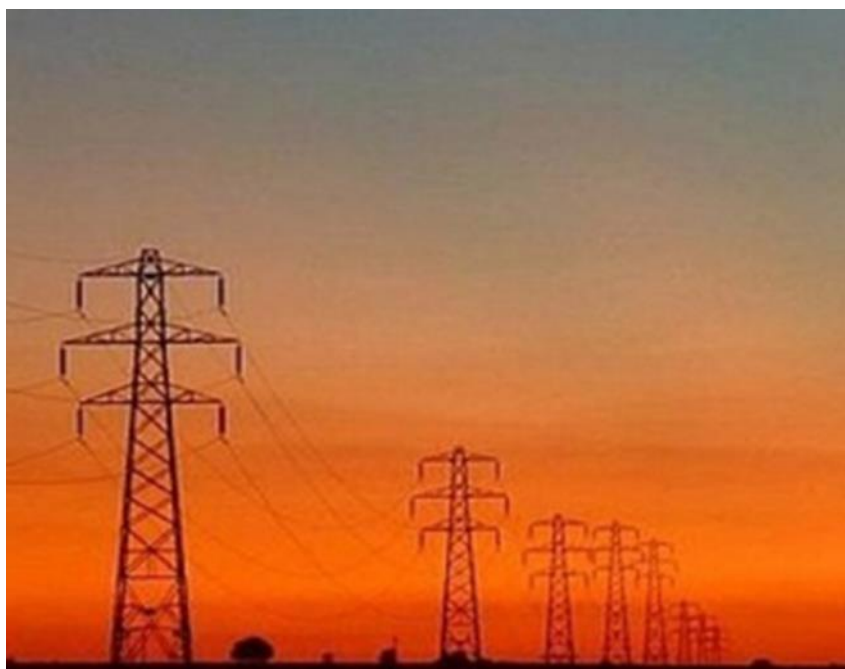




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Σχεδιασμός Μεταλλικού Πυλώνα  
Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας**



**Παναγιώτης Φ. Στεφάνου**

Επιβλέπων: Τάσος Αβραάμ

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

ΕΜΚ ΔΕ 2019/21



Στεφάνου Φ. Π. (2019)

Σχεδιασμός Μεταλλικού Πυλώνα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2019/21

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα

Stefanou F. P. (2019)

Design of a Steel Electric Energy Transmission Tower

Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2019/21

Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens



## Ευχαριστίες

---

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της. Συγκεκριμένα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Τάσο Αβραάμ, ο οποίος συνεργάστηκε μαζί μου και με καθηδηγούσε σε όλη τη πορεία της. Τέλος, ευχαριστώ την οικογένειά μου, όπως και τους φίλους μου που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και συνεχίζουν να στηρίζουν κάθε προσπάθειά μου.



## Περίληψη

Στην διπλωματική εργασία αναλύεται και διαστασιολογείται ένας δικτυωτός πυλώνας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για γραμμή μεταφοράς τάσης 150 kV. Η απόκλιση του από την ευθυγραμμία είναι μικρή, ενώ πρόκειται για γραμμή μεταφοράς διπλού κυκλώματος. Ο πυλώνας αποτελείται μόνο από γωνιακές διατομές. Συνολικά υπάρχουν τρεις γέφυρες, καθεμία από τις οποίες φέρει στου κόμβους τις τα καλώδια μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στην κορυφή ο πυλώνας φέρει καλώδιο προστασίας.

Αρχικά, αναφέρονται γενικά στοιχεία για τους πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ακολουθεί η παρουσίαση του φορέα. Η προσομοίωση του φορέα γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού Sofistik. Όλα τα στοιχεία της κατασκευής αποτελούνται από χάλυβα ποιότητας S355 και μέτρο ελαστικότητας  $E=210\text{Gpa}$ .

Στη συνέχεια υπολογίζονται τα φορτία της κατασκευής. Οι δράσεις χωρίζονται σε μόνιμες, σε μεταβλητές και σε τυχηματικές. Στις μόνιμες δράσεις συμπεριλαμβάνονται τα φορτία των αγωγών μεταφοράς ενέργειας που ασκούνται συγκεντρωμένα στους κόμβους των γεφυρών, όπως και τα φορτία του καλωδίου προστασίας που ασκείται στη κορυφή του πυλώνα. Στις μεταβλητές δράσεις συμπεριλαμβάνεται ο άνεμος, ο οποίος αποτελεί τη κυρίαρχη φόρτιση, ενώ συνδυάζεται και με την ύπαρξη παγετού περιμετρικά των διατομών με σταθερό πάχος, καθώς και το φορτίο του χιονιού, το οποίο υπολογίζεται ως κατανεμημένο στα στοιχεία του πυλώνα. Στις τυχηματικές δράσεις συμπεριλαμβάνεται το φορτίο του σπασμένου αγωγού, το οποίο προέκυψε από την αφαίρεση ενός αγωγού από έναν κόμβο της δεύτερης γέφυρας. Ο υπολογισμός των φορτίων κλείνει με τους συνδυασμούς φορτίσεων σε Ο.Κ.Α και Ο.Κ.Λ.

Στο επόμενο κεφάλαιο πραγματοποιείται ανάλυση και διαστασιολόγηση του φορέα κάνοντας έλεγχο σε αξονικό εφελκυσμό, σε αξονική θλίψη, καθώς και σε καμπτικό λυγισμό. Γίνεται ακόμη έλεγχος βελών στην οριζόντια και στη κατακόρυφη διεύθυνση, όπως και έλεγχος συνδέσεων ορισμένων μελών και στο τέλος του κεφαλαίου παρουσιάζονται τα αποτελέσματά του.

Τέλος, πραγματοποιείται εναλλακτικός σχεδιασμός πυλώνα, ο οποίος αυτή τη φορά αποτελείται μόνο από κυκλικές διατομές. Συγκρίνεται το συνολικό βάρος των 2 πυλώνων, η ροπή που αναπτύσσεται στη βάση τους κατά τους άξονες  $x$  και  $y$ , το ποσοστό αξιοποίησης των διατομών τους, όπως και τα φορτία του ανέμου καθ' ύψος του.





## **Abstract**

The thesis aims to analyze and determine the dimensions of a transmission tower for 150 kV transmission line. The tower run the straight line route as the angle deviation is too small, and the transmission line is a double circuit transmission line. The tower has three cross arms, which are extended to hold the conductors and lines with spacing that prevents contact. At the top(peak) there is protective cable.

The electricity transmission towers functions and structure parts are introduced, following by an extended presentation of the operator. The simulation of the vector is done using the Sofistik software. All components are made of S355 grade steel and  $E= 210$  GPa modulus.

The general information about the transmission tower is followed by structural analysis. It became necessary to determine the loads the tower must support. There are three types of loads that the tower must encounter in the design. The first type of loads are dead loads that consist of the tower's weight and the weights of the conductors which are permanently attached to the structure. The second type of loads are live or variable loads which vary in their magnitude and location. In this analysis these are the wind loads, which was considered as basic live load, and snow loads. The third type is random loads which here is the load of the broken pipe, who resulted from the removal of a pipe from a junction of the second cross arm. In order for the structure to remain reliable we satisfied all the general building code and design code's requirements. We used the codes varieties of load combinations together with load factors for each load type to ensure the safety of the structure under different maximum expected loading scenarios.

In the next chapter, the tower is analyzed and dimensioned by performing tension test, compression test and flexural buckling test. The results of the tests are discussed.

In conclusion, an alternative tower design is demonstrated consisting only of circular cross-sections. The weight of the two towers, the torque developed at their base along the x and y axes, the cross-section's utilisation level and the wind loads are being compared.



## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	iii
Abstract .....	v
Πίνακας περιεχομένων .....	vii
Κατάλογος Πινάκων.....	ix
Κατάλογος Σχημάτων .....	xi
Κατάλογος Εικόνων .....	xiii
1 Εισαγωγή.....	15
1.1 Σκοπός – Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	15
1.2 Γενικά στοιχεία για τους πυλώνες .....	15
1.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία .....	15
1.2.2 Πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας .....	16
1.2.3 Μονωτήρες.....	16
1.2.4 Αγωγοί μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	18
1.3 Παρουσίαση φορέα.....	19
1.3.1 Προσομοίωση πυλώνα .....	23
1.3.2 Προσομοίωση γραμμής μεταφοράς ενέργειας .....	23
2 Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων .....	25
2.1 Γενικά .....	25
2.2 Μόνιμες δράσεις.....	25
2.3 Μεταβλητές δράσεις.....	27
2.3.1 Φορτία ανέμου .....	27
2.3.2 Συντελεστής δύναμης $c_f$ .....	29
2.3.3 Βασική ταχύτητα ανέμου .....	30
2.3.4 Συντελεστές τραχύτητας $c_r(z)$ .....	32
2.3.5 Συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης $c_t(z)$ .....	34
2.4 Φορτία χιονιού.....	38

2.5	Φορτία σπασμένου αγωγού .....	40
2.6	Συνδυασμοί φορτίσεων .....	42
3	Ανάλυση και διαστασιολόγηση φορέα .....	45
3.1	Έλεγχοι .....	45
3.1.1	Έλεγχος σε αξονικό εφελκυσμό .....	45
3.1.2	Αντοχή σε αξονική θλίψη .....	46
3.1.3	Έλεγχος σε καμπτικό λυγισμό για μέλος υπό θλίψη .....	49
3.2	Έλεγχος βελών .....	53
3.3	Αποτελέσματα .....	56
4	Συνδέσεις .....	63
4.1	Έλεγχος συνδέσεων .....	63
5	Εναλλακτικός σχεδιασμός πυλώνα .....	69
5.1	Φορτία ανέμου .....	69
5.2	Φορτία χιονιού .....	72
5.3	Αποτελέσματα .....	73
6	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	79
6.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας .....	79
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....	79
	Βιβλιογραφία .....	81

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Τύποι πυλώνων για κάθε κατηγορία γραμμών .....	19
Πίνακας 2.1 Φορτία στις διευθύνσεις Y και Z.....	26
Πίνακας 2.2 Κατηγορίες εδάφους και παράμετροι εδάφους.....	34
Πίνακας 2.3 Φορτία χιονιού για γωνιακές διατομές .....	39
Πίνακας 2.4 Δυνάμεις στου κόμβους της δεύτερης γέφυρας λόγω σπασμένου αγωγού .....	41
Πίνακας 2.5 Κατηγορίες αξιοπιστίας για πύργους.....	43
Πίνακας 2.6 Συντελεστές ασφάλειας των δράσεων στην Ο.Κ.Α.....	43
Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων στους ορθοστάτες και αντίστοιχοι έλεγχοι	47
Πίνακας 3.2 Αξονικές δυνάμεις και αντοχή μελών .....	48
Πίνακας 3.3 Συντελεστής k για ορθοστάτες .....	50
Πίνακας 3.4 Συντελεστής k για συνδέσμους δυσκαμψίας .....	50
Πίνακας 3.5 Επιλογή καμπύλης λυγισμού για δεδομένη διατομή .....	52
Πίνακας 3.6 Συντελεστής ατελειών για καμπύλη λυγισμού .....	52
Πίνακας 4.1 Ονομαστικές τιμές ορίων διαρροής και θραύσης χάλυβα EN 1993-1-8 Πίν. 3.1) .....	63
Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά των κοχλιών .....	63



## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Δείκτης πληρότητας $\phi$ καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 0 μοιρών.....	29
Σχήμα 2.2 Δείκτης πληρότητας $\phi$ καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 90 μοιρών.....	29
Σχήμα 2.3 Συντελεστής δύναμης $c_f$ καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 0 μοιρών.....	30
Σχήμα 2.4 Συντελεστής δύναμης $c_f$ καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 90 μοιρών.....	30
Σχήμα 2.5 Μέση ταχύτητα ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα.....	31
Σχήμα 2.6 Συντελεστής τραχύτητας $c_t(z)$ καθ' ύψος του πυλώνα .....	34
Σχήμα 2.7 Κατανομή της πιέσεως του ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα .....	36
Σχήμα 2.8 Δυνάμεις ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 0 μοιρών.....	36
Σχήμα 2.9 Δυνάμεις ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 90 μοιρών.....	37
Σχήμα 3.1 Καμπύλες λυγισμού .....	53





## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Πυλώνες μεταφοράς ενέργειας διπλού κυκλώματος με τρεις γέφυρες .....	16
Εικόνα 1.2 Σκαρίφημα μονωτήρα αναρτήσεως .....	17
Εικόνα 1.3 Σκαρίφημα μονωτήρα στηρίξεως .....	17
Εικόνα 1.4 Σκαρίφημα μονωτήρα τύπου Longrod.....	17
Εικόνα 1.5 Σκαρίφημα μονωτήρα διέλευσης και εικόνα μονωτήρα τύπου Shackle .....	18
Εικόνα 1.6 Σύνθετοι αγωγοί αλουμινίου με χαλύβδινη ενίσχυση .....	18
Εικόνα 1.7 Διαμήκης και εγκάρσια όψη πυλώνα.....	20
Εικόνα 1.8 Εγκάρσια όψη γεφυρών από το περιβάλλον του Sofistik.....	21
Εικόνα 1.9 Κάτοψη γέφυρας από το περιβάλλον του Sofistik .....	21
Εικόνα 1.10 Πυλώνας σε 3D από το περιβάλλον του Sofistik .....	22
Εικόνα 1.11 Κάτοψη πυλώνα από το περιβάλλον του Sofistik .....	23
Εικόνα 2.1 Φορτία αγωγών και καλωδίων προστασίας από το περιβάλλον του Sofistik.....	26
Εικόνα 2.2 Δικτυωτή κατασκευή ή ικρίωμα .....	28
Εικόνα 2.3 Κατηγορίες εδάφους .....	33
Εικόνα 2.4 Φορτία ανέμου από το περιβάλλον του Sofistik.....	38
Εικόνα 2.5 Φορτία χιονιού από το περιβάλλον του Sofistik.....	40
Εικόνα 2.6 Φορτία καλωδίων στην περίπτωση σπασμένου αγωγού από το περιβάλλον του Sofistik .....	42
Εικόνα 3.1 Κόμβοι γεφυρών .....	45
Εικόνα 3.2 Σύνδεσμοι δυσκαμψίας που ελέγχθηκαν .....	48
Εικόνα 3.4 Αξονικές δυνάμεις στα μέλη του πυλώνα σε όψη στο περιβάλλον του Sofistik (αριστερά).....	51
Εικόνα 3.5 Αξονικές δυνάμεις στα μέλη του πυλώνα σε εγκάρσια όψη (δεξιά).....	51
Εικόνα 3.6 Μέγιστα κατακόρυφα βέλη στους κόμβους των γεφυρών .....	54
Εικόνα 3.7 Μέγιστα οριζόντια βέλη κατά τον άξονα των x από το περιβάλλον του Sofistik	55
Εικόνα 4.1 Σημεία ελέγχου συνδέσεων .....	64



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1 Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός – Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

---

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση και η διαστασιολόγηση των στοιχείων του δικτύωματος ενός πυλώνα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας γωνιακών διατομών και ο εναλλακτικός σχεδιασμός ενός πυλώνα κυκλικών διατομών. Η ανάλυση και η προσομοίωση του φορέα έγινε με το λογισμικό Sofistik. Ο υπολογισμός των φορτίων έγινε σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 1.

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι και η εμβάθυνση των γνώσεων που αφορούν την ανάλυση και τη διαστασιολόγηση δικτυωτών κατασκευών με χρήση προγράμματος Ηλεκτρονικού Υπολογιστή, όπως είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τον εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, το Sofistik.

### 1.2 Γενικά στοιχεία για τους πυλώνες

---

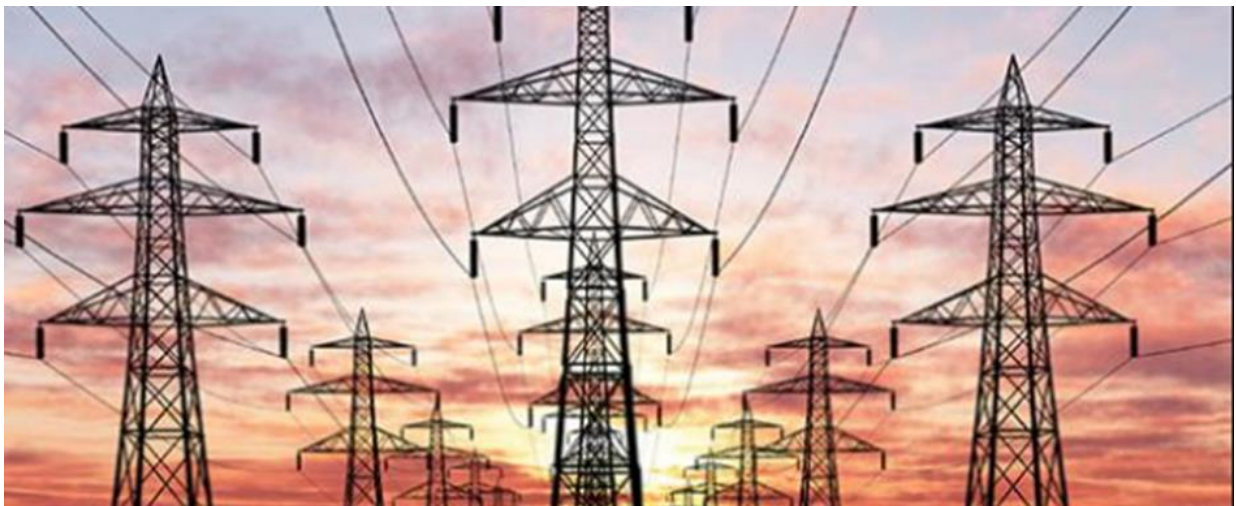
#### 1.2.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται υπό υψηλή τάση(150kV),μέσω του δικτύου υψηλής και υπερ-υψηλής τάσης για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Οι γραμμές μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση (220/380V),αλλά φθάνουν σε ορισμένα σημεία ,τους υποσταθμούς μεταφοράς όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση, δηλαδή στα 20kV του δικτύου. Οι υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο του ηλεκτρισμού. Από αυτά τα σημεία όπου βρίσκονται οι υποσταθμοί μεταφοράς εκκινούν οι γραμμές διανομής που καταλήγουν στους υποσταθμούς διανομής όπου γίνεται υποβιβασμός της μέσης τάσης στη χαμηλή τάση που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι τελικοί καταναλωτές. Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι:

- Πυλώνες ή πύργοι στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών
- Μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται οι αγωγοί γραμμών στους πυλώνες
- Αγωγοί, κυρίως αποτελούμενοι από χαλκό και αλουμίνιο

### **1.2.2 Πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας**

Οι πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως χαλύβδινα στατικά δικτυώματα. Τα δικτυώματα των όψεων των πύργων είναι συμμετρικά. Οι οριζόντιες τομές των πύργων είναι τετράγωνα. Η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών πυλώνων εξαρτάται από το επιτρεπόμενο κατακόρυφο βέλος του τόξου του αναρτημένου αγωγού και για χαλύβδινους πυλώνες γραμμών υψηλής τάσεως η απόσταση μεταξύ δύο ποταμών, κοιλάδων και υπερθαλάσσιων ζωνών οι αποστάσεις αυτές μπορεί να ανέλθουν και 1200 m. Όσο μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα τόσο και πιο ισχυρός θα πρέπει να είναι ο πυλώνας ώστε να αναλάβει τα αυξημένα φορτία. Το βάρος του κάθε πυλώνα καθορίζεται από το ύψος του, το υλικό κατασκευής, τη γεωμετρία των διατομών που απαρτίζεται, τη θέση του (γωνιακοί, τερματικοί, ευθύγραμμης πορείας) καθώς και από τη γεωμετρία της κατασκευής. Τα δικτυώματα των όψεων των πύργων είναι συμμετρικά. Οι οριζόντιες τομές των πύργων είναι τετράγωνα.

