

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΑΡΙΝΟ ΕΞΑΜΗΝΟ 2018-2019

ΜΑΘΗΜΑ : ΣΤΑΤΙΚΗ

ΕΠΙΘΕΤΟ: Παντής

ΟΝΟΜΑ: Άγγελος

ΤΜΗΜΑ: ΜΗΠΕΡ

Α.Μ.: 2018050055

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΟΜΑΔΑ: 8

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ: 2

ΘΕΜΑ ΑΣΚΗΣΗΣ : << Ισοστατικά και Υπερστατικά δικτυώματα>>

ΧΑΝΙΑ (ΗΗ/ΜΜ/ΕΕ): 14/4/19

Πείραμα 1 : Δυνάμεις σε στατικά ορισμένο δικτύωμα πρόβολο

Περίληψη

Σκοπός της εργαστηριακής άσκησης είναι η μελέτη ενός ισοστατικού δικτυώματος ως προς τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στα μέλη του κατά την επιβολή φορτίου μέσω δυναμοκυψέλης. Συγκεκριμένα, μετρήθηκαν οι πειραματικές τιμές των δυνάμεων που ασκούνται σε κάθε μέλος, δυο εκ των οποίων ενδεικτικά μελετήθηκαν ως προς τις πραγματικές δυνάμεις που τους επιβάλλονται, αφαιρώντας τις αρχικές δυνάμεις που προέκυψαν κατά τη προκαταρκτική φόρτιση. Ακόμα, παραστάθηκε γραφικά η μεταβολή του φορτίου και της βύθισης του δικτυώματος. Επίσης, βρέθηκαν οι θεωρητικές τιμές για κάθε μέλος του ισοστατικού δικτυώματος (για φόρτιση 200 N) και συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες θεωρητικές. Τέλος, έγινε σχολιασμός για τη λειτουργικότητα των strain gauges κατά τη πειραματική μέτρηση πραγματικών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κατασκευές.

Εισαγωγή

Το πείραμα βασίζεται στον υπολογισμό και την μελέτη των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα μέλη ενός ισοστατικού δικτυώματος, κατά τη φόρτισή του.

Δικτύωμα είναι ένα σύστημα που αποτελείται από ευθύγραμμες ράβδους οι οποίες είναι συνδεδεμένες στα άκρα τους, έτσι ώστε να αποτελούν συνολικά έναν στερεό σχηματισμό. Τα σημεία που ενώνονται οι ράβδοι λέγονται κόμβοι. Οι ράβδοι, τα μέλη δηλαδή του δικτυώματος, είναι μέλη δύο δυνάμεων, καθώς υπόκεινται σε δυο ίσες και αντίθετες δυνάμεις οι οποίες κατευθύνονται κατά μήκος του άξονά τους (εφελκυστικές ή θλιπτικές δυνάμεις).

Σε ένα ισοστατικό δικτύωμα, ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταξύ τους εξισώσεων ισορροπίας είναι ίσος με τον αριθμό των αγνώστων που εισάγει το δικτύωμα.

Μέθοδος κόμβων

Η ανάλυση του δικτυώματος της πειραματικής άσκησης, ώστε να βρεθούν οι θεωρητικές τιμές των δυνάμεων σε κάθε ράβδο, γίνεται με τη μέθοδο των κόμβων.

Σε πρώτο χρόνο, γίνεται το διάγραμμα ελευθέρου σώματος του δικτυώματος, και με τη χρήση των τριών εξισώσεων ισορροπίας:

$\Sigma F_x = 0, \Sigma F_y = 0, \Sigma M = 0$, για τη μελέτη ολόκληρου του σώματος, υπολογίζονται οι αντιδράσεις στήριξης που αναπτύσσονται εξωτερικά αυτού.

Στη συνέχεια, γίνεται "αποσυναρμολόγηση" του δικτυώματος και σχεδιάζεται το διάγραμμα ελευθέρου σώματος για κάθε μέλος και κόμβο.

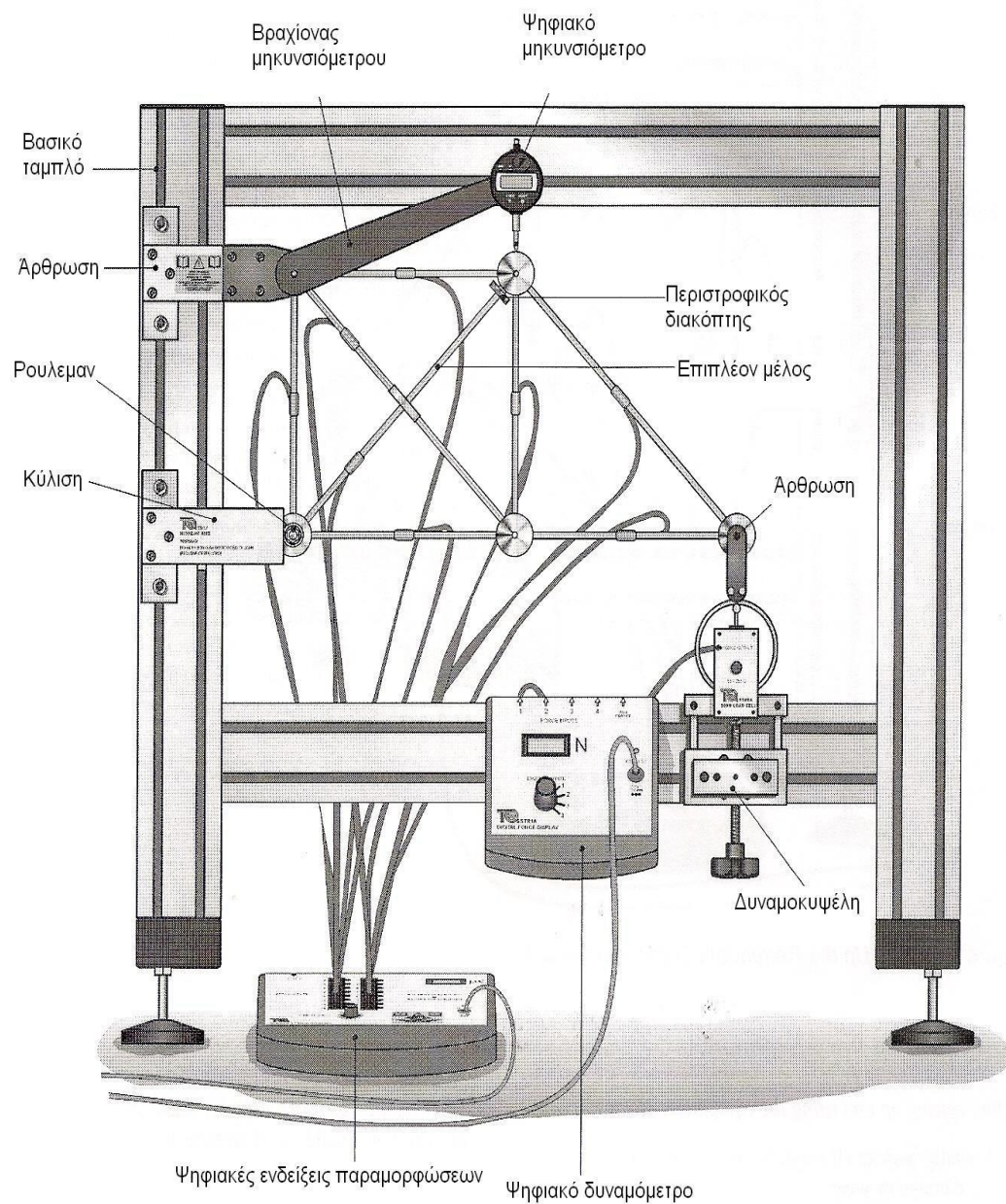
Σε κάθε μέλος δρουν δυο δυνάμεις, μια σε κάθε άκρο, οι οποίες έχουν το ίδιο μέγεθος, την ίδια γραμμή ενέργειας και αντίθετη φορά. Το κοινό μέγεθος αυτών των δυο δυνάμεων που ασκούνται από ένα μέλος στους δύο κόμβους με τους οποίους αυτό συνδέεται, ονομάζεται δύναμη μέλους. Ανάλογα με το πρόσημο της δύναμης μέλους, γίνεται αναγνώριση της εφελκυστικής ή της θλιπτικής κατάστασης που βρίσκεται το αντίστοιχο μέλος.

