

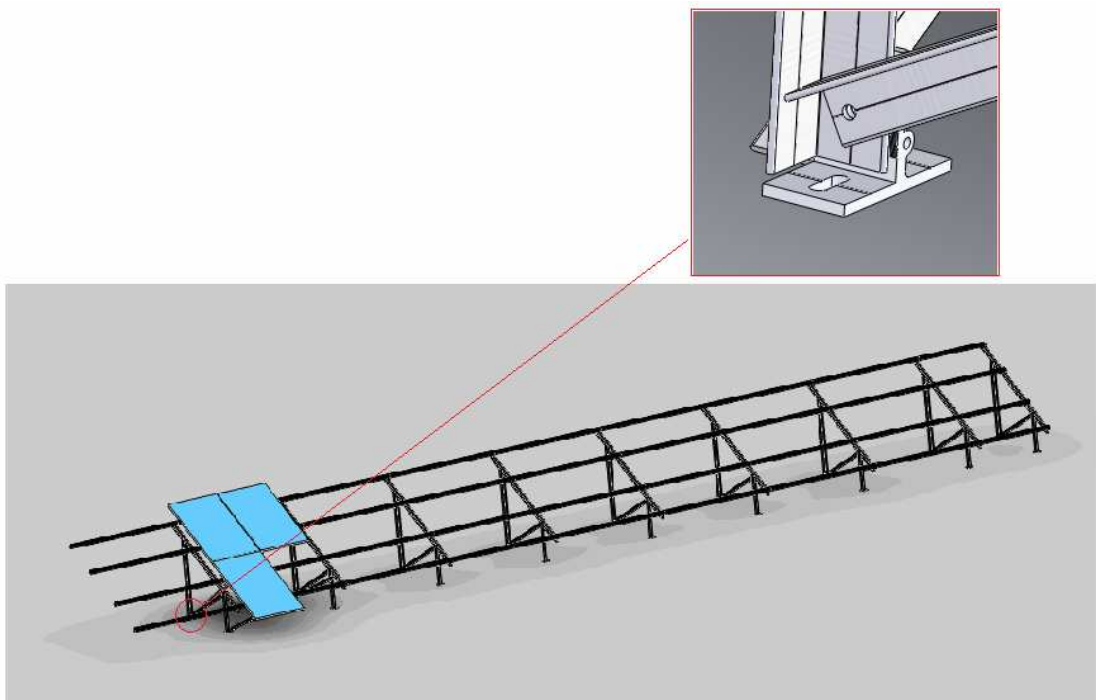


**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Στατική ανάλυση εκλογής κοχλιών για τη σύνδεση των διατομών  
ικριώματος στήριξης φωτοβολταϊκών panel**

**Static screw stresses of threaded fasteners for the supporting structure of  
photovoltaic panels**



**Σαπφώ Τσούτσου**  
**Επιβλέπων καθηγητής: Θεόδωρος Κωστόπουλος**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου  
Θεόδωρο Κωστόπουλο για την πολύτιμη στήριξη  
του και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, καθώς  
και τον υποψήφιο διδάκτορα Δημήτριο  
Τσαντιώτη, ο οποίος με την καθοδήγηση του ήταν  
δίπλα μου σε κάθε βήμα κατά τη διάρκεια της  
εργασίας.

## Περιεχόμενα

<b>1. Γενικά περί κοχλιών</b>	4
• Εισαγωγή	4
• Βασικά στοιχεία	5
• Είδη σπειρωμάτων	6
• Προένταση κοχλιοσυνδέσεων	8
• Ανάλυση δυνάμεων στους κοχλίες	12
• Πλαστική παραμόρφωση και καθίζηση	18
• Οπές κοχλιώσεων	19
• Σύθλιψη άντυνας της σπής	20
<b>2. Τεχνική περιγραφή</b>	24
• Σκοπός	24
• Ισχύοντες κανονισμοί	24
• Κατάταξη διατομών	25
• Κρίσιμα φορτία διατομών	27
• Φορτία – Συνδυασμοί φορτίσεων	28
<b>3. Εκλογή κοχλιών</b>	35
<b>4. Έλεγχος σύθλιψης της άντυνας</b>	47
<b>5. Παράδειγμα σύγκρισης καταπόνησης κοχλία με εφελκυστική και με διατμητική φόρτιση.</b>	50
<b>6. Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα</b>	53
<b>7. Παράρτημα Α</b>	54
• Κατηγορίες υλικών κοχλιών	54
<b>8. Παράρτημα Β</b>	55
• Εισαγωγή	55
• Η μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων	57
• Παραγωγή πλέγματος	59
• Εφαρμογή φορτίων	61
• Οριακές συνθήκες	63
• Solidworks	64
<b>9. Παράρτημα Γ</b>	68
• Πληροφορίες ικριώματος	68
<b>10.Βιβλιογραφία</b>	88

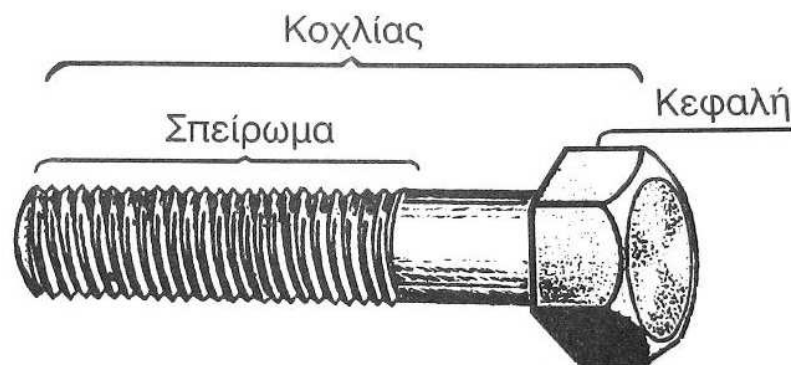
## Γενικά περί κοχλιών

### Εισαγωγή

Ο κοχλίας είναι ένα στοιχείο συνδέσεως που χρησιμοποιείται περισσότερο από κάθε άλλο στοιχείο μηχανής στις διάφορες κατασκευές. Με τη δυνατότητα λύσης και επανασύνδεσης που διαθέτει χρησιμεύει ως:

1. μετατροπέας ροπής σε αξονική δύναμη και αντίστροφα
2. μετατροπέας περιστροφικής κίνησης σε γραμμική και αντίστροφα
3. μέσο για δημιουργία προέντασης σε μηχανικά συστήματα για διάφορους σκοπούς

Όσον αφορά τη γεωμετρία του ο κοχλίας αποτελείται από την κεφαλή και τον κορμό. Ο κορμός αποτελείται από το αυλακωτό μέρος, δηλαδή το σπείρωμα, και από τμήμα που δεν έχει αυλάκωση το οποίο λέγεται αυχέννας (δεν υπάρχει πάντα).



Τα κύρια χαρακτηριστικά του σπειρώματος ενός κοχλία είναι ότι ακολουθεί μία ελικοειδή γραμμή και το σταθερό του βήμα  $h = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \epsilon\phi\alpha$ . Η  $a$  είναι η γωνία ελικώσεως του σπειρώματος ενώ ως βήμα ορίζεται η αξονική μετατόπιση ενός σημείου του σπειρώματος για μία πλήρη περιστροφή του κοχλία γύρω από τον άξονα του.

Όταν το σπείρωμα δημιουργείται στο εξωτερικό μέρος ενός κυλίνδρου λέγεται εξωτερικό. Τέτοιο σπείρωμα φέρουν οι κοχλίες. Όταν το σπείρωμα δημιουργείται στο εσωτερικό μέρος λέγεται εσωτερικό. Τέτοιου είδους σπείρωμα έχουν τα περικόχλια.

## Βασικά στοιχεία

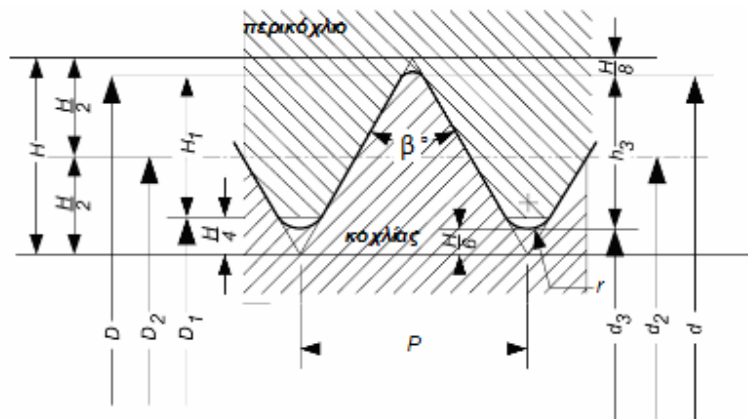
Τα βασικά στοιχεία με τα οποία καθορίζεται ένα σύστημα κοχλία- περικοχλίου είναι τα εξής:

- Η ονομαστική ή εξωτερική διάμετρος  $d$  του σπειρώματος του κοχλία. Η εξωτερική διάμετρος  $D$  του σπειρώματος του περικοχλίου είναι ίση με την ονομαστική διάμετρο του κοχλία.
- Η διάμετρος πυρήνα του κοχλία  $d_1$
- Η διάμετρος πυρήνα του περικοχλίου  $D_1$
- Η μέση διάμετρος του κοχλία  $d_2$
- Η μέση διάμετρος του περικοχλίου  $D_2$

$$d_2 = \frac{d + d_1}{2} = \frac{D + D_1}{2} = D_2$$

- Το βήμα  $h$
- Ο αριθμός των σπειρών σε μήκος μίας ίντσας  $z$
- Το μήκος του σπειρώματος  $b$
- Το μήκος του κορμού  $l$
- Το ύψος του περικοχλίου  $m$
- Το ύψος της κεφαλής του κοχλία  $k$
- Η ολική γωνία των παρειών  $\beta$

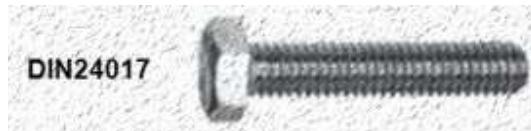
- Η μορφή της κατανομής του σπειρώματος



## **Είδη σπειρωμάτων**

Εξαιτίας του ευρύτατου εύρους εφαρμογής των κοχλιών, αλλά και των διαφόρων ειδικών συνθηκών λειτουργίας έχουν διαμορφωθεί διάφορα είδη σπειρωμάτων. Οι βασικότερες κατηγορίες είναι οι εξής:

1. Ανάλογα με το σκοπό που εξυπηρετούν:
  - Κοχλίες σύσφιξης: Για τους κοχλίες αυτούς επιθυμείται αυτοσυγκράτηση, δηλαδή διατήρηση της σύσφιξης μετά την απομάκρυνση της αιτίας σύσφιξης. Κατάλληλα γι' αυτό είναι τα τριγωνικά σπειρώματα.
  - Κοχλίες κινήσεως: Οι κοχλίες κινήσεως μετατρέπουν την περιστροφική κίνηση του κορμού τους σε ευθύγραμμη κίνηση του περικοχλίου τους.
2. Ανάλογα με τη μορφή της κεφαλής:
  - Κοχλίες με εξαγωνική κεφαλή



- Κοχλίες με τετραγωνική κεφαλή
- Κοχλίες με κυλινδρική κεφαλή και εγκοπή για την περιστροφή με κοχλιοστρόφιο (κατσαβίδι)



- Κοχλίες με φραιζάτη κεφαλή (κολουροκωνική): Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που εμποδίζει η εξέχουσα κεφαλή. Έτσι με τη φραιζάτη μορφή η κεφαλή του κοχλίου βυθίζεται σε αντίστοιχη υποδοχή στο κομμάτι.
- Κοχλίες με ημισφαιρική κεφαλή

- Κοχλίες με κυλινδρική κεφαλή και υποδοχή ALLEN



3. Ανάλογα με τον τρόπο που συνδέουν τα κομμάτια:

- Κοχλίες περαστοί : Περνούν ελεύθερα και στα δύο κομμάτια.
- Κοχλίες κεφαλής: Χρησιμοποιούνται χωρίς περικόχλιο
- Κοχλίες φυτευτοί: Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις που η φθορά του εσωτερικού σπειρώματος είναι ανεπανόρθωτη. Ο κοχλίας φυτεύεται στο ένα τεμάχιο και στο άλλο περνά ελεύθερα.
- Κοχλίες αγκυρώσεως κοινοί και κοχλίες διαστολής: Χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα για τη στερέωση των μηχανών στο δάπεδο, αλλά και σε τοίχους και οροφές.

## Προένταση κοχλιοσυνδέσεων

Οι κοχλίες συσφίξεως πρέπει πάντοτε να προεντείνονται άσχετα με το είδος και τη μορφή της φορτίσεως τους. Η προένταση τους έχει σκοπό να ακινητοποιήσει τα συνδεόμενα στοιχεία σε μία συγκεκριμένη θέση λειτουργίας τους.

Η προένταση μίας κοχλιοσυνδέσεως καταπονεί τους κοχλίες της σε εφελκυσμό και εφόσον η εφελκυστική τάση, που αναπτύσσεται σ' αυτούς, είναι μικρότερη από το όριο ελαστικότητας του υλικού τους, ο κορμός τους επιμηκύνεται ελαστικά. Αντίθετα τα συνδεόμενα στοιχεία καταπονούνται κατά την προένταση σε θλίψη και βραχύνονται ελαστικά εφόσον η θλιπτική τάση τους είναι αντίστοιχα μικρότερη απ' το όριο ελαστικότητας του υλικού τους.

Για να σχεδιαστεί το τρίγωνο προεντάσεως μιας κοχλιοσυνδέσεως πρέπει να είναι γνωστές οι σταθερές ελατηρίου του κοχλία  $c_{\text{κοχλία}}$  και των συνδεόμενων στοιχείων  $c_{\Sigma}$ , διότι από αυτές υπολογίζονται οι γωνίες  $\alpha$  και  $\beta$  του τριγώνου προεντάσεως. Η γωνία  $\alpha$  είναι η γωνία του ορθογωνίου τριγώνου που σχηματίζεται με βάση την επιμήκυνση του κοχλία και ύψος την αξονική δύναμη  $F_v$  που προκαλεί αυτή την επιμήκυνση ενώ η γωνία  $\beta$  σχηματίζεται με βάση τη βράχυνση της φλάντζας και ύψος επίσης την αξονική δύναμη  $F_v$  που στην περίπτωση αυτή προκαλεί τη βράχυνση.

Από το νόμο του Hooke είναι γνωστό ότι για κάθε ελαστικό σώμα ισχύει :

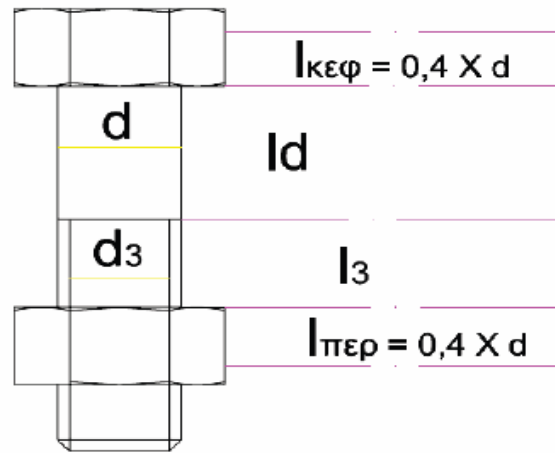
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A \cdot E} \quad (1)$$

$$F = c \cdot \Delta l \quad (2)$$

$$(1), (2) \Rightarrow c = \frac{A \cdot E}{l}$$



Για τον κοχλία, λοιπόν, έχουμε:

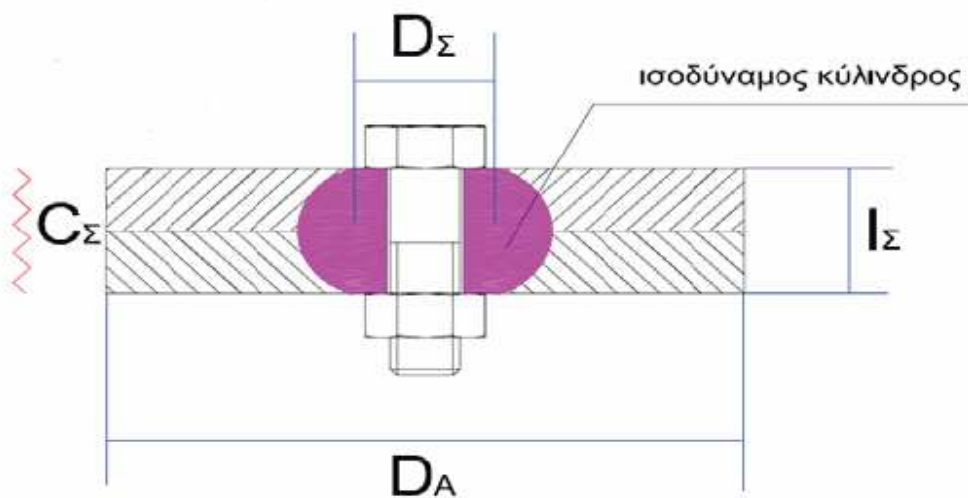


Τα στοιχεία είναι συνδεδεμένα στη σειρά οπότε η σταθερά του κοχλία προκύπτει:

$$\frac{1}{C_{κοχλία}} = \frac{1}{C_{κεφ}} + \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_{d_3}} + \frac{1}{C_{περ}}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{C_{κοχλία}} = \frac{1}{E_{κοχλία}} \left( \frac{1}{d} + \frac{4 \cdot l_d}{\pi \cdot d^2} + \frac{4 \cdot l_{d_3}}{\pi \cdot d_3^2} \right)$$

Αντίστοιχα για τη φλάντζα:



$$c_{\Sigma} = \frac{E_{\Sigma} \cdot A_{\Sigma}}{l_{\Sigma}}$$

Όπου:  $D_{\Sigma} \rightarrow$  η ισοδύναμη διάμετρος

$l_{\Sigma} \rightarrow$  το ισοδύναμο μήκος το οποίο είναι για:

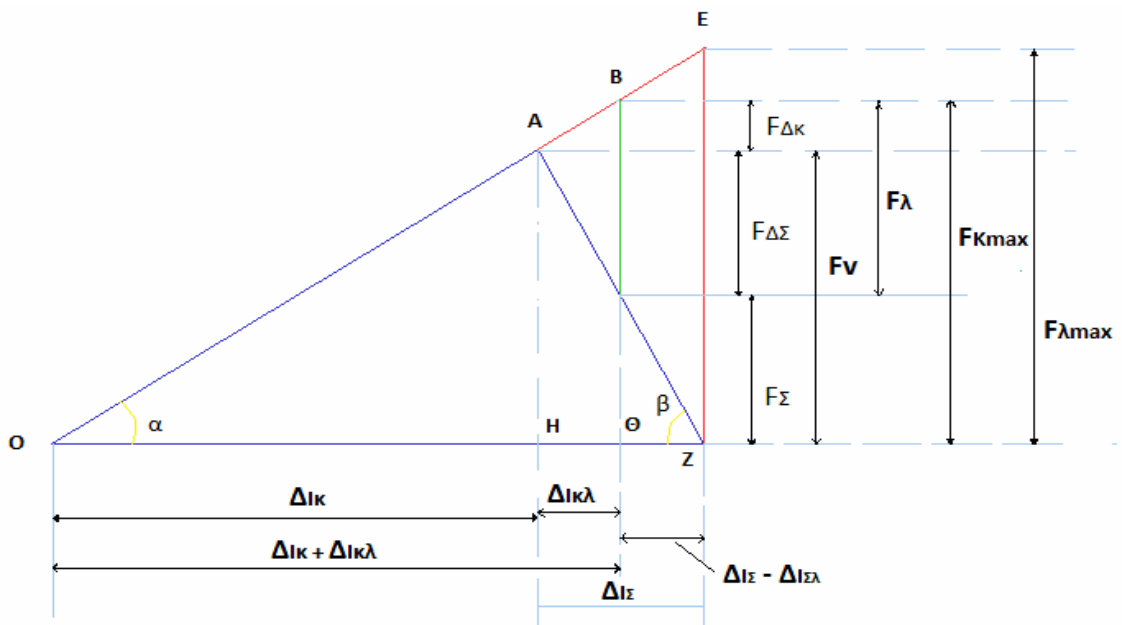
- Περαστό κοχλία:  $2 \times$  μήκος φλάντζας
- Κοχλία τυφλής οπής: μήκος της φλάντζας που έρχεται σε επαφή με την κεφαλή του κοχλία  $+ 0.4 \times d$

$A_{\Sigma} \rightarrow$  Η επιφάνεια που υπολογίζεται με βάση τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κοχλιοσυνδέσεως και ισούται με:

- $A_{\Sigma} = \frac{\pi}{4} (D_{\Sigma}^2 - d_o^2) = \frac{\pi}{4} \left( \left( s + \frac{l_{\Sigma}}{x} \right)^2 - d_o^2 \right)$ , για  $D_A > 3s$
- $A_{\Sigma} = \frac{\pi}{4} (s^2 - d_o^2) + \frac{\pi}{8} \left( \frac{D_A}{s} - 1 \right) \cdot \left( \frac{s \cdot l_{\Sigma}}{5} + \frac{l_{\Sigma}^2}{100} \right)$ , για  $D_A \leq 3s$

Όπου  $s \rightarrow$  η διάμετρος του εγγεγραμμένου κύκλου της κεφαλής του κοχλία

Συνθέτοντας, λοιπόν, τα παραπάνω και τα διαγράμματα που προκύπτουν για τον κοχλία και τη φλάντζα δημιουργούμε τρίγωνα προεντάσεως της παρακάτω μορφής:



Ισχύει ότι:

$$F_{\Delta\kappa} = F_{\Lambda} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\Delta l_{\kappa}}{\Delta l_{\Sigma}}}$$

Όπου:  $F_{\Lambda}$   $\rightarrow$  το φορτίο λειτουργίας του κοχλία

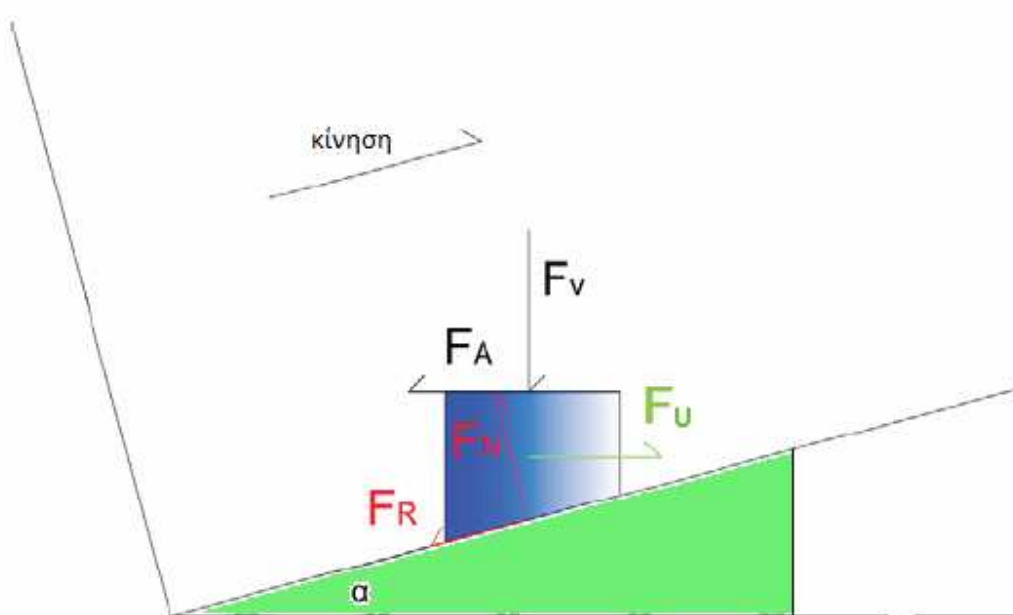
Η  $F_{\lambda}$  είναι η δύναμη μίας γενικής περίπτωσης καταπόνησης με όρια όπως φαίνονται στο τρίγωνο προεντάσεως. Καθώς αυτή μεταβάλλεται μεταβολές παρουσιάζουν και οι καταπονήσεις τόσο του κοχλία όσο και της φλάντζας. Χαρακτηριστικά της καταπόνησης

του κοχλία είναι η μέση τιμή  $F_m = F_v + \frac{F_{\Delta\kappa}}{2}$  και πλάτος  $F_r = \frac{F_{\Delta\kappa}}{2}$  και της φλάντζας

η μέση τιμή  $F_m = F_v - \frac{F_{\Delta\Sigma}}{2}$  και πλάτος  $F_r = \frac{F_{\Delta\Sigma}}{2}$ .