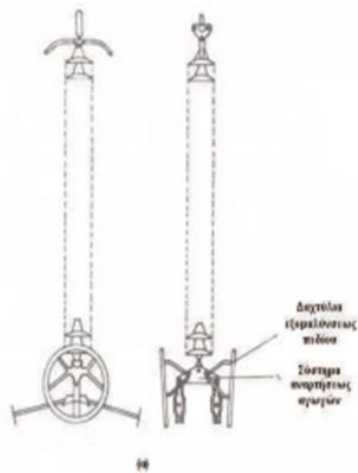


Εικόνα 1.1 Πυλώνες μεταφοράς ενέργειας διπλού κυκλώματος με τρεις γέφυρες

### **1.2.3 Μονωτήρες**

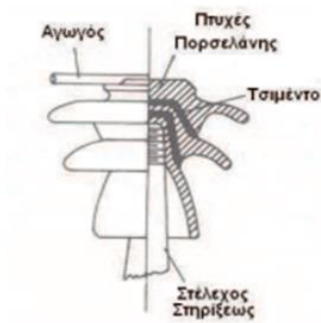
Οι μονωτήρες των εναέριων γραμμών χρησιμοποιούνται για την ανάρτηση των αγωγών στους πυλώνες και ουσιαστικά για να μονώσουν ηλεκτρικά τα μεταλλικά μέρη των αγωγών στις συνδέσεις τους. Μία τέτοια μονάδα μονωτήρων αποτελείται από σειρά μονωτήρων (αλυσίδες μονωτήρων) και όσο ανεβαίνουν τα επίπεδα της τάσης, τόσο προστίθενται στη σειρά κι άλλοι μονωτήρες. Χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι και αυτό εξαρτάται από το επίπεδο της τάσης αλλά και από τις απαιτήσεις των μηχανικών τάσεων. Οι τύποι μονωτήρων που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι εξής:

- Μονωτήρας αναρτήσεως



Εικόνα 1.2 Σκαρίφημα μονωτήρα αναρτήσεως

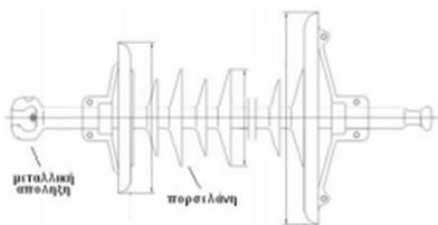
- Μονωτήρας στηρίξεως (ή τύπου στελέχους)



**Τυπικός Μονωτήρας Στηρίξεως**

Εικόνα 1.3 Σκαρίφημα μονωτήρα στηρίξεως

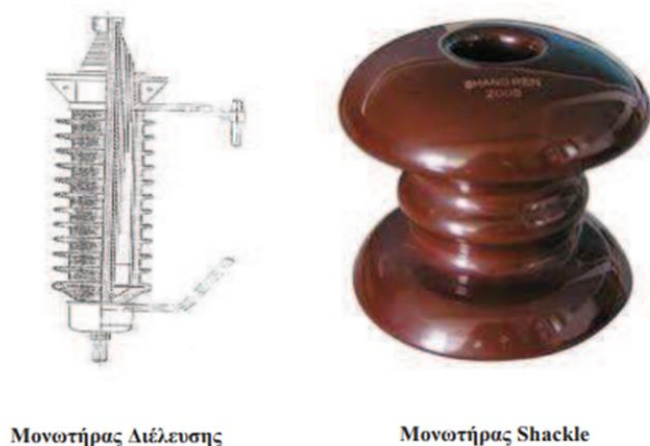
- Μονωτήρες τύπου Longrod



**Μονωτήρας Longrod 1**

Εικόνα 1.4 Σκαρίφημα μονωτήρα τύπου Longrod

- Μονωτήρες διέλευσης και μονωτήρες τύπου shackle



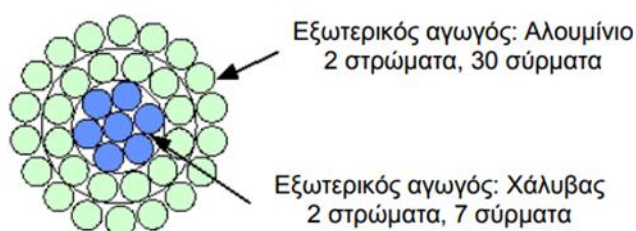
Μονωτήρας Διέλευσης

Μονωτήρας Shackle

Εικόνα 1.5 Σκαρίφημα μονωτήρα διέλευσης και εικόνα μονωτήρα τύπου Shackle

#### 1.2.4 Αγωγοί μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Οι αγωγοί αποτελούν το μέσο μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με την κατασκευή τους διακρίνονται σε μονόκλωτους (από ένα σύρμα) και σε πολύκλωνους (από περισσότερα του ενός σύρματος). αγωγοί μεταφοράς ενέργειας αποτελούνται συνήθως από κλώνους αλουμινίου ενισχυμένους με κλώνους χάλυβα στον πυρήνα.



Εικόνα 1.6 Σύνθετοι αγωγοί αλουμινίου με χαλύβδινη ενίσχυση

Οι γραμμές μεταφοράς ενέργειας διακρίνονται σε γραμμές ελαφρύ και βαρύ τύπου, όπως επίσης και σε απλού κυκλώματος, διπλού κυκλώματος και πολλαπλών κυκλωμάτων. Ανάλογα με τη διεύθυνση της γραμμής μεταφοράς ενέργειας, οι πυλώνες διακρίνονται σε πυλώνες ευθυγραμμίας, μικρής γωνίας, γωνίας 45 μοιρών και σε πυλώνες 75 μοιρών ή τέρματος. Στο υλικό των πύργων περιλαμβάνονται και τα εξαρτήματα πρόσδεσης των εξαρτημάτων γραμμής, πάνω στον πύργο, όπως δίχαλα, επιμηκύνσεις πρόσδεσης αλυσίδων μονωτήρων, στελέχη σχήματος U κλπ. Τα παραπάνω εξαρτήματα πύργων κατασκευάζονται με χάλυβα υψηλής

αντοχής και έχουν ανοίγματα με κατάλληλες ακτίνες καμπυλότητας, ώστε να φέρουν χωρίς τριβές τα εξαρτήματα γραμμής.

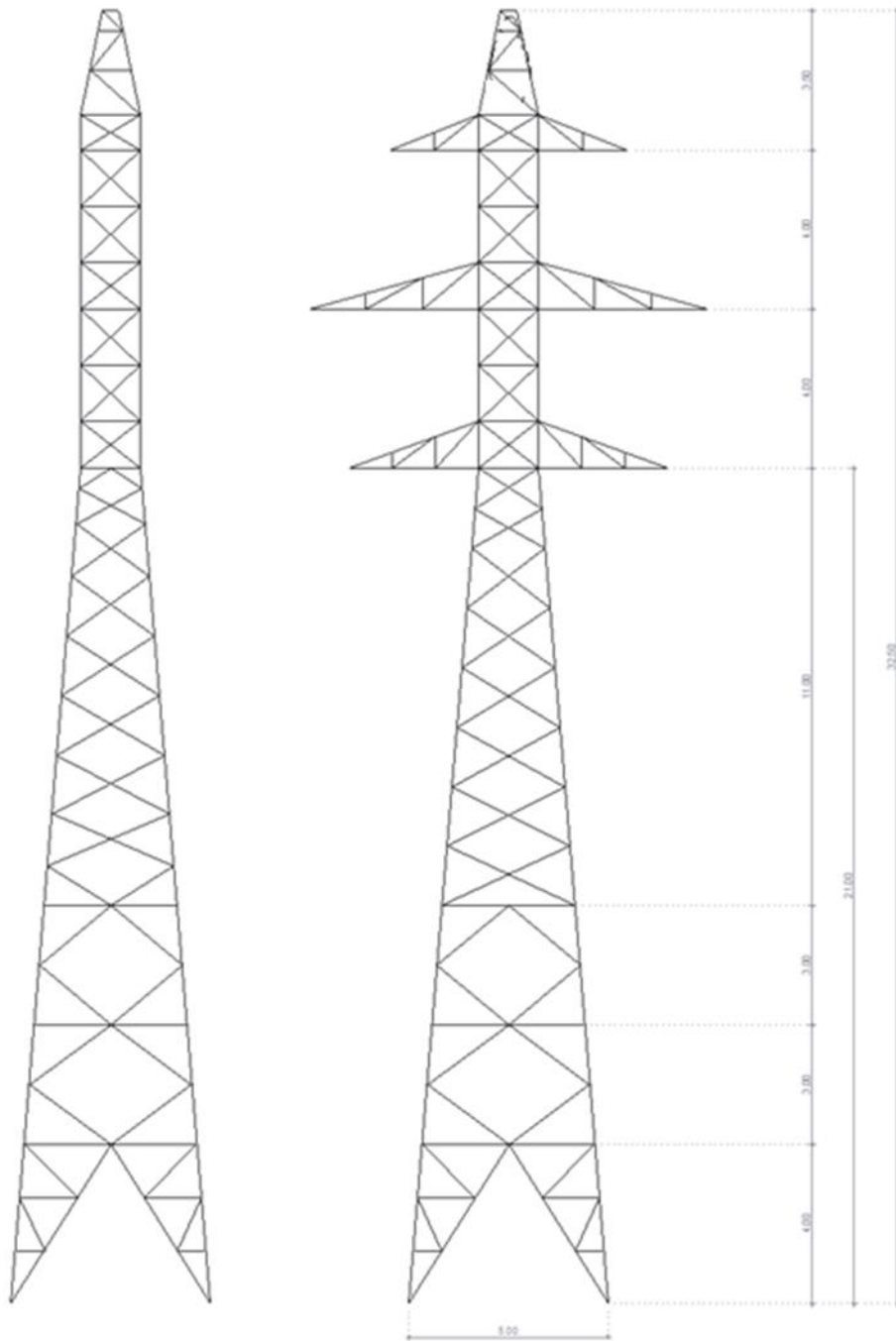
Πίνακας 1.1 Τύποι πυλώνων για κάθε κατηγορία γραμμών

Κατηγορία	E	B	2B
Τύπος πύργου	Απλό κύκλωμα ελαφρού τύπου	Απλό κύκλωμα βαρέως τύπου	Διπλό κύκλωμα βαρέως τύπου
Ευθυγραμμίας	S2	S3	S4
Μικρής γωνίας	R2	R3	R4
Γωνίας 45 μοιρών	T2	T3	T4
Γωνίας 75 μοιρών ή τέρματος	Z2	Z3	Z4

### 1.3 Παρουσίαση φορέα

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας μελετώνται δικτυωτοί μεταλλικοί πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για γραμμή μεταφοράς τάσης 150kV διπλού κυκλώματος. Το συνολικό ύψος των πυλώνων είναι 32,5 m και η βάση τους έχει τετραγωνική κάτοψη 5.0m x 5.0m.

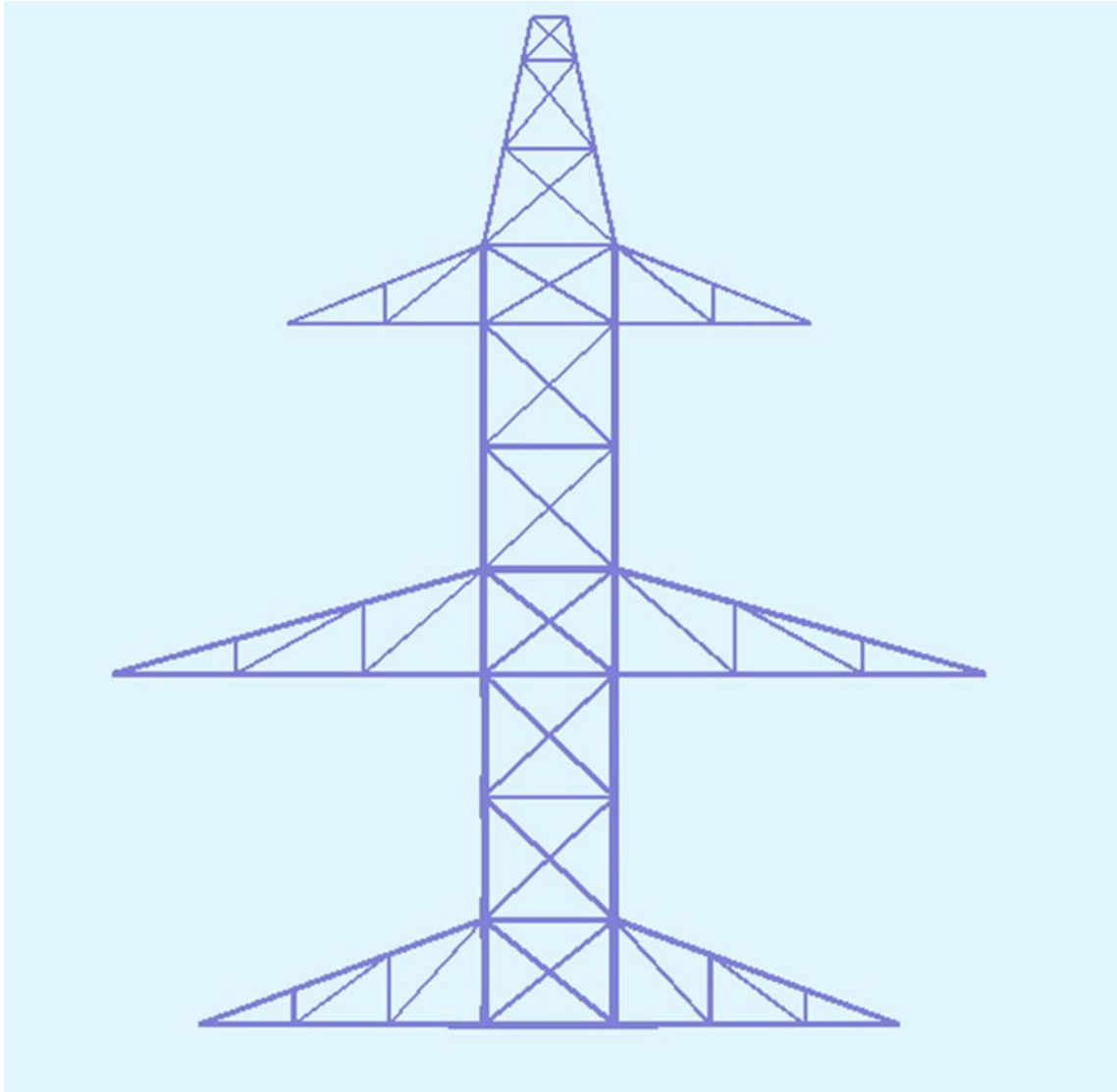
Το κάτω μέρος του πυλώνα ύψους 21m αποτελείται από ορθοστάτες με κλίση 7 μοιρών ως προς το κατακόρυφο άξονα. Το πάνω μέρος του πυλώνα ύψους 11,5m αποτελείται από κατακόρυφους ορθοστάτες ενώ φέρει και τις 3 γέφυρες.



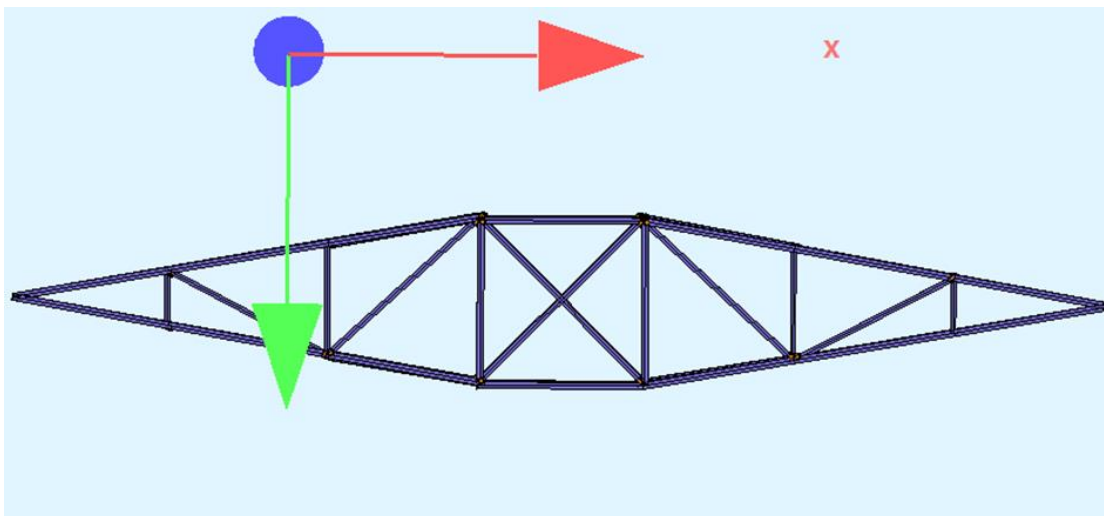
Εικόνα 1.7 Διαμήκης και εγκάρσια όψη πυλώνα

Ο πυλώνας αποτελείται από 3 γέφυρες τριγωνικής κάτοψης στα ύψη 21m,25m και 29m αντίστοιχα.





