



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ & ΑΥΤΟΜ. ΕΛΕΓΧΟΥ

Εργαστήριο Δυναμικής & Κατασκευών

Διπλωματική Εργασία

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ  
ΜΕ ΜΕΜΒΡΑΝΗ ΑΠΟ ΥΦΑΣΜΑ**

Νικόλαος Κουτσογιάννης

*Επιβλέπων Καθηγητής: Χ. Γ. Προβατίδης*

ΑΘΗΝΑ 2015

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εφελκυσόμενες κατασκευές μεμβράνης από ύφασμα είναι εξαιρετικά δημοφιλής στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Υπάρχει μια αυξανόμενη τάση σχετικά με τη χρήση των δομών της μεμβράνης στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό. Είναι σημαντικό να αναγνωρίσουμε το σκεπτικό πίσω από την αύξηση της δημοτικότητας: γιατί είναι τόσο πολλοί οι αρχιτέκτονες που χρησιμοποιούν τη δυνατότητα σχεδιασμού, στα σχέδιά τους;

Η ταχύτατη κατασκευή τους, η ποικιλομορφία των μορφών, η σχέση ιδίου βάρους-αντοχής κάνουν τις κατασκευές αυτές πραγματικά μία επανάσταση στον τομέα της μηχανικής.

Η παρούσα εργασία πραγματεύεται τις παραμέτρους που πρέπει να αναλυθούν, ώστε ο σχεδιασμός των κατασκευών αυτών να είναι ο βέλτιστος τόσο ως προς την μορφή, την στιβαρότητα και την οικονομία του υλικού.

Καθώς το πρόβλημα είναι πολυσύνθετο απαιτείται η γνώμη πολλών ειδικοτήτων μηχανικών, χρήση λογισμικών περασμένων στοιχείων, τρισδιάστατου σχεδιασμού, ροής αέρα, και επαναληπτικών μεθόδων μη γραμμικής ανάλυσης.

Η εργασία περιλαμβάνει έξι κεφάλαια:

1. Ιστορική αναδρομή
2. Επισκόπηση υπαρχόντων κατασκευών
3. Υλικά κατασκευής, ιδιότητες και συμπεριφορά
4. Ανάλυση του είδους της μορφής των κατασκευών
5. Παράμετροι και στοιχεία μόρφωσης της εφελκυσόμενης κατασκευής με μεμβράνη από ύφασμα
6. Ανάλυση παραμέτρων των γωνιακών πλακών συγκράτησης

## Ευχαριστίες-Αφιερώσεις

Η εργασία αυτή έγινε με το σκεπτικό να δοθεί περιεκτικά και όσο το δυνατόν πλήρης επιστημονικά και πρακτικά η ανάλυση των παραγόντων που πρέπει να εξετάζονται για τον σχεδιασμό των εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης από ύφασμα. Αφιερώνεται σ' αυτούς που θα θελήσουν να διευρύνουν την μελέτη του κάθε παράγοντα αξιοποιώντας τα γραφόμενα εδώ, τα οποία είναι απόρροια εμπειρίας δεκαπέντε ετών στην πραγματική μελέτη και κατασκευή. Ώρες πολλές, αμέτρητες για την συλλογή στοιχείων βρίσκονται μέσα σ' αυτή την εργασία.

Θα ήθελα πρώτα απ' όλα να ευχαριστήσω για την υπομονή τους τα παιδιά μου Άννα-Μαρία, Κωνσταντίνα και Γιώργο. Την μητέρα τους Άρτζη και τον πατέρα της Γιώργο που μου έδωσε την ευκαιρία να γνωρίσω τις τέντες.

Την μητέρα μου που με στήριζε πάντα ,τον πατέρα μου Μαστρο-Βασίλη που μου έμαθε την τέχνη του σιδήρου και την σύντροφο μου Denka για την τεράστια υπομονή και δύναμη που μου έδωσε για να υλοποιηθεί αυτή η εργασία.

Τον Καθηγητή κύριο Σφαντζικόπουλο που μου έδωσε την άδεια να προχωρήσω με αυτό το θέμα και τον συνεχιστή του Καθηγητή κύριο Προβατίδη.

Επίσης τον μέντορα μου στην σχεδίαση των κατασκευών Καθηγητή Αρχιτεκτονικής στο Πανεπιστήμιο της Napoli Italia κύριο Gerry D'Anza καθώς και τον φίλο Γιάννη που μου έδωσε την δύναμη να ξαναασχοληθώ με τις σπουδές μου μέχρι την ολοκλήρωση τους.

<<Make things as simple as possible, but not simpler>>

Albert Einstein

## ΠΕΡΙΟΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΙΣΤΟΡΙΑ

#### 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

#### 1.2 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### 1.3 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### 2.1 Στάδιο San Nicola – Bari, Italy, 1990

#### 2.2 Park Dome Kumamoto – Kumamoto, Japan, 1997

#### 2.3 Millennium Dome – Greenwich, UK, 1999

#### 2.4 Don Valley Stadium – Sheffield, UK, 1990

#### 2.5 Sails in the Desert – Yulara, Australia, 1984

#### 2.6. Yao-Yuan County Arena – Taoyuan, Taiwan, 1993

#### 2.7. San Diego Conventions Centers - San Diego, USA, 1989

#### 2.8. “Nuage Leger”, La Grande Arche – Paris, France, 1989

#### 2.9. Columbus’92 “Bigo” – Genoa, Italy, 1992

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΥΛΙΚΑ

#### 3.1 ΚΑΛΩΔΙΑ

##### 3.1.1 ΔΟΜΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ

##### 3.1.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

###### 3.1.2.1 ΠΑΤΕΝΤΑΡΙΣΜΑ (PATENTING)

###### 3.1.2.2 ΑΠΟΞΕΙΔΩΣΗ (DESCALING OR PICKLING)

###### 3.1.2.3 ΕΛΚΥΣΗ (DRAWING)

###### 3.1.2.4 ΓΑΛΒΑΝΙΣΜΑ (GALVANIZING OR ZINC COATING)

###### 3.1.2.5 ΕΛΕΓΧΟΣ (INSPECTION AFTER GALVANISING)

###### 3.1.2.6 ΠΕΡΙΕΛΙΞΗ (WINDING)

###### 3.1.2.7 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΛΩΝΩΝ (STRANDING)

###### 3.1.2.8 ΕΛΕΓΧΟΣ (INSPECTION AFTER STRANDING)

###### 3.1.2.9 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ (CLOSING OR ROPING)

###### 3.1.2.10 ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ (PACKING)

##### 3.1.3 ΤΥΠΟΙ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

###### 3.1.3.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΡΜΑΤΩΝ

###### 3.1.3.2 ΤΕΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ

###### 3.1.3.3 ΦΟΡΑ ΠΕΡΙΕΛΙΞΗΣ

###### 3.1.3.4 ΠΥΡΗΝΑΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ

###### 3.1.3.5 ΠΛΗΘΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΛΩΝΩΝ

##### 3.1.4 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

##### 3.1.5 ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

##### 3.1.6 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΥΠΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ

###### 3.1.6.1 ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟ ΚΑΛΩΔΙΟ ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟ ΜΕΣΟΝ

##### 3.1.7 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΜΕ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΑ

###### ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΤΟΞΟΥ

#### 3.2 ΥΛΙΚΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

##### 3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ

###### 3.2.1.1 ΒΑΣΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ

###### 3.2.1.2 ΝΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΑ

###### 3.2.1.3 ΥΑΛΟΝΗΜΑΤΑ (FIBER GLASS)

- 3.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΒΑΣΙΚΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ
  - 3.2.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ
  - 3.2.2.2 ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ
- 3.2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ
  - 3.2.3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ
  - 3.2.3.2 PVC ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ
  - 3.2.3.3 ΡΤΦΕ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ
  - 3.2.3.4 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ
  - 3.2.3.5 ΣΙΛΙΚΟΝΟΥΧΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ
- 3.2.4 ΥΦΑΣΜΑΤΑ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ
  - 3.2.4.1 ΤΕΧΝΙΚΟ ΔΕΛΤΙΟ ΜΕ ΤΑ ΚΟΙΝΩΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΠΡΟΤΥΠΑ
  - 3.2.4.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
- 3.2.5 ΦΥΛΛΑ ΕΤΦΕ
- 3.2.6 ΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ
  - 3.2.6.1 ΓΕΝΙΚΑ
  - 3.2.6.2 ΦΑΣΗ ΑΝΑΠΤΥΓΜΑΤΟΣ
  - 3.2.6.3 ΦΑΣΗ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ
  - 3.2.6.4 ΦΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
- 3.2.7 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
  - 3.2.7.1 ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΕΣ ΤΜΗΜΑ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ-ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ ΘΕΣΗΣ
  - 3.2.7.2 ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
  - 3.2.7.3 ΜΕΜΒΡΑΝΗ ΥΠΟ ΕΝΤΑΣΗ
- 3.2.8 ΘΕΩΡΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ
  - 3.2.8.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ
  - 3.2.8.2 ΣΧΕΣΕΙΣ ΤΡΟΠΩΝ-ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ
  - 3.2.8.3 ΕΠΙΠΕΔΗ ΜΕΜΒΡΑΝΗ
  - 3.2.8.4 ΦΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΠΙΠΕΔΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
  - 3.2.8.5 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΕ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ
- 3.2.9 ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΓΑΛΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ
  - 3.2.9.1 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ
  - 3.2.9.2 ΣΧΕΣΕΙΣ ΦΟΡΤΙΟΥ – ΤΡΟΠΗΣ
- 3.2.10 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
- 3.2.11 ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ
  - 3.2.11.1 ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ
  - 3.2.11.2 ΔΟΚΙΜΗ ΓΙΑ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ
  - 3.2.11.3 ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΝΤΟΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ
  - 3.2.11.4 Η ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΚΙΣΙΜΑΤΟΣ
  - 3.2.11.5 ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ, ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ
  - 3.2.11.6 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΡΠΥΣΜΟΥ
  - 3.2.11.7 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 4.2 ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΝΤΙΚΛΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

#### 4.2.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ.

- 4.2.1.1 ΕΥΚΑΜΠΤΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΡΙΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
- 4.2.1.2 ΕΥΚΑΜΠΤΕΣ ΚΟΡΥΦΟΓΡΑΜΜΕΣ ,ΚΟΙΛΑΔΕΣ ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΙ
- 4.2.1.3 ΔΥΣΚΑΜΠΤΑ ΟΡΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
- 4.2.1.4 ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΕΙΣ-ΑΨΙΔΕΣ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΑ

- 4.2.1.5 ΚΑΜΠΟΥΡΩΤΕΣ ΣΤΗΡΙΞΕΙΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
- 4.2.1.6 ΙΣΤΟΙ
- 4.2.1.7 ΚΑΛΩΔΙΑ
- 4.2.1.8 ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ
- 4.3 ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΣΥΓΚΛΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ
  - 4.3.1 ΑΕΡΟΪΠΟΣΤΗΡΙΖΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ
    - 4.3.1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ
    - 4.3.1.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ
    - 4.3.1.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ
      - 4.3.1.3.1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ
      - 4.3.1.3.2 ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΗΣ
      - 4.3.1.3.3 ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ
    - 4.3.1.4 ΟΡΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ
  - 4.3.2 ΦΟΥΣΚΩΜΕΝΑ ΜΑΞΙΛΑΡΙΑ (INFLATED CUSHIONS)
    - 4.3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ
    - 4.3.2.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΓΙΑ ETFE CUSHIONS.
      - 4.3.2.2.1 HUNTINGTON METHOD
      - 4.3.2.2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ WAGNER
      - 4.3.2.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ BORGART
      - 4.3.2.2.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
    - 4.3.2.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΑΚΑΜΠΤΩΝ ΟΡΙΩΝ ΓΙΑ INFLATED CUSHION
    - 4.3.2.4 INFLATION UNITS
    - 4.3.2.5 CONTROL SYSTEM
  - 4.3.3 TENSAIRITY
    - 4.3.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ
    - 4.3.3.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ TENSAIRITY
    - 4.3.3.3 ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ
- 4.4 TENSEGRITY
  - 4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ
  - 4.4.2 TRUE ΚΑΙ FALSE TENSEGRITY (ΟΡΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΤΑΙ ΔΙΕΘΝΩΣ).
    - 4.4.2.1 ΘΟΛΟΙ (DOMES)
    - 4.4.2.2 ΟΡΟΦΕΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΑ
    - 4.4.2.3 ΑΨΙΔΕΣ ΚΑΙ ΥΠΟΣΤΕΓΑ
    - 4.4.2.4 ΒΟΗΘΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ TENSEGRITY ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ
- 4.5 ΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΣΤΕΓΕΣ
  - 4.5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ
  - 4.5.2 ΤΥΠΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ
  - 4.5.3 ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΙΝΗΣΗ
  - 4.5.4 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

- 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ
- 5.2. ΕΥΡΕΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ
  - 5.2.1 ΟΡΙΣΜΟΙ
  - 5.2.2 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ
  - 5.2.3 ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ
  - 5.2.4 UPDATED REFERENCE STRATEGY (URS)
  - 5.2.5 ΜΕΘΟΔΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ (FDM)
  - 5.2.6 ΜΕΘΟΔΟΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΔΥΝΑΜΗΣ (NFDM)
  - 5.2.7 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ «ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ-ΔΥΝΑΜΗΣ»

## 5.3 ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

### 5.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 5.3.2 ΠΡΟΕΝΤΑΣΗ

### 5.3.3 ΙΔΙΟ ΒΑΡΟΣ

### 5.3.4 ΑΝΕΜΟΣ

#### 5.3.4.1 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΗΡΑΓΓΑ

#### 5.3.4.2 CFD (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

#### 5.3.4.3 ΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ

### 5.3.5 ΧΙΟΝΙ

### 5.3.6 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

### 5.3.7 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ

### 5.3.8 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΟΧΕΣ

### 5.3.9 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΙ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

### 5.3.10 ΔΥΣΑΝΑΛΟΓΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ

### 5.3.11 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

#### 5.3.11.1 ΑΠΛΗ ΜΕΘΟΔΟΣ NEWTON – RAPHSON

#### 5.3.11.2 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ NEWTON – RAPHSON

#### 5.3.11.3 ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ NEWTON – RAPHSON

#### 5.3.11.4 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

#### 5.3.11.5 ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΤΩΝ ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

## 5.4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΧΗΜΑΤΟΜΟΡΦΩΣΗΣ (PATTERNING) –ΡΑΦΕΣ

### 5.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 5.4.2 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΟΥ ΣΧΕΔΙΟΥ ΚΟΠΗΣ

### 5.4.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΧΕΔΙΟΥ ΚΟΠΗΣ ΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

### 5.4.4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΧΩΡΙΚΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΓΙΑ ΣΧΗΜΑΤΟΜΟΡΦΩΣΗ

### 5.4.5 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ

### 5.4.6 ΕΠΙΠΕΔΟΠΟΙΗΣΗ ΧΩΡΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

### 5.4.7 ΕΠΙΠΕΔΩΣΗ ΛΩΡΙΔΑΣ

### 5.4.8 ΑΠΟΜΕΙΩΣΗ ΛΩΡΙΔΑΣ

### 5.4.9 ΕΠΙΠΕΔΕΣ ΤΟΜΕΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ

### 5.4.10 ΗΜΙ-ΓΕΩΔΑΙΤΙΚΕΣ ΓΡΑΜΜΕΣ

### 5.4.11 ΡΑΦΕΣ

#### 5.4.11.1 ΡΑΦΕΣ ΜΕ ΒΕΛΟΝΑ

#### 5.4.11.2 ΣΥΓΚΟΛΛΗΜΕΝΕΣ ΡΑΦΕΣ

#### 5.4.11.3 ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΡΑΦΩΝ

#### 5.4.11.4 ΚΟΛΛΗΜΕΝΕΣ ΡΑΦΕΣ

#### 5.4.11.5 ΡΑΦΕΣ ΜΕ ΔΕΣΙΜΟ

#### 5.4.11.6 ΡΑΦΕΣ ΣΥΣΦΙΞΗΣ

## 5.5. ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΑΚΡΑ

## 5.6 ΠΛΑΚΕΣ ΕΔΡΑΣΗΣ

## 5.7 ΑΓΚΥΡΩΣΗ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΓΩΝΙΕΣ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ

### 6.1 ΑΚΑΜΠΤΑ ΑΚΡΑ

### 6.2 ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ

### 6.3 ΣΗΜΕΙΑΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ ΤΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΣΤΟ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΤΗΣ

### 6.4 ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ ΓΩΝΙΩΝ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σχ.3.1 Κατασκευή Καλωδίου

Σχήμα 3.2 Διάγραμμα Φάσεων Σιδήρου (Fe) . Άνθρακα (C)

Σχήμα 3.3 Κρυσταλλική Δομή του Ωστενίτη

Σχήμα 3.4 Κρυσταλλική Δομή του Φερρίτη

Σχήμα 3.5 Μικρογραφία Περλίτη

Σχήμα 3.6 Μικρογραφία Μπαινίτη

Σχήμα 3.7 Μικρογραφία Μαρτενσίτη

Σχήμα 3.8 Μορφή Διαγράμματος Συνεχούς Ψύξης (CCT)

Σχήμα 3.9 Μορφή Διαγράμματος Σταθερής Ψύξης (TTT)

Σχήμα 3.10 Ανώτερο Τμήμα Διαγράμματος Σταθερής Ψύξης (TTT)

Σχήμα 3.11 Κατώτερο Τμήμα Διαγράμματος Σταθερής Ψύξης (TTT)

Σχήμα 3.12 Καμπύλες Ψύξης A και B

Σχήμα 3.13 Καμπύλες Ψύξης C, D και E

Σχήμα 3.14 Καμπύλη Ψύξης κατά το Πατεντάρισμα

Σχήμα 3.15 Μήτρα Συρματοποίησης

Σχήμα 3.16 Διάταξη Μήτρων και Τύμπανων κατά τη Συρματοποίηση

Σχήμα 3.17 Μηχανή Κατασκευής Κλώνων (Stranding Machine)

Σχήμα 3.18 Τρόπος περιέλιξης

Σχήμα 3.19 Μπομπίνες Συσκευασίας Καλωδίων

Σχήμα 3.20 Αστοχία Καλωδίων από Σύνθλιψη

Σχήμα 3.21 Διατομή Επενδυμένων Καλωδίων

Σχήμα 3.22 Φορά Περιέλιξης Συρμάτων και Κλώνων

Σχήμα 3.23 Μήκος Τριβής Συρμάτων Καλωδίων RL και LL

Σχήμα 3.24 Μονόκλινα Καλώδια

Σχήμα 3.25 Καλώδια μιας Στρώσης Κλώνων

Σχήμα 3.26 Πολλών Στρώσεων Μη Περιστρεφόμενα Καλώδια

Σχήμα 3.27 Μέτρηση Διαμέτρου Καλωδίου

Σχήμα 3.28 Αβαρές καλώδιο σε άνοιγμα μήκους L

Σχήμα 3.29 Θέση ισορροπίας αβαρούς καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον

Σχήμα 3.30 Δρόμος ισορροπίας για καλώδιο υπό συγκεντρωμένο φορτίο

Σχήμα 3.31 Ένταση καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση της παραμόρφωσης

Σχήμα 3.32 Ένταση καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση του φορτίου



Σχήμα 3.33 Δυσκαμψία καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση της παραμόρφωσης

Σχήμα 3.34 Δυσκαμψία καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση του φορτίου

Σχήμα 3.35 Επιρροή αρχικού μήκους στο δρόμο ισορροπίας καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο

Σχήμα 3.36 Επιρροή αρχικού μήκους στην ένταση καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση του βέλους

Σχήμα 3.37 Επιρροή αρχικού μήκους στη δυσκαμψία καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση του βέλους

Σχήμα 3.38 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος καλωδίου με ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του τόξου του

Σχήμα 3.39 Καλώδιο με ομοιόμορφο φορτίο κατά μήκος του τόξου

Σχ.3.40 Μembrάνη για εφελκυστικές αρχιτεκτονικές κατασκευές

Σχ. 3.41 Διαδικασία τήξης της κλώσης

Σχ. 3.42 Διάγραμμα δύναμης-επιμήκυνσης για τα νήματα από πολυεστέρα

Σχ. 3.43 Αναπαράσταση υφάσματος PANAMA διπλής πλέξης με low wick νήματα

Σχ. 3.44 Συμπεριφορά δύναμης εφελκυσμού για υαλονήματα

Σχ. 3.45.1 Μοτίβο πλέξης

Σχ. 3.45.1α Επίπεδο μοτίβο

Σχ. 3.45.1β Μοτίβο 2-2 box ή PANAMA

Σχ. 3.46 Επεξεργασία PTFE μεμβρανών.

Σχήμα 3.47 Δοκός φορτιζόμενη με σημειακό φορτίο

Σχήμα 3.48 Καλώδιο φορτιζόμενο με σημειακό φορτίο

Σχήμα 3.49 Στοιχειώδες τμήμα μεμβράνης

Σχήμα 3.50 Επιφάνειες ελλειπτικού τύπου

Σχήμα 3.51 Επιφάνειες υπερβολικού τύπου

Σχήμα 3.52 Επιφάνειες παραβολικού τύπου

Σχήμα 3.53 Οι συνιστώσες της έντασης στη μεμβράνη

Σχήμα 3.54 Γραφική απεικόνιση της εντατικής κατάστασης στη περίπτωση μονοαξονικής πτύχωσης

Σχήμα 3.55 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος στοιχειώδους τμήματος της μεμβράνης

Σχήμα 3.56 Ορθοκανονικό σύστημα αναφοράς

Σχήμα 3.57 Περιγραφή της επιφάνειας της μεμβράνης με πολικές συντεταγμένες

Σχήμα 3.58 Ισορροπία στοιχειώδους τμήματος σε επίπεδη μεμβράνη

Σχήμα 3.59 Γραμμικά μεταβαλλόμενες εντάσεις σε ορθογώνιο τμήμα μεμβράνης

Σχήμα 3.60 Ισορροπία ελαφρά καμπυλωμένης μεμβράνης

Σχήμα 3.61 Πεπερασμένο στοιχείο μεμβράνης - μεγάλες παραμορφώσεις

Σχήμα 3.62 Τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο μεμβράνης

Σχ. 3.63 Διατμητική παραμόρφωση ενός υφαντού υφάσματος

Σχ. 3.64 Διάτμηση

Σχ. 3.65 Η εξάρτηση μεταξύ γωνίας και αντοχής του νήματος

Σχ. 3.66 Τραπεζοειδής δείγμα

Σχ. 3.67 τραπεζοειδής δοκιμή

Σχ. 3.68 Συμπεριφοράς διάδοσης του σχισίματος σε διαξονικά εφελκούμενη μεμβράνη

Σχ. 3.69 μονοαξονικά φορτιζόμενο δείγμα με μία σχισμή

Σχ. 4.2 Συνήθειες εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης

Σχ. 4.2 Σκίτσα αντικλαστικών επιφανειών, από πάνω αριστερά προς τα δεξιά ωρολογιακά: σέλα, υποστηριζόμενη αψίδα, υποστηριζόμενη καμπούρα και σχήματα κορυφογραμμής / κοιλάδας σκίτσα από Frei Otto

Σχ. 4.3 Αντικλαστική ελαχιστοτική επιφάνεια που σχηματίζεται με ελεύθερα όρια. (Αριστερά) μοντέλο με φιλμ από σαπούνι (δεξιά) το μοντέλο του υπολογιστή που δημιουργείται με το PAM Lisa από ARCHITEKTURBÜRO RASCH + BRADATSCHE

Σχ. 4.4 Αριθμητικά μοντέλα «ελάχιστης επιφάνειας». (Αριστερά) σελοειδές τεσσάρων σημείων ιστίο (Δεξιά) συμμετρική ακτινική συστοιχία μορφών σχήματος σέλας, που δημιουργούνται με PAM Lisa by Architekturbüro Rasch+Bradatsch, 2004

Fig.4.5 Μια αντικλαστική εφελκούμενη κατασκευή ελεύθερης μορφής, με δίκτυο καλωδίων ως δομική στρώση και ένα επίπεδο μεμβράνης για την προστασία από την κακοκαιρία.

Σχ.4.6 1-κατασκευή μεμβράνης με υψηλά και χαμηλά σημεία και ανοίγματα βρόχων, 2- κωνική κατασκευή με κεντρικό άνοιγμα, σκίτσο για το κτίριο IL, Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης, Γερμανία, 3 - ελεύθερη διαμορφωμένη μορφή της μεμβράνης με υψηλά σημεία με βρόχους, 4- μεμβράνη εξωτερικά, 5- μεμβράνη υποστηριζόμενη με κατασκευή αψίδας εσωτερικά.

Σχ. 4.7 Κολάζ των μοντέλων φιλμ σαπουνιού, συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων στοιχείων που υποστηρίζουν. Από πάνω αριστερά ωρολογιακά: σημειακά συγκράτηση, αψίδα, καμπούρα και θηλιά. (Μελέτες που αναπτύχθηκαν από τον Frei Otto)

Σχ.4.8 Τέντα Θεατών, Thowal, Saudi Arabia, 1991, SL Rasch.

Σχ.4.9 Majlis Tent, Thowal, Saudi Arabia, 1991, SL Rasch.

Σχ.4.10 Εύκαμπτο όριο μεμβράνης από ιμάντα:

Σχ.4.11 Ατσάλινο καλώδιο σε καμπυλωτό όριο

Σχ.4.12 Λεπτομέρεια που δείχνει καλώδια σε κορυφογραμμές και κοιλάδες στην επιφάνεια της μεμβράνης.

Σχ.4.13 Δομή με στρογγυλό δύσκαμπτο όριο μεμβράνης που καθορίζεται από την πρόσοψη, η οποία είναι επίσης ένα δομικό σταθεροποιητικό στοιχείο.

Σχ.4.14 Το τόξο χρησιμοποιείται ως δύσκαμπτη γραμμική στήριξη στη θολωτό είσοδο για την

Ομοσπονδιακή Έκθεση Κήπος 1957

- Σχ.4.15 Καμπουρωτά στοιχεία υποστήριξης για τα υψηλά σημεία σε μια τέντα
- Σχ.4.16 Λεπτομέρεια με δύο συνοριακούς ιστούς
- Σχ.4.17 Εσωτερικός ιστός
- Σχ.4.18 Ένα παράδειγμα για flying masts
- Σχ.4.19 Ανοιγόμενη κατασκευή πάνω από το υπαίθριο θέατρο του καζίνο στις Κάννες
- Σχ.4.20 Ένα παράδειγμα όπου μία κατασκευή από δίκτυο καλωδίων έχει εξωτερικά αναρτηθεί από την «GrandArche» με καλώδια χάλυβα.
- Σχ.4.21 Σχεδιασμένο θεμέλιο ενός ιστού ανάρτησης
- Σχ. 4.22 "Κινητά ακίνητα": δομή για τη Festo
- Σχ. 4.23 Αεροϋποστηριζόμενες κατασκευές
- Σχ. 4.24 Τρόποι αστοχίας
- Σχ. 4.25 κυλινδρικού σχήματος αεροϋποστηριζόμενη κατασκευή
- Σχ. 4.26 Δράση του αέρα σε αεροϋποστηριζόμενη κατασκευή
- Σχ. 4.27 Αντιδράσεις στηρίξεων
- Σχ. 4.28 Δακτύλιος συγκράτησης
- Σχ. 4.29 Υψηλό προφίλ (αριστερά) και χαμηλό προφίλ (δεξιά) κατασκευής
- Σχ. 4.30 Χαμηλού προφίλ κατασκευή και αναχώματα εξάλειψης των δυνάμεων πίεσης
- Σχ. 4.31 Μεταφορά δύναμης γύρω από μια πόρτα
- Σχ. 4.32 WATER CUBE ΠΕΚΙΝΟ οροφή και πρόσοψη από ETFE INFLATED CUSHIONS.
- Σχ. 4.33 Ικανότητα του ETFE να μειώνει ή να αυξάνει τον φυσικό φωτισμό σε ένα κτίριο.
- Σχ. 4.34 - Cushion κάτω από εσωτερικό φορτίο
- Σχ. 4.35 - Cushion κάτω από εξωτερική φόρτιση
- Σχ 4.36 Φουσκωμένα ορθογώνιο Cushion
- Σχ.4.36 Inflated cushion
- Σχ.4.37 NFDM εξέταση inflated cushion χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ixCube
- Σχ.4.38 Σύνδεση ETFE Cushions στην υποστηρικτική δομή
- Σχ.4.39 ETFE inflated cushions συνδέσεις
- Fig.4.40 Μέθοδος προσάρτησης ETFE Cushions για Καλώδια
- Σχ.4.41 Εύκαμπτος σωλήνα αέρα σε σύνδεση με ένα ETFE Cushion
- Fig.4.41 Τυπική μονάδα συμπίεσης αέρα
- Σχ.4.42 - Παράδειγμα state-of-the-art σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου.
- Σχ.4.43 Tensairity

Σχ 4.44. 3D όψη και εγκάρσια τομή του σωλήνα χωρίς νευρώσεις και ο σωλήνας με νευρώσεις

Σχ.4.45 Tensairity πάρκο αυτοκινήτων στο Montreux

Σχ.4.46 Φωτισμένα Tensairity

Σχ. 4.47 Tensairity δοκό (αριστερά) σε σύγκριση με μια δοκό δικτυώματος (δεξιά). Βασικά, οι κάθετες αντηρίδες του δικτυώματος αντικαθίστανται από μια αεροδοκό στην δομή Tensairity με σημαντικές συνέπειες.

Σχ. 4.48 φορτίο λυγισμού δοκών κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Η κατάσταση με η πληρώσεις που βρίσκονται στο δικτύωμα. Η συνεχής ελαστική στήριξη αντικατοπτρίζει την κατάσταση του στοιχείου συμπίεσης σε Tensairity. Το φορτίο λυγισμού είναι ανεξάρτητο του μήκους για τη συνεχή ελαστική στήριξη.

Σχ. 4.49. διάφορες μορφές δοκών Tensairity: (α) κύλινδρος (β) σχήμα πούρου, (γ) συμμετρική άτρακτος και (δ) ασύμμετρη άτρακτος.

Σχ. 4.50 Αποσυναρμολογημένα Tensairity

Σχ. 4.51 Keder

Σχ. 4.52 Σύνδεση των δοκών του αέρα με τις κολόνες.

Σχ. 4.53 Λεπτομέρεια σύνδεσης με την μεμβράνη: ειδικά σχεδιασμένο προφίλ αλουμινίου

Σχ.4.54 Η βασική tensegrity μονάδα

Σχ.4.55 Όψη και κάτοψη μιας βασικής tensegrity μονάδας (τριγωνικό πρίσμα)

Σχ.4.56 Κατόψεις tensegrity πρισμάτων

Σχήμα 4.57. Κατακόρυφη πρόσθεση tensegrity μονάδων

Σχ.4.58 Τα δίκτυα τενόντων σχηματίζουν τριγωνικές επίπεδες επιφάνειες

Σχ. 4.59 Atlanta Dome

Σχ. 4.60 Στάδιο La Plata

Σχ. 4.61. Οροφές tensegrity

Σχ. 4.62 Double-layer grid the Laboratoire de Mécanique et Génie Civil in Montpellier

Σχ.4.63 Τρισδιάστατη απεικόνιση αψίδας Tensegrity που υποστηρίζει εφελκούμενη μεμβράνη.

Σχ. 4.64 Λεπτομέρεια από αψίδα Tensegrity

Σχ.4.65 (α) Two-way spanning double layer tensegrity grid computer model; (β) Two-way spanning double layer tensegrity grid φυσικό μοντέλο

Σχ. 4.66 Η κατάταξη των πτυσσόμενων στεγών

Σχ. 4.67 βαθμός της ελευθερίας του στερεού σώματος (αριστερά) και οι βαθμοί ελευθερίας της άκαμπτης πλάκας (δεξιά)

Σχ. 4.68 Τυπολογία πτυσσόμενων στεγών

Σχ. 4.69 ενέργεια που απαιτείται για τη μετακίνηση των διαφορετικών τύπων πτυσσόμενων στεγών

Σχ. 4.70 απαραίτητες συσκευές για το σημείο στηρίξεως πτυσσόμενης οροφή μεμβράνης

Σχ. 4.71 Μονάδα τροχαλιών για τα σημεία που υποστηρίζουν την πτυσσόμενη οροφή μεμβράνης

Σχ. 4.72 Δύο συστήματα οδήγησης για το σημείο στηρίξεως πτυσσόμενης οροφής μεμβράνης

Σχ. 4.73 ένας ελκυστήρας του Allwetterbad στο Ντίσελντορφ που κατασκευάστηκε το 1977 (αριστερά) και συρόμενα βαγόνια του Σταδίου Φρανκφούρτης που κατασκευάστηκε το 2005 (δεξιά)

Σχ. 4.74 Rathaus Vienna, Austria

Σχ. 4.75 Shopping Mall Athens Heart

Σχ.5.1 η κατασκευή μετά την εύρεση της μορφής, μοντέλο για CFD ανάλυση, δημιουργία πατρών, πραγματική κατασκευή

Σχ. 5.2 Διάγραμμα ροής της γενικής διαδικασίας για τον σχεδιασμό και υπολογισμό εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης

Σχ. 5.3 Απλός μονοβάθμιος ταλαντωτής

Σχ. 5.4 (α) Διάγραμμα μετατόπισης - χρόνου, (β) Διάγραμμα ταχύτητας – χρόνου

Σχ. 5.5 Διαγράμματα με απόσβεση (α) μετατόπισης - χρόνου, (β) ταχύτητας χρόνου

Σχ. 5.6 Επικόμβια φόρτιση συνημίτονο κατεύθυνσης

Σχήμα 5.7 Πεπερασμένο στοιχείο μεμβράνης - συνιστώσες των επικόμβιων δυνάμεων κατά μήκος των πλευρών του στοιχείου

Σχ. 5.8 Εύρεση τοπικού ακρότατου κινητικής ενέργειας

Σχ. 5.9 (α) Δίκτυο καλωδίων (β) Προσομοίωση της μεμβράνης με δίκτυο καλωδίων

Σχήμα 5.10 (α) Ισοτασικό τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο μεμβράνης (β) Το ίδιο στοιχείο με τις επικόμβιες δυνάμεις κατά τις διευθύνσεις των πλευρών

Σχ. 5.11: Βιώσιμες διαμορφώσεις που παράγονται μέσω της επιβολής διαφορετικών ρυθμίσεων κομβικών μετατοπίσεων στο ίδιο επίπεδο τετράγωνο πλέγμα αναφοράς, με ή χωρίς τρύπα.

Σχ. 5.12 Σύγκριση μεταξύ ελάχιστων και μη ελάχιστων κωνικών επιφανειών.

Σχ. 5.13 καθεστώς "δυναμικά-ελεγχόμενης" προέκτασης της δομής της μεμβράνης με υδραυλικά έμβολα

Σχ. 5.14 : Κλίμακα Beaufort

Σχήμα 5.15: Επισκόπηση εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης που έχουν καταρρεύσει

Σχ. 5.16: Οι τρεις βασικές δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα για τις δομές μεμβράνης

Σχ. 5.17 Μοντέλο γηπέδου για αεροδυναμική σήραγγα

Σχ. 5.18 Μοντέλα Αεροσήραγγας

Σχ. 5.19 Οργανόγραμμα Μεθοδολογίας μέτρησης

Σχ. 5.20.1 Wind Tunnel Μοντέλο

Σχ. 5.20.2 Ορισμός Ζωνών σε Cp Κώνο

Σχ. 5.21 Εξωτερικές τιμές Cp για κώνους

Σχ. 5.22 Typical "Ridge and Valley" Type of Membrane Structure.

Σχ. 5.23 Ridge and Valley Cp Zone Definition

Σχ. 5.24 External Cp Values for “Ridge and Valley” Type Structures

Σχ. 5.25 Wind Tunnel Model of the Hypar Form – published in ‘Das Hangende Dach’ Frei Otto 1954.

Σχ. 5.26 Hypar Cp Zone Definition

Σχ. 5.28 – Διάφορες CFD εφαρμογές για το σχεδιασμό των κτιρίων

Σχ. 5.29 - Architectural design process with CFD simulation

Σχ. 5.30 Πτερυγισμός κατά μήκος ενός ελεύθερου άκρου της μεμβράνης

Σχ. 5.31 Κατανομή φορτίου χιονιού στην κωνικής μορφής της δομή μεμβράνης (πρώτο πλάνο) και οροφή δικτύου καλωδίων επενδυμένη με ακρυλικό γυαλί (φόντο)

Σχ. 5.32 Λίμνες χιονιού στην στέγη μεμβράνης

Σχήμα 5.33 Γραφική απεικόνιση (διάγραμμα φόρτισης P - παραμόρφωσης δ) της μεθόδου Newton-Raphson για μονοβάθμιο σύστημα

Σχήμα 5.34 Γραφική απεικόνιση (διάγραμμα φόρτισης P - παραμόρφωσης δ) της τροποποιημένης μεθόδου Newton-Raphson για μη γραμμικό μονοβάθμιο σύστημα

Σχήμα 5.35 Γραφική απεικόνιση της υβριδικής επαναληπτικής μεθόδου για μη γραμμικό μονοβάθμιο σύστημα.

Σχ. 5.35 Σύγκριση της μη-γεωδαιτικής και γεωδαιτικής δημιουργίας πάνελ υφάσματος

Σχ. 5.36 Διαδικασία δημιουργίας σχεδίου κοπής

Σχ. 5.37 Διακριτά επιφανειακό μοντέλο που δημιουργείται από τρίγωνα.

Σχ. 5.38: Κάθετα διανύσματα, αναγκαία προϋπόθεση για την περιγραφή της καμπυλότητας της επιφάνειας.

Σχ.5.39 Γεωδαιτικές γραμμές που χωρίζουν μία διακριτή επιφάνεια της μεμβράνης σε λωρίδες.

Σχ. 5.40: Απλή επιφάνεια σέλλας.

Σχ. 5.41: Κοπή με κάθετα επίπεδα για σχηματοποίηση της σέλλας που φαίνεται στο Σχ. 5.40.

Σχ.5.42 Σχηματοποίηση της σέλλας που φαίνεται στο Σχ. 5.40 με γεωδαιτικές γραμμές.

Σχ. 5.43 Σκίτσο ραφών: Διπλής υποστήριξης

Σχ. 5.44 Είδη για συγκολλημένες ραφές: πισινή ραφή, διπλή πισινή ραφή, ραφή επικάλυψης

Σχ. 5.45 Μέθοδος δοκιμής ραφών, δοκιμή «ξεφλουδίσματος»

Σχ. 5.46 Τρόποι αστοχίας

Σχ. 5.47 "συμμετρική" και "ασύμμετρη" ραφή

Σχ. 5.48 Δύο τύποι ραφής

Σχ. 5.49 Σύνδεση με έλασμα σύσφιξης

Σχ. 5.50 Διαφορετικοί τύποι για την εγκατάσταση των πλακών σύσφιξης. Το αριστερό παράδειγμα χρειάζεται μεγάλες τρύπες για να επιτρέψει την επιμήκυνση του υφάσματος

Σχ. 5.51 εύκαμπτα άκρα: το καλώδιο στην θήκη, το καλώδιο έξω από την θήκη και ζώνη ενίσχυσης του υφάσματος.

Σχ. 5.52 The Inland Revenue Amenity Building, Nottingham, UK. Οι εικόνες δείχνουν – η πιο ψηλή κατασκευή μεμβράνης PTFE/υαλόνημα συνδέεται με ελάσματα σε ένα εξωτερικό καλώδιο άκρης – η χαμηλότερη κατασκευή μεμβράνης PTFE/υαλόνημα όπου το καλώδιο της άκρης κρύβεται μέσα σε μία συνεχή θήκη. Στην κάτω φωτογραφία η κατασκευή μεμβράνης PTFE/υαλόνημα που συνδέεται με ελάσματα σε πιο κοντινό πλάνο

Σχ. 5.53 Οι άκρες της προσωρινής κατασκευής με ιμάντες

Σχ. 5.54 Τρεις τύποι πλακών βάσης

Σχ. 5.55 Πλάκες βάσης καλωδίων: μεμονωμένα αρθρώνεται με τη χρήση ενός πιρουνιού και διπλά αρθρώνεται με επιπλέον προστιθέμενο στοιχείο εναλλαγής ανάμεσα στο άκρο του πιρουνιού και την πλάκα βάσης.

Σχ. 5.56 Αρχή της ενεργής και παθητικής αγκύρωσης

Σχ. 6.1 Άκαμπτα άκρα: σωλήνα σε θήκη, μεμβράνη που τελειώνει σε δακτυλίου

Σχ. 6.2 Άκαμπτα άκρα με σύσφιξη. Παράδειγμα ύφασμα το οποίο συσφίγγεται επί ενός άκαμπτου πλαισίου

Σχ. 6.3. Ελάσματα σύσφιξης και πάνω και κάτω στην μεμβράνη

Σχ. 6.4. Διάταξη έντασης μέσω προεντεταμένων κοχλιών

Σχ. 6.5. Διάταξη έντασης μέσω προεντεταμένων κοχλιών για διπλή μεμβράνη

Σχ. 6.6. Διάταξη δακτυλίων με στρογγυλό προφίλ.

Σχ.6.7. Συγκράτηση σε κοίλη ορθογωνική δοκό

Σχ.6.8. Συγκράτηση σε κοίλη κυκλική δοκό

Σχ.6.9. Συγκράτηση σε δοκό από σκυρόδεμα

Σχ.6.10. Συγκράτηση σε κοίλη ορθογωνική δοκό με απλούς κοχλίες

Σχ.6.11. Συγκράτηση με γωνιακό προφίλ και με απλούς κοχλίες

Σχ.6.12. Συγκράτηση με επικαλυπτόμενα ελάσματα

Σχ.6.13. Συγκράτηση με διάταξη που περιέχει και υδρορροή

Σχ.6.14.α. Συγκράτηση ETFE δύο επιπέδων

Σχ.6.14.β. Συγκράτηση ETFE τριών επιπέδων

Σχ.6.14.γ. Συγκράτηση ETFE τεσσάρων επιπέδων με μόνωση

Σχ.6.14.α1. Πλήρες άκαμπτο όριο

Σχ.6.14.α2. Άκαμπτο όριο μικρής δυσκαμψίας και διάγραμμα καμπτικών ροπών

Σχ.6.14.α3. Άκαμπτο όριο μεγάλης δυσκαμψίας και διάγραμμα καμπτικών ροπών

Σχ. 6.15 Καλώδια σχηματίζουν την κοιλάδα και άκαμπτα στοιχεία την κορυφογραμμή με αποτέλεσμα την κυματοειδή επιφάνεια.

Σχ. 6.16 Σύνδεση του καλωδίου της κοιλάδας με το καλώδιο του ορίου

Σχ. 6.17 Μια συνεχής μεμβράνη τεντώνεται πάνω από δύο κάθετα τοξωτά δικτυώματα και καλύπτει την σκηνή στο υπαίθριο θέατρο Bloemendaal.

Σχ. 6.18 Στο Inland Revenue Amenity Building οι νευρώσεις της αφίδας υποστηρίζουν το ύφασμα, ενώ την ίδια στιγμή επιτρέπουν το φως της ημέρας να εισέρχεται.

Σχ. 6.19 Η αποφυγή μεγάλων τάσεων στη μεμβράνη γίνεται με τη χρήση ενός δακτυλίου. Γενικά, το ύφασμα στερεώνεται συνεχώς γύρω από τον δακτύλιο. Όπως φαίνεται ο δακτύλιος στερεώνεται στον ιστό με άκαμπτο τρόπο.

Σχ. 6.20 Ο ιστός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τάνυση της μεμβράνης, παρέχοντας προσαρμογή με το μήκος του.

Σχ. 6.21 Η μορφή πεταλούδα χρησιμοποιείται σε χαμηλά και υψηλά σημεία.

Σχ. 6.22 Ένας "βρόχος καλωδίων», είναι ένας τρόπος μείωσης τάσεων, που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο από φιλμ σαπουνιού.

Σχ. 6.23 Ένας κώνος με ίδιες ιδιότητες εκτός της διαμέτρου του δακτυλίου συγκράτησης. Οι τάσεις βλέπουμε ότι μειώνονται από τα 10 kN/m στα 5 kN/m καθώς η διάμετρος του δακτυλίου μεταβάλλεται από τα 600mm στα 1600mm.

Σχ. 6.24 Ροή της δύναμης σε γωνιακό σημείο. Κατά μήκος του καλωδίου του ορίου προκύπτει μια εφαπτομενική δύναμη

Σχ. 6.25 Γωνιακή πλάκα με θέση εκτός υφάσματος με μικρές ρυθμιζόμενες ζώνες που εμποδίζουν την ανοδική ολίσθηση της μεμβράνης κατά μήκος των καλωδίων της άκρης.

Σχ. 6.26 Με σύσφιξη του υφάσματος στην πλάκα η ανοδική ολίσθηση της μεμβράνης αποτρέπεται

Σχ. 6.27 Σε περίπτωση συνεχούς καλωδίου άκρης χρησιμοποιούνται συχνά οβάλ πλάκες σύσφιξης. Αυτές οι πλάκες συνδέονται με την κατασκευή υποστήριξης με ρυθμιζόμενους κοχλίες σχήματος U.

Σχ. 6.28 ύφασμα συνδεδεμένο με γωνιακή πλάκα μέσω ενός keder, τα καλώδια της άκρης είναι ρυθμιζόμενα και συνδέεται με την μεμβράνη με ελάσματα σε σχήμα U.

Σχ. 6.29 ύφασμα συνδεδεμένο στη γωνία μέσω ιμάντων

Σχ. 6.30 Διαφορετικά παραδείγματα συνδέσεων γωνιών με ιμάντες

Σχ. 6.31 Διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης πλάκας γωνίας στην φέρουσα δομή

Σχ. 6.32 Κάλυψη σκηνής. Παράδειγμα πρώιμου σκίτσου στο οποίο η "φυσική ροή δυνάμεων» εμφανίζεται. Ανάλυση των γεωμετρικών συνθηκών (σε επίπεδη επιφάνεια) σε διάφορα σημεία γωνιών.

Σχ. 6.33 με τη χρήση δύο πανομοιότυπων χυτών και με κατοπτρισμό, καθώς και χρήση αμοιβαίας περιστροφής των πλακών γωνίας, ένα σύστημα ικανό να πληροί τις διαφορετικές γεωμετρικές συνθήκες θα μπορούσε να γίνει.

Σχ. 6.34 Διανυσματική όψη των δυνάμεων αντίδρασης

Σχ. 6.35 Μορφή σύνδεσης και τα επιμέρους στοιχεία

Σχ. 6.36 πλάκα συγκράτησης για μικρά σχετικά φορτία και συνεχές καλώδιο άκρων.

Σχ. 6.37 πλάκα συγκράτησης με ρυθμιζόμενα καλώδια άκρων.

Σχ. 6.38 πλάκα συγκράτησης με ρυθμιζόμενα καλώδια άκρων.

Σχ. 6.38 πλάκα συγκράτησης με ρυθμιζόμενα καλώδια άκρων.

Σχ. 6.39 παραμετρικός σχεδιασμός.



Σχ. 6.40 Γεωμετρικοί περιορισμοί που συνδέονται με πείρους

Σχ. 6.41 Κριτήρια σχεδιασμού συνδέσεων με πείρους

Σχ. 6.42 καμπτική ροπή σε πείρο

Σχ. 6.43 γεωμετρικά δεδομένα και λειτουργικά φορτία τυποποιημένων διατάξεων έντασης

Σχ. 6.44 Τυποποιημένα εξαρτήματα επί γωνιακών πλακών Golden Iris Vessel σχεδιασμένο-υπολογισμένο από τον γράφοντα 2015.

Σχ. 6.45 Μη τυποποιημένα εξαρτήματα επί γωνιακών πλακών Stobi Vinaria FUROM σχεδιασμένο υπολογισμένο από τον γράφοντα 2015.

Σχ. 6.46 Θέτοντας ως παράμετρο την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση επιλέγουμε την ακτίνα της γωνιακής πλάκας.

Σχ. 6.46 Η τρισδιάστατη πλάκα στην γωνία της μεμβράνης

Σχ. 6.46 Οι εφελκυστικές εφαπτομενικές δυνάμεις στην γωνιακή πλάκα της μεμβράνης

Σχ. 6.47 Ανάλυση με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία

Σχ. 6.47 Ανάλυση με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία εύρεση συντελεστή ασφαλείας

Σχ. 6.48 Ανάλυση με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία εύρεση μετατοπίσεων

Σχ. 6.49 Ορισμός επιπέδου της πλάκας.

Σχ. 6.50 Αριστερά τομή στην μεμβράνη στην ευθεία που προσδιορίζει την πλάκα. – Δεξιά χρωματική παράσταση των κάθετων στην επιφάνεια γωνιών.

Σχ. 6.51 Προσομοίωση γωνίας μεμβράνης με δύσκαμπτα στοιχεία

Σχ. 6.52 Ανάλυση επιφάνειας ως προς την καμπυλότητα. Η καμπυλότητα είναι μηδενική (επίπεδο)

Σχ. 6.53 Αντιδράσεις στήριξης πριν και μετά την διαδικασία.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΙΣΤΟΡΙΑ**

### **1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Ένας Γερμανός σχεδιαστής με το όνομα του καθηγητή Frei Otto κατέπληξε τους αρχιτέκτονες από όλο τον κόσμο με το σχεδιασμό του περιπτόρου της Ομοσπονδιακής Δημοκρατίας της Γερμανίας για την ΕΧΡΟ που πραγματοποιήθηκε το 1967 (Roy, 1967). Εκείνη την εποχή ήταν σύνηθες να υπάρχει ανταγωνισμός για τις δομές που αποτελούνται από ατσάλι και γυαλί. Η κατασκευή με μεμβράνη του καθηγητή Frei ήταν ελαφριά, λεπτή και μαλακή και παρείχε κάτι νέο και φρέσκο στο τομέα της αρχιτεκτονικής. Το σχέδιό του ήταν επίσης πολύ διαφορετικό από οποιαδήποτε άλλα σχέδια κατά τη χρονική στιγμή, καθώς χρησιμοποίησε καμπυλωτή επιφάνεια που έγινε φωτεινή λόγω της ημιδιαφάνειας του υλικού της μεμβράνης.

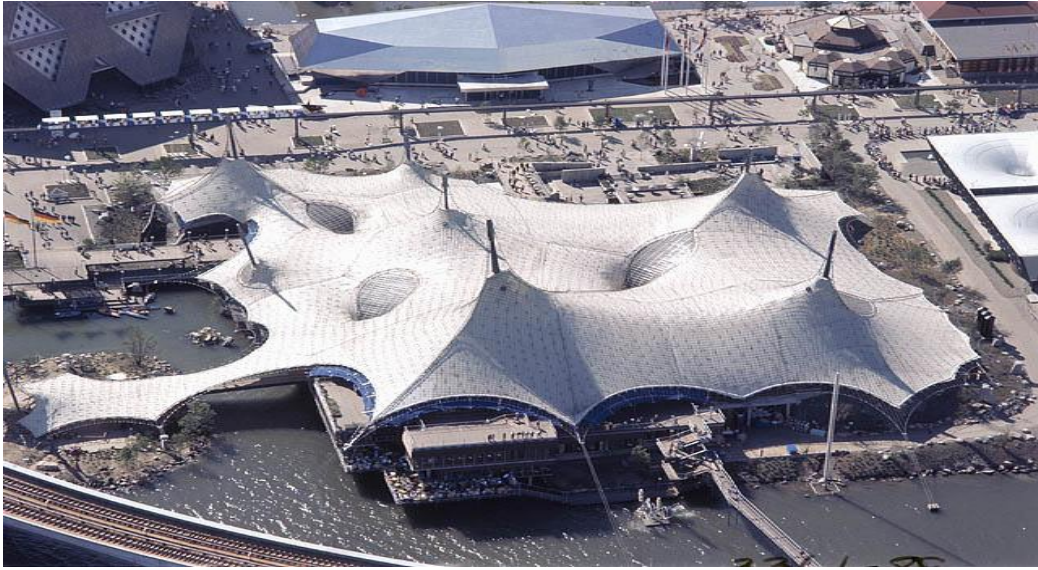
Οι εφελκόμενες κατασκευές που μοιάζουν με τέντες σαν δομές προέρχονται από τη Γερμανία. Αυτές ήταν ανθεκτικές και αξιόπιστες δομές που γρήγορα καθιερώθηκαν σαν μια νέα κατηγορία της σύγχρονης αρχιτεκτονικής που γρήγορα εξαπλώθηκε σε όλη την υδρόγειο. Ακόμα και στην σημερινή εποχή οι δομές αυτές εξακολουθούν να θεωρούνται ως πολύ αξιόπιστες και παραμένουν πρότυπα και σημεία αναφοράς.

### **1.2 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Σε ένα δοκίμιο που έγραψε το 1961, ο καθηγητής Otto υποστήριξε ότι τα κτίρια δεν θα πρέπει να θεωρούνται ή να σχεδιάζονται ως σταθερές δομές μέσα στο οποίο οι άνθρωποι συνθλίβονται. Τόνισε, επίσης, την άποψή του ότι τα κτίρια θα πρέπει να μεγαλώνουν μαζί με εμάς, και να ανακαινίζονται με τον κατάλληλο τρόπο. Ο Otto δήλωσε ότι το μινιμαλιστικό δομικό υλικό που αναπτύχθηκε μέσω της εκτεταμένης έρευνας ήταν επίσης παρόν στο φυσικό περιβάλλον, και ότι ήταν δυνατό να αξιοποιηθεί τις ιδιότητες που παρουσιάζουν εντός των οργανισμών ώστε να παραχθούν μορφές των αρχιτεκτονικών μεμβρανών. (Koch, 2004).

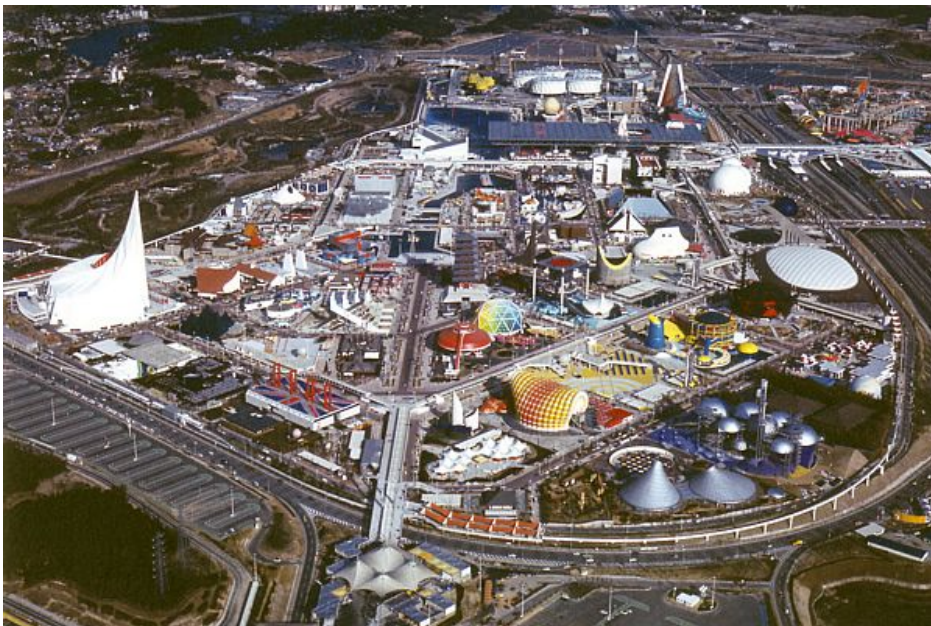
Otto υπενθύμισε στον κόσμο ότι αν και οι τέντες είχαν υπάρξει για πάνω από 30.000 χρόνια και θεωρείται εύκολο να κατασκευαστούν, είναι στην πραγματικότητα εξαιρετικά δύσκολο να δομηθούν σωστά και ότι η ακριβής κατασκευή τέντας είναι από τις πιο δύσκολες μεθόδους κατασκευής.

Ο Otto και οι συνεργάτες του δημοσίευσαν ένα άρθρο στο 1965, γνωστό ως Spannweite, στο οποίο αναφέρονται λεπτομερώς όλα τα πορίσματά τους στην έρευνα των μεμβρανών ως υλικό δομών από αρχιτεκτονική άποψη. Το έγγραφο αυτό έλαβε την προσοχή από ακαδημαϊκούς και εμπειρογνώμονες στον τομέα από όλο τον κόσμο. Ο Otto πήγε να εργαστεί με άλλους εμπειρογνώμονες στο Ινστιτούτο Ελαφρών Κατασκευών όπου έγιναν οι εξελίξεις στην τεχνολογία. Αυτές οι εξελίξεις είχαν τεθεί σε εφαρμογή όταν το γερμανικό περίπτερο κατασκευάστηκε για την Εχρo 1967 στο Μόντρεαλ (Roy, 1967). Αυτό το κτίριο διαμόρφωσε σημαντικά τις γνώσεις του κόσμου των κατασκευών μεμβράνης και συμβόλιζε τις τελευταίες εξελίξεις στην τεχνολογία αυτή σε όλο τον κόσμο.



Φωτ.1 The German Pavilion στο Montreal 1967

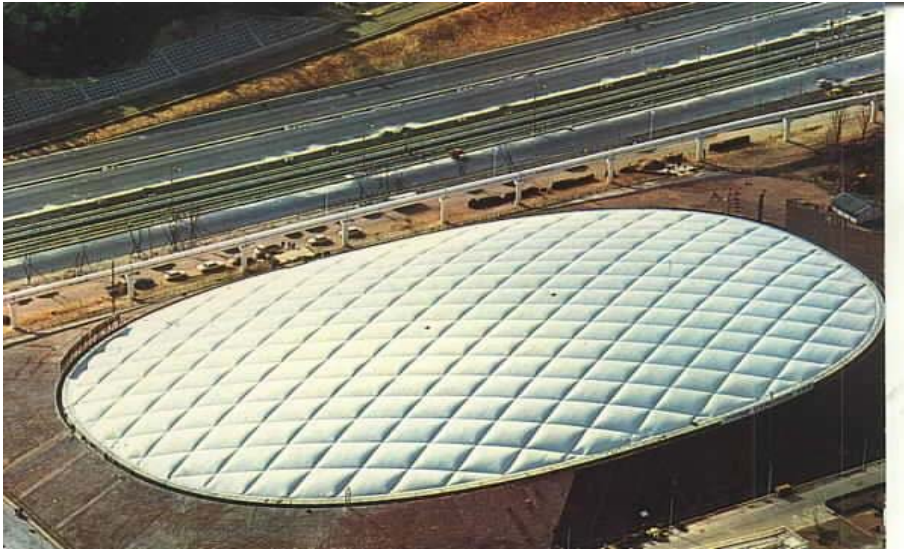
Το 1970 η Έκθεση πραγματοποιήθηκε στην Ιαπωνία. Αντί να χρησιμοποιηθούν οι παραδοσιακές δομικές μορφές της Ιαπωνίας, οι αρχιτέκτονες αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν κατασκευές μεμβράνης για πολλές από τις κατασκευές. Παρά το γεγονός ότι στην Έκθεση παρουσιάστηκε η αξιοπιστία και η δυναμική των κατασκευών μεμβράνης, δεν ευνοήθηκε η χρήση τους μέχρι πολλά χρόνια αργότερα (HeeKyun, 2005).



Φωτ.2 Αεροφωτογραφία EXPO Osaka 1970

Πολλά σχέδια για κατασκευές μεμβράνης προτάθηκαν για την είσοδο του περιπτέρου των ΗΠΑ για την Έκθεση του 1970 στην Osaka. Το σχέδιο του David Geiger έγινε αποδεκτό, δεδομένου ότι θεωρήθηκε ως η πιο ρεαλιστική καθώς και αισθητικά ευχάριστη στο μάτι ιδέα. Η ιδέα του ήταν να χρησιμοποιήσει ένα χαμηλό προφίλ αέρα που υποστήριζε την μεμβράνη. Το Αμερικάνικο περίπτερο έπρεπε να πλήρη τα πρότυπα ασφαλείας και ως εκ τούτου, είχε σχεδιαστεί έτσι ώστε σε περίπτωση που η κατασκευή

της μεμβράνης έχανε τον αέρα , δεν θα έπεφτε στο χώρο των θεατών . Αυτό το σχέδιο χαιρετίστηκε ως περαιτέρω πρόοδο στην ανάπτυξη των κατασκευών μεμβράνης και επέτρεψε την ανάπτυξη των κατασκευών θόλων μεμβράνης με υποστήριξη αέρα(Air Domes). Μελλοντικοί κατασκευαστές Air Domes χρησιμοποίησαν το USA Sotirios ως πρότυπο μοντέλο για τα σχέδιά τους.



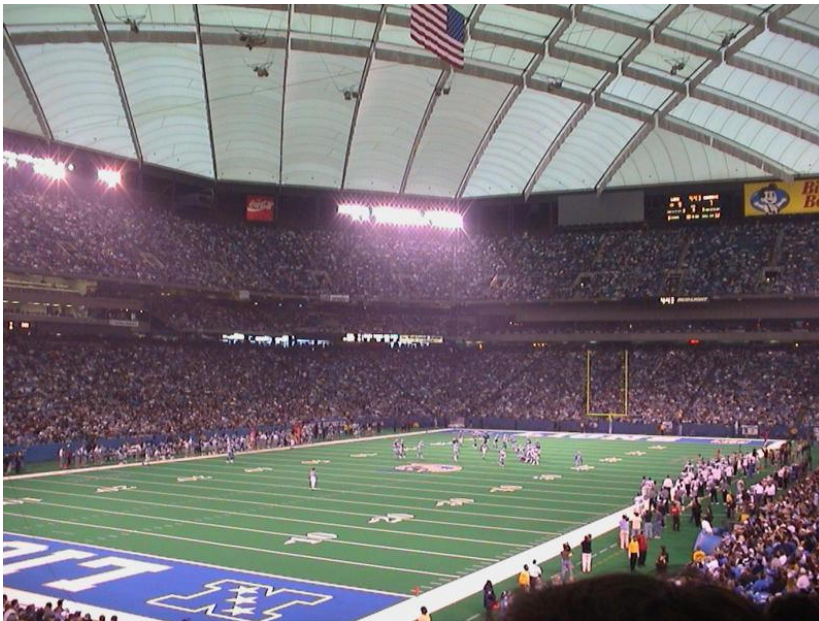
Φωτ.3 USA Pavilion EXPO Osaka 1970

Από το 1970 ήταν οι ΗΠΑ, που άνοιξαν το δρόμο όσον αφορά την έρευνα και τις επενδύσεις σε κατασκευές μεμβράνης. Οι επενδύσεις στην εταιρεία Geiger-Argie και συνεργάτες βοηθούν να γίνουν πολλές νέες εξελίξεις στον τομέα της τεχνολογίας σε όλη τη δεκαετία του 1970. Μία τέτοια εξέλιξη ήταν η χρήση του PTFE , επικαλυμμένη μεμβράνη ινών γυαλιού ως ένα νέο υλικό μεμβράνης. Το υλικό αυτό έκανε δυνατή την κατασκευή ανθεκτικών και σταθερών κατασκευών μεμβράνης σε όλες τις ΗΠΑ (A, 2001).

Γνωστές μεταγενέστερες κατασκευές Air Domes στις ΗΠΑ ήταν στο Steve Lacy Field House at Milligan College, που χτίστηκε το 1974 , και το Thomas E. Leave Activities Center at Santa Clara University που χτίστηκε το 1976.Αυτές οι κατασκευές θεωρήθηκαν εξαιρετικής τεχνικής και κατάλληλες για να εξυπηρετήσουν τον σκοπό τους, μιας και η ψυχαγωγία και οι αθλητικές εκδηλώσεις ήταν εξαιρετικά δημοφιλείς στις ΗΠΑ, παρείχαν προστασία από κάθε είδους καιρικές συνθήκες και μπορούσαν να φιλοξενήσουν μεγάλο αριθμό θεατών και επισκεπτών. Ένα παράδειγμα σταδίου ήταν το Silver Dome της πόλης Ροντίας που είχε χωρητικότητα 80.000 θεατών.



Φωτ.4 Thomas E. Leave Activities Center at Santa Clara University



Φωτ.5 Silver Dome of Pontiac

Προγενέστερες των Air Domes κατασκευές μεγάλης κλίμακας είχαν το μειονέκτημα του σκοτεινού και αποπνικτικού χώρου. Όλα αυτά άλλαξαν με την χρήση των κατασκευών μεμβράνης οι οποίες είχαν την δυνατότητα να διαχέουν το φως σε όλο τον χώρο. Ένα άλλο πλεονέκτημα ήταν το χαμηλό κόστος κατασκευής και η ταχύτητα κατασκευής, έτσι έγιναν ταχύτατα διαδεδομένες κατασκευές (Mews, 1993). Παρ'όλα αυτά υπήρχαν και προβλήματα τα οποία ήταν συνάρτηση της σιβαρότητας της κατασκευής με το κόστος της συνεχούς διατήρησης του επιπέδου συμπίεσης του αέρα μέσα στην μεμβράνη. Έτσι αν η επένδυση με την πάροδο του χρόνου δεν απέδιδε η διατήρηση της κατασκευής ήταν αδύνατη με καταστροφικά αποτελέσματα.



Φωτ.6 Silver Dome of Pontiac 3 χρόνια μετά την διάλυση της ομάδας

Για αυτόν τον λόγο την δεκαετία του '80 άρχισαν να ερευνούνται εναλλακτικές μέθοδοι για την διατήρηση των Air Domes.

Στα μέσα της δεκαετίας του '80 οι κατασκευές μεμβράνης άρχισαν εκτός από κατασκευές για κάλυψη μεγάλων χώρων να εξελίσσονται σε κατασκευές με συνδυασμό ομορφιάς και πρωτοτύπων αρχιτεκτονικών μορφών. Δύο χαρακτηριστικές κατασκευές είναι Lindsay Park sports κατασκευής 1984 και το Chene Park Amphitheater κατασκευής 1990.



Φωτ.7 Lindsay Park sports Calgary Canada

Επιπροσθέτως κατασκευές μεμβράνης άρχισαν να συνδυάζονται με γυαλί έτσι ώστε να δημιουργούν εντυπωσιακούς λαμπερούς χώρους. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως στα εμπορικά κέντρα (Kaltenbach, 2004).



Φωτ.8 Chene Park Amphitheater Detroit

Τα Air Dome ως κυρίαρχη μορφή κατασκευής με μεμβράνη στις ΗΠΑ αντικαταστάθηκε προς το τέλος της δεκαετίας του 1980 από τον θόλο tensegrity που χρησιμοποιεί ένα αποτελεσματικό σύστημα καλωδίων και θλιπτικών στύλων για την κάλυψη μεγάλων χώρων με ασφάλεια. Παραδείγματα των κτιρίων που χρησιμοποιούν τη νέα αυτή μέθοδο είναι η Redbird Arena κατασκευάστηκε το 1988, το Thunder dome κατασκευάστηκε το 1989 και το Georgia dome κατασκευάστηκε το 1992. Επιπλέον, σχεδιάστηκε από τους Geiger Associates, του Gymnastics Hall και το Fencing Hall στο Ολυμπιακό συγκρότημα της Σεούλ το 1986 όπου διεξήχθησαν οι Ολυμπιακοί Αγώνες.



Φωτ.9 Georgia Dome εξωτερική και εσωτερική όψη

Οι αρχιτέκτονες φέρανε τις κατασκευές στην Ευρώπη στα μέσα της δεκαετίας του 1980 και υπήρξαν εκ νέου εξελίξεις στον τομέα, καθώς οι Ευρωπαίοι είχαν νέες ιδέες και δημιούργησαν μοναδικές κατασκευές, σε αντίθεση με τις κατασκευές στις ΗΠΑ οι οποίες ήταν όλες αρκετά παρόμοιες στο σχεδιασμό. Η πρώτη τέτοια κατασκευή υλοποιήθηκε

στην Ευρώπη ήταν η Schlumberger Cambridge Research Center που χτίστηκε το 1985. Πάντως, δεν ήταν μέχρι το 1989, όταν η Nuage Leger, συνδέθηκε με το Grande Arche στο Παρίσι και έκανε αυτό το ύφος των κατασκευών πραγματικά να εντυπωσιάζουν στην Ευρώπη. Ο Nuage Leger ήταν μια εντυπωσιακή κατασκευή μεμβράνης που πήρε τη μορφή των κυμαινόμενων σύννεφων.



Φωτ.10 Schlumberger Cambridge Research Center





Φωτ.10 Grande Arche

Τα Ευρωπαϊκά γήπεδα ποδοσφαίρου, όπως το Ολυμπιακό Στάδιο της Ρώμης που κατασκευάστηκε το 1990, άρχισαν να χρησιμοποιούν τις κατασκευές μεμβράνης λόγω των πλεονεκτικών χαρακτηριστικών τους, δηλαδή ότι ήταν σε θέση να φιλτράρουν το φυσικό φως, σε αντίθεση με τις παραδοσιακές στέγες που σκοτεινιάζουν τις περιοχές κάτω από αυτές. Η κατασκευή της μεμβράνης του Ολυμπιακού Σταδίου της Ρώμης ισορροπεί χάρη σε ένα χωροδικτύωμα που ενεργεί ως ένα ελατήριο συμπίεσης (compression ring), είναι μια φωτεινή οροφή στην οποία χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός καλωδίων και μεμβράνης. Αυτή ήταν στέγη δεν ήταν μόνο οπτικά ευχάριστη στο μάτι επίσης δεν ζύγιζε πολύ σε σύγκριση με τις δομές που χρησιμοποιούνταν στο παρελθόν. Σε άλλα στάδια, όπως το Στάδιο San Nicola που χτίστηκε το 1990 και το



Φωτ.11 Grande Arche Ολυμπιακού Σταδίου της Ρώμης



Φωτ.12 Στάδιο San Nicola

γήπεδο Gittlieb-Daimler που κατασκευάστηκε το 1993 επεδίωξαν επίσης να χρησιμοποιήσουν τις κατασκευές μεμβράνης για την παραγωγή τόσο όμορφων και καλά φωτισμένων γηπέδων με το δικό τους στυλ και δημιουργικότητα (HeeKyun, 2005).



Φωτ.13 Στάδιο Gittelieb-Daimler

Καθώς οι εξελίξεις έτρεχαν στην τεχνολογία, το PTFE επικαλυμμένο ύφασμα ινών υάλου ήρθε να αντικαταστήσει το επικαλυμμένο ύφασμα PVC πολυεστέρα σαν το κυρίως υλικό των κατασκευών μεμβράνης στην Ευρώπη.

Σύμφωνα με τον Frei Otto υπήρχε πάρα πολύ μεγάλη επανάληψη των μορφών των κατασκευών μεμβράνης, μέχρι που αναπτύχθηκαν εναλλακτικές τεχνικές διαμόρφωσης και οι κατασκευές παρήχθησαν σε μεγαλύτερη κλίμακα και με προσωπική πρωτοποριακή αντίληψη του κάθε αρχιτέκτονα.

Παρά το γεγονός ότι στην Ιαπωνία χρησιμοποιήθηκαν κατασκευές μεμβράνης εντός της Expo που φιλοξένησε το 1970, δεν υπήρχε μεγάλη ζήτηση για αυτούς τους τύπους των κατασκευών στο άμεσο χρονικό διάστημα μετά από αυτή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η Ιαπωνία είχε ήδη ένα μοναδικά καλαίσθητο στυλ και επειδή δεν χρησιμοποιούσαν κατασκευές με τεχνική ανάρτησης. Η κατάσταση αυτή άλλαξε γρήγορα στη δεκαετία του 1980, όταν διαγωνισμοί σχεδιασμού φιλοξενήθηκαν στην Ιαπωνία. Πολλές από τις εισόδους σε αυτούς τους διαγωνισμούς είχαν δημιουργηθεί με πολύ ευφάνταστα σχέδια χρησιμοποιώντας κατασκευές μεμβράνης και ως εκ τούτου πολλές εκπληκτικές κατασκευές μεμβράνης άρχισαν να εμφανίζονται σε όλη την Ιαπωνία. Αυτό συνέβη όταν πολλοί αρχιτέκτονες άρχισαν να συνειδητοποιούν πόσο συμφέρουσα ήταν οι κατασκευές μεμβράνης. Κτίρια έχουν σχεδιαστεί με κατασκευές μεμβράνης που χρησίμευσαν για να διαχυθεί το φως σε συγκεκριμένα τμήματα του συγκροτήματος. Επιπλέον, οι κατασκευές μεμβράνης επέτρεψαν την εσωτερική καλλιέργεια φυτών που χρειαζόντουσαν το φυσικό φως που φιλτράρεται, και ως εκ τούτου η θέση των εν λόγω φυτών, είχαν ληφθεί υπόψη και στο σχεδιασμό των χώρων.

Στις μέρες μας ο σχεδιασμός, χάρη στην χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών, έχει αναπτύξει τον κλάδο των εφελκυσμένων κατασκευών μεμβράνης σε νέα επίπεδα. Νέα υλικά προστίθενται στα υπάρχοντα, τα οποία συνεχίζουν να αναπτύσσονται και να βελτιώνονται. Οι κατασκευές πλέον μπορούν να είναι ανοιγόμενες (οροφές εμπορικών κέντρων και σταδίων), να χρησιμοποιούνται για μόνωση παίζοντας αρχιτεκτονικά με τον φωτισμό και το φυσικό φως (ETFE).

Οι χώρες που αναπτύσσουν ταχύτερα την αρχιτεκτονική των εφελκυσμένων κατασκευών είναι η Κίνα και η Ινδία που έχουν την μεγαλύτερη κάλυψη κατασκευών σε τετραγωνικά μέτρα. Η μεγαλύτερη δε κατασκευή παγκοσμίως είναι στην Astana του Καζακστάν το Khan Shatyr Entertainment Centre.

Όλο και περισσότερο οι εφελκυσμένες κατασκευές μεμβράνης βρίσκουν μιμητές και γίνονται ίσως οι πιο ταχύτερα διαδεδομένες μορφές κατασκευών σε όλο τον κόσμο. Αυτό

οφείλεται εν μέρει στη σύγχρονη τεχνολογία και την αυξημένη ταχύτητα επικοινωνίας. Όταν οι εξελίξεις στο σχεδιασμό βρίσκονται σε ένα μέρος του πλανήτη, γρήγορα διαδίδονται σε άλλα μέρη.



Φωτ.14 Ανοιγόμενη οροφή Εθνικό Στάδιο Βουκουρεστίου



Φωτ.15 Allianz Arena με υλικό ETFE



Φωτ.16 Khan Shatyr Entertainment Centre

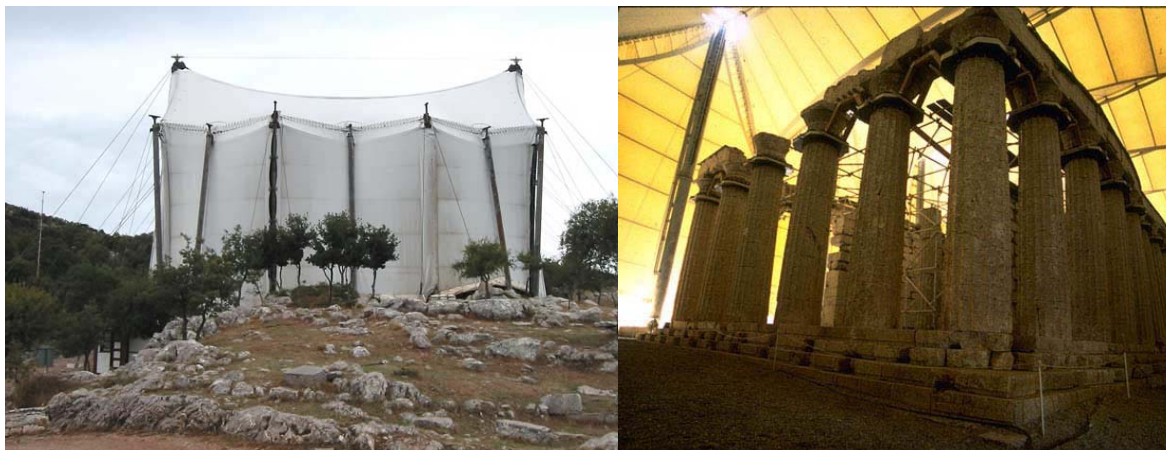
### 1.3 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Οι εφελκυόμενες κατασκευές στην Ελλάδα παρουσιάστηκαν από τον καθηγητή Αρχιτεκτονικής Τάσο Μπίρη ,ο οποίος κατάφερε να κατασκευάσει κάποιες μικρές εφελκυόμενες κατασκευές στο χώρο του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



Φωτ.17 Εφελκυόμενες κατασκευές Καθ.Τάσου Μπίρη

Η πρώτη εφελκόμενη κατασκευή μεγάλης κλίμακας τοποθετήθηκε στις εργασίες αναστηλώσεις του Ναού του Επικούρειου Απόλλωνα στις Βάσσεις της Φιγάλειας (1987).



Φωτ.18 Εφελκόμενη κατασκευή Ναού του Επικούρειου Απόλλωνα

Την επόμενη χρονιά κατασκευάστηκε το Κλειστό Γυμναστήριο Καλαμάτας (1988).

Η επόμενη κατασκευή μεγάλης κλίμακας έγινε στο Περιβαλλοντικό Πάρκο <<Αντώνης Τρίτσης>> στην περιοχή του Ιλίου (1993).

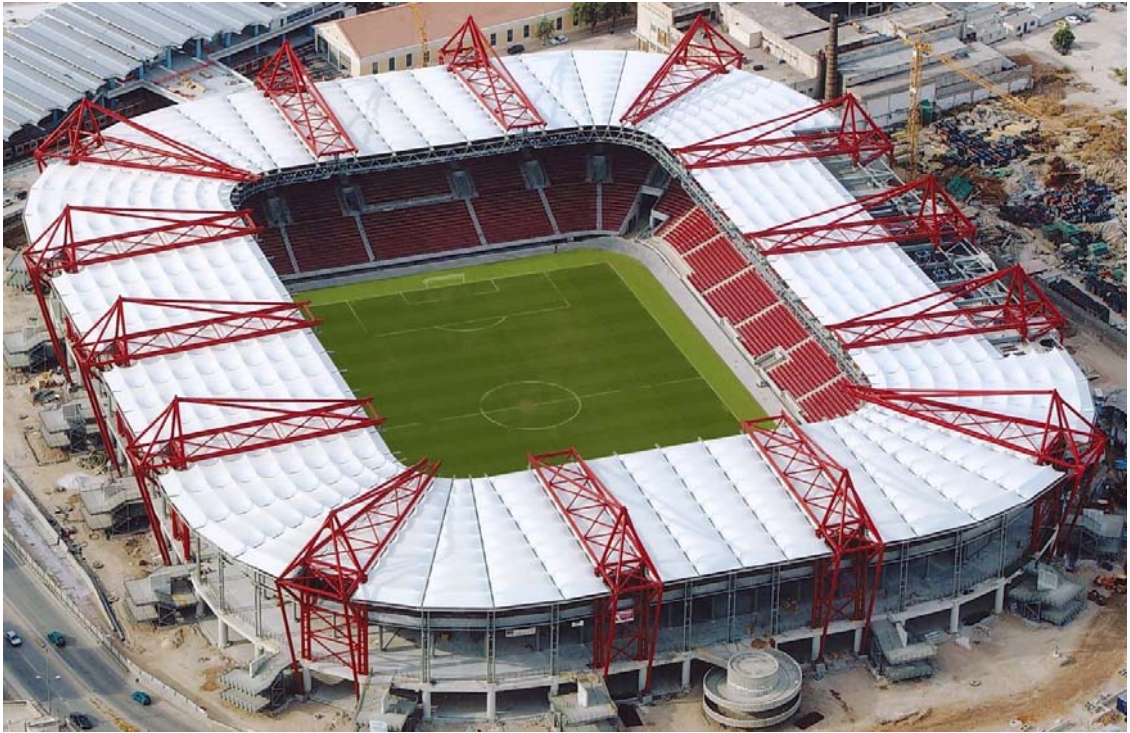
Πέρασαν αρκετά χρόνια μέχρι να ξαναγίνει κάποια μεγάλη κατασκευή. Αυτό έγινε πραγματικότητα με τους Ολυμπιακούς Αγώνες όπου κατασκευάστηκε το στέγαστρο του σταδίου Καραϊσκάκη ,το Πανθεσσαλικό Στάδιο , ο σταθμός Δουκίσσης Πλακεντίας ,ο νέος τερματικός σταθμός του Λιμένος Πατρών και το Athens Mall που είναι και η πρώτη κατασκευή με ETFE στην Ελλάδα.

Το 2005 το πρώτο πλήρες σκεπαστό γήπεδο προπονήσεων ποδοσφαίρου μικρών ηλικιών στο Ηράκλειο Κρήτης (σχεδιασμένο και κατασκευασμένο από τον γράφοντα).

Το 2008 κατασκευάστηκε και η πρώτη ανοιγόμενη κατασκευή στο Εμπορικό Κέντρο Athens Heart με χρήση οδηγών ραούλων και προεντεταμένα συρματόσχοινα καθώς και πάνελ ETFE.



Φωτ.19 Πάρκο Αντώνης Τρίτσης



Φωτ.20 Στάδιο Καραισκάκη



Φωτ.21 Πανθεσσαλικό Στάδιο



Φωτ.22 Λιμένας Πάτρας





Φωτ.23 Σταθμός Δουκίσσης Πλακεντίας



Φωτ.24 Athens Mall



Φωτ.25 Athens Heart Mall



Φωτ.26 Lido Soccer γήπεδο ποδοσφαίρου διαστάσεων 44X64 μέτρων.

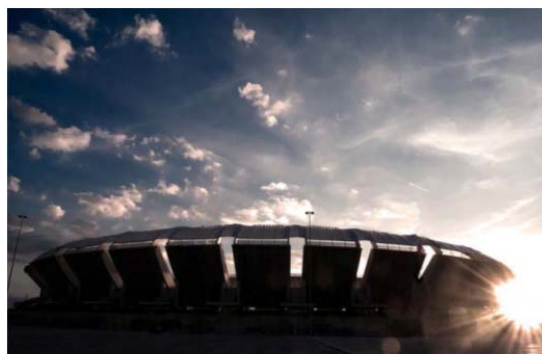
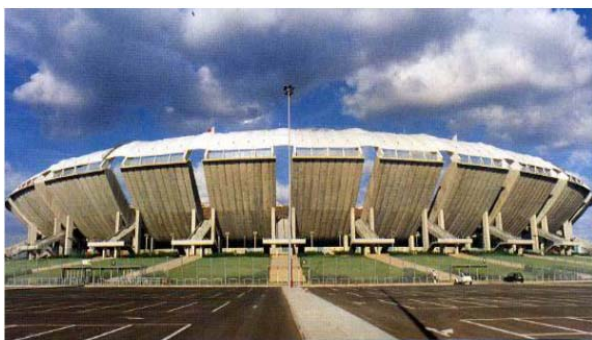


Φωτ.27 Κλειστό Γυμναστήριο Καλαμάτας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

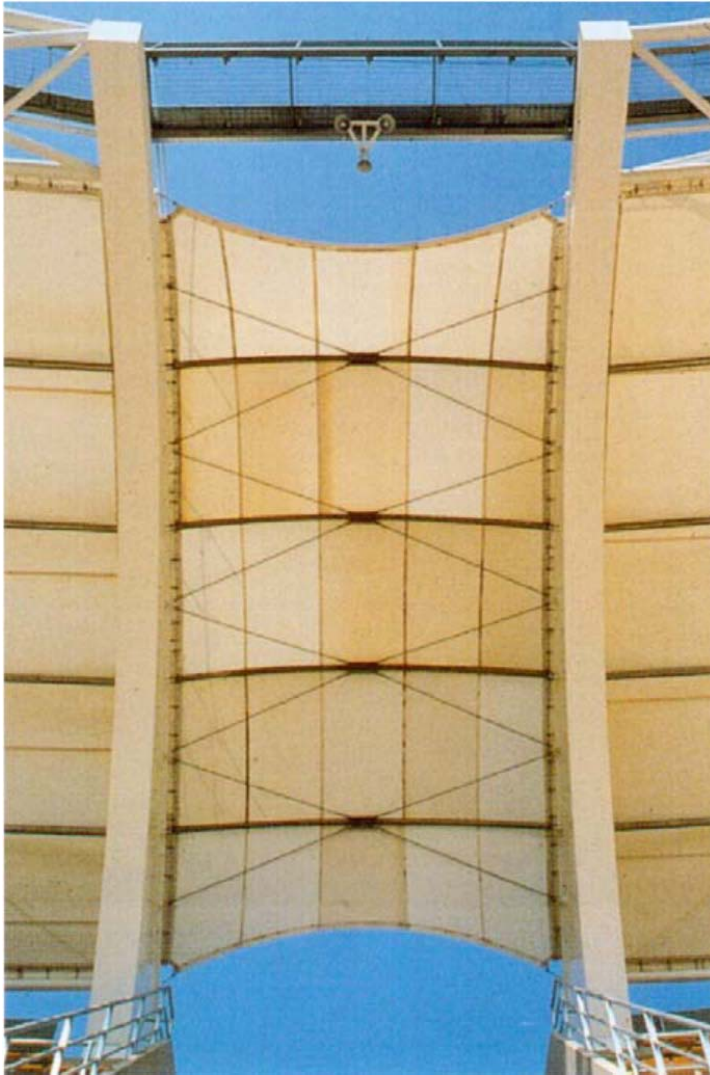
### 2.1 Στάδιο San Nicola – Bari, Italy, 1990

Το 1990, το Παγκόσμιο Κύπελλο πραγματοποιήθηκε στην Ιταλία και η χώρα είχε κατασκευάσει οκτώ γήπεδα για να φιλοξενήσει την εκδήλωση. Αυτό είναι ένα από τα οκτώ στάδια για την εκδήλωση. Με αναδιάταξη των θέσεων των θεατών μέσα στο στάδιο, χρησιμοποιώντας 310 σε σχήμα ημισελήνου δοκών σκυροδέματος, ένα οβάλ σχήμα τελικά διαμορφώθηκε. Είναι χωρισμένο σε διάφορα τμήματα, ενώ ένα τέτοιο τμήμα αποτελείται από 26 «μεγάλα πέταλα» που βρίσκεται στον άνω όροφο. Το κτίριο δεν φαίνεται πλέον τόσο βαρύ στα μάτια, καθώς σχισμές είχαν διαμορφωθεί μεταξύ των πετάλων. Επίσης καταδεικνύει, τους χώρους κυκλοφορίας, και περιλαμβάνει όλες τις εισόδους και εξόδους εκπληρώνοντας τις απαιτήσεις υγείας και ασφάλειας. Προσομοιώσεις σε υπολογιστή χρησιμοποιήθηκαν, προκειμένου να διατηρηθεί η αισθητική πλευρά του σταδίου.

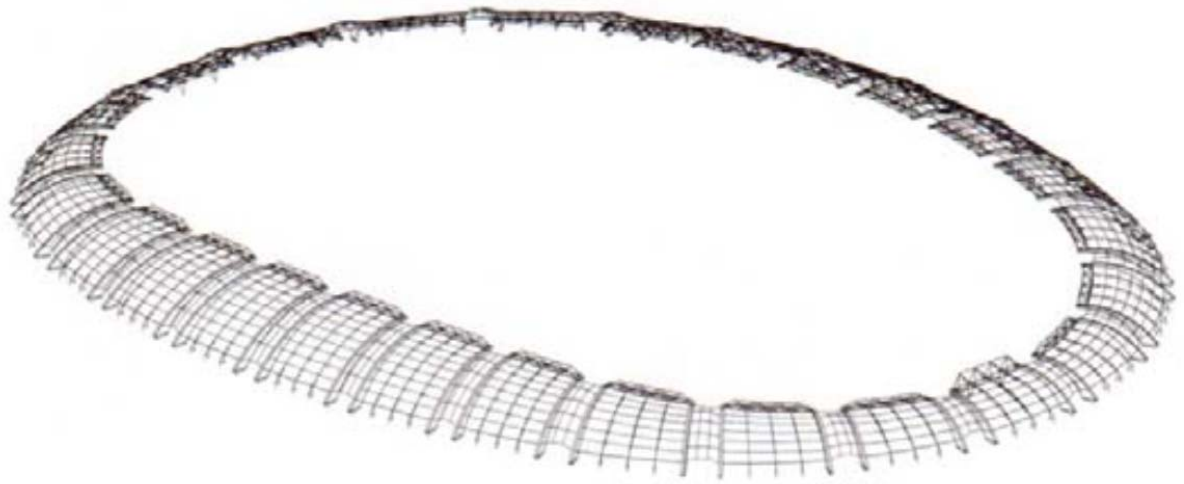


Η μεμβράνη της οροφής είναι από fiber glass ίνες επικαλυμμένες με PTFE και σχεδιάστηκε από την Over Arup & Partners με σκοπό την προστασία των θεατών από τις εξωτερικές καιρικές συνθήκες. Υπάρχουν δύο επίπεδα σε αυτή τη στέγη, το κύριο επίπεδο αποτελείται από κυβοειδείς δοκούς που αναρτούνται από την κορυφή. Το δεύτερο επίπεδο αποτελείται από δοκούς υποστήριξης για προβολείς και δικτυώματα από χάλυβα και καλώδια. Αυτή η μέθοδος κατασκευής έχει εξασφαλίσει ένταση μέσα στην όλη δομή.

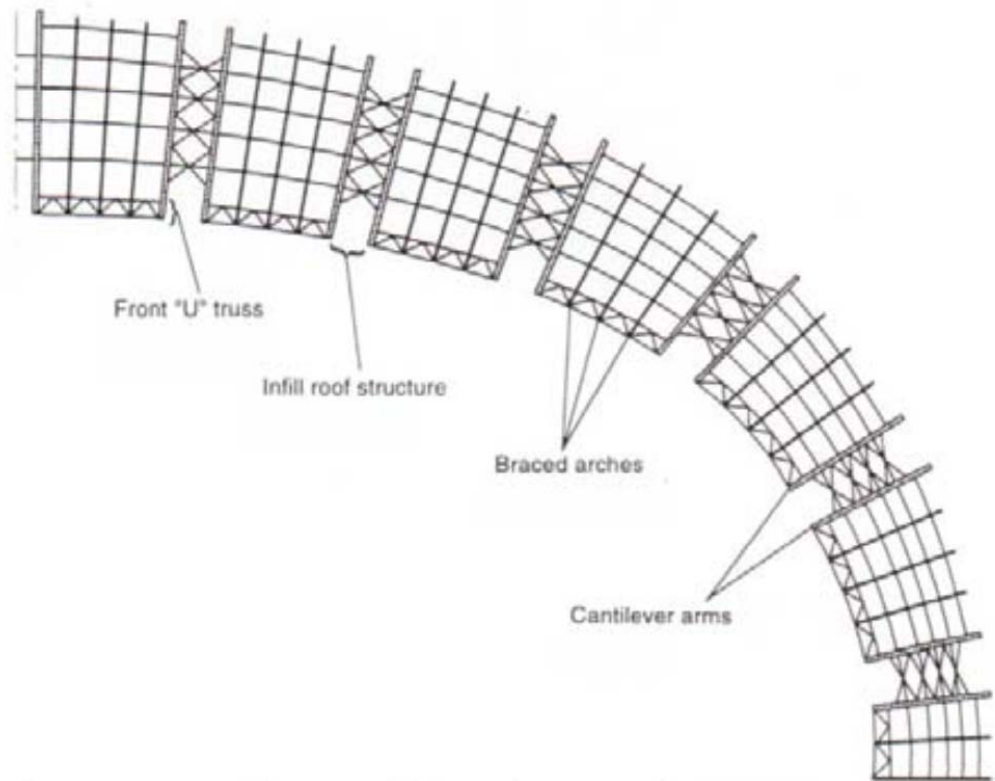
Το Πανεπιστήμιο του Μπρίστολ βοήθησε στο έργο χρησιμοποιώντας προσομοίωση σε υπολογιστή για την παρακολούθηση της ροής του ανέμου στο γήπεδο. Προγράμματα ηλεκτρονικών υπολογιστών της Arup, όπως το πρόγραμμα Fablon και το General Structural Analysis χρησιμοποιήθηκαν για να δημιουργήσουν την προσομοίωση. Κυρίως ελέγχθη η συμπεριφορά του αέρα δεν θα έχει καμιά ανεπιθύμητη επίπτωση στους θεατές.



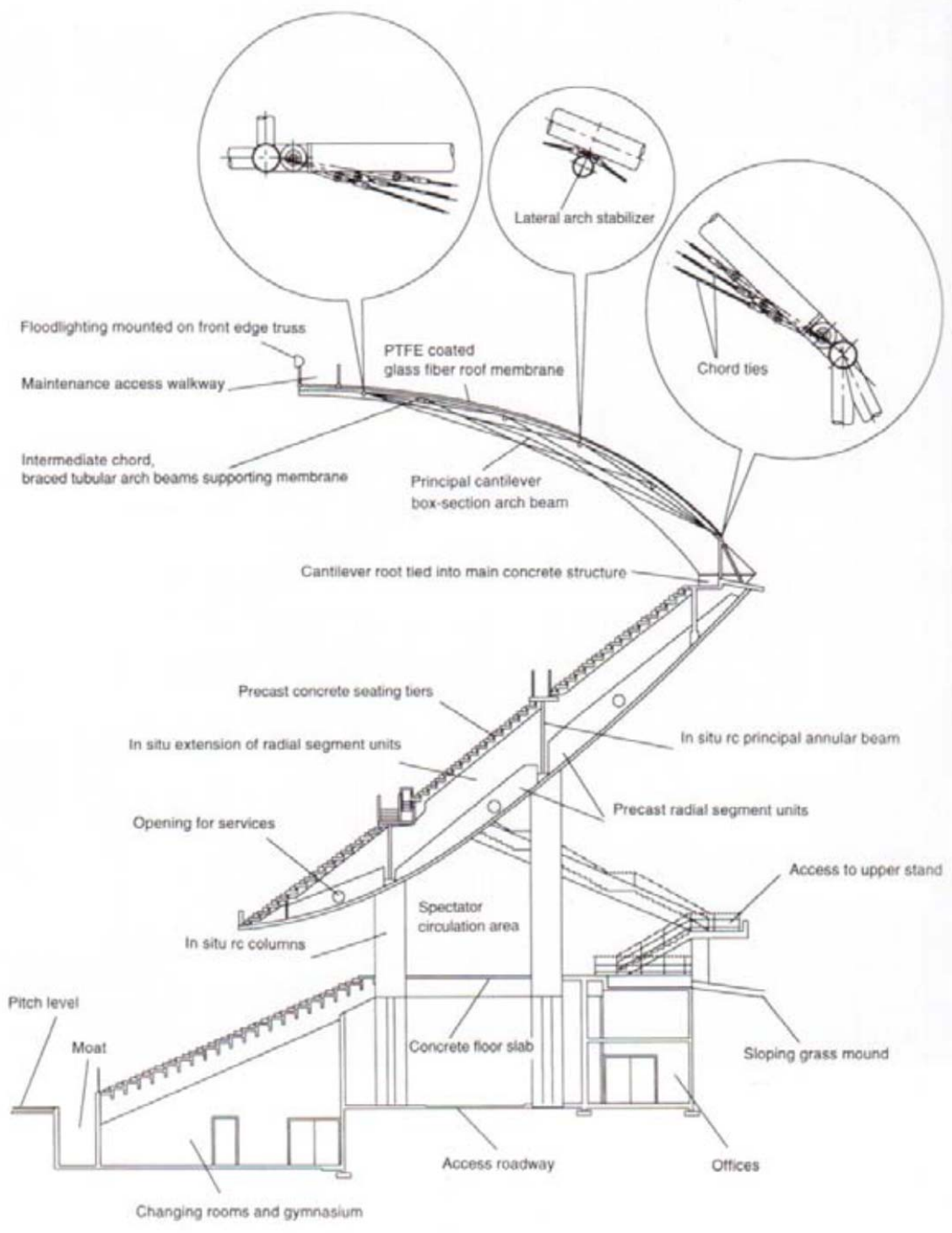
Υπάρχουν πολλές σκυροδετημένες δοκοί στα ανώτερα επίπεδα των κερκίδων, ώστε να υποστηρίξουν την οροφή. Η ίδια στέγη αποτελείται από 26 μεγάλα πάνελ. " Structural Springs" , που καλύπτουν μια έκταση 13,250m<sup>2</sup> , είναι τοποθετημένα μεταξύ των συγκεκριμένων δοκών και σφραγίζουν το χάσμα μεταξύ των ανώτερων βαθμίδων των κερκίδων. Παρά το δυναμισμό της ανύψωσης και τις σκυροδετημένες κολόνες, μια σταθερή έχει υπολογιστεί έτσι ώστε να είναι σε θέση να κατασκευαστεί η απαιτούμενη μεταλίκι κατασκευή. Το άνοιγμα αυτών των δοκών είναι μεταξύ 14-27μ. Κάθε πάνελ οροφής αποτελείται από μεταλλική πλάκα γύρω από την ακμή του. Ουσιαστικά, το συγκεκριμένο πλαίσιο ακολουθεί τις ανώτερες κερκίδες. "U" δικτυώματα χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν τις δοκούς μεταξύ τους. Οι προβολείς μέσα στα γήπεδα υποστηρίχθηκαν από αυτά δικτυώματα και κάνουν προσπελάσιμη όλη την στέγη. Επιπλέον, μπορεί κανείς να δει ότι κάθε πάνελ οροφής αποτελούν ένα κλωβό για το προκατασκευασμένα πάνελ μεμβράνης που πρέπει να τεντωθεί.



Frame of the membrane roof.

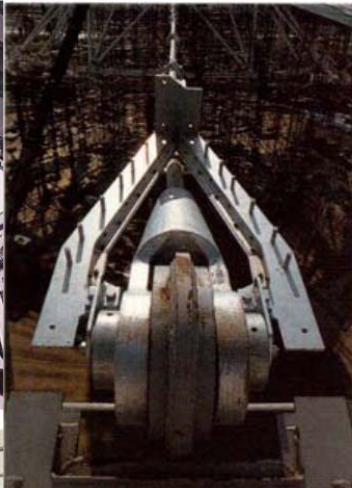


Computer graphic images of the membrane roof.



## 2.2 Park Dome Kumamoto – Kumamoto, Japan, 1997

Οι σχεδιαστές θέλησαν με ένα κύκλο διαμέτρου 120 μέτρων να καλύψουν τον κεντρικό χώρο. Κατόπιν θέλησαν τον εξωτερικό χώρο των εγκαταστάσεων να του δώσουν μία ακανόνιστη μορφή.



Joints of the upper cables and ring truss.



Joints of the ring truss.



Interior of the air-inflated membrane with the hybrid structure.

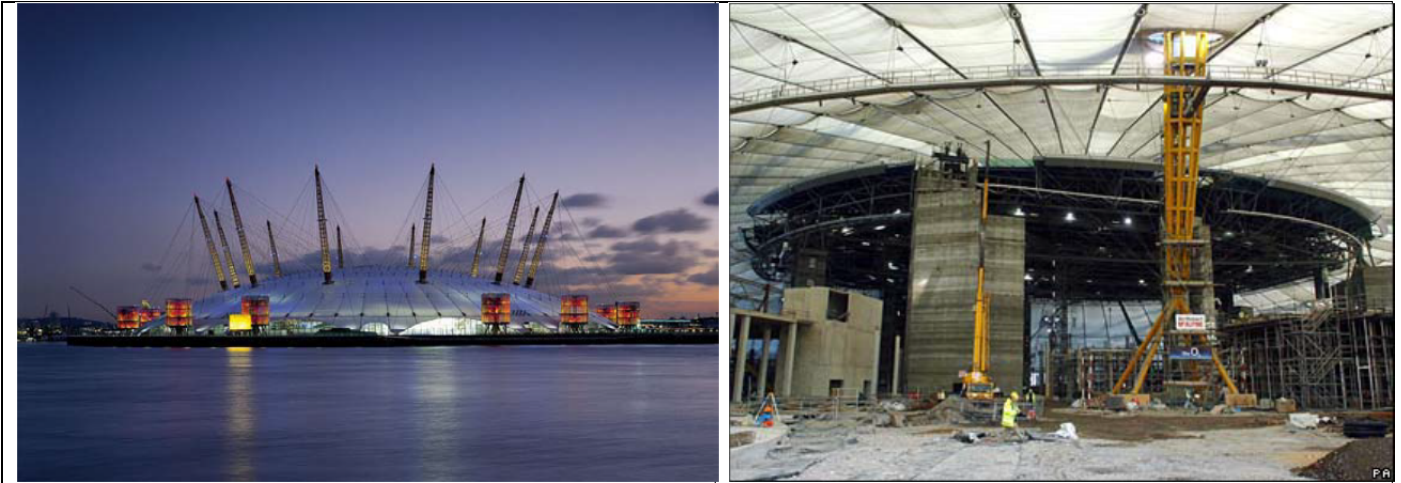
Η ιδέα για τον σχεδιασμό του θόλου ήταν να κατασκευαστεί μία ποικιλία πρωτότυπων κατασκευών που τελικά θα συνδεθούν μεταξύ τους, παρά να γίνει μία μεγάλη ογκώδεις κατασκευή. Οι αρχιτέκτονες ήθελαν το κτήριο να έχει την τελευταία λέξη της τεχνολογίας στον σχεδιασμό έτσι ώστε όχι μόνο να δημιουργηθεί ένας εντυπωσιακός εσωτερικός χώρος αλλά ταυτόχρονα να χρησιμοποιείται φυσική ενέργεια και να μειώσουν τα έξοδα λειτουργίας. Για να παρουσιάσουν αυτήν την ιδέα αποφάσισαν να δώσουν στην κατασκευή την μορφή ενός σύννεφου που καλύπτει τον χώρο.

Η οροφή λοιπόν δημιουργήθηκε με ένα κυκλικό διπλού στρώματος εφελκόμενης μεμβράνης αεροθάλαμο που έδινε την αίσθηση του σύννεφου που ίπταται πάνω από τον κόσμο. Επιπροσθέτως για να δώσουν οπτικά το τελικό αποτέλεσμα , κάλυψαν τον υπόλοιπο χώρο μια απλή εφελκόμενη μεμβράνη. Έτσι αν και η κυρίως οροφή ήταν μία κατασκευή υπό πίεση εντούτοις στον χώρο δεν χρειαζόταν να υπάρχουν περιορισμοί για την θέση και την λειτουργία θυρών και παραθύρων. Στην κορυφή της κατασκευής , προκειμένου να στηριχθούν όλες οι αναρτήσεις , σχεδιάστηκε ένα πλαίσιο σε σχήμα κόλουρου κώνου. Το σχήμα του κώνου επέτρεψε να υπάρχει ένα άνοιγμα έτσι ώστε περισσότερο φυσικό φως να εισέρχεται στον χώρο.

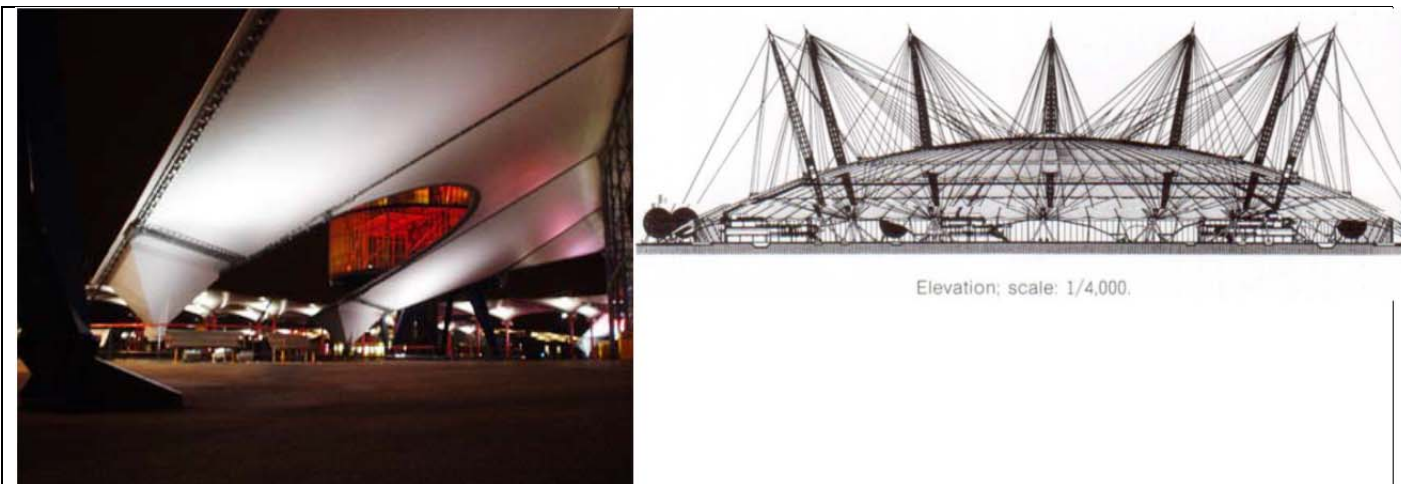


### 2.3 Millennium Dome – Greenwich, UK, 1999

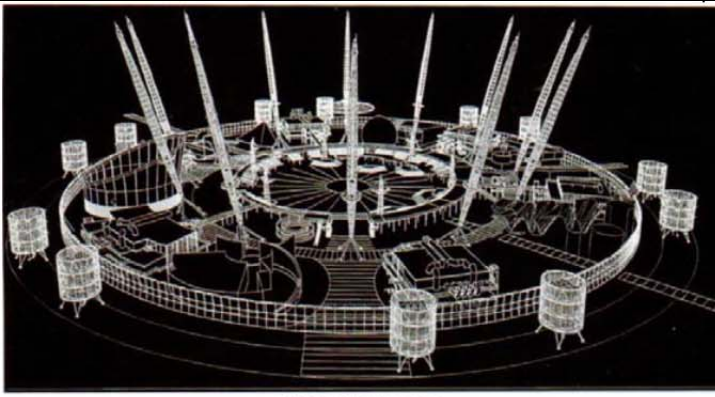
Το 1996 η χερσόνησος του Greenwich επιλέχθηκε ανάμεσα σε 57 διαφορετικά μέρη να φιλοξενήσει μια κατασκευή με το όνομα Millennium Experience. Το επιλεγμένο μέρος για πολλά χρόνια δεν είχε κάποια χρήση, ανήκε στην British Gas και κατά καιρούς χρησιμοποιήθηκε από άλλους οργανισμούς. Ο σχεδιασμός του Millennium Dome έγινε με βάση την ανάγκη να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες και του εξωτερικού και του εσωτερικού χώρου. Για παράδειγμα θα έπρεπε να προβλεφθεί η χρήση οδών, πάρκων και διαδρόμων κατά μήκος του ποταμού Thames, έτσι ώστε να μπορούν οι επισκέπτες να έχουν την άνεση της πρόσβασης.



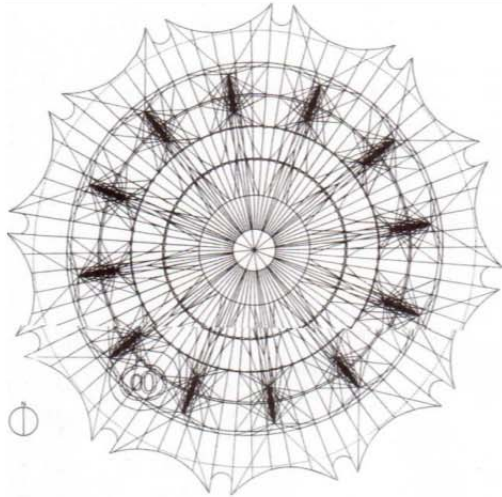
Η κατασκευή του θόλου είναι τεράστια καθώς καλύπτει ένα χώρο 80.000 τετ.μετ. Και έχει περίμετρο περίπου 1 χιλιόμετρο. Η διάμετρος αγγίζει τα 364 μέτρα και το υψηλότερο σημείο είναι σε ύψος 50 μέτρων. Πάνω από 70 χιλιόμετρα υψηλής αντοχής συρματόσχοινα χρησιμοποιήθηκαν ώστε να συγκρατήσουν μια σειρά 12 πυλώνων. Αυτοί οι πυλώνες είναι που συγκρατούν την κατασκευή στη θέση της. Το ύφασμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν fiber glass με επίστρωση PTFE. Το Millennium Dome σχεδιάστηκε για την διασκέδαση του κοινού και έτσι στο κέντρο του υπάρχει χώρος θεάτρου και άλλων θεματικών επιλογών.



Τον Ιούνιο του 1997 άρχισαν οι εργασίες. Ξεκίνησε με την εκσκαφή των θεμελίων και εκτελέστηκαν χωματουργικές και άλλες εργασίες διαμορφώσεις. Οι 12 πυλώνες από 1600 τόνους χάλυβα συγκολλήθηκαν τον Αύγουστο του 1997 πριν συναρμολογηθούν τον Οκτώβριο του 1997. Το 1998 και το δίκτυο των συρματόσχοινων και το δίκτυο συγκράτησης της μεμβράνης τοποθετήθηκαν. Το 1998 ολοκληρώθηκαν οι εργασίες στον εσωτερικό και το 1999 και στον εξωτερικό χώρο.



Central performance arena.



Roof plan; scale: 1/5,000.



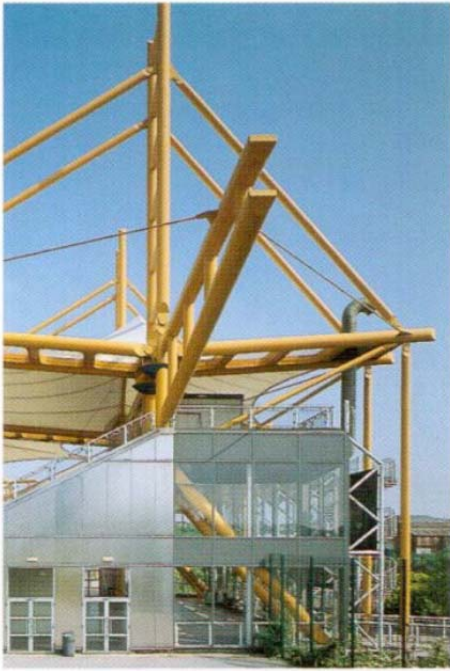
## 2.4 Don Valley Stadium – Sheffield, UK, 1990

Το στάδιο Don Valley στο Sheffield σχεδιάστηκε με την ιδέα των αρχιτεκτόνων να “ταιριάζει παντού και πάντα”. Το στάδιο θα φιλοξενούσε αγώνες ποδοσφαίρου και άλλα αθλητικά γεγονότα. Το πρώτο μεγάλο γεγονός ήταν οι παγκόσμιοι φοιτητικοί αγώνες του 1991. Ήλπιζαν ότι το στάδιο των 25.000 θεατών που θα χτιζόταν στην μέση της Βιομηχανικής περιοχής της πόλης, θα αποτελούσε το κεντρικό σημείο για την αναβάθμιση της περιοχής. Η εφελκόμενη μεμβράνη της οροφής σχεδιάστηκε ώστε να παρέχει άνεση στους θεατές και να προσελκύει το βλέμμα ως κατασκευή.



Η πίστα των αγώνων και ο αγωνιστικός χώρος είναι περίπου 4 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό σε συνδυασμό με την κατασκευή αναχώματος γύρω από την πίστα επιτρέπει στους θεατές να κοιτάζουν προς τα κάτω τα γεγονότα που λαμβάνουν χώρα. Η κατασκευή αυτή χρησιμεύει επίσης για να παρέχει ιδανικές συνθήκες προστασίας που βοηθά τους αθλητές και ενδεχομένως τους επιτρέπει να επιτύχουν επιδόσεις παγκόσμιων ρεκόρ. Το Sheffield είναι γνωστή ως πόλη του χάλυβα λόγω του παρελθόν της και την εξάρτησή της από αυτή τη βιομηχανία. Οι αρχιτέκτονες με στόχο να συνδέσουν την κληρονομιά της «πόλης του χάλυβα» με το Don Valley σχεδίασαν μια οροφή που αποτελείται από κοίλους χαλύβδινους δοκούς και πάνελ από εφελκόμενη μεμβράνη.

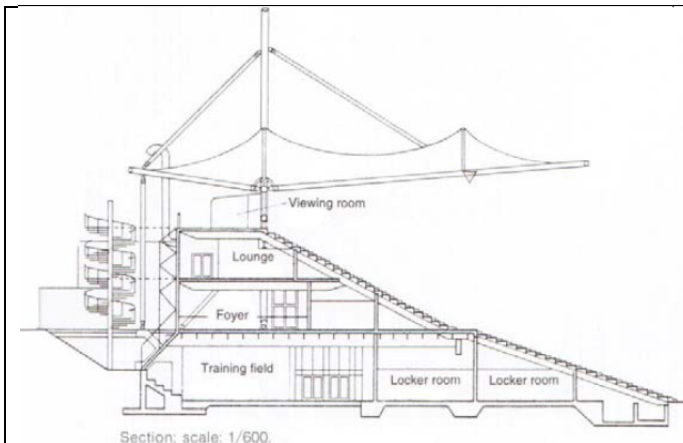




Side view of the stand.

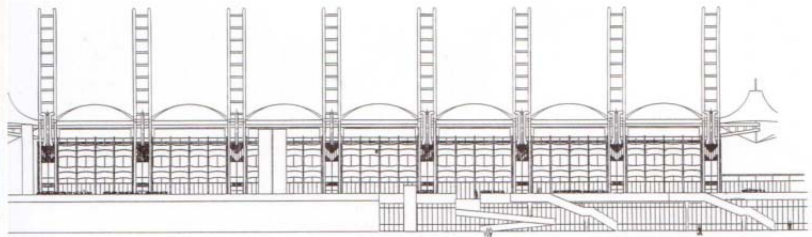
Η είκοσι έξι μέτρων δοκός του προβόλου, που ισοδυναμεί με ένα βάρος 40 κιλών ανά τετραγωνικό μέτρο , ισορροπεί με μία σειρά από 12 σύλους διατεταγμένους οι οποίοι ισορροπούν με την σειρά τους με τένοντες αναρτήσεις.

Λόγω των μεγάλων θλιπτικών δυνάμεων , που παρατηρούνται στην αντίδραση στην άνωση λόγω των ισχυρών ανέμων , χρησιμοποιούνται κυκλικές κοίλες διατομές. Η διάμετρος του κυρίως στοιχείου των δικτυωμάτων που χρησιμοποιούνται είναι 508 χιλιοστά. Οι αντηρίδες είναι διαμέτρου 323,9 χιλιοστών και οι εμπρόσθιες έχουν μήκος 19 μέτρων. Για να επιτευχθεί η στιβαρότητα της κατασκευής όλα τα δικτυώματα έγιναν με διάταξη διπλής δοκού σε σχήμα σκάλας.





Upward view of the membrane roof.



North elevation, scale: 1/1,000.



## 2.5 Sails in the Desert – Yulara, Australia, 1984

Το συγκρότημα Yulara θεωρείται ως μια οάση, καθώς βρίσκεται 20 χιλιόμετρα από Ayers Rock, Yulara στην έρημο της Βόρειας Αυστραλίας.

Το φως του ήλιου μέσα στο συγκρότημα φιλτράρεται χρησιμοποιώντας ιστία από ελαφρύ ύφασμα, και το εσωτερικό των κτιρίων, όπως το ξενοδοχείο και το εμπορικό κέντρο ψύχονται με τη χρήση διπλού επιπέδου ύφασμα (pillow).



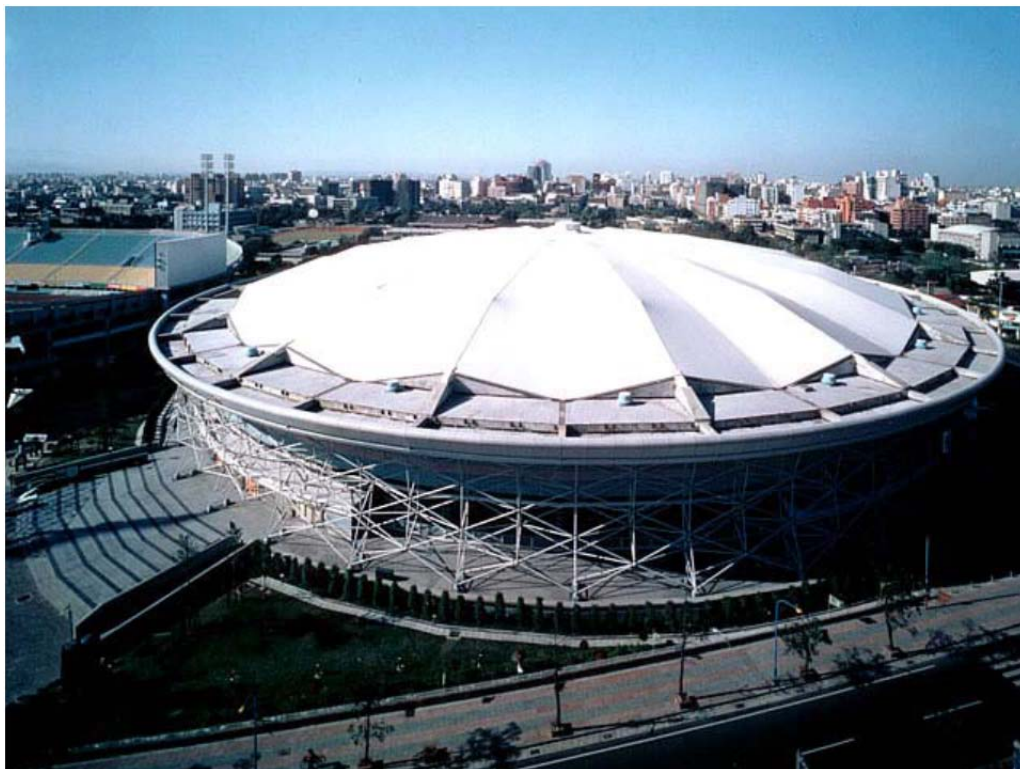
Upward view of the membrane shade.

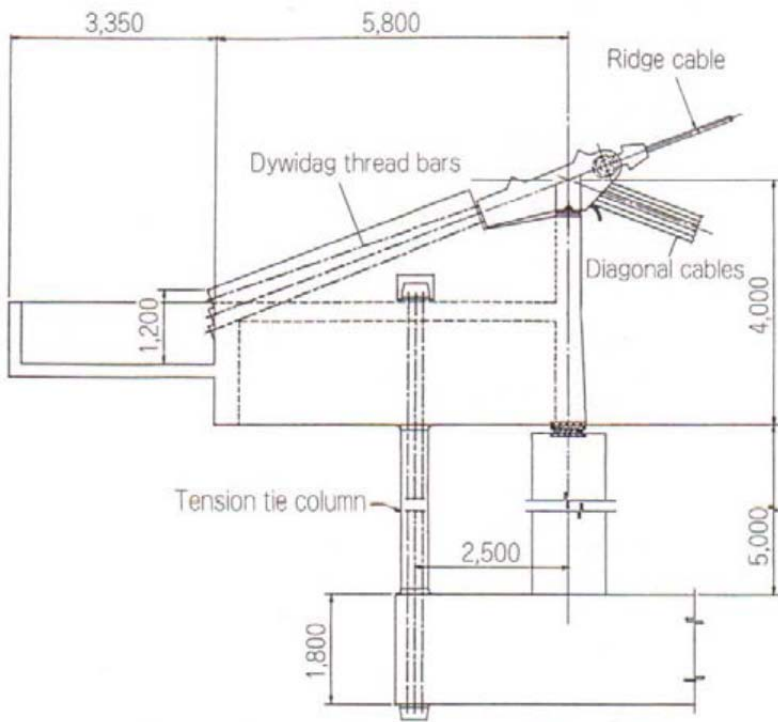


Entrance to the hotel

## 2.6. Yao-Yuan County Arena – Taoyuan, Taiwan, 1993

Βρίσκεται στις παρυφές της Ταϊπέι, Tao-Yuan County και η κατασκευή του Tao-Yuan Country Arena - με την ικανότητα να φιλοξενήσει 15.000 θεατές –έγινε για την υποστήριξη αθλητικών και καλλιτεχνικών στην περιοχή. Ο σχεδιασμός του Tao-Yuan Country Arena επηρεάστηκε από αυτόν της Olympic Gymnastic Arena, που βρίσκεται στην Seoul της Νότιας Κορέας. Είχε σχεδιαστεί σύμφωνα με τρούλο <<τύπου tensegrity>> χρησιμοποιώντας το σύστημα Geiger Cable Dome λόγω των αναγκών που επιτρέπει να διοχετεύεται το μέγιστο δυνατό φως της ημέρας μέσα σε μια κυκλική κατασκευή.





Detail of the roof structure; scale: 1/200.





## 2.7. San Diego Conventions Centers - San Diego, USA, 1989

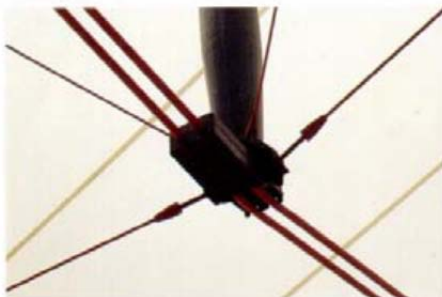
Το San Diego Conventions Center's με καθαρό άνοιγμα της οροφής 91.5m καλύπτει δύο χώρους ,το εκθεσιακό κέντρο και το χώρο των ειδικών εκδηλώσεων. Έχει σχεδιασθεί με το σύστημα <<supporting masts>> τα οποία εδράζονται πάνω σε προεντεταμένα συρματόσχοινα και με αυτόν τον τρόπο εφελκύνουν την μεμβράνη.



Suspension cables running through the roof.



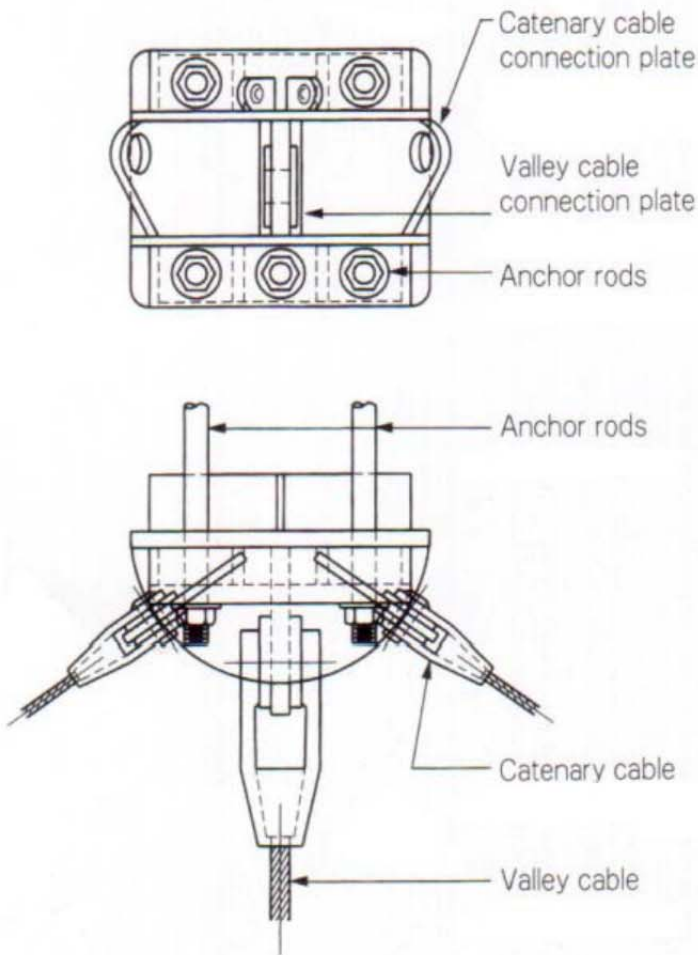
Suspension cables.



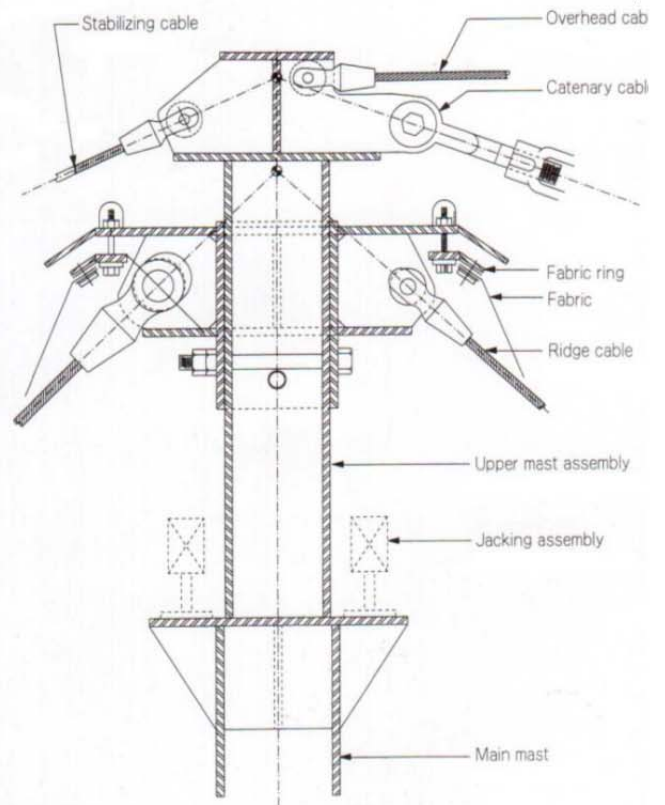
Bottom of the flying mast.



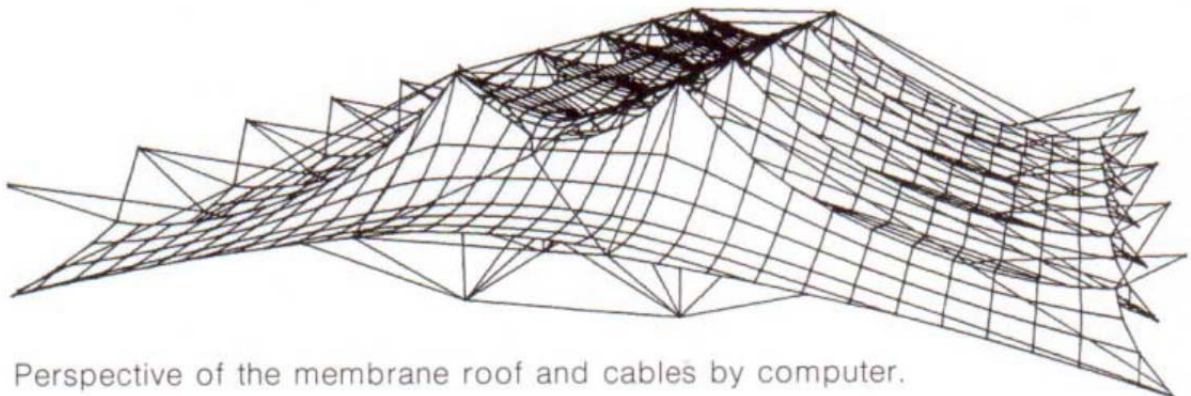
Anchor block for the suspension cables.



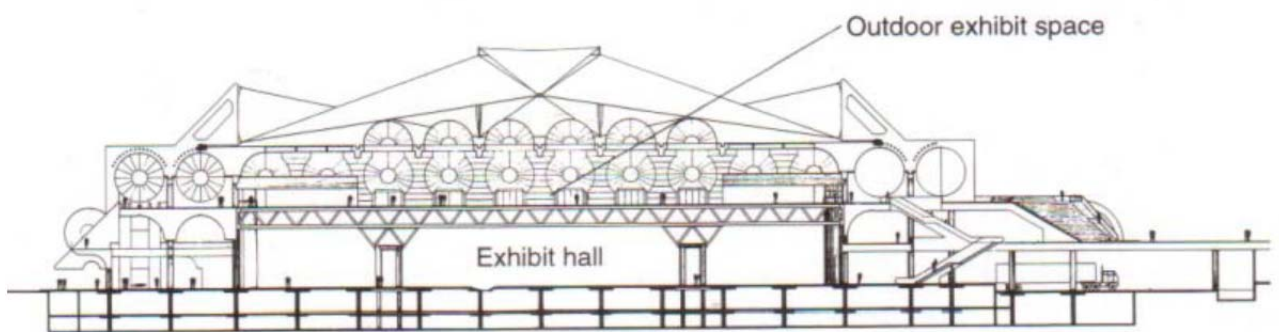
Anchor block at the top of the concrete piers.



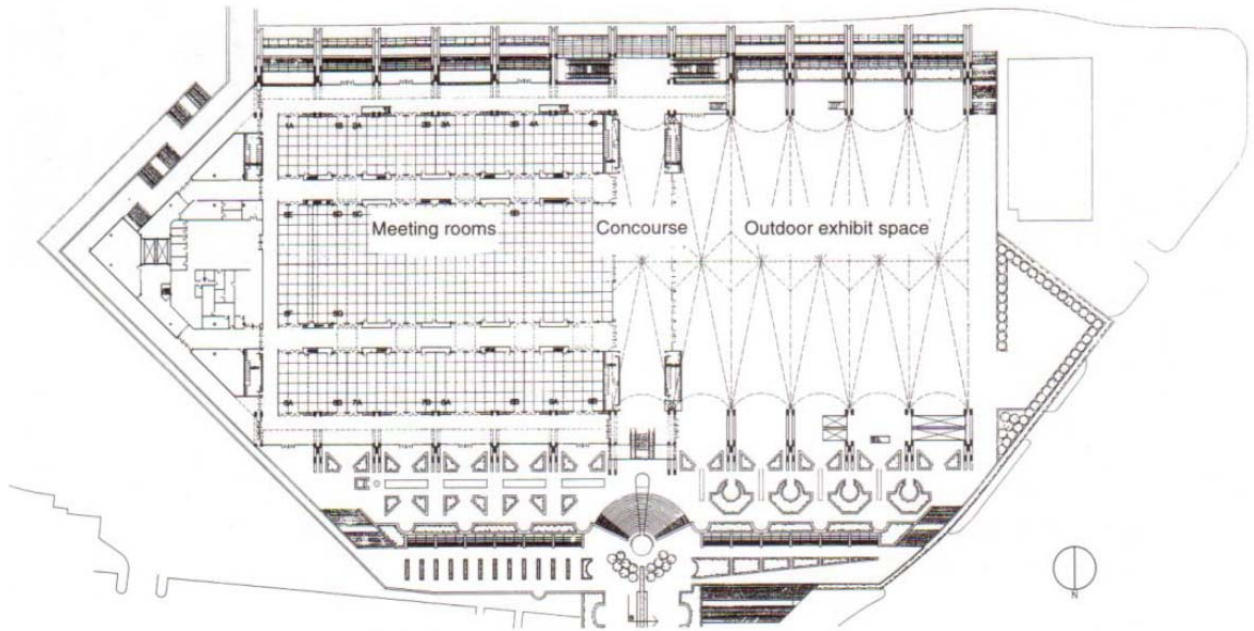
Detailed section at the top of the flying mast.



Perspective of the membrane roof and cables by computer.



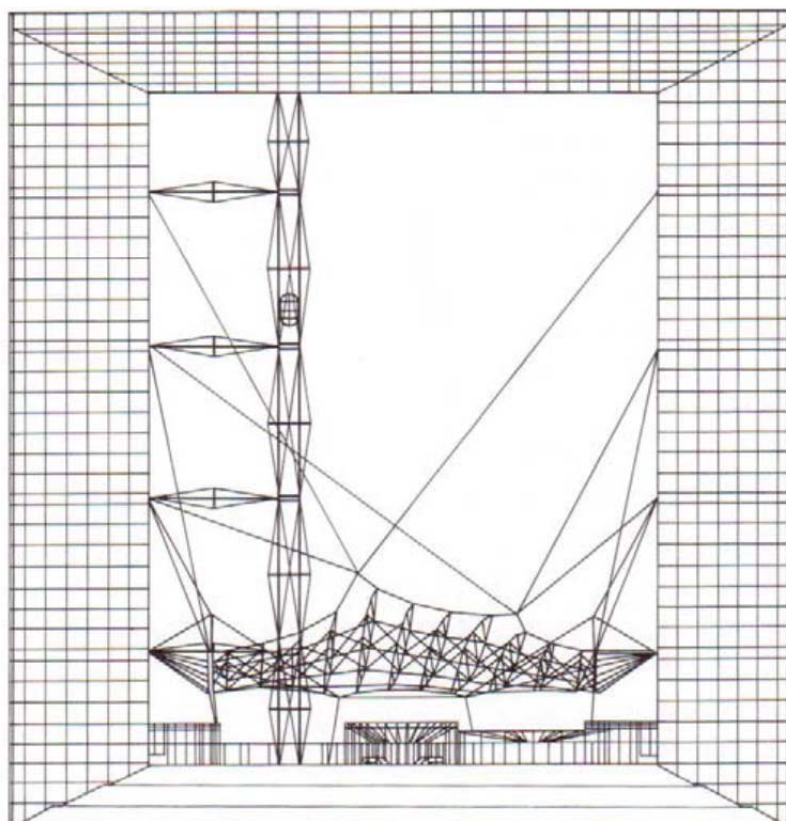
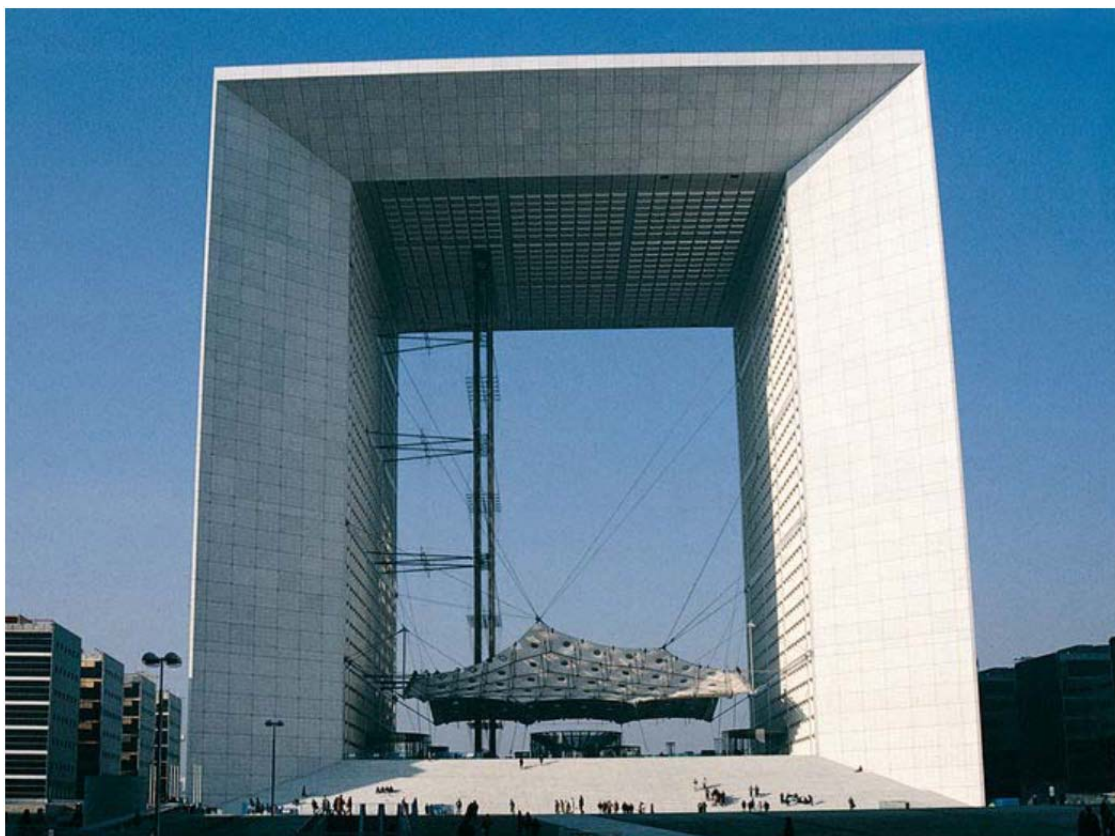
Section; scale: 1/2,000.



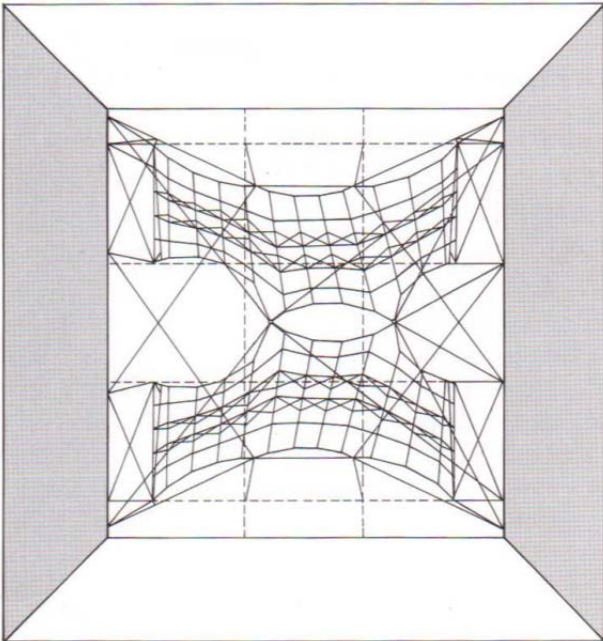
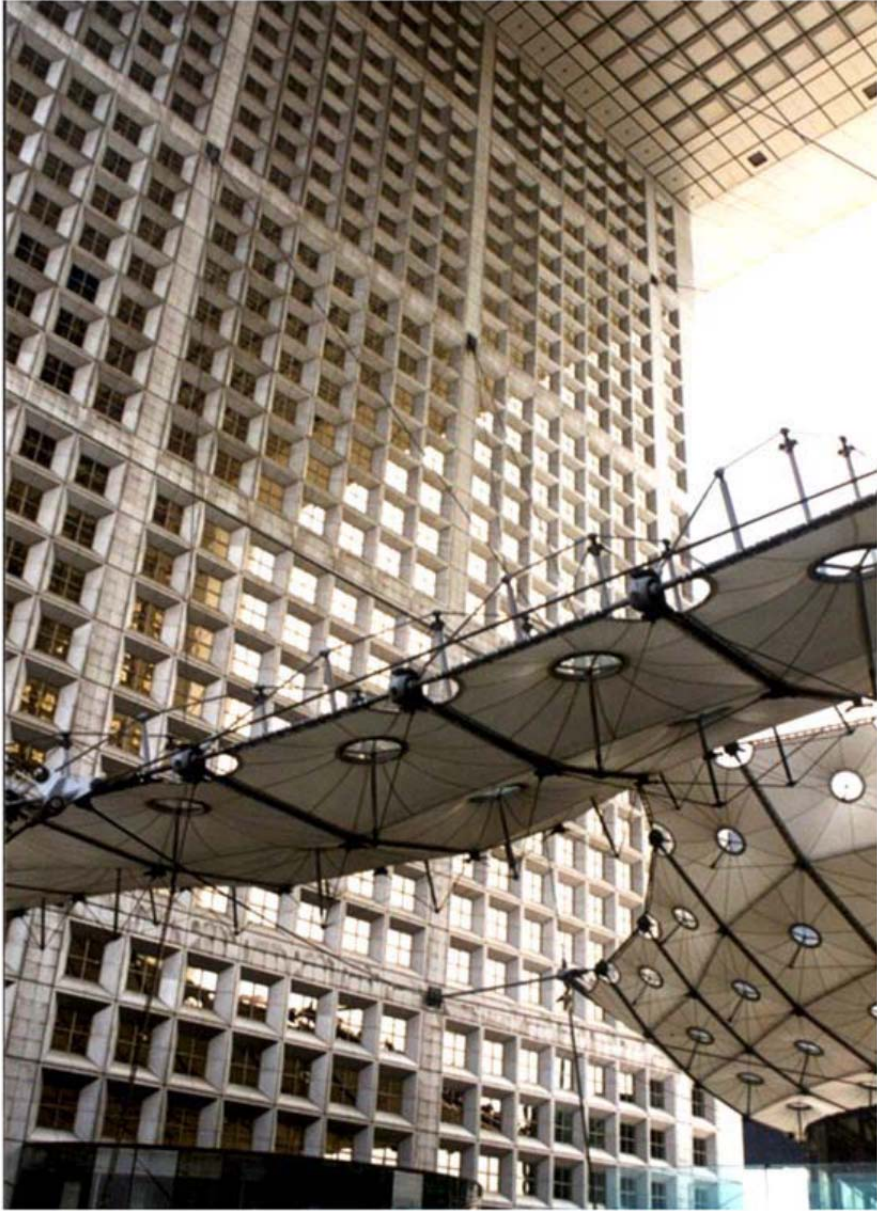
Second floor plan; scale: 1/3,000.

## 2.8. “Nuage Leger”, La Grande Arche – Paris, France, 1989

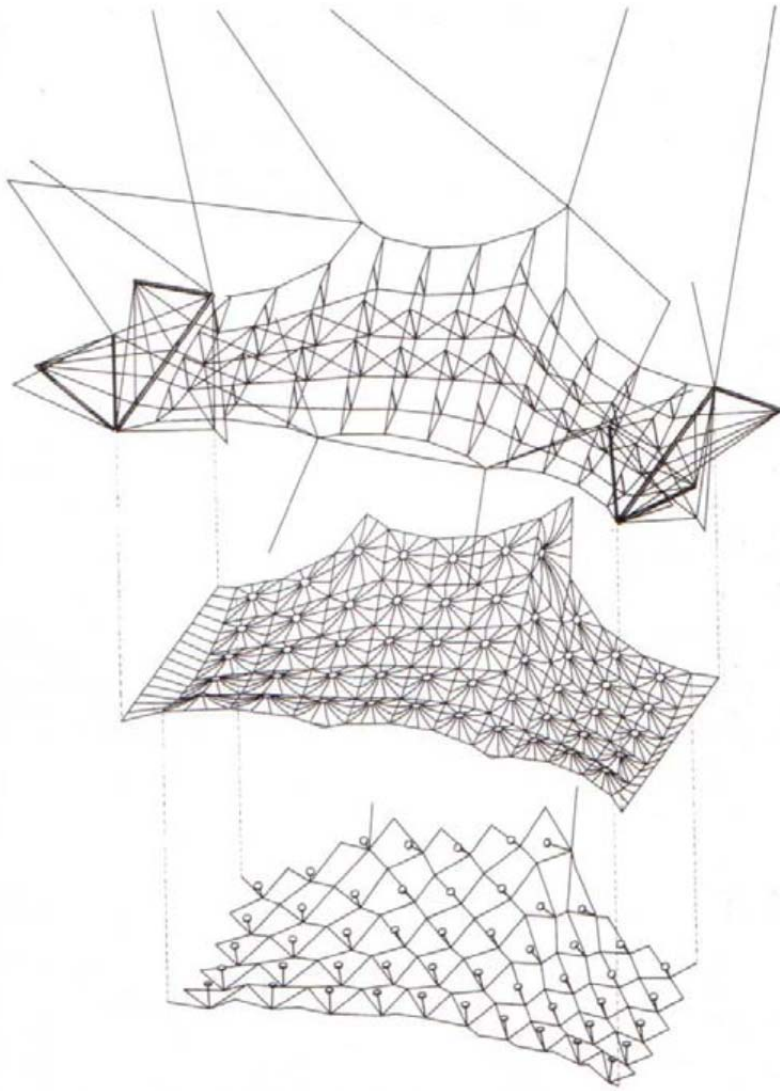
Ένας τεράστιος θόλος γνωστός ως το σύννεφο, ή το Nuage λόγω Spreckelsen που είχε την ιδέα της ομίχλης πάνω από το έδαφος στήθηκε μέσα στο Arche με σκοπό την προστασία της κατασκευής από τα στοιχεία. Ο θόλος καταλαμβάνει μια επιφάνεια 2300 τετραγωνικά μέτρα και το άνοιγμα της φτάνει τα 70 μέτρα.



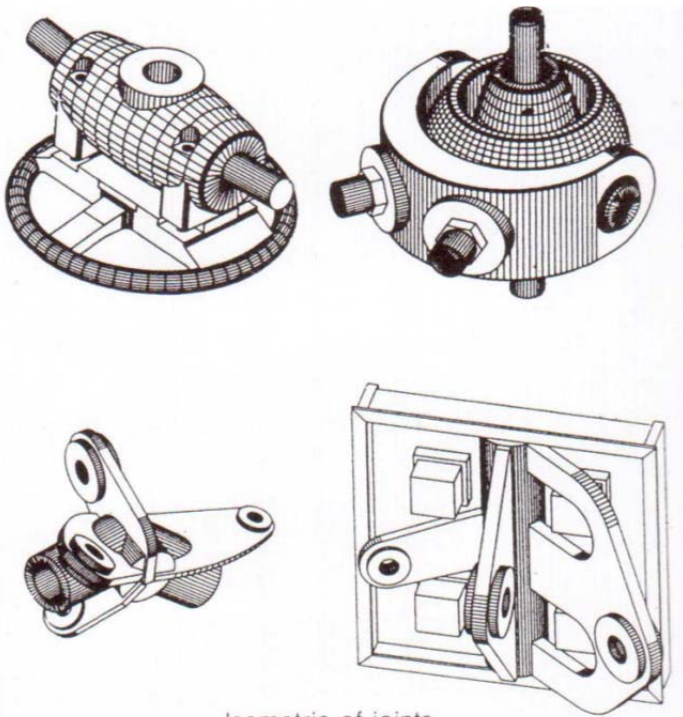
Section; scale: 1/1,800.



Plan; scale: 1/1,800.



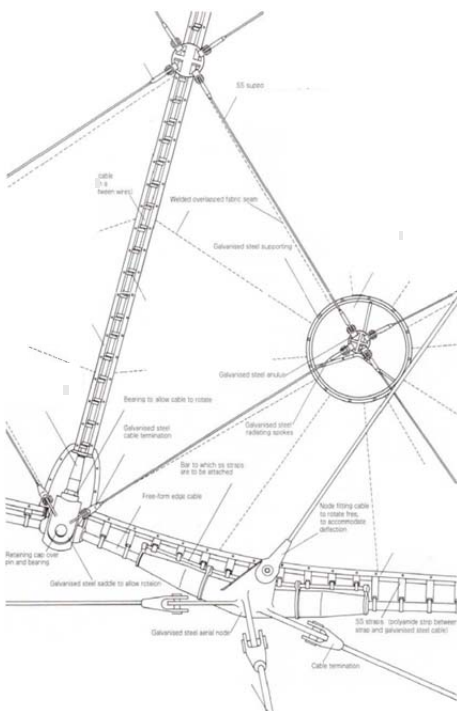
Structural system of the canopy.



Isometric of joints.



Canopies viewed on the plateau.



## 2.9. Columbus'92 "Bigo" – Genoa, Italy, 1992

Η κατασκευή αποτελείται από 5 πάνελ εφελκυσμένης μεμβράνης από fiber glass με επίστρωση PTFE. Τα όρια της μεμβράνης εδράζονται σε προεντεταμένα συρματόσχοινα με ειδικά στοιχεία από προφίλ αλουμινίου εν είδη μέγγενης.





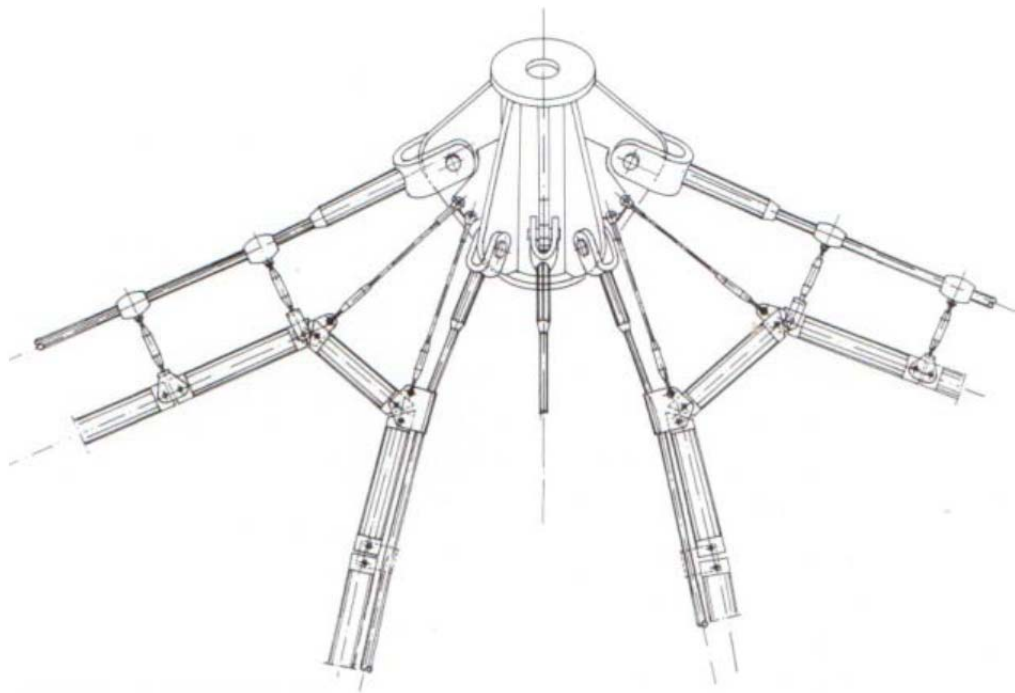


Tip of the boom supporting the canopy.

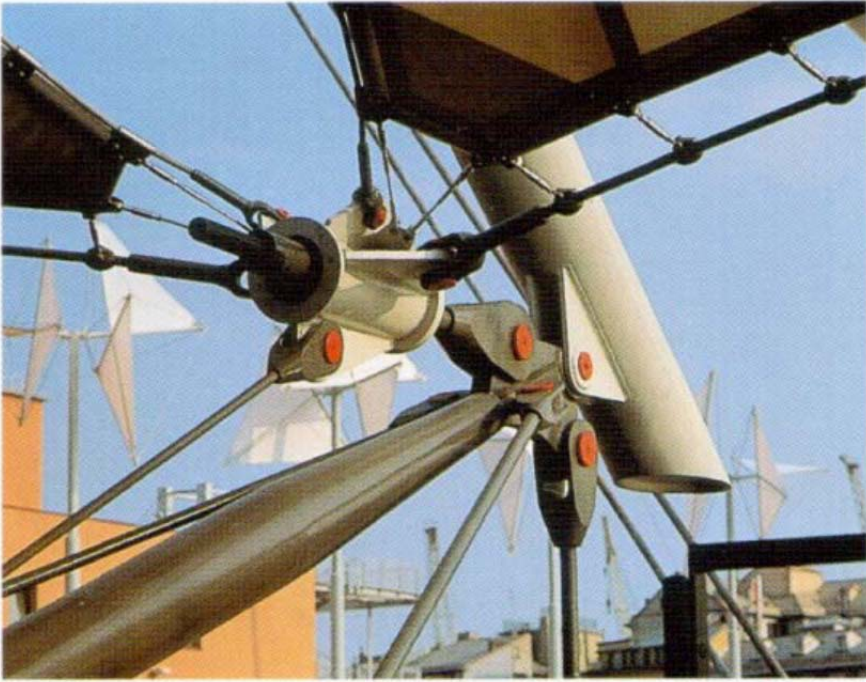




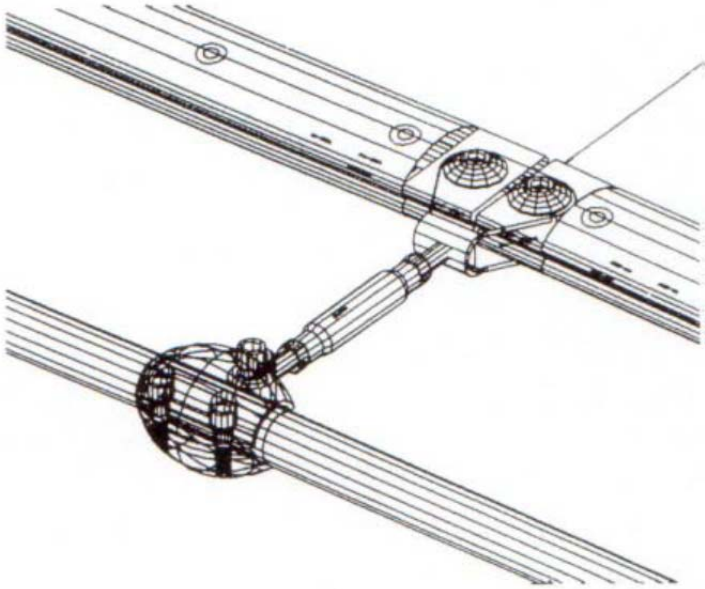
This component automatically adjusts the position of the glass.



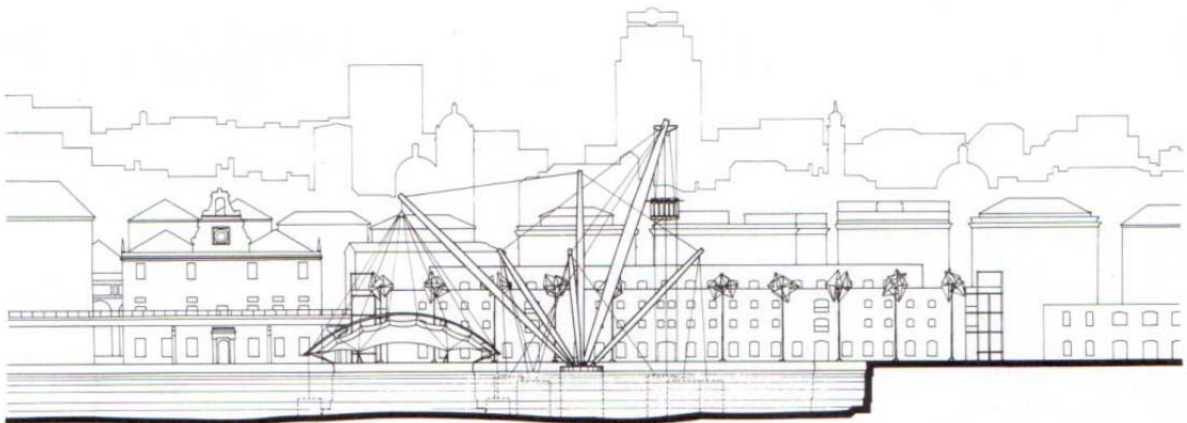
Cable suspension.



Joints of the ached rib's end.



Membrane connecting to the boundary cable.



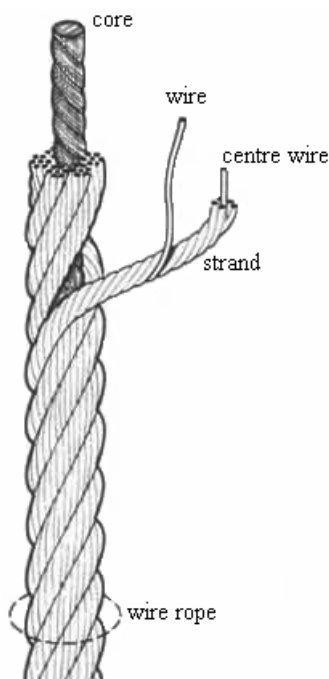
Section; scale: 1/2,000.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΥΛΙΚΑ

### 3.1 ΚΑΛΩΔΙΑ

#### 3.1.1 ΔΟΜΗ ΚΑΛΩΔΙΟΥ

Λέγοντας **καλώδιο** (wire rope) εννοούμε ένα εύκαμπτο εφελκυσμένο μέλος το οποίο δεν μπορεί να παραλάβει κάμψη ή θλίψη και το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο **συρμάτων** (wires) ή **κλώνων** (strands) τυλιγμένων ελικοειδώς γύρω από κάποιο **πυρήνα** (core) ή κάποιο κεντρικό κλώνο.



Σχ.3.1  
Κατασκευή Καλωδίου

Τα καλώδια κατασκευάζονται είτε από συνθετικές ίνες (πολυπροπυλενίου, πολυεστέρα, πολυαιθυλενίου, kevlar και άλλων), είτε από σίδηρο ή κράματα (alloys) αυτού όπως ο χάλυβας, με περισσότερο διαδεδομένη τη χρήση χάλυβα υψηλής αντοχής (High Carbon Steel). Η βιομηχανική παραγωγή, ειδικά των μεταλλικών καλωδίων, παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον και από την πλευρά της μεταλλουργίας του σιδήρου και από την πλευρά της κατασκευής τους δηλαδή, του τρόπου περιέλιξης των συρμάτων μεταξύ τους και των κλώνων γύρω από κάποιο πυρήνα. Στην πραγματικότητα ένα μεταλλικό καλώδιο, εκτός από το ότι παρέχει τον χάλυβα στην ισχυρότερη μορφή του, είναι μια σύνθετη κατασκευή αποτελούμενη από ένα πλήθος κινούμενων μελών σχεδιασμένων να επιβάλουν συγκεκριμένα φορτία το ένα στο άλλο τέτοια ώστε να παραμορφώνονται όλα μαζί, χωρίς να αποχωρίζονται, παρέχοντας στο καλώδιο την απαραίτητη αντοχή και ευκαμψία για τη σωστή του λειτουργία.

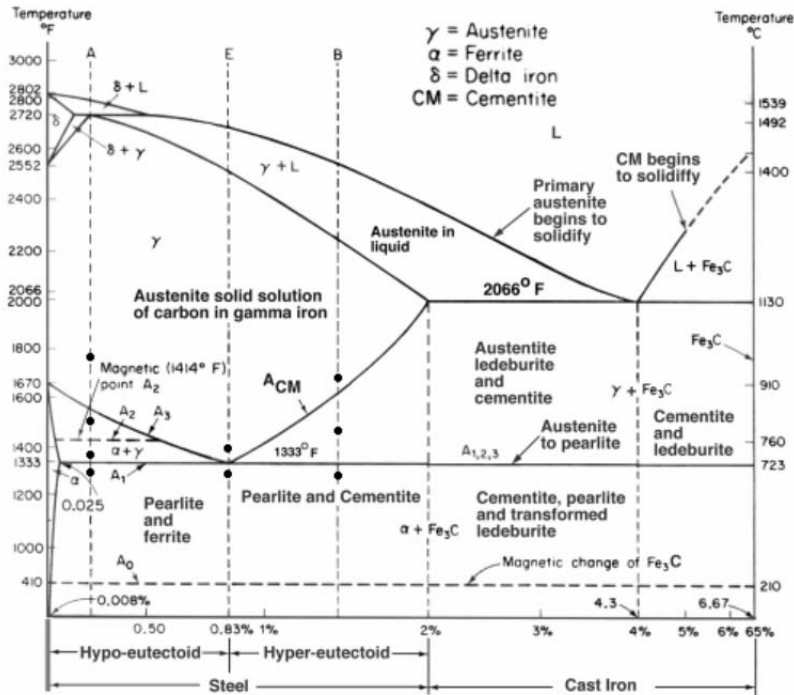
#### 3.1.2 ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

Η βιομηχανική παραγωγή των μεταλλικών καλωδίων αφορά όλες τις επεξεργασίες στις οποίες υπόκεινται έτοιμες ράβδοι χάλυβα μέχρι τη διαμόρφωση του τελικού προϊόντος και οι οποίες κατά σειρά εκτέλεσης είναι :

- (α) Πατεντάρισμα (Patenting)
- (β) Αποξειδωση (Pickling)
- (γ) Έλκυση (Drawing)
- (δ) Γαλβάνισμα (Galvanizing)
- (ε) Έλεγχος (Inspection after galvanizing)
- (στ) Περιέλιξη (Winding)
- (ζ) Κατασκευή κλώνων (Stranding)
- (η) Έλεγχος (Inspection after stranding)
- (θ) Διαμόρφωση καλωδίων (Roping)
- (ι) Συσσκευασία (Packing)

Αξίζει να σημειωθεί ότι το 70% του κόστους κατασκευής των συρμάτων αφορά το πατεντάρισμα, θερμική επεξεργασία καθοριστική για τις αντοχές των καλωδίων. Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο στόχος της επεξεργασίας αυτής, είναι αναγκαίο να αναφερθούν ορισμένα βασικά στοιχεία για την κρυσταλλική δομή των χαλύβων (κράμα σιδήρου . άνθρακα) και για την επίδραση σε αυτήν της ταχύτητας ψύξης η οποία ακολουθεί τη θερμική διεργασία.

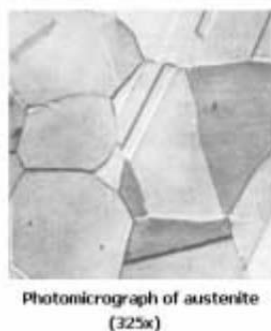
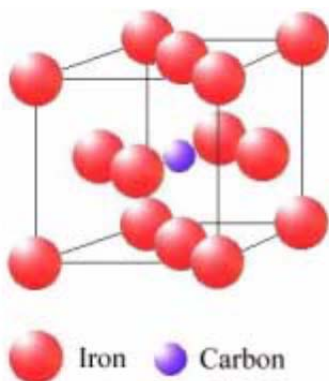
Στο σχήμα που ακολουθεί (σχήμα 3.2), παρουσιάζεται το διάγραμμα ισορροπίας των φάσεων του κράματος σιδήρου-άνθρακα το οποίο απεικονίζει τις φάσεις στις οποίες μετασχηματίζεται ένα, συγκεκριμένης περιεκτικότητας σε άνθρακα, κράμα όταν αυτό θερμανθεί μέχρι ορισμένη θεοκρασία και αφευθεί να ψυχθεί με φυσικό τρόπο (σε θεοκρασία δωματίου). Ο οριζόντιος άξονας του διαγράμματος αντιστοιχεί στην επί τοις εκατό κατά βάρος (wt. %) περιεκτικότητα σε άνθρακα του κράματος ενώ οι δύο κατακόρυφοι άξονες, δεξιά και αριστερά, αντιστοιχούν στην θεοκρασία στην οποία αυτό υπόκειται σε βαθμούς Celsius (oC) και Fahrenheit (oF) αντίστοιχα. Οι φάσεις στις οποίες είναι δυνατόν να βρίσκεται ο χάλυβας είναι ο ωστενίτης (austenite), ο φερρίτης (ferrite), ο σεμεντίτης (cementite), ο περλίτης (pearlite), ο μπαινίτης (bainite) και ο μαρτενσίτης (martensite).



Σχήμα 3.2

Διάγραμμα Φάσεων Σιδήρου (Fe) . Άνθρακα (C)

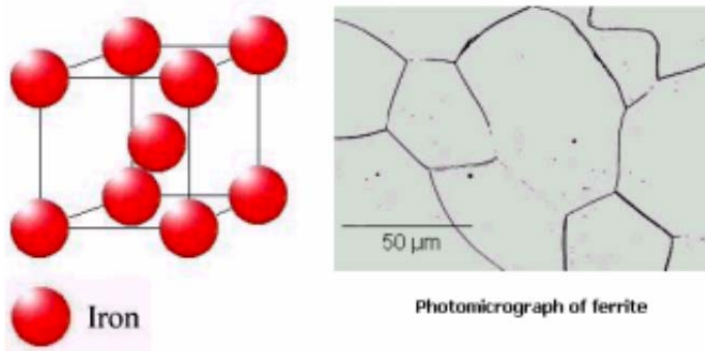
Ο **ωστενίτης**, ο οποίος συμβολίζεται με  $\gamma$ , είναι η φάση εκείνη του χάλυβα που εμφανίζεται όταν αυτός θερμανθεί περί τους 1000oC και κατά την οποία ο σίδηρος βρίσκεται με εδροκεντρομένη κυβική κρυσταλλική δομή (fcc lattice structure), εντός της οποίας υπάρχει άνθρακας υπό μορφή στερεού διαλύματος (σχήμα 3.3). Ο ωστενίτης είναι μαλακός και όλκιμος. Είναι ευσταθής (δεν μετασχηματίζεται) για θεοκρασίες μέχρι 723oC και μετασταθής (μμετασχηματίζεται σε άλλες φάσεις) για μικρότερες θεοκρασίες.



Σχήμα 3.3

Κρυσταλλική Δομή του Ωστενίτη

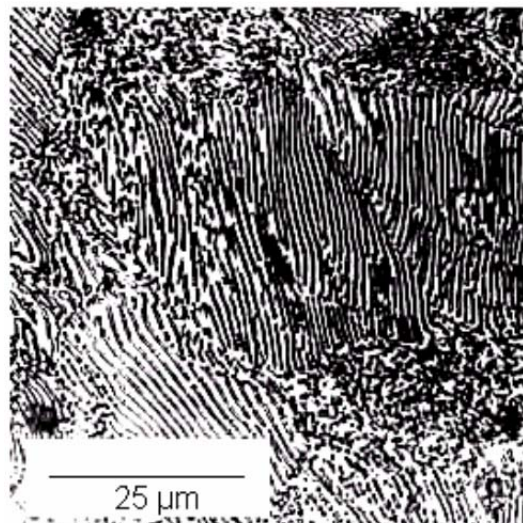
Ο **φερρίτης**, ο οποίος συμβολίζεται με **α**, είναι η φάση εκείνη του χάλυβα κατά την οποία ο σίδηρος μεταβάλλει την κρυσταλλική του δομή από εδροκεντρομένη σε χωροκεντρομένη κυβική (bcc lattice structure), εντός της οποίας δεν επιτρέπεται η ύπαρξη ατόμων άνθρακα (σχήμα 3.4). Η απουσία του άνθρακα καθιστά τον φερρίτη ακόμη πιο μαλακό και όλκιμο από τον ωστενίτη.



Σχήμα 3.4  
Κρυσταλλική Δομή του Φερρίτη

Καθώς ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε φερρίτη, άτομα άνθρακα αποβάλλονται από τον σίδηρο και σχηματίζουν συμπαγείς μάζες (καρβίδια), οι οποίες παραμένουν ξεχωριστές από τον φερρίτη. Τα καρβίδια αυτά συνιστούν τον **σεμεντίτη** ( $Fe_3C$ ), ο οποίος είναι εξαιρετικά σκληρός αλλά αντίστοιχα αρκετά ψαθυρός.

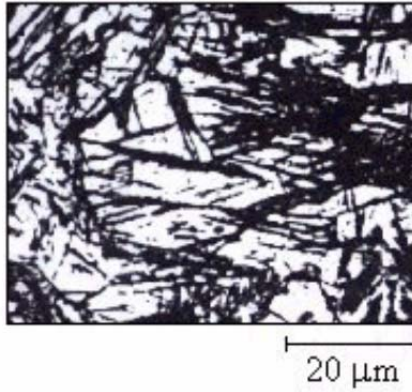
Ο **περλίτης** (pearlite) είναι η φάση εκείνη του χάλυβα όπου πλακίδια φερρίτη συντάσσονται εναλλάξ με πλακίδια σεμεντίτη (σχήμα 3.5). Βασικό χαρακτηριστικό του είναι η απόσταση μεταξύ των πλακιδίων σεμεντίτη, η οποία μειούμενη αυξάνει την αντοχή του χάλυβα.



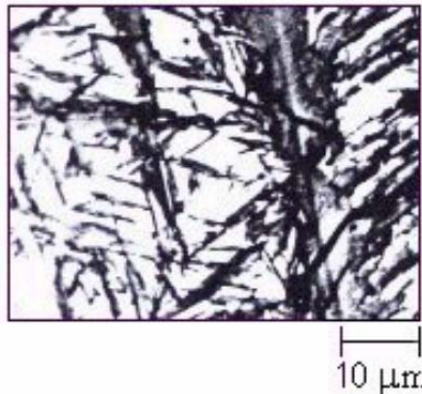
Σχήμα 3.5  
Μικρογραφία Περλίτη

Ο **μπαινίτης** (bainite) δεν απεικονίζεται στο διάγραμμα φάσεων σιδήρου- άνθρακα επειδή ο σχηματισμός του απαιτεί ταχεία ψύξη του χάλυβα (σχήμα 3.8). Διαμορφώνεται σε θερμοκρασία από 500oC έως 240oC και η κρυσταλλική του δομή αποτελείται από φερρίτη σε βελονοειδή μορφή, πάχους 0,20μm και μήκους 10μm περίπου, μεταξύ του οποίου παρεμβάλλεται σεμεντίτης (σχήμα 3.6).

Ο **μαρτενσίτης** (martensite) εξαρτάται επίσης από την ταχύτητα ψύξης του χάλυβα και δεν συμπεριλαμβάνεται στο διάγραμμα φάσεων σιδήρου-άνθρακα. Ο σχηματισμός του επιτυγχάνεται με την ταχεία ψύξη του ωστενίτη, σε θερμοκρασίες από 350oC έως 200oC, όπου η κρυσταλλική δομή του ωστενίτη μετατρέπεται από εδροκεντρομένη κυβική (fcc) σε χωροκεντρομένη τετραγωνική (bct). Οι κρύσταλλοι του μαρτενσίτη σχηματίζουν επιμήκεις πλάκες (σχήμα 3.7) μη παράλληλες μεταξύ τους οι οποίες περιορίζονται στα όρια των κόκκων του ωστενίτη. Η φάση αυτή του χάλυβα είναι εξαιρετικά σκληρή και ψαθυρή.

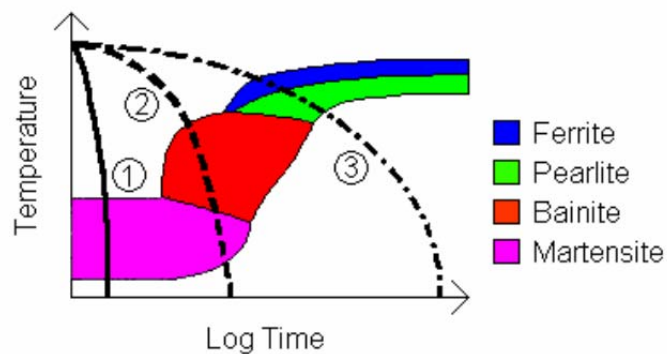


Σχήμα 3.6  
Μικρογραφία Μπαινίτη



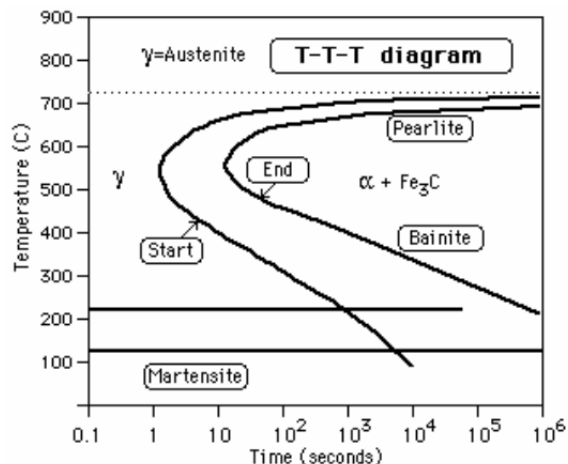
Σχήμα 3.7  
Μικρογραφία Μαρτενσίτη

Ο ρυθμός ψύξης του χάλυβα είναι καθοριστικός για την τελικά διαμορφούμενη κρυσταλλική του δομή και η επίδρασή του απεικονίζεται σε ειδικά διαγράμματα κάθε ένα από τα οποία αφορά συγκεκριμένης σύστασης χάλυβα. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι τέτοιων διαγραμμάτων και είναι τα διαγράμματα συνεχούς ψύξης (σχήμα 3.8), γνωστά ως **CCT** (Continuous-Cooling-Transformation diagrams), και τα διαγράμματα σταθερής ψύξης (σχήμα 3.9), γνωστά ως **TTT** (Time-Temperature-Transformation diagrams).



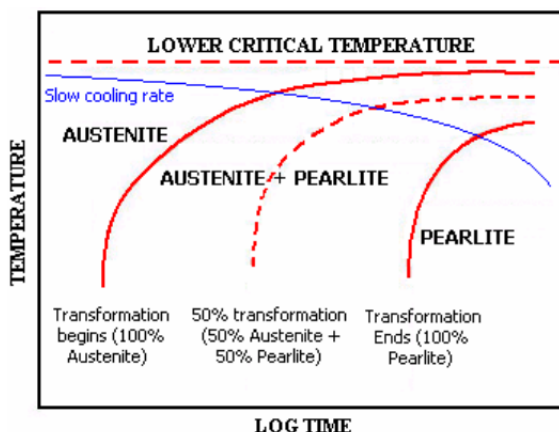
Σχήμα 3.8  
Μορφή Διαγράμματος Συνεχούς Ψύξης (CCT)

Μέσω των CCT διαγραμμάτων περιγράφεται ο βαθμός μετασχηματισμού του ωστενίτη σε άλλες φάσεις ως χρονική συνάρτηση για συνεχώς μειούμενη θερμοκρασία. Η καμπύλη ψύξης 1, στο διάγραμμα του σχήματος 3.8, αφορά εξαιρετικά ταχεία ψύξη (μείωση περίπου 170oC ανά λεπτό) και η μόνη φάση μετασχηματισμού είναι ο μαρτενσίτης. Η καμπύλη ψύξης 2, αφορά μέτριας ταχύτητας ψύξη και οι φάσεις μετασχηματισμού είναι κυρίως μπαινίτης και πολύ λιγότερο μαρτενσίτης. Η καμπύλη ψύξης 3, αφορά φυσική ψύξη και οι φάσεις μετασχηματισμού είναι ο φερρίτης και ο περλίτης οι οποίες εμφανίζονται και στο διάγραμμα φάσεων σιδήρου-άνθρακα.



Σχήμα 3.9  
Μορφή Διαγράμματος Σταθερής Ψύξης (TTT)

Μέσω των TTT διαγραμμάτων περιγράφεται ο χρόνος που απαιτείται να παραμείνει σε ορισμένη θερμοκρασία ο ωστενίτης μέχρι τον επιθυμητό βαθμό μετασχηματισμού του σε άλλη φάση. Η αριστερή πλευρά του διαγράμματος του σχήματος 2.9, αντιπροσωπεύει τη φάση του ωστενίτη. Υπάρχει μία θερμοκρασία, η κατώτερη κρίσιμη θερμοκρασία (LCT), η οποία ανάλογα με την περιεκτικότητα σε άνθρακα του χάλυβα κυμαίνεται από 910oC έως 723oC, πάνω από την οποία ο ωστενίτης είναι ευσταθής και κάτω από την οποία αρχίζει να μετασχηματίζεται σε άλλες φάσεις. Η αριστερή καμπύλη του διαγράμματος δηλώνει την έναρξη μετασχηματισμού του και η δεξιά το πέρας, ενώ η περιοχή μεταξύ των δύο αυτών καμπυλών αντιστοιχεί σε διάφορες φάσεις μετασχηματισμού όπως ωστενίτης και περλίτης, ωστενίτης και μαρτενσίτης ή ωστενίτης και μπαινίτης.



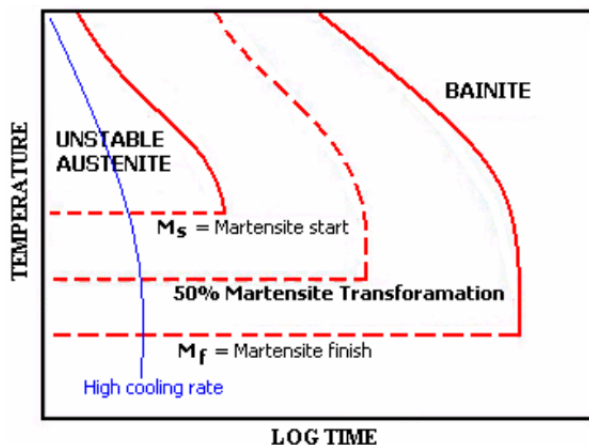
Σχήμα 3.10  
Ανώτερο Τμήμα Διαγράμματος Σταθερής Ψύξης (TTT)

Στο σχήμα 2.10, απεικονίζεται το άνω μισό τμήμα ενός διαγράμματος TTT. Παρατηρούμε ότι ανάλογα με τον ρυθμό ψύξης που επιλέγεται, επιτυγχάνεται συγκεκριμένο ποσοστό μετασχηματισμού του ωστενίτη (50%, 100%, κλπ). Εάν ο ρυθμός ψύξης είναι αρκετά βραδύς, ώστε η καμπύλη ψύξης να περνά από όλη την περιοχή μετασχηματισμού, τότε το τελικό προϊόν θα είναι 100% περλίτης. Με ένα ταχύτερο ρυθμό, τέτοιο ώστε η καμπύλη ψύξης να περνά από το μέσον της περιοχής μετασχηματισμού, το τελικό προϊόν θα αποτελείται από 50% περλίτη και 50% μπαινίτη ή μαρτενσίτη. Διευκρινίζεται σε αυτό



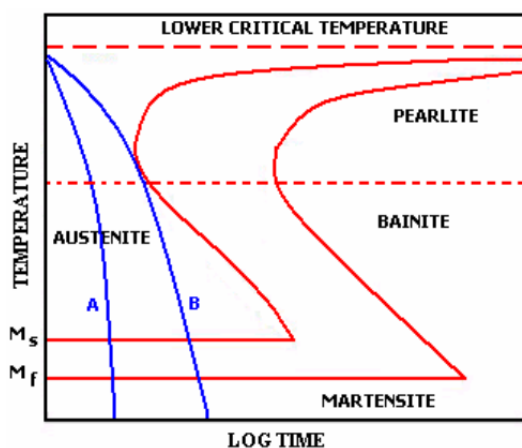
το σημείο ότι ο ωστενίτης είναι η μόνη φάση του χάλυβα η οποία μπορεί να μετασχηματίζεται και ότι από τη στιγμή που μέρος ή όλος ο ωστενίτης θα μετασχηματιστεί σε κάποια άλλη φάση, αυτή διατηρείται στο τελικό προϊόν (θερμοκρασία περιβάλλοντος). Επιπλέον, ο ωστενίτης δεν μπορεί να διατηρηθεί ως τελική φάση παρά μόνον σε ορισμένες περιπτώσεις με προσθήκη μαγγανίου (Mg) στο κράμα.

Στο σχήμα 2.11 απεικονίζεται το κατώτερο τμήμα του διαγράμματος TTT το οποίο αντιπροσωπεύει τις φάσεις που επιτυγχάνονται στο χάλυβα με υψηλότερους ρυθμούς ψύξης. Οι καμπύλες ψύξης σε αυτή την περίπτωση περιορίζονται στο αριστερό τμήμα του διαγράμματος και όλος ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μαρτενσίτη.



Σχήμα 3.11  
Κατώτερο Τμήμα Διαγράμματος Σταθερής Ψύξης (TTT)

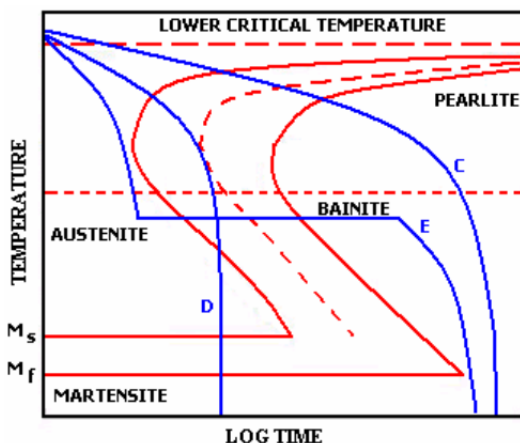
Στο σχήμα 3.12 απεικονίζονται δύο καμπύλες, ταχύ ρυθμού ψύξης, οι A και B εκ των οποίων η καμπύλη A αντιπροσωπεύει ταχύτερο ρυθμό. Και οι δύο καμπύλες έχουν ως αποτέλεσμα τον πλήρη μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη, ο ταχύτερος όμως ρυθμός της καμπύλης A έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση υψηλότερων εσωτερικών τάσεων και διατμητικών παραμορφώσεων στην κρυσταλλική δομή του μαρτενσίτη. Η καμπύλη B αντίθετα, η οποία είναι γνωστή ως καμπύλη κρίσιμου ρυθμού ψύξης (critical cooling rate) και η οποία εφάπτεται στο «γόνατο» του διαγράμματος TTT, αντιστοιχεί στην μικρότερη δυνατή ταχύτητα ψύξης που εξασφαλίζει τον πλήρη μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μαρτενσίτη και ελαχιστοποιεί τις εσωτερικές τάσεις και παραμορφώσεις στην κρυσταλλική του δομή.



Σχήμα 3.12  
Καμπύλες Ψύξης A και B

Η γενική περιγραφή των διαφόρων περιπτώσεων ψύξης του χάλυβα συμπληρώνεται με τρεις επί πλέον καμπύλες, τις C, D και E, οι οποίες απεικονίζονται στο σχήμα 3.13 και εξηγούνται ακολούθως. Η καμπύλη ψύξης C αντιπροσωπεύει έναν αργό ρυθμό ψύξης, που επιτυγχάνεται εντός ειδικών φούρνων, κατά τον οποίο όλος ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε περλίτη. Η καμπύλη D αντιπροσωπεύει ένα σχετικά γρήγορο ρυθμό, όχι όμως ικανό να προκαλέσει τον 100% μετασχηματισμό σε μαρτενσίτη. Από τη στιγμή που η καμπύλη ψύξης εισέρχεται εντός της περιοχής μετασχηματισμού, ένα μέρος του

ωστενίτη μετασχηματίζεται σε περλίτη ενώ το υπόλοιπο σε μαρτενσίτη. Με την καμπύλη D συγκεκριμένα, παράγεται 50% περλίτης (εφάπτεται της καμπύλης 50%) και 50% μαρτενσίτης.

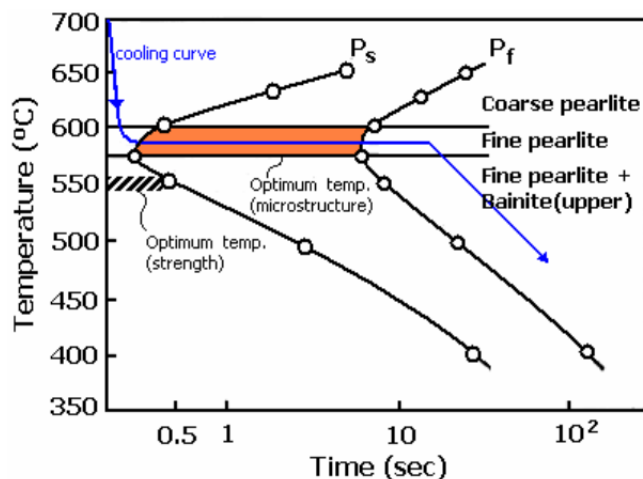


Σχήμα 3.13  
Καμπύλες Ψύξης C, D και E

Η καμπύλη E, αντιπροσωπεύει μια αρκετά ταχεία ψύξη που όμως διακόπτεται (οριζόντια γραμμή), λίγο χαμηλότερα από το γόνατο του διαγράμματος TTT, και διατηρείται ο χάλυβας σε σταθερή θερμοκρασία μέχρι τον πλήρη μετασχηματισμό του ωστενίτη σε μπαινίτη. Η διακοπή αυτή επιτυγχάνεται με εμβάπτιση του χάλυβα εντός λουτρών, συνήθως τηγμένων αλάτων.

### 3.1.2.1 Πατεντάρισμα (Patenting)

Πρόκειται για ειδική θερμική επεξεργασία των μεταλλικών ράβδων που προορίζονται για την παραγωγή συρμάτων. Πρωτοαναπτύχθηκε και αποτέλεσε καινοτομία (πατέντα) στη μεταλλουργία των χαλύβων το 1854 από τον James Horsfall στο Birmingham της Αγγλίας και εξακολουθεί ακόμη και σήμερα να ονομάζεται πατεντάρισμα. Αρχικά, στρογγυλεμένες ράβδοι χάλυβα θερμαίνονται εντός ειδικών φούρνων σε θερμοκρασία περίπου 970°C, όπου και επιτυγχάνεται η πλήρης ωστενοποίησή τους. Ακολουθεί ταχεία ψύξη του χάλυβα, περίπου μέχρι τους 575°C (γόνατο διαγράμματος TTT), με εμβάπτιση των ράβδων εντός λουτρού τηγμένου μολύβδου. Οι ράβδοι διατηρούνται στη θερμοκρασία αυτή μέχρι τον πλήρη μετασχηματισμό του ωστενίτη σε περλίτη, ή μίγμα περλίτη-μπαινίτη (σχήμα 3.14), και τέλος ψύχονται, με ψεκασμό αέρα ή νερού, μέχρι τη θερμοκρασία δωματίου. Στόχος της επεξεργασίας αυτής είναι η παραγωγή περλίτη, ο οποίος συνδυάζει τη σκληρότητα του σεμεντίτη με την ολκιμότητα του φερρίτη, με την κατά το δυνατόν λεπτότερη κρυσταλλική δομή, δηλαδή με τη μικρότερη δυνατή απόσταση μεταξύ πλακιδίων φερρίτη-σεμεντίτη. Η απόσταση μεταξύ των πλακιδίων μικραίνει καθώς μικραίνει η θερμοκρασία ψύξης και υπάρχει μια βέλτιστη θερμοκρασία, περίπου 550°C, για την οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή αντοχή των συρμάτων.



Σχήμα 3.14  
Καμπύλη Ψύξης κατά το Πατεντάρισμα

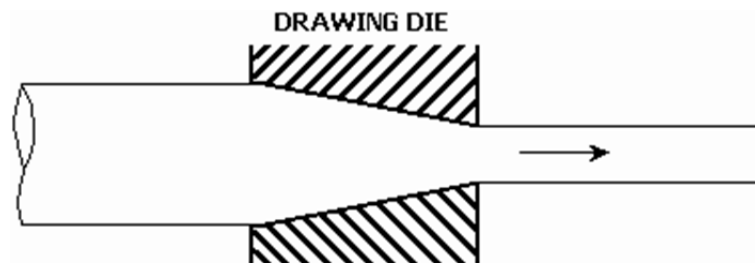
Τότε όμως μειώνεται η ικανότητα των αρχικών ράβδων να υπόκεινται σε μεγάλο ποσοστό μείωσης της αρχικής διατομής τους κατά τη συρματοποίηση, το οποίο μόνο μετά από την επεξεργασία του πατενταρίσματος μπορεί να φτάσει έως και το 90%. Η βέλτιστη θερμοκρασία για τη μέγιστη μείωση των διατομών κατά τη συρματοποίηση είναι περίπου 575oC.

### 3.1.2.2 Αποξειδωση (Descaling or Pickling)

Κατά το πατεντάρισμα η εξωτερική επιφάνεια των ράβδων οξειδώνεται. Ο καθαρισμός της γίνεται εντός δεξαμενών κρύου υδροχλωρικού οξέως, από τις οποίες διέρχονται οι ράβδοι. Στη συνέχεια, ξεπλένονται πολύ καλά με ψεκάσμο νερού και πριν από τη συρματοποίησή τους προστατεύεται η επιφάνειά τους με λεπτή επίστρωση μολύβδου η οποία λειτουργεί ως στερεό λιπαντικό.

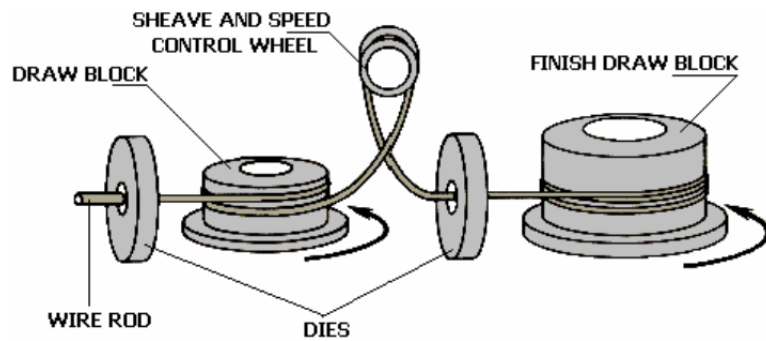
### 3.1.2.3 Έλκυση (Drawing)

Η συρματοποίηση είναι ψυχρή διεργασία κατά την οποία λαμβάνουν χώρα πλαστικές παραμορφώσεις στο χάλυβα και προσδίδονται, στα παραγόμενα σύρματα, τα τελικά μηχανικά χαρακτηριστικά τους. Η διεργασία αυτή περιλαμβάνει την έλκυση των ράβδων χάλυβα μέσα από μια σειρά οριζόντιων μητρών κωνικής μορφής (διάμετρος εξόδου < διάμετρο εισόδου), όπου κάθε μήτρα έχει μικρότερη διατομή από την προηγούμενή της, ενώ παράλληλα τα σύρματα ψύχονται με ψεκάσμο νερού ή αέρα προκειμένου να διατηρήσουν τις ιδιότητές τους.



Σχήμα 3.15  
Μήτρα Συρματοποίησης

Το ποσοστό μείωσης της διατομής ανά μήτρα είναι αρχικά μικρό (1-2%) και αυξάνει καθώς μειώνεται η διατομή (περίπου μέχρι 30%). Η συνήθης ταχύτητα έλκυσης είναι 30m/min και προκειμένου να διατηρηθεί, επειδή το μήκος των συρμάτων αυξάνει καθώς μειώνεται η διατομή τους, παρεμβάλλονται μεταξύ των μητρών τύμπανα περιέλιξης των συρμάτων διαμέτρου ανάλογης προς την αύξηση του μήκους (σχήμα 3.16). Η υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό των συρμάτων οφείλεται, κατά κύριο λόγο, στην περαιτέρω μείωση της απόστασης μεταξύ των πλακιδίων σεμεντίτη, λόγω της υψηλής πίεσης και συμπύκνωσης των πλακιδίων φερρίτη καθώς αυτά διέρχονται μέσα από τις μήτρες, καθώς και στην ευθυγράμμισή τους σε ίνες παράλληλες προς τον διαμήκη άξονα των συρμάτων. Σε αυτή την αναδιάταξη της κρυσταλλικής δομής του χάλυβα επιδρούν πολλοί παράγοντες, εκτός από την πρωταρχικής σημασίας διεργασία του πατενταρίσματος, όπως η ταχύτητα διέλευσης των συρμάτων μέσα από τις μήτρες, η γωνία κλίσης κάθε μήτρας (διαφορά διαμέτρου εισόδου-εξόδου), η ποσοστιαία μεταβολή της διατομής του σύρματος ανά μήτρα καθώς και οι αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια της συρματοποίησης. Η απαίτηση των βιομηχανιών παραγωγής συρμάτων για αύξηση του όγκου παραγωγής και μείωση του κόστους, η οποία συνεπάγεται υψηλότερες ταχύτητες συρματοποίησης και μειώσεις των διατομών ανά μήτρα αλλά και αύξηση της έκθεσης του υλικού στις παραγόμενες από τη διεργασία θερμοκρασίες, έχει οδηγήσει σε έρευνες σχετικές με την επίδραση των ανωτέρω παραγόντων στα τελικά μηχανικά χαρακτηριστικά των συρμάτων. Οι μέχρι τώρα έρευνες έχουν αποδείξει ότι η αύξηση τόσο της ταχύτητας όσο και της μείωσης της διατομής ανά μήτρα, αυξάνουν την εφελκυστική αντοχή των συρμάτων αλλά μειώνουν σημαντικά την ολκιμότητα με αποτέλεσμα τη θραύση των συρμάτων από στρέψη (delamination) κατά το στάδιο δημιουργίας των κλώνων. Σε ότι αφορά τη διατήρηση της θερμοκρασίας σε χαμηλά επίπεδα, έχει βρεθεί ότι η συνεχής διαβροχή των συρμάτων μειώνει έως και 10% την αντοχή σε εφελκυσμό, σε σχέση με την ψύξη των συρμάτων με εμβάπτισή τους εντός λουτρών τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ των μητρών συρματοποίησης. Ο γενικότερος στόχος των ερευνών είναι η εξαγωγή μαθηματικών σχέσεων και προσομοιωμάτων πεπερασμένων στοιχείων στα οποία να εφαρμόζονται οι παράμετροι της συρματοποίησης και να εξαγονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων συρμάτων.



Σχήμα 3.16  
Διάταξη Μήτρων και Τύμπανων κατά τη Συρματοποίηση

#### 3.1.2.4 Γαλβάνισμα (Galvanising or Zinc Coating)

Το γαλβάνισμα είναι μια προαιρετική διεργασία και αποτελεί ένα μέσο προστασίας των εκτιθέμενων σε διαβρωτικό περιβάλλον συρμάτων. Συνίσταται στη δημιουργία λεπτού προστατευτικού στρώματος μετάλλου μέσω εμβάπτισης των συρμάτων σε λουτρό τηγμένου ψευδαργύρου (Zn). Η εφαρμογή του μπορεί να γίνεται είτε μετά τη συρματοποίηση (galvanized to finished size wire), είτε πριν (drawn galvanized wire). Όταν εφαρμόζεται μετά τη συρματοποίηση, τα σύρματα παράγονται με λίγο μικρότερες διαμέτρους από τις ονομαστικές τους καθώς αυτές επιτυγχάνονται μετά την επίστρωση του ψευδαργύρου. Τα παραγόμενα με αυτή τη μέθοδο γαλβανισμένα σύρματα, και συνακολούθως τα καλώδια, έχουν κατά 10% περίπου μικρότερη εφελκυστική αντοχή από τα αντίστοιχης διαμέτρου μη γαλβανισμένα. Όταν εφαρμόζεται πριν από τη συρματοποίηση επιτυγχάνονται μικρότερα πάχη επικάλυψης με καλύτερη πρόσφυση στο προστατευόμενο μέταλλο. Η αντοχή σε εφελκυσμό των γαλβανισμένων με αυτό τον τρόπο συρμάτων είναι ακριβώς ή ίδια με αυτή των μη γαλβανισμένων (bright wires).

#### 3.1.2.5 Έλεγχος (Inspection after Galvanising)

Αμέσως μετά το γαλβάνισμα, ή μετά από τη συρματοποίηση όταν αυτό παραλείπεται, και πριν τη δημιουργία των κλώνων ελέγχεται η εφελκυστική αντοχή των συρμάτων, η ανηγμένη επιμήκυνσή τους, η διάμετρός τους καθώς και το πάχος και η πρόσφυση της προστατευτικής επίστρωσής τους. Τα απορριπτέα σύρματα επιστρέφονται σε χυτήρια και τα αποδεκτά προετοιμάζονται για την κατασκευή των κλώνων.

#### 3.1.2.6 Περιέλιξη (Winding)

Πρόκειται για το τύλιγμα των συρμάτων σε ειδικά διαμορφωμένες μπομπίνες οι οποίες τοποθετούνται ακολούθως στις μηχανές κατασκευής των κλώνων.

#### 3.1.2.7 Κατασκευή Κλώνων (Stranding)

Η κατασκευή των κλώνων πραγματοποιείται σε ειδικές μηχανές (σχήμα 3.17) με περιέλιξη δύο ή περισσότερων συρμάτων μεταξύ τους με διάφορους τρόπους. Το πλήθος των συρμάτων ανά κλώνο καθορίζει την κατηγορία του κλώνου η οποία είναι πάντα 1xη, όπου η είναι το πλήθος των χρησιμοποιούμενων συρμάτων. Δηλαδή κλώνος 1x7 σημαίνει ότι αποτελείται από επτά σύρματα.

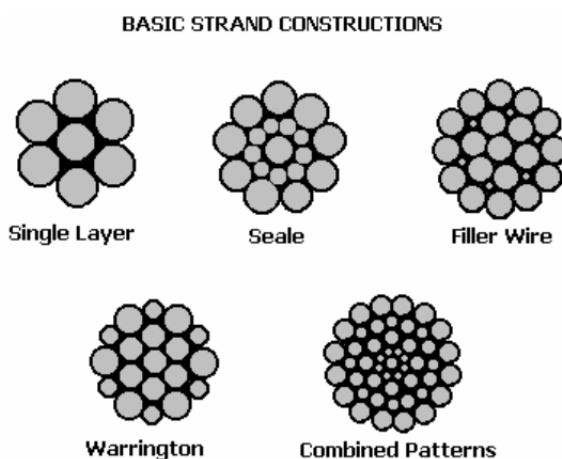
Ο τρόπος περιέλιξης καθορίζει τον τύπο του κλώνου, εκ των οποίων οι βασικότεροι απεικονίζονται στο σχήμα 3.18 και είναι οι μονόστρωτοι κλώνοι (single layer strand), οι δίστρωτοι με ίδιο πλήθος συρμάτων ανά στρώση (seale strand), οι δίστρωτοι με ίδιας διαμέτρου σύρματα ανά στρώση (filler wire strand), οι δίστρωτοι με διαφορετικής διαμέτρου σύρματα στην εξωτερική στρώση (warrington strand) και οι πολύστρωτοι κλώνοι (combined patterns strand).

Οι συνηθέστεροι μονόστρωτοι κλώνοι είναι οι 1x7 οι οποίοι αποτελούνται από ένα κεντρικό σύρμα γύρω από το οποίο τυλίγονται έξι σύρματα, όλα της ίδιας διαμέτρου. Οι δίστρωτοι κλώνοι με ίδιο πλήθος συρμάτων ανά στρώση, σχεδιάζονται έτσι ώστε τα μεγαλύτερης διαμέτρου σύρματα της εξωτερικής στρώσης να εφάπτονται στην κοιλότητα που δημιουργούν ανά δύο οι κλώνοι της εσωτερικής στρώσης. Χαρακτηριστικό των δίστρωτων κλώνων, με ίδιας διαμέτρου σύρματα ανά στρώση, είναι ότι η εσωτερική αποτελείται από τα μισά σε πλήθος σύρματα, σε σχέση με την εξωτερική, και ότι μεταξύ των δύο στρώσεων τοποθετούνται μικρότερα σύρματα τέτοια ώστε να εφάπτονται της κοιλότητας που δημιουργείται μεταξύ τεσσάρων συρμάτων, δύο της εσωτερικής και δύο της εξωτερικής στρώσης. Οι δίστρωτοι κλώνοι τύπου Warrington, αποτελούνται από ίδιας διαμέτρου σύρματα στην εσωτερική στρώση και από σύρματα δύο διαφορετικών διαμέτρων στην εξωτερική, εναλλάξ τοποθετημένα μεταξύ

τους, έτσι ώστε τα μεγαλύτερης διαμέτρου να εφάπτονται στις κοιλότητες των συρμάτων της εσωτερικής στρώσης ενώ τα μικρότερης διαμέτρου να εφάπτονται στις κορυφές αυτών. Οι πολύστρωτοι κλώνοι κατασκευάζονται έτσι ώστε να συνδυάζουν τουλάχιστον δύο από τους προηγούμενους τύπους.



Σχήμα 3.17  
Μηχανή Κατασκευής Κλώνων (Stranding Machine)



Σχήμα 3.18  
Τρόπος περιέλιξης

#### 3.1.2.8 Έλεγχος (Inspection after Stranding)

Μετά από την κατασκευή των κλώνων ελέγχεται η αντοχή θραύσης τους και η ποιότητα περιέλιξης των συρμάτων. Η αντοχή θραύσης κάθε παρτίδας κλώνων προκύπτει με δειγματοληπτικό έλεγχο και θραύση των δοκιμίων, σύμφωνα με τους κανονισμούς και τις προδιαγραφές της χώρας παραγωγής. Η ποιότητα περιέλιξης των συρμάτων ελέγχεται με μέτρηση του μήκους μιας πλήρους περιστροφής του σύρματος γύρω από τον διαμήκη άξονα του κλώνου.

#### 3.1.2.9 Διαμόρφωση Καλωδίων (Closing or Roping)

Οι κλώνοι οι οποίοι δεν διατίθενται για απευθείας χρήση αλλά προορίζονται για κατασκευή καλωδίων, τυλίγονται σε ειδικές μπομπίνες και οδηγούνται σε μηχανές κατασκευής καλωδίων (closing machines), παρόμοιες με αυτές της κατασκευής κλώνων. Οι παραγόμενοι τύποι καλωδίων αναπτύσσονται σε επόμενη παράγραφο. Μετά από την κατασκευή των καλωδίων ακολουθούν και πάλι έλεγχοι από τους οποίους καθορίζονται τα τελικά μηχανικά χαρακτηριστικά τους.

### 3.1.2.10 Συσκευασία (Packing)

Η συσκευασία των καλωδίων γίνεται σε μπομπίνες μεγάλης εσωτερικής διαμέτρου ώστε να αποφεύγονται οι έντονες καμπυλότητες οι οποίες δημιουργούν τσακίσματα. Οι μπομπίνες αυτές είναι είτε ξύλινες είτε μεταλλικές από τραπεζοειδή λαμαρίνα (σχήμα 3.19) με την οποία επιτυγχάνεται μείωση του βάρους. Μετά την περιέλιξη των καλωδίων θα πρέπει να προσαρμόζονται κατάλληλα καλύμματα στα καρούλια ώστε τα καλώδια να μένουν ανέπαφα από άλλα αντικείμενα κατά τη μεταφορά και να μην εκτίθενται στα διάφορα καιρικά φαινόμενα μέχρι την εγκατάστασή τους.



Σχήμα 3.19  
Μπομπίνες Συσκευασίας Καλωδίων

### 3.1.3 ΤΥΠΟΙ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

Η συνεχής αύξηση της χρήσης των καλωδίων στις κατασκευές αλλά και οι διαφορετικές απαιτήσεις κάθε κατασκευής από καλώδια, έχουν οδηγήσει σε μια αρκετά μεγάλη ποικιλία παραγόμενων τύπων καλωδίου. Οι κύριες απαιτήσεις τις οποίες καλείται να καλύψει ένα καλώδιο είναι :

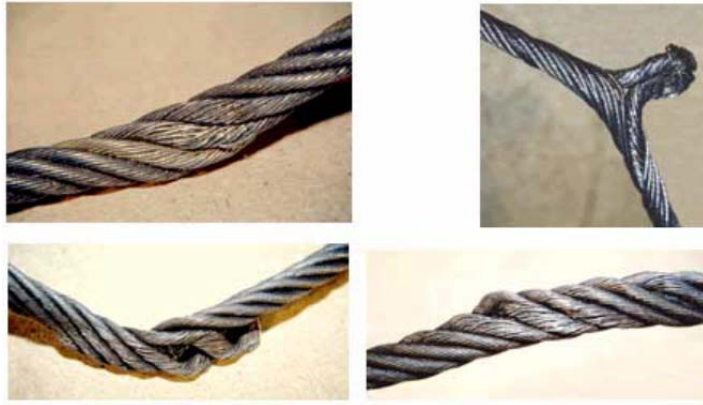
**Αντοχή σε Εφελκυσμό (Tensile Strength).** Το καλώδιο πρέπει να αντέξει τη μέγιστη εφελκυστική δύναμη στην οποία τυχόν θα υποβληθεί, λαμβάνοντας πάντα υπόψη και ένα συντελεστή ασφαλείας.

**Αντίσταση σε Κόπωση (Fatigue Resistance).** Με την αντίσταση σε κόπωση εκφράζεται η ικανότητα του καλωδίου να καμπυλώνεται επαναλαμβανόμενα ενώ είναι υπό ένταση. Αφορά κυρίως τις περιπτώσεις όπου κατά τη λειτουργία τους τα καλώδια περνάνε ή τυλίγονται γύρω από τύμπανα αλλά και τις τοπικές κάμψεις στις θέσεις στηρίξεών τους και στις θέσεις επιβολής εγκάρσιων φορτίων. Η αύξηση της αντίστασης σε κόπωση επιτυγχάνεται με αντίστοιχη αύξηση του πλήθους των συρμάτων που συνθέτουν την διατομή του καλωδίου. Δηλαδή, μεταξύ δύο καλωδίων ίδιας διαμέτρου μεγαλύτερη αντίσταση παρουσιάζει αυτό με τα περισσότερα και λεπτότερα σύρματα. Για τη μείωση των φαινομένων κόπωσης χρησιμοποιούνται, στις θέσεις κάμψεως των καλωδίων, εξαρτήματα κατάλληλης ακτίνας καμπυλότητας.

**Αντοχή σε Σύνθλιψη (Crushing Strength).** Ως σύνθλιψη εννοείται το τοπικό μόνιμο τσάκισμα των καλωδίων εξαιτίας εξωτερικής, εγκάρσιας στο διαμήκη άξονά τους, πίεσης καθώς επίσης και εξαιτίας της πίεσης που προκαλούν τα εξωτερικά σύρματα στα εσωτερικότερα καθώς εφελκύνονται, λόγω της ελικοειδούς μορφής τους. Πρόκειται για αλλαγή (στρέβλωση) του σχήματος της διατομής κάποιου σύρματος ή κλώνου ή του πυρήνα ή όλων μαζί, η οποία εμποδίζει την ταυτόχρονη λειτουργία όλων των στοιχείων που συνθέτουν το καλώδιο με αποτέλεσμα την αστοχία λόγω συγκέντρωσης τάσεων.

**Αντίσταση σε Τριβή (Abrasion Resistance).** Είναι η αντίσταση σε φθορά του μετάλλου των εξωτερικών συρμάτων η οποία προκαλείται από την επαφή του καλωδίου με άλλα στοιχεία κατά τη φάση λειτουργίας του. Η φθορά του μετάλλου, εκτός από την απομείωση της διατομής των συρμάτων, τα καθιστά ευπαθέστερα σε οξειδώσεις. Επιπλέον ευνοεί τη συγκέντρωση τάσεων καθώς η διατομή τοπικά χάνει την κυκλική μορφή της και επιτεδώνεται εμποδίζοντας την ομαλή κάμψη του καλωδίου.

**Αντίσταση σε Διάβρωση (Corrosion Resistance).** Πρόκειται για την ικανότητα του μετάλλου των καλωδίων να μην οξειδώνεται όταν βρίσκεται σε διαβρωτικό περιβάλλον.



Σχήμα 3.20  
Αστοχία Καλωδίων από Σύνθλιψη

Η δυσκολία στην ταυτόχρονη κάλυψη των απαιτήσεων αυτών αναπόφευκτα οδηγεί στην παραγωγή διαφόρων τύπων καλωδίου, κάθε ένας από τους οποίους κρίνεται κατάλληλος για ορισμένες εφαρμογές.

Οι βασικές παράμετροι που καθορίζουν τον τύπο κάθε καλωδίου είναι :

- (α) Η αντοχή των συρμάτων
- (β) Η τελική επιφάνεια των συρμάτων
- (γ) Η φορά περιέλιξης των συρμάτων σε κλώνους και των κλώνων σε καλώδια
- (δ) Το είδος του πυρήνα του καλωδίου
- (ε) Το πλήθος και η διάταξη των χρησιμοποιούμενων κλώνων.

#### 3.1.3.1 Αντοχή Συρμάτων

Με την ειδική θερμική επεξεργασία στην οποία υπόκειται ο χάλυβας κατά την παραγωγή των συρμάτων (§3.1.2) και με την οποία ρυθμίζεται η αντοχή τους, παράγονται έξι κατηγορίες αντοχής συρμάτων. Είναι τα σύρματα αντοχής 1370MPa, 1470MPa, 1570MPa, 1770MPa, 1960MPa και 2260MPa. Ανάλογα με την κατηγορία των χρησιμοποιούμενων συρμάτων, ο τύπος των καλωδίων σε ότι αφορά την αντοχή του χάλυβα (grade of wire rope) μπορεί να είναι :

- Καλώδια TS (*Traction Steel wire ropes*) για τα οποία χρησιμοποιούνται σύρματα αντοχής 1370MPa.
- Καλώδια MPS (*Mild Plow Steel wire ropes*) για τα οποία χρησιμοποιούνται σύρματα αντοχής 1470MPa.
- Καλώδια PS (*Plow Steel wire ropes*) για τα οποία χρησιμοποιούνται σύρματα αντοχής 1570MPa.
- Καλώδια IPS (*Improved Plow Steel wire ropes*) για τα οποία χρησιμοποιούνται σύρματα αντοχής 1770MPa.
- Καλώδια EIPS (*Extra Improved Plow Steel wire ropes*) για τα οποία χρησιμοποιούνται σύρματα αντοχής 1960MPa.
- Καλώδια EEIPS (*Extra Extra Improved Plow Steel wire ropes*) για τα οποία χρησιμοποιούνται σύρματα αντοχής 2260MPa.

Τα καλώδια EEIPS κατασκευάζονται για πολύ ειδικές εφαρμογές όπου ο σχεδιασμός απαιτεί πολύ μικρό ίδιο βάρος καλωδίου σε σχέση με την εφελκυστική αντοχή του.

### 3.1.3.2 Τελική Επιφάνεια

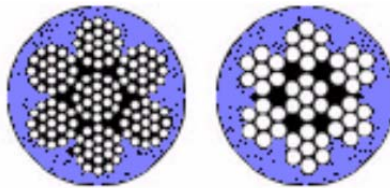
Η τελική επιφάνεια των καλωδίων (coating) εξαρτάται από το πόσο διαβρωτικό είναι το περιβάλλον στο οποίο πρόκειται αυτό να χρησιμοποιηθεί και ανάλογα με αυτή διακρίνονται οι εξής τύποι καλωδίου :

- *Ανεπένδυτα καλώδια (Bright or Uncoated)* των οποίων η αντίσταση σε οξειδωση είναι σχετικά μικρή και αποφεύγεται η χρήση τους σε διαβρωτικό περιβάλλον. Τα καλώδια αυτά χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου η μηχανική φθορά τους απαιτεί τόσο συχνή αντικατάστασή ώστε να μην προλαβαίνουν να διαβρωθούν (ανελκυστήρες, ανυψωτικά μηχανήματα, κ.α.).

- *Γαλβανισμένα καλώδια (Galvanized wire ropes)*. Το γαλβάνισμα παρέχει αρκετά καλή προστασία έναντι διαβρώσεων ανάλογη του πάχους της προστατευτικής επίστρωσης. Ως επίστρωση, υπόκειται σε φθορές και απαιτείται συχνό έλεγχο και αν χρειάζεται επιδιόρθωση.

- *Καλώδια ανοξειδωτων συρμάτων (Stainless Steel wire ropes)*. Η προστασία έναντι διάβρωσης παρέχεται από το ίδιο το κράμα χάλυβα, το οποίο περιέχει περίπου 18% χρώμιο και 8% νικέλιο. Έχει σημαντικά αυξημένο κόστος και χρησιμοποιείται σε περιορισμένου εύρους κατασκευές και κυρίως σε περιπτώσεις όπου η επαφή με θαλασσινό νερό είναι άμεση, όπως για παράδειγμα οι επίτονοι ιστιοπλοϊκών σκαφών. Εξαιτίας του χρώματος του ανοξειδωτου χάλυβα, χρησιμοποιείται και όταν αρχιτεκτονικοί λόγοι το επιβάλουν.

- *Καλώδια επενδυμένα με πολυμερή πλαστικά (Compound Coating wire ropes)*. Καλώδια επενδυμένα με πλαστικά χρησιμοποιούνται σε έντονα διαβρωτικό περιβάλλον όπου το γαλβάνισμα δεν είναι αρκετό. Τα συνηθέστερα πλαστικά επικάλυψης καλωδίων είναι το PVC (χλωριούχο πολυβινύλιο), διαφόρων ειδών NYLON (θερμοπλαστικά ελαστομερή) και το TEFLON. Η επένδυση γίνεται με την εκτόξευση τηγμένου πλαστικού υπό πίεση πάνω στην επιφάνεια του καλωδίου, το οποίο αφού ψυχθεί σχηματίζει με το καλώδιο ένα ενιαίο σώμα. Πολλές φορές εφαρμόζεται επί γαλβανισμένων καλωδίων για μεγαλύτερη προστασία.



