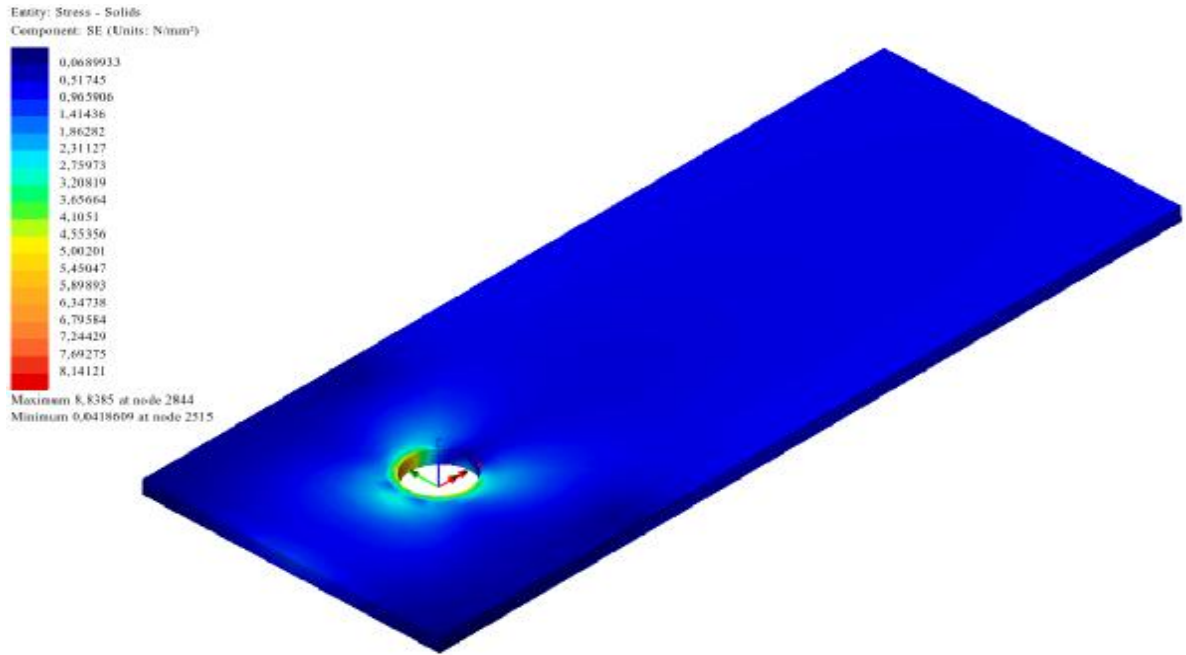
Σχήμα 4.3: Περιγράμματα (α) ισοδύναμης τάσης και (β) συνισταμένης μετατόπισης για τον ήλο

Τα αποτελέσματα που αφορούν το άνω έλασμα σε σχέση με την ισοδύναμη τάση von Mises (MPa) αλλά και το μέτρο του συνισταμένου διανύσματος μετατόπισης (mm) παρουσιάζονται στα περιγράμματα του Σχήματος 4.4α και β, αντίστοιχα.

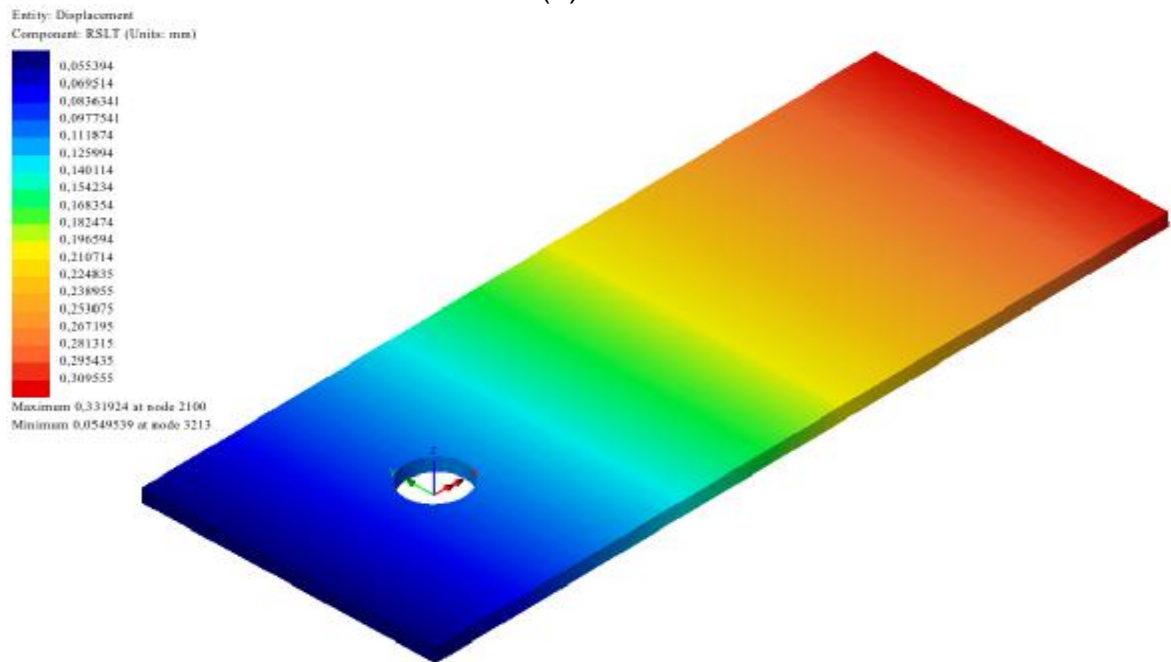


Σχήμα 4.4: Περιγράμματα (α) ισοδύναμης τάσης και (β) συνισταμένης μετατόπισης για το άνω έλασμα

Τα αποτελέσματα που αφορούν το κάτω έλασμα σε σχέση με την ισοδύναμη τάση von Mises (MPa) αλλά και το μέτρο του συνισταμένου διανύσματος μετατόπισης (mm) παρουσιάζονται στα περιγράμματα του Σχήματος 4.5α και β, αντίστοιχα.