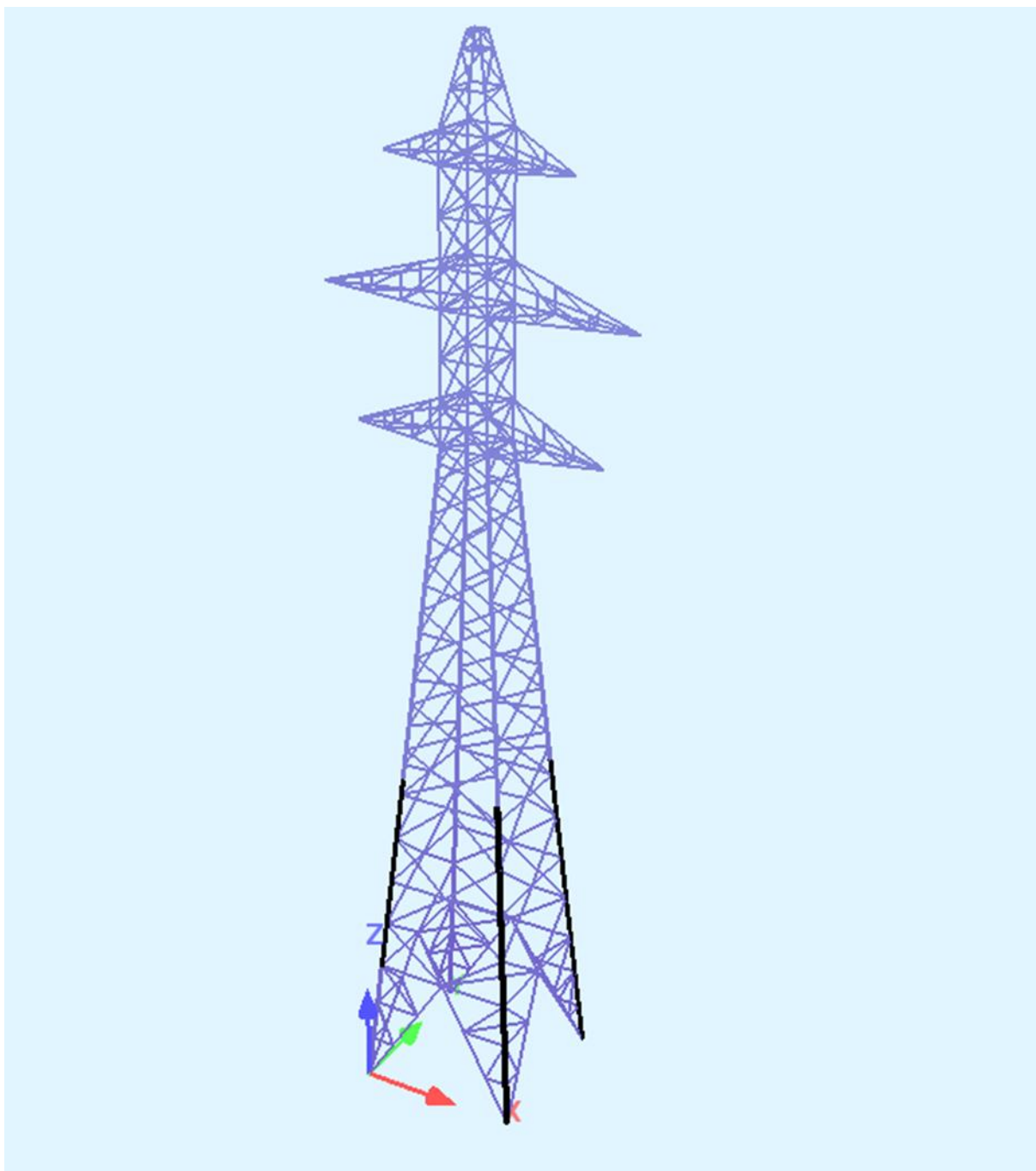
Εικόνα 1.8 Εγκάρσια όψη γεφυρών από το περιβάλλον του Sofistik



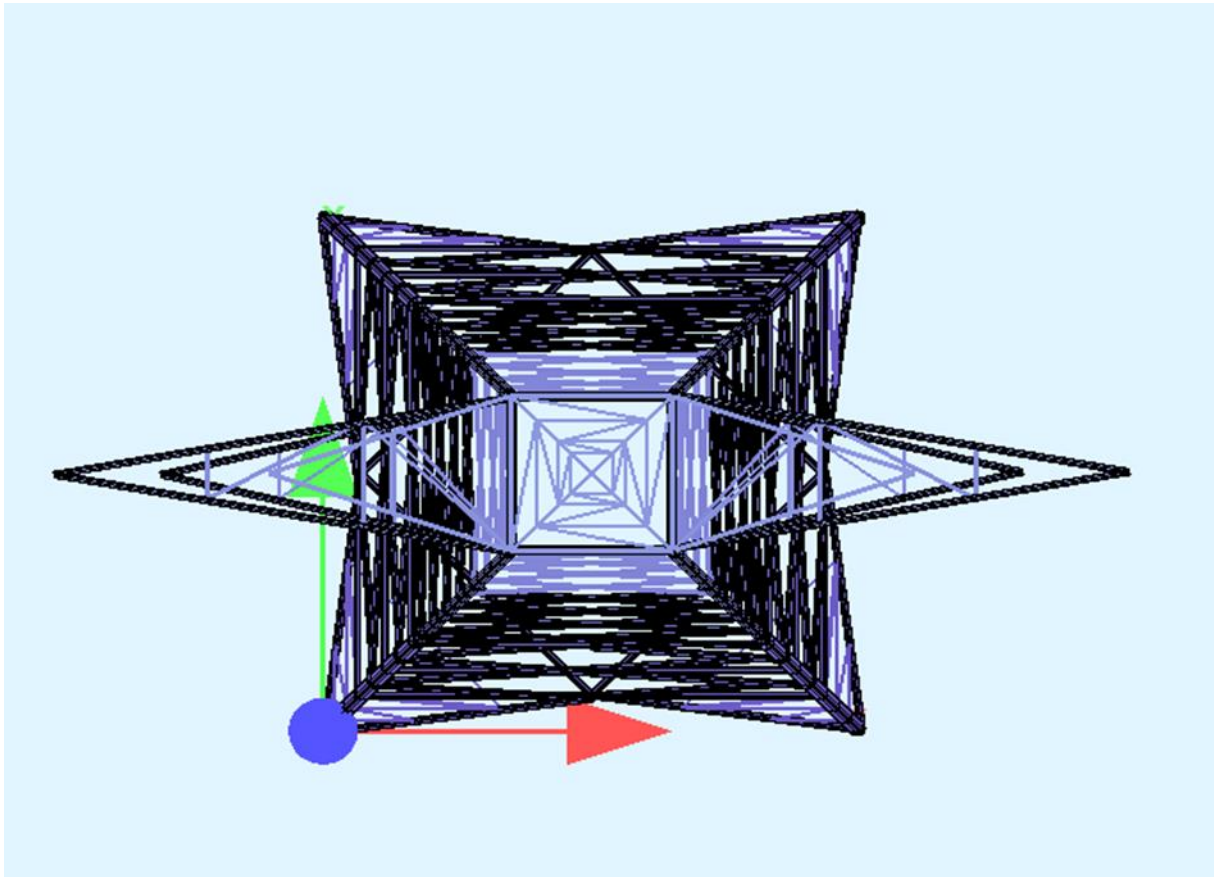
Εικόνα 1.9 Κάτοψη γέφυρας από το περιβάλλον του Sofistik

Στις στάθμες 2,5m και 4m καθώς και στα οριζόντια επίπεδα πάνω και κάτω από κάθε γέφυρα έχουν τοποθετηθεί οριζόντιοι σύνδεσμοι δυσκαμψίας για την ενίσχυση της οριζόντιας δυσκαμψίας του πύλωνα.

Τα μέλη του δικτυωτού φορέα αποτελούνται από γωνιακές διατομές L110x11, L90x9, L80x8, L70x7, L60x6, L50x5, L45x4.5 και L40x4.



Εικόνα 1.10 Πύλωνας σε 3D από το περιβάλλον του Sofistik



Εικόνα 1.11 Κάτοψη πυλώνα από το περιβάλλον του Sofistik

### ***1.3.1 Προσομοίωση πυλώνα***

Η προσομοίωση του φορέα έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού Sofistik. Τα στοιχεία του φορέα προσομοιώθηκαν σαν στοιχεία δοκών-υποστυλωμάτων (beam elements). Όλα τα στοιχεία της κατασκευής αποτελούνται από χάλυβα ποιότητας S355 και μέτρο ελαστικότητας  $E=210\text{Gpa}$ .

### ***1.3.2 Προσομοίωση γραμμής μεταφοράς ενέργειας***

Οι αγωγοί μεταφοράς ενέργειας και τα καλώδια προστασίας έχουν προσομοιωθεί σαν στοιχεία καλωδίων (cable elements).



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2 Φορτία και συνδυασμοί φορτίσεων

#### 2.1 Γενικά

---

Ανάλογα με τη θέση, τη μορφή και τη χρήση του έργου προσδιορίζονται οι δράσεις με τις οποίες ο μελετητής θα αναλύσει το φορέα, ούτως ώστε να προσδιορίσει τα εντατικά και τα παραμορφωσιακά μεγέθη. Οι δράσεις με τις οποίες διαστασιολογήθηκε ο φορέας είναι σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 1 (EN 2005). Οι δράσεις κατατάσσονται ως εξής

Ανάλογα με τη μεταβολή τους ως προς το χρόνο

- -Μόνιμες δράσεις(G)
- Μεταβλητές δράσεις(Q)
- Τυχηματικές δράσεις(A)

Ανάλογα με τη μεταβολή τους ως προς το χώρο

- Σταθερές
- Ελεύθερες

Ανάλογα με την απόκριση του φορέα

- Στατικές
- Δυναμικές

#### 2.2 Μόνιμες δράσεις

---

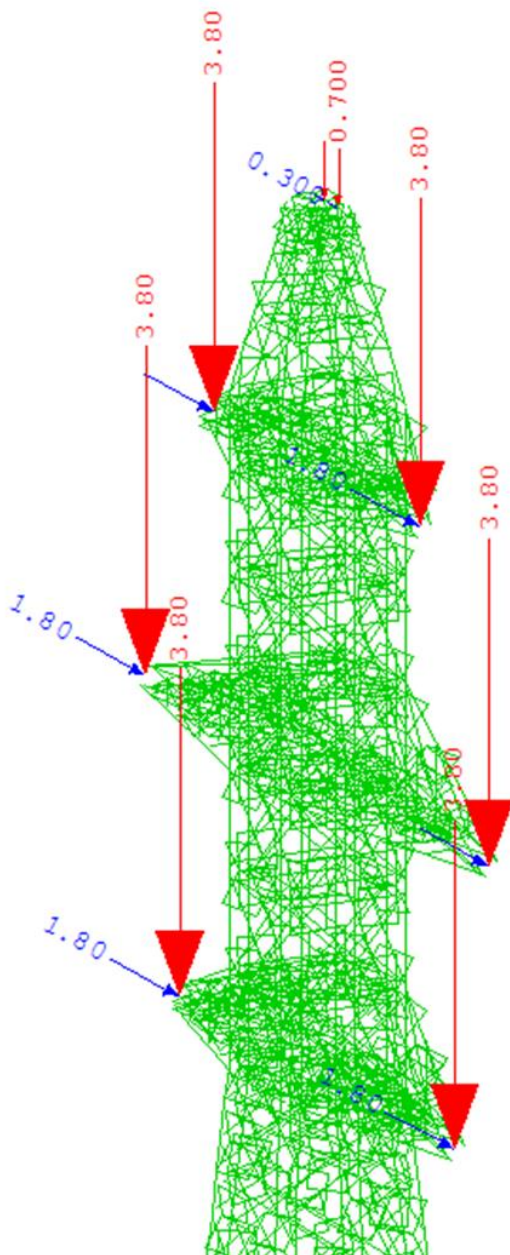
Μόνιμες είναι όλες οι δράσεις των οποίων η τιμή παραμένει σταθερή για μεταβολή του χρόνου. Σε αυτές περιλαμβάνονται τα ίδια βάρη της κατασκευής τόσο των φερόντων στοιχείων όσο και των δευτερευόντων στοιχείων όπως τα καλώδια προστασίας, οι αγωγοί καλωδίων, οι λεπίδες αποκατάστασης της συνέχειας και οι συνδέσεις.

Όσο αφορά το ίδιο βάρος του φορέα υπολογίστηκε για κάθε μέλος του ξεχωριστά ως κατανεμημένο φορτίο και σε διεύθυνση κατά τον άξονα των z(διεύθυνση της βαρύτητας).Το βάρος του κάθε μέλους υπολογίστηκε βάσει του όγκου του και του ειδικού βάρους του υλικού που είναι ίσο με 78,5 kN/m<sup>3</sup>.

Τα φορτία των αγωγών ασκούνται ως συγκεντρωμένα στους κόμβους των γεφυρών όπου διέρχονται, ενώ το φορτίο του καλωδίου προστασίας ασκείται ως συγκεντρωμένο στον ανώτερο κόμβο του πυλώνα. Οι τιμές τους θεωρήθηκαν δεδομένες και παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.1 Φορτία στις διευθύνσεις Y και Z

	Οριζόντια διεύθυνση Y	Κατακόρυφη διεύθυνση Z
Φορτίο αγωγών	1,8 kN	3,8 kN
Φορτίο καλωδίου προστασίας	0,7 kN	0,3 kN



Εικόνα 2.1 Φορτία αγωγών και καλωδίων προστασίας από το περιβάλλον του Sofistik

## 2.3 Μεταβλητές δράσεις

---

### 2.3.1 Φορτία ανέμου

Η συνολική δύναμη του ανέμου η οποία δρα σε μια κατασκευή ενός επιμέρους στοιχείου της, προσδιορίζεται είτε με υπολογισμό δυνάμεων χρησιμοποιώντας τους συντελεστές δύναμης, είτε με υπολογισμό δυνάμεων από τις πιέσεις επί των επιφανειών. Οι δράσεις ανέμου κατατάσσονται στις μεταβλητές καθορισμένες δράσεις. Στους πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας η δράση του ανέμου έχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο και πολλές φορές αποτελεί τη βασική φόρτιση. Θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ταυτόχρονη επιρροή των άλλων δράσεων επί της κατασκευής ( χιόνι, κυκλοφορία, πάγος) που είναι δυνατόν να επιφέρουν αλλαγές στην επιφάνεια αναφοράς ή σε κάποιους συντελεστές.

Ο υπολογισμός των φορτίων του ανέμου λαμβάνεται σύμφωνα με τις διατάξεις και τις μεθόδους του Ευρωκώδικα 1.

Η δράση του ανέμου  $F_w$  που δρα σε μια κατασκευή υπολογίζεται από τη σχέση  $F_w$

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref}$$

Όπου

$c_s c_d$  είναι ο συνδυασμένος δυναμικός συντελεστής

$c_f$  είναι ο συντελεστής δύναμης της κατασκευής ή του στοιχείου της κατασκευής

$q_p(z_e)$  είναι η πίεση ταχύτητας αιχμής σε ύψος αναφοράς  $z_e$

$A_{ref}$  είναι η επιφάνεια αναφοράς της κατασκευής ή του στοιχείου της κατασκευής

Ο συντελεστής δύναμης  $c_f$  για δικτυωτές κατασκευές και ικριώματα δίνεται από τη εξίσωση (2)

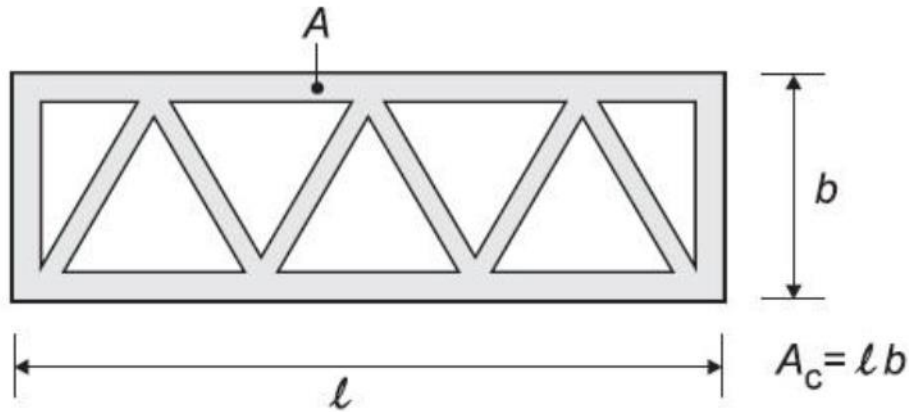
$$c_f = c_{f,0} \cdot \psi \lambda \quad (2)$$

Όπου

$c_{f,0}$  είναι ο συντελεστής δύναμης χωρίς επίδραση άκρων και δίνεται στα σχήματα 6.30 έως 6.32, συναρτήσεων του λόγου πληρότητας  $\phi$  και του αριθμού Reynolds  $Re$ .

$Re$  είναι ο αριθμός Reynolds που προκύπτει για τη μέση διάμετρο του μέλους  $b_i$ .