Σχήμα 3.21  
Διατομή Επενδυμένων Καλωδίων

Η επένδυση με PVC είναι η οικονομικότερη από τις πλαστικές επενδύσεις των καλωδίων, προσφέρεται σε αρκετά χρώματα και είναι πολύ ανθεκτική στην ηλιακή έκθεση. Δεν πρέπει να εφαρμόζεται σε περιπτώσεις όπου τα καλώδια υπόκεινται σε τριβές γιατί φθείρεται εύκολα. Οι επενδύσεις με NYLON είναι αρκετών ειδών αλλά κάθε είδος προσφέρει προστασία έναντι πολύ συγκεκριμένων διαβρωτικών παραγόντων ενώ είναι ευπαθές έναντι άλλων. Οι τύποι όμως στους οποίους προσφέρεται, καλύπτουν απαιτήσεις που κυμαίνονται από έκθεση σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες έως έκθεση σε κάθε είδους χημικά. Η επένδυση με TEFLON είναι από τις ακριβότερες λύσεις προστασίας, αλλά προσφέρει ταυτόχρονη προστασία έναντι υψηλών θερμοκρασιών, χημικών και τριβών.

### 3.1.3.3 Φορά Περιέλιξης

Η φορά περιέλιξης των συρμάτων σε κλώνους ή των κλώνων σε καλώδια μπορεί να είναι είτε δεξιόστροφη (right lay) είτε αριστερόστροφη (left lay). Η φορά περιέλιξης συρμάτων και κλώνων συνδυάζονται μεταξύ τους σε έξι διαφορετικές διατάξεις σχηματίζοντας έξι τύπους καλωδίων :

- *Καλώδια RRL (Right Regular Lay wire ropes)* όπου η περιέλιξη των κλώνων σε καλώδιο είναι δεξιόστροφη ενώ των συρμάτων σε κλώνο αριστερόστροφη (σχήμα 3.22.a).

- *Καλώδια LRL (Left Regular Lay wire ropes)* όπου η περιέλιξη των κλώνων σε καλώδιο είναι αριστερόστροφη ενώ των συρμάτων σε κλώνο δεξιόστροφη (σχήμα 3.22.b).

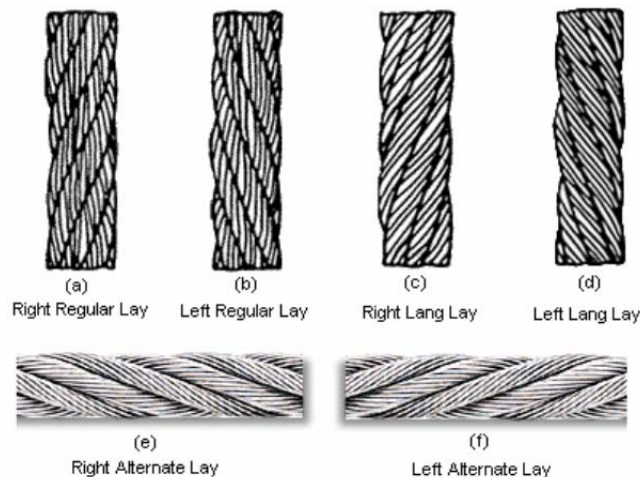


• Καλώδια RLL (*Right Lang Lay wire ropes*) όπου η φορά περιέλιξης συρμάτων και κλώνων είναι δεξιόστροφη (σχήμα 3.22.c).

• Καλώδια LLL (*Left Lang Lay wire ropes*) όπου η φορά περιέλιξης συρμάτων και κλώνων είναι αριστερόστροφη (σχήμα 3.22.d).

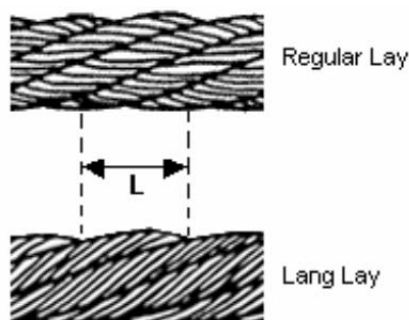
• Καλώδια R-ALT (*Right Alternate lay wire ropes*) όπου η περιέλιξη των κλώνων σε καλώδιο είναι δεξιόστροφη ενώ των συρμάτων σε κλώνο εναλλάσσεται, από κλώνο σε κλώνο, από δεξιόστροφη σε αριστερόστροφη (σχήμα 3.22.e).

• Καλώδια L-ALT (*Left Alternate lay wire ropes*) όπου η περιέλιξη των κλώνων σε καλώδιο είναι αριστερόστροφη ενώ των συρμάτων σε κλώνο εναλλάσσεται, από κλώνο σε κλώνο, από δεξιόστροφη σε αριστερόστροφη (σχήμα 3.22.f).



Σχήμα 3.22  
Φορά Περιέλιξης Συρμάτων και Κλώνων

Χαρακτηριστικό της αντίθετης περιέλιξης συρμάτων και κλώνων (Regular Lay) είναι ότι τα σύρματα είναι τελικώς παράλληλα με τον διαμήκη άξονα του καλωδίου και οι κλώνοι σχηματίζουν γωνία με αυτόν. Αντίστοιχα, στην ομόφορη περιέλιξη συρμάτων και κλώνων (Lang Lay) τόσο τα σύρματα όσο και οι κλώνοι σχηματίζουν γωνία με τον διαμήκη άξονα του καλωδίου. Τα καλώδια ομόφορης περιέλιξης (LL), έναντι των αντίθετης περιέλιξης (RL), είναι ανθεκτικότερα σε καμπτική κόπωση (bending fatigue) και σε τριβή (abrasion). Η υπεροχή στην καμπτική κόπωση οφείλεται στο μεγαλύτερο μήκος των εξωτερικών τους συρμάτων (10% έως 15% μεγαλύτερο μήκος) καθώς και στη γωνία κλίσης που αυτά σχηματίζουν με τον διαμήκη άξονα του καλωδίου. Λόγω των χαρακτηριστικών αυτών, τα εξωτερικά σύρματα των LL καλωδίων καμπυλώνονται με μικρότερη ακτίνα καμπυλότητας από αυτή του διαμήκη άξονα του καλωδίου, ενώ στην περίπτωση των RL η ακτίνα καμπυλότητας είναι η ίδια. Η υπεροχή στην τριβή οφείλεται στη γωνία κλίσης που σχηματίζουν τα εξωτερικά σύρματα με το διαμήκη άξονα του καλωδίου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 3.23, για ένα μήκος επαφής L του καλωδίου σε κάποια άλλη επιφάνεια (π.χ. σε κάποια τροχαλία), κάθε σύρμα ενός RL καλωδίου υπόκειται σε τριβή για μήκος L ενώ περισσότερα σύρματα αλλά σε μικρότερη έκταση υπόκεινται σε τριβή στην περίπτωση του LL καλωδίου.



Σχήμα 3.23  
Μήκος Τριβής Συρμάτων Καλωδίων RL και LL

Βέβαια, εξαιτίας της γωνίας κλίσης μεταξύ των συρμάτων ενός καλωδίου LL και του διαμήκη άξονα του καλωδίου, η διατομή του είναι ευπαθέστερη σε στρεβλώσεις και επομένως έχουν μικρότερη αντίσταση σε σύνθλιψη (crushing resistance) από τα RL καλώδια. Αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στην άνω δεξιά φωτογραφία του σχήματος 3.20, η οποία αντιπροσωπεύει αστοχία από σύνθλιψη ενός καλωδίου LL.

#### 3.1.3.4 Πυρήνας Καλωδίου

Ο πυρήνας (core) αποτελεί τη «θεμελίωση» του καλωδίου. Σκοπός του είναι να στηρίζει τους γύρω από αυτόν κλώνους καθώς το καλώδιο κινείται ή κάμπτεται υπό ένταση. Οι χρησιμοποιούμενοι πυρήνες είναι τριών ειδών και ανάλογα με αυτούς τα καλώδια μπορεί να είναι :

- *Καλώδια I.W.R.C. (Independent Wire Rope Core)*. Πρόκειται για καλώδια με πυρήνα ένα ανεξάρτητο καλώδιο μικρότερης διατομής.

- *Καλώδια W.S.C. ή S.C. (Wire Strand Core or Steel Core)*. Στα καλώδια αυτά τον πυρήνα αποτελεί ένας κλώνος, ίδιου ή άλλου τύπου από τους υπόλοιπους κλώνους του καλωδίου.

- *Καλώδια F.C. ή S.C. (Fiber Core)* στα οποία τον πυρήνα αποτελούν ίνες φυτικές (natural fibers) ή συνθετικές (synthetic fibers). Οι φυτικές ίνες που χρησιμοποιούνται στα καλώδια μπορεί να είναι είτε από φύλλα φυτού «abaca», παρόμοια με τα φύλλα μπανανιάς (manila fibers), είτε από φύλλα του κακτοειδούς φυτού «αθάνατος» ή αλλιώς «agave sisalana» (sisal fibers), είτε από φύλλα καννάβεως (hemp fibers). Οι συνθετικές ίνες μπορεί να είναι είτε από πολυπροπυλένιο (polypropylene fibers) είτε από πολυβινύλιο (polyvinyl fibers) είτε από νάιλον (nylon fibers).

Γενικότερα, τα καλώδια I.W.R.C. και W.S.C. είναι περισσότερο ανθεκτικά στη σύνθλιψη, στις υψηλές θερμοκρασίες και έχουν κατά 15% περίπου μεγαλύτερες αντοχές από τα αντίστοιχων διαμέτρων καλώδια F.C. Τα καλώδια F.C. είναι περισσότερο εύκαμπτα (flexible).

#### 3.1.3.5 Πλήθος και Διάταξη Κλώνων

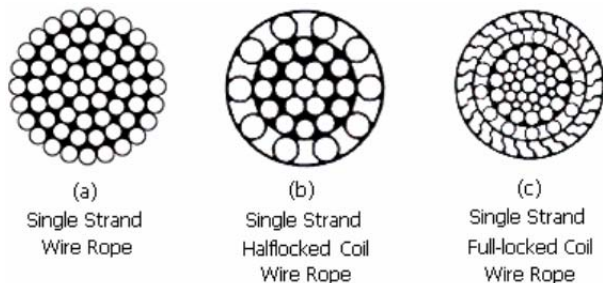
Η κατασκευή των καλωδίων ποικίλει τόσο ως προς το πλήθος των χρησιμοποιούμενων συρμάτων, όσο και ως προς τη διάταξη αυτών σε κλώνους. Σε ότι αφορά το πλήθος των συρμάτων, τα καλώδια ταξινομούνται σε τέσσερις βασικές κατηγορίες :

Κατηγορία Καλωδίου	Σύρματα ανά Κλώνο
6 X 7	7 έως 15
6 X 19	16 έως 26
6 X 37	27 έως 49
6 X 61	50 έως 76

Οι κατηγορίες αυτές αναφέρονται στα καλώδια 6 κλώνων (6 x) και είναι ίδιες και για τα καλώδια 8 κλώνων (8 x). Σε κάθε κατηγορία, όλα τα καλώδια ίδιας διαμέτρου, ποιότητας χάλυβα (grade) και πυρήνα, έχουν την ίδια εφελκυστική αντοχή και το ίδιο βάρος ανά τρέχον μέτρο.

Ως προς τη διάταξη των κλώνων, διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες καλωδίων :

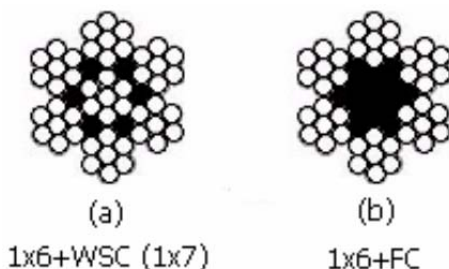
- *Μονόκλινα καλώδια (Single Strand wire ropes or Single Strands or Spiral Strands)*. Χαρακτηριστικό των καλωδίων αυτών είναι ότι αποτελούνται από διάφορες στρώσεις συρμάτων, περιελιγμένων γύρω από κάποιο κεντρικό σύρμα, χωρίς τα σύρματα να είναι διατεταγμένα σε κλώνους (σχήμα 3.24). Η διάμετρός τους κυμαίνεται από 0,5mm (εξαιρετικά λεπτά καλώδια ελέγχου συστημάτων μηχανημάτων) έως 100mm, ή περισσότερο (επίτονοι και καλώδια γεφυρών). Στην κατηγορία αυτή, ανήκουν και τα ημισυμπαγή (half locked coil) ή συμπαγή (full locked coil) καλώδια. Αυτά αποτελούνται από ομόκεντρες στρώσεις ειδικά διαμορφωμένων (ως προς το σχήμα) συρμάτων, οι οποίες αναπτύσσονται γύρω από τα κυκλικά σύρματα του πυρήνα. Η ειδική διαμόρφωση των συρμάτων έγκειται στις εγκοπές και τις προεξοχές τους, ώστε κάθε σύρμα να εισχωρεί στο δίπλανό του, δίνοντας την εντύπωση συμπαγούς κατασκευής. Οι στρώσεις είναι εναλλασσόμενης περιέλιξης μια δεξιόστροφη και μια αριστερόστροφη.



Σχήμα 3.24  
Μονόκλιωνα Καλώδια

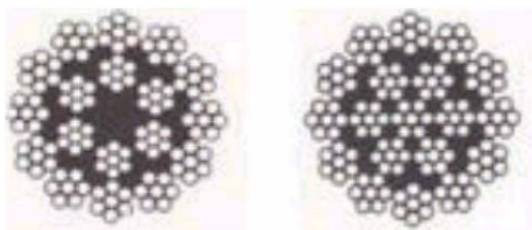
Στόχος του σχεδιασμού αυτού ήταν η ελαχιστοποίηση των επιμηκύνσεων και η αποφυγή της περιστροφής (spin) του σύρματος γύρω από τον άξονά του. Τα μειονεκτήματα της μορφής αυτής είναι η πολύ μικρή αντοχή σε καμπτική κυρίως κόπωση και η μικρή αντίσταση σε διάβρωση, και ενώ μέχρι το 1965 ήταν ο κατ' αποκλειστικότητα χρησιμοποιούμενος τύπος καλωδίου στην κατασκευή γεφυρών, τείνει να αντικατασταθεί πλήρως από καλώδια παράλληλων συρμάτων.

- *Καλώδια μίας στρώσης κλώνων (Single Layer Stranded wire ropes).* Τα καλώδια αυτά αποτελούνται από μια στρώση τεσσάρων, έξι, οκτώ ή εννέα κλώνων οι οποίοι τυλίγονται δεξιόστροφα ή αριστερόστροφα γύρω από ένα πυρήνα που μπορεί να είναι είτε I.W.R.C., είτε W.R.C. είτε F.C. Η αύξηση του πλήθους των κλώνων καθιστά το καλώδιο πιο εύκαμπτο αλλά μικρότερης εφελκυστικής αντοχής και αντοχής σε σύνθλιψη. Τα καλώδια εννέα κλώνων είναι πολύ πιο εύκαμπτα αλλά παρουσιάζουν 20% μικρότερη εφελκυστική αντοχή από τα αντίστοιχης διαμέτρου έξι κλώνων. Η μείωση του πλήθους των κλώνων αντιστοιχεί σε μείωση της τάσης του καλωδίου να περιστρέφεται γύρω από τον άξονά του. Γενικά, ο τύπος των έξι κλώνων είναι αυτός που συνδυάζει καλύτερα την εφελκυστική αντοχή, την αντοχή σε σύνθλιψη και την αντίσταση σε τριβή και είναι ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος σε εφαρμογές όπως ανελκυστήρες, ανυψωτικά μηχανήματα, τελεφερίκ, κιγκλιδώματα ασφαλείας και επίτονοι ιστιοπλοϊκών σκαφών.



Σχήμα 3.25  
Καλώδια μίας Στρώσης Κλώνων

- *Καλώδια πολλών στρώσεων κλώνων μη περιστρεφόμενα (Multi Strand non-spin Ropes).* Όταν ένα καλώδιο μίας στρώσης κλώνων υποβάλλεται σε εφελκυσμό, τείνει να ξετυλιχθεί. Το πρόβλημα είναι πολύ εντονότερο όταν το ένα άκρο του καλωδίου είναι ελεύθερο (π.χ καλώδιο ανύψωσης φορτίων γερανού). Τα μη περιστρεφόμενα καλώδια αποτελούνται από τουλάχιστον δύο στρώσεις κλώνων, εκ των οποίων η μία είναι αντίθετης φοράς από την άλλη. Με αυτή την κατασκευή επιτυγχάνεται περιστροφική ισορροπία αφού ο επιβαλλόμενος εφελκυσμός τείνει να ξετυλίξει τη μία στρώση και να περιελίξει την άλλη. Στα περισσότερων των δύο στρώσεων κλώνων καλώδια, κάθε στρώση είναι αντίθετη της άλλης.



Σχήμα 3.26  
Πολλών Στρώσεων Μη Περιστρεφόμενα Καλώδια

### 3.1.4 ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

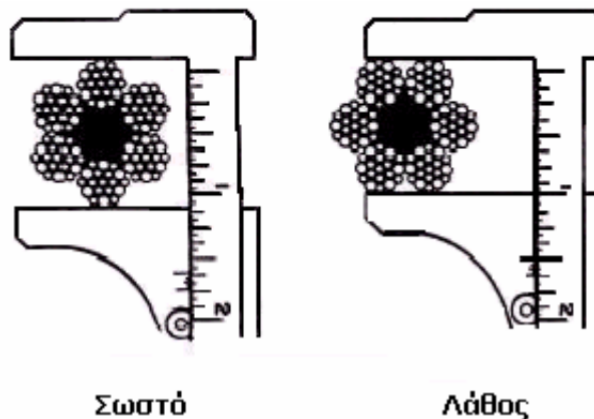
Όπως προκύπτει από τα ανωτέρω, στην αγορά διατίθεται ένα μεγάλο πλήθος τύπων καλωδίων. Προκειμένου λοιπόν να περιγραφεί με ακρίβεια κάποιος τύπος καλωδίου, ειδικά όταν πρόκειται για παραγγελία, πρέπει υποχρεωτικά να αναφέρονται :

- Το μήκος του καλωδίου
- Η διάμετρός του
- Η φορά περιέλιξης
- Η τελική επιφάνεια
- Η ποιότητα χάλυβα των συρμάτων και
- Ο τύπος του πυρήνα

Για παράδειγμα, μια πλήρης περιγραφή ενός καλωδίου μπορεί να έχει ως εξής :

**1500m 20mm 6x19 WS RRL IPS WSC**

Η περιγραφή αυτή σημαίνει 1500m καλώδιο, διαμέτρου 20mm, αποτελούμενο από 6 κλώνους Warrington 19 συρμάτων ο κάθε ένας, δεξιόστροφης περιέλιξης συρμάτων και κλώνων, ποιότητας χάλυβα 1960MPa, με πυρήνα κλώνο. Έχει επιπλέον καθιερωθεί ότι, όταν η φορά περιέλιξης δεν διευκρινίζεται εννοείται RRL. Επίσης όταν η τελική επιφάνεια δεν αναφέρεται το καλώδιο εννοείται ανεπένδυτο (bright). Τέλος, η σωστά μετρούμενη διάμετρος ενός καλωδίου απεικονίζεται στο σχήμα 2.27.



Σχήμα 3.27  
Μέτρηση Διαμέτρου Καλωδίου

### 3.1.5 ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

Στην παρούσα ενότητα, παρατίθενται πίνακες εφελκυστικών αντοχών ορισμένων τύπων κλώνων και καλωδίων. Ο προτεινόμενος συντελεστής ασφαλείας σε ότι αφορά την εφελκυστική αντοχή των καλωδίων, σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 3 (EC3.3) περί «Εφελκυσόμενων Μελών Υψηλής Αντοχής και Επίτονων Ιστών», είναι  $\gamma_M=1.8$ . Σύμφωνα με Αμερικάνικους Κανονισμούς, ο συντελεστής αυτός ορίζεται (α) 2.2 για εφελκυστικά φορτία λόγω ιδίου βάρους, προέντασης και κινητού φορτίου (χιονιού ή λειτουργίας), (β) 2.0 για φορτία λόγω ιδίου βάρους, προέντασης, κινητού φορτίου (χιονιού ή λειτουργίας), και ανέμου ή σεισμού. Το προτεινόμενο μέτρο ελαστικότητας σύμφωνα με τον EC3.3 είναι (α)  $E=200\text{GPa}$  για μεμονωμένα σύρματα ή για καλώδια παράλληλων συρμάτων, (β)  $E=170\text{GPa}$  για συμπαγή ή ημισυμπαγή μονόκλινα καλώδια, (γ)  $E=50\text{GPa}$  για καλώδια με μήκος περιέλιξης (το μήκος μιας πλήρους περιέλιξης ενός κλώνου ή σύρματος γύρω από τον διαμήκη άξονα του καλωδίου) μεγαλύτερο από 10 φορές τη διάμετρο του καλωδίου, (δ)  $E<120\text{GPa}$  για άλλα καλώδια. Από Αμερικάνικους Κανονισμούς το προτεινόμενο μέτρο ελαστικότητας είναι (α)  $E=140\text{GPa}$  για πολύκλινα καλώδια ελικοειδούς περιέλιξης κλώνων, (β)  $E=170\text{GPa}$  για μονόκλινα καλώδια, (γ)  $190\text{GPa}$   $<E<210\text{GPa}$  για καλώδια παράλληλων κλώνων.

Στο Παράρτημα Α επισυνάπτονται πίνακες εφελκυστικών αντοχών καλωδίων.

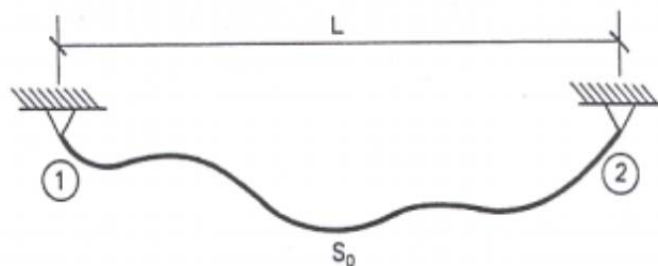
### 3.1.6 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΥΠΟ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΑ ΦΟΡΤΙΑ

Στο παρόν εξετάζονται μεμονωμένα καλώδια με τέτοια γεωμετρία και φόρτιση, ώστε η अपαραμόρφωτη γεωμετρία, τα φορτία, και η παραμορφωμένη γεωμετρία να ανήκουν σε ένα επίπεδο. Αρχικά μελετώνται περιπτώσεις για τις οποίες υπάρχουν αναλυτικές λύσεις, με στόχο να επιτευχθεί ποιοτική κατανόηση του τρόπου συμπεριφοράς καλωδιωτών κατασκευών.

Οι δύο περιπτώσεις που εξετάζονται για τα καλώδια είναι οι συνήθεις φορτίσεις που ασκούνται στα περιμετρικά συρματόσχοινα των εφελκυσόμενων μεμβρανών. Ο ρόλος τους στην προέγνταση των εφελκυσόμενων μεμβρανών θα εξεταστεί αργότερα.

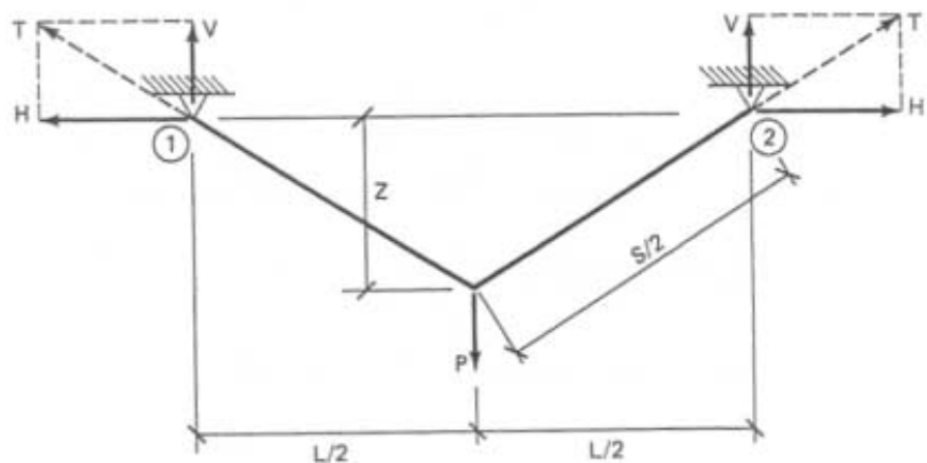
#### 3.1.6.1 ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟ ΚΑΛΩΔΙΟ ΜΕ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΣΤΟ ΜΕΣΟΝ

Έστω καλώδιο με αρχικό, απαραμόρφωτο μήκος  $S_0$  που γεφυρώνει οριζόντια απόσταση με άνοιγμα  $L$  όπως φαίνεται στο σχήμα 3.28. Επιπλέον υποθέτουμε ότι το καλώδιο είναι αβαρές, δηλαδή μπορούμε να αμελήσουμε το ίδιο βάρος του σε σχέση με τα εξωτερικά φορτία προέγντασης και λειτουργίας.



Σχήμα 3.28  
Αβαρές καλώδιο σε άνοιγμα μήκους L

Εάν ασκήσουμε στο μέσον του καλωδίου ένα συγκεντρωμένο φορτίο P, το καλώδιο θα ενταθεί και θα ισορροπήσει όπως φαίνεται στο σχήμα 3.29, όπου το σημείο εφαρμογής του φορτίου απέχει κατακόρυφα απόσταση z από τις δύο στηρίξεις. Η στατική συμπεριφορά του καλωδίου περιγράφεται, όπως σε όλα τα προβλήματα της μηχανικής, από τρεις ομάδες εξισώσεων: (α) εξισώσεις ισορροπίας, (β) εξισώσεις συμβιβαστού των παραμορφώσεων, και (γ) καταστατικές εξισώσεις του υλικού.



Σχήμα 3.29  
Θέση ισορροπίας αβαρούς καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον

Οι αντιδράσεις στήριξης υπολογίζονται από εξισώσεις ισορροπίας που γράφονται στην παραμορφωμένη γεωμετρία του καλωδίου. Αυτό είναι υποχρεωτικό για να ληφθεί υπόψη η γεωμετρική μη γραμμικότητα, δηλαδή το γεγονός ότι οι μετατοπίσεις δεν είναι αμελητέες σε σύγκριση με τις χαρακτηριστικές διαστάσεις του φορέα. Αυτό αποτελεί και την πρώτη διαφορά στον τρόπο προσέγγισης μιας καλωδιωτής κατασκευής σε σύγκριση με τις μεθόδους στατικής ανάλυσης συμβατικών φορέων.

Λόγω συμμετρίας:

$$V = \frac{P}{2} \quad 3.1$$

Από ισορροπία ροπών ως προς το σημείο εφαρμογής του φορτίου:

$$H * z = V * \frac{L}{2} \Rightarrow H = \frac{P}{4} * \left(\frac{L}{z}\right) \quad 3.2$$

Επομένως, η εφελκυστική δύναμη του καλωδίου είναι:

$$T = \sqrt{V^2 + H^2} = \frac{P}{2} * \sqrt{1 + \frac{L^2}{4 * z^2}} \quad 3.3$$

Στη σχέση αυτή περιέχεται η άγνωστη παράμετρος  $z$ . Παρατηρούμε δηλαδή ότι, σε αντίθεση με τις συμβατικές κατασκευές, δεν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των αντιδράσεων στήριξης με χρήση μόνον των εξισώσεων ισορροπίας. Για να υπολογιστεί το  $z$  θα γίνει χρήση του καταστατικού νόμου του υλικού. Υποθέτοντας γραμμική ελαστικότητα, ισχύει ο νόμος του Hooke:

$$\sigma = E * \varepsilon \Rightarrow \frac{T}{A} = \frac{\Delta S}{S_0} \Rightarrow T = E * A * \frac{S - S_0}{S_0} \quad 3.4$$

όπου  $A$  η διατομή του καλωδίου,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του και  $S$  το νέο, παραμορφωμένο μήκος.

Κάνοντας επιπλέον χρήση συμβιβαστού των παραμορφώσεων, έχουμε:

$$\frac{S}{2} = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + z^2} \Rightarrow S = 2 * z * \sqrt{1 + \frac{L^2}{4 * z^2}} \quad 3.5$$

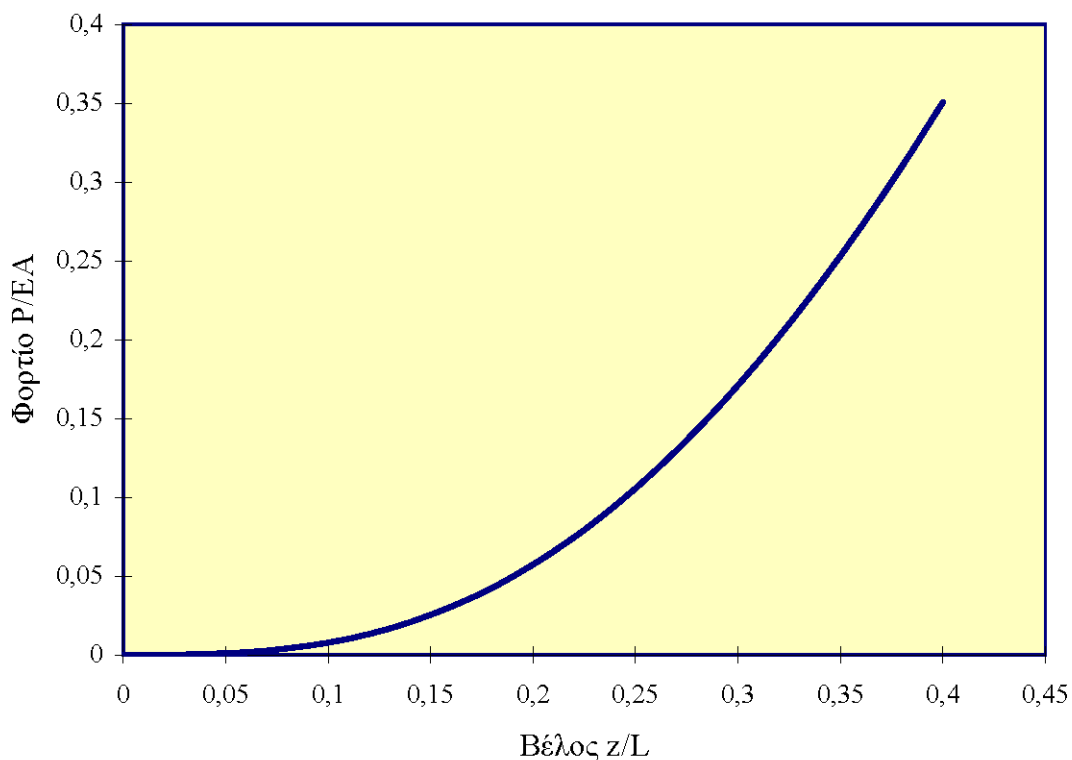
Από τις σχέσεις (3.3), (3.4) και (3.5) απαλείφοντας τα  $T$  και  $S$  προκύπτει:

$$\begin{aligned} \frac{P}{2} \sqrt{1 + \frac{L^2}{4z^2}} &= EA \left( \frac{2z}{S_0} \sqrt{1 + \frac{L^2}{4z^2}} - 1 \right) \Rightarrow \\ P &= 2EA \left( \frac{2z}{S_0} - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{L^2}{4z^2}}} \right) = 2EA \left( \frac{2}{S_0} - \frac{1}{\sqrt{z^2 + \frac{L^2}{4}}} \right) z \end{aligned} \quad 3.6$$

Η σχέση αυτή συνδέει το επιβαλλόμενο φορτίο  $P$  με την προκύπτουσα μετατόπιση  $z$ . Σε συμβατικά, γραμμικά προβλήματα, η σχέση αυτή θα ήταν γραμμική, δηλαδή η απόκριση θα ήταν ανάλογη του φορτίου, και θα ίσχυε η αρχή της επαλληλίας. Στην προκειμένη περίπτωση αυτό δε συμβαίνει. Η γραφική παράσταση της σχέσης (3.6), δηλαδή ο δρόμος ισορροπίας του καλωδίου, φαίνεται στο σχήμα 3.30.

Παρατηρούμε ότι ο δρόμος ισορροπίας δεν είναι ευθύγραμμος αλλά καμπύλος, και μάλιστα στρέφει τα κοίλα προς τα πάνω, δηλαδή το καλώδιο γίνεται περισσότερο δύσκαμπτο καθώς το φορτίο και το αντίστοιχο βέλος αυξάνονται. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά, αφού για μεγαλύτερο βέλος

μεγαλώνει και η κλίση των δύο τμημάτων του καλωδίου δεξιά και αριστερά του εφαρμοζόμενου φορτίου, και επομένως αυξάνει η κατακόρυφη συνιστώσα της έντασης του καλωδίου, που είναι εκείνη που εξισορροπεί το εξωτερικό φορτίο.



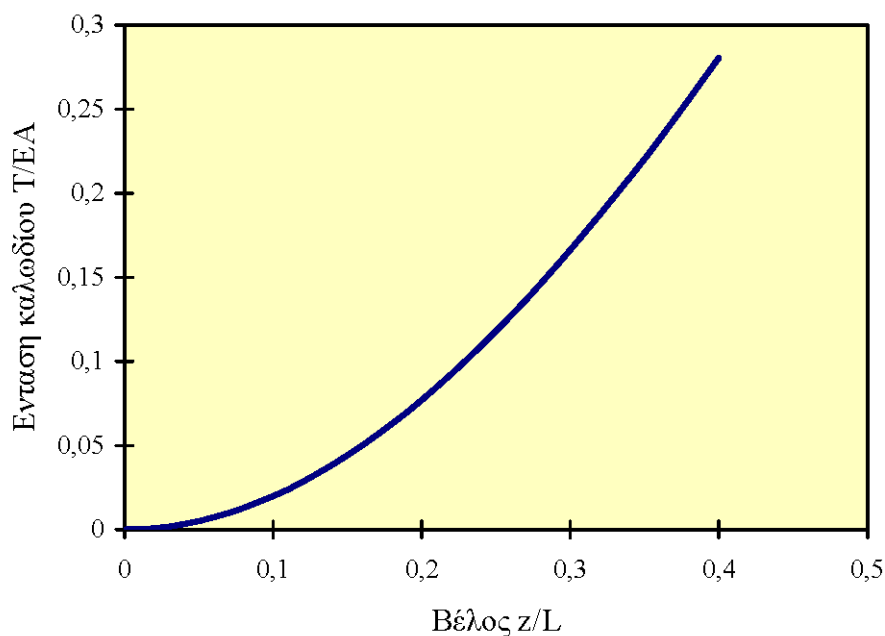
Σχήμα 3.30  
Δρόμος ισορροπίας για καλώδιο υπό συγκεντρωμένο φορτίο

Αντίστοιχα, η ένταση του καλωδίου υπολογίζεται αν αντικαταστήσουμε τη σχέση (3.6) στην (3.3):

$$T = EA \left( \frac{2z}{S_0} \sqrt{1 + \frac{L^2}{4z^2}} - 1 \right)$$

3.7

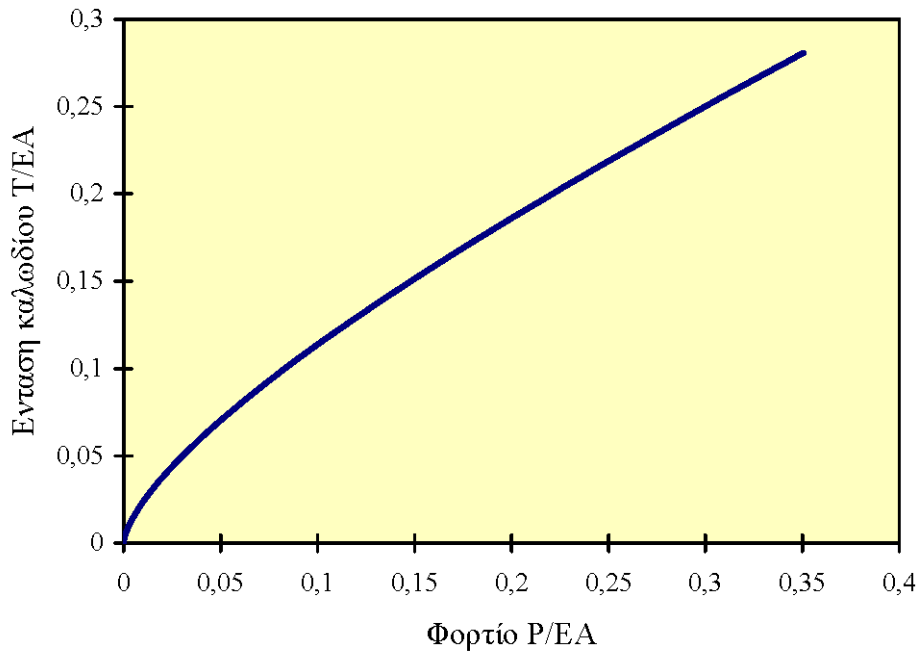
Επομένως όχι μόνον το βέλος αλλά και η ένταση του καλωδίου, δηλαδή η συνολική απόκριση, περιγράφεται από μη γραμμικές εξισώσεις. Η γραφική παράσταση της σχέσης (3.7) δίνεται στο σχήμα 3.31.



Σχήμα 3.31

Ένταση καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση της παραμόρφωσης

Τέλος, η σχέση μεταξύ έντασης καλωδίου και εξωτερικού φορτίου υπολογίζεται αν συνδυάσουμε τις τιμές T και P που δίνουν οι σχέσεις (3.7) και (3.6) αντίστοιχα για διάφορες τιμές του z. Προκύπτει γραφική παράσταση του σχήματος 3.32. Έχει μεγάλο ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε ότι η καμπύλη αυτή στρέφει τα κοίλα προς τα κάτω, δηλαδή ο ρυθμός αύξησης της έντασης μειώνεται καθώς το φορτίο μεγαλώνει. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει τον ισχυρισμό ότι οι καλωδιωτές κατασκευές ανταποκρίνονται σε αυξήσεις των επιβαλλόμενων φορτίων κυρίως προσαρμόζοντας τη γεωμετρία τους και λιγότερο μεταβάλλοντας τις αναπτυσσόμενες τάσεις τους.



Σχήμα 3.32

Ένταση καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση του φορτίου

Παρατηρώντας τα σχήματα 3.30 ως 3.32 βλέπουμε ότι αύξηση του εξωτερικού φορτίου συνεπάγεται αύξηση της δυσκαμψίας της κατασκευής, που είναι η εφαπτόμενη σε κάθε σημείο του διαγράμματος P-z.

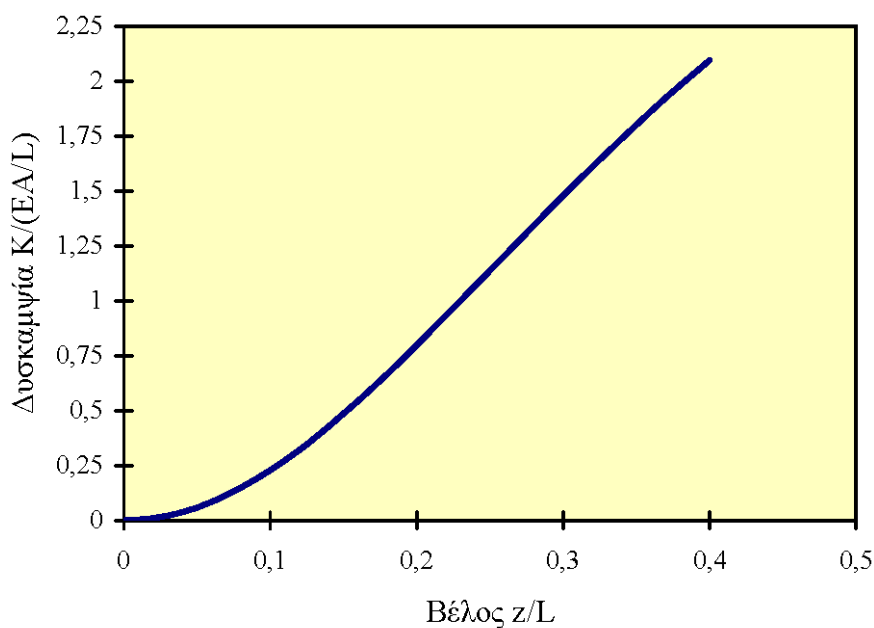
$$K = \frac{\partial P}{\partial z} = 2EA \left[ \frac{2}{S_0} - \left( 1 + \frac{L^2}{4z^2} \right)^{-3/2} \left( -\frac{1}{2} \right) \frac{L^2}{4} \left( -\frac{2}{z^3} \right) \right] \Rightarrow$$

$$K = K(z) = 2EA \left[ \frac{2}{S_0} - \frac{L^2}{4z^3 \left( 1 + \frac{L^2}{4z^2} \right)^{3/2}} \right] \Rightarrow$$

$$K = K(z) = \frac{4EA}{L} \left\{ \frac{L}{S_0} - \frac{\left( \frac{L}{2z} \right)^3}{\left[ 1 + \left( \frac{L}{2z} \right)^2 \right]^{3/2}} \right\}$$

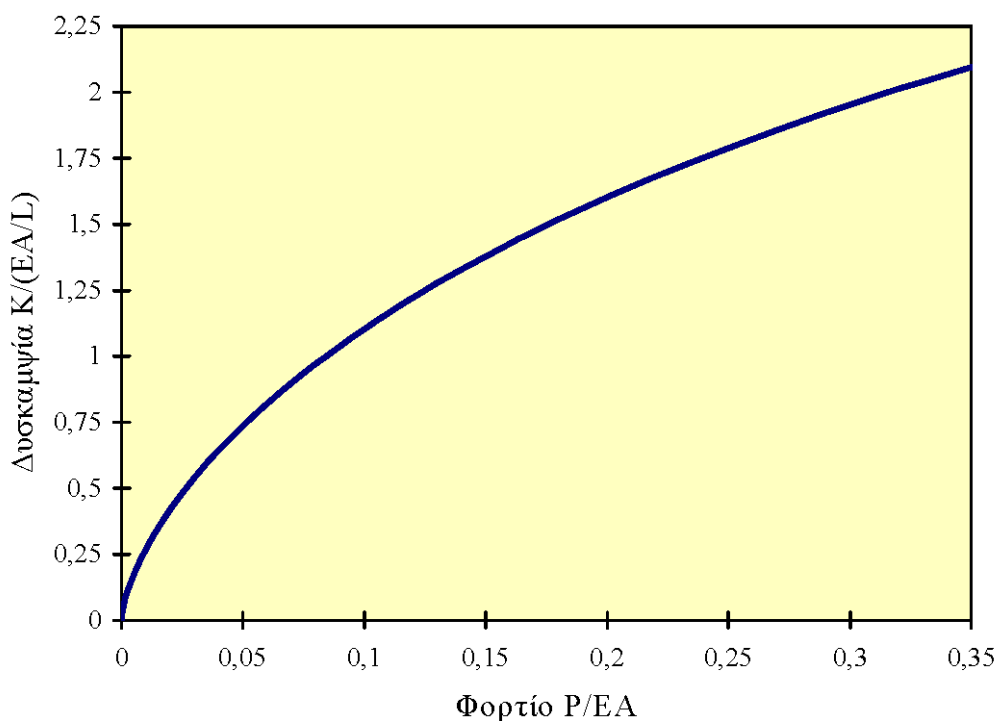


Η γραφική παράσταση αυτής της σχέσης φαίνεται στο σχήμα 3.33 και η εξάρτηση της δυσκαμψίας από το φορτίο P στο σχήμα 3.34.



Σχήμα 3.33

Δυσκαμψία καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση της παραμόρφωσης



Σχήμα 3.34

Δυσκαμψία καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση του φορτίου

Από τα σχήματα 3.33 και 3.34 επιβεβαιώνεται ο σημαντικός ρόλος της προέντασης στη συμπεριφορά του καλωδίου. Εάν η δύναμη προέντασης είναι P και κατόπιν ασκηθεί επιπλέον εξωτερικό φορτίο  $\Delta P$ , τότε ισχύει η σχέση:

$$(P + \Delta P) = P + \frac{\partial P}{\partial z} \Big|_z (\Delta z) \Rightarrow$$

$$\Delta P = K(z) \Delta z \Rightarrow$$

$$\Delta z = \frac{\Delta P}{K(z)}$$

3.9

Όσο μεγαλύτερη είναι η δύναμη προέντασης  $P$ , τόσο μεγαλύτερη η δυσκαμψία  $K(z)$  και επομένως τόσο μικρότερες οι πρόσθετες μετατοπίσεις  $\Delta z$  λόγω των φορτίων λειτουργίας  $\Delta P$ . Επίσης, από τη σχέση (3.8) και τα διαγράμματα των σχημάτων 3.33 και 3.34 προκύπτει ότι για μεγάλες τιμές του  $z$ , δηλαδή του  $P$ , η σημασία του μη γραμμικού όρου μικραίνει και η συμπεριφορά του καλώδιου γίνεται με ικανοποιητική προσέγγιση γραμμική. Έτσι επιβεβαιώνεται η άποψη ότι για σημαντική αρχική προένταση και συγκριτικά μικρά φορτία λειτουργίας είναι αποδεκτή η παραδοχή γραμμικής συμπεριφοράς. Σημειώνεται ότι όλα τα παραπάνω διαγράμματα έγιναν για την περίπτωση  $S_0=L$ , οπότε το καλώδιο αρχίζει να εντνείνεται αμέσως μόλις φορτιστεί. Αντίθετα όταν  $S_0>L$ , αρχικά το καλώδιο παραμένει άτονο μέχρις ότου  $S=S_0$ , δηλαδή:

$$2z\sqrt{1+\frac{L^2}{4z^2}} = S_0 \Rightarrow$$

$$1+\frac{L^2}{4z^2} = \frac{S_0^2}{4z^2} \Rightarrow$$

$$4z^2 + L^2 = S_0^2 \Rightarrow$$

$$\left(\frac{2z}{L}\right)^2 + 1 = \left(\frac{S_0}{L}\right)^2 \Rightarrow \frac{2z}{L} = \sqrt{\left(\frac{S_0}{L}\right)^2 - 1} \Rightarrow \left(\frac{z}{L}\right)^* = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{S_0}{L}\right)^2 - 1}$$

3.10

που είναι η τιμή του βέλους πέραν της οποίας το καλώδιο αρχίζει να εντνείνεται.  
π.χ. για:

$$\frac{S_0}{L} = 1.1 \Rightarrow \left(\frac{z}{L}\right)^* = \frac{1}{2} \sqrt{1.1^2 - 1} = 0.23$$

Αυτό υλοποιείται, π.χ. στη σχέση (3.6) ως εξής:

$$(3.6) \Rightarrow \frac{P}{EA} = \left( \frac{4}{S_0} - \frac{2}{\sqrt{z^2 + \frac{L^2}{4}}} \right) z$$

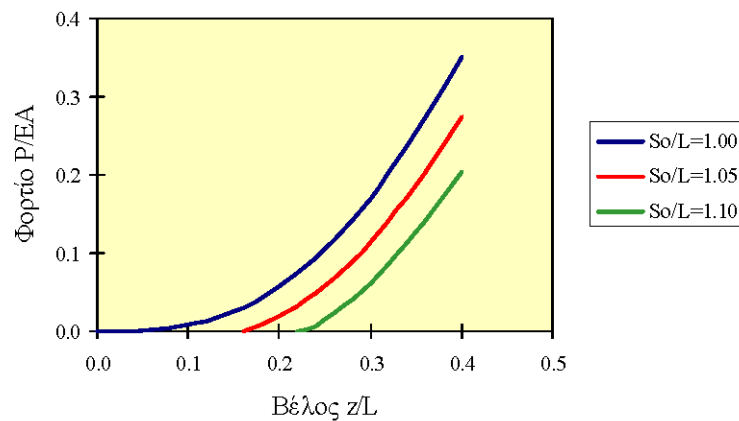
$$\Rightarrow \frac{PL}{EA} = \left( \frac{4}{\left(\frac{S_0}{L}\right)} - \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{z}{L}\right)^2 + \frac{1}{4}}} \right) z$$

$$\text{για } \frac{S_0}{L} = 1.1 \Rightarrow \frac{PL}{EA} = \left( 3.636 - \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{z}{L}\right)^2 + \frac{1}{4}}} \right) z$$

Δηλαδή παρατηρούμε ότι για  $z < 0.23 * L = \frac{PL}{EA} < 0$  που δεν έχει φυσική σημασία.

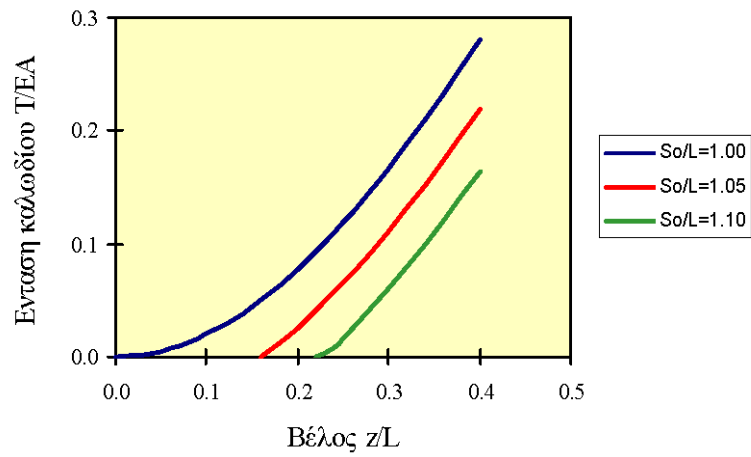
Επομένως, οι σχέσεις (3.6), (3.7), (3.8) και τα αντίστοιχα διαγράμματα 3.30 ως 3.33 ισχύουν μόνον για  $\frac{S_0}{L}=1$ . Για  $\frac{S_0}{L}>1$  οι σχέσεις (3.6), (3.7), (3.8) ισχύουν μόνο για  $\frac{z}{L} > \left(\frac{z}{L}\right)^*$  ενώ τα μεγέθη P, T, K είναι μηδενικά για  $0 \leq \frac{z}{L} \leq \left(\frac{z}{L}\right)^*$

Τα αντίστοιχα διαγράμματα για διάφορους λόγους  $\frac{S_0}{L}$  φαίνονται στα σχήματα που ακολουθούν.



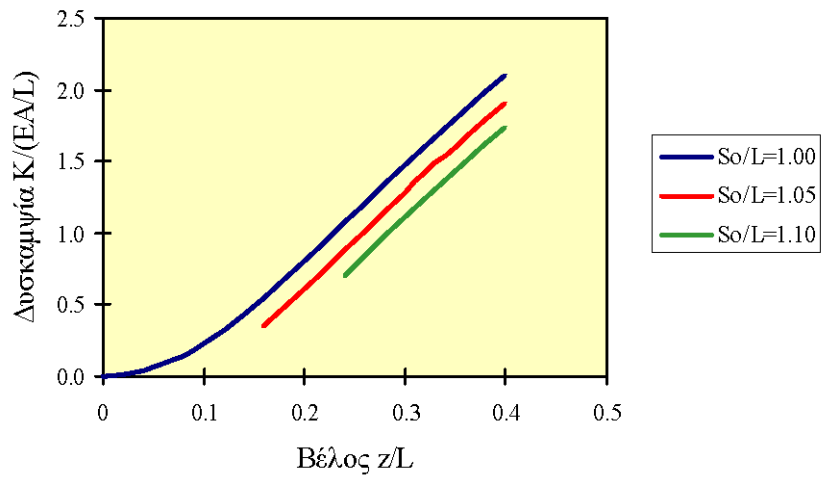
Σχήμα 3.35

Επιρροή αρχικού μήκους στο δρόμο ισορροπίας καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο



Σχήμα 3.36

Επιρροή αρχικού μήκους στην ένταση καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση του βέλους

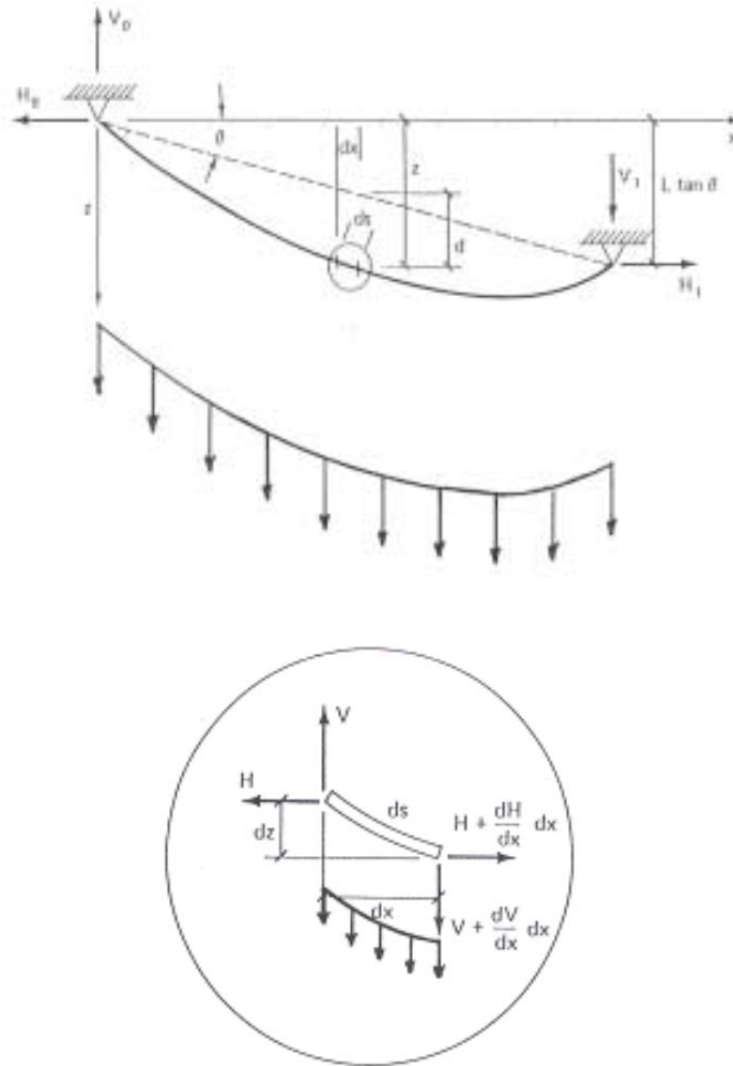


Σχήμα 3.37

Επιρροή αρχικού μήκους στη δυσκαμψία καλωδίου υπό συγκεντρωμένο φορτίο ως συνάρτηση του βέλους

### 3.1.7 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΜΕ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΑ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΤΟΞΟΥ

Έστω τώρα καλώδιο με αρχικό απαραμόρφωτο μήκος  $S_0$  που γεφυρώνει οριζόντια απόσταση  $L$ . Ασκούμε ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο  $q$  κατά μήκος του τόξου του, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.38.



Σχήμα 3.38

Διάγραμμα ελευθέρου σώματος καλωδίου με ομοιόμορφο κατανεμημένο φορτίο κατά μήκος του τόξου του

Ως ανεξάρτητη μεταβλητή συμφέρει εδώ να χρησιμοποιήσουμε το μήκος τόξου  $s$ , μετρούμενο από το αριστερό άκρο του καλωδίου.

Από εξισώσεις ισορροπίας λαμβάνουμε:

$$\frac{dH}{dx} = 0 \rightarrow H = H_0 \quad 3.11$$

$$\frac{dV}{dx} = -q \frac{ds}{dx} \quad 3.12$$

Από εξισώσεις γεωμετρίας και λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η ένταση  $T$  είναι αξονική και επομένως έχει διεύθυνση κατά την εφαπτομένη του παραμορφωμένου καλωδίου, προκύπτει:

$$\frac{dz}{dx} = \frac{V}{H_0} \rightarrow V = H_0 \frac{dz}{dx} \quad 3.13$$

Από τη σχέση (3.13), με παραγωγή ως προς  $x$ , και λόγω της (3.11), έχουμε:

$$\frac{dV}{dx} = H_0 \frac{d^2z}{dx^2} \quad 3.14$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.12) και (3.14) προκύπτει:

3.15

$$H_0 \frac{d^2 z}{dx^2} = -q \frac{ds}{dx}$$

Επίσης, για το μήκος τόξου ισχύει:

$$ds^2 = dx^2 + dz^2 \quad 3.16$$

Οπότε η (3.16) γίνεται:

$$H_0 \frac{d^2 z}{dx^2} = -q \frac{\sqrt{dx^2 + dz^2}}{dx} \quad 3.17$$

Η οποία τελικά γράφεται:

$$\frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{q}{H_0} \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2} = 0 \quad 3.18$$

Αυτή είναι η διαφορική εξίσωση ισορροπίας καλωδίου υπό το ίδιο βάρος του ή άλλο φορτίο ομοιόμορφα καταμεμημένο κατά μήκος του τόξου του. Η λύση της είναι γνωστή ως αλυσοειδής καμπύλη, αφού περιγράφει το σχήμα που θα πάρει μια ανηρτημένη αλυσίδα υπό το ίδιο βάρος της.

Εάν υποθεθεί ότι η οριζόντια συνιστώσα της έντασης  $H_0$  είναι γνωστή, λύνοντας την (3.18) ως προς  $z$  προκύπτει:

$$z = c_2 - \frac{H_0 \cosh\left(-qx + q \frac{c_1}{H_0}\right)}{q} \quad 3.19$$

Στη λύση αυτή εισάγονται οι συνοριακές συνθήκες:

$z=0$ , στο  $x=0$

$z=L \tan \theta$  στο  $x=L$

οπότε προκύπτει:

$$z = \frac{H_0}{q} \left\{ \cosh(\gamma + \beta) - \cosh\left[\gamma + \beta\left(1 - \frac{2x}{L}\right)\right] \right\} \quad 3.20$$

Όπου

$$\beta = \frac{qL}{2H_0} \quad 3.21$$

$$\gamma = \sinh^{-1}\left(\tan \theta \frac{\beta}{\sinh \beta}\right) \quad 3.22$$

Ο λόγος  $f$  του βέλους  $z$  στο μέσον προς το άνοιγμα  $L$  προκύπτει από την (4.50) για  $x=L/2$ :

$$f = \frac{1}{2\beta} [\cosh(\gamma + \beta) - \cosh \gamma] \quad 3.23$$

Η ένταση T προκύπτει:

$$T = \sqrt{V_0^2 + H_0^2} = \sqrt{H_0^2 \left( \frac{dz}{dx} \right)^2 + H_0^2} \rightarrow T = H_0 \sqrt{1 + \left( \frac{dz}{dx} \right)^2} \quad 3.24$$

Από την (3.13) έχουμε:

$$V = H_0 \frac{dz}{dx}$$

Και από την (3.20)

$$\frac{dz}{dx} = \frac{2\beta H_0 \sinh \left[ \gamma + \beta \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right]}{Lq} \quad 3.25$$

Έτσι προκύπτει:

$$V = H_0 \sinh \left[ \gamma + \beta \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \quad 3.26$$

$$T = H_0 \sqrt{1 + \sinh^2 \left[ \gamma + \beta \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right]} = H_0 \cosh \left[ \gamma + \beta \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \quad 3.27$$

Όταν η οριζόντια συνιστώσα της έντασης δεν είναι γνωστή, κάνουμε χρήση του καταστατικού νόμου του υλικού. Υποθέτουμε γραμμική ελαστικότητα, οπότε ισχύει ο νόμος του Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \rightarrow T = EA \frac{ds - ds_0}{ds_0} \rightarrow ds = ds_0 \left( 1 + \frac{T}{EA} \right) \rightarrow \frac{ds}{dx} = \frac{ds_0}{dx} \left( 1 + \frac{T}{EA} \right) = \frac{T}{H_0} \quad 3.28$$

Με την παραδοχή ότι

$$T \ll EA \rightarrow \frac{1}{1 + T/EA} \cong 1 - \frac{T}{EA}$$

έχουμε:

$$\frac{ds_0}{dx} = \frac{T}{H_0} - \frac{T^2}{H_0 EA} \quad 3.29$$

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση, αφού αντικατασταθεί η ένταση T από τη σχέση (3.27), έχει λύση:

$$S_0(x) = \frac{1}{8AE\beta} \left[ -4\beta H_0 x + 4AEL \sinh(\beta + \gamma) - H_0 L \sinh(2\beta + 2\gamma) - 4EAL \sinh\left(\beta - \frac{2\beta x}{L} + \gamma\right) + H_0 L \sinh\left(2\beta - \frac{4\beta x}{L} + 2\gamma\right) \right] \quad 3.30$$

Από τη συνθήκη  $S_0(L) = S_0$  λαμβάνουμε:

$$\frac{S_0}{L} = \frac{V_0 - V_1}{qL} - \frac{qL}{2AE} \left( \frac{H_0}{qL} + \frac{V_0 T_0 - V_1 T_1}{qL} \right) \quad 3.31$$

όπου  $S_0$  το ολικό अपαραμόρφωτο μήκος και:

$$\begin{aligned} V_0 &= V(0) = H_0 \sinh(\gamma + \beta) \\ V_1 &= V(L) = H_0 \sinh(\gamma - \beta) \\ T_0 &= T(0) = H_0 \cosh(\gamma + \beta) \\ T_1 &= T(L) = H_0 \cosh(\gamma - \beta) \end{aligned} \quad 3.32$$

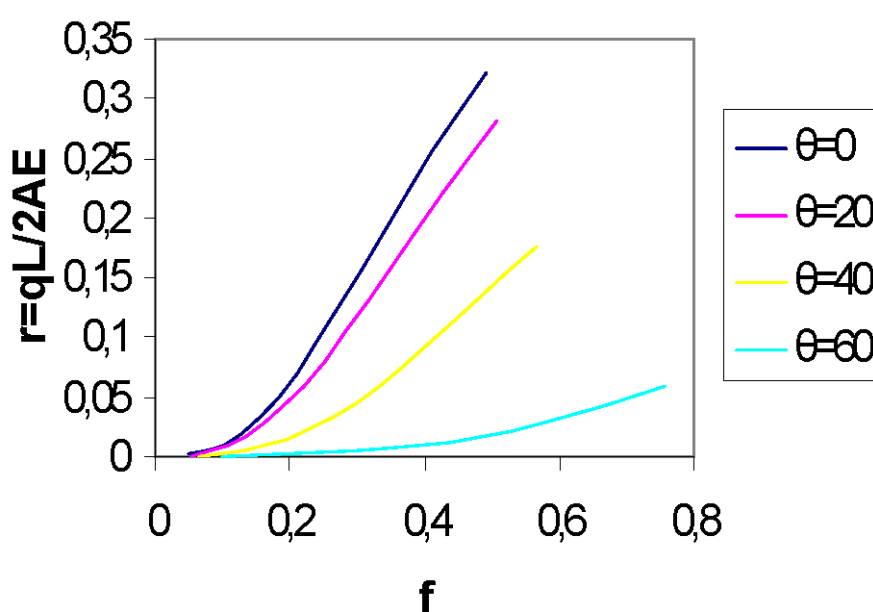
Οι εξισώσεις (3.26) έως (4.32) περιγράφουν την συμπεριφορά του παραμορφωμένου καλωδίου που εξετάζουμε συναρτήσει της άγνωστης ακόμα οριζόντιας δύναμης  $H_0$ . Εάν γνωρίζουμε το  $S_0$ , από την (3.31) υπολογίζεται η  $H_0$  αριθμητικά. Στη συνέχεια, η κρέμαση στο μέσον μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$f = \frac{1}{2\beta} [\cosh(\gamma + \beta) - \cosh(\gamma)] - \frac{1}{2} \tan \theta \quad 3.33$$

Στη σχέση (3.31) θέτουμε:

$$r = \frac{qL}{2AE} \quad \text{και} \quad \frac{S_0}{L} = \frac{1}{\cos \theta}$$

και χαράσσουμε τους αδιαστατοποιημένους δρόμους ισορροπίας για διάφορες τιμές της γωνίας κλίσεως του καλωδίου ( $0^\circ, 20^\circ, 40^\circ, 60^\circ$ ). Σχεδιάζονται, δηλαδή, οι καμπύλες  $r=r(f)$  για διάφορες τιμές της γωνίας  $\theta$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 3.39

Καλώδιο με ομοιόμορφο φορτίο κατά μήκος του τόξου



Γράφουμε τις εξισώσεις για την ειδική περίπτωση  $\theta=0$ :

$$z = \frac{H_0}{q} \left\{ \cosh \beta - \cosh \left[ \beta \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \right\} \quad 3.34$$

$$V = H_0 \sinh \left[ \beta \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \quad 3.35$$

$$T = H_0 \cosh \left[ \beta \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right] \quad 3.36$$

$$f = \frac{1}{2\beta} (\cosh \beta - 1) \quad 3.37$$

Αντικαθιστώντας στην (3.31) τις τιμές  $V_0, V_1, T_0, T_1$  με  $\theta=0$  προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{S_0}{L} = \frac{\sinh \beta}{\beta} - \frac{qL}{4AE} \left( 1 + \cosh \beta \frac{\sinh \beta}{\beta} \right) \quad 3.38$$

Για μικρές τιμές της  $f$  η λύση προσεγγίζει αυτή ενός παραβολικού τμήματος.  
Για μικρά  $\beta$ ,  $\theta$  χρησιμοποιούμε τις σειρές Taylor:

$$\sinh \varepsilon \approx \varepsilon + \varepsilon^3/6$$

$$\cosh \varepsilon \approx \varepsilon + \varepsilon^2/2$$

Και θέτοντας  $\gamma \approx \tan \theta$ , η (3.34) γίνεται:

$$z = \gamma x + \beta x(1-x/L) = x \tan \theta + d$$

Και από τις (3.35), (3.36) και (3.37) έχουμε:

$$V = H_0 \left[ c + b \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right]^2 = H_0 \tan \theta + \frac{qL}{2} \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \quad 3.39$$

$$T = H_0 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left[ c + b \left( 1 - \frac{2x}{L} \right) \right]^2 \right\} \quad 3.40$$

$$f = \left[ \frac{c}{2} - \frac{1}{2} \tan \theta \right] + \frac{b}{4} = \frac{qL}{8H_0} \quad 3.41$$

Αναλόγως της γεωμετρίας και της επιλογής του βέλους κάμψης με επαναληπτικές μεθόδους υπολογίζουμε τις αντιδράσεις και την ένταση του καλωδίου.

## 3.2 ΥΛΙΚΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

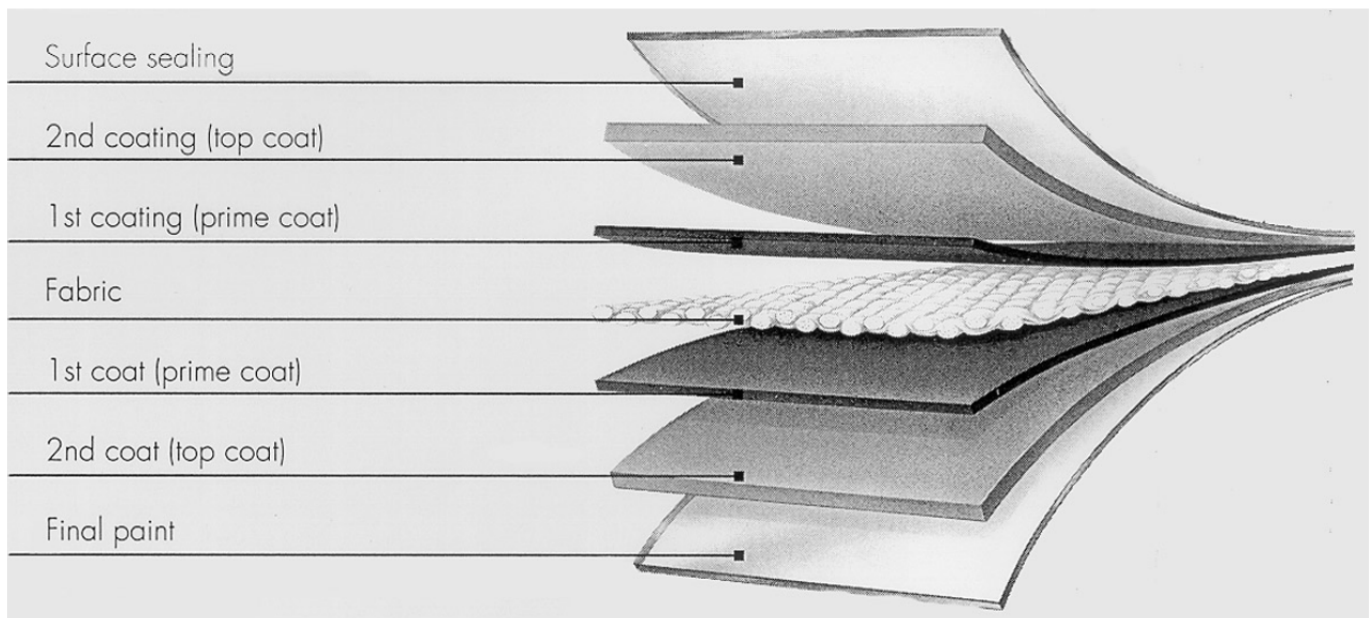
### ΟΡΙΣΜΟΣ

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τις αρχιτεκτονικά μεμβράνες γενικά αποτελούνται από ένα πλεκτό ύφασμα επικαλυμμένο με πολυμερή ρητίνη. Η αντοχή των επικαλυμμένων υφασμάτων καθορίζεται κυρίως από την αντοχή των συστατικών νημάτων τους. Weft-inserted υφάσματα, υφάσματα με πολλαπλές στρώσεις και τα φύλλα (foils) είναι παραλλαγές της γενικής έννοιας.

Όταν χρησιμοποιούνται μη επικαλυμμένα τα υφάσματα έχουν μικρή διάρκεια ζωής. Η επιστροφή του υφάσματος δίνει τα ακόλουθα οφέλη:

- α) Προστασία των νημάτων από διαφορετικές πηγές φθορών (UV, τριβή, ατμόσφαιρα)
- β) Η διόγκωση της μεμβράνης από τα όμβρια ύδατα και την ατμοσφαιρική υγρασία
- γ) Σταθεροποιητικά γιατί αλλιώς δεν θα μπορούσαν να έχουν τα υφάσματα ευσταθή γεωμετρία
- δ) Παροχή υλικού ώστε να επιτρέπονται η θερμοραφές

Ακριβέστερα μια μεμβράνη αποτελείται από διαφορετικά στρώματα σε συνδυασμό με το ύφασμα, ένα πρωταρχικό επίστρωμα, ένα άνω επίστρωμα και μια επιφανειακή επεξεργασία για τη στεγάνωση ή την εκτύπωση, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.40



Σχ.3.40 Μembrάνη για εφελκυστικές αρχιτεκτονικές κατασκευές

Το πρωταρχικό στρώμα έχει την κύρια λειτουργία που περιγράφεται παραπάνω και προστατεύεται από ένα λεπτό, χημικό ξεχωριστό κάλυμμα. Το εξωτερικό στρώμα είναι ειδικό για την χημική φύση των επικαλύψεων, ώστε να επιτραπεί η ένωση και η στεγάνωση των υφασμάτων (και η ικανότητα εκτύπωσης όπου είναι απαραίτητο), με χημική συμβατότητα των συστατικών.

### ΚΥΡΙΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ

Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά είναι:

- α) PVC επιχρισμένα υφάσματα από πολυεστέρα (PVC = πολυβινυλοχλωρίδιο)
- β) PTFE επιχρισμένα υφάσματα από ίνες γυαλιού( fiber glass) (PTFE = πολυτετραφθοροαιθυλένιο) και από αυτά τα υφάσματα με πολυεστέρα με επικάλυψη PVC χρησιμοποιούνται ευρύτερα από τα PTFE. Αυτό οφείλεται στο ότι γίνονται συμβιβασμοί σε αναλογίες μεταξύ του κόστους, την απόδοση και την αντοχή.

Άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- γ) επικαλυμμένο με σιλικόνη ίνες γυαλιού( fiber glass)
- δ) PTFE επιχρισμένα υφάσματα PTFE
- ε) φύλλα ETFE (ETFE = αιθυλενίου-τετραφθοροαιθυλενίου συμπολυμερές)

Άλλα νήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπως: αραμιδίου (αρωματικό πολυαμίδιο) και LCP (κρύσταλλο πολυμερές υγρό με βάση αρωματικό πολυεστέρα).

Οι άνω επιστρώσεις βασίζονται σε πολυμερή υλικά, όπως: ακρυλικό, φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVDF) ή πολυβινύλιο (PVF) για τα PVC επιχρισμένα υφάσματα από πολυεστέρα, και fluoroethylenepropylene (FEP) για PTFE επικαλυμμένα γυαλί ύφασμα.

### 3.2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΙΝΩΝ

#### 3.2.1.1 ΒΑΣΙΚΟΣ ΟΡΙΣΜΟΣ

Η πρώτη ύλη ή κλωσμένο νήμα, βασίζεται σε ένα δεδομένο αριθμό άπειρου μήκους νημάτια μικρής διαμέτρου (μεταξύ 3 και 25 microns). Δύο νήματα, ή περισσότερο, μπορούν να συναρμολογηθούν με συστροφή ώστε να ληφθεί ένα νήμα από υψηλότερη αντοχή.

Τα νήματα λαμβάνονται με εξώθηση κλώση τήγματος των υλικών (γυαλί, πολυεστέρας) ή από ένα διάλυμα, όπως αραμίδια

Ο βασικός ορισμός του νήματος αποτελείται από:

- α) Αριθμός στοιχειωδών νημάτων
- β) Γραμμική πυκνότητα ή μέτρηση σε tex (g / km), dtex ή denier (g / 9000m)
- γ) διάμετρο του νήματος
- δ) τον αριθμό στροφών / μέτρο, σε S ή Z κατεύθυνση (S είναι για στρίψιμο αριστερά και το Z είναι μια δεξιά συστροφή των νημάτων στο εσωτερικό ενός έλικα)
- ε) την τελική κατεργασία.

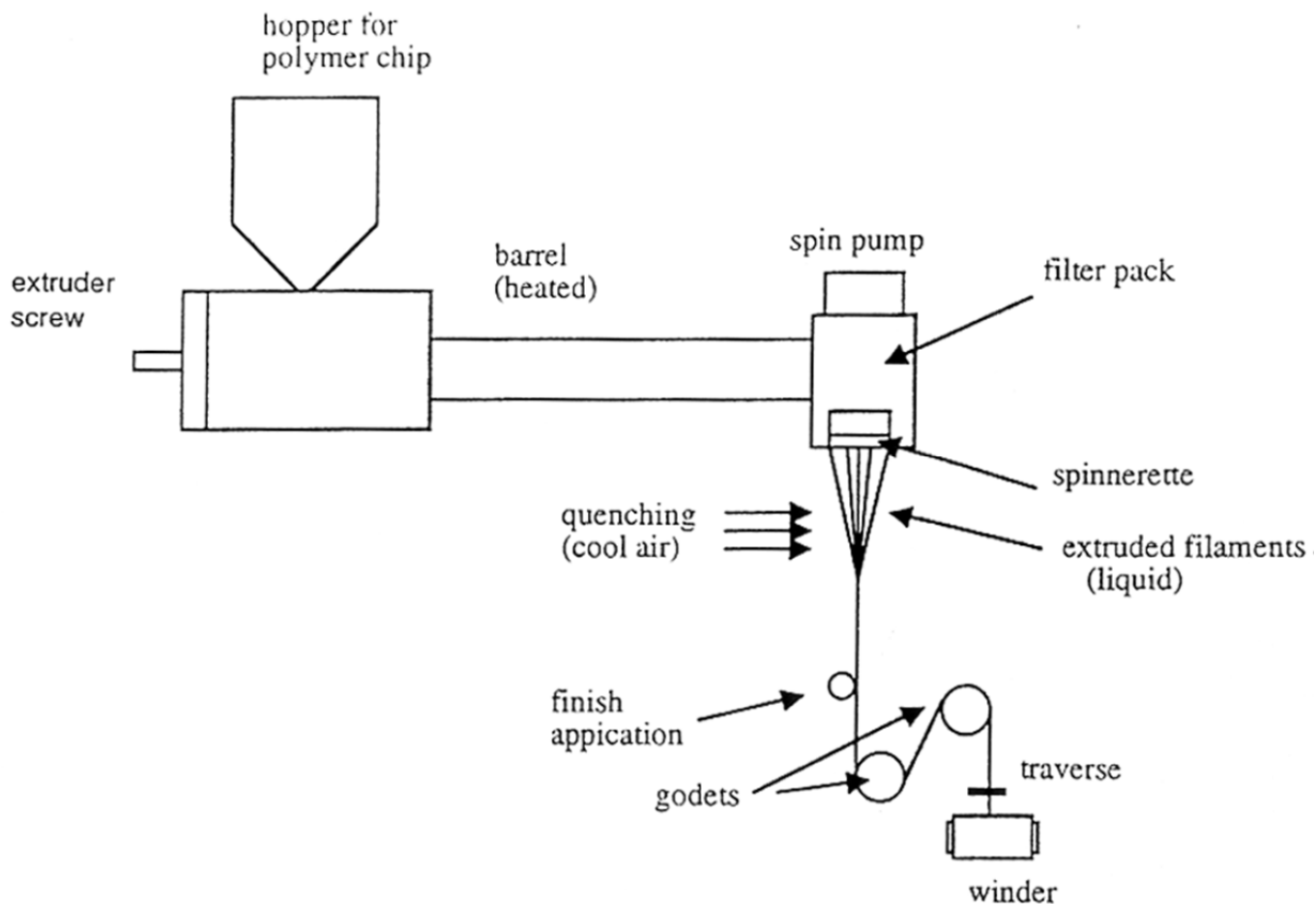
Οι γενικές ιδιότητες των νημάτων συνοψίζονται στον πίνακα 1:

	Polyester High Tenacity	Glass	High modulus Aramid	LCP
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.38	2.6	1.45	1.40
Tensile strength (GPa) (N/tex)	0.97 – 1.17 0.70 – 0.85	2.4 0.92	3.32 2.35	3.28 2.4
Extension at break (%)	11 – 15	4.5	1.5	2.5
Tensile modulus (GPa) (N/tex)	12 – 15 9 – 11	73 28	160 109	104 74
Water uptake (%)	0.4	< 0.1	1.2 – 3	< 0.1

Πίνακα 1

#### 3.2.1.2 ΝΗΜΑΤΑ ΑΠΟ ΠΟΛΥΕΣΤΕΡΑ

Τα νήματα από πολυεστέρα που παράγεται από "κλώση τήγματος" ενός πολυμερές στους 265 ° C διαμέσου μήτρας με ένα δεδομένο αριθμό σπών που καθορίζει τον αριθμό των μεμονωμένων νημάτων. Η διαδικασία φαίνεται στο Σχ. 3.41. Κατά τη διάρκεια της ψύξης, συμβαίνει η κρυστάλλωση και ο προσανατολισμός των μακρομοριακών αλυσίδων. Το σχέδιο του νήματος σε ένα ή δύο στάδια, παρέχει έναν επιπλέον προσανατολισμό των μακρομορίων. Με τη σειρά του αυτό οδηγεί σε υψηλότερες τιμές του μέτρου ελαστικότητας και αντοχής.



Σχ. 3.41 Διαδικασία τήξης της κλώσης

Τα νήματα υψηλής αντοχής από πολυεστέρα χαρακτηρίζονται από αντοχή σε εφελκυσμό, τουλάχιστον,  $0.7 \text{ N / tex}$ . Το ίδιο το νήμα αποτελείται από περίπου 200 ίνες / νήμα. Η συνεκτικότητα, για να είναι υψηλή, εξαρτάται από το βαθμό της κρυστάλλωσης του νήματος και τον προσανατολισμό των κρυσταλλικών και άμορφων περιοχών.

Το διάγραμμα δύναμης-επιμήκυνσης για τα νήματα από πολυεστέρα παρουσιάζει 3 ζώνες που συσχετίζονται με τη δομή της αλυσίδας του πολυμερούς. Αυτό έχει ένα σχήμα ζικ-ζακ. Στη ζώνη "I", η γωνία αυτής της αλυσίδας ζικ-ζακ αρχικά διευρύνεται. Στη ζώνη "II" οι αλυσίδες αρχίζουν να εξέρχονται από την άμορφη περιοχή. Το γεγονός αυτό καθιστά τα νήματα πιο όλκιμα. Στη ζώνη "III" γίνεται μπλοκάρισμα των παρατεταμένων αλυσίδων και επέρχεται η ανάπτυξη των κρυσταλλικών περιοχών και κατά συνέπεια η συμπεριφορά τους γίνεται πιο δύσκαμπτη.

Είναι αξιοσημείωτο ότι το στημόνι και το υφάδι έχουν διαφορετικές ιδιότητες. Αυτό συμβαίνει επειδή τόσο η ύφανση όσο και η επικάλυψη των νημάτων είναι διαφορετικές. Τα νήματα στημονιού υποβάλλονται σε διαφορετικά φορτία από εκείνα του υφαδιού, από όπου προκύπτουν οι διαφορές. Η πιο σημαντική διαφορά είναι η λεγόμενη "weft jump". Τα νήματα θερμαίνονται κατά τη διάρκεια της επικάλυψης του υφάσματος και οι αλυσίδες πολυμερούς σε κάθε νήμα προσπαθούν να συρρικνωθούν ξανά καθώς υπερβαίνουν την θερμοκρασία "glass transition". Τα νήματα στημονιού ωστόσο παραμένουν υπό τάση και ως εκ τούτου δεν μπορούν να ακολουθήσουν την φορά αυτή. Τα νήματα υφαδιού από την άλλη πλευρά, δεν συγκρατούνται και έτσι συρρικνώνονται. Επομένως, είναι μαλακότερα με χαμηλότερο συντελεστή ελαστικότητας και υψηλότερο ποσοστό επιμήκυνσης σε θραύση (Σχ 3.42). Παρ' όλα αυτά, σε ορισμένες περιπτώσεις, υπό την κατάλληλη επεξεργασία του υφαδιού κατά την επικάλυψη, είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά τις διαφορές αυτές μεταξύ υφαδιού και στημονιού (π.χ. διαδικασία προέντετασης Ferrari ).

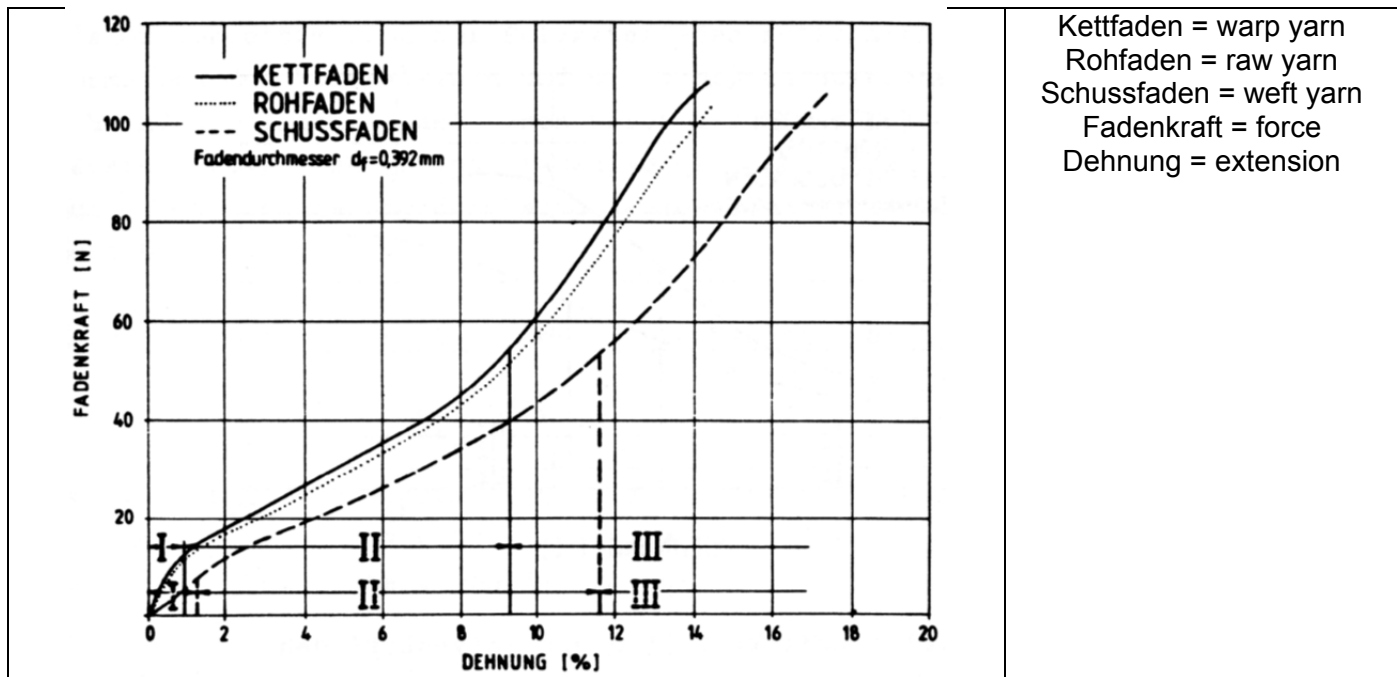


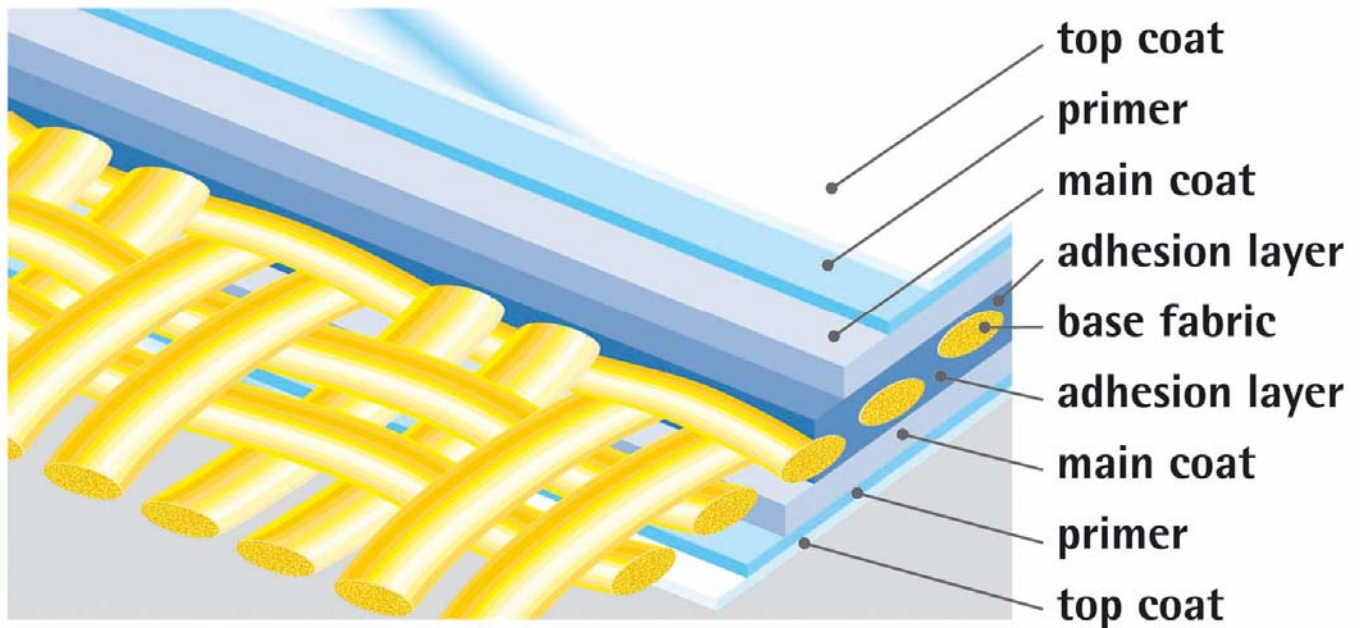
Fig. 3.42 Διάγραμμα δύναμης-επιμήκυνσης για τα νήματα από πολυεστέρα

\* Προεντεταμένα υφάσματα επονομαζόμενα Preconstraint Serge Ferrari τα οποία δεν απαιτούν μεγάλο ποσοστό <<compensation>> κατά την διαδικασία κοπής των πατρών.

Αυτά η επίδραση επί των νημάτων μπορεί να αξιολογηθεί με τη μέτρηση του μήκους τους  $l_1$  υπό τάση μετά την εκχύλιση τους από το επιστρωμένο ύφασμα. Η συστολή (crimp index) των νημάτων υπολογίζεται σε σύγκριση με το πτυχωμένο μήκος  $l_0$  νήματος στα υφάσματα. Ο δείκτης crimp index (%) είναι ίσο με  $(l_1 - l_0) \cdot 100 / l_0$ .

Το ίδιο το νήμα είναι ως επί το πλείστον τύπου "λαμπρό" ή τύπου "ημι λαμπρό". Αυτό σημαίνει ότι δεν περιέχει μελάγχρωση, ή μόνο σε πολύ περιορισμένο βαθμό, καθιστώντας τα ευαίσθητα στην υπεριώδη ακτινοβολία όταν χρησιμοποιούνται σε μια κατασκευή όπου το PVC δεν θα παίξει το ρόλο ενός απορροφητή UV. Στην κανονική κατασκευή το PVC απορροφά αρκετή ενέργεια UV για να εγγυηθεί μια καλή διάρκεια ζωής του επικαλυμμένου υφάσματος. Χρώση ή UV σταθεροποίηση του πολυεστέρα είναι μια δυνατότητα.

Ο πολυεστέρας είναι ένα οργανικό υλικό που χαρακτηρίζεται από μία ομάδα εστέρων. Ως εκ τούτου, είναι ευαίσθητος σε υδρόλυση. Και πάλι το φράγμα PVC παίξει το ρόλο της προστασίας του νήματος από τη γήρανση και την οξειδωση. Σε μερικές περιπτώσεις, όπου η επένδυση από PVC εμφανίζει διατρήσεις, ή δεν διεισδύει στο ύφασμα, "ύγρανση" μπορεί να εμφανιστεί. Ύγρανση είναι η παροχή νερού μεταξύ των νημάτων που οδηγεί σε ανάπτυξη μυκήτων και βακτηρίων. Το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα το κιτρίνισμα καθώς και καφέ γραμμές και στίγματα κατά μήκος του υφάσματος αναπτύσσονται. Επίσης προκαλείται και μείωση της ικανότητας πρόσφυσης του υλικού. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στις ραφές ή απελασματοποίηση (φούσκωμα) της επικάλυψης. Μία από τις εναλλακτικές λύσεις για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος σε βραχυπρόθεσμο ορίζοντα είναι η χρήση των υδρόφοβων κατεργασμένων νημάτων - που συνήθως αναφέρονται ως "low wick" νήματα.

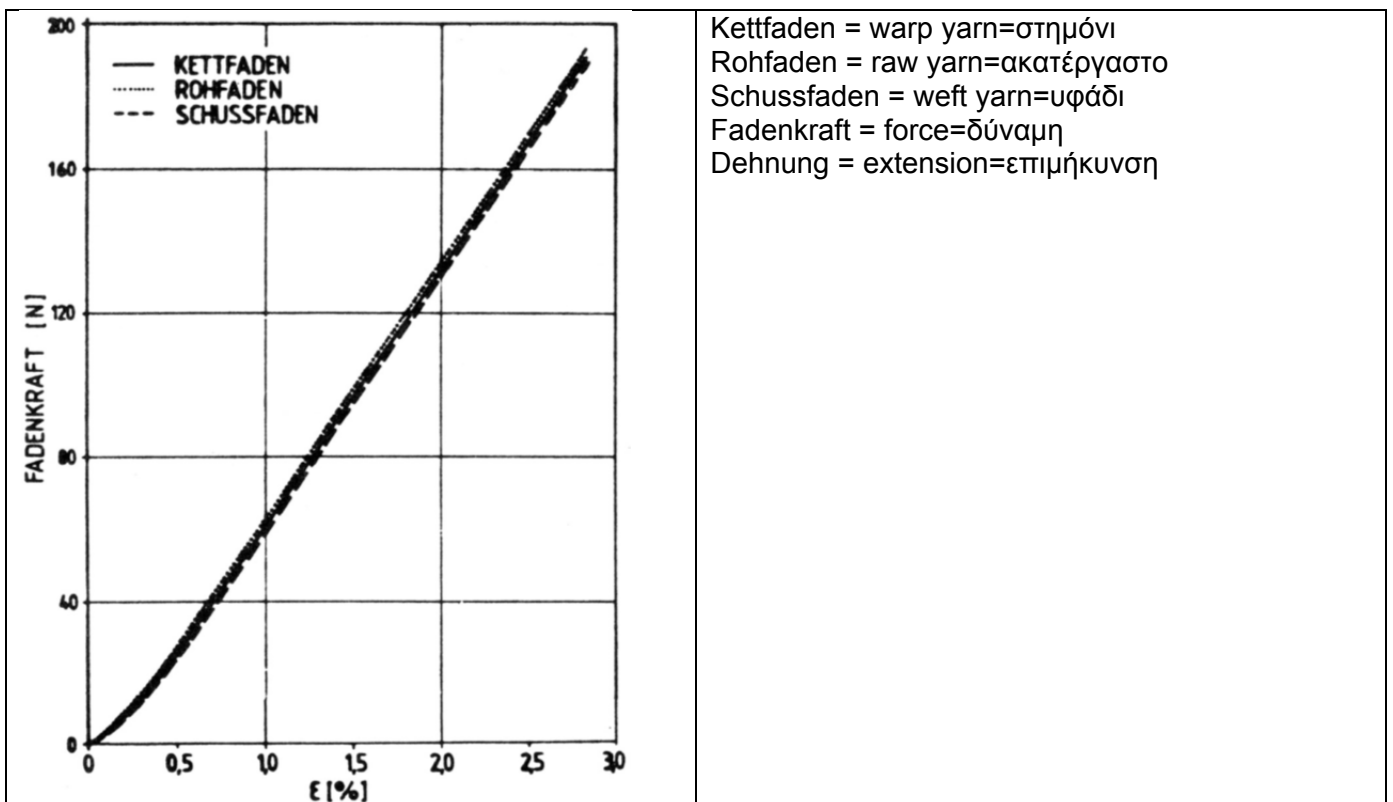


Σχ. 3.43 Αναπαράσταση υφάσματος PANAMA διπλής πλέξης με low wick νήματα

### 3.2.1.3 Υαλονήματα (fiber glass)

Οι γυάλινες ίνες παρέχονται σε διάφορες αρχικές διαμέτρους: 3, 6, 9 και 11 micron. Η αντοχή των νημάτων εξαρτάται κυρίως από τη διάμετρο. Αυτό οφείλεται στη διανομή της εγγενούς τάσης στα νημάτια. Οι γυάλινες ίνες προέρχονται από τήξη. Με αυτόν τον τρόπο τα εξωτερικά στρώματα ψύχονται πιο γρήγορα από ότι ο πυρήνας, ο οποίος δημιουργεί μια εγγενή κατάσταση έντασης. Στο εξωτερικό περίβλημα υπάρχουν θλιπτικές παραμορφώσεις κατά την αξονική διεύθυνση και τάσεις εφελκυσμού στο κέντρο. Στην περίπτωση των φορτίων εφελκυσμού τα εφελκυστικά φορτία προστίθενται στις εγγενείς τάσεις.

Τα υαλονήματα επιδεικνύουν γραμμική συμπεριφορά μέχρι το σημείο θραύσης, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.44.



Kettfaden = warp yarn=στημόνι  
 Rohfaden = raw yarn=ακατέργαστο  
 Schussfaden = weft yarn=υφάδι  
 Fadenkraft = force=δύναμη  
 Dehnung = extension=επιμήκυνση

Σχ. 3.44 Force-extension behavior of glass filaments

E-glass χρησιμοποιείται για επικαλυμμένα υφάσματα. Η σύνθεσή του είναι η εξής:

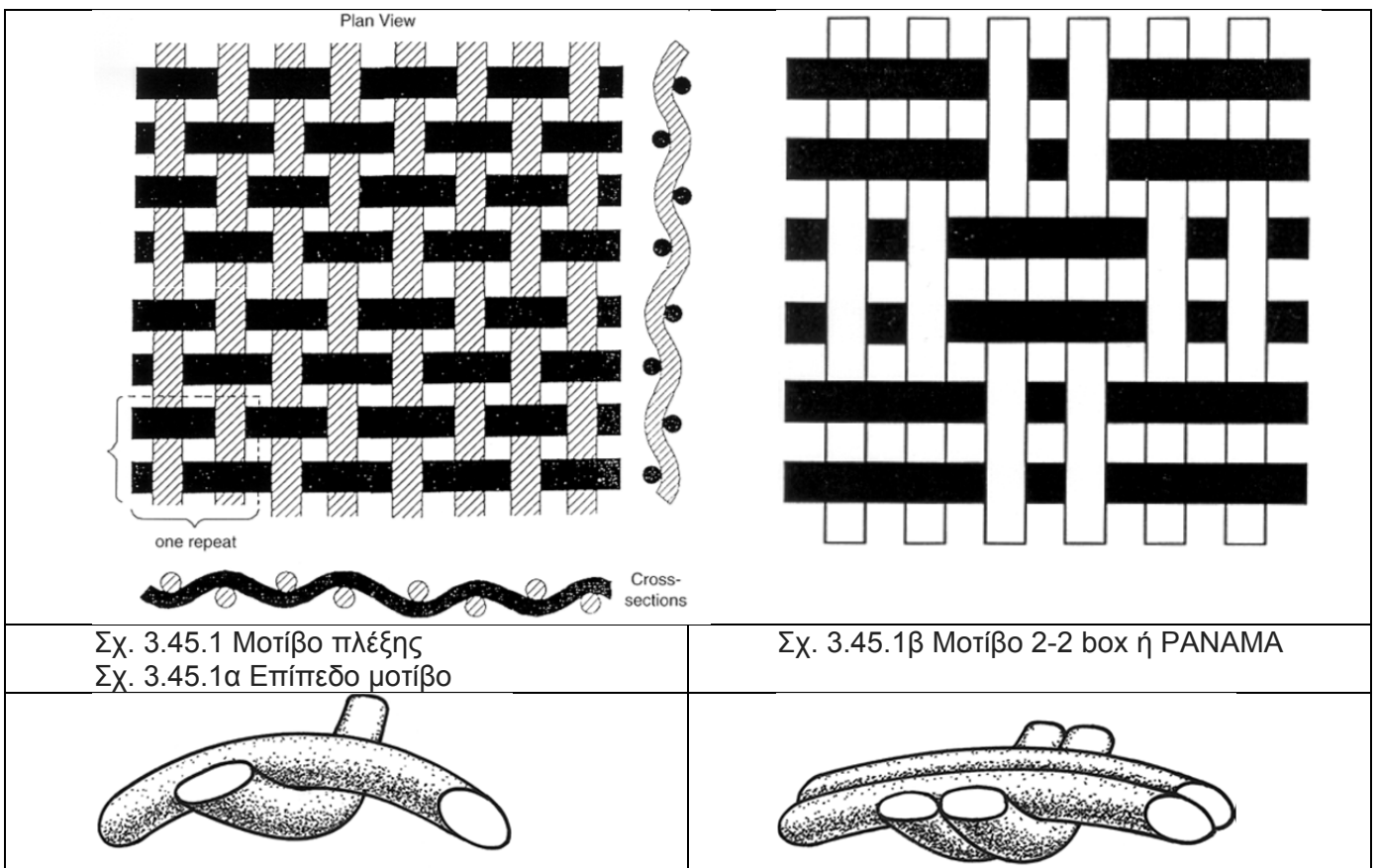
53 - 54% SiO<sub>2</sub>? 14 - 15% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>? 20 - 24% CaO, MgO? 6,5 έως 9% B<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Τα υαλονήματα είναι ευαίσθητα στις επιδράσεις της υγρασίας μπορεί βλάψει την εξωτερική ζώνη η οποία είναι υπό τάση. Για την προστασία τους είναι επικαλυμμένες είτε με PTFE ή σιλικόνη. Το γυαλί είναι ανθεκτικό σε υψηλές θερμοκρασίες και μπορεί να αντέξει τις θερμοκρασίες επεξεργασίας PTFE. Το υαλονήματα είναι ανθεκτικό στην υπεριώδη ακτινοβολία και στις καιρικές συνθήκες, έχει χαμηλή συμπεριφορά σε ερπυσμό και καλή σταθερότητα διαστάσεων. Τα υαλονήματα θα χάσουν την αντοχή τους αν κάμπτονται ή λυγίζουν.

### 3.2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΒΑΣΙΚΟΥ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ

#### 3.2.2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Τα υφάσματα γενικά είναι υφασμένα με την εισαγωγή νήματα υφαδιού μεταξύ δύο στρωμάτων από νήματα στημονιού σε 90 ° προς τα νήματα του στημονιού, ακολουθώντας το μοτίβο με το οποίο σχεδιάστηκε από τον αριθμό των νημάτων ανά εκατοστό και ένα μοτίβο ύφανσης. Τα κύρια μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην ύφανση εφελκόμενων μεμβρανών είναι απλή πλέξη ή box με 2-2 ύφανση (PANAMA), όπως φαίνεται στο Σχ. 3.45. Η «πτύχωση» των νημάτων είναι λιγότερη στην ύφανση PANAMA.



Τα υφάσματα χαρακτηρίζονται από:

- α) Επιφανειακό βάρος σε g / m<sup>2</sup>
- β) Αριθμός των νημάτων ανά εκατοστό στο υφάδι (ή στην πλήρωση) και στο στημόνι
- γ) μοτίβο ύφανσης
- δ) πτύχωση των νημάτων υφαδιού και στημονιού
- ε) Συντελεστής Κάλυψης (ή πορώδες)
- στ) Μηχανικές και φυσικές ιδιότητες.

Άλλα υφάσματα όπως η "weft-inserted" ύφανση μπορεί να επιτευχθεί με μια διαδικασία πλεξίματος με στημόνι που ενώνει στημόνι και υφάδι χωρίς να διασταυρώνονται τα νήματα. Ο κορμός του στημονιού και του υφαδιού υπερτίθενται το ένα πάνω από το άλλο και στη συνέχεια δένονται από ένα λεπτό πλεκτό νήμα. Η πτύχωση των νημάτων είναι πολύ χαμηλή, αλλά η διατηρητική ικανότητα του υφάσματος μειώνεται.

Το βάρος ενός υφάσματος μπορεί να μεταβληθεί με την αύξηση του αριθμού ή τη γραμμική πυκνότητα των νημάτων. Ανάλογα με τις συνθήκες της τάσης κατά τη διάρκεια της ύφανσης σε δεδομένο αργαλειό, η πτύχωση των νημάτων μπορεί να αλλάξει.

Κατά συνέπεια, το πάχος και η επιμήκυνση των υφασμάτων αυξάνονται με πολύ κυματιστά νήματα κάτω από χαμηλή πίεση, καθώς επίσης και με μοτίβα όπως της απλής ύφανσης. Ένα πιο σταθερό ύφασμα λαμβάνεται με εφαρμογή έντασης στο στημόνι και στο υφάδι μιας απλής ύφανσης, προκειμένου να επιτευχθεί πιο συνεκτική και πιο ισορροπημένη δυσκαμψία σε όλο το ύφασμα.

### 3.2.2.2 ΦΙΝΙΡΙΣΜΑ

Σε γενικές γραμμές, μετά την ύφανση ακολουθεί ένα ειδικό φινίρισμα του υφάσματος. Ο σκοπός αυτού του πολύ λεπτού στρώματος είναι να αυξηθούν οι χημικές και φυσικές συμβατότητες μεταξύ του υφάσματος και την πρώτη επικάλυψη του. Μια καλύτερη συμβατότητα σημαίνει πρώτον, μια καλή διαβρεξιμότητα των ινών από την υγρή ρητίνη στο στάδιο επεξεργασίας και δεύτερον, μετά τη διαβροχή καλή φυσική και χημική πρόσφυση μεταξύ ινών και ρητίνης.

Για τα πολυεστερικά υφάσματα, η χρήση των νημάτων low-wick σημαίνει ότι μια υδρόφοβη ένωση έχει τεθεί επάνω στην ίνα, ώστε να έχουν την καλύτερη συμβατότητα η ρητίνη με τις ίνες, έτσι ώστε να αποφευχθεί η διάχυση της υγρασίας στη διεπαφή ίνας / ρητίνης.

Για τα υφάσματα από υαλόνημα, μια "base coat" εφαρμόζεται για να παρέχει μια σταθερή αγκύρωση της επικάλυψης PTFE. Επίσης, καθορίζει τα χαρακτηριστικά ευελιξίας των τελικών επικαλυμμένων προϊόντων. Ανάλογα με τις αναμενόμενες ιδιότητες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές συνθέσεις.

Για χαμηλής αντίδρασης υλικά, όπως υφάσματα αραμιδίου, είναι αναγκαία μία ειδική χημική τροποποίηση της επιφάνειας των ινών για την αποφυγή αποφλοιώσης μεταξύ επίστρωσης και υφάσματος.

### 3.2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗΣ

#### 3.2.3.1 ΟΡΙΣΜΟΣ

Η προστασία του υφάσματος επιτυγχάνεται γενικά με την εφαρμογή μιας επικάλυψης ρητίνης σε μορφή πάστας. Οι επιστρώσεις έχουν ειδικά χημικά συστατικά τα οποία καθιστούν τη βασική ρητίνη κατάλληλη για την επεξεργασία, καθώς και την αύξηση των επιπέδων της απόδοσης των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, όπως η επιβράδυνση της φωτιάς, η αντίσταση των μυκήτων, και η μελάγχρωση του χρώματος. Η διαδικασία επίστρωσης είναι συγκεκριμένη για κάθε χημική ρητίνη που χρησιμοποιείται. Μία επικάλυψη χαρακτηρίζεται από την:

α) Βάρος σε g / m<sup>2</sup>

β) Πάχος μετράται είτε ως το συνολικό πάχος του τελικού προϊόντος ή ως η απόσταση μεταξύ της κορυφής του νήματος του υφάσματος και της εξωτερικής επιφάνειας της επικάλυψης.

#### 3.2.3.2 PVC ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ

Η σύνθεση PVC είναι τύπου επιβράδυνσης της φλόγας, δεδομένου ότι πρέπει να συμμορφωθεί με πολλούς αυστηρούς κανονισμούς ευφλεκτότητας όπως η γαλλική M2, η γερμανική B1 ή το NFPA ΗΠΑ. Αυτά έχουν μια ξεχωριστή επίπτωση στη σύνθεση του πλαστικοποιημένου PVC.

Για την άμεση διαδικασία επίστρωσης, οι PVC τύποι που χρησιμοποιούνται για "πάστα" PVC είναι είτε από εναιώρημα PVC είτε από γαλάκτωμα PVC και που περιέχουν σημαντικές ποσότητες από γαλακτωματοποιητές. Η επιλογή αυτών των πολυμερών κατά τη διαδικασία παραγωγής του



επικαλυμμένου υφάσματος είναι κρίσιμη με τον τρόπο που ο τύπος και η συγκέντρωση των γαλακτωματοποιητών έχει αντίκτυπο στην επεξεργασία (ρεολογία), τις θερμικές ιδιότητες, τον καθαρισμό και την ποιότητα της επιφάνειας.

Το δεύτερο σημαντικό συστατικό στην επίστρωση είναι ο πλαστικοποιητής. Πλαστικοποιητές μπορούν να επιλέγονται από μια σειρά από φθαλικές ενώσεις, φωσφορικά άλατα, χλωριωμένα προϊόντα ή άλλους εστέρες.

Όσον αφορά τα επιβραδυντικά φλόγας, τα φωσφορικά άλατα είναι από τους πλέον προτιμώμενους πλαστικοποιητές, όπου από την άποψη της απόδοσης, το προϊόν είναι το πιο αποτελεσματικό από μία ομάδα ακρυλικών. Με τη χρήση φωσφορικών αλάτων όμως, θα πρέπει να έχουμε κατά νου ότι αυτά τα μόρια έχουν υψηλή τάση για μετανάστευση και είναι επιρρεπή σε βιολογικές επίθεσεις. Μάλιστα ενεργούν ως πρώτη ύλη για τα βακτηρίδια και τους μύκητες. Οι φθαλικές ενώσεις, από την άλλη πλευρά είναι οι πιο ευρέως χρησιμοποιούμενοι πλαστικοποιητές. Η πολύ καλή συμβατότητα τους με το PVC, τα καθιστά αναντικατάστατα στη διαμόρφωση του μαλακού PVC. Τα φωσφορικά άλατα, είναι επίσης επιρρεπή σε μετανάστευση και υδρόλυση. Αυτό συμβαίνει πιο έντονα με τα κλαδωτούς από ότι με τους γραμμικούς τύπους.

Χλωριωμένη παραφίνη είναι το τρίτο είδος των πλαστικοποιητών. Είναι εξαιρετικά αποτελεσματική σε πλαστικοποίησης σε συνδυασμό με επαρκή ιδιότητα ως επιβραδυντικά φλόγας, αλλά έχουν επίσης μια πολύ ισχυρή τάση να μεταναστεύουν προς την επιφάνεια, με αποτέλεσμα μια ισχυρή συσσώρευση βρωμιάς.

Για να παρουσιαστεί το ύφασμα με λάμψη και ομορφιά, το PVC είναι πάντα χρωματισμένο, ως επί το πλείστον σε λευκό. Επίσης ο τύπος και η συγκέντρωση της χρωστικής ουσίας διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο χρώμα, τη σταθερότητα UV και την αδιαφάνεια. Όπως και με τους πλαστικοποιητές, οι χρωστικές ουσίες μπορεί να επηρεάσουν την σταθερότητα στο φως και τις ιδιότητες επιφάνειας όπως η συσσώρευση βρωμιάς.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα φθοράς και η συσσώρευση βρωμιάς η επικάλυψη PVC σταθεροποιείται με μόρια που ενεργούν ως θερμικοί σταθεροποιητές, σταθεροποιητές οξειδωσης και UV / σταθεροποιητές φωτός.

Προκειμένου να πληρούν τα κριτήρια αναφλεξιμότητας, έχουν προστεθεί πρόσθετα επιβραδυντικά φλόγας όπως το οξειδίο του αντιμονίου, τριένυδρο αργίλιο, φωσφορικά άλατα, κ.λπ. Οι εξαιρετικές ιδιότητες για επιβράδυνση της φλόγας του PVC είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με το χλώριο του PVC. Μαζί με το οξειδίο του αντιμονίου οι ρίζες χλωρίου στην αέρια φάση εμφανίζουν υψηλή αποδοτικότητα ανασυνδυασμού, σκοτώνοντας με τον τρόπο αυτό την φλόγα ακαριαία.

Τα φωσφορικά άλατα και το υδροξείδιο του αργιλίου, από την άλλη πλευρά δρουν ως ενδοθερμικά φράγματα της επιφάνειας εμποδίζοντας την περαιτέρω πυρόλυση της καύσιμης ύλης.

Είναι δυνατή η ανακύκλωση των υφασμάτων με επικάλυψη PVC χρησιμοποιώντας μια διαδικασία (κατοχυρωμένη με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τη Solvay και εφαρμόζεται από την Ferrari), η οποία επιτρέπει τη χωριστή ανακύκλωση της ρητίνης PVC και τις ίνες πολυεστέρα με επιλεκτική χημική διάλυση.

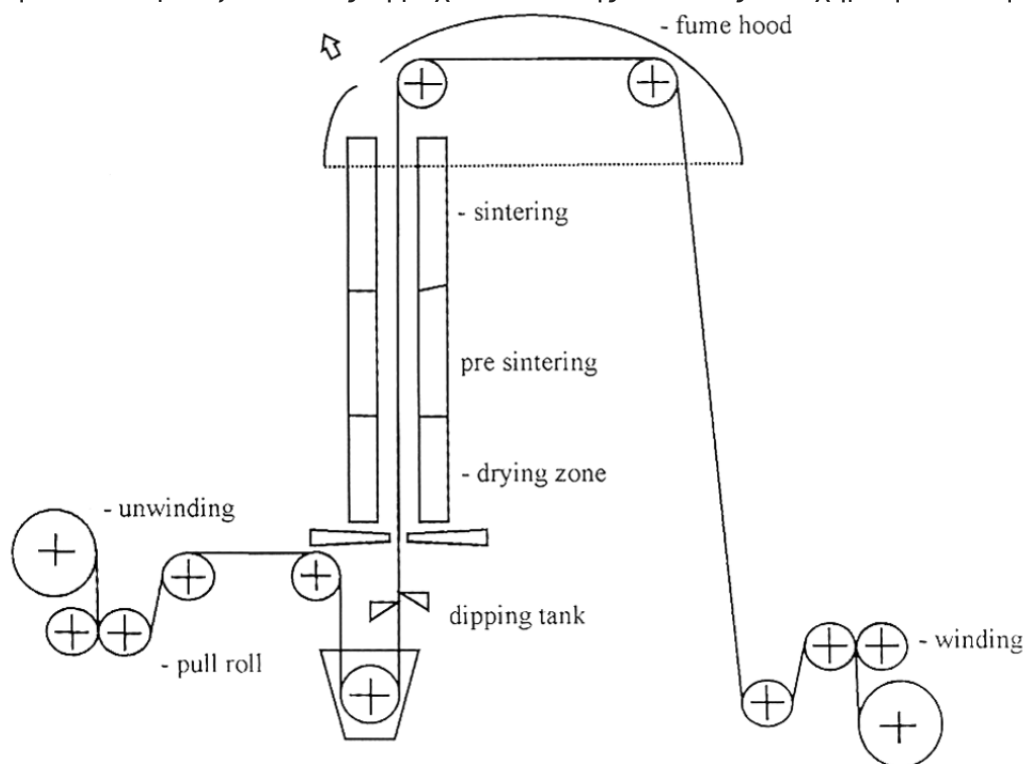
Τα χρησιμοποιημένα υλικά κόβονται μηχανικά σε μικρά κομματάκια (pellets) μήκος περίπου 20 έως 60 mm. Σε αυτό το στάδιο όλα τα ετερογενή υλικά, όπως μεταλλικά μέρη, μπορούν να αφαιρεθούν. Το πλαστικοποιημένο PVC διαλύεται σε ένα κετονικό διαλύτη στους 115° C ενώ οι ίνες PET παραμένουν σε εναιώρημα εντός του μέσου. Οι ίνες PET ανακτούνται με διήθηση και ξήρανση. Το διάλυμα PVC συνέχεια καθιζάνει σε θερμοκρασία δωματίου χρησιμοποιώντας ένα μη-διαλύτη όπως το νερό. Στο βήμα αυτό, είναι δυνατόν να εισαχθούν τα πρόσθετα, προκειμένου να επανασταθεροποιηθεί η ρητίνη. Το ίζημα στροβιλιζεται και διηθείται για να δώσει μια ελεύθερη ρέουσα σκόνη του οποίου η κοκκομέτρηση είναι περίπου 350 μm. Η σκόνη αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μείγμα χωρίς καμία άλλη επεξεργασία. Το νερό και ο διαλύτης είναι σε φάση διαχωρισμού και ανακτάται για επαναχρησιμοποίηση.

Η όλη διαδικασία λειτουργεί σε ένα εντελώς κλειστό βρόχο και κάθε ένα από τα δύο συστατικά μπορούν να ξαναχρησιμοποιηθούν.

### 3.2.3.3 PTFE ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ

Οι υφασμάτινες μεμβράνες κατασκευάζονται επίσης από υαλονήματα που εμβαπτίζονται βαθειά με διασπορά PTFE. Η ξήρανση και πυροσυσσωμάτωση σε 350-380 ° C ολοκληρώνει την διαδικασία επίστρωσης(Σχήμα3.46.).

Το PTFE είναι ένα μοναδικό πολυμερές με εξαιρετικές ιδιότητες, που δεν μπορούν να επιτευχθούν με τα περισσότερα άλλα πολυμερή. Αυτές οι αξιοσημείωτες ιδιότητες συνδέονται στενά με τη μοριακή δομή που χαρακτηρίζεται από μακράς αλυσίδας μόρια που αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες μονάδες μονομερούς τετραφθοροαιθυλενίου. Η ένωση άνθρακα-φθορίου αποδίδει ενέργεια 460 kJ / mol και αποτελεί έναν από τους ισχυρότερους δεσμούς στην οργανική χημεία. Η αλυσίδα PTFE υιοθετεί μια ελαφριά συστροφής έλικα με έναν πυρήνα με βάση τον άνθρακα και ένα εξωτερικό περίβλημα από άτομα φθορίου, η οποία θωρακίζει εντελώς τη ραχοκοκαλιά της αλυσίδας από χημική επίθεση.



Σχ. 3.46 Επεξεργασία PTFE μεμβρανών.

Δεδομένου ότι το ανώτατο όριο του PTFE σε συνεχή θερμοκρασία λειτουργίας είναι 260 ° C μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμές κλιματικές ζώνες. Το κατώτερο όριο της συνεχούς θερμοκρασίας λειτουργίας είναι -200 ° C. Διακυμάνσεις της θερμοκρασίας δεν έχουν καμία επίδραση στην διάρκεια ζωής. Οι πλαστικοποιητές δεν είναι απαραίτητοι για την ευελιξία και την αντοχή σε κρούση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Το PTFE έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (0.25-0.50W/mK<sup>0</sup>) και καλές μονωτικές ιδιότητες.

Το PTFE είναι υπό κανονικές συνθήκες άφλεκτο. Μόνο εάν το περιβάλλον περιέχει περισσότερο από 95% οξυγόνο το PTFE αδυνατεί να αντισταθεί στη φωτιά. Οι PTFE μεμβράνες έχουν περάσει πολλές διεθνείς δοκιμές αναφλεξιμότητας με άριστα αποτελέσματα: ASTM E84, ASTM E108, NFPA 701 (ΗΠΑ), BS 476 Μέρος 3, Μέρος 5, Μέρος 6, Μέρος 7 (GB), NF P 92-503 M1 (F), και DIN 4102 B1 / A2 (D). Το PTFE έχει ένα υψηλό ιξώδες τήγματος (10<sup>10</sup> Pa\*s), το οποίο εμποδίζει το σχηματισμό λειωμένων σταγονιδίων κατά τη διάρκεια μιας πυρκαγιάς.

Το PTFE είναι ανθεκτικό έναντι των ισχυρότερων διαβρωτικών ουσιών, όπως το υδροχλωρικό οξύ, υδροφθορικό οξύ, θειικό οξύ και νιτρικό οξύ, θερμό διάλυμα υδροξειδίου του νατρίου, υδραζίνη ή τα οξειδία του αζώτου. Το PTFE δεν είναι διαλυτό σε κοινούς διαλύτες, όπως αλκοόλες, εστέρες, κετόνες και της βενζίνης. Ως εκ τούτου, οι μεμβράνες PTFE είναι αδρανή έναντι όλων των περιβαλλοντικών ρύπων, όπως τα βιομηχανικά και της κυκλοφορίας καυσαερίων.

Τα μόρια είναι μακροσκοπικά μη πολικά. Επιφανειακή ενέργεια του είναι μία από τις χαμηλότερα γνωστές (περ. 18,5 mN/m) και οδηγεί στην αντι-κολλητική φύση του PTFE. Ως εκ τούτου, οι μεμβράνες PTFE επιδεικνύουν καλές ιδιότητες αυτο-καθαρισμού και απωθητικού του νερού.

Λόγω των υδρόφοβων ιδιοτήτων του, το PTFE είναι μια εξαιρετική προστασία για την ενίσχυση της πλέξης της μεμβράνης, καθώς το υαλόνημα χάνει την αντοχή εφελκυσμού του σε επαφή με υγρασία.

Το PTFE είναι εντελώς ανθεκτική σε UV και IR ακτινοβολία. Οι PTFE μεμβράνες δεν δείχνουν γήρανση ή ευθραυστότητα που να οφείλεται σε UV / IR-ακτινοβολία. Σε αντίθεση με το PVC αυτή η απόδοση επιτυγχάνεται χωρίς την ανάγκη χρήσης πλαστικοποιητών, αντιοξειδωτικών και απορροφητών UV-κ.λπ., τα οποία θα μπορούσαν να μεταναστεύουν έξω.

#### 3.2.3.4 ΕΞΩΤΕΡΙΚΗ ΕΠΙΣΤΡΩΣΗ

Η εξωτερική επίστρωση (λάκα), χρησιμοποιείται προκειμένου να εξασφαλίζει καλή δυνατότητα καθαρισμού, καλής ολίσθησης και επεξεργασία, και να προσδίδουν ένα αποτελεσματικό εμπόδιο για τη μετανάστευση του πλαστικοποιητή και τις καιρικές συνθήκες. Τα περισσότερα υγρά βερνίκια για τα υφάσματα με επικάλυψη το PVC που κατασκευάζονται είναι ακρυλικά, PVDF / ακρυλικά μείγματα και PVDF (φθοριούχο πολυβινυλιδένιο).

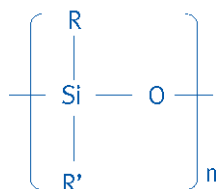
Οι PVF (πολυβινυλοφθορίδιο) ταινίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και να παρέχουν μια καλή αντίσταση και τη χαμηλότερη διάβρωση κατά τη διάρκεια της γήρανσης. Τα φθοριούχα έχουν μια καλύτερη αντίσταση στην υπεριώδη ακτινοβολία από τα ακρυλικά.

Προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι έχουμε πάντα να κάνουμε συμβιβασμούς μεταξύ των δύο, για παράδειγμα, βελτιστοποιημένη συγκολλησιμότητα, βελτιστοποιημένη αντοχή στις καιρικές συνθήκες και αισθητική απόδοση.

Για υφάσματα υαλονημάτων με επικάλυψη PTFE η τελική επίστρωση αποτελείται από FEP (φθόριο συμπολυμερές αιθυλενίου προπυλενίου) για την ενίσχυση της υδατοστεγανότητας, συγκολλησιμότητας και αντοχή στη μυκητίαση και οφείλεται σε ένα χαμηλότερο σημείο μαλακύνσεως του FEP από το PTFE.

#### 3.2.3.5 ΣΙΛΙΚΟΝΟΥΧΑ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

Η επίστρωση σιλικόνης βασίζεται σε ελαστικά σιλικόνης τα οποία λαμβάνονται με διασταυρούμενη σύνδεση κατά την επεξεργασία, μακρομορίων πυριτίου:



Διαφορετικές διαμορφώσεις πυριτίου, σε συνδυασμό με διαφορετικές διαδικασίες επικάλυψης, επιτρέπει την παραγωγή υλικών που χρειάζονται στις διάφορες χρήσεις. Βασικά, λάστιχα σιλικόνης συνδυάζουν ελαστικότητα και μηχανική αντοχή σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασίας [-50 ° C έως + 200 ° C], και αντοχή σε επιθετικές συνθήκες ατμόσφαιρας.

Παρά τα πολλά πλεονεκτήματα, όπως ευκολία χειρισμού, όμως όταν συγκρίνεται με τα υφάσματα PTFE μειονεκτούν ως προς την συλλογή βρομιάς, την «σταθερότητα». Ωστόσο, πρόσφατα αναπτύχθηκαν επιφανειακές επεξεργασίες που βοηθούν να αντισταθμιστούν αυτά τα ελαττώματα.

#### 3.2.4 ΥΦΑΣΜΑΤΑ ΜΕ ΕΠΙΚΑΛΥΨΗ

##### 3.2.4.1 ΤΕΧΝΙΚΟ ΔΕΛΤΙΟ ΜΕ ΤΑ ΚΟΙΝΩΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΑ ΠΡΟΤΥΠΑ

Οι παραγωγοί των υφασμάτων έχουν τεχνικά δελτία που περιγράφουν τα κύρια χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των προϊόντων τους. Τυπικά, το δελτίο περιγράφει:

α) Χαρακτηριστικά του βασικού υφάσματος και των νημάτων: το υλικό, το βάρος, ο τρόπος ύφανσης, αριθμός νημάτων

β) Χαρακτηριστικά της επικάλυψης ή της τελικής στρώσης: υλικό, το βάρος, συνολικό πάχος και το πάχος επικάλυψης

γ) Χαρακτηριστικά του επιχρισμένου υφάσματος: βάρος, πάχος, διαθέσιμο πλάτος, το χρώμα

δ) Μηχανικά χαρακτηριστικά του επικαλυμμένου υφάσματος: αντοχή σε εφελκυσμό σε στημόνι και υφάδι, τραπεζοειδείς σχίσιμο, προσκόλληση επικάλυψης

ε) Άλλες σημαντικές ιδιότητες των επικαλυμμένων υφασμάτων: συμπεριφορά σε φωτιά, μετάδοση φωτός.

Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά αξιολογούνται σύμφωνα με το Διεθνές (ISO) ή ευρωπαϊκά πρότυπα (EN), εφόσον υπάρχουν. Εάν όχι, τα εθνικά πρότυπα χρησιμοποιούνται σαν NF, DIN, BS, ASTM. Τα πρότυπα απαριθμούνται στο παράρτημα Β.

Πιο αναλυτικές ιδιότητες, όπως καμπύλες διαζονικού εφελκυσμού μπορούν να ληφθούν από τους παραγωγούς.

### 3.2.4.2 ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Μια σειρά από κατασκευαστές παράγουν ένα φάσμα διαφορετικών ποιοτήτων σε αντοχή τόσο PVC/PES όσο και PTFE/fiberglass. Για επικαλυμμένα με PVC υφάσματα από πολυεστέρα, η ομάδα εργασίας για την αρχιτεκτονική στο MESSE FRANKFURT 1 και ο FRENCH DESIGN GUIDE3 έχουν το καθένα προτείνει μια ταξινόμηση σε πέντε διακριτούς τύπους που ακολουθούν τα κύρια χαρακτηριστικά, όπως περιγράφονται στον Πίνακα 2. Οι κύριες παράμετροι ταξινόμησης των υλικών είναι η αντοχή σε εφελκυσμό και η σύνθεση των επικαλυμμένων υφασμάτων.

Type	1	2	3	4	5
<b>Surface weight (g/m<sup>2</sup>)</b>					
French design guide	720	1 000	1 200	1 400	2 000
WG Messe Frankfurt	800	900	1 050	1 300	1 450
<b>Yarn linear density (dtex)</b>					
French design guide					
WG Messe Frankfurt	1 100	1 100	1 670	1 670	2 200
<b>Tensile strength warp/weft (kN/m)</b>					
French design guide	60/60	84/80	110/104	120/130	160/170
WG Messe Frankfurt	60/60	88/79	115/102	149/128	196/166
<b>Trapezoidal test warp/weft (N)</b>					
French design guide					
WG Messe Frankfurt	310/350	520/580	800/950	1 100/1 400	1 600/1 800
<b>Yarn number per cm warp/weft</b>					
French design guide					
WG Messe Frankfurt	9/9	12/12	10.5/10.5	14/14	14/14

Πίνακας 2 Ταξινόμηση των μεμβρανών: με επικάλυψη PVC υφάσματα από πολυεστέρα

Για υφάσματα από fiberglass με επικάλυψη PTFE, η κατάσταση είναι διαφορετική. Κατ 'αναλογία με τον Πίνακα 2 γίνεται ταξινόμηση για υφάσματα fiberglass επικαλυμμένα PTFE σε επτά διαφορετικούς τύπους παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Είναι επομένως δυνατή μια σύγκριση μεταξύ τύπου 1 έως 5 και το είδος G3 ως G7 που αναφέρεται σε αυτές τις δύο ταξινομήσεις.

Type	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
<b>Tensile strenght warp/weft (kN/m)</b>	26/22	43/28	70/70	90/72	124/100	140/120	170/158
<b>Filament diameter (micrometer)</b>	9	6	3	6	3	3 or 6	3
<b>Surface weight (g/m<sup>2</sup>)</b>	500	420	800	1 000	1 200	1 500	1 600
<b>Trapezoidal tear warp/weft (N)</b>			300/300	300/300	400/400	500/500	450/450

Πίνακας 3 Ταξινόμηση των μεμβρανών από υφάσματα με fiberglass επιχρισμένα με PTFE

Γενικές συγκριτικές ιδιότητες των υλικών για κατασκευές εφελκόμενων μεμβρανών δίδονται στον Πίνακα 4. Μεταξύ των δύο κύριων υλικών που χρησιμοποιούνται μέχρι τώρα, το PVC/PES τείνει να χρησιμοποιείται πιο συχνά από ότι PTFE/fiberglass. Παρ'όλα αυτά κάθε υλικό έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του τα οποία πρέπει να εξεταστούν σε σχέση με το κόστος και τις λειτουργικές παραμέτρους του κάθε έργου.

	PVC coated polyester fabrics	PTFE coated glass fabrics	Silicone coated glass fabrics	PTFE coated PTFE fabrics
Tensile strength warp/weft (kN/m)	115/102	124/100	107/105	84/80
Fabric weight (g/m <sup>2</sup> )	1200 (type 3)	1200 (type G5)	1100	830
Trapezoidal tear warp/weft (N)	800/950	400/400	960/700	925/925
Visible light transmission (%)	10-15	10-20	< 80	19-38
Flexibility/crease recovery	high	low	high	high
Fire reaction	M2 (NFP 92 503) B1 (DIN 4102)	M1 (NFP 92 503) B1/A2 (DIN 4102)	A (ASTM E-108) no toxicity of smokes	
Cleaning	easier with top coats	self cleaning	self cleaning	self cleaning
How to make the seams	by high frequency	thermally	vulcanisation	stitching
Life span (years)	> 15-20	> 25	> 25	
Cost	low	high	high	

Πίνακας 4 Γενικές συγκριτικές ιδιότητες των υλικών για εφελκυστικές μεμβράνες

Αυτές οι διαφορές σχετίζονται με τη φύση των υλικών: έχουν μεγαλύτερη αντοχή από ότι αυτά του πολυεστέρα αλλά μικρότερη ευκαμψία λόγω της χαμηλότερης ευκαμψία τους. Έτσι, το τελικό προϊόν παρουσιάζει μεγαλύτερες δυσκολίες στην αναδίπλωση και συσκευασία για την τελική του παράδοση. Από την άλλη πλευρά, το φαινόμενο του ερπυσμού/χαλάρωση του πολυεστέρα απαιτεί διαφορετικές διαδικασίες για την τάνυση από εκείνες του υαλονήματος.

Η φύση των πολυμερών των επικαλύψεων αντιπροσωπεύει τις διαφορές. Το PTFE και η σιλικόνη έχουν καλή χημική αντοχή σχετικά με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους λόγω της χημικής τους αδράνειας. Το PVC πρέπει να διαμορφωθεί με πλαστικοποιητές για να είναι τόσο μαλακό όπως απαιτείται από τις μηχανικές απαιτήσεις.

Ο "Αυτο-καθαρισμός" είναι καλύτερος όταν τα συστατικά φθορίου βρίσκονται στην επιφάνεια των μεμβρανών.

Η αντίδραση στην φωτιά είναι επίσης μία διακριτική παράμετρος μεταξύ των υλικών όπου η διάδοση της φλόγας ή η τοξικότητα του καπνού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Η ευρωπαϊκή οδηγία για την κατασκευή των προϊόντων δομικών κατασκευών 89/106 / ΕΟΚ του Συμβουλίου της 21/12/1988 ορίζει νέους κανόνες για την απαίτηση πυρασφάλειας (Παράρτημα Γ). Οι κατηγορίες της ευρωπαϊκής νομοθεσίας δεν είναι, ακόμη, υποχρεωτική για τα υλικά των μεμβρανών σε εφελκυσμό, αλλά θα μπορούσαν να υιοθετηθούν από τον παραγωγό και τον κατασκευαστή. Νέες δοκιμές της αντίδρασης στη φωτιά έχουν οριστεί (Παράρτημα Γ).

Η διάρκεια ζωής όλων των υλικών, λόγω βελτιώσεις στην ποιότητα τους έχει αυξηθεί. Παρ'όλα αυτά τα υφάσματα από υαλονήματα προσφέρουν ένα πλεονέκτημα έναντι των υφασμάτων από πολυεστέρα. Η αντοχή των υφασμάτων από πολυεστέρα μπορούν τώρα να αξιολογείται λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο της προέντασης και το επίπεδο της ρύπανσης, όπου η μεμβράνη είναι τοποθετημένη. Γενικότερα, η γήρανση του υφάσματος σε συνθήκες λειτουργίας οδηγεί σε μια απώλεια αντοχής σε σύγκριση με το νέο ύφασμα.

Εκτός από τα δύο κυριότερα υλικά, για ορισμένες ειδικές εφαρμογές τα με επικάλυψη σιλικόνης υφάσματα υαλονημάτων έχουν κάποιες ευκαιρίες να αναπτυχθούν. Επίσης τα επικαλυμμένα με PTFE υφάσματα PTFE έχουν, για παράδειγμα, αντίσταση στο σχίσιμο ανώτερη από τα άλλα.

### 3.2.5 ΦΥΛΛΑ ETFE

Το ETFE είναι ένα συμπολυμερές αιθυλενίου και τετραφθοροαιθυλενίου, που έχει ένα εύρος θερμοκρασίας τήξεως 250-270°C, πυκνότητα μεταξύ 1.73-1.77g/cm<sup>3</sup>, τον δείκτη LOI (Limit Oxygen Index) 30% και πολύ καλή χημική αντίσταση.

Τα φύλλα ETFE έχουν ειδικά πλεονεκτήματα όπως ημιδιαφάνεια μέχρι 90%, υψηλή απορρόφηση της ακτινοβολίας, η χαμηλή απορρόφηση της υπεριώδους και ορατού φωτός δίνει πλεονεκτήματα για χρήση σε θερμοκήπια.

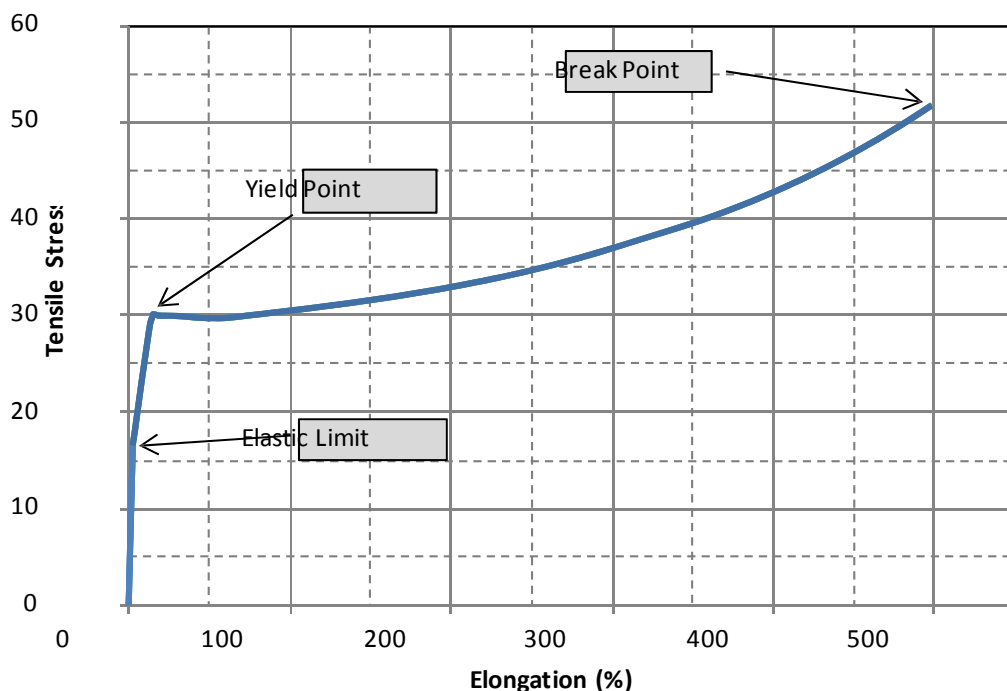
Η μεμβράνη ETFE έχει μια διγραμμική ελαστική ισοτροπική συμπεριφορά και οι γενικές ιδιότητες συνοψίζονται στον Πίνακα 5.

Thickness (microns)	Weight (g/m <sup>2</sup> )	Tensile strength L/T (N/mm <sup>2</sup> ) (DIN 53455)	Tensile strain L/T (%)	Tear strength L/T (N)
50	87.5	64/56	450/500	450/450
80	140	58/54	500/600	450/550
100	175	58/57	550/600	430/440
150	262.5	58/57	600/650	450/430
200	350	52/52	600/600	430/430
250	437.5	40/40	300/300	300/300

Πίνακας 5 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ETFE foils  
L / T (Διαμήκη / Εγκάρσια κατεύθυνση)

Ενώ τα περισσότερα οικοδομικά υλικά έχουν σχεδιαστεί για την μέγιστη αντοχή ακαμψία τους, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα στοιχείο των κατασκευών με ETFE είναι η ολκιμότητα και η ευελιξία τους. Η ικανότητα να επιμηκυνθεί μεταξύ 250-650% επιτρέπει στο υλικό να διατηρήσει την ένταση και τη σταθερότητά του παρά τις μεγάλες εκτροπές του. Ενώ η δομική ακαμψία σε πολλά ψηλά κτίρια καθορίζεται από την πρόληψη των ρωγμών των προσόψεων ή το σπάσιμο των υαλοπινάκων, το ETFE απορροφά όλες τις παραγόμενες μετακινήσεις μεταβάλλοντας συνεχώς τη γεωμετρία του. Συστήματα τύπου <<μαξιλαριού>> φουσκωμένα με αέρα (αεροθύλακες), σε συνδυασμό με την ευελιξία του ETFE, αποσβένουν επίσης τις επιπτώσεις από τις αιφνίδιες ριπές του ανέμου στα κτίρια, μειώνοντας έτσι τα απαιτούμενα φορτία σχεδιασμού έναντι του ανέμου στην κατασκευή. Το παρακάτω σχήμα δείχνει μια καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για μία τυπική μονοαξονική δοκιμή ETFE (Moritz 2007). Αυτό το γράφημα έχει ως στόχο να τονίσει ποιοτικά πόσο παραμορφώνεται το ETFE υπό φόρτιση και δεν αντιπροσωπεύει ένα πραγματικό δοκίμιο.

Μία μοναδική ιδιότητα που διαθέτει το ETFE είναι ότι έχει μια διγραμμική καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης που ακολουθείται από μια μεγάλη πλαστική περιοχή. Η πρώτη αλλαγή στην ακαμψία ονομάζεται ελαστικό όριο και το δεύτερο σημείο είναι το όριο διαρροής (yield point). Το ελαστικό όριο είναι το πρώτο σημείο που απεικονίζεται στο σχήμα, στο οποίο εμφανίζεται η πρώτη ουσιαστική μεταβολή στη δυσκαμψία. Το σημείο διαρροής εμφανίζεται όταν το υλικό χάνει στιγμιαία όλη την δυσκαμψία του και αποκτά ιδιαίτερα μη γραμμική συμπεριφορά. Όταν ξεπεράσει το σημείο διαρροής το υλικό μπαίνει σε μια φάση σκλήρυνσης λόγω παραμόρφωσης στην οποία μπορεί να επιμηκυνθεί πολλές φορές το μήκος του, και σχεδόν να διπλασιάσει την αντοχή του.



Γενική Καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης για Μονοαξονική Δοκιμή εφελκυσμού ETFE Foil

### 3.2.6 ΣΤΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

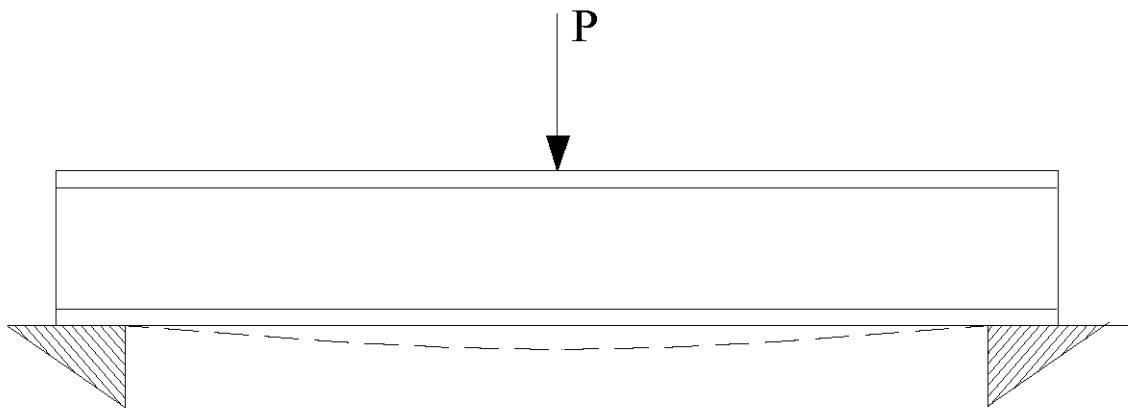
#### 3.2.6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Οι κατασκευές από μεμβράνη εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά κατά την καταπόνησή τους από φορτία σε σχέση με τις κατασκευές από συνήθη δομικά υλικά. Λόγω της μειωμένης δυσκαμψίας που παρουσιάζουν, είναι επιρρεπείς σε μεγάλες μετακινήσεις, κυρίως από συγκεντρωμένα φορτία και δυναμικά φαινόμενα. Η επιθυμητή δυσκαμψία επιτυγχάνεται μέσω της καμπυλότητας που δίνεται στο σχήμα και μέσω της προέντασης. Η μη γραμμικότητα στη συμπεριφορά των μεμβρανών έναντι κάθε είδους φόρτισης (προένταση, φορτία λειτουργίας) εμφανίζεται ανεξάρτητα από την γραμμικότητα του υλικού.

Κατά την εφαρμογή φορτίων σε μια εφελκυσόμενη κατασκευή, δημιουργείται αναδιάταξη των εσωτερικών εντάσεων και αλλαγή της γεωμετρίας και έτσι ο φορέας ισορροπεί. Έτσι λοιπόν, παρατηρείται σημαντική μεταβολή στο σχήμα των φορέων αυτών -σε σχέση με τους φορείς με αξιόλογη καμπτική και διατμητική δυσκαμψία- υπό την επίδραση φορτίων.

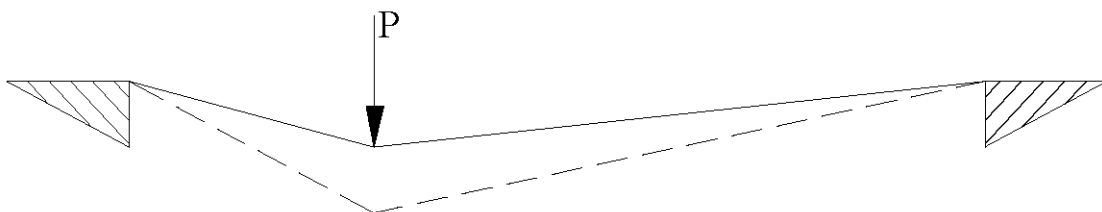
Ακολουθούν δυο συγκριτικά παραδείγματα: ενός φορέα με καμπτική αντοχή και ενός εφελκυσμένου φορέα.

Η δοκός από χάλυβα του σχήματος 3.47 φορτίζεται με σημειακό φορτίο. Η δοκός αντιδρά με κάμψη καθώς μεταφέρει τα φορτία στις στηρίξεις της, ενώ η αξονική της παραμόρφωση και η στροφή των στηρίξεων είναι φαινόμενα αμελητέα και μπορούν να αγνοηθούν. Η κατακόρυφη αντίδραση στην κάθε στήριξη είναι ανάλογη της απόστασης από το φορτίο.



Σχήμα 3.47  
Δοκός φορτιζόμενη με σημειακό φορτίο

Διαφορετική μοιάζει να είναι η συμπεριφορά του καλωδίου του σχήματος 3.48, το οποίο χρησιμοποιείται εναλλακτικά για το ίδιο άνοιγμα. Στο αρχικά χαλαρό καλώδιο εφαρμόζεται το ίδιο σημειακό φορτίο και αυτό αρχίζει να τεντώνεται. Για τις κατακόρυφες αντιδράσεις ισχύει ότι και για τη δοκό του προηγούμενου παραδείγματος, ενώ όσον αφορά τις οριζόντιες, εδώ λαμβάνουν σημαντική τιμή και ως εκ τούτου δεν μπορούν να αγνοηθούν. Για μεγάλες γωνίες και για καλώδιο με μεγάλη αξονική δυσκαμψία, η επιμήκυνση θα είναι μικρή και οι οριζόντιες αντιδράσεις θα είναι ανάλογες του ασκούμενου φορτίου και της επαπτομένης των γωνιών στήριξης. Η κατακόρυφη παραμόρφωση του καλωδίου εξαρτάται από την εφελκυστική τάση του, που όμως έχει άγνωστη οριζόντια συνιστώσα και συνεπώς οι οριζόντιες αντιδράσεις στις στηρίξεις δεν είναι υπολογίσιμες.



Σχήμα 3.48  
Καλώδιο φορτιζόμενο με σημειακό φορτίο

Για την ίδια εφαρμογή με προεντεταμένο καλώδιο, οι πραγματοποιούμενες εξ' αιτίας του φορτίου παραμορφώσεις θα ήταν μικρότερες, όμως η εφελκυστική τάση θα ήταν μεγαλύτερη.

Έτσι, είναι προφανές ότι το πρόβλημα αφορά τη γεωμετρική μη γραμμικότητα, πρόβλημα που χαρακτηρίζει τις περισσότερες εφελκυσόμενες κατασκευές.

Παρά την μη γραμμική συμπεριφορά των εφελκυσόμενων φορέων, το υλικό κατασκευής φαίνεται να συμπεριφέρεται γραμμικά, τουλάχιστον στις περισσότερες περιπτώσεις. Εξαιρεση από την παραπάνω θεώρηση αποτελούν κάποια υλικά όπως υπερελαστικά και βισκοελαστικά, καλώδια και μεμβράνες από πολυμερή, ανισότροπα υφάσματα, καθώς και υλικά που εμφανίζουν θερμοελαστική και ελαστοπλαστική συμπεριφορά υπό μεγάλα φορτία. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η μη γραμμικότητα του υλικού πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπ' όψιν στην συμπεριφορά της κατασκευής. Ακόμη, μια πηγή μη γραμμικότητας για την κατασκευή μπορεί να δημιουργηθεί από την επίδραση υδροστατικών και υδροδυναμικών φορτίων. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα φορτία δεν είναι μόνο μη γραμμικά, αλλά και μη συντηρητικά.

Η συμπεριφορά μιας εφελκυσόμενης κατασκευής υπό την επίδραση φορτίων μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι διαφορετική για κάθε μια από τις 3 φάσεις ύπαρξης της: τη φάση αναπτύγματος, τη φάση προέντασης και τη φάση λειτουργίας.



### 3.2.6.2 ΦΑΣΗ ΑΝΑΠΤΥΓΜΑΤΟΣ

Είναι η φάση κατά την οποία η μεμβράνη ξεδιπλώνεται από την συμπαγή κατάσταση στην οποία βρισκόταν κατά την αποθήκευση και την μεταφορά της, ενώ οι εξωτερικές φορτίσεις εξισορροπούνται από τις δυνάμεις αδρανείας και μόνο. Κατά την διάρκεια της δυναμικής αυτής διαδικασίας, η κατασκευή δεν βρίσκεται υπό ένταση και η στατική και κινηματική της συμπεριφορά καθορίζεται από τον τρόπο σύνδεσης των διαφόρων τμημάτων του φορέα μεταξύ τους. Η διαδικασία αναπτύγματος είναι ισχυρά μη γραμμική και δεν έχει βρεθεί γι' αυτήν μοναδική λύση. Είναι επιθυμητό σε αυτή την δυναμική φάση να δοθεί προσοχή για την αποφυγή ζαρωμάτων και γωνιασμάτων που μπορεί να οδηγήσουν σε σκισίματα και χτυπήματα, πιθανή έλλειψη σταθερότητας και ανάπτυξη ανεπιθύμητων τάσεων όταν η μεμβράνη ξεδιπλωθεί πλήρως. Η συμπεριφορά του φορέα στη φάση αυτή αποτελεί ένα πρόβλημα μαθηματικής τοπολογίας και μπορεί να περιγραφεί από εξισώσεις διαφορικής γεωμετρίας και συνοριακών συνθηκών.

### 3.2.6.3 ΦΑΣΗ ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ

Κατά τη φάση αυτή, που αποτελεί και φάση "ανέγερσης της κατασκευής", αυτή προεντείνεται – τεντώνεται - ενώ υφίσταται ισχυρή μετατόπιση από την αρχική της, άνευ εντάσεως, κατάσταση (δηλαδή μετά το πέρας του ξεδιπλώματος), μεταπίπτοντας στην τελική κατάσταση στατικής ισορροπίας, η οποία υπαγορεύεται από το τελικό της γεωμετρικό σχήμα και τις δυνάμεις προέντασης. Το πρόβλημα είναι γεωμετρικά μη γραμμικό με δυνατότητα εύρεσης μοναδικών λύσεων για τις μετατοπίσεις και τις εσωτερικές εντάσεις. Τα φορτία της προέντασης είναι αυτά που σκοπό έχουν την επίτευξη της ισορροπίας στον φορέα, σταθεροποιούν την κατασκευή και της προσδίδουν δυσκαμψία ώστε να αποφεύγονται περαιτέρω μετακινήσεις. Ο φορέας αντιδρά πάντα - όπως ήδη διαπιστώθηκε - με τρόπο μη γραμμικό, έτσι ώστε η ισορροπία του φορέα και οι αναπτυσσόμενες τάσεις να εξαρτώνται από τα φορτία αυτά.

### 3.2.6.4 ΦΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Κατά τη φάση λειτουργίας, η κατασκευή επιτελεί τον σκοπό για τον οποίο δημιουργήθηκε, ενώ επιβάλλονται φορτία λειτουργίας, δηλαδή φορτία που η κατασκευή καλείται να αναλάβει κατά την διάρκεια ζωής της, στον ήδη προεντεταμένο σχηματισμό.

Τα φορτία λειτουργίας χωρίζονται σε 2 κατηγορίες:

#### • **στατικά**

συγκεντρωμένα (μόνιμα ή/ και κινητά)

κατανεμημένα (μόνιμα ή/ και κινητά)

ομοιόμορφη εσωτερική πίεση

χιόνι

#### • **δυναμικά**

άνεμος

σεισμός, κ.ά

Η απόκριση του φορέα στα φορτία λειτουργίας μπορεί να είναι μη γραμμική ή γραμμική, γεγονός το οποίο εξαρτάται από το μέγεθος των φορτίων αυτών σε σχέση με τις ήδη αναπτυχθείσες τάσεις προέντασης στην κατασκευή. Επειδή η προένταση προσδίδει δυσκαμψία στην κατασκευή, οι

μετατοπίσεις οι οφειλόμενες στα φορτία λειτουργίας είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που πραγματοποιήθηκαν λόγω προέντασης.

Το γεωμετρικό σχήμα που προέκυψε κατά τη φάση της προέντασης συνήθως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς της παρούσας φάσης, αφού δεν παρατηρούνται σε αυτό αξιόλογες μεταβολές. Στην περίπτωση που απαιτείται να επιβληθούν μεγάλου μεγέθους φορτία, τότε χρησιμοποιείται για την ανάλυση μια τεχνική σταδιακής φόρτισης, κατά την οποία γίνεται επαναπροσδιορισμός της γεωμετρίας μετά από κάθε βήμα φορτίσεως.

Οι εξισώσεις που περιγράφουν το πρόβλημα στη φάση λειτουργίας είναι γραμμικές, αφού η γεωμετρία είναι δεδομένη και οι μετατοπίσεις είναι μικρές. Κάποια φαινόμενα μη γραμμικότητας μπορεί να ληφθούν υπ' όψιν λόγω της επιρροής της προέντασης στη μεμβράνη, π.χ. στη δυναμική ανάλυση των μεμβρανών έχει διαπιστωθεί ότι το μέγεθος της προέντασης επιδρά στις συχνότητες των δονήσεων.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι η στατική συμπεριφορά των εφελκόμενων κατασκευών στην φάση αυτή δεν είναι πλήρως γνωστή. Αρκετές φορές λαμβάνεται υπ' όψιν σχεδόν γραμμική συμπεριφορά του υλικού. Πολύ σημαντικό κομμάτι της ανάλυσης των μεμβρανών κατά τη φάση λειτουργίας είναι αν και κατά πόσον μειώνονται οι τάσεις προέντασης εξ' αιτίας των επιπρόσθετων φορτίων. Ακόμη, κάθε είδους ζαρώματα στις μεμβράνες πρέπει αν όχι να αποφεύγονται, τουλάχιστον να είναι δυνατό να προβλέπεται η επίδρασή τους στη σταθερότητα της κατασκευής. Επί πλέον, δυναμικά φαινόμενα, όπως πτερυγισμός και δυναμικά ζαρώματα υπό την επίδραση του ανέμου, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό.

Η αδυναμία της μεμβράνης να αντισταθεί σε καμπτικά φορτία οδηγεί σε μεγάλες παραμορφώσεις όταν επιβάλλονται τέτοιες φορτίσεις. Οι κάθετες στην επιφάνεια της μεμβράνης τάσεις που ο άνεμος επιβάλλει, ή η εσωτερική ομοιόμορφη πίεση που επιβάλλεται σε αεριουποστηριζόμενη μεμβράνη, εξαρτώνται άμεσα από το σχήμα της. Αν τα εξωτερικά φορτία δημιουργήσουν θλιπτικές τάσεις και εξουδετερώσουν την προένταση της μεμβράνης, τότε δημιουργούνται πτυχώσεις και κοιλώματα στην επιφάνεια.

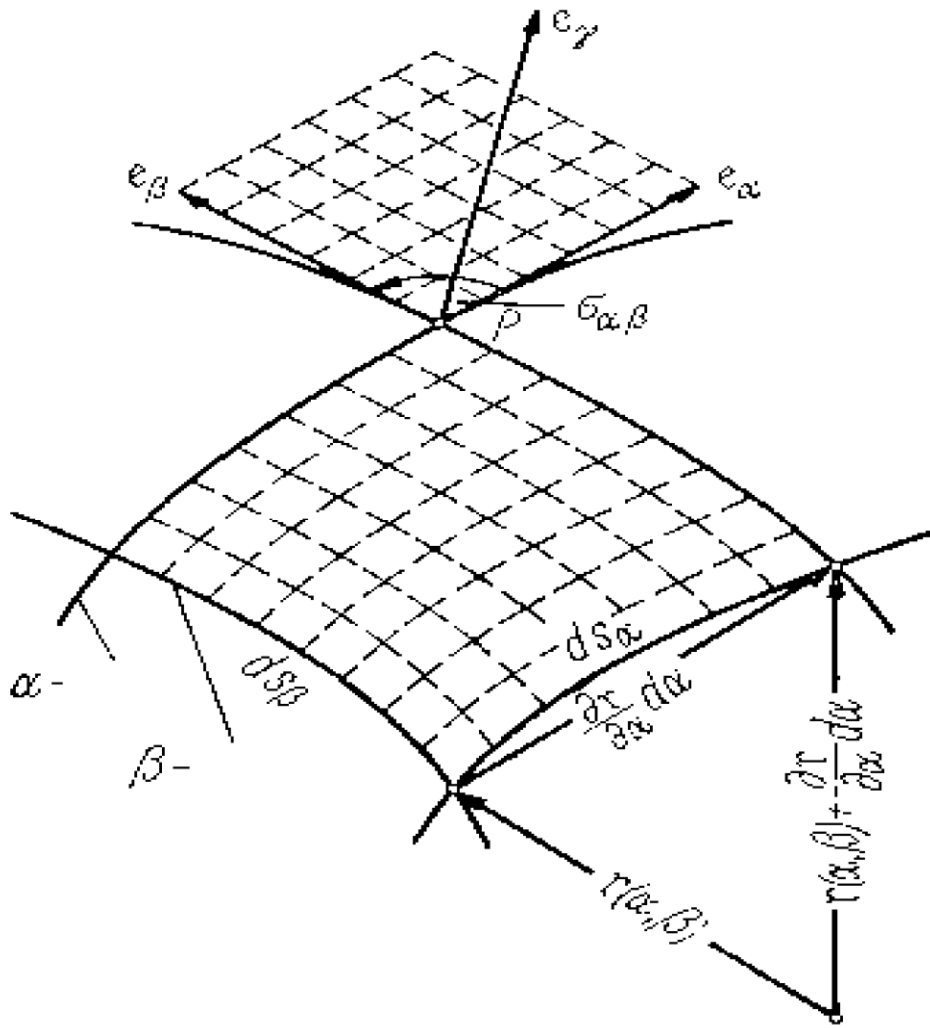
### 3.2.7 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

#### 3.2.7.1 Στοιχειώδες τμήμα μεμβράνης-Διανύσματα θέσης

Μια επιφάνεια μπορεί να περιγραφεί από ένα διάνυσμα θέσης,

$r = r(\alpha, \beta)$	3.42
------------------------	------

το οποίο εξαρτάται από δύο βαθμωτές παραμέτρους  $\alpha$ ,  $\beta$ . Στην επιφάνεια του σχήματος 3.49 δύο οικογένειες καμπυλών (οι  $\alpha$ - καμπύλες,  $r = r(\alpha, \beta_c)$ , κατά μήκος των οποίων το  $\beta$  είναι σταθερό και ίσο με  $\beta_c$  και οι  $\beta$ - καμπύλες  $r = r(\alpha_c, \beta)$  κατά μήκος των οποίων το  $\alpha$  είναι σταθερό και ίσο με  $\alpha_c$ ) δημιουργούν ένα γενικά μη ορθογωνικό δίκτυο.



Σχήμα 3.49  
Στοιχειώδες τμήμα μεμβράνης

Για να βρούμε τον προσανατολισμό του επιπέδου που εφάπτεται στην επιφάνεια της μεμβράνης στο σημείο P, ορίζουμε τα μοναδιαία διανύσματα  $e_\alpha$ ,  $e_\beta$  και το κάθετο προς αυτά  $e_\gamma$  στο σημείο P:

$\mathbf{e}_\alpha = \frac{\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \alpha}}{\left  \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \alpha} \right } = \frac{\mathbf{r}_\alpha}{ \mathbf{r}_\alpha } = \frac{\mathbf{r}_\alpha}{\sqrt{g_{\alpha\alpha}}}$ $\mathbf{e}_\beta = \frac{\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \beta}}{\left  \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \beta} \right } = \frac{\mathbf{r}_\beta}{ \mathbf{r}_\beta } = \frac{\mathbf{r}_\beta}{\sqrt{g_{\beta\beta}}}$	3.43
---	------

όπου  $g_{\alpha\alpha}$ ,  $g_{\beta\beta}$  και  $g_{\alpha\beta}$  που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια είναι οι τρεις αναλλοίωτες 1ης τάξης κατά Gauss, που δίνονται από τις σχέσεις :

$g_{\alpha\alpha} = \mathbf{r}_\alpha^2$ $g_{\beta\beta} = \mathbf{r}_\beta^2$ $g_{\alpha\beta} = \mathbf{r}_\alpha \cdot \mathbf{r}_\beta$	3.44
---	------

Ακόμη, τα στοιχειώδη ευθύγραμμα τμήματα  $ds_\alpha$  και  $ds_\beta$  δίνονται από τις σχέσεις:

$ds_\alpha = \left  \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \alpha} \right  d\alpha =  \mathbf{r}_\alpha  d\alpha = \sqrt{g_{\alpha\alpha}} d\alpha$ $ds_\beta = \left  \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \beta} \right  d\beta =  \mathbf{r}_\beta  d\beta = \sqrt{g_{\beta\beta}} d\beta$	3.45
---	------

Από τις σχέσεις (3.43) και (3.45) προκύπτει :

$\mathbf{e}_\alpha = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s_\alpha}$ $\mathbf{e}_\beta = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s_\beta}$	3.46
---	------

Ο προσανατολισμός του εφαπτομενικού επιπέδου στο σημείο P καθορίζεται από το εξωτερικό γινόμενο  $\mathbf{e}_\gamma$  των  $\mathbf{e}_\alpha$  ,  $\mathbf{e}_\beta$  :

$\mathbf{e}_\gamma = \frac{\mathbf{e}_\alpha \times \mathbf{e}_\beta}{ \mathbf{e}_\alpha \times \mathbf{e}_\beta } = \frac{\mathbf{e}_\alpha \times \mathbf{e}_\beta}{\sin \sigma_{\alpha\beta}}$	3.47
---	------

όπου  $\sigma_{\alpha\beta}$  είναι η γωνία που σχηματίζεται από τις θετικές διευθύνσεις των καμπυλών  $\alpha$  και  $\beta$ .

Από τον ορισμό του εσωτερικού γινομένου δύο διανυσμάτων προκύπτει:

$\cos \sigma_{\alpha\beta} = \mathbf{e}_\alpha \cdot \mathbf{e}_\beta = \frac{\mathbf{r}_\alpha \cdot \mathbf{r}_\beta}{ \mathbf{r}_\alpha   \mathbf{r}_\beta } = \frac{g_{\alpha\beta}}{\sqrt{g_{\alpha\alpha}} \sqrt{g_{\beta\beta}}}$	3.48
--	------

Ακόμη προκύπτει:

$\sin \sigma_{\alpha\beta} = \sqrt{1 - \cos^2 \sigma_{\alpha\beta}} = \frac{\sqrt{g_{\alpha\alpha} g_{\beta\beta} - g_{\alpha\beta}^2}}{\sqrt{g_{\alpha\alpha}} \sqrt{g_{\beta\beta}}}$	3.49
---	------

Από τις σχέσεις (3.47) και (3.49) καταλήγουμε στη σχέση:

$\mathbf{e}_\gamma = \frac{\sqrt{g_{\alpha\alpha}} \sqrt{g_{\beta\beta}}}{\sqrt{g_{\alpha\alpha} g_{\beta\beta} - g_{\alpha\beta}^2}} \cdot (\mathbf{e}_\alpha \times \mathbf{e}_\beta) = \frac{\mathbf{r}_\alpha \times \mathbf{r}_\beta}{\sqrt{\mathbf{r}_\alpha^2 \mathbf{r}_\beta^2 - (\mathbf{r}_\alpha \cdot \mathbf{r}_\beta)^2}} = \frac{\mathbf{r}_\alpha \times \mathbf{r}_\beta}{ \mathbf{r}_\alpha \times \mathbf{r}_\beta }$	3.50
---	------

Η στοιχειώδης επιφάνεια που αντιστοιχεί στα στοιχειώδη ευθύγραμμα τμήματα  $ds_\alpha$  και  $ds_\beta$  δίνεται από τη σχέση:

$$dS = |ds_\alpha \times ds_\beta| = \left| \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \alpha} d\alpha \times \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \beta} d\beta \right| = |\mathbf{r}_\alpha \times \mathbf{r}_\beta| d\alpha d\beta = \sqrt{g_{\alpha\alpha}g_{\beta\beta} - g_{\alpha\beta}^2} d\alpha d\beta$$

3,51

### 3.2.7.2 Καμπυλότητα μεμβράνης

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των μεμβρανών είναι η διαφορετική καμπυλότητα κατά τις δύο κύριες διευθύνσεις. Έστω  $K_1$  και  $K_2$  οι καμπυλότητες κατά την κύρια και τη δευτερεύουσα διεύθυνση αντίστοιχα. Τότε ορίζεται η καμπυλότητα Gauss  $K$  που είναι το γινόμενο των δύο καμπυλοτήτων:

$$K = K_1 \cdot K_2$$

3.52

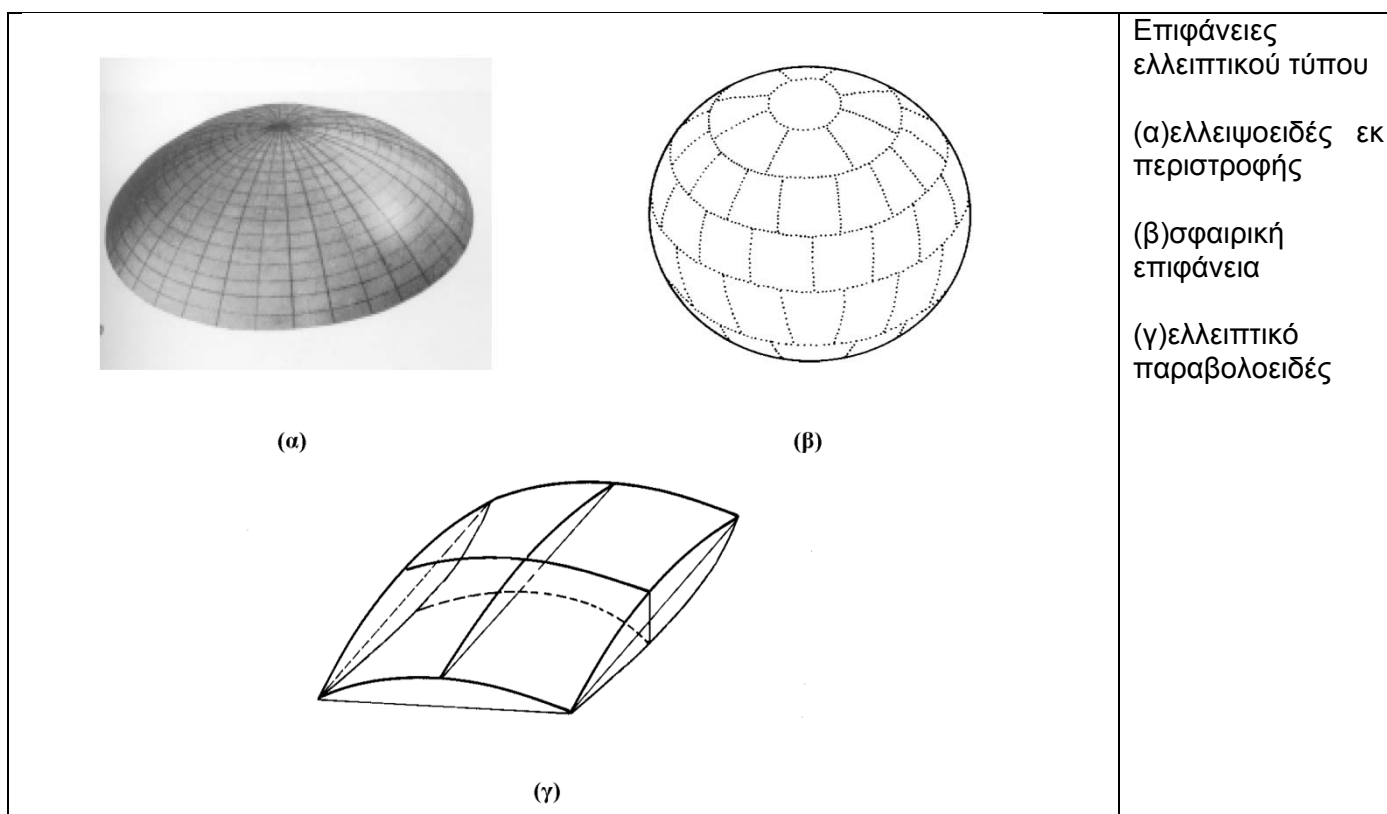
Ανάλογα με το πρόσημο της καμπυλότητας Gauss διακρίνουμε τις παρακάτω κατηγορίες επιφανειών:

1. Ελλειπτικού τύπου επιφάνειες, σε όλα τα σημεία των οποίων ισχύει  $K > 0$ .

Αυτές οι επιφάνειες σε όλα τα σημεία έχουν τις ακτίνες καμπυλότητας  $r_1$  και  $r_2$ , όπου

$$r_1 = \frac{1}{|K_1|}, \quad r_2 = \frac{1}{|K_2|},$$

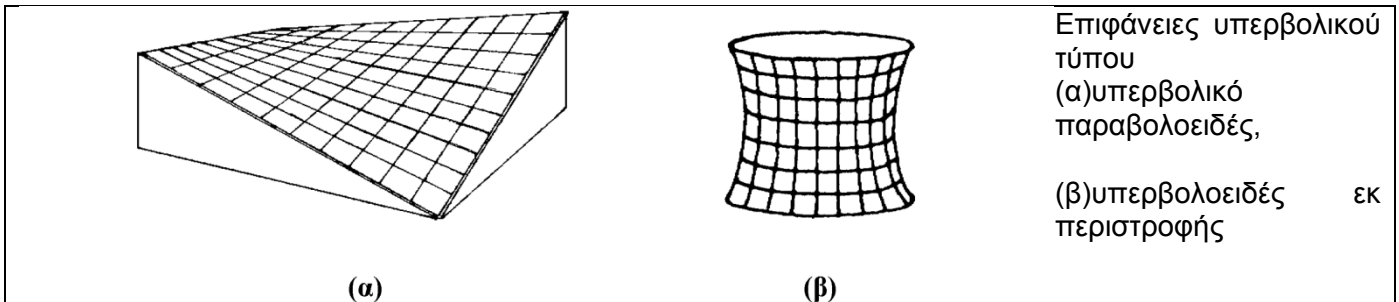
προς την ίδια πλευρά του επιπέδου που εφάπτεται στο σημείο που εξετάζουμε. Τέτοιες επιφάνειες φαίνονται στο σχήμα 3.50.



Σχήμα 3.50

2. Υπερβολικού τύπου επιφάνειες, σε όλα τα σημεία των οποίων ισχύει  $K < 0$ .

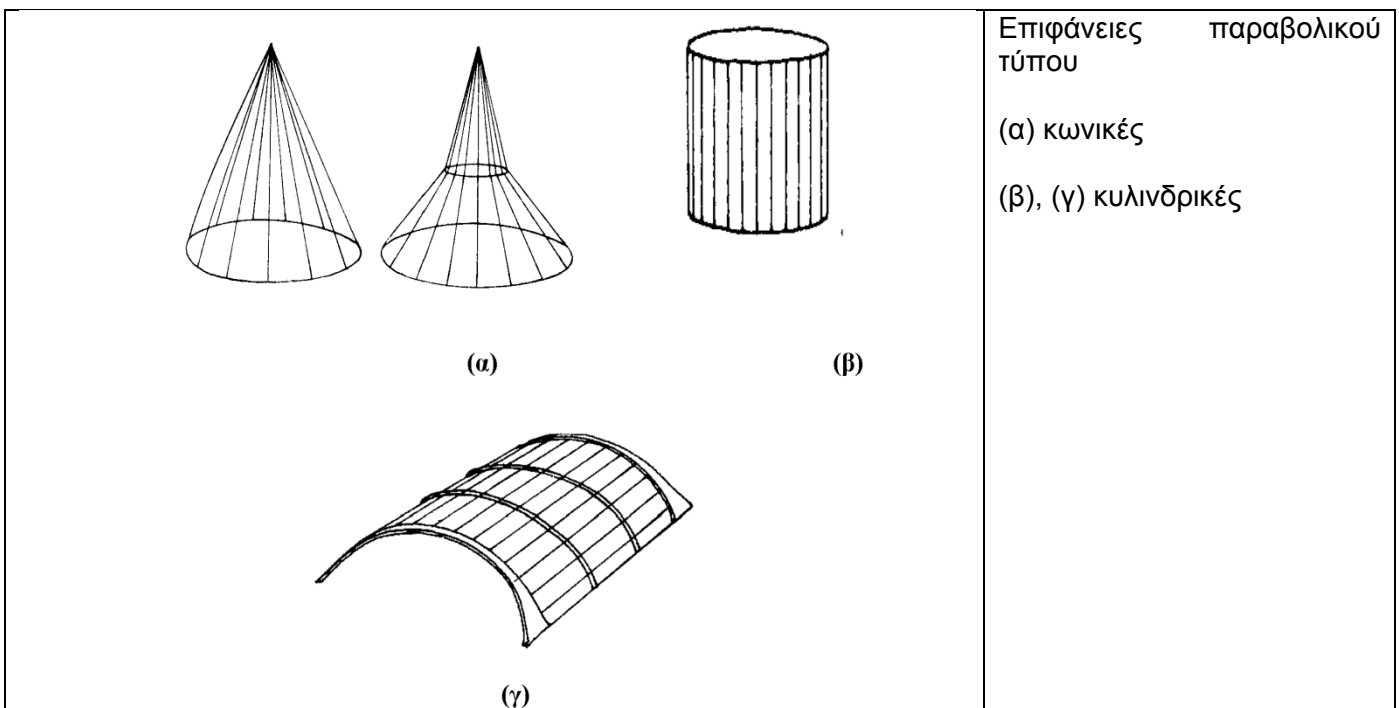
Σ'αυτή την περίπτωση οι ακτίνες καμπυλότητας  $r_1$  και  $r_2$  κείτονται εκατέρωθεν του εφαπτομενικού επιπέδου στο σημείο που εξετάζουμε. Μερικές τέτοιες επιφάνειες φαίνονται στο σχήμα 3.51.



Σχήμα 3.51

3. Παραβολικού τύπου επιφάνειες, σε όλα τα σημεία των οποίων ισχύει  $K = 0$ .

Οι επιφάνειες αυτές είναι απλής καμπυλότητας εφόσον η μια από τις δύο καμπυλότητες είναι μηδενική. Ορισμένες επιφάνειες αυτής της κατηγορίας φαίνονται στο σχήμα 3.52.



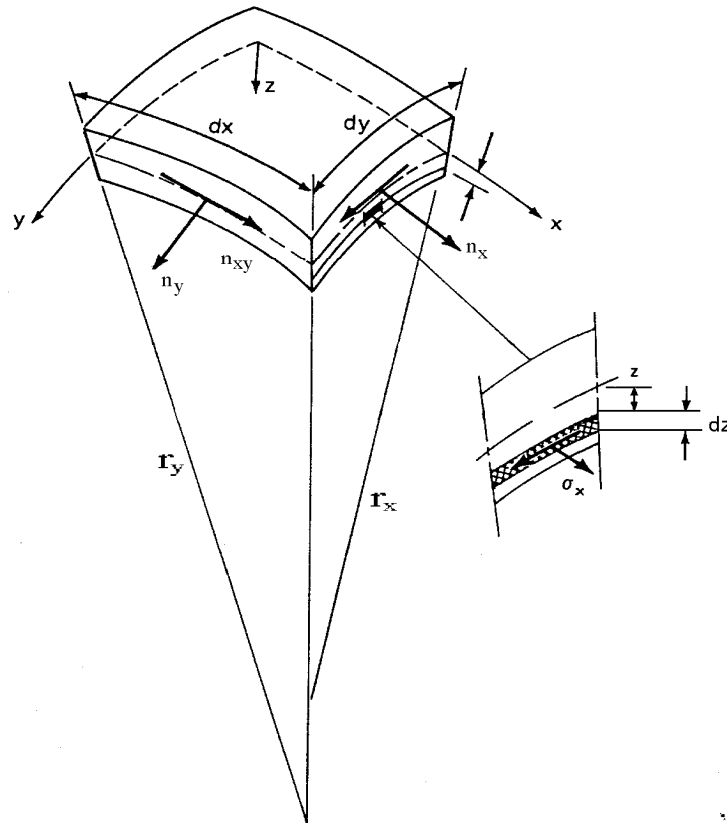
Σχήμα 3.52

### 3.2.7.3 Μembrάνη υπό ένταση

Στο σχήμα 3.53 απεικονίζεται ένα στοιχειώδες τμήμα ( $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$ ) μιας μεμβράνης πάχους  $h$  με ένα καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων  $x$ ,  $y$ ,  $z$  που βρίσκεται στη μέση επιφάνεια της μεμβράνης, με τον άξονα  $z$  να είναι κάθετος στη μέση επιφάνεια της μεμβράνης. Οι μέσες συνιστώσες έντασης ανά μονάδα μήκους της μέσης επιφάνειας που αντιστοιχούν στις τάσεις  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , ορίζονται ως εξής:

$n_x = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_x \left(1 - \frac{z}{r_x}\right) dz$ $n_y = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y \left(1 - \frac{z}{r_y}\right) dz$	3.53
---	------

όπου  $r_x$  και  $r_y$  είναι οι ακτίνες καμπυλότητας ως προς τους άξονες  $x, y$ .



Σχήμα 3.53  
Οι συνιστώσες της έντασης στη μεμβράνη

Οι εξισώσεις (3.53) μπορούν κατά προσέγγιση να γραφούν ως εξής:

$n_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz$ $n_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz$	3.54
---	------

εφόσον για τις μεμβράνες ισχύει  $h/r_x$  και  $h/r_y \ll 1$ . Αν  $\tau_{xy}$  είναι η διατμητική τάση στη μεμβράνη τότε η μέση διατμητική τάση ανά μονάδα μήκους είναι:

$$n_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz$$

3.55

Αν υπολογίσουμε την επίπεδη ένταση  $n_x$ ,  $n_y$ ,  $n_{xy}$  για μια φόρτιση της μεμβράνης τότε μπορούμε να βρούμε τις κύριες συνιστώσες (μέγιστες και ελάχιστες τιμές) καθώς και τη διεύθυνσή τους (γωνία  $\theta$  ως προς το σύστημα αναφοράς). Οι κύριες συνιστώσες μπορούν να βρεθούν γραφικά από τον κύκλο του Mohr (σχ. 3.54). Η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή της έντασης δίνεται από τις σχέσεις:

$$n_{\min} = \frac{n_x - n_y}{2} - \left[ \left( \frac{n_y - n_x}{2} \right)^2 + n_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cos 2\theta$$

$$n_{\max} = \frac{n_x - n_y}{2} + \left[ \left( \frac{n_y - n_x}{2} \right)^2 + n_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \cos 2\theta$$

3.56

Η γωνία  $\theta$  που σχηματίζουν οι άξονες του συστήματος αναφοράς με το κύριο σύστημα αξόνων δίνεται από τη σχέση:

$$\tan 2\theta = \frac{2n_{xy}}{n_y - n_x}$$

3.57

Παρατηρούμε ότι ακόμη και αν οι συνιστώσες  $n_x$  και  $n_y$  είναι θετικές είναι δυνατόν, αν η συνιστώσα  $n_{xy}$  είναι αρκετά μεγάλη, η  $n_{\min}$  να είναι αρνητική (σχ. 3.54). Είναι σημαντικό να προβλέψουμε την ύπαρξη θλιπτικών τάσεων γιατί οι μεμβράνες έχουν αμελητέα καμπτική αντίσταση, άρα και πολύ μικρή αντίσταση στο λυγισμό. Το ότι από το μαθηματικό προσομοίωμα προκύπτει αρνητική (θλιπτική) τάση σε κάποια περιοχή της μεμβράνης αυτό σημαίνει ότι η μεμβράνη σ' αυτό το σημείο θα παρουσιάσει πτυχώσεις ή κοιλώματα. Σ' αυτή την περίπτωση η μεμβράνη δε λειτουργεί διαξονικά αλλά μονοαξονικά κατά τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης.

Η διαδικασία για την αντιμετώπιση του προβλήματος της πτύχωσης της μεμβράνης συνίσταται στον έλεγχο των κύριων τάσεων  $n_1(n_{1\max})$  και  $n_2(n_{2\min})$  ( $n_1 > n_2$ ) σε κάθε σημείο της μεμβράνης. Το αν θα παρουσιαστούν ή όχι πτυχώσεις καθορίζεται ως εξής:

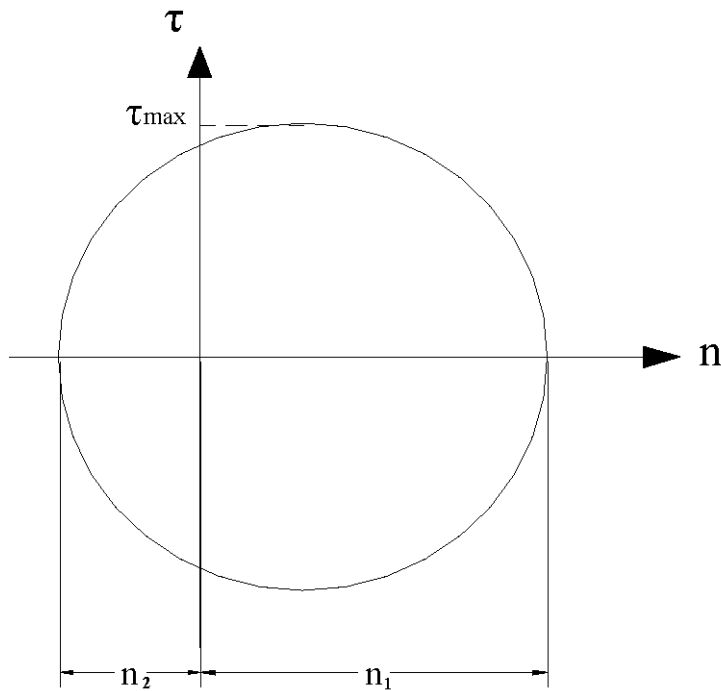
- (1) Αν  $n_2 \leq 0$  συμβαίνει διαξονική πτύχωση
- (2) Αν  $n_2 \leq 0$  και  $n_1 > 0$  συμβαίνει μονοαξονική πτύχωση στη δεύτερη κύρια διεύθυνση
- (3) Αν  $n_2 > 0$  δε συμβαίνει πτύχωση

Στη περίπτωση διαξονικής πτύχωσης, το στοιχείο της μεμβράνης είναι ανενεργό. Επομένως όλες οι τάσεις είναι μηδενικές και χρησιμοποιείται ένα διαγώνιο μητρώο δυσκαμψίας της μορφής:

$$D = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix}, \text{ όπου το } a \text{ είναι ένας πολύ μικρός αριθμός}$$

Στη περίπτωση μονοαξονικής πτύχωσης η εντατική κατάσταση φαίνεται στο σχήμα 3.54.





Σχήμα 3.54

Γραφική απεικόνιση της εντατικής κατάστασης στη περίπτωση μονοαξονικής πτύχωσης

Το ζητούμενο σε αυτή τη περίπτωση είναι να βεβαιωθούμε ότι δεν εμφανίζεται η θλιπτική τάση  $n_2$ . Αν γράψουμε τις καταστατικές εξισώσεις κατά τις δύο κύριες διευθύνσεις έχουμε:

$$n_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2) + n_{10} \quad 3.58$$

$$n_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\nu\varepsilon_1 + \varepsilon_2) + n_{20} \quad 3.59$$

$$T = 0^1 \quad 3.60$$

1 Αν και η διατμητική τάση είναι μηδέν κατά την κύρια διεύθυνση, η διατμητική παραμόρφωση δεν είναι γενικά μηδέν εφόσον υπάρχει μια αρχική προένταση.

όπου  $n_{10}$  και  $n_{20}$  είναι οι αρχικές τάσεις κατά τις κύριες διευθύνσεις. Στην περίπτωση που η δεύτερη κύρια τάση  $n_2$  είναι μηδέν (εφόσον η μεμβράνη δεν μπορεί να αναλάβει εφελκυσμό) από τη εξίσωση (3.59) έχουμε:

$$\varepsilon_2 = -\nu\varepsilon_1 - \frac{1-\nu^2}{E} n_{20} \quad 3.61$$

Αν αντικαταστήσουμε τη σχέση (3.61) στην εξίσωση (3.58) προκύπτει:

$$n_1 = E\varepsilon_1 + n_{10} - \nu n_{20} \quad 3.62$$

Επομένως το διάνυσμα τάσης του πτυχωμένου στοιχείου (κύριες διευθύνσεις) είναι:

$$n_1 = [n_1 \quad 0 \quad 0]$$

και το μητρώο ελαστικών σταθερών του στοιχείου παίρνει τη μορφή:

$$D = \begin{bmatrix} E & 0 & 0 \\ 0 & \alpha & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix}$$

Το διάνυσμα  $n$  και το μητρώο  $D$  στη συνέχεια μετασχηματίζονται στο σύστημα αναφοράς του πεπερασμένου στοιχείου ώστε να υπολογιστούν τα τοπικά μητρώα δυσκαμψίας. Αυτό είναι σημαντικό γιατί μετά το σχηματισμό των πτυχώσεων η ανισοτροπία του υλικού της μεμβράνης αυξάνεται.

### 3.2.8 ΘΕΩΡΙΑ ΜΙΚΡΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ

#### 3.2.8.1 Εξισώσεις ισορροπίας

Οι μεμβρανικές δυνάμεις στο σύστημα ( $e_\alpha$ ,  $e_\beta$ ,  $e_\gamma$ ), που φαίνεται στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος του σχήματος 3.55 εκφράζονται από τις συνιστώσες τους ως εξής:

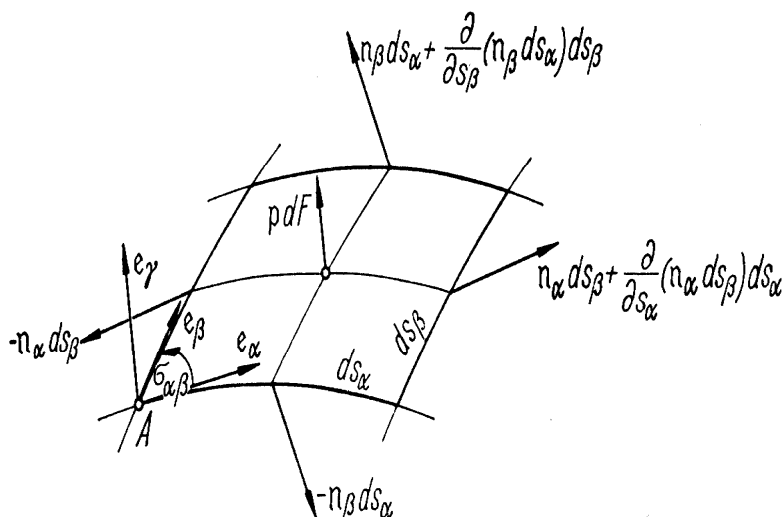
$n_\alpha = n_{\alpha\alpha} e_\alpha + n_{\alpha\beta} e_\beta$	3.63
$n_\beta = n_{\beta\alpha} e_\alpha + n_{\beta\beta} e_\beta$	

Κάθε στοιχειώδες τμήμα της μεμβράνης, όπως αυτό του σχήματος 3.55, πρέπει να ισορροπεί. Η στοιχειώδης επιφάνεια του είναι:

$dS = ds_\alpha ds_\beta \sin \sigma_{\alpha\beta}$	3.64
---	------

Έστω  $p$  το εξωτερικό φορτίο που ασκείται στην επιφάνεια (κατανεμημένο ανά μονάδα επιφανείας) και εκφράζεται από τις συνιστώσες του κατά  $\alpha, \beta, \gamma$  σύμφωνα με τη σχέση:

$p = p_\alpha e_\alpha + p_\beta e_\beta + p_\gamma e_\gamma$	3.65
---	------



Σχήμα 3.55 Διάγραμμα ελευθέρου σώματος στοιχειώδους τμήματος της μεμβράνης

Από την ισορροπία των δυνάμεων όπως αυτές απεικονίζονται στο σχήμα 3.55 έχουμε:

$$\frac{\partial}{\partial s_\alpha} (\mathbf{n}_\alpha ds_\beta) ds_\alpha + \frac{\partial}{\partial s_\beta} (\mathbf{n}_\beta ds_\alpha) ds_\beta + \mathbf{p} ds_\alpha ds_\beta \sin \sigma_{\alpha\beta} = 0$$

3.66

Από τη ισορροπία ροπών ως προς Α προκύπτει:

$$\begin{aligned} & \left( ds_\alpha \mathbf{e}_\alpha + \frac{ds_\beta}{2} \mathbf{e}_\beta \right) \times \left( \mathbf{n}_\alpha ds_\beta + \frac{\partial}{\partial s_\alpha} (\mathbf{n}_\alpha ds_\beta) ds_\alpha \right) - \frac{ds_\beta}{2} \mathbf{e}_\beta \times \mathbf{n}_\alpha ds_\beta + \\ & + \left( ds_\beta \mathbf{e}_\beta + \frac{ds_\alpha}{2} \mathbf{e}_\alpha \right) \times \left( \mathbf{n}_\beta ds_\alpha + \frac{\partial}{\partial s_\beta} (\mathbf{n}_\beta ds_\alpha) ds_\beta \right) - \frac{ds_\alpha}{2} \mathbf{e}_\alpha \times \mathbf{n}_\beta ds_\alpha + \\ & + \left( \frac{ds_\alpha}{2} \mathbf{e}_\alpha + \frac{ds_\beta}{2} \mathbf{e}_\beta \right) \times \mathbf{p} ds_\alpha ds_\beta \sin \sigma_{\alpha\beta} = 0 \end{aligned}$$

3.67

Οι σχέσεις αυτές, λαμβάνοντας υπόψη τις σχέσεις (3.45), (3.47), (3.49) και (3.52) και αμελώντας τους όρους ανώτερης τάξης, παίρνουν τη μορφή:

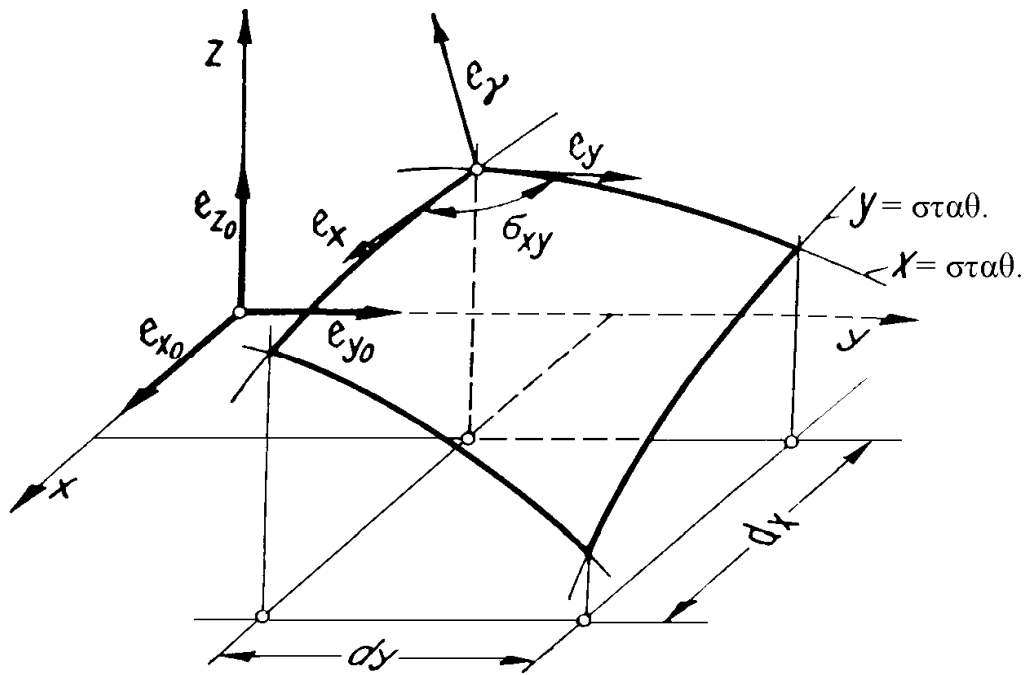
$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \alpha} (\sqrt{g_{\beta\beta}} \mathbf{n}_\alpha) + \frac{\partial}{\partial \beta} (\sqrt{g_{\alpha\alpha}} \mathbf{n}_\beta) + \mathbf{p} \sqrt{g_{\alpha\alpha} g_{\beta\beta} - g_{\alpha\beta}^2} = 0 \\ & \mathbf{e}_\alpha \times \mathbf{n}_\alpha + \mathbf{e}_\beta \times \mathbf{n}_\beta = \mathbf{e}_\gamma \sin \sigma_{\alpha\beta} (\mathbf{n}_{\alpha\beta} - \mathbf{n}_{\beta\alpha}) = 0 \end{aligned}$$

3.68

Αν η επιφάνεια της μεμβράνης δίνεται από μια συνάρτηση της μορφής  $z=z(x,y)$  και θέσουμε  $a=x$  και  $b=y$  μπορούμε να εκφράσουμε τις εξισώσεις ισορροπίας ως προς το ορθοκανονικό σύστημα αναφοράς ( $\mathbf{e}_{x_0}$ ,  $\mathbf{e}_{y_0}$ ,  $\mathbf{e}_{z_0}$ ), που απεικονίζεται στο σχήμα 3.56, χρησιμοποιώντας τα διανύσματα:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_x &= \frac{\mathbf{r}_x}{\sqrt{g_{xx}}} = \frac{\mathbf{e}_{x_0} + z_x \mathbf{e}_{z_0}}{\sqrt{1 - z_x^2}}, \quad \mathbf{e}_y = \frac{\mathbf{r}_y}{\sqrt{g_{yy}}} = \frac{\mathbf{e}_{y_0} + z_y \mathbf{e}_{z_0}}{\sqrt{1 - z_y^2}} \\ \mathbf{e}_\gamma &= \frac{\mathbf{e}_x \times \mathbf{e}_y}{\sin \sigma_{xy}} = \frac{\mathbf{e}_{z_0} - z_x \mathbf{e}_{x_0} - z_y \mathbf{e}_{y_0}}{\sqrt{1 + z_x^2 + z_y^2}} \end{aligned}$$

3.69



Σχήμα 3.56 Ορθοκανονικό σύστημα αναφοράς

Όπως και προηγουμένως, εκφράζουμε τα διανύσματα  $n_x$  και  $n_y$  της εσωτερικής έντασης στο στοιχειώδες τμήμα της μεμβράνης από τις συνιστώσες τους στο ορθοκανονικό σύστημα αναφοράς:

$\mathbf{n}_x = n_x \mathbf{e}_x + n_{xy} \mathbf{e}_y = \frac{n_x}{\sqrt{1+z_x^2}} \mathbf{e}_{x0} + \frac{n_{xy}}{\sqrt{1+z_y^2}} \mathbf{e}_{y0} +$ $+ \left( \frac{n_x z_x}{\sqrt{1+z_x^2}} + \frac{n_{xy} z_y}{\sqrt{1+z_y^2}} \right) \mathbf{e}_{z0}$ $\mathbf{n}_y = n_{xy} \mathbf{e}_x + n_y \mathbf{e}_y = \frac{n_{xy}}{\sqrt{1+z_x^2}} \mathbf{e}_{x0} + \frac{n_y}{\sqrt{1+z_y^2}} \mathbf{e}_{y0} +$ $+ \left( \frac{n_{xy} z_x}{\sqrt{1+z_x^2}} + \frac{n_y z_y}{\sqrt{1+z_y^2}} \right) \mathbf{e}_{z0}$	3.70
---	------

Κατά τον ίδιο τρόπο το διάνυσμα της εξωτερικής έντασης εκφράζεται ως εξής:

$\mathbf{p} = p_{x0} \mathbf{e}_{x0} + p_{y0} \mathbf{e}_{y0} + p_{z0} \mathbf{e}_{z0}$	3.71
---	------

Επομένως οι εξισώσεις ισορροπίας μπορούν να γραφούν:

$\begin{aligned} \mathbf{e}_{x_0} : \frac{\partial}{\partial x} \left( \sqrt{\frac{1+z_y^2}{1+z_x^2}} n_x \right) + \frac{\partial n_{xy}}{\partial y} + p_x \sqrt{1+z_x^2+z_y^2} &= 0 \\ \mathbf{e}_{y_0} : \frac{\partial}{\partial y} \left( \sqrt{\frac{1+z_x^2}{1+z_y^2}} n_y \right) + \frac{\partial n_{xy}}{\partial x} + p_y \sqrt{1+z_x^2+z_y^2} &= 0 \\ \mathbf{e}_{z_0} : \frac{\partial}{\partial x} \left( z_x \sqrt{\frac{1+z_y^2}{1+z_x^2}} n_x \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( z_y \sqrt{\frac{1+z_x^2}{1+z_y^2}} n_y \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} (z_x n_{xy}) + \frac{\partial}{\partial x} (z_y n_{xy}) + p_z \sqrt{1+z_x^2+z_y^2} &= 0 \end{aligned}$	3.72
---	------

Από την τελευταία εξίσωση έχουμε:

$\begin{aligned} z_{xx} \left( \sqrt{\frac{1+z_y^2}{1+z_x^2}} n_x \right) + z_{yy} \left( \sqrt{\frac{1+z_x^2}{1+z_y^2}} n_y \right) + 2z_{xy} n_{xy} + \\ + z_x \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \sqrt{\frac{1+z_y^2}{1+z_x^2}} n_x \right) + \frac{\partial n_{xy}}{\partial y} \right] + z_y \left[ \frac{\partial}{\partial y} \left( \sqrt{\frac{1+z_x^2}{1+z_y^2}} n_y \right) + \frac{\partial n_{xy}}{\partial x} \right] + \\ + p_z \sqrt{1+z_x^2+z_y^2} = 0 \end{aligned}$	3.73
---	------

Αν αντικαταστήσουμε τις δύο πρώτες σχέσεις της (3.72) στην (3.73) έχουμε:

$\begin{aligned} z_{xx} \left( \sqrt{\frac{1+z_y^2}{1+z_x^2}} n_x \right) + z_{yy} \left( \sqrt{\frac{1+z_x^2}{1+z_y^2}} n_y \right) + 2z_{xy} n_{xy} = \\ = -\sqrt{1+z_x^2+z_y^2} \cdot (p_{z_0} - z_x p_{x_0} - z_y p_{y_0}) \end{aligned}$	3.74
---	------

Για  $p_{x_0} \sqrt{1+z_x^2+z_y^2} = \bar{p}_{x_0} = \text{σταθ. και}$   $p_{y_0} \sqrt{1+z_x^2+z_y^2} = \bar{p}_{y_0} = \text{σταθ.}$

το πρόβλημα ισορροπίας μπορεί να αναχθεί σε πρόβλημα εύρεσης της συνάρτησης τάσης  $H(x,y)$ , η οποία σχετίζεται με τις άλλες παραμέτρους του προβλήματος σύμφωνα με τις σχέσεις:

$\begin{aligned} n_x \cdot \sqrt{\frac{1+z_y^2}{1+z_x^2}} = H_{yy}, \quad n_y \cdot \sqrt{\frac{1+z_x^2}{1+z_y^2}} = H_{xx} \\ n_{xy} = -H_{xy} - \bar{p}_{x_0} y - \bar{p}_{y_0} x \end{aligned}$	3.75
--	------

Επομένως η σχέση (3.74) με τη βοήθεια των σχέσεων (3.75) γράφεται:

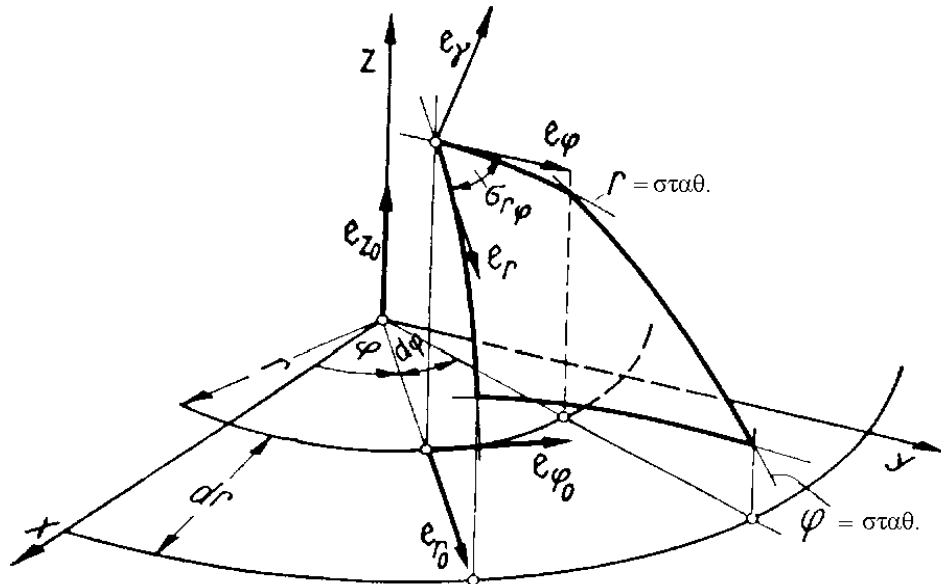
$\begin{aligned} H_{xx} z_{yy} + H_{yy} z_{xx} - 2H_{xy} z_{xy} = -p_{z_0} \sqrt{1+z_x^2+z_y^2} + \\ + \bar{p}_{x_0} (z_x + 2yz_{xy}) + \bar{p}_{y_0} (z_y + 2xz_{xy}) \end{aligned}$	3.76
---	------

Αν η επιφάνεια της μεμβράνης δίνεται σε πολικές συντεταγμένες (σχ.3.57),  $z=z(r,\varphi)$  ή  $r(r,\varphi) = re_{r_0} + z(r,\varphi)e_{z_0}$ , η εξίσωση (3.76) γράφεται ως εξής:

$z_{rr} \left( \frac{H_r}{r} + \frac{H_{\varphi\varphi}}{r^2} \right) + \left( \frac{z_r}{r} + \frac{z_{\varphi\varphi}}{r^2} \right) H_{rr} - 2 \left( \frac{z_\varphi}{r} \right)_r \left( \frac{H_\varphi}{r} \right)_r =$ $= -p_z \sqrt{1 + z_r^2 + \left( \frac{z_\varphi}{r} \right)^2}$	3.77
--	------

όπου η συνάρτηση τάσης  $H(r,\varphi)$  δίνεται από τις σχέσεις:

$\sqrt{\frac{1 + \left( \frac{z_\varphi}{r} \right)^2}{1 + z_r^2}} \cdot n_r = \frac{H_r}{r} + \frac{H_{\varphi\varphi}}{r^2}$ $\sqrt{\frac{1 + z_r^2}{1 + \left( \frac{z_\varphi}{r} \right)^2}} \cdot n_\varphi = H_{rr}$ $n_{r\varphi} = - \left( \frac{H_\varphi}{r} \right)$	3.78
---	------



Σχήμα 3.57 Περιγραφή της επιφάνειας της μεμβράνης με πολικές συντεταγμένες

### 3.2.8.2 Σχέσεις τροπών-μετατοπίσεων

Οι παραμορφώσεις σ'ένα στοιχείο της μεμβράνης δίνονται από τον τανυστή των τροπών D. Αν το διάνυσμα θέσης της απαραμόρφωτης μεμβράνης είναι  $r(\alpha, \beta)$  και το διάνυσμα μετατόπισης  $v(\alpha, \beta)$ , τότε το διάνυσμα θέσης στην παραμορφωμένη κατάσταση δίνεται από τη σχέση:

$r(\alpha, \beta) = r(\alpha, \beta) + v(\alpha, \beta)$	3.79
--	------

Αποδεικνύεται ότι ο τανυστής των τροπών είναι της μορφής:

$D = \begin{bmatrix} d_{\alpha\alpha} & d_{\alpha\beta} & d_{\alpha\gamma} \\ d_{\beta\alpha} & d_{\beta\beta} & d_{\beta\gamma} \\ d_{\gamma\alpha} & d_{\gamma\beta} & 0 \end{bmatrix}$	(συμμετρικός)	3.80
---	---------------	------

Οι συνιστώσες του τανυστή  $d_{i\gamma} = d_{\gamma i}$  ( $i = \alpha, \beta$ ) αποδεικνύεται ότι αντιπροσωπεύουν τις στροφές που εκτρέπουν το στοιχείο της μεμβράνης εκτός του εφαπτομενικο επιπέδου της. Αυτές οι συνιστώσες δεν σχετίζονται με την επιβαλλόμενη προένταση της μεμβράνης και επειδή το πάχος της μεμβράνης είναι μικρό μπορούν να αμεληθούν. Οι σημαντικές συνιστώσες του τανυστή D δίνονται από τις σχέσεις:

$d_{\alpha\alpha} = \varepsilon_\alpha \left( 1 + \frac{\varepsilon_\alpha}{2} \right) = \mathbf{e}_\alpha \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\alpha} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\alpha} \right)^2$ $d_{\beta\beta} = \varepsilon_\beta \left( 1 + \frac{\varepsilon_\beta}{2} \right) = \mathbf{e}_\beta \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\beta} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\beta} \right)^2$ $d_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta) \sin \gamma_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \left( \mathbf{e}_\alpha \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\beta} + \mathbf{e}_\beta \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\alpha} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\alpha} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\beta} \right)$	3.81
--	------

Από τις σχέσεις αυτές προκύπτουν οι επιμηκύνσεις και η γωνία διάτμησης:

$\varepsilon_\alpha = \sqrt{1 + 2d_{\alpha\alpha}} - 1 = \sqrt{1 + 2\mathbf{e}_\alpha \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\alpha} + \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\alpha} \right)^2} - 1$ $\varepsilon_\beta = \sqrt{1 + 2d_{\beta\beta}} - 1 = \sqrt{1 + 2\mathbf{e}_\beta \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\beta} + \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\beta} \right)^2} - 1$ $\sin \gamma_{\alpha\beta} = \frac{1}{(1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta)} \times \left[ \mathbf{e}_\alpha \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\beta} + \mathbf{e}_\beta \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\alpha} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\alpha} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\beta} \right] + \frac{2d_{\alpha\beta}}{(1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta)}$	3.82
---	------

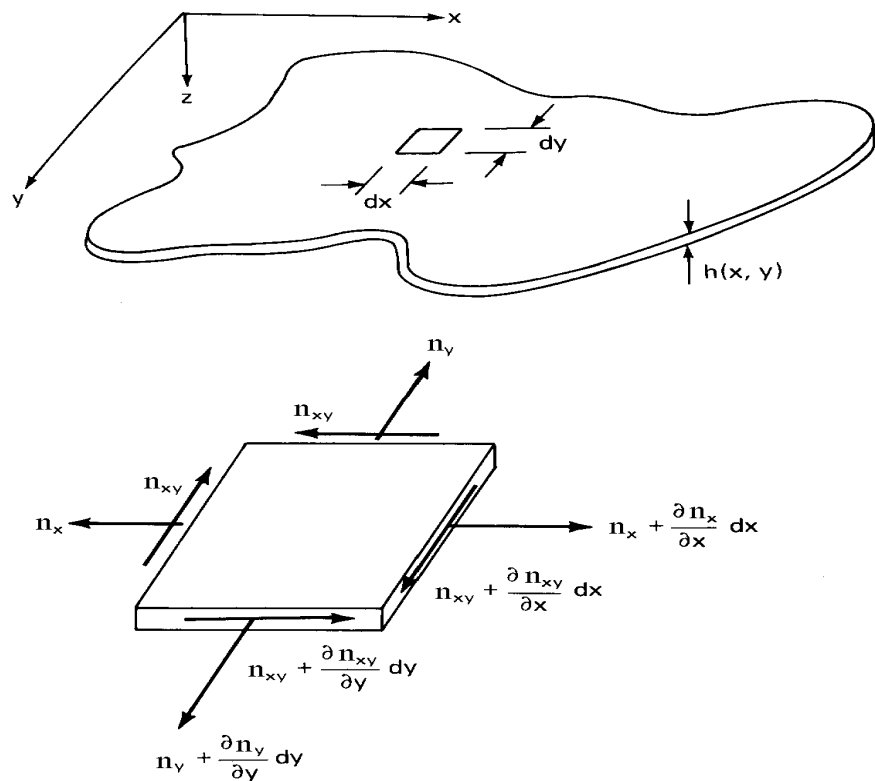
### 3.2.8.3 Επίπεδη μεμβράνη

Σ'αυτή την ενότητα εξετάζουμε μεμβράνες που θεωρούμε ότι παραμένουν επίπεδες κατά την προένταση. Έτσι θεωρούμε αμελητέα την επίδραση των νεκρών φορτίων σε σύγκριση με τις δυνάμεις προέντασης. Από αυτό το απλοποιημένο πρόβλημα συνοριακών τιμών μπορούμε να εξάγουμε κλειστές λύσεις για απλά σχήματα μεμβρανών ώστε να προκύψουν κάποια συμπεράσματα για τη συμπεριφορά της μεμβράνης υπό προένταση.

Στο σχήμα 3.58 φαίνεται ένα επίπεδο στοιχείο μεμβράνης που προεντνείται. Οι συνιστώσες της έντασης πρέπει να ικανοποιούν τις παρακάτω εξισώσεις ισορροπίας:

$\frac{\partial n_x}{\partial x} + \frac{\partial n_{xy}}{\partial y} + p_x = 0$ $\frac{\partial n_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial n_y}{\partial y} + p_y = 0$	3.83
---	------

όπου  $p_x$  και  $p_y$  είναι το καταναμημένο φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας κατά τους άξονες  $x$ ,  $y$  αντίστοιχα.



Σχήμα 3.58 Ισορροπία στοιχειώδους τμήματος σε επίπεδη μεμβράνη

Αν θεωρήσουμε αμελητέα τη μετατόπιση κατά τον άξονα  $z$  στη φάση της προέντασης, προκύπτουν οι γραμμικές σχέσεις τροπών μετατοπίσεων:

$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}$ $\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$ $\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$	3.84
---	------

όπου  $u$ ,  $v$  είναι οι μετατοπίσεις κατά τους άξονες  $x$ ,  $y$  αντίστοιχα.

Για ένα ελαστικό, ισότροπο υλικό ισχύουν οι παρακάτω καταστατικές σχέσεις μεταξύ τάσεων και τροπών:



$\varepsilon_x = \frac{1}{Eh}(n_x - \nu n_y)$ $\varepsilon_y = \frac{1}{Eh}(n_y - \nu n_x)$ $\gamma_{xy} = \frac{1}{Gh}n_{xy} = 2\left(\frac{1+\nu}{Eh}\right)n_{xy}$	3.85
---	------

Για να μπορέσουμε να ολοκληρώσουμε τις σχέσεις (3.84) ώστε να βρούμε τις μετατοπίσεις πρέπει να ισχύει η παρακάτω εξίσωση συμβιβαστού των παραμορφώσεων:

$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = 0$	3.86
--	------

Αν αντικαταστήσουμε τις εξισώσεις (3.85) στην (3.86) κάνοντας χρήση των σχέσεων (3.83) προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$\nabla^2(n_x + n_y) + (1+\nu)(p_{x,x} + p_{y,y}) = 0$	3.87
--	------

όπου  $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$  είναι ο τελεστής Laplace.

Οι εξισώσεις (3.83) μπορούν να εκφραστούν με όρους της συνάρτησης τάσης  $H$  που ικανοποιούν τις εξισώσεις ισορροπίας. Η συνάρτηση  $H$  ορίζεται από τις σχέσεις:

$n_x = Eh \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} - V_x$ $n_y = Eh \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} - V_y$ $n_{xy} = -Eh \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y}$	3.88
---	------

Όπου:

$V_x = \int_x p_x dx$ $V_y = \int_y p_y dy$	3.89
---	------

Αν αντικαταστήσουμε τις σχέσεις (3.88) και (3.89) στην εξίσωση (3.86) προκύπτει η διαρμονική εξίσωση:

$Eh \nabla^2 (\nabla^2 H) = \nabla^2 (V_x + V_y) - (1+\nu)(p_{x,x} + p_{y,y})$	3.90
--	------

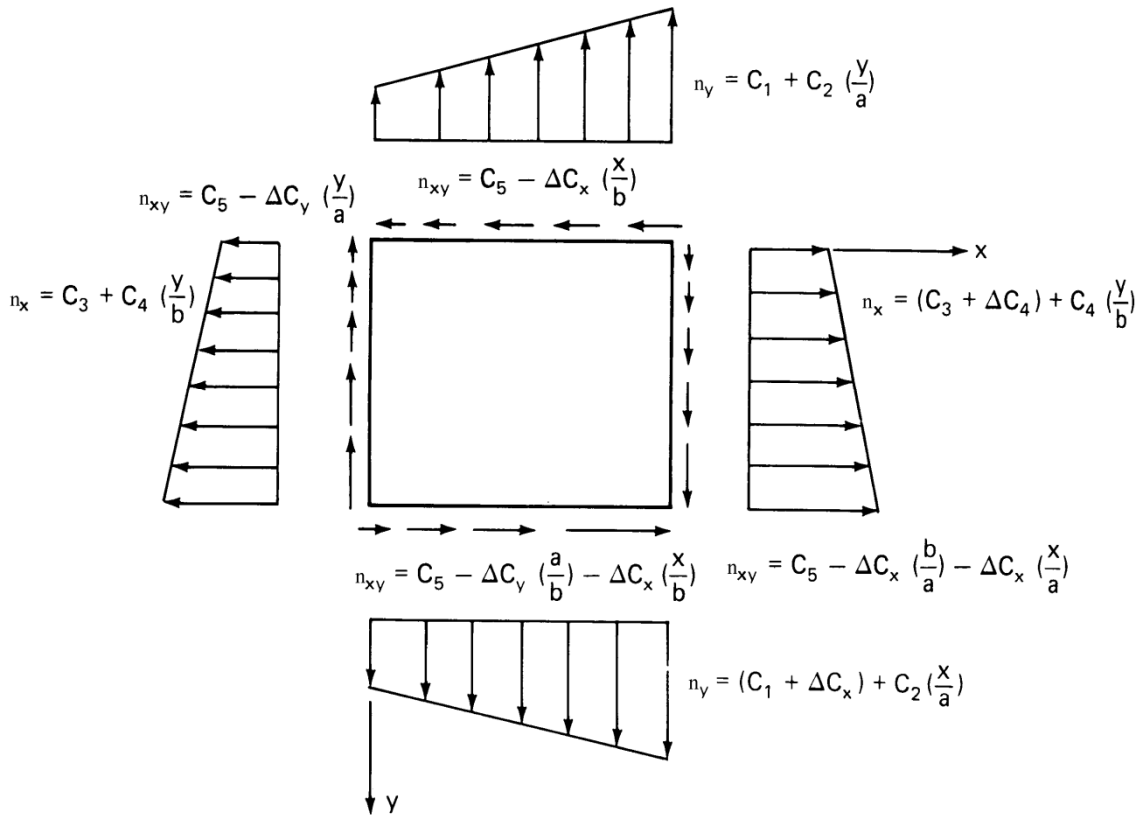
Για την αναλυτική επίλυση αυτής της εξίσωσης χρησιμοποιούμε σειρές Fourier.