(α)



(β)

Σχήμα 4.5: Περιγράμματα (α) ισοδύναμης τάσης και (β) συνισταμένης μετατόπισης για το κάτω έλασμα

Οι μέγιστες ισοδύναμες τάσεις εμφανίζονται στο άνω έλασμα, στην κάτω επιφάνεια του και πάνω στη περιφέρεια της οπής όπως ακριβώς φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Επιπρόσθετα, είναι προφανές από το Σχήμα 6.5β ότι οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται στο δεξί φορτιζόμενο άκρο του κάτω ελάσματος.



Σχήμα 4.6: Παρατηρούμενη μέγιστη τάσης von Mises σε όλο το σύστημα

Η μέγιστη ισοδύναμη τάση s_{\max}^{VM} στο εσωτερικό τους συστήματος προκύπτει με πολλαπλασιασμό της εξωτερική επιβαλλόμενη τάση $s_x = 1\text{MPa}$ με έναν συντελεστή συγκέντρωση τάσεως:

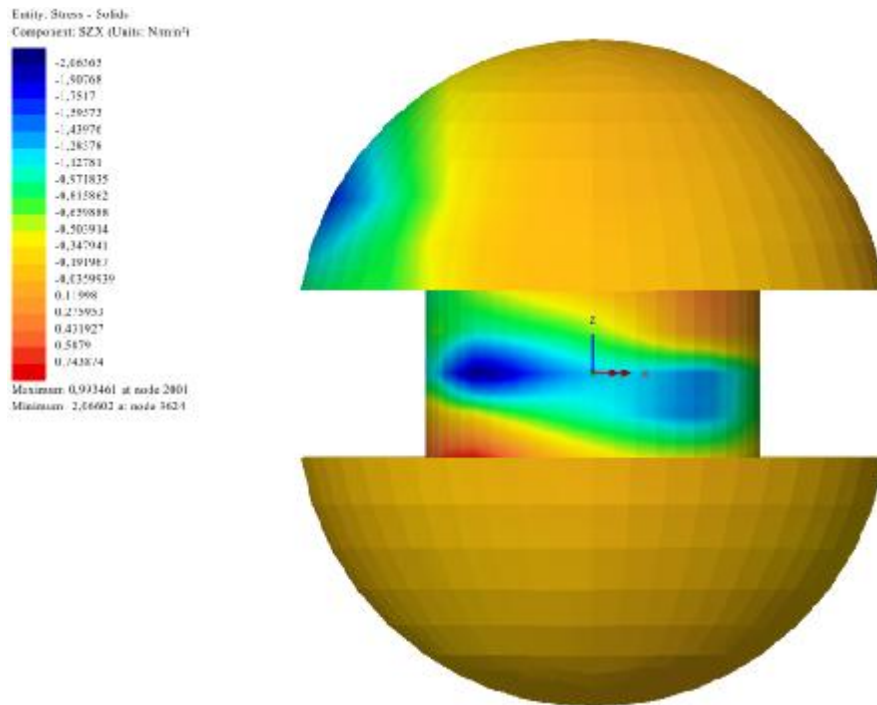
$$K = \frac{s_{\max}^{\text{VM}}}{s_x} \quad (6.1)$$

Για την συγκεκριμένη περίπτωση γεωμετρίας αυτός είναι ίσος με:

$$K = \frac{9.816\text{MPa}}{1\text{MPa}} = 9.816 \quad (6.2)$$

Ο μέγιστος συντελεστής παρουσιάζεται στο άνω έλασμα. Οι σχετικοί συντελεστές στον ήλο και στο κάτω έλασμα είναι 7.864 και 8.839, αντίστοιχα.

Το Σχήμα 4.7 παρουσιάζει το περίγραμμα των διαμηθικών τάσεων t_{zx} στον ήλο.



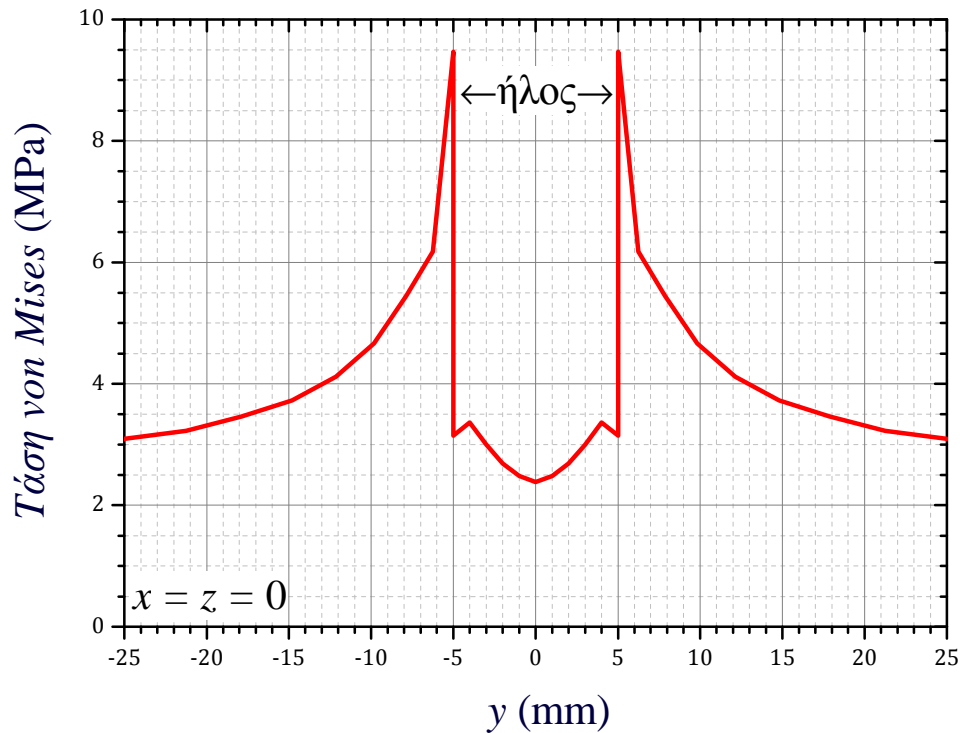
Σχήμα 4.7: Περίγραμμα διατμητικών τάσεων t_{zx} του ήλου

Η μέση διατμητική τάση σύμφωνα με τη θεωρία μηχανικής πρέπει να είναι:

$$t_{zx} = \frac{P}{A_0} = \frac{P}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{4P}{\pi D^2} = \frac{4 \times 125 \text{ N}}{\pi \times (10 \text{ mm})^2} = 1.592 \text{ MPa} \quad (6.3)$$

Πράγματι, από το παραπάνω περίγραμμα γίνεται φανερό ότι οι διατμητικές τάσεις t_{zx} στην περίμετρο του κορμού του ήλου για $z=0$ κυμαίνονται κατά απόλυτο τιμή μεταξύ από 1.12 έως 2.07 MPa.