$\psi \lambda$  είναι ο συντελεστής επίδρασης άκρων συναρτήσεων της λυγηρότητας  $\lambda$  της κατασκευής,  $\lambda = l/d$ , όπου  $l$ =μήκος και  $d$ =πλάτος



Εικόνα 2.2 Δικτυωτή κατασκευή ή ικρίωμα

Ο λόγος πληρότητας  $\phi$  καθορίζεται από τη σχέση:

$$\phi = \frac{A}{A_c}$$

Όπου:

$A$  είναι το άθροισμα της προβαλλόμενης επιφάνειας των μελών και των κομβοελασμάτων,κάθετα προς την όψη:

$$A = \sum b_i \cdot l_i + \sum_k A_{gk}$$

$A_c$  είναι η επιφάνεια που περικλύεται μεταξύ των ακραίων στοιχείων,προβαλλόμενα κάθετα προς την όψη:  $A_c = d \cdot l$

$l, d$  είναι το μήκος και το πλάτος του δικτυώματος

$l_i, b_i$  είναι το μήκος και το πλάτος του μεμονωμένου μέλους  $I$ ,προβαλλόμενου κάθετα στην όψη

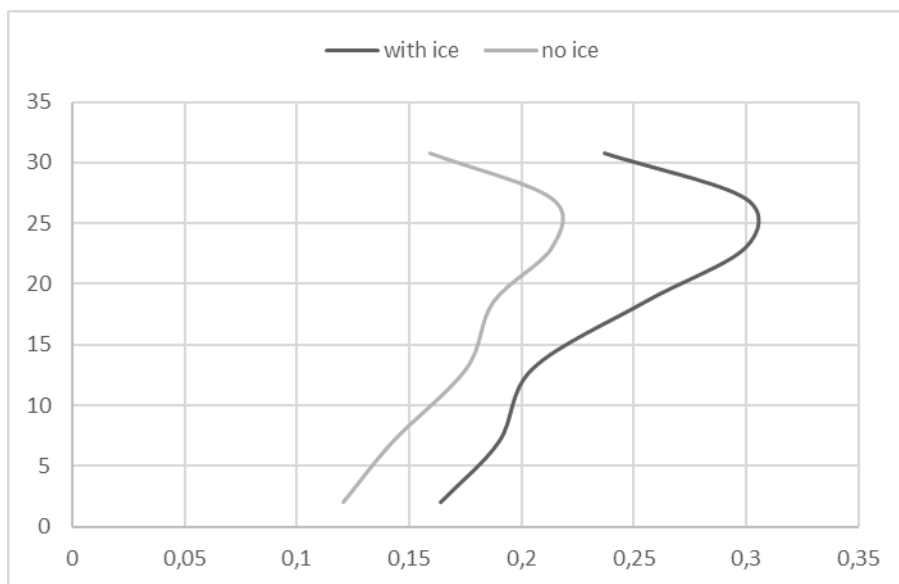
$A_{gk}$  είναι η επιφάνεια του κομβοελάσματος  $k$

Η επιφάνεια αναφοράς  $A_{ref}$  προσδιορίζεται από τη σχέση

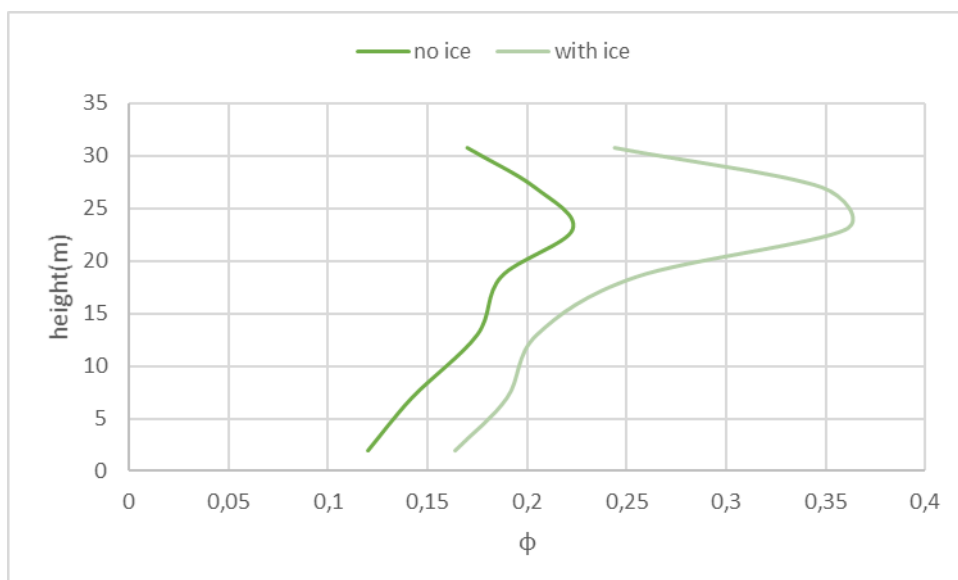
$$A_{ref} = A$$

Το ύψος αναφοράς  $z_e$  είναι ίσο με το ύψος του στοιχείου πάνω από το έδαφος.





Σχήμα 2.1 Δείκτης πληρότητας φ καθ'ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 0 μοιρών



Σχήμα 2.2 Δείκτης πληρότητας φ καθ'ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 90 μοιρών

### 2.3.2 Συντελεστής δύναμης $c_f$

Ο συντελεστής δύναμης δικτυωτών κατασκευών χωρίς την επίδραση άκρων, για γωνιακές διατομές υπολογίζεται από τη σχέση:

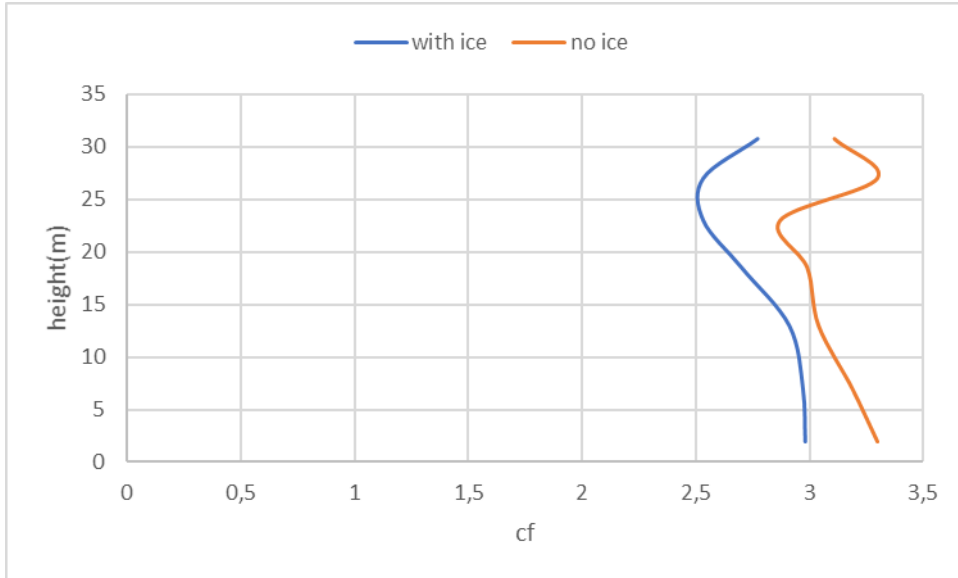
$$c_f = K_\theta \cdot c_{f,s,0} \cdot \frac{As}{\Sigma A}$$

Όπου:

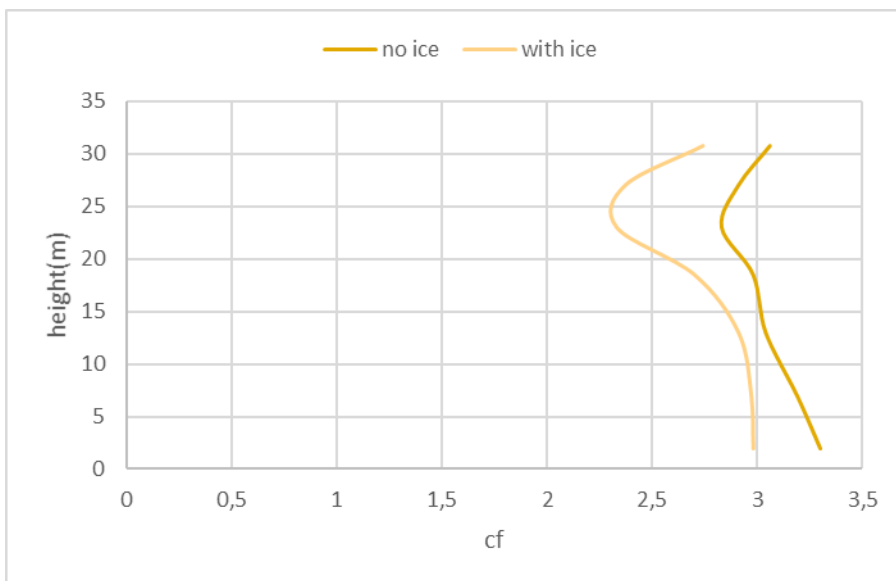
$K_\theta$  είναι ο συντελεστής διεύθυνσης του ανέμου και για διεύθυνση ανέμου 0 και 90 μοιρών λαβένεται ίσος με τη μονάδα, δηλαδή  $K_\theta=1$ .

$$c_{f,s,0} = 1,76 \cdot C_1 \cdot [1 - C_2 \cdot \varphi + \varphi^2]$$

$C_1, C_2$  συντελεστές που λαμβάνονται ίσοι με 2,25 και 1,5 αντίστοιχα για την υπάρχουσα διπλωματική εργασία όπου ο πυλώνας σε κάτοψη είναι τετραγωνικός.



Σχήμα 2.3 Συντελεστής δύναμης  $c_f$  καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 0 μοιρών.



Σχήμα 2.4 Συντελεστής δύναμης  $c_f$  καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 90 μοιρών.

### 2.3.3 Βασική ταχύτητα ανέμου

Η βασική ταχύτητα ανέμου ορίζεται ως συνάρτηση της διεύθυνσης του ανέμου και τις εποχής του έτους, στα 10m πάνω από το έδαφος κατηγορίας II, σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot V_{b,0}$$

Όπου:

$C_{dir}$  είναι ο συντελεστής διεύθυνσης (ίσος με 1)

$C_{season}$  είναι ο συντελεστής εποχής

$v_{b,0}$  είναι η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου, η οποία είναι η χαρακτηριστική μέση ταχύτητα του ανέμου 10 λεπτών, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση του και από την εποχή του έτους, στα 10 m πάνω από το έδαφος, σε ανοιχτή περιοχή με χαμηλή βλάστηση, όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια ανά αποστάσεις μεταξύ τους τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων(έδαφος κατηγορίας II).

Σύμφωνα με το εθνικό Προσάρτημα ,η θεμελιώδης τιμή της βασικής ταχύτητας του ανέμου  $v_{b,0}$  για τη χώρα μας ορίζεται σε 33 m/sec για τα νησιά και παράλια μέχρι 10km από την ακτή και σε 27m/sec για την υπόλοιπη χώρα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία ο πυλώνας δεν βρίσκεται σε νησί ή κοντά σε ακτή, οπότε λαμβάνεται βασική ταχύτητα ανέμου ίση με  $v_{b,0}=27$  m/sec.

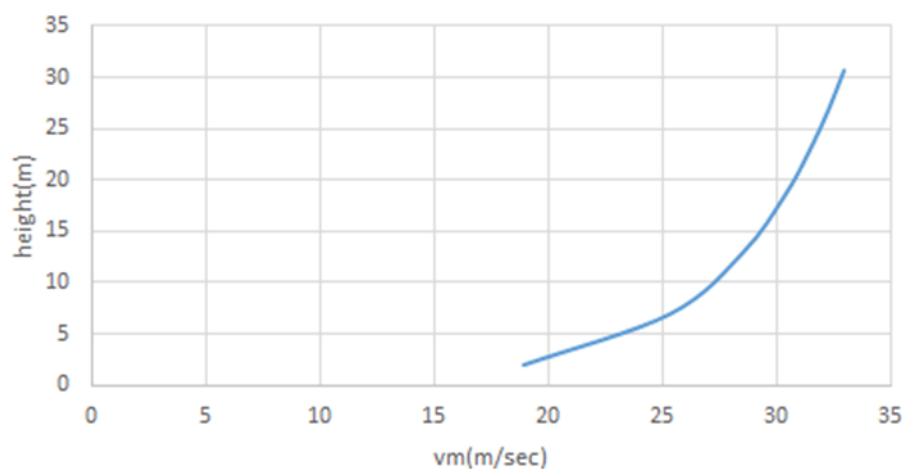
Η μέση ταχύτητα ανέμου  $v_m(z)$  σε ύψος  $z$  πάνω από το έδαφος εξαρτάται από την τραχύτητα του εδάφους και την τοπογραφική διαμόρφωση και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$v_m(z)=c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b$$

Όπου:

$c_r(z)$  είναι ο συντελεστής τραχύτητας

$c_0(z)$  είναι ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης



Σχήμα 2.5 Μέση ταχύτητα ανέμου καθ'ύψος του πυλώνα

#### 2.3.4 Συντελεστές τραχύτητας $c_r(z)$

Ο συντελεστής τραχύτητας  $c_r(z)$  λαμβάνει υπόψη τη μεταβλητότητα της μέσης ταχύτητας ανέμου στη θέση της κατασκευής λόγω του ύψους πάνω από το έδαφος και λόγω της τραχύτητας του εδάφους της προσήνεμης περιοχής στη θεωρούμενη διεύθυνση του ανέμου, υπολογίζεται δε συναρτήσει του ύψους  $z$  με τις ακόλουθες λογαριθμικές σχέσεις:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad \text{για } z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$$

Και

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z_{\min}}{z_0}\right), \quad \text{για } z \leq z_{\min}$$

$z_0$  είναι το μήκος τραχύτητας σε m

$z_{0,II} = 0,05m$  κατηγορία εδάφους II, Πίνακας 4.1)

$z_{\min}$  είναι το ελάχιστο ύψος που ορίζεται στον πίνακα 4.1

$z_{\max}$  λαμβάνεται ίσο προς 200m

### Κατηγορία εδάφους 0

Θάλασσα, παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα



### Κατηγορία εδάφους I

Λίμνες ή περιοχή με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια



### Κατηγορία εδάφους II

Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων



### Κατηγορία εδάφους III

Περιοχή με κανονική κάλυψη από βλάστηση ή από κτίρια ή από μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (όπως χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)



### Κατηγορία εδάφους IV

Περιοχή στην οποία τουλάχιστον το 15 % της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15 m

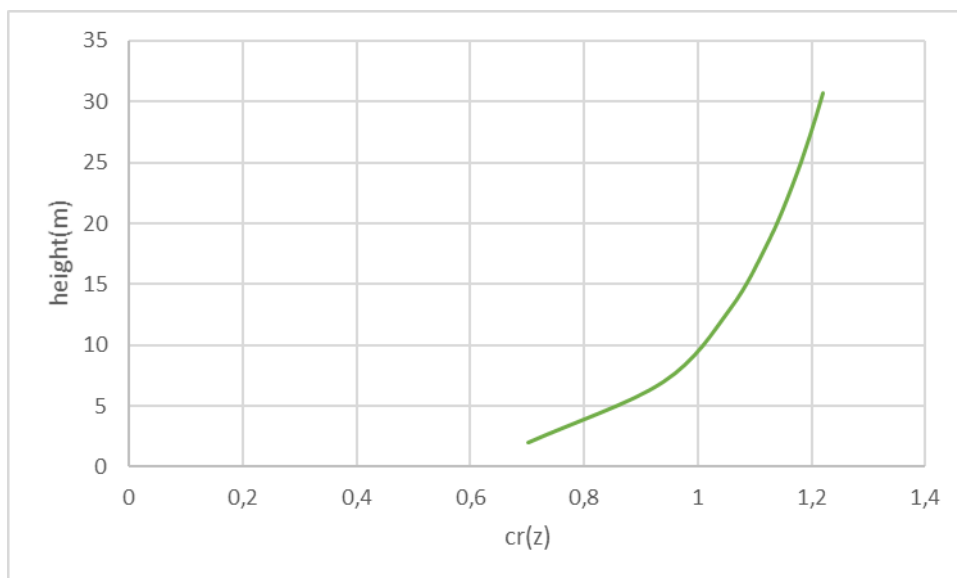


Εικόνα 2.3 Κατηγορίες εδάφους

Πίνακας 2.2 Κατηγορίες εδάφους και παράμετροι εδάφους

Κατηγορία εδάφους	$z_0(\text{m})$	$z_{\min}(\text{m})$
Θάλασσα ή παράκτια περιοχή εκτεθειμένη σε ανοικτή θάλασσα	0,003	1
Λίμνες ή επίπεδες και οριζόντιες περιοχές με αμελητέα βλάστηση και χωρίς εμπόδια	0,001	1
Περιοχή με χαμηλή βλάστηση όπως γρασίδι και μεμονωμένα εμπόδια (δέντρα, κτίρια) με απόσταση τουλάχιστον 20 φορές το ύψος των εμποδίων	0,05	2
Περιοχή με κανονική κάλυψη βλάστησης ή με κτίρια ή με μεμονωμένα εμπόδια με μέγιστη απόσταση το πολύ 20 φορές το ύψος των εμποδίων (χωρίς χωριά, προάστια, μόνιμα δάση)	0,3	5
Περιοχή όπου τουλάχιστον το 15% της επιφάνειας καλύπτεται με κτίρια των οποίων το μέσο ύψος ξεπερνά τα 15 m	1,0	10

Παρουσιάζεται παρακάτω ο συντελεστής τραχύτητας καθ' ύψος του πυλώνα για την διπλωματική εργασία που εκπονήθηκε.



Σχήμα 2.6 Συντελεστής τραχύτητας  $cr(z)$  καθ' ύψος του πυλώνα

### 2.3.5 Συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης $c_t(z)$

Μέσω του συντελεστή τοπογραφικής διαμόρφωσης (ή ανάγλυφου) εκτιμάται η αύξηση της μέσης ταχύτητας του ανέμου πάνω από μεμονωμένους λόφους και εξάρσεις ή γκρεμούς ανάλογα με την προσήνεμη κλίση  $\Phi = H/L_u$  κατά τη διεύθυνση του ανέμου. Η μεγαλύτερη αύξηση των ταχυτήτων του ανέμου συμβαίνει κοντά στη κορυφή της πλαγιάς και εκφράζεται μέσω του συντελεστή αυτού, ο οποίος είναι ίσος με:

$$C_0(z) = v_m / v_{mf}$$

Όπου:

$v_m$  είναι η μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος  $z$  πάνω από το έδαφος

$v_{mf}$  είναι η μέση ταχύτητα ανέμου πάνω από επίπεδο έδαφος

Ο συντελεστής τοπογραφικής διαμόρφωσης προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$C_i=1, \quad \text{για } \Phi < 0,05$$

$$C_i=1 + 2 \cdot S \cdot \Phi, \quad \text{για } 0,05 < \Phi < 0,3$$

$$C_i=1 + 0,6 \cdot s, \quad \text{για } \Phi > 0,3$$

Όπου:

$S$  είναι συντελεστής τοπογραφικής θέσης

$\Phi$  είναι η κλίση προς τη προσήνεμη πλαγιά

$L_e$  είναι το ενεργό μήκος προς τη προσήνεμη πλαγιά

$L_u$  είναι το πραγματικό μήκος της προσήνεμης πλαγιάς

$H$  είναι το ενεργό ύψος της εδαφικής ανωμαλίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία λαμβάνεται η τιμή του συντελεστή τοπογραφικής διαμόρφωσης ίσο με τη μονάδα, δηλαδή  $c_i=1$  καθ' ύψος του πυλώνα.