Το γεγονός ότι το δικτύωμα ισορροπεί συνεπάγεται ότι κάθε κόμβος βρίσκεται σε ισορροπία. Με την γνώση των παραπάνω, σχεδιάζονται στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος κάθε κόμβου οι δυνάμεις που του ασκούνται. Με τη χρήση των εξισώσεων $\Sigma F_x = 0, \Sigma F_y = 0$ για κάθε κόμβο του δικτυώματος, λύνοντας κάθε φορά ως προς την άγνωστη δύναμη μέλους, γίνεται ο προσδιορισμός όλων των εσωτερικών δυνάμεων του δικτυώματος.

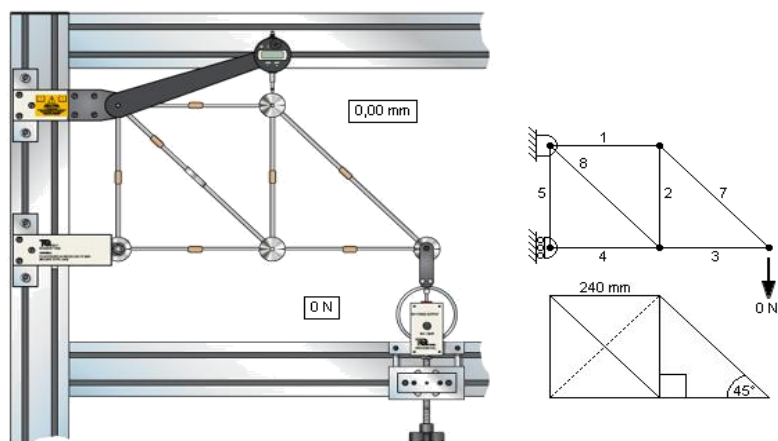
Πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την ανάλυση του δικτυώματος με την μέθοδο των κόμβων έγιναν οι παρακάτω παραδοχές:

1. Οι τριβές που αναπτύσσονται μεταξύ των ράβδων και των κόμβων θεωρήθηκαν μηδενικές.
2. Οι άξονες όλων των μελών του δικτυώματος θεωρήθηκαν απόλυτα ευθύγραμμοι.
3. Τα εξωτερικά φορτία συνίστανται αποκλειστικά σε δυνάμεις που ενεργούν επί των κόμβων ή είναι παράλληλες με τους άξονες των ράβδων. Οι ράβδοι του δικτυώματος θεωρήθηκαν εγκάρσια αφόρτιστες.

Πειραματική διάταξη και διαδικασία



Εικόνα 1 : Διάταξη δικτυώματος

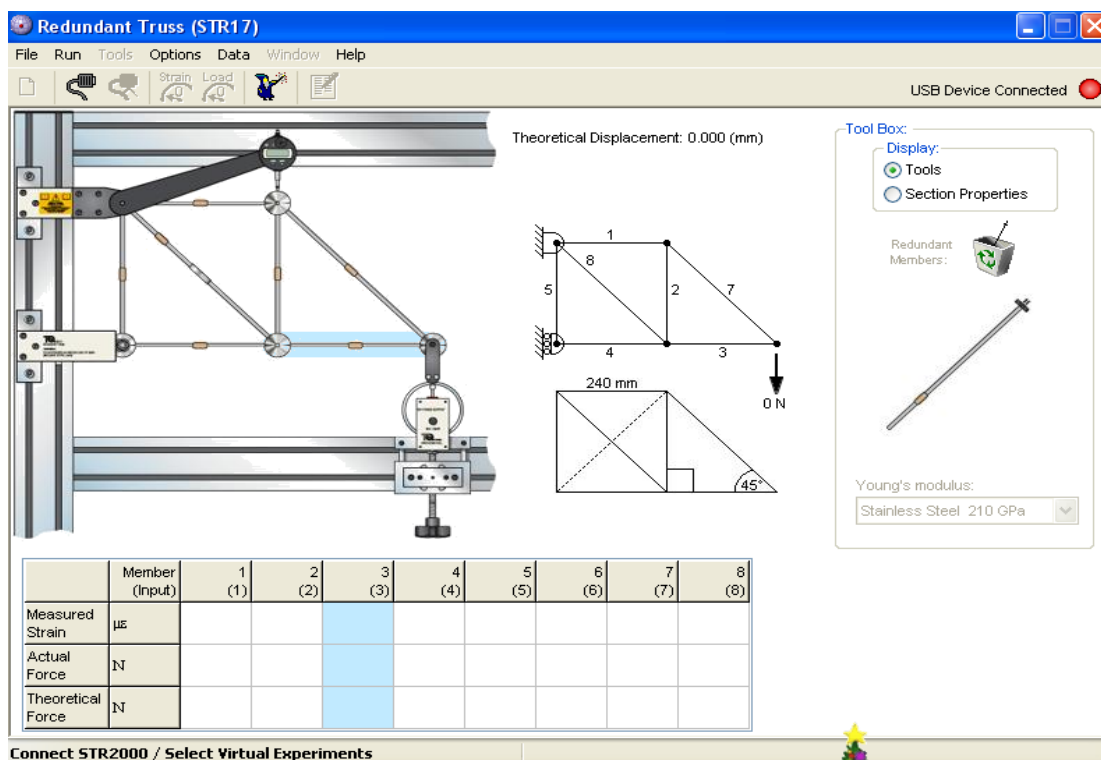


Εικόνα 2 : Διάταξη ισοστατικού δικτυώματος - Πείραμα 1

Το δικτύωμα στηρίζεται σε ολόκληρο το πλαίσιο με μία άρθρωση και μία κύλιση, όπως φαίνεται στις εικόνες 1 και 2 παραπάνω. Εφαρμόζονται κατακόρυφα φορτία μέσω μιας δυναμοκυψέλης η οποία ηλεκτρονικά μετράει και εμφανίζει το φορτίο κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το ψηφιακό μηκυνσιόμετρο μετρά τη παραμόρφωση (βύθιση) του φορέα. Κάθε ένα από τα μέλη του δικτυώματος έχει ένα είδος αισθητήρα κολλημένο στην επιφάνεια του, οι οποίοι μετρούν τη δύναμη των μελών και ονομάζονται "Strain Gauges" (αισθητήρες παραμόρφωσης).

Κάθε αισθητήρας παραμόρφωσης συγκολλάται στην επιφάνεια των ράβδων του δικτυώματος έτσι όταν μία ράβδος υποστεί θλίψη ή εφελκυσμό, ο αισθητήρας να θλίβεται ή να εφελκύεται με τον ίδιο τρόπο. Υπάρχουν τέσσερις αισθητήρες σε κάθε μέλος.

Με την ενεργοποίηση ηλεκτρονικά του συστήματος του δικτυώματος και των περιφερειακών μονάδων ανάκτησης δεδομένων, φορτώνεται παράλληλα το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων στον Η/Υ. Η πρώτη οθόνη που εμφανίζεται στον Η/Υ φαίνεται στην Εικόνα 3.



Εικόνα 3

Αρχικά, εφαρμόζεται μία προκαταρκτική φόρτιση στο σύστημα, ώστε η δύναμη της ράβδου 7 να έχει τιμή περίπου 100 N. Στη συνέχεια, εμφανίζονται αυτόματα στην οθόνη του Η/Υ σε μορφή πίνακα οι τιμές των δυνάμεων του κάθε μέλους του δικτυώματος που αντιστοιχούν στην προκαταρκτική δύναμη περίπου των 100 N. Αυτές οι πειραματικές τιμές έχουν καταγραφεί με τη βοήθεια των αισθητήρων παραμόρφωσης.