## Ανάλυση δυνάμεων στους κοχλίες

Είναι χρήσιμο να συσχετίσουμε την δύναμη σύσφιξης ενός περικοχλίου στον κοχλία του, με την αναπτυσσόμενη εφελκυστική δύναμη στο σώμα του κοχλία, η οποία αναπτύσσεται λόγω της σύσφιξης. Στο παρακάτω σχήμα μια σπείρα κοχλία αναπτύσσεται σε ορθογώνιο τρίγωνο με γωνία κεκλιμένου επιπέδου  $\alpha$ . Το κινούμενο σώμα από πάνω της είναι το περικόχλιο πάνω στο οποίο σχεδιάζονται οι ασκούμενες δυνάμεις.



$F_v$  : δύναμη προέντασης (σύσφιξης)

$F_A$  : δύναμη τριβής στο περικόχλιο και τη φλάντζα

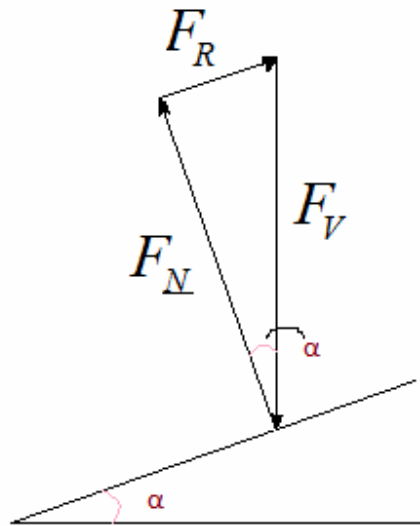
$F_u$  : περιφερειακή δύναμη από τη στρεπτική ροπή  $M_G$

$F_N$  : δύναμη αντίδρασης σπειρώματος-περικοχλίου

$F_R$  : δύναμη τριβής ολίσθησης

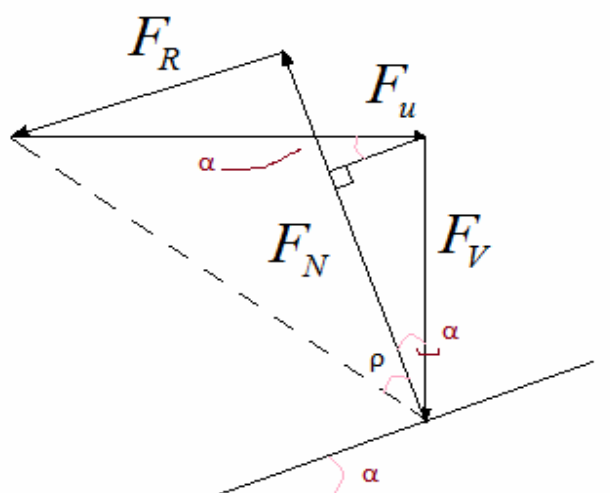
Για την ελίκωση ορθογωνικής διατομής μπορούμε να χαράξουμε τα δυναμόπολύγωνα για τις εξής τρεις περιπτώσεις:

1. Οριακή κατάσταση ισορροπίας του περικοχλίου χωρίς την επίδραση της περιφερειακής δυνάμεως  $F_u$



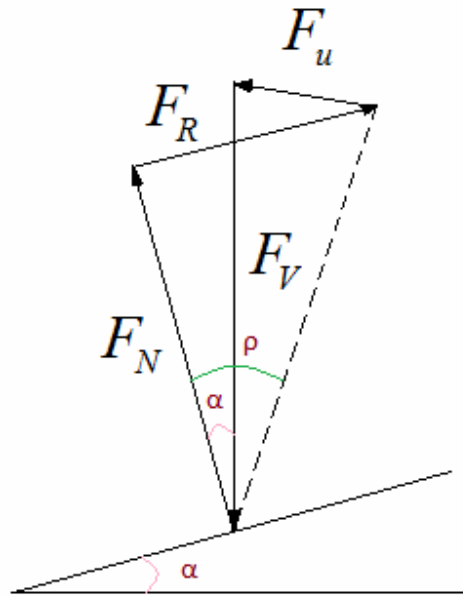
Δεν υπάρχει περιφερειακή δύναμη όταν το περικόχλιο είναι ακίνητο ή κινείται με σταθερή ταχύτητα.

2. Οριακή κατάσταση ισορροπίας του περικοχλίου με την εφαρμογή της περιφερειακής δυνάμεως  $F_u$  για την άνοδο του περικοχλίου. Περίπτωση προεντάσεως του κοχλίου.



Από το σχήμα παραπάνω προκύπτει ότι:  $F_u = F_v \cdot \tan(\rho + \alpha)$

3. Οριακή κατάσταση ισορροπίας του περικοχλίου με την εφαρμογή περιφερειακής δυνάμεως  $F_u$  για την κάθοδο του περικοχλίου. Περίπτωση λυσίματος κοχλία.



Στην περίπτωση αυτή η περιφερειακή δύναμη σε σχέση με την δύναμη προέντασης είναι:  $F_u = F_v \cdot \tan(\rho - \alpha)$

Τα παραπάνω ισχύουν για σπείρωμα με ορθογωνική διατομή. Οι τύποι αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για σπείρωμα με τριγωνική διατομή αν η πραγματική γωνία τριβής  $\rho$  αντικατασταθεί με μία ανηγμένη γωνία τριβής  $\rho'$  για την οποία θα ισχύει:  $\tan \rho' = \tan \rho / \cos(\beta/2)$  όπου με  $\beta/2$  ισούνται οι γωνίες παρειών.

Στη γενική περίπτωση, λοιπόν, για να προενταθεί ένας κοχλίας με αξονική δύναμη προεντάσεως  $F_v$  πρέπει να εφαρμοστεί στη μέση διάμετρο  $d_2$  του σπειρώματος

περιφερειακή δύναμη:  $F_u = F_v \cdot \tan(\rho \pm \alpha)$

Για να αναπτυχθεί αυτή η περιφερειακή δύναμη πρέπει να εφαρμοστεί στον κορμό του κοχλία η ροπή στρέψεως

$$M_G = \frac{d_2}{2} \cdot F_u$$

$$\Rightarrow M_G = F_v \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \tan(\rho + \alpha)$$

Για να υπάρξει αυτή η ροπή πρέπει να παραχθεί σε κάποια άλλη θέση και να μεταβιβαστεί μέσω ελαστικών παραμορφώσεων στην επιφάνεια επαφής των σπειρών. Κατά την μεταβίβαση αυτή φθείρεται το ενδιάμεσο υλικό και η ροπή συσφίξεως υφίσταται απώλειες λόγω της τριβής του περικοχλίου με τη φλάντζα. Η απώλεια στρεπτικής ροπής λόγω τριβής στην επιφάνεια του περικοχλίου είναι:

$$M_R = F_v \cdot \frac{d_A}{2} \cdot \mu_A$$

Όπου  $d_A$  είναι η μέση διάμετρος στην οποία αναπτύσσεται η δύναμη τριβής, η οποία προκύπτει από τη δύναμη  $F_v$  και το συντελεστή τριβής  $\mu_A$ . Συνεπώς η συνολική ροπή που πρέπει να εφαρμοστεί για τη σύσφιξη είναι:

$$M_G = M_t + M_R$$

$$M_G = 0,5 \cdot F_v \cdot d_2 \cdot \tan(\rho + \alpha) + 0,5 \cdot d_A \cdot \mu_A \cdot F_v$$

Ακόμα ισχύουν:

$$F_A = \mu_A \cdot F_v \cdot \left( \frac{d_A}{d_2} \right)$$

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

Η προένταση των κοχλιών γίνεται με διάφορες μεθόδους. Συνηθέστερη είναι η προένταση με τα γνωστά τυποποιημένα χειροκίνητα κλειδιά. Αυτός ο τρόπος προεντάσεως είναι βέβαια ο απλούστερος ωστόσο θεωρείται αρκετά ανακριβής, αφού το μέγεθος της προεντάσεως εξαρτάται από τη στιγμιαία εκτίμηση του τεχνίτη που κάνει την προένταση. Οι κρίσιμες κοχλιοσυνδέσεις μίας κατασκευής πρέπει να προεντείνονται με ακρίβεια ώστε να εξασφαλίζεται τόσο η λειτουργία τους όσο και η αντοχή τους. Για το σκοπό αυτό συνηθίζεται η χρήση χειροκίνητων δυναμόκλειδων με διάφορες διατάξεις για περισσότερη ή λιγότερη ακρίβεια στη μέτρηση της ροπής συσφίξεως. Ακόμα, όμως, και με τη χρήση δυναμόκλειδου το φαινόμενο της καθίζησης που αναλύεται παρακάτω δεν μπορεί να εξουδετερωθεί. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη δύναμη προεντάσεως καθορίζεται από τον τύπο:

$$(F_v)_{\mu\epsilon\gamma} = a_\pi \cdot (F_v + F_z)$$

Όπου:  $a_\pi \rightarrow$  συντελεστής προεντάσεως

$F_v \rightarrow$  η ελάχιστη απαιτούμενη δύναμη προεντάσεως του κοχλία για τη σωστή λειτουργία της κοχλιοσυνδέσεως

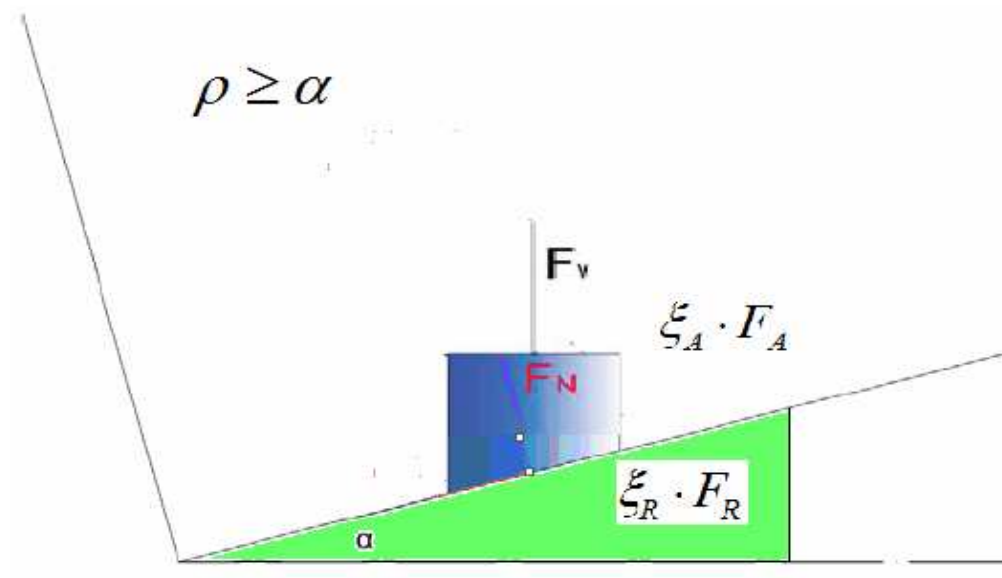
$F_z \rightarrow$  η πτώση της δυνάμεως πρέντασης, που οφείλεται στην καθίζηση των θλιβόμενων επιφανειών των στοιχείων της κοχλιοσυνδέσεως

$$F_z = \Delta I_z \cdot \frac{c_k \cdot c_\Sigma}{c_k + c_\Sigma}$$

Η αντίστοιχη μέγιστη ροπή στρέψεως είναι :

$$(M_G)_{\text{μεγ}} = F_v \cdot \frac{d_2}{I} \cdot \tan(\rho + \alpha)$$

Για τη διατήρηση της σύσφιξης θα πρέπει:



Κατά την αποσύσφιξη μιας κοχλιοσύνδεσης πρέπει να λυθούν οι προεντεταμένοι κοχλίες. Πρέπει δηλαδή σε κάθε κοχλία να εφαρμοστεί μία ροπή λυσίματος  $M_G$ . Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με πριν χρησιμοποιώντας τον τύπο

$$F_u = F_v \cdot \tan(\rho - \alpha)$$



προκύπτει ότι η ροπή που πρέπει να εφαρμοστεί

$$M_G = 0,5 \cdot F_v \cdot d_2 \cdot \tan(\rho - \alpha)$$

ενώ η ροπή που πρέπει να εφαρμοστεί στο περικόχλιο για να υπερνικηθεί η τριβή που αναπτύσσεται στη μετωπική του επιφάνεια είναι

$$M_G = 0,5 \cdot d_A \cdot \mu_A \cdot F_v$$

Συνολικά, δηλαδή, πρέπει να εφαρμοστεί μία ροπή λυσίματος η οποία ισούται με:

$$M_G = 0,5 \cdot F_v \cdot d_2 \cdot \tan(\rho - \alpha) + 0,5 \cdot d_A \cdot \mu_A \cdot F_v$$

## **Πλαστική παραμόρφωση και καθίζηση**

Σε μία κοχλιοσύνδεση, που λειτουργεί σε θερμοκρασία φυσικού περιβάλλοντος, υπάρχει πιθανότητα να αναπτυχθεί μία μέση επιφανειακή πίεση μεταξύ της μετωπικής επιφάνειας του κεφαλιού του κοχλία ή του περικοχλίου και της αντίστοιχης επιφάνειας των συνδεόμενων στοιχείων. Αυτή η πίεση μπορεί να προκαλέσει πλαστική παραμόρφωση και επομένως πλαστική βράχυνση των στοιχείων. Η βράχυνση μπορεί να είναι της τάξεως του εκατοστού ή ακόμη και του δεκάτου του χιλιοστού και οδηγεί στη μείωση της δύναμης προεντάσεως με άγνωστες συνέπειες για τη λειτουργία και την αντοχή της συνδέσεως.

Δεδομένου ότι το υλικό των κοχλιών έχει κατά κανόνα υψηλότερη αντοχή από το υλικό των συνδεόμενων στοιχείων, ο κίνδυνος της πλαστικής παραμόρφωσης αφορά βασικά μόνο τα συνδεόμενα στοιχεία. Στην περίπτωση, λοιπόν, που η επιφανειακή πίεση είναι μεγαλύτερη από την επιτρεπόμενη, θα πρέπει να τοποθετηθούν ροδέλες από επιβελτιωμένο ή βαμμένο χάλυβα στην επιφάνεια που αναπτύσσεται η πίεση, ώστε να αυξηθεί η επιφάνεια επαφής και επομένως να μειωθεί η τιμή της μέσης επιφανειακής πιέσεως.

Ένα άλλο φαινόμενο που παρατηρείται στις κοχλιοσυνδέσεις, οι οποίες λειτουργούν σε θερμοκρασία φυσικού περιβάλλοντος, και προκαλεί πτώση της δύναμης προεντάσεως είναι η ψυχρή καθίζηση. Στην κατηγορία αυτή κατατάσσονται όλες οι πλαστικές παραμορφώσεις μίας συνδέσεως, οι οποίες δεν προέρχονται από τη μακροσκοπική υπέρβαση του επιτρεπόμενου ορίου της μέσης επιφανειακής πίεσης, αλλά από τις πλαστικές μικροπαραμορφώσεις της επιφανειακής τραχύτητας στις θέσεις που αναπτύσσεται επιφανειακή πίεση. Το μεγαλύτερο μέρος της ψυχρής καθιζήσεως εμφανίζεται αμέσως μετά τη συναρμολόγηση και τη προένταση. Το μέγεθος της ψυχρής καθιζήσεως εξαρτάται από το αρχικό μέγεθος της τραχύτητας των επιφανειών των συνδεόμενων στοιχείων και από το είδος της εξωτερικής φόρτισης της συνδέσεως.

Μπορεί ακόμη να παρουσιαστεί και θερμή καθίζηση, η οποία αφορά στη θερμή λειτουργία μιας κοχλιοσυνδέσεως, σε μέγεθος που δεν μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια.

## **Οπές κοχλιώσεων**

Οι οπές των κοχλιώσεων κατασκευάζονται πάντοτε μεγαλύτερες από την ονομαστική διάμετρο του σπειρώματος, ώστε να περιοριστεί ο χρόνος συναρμολόγησης και να μην τραυματιστεί το σπείρωμα ενός κοχλία κατά την συναρμολόγηση ή αποσυναρμολόγηση.

Οι άξονες των οπών, που φέρουν τα εξαρτήματα προς σύνδεση, δεν είναι δυνατόν κατά τη συναρμολόγηση να συμπέσουν απόλυτα. Παίρνουν μία λιγότερο ή περισσότερο έκκεντρη θέση ανάλογα με το μέγεθος του σφάλματος κατεργασίας. Ανάλογο με το μέγεθος του σφάλματος είναι το μέγεθος της διαμέτρου αυτών των οπών έτσι ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτηση των κοχλιών με την ταυτόχρονη προστασία των σπειρωμάτων τους από τραυματισμό.

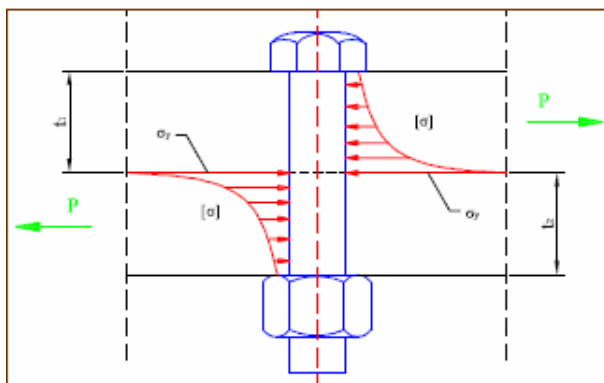
Τα παραπάνω ισχύουν όταν η κέντρωση των εξαρτημάτων, που συνδέει μία κοχλίωση δε γίνεται με κοχλίες, αλλά με πείρους κεντρώσεως ή με κατάλληλες διαβαθμίσεις των ίδιων των εξαρτημάτων.

Στην περίπτωση κεντρώσεως με κοχλίες οι οπές των κοχλιών κατασκευάζονται συγχρόνως στα δύο στοιχεία, ενώ ένα τμήμα του κορμού των κοχλιών πρέπει να είναι λείο και να έχει την ίδια ονομαστική διάμετρο με αυτή των οπών με ανοχή αμφιβόλου συσφίξεως. Η ονομαστική διάμετρος των κοχλιών αυτών πρέπει τότε να είναι μικρότερη από του λείου τμήματος του κορμού τους για την προστασία του σπειρώματος κατά τη συναρμολόγηση.

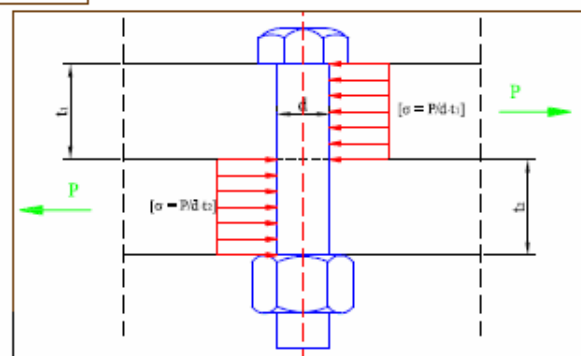
## Σύνθλιψη άντυγας οπής

Σε μία σύνδεση τριβής που αποτελείται από ήλους ή κοχλίες οι οποίοι υπόκεινται σε διατμητική καταπόνηση παρουσιάζονται τέσσερα στάδια κατά την αύξηση της φόρτισης. Στο πρώτο στάδιο η στατική τριβή παρεμποδίζει την ολίσθηση, στο δεύτερο στάδιο η φόρτιση είναι μεγαλύτερη από τη στατική τριβή και λαμβάνει χώρα η ολίσθηση μέχρι οι κορμοί των ήλων (ή των κοχλιών αντίστοιχα) να αρχίσουν να συνθλίβουν την άντυγα της οπής. Κατά το τρίτο στάδιο οι ήλοι-κοχλίες και τα συνδεόμενα τεμάχια παραμορφώνονται ελαστικά, οπότε η σχέση διατμητικής τάσης και ολίσθησης είναι γραμμική. Τέλος, στο τέταρτο στάδιο λαμβάνει χώρα διαρροή των ελασμάτων ή ηλών-κοχλιών μέχρι να συμβεί είτε θραύση ενός των ελασμάτων, είτε θραύση του κορμού του ήλου-κοχλίου λόγω διατμήσεως.

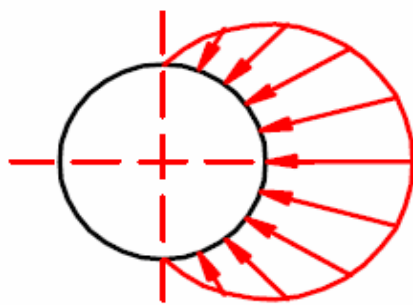
Όταν σε μία ηλωτή ή κοχλιωτή σύνδεση αρχίζει η ολίσθηση, μεταξύ κορμού των μέσων συνδέσεως και αντίστοιχων οπών αναπτύσσονται τάσεις επαφής. Η κατανομή των υπό του κορμού ασκουμένων τάσεων επαφής ή θλίψεως επί της άντυγος της οπής του συνδεόμενου ελάσματος είναι περίπλοκη.