Θέτουμε:

$H = \sum_i \sum_j \alpha_{ij} x^i x^j$	3.91
---	------

και το πρόβλημα ανάγεται στην εύρεση των συντελεστών  $\alpha_{ij}$  α έτσι ώστε η συνάρτηση  $H$  να ικανοποιεί την διαρμονική εξίσωση (3.90).

Για να γίνει κατανοητή η διαδικασία εύρεσης των συντελεστών  $\alpha_{ij}$  παραθέτουμε ένα απλό παράδειγμα. Πρόκειται για τη περίπτωση της επίπεδης αβαρούς μεμβράνης που φαίνεται στο σχήμα 3.59 και για την οποία ισχύει  $V_x = V_y = 0$ . Για λόγους απλότητας του παραδείγματος θεωρούμε ότι οι τάσεις στα άκρα της μεμβράνης μεταβάλλονται γραμμικά.



Σχήμα 3.59 Γραμμικά μεταβαλλόμενες εντάσεις σε ορθογώνιο τμήμα μεμβράνης

Έστω το πολυώνυμο τρίτου βαθμού που ικανοποιεί την εξίσωση (3.90):

$H = \alpha_{02} y^2 + \alpha_{03} y^3 + \alpha_{11} xy + \alpha_{12} xy^2 + \alpha_{20} x^2 + \alpha_{21} x^2 y + \alpha_{30} x^3$	3.92
---	------

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.92) στις εξισώσεις (3.88) προκύπτει:

$\begin{aligned} n_x &= Eh(2\alpha_{02} + 6\alpha_{03} y + 2\alpha_{12} x) \\ n_y &= Eh(2\alpha_{20} + 6\alpha_{30} x + 2\alpha_{21} y) \\ n_{xy} &= -Eh(2\alpha_{11} + 2\alpha_{12} y + 2\alpha_{21} x) \end{aligned}$	3.93
---	------

Μπορεί να αποδειχθεί ότι εφόσον θεωρούμε γραμμική τη μεταβολή των τάσεων στα άκρα της μεμβράνης ισχύει:

$n_x = C_3 + C_4 \left( \frac{y}{b} \right) + \Delta C_y \left( \frac{x}{a} \right)$ $n_y = C_1 + C_2 \left( \frac{x}{a} \right) + \Delta C_x \left( \frac{y}{b} \right)$ $n_{xy} = C_5 - \Delta C_y \left( \frac{y}{a} \right) - \Delta C_x \left( \frac{x}{b} \right)$	3.94
--	------

όπου  $C_1, C_2, \dots, C_5, \Delta C_x, \Delta C_y$  είναι οι συντελεστές που πρέπει να προσδιοριστούν ώστε να λυθεί το πρόβλημα συνοριακών τιμών.

Στο παραπάνω παράδειγμα αναφερθήκαμε μόνο σε συνθήκες που αφορούν ένταση. Για να λάβουμε υπόψη μας και τις συνθήκες μετατόπισης πρέπει να ολοκληρώσουμε τις εξισώσεις (3.84) ως προς  $u, v$  αφού προηγουμένως εκφραστούν οι τροπές  $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$  συναρτήσεως των συνιστωσών της έντασης  $n_x, n_y, n_{xy}$  σύμφωνα με τις εξισώσεις (3.85).

#### 3.2.8.4 Φάση λειτουργίας επίπεδης μεμβράνης

Σ'αυτή την ενότητα, κάνοντας ορισμένες απλουστεύσεις, εξετάζουμε τη λύση του προβλήματος των συνοριακών τιμών για μεμβράνη που φορτίζεται εγκάρσια. Η εγκάρσια φόρτιση αναγκάζει την μεμβράνη να καμπυλωθεί ώστε να μπορέσει να ισορροπήσει την εξωτερική φόρτιση. Αρχικά χρησιμοποιούμε μη γραμμικές εξισώσεις ώστε να λάβουμε υπόψη τη μετατόπιση  $w$  εκτός του αρχικού απαραμόρφωτου επιπέδου της μεμβράνης:

$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2$ $\epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2$ $\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}$	3.95
---	------

Η εξίσωση συμβιβαστού είναι:

$\frac{\partial^2 \epsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} = \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$	3.96
--	------

Από την ισορροπία των δυνάμεων κατά τις διευθύνσεις  $x, y$  προκύπτει η παρακάτω σχέση μεταξύ της συνάρτησης τάσης  $H$  και του βέλους  $w$  της μεμβράνης:

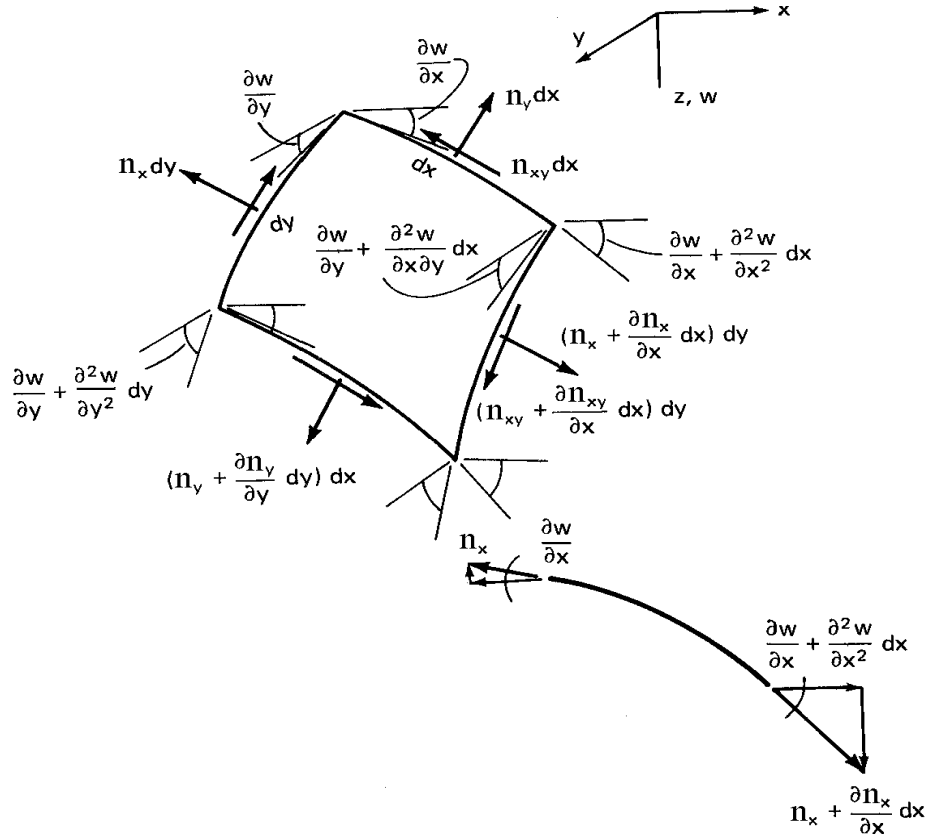
$\nabla^4 H = \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$	3.97
--	------

Από την ισορροπία των δυνάμεων κατά τον άξονα z (σχ. 3.60) καταλήγουμε στην εξίσωση:

$$n_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + n_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + p = 0$$

3.98

όπου p είναι το καταναμημένο εγκάρσιο φορτίο.



Σχήμα 3.60 Ισορροπία ελαφρά καμπυλωμένης μεμβράνης

Αν αντικαταστήσουμε τις σχέσεις (3.88) στην εξίσωση (3.98) προκύπτει η δεύτερη εξίσωση που συνδέει τη συνάρτηση τάσης H και το βέλος w:

$$\frac{p}{Eh} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 H}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} = 0$$

3.99

### 3.2.8.5 Συμπεριφορά σε δυναμική φόρτιση

Αν υποθέσουμε ότι οι συνιστώσες της επίπεδης τάσης παραμένουν σταθερές, μπορούμε να εξαγάγουμε εξισώσεις ταλάντωσης κατά την εγκάρσια διεύθυνση. Αν θέσουμε στην εξίσωση (3.98) το αδρανειακό φορτίο  $p = -\rho h \ddot{w}$ , όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού της μεμβράνης, τότε προκύπτει η εξίσωση:

$$n_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + n_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - \rho h \ddot{w} = 0$$

3.100

Με τη βοήθεια της μεθόδου των χωριζόμενων μεταβλητών, θέτοντας  $w = W(x, y) \cdot T(t)$  η εξίσωση (3.100) γίνεται:

$\frac{\ddot{T}}{T} = \frac{1}{Wh} \left( n_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - 2n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} \right) = -\omega_n^2$	3.101
---	-------

Επομένως έχουμε μια αρμονική λύση  $T = e^{i\omega t}$  και πρέπει να λύσουμε την εξίσωση:

$n_x \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + n_y \frac{\partial^2 W}{\partial y^2} - n_{xy} \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial y} + \rho h \omega^2 W = 0$	3.102
---	-------

Από την εξίσωση αυτή για κάθε φυσική συχνότητα  $\omega$  θα προκύψει μια συνάρτηση σχήματος  $W(x, y)$ .

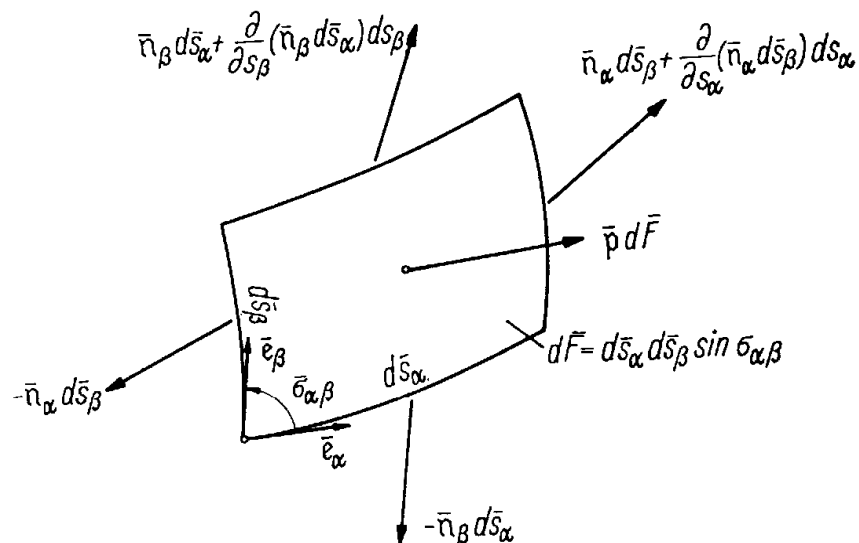
### 3.2.9 ΘΕΩΡΙΑ ΜΕΓΑΛΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΕΣ

#### 3.2.9.1 Εξισώσεις ισορροπίας

Στις προηγούμενες παραγράφους όπου ασχοληθήκαμε με μικρές παραμορφώσεις τα εντατικά μεγέθη στις μεμβράνες μπορούσαν να βρεθούν από τις συνθήκες ισορροπίας εφόσον ήταν εκ των προτέρων γνωστή η γεωμετρία της μεμβράνης. Αν θεωρήσουμε ότι οι παραμορφώσεις είναι μεγάλες κάτι που συμβαίνει τις περισσότερες φορές στις μεμβράνες για να βρούμε την τρέχουσα εντατική κατάσταση πρέπει να βρούμε την γεωμετρία της κατασκευής που αντιστοιχεί στην προένταση και τη φόρτιση που επιβάλλουμε. Αν το διάνυσμα θέσης της μεμβράνης στην απαραμόρφωτη κατάσταση είναι  $\mathbf{r}(\alpha, \beta)$  και  $\mathbf{v}(\alpha, \beta)$  είναι το διάνυσμα μετατόπισης, το διάνυσμα θέσης στην παραμορφωμένη κατάσταση  $\bar{\mathbf{r}}(\alpha, \beta)$  είναι το διανυσματικό τους άθροισμα. Η εσωτερική ένταση που παρουσιάζεται για μεγάλες παραμορφώσεις στο στοιχείο της μεμβράνης (σχ. 3.61) εκφράζεται από τις σχέσεις:

$\bar{\mathbf{n}}_\alpha = \bar{n}_\alpha \bar{\mathbf{e}}_\alpha + \bar{n}_{\alpha\beta} \bar{\mathbf{e}}_\beta$ $\bar{\mathbf{n}}_\beta = \bar{n}_{\beta\alpha} \bar{\mathbf{e}}_\alpha + \bar{n}_\beta \bar{\mathbf{e}}_\beta$	3.102
---	-------

όπου  $\bar{\mathbf{e}}_\alpha$  και  $\bar{\mathbf{e}}_\beta$  είναι τα διανύσματα βάσης που αντιστοιχούν στην τρέχουσα παραμορφωμένη κατάσταση.



Σχήμα 3.61 Πεπερασμένο στοιχείο μεμβράνης - μεγάλες παραμορφώσεις

Αντίστοιχα για την εξωτερική φόρτιση στην παραμορφωμένη επιφάνεια έχουμε:

$\bar{\mathbf{p}} = \bar{p}_\alpha \bar{\mathbf{e}}_\alpha + \bar{p}_\beta \bar{\mathbf{e}}_\beta + \bar{p}_\gamma \bar{\mathbf{e}}_\gamma$	3.103
---	-------

Από την ισορροπία των δυνάμεων που φαίνονται στο σχήμα 3.61 και μετά από πράξεις προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις ισορροπίας:

$\frac{\partial}{\partial \alpha} (\sqrt{\bar{g}_{\beta\beta}} \bar{\mathbf{n}}_\alpha) + \frac{\partial}{\partial \beta} (\sqrt{\bar{g}_{\alpha\alpha}} \bar{\mathbf{n}}_\beta) + \bar{\mathbf{p}} \cdot \sqrt{\bar{g}_{\alpha\alpha} \bar{g}_{\beta\beta} - \bar{g}_{\alpha\beta}^2} = 0$ $\bar{\mathbf{n}}_{\alpha\beta} = \bar{\mathbf{n}}_{\beta\alpha}$	3.104
---	-------

Όμως ισχύει:

$\bar{g}_{\alpha\alpha} = \bar{\mathbf{r}}_\alpha^2 = \left( \frac{\partial \bar{\mathbf{r}}}{\partial \alpha} \right)^2 = g_{\alpha\alpha} \left( \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s_\alpha} \right)^2 = g_{\alpha\alpha} \left( \mathbf{e}_\alpha + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s_\alpha} \right)^2 = g_{\alpha\alpha} (1 + \varepsilon_\alpha)^2$ $\bar{g}_{\beta\beta} = \bar{\mathbf{r}}_\beta^2 = g_{\beta\beta} (1 + \varepsilon_\beta)^2$ $\sqrt{\bar{g}_{\alpha\alpha} \bar{g}_{\beta\beta} - \bar{g}_{\alpha\beta}^2} = \sqrt{\bar{\mathbf{r}}_\alpha^2 \bar{\mathbf{r}}_\beta^2 - (\bar{\mathbf{r}}_\alpha \cdot \bar{\mathbf{r}}_\beta)^2} = \sqrt{\bar{\mathbf{r}}_\alpha^2 \bar{\mathbf{r}}_\beta^2 - \bar{\mathbf{r}}_\alpha^2 \bar{\mathbf{r}}_\beta^2 \cos^2 \bar{\sigma}_{\alpha\beta}} =$ $= \sqrt{g_{\alpha\alpha} g_{\beta\beta}} (1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta) \sin \bar{\sigma}_{\alpha\beta}$	3.105
--	-------

Με τη βοήθεια των σχέσεων (3.105) η πρώτη των σχέσεων (3.104) γράφεται:

$\frac{\partial}{\partial \alpha} [\sqrt{g_{\beta\beta}} (1 + \varepsilon_\beta) \bar{\mathbf{n}}_\alpha] + \frac{\partial}{\partial \beta} [\sqrt{g_{\alpha\alpha}} (1 + \varepsilon_\alpha) \bar{\mathbf{n}}_\beta] +$ $+ \bar{\mathbf{p}} \cdot \sqrt{g_{\alpha\alpha} g_{\beta\beta}} (1 + \varepsilon_\alpha)(1 + \varepsilon_\beta) \sin \bar{\sigma}_{\alpha\beta} = 0$	3.106
--	-------

### 3.2.9.2 Σχέσεις φορτίου – τροπής

Χρησιμοποιούμε τη γενίκευση του νόμου του Hook που ισχύει για μεγάλες παραμορφώσεις. Έστω  $\tilde{\mathbf{R}}$  ο συμμετρικός τανυστής που δίνεται από τη σχέση:

$\tilde{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{n}}_{\alpha\alpha} & \tilde{\mathbf{n}}_{\alpha\beta} \\ \tilde{\mathbf{n}}_{\alpha\beta} & \tilde{\mathbf{n}}_{\beta\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{n}}_\alpha \cdot \frac{1 + \varepsilon_\beta}{1 + \varepsilon_\alpha} & \bar{\mathbf{n}}_{\alpha\beta} \\ \bar{\mathbf{n}}_{\alpha\beta} & \bar{\mathbf{n}}_\beta \cdot \frac{1 + \varepsilon_\alpha}{1 + \varepsilon_\beta} \end{bmatrix}$	3.107
---	-------

και D το μητρώο τροπών για επίπεδη παραμόρφωση:

$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{\alpha\alpha} & d_{\alpha\beta} \\ d_{\beta\alpha} & d_{\beta\beta} \end{bmatrix}$	3.108
---	-------

Τότε αποδεικνύεται ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$d_{\alpha\alpha} = \frac{\tilde{n}_{\alpha\alpha}}{E_{\alpha}} - \frac{\nu_{\beta}}{E_{\beta}} \tilde{n}_{\beta\beta}$$

$$d_{\beta\beta} = \frac{\tilde{n}_{\beta\beta}}{E_{\beta}} - \frac{\nu_{\alpha}}{E_{\alpha}} \tilde{n}_{\alpha\alpha}$$

$$2d_{\alpha\beta} = \frac{\tilde{n}_{\alpha\beta}}{E_{\alpha\beta}}$$

3.109

Για ισότροπο υλικό ισχύει για το μέτρο ελαστικότητας  $E_{\alpha} = E_{\beta} = E$  και

για το λόγο Poisson  $\nu_{\alpha} = \nu_{\beta} = \nu$ .

Επίσης ισχύει:

$$E_{\alpha\beta} = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Από το νόμο του Hook προκύπτει για τις κύριες διευθύνσεις 1 και 2 όπου παρουσιάζονται οι μέγιστες τροπές:

$$\varepsilon_1 = \frac{\bar{n}_1}{E_1} - \frac{\nu_2}{E_2} \cdot \bar{n}_2$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\bar{n}_2}{E_2} - \frac{\nu_1}{E_1} \cdot \bar{n}_1$$

3.110

Για τις κύριες τιμές των τροπών έχουμε:

$$d_2 = \varepsilon_2 \left(1 + \frac{\varepsilon_2}{2}\right) = -\nu_1 d_1 = -\nu_1 \varepsilon_1 \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{2}\right)$$

3.111

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\bar{n}_1 = E_1 \frac{d_1(1+\varepsilon_1)}{\sqrt{1-2\nu_1\varepsilon_1\left(1+\frac{\varepsilon_1}{2}\right)}} = E_1 \frac{\varepsilon_1(1+\varepsilon_1)\left(1+\frac{\varepsilon_1}{2}\right)}{\sqrt{1-2\nu_1\varepsilon_1\left(1+\frac{\varepsilon_1}{2}\right)}}$$

3.112

Αν πολλαπλασιάσουμε την σχέση (3.112) με  $(1+\varepsilon_2)$  έχουμε:

$$\begin{aligned} \bar{n}_1(1+\varepsilon_2) &= E_1 \varepsilon_1(1+\varepsilon_1) \left(1 + \frac{\varepsilon_1}{2}\right) \Rightarrow \\ \Rightarrow \bar{n}_1(1+\varepsilon_2) &= \frac{\bar{n}_1(1+\varepsilon_2)b_0}{b_0} = \frac{\bar{n}_1 b}{b_0} \end{aligned}$$

3.113

Τελικά προκύπτει η σχέση:

$$b_{\alpha} = b_{0\alpha}(1+\varepsilon_2)$$

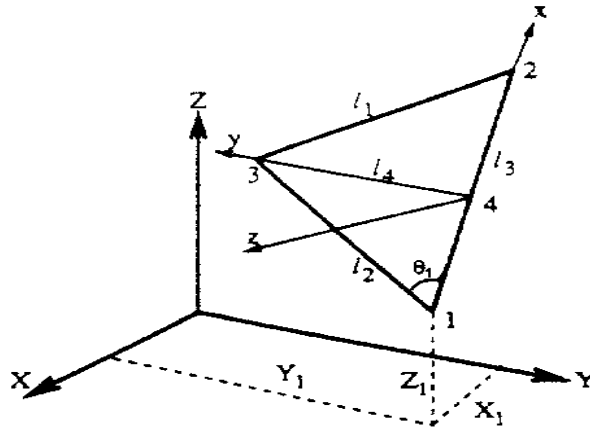
3.114

όπου  $b_{0\alpha}$  είναι το αρχικό πλάτος μιας λωρίδας μεμβράνης κατά την  $\alpha$ - διεύθυνση και

$b_{\alpha}$  το τρέχον πλάτος.

### 3.2.10 ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προσεγγίζει το πρόβλημα της ανάλυσης των εφελκυσόμενων κατασκευών με αρκετά ακριβή τρόπο. Λόγω της μεγάλης γεωμετρικής μη γραμμικότητας των μεμβρανών είναι προτιμότερη η χρήση ενός πυκνού δικτύου απλών πεπερασμένων στοιχείων, παρά ενός αραιού δικτύου με πεπερασμένα στοιχεία ανώτερης τάξης. Για αυτό το λόγο στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται ένα τριγωνικό στοιχείο μεμβράνης με τρεις κόμβους και εννέα βαθμούς ελευθερίας.



Σχήμα 3.62 Τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο μεμβράνης

Στο σχήμα 3.62 φαίνεται ένα τυπικό τριγωνικό στοιχείο, καθώς και δύο συστήματα συντεταγμένων, ένα καθολικό (X,Y,Z) και ένα τοπικό (x,y,z). Οι μετατοπίσεις του πεπερασμένου στοιχείου  $u(x,y)$ ,  $v(x,y)$  και  $w(x,y)$  εκφράζονται γραμμικά όπως φαίνεται στις παρακάτω σχέσεις ως προς το τοπικό σύστημα αναφοράς:

$\begin{cases} u = \alpha_1 + \alpha_2 X + \alpha_3 Y \\ v = \alpha_4 + \alpha_5 X + \alpha_6 Y \\ w = \alpha_7 + \alpha_8 X + \alpha_9 Y \end{cases}$	3.115
--	-------

όπου οι εννέα συντελεστές  $\alpha_i$  είναι σταθεροί.

Στη συνέχεια εκφράζουμε τις συνιστώσες των μετατοπίσεων του πεπερασμένου στοιχείου συναρτήσει των επικόμβιων μετατοπίσεων, οπότε προκύπτουν οι συναρτήσεις σχήματος του πεπερασμένου στοιχείου:

$\begin{aligned} u(x,y) &= (a_1 + b_1 x + c_1 y)u_1 + (a_2 + b_2 x + c_2 y)u_2 + (a_3 + b_3 x + c_3 y)u_3 \\ v(x,y) &= (a_1 + b_1 x + c_1 y)v_1 + (a_2 + b_2 x + c_2 y)v_2 + (a_3 + b_3 x + c_3 y)v_3 \\ w(x,y) &= (a_1 + b_1 x + c_1 y)w_1 + (a_2 + b_2 x + c_2 y)w_2 + (a_3 + b_3 x + c_3 y)w_3 \end{aligned}$	3.116
--	-------

Όπου:

$\begin{aligned} a_1 &= (x_2 y_3 - x_3 y_2) / 2\Delta, & b_1 &= (y_2 - y_3) / 2\Delta, & c_1 &= (x_2 - x_3) / 2\Delta \\ a_2 &= (x_3 y_1 - x_1 y_3) / 2\Delta, & b_2 &= (y_3 - y_1) / 2\Delta, & c_2 &= (x_3 - x_1) / 2\Delta \\ a_3 &= (x_1 y_2 - x_2 y_1) / 2\Delta, & b_3 &= (y_1 - y_2) / 2\Delta, & c_3 &= (x_1 - x_2) / 2\Delta \end{aligned}$	3.117
--	-------



$$2\Delta = \det \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{vmatrix} = 2 \quad (\text{Επιφάνεια τριγώνου})$$

Η μεμβράνη δε μπορεί να αναλάβει καμπτικές τάσεις. Γι αυτό τα εξωτερικά φορτία εξισορροπούνται μόνο από τάσεις που εφάπτονται στις καμπύλες επιφάνειες της μεμβράνης. Καθώς τα φορτία μεταβάλλονται οι τάσεις και οι τοπικές καμπυλότητες αλλάζουν ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία. Αυτές οι μεταβολές συνοδεύονται από σημαντικές μετατοπίσεις και στροφές της επιφάνειας. Γι αυτό δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι γραμμικές σχέσεις μετατοπίσεων παραμορφώσεων και χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μη γραμμικές σχέσεις:

$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \right]$ $\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]$ $\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} + \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right]$	3.118
--	-------

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.116) στις (3.118) προκύπτει η μητρική σχέση:

$\varepsilon = \mathbf{B}_0 \mathbf{v} + \frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\theta}$	3.119
--	-------

Όπου:

$\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 \\ c_1 & b_1 & 0 & c_2 & b_2 & 0 & c_3 & b_3 & 0 \end{bmatrix}$ $\boldsymbol{\theta} = \left[ \frac{\partial u}{\partial x} \quad \frac{\partial v}{\partial x} \quad \frac{\partial w}{\partial x} \quad \frac{\partial u}{\partial y} \quad \frac{\partial v}{\partial y} \quad \frac{\partial w}{\partial y} \right]^T$ $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} & \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \end{bmatrix}$ $\mathbf{v} = [u_1 \quad v_1 \quad w_1 \quad u_2 \quad v_2 \quad w_2 \quad u_3 \quad v_3 \quad w_3]^T$	3.120
---	-------

Επίσης εκφράζουμε το  $\boldsymbol{\theta}$  σε επικόμβιους όρους:

$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{G} \mathbf{v}$	3.121
---	-------

όπου  $\delta \epsilon$  και  $\delta u$  είναι οι δυνατές παραμορφώσεις και μετατοπίσεις αντίστοιχα και το μητρώο  $G$  γράφεται αναλυτικά:

$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 & b_2 & 0 & 0 & b_3 \\ c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & 0 & c_1 & 0 & 0 & c_2 & 0 & 0 & c_3 \end{bmatrix}$	3.122
---	-------

Εφόσον κάναμε την παραδοχή ότι οι μετατοπίσεις είναι μεγάλες και οι παραμορφώσεις είναι μικρές, οι καταστατικές σχέσεις για γραμμικά ελαστικό ισότροπο υλικό και για επίπεδη ένταση είναι της μορφής:

$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\epsilon} + \boldsymbol{\sigma}_0$	3.123
---	-------

όπου  $\boldsymbol{\sigma}_0$  είναι το διάνυσμα των αρχικών τάσεων και  $\mathbf{D}$  είναι το μητρώο:

$\mathbf{D} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}$	3.124
--	-------

όπου  $E$ ,  $\nu$  είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson αντίστοιχα.

Οι εξισώσεις ισορροπίας για κάθε πεπερασμένο στοιχείο στο τοπικό σύστημα αναφοράς δίνονται μέσω της αρχής των δυνατών έργων:

$\int_{V^e} \delta \boldsymbol{\epsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV - \delta \mathbf{u}^T \mathbf{p} = 0$	3.125
---	-------

Όπου  $V^e$  είναι ο όγκος του στοιχείου και  $\mathbf{p}$  είναι το διάνυσμα των εξωτερικά επιβαλλόμενων δυνάμεων.

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (3.118) και (3.121) στην εξίσωση (3.125) και απαλείφοντας τις δυνατές μετατοπίσεις  $\delta u^T$  έχουμε:

$\int_{V^e} (\mathbf{B}_0 + \mathbf{A}\mathbf{G})^T \left[ \mathbf{D}(\mathbf{B}_0 \mathbf{u} + \frac{1}{2} \mathbf{A} \boldsymbol{\theta} + \boldsymbol{\sigma}_0) \right] dV - \mathbf{p} = 0$	3.126
--	-------

Η παραπάνω εξίσωση είναι η στοιχειώδης εξίσωση ισορροπίας και ισχύει για κάθε πεπερασμένο στοιχείο. Οι εξισώσεις των πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να μετασχηματιστούν στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων και να συνενωθούν ώστε να προκύψουν οι συνολικές εξισώσεις ισορροπίας όλου του φορέα. Επειδή οι συνολικές εξισώσεις λύνονται με την επαναληπτική μέθοδο Newton Raphson πρέπει να γραμμικοποιήσουμε τις παραπάνω εξισώσεις σε επίπεδο στοιχείου ώστε να απλοποιηθεί η επαναληπτική διαδικασία. Έτσι θέτουμε:

$\boldsymbol{\Phi}^i = \int_{V^e} (\mathbf{B}_0 + \mathbf{A}^i \mathbf{G})^T \left[ \mathbf{D}(\mathbf{B}_0 \mathbf{u}^i + \frac{1}{2} \mathbf{A}^i \boldsymbol{\theta}^i) + \boldsymbol{\sigma}_0 \right] dV - \mathbf{p} = 0$	3.127
---	-------

Όπου  $\varphi^i$  είναι ο απομένων όρος μετά την  $i$  επανάληψη. Για το επόμενο βήμα έχουμε:

$\varphi^{i+1} = \varphi^i + \frac{\partial \varphi^i}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u}^i = 0$ <p style="text-align: center;">ή</p> $-\varphi^i = \frac{\partial \varphi^i}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u}^i$	3.128
$-\varphi^i = \frac{\partial \varphi^i}{\partial \mathbf{u}} \Delta \mathbf{u}^i$	3.129

όπου με  $\frac{\partial \varphi^i}{\partial \mathbf{u}}$  συμβολίζουμε το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου.

Από την σχέση (3.127) μπορούμε να υπολογίσουμε τις στοιχειώδεις μεταβολές της μετατόπισης,  $\Delta \mathbf{u}^i$  επομένως και τις μετατοπίσεις μετά την  $i+1$  επανάληψη:

$\mathbf{u}^{i+1} = \mathbf{u}^i + \Delta \mathbf{u}^i$	3.130
---	-------

Στην εξίσωση (3.127) το μητρώο εφαπτομενικής δυσκαμψίας του πεπερασμένου στοιχείου,  $\frac{\partial \varphi^i}{\partial \mathbf{u}}$  αποτελείται από δύο μέρη:

$\mathbf{K}_m = \frac{\partial \varphi^i}{\partial \mathbf{u}} = \int_{V^e} (\mathbf{B}_0 + \mathbf{A}^i \mathbf{G})^T \frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} \left[ \mathbf{D}(\mathbf{B}_0 \mathbf{u}^i + \frac{1}{2} \mathbf{A}^i \theta^i) \right] dV +$ $+ \int_{V^e} \frac{\partial}{\partial \mathbf{u}} \left[ (\mathbf{B}_0 + \mathbf{A}^i \mathbf{G})^T \left[ \mathbf{D}(\mathbf{B}_0 \mathbf{u}^i + \frac{1}{2} \mathbf{A}^i \theta^i) + \boldsymbol{\sigma}_0 \right] \right] dV = \mathbf{K}_e^i + \mathbf{K}_g^i$	3.131
--	-------

Όπου  $\mathbf{K}_e^i$  και  $\mathbf{K}_g^i$  είναι το ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας και το γεωμετρικό μητρώο δυσκαμψίας αντίστοιχα. Επομένως:

$\mathbf{K}_e^i = \int_{V^e} (\mathbf{B}_0 + \mathbf{A}^i \mathbf{G})^T \mathbf{D}(\mathbf{B}_0 + \mathbf{A}^i \mathbf{G}) dV$	3.132
$\mathbf{K}_g^i = \int_{V^e} \mathbf{G}^T \frac{\partial (\mathbf{A}^i)^T}{\partial \mathbf{u}} \boldsymbol{\sigma}^i dV = \int_{V^e} \mathbf{G}^T \mathbf{s}^i \mathbf{G} dV$	3.133

όπου:

$\mathbf{s}^i = \begin{bmatrix} n_x & 0 & 0 & n_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & n_x & 0 & 0 & n_{xy} & 0 \\ 0 & 0 & n_x & 0 & 0 & n_{xy} \\ n_{xy} & 0 & 0 & n_y & 0 & 0 \\ 0 & n_{xy} & 0 & 0 & n_y & 0 \\ 0 & 0 & n_{xy} & 0 & 0 & n_y \end{bmatrix}$	3.134
---	-------

Τα ελαστικά και τα γεωμετρικά μητρώα δυσκαμψίας μπορούν να αναλυθούν σε επιμέρους μητρώα, όπως στο γραμμικό μητρώο δυσκαμψίας και στο μητρώο αρχικών τάσεων. Προς ευκολία των υπολογισμών διατηρούμε τα μητρώα  $\mathbf{K}_e^i$  και  $\mathbf{K}_g^i$  στην αρχική τους μορφή. Για να υπολογίσουμε τα μητρώα  $\mathbf{K}_e^i$  και  $\mathbf{K}_g^i$  πρέπει να ξέρουμε τις μετατοπίσεις  $u, v, w$  (βλ. ορισμό μητρώου  $\mathbf{A}$ ). Γι αυτό πρέπει να καθοριστεί ένα πιθανό αρχικό πεδίο μετατοπίσεων που να ικανοποιεί τις συνοριακές συνθήκες αλλά όχι απαραίτητα τις συνθήκες ισορροπίας. Μόλις τα μητρώα των πεπερασμένων στοιχείων συνενωθούν ώστε να δώσουν το καθολικό μητρώο, υπολογίζονται νέα (αποδεκτά) πεδία μετατοπίσεων.

Βάσει των νέων μετατοπίσεων υπολογίζονται νέα μητρώα δυσκαμψίας. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι οι καθολικές μετατοπίσεις που υπολογίζουμε να προσεγγίσουν τις μετατοπίσεις που χρησιμοποιούμε για να υπολογίσουμε τα μητρώα των πεπερασμένων στοιχείων. Η πιο συνηθισμένη επαναληπτική μέθοδος είναι η Newton-Raphson ή κάποια τροποποίησή της. Για τις μεθόδους αυτές θα γίνει εκτενής αναφορά σε επόμενο κεφάλαιο. Οι μετασχηματισμοί από τα τοπικά συστήματα αξόνων στο καθολικό σύστημα γίνεται βάσει των παρακάτω σχέσεων:

$\mathbf{K} = \mathbf{Q}_e^T \mathbf{K}_m \mathbf{Q}_e$ $\mathbf{P} = \mathbf{Q}_e^T \mathbf{p}$ $\mathbf{U} = \mathbf{Q}_e^T \mathbf{u}$	3.135
---	-------

όπου  $\mathbf{Q}_e$  είναι το  $9 \times 9$  μητρώο μετασχηματισμού από το τοπικό σύστημα στο καθολικό και γράφεται σε μητρωϊκή μορφή:

$\mathbf{Q}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_e & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{T}_e & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{T}_e \end{bmatrix}$	3.136
---	-------

όπου  $\mathbf{T}_e$  είναι το  $3 \times 3$  μητρώο στροφής που συσχετίζει τον προσανατολισμό του τοπικού συστήματος του πεπερασμένου στοιχείου με το καθολικό σύστημα.

### 3.2.11 ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΜΕΜΒΡΑΝΩΝ

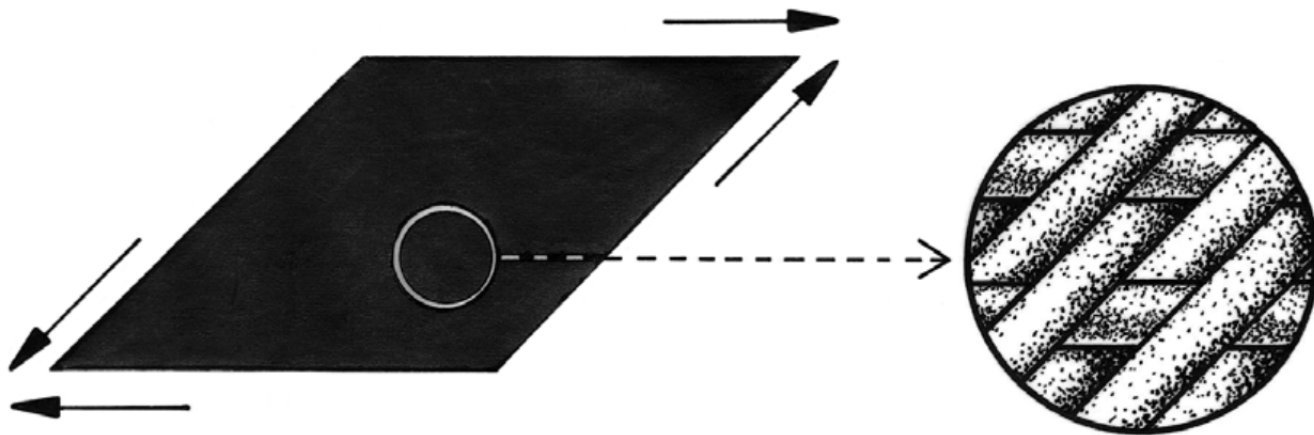
#### 3.2.11.1 ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΗΣ ΔΥΣΚΑΜΨΙΑΣ

Η δοκιμή προκαλεί παραμόρφωση όπως φαίνεται στο Σχ. 3.63. Αυτή η παραμόρφωση δεν μπορεί πάντως να αναπαραχθεί φυσικά επειδή είναι δύσκολο να εφαρμοστούν δυνάμεις διάτμησης. Είναι απαραίτητο, επομένως, να προσεγγίσει το πρόβλημα με διαφορετικό τρόπο. Η συσκευή διαξονικής δοκιμής που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί φαίνεται παρακάτω: Ένα δείγμα κόβεται, στο οποίο το στημόνι και το υφάδι είναι προσανατολισμένα σε 45 μοίρες προς το όριο.

Οι εντάσεις είναι  $n_{11}$  στην κατεύθυνση κατά μήκος ενός ορίου και  $n_{22}$  σε κατεύθυνση κάθετη προς αυτό. Αυτό δίνει τάσεις στο στημόνι και υφάδι του:

$n_{11} = E_{1111} \varepsilon_{11} + E_{1122} \varepsilon_{22}$	$n_{22} = E_{1122} \varepsilon_{11} + E_{2222} \varepsilon_{22}$	3,137
--	--	-------

Εκ τούτου υπάρχουν διατμητικές τάσεις στο σύστημα συντεταγμένων της κύριας ανισότροπης κατεύθυνσης εάν οι τάσεις παράλληλα με τα όρια δεν είναι οι ίδιες. Οι αντίστοιχες παραμορφώσεις διάτμησης πρέπει επίσης να μετρηθούν. Για να γίνει αυτό, οι παραμορφώσεις παράλληλες με τη διεύθυνση του στημονιού πρώτα μετρώνται και έπειτα μετρώνται εκείνες παράλληλες με την διεύθυνση του στημονιού και εκείνες κατά την γωνία των 45 μοιρών ως προς το στημόνι και υφάδι.

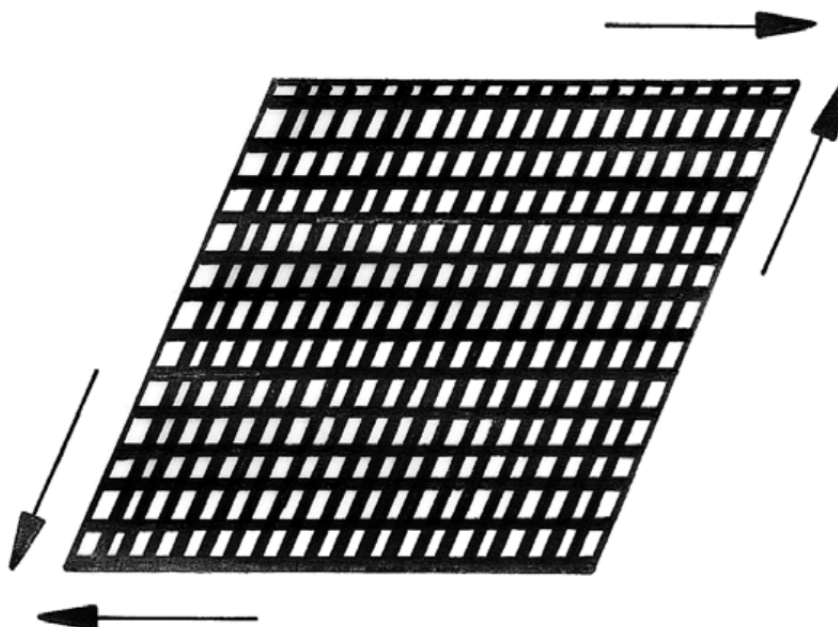


Σχ. 3.63 Διαμητική παραμόρφωση ενός υφαντού υφάσματος

Έτσι, οι συνιστώσες του τανυστή παραμόρφωσης δίνονται ως:

$\boldsymbol{\varepsilon}_\beta = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{11}' - \frac{1}{2}\varepsilon_{11} - \frac{1}{2}\varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{11}' - \frac{1}{2}\varepsilon_{11} - \frac{1}{2}\varepsilon_{22} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix}$	3.138
---	-------

Όταν αυτή η δοκιμή εκτελείται μπορούν να παρατηρηθούν τα ακόλουθα. Αρχικά, η αντίσταση στην διαμητική παραμόρφωση είναι χαμηλή. Είναι δυνατό να παραμορφώσει το υλικό σχεδόν τυχαία. Εάν η τάση διαμήσεως αυξάνεται, εντούτοις η διαμητική παραμόρφωση δεν αυξάνεται πλέον, η αντίσταση είναι μεγαλύτερη. Αυτή η συμπεριφορά φαίνεται στο Σχ. 3.64.



Σχ. 3.64 Διάτμηση

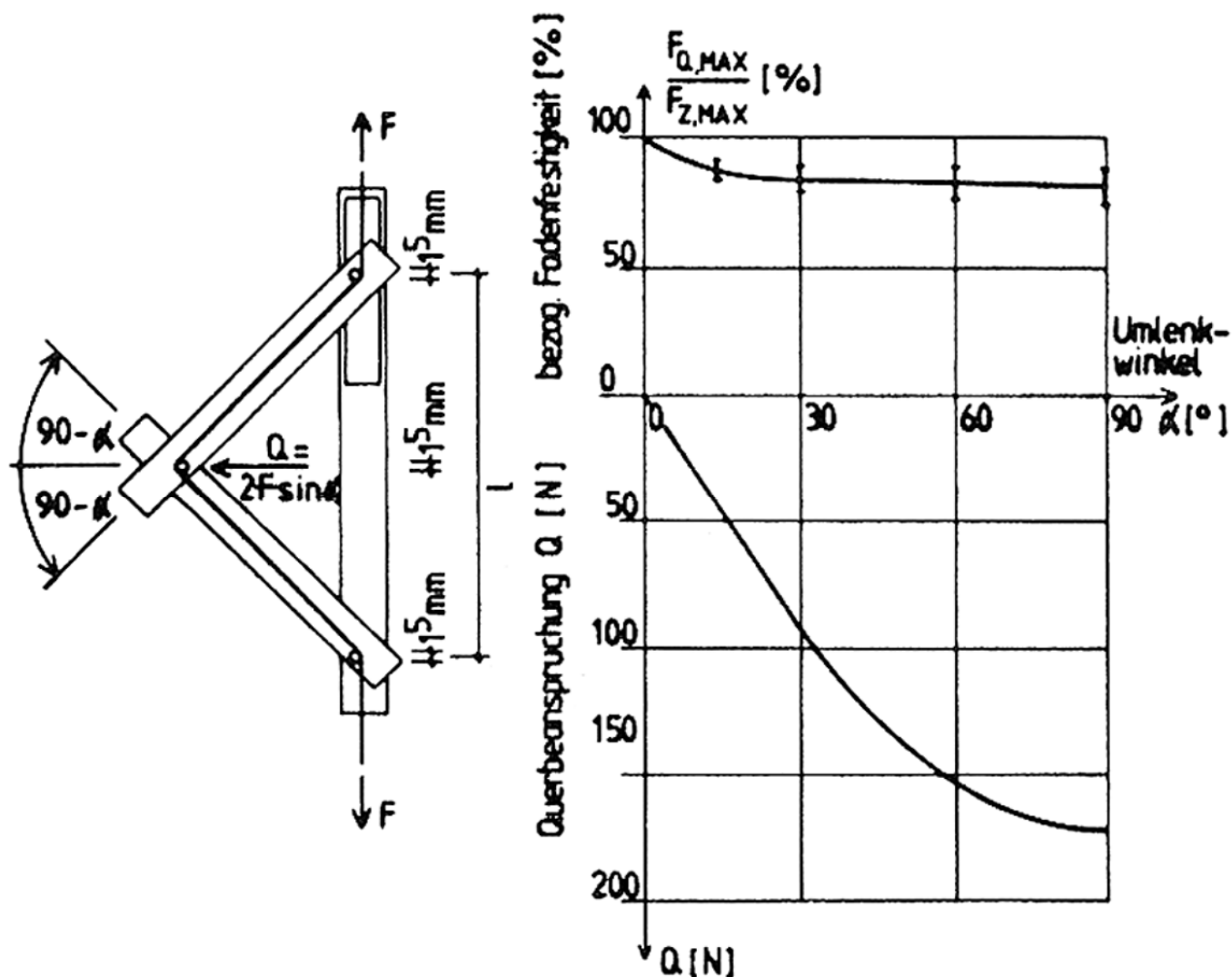
Ο λόγος για αυτό είναι ότι όσο τα νήματα στημονιού και υφαδιού δεν εμποδίζουν το ένα το άλλο η αντίσταση στην πλευρική μετατόπιση προέρχεται μόνο από την επικάλυψη. Αυτό συνεχίζεται μέχρι το στημόνι και υφάδι νήματα αμοιβαία εμπλέκονται μεταξύ τους. Στο σημείο αυτό η αντίσταση για την περαιτέρω ώθηση αυξάνεται δραματικά. Αυτό ονομάζεται "jamming condition". Η κρίσιμη γωνία, όπου ξεκινάει η αντίσταση, περιορίζει την απόσταση των νημάτων για μία προκαθορισμένη καμπυλότητα.

### 3.2.11.2 ΔΟΚΙΜΗ ΓΙΑ ΚΑΘΟΡΙΣΜΟ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Η αντοχή του επικαλυμμένου υφάσματος καθορίζεται αποκλειστικά από την αντοχή των νημάτων. Πρωταρχικής σημασίας δεν είναι εδώ η δύναμη ενός μεμονωμένου νήματος, αλλά μια μονάδα πλάτους του υφάσματος. Κατά τη διάρκεια των διαδικασιών της ύφανσης και της επικάλυψης των νημάτων εμφανίζεται μείωση της αντοχής κάτι που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή και επίχρηστη του υλικού. Ο λόγος για αυτό είναι ότι μπορεί να μάθει πόσο προστατεύει η διεργασία ύφανσης και επίστρωσης το μεμονωμένο νήμα. Ο τελικός χρήστης, ωστόσο, ενδιαφέρεται μόνο για τη δύναμη την οποία εμφανίζει το τελικό προϊόν.

Ωστόσο, η δύναμη του επικαλυμμένου υφάσματος είναι μικρότερη από εκείνη του επιμέρους νήματος πολλαπλασιασμένο με τον αριθμό των νημάτων ανά μονάδα πλάτους. Η εξήγηση για αυτό είναι ότι κάθε νήμα εκτρέπεται σε κάθε σημείο διασταύρωσης από μία δύναμη που εφαρμόζεται από τη νήματος που το διασταυρώνει. Αυτή η παραμόρφωση μειώνει την αντοχή του νήματος, αφού εκτός από την αξονική δύναμη, μια ροπή κάμψεως εφαρμόζεται και ο συνδυασμός προκαλεί την μείωση της αντοχής των νημάτων και στις δύο κατευθύνσεις. Αυτό το φαινόμενο δεν παρουσιάζεται στα weft-inserted υφάσματα.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι το στημόνι και το υφάδι μπορούν να έχουν διαφορετικές ιδιότητες.



Σχ. 3.65 Η εξάρτηση μεταξύ γωνίας και αντοχής του νήματος

### 3.2.11.3 ΔΙΑΞΟΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΑΣΕΩΝ-ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΔΟΚΙΜΗ ΣΥΝΤΟΜΟΥ ΧΡΟΝΟΥ

Το επόμενο θέμα που μας ενδιαφέρει είναι το πώς το υλικό εκτείνεται όταν φορτίζεται. Αυτή η ιδιότητα είναι που περιγράφεται από:

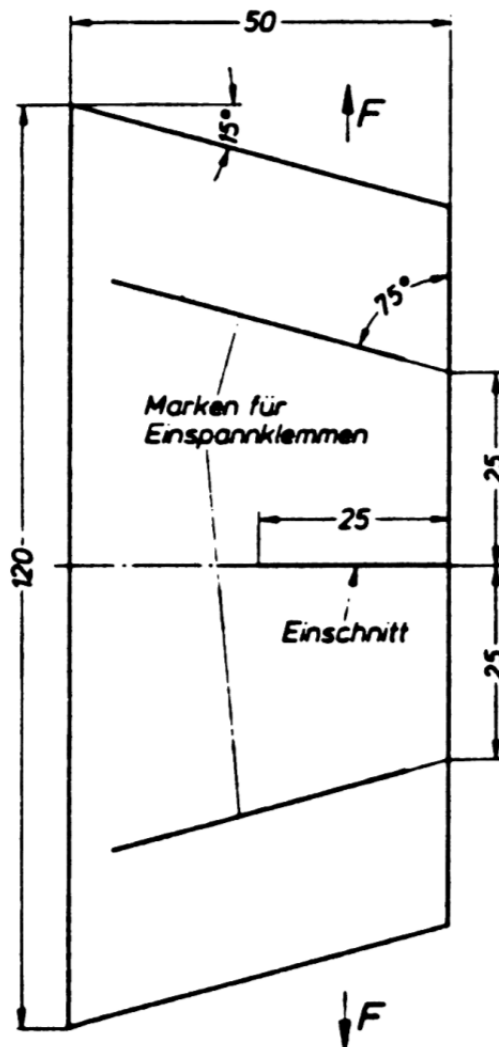
- α) Δυσκαμψία στη διεύθυνση του στημονιού
- β) Δυσκαμψία στην διεύθυνση του υφαδιού
- γ) Εγκάρσια έκταση
- δ) Δυσκαμψία στην διάτμηση

Αυτές οι ιδιότητες έχουν ενδιαφέρον για τον μηχανικό αφού οι τιμές τους έχουν μια σημαντική συμβολή στον υπολογισμό των καταπονήσεων της μεμβράνης. Η διαξονική συμπεριφορά μπορεί να περιγραφεί καλά σε ένα αριθμητικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας την πειραματική μέτρηση των ελεύθερων παραμέτρων. Η λύση για την περιγραφή της βραχυπρόθεσμης συμπεριφοράς μπορεί να βρεθεί με αυτά τα μέσα. Για το σκοπό αυτό η γνώση της ακαμψίας των νήματα στημονιού και υφαδιού είναι απαραίτητη. Είναι επίσης σημαντικό να κατανοήσουμε σαφώς ότι οι αριθμητικές τιμές των συντελεστών που βρίσκονται από αυτή την προσέγγιση δεν είναι σταθερές, αλλά εξαρτώνται από τη δύναμη που εφαρμόζεται και το ιστορικό της φόρτωσης.

Οι διαξονικές δοκιμές δεν προορίζονται για τη μέτρηση της αντοχής. Είναι για τον καθορισμό των στοιχείων αντιστάθμισης (compensation) και για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο η διενέργεια των δοκιμών να γίνεται μόνο στο σχετικό εύρος φορτίου, το οποίο πρέπει, συνεπώς, να καθορισθεί. Από τις δοκιμές είναι δυνατόν να παρέχονται μόνο τα γενικά δεδομένα αλλά κάθε μεμονωμένη περίπτωση είναι ευθύνη του γραφείου μελετών και της επίβλεψης κατασκευών. Σε γενικές γραμμές ένας συντελεστής ασφάλειας 5 χρησιμοποιείται, αλλά αυτό θα πρέπει να εξετάζεται πάντοτε σύμφωνα με την ανάλυση του μηχανικού σχεδιασμού και μπορεί να διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση. Η προένταση κανονικά είναι περίπου το ένα πέμπτο και μπορεί να είναι έως το ένα δέκατο του φορτίου λειτουργίας, δεδομένου ότι μπορεί να εξαρτάται από την καμπυλότητα της επιφάνειας και τον προσανατολισμό της ύφανσης. Έτσι, η προένταση είναι περίπου το ένα εικοστό πέμπτο της μονοαξονικής αντοχής.

### 3.2.11.4 Η ΜΕΤΑΔΟΣΗ ΤΟΥ ΣΚΙΣΙΜΑΤΟΣ

Μία περαιτέρω διερεύνηση είναι ο προσδιορισμός της συμπεριφοράς της διάδοσης του σχισίματος ενός επικαλυμμένου υφάσματος. Η μέθοδος που αποτελεί τη βάση των περισσότερων ευρωπαϊκών "κανόνων" και φαίνεται στο Σχ. 3.66, χρησιμοποιεί ένα σχήμα τραπεζίου δείγματος που περιέχει μια πρώτη σχισμή που τελειώνει στη μικρότερη από τις δύο ελεύθερες άκρες.



Σχ. 3.66 Τραπεζοειδής δείγμα

Το σχήμα 3.67 δείχνει καθαρά την συγκράτηση του δείγματος στις σιαγόνες της μηχανής δοκιμής, καθώς και την αλλαγή στο σχήμα του δείγματος υπό μονοαξονική φόρτιση.

Μια πιο αντιπροσωπευτική δοκιμασία για την διάδοση σχισίματος εντός των δομών της μεμβράνης φαίνεται στο Σχ. 9.16. Όταν ένα δοκίμιο που περιέχει μία αρχική "σχισμή" τίθεται υπό διαξονική φορτίο. Οι προκύπτουσες παραμορφώσεις έχουν γίνει πιο ορατές μέσω της τεχνικής Moiré fringe. Μπορεί να φανεί ότι η αρχική «σχισμή» έχει επεκταθεί στο σχήμα μιας έλλειψης.

Η δύναμη η οποία αρχικά διέρχεται απ' ευθείας μέσω αυτής της ζώνης που υπήρχε το σχίσσιμο, έχει τώρα "οδηγηθεί γύρω από το σχίσσιμο", και οι παραμορφώσεις που έχουν επέλθει από αυτό είναι σαφώς ορατές. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τη συμπεριφορά του δείγματος τραπεζοειδούς κομματιού όπου η δύναμη δεν μπορεί να «οδηγηθεί γύρω από το δάκρυ». Ως εκ τούτου, το τραπεζοειδές δείγμα μετρά μόνο το πώς τα μεμονωμένα νήματα αναλαμβάνουν την δύναμη στη ρίζα του σχισίματος ως αποτέλεσμα της παραμόρφωσης τους.



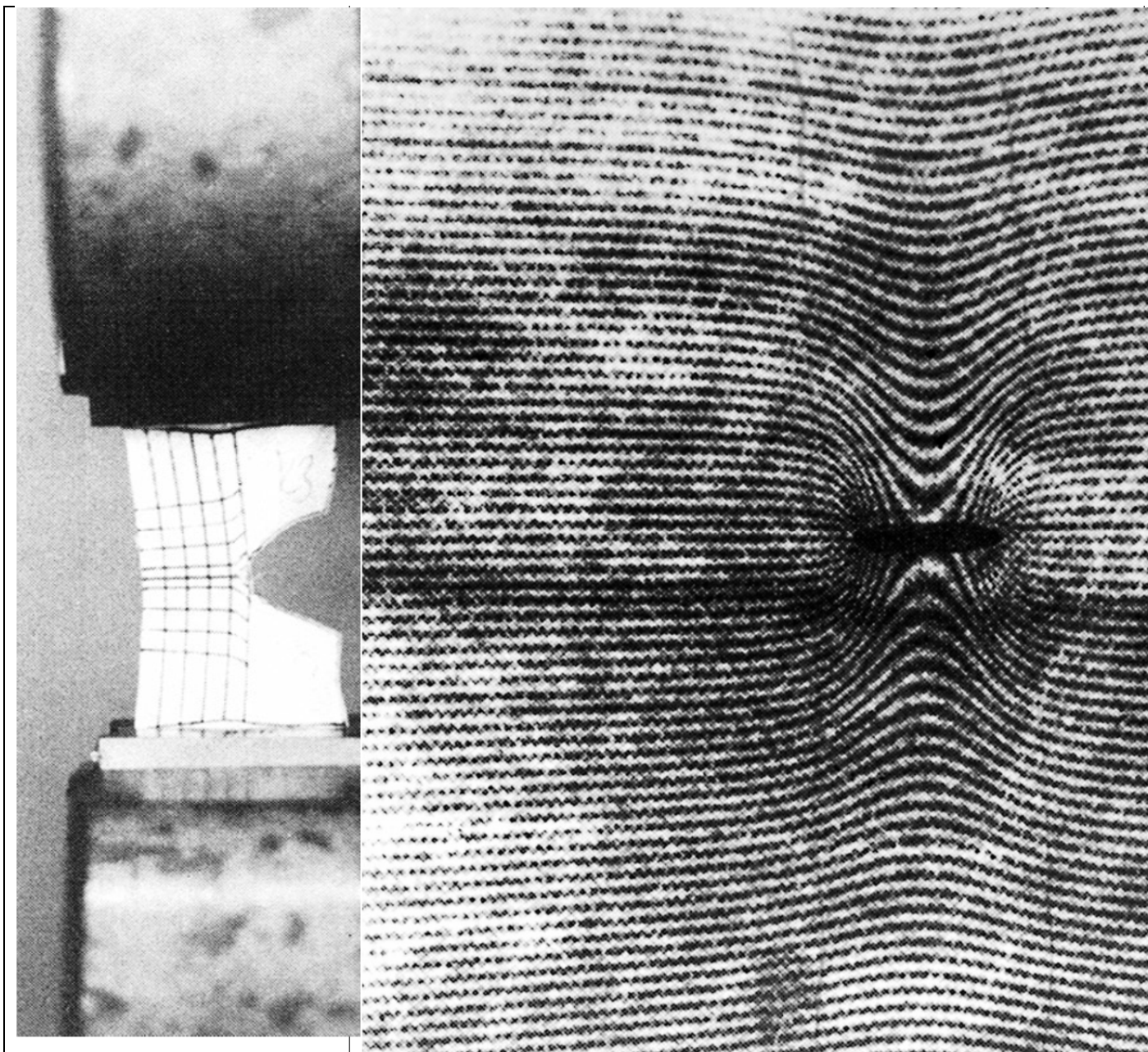


Fig. 3.67 τραπεζοειδής δοκιμή

Fig. 3.68 Συμπεριφοράς διάδοσης του σχισίματος σε διαξονικά εφελκυσμένη μεμβράνη

Μπορεί επίσης να φανεί στο Σχ. 3.68 ότι η δύναμη εκτρέπεται γύρω από το σχίσσιμο και επηρεάζει μόνο μία στενή λωρίδα. Αυτό παρέχει την ευκαιρία να σχεδιάσει ένα δείγμα μιας αντίστοιχης λωρίδας που να εμφανίζει τα χαρακτηριστικά της διάδοσης σχισίματος σε μονοαξονική δοκιμή. Η αντίστοιχη παραμόρφωση που φαίνεται στο Σχ. 3.69, δείχνει μια συμπεριφορά της μετάδοσης του σχισίματος η οποία μπορεί να συγκριθεί με μία αντίστοιχη αποκοπτόμενη λωρίδα δείγματος από την διαξονική συμπεριφορά στο Σχ. 3.68.

Μετά την εξέταση των εν λόγω δειγμάτων προκύπτει το ερώτημα για το τι πραγματικά θα πρέπει να μετράται σε μια δοκιμή διάδοσης του σχισίματος.

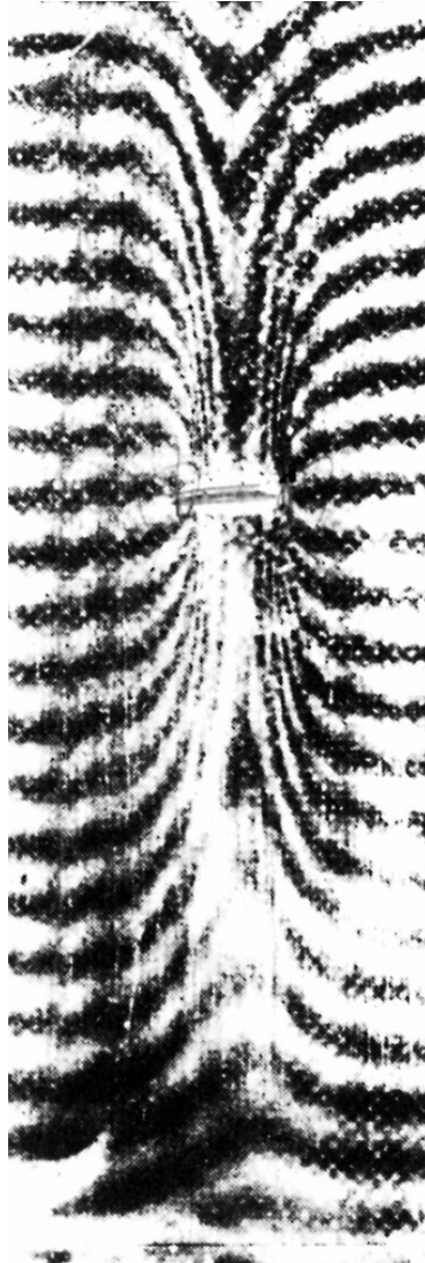


Fig. 3.69 μονοαξονικά φορτιζόμενο δείγμα με μία σχισμή

Ένα σχίσσιμο διαδίδεται σύμφωνα με τους νόμους της θερμοδυναμικής, εάν η ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μιας νέας επιφάνειας είναι μικρότερη από την ενέργεια παραμόρφωσης που απελευθερώνεται κατά την διάδοση του σχισίματος. Ως εκ τούτου, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι στην περίπτωση της επέκτασης ενός αρχικού σχισίματος η ενέργεια που αποθηκεύεται στο πεδίο παραμόρφωσης είναι μικρότερη, αλλά για τη δημιουργία μιας νέας επιφάνειας η ενέργεια καταναλώνεται. Το τελευταίο μπορεί να αναφέρεται ως ενέργεια της ελεύθερης επιφάνειας.

Εκ πρώτης όψεως, δεν είναι σαφές το πώς η ροπή ενός υλικού για σχίσσιμο μπορεί να συμπεριληφθεί σε μια προδιαγραφή της μηχανικής. Το ερώτημα μπορεί να απαντηθεί απλά με την παραδοχή ότι υπάρχει ήδη ένα γνωστό σε μήκος σχίσσιμο στη μεμβράνη. Το ερώτημα τώρα είναι αν αυτό το σχίσσιμο θα επεκταθεί περαιτέρω, εάν το πεδίο των τάσεων αυξάνεται ως αποτέλεσμα της αύξησης του εξωτερικά εφαρμοζόμενου φορτίου ή αν θα παραμένει σταθερό. Ωστόσο, το μήκος του αρχικού σχισίματος (που αναφέρεται επίσης ως μήκος "του κρίσιμου σχισίματος") θα πρέπει να προσδιορίζεται.

### 3.2.11.5 ΜΑΚΡΟΧΡΟΝΙΑ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ, ΠΑΡΑΜΕΝΟΥΣΕΣ ΑΝΤΟΧΕΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Μετά από τα παραπάνω, είναι σαφές ότι οι μακροπρόθεσμες ιδιότητες του υφάσματος καθορίζονται από την μακροπρόθεσμη συμπεριφορά των νημάτων και τη γεωμετρία τους μέσα στο ύφασμα. Η εξαίρεση σε αυτό είναι μια πρώτη φάση στην οποία η γεωμετρία της επαφής μεταξύ του στημονιού και του υφιδιού έχει προκαθορισθεί. Για τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη ότι ο ερπυσμός, η χαλάρωση και η θερμοκρασία παίζουν σημαντικό ρόλο. Στην περίπτωση των νημάτων από πολυεστέρα, είναι δυνατό να σωθεί χρόνος στην διάρκεια ζωής μέσω αυξημένης θερμοκρασίας εντός ορισμένων ορίων.

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι η αντοχή ελαττώνεται με την μακροπρόθεσμη φόρτωση. Η λεγόμενη <<παραμένουσα αντοχή>> είναι μικρότερη από το «βραχυπρόθεσμη αντοχή». Αυτό εξαρτάται από τη διάρκεια και το μέγεθος του φορτίου. Οι παραμένουσες αντοχές στο τέλος της προγραμματισμένης διάρκειας ζωής περιορίζουν την επιτρεπόμενη τάση λειτουργίας προεντεταμένων μεμβρανών. Η ανθεκτικότητα των επικαλυμμένων με PVC υφάσματα πολυεστέρα θα πρέπει να εκτιμάται λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο της ρύπανσης και της αρχικής προεντάσεως.

### 3.2.11.6 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΕΡΠΥΣΜΟΥ

Η συμπεριφορά ερπυσμού των νημάτων ή του υφάσματος πρέπει να καθοριστούν.

### 3.2.11.7 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΧΑΛΑΡΩΣΗΣ

Με καθορισμένες οριακές συνθήκες μπορεί να μην είναι οι τιμές ερπυσμού, αλλά οι τιμές χαλάρωσης που είναι αποφασιστικής σημασίας για τη μακροπρόθεσμη συμπεριφορά.

Στο Παράρτημα D αναφέρονται όλες οι δοκιμές που γίνονται σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα, ώστε να χαρακτηρισθεί πλήρως η συμπεριφορά μιας μεμβράνης που θα χρησιμοποιηθεί για εφελκυσμένη κατασκευή.

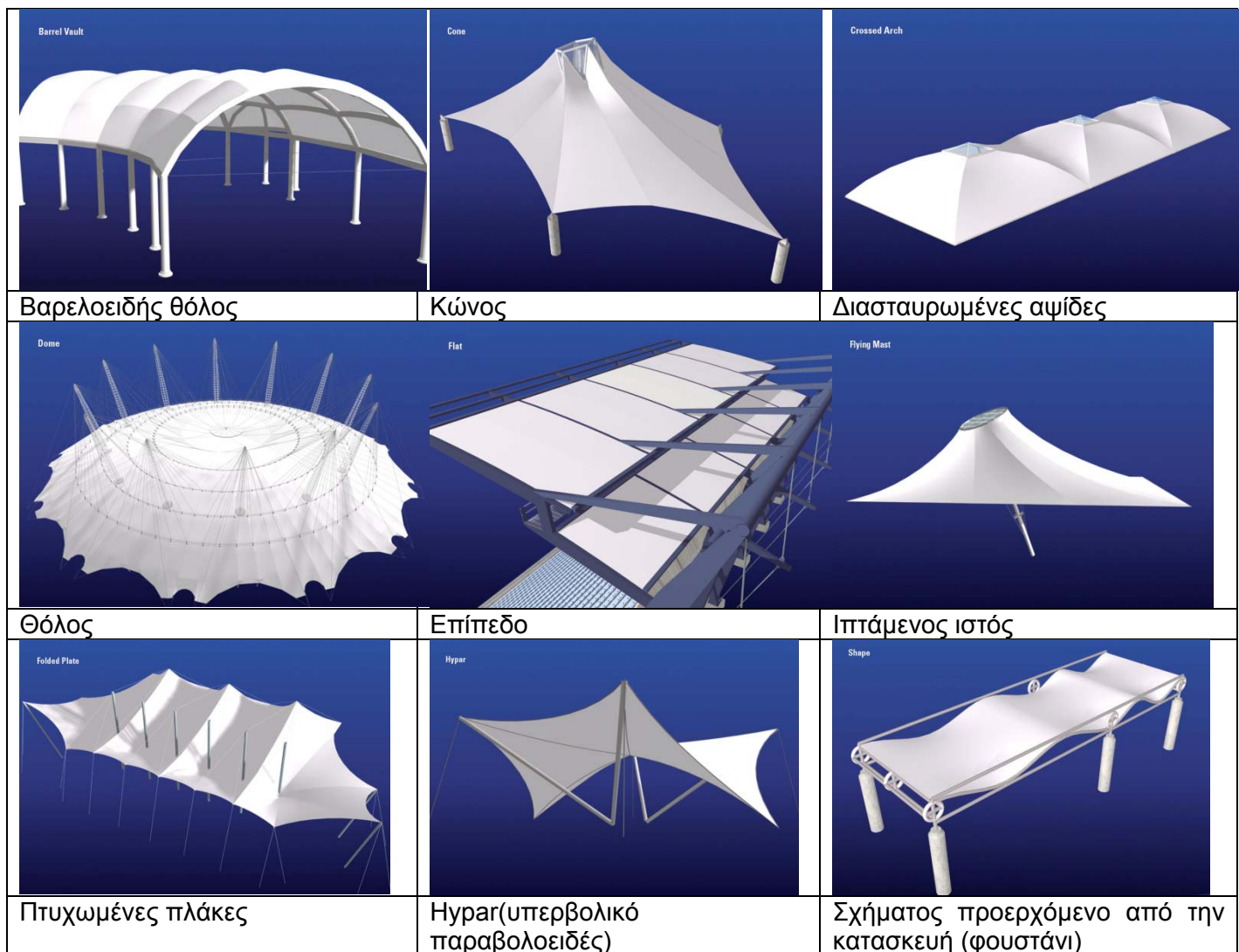
Στο Παράρτημα E παρατίθενται τα αποτελέσματα μιας δοκιμής διεφελκυσμού για συγκεκριμένο τύπο υφάσματος εφελκυσμένης κατασκευής.

## CHAPTER 4

### ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εφελκόμενες κατασκευές μπορούν να ταξινομηθούν σε πολλές κατηγορίες αναλόγως την μορφή τους, χρήση τους, την λειτουργία τους και τις αρχές της μηχανικής που έχουν χρησιμοποιηθεί για τον σχεδιασμό τους.

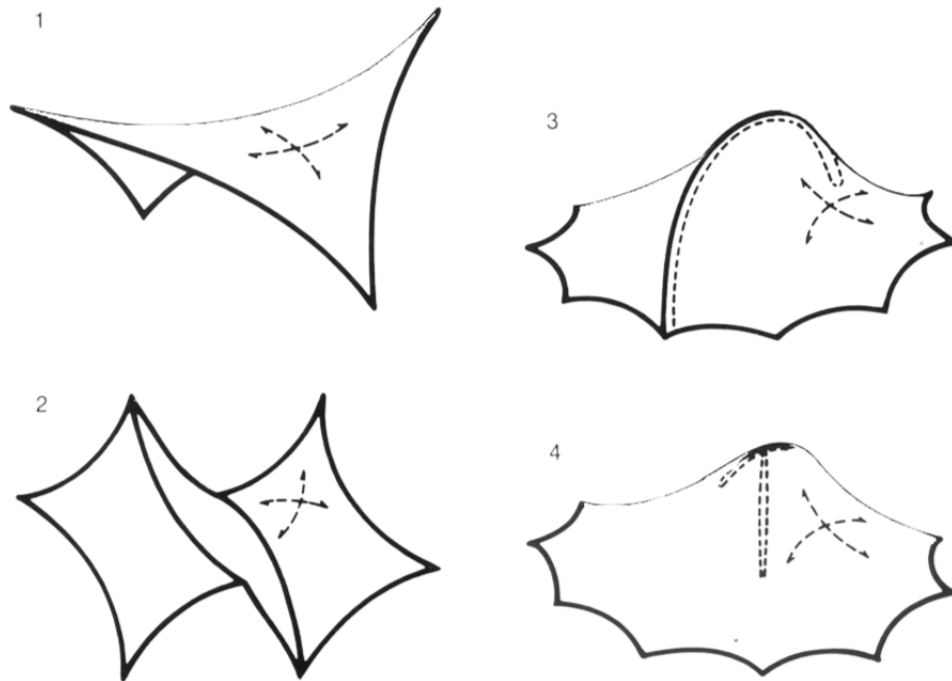


Σχ. 4.2 Συνήθεις εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης

Στις παρακάτω ενότητες θα διαχωρίσουμε τις κατασκευές ανάλογα με την μορφή της επιφάνειάς τους σε εφελκόμενες κατασκευές αντικλαστικής επιφάνειας, εφελκόμενες κατασκευές συγκλαστικής επιφάνειας οι οποίες διαχωρίζονται στις αεροϋποστηριζόμενες κατασκευές και στους <<μικρής επιφάνειας αεροθύλακες>> (inflated cushions) καθώς και στις κατασκευές tensairity (tension+air). Επίσης θα γίνει διαχωρισμός σαν κατηγορία οι μετακινούμενες αναδιπλούμενες αντικλαστικής επιφάνειας κατασκευές καθώς και οι κατασκευές με σύστημα ανάρτησης-υποβοήθησης tensegrity (tensional integrity).

#### 4.2 ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΝΤΙΚΛΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

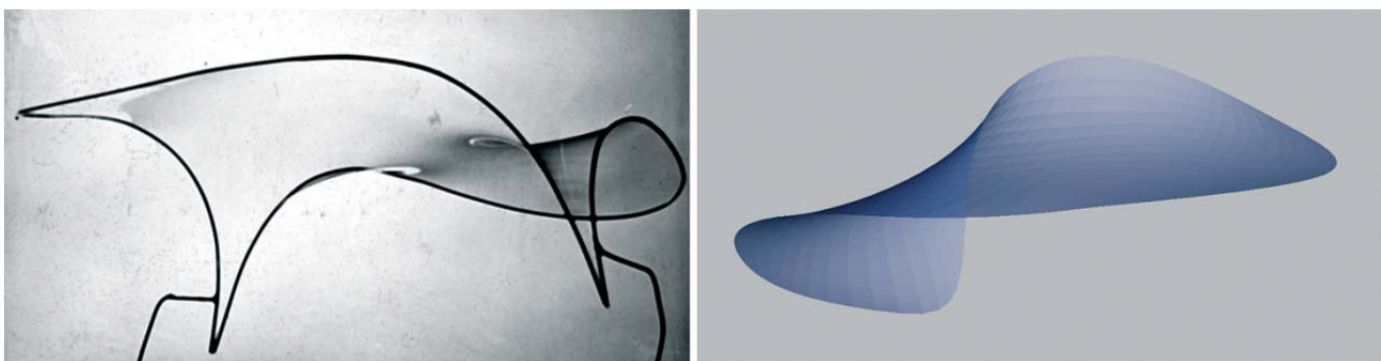
Είναι δυνατόν να σταθεροποιηθεί ένα στοιχείο στο χώρο χρησιμοποιώντας μόνο εφελκυστικές δυνάμεις, υπό την προϋπόθεση ότι συγκρατείται από ένα ελάχιστο αριθμό 4 εφελκυστικών φορέων δύναμης που δεν ενεργούν μονοεπίπεδα και είναι σε ισορροπία. Αυτή η δομική αρχή επιτρέπει τη σταθερή διαμόρφωση εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης. Σε μια αντικλαστική διπλά κυρτή επιφάνεια το άθροισμα όλων των θετικών και αρνητικών καμπυλοτήτων είναι μηδέν.



Σχ. 4.2 Σκίτσα αντικλαστικών επιφανειών, από πάνω αριστερά προς τα δεξιά ωρολογιακά: σέλα, υποστηριζόμενη αψίδα, υποστηριζόμενη καμπούρα και σχήματα κορυφογραμμής / κοιλάδας σκίτσα από Frei Otto

Διπλά καμπυλωτές κατασκευές μεμβράνης αντιστέκονται στα εξωτερικά φορτία με μετασχηματισμό της γεωμετρίας και όχι την αύξηση των τάσεων. Βασίζοντας την επιλογή της αρχιτεκτονικής μορφής σύμφωνα με αυτή την αρχή επιτρέπεται η κάλυψη μεγάλων εκτάσεων με ελάχιστη ποσότητα υλικού. Η ίδια η τετνωμένη επιφάνεια είναι το κύριο δομικό στοιχείο σε κατασκευή μεμβράνης. Η επιφάνεια διατηρείται σε ισορροπία με τις ενισχύσεις του γείσου (όπως υφασμάτινους ιμάντες ή καλώδια) που είναι διατεταγμένα στο χώρο με την υποστήριξη και αιώρηση δομικών στοιχείων. Για να καλύπτει μεγάλες επιφάνειες χωρίς να αυξάνεται το βάρος του κτιρίου χωρίς λόγο, μια στέγη μπορεί να δημιουργηθεί χρησιμοποιώντας μια ομάδα πάνελ μεμβράνης.

Παίζοντας με τη διάταξη των εσωτερικών και εξωτερικών δομικών στοιχείων που υποστηρίζουν τις μεμβράνες, οι σχεδιαστές μπορούν να βρουν πολλά αντικλαστικής διπλής επιφάνειας καμπύλα σχήματα. Όταν γίνεται συστηματικά ο σχεδιασμός και οι δύο απόψεις, αρχιτεκτονικές και της μηχανικής, μπορούν να εξεταστούν και να αναπτυχθούν ταυτόχρονα. Κατά τη διάρκεια της μελέτης και του σχεδιασμού, η διάταξη και το μέγεθος των στοιχείων στήριξης και η μορφή της μεμβράνης θα πρέπει να αναλύονται σύμφωνα με τα ανοίγματα(spans) που καλύπτονται και τα φορτία. Με αυτόν τον τρόπο το σχήμα του χώρου μπορεί να οριστεί σε μία βήμα-προς-βήμα διαδικασία, για να βρεθεί η καλύτερη αρχιτεκτονική λύση.

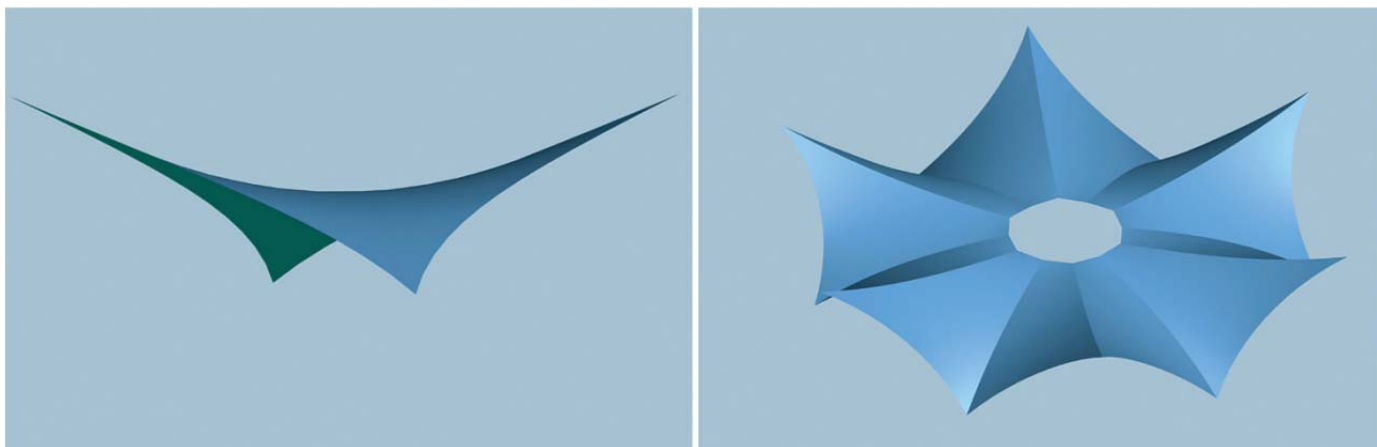


Σχ. 4.3 Αντικλαστική ελαχιστοτική επιφάνεια που σχηματίζεται με ελεύθερα όρια. (Αριστερά) μοντέλο με φιλμ από σαπούνι (δεξιά) το μοντέλο του υπολογιστή που δημιουργείται με το PAM Lisa από ARCHITEKTURBÜRO RASCH + BRADATSCHE

Παρά το γεγονός ότι ορισμένα κλασικά αντικλαστικά σχήματα χρησιμοποιούνται συχνά, εντούτοις υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία τυπικών δυνατοτήτων.

Δύο βασικές μέθοδοι σχεδιασμού χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το σχήμα μιας στέγης από εφελκυστική μεμβράνη. Η πρώτη βασίζεται στην ελεύθερη διάταξη των εσωτερικών και εξωτερικών κατασκευών στήριξης και ορισμός οριακών συνθηκών έτσι ώστε να σχηματιστεί συνεχής τάση ισορροπίας για ολόκληρο το δομικό στοιχείο. Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία μοναδικών αρχιτεκτονικών δημιουργημάτων. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί επαναλαμβανόμενα διπλά καμπύλα πάνελ που προστίθενται για να δημιουργήσουν μεγαλύτερες δομές.

Η πιο βασική αντικλαστική δομή είναι το σχήμα σέλας με τέσσερις σημειακούς ιστούς, που ορίζονται από εναλλασσόμενα υψηλά και χαμηλά σημεία και συνδέονται είτε με ευθεία είτε με καμπύλα άκρα. Ένα σύνολο δομοστοιχείων ιστίων σε μια ακτινική διάταξη δημιουργεί μια 'star structure' είτε με χαμηλό είτε με υψηλό κεντρικό σημείο. Όταν διατάσσονται σε μια γραμμική συστοιχία, έχουν ένα σχήμα που βασίζεται στην εναλλαγή των υψηλών και χαμηλών σημείων. Αυτά τα παραδείγματα απεικονίζουν δύο από τις πολλές πιθανές σπονδυλωτές διευθετήσεις που μπορούν να επιτευχθούν, παρέχοντας πολύπλοκα σχήματα ενός επαναλαμβανόμενου ή τμηματικού δομοστοιχείου ιστίου.



Σχ. 4.4 Αριθμητικά μοντέλα «ελάχιστης επιφάνειας». (Αριστερά) σελοειδές τεσσάρων σημείων ιστίο (Δεξιά) συμμετρική ακτινική συστοιχία μορφών σχήματος σέλας, που δημιουργούνται με PAM Lisa by Architekturbüro Rasch+Bradatsch, 2004

Ως εναλλακτική λύση στην επαναλαμβανόμενη παράθεση ιστίων, εφελκυσμένες μεμβράνες ελεύθερης μορφής είναι αρχιτεκτονικά συναρπαστικό, λόγω της δυναμικών και συνεχών θεμάτων τους. Πρόκειται είτε για απλά στοιχεία, όταν καθορίζονται από μερικά σημεία υποστήριξης, ή περισσότερο πολύπλοκα σχήματα. Μπορούν να αναπτυχθούν συμμετρικά ή εντός ενός ελεύθερα διατεταγμένου συστήματος συνόρων. Οι ελεύθερας μορφής κατασκευές παρουσιάζουν μια πιο σύνθετη δομική συμπεριφορά και απαιτούν περισσότερες λεπτομέρειες, δεδομένου ότι τα στοιχεία δεν επαναλαμβάνονται. Δεν είναι τόσο άκαμπτα από την επίσημη αρχιτεκτονική άποψη και έχουν σχέση με πιο πολύπλοκους



Fig. 4.4 Εφελκυσμένη κατασκευή για Mercedes Benz, Magdeburg, Germany, SL Rasch, 1994.

Το σχήμα της μεμβράνης σχετίζεται επίσης με τις διαστάσεις της δομής του κτιρίου. Η τεντωμένη μεμβράνη χρειάζεται επαρκή χώρο για την ανάπτυξη της διπλής καμπυλότητας. Η αναγκαία διαφορά ύψους μεταξύ χαμηλών και υψηλών σημείων στήριξης αφορούν το άνοιγμα (span) της δομής κτιρίου και το επίπεδο των δυνάμεων προέκτασης καθώς και τα φορτία αντίδρασης.

Μικρά ανοίγματα απαιτούν διαφορετικές μορφές από ότι τα μεγάλα ανοίγματα. Για παράδειγμα το απλό τεσσάρων σημείων ιστίο είναι μία από τις πιο αποδοτικές και ελαφριές λύσεις για ανοίγματα 15-20 μέτρων. Το σχήμα αυτό θα απαιτούσε πολύ ύψος, θα συσσωρεύονταν πολύ μεγάλα σημειακά φορτία στις στηρίξεις και θα χάνονταν η αρχιτεκτονική λειτουργία του ως κατασκευή κάλυψης για μεγάλα ανοίγματα. Για μεγάλα ανοίγματα οι εφελκυσόμενες μεμβράνες πρέπει να έχουν γραμμικά εσωτερικά σύνορα, όπως ράχες, κοιλάδες ή βρόχους που υποστηρίζονται από εσωτερικές δοκούς ή ιστούς ή να αναρτώνται από εξωτερικά στηρίγματα. Μπορεί επίσης να υποστηριχθούν οι μεγαλύτερες κατασκευές μεμβράνης από στρογγυλεμένα δομικά εξογκώματα, τα οποία είναι αρκετά μεγάλα σε διάμετρο σε σχέση με το περιβάλλον άνοιγμα ώστε να εγγυηθούν μια συνεχή μορφή και ροή των τάσεων της μεμβράνης.

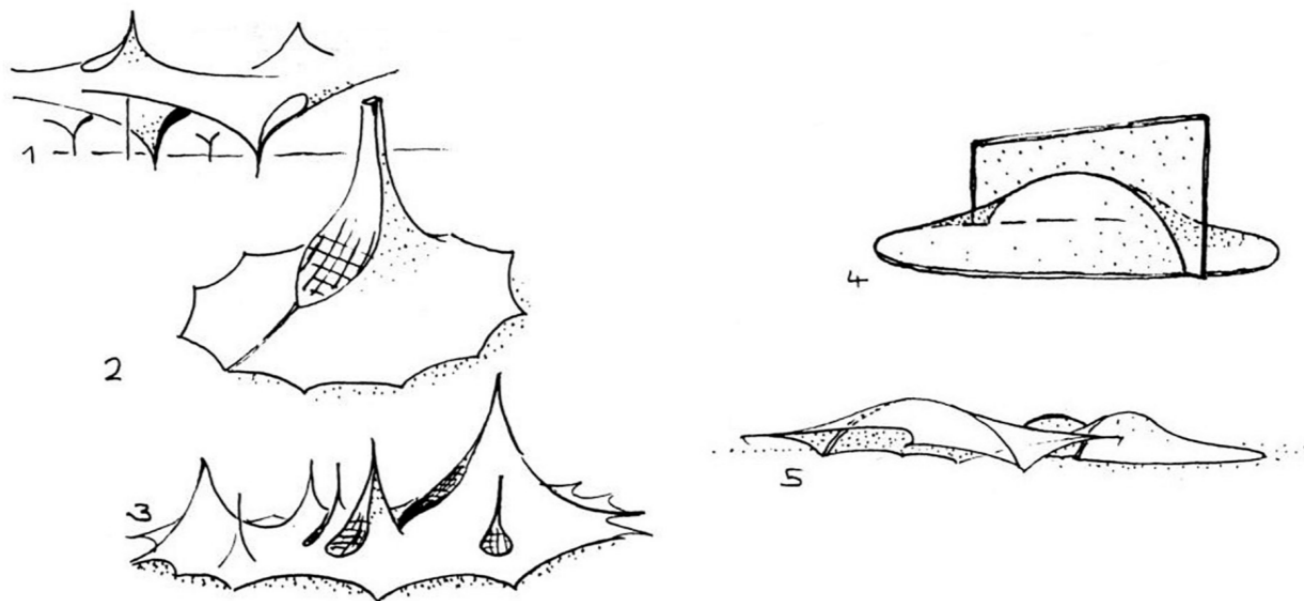


Fig.4.5 Γερμανικό περίπτερο στην Παγκόσμια Έκθεση στο Μόντρεαλ του Καναδά, το 1967, Frei Otto. Μια αντικλαστική εφελκυσόμενη κατασκευή ελεύθερης μορφής, με δίκτυο καλωδίων ως δομική στρώση και ένα επίπεδο μεμβράνης για την προστασία από την κακοκαιρία.

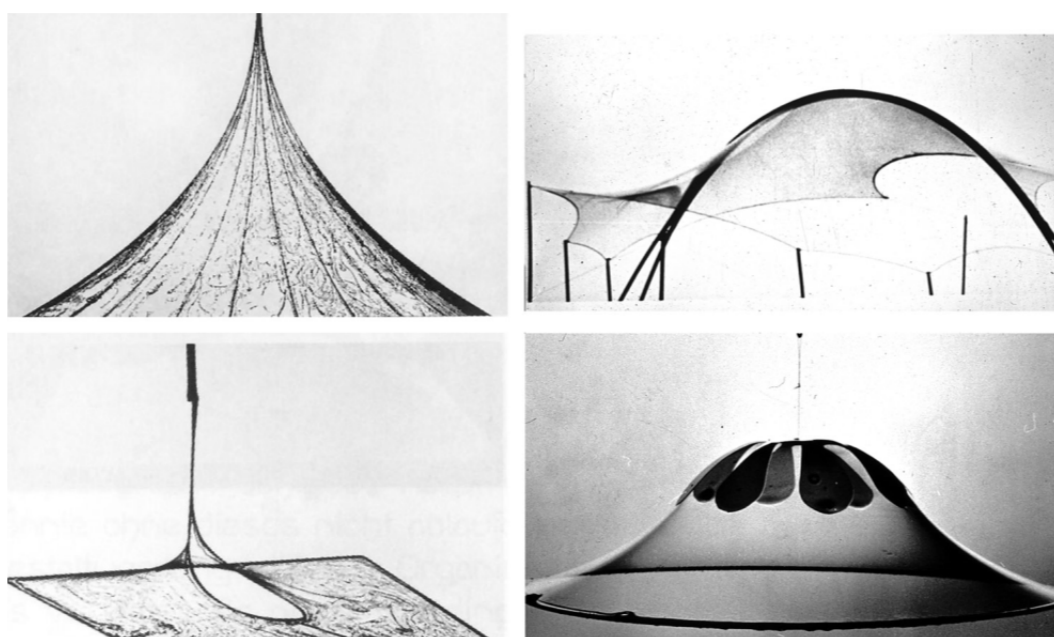
Η αρχιτεκτονική λύση πρέπει να είναι σε σχέση κλίμακας με το έργο από άποψη κατασκευαστικών, τεχνικών και οικονομικών πτυχών του. Σύμφωνα με την αρχή της ελαφρών κατασκευών ο αρχιτέκτονας και ο μηχανικός θα πρέπει να βρουν, ότι η πιο απλή λύση είναι συχνά και η πιο αποτελεσματική.

#### 4.2.1 Κατασκευές στήριξης μεμβράνης.

Μια επιφάνεια μεμβράνης πρέπει να στηριχθεί και να τεντωθεί κατά μήκος των ορίων της. Η μεμβράνη μπορεί να περιγραφεί ως μία "επιφάνεια συνεχής" και κάθε ένα από τα όρια της μπορεί να θεωρηθεί ως ένα "γραμμικά συνεχές". Το σύστημα στήριξης πρέπει να είναι αρκετά ισχυρό για να συλλέξει όλες τις δυνάμεις αντίδρασης της τεντωμένης μεμβράνης, από τα φορτία προέντασης καθώς και από τα εξωτερικά φορτία. Η κατασκευή στήριξης της μεμβράνης έχει να αντισταθμίσει τις εντάσεις της μεμβράνης με ασφάλεια για όλα τις καταστάσεις παραμορφώσεως της. Η δομή στήριξης της μεμβράνης μπορεί να είναι κυρτή ή ευθεία, εύκαμπτη ή άκαμπτη, ανάλογα με το σχεδιασμό. Όμως, το σχήμα και η διάταξη της στήριξης του ορίου της μεμβράνης θα επηρεάσει σημαντικά το είδος και το επίπεδο των δυνάμεων που δρουν στο εσωτερικό της.



Σχ.4.6 1-κατασκευή μεμβράνης με υψηλά και χαμηλά σημεία και ανοίγματα βρόχων, 2- κωνική κατασκευή με κεντρικό άνοιγμα, σκίτσο για το κτίριο IL, Πανεπιστήμιο της Στουτγάρδης, Γερμανία, 3 - ελεύθερη διαμορφωμένη μορφή της μεμβράνης με υψηλά σημεία με βρόχους, 4- μεμβράνη εξωτερικά, 5- μεμβράνη υποστηριζόμενη με κατασκευή αψίδας εσωτερικά.



Σχ. 4.7 Κολάζ των μοντέλων φιλμ σαπουνιού, συμπεριλαμβανομένων των διαφόρων στοιχείων που υποστηρίζουν. Από πάνω αριστερά ωρολογιακά: σημειακά συγκράτηση, αψίδα, καμπούρα και θηλιά. (Μελέτες που αναπτύχθηκαν από τον Frei Otto)



Όλα τα δομικά στοιχεία που αποτελούν το όριο στήριξης των εφελκόμενων μεμβρανών - ενισχύσεις άκρης, λεπτομέρειες γωνίας άκρης, καθώς και καμάρες, δοκάρια, ιστοί στηριγμάτων - θα πρέπει να επιλέγονται και να ακολουθούν τις αρχές της ελάχιστης διάρθρωσης, δηλαδή, μεγάλη απλότητα και υψηλή αποδοτικότητα.

Η μορφή ακολουθεί την λειτουργία, καθώς η ίδια η μεμβράνη βρίσκει το σχήμα της υπό ισορροπία τάσεων, έτσι ώστε κάθε σύνορο υποστήριξης θα πρέπει να έχει μια ελάχιστη διαμόρφωση σύμφωνα με τη ροή των δυνάμεων και πρέπει να εκφράζει σαφώς τη δομική λειτουργία του.

Για να δημιουργηθεί μία διπλή καμπυλότητα στη μεμβράνη τα σύνορα της πρέπει να είναι τοποθετημένα τρισδιάστατα στο χώρο. Σε σχέση με το επίπεδο του εδάφους, τα όρια θα πρέπει γενικά να διατάσσονται έτσι ώστε να περνούν μέσα από υψηλά και χαμηλά σημεία.



Σχ.4.8 Τέντα Θεατών, Thowal, Saudi Arabia, 1991, SL Rasch.



Σχ.4.9 Majlis Tent, Thowal, Saudi Arabia, 1991, SL Rasch.

Μεγάλες εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης που αποτελούνται από έναν αριθμό από διπλής καμπυλότητας πάνελ μεμβράνης που ενώνονται κατά μήκος με εύκαμπτες ή άκαμπτες γραμμικές ενισχύσεις πρέπει να υποστηρίζονται ή να αναρτώνται στις διασταυρώσεις αυτών με εσωτερικές ενισχύσεις. Αυτό μπορεί να γίνει με τη χρήση εσωτερικών ιστών ως στηριγμάτων ή ανάρτηση των πάνελ από εξωτερικούς ιστούς ή άλλες μορφές της υπερκατασκευής. Η διάταξη των υψηλών και χαμηλών

σημείων εντός της τρισδιάστατης γεωμετρίας της δομής της μεμβράνης έχει μεγάλη επιρροή στο σχήμα της, καθώς και στη συγκέντρωση των δυνάμεων που πρέπει να μεταφερθούν στα σημεία αγκύρωσης.

Δυνάμεις αναρρόφησης του ανέμου μεταφέρονται στα χαμηλά σημεία, ενώ τα καθοδικά φορτία, όπως το χιόνι ενεργούν στα υψηλά σημεία. Η κατανομή των υψηλών και χαμηλών σημείων καθορίζει επίσης τη ροή του νερού πάνω στην διπλής καμπυλότητας επιφάνεια της μεμβράνης. Η συλλογή και αποστράγγιση αυτού του νερού προς τα χαμηλά σημεία είναι μέρος του πεδίου σχεδιασμού. Σε ορισμένα κλίματα η συσσώρευση μεγάλων ποσοτήτων χιονιού πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό των περιοχών με χαμηλή σημείο.

Ο σχεδιασμός της κατασκευής στήριξης μιας μεμβράνης θα πρέπει πάντα να εκφράζει με σαφήνεια την ελαφρότητα της μεμβράνης και το σύστημα αντιστήριξη της, για παράδειγμα, στύλους αντιστήριξης (struts), συρματοσχοίνα μεταφοράς των αντιδράσεων (tie-backs) και τις σχετικές συσκευές τάνυσης. Υπάρχουν δύο διαφορετικούς τρόποι διαμόρφωσης της δομής στήριξης για εφελκόμενες μεμβράνες:

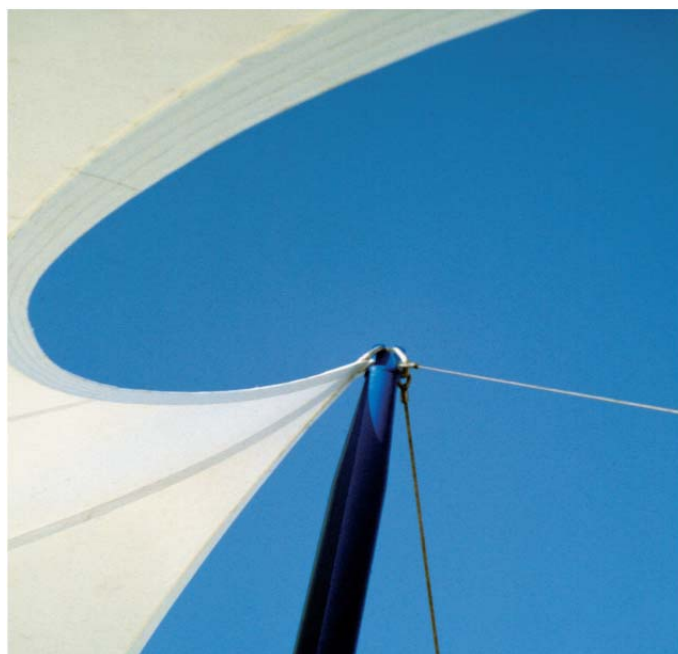
α. καμπυλόγραμμες ενισχύσεις που εκτείνονται μεταξύ των σημείων στήριξης, και των οποίων η ευελιξία τις επιτρέπει να προσαρμόζονται τέλεια στο σχήμα των προεντεταμένων μεμβρανών.

β. άκαμπτες δομές που σχηματίζουν ένα συνεχές σύνολο, με κυρτή ή πολυγωνική διάταξη από ευθεία ή καμπύλα δύσκαμπτα στοιχεία.

#### 4.2.1.1 ΕΥΚΑΜΠΤΗ ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΟΡΙΩΝ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

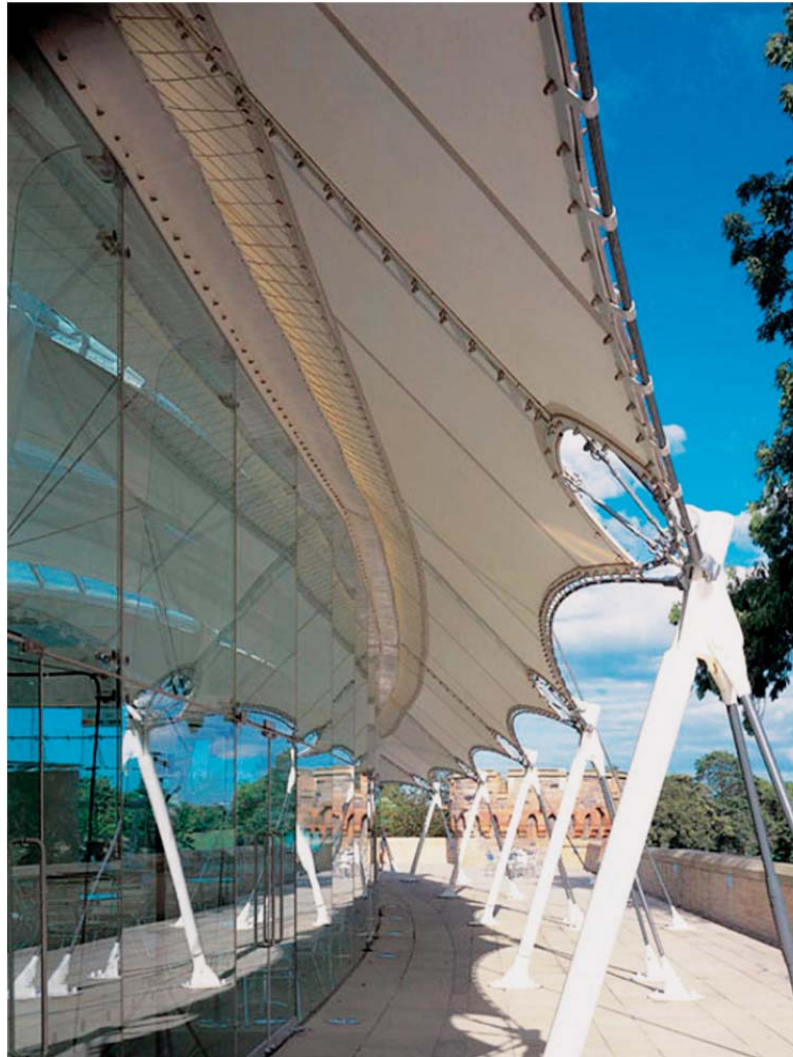
Οι εύκαμπτες γραμμικές ενισχύσεις συνόρων, όπως η υφασμάτινοι ιμάντες ή καλώδια από χάλυβα, μπορούν να μεταφέρουν μόνο εφελκυστικές αξονικές δυνάμεις. Πρέπει να διατάσσονται εντός της επιφάνειας της μεμβράνης και να ακολουθήσουν μία καμπύλη ακτίνας  $r$  (m). Η προκύπτουσα δύναμη  $F$  (kN) του καλωδίου μπορεί να ληφθεί από την προσεγγιστική σχέση  $F = qxr$ , όπου  $q$  είναι η προένταση της μεμβράνης (kN / m). Χρησιμοποιώντας αυτό, ο σχεδιαστής είναι σε θέση να ελέγχει χονδρικά τα επίπεδα δύναμης στο όριο της μεμβράνης από ένα πρώιμο στάδιο του σχεδιασμού.

Η ιδανική και πιο φυσική λύση για το όριο της μεμβράνης είναι μια συνεχής ενίσχυση κατασκευασμένη από το ίδιο υλικό με το ύφασμα, δημιουργώντας ένα καθαρό υφασμάτινη δομή όπου η τεντωμένη επιφάνεια και η ενίσχυση της άκρης συμπεριφέρονται με συμβατό ελαστικά τρόπο. Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα όταν μια δομή σε εφελκυσμό υφίσταται μεγάλες παραμορφώσεις κάτω από εξωτερικά φορτία. Ράψιμο υψηλής αντοχής υφασμάτινου ιμάντες πάνω στις άκρες του υφάσματος μπορεί να παράγει μια τεχνικά ομοιογενή κατασκευή μεμβράνης.



Σχ.4.10 ΕΥΚΑΜΠΤΟ ΟΡΙΟ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ ΑΠΟ ΙΜΑΝΤΑ:  
Spectators' Tent, Thowal, Saudi Arabia, 1991, SL Rasch.

Για ευρύ άνοιγμα, καλώδια από χάλυβα υψηλής αντοχής χρησιμοποιούνται για τη συγκέντρωση μεγάλων φορτίων στην άκρη της μεμβράνης. Καλώδια μικρής διαμέτρου μπορούν να τοποθετηθούν μέσα σε συνεχείς θήκες στις άκρες του υφάσματος. Καλώδια μεγάλης διαμέτρου, από την άλλη πλευρά μπορούν να τοποθετηθούν με αντιστάθμιση από την άκρη της μεμβράνης και να συνδέονται με αυτή κατά τακτά διαστήματα με μια ενισχυμένη ραφή.



Σχ.4.11 Ατσάλινο καλώδιο σε καμπυλωτό όριο  
Dynamic Earth Centre, Edinburgh 2000, Hopkins Architects

Γωνιακά σημεία, όπου χρειάζονται τουλάχιστον δυο άκρες της μεμβράνης συναντώνται πρέπει να τοποθετηθούν γύρω από την περίμετρο μίας μεμβράνης σε διαφορετικά ύψη σε σχέση με το έδαφος, έτσι ώστε να παράγουν διπλή καμπυλότητα για την τεντωμένη μεμβράνη.

Σε πολλές περιπτώσεις, τα χαμηλά σημεία μπορούν να τεντωθούν άμεσα στα θεμέλια, ενώ τα υψηλά σημεία μπορεί να τοποθετηθούν στο χώρο συγκρατούμενα από αγκυρομένους ιστούς ή άκαμπτα συστήματα δόμησης.

#### 4.2.1.2 ΕΥΚΑΜΠΤΕΣ ΚΟΡΥΦΟΓΡΑΜΜΕΣ, ΚΟΙΛΑΔΕΣ ΚΑΙ ΒΡΟΧΟΙ

Μεγάλες στέγες από μεμβράνη που έχουν μία επίπεδη περιμετρική ακμή μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας ένα σύστημα εναλλασσόμενων καλωδίων με τοπογραφία κορυφογραμμής και η κοιλάδας (ή ζώνες) που υποστηρίζεται στο εσωτερικό της. Αυτά οι εύκαμπτες γραμμικές ενισχύσεις μπορούν επίσης να θεωρηθούν ως ακμές μεταξύ παρακείμενων ζευγών πλαισίων μεμβράνης και παρόμοια όπως τα περιφερειακά όρια, αυτές οι εσωτερικές ενισχύσεις μπορεί να διαμορφωθούν με μια συνεχώς μεταβαλλόμενη καμπυλότητα. Για τις κατασκευές μεμβράνης που

δημιουργούνται ως μορφές από την ισορροπία των τάσεων, οι ακτίνες καμπυλότητας αλλάζουν συνεχώς ανάλογα με τη μεταβολή των γωνιών μεταξύ των παρακείμενων πάνελ μεμβράνης.



Σχ.4.12 Majlis Tent, Thowal, Saudi Arabia, 1991, SL Rasch.

Λεπτομέρεια που δείχνει καλώδια σε κορυφογραμμές και κοιλάδες στην επιφάνεια της μεμβράνης.

Τα τεντωμένα γραμμικά στηρίγματα της μεμβράνης συνδέεται μεταξύ σημείων που είναι συνήθως διατεταγμένα σε διαφορετικά επίπεδα σε σχέση με το έδαφος. Τα καλώδια των κορυφογραμμών συνδέονται με την εσωτερικά υψηλά σημεία, ενώ τα καλώδια των κοιλάδων συνδέονται με τα εσωτερικά χαμηλά σημεία της εφελκυσμένης μεμβράνης.

Ο βρόχος είναι μια ειδική περίπτωση και είναι μία εύκαμπτη εσωτερικά χαμηλή ή υψηλή στήριξη. Είναι καμπυλόγραμμη ενίσχυση άκρης σε σχήμα "δάκρυ" με ελεύθερες απολήξεις που συνδέονται με το ίδιο σημείο στήριξης. Αρκετοί βρόχοι μπορούν να συνδυαστούν σε "ροζέτες" για να δημιουργήσουν εσωτερικά στηρίγματα.

#### 4.2.1.3 ΔΥΣΚΑΜΠΤΑ ΟΡΙΑ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Αυτό το είδος των ορίων παρέχει μια μεγάλη ελευθερία στη διαρρύθμιση αφού η μορφή και η διάσταση τους μπορεί συνεχώς να προσαρμόζεται για να παρέχει επαρκή αντοχή και ακαμψία για να απορροφήσει τις δυνάμεις που προέρχονται από τη μεμβράνη.

Τα άκαμπτα άκρα μπορούν να είναι στρογγυλεμένα ή γωνιώδη και διαμορφώνονται με συνεχή κυρτά πλαίσια κατά μήκος της περιμέτρου μιας ενιαίας μεμβράνης με τέτοιο τρόπο, ώστε να παράγει επαρκή καμπυλότητα για τη μεμβράνη που εκτείνεται μεταξύ τους.

Σε συνδυασμό με εσωτερικές στηρίξεις της μεμβράνης (βλέπε 4.2.1.2), τα δύσκαμπτα άκρα μπορούν επίσης να σχηματίσουν σε ένα επίπεδο ένα ελεύθερα σχήμα, που μπορεί να είναι τετράγωνα ή καμπυλωτά πλαίσια. Η πιο αποτελεσματική λύση για το άκαμπτο όριο της μεμβράνης είναι ο κυκλικός δακτύλιος που συλλέγει μια ομοιόμορφη ένταση εφελκυσμού από την περίμετρο της μεμβράνης δημιουργώντας μέσα στον ίδιο αξονική θλίψη. Άλλες αποτελεσματικές λύσεις μπορούν να σχεδιασθούν χρησιμοποιώντας κεκλιμένα τμήματα αψίδων που αντιδρούν αντιπθέμενα με τον εφελκυσμό της μεμβράνης και ως εκ τούτου δημιουργούν άμεσες θλιπτικές δυνάμεις στα σημεία θεμελίωσης στο έδαφος.

Δομές με αυτοτελείς ενότητες μεμβράνη μπορεί να στερεώνονται επάνω σε χωρικά πλαίσια για να καλύπτονται μεγάλες περιοχές.



Σχ.4.13 24m Roundtent, Frei Otto with Architekturbüro Rasch + Bradatsch, Leonberg, Germany, 2000. Δομή με στρογγυλό δύσκαμπτο όριο μεμβράνης που καθορίζεται από την πρόσοψη, η οποία είναι επίσης ένα δομικό σταθεροποιητικό στοιχείο.

Η τεχνική λεπτομέρεια για την σύνδεση και της μεμβράνης σε άκαμπτα πλαίσια και της προέκτασης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις διαφορές στην ακαμψία μεταξύ των υλικών.

#### 4.2.1.4 ΑΚΑΜΠΤΕΣ ΓΡΑΜΜΙΚΕΣ ΣΤΗΡΙΞΕΙΣ-ΑΨΙΔΕΣ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΑ

Γωνιακά πλαίσια, ιδιαίτερα αψίδες, είναι κατάλληλα ως γραμμικά εσωτερικά στηρίγματα μεμβράνης. Είναι επίσης χρήσιμα για τη δημιουργία συνδέσεων και στεγανοποίηση μεταξύ γειτονικών πάνελ μεμβράνης. Όπως και με τα περιφερικά άκαμπτα όρια, υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία από πιθανά σχήματα για τα εσωτερικά γραμμικά στηρίγματα.



Σχ.4.14 Το τόξο χρησιμοποιείται ως δύσκαμπτη γραμμική στήριξη στη θολωτό είσοδο για την Ομοσπονδιακή Έκθεση Κήπος 1957, Frei Otto, Cologne, Germany.

Η συμπιεσμένη αψίδα είναι ένας ελαχιστοτικός δομικός σχηματισμός για γραμμικά άκαμπτα στηρίγματα μεμβράνης. Τεχνικά και αισθητικά παρέχει μια αποτελεσματική λύση για να εξισορροπήσουν οι εφελκυστικές τάσεις της μεμβράνης. Σε σχέση με το συνολικό σχήμα της μεμβράνης τα τόξα μπορούν να διαταχθούν ώστε να κείτονται σε επίπεδα όπου η καθαρή πλευρική δύναμη κάθετη προς τα επίπεδα τους να ελαχιστοποιείται ή να εξαλείφεται. Μπορεί να είναι δυνατό για τα τόξα να σταθεροποιηθούν πλευρικά από τη μεμβράνη και το μέγεθός τους να μειωθεί αναλόγως. Οι σχεδιαστές πρέπει φυσικά να εξετάζουν την αναγκαιότητα για ασφάλεια έναντι αστοχίας διατάξεων, σε περίπτωση που ένα πάνελ να αφαιρεθεί κατά λάθος από τη μία πλευρά.

#### 4.2.1.5 ΚΑΜΠΟΥΡΩΤΕΣ ΣΤΗΡΙΞΕΙΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

Μεγάλες επιφάνειες μεμβράνης μπορούν επίσης να υποστηρίζονται από σφαιρικά στηρίγματα. Η διάμετρος της περιοχής που υποστηρίζεται από την καμπούρα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με την περιοχή της μεμβράνης που βρίσκεται μεταξύ των. Η σχέση αυτή, καθώς και η διάταξη των στηριγμάτων καμπούρας, χρειάζεται να προσδίδουν ένα αρμονικά καμπύλο σχήμα στη μεμβράνη χωρίς απότομες μεταβολές που να προκαλούν έλλειψη ισορροπίας της προέντασης στη μεμβράνη.



Σχ.4.15 Καμπουρωτά στοιχεία υποστήριξης για τα υψηλά σημεία σε μια τέντα  
At Dyce near Aberdeen, Frei Otto, 1975.

#### 4.2.1.6 ΙΣΤΟΙ

Οι ιστοί είναι θλιπτικά στοιχεία που υποστηρίζουν τα γωνιακά και ακραία σημεία γύρω από την περίμετρο της κατασκευής εφελκυσόμενης μεμβράνης, και την υποστήριξη των εσωτερικών ενισχύσεων της μεμβράνης στα υψηλά σημεία τους. Αυτά τα σημεία μπορούν επίσης να αναρτώνται και από εξωτερικά τοποθετημένες κατασκευές ιστών, έτσι ώστε να παραμένει το σύνολο της περιοχής που καλύπτεται από την μεμβράνη ελεύθερο. Διακρίνουμε 3 τύπους:

A. Συνοριακοί ιστοί - αυτοί υποστηρίζουν τα γωνιακά και ακραία σημεία. Η βέλτιστη τοποθέτησή τους είναι η διχοτόμος μεταξύ της κατεύθυνσης της συνισταμένης των δυνάμεων του καλωδίου του ορίου και των δυνάμεων των καλωδίων της αγκύρωσης. Η κλίση του ιστού καθορίζει τη θέση του θεμελίου του. Η θλιπτική καταπόνηση του ιστού επηρεάζεται από τη θέση των σημείων της θεμελίωσης των καλωδίων αγκύρωσης. Η ιδανική μορφή του ιστού είναι ένα κωνικό σωληνωτό σχήμα. Ο σχεδιασμός του πέλδου ιστού έχει να επιτρέπει διανομή των δυνάμεων συμπίεσης στο έδαφος. Ο σχεδιασμός του πέλδου θεμελίωσης του ιστού πρέπει επιτρέπει την διανομή των δυνάμεων συμπίεσης στο έδαφος.



Fig.4.16 Λεπτομέρεια με δύο συντοριακούς ιστούς για το Spectators' Tent, Thowal, Saudi Arabia, 1991, SL Rasch.

Για τις περιπτώσεις όπου ο σχεδιασμός δεν επιτρέπει έναν αρθρωτού τύπου ιστό με tie-back απαιτείται πάλι η ίδια μορφή του συστήματος προβόλου. Αυτός μπορεί να λάβει τη μορφή του κωνικού ιστού και μπορεί να κατασκευαστεί από χάλυβα ή σκυρόδεμα.

Το αρχιτεκτονικό παίξιμο ανάμεσα στην μορφή του ορίου της μεμβράνης με αντισταθμιστές συντοριακούς ιστούς με κλίση και τα καλώδια αγκύρωσης, ή εναλλακτικά με το σχήμα του προβόλου, είναι ένα σημαντικό τυπικό χαρακτηριστικό που δίνει μια μοναδική εμφάνιση και πρέπει να αναπτυχθεί προσεκτικά κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού.

B. Εσωτερικός ιστός- είναι γενικά αρθρωτοί στο κάτω μέρος τους στην πλάκα της βάσης του ιστού και στην κορυφή τους στις ενισχύσεις που συγκεντρώνουν τις δυνάμεις της μεμβράνης. Οι εσωτερικοί ιστοί γενικά διατηρούνται σε ισορροπία από την ίδια την μεμβράνη και η βέλτιστη θέση τους προσδιορίζεται από το μέγεθος και την κατεύθυνση των δυνάμεων που ενεργούν. Οι ιστοί είναι καλύτερα διατεταγμένοι όταν βρίσκονται στην κατεύθυνση της συνισταμένης των δυνάμεων προέκτασης που προέρχονται από τη μεμβράνη. Η θέση του ιστού είναι κάθετη σε στέγες μεμβράνης μόνο με συμμετρικά διατεταγμένες στηρίξεις. Το βέλτιστο σχήμα για τέτοιους ιστούς είναι οι αρθρωτά κωνικής μορφής κυκλικοί δοκοί συμπίεσης. Σε πολλές περιπτώσεις είναι κομψό να χρησιμοποιείται για τον ιστό κατασκευή ελαφρού δικτυωτού πλέγματος ατρακτοειδούς μορφής στο οποίο μπορεί εύκολα να συνδεθούν φωτιστικά, ηχεία και άλλες τεχνικές υπηρεσίες.

Το πόδι και το κεφάλι ενός εσωτερικού ιστού πρέπει να είναι ειδικά σχεδιασμένα έτσι ώστε να επιτρέπουν την κίνηση, όταν η κατασκευή της στέγης από μεμβράνη παραμορφώνεται υπό την επίδραση των εξωτερικών φορτίων.

Ο σχεδιασμός του ιστού πρέπει επίσης να προβλέπει τις αναγκαίες κινήσεις που να επιτρέπει τον ιστό να είναι λειτουργικός κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συναρμολόγησης.



Σχ.4.17 Εσωτερικός ιστός: Majlis Σκηνή, Thowal, SL Ρας, 1991.  
Είναι ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε την κλίση του ιστού και το βέλτιστο σχήμα του.

Γ- <<Ιπτάμενος ιστός>> είναι μία σύνθετη κατασκευή που αποτελείται από ένα σύστημα καλωδίων από χάλυβα και ενός ιστού και είναι ένα μέσο για τη μείωση του αριθμού των κατασκευαστικών στηριγμάτων στο επίπεδο του δαπέδου.



Fig.4.18 Ένα παράδειγμα για flying masts μπορεί να βρεθεί στη μεμβράνη που καλύπτει τη διέλευση της Schlumberger στο Παρίσι, αρχιτέκτονα Renzo Piano BuildingWorkshop. Φωτογραφία από τον Rudi Scheuermann, Arup



Δ- Εξωτερικοί ιστοί - όταν ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός δεν επιτρέπει δομικά στοιχεία εντός της περιοχής που καλύπτεται, ψηλοί ιστοί μπορούν να βρίσκονται έξω από τον περίβολο της έγκλειστης περιοχής και να παρέχουν στήριξη στη μεμβράνη μέσω καλωδίων με κεκλιμένη ανάρτηση. Η διαρρύθμιση και η κλίση αυτών των ιστών δεν πρέπει να συνδέεται με τα σύνορα της περιμέτρου της μεμβράνης. Οι εξωτερικοί ιστοί παρουσιάζουν ενδιαφέρον όταν η αρχιτεκτονική πρόθεση είναι να παρουσιάσει την συνεχή εσωτερική επιφάνεια της μεμβράνης ως πλωτό κάλυμμα. Μπορούν να ομαδοποιούνται με τη μορφή Α-πλαισίων ή τρίποδων έτσι ώστε να σχηματίζουν τις εξωτερικές δομές στήριξης και να είναι σταθεροποιημένα είτε με την οροφή μεμβράνης ή αυτουποστηριζόμενο, χωρίς την ανάγκη για επιπλέον καλώδια αγκύρωσης.



Σχ.4.19 Ανοιγόμενη κατασκευή πάνω από το υπαίθριο θέατρο του καζίνο στις Κάννες, Frei Otto με BF Romberg, A Edzard, R. Taillibert, 1965. Δομή υποστηριζόμενη από εξωτερικούς ιστό, διατηρώντας την εσωτερική περιοχή ελεύθερη από εμπόδια.

#### 4.2.1.7 ΚΑΛΩΔΙΑ

Εύκαμπτα καλώδια και συρματοσχοίνα χρησιμοποιούνται ως εύκαμπτα γραμμικά σύνορα μεμβράνης, γραμμικές εσωτερικές ενισχύσεις μεμβράνης, καλώδια αγκύρωσης και για την εναέρια υποστήριξη για μεμονωμένα σημεία. Τα εξαρτήματα των καλωδίων και οι λεπτομέρειες των συνδέσεων τους στα σημεία ανάρτησης της μεμβράνης, των κεφαλών των ιστών ή των κόμβων, θα πρέπει να επιτρέπουν την ρύθμιση για τις ανοχές καθώς επίσης και τις κινήσεις της κατασκευής κάτω από εξωτερική φόρτιση, καθώς και κατά τη διάρκεια της ανέγερσης.

Σε ειδικές περιπτώσεις η συνολική κατασκευή της μεμβράνης μπορεί να υποστηρίζεται, στον χώρο ενός κτιρίου που την περιβάλλει, αποκλειστικά από τα καλώδια. Ένα από τα καλύτερα παραδείγματα είναι αυτό του «Le Grande Arche de La Défense» στο Παρίσι. Η εξωτερική κατασκευή είναι ένα εξαιρετικά δύσκαμπτο κτίριο εντός του οποίου έχει αναρτηθεί ένας θόλος μεμβράνης 2,500m<sup>2</sup> με τη χρήση καλωδίων από χάλυβα. Από απόσταση αυτό οδηγεί στο οπτικό αποτέλεσμα να φαίνεται ότι μεμβράνη αιωρείται χωρίς καμία μορφή υποστήριξης.



Σχ.4.20 <<Le Nuage>> στο La Défense κοντά στο Παρίσι (Αρχιτέκτονας Paul Andreu) είναι ένα παράδειγμα όπου μία κατασκευή από δίκτυο καλωδίων έχει εξωτερικά αναρτηθεί από την «GrandArche» με καλώδια χάλυβα.

Φωτογραφία από τον Rudi Scheuermann, Agur.

#### 4.2.1.8 ΘΕΜΕΛΙΩΣΕΙΣ

Μια ποικιλία συστημάτων θεμελίωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει τις δυνάμεις εφελκυσμού στις κατασκευές μεμβράνης. Για μικρά φορτία αγκύρωσης και κινητές τέντες, επαναχρησιμοποιήσιμες γεώβιδες ή βαριά δοχεία με βάρος άμμου ή νερού μπορεί να χρησιμοποιηθούν. Για μεγαλύτερα φορτία μόνιμα συστήματα έγχυσης αγκύρωσης που ενεργοποιούν μεγάλες μάζες του εδάφους είναι το πιο κατάλληλο σύστημα θεμελίωσης. Αυτός ο τύπος έχει γενικά μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σύγκριση με εκείνη των βαρέων θεμελίων από μπετόν. Σε πολλές περιπτώσεις, οι κατασκευές μεμβράνης μπορεί να συνδέονται με άκαμπτα στοιχεία του κτιρίου. Τα σημεία προσάρτησης για σημειακό φορτία ανάρτησης θα πρέπει να τοποθετηθούν εντός του άξονα των τοίχων και των πλακών σκυροδέματος.

Οι θεμελιώσεις τωνπέδων των ιστών και των καλωδίων αγκυρώσεις είναι σημεία υψηλής μεταφοράς δυνάμεων μεταξύ των διαφόρων μελών της κατασκευής. Τα σημεία αυτά είναι συχνά ορατά και εντός του πεδίου των χρηστών και ως εκ τούτου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να εκφράσουν δομικές και αρχιτεκτονικές λειτουργίες.



Σχ.4.21 Σχεδιασμένο θεμέλιο ενός ιστού ανάρτησης:  
Sail για το Δρ Molsberger, τη Γερμανία, το 1980, Rasch

#### 4.3 ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΣΥΓΚΛΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

##### 4.3.1 Αεροϋποστηριζόμενες κατασκευές



Σχ. 4.22 "Κινητά ακίνητα": δομή για τη Festo

##### 4.3.1.1 Εισαγωγή

Οι αεροϋποστηριζόμενες κατασκευές βασίζονται στην διατήρηση μιας εσωτερικής πίεσης του αέρα που είναι μόνο ελαφρώς υψηλότερη από την ατμοσφαιρική για να διατηρηθεί η ένταση της μεμβράνης (Σχ. 4.23). Λόγω του χαμηλού ιδίου βάρους της κατασκευής και των (συνήθως) σχετικά μικρών εξωτερικών φορτίων, η πραγματική εσωτερική πίεση που απαιτείται μπορεί να είναι παρομοίως μικρή και συνήθως δεν προκαλεί δυσφορία στους χρήστες της κατασκευής. Συνήθως μια υπερπίεση 1-3 mbar είναι επαρκής, η οποία αντιστοιχεί περίπου με τη διαφορά πίεσης αέρα μεταξύ του επιπέδου του εδάφους και 25 m πάνω. Η ακριβής τιμή της υπερπίεσης, η οποία διατηρείται και προσαρμόζεται από ένα σύστημα

ελέγχου, περιλαμβανομένων αισθητήρων και αντλιών αέρα, εξαρτάται από την τρέχουσα ταχύτητα του ανέμου. Με τον τρόπο αυτό, η μεμβράνη δεν φορτίζεται υψηλότερα από το αναγκαίο.

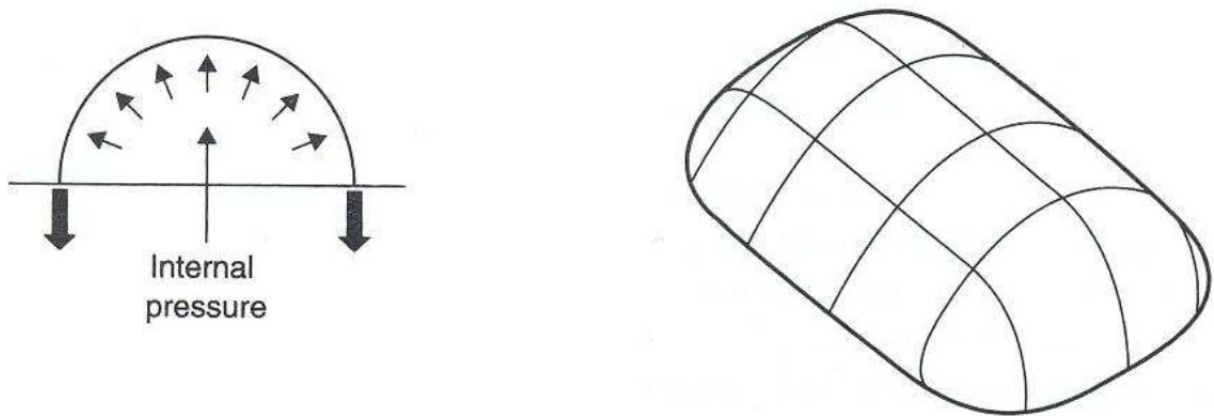
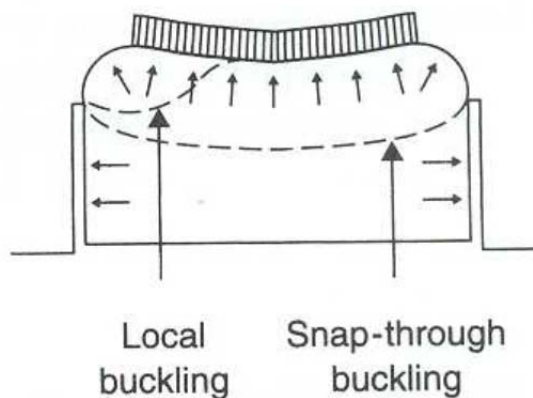


Fig. 4.23 Αεροϋποστηριζόμενες κατασκευές

Η αστοχία μιας αεροϋποστηριζόμενης κατασκευής μπορεί να είναι αποτέλεσμα του λυγισμού της μεμβράνης. Σε αυτήν την περίπτωση, δύο τρόποι αστοχίας είναι δυνατές: τοπικός λυγισμός της μεμβράνης ή θραύση λόγω λυγισμού της πλήρους κατασκευής (Σχήμα 4.24).



Σχ. 4.24 Τρόποι αστοχίας

#### 4.3.1.2 Περιορισμοί σχεδιασμού

Οι αεροϋποστηριζόμενες κατασκευές μπορούν να έχουν πολύ μεγάλα ανοίγματα, με τη βοήθεια της εσωτερικής υπερπίεσης ως μιας σταθερής ανοδικής δύναμης που ενεργεί, προσδίδοντας προέκταση στη μεμβράνη. Ωστόσο, ένα αεροϋποστηριζόμενο σύστημα προϋποθέτει ορισμένους περιορισμούς στο σχεδιασμό του λειτουργικού χώρου που καλύπτει.

Πρώτα από όλα, υπάρχουν περιορισμοί σχετικά με το σχήμα της κατασκευής. Όπως τα πειράματα με σαπουνόφουσκες έχουν αποδείξει, η φυσική μορφή των πνευματικών κατασκευών είναι η σφαίρα. Κάθε φουσκωμένη ομοιόμορφα ελαστική μεμβράνη τείνει να είναι σφαιρική, δηλαδή να έχει θετική καμπυλότητα Gauss. Με την εφαρμογή ενός κατάλληλου τρόπου κοπής των υφασμάτων ή την προσαρμογή των οριακών συνθηκών, κυλινδρικές ή σχήματος τόρου κατασκευές είναι επίσης δυνατές. Η χρήση εξωτερικών καλωδίων ή / και εσωτερικών τοίχων μπορεί να προσαρμόσει το διαρθρωτικό σχήμα. Ακόμα, η σφαίρα είναι η πιο απλή μορφή από την άποψη του σχεδιασμού.

Οι αεροϋποστηριζόμενες κατασκευές, όμως, συνήθως τείνουν να έχουν ένα κυλινδρικό επίμηκες σχήμα, το οποίο δίνει οπτικά την εντύπωση ενός ογκώδους λουκάνικου (σχήμα 4.25) Ένας από τους

λόγους για αυτό είναι η απλή κοπή παράλληλων λωρίδων. Στην περίπτωση των επιφανειών διπλής καμπυλότητας χάνεται πολύ υλικό κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κοπής.

Ο επόμενος περιοριστικός παράγοντας των αεροϋποστηριζόμενων κατασκευών είναι ο τύπος της θεμελίωσης που απαιτείται. Λόγω της δύναμης ανύψωσης που προκαλείται από την διαφορά πίεσης, η μεμβράνη πρέπει να αγκυρώνεται σταθερά στο έδαφος, με τέτοιο τρόπο που να απαγορεύει τις διαρροές. Αυτό συνεπάγεται αρκετά περίπλοκα στηρίγματα. Τέλος, το ύψος της πίεσης είναι μία παράμετρος για την λειτουργικότητα του χώρου. Η μετακίνηση από και προς το περιβάλλον ανθρώπων και αγαθών πρέπει να είναι δυνατή. Αυτό σημαίνει ότι το σύστημα αέρα που υποστηρίζει την κατασκευή πρέπει να είναι εξοπλισμένο με αεροπαγίδες και άλλους μηχανισμούς προκειμένου να καταστεί ο χώρος χρησιμοποιήσιμος.

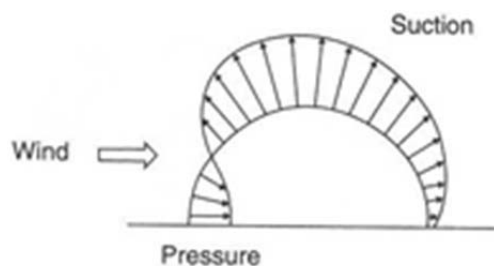


Σχ. 4.25 κυλινδρικού σχήματος αεροϋποστηριζόμενη κατασκευή

#### 4.3.1.3 Κατασκευαστικές αρχές

##### 4.3.1.3.1 Εξωτερικά φορτία

Η στατική συμπεριφορά της αεροϋποστηριζόμενης κατασκευής οφείλεται στην επιβολή ενός ομοιόμορφου φορτίου. Αυτό το είδος της φόρτωσης μπορεί να εξουδετερωθεί εύκολα από μια ενιαία εσωτερική πίεση, η οποία οδηγεί το σύστημα σε ισορροπία. Δυστυχώς, αυτό είναι μια ιδανική θεωρητική κατάσταση. Τα κύρια ωφέλιμα (live) φορτία που ενεργούν σε αυτό το είδος της κατασκευής είναι τα φορτία ανέμου και χιονιού, τα οποία δεν είναι ομοιόμορφα. Εκτός αυτού, η ύπαρξη μεγάλων συγκεντρωμένων φορτίων θα μπορούσε να είναι ένας λόγος για να επιλεγθεί ένα άλλο δομικό σύστημα.



Σχ. 4.26 Δράση του αέρα σε αεροϋποστηριζόμενη κατασκευή

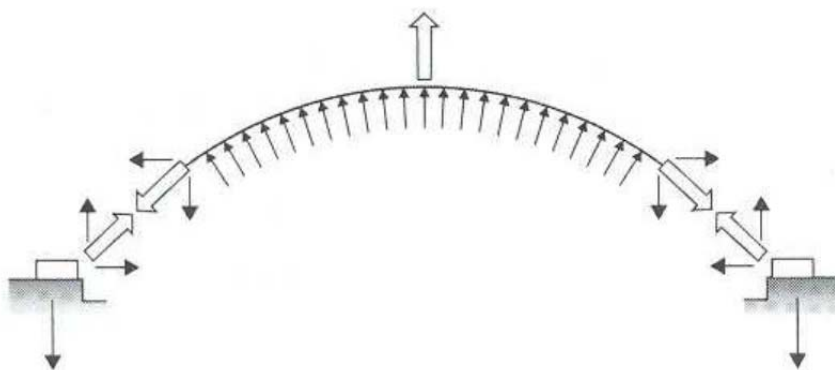
Η εξαιρετικά μεταβλητή δράση του ανέμου είναι ίσως το πιο ενοχλητικό είδος φόρτισης που μια αεροϋποστηριζόμενη κατασκευή έχει να αντιμετωπίσει. Δείτε το Σχήμα 4.26. Κατά προσέγγιση ο άνεμος θα πιέζει στις προσήνεμες πλευρές και θα αναρροφά στις υπόλοιπες: στην κορυφή, στις πλευρές παράλληλες προς την κατεύθυνση του ανέμου και στην υπήνεμη πλευρά της δομής. Οι φορτίσεις του ανέμου μπορούν εύκολα να γίνουν σημαντικές σε σύγκριση με τη σχετικά χαμηλή εσωτερική πίεση. Η αναρρόφηση του ανέμου τείνει να κρατήσει ψηλά τη στέγη. Οι δυνάμεις πίεσης δρουν προς την αντίθετη

πλευρά και θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε πτύχωση της μεμβράνης. Η ανομοιομορφία της φόρτωσης θα μπορούσε με τον τρόπο αυτό να επιφέρει μεγάλες παραμορφώσεις στην εύκαμπτη μεμβράνη.

Ανάλογα με την καμπυλότητα της μεμβράνης, το χιόνι μπορεί να συσσωρευθεί σε μία μεγάλη έκταση γύρω από την κορώνα της κατασκευής. Αυτό προκαλεί ένα φορτίο που ενεργεί προς τα κάτω. Χρησιμοποιώντας θερμό αέρα στο εσωτερικό της κατασκευής και του χαμηλού βαθμού μόνωσης της μεμβράνης, η δομή μπορεί να διατηρηθεί ελεύθερη από χιόνι.

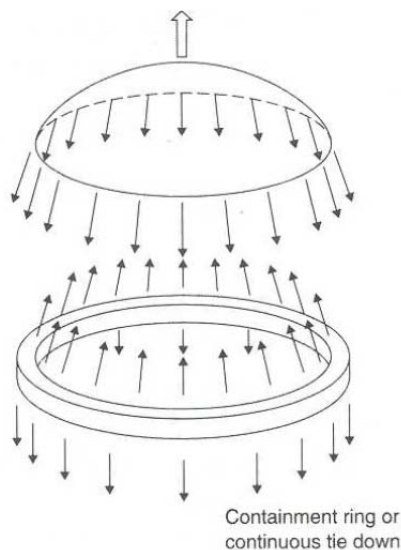
#### 4.3.1.3.2 Συνθήκες στήριξης

Κατακόρυφες, προς τα κάτω ενεργώντας δυνάμεις μεταφέρονται εύκολα στο έδαφος. Η ικανότητα του εδάφους να αναλαμβάνει μεγάλες δυνάμεις συμπίεσης μπορεί να αξιοποιηθεί πλήρως. Λόγω της ανοδικής δράσης της εσωτερικής πίεσης, ωστόσο, η αεροϋποστηριζόμενη κατασκευή προκαλεί δύναμη ανύψωσης για την θεμελίωση (σε ορισμένες περιπτώσεις, αυτό μπορεί να ενισχυθεί από τις δυνάμεις άνωσης λόγω εξωτερικών φορτίων του ανέμου). Ανάλογα με τη γεωμετρία της δομής, αυτό μπορεί να συνοδεύεται από σημαντικές οριζόντιες δυνάμεις. Σε συνδυασμό με την απαίτηση για αεροστεγανότητα, αυτό θα έχει μεγάλο επιπτώσεις στο σχεδιασμό της θεμελίωσης.



Σχ. 4.27 Αντιδράσεις στηρίξεων

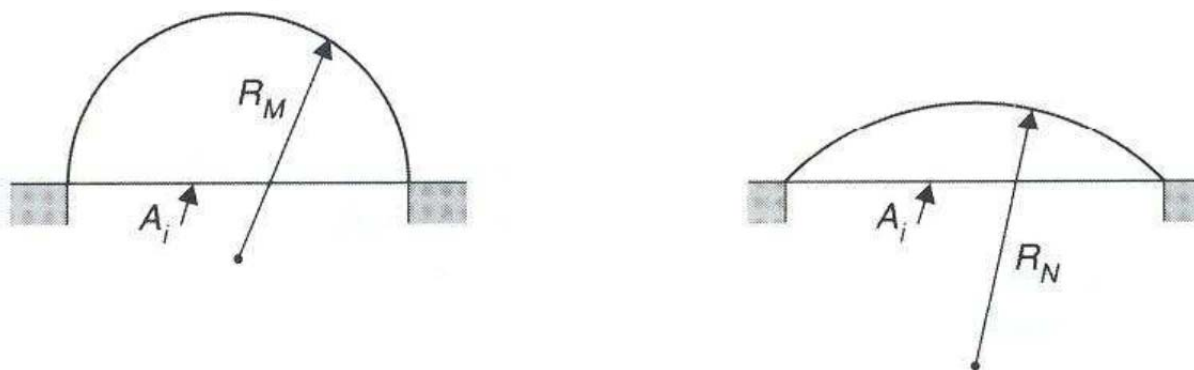
Μια συνηθισμένη λύση η δημιουργία μιας μορφή δακτυλίου συγκράτησης που, για εσωτερικώς κατευθυνόμενες δυνάμεις της μεμβράνης, παραλαμβάνει τις οριζόντιες δυνάμεις μέσω της συμπίεσης του δακτυλίου (Σχήμα 4.28). Στην περίπτωση ενός εύκαμπτου δακτυλίου, π.χ. από χάλυβα, η ίδια η δακτύλιος σταθεροποιείται με αυτό τον τρόπο από την εσωτερική υπερπίεση.



Σχ. 4.28 Δακτύλιος συγκράτησης

### 4.3.1.3.3 Γεωμετρικές επιδράσεις

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα προβλήματα σχεδιασμού, που σχετίζονται με τις αεροϋποστηριζόμενες κατασκευές, είναι η λήψη απόφασης σχετικά με το προφίλ της κατασκευής. Για να καλυφθεί μία ορισμένη περιοχή, δύο ακραίες καταστάσεις είναι δυνατές: μια υψηλού προφίλ κατασκευή (μικρή ακτίνα σφαίρας) ή ένα χαμηλό προφίλ κατασκευή (μεγάλη ακτίνα σφαίρας). Δείτε το Σχήμα 4.29.



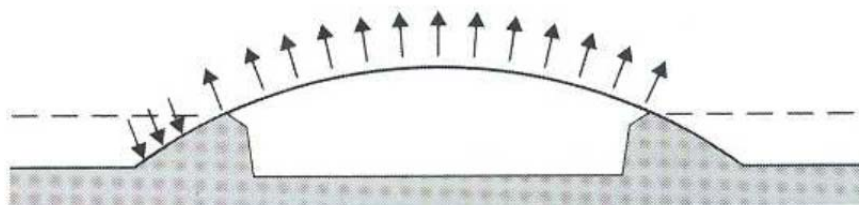
Σχ. 4.29 Υψηλό προφίλ (αριστερά) και χαμηλό προφίλ (δεξιά) κατασκευής

Σύμφωνα με τον τύπο

$$n = \frac{p_i \pi R_1^2}{2\pi R_1} = \frac{p_i R_1}{2}$$

Όπου  
 $n$  = Η τάση της μεμβράνης ανά μονάδα μήκους κατά την διαμήκη διεύθυνση  
 $R_1$  = είναι η ακτίνα της καμπύλης  
 $p_i$  = είναι η εσωτερική πίεση

Μια μεγαλύτερη ακτίνα καμπυλότητας αντιστοιχεί σε μεγαλύτερες πιέσεις μεμβράνης. Ως εκ τούτου, μία κατασκευή χαμηλού προφίλ απαιτεί ισχυρότερο τύπο υλικού για την μεμβράνη. Ταυτόχρονα μια κατασκευή μεγάλης ακτίνα σφαίρας προϋποθέτει περισσότερη ευαισθησία στις τοπικές διαταραχές. Ένα σχετικά μικρό σημειακό φορτίο μπορεί να προκαλέσει πολύ μεγάλες τάσεις στη μεμβράνη. Επιπλέον, μια κατασκευή χαμηλού προφίλ προκαλεί μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις στις στηρίξεις. Αυτό επηρεάζει το σχεδιασμό του δακτυλίου συμπίεσης.



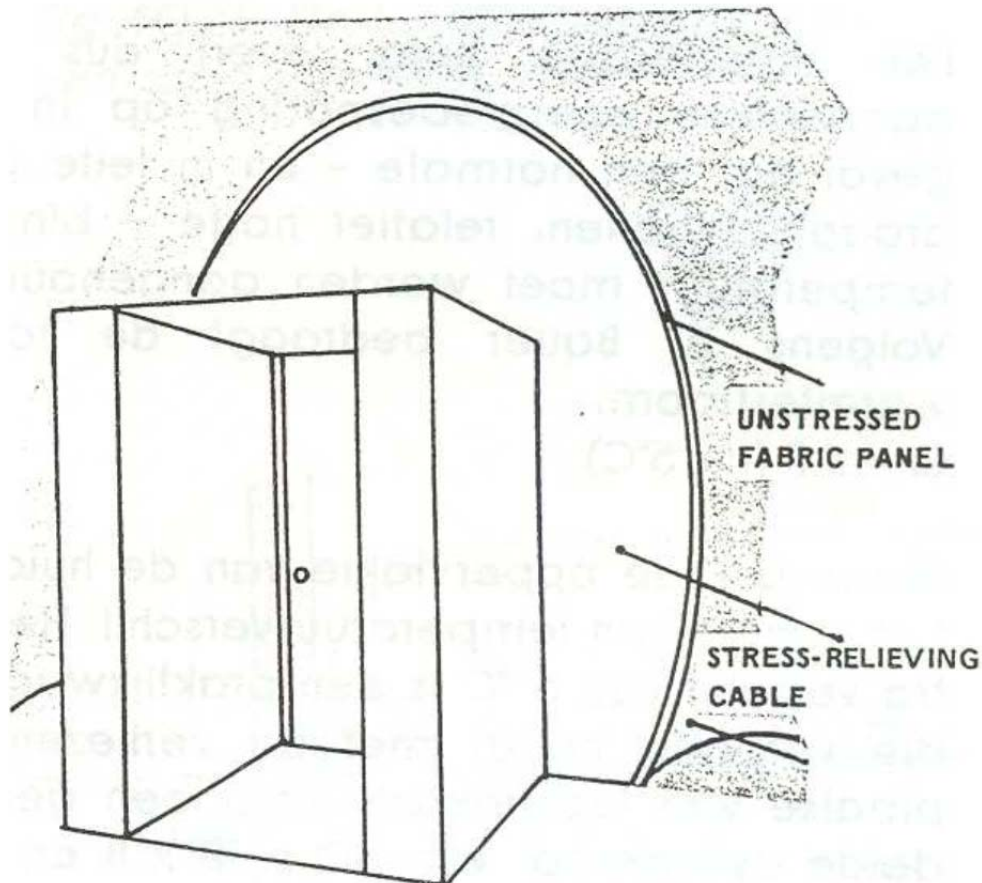
Σχ. 4.30 Χαμηλού προφίλ κατασκευή και αναχώματα εξάλειψης των δυνάμεων πίεσης

Από την άλλη πλευρά, μια δομή υψηλού προφίλ δέχεται μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις αντίδρασης λόγω του φορτίου του ανέμου. Για να διατηρηθεί η σταθερότητα του σχήματος της κατασκευής, η υπερπίεση πρέπει να είναι 5 έως 10 φορές υψηλότερη από ό, τι σε μια κατασκευή χαμηλού προφίλ. (μπορεί να είναι σχεδιασμένη κατά τέτοιο τρόπο ώστε μόνο δύναμης αναρρόφησης να ενεργούν πάνω στη μεμβράνη βλέπε Σχήμα 4.30. Στην περίπτωση αυτή, η εσωτερική υπερπίεση μπορεί

να είναι σημαντικά χαμηλότερη.). Περαιτέρω, μία κατασκευή υψηλού προφίλ οδηγεί σε μεγαλύτερο όγκο που πρέπει να θερμανθεί ή να ψυχθεί.

#### 4.3.1.4 Όρια μεμβράνης

Σε πολλές περιπτώσεις απαιτούνται ανοίγματα στη μεμβράνη. Μία αερούποστηριζόμενη κατασκευή απαιτεί μια είσοδο για να μπει κάποιος στο καλυμμένο χώρο. Επίσης απαιτεί ένα άνοιγμα για την παροχή αέρα, προκειμένου να διατηρηθεί η εσωτερική πίεση σταθερή. Στα όρια της μεμβράνης η δύναμη πρέπει να μεταφερθεί περαιτέρω, γύρω από το άνοιγμα. Για την ευχερή μεταφορά της ισχύος, το άνοιγμα πρέπει να είναι κυκλικού σχήματος. Κάποιο είδος δυσκαμψίας του ορίου παρέχεται από ένα χαλύβδινο καλώδιο, που τρέχει μέσα από μια θήκη στο όριο. Δείτε το Σχήμα 4.31.



Σχ. 4.31 Μεταφορά δύναμης γύρω από μια πόρτα

Η σύνδεση μεταξύ της μεμβράνης και του αντικειμένου, θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι εύκαμπτο, για να αποτρέψει την εμφάνιση υψηλών συγκεντρώσεων τάσεων στη μεμβράνη.

#### 4.3.2 ΦΟΥΣΚΩΜΕΝΑ ΜΑΞΙΛΑΡΙΑ (INFLATED CUSHIONS)

##### 4.3.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

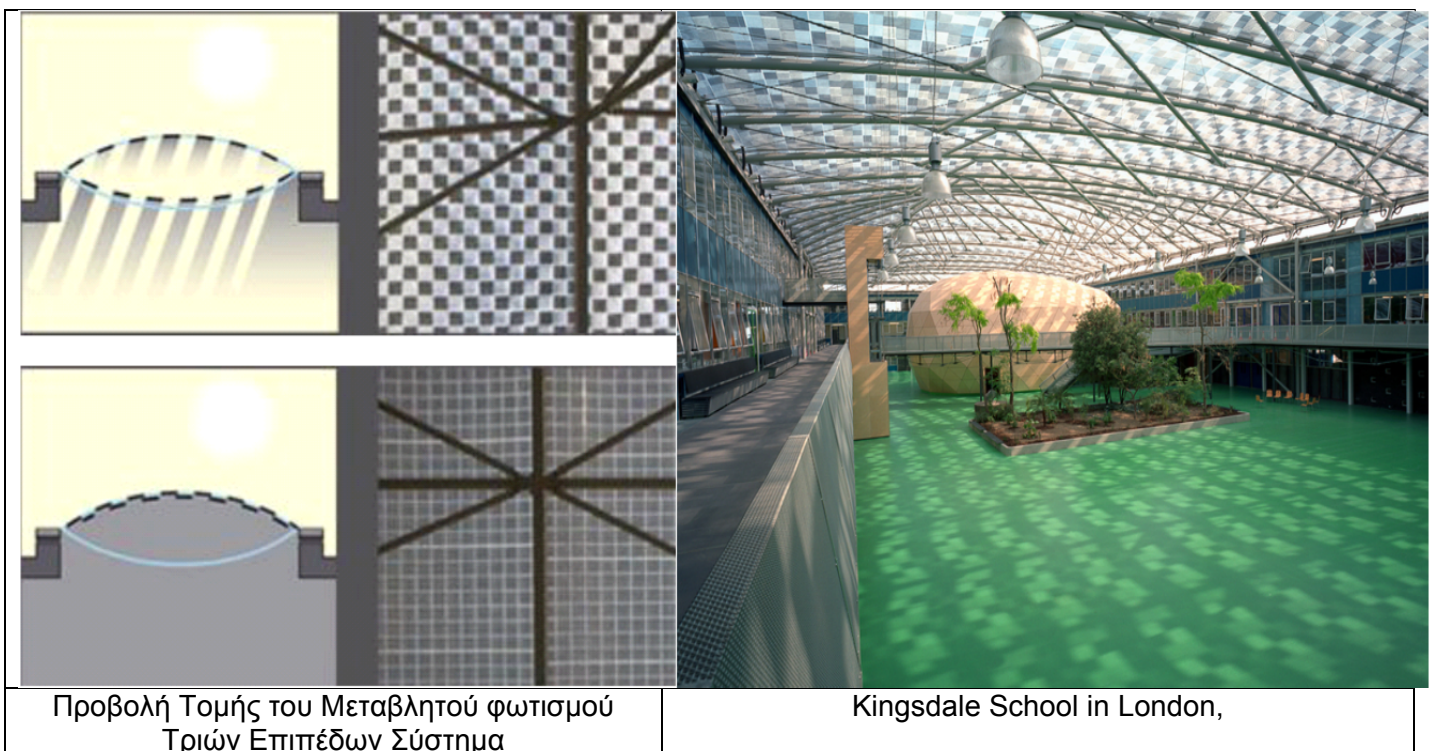
Τα INFLATED CUSHIONS είναι φουσκωτές κατασκευές που υποστηρίζονται επίσης από τη διαφορά μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής πίεσης. Επιθέματα ή συστοιχίες INFLATED CUSHIONS μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να σχηματίσουν στέγες και προσόψεις. Τέτοια INFLATED CUSHIONS κατασκευάζονται συνήθως από ETPE φιλμ για να δημιουργήσουν θερμές στέγες που έχουν υψηλή διαφάνεια. Οι θερμομονωτικές ιδιότητες μπορούν να βελτιωθούν με την προσθήκη εσωτερικών επιπέδων από φιλμ έτσι ώστε να μειωθεί η συναγωγή της κίνησης του αέρα. (Εικ. 4.32)





Σχ. 4.32 WATER CUBE ΠΕΚΙΝΟ οροφή και πρόσοψη από ETFE INFLATED CUSHIONS.

Οι διαφανής στέγες χρειάζονται σκίαση από την ακτινοβολία του ήλιου. Τα INFLATED CUSHIONS επιτρέπουν, με ένα ειδικό προσαρμοζόμενο σύστημα σκίασης, με εκτυπωμένες θετικές και αρνητικές εικόνες αντίστοιχα στο εξωτερικό και στο ενδιάμεσο στρώμα μεμβράνης. Ο βαθμός της σκίασης μπορεί να ρυθμιστεί με την αλλαγή της απόστασης μεταξύ του θετικού και αρνητικού τυπωμένου φιλμ, που μπορεί να επιτευχθεί με την αλλαγή της πίεσης του αέρα στα ενδιάμεσα αεροφυλάκια. (Εικ. 4.33)



Προβολή Τομής του Μεταβλητού φωτισμού Τριών Επιπέδων Σύστημα

Kingsdale School in London,

Σχ. 4.33 Ικανότητα του ETFE να μειώνει ή να αυξάνει τον φυσικό φωτισμό σε ένα κτίριο.

#### 4.3.2.2 Μέθοδοι σχεδιασμού κατασκευών για ETFE Cushions.

Μία κατασκευή ή ένα δομικό μέλος θεωρείται ότι είναι γεωμετρικά γραμμικό όταν οι πραγματικές μετατοπίσεις είναι ευθέως ανάλογες προς την εφαρμοζόμενη φόρτωση και γεωμετρικά μη γραμμική, όταν δεν είναι. Οι εφελκόμενες κατασκευές παρουσιάζουν γεωμετρικά γραμμική συμπεριφορά για μικρές μετατοπίσεις, αλλά μη γραμμική συμπεριφορά για μεγάλες μετατοπίσεις. Οι κατασκευές με μεμβράνη έχουν σχετικά μεγάλες μετακινήσεις της επιφάνειας κάτω από εφαρμοζόμενη φόρτιση, ώστε να τις

επιτρέπουν να φέρουν αποτελεσματικά τα φορτία, πράγμα που σημαίνει ότι κάθε ανάλυση πρέπει να αντιπροσωπεύει μη γραμμική συμπεριφορά.

Σύμφωνα με τον Frei Otto (1967), υπάρχουν δύο βασικά ζητήματα για την επίλυση της στατικής ανάλυσης των πνευματικών ή άλλων προεντεταμένων κατασκευών:

- 1) Καθορισμός της απαραίτητης πίεσης φουσκώματος για την αντιμετώπιση των αναμενόμενων εφαρμοζόμενα φορτία, και
- 2) Ο καθορισμός των μέγιστων τάσεων εφελκυσμού που θα παρουσιαστούν στο σύστημα με τη δεδομένη εσωτερική πίεση και εφαρμοζόμενο φορτίο.

Λόγω της γεωμετρικής μη γραμμικότητας του συστήματος, ο προσδιορισμός της πίεσης του αέρα πρέπει να είναι μια επαναληπτική διαδικασία. Για απλά σχήματα των ETFE Cushions, όπως ορθογώνια, αυτό μπορεί να γίνει με το χέρι, αν και η διαδικασία είναι χρονοβόρα. Για πιο πολύπλοκα σχήματα, απαιτείται τρισδιάστατη ανάλυση, έτσι ώστε η μοντελοποίηση σε ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων του υπολογιστή είναι απαραίτητη.

Αρκετές διαδικασίες για απλοποιημένη ανάλυση των INFLATED CUSHIONS έχουν προταθεί, και αυτά συζητούνται στις ακόλουθες ενότητες.

#### 4.3.2.2.1 Huntington Method

1. Ένα καλώδιο που εκτείνεται σε μια απόσταση  $l$ , με βέλος  $h$ , υπό ομοιόμορφη φόρτιση  $w$  έχει αντιδράσεις στήριξης  $V$  και  $H$ , στις οριζόντιες και κάθετες διευθύνσεις, αντίστοιχα, υπολογίζεται ως εξής:

$V = \frac{wl}{2}$	4.1
$H = \frac{wl^2}{8h}$	4.2

2. Για ομοιόμορφη φορτία κάθετα προς το καλώδιο, όπως εσωτερική πίεση, η δύναμη εφελκυσμού του καλωδίου,  $F$ , βρίσκεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$F = \frac{w(l^2 + 4h)}{8h}$	4.3
------------------------------	-----

3. Το μήκος τόξου του αφόρτιστου καλωδίου βρίσκεται ως εξής:

$A = 2 \left[ \frac{l^2}{4} + \frac{4}{3}h^2 \right]$	4.4
---	-----

4. Η μεταβολή του μήκους του τόξου υπό φόρτιση,  $\delta A$ , υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$\delta A = \frac{FA}{E}$	4.5
---------------------------	-----

Όπου  $E$  είναι το μέτρο ελαστικότητας

5. Το νέο μήκος του τόξου συνέχεια υπολογίζεται ως εξής:

$A' = A + \delta A$	4.6
---------------------	-----

6. Το αντίστοιχο νέο βέλος στο καλώδιο υπολογίζεται ως εξής:

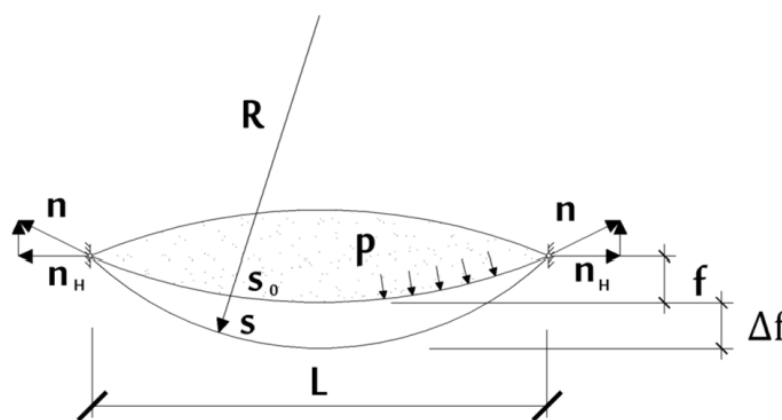
$h' = \frac{\sqrt{3}}{4} \sqrt{A'^2 + l^2}$	4.7
---	-----

7. Εισάγοντας  $h'$  στην αρχική εξίσωση για το  $F$  αποδίδει  $F''$ . Επανάληψη μέσω όλων των τύπων μέχρι το  $F''$  να συγκλίνει επιτρέπει τον προσδιορισμό της τελικής γεωμετρίας του καλωδίου.

Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος για φιλμ αντί για καλώδια, μια μονάδα πλάτους του φιλμ μπορεί να θεωρηθεί.

#### 4.3.2.2 Μέθοδος Wagner

Η Rosemarie Wagner (2007) ανέπτυξε μια μέθοδο ανάλυσης για την εύρεση των τάσεων στα INFLATED CUSHIONS, η οποία βασίζεται επίσης στην ιδέα του καλωδίου. Υπό εσωτερική πίεση οι παράμετροι των CUSHIONS ορίζονται στο σχήμα 4.34.



Σχήμα 4.34 - Cushion κάτω από εσωτερικό φορτίο (Wagner, 2007)

Το αρχικό μήκος του φύλλου,  $s_0$ , αυξάνει σε  $s$  όταν το μαξιλάρι είναι φουσκωμένο. Το νέο μήκος,  $s$ , βρίσκεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$s = L \sqrt{1 + \frac{16(f + \Delta f)^2}{3L^2}}$	4.8
--	-----

Αυτό μπορεί να απλοποιηθεί με τη χρήση μιας ανάπτυξης σειράς Taylor ως:

$s \cong L \left[ 1 + \frac{8(f + \Delta f)^2}{3L^2} \right]$	4.9
---	-----

Το συνολικό βέλος του Cushion,  $f + \Delta f$ , βρίσκεται ως εξής:

$f + \Delta f = R - R \sqrt{1 - \frac{L^2}{4R^2}}$	4.10
--	------

Αυτό μπορεί επίσης να απλοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια ανάπτυξη σειράς Taylor, δημιουργώντας την ακόλουθη εξίσωση.

$$f + \Delta f \cong \frac{L^2}{8R}$$

4.11

Σύμφωνα με αυτά:

$$R = \frac{L^2}{8(f + \Delta f)}$$

4.12

Έτσι ώστε η τάση στο φύλλο,  $n$ , περιγράφεται ως:

$$n = p \cdot R \cong p \cdot \frac{L^2}{8(f + \Delta f)}$$

4.13

Επίσης, το μήκος φύλλου,  $s$ , μπορεί να υπολογιστεί σε όρους  $n$ , χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$$s = L \left( 1 + \frac{p^2 L^2}{24n^2} \right) \cong s_o + \Delta s = s_o + \frac{ns_o}{EA}$$

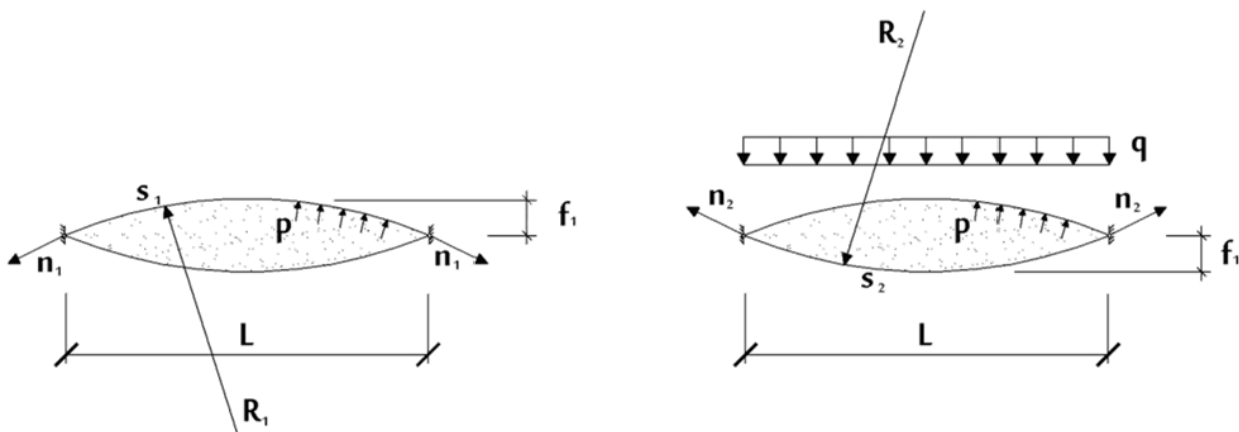
4.14

Για την επίλυση ως προς την τάση,  $n$ , η ακόλουθη εξίσωση κυβική θα πρέπει να επιλυθεί:

$$n^3 + EAn^2 \left( 1 + \frac{L}{s_o} \right) = \frac{EAp^2 L^3}{24s_o}$$

4.15

Ένα Cushion κάτω από εσωτερική πίεση και εξωτερικό φορτίο έχει τις παραμέτρους που φαίνεται στο Σχήμα 4.35.



Σχήμα 4.35 - Cushion κάτω από εξωτερική φόρτιση (Wagner, 2007)

Οι ακόλουθες υποθέσεις πρέπει να γίνουν ώστε να μπορεί να γίνει η χρήση των απλουστευμένων μη γραμμικών εξισώσεων που χρησιμοποιούνται σε αυτή την περίπτωση:

- Η γεωμετρία της επιφάνειας είναι ένα σχήμα εξαιτίας της ισορροπίας που ορίζεται από την εσωτερική πίεση
- Το cushion είναι απλά καμπύλο (δηλαδή δεν έχει καμία καμπυλότητα στην τρίτη διάσταση)
- Ο προσανατολισμός του υφάσματος είναι στην κατεύθυνση της καμπυλότητας

• Το εξωτερικό φορτίο είναι παρόμοιο του εσωτερικού, αποφεύγοντας καταπόνηση και έχουμε λιγότερες παραμορφώσεις

• Τα σύνορα είναι σταθερά (Wagner, 2007).

Στην ακόλουθη διαδικασία, ο δείκτης "ο" αναφέρεται στην διογκωμένη, αφόρτιστη κατάσταση. Το μήκος της άνω μεμβράνης βρίσκεται ως εξής:

$s_1 = s_{1,o} + \Delta s_1 \cong L_1 \left( 1 + \frac{8(f_1 - \Delta f_1)^2}{3L_1^2} \right)$	4.16
--	------

Η τάση στην πάνω μεμβράνης βρίσκεται ως εξής:

$n_1 = (p - q) \cdot R_1 = (p - q) \cdot \frac{L^2}{8(f_1 - \Delta f_1)^2}$	4.17
---	------

Το ελαστικό επιμήκυνση στην πάνω μεμβράνη υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

$\Delta s_1 = \frac{(n_1 - n_{1,o})s_{1,o}}{E_1 A_1} = \frac{(n_1 - \frac{p_o L^2}{8f_{1,o}})s_{1,o}}{E_1 A_1}$	4.18
---	------

Το παραμορφωμένο μήκος της άνω μεμβράνης λαμβάνεται με την πρόσθεση του αρχικού μήκους στην ελαστική επιμήκυνση, ως εξής:

$s_1 \cong s_{1,o} + \Delta s_1 = s_{1,o} + \frac{(n_1 - \frac{p_o L^2}{8f_{1,o}})s_{1,o}}{E_1 A_1}$	4.19
--	------

Για να προσδιοριστεί η τάση στην πάνω μεμβράνης, η ακόλουθη κυβική εξίσωση πρέπει να λυθεί:

$n_1^2 \left( n_1 - \frac{p_o L_1^2}{8f_{1,o}} \right) + E_1 A_1 n_1^2 \left( 1 - \frac{L_1}{s_{1,o}} \right) = \frac{E_1 A_1 (p - q)^2 L_1^3}{24 s_{1,o}}$	4.20
---	------

Ομοίως, η τάση στην κάτω μεμβράνης,  $n_2$ , μπορεί να βρεθεί από:

$n_2^2 \left( n_2 - \frac{p_o L_2^2}{8f_{2,o}} \right) + E_2 A_2 n_2^2 \left( 1 - \frac{L_2}{s_{2,o}} \right) = \frac{E_2 A_2 p^2 L_2^3}{24 s_{2,o}}$	4.21
---	------

Οι μη παραμορφωμένοι και οι παραμορφωμένοι όγκοι αέρα στο εσωτερικό του Cushion βρίσκονται ως εξής:

$V_o = \frac{2}{3}(L_1 f_{1,o} + L_2 f_{2,o}) \cdot b$	4.22
--	------

$V = \frac{2}{3}(L_1 f_1 + L_2 f_2) \cdot b$	4.23
--	------

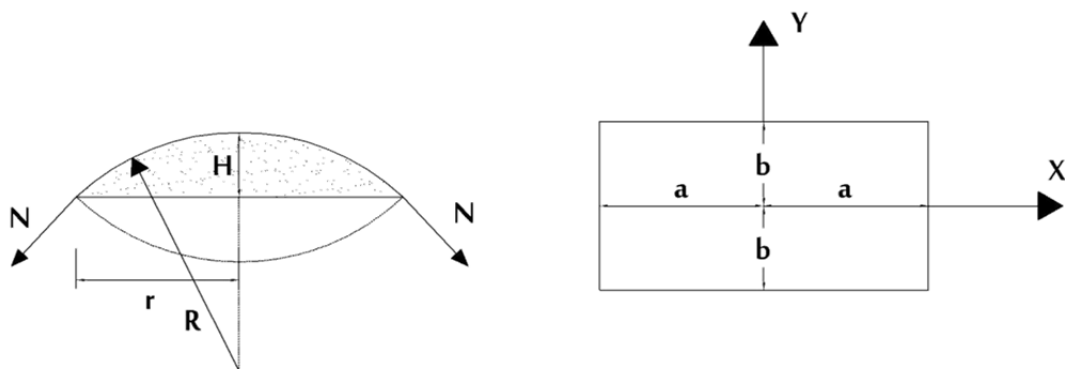
Χρησιμοποιώντας αυτές τις εξισώσεις για τους όγκους και τη σχέση του ιδανικού αερίου για πίεση-όγκο,  $P_o V_o = PV$ , η τρίτη εξίσωση που είναι αναγκαία για την επίλυση  $n_1$ ,  $n_2$ , και  $p$ , αναπτύσσεται:

$(p_o + p_{atm})(L_1 f_{1,o} + L_2 f_{2,o}) = (p_o + p_{atm})(L_1^3 \cdot \frac{p - q}{8n_1} + L_2^3 \frac{p}{8n_2})$	4.24
---	------

Εάν τα  $p_o$ ,  $f_{1,o}$  and  $f_{2,o}$  είναι γνωστά, τότε  $p$ ,  $n_1$  and  $n_2$  μπορούν να βρεθούν από την επίλυση των εξισώσεων (4.20), (4.21) and (4.24).

#### 4.3.2.2.3 Μέθοδος Borgart

Ο Borgart (2007) πρότεινε μια παρόμοια μέθοδο για την ανάλυση του ορθογώνιου. Το σχήμα 4.36 δείχνει τα χαρακτηριστικά του Cushion που χρησιμοποιούνται στις εξισώσεις του.



Σχ 4.36 Φουσκωμένα ορθογώνιο Cushion (Borgart, 2007)

Η ακτίνα του ενός από τα φουσκωμένα στρώματα φιλμ βρίσκεται ως εξής:

$R = \frac{H^2 + r^2}{2H}$	4.25
----------------------------	------

Οι δυνάμεις της μεμβράνης στις διευθύνσεις  $x$  και  $y$ , αντίστοιχα, δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$N_{xx} = \frac{-5b^2 QR_x}{4(a^2 + b^2)}$	4.26
$N_{yy} = \frac{-5a^2 QR_y}{4(a^2 + b^2)}$	4.27

Για τετράγωνο Cushion, η παραμόρφωση του υλικού περιγράφεται από

$\epsilon = \frac{5PR}{8K}$	4.28
-----------------------------	------

Όπου  $P$  είναι η εσωτερική πίεση του αέρα, το  $R$  είναι η ακτίνα του Cushion,  $K$  είναι η επίπεδη δυσκαμψία, η οποία ισούται με  $Ed(1+\nu)$ , όπου  $d$  είναι το πάχος στρώματος φύλλου και  $\nu$  είναι ο συντελεστής συστολής. Τα μήκη της ξεφουσκωτής και της φουσκωμένης μεμβράνης δίνεται από  $l$  και  $l_{o1}$ , αντίστοιχα, στα παρακάτω εξισώσεις:

$l = \frac{6r^2 + 4H^2}{3r}$	4.29
$l_{o1} = \frac{16KH_1(6r^2 + 4H_1^2)}{3r(5PH_1^2 + 5Pr^2 + 16KH_1)}$	4.30

Με βάση νόμο του Boyle για το φυσικό αέριο, οι πιέσεις πριν και μετά τη φόρτωση ενός Inflated Cushion με ένα εξωτερικό φορτίο μπορεί να σχετίζονται με:

$P_1 = \left( \frac{H_1 + H_2}{H_{11} + H_{21}} \right) P_o$	4.31
--	------

Στην παραπάνω εξίσωση,  $P_o$  είναι η εσωτερική πίεση του αέρα πριν από τη φόρτωση, το  $P_1$  είναι η εσωτερική πίεση του αέρα μετά τη φόρτωση,  $H_1$  και  $H_2$  είναι τα ύψη των άνω και κάτω στρωμάτων του Cushion πριν από τη φόρτωση, αντίστοιχα, και  $H_{11}$  και  $H_{21}$  είναι τα ύψη Cushion μετά φόρτωση. Για να προσδιοριστεί το παραμορφωμένο μήκος της μεμβράνης του Cushion, και οι δυνάμεις της μεμβράνης, οι ακόλουθες τρεις εξισώσεις μπορούν να λυθούν:

$l_{11} = l_{o1}(1 + \varepsilon)$	4.32
$\left[ 1 + \frac{5 \left( \left[ \frac{H_1 + H_2}{H_{11} + H_{21}} \right] P_o - P_o - P_w \right) (H_{11}^2 + r^2)}{16H_{11}K} \right] \cdot l_{o1} - \frac{6r^2 + 4H_{11}^2}{3r} = 0$	4.33
$\left[ 1 + \frac{5 \left( \left[ \frac{H_1 + H_2}{H_{11} + H_{21}} \right] P_o - P_w \right) (H_{21}^2 + r^2)}{16H_{21}K} \right] \cdot l_{o2} - \frac{6r^2 + 4H_{21}^2}{3r} = 0$	4.34

#### 4.3.2.2.4 Μέθοδοι Ανάλυσης Υπολογιστών

Οι παραπάνω μέθοδοι εφαρμόζονται μόνο για τα πολύ απλά σχήματα Cushion και σταθερή διανεμημένα φορτία. Τα μαθηματικά, ακόμη και σε αυτές τις βασικές περιπτώσεις, εξακολουθούν να είναι περίπλοκα και είναι χρήσιμο να έχουμε ένα πρόγραμμα υπολογιστή ικανό για επίλυση πολύπλοκων συστημάτων εξισώσεων για να καταλήξουμε σε μια λύση. Για περισσότερα ασυνήθιστα σχήματα Cushion ή μη-ομοιόμορφες φορτίσεις, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται μέθοδοι υπολογιστή. Τυπικά προγράμματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να προσαρμόζεται ώστε να περιλάβουν τον εσώκλειστο όγκο του αέρα μέσα στα Cushion, η πίεση των οποίων αλλάζει με την εφαρμοζόμενη φόρτιση. Ο Koch (2004) πρότεινε την ακόλουθη βασική προσαρμογή του νόμο των ιδανικών αερίων για το σκοπό αυτό:

- Χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, καθορίζουμε την απαραίτητη πίεση φουσκώματος,  $P_o$ , που να δημιουργεί την επιθυμητή προένταση στη μεμβράνη,
- Εκτιμούμε την τελική εσωτερική πίεση,  $P_i$ , μετά τη φόρτωση,
- Εκτελούμε μια ανάλυση του φορτίου του συστήματος μέχρι η  $P_i$  να συγκλίνει, και υπολογίζουμε αντίστοιχα το  $V_i$ .
- Συγκρίνουμε το  $P_o V_o$  με  $P_i V_i$ . Αν δεν είναι ίσα, ρυθμίζουμε το  $P_i$  επαναληπτικά μέχρι να είναι ίσα, και

- Υπολογίζουμε την τάση της μεμβράνης σε αυτήν την πίεση και τον όγκο για να καθοριστεί εάν είναι αποδεκτή.

Προκειμένου να διαμορφώσει την μη γραμμική συμπεριφορά των μεμβρανών, η Lewis (2003) προτείνει τη χρήση μιας από τις τρεις μεθόδους: τη μέθοδο παροδικής δυσκαμψίας, τη μέθοδο πυκνότητας δύναμης, και τη μέθοδο δυναμικής χαλάρωσης.

Χρησιμοποιούμε τη μέθοδο φυσικής πυκνότητας δύναμης (NFDM) και εξετάζουμε τη συμπεριφορά ενός inflated cushion με διαστάσεις 5X5 μέτρα, με άκαμπτα καθορισμένα σύνορα. Πρώτα ορίζουμε την κατεύθυνση στημόνι-υφάδι κάθετη προς τα σύνορα, και εξετάζουμε τις αντιδράσεις, καθώς κρατάμε σταθερή την προένταση της μεμβράνης σε 1kN / m και μεταβάλλουμε την πίεση σε 100 Pa, 200Pa και 300Pa. Παρατηρούμε ότι όσο η πίεση αυξάνεται οι ακτίνες καμπυλότητας αυξάνονται, αλλά οι αντιδράσεις ελαττώνονται.

Στο δεύτερο στάδιο εφαρμόζουμε κομβικό φορτίο 1kN στην +Z κατεύθυνση, η πίεση στο cushion είναι 220 Pa και παρατηρούμε τη διαφορά στις τάσεις για την πάνω και την κάτω επιφάνεια. Ακόμη και αν το φορτίο εφαρμόζεται σε σημείο της επάνω επιφάνειας, οι τάσεις στην κάτω επιφάνεια αλλάζουν από την κατάσταση προέντασης.

Στη συνέχεια, εξετάζουμε την παραμόρφωση στην επάνω επιφάνεια για τρεις διαφορετικούς τύπους μεμβράνης τύπου I, τύπου III, τύπου V και βλέπουμε πως όσο το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται η παραμόρφωση μικραίνει. Κρατώντας τον τύπο μεμβράνης V με τη μεγαλύτερη ακαμψία αλλάζουμε την πίεση, πρώτα σε 100 Pa και μετά από 300Pa και παρατηρούμε πως όσο η πίεση μεγαλώνει η παραμόρφωση μεγαλώνει. Για χαμηλού προφίλ, μικρή πίεση, οι αντιδράσεις αυξάνονται. Τελευταία εξετάζουμε το τάσεις von Mises για το ίδιο υλικό και πίεση με το ίδιο φορτίο, αλλά με διαφορετική κατεύθυνση των νημάτων του υφάσματος. Το πρώτο, έχει κάθετη κατεύθυνση στα άκαμπτα σύνορα και το δεύτερο έχει κατεύθυνση την διαγώνιο της κατασκευής.

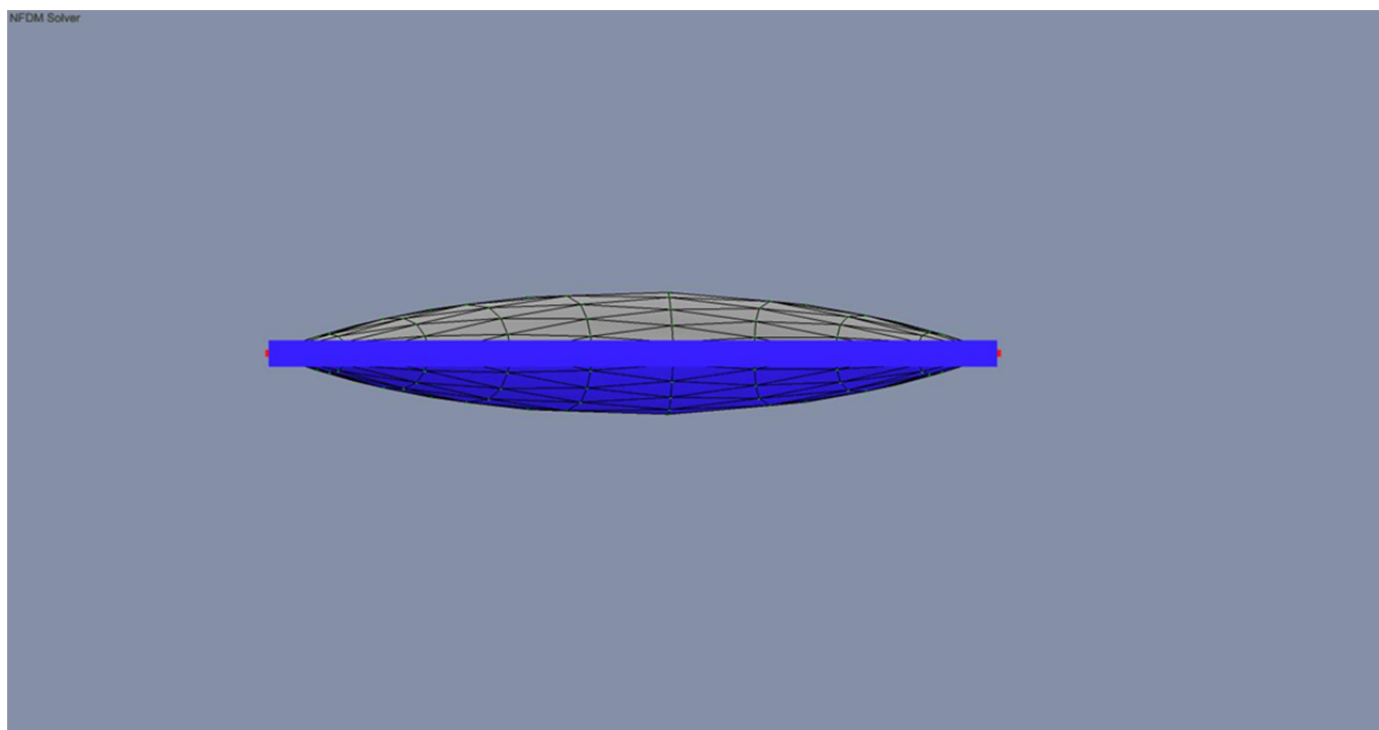
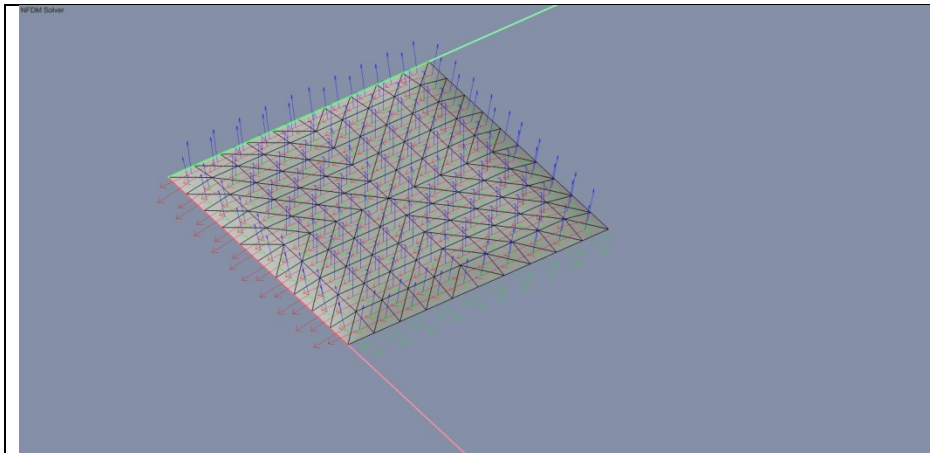
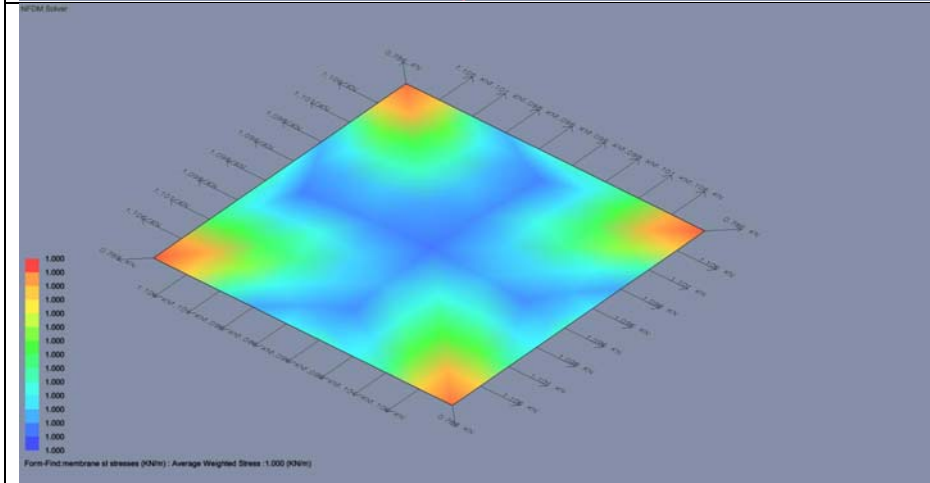


Fig.4.36 Inflated cushion

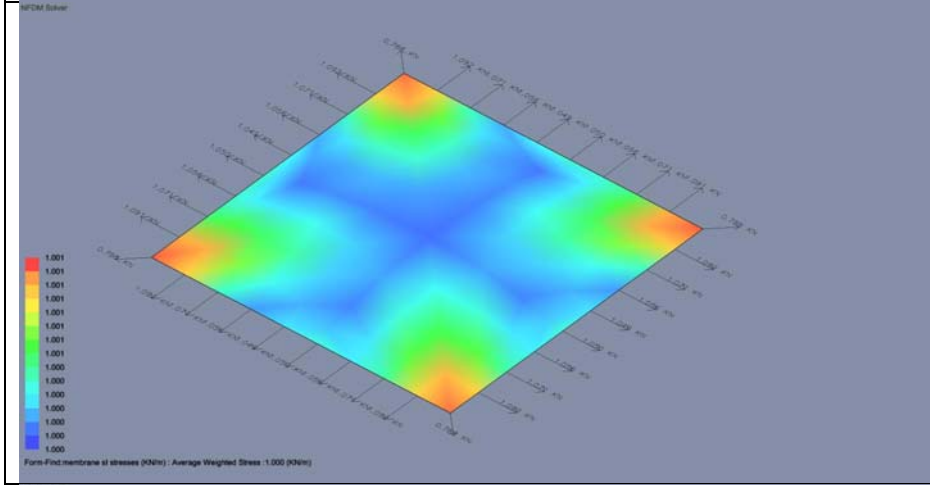




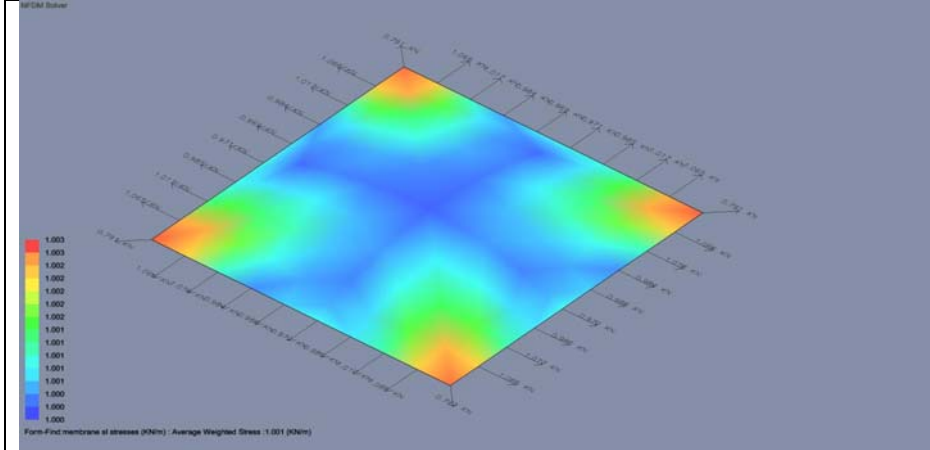
Στημόνι-Υφάδι  
(1)  
Κάθετα στα  
άκαμπτα όρια



Πίεση 100Pa

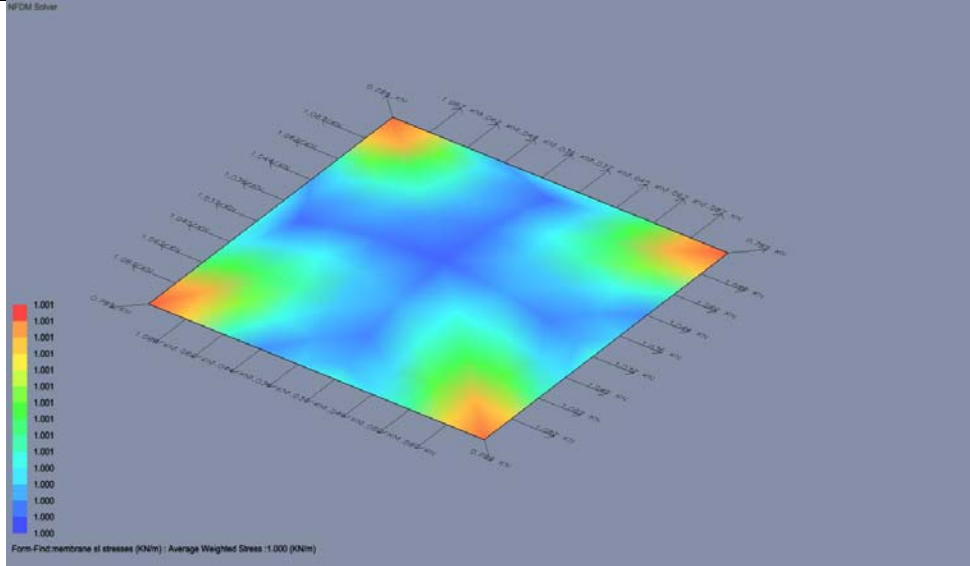


Πίεση 200Pa

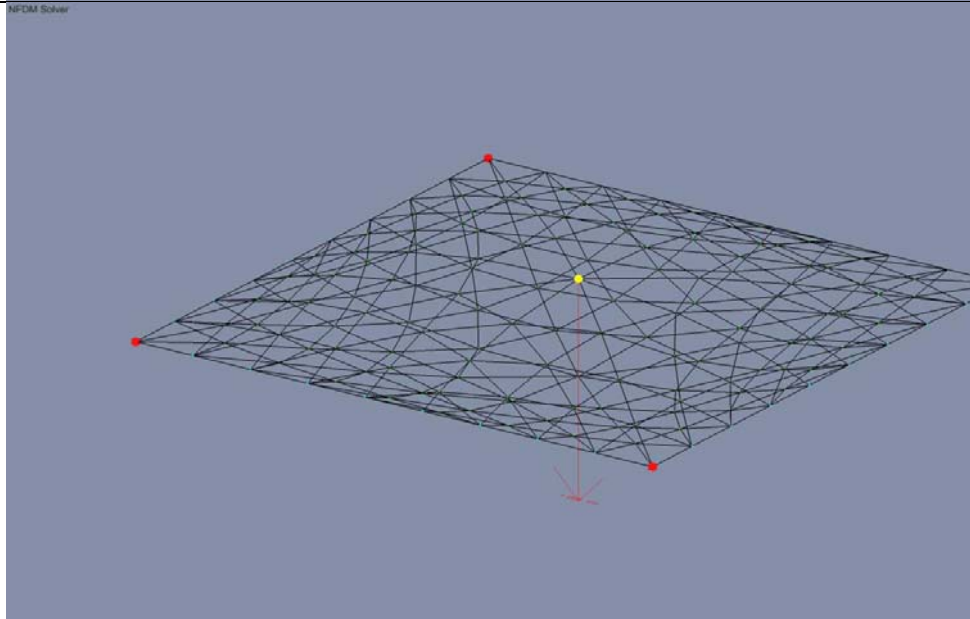


Πίεση 300Pa

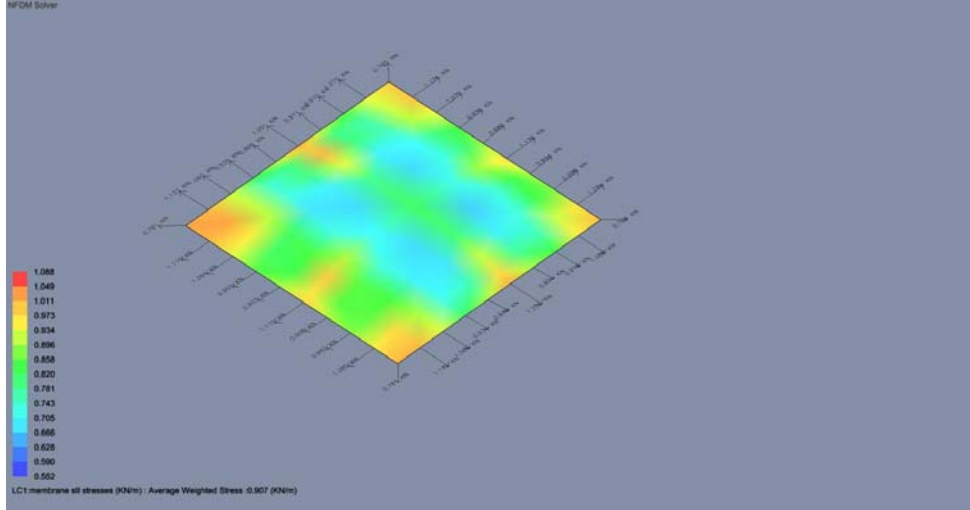
Πίεση 220Pa  
Συνήθης πίεση  
λειτουργίας



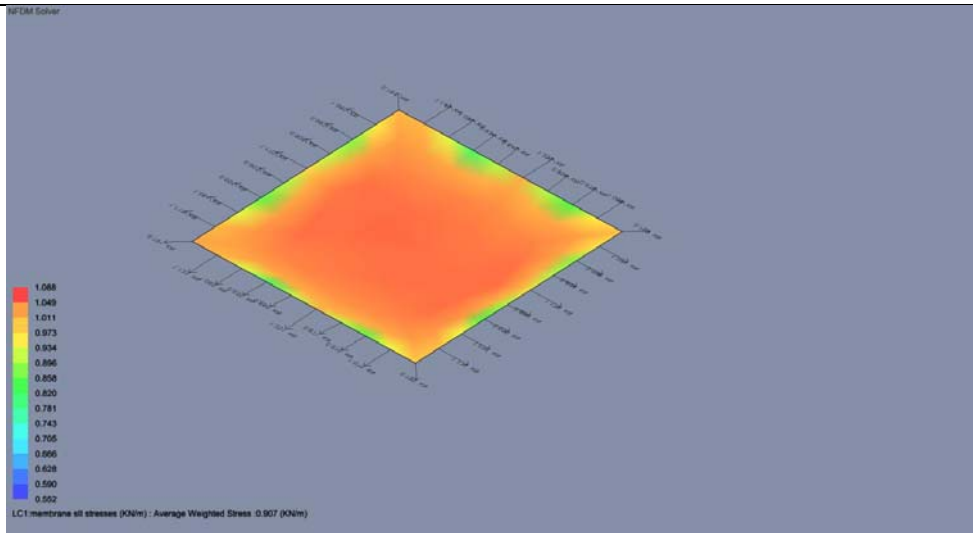
Φόρτιση 1kN



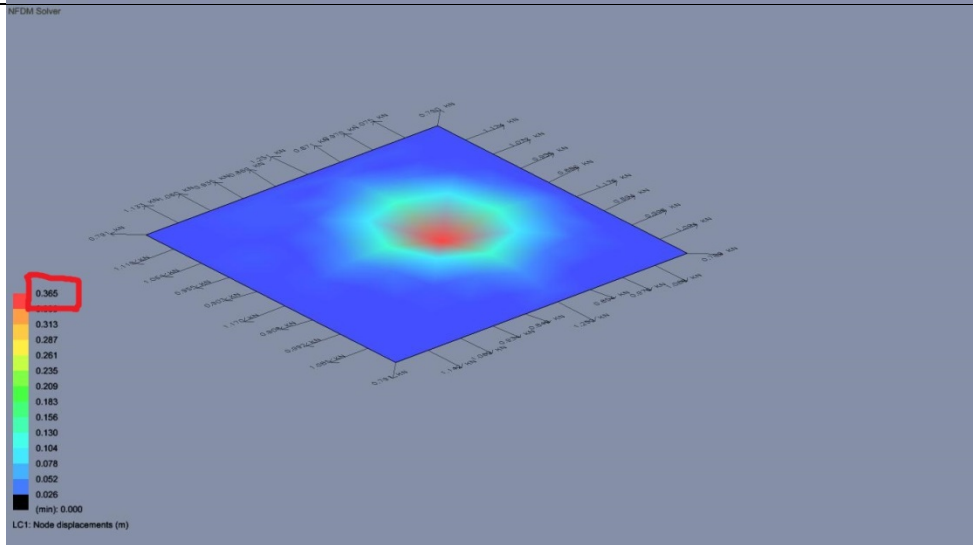
Τάσεις άνω  
επιφάνειας



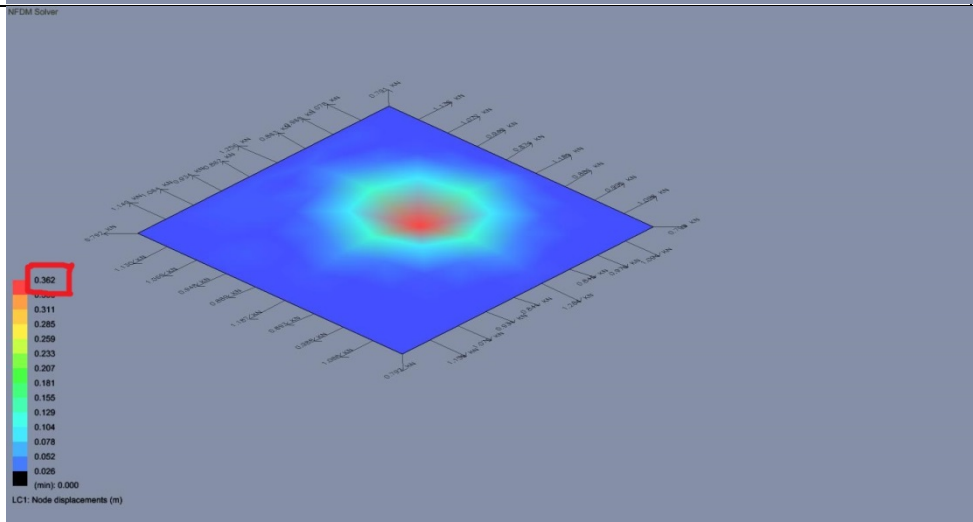
Τάσεις κάτω επιφάνειας

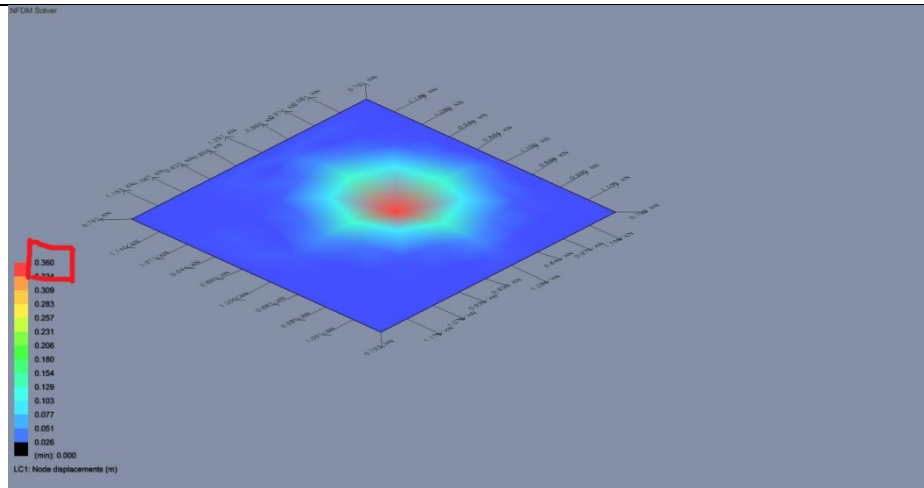


Παραμόρφωση ΤΥΡΕ I Υλικού

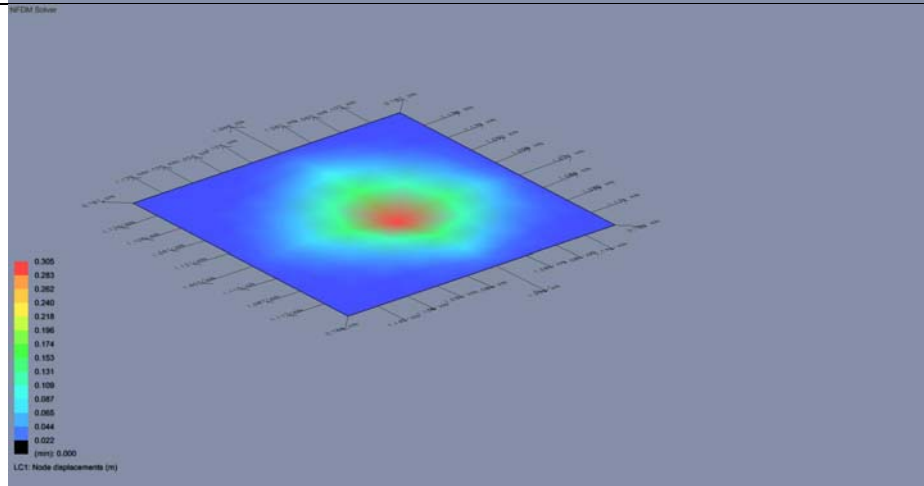


Παραμόρφωση ΤΥΡΕ III Υλικού

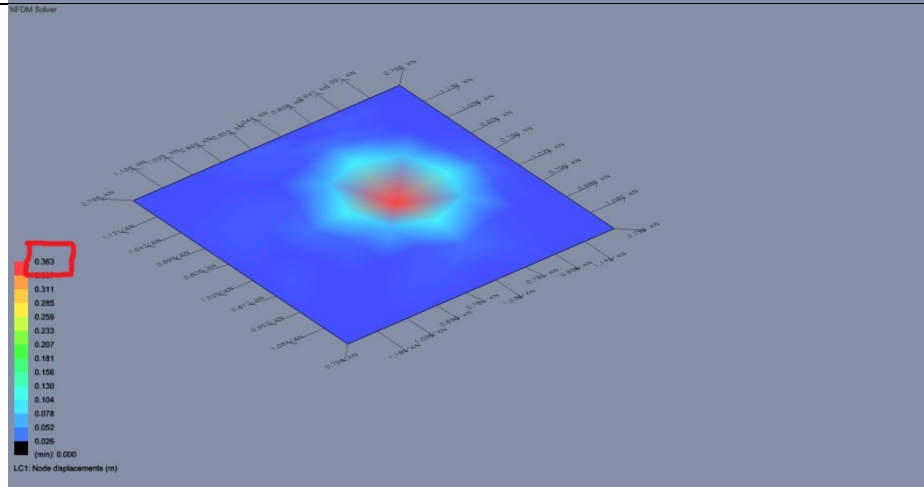




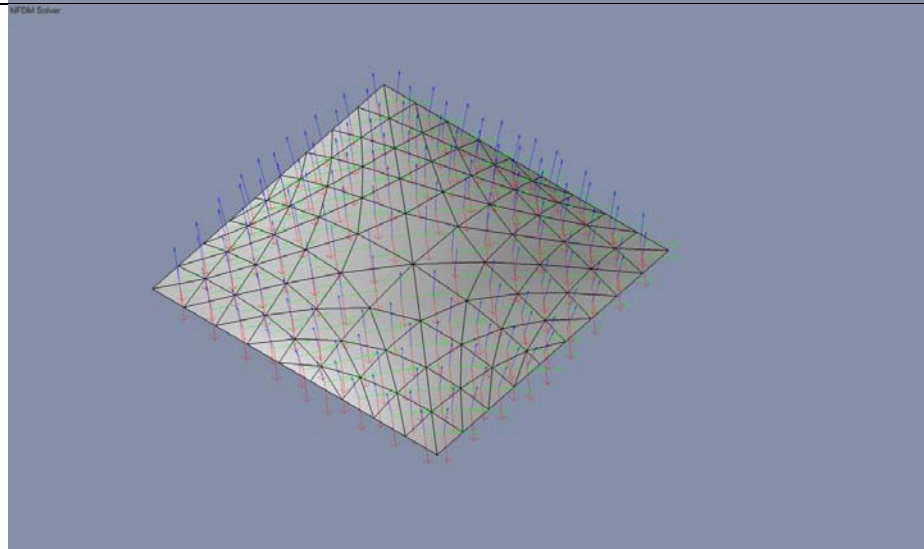
Παραμόρφωση  
TYPE V  
Υλικού



Παραμόρφωση  
TYPE V  
Υλικού  
Πίεση 100Pa



Παραμόρφωση  
TYPE V  
Υλικού  
Πίεση 300Pa



Στημόνι-Υφάδι με  
κατεύθυνση την  
διαγώνιο

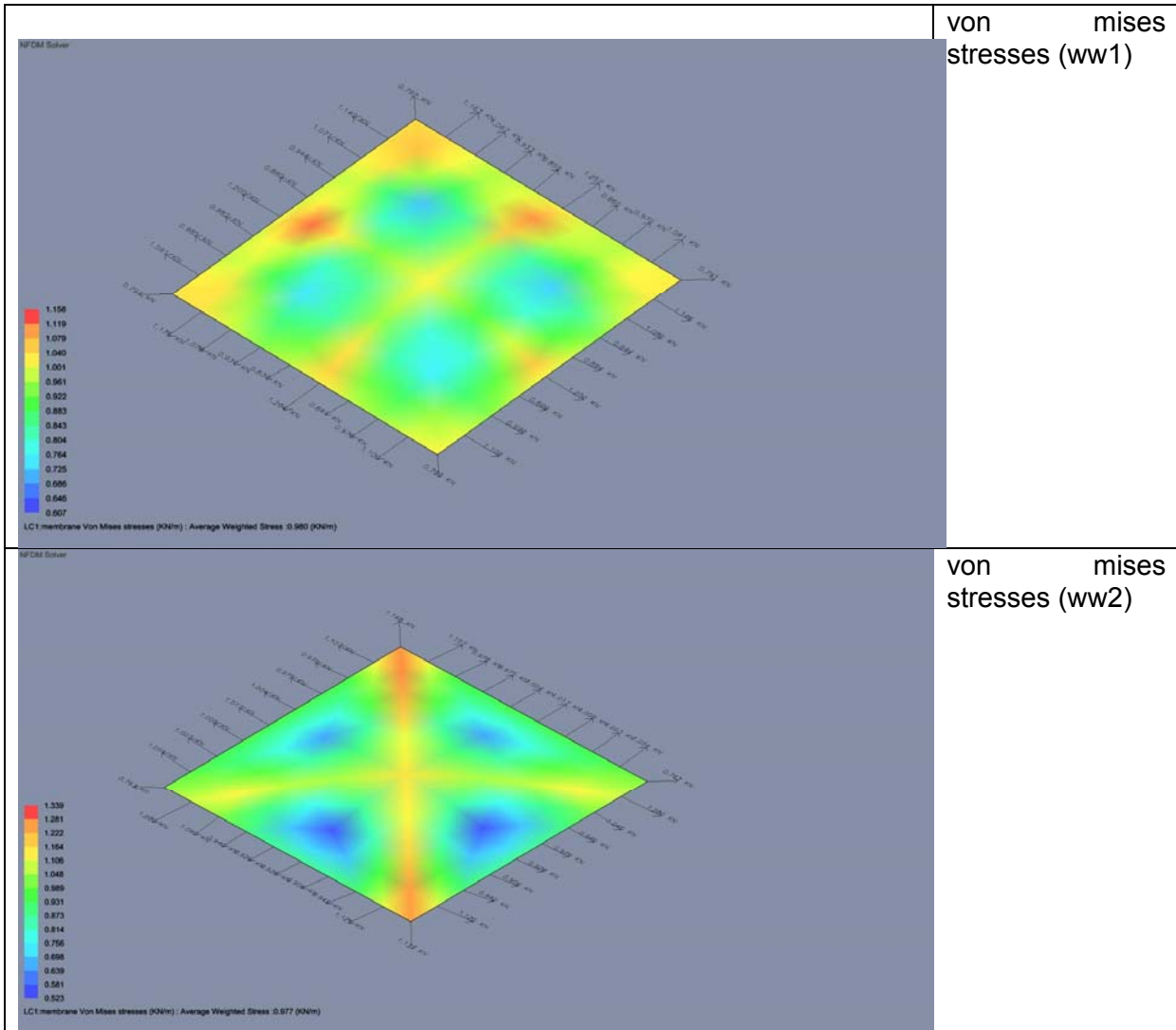


Fig.4.37 NFDI εξέταση inflated cushion χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ixCube

#### 4.3.2.3 Διαμόρφωση των άκαμπτων ορίων για inflated cushion

Η κυρίως κατασκευαστική δομή υποστηρίζει συνήθως μια δευτερεύουσα δομή που αποτελείται από ένα σύστημα υδρορροών και αρμοκάλυπτρα. Αυτή η δευτερεύουσα δομή παρέχει και ένα σημείο προσάρτησης, από αλουμινίου διέλασης που σφίγγει το ETFE cushion μαξιλάρι ETFE στο πλαίσιο στήριξης (Σχήμα 4.38)

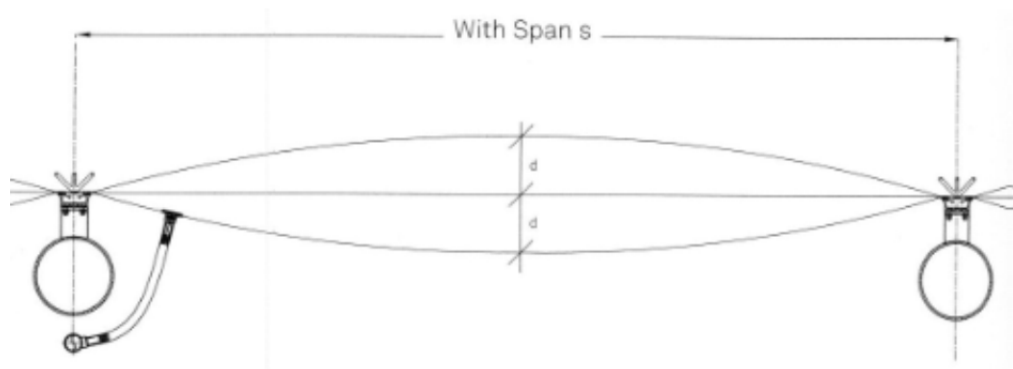
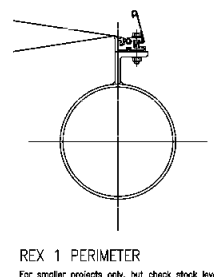
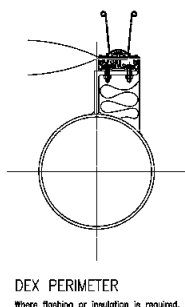
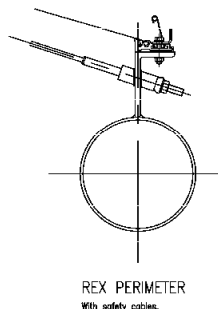
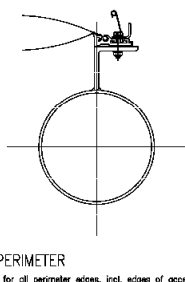
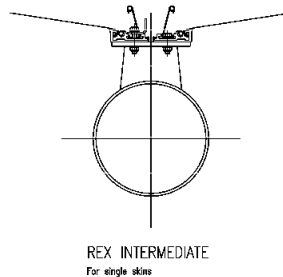
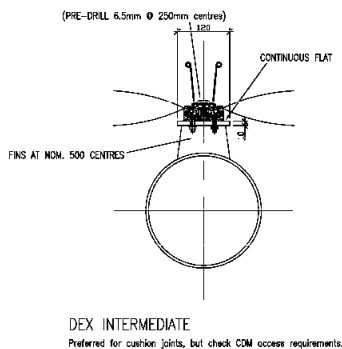
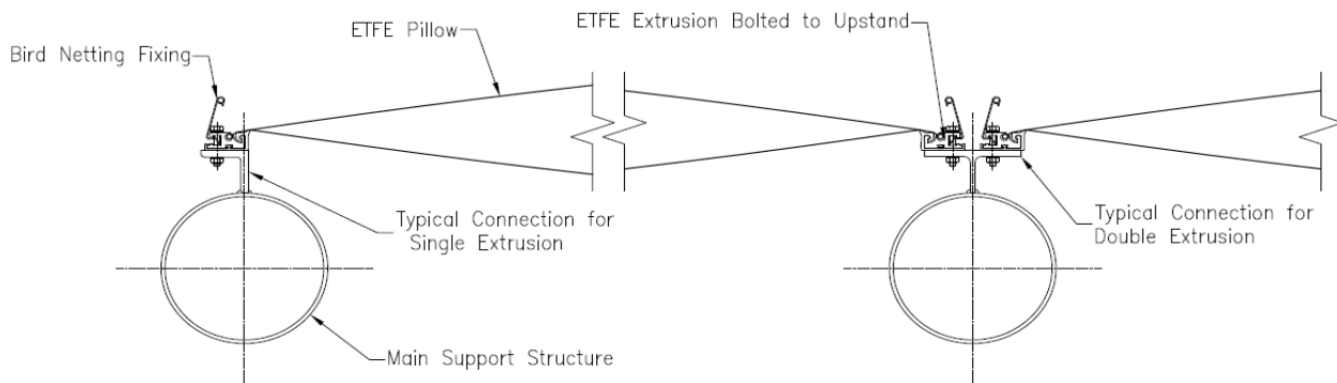


Fig.4.38 Connections of ETFE Cushions to Support Frame

Τα μέγιστα ανοίγματα πάνελ από γυαλί είναι της τάξης των 2 m επί 4 m, ενώ το ETFE μπορεί να εκτείνεται σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις. Εξαγωνικά **Cushions** διαμέτρου 11 μ και ρόμβοι διαγωνίου 17 m έχουν κατασκευαστεί για κτίρια στην Ευρώπη. Όσο μεγαλύτερα είναι τα **ETFE Cushions** τόσο λιγότερα τρέχοντα μέτρα απροκάλυπτων χρειάζονται. Αυτό βελτιώνει την τιμή της μόνωσης ολόκληρης της οροφής καθώς τα **ETFE Cushions** είναι επικίνδυνα σημεία εισόδου νερού και διαρροής εξωτερικού αέρα. Αυτή η μείωση της δομής υποστήριξης και αρμοκαλύπτρων, επίσης, συμβάλλει στην εντυπωσιακή εξοικονόμηση βάρους που έχει ήδη επιτευχθεί από την ίδια την μεμβράνη. Οι κατασκευές με **ETFE Cushions** με μεγάλα ανοίγματα προσφέρει ένα κλιματικά καλύτερο περιβάλλον από ότι η συνήθεις γυάλινες οροφές. Στο Σχήμα 4.39 βλέπουμε διάφορες μορφές συνδέσεων μεταξύ κύριας, δευτερεύουσας δομής και μεμβράνης



Σχ.4.39 ETFE inflated cushions συνδέσεις

Μία εναλλακτική μορφή κατασκευής για να υποστηρίξουμε ETFE Cushions, είναι η χρήση ενός δικτύου καλωδίων και ειδικά προφίλ εξέλασης αλουμινίου, όπου αυτές οι σφιχτές και μονωμένες συνδέσεις επιτρέπουν τα ETFE Cushions να προσαρμόζονται σε μια ποικιλία μεγεθών καλωδίου και παρέχει σημεία προσάρτησης για ανοξείδωτο σύρμα με πυρήνα καθαρού χάλυβα που δρα ως στοιχείο δυσκαμψίας στην κάτω πλευρά του Cushion για να μπορεί να αντισταθεί σε βαριά φορτία χιονιού. (Εικ. 4.40)

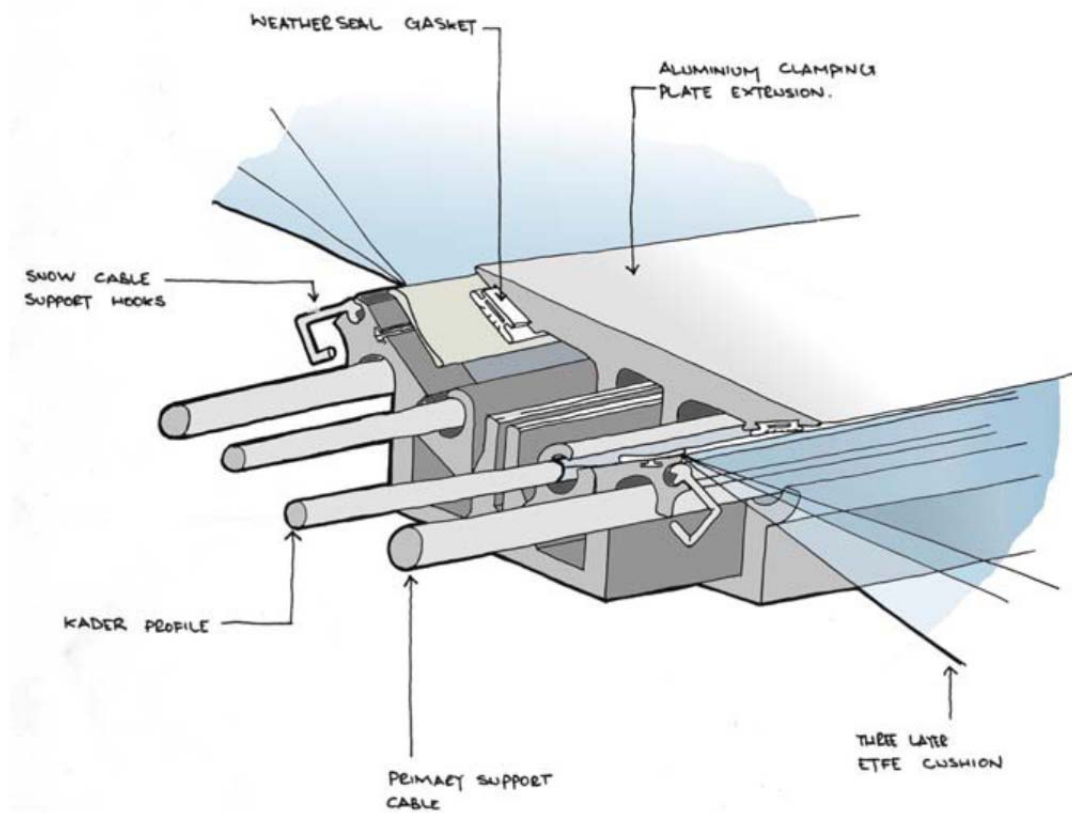


Fig.4.40 Μέθοδος προσάρτησης ETFE Cushions για Καλώδια

#### 4.3.2.4 Inflation units

Τα συστήματα ETFE Cushions διογκώνονται συνεχώς με μονάδες διαχείρισης αέρα από τα οποία αεραγωγοί τρέχουν σε κάθε Cushion.