Καταγράφονται οι παραπάνω τιμές που αντιστοιχούν στη προκαταρκτική φόρτιση της κάθε ράβδου στον Πίνακα 1 που φαίνεται στα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, μηδενίζεται τη ένδειξη του φορτίου στην δυναμοκυψέλη και στο ψηφιακό μηκυνσιόμετρο.

Αυξάνεται το φορτίο μονοσήμαντα κατά 50 N κάθε φορά (υπάρχοντας βεβαίως ήδη στο σύστημα των ράβδων του δικτυώματος της προκαταρκτικής φόρτισης των περίπου 100 N) με την σειρά που φαίνεται στον Πίνακα 2 παρακάτω. Καταγράφονται οι δυνάμεις που εμφανίζονται στην οθόνη - που αντιστοιχούν σε κάθε ράβδο ανάλογα με την αύξηση του φορτίου - καθώς και οι ενδείξεις του ψηφιακού μηκυνσιόμετρου (Πίνακας 2).

Ακολούθως, αφαιρούνται οι δυνάμεις που προκύπτουν από την προκαταρκτική φόρτιση από τις αντίστοιχες του Πίνακα 2 και συμπληρώνεται

ο Πίνακας 3, όπου φαίνονται οι τελικές δυνάμεις για κάθε ράβδο, που είναι και οι πραγματικές.

Έπειτα από τη συμπλήρωση του Πίνακα 3, επιλέγεται το μέλος του δικτυώματος και σχεδιάζεται για αυτό η γραφική παράσταση της μεταβολής των πραγματικών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε αυτό καθώς και των δυνάμεων που αντιστοιχούν σε αυτό σύμφωνα με τον Πίνακα 2. Οι δύο γραφικές παραστάσεις γίνονται σε ένα γράφημα, η μορφή του οποίου σχολιάζεται παρακάτω.

Σε καινούργιο γράφημα έγινε η ίδια διαδικασία για το μέλος 5 του δικτυώματος. Ακολούθησε επίσης σχολιασμός, όσον αφορά την δύναμη που αναπτύσσεται σύμφωνα με τους αισθητήρες παραμόρφωσης σε αυτό.

Ακόμα, έγινε η γραφική παράσταση της μεταβολής του φορτίου και της βύθισης του δικτυώματος. Το διάγραμμα που προέκυψε σχολιάστηκε και συγκρίθηκε με τα προηγούμενα.

Τέλος, με την βοήθεια της μεθόδου των κόμβων, υπολογίστηκαν οι θεωρητικές τιμές των δυνάμεων όλων των ράβδων για φόρτιση του δικτυώματος με δύναμη των 200N. Ο Πίνακας 4 συμπληρώθηκε με τις παραπάνω θεωρητικές τιμές και με τις αντίστοιχες πειραματικές (για την ίδια φόρτιση), που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 3. Έγινε σχολιασμός των καταγραφών του Πίνακα 4 και εξάχθηκαν βάσει αυτού συμπεράσματα για την ακρίβεια των strain gauges και την αποτελεσματικότητά τους κατά τη πειραματική μέτρηση πραγματικών δυνάμεων σε κατασκευές.

Αποτελέσματα-Ανάλυση-Συζήτηση

Πίνακας 1 : Υπάρχουσες δυνάμεις μελών

Ράβδος	1	2	3	4	5	6	7	8
Φορτίο (N)	67,9	-69,9	-67,5	-143,7	-0,7	-	99,6	93,7

Πίνακας 2 : Δυνάμεις μελών και βυθίσεις

Φορτίο (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	Ενδείξεις ψηφιακού μηκυνσιόμετρου (mm)
0	67,9	-69,9	-67,5	-143,7	-0,7	-	99,6	93,7	0
50	126,3	-126,0	-122,1	-258,9	1,8	-	183,4	174,8	-0,042
99	182,9	-179,6	-171,7	-371,6	2,5	-	259,0	250,3	-0,076
150	235,4	-233,2	-225,1	-476,7	1,3	-	336,6	323,7	-0,123
200	289,2	-290,5	-281,3	-593,1	6,1	-	416,9	401,2	-0,173

Πίνακας 3 : Πραγματικές δυνάμεις πειράματος

Φορτίο (N)	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	-	0	0
50	58,4	-56,1	-54,6	-115,2	1,1	-	83,8	81,1
99	115,0	-109,7	-104,2	-227,9	1,8	-	159,4	156,6
150	167,5	-163,3	-157,6	-333,0	0,6	-	237,0	230,0
200	221,3	-220,6	-231,8	-449,4	5,4	-	317,3	307,5

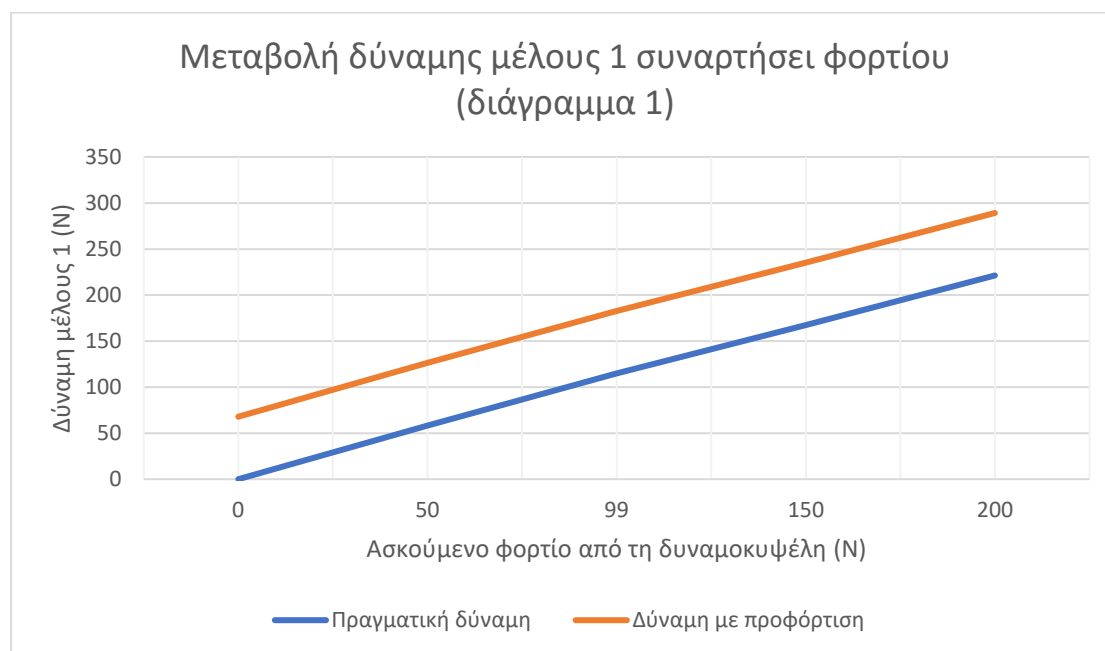
Πίνακας 4: Πειραματικές και Θεωρητικές τιμές στο δικτύωμα πρόβολο

Ράβδος	Πειραματική δύναμη (N)	Θεωρητική δύναμη (N)
1	221,3	200
2	-220,6	200
3	-231,8	200
4	-449,4	400
5	5,4	0
6	-	-
7	317,3	283
8	307,5	283

Συγκρίνοντας τις πειραματικές και τις θεωρητικές τιμές φόρτισης κάθε ράβδου για συγκεκριμένο φορτίο (200N) που ασκείται στον κόμβο 7 (όπως φαίνεται στο Δ.Ε.Σ. παρακάτω) , παρατηρείται ότι η απόκλιση μεταξύ τους είναι σχετικά μικρή. Τα αρνητικά πρόσημα που εμφανίζονται στις

πειραματικές τιμές δηλώνουν ότι το αντίστοιχο μέλος καταπονείται θλιπτικά , ενώ το θετικό πρόσημο στις τιμές μεταφράζεται ως κατάσταση εφελκυσμού. Στις θεωρητικές μετρήσεις των τιμών των μελών, το είδος κάθε φόρτισης αναγράφεται πάνω στο διάγραμμα ελευθέρου σώματος ως <<θ>> και <<ε>> που συμβολίζουν θλίψη και εφελκυσμό. Τόσο η μικρή απόκλιση μεταξύ των θεωρητικών και των πειραματικών τιμών, όσο και η σωστή αντιστοιχία της κατάστασης στην οποία βρίσκεται κάθε μέλος ανάμεσα στις δυο στήλες του Πίνακα 4, αποτελούν ενδείξεις σωστής ανάλυσης του δικτυώματος (με τη μέθοδο των κόμβων) και σωστού θεωρητικού υπολογισμού κάθε δύναμης μέλους.