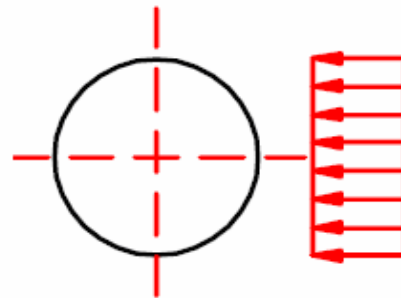
πραγματική



ιδεατή

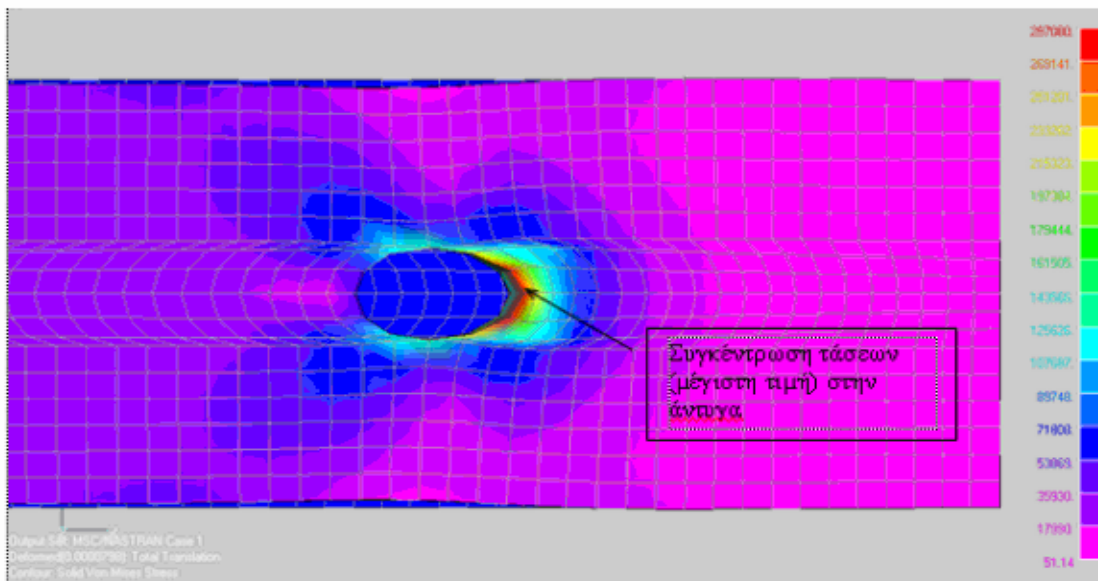


πραγματική



ιδεατή

Αρχικά κατά το ελαστικό στάδιο συμπεριφοράς έχουμε συγκέντρωση τάσεων στα σημεία επαφής. Με την αύξηση του φορτίου, όμως, λαμβάνει χώρα τοπική διαρροή με αποτέλεσμα η κατανομή των θλιπτικών τάσεων στο εμβαδό επαφής, να γίνεται πλέον ομοιόμορφη. Η τιμή της ομοιόμορφης αυτής τάσεως  $\sigma_p$  με την οποία θλίβεται η άντυγα θεωρείται ότι είναι κατανεμημένη επί εβδαδού ίσου με το γινόμενο της ονομαστικής τιμής της διαμέτρου του μέσου συνδέσεως επί το πάχος  $t$  του ελάσματος.

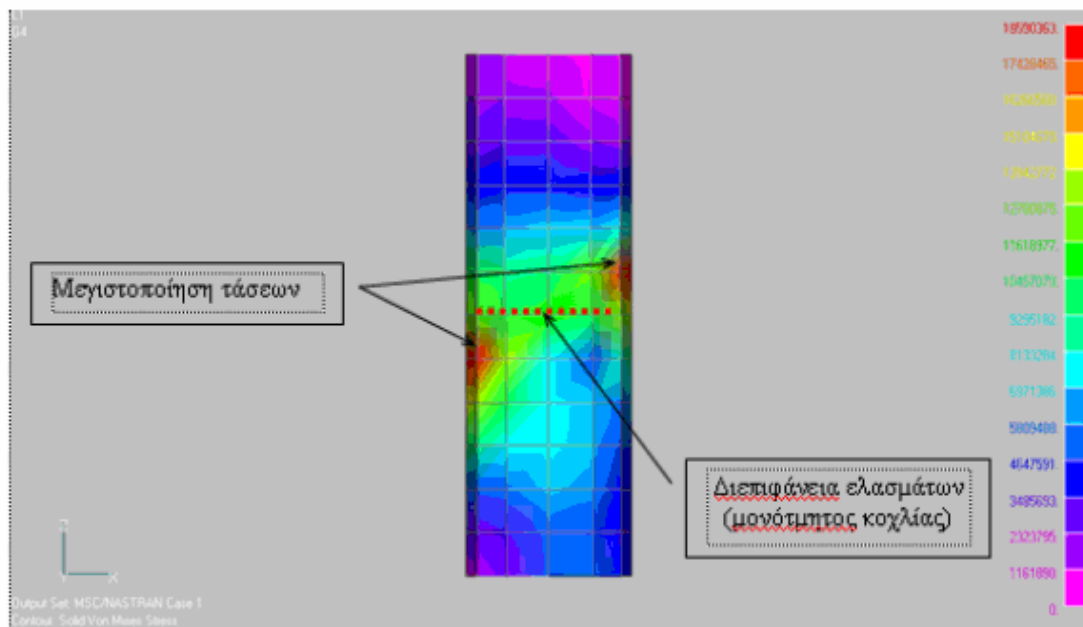


Βεβαίως, η δυσμενέστερη περίπτωση αντιστοιχεί στο λεπτότερο εκ των συνδεόμενων ελασμάτων. Συνεπώς, αν  $P$  είναι το μεταβιβαζόμενο φορτίο τότε:

$$\sigma_p = \frac{P}{dt}$$

όπου  $t = \min(t_1, t_2)$  για την περίπτωση δύο ελασμάτων και  $t = \min(t_1, t_2, t_3)$  για την περίπτωση τριών ελασμάτων.

Θα πρέπει να διευκρινισθεί ότι ο κορμός του μέσου συνδέσεως προφανώς καταπονείται και σε κάμψη. Οι αναπτυσσόμενες, όμως, καμπτικές τάσεις έναντι των τάσεων διατμήσεως είναι πρακτικώς αμελητέες λόγω του ότι το ύψος της καμπτόμενης διατομής (που ισούται με τη διάμετρο του μέσου συνδέσεως) διαφέρει πολύ λίγο του καμπτόμενου μήκους.



Η διατμητική, εξάλλου, τάση με την οποία καταπονείται ο κορμός του μέσου συνδέσεως ισούται με το μεταβιβαζόμενο φορτίο  $P$  διά του συνολικού εμβαδού της διατεμνόμενης επιφάνειας, δηλαδή

$$\tau = \frac{P}{A_n}$$

Όπου

- μονότμητος ήλος –κοχλίας:  $A_n = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$
- δίτμητος ήλος –κοχλίας:  $A_n = \frac{\pi \cdot d^2}{2}$
- πολύτμητος ήλος –κοχλίας με m  
το πλήθος διατεμνόμενες επιφάνειες :  $A_n = \frac{m \cdot \pi \cdot d^2}{4}$

## **Τεχνική περιγραφή της μελέτης**

**Σκοπός:** Η παρούσα μελέτη αφορά στην επιλογή κατάλληλης κοχλιοσύνδεσης μεταξύ των δοκών του ικρίωματος στο οποίο αναρτώνται φωτοβολταϊκά πλαίσια, καθώς και της συνολικής κατασκευής με το υπέδαφος. Το ικρίωμα κατασκευάζεται από δοκούς διελάσεως κράμματος EN 6005. Τα χαρακτηριστικά των προφίλ που χρησιμοποιούνται δίνονται στο παράρτημα 2. Το άνοιγμα τις κατασκευής είναι 20 m.

**Παρατήρηση:** Η στατική επάρκεια του ιδίου του ικρίωματος έχει ήδη εξεταστεί και τα στοιχεία που προέκυψαν θα χρησιμοποιηθούν κατωτέρω.

### **Υλικά Ικρίωματος:**

Για το υλικό των προφίλ έχουμε χρησιμοποιήσει τις παρακάτω μηχανικές ιδιότητες:

<b>Ιδιότητα</b>	<b>Μοναδες</b>	<b>Τιμή</b>
Rp,0.2	N/mm <sup>2</sup>	225
Rm	N/mm <sup>2</sup>	270
E	N/mm <sup>2</sup>	80e3
v	-	0,33

### **Ισχύοντες κανονισμοί:**

Οι κανονισμοί που λήφθηκαν υπόψη στην παρούσα μελέτη είναι:

- Ευρωκώδικας 1

EC1 – Μέρος 2-1: Πυκνότητες, ίδια βάρη και επιβεβλημένα φορτία

EC1 – Μέρος 2-3: Φορτία χιονιού

EC1 – Μέρος 2-4: Φορτία ανέμου

- Ευρωκώδικας 9

EC3 – Σχεδιασμός κατασκευών από αλουμίνιο, Μέρος 2

EC3 – Design of steel structures, Μέρος 3

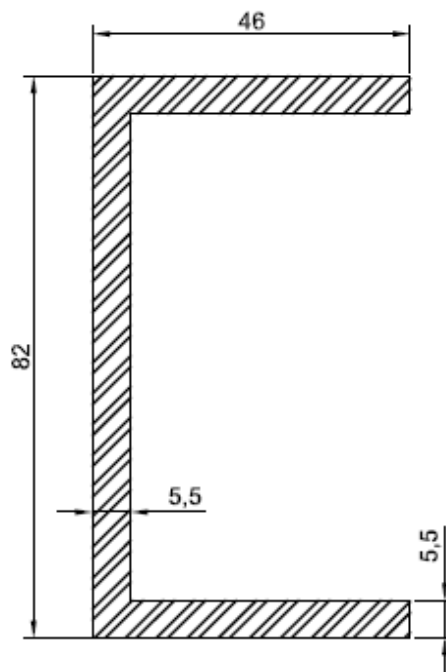
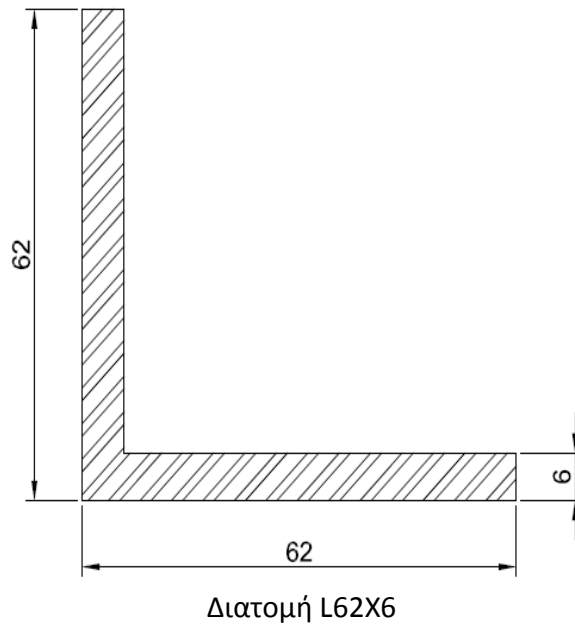
- Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000

- AA-LFRD2000

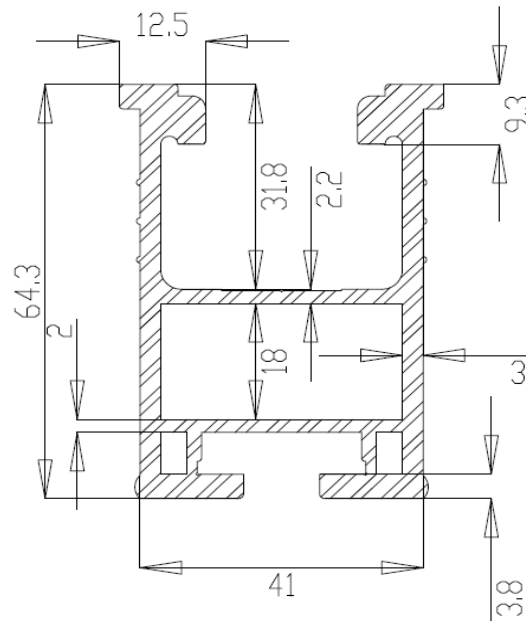


### Κατάταξη διατομών

Οι διατομές που χρησιμοποιούνται είναι αυτές που δίνονται στα παρακάτω σχήματα.



Διατομή SL03



Διατομή SL01

Διατομή	d (mm)	b (mm)	t (mm)	$\beta_o$	Total	Internal	Outstanding
L62x6	-	62	6	4,15	Class 3	Class 3	Class 2
SL01	82	46	5,5	7,36	Class 4	Class 2	Class 4
SL03	46	47	5	3,95	Class2	Class 1	Class2

	Outstanding	Inner
$\beta_1$	3,162	11,594
$\beta_2$	4,743	16,84
$\beta_3$	6,324	23,188

### **Κρίσιμα φορτία διατομών**

Τα κρίσιμα φορτία διατομών όπως έχουν υπολογιστεί από τη μελέτη στατικής επάρκειας του κριώματος είναι:

<b>Διατομή L62Χ6</b>	<b>Διατομή SL03</b>	<b>Διατομή SL01</b>
<b>Φορτίο Σχεδιασμού Κάμψης</b>		
$f_o=225 \text{ MPa}$	$a=0.962$	$a=Wpl/Wel$
$f_u=275 \text{ MPa}$	$f_o=225 \text{ MPa}$	$f_o=225 \text{ MPa}$
$M_{a,rd}= 1.285 \text{ kNm}$	$M_{a,rd}= 4.859 \text{ kNm}$	$M_{a,rd}= 2.194\text{kNm}$
$M_{c,rd}= 1.194 \text{ kNm}$	$M_{c,rd}= 4.781 \text{ kNm}$	$M_{c,rd}=2.876 \text{ kNm}$
$M_{rd}=1.194 \text{ kNm}$	$M_{rd}=4.781 \text{ kNm}$	$M_{rd}= 2.194\text{kNm}$

<b>Φορτίο Σχεδιασμού Διάτμησης</b>		
$F_v= 129.904 \text{ MPa}$	$\lambda_w=85.959$	$F_v= 129.904 \text{ MPa}$
$V_{rd}= 35.154 \text{ kN}$	$\rho_v=0,470$	$V_{rd}= 40.842 \text{ kN}$
	$V_{rd}= 37.903 \text{ kN}$	

<b>Φορτίο Σχεδιασμού Λυγισμού από θλίψη</b>		
$\lambda=76.396$	$\lambda=78.974$	$\lambda=114.643$
$\lambda_1= 59.238$	$\lambda_1=60.178$	$\lambda_1=59.238$
$\lambda_m= 1.290$	$\lambda_m=1.312$	$\lambda_m= 1.935$
$\phi=1.451$	$\phi=1.482$	$\phi=2.546$
$x= 0,324$	$x=0.289$	$x= 0,238$
$N_{cr}= 51.613 \text{ kN}$	$N_{cr}=52.995 \text{ kN}$	$N_{cr}= 38 \text{ kN}$
	$A=445.5$	
	$n=0,969$	

## Φορτία – Συνδυασμοί φορτίσεων

### Μόνιμα φορτία (D)

Ίδιο βάρος της κατασκευής του ικριώματος  
Πρόσθετο μόνιμο βάρος των φωτοβολταϊκών πάνελ: το βάρος έκαστου 20 kg και η διαστασή του 1600x800x50.

### Φορτίο χιονιού (S)

Ανάλογα με τη μορφή της στέγης, τα θερμικά της χαρακτηριστικά, την τραχύτητα της επιφάνειας, το ποσό της θερμότητας που εκλύεται κάτω από τη στέγη, την απόσταση των γειτονικών κτιρίων, τον περιβάλλοντα χώρο και τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, το χιόνι μπορεί να συσσωρευθεί επί της στέγης κατά διάφορους τρόπους. Ιδιαίτερη σημασία έχει το κατά πόσον εκτεθειμένη είναι η οροφή στον άνεμο, οι μεταβολές της θερμοκρασίας καθώς και η πιθανότητα συγκέντρωσης λόγω κατακρήμνισης ή βροχόπτωσης.

Σύμφωνα με τη στατική μελέτη του ικριώματος οι συντελεστές για την κατασκευή αυτή είναι:

$C_t$	1,00
$\phi$	30
$\mu_1$	0,80
$C_e$	1,00

<b>Ζώνη</b>	<b>A</b>
1	1
2	2
3	4

Οι τύποι που χρησιμοποιούνται είναι:

$$S_k = (0,42 \cdot Z - 0,03) \cdot \left(1 - \frac{L}{917}\right)^2$$

$$\mu_i = 0,8 \cdot \frac{(60 - \phi)}{30}$$

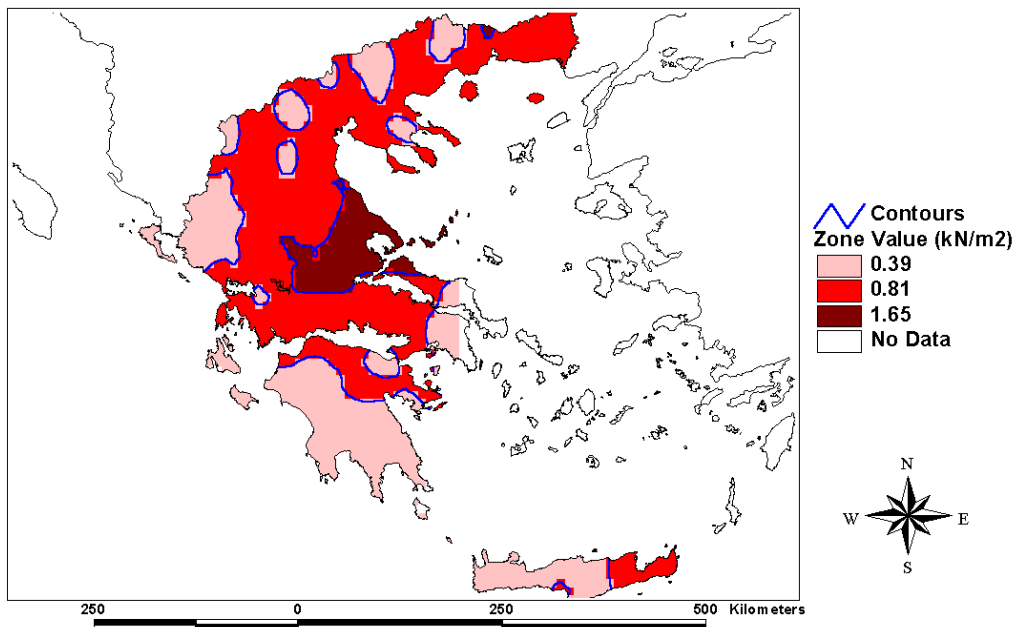
$$S_i = S_{k_{\max}} \cdot C_t \cdot C_e \cdot \mu_i$$

Όπου:

- $\mu_i$  είναι ο συντελεστής μορφής φορτίου χιονιού
- $S_k$  είναι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου χιονιού επί του εδάφους
- $C_e$  είναι ο συντελεστής έκθεσης
- $C_t$  είναι ο συντελεστής θερμότητας

Το φορτίο  $S_t$  θεωρείται ότι ενεργεί κατακόρυφα και αναφέρεται στην οριζόντια προβολή της στέγης.

## Greece: Snow Load at Sea Level



H (mm)	Sk,max (kN/m <sup>2</sup> )			St (kN/m <sup>2</sup> )		
	Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3	Ζώνη 1	Ζώνη 2	Ζώνη 3
0	0,39	0,81	1,65	0,31	0,65	1,32
100	0,39	0,82	1,67	0,32	0,66	1,34
200	0,41	0,85	1,73	0,33	0,68	1,38
300	0,43	0,90	1,83	0,35	0,72	1,46
400	0,46	0,96	1,96	0,37	0,77	1,57
500	0,51	1,05	2,14	0,40	0,84	1,71
600	0,56	1,16	2,36	0,45	0,93	1,89
700	0,62	1,28	2,61	0,49	1,03	2,09

800	0,69	1,43	2,91	0,55	1,14	2,32
900	0,77	1,59	3,24	0,61	1,27	2,59
1000	0,85	1,77	3,61	0,68	1,42	2,89
1100	0,95	1,98	4,02	0,76	1,58	3,22
1200	1,06	2,20	4,48	0,85	1,76	3,58
1300	1,17	2,44	4,97	0,94	1,95	3,97
1400	1,30	2,70	5,50	1,04	2,16	4,40
1500	1,43	2,98	6,06	1,15	2,38	4,85
1600	1,58	3,28	6,67	1,26	2,62	5,34
1700	1,73	3,59	7,32	1,38	2,88	5,86
1800	1,89	3,93	8,01	1,51	3,14	6,41
1900	2,06	4,29	8,73	1,65	3,43	6,99
2000	2,25	4,66	9,50	1,80	3,73	7,60

<u>Πυκνότητα χιονιού</u>	
Είδος χιονιού –	Πυκνότητα $\left[ \frac{kN}{m^3} \right]$
Φρέσκο	1,0
Συμπιεσμένο (μερικές ώρες ή ημέρες μετά τη χιονόπτωση)	2,0
Παλιό (μερικές εβδομάδες ή μήνες μετά τη χιονόπτωση)	2,5 – 3,5
Βρεγμένο	4,0

## Φορτία ανέμου (W)

Η συνολική απόκριση των κατασκευών και των επιμέρους στοιχείων τους στη δράση του ανέμου, μπορεί να θεωρηθεί ως επαλληλία μίας «βασικής» και μίας «συντονιστικής» συνιστώσας, όπου η βασική συνιστώσα ενεργεί ως οιονεί στατική ενώ η συντονιστική ως δυναμική. Για το μεγαλύτερο μέρος των κατασκευών αυτή η δεύτερη είναι συνήθως μικρή και μπορεί να αγνοηθεί, οπότε ο υπολογισμός γίνεται μόνο βάσει της πρώτης.

Στην μελέτη έγιναν δύο παραδοχές:

- η παραδοχή για ζώνη I αφού είναι προφανές ότι οι ανεμοπιέσεις για ζώνες II και III είναι μικρότερες από αυτή της ζώνης I.
- η παραδοχή ότι η επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πλαισίων είναι επαρκώς δύσκαμπτη.

Κατηγορία Περιοχής I	
$z_{min}$	1,00
$z_o$	0,01
$z_{o,II}$	0,05
$k_t=0,19*(z_o/z_{o,II})^{0,07}$	0,17

Αεροδυναμικοί Συντελεστές	
$z$	1,21
$c_t$	1,00
$c_r$	0,81
$c_e=c_r^2*c_t^2*(1+7*k_t/(c_r*c_t))$	1,63

Φορτία αναφοράς	
$q_b$	33,00
$q_p=1/2*\rho*q_b^2*c_e$	1,11

Ανεμοφόρτιση	
$c_{p,net}$	1,2
$w_e=c_{p,net}*q_p$	1,33
$c_{p,net}$	1,8
$w_e=c_{p,net}*q_p$	1,99

Στα παραπάνω καλύπτεται η απαίτηση του κατασκευαστή για φορτίο  $w_e=1.0$   $kN/m^2$ .