Σχ.4.41 Εύκαμπτος σωλήνας αέρα σε σύνδεση με ένα ETFE Cushion

Καθώς τα cushions πρέπει μόνο να διατηρήσουν την πίεση και όχι να δημιουργούν ροή αέρα, η κατανάλωση ενέργειας που χρησιμοποιείται από τις μονάδες αυτές είναι ελάχιστη. Μια ολόκληρη στέγη γενικά τροφοδοτείται από μια ενιαία μονάδα διαχείρισης αέρα η οποία αποτελείται από 2 ανεμιστήρες που κινούνται με ηλεκτροκινητήρες. Για μεγάλες εγκαταστάσεις μερικές φορές υπάρχει ανάγκη για επιπλέον μονάδες διαχείρισης αέρα να εγκατασταθούν.

Οι ανεμιστήρες λειτουργούν εναλλάξ για να διατηρήσουν την πίεση εντός των cushions, με ένα μόνο ανεμιστήρα να λειτουργεί σε κάθε δεδομένη στιγμή. Σε περίπτωση βλάβης του cushion, δυσμενών καιρικών συνθηκών ή πτώση της πίεσης στο cushion, οι δύο ανεμιστήρες θα λειτουργήσουν ταυτόχρονα για να διατηρήσουν μια σταθερή πίεση.

Οι μονάδες αεροσυμπιεστών είναι επίσης εξοπλισμένες με αφυγραντήρες για να στεγνώνουν τον αέρα που τροφοδοτεί τα cushions. Μια τυπική μονάδα έχει διαστάσεις 1.2m x 1.2m x 0.9m και βρίσκεται κοντά στο σύστημα ETFE cushion εσωτερικά ή εξωτερικά.

Το σύστημα απαιτεί μια ασφαλή και αξιόπιστη παροχή ρεύματος που αποτελείται από δύο 240V/13A σύνδεση. Καθώς η οροφή ETFE είναι ένα ζωντανό σύστημα τα cushions είναι μόνιμα συνδεδεμένο με τη μονάδα του συμπιεσμένου αέρα για να εξασφαλιστεί η διατήρηση της πίεσης.



Fig.4.41 Τυπική μονάδα συμπίεσης αέρα

Στη σπάνια περίπτωση διακοπής ρεύματος, το σύστημα ETFE cushion θα διατηρήσει την πίεση για 3 με 6 ώρες πριν να ξεφουσκώσει (ανάλογα με τις καιρικές συνθήκες). Αυτό οφείλεται στις βαλβίδες αντεπιστροφής που είναι ενσωματωμένες στο σύστημα. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα, υπάρχει μια πιθανότητα ότι, καθώς η πίεση πέφτει, η οροφή θα καταστραφεί. Ως εκ τούτου προτείνουμε να υπάρχει είτε μια εφεδρική γεννήτρια ή, εναλλακτικά, ένα σύστημα καλωδίων δικτύματος εγκατεστημένο για να υποστηρίξει τα cushions όταν προκύψει αυτή η κατάσταση.

#### 4.3.2.6 Control system

Ως βασικό εξοπλισμό τα συστήματα οροφών με ETFE cushion εφοδιάζονται με ένα ενεργό σύστημα παρακολούθησης state-of-the-art. Αυτό παρέχει συνεχώς πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την πίεση εντός των μαξιλαριών, τις τοπικές καιρικές συνθήκες, τα επίπεδα θερμοκρασίας και υγρασίας και τυχόν βλάβες ή μεταβολές εντός της λειτουργίας του συστήματος σε μια τοπική οθόνη LCD – βλέπε

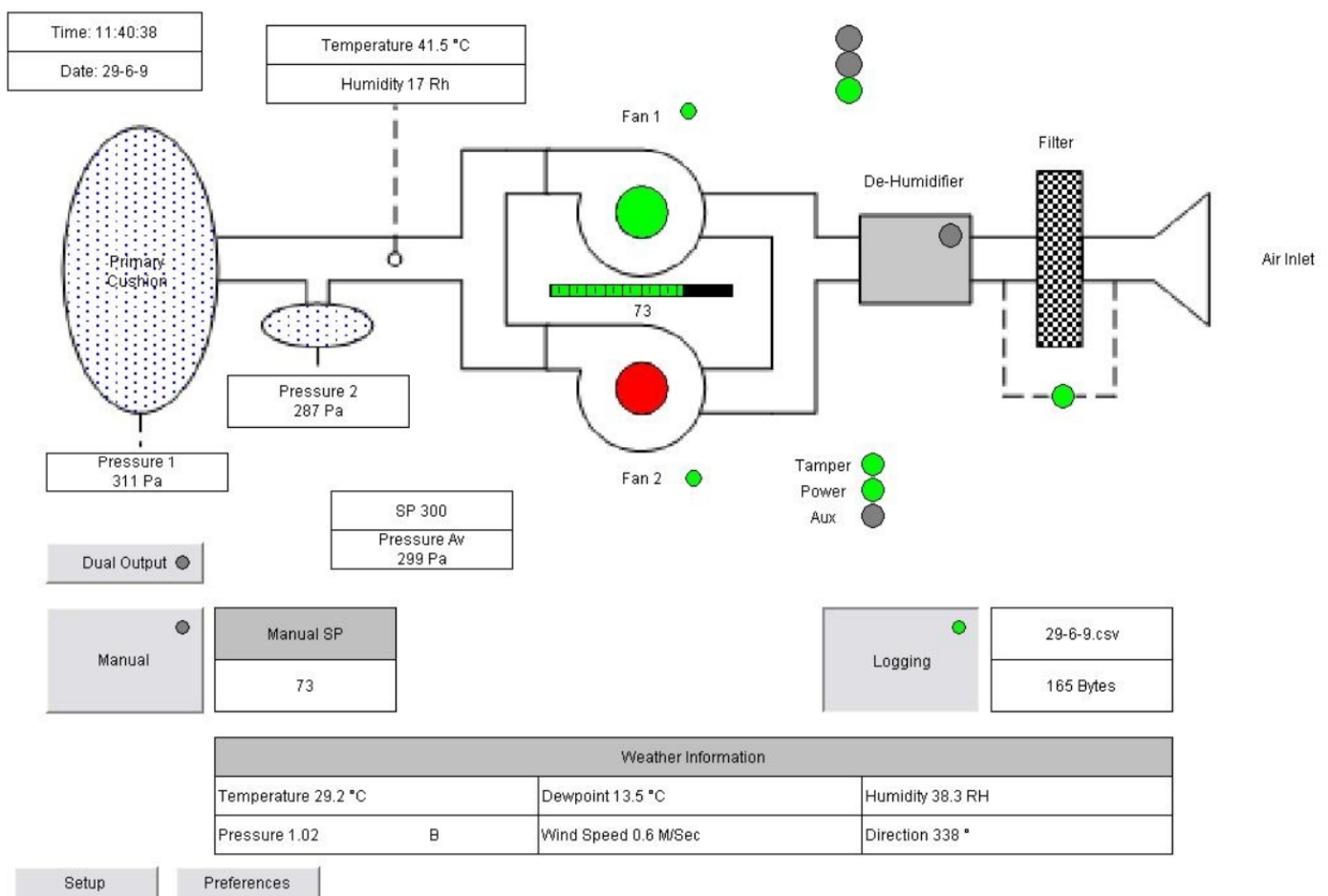


Σχ.4.42. Είναι δυνατόν ένας εξουσιοδοτημένος χρήστης να αποκτήσει πρόσβαση στο σύστημα ελέγχου εξ αποστάσεως και να βοηθά με ενημερώσεις off-site ή να διαγνώσει την βλάβη και να μπορεί να κάνει μικρές προσαρμογές πίεσης και απόδοσης.

Η συνεχής παρακολούθηση επιτρέπει στο σύστημα να προσαρμόζεται αυτόματα για την αποφυγή ενδεχόμενων προβλημάτων. Σε περίπτωση προβλήματος, το σύστημα ελέγχου θα προσπαθήσει αυτόματα να αντισταθμίσει τη βλάβη. Για παράδειγμα, όταν μια πτώση στην πίεση λαμβάνει χώρα ο ρυθμός της ροής του αέρα στα cushion θα αυξηθεί αυτόματα. Επιπλέον, το σφάλμα καταγράφεται και εμφανίζεται στην κύρια μονάδα ελέγχου και των σχετικών μονάδων διαχείρισης αέρα (χρησιμοποιώντας το σύστημα φωτεινού σηματοδότη που περιγράφεται παρακάτω) και ένα αυτόματο ηλεκτρονικό μήνυμα συναγερμού αποστέλλεται σε ένα προκαθορισμένο πρόσωπο. Ο συναγερμός θα πρέπει να σημάνει το συντομότερο μετά την διαπίστωση της βλάβης.

Για να επιτρέπεται η απλή διάγνωση, το προσωπικό συντήρησης μπορεί να επιθεωρήσει τα χρωματιστά "φανάκια" δείκτες στο μπροστινό μέρος της μονάδας διαχείρισης αέρα. Τα φανάκια εμφανίζουν την κατάσταση του εξοπλισμού ως εξής:

- Πράσινο :όλα δουλεύουν σωστά
- Πράσινο και κίτρινο: μικρό πρόβλημα, χρειάζεται προσοχή (για παράδειγμα, ένα μερικώς φραγμένο φίλτρο αέρα)
- Κόκκινο: άμεση προσοχή

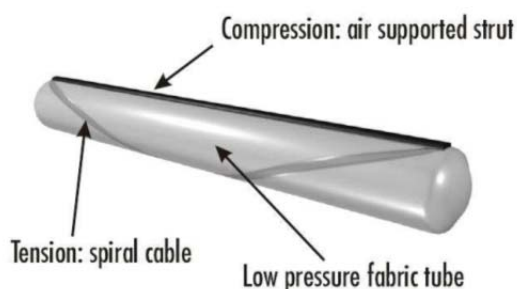


Σχ.4.42 - Παράδειγμα state-of-the-art σύστημα παρακολούθησης και ελέγχου.

### 4.3.3 Tensairity

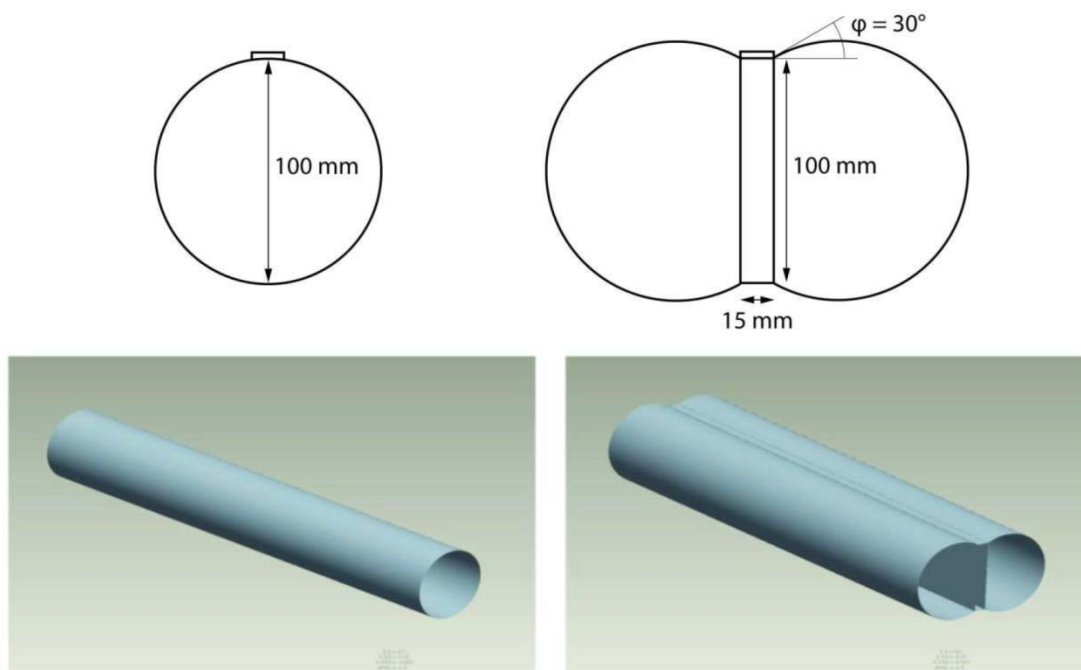
#### 4.3.3.1 Εισαγωγή

Tensairity είναι μια νέα, ελαφριά κατασκευαστική ιδέα, η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια πνευματική κατασκευή. Το βασικό στοιχείο είναι μια δοκός. Με την προσθήκη ενός στοιχείου συμπίεσης και καλώδια σε ένα φουσκωμένο σωλήνα από μεμβράνη, αποκτάται ένα δομικό σύστημα στο οποίο ο ορθοστάτης και τα καλώδια παραλαμβάνουν το εφαρμοζόμενο φορτίο και ο σωλήνας αέρος μεταβιβάζει τις δυνάμεις μεταξύ των δύο και σταθεροποιεί το στοιχείο συμπίεσης έναντι λυγισμού. Με τον τρόπο αυτό η ικανότητα μεταφοράς φορτίου είναι αυξημένη σε σύγκριση με ένα παραδοσιακό αεροσωλήνα, ενώ η πίεση του αέρα στο εσωτερικό του σωλήνα μπορεί να μειωθεί. Με αυτά τα χαρακτηριστικά Tensairity είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον για προσωρινές και αρχιτεκτονικές εφαρμογές, όπως στέγες, προσωρινές γέφυρες και σκηνές. Το Tensairity δεν περιορίζεται μόνο σε δοκούς: η ιδέα μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε κολόνες και αψίδες.



Σχ.4.43 Tensairity

Η έρευνα πάνω στα Tensairity επικεντρώνεται επί του παρόντος σχετικά με τις διαρθρωτικές βελτιώσεις που μπορούν να συμβάλουν στην εφαρμογή της ιδέας. Μία από αυτές τις πιθανές βελτιώσεις είναι η εφαρμογή ενός κορμού μεμβράνης: ένα ενισχυτικό νεύρωση μεμβράνης στο εσωτερικό του σωλήνα αέρα, που προεντίνεται από την πίεση του αέρα. Αυτή η νεύρωση αποδίδει μια σειρά από θετικά αποτελέσματα, ιδιαίτερα η βελτιωμένη σταθεροποίηση του στοιχείου συμπίεσης είναι πολλά υποσχόμενη: η θεωρία προβλέπει συντελεστή 10 για αύξηση του φορτίου λυγισμού.



Σχ 4.44. 3D όψη και εγκάρσια τομή του σωλήνα χωρίς νευρώσεις και ο σωλήνας με νευρώσεις

Το πάρκο γκαράζ στο Montreux, που χτίστηκε το 2004, ήταν η πρώτη σημαντική αρχιτεκτονική εφαρμογή των Tensairity. Η μόνιμη κατασκευή οροφής αποτελείται από δοκούς σε σχήμα ατράκτου Tensairity και έχει άνοιγμα περίπου 27 m, με προεντεταμένα πάνελ μεμβράνης στο ενδιάμεσο. Τα καλώδια στην κάτω πλευρά έχουν αντικατασταθεί από άλλα δύσκαμπτα σε κάμψη στοιχεία. Η χρήση των φώτων στο εσωτερικό των φουσκωμένων σωλήνων δίνει στην δομή μια φουτουριστική εμφάνιση το βράδυ.



Fig.4.45 Tensairity πάρκο αυτοκινήτων στο Montreux

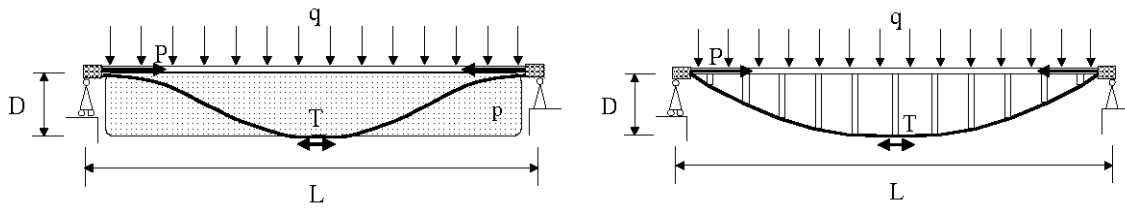


Fig.4.46 Φωτισμένα Tensairity

#### 4.3.3.2 Βασικές αρχές Tensairity

Στην πιο βασική του μορφή, μια δοκός Tensairity αποτελείται από μια απλή αεροδοκό (μια κυλινδρική μεμβράνη γεμάτη με πεπιεσμένο αέρα), το στοιχείο συμπίεσης στενά συνδεδεμένη με την αεροδοκό και δύο καλώδια που τρέχουν σε ελικοειδή μορφή γύρω από την αεροδοκό (Εικ. 4.43). Τα καλώδια συνδέονται στα δύο άκρα με το στοιχείο συμπίεσης. Για να κατανοήσουμε την διαρθρωτική αρχή των Tensairity, η σύγκριση με μια δικτυωτή δοκό είναι διαφωτιστική (Εικ. 4.47). Το δικτύωμα αποτελείται από ένα οριζόντιο στοιχείο συμπίεσης με μήκος  $L$ , κάθετες πληρώσεις με μήκος μέχρι το ύψος  $D$  και ένα καλώδιο το οποίο συνδέεται και στα δύο άκρα με το οριζόντιο στοιχείο συμπίεσης. Η

διαμόρφωση των δύο δομών είναι παρόμοια. Ωστόσο, αντί των κατακόρυφων υποστηριγμάτων των πληρώσεων μία αεροδοκός έχει τοποθετηθεί μεταξύ των καλωδίων και του στοιχείου συμπίεσης στη δομή Tensairity με σημαντικές συνέπειες.



Σχ. 4.47 Tensairity δοκό (αριστερά) σε σύγκριση με μια δοκό δικτύωματος (δεξιά). Βασικά, οι κάθετες αντηρίδες του δικτύωματος αντικαθίστανται από μια αεροδοκό στην δομή Tensairity με σημαντικές συνέπειες.

Υπό καταναμημένο φορτίο  $q$ , η τάση στο καλώδιο αυξάνει στις δύο δομές ώστε να αντισταθμίσει την ροπή κάμψης. Για λεπτές δομές ( $g = L / D \gg 1$ ), η συνολική ένταση στο καλώδιο  $T$  έχει περίπου την ίδια τιμή για το δικτύωμα και της δοκού Tensairity.

$T = \frac{1}{8} \cdot q \cdot L \cdot \gamma.$	4.35
---	------

Όπου  $\gamma$  είναι η τάξη του λυγισμού. Το φορτίο λυγισμού είναι η χαμηλότερη δυνατή μη τετριμμένη τιμή της  $P$ ,  $\gamma = 1$ .

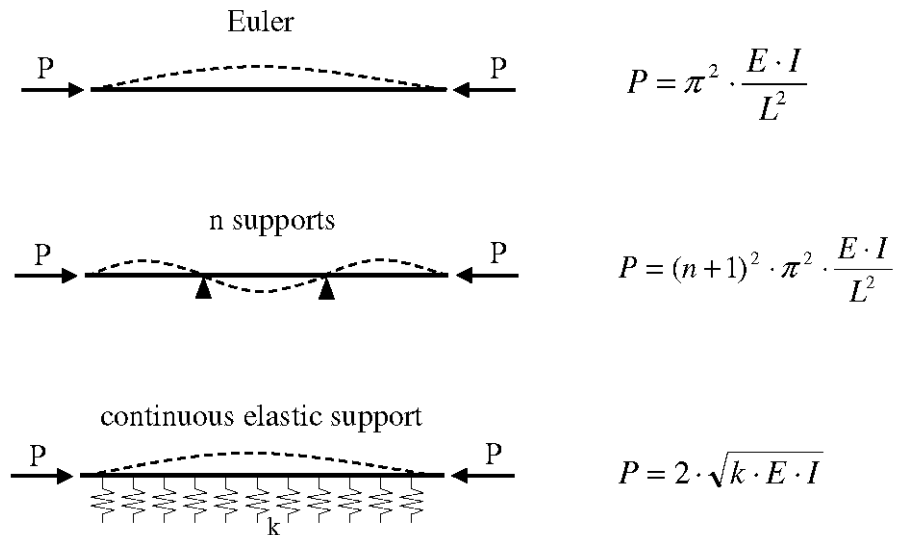
Λόγω της σύνδεσης των καλωδίων με το στοιχείο συμπίεσης, η δύναμη του καλωδίου μεταφέρεται στο στοιχείο συμπίεσης, ενεργώντας εκεί ως θλιπτική δύναμη  $P$ . Το στοιχείο συμπίεσης καθίσταται επιρρεπές σε λυγισμό. Για το δικτύωμα, το μήκος λυγισμού του οριζόντιου στοιχείου συμπίεσης είναι  $L/(n + 1)$ , για  $n$  αριθμό κάθετων πληρώσεων. Το οριζόντιο φορτίο λυγισμού στο μεταλλικό σκελετό είναι, επομένως,

$P_{buckling} = (n + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L^2},$	4.36
---	------

Με  $E$  το μέτρο ελαστικότητας και  $I$  η ροπή αδρανείας του στοιχείου συμπίεσης.

Το φορτίο λυγισμού μειώνεται με το αντίστροφο τετράγωνο του ανοίγματος και επομένως εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από αυτό. Σε γενικές γραμμές, το δύναμη λυγισμού είναι πολύ μικρότερη από τη δύναμη διαρροής που σημαίνει μια αναποτελεσματική χρήση υλικού και επιπλέον βάρος για το στοιχείο συμπίεσης. Η κατάσταση είναι ανάλογη για τις κάθετες πληρώσεις, οι οποίες είναι επίσης επιρρεπείς σε λυγισμό και συνεπώς δεν χρησιμοποιούνται με τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο. Με την αύξηση του αριθμού των κάθετων ορθοστατών, το μήκος λυγισμού του οριζόντιου στοιχείου συμπίεσης μειώνεται. Ωστόσο, η προκύπτουσα μείωση στο βάρος του οριζόντιου στοιχείου συμπίεσης πρέπει να είναι προσεκτικά ισορροπημένη με την αύξηση του βάρους που διαμορφώνεται από τις προστιθέμενες κατακόρυφες πληρώσεις. Ακόμη και στην βέλτιστη περίπτωση, η διάσταση όλων των στοιχείων υπό συμπίεση καθορίζεται από περιορισμούς λυγισμού και έτσι το δικτύωμα δεν είναι η πλέον αποδοτική δομή.

Η κατάσταση του στοιχείου συμπίεσης είναι διαφορετική στην περίπτωση του Tensairity. Το στοιχείο συμπίεσης είναι σφιχτά συνδεδεμένο με την μεμβράνη της αεροδοκού. Αντί των  $n$  στηριγμάτων του δικτύωματος, το στοιχείο συμπίεσης Tensairity συνεχώς υποστηρίζεται από την μεμβράνη. Στην πραγματικότητα, η μεμβράνη ενεργεί ως μια συνεχής ελαστική υποστήριξη για το στοιχείο συμπίεσης. Η ακαμψία αυτής της στήριξης καθορίζεται από την τάση της μεμβράνης, η οποία είναι ανάλογη με την υπερπίεση στο εσωτερικό αεροδοκού. Οι διαφορετικές καταστάσεις για το στοιχείο συμπίεσης στο δικτύωμα και στο Tensairity φαίνεται στο Σχήμα 4.47.



Σχ. 4.48 φορτίο λυγισμού δοκών κάτω από διαφορετικές συνθήκες. Η κατάσταση με n πληρώσεις που βρίσκονται στο δικτύωμα. Η συνεχής ελαστική στήριξη αντικατοπτρίζει την κατάσταση του στοιχείου συμπίεσης σε Tensairity. Το φορτίο λυγισμού είναι ανεξάρτητο του μήκους για τη συνεχή ελαστική στήριξη.

Από τη θεωρία των δοκών επί ενός ελαστικού θεμελίου, το φορτίο λυγισμού δίνεται από

$P_{buckling} = 2 \cdot \sqrt{k \cdot E \cdot I}$	4.37
---	------

Με τη σταθερά ελατηρίου  $k$  του ελαστικού θεμελίου (σε  $N / m^2$ ), το μέτρο ελαστικότητας  $E$  και τη ροπή αδράνειας  $I$  του στοιχείου συμπίεσης. Το φορτίο λυγισμού είναι ανεξάρτητο από το μήκος του στοιχείου συμπίεσης σε αυτή την περίπτωση. Έτσι, σε Tensairity το φορτίο λυγισμού του στοιχείου συμπίεσης που περιορίζει τη μέγιστη φόρτιση της κατασκευής είναι ανεξάρτητο του ανοίγματος της δοκού.

Σε δομές Tensairity η σταθερά ελατηρίου εξαρτάται από την υπερπίεση  $p$  της αεροδοκού και δίνεται από

$k = \pi \cdot p,$	4.38
--------------------	------

και το φορτίο λυγισμού του στοιχείου συμπίεσης Tensairity είναι επομένως

$P_{buckling} = 2 \cdot \sqrt{\pi \cdot p \cdot E \cdot I}.$	4.39
--	------

Μια σωστή επιλογή της ροπής αδράνειας για ένα δεδομένο υλικό και υπερπίεσης καταλήγουμε σε μία δύναμη λυγισμού που μπορεί να είναι υψηλότερη από την δύναμη διαρροής και η τάση διαρροής καθίσταται ο περιοριστικός παράγοντας του στοιχείου συμπίεσης. Αυτό είναι αυτό που λέμε λυγισμός ελεύθερος συμπίεσης. Έτσι, η θλιπτική δύναμη είναι

$P = \sigma \cdot A,$	4.40
-----------------------	------

με  $\sigma$  την τάση διαρροής και  $A$  το εμβαδόν διατομής του στοιχείου συμπίεσης. Το μέγιστο καταναμεμένο φορτίο  $q$  μιας δέσμης Tensairity επιτυγχάνεται με τον καθορισμό της δύναμης του καλωδίου  $T$  ίση με τη δύναμη συμπίεσης  $P$  που δίνεται από (Εξ. 4.35)

$$q = \frac{8 \cdot \sigma \cdot A}{\gamma \cdot L} .$$

4.41

Δεδομένου ότι το καλώδιο και το στοιχείο συμπίεσης λειτουργούν με την ίδια αποδοτικότητα ,  $\sigma$  και  $A$  είναι η τάση διαρροής και το εμβαδό διατομής είτε του στοιχείου συμπίεσης είτε του καλωδίου. Χρησιμοποιώντας το ίδιο υλικό για το καλώδιο και το στοιχείο συμπίεσης (π.χ. χάλυβας), το συνολικό εμβαδόν διατομής των καλωδίων και το στοιχείο συμπίεσης μπορεί να είναι ίδια. Η ένταση και η συμπίεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί με την ίδια αποδοτικότητα. Μαζί με την εφελκυσμένη μεμβράνη, όλα τα εξαρτήματα μιας δοκού Tensairity μπορούν να ενταθούν στο όριο διαρροής που οδηγεί σε ενδιαφέρουσες ιδιότητες για την τεχνολογία των ελαφρών κατασκευών. Ως εκ τούτου, Tensairity δοκοί μπορεί να είναι πολλές φορές ελαφρύτεροι από τις συμβατικές δοκούς με τα ίδια ανοίγματα και ταυτόσημα μέγιστα φορτία.

Η υπερπίεση του αέρα είναι μία πολύ σημαντική ποσότητα για τα Tensairity. Για να εκτιμηθεί η βέλτιστη πίεση, η αλληλεπίδραση μεταξύ του καλωδίου και της μεμβράνης θα πρέπει να μελετηθεί. Υπό φορτίο, τα καλώδια πιέζουν την μεμβράνη που οδηγεί σε μια κάθετη δύναμη στο καλώδιο ανάλογη της κάθετης δύναμης στο στοιχείο συμπίεσης από την ελαστική στήριξη της μεμβράνης. Η ένταση στο καλώδιο είναι το γινόμενο αυτής της κάθετης δύναμης επί την καμπυλότητα του ελικοειδούς καλωδίου. Δεδομένου ότι η κάθετη δύναμη εξαρτάται από την πίεση, μια σχέση μεταξύ της τάσης του καλωδίου και της πίεσης αποδεικνύεται και με την Εξ. 4.35, το εξωτερικό φορτίο με την πίεση συνδέονται. Λαμβάνοντας υπόψη ένα φορτίο ανά επιφάνεια  $q_a$ , όπως π.χ. σε στέγες, η υπερπίεση  $p$  δίνεται από

$$p = \frac{2}{\pi} \cdot q_a \cdot \gamma^2 .$$

4.43

Με το τετράγωνο του λυγερότητας η πίεση της απλής αεροδοκού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή της. Για λεπτές κατασκευές ( $\gamma \approx 30$ ) η πίεση στην απλή αεροδοκό χρειάζεται να είναι περισσότερο από 100 φορές μεγαλύτερη από την πίεση σε μια δομή Tensairity ώστε να αντέχει το ίδιο φορτίο. Έτσι, η φέρουσα ικανότητα των απλών αεροδοκών είναι πολύ περιορισμένη και είτε μία υψηλή πίεση ή μια άχαρη μορφή είναι απαραίτητη για λογικές εφαρμογές. Αυτή η διαφορά αντανακλά το γεγονός ότι ο ρόλος της υπερπίεσης είναι πολύ διαφορετική σε Tensairity και στην απλή δέσμη αέρα. Σε Tensairity, το φορτίο φέρεται από τα καλώδια και το στοιχείο συμπίεσης με τον αέρα χρησιμοποιείται για την προένταση των καλωδίων και για τη σταθεροποίηση του στοιχείου συμπίεσης. Στην απλή αεροδοκό , ο πεπιεσμένος αέρας μαζί με την εφελκυσμένη μεμβράνη είναι η φέρουσα δομή.

#### 4.3.3.3 Μορφές και δομή

Η πίεση των κατασκευών Tensairity κυμαίνεται από 50 mbar σε μερικά εκατοντάδες mbar, ανάλογα με την εφαρμογή. Δεδομένης αυτού του εύρους πίεσης, η ιδέα των Tensairity ανοίγει ένα νέο ενδιαφέρον πεδίο για κατασκευές με υποστήριξη αέρα ανάμεσα σε σπίτια με αέρα με υπερπίεση μερικά मिलιμπαρ και απλές δοκούς αέρα με υπερπίεση μερικά μπαρ.

Η δοκός Tensairity του σχήματος 4.43 έχει κυλινδρικό σχήμα. Άλλες μορφές που βασίζονται σε μια κυκλική διατομή είναι δυνατές, επίσης. Ερευνούνται διάφορα σχήματα δοκού μέσω υπολογισμών με πεπερασμένα στοιχεία.

Όπως αποδεικνύεται, μια μορφή πούρου γεωμετρία (Εικ. 4.48b) είναι καλύτερα προσαρμοσμένη στις κατασκευαστικές απαιτήσεις από την κυλινδρική μορφή (Σχ. 4.48a). Το υλικό για την μεμβράνη μπορεί να είναι λιγότερο και η δοκός να έχει μεγαλύτερη δυσκαμψία. Η γεωμετρία σχήματος ατράκτου (Εικ. 4.48cd), όπου το άκρο του σωλήνα συγκλίνει σε ένα σημείο, είναι η διαμόρφωση με την μεγαλύτερη δυσκαμψία. Στην περίπτωση αυτή, η γεωδαιτική σπείρα του καλωδίου εκφυλίζεται σε μια ευθεία γραμμή

και το καλώδιο μπορεί να αντικατασταθεί από μία ράβδο εφελκυσμού (tension rod). Δεδομένων αυτών των πλεονεκτημάτων, πολλές εφαρμογές Tensairity θα βασίζονται σε cigar- ή ατρακτοειδή σχημάτων σωλήνες.

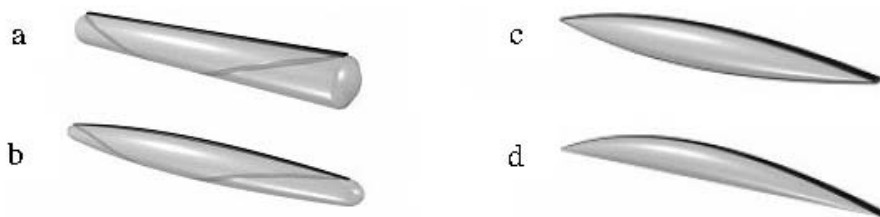


Fig4.49. διάφορες μορφές δοκών Tensairity: (α) κύλινδρος (β) σχήμα πούρου, (γ) συμμετρική άτρακτος και (δ) ασύμμετρη άτρακτος.

Δίπλα στα πλεονεκτήματα των ελαφρών κατασκευών, η γρήγορη και εύκολη ρύθμιση των κατασκευών Tensairity είναι ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα. Η συναρμολόγηση των δοκών Tensairity είναι πολύ εύκολη. Η μεμβράνη πρέπει να ξεδιπλωθεί, τα στοιχεία συμπίεσης να ενωθούν μεταξύ τους και να συνδεθούν με τη μεμβράνη με τη βοήθεια keders. Στο επόμενο στάδιο, τα καλώδια τοποθετούνται και συνδέονται με το στοιχείο συμπίεσης. Τέλος, ο αέρας αντλείται εντός της μεμβράνης και η δοκός Tensairity είναι πλήρης. Η δοκός μπορεί να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μην απαιτούνται βίδες ή καρφιά για τη συναρμολόγηση και να επιτρέπει ένα πολύ γρήγορο μοντάρισμα. Η αποσυναρμολογημένη δοκός Tensairity μπορεί να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί πολύ εύκολα. Η μεμβράνη και τα καλώδια μπορούν να τυλίγονται μαζί. Το μόνο άκαμπτο υλικό είναι το στοιχείο συμπίεσης. Εδώ έχουμε χωριστεί το στοιχείο συμπίεσης σε δύο μέρη 4 m το καθένα (Σχ. 7). Εάν είναι επιθυμητή η μεταφορά της συνολικής δοκού σε ένα μικρό κουτί, το στοιχείο συμπίεσης μπορεί να χωριστεί σε μικρότερα τμήματα. Ως εκ τούτου οι κατασκευές Tensairity είναι ιδανικές για να αναπτυχθούν εύκολα και γρήγορα προσωρινές κατασκευές όπως τέντες, καταφύγια και προσωρινές γέφυρες.



Fig 4.50 Dismantled Tensairity beam of the 8 m span bridge. The compression element on the right is the only bending stiff element, which can be divided in short pieces if compact transport in a box is needed.

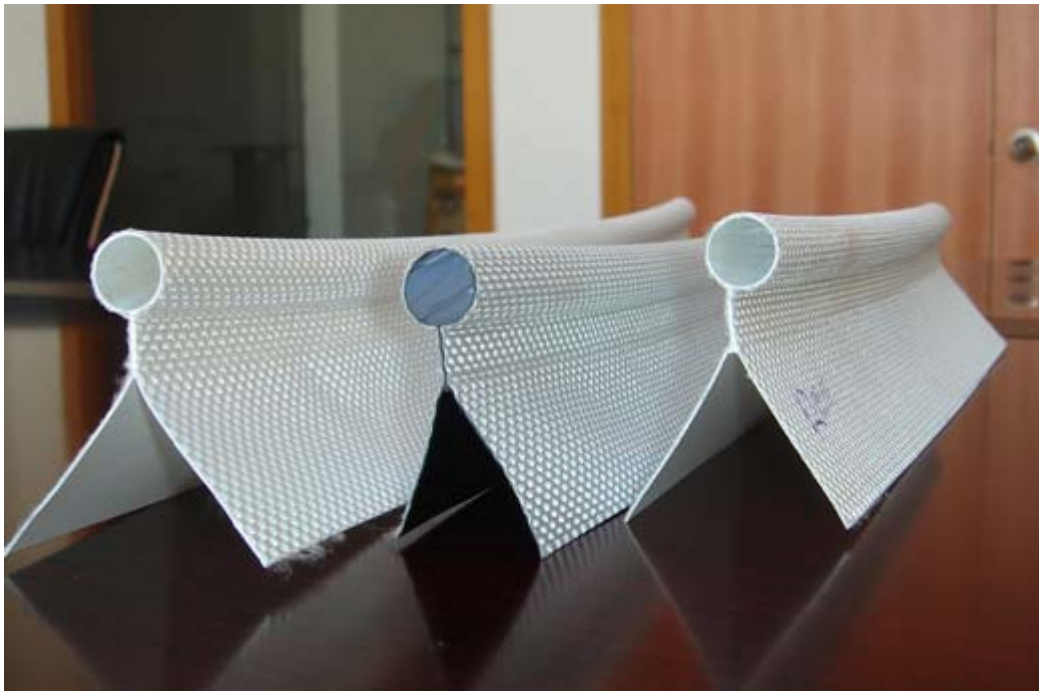


Fig 4.51 Keder

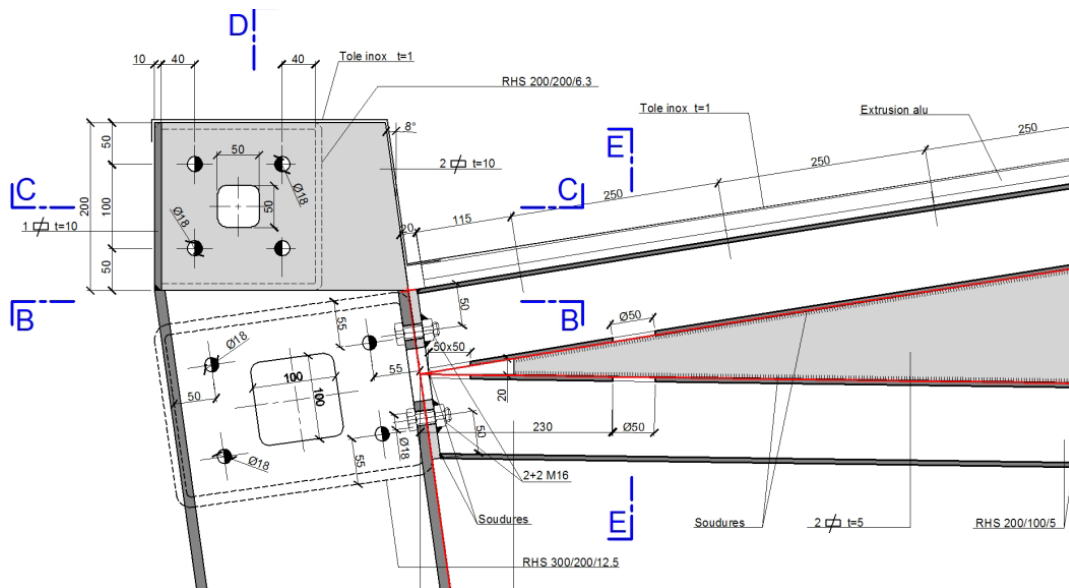
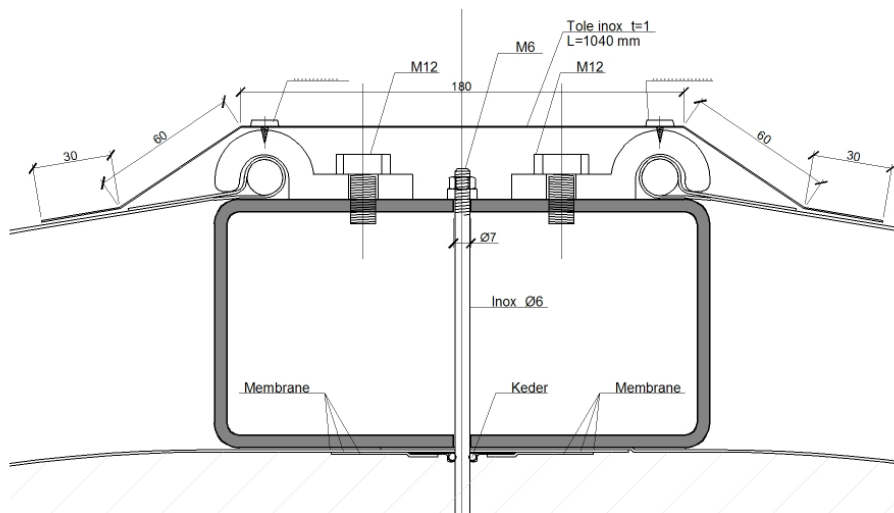


Fig 4.52 Joint detail: connection of the air beams with the columns



Σχήμα 4.53 Λεπτομέρεια σύνδεσης με την μεμβράνη: ειδικά σχεδιασμένο προφίλ αλουμινίου



## 4.4 TENSEGRITY

### 4.4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μία περίπτωση για την κατασκευή στήριξης της μεμβράνης αποτελεί η κατασκευή Tensegrity. Η δομή μιας κατασκευής Tensegrity μπορεί να περιγραφεί ως μια ομάδα από διακριτά θλιβόμενα στελέχη αναρτάται σε ένα συνεχές δίκτυο εφελκυσμένων τενόντων ώστε να δημιουργηθεί μια ευσταθή και ακέραιη κατασκευή στο χώρο. Το άθροισμα των θλιπτικών δυνάμεων ισούται με το άθροισμα των εφελκυστικών, και έτσι η δομή βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Αυτό που είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό είναι ότι μια δομή tensegrity είναι και λειτουργεί ως ενιαίο σύστημα.

Αν και από γεωμετρικής/δυναμικής άποψης η μοντελοποίηση των tensegrity συστημάτων αποτελεί πολύπλοκη διαδικασία, το αποτέλεσμα που προκύπτει (μοντέλο) είναι αξιόπιστο διότι οι φορτίσεις που επιδρούν πάνω στα δομικά στοιχεία και πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι μόνο αξονικές. Αυτό σημαίνει ότι η παραμόρφωση ενός στοιχείου πραγματοποιείται σε μία μόνο διάσταση (πχ. Οι τένοντες επιμηκύνονται). Γενικά, στοιχεία που παραμορφώνονται σε μία διάσταση είναι ευκολότερο να μοντελοποιηθούν σε σχέση με στοιχεία που παραμορφώνονται σε δύο ή τρεις διαστάσεις (κάμψη, στρέψη). Το ενδιαφέρον στα tensegrity συστήματα είναι ότι ενώ η συνολική δομή μπορεί να καμφθεί ή να συστραφεί, κανένα από τα δομικά στοιχεία δεν υφίσταται κάμψη και στρέψη.

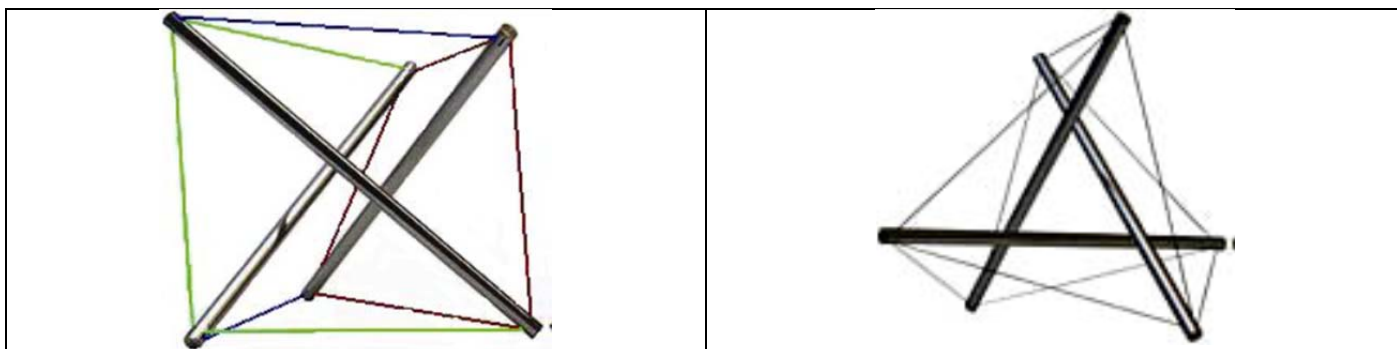


Σχ.4.54 Η βασική tensegrity μονάδα (tensegrity prism)

Πράσινο: αρχικοί τένοντες

Κόκκινο: τένοντες ανάρτησης τρίτης ράβδου

Μπλε: τένοντες έλξης τρίτης ράβδου



Σχ.4.55 Όψη και κάτοψη μιας βασικής tensegrity μονάδας (τριγωνικό πρίσμα)

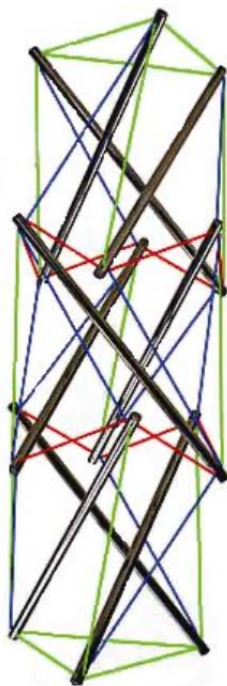
Η κατασκευή του σχήματος 4.54 και 4.55 είναι η απλούστερη tensegrity κατασκευή, αποτελούμενη από τρεις ράβδους και εννέα τένοντες. Θυμίζει τριγωνικό πρίσμα του οποίου η μία βάση έχει στραφεί σε σχέση με την άλλη, προκαλώντας συστροφή της παράπλευρης επιφάνειάς του. Η συστροφή αυτή είναι

αναγκαία για τη σύνθεση tensegrity κατασκευών και γίνεται είτε προς τα δεξιά, είτε προς τα αριστερά. Η εισαγωγή μιας επιπλέον ράβδου θα μετατρέψει την τριγωνική βάση του παραπάνω πρίσματος σε τετράγωνο, μία ακόμη ράβδος θα την μετατρέψει σε πεντάγωνο και ούτω καθεξής. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατόν να αναπαράγουμε μια πιθανώς άπειρη οικογένεια tensegrity πρισμάτων που να αντιστοιχούν σε γνωστά πρίσματα της στερεομετρίας (σχήμα 4.56).



Σχ.4.56 Κατόψεις tensegrity πρισμάτων

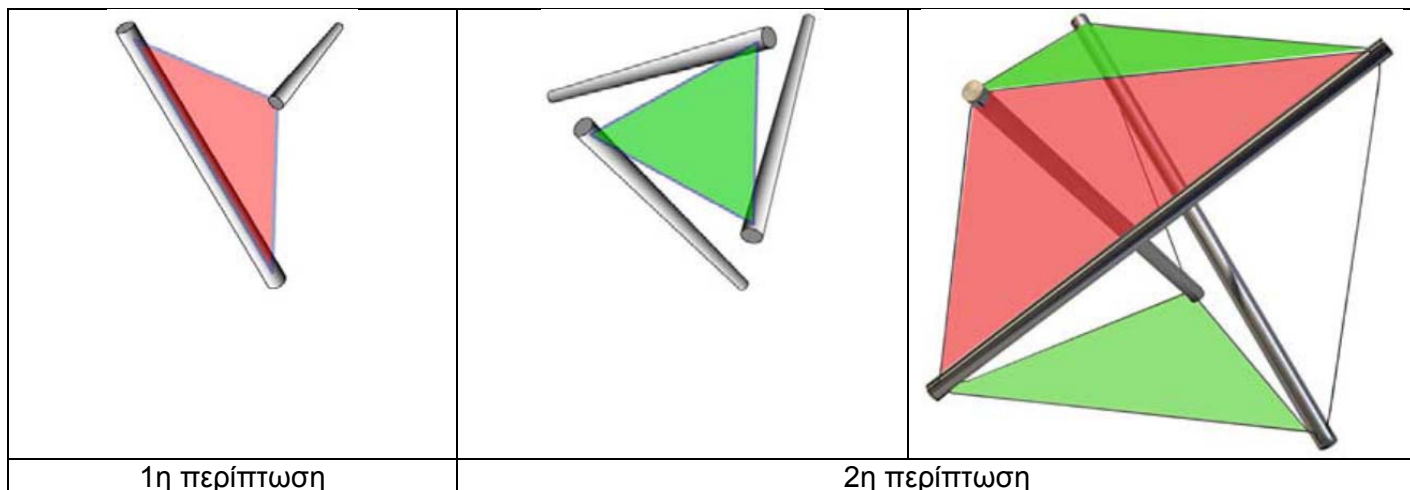
Μπορούμε να δημιουργήσουμε συνθετότερες tensegrity κατασκευές συνενώνοντας καθώς και συνένωση tensegrity μονάδων. Κάθε νέα μονάδα που τοποθετείται κατακόρυφα, είναι στραμμένη κατά γωνία  $\omega$  (δεξιά ή αριστερά) ως προς τον κεντρικό κατακόρυφο άξονα του συστήματος, σχηματίζοντας τελικά μια ελικοειδή σύνθεση.



Σχήμα 4.57. Κατακόρυφη πρόσθεση tensegrity μονάδων

Μπορούν να επιτευχθούν πολυάριθμες καταστάσεις ισορροπίας σε ένα tensegrity σύστημα, μικρής ή μεγάλης πολυπλοκότητας. Ωστόσο, μεγαλύτερη ευστάθεια παρατηρείται όταν το συνεχές δίκτυο τενόντων μοιάζει να σχηματίζει τρίγωνα επιφάνειες μαζί με τις ράβδους. Οι νοητές αυτές τριγωνικές επίπεδες επιφάνειες σχηματίζονται με δύο τρόπους:

1. Δύο τένοντες ξεκινούν από το ένα άκρο μιας ράβδου και καταλήγουν στα δύο άκρα μιας δεύτερης ράβδου αντίστοιχα
2. Τρεις τένοντες συνδέουν τα άκρα τριών ράβδων



Σχ.4.58 Τα δίκτυα τενόντων σχηματίζουν τριγωνικές επίπεδες επιφάνειες

Οι τένοντες έχουν έναν συγκεκριμένο βαθμό ελαστικότητας. Έτσι, ολόκληρο το tensegrity σύστημα είναι ελαστικό και η ευελιξία/ ακαμψία/ ισορροπία του εξαρτάται αφενός από το βαθμό προέντασης των τενόντων και τα χαρακτηριστικά του υλικού τους, κι αφετέρου από τη συνολική γεωμετρία του. Χάρη στην ελαστικότητα και την προένταση των τενόντων, οι εξωτερικές καταπονήσεις που δέχεται ένα tensegrity σύστημα απορροφώνται διότι είτε αυτές διανέμονται σε ολόκληρο το σύστημα, είτε αποσβένονται αν πρόκειται για κραδασμούς. Μια εξωτερική καταπόνηση παράγει ορατό έργο πάνω στο σύστημα κι ύστερα απορροφάται, γι' αυτό και οι δομές tensegrity εντάσσονται στην κατηγορία των ανταποκρινόμενων δομών (responsive structures).

#### 4.4.2 True και False Tensegrity (όρος που χρησιμοποιείται διεθνώς).

Ορισμένες δυσκολίες στην πρακτική εφαρμογή tensegrity συστημάτων σε κατασκευές μεγάλης κυρίως κλίμακας είναι ο λόγος διαχωρισμού τους σε true/false. Ένα σύστημα ράβδων και τενόντων σχηματίζει καθαρή δομή tensegrity όταν:

1. Όλα τα υπό θλίψη στοιχεία βρίσκονται μέσα στο σύστημα, δηλαδή οι ράβδοι ποτέ δεν είναι ακμές του νοητού στερεού που σχηματίζεται. Αντιθέτως, το φυσικό όριο του σχήματος το δίνουν πάντα και από όλα τα σημεία παρατήρησης οι τένοντες.
2. Καμία ράβδος δεν αγγίζει άλλη ράβδο.
3. Η θλίψη είναι ασυνεχής ενώ ο εφελκυσμός συνεχής

Όταν πληρούνται όλες οι παραπάνω προϋποθέσεις, τότε μιλάμε για true/pure tensegrity. Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις όπου ενδέχεται να μην εφαρμόζεται μία από τις προϋποθέσεις και πχ η θλίψη να είναι συνεχής ή οι ράβδοι να έρχονται σε επαφή αλλά κατά τα άλλα η δομή να διέπεται από τις αρχές της tensegrity. Οι περιπτώσεις αυτές χαρακτηρίζονται ως false tensegrity και αφορούν μεγάλες κατασκευές όπως πυλώνες ή θολωτές οροφές γηπέδων.

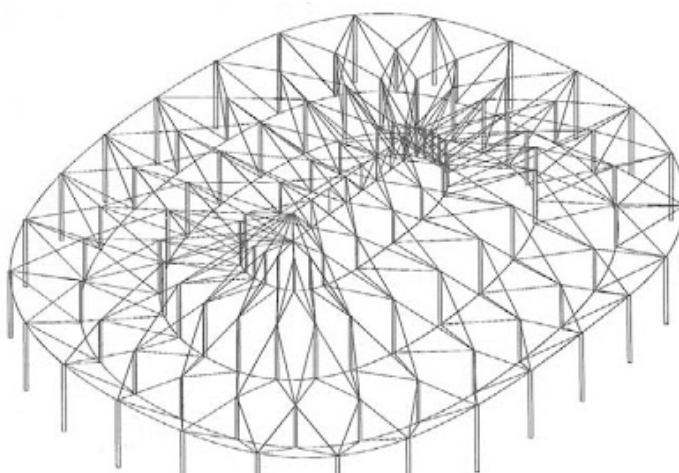
Στο πεδίο της Αρχιτεκτονικής και των Πολιτικών μηχανικών ποικίλες εφαρμογές και πολλά, διαφορετικά συστήματα έχουν αναπτυχθεί. Οι βασικότερες εφαρμογές που έχουν υλοποιηθεί αφορούν θολωτές κατασκευές, οροφές και δικτυώματα, αφίδες και υπόστεγα, ενώ ακολουθούν αισθητικής κυρίως σημασίας κατασκευές, και μόνο σε λίγες περιπτώσεις πρακτικές από ενεργειακής άποψης (πύργοι και πυλώνες).

Στο πεδίο των εφελκυσόμενων κατασκευών με μεμβράνη χρησιμοποιείται η False Tensegrity.

#### 4.4.2.1 Θόλοι (domes)

Για να κατανοήσουμε πώς μια δομή tensegrity μπορεί να εφαρμοστεί σε έναν θόλο, ας θεωρήσουμε ένα νοητό σφαιρικό πολυέδρο εγγεγραμμένο σε μια νοητή σφαίρα. Η τοποθέτηση των ράβδων και των τενόντων είναι τέτοια που μοιάζουν να σχηματίζουν επιφάνειες μέσα στα όρια μιας νοητής σφαίρας. Κανένα στοιχείο της δομής δεν είναι καμπύλο, ούτε οι ράβδοι και φυσικά όχι οι τένοντες. Η αίσθηση της καμπυλότητας προκύπτει όταν η κατασκευή είναι ολοκληρωμένη. Η ύπαρξη της καμπυλότητας αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ακαμψία των μελών και την ευστάθεια του συστήματος, καθώς σε όλο το εύρος της δομής ασκούνται ισχυρές και αντίθετες δυνάμεις που επιβάλλουν την ισορροπία του όλου συστήματος.

Ο Geiger χρησιμοποίησε τις αρχές tensegrity προκειμένου να σχεδιάσει την οροφή ενός σταδίου, η οποία θα ήταν καλυμμένη με μεμβράνη και θα ήταν οικονομική όσο μια air-supported δομή. Στην tensegrity προσέγγιση του Geiger οι τένοντες και οι ράβδοι της οροφής εκτείνονται ακτινικά, έτσι η ροή των δυνάμεων στις τρεις διαστάσεις απλουστεύεται. Οι φορτίσεις μεταφέρονται από έναν κεντρικό δακτύλιο που υπόκειται σε εφελκυστικές τάσεις, στον εξωτερικό δακτύλιο που υπόκειται σε θλιπτικές (περίμετρος της οροφής), μέσω των ακτινών (ράβδοι και τένοντες). Αυτό που αποτελεί «υπέρβαση» στη διάταξη αυτή σε σχέση με αυτήν του Fuller είναι ότι με μικρότερο αριθμό ράβδων και με λιγότερο πολύπλοκο δίκτυωμα επιτυγχάνετε ευστάθεια και ελαφριά καμπυλότητα η οποία συνεισφέρει στην αντιμετώπιση των εξωτερικών φορτίσεων (αέρας, βροχή, χιόνι). Ο λόγος ωστόσο για τον οποίο και αυτή η εφαρμογή συγκαταλέγεται στις false tensegrities είναι γιατί το όριο της δομής είναι θλιβόμενο στέλεχος (εξωτερικός δακτύλιος).



Σχ. 4.59 Atlanta Dome



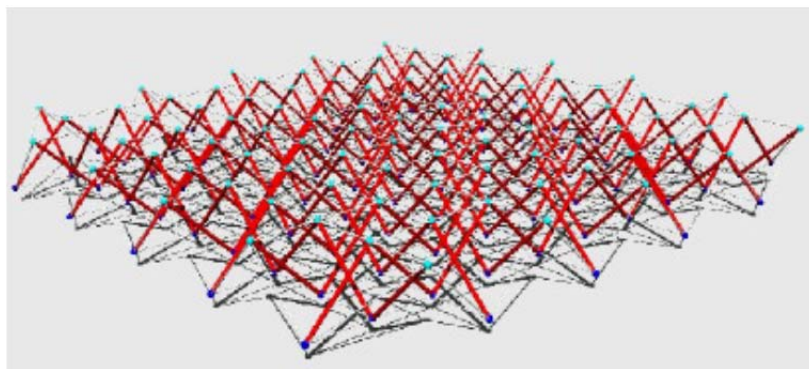
Σχ. 4.60 Στάδιο La Plata

#### 4.4.2.2 Οροφές και δικτυώματα

Οι αναφορές σε περιπτώσεις οροφών που χρησιμοποιούν καθαρά τις αρχές της tensegrity είναι ελάχιστες, ενώ στην πλειοψηφία τους αποτελούν υποκατηγορία των προαναφερθεισών θολωτών κατασκευών. Στην περίπτωση που δεν ανήκουν στην κατηγορία των θόλων, οι tensegrity οροφές περνούν στην κατηγορία των χωροδικτυωμάτων. Τα συμβατικά χωροδικτυώματα αποτελούνται από ένα σύμπλεγμα κόμβων και ράβδων που δημιουργεί δύο επάλληλα δικτυώματα τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με διαγώνιες ράβδους. Στην περίπτωση των καλωδιωτών χωροδικτυωμάτων (όπως αναφέρονται οι tensegrity δομές στην ελληνική βιβλιογραφία) το σύμπλεγμα των ράβδων καθώς και η σύνδεση των επάλληλων δικτυωμάτων διατηρείται και υποστηρίζεται μέσω της έντασης προσφέροντας μεγάλη ευελιξία για την δημιουργία στεγάστρων με πολύπλοκη μορφή. Η δυνατότητα της αναδίπλωσης, συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης, η αποτελεσματικότητα στη διασπορά των εξωτερικών φορτίσεων σε όλο το εύρος της δομής, η αυξανόμενη ανάγκη για χώρους με τον λιγότερο αριθμό υποστυλωμάτων και μεγάλων ανοιγμάτων, καθιστά τα tensegrity συστήματα ικανά να στεγάζουν επιφάνειες, μικρές ή μεγάλες, παρέχοντας υψηλή πάντα αισθητική.



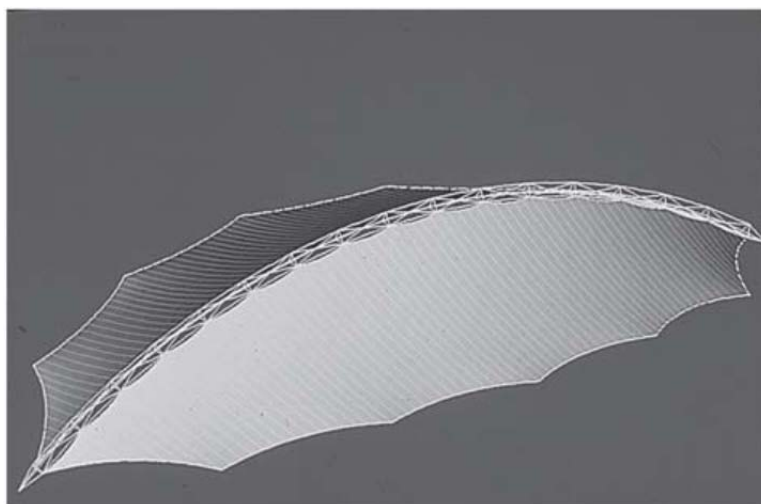
Σχ. 4.61. Οροφές tensegrity



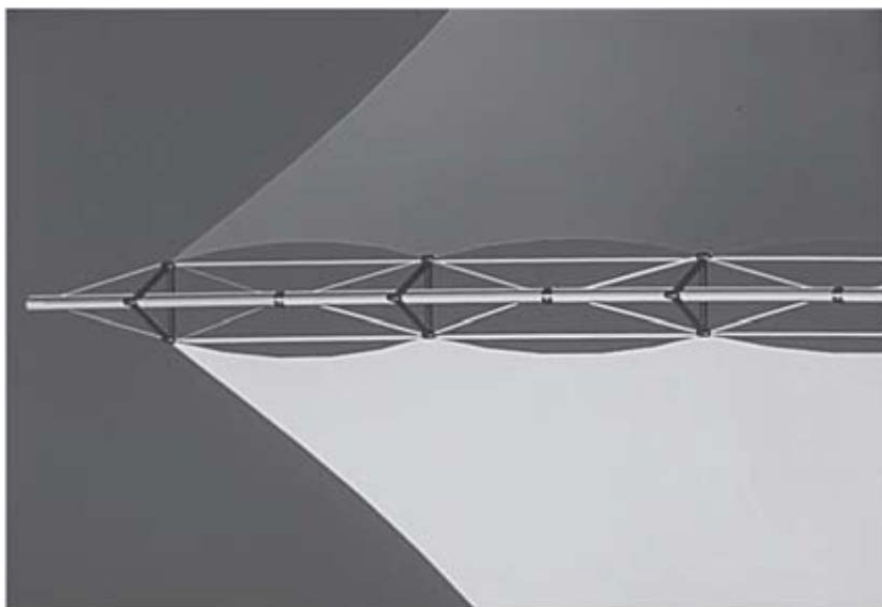
Σχ. 4.62 Double-layer grid the Laboratoire de Mécanique et Génie Civil in Montpellier

#### 4.4.2.3 Αψίδες και υπόστεγα

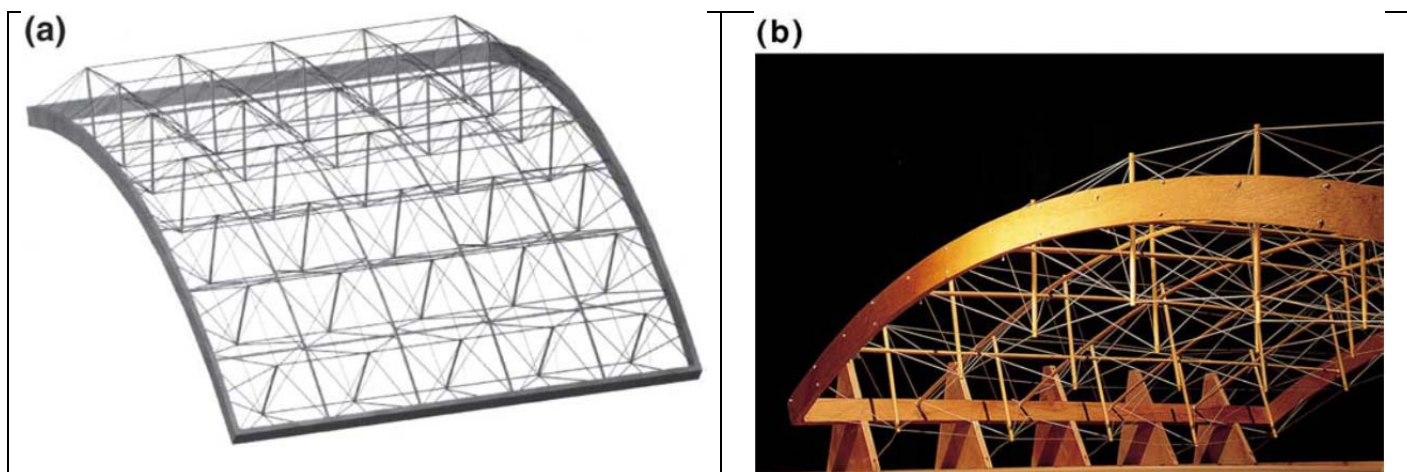
Οι αψίδες ως αρχιτεκτονικές δομές παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον, από κατασκευαστικής, τεχνικής και αισθητικής άποψης. Εξασφαλίζουν ένα τοξωτό σχήμα και μεγάλο πλάτος μεταξύ των δύο στηριγμάτων. Η ισορροπία της δομής επέρχεται με την ύπαρξη θλιπτικών και μόνο δυνάμεων, ενώ δεν έχουμε καθόλου ένταση. Οποιαδήποτε δύναμη εφελκυσμού, συνάφειας ή στρέψης εφαρμοστεί στα στοιχεία μιας αψίδας, μπορεί να ταράξει την ισορροπία της. Οι αρχές της tensegrity βρίσκουν πρόσφορο έδαφος στην περίπτωση των αψίδων διότι αναδεικνύουν προτερήματα που προκύπτουν από την αναδίπλωση, τη συναρμολόγηση, τη διευθέτηση των εξωτερικών καταπονήσεων, την αυξημένη ανθεκτικότητα και ευστάθεια όταν υπάρχει καμπυλότητα. Η ένταση που διέπει τη δομή δίνει το πλεονέκτημα στην tensegrity αψίδα να μπορεί να υπομείνει δυνάμεις στρέψης προκειμένου να αντισταθμίσει τυχόν εξωτερικές καταπονήσεις. Παρόλο που οι αψιδωτές μορφές ευνοούν και υποστηρίζουν την tensegrity ελάχιστες εφαρμογές έχουν πραγματοποιηθεί. Επίσης, αψίδες tensegrity έχουν κατασκευαστεί για να χρησιμοποιηθούν ως στήριξη οροφών από μεμβράνη. Στην κατηγορία των υπόστεγων και στεγάστρων, συναντάμε κυρίως εφαρμογές false tensegrity λόγω του ότι, είτε έχουμε θλιβόμενα στοιχεία στο όριο της κατασκευής, είτε η ίδια η κατασκευή δεν είναι προεντεταμένη.



Σχ.4.63 Τρισδιάστατη απεικόνιση αψίδας Tensegrity που υποστηρίζει εφελκυσμένη μεμβράνη.



Σχ. 4.64 Λεπτομέρεια από αψίδα Tensegrity



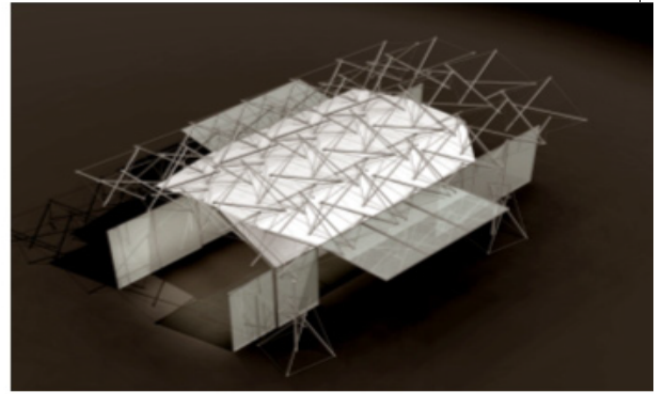
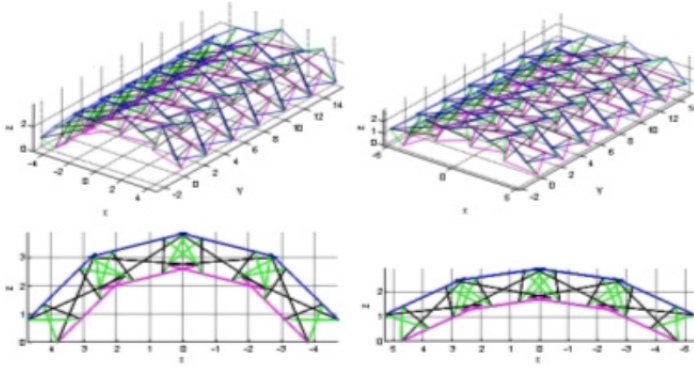
Σχ.4.65 (α) Two-way spanning double layer tensegrity grid computer model; (β) Two-way spanning double layer tensegrity grid φυσικό μοντέλο

Στην κατηγορία αυτή θα εντάξω και μία κατασκευή που βοήθησα στον σχεδιασμό και κατασκευήσα σύμφωνα με τις οδηγίες και τον σχεδιασμό της Κας Κατερίνας Λιάπη καθηγήτριας στο Πανεπιστήμιο Πατρών στη Σχολή Αρχιτεκτονικής στο τμήμα Ελαφρών Κατασκευών. Πρόκειται για ένα εκθεσιακό περίπτερο που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες του Θεάτρου Πάτρας στα πλαίσια των εκδηλώσεων για την Πάτρα Πολιτιστική Πρωτεύουσα της Ευρώπης 2006.

Για τις συνδέσεις χρησιμοποιήθηκε η US patent 5119-07202 της Κας Λιάπη. Η ένταση στους τένοντες δόθηκε με χρήση κοχλίας εκτείνοντας τις κορυφές των θλιβόμενων ράβδων.

Η κατασκευή είχε διαστάσεις 6X14 και το βάρος ήταν 5 φορές πιο λίγο από μία συμβατική κατασκευή.





Εκθεσιακό περίπτερο που κατασκευάστηκε για τις ανάγκες του Θεάτρου Πάτρας στα πλαίσια των εκδηλώσεων για την Πάτρα Πολιτιστική Πρωτεύουσα της Ευρώπης 2006.

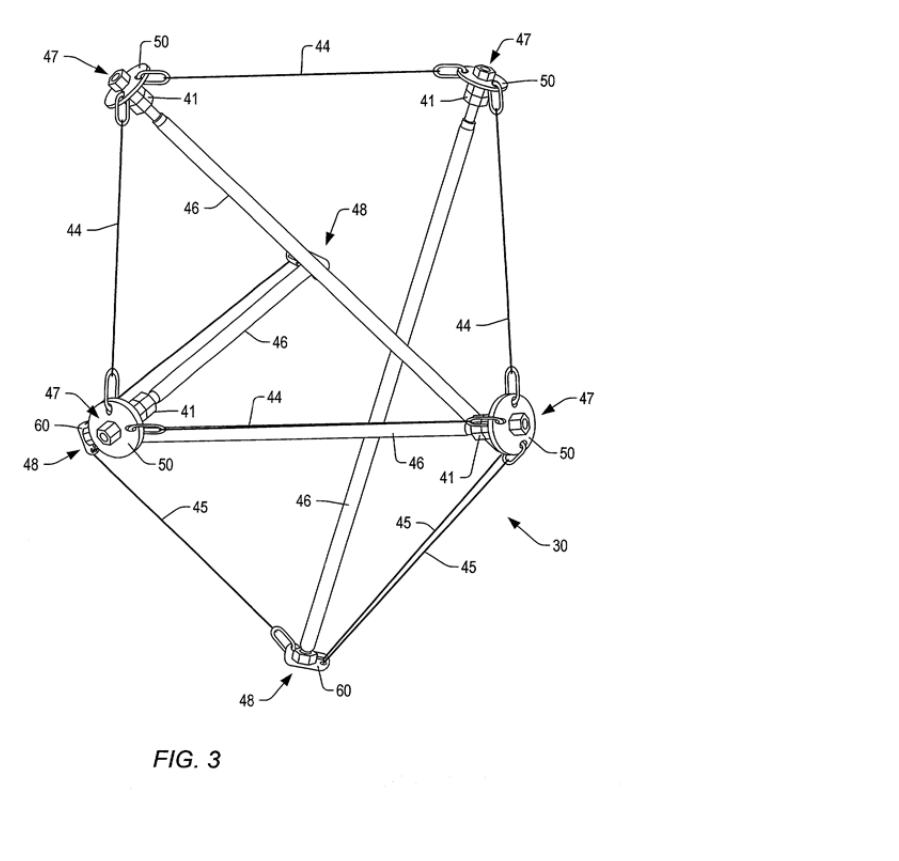


FIG. 3

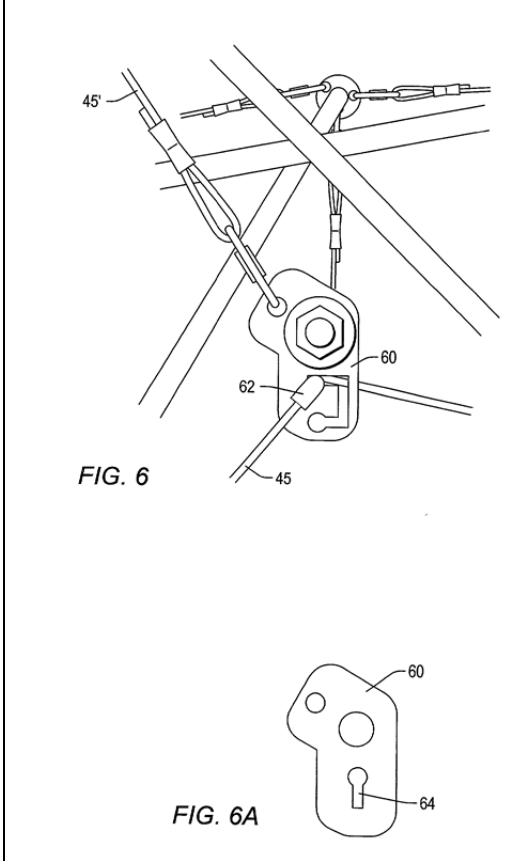


FIG. 6

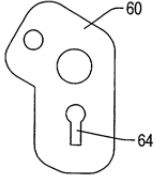


FIG. 6A

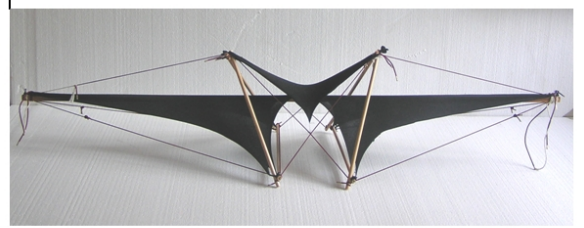
#### 4.4.2.3 Βοηθητικές διατάξεις Tensegrity για τις εφελκόμενες μεμβράνες

Οι διατάξεις με κατασκευές Tensegrity που χρησιμοποιούνται για υποστήριξη στις εφελκόμενες κατασκευές μεμβρανών είναι κυρίως οι ιπτάμενοι ιστοί (flying masts) και η διατάξεις αναρτήσεων δακτυλίων (rings) στις κωνικές κατασκευές.

Στις παρακάτω φωτογραφίες φαίνονται και οι δύο περιπτώσεις σε δύο κατασκευές που έχω σχεδιάσει και κατασκευάσει.



Επίσης σε κατασκευές Tensegrity μπορούμε να προσαρμόσουμε εφελκόμενες μεμβράνες προσδίδοντας έτσι μεγαλύτερη δυσκαμψία στο όλο σύστημα.

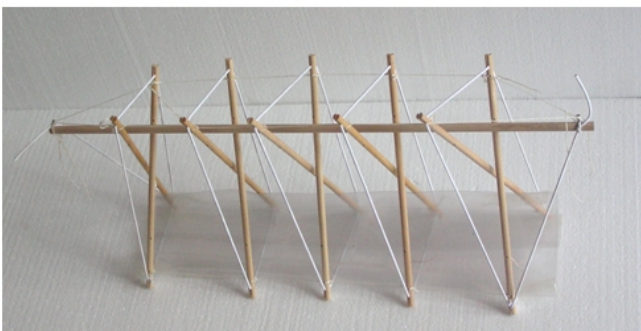
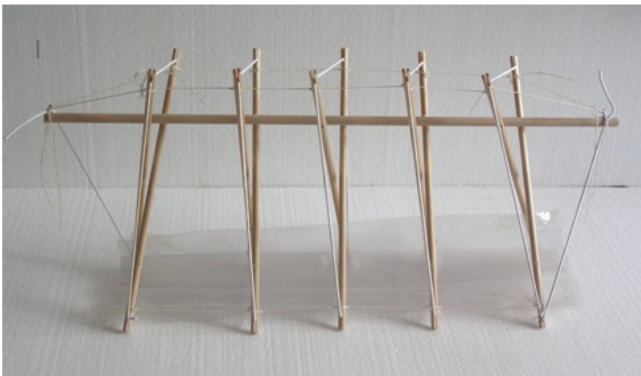
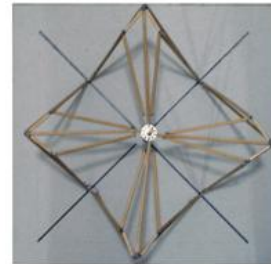
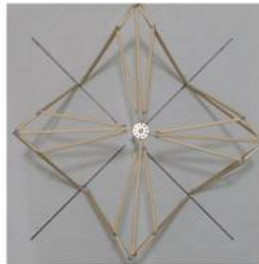
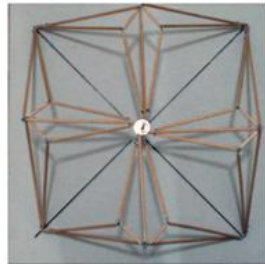
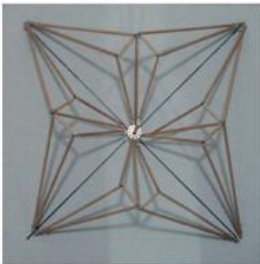


**ΠΥΞΙΣΘΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ II**

Τελική φάση  
Perspective views



Plans



## 4.5 ΠΤΥΣΣΟΜΕΝΕΣ ΣΤΕΓΕΣ

### 4.5.1 Εισαγωγή

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τα χαρακτηριστικά της πτυσσόμενης στέγης: η τυπολογία τους και η αναγκαία δύναμη για την κίνηση τους. Ειδικότερα, την απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ και τον μηχανισμό οδήγησης. Η τυπολογία εκφράζει την ποικιλομορφία των αναδιπλούμενων στεγών και η μελέτη της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας καταδεικνύει το πλεονέκτημα της εφαρμογής ελαφρών κατασκευών για τις αναδιπλούμενη στέγες.

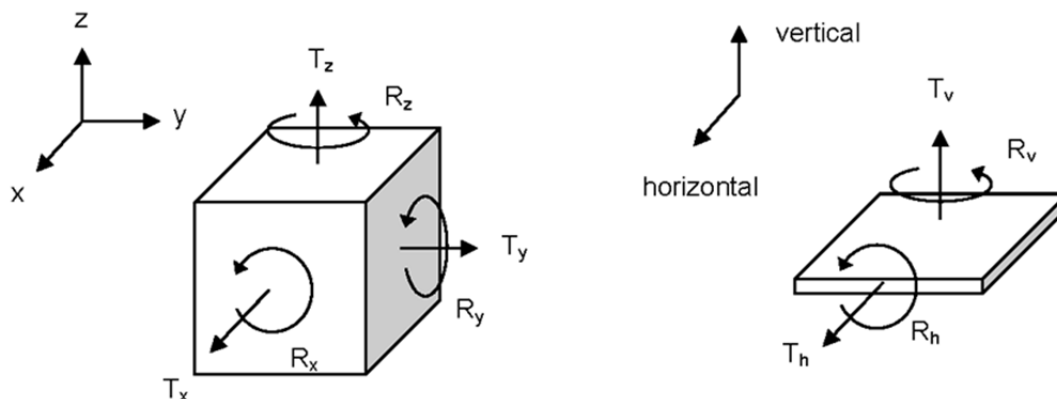
### 4.5.2 Τυπολογία της κίνησης

Ο Frei Otto ανέπτυξε ένα πίνακα, ο οποίος συχνά αναφέρεται ως η κατάταξη των πτυσσόμενων στεγών.

BAUART/ CONSTRUCTION SYSTEM	ART DER BEWEGUNG/ TYPE OF MOVEMENT	BEWEGUNGSRICHTUNG/DIRECTION OF MOVEMENT			
		PARALLEL/PARALLEL	ZENTRAL/CENTRAL	ZIRKULÄR/CIRCULAR	PERIPHER/PERIPHERAL
MEMBRANEN, TRAGKONSTRUKTION FESTSTEHEND/ MEMBRANES, SUPPORTING STRUCTURE STATIONARY	RAFFEN/ BUNCHING				
	ROLLEN/ ROLLING				
MEMBRANEN, TRAGKONSTRUKTION BEWEGLICH/ MEMBRANES, SUPPORTING STRUCTURE MOVABLE	SCHIEBEN/ SLIDING				
	KLAPPEN/ FOLDING				
	DREHEN/ ROTATING				
STEIFE KONSTRUKTIONEN/ RIGID CONSTRUCTIONS	SCHIEBEN/ SLIDING				
	KLAPPEN/ FOLDING				
	DREHEN/ ROTATING				

Σχ. 4.66 Η κατάταξη των πτυσσόμενων στεγών

Με βάση αυτό, μια μήτρα αναπτύχθηκε η οποία εκφράζει την ποικιλία των πτυσσόμενων στεγών, σύμφωνα με απλούς νόμους φυσικής και μαθηματικών (Εικ. 4.66). Η δυναμική του άκαμπτου σώματος είναι μια μελέτη της κίνησης των στερεών σωμάτων στη φυσική. Ένα άκαμπτο τρισδιάστατο σώμα με μη παραμορφώσιμο όγκο υποτίθεται ότι η κίνησή του χαρακτηρίζεται από έξι βαθμούς ελευθερίας (μεταφορά και περιστροφή σε τρεις κατευθύνσεις). Ένα άκαμπτο σώμα αντικαθίσταται με μία δισδιάστατη άκαμπτη πλάκα (με τέσσερις βαθμούς ελευθερίας) ως μία επίπεδη στέγη.



Σχ. 4.67 βαθμός της ελευθερίας του στερεού σώματος (αριστερά) και οι βαθμοί ελευθερίας της άκαμπτου πλάκας (δεξιά)

Η κίνηση αυτής της άκαμπτου πλάκας μπορεί να περιγραφεί από τον τύπο της κίνησης και με τον άξονα της κίνησης. Οι τύποι της κίνησης είναι είτε μεταφορά είτε περιστροφή. Η μεταφορά σημαίνει κίνηση της πλάκα στο χώρο, ενώ ο προσανατολισμός της παραμένει ο ίδιος. Κατά συνέπεια, η περιστροφή σημαίνει αλλαγή κατεύθυνσης του στο χώρο, ενώ η θέση του παραμένει η ίδια. Ο άξονας της κίνησης μπορεί να ορίζεται από δύο κατευθύνσεις, οριζόντια και κάθετη.


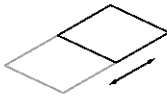
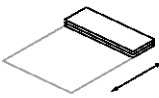
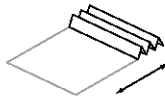
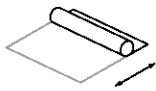


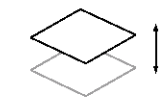





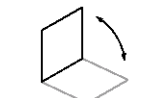

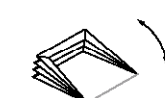




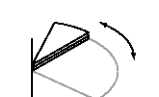



Επιπρόσθετα σε αυτά τα τέσσερα είδη κίνησης, μια πτυσσόμενη οροφή έχει και ένα μοναδικό τύπο κίνησης: αλλαγή της διάστασης της. Όταν μια πτυσσόμενη οροφή ανοίγει, θα πρέπει να αποθηκεύεται κοντά στο άνοιγμα. Αλλά ο χώρος αποθήκευσης περιορίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις. Ως εκ τούτου, για την αποθήκευση μια μείωση του μεγέθους ή αλλαγή της μορφής του ανοιχτού τμήματος της στέγης είναι σημαντική. Αυτή η αλλαγή των διαστάσεων μπορεί να εξηγηθεί στον Ευκλείδειο χώρο, όπως: η διαδρομή μετακίνησης μιας «μονοδιάστατου» γραμμής μετατρέπεται σε «δύο-διαστάσεων» επίπεδο. Ως φυσική συμπεριφορά, υπάρχουν τέσσερις βασικοί τύποι αλλαγής της μορφής της επιφάνειας μιας στέγης: επικαλυπτόμενη, πτυσσόμενη / στρίμωγμα, κυλιόμενη και παραμορφωμένη από τον αέρα.

Τώρα, οι διαφορετικές κατευθύνσεις και οι διαφορετικές δυνατότητες μείωσης του μεγέθους συνδυάζονται, και η προκύπτουσα μήτρα κίνησης δείχνει την τυπολογία των πτυσσόμενων στεγών. Η κίνηση ενός άκαμπτου καλύμματος μπορεί να ορίζεται από έναν άξονα, ενώ οι κινήσεις της στέγης που αποτελείται από διάφορα ανεξάρτητα κινούμενα μέρη ή συνεχή μεμβράνη μπορεί να εκφράζεται με τη χρήση πολλαπλών αξόνων. Όταν οι άξονες κίνησης είναι πολλαπλοί, κάθε άξονας μπορεί ελεύθερα να προσανατολίζεται, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις ελέγχεται με σκοπό το άνοιγμα του χώρου. Οι κατευθύνσεις κυκλοφορίας προσανατολίζονται κυρίως στην αποθηκευμένη θέση: περιφερικές και κεντρικές.

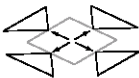
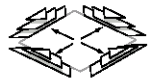

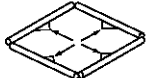


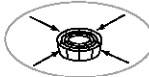








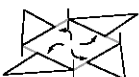






Οι περιπτώσεις πολλαπλών αξόνων κίνησης περιγράφονται σύμφωνα με το χώρο αποθήκευσης στο κάτω ήμισυ του Πίνακα 4.68.

Coordinate System 	none	Size reduction for storage			
		overlap	fold / bunch	role	deform by air

### Single - axis motion

type of motion		axis of motion							
Translation	Horizontal								
	Vertical								
Rotation	Horizontal								
	Vertical								

### Multiple - axis motion

type of motion		axis of motion		storage place							
Translation	Horizontal	peripheral									
			Central								
Rotation	Horizontal	peripheral									
		Central									
	Vertical	peripheral									
		Central									

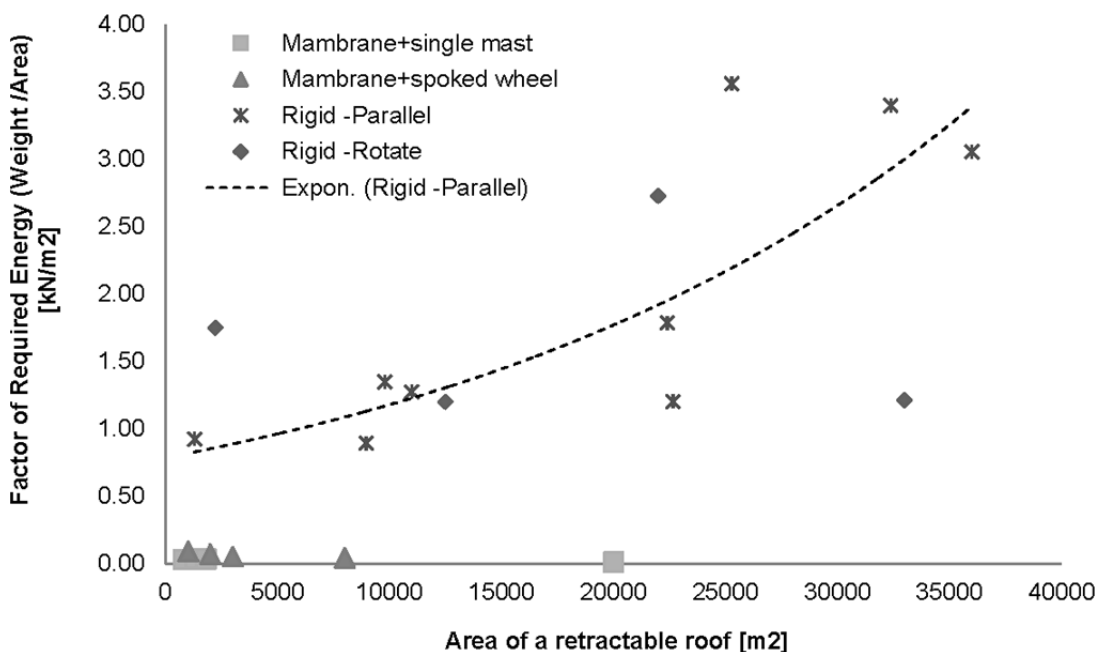
Σχ. 4.68 Τυπολογία πτυσσόμενων στεγών

### 4.5.3 Απαιτούμενη ενέργεια για την κίνηση

Η απαιτούμενη ενέργεια για να κινηθεί η πτυσσόμενη στέγη προσδιορίζεται από μια εξίσωση με βάση την ταχύτητα μεταφοράς, τα φορτία και την μηχανική απόδοση. Η εξίσωση εκφράζεται ως:

$L = \frac{V \cdot W \cdot Q}{6120 \cdot \eta} [kW]$	With L : Ηλεκτρική ενέργεια για να κινηθεί μια στέγη [kW] V : Ταχύτητα μεταφοράς της στέγης [m/min] W: Αντίσταση μετακίνησης [kgf/t] Q : Βάρος της στέγης [t] η : Μηχανική απόδοση
--	---

Κατά συνέπεια, το βάρος της πτυσσόμενη οροφή έχει μια μεγάλη επίδραση στην απαιτούμενη ενέργεια για την κίνηση. Κατά συνέπεια, το διάγραμμα (Σχήμα 4.69) συντάχθηκε με βάση τα δεδομένα του βάρους και την επιφάνεια μερικών υφιστάμενων πτυσσόμενων στεγών. Τα δεδομένα αναφοράς περιλαμβάνονται στην Παράρτημα F. Αυτό δείχνει τη σχέση μεταξύ της απαιτούμενης ενέργειας για διαφορετικούς τύπους υπαρχόντων πτυσσόμενων στεγών ως συνάρτηση του μεγέθους τους. Σε σύγκριση με τις πτυσσόμενη στέγες των αυστηρών δομών, οι πτυσσόμενες στέγες από μεμβράνη τείνουν να επηρεάζονται λιγότερο από τον παράγοντα μέγεθος. Η ποσότητα της απαιτούμενης ενέργειας για τις πτυσσόμενες στέγες με μεμβράνη είναι μικρότερη από αυτήν για τις στέγες με άκαμπτη δομή. Ωστόσο, οι περισσότερες από τις στέγες με μεμβράνη απαιτούν πρόσθετη ενέργεια για να παράγουν δύναμη προέντασης στην εφελκυσμένη μεμβράνη.

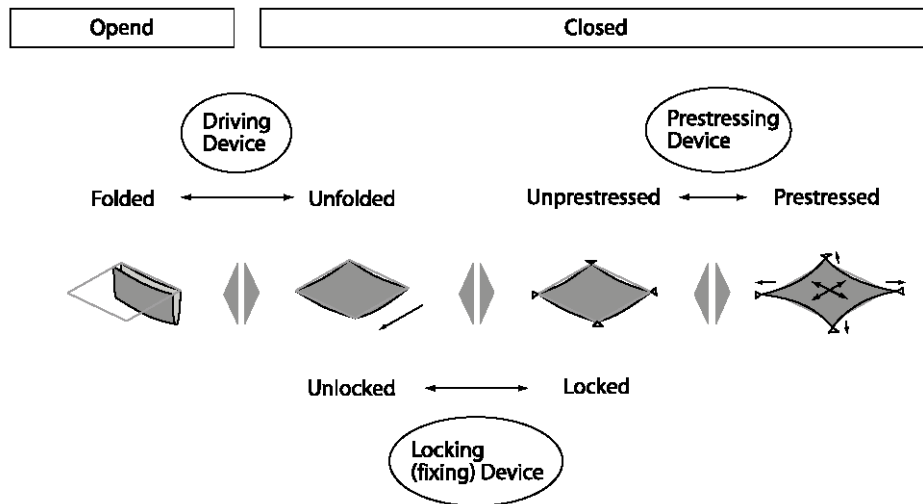


Σχ. 4.69 ενέργεια που απαιτείται για τη μετακίνηση των διαφορετικών τύπων πτυσσόμενων στεγών

### 4.5.4 Μηχανισμός οδήγησης

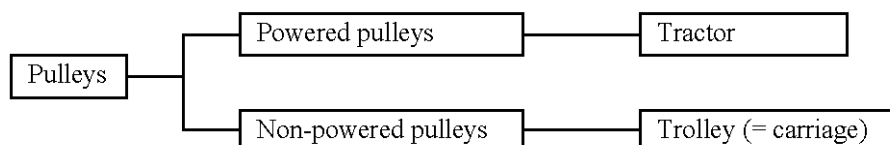
Τρεις διαφορετικές διατάξεις απαιτούνται για την σημειακής στήριξης πτυσσόμενη κατασκευή οροφής από μεμβράνη. Ένα διπλωμένο ύφασμα μεμβράνης ξετυλίγεται από μία συσκευή οδήγησης, όπως ένα σύστημα βαρούλκο, και στη συνέχεια τα σημεία ακμής ασφαρίζεται από μία συσκευή στερέωσης, για παράδειγμα ένα σύστημα lock-rip. Τέλος, το ύφασμα της κατασκευής από μεμβράνη τεντώνεται με τη βοήθεια των διατάξεων ενεργοποίησης.





Σχ. 4.70 απαραίτητες συσκευές για το σημείο στηρίξεως πτυσσόμενης οροφή μεμβράνης

Το σύστημα οδήγησης που έχει υιοθετηθεί για το σημείο στηρίξεως πτυσσόμενης στέγης με μεμβράνη είναι ένα σύστημα τροχαλίας, στο οποίο μια τροχαλία τρέχει σε ένα καλώδιο κατά την αναδίπλωση / ξεδίπλωμα της μεμβράνης. Σύμφωνα με τον Otto [1972], η μηχανοκίνητη τροχαλία ονομάζεται ελκυστήρας και για να παρέχει την κινητήρια δύναμη που χρειάζεται η κατασκευή για την μετακίνηση κατά μήκος του καλωδίου, είναι εφοδιασμένη με ένα ενσωματωμένο μοτέρ. Μεγάλη πίεση επαφής απαιτείται για να αναπτυχθεί κατάλληλο επίπεδο τριβής μεταξύ του ελκυστήρα και το καλωδίου, αφού ο ελκυστήρας κινείται μέσω της δύναμης της τριβής. Ένα επιπλέον πρόβλημα προκύπτει λόγω της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και το βάρος των ελκυστήρων και των κινητήρων. Μια μη μηχανοκίνητη τροχαλία, που ονομάζεται τρόλεϊ (ή και βαγόνι), κινείται κατά μήκος του καλωδίου, ενώ συμβαίνει η αναδίπλωση / ξεδίπλωμα της μεμβράνης. Το τρόλεϊ είναι μια παθητική μονάδα. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να τραβηχτεί είτε από το καλώδιο, ή να ωθείται από ένα ελκυστήρα.



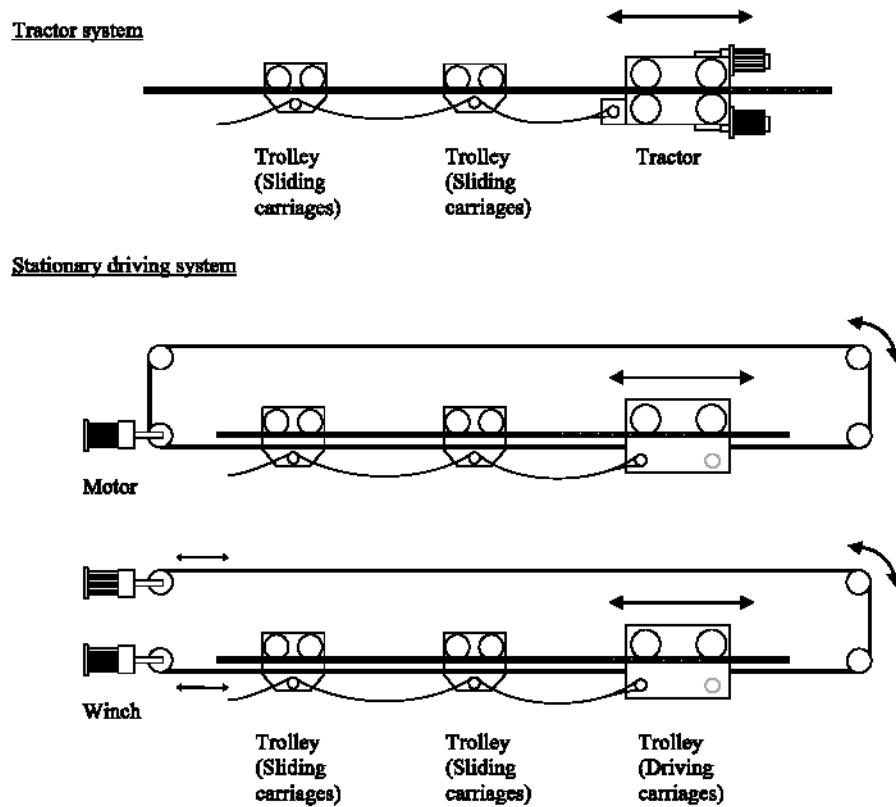
Σχ. 4.71 Μονάδα τροχαλιών για τα σημεία που υποστηρίζουν την πτυσσόμενη οροφή μεμβράνης

Το σύστημα οδήγησης του σημείου υποστήριξης της πτυσσόμενης οροφής μεμβράνης αποτελείται από ένα συνδυασμό αυτών των δύο μονάδων. Δύο είδη συστημάτων οδήγησης έχουν κυρίως υιοθετηθεί στα έργα που έχουν υλοποιηθεί.

Σε ένα σύστημα ελκυστήρα, ο ελκυστήρας κινείται με ενσωματωμένο κινητήρα. Τα υπόλοιπα τρόλεϊ (συρόμενα βαγόνια) που κινούνται κατά μήκος του ίδιου καλωδίου ωθούνται και έλκονται από ελκυστήρα. Όπως, σε γενικές γραμμές, ο κάθε ελκυστήρας έχει τη δική του γραμμή ρεύματος, η μέθοδος της παροχής ρεύματος στον ελκυστήρα θα πρέπει να εξετάζεται πάντα. Σε ένα στατικό σύστημα κίνησης, η απαιτούμενη κινητήρια δύναμη παρέχεται μέσω βαρούλκων που εγκαθίστανται στο σταθερό τμήμα της στέγης. Από το σύστημα απαιτείται να προσαρμοστεί κατάλληλα και μηχανικά στην αλλαγή της κατεύθυνσης οδήγησης μεταξύ έκτασης και συστολής. Σε ένα "κλειστό" σύστημα, το φορείο οδήγησης κινείται από έναν ατέρμονο καλώδιο, για το οποίο μόνο ένα μοτέρ είναι απαραίτητο. Ωστόσο, το ατέρμονο καλώδιο πρέπει πάντα να είναι σε τάση για να μεταφέρει τις δυνάμεις από τον κινητήρα. Σε ένα «ανοικτό» σύστημα, δύο βαρούλκα χρησιμοποιούνται για κάθε κατεύθυνση της κίνησης του φορείου οδήγησης.

Για μια πτυσσόμενη οροφή μεμβράνης με σύστημα κεντρικού ιστού, που συχνά κατασκευάστηκαν τις δεκαετίες του '60 και του '70, είχαν εφαρμοστεί, το σύστημα του ελκυστήρα, ενώ για εκείνα με

κατασκευή ακτινωτού τροχού (spoked wheel) που άρχισε να χρησιμοποιείται την δεκαετία τοθ '90, το στατικό σύστημα οδήγησης χρησιμοποιείται.



Σχ. 4.72 Δύο συστήματα οδήγησης για το σημείο στηρίξεως πτυσσόμενης οροφής μεμβράνης





Fig. 4.74 Rathaus Vienna, Austria

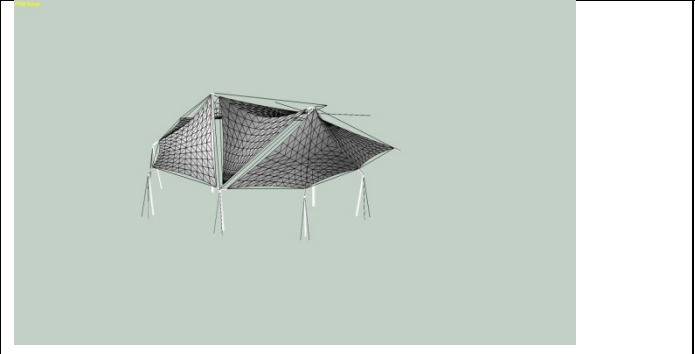
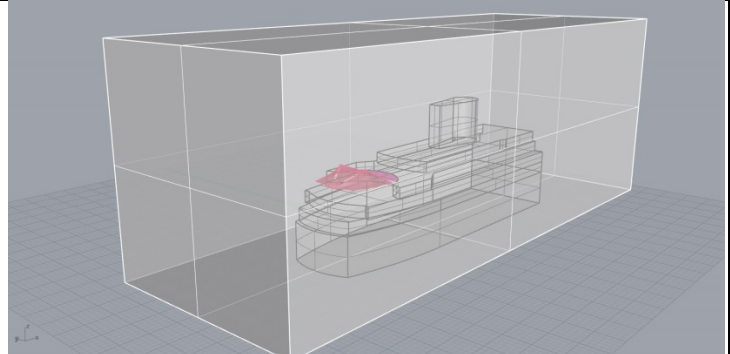
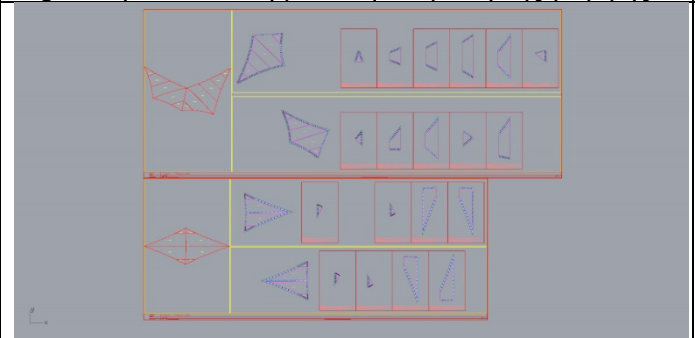
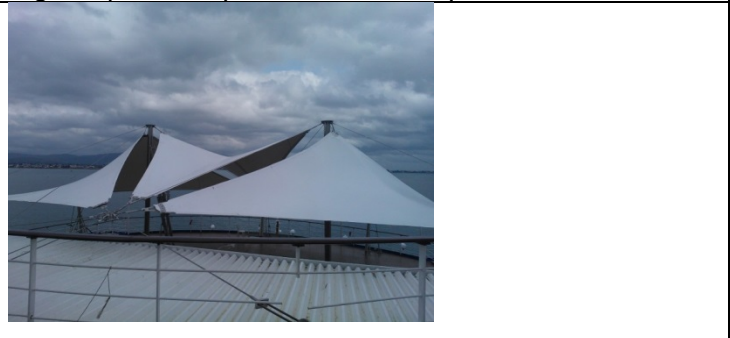


Fig. 4.75 Shopping Mall Athens Heart

ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ

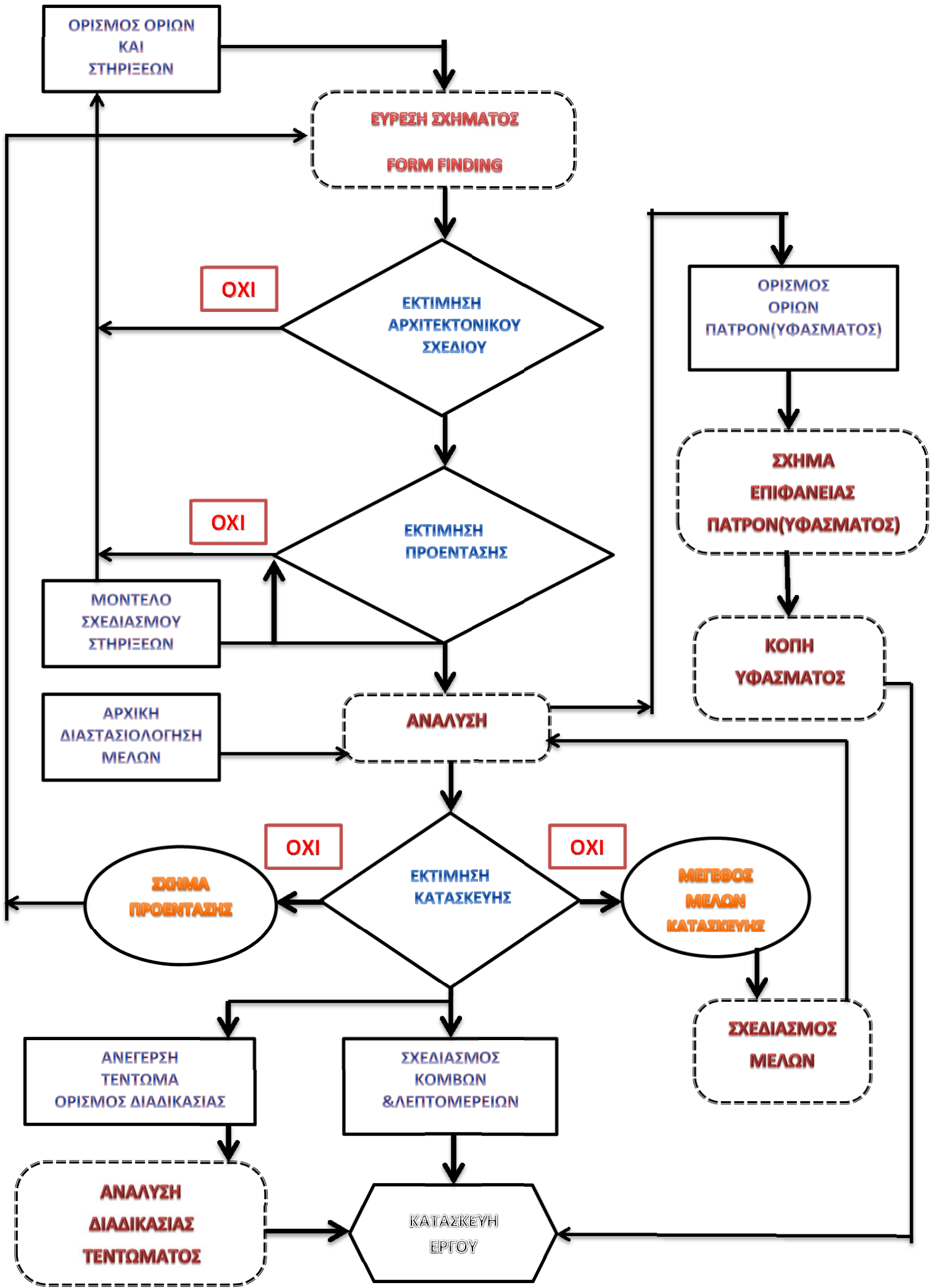
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Καμία άλλη κατηγορία αρχιτεκτονικών δομικών συστημάτων δεν εξαρτάται τόσο από τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών όσο οι εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης. Το σχήμα, η μορφή και η προένταση των δομών καθορίζονται χρησιμοποιώντας κυριολεκτικά την έννοια "τη βοήθεια υπολογιστή σχεδιασμού"(computer aided design).ακόμη και τα τυπικά απλά δομικά συστήματα αφηφούν την κλασική ανάλυση. Η δομική συμπεριφορά προσομοιώνεται υπό φορτίο με τεχνικές μοντελοποίησης υπολογιστή. Οι διαδικασίες για την προένταση του συστήματος καθορίζονται σε παρόμοιες αναλύσεις. Τέλος, τα σχέδια και τα πατρόν που χρησιμοποιούνται για την κοπή και την κατασκευή του υφάσματος της επιφάνειας της μεμβράνης είναι συνήθως δημιουργήματα ηλεκτρονικού υπολογιστή. (Fig.5.1 Golden Iris Vessel σχεδιασμένο, υπολογισμένο, κατασκευασμένο και τοποθετημένο από μένα).

	
<p>Fig.5.1 η κατασκευή μετά την εύρεση της μορφής</p>	<p>Fig.5.1 μοντέλο για CFD ανάλυση</p>
	
<p>Fig.5.1 δημιουργία πατρόν</p>	<p>Fig.5.1 πραγματική κατασκευή</p>

Η σύγχρονη χρήση των εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης ως μέσο κάλυψης μόνιμων μεγάλων χώρων εξ ολοκλήρου εξαρτάται από τη χρήση των ψηφιακών υπολογιστών. Πολλές από τις εξελίξεις στην τεχνολογία των εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης έχουν γίνει τα τελευταία είκοσι χρόνια, ακριβώς λόγω της προσβασιμότητας σε σχετικά ισχυρούς υπολογιστές. Η σημαντική πρωτοποριακή εργασία του Frei Otto επιτεύχθηκε με τη χρήση φυσικών μοντέλων, τα οποία αν και απεικονίζουν την επιθυμητή μορφή μεμβράνης δεν ευνοούν την ακριβή επικοινωνία ή / και τεκμηρίωση των διαρθρωτικών χαρακτηριστικών της μεμβράνης με τρόπο που είναι απαραίτητος για την κατασκευή μεγάλων και / ή σύνθετων συστημάτων. Οι εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης έχουν μοναδικές δυσκολίες που δεν μπορούν να ξεπεραστούν με κλασικές μεθόδους σχεδιασμού και ανάλυσης. Γενικά, έχουν μη γραμμική συμπεριφορά. Τυπικά οι δομές εμφανίζουν και γεωμετρική μη-γραμμικότητα λόγω των μεγάλων παραμορφώσεων/μετατοπίσεων και λόγω της μη-γραμμικότητας του υλικού. Η φύση των εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης είναι τέτοια ώστε ένα μεγάλο μέρος της ακαμψίας τους επιτυγχάνεται δυνάμει της αρχικής προέντασης στη μεμβράνη και των βοηθητικών δομών υποστήριξης. Η προένταση είναι μια εσωτερική κατάσταση έντασης που συνήθως υπολογίζεται από τον σχεδιαστή για να επιτευχθεί η επιθυμητή απόδοση της δομής και θα πρέπει να επηρεάζει το σύστημα στην κατασκευή του.

Σχ. 5.2 Διάγραμμα ροής της γενικής διαδικασίας για τον σχεδιασμό και υπολογισμό εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης



ΟΡΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ  
ΚΑΙ  
ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ

ΕΥΡΕΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ  
FORM FINDING

ΟΧΙ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ  
ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΟΥ  
ΣΧΕΔΙΟΥ

ΟΧΙ

ΕΚΤΙΜΗΣΗ  
ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ

ΜΟΝΤΕΛΟ  
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ  
ΣΤΗΡΙΞΕΩΝ

ΑΡΧΙΚΗ  
ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ  
ΜΕΛΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ

ΟΧΙ

ΣΧΗΜΑ  
ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ

ΟΧΙ

ΜΕΓΕΘΟΣ  
ΜΕΛΩΝ  
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

ΑΝΕΓΕΡΣΗ  
ΤΕΝΤΩΜΑ  
ΟΡΙΣΜΟΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ  
ΚΟΜΒΩΝ  
& ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΩΝ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ  
ΜΕΛΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ  
ΤΕΝΤΩΜΑΤΟΣ

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ  
ΕΡΓΟΥ

ΟΡΙΣΜΟΣ  
ΟΡΙΩΝ  
ΠΑΤΡΟΝ(ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ)

ΣΧΗΜΑ  
ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ  
ΠΑΤΡΟΝ(ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ)

ΚΟΠΗ  
ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ

Η γενική μεθοδολογία που επιδιώκεται στο σχεδιασμό και την κατασκευή μιας εφελκυσμένης κατασκευής μεμβράνης απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής που φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Οι διαδικασίες που συνήθως είναι αυτοματοποιημένες εμφανίζονται με διακεκομμένο περίγραμμα. Όπως με τις περισσότερες μεθοδολογίες σχεδιασμού, η διαδικασία είναι επαναληπτική, έτσι ώστε πρόβλεψη των αποτελεσμάτων κατά το σχεδιασμό της δομής θα μειώσει τη γενική προσπάθεια που χρειάζεται για τον σχεδιασμό και τη μηχανική του συστήματος. Ενώ υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται σήμερα με επιτυχία για κάθε μία από τις διεργασίες του υπολογιστή, η γενική μεθοδολογία που απεικονίζεται είναι κατάλληλη για μια ευρεία ποικιλία των προεντεταμένων συστημάτων εφελκυσμού.

Στην απλή περίπτωση δομών που υποστηρίζονται από αέρα η προένταση της μεμβράνης επιτυγχάνεται με την φόρτιση μιας συγκλαστικής διαμορφωμένης μεμβράνης με διαφορική πίεση αέρα. Η απλούστερη μορφή του τέτοιων δομών, για την οποία μπορεί να προσδιοριστεί εύκολα η προένταση, είναι ένας σφαιρικό θόλος. Υποθέτοντας ότι η μονάδα βάρους της μεμβράνης είναι μικρή σε σχέση με την εσωτερική πίεση λειτουργίας, η πίεση της μεμβράνης για μία δεδομένη πίεση είναι ανάλογη με την ακτίνα καμπυλότητας της σφαίρας. Ενώ η ανάλυση μιας τέτοιας δομής υπό πραγματικά φορτία ανέμου δεν είναι εύκολη, ωστόσο τόσο η σχηματοποίηση μεμβράνη όσο και ο προσδιορισμός της προέντασης εύκολα επιτυγχάνεται χωρίς τη βοήθεια των υπολογιστών. Ως εκ τούτου, δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι οι πρώτες ευρέως διαδεδομένες δομές μεμβράνης που υποστηρίζονται από αέρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι σφαιρικοί θόλοι που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν από την Birdair Inc.

Η μελέτη για χαμηλού προφίλ μη-σφαιρικού σχήματος κατασκευή μεμβράνης υποστηριζόμενη από αέρα, απαιτεί καλύτερα αναλυτικά εργαλεία. Τόσο η εύρεση της γεωμετρίας ή «σχήμα» του δικτύου καλωδίων όσο και η ανάλυση της κατασκευής μεμβράνης με υποστήριξη αέρα στέγη για το Περίπτερο των ΗΠΑ στην Expo '70 είχαν πραγματοποιηθεί σε έναν ψηφιακό υπολογιστή από τον David Geiger Associates με την βοήθεια του Δρ. Michael McCormick. Αυτή πιστεύεται ότι είναι η πρώτη χρήση υπολογιστή για εύρεση γεωμετρίας και ανάλυση για την κατασκευή εφελκυσμένης δομής μεμβράνης. Σε αυτή την περίπτωση, όπως με όλες τις πρώιμες κατασκευές μεμβράνης που υποστηρίζονται από αέρα του Geiger, τα πατρών της επιφάνειας του υφάσματος υπολογιζόντουσαν με το "χέρι", καθώς η γεωμετρία της επιφάνειας της μεμβράνης ήταν αρκετά απλή και μπορούσε να επιτευχθεί αρκετά ικανοποιητικά. Ο πρώτος σχεδιασμός πατρών υφάσματος εφελκυσμένης κατασκευής με μεμβράνη σε υπολογιστή, για μιας χαμηλού προφίλ κατασκευής airdome με καλώδια συγκράτησης χρησιμοποιήθηκε στην οροφή Minneapolis Metro dome, με σχέδια από την Birdair.

Προεντεταμένο αντικλαστικές εφελκυσμένες κατασκευές παρουσιάζουν ένα πολύ πιο δύσκολο πρόβλημα. Μια ευρεία ποικιλία των σύνθετων μορφών μπορούν να προσδιοριστούν από φυσικά μοντέλα. Όπως αποδεικνύεται από τον Frei Otto, μιμητιστικές (ελάχιστες) επιφάνειες μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας σαπουνάδα. Ωστόσο, καμία από αυτές τις τεχνικές δεν μπορούν να μεταβιβάσουν με ακρίβεια προς τον κατασκευαστή τις πληροφορίες προέντασης και την γεωμετρία της επιφάνειας που απαιτούνται για την κατασκευή και την προένταση του σχήματος της μεμβράνης. Αυτό έγινε πιεστικό ζήτημα, όταν ως κατάλληλα υλικά για μόνιμες δομές, όπως fiberglass ύφασμα με επικάλυψη Teflon™ έγιναν διαθέσιμα στο εμπόριο. Υφάσματα όπως τα fiberglass επικαλυμμένα με TEFLON™ έχουν επιθυμητές ιδιότητες, όπως η μη-ευφλεκτότητας τους, ωστόσο, είναι σημαντικά πιο άκαμπτα από άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως σε εφελκυσμένες κατασκευές μεμβράνης και, κατά συνέπεια, απαιτούν μεγαλύτερη ακρίβεια για την σχηματομόρφωσης (patterning). Η ανάπτυξη αλγορίθμων για τον καθορισμό της μορφής επιφάνειας ή το σχήμα των προεντεταμένων δικτύων με καλώδια ήταν το κλειδί για τον γενική εκμετάλλευση των εφελκυσμένων κατασκευών μεμβράνης σε δομές σημαντικής κλίμακας.

Υπάρχει ένας αριθμός αλγορίθμων εύρεσης μορφής που χρησιμοποιούνται σήμερα. Κυρίως χρησιμοποιείται λογισμικό που βασίζεται στη μέθοδο πυκνότητας δύναμης (FDM). Αυτή η μέθοδος επιλύει μήτρα απ' ευθείας για την γεωμετρία ενός γενικού δικτύου προεντεταμένων στοιχείων εφελκυσμού. Επαναληπτικές τεχνικές επιτρέπουν στο σχεδιαστή να καθορίσει επιθυμητές συνθήκες προεντεταμένων καλωδίων και στοιχεία μεμβράνης. Η Birdair Inc. χρησιμοποιεί με επιτυχία αλγόριθμο μήτρας ανάλυσή τους για την εύρεση μορφής. Βασικά στοιχεία δίνουν πολύ μικρή μηχανική ακαμψία και μία προκαθορισμένη προένταση. Η γεωμετρία ισορροπίας προσδιορίζεται με μια επαναληπτική ανάλυση της δομής. Μια άλλη

μέθοδος εύρεσης μορφής σε κοινή χρήση είναι η μέθοδος της δυναμικής χαλάρωσης με κινητική απόσβεση. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται στο λογισμικό εύρεσης μορφής που χρησιμοποιείται από την FTL Associates. Η ικανότητα να δημιουργούνται σχήματα σε ένα υπολογιστή εντός οριζόμενων ορίων με μία προκαθορισμένη προέκταση γρήγορα οδήγησε σε σχηματομόρφωση (patterning) αυτών των σχημάτων σε υπολογιστή. Το πρόβλημα είναι να προσδιοριστεί το μοτίβο για επίπεδες λωρίδες υφάσματος οι οποίες, όταν συρράπτονται μαζί θα προσεγγίζουν την επιφάνεια του σχήματος. Δεδομένου ότι η γεωμετρία του σχήματος προσδιορίζεται για μία προεντεταμένη κατάσταση, τα πατρόν πρέπει να απομειώνονται για την παραμόρφωση στο ύφασμα. Απομειωμένα (Compensated) μοτίβα λωρίδας χρησιμοποιούνται για την κοπή.

Ενώ τα φυσικά μοντέλα ακόμη χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των μορφών μεμβράνης, η γεωμετρία και οι συνθήκες προέκτασης της επιφάνειας της μεμβράνης τώρα προσδιορίζονται σχεδόν αποκλειστικά από τους σχεδιαστές χρησιμοποιώντας τεχνικές υπολογιστικής. Τα δεδομένα από την εύρεση της μορφής, συνήθως συμπεριλαμβάνοντας και τα πατρόν κοπής, γεωμετρία των κόμβων και των στοιχείων προέκτασης αντιπροσωπεύουν μια πλήρη περιγραφή του μοντέλου της δομής της μεμβράνης, χωρίς τις ιδιότητες του υλικού. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για την ανάλυση. Συχνά, επιπλέον στοιχεία, όπως αντηρίδες ή δοκάρια, προστίθενται σε ένα μοντέλο για τη δημιουργία ενός μοντέλου ανάλυσης του πλήρους δομικού συστήματος.

Γενικά η ανάλυση των δομών της μεμβράνης απαιτεί γεωμετρικά μη-γραμμικές τεχνικές. Τυπικές μέθοδοι επίλυσης χρησιμοποιούν μια επαναληπτική διαδικασία, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newton-Raphson ή μια παραλλαγή, συχνά με μια αποσβενόμενη πορεία της λύσης (damped solution strategy). Πολλά δομικά συστήματα εφελκυσμού είναι δύσκαμπτα. Μια ποικιλία από κοινά δομικά συστήματα σε εφελκυσμό αρχικά είναι εύκαμπτα και αρχίζουν να παρουσιάζουν δυσκαμπτική συμπεριφορά όταν εφαρμόζεται επαρκές φορτίο. Συνεπώς, οι στρατηγικές μη γραμμικής λύσης που προβλέπουν την δυσκαμπσία έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία και μπορεί να επιταχύνουν τη σύγκλιση σε μια ευρεία ποικιλία συχνών προβλημάτων. Υπάρχουν κάποιες εξαιρέσεις, όπως μια μορφή τύπου "tensegrity" που γίνονται εύκαμπτες όταν το φορτίο αυξάνεται. Η μέθοδος δυναμικής χαλάρωσης χρησιμοποιείται επίσης με επιτυχία για τη γενική ανάλυση των γεωμετρικά μη-γραμμικών προβλημάτων.

Τα περισσότερα αρχιτεκτονικά / δομικά υλικά από ύφασμα παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά, ως συνέπεια της ύπαρξης υφασμένων σύνθετων υλικών. Σχεδόν όλα τα αρχιτεκτονικά υφάσματα που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι επικαλυμμένα. Ωστόσο, η μη-γραμμικότητα του υλικού σπάνια μοντελοποιείται. Η μηχανική συμπεριφορά των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις ιδιότητες τόσο του νήματος όσο και της ύφανσης. Οι ιδιότητες της επικάλυψης έχουν επίσης μια επίδραση επί της μηχανικής συμπεριφοράς του σύνθετου υλικού, αν και σε μικρότερο βαθμό από τις ιδιότητες του βασικού υφάσματος. Το ύφασμα συνήθως μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας LST (Γραμμικό Παραμόρφωσης Τριγωνικό) ή CST (Σταθερής Παραμόρφωσης Τρίγωνο) πεπερασμένα στοιχεία μεμβράνης ή ένα δίκτυο string (γραμμικών ελαστικών) πεπερασμένων στοιχείων. Και οι δύο αυτές προσεγγίσεις μοντελοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως με επιτυχία, ενώ η καθεμία έχει συνακόλουθους περιορισμούς που ο αναλυτής πρέπει να εξετάσει. Έχουν αναπτυχθεί πεπερασμένα στοιχεία μεμβράνης που προσομοιώνουν καλύτερα τη μη γραμμική συμπεριφορά των υφαντών σύνθετων υλικών. Ενώ το ύφασμα ως μη-γραμμικό υλικό τυπικά δεν μοντελοποιείται, κατά πάσα πιθανότητα θα αποδειχθεί χρήσιμο όταν η μηχανική καταστροφών (failure mechanics) για τα υφάσματα γίνουν πιο κατανοητά και χρησιμοποιηθούν ποσοτικά σε μια σχεδιαστική προσέγγιση οριακών καταστάσεων.

## 5.2. Εύρεση Σχήματος

### 5.2.1 Ορισμοί

*Form finding:* (Εύρεση σχήματος) είναι η διαδικασία κατά την οποία βρίσκονται οι μορφές ισορροπίας εφελκυσμένης κατασκευής με δεδομένα όρια και δυνάμεις προέκτασης.

*Minimal surface:* (Ελάχιστη ή μινιμαλιστική επιφάνεια) ορίζεται η επιφάνεια με το ελάχιστο εμβαδόν στο εσωτερικό κλειστής καμπύλης στο χώρο. Για μία μεμβράνη με δεδομένα όρια ο καθορισμός της ελάχιστης επιφάνειας συνεπάγεται ομοιόμορφη εντατική κατάσταση σε κάθε σημείο και διεύθυνση.

## 5.2.2 Μη Γραμμική Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Το 1973 διατυπώθηκε από τον Γιάννη Αργύρη (Παράρτημα Τιμής) και τους συνεργάτες του η ιδέα της ψηφιακής προσομοίωσης των ισορροπούσων μορφών που λαμβάνουν μεγάλης ευκαμψίας ελαστικά υφάσματα όταν προενταθούν από δεδομένο ακλόνητο όριο. Για το σκοπό αυτό ,επινόησε την χρήση ιδεατού υλικού με γραμμική σχέση τάσεων-παραμορφώσεων ακόμα και σε πολύ μεγάλες παραμορφώσεις.

Η μέθοδος αυτή ξεκινά από ένα προεντεταμένο ισορροπών δίκτυο καλωδίων, μετακινώντας τους οριακούς κόμβους βηματικά μέχρις ότου φθάσουν στην προκαθορισμένη θέση τους στο χώρο. Σε κάθε βήμα γίνεται καθορισμός της νέας γεωμετρικής μορφής με εφαρμογή βηματικών μητρικών μεθόδων δυσκαμψίας και θεώρηση μεγάλων μετακινήσεων. Κατά την διαδικασία αυτή γίνεται υπολογισμός του μη ισορροπώντος φορτίου  $R_u$  και ελέγχεται η ικανοποίηση της ισορροπίας σε κάθε κόμβο με βάση την επιθυμητή ακρίβεια  $\epsilon$ . Εάν αυτή δεν ικανοποιείται, τότε καθορίζεται η ισορροπούσα μορφή με εφαρμογή της βηματικής μεθόδου Newton-Raphson για την επίλυση του γραμμικού συστήματος εξισώσεων.

$R_u = [K_E + K_G] r_\Delta$	5.1
------------------------------	-----

Όπου  $R_u$  : Μονόστηλο μητρώο με τις τιμές του μη ισορροπώντος φορτίου των κόμβων σε κάθε βήμα

$K_E + K_G$  : το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας της συνολικής κατασκευής (ελαστικό και γεωμετρικό μητρώο δυσκαμψίας αντίστοιχα)

$r_\Delta$  : μονόστηλο μητρώο με τις μεταβολές των μετακινήσεων ανά βήμα

Εδώ είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι, ενδιάμεσες θλιπτικές δυνάμεις που πιθανόν να εμφανιστούν σε τμήματα καλωδίων αντιμετωπίζονται με την προσωρινή κατάργησή τους και την επαναφορά τους όταν οι μετακινήσεις των άκρων τους συνεπάγονται εφελκυστική καταπόνηση.

Η παραπάνω διαδικασία καταλήγει στην εύρεση ισορροπούσας μορφής της οποίας τα μέλη μπορεί να έχουν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις και δυνάμεις σημαντικά διαφορετικές από την προκαθορισμένη επιθυμητή τιμή προέντασής τους. Για τον σκοπό αυτό εισάγεται διαδικασία διόρθωσης των αρχικών απαραμόρφωτων μηκών του δικτύου έτσι ώστε στην τελική του θέση οι αξονικές δυνάμεις να είναι οι επιθυμητές. Χαρακτηριστικά ισχύει :

$L_u = \frac{L_0 + \Delta L}{1 + \epsilon} = \frac{L_0 + \Delta L}{1 + \frac{P_{np}}{EA}}$	5.2
--	-----

$L_u$ : το απαραμόρφωτο μήκος το οποίο αντιστοιχεί στην επιθυμητή προένταση τελικής ισορροπούσας μορφής.

$L_0$ : το απαραμόρφωτο μήκος της αρχικά ισορροπούσας κατασκευής

$\Delta L$ : η επιμήκυνση του μήκους  $L_0$  ενός μέλους μέχρι το μήκος στην τελική επιθυμητή θέση ισορροπίας

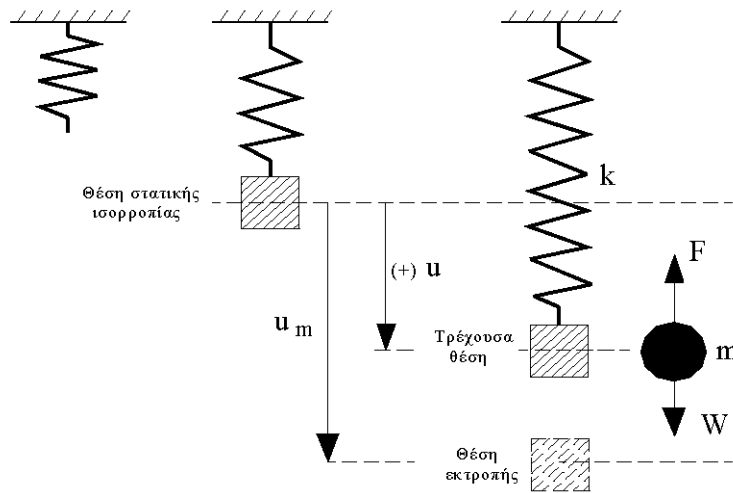
$P_{np}$ : η προκαθορισμένη επιθυμητή τιμή της προέντασης.

## 5.2.3 Μέθοδος δυναμικής χαλάρωσης



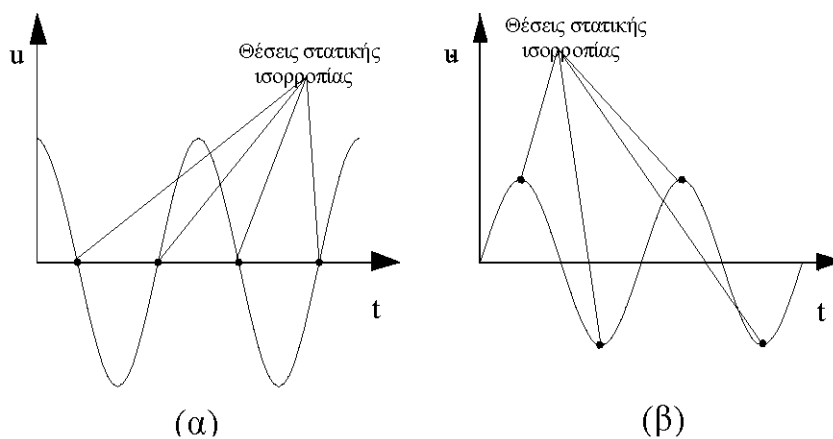
Η μέθοδος της δυναμικής χαλάρωσης επιλύει τα γεωμετρικώς μη γραμμικά προβλήματα της εύρεσης σχήματος μετατρέποντάς τα σε δυναμικά προβλήματα. Στη συνέχεια τα προβλήματα αυτά λύνονται χρησιμοποιώντας τις αρχές της δυναμικής ανάλυσης. Αυτό σημαίνει πως ο μηχανικός πρέπει να καθορίσει τη μάζα και τα χαρακτηριστικά απόσβεσης που θα δώσει στο προσομοίωμα, ώστε αυτό να αποκρίνεται κατάλληλα στην ταλάντωση που του επιβάλλεται.

Για να γίνει κατανοητή η όλη διαδικασία είναι χρήσιμο να γίνει μια σύντομη αναφορά στον απλό μονοβάθμιο ταλαντωτή (σχ. 5.3). Το σύστημα αποτελείται από ένα ελατήριο με ελαστική σταθερά  $k$  και από μια συγκεντρωμένη μάζα  $m$ . Το σύστημα αρχικά ισορροπεί σε μια θέση στατικής ισορροπίας. Αν εκτρέψουμε τη μάζα από τη θέση ισορροπίας κατά  $u_m$  και την αφήσουμε ελεύθερη θα εκτελέσει ταλάντωση. Αν υπάρχει απόσβεση η ταλάντωση θα εξασθενεί με το χρόνο και τελικά η συγκεντρωμένη μάζα θα σταματήσει πάλι στη θέση στατικής ισορροπίας που είναι μοναδική για τον απλό μονοβάθμιο ταλαντωτή.



Σχ. 5.3 Απλός μονοβάθμιος ταλαντωτής

Στο σχήμα 5.4 φαίνονται τα διαγράμματα μετατόπισης - χρόνου και ταχύτητας χρόνου. Όταν η μάζα διέρχεται κατά την ταλάντωσή της από τη θέση στατικής ισορροπίας η μετατόπισή της από τη θέση ισορροπίας,  $u(t)$ , μηδενίζεται ενώ η ταχύτητά της,  $\dot{u}(t)$ , άρα και η κινητική ενέργεια του ταλαντωτή γίνεται μέγιστη.



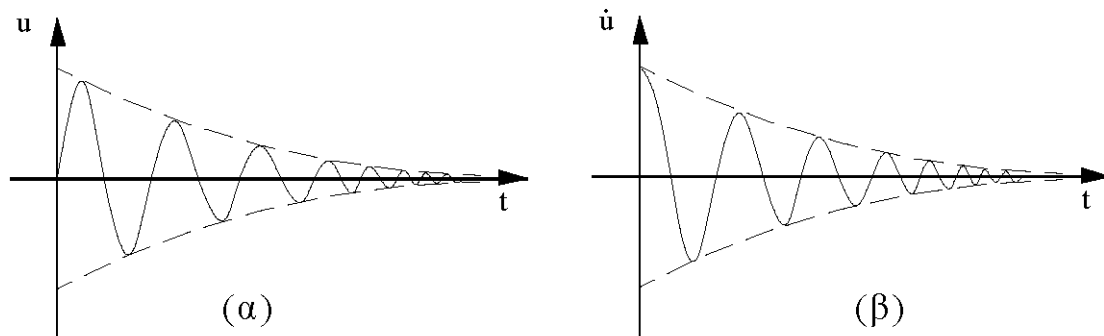
Σχ. 5.4

(α) Διάγραμμα μετατόπισης - χρόνου, (β) Διάγραμμα ταχύτητας – χρόνου

Στην περίπτωση του απλού ταλαντωτή η κινητική ενέργεια δίνεται από τη σχέση:

$$E_k = \frac{1}{2} m \dot{u}^2$$

Στην περίπτωση που έχουμε απόσβεση το εύρος της ταλάντωσης συνεχώς μειώνεται με το χρόνο (σχ. 5.5α) μέχρι ο ταλαντωτής να βρεθεί στη θέση στατικής ισορροπίας. Κατά τον ίδιο τρόπο η ταχύτητα του ταλαντωτή (σχ. 5.5β) σε μια ταλάντωση με απόσβεση φθίνει συνεχώς μέχρι ο ταλαντωτής να φθάσει στη θέση στατικής ισορροπίας. Το πόσο γρήγορα θα φτάσει ο ταλαντωτής στη θέση στατικής ισορροπίας, για δεδομένη εκτροπή από τη θέση στατικής ισορροπίας, εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά απόσβεσής του. Επομένως αν αυξήσω πολύ τα χαρακτηριστικά απόσβεσης του ταλαντωτή υπάρχει το ενδεχόμενο αυτός να μην εκτελέσει ταλάντωση ή η ταλάντωση που θα εκτελέσει να διαρκέσει για πολύ λίγο.



Σχ. 5.5 Διαγράμματα με απόσβεση (α) μετατόπισης - χρόνου, (β) ταχύτητας - χρόνου

Στην περίπτωση της μεμβράνης η θέση στατικής ισορροπίας είναι άγνωστη. Για να βρούμε τη θέση ισορροπίας υποθέτουμε αυθαίρετα μια θέση ισορροπίας και αφήνουμε το σύστημα ελεύθερο. Αυτό αρχίζει να ταλαντώνεται μέχρι να ισορροπήσει, λόγω απόσβεσης, σε μια θέση στατικής ισορροπίας.

Η επαναληπτική διαδικασία που ακολουθείται εξετάζει τις μεταβολές της κινητικής ενέργειας στη μεμβράνη. Όπως αναφέραμε προηγουμένως για τον μονοβάθμιο ταλαντωτή στη θέση στατικής ισορροπίας η κινητική ενέργεια του συστήματος γίνεται μέγιστη. Για την περίπτωση της μεμβράνης που είναι ένα πολυβάθμιο σύστημα εξετάζουμε τη συνολική κινητική ενέργεια του συστήματος. Όταν παρουσιαστεί ακρότατο στην συνολική κινητική ενέργεια της μεμβράνης η επαναληπτική διαδικασία σταματάει και ξεκινάει πάλι εκτρέποντας τη μεμβράνη με τις μετατοπίσεις που βρήκαμε στην πρώτη επανάληψη. Σε όλη αυτή τη διαδικασία χρησιμοποιούμε το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα σε βηματική μορφή κεντρικών πεπερασμένων διαφορών. Έτσι για την κίνηση του κόμβου  $i$  κατά την διεύθυνση  $x$  στο χρόνο  $t$  έχουμε:

$$R_{xi}^t - C_{xi} \frac{(V_{xi}^{t+\Delta t} + V_{xi}^{t-\Delta t})}{2} = M_{xi} \frac{(\dot{V}_{xi}^{t+\Delta t} + \dot{V}_{xi}^{t-\Delta t})}{2}$$

Όπου  $R_{xi}^t$  είναι η συνισταμένη των δυνάμεων,  $C_{xi}$  είναι οι συντελεστές ιξώδους απόσβεσης,  $V_{xi}$  και  $\dot{V}_{xi}$  είναι η ταχύτητα και η επιτάχυνση αντίστοιχα κατά την διεύθυνση  $x$ ,  $\Delta t$  είναι μια μικρή χρονική αύξηση και  $M_{xi}$  είναι η συγκεντρωμένη (πλασματική) μάζα στον κόμβο.

Αντικαθιστώντας την έκφραση  $C_{xi} = M_{xi} C' \Delta t$  στη σχέση (5.4) έχουμε:

$$V_{xi}^{t+\Delta t} = A \cdot V_{xi}^{t-\Delta t} + B_{xi} \cdot R^t$$

Όπου:

$$A = \frac{(1 - C'/2)}{(1 + C'/2)}, \quad B_{xi} = \frac{\Delta t}{2M_{xi}}(1 + A)$$

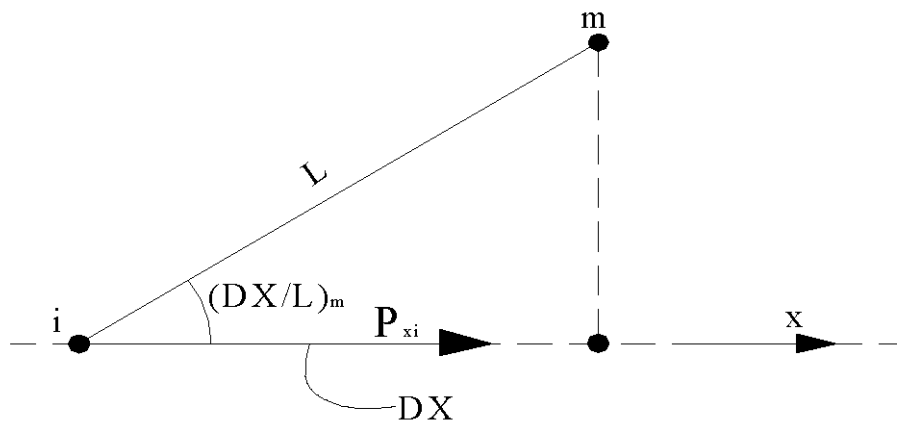
και  $C'$  είναι η απόσβεση ανά μονάδα μάζας και θεωρείται σταθερή. Στην περίπτωση μας ισχύει  $A=1$ . Η επαναληπτική σχέση για τις συντεταγμένες των κόμβων είναι:

$X_{xi}^{t+\Delta t} = X_i^t + \Delta t \cdot V_{xi}^{t+\Delta t/2}$	5.6
--	-----

Οι επικόμβιες, δυνάμεις στο χρόνο  $t+\Delta t$  είναι:

$R_{xi}^{t+\Delta t} = P_{xi} + \sum \left( \frac{DX}{L} \right)_m \cdot T_m^{t+\Delta t}$	5.7
--	-----

όπου  $P_{xi}$  και  $T_m$  είναι το εφαρμοζόμενο φορτίο κατά την διεύθυνση  $x$  και η δύναμη εφελκυσμού στην πλευρά  $m$  αντίστοιχα. Επίσης  $((DX)/L)_m$  είναι το τρέχον συνημίτονο κατεύθυνσης μεταξύ της πλευράς του πεπερασμένου στοιχείου και του άξονα  $x$  (σχήμα 5.6).



Σχ. 5.6 Επικόμβια φόρτιση συνημίτονο κατεύθυνσης

Αφού βρούμε τις νέες επικόμβιες δυνάμεις από τη σχέση (5.7), από τη σχέση (5.5) βρίσκουμε τις νέες ταχύτητες κ.ο.κ. Όταν πλησιάζουμε τη θέση ισορροπίας που κινητικά είναι μια ευσταθής θέση, η κινητική ενέργεια της μεμβράνης αυξάνεται. Όταν στην επαναληπτική μέθοδο βρίσκουμε ένα ακρότατο, δηλαδή όταν η ταχύτητα σε ένα βήμα είναι μικρότερη από την ταχύτητα του προηγούμενου βήματος (θέση ακρότατου), αυτό σημαίνει ότι η μεμβράνη ταλαντώνεται γύρω από μια θέση ισορροπίας. Τότε θέτουμε τις επικόμβιες ταχύτητες ίσες με μηδέν και αρχίζουμε μια νέα ταλάντωση.

Η νέα ταλάντωση γίνεται με επικόμβιες συντεταγμένες που αντιστοιχούν στο ακρότατο και με νέες επικόμβιες δράσεις. Όταν προσεγγίζουμε τη ζητούμενη κατάσταση ισορροπίας, τότε τα ακρότατα παρουσιάζουν όλο και μικρότερες τιμές μέχρι ουσιαστικά να μηδενιστούν.

Ο υπολογισμός των εφελκυστικών δυνάμεων στα στοιχεία της μεμβράνης μπορεί να γίνει από τη μητρωϊκή σχέση:

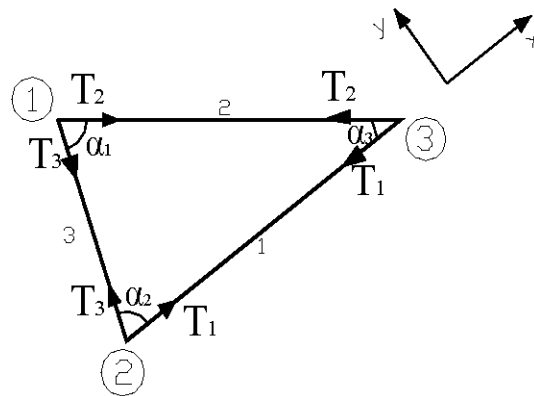
$T = T^S + K \Delta l$	5.8
------------------------	-----

όπου  $T^S$  είναι το μητρώο των επικόμβιων δυνάμεων προέντασης στο πεπερασμένο στοιχείο,  $\Delta l$  οι μεταβολές μήκους των πλευρών του στοιχείου,  $T$  το μητρώο των εφελκυστικών δυνάμεων στα άκρα του στοιχείου και  $K$  το μητρώο δυσκαμψίας.

Το μέτρο διάτμησης στις μεμβράνες είναι γενικά μικρό. Επομένως αν οι διατμητικές τάσεις αμεληθούν και οι κύριες διευθύνσεις της πλέξης αντιστοιχούν στις τοπικές διευθύνσεις  $x, y$  ο καθορισμός του εφελκυσμού στην πλευρά  $i$  του πεπερασμένου στοιχείου απλοποιείται ως εξής:

$T_i = \frac{n_y \cdot l_i}{2 \tan \alpha_i} + \frac{A}{l_i} \cdot (n_x - n_y)$	5.9
---	-----

όπου  $l_i$  είναι το μήκος της πλευράς  $i$  του στοιχείου και  $\alpha_i$  είναι η γωνία του στοιχείου που βρίσκεται απέναντι από την πλευρά  $i$ . Επίσης  $A$  είναι η τρέχουσα επιφάνεια του πεπερασμένου στοιχείου και  $n_x, n_y$  είναι οι εντάσεις κατά τις διευθύνσεις  $x, y$ .



Σχήμα 5.7 Πεπερασμένο στοιχείο μεμβράνης - συνιστώσες των επικόμβιων δυνάμεων κατά μήκο των πλευρών του στοιχείου

Οι εντάσεις στη μεμβράνη (δύναμη ανά μονάδα πλάτους), για απλό ορθότροπο υλικό δίνονται από τις σχέσεις:

$n_x = n_x^s + d_{xx} \cdot \varepsilon_x + d_{xy} \cdot \varepsilon_y$ $n_y = n_y^s + d_{xy} \cdot \varepsilon_x + d_{yy} \cdot \varepsilon_y$	5.10
---	------

όπου  $n_x^s$  και  $n_y^s$  είναι οι τιμές της προέντασης,  $d_{xx}, d_{yy}, d_{xy}$  είναι οι ορθοτροπικές σταθερές του υλικού.

Οι τροπές της μεμβράνης δίνονται από τις σχέσεις:

$\varepsilon_x = \frac{l_i}{l_i^s} - 1 \quad \text{και} \quad \varepsilon_y = \frac{A \cdot l_i^s}{A^s \cdot l_i} - 1$	5.11
--	------

όπου  $A^s$  και  $l_i^s$  είναι αντίστοιχα η επιφάνεια του στοιχείου και το μήκος της πλευράς  $l$  στην αρχική κατάσταση και  $A, l_i$  είναι τα ίδια μεγέθη στην τρέχουσα παραμορφωμένη κατάσταση.

Επανάραξη της επαναληπτικής διαδικασίας στα σημεία ακρότατου της κινητικής ενέργειας

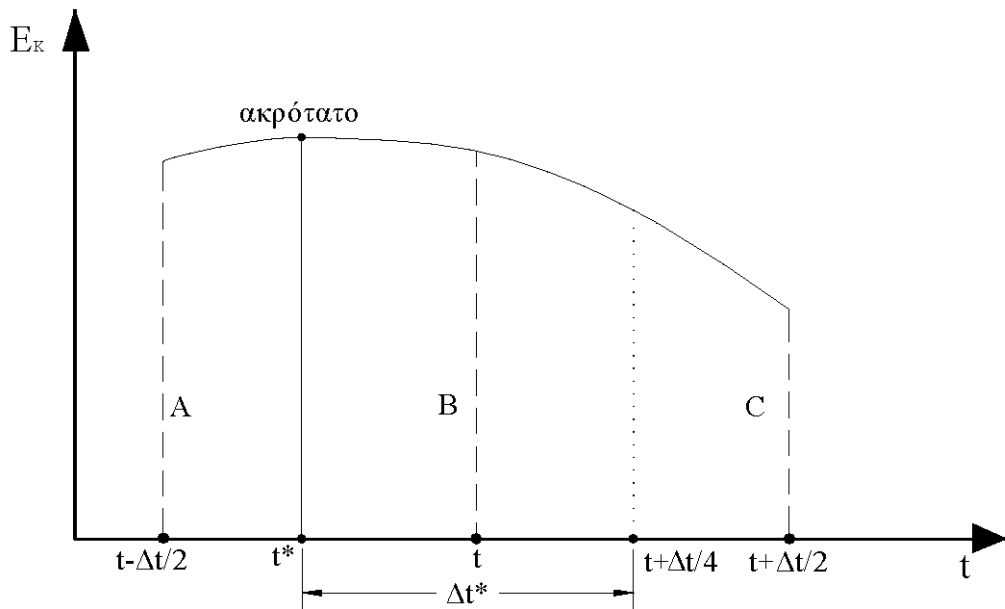
Όπως αναφέραμε η ταχύτητα στο χρόνο  $t+\Delta t/2$  δίνεται για  $A=1$  από τη σχέση:

$\mathbf{V}^{t+\Delta t/2} = \mathbf{V}^{t-\Delta t/2} + \Delta t \cdot \frac{\mathbf{R}^t}{M}$	5.12
---	------

Οι νέες συντεταγμένες είναι:

$\mathbf{X}^{t+\Delta t} = \mathbf{X}^t + \Delta t \cdot \mathbf{V}^{t+\Delta t}$	5.13
---	------

Αν η κινητική ενέργεια στο χρόνο  $t+\Delta t/2$  είναι μικρότερη απ' ότι στο χρόνο  $t-\Delta t/2$ , αυτό σημαίνει ότι <<περάσαμε>> ένα ακρότατο της συνολικής κινητικής ενέργειας και οι ταχύτητες πρέπει να μηδενιστούν. Επίσης οι συντεταγμένες στο τρέχον βήμα είναι  $X^{t+\Delta t}$ , ενώ στο ακρότατο είναι  $X^{t^*}$ , όπου  $t^*$  είναι ο χρόνος που παρουσιάζεται το ακρότατο. Για να καθορίσουμε τις συντεταγμένες  $X^{t^*}$  πρέπει να βρούμε μια καμπύλη δευτέρου βαθμού που να διέρχεται από τα σημεία όπου η κινητική ενέργεια παίρνει τις τιμές A, B και C (σχήμα 14.6).



Σχ. 5.8 Εύρεση τοπικού ακρότατου κινητικής ενέργειας

Οι τιμές A και B είναι οι δύο προηγούμενες τιμές της συνολικής κινητικής ενέργειας και C είναι η τρέχουσα τιμή της. Ο χρόνος  $\Delta t^*$  δίνεται από τη σχέση:

$\Delta t^* = \Delta t \cdot \frac{E}{E - D} = \Delta t \cdot q$	5.14
--	------

όπου  $E=(C-B)$  και  $D=(B-A)$ .

Επομένως οι συντεταγμένες στο ακρότατο είναι:

$X^{t^*} = X^{t+\Delta t} - \Delta t \cdot V^{t+\frac{\Delta t}{2}} - \Delta t^* V^{t-\frac{\Delta t}{2}}$	5.15
--	------

Η σχέση (5.15) με τη βοήθεια των σχέσεων (5.12) και (5.14) γράφεται:

$$\mathbf{X}^{i*} = \mathbf{X}^{t+\Delta t} - \Delta t(1+q) \cdot \mathbf{V}^{t+\Delta t/2} + \frac{\Delta t^2}{M} \cdot q \cdot \mathbf{R}^t$$

5.16

Οι ταχύτητες στο μέσο του πρώτου χρονικού βήματος όταν ξεκινάει πάλι η επαναληπτική διαδικασία δίνονται από τη σχέση:

$$\mathbf{V}^{\frac{\Delta t}{2}} = \frac{\Delta t}{2M} \cdot \mathbf{R}^{(0)}$$

5.17

#### 5.2.4 Updated Reference Strategy (URS)

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τους Bletzinger K. U. και Ramm E. το 1999 ως γενική μέθοδος εύρεσης ισορροπουσών μορφών δικτύων καλωδίων ή μεμβρανών και βασίζεται στην μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Η μέθοδος αυτή ξεκινά με την αρχή των δυνατών έργων στην παραμορφωμένη γεωμετρία του φορέα ο οποίος θεωρείται ότι ισορροπεί υπό δεδομένο πεδίο τάσεων (οι τάσεις είναι αποτέλεσμα της αρχικής προέκτασης και των παραμορφώσεων της μεμβράνης με γνωστό όριο). Το δυνατό έργο που το παραπάνω πρόβλημα δίνεται από την σχέση:

$$\delta w = t \int_{\alpha} \sigma d\varepsilon d\alpha = t \int_{\alpha} \sigma \frac{\partial(\delta \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}} d\alpha = 0$$

5.18

Όπου

$\sigma$  :τανυστής τάσεων Cauchy με στοιχεία τις τάσεις στην παραμορφωμένη θέση (που ταυτίζεται με την θέση ισορροπίας)

$\frac{\partial(\delta \mathbf{u})}{\partial \mathbf{x}}$  : η μερική παράγωγος των δυνατών μετακινήσεων αναφορικά με την παραμορφωμένη θέση

t: πάχος μεμβράνης (θεωρείται σταθερό κατά την παραμόρφωση)

$\alpha$ : η επιφάνεια στην παραμορφωμένη θέση

η παραπάνω εξίσωση με χρήση της διαφορικής γεωμετρίας μπορεί να γραφεί με ολοκλήρωση στην επιφάνεια A της αρχικής γεωμετρίας (initial configuration) ως εξής:

$$\delta w = t \int_A \det \mathbf{F} (\sigma \mathbf{F}^{-T}) \delta \mathbf{F} d\mathbf{A} = t \int_A \mathbf{F} \mathbf{S} \delta \mathbf{F} d\mathbf{A} = 0$$

5.19

Όπου

$\mathbf{S}$  : 2<sup>nd</sup> Piola-Kirchoff τανυστής των τάσεων με τις τάσεις στην αρχική γεωμετρία (initial configuration) και δίνεται από την σχέση  $\mathbf{S} = \det \mathbf{F}^* \mathbf{F}^{-1} \sigma \mathbf{F}^{-T}$

$\mathbf{F}$ : μητρώο κλίσεων παραμορφώσεων (gradient deformation) το οποίο συνδέει το μήκος στην παραμορφωμένη γεωμετρία με το μήκος στην απαραμόρφωτη γεωμετρία με την σχέση  $\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}}$  ( $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{X}$  : το διάνυσμα με τις συντεταγμένες στην παραμορφωμένη και αρχική γεωμετρία αντίστοιχα)

Η επίλυση της εξίσωσης 5.19 γίνεται αριθμητικά με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Χαρακτηριστικά, οι συντεταγμένες και η μετακίνηση ενός τυχαίου σημείου κάποιου στοιχείου της διακριτοποιημένης επιφάνειας περιγράφεται ως συνάρτηση των συντεταγμένων και των μετακινήσεων των κόμβων του αντίστοιχα. Έτσι η εξίσωση της σχέσης 5.19 καταλήγει σε μη γραμμικό σύστημα  $N$  (αριθμός βαθμών ελευθερίας) εξισώσεων της μορφής

$\frac{\partial w}{\partial b_r} = t \int_A \det \mathbf{F} (\sigma \mathbf{F}^{-T}) \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial b_r} d\mathbf{A} = 0$	5.20
--	------

Όπου

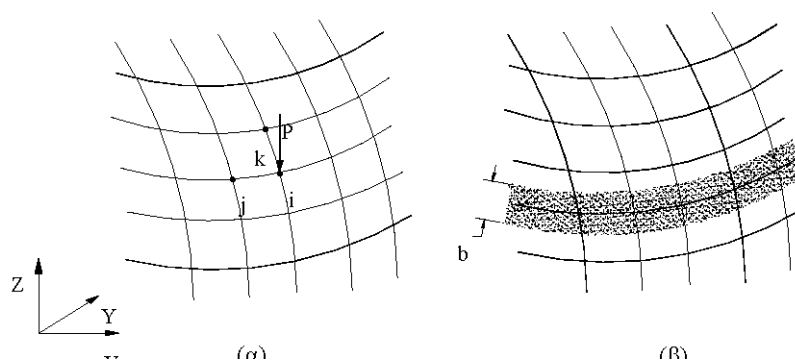
$b_r$  : το διάνυσμα των επικόμβιων μετακινήσεων των κόμβων των στοιχείων.

Η επίλυση του παραπάνω συστήματος γίνεται με την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson. Εδώ παρατηρούμε ότι το μητρώο δυσκαμψίας της κατασκευής είναι πιθανόν να μην αντιστρέφεται λόγω ύπαρξης της εντός επιπέδου αλλαγής της μορφής. Αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί αγνοώντας τις εντός επιπέδου μετακινήσεις και λαμβάνοντας μόνο τις κάθετες στην επιφάνεια μετακινήσεις. Για την περίπτωση όμως που αυτή η θεώρηση δεν είναι εφικτή, όπως για παράδειγμα συμβαίνει με μεμβράνες με ακραίο καλώδιο των οποίων η ένταση προκαλεί σημαντικές εντός επιπέδου μετακινήσεις, τότε θα πρέπει να βρεθεί άλλη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την μέθοδο της αριθμητικής συνέχισης (numerical continuation ή homotopic method) και διατυπώνει το αρχικό πρόβλημα διαφορετικά με την προσθήκη μιας συνθήκης της οποίας η επίδραση είναι αμελητέα κατά την προσέγγιση της λύσης.

### 5.2.5 Μέθοδος Πυκνότητας Δύναμης (FDM)

Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε για καλώδια από τον Schek και επεκτάθηκε και στην εύρεση σχήματος για μεμβράνες. Στα σχήματα 5.9α και 5.9β φαίνονται αντίστοιχα ένα δίκτυο καλωδίων και η προσομοίωση της μεμβράνης από αυτό το δίκτυο. Θεωρούμε τον κόμβο  $i$  του δικτύου καλωδίων. Αυτός συνδέεται με τους κόμβους  $j, k$  κ.λ.π. Έστω  $p_i$  η εξωτερική δύναμη που δρα στον κόμβο  $i$  και  $F_{ij}$  η αξονική δύναμη στο τμήμα του καλωδίου με μήκος  $L_{ij}$ . Οι εξισώσεις ισορροπίας για τον κόμβο  $i$  στο καθολικό σύστημα συντεταγμένων γράφονται:



Σχ. 5.9

(α) Δίκτυο καλωδίων (β) Προσομοίωση της μεμβράνης με δίκτυο καλωδίων

$F_{ij} \cdot \frac{X_j - X_i}{L_{ij}} + F_{ik} \cdot \frac{X_k - X_i}{L_{ik}} + \dots = p_{ix}$ $F_{ij} \cdot \frac{Y_j - Y_i}{L_{ij}} + F_{ik} \cdot \frac{Y_k - Y_i}{L_{ik}} + \dots = p_{iy}$ $F_{ij} \cdot \frac{Z_j - Z_i}{L_{ij}} + F_{ik} \cdot \frac{Z_k - Z_i}{L_{ik}} + \dots = p_{iz}$	5.21
--	------

Εισάγουμε για κάθε στοιχείο καλωδίου το μέγεθος της πυκνότητας δύναμης, δηλαδή τον λόγο:

$f_{ij} = \frac{F_{ij}}{L_{ij}}$	5.22
----------------------------------	------

Επομένως αν αντικαταστήσουμε τη σχέση (5.22) στις εξισώσεις (5.21) αυτές γράφονται:

$f_{ij} \cdot (X_j - X_i) + f_{ik} \cdot (X_k - X_i) + \dots = p_{ix}$ $f_{ij} \cdot (Y_j - Y_i) + f_{ik} \cdot (Y_k - Y_i) + \dots = p_{iy}$ $f_{ij} \cdot (Z_j - Z_i) + f_{ik} \cdot (Z_k - Z_i) + \dots = p_{iz}$	5.23
--	------

Παρόμοιες εξισώσεις μπορούν να γραφούν για όλους τους εσωτερικούς κόμβους της μεμβράνης, ενώ για τους συνοριακούς κόμβους οι εξισώσεις μειώνονται ανάλογα με τους βαθμούς ελευθερίας του κάθε κόμβου. Από το σύστημα αυτό προκύπτουν οι συντεταγμένες των κόμβων του δικτύου, εφόσον είναι γνωστές οι ποσότητες πυκνότητας - δύναμης και οι επικόμβιες εξωτερικές φορτίσεις. Στη συνέχεια υπολογίζεται το μήκος του κάθε στοιχείου, άρα και η εφελκυστική δύναμη στο στοιχείο:

$F_{ij} = f_{ij} \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}$	5.24
--	------

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι μπορεί εύκολα να επεκταθεί στις μεμβράνες με απλές τροποποιήσεις. Αν το υλικό της μεμβράνης αποτελείται από ίνες δύο διευθύνσεων χωρίς κάποιο συνδετικό υλικό μεταξύ τους και έχουν σχετικά χαλαρή πλέξη τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η παραμόρφωση των ινών κατά τη μια διεύθυνση δεν επηρεάζει την άλλη διεύθυνση (λόγος Poisson  $\nu \cong 0$ ). Τότε μια λωρίδα πλάτους  $b$  (σχήμα 5.9β ) μπορεί να προσομοιωθεί με καλώδιο. Αυτή όμως η περίπτωση είναι συνήθως σπάνια. Στις μεμβράνες γενικά παρουσιάζεται διαξονική ένταση και παραμόρφωση. Για να προσομοιώσουμε τη μεμβράνη σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιούμε τριγωνικά στοιχεία, με σταθερή παραμόρφωση (σχήμα 5.10α). Σε αυτή την περίπτωση ισχύει η μητρική σχέση:

$\mathbf{p} = \Delta \cdot \mathbf{h} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{s}$	5.25
--	------

όπου:

$\Delta$ : επιφάνεια στοιχείου

$h$ : πάχος στοιχείου

$\mathbf{p} = [p_{1x} \ p_{1y} \ p_{2x} \ p_{2y} \ p_{3x} \ p_{3y}]^T$  διάνυσμα εξωτερικών επικόμβιων φορτίων στοιχείου

$\mathbf{s} = [\sigma_{xx} \ \sigma_{yy} \ \tau_{xy}]^T$  διάνυσμα εσωτερικών τάσεων στοιχείου και



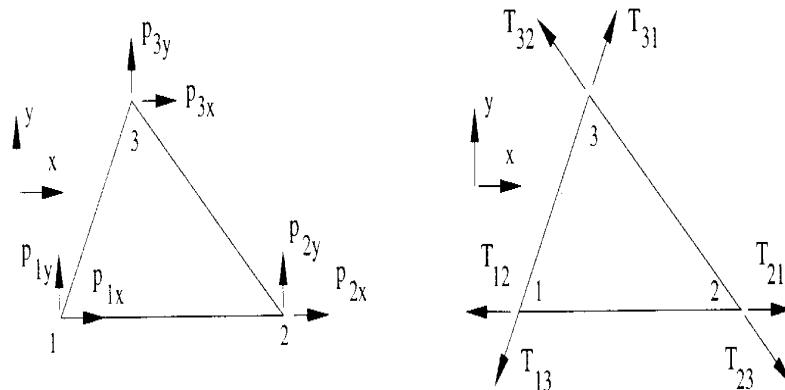
$$\mathbf{B} = \frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{bmatrix}^T$$

μητρώο διαφοράς συντεταγμένων γειτονικών κόμβων στοιχείου,

$$b_1 = y_2 - y_3, \quad b_2 = y_3 - y_1, \quad b_3 = y_1 - y_2,$$

$$c_1 = x_3 - x_2, \quad c_2 = x_1 - x_3, \quad c_3 = x_2 - x_1$$

Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται σε τοπικό σύστημα αξόνων, όπου  $x, y$  είναι συνεπίπεδα και ο  $x$  άξονας είναι παράλληλος σε μια πλευρά (σχήμα 5.10β).



Σχήμα 5.10 (α) Ισοστασικό τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο μεμβράνης (β) Το ίδιο στοιχείο με τις επικόμβιες δυνάμεις κατά τις διευθύνσεις των πλευρών

Στη συνέχεια οι επικόμβιες δυνάμεις συνδέονται με τις αξονικές δυνάμεις στα μέλη. Για τον κόμβο #1 η σχέση μετασχηματισμού είναι:

$\begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_3}{L_{12}} & \frac{c_2}{L_{13}} \\ \frac{b_3}{L_{12}} & -\frac{b_2}{L_{13}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_{13} \end{bmatrix}$	5.26
--	------

Επίσης ορίζουμε τις ποσότητες πυκνότητας δύναμης για τα στοιχεία της μεμβράνης:

$t_{12} = \frac{T_{12}}{L_{12}}$ $t_{13} = \frac{T_{13}}{L_{13}}$	5.27
---	------

Αν αντικαταστήσουμε τις σχέσεις (5.27) στην μητρωϊκή εξίσωση (5.26) έχουμε:

$\begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_3 & c_2 \\ b_3 & -b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{12} \\ t_{13} \end{bmatrix}$	5.28
--	------

Αν αντιστρέψουμε αυτή τη σχέση προκύπτει:

$\begin{bmatrix} t_{12} \\ t_{13} \end{bmatrix} = \frac{1}{c_2 b_3 - c_3 b_2} \begin{bmatrix} b_2 & c_2 \\ b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{1x} \\ p_{1y} \end{bmatrix}$	5.29
--	------

Εκτελώντας την ίδια διαδικασία και για τους άλλους δύο κόμβους του στοιχείου προκύπτει τελικά η συνολική μητρική σχέση για τον υπολογισμό του λόγου πυκνότητας δύναμης για τα στοιχεία της μεμβράνης:

$\begin{bmatrix} t_{12} \\ t_{13} \\ t_{21} \\ t_{23} \\ t_{31} \\ t_{32} \end{bmatrix} = -\frac{1}{2\Delta} \begin{bmatrix} b_2 & c_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ b_3 & c_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_1 & c_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & b_2 & c_2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{P}$	5.30
---	------

Όπου

$$-2\Delta = c_2 b_3 - c_3 b_2 = c_3 b_1 - c_1 b_3 = c_1 b_2 - c_2 b_1$$

Από τις σχέσεις (5.25) και (5.30) προκύπτει:

$\begin{bmatrix} t_{12} \\ t_{13} \\ t_{21} \\ t_{23} \\ t_{31} \\ t_{32} \end{bmatrix} = -\frac{h}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_1 b_2 & c_1 c_2 & b_1 c_2 + b_2 c_1 \\ b_3 b_1 & c_3 c_1 & b_3 c_1 + b_1 c_3 \\ b_1 b_2 & c_1 c_2 & b_1 c_2 + b_2 c_1 \\ b_2 b_3 & c_2 c_3 & b_2 c_3 + b_3 c_2 \\ b_3 b_1 & c_3 c_1 & b_3 c_1 + b_1 c_3 \\ b_2 b_3 & c_2 c_3 & b_2 c_3 + b_3 c_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xx} \end{bmatrix}$	5.31
--	------

Όμως ισχύει  $t_{ij} = t_{ji}$ , επομένως:

$\begin{bmatrix} t_{12} \\ t_{23} \\ t_{32} \end{bmatrix} = -\frac{h}{4\Delta} \begin{bmatrix} b_1 b_2 & c_1 c_2 & b_1 c_2 + b_2 c_1 \\ b_2 b_3 & c_2 c_3 & b_2 c_3 + b_3 c_2 \\ b_3 b_1 & c_3 c_1 & b_3 c_1 + b_1 c_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$	5.32
---	------

Η εξίσωση (5.32) μας δίνει τις ποσότητες πυκνότητας δύναμης για ισοτασικό τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο μεμβράνης. Συνοπτικά η διαδικασία της μεθόδου πυκνότητας δύναμης για την εύρεση του σχήματος της μεμβράνης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

1. Υποδιαιρούμε τη μεμβράνη σε μικρά τριγωνικά στοιχεία.
2. Υποθέτουμε μια κατανομή τάσεων  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  και  $\tau_{xy}$  σε κάθε τριγωνικό στοιχείο.
3. Αντικαθιστούμε κάθε τρίγωνο με τρία στοιχεία καλωδίου (τα οποία αντιστοιχούν στις πλευρές των τριγώνων) και υπολογίζουμε τις ποσότητες πυκνότητας - δύναμης σ'αυτά από τη σχέση (5.32).
4. Σχηματίζουμε τις εξισώσεις ισοροπίας του δικτύου.
5. Λύνουμε το σύστημα και βρίσκουμε τις συντεταγμένες των κόμβων.
6. Υπολογίζουμε τις τάσεις σε κάθε στοιχείο με τις νέες συντεταγμένες λύνοντας την

εξίσωση (5.32).

7. Ελέγχουμε την ακρίβεια της λύσης. Αν δεν είναι ικανοποιητική επιστρέφουμε στο 3ο βήμα και επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία.

8. Ελέγχουμε την απόκλιση από το σχήμα που ζητάμε. Αν είναι μεγάλη τροποποιούμε την κατανομή των τάσεων στο 2ο βήμα.

9. Ελέγχουμε αν σ'όλα τα στοιχεία οι κύριες τάσεις είναι θετικές. Αν δεν είναι επιστρέφουμε στο 2ο βήμα.

10. Αν μετά από πολλές επαναλήψεις διαπιστώνουμε ότι δεν έχουμε σύγκλιση τότε μπορεί να είναι απαραίτητο να τροποποιήσουμε το ζητούμενο σχήμα.

#### Πλεονεκτήματα της μεθόδου πυκνότητας δύναμης

Η εισαγωγή του μεγέθους «πυκνότητα δύναμης», έχει ως αποτέλεσμα μεγάλες αλλαγές τόσο στην στρατηγική όσο και στην αριθμητικό μέρος της διαδικασίας εύρεσης σχήματος επειδή, οι οποίες και αναλύονται στη συνέχεια:

- Οι εξισώσεις πυκνότητας δύναμης είναι γραμμικές, και έτσι για την εύρεση ενός σχήματος ισορροπίας πρέπει να επιλυθεί το σύστημα των γραμμικών εξισώσεων (5.32). Το σύστημα των γραμμικών αυτών εξισώσεων δίνει μοναδική λύση, αν οριστούν ως σταθερές παράμετροι:

α) οι συντεταγμένες των σταθερών (αμετακίνητων) κόμβων που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο πρόβλημα

β) τα μεγέθη «πυκνότητας δύναμης» για όλα τα καλώδια του δικτύου

Η δεύτερη παράμετρος μοιάζει να αποτελεί εμπόδιο για την πρακτική εφαρμογή της μεθόδου γιατί δεν είναι εκ των προτέρων γνωστά τα μεγέθη πυκνότητας δύναμης που ανήκουν σε ένα δεδομένο σχήμα ισορροπίας, όμως εκτεταμένες έρευνες και πειράματα έδειξαν ότι έστω και μη ακριβείς προεκτιμήσεις των μεγεθών αυτών αρκούν για την παραγωγή σχημάτων ισορροπίας που λειτουργούν ως σημείο εκκίνησης της επαναληπτικής διαδικασίας εύρεσης σχήματος. Έτσι, στις περισσότερες περιπτώσεις αρκεί σαν πρώτο βήμα να εισαχθούν τα χαλαρά μήκη των καλωδίων στα μεγέθη πυκνότητων δύναμης για κάθε εσωτερικό καλώδιο ισοδύναμου δικτύου, ενώ για τη συνοριακή ζώνη του δικτύου, αρκεί να εισαχθούν νούμερα τα οποία είναι αντιστρόφως ανάλογα του μήκους των καλωδίων που αντιστοιχούν στο τυχαίο σχήμα του συνόρου αυτού.

Το γεγονός αυτό παρόλο που δεν είναι αυταπόδεικτο, απλοποιεί τη μέθοδο και την καθιστά ως ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την εύρεση σχήματος μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.

#### Χαρακτηριστικά της μεθόδου

- για να παραχθεί μια ικανοποιητική μορφή ισορροπίας, πρέπει να επιλυθεί μόνο ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων και αυτό μπορεί να γίνει χωρίς επαναλήψεις σε ένα και μόνο γρήγορο βήμα υπολογισμών.

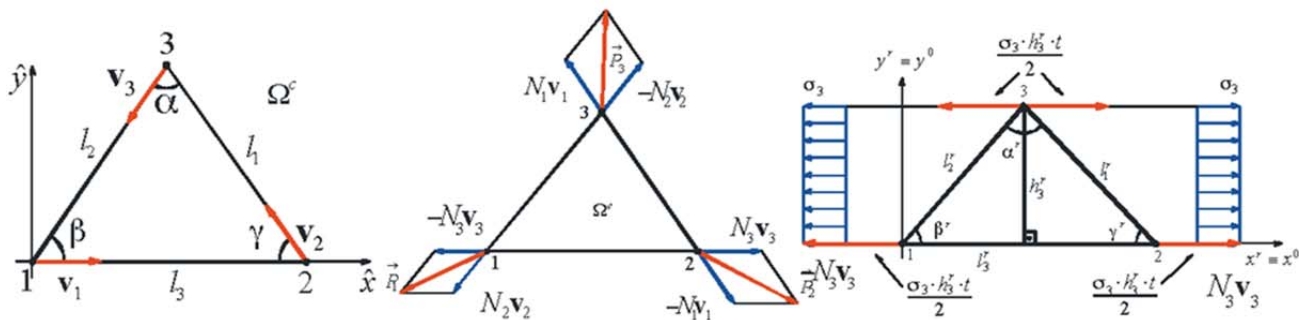
- τα δεδομένα για τις πυκνότητες δύναμης, οι οποίες αποτελούν τα απαραίτητα προαπαιτούμενα στοιχεία για τους υπολογισμούς, μπορούν εύκολα να βρεθούν, αφού τις περισσότερες φορές είναι επαρκής η εισαγωγή των ισοδυνάμων χαλαρών μηκών  $l$  των καλωδίων για το εσωτερικό του δικτύου και τα αντίστροφά τους  $1/l$  για το σύνορο ώστε να δημιουργηθούν αρχικά σχήματα.

- οι εξισώσεις των πυκνοτήτων δύναμης δεν περιέχουν καθόλου παραμέτρους που να αναφέρονται στο υλικό κατασκευής του δικτύου, δηλαδή η λύση τους περιγράφει ένα καθαρό σχήμα ισορροπίας ανεξαρτήτως υλικού. Σε επόμενο στάδιο της διαδικασίας εύρεσης σχήματος, απαιτείται να προσδιοριστεί κάποιο αυθαίρετα επιλεγμένο υλικό.

### 5.2.6 Μέθοδος Φυσικής Πυκνότητας Δύναμης (NFDM)

Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε από τον R.M.O. Pauletti και P.M. Pimenta (2006). Η μέθοδος φυσικής δύναμης πυκνότητας (NFDM) είναι μια επέκταση της πολύ γνωστής μεθόδου πυκνότητας δύναμης για την εύρεση μορφή συνεχούς εφελκυσμένης μεμβράνης, η οποία διατηρεί τη γραμμικότητα της αρχικής μεθόδου. Εκτός αυτού, αν η NFDM εφαρμόζεται επαναληπτικά, συγκλίνει σε μια διαμόρφωση κάτω από ένα ενιαίο και ισοτροπικό επίπεδο πεδίο τάσεων. Αυτό σημαίνει ότι μια ελάχιστη επιφάνεια για μια μεμβράνη μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας διαδοχής βιώσιμων διαμορφώσεων, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η διαδικασία μπορεί να διακοπεί σε οποιαδήποτε επανάληψη, και το αποτέλεσμα να θεωρείται ότι είναι καλό. Η NFDM μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση μορφής μη-ελάχιστων επιφανειών, περιπτώσεων στις οποίες δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι για ένα καθορισμένο, μη-ισοτροπικό πεδίο τάσεων μπορεί να επιτευχθεί μέσω επαναλήψεων.

Ας εξετάσουμε το τριών-κόμβων επίπεδο τριγωνικό πεπερασμένο στοιχείο που φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Ας  $l_i^0, l_i^r$  και  $l_i, i=1, 2, 3$ , να είναι τα πλευρικά μήκη των στοιχείων σε μία απαραμόρφωτη, ισορροπίας και αναφοράς κατάσταση ισορροπίας, αντίστοιχα. Ορίζουμε τρεις «φυσικές παραμορφώσεις» κατά μήκος των πλευρών του στοιχείου, σύμφωνα  $\epsilon_i = (l_i^r - l_i^0) (l_i^0)^{-1}$ , και τα συγκεντρώνουμε σε ένα διάνυσμα φυσικών παραμορφώσεων  $\epsilon_n = [\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \epsilon_3]^T$ . Υπάρχει μια γραμμική σχέση μεταξύ  $\epsilon_n$  και των γραμμικών παραμορφώσεων Green,  $\epsilon_n = \mathbf{T}\epsilon$ , από το οποίο μπορούμε να ορίσουμε ένα διάνυσμα από φυσικές τάσεις  $\sigma_n = \mathbf{T}^T\sigma$ , όπου  $\sigma$  είναι το διάνυσμα των τάσεων Cauchy που ενεργούν στο στοιχείο. Μπορεί να δειχθεί ότι  $\sigma_n$  και  $\epsilon_n$  είναι ενεργειακά συζευγμένα.



Σχ. 5.10 (a) μοναδιαία διανύσματα,  $\mathbf{v}_i, i = 1,2,3$ , κατά μήκος των πλευρών του στοιχείου (b) εσωτερικές κομβικές δυνάμεις  $\mathbf{p}_i$ , αναλυόμενες σε φυσικές δυνάμεις  $N_i \mathbf{v}_i$ ; (c) προσδιορισμός της φυσικής δύναμης  $N_3$ .

Επίσης ορίζουμε τρεις <<φυσικές δυνάμεις >> που ενεργούν κατά μήκος των πλευρών των στοιχείων σύμφωνα με την

$N_i = V l_i^{-1} \sigma_i$  όπου  $V$  είναι ο όγκος του στοιχείου και τις συγκεντρώνουμε σε ένα διάνυσμα φυσικής δύναμης

$$\mathbf{p}_n = [N_1 \ N_2 \ N_3]^T$$

Ακόμη, ορίζουμε το διάνυσμα των φυσικών πυκνοτήτων δύναμης σύμφωνα με

$$\mathbf{n} = [n_1 \ n_2 \ n_3]^T = \mathcal{L}^{-1} \mathbf{p}_n = V \mathcal{L}^{-2} \mathbf{T}^T \sigma \text{ όπου } \mathcal{L} = \text{diag} \{ l_1 \ l_2 \ l_3 \}.$$

Ακόμη, δείχνουμε, ότι για ένα καθορισμένο διάνυσμα  $\mathbf{n}$ , υπάρχει μία γραμμική σχέση μεταξύ του διανύσματος των φυσικών δυνάμεων  $\mathbf{p}_n$  και των συντεταγμένων των στοιχείων  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$  σύμφωνα με την σχέση,  $\mathbf{P}_n = \mathbf{k}_n \mathbf{x}$  όπου,  $x_i, i = 1,2,3$ , είναι τα διανύσματα θέσης των στοιχείων στην κατάσταση ισορροπίας και  $\mathbf{k}_n$  είναι ένα σταθερό μητρώο δυσκαμψίας που δίνεται από :

$$\mathbf{k}_n = \begin{bmatrix} (n_2 + n_3)\mathbf{I} & -n_3\mathbf{I} & -n_2\mathbf{I} \\ \cdot & (n_1 + n_3)\mathbf{I} & -n_1\mathbf{I} \\ sym. & \cdot & (n_1 + n_2)\mathbf{I} \end{bmatrix}.$$

Έτσι, μετά την σύνθεση της συνεισφοράς όλων των στοιχείων με το φορτίο τους και την δυσκαμψία τους, φτάνουμε σε ένα γραμμικό πρόβλημα, το οποίο είναι τελείως ανεξάρτητο από κάθε διαμόρφωση αναφοράς. Ωστόσο, αντί να προδιαγράφουν άμεσα κάποιο  $\mathbf{n}$  για κάθε στοιχείο, μπορεί να είναι πιο βολικό να υπολογιστούν από τις τάσεις  $\boldsymbol{\sigma}_r$  που ορίζονται σε μια διαμόρφωση αναφοράς, σύμφωνα με την

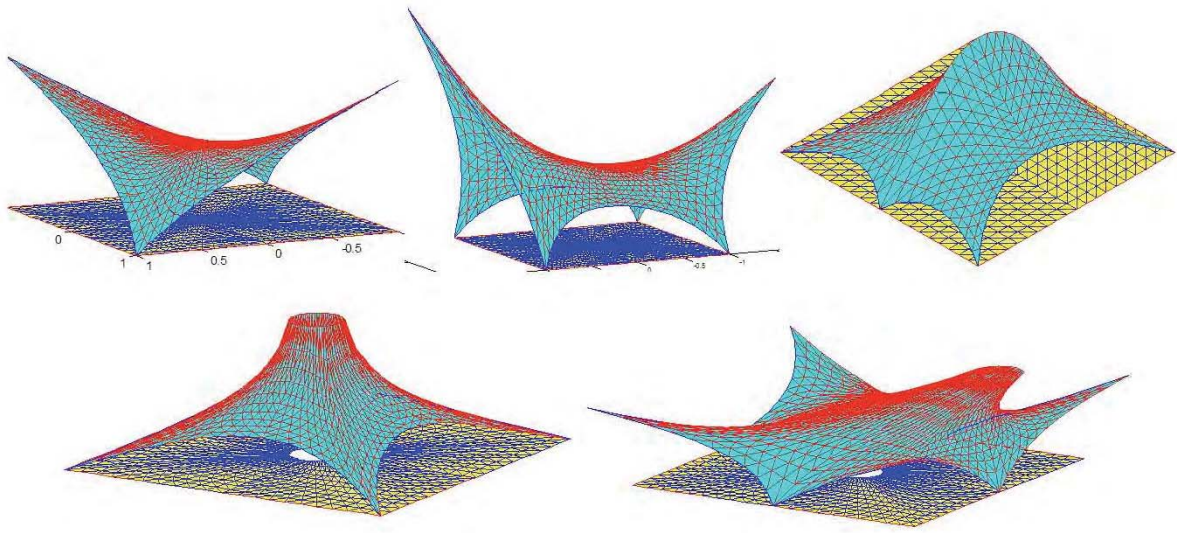
$$\mathbf{n}_r = \mathbf{V}^T \mathcal{L}_r^{-2} \mathbf{T}_r^{-T} \boldsymbol{\sigma}_r$$

Μπορεί ναδειχθεί ότι  $\boldsymbol{\sigma}_r$  ότι αντιστοιχεί στην 2<sup>nd</sup> Piola- Kirchhoff τάσεις που σχετίζονται με τις τελικές τάσεις Cauchy, υπολογισμένες στην τελική διαμόρφωση σύμφωνα με  $\boldsymbol{\sigma} = (\mathbf{V}^{-1} \mathcal{L}^2 \mathbf{T}) \mathbf{n}_r$ .

Εάν η NFDM εφαρμόζεται επαναληπτικά, πάντα με νέα επιβολή σταθερού, ομοιόμορφου και ιστροπικού πεδίου 2PK τάσεων, η μέθοδος θα συγκλίνει σε μια διαμόρφωση υπό ομοιόμορφα, ισότροπο Cauchy πεδίο τάσεων. Αυτό σημαίνει ότι μια ελάχιστη επιφάνεια για μια μεμβράνη μπορεί να επιτευχθεί μέσω μιας διαδοχής βιώσιμων διαμορφώσεων, κατά τέτοιο τρόπο ώστε η διαδικασία μπορεί να διακοπεί σε οποιαδήποτε επανάληψη, και το αποτέλεσμα θεωρείται ότι είναι καλό. Αυτό είναι ένα σαφές πλεονέκτημα, σε σύγκριση με τη μέθοδο Newton, η οποία μπορεί επίσης να συγκλίνει σε μία ελάχιστη λύση, αλλά μέσω μιας σειράς ανέφικτων διαμορφώσεων, μη-ισορροπίας.

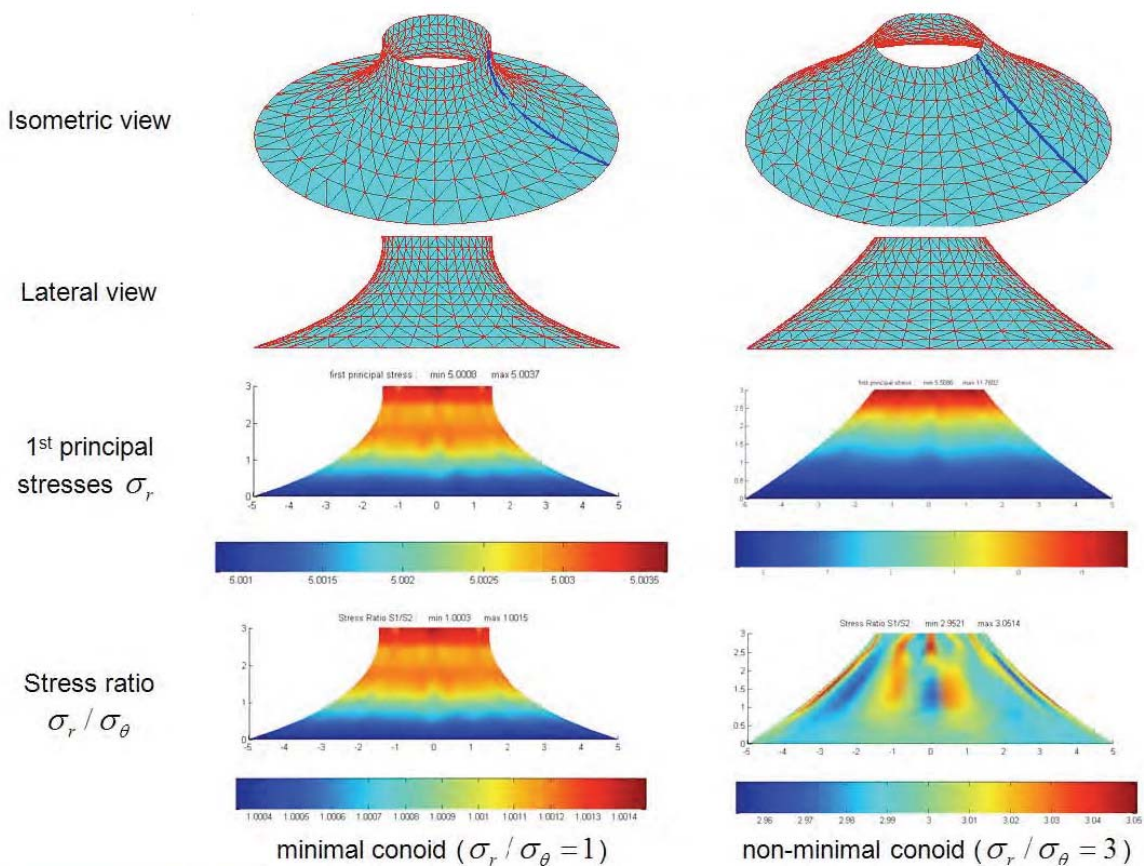
Επιπλέον, η NFDM μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για εύρεση μορφής μη-ελάχιστων επιφανειών της μεμβράνης, μέσω της επιβολής μη ιστροπικού πεδίου 2PK τάσεων. Σε αυτή την περίπτωση, ωστόσο, ακόμη και αν μια βιώσιμη μορφή μπορεί να λαμβάνεται σε κάθε γραμμικό βήμα, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι ένα αυθαίρετο προδιαγραμμένο, μη-ιστροπικό πεδίο τάσεων Cauchy μπορεί να επιτευχθεί μέσω επαναλήψεων. Επιπλέον, δεδομένου ότι η γεωμετρία κυμαίνεται κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων, ο ορισμός των κύριων κατευθύνσεων των τάσεων γίνεται πιο περίπλοκος.

Ως εφαρμογή του γραμμικού NFDM, θεωρούν την μετατροπή του ίδιο τετράγωνου πλέγματος (mesh) αναφοράς σε διαφορετικές επιφάνειες, σε ένα μόνο βήμα NFDM. Η πρώτη γραμμή της Εικ. 5.11 δείχνει το ίδιο πλέγμα αναφοράς να μετασχηματίζεται σε διαφορετικά σχήματα, απλά προδιαγράφοντας μετατοπίσεις σε ορισμένους επιλεγμένους κόμβους, μαζί με ένα ομοιόμορφο πεδίο 2PK τάσεων επί της μεμβράνης και κάθετα φορτία επί των καλωδίων των συνόρων. Φυσικά, οι τάσεις Cauchy στην διαμορφωμένη ισορροπία δεν είναι πια ομοιόμορφες. Αυτό συμβιβάζεται πλήρως με την αρχική FDM, όπου οι οριστικές τάσεις επίσης δεν ελέγχει τις κάθετες δυνάμεις που ενεργούν στα καλώδια, στη διαμόρφωση ισορροπίας. Αν και η αρχική γεωμετρία πλέγματος είναι ουσιαστικά άνευ σημασίας, η τοπολογική γέννηση της επιφάνειας πρέπει να γίνει σεβαστή. Έτσι, προκειμένου να παραχθεί μια κωνική επιφάνεια, μια οπή πρέπει να δημιουργηθεί στο αρχικό πλέγμα, όπως φαίνεται στη δεύτερη γραμμή της Εικ. 5.11.



Σχ. 5.11: Βιώσιμες διαμορφώσεις που παράγονται μέσω της επιβολής διαφορετικών ρυθμίσεων κομβικών μετατοπίσεων στο ίδιο επίπεδο τετράγωνο πλέγμα αναφοράς, με ή χωρίς τρύπα.

Ως μια άλλη εφαρμογή, το σχήμα 5.12 συγκρίνει μια ελάχιστη (αναλογία τάσεων  $\sigma_r/\sigma_\theta = 1$  αναγκαία, σε όλη την επιφάνεια) σε μία μη-minimal κωνική επιφάνεια ( $\sigma_r/\sigma_\theta = 3$ , αυθαίρετη σε όλη την επιφάνεια). Και οι δύο γεωμετρίες ελήφθησαν μετά από 10 NFDΜ επαναλήψεις, που απαιτούνται για τη σύγκλιση των λόγων των τάσεων. Είναι επίσης σημαντικό να επισημάνουμε ότι η γεωμετρία συγκλίνει πολύ πιο γρήγορα και, για πρακτικούς λόγους, η ανάλυση θα μπορούσε να σταματήσει μετά από μία μόνο επανάληψη, ή ένα ζευγάρι από αυτές, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένα λόγος στην εκτέλεση πολλών επαναλήψεων κινητώντας ένα αποτέλεσμα (με την επιβληθείσα αναλογία τάσεων), η οποία είναι γνωστή εκ των προτέρων.



Σχ. 5.12 Σύγκριση μεταξύ ελάχιστων και μη ελάχιστων κωνικών επιφανειών.

### 5.2.7 Εφαρμογή μεθόδου «πυκνότητας-δύναμης»

Κατά το σχεδιασμό μιας κατασκευής με τη μέθοδο «Πυκνότητας Δύναμης», η διαδικασία εύρεσης σχήματος σε ισορροπία ξεκινά χωρίς να λαμβάνεται υπ'όψιν το υλικό κατασκευής.

Οι κύριες παράμετροι από τις οποίες εξαρτάται μια μορφή που ισορροπεί, π.χ. μια μεμβράνη, είναι η καμπυλότητα της επιφάνειας και του συνόρου, το εσωτερικό (εντός του συνόρου) δίκτυο καλωδίων που έχει επιλεγεί για την προσομοίωση της μεμβράνης, τα σχετικά ύψη των σταθερών σημείων από τα οποία προεντείνεται η μεμβράνη, η επιβαλλόμενη προένταση και το υλικό κατασκευής.

- Καμπυλότητα του συνόρου. Σε μια προεντεταμένη κατασκευή το σύνορο της επιφάνειας οριοθετείται από καλώδιο που υλοποιεί την άκρη ακμή- της κατασκευής και εμφανίζεται με μεγαλύτερη ή μικρότερη αντοχή σε κάμψη. Προεντεινόμενο επί τόπου μεταξύ δυο σταθερών σημείων, το καλώδιο του συνόρου, μέσω της καμπυλότητας που αποκτά, αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο που επηρεάζει κυρίως τη σχέση μεταξύ του μεγέθους των εφελκυστικών δυνάμεων στο σύνορο και στο τμήμα του εσωτερικού δικτύου/μεμβράνης που είναι σε άμεση επαφή με το σύνορο αυτό. Για εύρεση σχήματος με τη μέθοδο πυκνότητας δύναμης, οι αρχικές παράμετροι καμπυλότητας ορίζονται σε αναλογία με αυτές ενός τόξου που γεφυρώνει ένα άνοιγμα.

- Διπλή καμπυλότητα του δικτύου/ μεμβράνης. Η καμπυλότητα του δικτύου είναι αποτέλεσμα των διαφορετικών σχετικών υψών των σταθερών σημείων από τα οποία γίνεται η προένταση και τροποποιείται μέσω αλλαγής των υψών αυτών. Όμως η σχετική καμπυλότητα ενός μεμονωμένου καλωδίου ή μιας κλωστής (αν πρόκειται για μεμβράνη), είναι αποτέλεσμα της σχετικής με το σύνορο γεωμετρικής θέσης τους, η οποία μπορεί να επιλεγεί αυθαίρετα από την αρχή της ανάλυσης.

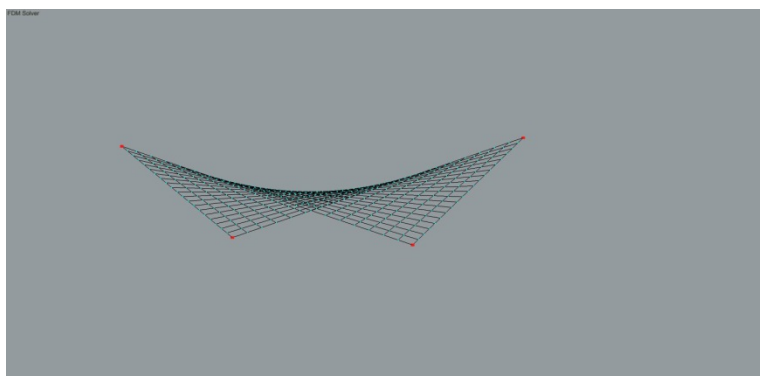
- Επιβαλλόμενη προένταση στην κατασκευή. Η αύξηση του μεγέθους της προέντασης σημαίνει μείωση των μετατοπίσεων της κατασκευής υπό την επιβολή φορτίων, αλλά και αύξηση των θλιπτικών δυνάμεων που αναλαμβάνουν τα ιστία (οι σύλλοι που ορίζουν τα σταθερά σημεία της κατασκευής) καθώς και αύξηση των εφελκυστικών δυνάμεων στην περιοχή του δικτύου που συνορεύει με σημεία αγκύρωσης μικρού ύψους από το έδαφος, δηλαδή η αύξηση της προέντασης πρέπει να συνεπάγεται νέα διαστασιολόγηση της αρχικής κατασκευής ώστε αυτή να είναι σε θέση να αναλάβει μεγαλύτερες δυνάμεις.

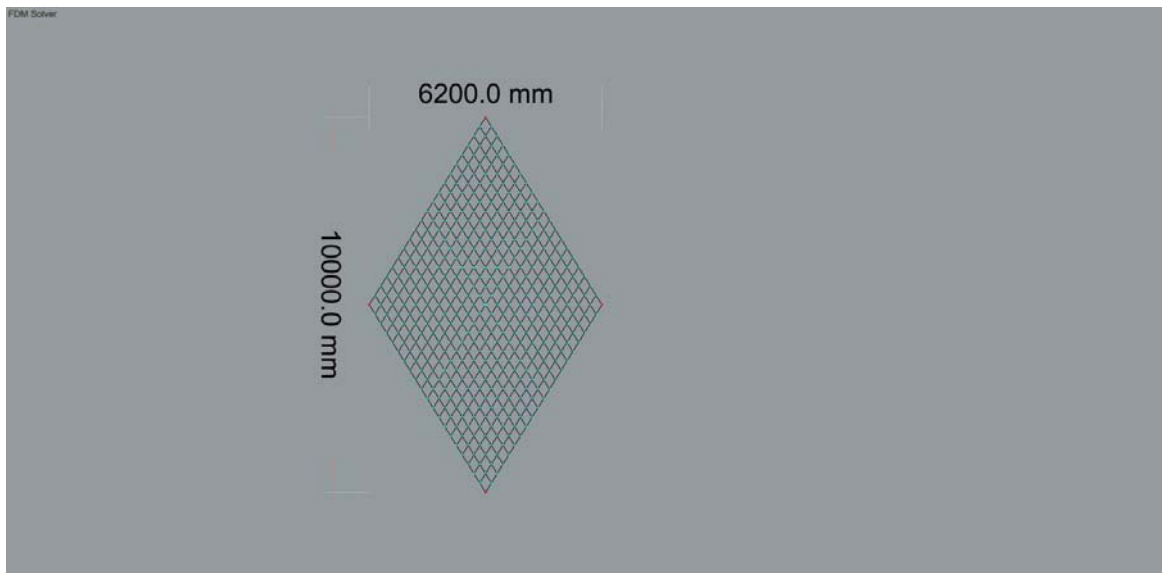
- Το υλικό κατασκευής. Για την έναρξη της εύρεσης σχήματος και της ανάλυσης, πρέπει έστω και θεωρητικά- να μπορεί να γίνει προσαρμογή της προεντεινόμενης επιφάνειας σχεδόν σε κάθε ελαστικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Στις μεμβράνες υπάρχει η δυνατότητα επιλογής υλικών μεγάλης ποικιλίας, από το εξαιρετικά δύσκαμπτο Kevlar μέχρι πολύ εύκαμπτο ύφασμα. Πολλές ουσιώδεις παράμετροι της ανάλυσης μπορούν να εξετασθούν χωρίς να ληφθεί υπ'όψιν το υλικό κατασκευής.

Πολλές ουσιώδεις παράμετροι της ανάλυσης μπορούν να εξετασθούν χωρίς να ληφθεί υπ'όψιν το υλικό κατασκευής. Αυτό γίνεται κατανοητό στο επόμενο παράδειγμα.

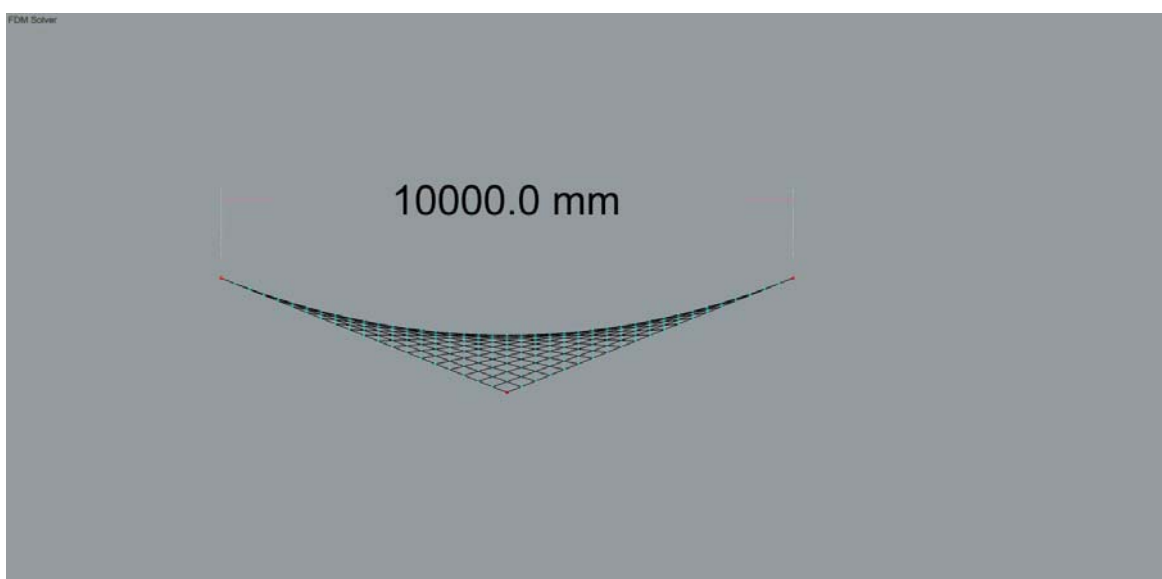
Για την εφαρμογή επιλέχθηκαν δυο περίπου τετράπλευρα δίκτυα που περιέχουν 441 κόμβους και αγκυρώνονται σε 4 σταθερά σημεία το κάθε ένα, τα οποία αποτελούν και τον ελάχιστο αριθμό για την δημιουργία επιφάνειας διπλής καμπυλότητας, αφού με 3 σταθερά σημεία αγκύρωσης, η επιφάνεια μεταπίπτει σε επίπεδο.