Παρουσιάζεται παρακάτω το διάγραμμα 1, στο οποίο φαίνεται η μεταβολή της πραγματικής δύναμης αλλά και της δύναμης που περιέχει τη προκαταρκτική φόρτιση για τη δύναμη μέλους 1. Η ράβδος 1 επιλέχθηκε ενδεικτικά.

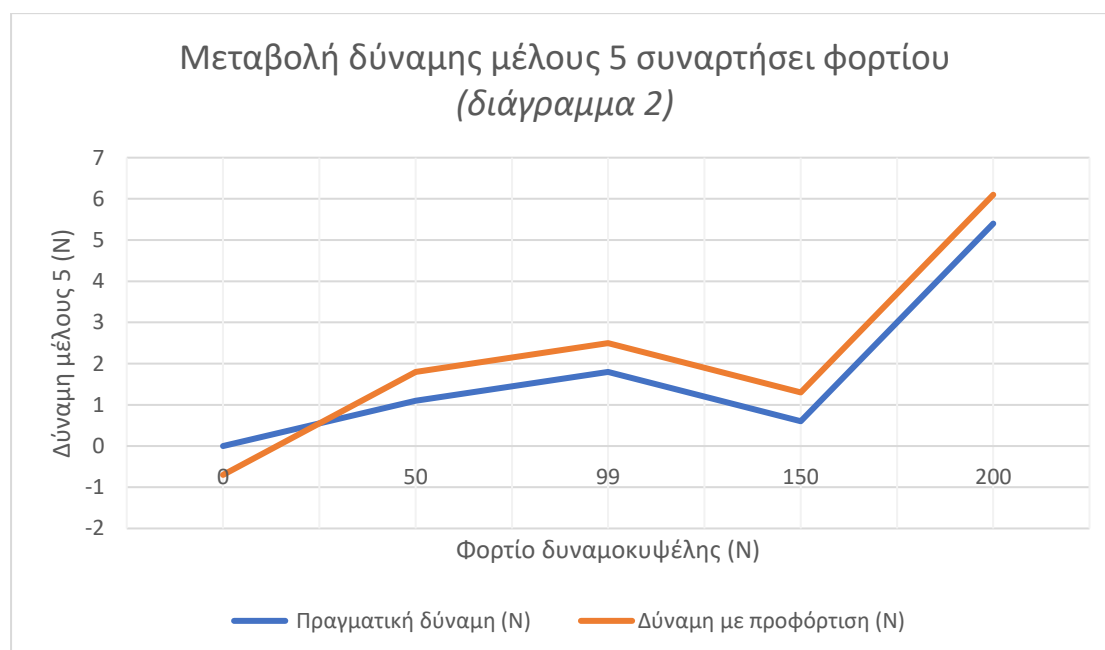


Από το διάγραμμα 1 γίνεται εμφανές ότι το φορτίο που ασκείται σε ένα δικτύωμα και η δύναμη ενός μέλους του δικτυώματος που προκαλείται λόγω αυτού, είναι μεγέθη ανάλογα. Η μορφή των παραπάνω γραφικών παραστάσεων είναι αναμενόμενη , καθώς είναι εύκολα αντιληπτό το γεγονός ότι το μέτρο των δυνάμεων κάθε μέλους του δικτυώματος (που βρίσκεται σε

ισορροπία) αυξάνεται, όσο αυξάνεται το μέτρο του φορτίου που ασκείται σε κάποιο σημείο του. Εξίσου αναμενόμενη είναι η θέση της γραφικής που εκφράζει τη πραγματική δύναμη σε σχέση με την δεύτερη, που εκφράζει τη δύναμη στη τιμή της οποίας περιέχεται και η τιμή της προκαταρκτικής φόρτισης. Συγκεκριμένα, από κάθε τιμή του άξονα y (δύναμη μέλους) που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένες τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής (δύναμη που ασκεί η δυναμοκυψέλη) και περιγράφει τη φόρτιση του μέλους 1 σύμφωνα με τον Πίνακα 2, έχει αφαιρεθεί μια σταθερή τιμή (προφόρτιση). Συνεπώς, οι δύο γραφικές θα παρουσιάζουν μια σταθερή διαφορά σε κάθε τιμή των στοιχείων που αντιστοιχούν στην ίδια τιμή x , και αυτή θα ισούται με τη τιμή προφόρτισης της ράβδου. Εκτός από το παραπάνω, δεν παρουσιάζουν άλλη διαφορά.

Τέλος, παρατηρείται ότι το μέλος 1 βρίσκεται σε κατάσταση εφελκυσμού κατά τη διαδικασία αύξησης του φορτίου που ασκεί η δυναμοκυψέλη.

Το διάγραμμα 2 που ακολουθεί έγινε με την ίδια λογική και αντιστοιχεί στο μέλος 5 του δικτυώματος.

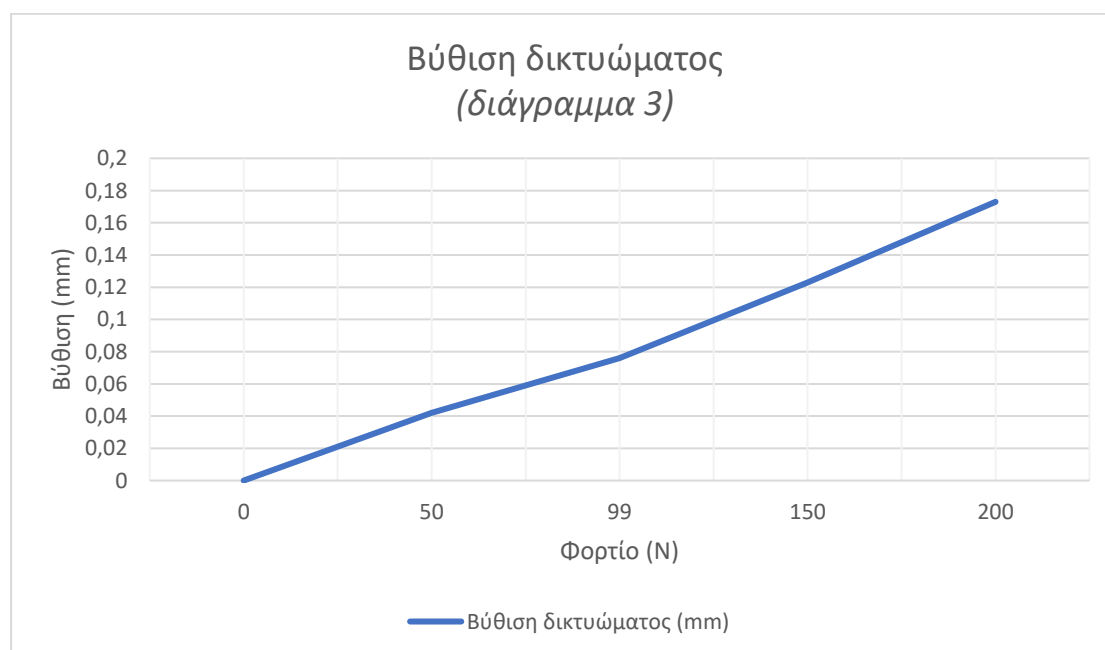


Παρατηρείται από το διάγραμμα 2 ότι η δύναμη που ασκείται στη ράβδο 5 κατά τη προφόρτιση, τη καταπονεί θλιπτικά. Μόλις αυξηθεί η δύναμη που προέρχεται από τη δυναμοκυψέλη, το μέλος 5 βρίσκεται σε κατάσταση εφελκυσμού. Η λογική που διαμορφώνεται στη συνέχεια το διάγραμμα 2 είναι η ίδια με αυτή του διαγράμματος 1.