### Φορτίο σεισμού (Q)

Για τον σεισμό έχουμε τις παρακάτω παραμέτρους:

Παραμετροι Φάσματος	
$\gamma_1$	1,000
$q$	1,500
$\zeta$	2,000
$n$	1,323
$\Theta$	1,000
$B_0$	2,500
Κατ. Εδάφους	
T1 (sec)	0,200
T2 (sec)	0,600
a	0,360

Οριζόντια συνιστώσα	
T (sec)	$\Phi_d(T)$
0,000	0,360
0,200	0,794
0,600	0,794
2,000	0,356



## Συνδυασμοί φορτίσεων

Οι συνδυασμοί φορτίσεων που ακολουθούνται είναι οι εξής:

<b>Combination</b>				
<b>ComboName</b>	<b>ComboType</b>	<b>CaseType</b>	<b>CaseName</b>	<b>ScaleFactor</b>
Text	Text	Text	Text	Unitless
COMB1	Linear Add	Linear Static	DEAD	1,35
COMB1		Linear Static	wind_front	1,5
COMB1		Linear Static	SNOW	1,05
COMB2	Linear Add	Linear Static	DEAD	1,35
COMB2		Linear Static	wind_back	-1,5
COMB2		Linear Static	SNOW	1,05
COMB3	Linear Add	Linear Static	DEAD	1,35
COMB3		Linear Static	wind_front	0,9
COMB3		Linear Static	SNOW	1,5
COMB4	Linear Add	Linear Static	DEAD	1,35
COMB4		Linear Static	wind_back	-0,9
COMB4		Linear Static	SNOW	1,5
COMB5	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB5		Linear Static	QUAKE_X	1
COMB5		Linear Static	quake_y	0,3
COMB5		Linear Static	quake_z	0,3
COMB6	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB6		Linear Static	QUAKE_X	0,3
COMB6		Linear Static	quake_y	1
COMB6		Linear Static	quake_z	0,3
COMB7	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB7		Linear Static	QUAKE_X	0,3
COMB7		Linear Static	quake_y	0,3
COMB7		Linear Static	quake_z	1
COMB8	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB8		Linear Static	QUAKE_X	1
COMB8		Linear Static	quake_y	0,3
COMB8		Linear Static	SNOW	0,3
COMB9	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB9		Linear Static	QUAKE_X	-1
COMB9		Linear Static	quake_y	0,3
COMB9		Linear Static	SNOW	0,3
COMB10	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB10		Linear Static	QUAKE_X	-1

COMB10		Linear Static	quake_y	-0,3
COMB10		Linear Static	SNOW	0,3
COMB11	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB11		Linear Static	QUAKE_X	1
COMB11		Linear Static	quake_y	-0,3
COMB11		Linear Static	SNOW	0,3
COMB12	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB12		Linear Static	QUAKE_X	0,3
COMB12		Linear Static	quake_y	1
COMB12		Linear Static	SNOW	0,3
COMB13	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB13		Linear Static	QUAKE_X	0,3
COMB13		Linear Static	quake_y	-1
COMB13		Linear Static	SNOW	0,3
COMB14	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB14		Linear Static	QUAKE_X	-0,3
COMB14		Linear Static	quake_y	-1
COMB14		Linear Static	SNOW	0,3
COMB15	Linear Add	Linear Static	DEAD	1
COMB15		Linear Static	QUAKE_X	-0,3
COMB15		Linear Static	quake_y	1
COMB15		Linear Static	SNOW	0,3
COMB16	Linear Add	Linear Static	DEAD	0,9
COMB16		Linear Static	wind_back	1,5

## Εκλογή κοχλιών

Σύμφωνα με την υπάρχουσα μελέτη στατικής στατική επάρκειας ικριώματος στο οποίο αναρτώνται φωτοβολταϊκά ο κόμβος ο οποίος δέχεται τη μέγιστη δύναμη αντίδρασης, επομένως και ο δυσμενέστερος, είναι ο 117. Ο κόμβος αυτός καταπονείται από 3 δυνάμεις:

$$F_x = 3,69kN$$

$$F_y = 22,23kN$$

$$F_z = 42,48kN$$

Η  $F_x$  και η  $F_y$  καταπονούν σε διάτμηση τον κοχλία:  $F_{\text{διατμ.}} = 22,53kN$  ενώ η  $F_z$  τον καταπονεί εφελκυστικά.

Για την εκλογή του κοχλία εξετάζουμε διάφορες περιπτώσεις και στη συνέχεια θα επιλέξουμε την καλύτερη.

- **Ποιότητα κοχλία A2 - Υλικό St80**

Αντοχή θραύσης σε εφελκυσμό :  $f_{ub} = 800N / mm^2$

Όριο σε εφελκυσμό πάνω από το οποίο προκαλούνται μόνιμες παραμορφώσεις στον κοχλία:

$$f_{vb} = 600N / mm^2$$

### Υπολογισμός κοχλιοσύνδεσης μόνο με την εφελκυστική φόρτιση

Οπότε η ορθή τάση που προκύπτει από την εφελκυστική δύναμη που καταπονεί τον κοχλία είναι:

$$\sigma_z = \frac{F_V}{A_K} = \frac{42480}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{54087,22}{d^2}$$

Για αντοχή του κοχλίου σε θραύση από εφελκυσμό έχουμε:

$$\sigma_z \leq f_{ub}$$
$$\Rightarrow \frac{54087,22}{d^2} \leq 800$$

$$\Rightarrow d^2 \geq 67,61$$

$$\Rightarrow d \geq 8,22mm$$

Διαλέγουμε το αμέσως επόμενο τυποποιημένο μέγεθος άρα θέλουμε κοχλία M9. Κοχλίες M9 όμως δεν είναι εύκολα προσβάσιμοι στην αγορά οπότε για λόγους διευκόλυνσης επιλέγουμε **M10**.

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	9,026	8,160	1,5

Για αντοχή του κοχλίου σε οποιαδήποτε παραμόρφωση έχουμε:

$$\sigma_z \leq f_{vb}$$
$$\Rightarrow \frac{54087,22}{d^2} \leq 600$$

$$\Rightarrow d^2 \geq 90,145$$

$$\Rightarrow d \geq 9,49mm$$

Διαλέγοντας το αμέσως επόμενο τυποποιημένο μέγεθος άρα θέλουμε κοχλία **M10**.

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	9,026	8,160	1,5

Θεωρώντας μη αμελητέα τη διατμητική δύναμη τότε έχουμε διατμητική τάση ίση με:

$$\tau_d = \frac{F_{\text{διατμ.}}}{A_K} = \frac{22.53}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{28686,09}{d^2}$$

Η ισοδύναμη τάση είναι:

$$\sigma_{vz} = \frac{73444,55}{d^2}$$

Άρα ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως και παραπάνω για έλεγχο της αντοχής του κοχλίου σε θραύση και σε παραμόρφωση έχουμε αντίστοιχα:

α)

$$\sigma_{vz} \leq f_{ub}$$
$$\Rightarrow \frac{73444,55}{d^2} \leq 800$$
$$\Rightarrow d^2 \geq 91,81$$
$$\Rightarrow d \geq 9,58mm$$

Οπότε εκλέγουμε κοχλία **M10**

β)

$$\sigma_{vz} \leq f_{vb}$$
$$\Rightarrow \frac{73444,55}{d^2} \leq 600$$
$$\Rightarrow d^2 \geq 122,41$$
$$\Rightarrow d \geq 11,06mm$$

Οπότε εκλέγουμε κοχλία **M12**

Υπολογισμός κοχλιοσυνδέσεως με διατμητική φόρτιση:

Η ελάχιστη απαιτούμενη δύναμη προέντασης μίας κοχλιοσυνδέσεως που καταπονείται με διατμητική φόρτιση εξαρτάται από τη διατμητική δύναμη και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S_{o\lambda} = \mu \cdot \frac{F_V}{P}$$
$$\Rightarrow F_V = \frac{S_{o\lambda} \cdot P}{\mu}$$
$$\Rightarrow F_V = 187,75kN$$

Θεωρήσαμε ότι:

- ο συντελεστής ασφαλείας είναι  $S_{oλ} = 1$  αφού ήδη στους υπολογισμούς των δυνάμεων έχει συμπεριληφθεί ένα όριο ασφαλείας
- ο συντελεστής ολίσθησης είναι  $\mu = 0,12$ , μικρότερος από το συνήθη λόγο της θέσης στην οποία βρίσκεται ο κόμβος που εξετάζουμε.

Έστω ότι επιλέγουμε κοχλία **M10**.

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	9,026	8,160	1,5

Η ορθή τάση που προκύπτει από την δύναμη προεντάσεως είναι:

$$\Rightarrow \sigma_z = 597,627 N / mm^2$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από τη στρεπτική ροπή είναι:

$$\Rightarrow t_t = 13.473,79 N / mm^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική τάση που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο παραπάνω είναι:

$$\Rightarrow t_{iv} = 13.477,11 N / mm^2$$

Προφανώς ο κοχλίας δεν αντέχει.

Έστω ότι επιλέγουμε κοχλία **M16**

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	14,701	13,546	2

Η ορθή τάση που προκύπτει από την δύναμη προεντάσεως είναι:

$$\sigma_z = 233,448 N / mm^2$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από τη στρεπτική ροπή είναι:

$$t_t = 514,351 N / mm^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική τάση που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο παραπάνω είναι:

$$t_{iv} = 527,429 N / mm^2$$

Παρατηρούμε ότι για υλικό St80 ο κοχλίας **M16** και σε θραύση και σε παραμόρφωση.

- **Ποιότητα κοχλία 8.8 - Υλικό St80**

Αντοχή θραύσης σε εφελκυσμό :  $f_{ub} = 800 N / mm^2$

Όριο σε εφελκυσμό πάνω από το οποίο προκαλούνται μόνιμες παραμορφώσεις στον κοχλία:

$$f_{vb} = 640 N / mm^2$$

Υπολογισμός κοχλιοσύνδεσης μόνο με την εφελκυστική φόρτιση

Οπότε η ορθή τάση που προκύπτει από την εφελκυστική δύναμη που καταπονεί τον κοχλία είναι:

$$\sigma_z = \frac{F_V}{A_K} = \frac{42480}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{54087,22}{d^2}$$

Για αντοχή του κοχλία σε θραύση από εφελκυσμό έχουμε:

$$\sigma_z \leq f_{ub}$$

$$\Rightarrow \frac{54087,22}{d^2} \leq 800$$

$$\Rightarrow d^2 \geq 67,61$$

$$\Rightarrow d \geq 8,22mm$$

Διαλέγουμε το αμέσως επόμενο τυποποιημένο μέγεθος άρα θέλουμε κοχλία M9, ο οποίος όπως αναφέραμε δεν κυκλοφορεί στην αγορά οπότε για λόγους ευκολίας επιλέγουμε **M10**.

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	9,026	8,160	1,5

Για αντοχή του κοχλίου σε οποιαδήποτε παραμόρφωση έχουμε:

$$\begin{aligned}\sigma_z &\leq f_{vb} \\ \Rightarrow \frac{54087,22}{d^2} &\leq 640 \\ \Rightarrow d^2 &\geq 84,511 \\ \Rightarrow d &\geq 9,19mm\end{aligned}$$

Διαλέγοντας το αμέσως επόμενο τυποποιημένο μέγεθος άρα θέλουμε κοχλία **M10**.

Κατά DIN 13:

d2	d3	P
9,026	8,160	1,5

Θεωρώντας μη αμελητέα τη διατμητική δύναμη τότε έχουμε διατμητική τάση ίση με:

$$\tau_d = \frac{F_{\text{διατμ.}}}{A_K} = \frac{22,53}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{28686,09}{d^2}$$

Η ισοδύναμη τάση είναι:

$$\sigma_{vz} = \frac{73444,55}{d^2}$$

Άρα ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως και παραπάνω για έλεγχο της αντοχής του κοχλίου σε θραύση και σε παραμόρφωση έχουμε αντίστοιχα:

α)

$$\begin{aligned}\sigma_{vz} &\leq f_{ub} \\ \Rightarrow \frac{73444,55}{d^2} &\leq 800 \\ \Rightarrow d^2 &\geq 91,81 \\ \Rightarrow d &\geq 9,58mm\end{aligned}$$

Οπότε εκλέγουμε κοχλία **M10**

β)

$$\sigma_{vz} \leq f_{vb}$$



$$\Rightarrow \frac{73444,55}{d^2} \leq 640$$

$$\Rightarrow d^2 \geq 114,76$$

$$\Rightarrow d \geq 10,71mm$$

Οπότε εκλέγουμε κοχλία **M12**

Υπολογισμός κοχλιοσυνδέσεως με διατμητική φόρτιση:

Η ελάχιστη απαιτούμενη δύναμη προέντασης μίας κοχλιοσυνδέσεως που καταπονείται με διατμητική φόρτιση εξαρτάται από τη διατμητική δύναμη και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S_{o\lambda} = \mu \cdot \frac{F_V}{P}$$

$$\Rightarrow F_V = \frac{S_{o\lambda} \cdot P}{\mu}$$

$$\Rightarrow F_V = 187,75kN$$

Θεωρήσαμε ότι:

- ο συντελεστής ασφαλείας είναι  $S_{o\lambda} = 1$  αφού ήδη στους υπολογισμούς των δυνάμεων έχει συμπεριληφθεί ένα όριο ασφαλείας
- ο συντελεστής ολίσθησης είναι  $\mu = 0,12$ , μικρότερος από το συνήθη λόγο της θέσης στην οποία βρίσκεται ο κόμβος που εξετάζουμε.

Έστω ότι επιλέγουμε κοχλία **M10**.

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	9,026	8,160	1,5

Η ορθή τάση που προκύπτει από την δύναμη προεντάσεως είναι:

$$\Rightarrow \sigma_z = 597,627N / mm^2$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από τη στρεπτική ροπή είναι:

$$\Rightarrow t_t = 13.473,79N / mm^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική τάση που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο παραπάνω είναι:

$$\Rightarrow t_{tv} = 13.477,11N / mm^2$$

Προφανώς ο κοχλίας δεν αντέχει.

Έστω ότι επιλέγουμε κοχλία **M16**

Κατά DIN 13:	d2	d3	P	
	14,701	13,546		2

Η ορθή τάση που προκύπτει από την δύναμη προεντάσεως είναι:

$$\sigma_z = 233,448N / mm^2$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από τη στρεπτική ροπή είναι:

$$t_t = 514,351N / mm^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική τάση που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο παραπάνω είναι:

$$t_{tv} = 527,429N / mm^2$$

Παρατηρούμε ότι για υλικό St80 ο κοχλίας **M16** και σε θραύση και σε παραμόρφωση.

- **Ποιότητα κοχλία A4 - Υλικό St100**

Αντοχή θραύσης σε εφελκυσμό :  $f_{ub} = 1000N / mm^2$

Όριο σε εφελκυσμό πάνω από το οποίο προκαλούνται μόνιμες παραμορφώσεις στον κοχλία:

$$f_{vb} = 750N / mm^2$$

Υπολογισμός κοχλιοσύνδεσης μόνο με την εφελκυστική φόρτιση

Οπότε η ορθή τάση που προκύπτει από την εφελκυστική δύναμη που καταπονεί τον κοχλία είναι:

$$\sigma_z = \frac{F_V}{A_K} = \frac{42480}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{54087,22}{d^2}$$

Για αντοχή του κοχλία σε θραύση από εφελκυσμό έχουμε:

$$\begin{aligned} \sigma_z &\leq f_{ub} \\ \Rightarrow \frac{54087,22}{d^2} &\leq 1000 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow d^2 \geq 54,09$$

$$\Rightarrow d \geq 7,35mm$$

Διαλέγουμε το αμέσως επόμενο τυποποιημένο μέγεθος άρα θέλουμε κοχλία M9, ο οποίος όπως αναφέραμε δεν κυκλοφορεί στην αγορά οπότε για λόγους ευκολίας επιλέγουμε **M10**.

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	9,026	8,160	1,5

Για αντοχή του κοχλία σε οποιαδήποτε παραμόρφωση έχουμε:

$$\begin{aligned} \sigma_z &\leq f_{vb} \\ \Rightarrow \frac{54087,22}{d^2} &\leq 750 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow d^2 \geq 72,12$$

$$\Rightarrow d \geq 8,49mm$$

Διαλέγοντας το αμέσως επόμενο τυποποιημένο μέγεθος που υπάρχει στην αγορά άρα θέλουμε κοχλία **M10**.

d2	9,026	d3	8,160	P	1,5
----	-------	----	-------	---	-----

Κατά DIN 13:

Θεωρώντας μη αμελητέα τη διατμητική δύναμη τότε έχουμε διατμητική τάση ίση με:

$$\tau_d = \frac{F_{\text{διατμ.}}}{A_K} = \frac{22.53}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{28686,09}{d^2}$$

Η ισοδύναμη τάση είναι:

$$\sigma_{vz} = \frac{73444,55}{d^2}$$

Άρα ακολουθώντας την ίδια διαδικασία όπως και παραπάνω για έλεγχο της αντοχής του κοχλίου σε θραύση και σε παραμόρφωση έχουμε αντίστοιχα:

α)

$$\sigma_{vz} \leq f_{ub}$$
$$\Rightarrow \frac{73444,55}{d^2} \leq 1000$$
$$\Rightarrow d^2 \geq 73,44$$
$$\Rightarrow d \geq 8,57 \text{ mm}$$

Οπότε εκλέγουμε κοχλία **M10**

β)

$$\sigma_{vz} \leq f_{vb}$$
$$\Rightarrow \frac{73444,55}{d^2} \leq 750$$
$$\Rightarrow d^2 \geq 97,92$$
$$\Rightarrow d \geq 9,90 \text{ mm}$$

Οπότε εκλέγουμε κοχλία **M10**

### Υπολογισμός κοχλιοσυνδέσεως με διατμητική φόρτιση:

Η ελάχιστη απαιτούμενη δύναμη προέντασης μίας κοχλιοσυνδέσεως που καταπονείται με διατμητική φόρτιση εξαρτάται από τη διατμητική δύναμη και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S_{o\lambda} = \mu \cdot \frac{F_V}{P}$$
$$\Rightarrow F_V = \frac{S_{o\lambda} \cdot P}{\mu}$$
$$\Rightarrow F_V = 187,75kN$$

Θεωρήσαμε ότι:

- ο συντελεστής ασφαλείας είναι  $S_{o\lambda} = 1$  αφού ήδη στους υπολογισμούς των δυνάμεων έχει συμπεριληφθεί ένα όριο ασφαλείας
- ο συντελεστής ολίσθησης είναι  $\mu = 0,12$ , μικρότερος από το συνήθη λόγο της θέσης στην οποία βρίσκεται ο κόμβος που εξετάζουμε.

Έστω ότι επιλέγουμε κοχλία **M10**.

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	9,026	8,160	1,5

Η ορθή τάση που προκύπτει από την δύναμη προεντάσεως είναι:

$$\Rightarrow \sigma_z = 597,627N / mm^2$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από τη στρεπτική ροπή είναι:

$$\Rightarrow t_t = 13.473,79N / mm^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική τάση που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο παραπάνω είναι:

$$\Rightarrow t_{iv} = 13.477,11N / mm^2$$

Προφανώς ο κοχλίας δεν αντέχει.

Έστω ότι επιλέγουμε κοχλία **M16**

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	14,701	13,546	2

Η ορθή τάση που προκύπτει από την δύναμη προεντάσεως είναι:

$$\sigma_z = 233,448N / mm^2$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από τη στρεπτική ροπή είναι:

$$t_t = 514,351N / mm^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική τάση που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο παραπάνω είναι:

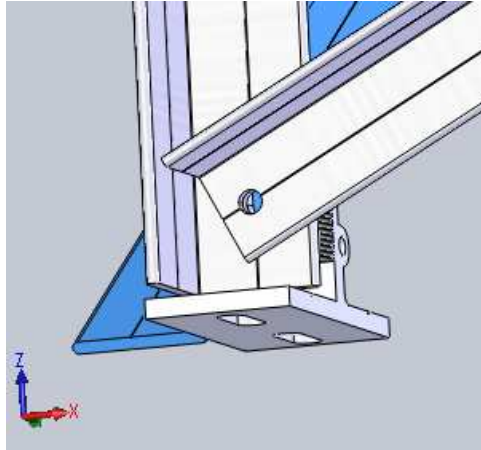
$$t_{iv} = 527,429N / mm^2$$

Παρατηρούμε ότι για υλικό St100 ο κοχλίας **M16** και σε θραύση και σε παραμόρφωση.

## Έλεγχος σύνθλιψης της άντυνας της οπής

Ελέγχουμε 3 ενώσεις τις βάσεως:

### 1. Βάση – L62X62X6\_2250



Πλάτος βάσης επί του οποίου περνάει ο κοχλίας: 42,22mm

Πλάτος διατομής L62X62X6\_2250 επί του οποίου περνάει ο κοχλίας: 6mm

Τάση σύνθλιψης της άντυνας της οπής:

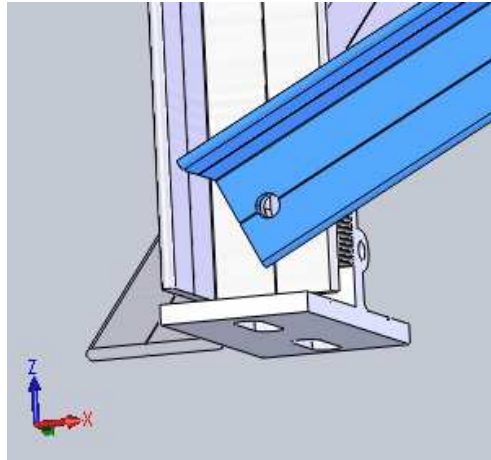
$$q = \frac{F_{\text{διατμ.}}}{t_{\text{βάσης}} \cdot d_{\text{κοχλία}}} = \frac{22,53}{48,22 \cdot d_{\text{κοχλία}}}$$

Υπολογίζουμε την τάση που προκύπτει και για τις τρεις κατηγορίες κοχλιών εκ των οποίων έχουμε κάνει εκλογή των κοχλιών – A2\_St80, 8.8\_St80, A4\_St100 αφού μέσω ελέγχου καταλήξαμε στους ίδιους κοχλίες. Η τάση σύνθλιψης της άντυνας της οπής στη βάση θα είναι:

Αν θεωρήσουμε ότι ο εκάστοτε κοχλίας μετά την προένταση καταπονείται σε:

- Αν επιλέξουμε κοχλίες M12  $q = 38,94 \text{ N} / \text{mm}^2$
- Αν επιλέξουμε κοχλίες M16  $q = 29,20 \text{ N} / \text{mm}^2$

## 2. Βάση – L50X50X5\_1492



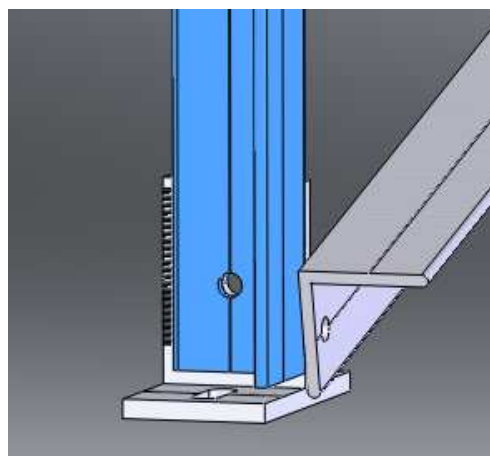
Πλάτος βάσης επί του οποίου περνάει ο κοχλίας: 7,5mm  
Πλάτος 1<sup>ης</sup> διατομής επί του οποίου περνάει ο κοχλίας: 5mm  
Πλάτος 2<sup>ης</sup> διατομής επί του οποίου περνάει ο κοχλίας: 6mm

Τάση σύνθλιψης της άντυγας της σπής:

$$q = \frac{F_{\text{διατμ.}}}{t_{\text{βάσης}} \cdot d_{\text{κοχλία}}} = \frac{22,53}{18,5 \cdot d_{\text{κοχλία}}}$$

- Αν επιλέξουμε κοχλίες M12  $q = 101,49N / mm^2$
- Αν επιλέξουμε κοχλίες M16  $q = 76,11N / mm^2$

## 3. Βάση – L62X62X6\_750





Πλάτος βάσης επί του οποίου περνάει ο κοχλίας: 8mm  
Πλάτος διατομής επί του οποίου περνάει ο κοχλίας: 6mm

Τάση σύνθλιψης της άντυγας της σπής στη βάση:

$$q = \frac{F_{\text{διατμ.}}}{t_{\text{βάσης}} \cdot d_{\text{κοχλίας}}} = \frac{22,53}{14 \cdot d_{\text{κοχλίας}}}$$

- Αν επιλέξουμε κοχλίες M12  $q = 134,11N / mm^2$
- Αν επιλέξουμε κοχλίες M16  $q = 100,58N / mm^2$

Παρατηρούμε ότι για όλες τις περιπτώσεις συνδέσεως που χρησιμοποιούνται οι εκλεγμένοι κοχλίες  $q \leq q_{\text{επ}}$  όπου  $q_{\text{επ}} = 225N / mm^2$  για το υλικό Al6061 που χρησιμοποιούμε, οπότε δεν υπάρχει σύνθλιψη άντυγας σε καμία σπή κοχλιώσεως .