Οι φωτογραφίες παρακάτω δείχνουν την γεωμετρία :

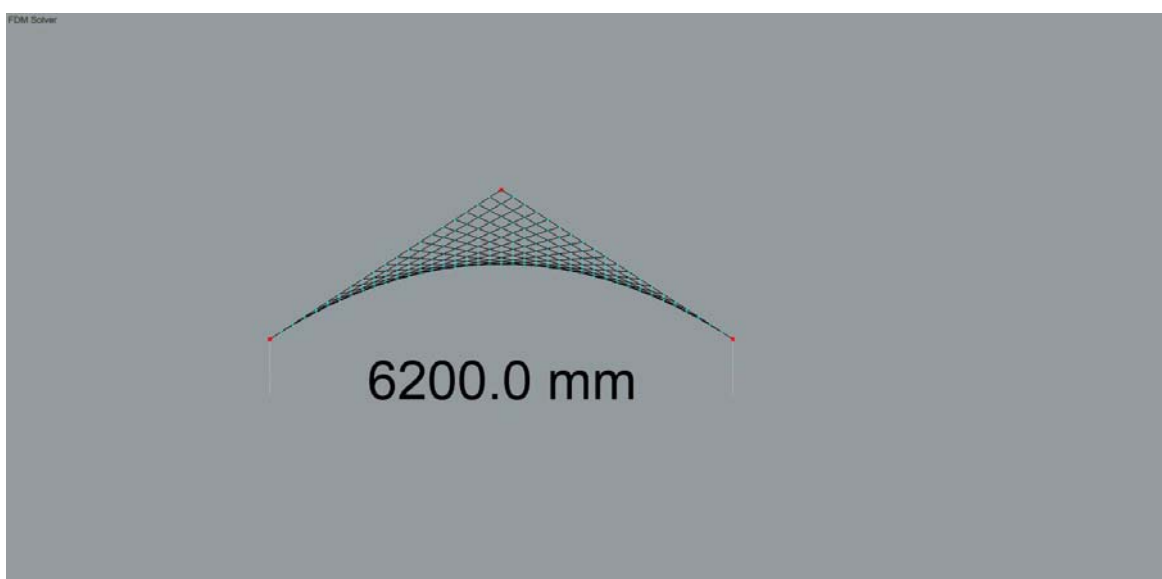




Φωτ.1 Κάτοψη



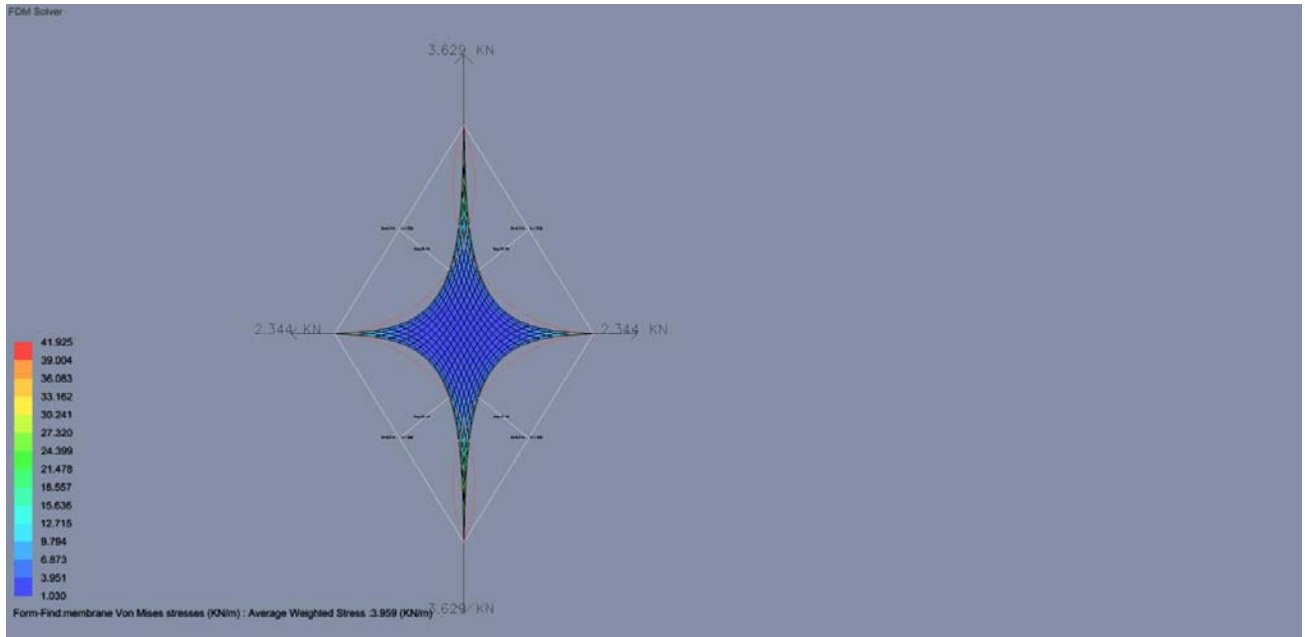
Φωτ.2 Πλάγια όψη-Υψομετρική διαφορά 2 μέτρα



Φωτ.3 Εμπρόσθια όψη



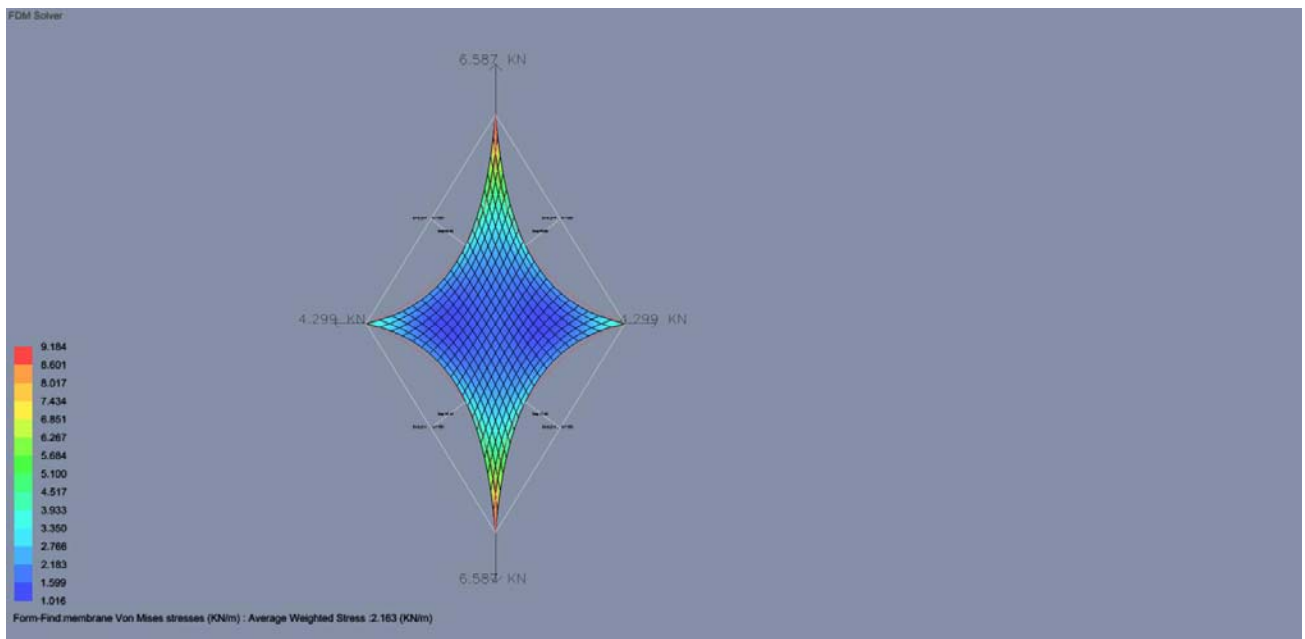
## Ανάλυση 1. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 1



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=1.559\text{mm } \text{sag}=25.10$$

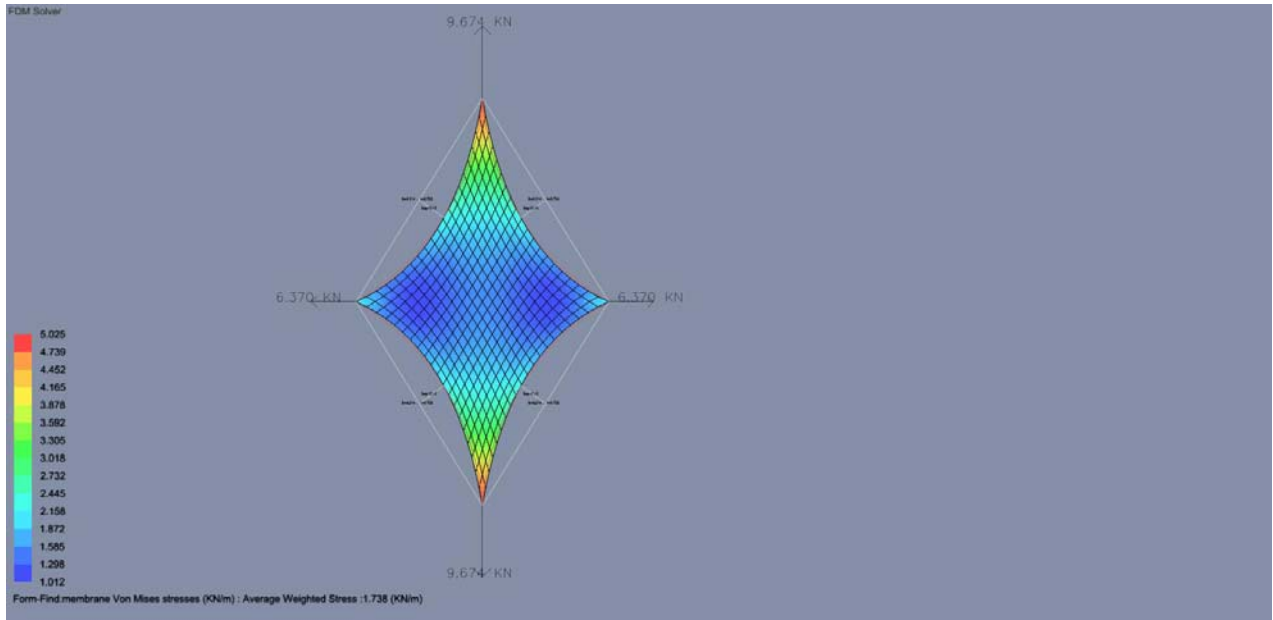
## Ανάλυση 2. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 5



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=1.051\text{mm } \text{sag}=16.92$$

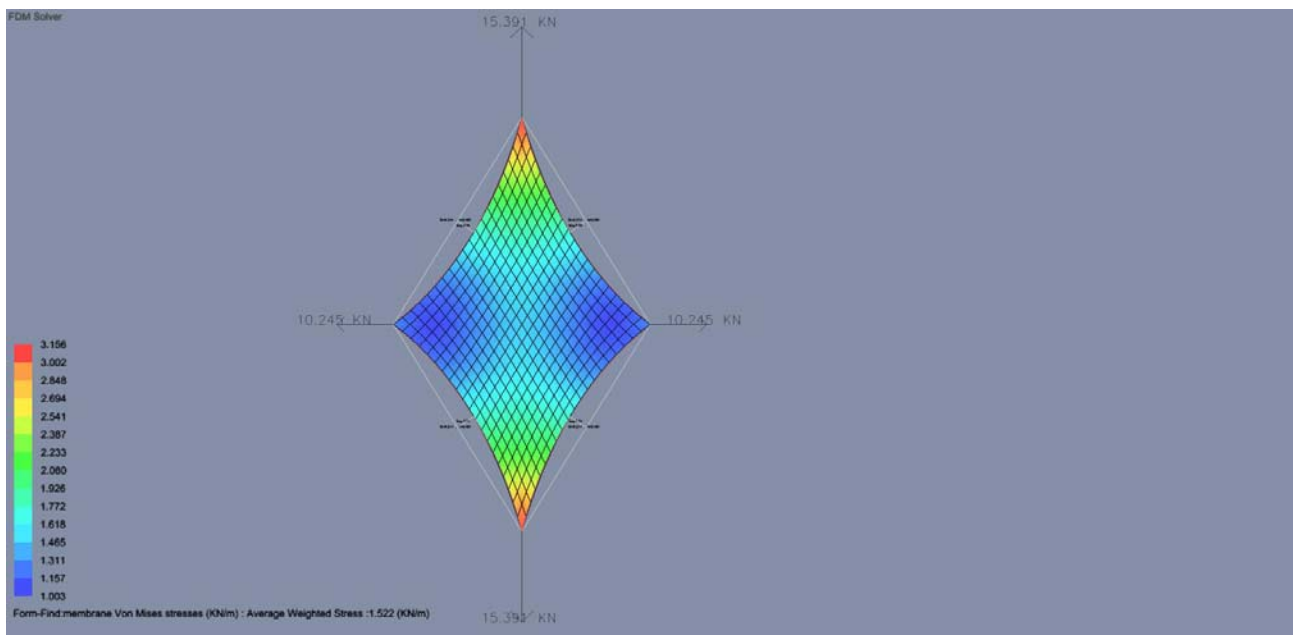
### Ανάλυση 3. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 10



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=0.753\text{mm } \text{sag}=12.12$$

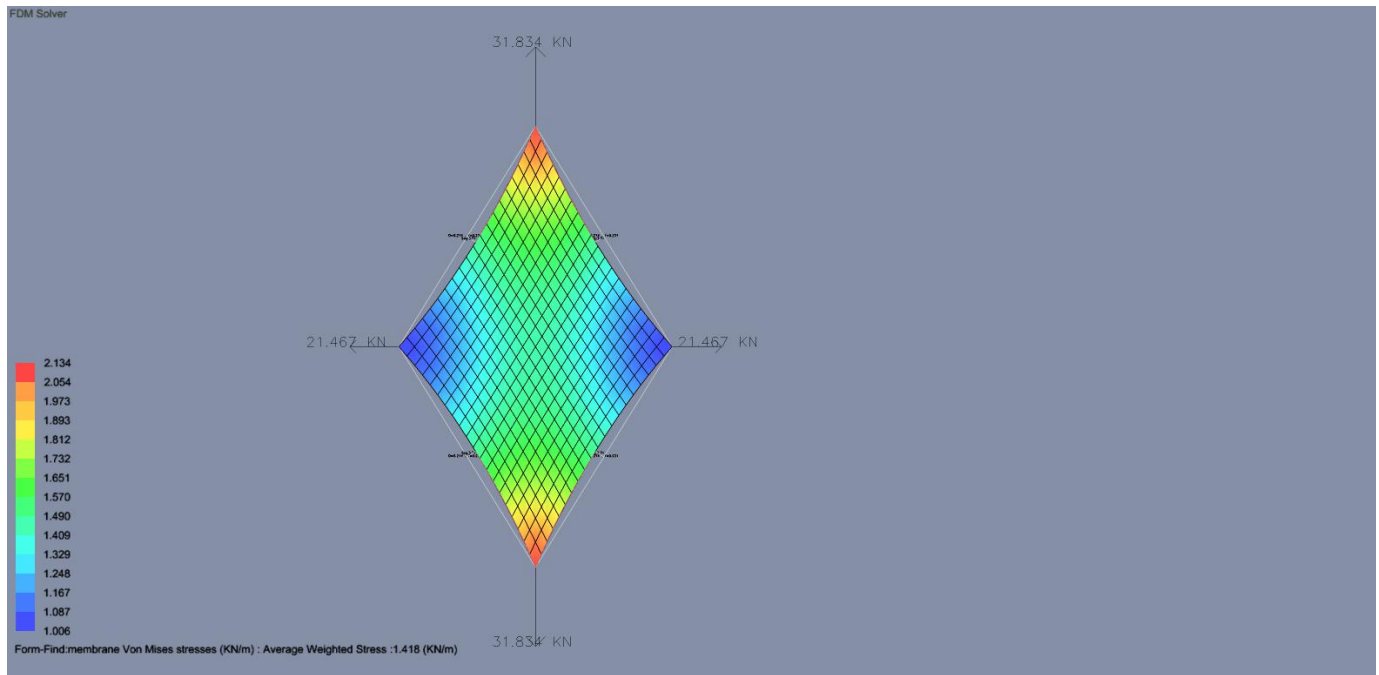
### Ανάλυση 4. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=0.481\text{mm } \text{sag}=7.74$$

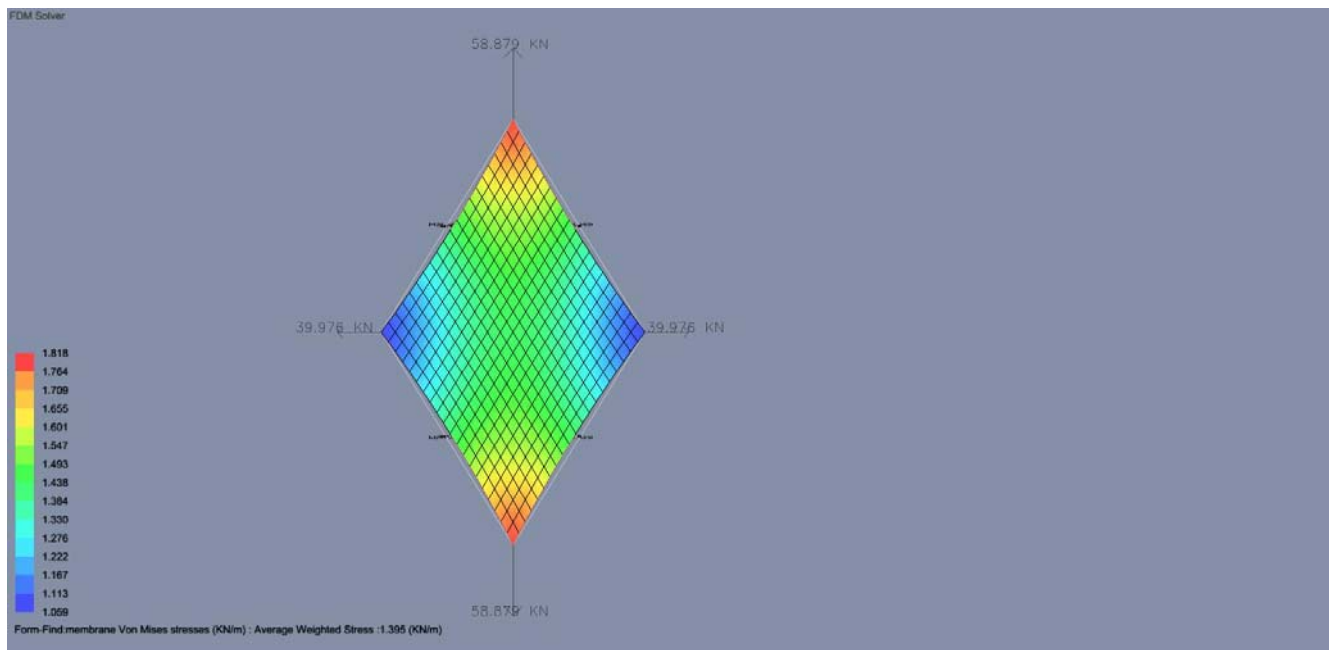
## Ανάλυση 5. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 50



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=0.23\text{mm } \text{sag}=3.81$$

## Ανάλυση 6. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 100

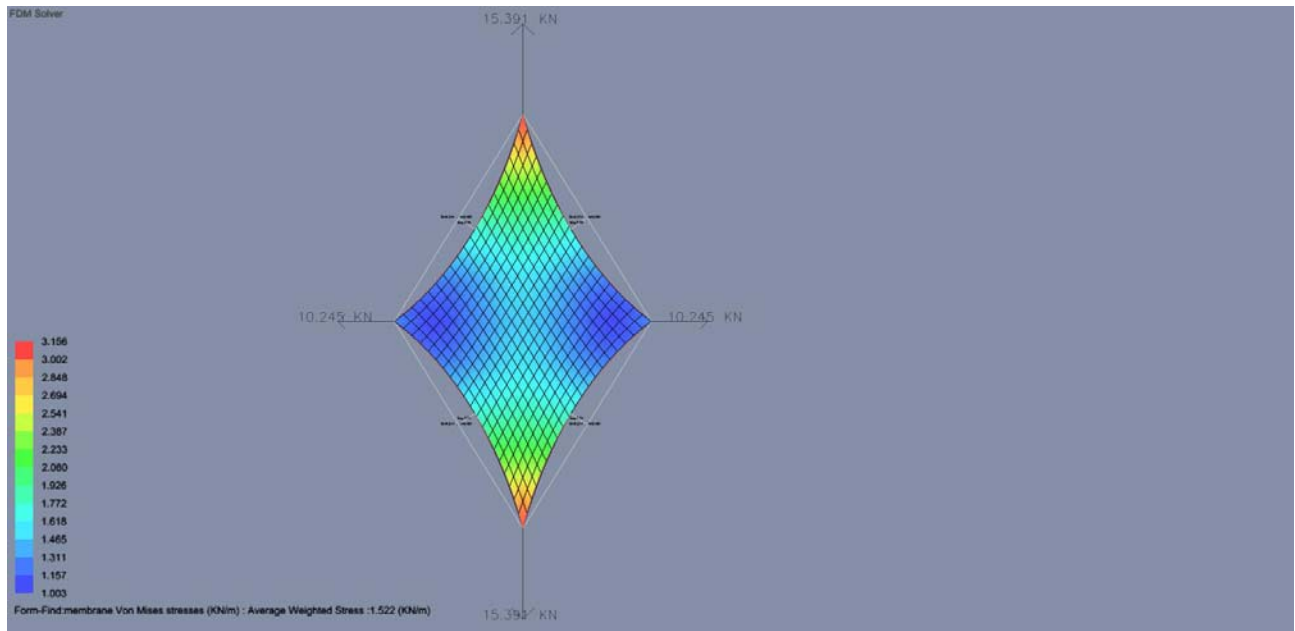


Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=0.124\text{mm } \text{sag}=1.99$$

**Συμπέρασμα παραδειγμάτων: μεγαλύτερες σχετικές δυνάμεις στο σύνορο δίνουν μικρότερη καμπυλότητα σε αυτό.**

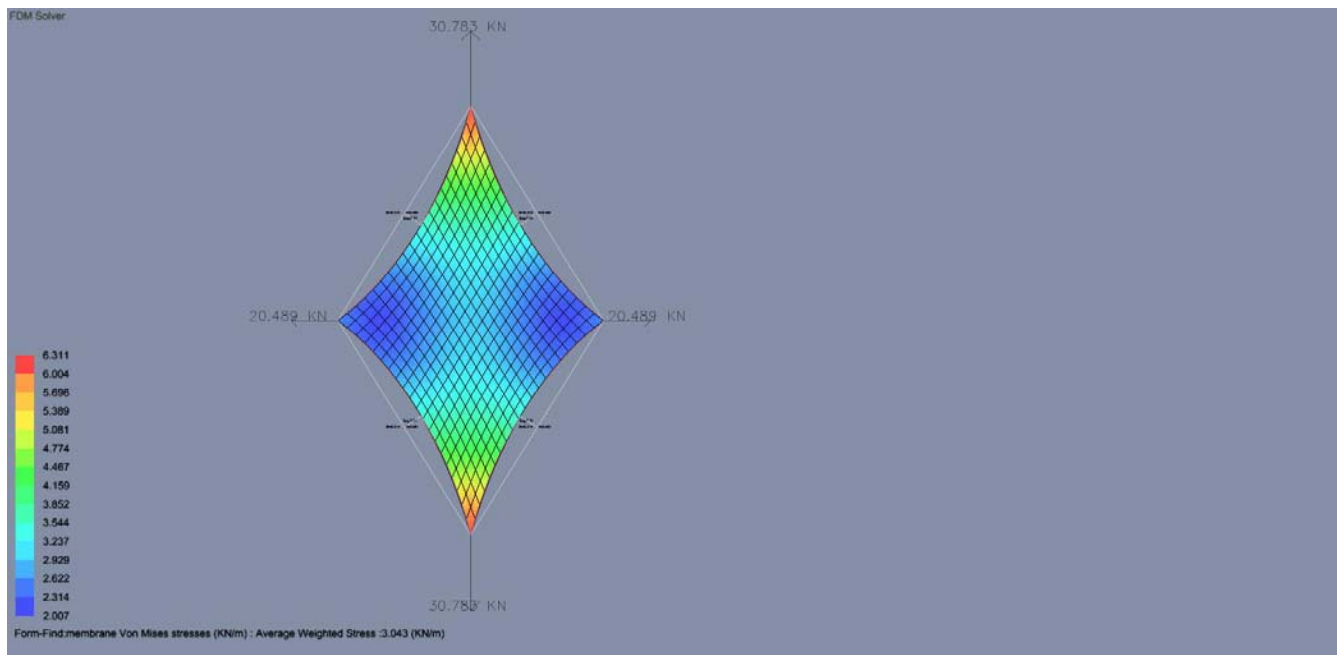
## Ανάλυση 7. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=0.481\text{mm } \text{sag}=7.74$$

## Ανάλυση 8. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 2-Εξωτερικά 40



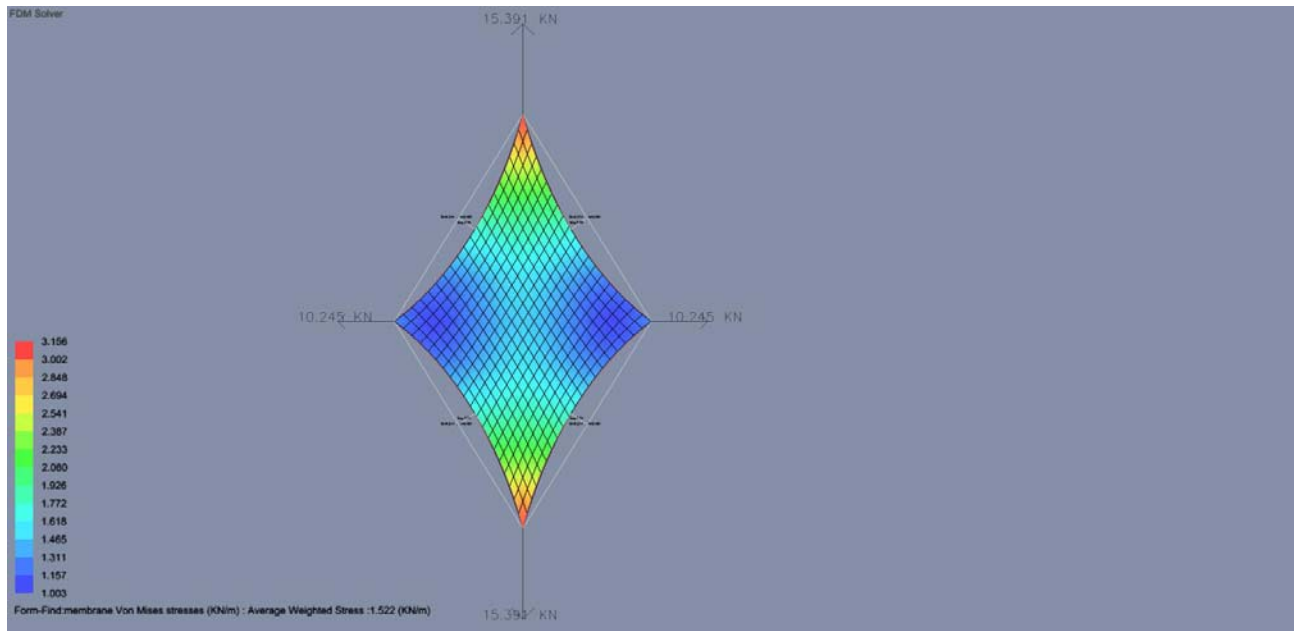
Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=0.481\text{mm } \text{sag}=7.74$$

**Συμπέρασμα :** η σταθερή αναλογία δυνάμεων μεταξύ συνόρου και εσωτερικού δικτύου συνεπάγεται ίδιες μορφές αλλά μεγαλύτερες αντιδράσεις στήριξης και μεγαλύτερες τάσεις προέντασης.

Επίσης μπορούμε να δούμε ότι το υλικό δεν έχει καμία σημασία στην εύρεση μορφής καθώς και η διάταξη του δικτύου.

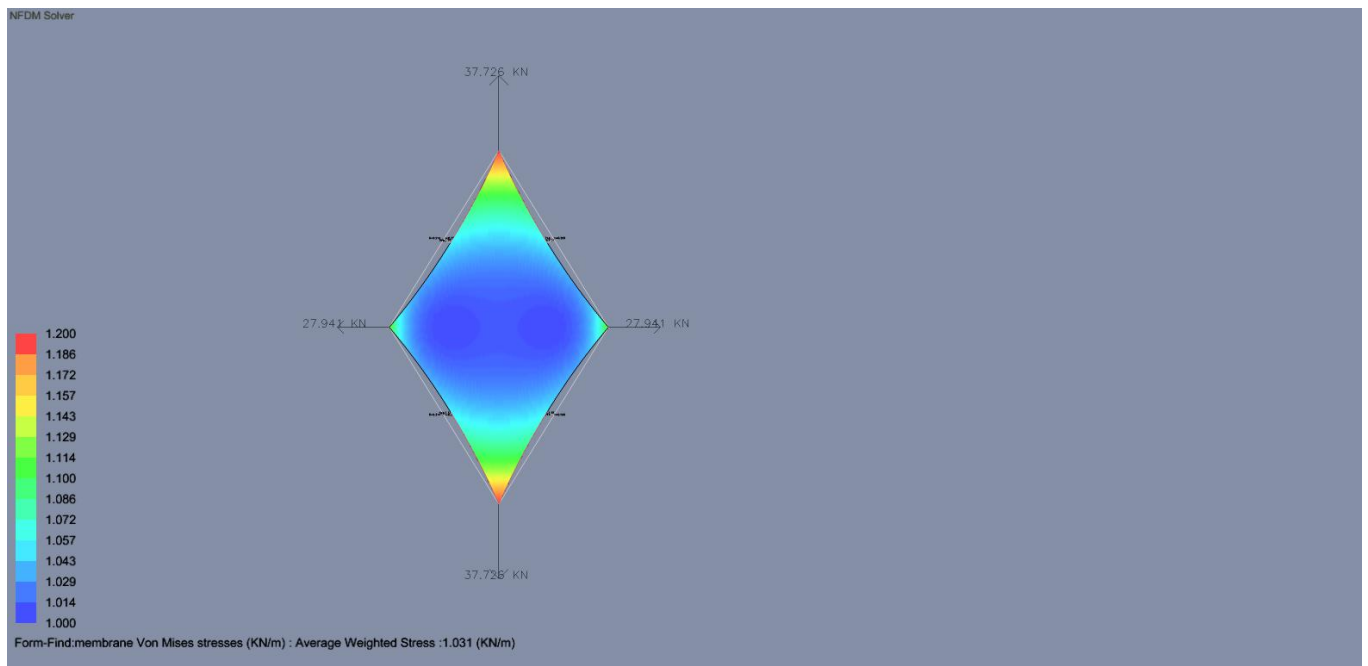
## Ανάλυση 9. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση FDM(force density method)



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=0.481\text{mm } \text{sag}=7.74$$

Ανάλυση 10. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM(natural force density method) χωρίς επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Οι διευθύνσεις είναι αυθαίρετες πάνω στο δίκτυο.

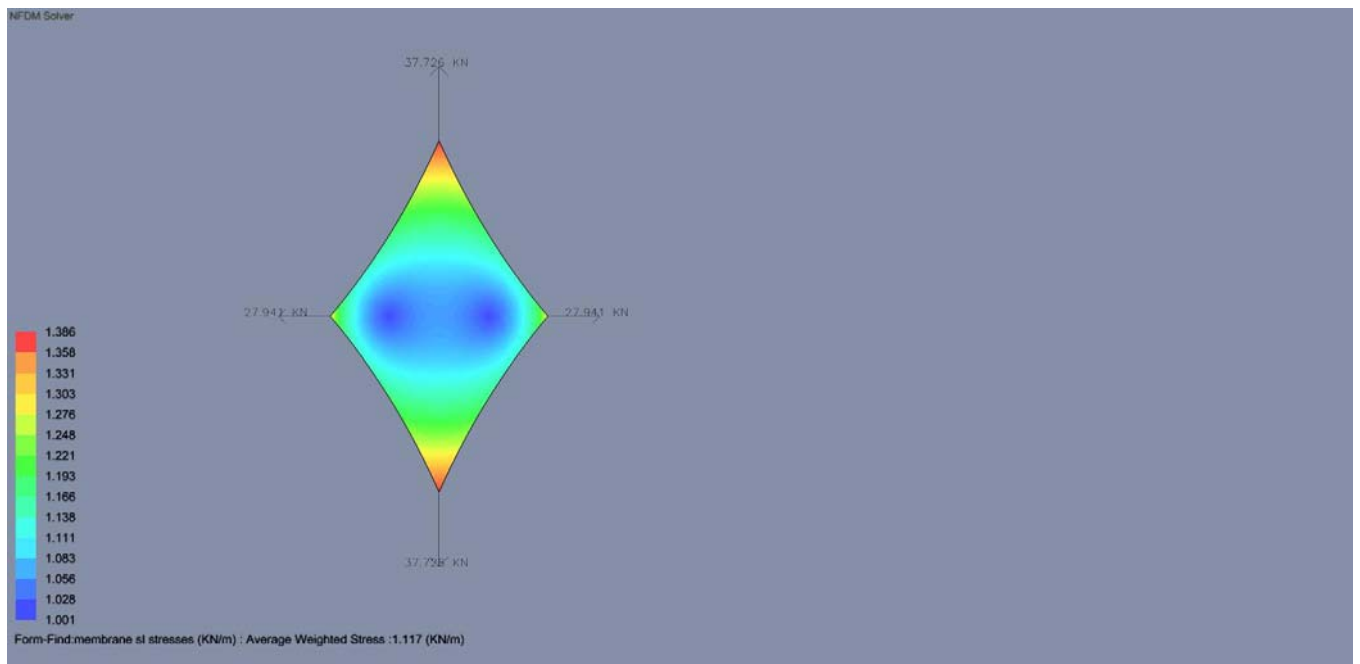


Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις και η βύθιση του εξωτερικού ορίου

$$D=6.214\text{mm } f=0.209\text{mm } \text{sag}=3.37$$

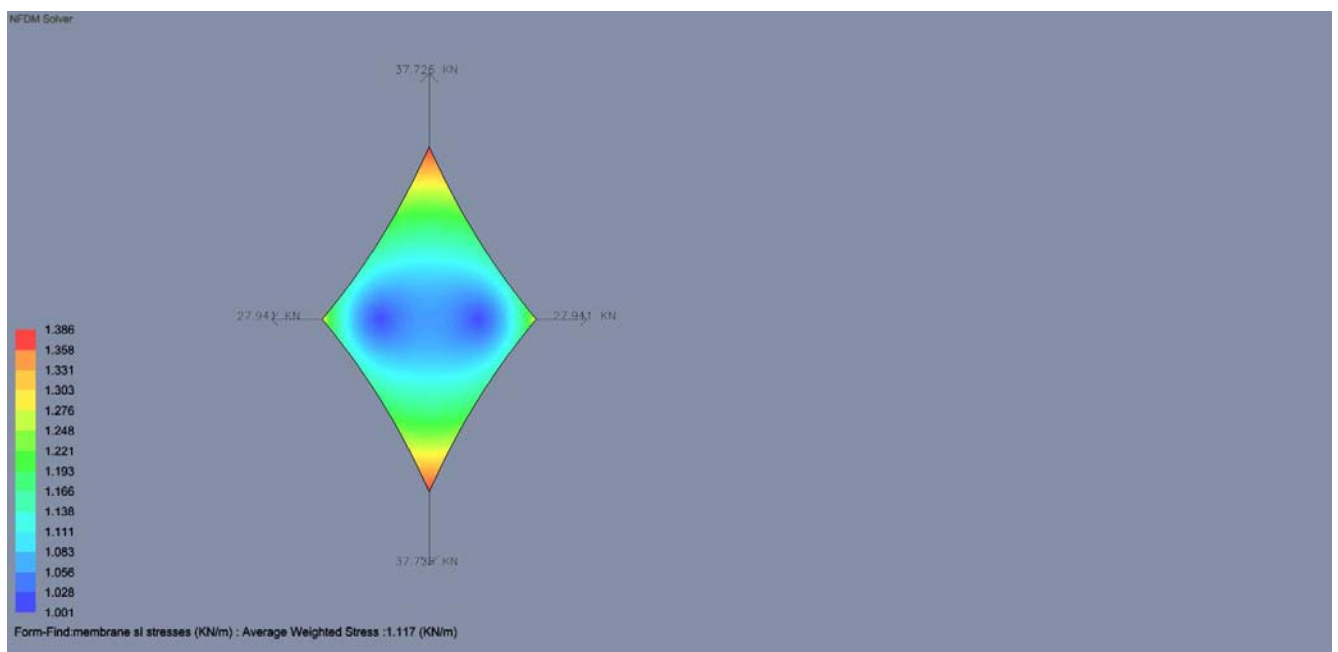
**Συμπέρασμα :** αν και οι αναλογίες είναι ίδιες βλέπουμε ότι οι δύο μέθοδοι διαφέρουν καθώς η NFDM τείνει να δώσει σε όλο το δίκτυο την ίδια αρχική προένταση. Απ'ότι φαίνεται για να επιτευχθεί αυτό αυξάνεται η ένταση των καλωδίων, το βέλος μικραίνει και ο χάρτης των τάσεων τείνει προς το μπλε χρώμα που είναι η προένταση που έχει ορισθεί ίση με 1kN/m.

Ανάλυση 11. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wrap} = 463.32$  KN/m  $E_{weft} = 210.52$  KN/m. Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm.



Φαίνονται οι τάσεις SI και οι αντιδράσεις

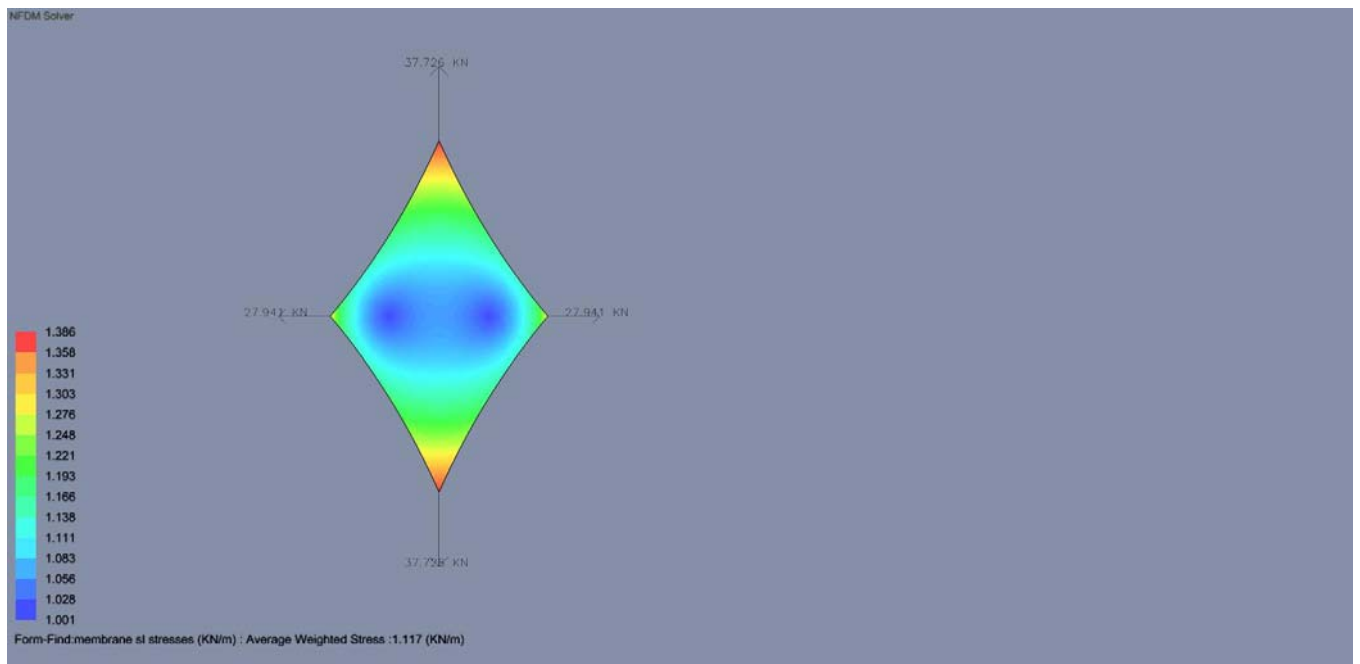
Ανάλυση 12. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wrap} = 463.32$  KN/m  $E_{weft} = 210.52$  KN/m. Διεύθυνση στημονιού ο μικρός άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm.



Φαίνονται οι τάσεις SI και οι αντιδράσεις

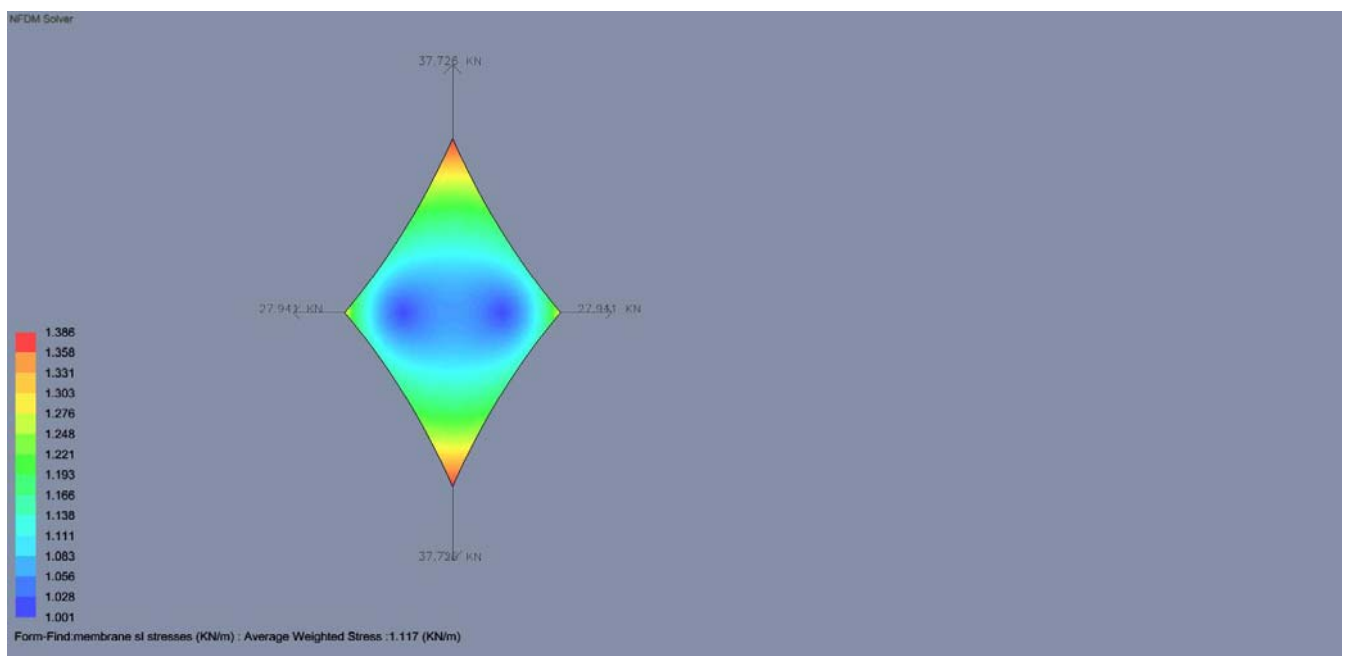
**Συμπέρασμα :** αν και η διάταξη στημονιού υφαδιού είναι διαφορετικές η εύρεση μορφής είναι η ίδια και δεν εξαρτάται από την κατεύθυνση των ινών.

Ανάλυση 13. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wgap}= 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{wft}= 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm.



Φαίνονται οι τάσεις SI και οι αντιδράσεις

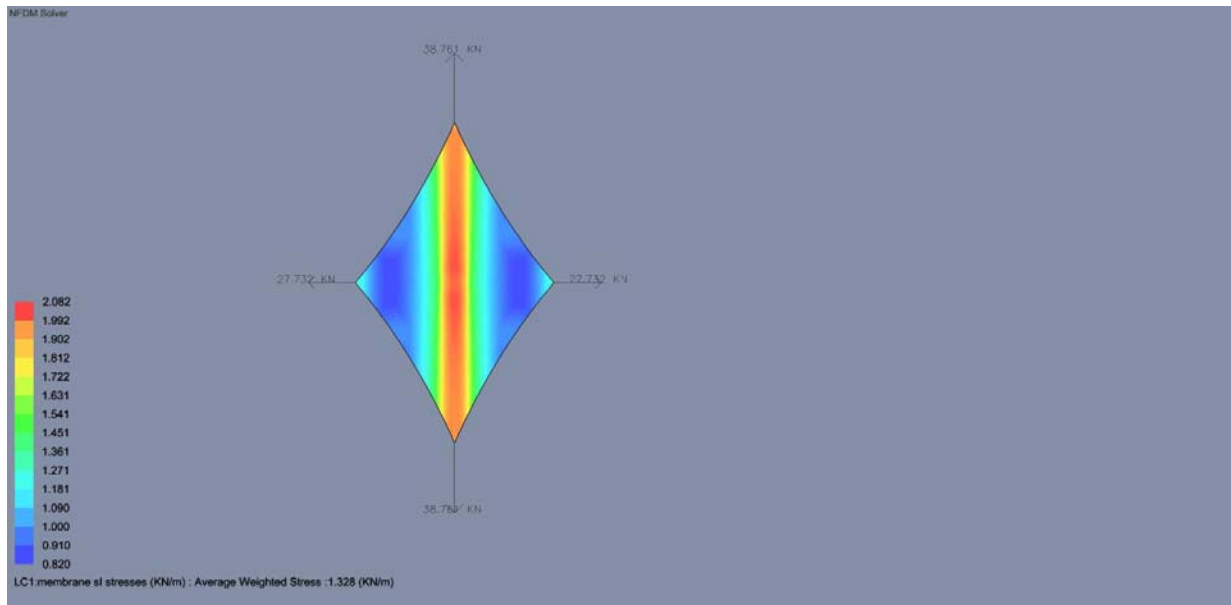
Ανάλυση 14. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE IV (1400 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wgap}= 847.45 \text{ KN/m}$   $E_{wft}= 382.91 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm.



Φαίνονται οι τάσεις SI και οι αντιδράσεις

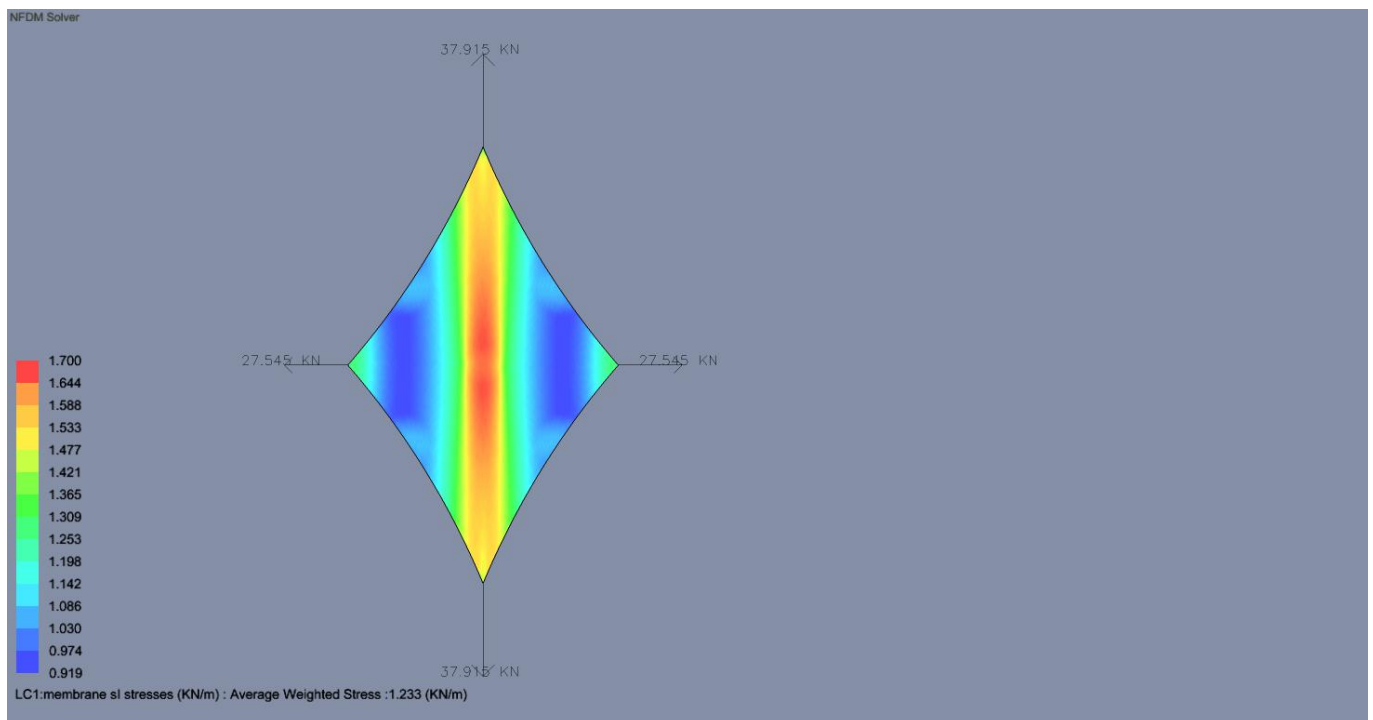
**Συμπέρασμα :** αν και έχουμε διαφορετικά υλικά το πεδίο των τάσεων δεν άλλαξε ούτε οι αντιδράσεις.Άρα η εύρεση μορφής δεν εξαρτάται από το υλικό.

Ανάλυση 15. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp} = 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft} = 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο  $1 \text{ kN/m}^2$  και λαμβάνεται και το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



Φαίνονται οι τάσεις SI και οι αντιδράσεις

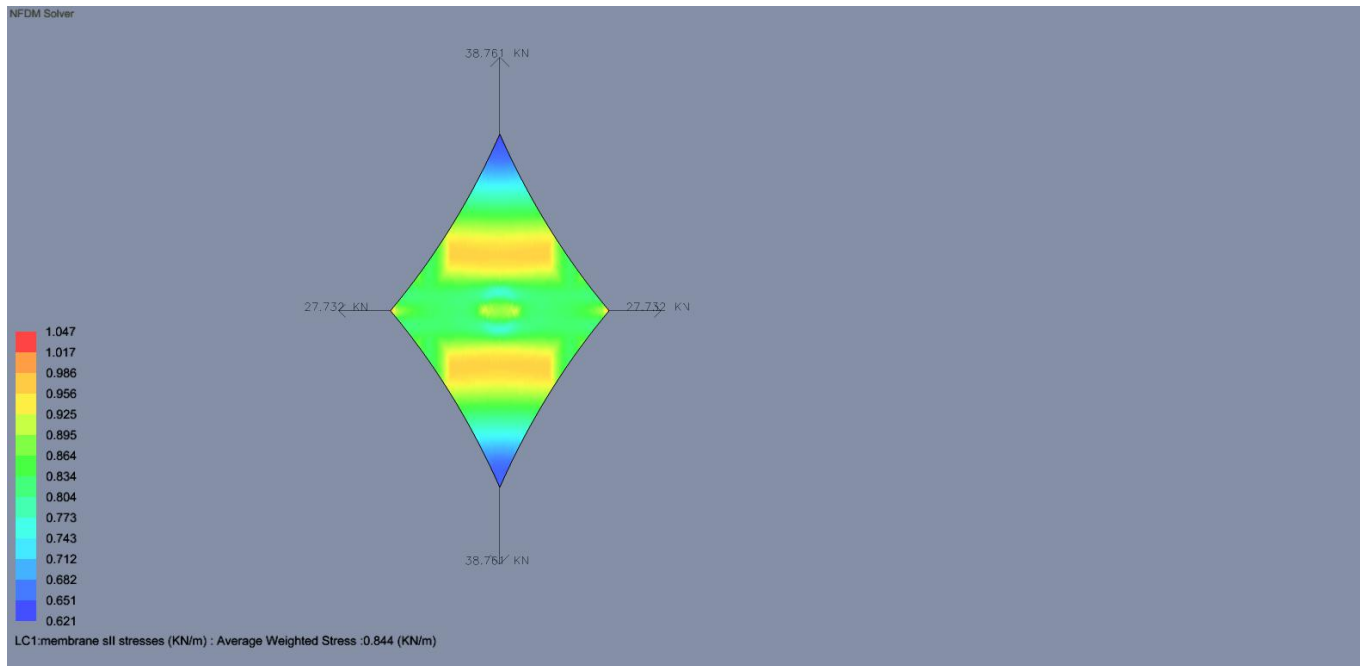
Ανάλυση 16. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp} = 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft} = 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μικρός άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο  $1 \text{ kN/m}^2$  και λαμβάνεται και το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



Φαίνονται οι τάσεις SI και οι αντιδράσεις

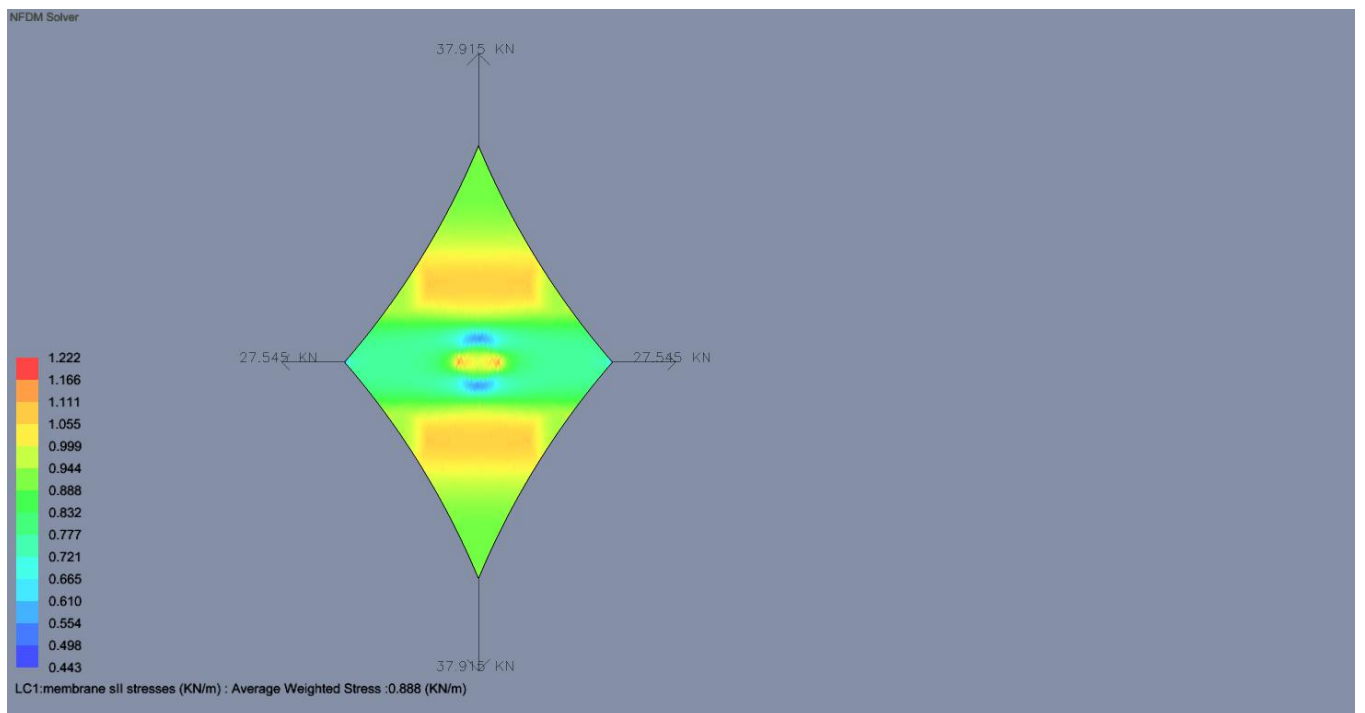


Ανάλυση 17. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp}= 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft}= 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> και λαμβάνεται και το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



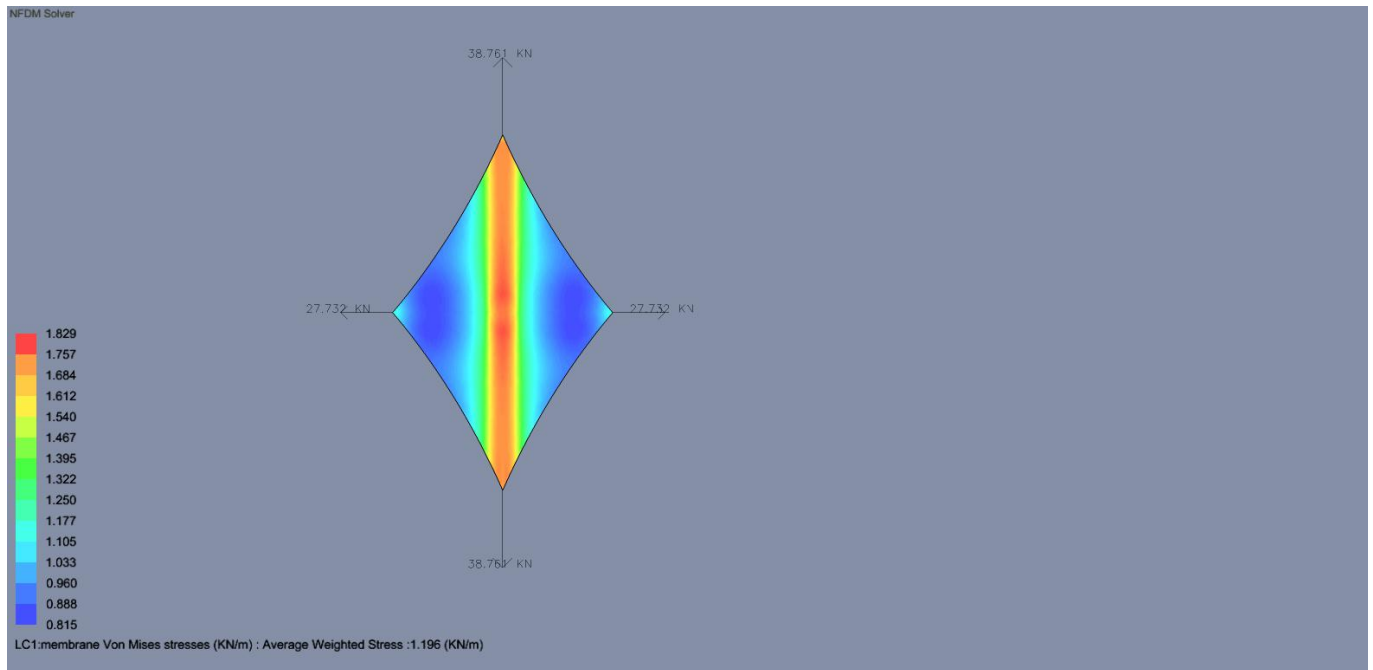
Φαίνονται οι τάσεις SII και οι αντιδράσεις

Ανάλυση 18. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp}= 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft}= 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μικρός άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> και λαμβάνεται και το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



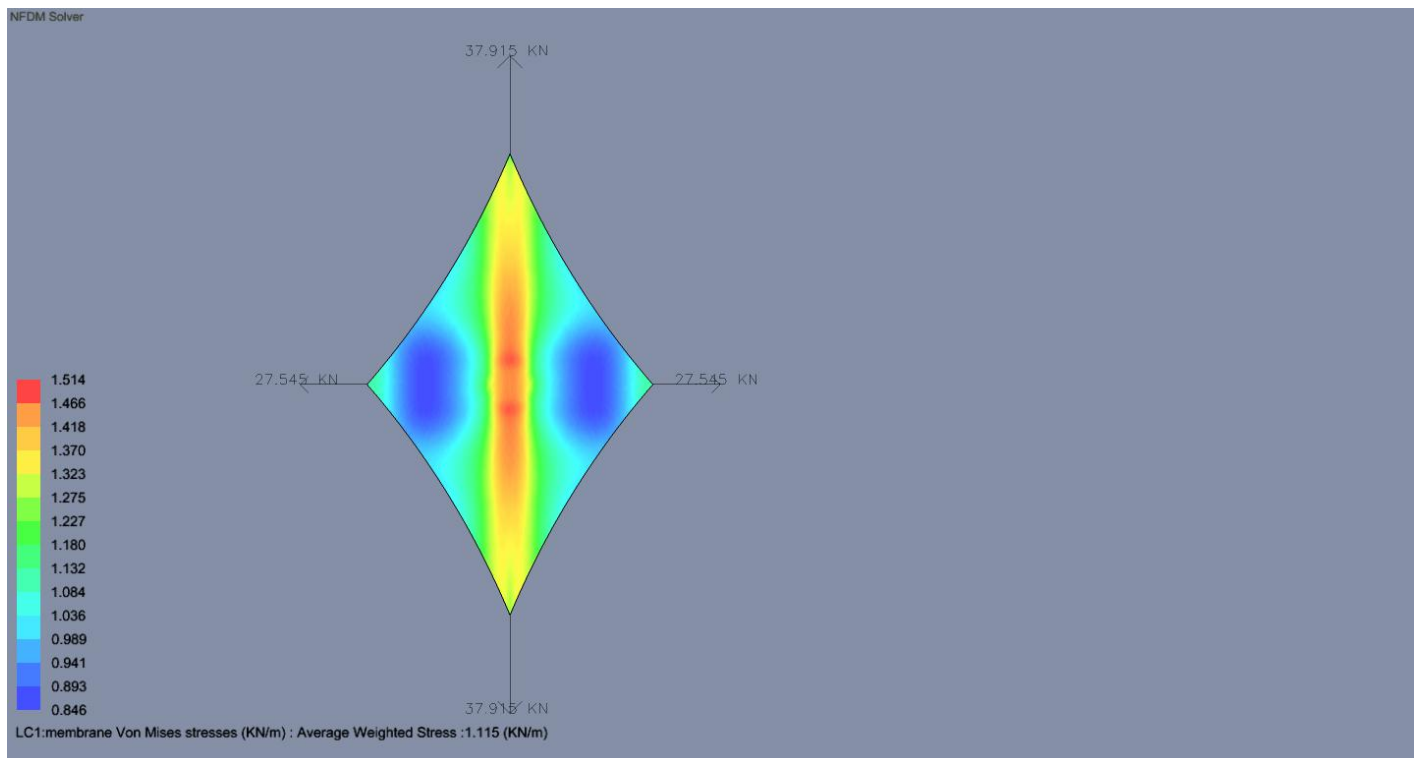
Φαίνονται οι τάσεις SII και οι αντιδράσεις

Ανάλυση 19. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wgr} = 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft} = 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> και λαμβάνεται και το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



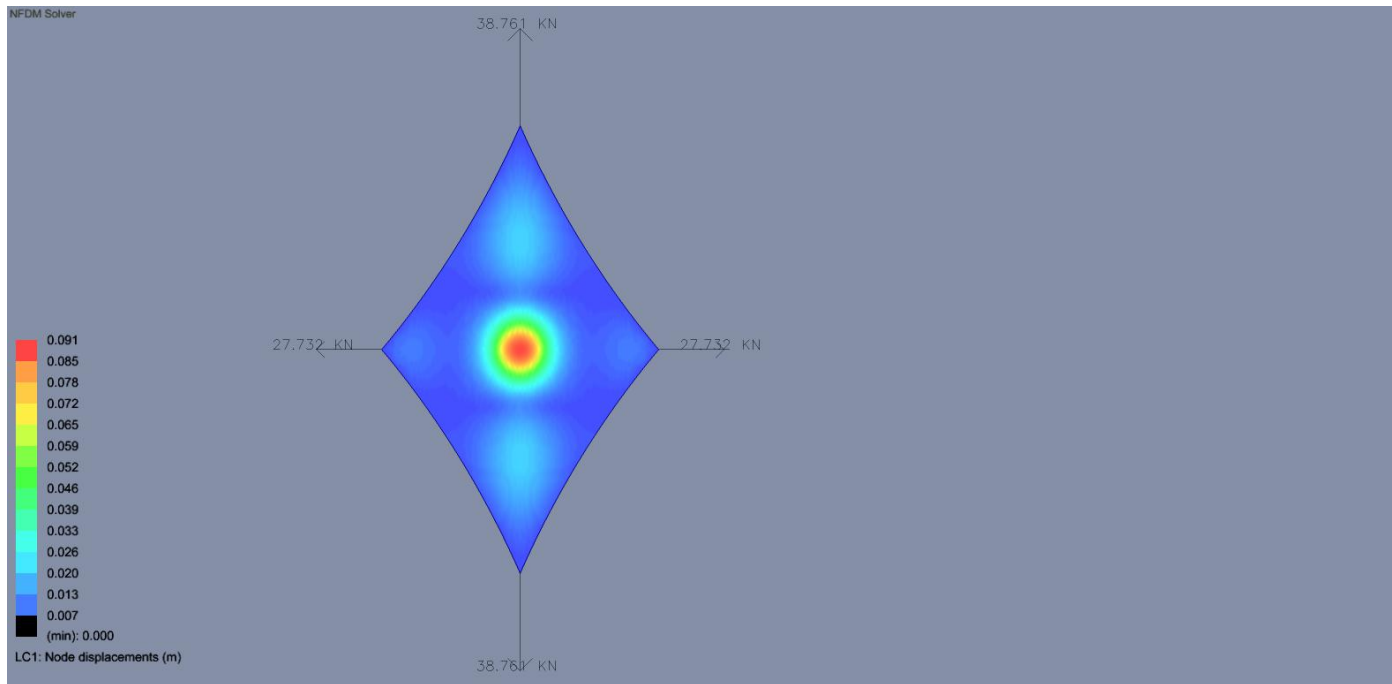
Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις

Ανάλυση 20. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wgr} = 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft} = 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μικρός άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> και λαμβάνεται και το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



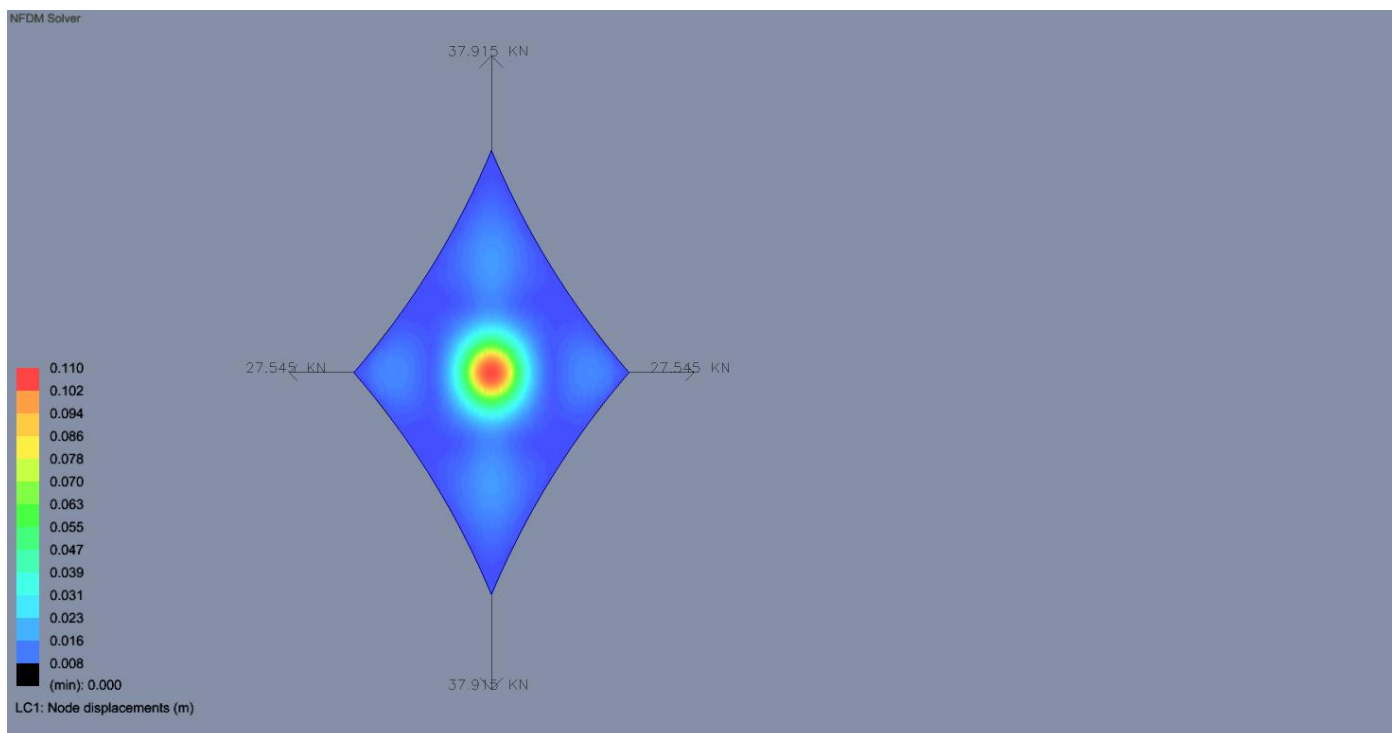
Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις

Ανάλυση 21. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp} = 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft} = 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> και λαμβάνεται και το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



Φαίνονται οι μετατοπίσεις των κόμβων

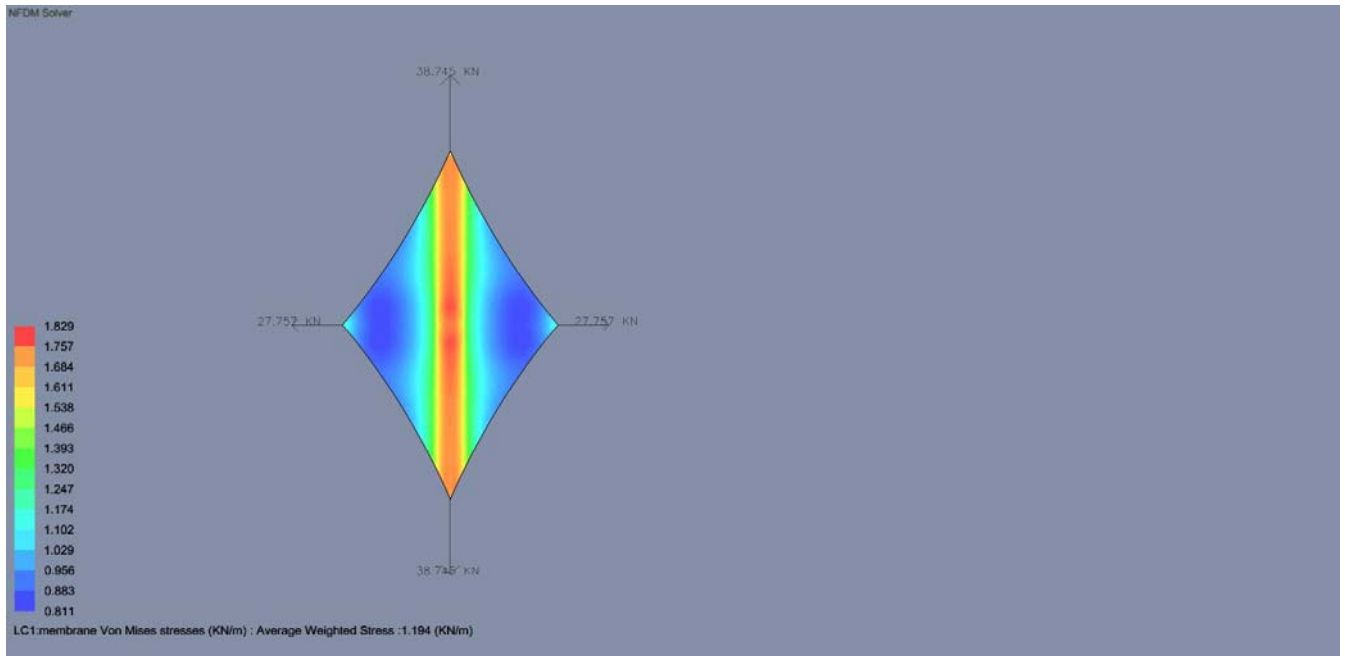
Ανάλυση 22. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp} = 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft} = 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μικρός άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> και λαμβάνεται και το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



Φαίνονται οι μετατοπίσεις των κόμβων

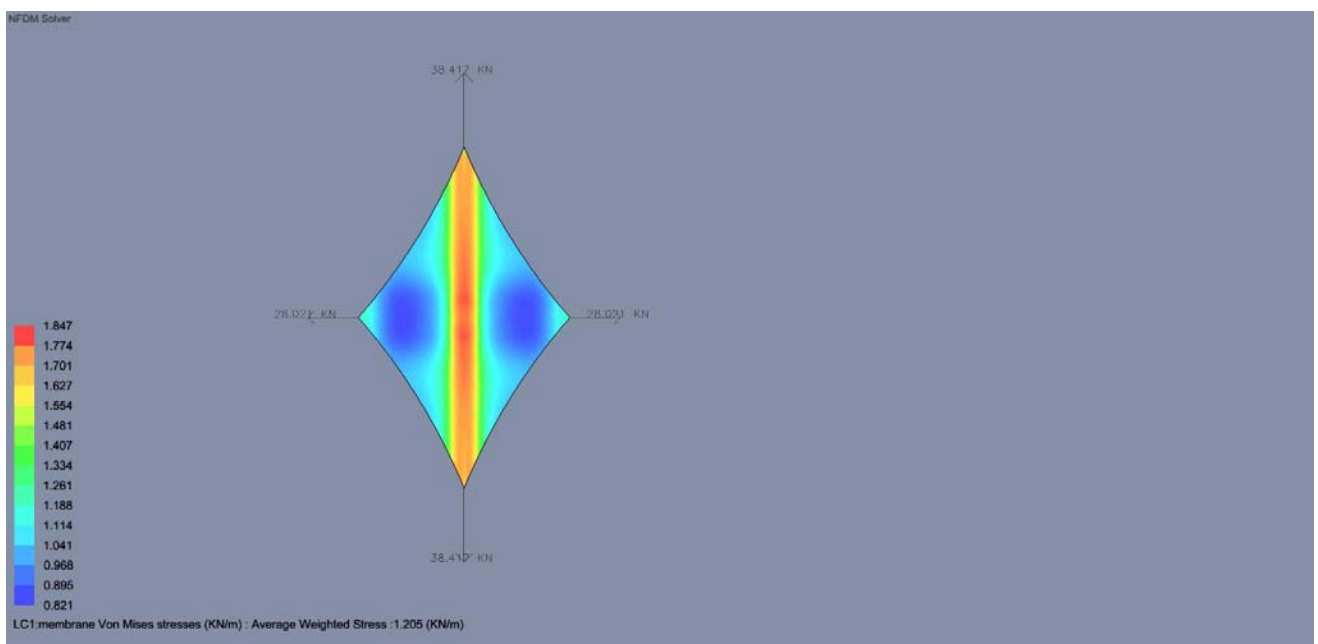
**Συμπέρασμα :** Στη μη γραμμική ανάλυση για το ίδιο υλικό με τις ίδιες φορτίσεις βλέπουμε ότι υπάρχει διαφορά στην κατανομή των τάσεων, στο ύψος των αντιδράσεων και στις μετατοπίσεις αν η διάταξη του στημονιού και του υφαδιού είναι διαφορετική.

Ανάλυση 23. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wrap}= 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft}= 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> δεν λαμβάνεται το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



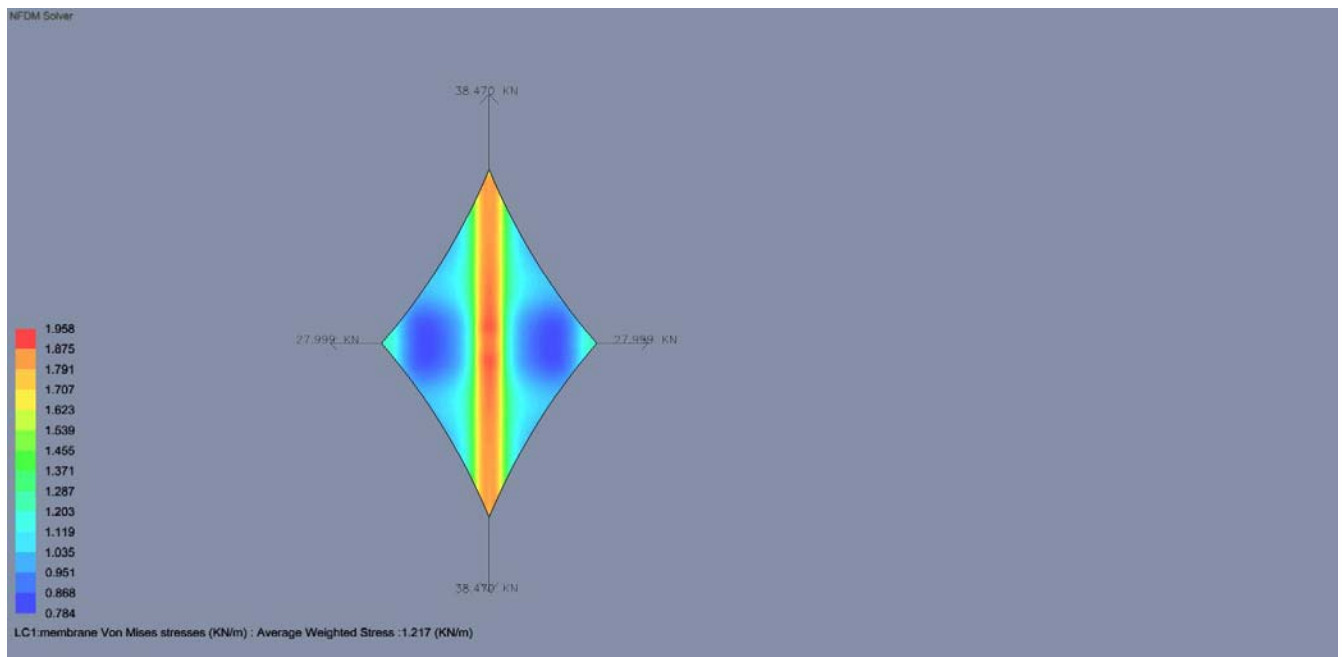
Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις

Ανάλυση 23. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE III (1000 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wrap}= 653.95 \text{ KN/m}$   $E_{weft}= 293.33 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm.



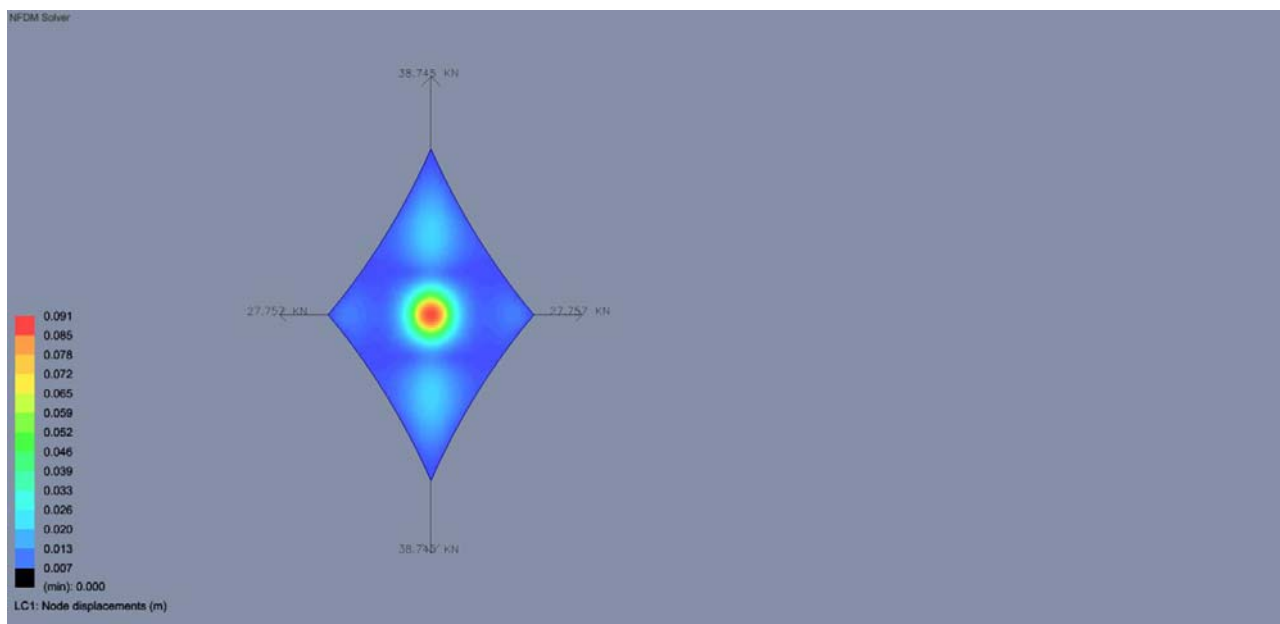
Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις

Ανάλυση 24. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE IV (1400 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp}= 847.45 \text{ KN/mKN/m}$   $E_{weft}= 382.91 \text{ KN/mKN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm.



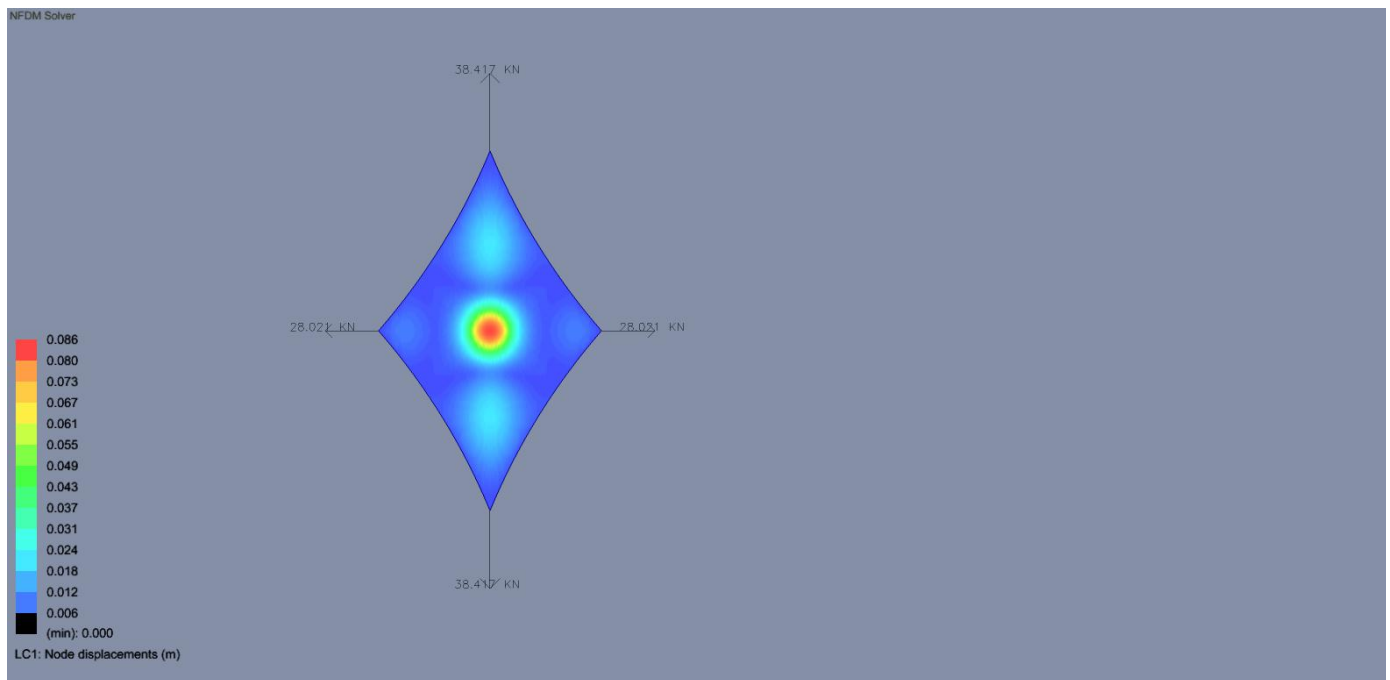
Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις

Ανάλυση 25. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp}= 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft}= 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> δεν λαμβάνεται το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



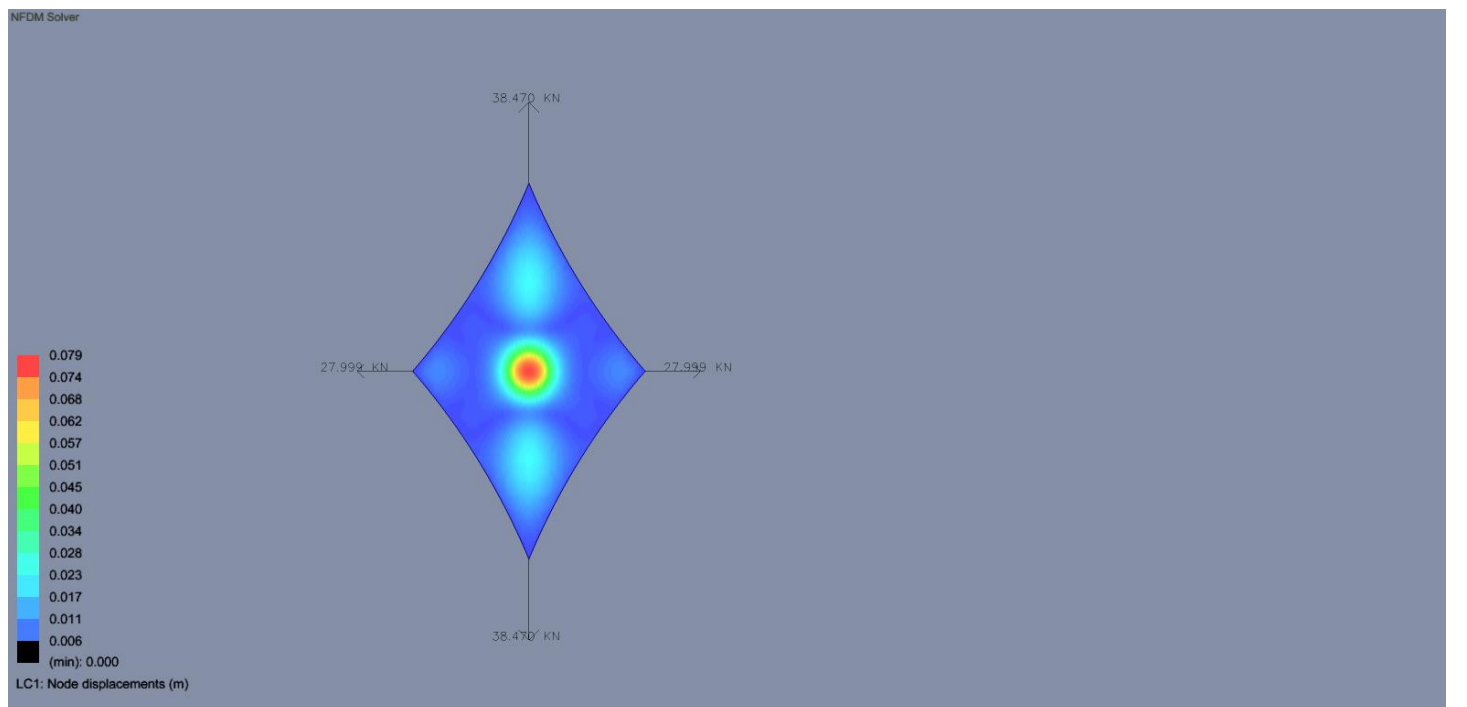
Φαίνονται οι μετατοπίσεις και οι αντιδράσεις

Ανάλυση 23. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE III (1000 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wgr}= 653.95 \text{ KN/m}$   $E_{wft}= 293.33 \text{ KN/mKN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm.



Φαίνονται οι μετατοπίσεις και οι αντιδράσεις

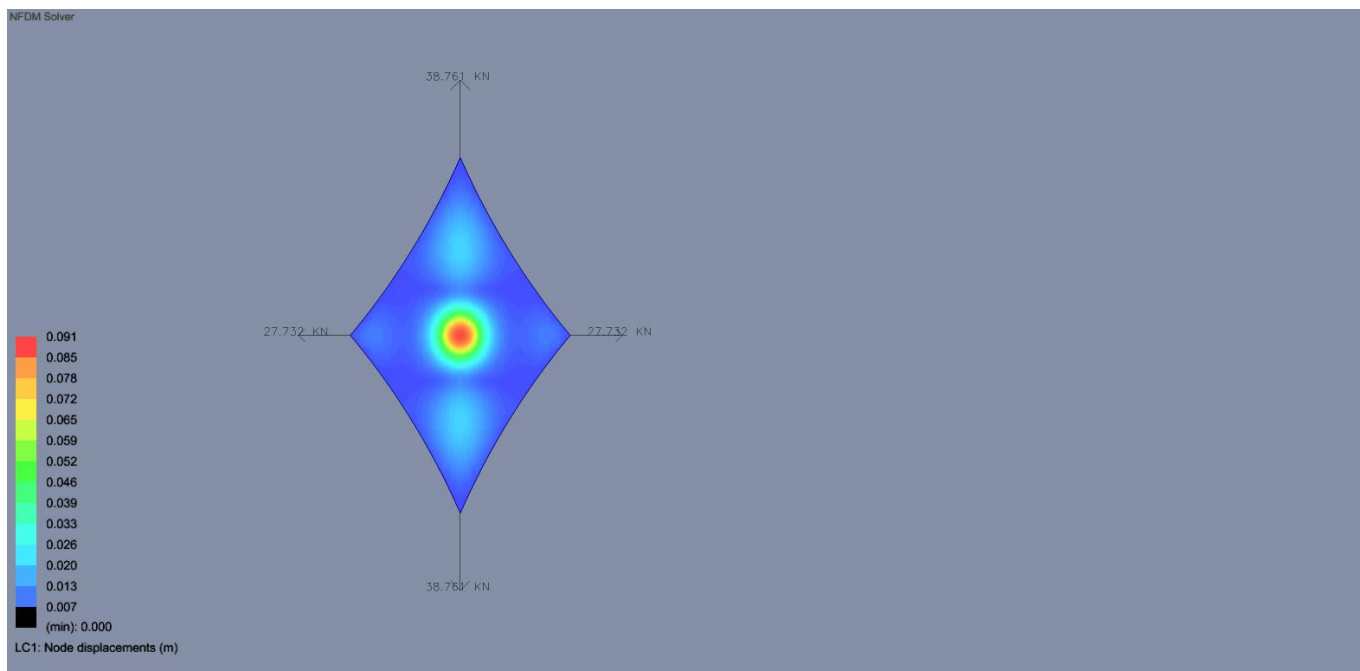
Ανάλυση 24. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι).Υλικό TYPE IV (1400 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wgr}= 847.45 \text{ KN/mKN/m}$   $E_{wft}= 382.91 \text{ KN/mKN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας.Καλώδιο ορίου 10mm.



Φαίνονται οι μετατοπίσεις και οι αντιδράσεις

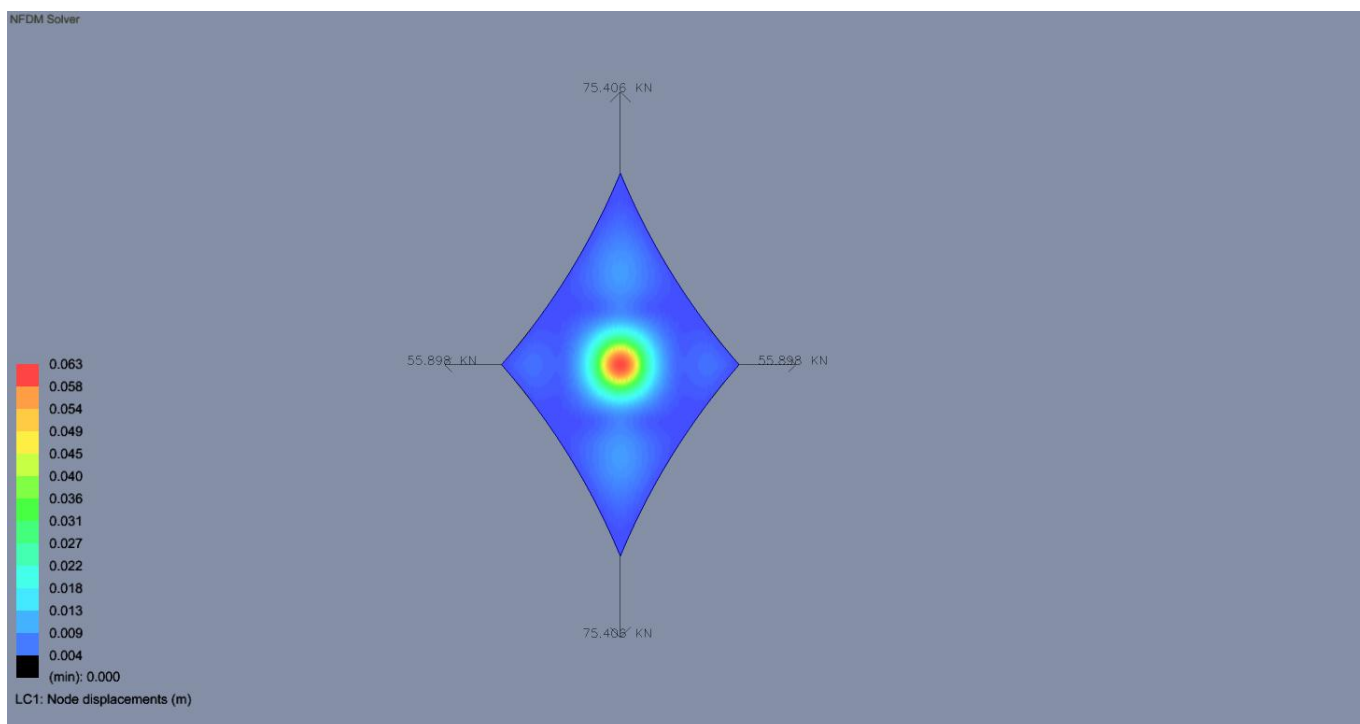
**Συμπέρασμα :** Στη μη γραμμική ανάλυση για διαφορετικά υλικά με τις ίδιες φορτίσεις βλέπουμε ότι όσο πιο δύσκαμπτο το υλικό τόσο αύξάνονται οι τάσεις και μειώνονται οι μετατοπίσεις.

Ανάλυση 26. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp} = 463.32$  KN/m  $E_{weft} = 210.52$  KN/m. Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> λαμβάνεται το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



Φαίνονται οι μετατοπίσεις και οι αντιδράσεις

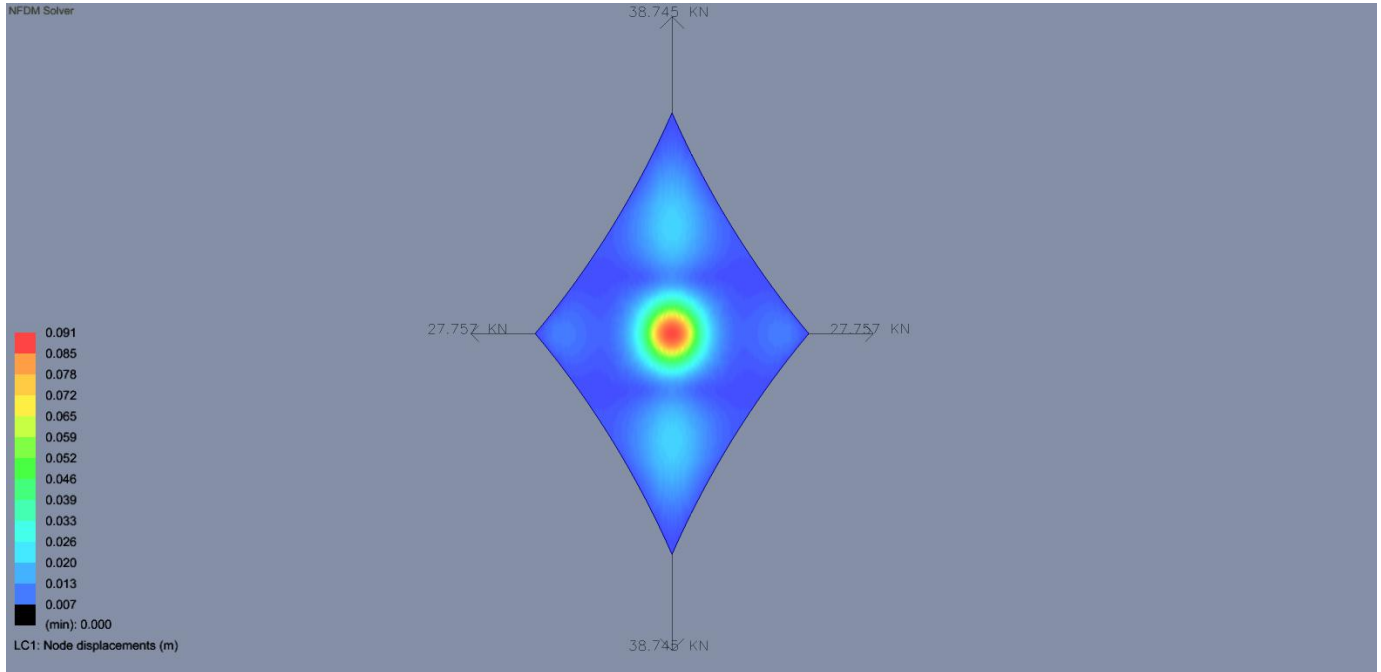
Ανάλυση 27. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 2-Εξωτερικά 40 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp} = 463.32$  KN/m  $E_{weft} = 210.52$  KN/m. Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> λαμβάνεται το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης. Ο λόγος πυκνότητας δύναμης παραμένει σταθερός αλλά διπλασιάζονται οι ονομαστικές τιμές.



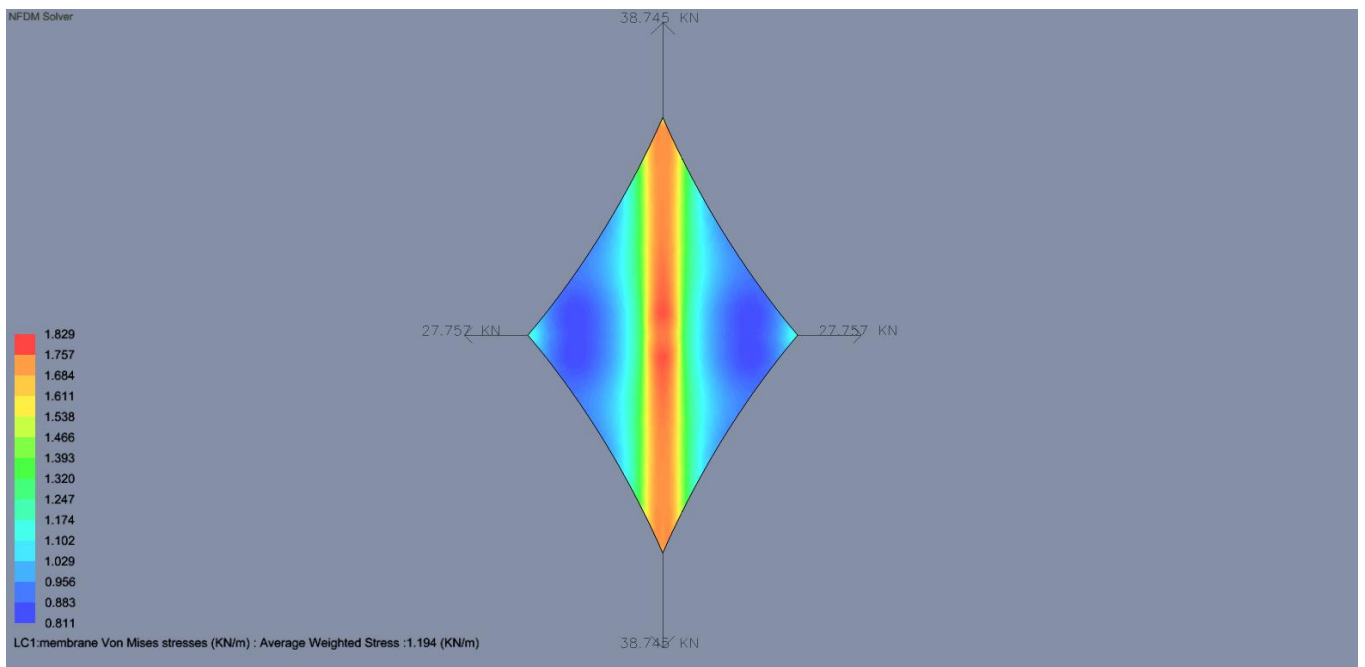
Φαίνονται οι μετατοπίσεις και οι αντιδράσεις

**Συμπέρασμα :** Στη μη γραμμική ανάλυση για ίδια υλικά με τις ίδιες φορτίσεις και ίδια μορφή βλέπουμε ότι όσο πιο μεγάλη προένταση έχουμε τόσο αυξάνονται οι αντιδράσεις και ελαττώνονται οι μετατοπίσεις.

Ανάλυση 28. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{wpar}= 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft}= 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> δεν λαμβάνεται το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



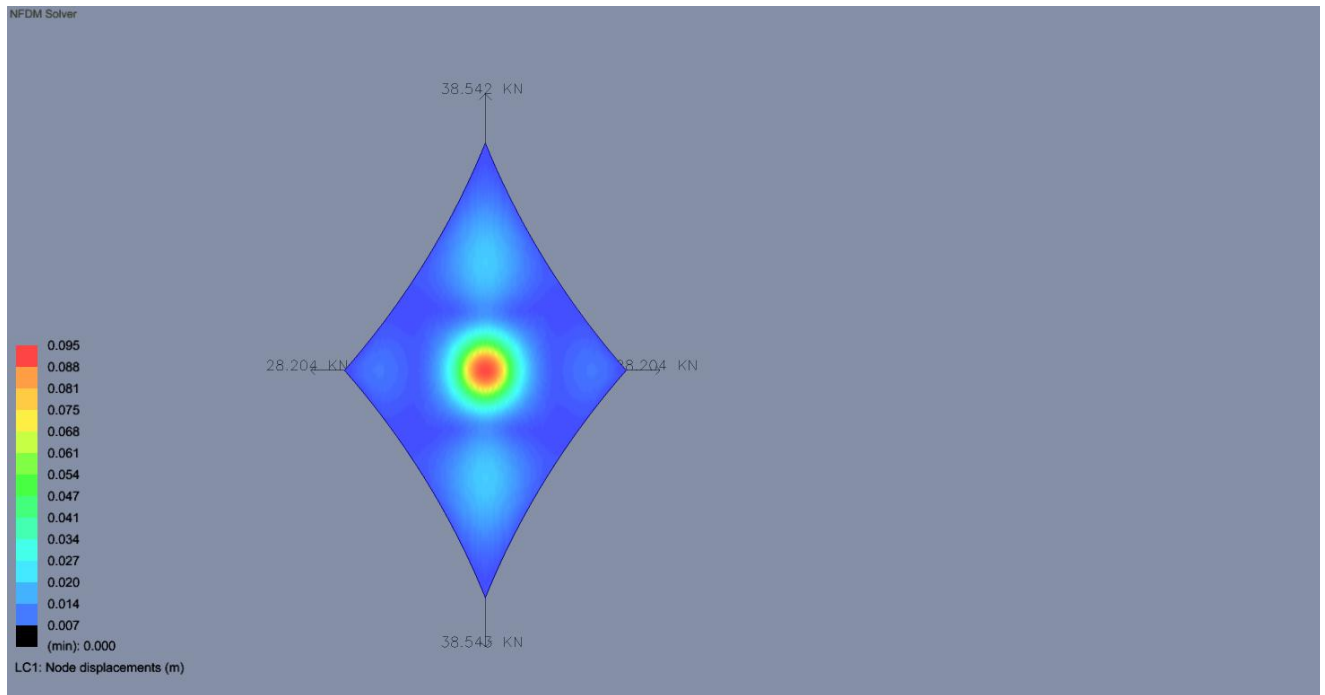
Φαίνονται οι μετατοπίσεις και οι αντιδράσεις



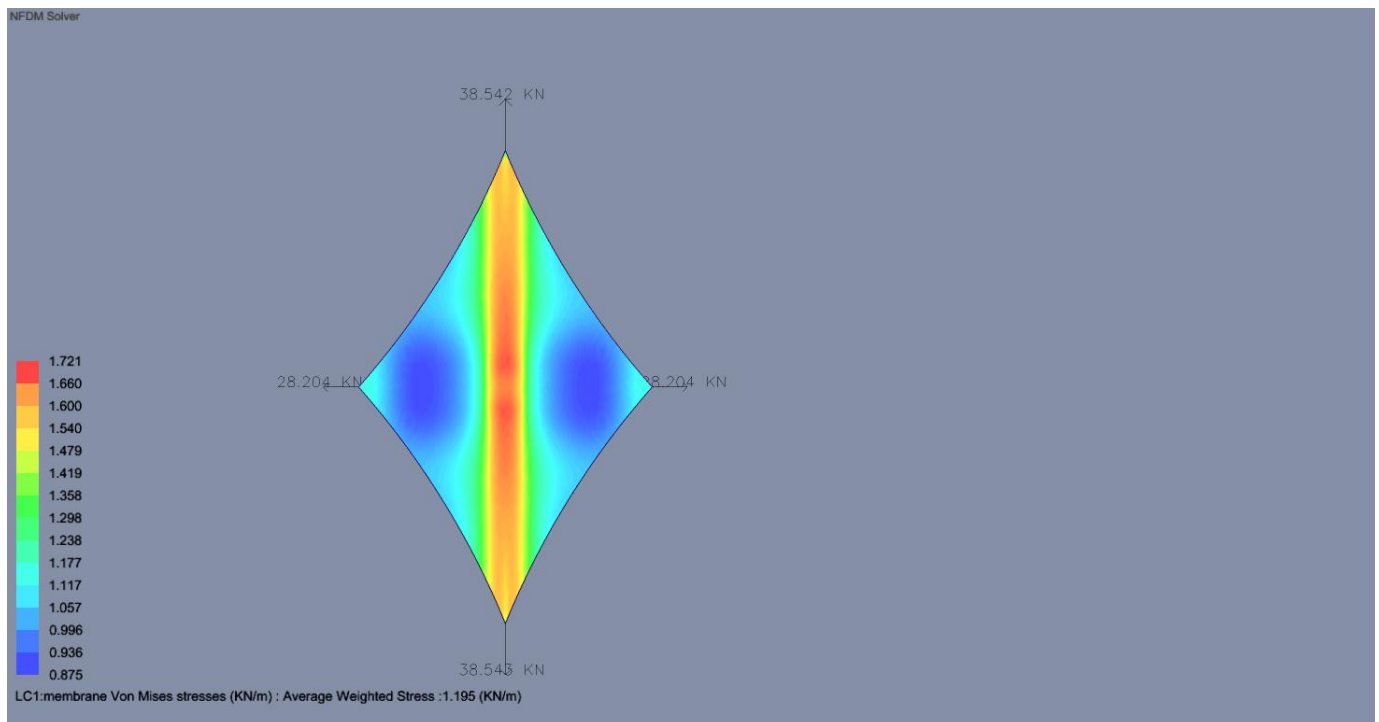
Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις



Ανάλυση 29. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp} = 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft} = 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας. Καλώδιο ορίου 20mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> δεν λαμβάνεται το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



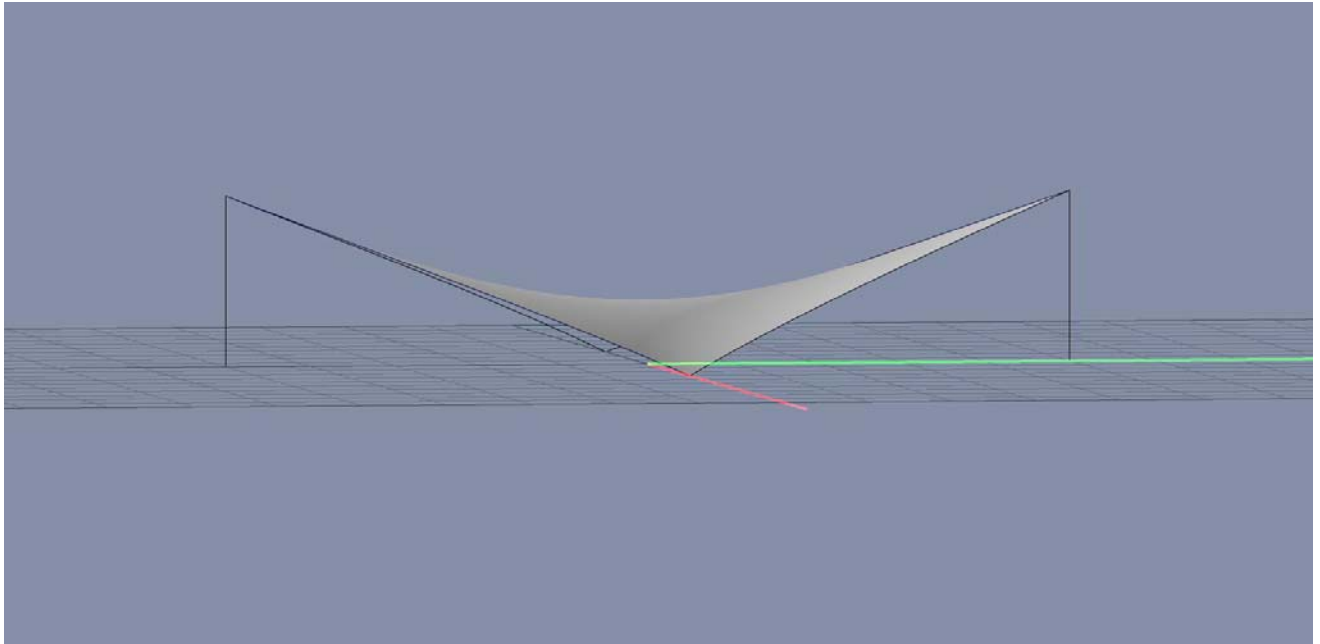
Φαίνονται οι μετατοπίσεις και οι αντιδράσεις



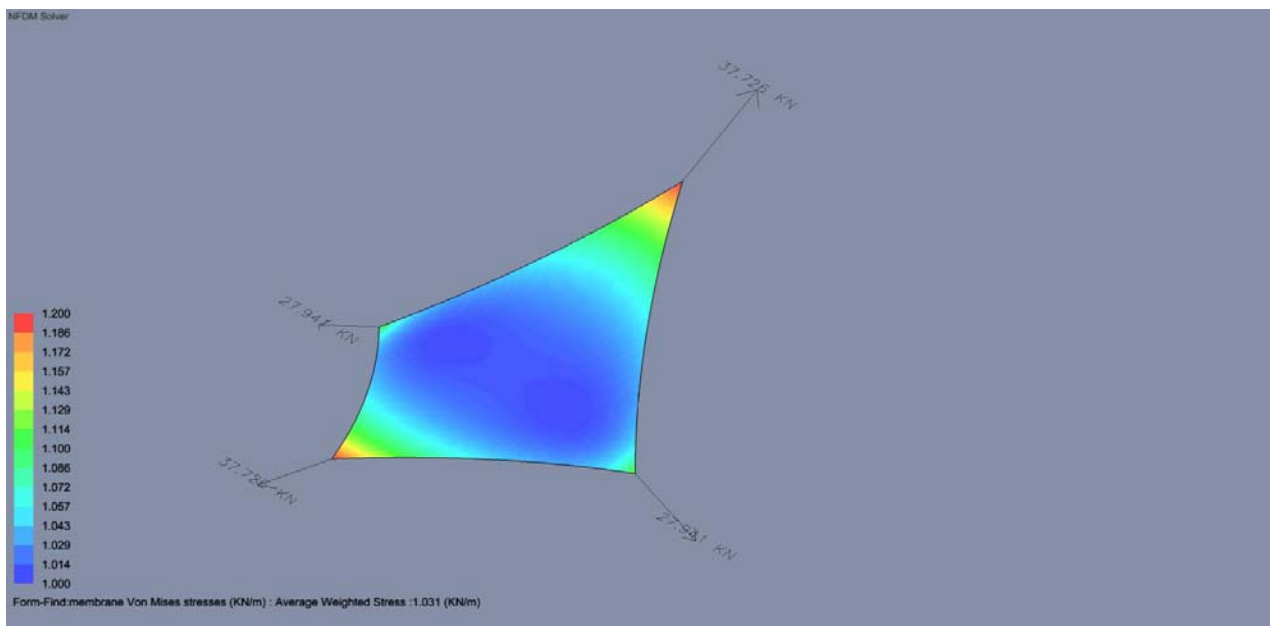
Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις

**Συμπέρασμα :** Στη μη γραμμική ανάλυση για ίδια υλικά με τις ίδιες φορτίσεις και ίδια μορφή αλλά διαφορετική δυσκαμψία στο όριο βλέπουμε ότι οι μετατοπίσεις μεγαλώνουν , οι τάσεις στο δίκτυο μειώνονται όπως και οι αντιδράσεις. Δηλαδή με πιο δύσκαμπτα άκρα πρέπει να μειωθεί ο λόγος των πυκνοτήτων δύναμης.

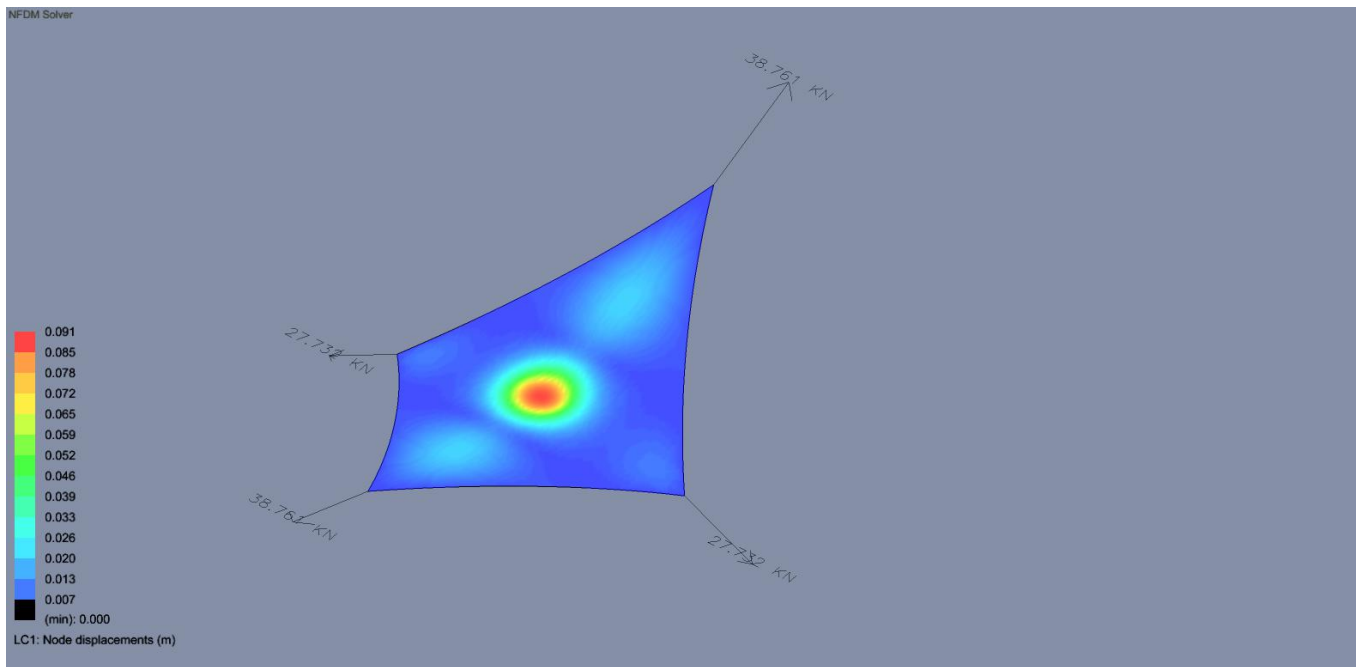
Ανάλυση 30. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp} = 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft} = 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατανεμημένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> λαμβάνεται το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης.



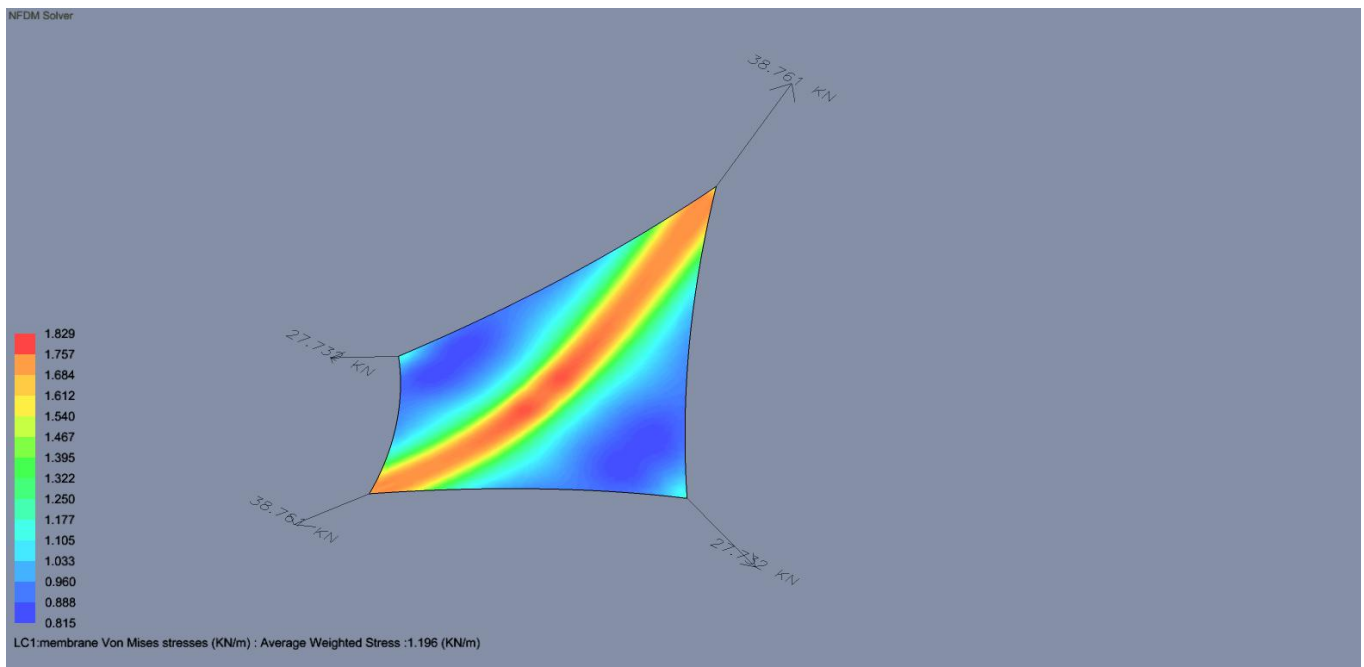
3d όψη



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises για την προένταση και οι αντιδράσεις

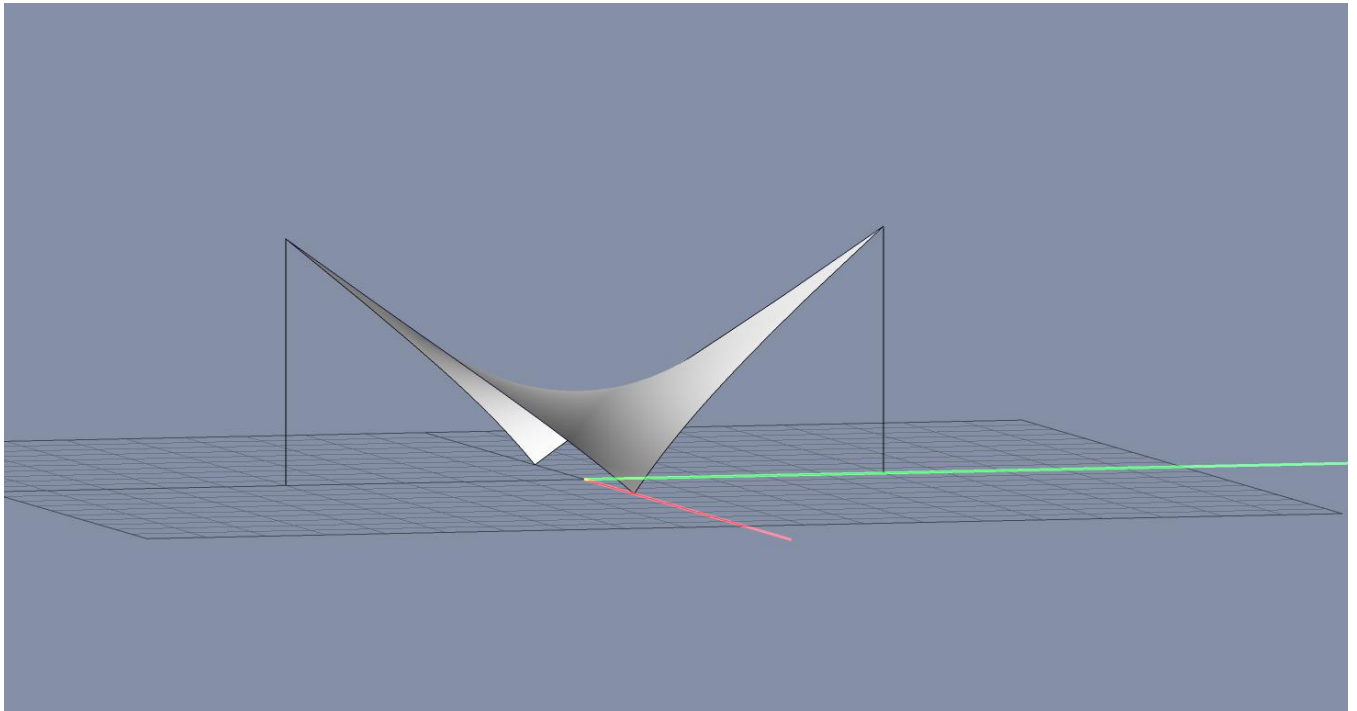


Φαίνονται οι μετατοπίσεις και οι αντιδράσεις

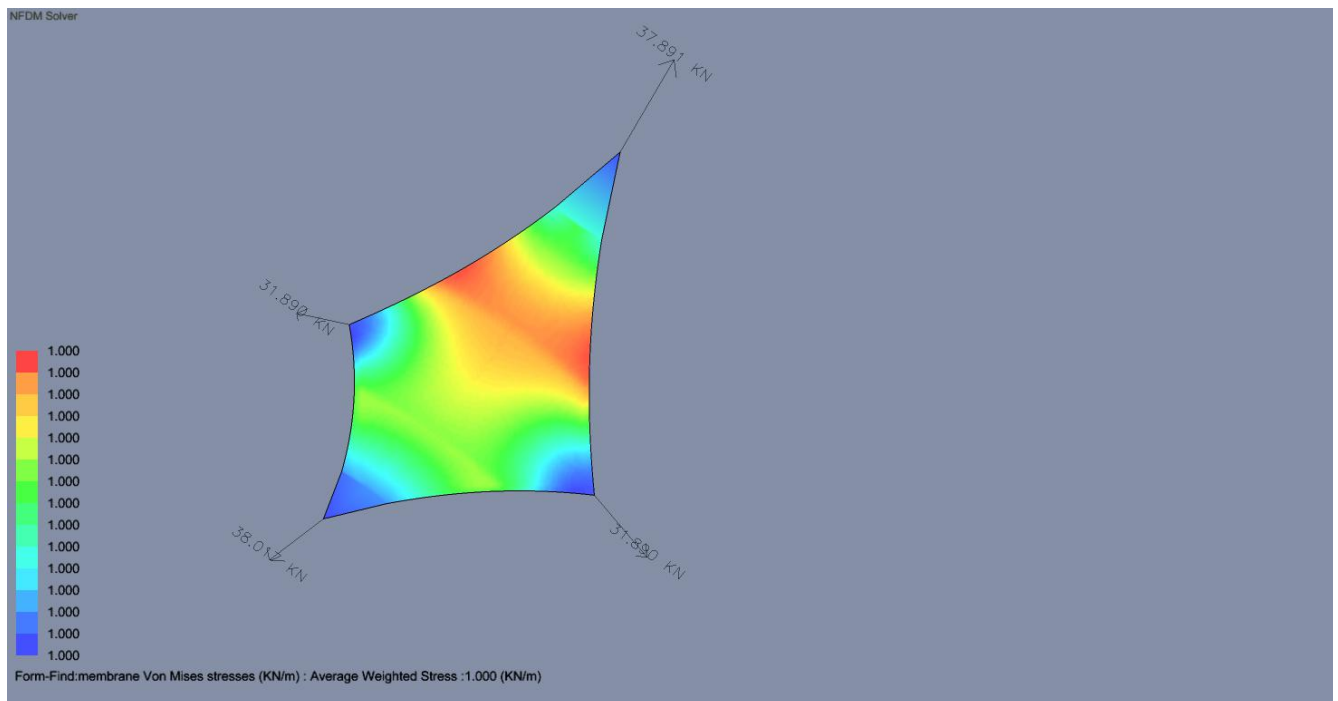


Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις

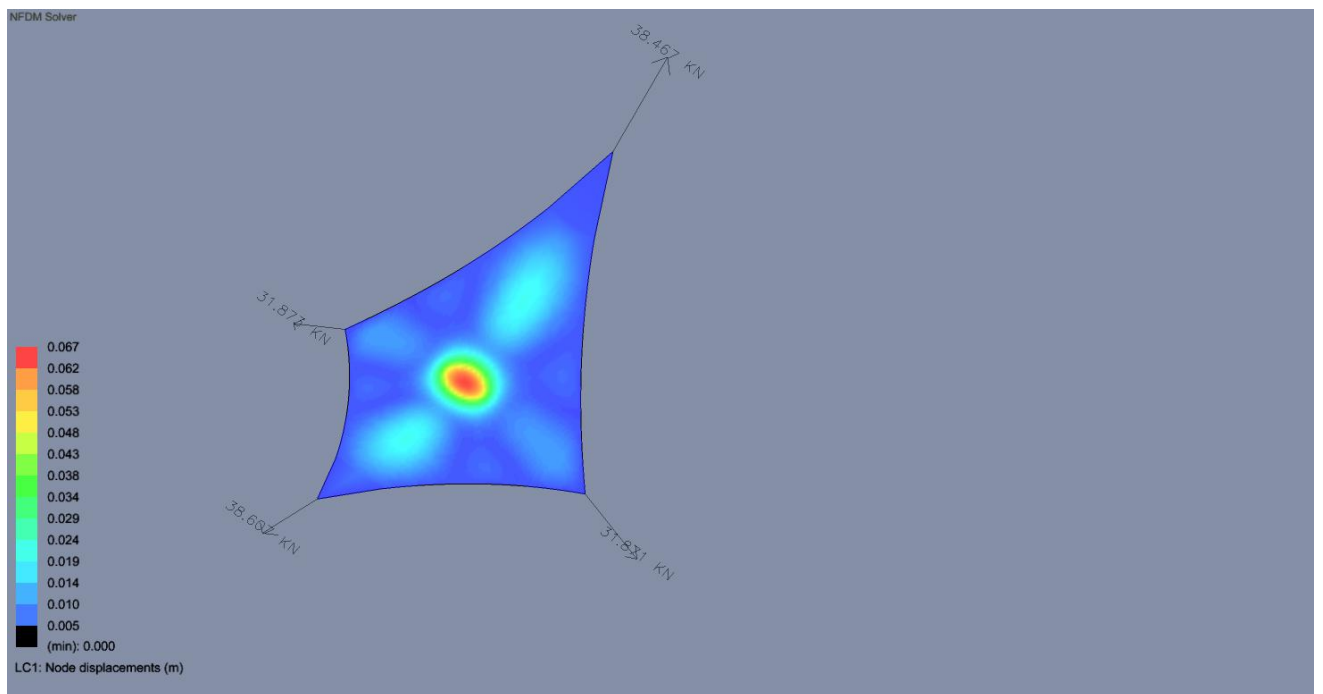
Ανάλυση 31. Πυκνότητα δύναμης Εσωτερικά 1-Εξωτερικά 20 με χρήση NFDM (natural force density method) με επιλογή υλικού και ορισμό κυρίων διευθύνσεων του υλικού (στημόνι-υφάδι). Υλικό TYPE I (700 gr/m<sup>2</sup>) με  $E_{warp} = 463.32 \text{ KN/m}$   $E_{weft} = 210.52 \text{ KN/m}$ . Διεύθυνση στημονιού ο μεγάλος άξονας. Καλώδιο ορίου 10mm. Σε επιλεγμένα τριγωνικά στοιχεία εφαρμόζεται κατακεκομμένο κατακόρυφο φορτίο 1kN/m<sup>2</sup> λαμβάνεται το ίδιο βάρος όλης της μεμβράνης. Υψομετρική διαφορά 4 μέτρα που σημαίνει πιο έντονη καμπυλότητα.



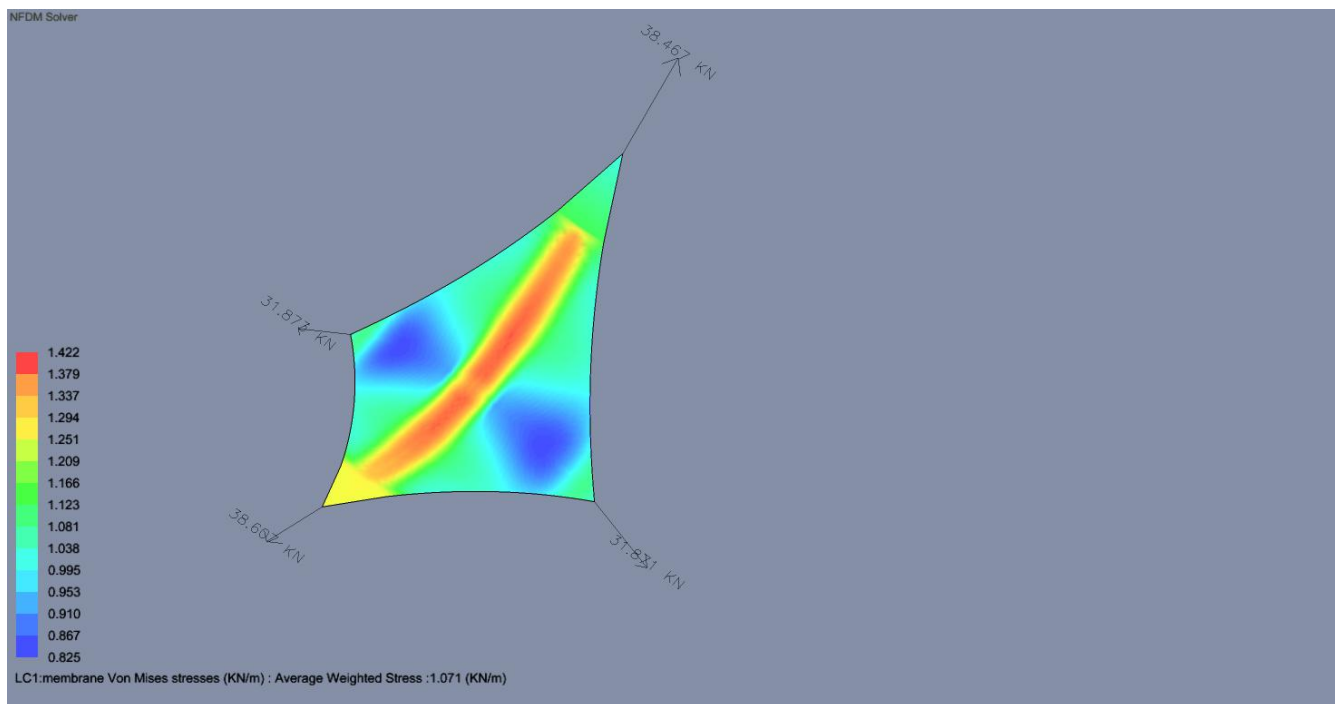
3d όψη



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises για την προένταση και οι αντιδράσεις



Φαίνονται οι μετατοπίσεις και οι αντιδράσεις



Φαίνονται οι τάσεις Von Mises και οι αντιδράσεις

**Συμπέρασμα :** Στην εύρεση μορφής για ίδια υλικά με τον ίδιο λόγο πυκνότητας δύναμης βλέπουμε ότι με την αύξηση της καμπυλότητας οι τάσεις τείνουν να έχουν την ίδια τιμή σε όλη την επιφάνεια και ταυτόχρονα αυξάνονται οι αντιδράσεις των συγκρατήσεων των χαμηλών σημείων.

Στη μη γραμμική ανάλυση βλέπουμε ότι με την αύξηση της καμπυλότητας οι τάσεις της μεμβράνης μειώνονται με ταυτόχρονη μείωση των παραμορφώσεων.

Έτσι έχουμε το συμπέρασμα ότι όσο πιο έντονη είναι η καμπυλότητα τόσο πιο δύσκαμπτη είναι η μεμβράνη.

## 5.3 Φορτίσεις

### 5.3.1 Εισαγωγή

Από την ίδια τη φύση τους οι ελαφρές κατασκευές έχουν την αναλογία της εφαρμοσμένης φόρτισης προς το ίδιο βάρος πολλές φορές μεγαλύτερη από εκείνη των συμβατικών κτιρίων. Αλλαγές στο μέγεθος του ανέμου και του χιονιού είναι επομένως πιθανό να έχουν αναλογικά μεγαλύτερο αντίκτυπο στο μέγεθος των δομικών μελών που απαιτούνται και την κλίμακα των παραμορφώσεων.

Κατά συνέπεια, η επιλογή των κατάλληλων προτύπων φόρτωσης για το σχεδιασμό των εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης πρέπει να εξεταστεί προσεκτικά. Επιπλέον, τα πρότυπα που υπάρχουν για τυποποιημένα σχήματα και την συμπεριφοράς τους, συνήθως κάνουν την εφαρμογή ενός ενιαίου κώδικα πολύ δύσκολη. Κατά συνέπεια, περισσότερο χρόνο και προσπάθεια πρέπει να καταβληθεί για τον καθορισμό περιπτώσεων φορτίσεων. Λόγω της ευκαμψίας της μεμβράνης ο σχεδιασμός των δομών αυτών θα πρέπει να διαφέρει από τους νέους ευρωπαϊκούς κώδικες. (EUROCODES).

### 5.3.2 Προένταση

Το επίπεδο της προέντασης στην επιφάνεια της μεμβράνης επηρεάζει όλα τα στοιχεία της δομής στήριξης (ιστούς, δικτυώματα, καλώδια κ.λπ.). Η προένταση αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της δομικής συμπεριφοράς της κατασκευής. Τα επίπεδα προέντασης έχουν επιλεγεί ως αποτέλεσμα της διαδικασίας «εύρεσης μορφής», και πρέπει να επιτευχθούν και να διατηρηθούν κατά τη διάρκεια της ανέγερσης και της ζωής της δομής.

Η προένταση των εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης είναι ένα θεμελιώδες μέρος του σχήματος και της στατικής συμπεριφοράς. Οι μακροπρόθεσμες επιπτώσεις, όπως ο ερπυσμός του υλικού της μεμβράνης μπορεί να αλλοιώσει τα επίπεδα προέντασης. Η τοποθέτηση της θεμελίωσης μπορεί επίσης, αν και σπάνια, να είναι μια επιρροή επίσης. Τα αποτελέσματα αυτά πρέπει να εξεταστούν και να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για να εξασφαλιστεί η διατήρηση επαρκούς προέντασης.

Γενικά, η ελάχιστη απαιτούμενη προένταση των επιφανειών της μεμβράνης εξαρτάται από την ακαμψία και την αντοχή του υλικού και η επιρροή της στην μορφή της επιφάνειας της μεμβράνης (δηλαδή την καμπυλότητα). Επιπλέον χαμηλότερα επίπεδα προέντασης από αυτά που απαιτούνται μπορεί να οδηγήσει σε ανώμαλη ή ρυτιδωμένη εμφάνιση καθώς δεν έχουν όλες οι ίνες στην επιφάνεια τεντωθεί επαρκώς.

Για κατασκευές με μεμβράνη πολυεστέρα επικαλυμμένη με PVC, ένας «κανόνας» είναι ότι η προένταση δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 1,3% της μέσης ικανότητας λωρίδας σε εφελκυσμό του υλικού τόσο στο στημόνι όσο και στο υφάδι. Η τιμή που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να ικανοποιήσει την ελάχιστη απαίτηση για προένταση των μόνιμων δομών μεμβράνης φαίνεται στον παρακάτω πίνακα για τους τύπους μεμβράνη πολυεστέρα επικαλυμμένη με PVC:

Ελάχιστα επίπεδα προέντασης για δομές μεμβρανών πολυεστέρα με επικάλυψη PVC
Type I 0.70 KN/m
Type II 0.90 KN/m
Type III 1.30 KN/m
Type IV 1.60 KN/m
Type V 2.00 KN/m

Η προένταση μπορεί να επιλεγεί με υψηλότερες τιμές για την ελαχιστοποίηση των παραμορφώσεων των καμπύλων μορφών της μεμβράνης, αλλά με την αυξημένη προένταση στα όρια μειώνεται το εύρος της περιοχής των επιτρεπόμενων τιμών των τάσεων λειτουργίας. Προσωρινή ή ειδικές κατασκευές μεμβράνης θα μπορούσε να σχεδιαστεί με τη χρήση χαμηλότερων τιμών προέντασης.

Οι τιμές προένταση για κατασκευές μεμβράνης από υαλόνημα με επικάλυψη PTFE τείνουν να είναι υψηλότερα καθώς το υλικό είναι πιο σκληρό. Η προένταση δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 2.0kN / m και

τα ισχυρότερη σήμερα διαθέσιμα υλικά συχνά παίρνουν τιμές προέντασης 5.0 kN / m (και για πολύ επίπεδες επιφάνειες ίσως έως 10kN / m).

Ένα "κανόνας" είναι ότι η προένταση δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 2,5% ούτε ανώτερη από 6% του μέσου όρου της ικανότητας λωρίδας σε εφελκυσμό του υλικού τόσο στο στημόνι όσο και στο υφάδι. Οι παραπάνω τιμές πρέπει να εφαρμοστούν για να ικανοποιηθεί η βασική προϋπόθεση για την προένταση των μόνιμων δομών μεμβράνης.

Το επίπεδο της προέντασης στην επιφάνεια της μεμβράνης επηρεάζει τις δομές στήριξης (π.χ. ιστό, δικτυώματα και τα καλώδια) και αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της δομικής συμπεριφοράς. Οι τιμές της προέντασης επιλέγονται κατά τη διαδικασία εύρεσης της μορφής και τα επίπεδά τους επικυρώνονται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης των περιπτώσεων φορτίων σχεδιασμού. Οι δυνάμεις προέντασης, φυσικά, πρέπει να περιλαμβάνονται σε όλες τις περιπτώσεις συνδυασμού φορτίσεων.

Διαφορετικά επίπεδα προέντασης μεταξύ στημονιού και υφαδιού μπορεί να μεταβάλει το σχήμα σε κάποιο βαθμό και μπορεί να βελτιώσει τη δομική συμπεριφορά. Η στρατηγική αυτή είναι στην πραγματικότητα μια εξομάλυνση για δομές που έχουν ένα "σχεδιασμένο ειδικό αναγκαστικό" φορτίο σε μια κατεύθυνση και ένα μέτριο φορτίο στην άλλη αντίθετη κατεύθυνση. Ωστόσο η επιλογή πιο κατάλληλων γεωμετρικών οριακών συνθηκών και πιο μεγάλης καμπυλότητας επιφάνεια θα είναι πάντα ένας πιο επιτυχημένος τρόπος για τη βελτίωση της δομικής συμπεριφοράς.

Για κωνικά σχήματα εφελκόμενης μεμβράνης τα διαφορετικά επίπεδα προέντασης είναι μια αναγκαιότητα, καθώς το σχήμα της μεμβράνης δένει σαν "θηλιά" γύρω από το δακτύλιο στήριξης. Γενικά, οι αναλογίες προέντασης δεν θα πρέπει να διαφέρουν περισσότερο από 1: 4 ή 4: 1.

Οι δομές μεμβράνης συνήθως χρειάζονται <<απομείωση>> , έτσι ώστε το ύφασμα θα επιτύχει τα προκαθορισμένα επίπεδα προέντασης στη σωστή γεωμετρία όταν συμβεί ο ερπυσμός της μεμβράνης. Η διαδικασία <<απομείωσης>> αντιπροσωπεύει το ελαστικό τέντωμα της μεμβράνης και των καλωδίων, καθώς και για τον ερπυσμό της μεμβράνης.



Σχ. 5.13 καθεστώς "δυναμικά-ελεγχόμενης" προέντασης της δομής της μεμβράνης με υδραυλικά έμβολα © Landrell

Ένα καθεστώς "δυναμικά-ελεγχόμενης" προέντασης είναι εκείνη στην οποία όλα τα στοιχεία, συμπεριλαμβανομένης της μεμβράνης φθάσουν στις προκαθορισμένες τιμές προέντασης τους, αλλά θα πρέπει να υποβληθούν σε εκ νέου σε τάση αφού έχει συμβεί η πρώιμη φάση ερπυσμού, βλέπε Σχ. 5.13. Εναλλακτικά, ένα καθεστώς "γεωμετρικά ελεγχόμενης" προέντασης θα πρέπει να εντείνει την μεμβράνη ελαφρώς πάνω από την καθοριζόμενη τάση ώστε να αποκτήσει επαρκή φορτίο για την υπερνίκηση του ερπυσμού. Πολύ προεντεταμένες μεμβράνες μπορεί να φτάσουν το φορτίο λειτουργίας τους για ένα μικρό χρονικό διάστημα, ενώ είναι τεντωμένες σε θέση, χωρίς χρόνο για να εκδηλωθεί ο ερπυσμός και πρέπει επομένως να εγκατασταθούν με "δυναμικά-ελεγχόμενης" τρόπο ή χρησιμοποιώντας μια "χρονικά βηματική" "γεωμετρικά ελεγχόμενη" προένταση. Η δομή δεν χρειάζεται να τεντωθεί εκ νέου μετά την εγκατάσταση αν έχουν προβλεφθεί κατάλληλες τιμές <<απομείωσης>> και έχουν ληφθεί υπόψη για τις πιθανές μακροπρόθεσμες κινήσεις, όπως η καθίζηση των θεμελίων και η μετατόπισή τους.

Χρησιμοποιώντας καθεστώς "γεωμετρικά ελεγχόμενης" προέντασης, απαιτείται λεπτομερή ανάλυση για να αποφευχθεί η υπερβολική καταπόνηση της μεμβράνης και θα πρέπει να προβλεφθεί ότι μπορεί να υποβληθεί σε υψηλές εξωτερικές φορτίσεις αμέσως μετά την εγκατάσταση.

### 5.3.3 Ίδιο Βάρος

Το ίδιο βάρος της μεμβράνης είναι συνήθως μεταξύ 0,7 και 2,0 kg / m<sup>2</sup>. Δεν είναι συνηθισμένο να περιλαμβάνεται το ίδιο βάρος στη διαδικασία εύρεσης μορφής, γιατί αυτό μπορεί να προκαλέσει κάποια πρόσθετη μηχανική ελευθερία στην απόκριση της μεμβράνης. Αν και έχει συνήθως ασήμαντη επίδραση, σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να είναι σημαντικό - για παράδειγμα σε κατασκευή σχετικώς μικρής επιφάνειας εφελκυσμένης μεμβράνης χρησιμοποιηθεί βαρύτερο υφάσματα. Το αν ή όχι το ίδιο βάρος περιλαμβάνεται στη διαδικασία εύρεσης μορφής (για να καθορίσουμε την αρχική γεωμετρική κατάσταση) πρέπει να περιλαμβάνεται σε όλες τις περιπτώσεις που εφαρμόζεται το φορτίο.

### 5.3.4 Άνεμος

Ο άνεμος, ιδίως με τη μορφή της ανύψωσης, είναι συνήθως η πιο κρίσιμη φόρτιση για τη μεμβράνη και τα καλώδια έντασης στις εφελκυσμένες κατασκευές μεμβράνης. Γενικά θεωρείται ως μια περίπτωση στατικού φορτίου που καθορίζεται από μια δυναμική πίεση που πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή πίεσης (C<sub>p</sub>). Είναι επίσης δεδομένο ότι η μεμβράνη υφίσταται μόνο μικρές αλλαγές στη γεωμετρία της, έτσι ώστε οι αλλαγές στον παράγοντα C<sub>p</sub> είναι αρκετά μικρές και μπορούν με ασφάλεια να αγνοηθούν. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να μην είναι κατάλληλη εάν η μορφή της μεμβράνης είναι ευαίσθητη σε παραμορφώσεις και / ή μεγάλες παραμορφώσεις είναι το θέμα προς διερεύνηση.

Δεδομένου ότι ο σχεδιασμός και η εφαρμογή των εφελκυσμένων κατασκευών μεμβράνης αναπτύχθηκαν αρκετά πρόσφατα, μια μεγάλη τεκμηρίωση και έρευνα πρέπει ακόμη να πραγματοποιηθεί. Ειδικά στον τομέα της ανάλυσης του ανέμου ακριβής τρόπος για τον προσδιορισμό του φορτίου του ανέμου πρέπει να εξεταστεί. Ο προσδιορισμός της ανεμοπίεσης σε εφελκυσμένες κατασκευές μεμβράνης είναι ένα σύνθετο πρόβλημα. Αυτές οι δομές επηρεάζονται έντονα από τις εξωτερικές φορτίσεις, όπως ο άνεμος, λόγω της μικρής αναλογίας ίδιο βάρος-προς-φορτίο.

Εκτός από αυτό, οι δομές μεμβράνης που εφαρμόζονται και εκτελούνται σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών, τα σχήματα, τα μεγέθη, οι αναλογίες και οι κατευθύνσεις, αναγκάζουν τους κατασκευαστές μηχανικούς να κάνουν απλουστευτικές υποθέσεις και προσεγγίσεις κατά τον υπολογισμό των εφελκυσμένων κατασκευών μεμβράνης υπό φορτίο ανέμου. Αυτές οι υποθέσεις οδηγούν άρρηκτα σε υπερβολικά υψηλή ή χαμηλή διαστασιολόγηση των κατασκευών. Η υπερδιαστασιολόγηση έχει κυρίως επιπτώσεις στην οικονομικό τομέα. Ο μηχανικός του σήμερα έχει να κάνει με την αντοχή, την βιωσιμότητα και τη βέλτιστη χρήση των υλικών, περιορίζοντας την υπερβολική κατανάλωση των πρώτων υλών. Υπό-διαστασιολόγηση από την άλλη πλευρά θα μπορούσε να προκαλέσει περισσότερο σοβαρές επιπτώσεις. Θα μπορούσε να θέσει σε κίνδυνο την ασφάλεια και την κανονική χρήση αυτών των δομών. Πρόσφατα αρκετές εφελκυσμένες κατασκευές μεμβράνης έχουν καταρρεύσει υπό φορτία ανέμου σε όλο τον κόσμο, προκαλώντας οικονομικές και ανθρώπινες απώλειες. Μια περιορισμένη επισκόπηση ορισμένων που κατέρρευσαν απεικονίζεται στο σχήμα 5.15. Η αστοχία αυτών των κατασκευών δεν περιορίζεται σε ένα συγκεκριμένο πεδίο εφαρμογής, αλλά παρατηρείται για τις διάφορες δομές μεμβράνης, που κυμαίνονται



από προσωρινές κατασκευές όπως σκηνές φεστιβάλ και τέντες, ως μόνιμες δομές, όπως η εσωτερικού χώρου εγκατάσταση προπόνησης των Dallas Cowboys ομάδας αμερικάνικου ποδοσφαίρου.



International Boatshow Nieuwpoort, Belgium – October, 2003 – [41]



Dallas Cowboys indoor practice facility, USA – May, 2009 – [28]



Film set County Antrim, Northern Ireland – September, 2011 – [5]



Pukkelpop Kiewit, Belgium – August, 2011 – [55] [57]



Indiana State Fair stage, USA – September, 2011 – [29] [58]



Toronto stage Radiohead, USA – June, 2012 – [40]



Circus tent Belize, USA – Oktober, 2010 – [1]



Arkansas Music Pavilion, USA – July, 2012 – [23]



Garden pavilion, Netherlands – August, 2012 – [36]



Star Phoenix smoking tent, Canada – January, 2014 – [21]



Flanders Open Rugby Dendermonde, Belgium – May, 2009 – [51]



### Σχήμα 5.15: Επισκόπηση εφελκυσμένων κατασκευών μεμβράνης που έχουν καταρρεύσει

Ο μικρός ίδιου-βάρους-προς-εξωτερικού φορτίου δείκτης ορίζει την ευπάθεια αυτών των ελαφρών κατασκευών σε εξωτερικά φορτία ανέμου. Η έλλειψη εμπειρίας σε αυτές τις μάλλον νέες δομές προκαλεί ένα μεγάλο αριθμό των περιστατικών και των κατασκευαστικών αδυναμιών οι οποίες εκκινούν από διαφορετικές αφετηρίες. Οι περισσότερες γνωστές δομικές αστοχίες ξεκίνησαν από την αστοχία των μεμβρανών εξαιτίας θραύσης, η αστοχία του συστήματος στήριξη λόγω κάμψης των ορθοστατών ή χαλάρωση των καλωδίων, η αστοχία των συνδέσεων ή εξαρτημάτων μεταξύ της μεμβράνης και της δομής στήριξης και της αστοχία των θεμελίων που οφείλονται στην ανύψωση ολόκληρης της δομής. Σημειωτέον ότι στις περισσότερες περιπτώσεις η αστοχία ενός μόνο στοιχείου θα μπορούσε να προκαλέσει την κατάρρευση ολόκληρης της δομής της εφελκυσμένης κατασκευής, υπάρχει η γενική άποψη ότι η δομική σταθερότητα αυτών των δομών εξαρτάται από την αλληλεπίδραση μεταξύ όλων των στοιχείων που την

συνιστούν. Εκτός αυτού, επίσης, θα μπορούσε να συμβεί και μη καταστρεπτική αστοχία, όπως κυματισμός ή καλπασμός με αποτέλεσμα μεγάλο θόρυβο. Εκτός αυτού αυτά τα φαινόμενα αποτρέπουν κυρίως την συνήθη χρήση και την άνεση των δομών αυτών και θα μπορούσε να είναι αφετηρία ερπυσμού και κόπωσης

Από αυτή την άποψη, πιο ακριβής σχεδιασμός απαιτείται για τα φορτία του ανέμου για τις εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης, χωρίς υπερβολική διαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η δομική σχεδίαση αυτών των ελαφρών κατασκευών υπό ανεμοπίεση, εμπειριστατωμένη ανάλυση του ανέμου θα πρέπει να γίνεται σε κάποιες «τυπικές» γεωμετρίες μεμβράνης (υπερβολική παραβολοειδής, κώνος, μορφές αψίδας, τρούλους και είδη κύματος). Ένας πιο ακριβής προσδιορισμός της ανεμοπίεσης σε αυτές τις «τυπικές» μορφές θα επιτρέψει στον σχεδιαστή μηχανικό να εκτελέσει έναν πιο ακριβή σχεδιασμό του ανέμου, μειώνοντας δραστικά το ποσό της απλούστευσης των υποθέσεων και προσεγγίσεων. Σε αυτόν τον τομέα έρευνας η ανάλυση σε σήραγγες ανέμου πειραματικά θα μπορούσε να παράσχει την ακριβή ανεμοπίεση και τον προσδιορισμό του συντελεστή ασφάλειας στην αντοχή των εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης και θα μπορούσε να αποτελέσει μια θεμελιώδη βάση για έναν πιο γενικό Ευρωκώδικα σχετικά με το σχεδιασμό των δομών της μεμβράνης. Η ανάγκη για ακριβή πρότυπα του φορτίου ανέμου για αυτούς τους τύπους των κατασκευών έχει ήδη τονιστεί σε αρκετές δημοσιεύσεις, δηλώνοντας την έλλειψη των σημερινών προτύπων που διέπουν την ένταση της αντίστασης του ανέμου για αυτές τις δομές και την ανάγκη για μια ευρέως διαδεδομένη σειρά προτύπων.

Συχνά, η ένταση του ανέμου περιγράφεται με την κλίμακα των Beaufort (Σχήμα 5.14), το οποίο εισήχθη το 1838. Το Βρετανικό Ναυτικό χρησιμοποίησε αυτή την κλίμακα ως μια τεχνική για να εκτιμηθεί η ταχύτητα των ανέμων στη θάλασσα, ερμηνεύοντας την επιφάνεια του νερού ή τα πανιά του πλοίου. Αυτό δείχνει ήδη τη σημαντική σχέση των κατασκευών μεμβράνης από τον αλληλεπίδραση με τον άνεμο. Αργότερα η εμπειρική Κλίμακα μποφόρ και η κατάταξή της δε δεκατρείς διαβαθμίσεις της έντασης του ανέμου, που κυμαίνονται από την ηρεμία σε τυφώνες, αναβαθμίστηκε για χρήση στην στεριά. Σήμερα διατάξεις μέτρησης ανέμου, έχουν αναπτυχθεί, επιτρέποντας πολύ ακριβή προσδιορισμό της πραγματικής ταχύτητας του ανέμου. Για αρκετές δεκαετίες οι ταχύτητες του ανέμου έχουν καταγραφεί σε διάφορους μετεωρολογικούς σταθμούς σε διαφορετικά κράτη. Αυτά τα καταγεγραμμένα δεδομένα του ανέμου έχουν επιτρέψει να περιγράψει ο άνεμος από ένα μαθηματικό μοντέλο, δηλαδή έναν λογαριθμικό ή εκθετικό νόμο του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου σε συνάρτηση με το ύψος πάνω από το έδαφος και αρκετά χαρακτηριστικά του εδάφους και τις οριακές συνθήκες. Κατά συνέπεια, ένα στατιστικό μοντέλο του ανέμου θα πρέπει να χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της στατικής μελέτης των κτιρίων, προκειμένου να μοντελοποιήσουμε τις δράσεις του ανέμου που θα μπορούσαν να φορτίσουν μια δομή μέσα σε μια ορισμένη ετήσια πιθανότητα υπέρβασης των ορίων. Επιπλέον, ασυνήθιστες και πολύπλοκες δομές ή οριακές συνθήκες απαιτούν αριθμητική προσομοίωση με Computer Fluid Dynamics (CFD) ή πειραματικές δοκιμές αεροδυναμικής σήραγγας για το οριακό στρώμα.

Beaufort number	Wind speed				Mean wind speed (kt / km/h / mph)	Description	Wave height		Sea conditions	Land conditions
	kt	km/h	mph	m/s			m	ft		
0	0	0	0	0-0.2	0 / 0 / 0	Calm	0	0	Flat.	Calm. Smoke rises vertically.
1	1-3	1-6	1-3	0.3-1.5	02 / 04 / 2	Light air	0.1	0.33	Ripples without crests.	Wind motion visible in smoke.
2	4-6	7-11	4-7	1.6-3.3	05 / 09 / 6	Light breeze	0.2	0.66	Small wavelets. Crests of glassy appearance, not breaking.	Wind felt on exposed skin. Leaves rustle.
3	7-10	12-19	8-12	3.4-5.4	9 / 17 / 11	Gentle breeze	0.6	2	Large wavelets. Crests begin to break; scattered whitecaps.	Leaves and smaller twigs in constant motion.
4	11-16	20-29	13-18	5.5-7.9	13 / 24 / 15	Moderate breeze	1	3.3	Small waves.	Dust and loose paper raised. Small branches begin to move.
5	17-21	30-39	19-24	8.0-10.7	19 / 35 / 22	Fresh breeze	2	6.6	Moderate (1.2 m) longer waves. Some foam and spray.	Smaller trees sway.
6	22-27	40-50	25-31	10.8-13.8	24 / 44 / 27	Strong breeze	3	9.9	Large waves with foam crests and some spray.	Large branches in motion. Whistling heard in overhead wires. Umbrella use becomes difficult.
7	28-33	51-62	32-38	13.9-17.1	30 / 56 / 35	Near gale	4	13.1	Sea heaps up and foam begins to break.	Whole trees in motion. Effort to walk against the wind.
8	34-40	63-75	39-46	17.2-20.7	37 / 68 / 42	Gale	5.5	18	Moderately high waves with breaking crests forming spindrift. Streaks of foam.	Twigs broken from trees. Cars veer on road.
9	41-47	76-87	47-54	20.8-24.4	44 / 81 / 50	Strong gale	7	23	High waves (2.75 m) with dense foam. Wave crests start to roll over. Considerable spray.	Light structure damage.
10	48-55	88-102	55-63	24.5-28.4	52 / 96 / 60	Storm	9	29.5	Very high waves. The sea surface is white and there is considerable tumbling. Visibility is reduced.	Trees uprooted. Considerable structural damage.
11	56-63	103-117	64-72	28.5-32.6	60 / 111 / 69	Violent storm	11.5	37.7	Exceptionally high waves.	Widespread structural damage.
12	>63	>117	>72	>32.7	N/A	Hurricane	14+	46+	Huge waves. Air filled with foam and spray. Sea completely white with driving spray. Visibility very greatly reduced.	Massive and widespread damage to structures.

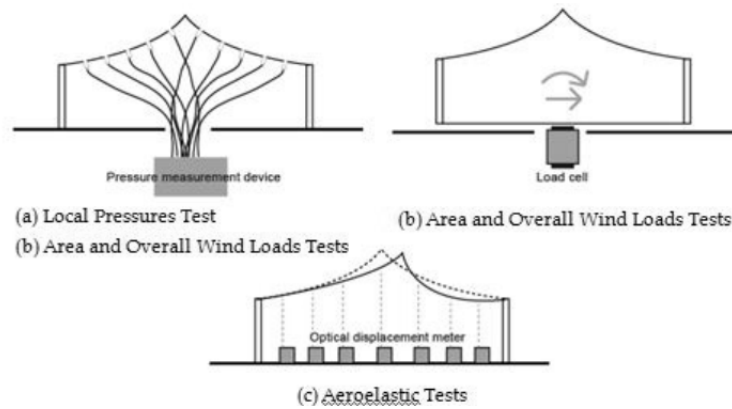
Σχ. 5.14 : Κλίμακα Beaufort

Η ανάγκη για την τεχνογνωσία και την έρευνα σχετικά με τις αρκετά πρόσφατα αναπτυσσόμενες εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη του TensiNet, ένα Θεματικό Δίκτυο για την αναβάθμιση του δομημένου περιβάλλοντος στην Ευρώπη μέσω εφελκόμενων κατασκευών. Το TensiNet είναι μια ένωση συνεργατών διεσπαρμένους σε διάφορες ευρωπαϊκές χώρες και έχει ως στόχο να συγκεντρώνουν, να μοιράζονται και να ανταλλάσσουν όλες τις διαθέσιμες έρευνας και την τεχνογνωσία, φέρνοντας μαζί ενεργούς κορυφαίους ερευνητές, μηχανικούς, σχεδιαστές, πολεοδόμους, αρχιτέκτονες, προμηθευτές υλικών, και τις αρχές ελέγχου σχετικά με τον σχεδιασμό και τον έλεγχο των αρχιτεκτονικών εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης.

Αυτός ο Ευρωπαϊκός Οδηγός Σχεδιασμού απεικονίζει σαφώς ότι μία από τις προτεραιότητες που προσδιορίζονται ερευνητικά είναι ο προσδιορισμός των ακριβών φορτίσεων ανέμου στις εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης. Ανεξάρτητα από κάποιες πειραματικές αναλύσεις και μελέτες που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί, εξακολουθεί να υπάρχει ανάγκη για πρόσθετη ακριβή και αντιπροσωπευτική έρευνα σχετικά με την ανεμοπίεση των δομών της μεμβράνης.

Υπάρχουν τρεις κύριες προσεγγίσεις για την ανάλυση σε αεροδυναμική σήραγγα της αντοχής των εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης (Σχήμα 5.16). Από τη μία πλευρά, η δομή θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι παραμορφώνεται πολύ λίγο κάτω από την εξωτερική ανεμοπίεση, η οποία δεν θα μπορούσε να προκαλέσει σημαντική μεταβολή των συντελεστών πίεσης του ανέμου. Σε αυτή την περίπτωση άκαμπτα μοντέλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να δημιουργηθεί η κατανομή της πίεσης. Δύο κατηγορίες ορίζονται: τοπικές δοκιμές πίεσης και συνολικές δοκιμές πίεσης στην επιφάνεια της μεμβράνης. Από την άλλη πλευρά, η ικανότητα παραμόρφωσης και η ευκαμψία της δομής της μεμβράνης θα πρέπει οπωσδήποτε να εξετάζεται σε δομές που παραμορφώνονται σημαντικά κάτω από την εξωτερική φόρτιση ανέμου. Αυτή η πειραματική ανάλυση χρησιμοποιεί τα αερο-ελαστικά μοντέλα για μια πιο λεπτομερή ανάλυση της ευαισθησίας στη δυναμική και τις παρενέργειες των φορτίων ανέμου σε εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης. Αυτές οι δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα πραγματοποιούνται με οπτικές μετρήσεις. Και στις δύο προσεγγίσεις η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία θα μπορούσε να συνδέσει την ανάλυση σε αεροδυναμική σήραγγα με αριθμητικές προσομοιώσεις, όπως Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής Computational Fluid Dynamics (CFD). Η αλληλεπίδραση μεταξύ της φόρτισης του ανέμου και της δομικής συμπεριφοράς των ελαφρών κατασκευών μεμβράνης είναι ένα σύνθετο πρόβλημα. Ως εκ τούτου, τα πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα απαιτούνται για τον προγραμματισμό και τη βελτίωση των υπολογισμών του CFD για ανοιχτά στέγαστρα. Ένα νέο μοντέλο σύζευξης μεταξύ του φορτίου του ανέμου

και της δομικής συμπεριφοράς θα πρέπει να καθοριστεί για να βελτιστοποιηθούν οι αριθμητικές προσομοιώσεις για αυτές τις δομές μεμβράνης.



Σχ. 5.16: Οι τρεις βασικές δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα για τις δομές μεμβράνης

#### 5.3.4.1 Αεροδυναμική Σήραγγα

Δοκιμές στη σήραγγα αεροδυναμικής χρειάζονται να χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό τιμών  $C_p$  όταν:

1. Το σχήμα της μεμβράνης και η μορφή είναι αρκετά διαφορετικές από εκείνες που περιγράφονται στο πλαίσιο των κωδίκων και τη διαθέσιμη βιβλιογραφία και δεν μπορεί να γίνει μια αξιόπιστη εκτίμηση των τιμών  $C_p$ .
2. Η συντηρητική προσέγγιση καθιστά μια σύνθετη δομή πάρα πολύ ακριβή για να κατασκευαστεί.

Μια δοκιμή σε αεροδυναμική σήραγγα μπορεί να διερευνήσει τους τοπικούς συντελεστές πίεσης και να βελτιώσει την αξιοπιστία του σχεδιασμού φόρτισης. Η πλειονότητα των δοκιμών αεροδυναμικής σήραγγας διεξάγονται σε άκαμπτα μοντέλα που δεν λαμβάνουν υπόψη τις αλλαγές στην κατανομή της πίεσης που εφαρμόζεται λόγω της παραμόρφωσης της επιφάνειας της μεμβράνης. Ως εκ τούτου, οι δοκιμές με άκαμπτο μοντέλο δεν είναι ο πιο κατάλληλος τύπος για τις παραμορφώσεις των ευαίσθητων επιφανειών της μεμβράνης, αλλά γενικά είναι η μόνη επιλογή. Ένα πιο πολύπλοκο τεστ "αερο-ελαστικού" σε αεροδυναμική σήραγγα για να διερευνήσει τις δυναμικές επιδράσεις, όπως καλπασμό και πτερυγισμό, θα μπορούσε να είναι πιο κατάλληλο για μια τέτοια δομή. Αυτό θα ενσωματώσει στο μοντέλο μια επιφάνεια που εκτρέπεται με παρόμοιο τρόπο με την πλήρη μεγέθους δομή. Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά είναι πολύ περίπλοκα για να δημιουργηθούν και δεν παρέχουν πάντοτε πολύ συνεπής απαντήσεις. Η τρέχουσα έρευνα προσπαθεί να εκτιμήσει την αεροδυναμική σταθερότητα σε συνδυασμό με τη χρήση αριθμητικής ανάλυσης για τη ροή του ανέμου (Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής ανάλυση CFD) και δομική αλληλεπίδραση (Finite Element Modelling FEM). Ωστόσο, η εφαρμογή τους για να αποδείξουν τη δυνατότητα αντιμετώπισης του ανέμου για τις πολύ εύκαμπτες εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης θα είναι μια πτυχή για μελλοντική έρευνα.

Η αεροδυναμική σήραγγα θα πρέπει να αντιπροσωπεύει το κατάλληλο Ατμοσφαιρικό Οριακό Στρώμα που μπορεί να δεχθεί επιδράσεις έναντι ριπών ανέμου συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που προκύπτουν από τα κυρίαρχα κτίρια και άλλα εμπόδια στη γύρω περιοχή.

Γενικά, η αεροδυναμική σήραγγα είναι σε θέση να παρέχει τοπικά φορτία πίεσης, συμπεριλαμβανομένων των τιμών  $C_p$ , δυναμικούς παράγοντες ενίσχυσης και τις επιπτώσεις του μεγέθους. Τα αποτελέσματά τους βασίζονται στις ακόλουθες πληροφορίες που παρέχονται από τον πολιτικό μηχανικό:

- α) Τα κατασκευαστικά σημαντικά σχήματα σε ιδιομορφική ανάλυση και τη φυσική τους συχνότητα.
- β) Η μέγιστη απόκλιση που βασίζεται στην καθορισμένα φορτία

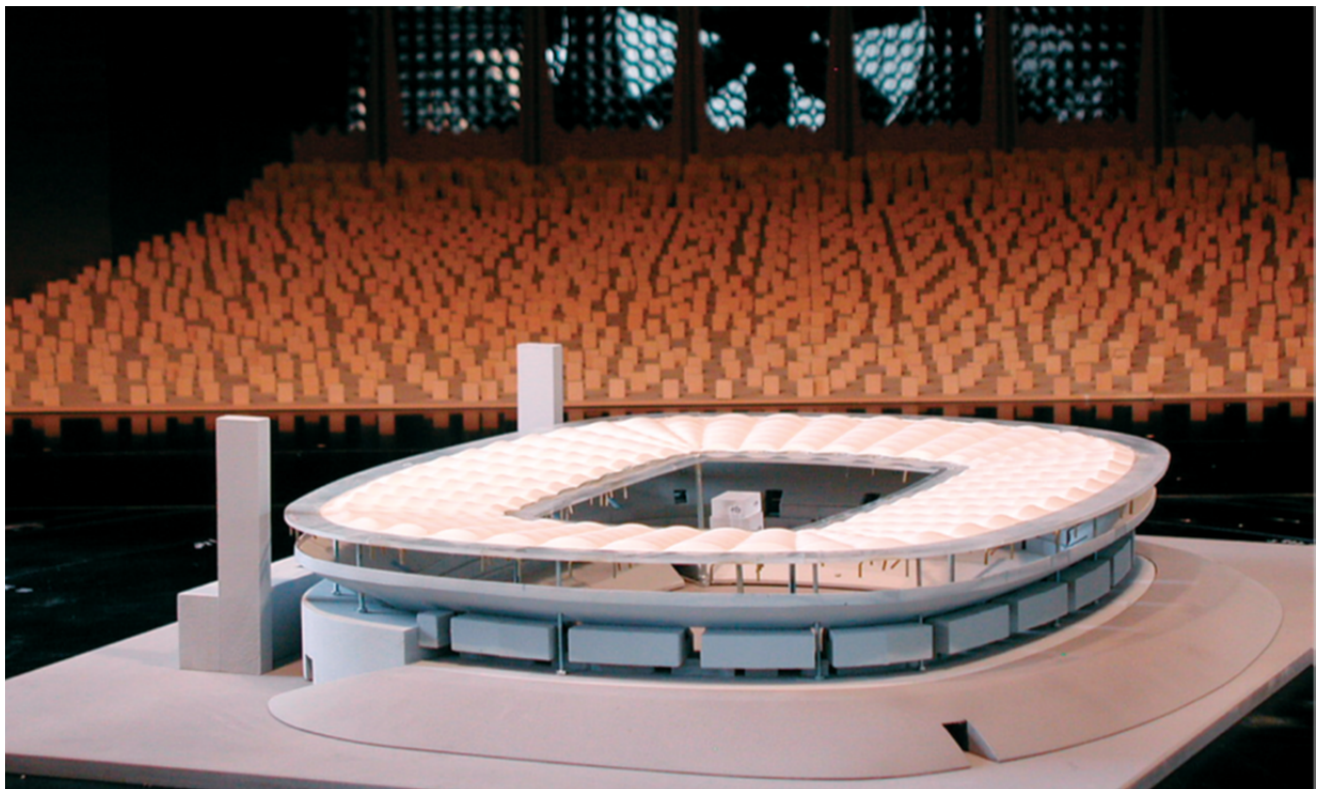
γ) περιοχές εφαρμογής φορτίου (συνολικά, δευτερεύοντα στοιχεία, επενδύσεις κλπ)

δ) συγκεκριμένες περιοχές ενδιαφέροντος για φορτία.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών χρειάζεται να φιλτράρονται κατάλληλα για να βρίσκονται οι πιο κρίσιμες περιπτώσεις φορτίου για τη δομή. Η πιο κρίσιμη περίπτωση φορτίου ανέμου για μία δομή μεμβράνης δεν θα πρέπει αναγκαστικά να συνδέεται με τα ιδιομορφικά σχήματα, τα οποία είναι συχνά η κρίσιμη περίπτωση για τις περισσότερο πρότυπες δομές.

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας στατικής μελέτης, οι σχετικές δράσεις του ανέμου πρέπει να καθορίζονται για κάθε κατάσταση σχεδιασμού, προκειμένου να διαστασιοποιηθεί η δομή. Εκτός αυτού, θα πρέπει επίσης να εξετάσει την κατασκευή διαφόρων σταθερών και μεταβλητών δράσεων όπως το χιόνι, ο πάγο, η βροχή και φορτία λειτουργίας, τα οποία θα μπορούσαν να τροποποιήσουν τα αποτελέσματα της δράσης του ανέμου στη δομή. Επιπλέον, η δομή θα πρέπει να ελεγχθεί για πιθανές επιπτώσεις της κόπωσης που μπορεί να προκληθεί από την τυρβώδη ροή της δράσης του ανέμου.

Ο άνεμος είναι μια κυμαινόμενη ροή των μορίων του αέρα, που προκαλείται από την ανισορροπία των δυνάμεων που επενεργούν επί των μορίων του αέρα. Κατά συνέπεια ο άνεμος θα αλληλεπιδράσει με οποιοδήποτε αντικείμενο που επηρεάζει την ελεύθερη ροή τους ρεύματος με μόριο-συγκρούσεις μεταξύ των δύο αλληλεπιδρώντων μέσων. Οι συγκρούσεις αυτές έχουν σαν αποτέλεσμα την ενέργεια μετάδοσης, εκπροσωπούμενη από τις δυνάμεις ή πιέσεις στον διαχωρισμό των όψεων. Η ποσότητα της ενέργειας που εκπέμπεται εξαρτάται έντονα από τον προσανατολισμό της σύγκρουσης και κατά συνέπεια τον προσανατολισμό των όψεων του διαχωρισμού, και έτσι στην ουσία το σχήμα και τις αεροδυναμικές παραμέτρους του αντικειμένου.

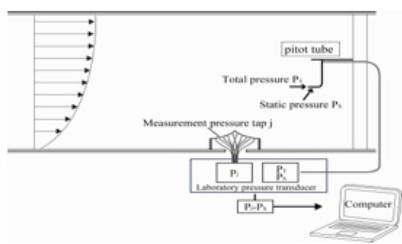


Σχ. 5.17 Μοντέλο γηπέδου για αεροδυναμική σήραγγα, © Wacker Ingenieure

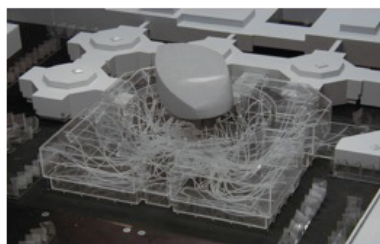
Επιπλέον θα πρέπει επίσης να εξετάσει την απόκριση της ίδιας της δομής, ανάλογα με το μέγεθος, το σχήμα της και τις δυναμικές ιδιότητες. Στην περίπτωση των ελαφρών εύκαμπτων εφελκυστικών κατασκευών μεμβράνης, η αερο-ελαστική απόκριση πρέπει να αξιολογηθεί. Οι ευέλικτες δομές θα παραμορφωθούν σημαντικά υπό φόρτιση του ανέμου που προκαλούν αλλαγές στις αεροδυναμικές ιδιότητες τους. Η μοντελοποίηση των φορτίων ανέμου που δρουν σε μια δομή ξεκινά με την αντιπροσώπευση της μεταβαλλόμενης μορφής της αιολικής ενέργειας από στατικές τιμές που καλύπτουν, σύμφωνα με το ευρωπαϊκό δίκαιο, μια ετήσια πιθανότητα 98%, με τις ακραίες επιδράσεις του τυρβώδους

ανέμου για περίοδο επαναφοράς 50 ετών. Εν συντομία αυτή τη διαδικασία της αναπαράστασης της στοχαστικής φύσης των φορτίων ανέμου (με βάση τις παραδοχές του προφίλ του ανέμου, διεύθυνση ανέμου και ένταση του ανέμου) ξεκινά από τη βασική ταχύτητα του ανέμου, η οποία είναι εισηγμένη στο Εθνικό Παράρτημα. Στη συνέχεια, η μέση ταχύτητα του ανέμου υπολογίζεται, ακολουθούμενη από την πίεση της ταχύτητας αιχμής. Τέλος, οι συσχετιζόμενες πιέσεις του ανέμου ή οι δυνάμεις που δρουν επί των αντίστοιχων επιφανειών διορθώνονται από τους αεροδυναμικούς συντελεστές πίεσης ή δύναμης για να λάβει υπόψη την αεροδυναμική της δομής.

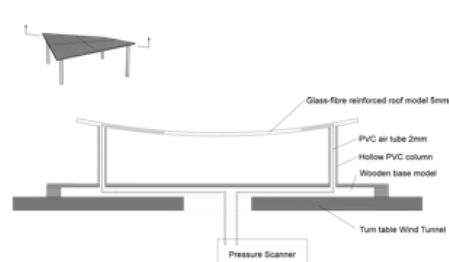
Για τα πειράματα σε αεροδυναμική σήραγγα, άκαμπτα μοντέλα με τετράγωνης κάτοψης βάση χρησιμοποιούνται. Οι διαστάσεις επιλέγονται σύμφωνα με το μέγιστο επιτρεπόμενο βαθμό μπλοκαρίσματος για την αεροδυναμική σήραγγα, όπως ορίζεται στην παράγραφο 4 στο Wind Tunnel Experiments. Οι λεπτές κατασκευές οροφής θα πρέπει να επιτρέπουν την ταυτόχρονη μέτρηση της πίεσης και στις δύο πλευρές της δομής της οροφής, όπου τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα σε αεροσήραγγα έχουν αποκλειστικά στρόφιγγες πίεσης στην εξωτερική όψη ενός κλειστού όγκου (Σχήμα 5.18). Τα σημεία μέτρησης και στις δύο όψεις θα πρέπει να ευθυγραμμίζονται προς την κεντρική γραμμή της δομής ώστε να επιτρέψει το ακριβές άθροισμα των καθαρών συντελεστές πίεσης για ανοικτά στέγαστρα. Τα μοντέλα θα δοκιμαστούν ως δομή στέγης που είναι μέρος του κελύφους του κτιρίου και η ίδια δομή της οροφής, αντίστοιχα με και χωρίς να περικλείεται από τοίχους, για διαφορετικές γωνίες προσβολής. Η παρουσία των τοίχων θα επιτρέψει τη μελέτη της επίδρασής τους στην κατανομή του συντελεστή πίεσης στην εξωτερική επιφάνεια της οροφής, δηλαδή τι μπορεί να αναμένεται από την ανακατεύθυνση της ροής του αέρα που μπλοκάρεται. Δομές στέγη που αποτελούν τμήμα του κελύφους του κτιρίου θα ανταποκρίνονται διαφορετικά στη δυναμική πίεση του ανέμου σε σχέση με τα ανοικτά στέγαστρα. Το πάχος των μοντέλων δοκιμής πρέπει να μειωθεί όσο το δυνατόν περισσότερο για την προσέγγιση των κυρίως μονής στρώσης πολύ λεπτών εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης, καθώς το πάχος των ορίων της οροφής θα επηρεάσει τη ροή του αέρα και έτσι το στροβιλισμό πάνω από την μεμβράνη. Παρ' όλα αυτά, οι ελάχιστες διαστάσεις καθορίζονται από τη διάμετρο των χρησιμοποιούμενων από πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) σωλήνων αέρα που συνδέονται με τους αισθητήρες μέτρησης ενός μετατροπέα πίεσης. Αυτοί οι σωλήνες έχουν μια εσωτερική διάμετρο 1 mm και πάχος τοιχώματος 0,5 mm, το οποίο οδηγεί σε μία 2 χιλιοστών εξωτερική διάμετρο. Επιπλέον, οι σωλήνες PVC θα πρέπει να συνδέονται κάθετα προς την επιφάνεια της στέγης, αναφερόμενοι στην φύση της πίεσης του ανέμου που ενεργεί κάθετα προς τις επιφάνειες. Οι σωλήνες στη συνέχεια διέρχονται μέσω των σωληνοειδών κολώνων της δομής του στεγάστρου για να μειωθεί η ροή του αέρα διαταραχής όσο το δυνατόν περισσότερο. Κάθε στήλη περιέχει 15 ή 16 από αυτούς τους σωλήνες αέρα PVC και βρίσκεται σε μία γωνία της δομής. Η χρήση άκαμπτων μοντέλων δικαιολογείται από το γεγονός ότι η κατανομή της πίεσης είναι η λειτουργία των γεωμετρικών παραγόντων, και έτσι στην ουσία καθορίζει τους συντελεστές πίεσης σε συμφωνία με την παραμορφωμένη κατάσταση λειτουργίας της δομής της μεμβράνης. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία της παραμορφωμένης κατάστασης. Ωστόσο, είναι πολύ δύσκολο να καθοριστεί η παραμορφωμένη κατάσταση μιας δομής μεμβράνης, επειδή η παραμόρφωση είναι συνάρτηση αρκετών αλληλεπιδρώντων παραγόντων, όπως η ακαμψία της μεμβράνης, την εφαρμοζόμενη προένταση, την υποστηρικτική κατασκευή, τα εφαρμοζόμενα φορτία, κλπ. Για να αντιμετωπίσει αυτά τα προβλήματα, η έρευνα πρέπει να γίνει σχετικά με τις παραμέτρους που επηρεάζουν κυρίως την παραμόρφωση. Οι δοκιμές σε αεροσύραγγα κατάλληλης κλιμάκωσης αεροελαστικών μοντέλων των βασικών μορφών δομών μεμβράνης θα μπορούσε να παρέχει γνώσεις στη συμπεριφορά παραμόρφωσης των δομών σε συνάρτηση με αυτές τις παραμέτρους.



Typical wind tunnel testing set-up – model – pressure scanner – pc – [45]



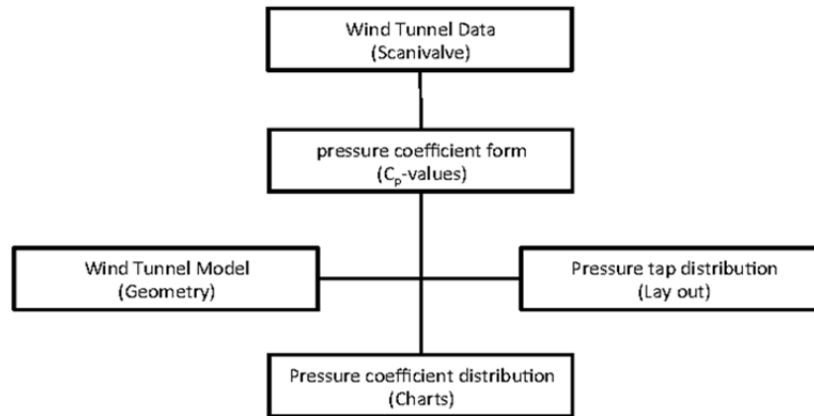
Typical wind tunnel model – pressure taps at outside face – [64]



Intended wind tunnel model – pressure taps at upper and lower roof face

Σχ. 5.18 Μοντέλα Αεροσήραγγας

Η δοκιμή σε αεροσήραγγα πρέπει να πραγματοποιείται σύμφωνα με το bi-συμμετρική διάταξη στροφίγγων πίεσης ώστε να αντιπροσωπεύουν ένα πλήρες προφίλ κατανομής της πίεσης κατά την εξεταζόμενη δομή. Κάθε μοντέλο θα δοκιμαστεί υπό συνεχή περιστροφή με το χέρι, για να καθοριστούν οι πιο κρίσιμες γωνίες προσβολής, και θα δοκιμαστεί υπό συγκεκριμένες γωνίες για τυχηματικό άνεμο. Στην αρχή διακριτές δοκιμές καταγράφουν τις μετρήσεις της πίεσης για τις γωνίες αζιμούθιου. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα της αεροδυναμικής σήραγγας και τα αποτελέσματα έχουν μετατραπεί σε διαγράμματα διανομής συντελεστής πίεσης, (Σχήμα 5.19).’



Σχ. 5.19 Οργανόγραμμα Μεθοδολογίας μέτρησης

Τα διαγράμματα συντελεστής πίεσης γίνονται για διαφορετικούς προσανατολισμούς του ανέμου ώστε να διευκολυνθεί η χρήση τους σε υπολογισμούς ανεμοπίεσης όπως παρουσιάζεται στο Ευρωκώδικα. Οι συντελεστές της πίεσης που υπολογίζονται από τα δεδομένα που έχουν εξαχθεί με την δοκιμή γίνονται με τον ακόλουθο τύπο, που μεταφράζει τη μέση πίεση του ανέμου σε κάθε μετρητή που καταγράφει κατά τη διάρκεια της δοκιμής αεροδυναμικής σήραγγας σε ένα συντελεστή πίεσης που είναι ανεξάρτητος από την ταχύτητα του ανέμου και την πυκνότητα του αέρα.

$C_p = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} * \rho * V^2} = 1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2$	5.34
---	------

Με:

- $c_p$  ο τοπικός συντελεστής πίεσης για την εξέταση του σημείου
- $P$  την πίεση του ανέμου κατά το εξεταζόμενο σημείο κατά τη διάρκεια της δοκιμής
- $P_0$  η στατική πίεση του ανέμου αναφοράς
- $\rho$  η πυκνότητα του αέρα κατά τη διάρκεια της δοκιμής
- $V$  η ταχύτητα του ανέμου στο εξεταζόμενο σημείο κατά τη διάρκεια της δοκιμής
- $V_0$  η ταχύτητα του ανέμου στατική αναφορά

Η εξίσωση του συντελεστή πίεσης δείχνει ότι σε περιοχές όπου  $P > P_0$  ή  $V < V_0$  συσσώρευση του ανέμου οδηγεί σε θετικά  $C_p$  τιμές και πιέσεις, ενώ για  $P < P_0$  ή  $V > V_0$  εκροή του ανέμου οδηγεί σε αρνητικές  $C_p$  τιμές και πιέσεις (αναρρόφηση) και, αν  $P = P_0$  ή  $V = V_0$  η ελεύθερη ροή του ανέμου οδηγεί σε  $C_p$  τιμές και πιέσεις ίσες με μηδέν. Η εξίσωση μπορεί να επεκταθεί για την μέση και τη μέγιστη τιμή των συντελεστών όπως απεικονίζεται παρακάτω.

$$C_{p,mean} = C_p = \frac{\Delta P_{mean}}{\frac{1}{2} * \rho * V_{mean}^2}$$

$$C_{p,peak} = G * C_p = \frac{\Delta P_{peak}}{\frac{1}{2} * \rho * V_{peak}^2}$$

5.35

Ο ανωτέρω τύπος δεικνύει σαφώς την επίδραση της αεροδυναμικής στις κατανομές του συντελεστή πίεσης γύρω από κτιριακές κατασκευές. Ο αέρας και η πίεση του ανέμου συσσωρεύεται σε επιφάνειες που εμποδίζουν την ελεύθερη ροή του ανέμου στην μπροστινή επιφάνεια. Επιπλέον, ο άνεμος αποτυγχάνει να ρέει γύρω από αιχμηρές ακμές και γωνίες και διαχωρίζεται κατά συνέπεια. Είναι δύσκολο να προβλεφθεί η θέση αυτών των σημείων διαχωρισμού γιατί είναι συνάρτηση πολλών παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένης του μεγέθους των δυνάμεων ιξώδους που κυριαρχούν στη ροή. Αυτές οι δυνάμεις μπορούν να εξηγηθούν από τον αριθμό Reynolds, ο οποίος επιτρέπει την περιγραφή της ροής ως στρωτή ή τυρβώδης.

$$R_r = \frac{\text{inertia forces}}{\text{viscous forces}}$$

5.36

Δια του παρόντος, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι η κατανομή πίεσης και τα φορτία ανέμου που ενεργούν σε μια δομή είναι συνάρτηση των τοπικών διακυμάνσεων στην ταχύτητα του ρευστού που προκαλείται από τη γεωμετρία της δομής, συμπεριλαμβανομένης της παρουσίας επιδράσεων Venturi και τη θέση των σημείων διαχωρισμού.

Οι δοκιμές σε αεροσήραγγα της αντοχής των δομών, καθώς και η βιβλιογραφία που καλύπτει τόσο άκαμπτες όσο και εφελκόμενες κατασκευές έχουν διερευνηθεί και παρέχουν πληροφορίες για τυπικές εξωτερικές τιμές  $C_p$  για τέσσερις τύπους απλών δομής της μεμβράνης. Τα είδη που εξετάζονται εδώ είναι:

- Κώνος
- Κορυφογραμμές και κοιλάδες
- Υπερβολικό παραβολοειδές (Hypar)

Από την παρούσα έρευνα έχουν ληφθεί διαγράμματα και πίνακες που δίνουν μέσες τιμές  $C_p$ . Οι τιμές  $C_p$  που δίδονται είναι στην ίδια βάση, όπως αυτές που περιέχονται στον Ευρωκώδικα για τις συμβατικές κατασκευές και προορίζονται για χρήση με τον Ευρωκώδικα. Οι εξωτερικές τιμές  $C_p$  μπορούν να χρησιμοποιηθούν με την ακόλουθη εξίσωση:

Εξωτερική πίεση ανέμου (φορτίο) = πίεση ανέμου x Εξωτερικές Μέση  $C_p$

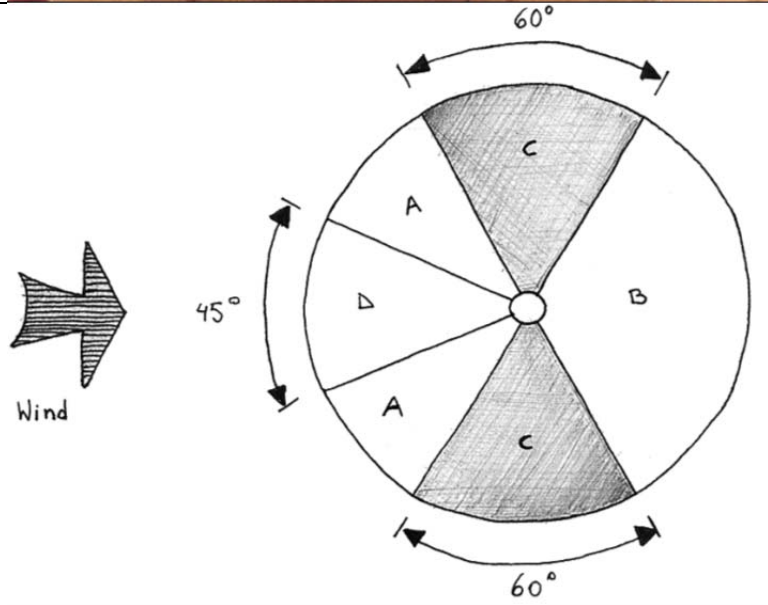
Η πίεση του ανέμου μπορεί να βρεθεί με τη χρήση της διαδικασίας του Ευρωκώδικα για τους όρους  $q_{ref}$  (πίεση αναφοράς για τη μέση ένταση της ταχύτητα του ανέμου) και  $c_{e(z)}$  (συντελεστής έκθεσης - αυτό περιλαμβάνει τα εδάφη και ριπές ανέμου, παράγοντες που σχετίζονται με την περιοχή). Ο Ευρωκώδικας περιλαμβάνει χάρτες της ταχύτητας του ανέμου για το σύνολο της Ευρώπης και από τους οποίους λαμβάνεται η βασική ταχύτητα αναφοράς για την τοποθεσία και μπορεί να προσδιοριστεί πίεση του ανέμου. Εσωτερικές τιμές  $C_p$  / κάτω επιφάνεια για την κωνική, κορυφογραμμή / κοιλάδα και HYPAR / σέλα θα πρέπει να προσδιορίζεται με τη χρήση της προσέγγισης του Ευρωκώδικα με βάση την κατανομή και το μέγεθος τυχόν ανοιγμάτων στο κέλυφος του κτιρίου.

Οι μέσες τιμές  $C_p$  δίνονται παρακάτω ως μια μέση τιμή για μια ζώνη που ορίζεται όπως φαίνεται στα διαγράμματα. Είναι κατάλληλα για το σχεδιασμό της μεμβράνης και τη φέρουσα δομή του, αλλά όχι για πάνελ επικάλυψης και μεμονωμένες τεγίδες, οι οποίες θα υπόκεινται σε μεγαλύτερη τοπική φόρτωση, όπως περιγράφεται στον κώδικα. Η συμπεριφορά του ανέμου και ως εκ τούτου οι τιμές  $C_p$  δεν θα διαφέρουν σε μεγάλο βαθμό, με μικρές αλλαγές, στο συνολικό μέγεθος της δομής. Οι τιμές  $C_p$  που δίνονται εδώ μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει για δομές με διαστάσεις ανοίγματος 10-100m.





Σχ. 5.20.1 Wind Tunnel Μοντέλο



Σχ. 5.20.2 Ορισμός Ζωνών σε Cp Κώνο

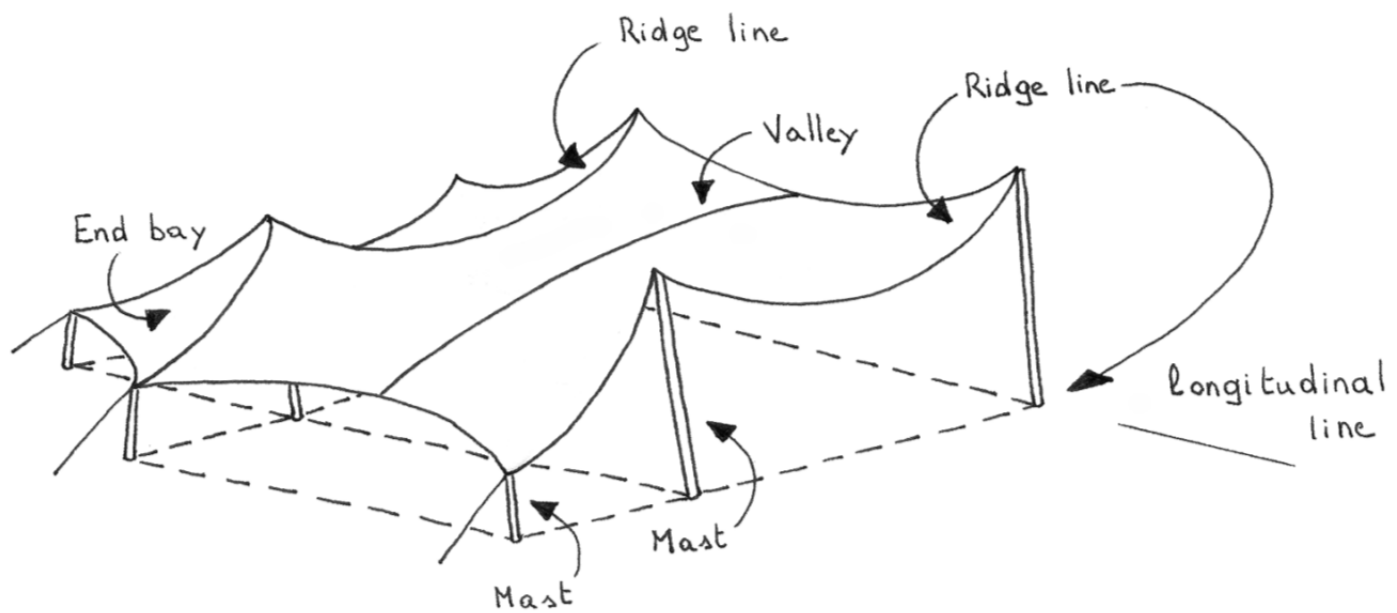
Παραμέτρους σχήμα:

- α) Η γωνία κλίσης της μεμβράνης
- β) Ανοιχτές ή κλειστές πλευρές.

Η γωνία κλίσης της μεμβράνης με βάση την γωνία ανύψωσης από οριζόντια σε μια ευθεία γραμμή που σύρεται από τη περίμετρο προς την κορυφή. Λόγω της κοίλης φύσης της εξωτερικής επιφάνειας, η γωνία προς την οριζόντια του υφάσματος στην περίμετρο θα είναι λιγότερη από αυτή που ορίζεται γωνία. Ομοίως, η γωνία του υφάσματος πλησίον της κορυφής της δομής θα είναι μεγαλύτερη.

External $C_p$ Values for Conical Structures		Zones			
	Angle of slope of membrane to horizontal /deg.	A	B	C	D
Open sided structure	40	-0.15	-0.6	-1.0	+0.4/-0.2
Closed structure	40	-0.41	-0.7	-1.0	+0.75/-0.6

Σχ. 5.21 Εξωτερικές τιμές  $C_p$  για κώνους



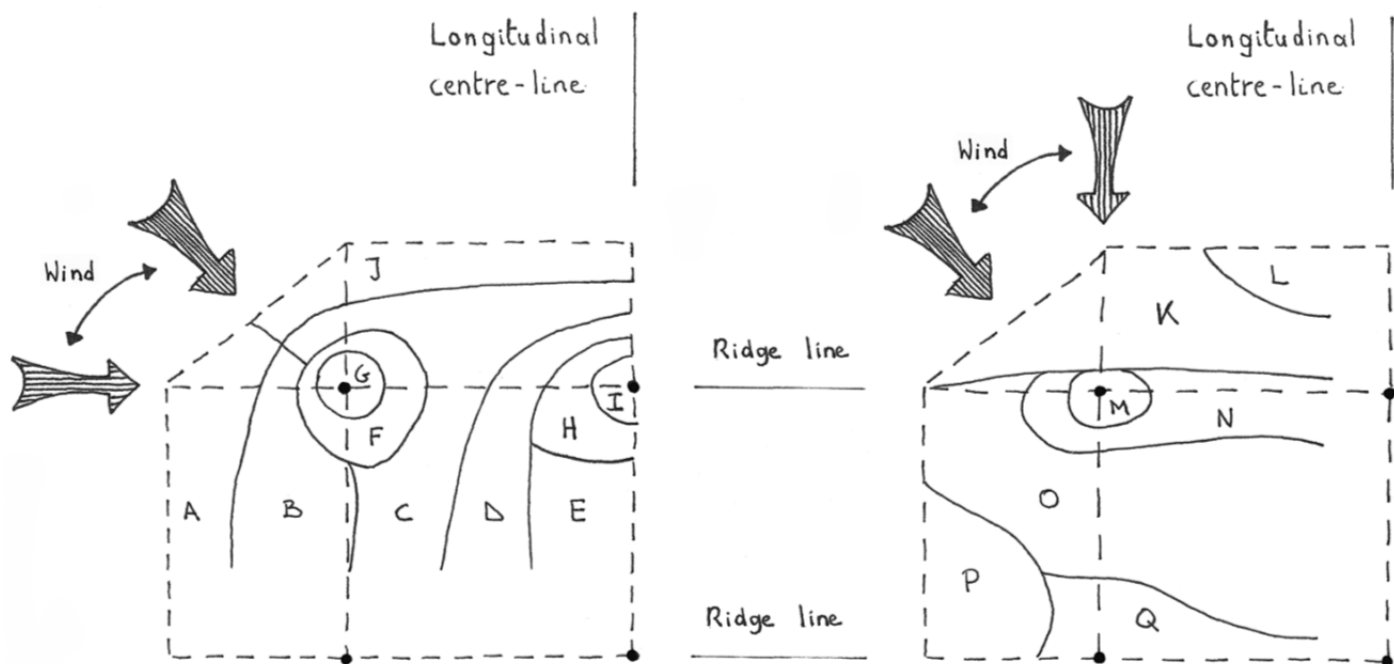
Σχ. 5.22 Typical "Ridge and Valley" Type of Membrane Structure.

Παράμετροι σχήματος:

Η παράμετρος που καθορίζει το σχήμα για αυτόν τον τύπο δομής είναι

α) Λόγος: πλάτος κοιλάδα / βάθος της κοιλάδας

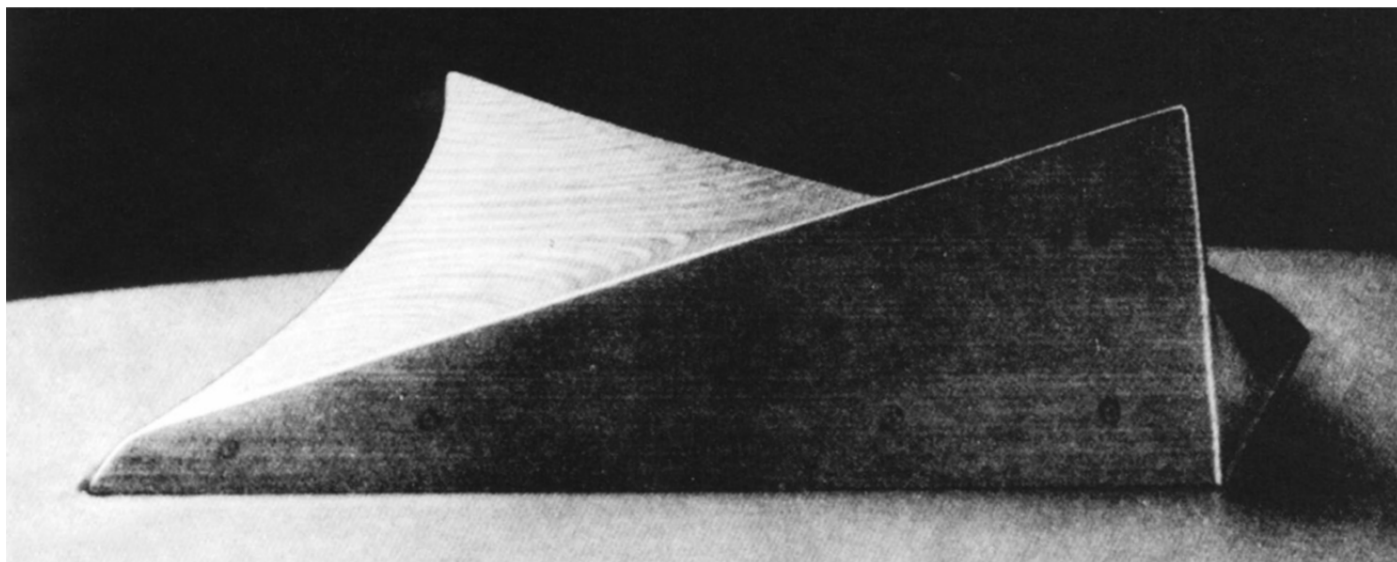
β) Ανοιχτές ή κλειστές πλευρές.



Σχ. 5.23 Ridge and Valley Cp Zone Definition

External $C_p$ Values for Ridge/Valley Type Structures	Sides	Open	Closed
	Ratio of Valley Width to Valley Depth	2.5	4
	Approximate slope of membrane /deg	39	26
$C_p$ zones	A	+0.6 -0.39	+0.3
	B	+0.23 -0.33	+0.25
	C	-0.41	-0.2
	D	-0.2	-0.3
	E	-0.11	-0.45
	F	-0.38	-0.35
	G	-0.38	-0.8
	H	-0.33	-0.5
	I	-0.33	-0.9
	J	+0.14 -0.3	+0.35 -0.3
	K	+0.58 -0.29	0.3
	L	+0.38 -0.42	+0.3 -0.2
	M	-0.38	-1.2
	N	-0.38	-0.6
	O	+0.38 -0.37	-0.4
	P	+0.45 -0.46	+0.2 -0.2
	Q	+0.12 -0.27	+0.3 -0.3

Σχ. 5.24 External  $C_p$  Values for “Ridge and Valley” Type Structures



Σχ. 5.25 Wind Tunnel Model of the Hypar Form – published in ‘Das Hangende Dach’ Frei Otto 1954.

παράμετροι σχήματος:

α) Λόγος:

Διαγώνια διάσταση / Κάθετη απόσταση μεταξύ υψηλών και χαμηλών γωνιών

β) Κλειστές πλευρές μόνο

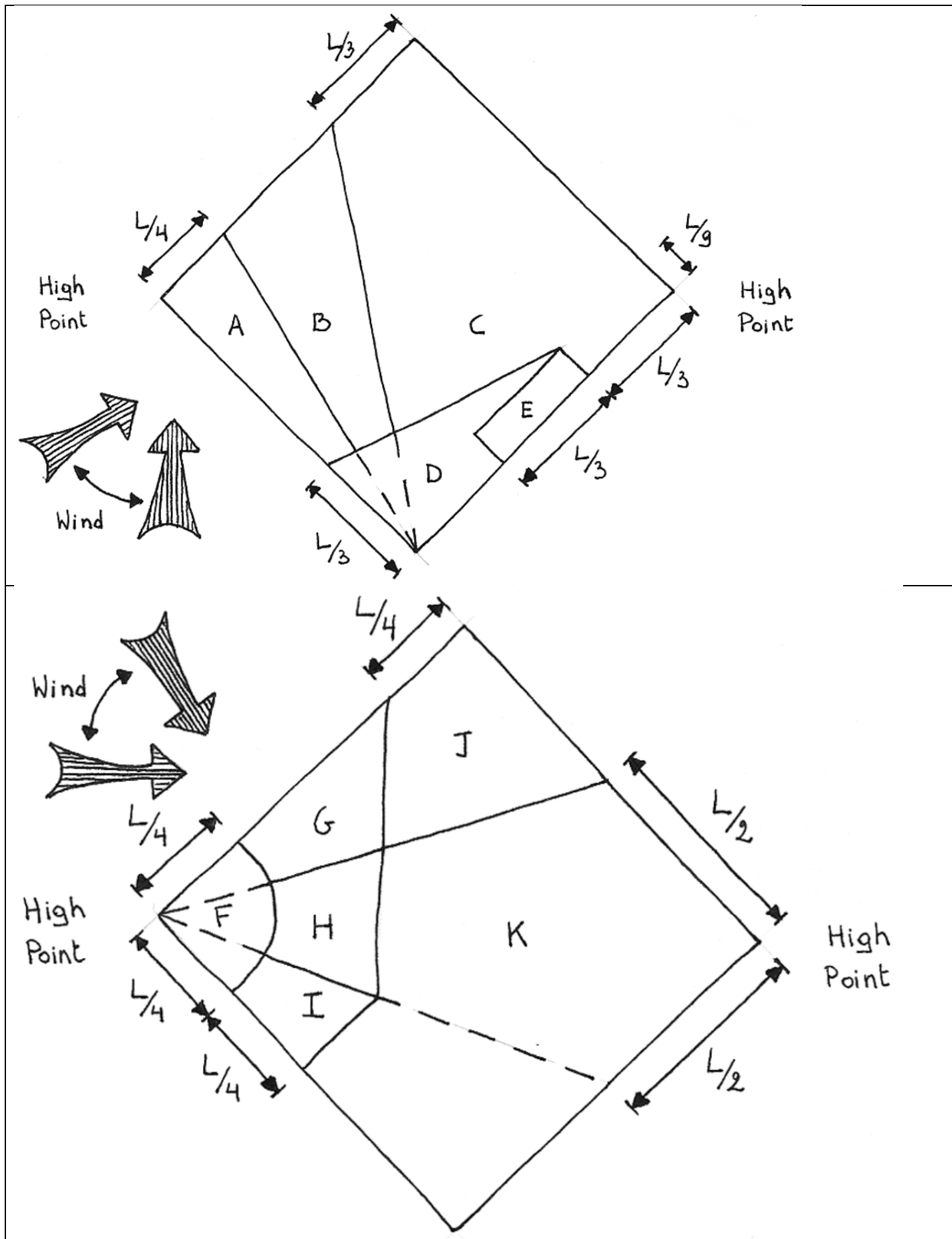


Fig. 5.26 Hyper Cp Zone Definition

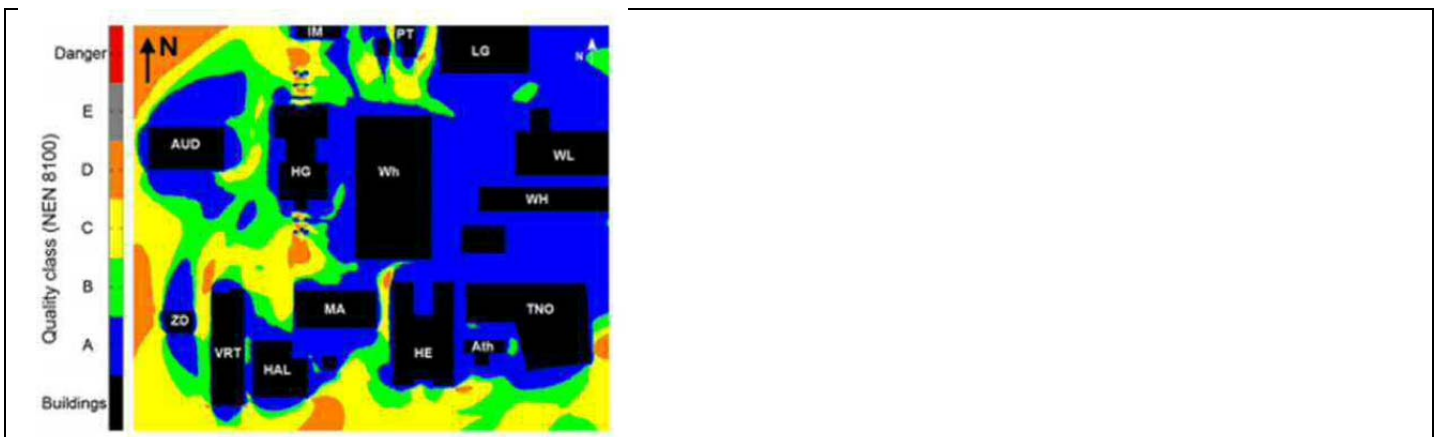
External $C_p$ Values	Zones										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
positive	+0	+0	+0.3	+0.3	+0.3	+0	+0	+0.2	+0	+0	+0.2
negative	-1.45	-0.9	-0.65	-0.70	-1.20	-1.80	-1.20	-0.90	-1.20	-0.65	-0.65

Σχ. 5.27 Εξωτερικές τιμές Cr για δομή HYPAR / σέλα. Τα δεδομένα βασίζονται σε μια κλειστή δομή όψης με αναλογία σχήμα 4.7

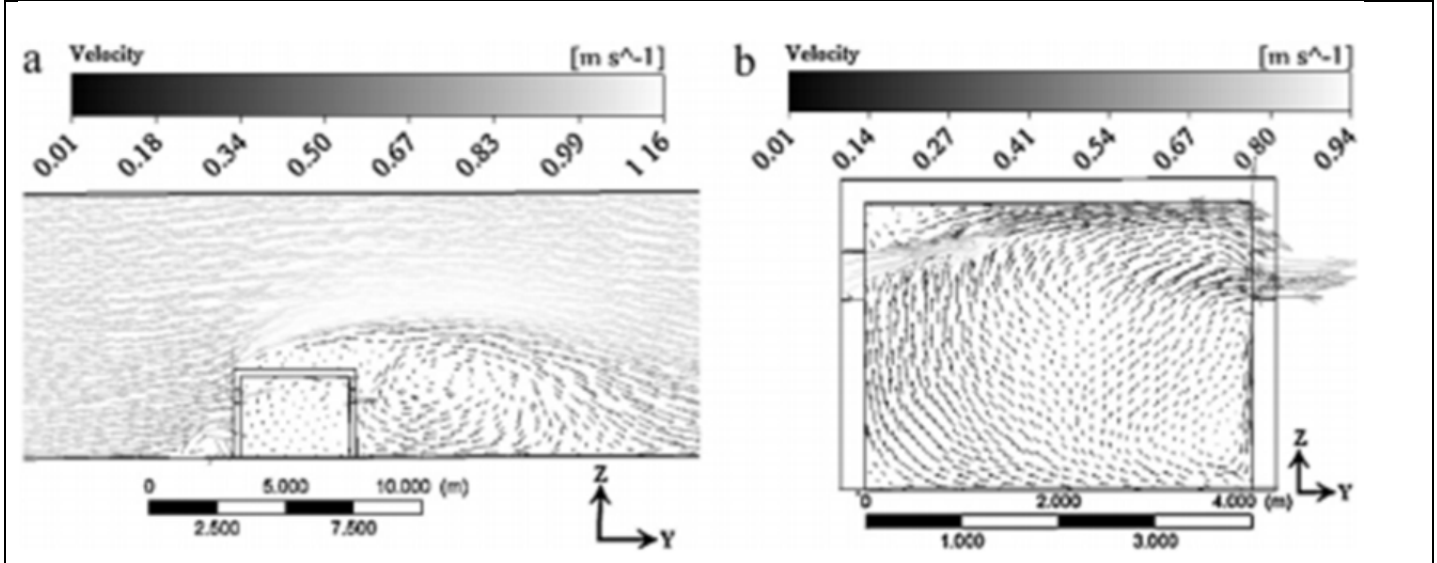
### 5.3.4.2 CFD (Computational Fluid Dynamics)

Λόγω των χρονικών ορίων και του κόστους που σχετίζονται με τις δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα, CFD χρησιμοποιείται πλέον ευρέως για την πρόβλεψη των πεδίων ροής. Οι πρώτες τεχνικές CFD εισήχθησαν στις αρχές του 1950, που κατέστη δυνατή με την έλευση του ψηφιακού υπολογιστή. Το CFD είναι ένας υπολογιστικός τρόπος που βασίζεται σε εργαλεία μαθηματικών μοντέλων ικανών να αντιμετωπίσουν τα προβλήματα ροής ρευστού και την πρόβλεψη φυσικών υγρών ροών και μεταφοράς θερμότητας. Ενώ παραδοσιακά είχε θεωρηθεί αποκλειστικά για χρήση στην αεροδυναμική έρευνα, η ανάλυση CFD εφαρμόζεται τώρα σε πολλούς άλλους τομείς, συμπεριλαμβανομένης της θαλάσσιας μηχανικής, ηλεκτρολόγων και ηλεκτρονικών μηχανικών, της βιοϊατρικής μηχανικής, χημική μηχανική, περιβαλλοντική μηχανική, μηχανική του ανέμου, υδρολογία, ωκεανογραφία, μετεωρολογία, και την πυρηνική ενέργεια. Δεδομένου ότι το εύρος των εφαρμογών CFD συνεχίζει να αυξάνεται, νέες τεχνικές έχουν εισαχθεί που διευκολύνουν τη χρήση του τόσο σε αρχιτεκτόνων μηχανικών όσο και HVAC (θέρμανση, εξαερισμός και κλιματισμός) σχεδιασμό. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο στον σχεδιασμό και την ανάλυση κατασκευών, όπου έχει εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία. Υπάρχουν πλέον πολλά εμπορικά πακέτα λογισμικού CFD που απευθύνονται ειδικά στις εφαρμογές οικοδομικής.

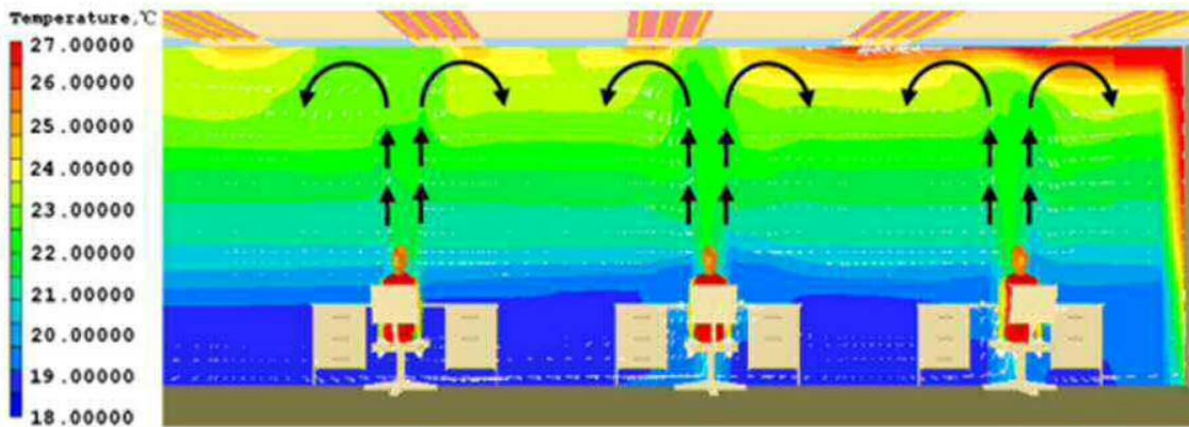
Η ανάλυση CFD χρησιμοποιείται εντατικά ως εργαλείο για την αξιολόγηση του περιβάλλοντος των εσωτερικών χώρων του κτιρίου και την αλληλεπίδρασή του με το κέλυφος του κτιρίου, καθώς και για την



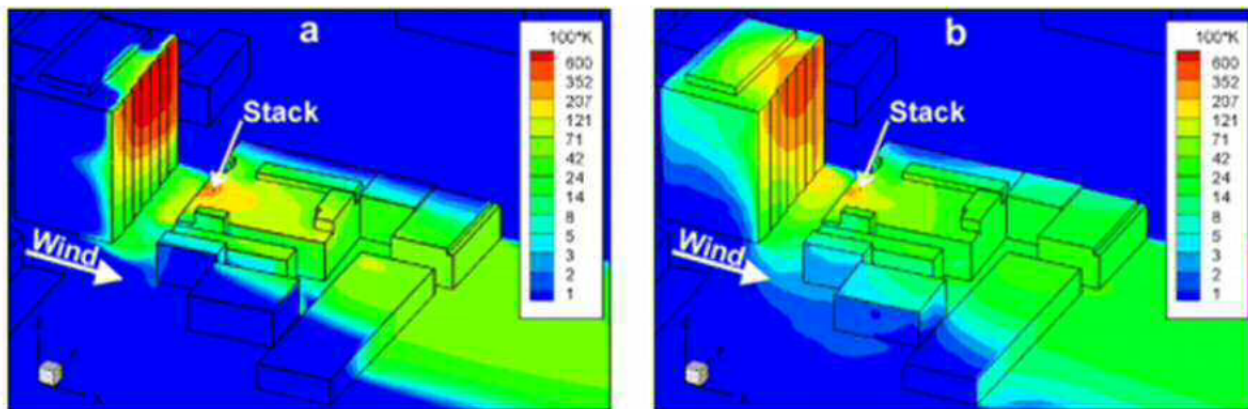
a. Αξιολόγηση της άνεσης του ανέμου σε πεζόδρομους (Janssen et al., 2013)



b. Πρόβλεψη του φυσικού αερισμού (Bangalee et al., 2012)



c. Διερεύνηση των συστημάτων HVAC για το εσωτερικό περιβάλλον (Chiang et al., 2012)



d. Πρόβλεψη διασποράς ατμοσφαιρικών ρύπων (Gousseau et al., 2011)

Fig 5.28 – Διάφορες CFD εφαρμογές για το σχεδιασμό των κτιρίων

ανάλυση του εξωτερικού περιβάλλοντος του κτιρίου. Για την πρόβλεψη των εξωτερικών ροών ανέμου, η ανάλυση CFD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση ανεμοπίεσης σε κτίρια, γέφυρες και δρόμων σε φαράγγια. Για παράδειγμα, ο Sengupta (2008) προσομοίωσε τις επιδράσεις των microburst και των ανεμοστροβιλικών ανέμων ώστε να ποσοτικοποιηθεί η προκύπτουσα αεροδυναμική φόρτιση σε ένα κτίριο προκειμένου να διερευνηθούν τα φορτία αιχμής και οι τάσεις σε διάφορες θέσεις σε μια στέγη και, στη συνέχεια, έγινε σύγκριση με τα αποτελέσματα με τις αντίστοιχες τιμές που καθορίζονται στο ASCE 7-05. Σε μια μελέτη που εξετάζει την αίσθηση άνεσης στον άνεμο σε πεζόδρομο, ο Janssen (2013) σύγκρινε και αξιολόγησε τα διάφορα κριτήρια άνεσης του ανέμου για να τονίσει τη σημασία της τυποποίησης της διαδικασίας αξιολόγησης της άνεσης του ανέμου με τη χρήση τεχνικών CFD. Για την έρευνά τους σχετικά με την πρόβλεψη της διασποράς των ρύπων, ο Gousseau κ.ά.. (2011) χρησιμοποίησαν ανάλυση CFD για τη διερεύνηση των συγκεντρώσεων ρύπων σε δρόμους και σε οικοδομικές επιφάνειες γύρω από την πηγή. Η ανάλυση CFD έχει επίσης εφαρμοστεί ώστε να δοκιμαστούν τα προτεινόμενα φυσικού αερισμού, μικτής λειτουργίας αερισμού, κλιματισμού συστήματα σε κτίρια, η οποία γενικά περιλαμβάνει και την πρόβλεψη της θερμοκρασίας του αέρα, της ταχύτητας, και την σχετική υγρασία, μεταξύ άλλων παραμέτρων. Οι τεχνικές CFD χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της εξάπλωσης της φωτιάς και του καπνού σε χώρους μεγάλου όγκου καθώς και να εφαρμοστούν σε <<καθαρά>> δωμάτια και κτίρια για την προστασία από βιοχημικών και ραδιενεργών παραγόντων και να παρέχουν έλεγχο της μόλυνσης. Το σχήμα 5.28 παρουσιάζει διάφορα παραδείγματα εφαρμογών CFD που ενισχύουν την ενεργειακή απόδοση των κτηρίων.