Για το μέλος 5 του δικτυώματος παρατηρείται ότι οι τιμές των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε αυτή είναι πολύ μικρές συγκριτικά με αυτές των άλλων μελών (οριακά μηδενικές). Από την ανάλυση του δικτυώματος για τον υπολογισμό κάθε δύναμης μέλους με τη μέθοδο των κόμβων, διαπιστώθηκε πράγματι ότι η δύναμη του μέλους 5 είναι θεωρητικά μηδενική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ράβδος 5 δεν καταπονείται από κάποια εσωτερική δύναμη. Όπως φαίνεται και στην αναλυτική περιγραφή της μεθόδου των κόμβων παρακάτω, η κάθετη δύναμη της άρθρωσης που βρίσκεται στη πάνω άκρη της ράβδου 5, "εξουδετερώνεται" από τη κατακόρυφη συνιστώσα του πάνω άκου της ράβδου 8, με αποτέλεσμα να εξυπηρετείται η ισορροπία του δικτυώματος χωρίς κάποια φόρτιση στη ράβδο 5.

Οι μικρές τιμές δύναμης που ανιχνεύουν οι αισθητήρες φόρτισης οφείλονται κυρίως στο βάρος της ίδιας της ράβδου, το οποίο αν και είναι πολύ μικρό και δεν έχει ουσιαστική επιρροή στο δικτύωμα, δεν παύει να υπάρχει.

Στο διάγραμμα 3 παρουσιάζεται η βύθιση του δικτυώματος (ενδείξεις ψηφιακού μηκυσιόμετρου) συναρτήσει του φορτίου.



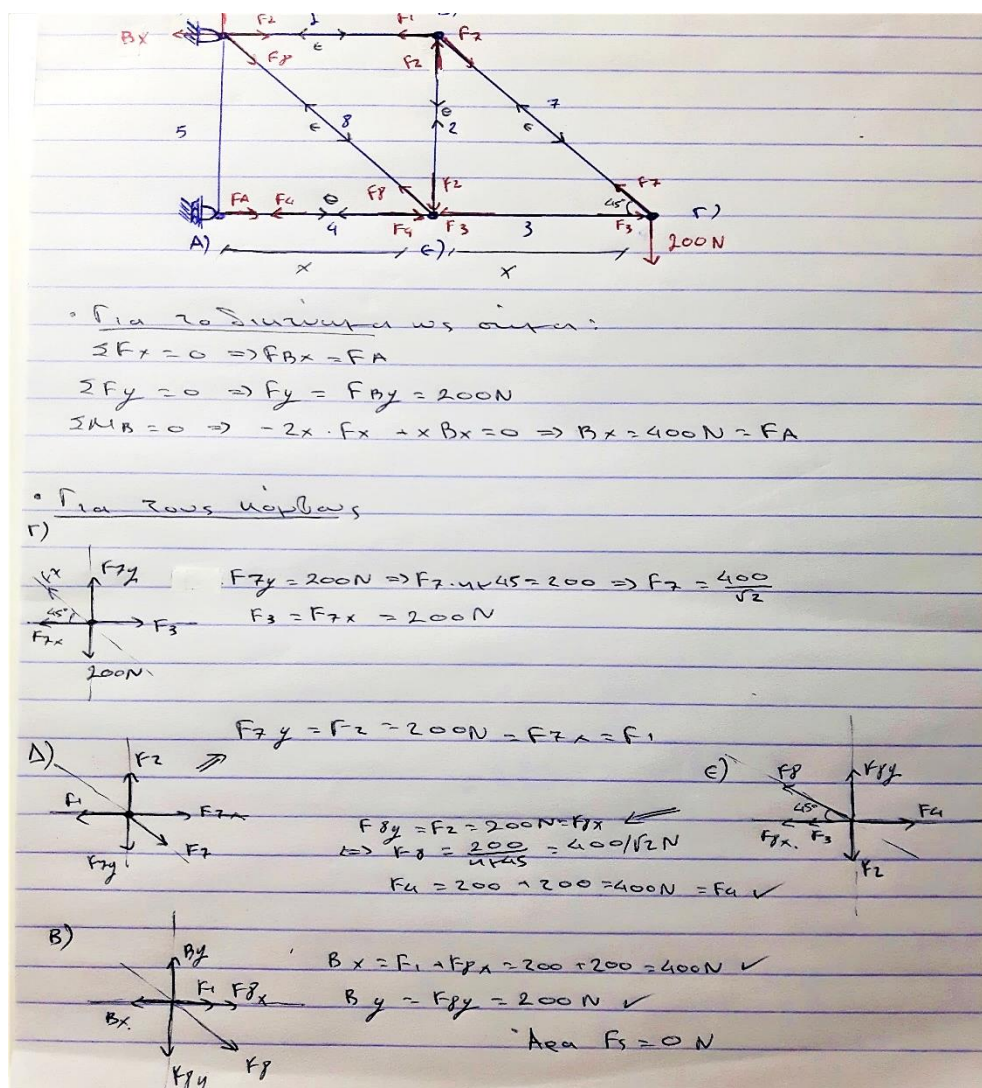
Η αρνητική ένδειξη του μηκυσιόμετρου στις τιμές του πίνακα 2 δηλώνει ότι το δικτύωμα έχει υποστεί βύθιση. Για λόγους απλούστευσης, ο γ άξονας ορίστηκε να εκφράζει τη βύθιση, ώστε να παραληφθούν τα αρνητικά πρόσημα. Από το παραπάνω διάγραμμα φαίνεται ότι το μέγεθος του φορτίου που ασκείται κατακόρυφα του δικτυώματος και το μέγεθος της βύθισης στην οποία αυτό επιβάλλεται, είναι ανάλογα. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η

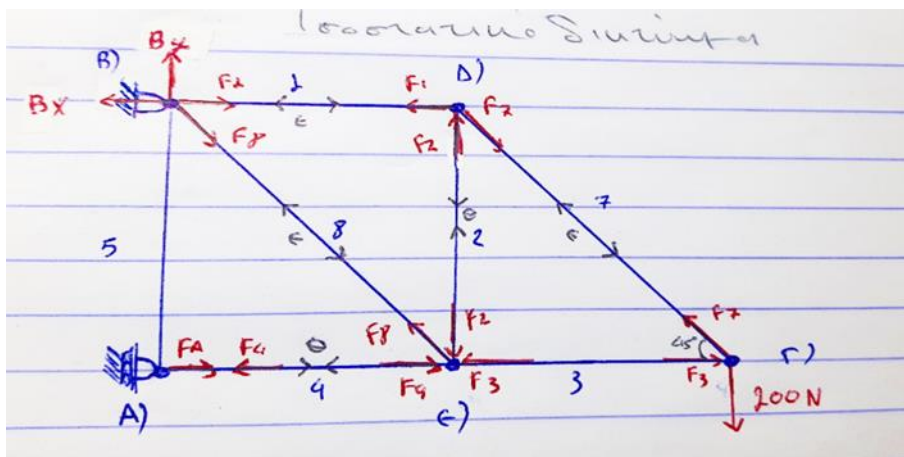
κατακόρυφη δύναμη που ασκείται σε κάποιο μέλος του δικτυώματος, τόσο αυξάνεται και η βύθισή του (σε mm).