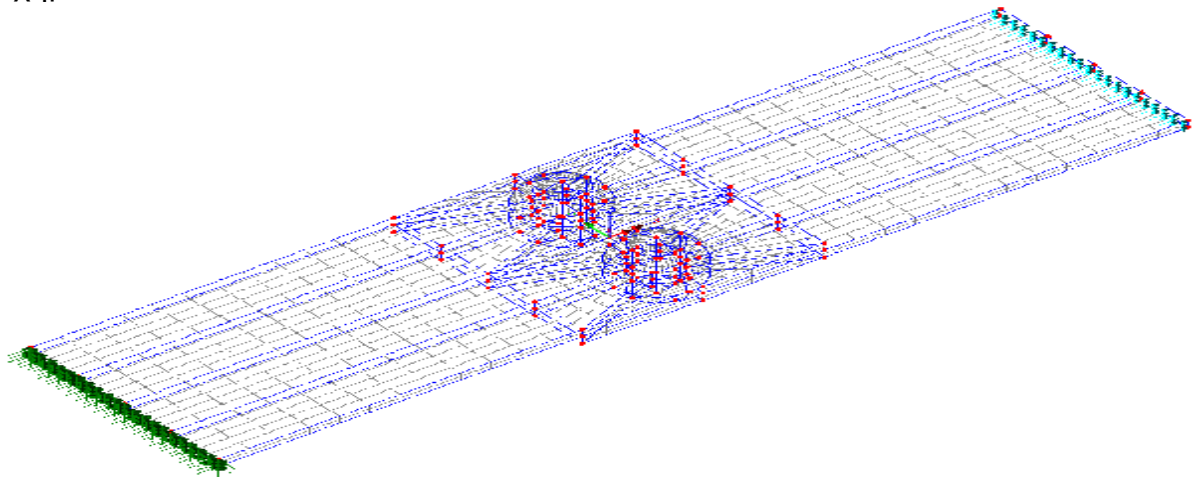
Το Σχήμα 4.8 απεικονίζει τη μεταβολή της ισοδύναμης τάσης von Mises σε σχέση με τη συντεταγμένη y κατά τη διεπιφάνεια των ελασμάτων πάνω στο επίπεδο xy . Γίνεται φανερή η συγκέντρωση τάσεων αλλά και η ασυνέχεια τους στα σημεία επαφής των ελασμάτων με τον ήλο.



Σχήμα 4.8: Ισοδύναμη τάση von Mises σε σχέση με την συντεταγμένη y για $x = z = 0$

4.2 ΔΙΠΛΗ ΗΛΩΣΗ

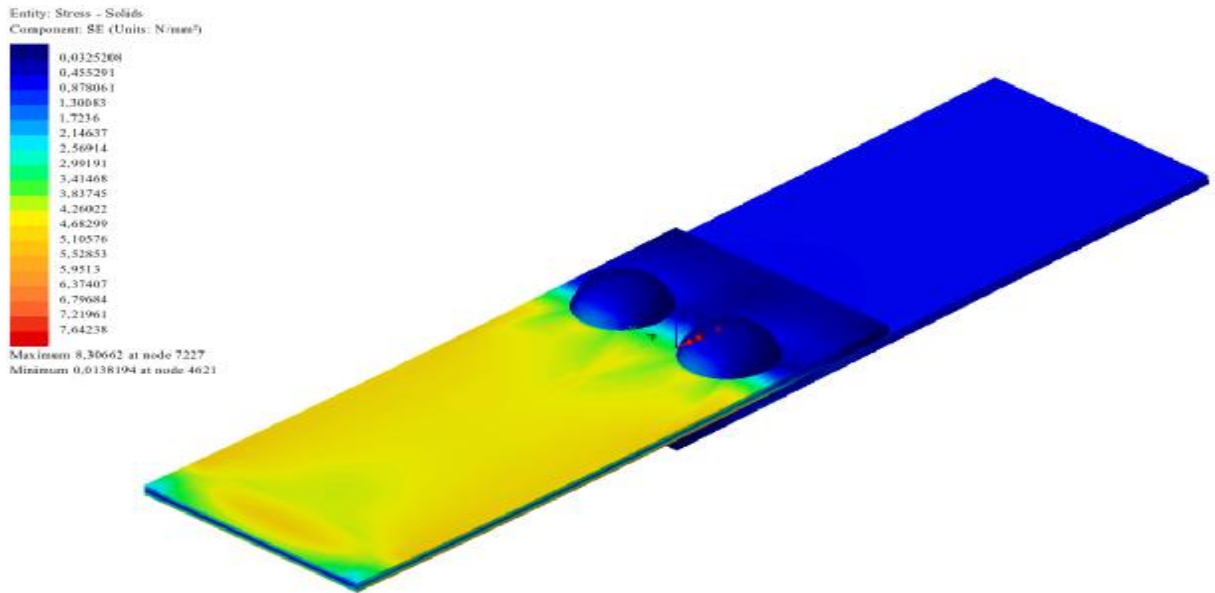
Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων διπλής ήλωσης απεικονίζεται στο Σχήμα 4.9.