Η ανάλυση CFD προσφέρει μια σειρά πλεονεκτημάτων σε σύγκριση με τις παραδοσιακές δοκιμές σε αεροδυναμική σήραγγα. Όχι μόνο μπορεί να δημιουργήσει προσομοιώσεις πλήρους κλίμακα σε αντίθεση με τις μινιατούρες πολλών φυσικών προσομοιώσεων, παρέχει επίσης πιο εκτεταμένα δεδομένα από ότι μπορούν να μετρηθούν στο εργαστήριο και τα αποτελέσματά της μπορούν να απεικονιστούν με σαφήνεια και με μεγάλη λεπτομέρεια. Από την άλλη πλευρά, η ανάλυση CFD έχει επίσης διάφορα μειονεκτήματα και προβλήματα. Η γνώση και η εμπειρία της μηχανικής των ρευστών καλούνται να αξιολογήσουν τα αποτελέσματα της ανάλυσης CFD κριτικά και μια καλή αντίληψη του πώς μια ανάλυση CFD λειτουργεί ώστε μια συγκεκριμένη εφαρμογή να είναι απαραίτητη, εάν τα αποτελέσματα πρέπει να είναι ουσιαστικά.

Επιπλέον, το κόστος για την αγορά ένα εμπορικού πακέτου CFD είναι υψηλό και απαιτείται ένας υπολογιστής υψηλών επιδόσεων.

Σύμφωνα με τον AIA (Αμερικανικού Ινστιτούτου Αρχιτεκτόνων), η σχεδίαση και η κατασκευή έργων περιλαμβάνει συνήθως διάφορες φάσεις (Οι πέντε φάσεις των σχεδιασμού, AIA). Στο πρώτο στάδιο, λαμβάνονται οι πιο σημαντικές αποφάσεις. Σε αυτό το στάδιο, οι συζητήσεις σχετικά με τις απαιτήσεις του έργου, διεξάγονται με τους ενδιαφερόμενους φορείς που παρουσιάζουν τις προσδοκίες τους για θέματα όπως ο αριθμός των δωματίων, των λειτουργιών και των επιβαινόντων, στη σχεδιαστική ομάδα. Οι συζητήσεις αυτές προσδιορίζουν το αντικείμενο του έργου του σχεδιασμού που πρέπει να περιγραφεί. Μόλις έχει καθοριστεί το αντικείμενο της κατασκευής, το επόμενο βήμα είναι να δημιουργηθούν σχηματικά σχέδια. Κατά τη διάρκεια του σταδίου του σχηματικό σχεδιασμού, τα σχέδια της μελέτης, έγγραφα ή άλλα μέσα τα οποία απεικονίζουν τις έννοιες του σχεδιασμού και περιλαμβάνουν χωρικές σχέσεις, την κλίμακα και τη μορφή καταρτίζονται και δίνονται στον ιδιοκτήτη για επανεξέταση. Το τρίτο βήμα είναι η ανάπτυξη του σχεδιασμού. Σε αυτή τη φάση, τα αρχικά σχέδια από τη δεύτερη φάση θα αναπτυχθούν περαιτέρω με την προσθήκη λεπτομερειών των μηχανολογικών, ηλεκτρολογικών, υδραυλικών εγκαταστάσεων του έργου, και κατασκευαστικά στοιχεία και τα αρχιτεκτονικά έγγραφα που προβλέπονται. Μόλις η φάση του σχεδιασμού της ανάπτυξης έχει ολοκληρωθεί, τα έγγραφα κατασκευής ετοιμάζονται. Μόλις ολοκληρωθούν τα κατασκευαστικά έγγραφα, ο γενικός ανάδοχος ή ο οικοδόμος ο οποίος θα αναλάβει την πραγματική κατασκευή μισθώνεται (Οι πέντε φάσεις των σχεδίαση, AIA).

Κατά τη διάρκεια της φάσης σχεδιασμού, η ανάλυση CFD συχνά χρησιμοποιείται για να υπολογίσει το ρεύμα του αέρα μέσα και γύρω από τα κτίρια. Με βάση τα αποτελέσματα των υπολογισμών, τυπικά προσδιορίζει αν ο σχεδιασμός θα πρέπει να τροποποιηθεί. Προκειμένου να επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση εσωτερικών και εξωτερικών περιβαλλοντικών όρων για την κατασκευή, τα μέτρα αυτά θα πρέπει να επαναλαμβάνονται επαναληπτικά όσο συχνά χρειάζεται για να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι τεχνικές CFD χρησιμοποιούνται τώρα ευρέως ως ένα εργαλείο βοήθεια σχεδιασμού. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων CFD κατά το στάδιο σχηματικής σχεδίασης μπορούν να βοηθήσουν τους αρχιτέκτονες και τους σχεδιαστές να βελτιώσουν το εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον για τη σχεδιαζόμενη κατασκευή. Το σχήμα 5.29 δείχνει την αρχιτεκτονική διαδικασία σχεδιασμού, όταν χρησιμοποιείται CFD προσομοίωση.

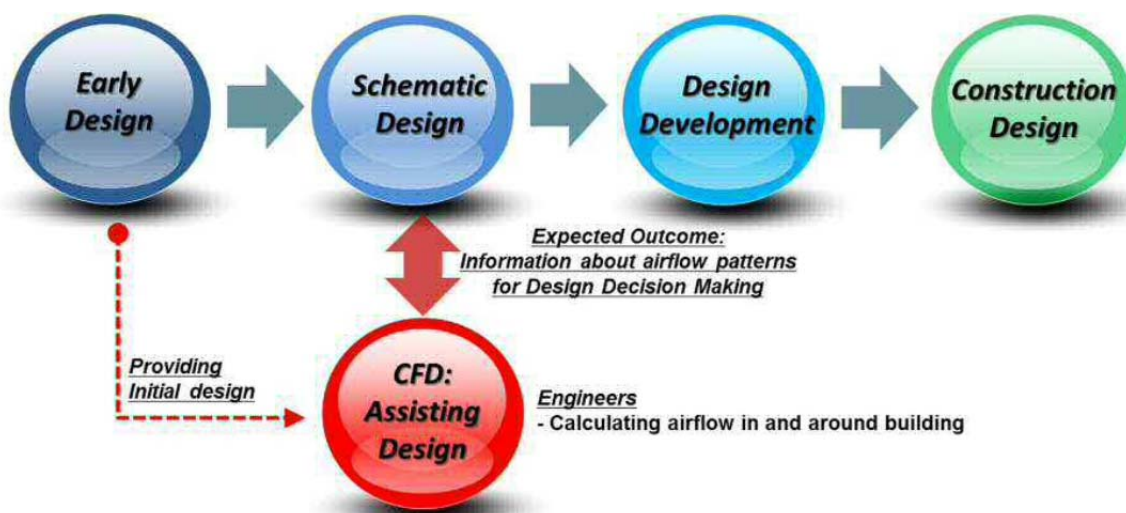


Figure 5.29 - Architectural design process with CFD simulation

Δεδομένου ότι οι αναλύσεις CFD προσομοιώσεων που έχουν αναπτυχθεί βασίζονται σε αριθμητικές μεθόδους και αλγορίθμους, θεωρήθηκε προτιμότερο να παρουσιαστούν συνοπτικά τα χαρακτηριστικά των υπολογιστικών παραμέτρων αντί να δοθούν αιτιολογήσεις για τις εξισώσεις της ανάλυσης CFD. Έτσι, δίνονται ευρέως χρησιμοποιούμενες κατευθυντήριες γραμμές βέλτιστης πρακτικής για την ανάλυση CFD.

Σε γενικές γραμμές, οι κατευθυντήριες γραμμές βέλτιστης πρακτικής CFD έχουν αναπτυχθεί την τελευταία δεκαετία για να υποστηρίξουν την ορθή χρήση των προσομοιώσεων CFD. Αυτές θεωρήθηκαν

αναγκαίες λόγω της πολυπλοκότητας της ανάλυσης CFD και τις δυνητικά σοβαρές επιπτώσεις των υπολογιστικών λαθών ή αβεβαιοτήτων και πολλοί ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει αυτές τις κατευθυντήριες γραμμές για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Τρεις από τις κατευθυντήριες γραμμές βέλτιστης πρακτικής επελέγησαν και επικεντρώθηκαν κυρίως σε εφαρμογές CFD που σχετίζονται με την ροή γύρω από τα κτήρια. Με βάση τις υπολογιστικές παράμετρος που περιγράφονται στις βασικές αρχές CFD που αναφέρονται στο Παράρτημα F, γίνονται συγκεκριμένες συστάσεις σχετικά με το μέγεθος του υπολογιστικού πεδίου, τη γεωμετρική αναπαράσταση, την κατασκευή του δικτύου (meshing), την επιλογή των συνόρων, την επιλογή των μοντέλων τύρβης, και τα κριτήρια σύγκλισης:

1) Ποιο επίπεδο λεπτομέρειας στη γεωμετρική αναπαράσταση των κτιρίων είναι απαραίτητη;

- Η κεντρική περιοχή ενδιαφέροντος (Στην περιοχή ακτίνας 1 -2 H από το κτίριο του ενδιαφέροντος όπου H είναι το ύψος του κτιρίου του ενδιαφέροντος) αναπαράγεται όσο το δυνατόν ακριβέστερα.

- Τουλάχιστον ένα επιπλέον μπλοκ οδών σε κάθε κατεύθυνση γύρω από την κεντρική περιοχή του ενδιαφέροντος να αντιπροσωπεύεται.

- Τα κτίρια που βρίσκονται μακριά από την περιοχή του ενδιαφέροντος αντιπροσωπεύονται με απλά σχεδιαστικά τρισδιάστατα μπλοκ.

2) Ποιο είναι το σωστό μέγεθος του υπολογιστικού πεδίου;

- 5H για την κορυφή και 10H για το πλευρικό όριο συνιστώνται τόσο στην περίπτωση ενός ενιαίου κτιρίου όσο και των αστικών περιοχών με πολλαπλά κτίρια, όταν H είναι το ύψος του ψηλότερου κτιρίου.

- 5H και 15H μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το προσήνεμο και το υπήνεμο μήκος αντίστοιχα.

3) Ποιος είναι ο ενδεδειγμένος ο τύπος του υπολογιστικού πλέγματος και η πυκνότητα του δικτύου;

- Τόσο εξαεδρικό και όσο και τετραεδρικό πλέγμα (mesh) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές CFD για ροή του αέρα γύρω από τα κτήρια.

- Τουλάχιστον 10 στοιχεία (cells) ανά κυβική ρίζα του οικοδομικού όγκου ενδείκνυται για την αρχική ανάλυση πλέγματος.

4) Ποιά είναι οι κατάλληλες οριακές συνθήκες συμπεριλαμβανομένης της εισόδου, εξόδου, της κορυφή και των πλευρών;

- Η μέση κατανομή της ταχύτητας που προβλέπεται από τον λογαριθμικό νόμο ταχύτητας αέρα αναφοράς και πληροφορίες σχετικά με το τυρβώδες απαιτούνται για την κατάσταση ορίου εισόδου. (inlet)

- Για την οριακή συνθήκη εξόδου (outlet), συνιστάται σταθερές συνθήκες πίεσης.

- Οι συνθήκες συμμετρίας (Symmetry conditions) χρησιμοποιούνται για την κορυφή και τα πλευρικά όρια.

5) Ποιο είναι το κατάλληλο μοντέλο τύρβης;

- Για να αναπαραχθούν ροή του ανέμου γύρω από ένα κτίριο, τόσο LES (Large Eddy Simulation) μοντέλο όσο και μοντέλα τύρβης με βάση την προσέγγιση RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes equations) μπορούν να χρησιμοποιηθούν.

6) Ποιο είναι το κατάλληλο εύρος για τα επαναληπτικά κριτήρια σύγκλισης;

- Τα κλιμακούμενα υπόλοιπα να τερματίζονται σε 0.001

#### ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΙΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Ο σχεδιασμός και οι υπολογισμοί έγιναν από μένα για τη δομή της μεμβράνης διπλού κώνου σε πραγματικό περιβάλλον.

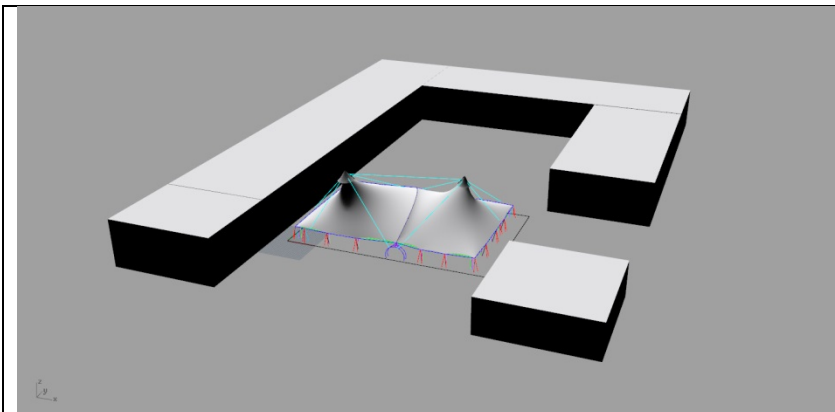


Ο σχεδιασμός έγινε με το λογισμικό NURBS μοντελοποίησης Rhinoceros, η εύρεση της μορφής της μεμβράνης με το λογισμικό iXcube 10 χρησιμοποιώντας FDM, CFD έγινε με το λογισμικό Caedium Symscap.

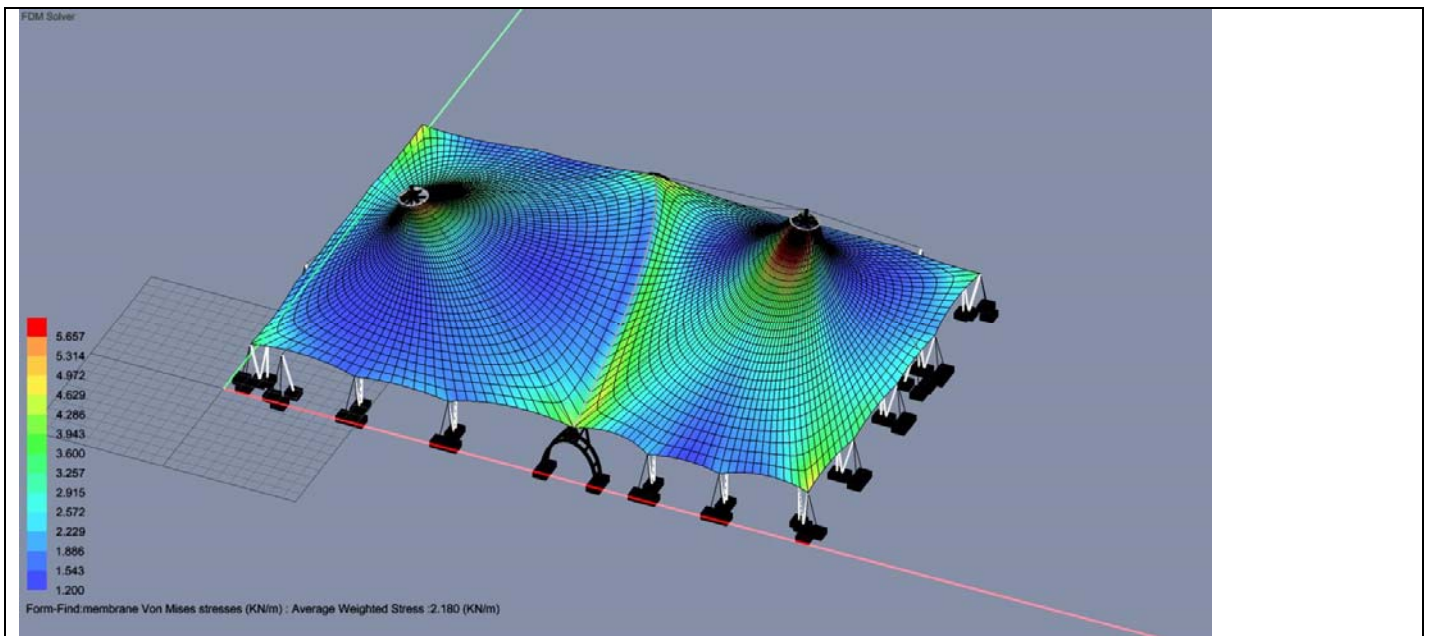
Το συνολικό εμβαδόν της κατασκευής είναι 1200 τετραγωνικά μέτρα (30mX40m) και έχουν ληφθεί οι τιμές ανέμου από τις τοπικές αναφορές ανέμου της ΠΓΔΜ (Gradsco, VINARIA Στόμπι, ΠΓΔΜ 2015)



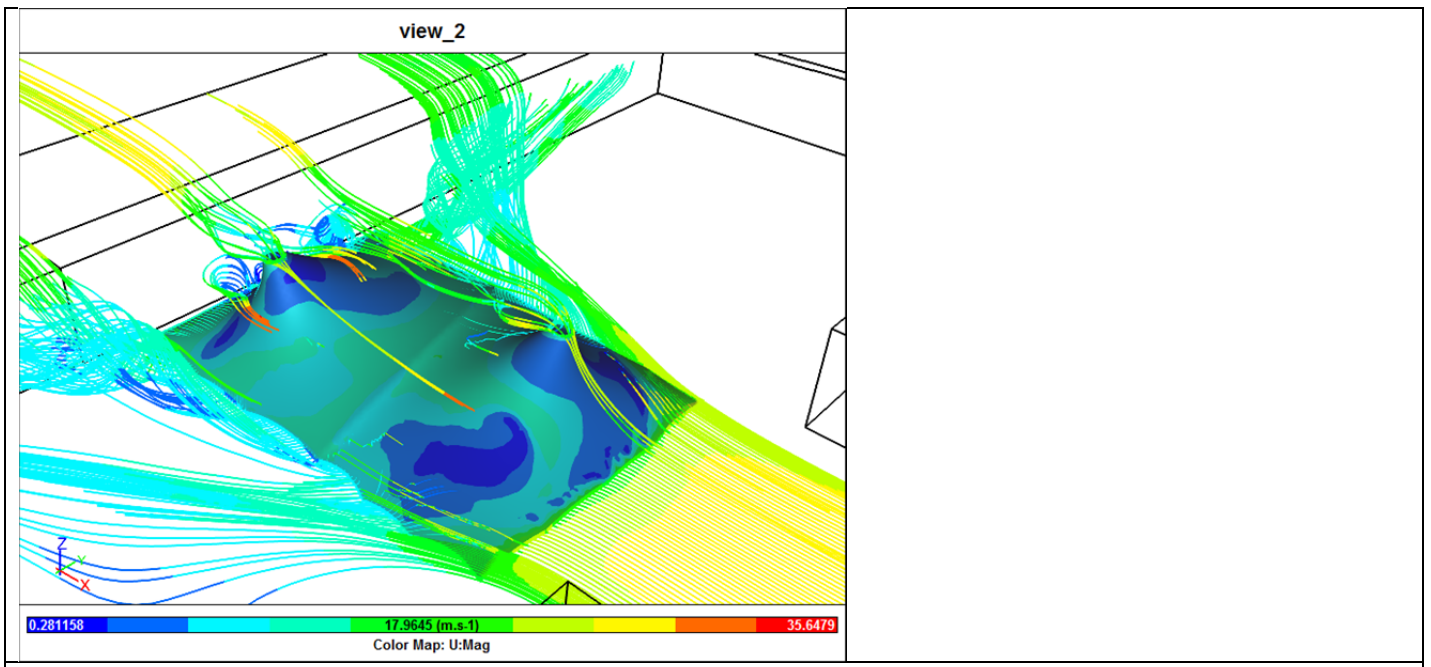
1. Το περατωμένο έργο



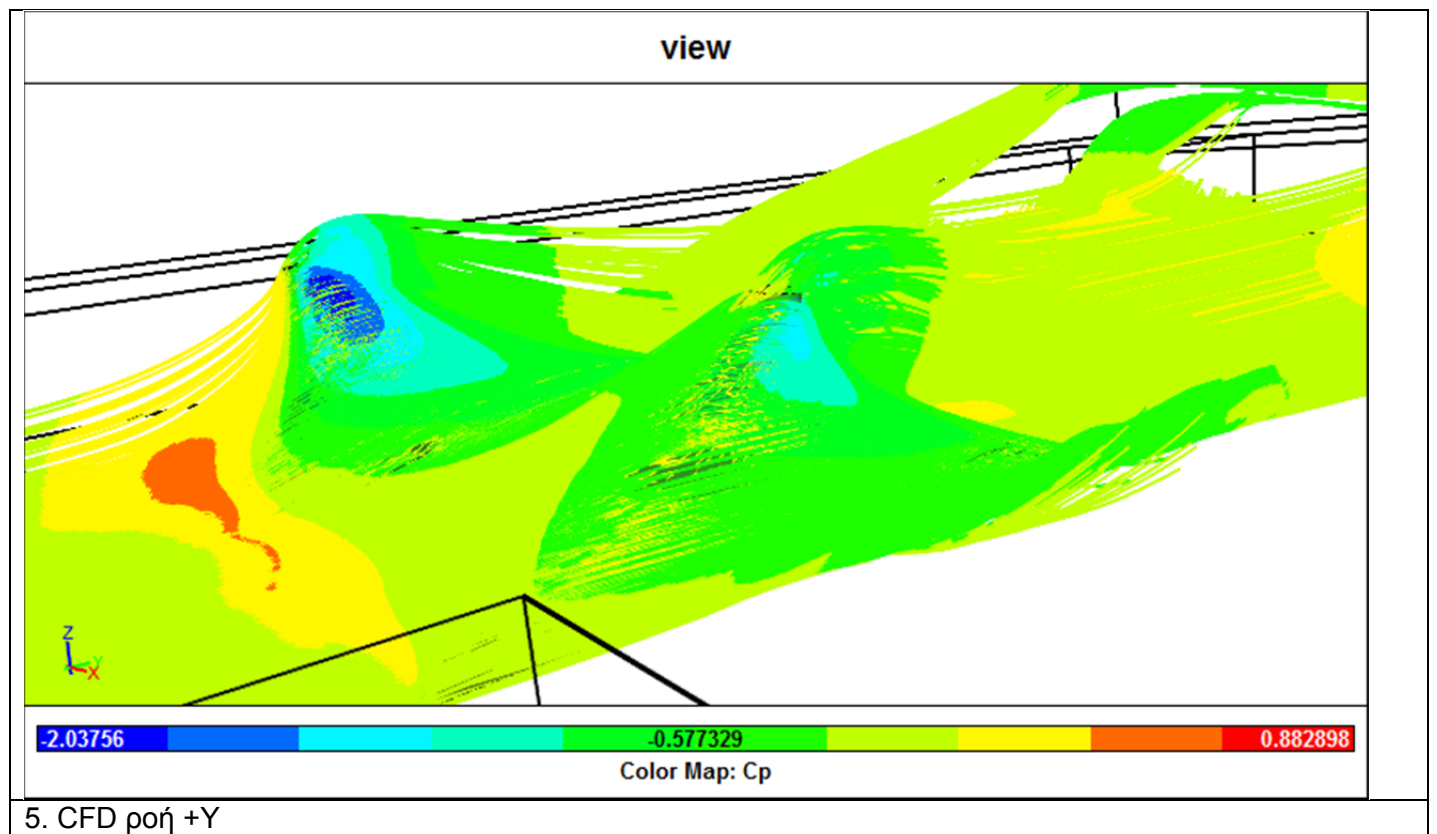
2. Τοπική τοπογραφία (Rhino 3d)



3. τάσεις μετά την εύρεση μορφής (prestress) (iXcube 10)

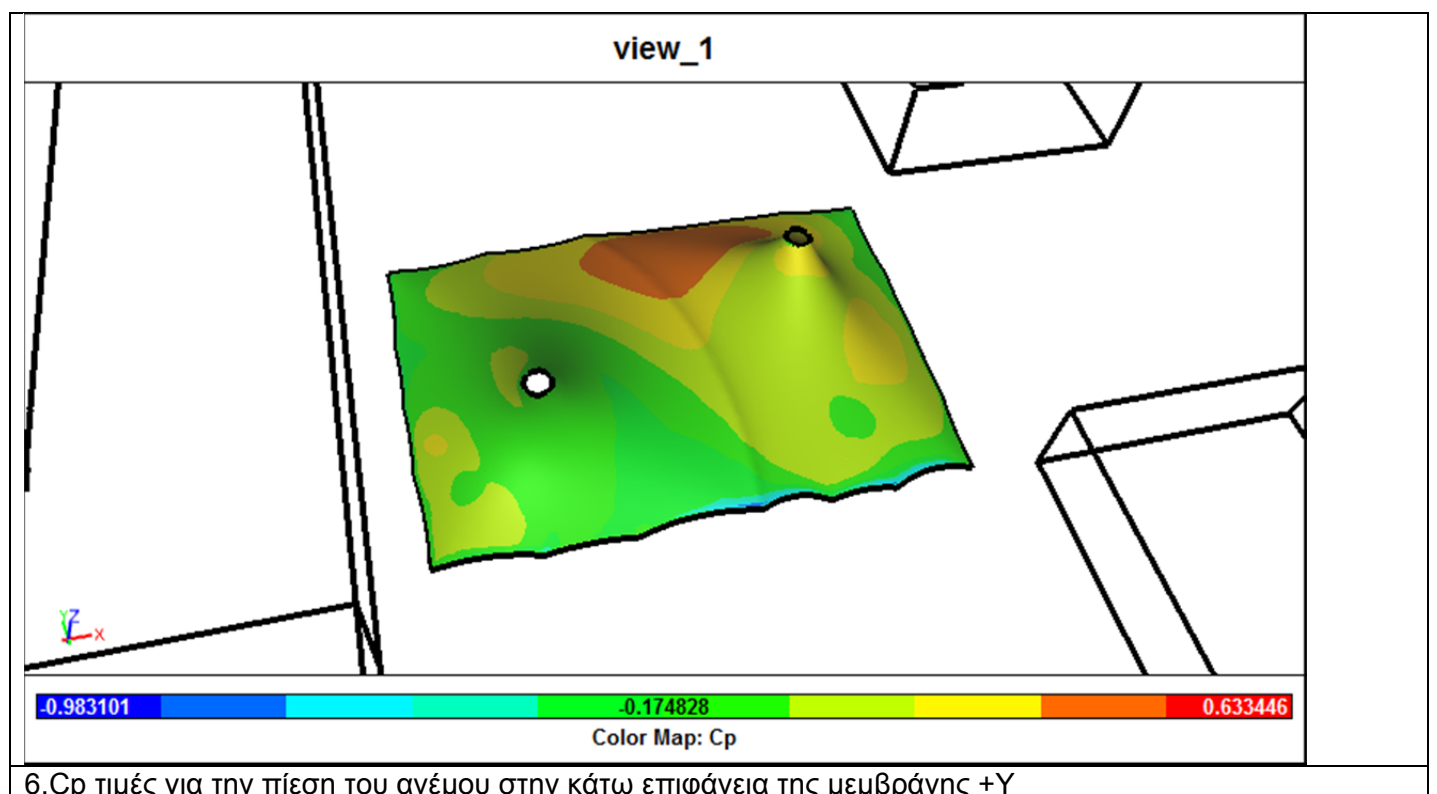


4. ταχύτητα ανέμου +X (Caedium)

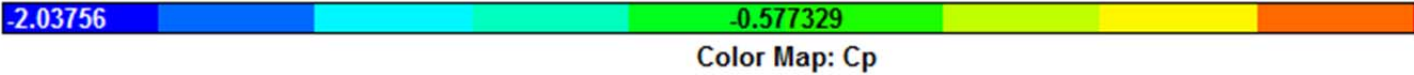
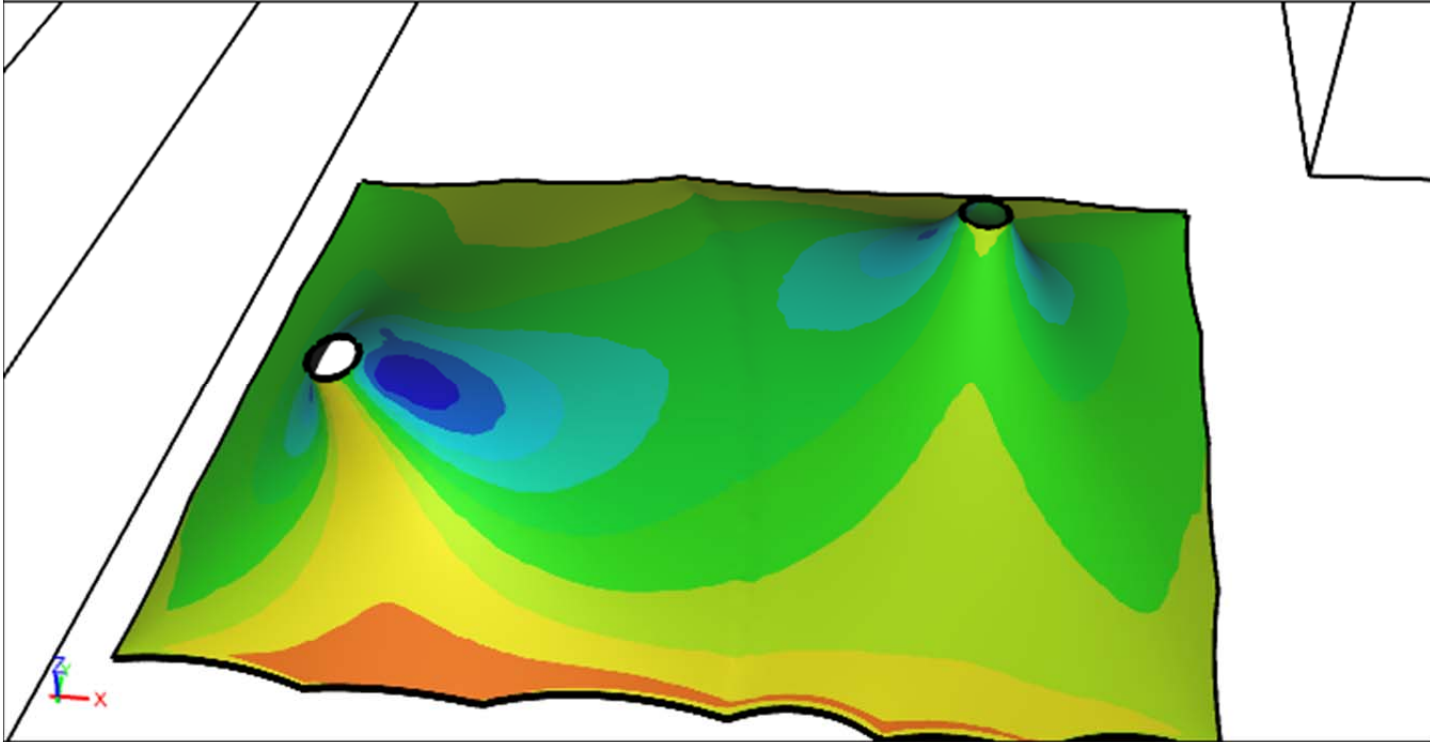


Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται οι συντελεστές  $C_p$  που δρουν στην άνω και την κάτω επιφάνεια της μεμβράνης.

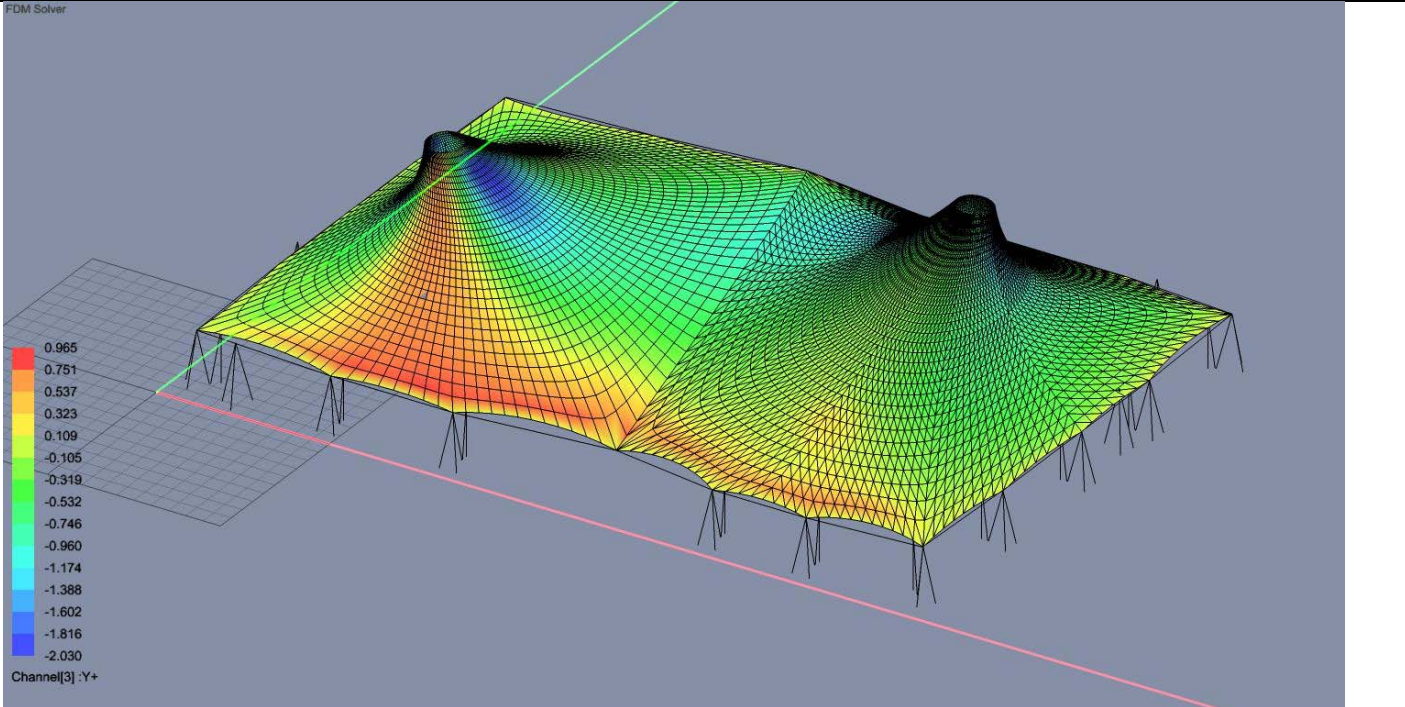
Δεχόμενοι ως θετική την τιμή της πίεσης που δρα **προς** στην επιφάνεια και αρνητική την πίεση που δρα **από** την επιφάνεια και αθροίζοντας τις δύο πιέσεις αλγεβρικά, έχουμε το συνολικό συντελεστή για όλη την κατασκευή.



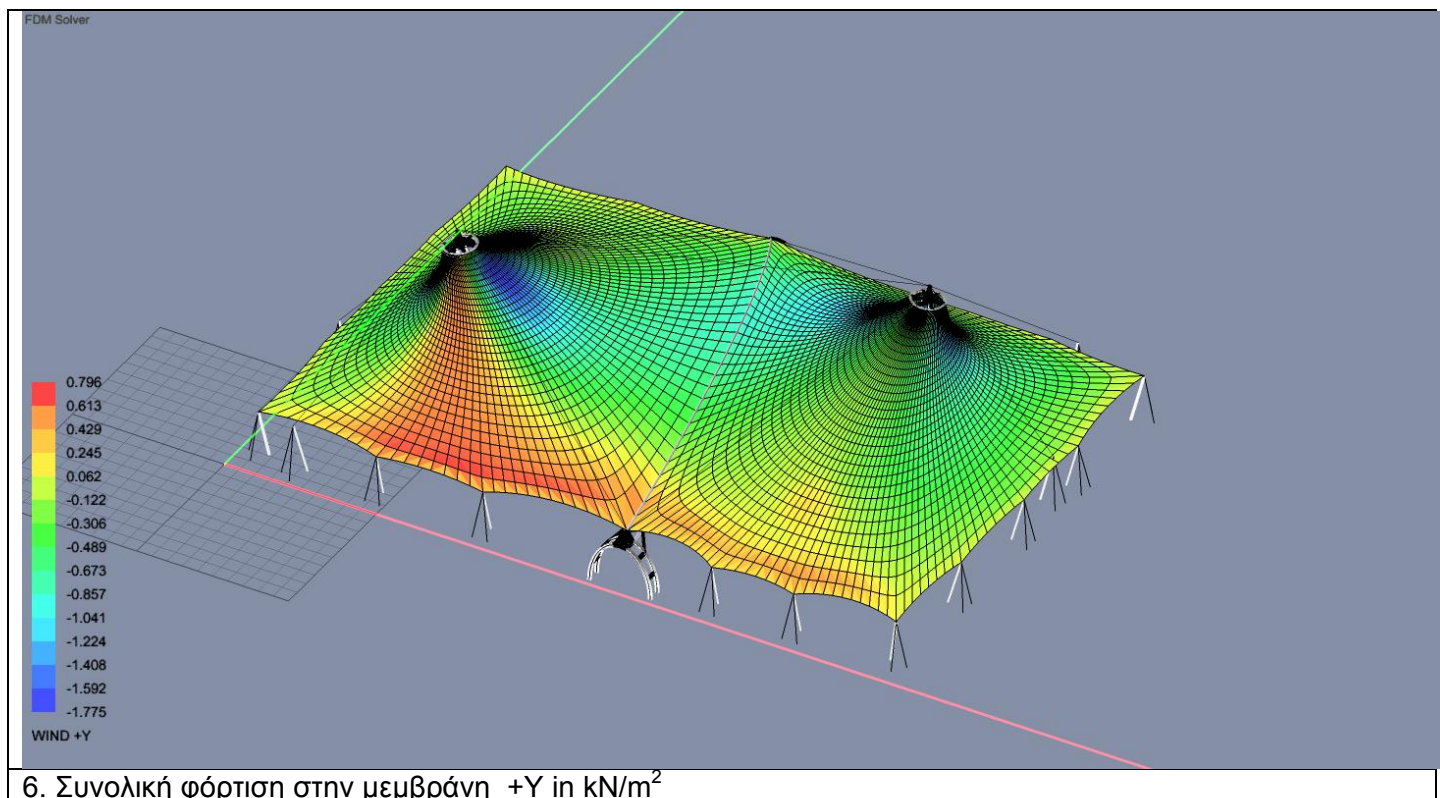
view



6. Cp τιμές για την πίεση του ανέμου στην πάνω επιφάνεια της μεμβράνης +Y



6. Συνολικές Cp τιμές για την πίεση του ανέμου στην επιφάνεια της μεμβράνης +Y

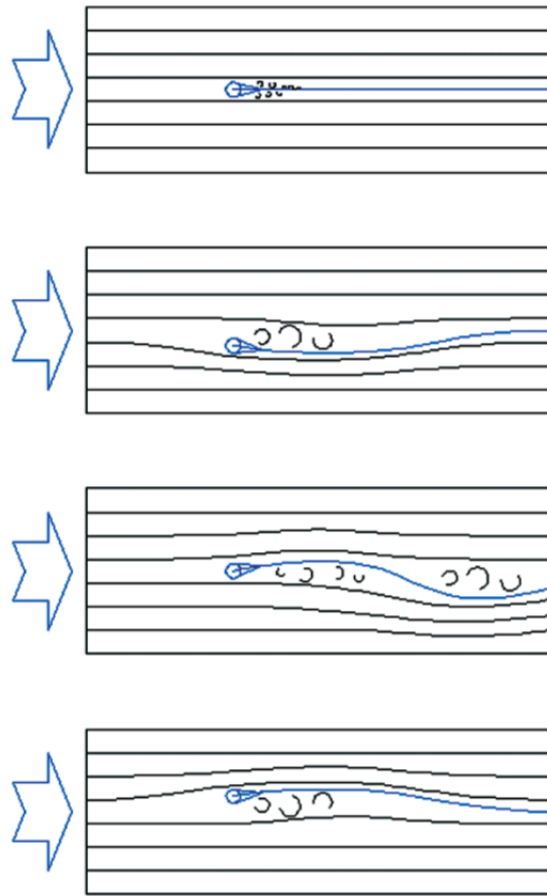


### 5.3.4.3 Δυναμικές Επιδράσεις

Συνήθως οι υπολογισμοί γίνονται με τη χρήση στατικών φορτίων που εφαρμόζονται στην κατασκευή. Ωστόσο, σε σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να χρειάζεται να εξεταστούν και οι δυναμικές επιδράσεις του ανέμου.

Σε σχέση με την “global resonant behavior” οι δομές με εφελκόμενη μεμβράνη έχουν χαμηλές φυσικές συχνότητες (NF) και οι τυπικές τιμές τους είναι 1,5 - 0,5. Ωστόσο, λόγω του πολύ χαμηλού βάρους τους και της πολύ καλής αποσβενόμενης συμπεριφορά τους, οι αρνητικές επιδράσεις όπως η δυναμική ενίσχυση είναι πολύ μικρές και μπορούν να αγνοηθούν στις περισσότερες περιπτώσεις. Παρουσιάζονται επίσης συχνά ως ελαφρά αποσβενόμενες δομές όσον αφορά την λόγο της δομικής απόσβεσής τους. Ωστόσο, σε δοκιμές με αεροελαστικά μοντέλα σε αεροδυναμική σήραγγα, ιδιαίτερα για κλειστές δομές μεμβράνης, παρουσιάζουν μια εξαιρετικά αποσβενόμενη συμπεριφορά που δεν προκαλεί αεροδυναμική αστάθεια. Ομοίως, για τις ανοιχτών πλευρών δομές φαίνεται ότι ένας μεγάλος βαθμός απόσβεσης παρέχεται από τους όγκους κίνησης του αέρα. Για την εκτίμηση του δυναμικών παραγόντων της ενίσχυσης, οι ειδικοί στις αεροδυναμικής σήραγγας υποθέτουν λόγο απόσβεσης μεταξύ 1,5% και 3% - παραμελώντας την αεροδυναμική απόσβεση. Ωστόσο, η βιομηχανία κατασκευής εφελκόμενων μεμβρανών θεωρεί ότι ενδείκνυται υψηλότερες τιμές απόσβεσης καθώς η σύνθετη φύση του υλικού και η εναλλαγή της πτύχωσης μεταξύ των νημάτων θα προκαλέσει φυσική υψηλή απόσβεση λόγω τριβής.

Τα ελεύθερα άκρα της μεμβράνης είναι επιρρεπή σε τοπικά δυναμικά θέματα. Λαμβάνεται μέριμνα για τις μπροστινές άκρες και τα όρια της μεμβράνης που βρίσκεται παράλληλα με την υπήνεμη εκτεθειμένη ροή του αέρα, επειδή οι παράγοντες  $C_p$  σε αυτές τις άκρες μπορεί να αλλάξουν δραματικά με μόνο μια μικρή αλλαγή στη "γωνία προσβολής" της ροής του ανέμου. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται "πτερυγισμός" (σχήμα 5,30) και συμβαίνει ιδιαίτερα στις εκ φύσεως επίπεδες περιοχές συνόρων ή σε περιοχές συνόρων με χαμηλή ένταση στο ύφασμα.



Σχ. 5.30 Πτερυγισμός κατά μήκος ενός ελεύθερου άκρου της μεμβράνης

Η αυξημένη κίνηση της επιφάνειας του υφάσματος μειώνει την διάρκεια ζωής της μεμβράνης και μπορεί κάλλιστα να ενοχλεί τον παρατηρητή-χρήστη της κατασκευής. Για την ελαχιστοποίηση αυτών των επιπτώσεων, συνιστάται να περιοριορίζονται οι ελεύθερες εκτάσεις των συνόρων των καλωδίων και να μην είναι μεγαλύτερες από 20m.

Παρόμοια με όλες τις σημαντικές περιπτώσεις των φορτίων σχεδιασμού, η επαρκής καμπυλότητα της επιφάνειας της μεμβράνης είναι το κλειδί για την ελαχιστοποίηση του πτερυγισμού από τον άνεμο διέγερσης, αν και οι υψηλές τιμές προεντάσεων στις επίπεδες επιφάνειες της μεμβράνης είναι μερικές φορές μια εναλλακτική λύση. Η ακόλουθη εξίσωση παρέχει μια καλή ένδειξη για την διαθέσιμη δυσκαμψία για να αντιδράσει ενάντια στα φορτία πίεσης ( $D$ ) που μετριέται σε μια εξισορροπημένη κατάσταση εύρεσης μορφής του μοντέλου.

$$D \approx \frac{N_{warp}}{R_{warp}} + \frac{N_{weft}}{R_{weft}} \quad N_{warp} = \text{προένταση στην κατεύθυνση του στημονιού (kN/m)}$$

$N_{weft}$  = προένταση στην κατεύθυνση του (kN/m)

$R_{warp}$  = θετική ακτίνα της προέντασης στην κατεύθυνση του στημονιού (m)

$R_{weft}$  = θετική ακτίνα της προέντασης στην κατεύθυνση του υφαδιού (m)

$D$  = Stiffness of Surface (kN/m<sup>2</sup>)

Οι εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης με πολύ καλή δομοστατική συμπεριφορά βρέθηκαν να έχουν  $D$  μεγαλύτερο από  $0.3\text{kN} / \text{m}^2$ . Σε ορισμένες επιφάνειες εφελκόμενων κατασκευών μεμβράνης, με  $D$  γύρω στο  $0.15\text{kN} / \text{m}^2$  και λιγότερο, έχει παρατηρηθεί ότι μικρά κύματα ταξιδεύουν όταν διεγείρεται η επιφάνεια από τον αέρα. Δομές μεμβράνης που έχουν  $D < 0.2\text{kN} / \text{m}^2$  σε μεγάλες περιοχές μπορεί να δείξουν ευαισθησία στις παραμορφώσεις και μπορεί να απαιτούν λεπτομερή έρευνα για την δομική συμπεριφορά τους υπό περιβαλλοντικά φορτία.

Στις αερούποστηριζόμενες κατασκευές μεμβράνης, έχοντας χαμηλή θετική Gaussian καμπυλότητα και σχετικά επίπεδες επιφάνειες μεμβράνης, η εμφάνιση κυμάτων μπορεί να συμβεί ακόμα και κάτω από σταθερούς ανέμους καθώς η εσωτερική πίεση είναι συχνά σε χαμηλή ρύθμιση για τη μείωση του κόστους λειτουργίας. Η ακαμψία της επιφάνειας  $D$  είναι για τις αερούποστηριζόμενες κατασκευές μεμβράνης ισοδύναμη με την εσωτερική πίεση.

### 5.3.5 Χιόνι

Το φορτίο χιονιού του εδάφους θα πρέπει να διερευνηθεί με τη χρήση και καθοδήγηση του EC1. Για δομές μεγάλων ανοιγμάτων, συνιστάται το φορτίο χιονιού πρέπει να διερευνηθεί χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα στοιχεία από την τοπική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Σε περιοχές που δεν υπόκεινται σε φορτία χιονιού, ωστόσο πρέπει ως ονομαστικό ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο  $0.3\text{kN} / \text{m}^2$  να θεωρηθεί. Ο αριθμός αυτός μπορεί να μειωθεί για κατασκευές με ανοίγματα πάνω από  $50\text{m}$  εφαρμόζοντας μια λεπτομερή στατιστική έρευνα που αντιπροσωπεύει για φόρτιση από τη βροχή, πεσμένα φύλλα, άμμο / βρωμιά κ.λπ.

Το χιόνι μπορεί να εναποτίθεται σε στέγες κάτω από ήρεμες ή θυελλώδεις συνθήκες. Υπό συνθήκες ηρεμίας μια ακόμη στρώση έχει την τάση να εναποτίθενται σε όλη την οροφή. Ο EC1 παρέχει καθοδήγηση σχετικά με τις τιμές των συντελεστών που πρέπει να χρησιμοποιούνται.

Κάτω από θυελλώδεις συνθήκες, το χιόνι θα τείνει να παρασυρθεί με αποτέλεσμα την εφαρμογή μιας ανομοιόμορφη φόρτισης στην οροφή. Η φύση αυτής της άνισης φόρτισης εξαρτάται από το προφίλ της επιφάνειας της στέγης προς την κατεύθυνση του ανέμου.

Στην περίπτωση μιας στέγης που αποτελείται από μια σειρά κορυφογραμμών και κοιλάδων υπό θυελλώδεις συνθήκες ανέμου το χιόνι θα παρασυρθεί μακριά από τις κορυφογραμμές μέσα στις κοιλάδες. Ο EC1 δίνει συντελεστές για το ποσό του χιονιού στην κορυφή και στη βάση της κοιλάδας και για το ελάχιστο ποσό του χιονιού στο κορυφογραμμή. Αυτή η επίδραση είναι δύσκολο να προβλεφθεί και πρέπει να ληφθεί μέριμνα.

Εναλλακτικές πιθανές κατανομές του φορτίου πρέπει να θεωρούνται και για το σχεδιασμό να λαμβάνεται η πιο επαχθής. Η πιθανότητα πολλές χιονοπτώσεις να επιδεινώνουν την φόρτιση του φορτίου του χιονιού πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη. Στον EC1 η έννοια της «ενιαίες εκδηλώσεις χιονιού» και «πολλαπλά συμβάντα χιονιού» χρησιμοποιούνται. «Ενιαίες εκδηλώσεις χιονιού» συμβαίνουν σε περιοχές όπου υπάρχει εύλογη προσδοκία ότι το χιόνι που έπεσε στις στέγες θα ξεπαγώσει πριν της άφιξης ενός νέου συστήματος καιρικών συνθηκών χιονιού.

Ο άνεμος που μεταθέτει το χιόνι σε μεγάλες κατασκευές μεγάλου ανοίγματος μπορεί να απεικονιστεί σε μια αεροδυναμική σήραγγα ή έναν ανοικτό αγωγό για να προβλεφθεί η αναδιανομή του χιονιού στη στέγη. Είναι γενικά παραδεκτό ότι το συνολικό φορτίο χιονιού στην στέγη θα παραμείνει το ίδιο, αλλά σύμφωνα με την ενέργεια του ανέμου το χιόνι μπορεί να μετατοπιστεί στις κοιλάδες της οροφής και να αυξηθεί η φόρτιση στις περιοχές αυτές.



Σχ. 5.31 Κατανομή φορτίου χιονιού στην κωνικής μορφής της δομή μεμβράνης (πρώτο πλάνο) και οροφή δικτύου καλωδίων επενδυμένη με ακρυλικό γυαλί (φόντο)

Πρέπει να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις του χιονιού ολίσθησης πάνω σε λείες επιφάνειες στις κοιλάδες. Ο κίνδυνος του χιονιού που πέφτει από την οροφή και εκθέτει σε κίνδυνο πρόσωπα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη. Υπάρχει ένας υψηλότερος κίνδυνος στις εφελκυσόμενες κατασκευές λόγω των λείων επιφανειών τους που μπορούν αποτελεσματικά να <<λιπαίνονται>> από το λιώσιμο του χιονιού.

Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, το χιόνι θα παρασυρθεί και θα σπρωχθεί μέσα στις κοιλάδες και προς τα σύνορα. Με ένα μεγάλο φορτίο χιονιού, η δομή μπορεί να αναπτύξει εκτροπές τέτοιες ώστε η καθοδική κλίση να αντιστραφεί.





## Σχ. 5.32 Λίμνες χιονιού στην στέγη μεμβράνης, Πενσυλβάνια

Πρέπει να εξεταστούν οι διαδικασίες για την εκκαθάριση του χιονιού. Μειωμένα φορτία χιονιού μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε περίπτωση που «ο περιορισμός του βάθους χιονιού» μπορεί να εξασφαλιστεί με ένα πρακτικό μέσο απομάκρυνσης χιονιού. Τα πρόσθετα φορτία πρόσβασης μπορεί να είναι μεγαλύτερα από το φορτίο του χιονιού, αλλά μικρότερες κατασκευές επιτρέπουν τη χρήση εναλλακτικών μέσων εκκαθάρισης του χιονιού.

Μια μέθοδος είναι να χρησιμοποιήσετε έναν εύκαμπτο σωλήνα για να πλύνετε το χιόνι μετά από μια χιονόπτωση. Άλλος τρόπος, ο οποίος χρησιμοποιείται συχνά για να καθαρίσει το χιόνι σε χαμηλού προφίλ αερούποστηριζόμενες κατασκευές, είναι η θέρμανση της εσωτερικής επιφάνειας της μεμβράνης καθώς το χιόνι είναι σε θέση να γλιστρήσει μακριά και εύκολα σε όλες τις κατευθύνσεις. Όλες οι άλλες μέθοδοι που προσπαθούν να λιώσουν το χιόνι έχουν βρεθεί να είναι ανεπιτυχείς και αναξιόπιστες.

### 5.3.6 Θερμοκρασία

Οι επιδράσεις της θερμοκρασίας σε σχέση με τη συνολική δομική συμπεριφορά και την ανάλυση του φορτίου βρέθηκε ότι συνήθως είναι λιγότερο σημαντική για τις εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης σε σύγκριση με τις άκαμπτες κατασκευές. Η μεταβολή της θερμοκρασίας εκδηλώνεται σε σχετικά μικρό εύρος διακύμανσης  $\pm$  στα επίπεδα προέντασης. Ωστόσο, οι επιδράσεις της θερμοκρασίας είναι πιο σημαντικές για τα δίκτυα καλωδίων από χάλυβα.

### 5.3.7 Σεισμική Φόρτιση

Σε γενικές γραμμές τα σεισμικά φορτία δεν είναι πρόβλημα, για τις εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης καθώς ζυγίζουν λίγο και έτσι δεν μπορεί να πάρει σημαντικές δυνάμεις επιτάχυνσης υπό σεισμική δράση. Σε περίπτωση που η δομή περιέχει σχετικώς ογκώδη μέρη όπως ορθοστάτες ή συνδέσεις, τότε αυτά θα υπόκεινται σε επιταχύνσεις υπό σεισμική φόρτιση.

### 5.3.8 Κατασκευαστικές Ανοχές

Οι ευρωπαϊκοί κώδικες για τις ανοχές κατασκευής ποικίλει, αλλά γενικά μπορούμε να πούμε ότι οι ανοχές που προβλέπονται για το τυποποιημένο σκυρόδεμα δεν είναι καθόλου επαρκής για να ανεγερθούν υπερστατικές δομές επάνω. Ως εκ τούτου, οι πιο στενές ανοχές πρέπει να επιλέγονται ή τα μέτρα διαρθρωτικής προσαρμογής πρέπει να ληφθούν για τη διασφάλιση των σημείων σύνδεσης (π.χ. πλάκες βάσης, ιστοί ή επιτοιχίες συνδέσεις) και να είναι ακριβείς. Άκαμπτες δομές ή ιδιαίτερα στοιχεία προέντασης μπορεί να απαιτούν υψηλές ανοχές κατασκευής, ιδίως κατά την αξονική κατεύθυνση της δύναμης, για να εξασφαλιστεί ότι οι προκαθορισμένες δυνάμεις προέντασης και η γεωμετρία της δομής μπορούν να επιτευχθούν. Η ανάλυση ευαισθησίας που αφορά σύντμηση ή επιμήκυνση κείριων δομικών στοιχείων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθοριστούν οι απαιτούμενες ανοχές κατασκευής για τη βάση. Οι βάσεις θα πρέπει να εξεταστούν πριν από την εγκατάσταση της δομής της μεμβράνης.

Περαιτέρω ανοχές που πρέπει να υπάρχουν είναι οι ανοχές εντός της δομής της μεμβράνης και των καλωδίων. Η επιφάνεια της μεμβράνης, που είναι λιγότερο δύσκαμπτη, είναι συνήθως πιο επιεικής σε μικρές ανακρίβειες διαστάσεων από τα καλώδια. Σε γενικές γραμμές, τα μέλη έντασης μιας δομής καλωδίων δεν επιτρέπουν την προσαρμογή του μήκους τους για να αντισταθμίσουν την ανοχή της κατασκευής.

Ως εκ τούτου, η ανοχή κατασκευής του μήκους της πλήρους διάταξης με εξαρτήματα στην άκρη είναι κρίσιμη. Οποιοδήποτε λάθος στο μήκος του καλωδίου θα έχει ως αποτέλεσμα διαφορές μεταξύ των πραγματικών και δυνάμεων σχεδιασμού της προέντασης στο καλώδιο άπαξ και ανεγερθεί πλήρως.

Αν τα καλώδια είναι γενικά μικρότερα από ότι έχουν σχεδιαστεί τότε οι δυνάμεις προέντασης θα είναι μεγαλύτερη, με αποτέλεσμα:

α) την πιθανή υπερφόρτωση του καλωδίου όταν η δομή φορτιστεί

β) Μεγαλύτερες δυνάμεις στις διατάξεις έντασης απαιτούνται για τη σύνδεση των καλωδίων καθώς αυτά πρέπει να «τεντωθούν» στη θέση τους. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος του καλωδίου τόσο μεγαλύτερη θα είναι το επιπλέον φορτίο που απαιτείται για το τέντωμα του καλωδίου από ένα συγκεκριμένο

ποσοστό του μήκους του - εξ ου και η ανοχή για μήκος σε κοντά καλώδια είναι πιο κρίσιμη από τις μικρότερης διαμέτρου μακριών καλωδίων.

Εναλλακτικά, εάν τα καλώδια είναι γενικά μεγαλύτερα από τον σχεδιασμό τότε οι δυνάμεις θα είναι μικρότερες, με αποτέλεσμα:

γ) τα καλώδια να είναι χαλαρά όταν η κατασκευή φορτιστεί (ή ακόμη και σε καθεστώς προέντασης) έχοντας έλλειψη δομικής ακαμψίας.

Μια τυπική ανοχή για ένα καλώδιο κομμένο σύμφωνα με προφόρτιση και με εξαρτήματα τέλους είναι:

Ανοχή=± ((L/1000)0,5 + 5 mm) όπου L είναι το μήκος του καλωδίου σε mm.

Για την επίτευξη αυτών των ανοχών κατασκευής τα καλώδια συνήθως είναι κομμένα σε μήκος υπολογισμένο κάτω από το φορτίο σχεδίασης της προέντασης τους. Επομένως, είναι σημαντικό ότι τα φορτία σχεδίασης της προέντασης είναι ακριβή και τα φορτία που θα υπάρχουν στα καλώδια στην ανέγερση θα είναι τα φορτία προέντασης.

Δεν είναι όλοι οι κατασκευαστές καλωδίων σε θέση να παράγουν αυτές τις ανοχές και μια μελέτη διαρθρωτικής ευαισθησίας θα πρέπει να γίνει.

### 5.3.9 Συνδυασμοί φόρτισης

Για να ληφθούν υπόψη οι μεγάλες εκτροπές των δομών μεμβράνης, η ανάλυση πρέπει να γίνει χωρίς χρήση συντελεστή του φορτίου. Είναι πολύ σημαντικό ότι τα αποτελέσματα του συνδυασμού φορτίσεων βρίσκονται πρώτα και στη συνέχεια αναλύονται, αντί αναλύοντας κάθε φορτίο ξεχωριστά και στη συνέχεια προσθέτοντας τα αποτελέσματα.

Οι προένταση και το ίδιο βάρος θα πρέπει να είναι μέρος του συνόλου των περιπτώσεων φορτίσεων. Αυτή είναι μια απόκλιση από τους κώδικες EC, καθώς το ίδιο βάρος της μεμβράνης δεν πρέπει να εξαιρεθεί για τις περιπτώσεις ανύψωσης από άνεμο, καθώς είναι αμελητέα.

Παραδείγματα περιπτώσεων φορτίου που πρέπει να εξεταστούν:

α) ίδιο βάρος + προένταση

β) ίδιο βάρος + προένταση + χιονιού

γ) ίδιο βάρος + προένταση + άνεμος

δ) ίδιο βάρος + προεντάσεων + άνεμος (καθοδικές πιέσεις) + χιονιού

ε) κ.λπ.

Οι συνδυασμοί φορτίου θα πρέπει να εφαρμόζονται σύμφωνα με του εθνικό έγγραφο εφαρμογής του EC1 αμελώντας τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για το φόρτιση, όπως περιγράφεται στο Παράρτημα G. Ωστόσο, για τους συνδυασμούς φορτίου, συμπεριλαμβανομένων των πολλαπλών επιβαλλομένων κινητών φορτίων (π.χ. άνεμος προς τα κάτω + χιόνι), ένα από αυτά τα φορτία που εφαρμόζονται θα μπορούσε να μειωθεί εύλογα.

### 5.3.10 Δυσανάλογη Κατάρρευση

Θα πρέπει να εξετάζεται στο σχεδιασμό των δομών μεμβράνης η αποφυγή της δυσανάλογης κατάρρευσης. Αφού έχουν προσδιοριστεί οι πιθανές μορφές αστοχίας η δομή της μεμβράνης θα πρέπει να διαμορφωθεί στο εν μέρει σημείο, προκειμένου να μην υπάρξει περαιτέρω αποτυχία και κατάρρευση. Η κατάσταση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως μια περίπτωση πρόσθετου φορτίου αν και τα μοντέλα που αναλύθηκαν θα έχουν προφανώς ποικιλοτρόπως προσδιοριστεί για τις μερικής κατάρρευσης καταστάσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις φορτίου, ο συντελεστής ασφαλείας (FoS) για τα υλικά μπορεί να μειωθεί από εκείνα που χρησιμοποιούνται στις κύριες περιπτώσεις φορτίου.

### 5.3.11 Μη Γραμμική Ανάλυση

Μετά την διαδικασία της εύρεσης μορφής της εφελκυσμένης μεμβράνης, τον ορισμό των φορτίσεων καθώς και των συνδυασμών φορτίσεων υπεισέρχεται η ανάγκη επίλυσης του μη γραμμικού προβλήματος. Η επίλυση του γίνεται με επαναληπτική μέθοδο.

Στη μέθοδο αυτή το συνολικό φορτίο  $R$  που ασκείται στην κατασκευή προστίθεται κατά βήματα. Στο βήμα  $m+1$  το φορτίο μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

${}^{m+1}R = {}^mR + {}^{m+1}\Delta R$	5.37
--	------

Όπου ο άνω αριστερός δείκτης  $m$  χρησιμοποιείται για να δηλώσει το  $m$  αυξητικό βήμα. Έστω  ${}^mU$ ,  ${}^m\sigma$ ,  ${}^m\epsilon$  οι αντίστοιχες μετατοπίσεις, τάσεις και παραμορφώσεις. Η αύξησή τους που αντιστοιχεί στην αύξηση του φορτίου κατά  $\Delta R$  δίνεται από τις σχέσεις:

${}^{m+1}U = {}^mU + {}^{m+1}\Delta U$ ${}^{m+1}\sigma = {}^m\sigma + {}^{m+1}\Delta\sigma$	5.38
--	------

Από την ισορροπία των επικόμβιων δυνάμεων έχουμε:

${}^{m+1}F = {}^{m+1}R$	5.39
-------------------------	------

όπου  ${}^{m+1}F$ ,  ${}^{m+1}R$  είναι οι εσωτερικές και εξωτερικές επικόμβιες δυνάμεις αντίστοιχα.

Η εξίσωση (5.39) μπορεί να γραφεί:

$\Psi({}^{m+1}U) = {}^{m+1}F({}^{m+1}U) - {}^{m+1}R({}^{m+1}U) =$	5.40
---	------

Κατ'αυτό τον τρόπο γραμμικοποιώ το μη γραμμικό πρόβλημα. Η εξίσωση (5.40) είναι μια μη γραμμική μητρική εξίσωση εκφρασμένη με όρους μετατόπισης  ${}^{m+1}U$ . Η εξίσωση αυτή αντιπροσωπεύει την ισορροπία των εξωτερικών δυνάμεων  ${}^{m+1}R$  και των εσωτερικών δυνάμεων  ${}^{m+1}F$ .

Στις επόμενες ενότητες αναπτύσσονται κάποιες επαναληπτικές μέθοδοι που έχουν ως βάση την επαναληπτική μέθοδο Newton-Raphson.

#### 5.3.11.1 Απλή μέθοδος Newton – Raphson

Σύμφωνα μ'αυτή τη μέθοδο, αν ζητούμε μια ρίζα της εξίσωσης  $f(x)=0$  και θεωρήσουμε μια αρχική προσέγγιση της λύσης, έστω  $x_{i-1}$ , τότε η ρίζα βρίσκεται από την επαναληπτική σχέση:

$x_i = x_{i-1} - \frac{f(x_i)}{f'(x_{i-1})}$	5.41
--	------

όπου  $x_i$ , είναι η προσέγγιση της λύσης μετά την  $i$  επανάληψη.

Για την επίλυση του προβλήματος αναφερόμαστε σε πολλαπλούς βαθμούς ελευθερίας. Έστω ότι γνωρίζουμε την  $i-1$  προσέγγιση,  ${}^{m+1}U^{(i-1)}$  της μετατόπισης  ${}^{m+1}U$ , δηλαδή τις μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στο  $m+1$  βήμα φόρτισης. Αναλύοντας τον όρο  $\Psi({}^{m+1}U)$  της σχέσης (5.40) κατά Taylor και αμελώντας τους όρους ανώτερης τάξης έχουμε:

$\Psi({}^{m+1}U^{(i-1)}) + \frac{\partial \Psi}{\partial U} \Big _{m+1U^{(i-1)}} ({}^{m+1}U^{(i)} - {}^{m+1}U^{(i-1)}) = 0$	5.42
---	------

Ή

$$\left. \frac{\partial F}{\partial U} \right|_{m+1, U^{(i-1)}} \Delta U^{(i)} + {}^{m+1}F^{(i-1)} - {}^{m+1}R = 0$$

5.43

όπου

$$\Delta U^{(i)} = {}^{m+1}U^{(i)} - {}^{m+1}U^{(i-1)} \quad \text{και} \quad {}^{m+1}F^{(i-1)} = {}^{m+1}F({}^{m+1}U^{(i-1)})$$

5.44

Τελικά οι παραπάνω σχέσεις παίρνουν την μορφή:

$${}^{m+1}K^{(i-1)} \Delta U^{(i)} = {}^{m+1}R - {}^{m+1}F^{(i-1)}$$

$${}^{m+1}U^{(i)} = {}^{m+1}U^{(i-1)} + \Delta U^{(i)}$$

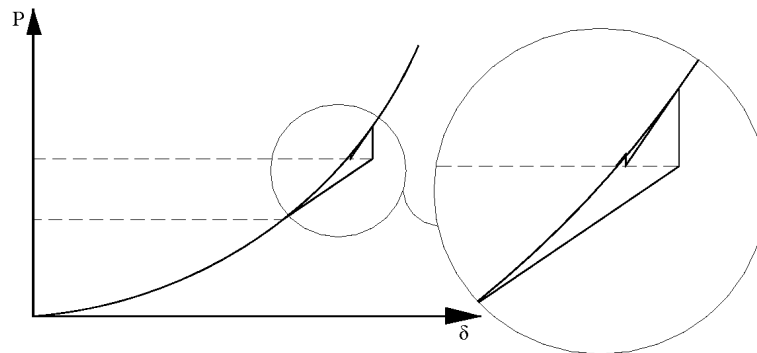
$${}^{m+1}U^{(0)} = {}^m U, \quad {}^{m+1}K^{(0)} = {}^m K$$

$${}^{m+1}F^{(0)} = {}^m F$$

(i=1,2,...)

5.45

Οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης που επιλέξαμε και το οποίο θα εξεταστεί παρακάτω. Αυτή η επαναληπτική διαδικασία για μονοβάθμιο μη γραμμικό σύστημα φαίνεται στο σχήμα 5.33.



Σχήμα 5.33 Γραφική απεικόνιση (διάγραμμα φόρτισης P - παραμόρφωσης δ) της μεθόδου Newton-Raphson για μονοβάθμιο σύστημα

Η μέθοδος Newton Raphson έχει υψηλό ρυθμό σύγκλισης, συγκλίνοντας τετραγωνικά. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί ότι το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας  ${}^{m+1}K^{(i-1)}$  υπολογίζεται σε κάθε επανάληψη κάθε βήματος, άρα αυξάνεται πολύ το υπολογιστικό φορτίο. Εξ αιτίας αυτού του γεγονότος βρέθηκαν κάποιες τροποποιημένες επαναληπτικές μέθοδοι, που παρουσιάζονται παρακάτω.

### 5.3.11.2 Τροποποιημένη μέθοδος Newton – Raphson

Μια από τις τροποποιήσεις της μεθόδου Newton-Raphson είναι η αντικατάσταση του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας  ${}^{m+1}K^{(i-1)}$  από το μητρώο  ${}^n K$  που είναι το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας που υπολογίζεται στο βήμα n,  $n < m+1$ . Αν το  ${}^n K$  υπολογίζεται μόνο στην αρχή κάθε βήματος φόρτισης, λαμβάνουμε την λεγόμενη μέθοδο αρχικής τάσης. Συχνά το μητρώο δυσκαμψίας υπολογίζεται στην αρχή κάθε βήματος φόρτισης ή χρησιμοποιείται για το (m+1) βήμα το μητρώο δυσκαμψίας:

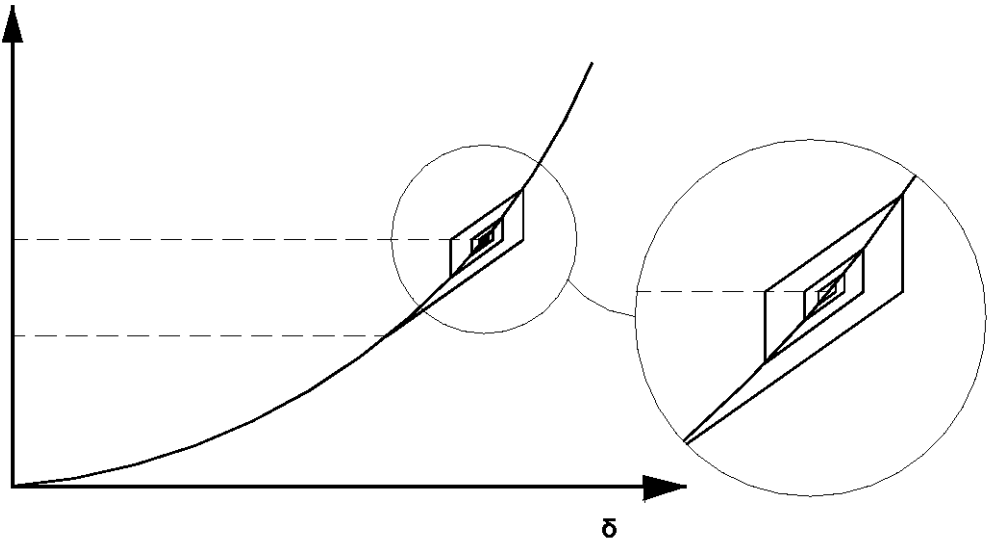
$${}^n K = {}^{m+1} K^{(0)} = {}^m K$$

5.46

Επομένως ο αλγόριθμος της τροποποιημένης μεθόδου Newton-Raphson γράφεται:

${}^n \mathbf{K} \Delta \mathbf{U}^{(i)} = {}^{m+1} \mathbf{R} - {}^{m+1} \mathbf{F}^{(i-1)}$ ${}^{m+1} \mathbf{U}^{(i)} = {}^{m+1} \mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta \mathbf{U}^{(i)} \quad (i=1,2,\dots)$ ${}^{m+1} \mathbf{U}^{(0)} = {}^m \mathbf{U}, \quad {}^{m+1} \mathbf{F}^{(0)} = {}^m \mathbf{F}$	5.47
--	------

Η επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης. Στο σχήμα 5.34 φαίνεται η τροποποιημένη επαναληπτική μέθοδος Newton-Raphson για ένα μονοβάθμιο μη γραμμικό σύστημα.



Σχήμα 5.34 Γραφική απεικόνιση (διάγραμμα φόρτισης P - παραμόρφωσης δ) της τροποποιημένης μεθόδου Newton-Raphson για μη γραμμικό μονοβάθμιο σύστημα

Το πλεονέκτημα της μεθόδου είναι ότι υπολογίζονται λιγότερα μητρώα δυσκαμψίας. Ωστόσο η μέθοδος συγκλίνει γραμμικά και επομένως είναι αρκετά πιο αργή από την απλή μέθοδο Newton-Raphson.

5.3.11.3 Υβριδική μέθοδος Newton – Raphson

Η μέθοδος αυτή είναι ένας συνδυασμός της απλής και της τροποποιημένης μεθόδου Newton-Raphson. Η απλή μέθοδος Newton-Raphson απαιτεί τον υπολογισμό των μητρώων δυσκαμψίας της κατασκευής σε κάθε επανάληψη. Από την άλλη πλευρά η τροποποιημένη μέθοδος Newton-Raphson διατηρεί το ίδιο μητρώο δυσκαμψίας κατά τη διάρκεια αρκετών επαναλήψεων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αργό ρυθμό σύγκλισης. Αντίθετα με αυτές τις δύο μεθόδους η υβριδική μέθοδος Newton-Raphson χρησιμοποιεί μητρώα μικρότερης τάξης για να ενημερωθεί το αντίστροφο μητρώο δυσκαμψίας,  ${}^{m+1}(\mathbf{K}-1)^{(i-1)}$ . Αυτή η διαδικασία δίνει μια τέμνουσα προσέγγιση του μητρώου  ${}^{m+1}(\mathbf{K}-1)^{(i-1)}$ . Αυτή η μέθοδος ανήκει σε μια ομάδα μεθόδων που ονομάζονται μέθοδοι επαναληπτικής ενημέρωσης των μητρώων. Η μέθοδος που αναπτύσσεται σ'αυτή την ενότητα χρησιμοποιεί την μέθοδο δεύτερης τάξης Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shamo(BFGS), σύμφωνα με την οποία καθορίζουμε την αύξηση της παραμόρφωσης  $\Delta \mathbf{U}^{(i)}$  :

$\Delta \mathbf{U}^{(i)} = {}^{m+1} \mathbf{U}^{(i)} - {}^{m+1} \mathbf{U}^{(i-1)}$	5.48
---	------

Επίσης ορίζουμε το «εκτός ισορροπίας» διάνυσμα  $\mathbf{R}^{(i)}$  και την αύξηση  $\mathbf{y}^{(i)}$  :

$\mathbf{y}^{(i)} = \mathbf{R}^{(i-1)} - \mathbf{R}^{(i)}$ $\mathbf{R}^{(i)} = {}^{m+1} \mathbf{R} - {}^{m+1} \mathbf{F}^{(i)}$	5.49
---	------

Το ενημερωμένο μητρώο  ${}^{m+1} \mathbf{K}^{(i)}$  ικανοποιεί την υβριδική εξίσωση:

$${}^{m+1}\mathbf{K}^{(i)} \Delta\mathbf{U}^{(i)} = \boldsymbol{\gamma}^{(i)}$$

5.50

Για ένα συμμετρικό, θετικά ορισμένο μητρώο δυσκαμψίας η επαναληπτική διαδικασία αντιστροφής του μητρώου είναι:

$${}^{m+1}(\mathbf{K}^{-1})^{(i)} = \mathbf{A}^{(i-1)T} {}^{m+1}(\mathbf{K}^{-1})^{(i-1)} \mathbf{A}^{(i-1)}$$

5.51

όπου  $\mathbf{A}$  είναι το μητρώο τροποποίησης που ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{A}^{(i-1)} = \mathbf{I} + \mathbf{V}^{(i-1)} \mathbf{W}^{(i-1)T}$$

5.52

όπου  $\mathbf{I}$  είναι το μοναδιαίο μητρώο των ίδιων διαστάσεων όπως το  $\mathbf{K}$ , ενώ τα  $\mathbf{V}^{(i-1)}$  και  $\mathbf{W}^{(i-1)}$  είναι διανύσματα εκφρασμένα σε όρους των διανυσμάτων  $\Delta\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{R}$  και  $\boldsymbol{\gamma}$ . Η επαναληπτική διαδικασία για το βήμα  $i$  ( $i=1,2, \dots$ ) υποδιαιρείται σε δύο βήματα:

1. Υπολογίζουμε την αύξηση της μετατόπισης  $\Delta\mathbf{U}$ :

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{U} &= {}^{m+1}(\mathbf{K}^{-1})^{(i-1)} \mathbf{R}^{(i-1)} = \mathbf{A}^{(i-1)T} \dots \mathbf{A}^{(i)T} \dots \mathbf{A}^{(i-1)} \mathbf{R}^{(i-1)} \\ \Delta\mathbf{U}^{(i)} &= \Delta\mathbf{U} \\ {}^{m+1}\mathbf{U}^{(i)} &= {}^{m+1}\mathbf{U}^{(i-1)} + \Delta\mathbf{U} \end{aligned}$$

5.53

2. Υπολογίζουμε τα διανύσματα διόρθωσης,  $\mathbf{V}^{(i)}$  και  $\mathbf{W}^{(i)}$ , που θα χρησιμοποιηθούν στο επόμενο επαναληπτικό βήμα:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}^{(i)} &= -\mathbf{c}^{(i)} {}^{m+1}\mathbf{K}^{(i-1)} \Delta\mathbf{U}^{(i)} - \boldsymbol{\gamma}^{(i)} = \\ &= \mathbf{R}^{(i)} - (1 + \mathbf{c}^{(i)}) \mathbf{R}^{(i-1)} \\ \mathbf{W}^{(i)} &= \frac{\Delta\mathbf{U}^{(i)}}{\Delta\mathbf{U}^{(i)T} \boldsymbol{\gamma}^{(i)}} = \frac{\Delta\mathbf{U}^{(i)}}{G(0) - G(1)} \end{aligned}$$

5.54

όπου το  $\mathbf{c}^{(i)}$  δίνεται από την σχέση:

$$\mathbf{c}^{(i)} = \left( \frac{\Delta\mathbf{U}^{(i)T} \boldsymbol{\gamma}^{(i)}}{\Delta\mathbf{U}^{(i)T} {}^{m+1}\mathbf{K}^{(i-1)} \boldsymbol{\gamma}^{(i)}} \right)^{1/2} = \frac{G(0) - G(1)}{G(0)}$$

5.55

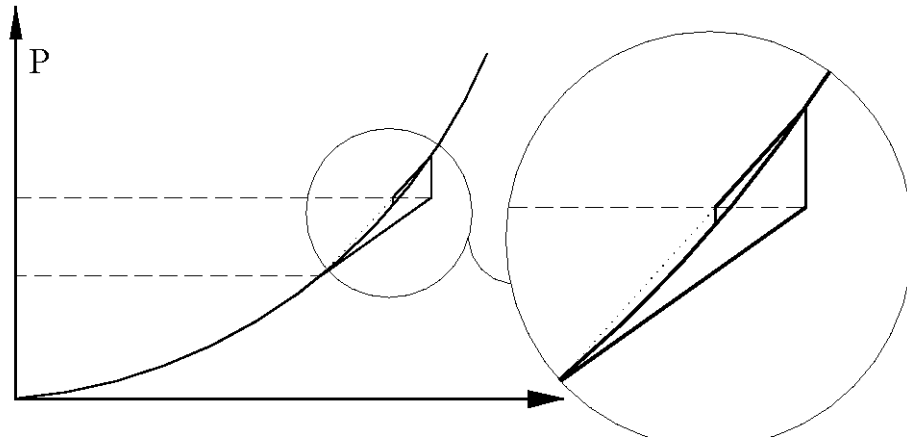
Για να αποφύγουμε αριθμητικές αστάθειες, η ενημέρωση γίνεται μόνο όταν  $\mathbf{c}^{(i)}$  είναι μικρότερο από μια προκαθορισμένη ανοχή, έστω  $10^5$ .

Η συνάρτηση  $G(x)$  καθορίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} G(x) &= G({}^{m+1}\mathbf{U}^{(i-1)} + \mathbf{x} \Delta\mathbf{U}) = \\ &= \Delta\mathbf{U}^T [{}^{m+1}\mathbf{R} - {}^{m+1}\mathbf{F}({}^{m+1}\mathbf{U}^{(i-1)} + \mathbf{x}(\Delta\mathbf{U}))] \end{aligned}$$

5.56

Οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο σύγκλισης. Η επαναληπτική διαδικασία για μονοβάθμιο μη γραμμικό σύστημα φαίνεται στο σχήμα



Σχήμα 5.35 Γραφική απεικόνιση της υβριδικής επαναληπτικής μεθόδου για μη γραμμικό μονοβάθμιο σύστημα.

Οι υπολογισμοί που απαιτούνται σ αυτή τη μέθοδο είναι περισσότεροι απ'ότι στην τροποποιημένη μέθοδο Newton Raphson, αλλά λιγότεροι απ ότι στην κλασσική μέθοδο Newton Raphson. Ωστόσο αυτή η μέθοδος συγκλίνει γρηγορότερα από την τροποποιημένη μέθοδο Newton Raphson.

#### 5.3.11.4 Κριτήρια σύγκλισης επαναληπτικών μεθόδων

Στις επαναληπτικές μεθόδους είναι καθοριστική η επιλογή του κατάλληλου κριτηρίου σύγκλισης. Στο τέλος κάθε επανάληψης πρέπει να ελέγχεται η λύση σε σχέση με μια ανοχή την οποία προεπιλέγουμε ώστε να εξετάσουμε αν το κριτήριο σύγκλισης ικανοποιείται.

Για μια ανάλυση με τη μέθοδο των μετατοπίσεων με πεπερασμένα στοιχεία οι υπολογισμένες μετατοπίσεις πρέπει να προσεγγίζουν τις πραγματικές μετατοπίσεις. Εφόσον οι πραγματικές μετατοπίσεις δεν είναι γνωστές εκ των προτέρων, χρησιμοποιούμε ένα κριτήριο σύγκλισης της μορφής:

$\ \Delta \mathbf{U}^{(i)}\ _2 \leq \varepsilon_D \ \mathbf{U}^{(i)} - \mathbf{U}^{(m)}\ _2$	5.57
--	------

όπου  $\Delta \mathbf{U}^{(i)}$  είναι η αύξηση της μετατόπισης στην  $i$  επανάληψη,  $\|\cdot\|_2$  είναι η ευκλείδεια νόρμα διανύσματος και  $\varepsilon_D$  είναι μια προκαθορισμένη ανοχή για την μετατόπιση  $\mathbf{U}$ . Αυτό το κριτήριο ονομάζεται κριτήριο μετατόπισης, διότι ελέγχεται η σύγκλιση των μετατοπίσεων.

Για μια επαναληπτική διαδικασία ισορροπίας, ζητούμε μια λύση  $\mathbf{U}$ , που να ικανοποιεί τις συνθήκες ισορροπίας. Έτσι εισάγουμε το κριτήριο:

$\ \mathbf{R}^{(m+1)} - \mathbf{F}^{(i)}\ _2 \leq \varepsilon_F \ \mathbf{R}^{(m+1)} - \mathbf{F}^{(m)}\ _2$	5.58
--	------

όπου  $\varepsilon_F$  είναι μια προκαθορισμένη ανοχή για την εκτός ισορροπίας δύναμη. Αυτό το κριτήριο ονομάζεται κριτήριο δυνάμεων.

Ένα τρίτο κριτήριο προκύπτει από τον έλεγχο για το πόσο κοντά βρίσκονται οι δυνάμεις όσο και οι μετατοπίσεις στις τιμές ισορροπίας. Το κριτήριο αυτό ονομάζεται κριτήριο εσωτερικής ενέργειας και εκφράζεται ως εξής:

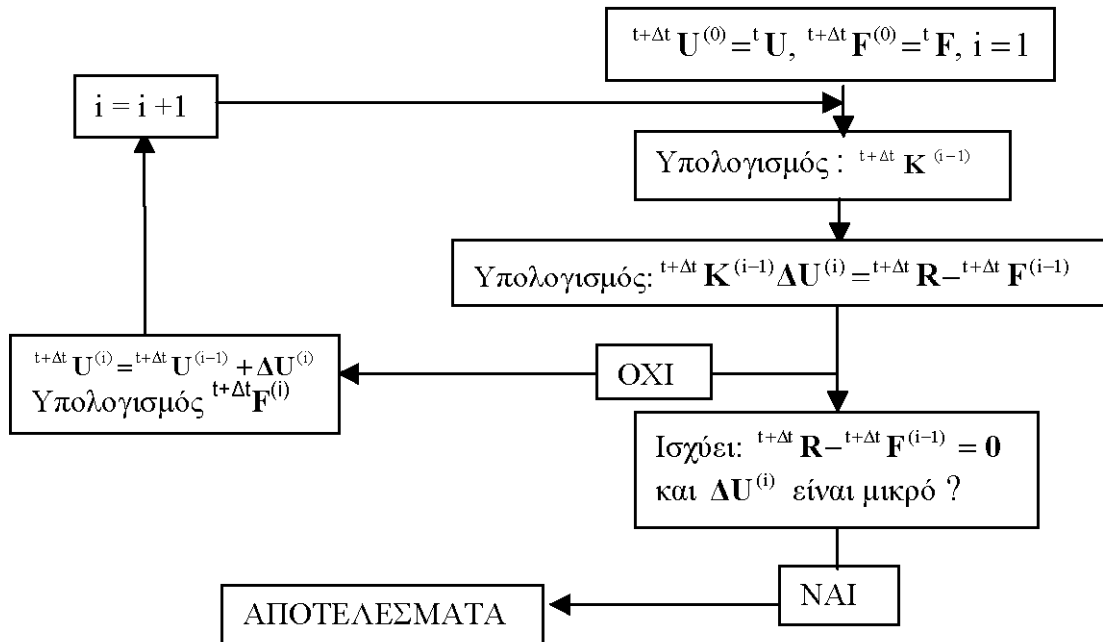
$\Delta \mathbf{U}^{(i)T} (\mathbf{R}^{(m+1)} - \mathbf{F}^{(i)}) \leq \varepsilon_E \Delta \mathbf{U}^{(1)T} (\mathbf{R}^{(m+1)} - \mathbf{F}^{(m)})$	5.59
--	------

όπου το δεξιό μέλος της ανισότητας αντιπροσωπεύει το έργο που καταναλώνεται από τη δύναμη εκτός ισορροπίας κατά τη μεταβολή της μετατόπισης στο κάθε βήμα και το αριστερό μέλος είναι η αρχική τιμή του ίδιου έργου. Τέλος  $\epsilon_E$  είναι η προκαθορισμένη ανοχή της εσωτερικής ενέργειας.

Καθένα από τα παραπάνω κριτήρια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση της προσέγγισης της λύσης του προβλήματος εύρεσης σχήματος. Πρέπει όμως να γίνει προσεκτική επιλογή της ανοχής. Μια μεγάλη ανοχή οδηγεί σε ανακριβή αποτελέσματα, ενώ μια μικρή ανοχή μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολικούς και άσκοπους υπολογισμούς.

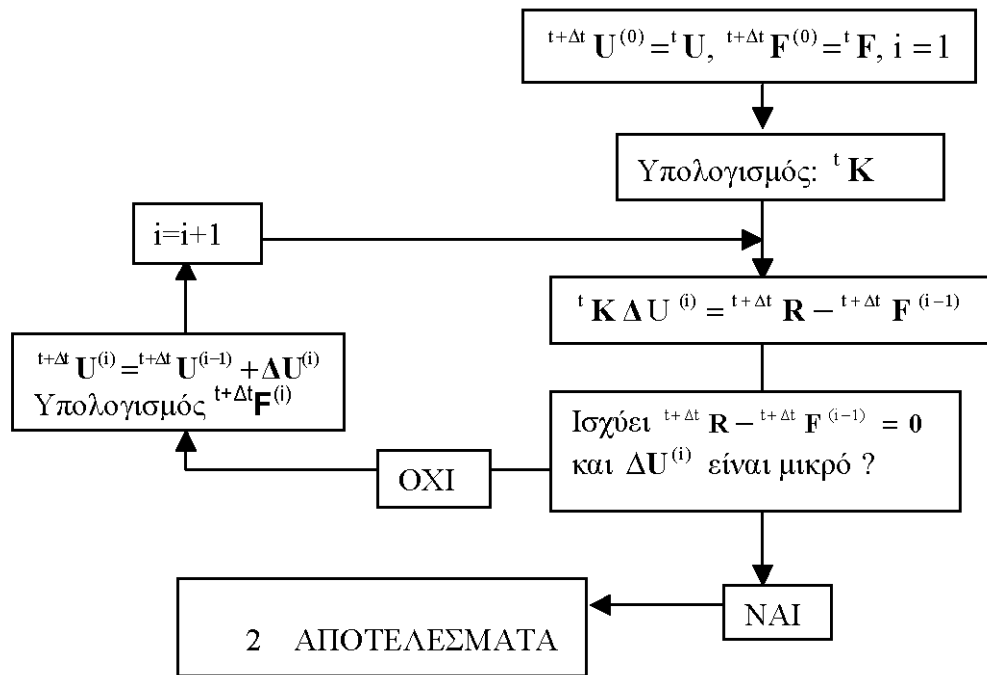
#### 5.3.11.4 Σχηματική παρουσίαση αλγορίθμων των επαναληπτικών μεθόδων

- **Απλή επαναληπτική μέθοδος Newton – Raphson**

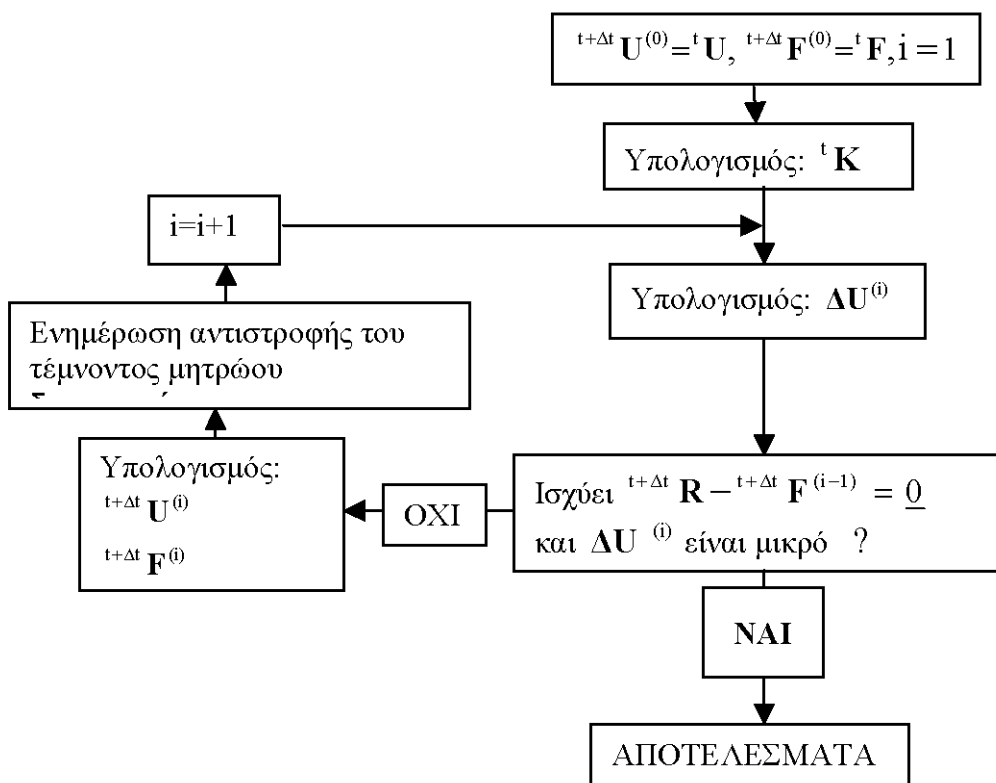




- Τροποποιημένη μέθοδος Newton –Raphson



- Υβριδική επαναληπτική μέθοδος



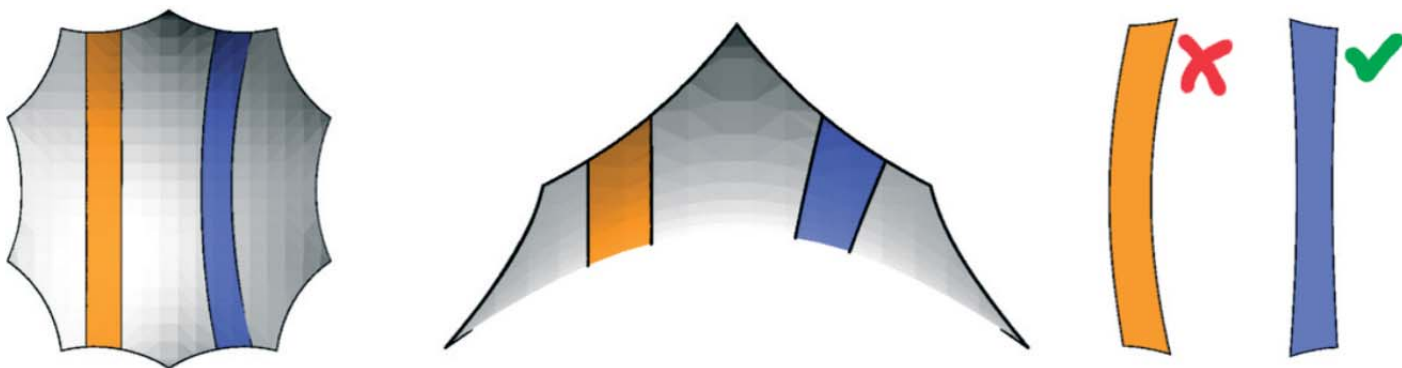
## 5.4 Κατασκευή Σχηματομόρφωσης (Patterning) –Ραφές

### 5.4.1 Εισαγωγή

Τα επικαλυμμένα υφάσματα που χρησιμοποιούνται για έργα εφελκόμενων κατασκευών με μεμβράνη δεν είναι σε θέση να αντέχουν σε παρατεταμένη φόρτιση διάτμησης. Κατά συνέπεια, η διάταξη του υφάσματος πρέπει να διατάσσεται έτσι ώστε η κύρια των τάσεων της μεμβράνης να συμπίπτει περίπου με την κατεύθυνση της ύφανσης του υφάσματος. Επιπλέον, η κύρια απαίτηση για την σχηματοποίηση του πάνελ υφάσματος είναι ότι το κέντρο του πάνελ και οι γραμμές των ραφών πρέπει να ακολουθούν τις γεωδαιτικές διαδρομές πάνω στην διπλής καμπύλης επιφάνεια της μεμβράνης. Όταν θα τοποθετηθεί στο επίπεδο αυτό συνεπάγεται ότι η κεντρική γραμμή του πάνελ θα είναι μια ευθεία γραμμή, η γραμμή του στημονιού, αλλά τα άκρα της θα είναι κυρτά (προς τα μέσα για αντικλαστικές επιφάνειες) και έτσι τα νήματα κατά μήκος των ραφών θα επικαλύπτονται σε μία γωνία. Αλλά για να ολοκληρωθεί σε μια χωρική επιφάνεια, τα αρχικά επίπεδα πάνελ πρέπει να υποστούν διάτμηση, έτσι ακόμη και αν η διατμητική δυσκαμψία είναι πολύ χαμηλή το γεγονός ότι η ύφανση είναι <<κλειδωμένη>> στην ραφή της συγκόλλησης μπορεί να εμφανιστούν ελαφρές ρυτίδες. Η προένταση πρέπει να είναι επαρκής για να αποφευχθεί αυτό το αποτέλεσμα (το πλάτος του πάνελ μειώνεται σε περιοχές με υψηλή καμπυλότητα).

Η απομείωση (compensation) για την επίτευξη του τεντώματος συνήθως είναι δεν σταθερή κατά μήκος ενός πάνελ, αλλά θα διαφέρει ανάλογα με τις αναλογίες και τα επίπεδα προέντασης στο στημόνι και στο υφάδι. Έτσι διαβαθμίζονται (γραμμικά) κατά μήκος του πάνελ. Ωστόσο, τα άκρα του πάνελ συχνά οριοθετούνται από περισσότερο άκαμπτα στοιχεία, όπως ένα καλώδιο ή το σύνορο να είναι δακτύλιος σύσφιξης (κορυφή κώνων). Στην περίπτωση αυτή, η απομείωση (compensation) πρέπει να μειωθεί όταν τα όρια είναι καλώδια και να αφαιρεθεί πλήρως στην περίπτωση άκαμπτου όριο, έτσι ώστε τα μήκη τους να ταιριάζουν με τα άκαμπτα στοιχεία της κατασκευής. Αυτή η άρση της απομείωσης διαμορφώνεται συνήθως γραμμικά μέσα σε μικρό μήκος, έτσι ώστε μετά 1μ στο πάνελ να εφαρμόζεται η πλήρης απομείωση. Μια σημείωση σχετικά με την ορολογία, είναι σκόπιμη: η ιδέα μιας γραμμικής διαβάθμισης της απομείωσης στην επιφάνεια ενός ολόκληρου πάνελ με επάλληλες τοπικές άρσεις της απομείωσης στα άκρα του μπορεί να θεωρηθούν μόνο ως διαφορετικές και διαβαθμισμένες απομειώσεις μέχρι και σε τρεις περιοχές του πάνελ - τοπικά σε κάθε άκρο και στο κύριο σώμα του πάνελ του υφάσματος.

Η κατασκευή της σχηματομόρφωσης (patterning) πρέπει να λογίζεται σαφώς εντός των αριθμητικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται τόσο για τη εύρεση της μορφής όσο και την ανάλυση των προεντεταμένων μεμβρανών. Οι διπλά καμπύλες επιφάνειες κατασκευάζονται από επίπεδα πάνελ χωρίς ένταση με συγκολλημένες ραφές. Για λόγους οικονομίας υλικού και ακρίβειας, για να αποφευχθεί το ζάρωμα στην μορφή της επιφάνειας, οι κεντρικές γραμμές των πάνελ και οι ραφές θα πρέπει να ακολουθήσουν τις γεωδαιτικές διαδρομές πάνω στην επιφάνεια. Αυτές οι γεωδαιτικές διαδρομές είναι η συντομότερη απόσταση μεταξύ δύο σημείων σε μια επιφάνεια - ή εναλλακτικά οι τροχιές που θα μπορούσε να ακολουθήσει μια επίπεδη ταινία του υλικού χωρίς διάτμηση και φαίνεται στο Σχ. 5.35.



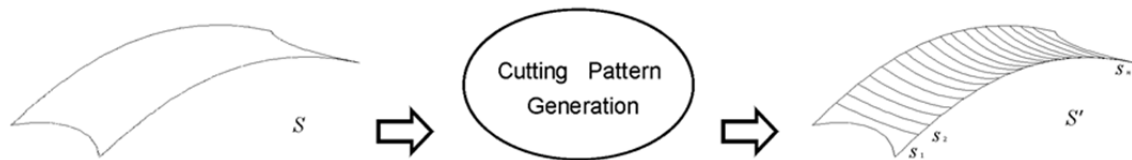
Σχ. 5.35 Σύγκριση της μη-γεωδαιτικής και γεωδαιτικής δημιουργίας πάνελ υφάσματος

Οι κατευθύνσεις της ύφανσης του υφάσματος, με στημόνι κατά μήκος του πάνελ και υφάδι κάθετα, υπαγορεύονται από την σχηματοποίηση και από την προένταση που προσδιορίζονται για αυτές τις συγκεκριμένες κατευθύνσεις ύφανσης που διέπουν την επιφάνεια σχήματος. Έτσι, θα πρέπει να ληφθούν οι κατευθύνσεις της ύφανσης υπόψη που προορίζονται για την σχηματοποίηση κατά την εύρεση της μορφής.

Το ίδιο ισχύει προφανώς για την μοντελοποίηση των σχέσεων τάσης / παραμόρφωσης της ύφανσης κατά τη διάρκεια της ανάλυσης του φορτίου.

#### 5.4.2 Το πρόβλημα του σχεδίου κοπής

Γενικά, το πρόβλημα εύρεσης της μορφής της κοπής των πάνελ μπορεί να οριστεί έτσι. Λαμβάνοντας υπόψη μια επιφάνεια  $S$ , καθορίζουμε ένα σύνολο από  $n$  επίπεδες υπο-επιφάνειες  $\{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n\}$  έτσι ώστε η παραμόρφωση μεταξύ  $S$  και  $S'$  ελαχιστοποιείται, όπου  $S'$  είναι μια επιφάνεια του τύπου  $S$  που δημιουργήθηκε από ανασύνθεση των υπο-επιφανειών. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 5.36.



Σχ. 5.36 Διαδικασία δημιουργίας σχεδίου κοπής

Στην οριακή περίπτωση όπου  $S$  είναι δύο διαστάσεων αναπτύξιμη, η στρέβλωση μπορεί να μειωθεί στο μηδέν. Γενικά, όμως, οι επιφάνειες οι οποίες χρησιμοποιούνται στην πραγματικότητα για εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης πρέπει να διαθέτουν ισχυρή διπλή καμπυλότητα. Ο κύριος στόχος γίνεται, επομένως, να αποφασισθεί πού και πώς θα εισαχθεί η ελάχιστη απαραίτητη παραμόρφωση. Επιπλέον, η ειδική φύση κάποιας επιμέρους περιοχής της εφαρμογής μπορεί να επιβάλει πρόσθετους περιορισμούς. Ο έλεγχος της στρέβλωσης επιτυγχάνεται μέσω του προσανατολισμού και της απόστασης των γραμμών ραφής του υφάσματος. Σαφώς σε περιοχές ιδιαίτερα υψηλής καμπυλότητας μπορεί να είναι απαραίτητο να μειωθεί το πλάτος υφάσματος.

Ένας αριθμός προβλημάτων σχετίζονται με την παραγωγή των πρότυπων κοπής. Αυτά είναι:

- Η γεωμετρία της επιφάνειας δεν ορίζεται χωρίς προένταση. Η κατάσταση μη έντασης δεν ορίζει γεωμετρικό σχήμα.
- Οι επιφάνειες δεν μπορούν να περιγραφούν από ορισμένες μαθηματικές εκφράσεις. Θα πρέπει να περιγράφονται από διακριτά σημεία της επιφάνειας τα οποία πρέπει να αντιστοιχούν στην κατάσταση ισορροπίας δύναμης στη δομή.
- Η επιφάνεια της μεμβράνης είναι προεντεταμένη και διπλά καμπύλη ώστε να αντισταθεί στις εξωτερικές φορτίσεις. Επομένως, δεν είναι αναπτύξιμη στο επίπεδο χωρίς παραμόρφωση.
- Οι ρυτίδες στην προεντεταμένη επιφάνεια πρέπει να αποφεύγονται.
- Η ακρίβεια των πάνελ πρέπει να είναι πολύ υψηλή στην περίπτωση πιο άκαμπτων υλικών, όπως στα υφάσματα υαλονήματος.
- Οι επίπεδες λωρίδες πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο ευθείες προκειμένου να βελτιστοποιηθεί το σχέδιο και από τις δύο απόψεις: σπατάλης και απόδοσης του υλικού του υφάσματος.
- Οι ελαστικές ιδιότητες των υλικών της κλωστοϋφαντουργίας είναι εξαιρετικά μη-γραμμικές. Ως εκ τούτου, οι εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης από ύφασμα δεν μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας ένα ομοιογενές διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων.
- Οι γραμμές των ραφών και ενίσχυσης των συνόρων θα περιπλέξει επιπλέον την ελαστική απόκριση των δομών.
- Προκειμένου να καθοριστεί η επιθυμητή επιφάνεια προέντασης τα σχέδια πρέπει να απομειωθούν στην επιμήκυνση. Η απόφαση για το πόσο μικρότερο πρέπει να κοπεί το πάνελ από το υπολογισμένο στην φάση της προέντασης είναι εξαιρετικά περίπλοκη διαδικασία.

- Ο τρόπος του ραψίματος των επίπεδων λωρίδων καθώς και οι οριακές συνθήκες επηρεάζουν επίσης τη διαδικασία απομείωσης.

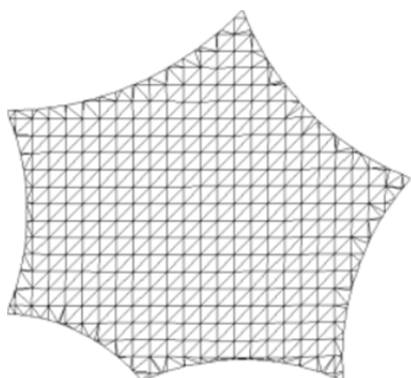
#### 5.4.3 Περιορισμοί για την δημιουργία σχεδίου κοπής των εφελκυσμένων κατασκευών μεμβράνης

Τα υφάσματα πρέπει να κόβονται από ύφασμα σε κυλίνδρους (ρολά) από σχετικά στενό πλάτος. Για οικονομικούς λόγους, είναι επιθυμητό ότι κάθε πάνελ υφάσματος θα πρέπει να μεγιστοποιεί τη χρήση του διαθέσιμου πλάτους. Η χρήση των γεωδαιτικών γραμμών ραφής είναι επομένως ιδιαίτερα κατάλληλη για όλες σχεδόν τις περιπτώσεις. Μερικές φορές είναι οικονομικά συμφέρουσα για τα υφάσματα να είναι σχεδιασμένα με μια ευθεία πλευρά. Τα μήκη των ραφών των παρακείμενων πάνελ πρέπει να είναι τα ίδια, και η παραμόρφωση του υφάσματος σε σύνορα της δομής πρέπει να αποφεύγεται.

Από άποψη αισθητικής είναι επιθυμητό ότι θα ληφθούν υπόψη η τοποθέτηση των γραμμών ραφής. Δεδομένου ότι οι άλλοι περιορισμοί που αναφέρονται παραπάνω έχουν ήδη χρησιμεύσει για να δημιουργηθεί ένας οπτικά αποδεκτός προσανατολισμός της ραφής, στην πράξη η απαίτηση αυτή είναι σε μεγάλο βαθμό περιττή. Ωστόσο, τα παρακείμενα υφάσματα πρέπει να είναι διαμορφωμένα έτσι ώστε τα πλάτη των να ποικίλουν σταδιακά από περιοχή σε περιοχή. Λόγω του επιπλέον πάχους των ραφών, η κατασκευή διευκολύνεται εάν αποφεύγονται να συναντιούνται τέσσερις γραμμές κοπής υφάσματος σε μια γωνία. Εάν απαιτείται τέτοια διάταξη ραφής θα πρέπει να επιτευχθεί μέσω της χρήσης των επί τόπου κατασκευών ραφών. Είναι γενικά καλύτερο αν οι ραφές παραμένουν μακριά από όριο γωνιών.

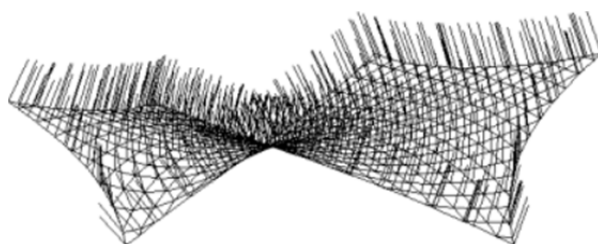
#### 5.4.4 Προσομοίωση διακριτών χωρικών επιφανειών για σχηματομόρφωση

Προκειμένου να ξεπεραστούν όλες οι δυσκολίες που αναφέρονται παραπάνω, η γεωμετρική μορφή της δομής της μεμβράνης θα πρέπει να διαμορφώνεται με κατάλληλο τρόπο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με ένα δίκτυο από κόμβους, συνδέσμους, τρίγωνα και πολύγωνα επιφάνειας. Μέσα από τη σωστή διαχείριση των εν λόγω αντικειμένων του δικτύου ισχυρά εργαλεία μπορούν να δημιουργηθούν για την διαδικασία της επιπέδωσης των διπλά καμπύλων επιφανειών.



Σχ. 5.37 Διακριτά επιφανειακό μοντέλο που δημιουργείται από τρίγωνα.

Με βάση τον κανόνα του Euler οι επιφάνειες των πολύγωνων παρέχουν τις απαραίτητες πληροφορίες για τον μοναδικό καθορισμό των αναγκαίων γεωμετρικών ιδιοτήτων της επιφάνειας, συμπεριλαμβανομένων των κάθετων διανυσμάτων.



Σχ. 5.38: Κάθετα διανύσματα, αναγκαία προϋπόθεση για την περιγραφή της καμπυλότητας της επιφάνειας.

Αντί να γίνει η εύρεση μορφής της επιφάνειας και ο σχεδιασμός κοπής πάνελ ταυτόχρονα, είναι προτιμότερο να εκτελεστούν διαδοχικά. Το πρόβλημα της κοπής μπορεί στη συνέχεια να λυθεί με τον

σχεδιασμό των γραμμών ραφής σύμφωνα με τη μορφή του πλέγματος που βρέθηκε για την επιφάνεια και στη συνέχεια η κοπή της επιφάνειας σε μεμονωμένες υπο-βρόχους σύμφωνα με αυτές τις γραμμές. Οι υπο-επιφάνειες θα είναι γενικά μη αναπτύξιμες και ως εκ τούτου πρέπει να επιπεδοποιούνται. Τέτοια επιπέδωση μπορεί να εκτελείται με μία ποικιλία τρόπων. Είναι σαφές ότι οι στρατηγικές που αποσκοπούν στην ελαχιστοποίηση της συνολικής στρέβλωσης είναι οι καλύτερες, αν και είναι σημαντικό να είμαστε σε θέση να σταθμίσουμε τη ρύθμιση μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του υφάσματος. Η δημιουργία λωρίδων με μία πλευρά ευθεία μπορεί να επιτευχθεί με επιπλέον περιορισμούς των κόμβων της ευθείας πλευράς ώστε να κείνται κατά μήκος ενός άξονα κατά τη διάρκεια της διαδικασίας επιπέδωσης.

#### 5.4.5 Δημιουργία γεωδαιτικών γραμμών

Οι γεωδαιτικές γραμμές κατά μήκος μιας επιφάνειας ορίζεται μαθηματικά από διαφορικές εξισώσεις όσον αφορά την κατεύθυνσή τους. Σε κάθε σημείο είναι τοπικά σε ευθεία σχέση με το επίπεδο που εφάπτεται στην επιφάνεια. Οι γεωδαιτικές γραμμές δεν δημιουργούν καμπύλη στο εφαπτόμενο επίπεδο. Επιπλέον η συντομότερη διαδρομή μεταξύ δύο σημείων σε μια επιφάνεια θα είναι γεωδαισιακή. Είναι το γεγονός ότι μια γεωδαιτική γραμμή είναι ευθεία και η ανάπτυξη της οδηγεί σε εξαιρετικά κατάλληλες γραμμές για ραφές στην παραγωγή εφελκυσμένων κατασκευών μεμβράνης. Για μια απείρως στενή λωρίδα υφάσματος, το προκύπτον επίπεδο σχέδιο που δημιουργείται από μια γεωδαιτική γραμμή θα έχει ευθείες πλευρές. Καθώς αυξάνει το πλάτος του υφάσματος, θα αυξάνουν αντίστοιχα και οι στρεβλώσεις σχηματισμού, έτσι οι πλευρές θα καμπυλώνονται. Κατά συνέπεια, μία επιφάνεια κατάλληλα διαμορφωμένη με βάση τις γεωδαιτικές γραμμές μπορούν να έχει πάνελ που ελαχιστοποιούν τη χρήση υφάσματος, καθώς και τις γωνίες μεταξύ ύφανσης και των κυρίων επιφανειακών τάσεων της καταπόνησης.

Όπως και με τον θεωρητικό ορισμό, οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την υπολογιστική δημιουργία γεωδαιτικών γραμμών μπορούν γενικά να χωριστούν μεταξύ γραμμικού μήκους και γωνιακής προσέγγισης. Με την πρώτη θεώρηση η θέση των ενδιάμεσων σημείων ρυθμίζονται έτσι ώστε το συνολικό μήκος της γραμμής να ελαχιστοποιείται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διάφορους τρόπους. Οι σύνδεσμοι ραφών με πολύ υψηλή ένταση μπορεί να εισαχθεί στο δίκτυο κατά την εύρεση μορφής και να χρησιμοποιηθεί ώστε να οδηγήσει τις ραφές στο γεωδαιτικό δρόμο. Σαφώς, έτσι ώστε να μην επηρεάζουν την εύρεση της μορφής της επιφάνειας πάρα πολύ, οι σύνδεσμοι αυτών των ραφών υψηλών εντάσεων πρέπει να οδηγηθούν σε τελικό σημείο στήριξης. Εναλλακτικά, οι γραμμές μπορεί να ολισθαίνουν πάνω σε μια σταθερή επιφάνεια χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση ελαχιστοποίησης μήκους.

Μια γεωδαιτική γραμμή σε μια διακριτή επιφάνεια μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα πολύγραμμο (polyline) από την άποψη των σημείων τομής με τις πλευρές των τριγώνων. Η αλληλουχία αυτών των τεμνόμενων πλευρών μπορεί να αναπτυχθεί χωρίς παραμόρφωση. Η τεμνόμενη polyline θα είναι μια ευθεία γραμμή μεταξύ του αρχικού και τελικού σημείου. Μια απλοϊκή προσέγγιση για τη δημιουργία γεωδαιτικών γραμμών πάνω σε τριγωνοποιημένες επιφάνειες βασίζεται σε αυτή την ιδιότητα. Με πολλαπλασιασμό των τομών γραμμών / τριγώνων από όψη σε όψη γεωδαιτικές κατατμήσεις επιφάνειας μπορούν να δημιουργηθούν. Αν και σε ορισμένες περιπτώσεις, το μειονέκτημα με μια τέτοια προσέγγιση είναι ότι τα αριθμητικά σφάλματα συσσωρεύονται σε όλη την επιφάνεια.

Η καθαρότερη προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθεί ένας αλγόριθμος ο οποίος ρυθμίζει τη θέση των κόμβων σύμφωνα με την εξέταση σχετικά με το κάθετο επίπεδο των ίδιων των γωνιών. Σε μια τέτοια προσέγγιση τα επιφανειακά εφαπτόμενα επίπεδα στην περιοχή του κάθε σημείου της γραμμής προσδιορίζονται για να οριστούν πολλαπλά τοπικά συστήματα συντεταγμένων. Περιορίζοντας τους κόμβους της γραμμής να βρίσκονται σε αυτά τα επίπεδα, είναι δυνατόν να εμφανίσουν γραμμικά προβλήματα ρύθμισης της παρατήρησης σχετικά με τις γωνίες και των βαθμών ελευθερίας για κάθε σημείο. Μετά την επίλυση κάθε γραμμικού προβλήματος, οι κόμβοι πρέπει να επανέρθουν πίσω στην επιφάνεια και η διαδικασία να επαναλαμβάνεται μέχρις ότου επιτευχθεί σύγκλιση. Εάν είναι επιθυμητό, η απόσταση μεταξύ των ενδιάμεσων κόμβων μπορεί να τροποποιηθεί με την εκ νέου διακριτοποίηση κατά μήκος της γραμμής που δημιουργείται.

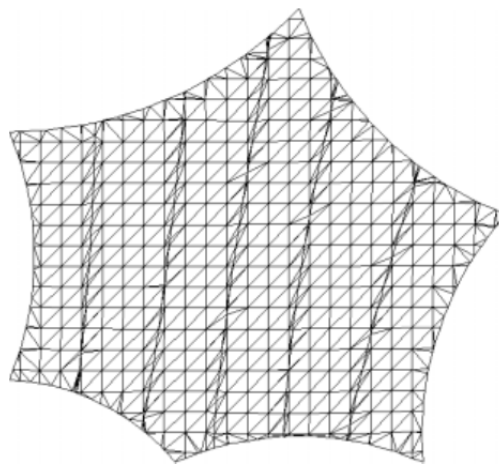


Fig.5.39 Γεωδαιτικές γραμμές που χωρίζουν μία διακριτή επιφάνεια της μεμβράνης σε λωρίδες.

#### 5.4.6 Επιπεδοποίηση χωρικής επιφάνειας

Η επιπεδοποίηση τρισδιάστατων επιφανειών είναι ένας τυπικός μετασχηματισμός προβολής χάρτη. Η διαδικασία επιπέδωσης θα πρέπει να καταλήξει σε μια επίπεδη επιφάνεια με ελάχιστη παραμόρφωση, τόσο σε γενικό όσο και τοπικό επίπεδο.

Χρησιμοποιώντας γεωδαιτικές γραμμές τομής, η διακριτή επιφάνεια μπορεί να κοπεί σε λωρίδες. Οι προκύπτουσες ταινίες είναι διακριτές επιφάνειες οι οποίες μπορεί να μοντελοποιηθούν με κόμβους, συνδέσμους, τρίγωνα και πολύγωνα με τον ίδιο τρόπο όπως και η αρχική δομή. Κάθε λωρίδα πολυγώνου αποτελείται από οριακές γραμμές της επιφάνειας και γεωδαισιακές γραμμές.

Για τη περιγραφή της διακριτής τριγωνικής επιφάνειας, η ταυτόχρονη χαρτογράφηση των επιφανειακών τριγώνων στα επίπεδα τρίγωνα των μεμονωμένων λωρίδων είναι το κλειδί για το πρόβλημα της επιπέδωσης.

Η χαρτογράφηση των τριγώνων μπορεί να περιγραφεί από συσχετισμένους μετασχηματισμούς του ακόλουθου τύπου, όπου  $x'$  είναι η προβολή συσχετισμένη του  $x$ , οι συντεταγμένες των κορυφών τριγώνου:

$\mathbf{x}' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{x}'_0.$	5.49
---	------

Ο μετασχηματισμός καταλήγει σε χαρτογράφηση όπου παράλληλες ευθείες είναι παράλληλες στο μετασχηματισμένη εικόνα και σχέσεις των αποστάσεων μέσα στα τρίγωνα παραμένουν αμετάβλητες. Η παραμόρφωση του κάθε τριγώνου θα διαμορφωθεί από τρεις ανεξάρτητες παραμέτρους. Αυτά μπορεί να είναι οι παραμορφώσεις του μήκους των πλευρών του τριγώνου ή οι παράμετροι παραμόρφωσης του Green.

#### 5.4.7 Επιπέδωση λωρίδας

Για τη μοντελοποίηση της επιπέδωσης των λωρίδων που υπόκεινται σε επιπλέον οριακές συνθήκες, όπως είναι ο καθορισμός των συνοριακών γραμμών να είναι ευθεία ή τα μήκη των ορίων να έχουν σταθερή τιμή, απαιτούνται πρόσθετα εργαλεία. Η διαδικασία επιπέδωσης βασίζεται στα κάθετα διανύσματα σε κάθε σημείο της επιφάνειας. Καθορίζουν επιμέρους επίπεδα προβολής στα οποία τα γειτονικά σημεία είναι ορθογώνια προβαλλόμενα. Λόγω της αλληλοεπικάλυψης των τοπικών συστημάτων συντεταγμένων ένα διασυνδεδεμένο πρόβλημα μετασχηματισμού εμφανίζεται το οποίο μπορεί να λυθεί με μια σταθμισμένη ελαχιστοποίηση των στρεβλώσεων των συντεταγμένων με την ακόλουθη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων του Gauss.

Οι εξισώσεις ως εξής:

$$\mathbf{0} + \mathbf{v} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_a & -t_b \\ t_b & t_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x'_0 \\ y'_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \mathbf{T}\mathbf{x} + \mathbf{x}'_0 - \mathbf{x}'.$$

Ελαχιστοποιώντας το σταθμισμένο άθροισμα των αποτελεσμάτων  $v^2$  σε ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων για τις επίπεδες συντεταγμένες του  $x'$ , και των παραμέτρων μετασχηματισμού του κάθε συστήματος συντεταγμένων. Το σύστημα των εξισώσεων μπορεί εύκολα να επεκταθεί με την επιβολή πρόσθετων περιορισμών των επίπεδων συντεταγμένων που πρέπει να εκπληρώνονται, όπως αναφέρεται παραπάνω. Καθώς η τοπολογική περιγραφή των λωρίδων παραμένει αμετάβλητη, η στρέβλωση του κάθε τριγώνου μπορεί να αξιολογηθεί και τυχόν πρόσθετα σημεία της επιφάνειας μπορεί να αντιστοιχίζονται σωστά στη θέση της επίπεδης προβολή τους με την εφαρμογή του μετασχηματισμού.

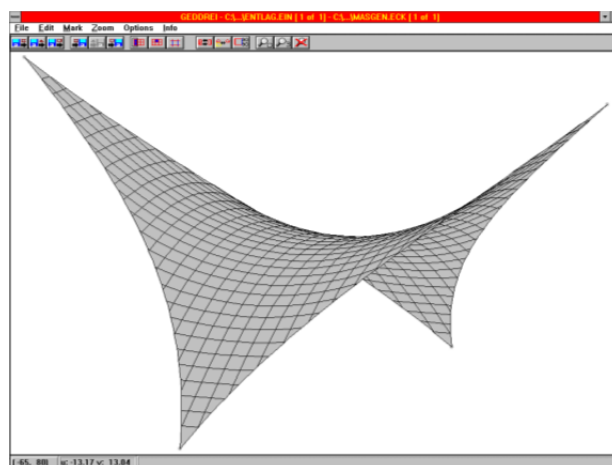
Κατά τη διάρκεια της επιπέδωσης με τον περιορισμό ότι τα μήκη των ραφή των παρακείμενων πάνελ είναι ταυτόσημα μπορεί να εκτελεστεί άμεσα. Συνήθως μια διαδοχική μεθοδολογία χρησιμοποιείται όταν η εκτέλεση πραγματοποιείται με μια χωριστή προσαρμογή 2D. Αυτός ο διαχωρισμός καθικόντων επιτρέπει μια πιο προσεκτική εξέταση της σταδιακής συσσώρευσης των στρεβλώσεων σχηματοποίησης.

#### 5.4.8 Απομείωση λωρίδας

Καθώς οι λωρίδες δεν θα κοπούν υπό προέκταση, μια απομείωση μήκους και πλάτους των λωρίδων είναι απαραίτητη. Η κατεύθυνση του σημονιού και του υφαδιού ορίζεται για την πεπλατυσμένη λωρίδα. Παρόλο που η απομείωση θα μπορούσε να ενσωματωθεί στη διαδικασία επιπέδωσης είναι γενικά καλύτερο να εφαρμοσθεί η απομείωση μετά την επιπέδωση. Αυτό είναι ιδιαίτερα αληθές όταν οι ραφές ενισχύονται από καλώδια ή ιμάντες ή όταν καταλήγουν σε σταθερά όρια. Για τα εν λόγω όρια, η απομείωση πρέπει να είναι κοντά στο μηδέν και στη συνέχεια να αυξάνεται σταδιακά. Η διαδικασία είναι εξαιρετικά περίπλοκη και μπορεί ακόμη να μην μοντελοποιείται ικανοποιητικά εντελώς υπολογιστικά, λόγω της απουσίας των δεδομένων του υλικού. Κατά συνέπεια, ο σχεδιαστής πρέπει να έχει τον πλήρη έλεγχο της σχετικής κατανομής του βαθμού της απομείωσης.

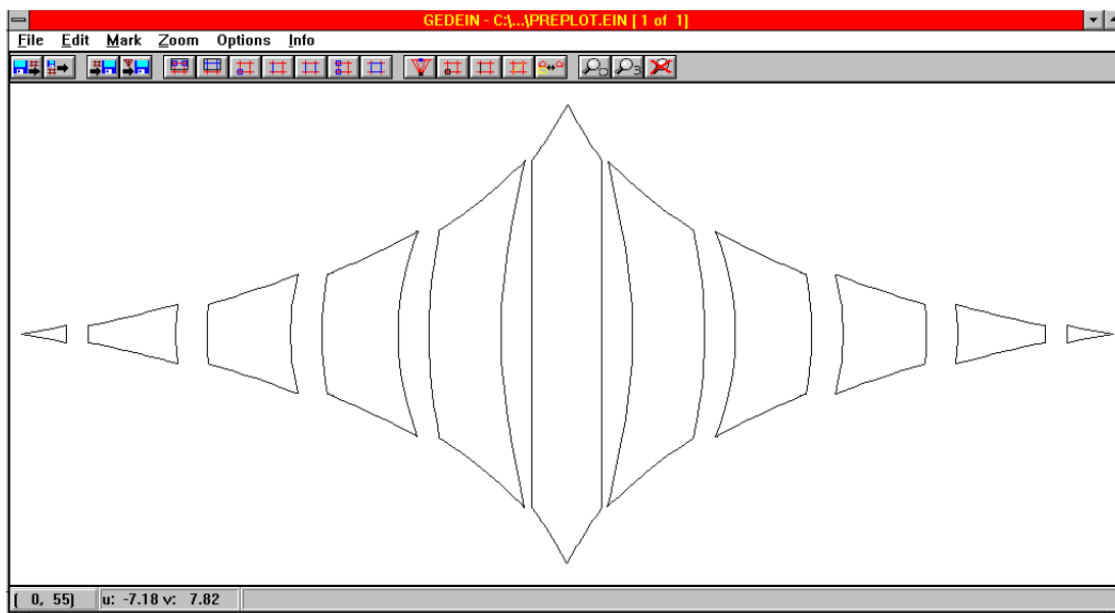
#### 5.4.9 Επίπεδες τομές σε σχέση με τις γεωδαιτικές γραμμές

Μερικά συστήματα σχηματοποίησης εξακολουθούν να χρησιμοποιούν αποκλειστικά και μόνο τις γραμμές που ορίζονται από την τομή της δομικής επιφάνειας με απλά επίπεδα. Η ανεπάρκεια μιας τέτοιας στρατηγικής σε σχέση με μια γεωδαιτική προσέγγιση έχει μεγάλες διαφορές. Για παράδειγμα, στα Σχ. 5.41 και 5.42 τα δύο μοτίβα παρουσιάζονται για την απλή επιφάνεια σέλλας που φαίνεται στο Σχ. 5.40. Στο Σχ. 5.41, κάθετα επίπεδα που τέμνουν την επιφάνεια χρησιμοποιήθηκαν για την σχηματοποίηση. Τα χαρακτηριστικές πάνελ σε σχήμα «μπανάνας» μπορούν να συγκριθούν με εκείνα που προέρχονται από μια γεωδαιτική εφαρμογή κοπής τα οποία παρουσιάζονται στο Σχ. 5.42.



Σχ. 5.40: Απλή επιφάνεια σέλλας.

Υπάρχουν ορισμένες περιπτώσεις όπου ένα επίπεδο τμήμα είναι το πιο κατάλληλο για τον τύπο της γραμμής. Για παράδειγμα, σε συμμετρικές επιφάνειες μία κάθετη τομή μπορεί να είναι η καλύτερη επιλογή για τις ραφές, ή το κέντρο του πάνελ του υφάσματος, που τρέχει κατά μήκος των αξόνων συμμετρίας. Ομοίως, όταν στέγες πρέπει να συνδεθούν σε ευθύγραμμο άκαμπτα όρια, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι καλύτερα να κοπεί η επιφάνεια με επίπεδα τμήματα, και όχι ευθύγραμμες γεωδαιτικές γραμμές.



Σχ. 5.41: Κοπή με κάθετα επίπεδα για σχηματοποίηση της σέλας που φαίνεται στο Σχ. 5.40.

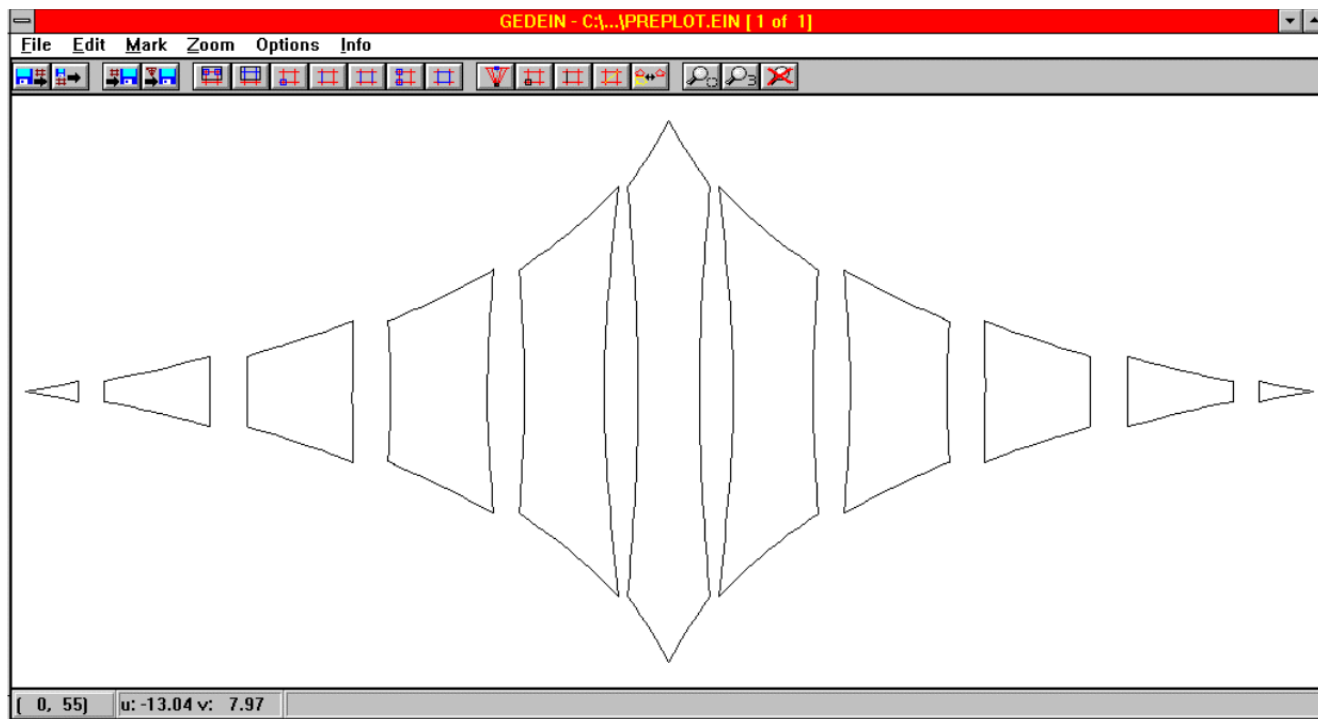


Fig.5.42 Σχηματοποίηση της σέλας που φαίνεται στο Σχ. 5.40 με γεωδαιτικές γραμμές.

#### 5.4.10 Ημι-Γεωδαιτικές γραμμές

Όποια και αν είναι η βάση της φιλοσοφίας, τα περισσότερα υψηλής ποιότητας συστήματα κοπής πατρών εκμεταλλεύονται κατά κάποιο τρόπο τα οφέλη των γεωδαιτικών γραμμών ραφής. Σε ένα μικρό αριθμό περιπτώσεων, ωστόσο, οι γραμμές γεωδαισίας δεν είναι η πιο κατάλληλη επιλογή. Για παράδειγμα τα άκρα μερικών κατασκευών με υποστήριξη αέρα μπορεί να προσεγγίζουν σφαιρικά σχήματα. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να είναι δύσκολο να διατηρηθεί υπό έλεγχο το κέντρο του πάνελ. Μια καθαρή γραμμή γεωδαισίας συνήθως ορίζεται με βάση μόνο τις θέσεις του τελικού σημείου. Για καλύτερο έλεγχο του χρήστη, θα ήταν χρήσιμο, μέσω ειδικών εσωτερικών σημείων της επιφάνειας, να δημιουργηθούν περιορισμοί που να είναι σε θέση να περάσουν επιπλέον οι γραμμές. Εκτός αν τέτοια περιοριστικά σημεία



βρίσκονται στην καθαρή γεωδαιτική διαδρομή, τότε η παραγόμενο γραμμή δεν θα είναι κατ'ευθείαν σχέση με την επιφάνεια. Κατά συνέπεια ο όρος ημι-Γεωδαιτικός χρησιμοποιείται για τη διάκριση αυτών των γραμμών.

Κατά τη δημιουργία μιας ημι-γεωδαιτικής γραμμής μέσω της καθιέρωσης ενός πρόσθετου εσωτερικού περιορισμού, η προκύπτουσα γραμμή θα έχει σταθερή καμπυλότητα στο επίπεδο. Όπως μπορεί να αναμένεται η εισαγωγή μιας σταθερής καμπυλότητας επιτρέπει την εκμετάλλευση ενός αριθμού αποτελεσματικών στρατηγικών. Ειδικότερα, είναι δυνατή η εφαρμογή πλασματικής κατανεμημένης φόρτωσης στο επίπεδο της επιφάνειας για να εκτρέψει την καμπύλη κατά την απαιτούμενη ποσότητα.

#### 5.4.11 Ραφές

Οι ραφές είναι η γραμμική σύνδεση μεταξύ γειτονικών πάνελ της μεμβράνης. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη είναι η απλή συγκολλημένη επικάλυψη. Στην πράξη, οι δύο τύποι του υλικού που χρησιμοποιούνται πολύ συχνά - πολυεστέρας με επικάλυψη PVC και υαλονήματα με επικάλυψη PTFE. Οι μέθοδοι για τις ενώνεις τους έχουν πολύ καλά καθιερωθεί. Η αντοχή και η λειτουργικότητα της ραφής παραμένει ευθύνη του κατασκευαστή, ο οποίος πρέπει επίσης να ελέγξει την αντοχή της ραφής εκ των προτέρων, καθώς και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής.

##### 5.4.11.1 Ραφές με βελόνα

Για τις εφελκυσόμενες κατασκευές μεμβρανών οι ραφές με βελόνα γενικά περιορίζονται στη σύνδεση συγκεκριμένων τμημάτων και χρησιμοποιούνται συχνά όταν δεν υπάρχει άλλη διαθέσιμη λύση. Ραφές με βελόνα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλα φορτία, ιδίως όταν χρησιμοποιείται ένα νήμα PTFE. Το νήμα είναι ανθεκτικό στην υπεριώδη ακτινοβολία και έχει A2 επιβράδυνση πυρκαγιάς. Είναι, ωστόσο, πολύ ακριβό και ένας έμπειρος μηχανικός χρειάζεται να προσαρμόσει την ραπτομηχανή.

Οι ραφές με βελόνα παράγονται από μια βιομηχανική ραπτομηχανή με μια ή δύο βελόνες. Υπάρχουν πολλοί τύποι ραφών, και η χρήση τους είναι ανάλογα με την εφαρμογή. Ραφές με βελόνα χρησιμοποιούνται για:

α) Για μη επικαλυμμένα υφάσματα ή μη συγκολλητά υφάσματα

β) Μη εγγενώς αδιάβροχα, έτσι πρέπει να καλύπτονται ή να εμποτίζονται

γ) Σε γενικές γραμμές είναι κατάλληλες για μικρότερες τάσεις

δ) Χρησιμοποιείται όταν τα φορτία είναι κάθετα προς το επίπεδο της μεμβράνης. Αυτή συχνά είναι η περίπτωση με τα συστήματα με υποστήριξη αέρα.



Σχ. 5.43 Σκίτσο ραφών: Διπλής υποστήριξης

Οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν την αντοχή της ραφής είναι:

α) Η κατανομή των ραφών (αριθμός ραφών ανά εκατοστό)

β) Η αντοχή της κλωστής (όσο ισχυρότερη είναι η κλωστή, τόσο ισχυρότερη είναι η σύνδεση)

γ) Η διάταξη ή το μοτίβο της ραφής (ζικ-ζακ ή ευθεία).

Η καλύτερη ραφή για ένα ειδικό υλικό μπορεί να προσδιοριστεί με δοκιμές. Με την ανάλυση της διαδικασίας αποτυχίας, οι παράμετροι που χρειάζονται τροποποίηση μπορούν να βρεθούν. Τα ISO 4915 και ISO 4916 έχουν πληροφορίες σχετικά με τις ραφές.

#### 5.4.11.2 Συγκολλημένες ραφές

Οι ραφές συγκόλλησης που χρησιμοποιούνται πιο συχνά, λόγω της εγγενούς στεγανότητας τους και της ελεγχόμενης διαδικασίας παραγωγής. Οι συγκολλήσεις που γίνονται συνήθως με την απλή επικάλυψη των άκρων πάνελ. Το πλάτος της επικάλυψης καθορίζει το πλάτος της συγκόλλησης. Η διαδικασία συγκόλλησης λειώνει ταυτόχρονα τις επικαλύψεις των δύο επικαλυπτόμενων κομματιών του υλικού. Αυτή είναι μια σημαντική διαφορά με τις ραφές με βελόνα που έχουν μηχανική σύνδεση μεταξύ των δύο υφασμάτων. Η δύναμη μιας συγκολλημένης ραφής εξαρτάται από την συγκόλληση της επικάλυψης, την ύφανση και το πλάτος της ραφής. Με την αλλαγή του πλάτους της ραφής, η αντοχή των ραφών αλλάζει.

Για επικαλυμμένα με PVC υφάσματα από πολυεστέρα (π.χ. πολικά υλικά) η ακόλουθη μέθοδος είναι διαθέσιμα:

α) Συγκόλλησης υψηλής συχνότητας, μόνο στο εργαστήριο

β) Θερμής επαφής συγκόλληση, μόνο

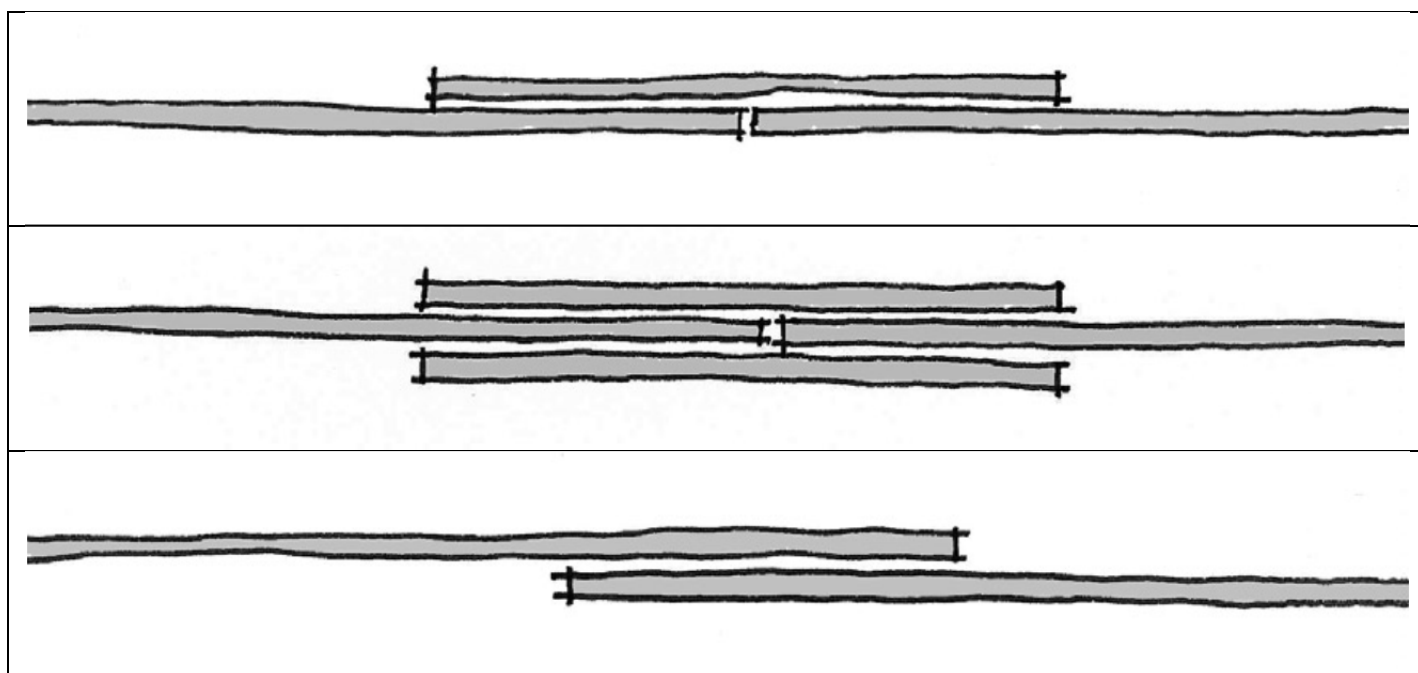
γ) Συγκόλληση θερμού αέρα, στο εργαστήριο και στο εργοτάξιο. Η συγκόλληση με ζεστό αέρα, χρειάζεται έναν έμπειρο τεχνίτη και είναι πιο κατάλληλη για ευθείες ραφές. Δεν συνιστάται για τις μόνιμες δομές. Είναι δυνατόν να εφαρμοστεί στο εργοτάξιο, αλλά με την προϋπόθεση ότι ένα καθαρό και στεγνό περιβάλλον είναι διαθέσιμο.

Για υφάσματα με υαλόνημα και PTFE επικάλυψη:

α) Διαδικασία θερμικής συγκόλλησης στο κατάστημα

β) Θερμαινόμενο ηλεκτρικό σίδερο, χειρός, για τις επισκευές των επιθεμάτων.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι παραγωγής συγκόλλησης ραφών, όπως φαίνεται στο Σχ. 5.44



Σχ. 5.44 Είδη για συγκολλημένες ραφές: πρισινή ραφή, διπλή πρισινή ραφή, ραφή επικάλυψης

Η πιο κοινή είναι η ραφή επικάλυψης και ακολουθείται από την πρισινή ραφή. Σε ραφές η δύναμη πρέπει να μεταφέρεται από το ένα ύφασμα στο άλλο μέσω της επικάλυψης. Σε ορισμένες περιπτώσεις, του πολυεστέρα με επικάλυψη PVC το κορυφαίο βερνίκι πρέπει να λειαίνεται καλά (Non-weldable PVDF) πριν από τη συγκόλληση.

Η δύναμη της συγκόλλησης εξαρτάται ουσιαστικά από την πρόσφυση του επιχρίσματος πάνω στην ύφανση, τις παραμέτρους συγκόλλησης, και το πλάτος της ραφής. Ως εκ τούτου, οι δοκιμές αντοχής ραφών απαιτούνται για κάθε επεξεργασία της παρτίδας του υλικού. Ο πίνακας που ακολουθεί προτείνει συγκολλημένα πλάτη για μια απλή συγκόλληση επικάλυψης για την τυπική γκάμα από πολυεστέρα με PVC

επικάλυψη, με βάση την αξιολόγηση των υφιστάμενων αποτελεσμάτων των δοκιμών και για τις δύο θερμοκρασίες των 23 ° C και 70 ° C. Ωστόσο, το πλάτος της ραφής συγκόλλησης μπορεί να μειωθεί αν διαπιστωθεί από επαρκή αποτελέσματα των δοκιμών ή μπορεί να πρέπει να αυξηθεί εάν τα αποτελέσματα σηματοδοτούν αυτό.

Προτεινόμενα πλάτη ραφών:

Type I: 40 mm;

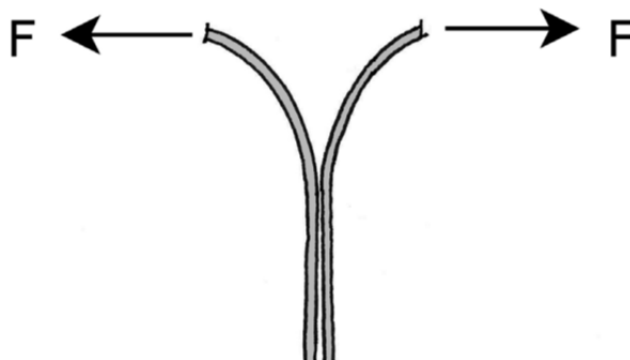
Type II: 60 mm;

Type III: 80 mm;

Type IV: 80 mm;

Type V: 100 mm.

Η αντοχή της ραφής πρέπει να διερευνηθεί μέσω μονοαξονικών δοκιμών. Επί του παρόντος δεν υπάρχουν ειδικοί κανονισμοί για τις δοκιμές ραφών για τις εφελκυσόμενες κατασκευές μεμβράνης. Κωδικοί όπως DIN 53357, NF G37107 παρέχουν ελέγχους που σχετίζονται με τον κλάδο της ένδυσης. Για παράδειγμα, η T-Test διερευνά τη ραφή στο πλαίσιο ενός φορτίου «ξεφλουδίσματος», ενώ οι δομές μεμβρανών είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να μην φορτιστούν με τέτοιο τρόπο. Η δοκιμή δίνει πληροφορίες για την προσκόλληση της επικάλυξης στην ύφανση αλλά δεν έχει καμία σχέση με μια πρακτική περίπτωση φόρτισης.



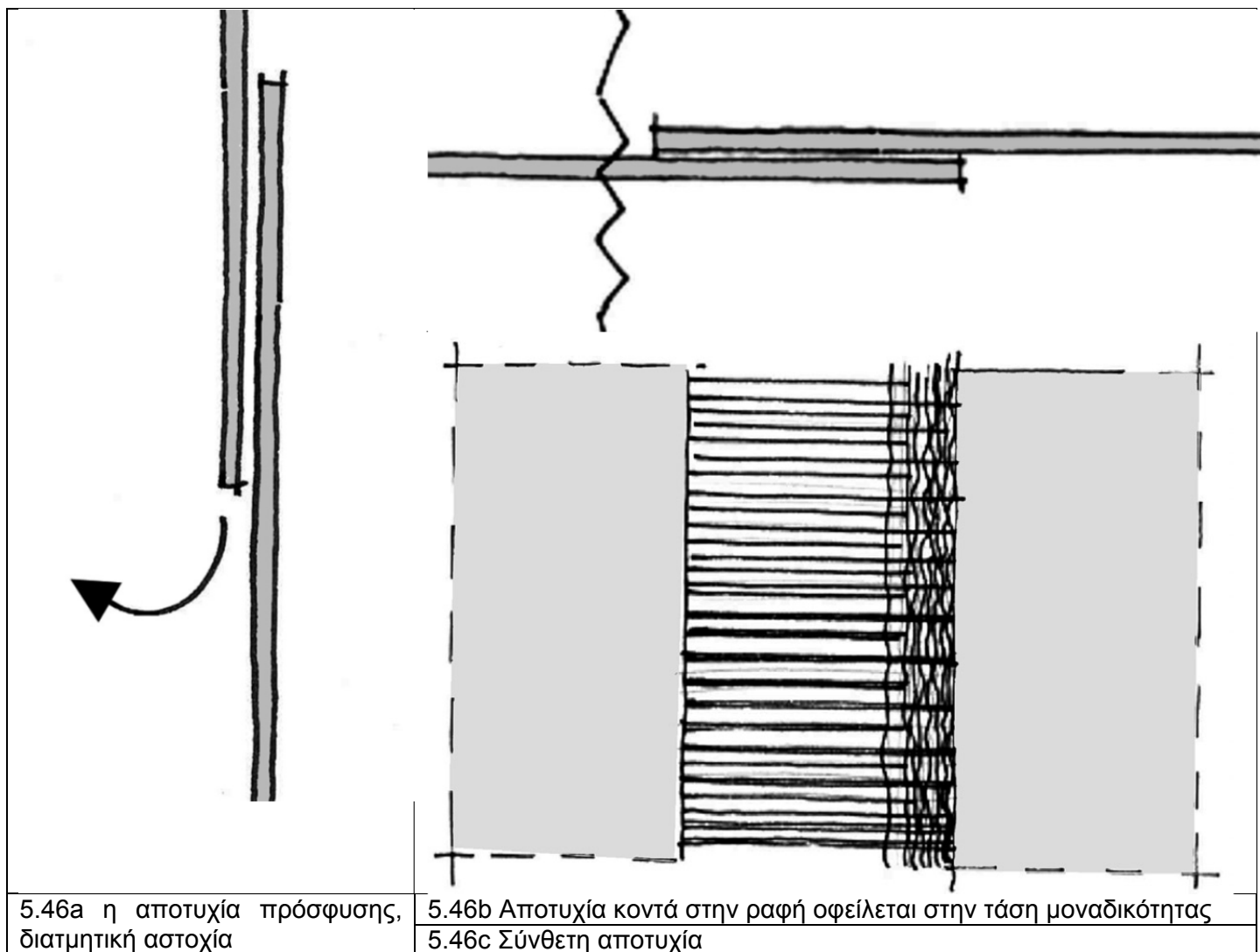
Σχ. 5.45 Μέθοδος δοκιμής ραφών, δοκιμή «ξεφλουδίσματος»

Για τα αποτελέσματα των δοκιμών ραφών όχι μόνο η δύναμη ραφής, αλλά και ο τρόπος αποτυχίας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Ένα τεστ μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν υπάρχει αστοχία του υλικού κοντά στην ραφή. Κοντά στην ραφή οι τάσεις στο ύφασμα διπλασιάζονται - το λεγόμενο <<ιδιομορφία τάσεων>>. Όταν η πρόσφυση στην ύφανση δεν είναι αρκετή για την σύνδεση, η επικάλυψη θα χαλαρώσει από το ύφασμα - η λεγόμενη αποτυχία πρόσφυσης. Όταν η ίδια η ύφανση χάσει τη σύνδεση της λέγεται σύνθετο αποτυχία.

Επειδή η επίστρωση είναι το συνδετικό στοιχείο σε μια ραφή, και μπορεί να επηρεάζεται από τη θερμοκρασία (έως 70 ° C σε επικαλυμμένα με PVC υφάσματα είναι δυνατό σε εξωτερικούς χώρους), οι συνδέσεις πρέπει να δοκιμαστούν υπό αυξημένες θερμοκρασίες. Η συνήθης αστοχία υπό θερμοκρασία είναι η προσκόλληση ή η διατμητική αστοχία.

Οι έλεγχοι μεταποίησης είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ποιότητας των ραφών κατά την παραγωγή. Οι παράμετροι συγκόλλησης πρέπει να καθοριστούν και δοκιμές να πραγματοποιηθούν πριν από την έναρξη της παραγωγής κάθε μέρα. Η αντοχή της ραφής αυξάνει με το πλάτος της μέχρι μια μέγιστη τιμή, η οποία γενικά αναφέρεται ως το «βέλτιστο πλάτος ραφής». Το πλάτος αυτό μπορεί να προσδιοριστεί με μονοαξονική δοκιμή.

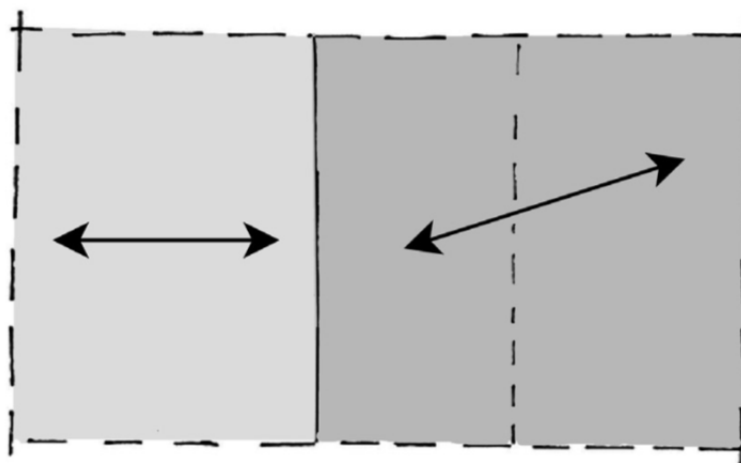
Οι δοκιμές ραφής συνήθως γίνεται για συμμετρικές ραφές. Αυτές βρίσκονται κυρίως στο κέντρο των μεγάλων δομών. «Συμμετρική», σε αυτή την περίπτωση σημαίνει ότι οι κατευθύνσεις της ανισοτροπίας (στημόνι και υφάδι) των συνδεδεμένων υφασμάτων είναι σε μεγάλο βαθμό παράλληλα το ένα με το άλλο.



Σχ. 5.46 Τρόποι αστοχίας

Μπορεί να χρειάζεται ο καθορισμός του τρόπου που προκύπτουν αλλαγές της δύναμης της ραφής μέσα στην περιεχόμενη γωνία μεταξύ των μέσων αξόνων της ανισοτροπίας (κατεύθυνση στημονιού ή υφαδιού) επειδή στις άκρες και σε μικρότερες δομές υπάρχουν μεγαλύτερες γωνίες.

Επί του παρόντος, η γωνία απλώς λαμβάνεται υπόψη ως μια περιορισμένη γωνία ανάλογα με το υλικό. Αυτή η γωνία μπορεί να ποικίλλει, αλλά μια ένδειξη της τιμής της είναι περίπου 10 μοίρες. Υπάρχουν διαφορές μεταξύ συμμετρικών και ασύμμετρων ραφών κατά τη διαδικασία κατασκευής. Στην περίπτωση της ασύμμετρης ραφής, τα σημεία σύμπτωσης πρέπει να τεθούν, καθώς και μια διαφορετική απομείωση πρέπει να εφαρμοστεί. Η υγρασία και η θερμοκρασία έχουν και οι δύο επιπτώσεις στη δύναμη της ραφής.



Σχ. 5.47 "συμμετρική" και "ασύμμετρη" ραφή

#### 5.4.11.3 Συνδυασμός ραφών

Ραφές που χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό και των δύο ραφών (συγκόλλησης και με βελόνα) μπορεί να παρέχει ένα επιπλέον επίπεδο ασφάλειας, για παράδειγμα, για τις χώρες με θερμό κλίμα όπου οι θερμοκρασίες του υφάσματος μπορεί να προσεγγίσει τους 70 ° C. Μετά την ραφή με βελόνα, η ραφή μπορεί να καλυφθεί με ένα επιπλέον στρώμα του υφάσματος, ώστε να είναι υδατοστεγής και την προστασία της κλωστής από την ακτινοβολία UV. Αυτό το στρώμα δεν κάνει τη ραφή ισχυρότερη, αλλά την καθιστά ασφαλέστερη. Η δύναμη μιας συγκολλημένης ραφή είναι πολύ χαμηλότερη σε υψηλότερη θερμοκρασία λόγω της εξασθένησης του επιχρίσματος. Παρέχοντας μια επιπλέον ραφή με βελόνα εγγυάται μια μεγαλύτερη αντοχή. Επίσης, ο συνδυασμός ραφών παρέχει χρήσιμες αντιστάσεις σε δυνάμεις που εφαρμόζονται στις 90 μοίρες προς το άκρο της ραφής η οποία θα μπορούσε διαφορετικά να προκαλέσει μια αστοχία «ξεφλουδίσματος».

Ο συνδυασμός ραφών είναι φυσικά πιο ακριβός από ότι οι απλές συγκολλήσεις με επικάλυψη και γίνονται μόνο για υλικά που μπορούν να ραφτούν - για παράδειγμα πολυεστέρα με επικάλυψη PVC και υφασμάτων, PTFE, αλλά όχι για υαλονήματα με επικάλυψη PTFE.

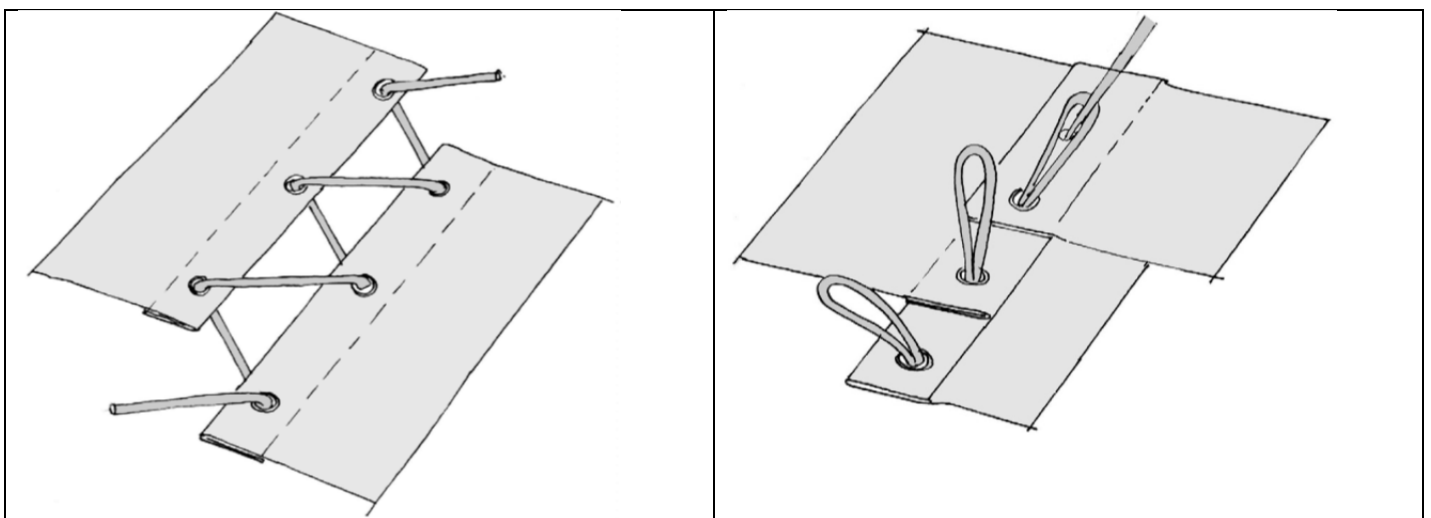
#### 5.4.11.4 Κολλημένες ραφές

Κολλημένες ραφές δεν χρησιμοποιούνται συνήθως στις δομές της μεμβράνης. Κόλλημα με κόλλα χρησιμοποιείται για την κατασκευή επιθέματος επισκευών σε επικαλυμμένες με PVC μεμβράνες, αλλά είναι ακριβή και εντατική εργασία. Τα επικαλυμμένα με ελαστομερές υλικό, όπως Hyralon ή σιλικόνη επιχρισμένα υφάσματα συνδέονται με κόλληση με κόλλα ή ράψιμο.

Μιας διπλής όψης κολλητική ταινία έχει αναπτυχθεί πρόσφατα για τη σύνδεση των πάνελ υαλονημάτων επικαλυμμένα με σιλικόνη. Μόλις εφαρμοστεί, η κόλλα ενεργοποιείται μέσω της θερμότητας (+/- 200 ° C) και της πίεσης. Αυτή η διαδικασία δύο σταδίων επιτρέπει τη δυνατότητα προσαρμογής των πάνελ πριν από την ενεργοποίηση της κόλλας.

#### 5.4.11.5 Ραφές με δέσιμο

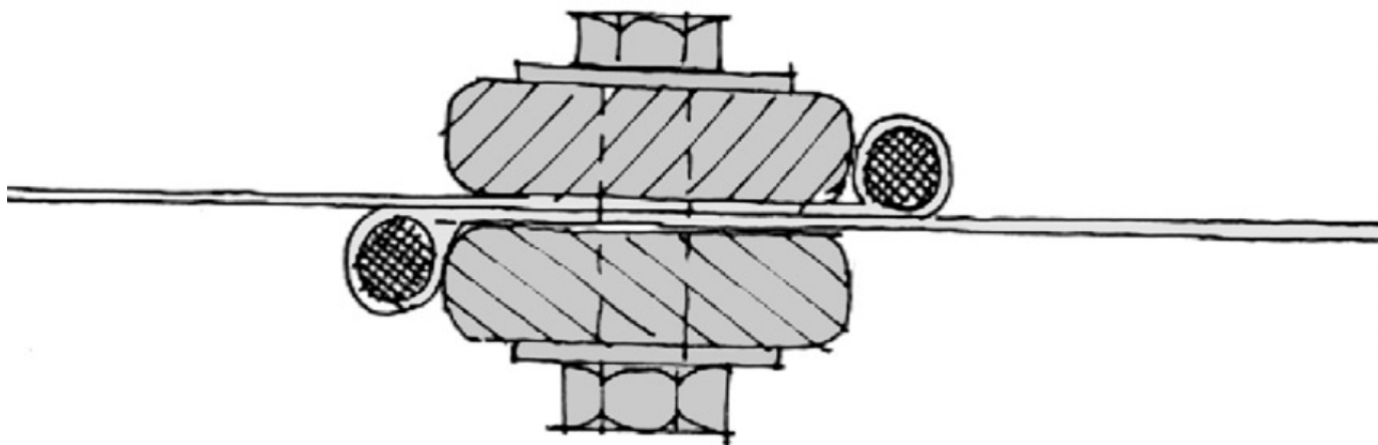
Η σύνδεση με σχοινί χρησιμοποιείται για να συνδεθούν δύο μέρη από ύφασμα με έναν εύκολο και αποσυναρμολογούμενο τρόπο. Το δέσιμο γίνεται με ένα κομμάτι σχοινί που συνδέεται σε ένα μέρος του υφάσματος και μέσω ιδιαίτερου τρόπου ραφής μπορεί να γίνει. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι περισσότερες από τις οποίες προέρχονται από την παραδοσιακή τέχνη περιοδεύοντος τσίρκο (Σχήμα 5.48). Η φέρουσα ικανότητα των εν λόγω συνδέσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ενίσχυση των οπών μέσω των οποίων το δέσιμο περνάει.



Σχ. 5.48 Δύο τύποι ραφής

#### 5.4.11.6 Ραφές σύσφιξης

Μια σφιχτή ραφή γίνεται με μία σειρά σχηματισμένων, επικαλυπτόμενων ελασμάτων που συσφίγγονται μαζί διαμέσου του υφάσματος με βίδωμα. Οι λωρίδες γίνονται σε διακεκριμένα μήκη ανάλογα με την καμπυλότητα κατά μήκος της ραφής. Θα πρέπει επίσης να επιτρέπει το τέντωμα του υφάσματος που το περιορίζει σε μήκος (Σχήμα 5.49).

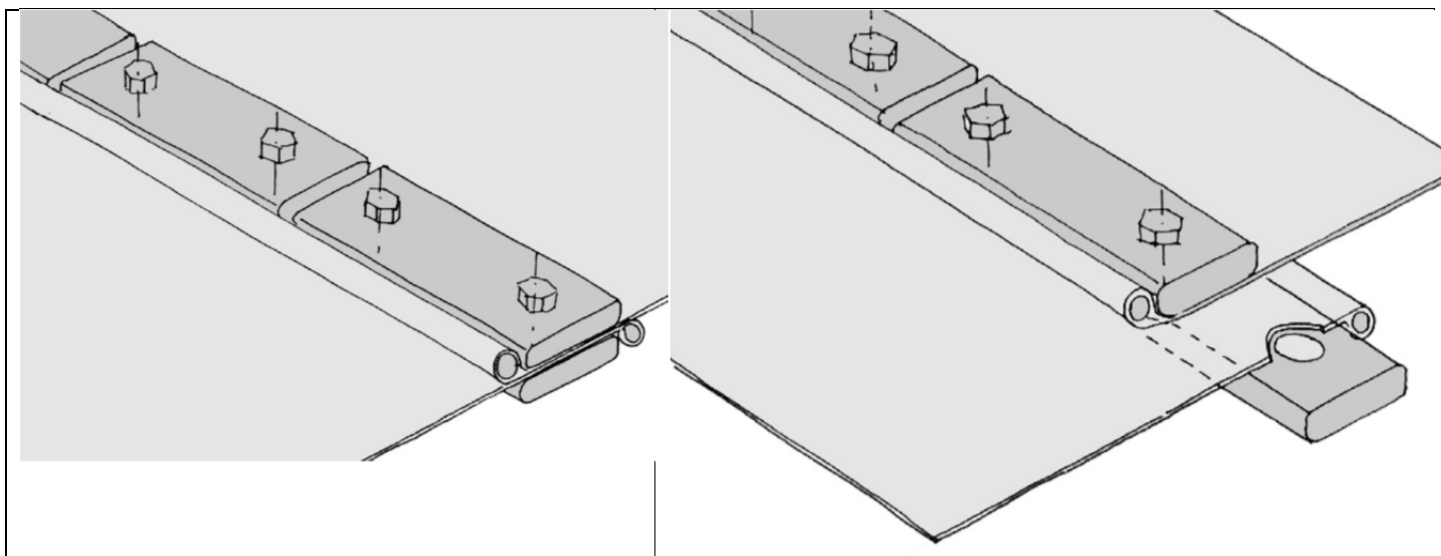


Σχ. 5.49 Σύνδεση με έλασμα σύσφιξης

Αυτός ο τύπος σύνδεσης τοποθετείται στο εργοτάξιο, έχει μια ισχυρή οπτική εμφάνιση και χρησιμοποιείται για να ενώσει μεγάλα προκατασκευασμένα πάνελ μεμβράνης μαζί. Μπορεί να γίνει από μια ποικιλία υλικών ικανά να δεχθούν το φορτίο, π.χ. ξύλο, χάλυβα, αλουμίνιο.

Οι συνδέσεις με πλάκες σύσφιξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υποδιαίρεση πολύ μεγάλων εκτάσεων υφασμάτων για να διευκολύνει το χειρισμό στο εργαστήριο. Ένα ενιαίο στρώμα πλακών σύσφιξης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με παρόμοιο τρόπο για να συσφίγγει το άκρο της μεμβράνης απ' ευθείας επί μιας δοκού στο σύνορο.

Η σύνδεση εξαρτάται από το “keder” που τρέχει κατά μήκος του ορίου των πάνελ του υφάσματος. Η μεταφορά φορτίου μεταξύ της μεμβράνης και της οριακής γραμμής στήριξης λαμβάνει χώρα από το “keder” που φέρει στην άκρη των πλακών σύσφιξης. Το “keder” εμποδίζει το ύφασμα από την ολίσθηση μεταξύ των πλακών σύσφιξης. Η δύναμη σύσφιξης θα πρέπει να είναι τόσο υψηλή ώστε να επιτρέπει την δύναμη της μεμβράνης να μπορεί να μεταδοθεί με την δύναμη άντυγας του “keder” στις άκρες των πλακών σύσφιξης.



Σχ. 5.50 Διαφορετικοί τύποι για την εγκατάσταση των πλακών σύσφιξης. Το αριστερό παράδειγμα χρειάζεται μεγάλες τρύπες για να επιτρέψει την επιμήκυνση του υφάσματος

Η δύναμη σύσφιξης δεν πρέπει να είναι τόσο υψηλή ώστε η δύναμη της μεμβράνης να μεταδίδεται με την τριβή που δημιουργείται μεταξύ των πλακών σύσφιξης και της μεμβράνης. Ο μηχανισμός βασίζεται επίσης στις τρύπες μέσα στο ύφασμα που πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη ώστε να δώσει ελευθερία γύρω από το μπουλόني. Η ελευθερία αυτή θα πρέπει να επιτρέπει τις ανοχές κατασκευής. Η δύναμη σύσφιξης δεν πρέπει να είναι υπερβολικά υψηλό, επειδή το μπουλόني δεν προορίζεται να είναι το στοιχείο που φέρει την δύναμη. (Σύσφιξη που βασίζεται στην τριβή θα ήταν δυνατή με τεντωμένα μπουλόνια ή με την χρήση ελατηρίων λόγω ερπυσμού στο ύφασμα μόνο). Η απόσταση μεταξύ των κοχλιών έχει σχέση με την ακαμψία των πλακών σύσφιξης. Όσο πιο συχνά έχουμε βίδες, τόσο μικρότερη είναι η ακαμψία της πλάκας σύσφιξης που χρειάζεται. Το “keder” πρέπει να συγκρατείται συνεχώς σε όλο το μήκος του. Οι τιμές της θέσεις τους πρέπει να καθορίζονται με σημάδια.

## 5.5 Οι ακμές-άκρα

Υπάρχουν δύο τύποι ακμών ή όρια της μεμβράνης τα εύκαμπτα και τα άκαμπτα, και στις δύο περιπτώσεις, τόσο οι κάθετες όσο και οι εφαπτομενικές δυνάμεις πρέπει να μεταφερθούν από τη μεμβράνη στο στοιχείο του άκρου ή του συστήματος. Στο επόμενο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τα άκαμπτα άκρα καθώς μπορούν να θεωρηθούν ως μέρος των σταθερών στηρίξεων και της κατασκευής υποστήριξης.

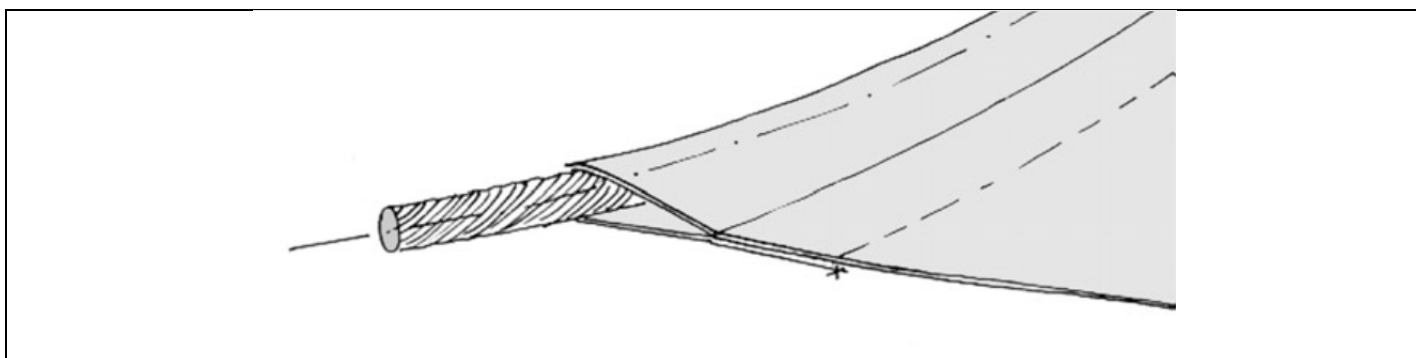
### 5.5.1 Εύκαμπτα άκρα

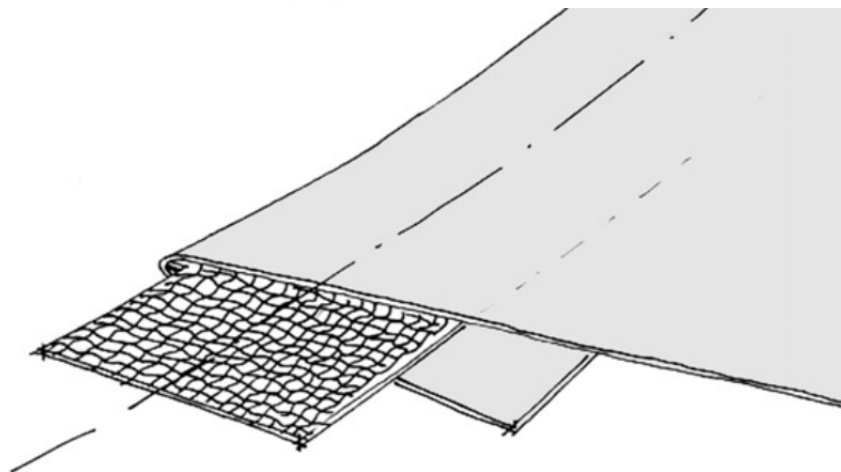
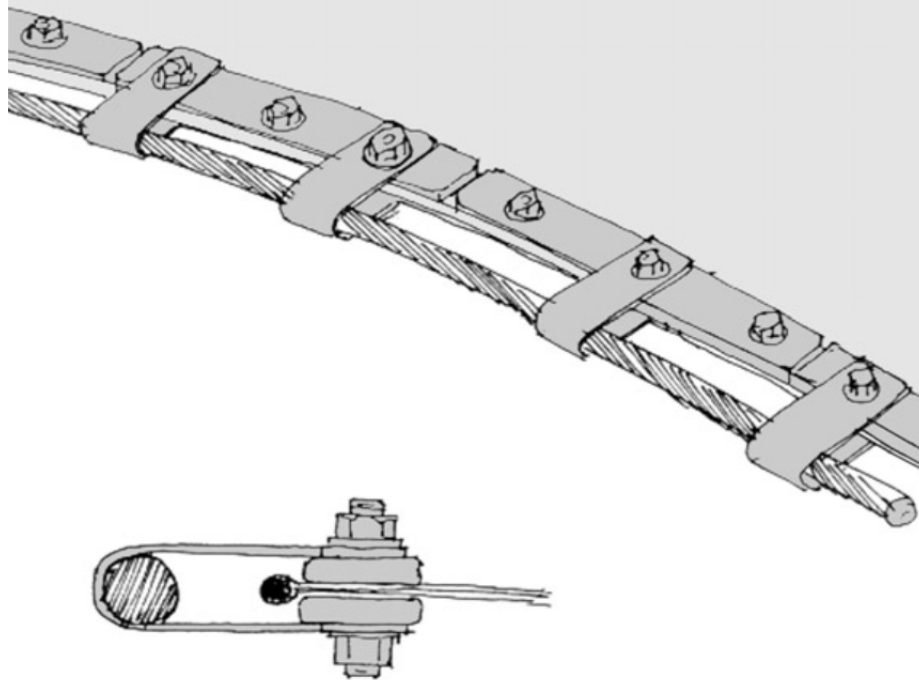
Τα εύκαμπτα καμπύλα άκρα επιτρέπουν την προένταση του υφάσματος ως αποτέλεσμα μια εφελκυστικής δύναμης που αναπτύσσεται στα όρια του στοιχείου. Πολλές παραλλαγές είναι διαθέσιμες:

α) Μια πολύ συνηθισμένη μέθοδος με PVC / πολυεστερικό ύφασμα είναι να τρέξει ένα χαλαρό καλώδιο μέσα σε μια συγκολλημένη θήκη (τσέπη-rocket) συνεχώς κατά μήκος της άκρης της μεμβράνης. Μια τέτοια θήκη μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους (βλέπε σχήμα 5.51). Είναι επίσης δυνατόν να χρησιμοποιηθεί αυτή η μορφή και για πάνελ του PTFE / υαλόνημα. Ωστόσο αυτή η μέθοδος περιορίζεται από το μήκος της ραφής. Όταν οι εφαπτομενικές δυνάμεις γίνουν μεγάλες, η συγκέντρωση της εν λόγω δύναμης στις γωνίες γίνεται κρίσιμη και μπορεί να είναι καλύτερα να αντισταθμιστεί με ένα καλώδιο από το άκρο της μεμβράνης όπως στο (β).

β) Το καλώδιο άκρο μπορεί να τοποθετηθεί έξω από το άκρο της μεμβράνης και να συνδέεται με αυτό κατά διαστήματα από μια ακολουθία πλακών τιράντες και σφιγκτήρες. Η επιλογή αυτή χρησιμοποιείται κυρίως για τα υφάσματα PTFE / υαλόνημα και επίσης για τα PVC / πολυεστέρα όταν το άκρο εκτείνεται πάνω από 20μ.

γ) Οι ιμάντες μπορούν να ράβονται ή να συγκολλούνται κατά μήκος της περιμέτρου. Η επιλογή αυτή ισχύει για τα PVC / πολυεστερικό ύφασμα και χρησιμοποιείται κυρίως για τις αναδιπλούμενες στέγες, ομπρέλες, μικρών ανοιγμάτων κατασκευές και προσωρινές κατασκευές. Ο ιμάντας εκτελεί την λειτουργία ανάληψης εφαπτομενικών δυνάμεων στην άκρη. Οι υφαντοί ιμάντες μπορούν να είναι ραμμένοι ή συγκολλημένοι με το PVC / πολυεστέρα χωρίς βλάβη στο ύφασμα. Ωστόσο, αυτό δεν μπορεί να γίνει στο PTFE / υαλόνημα, το οποίο μπορεί να ενωθεί μόνο με το ίδιο υλικό με συγκόλληση αφού το ράψιμο προκαλεί βλάβη στα υαλονήματα, καθώς και επιτρέπει την υγρασία να διαπεράσει στα νήματα προκαλώντας απώλεια αντοχής.





Σχ. 5.51 εύκαμπτα άκρα: το καλώδιο στην θήκη, το καλώδιο έξω από την θήκη και ζώνη ενίσχυσης του υφάσματος.

Κατ' αρχήν υπάρχουν δύο διαφορετικοί τρόποι σχηματισμού μιας θήκης: Η πρώτη είναι να γυρίσει η άκρη του υφάσματος πίσω στον εαυτό της και αυτό πρέπει να γίνει σε διακριτά μήκη για να επιτρέψει στο ύφασμα να είναι σε θέση να συμμορφώνεται με την καμπυλότητα του καλωδίου. Για να γίνει αυτό απαιτείται να γίνονται σχισμές στο υλικό σε ορθές γωνίες προς τον άξονα του καλωδίου σε κατάλληλα διαστήματα, ανάλογα με την ακτίνα του τόξου του καλωδίου.

Η δεύτερη μέθοδος είναι να υπολογιστεί ένα "μοτίβο" με καλώδιο μέσα σε "μανσέτα" στο κατάλληλο σχήμα έτσι ώστε όταν συσσωρεύεται η προένταση, ένα ομαλό σχήμα να αναπτύσσεται χωρίς να σχηματίζονται ρυτίδες.

Μια σημαντική παράμετρος για την αντοχή της θήκης είναι η γωνία μεταξύ της άνω και της κάτω επιφάνειας της θήκης. Αυτή η τιμή εξαρτάται λογικά από το πλάτος της θήκης σε σχέση με την διάμετρο του καλωδίου. Αυτό πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο για την αποφυγή μεγάλων δυνάμεων αποφλοιώσεως κατά μήκος της γραμμής όπου η θήκη είναι συγκολλημένη με τη μεμβράνη, δηλαδή όπου οι άνω και κάτω επιφάνειες της θήκης αποκλίνουν η μία από την άλλη.





Σχ. 5.52 The Inland Revenue Amenity Building, Nottingham, UK. Οι εικόνες δείχνουν – η πιο ψηλή κατασκευή μεμβράνης PTFE/υαλόνημα συνδέεται με ελάσματα σε ένα εξωτερικό καλώδιο άκρης – η χαμηλότερη κατασκευή μεμβράνης PTFE/υαλόνημα όπου το καλώδιο της άκρης κρύβεται μέσα σε μία συνεχή θήκη. Στην κάτω φωτογραφία η κατασκευή μεμβράνης PTFE/υαλόνημα που συνδέεται με ελάσματα σε πιο κοντινό πλάνο

Οι κινήσεις του υφάσματος κατά μήκος του καλωδίου κατά την επαπτομενική κατεύθυνση πρέπει να προληφθούν, έτσι ώστε να αποφεύγεται η βλάβη λόγω τριβής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ιμάντες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά των επαπτομενικών δυνάμεων της μεμβράνης κατευθείαν στη γωνία.

Ανάλογα με τον τύπο του υλικού της μεμβράνης ζώνες μπορούν να ενωθούν με ραφή με βελόνες (ράψιμο) ή με συγκόλληση. Μπορούν να συνδέονται με το εσωτερικό ή το εξωτερικό της θήκης του καλωδίου. Οι ιμάντες στην πάνω πλευρά της μεμβράνης πρέπει να καλυφθούν έτσι ώστε προστατεύονται

από την υπεριώδη ακτινοβολία και την αποφυγή της εμφάνισης βρύων, μυκήτων που δημιουργείται από την συσσώρευση βρωμιάς.

Οι ιμάντες πρέπει να απομειώνονται για την συμπεριφορά του ερπυσμού τους και απαιτούν ένα αρχικό τέντωμα πριν την εγκατάστασή τους.



Σχ. 5.53 Οι άκρες της προσωρινής κατασκευής με ιμάντες

### 5.6 Πλάκες έδρασης

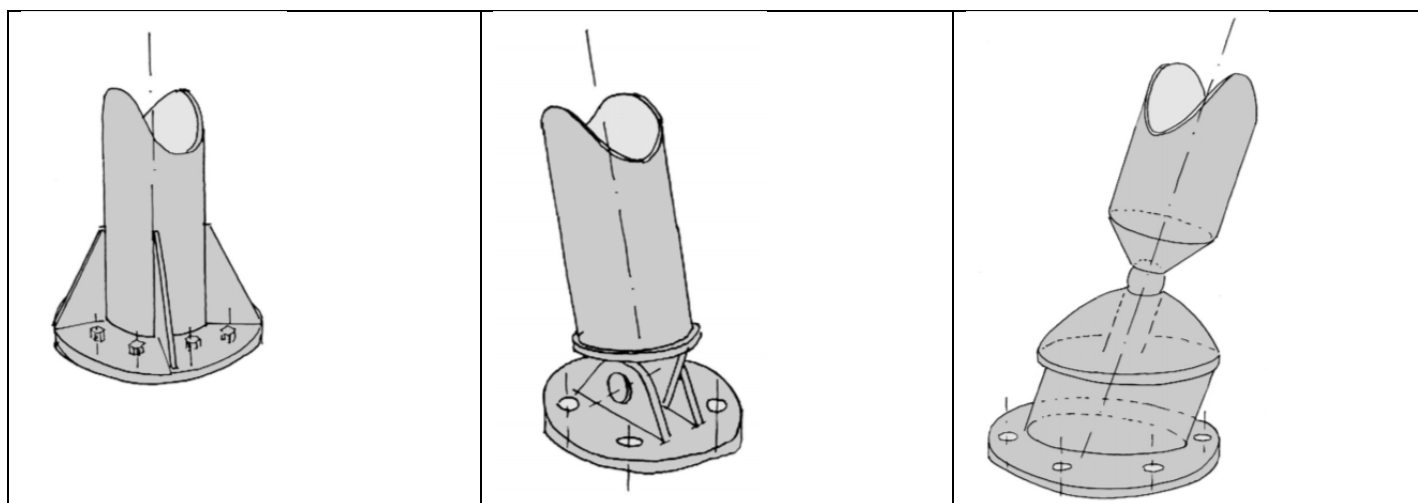
Οι πλάκες των εδράσεων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στις βάσεις ιστών και στις βάσεις συγκράτησης καλωδίων.

Πλάκες βάσης ιστών:

- Πακτωμένες με εμφάνιση ροπών. Σπανίως χρησιμοποιούνται λόγω του ότι οι εμφανιζόμενες ροπές προκαλεί αύξηση των θεμελίων. Η χρήση τους γίνεται μόνο όταν δεν μπορεί να τοποθετηθούν καλώδια αντιστήριξης.

- Αρθρωτές κατά τον ένα άξονα. Είναι η πιο συνήθης μορφή, η οποία όμως απαιτεί λεπτομέρεια στην σχεδίαση της τοποθέτησης μιας και πρέπει ο άξονας της περιστροφής να είναι κάθετος στην δύναμη της προέκτασης.

- Πλήρως αρθρωτές-Σφαιρική άρθρωση. Είναι η ιδανική στήριξη μιας και μπορεί να αποσβήνει όλες τις μετατοπίσεις της φόρτισης αλλά είναι πολύ ακριβή η παραγωγή τους.



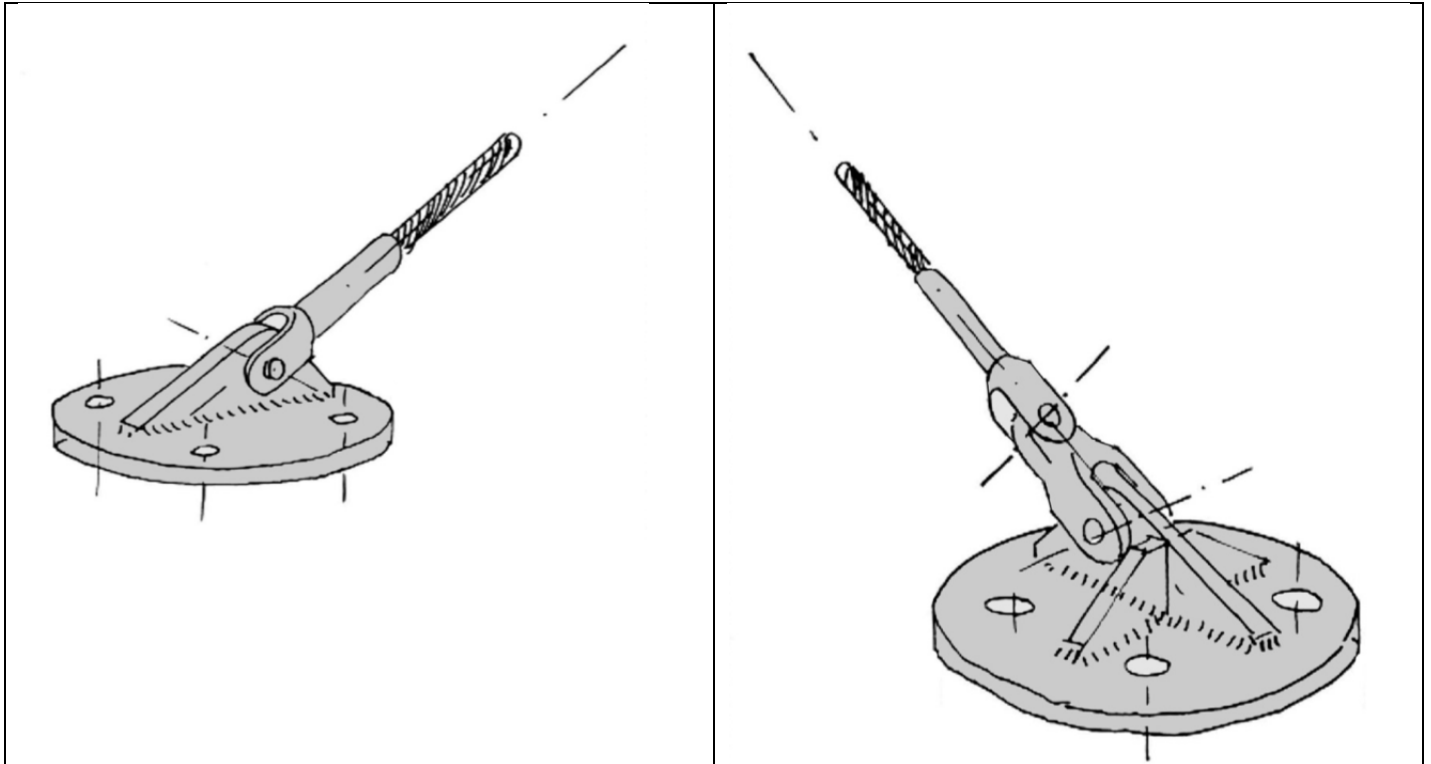
Σχ. 5.54 Τρεις τύποι πλακών βάσης

Πλάκες έδρασης καλωδίων

- Πλήρως πακτωμένες. Η χρήση τους είναι σπάνια και αποφεύγεται. Δεν συνιστάται επίσης να χρησιμοποιηθεί σωλήνα με τερματικό

- Απλά αρθρωτά. Η κυριότερη μορφή όπου έχουμε πλήρη ελευθερία περιστροφής στον κάθετο άξονα της προέντασης.

- Διπλά αρθρωτά. Πλήρης ελευθερία περιστροφής.



Σχ. 5.55 Πλάκες βάσης καλωδίων: μεμονωμένα αρθρώνεται με τη χρήση ενός πιρουνιού και διπλά αρθρώνεται με επιπλέον προστιθέμενο στοιχείο εναλλαγής ανάμεσα στο άκρο του πιρουνιού και την πλάκα βάσης.

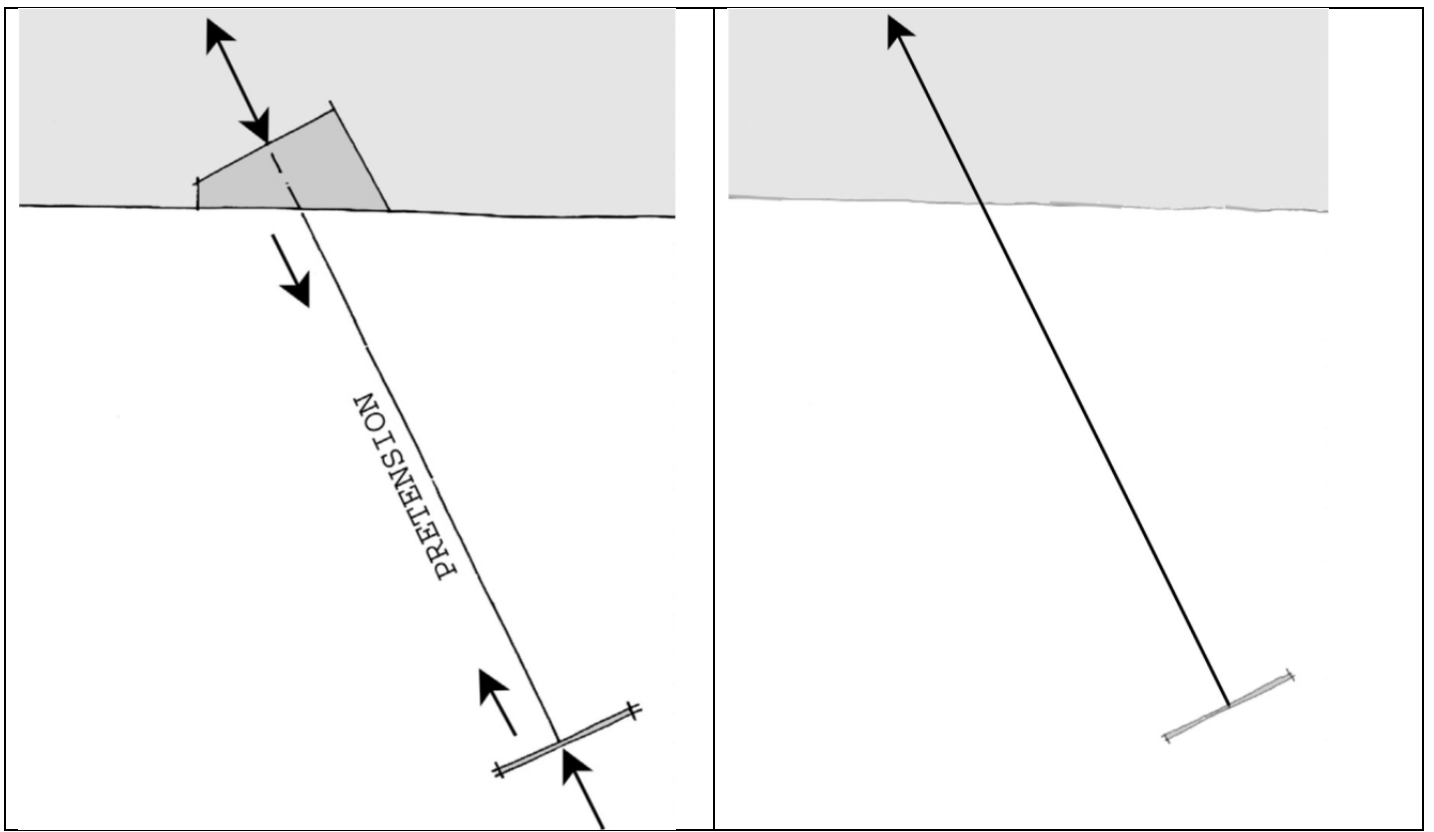
### 5.7 Αγκύρωση

Οι αγκυρώσεις είναι τα θεμέλια για την παραλαβή των δυνάμεων του εφελκυσμού. Οι πρόγονοι των σύγχρονων αγκυρώσεων μπορούν να βρεθούν στη φύση, για παράδειγμα, οι ρίζες των φυτών παρέχουν αντίσταση ανύψωσης ενάντια στον αέρα με την αντίσταση του μεγάλου όγκου του εδάφους όπου είναι διασπαρμένες. Οι άγκυρες θαλάσσης προσδένουν τα πλοία στον βυθό της θάλασσας. Πάσσαλοι που μπήγονται στο έδαφος έχουν χρησιμοποιηθεί για την αγκύρωση σκηνών και τις τέντες τσίρκων.

Τα αγκύρια είναι είτε "ενεργά" (προεντεταμένα) ή "παθητικά" (νεκρό φορτίο) ανάλογα με το αν έχουν υποβληθεί σε μόνιμη προένταση ή όχι.

Τα ενεργά αγκύρια προεντείνονται από μια αρχική τάνυση έναντι μίας χαλύβδινης πλάκας έδρασης. Το επίπεδο της προέντασης είναι ένα ποσοστό του φορτίου σχεδιασμού λειτουργίας. Όταν το προεντεταμένο αγκύριο φορτίζεται εξωτερικά, συμπεριφέρεται πολύ πιο δύσκαμπτα από ότι τα αγκύρια με νεκρό φορτίο.

Τα παθητικά αγκύρια δρουν εναντίον του εδάφους μόνο όταν φορτιστούν. Κινούνται περισσότερο από τα ενεργά αγκύρια, αλλά είναι απλούστερα και έχουν λιγότερα προβλήματα χαλάρωσης και αντοχής. Μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κύριες ομάδες ανάλογα με το αν φτάνουν στην επιφάνεια του εδάφους ή είναι θαμμένα. Η ικανότητα έναντι ανύψωσης παρέχεται από τέσσερις συνεργασίες: πλάκα έδρασης, άξονας, ίδιο-βάρους και της πίεσης του εδάφους. Συνήθως δρουν σε συνδυασμό ανάλογα με τον τύπο και τη θέση των αγκυρίων.



Σχ. 5.56 Αρχή της ενεργής και παθητικής αγκύρωσης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Σ' αυτό το κεφάλαιο αναπτύσσεται η ανάλυση όλων των δύσκαμπτων και θλιπτικών στοιχείων των εφελκυσμένων κατασκευών μεμβράνης.

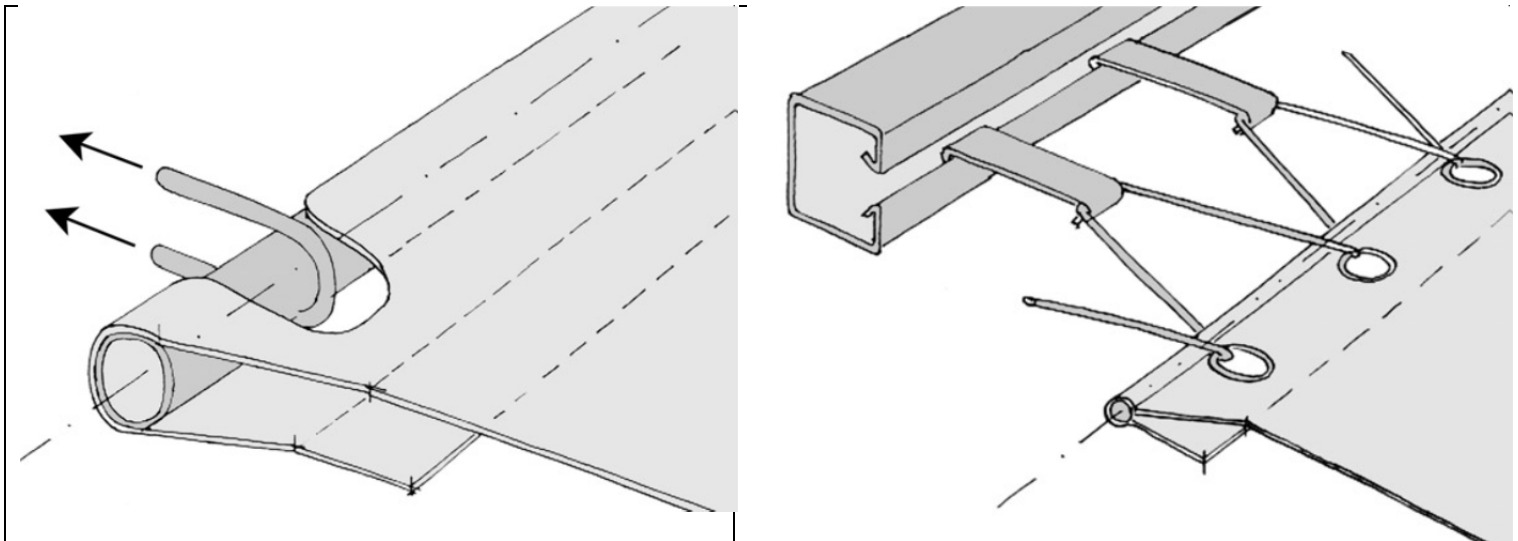
### 6.1 Άκαμπτα άκρα είναι

Τα άκαμπτα άκρα είναι τα άκρα, όπου το ύφασμα συγκρατείται συνεχώς από μία δομή υποστήριξης που έχει πολύ μεγαλύτερη πλευρική ακαμψία σε σύγκριση με εκείνη του υφάσματος. Υπάρχει μια ποικιλία λύσεων και τα ακόλουθα, που φαίνονται στα Σχήματα 6.1 και 6.2 απεικονίζουν τους βασικούς τύπους:

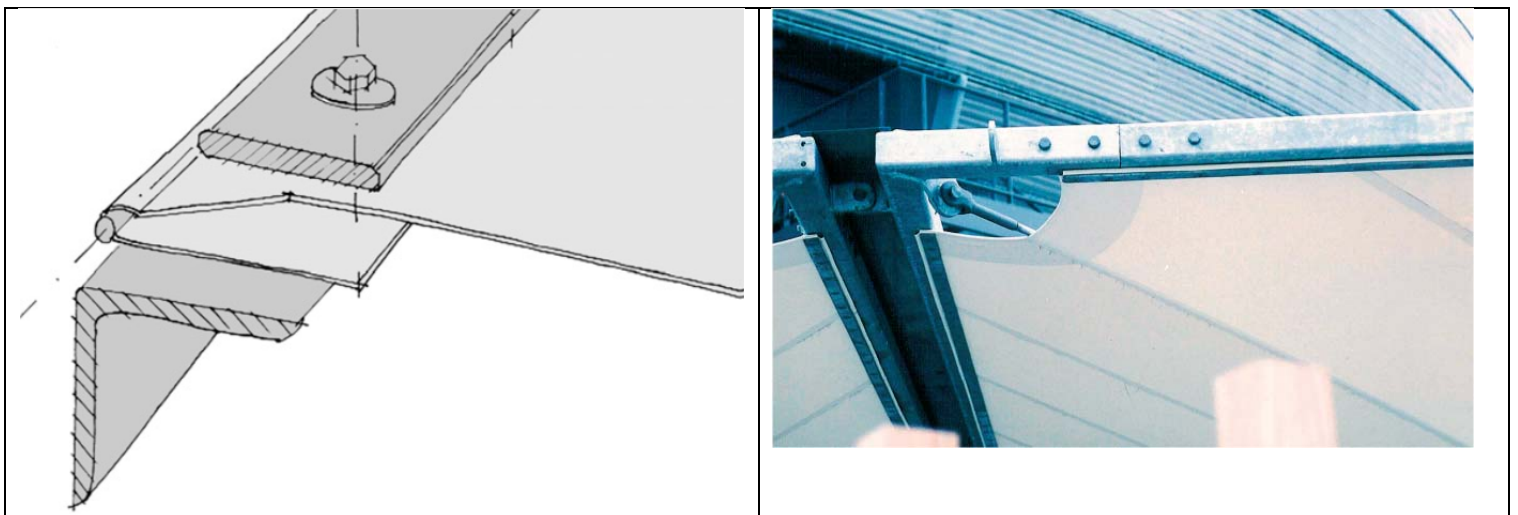
α) Σωλήνας σε θήκη αντί ενός καλωδίου (PVC / πολυεστέρα). Τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται για τις θήκες καλωδίων ισχύουν και εδώ. Οι δυνάμεις μεταφέρονται κάθετα μέσα στον σωλήνα. Οι κινήσεις κατά μήκος του σωλήνα πρέπει να προληφθούν και η γωνία για την θήκη πρέπει να επιλέγεται ώστε να είναι αρκετά μικρή για να περιοριστούν οι δυνάμεις «ξεφλούδισματος» στην ραφή.

β) Κανάλι (PVC / πολυεστέρα). Η άκρη της μεμβράνης είναι εξοπλισμένη με δακτυλίους σε τακτά διαστήματα. Ένα σχοινί δένεται από τις οπές και γύρω από μια ράβδο στο κανάλι. Οι δυνάμεις οδηγούνται κάθετα μέσα στο κανάλι, και λόγω του τριγωνικού δεσίματος, οι επαπτομενικές δυνάμεις παραλαμβάνονται επίσης. Αυτή είναι μία από τις πολλές δυνατότητες για ένα άκαμπτο άκρο καναλιού.

γ) Στερεωμένα με σύσφιξη άκρα. Αυτά είναι παρόμοια με τις ραφές με σύσφιξη, αλλά υπάρχει μόνο ένα στρώμα από ύφασμα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για το PVC / πολυεστέρα όσο και PTFE / υαλόνημα.



Σχ. 6.1 Άκαμπτα άκρα: σωλήνα σε θήκη, μεμβράνη που τελειώνει σε δακτυλίους



Σχ. 6.2 Άκαμπτα άκρα με σύσφιξη. Παράδειγμα ύφασμα το οποίο συσφίγγεται επί ενός άκαμπτου πλαισίου

Παρακάτω παρατίθεται μια σειρά από σταθερά άκρα για την συγκράτηση της μεμβράνης.

Αρχικά έχουμε σταθερά όρια της μεμβράνης με δυνατότητα κάθετης προέκτασης.

Ελάσματα σύσφιξης (Σχ.6.3.) και πάνω και κάτω στην μεμβράνη συνδεδεμένα με κοχλίες οι οποίοι ταυτόχρονα συγκρατούν και τα ελάσματα σύνδεσης με το καλώδιο που έχει ρόλο διάταξης τάνυσης. Οι οπές στην μεμβράνη πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερες από την διάμετρο των κοχλιών ώστε να μπορεί να επιμηκυνθεί η μεμβράνη. Το keder δεν επιτρέπει την ολίσθηση της μεμβράνης κάθετα στα ελάσματα.

Χρησιμοποιείται συνήθως για μεγάλα ανοίγματα και το εξωτερικό συρματόσχοινο έχει πολύ μεγάλη ένταση. Είναι μία πολύ γρήγορη και εύκολη συγκράτηση, καθώς στο εργοτάξιο μπορεί να γίνει η τοποθέτηση του εξωτερικού καλωδίου διαμέσου των ελασμάτων συγκράτησης πριν αυτό ενταθεί.



Σχ. 6.3. Ελάσματα σύσφιξης και πάνω και κάτω στην μεμβράνη

Με την (Σχ.6.4.) χρήση ειδικού προφίλ αλουμινίου ( σύνηθες κράμα 6061T6 με όριο διαρροής τα 270-290 MPa ) το οποίο από την μία μεριά συγκρατεί την μεμβράνη μέσω του keder και από την άλλη μεριά έχει υποδοχή ώστε να μπορεί να διατρέξει όλο το μήκος η εξάγωνη κεφαλή του κοχλία, ο οποίος συγκρατείται σε ελάσματα αρκετά χοντρά ώστε να θεωρούνται άκαμπτα σε σχέση με τις εφελκυστικές δυνάμεις που αναπτύσσονται.

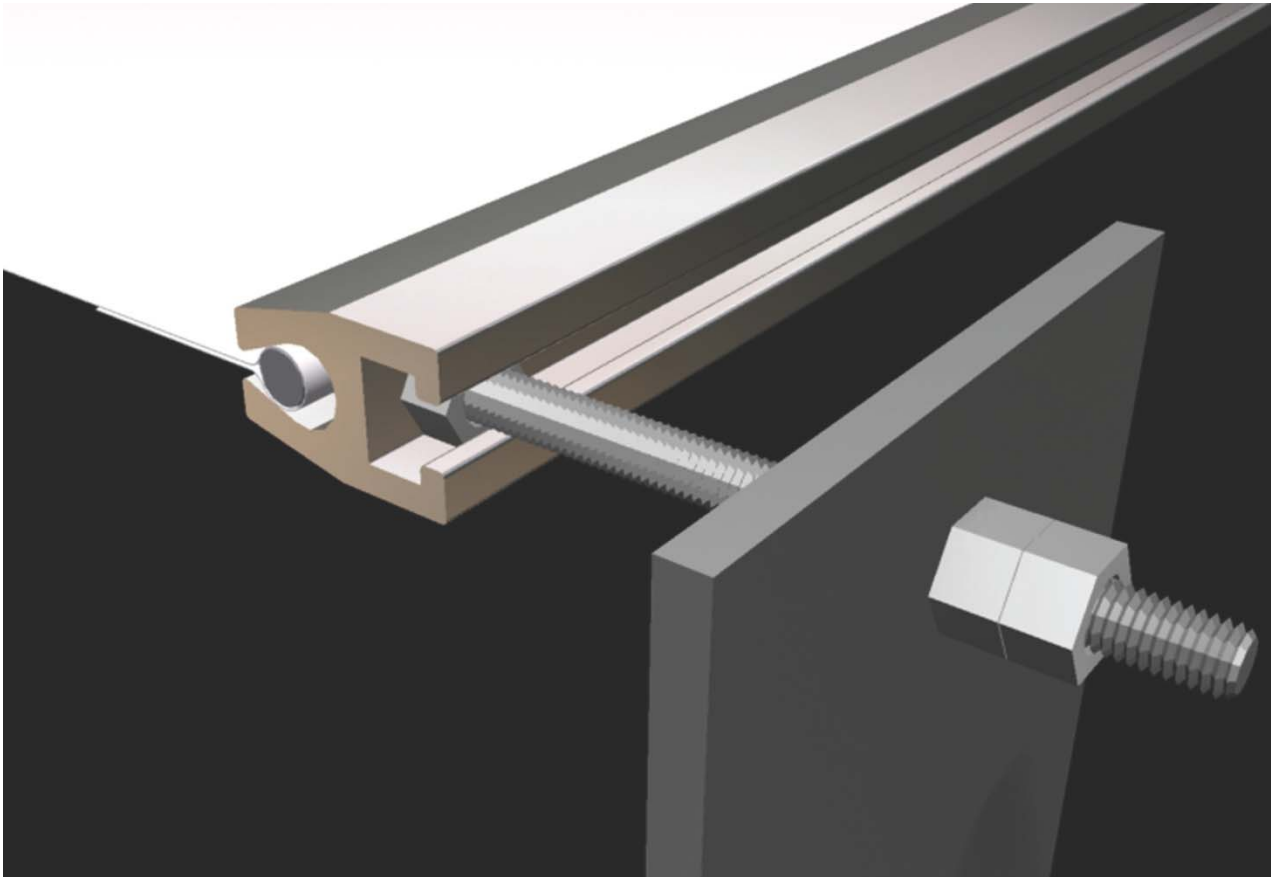
Κρίσιμη μεταβλητή είναι η μεταξύ των ελασμάτων συγκράτησης απόσταση καθώς οι σταθερές που έχουμε είναι οι εξής:

A. Η μορφή του προφίλ είναι συγκεκριμένη καθώς η μήτρα παραγωγής είναι κάτι δαπανηρό. Έτσι από αναλύσεις και λόγω ότι το όριο θραύσης του keder είναι 4kN/m έχει επιλεχθεί ο κοχλίας να είναι M16. Θα πρέπει το προφίλ να μην παρουσιάζει βέλος κάμψης μεγαλύτερο από  $L/500$  όπου L η απόσταση μεταξύ κοχλιών.

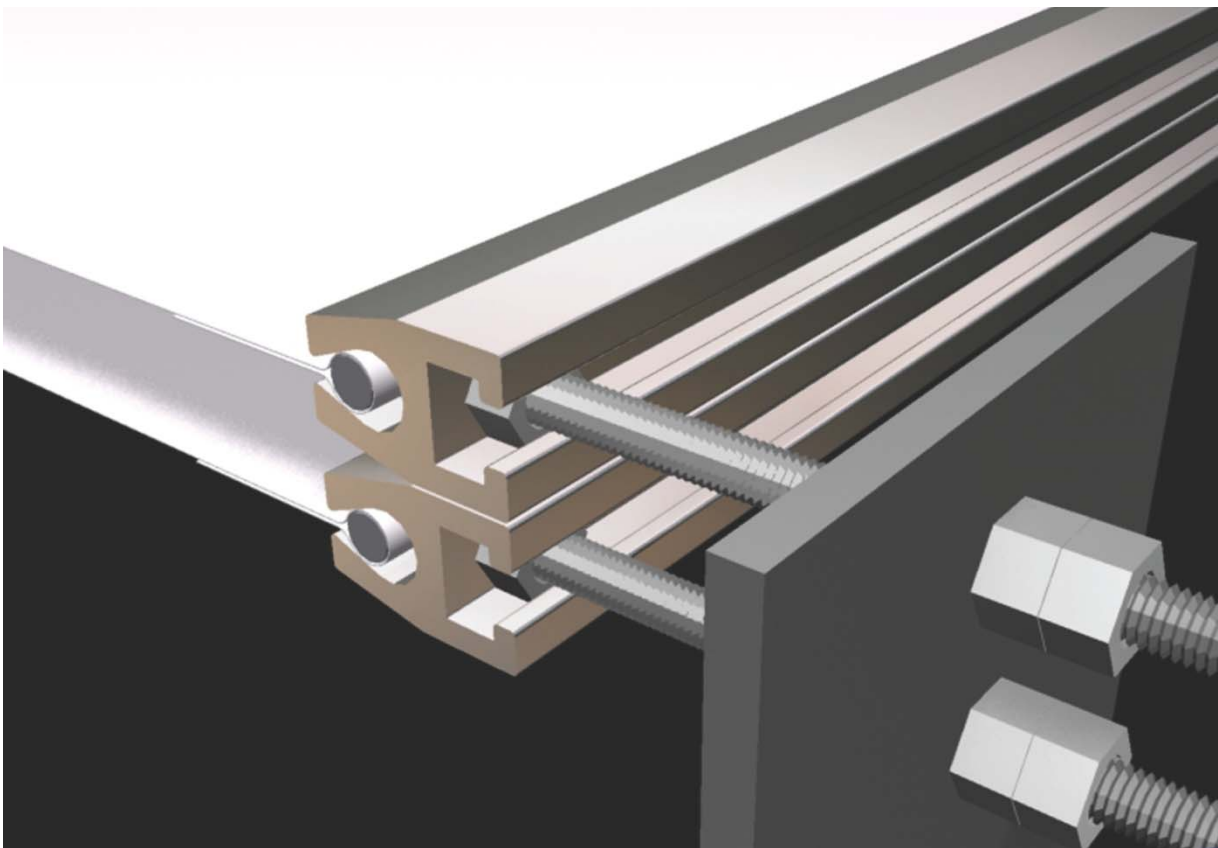
B. Η απόσταση μεταξύ ελασμάτων και προφίλ στην τελική κατάσταση δεν θα πρέπει να επιτρέπει τον λυγισμό του σώματος του κοχλία.

Γ. Η απόσταση της συγκόλλησης του ελασματος με τον φορέα από την οπή διέλευσης του κοχλία να είναι η ελάχιστη δυνατή ώστε να μην εμφανίσει βέλος κάμψης λόγω καμπτικών ροπών το έλασμα.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω και με την ανάλυση των φορτίων που ασκούνται στην μεμβράνη επιλέγεται η κατάλληλη απόσταση μεταξύ των συγκρατήσεων.