Γενικά, από τα διαγράμματα 1,2,3 γίνεται αντιληπτό το γεγονός ότι το μέγεθος μιας εξωτερικής δύναμης που ασκείται σε κάποιο μέρος ενός δικτυώματος είναι ανάλογο :

- της παραμόρφωσης που αυτή προκαλεί στο δικτύωμα (εδώ βύθιση)
- των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε μέλος του δικτυώματος ώστε να διατηρείται αυτό σε κατάσταση ισορροπίας.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία υπολογισμού των δυνάμεων κάθε ράβδου του δικτυώματος, για δεδομένη φόρτιση 200N (στη δυναμοκυψέλη)





Συμπεράσματα

Στο παραπάνω πείραμα έγινε μελέτη των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε μέλος ενός ισοστατικό δικτυώματος, όταν αυτό φορτίζεται εξωτερικά σε κάποιο σημείο. Οι δυνάμεις κάθε μέλους υπολογίσθηκαν πρώτα πειραματικά και στη συνέχεια θεωρητικά. Για τον πειραματικό υπολογισμό της κάθε δύναμης μέλους αναγκαία ήταν η χρήση αισθητήρων καταπόνησης (Strain Gauges), κατάλληλα προσκολλημένων πάνω σε κάθε ράβδο. Από τη παραπάνω διαδικασία έγινε αντιληπτή η μεγάλη ακρίβεια των εν λόγω αισθητήρων, η οποία δικαιολογεί την αυξημένη τους ευαισθησία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της παραπάνω διαπίστωσης αποτελεί η ράβδος 5 του πειράματος, η οποία παρόλο που θεωρητικά δεν καταπονείται με κάποια φόρτιση, οι αισθητήρες κατέγραψαν μια πολύ μικρή τιμή δύναμης που οφείλεται στο βάρος της.

Η λειτουργικότητα της μεθόδου των strain gauges και η μεγάλη της ακρίβεια την καθιστά μια από τις πιο βασικές και διαδεδομένες στην επιστήμη των μηχανικών.

Πείραμα 2 : Δυνάμεις σε υπερστατικό δικτύωμα

Περίληψη

Σκοπός της πειραματικής άσκησης είναι η παρατήρηση και η μελέτη των εσωτερικών δυνάμεων κατά τη φόρτιση ενός δικτυώματος που μετατρέπεται από ισοστατικό σε υπερστατικό. Συγκεκριμένα, καταγράφηκε σε πίνακα η τιμή της προκαταρκτικής φόρτισης για κάθε ράβδο και οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτές κατά την διαδοχική αύξηση του φορτίου. Στη συνέχεια βρέθηκαν τα μέτρα των πραγματικών δυνάμεων κάθε μέλους. Για τα μέλη 8 και 5 παρουσιάστηκε γραφικά η μεταβολή των δυνάμεών τους και ειδικά για το δεύτερο σχολιάστηκε η φόρτιση που παρουσιάζει στο υπερστατικό σε σχέση με το ισοστατικό δικτύωμα. Ακολούθησε σύγκριση των πειραματικών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε κάθε ράβδο στο υπερστατικό και στο ισοστατικό δικτύωμα για συγκεκριμένη φόρτιση. Τέλος, σχολιάστηκε το κατά πόσο εύλογη ήταν η αύξηση της υπερστατικότητας του δικτυώματος, βάση των αποτελεσμάτων και του οικονομικού κόστους.

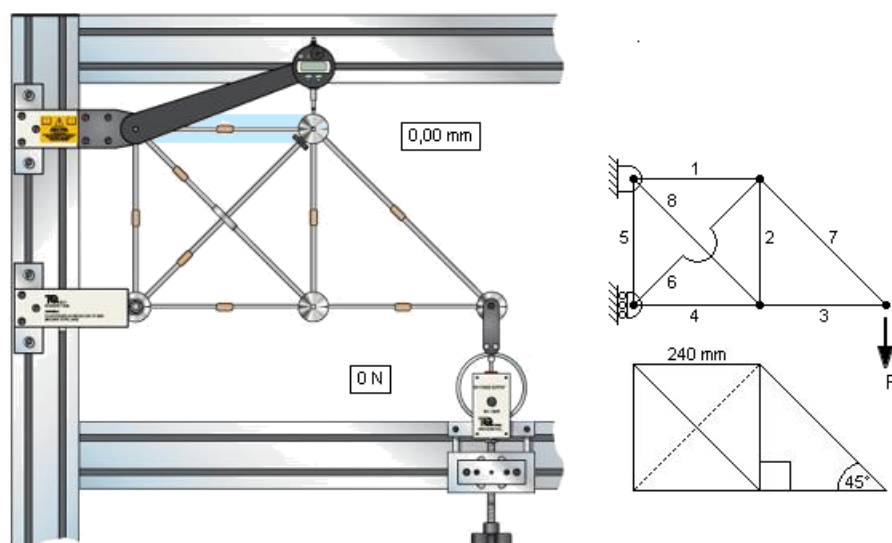
Εισαγωγή

Το πείραμα βασίζεται στον υπολογισμό και την μελέτη των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα μέλη ενός υπερστατικού δικτυώματος, κατά τη φόρτισή του.

Η επίλυση ενός υπερστατικού δικτυώματος απαιτεί επιπλέον εξισώσεις από τις ήδη γνωστές που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του ισοστατικού δικτυώματος παραπάνω. Λόγω αυτού, το υπερστατικό δικτύωμα δεν μπορεί να αναλυθεί με τη μέθοδο των κόμβων και συνεπώς δεν θα εξεταστεί ως προς τις θεωρητικές τιμές κάθε δύναμης μέλους.

Μία υπερστατική κατασκευή παρουσιάζει πολύ μικρότερες παραμορφώσεις και μετακινήσεις από μια ισοστατική. Η υπερστατικότητα λειτουργεί σαν ασφαλιστική δικλίδα, καθώς σε περιπτώσεις κάποιας αστοχίας η ανακατανομή των εντατικών μεγεθών δύναται να αποτρέψει τη κατάρρευση της κατασκευής. Λόγω του παραπάνω, η κατασκευή υπερστατικών δομών έχει μεγαλύτερο οικονομικό κόστος.

Πειραματική διάταξη και διαδικασία



Εικόνα 4 : Διάταξη πειράματος 2

Στο πείραμα 2 η διάταξη παραμένει σχεδόν ίδια. Γίνεται μελέτη του ίδιου δικτύωματος με το 1ο Πείραμα, αλλά με ένα επιπλέον μέλος (μέλος 6) να περιλαμβάνεται στο δικτύωμα. Αυτομάτως, το δικτύωμα μετατρέπεται από ισοστατικό σε υπερστατικό. Για να εισαχθεί και το επιπλέον μέλος 6 περισφίγγεται με τα χέρια κατάλληλος περιστροφικός διακόπτης στο πάνω άκρο του μέλους.

Η διαδικασία που ακολουθεί είναι κατά βάση ίδια με τη πειραματική διαδικασία του Πειράματος 1. Συγκεκριμένα :

Εφαρμόζεται προκαταρκτική φόρτιση, τέτοια ώστε η ράβδος 7 να έχει εμφανίζει στην οθόνη του προγράμματος επεξεργασίας των δεδομένων στον Η/Υ πραγματική δύναμη ίση περίπου με 100 N. Στη συνέχεια, εμφανίζονται αυτόματα στην οθόνη του Η/Υ σε μορφή πίνακα οι τιμές των δυνάμεων του κάθε μέλους του δικτύωματος που αντιστοιχούν στην προκαταρκτική δύναμη περίπου των 100 N και υπολογίσθηκαν από τα strain gauges.

Καταγράφονται οι παραπάνω τιμές που αντιστοιχούν στη προκαταρκτική φόρτιση της κάθε ράβδου στον Πίνακα 5 που φαίνεται στα αποτελέσματα.

Μηδενίζεται η ένδειξη του φορτίου στην δυναμοκυψέλη και στο ψηφιακό μηκυνσιόμετρο.