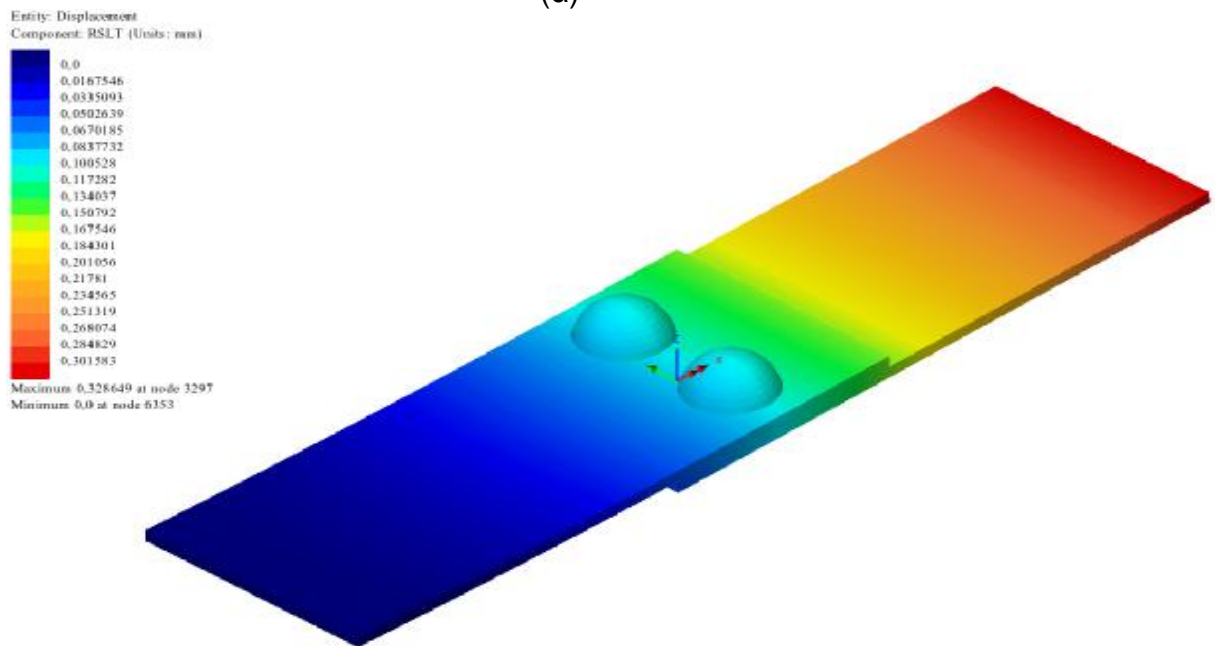
Σχήμα 4.9 : Μοντέλο διπλής ήλωσης

Τα αποτελέσματα που αφορούν όλο το μοντέλο σε σχέση με την ισοδύναμη τάση von Mises (MPa) αλλά και το μέτρο του συνισταμένου διανύσματος μετατόπισης (mm) παρουσιάζονται στα περιγράμματα του Σχήματος 4.10α και β, αντίστοιχα. Οι μετατοπίσεις των σωμάτων και εδώ

απεικονίζονται σε μεγέθυνση επί 20 για καλύτερη κατανόηση των παραμορφώσεων.



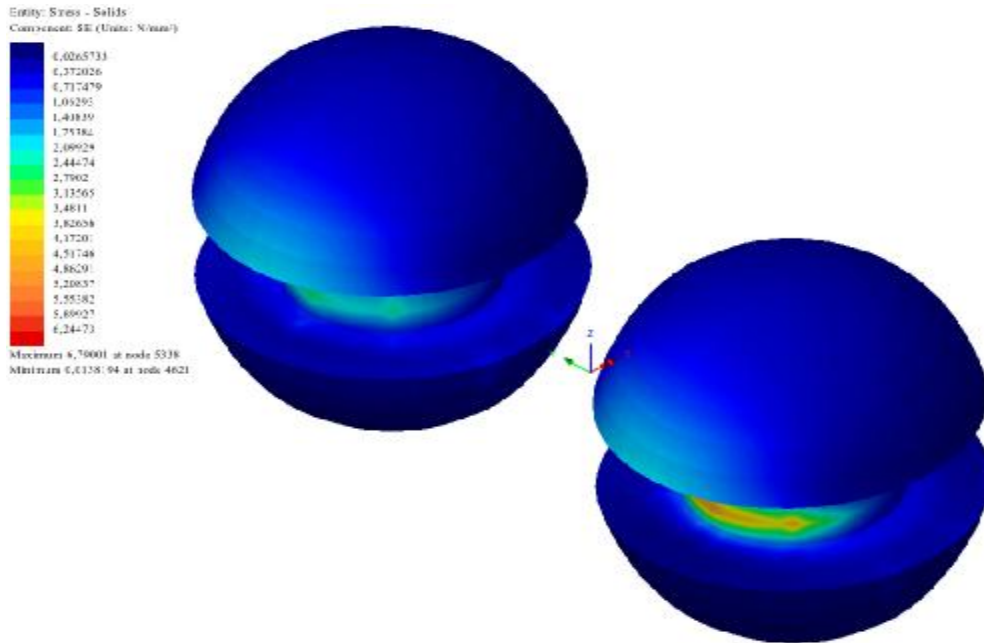
(α)



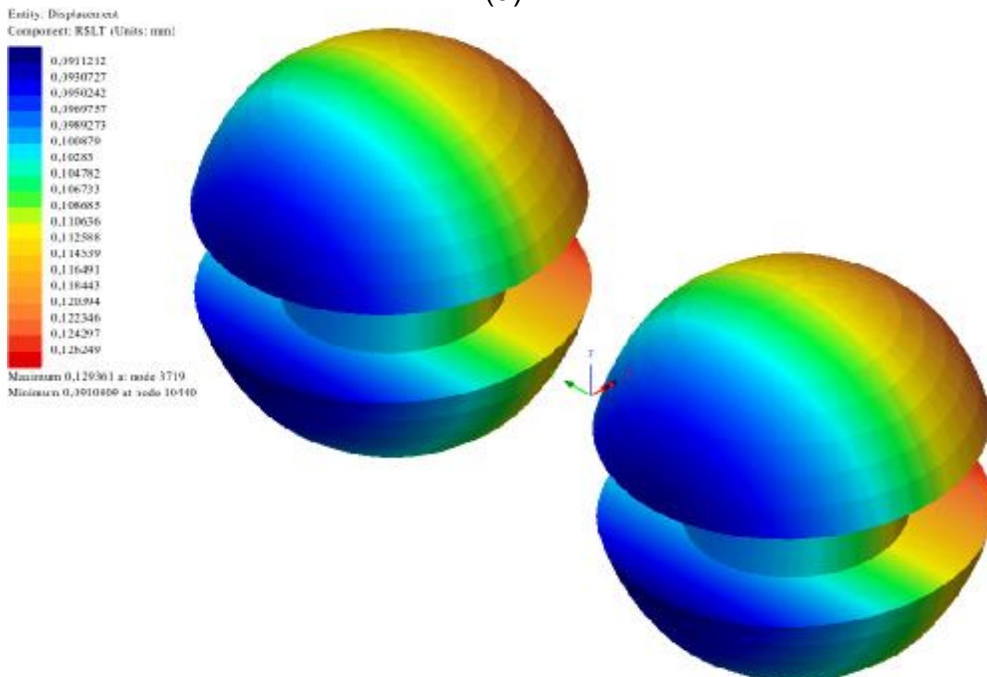
(β)