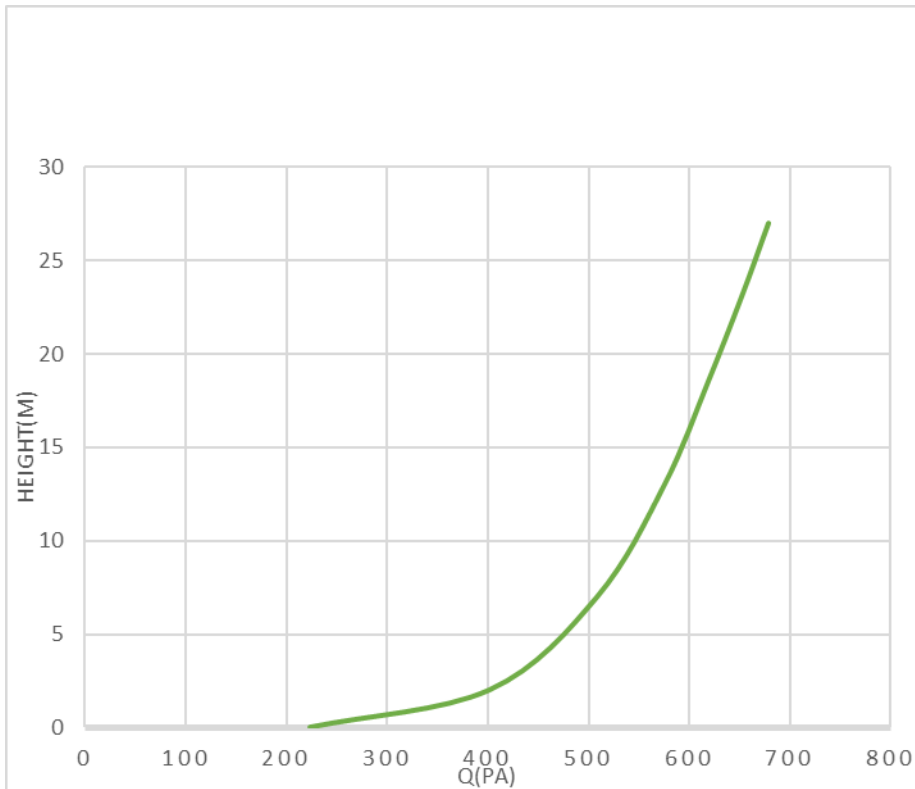
Η μέση πίεση που προκαλεί ο άνεμος  $q_m(z)$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q_m(z) = \frac{(v_m)^2}{2} \cdot \rho$$

Όπου:

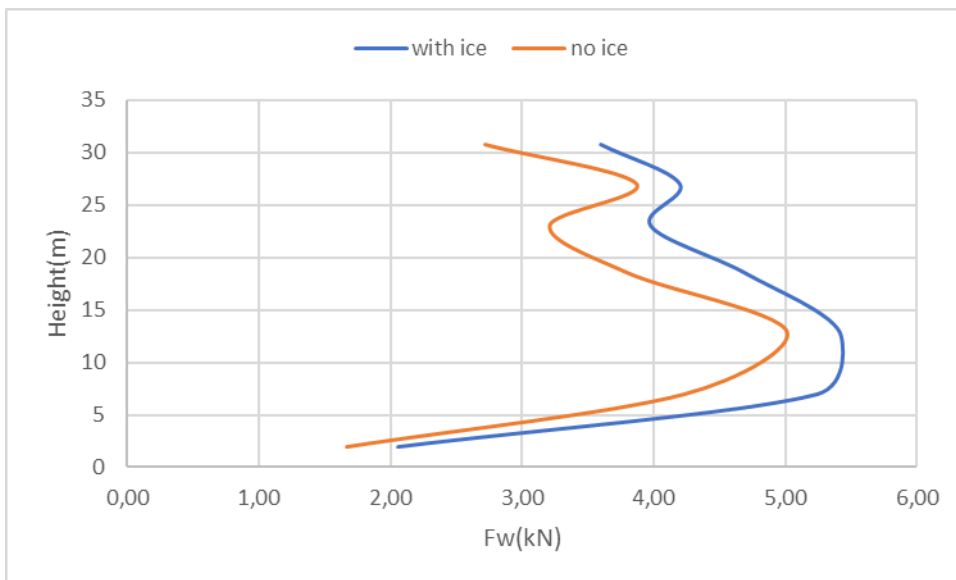
$v_m(z)$  είναι όπως έχουμε αναφέρει προηγουμένως η βασική ταχύτητα του ανέμου

$\rho$  είναι η πυκνότητα του αέρα και λαμβάνεται ίση με 1,25 kg/m



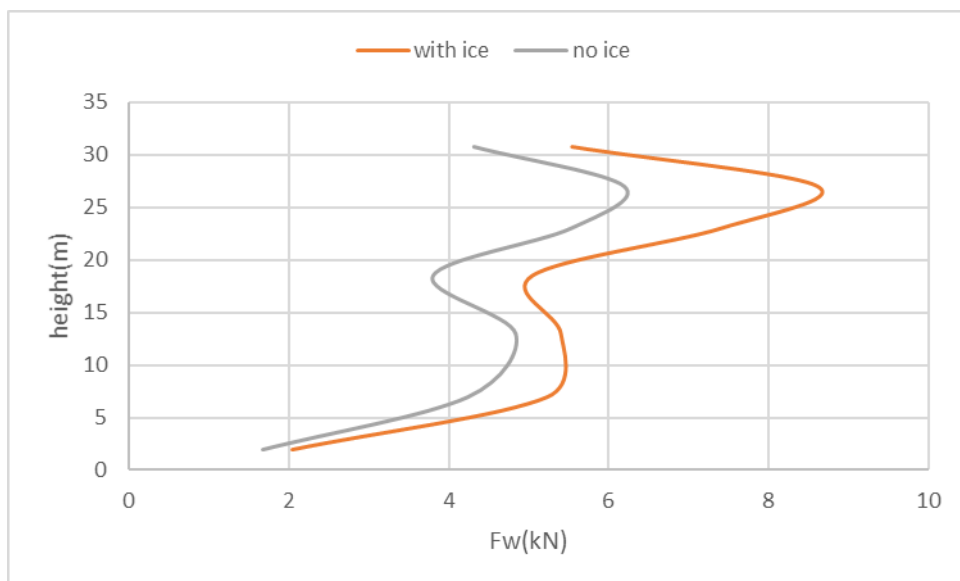
Σχήμα 2.7 Κατανομή της πίεσεως του ανέμου καθ ύψος του πυλώνα

Συνεπώς, οι δυνάμεις ανέμου χωρίς ή με την ύπαρξη παγετού μπορούν πλέον να υπολογιστούν και φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα.



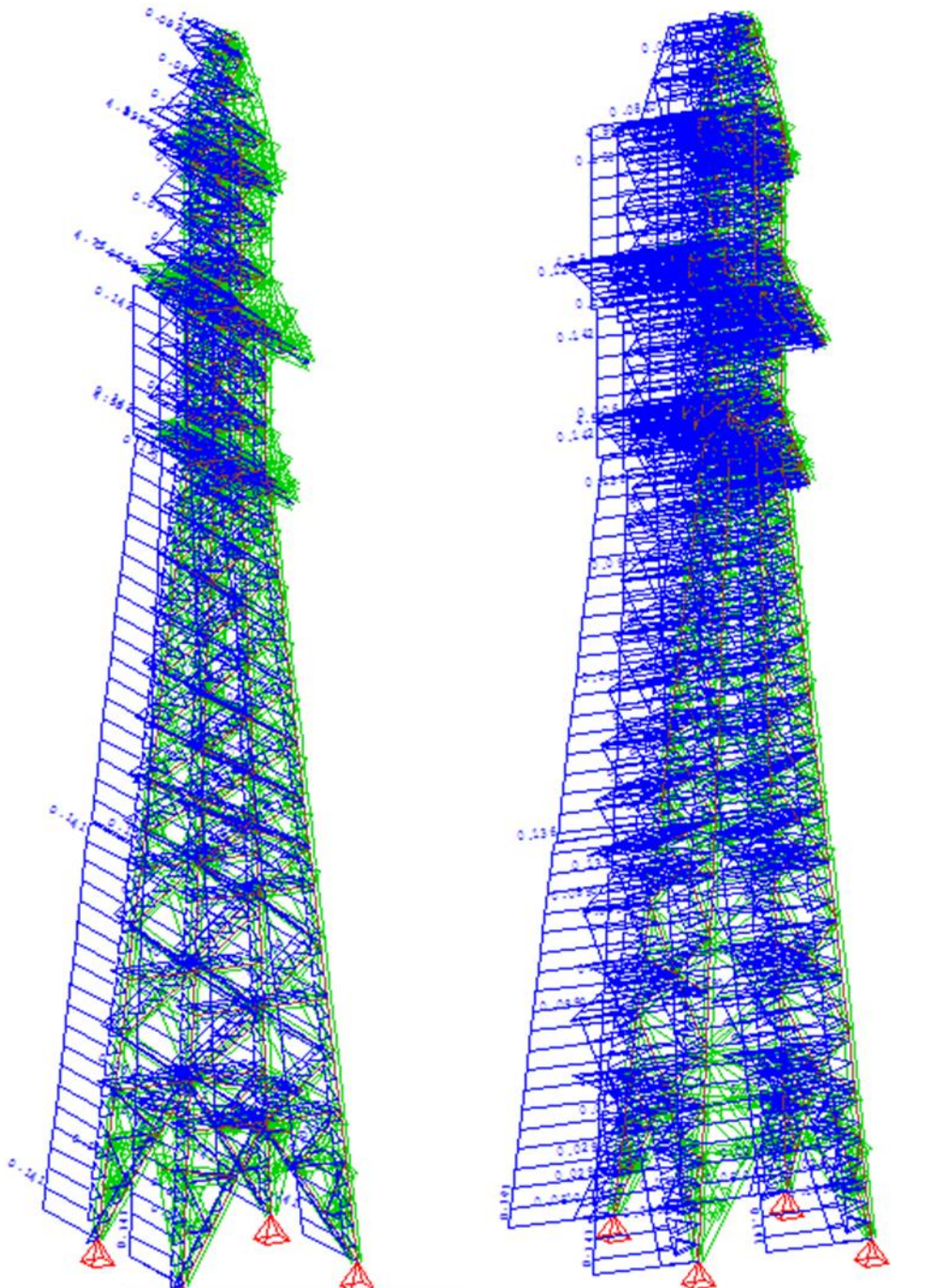
Σχήμα 2.8 Δυνάμεις ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 0 μοιρών





Σχήμα 2.9 Δυνάμεις ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα σε διεύθυνση 90 μοιρών

Έπειτα παρουσιάζονται τα φορτία ανέμου όπως φαίνονται από το περιβάλλον του sofistik σε διευθύνσεις 0 και 90 μοιρών.



Εικόνα 2.4 Φορτία ανέμου από το περιβάλλον του Sofistik

## 2.4 Φορτία χιονιού

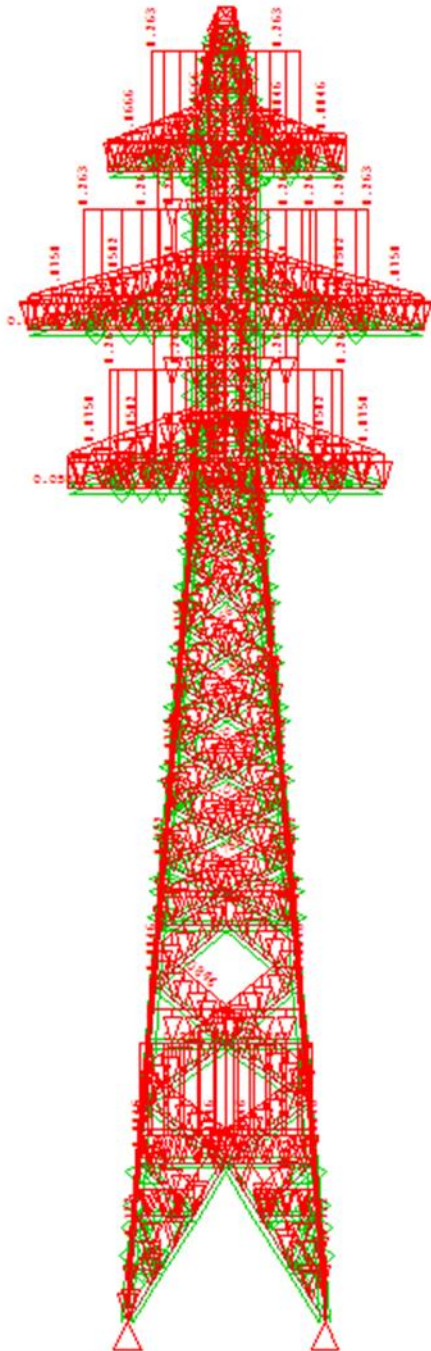
Το φορτίο του χιονιού κατατάσσεται στις μεταβλητές καθορισμένες δράσεις. Η δράση του χιονιού θεωρείται στατική, μεταβλητή στο χρόνο και σταθερή στο χώρο. Το μέρος 1-3 του EN (Ευρωκώδικας 1) παρέχει οδηγίες για τα φορτία λόγω χιονόπτωσης, η οποία έλαβε χώρα υπό συνθήκες νηνεμίας ή με ταυτόχρονη ύπαρξη ανέμων. Τα φορτία αυτά αναφέρονται σε κτίρια ή έργα πολιτικού μηχανικού γενικά, με υψόμετρα κάτω των 1500 m. Για περιοχές με ιδιαίτερες

κλιματικές συνθήκες (υψηλές ταχύτητες ανέμου και λιώσιμο του χιονιού ),μπορεί να εφαρμοστεί το Παράρτημα Β του Μέρους 1-3,στο οποίο δίνονται ειδικές μορφές συγκέντρωσης χιονιού, καθώς και οι αντίστοιχοι συντελεστές μορφής.

Το φορτίο του χιονιού στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν υπολογίζεται αναλυτικά αλλά για τη δυσμενή περίπτωση του glazed ice, δηλαδή του χιονιού που παραμένει στάσιμο στα μέλη του πυλώνα, θεωρούμε σταθερό πάχος χιονιού περιμετρικά από κάθε διατομή ίσο με 2,5 cm. Το ειδικό βάρος χιονιού θεωρείται ίσο με  $\gamma=9 \text{ kN/m}^3$ .Για κάθε διατομή προκύπτουν τα φορτία χιονιού που φαίνονται στο παρακάτω πίνακα

Πίνακας 2.3 Φορτία χιονιού για γωνιακές διατομές

	$Q_{ice}(\text{kN/m})$
L110	0,125
L90	0,102
L80	0,092
L70	0,084
L60	0,076
L50	0,066
L45	0,0625
L40	0,0582



Εικόνα 2.5 Φορτία χιονιού από το περιβάλλον του Sofistik

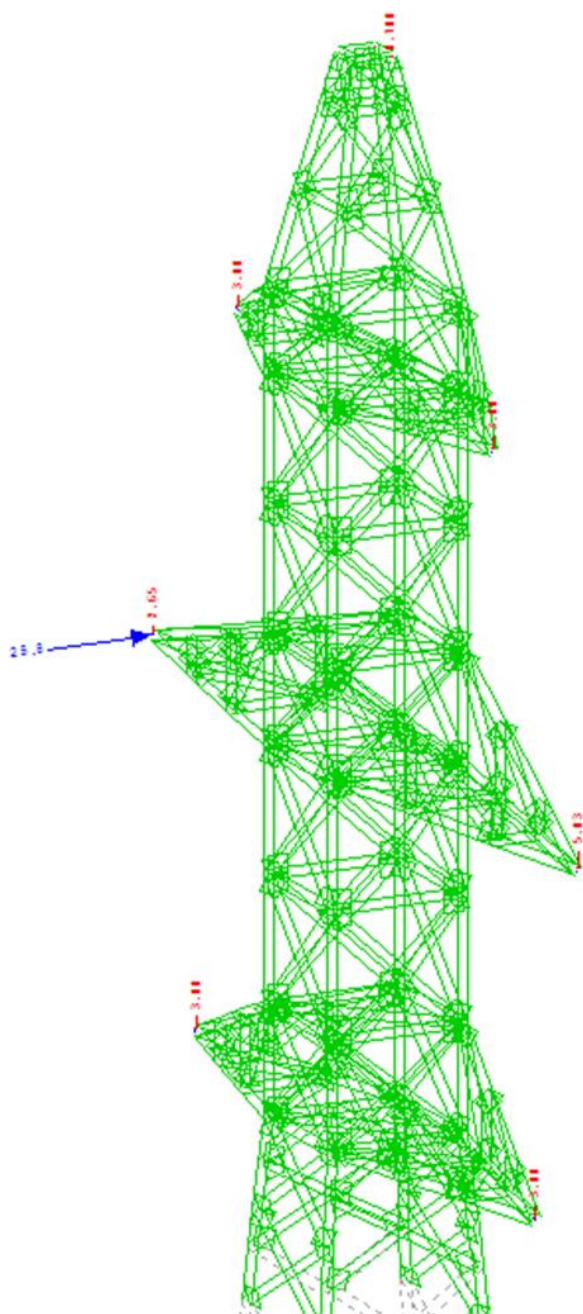
## **2.5 Φορτία σπασμένου αγωγού**

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι δράσεις από τα φορτία των αγωγών που διέρχονται από τους κόμβους του πυλώνα στην περίπτωση που ο αγωγός από τη μια πλευρά του πυλώνα έχει σπάσει. Τα φορτία αυτά κατατάσσονται στις τυχηματικές δράσεις και συνδυάζονται με τα φορτία του ίδιου βάρους, όπως και με τα φορτία του ανέμου και του χιονιού.

Τα φορτία του σπασμένου αγωγού υπολογίστηκαν από το προσομοίωμα της γραμμής μεταφοράς ενέργειας αφαιρώντας από τη δεύτερη γέφυρα έναν αγωγό, όπως φαίνεται στο σχήμα .Τα φορτία στους κόμβους των γεφυρών παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα, όπου ο κόμβος 1 είναι το σημείο όπου έχει σπάσει ο αγωγός και ο κόμβος 2 είναι ο αντιδιαμετρικός του.