Αυξάνεται το φορτίο μονοσήμαντα κατά 50 N κάθε φορά (υπάρχοντος βεβαίως ήδη στο σύστημα των ράβδων του δικτυώματος της προκαταρκτικής φόρτισης των περίπου 100 N) με την σειρά που φαίνεται στον Πίνακα 6 παρακάτω. Καταγράφονται οι δυνάμεις που εμφανίζονται στην οθόνη , καθώς και οι ενδείξεις του ψηφιακού μηκυνσιόμετρου (Πίνακας 6).

Ακόμα, αφαιρούνται οι δυνάμεις που προκύπτουν από την προκαταρκτική φόρτιση από τις αντίστοιχες του Πίνακα 6 και συμπληρώνεται ο Πίνακας 7, όπου φαίνονται οι πραγματικές δυνάμεις για κάθε ράβδο.

Οι τιμές των δυνάμεων που μετρούν οι αισθητήρες καταπόνησης προφανώς θα έχουν αλλάξει, καθώς η προσθήκη του επιπλέον μέλους 6 προκάλεσε ανακατανομή των εσωτερικών δυνάμεων.

Για το μέλος 8 του υπερστατικού δικτυώματος σχεδιάσθηκε η γραφική παράσταση της μεταβολής των πραγματικών δυνάμεων του με βάση τις αντίστοιχες τιμές στον Πίνακα 7 και Πίνακα 6. Ακολούθως, συγκρίθηκαν και σχολιάστηκαν τα αποτελέσματα των δύο παραστάσεων που έγιναν σε κοινό γράφημα. Ακόμα, συγκρίθηκαν οι τιμές των δυνάμεων του μέλους 8 όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 7 με αυτές του Πίνακα 3.

Σε άλλο γράφημα έγινε η ίδια διαδικασία για το μέλος 5 του δικτυώματος και σχολιάστηκε η τιμή της δύναμής του στο υπερστατικό δικτύωμα σε σχέση με αυτή που παρουσίαζε το ίδιο μέλος στο ισοστατικό.

Τέλος, οι πειραματικές τιμές των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε όλα τα μέλη του ισοστατικού και του υπερστατικού δικτυώματος για φόρτιση 200N (συμπεριλαμβανομένης της προκαταρκτικής φόρτισης των περίπου 100 N) όπως ήδη έχουν καταγραφεί στον Πίνακα 3 και στον Πίνακα 7 εισάγονται στις αντίστοιχες στήλες του Πίνακα 8.

Συγκρίθηκαν οι τιμές αυτές των δυνάμεων σε όλα τα μέλη. Με αυτή τη σύγκριση, γίνεται αντιληπτή η τάξη μεγέθους του συντελεστή ασφαλείας που δημιουργείται κατά τη μετατροπή του ισοστατικού δικτυώματος σε υπερστατικό. Βάση αυτού, προέκυψαν ανάλογα συμπεράσματα για το κατά πόσο εύστοχη είναι η αύξηση του συντελεστή ασφαλείας (υπερστατικότητα που προσδίδεται στο δικτύωμα με την εισαγωγή του μέλους 6) , αν αναλογιστεί κανείς το οικονομικό κόστος.

Αποτελέσματα-Ανάλυση-Συζήτηση

Πίνακας 5 : Υπάρχουσες δυνάμεις μελών

Ράβδος	1	2	3	4	5	6	7	8
Φορτίο (N)	95,2	-47,0	-68,0	-125,3	21,1	-20,2	100,3	63,7

Πίνακας 6 : Δυνάμει ράβδων και βυθίσεις

Φορτίο (N)	1	2	3	4	5	6	7	8	Βύθιση (mm)
0	95,2	-47,0	-68,0	-125,3	21,1	-20,2	100,3	63,7	0
50	184,0	-86,6	-127,4	-230,6	47,1	-50,4	192,8	121,8	-0,016
99	254,8	-113,3	-173,0	-306,3	69,2	-79,1	262,8	161,4	-0,022
150	328,9	-146,7	-226,9	-393,3	91,7	-121,8	338,5	198,6	-0,043
200	414,6	-170,2	-295,2	-457,7	123,9	-151,2	424,4	246,7	-0,056

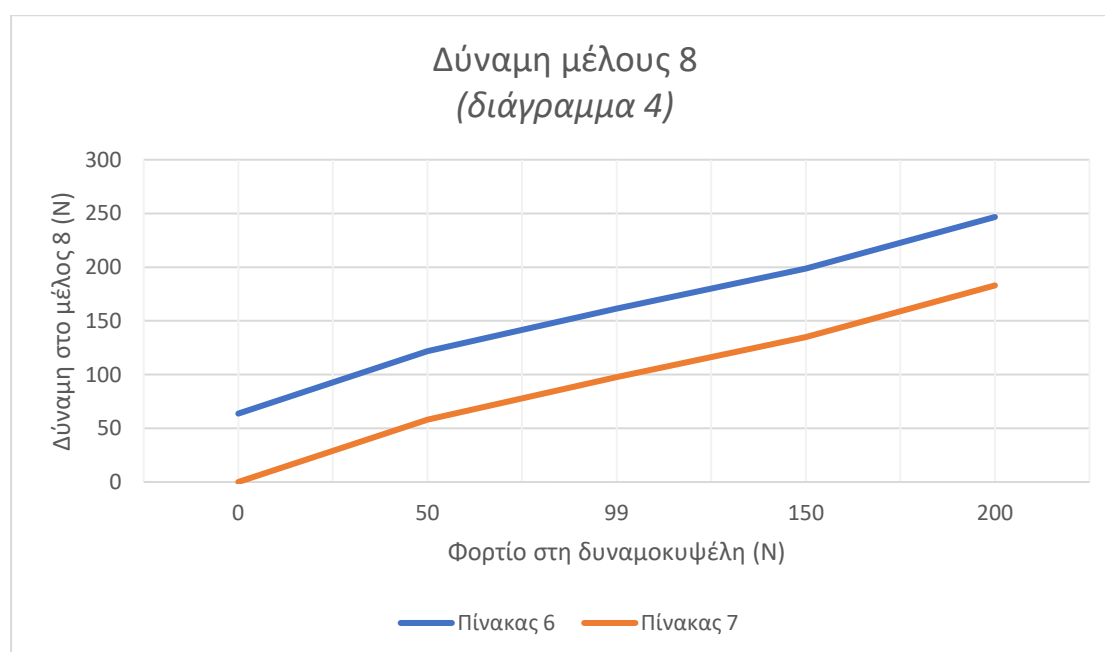
Πίνακας 7 : Πραγματικές δυνάμεις Πειράματος 2

Φορτίο (N)	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	88,8	-39,6	-59,4	-105,3	26,0	-30,2	-92,5	58,1
99	159,6	-66,3	-105,0	-181,0	48,1	-58,9	-162,5	97,7
150	233,7	-99,7	-158,9	-268,0	70,6	-101,6	-238,2	134,9
200	319,4	-123,2	-227,2	-332,4	102,8	-131,0	-324,1	183,0

Πίνακας 8 : Πειραματικές τιμές ράβδων στο υπερστατικό και στο ισοστατικό δικτύωμα, για φόρτιση 200 N στη δυναμοκυψέλη