Σχήμα 4.10: Περιγράμματα (α) ισοδύναμης τάσης και (β) συνισταμένης μετατόπισης για όλο το σύστημα

Τα αποτελέσματα που αφορούν τους ήλους σε σχέση με την ισοδύναμη τάση von Mises (MPa) αλλά και το μέτρο του συνισταμένου διανύσματος μετατόπισης (mm) παρουσιάζονται στα περιγράμματα του Σχήματος 4.11α και β, αντίστοιχα.



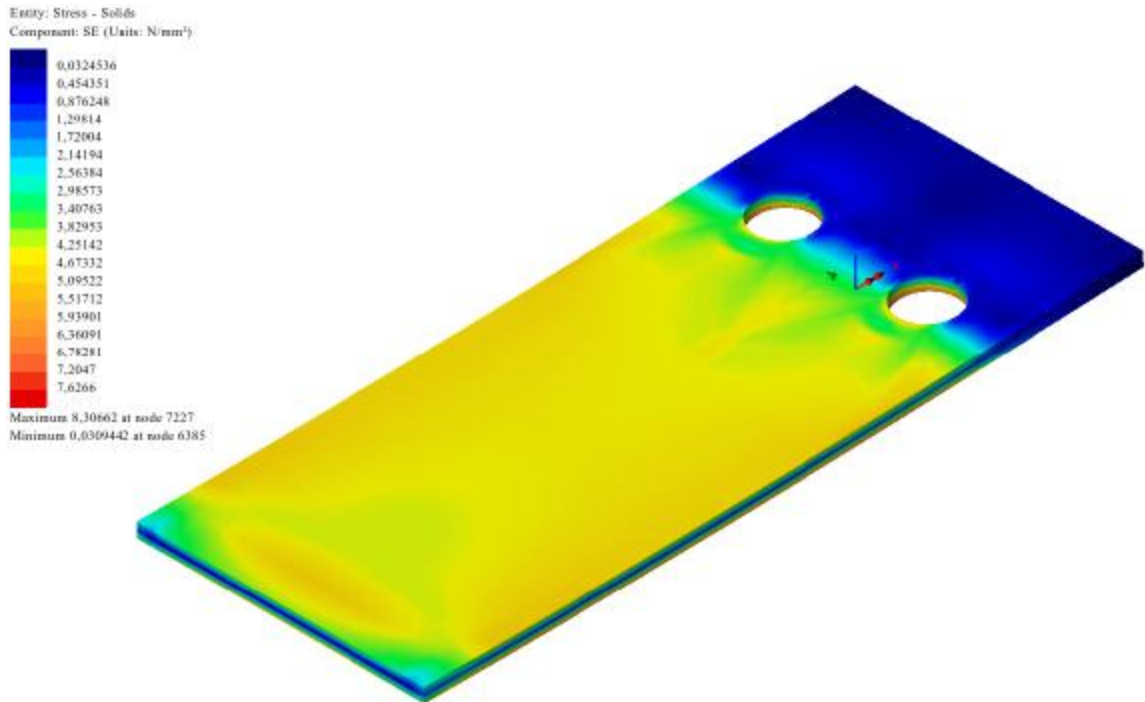
(α)



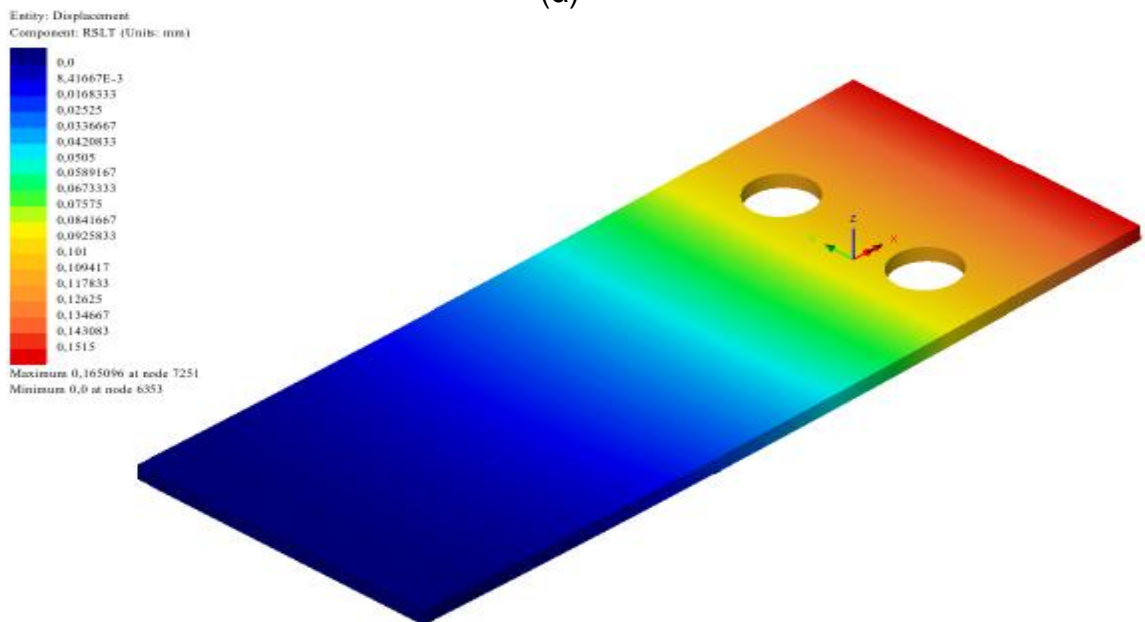
(β)

Σχήμα 4.11: Περιγράμματα (α) ισοδύναμης τάσης και (β) συνισταμένης μετατόπισης για τους ήλους

Τα αποτελέσματα που αφορούν το άνω έλασμα σε σχέση με την ισοδύναμη τάση von Mises (MPa) αλλά και το μέτρο του συνισταμένου διανύσματος μετατόπισης (mm) παρουσιάζονται στα περιγράμματα του Σχήματος 4.12α και β, αντίστοιχα.