### **Παράδειγμα σύγκρισης καταπόνησης κοχλία με εφελκυστική και με διατμητική φόρτιση.**

Κοχλίας χαλύβδινος St60 χρησιμοποιείται σε σύνδεση τριβής. Η δύναμη προεντάσεως για τη σύσφιξη του κοχλία είναι  $F_V=40\text{kN}$ . Αφού συσφιχτεί ο κοχλίας καταπονείται:

α) με αξονική φόρτιση  $P=20\text{kN}$

β) με διατμητική φόρτιση  $P=20\text{kN}$

- συντελεστής τριβής των σπειρωμάτων είναι  $\mu=0,15$
- συντελεστής τριβής περικοχλίου-συνδεόμενου κομματιού  $\mu_A=0,15$
- μέση διάμετρο τριβόμενης επιφάνειας  $d_A=24\text{mm}$
- συντελεστής ασφαλείας ολίσθησης  $S_{ολ}=1,25$

Για να ελέγξουμε την αντοχή ενός κοχλία ελέγχουμε τον κορμό του.

#### Υπολογισμός κοχλιοσυνδέσεως με αξονική φόρτιση

Όταν μία κοχλιοσύνδεση μετά την προένταση της καταπονείται από μία πρόσθετη εφελκυστική δύναμη λειτουργίας  $P$ , που έχει την ίδια διεύθυνση και φορά με τη δύναμη προεντάσεως  $F_V$  των κοχλίων της συνδέσεως τότε η εφελκυστική δύναμη, που καταπονεί τους κοχλίες κατά τη λειτουργία της συνδέσεως, δεν αυξάνεται από  $F_V$  σε  $F_V + P$ , αλλά σε  $F_V + F_{\Delta K}$  όπου  $F_{\Delta K} < P$ .

Αν, λοιπόν, εκλέξουμε κοχλία για δύναμη ίση με  $F_V + P$  τότε σίγουρα θα αντέχει και σε μικρότερη εφελκυστική δύναμη.

Οπότε η ορθή τάση που προκύπτει από τη δύναμη αυτή είναι:

$$\sigma_z = \frac{F_V}{A_K} = \frac{60000}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{76394,37}{d^2}$$

Από το διάγραμμα Smith για St60 έχουμε  $\sigma_{\epsilon\pi}=270\text{N/mm}^2$  οπότε πρέπει:

$$\begin{aligned}\sigma_z &\leq \sigma_{\epsilon\pi} \\ \Rightarrow \frac{76394,37}{d^2} &\leq 270 \\ \Rightarrow d^2 &\geq 282,84 \\ \Rightarrow d &\geq 16,82\end{aligned}$$

Διαλέγοντας το αμέσως επόμενο τυποποιημένο μέγεθος έχουμε  $d = 18\text{mm}$ .

Κατά DIN 13:	d2	d3	P
	16,376	14,933	2,5

Υπολογισμός κοχλιοσυνδέσεως με διατμητική φόρτιση:

Η ελάχιστη απαιτούμενη δύναμη προέντασης μίας κοχλιοσυνδέσεως που καταπονείται με διατμητική φόρτιση εξαρτάται από τη διατμητική δύναμη και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S_{oz} = \mu \cdot \frac{F_V}{P}$$

$$\Rightarrow F_V = \frac{S_{oz} \cdot P}{\mu}$$

$$\Rightarrow F_V = 166,68kN$$

- Έστω ότι επιλέγουμε κοχλία ονομαστικής διαμέτρου  $d = 18mm$ .

Η ορθή τάση που προκύπτει από την δύναμη προεντάσεως είναι:

$$\sigma_z = \frac{F_V}{A_K}$$

$$\Rightarrow \sigma_z = 163,753N / mm^2$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από τη στρεπτική ροπή είναι:

$$t_t = \frac{M_t}{W_t} = \frac{\frac{F_V}{2} \cdot [d_2 \cdot \tan(\alpha + \rho') + d_A \cdot \mu_A]}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}}$$

$$\Rightarrow t_t = 333,67N / mm^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική τάση που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο παραπάνω είναι:

$$t_{iv} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_z}{2}\right)^2 + t_t^2}$$

$$\Rightarrow t_{iv} = 343,573N / mm^2$$

Από το διάγραμμα Smith για St60 ισχύει  $t_{επ} = 200N/mm^2$  οπότε ο κοχλίας αστοχεί.

Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιλέξουμε μεγαλύτερη διάμετρο για τον κοχλία.

- Έστω ότι επιλέγουμε κοχλία ονομαστικής διαμέτρου  $d = 20mm$

Κατά DIN 13:

d2	d3	P
18,376	16,933	2,5

Η ορθή τάση που προκύπτει από την δύναμη προεντάσεως είναι:

$$\sigma_z = 132,6397N / mm^2$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από τη στρεπτική ροπή είναι:

$$t_t = 297,6955N / mm^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική τάση που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο παραπάνω είναι:

$$t_{iv} = 304,9933N / mm^2$$

Οπότε ο κοχλίας πάλι αστοχεί. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να επιλέξουμε μεγαλύτερη διάμετρο για τον κοχλία.

- Έστω ότι επιλέγουμε κοχλία ονομαστικής διαμέτρου  $d = 24mm$

Κατά DIN 13:

d2	d3	P
22,501	20,319	3

Η ορθή τάση που προκύπτει από την δύναμη προεντάσεως είναι:

$$\sigma_z = 92,11092N / mm^2$$

Η διατμητική τάση που προκύπτει από τη στρεπτική ροπή είναι:

$$t_t = 184,6429N / mm^2$$

Η ισοδύναμη διατμητική τάση που προκύπτει από το συνδυασμό των δύο παραπάνω είναι:

$$t_{iv} = 190,3001N / mm^2$$

Με αυτής της διαμέτρου κοχλία βλέπουμε ότι ισχύει:  $t_{iv} \leq t_{επ}$  άρα ο κοχλίας αντέχει.

## Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα

Όπως καθίσταται σαφές από τα πειραματικά δεδομένα αλλά και το παράδειγμα που έχουν προηγηθεί, όταν η επιπλέον καταπόνηση του κοχλία της σύνδεσης πέραν την προέντασης του είναι διατμητική, τότε απαιτείται μεγαλύτερη διάμετρος κοχλία. Η διαπίστωση αυτή γίνεται σε σχέση με την εφελκυστική φόρτιση. Κατά τη διάτμηση δηλαδή απαιτείται μεγαλύτερη επιφάνεια παραλαβής του φορτίου.

Η ίδια παρατήρηση έχει διατυπωθεί από τον Tresca, ο οποίος διατύπωσε το λεγόμενο κριτήριο μέγιστης διατμητικής τάσης. Το κριτήριο αυτό αποτέλεσε την πρώτη έρευνα για τον καθορισμό της συνθήκης διαρροής μετάλλων και στηρίχθηκε στο γενικότερο νόμο αστοχίας του εδάφους ο οποίος είχε εισαχθεί από τον Coulomb.

Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, λοιπόν, ένα δεδομένο δομικό στοιχείο είναι ασφαλές όσο χρονικό διάστημα η μέγιστη τιμή  $\tau_{max}$  της διατμητικής τάσης σε αυτό το στοιχείο παραμένει μικρότερη από την αντίστοιχη της διατμητικής τάσης που εμφανίζεται σε ένα δοκίμιο εφελκυσμού του ίδιου υλικού καθώς αυτό αρχίζει να διαρρέει. Στην περίπτωση αυτή η μέγιστη τιμή της διατμητικής τάσης υπό την επίδραση ενός κεντρικού αξονικού φορτίου ισούται με το μισό της τιμής της αντίστοιχης ορθής, αξονικής τάσης. Δηλαδή η μέγιστη διατμητική τάση σε ένα δοκίμιο εφελκυσμού είναι  $\frac{f_{vb}}{2}$ . Ως εκ τούτου η μέγιστη εφελκυστική τάση που μπορεί να φορτίσει ένα δοκίμιο είναι διπλάσια από τη μέγιστη διατμητική.

Το αποτέλεσμα αυτό οφείλεται στα εξής:

- Ο χάλυβας είναι ένα αρκετά όλκιμο στοιχείο, οπότε παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στις διατμητικές τάσεις απ' ό,τι στον εφελκυσμό.
- Μια εφελκυσόμενη ράβδος τεντώνεται, οπότε αν υπάρχουν ανωμαλίες στον άξονά της τείνουν να εξαφανιστούν. Όσο περισσότερο φορτίζεται η ράβδος, τόσο πιο ευθύγραμμος γίνεται ο άξονας της. Συνεπώς στον εφελκυσμό έχουμε αύξηση της ευστάθειας της ράβδου.
- Η διάτμηση οδηγεί σε ψαθυρή αστοχία. Ψαθυρή μορφή αστοχίας θεωρείται κάθε αστοχία η οποία συμβαίνει ακαριαία - απροειδοποίητα και κυρίως χωρίς την δυνατότητα να γίνεται ανακατανομή των εντάσεων, δηλαδή όταν δεν έχεις την δυνατότητα υπό σταθερή τάση να αυξάνονται οι παραμορφώσεις σου. Συνεπώς μειώνεται η αντοχή του υλικού σε διαρροή. Δικαιολογείται, έτσι, ότι το όριο διαρροής σε διάτμηση είναι πάντα 0.5-0.6 του ορίου διαρροής σε απλό εφελκυσμό.

## Παράρτημα Α

### Κατηγορίες υλικών κοχλιών

Οι χαλύβδινοι κοχλίες κατατάσσονται σε κατηγορίες ως προς την αντοχή τους. Το σύμβολο της κατηγορίας αντοχής των κοχλιών αποτελείται από δύο ψηφία,  $x$  και  $y$ , χωρισμένα με τελεία ( $x.y$ ). Το πρώτο ψηφίο μας δίνει, αν πολλαπλασιαστεί με το 100, το όριο θραύσης του υλικού των κοχλιών σε MPa. Το δεύτερο ψηφίο μας δίνει το όριο διαρροής ως ποσοστό του ορίου θραύσης. Για παράδειγμα: κατηγορία ( $x.y$ ) = (4.8) σημαίνει:  $S_u = x*100 = 4*100 = 400$  MPa, και  $S_y = (y*10)\%*S_u = (8*10)\% * 400 = 320$  MPa.

**Πίνακας 7-10: Μηχανικές ιδιότητες χαλύβδινων κοχλιών μετρικών σπειρωμάτων (DINISO\_898\_part\_1)**

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΚΟΧΛΙΑ	$S_u$	$S_y$	$S_{y0.2}$	$\delta_u$ (% επιμήκυνση μετά τη θραύση)	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΠΕΡΙ- ΚΟΧΛΙΟΥ	$S_u$
	(MPa)	(MPa)	(MPa)			(MPa)
3.6	300	180	-	25	5	500
4.6	400	240	-	22	5	500
4.8	400	320	-	14	5	500
5.6	500	300	-	20	5	500
5.8	500	400	-	10	5	500
6.6	600	360	-	16	6	600
6.8	600	480	-	8	6	600
6.9	600	-	540	12	6	600
8.8	800	-	640	12	8	800
10.9	1000	-	900	9	10	1000
12.9	1200	-	1080	8	12	1200
14.9	1400	-	1260	7	14	1400

## Παράρτημα Β

### Εισαγωγή

Η ανάλυση των μηχανικών μερών υπό την μορφή απλών ράβδων, δοκών, κ.α. μπορεί να γίνει εύκολη υπόθεση με την χρήση βασικών μεθόδων μηχανικής, που παρέχουν λύσεις κλειστής μορφής. Ωστόσο τα μηχανικά μέρη σε μία πραγματική κατασκευή, σπάνια έχουν τόσο απλή μορφή, και ο σχεδιαστής είναι αναγκασμένος είτε να κάνει απλοποιήσεις επιλύοντας το πρόβλημα του με προσεγγίσεις λύσεων κλειστής μορφής (που έχουν μειωμένη αποτελεσματικότητα), είτε να χρησιμοποιήσει πειραματικές και αριθμητικές μεθόδους.

Υπάρχουν αρκετές αριθμητικές τεχνικές για μηχανολογικές εφαρμογές, οι οποίες επιλύονται εύκολα με την χρήση Η/Υ. Στον σύγχρονο μηχανικό σχεδιασμό, χρησιμοποιείται αρκετά όπως αναφέραμε ο υπολογιστικά υποβοηθούμενος σχεδιασμός (CAD), το οποίο ως λογισμικό συνεργάζεται πολύ αρμονικά με τις μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων (FEA), με αποτέλεσμα τα περισσότερα τα περισσότερα προγράμματα CAD πλέον να ενσωματώνουν δυνατότητες ανάλυσης FEA όπως το SolidWorks που χρησιμοποιήθηκε και στην παρούσα εργασία. Οι μαθηματικές θεωρίες και οι εφαρμογές της μεθόδου είναι τεράστιες. Υπάρχει επίσης ένας μεγάλος αριθμός εμπορικών πακέτων εξειδικευμένου λογισμικού για πεπερασμένα στοιχεία, όπως το ANSYS, NASTRAN κλπ.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα επιχειρηθεί μία συνοπτική εισαγωγή σε μερικές από τις θεμελιώδεις πτυχές της FEA, προκειμένου να γίνουν περισσότερο κατανοητές οι πειραματικές μετρήσεις του επόμενου κεφαλαίου. Στο σχήμα 3-1 απεικονίζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων ενός στροφαλοφόρου άξονα που αναπτύχθηκε για να μελετηθούν τα αποτελέσματα της μηχανικής του καταπόνησης και φόρτισης στην κατασκευαστική του απόδοση.

Υπάρχει μια πληθώρα εφαρμογών FEA, όπως η στατική και η δυναμική ανάλυση (γραμμική και μη γραμμική), αναλύσεις τάσης και παραμόρφωσης, ελεύθερων ή εξαναγκασμένων κραδασμών, αναλύσεις μεταφοράς θερμότητας (η οποία μπορεί να συνδυαστεί με την ανάλυση τάσεων και παραμόρφωσης ώστε να υπολογιστούν οι θερμικά προκαλούμενες τάσεις και παραμορφώσεις), ελαστικής αστάθειας (κύρτωση), ακουστική ανάλυση, ηλεκτροστατική και μαγνητική (συνδυασμένη με μεταφορά θερμότητας), υδραυλική, αναλύσεις σωληνώσεων (piping) και φυσικά αναλύσεις συνδυασμού των παραπάνω (multiphysics analysis). Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε περισσότερο με την βασική μηχανική ανάλυση.

Ένα πραγματικό μηχανικό μέρος είναι μία συνεχής ελαστική δομή. Η ανάλυση FEA τμηματοποιεί (διακριτοποιεί) την δομή σε μικρά ωστόσο πεπερασμένα, αυστηρά ορισμένα, ελαστικά υποδομήματα (τα αποκαλούμενα και στοιχεία). Με την χρήση

πολυωνυμικών εξισώσεων και μητρών, ορίζεται η συνεχής ελαστική συμπεριφορά του κάθε στοιχείου εκφρασμένη γύρω από τις ιδιότητες του υλικού του στοιχείου, αλλά και βάσει της γεωμετρίας του. Τα φορτία μπορούν να εφαρμόζονται μέσα στο στοιχείο (βαρυτικές, δυναμικές, θερμικές ή άλλες επιδράσεις), στην επιφάνεια του, ή ακόμα στους κόμβους του στοιχείου. Οι κόμβοι του στοιχείου είναι οι βασικές και κυρίαρχες οντότητες του στοιχείου, αφού εκεί το στοιχείο ενώνεται με άλλα στοιχεία, με βάση αυτή την σύνδεση καθορίζονται οι ελαστικές ιδιότητες του, εκεί εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες και τέλος εκεί εφαρμόζονται οι δυνάμεις. Ο κάθε κόμβος χαρακτηρίζεται από βαθμούς ελευθερίας (dof's).

Οι βαθμοί ελευθερίας είναι οι ανεξάρτητες καρτεσιανές και στρεπτικές κινήσεις που μπορεί να υπάρχουν σε έναν κόμβο. Στην καλύτερη περίπτωση, ένας κόμβος μπορεί να διαθέτει τρεις καρτεσιανούς και τρεις περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Εφόσον το κάθε στοιχείο μέσα σε μια δομή ορίζεται τοπικά με την μορφή του πίνακα, συνεπαγωγικά τα στοιχεία στο σύνολο τους εκφράζονται μέσω των κοινών κόμβων τους (μέσω των DOF που κάθε φορά έχουν) σε μία καθολική μήτρα του συστήματος. Στην συνέχεια καθορίζονται τα εφαρμοζόμενα φορτία και οι οριακές συνθήκες, και έπειτα προσδιορίζονται μέσα από πράξεις πινάκων όλες οι άγνωστες μετατοπίσεις για κάθε βαθμό ελευθερίας των επιμέρους στοιχείων. Μόλις γίνει αυτό, είναι έπειτα εύκολο να υπολογισθούν οι εντάσεις και οι τάσεις για κάθε στοιχείο, με την χρήση των θεμελιωδών εξισώσεων της ελαστικότητας.



## Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων

Η σύγχρονη ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ξεκίνησε το 1940 από τον τομέα Δομικής Μηχανικής με το έργο των Hennrikoff, McHenry και Newmark, οι οποίοι χρησιμοποίησαν ένα πλέγμα στοιχείων γραμμής (ράβδους και δοκούς) για την επίλυση και εύρεση των τάσεων σε συνεχή στερεά. Το 1943, ο Courant πρότεινε την χρήση πολυωνυμικής παρεμβολής σε τριγωνικές υποπεριοχές, ως μία μέθοδο εύρεσης των περιστροφικών τάσεων. Με την διάδοση των ψηφιακών υπολογιστών κατά την δεκαετία του 1950, έγινε όλο και πιο διαδεδομένο αλλά και πρακτικό για τους μηχανικούς, η επίλυση των εξισώσεων δυσκαμψίας με την χρήση μητρών. Μία γνωστή δημοσίευση των Turner, Clough, Martin, και Torp το 1956, παρουσίασε τις εξισώσεις του πίνακα ακαμψίας για μία δομή από δοκούς και άλλα στοιχεία. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία αποδίδεται στον Clough. Από εκείνες τις αρχικές και πρώιμες έρευνες μέχρι σήμερα, έχουν γίνει μεγάλες προσπάθειες στην ανάπτυξη της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για κατασκευαστικά προβλήματα, αλλά και για την ανάπτυξη υπολογιστικών εργαλείων βασισμένα στις μεθόδους αυτής της ανάλυσης. Μερικά παραδείγματα της συνεισφοράς της τεχνολογίας των υπολογιστών στην δομική μηχανική, είναι οι σύγχρονες επεξεργαστικές δυνατότητες που γίνονται όλο και μεγαλύτερες, η ύπαρξη αποτελεσματικών άμεσων και επακριβών ρουτινών υπολογισμού μητρών, τα γραφικά των υπολογιστών που κάνουν πιο εύκολη την σύγχρονη σχεδίαση κτιρίων, η αυτόματη και προσαρμοστική παραγωγή πλέγματος καθώς και οι δυνατότητες προ- και μετα- εκτίμησης του σχεδιασμού.

Δεδομένου ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μία αριθμητική τεχνική η οποία διακριτοποιεί μία συνεχή δομή, τα λάθη είναι αναπόφευκτα. Αυτά τα λάθη είναι κυρίως:

Υπολογιστικά λάθη:

Οφείλονται στις στρογγυλοποιήσεις που κάνει ο υπολογιστής με την χρήση floating-point μεταβλητών, και από την χρήση των αριθμητικών ολοκληρώσεων. Τα περισσότερα εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων επικεντρώνονται στην μείωση αυτών των σφαλμάτων, κατά συνέπεια ο αναλυτής μπορεί να τα θεωρήσει αμελητέα και να ασχολείται περισσότερο με τα παρακάτω σφάλματα.

Σφάλματα Διακριτοποίησης:

Η γεωμετρία και η κατανομή της μετατόπισης μίας πραγματικής δομής συνεχώς διαφέρει. Η χρήση ενός πεπερασμένου αριθμού στοιχείων για την μοντελοποίηση μίας δομής, εισάγει σαφώς λάθη στην αντιστοίχιση γεωμετρίας και μετατοπίσεων, λόγω των εγγενών μαθηματικών περιορισμών των στοιχείων.