Πίνακας 2.4 Δυνάμεις στου κόμβους της δεύτερης γέφυρας λόγω σπασμένου αγωγού

	$N_x(\text{kN})$	$N_y(\text{kN})$	$N_z(\text{kN})$
Κόμβος 1	0,71	25,66	2,65
Κόμβος 2	1,74	0,11	5,03



Εικόνα 2.6 Φορτία καλωδίων στην περίπτωση σπασμένου αγωγού από το περιβάλλον του Sofistik

## 2.6 Συνδυασμοί φορτίσεων

---

Τα φορτία που ελήφθησαν κατά τους υπολογισμούς, όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα και όπως αναλύθηκαν σε αντίστοιχη παράγραφο είναι τα εξής:

- **G** το οποίο περιλαμβάνει το ίδιο βάρος των στοιχείων
- **W<sub>0</sub>** το οποίο περιλαμβάνει το φορτίο του ανέμου σε διεύθυνση 0 μοιρών κατά τη διεύθυνση x

- **W<sub>45</sub>** το οποίο περιλαμβάνει το φορτίο του ανέμου σε διεύθυνση 45 μοιρών.
- **W<sub>90</sub>** το οποίο περιλαμβάνει το φορτίο του ανέμου σε διεύθυνση 90 μοιρών, δηλαδή κατά τη διεύθυνση  $y$
- **Q<sub>ice</sub>** το οποίο περιλαμβάνει το φορτίο του χιονιού
- **Q<sub>b,c</sub>** το οποίο περιλαμβάνει το φορτίο του σπασμένου αγωγού
- **W<sub>0,b,c</sub>** το οποίο περιλαμβάνει το φορτίο του ανέμου σε διεύθυνση 0 μοιρών για σπασμένο αγωγό
- **W<sub>90,b,c</sub>** το οποίο περιλαμβάνει το φορτίο του ανέμου σε διεύθυνση 90 μοιρών για σπασμένο αγωγό
- **W<sub>45,b,c</sub>** το οποίο περιλαμβάνει το φορτίο του ανέμου σε διεύθυνση 45 μοιρών για σπασμένο αγωγό

Οι οριακές καταστάσεις διακρίνονται σε 2 κατηγορίες, την οριακή κατάσταση αστοχίας(ΟΚΑ) και την οριακή κατάσταση λειτουργικότητας(ΟΚΛ).

Η οριακή κατάσταση αστοχίας σχετίζεται με απώλεια ισορροπίας του φορέα, αστοχία λόγω υπερβολικών παραμορφώσεων, μετατροπή του φορέα ή μέρους του σε μηχανισμό θραύσης και απώλεια της ευστάθειάς του και αστοχία λόγω κόπωσης που θέτουμε σε κίνδυνο ανθρώπινες ζωές.

Ανάλογα με τη κατηγορία αξιοπιστίας του έργου υπολογίζονται οι συντελεστές ασφάλειας αξιοπιστίας του έργου, που φαίνονται στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 2.5 Κατηγορίες αξιοπιστίας για πύργους

Reliability Class	
3	towers and masts erected in urban locations, or where their failure is likely to cause injury or loss of life; towers and masts used for vital telecommunication facilities; other major structures where the consequences of failure would be likely to be very high
2	all towers and masts that cannot be defined as class 1 or 3
1	towers and masts built on unmanned sites in open countryside; towers and masts, the failure of which would not be likely to cause injury to people

Πίνακας 2.6 Συντελεστές ασφάλειας των δράσεων στην Ο.Κ.Α

Type of Effect	Reliability Class, see NOTE to 2.1.2	Permanent Actions	Variable Actions ( $Q_s$ )
unfavourable	3	1,2	1,6
	2	1,1	1,4
	1	1,0	1,2
favourable	All Classes	1,0	0,0
Accidental situations		1,0	1,0

Ο πυλώνας που μελετάται ανήκει στη κατηγορία αξιοπιστίας 2, με συντελεστές δυσμενούς επίδρασης μονίμων φορτίων  $\gamma_g=1,2$ , μεταβλητών δράσεων  $\gamma_q=1,6$  και τυχηματικών δράσεων  $\gamma_g=\gamma_q=1,0$ .

Οι συνδυασμοί φόρτισης στην ΟΚΑ που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- C1:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot W_0$
- C2:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot W_{90}$
- C3:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot W_{45}$
- C4:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot Q_{ice}$
- C5:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot 0,6 \cdot W_{0,ice} + 1,6 \cdot 0,5 \cdot Q_{ice}$
- C6:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot 0,6 \cdot W_{90,ice} + 1,6 \cdot 0,5 \cdot Q_{ice}$
- C7:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot 0,6 \cdot W_{45,ice} + 1,6 \cdot 0,5 \cdot Q_{ice}$
- C8:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot W_{0,ice} + 1,6 \cdot Q_{ice}$
- C9:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot W_{90,ice} + 1,6 \cdot Q_{ice}$
- C10:  $1,2 \cdot G + 1,6 \cdot 0,6 \cdot 0,6 \cdot W_{45,ice} + 1,6 \cdot Q_{ice}$
- C11:  $1,0 \cdot G + 1,0 \cdot Q_{b,c}$
- C12:  $1,0 \cdot G + 1,0 \cdot Q_{b,c} + 1,0 \cdot W_0$
- C13:  $1,0 \cdot G + 1,0 \cdot Q_{b,c} + 1,0 \cdot W_{90}$
- C14:  $1,0 \cdot G + 1,0 \cdot Q_{b,c} + 1,0 \cdot W_{45}$

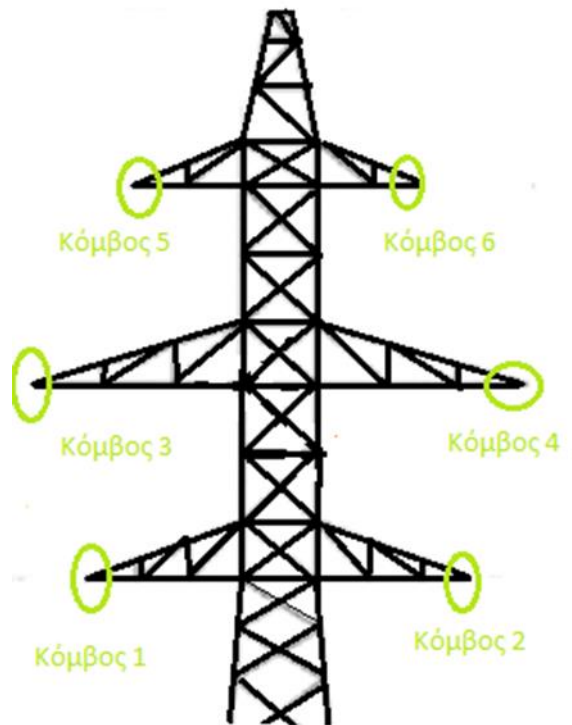
Η οριακή κατάσταση λειτουργικότητας σχετίζεται με συνθήκες για τις οποίες δεν πληρούνται οι λειτουργικές απαιτήσεις του φορέα ή μέρους αυτού. Οι συνδυασμοί φόρτισης στην ΟΚΛ που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

- C15:  $1,0 \cdot G + 1,0 \cdot W_0$
- C16:  $1,0 \cdot G + 1,0 \cdot W_{90}$
- C17:  $1,0 \cdot G + 1,0 \cdot W_{45}$
- C18:  $1,0 \cdot G + 0,6 \cdot W_{0,ice} + 0,5 \cdot Q_{ice}$
- C19:  $1,0 \cdot G + 0,6 \cdot W_{90,ice} + 0,5 \cdot Q_{ice}$
- C20:  $1,0 \cdot G + 0,6 \cdot W_{45,ice} + 0,5 \cdot Q_{ice}$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3 Ανάλυση και διαστασιολόγηση φορέα



Εικόνα 3.1 Κόμβοι γεφυρών

#### 3.1 Έλεγχοι

---

##### 3.1.1 Έλεγχος σε αξονικό εφελκυσμό

Για να ικανοποιείται ο έλεγχος του αξονικού εφελκυσμού θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$NEd \leq Nt, Rd$$

Όπου:

$NEd$  είναι η αξονική δύναμη σχεδιασμού που καταπονείται η διατομή

$Nt, Rd$  είναι η αντοχή σχεδιασμού της διατομής σε εφελκυσμό και προκύπτει από τη σχέση:

$$Nt, Rd = \min[Npl, Rd, Nu, Rd]$$

Όπου:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \text{ και } N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_y}{\gamma_{M2}}$$

Όπου:

$N_{pl,Rd}$  είναι η πλαστική αντοχή της πλήρους διατομής

$N_{u,Rd}$  είναι η οριακή αντοχή της καθαρής διατομής στις θέσεις με οπές κοχλιών  
A είναι το εμβαδόν της πλήρους διατομής

$f_y$  είναι το όριο διαρροής του χάλυβα

$\gamma_{M0}$  είναι ο επιμέρους συντελεστής του χάλυβα

$\gamma_{M2}$  είναι ο επιμέρους συντελεστής του χάλυβα σε θραύση

$A_{net}$  είναι το εμβαδόν της καθαρής διατομής

$f_u$  είναι το όριο θραύσης του χάλυβα

### 3.1.2 Αντοχή σε αξονική θλίψη

Για να ικανοποιείται ο έλεγχος της αξονικής θλίψης θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$NEd \leq N_{c,Rd}$$

Όπου:

$N_{c,Rd}$  είναι η αντοχή σχεδιασμού της διατομής σε θλίψη και ισούται με:

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \text{για διατομές κατηγορίας 1,2,3}$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \text{για διατομές κατηγορίας 4}$$

$f_y$  είναι το όριο διαρροής του χάλυβα

$\gamma_{M0}$  είναι ο επιμέρους συντελεστής του χάλυβα

$f_u$  είναι το όριο θραύσης του χάλυβα

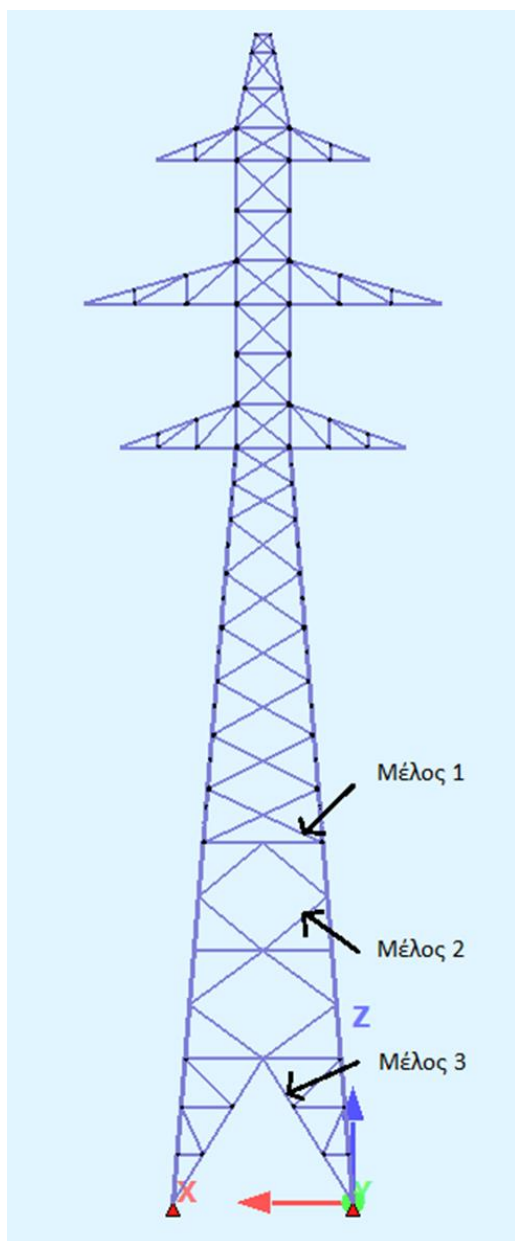
$A_{eff}$  είναι το εμβαδόν της ενεργού διατομής

Τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη της αξονικής δύναμης στο φορέα παρουσιάστηκαν στους ορθοστάτες. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών των αξονικών δυνάμεων για τους ορθοστάτες καθώς και οι αντίστοιχοι έλεγχοι.

Πίνακας 3.1 Αποτελέσματα αξονικών δυνάμεων στους ορθοστάτες και αντίστοιχοι έλεγχοι

	L110	L90	L80
Nmin(kN)	415,6	373,9	202,3
Nmax(kN)	428,2	378,5	204,4
Nc,Rd(kN)	820,1	550,3	436,7
Nb,Rd(kN)	651,8	393,3	277,6

Οι έλεγχοι σε αξονικό εφελκυσμό και σε αξονική θλίψη των διατομών καθώς και ο έλεγχος καμπτικού λυγισμού των μελών πληρούνται. Στη συνέχεια παρατίθενται οι έλεγχοι ορισμένων μελών συνδέσμων δυσκαμψίας, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα



Εικόνα 3.2 Σύνδεσμοι δυσκαμψίας που ελέγχθηκαν

Τα αποτελέσματα ήταν τα εξής:

Πίνακας 3.2 Αξονικές δυνάμεις και αντοχή μελών

	Μέλος 1(L60)	Μέλος 2(L70)	Μέλος 3(L70)
$N_{min}(kN)$	9,18	14,7	24,3
$N_{max}(kN)$	0,64	13,9	25,8
$N_c, R_d(kN)$	245,3	333,7	333,7
$N_b, R_d(kN)$	44,04	55,8	106,9

Οι έλεγχοι των διατομών σε αξονικό εφελκυσμό και σε αξονική θλίψη ικανοποιούνται.

### 3.1.3 Έλεγχος σε καμπτικό λυγισμό για μέλος υπό θλίψη

Για τα θλιβόμενα μέλη έναντι λυγισμού θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{NEd}{Nb,Rd} \leq 1,0$$

Όπου:

$NEd$  είναι η θλιπτική δύναμη σχεδιασμού που καταπονείται το μέλος

$Nb,Rd$  είναι η αντοχή του θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό

Η αντοχή του θλιβόμενου μέλους σε λυγισμό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$Nb, Rd = \frac{\chi \cdot fy \cdot A}{\gamma M1}, \text{για διατομές κατηγορίας 1,2 και 3}$$

$$Nb, Rd = \frac{\chi \cdot fy \cdot A_{eff}}{\gamma M1}, \text{για διατομές κατηγορίας 4}$$

Όπου:

$\chi$  είναι ο μειωτικός συντελεστής για την αντίστοιχη μορφή λυγισμού και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - (\bar{\lambda})^2}}, \text{αλλά } \chi \leq 1$$

Όπου:

$\bar{\lambda}$  είναι η ανηγμένη λυγηρότητα για διατομές κατηγορίας 1,2,3 και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{A \cdot fy / Ncr}$$

ενώ για διατομές κατηγορίας 4 είναι:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{A_{eff} \cdot fy / Ncr}$$

$\phi$  είναι συντελεστής και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha * (\bar{\lambda} - 0,2) + (\bar{\lambda})^2]$$

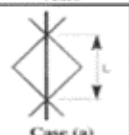
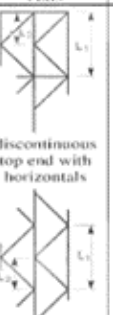
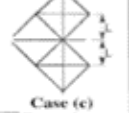
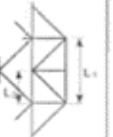
$\alpha$  είναι συντελεστής ατελειών

Σύμφωνα με τον EN 1993-3-1 αντί για την ανηγμένη λυγηρότητα  $\bar{\lambda}$  χρησιμοποιεί την ανηγμένη ενεργή λυγηρότητα  $\bar{\lambda}_{eff}$  για τον υπολογισμό του μειωτικού συντελεστή  $\chi$  για τα θλιβόμενα μέλη σταθερής διατομής δικτυωτού πυλώνα, λαμβάνοντας έτσι τις συνθήκες στήριξης. Η ενεργή ανηγμένη λυγηρότητα υπολογίζεται από τη σχέση:

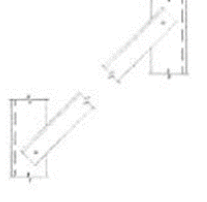
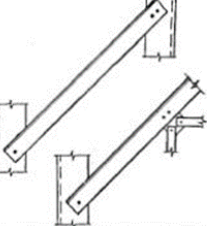
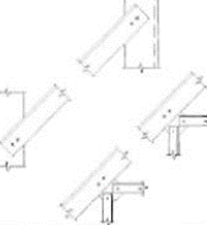
$$\bar{\lambda}_{eff} = k \cdot \bar{\lambda}$$

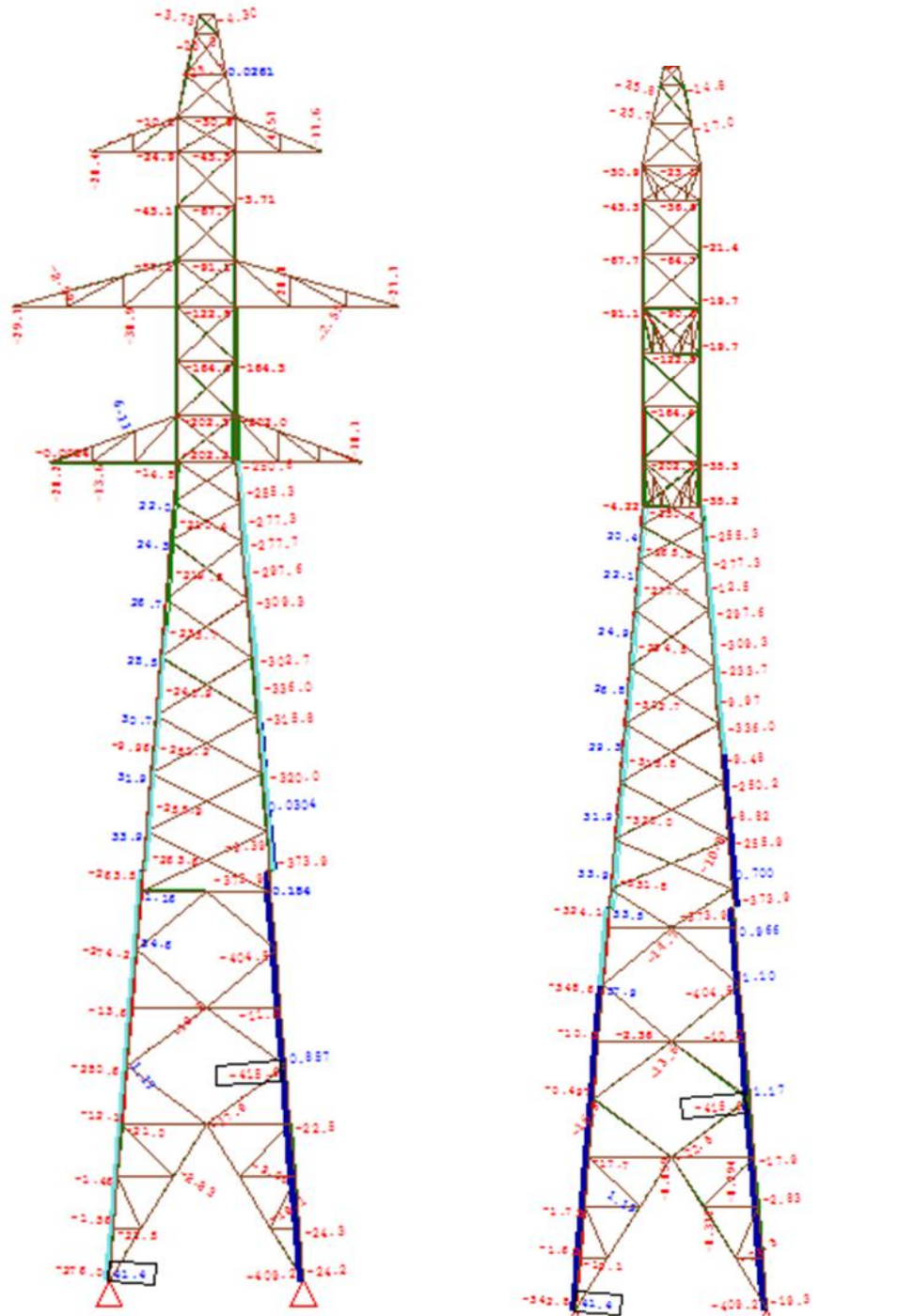
Όπου:  $k$  είναι ο συντελεστής ενεργού λυγηρότητας και υπολογίζεται από τους πίνακες