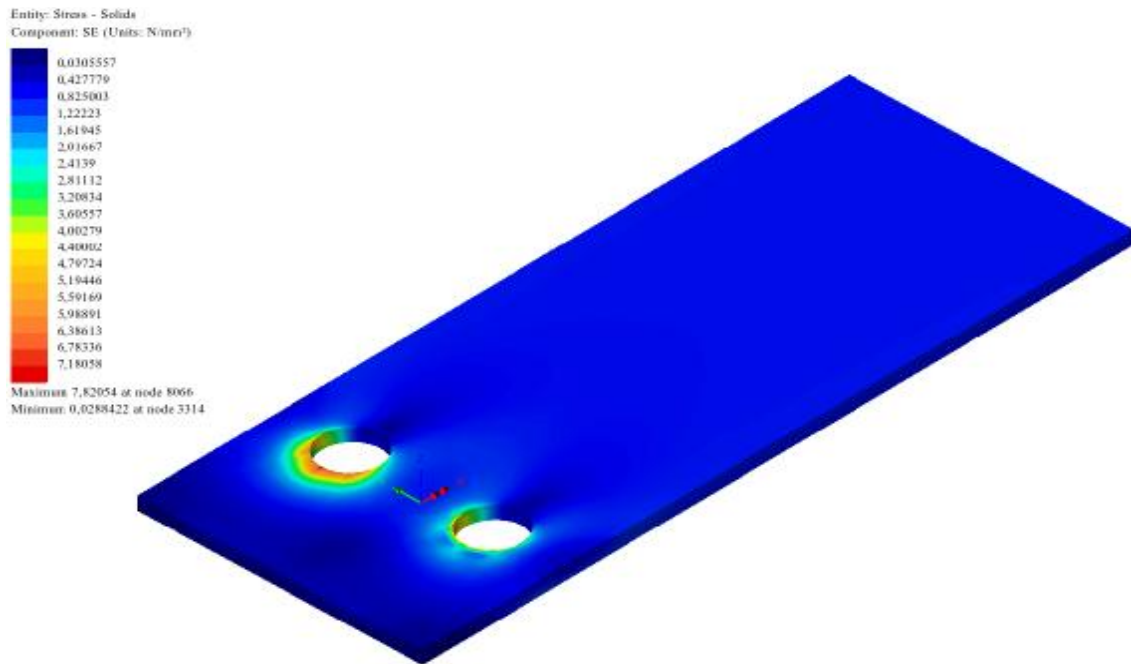
(α)



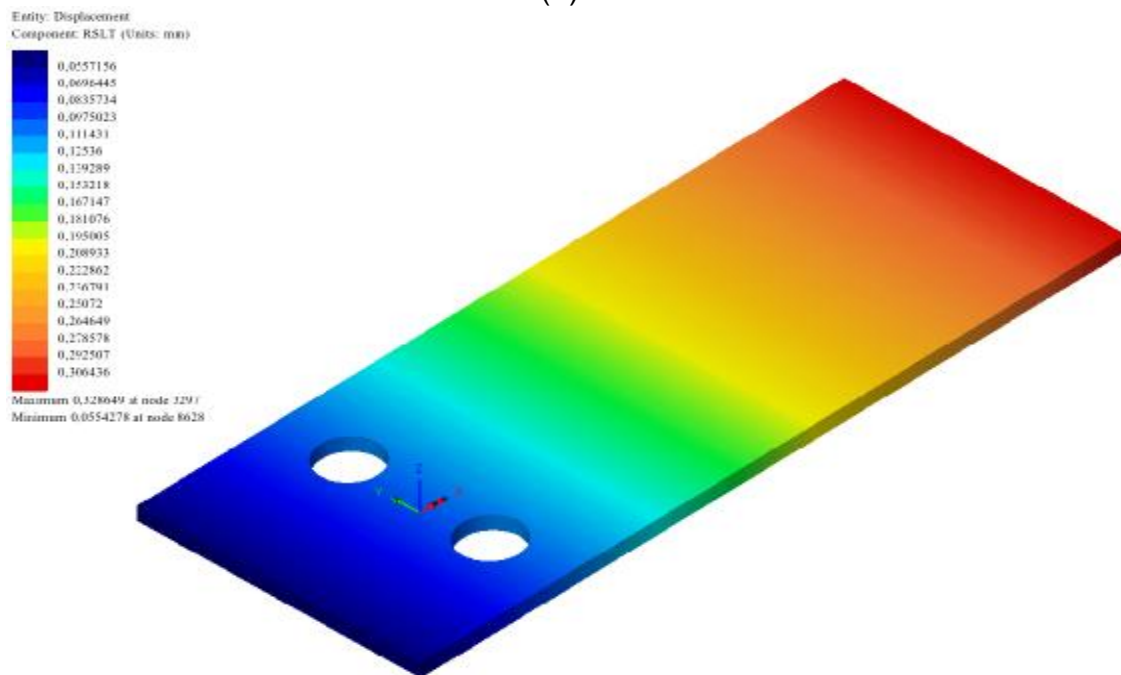
(β)

Σχήμα 4.12: Περιγράμματα (α) ισοδύναμης τάσης και (β) συνισταμένης μετατόπισης για το άνω έλασμα

Τα αποτελέσματα που αφορούν το κάτω έλασμα σε σχέση με την ισοδύναμη τάση von Mises (MPa) αλλά και το μέτρο του συνισταμένου διανύσματος μετατόπισης (mm) παρουσιάζονται στα περιγράμματα του Σχήματος 4.13α και β, αντίστοιχα.