Γεωμετρίες των στοιχείων:

Υπάρχουν πολλά γεωμετρικά σχήματα στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για συγκεκριμένες εφαρμογές. Τα διάφορα στοιχεία που χρησιμοποιεί μία γενικού-σκοπού εμπορική εφαρμογή FEA, ονομάζονται

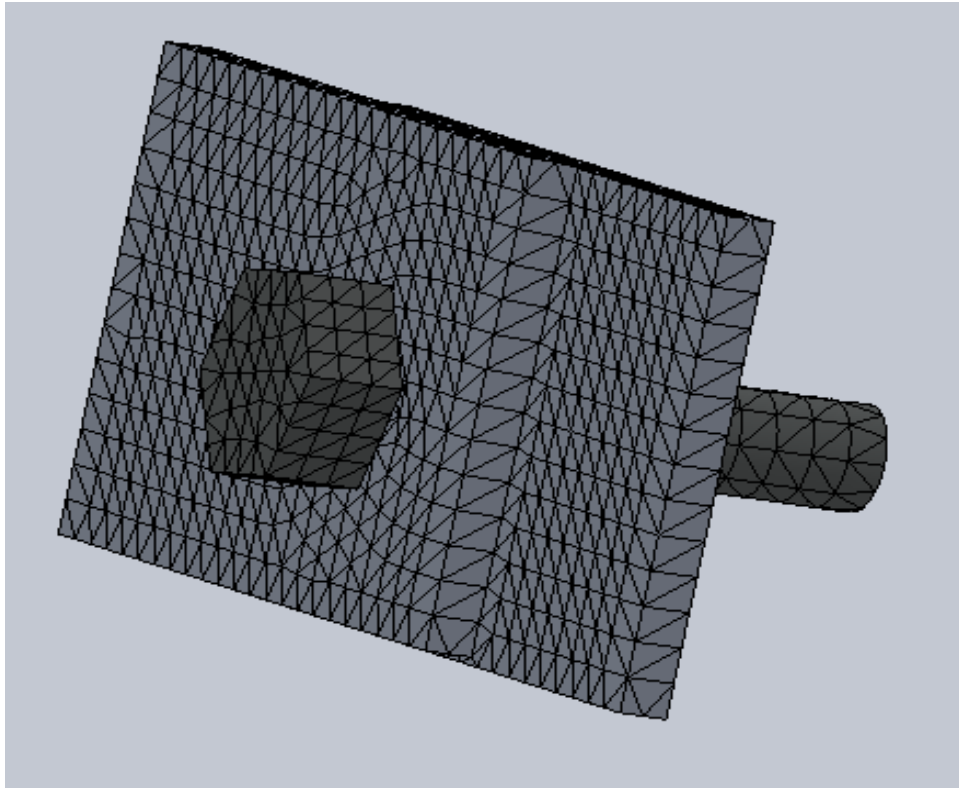
ως η βιβλιοθήκη των στοιχείων (element library). Τα στοιχεία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής: στοιχεία γραμμής, επιφανειακά στοιχεία, στερεά στοιχεία, και στοιχεία ειδικού σκοπού.

Μερικά από τα στοιχεία δεν υποστηρίζουν όλους τους βαθμούς ελευθερίας. Για παράδειγμα, ένα τρισδιάστατο δικτύωμα υποστηρίζει μόνο τρεις καρτεσιανές παραμορφώσεις σε κάθε κόμβο. Η σύνδεση διαφορετικών στοιχείων τα οποία έχουν και διαφορετικούς βαθμούς ελευθερίας απαιτεί σαφώς κάποιες τροποποιήσεις. Αν πάρουμε το παράδειγμα της σύνδεσης ενός πλαισίου που υποστηρίζει και τους έξι βαθμούς ελευθερίας, με ένα δικτύωμα παρατηρούμε ότι ο ένας κόμβος του στοιχείου, μπορεί να περιστρέφεται ελεύθερα στην σύνδεση δηλαδή στον κόμβο του.

Σε αυτό το σημείο θα γίνει μία περιγραφή της διαδικασίας επίλυσης ενός προβλήματος πεπερασμένων στοιχείων για ένα απλό μονοδιάστατο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας ως στοιχεία γραμμικά δικτύωματα (linear truss element). Το δικτύωμα είναι μία μπάρα η οποία υφίσταται είτε εφελκυσμό είτε θλίψη και έχει σταθερή γεωμετρία με διατομή  $A$ , μήκος  $l$  και μέτρο ελαστικότητας  $E$ . Το βασικό δικτύωμα έχει μόνο δύο κόμβους, επομένως για ένα μονοδιάστατο πρόβλημα, ο κάθε κόμβος θα έχει μόνο έναν βαθμό ελευθερίας. Το δικτύωμα μπορεί επιπλέον να μοντελοποιηθεί ως ένα απλό γραμμικό ελατήριο με σταθερά ελατηρίου:

$$k = \frac{A \cdot E}{l}$$

## Παραγωγή πλέγματος



Το δίκτυο των στοιχείων και των κόμβων που διακριτοποιεί μια περιοχή αναφέρεται ως πλέγμα. Η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται όσο τοποθετούνται περισσότερα στοιχεία σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Η αναθεώρηση ενός πλέγματος σημαίνει την τροποποίηση ενός πλέγματος μίας ανάλυσης ώστε να προκύψει μία άλλη που θα δίνει βελτιωμένα αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα γενικά βελτιώνονται, όταν η πυκνότητα του πλέγματος αυξάνεται σε περιοχές με υψηλή μεταβολή της τάσης και όταν οι γεωμετρικές περιοχές πλεγματοποιούνται πιο ομαλά. Σε γενικές γραμμές, αλλά όχι πάντα, η ανάλυση FEA συγκλίνει προς τα ακριβή αποτελέσματα, με την συνεχή τροποποίηση του πλέγματος. Για παράδειγμα, όταν έχουμε περιοχές με υψηλή τάση, η δομή θα πρέπει να επαναπλεγματοποιηθεί με υψηλότερη πυκνότητα πλέγματος για αυτήν την περιοχή. Εάν η μεταβολή της τάσης δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη σε σχέση με την προηγούμενη πυκνότητα πλέγματος, είναι λογικό να θεωρήσουμε ότι υπάρχει σύγκλιση σε μία λύση. Υπάρχουν τρεις κυρίως τρόποι παραγωγής πλέγματος από στοιχεία: από τον ίδιο τον σχεδιαστή, ημιαυτόματα και τέλος πλήρως αυτοματοποιημένα.

### 1. Δημιουργία πλέγματος από τον σχεδιαστή (manually):

Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνταν το πλέγμα παλαιότερα στην ανάλυση FEA. Αποτελεί μία πολύ κοπιαστική και απαιτητική μέθοδο δημιουργίας πλέγματος, και σπάνια χρησιμοποιείται εκτός από την περίπτωση κάποιων ειδικών περιοχών της

κατασκευής που μας ενδιαφέρει η ακρίβεια, και στις οποίες ο σχεδιαστής θα πρέπει να επιλέξει μόνος του το πλέγμα. Η μη-αυτόματη επιλογή πλέγματος έχει περισσότερο εκπαιδευτικό πλέον χαρακτήρα και χρησιμοποιείται κυρίως σε πολύ απλά προβλήματα.

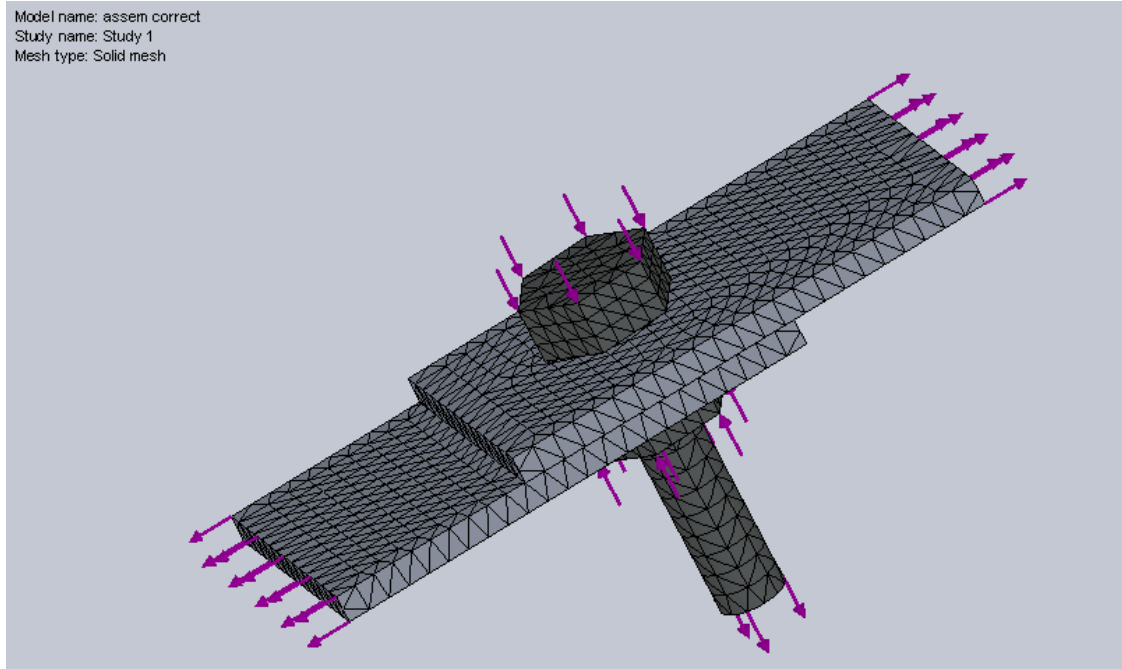
## 2. Ημιαυτόματη δημιουργία πλέγματος:

Με την πάροδο των χρόνων, έχουν αναπτυχθεί αλγόριθμοι που επιτρέπουν στον σχεδιαστή αυτόματα να πλεγματοποιεί περιοχές της κατασκευής, τις οποίες έχει διαχωρίσει χρησιμοποιώντας κάποιες αυστηρά ορισμένες οριακές συνθήκες. Επειδή είναι αναγκαία η επιλογή από τον χρήστη των οριακών συνθηκών για αυτό και η τεχνική θεωρείται ημιαυτόματη. Η ανάπτυξη αυτών των αλγορίθμων για την παραγωγή του πλέγματος προέρχεται από το χώρο των γραφικών των υπολογιστών.

## 3. Πλήρως αυτοματοποιημένη δημιουργία πλέγματος:

Οι περισσότεροι σχεδιαστές λογισμικού επικεντρώνουν τις προσπάθειές τους στην ανάπτυξη μίας πλήρως αυτοματοποιημένης δημιουργίας πλέγματος, και σε ορισμένες περιπτώσεις στην αυτόματη και αυτοπροσαρμοζόμενη τελειοποίηση του πλέγματος (mesh refinement). Ο προφανής στόχος είναι να μειωθεί σημαντικά ο προ-επεξεργαστικός χρόνος και να μειωθεί η προσπάθεια του σχεδιαστή για να καταλήξει σε ένα τελικό και καλά δομημένο πλέγμα FEA. Μόλις καθοριστούν οι οριακές συνθήκες, χωρίς υποδιαίρεσεις, όπως κάναμε στην ημιαυτόματη δημιουργία πλέγματος και με την ελάχιστη παρέμβαση του χρήστη, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι διακριτοποίησης με ένα στοιχείο. Σε προβλήματα επίπεδης ελαστικότητας οι οριακές συνθήκες καθορίζονται από μια σειρά εσωτερικών και εξωτερικών γεωμετρικών γραμμών και το στοιχείο που θα πλεγματοποιηθεί αυτόματα θα είναι επίσης το επίπεδο ελαστικό στοιχείο. Για κατασκευές λεπτού πάχους, η γεωμετρία θα ορίζεται από τρισδιάστατες επιφανειακές αναπαραστάσεις και το αυτόματα πλεγματοποιημένο στοιχείο θα είναι μία τρισδιάστατη πλάκα. Όσον αφορά τις στερεές δομές, το όριο θα μπορούσε να κατασκευαστεί με τη χρήση μεθόδων όπως η *constructive solid geometry (CSG)* και η *boundary representation (B-rep)*. Τα αυτόματα και αυτοπροσαρμοζόμενα προγράμματα τελειοποίησης του πλέγματος, κάνουν μία εκτίμηση του σφάλματος της ανάλυσης FEA. Με βάση αυτό το σφάλμα, αναθεωρείται αυτόματα το πλέγμα και επανααναλύεται. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου κάποιο κριτήριο σύγκλισης ή μία συνθήκη ικανοποιηθεί.

## Εφαρμογή φορτίων



Υπάρχουν δύο βασικές μορφές εφαρμογής φορτίων σε μία κατασκευή: η κομβική φόρτιση και η φόρτιση στοιχείων. Ωστόσο, και η φόρτιση στοιχείων τελικά εφαρμόζεται στους κόμβους, με τον υπολογισμό των ισοδύναμων κομβικών φορτίσεων. Μια πτυχή της εφαρμογής φορτίων έχει σχέση με την αρχή του Saint-Venant.

Αν κάποιος δεν ενδιαφέρεται για τον υπολογισμό των πιέσεων κοντά στα σημεία εφαρμογής των φορτίων, δεν είναι απαραίτητο να κατανείμει την φόρτιση με μεγάλη ακρίβεια. Η δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα κόμβο, εφόσον το στοιχείο υποστηρίζει τους βαθμούς ελευθερίας που αφορούν την εφαρμοζόμενη δύναμη. Ο σχεδιαστής δεν θα πρέπει να εκπλήσσεται, όταν τα αποτελέσματα των καταπονήσεων και των τάσεων στην περιοχή του σημείου εφαρμογής του φορτίου διαπιστώνονται να είναι πολύ μεγάλα. Οι συγκεντρωμένες δυνάμεις μπορούν να εφαρμοζονται στους κόμβους μίας δοκού και σε στοιχεία πλάκας. Ωστόσο, οι συγκεντρωμένες δυνάμεις δεν μπορούν να εφαρμοζονται σε δικτυώματα, σε δισδιάστατα ελαστικά επίπεδα ή σε αξονομετρικά στοιχεία. Και αυτό γιατί αυτά τα στοιχεία δεν υποστηρίζουν περιστροφικούς βαθμούς ελευθερίας. Η συγκεντρωμένη δύναμη μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτά τα στοιχεία μόνο με την χρήση ζεύγους δυνάμεων. Από στατικής άποψης, το ζεύγος δυνάμεων μπορεί να παραχθεί με τη χρήση δύο ή περισσότερων δυνάμεων που επενεργούν σε ένα επίπεδο και όπου η συνολική τους δύναμη είναι μηδέν. Η ολική δύναμη είναι ένα διάνυσμα κάθετο στο επίπεδο είναι και το ολοκλήρωμα των δυνάμεων γύρω από ένα σημείο.

Τα φορτία των στοιχείων μπορεί να είναι στατικά φορτία λόγω βαρύτητας (βάρος), θερμικές επιδράσεις, επιφανειακά φορτία όπως η ομοιόμορφη και η υδροστατική πίεση αλλά και δυναμικά φορτία λόγω σταθερής επιτάχυνσης ή σταθερής περιστροφής (φυγόκεντρη επιτάχυνση). Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, τα φορτία των στοιχείων μετατρέπονται από το λογισμικό σε ισοδύναμα κομβικά φορτία και στο τέλος αντιμετωπίζονται ως συγκεντρωμένα φορτία που εφαρμόζονται στους κόμβους. Για την εφαρμογή φορτίου βαρύτητας, ο σχεδιαστής θα πρέπει να καθορίσει την σταθερά της βαρύτητας στις κατάλληλες μονάδες καθώς και την κατεύθυνση της βαρύτητας. Για παράδειγμα εάν το μήκος του μοντέλου και οι ασκούμενες δυνάμεις εκφράζονται αντίστοιχα σε ίντσες και lbf, τότε η σταθερά θα εκφράζεται ως  $g = 386,1 \text{ ips}^2$ . Εάν οι μονάδες μήκους και δύναμης του μοντέλου εκφράζονται σε μέτρα και Newton τότε αυτή θα είναι  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ . Η κατεύθυνση της βαρύτητας συνήθως σχεδιάζεται προς το κέντρο της γης.

Για τη θερμική φόρτιση, θα πρέπει να δίνεται πάντα ο συντελεστής θερμικής διαστολής του κάθε υλικού, η αρχική θερμοκρασία της κατασκευής, και οι τελικές κομβικές θερμοκρασίες. Τα περισσότερα πακέτα λογισμικού έχουν την δυνατότητα να εκτελούν θερμικές αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία στην κατασκευή για να καθορίσουν τις τελικές κομβικές θερμοκρασίες. Τα αποτελέσματα των θερμοκρασιών καταγράφονται σε ένα αρχείο, το οποίο μπορεί να εισαχθεί στην στατική ανάλυση τάσεων. Το μοντέλο μεταφοράς θερμότητας θα πρέπει να έχει τους ίδιους κόμβους και τύπους στοιχείων με το μοντέλο της στατικής ανάλυσης τάσεων, αλλιώς δεν θα μπορέσει να εκτιμήσει τα στατικά φορτία λόγω θερμικών φορτίσεων.

Οι επιφανειακές φορτίσεις μπορούν να εφαρμοστούν στα περισσότερα στοιχεία. Για παράδειγμα, η ομοιόμορφη ή η γραμμική εγκάρσια φόρτιση μπορεί να εφαρμοστεί σε δοκούς. Η ομοιόμορφη και γραμμική πίεση μπορεί να εφαρμοστεί στα άκρα ενός διδιάστατου επιπέδου ή ενός αξονομετρικού στοιχείου. Η πλευρική πίεση μπορεί να εφαρμοστεί σε στοιχεία πλάκας. Κάθε πακέτο λογισμικού έχει έναν μοναδικό τρόπο με τον οποίο προσδιορίζει αυτά τα επιφανειακά φορτία, συνδυάζοντας γραφικές και παραμετρικές λειτουργίες.

## Οριακές συνθήκες

Η προσομοίωση οριακών συνθηκών και άλλων περιορισμών είναι ίσως το πιο δύσκολο κομμάτι της επακριβής μοντελοποίησης μίας κατασκευής με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων. Κατά τον καθορισμό των περιορισμών, είναι σχετικά εύκολο να γίνουν λάθη παράλειψης ή λανθασμένης αποτύπωσης. Μπορεί να είναι απαραίτητο για την ανάλυση, να εξετάζονται διαφορετικές προσεγγίσεις μοντελοποίησης των εσωτερικών περιορισμών, όπως οι αρθρώσεις, συγκολλήσεις, κ.α., τα οποία δεν είναι τόσο απλά στην μοντελοποίηση όσο οι εξιδανικευμένες σταθερές αρθρώσεις. Οι δοκιμές πρέπει να γίνονται σε απλά προβλήματα και όχι σε μεγάλες, σύνθετες κατασκευές. Μερικές φορές, όταν ο ακριβής ορισμός μιας οριακής συνθήκης είναι αβέβαιος, μπορούν να οριστούν μόνο κάποια όρια συμπεριφοράς.

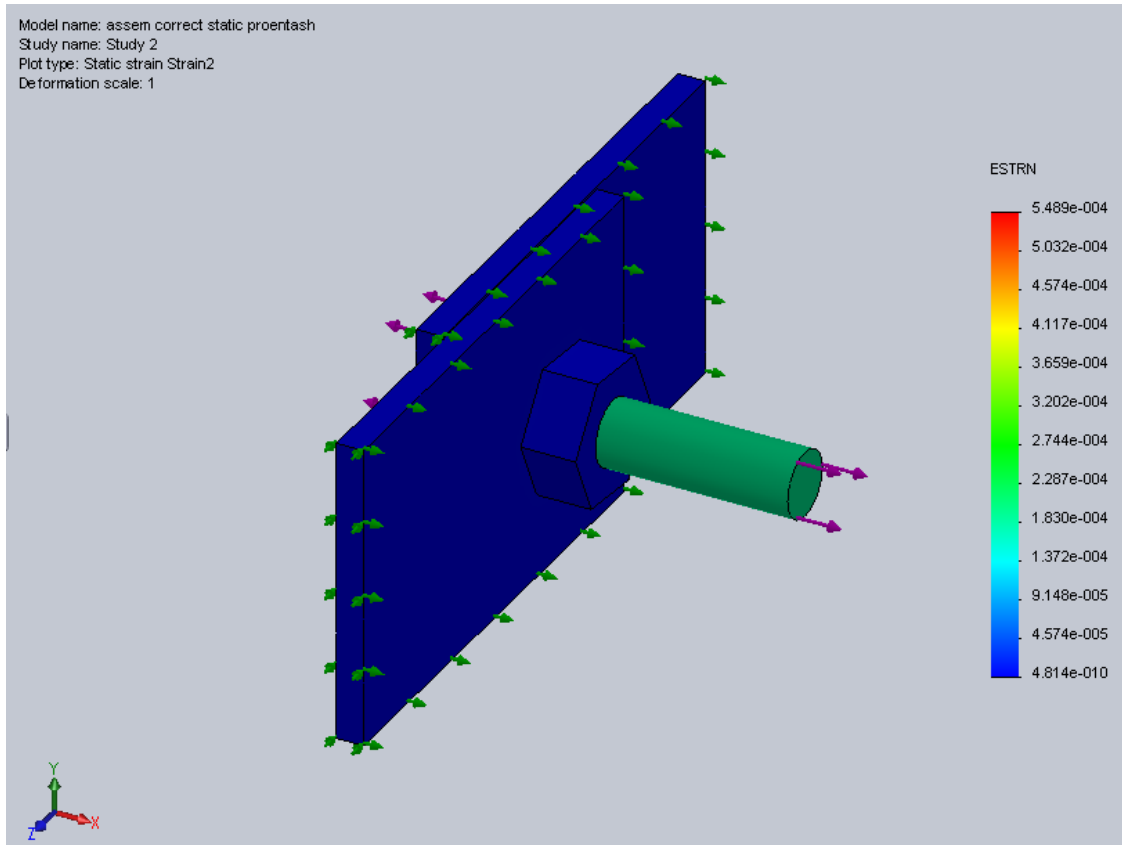
Οι οριακές εξισώσεις πολλών σημείων (*Multipoint constraint equations*) χρησιμοποιούνται αρκετά συχνά για τη μοντελοποίηση οριακών συνθηκών και άκαμπτων συνδέσεων μεταξύ των ελαστικών μηχανικών μερών. Όταν χρησιμοποιούνται σε αυτή τη μορφή, οι εξισώσεις λειτουργούν ως στοιχεία και ως εκ τούτου αναφέρονται ως άκαμπτα στοιχεία.

Τα οριακά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την εφαρμογή ειδικών μη μηδενικών μετατοπίσεων σε μια κατασκευή. Τα οριακά στοιχεία μπορεί επίσης να είναι χρήσιμα στην μοντελοποίηση οριακών συνθηκών σε ένα καθολικό σύστημα συντεταγμένων.