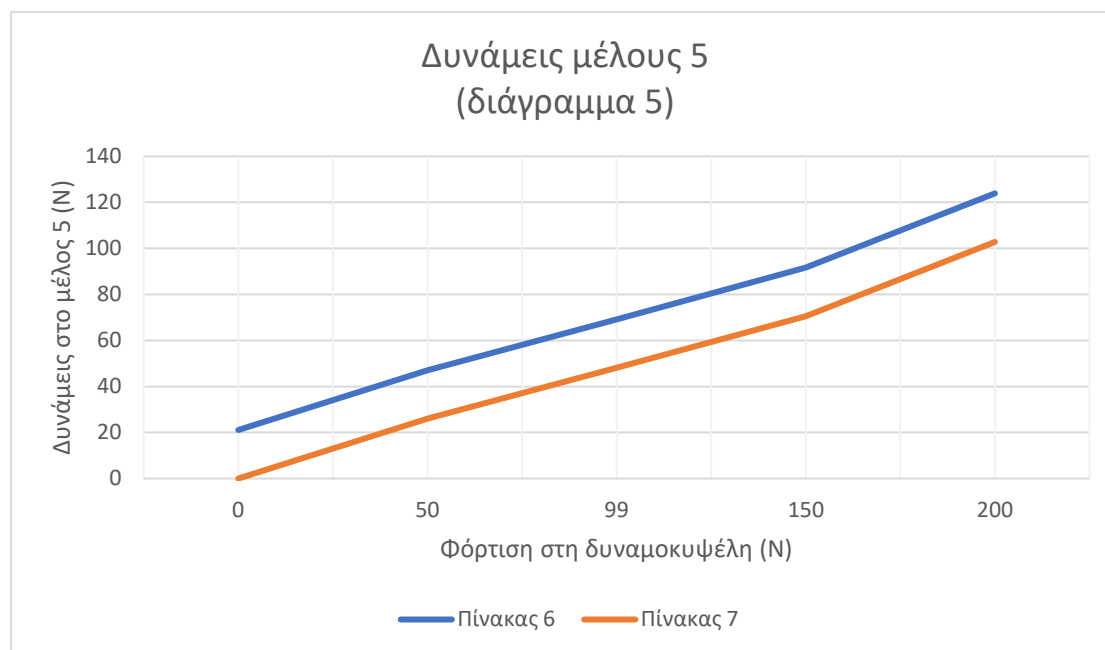
Ράβδος	Πειραματική δύναμη στο ισοστατικό δικτύωμα (N)	Πειραματική δύναμη στο υπερστατικό δικτύωμα (N)
1	221,3	319,4
2	-220,6	-123,2
3	-231,8	-227,2
4	-449,4	-332,4
5	5,4	102,8
6	-	-131,0
7	317,3	-324,1
8	307,5	183,0

Στο διάγραμμα 4 που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή της δύναμης που αναπτύσσεται στο μέλος 8, σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 6 και του Πίνακα 7, ως προς τη δύναμη που ασκείται στη δυναμοκυψέλη.



Οι τιμές των δυνάμεων του Πίνακα 6 περιέχουν τη τιμή της προκαταρκτικής φόρτισης (100N) στη ράβδο 7, από την αφαίρεση της οποίας έχει προκύψει ο Πίνακας 7 (πραγματικές δυνάμεις). Η δομή του παραπάνω διαγράμματος έχει προκύψει με την ίδια λογική του διαγράμματος 1. Οι γραφικές παραστάσεις έχουν την ίδια μορφή, με τη διαφορά ότι η γραφική του πίνακα 6 παρουσιάζει μια σταθερή ανύψωση – ίση με τη τιμή της προφόρτισης – σε κάθε δύναμη του μέλους 8 που προκύπτει κατά την αύξηση του φορτίου στη δυναμοκυψέλη.

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για το μέλος 5 του δικτυώματος, στο διάγραμμα 5.



Η λογική του διαγράμματος 5 παραμένει η ίδια με αυτή των διαγραμμάτων 1,2 και 4. Πρέπει να σημειωθεί ότι το μέλος 5 του δικτυώματος, όταν αυτό ήταν ισοστατικό, θεωρητικά δεν είχε καμία φόρτιση και στη πράξη εμφάνιζε πολύ μικρές τιμές δυνάμεων. Με την εναλλαγή του δικτυώματος από ισοστατικό σε υπερτασικό, λόγω της ανακατανομής των δυνάμεων που αυτό συνεπάγεται, το μέλος 5 αποκτά πολύ μεγαλύτερη φόρτιση κατά τη διαδικασία αύξησης του φορτίου που ασκείται στη ράβδο 7.

Στον Πίνακα 8 φαίνονται οι μεταβολές στις δυνάμεις των μελών (για φόρτιση 200N στη ράβδο 7) που οφείλονται στην αλλαγή του δικτυώματος από ισοστατικό σε υπερτασικό. Συγκεκριμένα:

- Η δύναμη μέλους 1 αυξήθηκε αρκετά στο υπερστατικό δικτύωμα, κατά 98,1N. Και στις δύο περιπτώσεις, η δύναμη ήταν εφελκυστική.
- Η δύναμη μέλους 2 μειώθηκε σημαντικά στο υπερστατικό δικτύωμα, κατά 97,4N. Και στις δύο περιπτώσεις, η δύναμη ήταν θλιπτική.
- Η τιμή της δύναμης μέλους 3 παρουσίασε μικρή μείωση στο υπερστατικό δικτύωμα, της τάξεως των 4,6N. Και στις δύο περιπτώσεις η δύναμη ασκείται θλιπτικά.
- Στο μέλος 4 η δύναμη στο υπερστατικό δικτύωμα είναι σημαντικά μειωμένη σε σχέση με το ισοστατικό. Παρουσιάζει διαφορά 116,8N, ενώ και στις δύο περιπτώσεις δρα θλιπτικά.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει η δύναμη μέλους 5 του δικτυώματος, η οποία πριν την εισαγωγή του μέλους 6 (ισοστατικό δικτύωμα) είναι

πρακτικά αφόρτιστο (5,4N). Μετά την εισαγωγή του μέλους 6 (υπερστατικό δικτύωμα) η τιμή της δύναμης μέλους 5 αυξήθηκε στα 102,8N .

- Η δύναμη μέλους 7 παρουσίασε μικρή αύξηση στο υπερστατικό δικτύωμα κατά 6,8N. Πρέπει να σημειωθεί ότι στο ισοστατικό δικτύωμα η δύναμη στο μέλος 7 το καταπονούσε εφελκυστικά, ενώ στο υπερστατικό ασκείται θλιπτικά.
- Η δύναμη μέλους 8 μειώθηκε σημαντικά κατά τη μετατροπή του δικτύωματος σε υπερστατικό (μείωση κατά 124,5N). Και στις δυο περιπτώσεις, η δύναμη ήταν εφελκυστική.

Συμπεράσματα

Στο παραπάνω πείραμα δόθηκε έμφαση στη συμπεριφορά ενός υπερστατικού δικτύωματος σε σχέση με το αντίστοιχο ισοστατικό που μελετήθηκε στο πείραμα 1, όσον αφορά την κατανομή των εσωτερικών του φορτίων. Παρατηρήθηκε άμεσα η αλλαγή στη δύναμη κάθε μέλους κατά την μετατροπή του δικτύωματος σε υπερστατικό , τόσο ως προς το μέτρο όσο και ως προς το είδος (εφελκυστική – θλιπτική). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της ανακατανομής των εσωτερικών φορτίων αποτελεί η περίπτωση της ράβδου 5, η οποία από πρακτικά αφόρτιστη (ισοστατικό) αποκτά φορτίο της τάξεως των 100N (υπερστατικό).

Με τη μετατροπή του δικτύωματος σε υπερστατικό αυξάνεται η αντοχή του κατά την επιβολή φορτίων που πιθανόν θα οδηγούσαν το αντίστοιχο ισοστατικό σε κατάρρευση. Μαζί με την αύξηση της υπερστατικότητας μιας κατασκευής αυξάνεται και το οικονομικό κόστος που απαιτεί η δόμησή της. Συνεπώς ,σκόπιμη είναι η μελέτη του συντελεστή ασφαλείας που προσδίδεται στην εν λόγω κατασκευή με την προσθήκη επιπλέον μελών, ώστε να επιτευχθούν όσο καλύτερα αποτελέσματα γίνεται με την ελάχιστη καταβολή χρόνου, κόπου και χρημάτων.

Όσον αφορά το δικτύωμα του πειράματος 2, η εισαγωγή της ράβδου 6 εξυπηρετεί σίγουρα την αύξηση της αντοχής του δικτύωματος σε μεγαλύτερες καταπονήσεις. Ωστόσο, απαιτείται εκτενέστερη έρευνα για να βρεθεί το κατάλληλο σημείο τοποθέτησης του επιπλέον μέλους στο δικτύωμα ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη υπερστατικότητα.