(α)



(β)

Σχήμα 4.13: Περιγράμματα (α) ισοδύναμης τάσης και (β) συνισταμένης μετατόπισης για το κάτω έλασμα

Και σε αυτή την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται δύο ήλοι, οι μέγιστες ισοδύναμες τάσεις εμφανίζονται στο άνω έλασμα, στην κάτω επιφάνεια του και πάνω στις περιφέρειες των οπών όπως ακριβώς απεικονίζει και το Σχήμα 4.14. Είναι προφανές επίσης από το Σχήμα 6.13β ότι οι μέγιστες παραμορφώσεις εμφανίζονται μακριά από την πάκτωση και συγκεκριμένα στο δεξί φορτιζόμενο άκρο του κάτω ελάσματος.



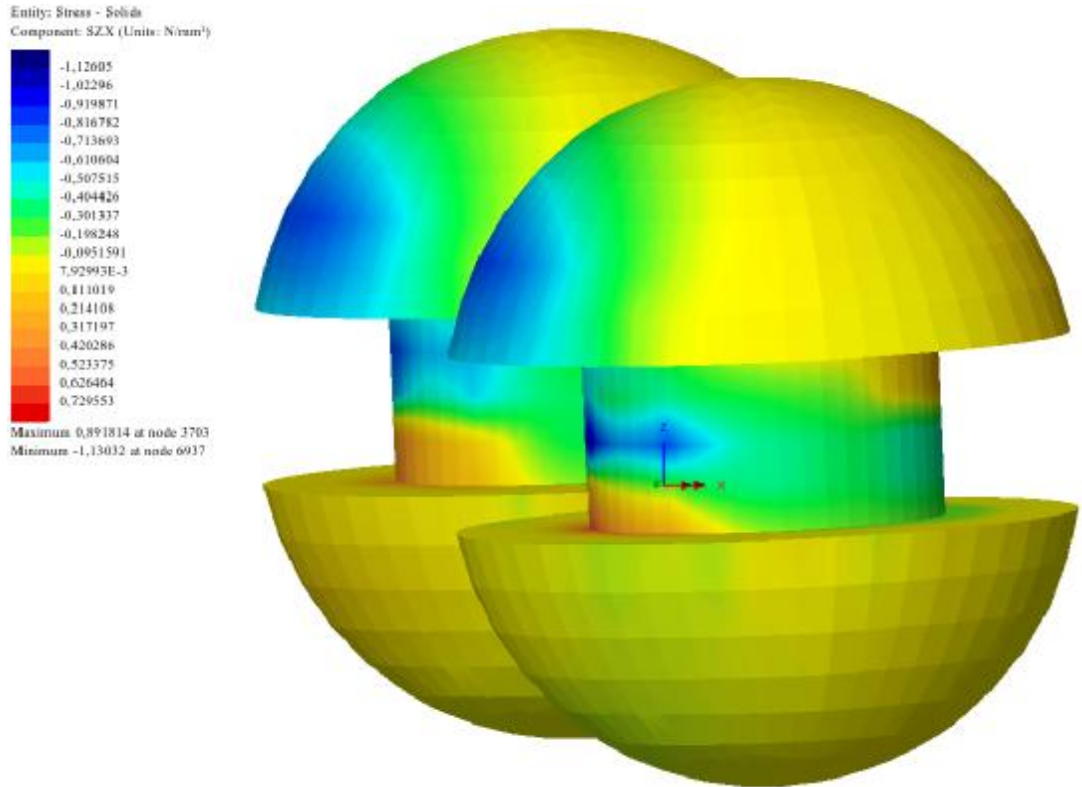
Σχήμα 4.14: Παρατηρούμενη μέγιστη τάση von Mises σε όλο το σύστημα

Για την συγκεκριμένη περίπτωση γεωμετρίας ο συντελεστή συγκέντρωσης τάσεως είναι ίσος με:

$$K = \frac{S_{\max}^{\text{VM}}}{S_x} = \frac{8.307\text{MPa}}{1\text{MPa}} = 8.307 \quad (6.4)$$

Ο μέγιστος συντελεστής παρουσιάζεται στο άνω έλασμα. Οι σχετικοί συντελεστές στον ήλο και στο κάτω έλασμα είναι 7.821 και 6.790, αντίστοιχα.

Το Σχήμα 4.15 παρουσιάζει το περίγραμμα των διατμητικών τάσεων t_{zx} στον ήλο.



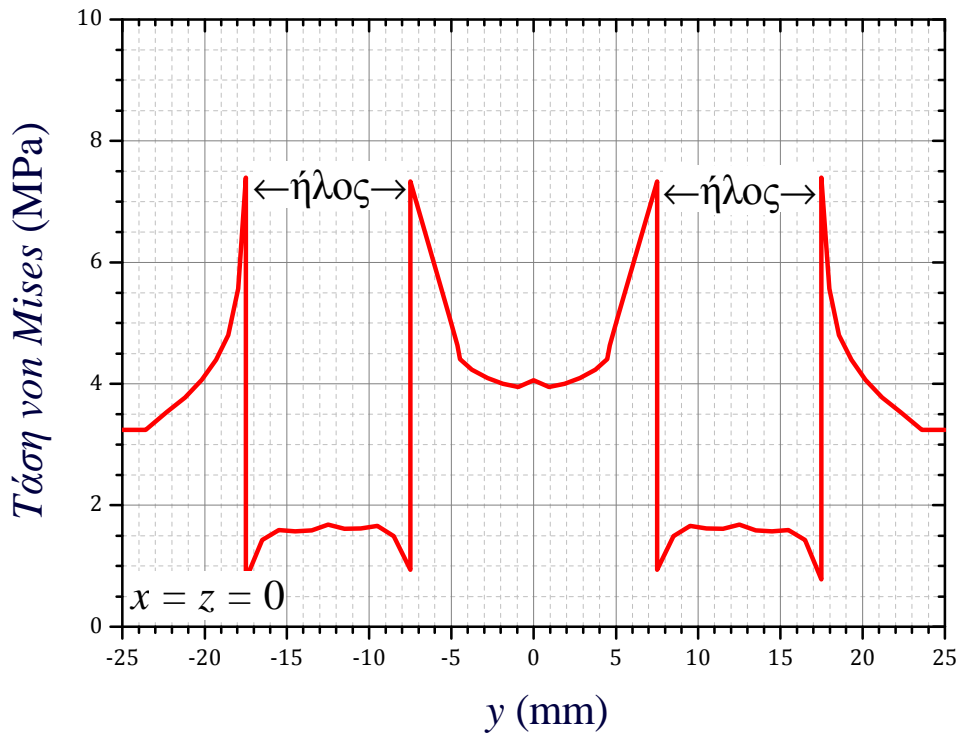
Σχήμα 4.15: Περίγραμμα διατμητικών τάσεων t_{zx} των ήλων