## Solidworks

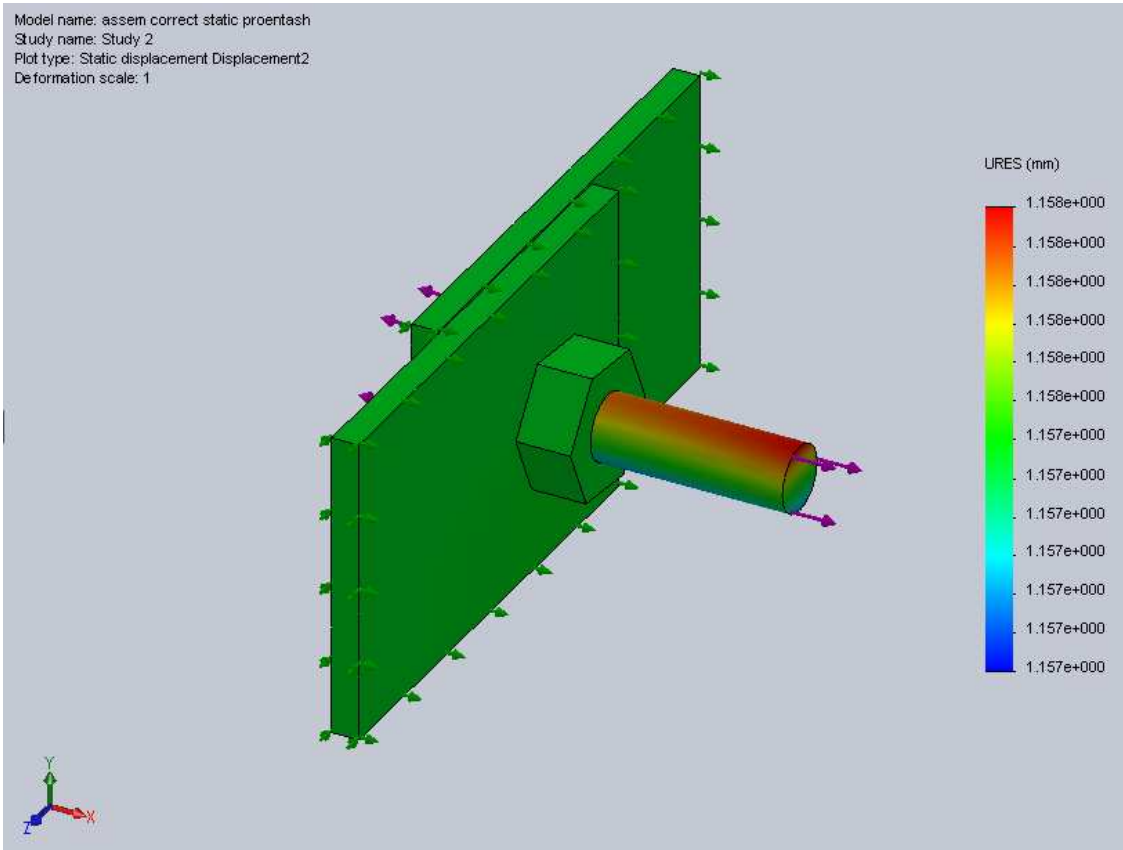
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για μία σύνδεση τριβής η οποία φορτίζεται με εφελκυστική είναι:

- Stress



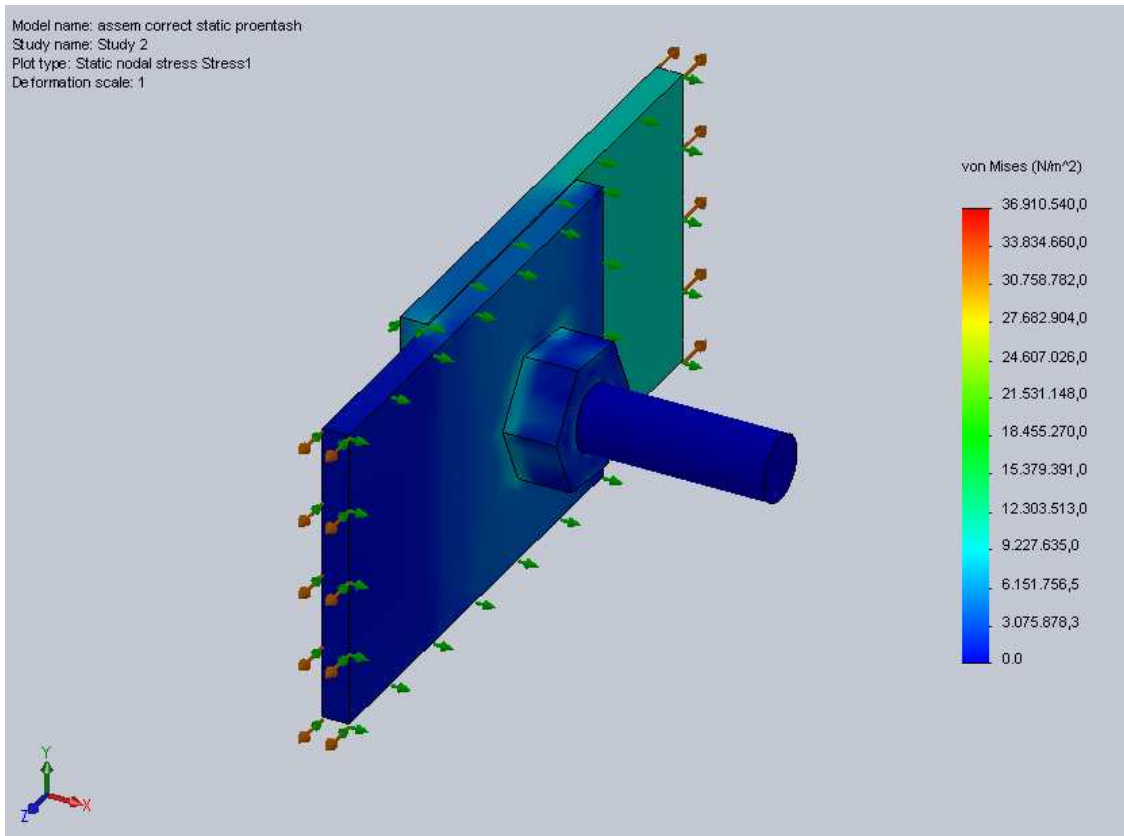


- Displacement

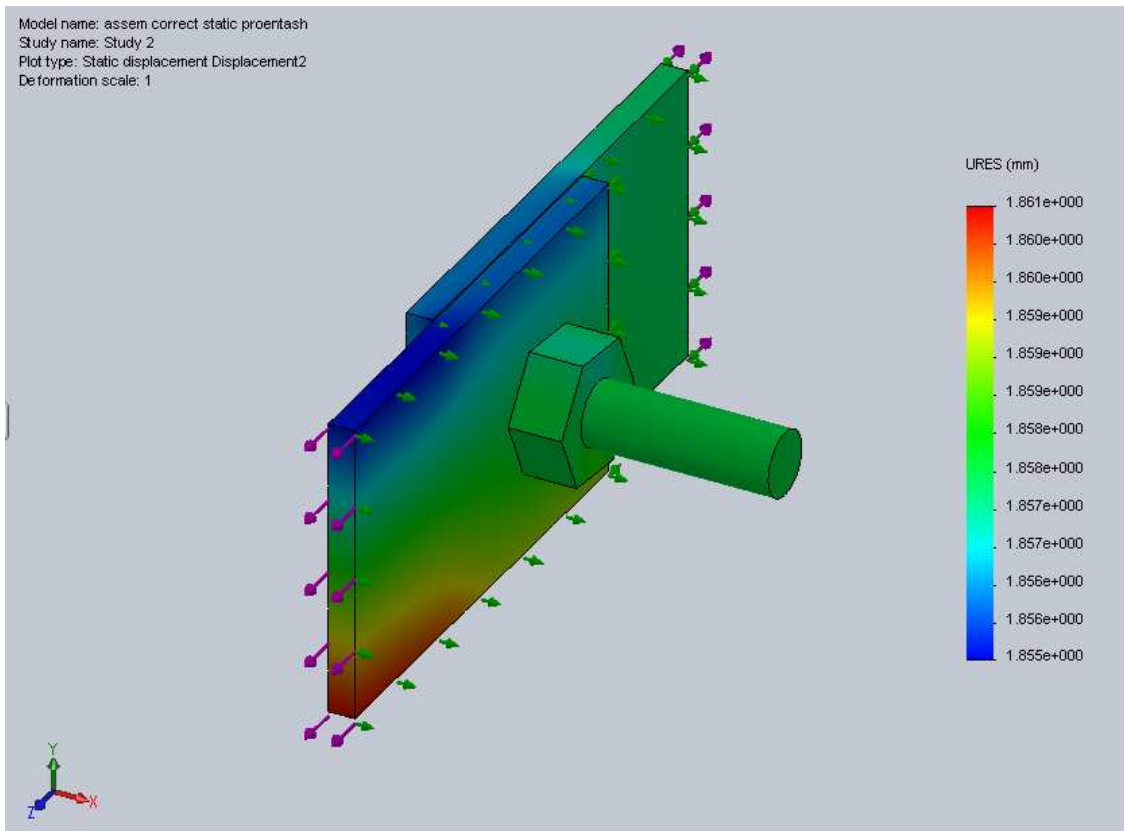


Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για μία σύνδεση τριβής η οποία φορτίζεται με διατμητική δύναμη είναι:

- stress



- Displacement



Παρατηρούμε ότι και η λύση που προκύπτει από το Solidworks δείχνει ότι η διατμητική φόρτιση έχει μεγαλύτερες επιπτώσεις από την εφελκυστική.

## Παράρτημα Γ

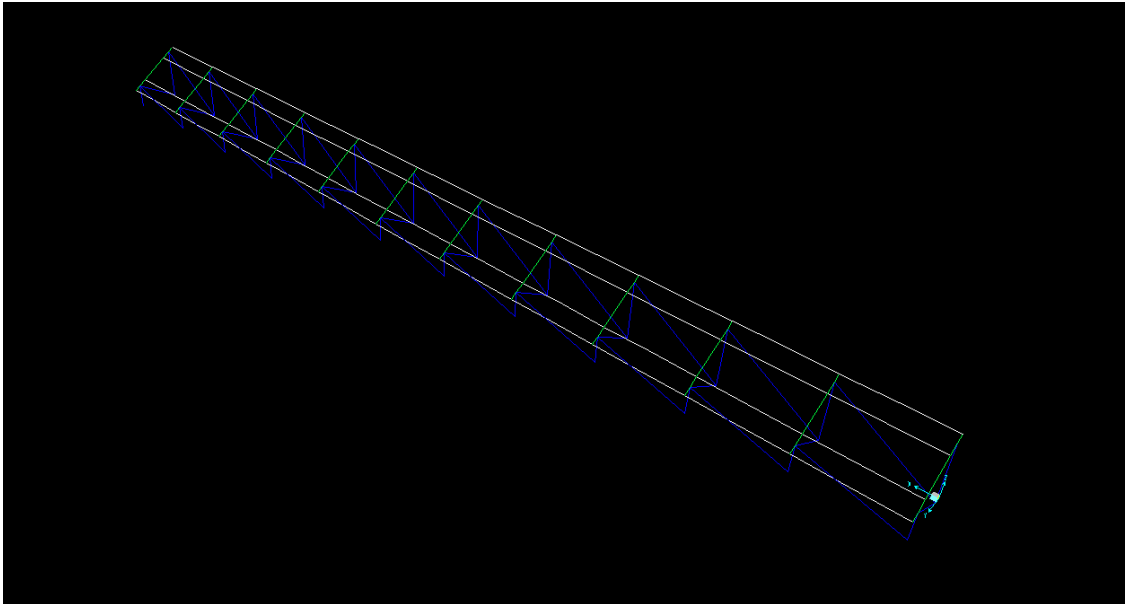


TABLE: Joint Coordinates			
Joint	XorR	Y	Z
Text	m	m	m
1	0,00	1,47	0,63
2	0,00	1,30	0,73
3	0,00	0,00	1,46
4	0,00	-0,17	1,56
5	0,00	1,30	0,00
6	0,00	0,00	0,00
7	4,80	0,00	0,00
8	4,80	1,47	0,63
9	4,80	1,30	0,73
10	4,80	0,00	1,46
11	4,80	1,30	0,00

12	4,80	-0,17	1,56
13	0,00	0,24	1,33
14	2,40	0,00	0,00
15	2,40	1,47	0,63
16	2,40	1,30	0,73
17	2,40	0,00	1,46
18	4,80	1,06	0,86
19	2,40	1,30	0,00
20	4,80	0,24	1,33
21	0,00	1,06	0,86
22	2,40	-0,17	1,56
23	2,40	1,06	0,86
24	2,40	0,24	1,33
25	3,60	1,47	0,63
26	3,60	-0,17	1,56
27	3,60	1,06	0,86
28	3,60	0,24	1,33
29	7,20	0,00	0,00
30	7,20	1,47	0,63
31	7,20	1,30	0,73
32	7,20	0,00	1,46
33	7,20	1,30	0,00
34	7,20	-0,17	1,56
35	7,20	1,06	0,86
36	7,20	0,24	1,33
37	6,00	1,47	0,63
38	6,00	-0,17	1,56

39	6,00	1,06	0,86
40	6,00	0,24	1,33
41	9,60	0,00	0,00
42	9,60	1,47	0,63
43	9,60	1,30	0,73
44	9,60	0,00	1,46
45	9,60	1,30	0,00
46	9,60	-0,17	1,56
47	9,60	1,06	0,86
48	9,60	0,24	1,33
49	8,40	1,47	0,63
50	8,40	-0,17	1,56
51	8,40	1,06	0,86
52	8,40	0,24	1,33
53	12,00	0,00	0,00
54	12,00	1,47	0,63
55	12,00	1,30	0,73
56	12,00	0,00	1,46
57	1,20	1,47	0,63
58	1,20	-0,17	1,56
59	1,20	1,06	0,86
60	1,20	0,24	1,33
61	12,00	1,30	0,00
62	12,00	-0,17	1,56
63	12,00	1,06	0,86
64	12,00	0,24	1,33
65	10,80	1,47	0,63

66	10,80	-0,17	1,56
67	10,80	1,06	0,86
68	10,80	0,24	1,33
69	14,40	0,00	0,00
70	14,40	1,47	0,63
71	14,40	1,30	0,73
72	14,40	0,00	1,46
73	14,40	1,30	0,00
74	14,40	-0,17	1,56
75	14,40	1,06	0,86
76	14,40	0,24	1,33
77	13,20	1,47	0,63
78	13,20	-0,17	1,56
79	13,20	1,06	0,86
80	13,20	0,24	1,33
81	16,80	0,00	0,00
82	16,80	1,47	0,63
83	16,80	1,30	0,73
84	16,80	0,00	1,46
85	16,80	1,30	0,00
86	16,80	-0,17	1,56
87	16,80	1,06	0,86
88	16,80	0,24	1,33
89	15,60	1,47	0,63
90	15,60	-0,17	1,56

91	15,60	1,06	0,86
92	15,60	0,24	1,33
93	19,20	0,00	0,00
94	19,20	1,47	0,63
95	19,20	1,30	0,73
96	19,20	0,00	1,46
97	19,20	1,30	0,00
98	19,20	-0,17	1,56
99	19,20	1,06	0,86
100	19,20	0,24	1,33
101	18,00	1,47	0,63
102	18,00	-0,17	1,56
103	18,00	1,06	0,86
104	18,00	0,24	1,33
105	21,60	0,00	0,00
106	21,60	1,47	0,63
107	21,60	1,30	0,73
108	21,60	0,00	1,46
109	21,60	1,30	0,00
110	21,60	-0,17	1,56
111	21,60	1,06	0,86
112	21,60	0,24	1,33
113	20,40	1,47	0,63
114	20,40	-0,17	1,56
115	20,40	1,06	0,86



116	20,40	0,24	1,33
117	24,00	0,00	0,00
118	24,00	1,47	0,63
119	24,00	1,30	0,73
120	24,00	0,00	1,46
121	24,00	1,30	0,00
122	24,00	-0,17	1,56
123	24,00	1,06	0,86
124	24,00	0,24	1,33
125	22,80	1,47	0,63
126	22,80	-0,17	1,56
127	22,80	1,06	0,86
128	22,80	0,24	1,33
129	26,40	0,00	0,00
130	26,40	1,47	0,63
131	26,40	1,30	0,73
132	26,40	0,00	1,46
133	26,40	1,30	0,00
134	26,40	-0,17	1,56
135	26,40	1,06	0,86
136	26,40	0,24	1,33
137	25,20	1,47	0,63
138	25,20	-0,17	1,56
139	25,20	1,06	0,86
140	25,20	0,24	1,33

TABLE: Joint Reactions							
Joint	OutputCase	F1	F2	F3	M1	M2	M3
Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
5	COMB1	-1,81	0,00	1,99	0,00	0,00	0,00
5	COMB2	-1,75	0,00	3,77	0,00	0,00	0,00
5	COMB3	-1,69	0,00	4,46	0,00	0,00	0,00
5	COMB4	-1,66	0,00	5,53	0,00	0,00	0,00
5	COMB5	-1,64	-0,01	-0,29	0,00	0,00	0,00
5	COMB6	-1,52	-0,02	-0,15	0,00	0,00	0,00
5	COMB7	-1,52	-0,01	-0,31	0,00	0,00	0,00
5	COMB8	-1,57	-0,01	0,91	0,00	0,00	0,00
5	COMB9	-1,23	-0,01	1,03	0,00	0,00	0,00
5	COMB10	-1,23	0,01	0,95	0,00	0,00	0,00
5	COMB11	-1,58	0,01	0,83	0,00	0,00	0,00
5	COMB12	-1,45	-0,02	1,05	0,00	0,00	0,00
5	COMB13	-1,46	0,02	0,77	0,00	0,00	0,00
5	COMB14	-1,36	0,02	0,81	0,00	0,00	0,00
5	COMB15	-1,35	-0,02	1,08	0,00	0,00	0,00
6	COMB1	-2,56	11,19	25,38	0,00	0,00	0,00
6	COMB2	-2,48	1,16	6,31	0,00	0,00	0,00
6	COMB3	-2,63	7,59	20,49	0,00	0,00	0,00
6	COMB4	-2,59	1,58	9,05	0,00	0,00	0,00
6	COMB5	-1,84	0,09	-0,22	0,00	0,00	0,00
6	COMB6	-1,71	-0,07	-0,31	0,00	0,00	0,00
6	COMB7	-1,71	0,07	-0,27	0,00	0,00	0,00
6	COMB8	-1,91	0,37	1,65	0,00	0,00	0,00
6	COMB9	-1,54	0,35	1,76	0,00	0,00	0,00
6	COMB10	-1,54	0,48	1,87	0,00	0,00	0,00

6	COMB11	-1,91	0,50	1,76	0,00	0,00	0,00
6	COMB12	-1,78	0,21	1,55	0,00	0,00	0,00
6	COMB13	-1,78	0,64	1,93	0,00	0,00	0,00
6	COMB14	-1,67	0,63	1,97	0,00	0,00	0,00
6	COMB15	-1,67	0,21	1,59	0,00	0,00	0,00
7	COMB1	-2,14	11,83	31,24	0,00	0,00	0,00
7	COMB2	-2,18	-0,78	9,13	0,00	0,00	0,00
7	COMB3	-2,18	6,50	26,02	0,00	0,00	0,00
7	COMB4	-2,20	-1,06	12,75	0,00	0,00	0,00
7	COMB5	-1,76	-0,17	0,38	0,00	0,00	0,00
7	COMB6	-1,63	-0,37	0,24	0,00	0,00	0,00
7	COMB7	-1,63	-0,16	0,27	0,00	0,00	0,00
7	COMB8	-1,77	-0,36	2,84	0,00	0,00	0,00
7	COMB9	-1,41	-0,35	2,86	0,00	0,00	0,00
7	COMB10	-1,41	-0,18	2,97	0,00	0,00	0,00
7	COMB11	-1,77	-0,19	2,96	0,00	0,00	0,00
7	COMB12	-1,65	-0,56	2,71	0,00	0,00	0,00
7	COMB13	-1,64	0,02	3,10	0,00	0,00	0,00
7	COMB14	-1,54	0,02	3,11	0,00	0,00	0,00
7	COMB15	-1,54	-0,56	2,71	0,00	0,00	0,00
11	COMB1	-1,86	0,00	9,15	0,00	0,00	0,00
11	COMB2	-1,84	0,00	9,62	0,00	0,00	0,00
11	COMB3	-1,82	0,00	13,12	0,00	0,00	0,00
11	COMB4	-1,81	0,00	13,41	0,00	0,00	0,00
11	COMB5	-1,58	-0,01	0,60	0,00	0,00	0,00

11	COMB6	-1,46	-0,02	0,76	0,00	0,00	0,00
11	COMB7	-1,46	-0,01	0,50	0,00	0,00	0,00
11	COMB8	-1,55	-0,01	3,17	0,00	0,00	0,00
11	COMB9	-1,23	-0,01	3,17	0,00	0,00	0,00
11	COMB10	-1,23	0,01	3,03	0,00	0,00	0,00
11	COMB11	-1,56	0,01	3,04	0,00	0,00	0,00
11	COMB12	-1,44	-0,02	3,33	0,00	0,00	0,00
11	COMB13	-1,44	0,02	2,88	0,00	0,00	0,00
11	COMB14	-1,34	0,02	2,88	0,00	0,00	0,00
11	COMB15	-1,34	-0,02	3,32	0,00	0,00	0,00
14	COMB1	-2,33	9,86	28,97	0,00	0,00	0,00
14	COMB2	-2,30	-1,50	8,37	0,00	0,00	0,00
14	COMB3	-2,36	4,76	24,08	0,00	0,00	0,00
14	COMB4	-2,35	-2,06	11,72	0,00	0,00	0,00
14	COMB5	-1,81	-0,23	0,29	0,00	0,00	0,00
14	COMB6	-1,68	-0,42	0,17	0,00	0,00	0,00
14	COMB7	-1,68	-0,21	0,19	0,00	0,00	0,00
14	COMB8	-1,84	-0,61	2,57	0,00	0,00	0,00
14	COMB9	-1,48	-0,59	2,60	0,00	0,00	0,00
14	COMB10	-1,47	-0,42	2,71	0,00	0,00	0,00
14	COMB11	-1,84	-0,44	2,68	0,00	0,00	0,00
14	COMB12	-1,71	-0,80	2,45	0,00	0,00	0,00
14	COMB13	-1,71	-0,23	2,82	0,00	0,00	0,00
14	COMB14	-1,60	-0,23	2,83	0,00	0,00	0,00
14	COMB15	-1,60	-0,79	2,46	0,00	0,00	0,00