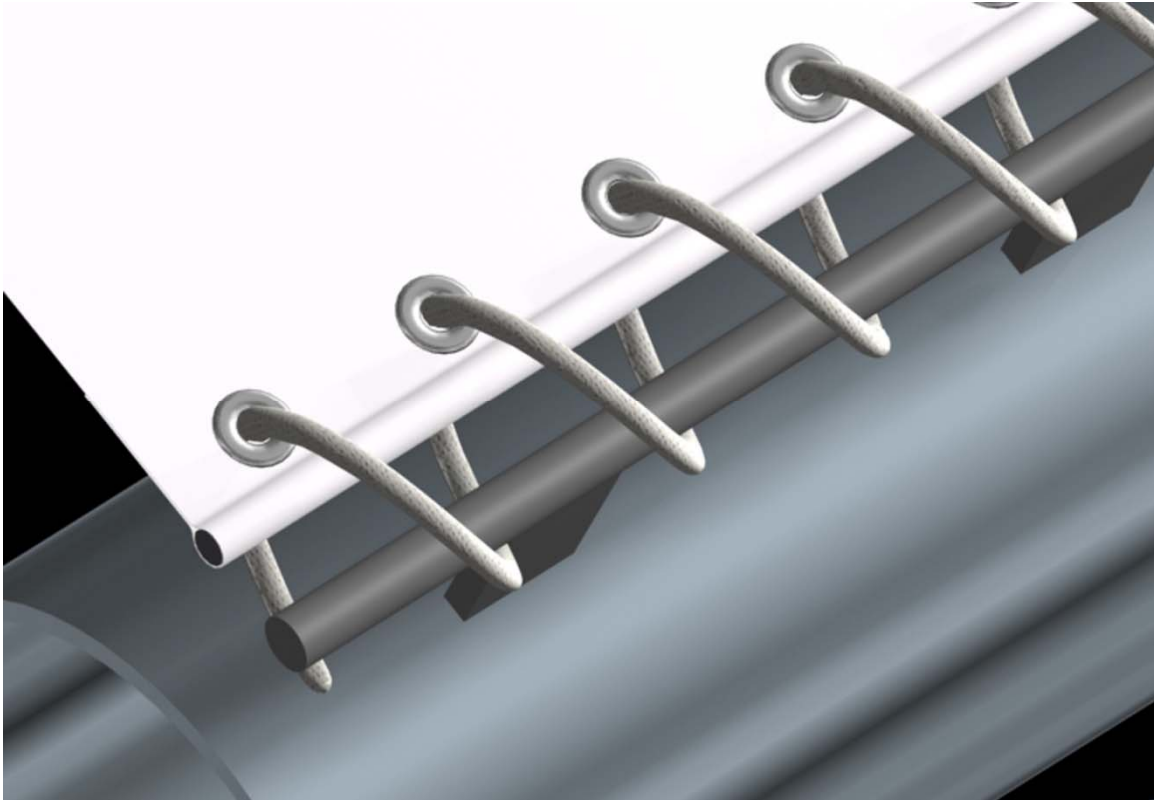
Σχ. 6.4. Διάταξη έντασης μέσω προεντεταμένων κοχλιών



Σχ. 6.5. Διάταξη έντασης μέσω προεντεταμένων κοχλιών για διπλή μεμβράνη

Για μικρές φορτίσεις έχουμε την χρήση δακτυλίων με σχοινί. Οι δακτύλιοι πρεσάρονται στην μεμβράνη και ειδικές σιαγόνες παραμορφώνουν την μεμβράνη κατά την συγκράτηση. Το keder χρησιμοποιείται σαν ασφαλιστικό σε περίπτωση αστοχίας της συγκράτησης της μεμβράνης από τους δακτυλίους. Κρίσιμα μεγέθη είναι η μεταξύ των δακτυλίων απόσταση ,η διάμετρος του στρογγυλού προφίλ και η απόσταση των ελασμάτων

συγκόλλησης επί του φορέα. Και σε αυτήν την περίπτωση δεν θέλουμε να έχουμε βέλος κάμψης μεγαλύτερο από  $L/500$  όπου  $L$  η απόσταση μεταξύ δύο ελασμάτων συγκράτησης του στρογγυλού προφίλ.



Σχ. 6.6. Διάταξη δακτυλίων με στρογγυλό προφίλ.

Στις περιπτώσεις που υπάρχει άλλη διάταξη για την προένταση της μεμβράνης (Πχ. Ανυψούμενη κεφαλή δακτυλίου κωνικής μορφής μεμβράνης) τότε τα σταθερά όρια δεν απαιτούν μετακίνηση ώστε να προσδίδουν την προένταση.

Οι φορείς συγκράτησης μπορεί να είναι είτε κοίλης ορθογωνικής μορφής (Σχ.6.7.) ,είτε κοίλης κυκλικής μορφής(Σχ.6.8.) και ακόμη και δοκοί από σκυρόδεμα (Σχ.6.9.).



Σχ.6.7. Συγκράτηση σε κοίλη ορθογωνική δοκό





Σχ.6.8. Συγκράτηση σε κοίλη κυκλική δοκό



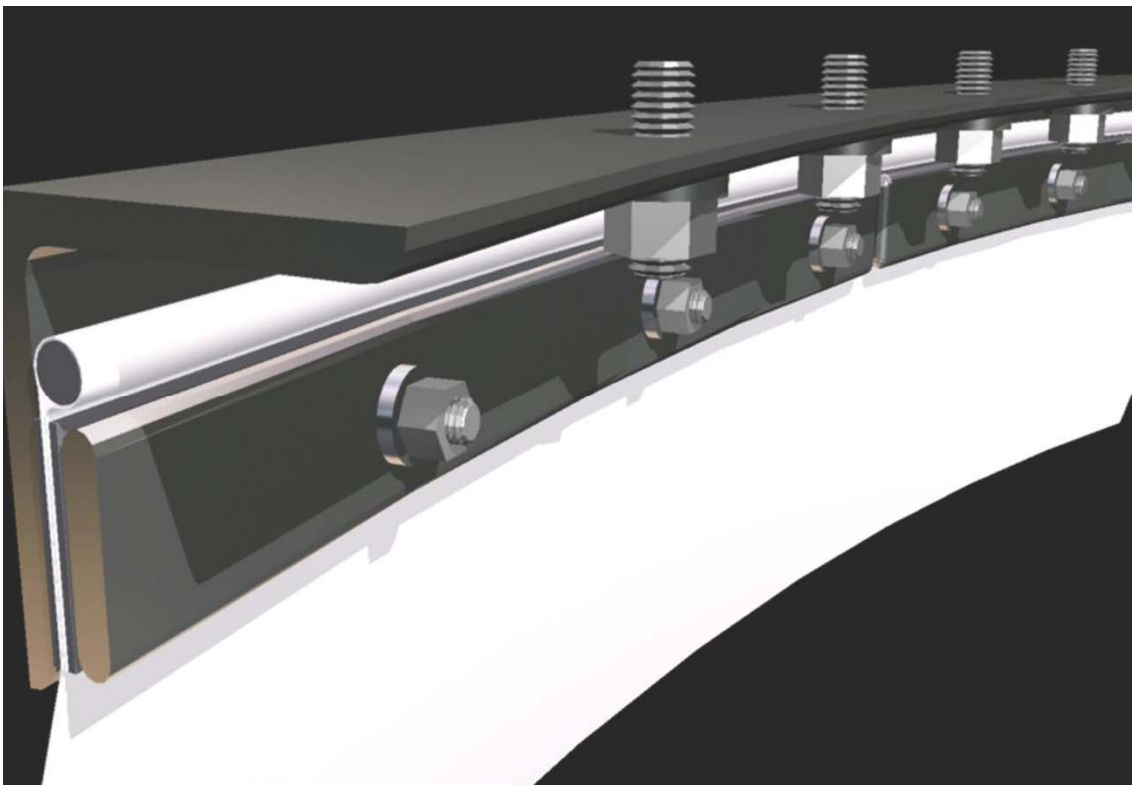
Σχ.6.9. Συγκράτηση σε δοκό από σκυρόδεμα

Τα κρίσιμα μεγέθη είναι η απόσταση των κοχλιών συγκράτησης και το πλάτος των ελασμάτων σύσφιξης. Το keder εξασφαλίζει την ολίσθηση της μεμβράνης και οι οπές της μεμβράνης θα πρέπει να είναι επ' ακριβώς ορισμένες ώστε να είναι σύμφωνες με την προδιάτρηση των δοκών. Στις κυκλικές δοκούς χρειάζεται ένα επιπλέον έλασμα ώστε να επιπεδοποιήσει την κυλινδρική επιφάνεια για να έχουμε μεγαλύτερη επιφάνεια συγκράτησης. Στις δοκούς από σκυρόδεμα η διάτρηση για την τοποθέτηση των αγκυρίων προηγείται της προδιάτρησης των ελασμάτων και της μεμβράνης γιατί μπορεί να παρουσιαστούν προβλήματα γεωμετρίας. Η διάταξη αυτή είναι δαπανηρή καθώς οι κοχλίες είναι τυφλοί και γίνεται χρήση Hollo Bolts που ανεβάζει το κόστος. Μία λύση για να χρησιμοποιηθούν απλοί κοχλίες φαίνεται στο Σχ.6.10. για τους κοίλους ορθογωνικούς δοκούς.



Σχ.6.10. Συγκράτηση σε κοίλη ορθογωνική δοκό με απλούς κοχλίες

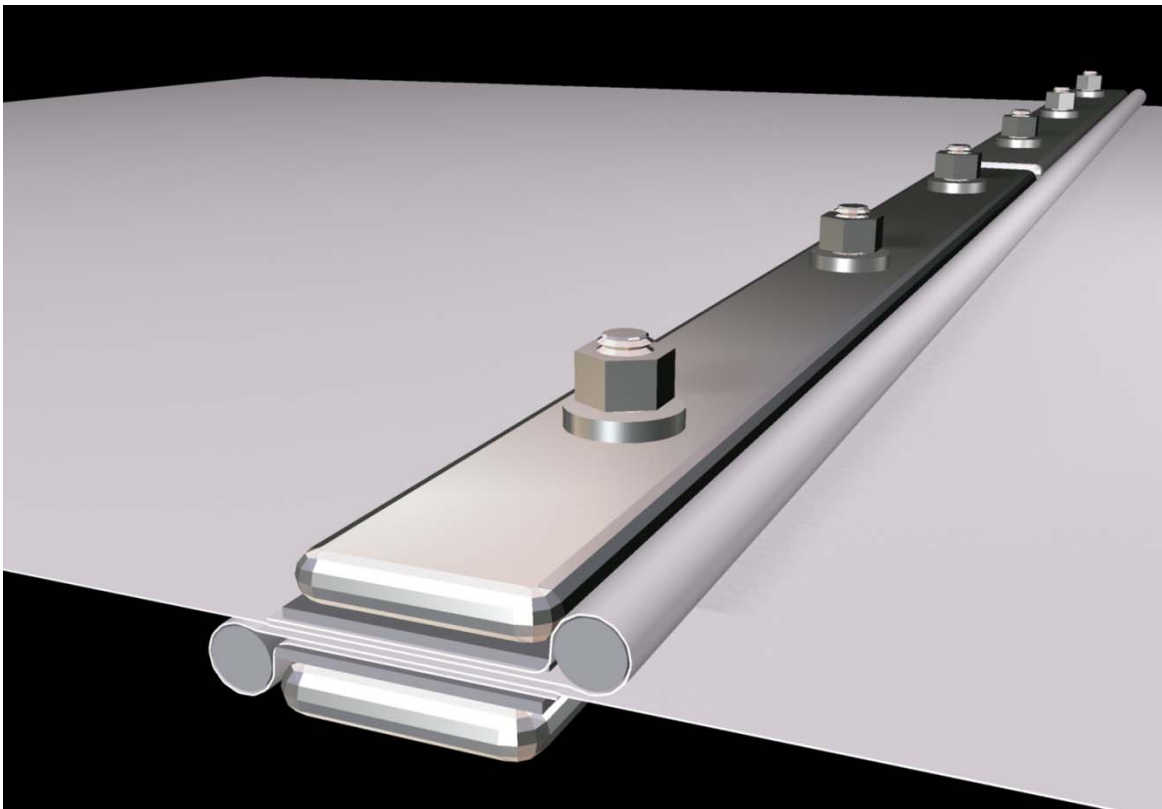
Στις περιπτώσεις που τα άκαμπτα άκρα απαιτούν σχεδιαστικά να έχουν τοξοειδή μορφή η βέλτιστη λύση είναι να χρησιμοποιηθεί γωνιακό προφίλ (Σχ.6.11.) όπου η μία πλευρά συγκρατεί την μεμβράνη και η άλλη πλευρά συγκρατεί όλη την διάταξη επί του φορέα.



Σχ.6.11. Συγκράτηση με γωνιακό προφίλ και με απλούς κοχλίες

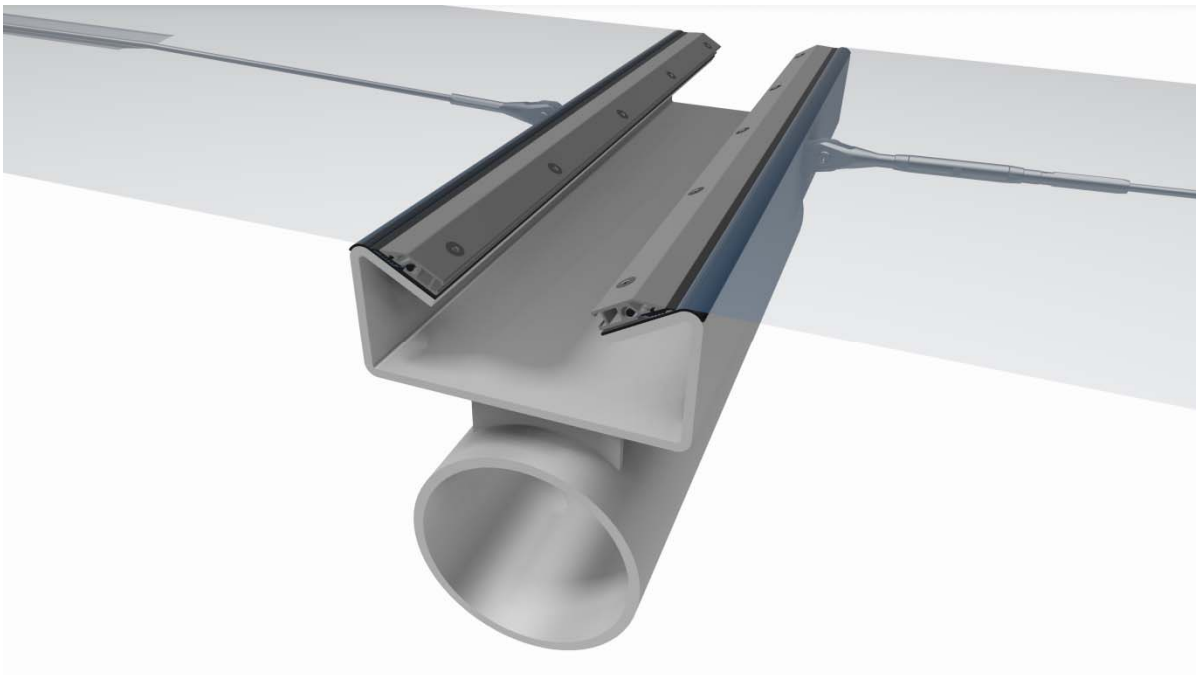
Όταν στον σχεδιασμό απαιτείται η χρήση ενδιάμεσου σταθερού άκρου ,που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι συνέχεια της μεμβράνης υπάρχουν δύο τρόποι συγκράτησης:

A. Με ελάσματα τα οποία με υπερέκλυση (Σχ.6.12.) ενώνουν δύο πάνελ μεμβράνης και εξασφαλίζουν την στεγανότητα .Κυρίως χρησιμοποιούνται στις κορυφογραμμές επαναλαμβανόμενων μορφών.



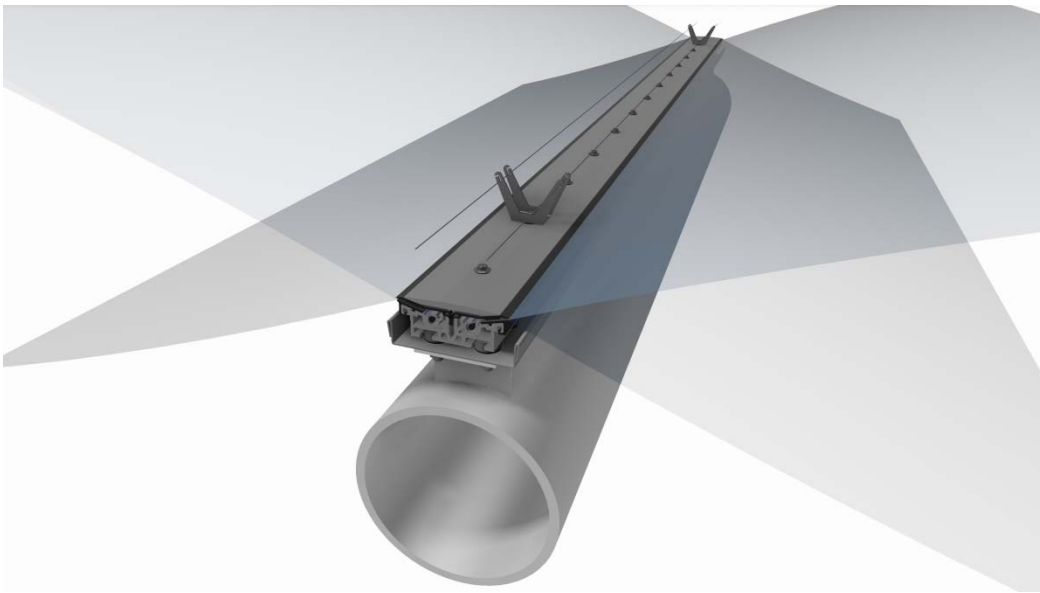
Σχ.6.12. Συγκράτηση με επικαλυπτόμενα ελάσματα

Β. Στις περιπτώσεις των κοιλάδων καθώς και στις οροφές σταδίων χρησιμοποιείται μια διάταξη με υδρορροή (Σχ.6.13.).

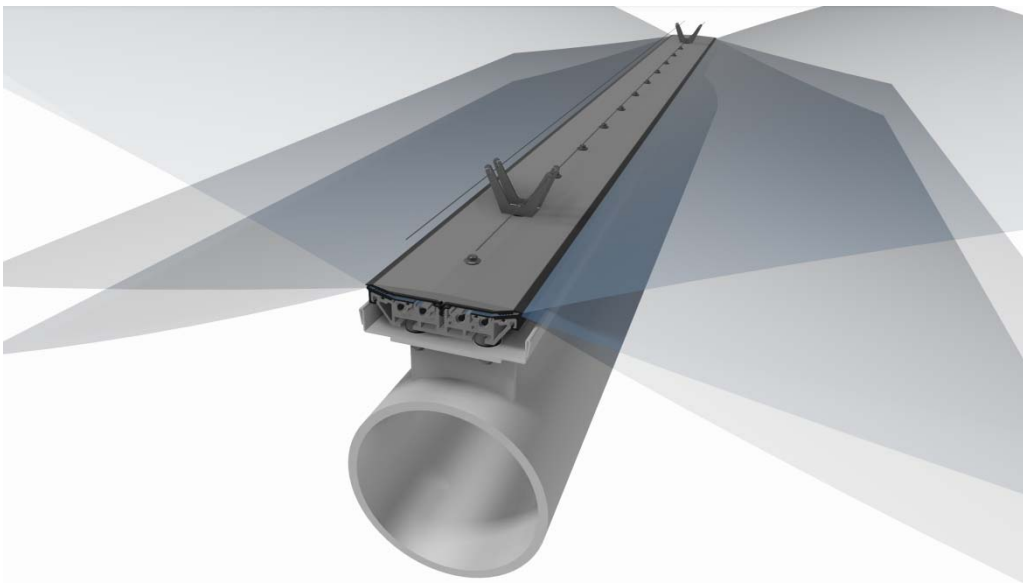


Σχ.6.13. Συγκράτηση με διάταξη που περιέχει και υδρορροή

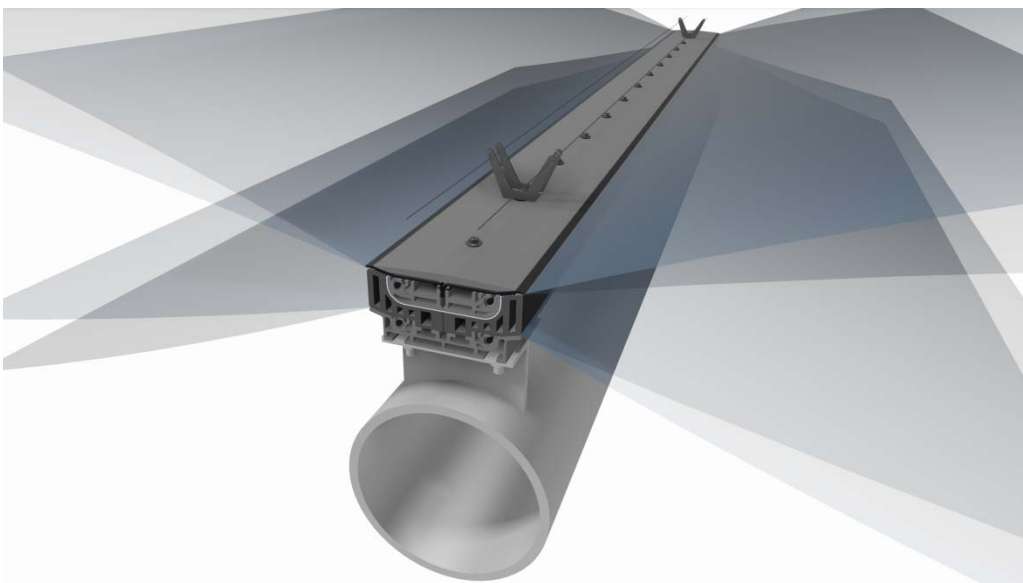
Ένα άλλο είδος άκαμπτων άκρων είναι αυτό που υποστηρίζει κατασκευές με (ETFE Σχ.6.14.). Το όριο μπορεί να είναι οποιασδήποτε μορφής δοκός αλλά υποστηρίζει ειδικά προφίλ αλουμινίου τα οποία συγκρατούν το ETFE και ταυτόχρονα παρέχουν πλήρη σύσφιξη ώστε να μην υπάρχει διαρροή αέρα.



Σχ.6.14.α. Συγκράτηση ETFE δύο επιπέδων



Σχ.6.14.β. Συγκράτηση ETFE τριών επιπέδων

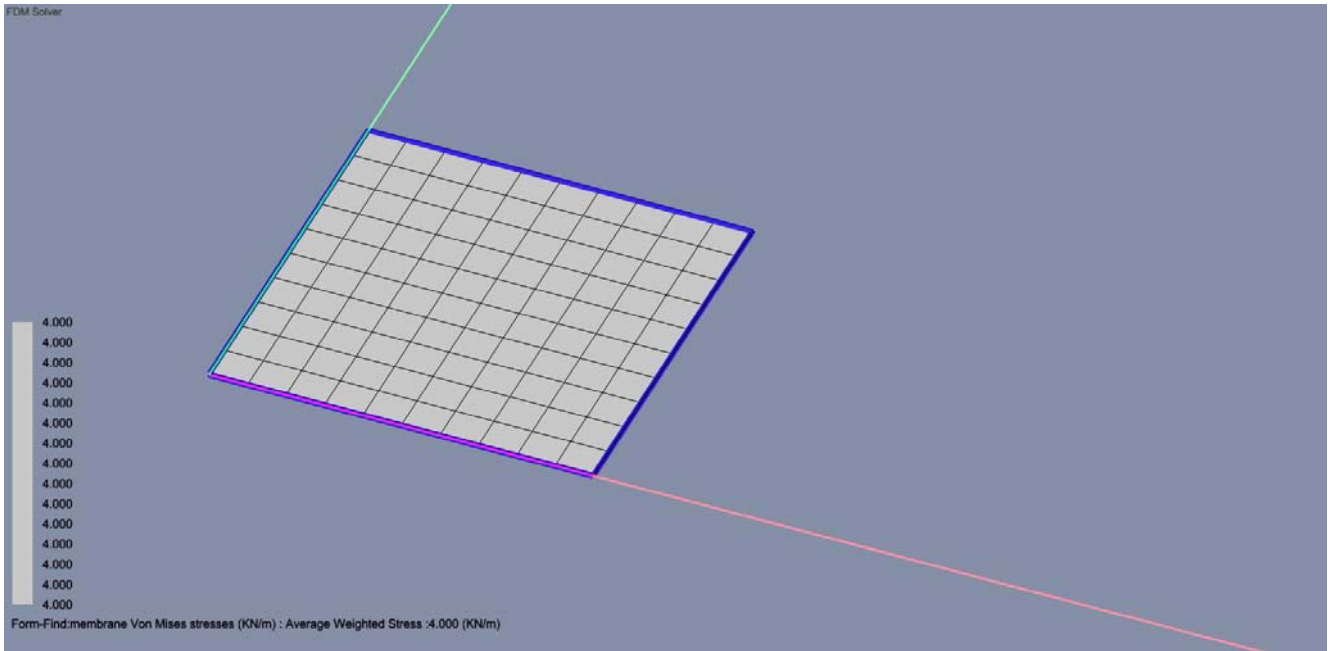


Σχ.6.14.γ. Συγκράτηση ETFE τεσσάρων επιπέδων με μόνωση

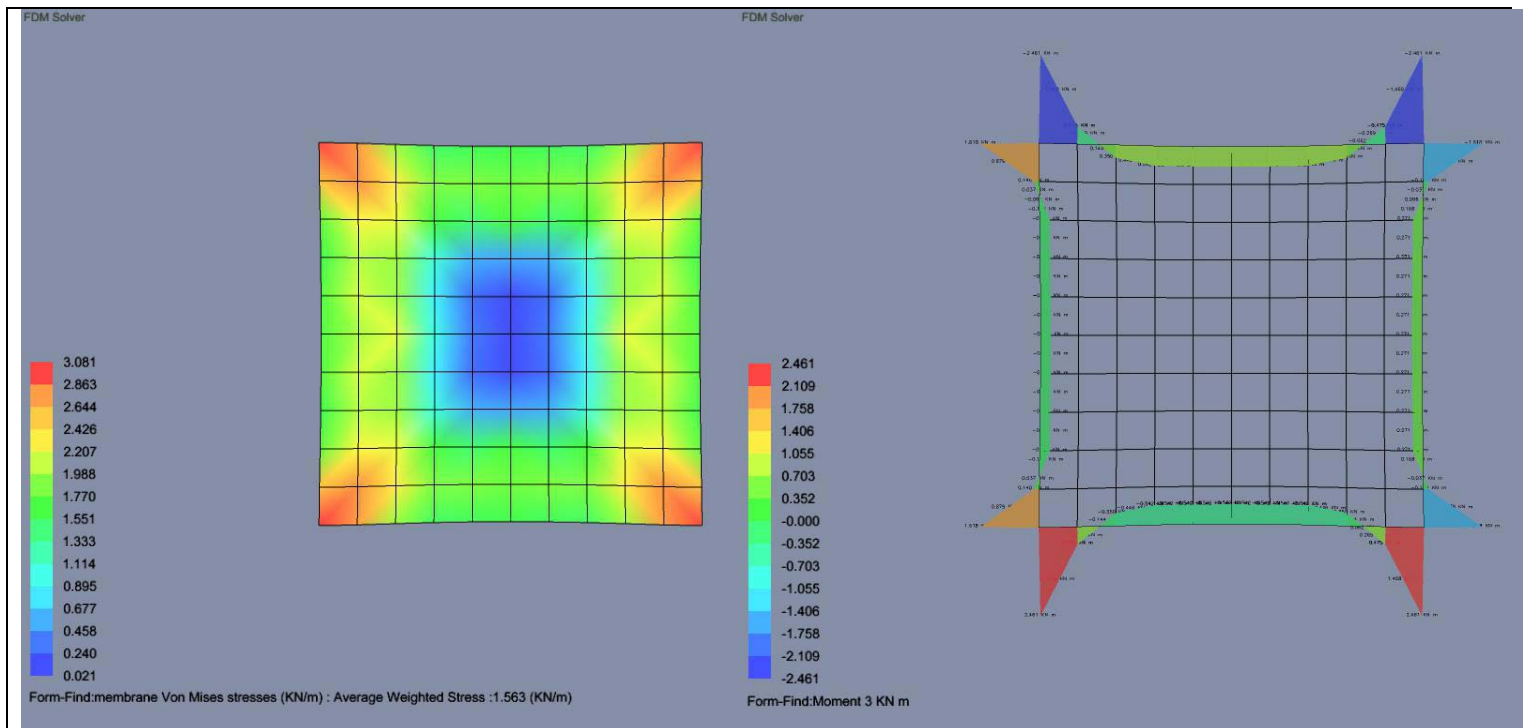
Στην εύρεση μορφής της μεμβράνης που περιλαμβάνει σταθερά όρια πρέπει να γίνει ο υπολογισμός με το σκεπτικό ότι αν και δεχόμαστε ότι είναι άκαμπτα εντούτοις πάντα υπάρχει η μεταβολή της γεωμετρίας λόγω βέλους κάμψης.

Στα παρακάτω φαίνεται η διαφορά μεταξύ άκαμπτου ιδανικού φορέα (Σχ.6.14.α.), μικρής δυσκαμψίας (Σχ.6.14.β.), και μεγάλης δυσκαμψίας (Σχ.6.14.β.).

Για τον τρόπο υπολογισμού θα πρέπει να θεωρήσουμε ιδανικά άκαμπτο τον φορέα ,να επιλυθεί το πρόβλημα των φορτίσεων ,προέντασης και εξωτερικών και να διαστασιοποιηθεί το άκρο για βέλος κάμψης μικρότερο του  $L/500$  και να ξαναγίνει η εύρεση μορφής με μη γραμμική ανάλυση και να λάβει το συγκεκριμένο μητρώο δυσκαμψίας που προσδίδει στην κατασκευή η συγκεκριμένη μορφή άκαμπτου άκρου.

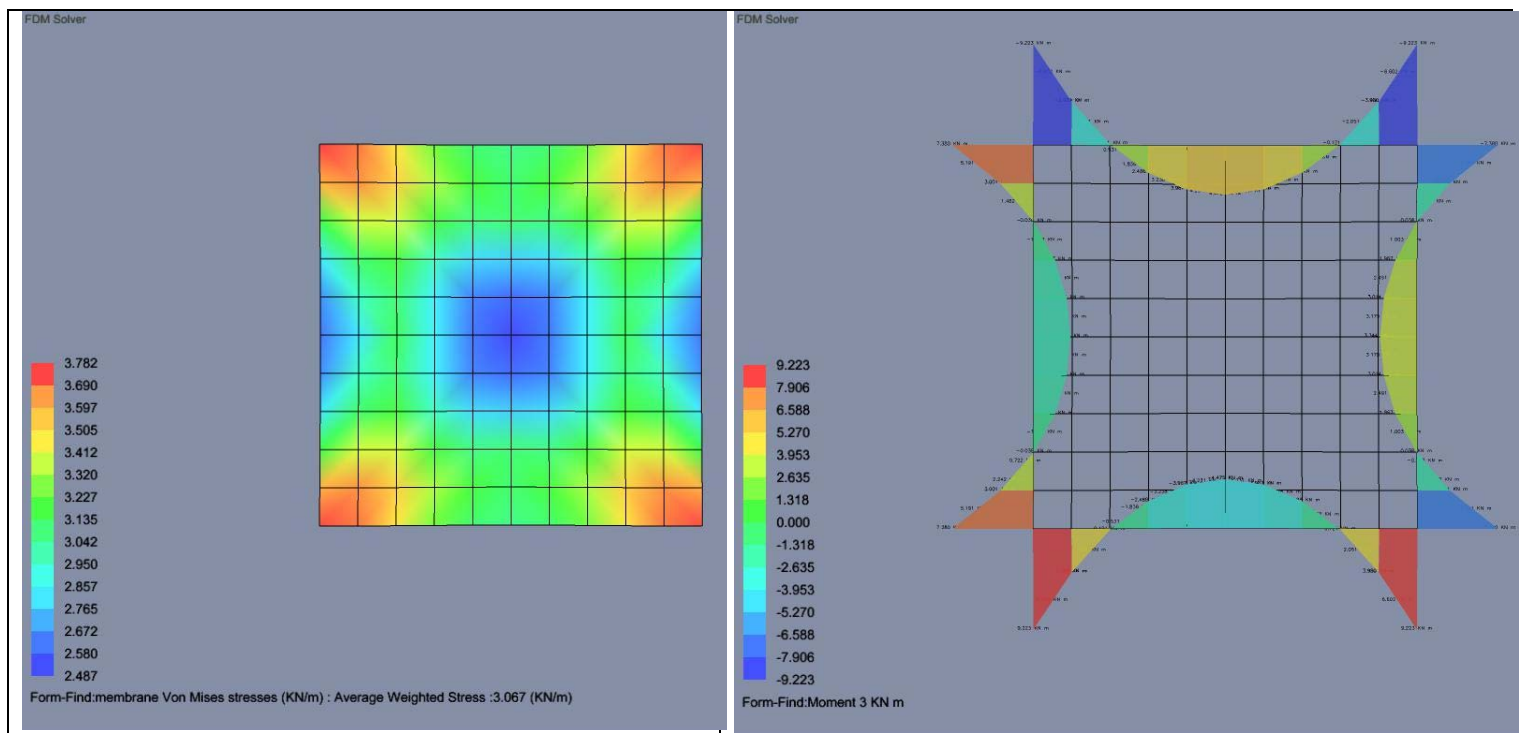


Σχ.6.14.α. Πλήρες άκαμπτο όριο



Σχ.6.14.α. Άκαμπτο όριο μικρής δυσκαμψίας και διάγραμμα καμπτικών ροπών

Βλέπουμε την διαφορά στο βέλος κάμψης ,την χαλάρωση της μεμβράνης. Στης μεγάλης δυσκαμψίας άκρο η μεμβράνη τείνει να αποκτήσει ομοιογενή ένταση, μικραίνει το βέλος κάμψης και αυξάνονται οι ροπές του άκρου καθώς προβάλει μεγαλύτερη αντίσταση στην παραμόρφωση.



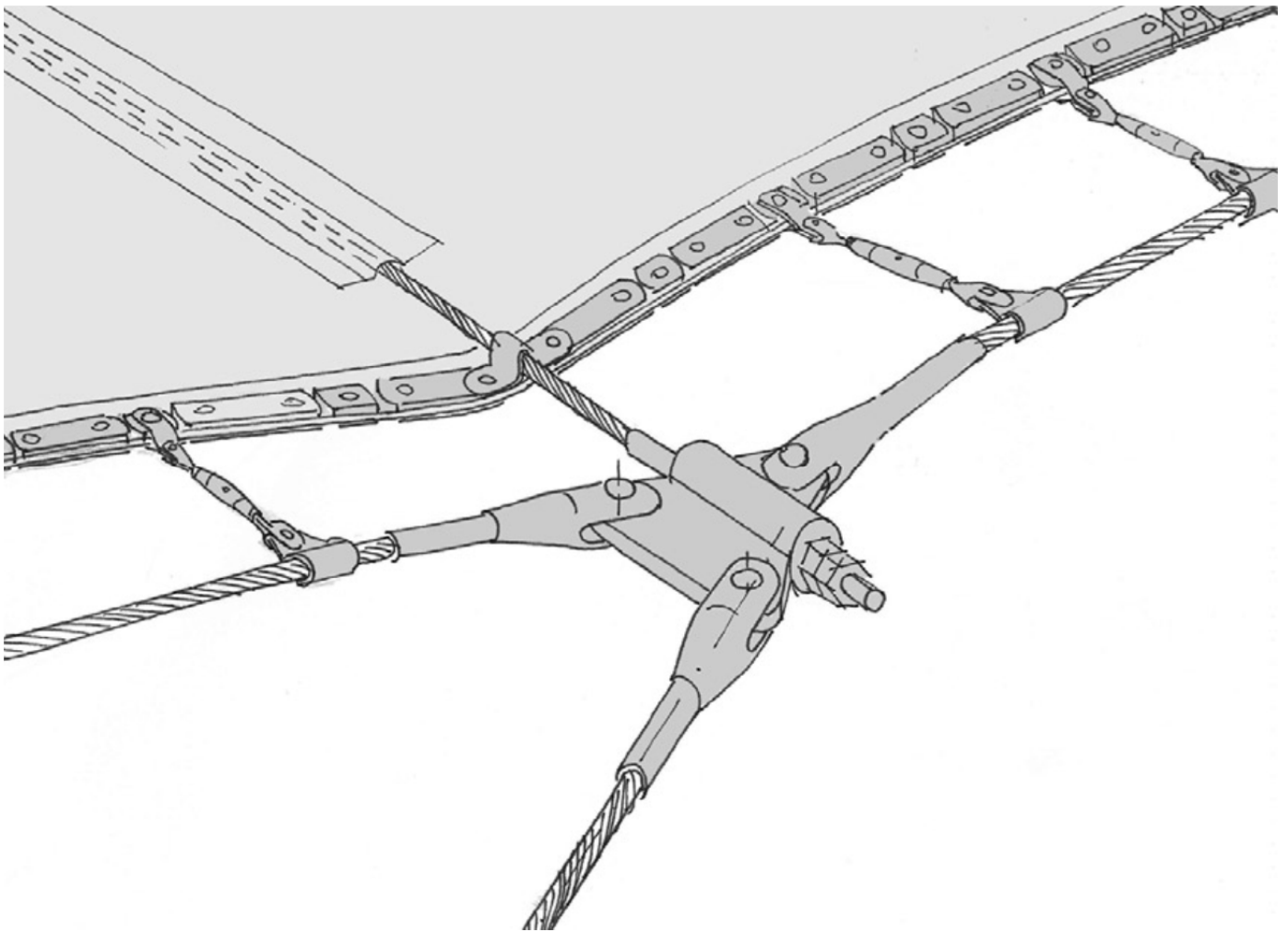
Σχ.6.14.α. Άκαμπτο όριο μεγάλης δυσκαμψίας και διάγραμμα καμπτικών ροπών

## 6.2 Γραμμικές διατάξεις υποστήριξης της μεμβράνης στο εσωτερικό της

Η χαρακτηριστική ιδιότητα της «Κορυφογραμμής και Κοιλιάδας» μορφής (ή σχήμα "Κύμα") είναι η κατεύθυνση της διπλής καμπυλότητας του. Τα καλώδια τρέχουν παράλληλα το ένα με το άλλο ώστε να δώσουν το σχήμα του κύματος. Η προένταση στο ύφασμα μπορεί να ληφθεί με το τέντωμα του καλωδίου της κορυφογραμμής ή / και της κοιλάδας. Τα καλώδια πρέπει να είναι ρυθμιζόμενα σε μήκος.

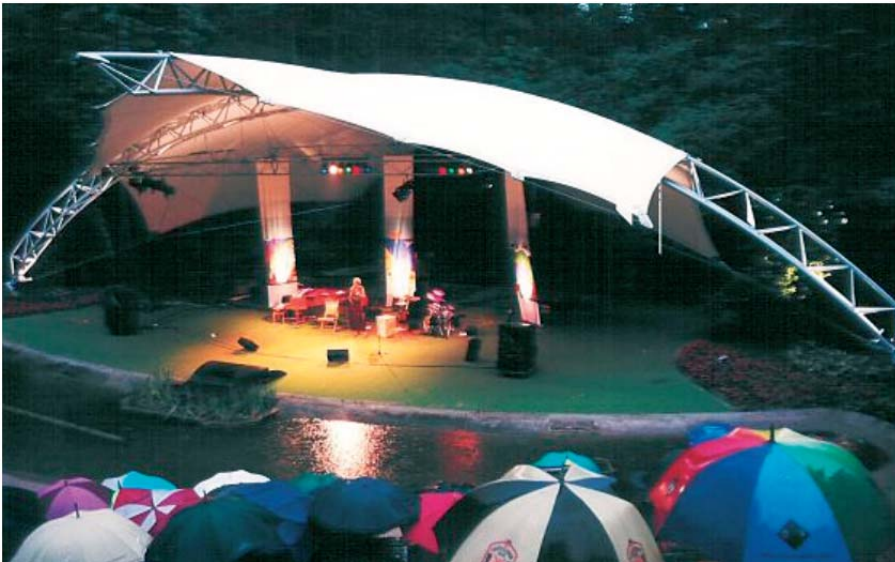


Σχ. 6.15 Καλώδια σχηματίζουν την κοιλάδα και άκαμπτα στοιχεία την κορυφογραμμή με αποτέλεσμα την κυματοειδή επιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή το σχήμα κύματος εφαρμόζεται σε μια πρόσοψη (Αυστραλιανό περίπτερο στην EXPO 2000 στο Αννόβερο).

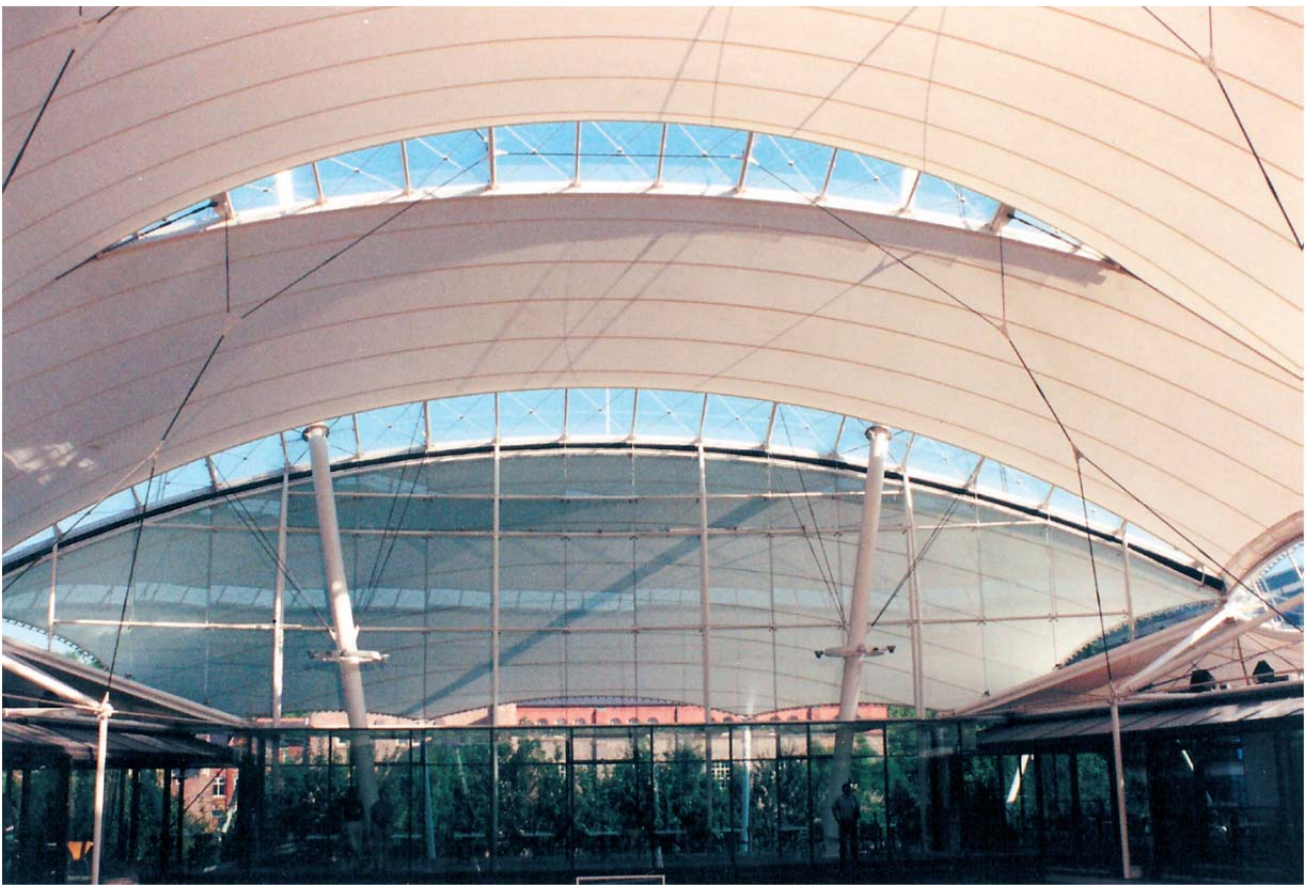


Σχ. 6.16 Σύνδεση του καλωδίου της κοιλάδας με το καλώδιο του ορίου

Γραμμικές αψίδες χρησιμοποιούνται με διαφορετικούς προσανατολισμούς και παράγουν διαφορετικά σχήματα επιφάνειας όπως παρουσιάζεται στα Σχήματα 6,17 και 6,18.



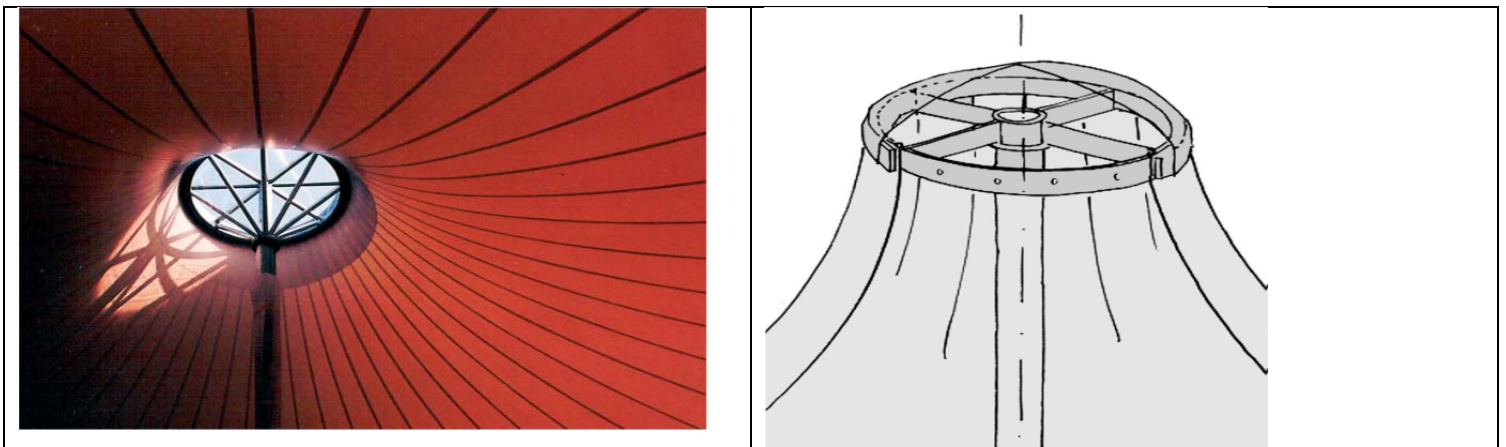
Σχ. 6.17 Μια συνεχής μεμβράνη τεντώνεται πάνω από δύο κάθετα τοξωτά δικτυώματα και καλύπτει την σκηνή στο υπαίθριο θέατρο Bloemendaal.



Σχ. 6.18 Στο Inland Revenue Amenity Building οι νευρώσεις της αψίδας υποστηρίζουν το ύφασμα, ενώ την ίδια στιγμή επιτρέπουν το φως της ημέρας να εισέρχεται.

### 6.3 Σημειακές διατάξεις υποστήριξης της μεμβράνης στο εσωτερικό της

Τα βασικά αντικλαστικά σχήματα του κώνου, HYPAR και σέλας αποκτούν το σχήμα της επιφάνειάς τους από τη σχετική διάταξη των στηρίξεων των ορίων τους. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μέσα στην επιφάνεια τελικά συγκεντρώνονται στα στηρίγματα των ορίων. Ειδική μελέτη εφαρμογής απαιτείται για να μπορέσει αυτό το είδος υποστήριξης να είναι αποτελεσματικό. Ένας πολύ κοινός τρόπος για να ελέγχονται τα επίπεδα των τάσεων σε μια μεμβράνη είναι να κάνουμε χρήση ενός στοιχείου σχήματος δακτυλίου. Η διάμετρος του δακτυλίου εξαρτάται από την αντοχή του υφάσματος και το συνολικό φορτίο που μεταφέρεται μέσα στο υποστήριγμα. Ο σχεδιαστής μπορεί να επιλέξει να προσθέσει μια ενισχυτική στρώση τοπικά στην μεμβράνη ως μέσο μείωσης της διαμέτρου του δακτυλίου. Ο δακτύλιος μπορεί να κατασκευάζεται από μία ποικιλία υλικών, ο χάλυβας είναι το πιο κοινό. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να αναρτηθεί η μεμβράνη στο δακτύλιο, όπως φαίνεται στα συνημμένα σχήματα.

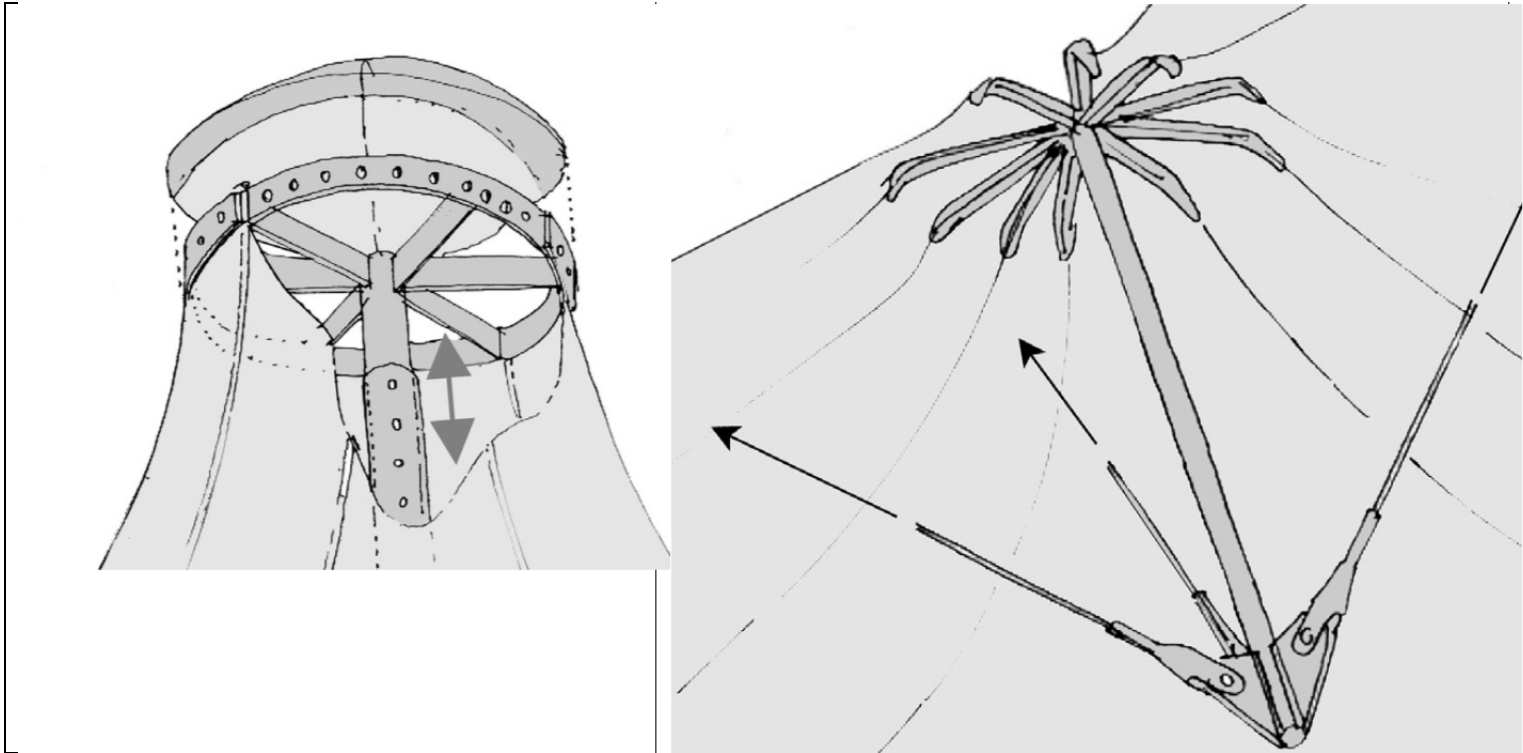


Σχ. 6.19 Η αποφυγή μεγάλων τάσεων στη μεμβράνη γίνεται με τη χρήση ενός δακτυλίου. Γενικά, το ύφασμα στερεώνεται συνεχώς γύρω από τον δακτύλιο. Όπως φαίνεται ο δακτύλιος στερεώνεται στον ιστό με άκαμπτο τρόπο.

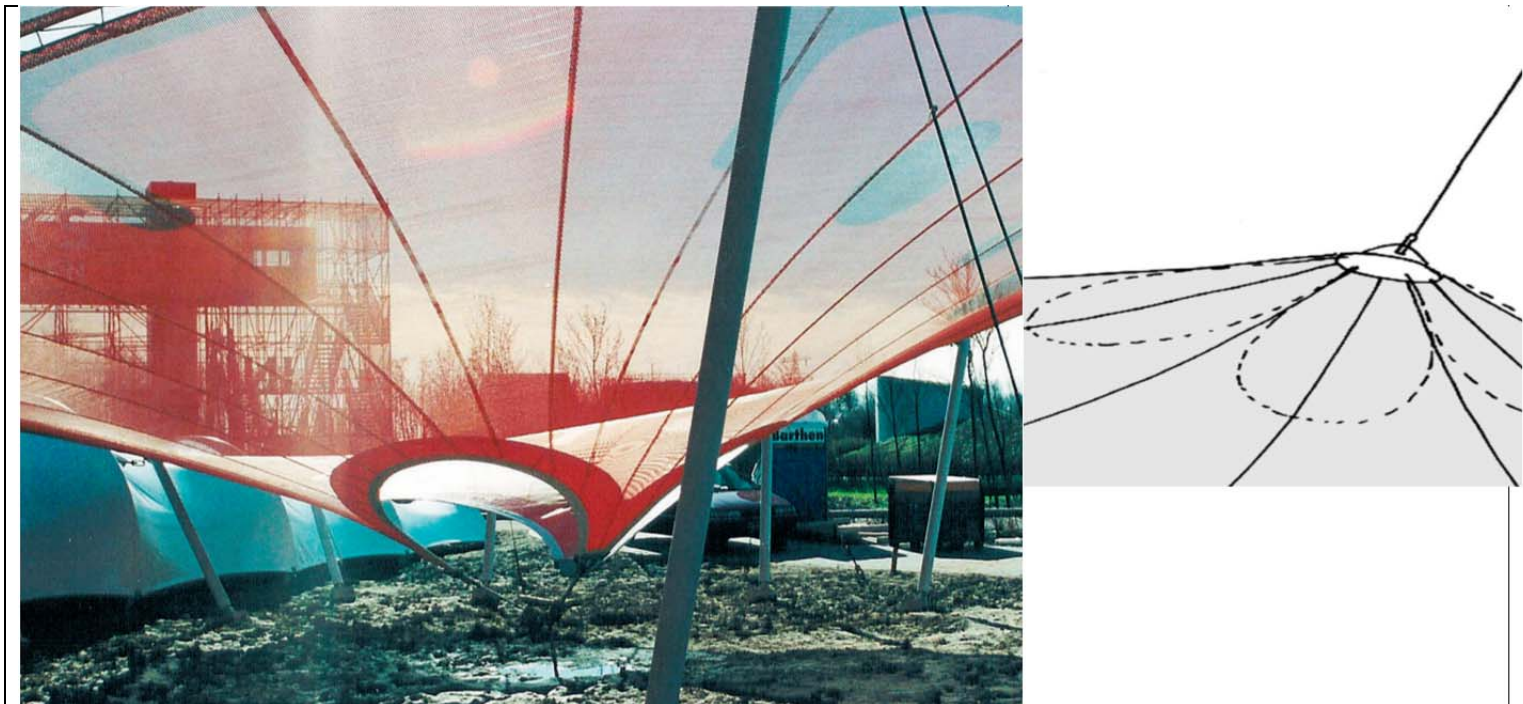


Για να γίνει ο δακτύλιος στεγανός μπορεί να καλυφθεί με διάφορους τρόπους. Μερικές φορές χρησιμοποιείται για αερισμό. Όταν η εσωτερική στήριξη χρησιμοποιείται ως ένα χαμηλό σημείο, θα συλλέξει τα όμβρια ύδατα και το χιόνι, εκτός εάν προβλέπεται αποστράγγιση.

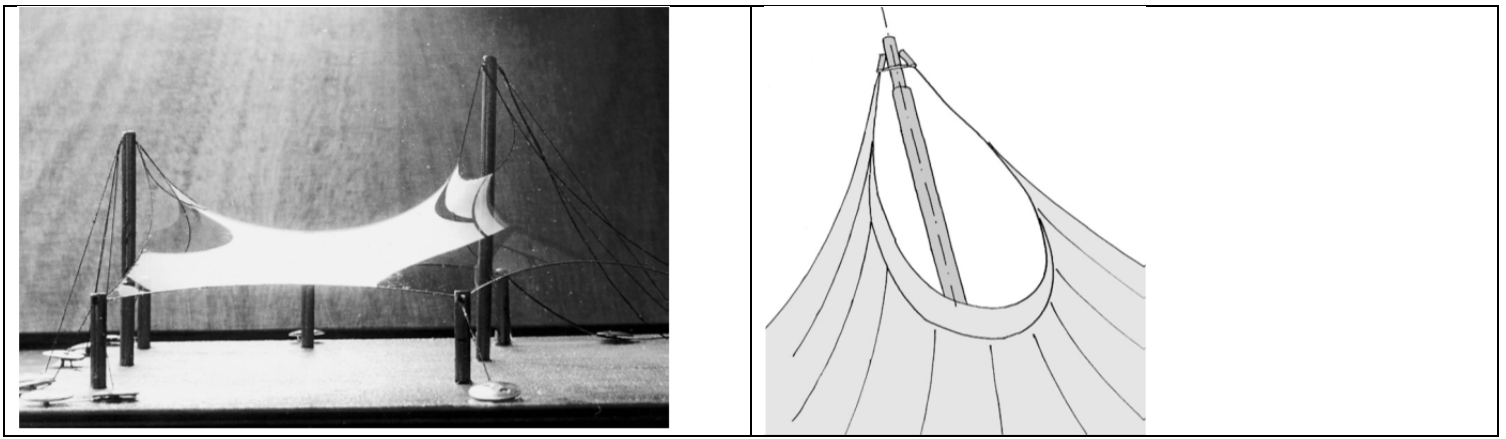
Ένας άλλος τρόπος μείωσης των τάσεων στο ύφασμα είναι η χρήση της λεγόμενης λύσης "πεταλούδα" η οποία προέρχεται από την εύρεση μορφής με φιλμ σαπουνιού. Μια ακολουθία βρόχων καλωδίων σχηματίζουν ένα κλειστό συνεχές σύνορο που βρίσκεται μέσα στην επιφάνεια της μεμβράνης. Είναι ένα κομψό αλλά δύσκολης εργασίας λύση.



Σχ. 6.20 Ο ιστός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την τάνυση της μεμβράνης, παρέχοντας προσαρμογή με το μήκος του.

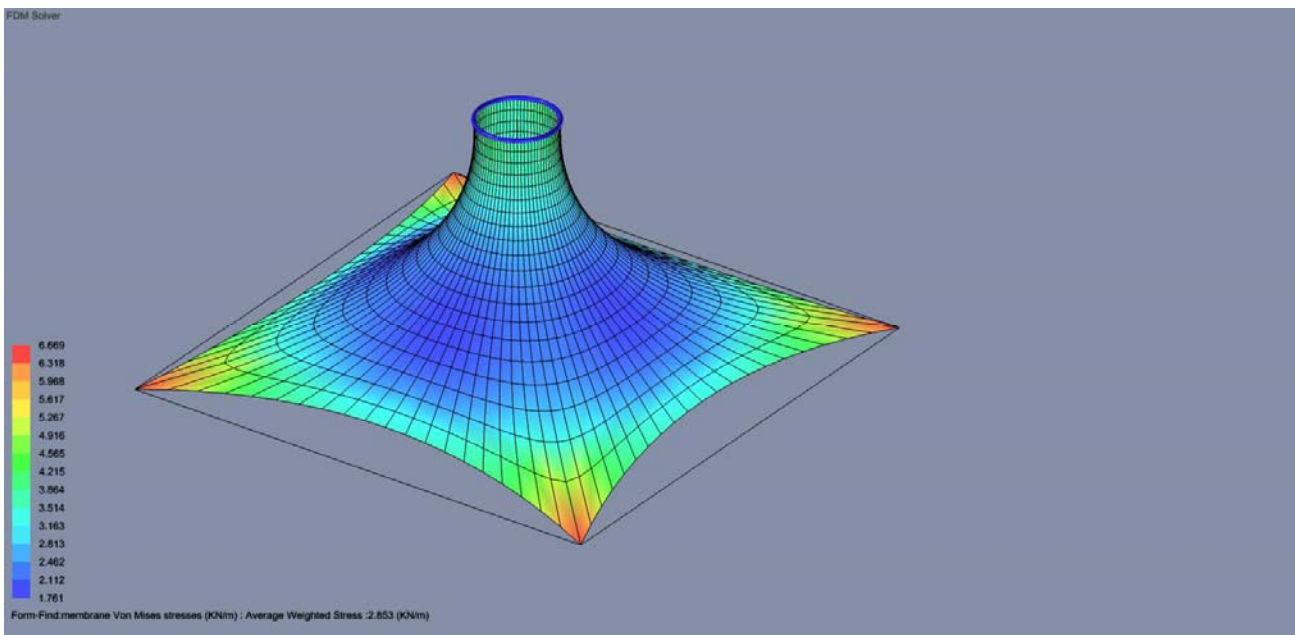
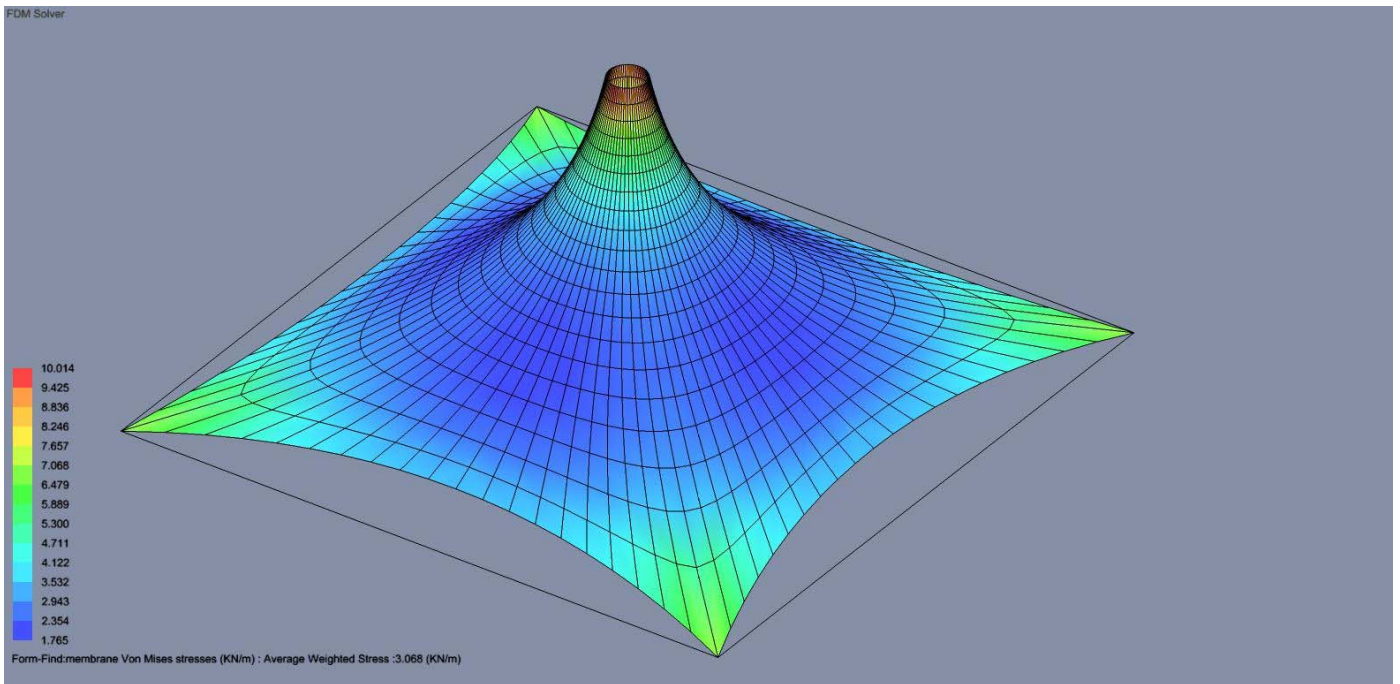


Σχ. 6.21 Η μορφή πεταλούδα χρησιμοποιείται σε χαμηλά και υψηλά σημεία.



Σχ. 6.22 Ένας "βρόχος καλωδίων», είναι ένας τρόπος μείωσης τάσεων, που λαμβάνεται χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο από φιλμ σαπουνιού.

Το πεδίο των τάσεων που αναπτύσσεται στην μεμβράνη εξαρτάται από την διάμετρο του δακτυλίου όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχ. 6.23 Ένας κώνος με ίδιες ιδιότητες εκτός της διαμέτρου του δακτυλίου συγκράτησης. Οι τάσεις βλέπουμε ότι μειώνονται από τα 10 kN/m στα 5 kN/m καθώς η διάμετρος του δακτυλίου μεταβάλλεται από τα 600mm στα 1600mm.

#### 6.4 Συνδέσεις γωνιών

Οι δυνάμεις της μεμβράνης ρέουν μέσα στα καλώδια των ορίων τα οποία, με τη σειρά τους τα μεταβιβάζουν στις γωνίες. Οι γωνίες μεταφέρουν αυτές τις δυνάμεις στη κατασκευή υποστήριξης. Η λεπτομέρεια μεταξύ των γωνιών και της φέρουσας κατασκευής είναι συνήθως μια επίπεδη πλάκα και είναι πολύ σημαντική μπορεί δε να λυθεί με διάφορους τρόπους.

Κατά τη διάρκεια της ζωής της μια πλάκα έχει διαφορετικές λειτουργίες να εκτελέσει. Πριν παίρνει στο εργοτάξιο μπορεί να είναι ένα κομμάτι μετάλλου που μπορεί να βλάψει το ύφασμα, αν δεν έχει ληφθεί μέριμνα κατά το χειρισμό της. Στο εργοτάξιο παρέχει βοήθεια για την εγκατάσταση και την προένταση της κατασκευής. Κατά τη διάρκεια της ζωής της θα πρέπει να παραμείνει ενεργή ως ένα αρθρωτό τμήμα της κατασκευής και να σε αρμονική σχέση με τη μεμβράνη. Σε αυτές τις δύο φάσεις, καλείται να εκτελέσει διάφορες λειτουργίες.

Κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης:

α) Οι δυνάμεις αρχικά τείνουν να περάσουν μέσα από τη μεμβράνη και όχι μέσω των καλωδίων. Τα καλώδια είναι ακόμα χαλαρά επειδή το ύφασμα δεν είναι στην τελική του θέση. Έτσι, το βάρος του υφάσματος μπορεί να φέρεται μόνο από τις συνδέσεις του υφάσματος στις γωνίες.

β) Οι πλάκες των γωνιών έχουν μια ιδιαίτερη μάζα που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαδικασία εγκατάστασης. Μπορεί να απαιτηθεί προσωρινή στήριξη των πλακών για να υποστηριχθεί το βάρος τους και να κρατηθούν σε μια βέλτιστη γωνία.

γ) Εύκαμπτες συνδέσεις απαιτούνται για να παρέχουν αρκετούς βαθμούς ελευθερίας κατά την εγκατάσταση, επειδή η μεμβράνη δεν είναι στην τελική της θέση και κατά την έναρξη της εγκατάστασης έχει μια θέση που καθορίζεται από τη βαρύτητα. Αυτό μπορεί, για παράδειγμα, να προκαλέσει μια περιστροφή της κατά μια γωνία  $180^\circ$  κατά την ανύψωση του υφάσματος.

δ) Κατά την τοποθέτηση χρειάζονται διατάξεις εγκατάστασης για να διευκολύνουν την ανύψωση, την τοποθέτηση σε ακριβές σημείο, το τέντωμα και την προένταση της μεμβράνης. Οι γωνίες πρέπει να παρέχουν τα μέσα διευκόλυνσης για αυτές τις ενέργειες.

Λειτουργίες όταν η εγκατάσταση ολοκληρωθεί:

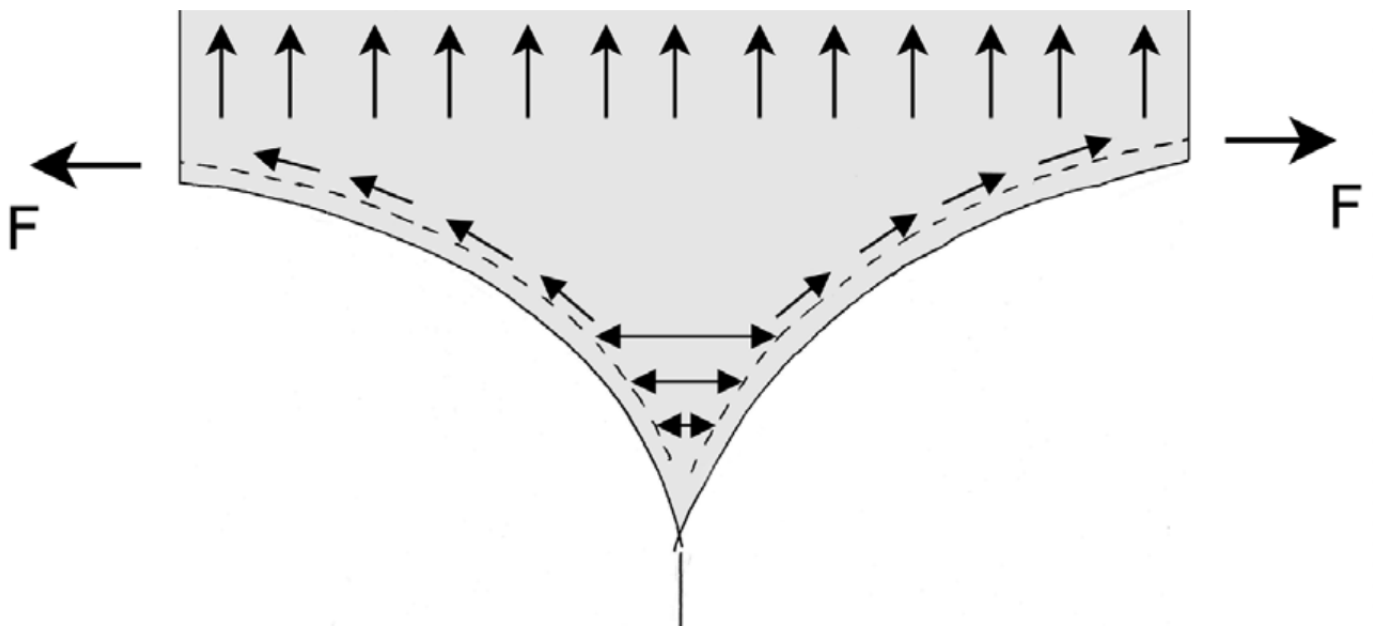
ε) Την μεταφορά των δυνάμεων μέσω των καλωδίων των ορίων. Οι δυνάμεις δεν μεταφέρονται απευθείας στις γωνίες από το ύφασμα, αλλά περνούν ουσιαστικά μέσα από τα καλώδια των ορίων που τις μεταφέρουν, στη συνέχεια, στις γωνίες.

στ) Τη μεταφορά των εφαπτομενικών δυνάμεων. Μια διπλά καμπυλωμένη μεμβράνη έχει καταπονήσεις και στις δύο διευθύνσεις του στημονιού και του υφαδιού. Οι κάθετες τάσεις προς το ένα άκρο μεταφέρονται στο ακραίο στοιχείο. Οι τάσεις στην άλλη κατεύθυνση τρέχει κατά μήκος του ορίου και πρέπει να συλλέγονται σε κάθε άκρο, π.χ. στις γωνίες. Όταν ένα καλώδιο άκρης είναι χαλαρό μέσα σε μια θήκη, η εφαπτομενική δύναμη μπορεί να προκαλέσει κίνηση του καλωδίου σε σχέση με την θήκη. Παρέχοντάς έναν τρόπο για την αποτροπή αυτής της κίνησης η εφαπτομενική δύναμη απορροφάται.

ζ) Γεωμετρική συμβατότητα. Είναι σημαντικό ότι μετά την εγκατάσταση όλα οι δυνάμεις που συλλέγονται σε μια γωνία τρέχουν κατά μήκος των γραμμών του συστήματος έτσι ώστε να αποφεύγεται η εκκεντρικότητα και οι συγκεντρώσεις τάσεων στις γωνίες οι οποίες, μακροπρόθεσμα, θα μπορούσαν να προκαλέσουν αστοχία της σύνδεσης.

η) Ακρίβεια στην κατασκευή. Σχετικά με το (ζ) ανωτέρω, ο σχεδιασμός πρέπει να είναι σύμφωνα με τις γραμμές του συστήματος, αλλά όταν η κατασκευή των γωνιών είναι ανακριβής το ίδιο πρόβλημα μπορεί να προκύψει.

ι) Δυνατότητα ρύθμισης. Για να είναι σε θέση να τελειοποιηθεί η μεμβράνη κατά την εγκατάσταση ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, να δώσουν προένταση στη μεμβράνη, οι γωνίες πρέπει να είναι εφοδιασμένες με σύστημα δυνατότητας ρύθμισης.

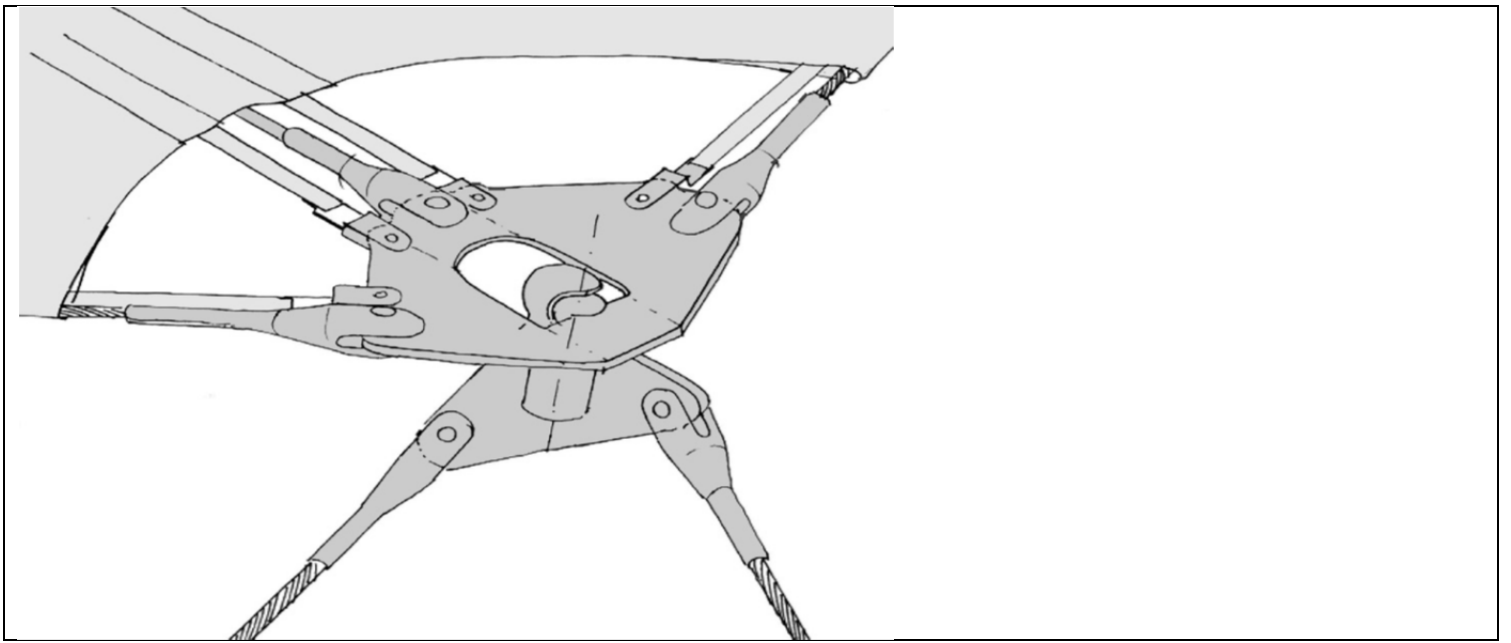


Σχ. 6.24 Ροή της δύναμης σε γωνιακό σημείο. Κατά μήκος του καλωδίου του ορίου προκύπτει μια εφαπτομενική δύναμη

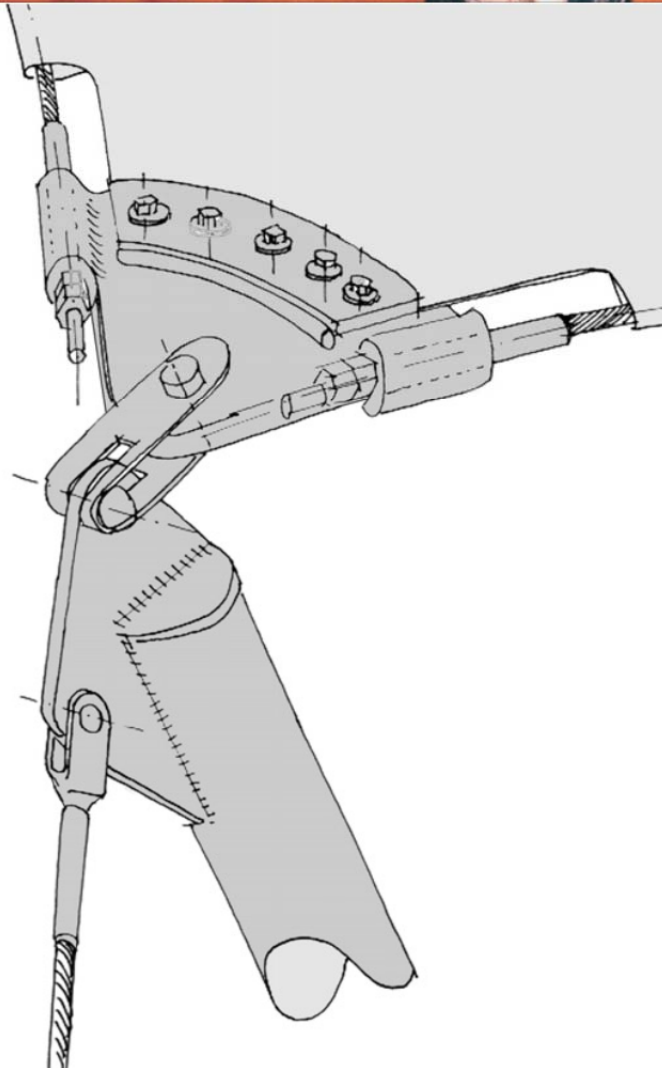
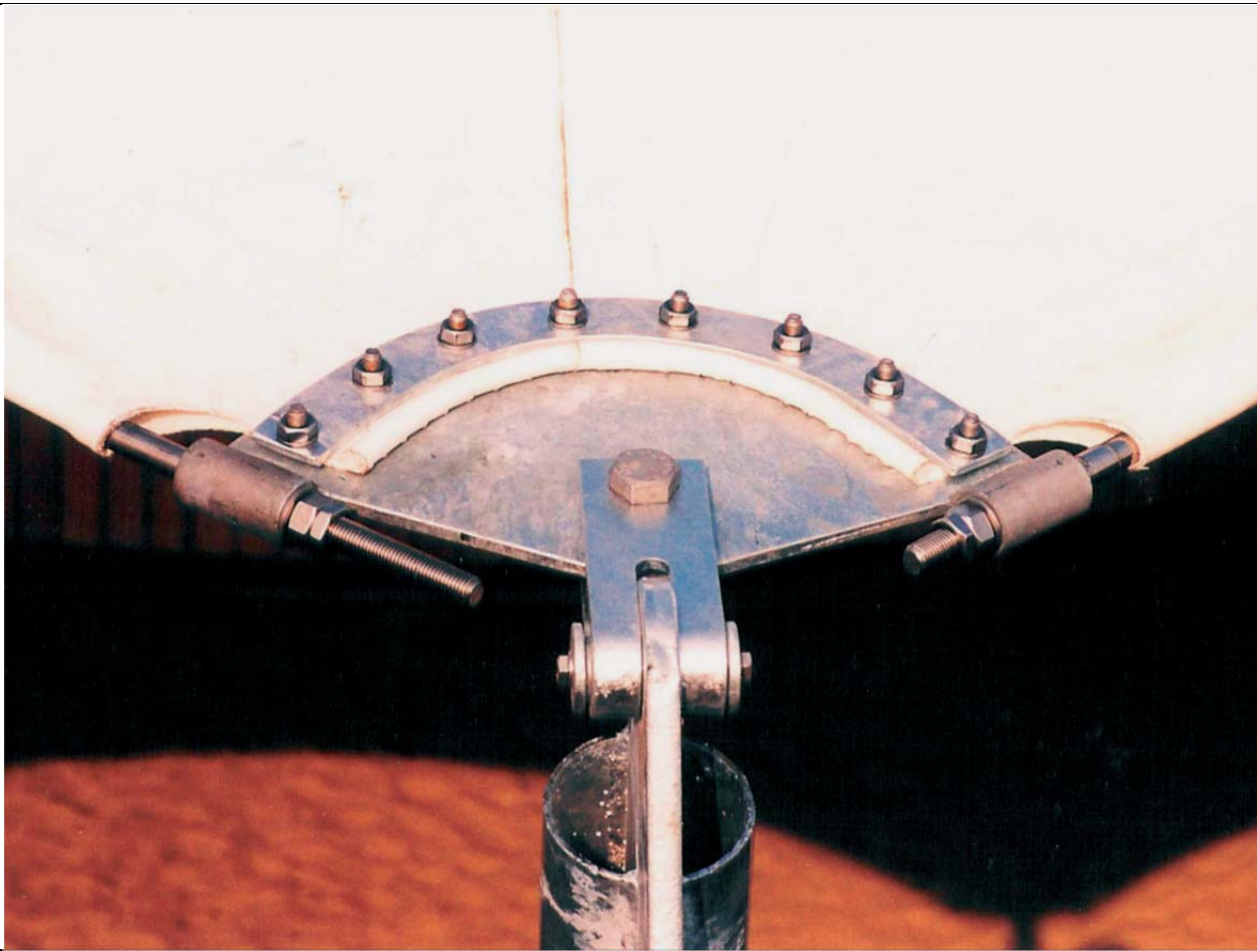
Υπάρχουν 5 τύποι γωνιών:

- 1) Γωνιακή πλάκα εκτός του υφάσματος, και ρυθμιζόμενες ξεχωριστά από το ύφασμα και τα καλώδια (PVC / Polyester, PTFE / Γυαλί)
- 2) Γωνιακή πλάκα που στερεώνεται στο ύφασμα, ρυθμιζόμενα καλώδια (PVC / Polyester, PTFE / Γυαλί)
- 3) Γωνιακή πλάκα που συνδέεται με keder στο άκρο του υφάσματος, καλώδια ρυθμιζόμενα ή σταθερού μήκους (PTFE / Γυαλί)
- 4) Γωνιακή πλάκα που συσφίγγεται στο ύφασμα, καλώδιο συνεχούς ακμής (PVC / Polyester)
- 5) Γωνιακή πλάκα, σύνδεση με ιμάντες (PVC / Polyester)

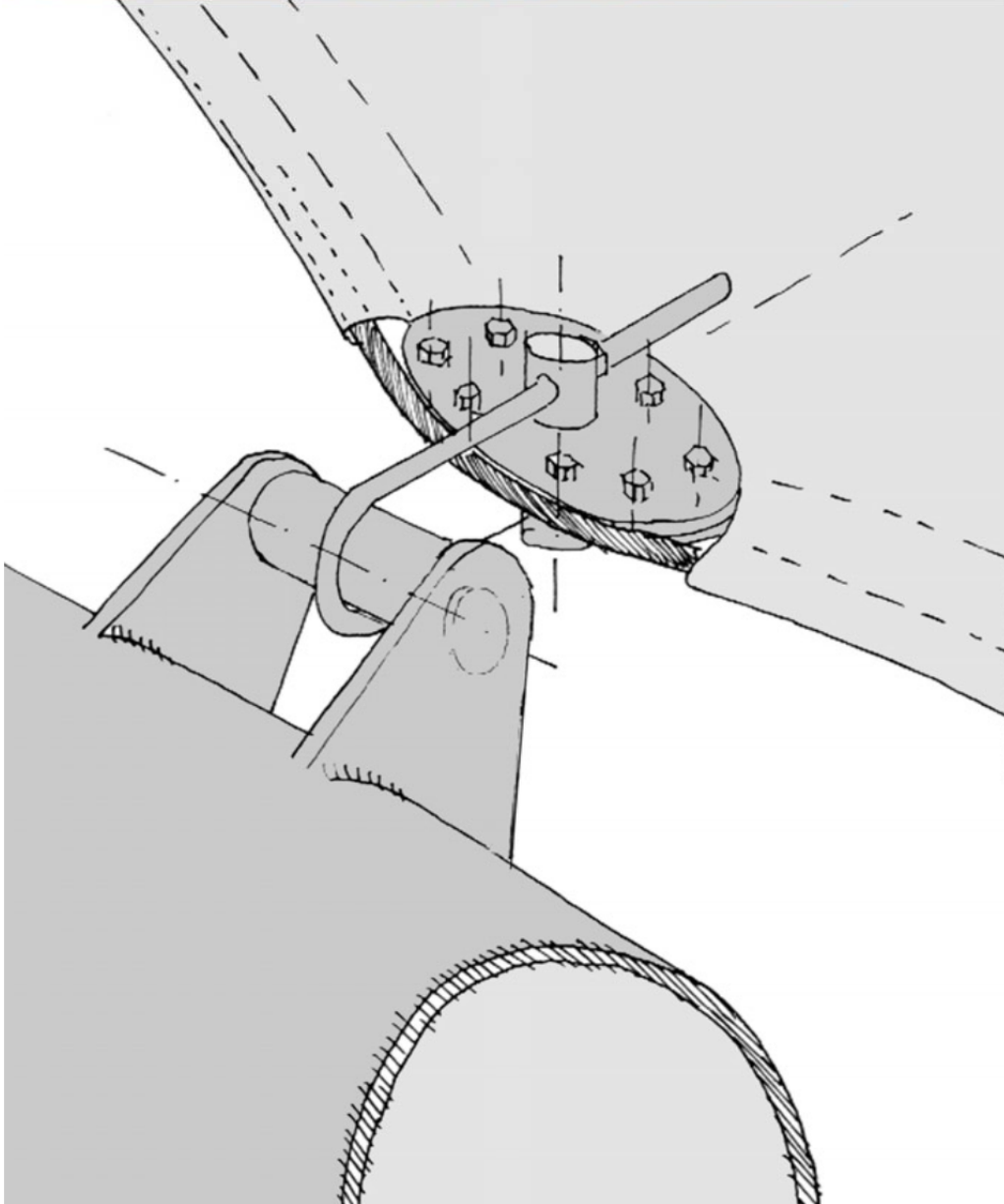




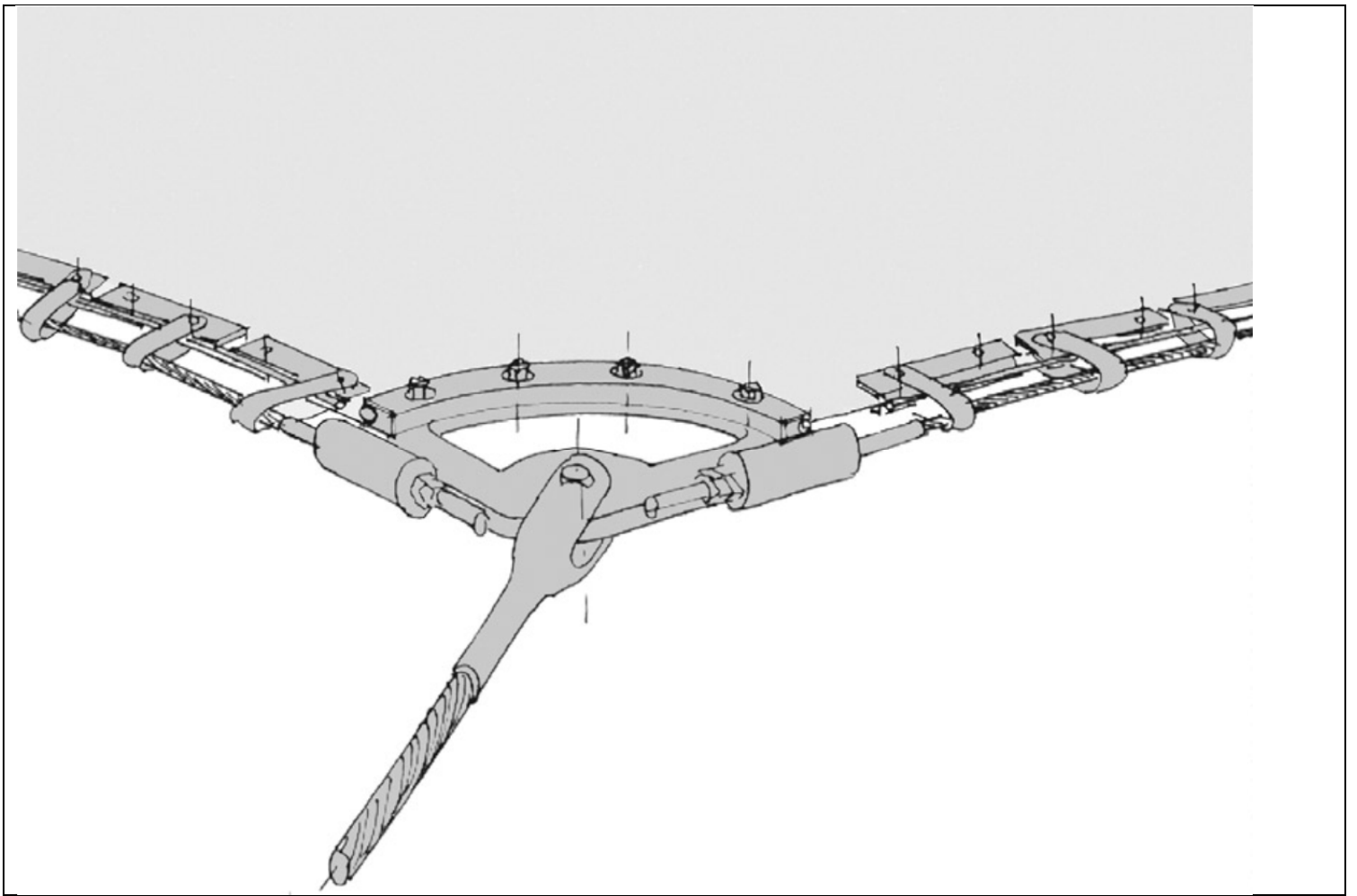
Σχ. 6.25 Γωνιακή πλάκα με θέση εκτός υφάσματος με μικρές ρυθμιζόμενες ζώνες που εμποδίζουν την ανοδική ολίσθηση της μεμβράνης κατά μήκος των καλωδίων της άκρης.



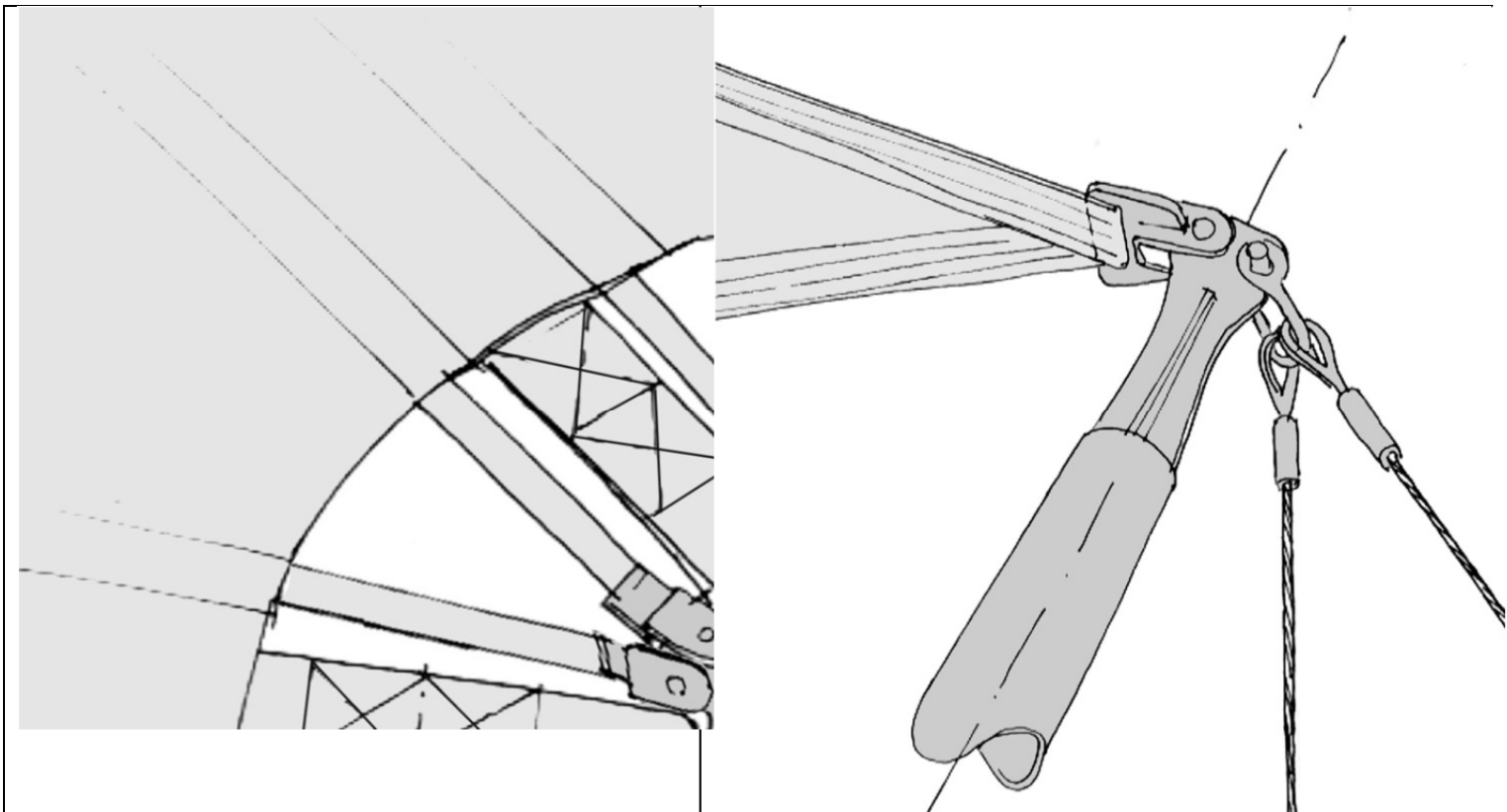
Σχ. 6.26 Με σύσφιξη του υφάσματος στην πλάκα η ανοδική ολίσθηση της μεμβράνης αποτρέπεται.



Σχ. 6.27 Σε περίπτωση συνεχούς καλωδίου άκρης χρησιμοποιούνται συχνά οβάλ πλάκες σύσφιξης. Αυτές οι πλάκες συνδέονται με την κατασκευή υποστήριξης με ρυθμιζόμενους κοχλίες σχήματος U.



Σχ. 6.28 ύφασμα συνδεδεμένο με γωνιακή πλάκα μέσω ενός keder, τα καλώδια της άκρης είναι ρυθμιζόμενα και συνδέεται με την μεμβράνη με ελάσματα σε σχήμα U.

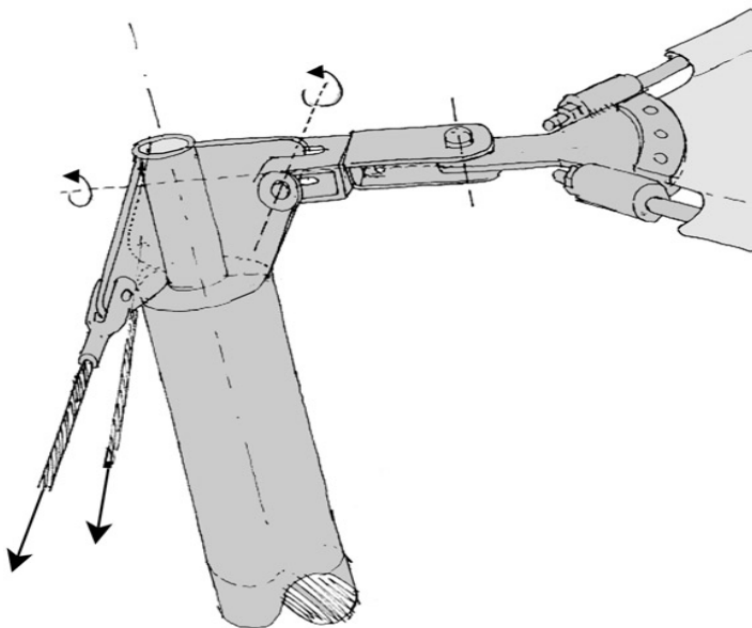
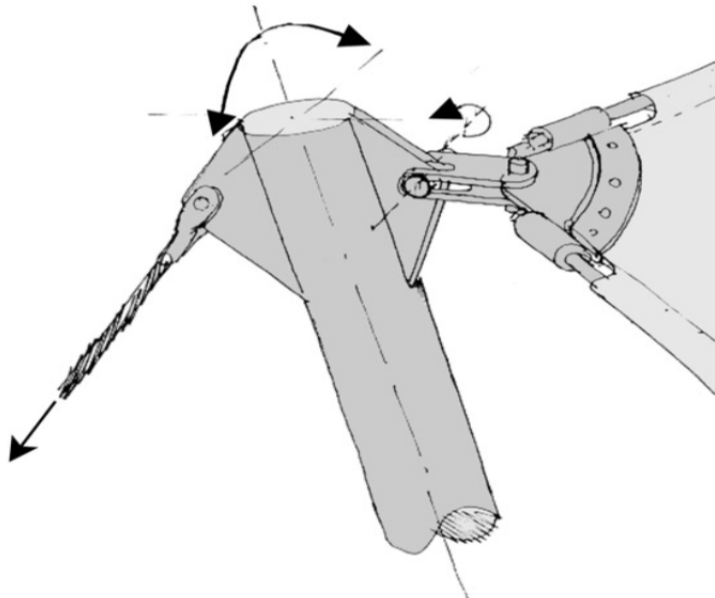
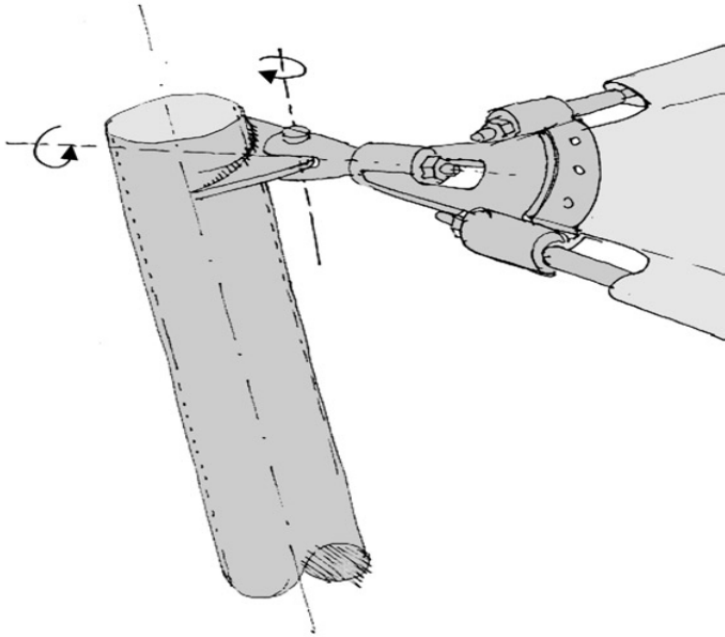


Σχ. 6.29 ύφασμα συνδεδεμένο στη γωνία μέσω ιμάντων



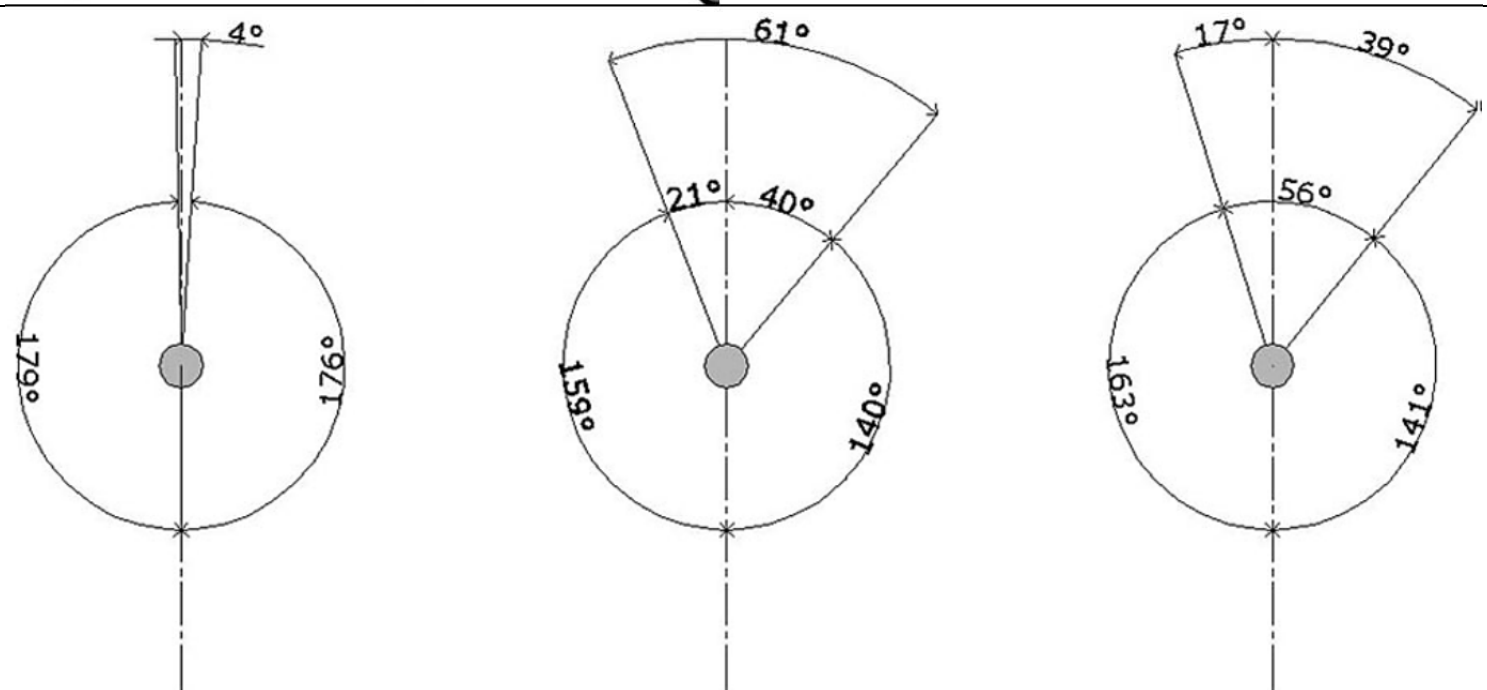
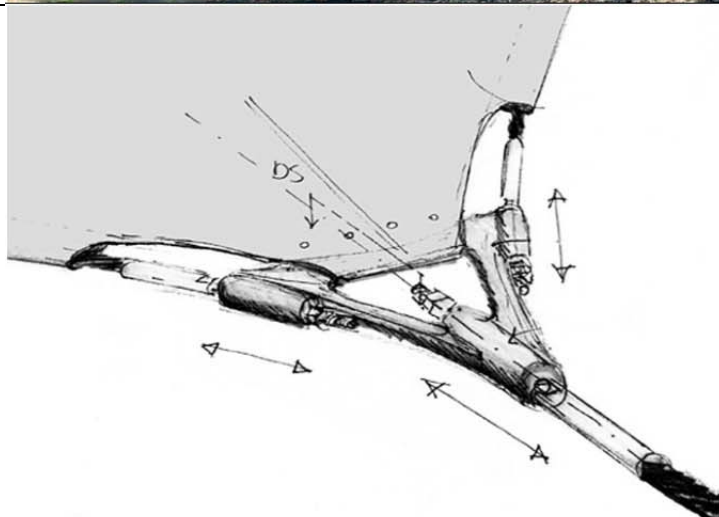


Σχ. 6.30 Διαφορετικά παραδείγματα συνδέσεων γωνιών με ιμάντες



Σχ. 6.31 Διαφορετικοί τρόποι σύνδεσης πλάκας γωνίας στην φέρουσα δομή

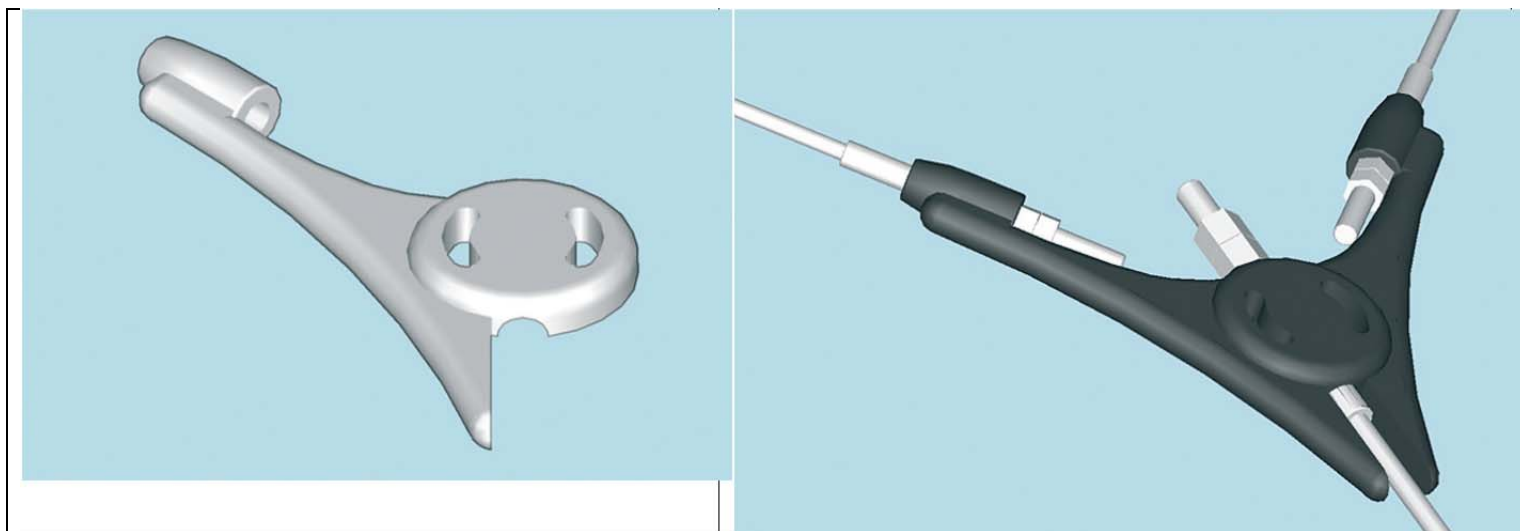
Στις εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης οι γεωμετρικές συνθήκες σε κάθε γωνιακή σύνδεση διαφέρουν από τη μία στην άλλη όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.32. Αυτό σημαίνει ότι κάθε γωνιακή πλάκα θα πρέπει να σχεδιαστεί χωριστά με κάποιες ορισμένες πάγιες αρχές. Στην περίπτωση της χύτευσης ένα ειδικό καλούπι θα ήταν αναγκαίο για κάθε γωνία.



Σχ. 6.32 Κάλυψη σκηνής. Παράδειγμα πρώιμου σκίτσου στο οποίο η "φυσική ροή δυνάμεων» εμφανίζεται. Ανάλυση των γεωμετρικών συνθηκών (σε επίπεδη επιφάνεια) σε διάφορα σημεία γωνιών.

Οι γεωμετρικές συνθήκες στα διάφορα σημεία γωνιών φαίνονται στο Σχήμα 6.32. Σε αυτή την ανάλυση τα σημεία φαίνονται σε ένα μόνο επίπεδο, απλοποιώντας την τρισδιάστατη εικόνα ισορροπίας που λαμβάνεται από την εύρεση μορφής. Στο επίπεδο και μοντελοποιημένα ως μια ευθεία γραμμή, τόσο η ακμή όσο και τα κύρια καλώδια είναι ένα αποτέλεσμα μιας περιστροφής γύρω από ένα σημείο γωνίας. Σε αυτή την περίπτωση οι γεωμετρικές αποκλίσεις κάθετα προς την επιφάνεια της μεμβράνης είναι μικρές και ως εκ τούτου μια τέτοια απλοποίηση είναι επιτρεπτή.

Στο σχήμα 6.33, εμφανίζεται το επόμενο βήμα. Σε αυτήν την έννοια οι δύο πανομοιότυπα προϊόντα χύτευσης συνδυάζονται για να σχηματίσουν μια πλάκα γωνίας. Με ένα συνδυασμό του κατοπτρισμού και της αμοιβαίας περιστροφής, μπορούν να ικανοποιηθούν οι διαφορετικές γεωμετρικές συνθήκες. Οι συνδέσεις των καλωδίων επιτρέπουν μικρές περιστροφές σε τρεις κατευθύνσεις. Ως εκ τούτου, μια δισδιάστατη λύση των περιστρεφόμενων επιπέδων των χυτών στοιχείων μπορεί να λύσει το τρισδιάστατο πρόβλημα.



Σχ. 6.33 με τη χρήση δύο πανομοιότυπων χυτών και με κατοπτρισμό, καθώς και χρήση αμοιβαίας περιστροφής των πλακών γωνίας, ένα σύστημα ικανό να πληροί τις διαφορετικές γεωμετρικές συνθήκες θα μπορούσε να γίνει.

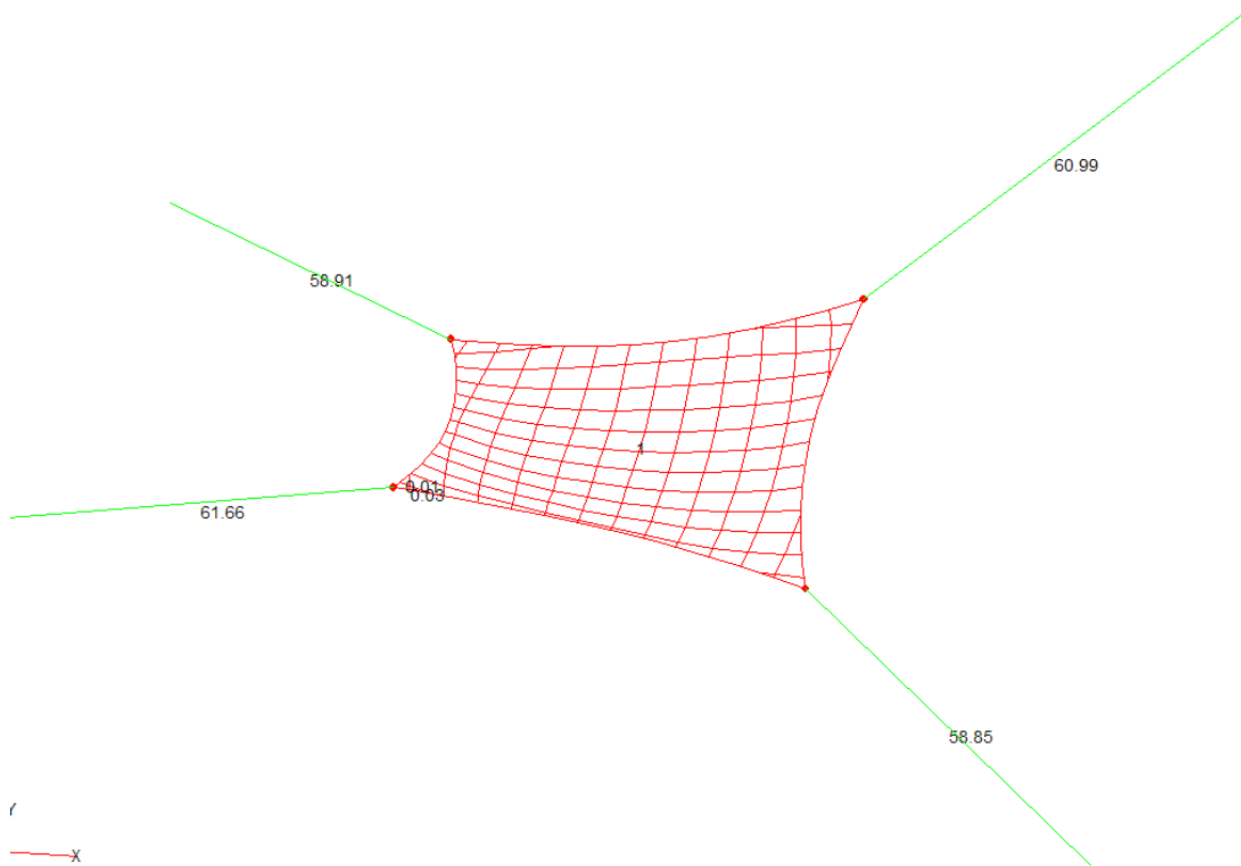
Όπως βλέπουμε είναι πολύ δύσκολο να σχεδιάσουμε μία ευέλικτη γωνιακή πλάκα που θα μπορούσε να προσαρμοσθεί σε κάθε κατασκευή καθώς απαιτείται διαφορετική γεωμετρία παραλαβής επαπτομενικών τάσεων, επικάλυψη μεμβράνης, γωνία συγκράτησης και διαφορετικό αριθμό και διαμέτρων κοχλιών σύσφιξης.

Για μικρών εκτάσεων τυποποιημένες κατασκευές όπως sail shades και εφελκυσόμενες ομπρέλες θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε τον τύπο γωνιών συγκράτησης εξωτερικά του υφάσματος είτε με όρια καλώδια είτε ιμάντες. Η πλάκα όντας έξω από το ύφασμα μπορεί να έχει μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού καθώς μπορεί να αναρτήσει την μεμβράνη με διάφορες βοηθητικές διατάξεις όπως μικρούς εντατήρες και ναυτικά κλειδιά.

Παρακάτω ακολουθεί μία περίπτωση εφαρμογής για ένα μικρό sail shade. Σε αυτή την περίπτωση απλά η στερέωση της μεμβράνης γίνεται απλά σε όλες τις γωνίες. Εάν η μεμβράνη επιβαρύνεται με ένα φορτίο χιονιού, η αντίδραση μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα για τη διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων.

Ο προσδιορισμός για τη διαστασιολόγηση των στοιχείων είναι το αποτέλεσμα των δυνάμεων αντίδρασης, το οποίο είναι το διάνυσμα των επιμέρους συνιστωσών των κατευθύνσεων  $x$ ,  $y$  και  $z$ . (Σχ. 6.34)

Η διαστασιολόγηση γίνεται βάση τυποποιημένων στοιχείων της εταιρείας CarlStahl.



Σχ. 6.34 Διανυσματική όψη των δυνάμεων αντίδρασης

Για την διαστασιολόγηση των μερών η τιμή σχεδιασμού (ULS οριακή κατάσταση) λαμβάνεται υπόψη. Η τιμή της δύναμης της μελέτης περιλαμβάνει τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας και παράγοντες συνδυασμών σύμφωνα με το DIN 1055-100, EC 1.

$$NED = \gamma * N_{ek} = 1,5 * 61,66 = 92,5 \text{ kN}$$

Προς το παρόν το σύστημα στερέωσης είναι διαθέσιμο στη διάσταση 25, 100 και 200. Το διάσταση "100" σημαίνει ότι η αντίσταση του σχεδιασμού του κάθε τμήματος είναι τουλάχιστον 100 kN.

Διαδικασία σχεδιασμού για τα στοιχεία:

$$NED = 92,5 \text{ kN} < 100 \text{ kN} = NRd$$

Για αυτό το παράδειγμα το μέγεθος του στοιχείου 100 είναι επαρκής.

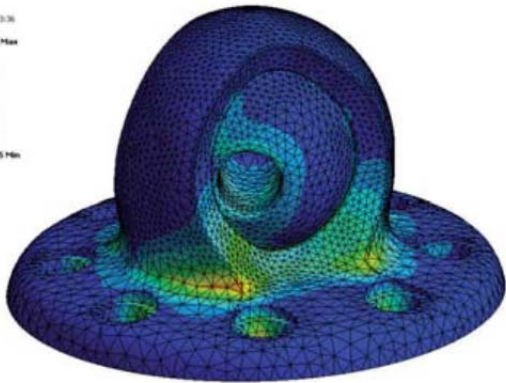
Το σύστημα περιέχει μεμονωμένα στοιχεία, τα οποία μπορούν να συναρμολογηθούν σύμφωνα με το μέγεθος του στοιχείου και των επιμέρους συνθηκών.

Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη και κομψή και χρησιμοποιείται όταν το αισθητικό αποτέλεσμα είναι πολύ πιο κρίσιμη μεταβλητή στην κατασκευή από το κόστος. Το κόστος των στοιχείων είναι αρκετά υψηλό καθώς είναι από ανοξείδωτο χάλυβα κατεργασμένο σε κέντρο κατεργασίας 5 αξόνων.









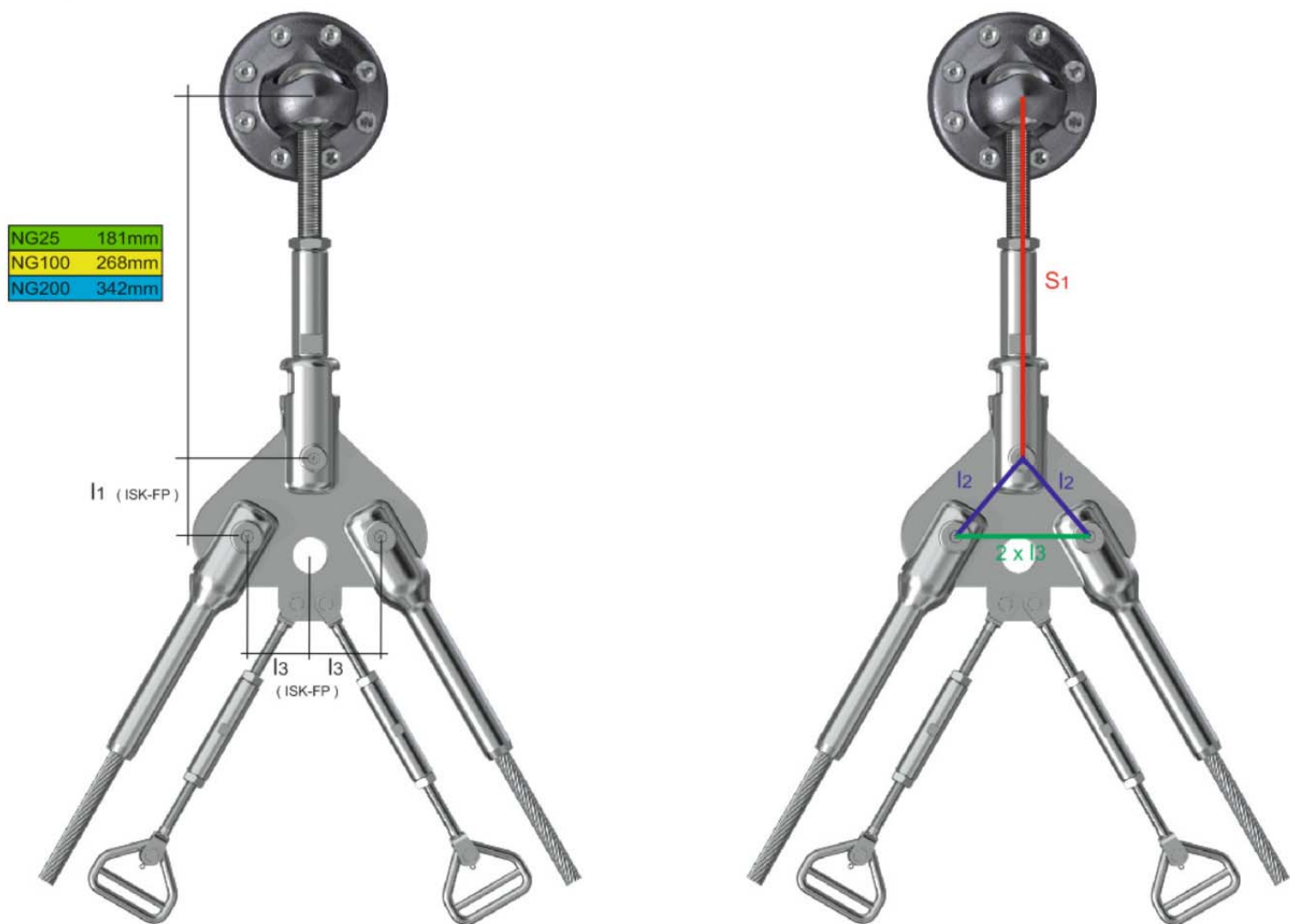
A: Static Structural (ANSYS)  
 Equivalent Stress  
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
 Unit: MPa  
 Item: 1  
 08.11.2009 13:36

746,22 MPa  
 400  
 425,03  
 365,06  
 300,00  
 240,11  
 180,14  
 120,17  
 60,197  
 0,27535 MPa



TENNECT PN

						
	Kugel Ball	Kugelhalter N Ball holder N	Zylinderkopfschrauben Socket head screw	Sechskantmutter Hexagon nut	Gabelkopf, verstellbar Fork, adjustable	Gabelanschlussplatte nach Maß auf Anfrage
Artikelnummer Part number	Abmessungen der Bauteile siehe Seite 9 ff.   Dimensions of the components see page 9 ff.					
PN 25	ISK-K25	ISK-N25	ISK-S0816	1892-1000	ISK-AF25	Customized connection plate on request
PN 100	ISK-K100	ISK-N100	ISK-S1225	1892-2000	ISK-AF100	
PN 200	ISK-K200	ISK-N200	ISK-S2035	1892-2400	ISK-AF200	



Σχ. 6.35 Μορφή σύνδεσης και τα επιμέρους στοιχεία

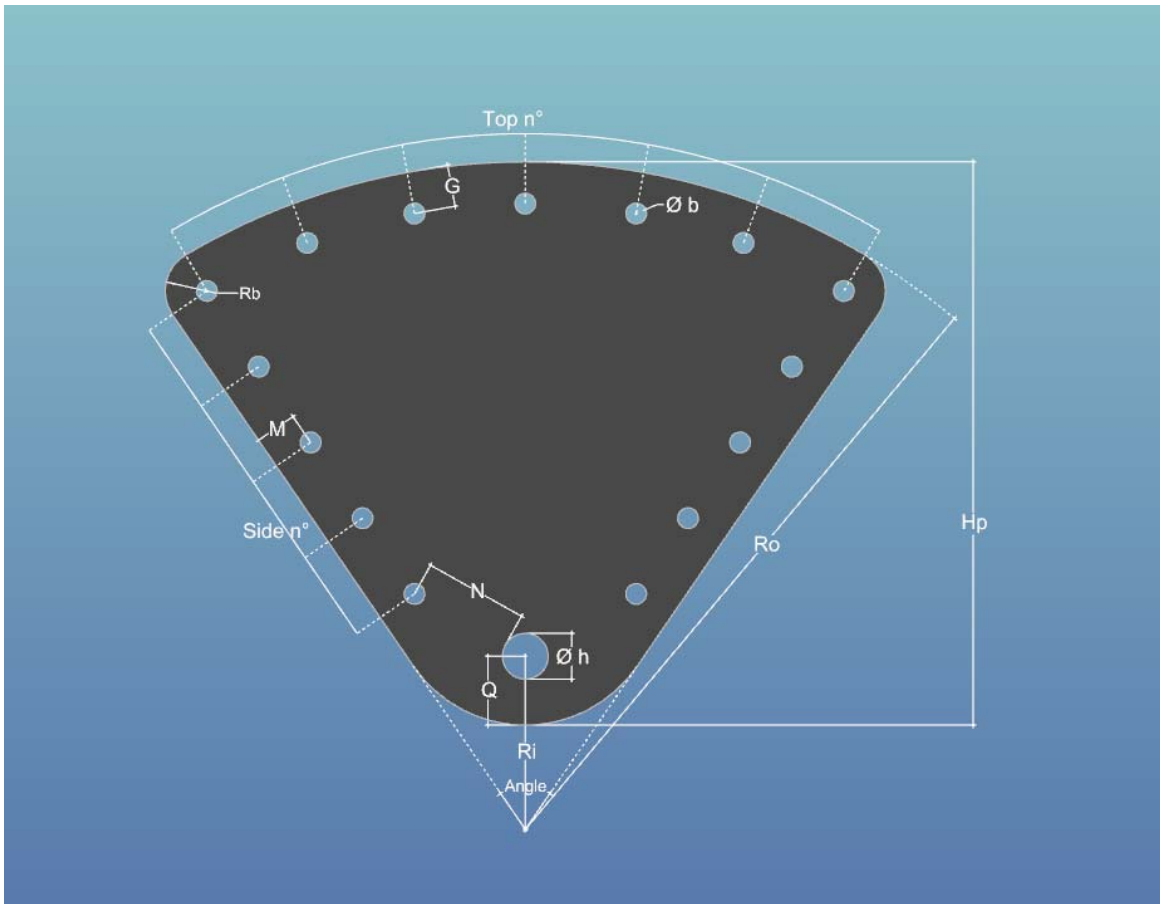
Ο προτεινόμενος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος για τον σχεδιασμό και την ανάλυση των πλακών συγκράτησης είναι η παραμετρική σχεδίαση και η δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων, βάση κάποιων κρίσιμων μεταβλητών.

Οι κρίσιμότερες γεωμετρικές μεταβλητές είναι η γωνία που σχηματίζουν οι εφαπτομενικές δυνάμεις των καλωδίων των άκρων, η ακτίνα της εξωτερικής διαμέτρου της πλάκας και η διάμετρος της οπής όπου τοποθετείται ο πείρος του εξαρτήματος συγκράτησης. Αν γίνεται χρήση τυποποιημένων εξαρτημάτων προέντασης μπορούμε να έχουμε ,μέσω πινάκων των κατασκευαστών, τις τιμές λειτουργίας και να επιλέγουμε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πείρου συγκράτησης. Επιπροσθέτως απαιτείται και ένα μεγάλο διάκενο το οποίο βοηθά την ανάρτηση και συγκράτηση βοηθητικών διατάξεων για την προένταση της μεμβράνης.

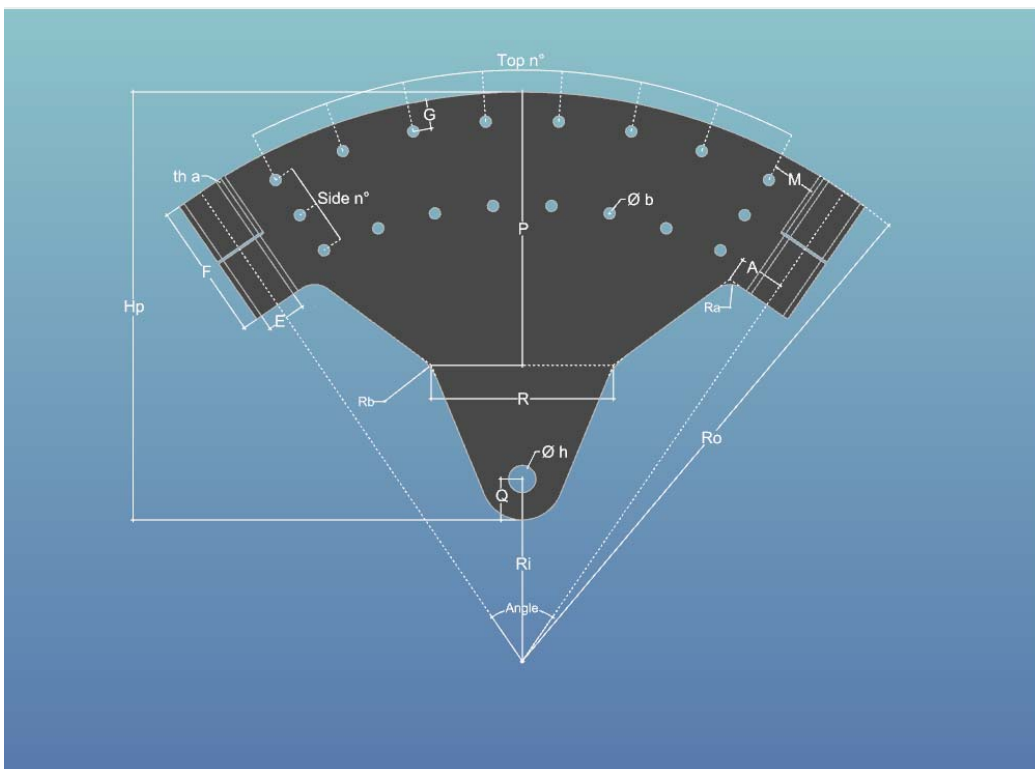
Με το τρισδιάστατο μοντέλο μπορούμε με την χρήση χωρικών πεπερασμένων στοιχείων να γίνει η εκλογή του πάχους των πλακών, ο αριθμός ,η θέση και η διάμετρος των κοχλιών συγκράτησης των πλακών επί της μεμβράνης και η γεωμετρική οικονομία του υλικού. Πολλές φορές η δυνατότητα βελτιστοποίησης να μην είναι τόσο κρίσιμος παράγοντας όσο είναι η οπτική και αισθητική όψη της γωνίας καθώς είναι ορατές στο αρχιτεκτονικό αποτέλεσμα. Σ' αυτές τις περιπτώσεις η χρήση της ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία γίνεται για να προσδιοριστεί η ασφάλεια της εφαρμογής.

Τα υλικά που κυρίως χρησιμοποιούνται για τις πλάκες συγκράτησης είναι συνήθως ο κοινός χάλυβας S235 ο οποίος μετά την κοπή σε laser γαλβανίζεται εν θερμό και βάφεται με ηλεκτροστατική βαφή βάσης ψευδαργύρου ώστε να παραμένει χωρίς οξειδωση για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το αμέσως επόμενο υλικό είναι ο ανοξειδωτος χάλυβας AISI 316 ο οποίος όμως για σχετικά οικονομική κοπή σε laser δεν ξεπερνά το πάχος των 8 χιλιοστών. Πολλές φορές όταν κρίσιμο μέγεθος είναι το βάρος χρησιμοποιούνται και κράματα αλουμινίου σειράς 6xxx.

Στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε τις γεωμετρικές παραμέτρους που είναι τα κρίσιμα μεγέθη για τον σχεδιασμό. Κάνοντας χρήση αλγορίθμων σχεδιασμού (script) σε κατάλληλο λογισμικό δημιουργούμε το δισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο.

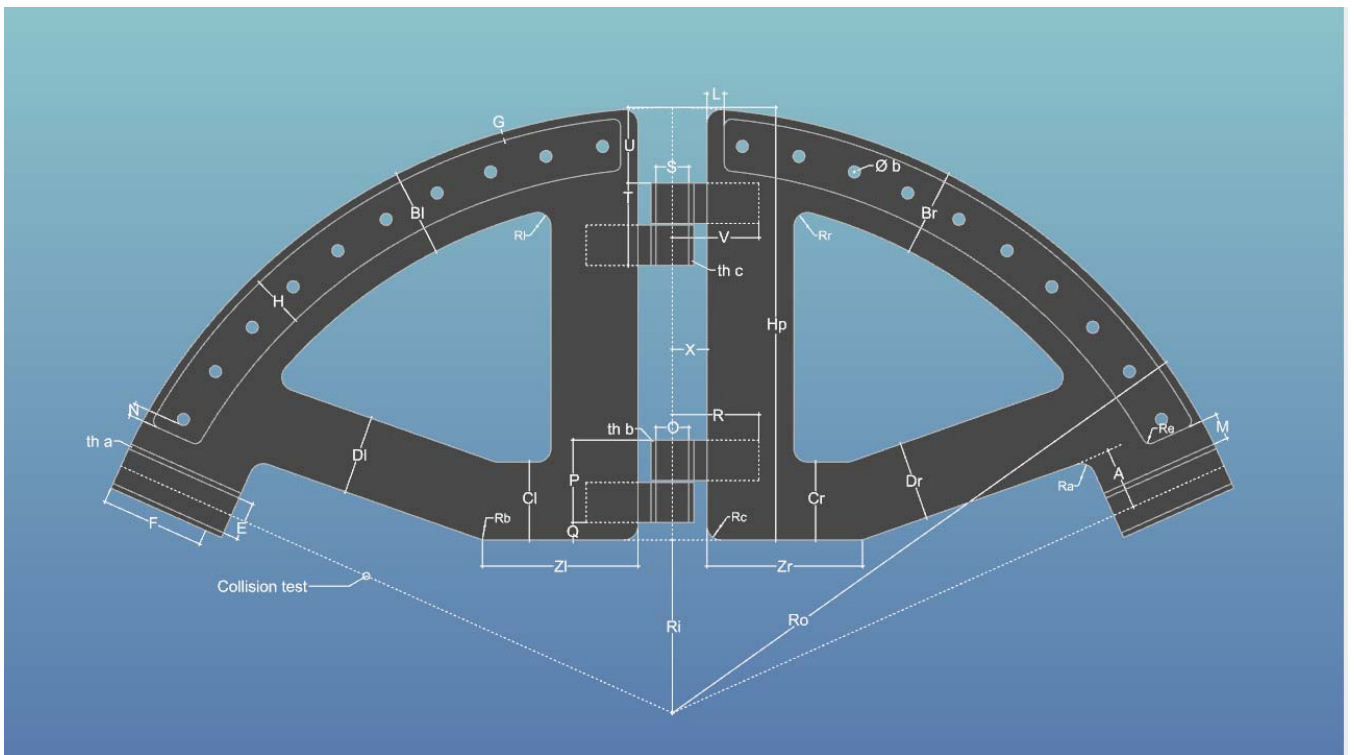


Σχ. 6.36 πλάκα συγκράτησης για μικρά σχετικά φορτία και συνεχές καλώδιο άκρων. Οι πλευρικές κοχλίες χρησιμεύουν εκτός της συγκράτησης και για οδήγηση του καλωδίου. Για αυτόν το λόγο πρέπει να έχουν κορμό. Η άνω και η κάτω πλάκα είναι όμοιες.

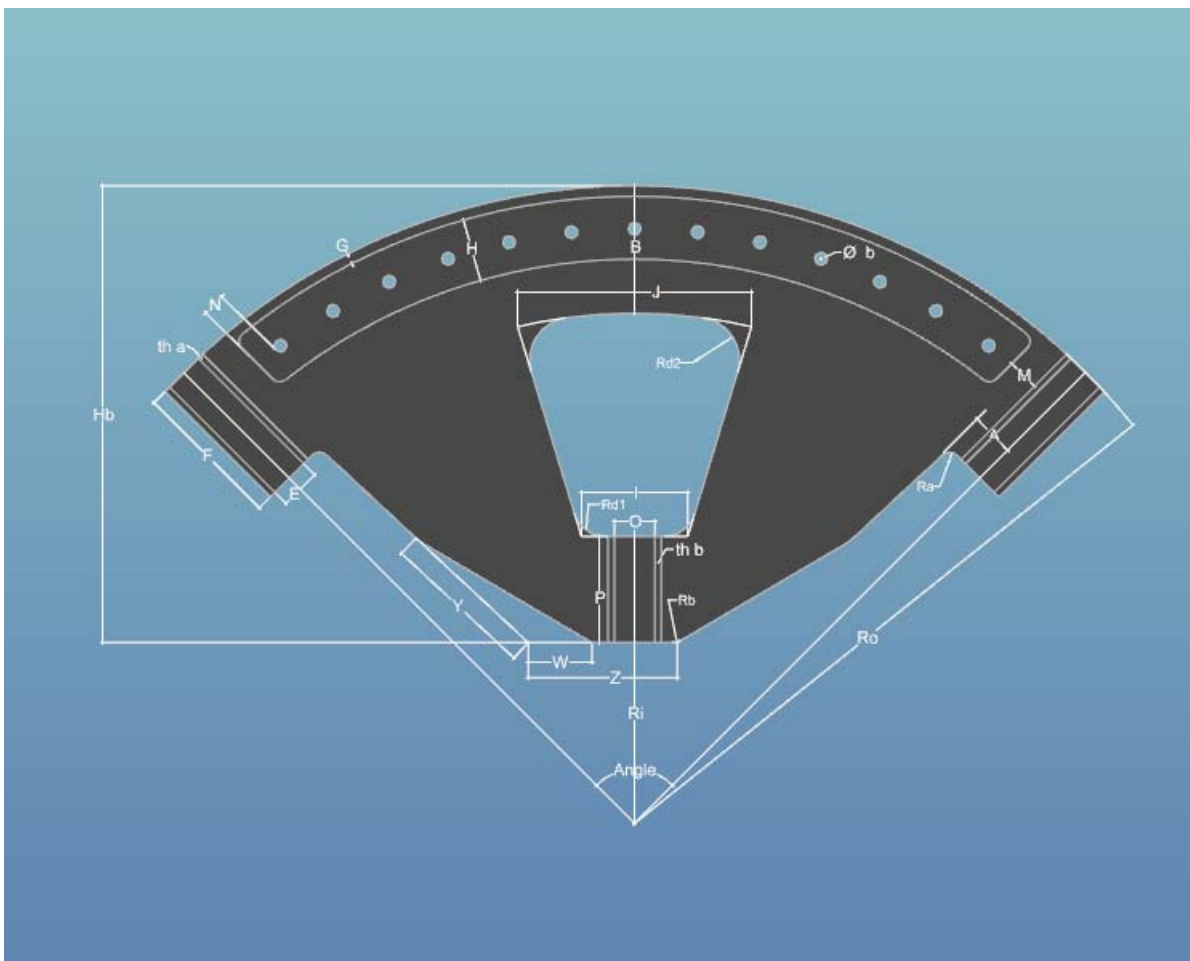


Σχ. 6.37 πλάκα συγκράτησης με ρυθμιζόμενα καλώδια άκρων. Η άνω και η κάτω πλάκα είναι όμοιες. Χρησιμοποιούνται όταν έχουμε εντατήρες ή εξωτερικά ρυθμιζόμενα καλώδια συγκράτησης.

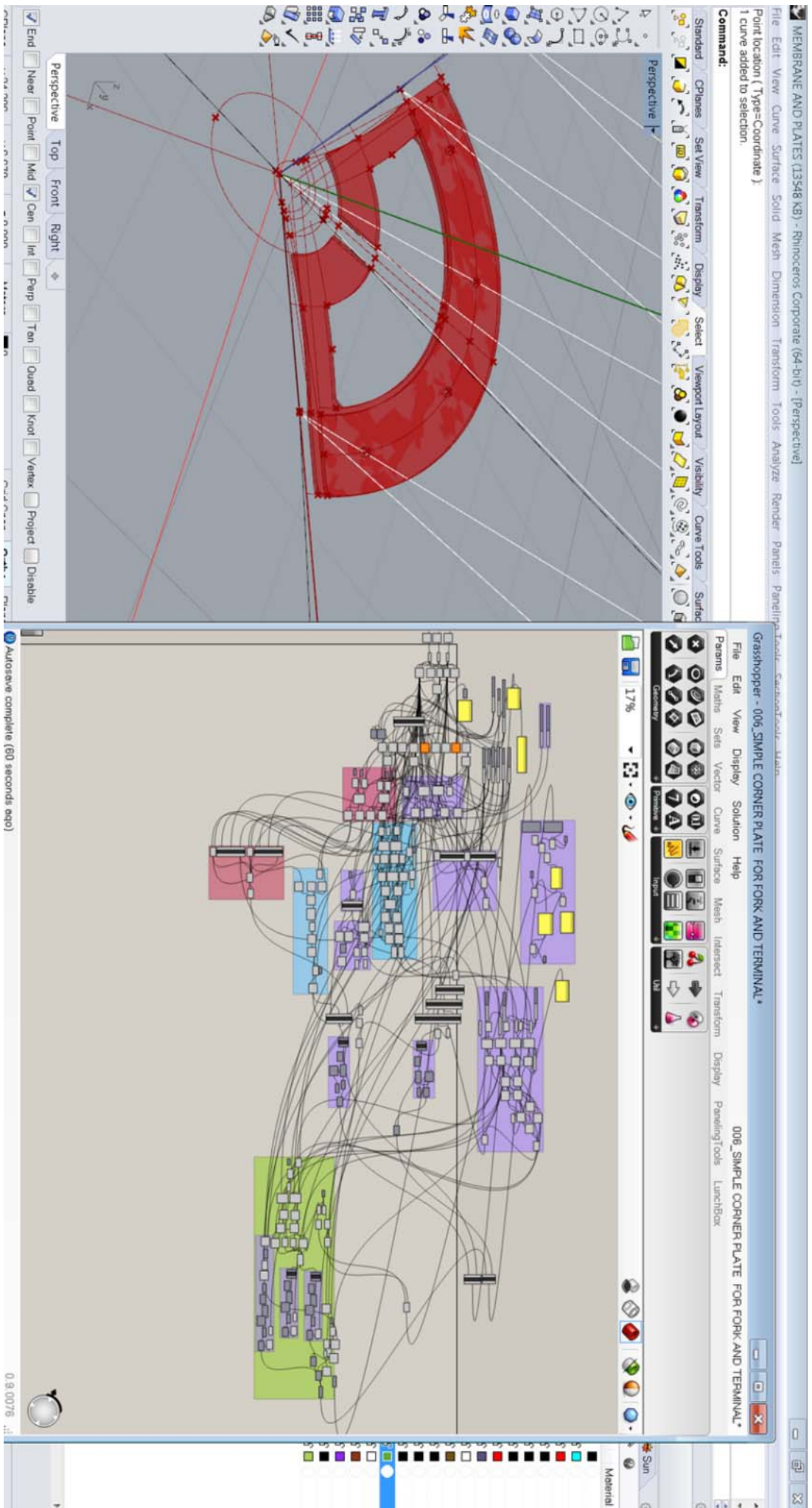




Σχ. 6.38 πλάκα συγκράτησης με ρυθμιζόμενα καλώδια άκρων. Η άνω πλάκα είναι σαφώς μικρότερης της κάτω. Χρησιμοποιούνται όταν έχουμε και καλώδια κορυφογραμμής ή κοιλάδας.

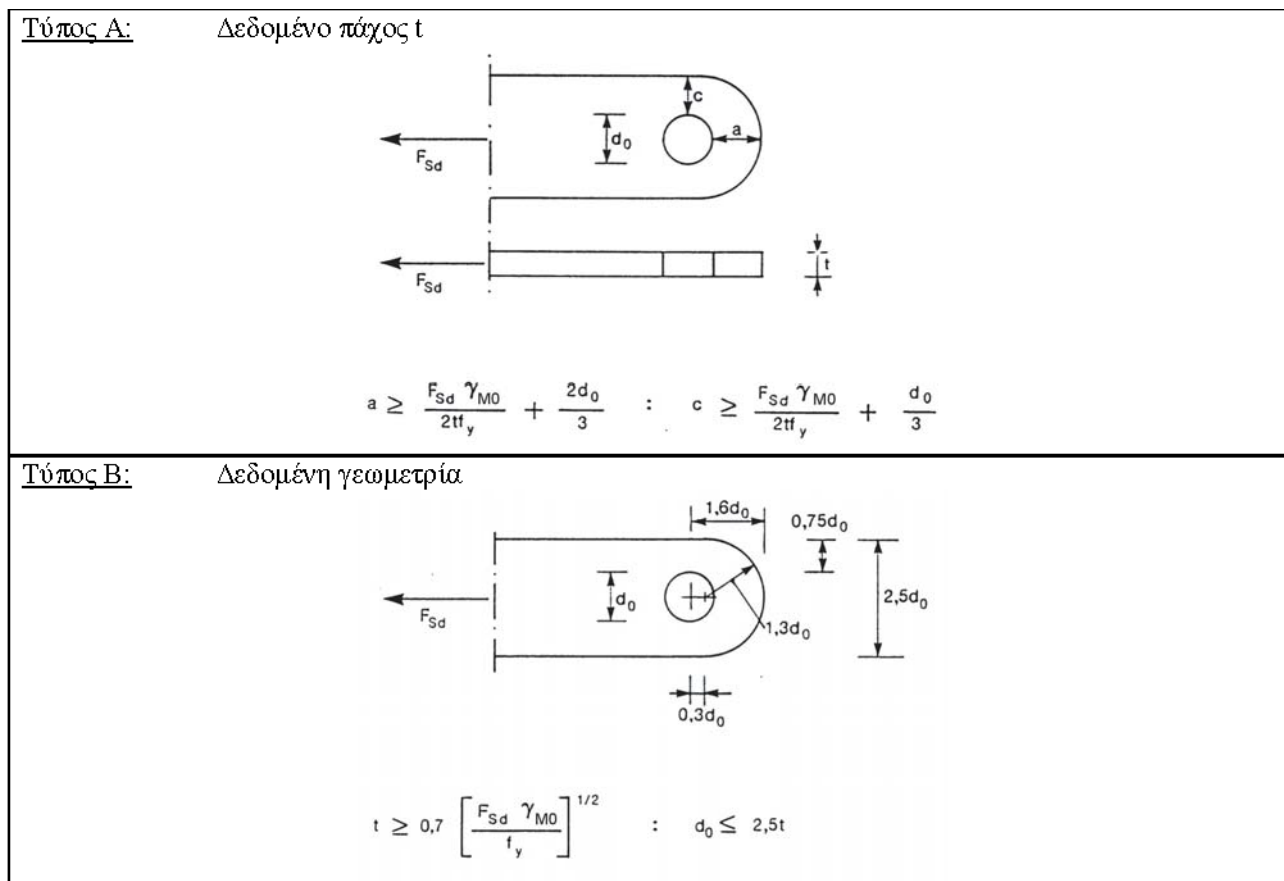


Σχ. 6.38 πλάκα συγκράτησης με ρυθμιζόμενα καλώδια άκρων. Η άνω πλάκα είναι σαφώς μικρότερης της κάτω. Είναι οι κυρίως χρησιμοποιούμενες πλάκες καθώς με εξωτερικές βοηθητικές διατάξεις δίνουμε την προένταση και το εξάρτημα συγκράτησης προσδίδει περαιτέρω προένταση ξεκινώντας από πολύ υψηλές τιμές καθώς έχει μικρή δυνατότητα επιμήκυνσης.



Σχ. 6.39 παραμετρικός σχεδιασμός.

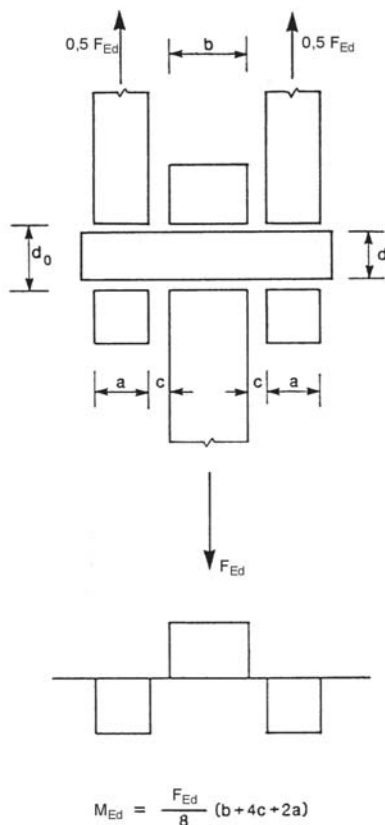
Η γωνία των εφαπτομενικών δυνάμεων συμπίπτει με την γωνία που σχηματίζει η μεμβράνη. Έτσι έχουμε το πρώτο γεωμετρικό δεδομένο. Από την ανάλυση των φορτίσεων ξέρουμε την αντίδραση στην γωνία. Έτσι είτε κάνοντας χρήση του prEn 1993-1-8:2003 του Ευροκώδικα 3 που παρατίθεται παρακάτω



Σχ. 6.40 Γεωμετρικοί περιορισμοί που συνδέονται με πείρους

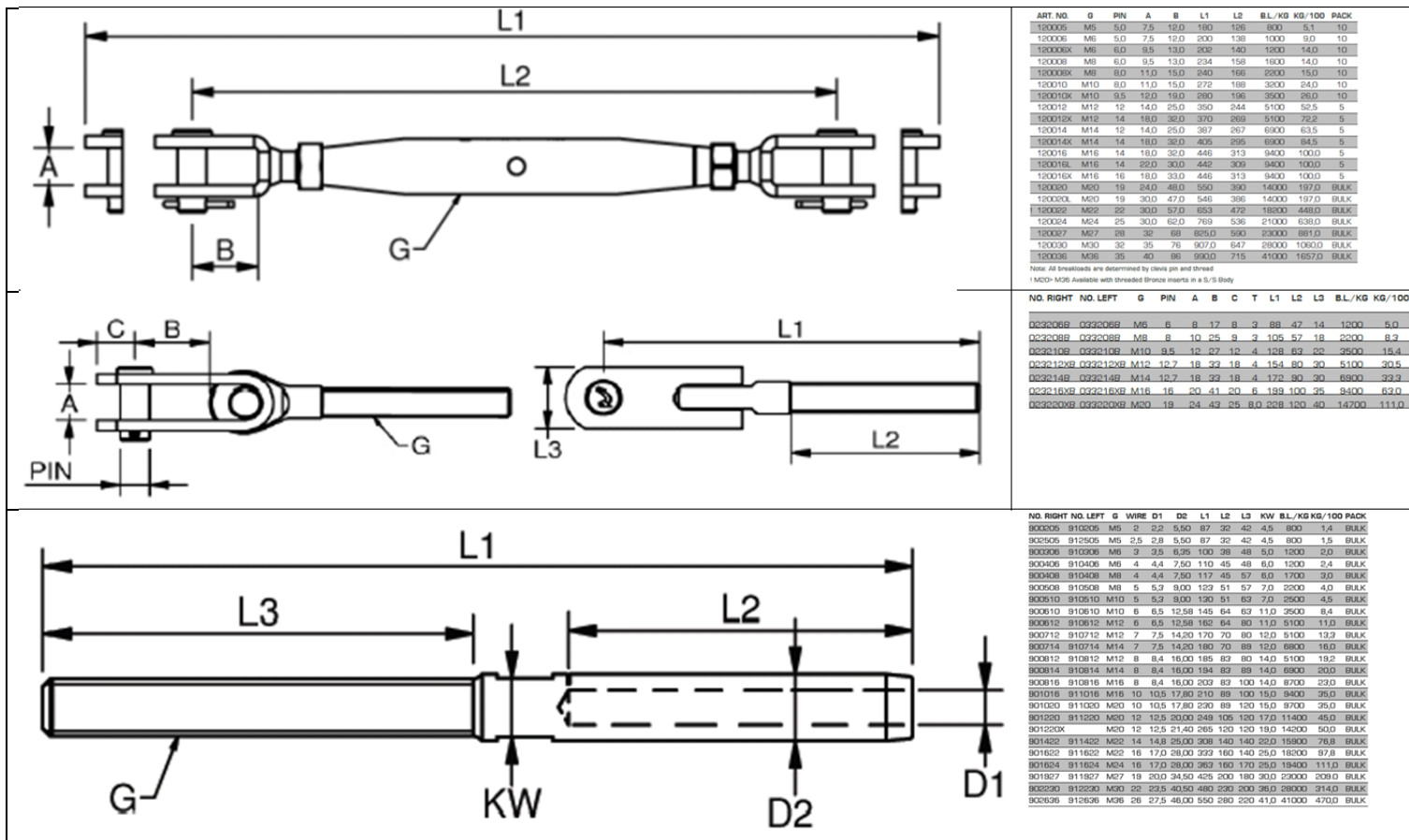
Μηχανισμός αστοχίας	Απαιτήσεις σχεδιασμού
Αντοχή σε διάτμηση του πείρου	$F_{v,Rd} = 0,6 A f_{up} / \gamma_{M2} \geq F_{v,Ed}$
Αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας του ελάσματος και του πείρου	$F_{b,Rd} = 1,5 t d f_y / \gamma_{M0} \geq F_{b,Ed}$
Αν απαιτείται ο πείρος να είναι αντικαταστάσιμος πρέπει επίσης να ικανοποιείται αυτός ο περιορισμός	$F_{b,Rd,ser} = 0,6 t d f_y / \gamma_{M6,ser} \geq F_{b,Ed,ser}$
Αντοχή σε κάμψη του πείρου	$M_{Rd} = 1,5 W_{ef} f_{yp} / \gamma_{M0} \geq M_{Ed}$
Αν απαιτείται ο πείρος να είναι αντικαταστάσιμος πρέπει επίσης να ικανοποιείται αυτός ο περιορισμός	$M_{Rd,ser} = 0,8 W_{ef} f_{yp} / \gamma_{M6,ser} \geq M_{Ed,ser}$
Αντοχή σε αλληλεπίδραση διάτμησης και ροπής του πείρου	$\left[ \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[ \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1$
$d$	είναι η διάμετρος του πείρου
$f_y$	είναι η μικρότερη από τις αντοχές σχεδιασμού του πείρου και του συνδεδεμένου μέρους
$f_{up}$	είναι η εφελκυστική αντοχή του πείρου
$f_{yp}$	είναι το όριο διαρροής του πείρου
$t$	είναι το πάχος του συνδεδεμένου μέρους
$A$	είναι η διατομή του πείρου

Σχ. 6.41 Κριτήρια σχεδιασμού συνδέσεων με πείρους



Σχ. 6.42 καμπτική ροπή σε πείρο

Είτε χρησιμοποιώντας πιστοποιημένες διατάξεις έντασης.



Σχ. 6.43 γεωμετρικά δεδομένα και λειτουργικά φορτία τυποποιημένων διατάξεων έντασης

Επίσης στην δημιουργία της γεωμετρίας μεγάλο ρόλο έχει και η διάμετρος του σπειρώματος της διάταξης ρύθμισης του καλωδίου της άκρης καθώς το περικόχλιο αυτής καθορίζει την εξωτερική διάμετρο του ηλεκτροσυγκολλημένου στην πλάκα δακτυλίου συγκράτησης.

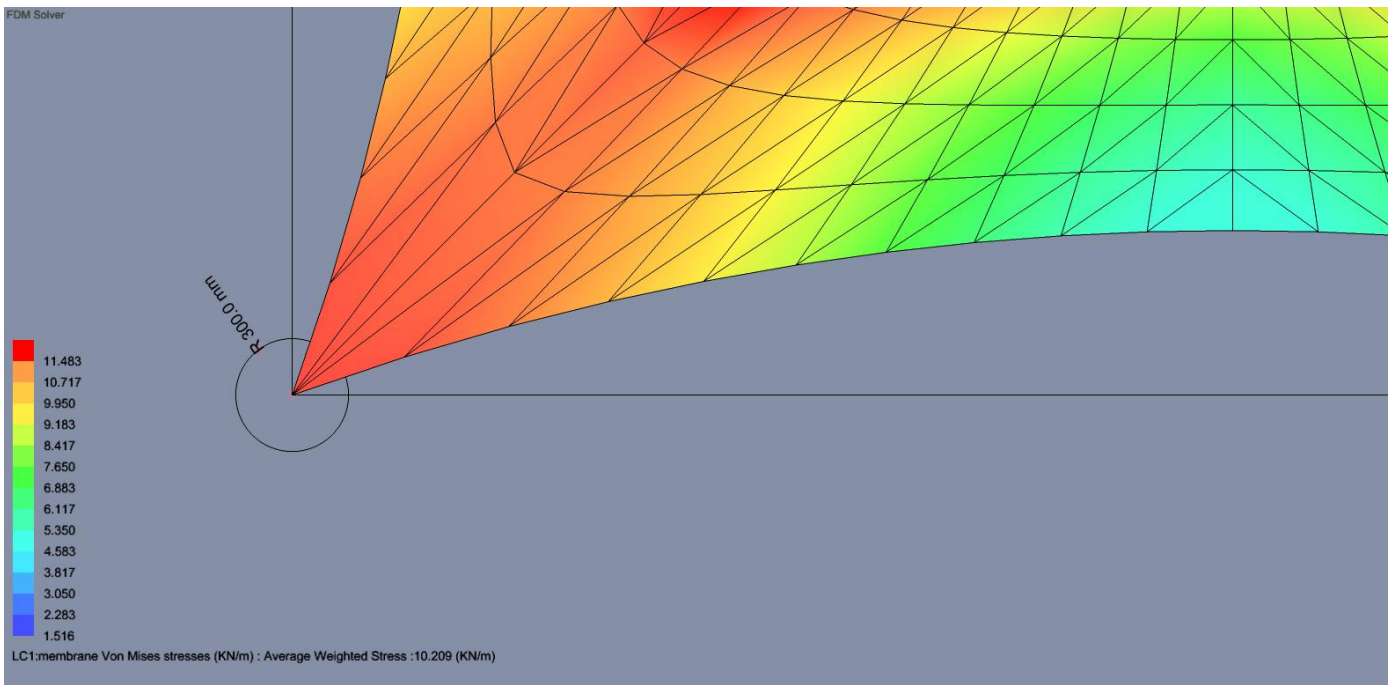


Σχ. 6.44 Τυποποιημένα εξαρτήματα επί γωνιακών πλακών Golden Iris Vessel σχεδιασμένο-υπολογισμένο από τον γράφοντα 2015.



Σχ. 6.45 Μη τυποποιημένα εξαρτήματα επί γωνιακών πλακών Stobi Vinaria FUROM σχεδιασμένο-υπολογισμένο από τον γράφοντα 2015.

Για την επιλογή της εξωτερικής διαμέτρου της πλάκας χρειαζόμαστε να έχουμε την πλήρη χαρτογράφηση των τάσεων της μεμβράνης υπό των φορτίσεων και τον συνδυασμών αυτών σύμφωνα με τον Ευροκώδικα. Λαμβάνοντας υπόψη, ότι οι τάσεις λειτουργίας της μεμβράνης δεν πρέπει να ξεπερνάνε το  $\frac{1}{4}$  (25%) της τάσης θραύσης της μεμβράνης, υπολογίζουμε τα πεδία των τάσεων της μεμβράνης κοντά στις γωνίες, όπου γίνεται μεγάλη συσσώρευση τάσεων, και αποφασίζουμε την τιμή της εξωτερικής διαμέτρου της γωνιακής πλάκας.



Σχ. 6.46 Θέτοντας ως παράμετρο την μέγιστη επιτρεπόμενη τάση επιλέγουμε την ακτίνα της γωνιακής πλάκας.

Μετά την επιλογή των γεωμετρικών στοιχείων δημιουργούμε την πλάκα στον τρισδιάστατο χώρο. Καθώς η πλάκα κατά την τρίτης διάσταση δημιουργείται με εξώθηση (extrude) κατά το μήκος του πάχους της θα πρέπει να υπολογιστεί το πάχος. Αυτό μπορούμε να το βρούμε κάνοντας χρήση του παρακάτω :

$$t \geq F \cdot \gamma_{M0} / (1,5 \cdot d \cdot f_y)$$

6.1

όπου

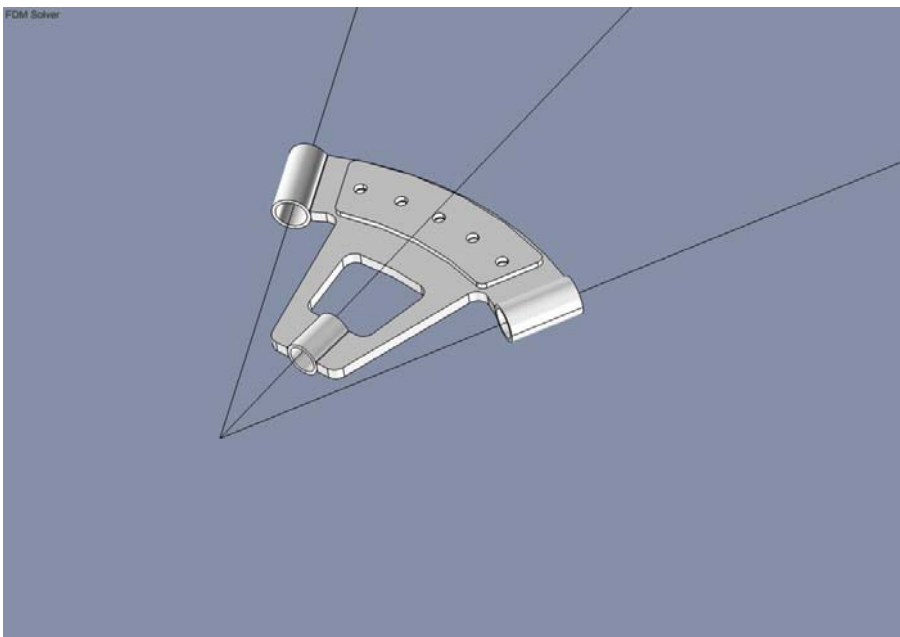
t είναι το πάχος του ελάσματος

F είναι η εξασκούμενη συνολική δύναμη συγκράτησης

$\gamma_{M0}$  είναι συντελεστής ασφαλείας με τιμή 1,00-1,25

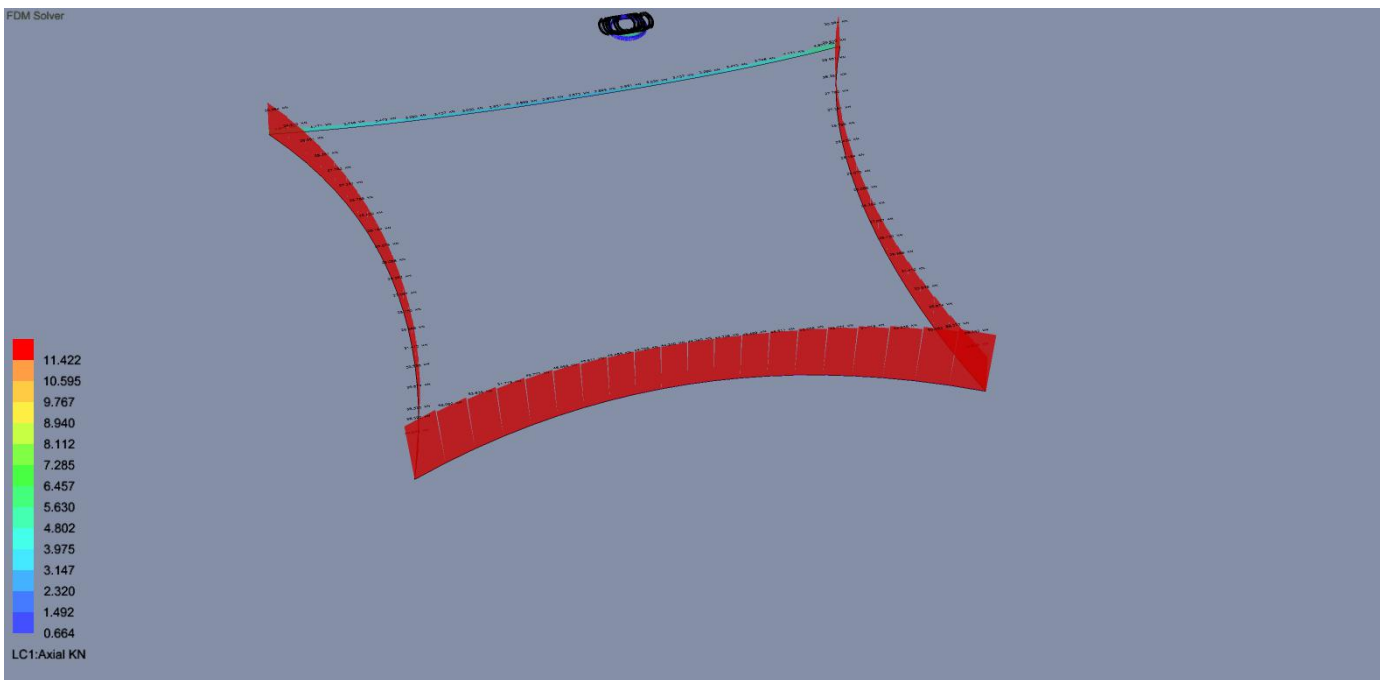
d είναι η διάμετρος του πείρου

$f_y$  είναι το όριο διαρροής του ελάσματος

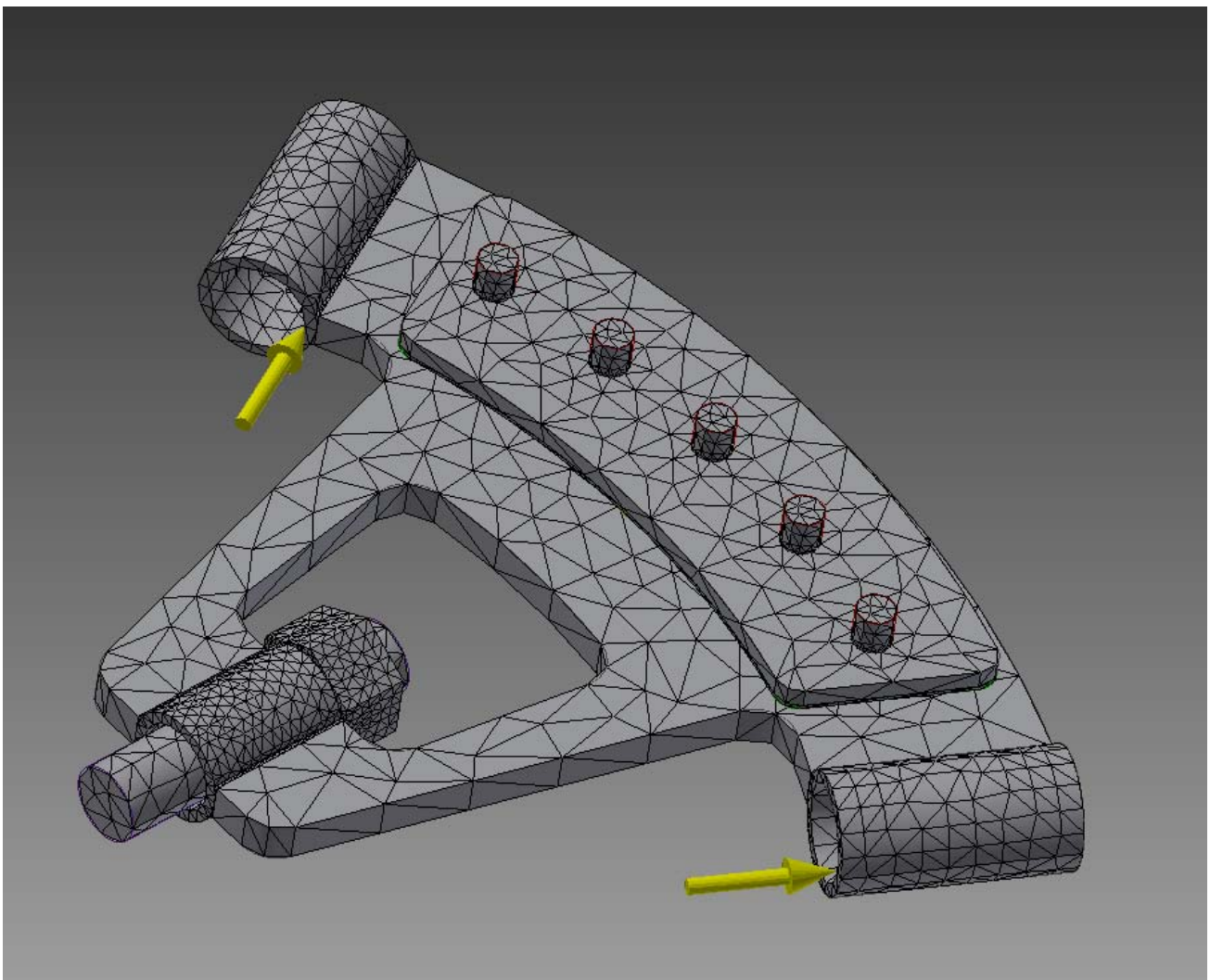


Σχ. 6.46 Η τρισδιάστατη πλάκα στην γωνία της μεμβράνης

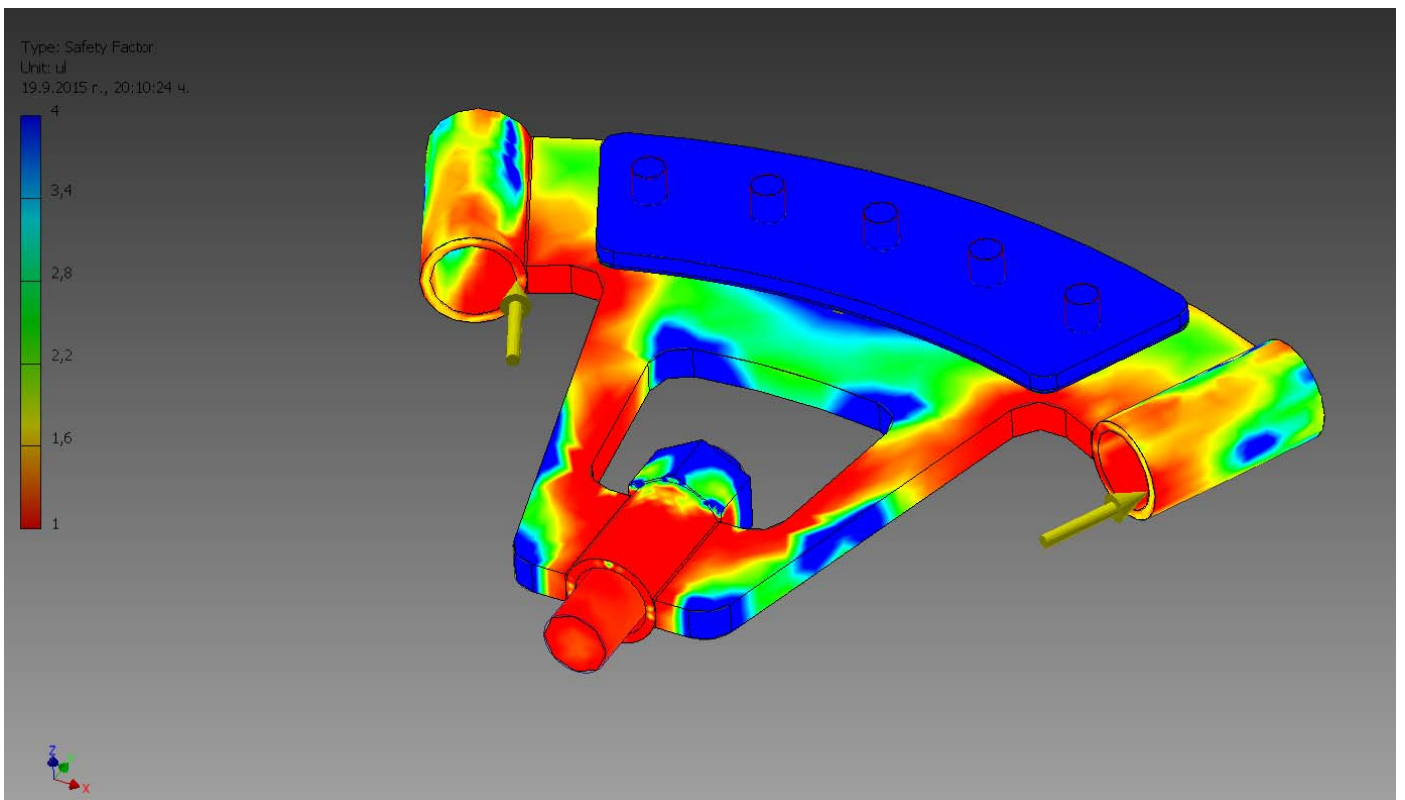
Επίσης από την ανάλυση βρίσκουμε τις εφελκυστικές δυνάμεις που δρουν στην γωνιακή πλάκα μέσω των δακτυλίων συγκράτησης των καλωδίων. Επίσης αν ανάγουμε την φόρτιση της μεμβράνης τοπικά από  $\text{kN/m}$  σε  $\text{kN/m}^2$  για πάχος 1 χιλιοστού μπορούμε να ορίσουμε χωρικά πεπερασμένα στοιχεία για την ανάλυση του συστήματος της γωνιακής πλάκας.



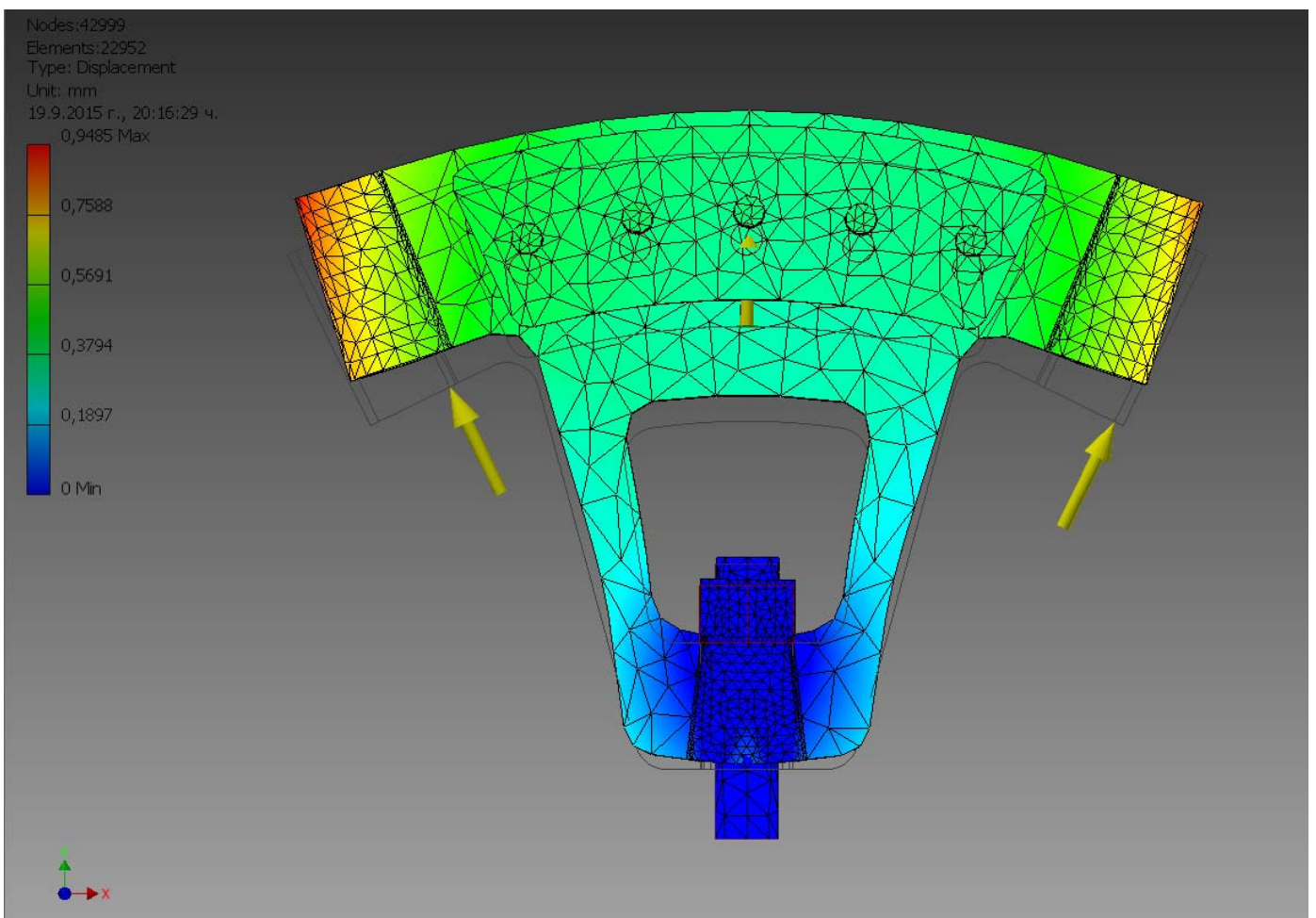
Σχ. 6.46 Οι εφελκυστικές επαππομενικές δυνάμεις στην γωνιακή πλάκα της μεμβράνης



Σχ. 6.47 Ανάλυση με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία



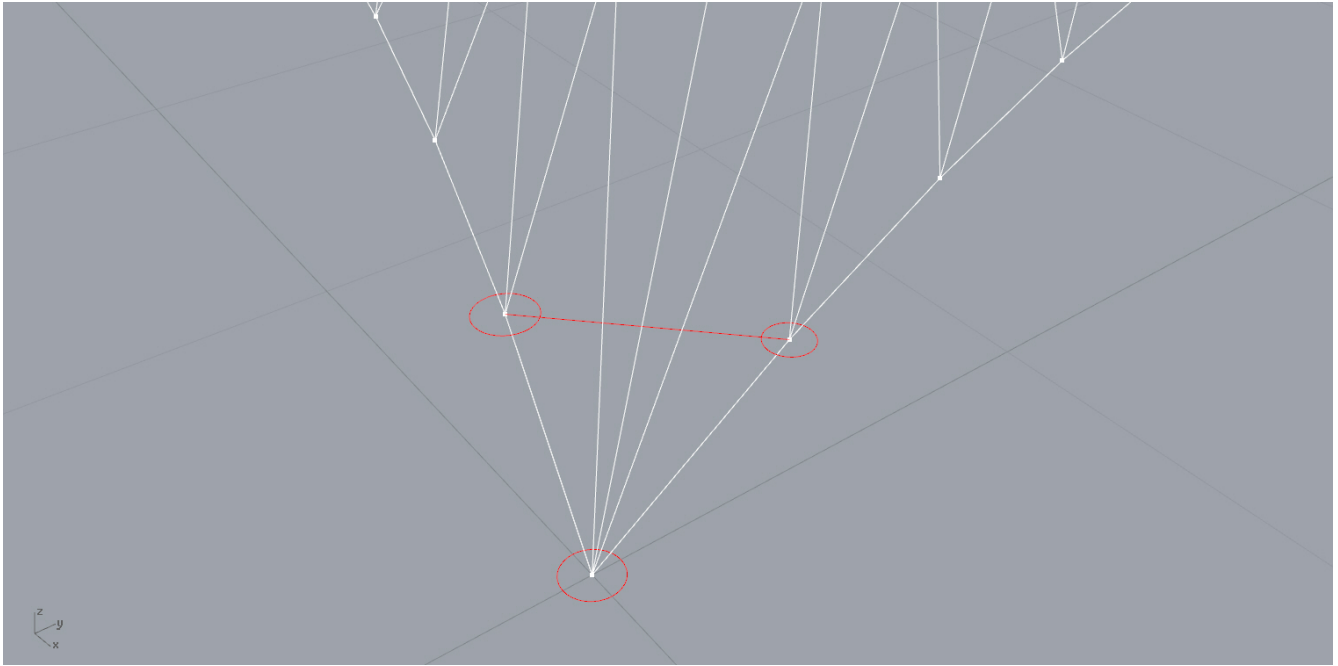
Σχ. 6.47 Ανάλυση με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία εύρεση συντελεστή ασφαλείας



Σχ. 6.48 Ανάλυση με χωρικά πεπερασμένα στοιχεία εύρεση μετατοπίσεων

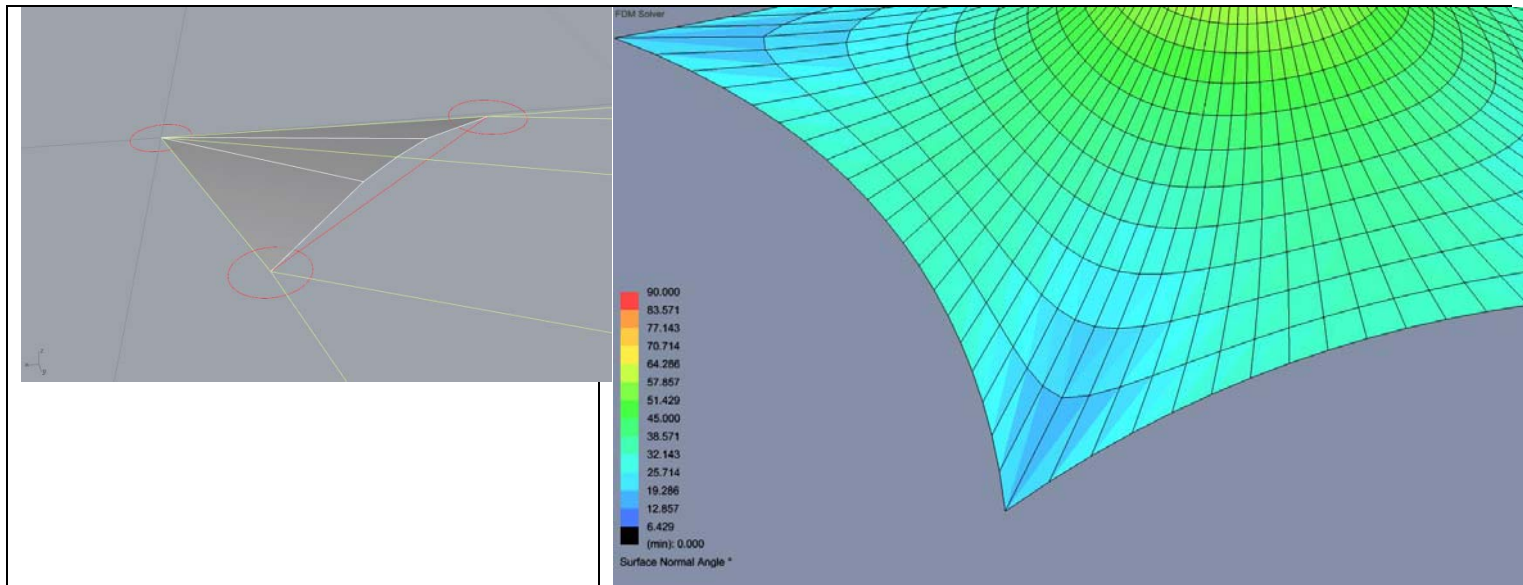


Στις περισσότερες περιπτώσεις οι γωνιακές πλάκες έχουν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της διπλής καμπυλότητας της μεμβράνης. Όπως βλέπουμε στο σχήμα 6.49 το επίπεδο της πλάκας ορίζεται από τρία σημεία.



Σχ. 6.49 Ορισμός επιπέδου της πλάκας.

Η απόσταση των δύο πλευρικών σημείων είναι μικρότερη από την πραγματική απόσταση της μεμβράνης όπως φαίνεται στο σχήμα 6.50



Σχ. 6.50 Αριστερά τομή στην μεμβράνη στην ευθεία που προσδιορίζει την πλάκα. – Δεξιά χρωματική παράσταση των κάθετων στην επιφάνεια γωνιών.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την συσσώρευση υλικού μεμβράνης στα γεωμετρικά όρια της πλάκας με αποτέλεσμα την εμφάνιση ρυτίδων. Οι ρυτίδες είναι έντονα ορατές και αισθητικά δεν αρμόζει σε μια αρχιτεκτονική κατασκευή αλλά και πρακτικά είναι πηγή για την αρχή της φθοράς της μεμβράνης καθώς παρουσιάζεται πεδίο τάσεων πολύ χαμηλό σε σημείο της επιφάνειας που κανονικά πρέπει να υπάρχουν υψηλές τάσεις. Αυτή η χαλάρωση μεταδίδεται σε όλη την επιφάνεια της μεμβράνης και πολλές φορές θέτει την όλη κατασκευή σε κίνδυνο.

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αντιμετωπιστεί με τρεις διαφορετικούς τρόπους.

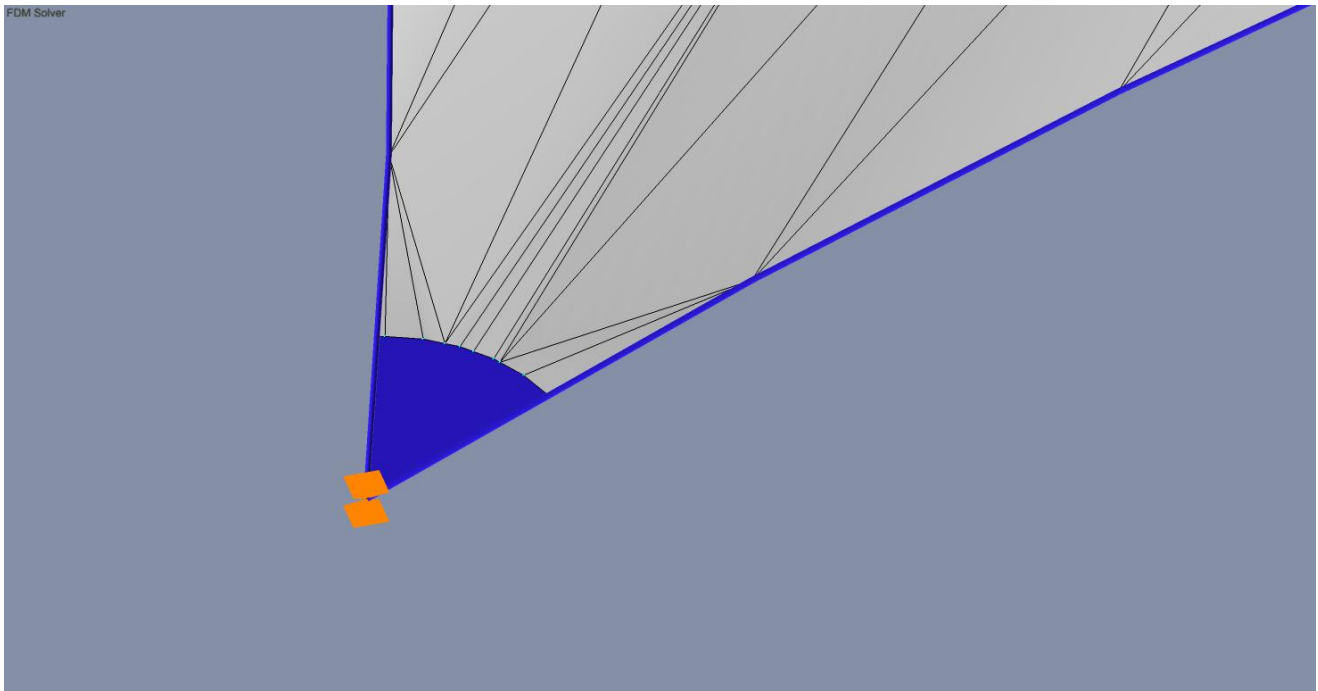
1. Να γίνει χρήση γωνιακής πλάκας όπως φαίνεται στο Σχ. 6.38. (Τύπος μεντεσέ –στρόφιγγα θύρας) .Μία τέτοια λύση προσθέτει βάρος σημειακά και καθώς δεν υπάρχει ενδιάμεσο καλώδιο ώστε να εξισορροπεί

τις επαπτομενικές δυνάμεις οι δακτύλιοι των αρμών θα υποφέρουν σε μεγάλη διάτμηση. Η λύση κρίνεται κυρίως αντισοικονομική.

2. Να γίνει χρήση προ κεκαμμένης πλάκας σύμφωνα με την καμπυλότητα της επιφάνειας της μεμβράνης. Η λύση αυτή είναι και δαπανηρή αλλά και τεχνικά δεν θα επιφέρει το ακριβές αποτέλεσμα καθώς είναι κατεργασία περισσότερο εμπειρική .
3. Να αρθεί τοπικά η καμπυλότητα της μεμβράνης.

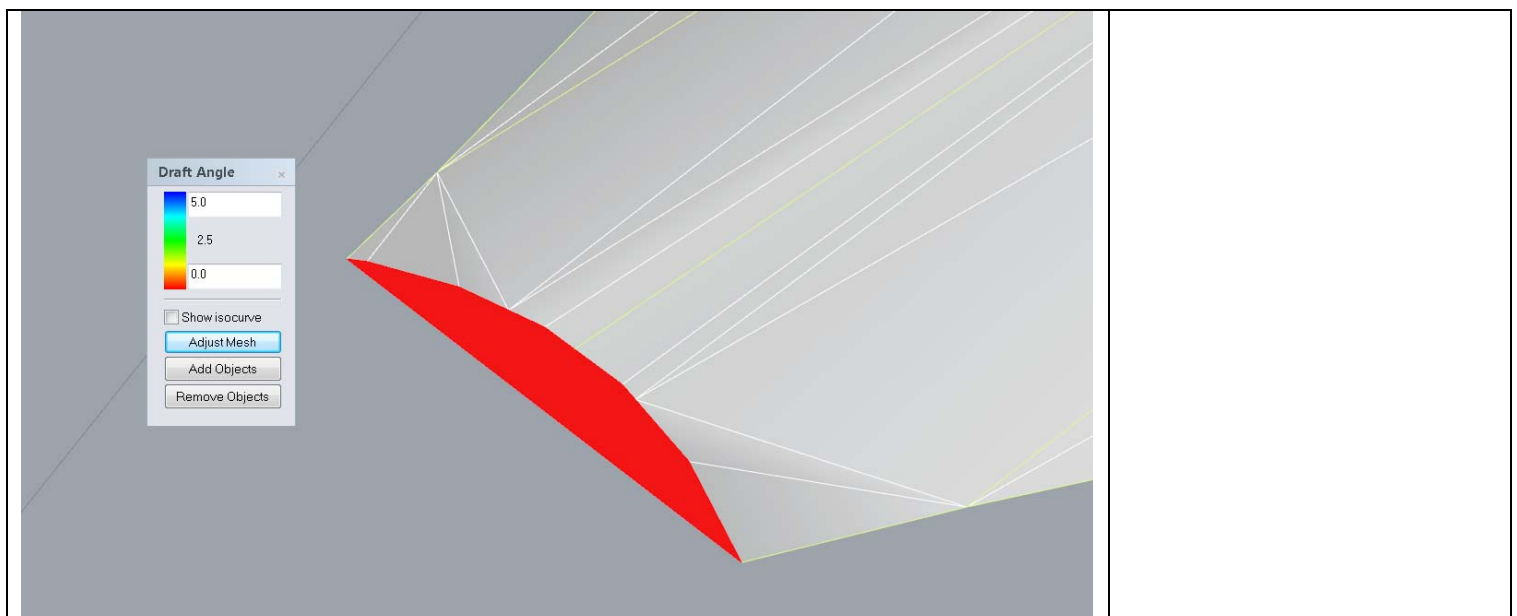
#### ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΑΡΣΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ

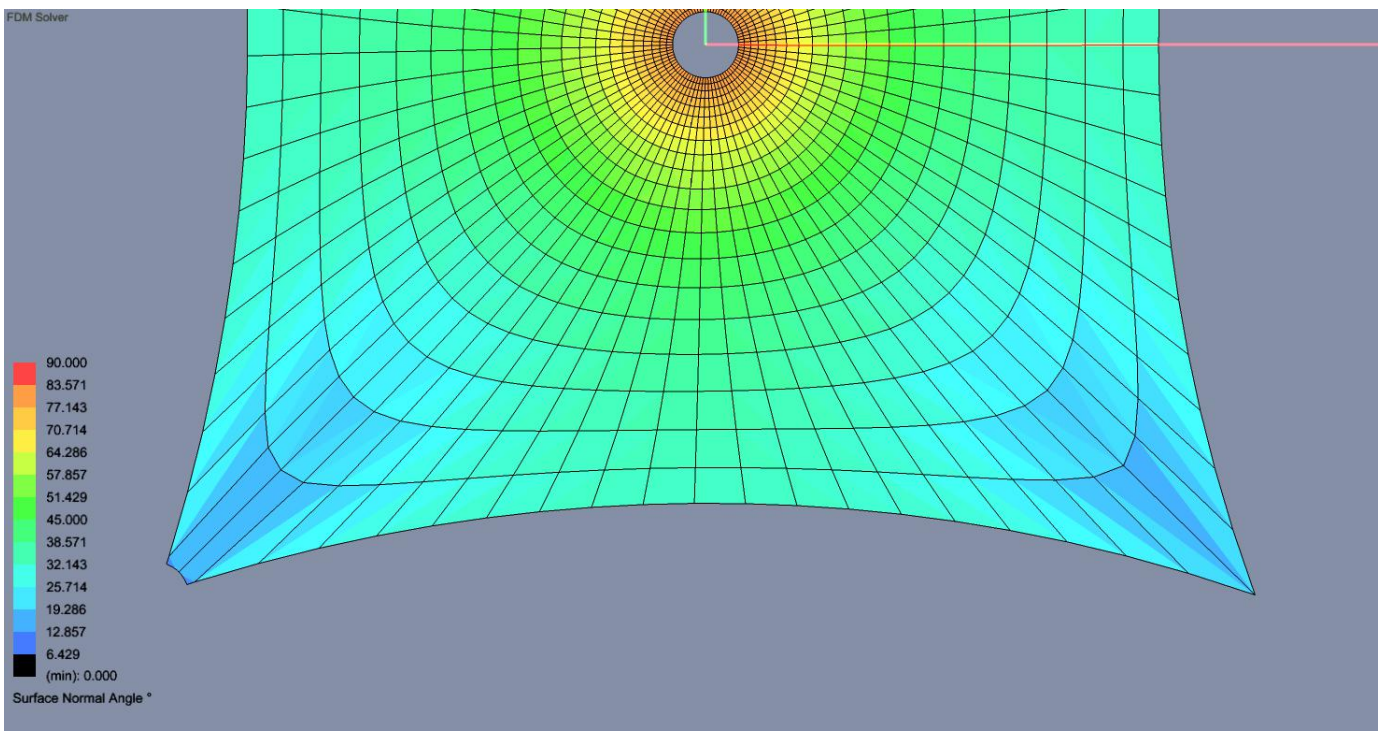
Όπως αναφέραμε παραπάνω ένα από τα κρίσιμα μεγέθη είναι η εύρεση της εξωτερικής ακτίνας της πλάκας. Δημιουργούμε λοιπόν τομές στην επιφάνεια της μεμβράνης ακριβώς στην διάμετρο της πλάκας. Κατόπιν προσομοιώνουμε την επιφάνεια της γωνίας με δύσκαμπτα πεπερασμένα στοιχεία χάλυβα.



Σχ. 6.51 Προσομοίωση γωνίας μεμβράνης με δύσκαμπτα στοιχεία

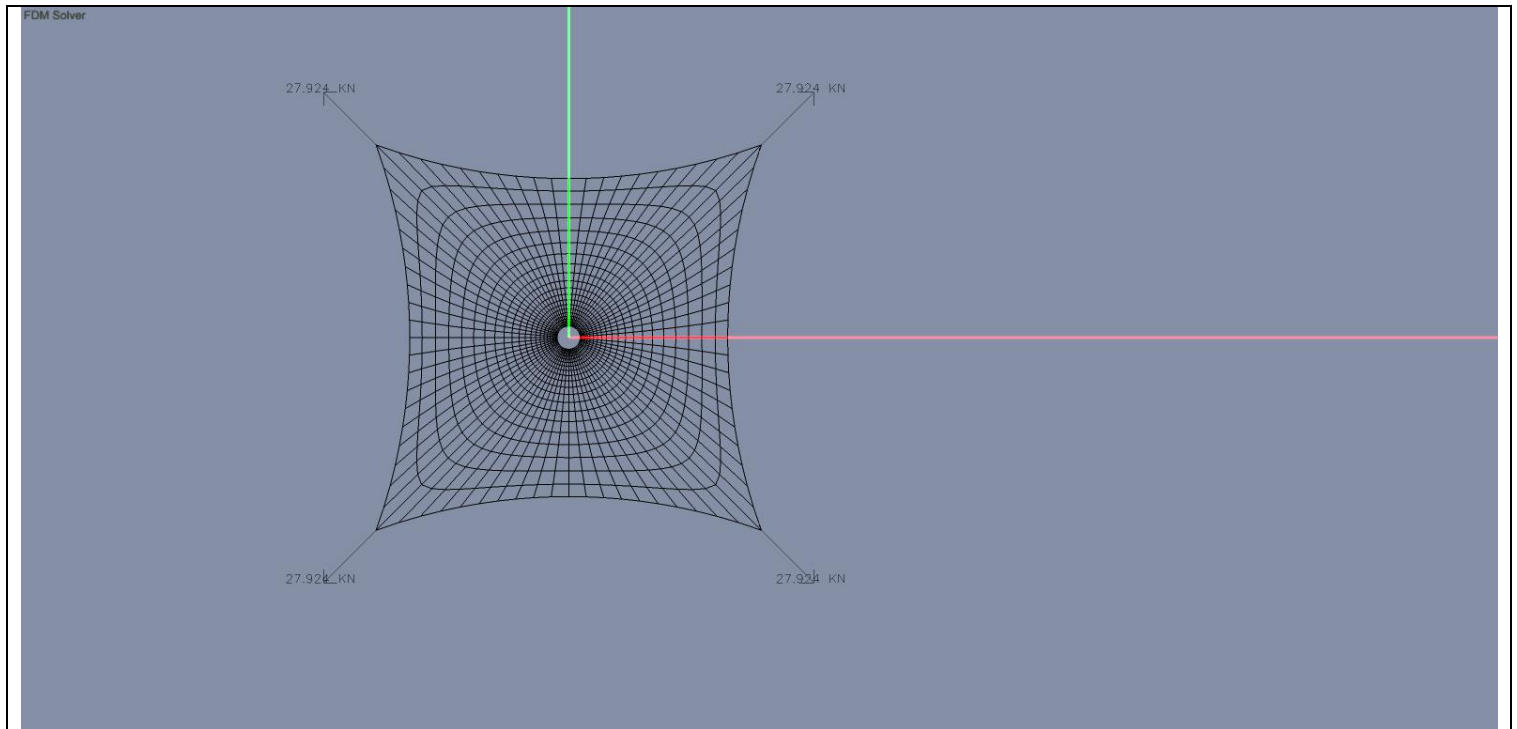
Κατόπιν γίνεται πάλι η εύρεση μορφής μεμβράνης έχοντας πλέον άκαμπτο όριο όχι ένα τοπικό σημείο αλλά την εξωτερική ακτίνα της πλάκας. Ο χώρος μεταξύ των σημείων της πλάκας και του σημείου συγκράτησης επιπεδώνεται όπως φαίνεται στο Σχ. 6.52.

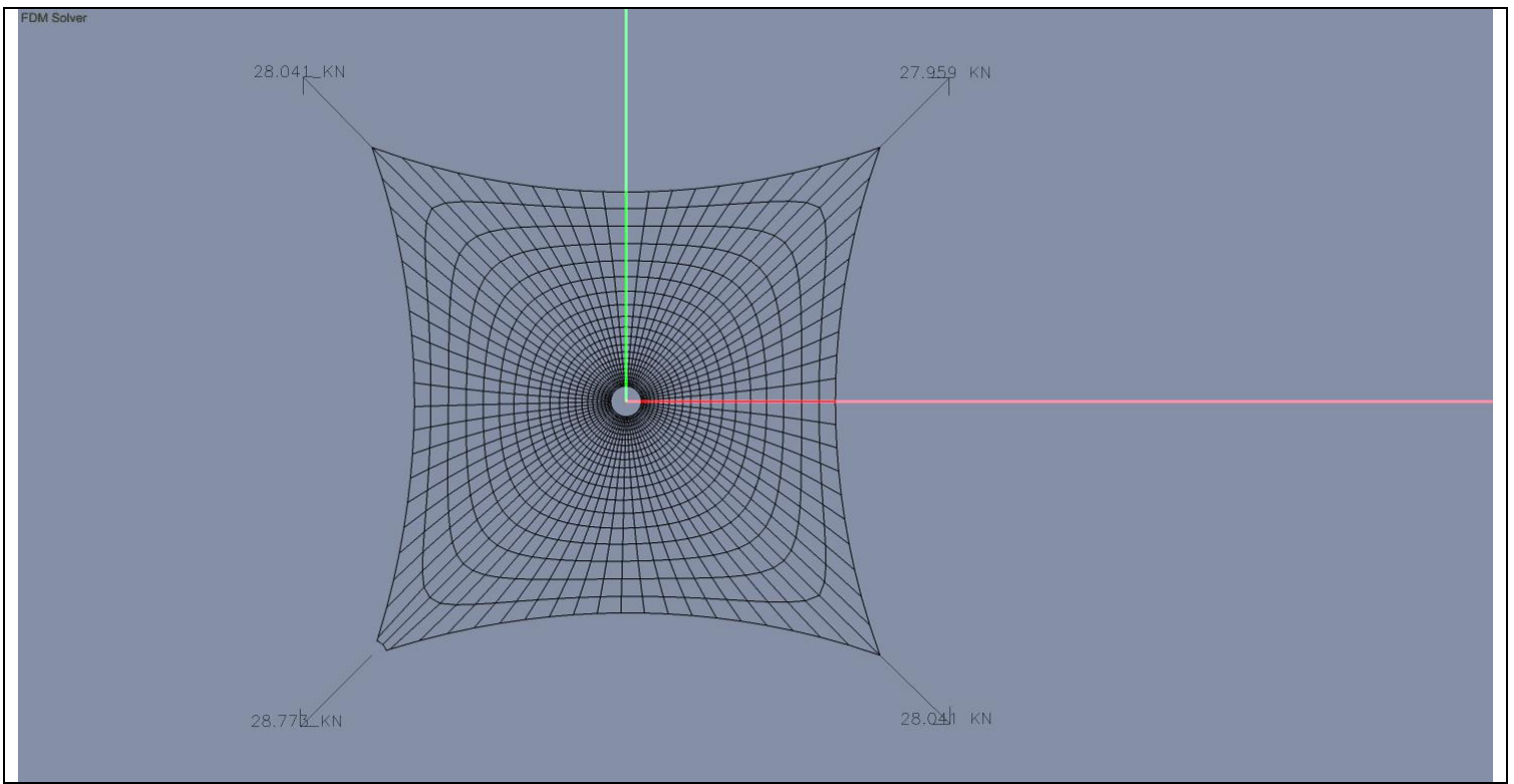




Σχ. 6.52 Ανάλυση επιφάνειας ως προς την καμπυλότητα. Η καμπυλότητα είναι μηδενική (επίπεδο)

Όπως βλέπουμε παρακάτω αυτή η διαδικασία προκαλεί μεταβολές στην εύρεση μορφής της μεμβράνης. Βλέπουμε ενώ το σχήμα είναι συμμετρικό και οι αντιδράσεις σε όλα τα σημεία συγκράτησης ίδιες με την επιβολή δύσκαμπτων στοιχείων γωνίας σε ένα σημείο συγκράτησης οι αντιδράσεις διαφοροποιούνται.





Σχ. 6.53 Αντιδράσεις στήριξης πριν και μετά την διαδικασία.

Αν και οι εφελκόμενες κατασκευές μεμβράνης από ύφασμα είναι σχετικά πρόσφατες κατασκευές στο πεδίο των μηχανικών εντούτοις έχουν γίνει μεγάλοι πρόοδοι ως προς τον σχεδιασμό και τον υπολογισμό τους. Θα μπορούσε να είναι ένας νέος κλάδος μηχανικών καθώς απαιτεί γνώσεις από πολλούς κλάδους.

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν τον σχεδιασμό τους είναι πάρα πολλοί και όλοι τους κρίσιμοι για την βιωσιμότητα της κατασκευής. Κάθε μέλος της και κάθε εξωτερική επίδραση στην κατασκευή παίζει πρωτεύων ρόλο.

Οι παράμετροι θα μπορούσαν να ομαδοποιηθούν ως :

1. Παράμετροι χρήσης της κατασκευής.
2. Αισθητικοί παράμετροι.
3. Οι παράμετροι εύρεσης της μορφής.
4. Οι παράμετροι φορτίσεων
5. Παράμετροι υλικών.
6. Παράμετροι σχεδιασμού της υποστηρικτικής κατασκευής.
7. Παράμετροι σύνδεσης της μεμβράνης με την υποστηρικτική κατασκευή

Κάθε μία κατηγορία επιβάλλει περιορισμούς που είτε επιλύονται άμεσα είτε έμμεσα με επαναπροσδιορισμό των παραμέτρων. Η χρήση ειδικών λογισμικών είναι απαραίτητη σε κάθε βήμα του σχεδιασμού. Λογισμικό για τρισδιάστατη παραμετρική σχεδίαση απαιτείται για τον προσδιορισμό της ένταξης της κατασκευής στο περιβάλλον. Χρήση λογισμικού για την εύρεση της μορφής της επιφάνειας της μεμβράνης με κυριότερη μέθοδο την μέθοδο πυκνότητας δύναμης.

Λόγω των μη συμβατικών μορφών απαιτείται η χρήση λογισμικού για την προσομοίωση της ροής του αέρα γύρω από την επιφάνεια και εύρεσης των συντελεστών πίεσης. Οι ιδιότητες των υλικών της κατασκευής, λόγω της ελαστικότητας τους, επιβάλλει την χρήση επαναληπτικών μεθόδων για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος της επιβολής φορτίων επί της κατασκευής.

Οι πολυσύνθετες γεωμετρικές μορφές, πολλές φορές οδηγούν σε υποστηρικτικές κατασκευές οι οποίες δεν μπορούν να επιλυθούν χωρίς την χρήση λογισμικού στατικής μη γραμμικής ανάλυσης. Ακόμη λόγω των αισθητικών απαιτήσεων πολλά από τα στοιχεία της κατασκευής χαρακτηρίζονται <<μη συνήθη>> και ο σχεδιασμός τους απαιτεί την χρήση λογισμικών πεπερασμένων στοιχείων.

Ακόμη και η διαδικασία της παραγωγής των σχεδίων κοπής της μεμβράνης απαιτεί την χρήση λογισμικού με αρχές επίλυσης διαφορικής γεωμετρίας, εύρεσης γεωδαιτικών γραμμών και επιπεδοποίησης τρισδιάστατων επιφανειών. Η οικονομία του υλικού απαιτεί λογισμικό βελτιστοποίησης των κοπών και η παραγωγή των μεμβρανών ειδικές μηχανές συγκόλλησης.

Η εφαρμογή στο εργοτάξιο είναι ένα ακόμη πρόβλημα με τις δικές του παραμέτρους καθώς πρέπει να αναλυθεί ο χώρος, ο χρόνος και ο τρόπος ανέγερσης και προέντασης.

Στο πεδίο των υλικών οι παράμετροι που δίνουν τροφή για σκέψη είναι όχι μόνο τα υλικά να είναι τα κατάλληλα ως προς την στατική τους επάρκεια αλλά να είναι φιλικά προς το περιβάλλον, βιοκλιματικά και ανακυκλώσιμα.

Η ανάλυση όλων των παραμέτρων οδηγεί στην επίλυση του προβλήματος με διαδικασίες πολλές φορές επαναληπτικές. Ο αρχικός σχεδιασμός οδηγεί σε επίλυση του στατικού προβλήματος, δίνει την δυνατότητα της σχεδίασης των υποστηρικτικών κατασκευών και των στοιχείων συγκράτησης. Έτσι το πρόβλημα ανάγεται πάλι στην εύρεση μορφής της μεμβράνης με τα τελικά γεωμετρικά δεδομένα ώστε να δοθεί προς παραγωγή η όλη κατασκευή.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ΑΡΓΥΡΗΣ ΓΙΑΝΝΗΣ ANGELOPOULOS T. BICHAT B. <<A GENERAL METHOD FOR THE SHAPE FINDING OF LIGHTWEIGHT TENSION STRUCTURES>> (1974)
2. ΓΑΝΤΕΣ ΧΑΡΗΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟ ΜΑΘΗΜΑ <<ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΛΩΔΙΩΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΚΑΙ MEMBRANΩΝ>> (2007)
3. ASSELT P.H. VAN << ANALYSIS OF STRESSED MEMBRANE STRUCTURES >> MS. THESIS (2007)
4. BARNES M. <<FORM FINDING AND ANALYSIS OF TENSION SPACE STRUCTURES BY DYNAMIC RELAXATION PHD. THESIS (1977)
5. BLUM, R. DETAILING IN TEXTILE ARCHITECTURE. LABOR BLUM, STUTTGART. (2001).
6. BESSEY RYAN PAUL << STRUCTURAL DESIGN OF FLEXIBLE ETFE ATRIUM ENCLOSURES USING A CABLE-SPRING SUPPORT SYSTEM>> MS. THESIS (2012)
7. BRITISH STANDARDS INSTITUTION BS 6661: 1986 GUIDE FOR THE DESIGN, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF SINGLE SKIN AIR-SUPPORTED STRUCTURES, (1997).
8. CAMPBELL DAVID M. << THE UNIQUE ROLE OF COMPUTING IN THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF TENSILE MEMBRANE STRUCTURES >> (1991)
9. CAMPBELL D.M. , “SNOW INDUCED PONDING OF TEXTILE MEMBRANE ROOF STRUCTURES”, TENSINET SYMPOSIUM DESIGNING TENSILE ARCHITECTURE, (2003)
10. COLLIERS JIMMY SILVIA GEORGES <<WIND LOADING ON TENSILE SURFACE STRUCTURES EXPERIMENTAL APPROACH >> MS. THESIS (2014)
11. FORSTER BRIAN -MARIJKE MOLLAERT TENSINET EUROPEAN DESIGN GUIDE AND TENSILE SURFACE STRUCTURES (2004)
12. GOSSEN PAUL A., DPL. ING, DAVID CHEN, M.SC., AND EUGENE MIKHLIN, PHD. << THE FIRST RIGIDLY CLAD "TENSEGRITY" TYPE DOME, THE CROWN COLISEUM, FAYETTEVILLE, NORTH CAROLINA >> (1998)
13. GRÜNDIG LOTHAR << HIGH-PERFORMANCE CUTTING PATTERN GENERATION OF ARCHITECTURAL TEXTILE STRUCTURES >> (2000)
14. JÁUREGUI VALENTÍN GÓMEZ << TENSEGRITY STRUCTURES AND THEIR APPLICATION TO ARCHITECTURE>> MS. THESIS (2004)
15. HANNA, T.H. “FOUNDATIONS IN TENSION”. GROUND ANCHORS
16. HUNTINGTON, C.G., CONNECTIONS AND DETAILING PART 1. FABRIC ARCHITECTURE (2000-1).
17. KAIJIMA SAWAKO, ROLAND BOUFFANAIS, KAREN WILLCOX (2013)
18. KIM DAEUNG << THE APPLICATION OF CFD TO BUILDING ANALYSIS AND DESIGN: A COMBINED APPROACH OF AN IMMERSIVE CASE STUDY AND WIND TUNNEL TESTING>> PHD. THESIS (2013)
19. LANDRELL ARCHITEN <<ETFE FOIL : A GUIDE TO DESIGN>>
20. LLORENS, J.I. DETAILS AND CONNECTION DESIGN; J.I.; SCHOOL OF ARCHITECTURE; BARCELONA (2002).
21. LUCHSINGER R. H., A. PEDRETTI, P. STEINGRUBER, M. PEDRETTI << LIGHT WEIGHT STRUCTURES WITH TENSAIRITY >>
22. MASUBUCHI MOTOI << CONCEPTUAL AND STRUCTURAL DESIGN OF ADAPTIVE MEMBRANE STRUCTURES WITH SPOKED WHEEL PRINCIPLE – FOLDING TO THE PERIMETER>> PHD. THESIS (2013)
23. PAULETTI RUY MARCELO DE OLIVEIRA << THE NATURAL FORCE DENSITY METHOD FOR THE SHAPE FINDING OF MEMBRANE STRUCTURES >> (2008)
24. SCHOCK, HANS-JOACHIM SEGEL, FOLIEN UND MEMBRANEN, (1997).
25. SKELTON, J. “MECHANICAL PROPERTIES OF COATED FABRICS”, IN “MECHANICS

- OF FLEXIBLE FIBRE ASSEMBLIES”, (1980).
26. STUTTGART IL UNIVERSITY AND SCHOOL OF ARCH. AND BUILD. ENGINEERING  
UNIVERSITY BATH – IL  
15 AIR HALL HANDBOOK, AUGUST (1983)
27. WEVER T.E. << TENSAIRITY - THE EFFECT OF INTERNAL STIFFENERS ON THE  
BUCKLING BEHAVIOUR OF AN INFLATABLE COLUMN>> MS. THESIS (2008)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

### ΠΙΝΑΚΕΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

Construction 1 x 7				
1 ΚΛΩΝΟΣ : 7 ΣΥΡΜΑΤΑ				
Nominal Diam	Approx Weight	Minimum Breaking Load (kN)		
0,60	0,18	0,31	0,35	0,38
0,80	0,32	0,55	0,62	0,68
1,00	0,50	0,86	0,96	1,06
1,50	1,13	1,92	2,17	2,40
2,00	2,01	3,42	3,85	4,26
2,50	3,14	5,34	6,02	6,67
3,00	4,52	7,69	8,67	9,60
3,50	6,15	10,50	11,80	13,10
4,00	8,03	13,70	15,40	17,10
4,50	10,20	17,30	19,50	21,60
5,00	12,60	21,40	24,10	26,70
6,00	18,10	30,80	34,70	38,40
7,00	24,60	41,90	47,20	52,30
8,00	32,10	54,70	61,70	68,30
9,00	40,70	69,20	78,00	86,40
10,00	50,20	85,50	96,30	106,00

Πίνακας 2.1

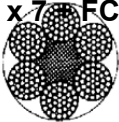
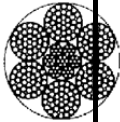
Εφελκυστική Αντοχή Κλώνων 1x7



<b>Construction 1 x 19</b>				
<b>1 ΚΛΩΝΟΣ : 19 ΣΥΡΜΑΤΑ</b>				
<b>Nominal Diam</b>	<b>Approx Weight</b>	<b>Minimum Breaking Load (kN)</b>		
1,00	0,50	0,83	0,93	1,03
1,50	1,11	1,86	2,09	2,31
2,00	1,98	3,30	3,72	4,12
2,50	3,10	5,15	5,81	6,43
3,00	4,46	7,42	8,37	9,27
3,50	6,07	10,10	11,40	12,60
4,00	7,93	13,20	14,90	16,50
5,00	12,40	20,60	23,20	25,70
6,00	17,80	29,70	33,50	37,10
7,00	24,30	40,40	45,60	50,50
8,00	31,70	52,80	59,50	65,90
9,00	40,10	66,80	75,30	83,40
10,00	49,50	82,50	93,00	103,00
11,00	59,90	99,80	112,00	124,00
12,00	71,30	119,00	134,00	148,00
13,00	83,70	139,00	157,00	174,00
14,00	97,10	162,00	182,00	202,00
15,00	111,00	186,00	209,00	231,00

**Πίνακας 2.2**

**Εφελκυστική Αντοχή Κλώνων 1x19**

		Construction 6 x 7 FC		Construction 7 x 7				
								
		6 ΚΛΩΝΟΙ : 7 ΣΥΡΜΑ ΤΑ		7 ΚΛΩΝΟΙ : 7 ΣΥΡΜΑ ΤΑ				
Nominal Diam (mm)	Approx Weight (kg/100m)		Minimum Breaking Load (kN)					
			1570MPa		1770MPa		1960MPa	
			FC	IWRC	FC	IWRC	FC	IWRC
1,50	0,81	0,89	1,17	1,27	1,32	1,43	1,46	1,58
2,00	1,43	1,58	2,08	2,25	2,35	2,54	2,60	5,81
3,00	3,22	3,55	4,69	5,07	5,28	5,71	5,86	6,32
4,00	5,72	6,32	8,33	9,01	9,40	10,10	10,40	11,20
5,00	8,94	9,87	13,00	14,00	14,60	15,80	16,30	17,60
6,00	12,90	14,20	18,70	20,20	21,10	22,80	23,40	25,30
7,00	17,50	19,30	25,50	27,60	28,70	31,10	31,90	34,40
8,00	22,90	25,30	33,30	36,00	37,60	40,60	41,60	45,00
9,00	29,00	32,00	42,20	45,60	47,50	51,40	52,70	56,90
10,00	35,80	39,50	52,10	56,30	58,70	63,50	65,10	70,30
11,00	43,30	47,80	63,00	68,10	71,10	76,80	78,70	85,00
12,00	51,60	56,80	75,00	81,10	84,60	91,50	93,70	101,00
13,00	60,40	66,40	88,10	95,20	99,40	107,00		
14,00	70,10	77,10	102,00		115,00			
16,00	91,50	101,00	134,00		151,00			
18,00	116,00	128,00	169,00		191,00			
20,00	143,00	157,00	209,00		235,00			

Πίνακας 2.3

Εφελκυστική Αντοχή Καλωδίων 6x7+F.C. ή I.W.R.C.