Η μέση διατμητική τάση για διπλή ήλωση σύμφωνα με τη θεωρία μηχανικής πρέπει να είναι:

$$t_{zx} = \frac{P}{2A_0} = \frac{P}{2 \frac{\pi D^2}{4}} = \frac{2P}{\pi D^2} = \frac{2 \times 125 \text{ N}}{\pi \times (10 \text{ mm})^2} = 0.796 \text{ MPa} \quad (6.5)$$

Πράγματι, από το παραπάνω περίγραμμα γίνεται φανερό ότι οι διατμητικές τάσεις t_{zx} στην περίμετρο του κορμού έκαστου ήλου για $z = 0$ κυμαίνονται κατά απόλυτο τιμή μεταξύ από 0.41 έως 1.13 MPa.

Το Σχήμα 4.16 απεικονίζει τη μεταβολή της ισοδύναμης τάσης von Mises σε σχέση με τη συντεταγμένη y κατά τη διεπιφάνεια των ελασμάτων πάνω στο επίπεδο xy . Η ασυνέχεια των τάσεων στα σημεία επαφής των ελασμάτων με τους δύο ήλους γίνεται φανερή.



Σχήμα 4.16: Ισοδύναμη τάση von Mises σε σχέση με την συντεταγμένη y για $x=z=0$

4.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα πτυχιακή υιοθετήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση της στατικής συμπεριφοράς συστήματος μονής και διπλής ήλωσης. Το πρόβλημα ήταν ισχυρά μη γραμμικό και δεν ήταν δυνατή η ακριβής και η απόλυτα ρεαλιστική αναλυτική του προσέγγιση, διότι η μελέτη εμπειρείχε φαινόμενα επαφής με τριβή μεταξύ άνω και κάτω ελάσματος αλλά και μεταξύ ήλων και ελασμάτων. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, αποτελεί σε αυτές τις περιπτώσεις ένα αξιόπιστο και απλοϊκό εργαλείο για τον μελετητή χωρίς να είναι απαραίτητη η διεξαγωγή πειράματος. Τα ελάσματα καθώς και οι ήλοι μοντελοποιήθηκαν με τη χρήση τρισδιάστατων, γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων και τριών βαθμών ελευθερίας ανά κόμβο. Για την προσομοίωση της επαφής θεωρήθηκε ένας αρκετά μεγάλος συντελεστής τριβής αντιπροσωπευτικός για την επαφή μεταξύ χαλύβδινων υλικών ενώ η διείδυση μεταξύ των επιφανειών επαφής απαγορεύτηκε με κατάλληλες συνθήκες επαφής στην εγκάρσια διεύθυνση. Κατά την μελέτη αναλύθηκαν τόσο οι συγκεντρώσεις τάσεων στις οπές των ελασμάτων όσο και στις επιφάνειες των κορμών των ήλων. Επιπρόσθετα εξετάστηκαν και οι μετατοπίσεις όλου του συστήματος γενικότερα. Διαπιστώθηκε ότι οι μέγιστες τάσεις παρατηρούνται στις οπές του άνω

ελάσματος. Η χρήση δύο αντί για ενός ήλου οδήγησε σε αρκετά μικρότερες ισοδύναμες τάσεις von Mises. Επιπλέον, οι διατμητικές τάσεις στον κορμό των ήλων μειώθηκαν περίπου στο μισό στη περίπτωση διπλής ήλωσης.

Η παρούσα εργασία βοήθησε στην λήψη θεωρητικών γνώσεων πάνω στις συνδέσεις με ήλους. Επίσης βοήθησε στην καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των μονίμων συνδέσεων υπό στατικές εφελκυστικές φορτίσεις και ιδιαίτερα στην συγκέντρωση τάσεων που παρατηρείται στις έντονες γεωμετρικές ασυνέχειες. Παράλληλα προσέδωσε στο γράφοντα αρκετή εμπειρία στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων που ίσως φανεί χρήσιμη σε μια μελλοντική ανάλυση - μελέτη ενός πιο σύνθετου προβλήματος στοιχείων μηχανών όπου η αναλυτική λύση δεν είναι εφικτή ενώ το πείραμα είναι πρακτικά αδύνατο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Στεργίου Κ. Ιωάννης, Στεργίου Ι Κωνσταντίνος, Στοιχεία Μηχανών Ι, Σύγχρονη εκδοτική, Αθήνα (2003).
- [2] Βόσου Γ. Κλείω , Στοιχεία μηχανολογίας, Σημειώσεις από Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο .
- [3] American Fastener-Technologies corporation.
- [4] Μπαράκος Κ. Γεώργιος Διπλ. Αεροναυπηγός Μηχανικός, ΔΙΑΤΜΗΣΗ, Σημειώσεις από ΤΕΙ Πατρών.
- [5] Παπαδόπουλος Χρ. ,Ηλώσεις ,Σημειώσεις από Πανεπιστήμιο Πατρών .
- [6] Πασχάλης Δρ. Γκότσης Κ., Πεπερασμένα στοιχεία, εκδόσεις Ζήτη, Σέρρες (2004).
- [7] LUSAS user's manual, FEA Ltd, Forge House, 66 High Street, Kingston upon Thames, Surrey KT1 1HN, UK, 1999.