Πίνακας 3.3 Συντελεστής  $k$  για ορθοστάτες

Symmetrical bracing			Unsymmetrical bracing			
Section	AXIS		Section	AXIS		
	v-v	y-y		v-v	y-y	y-y
 <b>Case (a)</b> Primary bracing at both ends	$0,8 + \frac{\lambda}{10}$ but $\geq 0,9$ and $\leq 1,0$	$1,0^{(1)}$	 discontinuous top end with horizontals <b>Case (d)</b> Primary bracing at both ends	$1,2 \left( 0,8 + \frac{\lambda}{10} \right)$ but $\geq 1,08$ and $\leq 1,2$ on $L_2^{(2)}$	$1,2 \left( 0,8 + \frac{\lambda}{10} \right)$ but $\geq 1,08$ and $\leq 1,2$ on $L_1$	$1,0$ on $L_1^{(1)}$
 <b>Case (c)</b> Secondary bracing at both ends	$0,8 + \frac{\lambda}{10}$ but $\geq 0,9$ and $\leq 1,0$	$1,0$	 <b>Case (e)</b> Primary bracing at both ends	$0,8 + \frac{\lambda}{10}$ but $\geq 0,9$ and $\leq 1,0$ on $L_2^{(2)}$	$0,8 + \frac{\lambda}{10}$ but $\geq 0,9$ and $\leq 1,0$ on $L_1$	$1,0$ on $L_1^{(1)}$

Πίνακας 3.4 Συντελεστής  $k$  για συνδέσμους δυσκαμψίας

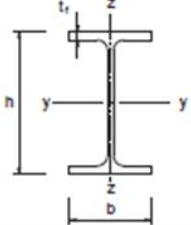
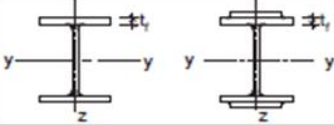

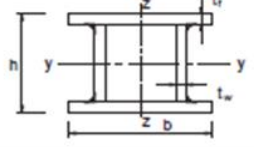
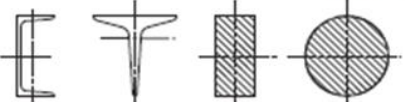

Type of restraint	Examples	Axis	$k$
Discontinuous both end (i.e. single bolted at both ends of member)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\lambda_1}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,58}{\lambda_1}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,58}{\lambda_2}$
Continuous one end (i.e. single bolted at one end and either double bolted or continuous at other end of member)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\lambda_1}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_1}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_2}$
Continuous both ends (i.e. double bolted at both ends, double bolted at one end and continuous at other end, or continuous at both ends of the member)		v-v	$0,7 + \frac{0,35}{\lambda_1}$
		y-y	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_1}$
		z-z	$0,7 + \frac{0,40}{\lambda_2}$



Εικόνα 3.3 Αξονικές δυνάμεις στα μέλη του πυλώνα σε όψη στο περιβάλλον του Sofistik (αριστερά)

Εικόνα 3.4 Αξονικές δυνάμεις στα μέλη του πυλώνα σε εγκάρσια όψη (δεξιά)

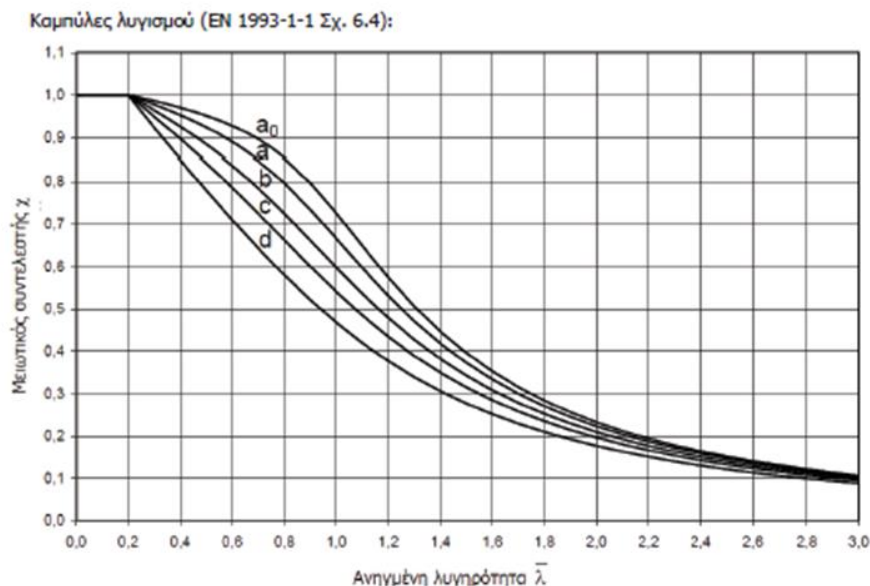
Πίνακας 3.5 Επιλογή καμπύλης λυγισμού για δεδομένη διατομή

Διατομή	Όρια	Λυγισμός περί τον άξονα	Καμπύλη λυγισμού		
			S235 S275 S355 S420	S460	
Ελατές διατομές 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a a <sub>0</sub>	a <sub>0</sub> a
		$t_f > 40 \text{ mm}$ $t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c
Συγκολλητές I-διατομές 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c	
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d	
Κολές Διατομές 	Εν θερμώ έλαση	Κάθε	a	a <sub>0</sub>	
	Ψυχρή έλαση	Κάθε	c	c	
Συγκολλητές κιβωτοειδείς διατομές 	Γενικά (εκτός των κατωτέρω)	Κάθε	b	b	
	Μεγάλα πάχη ραφής: $a > 0,5 \cdot b$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	Κάθε	c	c	
U-, T- και συμπαγείς διατομές 		Κάθε	c	c	
L-διατομές 		Κάθε	b	b	

Πίνακας 3.6 Συντελεστής ατελειών για καμπύλη λυγισμού

Καμπύλη λυγισμού	a <sub>0</sub>	a	b	c	d
Συντελεστής ατελειών α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76





Σχήμα 3.1 Καμπύλες λυγισμού

Σημειώνεται ότι δεν λαμβάνονται υπόψιν οι οπές για κοχλίες στα άκρα των υποστυλωμάτων.

### 3.2 Έλεγχος βελών

Η κατακόρυφη μετακίνηση των κόμβων των γεφυρών θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω σχέση:

$$v \leq \frac{L}{200}$$

Όπου:

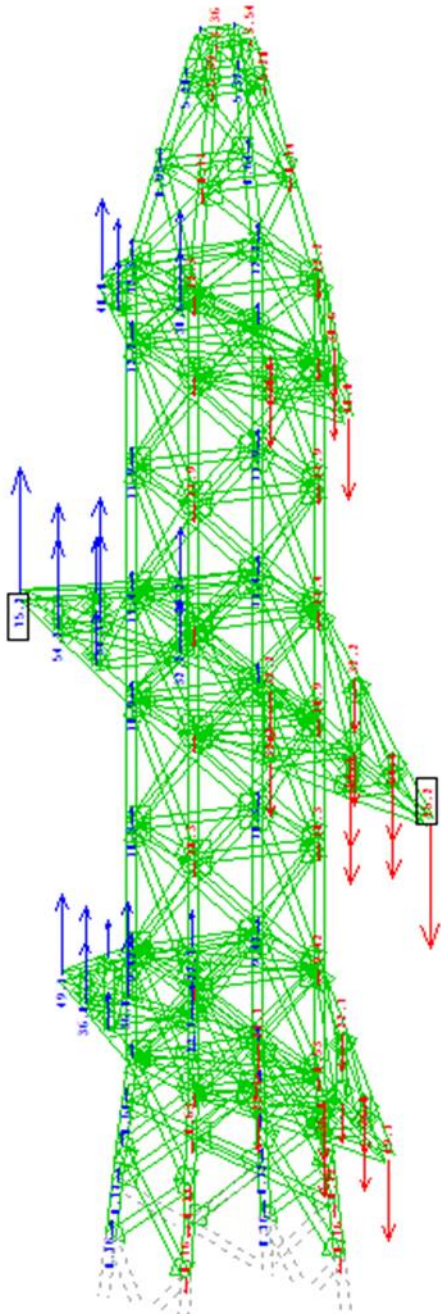
$v$  είναι η κατακόρυφη μετακίνηση των κόμβων των γεφυρών

$L$  είναι το μήκος της κάθε γέφυρας

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο Sofistik για όλους τους συνδυασμούς των δράσεων προέκυψε ότι τα μέγιστα κατακόρυφα βέλη στους κόμβους των γεφυρών ήταν τα εξής:

- $v=13,7\text{mm}$  που είναι μικρότερο του μέγιστου επιτρεπτού βέλους  $v_{\max}=16,25\text{mm}$  για τη γέφυρα σε ύψος 21m.
- $v=20,7\text{mm}$  που είναι μικρότερο από το μέγιστο επιτρεπτό βέλος  $v_{\max}=21,25\text{mm}$  για την γέφυρα σε ύψος 25m.
- $v=6,4\text{mm}$  που είναι μικρότερο από το μέγιστο επιτρεπτό βέλος  $v_{\max}=11,25\text{mm}$  για τη γέφυρα σε ύψος 29m.

Τα μέγιστα κατακόρυφα βέλη προέκυψαν για όλους τους κόμβους από τη δράση του ανέμου σε διεύθυνση 90 μοιρών σε συνδυασμό με πάγο. Παρακάτω δίνεται ο πυλώνας με τα μέγιστα κατακόρυφα βέλη στους κόμβους του μέσω του περιβάλλοντος του Sofistik.



Εικόνα 3.5 Μέγιστα κατακόρυφα βέλη στους κόμβους των γεφυρών

Οι οριζόντιες μετακινήσεις των στοιχείων του πυλώνα θα πρέπει να ικανοποιούν τη παρακάτω σχέση:

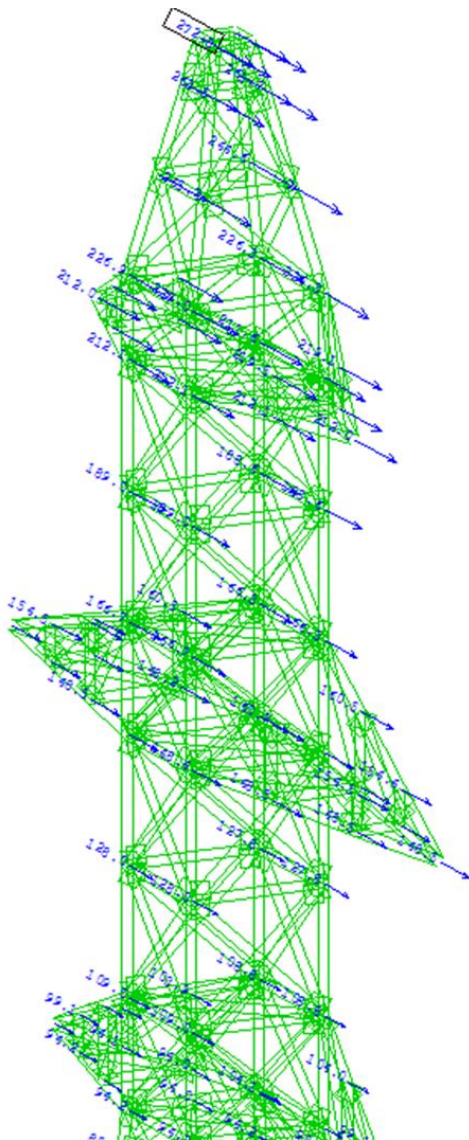
$$u \leq \frac{H}{120}$$

Όπου:

$u$  είναι η οριζόντια μετακίνηση του στοιχείου του πυλώνα

$H$  είναι το ύψος του πυλώνα

Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από το περιβάλλον του Sofistik προέκυψε ότι τα μέγιστα οριζόντια βέλη για τα στοιχεία του πυλώνα είναι εκείνα που βρίσκονται σε ύψος 32,5m, δηλαδή στη κορυφή του πυλώνα. Το μέγιστο αυτό βέλος προέκυψε ίσο με  $u=272\text{mm}$ . Σημειώνεται ότι το μέγιστο βέλος προέκυψε από τη φόρτιση του ανέμου σε διεύθυνση 90 μοιρών σε συνδυασμό με παγετό.

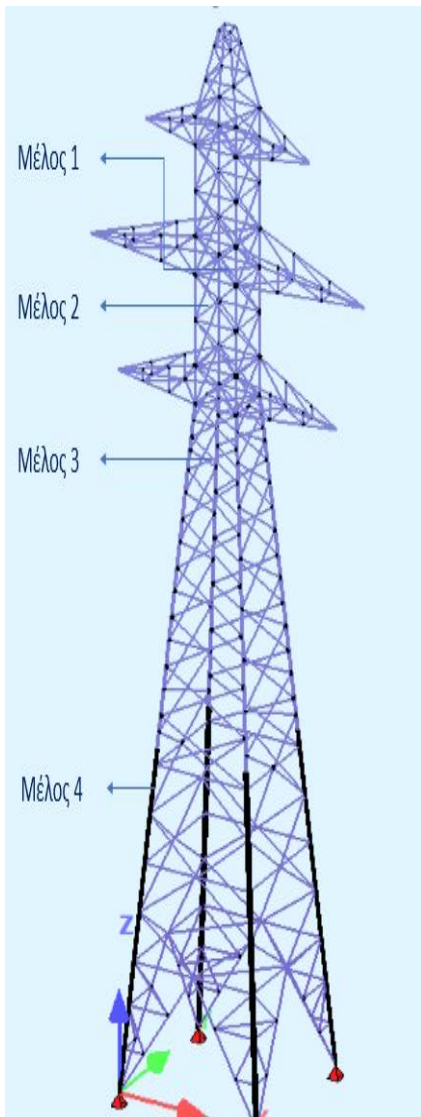


Εικόνα 3.6 Μέγιστα οριζόντια βέλη κατά τον άξονα των  $x$  από το περιβάλλον του Sofistik

### 3.3 Αποτελέσματα

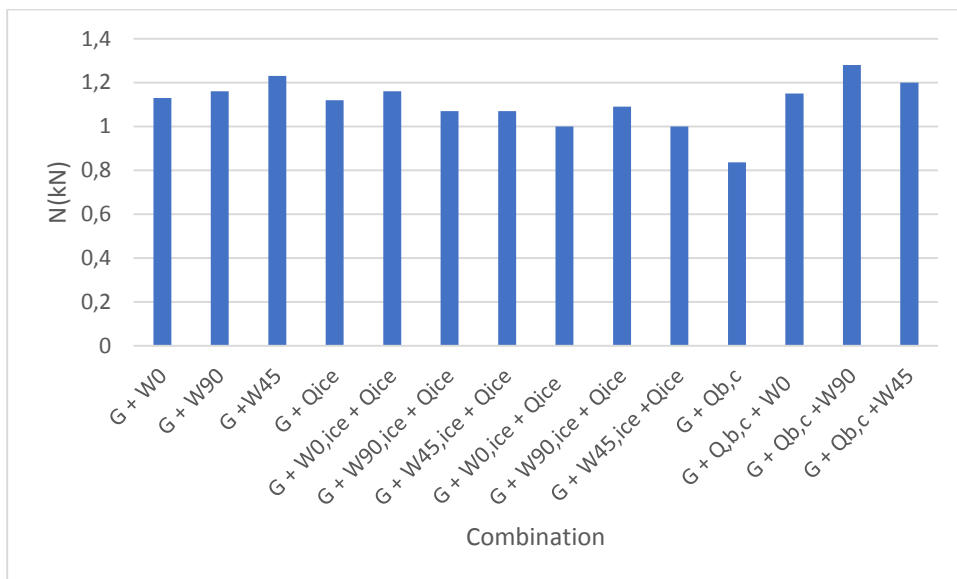
---

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η συμπεριφορά 4 μελών, σχετικά με την αξονική δύναμη που αναπτύσσεται σ' αυτά καθώς και με το ποσοστό αξιοποίησης των διατομών τους ανάλογα με το συνδυασμό δράσεων. Τα μέλη αυτά είναι το οριζόντιο μέλος της δεύτερης γέφυρας (Μέλος 1) σε ύψος 25m, το διαγώνιο μέλος ακριβώς κάτω από τη δεύτερη γέφυρα (Μέλος 2) σε ύψος 25m, το διαγώνιο μέλος κάτω από τη πρώτη γέφυρα (Μέλος 3) σε ύψος 21m και τέλος ο ορθοστάτης διατομής L110 της βάσης του πυλώνα.