Construction 6 x 37 + FC			Construction 7 x 37					
Nominal Diam (mm)	Approx Weight (kg/100m)		Minimum Breaking Load (kN)					
			1570MPa		1770MPa		1960MPa	
			FC	IWRC	FC	IWRC	FC	IWRC
5,00	8,83	9,72	11,50	12,50	13,00	14,10	14,40	15,60
6,00	12,70	14,00	16,60	18,00	18,70	20,30	20,80	22,50
7,00	17,30	19,00	22,60	24,50	25,50	27,60	28,30	30,60
8,00	22,60	24,90	29,60	32,00	33,40	36,10	37,00	40,00
9,00	28,60	31,50	37,50	40,50	42,20	45,70	46,80	50,60
10,00	35,30	38,90	46,30	50,00	52,20	56,40	57,80	62,50
11,00	42,70	47,00	56,00	60,60	63,10	68,30	69,90	75,70
12,00	50,80	56,00	66,60	72,10	75,10	81,30	83,30	90,00
13,00	59,60	65,70	78,20	84,60	88,20	95,40	97,70	106,00
14,00	69,20	76,20	90,70	98,10	102,00		113,00	
16,00	90,40	99,50	118,00		133,00		148,00	
18,00	114,00	126,00	150,00		169,00		187,00	
20,00	141,00	156,00	185,00		208,00		231,00	
22,00	171,00	188,00	224,00		252,00		280,00	
24,00	203,00	224,00	266,00		300,00		333,00	
26,00	239,00	263,00	313,00		352,00		391,00	
28,00	277,00	305,00	363,00		409,00		453,00	
30,00	318,00	350,00	416,00		469,00		520,00	
32,00	361,00	398,00	474,00		534,00		592,00	
34,00	408,00	449,00	535,00		603,00		668,00	
36,00	457,00	504,00	600,00		676,00		749,00	
38,00	510,00	561,00	668,00		753,00		835,00	
40,00	554,00	609,00	741,00					
44,00	670,00	737,00	986,00					

Πίνακας 2.5

Εφελκυστική Αντοχή Καλωδίων 6x37+F.C. ή I.W.R.C.

<b>Construction 6 x 12 + 7FC</b>				
<b>6 ΚΛΩΝΟΙ 12 ΣΥΡΜΑΤΑ 6 ΠΥΡΙΝΕΣ FIBER</b>				
<b>Nominal Diam</b>	<b>Approx Weight</b>	<b>Minimum Breaking Load (kN)</b>		
8,00	16,50	21,00	23,70	
9,00	20,90	26,60	30,00	
10,00	25,80	32,80	37,00	
11,00	31,20	39,70	44,80	
12,00	37,20	47,30	53,30	
13,00	43,60	55,50	62,50	
14,00	50,60	64,30	72,50	
16,00	66,10	84,00	84,70	
18,00	83,60	106,00	120,00	
20,00	103,00	131,00	148,00	
22,00	125,00	159,00	179,00	
24,00	148,00	189,00	213,00	

Πίνακας 2.6

Εφελκυστική Αντοχή Καλωδίων 6x12+7F.C.

<b>Construction 6 x 24 + 7FC</b>				
<b>6 ΚΛΩΝΟΙ 24 ΣΥΡΜΑΤΑ 6 ΠΥΡΙΝΕΣ FIBER</b>				
<b>Nominal Diam</b>	<b>Approx Weight</b>	<b>Minimum Breaking Load (kN)</b>		
8,00	20,80	28,10	31,70	
9,00	26,30	35,60	40,10	
10,00	32,40	43,90	49,60	
11,00	39,30	53,10	60,00	
12,00	46,70	63,30	71,40	
13,00	54,80	74,20	83,80	
14,00	63,50	86,10	97,10	
16,00	83,00	112,00	127,00	
18,00	105,00	142,00	161,00	
20,00	130,00	175,00	198,00	
22,00	157,00	212,00	240,00	
24,00	187,00	253,00	285,00	
26,00	219,00	297,00	335,00	
28,00	254,00	344,00	389,00	

Πίνακας 2.7

Εφελκυστική Αντοχή Καλωδίων 6x24+7F.C.

**Table 1 of 2**

**Bridge Ropes**

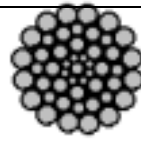
**(combined pattern spiral strand)**

<b>Nominal Diam (mm)</b>	<b>Approx Weight (kg/100m)</b>	<b>Metallic Area (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Minimum Breaking Load (kN)</b>		
<b>Construction 18:12:6-1 (1x37)</b>					
22,00	234,00	282,00	390,00	439,00	
26,00	327,00	394,00	544,00	614,00	
29,00	407,00	490,00	677,00	763,00	
32,00	495,00	597,00	824,00	930,00	
35,00	593,00	714,00	986,00		
38,00	698,00	842,00	1160,00		
42,00	853,00	1030,00	1420,00		
<b>Construction 24:18:12:6-1 (1x61)</b>					
20,00	193,00	233,00	322,00	363,00	
22,00	234,00	282,00	389,00	439,00	
26,00	327,00	393,00	544,00	613,00	
29,00	406,00	489,00	676,00	762,00	
32,00	495,00	596,00	823,00	928,00	
35,00	592,00	713,00	985,00	1110,00	
38,00	698,00	840,00	1160,00	1310,00	
42,00	852,00	1030,00	1420,00		
45,00	978,00	1180,00	1630,00		
48,00	1110,00	1340,00	1850,00		
50,00	1210,00	1450,00	2010,00		
51,00	1260,00	1510,00	2090,00		
52,00	1310,00	1570,00	2170,00		
54,00	1410,00	1700,00	2340,00		

**Πίνακας 2.8.1**

**Εφελκυστική Αντοχή Μονόκλωνων Καλωδίων**

Table 2 of 2

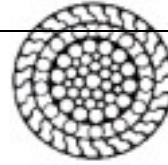


Nominal Diam (mm)	Approx Weight (kg/100m)	Metallic Area	Minimum Breaking Load (kN)		
<b>Construction 30:24:18:12:6-1 (1x91)</b>					
40,00	771,00	929,00	1280,00	1450,00	
42,00	850,00	1020,00	1410,00	1590,00	
45,00	976,00	1180,00	1620,00	1830,00	
48,00	1110,00	1340,00	1850,00	2080,00	
51,00	1250,00	1510,00	2090,00	2350,00	
54,00	1400,00	1690,00	2340,00		
57,00	1570,00	1890,00	2610,00		
60,00	1730,00	2090,00	2890,00		
64,00	1970,00	2380,00	3280,00		
66,00	2100,00	2530,00	3490,00		
<b>Construction 36:30:24:18:12:6-1 (1x127)</b>					
68,00	2230,00	2680,00	3710,00	4180,00	
71,00	2430,00	2930,00	4040,00	4560,00	
74,00	2640,00	3180,00	4390,00	4950,00	
77,00	2860,00	3440,00	4750,00	5360,00	
80,00	308,00	3720,00	5130,00	5790,00	
84,00	3400,00	4100,00	5660,00	6380,00	
87,00	3650,00	4390,00	6070,00	6840,00	
90,00	3900,00	4700,00	6500,00	7320,00	
92,00	4080,00	4910,00	6790,00	7650,00	
96,00	4440,00	5350,00	7390,00	8330,00	
103,00	5110,00	6160,00	8510,00	9590,00	

Πίνακας 2.8.2

Εφελκυστική Αντοχή Μονόκλωνων Καλωδίων

Table 1 of 2

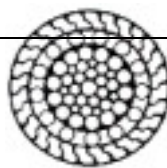


Nominal Diam (mm)	Approx Weight (kg/100m)	Metallic Area	Minimum Breaking Load (kN)		
<b>Center of Round Wires and 1 Layer of Shaped Wires</b>					
20,00	216,00	254,00	321,00	344,00	368,00
22,00	261,00	308,00	388,00	416,00	445,00
25,00	337,00	398,00	501,00	538,00	574,00
26,00	365,00	430,00	542,00	582,00	601,00
28,00	423,00	499,00	629,00	674,00	720,00
29,00	454,00	535,00	674,00	723,00	773,00
30,00	486,00	572,00	722,00	774,00	827,00
32,00	553,00	651,00	821,00	881,00	941,00
34,00	625,00	735,00	927,00	994,00	1060,00
35,00	662,00	779,00	982,00	1050,00	1130,00
36,00	700,00	824,00	1040,00	1120,00	1190,00
38,00	780,00	919,00	1160,00	1240,00	1330,00
40,00	865,00	1018,00	1280,00	1380,00	1470,00
<b>Center of Round Wires and 2 Layers of Shaped Wires</b>					
25,00	350,00	412,00	520,00	558,00	596,00
26,00	379,00	446,00	562,00	603,00	644,00
28,00	440,00	517,00	652,00	700,00	747,00
29,00	472,00	555,00	699,00	750,00	801,00
32,00	574,00	676,00	851,00	914,00	976,00
35,00	687,00	808,00	1020,00	1090,00	1170,00
38,00	810,00	953,00	1200,00	1290,00	1380,00
40,00	897,00	1060,00	1330,00	1430,00	1520,00
42,00	989,00	1160,00	1470,00	1570,00	1680,00
45,00	1140,00	1340,00	1680,00	1810,00	1930,00
48,00	1290,00	1520,00	1920,00	2060,00	2200,00
49,00	1350,00	1580,00	2000,00	2140,00	2290,00
50,00	1400,00	1650,00	2080,00	2230,00	2380,00

Πίνακας 2.9.1

Εφελκυστική Αντοχή Συμπαγών Καλωδίων

Table 2 of 2



Nominal Diam (mm)	Approx Weight (kg/100m)	Metallic Area	Minimum Breaking Load (kN)		
<b>Center of Round Wires and 3 or more Layers of Shaped</b>					
51,00	1530,00	1800,00	2270,00	2430,00	2600,00
54,00	1710,00	2020,00	2540,00	2730,00	2910,00
57,00	1910,00	2250,00	2830,00	3040,00	3240,00
61,00	2190,00	2570,00	3240,00	3480,00	3710,00
64,00	2410,00	2830,00	3570,00	3830,00	4090,00
67,00	2640,00	3100,00	3910,00	4200,00	4480,00
71,00	2960,00	3490,00	4390,00	4710,00	5030,00
72,00	3050,00	3580,00	4520,00	4850,00	5180,00
74,00	3220,00	3780,00	4770,00	5220,00	5470,00
77,00	3480,00	4100,00	5160,00	5540,00	5920,00
80,00	3770,00	4420,00	5580,00	5980,00	6390,00
81,00	3850,00	4530,00	5720,00	6130,00	6550,00
82,00	3950,00	4650,00	5860,00	6280,00	6710,00
85,00	4240,00	4990,00	6290,00	6750,00	7210,00
88,00	4550,00	5350,00	6750,00	7240,00	7730,00
90,00	4760,00	5600,00	7060,00	7570,00	8090,00
92,00	5030,00	5920,00	7460,00	8000,00	8540,00
94,00	5250,00	6180,00	7780,00	8350,00	8920,00
96,00	5480,00	6440,00	8120,00	8710,00	9300,00
98,00	5710,00	6710,00	8460,00	9080,00	9700,00
100,00	5940,00	6990,00	8810,00	9450,00	10100,00
103,00	6300,00	7420,00	9350,00	10000,00	10700,00
104,00	6430,00	7560,00	9530,00	10200,00	10900,00
106,00	6680,00	7850,00	9900,00	10600,00	11300,00
109,00	7060,00	8310,00	10500,00	11200,00	12000,00
110,00	7190,00	8460,00	10700,00	11400,00	12200,00
112,00	7450,00	8770,00	11100,00	11900,00	12700,00
114,00	7720,00	9080,00	11400,00	12300,00	13100,00
115,00	7860,00	9240,00	11700,00	12500,00	13400,00
118,00	8270,00	9730,00	12300,00	13200,00	14100,00
120,00	8560,00	10100,00	12700,00	13600,00	14500,00
122,00	8840,00	10400,00	13100,00	14100,00	15000,00
125,00	9280,00	10900,00	13800,00	14800,00	15800,00

Πίνακας 2.9.2

Εφελκυστική Αντοχή Συμπαγών Καλωδίων



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β  
ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΠΡΟΤΥΠΑ  
ΓΙΑ ΥΦΑΣΜΑΤΑ

**A3.3 DATA SHEET WITH COMMONLY USED STANDARDS**

Technical characteristics	Unit	EN standard	ISO standard	National standards	Alternative Proposal
<b>Base Fabric/ yarn</b>					
- Material <sup>(1)</sup>					
- Weight	g/m <sup>2</sup>	EN 22286	ISO 2286-2		
- Weave style <sup>(2)</sup>			ISO 9354	NF G 07155	
- Nb of yarns /cm warp/weft			ISO 7211-2	DIN 53853 NF EN 1049-2	
- Yarn (warp, weft)					
* count <sup>(3)</sup> , diameter of filaments	dtex, µm	EN 1973		DIN 53830	
* number of filaments					
* twist <sup>(4)</sup> , turns per meter, sizing <sup>(5)</sup>	tpm				
* tensile strength, elongation	N/tex, %	EN ISO 2062	EN ISO 2062		
* threads from fabric -> reduction by weaving					LBV 1101, LBV 1113
* threads under deflection					LBV 1102
* long term behaviour					LBV 1202
<b>Coating</b>					
- Material <sup>(6)</sup>					
- Weight	g/m <sup>2</sup>	EN 22286	ISO 2286-2		
- Total thickness			ISO 2286-3		
- Thickness (top fabric) <sup>(7)</sup>	mm				internally
- Top coat (material, weight) <sup>(8)</sup>					
<b>Coated fabric</b>					
- Weight	g/m <sup>2</sup>		ISO 2286-2		
- Thickness	µm	EN 22286	ISO 2286-3		
- Available width	m				
- Colour					

Mechanical characteristics of the coated fabric	Unit	EN standard	ISO standard	National standards	Alternative Proposal
- Tensile strength (warp, weft)	daN/5cm		EN ISO 1421	NF G 37103 ; BS 3424 part 4 Method 6 ; DIN 53354 ASTM D 4851	
- Tear strength (warp, weft) - trapezoidal test	N		EN ISO 4674-2	NF G 37130 ; BS 7304 part 44; ASTM D 4851; DIN 53363	LBV 1111
- Elongation at break (tensile test)	%		EN ISO 1421	NF G 37103	
- Coating adhesion			EN ISO 2411 ISO 5978	NF G 37107 ; BS 3424 part 7 ; DIN 53357	
- Biaxial behaviour ratios 1/1, 2/1, 1/2, 5/1,	daN/5cm				LBV 1106 /(LBV 1107)
- Elastic modulus					LBV 1501
- Poisson's ratios					
- Creep, relaxation		EN ISO 899-1			
- Fatigue behaviour					
- Shear modulus shear angle					LBV 1110 LBV 1112 (uniaxial)

Other characteristics	Unit	EN standard	ISO standard	National standards	Alternative
<b>Fire reaction</b>					
· Noncombustibility of substrate			ISO 3941	NFP 92 503 ; ASTM E –136; DIN 4102; BS 7837	
· Intermittent flame, spread of flame				ASTM E-108	
· External fire exposure roof test				BS 476 part 3	
· Fire propagation				BS 476 part 6	
· Spread of flame				BS 476 part 7	
<b>Physical properties</b>					
· Infra-red emissivity and absorbance				ASTM C 423-89	
· Acoustic insulation, absorption					
· Light transmission				NFP 38511; ASTM D 1494; ASTM E-903	
· Solar transmission reflectance				ASTM E 424-71; ASHRAE 74-73	
<b>Ageing, Durability</b>					
· Accelerated ageing		NF EN 12280-1/2/3	DIN EN ISO 4892		
<b>Seams</b>					
· Strip test tensile			ISO 1421		
<b>Others</b>					
· Hydrostatic resistance		EN 20811	ISO 811	NF EN 1734	
· Cold crack		EN 1876-2		NF G 37116	
· Burst				NF G 37131	
· Crease					
· Puncturing					
· Gas permeability				NF G 37114	
· Hydrolysis resistance				NF G 37122	
· Volatile organic content					
· Cleaning ability					
· Recyclability					
<b>Quality Insurance</b>			ISO 9002		

ISO = International standards

EN = European standards

BS = British standards

DIN = German standards

NF = French standards

ASTM = American Society for Testing and Materials

LBV = Blum Laboratory protocoles

(1) polyester (PES or PET), high tenacity polyester (PES HT), glass (G)

EC6 means continuous E glass multifilament yarn of 6 µm diameter for each filament

Polytetrafluoethylene (PTFE)

(2) Weave pattern : plain weave fabric ; 2 x 2 basket weave (or panama) ; 2 x 2 twill weave; 4 x 1 satin weave

(3) Count : linear density, 1 tex = 1g/1000 m ; 1 dtex = 1g/10000m ; 1 den = 1g/9000 m

(4) Twist = S or Z

(5) Sizing or finish

(6) Polyvinylchloride (PVC), acrylics (ACR), silicone (SIL), polyvinylfluoride (PVF), polytetrafluoroethylene (PTFE)

(7) Measurement of the coating thickness between the top of the base fabric and the top surface of the coated fabrics by microscope.

(8) Acrylics (ACR), polyvinyl fluoride (PVF), polyvinylidene fluoride (PVDF)

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

### ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΣΤΗΝ ΦΩΤΙΑ

## **A3.4 FIRE REACTION FOR BUILDING CONSTRUCTION PRODUCTS**

### **A3.4.1 INTRODUCTION**

The directive for building construction products (DPC) 89/106/CEE of 21/12/1988 defines six kinds of safety requirements. One of these concerns fire safety requirement. Each European country has to transpose this into its own national rules. For instance France, by decree of 21 November 2002 relating to the fire reaction of products for building construction, abrogated the earlier decree of 30 June 1983, and introduced the « Euroclasses ».

According to the directive 89/106/CEE, one understands by building construction products any product which is manufactured with a view to being incorporated in a lasting manner in any work of construction, which covers both buildings as such and also civil engineering works.

### **A3.4.2 CLASSIFICATION OF BUILDING CONSTRUCTION PRODUCTS**

The classification relating to the fire reaction of building construction products covered by the DPC directive, refers to the Euroclasses. The products are then considered according to their end-uses. From the fire reaction point of view, building construction products can be classified A1, A2, B, C, D, E or F, according to a procedure detailed in the standard EN 13501-1. A product classified F is a product having failed to obtain another classification, or not having undergone a test.

Additional classifications can also be determined concerning smoke production (classifications s1, s2, s3), and the production of ignited drops or debris (classifications do, d1, d2).

### **A3.4.3 CLASSIFICATION REPORTS AND CE MARKING**

Building construction products covered by the DPC directive are liable to the delivery of a classification report. The DPC directive foresees that all building construction products put on the market and covered by the directive, will rapidly be subjected to EC marking. Thus each manufacturer should make sure to correctly apply the certificate of conformity (systems 1 to 4) according to his product and its application area. A manufacturer can find all the necessary information in each homologated European standard or technical approval covering his product family.

Up until now there has not been a mandatory proposal for the CE Marking of tensile membrane materials. But as transposition of classification exists in some countries (tables 1 and 2), and as the classifications and the tests for them are defined, it could be proposed by the materials producer and by the building fabricator to characterise their products for the fire reaction by the Euroclasses

Euroclasses			compliance
A1	-	-	Uncombustible
A2	s1	do	Mo
A2	s1	d1	M1
A2	s2 s3	do d1	
B	s1 s2 s3	do d1	
C	s1	do	M2
	s2	d1	M3
	s3		
D	s1	do	M4 (non dripping)
	s2	d1	
	s3		

Table 1 Transposition for fire reaction classification between Euroclasses EN 13501-1 and French M classification NF P 92-507

Euro class	Requirements					Time to flashover	Typical products	Present national classifications																
	Smoke	Droplet	Non comb	SBI	Small flame			Reference scenario (R / C, ISO 9705)	Examples	AUT	BEL	DK	FIN	FRA	GER	GR	IRE	ITA	NL	NO	PORT	SK	SPA	SWE
A1	-	-	X	-	-	> 20 min	Stone, concrete	A	A0	A/NC	1/I NC	M0	A1	0	0	NC	NC	In1/NC	M0	A	M0	I/NC		0
A2	X	X	x	x	-	> 20 min	Gypsum boards	A	A1	A/NC	1/I NC	M0	A2	0/1	0	0	1	In1/NC	M0	B	M0	I/NC		0
B	X	X	-	x	x	> 20 min	FR wood	B1	A2	A	1/I	M1	B1	3	0/1	1	2	In1	M2	B	M1/M2	I		0/1
C	X	X	-	x	x	> 10 min	Wall covering on gypsum board	>B1	A3/A4		1/II	M2		3	1	2	3	In2	M3	B	M3	II		1
D	X	X	-	x	x	> 2 min	Wood (untreated)	B2, B1	A3/A4	B	1/- 2/-	M3/M4	B2	4	3	3	4	In2	M4	C2	M3/M4	III		3
E	-	X	-	-	x	< 2 min	Low density wood fibreboard	B3 (B2, B1)	A4	U	U	M3/M4	B3/B2	4	4	4	4/5	U		C3	M4	U		4
F			-	-	-	< 2 min	Some plastics			U	U	M4	U/B3	4		4/5	5	U		C3	U	U		4

Table 2 Possible transpositions between fire reaction classification of different European countries

#### A3.4.4 TEST METHODS FOR FIRE REACTION EVALUATION OF EUROCLASSES EN 13501-1

In order to fulfill the Euroclasses new specific tests of fire reaction have been designed.

##### A3.4.4.1 Test of non-combustibility (EN ISO 1182)

This identifies those products which do not contribute, or contribute little to a fire, whatever be their end-uses, and applies to the classes A1, A2, only. The test material is placed in a tubular oven open at both ends, and heated to 750°C. The performance criteria are the loss of mass, the duration of ignition, and the rise in temperature of the ambient air.

**A3.4.4.2 Heat of combustion (EN ISO 1716)**

It determines the total release of the potential maximum heat from a product during a complete live combustion, whatever be its end-use, and applies to the classes A1, A2. The test is carried out using a calorimetric oven, in a medium saturated with O<sub>2</sub> at 30 bars, and one then determines the maximum calorific value (HCV) of the product.

**A3.4.4.3 Test of an insulated object in fire: test SBI (EN 13823)**

This evaluates the potential contribution of a product under its end-use conditions, to the development of a fire, in a fire situation simulating the conflagration of an element in the corner of a room close to the product tested. It applies to the classes A2, B, C, D (and possibly A1).

The principle consists in applying a flame from a 30kW burner for 20 minutes, in a right angle formed by two panels of 1.5 x 1 m and 1.5 x 0.5 m, made up from the product to be tested. The criteria observed are the total thermal release (THR600s), and the acceleration of the energy release (FIGRA), the propagation of lateral flame (LFs), the total smoke emission (TSP600s), and the acceleration of smoke production (SMOGRA) – all this for the classifications s1, s2 or s3, and the falls of ignited debris and drops for the classifications d0, d1 or d2.

**A3.4.4.4 Single flame source test (EN ISO 11925-2)**

It applies to the classes A2, B, C, D, E and evaluates the ignitability of a product under its end-use conditions, exposed vertically to a small flame. One can then evaluate the time necessary for the flame to spread vertically over a distance of 150 mm (Fs) as well as the falling of ignited debris and drops for the d2 classification (the latter for building construction products other than floor coverings).

**A3.5 REFERENCES**

- (1) Bidmon, W. und Blum, R.  
«Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Bautextilien»  
Bidmon, W. und Blum, R.  
SFB 64 Mitteilung 74, 1987.
- (2) Bridgens, Gosling  
«A new biaxial test protocol for architectural fabrics»  
abstract for IASS 2004

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ  
ΕΛΕΓΧΟΣ ΤΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ  
ΓΙΑ ΓΕΝΙΚΗ ΕΓΚΡΙΣΗ

- 1: ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΑΙ ΔΟΜΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ
- 2: ΠΥΡΟΠΡΟΣΤΑΣΙΑ
- 3: ΥΓΙΕΙΝΗ, ΥΓΕΙΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΤΟΥ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
- 4: ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
- 5: ΗΧΟ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ
- 6: Η ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΙΚΗ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ.



### A3.1 TESTING PROCEDURES WITH REGARD TO A GENERAL APPROVAL

This document sets out a basis for authorizing the use of textile membrane in building construction. It takes account of the EU Building Products Guidelines which are also valid in Germany in the form of the law dated 28.04.1998, and updated 15.12.2001.

Related documents are The German Model Building Regulations and the National Building Regulations insofar as they contain supplementary requirements on this subject. The standard to be observed is DIN 18200.

This document presents one option for approval testing. It is left to the applicant to carry out any further freewill testing or to try out other methods since in this area there are no standards and no other binding standards. This procedure is therefore written up according to section B of the Building Products Guidelines. The considerations presented here are ideal for high-quality PVC coated polyester fabrics of type III. It is certainly possible to transfer this procedure to other types of fabric but it would then be necessary to consider the individual details again in terms of procedure and acceptance criteria.

The six basis documents for the Building Products Guidelines are:

- 1: Mechanical strength and structural stability**
- 2: Fire protection**
- 3: Hygiene, health and environmental protection**
- 4: Operating safety**
- 5: Sound protection**
- 6: Energy saving and thermal protection.**

All the documents printed in bold above are relevant to membranes. The roles of basis documents 1, 2 5 and 6 are self explanatory. The role of basis document 3 however needs a little further explanation:

- a) In the case of high air humidity levels there is the problem of the PVC being affected by moulds. This must be counteracted by means of suitable additives. This effect needs to be investigated. In addition over a long period of time the membrane will become contaminated. Precautions against this can be taken by the use of a particular top coat. Here again the soiling behaviour must be investigated.
- b) Sound protection requires special consideration as described in more detail below.

Basis document 6 includes light since light is directly involved with energy.

The tests described can be classified as:

- Tests required for the initial approval of the coating firm**
- Tests required for the self-monitoring of the coating firm**
- Tests required for the external monitoring of the coating firm**
- Tests required for the initial monitoring of the fabric manufacturer**
- Tests required for the self-monitoring of the fabric manufacturer**
- Tests required for the external monitoring of the fabric manufacturer.**

In addition, and within the scope of the authorization required from the Building Inspection Authorities, it is necessary to present evidence of identity and reduction factors.

The evidence required of the mechanical strength and stability can be considered under the following headings and sub-headings.

### **A3.1.1 STRENGTH AND STABILITY OF THE MATERIAL**

#### **A3.1.1.1 Short-term behaviour**

In general all strength investigations are carried out as **uniaxial** strip tests. It is generally understood that with a biaxial load the strength will be lower than that with a uniaxial load. For this reason a reduction factor is inserted which is not determined but simply assumed. The reason for this is that the biaxial strength is very difficult to measure. In the biaxial testing rig familiar to the authors it is the strength of the sample and not that of the material which is determined since the failure always starts from an edge. Another method would be the examination of a cylinder which is loaded by an axial compression load. In the manufacture of a cylinder however a seam is necessary at which point this sample body would also tear preferentially. A solution to this would appear to be the bursting test which is proposed in the standards, but which will first have to be examined more closely. (Corresponding tests in preparation.)

To obtain the uniaxial strip strength loaded parallel with the yarn direction we recommend the use of 100mm wide samples of fabric cut parallel to the warp and parallel with the weft as defined in DIN 53354, EN ISO 13934-1 and other standards. Although most European standards are still based on 50mm-strips, 100 mm wide samples lead to more consistent results because the number of threads has less influence. In setting the number of tests it is necessary to decide which evaluations are the most important. If only the average value is to be given then normally 5 tests are sufficient. If however more accurate information on the distribution of measured values are to be given, for example to calculate the 5 % fractile, then significantly more tests are required. However if the 5% fractile can be safely given, this can then be used to establish a reduction factor for the lack of homogeneity in the fabric. It should also be noted that strength can depend on where the sample has been removed from the cloth. For example at the edge of a roll lower strengths are often measured compared with those taken from the middle. The values at the start of a roll can also turn out to be lower than those in the middle. It is therefore necessary to prepare a sampling plan so as to be able to interpret any non-homogeneous strength distributions.

For individual breaking test results it is necessary to give:

- a) the type of break
- b) width of strip
- c) breaking stress
- d) average value
- e) standard deviation
- f) 5% fractile
- g) sample removal plan

If a device exists to measure elongation it should be checked and calibrated at the same time to comment on any differences in the elongation behaviour. Such a device can only operate on an optical basis and must not be a device relying on physical contact, since the latter could destroy the measuring equipment. If characteristic subsets are found in the results, should these be traced back to the sampling plan, then such subsets will have to be treated as separate statistics since they would falsify the latter.



The **uniaxial** strip test should be carried out at different temperatures: -20°C, 23°C and 70°C:

- At 23°C

<b>Test procedure:</b>	According to DIN 53354, EN ISO 1421 (EN ISO 13934-1) with the alteration that the width of the sample must be 100mm.
<b>Test type:</b>	Initial approval, self-monitoring, external monitoring
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm
<b>Test quantity:</b>	At least 5 in each direction warp and weft
<b>Initial test:</b>	20 warps and 20 wefts at 23°C
<b>Self-monitoring:</b>	10 warps, 10 wefts per batch
<b>External monitoring:</b>	Visit twice per annum, removal of a 2m wide piece at a random interface, 10 warp tests, 10 weft tests.

- At 70°C

All other things being equal, the above prescription applies here, with the additional requirement that the samples must be brought up to the testing temperature for at least one hour before testing and that the clamps must also be at the sample temperature if at all possible.

N.B.: For a PVC coated polyester fabric a temperature of 70°C can be reached without any problems. For other fabrics however other testing temperatures must be used, so that under the effect of the sunrays they don't heat up too much. Until there is evidence of lower heating-up temperatures however 70°C should be set. The evidence of lower testing temperatures can either be determined by calculation using the absorption curves for radiation or by means of tests.

<b>Test procedure:</b>	According to DIN 53354, EN ISO 1421 (EN ISO 13934-1) with the alteration that the width of the sample must be 100mm.
<b>Test type:</b>	Initial approval, self-monitoring, external monitoring
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm
<b>Test quantity:</b>	At least 5 in each direction warp and weft
<b>Initial approval:</b>	20 warp samples, 20 weft samples
<b>Self-monitoring:</b>	5 warp samples, 5 weft samples per batch
<b>External monitoring:</b>	5 warp samples, 5 weft samples, for removal see above

– At -20°C

Here again, all other things being equal, the above applies. The test does not have to be carried out if the application is not expected to reach these temperatures.

<b>Test procedure:</b>	According to DIN 53354, EN ISO 1421 (EN ISO 13934-1) with the alteration that the width of the sample must be 100mm.
<b>Test type:</b>	Initial approval
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm
<b>Test quantity:</b>	20 warp samples, 20 weft samples

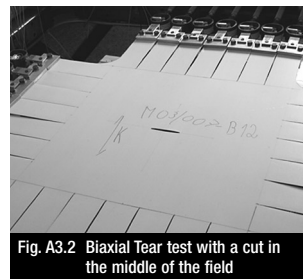
### The bi-axial strength

In addition to the strip tests two-dimensional **bursting tests** should be carried out for the initial approval. The difficulties in carrying out bursting tests are due to the fact that the fabrics are anisotropic materials. This means that the deformation shape only approximates to a calotte shell and the determination of the failure load has many elements of uncertainty. The problem must however be investigated further.

<b>Test procedure:</b>	Bursting test according to EN ISO 53861 with a circle diameter of 500 mm
<b>Test type:</b>	Initial approval
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm
<b>Test quantity:</b>	To be established according to the spread of the tests but at least three

### The tear strength

The tear-type damage must be defined properly. What is needed is the load at which the tear will be subject to unstable propagation so that the membrane finally fails. The governing theory here is that of fracture mechanics in which the stress concentration factor is defined as the decisive variable. This material variable is defined on the basis of the linear theory of elasticity and it can be applied to anisotropic materials without problems. It can be shown that this theory is also valid as a good approximation for coated fabrics.



- Evaluation method by means of biaxial tear tests

The evaluation should be done according to linear-elastic fracture mechanics where a stress concentration factor  $K_c$  is defined as following:

$$K_c = \sqrt{\pi a \sigma}$$

with  $a$ : half of the slit length,

$\sigma$ : stress perpendicular to the slit direction ad infinitum.

It has been proved that this procedure can be applied to anisotropic fabrics with adequate accuracy. The stress concentration factor is a material constant from which can be calculated either the stress level at which a slit with a certain length is going to propagate or how long a slit could be when held at a particular stress level without propagation occurring.

For the formulation of a reduction factor it is proposed to start with a slit of 5cm and to take into the load/unit width at which the tear starts to propagate.

<b>Test procedure:</b>	According to LBV P1111
<b>Evaluation:</b>	According to LBV P1111
<b>Test type:</b>	See comments
<b>Duty to provide evidence:</b>	See comments

Comments: Whether a time-consuming tear growth test is really part of the approval process has still to be discussed. Normally textile structures are not at risk of tearing after erection.

- Uniaxial tear growth test (Trapezoidal test)

<b>Test procedure:</b>	DIN 53363
<b>Evaluation:</b>	See standard
<b>Test type:</b>	Initial approval, external monitoring
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm
<b>Test quantity:</b>	At least 5 in warp and 5 in weft
<b>Initial approval:</b>	10 warp samples, 10 weft samples
<b>External monitoring:</b>	5 warp samples, 5 weft samples

In the textile industry the trapezoidal test has become well established since it is easy to carry out and is subject to DIN standard no. 53363. This test can however at the very best be used as a comparison test between different fabrics. No conclusion about actual tear strength can be drawn from this test. The test is only included for the sake of completeness.

### A3.1.1.2 Long-term strength behaviour

- Strength loss following loading

The long-term strength behaviour test is carried out in exactly the same way as for the short-term strength test in uniaxial strip tests parallel with the yarns. The following load steps should be set:

**10% of the short-time tensile strength at 23°C according to A3.1.1.1.**

**20% of the short-time tensile strength at 23°C according to A3.1.1.1.**

**50% of the short-time tensile strength at 23°C according to A3.1.1.1.**

**90% of the short-time tensile strength at 23°C according to A3.1.1.1.**

Test series should be done to obtain a sensitive reduction factor for long-term-loading. After 1000hours the residual strength is established.

<b>Test:</b>	After uniaxial loading at 23°C over 1000hours uniaxial strength according to A3.1.1.1
<b>Test type:</b>	Initial test
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm
<b>Test quantity:</b>	At least three samples for each load in the warp direction and three in the weft direction

- Strength loss due to exposure to weather

After the pure loading tests artificial weathering tests are also required. In these weather exposure tests strips taken in the warp and weft directions are subjected to a standard climate. The exposure time is normally 1000hours. At the end of this period the strengths are determined. A time acceleration of a factor of 10 can be achieved. In other words after 1000hours of artificial weathering the strength loss after 10,000hours can be determined. There exist calculation methods for the determination of the strength loss based on the tests. At the present time work is being done to formalize the calculation methods.

More test data of commonly used materials are needed.

## A3.1.2 STRENGTH OF THE CONNECTING SYSTEM

### A3.1.2.1 Welded seams

#### A3.1.2.1.1 Short-term behaviour

Seam strengths in **uniaxial** tests parallel with the yarns

Current industry practice is for the membrane fabricator to be responsible for the seam and its strength. On the other hand the seam strength depends to a great extent on the bonding strength of the coating on the fabric, for which the coating firm is responsible. There is

thus a split in responsibility here. The consequence of this is that the coating firm should show what can be achieved by optimizing the technology of bonding the coating onto the fabric. Prototype trials are necessary. By means of these trials the seam strength must be proven.

The strength of the seam for different seam widths needs to be established. The seam width is increased until no more increase in strength is possible. This permits the definition of an optimum seam width. Up to this optimum seam width the strength increases linearly with the width. From this and knowing the optimum width it is then possible to determine the minimum seam width. This then permits to know the seam strength based on the width.

It remains to be said that other seam arrangements may lead to higher seam strengths.

This leads to two further tasks:

- Determination of the dependence of strength on seam width at 23°C

<b>Test procedure:</b>	DIN 53354/ EN ISO 1421 and LBV
<b>Test type:</b>	Initial approval
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm, fabric manufacturer
<b>Test quantity:</b>	At least 5 in each direction warp and weft, 20 samples in warp direction, 20 samples in weft direction for both the coating firm and the fabric manufacturer

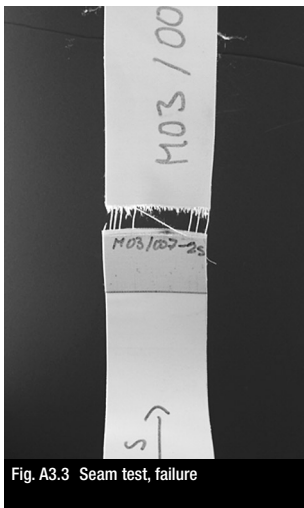


Fig. A3.3 Seam test, failure

The **fabric manufacturer** needs to prove whether he can achieve the strength which has been achieved and proven by the **coating firm** or whether, for whatever reason, he has to make concessions. Accordingly he must establish his seam width and define and prove the corresponding strength.

- Determination of seam strength at 23°C for the seam width established by the fabric manufacturer as normal

<b>Test procedure:</b>	DIN 53354/ EN ISO 1421
<b>Evaluation:</b>	According to above mentioned standards or EN ISO 13934-1
<b>Test type:</b>	Initial approval, self-monitoring, external monitoring
<b>Duty to provide evidence:</b>	Fabric manufacturer
<b>Test quantity:</b>	At least 5 in each direction warp and weft
<b>Initial approval:</b>	20 samples in warp direction 20 samples in weft direction
<b>Self-monitoring:</b>	5 samples in warp direction, 5 samples in weft direction per 1000m <sup>2</sup> of fabric
<b>External monitoring:</b>	10 samples in warp direction, 10 samples in weft direction

- Seam strengths at -20°C and +70°C

Here it is only necessary to carry out parallel-yarn uniaxial tests. All other things being equal to the proposals outlined above. Biaxial tests are not required here.

<b>Test procedure:</b>	DIN 53354/ EN ISO 1421 fabric
<b>Evaluation:</b>	According to above mentioned standards or EN ISO 13934-1
<b>Type of test:</b>	Initial approval, external monitoring
<b>Duty to provide evidence:</b>	Fabric manufacturer
<b>Test quantity:</b>	at least 5 in each direction warp and weft
<b>Initial approval:</b>	10 samples each in warp direction, 10 samples each in weft direction
<b>External monitoring:</b>	Inspection visits twice per annum, removal of a 2m wide piece from a random interface, manufacturing of the seam, 10 warp tests, 10 weft tests

- Biaxial seam strength

So far the determination of seam strength has been suitably defined. In most structures the actual seam directions will not be able to align themselves exactly with the warp direction. Therefore in the tests for biaxial seam strength it is necessary to include a small angle of deviation. In the general situation this angle will be reduced as discussed later. However the strength of the seam will be dependent on this angle so this value should be determined. It cannot however be established in uniaxial tests since in that case shear distortions will occur which do not occur in practice. This strength can only be measured in biaxial tests. The standard biaxial tests however nearly always result in a failure starting from the edge so that it is really only the sample shape which is being tested and not the seam. It is only the bursting test which is capable of answering the question of the biaxial strength.



The bursting test is required here and the diameter of the base circle should be at least five times the seam width.

The results of the bursting tests will establish the reduction factor of the parallel uniaxial seam test as a result of biaxial loading.

<b>Test procedure:</b>	According to EN ISO 52861-3
<b>Evaluation specifications:</b>	Still to be prepared
<b>Type of test:</b>	Initial approval
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm, fabric manufacturer
<b>Test quantity:</b>	To be established according to initial tests

*A3.1.2.1.2 The long-term behaviour of the seam strength*

- According to load

The strength in long-term behaviour is established in the same way as for short-term strength in single axis tests parallel with the yarns. The following loading steps are to be used:

**Prestress**

**Working stress**

**Mean value of prestress and working stress**

**75 % of the sum of prestress and working stress**

**25 % of the sum of prestress and working stress**

Ten samples are to be tested for each load step. After 1000 hours the residual strength can then be established. Prestress and working stress are defined with respect to the strength (see A3.1.3.1).

<b>Test:</b>	Single axis strength after uniaxial loading at 23 degrees over 1000 hours according to ISO 4892-2
<b>Test type:</b>	Initial test
<b>Duty to provide evidence:</b>	Fabric manufacturer
<b>Test quantity:</b>	Three samples for each load in the warp direction and three in the weft direction

- Strength reduction after exposure to weather

Beside the pure loading tests artificial weathering tests are also required. In this weather exposure test strips are taken in the warp and weft directions and are subjected to a standard climate. The exposure time is normally 1000hours. After this time the strengths are determined. A time acceleration of a factor of 10 can be achieved. In other words after 1000hours of artificial weathering the strength loss after 10,000hours can be determined. There exist calculation methods for the determination of the strength loss based on the tests. At the present time work is being done to formalize the calculation methods.

### A3.1.2.2 Clamped connections

#### A3.1.2.2.1 Short-term behaviour

In a clamped seam the two edges to be joined together are both provided with a “Keder” edge and then perforated at a defined spacing. The two edges are then bolted together with clamping plates. The “Keder” bears against the edges of the clamping plates such that the force is transferred in direct bearing. The clamping pressure must never be so great that the force to be transferred between the two panels is only passed by friction, since the strength of the yarn is reduced by high transverse pressure. The “Keder” material must not be so soft that it can be dragged in between the clamp plates by the membrane tension. It’s also necessary to consider that a temperature range of  $-20^{\circ}\text{C}$  to  $+70^{\circ}\text{C}$  can arise. For this reason the “Keder” material should never be soft PVC, but rather an elastomer material having the requisite temperature resistance. The clamping force is produced by bolts and for these bolts the clamping plates have to be drilled and the membrane perforated. The hole spacings should match up with one another in the prestressed condition. For this purpose the spacing of the holes, when the membrane is lying, unstrained on the floor of the fabrication hall, have to be compensated for.

The stress distribution in the area around the hole shows a stress concentration from which stress singularities could affect the membrane. These must not lead to failure, therefore part of the membrane forces arising should be taken up by friction resulting from compression. Also the hole spacings must not be so small that such singularities, when combined with the other forces, could lead to damage.

In the prestressed condition the membrane pulls slightly into the clamps. Because of this it’s possible that the hole face could be forced against the clamping bolt and damage may develop at this point. The hole in the membrane must therefore always be greater than the bolt which passes through it.

Demonstrating the capacity of such connections is a task for the fabric manufacturer. He can do this via uniaxial strip tests with the yarns parallel with the applied load.

Determination of the strength of a clamped seam in a uniaxial test, parallel to the yarns at 23,  $-20$  and  $70^{\circ}\text{C}$ :

– At  $23^{\circ}\text{C}$

<b>Test procedure:</b>	According to DIN 53354/ EN ISO 1421 similar to the uniaxial seam test
<b>Evaluation:</b>	See above
<b>Type of test:</b>	Initial approval, self-monitoring
<b>Duty to provide evidence:</b>	Fabric manufacturer
<b>Test quantity:</b>	At least 5 in each direction warp and weft
<b>Initial approval:</b>	10 strips in the warp direction, 10 strips in the weft direction
<b>Self-monitoring:</b>	5 tests per 1000m of continuous clamped seam

- At 70°C
  - Test procedure:** According to DIN 53354/ EN ISO 1421 similar to the uniaxial seam test
  - Evaluation:** See above
  - Type of test:** Initial approval, self-monitoring
  - Duty to provide evidence:** Fabric manufacturer
  - Test quantity:** At least 5 in each direction warp and weft
  - Initial approval:** 10 strips in the warp direction, 10 strips in the weft direction
  - Self-monitoring:** 5 tests per 1000m of continuous clamped seam
  
- At -20°C
  - Test procedure:** According to DIN 53354/ EN ISO 1421 similar to the uniaxial seam test
  - Evaluation:** See above
  - Type of test:** Initial approval
  - Duty to provide evidence:** Fabric manufacturer
  - Test quantity:** 10 strips in the warp direction, 10 strips in the weft direction

For the testing of the clamped edge the above description for the clamped seam can be used. The test required is again the uniaxial, parallel-yarn strip test. As above it is essential to ensure that the clamps etc. are also brought up to the testing temperature.

- Long-term behaviour of clamped connections
  - No tests are foreseen for the long-term behaviour of clamped connections.

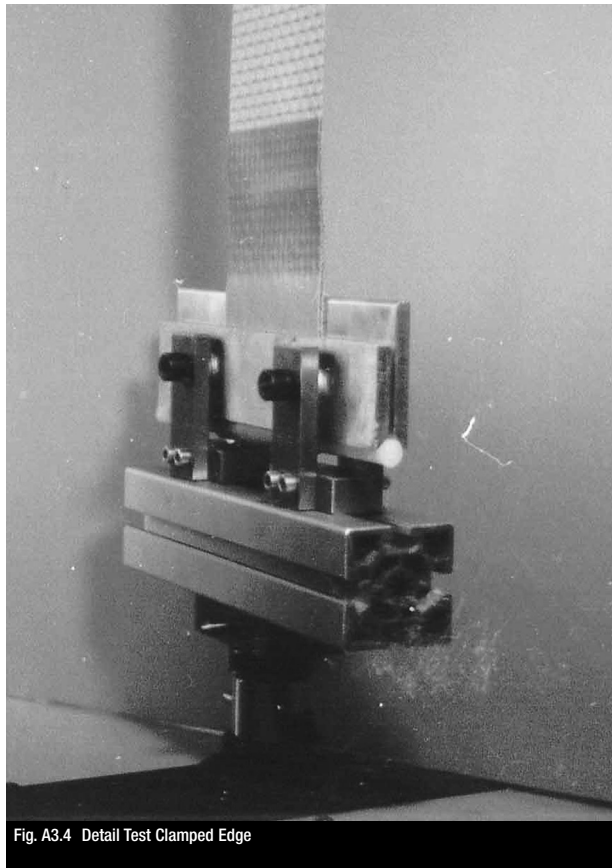


Fig. A3.4 Detail Test Clamped Edge

### A3.1.2.3 Pocket edges: Tubular and cable edges

#### A3.1.2.3.1 Short-term behaviour

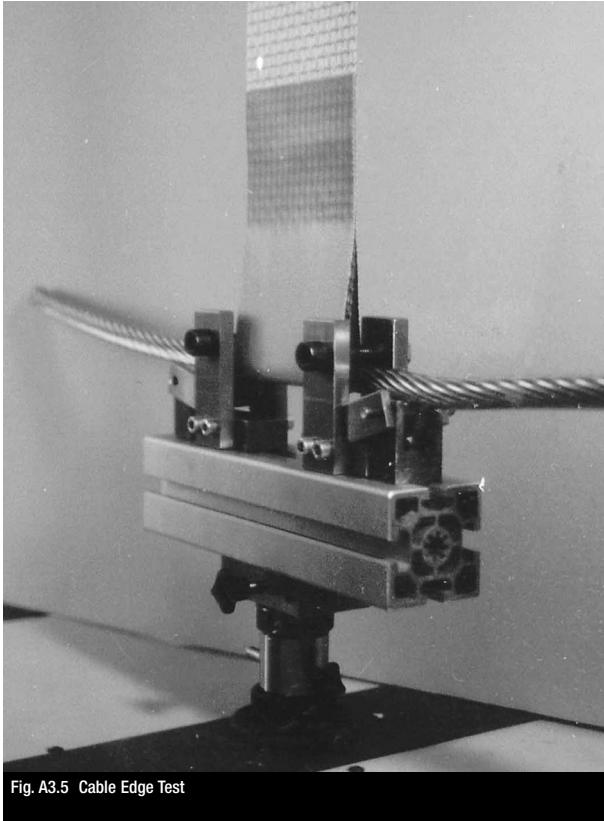


Fig. A3.5 Cable Edge Test

For the testing of the **pocket edge** the above description for the clamped seam can be used.

N.B.: On a cable edge it is essential to ensure that the cable remains straight during the test and does not become bent since otherwise another form of failure will occur.

#### A3.1.2.3.2 Long-term behaviour

No tests on the long-term behaviour of pocket edges are proposed.

### A3.1.3 DEFORMATION BEHAVIOUR

#### A3.1.3.1 Biaxial, parallel yarn tests

Biaxial tests are not intended for strength measurement. They are to establish the compensation data and to determine the moduli of elasticity. For this reason it is only necessary to carry out the tests in the relevant load range, which therefore needs to be defined. It is only possible here to provide general data and each individual case is the responsibility of the engineering consultancy and the building inspectorate. In general a safety factor of 5 is used, but this should always be discussed in accordance with the design engineer's analysis and may vary from case to case. In the example given below how these tests could be carried out the **working stress** is one fifth of the strength measured in the uniaxial test. The prestress is nor-

mally about a fifth and may be up to one tenth of the working stress since it can depend on the curvature of the surface and the orientation of the weave. Here the one-fifth figure should be started with. Thus the prestress is about one twenty-fifth of the uniaxial strength. Now it is not always true that the same prestress is found in the warp and weft therefore it is necessary to start with tests in which the following are taken as the basis of testing:

**Warp prestress : weft prestress = 1 : 2 = 1/50 working stress : 1/25 working stress**

**Warp prestress : weft prestress = 1 : 1 = 1/25 working stress : 1/25 working stress**

**Warp prestress : weft prestress = 2 : 1 = 1/25 working stress : 1/50 working stress**

In addition it is necessary during biaxial tests to simulate the behaviour in the building structure, in other words under real conditions. Real loads are snow and wind. If the main anisotropic directions are approximately parallel with the warp and weft, then in this load case one of the directions is loaded and the one which is perpendicular to it is relieved of load. This procedure is then inverted and the previously loaded direction is unloaded and the previously unloaded direction is then loaded. Which direction is the warp and weft depends of course on the design.

Also it must be remembered that the loads for which the stresses are calculated only occur very seldom if at all. For safety reasons it is always the highest load which is used. It is then realistic not to assume that the working stress is the upper limit but only 80% of it. Therefore the upper limit of the load in the test is 0.8 x working stress. A characteristic load history is shown in Fig. A3.6.

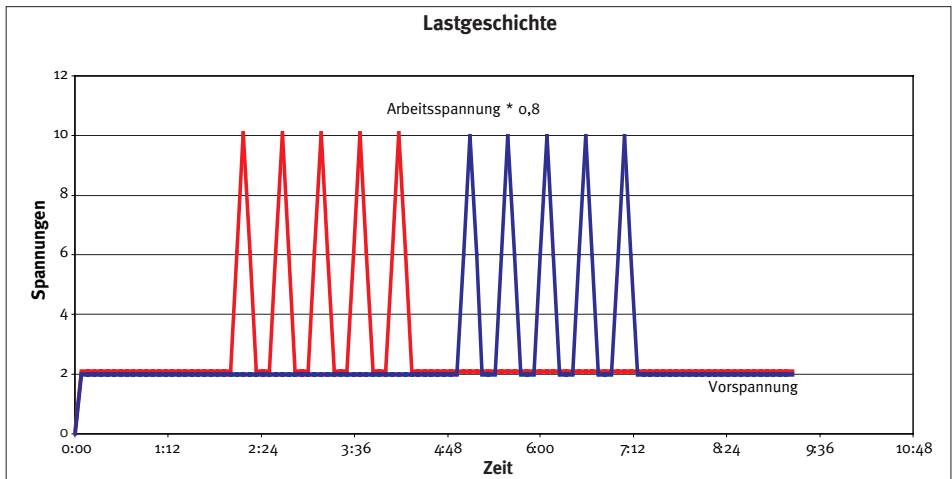


Fig. A3.6 Characteristic load history, red = stress in warp direction, blue is the stress in the weft direction

- Test procedure:** According to laboratory specification LBV P 1106
- Evaluation:** As described below
- Test type:** See comments
- Duty to provide evidence:** Coating firm
- Test quantity:** at least 2 of the same prestress ratio

Here it is necessary to differentiate between two cases: either the coating firm can prove that its product is homogeneous then the test can be limited to initial approval and external monitoring. However where the proof of homogeneity is unsuccessful, it is then necessary to carry out at least one corresponding biaxial test for each production batch. In the case of larger building projects the tendering engineer can specify self-testing in the tender. Who then has the duty of providing evidence should be discussed individually and this is then incorporated in the price.

– Determination of linear elastic moduli: Theory

The following nomenclature is used:

The index 1 indicates the warp direction, the index 2 the fill or weft direction  
Stresses and strains have two indices since they are tensors of second rank  
E-moduli and compliances have four indices since they are tensors of fourth rank  
Stresses are indicated by  $n$ , strains by  $\varepsilon$ , E-Moduli by  $E$  and compliances by  $C$   
 $n_{11}$  stress in warp direction,  $n_{22}$  stress in fill direction,  
 $\varepsilon_{11}$  strain in warp direction,  $\varepsilon_{22}$  strain in fill direction.

So we find the following abbreviations:

$E_{1111}$  stiffness in warp direction,  $E_{2222}$  stiffness in fill direction,  $E_{1122}$  stiffness interaction between warp and fill,  $\nu_{12} = E_{1122}/E_{1111}$  Poisson ratio for the interaction between warp and fill  $\nu_{21} = E_{1122}/E_{2222}$  Poisson ratio for the interaction between fill and warp,  $C_{1111}$  compliance in warp direction,  $C_{2222}$  compliance in fill direction,  $C_{1122}$  compliance interaction between warp and fill.

In linear approximation we have the following relations:

$$\begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1111} & E_{1122} \\ E_{1122} & E_{2222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \end{bmatrix}$$

with the inversion:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} \\ C_{1122} & C_{2222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_{11} \\ n_{22} \end{bmatrix}$$

or, explicitly:

$$\begin{aligned} n_{11} &= E_{1111} \varepsilon_{11} + E_{1122} \varepsilon_{22} = E_{1111} (\varepsilon_{11} + \nu_{12} \varepsilon_{22}) \\ n_{22} &= E_{1122} \varepsilon_{11} + E_{2222} \varepsilon_{22} = E_{2222} (\nu_{21} \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \end{aligned}$$

with the inversion:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= C_{1111} n_{11} + C_{1122} n_{22} \\ \varepsilon_{22} &= C_{1122} n_{11} + C_{2222} n_{22}. \end{aligned}$$

It should be noted that in general there are three moduli  $E_{1111}$ ,  $E_{1122}$  and  $E_{2222}$ .

The exact method to calculate the moduli in the tests reported here will be shown in evaluation of the first test results. It should be noted that one has to replace the stresses  $n$  and the deformations  $\Delta$  by  $\Delta_n$  and  $\Delta$  if one wants to linearize a non-linear behaviour in an interesting interval. An example of this in a prestressed material is normally the interval between the prestress and the working stress.

– Evaluation method

First it should be noted that the elastic moduli need to be calculated between an assumed prestress of 1kN/m and an upper value of 10, 20 and 30kN/m as shown in the load history, figure A3.6. The evaluation method is explained in detail in the following sketches in figure A3.7 which is extracted from the measured strains of the applied stresses of figure A3.6. The procedure corresponds to a typical loading by wind followed by a loading by snow.

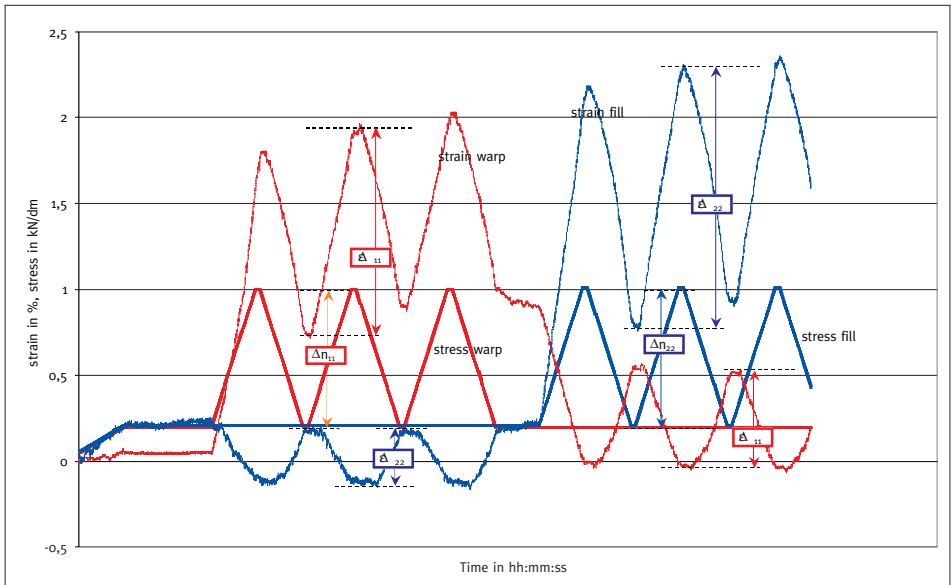


Fig. A3.7 How the elastic moduli can be evaluated with respect to the interaction between warp and weft threads

In the first part of the first cycles of the load history  $\Delta n_{11} \neq 0$ ,  $\Delta n_{22} = 0$ . The analogue strain  $\Delta_{11}$  and  $\Delta_{22}$  values can be read from the results.

In the second part  $\Delta n_{11} = 0$ ,  $\Delta n_{22} \neq 0$ . The analogue strain  $\Delta_{11}$  and  $\Delta_{22}$  values can be read from the results.

Thus for the first part the equations:

$$\begin{aligned} \Delta n_{11} &= E_{1111} \Delta_{11} + E_{1122} \Delta_{22} \\ 0 &= E_{1122} \Delta_{11} + E_{2222} \Delta_{22} \end{aligned}$$

For the second part we will find:

$$\begin{aligned} 0 &= E_{1111} \Delta_{11} + E_{1122} \Delta_{22} \\ \Delta n_{22} &= E_{1122} \Delta_{11} + E_{2222} \Delta_{22} \end{aligned}$$

With these equations the moduli  $E_{1111}$ ,  $E_{1122}$  and  $E_{2222}$  can be calculated.

This procedure will be repeated for every part of the load history. Thus an impression of the elastic moduli over the range of loading can be obtained.

The method presented above describes one way of testing and evaluation as it stands in the current state of the art. Other approaches calculating “response surfaces” are being developed (Blum, Gosling et al).

### A3.1.3.2 Shear behaviour

The fabric behaviour under parallel yarn stresses has been suitably described above. With the tests defined here nothing can be concluded about any possible shear stresses. For this purpose self-testing must be arranged. First however it is necessary to discuss the significance of the shear modulus in membrane construction.

For this purpose the situation on a seam is analyzed. At a seam an angle change of  $\alpha$  in the plane is necessary to generate a smoothly curved surface from the flat panels cut out of a roll. In the prestressed curved state this angle should approximate to zero, and the main anisotropic lines should run smoothly over the seam. Thereby the angle change over the seam  $\alpha$ , corresponds to a shear deformation of  $\varepsilon_{12}(\alpha)$ . The respective shear stress is  $\varepsilon_{12} \times E_{1212}$ . This is then superimposed by the initial stress  $n_{\beta}$  so that the stress state can now be given as:

$$n_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} n_{11} & \varepsilon_{12} E_{1212} \\ \varepsilon_{12} E_{1212} & n_{22} \end{pmatrix}$$

Now the requirement is that none of the main stresses should be negative so the following must be valid:

$$n_{11}n_{22} - E_{1212}E_{1212}\varepsilon_{12}\varepsilon_{12} > 0$$

From this the following condition can be obtained:

$$\frac{\sqrt{n_{11}n_{22}}}{\varepsilon_{12}} > E_{1212}$$

The shear modulus should therefore be limited by this condition. Or, if the shear modulus is known, it limits the possible angle change by the requirement that no negative main stresses should occur. The shear modulus itself does not play a significant role in the calculation of the stress distribution in a membrane structure.



It's possible to determine the shear modulus either by a biaxial test or by a uniaxial test.

- Determination of the shear modulus using a biaxial test

This test is very time-consuming and is only meaningful for the initial approval of a fabric.

The sample is shown in Fig. A3.8.

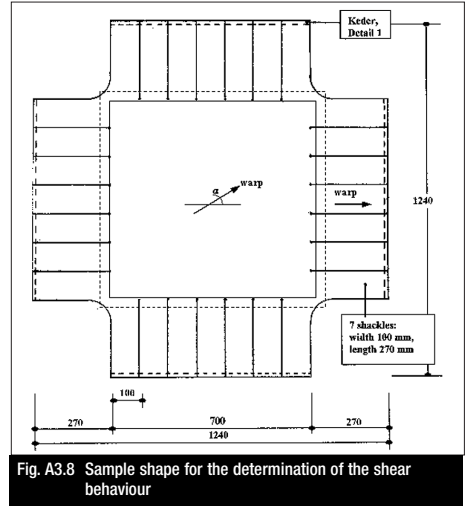


Fig. A3.8 Sample shape for the determination of the shear behaviour

Using a system of coordinates parallel with the edges of the sample the stresses in this sample are given by:

$$n'_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} n'_{11} & 0 \\ 0 & n'_{22} \end{pmatrix}$$

If  $\underline{T}$  is the matrix of rotation between the system of coordinates on the main anisotropic axes and those parallel to the edge then for  $\underline{T}$  we can give:

$$\underline{T} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$$

where  $\text{Det}(\underline{T}) = 1$  and  $\underline{T}^{-1} = \underline{T}^T$

For the relationship between the components of the stress tensor in the two systems of coordinate,

$$n_{11} = \cos^2 \varphi n'_{11} + \sin^2 \varphi n'_{22}$$

$$n_{22} = \sin^2 \varphi n'_{11} + \cos^2 \varphi n'_{22}$$

$$n_{12} = -\cos \varphi \sin \varphi (n'_{22} - n'_{11})$$

and for  $\varphi = 45^\circ$ :

$$n_{11} = \frac{1}{2}(n'_{11} + n'_{22})$$

$$n_{22} = \frac{1}{2}(n'_{11} + n'_{22})$$

$$n_{12} = \frac{1}{2}(n'_{22} - n'_{11})$$

Therefore to create a linearly growing shear stress  $n_{12}$ , it is necessary to increase linearly the difference between  $n'_{11}$  and  $n'_{22}$ .

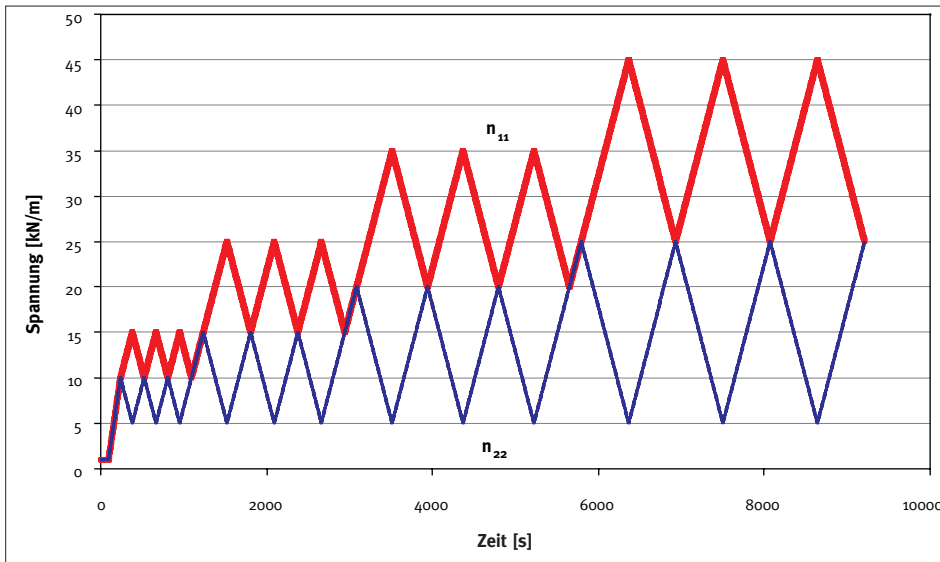


Fig. A3.9 Loading history for a shear test

<b>Test procedure:</b>	LBV
<b>Evaluation:</b>	As described below
<b>Shear stress determination:</b>	As described above
<b>Shear distortion determination:</b>	As described below
<b>Type of test:</b>	Initial approval
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm

The elongations in the warp direction, in the weft direction and in the bisecting line of the angle between warp and weft are measured. First it is necessary to calculate both the stress as well as the strain tensors in the coordinate system of the main axes. Only in this coordinate system the stress-strain-relationship has the simple form:

$$\eta_{12} = G \varepsilon_{12} = 2 E_{1212} \varepsilon_{12}$$

In general this can also be written as:

$$\eta_{\hat{\alpha}} = E_{\hat{\alpha}} \varepsilon_{\hat{\alpha}}$$

where all those indices from 1 to 2 which appear twice are summed (Einstein's summation convention). The factor 2 at  $E_{1212}$  stems from the fact that the distortion tensor is symmetrical and thus appears twice in the summation.  $2 E_{1212}$  is also described as the shear modulus  $G$  for isotropic materials:

$$2 E_{1212} = G.$$

In the case of non-linear shear behaviour the tangential shear modulus  $G$  can be defined by:

$$E_{1212} = \frac{\partial \eta_{12}}{\partial \varepsilon_{12}}$$

Now it is necessary to calculate all the variables in the coordinate system of the main anisotropic axes. The measuring is done as described above:

The strain in the warp direction  $\varepsilon_{11}$

The strain in the weft direction  $\varepsilon_{22}$

And the strain in the bisecting angle  $\varepsilon'_{11}$ .

The strain in the bisecting angle can be obtained according to the transformation rules of tensor calculation:

$$\varepsilon'_{11} = T_{1\mu} T_{1\nu} \varepsilon_{\mu\nu}$$

This equation thus has the following appearance:

$$\varepsilon'_{11} = T_{11} T_{11} \varepsilon_{11} + 2 T_{11} T_{12} \varepsilon_{12} + T_{12} T_{12} \varepsilon_{22}$$

This can be resolved according to  $\varepsilon_{12}$  into:

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{2T_{11}T_{12}} (\varepsilon'_{11} - T_{11}T_{11}\varepsilon_{11} - T_{12}T_{12}\varepsilon_{22})$$

For  $\varphi = 45$  degrees:

$$T_{11} = T_{12} = \frac{1}{2}\sqrt{2}$$

and from that is derived:

$$\varepsilon_{12} = \varepsilon'_{11} - \frac{1}{2}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})$$

The tensor of distortions in the main axis system of anisotropics therefore appears as follows:

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon'_{11} - \frac{1}{2}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) \\ \varepsilon'_{11} - \frac{1}{2}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22}) & \varepsilon_{22} \end{pmatrix}$$

with the measured variables  $\varepsilon_{11}$  along the warp direction,  $\varepsilon_{22}$  along the weft direction and  $\varepsilon'_{11}$  along the bisecting angle. Now the coefficients of the distortion tensor still have to be indicated. In general it can be said that the distortion tensor (in the two-dimensional case) describes the change in a Cartesian system with the orthonormal dimensional vectors  $\mathbf{E}_1$  and  $\mathbf{E}_2$  subject to a deformation  $\mathbf{e}_1$  and  $\mathbf{e}_2$ , and – more accurately stated, the change in the corresponding scalar products. The scalar products of  $\mathbf{E}_\alpha$ , because of the orthonormality, can be given by:

$$\mathbf{E}_1\mathbf{E}_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

And those of  $\mathbf{e}_\alpha$ , since they are not orthonormal, are derived from:

$$\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2 = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_{11} & \mathbf{e}_{12} \\ \mathbf{e}_{12} & \mathbf{e}_{22} \end{pmatrix}$$

Half of the difference between the scalar products  $\mathbf{e}_\alpha \mathbf{e}_\beta$  and scalar products  $\mathbf{E}_\alpha \mathbf{E}_\beta$  is described as distortion:

$$\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} (\mathbf{e}_\alpha \mathbf{e}_\beta - \mathbf{E}_\alpha \mathbf{E}_\beta)$$

Thus for the square of the length in direction 1 in the deformed state:

$$|\mathbf{e}_1|^2 = 1 + 2\varepsilon_{11}$$

and for the length itself:

$$|\mathbf{e}_1| = \sqrt{1 + 2\varepsilon_{11}}$$

For small  $\varepsilon_{11}$  it is possible to develop the roots in a series and hence we get:

$$|\mathbf{e}_1| = 1 + \varepsilon_{11}$$

In this way  $\varepsilon_{11}$  is the change in the length of the unit vector  $\mathbf{E}_1$ . In the same way  $\varepsilon_{22}$  is the change in length of the unit vector  $\mathbf{E}_2$ . For  $\varepsilon_{12}$ , due to the orthonormality of  $\mathbf{E}_1$  and  $\mathbf{E}_2$ , if the angle between  $\mathbf{e}_1$  and  $\mathbf{e}_2$  is set at  $90^\circ - \delta$  and taking account of the addition theorem for the cosine:

$$2\varepsilon_{12} = \cos(\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2) = \cos(90^\circ - \delta) = \sin \delta$$

from which for  $\delta$ :

$$\delta = \arcsin(2\varepsilon_{12})$$

For small distortions and small angle changes  $\delta$ :

$$\sin \delta \approx \delta = 2\varepsilon_{12}.$$

Therefore it needs to be remembered that  $\varepsilon_{12}$  should be given as an absolute rather than a percentage figure and that the angle should be given in radians. Thereby all the distortion variables have been defined.

For the measured results the linear elongation is given, since this is measured directly. Now it is not possible to state that the linear elongation is not accurate. Both definitions are accurate. What is decisive here is with which definition the material law is defined. If there are large elongations the definition of stresses will also have to be included here. Also there are various options which if carried out would be out of all proportion to the framework specified here. For a better estimation of the numerical differences between „linear” elongation and the elongation defined by metric alteration the differences between the various elongation definitions are numerically listed in the following table.

Linear elongation	Linear elongation	Metric elongation	Difference	Difference
1.00	%	1.00	1	%
0.01	1.00	0.01	0.00005	0.50
0.02	2.00	0.02	0.00020	0.99
0.03	3.00	0.03	0.00045	1.48
0.04	4.00	0.04	0.00080	1.96
0.05	5.00	0.05	0.00125	2.44
0.06	6.00	0.06	0.00180	2.91
0.07	7.00	0.07	0.00245	3.38
0.08	8.00	0.08	0.00320	3.85
0.09	9.00	0.09	0.00405	4.31
0.10	10.00	0.11	0.00500	4.76
0.11	11.00	0.12	0.00605	5.21
0.12	12.00	0.13	0.00720	5.66
0.13	13.00	0.14	0.00845	6.10
0.14	14.00	0.15	0.00980	6.54
0.15	15.00	0.16	0.01125	6.98
0.16	16.00	0.17	0.01280	7.41
0.17	17.00	0.18	0.01445	7.83
0.18	18.00	0.20	0.01620	8.26
0.19	19.00	0.21	0.01805	8.68
0.20	20.00	0.22	0.02000	9.09
-0.01	-1.00	-0.01	0.00005	-0.50
-0.02	-2.00	-0.02	0.00020	-1.01
-0.03	-3.00	-0.03	0.00045	-1.52
-0.04	-4.00	-0.04	0.00080	-2.04
-0.05	-5.00	-0.05	0.00125	-2.56
-0.06	-6.00	-0.06	0.00180	-3.09
-0.07	-7.00	-0.07	0.00245	-3.63
-0.08	-8.00	-0.08	0.00320	-4.17
-0.09	-9.00	-0.09	0.00405	-4.71
-0.10	-10.00	-0.10	0.00500	-5.26
-0.11	-11.00	-0.10	0.00605	-5.82
-0.12	-12.00	-0.11	0.00720	-6.38
-0.13	-13.00	-0.12	0.00845	-6.95
-0.14	-14.00	-0.13	0.00980	-7.53
-0.15	-15.00	-0.14	0.01125	-8.11
-0.16	-16.00	-0.15	0.01280	-8.70
-0.17	-17.00	-0.16	0.01445	-9.29
-0.18	-18.00	-0.16	0.01620	-9.89
-0.19	-19.00	-0.17	0.01805	-10.50
-0.20	-20.00	-0.18	0.02000	-11.11

For the sake of completeness the relationship between the shear distortion  $\epsilon_{12}$  and the angle change  $\delta$  for pure shear is summarized in a table and in the form of a graph.

In this figure the relationship between shear angle  $\delta$  and shear distortion  $\epsilon_{12}$  is shown:

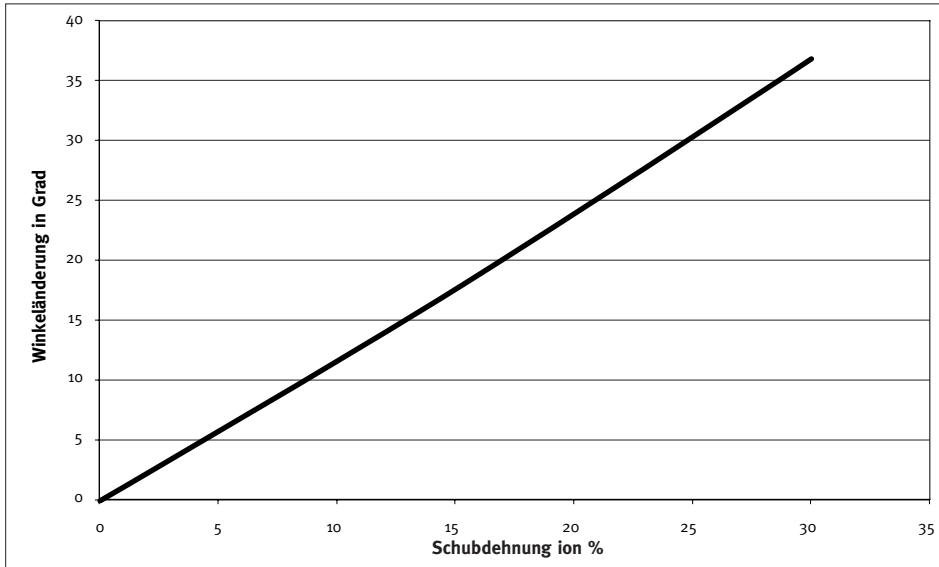


Fig. A3.10 Relationship between shear elongation and angular change

- Determination of the shear modulus using a uniaxial test

It is also possible to set up an alternative one-dimensional test, which is simpler to carry out and can be used for monitoring. It is shown in fig. A3.11.

For evaluation the angular change is measured as a result of the applied transverse force.

<b>Test procedure:</b>	According to LBV
<b>Type of test:</b>	External monitoring
<b>Duty to provide evidence:</b>	Coating firm

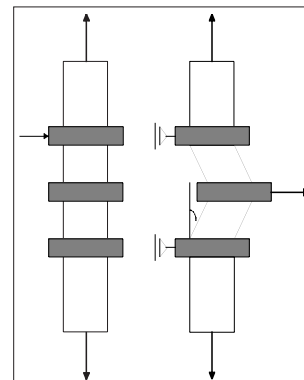


Fig. A3.11 Proposal for a monoaxial test to estimate the shear stiffness

**A3.1.3.3 Relaxation behaviour**

Relaxation denotes a decrease in the initially induced stress with constant elongation. Biaxial relaxation tests are however very difficult to carry out. It therefore makes sense here to carry out uniaxial tests and then to attempt to work out the fabric behaviour by calculation. As a first approximation it can be assumed that the stress changes linearly with the relaxation behaviour of the yarn. The proportionality constants can be calculated from the E-modulus and the relaxation behaviour of the yarn by means of the following regulation in warp and fill direction:

stress in warp direction in dependance of time:  $n_{11}(t) = n_{11}(0) \times f_1(t)$

stress in fill...:  $n_{22}(t) = n_{22}(0) \times f_2(t)$

where  $f_1(t)$  and  $f_2(t)$  are the relaxation functions of the threads in warp and fill directions.

Thereby the relaxation behaviour of the fabric has been traced back to the relaxation behaviour of the yarn, which needs to be established by experiment.

**A.3.1.3.4 Creep**

The creep behaviour of the fabric can also be traced back (in the same way as for the relaxation behaviour) to the creep behaviour of the yarn.

**A3.2 PROPOSAL FOR A GENERAL APPROVAL OF FABRIC MATERIALS FOR USE IN TEXTILE ARCHITECTURE**

INTERPRETATIVE DOCUMENT 1																
tested object	measured variable	device	code/manual				sample	test temperature	coater			manufacturer				
			DIN	English Standard	French Standard	others			initial approval	self-control	external control	initial approval	self-control	external control		
<b>1.1. MATERIAL</b>																
<b>1.1.1. Shortterm behaviour</b>																
-1	Material	strength and strain	monoaxial				strip in warp direction	23								
							strip in weft direction	23								
-2							strip in warp direction	70								
							strip in weft direction	70								
-3							strip in warp direction	-20								
							strip in weft direction	-20								
-4		strength	biaxial				bursting test	23								
-5		tear test	biaxial				cross sample	23								
			monoaxial				strip	23								
<b>1.1.2. Longterm behaviour</b>																
-1		relaxation	monoaxial				strip in warp direction	23								
							strip in weft direction	23								
-2		creep	monoaxial				strip in warp direction	23								
							strip in weft direction	23								
-3		strength after loading	monoaxial				strip in warp direction	23								
							strip in weft direction	23								
-4		strength after weathering	monoaxial				strip in warp direction	23								
							strip in weft direction	23								
<b>1.2. JOINTS</b>																
<b>1.2.1. Welded Seams</b>																
<b>1.2.1.1. Shortterm behaviour</b>																
-1		optimum seam width	monoaxial				strip in warp direction	23								
							strip in weft direction	23								
-2							strip in warp direction	23								
							strip in weft direction	23								
-3							strip in warp direction	-20								
							strip in weft direction	-20								
-4							strip in warp direction	70								
							strip in weft direction	70								
-5	seam	strength	monoaxial				strip in weft direction	70								
			biaxial				bursting test	23								

<b>1.2.1.2. Longterm behaviour</b>									
-1	seam					strip in warp direction	23		
		strength after loading				strip in weft direction	23		
-2	seam					strip in warp direction			
		strength after weathering				strip in weft direction			
<b>1.2.2. Clamped connections</b>									
<b>1.2.2.1. Shortterm behaviour</b>									
-1						strip in warp direction	23		
						strip in weft direction	23		
-2						strip in warp direction	-20		
						strip in weft direction	-20		
-3	clamp plate connection	strength	monoaxial			strip in warp direction	70		
						strip in weft direction	70		
-4						strip in warp direction	23		
						strip in weft direction	23		
-5						strip in warp direction	-20		
						strip in weft direction	-20		
-6	clamp plate edge detail	strength	monoaxial			strip in warp direction	70		
						strip in weft direction	70		
<b>1.2.2.2. Longterm behaviour</b>									
<b>1.2.3. Edges in pockets</b>									
<b>1.2.3.1. Shortterm behaviour</b>									
-1						strip in warp direction	23		
						strip in weft direction	23		
-2						strip in warp direction	-20		
						strip in weft direction	-20		
-3	tube edge in pocket	strength	monoaxial			strip in warp direction	70		
						strip in weft direction	70		
-4						strip in warp direction	23		
						strip in weft direction	23		
-5						strip in warp direction	-20		
						strip in weft direction	-20		
-6	cable edge in pocket	strength	monoaxial			strip in warp direction	70		
						strip in weft direction	70		
<b>1.2.3.2. Longterm behaviour</b>									
<b>1.3. STRESS-STRAIN BEHAVIOUR</b>									
-1	Material	Strain parallel to threads	biaxial			cross sample	23		
-2	Material	shear strain	biaxial			cross sample	23		
			monoaxial			strip	23		
-3	Material	Relaxation	monoaxial			warp thread	23		
						weft thread	23		
-4	Material	creep	monoaxial			warp thread	23		
						weft thread	23		
<b>1.4. IDENTIFICATION TESTS</b>									
-1		Number of threads							
-2		Fineness							
-3		twist							
-4		Material							
-5		Mass per sqm							
-6	fabric	weave style							
-7		Material							
-8		Minimum thickness							
-9	coating	Mass per sqm							
-10		Mass per sqm							
-11		Thickness							
-12		width to be supplied							
-13		colour							
-14		topcoat material							
-15	coated fabric	topcoat thickness							
-16	strength	Material	monoaxial			warp thread	23		
						weft thread	23		
-17	Geometry	Geometry of warp and weft threads, cover	Lupe			cut in warp direction	23		
						cut in weft direction	23		
black: Test in monoaxial machine									
red: Test in biaxial machine									
green: Longterm Stand									
blue: Bursting tests, Diameter of bursting area minimum 500 mm									
pink: Artificial weathering									



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε  
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΞΟΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΔΟΚΙΜΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΕΜΠΟΡΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ  
ΤΥΠΕ Ι

DATUM 03.06.09  
PROJEKT: 550-07  
SEITE 1 VON 11  
ERSTELLT VON BÖGNER

## **REPORT ON BIAXIAL TESTS**

### **Mehler Valmex FR 900 Mehatop F – Type II**

DATEI: P:\PR550 MEHLER-  
HAKU\550-07-  
BIAXVERSUCHE\AKTEN\550  
-07-BIAXBERICHT-VALMEX  
900.DOC

## Report on biaxial tests

DATUM 03.06.09  
PROJEKT: 550-07  
SEITE 2 VON 11  
ERSTELLT VON BÖGNER

**Client:** Mehler Technologies GmbH  
Rheinstrasse 11  
D-41836 Hückelhoven

**Task:** The Biaxial tests have been carried out according to  
the European Design Guide on Tensile Surface  
Structures.  
The results should not be used for compensation.

### Samples:

Date of receipt: 16.03.09  
Supplier: Mehler

**Material:** Valmex FR 900 Mehatop F – Type II  
Prod. No.: 1259580231  
Specimen No. M09/188

DATEI: P:\PR550 MEHLER-  
HAKU\550-07-  
BIAXVERSUCHE\AKTEN\550  
-07-BIAXBERICHT-VALMEX  
900.DOC

DATUM 03.06.09  
PROJEKT: 550-07  
SEITE 3 VON 11  
ERSTELLT VON BÖGNER

**Test and results:**

Date of test: 18.05.09

Responsible: Dr.-Ing. Heidrun Bögner-Balz

The results are graphically shown on the following pages.



Stuttgart, 03.06.2009

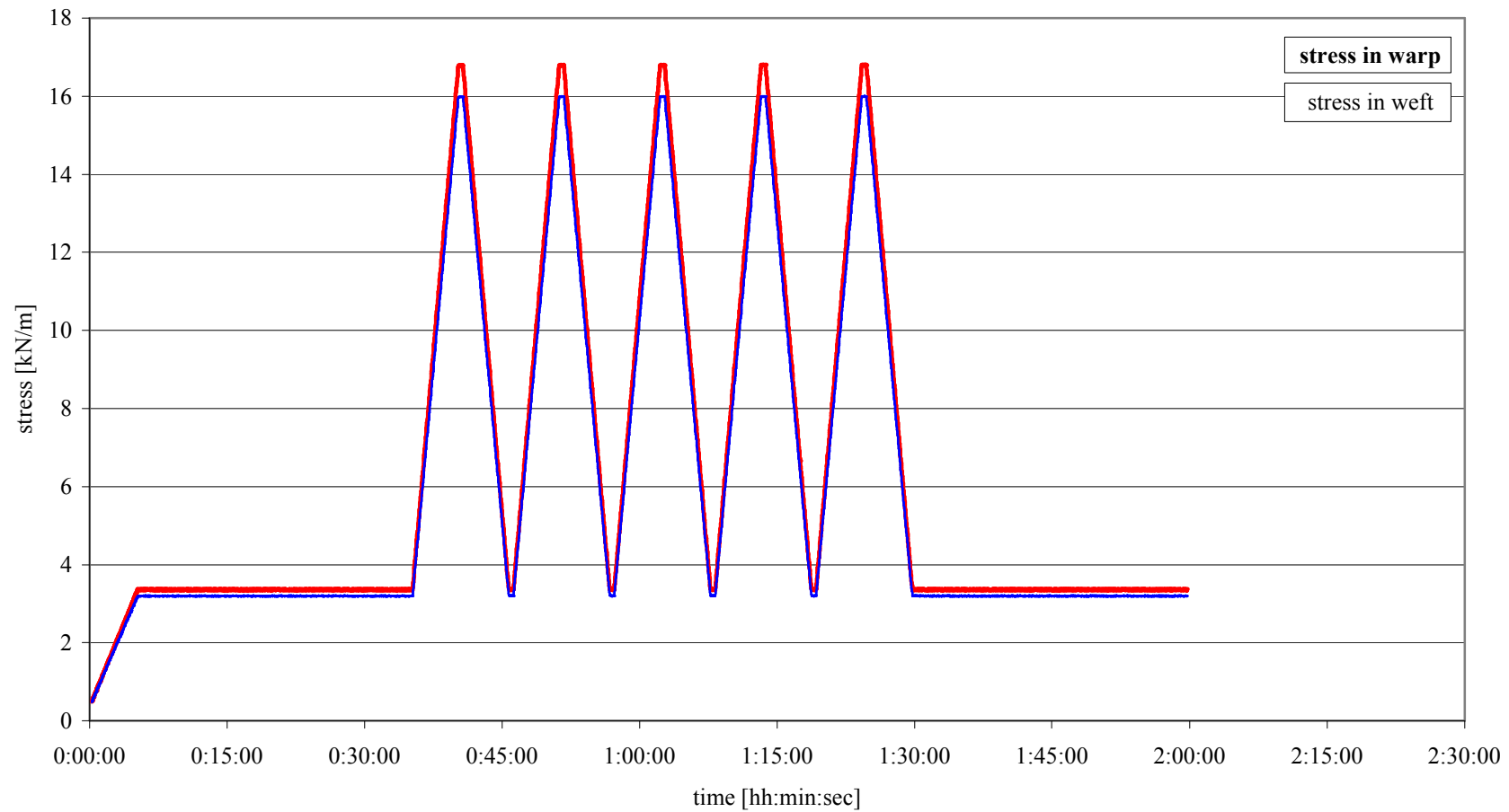


LABOR BLUM  
HANDWERKSTRASSE 58  
70565 STUTT GART  
TEL. 0711/7802001

DATEI: P:\PR550 MEHLER-  
HAKU\550-07-  
BIAXVERSUCHE\AKTEN\550  
-07-BIAXBERICHT-VALMEX  
900.DOC

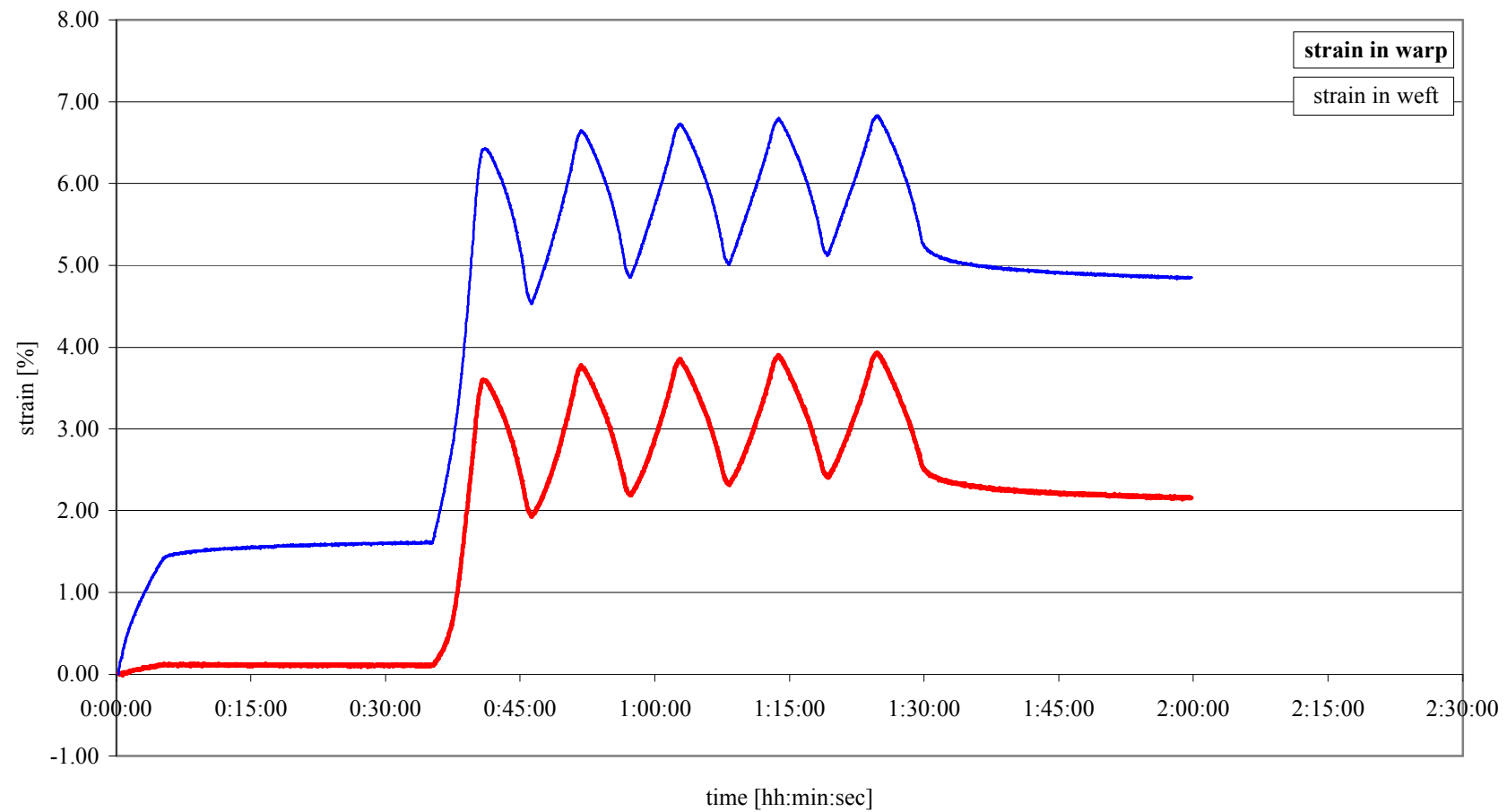
**Pr 550-07: Mehler Technologies Biaxial Test**  
**Valmex FR 900 Mehatop F, type II, M09/188-01**

DATUM 03.06.09  
PROJEKT: 550-07  
SEITE 4 VON 11  
ERSTELLT VON BÖGNER



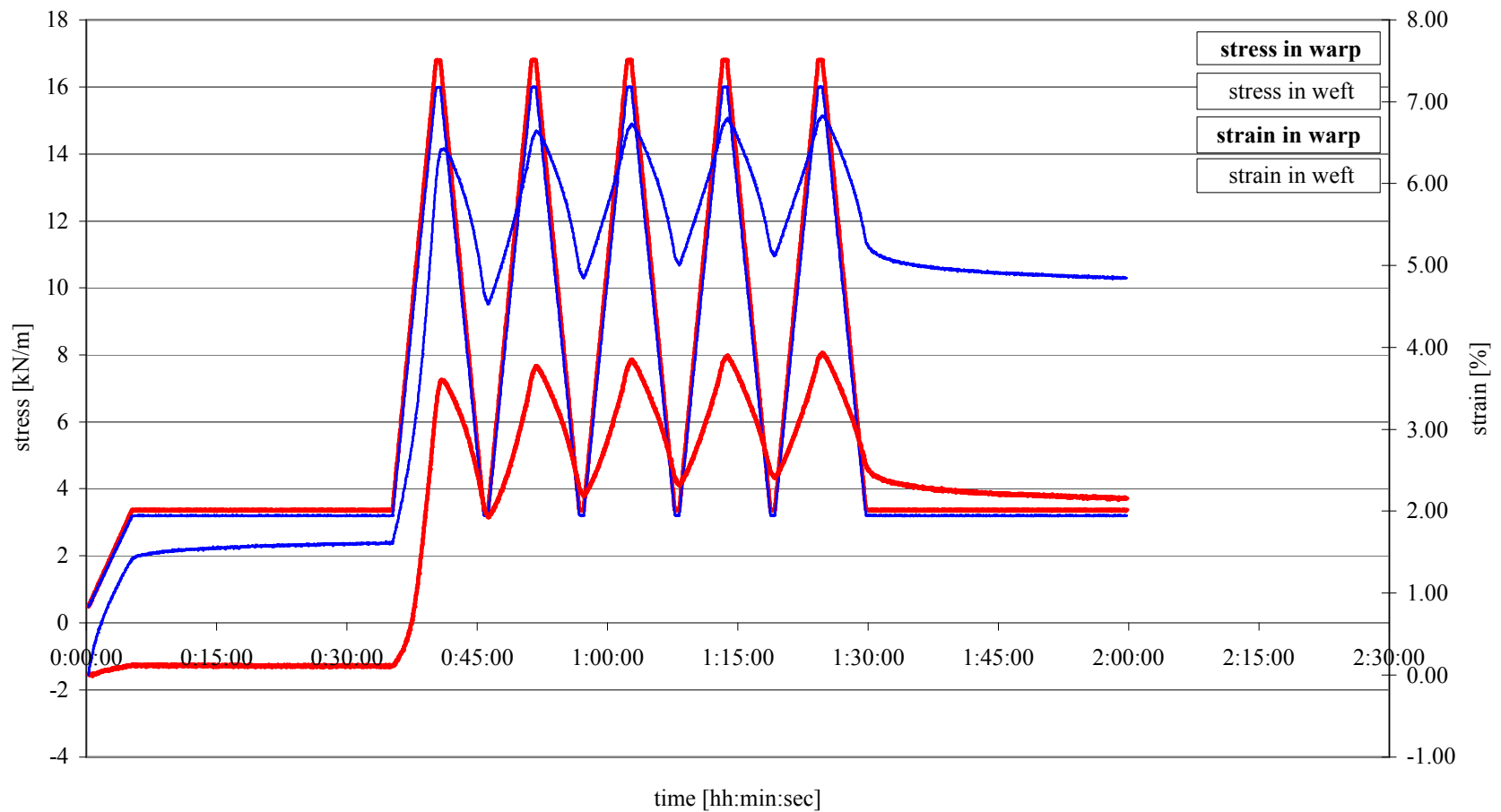
**Pr 550-07: Mehler Texnologies Biaxial Test**  
**Valmex FR 900 Mehatop F, type II, M09/188-01**

DATUM 03.06.09  
 PROJEKT: 550-07  
 SEITE 5 VON 11  
 ERSTELLT VON BÖGNER



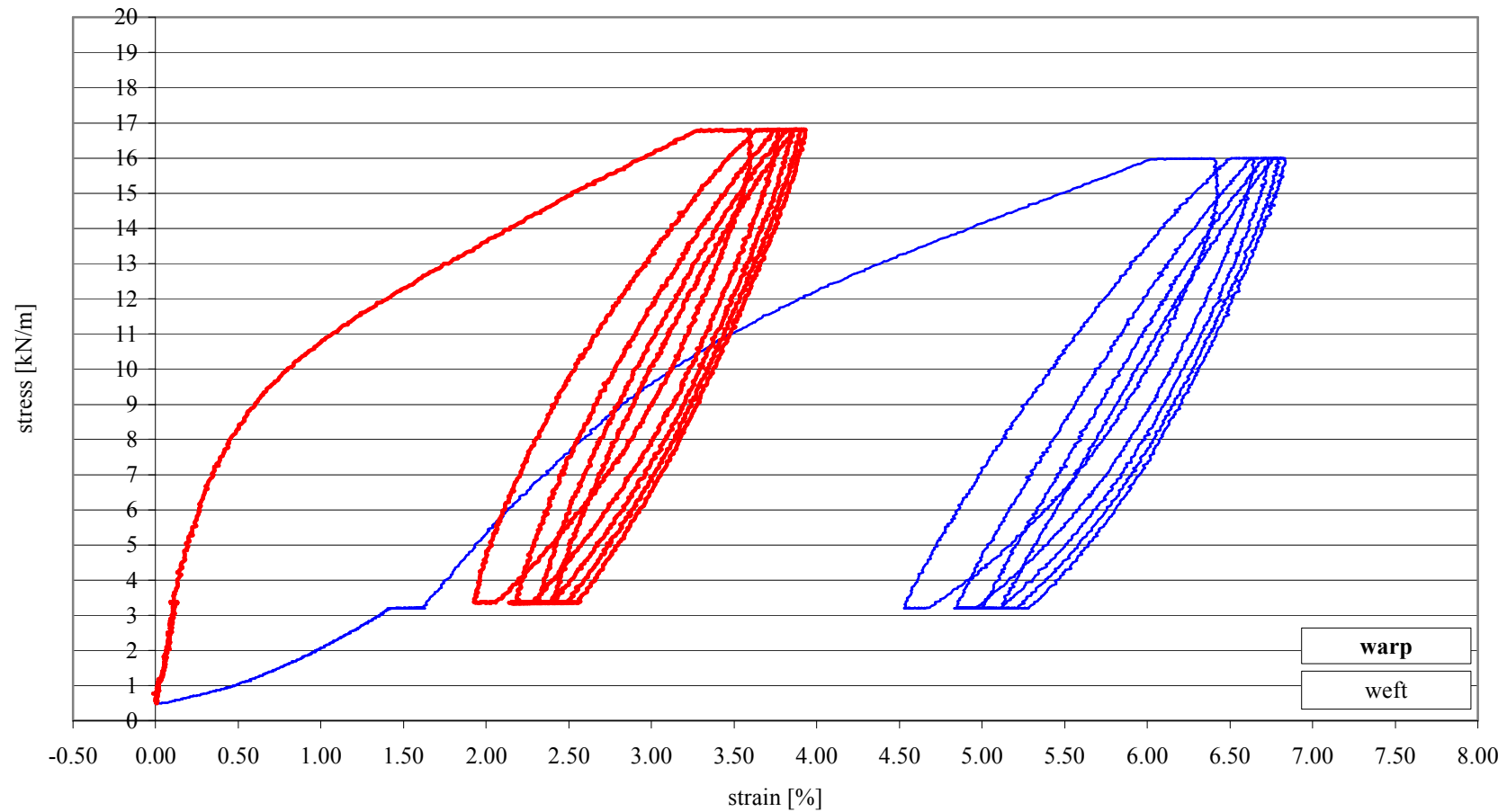
**Pr 550-07: Mehler Technologies Biaxial Test**  
**Valmex FR 900 Mehatop F, type II, M09/188-01**

DATUM 03.06.09  
 PROJEKT: 550-07  
 SEITE 6 VON 11  
 ERSTELLT VON BÖGNER



**Pr 550-07: Mehler Technologies Biaxial Test**  
**Valmex FR 900 Mehatop F, type II, M09/188-01**

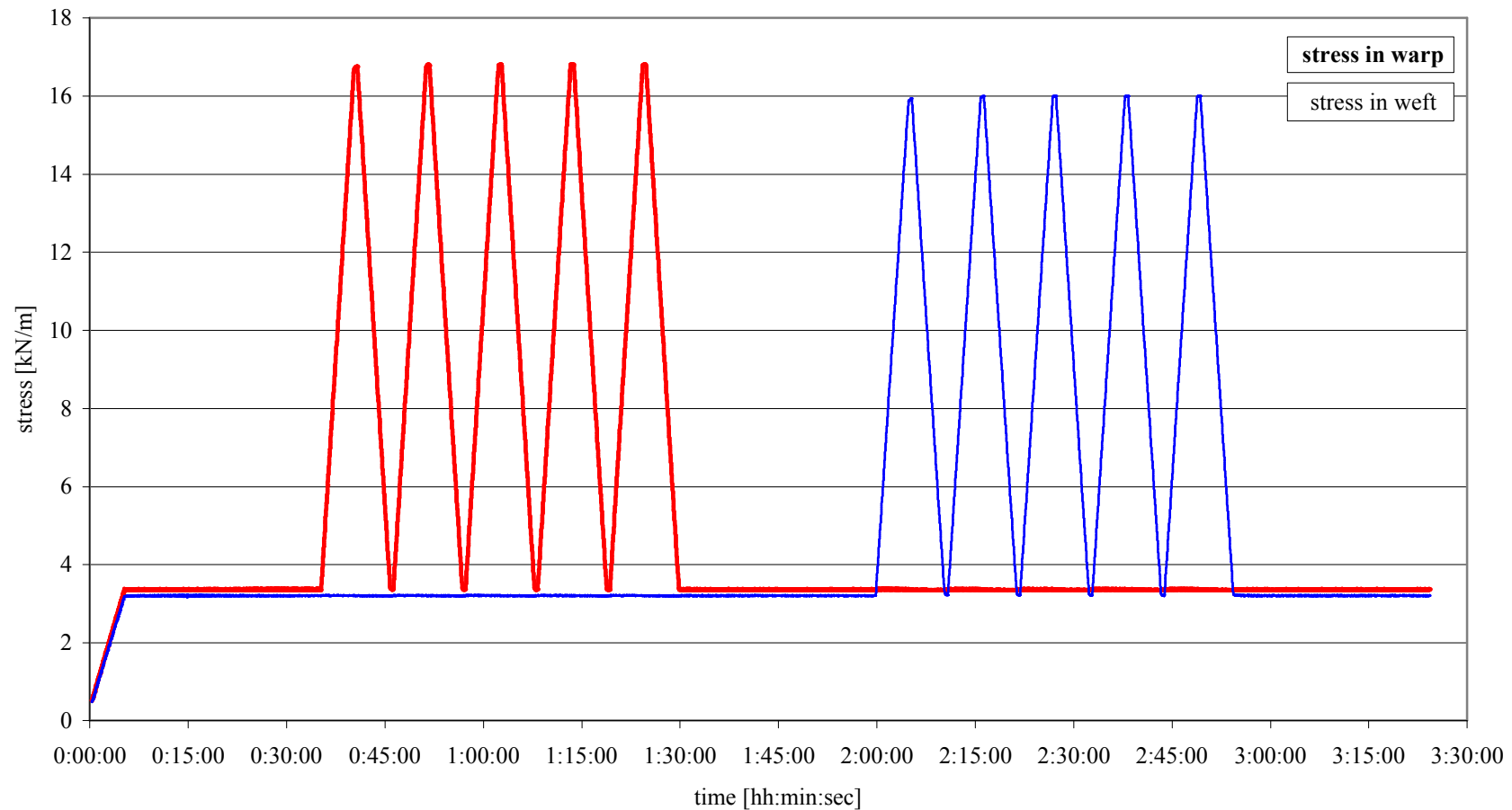
DATUM 03.06.09  
PROJEKT: 550-07  
SEITE 7 VON 11  
ERSTELLT VON BÖGNER





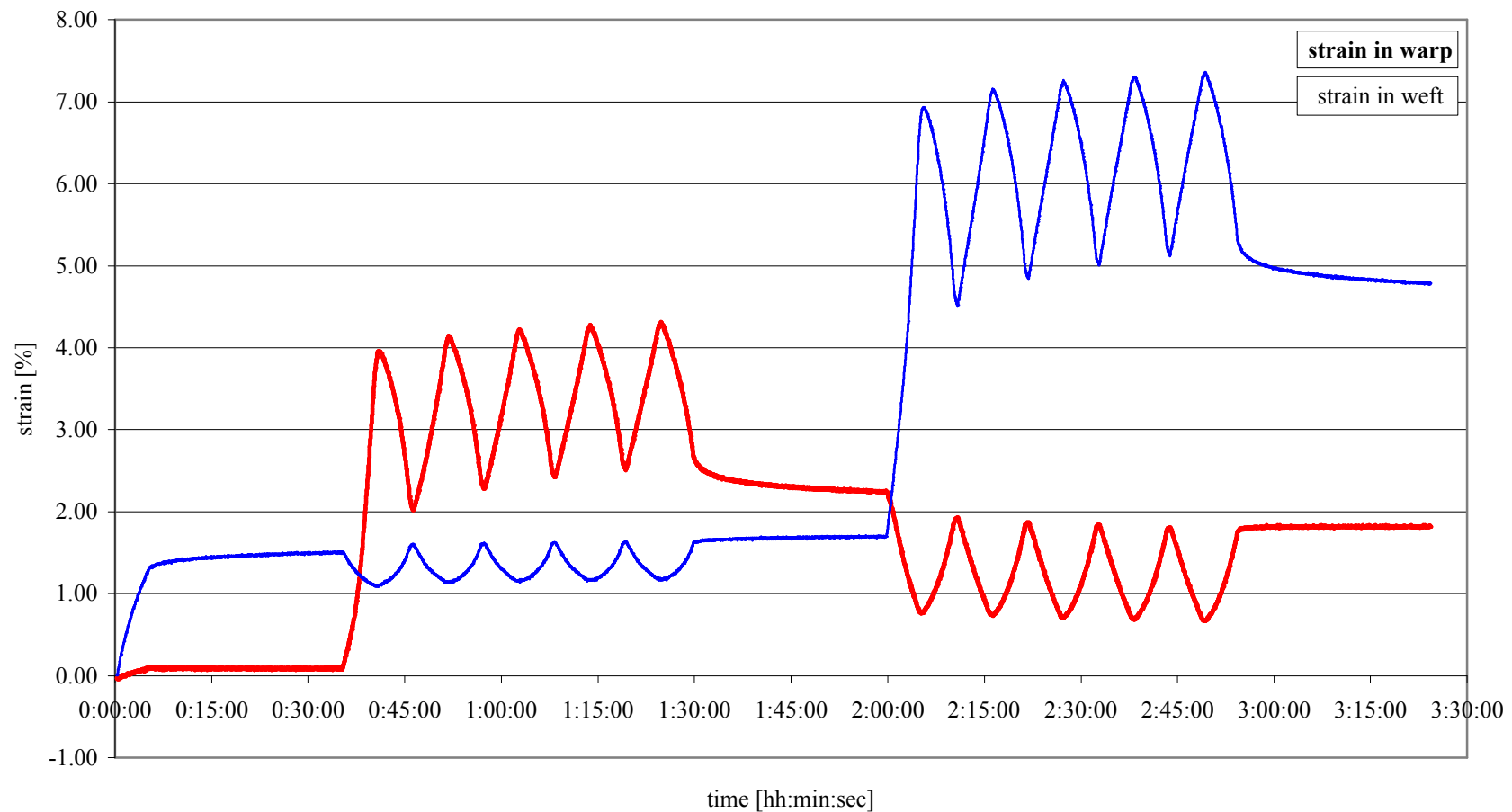
**Pr 550-07: Mehler Technologies Biaxial Test**  
**Valmex FR 900 Mehatop F, type II, M09/188-02**

DATUM 03.06.09  
PROJEKT: 550-07  
SEITE 8 VON 11  
ERSTELLT VON BÖGNER



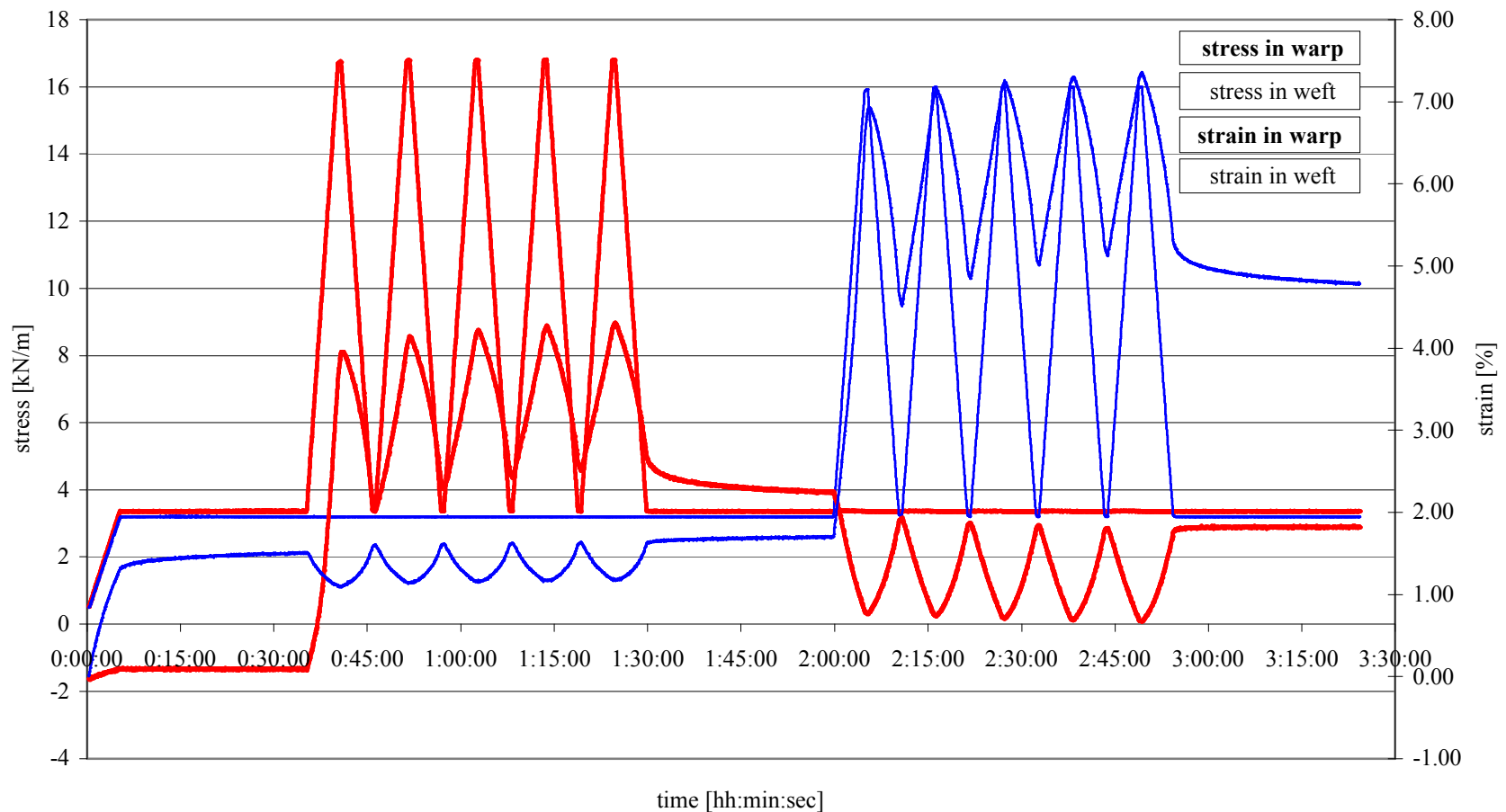
**Pr 550-07: Mehler Technologies Biaxial Test**  
**Valmex FR 900 Mehatop F, type II, M09/188-02**

DATUM 03.06.09  
 PROJEKT: 550-07  
 SEITE 9 VON 11  
 ERSTELLT VON BÖGNER



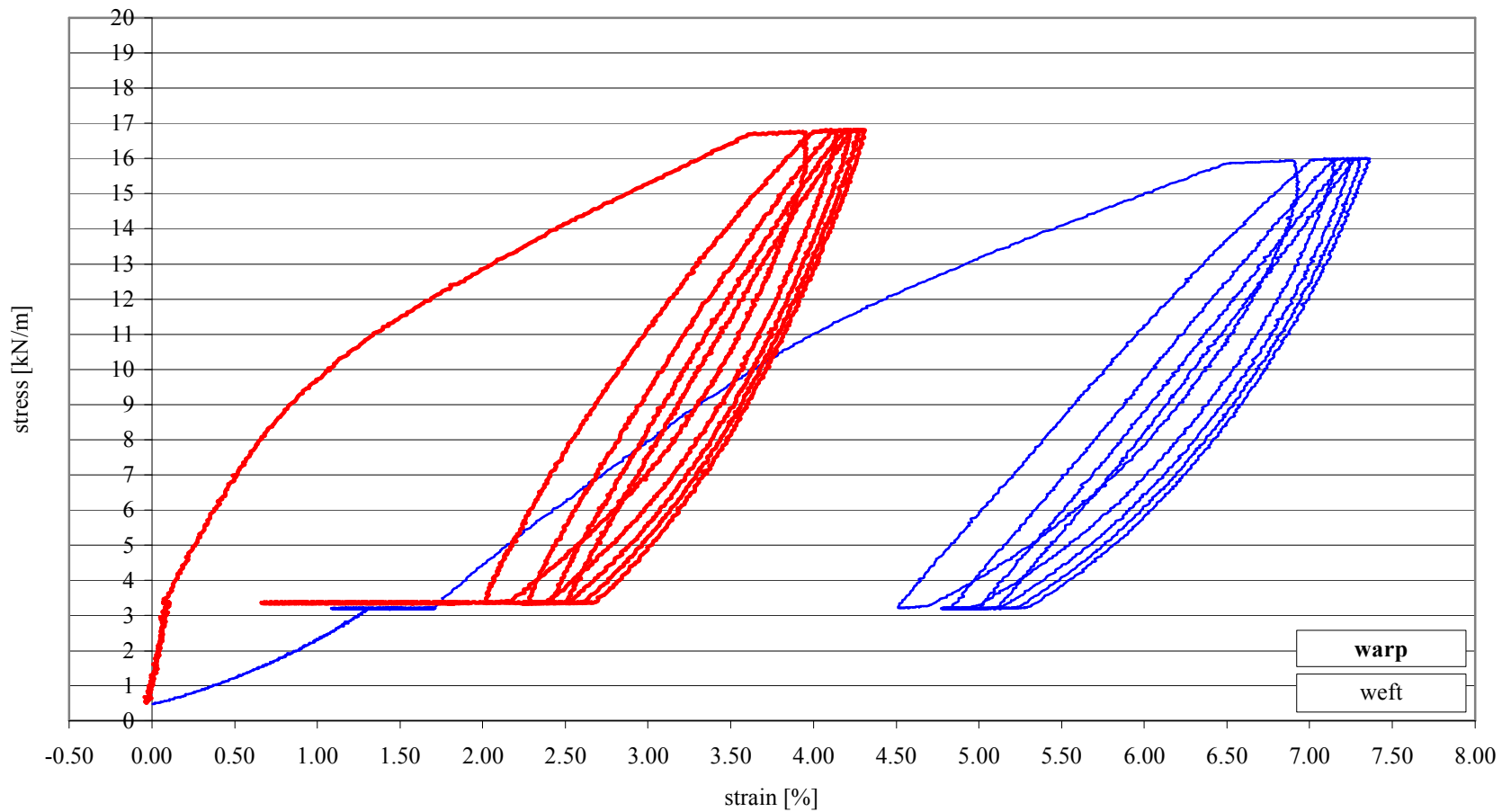
**Pr 550-07: Mehler Technologies Biaxial Test**  
**Valmex FR 900 Mehatop F, type II, M09/188-02**

DATUM 03.06.09  
 PROJEKT: 550-07  
 SEITE 10 VON 11  
 ERSTELLT VON BÖGNER



**Pr 550-07: Mehler Texnologics Biaxial Test**  
**Valmex FR 900 Mehatop F, type II, M09/188-02**

DATUM 03.06.09  
 PROJEKT: 550-07  
 SEITE 11 VON 11  
 ERSTELLT VON BÖGNER



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ  
ΘΕΩΡΗΣΗ ΑΡΧΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ  
ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ  
ΡΟΗΣ ΑΕΡΑ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

## APPENDICES

### Appendix A: CFD procedures

In general, a CFD analysis is typically composed of three phases: pre-processing, solving and post-processing. Pre-processing consists of importing the building geometry from CAD, creating a computational domain, mesh generation, defining boundaries and initial conditions, and setting numerical controls. Once the computational conditions have been set, the analysis will proceed using commercial CFD codes such as STAR-CD and STAR CCM+ (*CD-Adapco*), FLUENT and CFX (*ANSYS, Inc*), OpenFOAM, or COVERFLOW. The results can take the form of color plots, contour plots, and numerical reports in the post-processing phase. The specific process involved in performing a CFD analysis is outlined in detail in *NPARC Alliance CFD Verification and Validation* (2012):

- 1) Formulate the Flow Problem
- 2) Model the Geometry and Flow Domain
- 3) Establish the Boundary and Initial Conditions
- 4) Generate the Grid
- 5) Establish the Simulation Strategy
- 6) Establish the Input Parameters and Files
- 7) Perform the Simulation
- 8) Monitor the Simulation for Completion
- 9) Post-Process the Simulation to get the Results
- 10) Make Comparisons of the Results
- 11) Repeat the Process to Examine Sensitivities
- 12) Document

## Appendix B: CFD fundamentals

### 1. Governing equations

According to the book *Computational Fluid Dynamics: The Basics With Applications* (Anderson, 1995), CFD utilizes the fundamental governing equations of fluid dynamics as represented by the continuity, momentum, and the energy equations. These are based on three fundamental physical principals:

- (1) Mass is conserved;
- (2)  $F = ma$  (Newton's second law); and
- (3) Energy is conserved (Anderson, 1995, p.38).

These are summarized in the Navier–Stokes equations for incompressible flow:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{Equation 1- The conservation of mass}$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_i \quad \text{Equation 2 - A momentum equation}$$

where  $x_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) are the three coordinate directions,  $u_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) are the velocities in these directions,  $p$  is pressure,  $\rho$  is density and  $\mu$  is viscosity. Equation 1 expresses the conservation of mass, while Equation 2 is a momentum equation where the first term on the left-hand side represents the variation with time and the second is the convection term; on the right-hand side the terms are the pressure gradient, a diffusion term and the source term, respectively (Wainwright & Mulligan, 2004). In general, the Navier-Stokes equations comprise a system of nonlinear partial differential equations and provide the highest level approximations for the flow physics approaching the continuum-mechanics based flow regime (Veress & Rohács, 2012).

## 2. Initial conditions

At an early stage of the CFD process, the initial conditions must be determined. These conditions are sensitive to the selection of the turbulence model to be utilized. The number of iterations is set up for steady flow problems, but for the case of unsteady flow problems, time steps are needed. A more detailed explanation of how the turbulence model is selected is provided below in Section 5.

## 3. Grid generation

The geometric domain to be modeled using CFD must be divided up or *discretized* into cells. The combination of all the cells is regarded as the grid or computational domain. For example, three dimensional cells are usually hexahedral or tetrahedral in shape (Scott et al., 2006). The process of determining the grid is referred to as *grid*, or *mesh generation*. Anderson (1995) pointed out that the grid generation is a significant consideration in the CFD process and an appropriate determination of the type of grid is essential if a valid numerical solution is to be obtained. This process has a significant impact on the efficiency and accuracy of CFD, as the element or cell shape and size influences both the computation speed and numerical accuracy (Kortelainen, 2009).

Based upon the connectivity of the mesh or on the type of elements two types of meshes, structured and unstructured, have been defined as shown in Figure 1. According to Bern and Plassmann (2000), all the interior vertices of a structured mesh are topologically alike and the vertices of an unstructured mesh may be arbitrarily different for local neighborhoods. They also noted that a hybrid mesh can be made up of a number of small structured meshes in an overall unstructured pattern, as shown in Figure 2. While a structural mesh is simple and easy to access, an unstructured mesh generally provides a better fit for complicated domains and offers more convenient mesh adaptivity (Oliveira et al., 2008). A high-quality hybrid mesh can take advantage of both these approaches. In addition, both structured and unstructured meshes must



remove unnecessary details in the geometry to ensure robustness and mesh quality (Oliveira et al., 2008).

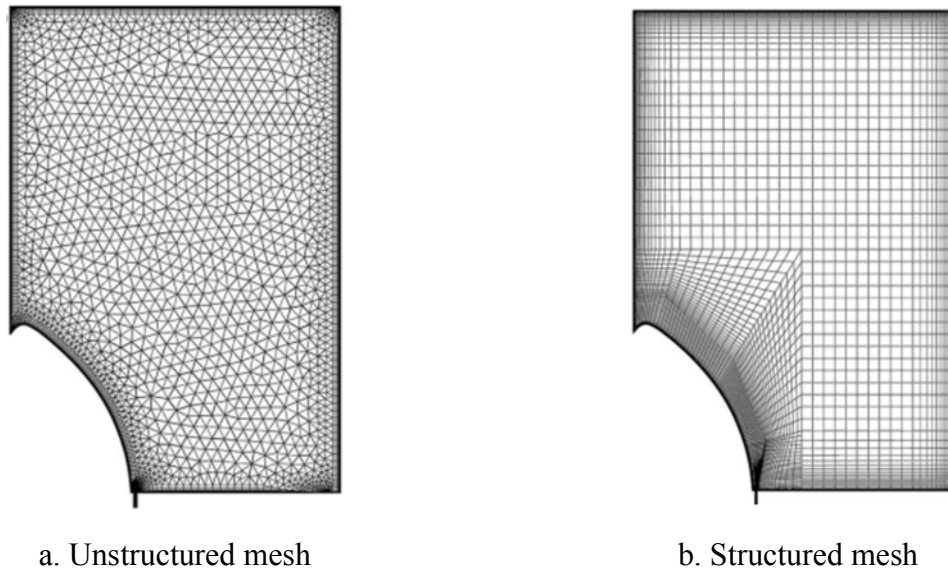


Figure 1 - The two different mesh types (Bosbach et al. ,2006)

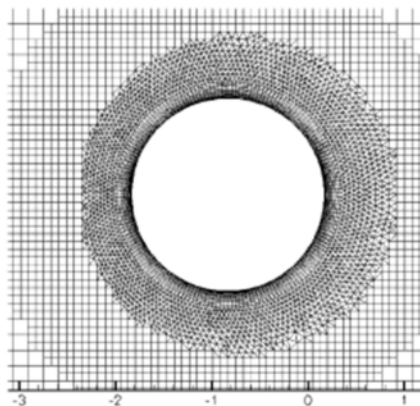


Figure 2 - Close-up view of a hybrid computational grid (Zhang & Wang, 2004)

#### 4. Discretization

Once the cell types have been determined, the next step is to divide the flow domain into small computational volumes called *elements* or *cells* that cover the domain completely but do not

overlap one another (Kortelainen, 2009). Depending upon the type of discretization method utilized, computational grids can be either structured or unstructured. Anderson defined *discretization* as:

the process by which a closed-form mathematical expression, such as a function or a differential or integral equation involving functions, all of which are viewed as having an infinite continuum of values throughout some domain, is approximated by analogous (but different) expressions which prescribe values at only a finite number of discrete points or volumes in the domain (1995, p.125).

Various numerical discretization methods have been developed for the solution of non-linear Partial Differential Equations (Uddin, 2008). According to Veress and Rohács (2012), three discretization methods are normally used in commercial CFD codes: the Finite Difference method, the Finite Element method and the Finite Volume method. Other discretization methods such as the Spectral, Boundary element, Vorticity type and Lattice gas or Lattice Boltzmann methods have been rarely, if ever, used for this purpose.

The characteristics of the three most frequently used methods can be summarized as follows (Udoewa & Kumar, 2012; Veress & Rohács, 2012):

- 1) The *Finite Difference* method (FDM) is the most traditional and oldest method of the three and is only suitable for structured grids. The mesh size and properties such as stretch ratio, aspect ratio and skewness have a significantly impact on its accuracy. This method is not widely used because of the geometric limitations it imposes on applications, but it is the easiest discretization method of the three.
- 2) The *Finite Element* method (FEM) provides greater flexibility for dealing with complex geometries than the Finite Difference method. The mesh in the Finite Element method can be either structured or unstructured. While this method is more stable than the Finite Volume method, it requires more computing memory than the Finite Volume method.

3) The *Finite Volume* method (FVM) calculates the partial differential equations over finite volumes created as parts of one or more cells that can be either overlapped or non-overlapped. In this method, it is possible to modify the shape and location of the control volumes to allow greater freedom in the choice of the functional representation of the flow field. The Finite Volume Method permits the use of irregular grids while retaining computational simplicity.

As shown in Figure 3, while FEM separates the continuum region of interest into a number of simply shaped regions, FVM subdivides the domain of interest into a finite number of contiguous control volumes based on a grid (Molina-Aiz et al., 2010).

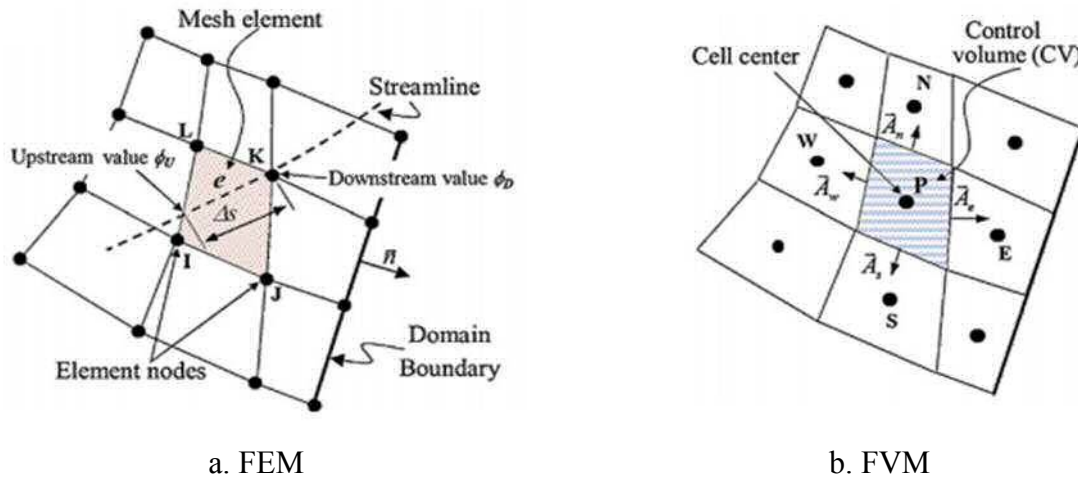


Figure 3 - Structured meshes for the two main discretization methods (Molina-Aiz et al., 2010)

## 5. Turbulence models

A fundamental phenomenon in this field of study is turbulence. Generally, turbulence is a complicated phenomenon that occurs over a wide range of time scales and length scales. Most CFD researchers deal with this by selecting a certain length scale and time scale for the range of turbulence anticipated since turbulence acts over such a wide range of length scales and its periodicity manifests over similarly wide ranges of time periods (Udoewa & Kumar, 2012). Udoewa and Kumar explained that resolving turbulence means computing and calculating

turbulent quantities such as vorticity, velocities and pressures in turbulent regions and noted that modeling turbulence creates the effect of fully resolved turbulence on unknown values such as velocity and pressure based on the effect of the equation to which an expression is added. Turbulence modeling is difficult and represents the most important challenge facing CFD (Wainwright & Mulligan, 2004) and successfully modeling turbulence greatly enhances the quality of numerical simulations (Sodja, 2007).

There are three popular approaches for the analysis of a turbulent flow problem, namely *Direct Numerical Simulation* (DNS), *Large Eddy Simulation* (LES) and models based on *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) equations (Udim, 2008). The characteristics of these three approaches are summarized by Wainwright & Mulligan in their book *Environmental Modeling: Finding Simplicity in Complexity* as follows:

For DNS, it is possible to predict all the eddy structures from the large ones down to the smallest but it requires significant computing resources for practical flows. In LES approach, it uses a length scale to differentiate between larger and smaller eddies. The larger eddies are resolved directly but the smaller eddies are not predicted directly. The smaller eddies are accounted for through a subgrid-scale model. When applying this approach, appropriate filter or grid size should be considered in order to achieve accurate results. However it is less expensive than DNS, LES still requires high computing power and needs fine grids for practical flows. On the other hand, the most widely used approach is the turbulence models based on RANS equations. The most popular option is the  $k - \varepsilon$  model which is usually the default option in CFD software.  $k$  represents the kinetic energy in the turbulent fluctuations and  $\varepsilon$  represents the rate of dissipation of  $k$  (2004, pp.338).

In addition, Udim (2008) mentioned that the RANS approach predicts only the mean flow field and can be applied to achieve a sufficiently accurate prediction in many cases. However, this does fail to represent the true flow physics.

In sum, although both the DNS and LES approaches provide better results, they require far greater computer resources than turbulence models based on RANS methods. Furthermore, there are a number of different versions of turbulence models based RANS methods now available commercially (Udoewa & Kumar, 2012).

## **6. Solution algorithm**

CFD simulations are constructed around numerical algorithms that can deal with fluid flow problems. For example, consider the numerical algorithms used to resolve the coupling that arises in the solution of Navier-Stokes equations between velocity, density and pressure (Moukalled & Darwish, 2000). The SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) type of algorithm is commonly used in CFD studies (Patankar & Spalding, 1972), but over the years, a number of modified versions of the SIMPLE algorithm have been suggested including the SIMPLER, SIMPLEC and PISO algorithms (Moukalled & Darwish, 2000).

Versteeg and Malalasekera (1995) compared those four algorithms in their book *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. The SIMPLE algorithm was originally proposed by Patankar and Spalding (1972) and is essentially a guess-and-correct procedure for the calculation of pressure on a staggered grid arrangement. This method is relatively straightforward and has been successfully used in numerous CFD procedures. The SIMPLER (SIMPLE-Revised) algorithm is an improved version of the SIMPLE algorithm that utilizes pressure corrections only to correct velocity fields. Consequently, this algorithm is very effective in calculating the pressure field correctly and solving the momentum equations while at the same time reducing the computing resources required. The book also introduces the SIMPLEC and PISO algorithms. The SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) algorithm follows the same steps as the SIMPLE algorithm but defines the coefficients in the pressure-correlation equation differently. The PISO algorithm, where the acronym PISO stands for Pressure Implicit with Splitting of Operators, and implements a pressure-velocity calculation procedure for the non-iterative computation of unsteady compressible flows. Versteeg and Malalasekera consider that although the SIMPLEC and PISO algorithms have proved that they are as efficient as the

SIMPLER algorithm for certain types of flows, it is not clear whether they are better overall than the SIMPLER algorithm.

## **7. Boundary conditions**

After choosing a suitable mathematical model for the physical phenomenon, boundary conditions must be chosen. For boundary-value problems, it is essential to assign values along the boundary of the domain that will permit the problem to be solved throughout the entire 2D or 3D space. There are two types of boundary conditions, namely *Dirichlet* and *Neumann* boundary conditions. For a Dirichlet boundary condition, the fixed value of the unknown on the boundary is specified for some flow problems; this is referred to as a direct boundary condition. In contrast, when the value of a derivative of the unknown is specified, this is called a Neumann or natural boundary condition. These boundaries are spatial boundaries (Udoewa & Kumar, 2012).

According to Wainwright & Mulligan (2004), it is common for the velocity to be fixed at an inlet and outlet. For an inlet, turbulence quantities must be correctly specified and inlet profiles consistent with the definition of roughness along the boundaries of the domain. For the outlet condition, careful consideration must be given to the question of whether the outflow should equal the inflow or whether the flow profile should be uniform along the stream direction in order to avoid poor convergence or solutions that are not physically feasible.

## **8. Numerical parameters for controlling the calculation**

Numerical parameters must be specified in order to control the calculation and reduce the computational resources needed. These parameters include the relaxation factor, monitoring residuals, different numerical schemes, the number of iterations for steady flow, number of time steps for unsteady flow, and the choice between single and double precision.

## **Appendix C: Definitions of several CFD terms**

CFD is a computer based mathematical modeling tool that is based upon the fundamental governing equations of fluid dynamics. However, terms within CFD are often not obvious to non-experts to that field (Souza, 2005). Thus, it is important to introduce and describe CFD terms to them. While the most commonly used parameters of CFD will be introduced in this chapter, several terms of CFD simulation will be introduced briefly in this section.

### 1. Aspect ratio

This is ratio of longest edge length to shortest edge length and it is a measure of quality for a computational grid. In order to avoid convergence problems, the cell aspect ratios should be kept as small as possible (Souza, 2005; STAR-CCM+ user guide 8.04).

### 2. Boundary conditions

The spatial or temporal specification of variable values or behavior to produce an unique solution (Souza, 2005).

### 3. Convergence criteria

Through the iterations, the magnitude of the velocity divergence is reduced below some absolute numerical value that tends to a single answer (Souza, 2005)

### 4. Divergence

The progression of a numerical scheme away from any single solution (Souza, 2005).

### 5. Grid / mesh

This is the outcome of discretizing the computational domain into a number of elements or cells defining the discrete points at which the numerical solution is computed (Souza, 2005).

### 6. Grid density

This term means the number of cells in a given volume. A higher grid density should be applied in regions of interest where the variables change rapidly so that their gradients can be computed and represented accurately. In the case of lower grid density, it is generally used where the solution is changing less in order to reduce the computational resources (Souza, 2005).

#### 7. Invalid cell

When each cell interior face belongs to exactly two cells, this is considered as valid cell. If the arrays storing the cell connectivity and vertices have entries that make reference to faces or vertices that fall outside the expected range of values, invalid cells occur (STAR-CCM+ user guide 8.04).

#### 8. No-slip wall

This term means that the fluid velocity at the wall equals the wall velocity. The wall can rest or a tangential wall velocity in the form of a velocity vector with respect to the laboratory coordinate system can be specified (STAR-CCM+ user guide 8.04).

#### 9. Schmidt number

A dimensionless number that is the ratio of kinematic viscosity to diffusivity (STAR-CCM+ user guide 8.04).

#### 10. Skewness

This term is an important measure of cell quality and it is designed to reflect whether the cells on either side of a face are formed in such a way as to permit diffusion of quantities without these quantities becoming unbounded (STAR-CCM+ user guide 8.04).

#### 11. Slip wall

This term means that the fluid velocity at the wall is different with the wall velocity (STAR-CCM+ user guide 8.04).



## 12. Structured grid

This grid forms a regular pattern. Its grid lines are continuous across the domain and are usually aligned with the co-ordinate directions. For this grid, hexahedra in three dimensions or quadrilaterals in two dimensions are included (Souza, 2005).

## 13. Unclosed cell

Generally a topologically closed volume cell consists of edges that are connected to exactly two faces, and faces with normals pointing outwards. When a cell is missing a face, or the outward normals are inconsistent, it is regarded as unclosed mesh (STAR-CCM+ user guide 8.04).

## 14. Unstructured grid

Unlike structured grid, this grid forms an irregular pattern. This grid allows highly complex geometries to be modeled with relative ease compared to structured grids (Souza, 2005).

## 15. Wall functions

This function has been used to describe the effects of turbulent boundary layers in the region adjacent to a wall, without resolving details of the near wall flow and eliminating the need for high grid resolution in the viscous sub-layer (Souza, 2005).

## **Appendix D: The commercial CFD codes**

Many commercial CFD codes such as STAR-CD and STAR CCM+ (*CD-Adapco*), FLUENT and CFX (*ANSYS, Inc.*) or OpenFOAM have been used to simulate physical processes. These commercial CFD packages include pre-processors to construct grids, and apply initial conditions, processing algorithms that permit segregated or coupled, steady or unsteady state flows and a variety of turbulence models, and post-processors that display results in a manner that enhance interpretation. Among commercial codes, the characteristics of FLUENT and STAR-CCM+ have been reviewed.

### **1. FLUENT**

FLUENT is a most commonly used commercial CFD code. FLUENT solves the conservative form of the Navier-Stokes equations using the finite volume method on an unstructured, non-orthogonal, curvilinear coordinate grid system. Combinations of elements in a variety of shapes are permitted, such as quadrilaterals and triangles for 2-D simulations and hexahedra, tetrahedra, polyhedra, prisms and pyramids for 3-D simulations. Meshes can be created using mesh generators (GAMBIT) or by several third-party CAD packages. FLUENT allows the following file formats for importing are summarized in table 1 (*ANSYS FLUENT, 12.0 User's Guide*).

Table 1 - File formats for importing into FLUENT (*ANSYS FLUENT, 12.0 User's Guide*)

---

ABAQUS .inp, .fil, and .odb files
Mechanical APDL .inp, .cdb, .rst, .rmg, and .rfl files.
ANSYS CFX .def and .res files
CGNS files
EnSight files
ANSYS FIDAP Neutral files
GAMBIT files
HYPERMESH ASCII files.
NASTRAN Bulk Data files
PATRAN Neutral files.
PLOT3D mesh and result files.

---

Turbulent flow models including several popular  $k$ -epsilon and  $k$ -omega models, and the Reynolds stress model (RSM) are available. Moreover, large eddy simulation (LES) and the more economical detached eddy simulation (DES) turbulence models can be employed (*ANSYS FLUENT, 12.0 User's Guide*).

## 2. STAR-CCM+

STAR-CCM+ includes the general characteristics of FLUENT. In addition, STAR-CCM+ has a single environment for whole CFD process such as solid modeling, mesh generation, post-processing, etc. Moreover, STAR-CCM+ has a comprehensive suite of geometry creation and preparation tools. For meshing, STAR-CCM+ employs the technology of hexahedral, dodecahedral and arbitrary polyhedral cells and produces boundary trimmed meshes that conform to geometry, as well as high quality prism layer meshes for accuracy. The following file formats that can be imported into STAR-CCM+ are summarized in table 2 (STAR-CCM+ user guide 8.04).

Table 2 - File formats for importing into STAR-CCM+ (STAR-CCM+ user guide 8.04)

---

Parasolid .x_t , .x_b
IGES .iges, .igs
STEP .stp, .step
Stereo lithography file .stl
PATRAN shells .pat
NASTRAN shells .nas
CATIA V4 .model, .exp, .session / CATIA V5 .catpart, .cadproduct
SolidWorks .sldprt, .sldasm
PRO/Engineer .prt, .asm
Autodesk Inventor .ipt, .iam

---

For turbulence models, various models that provide closure of the RANS equations, LES and DES model are also available (STAR-CCM+ user guide 8.04).

### 3. The selection of CFD code

Reviewing manuals, similarities and differences between FLUENT and STAR-CCM+ in their physics conditions such as turbulence types, grid discretization, and solving methods were obtained. Although FLUENT is widely used and initially considered as a potential candidate for this study, it has difficulties in creating models and meshes from other tools such as GAMBIT. Moreover, the cost of its license ranges from \$2,000 to \$ 10,000 per year. In the case of STAR-CCM+, it provides a single environment in which users can perform CAD creation to post-processing and allows various types of file formats to be imported. In addition, free academic license is provided. Thus, STAR-CCM+ was employed for this present study.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ  
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ  
ΓΙΑ ΕΦΕΛΚΥΟΜΕΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕΜΒΡΑΝΗΣ  
ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ - ΑΝΑΘΕΩΡΗΣΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ

## 6.1 Basis for Design

Most National and Euro Codes are based on a “limit state” approach, i.e. for various combinations of factored load the structure and its components should comply with acceptable strength criteria, and for various working load combinations acceptable deformation and degradation limits should not be exceeded. This contrasts with the previously used “permissible stress” basis for design in which the stresses in the structure at maximum “working” loads were not allowed to exceed a certain proportion of the yield stress of the construction material. For structures which are, or are assumed to be, “linear-elastic” in their behaviour there need be no significant difference between these two approaches in the context of strength assessment. For structures which exhibit softening behaviour through material non-linearities (e.g. yielding and plasticity in steel or cracking in concrete) a limit state approach with factored loadings may be safer and more accurate. For structures which exhibit strong geometric non-linearity, in particular stiffening systems such as tensile structures, a limit state approach (with partial safety factors applied to the loading conditions as well as material strengths) may not be appropriate since the geometry of the structure is dependent on both the magnitude and the distribution of loading; the changes in geometry being particularly significant for non-uniform loading distributions. Another aspect which mitigates against the use of factored loadings for prestressed fabric structures is the large variation in material characteristics and the large factors which must be applied to the quoted (or ideal test) rupture strength of the virgin fabric in order to allow for aspects such as material variabilities, tear strength, degradation and local damages during erection handling. For other components of the structure which use more conventional material such as steel (columns and trusses etc) it may / will be necessary to show compliance with limit state Euro Codes using appropriate factors applied to the various design case forces and moments in the members.

It is proposed in the following that for purposes of assessing the strength of tensile structures, in particular the components of stressed fabrics, cables, ropes and webbing belts, design loads are taken as the characteristic loads (or maximum service design loads) and the various components are then checked on a permissible stress basis which in addition to allowing for material variability also allows for appropriate partial factors of safety associated with the type of loading.

Typically these composite factors might be 5 – 7 for the fabric strength, 2.5 for cables, 3 for webbings – each in relation to rupture strength and depending on the materials used and the type and duration of loading. For steel components appropriate factors (and their combinations for different loadings) would then be applied to the forces and moments predicted by the non-linear design load analyses. The values for factors quoted above are illustrative – actual values for the various factors will depend on environmental conditions and manufacturing quality, and are discussed in the following sections.

In addition to the stress factor approach for the non-linear analysis, it is proposed that for tensile systems employing support structures which may be subject to snap-through buckling (such as slender arch supported cable nets or membranes) an ultimate load stability check should be used with a factor of 2 applied for medium or long term loads and a factor of 1.8 for gust wind loads (and in each case using appropriately stiffened material properties for any fabric membranes – unless a fully non-linear coupled analysis is undertaken

to model the snap-through buckling of support systems accounting for their compliance with deforming membranes). Other important limit state conditions to be considered are: the avoidance of progressive collapse due to the failure of any components, the ensurance of the security of heavy structural components in the event of the partial failure or removal of any membrane area, and the avoidance of ponding – with the structure shaped, and remaining shaped, so that there is positive drainage from all areas.

## 6.2 Membrane Stress Factors: A Review of Code Recommendations

The strength of a membrane material (and its seams or joints) is dependent on factors such as age, handling degradation, creasing, fatigue, creep, temperature and other environmental conditions; as well as some unevenness of the material made during manufacture. Nearly all of these factors depend on the type of material used, the method of jointing, the scale of the structure and the intended service life of the structural fabric. A number of design guides have been or are being developed in various countries in Europe, North America and Japan, and these have quite widely varying emphases on the different component factors which combine to form a total factor of safety applied to the specified / manufactured strengths of coated fabric materials. Some of the guides are based on a “permissible stress” (or stress resultant) approach, and others on a combined approach with a limit state check for overload conditions. Despite their differences in approach and the various contributing factors there is a reasonable consistency in the total factors of safety recommended by various previous guides which are summarised below:

### 6.2.1 THE IASS WORKING GROUP 7 RECOMMENDATIONS<sup>1</sup>

The IASS Working Group 7 recommendations<sup>1</sup>, intended principally for air-supported membranes, proposes that the total “safety” factor (based on a permissible stress approach) must include a coefficient of application, a coefficient of importance, and uncertainty factors relating to the estimation of loads, the accuracy and verification of the structural calculations, and the quality of execution of the work. The designer is first required to make an estimate of the critical strengths of a given membrane material and its joints using appropriate experiments and / or past data and to apply a minimum material safety factor of 2. The total safety factor is then obtained by applying also the various coefficients referred to above. Suggested values for these coefficients are:

- Coefficient of unevenness of material:  $L_1 = 1.25$  for warp &  $1.43$  for weft
- Coefficient for accuracy of calculations:  $L_2 = 1.0$  when confirmed by experiment;  
otherwise:  $L_2 = 1.3$
- Coefficients for uncertainty of loading, for application, and for execution:  
all normally:  $L_3, L_4, L_6 = 1.0$
- Coefficient for material reliability / reliability of test results:  $1.1 < L_5 < 1.3$
- Other factors / unforeseen aspects:  $L_5 = 1.2$  (min)

The product of these coefficients (assuming calculations are not confirmed by experiment) lies in the range: 2.1 – 2.5 for warp, and 2.5 – 2.9 for weft.

In addition, to allow for environmental degradation of the membrane (including ultra-violet radiation, cyclic loading, high temperatures, creep and humidity) a factor in the range 2.0 – 2.4 is suggested.

In summary, a total factor of safety on the virgin strength of the material is implied to lie in the range: 4.2 – 6.0 for warp, and 5.0 – 7.0 for weft.

### 6.2.2 THE FRENCH DESIGN GUIDE FOR PERMANENT TENSILE FABRICS<sup>2</sup>

In the proposed French Design Guide for Permanent Tensile Fabrics<sup>2</sup> permissible stress resultants  $T_p$  (warp or weft) are given by:

$$T_p = (K_q \cdot K_e \cdot T_{sm}) / S_f$$

where:  $T_{sm}$  = specified minimum breaking strength (warp or weft)

$K_q$  = Factor for membrane quality (seams and fabric)

= 1.0 for tested or certified seams and fabric

= 0.8 otherwise

$K_e$  = Scale factor which takes into account the increased risk of a critical defect as the surface area increases (this should perhaps relate to the area of any surface region bounded by cables or other support elements)

= 1.0 for surface area < 50m<sup>2</sup>

= 0.8 for surface area > 1000m<sup>2</sup> (typically)

$S_f$  = Security factor depending on level of pollution / environmental degradation to which the membrane will be subject

= 4.0 for soft pollution

= 4.5 for strong pollution

This factor ( $S_f$ ) is increased to 5 for areas of the membrane which may be subject to stress concentrations. This may depend on the level of sophistication of the analysis; unless element meshes are very fine in potential areas of stress concentrations the stresses will not be adequately predicted.

To summarise the above: in small scale structures in which seams and fabric have not been certified, or in large scale structures in which they have been certified (or auto-tested), the minimum total safety factor to be applied to the specified strengths of the virgin fabric in order to obtain permissible stress resultant values is  $S_t = 5.0$ .

In the extreme case of large structures subject to strong pollution and with uncertified seam and fabric strengths this factor must be increased to  $S_t = 7.0$ .

Note in relation to the above approach the “security factor”  $S_f$  is high if it is intended only to be associated with “pollution” effects. In reality it probably also takes some account of possible small damages and resistance of the fabric to tear propagation. It may also take some account of the fact that tensile structures are typically one-off structures with a relatively unconventional form, and therefore confidence in assumed loadings may be less than for more conventional structures. It may be appropriate to perhaps reduce the “pollution / degradation” factor but to include additional factors for tear resistance and confidence in loadings.



Alternatively and perhaps more consistently with the approach of most codes, the latter aspect might be accounted for by factoring or including additional loading cases.

### 6.2.3 DIN 4134 AND THE DISSERTATION OF “MECHANICAL BEHAVIOUR OF CONNECTIONS OF COATED FABRICS”<sup>4</sup>

German practice combines DIN 4134 – Tragluftbauten<sup>3</sup> and the dissertation of Minte – “Mechanical Behaviour of connections of coated fabrics”<sup>4</sup>, which derives safety factors based on numerous tests. In Germany non-licensed materials such as coated fabrics have to be approved by the Institute for Building Technology (DIBT) and the proof engineer. The scope of testing is at the discretion of both the proof engineer and the design engineer and is usually dependent on the size and importance of the structure, and whether similar materials and details have been employed on previous projects. However, where the design engineer relies on the experience of previous projects it is necessary for fabricators to validate the membrane material’s strength.

Historically the DIN 4134 (Ultimate Limit State) is based on a load factoring approach using the following factors,  $\gamma_f$ , for four design load cases:

Permanent	1.3 x Prestress and Self weight (Prestress)
Winter storm	1.1 x Prestress and 1.6 x Wind Load
Summer storm	1.1 x Prestress and 0.7 x Wind Load
Maximum snow	1.1 x Prestress and 1.5* x Snow Load

(\* Common use, but DIN 4134 does not provide safety factors for snow on airhalls).

This approach takes into account the fact that seam strength falls with increasing temperatures and that in hot conditions the wind speeds are naturally lower. The factor of 0.7 for summer wind is probably artificially low because a temperature factor is then applied which effectively increases it. This may not seem particularly logical since strong winds will always cool a membrane surface, but it cannot be assumed that all welds, including clamped details, will cool off rapidly to a test temperature of 23 °C.

As noted in section 6.1 the above approach is no longer appropriate and current design practice in Germany typically adopts a stress factor approach applying the unfactored design loads (unless dealing with stability checks). This revised approach does however incorporate a factor depending on loading type, but as a reduction factor on stresses. The allowable stresses are defined (similar to Minte) as follows:

$$f_d = \frac{f_{tk}}{g_f \cdot g_M \cdot A_i} = f_{tk} / A_{res}$$

where:  $f_d$  = allowable stress

$f_{tk}$  = tensile strength defined as 5%-fractile of at least 5 strips 10cm wide, tested at 23 °C (codes: DIN 53 354, ISO 1421).

(Alternatively, from Minte, 0.868 x mean tensile strength for the fabric or 0.802 x mean strength for / near the seams).

$g_f$  = load-factor

$g_M$  = material safety coefficient for all approved materials:

$g_M$  = 1.4 within the fabric surface, or = 1.5 for connections

$A_i$  = combination of reduction factors depending on load case.

The various individual reduction factors differ depending on whether a main fabric area or a seam / detail is being considered.

Since it is neither possible nor realistic to combine in a linear way the various types of loading (permanent, wind or snow) the following combinations have been proposed so as to comply with codified practice when accounting for load effects within the Stress Factors applied to the results of non-linear analyses based on unfactored loads:

Permanent:  $\gamma_f = 1.5 \times$  Prestress and Self Weight  
 Wind storm  $\gamma_f = 1.6 \times$  Prestress and Self Weight and Wind Load  
 Maximum Snow  $\gamma_f = 1.5 \times$  Prestress and Self Weight and Snow Load

In the above, the “Summer Storm” factor has been excluded. This is partly because for permanent or semi-permanent membranes it will rarely be the governing case for membrane stresses or details. Also for the design of structures temporarily deployed in the summer only it is recommended to use the appropriate / approved seasonal loadings.

The following component “A” factors are the result of many tests which have been done in the last 20 – 30 years and which are in current use for the membrane surface; the figures in ( ) are appropriate for connections, with the ranges depending on type – (e.g.: welded, clamped, width etc).

$A_0 = 1.0 - 1.2$  (1.2) Reduction factor taking into account that the small width strip tensile test produces a higher value than the biaxial strength. (The lower value of 1.0 is appropriate if the loading produces dominant stress in one direction of the weave).

$A_1 = 1.6 - 1.7$  (1.5 – 3.4) Reduction factor for long-term loads, with the connection factors very dependent on seam widths (excluding stitched seams).

$A_2 = 1.1 - 1.2$  (1.2) Reduction factor for pollution and degradation (again excluding stitched seams).

$A_3 = 1.1 - 1.25$  (1.4 – 1.95) Reduction factor for high temperature load cases (i.e. prestress + self weight in summer & excluding wind cooling).

Appropriate seam widths are assumed in the above, particularly for the connection factors for  $A_1$  and  $A_3$  (typically minimum values of 40mm for PVC type I and 80 mm for type IV). See also Chapter 10.

To summarise the above the following ranges of global safety factors can be obtained:

For the Material:

Permanent:  $A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_1 \times A_2 \times A_3 = 4.9 - 6.4$   
 Wind storm:  $A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_2 = 2.9 - 3.2$   
 Maximum snow:  $A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_1 \times A_2 = 4.4 - 5.1$

For Connections (only welded seams with appropriate widths for fabric type):

Permanent:  $A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_1 \times A_2 \times A_3 = 6.7 - 9.5$

Wind storm:  $A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_2 = 3.5$

Maximum snow:  $A_{res} = \gamma_f \times \gamma_m \times A_0 \times A_1 \times A_2 = 4.9$

The safety factors for long term loads and snow loads are comparable with other international guide lines. The German approach provides very low safety factors for short-term wind loads generally around 3.0 which may seem surprising. But being the only code using the strong short-term behaviour of composite plastics this may seem reasonable.

However, this approach neglects the potential tear propagation due to pre-existing flaws and is commonly treated in this design strategy as a failure load case. This is reviewed in a later section of this chapter.

#### 6.2.4 THE ITALIAN CODE<sup>5</sup>

The Italian code<sup>5</sup> is similar to German practice and uses similar reduction factors, but for connections three classes are defined which account for different qualities of connection assemblies (manufactured or on site):

1<sup>st</sup> class: – connections performed by licensed personnel using methodologies defined (that characterise all the parameters and work conditions) by the coated fabric manufacturer or from the membrane fabricator and tested by the membrane fabricator.

2<sup>nd</sup> class: – connections performed by licensed personnel using methodologies defined (that characterise all the parameters and work conditions) by the coated fabric manufacturer or from the membrane fabricator and not tested by the membrane fabricator.

3<sup>rd</sup> class: – connections, however performed, permitted exclusively for the realisation of secondary elements or sealing.

The design connection class has to be chosen in relation to the structure type. For tents having a primary load bearing textile structure connections may be of 1<sup>st</sup> or 2<sup>nd</sup> class. For membranes all connections have to be 1<sup>st</sup> class connections which have to be made by a qualified manufacturer.

#### 6.2.5 THE MEMBRANE STRUCTURES ASSOCIATION OF JAPAN<sup>6</sup>

The Membrane Structures Association of Japan<sup>6</sup> guide for “Specific Membrane Structures” allows stresses of  $T_{sm} / 8$  for sustained loads and  $T_{sm} / 4$  for temporary loads on flexible membrane regions. (For membranes used effectively as cladding on primary space or framed structures these factors are reduced to  $T_{sm} / 6$  and  $T_{sm} / 3$ ).

## 6.2.6 THE ASCE STANDARD<sup>7</sup>

For the proposed ASCE Standard<sup>7</sup> for tensile membrane structures it is anticipated that permissible stress resultant values will be assessed on a similar basis for uniaxial loading:

$$T_p = \beta \cdot L_t \cdot T_{sm} \text{ (applied to warp or weft direction)}$$

where:  $\beta$  = Strength Reduction factor depending on loading systems / combinations  
= 0.27 for most loading combinations  
 $L_t$  = Life Cycle factor  
= 0.75 for fabric and webbing materials which are certified to retain at least 75% of initial strength over their intended life.  
= 0.6 for structures subject to repeated handling.

For structures subject to bi-axial loading, in addition to the above checks, it is proposed that the sum of the stresses in warp and weft should be less than:

$0.8 \beta \cdot L_t (T_{sw} + T_{sf})$ , where  $(T_{sw} + T_{sf})$  is the sum of the specified minimum breaking strengths in warp and weft.

### SUMMARY:

The foregoing review of various codes and design guides has taken into account many different combinations of factors ranging from load conditions and structure size to pollution and life-cycle effects. In broad terms, for permanent or semi-permanent structures (and long term loadings) a minimum stress factor for the membrane material of 5 has been frequently used (although in some cases – for short term / gust loadings factors between 3 – 4 have been used) with increased factors of up to 7 for connections or allowance for stress concentrations. Two aspects not explicitly considered in European codes / guides are tear propagation within membrane panels and creep rupture of seams under high temperatures. Both of these merit further consideration.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΓΙΑ ΣΤΑΘΕΡΑ ΟΡΙΑ  
ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ-ΠΡΟΕΝΤΑΣΗΣ  
ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΚΟΧΛΙΩΝ ΣΥΓΚΡΑΤΗΣΗΣ

## TENNECT

Manual: linear fixation



date: 10.09.2010

## Index

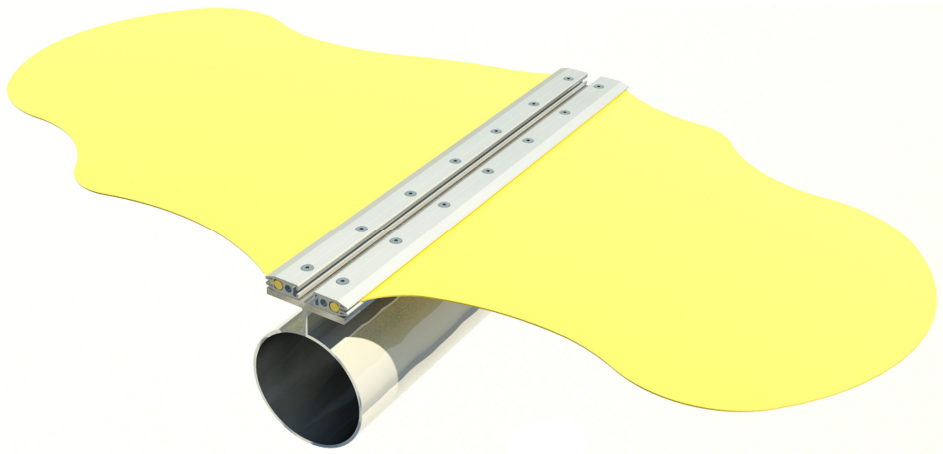
1	Overview .....	3
1.1	General .....	3
1.2	Sample applications .....	5
2	Welt section PF 3000 .....	8
2.1	Characteristics of welt section .....	8
2.2	Choice of crew distance .....	9
3	Welt section PL 3000 .....	11
3.1	Characteristics of welt section .....	11
3.2	Choice of crew distance .....	12
4	Ripping out of the keder .....	15

## 1 Overview

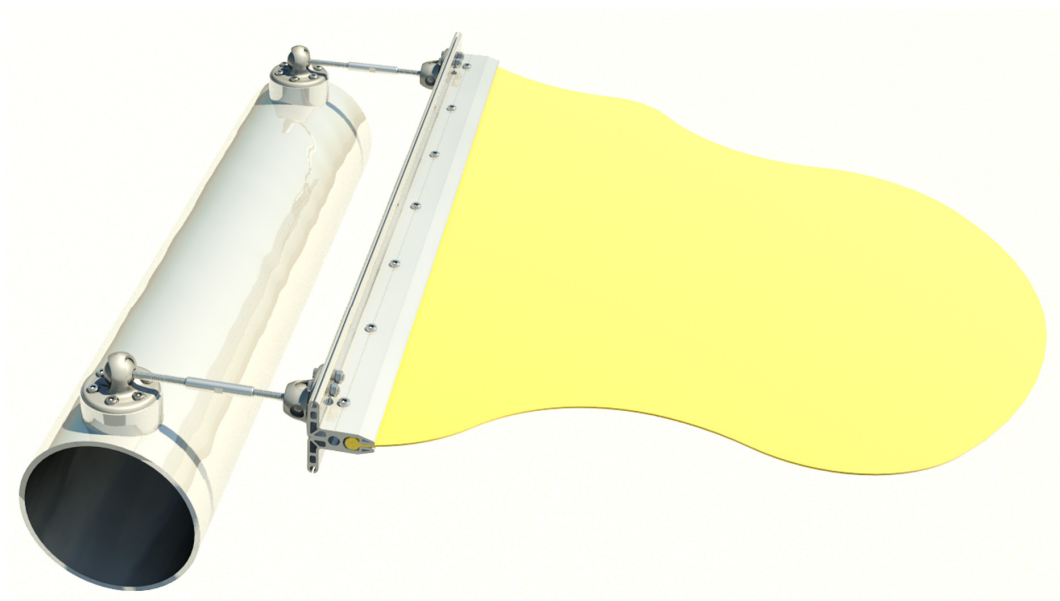
### 1.1 General

The TENNECT system includes two types of aluminium profiles for linear fixation of membrane borders.

a : ISK-PF 3000 welt section AW6060 T6



b : ISK-PL 3000 welt section AW6060 T6

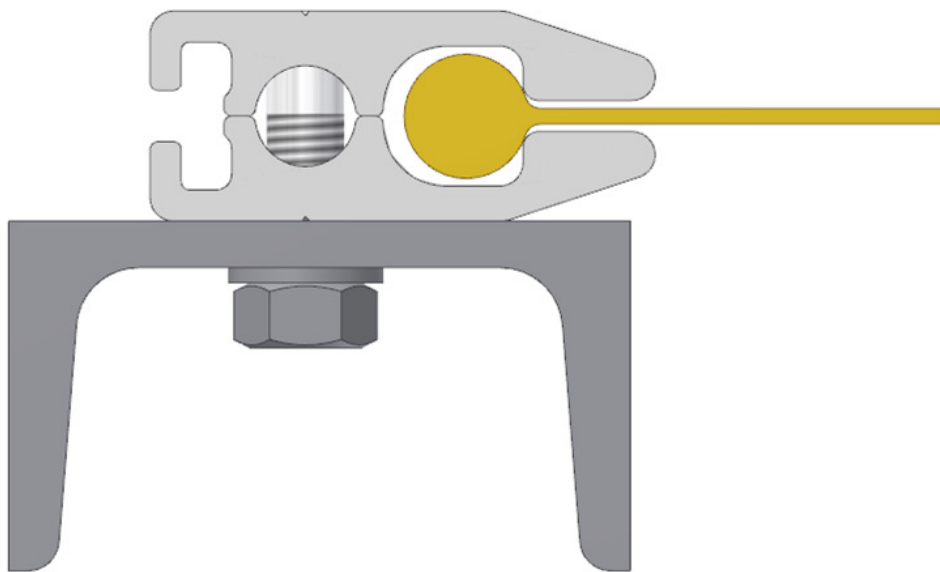


The different welt sections can be combined can be combined.



Up to now either the membrane border is perforated at regular intervals and clamped or the keder (also known as a „bolt-rope“) is pulled into a single aluminium profile. Both proceedings include serial disadvantages. The perforation of the membrane border is expensive, complex and error-prone. The looming of the membrane border is mostly difficult to realize and complex.

The TENNECT system consists of an aluminium profile that can be screwed with a mirrored one. In that manner the looming of the membrane border will be much easier.



The welt section ISK-PF 3000 is particularly suitable for linear fixation on a beam or a wall. The aluminium profile has got in different to the welt section PL a lower moment of inertia in transverse direction and must be fixated in regular distances.

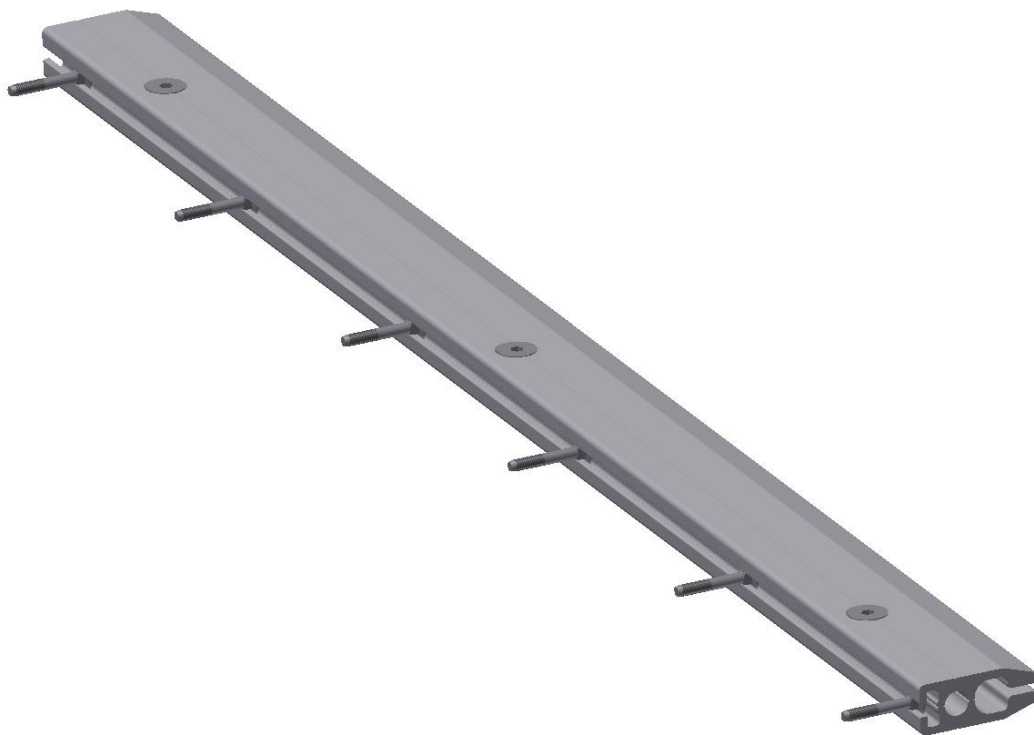
The welt section ISK-PL 3000 can be used, because of the higher moment of inertia in transverse direction, if a continuous fixation on a beam or wall is not feasible, or if the system should be tensible.

In case of a tensible system the TENNECT part W25 can be used which size is adjusted to the sizes of the welt section PL.

## 1.2 Sample applications

Additional to the sample applications of chapter 1.1 further examples should point up the application possibilities of the welt sections.

The welt section ISK-PF 3000 contains a slot which can be used to pull the system during assembly or to fixate the system in case of low horizontal forces. The slot is designed for a cup square neck bolt DIN 603 M6. The maximum bearing load of the bolt is  $F = 3,0 \text{ kN}$ .



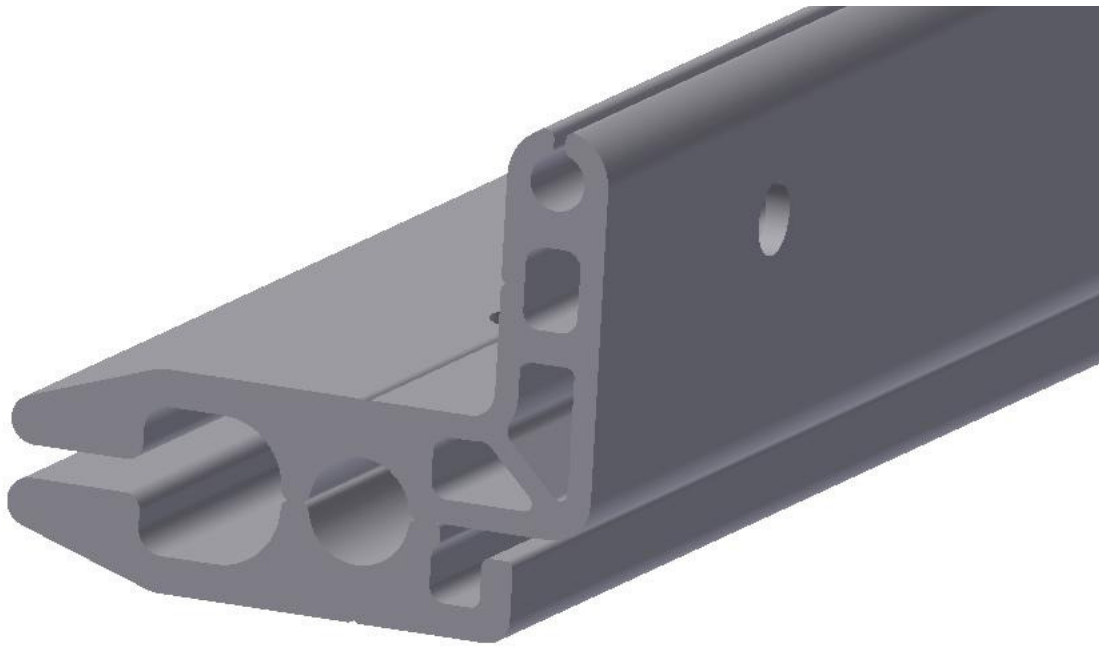
Bracing with a cup square neck bolt

The welt section ISK-PL 3000 can be fixed variously. Secondary to the solution of chapter 1.1 where the system is connected with TENNECT parts, also U-bolt pipe hanger can be used. This kind of fixation is cheap and very flexible and offers the possibility to retension the membrane.



Bracing with U-bolt pipe hanger

The combination of welt section is possible and could make sense in case of high vertical loads which would overload the welt section PF.



Combination of welt sections

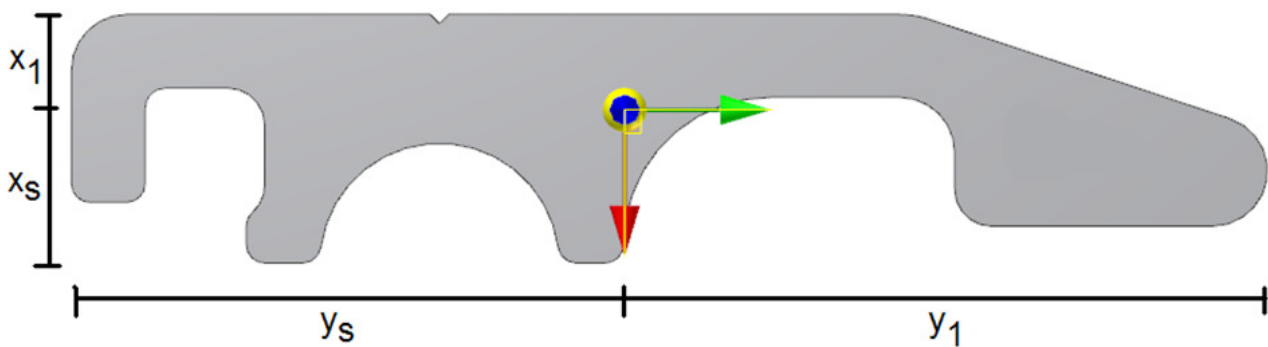
## 2 Welt section PF 3000

### 2.1 Characteristics of welt section

Distance center of gravity:  $x_s = 8,3 \text{ mm}$   
 $y_s = 30,1 \text{ mm}$   
 $x_1 = 5,2 \text{ mm}$   
 $y_1 = 34,9 \text{ mm}$

Moment of inertia:  $I_{xx} = 15,7 \text{ cm}^4$   
 $I_{yy} = 0,5 \text{ cm}^4$   
 $I_{xy} = -0,6 \text{ cm}^4$

Area:  $A = 474 \text{ mm}^2$



## 2.2 Choice of crew distance

The value of crew distance depends on the magnitude of force and the direction of the resulting force. The following graphic illustrate a feasible crew distance depending on the forces. The loading  $F_h$  (kN/m) is a characteristic value without any safety- or combination factors according to DIN 1055-100, EC1 or equal standard.

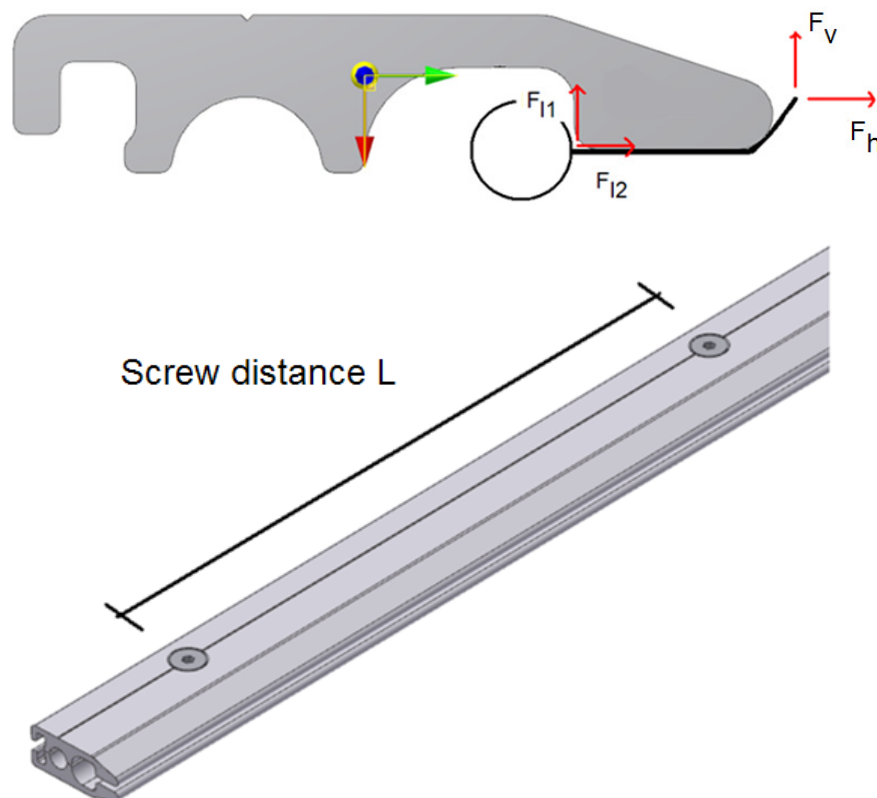
The values given in the spreadsheet assuming that the keder is large and rigid enough that a ripping out of the keder is impossible. Basic of the calculation is a continuous fixation of the welt section on a beam etc.

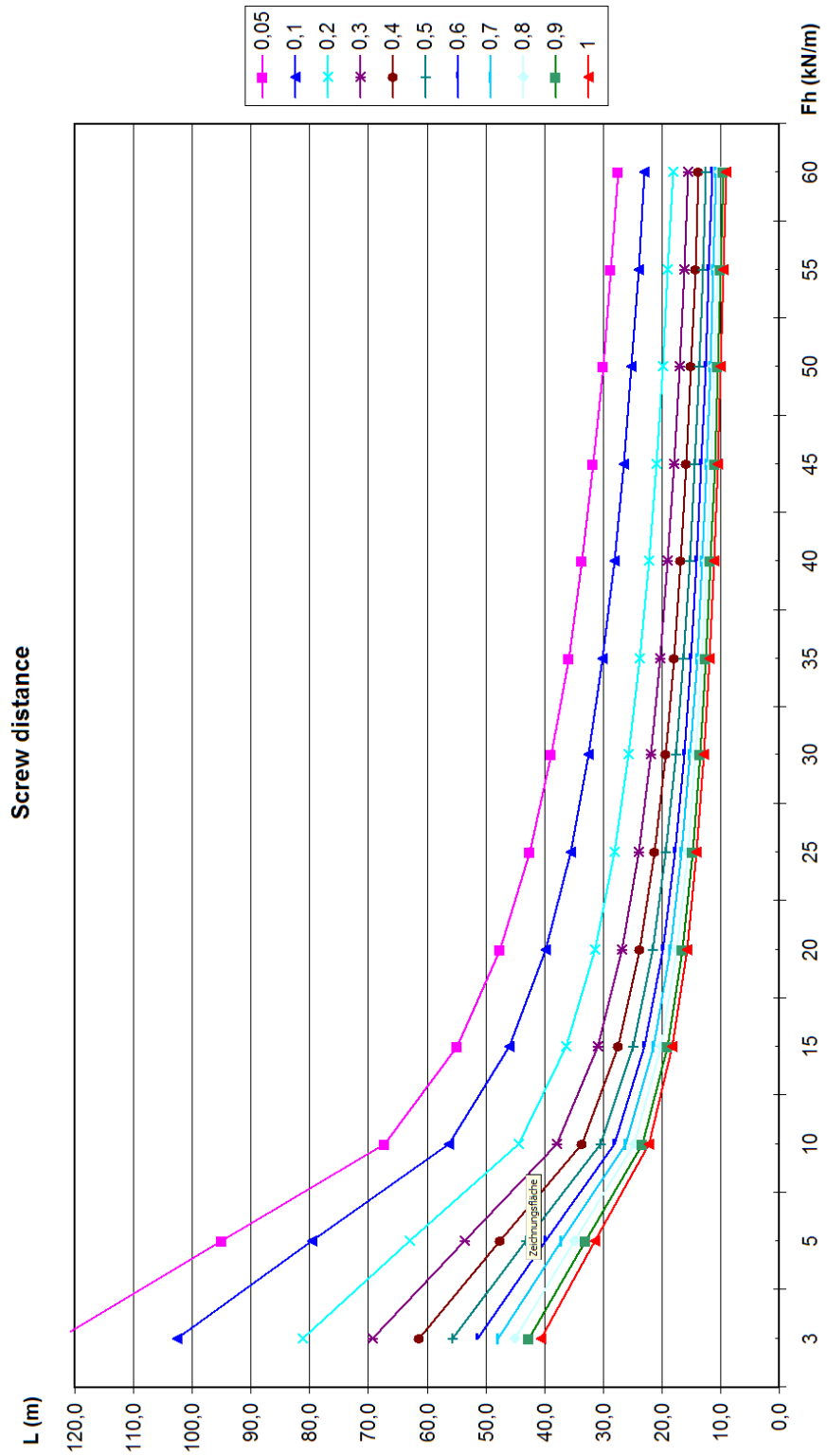
The values given in the caption relate to the quotient of the forces  $F_v/F_h$ . For example the curve 0,4 illustrate the loading  $F_v = 0,4 * F_h$ .

Example:

The forces are  $F_v = 2$  kN and  $F_h = 10$  kN

In this case the screw distance can be read from the loading value in x-direction  $F_h = 10$  kN/m and the curve 0,2. The screw distance from table is 44 cm.

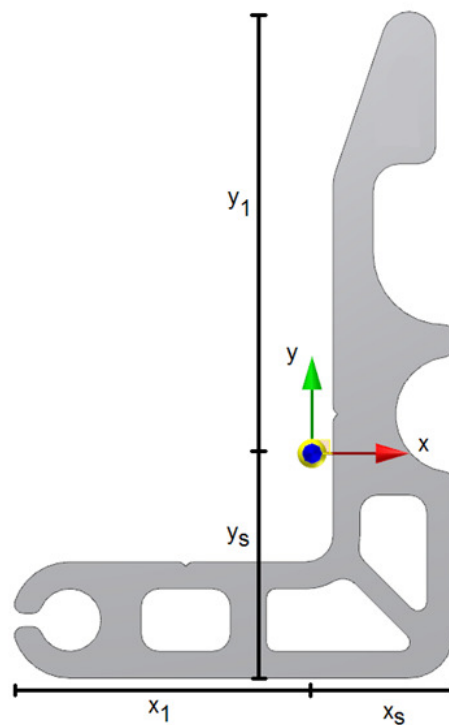




The graphic based on the safety value and material properties of DIN 4113.

### 3 Welt section PL 3000

#### 3.1 Characteristics of welt section



Distance center of gravity:  $x_s = 15,9 \text{ mm}$

$y_s = 25,1 \text{ mm}$

$x_1 = 33,3 \text{ mm}$

$y_1 = 49,3 \text{ mm}$

Moment of inertia:  $I_{xx} = 39,5 \text{ cm}^4$

$I_{yy} = 14,3 \text{ cm}^4$

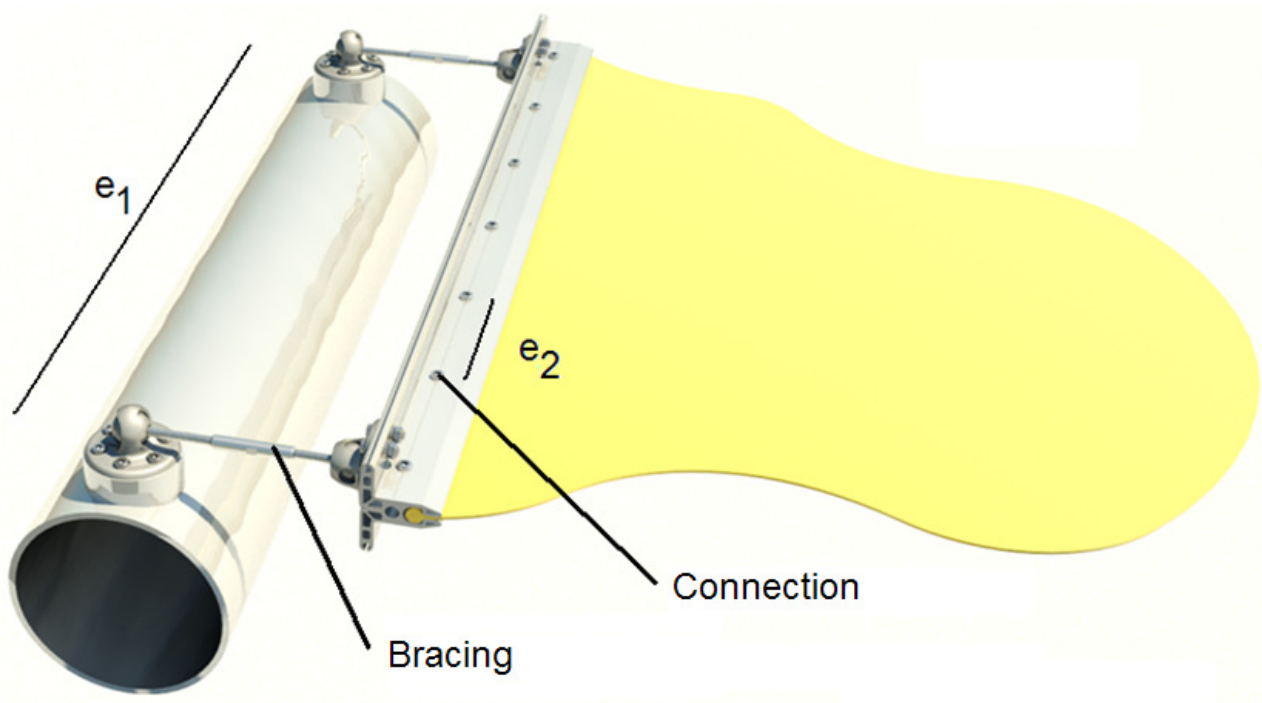
$I_{xy} = -12,4 \text{ cm}^4$

Area:  $A = 835 \text{ mm}^2$



### 3.2 Choice of crew distance

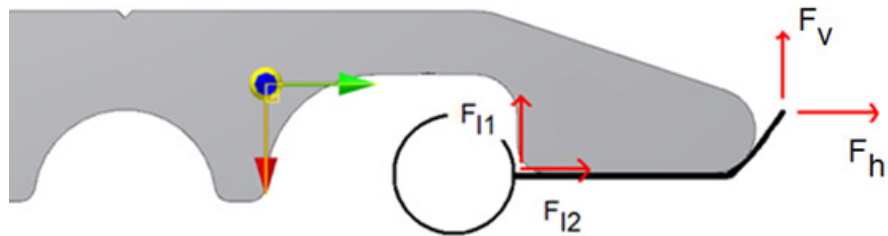
For the fixation of the welt section the distance  $e_1$  of the bracing is as well to estimate as the distance  $e_2$  which mark the distance of two screws which connect the two profiles together. The distance  $e_2$  can be taken from the table of chapter 2.2, whereas the distance should be at maximum  $e_2 = 0,4$  m.



The value of crew distance depends on the magnitude of force and the direction of the resulting force. The following graphic illustrate a feasible crew distance depending on the forces. The loading  $F_h$  (kN/m) is a characteristic value without any safety- or combination factors according to DIN 1055-100, EC1 or equal standard.

The values given in the spreadsheet assuming that the keder is large and rigid enough that a ripping out of the keder is impossible. Basic of the calculation is a continuous fixation of the welt section on a beam etc.

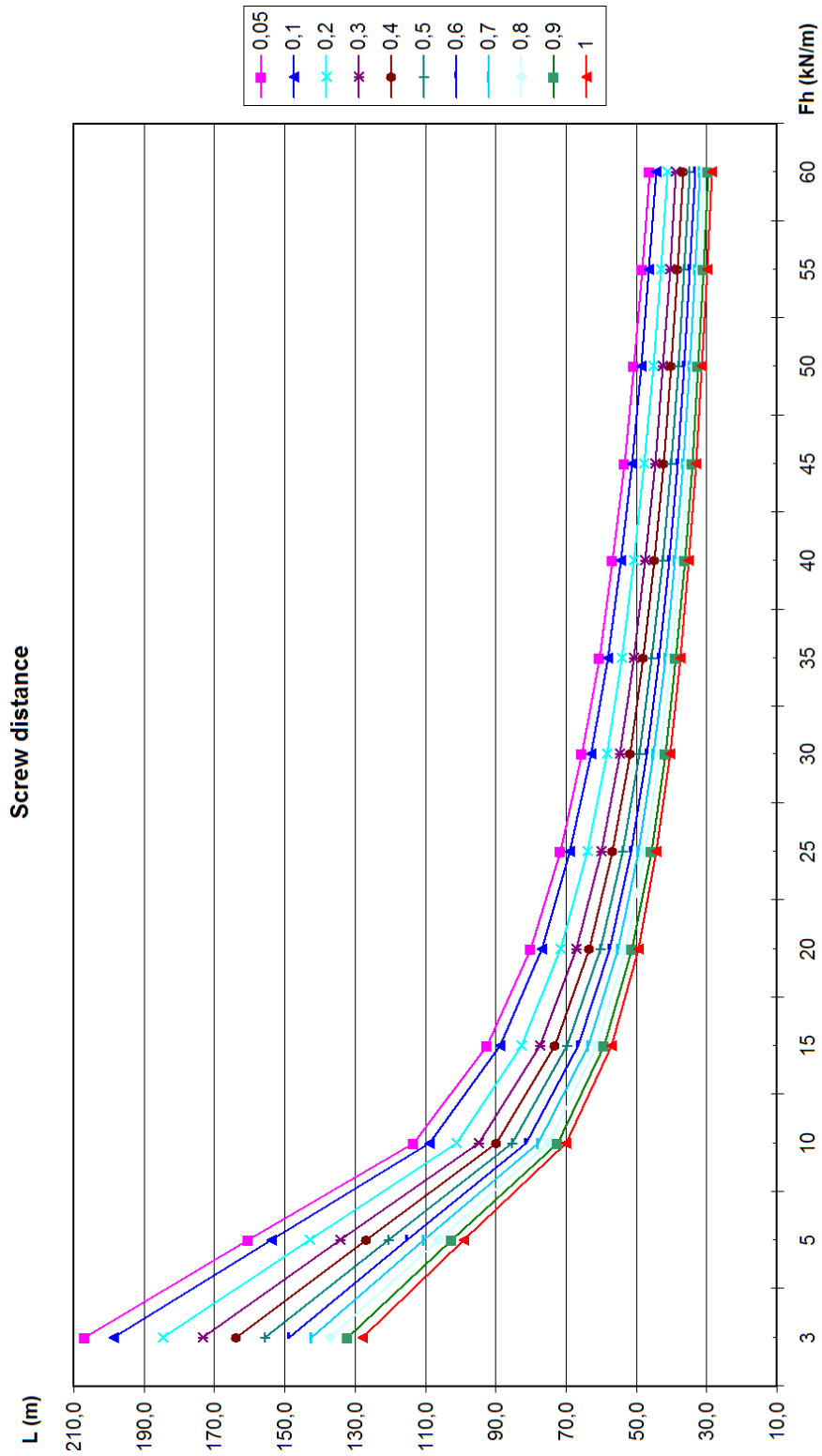
The values given in the caption relate to the quotient of the forces  $F_v/F_h$ . For example the curve 0,4 illustrate the loading  $F_v = 0,4 * F_h$ .



Example:

The forces are  $F_v = 2 \text{ kN}$  and  $F_h = 10 \text{ kN}$

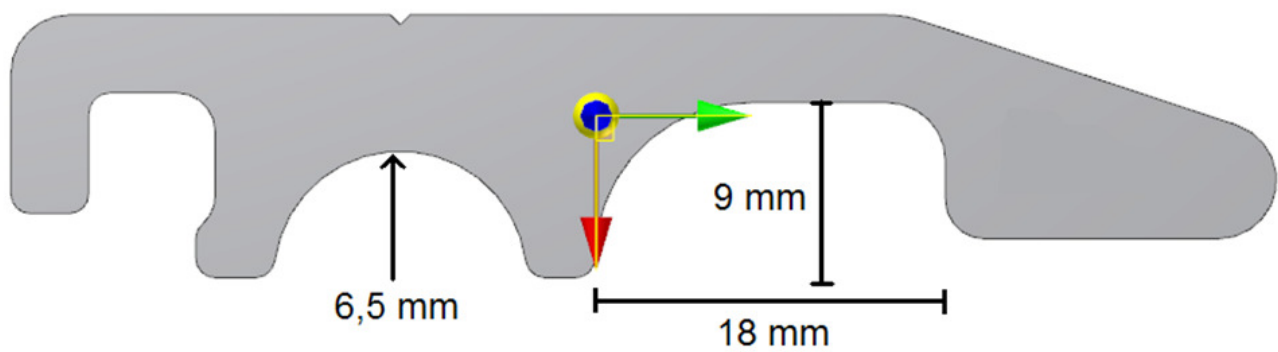
In this case the screw distance can be read from the loading value in x-direction  $F_h = 10 \text{ kN/m}$  and the curve 0,2. The screw distance from table is 100 cm.



The graphic based on the safety value and material properties of DIN 4113.

#### 4 Ripping out of the keder

The ripping out of the keder depends on several factors. Magisterial is the size of the keder and the distance of screwing. Advisable is a keder with a thickness of 10-12 mm. The total thickness of the keder and surrounding membrane should not bigger than 18 mm, otherwise the keder will be squeezed.



ΤΙΜΗΣ ΕΝΕΚΕΝ  
ΓΙΑΝΝΗΣ ΑΡΓΥΡΗΣ

ΑΝΔΡΩΝ ΕΠΙΦΑΝΩΝ ΠΑΣΑ ΓΗ ΤΑΦΟΣ

Ένας ακόμη μεγάλος επιστήμονας άγνωστος στην Ελλάδα αλλά διάσημος για την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα είναι **ο Γιάννης Αργύρης γνωστός ως John Argyris** με σπουδαία επιστημονικά επιτεύγματα. Το γεγονός ότι καθιερώθηκε στην Αμερική Παναμερικανικό βραβείο μαθηματικού διαγωνισμού «JOHN ARGYRIS» μερικών χιλιάδων δολαρίων μας κάνει να αισθανόμαστε αφ' ενός ένα «σφίξιμο» γιατί από την Ελλάδα πέρασε απαρατήρητος και αφ' ετέρου υπερηφάνεια και μία υποχρέωση να παρουσιάσουμε την προσωπικότητά



του. Ο Ιωάννης Αργύρης μία από τις μεγαλύτερες επιστημονικές προσωπικότητες του αιώνα μας δεν είναι πια στη ζωή. Έφυγε στις 2 του Απρίλη του 2004.

Ο καθηγητής Ιωάννης Αργύρης, η εξέχουσα αυτή προσωπικότητα της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας, ο διάσημος ερευνητής αλλά και μεγάλος δάσκαλος ήταν γέννημα της Θεσσαλίας. Γεννήθηκε στο Βόλο το 1913. Ο πατέρας του Νικόλαος Χατζηαργύρης, καταγόταν από το Αργυρόκαστρο της Βορείου Ηπείρου και

**ήταν απόγονος του Ρήγα Φεραίου.** Η μητέρα του ήταν η Λουκία Καραθεοδωρή. Τα πρώτα χρόνια της ζωής του σμιλεύτηκαν μέσα από τις εμπειρίες μιας αριστοκρατικής οικογενειακής ανατροφής, τα βιώματα της μεγάλης ιδέας και της μικρασιατικής καταστροφής. Σημαδεύτηκαν όμως και από τα τραύματα του εθνικού διχασμού της εποχής. Κατά την περίοδο των γυμνασιακών του χρόνων η οικογένειά του μεταναστεύει στην Αθήνα, όπου ο Ιωάννης Αργύρης φοιτά στο Τρίτο Κλασικό Γυμνάσιο Αρρένων, της οδού Σόλωνος. Εισάγεται, μεταξύ των πρώτων, στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Οι αφηγήσεις του από τα χρόνια του Πολυτεχνείου ήταν τόσο ζωντανές και άμεσες σαν να τον χώριζαν μόνο λίγα χρόνια από τότε. Είχε πάντα κάποιο περιστατικό να διηγηθεί από τους καθηγητές του. Το Θεοδωρίδη της Μηχανικής, το Μαλτέζο της Φυσικής, τον Κριεζή της Οικοδομικής, το Ρουσσόπουλο και τον Κυριακίδη της Στατικής και φυσικά τον Πρωτοπαπαδάκη της Σιδηροδρομικής. Στο τρίτο έτος, εγκαταλείπει τις σπουδές του στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, για να τις συνεχίσει στο Μόναχο λόγω της

αντιδικίας του με τον καθηγητή Πρωτοπαπαδάκη, **εξ' αιτίας των δημοκρατικών του πεποιθήσεων.**

**Από το Πολυτεχνείο του Μονάχου, δύο χρόνια αργότερα παίρνει το δίπλωμα του Πολιτικού Μηχανικού με την ανώτατη Γερμανική Διάκριση.** Εκεί βρίσκεται και ο θείος του, ο καθηγητής Κωνσταντίνος Καραθεοδωρή, με τον οποίο διέφεραν πολύ στο χαρακτήρα αλλά και στις ερευνητικές τους μεθόδους. Ο Αργύρης ήταν επαναστάτης, αντιδραστικός, ο Καραθεοδωρή ευπροσάρμοστος και δεκτικός. «Ήμασταν εκ διαμέτρου αντίθετοι, έλεγε ο Αργύρης. Εκείνος ήταν τρομερά ορθολογικός και ερχόταν αντιμέτωπος με την τρέλα μου, με τη διαισθητική μου προσέγγιση».

Όταν ξεσπά ο Β' παγκόσμιος πόλεμος, το 1940 κάνει μεταπτυχιακές σπουδές στο Πολυτεχνείο του Βερολίνου. **Οι ναζί ζητούν τις γνώσεις του για να τις χρησιμοποιήσουν στην πολεμική αεροναυπηγική βιομηχανία. Αρνείται.** Με την κατηγορία ότι μεταβιβάζει ερευνητικά μυστικά στους Συμμάχους συλλαμβάνεται και στέλνεται σε στρατόπεδο βομβαρδισμού του στρατοπέδου και κατευθύνεται στο σπίτι του ελληνικής καταγωγής ναυάρχου του γερμανικού ναυτικού **Φον Κανάρη, με τον οποίο είχαν γνωριστεί στην ελληνική πρεσβεία του Βερολίνου.**

Του ανοίγει την πόρτα ένας Αλβανός υπηρέτης, τον οδηγεί στο σαλόνι και ξυπνάει τον Κανάρη. Ήταν περασμένα μεσάνυχτα. Παρακαλεί τον Κανάρη να τον βοηθήσει να φύγει από τη Γερμανία, κι εκείνος δεν αρνείται. **Το 1944 ο Κανάρης θα εκτελεστεί, ως ένας από τους πρωτεργάτες της συνωμοσίας για τη δολοφονία του Χίτλερ, μετά από βασανιστήρια. Ο Αργύρης μιλούσε πάντα με συγκίνηση για τον Κανάρη που τον βοήθησε εξασφαλίζοντάς του χαρτιά για να μπορεί να κινηθεί.**

Πριν εγκαταλείψει τη Γερμανία φροντίζει να επισκεφθεί με κίνδυνο της ζωής του το θείο του Κωνσταντίνο Καραθεοδωρή στο Μόναχο και να τον ενημερώσει για όσα **έζησε στο στρατόπεδο συγκέντρωσης** και για **τις θηριωδίες του ναζισμού.** Ήταν η πρώτη φορά που ο Κωνσταντίνος Καραθεοδωρή τον άκουσε με μεγάλη προσοχή. Θα διαφύγει από τη ναζιστική Γερμανία με τρόπο δραματικό. Μια νύχτα κατά τη διάρκεια βομβαρδισμών, θα διασχίσει κολυμπώντας το Ρήνο, κρατώντας με τα δόντια του τα χαρτιά που του είχε εξασφαλίσει ο Φον Κανάρης. Το ρεύμα του ποταμού θα τον παρασύρει 4 χιλ. μακριά, θα καταφέρει όμως να περάσει στην Ελβετία. Στο Πανεπιστήμιο της Ζυρίχης ολοκληρώνει τις μεταπτυχιακές του σπουδές, με ειδίκευση στη Μηχανική, τα Μαθηματικά, τη Φυσική και την Αεροναυτική.

Το 1943, νεαρός μηχανικός πια **βρίσκεται στην Αγγλία. Μάταια προσπαθεί να προειδοποιήσει τους Βρετανούς για τις μεγάλες προόδους της γερμανικής πολεμικής τεχνολογίας και ειδικά για τους πυραύλους V2 του Φον Μπράουν,** οι οποίοι αργότερα κατέστρεψαν το Λονδίνο. Οι στρατιωτικές υπηρεσίες της Βρετανίας τον αντιμετώπιζαν με καχυποψία, τον θεωρούσαν πιθανό κατάσκοπο των Γερμανών. **Παρ' όλα αυτά όμως τον προσλαμβάνουν ως ερευνητή στη Βασιλική Εταιρία Αεροναυπηγικής.** Όταν βεβαιωθούν για τα πραγματικά του αισθήματα έναντι των Γερμανών του Χίτλερ, θα του ζητήσουν συγγνώμη.

Η πρώτη σημαντική εργασία του είχε ως θέμα τη μελέτη πύργων ύψους μεγαλύτερου των 300 μέτρων. Το τριγωνικό σχήμα που έδωσε στη διατομή του πύργου ενίσχυσε τη στρεπτική του ακαμψία και βελτίωσε σημαντικά τη στατική και δυναμική του συμπεριφορά.

Το ερευνητικό του ενδιαφέρον επικεντρώνεται στην Αεροναυτική και στην Αστροναυτική. Συγγράφει 3 κλασικές μελέτες που αφορούν στη διανομή των φορτίων στις μεμβράνες επικάλυψης των πτερύγων και της ατράκτου των αεροπλάνων.

**Στα 28 του χρόνια ερευνά και εφευρίσκει τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων**

**αφήνοντας έκπληκτο όλο το επιστημονικό κατεστημένο.** Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων, υπήρξε η μεγαλύτερη επινόηση της καριέρας του. Και όπως τη χαρακτήρισε ο μεγάλος καθηγητής Φον Κάρμαν: **«Μια από τις σημαντικότερες ανακαλύψεις όλων των εποχών στον τομέα της Μηχανικής.** Έφερε μια επανάσταση στον τρόπο σκέψης μας».

Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την προσομοίωση σύνθετων προβλημάτων με τη βοήθεια τριγωνικών και τετραεδρικών γεωμετρικών μορφών, στα οποία αναλύεται νοερά η υπό μελέτη κατασκευή, ώστε να επιλυθεί απλούστερα και ταχύτερα με τη βοήθεια ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή στα πλέον σύνθετα προβλήματα των μηχανικών όλων των ειδικοτήτων. Χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη των οπισθοκλινών πτερύγων των πρώτων βρετανικών αεριωθούμενων μαχητικών, στο σχεδιασμό και την ανάλυση κατασκευών της αεροναυπηγικής και ναυπηγικής βιομηχανίας, της αυτοκινητοβιομηχανίας καθώς και μεγάλων τεχνικών έργων όπως γέφυρες, υψηλά κτίρια κ.λ.π. Το 1955 ξεκινάει η πανεπιστημιακή του πορεία με την πρόσληψή του στο Διδακτικό Ερευνητικό Προσωπικό του Imperial College του Πανεπιστημίου του Λονδίνου όπου εκλέγεται τακτικός Καθηγητής.

**Το 1959, αναλαμβάνει τρεις θέσεις στο Πανεπιστήμιο της Στουτγκάρδης** ως Καθηγητής των Αεροδιαστημικών Επιστημών, Διευθυντής του Ινστιτούτου Στατικής και Δυναμικής των Αεροδιαστημικών Κατασκευών και Διευθυντής του Υπολογιστικού Κέντρου του Πανεπιστημίου.

**Αρνείται να αλλάξει την ελληνική του υπηκοότητα**

**και έτσι ψηφίζεται ειδικός νόμος, πρωτοφανές για τα πανεπιστημιακά χρονικά της Γερμανίας, το περίφημο**

**«Διάταγμα Αργύρη» για να μπορέσει να παραμείνει στο Πανεπιστήμιο της**

**Στουτγκάρδης, όπου και παρέμεινε**

**μέχρι το τέλος της πανεπιστημιακής του καριέρας.**

Το 1960 διατυπώνει θεωρία στη Μηχανική, η οποία επιλύει άλυτα ως τότε προβλήματα, εφαρμόζεται ευρέως στο σχεδιασμό του Boeing 747 και του χαρίζει την επιστημονική αναγνώριση των ΗΠΑ. Η NASA καταφεύγει στις γνώσεις του για τη μελέτη της θερμικής



**θωράκισης του διαστημόπλοιου «Απόλλων»** από τις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο κέλυφος κατά την επάνοδο του στην ατμόσφαιρα της Γης. Προτείνει την επικάλυψη της ατράκτου με ειδικές ουσίες, οι οποίες εξατμίζονται και ψύχουν την επιφάνεια του σκάφους.

**Η συμβολή του Αργύρη στη μελέτη της καλωδιακής οροφής του Ολυμπιακού Σταδίου του Μονάχου που φιλοξένησε τους Ολυμπιακούς**

**Αγώνες το 1972 υπήρξε καθοριστική. Η κατασκευή της κατέστη δυνατή, χάρη στη μη γραμμική αριθμητική μέθοδο που ανέπτυξε για το σκοπό αυτό.**

Μετά τη Μεταπολίτευση αποδέχεται πρόσκληση του Κωνσταντίνου Καραμανλή να οργανώσει ένα σύγχρονο κέντρο έρευνας και τεχνολογίας στην Ελλάδα. Η γραφειοκρατία και **η υπονόμευση της προσπάθειάς του από τον κύκλο των πανεπιστημιακών**, τον αναγκάζουν να εγκαταλείψει το εγχείρημα.

Ο καθηγητής Ιωάννης Αργύρης έχει ασχοληθεί ακόμα με τη θεωρία των ομάδων και τη θεωρία της σχετικότητας. Έχει συμβάλει στην ανάπτυξη του διαστημικού λεωφορείου «Ερμής» με την πρωτοποριακή του έρευνα, ώστε το σκάφος να μην εκραγεί κατά την επάνοδο του στην ατμόσφαιρα της Γης, με ταχύτητα 30 φορές μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου και θερμοκρασία 1000 βαθμών Κελσίου στην επιφάνεια του οχήματος.

Επίσης έχει ασχοληθεί με τα αεροδυναμικά φαινόμενα που εμφανίζονται κατά την επάνοδο των διαστημικών λεωφορείων στη γήινη ατμόσφαιρα.

Οι γνώσεις του έχουν χρησιμοποιηθεί, εκτός από την Αεροναυπηγική, στην αυτοκινητοβιομηχανία και στα μεγάλα τεχνικά έργα. Οι θεωρίες του έχουν δώσει απαντήσεις σε προβλήματα της ρευστομηχανικής, της Μεταφοράς Θερμότητας, της Ακουστικής, του Ηλεκτρομαγνητισμού και της Μοριακής Φυσικής.

Από το 1976 ασχολείται με τη μελέτη του χάους, για το οποίο το 1994 εκδίδει ένα βιβλίο 800



σελίδων στα Αγγλικά και στα Γερμανικά. Θεωρεί ότι όλες οι σπουδαίες σκέψεις ξεκινούν από το Χάος. Είναι η βάση όλων των αδιαμόρφωτων και ανεπίλυτων σκέψεων. «Την πρόοδο των επιστημών κατά τον 20ο αιώνα, έλεγε, θα τη θυμούνται για τρεις μεγάλες επιστημονικές φιλοσοφικές επαναστάσεις: τη Σχετικότητα, την Κβαντομηχανική και το Χάος». Από τις τρεις η Επανάσταση του Χάους έχει εφαρμογή σε ολόκληρο το Σύμπαν, όπως εμείς

το αντιλαμβανόμαστε και όπως αυτό εκδηλώνεται σε ανθρώπινη κλίμακα και μας επηρεάζει. Το Χάος γεννά τη ζωή, η τάξη γεννά τη συνήθεια. Το Χάος και η τάξη συνυπάρχουν μέσα σε όλα τα συστήματα του Σύμπαντος από τα πιο πολύπλοκα και μακρινά ως τα πιο απλά και κοντινά».

Οι TIMES του Λονδίνου αφιέρωσαν ένα εκτενές άρθρο για τις δραστηριότητές του με τίτλο: «Κανόνες του Χάους». Στο άρθρο αναφέρεται ότι το γραφείο του καθηγητή Αργύρη στο σπίτι του στη Στουτγκάρδη, θυμίζει Gallerie μοντέρνας τέχνης με μια συλλογή περίτεχνα χρωματισμένων και πολύπλοκα σχεδιασμένων εικόνων.

Το συγγραφικό του έργο είναι titάνιο. Έχει συγγράψει 500 περίπου εκτεταμένες, πρωτότυπες ερευνητικές εργασίες που αποτελούν πολύτιμα βοηθήματα των επιστημόνων και των μηχανικών. Έχει αφήσει ένα πολύτιμο έργο 10 πολυσέλιδων βιβλίων μεταξύ των οποίων: «Εγχειρίδιο Αεροναυτικής», «Θεωρήματα Αναλύσεως κατασκευών», «Εισαγωγή στη Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», «Δυναμική των κατασκευών», «Μια Περιήγηση στο Χάος».

**Υπήρξε μέλος της Ακαδημίας Αθηνών και άλλων πέντε ακαδημιών διεθνώς. Κατέχει 21 επίτιμα διδακτορικά διπλώματα από πανεπιστήμια όλου του κόσμου. Έχει τιμηθεί με 25 διεθνείς διακρίσεις και μετάλλια, ανάμεσα στα οποία ο Μεγαλόσταυρος Αξίας της Ομοσπονδιακής Δημοκρατίας της Γερμανίας, ενώ έχει τιμηθεί και με το χρυσό μετάλλιο Prince Philip της Βασιλικής Ακαδημίας Μηχανικής, το οποίο θεωρείται στις αγγλοσαξονικές χώρες ισότιμο του βραβείου Νόμπελ για μηχανικούς. Το Νοέμβριο του 2000 αναγορεύθηκε από τη βασίλισσα Ελισάβετ της Αγγλίας Ιπότης της Βρετανικής Αυτοκρατορίας.**

Ήταν παντρεμένος με την κόρη του συγγραφέα Κλέωνα Ραγκαβή προπολεμικά, που ήταν τότε πρέσβης της Ελλάδας στο Βερολίνο. Μετά το θάνατό της από ανίατη ασθένεια, γνώρισε τη Σουηδέζα Ινγκα-Λίζα. **Η δεύτερη σύζυγός του, όταν τον γνώρισε στο Λονδίνο, εντυπωσιάστηκε από το μυαλό του αλλά και από την ελληνική του καταγωγή.** Έζησαν μαζί 60 χρόνια γάμου, δύσκολα αλλά και πολύ ενδιαφέροντα.

Ο ίδιος χαρακτήριζε τον εαυτό του ως τρικυμιώδης μυαλό και χαοτική προσωπικότητα που διέθετε φαντασία και ένστικτο.

Ήταν χαρακτηριστική η ορμητική του διάθεση για επιστημονικές και ερευνητικές αναζητήσεις μέχρι τα τελευταία χρόνια της ζωής του. Δεν μπόρεσε ποτέ να βρει ικανοποίηση στην καθημερινή εργασιακή ρουτίνα. Τον γοήτευαν πάντα εκείνα τα προβλήματα που φαίνονταν άλυτα. Δεν μπορούσε να ικανοποιηθεί με ημίμετρα.

Ο καθηγητής Ιωάννης Αργύρης ήταν εκτός από διάσημος ερευνητής ένας μεγάλος δάσκαλος για όλους τους μηχανικούς. Το έργο του υπήρξε καθοριστικό και όχι μόνον αποτέλεσε αλλά εξακολουθεί να αποτελεί τον πνευματικό φάρο στις ερευνητικές αναζητήσεις. Πρόκειται για μια ανεκτίμητη παρακαταθήκη σε μας τις νεότερες

γενεές. Παράλληλα υπήρξε μια κορυφαία προσωπικότητα της πνευματικής ζωής της Ευρώπης. Ήταν ένας άνθρωπος με οικουμενική ακτινοβολία που διαδραμάτισε εξέχοντα ρόλο στην παγκόσμια επιστημονική κοινότητα προσφέροντας σπουδαίες υπηρεσίες στην επιστήμη και στη χώρα μας. Ήταν φαινόμενο πνευματικής πολυμέρειας και ποικίλων ταλέντων: στοχαστής, ερευνητής, πανεπιστημιακός δάσκαλος, οραματιστής, μύστης, ρήτορας, γλωσσομαθής. Με την πολυμορφία των ικανοτήτων του θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ο κατ' εξοχήν αναγεννησιακός άνθρωπος του αιώνα μας. Ήταν άνθρωπος γεμάτος αντιθέσεις, αιώνιος επαναστάτης της επιστήμης και της ζωής. Πίστευε ότι η επιστήμη είναι η ίδια η ζωή. **Η επιστήμη που υπήρξε η μεγάλη του αγάπη, μετά την Ελλάδα! (σημείωση: όχι όμως το επιστημονικό, νεολληνικό κατεστημένο)** Η Γερμανία του παρείχε την επιστημονική υποδομή και ότι χρειαζόταν για τις έρευνές του, αλλά ποτέ δεν υπήρξε ευτυχισμένος που ζούσε μακριά από την Ελλάδα. Υπήρξε πάνω απ' όλα ένας αληθινός Έλληνας στη σκέψη και ένας φλογερός πατριώτης στην ψυχή. Ένας Ρωμίος με ευρωπαϊκή ωριμότητα και ταυτόχρονα ένας Ευρωπαίος με ρωμείο οίστρο.

**Ο καθηγητής Ιωάννης Αργύρης ανήκει στους φωτισμένους Έλληνες της διασποράς που έλαμψαν με το πνεύμα τους. Αν κρίνουμε από τον κ. Καραθεοδωρή μπορούμε να ελπίζουμε στο ξεκίνημα της ανάδειξης του.**

Βιβλιογραφία:

- 1) Εργασία Ιωάννη Βαμβατέκη, Πολ. Μηχανικού
- 2) Διαδίκτυο

[Πηγή...](#)

Διαβάστε επίσης:

[ΤΟ 2013 ΕΤΟΣ ΤΟΥ ΓΙΑΝΝΗ ΑΡΓΥΡΗ \(JOHN ARGYRIS\)](#)

**Ιωανν. Αργύρης**

Σε απόσταση περίπου 200 χλμ απο τη Στουτγκάρδη, όπου πέθανε ο Ι. Αργύρης, στο Μόναχο, βρίσκεται ο τάφος του θείου του, Κ. Καραθεοδωρή:



**ΑΝΔΡΩΝ ΕΠΙΦΑΝΩΝ ΠΑΣΑ ΓΗ ΤΑΦΟΣ.**