19	COMB1	-1,91	0,00	8,20	0,00	0,00	0,00
19	COMB2	-1,88	0,00	9,38	0,00	0,00	0,00
19	COMB3	-1,86	0,00	12,38	0,00	0,00	0,00
19	COMB4	-1,84	0,00	13,09	0,00	0,00	0,00
19	COMB5	-1,63	-0,01	0,57	0,00	0,00	0,00
19	COMB6	-1,51	-0,02	0,73	0,00	0,00	0,00
19	COMB7	-1,51	-0,01	0,47	0,00	0,00	0,00
19	COMB8	-1,60	-0,01	3,09	0,00	0,00	0,00
19	COMB9	-1,26	-0,01	3,09	0,00	0,00	0,00
19	COMB10	-1,26	0,01	2,95	0,00	0,00	0,00
19	COMB11	-1,60	0,01	2,95	0,00	0,00	0,00
19	COMB12	-1,48	-0,02	3,25	0,00	0,00	0,00
19	COMB13	-1,49	0,02	2,79	0,00	0,00	0,00
19	COMB14	-1,38	0,02	2,79	0,00	0,00	0,00
19	COMB15	-1,38	-0,02	3,24	0,00	0,00	0,00
29	COMB1	-1,98	13,72	33,53	0,00	0,00	0,00
29	COMB2	-2,08	-0,15	9,90	0,00	0,00	0,00
29	COMB3	-2,01	8,13	28,00	0,00	0,00	0,00
29	COMB4	-2,07	-0,19	13,82	0,00	0,00	0,00
29	COMB5	-1,72	-0,12	0,44	0,00	0,00	0,00
29	COMB6	-1,60	-0,32	0,30	0,00	0,00	0,00
29	COMB7	-1,59	-0,11	0,33	0,00	0,00	0,00
29	COMB8	-1,71	-0,15	3,11	0,00	0,00	0,00
29	COMB9	-1,37	-0,15	3,11	0,00	0,00	0,00
29	COMB10	-1,37	0,03	3,24	0,00	0,00	0,00
29	COMB11	-1,71	0,03	3,23	0,00	0,00	0,00

29	COMB12	-1,59	-0,36	2,96	0,00	0,00	0,00
29	COMB13	-1,59	0,24	3,38	0,00	0,00	0,00
29	COMB14	-1,49	0,24	3,38	0,00	0,00	0,00
29	COMB15	-1,49	-0,36	2,97	0,00	0,00	0,00
33	COMB1	-1,82	0,00	10,18	0,00	0,00	0,00
33	COMB2	-1,81	0,00	9,95	0,00	0,00	0,00
33	COMB3	-1,79	0,00	14,01	0,00	0,00	0,00
33	COMB4	-1,79	0,00	13,88	0,00	0,00	0,00
33	COMB5	-1,54	-0,01	0,62	0,00	0,00	0,00
33	COMB6	-1,43	-0,02	0,77	0,00	0,00	0,00
33	COMB7	-1,43	-0,01	0,51	0,00	0,00	0,00
33	COMB8	-1,52	-0,01	3,28	0,00	0,00	0,00
33	COMB9	-1,21	-0,01	3,27	0,00	0,00	0,00
33	COMB10	-1,21	0,01	3,14	0,00	0,00	0,00
33	COMB11	-1,52	0,01	3,15	0,00	0,00	0,00
33	COMB12	-1,41	-0,02	3,43	0,00	0,00	0,00
33	COMB13	-1,41	0,02	2,99	0,00	0,00	0,00
33	COMB14	-1,32	0,02	2,99	0,00	0,00	0,00
33	COMB15	-1,32	-0,02	3,43	0,00	0,00	0,00
41	COMB1	-1,78	15,61	35,85	0,00	0,00	0,00
41	COMB2	-1,94	0,49	10,69	0,00	0,00	0,00
41	COMB3	-1,82	9,75	30,00	0,00	0,00	0,00
41	COMB4	-1,92	0,68	14,91	0,00	0,00	0,00
41	COMB5	-1,65	-0,06	0,53	0,00	0,00	0,00
41	COMB6	-1,54	-0,28	0,38	0,00	0,00	0,00

41	COMB7	-1,54	-0,07	0,41	0,00	0,00	0,00
41	COMB8	-1,64	0,07	3,39	0,00	0,00	0,00
41	COMB9	-1,30	0,06	3,38	0,00	0,00	0,00
41	COMB10	-1,30	0,25	3,51	0,00	0,00	0,00
41	COMB11	-1,64	0,25	3,52	0,00	0,00	0,00
41	COMB12	-1,52	-0,15	3,24	0,00	0,00	0,00
41	COMB13	-1,52	0,46	3,67	0,00	0,00	0,00
41	COMB14	-1,42	0,46	3,66	0,00	0,00	0,00
41	COMB15	-1,42	-0,15	3,24	0,00	0,00	0,00
45	COMB1	-1,73	0,00	11,23	0,00	0,00	0,00
45	COMB2	-1,74	0,00	10,30	0,00	0,00	0,00
45	COMB3	-1,72	0,00	14,91	0,00	0,00	0,00
45	COMB4	-1,72	0,00	14,35	0,00	0,00	0,00
45	COMB5	-1,47	-0,01	0,65	0,00	0,00	0,00
45	COMB6	-1,36	-0,02	0,80	0,00	0,00	0,00
45	COMB7	-1,36	-0,01	0,54	0,00	0,00	0,00
45	COMB8	-1,46	-0,01	3,40	0,00	0,00	0,00
45	COMB9	-1,16	-0,01	3,39	0,00	0,00	0,00
45	COMB10	-1,16	0,01	3,26	0,00	0,00	0,00
45	COMB11	-1,46	0,01	3,27	0,00	0,00	0,00
45	COMB12	-1,35	-0,02	3,55	0,00	0,00	0,00
45	COMB13	-1,35	0,02	3,12	0,00	0,00	0,00
45	COMB14	-1,26	0,02	3,12	0,00	0,00	0,00
45	COMB15	-1,26	-0,02	3,54	0,00	0,00	0,00
53	COMB1	-1,90	17,50	37,96	0,00	0,00	0,00
53	COMB2	-2,28	1,12	11,20	0,00	0,00	0,00
53	COMB3	-1,98	11,38	31,78	0,00	0,00	0,00

53	COMB4	-2,20	1,56	15,72	0,00	0,00	0,00
53	COMB5	-2,03	-0,01	0,34	0,00	0,00	0,00
53	COMB6	-1,89	-0,23	0,20	0,00	0,00	0,00
53	COMB7	-1,89	-0,02	0,23	0,00	0,00	0,00
53	COMB8	-1,98	0,28	3,41	0,00	0,00	0,00
53	COMB9	-1,57	0,28	3,45	0,00	0,00	0,00
53	COMB10	-1,57	0,46	3,58	0,00	0,00	0,00
53	COMB11	-1,97	0,47	3,54	0,00	0,00	0,00
53	COMB12	-1,83	0,06	3,27	0,00	0,00	0,00
53	COMB13	-1,83	0,69	3,71	0,00	0,00	0,00
53	COMB14	-1,71	0,69	3,72	0,00	0,00	0,00
53	COMB15	-1,71	0,06	3,28	0,00	0,00	0,00
61	COMB1	-2,31	0,00	12,06	0,00	0,00	0,00
61	COMB2	-2,33	0,00	10,44	0,00	0,00	0,00
61	COMB3	-2,30	0,00	15,59	0,00	0,00	0,00
61	COMB4	-2,31	0,00	14,62	0,00	0,00	0,00
61	COMB5	-1,95	-0,01	0,51	0,00	0,00	0,00
61	COMB6	-1,81	-0,02	0,66	0,00	0,00	0,00
61	COMB7	-1,82	-0,01	0,40	0,00	0,00	0,00
61	COMB8	-1,94	-0,01	3,34	0,00	0,00	0,00
61	COMB9	-1,55	-0,01	3,36	0,00	0,00	0,00
61	COMB10	-1,55	0,01	3,24	0,00	0,00	0,00
61	COMB11	-1,94	0,01	3,22	0,00	0,00	0,00
61	COMB12	-1,80	-0,02	3,50	0,00	0,00	0,00
61	COMB13	-1,80	0,02	3,08	0,00	0,00	0,00



61	COMB14	-1,69	0,02	3,08	0,00	0,00	0,00
61	COMB15	-1,68	-0,02	3,50	0,00	0,00	0,00
69	COMB1	-2,14	19,33	40,10	0,00	0,00	0,00
69	COMB2	-2,01	1,69	12,20	0,00	0,00	0,00
69	COMB3	-2,11	12,95	33,67	0,00	0,00	0,00
69	COMB4	-2,03	2,36	16,93	0,00	0,00	0,00
69	COMB5	-1,61	-0,01	0,76	0,00	0,00	0,00
69	COMB6	-1,50	-0,24	0,58	0,00	0,00	0,00
69	COMB7	-1,50	-0,02	0,62	0,00	0,00	0,00
69	COMB8	-1,63	0,44	3,97	0,00	0,00	0,00
69	COMB9	-1,30	0,44	3,93	0,00	0,00	0,00
69	COMB10	-1,30	0,63	4,07	0,00	0,00	0,00
69	COMB11	-1,63	0,63	4,10	0,00	0,00	0,00
69	COMB12	-1,51	0,22	3,79	0,00	0,00	0,00
69	COMB13	-1,51	0,86	4,25	0,00	0,00	0,00
69	COMB14	-1,41	0,86	4,24	0,00	0,00	0,00
69	COMB15	-1,41	0,22	3,78	0,00	0,00	0,00
73	COMB1	-1,87	0,00	13,43	0,00	0,00	0,00
73	COMB2	-1,79	0,00	11,15	0,00	0,00	0,00
73	COMB3	-1,86	0,00	16,82	0,00	0,00	0,00
73	COMB4	-1,81	0,00	15,45	0,00	0,00	0,00
73	COMB5	-1,43	-0,01	0,87	0,00	0,00	0,00
73	COMB6	-1,32	-0,02	1,00	0,00	0,00	0,00
73	COMB7	-1,32	-0,01	0,74	0,00	0,00	0,00
73	COMB8	-1,44	-0,01	3,78	0,00	0,00	0,00
73	COMB9	-1,15	-0,01	3,74	0,00	0,00	0,00
73	COMB10	-1,15	0,01	3,61	0,00	0,00	0,00
73	COMB11	-1,44	0,01	3,66	0,00	0,00	0,00

73	COMB12	-1,34	-0,02	3,91	0,00	0,00	0,00
73	COMB13	-1,34	0,02	3,50	0,00	0,00	0,00
73	COMB14	-1,25	0,02	3,49	0,00	0,00	0,00
73	COMB15	-1,25	-0,02	3,90	0,00	0,00	0,00
81	COMB1	-1,76	7,32	26,33	0,00	0,00	0,00
81	COMB2	-1,83	-2,66	6,94	0,00	0,00	0,00
81	COMB3	-1,74	2,26	21,29	0,00	0,00	0,00
81	COMB4	-1,78	-3,73	9,66	0,00	0,00	0,00
81	COMB5	-1,61	-0,21	0,34	0,00	0,00	0,00
81	COMB6	-1,49	-0,41	0,19	0,00	0,00	0,00
81	COMB7	-1,49	-0,19	0,24	0,00	0,00	0,00
81	COMB8	-1,57	-0,93	2,19	0,00	0,00	0,00
81	COMB9	-1,25	-0,93	2,19	0,00	0,00	0,00
81	COMB10	-1,25	-0,75	2,32	0,00	0,00	0,00
81	COMB11	-1,57	-0,75	2,31	0,00	0,00	0,00
81	COMB12	-1,46	-1,13	2,05	0,00	0,00	0,00
81	COMB13	-1,46	-0,55	2,46	0,00	0,00	0,00
81	COMB14	-1,36	-0,55	2,46	0,00	0,00	0,00
81	COMB15	-1,36	-1,13	2,05	0,00	0,00	0,00
85	COMB1	-1,85	0,00	6,18	0,00	0,00	0,00
85	COMB2	-1,82	0,00	8,48	0,00	0,00	0,00
85	COMB3	-1,87	0,00	10,44	0,00	0,00	0,00
85	COMB4	-1,85	0,00	11,82	0,00	0,00	0,00
85	COMB5	-1,44	-0,01	0,53	0,00	0,00	0,00
85	COMB6	-1,33	-0,02	0,69	0,00	0,00	0,00
85	COMB7	-1,33	-0,01	0,43	0,00	0,00	0,00
85	COMB8	-1,46	-0,01	2,80	0,00	0,00	0,00
85	COMB9	-1,16	-0,01	2,80	0,00	0,00	0,00

85	COMB10	-1,16	0,01	2,66	0,00	0,00	0,00
85	COMB11	-1,46	0,01	2,66	0,00	0,00	0,00
85	COMB12	-1,36	-0,02	2,96	0,00	0,00	0,00
85	COMB13	-1,35	0,02	2,51	0,00	0,00	0,00
85	COMB14	-1,27	0,02	2,51	0,00	0,00	0,00
85	COMB15	-1,27	-0,02	2,96	0,00	0,00	0,00
93	COMB1	-1,28	12,28	32,42	0,00	0,00	0,00
93	COMB2	-1,59	-0,80	9,25	0,00	0,00	0,00
93	COMB3	-1,27	6,73	26,79	0,00	0,00	0,00
93	COMB4	-1,46	-1,12	12,89	0,00	0,00	0,00
93	COMB5	-1,57	-0,13	0,45	0,00	0,00	0,00
93	COMB6	-1,45	-0,34	0,30	0,00	0,00	0,00
93	COMB7	-1,46	-0,12	0,34	0,00	0,00	0,00
93	COMB8	-1,48	-0,34	2,93	0,00	0,00	0,00
93	COMB9	-1,16	-0,34	2,93	0,00	0,00	0,00
93	COMB10	-1,16	-0,16	3,05	0,00	0,00	0,00
93	COMB11	-1,48	-0,16	3,06	0,00	0,00	0,00
93	COMB12	-1,37	-0,56	2,78	0,00	0,00	0,00
93	COMB13	-1,37	0,05	3,21	0,00	0,00	0,00
93	COMB14	-1,27	0,05	3,21	0,00	0,00	0,00
93	COMB15	-1,27	-0,55	2,78	0,00	0,00	0,00
97	COMB1	-1,79	0,00	8,94	0,00	0,00	0,00
97	COMB2	-1,81	0,00	9,51	0,00	0,00	0,00
97	COMB3	-1,84	0,00	12,92	0,00	0,00	0,00
97	COMB4	-1,85	0,00	13,27	0,00	0,00	0,00
97	COMB5	-1,41	-0,01	0,59	0,00	0,00	0,00

97	COMB6	-1,31	-0,02	0,74	0,00	0,00	0,00
97	COMB7	-1,30	-0,01	0,48	0,00	0,00	0,00
97	COMB8	-1,44	-0,01	3,13	0,00	0,00	0,00
97	COMB9	-1,15	-0,01	3,13	0,00	0,00	0,00
97	COMB10	-1,15	0,01	3,00	0,00	0,00	0,00
97	COMB11	-1,43	0,01	3,00	0,00	0,00	0,00
97	COMB12	-1,34	-0,02	3,29	0,00	0,00	0,00
97	COMB13	-1,33	0,02	2,84	0,00	0,00	0,00
97	COMB14	-1,25	0,02	2,84	0,00	0,00	0,00
97	COMB15	-1,25	-0,02	3,28	0,00	0,00	0,00
105	COMB1	-0,71	17,26	38,54	0,00	0,00	0,00
105	COMB2	-1,28	1,07	11,59	0,00	0,00	0,00
105	COMB3	-0,71	11,21	32,32	0,00	0,00	0,00
105	COMB4	-1,06	1,50	16,15	0,00	0,00	0,00
105	COMB5	-1,49	-0,05	0,58	0,00	0,00	0,00
105	COMB6	-1,38	-0,26	0,42	0,00	0,00	0,00
105	COMB7	-1,39	-0,05	0,45	0,00	0,00	0,00
105	COMB8	-1,34	0,24	3,68	0,00	0,00	0,00
105	COMB9	-1,03	0,24	3,67	0,00	0,00	0,00
105	COMB10	-1,03	0,43	3,80	0,00	0,00	0,00
105	COMB11	-1,34	0,43	3,81	0,00	0,00	0,00
105	COMB12	-1,23	0,03	3,52	0,00	0,00	0,00
105	COMB13	-1,24	0,65	3,97	0,00	0,00	0,00
105	COMB14	-1,14	0,65	3,96	0,00	0,00	0,00
105	COMB15	-1,14	0,03	3,51	0,00	0,00	0,00
109	COMB1	-1,71	0,00	11,67	0,00	0,00	0,00
109	COMB2	-1,76	0,00	10,53	0,00	0,00	0,00

109	COMB3	-1,80	0,00	15,37	0,00	0,00	0,00
109	COMB4	-1,82	0,00	14,69	0,00	0,00	0,00
109	COMB5	-1,33	-0,01	0,64	0,00	0,00	0,00
109	COMB6	-1,24	-0,02	0,79	0,00	0,00	0,00
109	COMB7	-1,24	-0,01	0,53	0,00	0,00	0,00
109	COMB8	-1,38	-0,01	3,46	0,00	0,00	0,00
109	COMB9	-1,10	-0,01	3,45	0,00	0,00	0,00
109	COMB10	-1,10	0,01	3,32	0,00	0,00	0,00
109	COMB11	-1,37	0,01	3,33	0,00	0,00	0,00
109	COMB12	-1,28	-0,02	3,61	0,00	0,00	0,00
109	COMB13	-1,28	0,02	3,17	0,00	0,00	0,00
109	COMB14	-1,19	0,02	3,17	0,00	0,00	0,00
109	COMB15	-1,20	-0,02	3,60	0,00	0,00	0,00
117	COMB1	-3,69	22,23	42,48	0,00	0,00	0,00
117	COMB2	-2,48	2,95	12,99	0,00	0,00	0,00
117	COMB3	-3,33	15,69	35,90	0,00	0,00	0,00
117	COMB4	-2,60	4,13	18,21	0,00	0,00	0,00
117	COMB5	-1,82	0,04	0,46	0,00	0,00	0,00
117	COMB6	-1,68	-0,18	0,31	0,00	0,00	0,00
117	COMB7	-1,69	0,03	0,34	0,00	0,00	0,00
117	COMB8	-1,90	0,84	4,00	0,00	0,00	0,00
117	COMB9	-1,53	0,84	4,03	0,00	0,00	0,00
117	COMB10	-1,54	1,03	4,16	0,00	0,00	0,00
117	COMB11	-1,90	1,03	4,13	0,00	0,00	0,00
117	COMB12	-1,76	0,61	3,85	0,00	0,00	0,00
117	COMB13	-1,78	1,25	4,31	0,00	0,00	0,00
117	COMB14	-1,67	1,25	4,32	0,00	0,00	0,00
117	COMB15	-1,65	0,61	3,85	0,00	0,00	0,00

121	COMB1	-2,72	0,00	14,08	0,00	0,00	0,00
121	COMB2	-2,69	0,00	11,24	0,00	0,00	0,00
121	COMB3	-2,97	0,00	17,46	0,00	0,00	0,00
121	COMB4	-2,95	0,00	15,75	0,00	0,00	0,00
121	COMB5	-1,71	-0,01	0,54	0,00	0,00	0,00
121	COMB6	-1,60	-0,02	0,69	0,00	0,00	0,00
121	COMB7	-1,59	-0,01	0,43	0,00	0,00	0,00
121	COMB8	-1,89	-0,01	3,59	0,00	0,00	0,00
121	COMB9	-1,55	-0,01	3,61	0,00	0,00	0,00
121	COMB10	-1,54	0,01	3,49	0,00	0,00	0,00
121	COMB11	-1,88	0,01	3,47	0,00	0,00	0,00
121	COMB12	-1,77	-0,02	3,75	0,00	0,00	0,00
121	COMB13	-1,76	0,02	3,33	0,00	0,00	0,00
121	COMB14	-1,66	0,02	3,33	0,00	0,00	0,00
121	COMB15	-1,67	-0,02	3,75	0,00	0,00	0,00
129	COMB1	-0,15	0,29	7,50	0,00	0,00	0,00
129	COMB2	-0,15	-2,60	1,86	0,00	0,00	0,00
129	COMB3	-0,15	-1,91	5,51	0,00	0,00	0,00
129	COMB4	-0,15	-3,64	2,13	0,00	0,00	0,00
129	COMB5	-0,13	-0,18	0,94	0,00	0,00	0,00
129	COMB6	-0,11	-0,31	0,78	0,00	0,00	0,00
129	COMB7	-0,11	-0,17	0,83	0,00	0,00	0,00
129	COMB8	-0,13	-0,88	1,14	0,00	0,00	0,00
129	COMB9	-0,09	-0,88	0,97	0,00	0,00	0,00
129	COMB10	-0,09	-0,76	1,05	0,00	0,00	0,00
129	COMB11	-0,13	-0,76	1,22	0,00	0,00	0,00

129	COMB12	-0,11	-1,01	0,98	0,00	0,00	0,00
129	COMB13	-0,11	-0,63	1,26	0,00	0,00	0,00
129	COMB14	-0,10	-0,63	1,21	0,00	0,00	0,00
129	COMB15	-0,10	-1,01	0,93	0,00	0,00	0,00
133	COMB1	-0,07	0,00	5,46	0,00	0,00	0,00
133	COMB2	-0,07	0,00	5,61	0,00	0,00	0,00
133	COMB3	-0,07	0,00	7,51	0,00	0,00	0,00
133	COMB4	-0,07	0,00	7,60	0,00	0,00	0,00
133	COMB5	-0,06	0,00	0,77	0,00	0,00	0,00
133	COMB6	-0,06	-0,01	0,85	0,00	0,00	0,00
133	COMB7	-0,06	0,00	0,67	0,00	0,00	0,00
133	COMB8	-0,06	0,00	2,13	0,00	0,00	0,00
133	COMB9	-0,05	0,00	2,04	0,00	0,00	0,00
133	COMB10	-0,05	0,00	1,94	0,00	0,00	0,00
133	COMB11	-0,06	0,00	2,03	0,00	0,00	0,00
133	COMB12	-0,06	-0,01	2,20	0,00	0,00	0,00
133	COMB13	-0,06	0,01	1,89	0,00	0,00	0,00
133	COMB14	-0,05	0,01	1,87	0,00	0,00	0,00
133	COMB15	-0,05	-0,01	2,18	0,00	0,00	0,00

## **Βιβλιογραφία**

1. Ρ. Γραικούση, *Στοιχεία Μηχανών Ι*, Εκδόσεις Γιαχούδη
2. AIAS ENGINEERING – DESIGN AND STRESS ANALYSIS OFFICE,  
*Ανάλυση στατικής επάρκειας ικριώματος φ/β panel*, Metaloumin S.A.
3. Δ. Λιογάνος, Τμήμα Μελετών CCS ΑΕ, *Κοχλίες – Επιλογή και εφαρμογή σε έργα από χάλυβα*
4. Kulak, G. L., Fisher, J. W., and Struik, J. H. A., *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, Second Edition
5. Σιδηρές Κατασκευές Ι, *Απλές διατεμνόμενες κοχλιώσεις*, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών
6. Π. Α. Μακρής, *Στοιχεία Μηχανών Ι*, Αθήνα 1998
7. Γεώργιος Κ. Μπαράκος, *Διάτμηση*
8. Γεώργιος Θ. Μιχάλτσος, *Ελαφρές Μεταλλικές Κατασκευές*, Εκδόσεις Συμεών
9. Ιωάννης Ερμόπουλος, *Ευρωκώδικας 1*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος
10. *Ευρωκώδικας 9 – Σχεδιασμός κατασκευών από αλουμίνιο*
11. *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000*
12. <http://www.bgstructuralengineering.com/BGSCM/BGSCM004/BGSCM00403.htm>