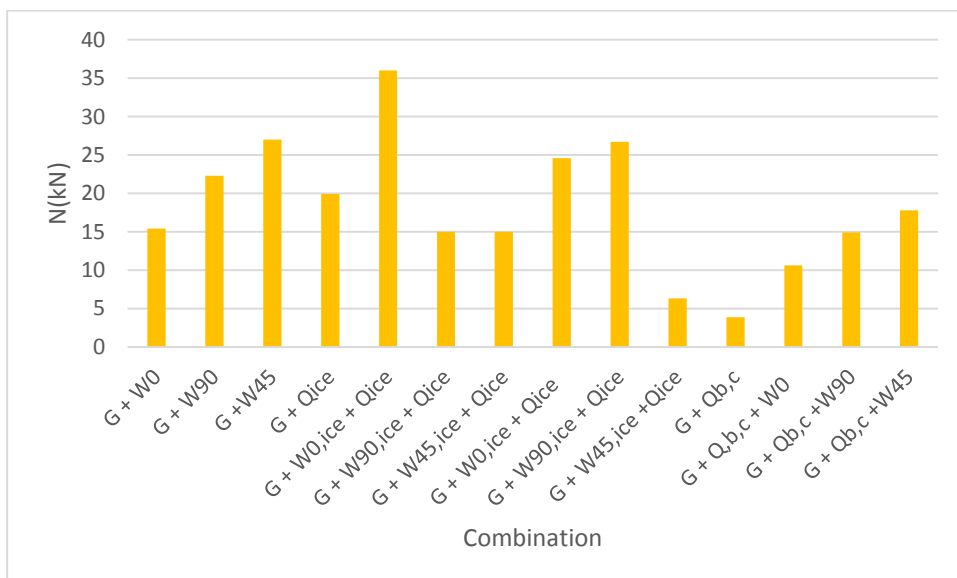


Εικόνα 6.1 Μέλη που εξετάστηκε η συμπεριφορά τους

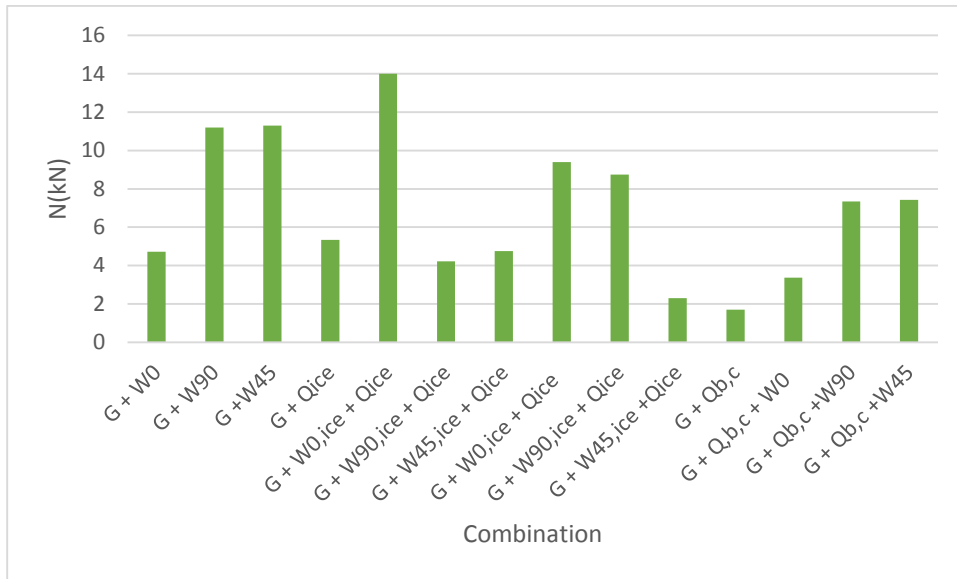
Τα αποτελέσματα της μέγιστης αξονική δύναμης που αναπτύχθηκε στα μέλη για κάθε συνδυασμό δράσεων ξεχωριστά φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



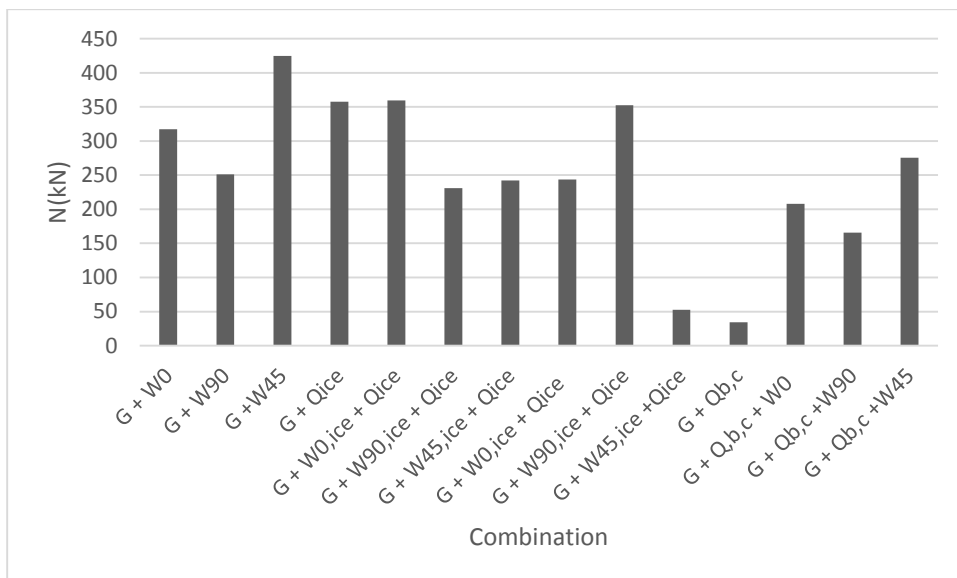
Σχήμα 6.2 Μέγιστη αξονική δύναμη Μέλους 1 για κάθε συνδυασμό δράσεων



Σχήμα 6.3 Μέγιστη αξονική δύναμη Μέλους 2 για κάθε συνδυασμό δράσεων



Σχήμα 6.4 Μέγιστη αξονική δύναμη Μέλους 3 για κάθε συνδυασμό δράσεων

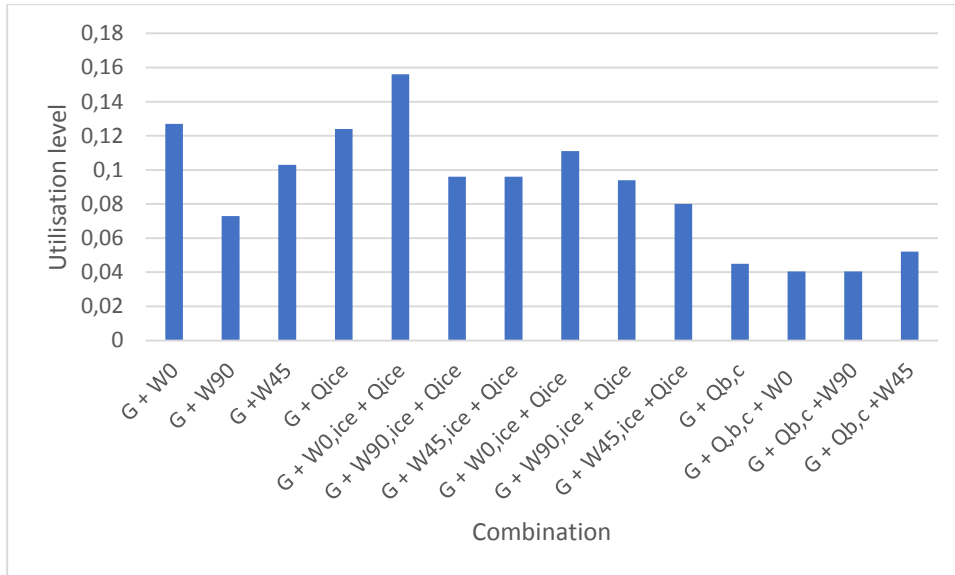


Σχήμα 6.5 Μέγιστη αξονική δύναμη Μέλους 4 για κάθε συνδυασμό δράσεων

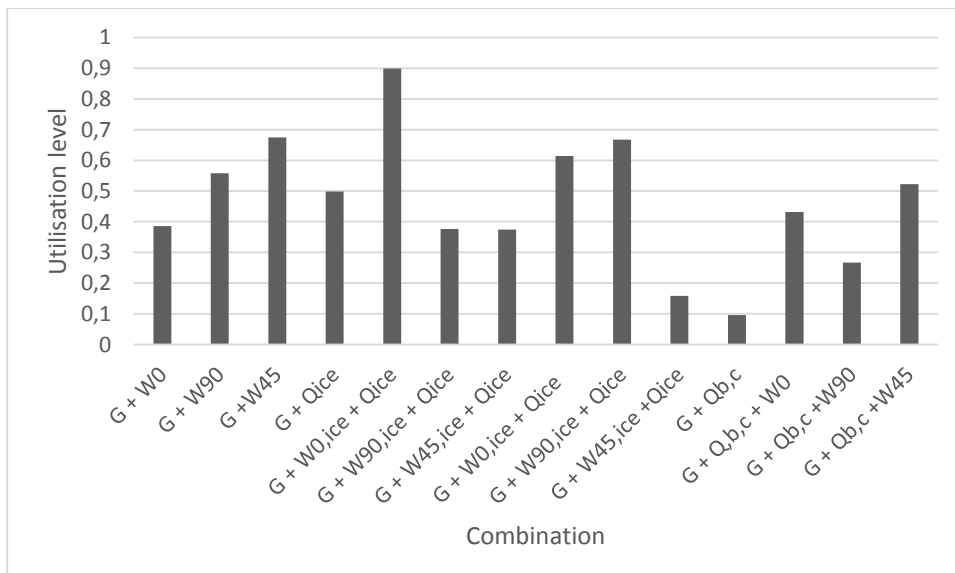
Παρατηρούμε ότι στον ορθοστάτη L110 (Μέλος 4) αναπτύσσεται αρκετά μεγαλύτερη αξονική δύναμη σε σχέση με τα άλλα 3 εξεταζόμενα μέλη. Αυτό συμβαίνει επειδή κυρίαρχη φόρτιση είναι ο άνεμος και η προβαλλόμενη επιφάνεια κάθετη σε αυτόν είναι σημαντικά μεγαλύτερη στον ορθοστάτη, ο οποίος είναι μεγαλύτερης διατομής και ταυτόχρονα κάθετος προς τη διεύθυνση του ανέμου.

Επιπλέον συμπεραίνουμε ότι ο δυσμενέστερος συνδυασμός σε γενικές γραμμές είναι ο συνδυασμός του Ίδιου Βάρους με τον άνεμο σε διεύθυνση 0 μοιρών και με τον πάγο (C5). Ο συνδυασμός της τυχμητικής δράσης του σπασμένου αγωγού είναι ο λιγότερο δυσμενής.

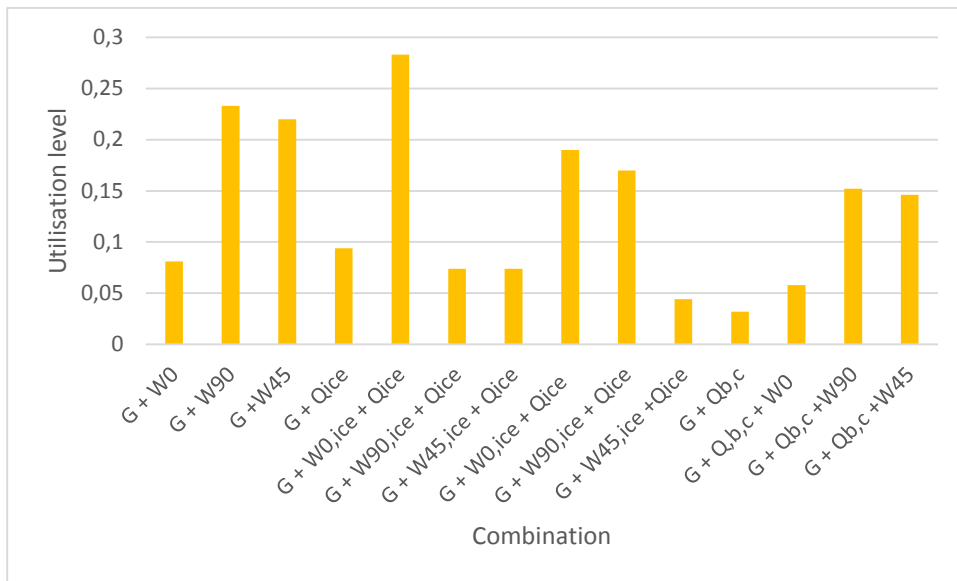
Τα αποτελέσματα σχετικά με το ποσοστό αξιοποίησης της διατομής των μελών παρουσιάζονται παρακάτω.



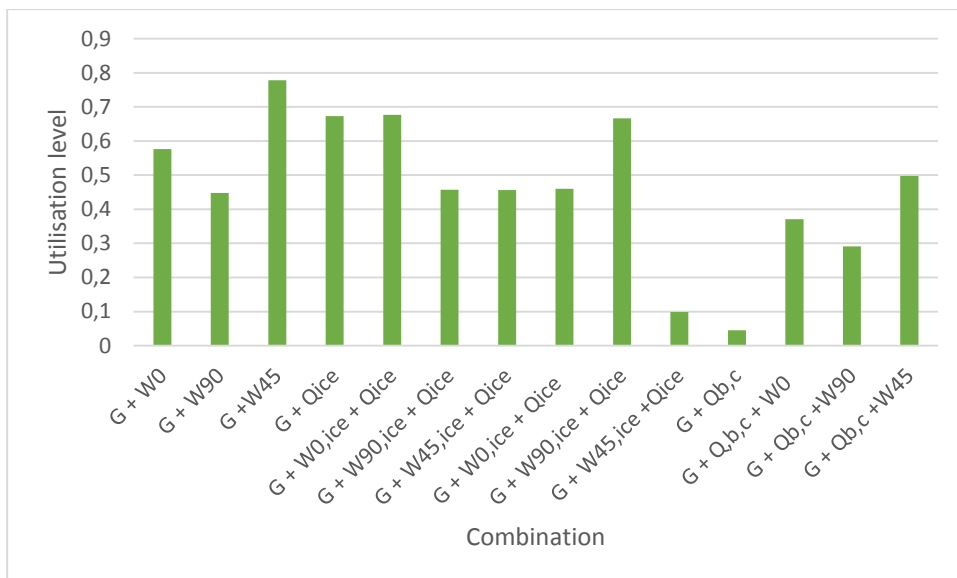
Σχήμα 6.6 Ποσοστό αξιοποίησης διατομής για το Μέλος 4



Σχήμα 6.7 Ποσοστό αξιοποίησης διατομής για το Μέλος 4



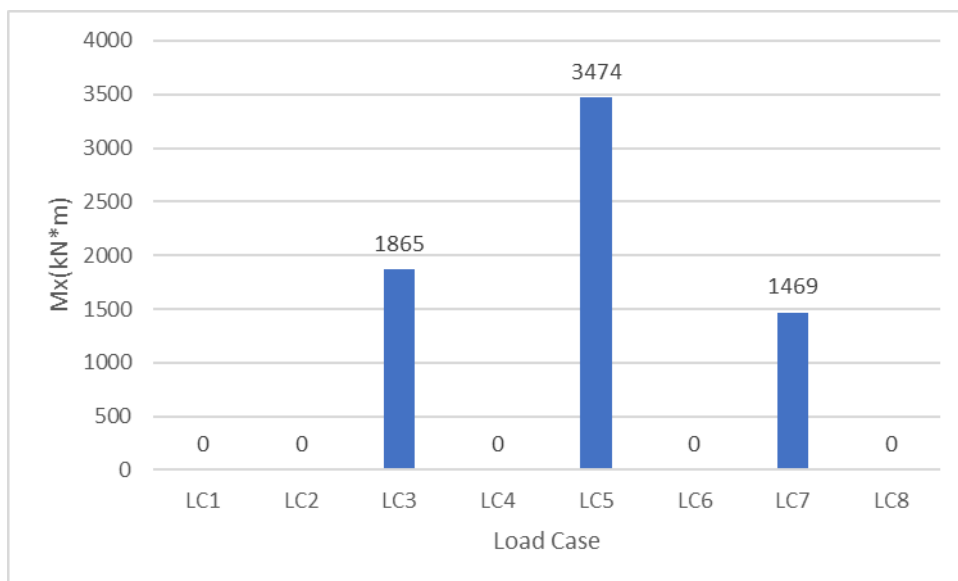
Σχήμα 6.8 Ποσοστό αξιοποίησης διατομής για το Μέλος 4



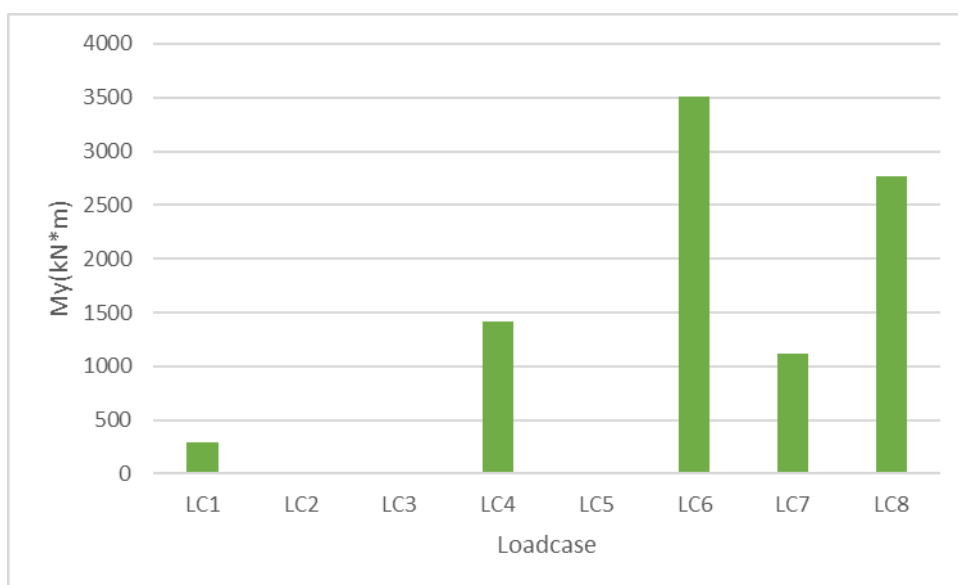
Σχήμα 6.9 Ποσοστό αξιοποίησης διατομής για το Μέλος 4

Εξετάστηκε παράλληλα η Ροπή που αναπτύσσεται στη βάση του πυλώνα κατά τις διευθύνσεις του άξονα x και του άξονα y.



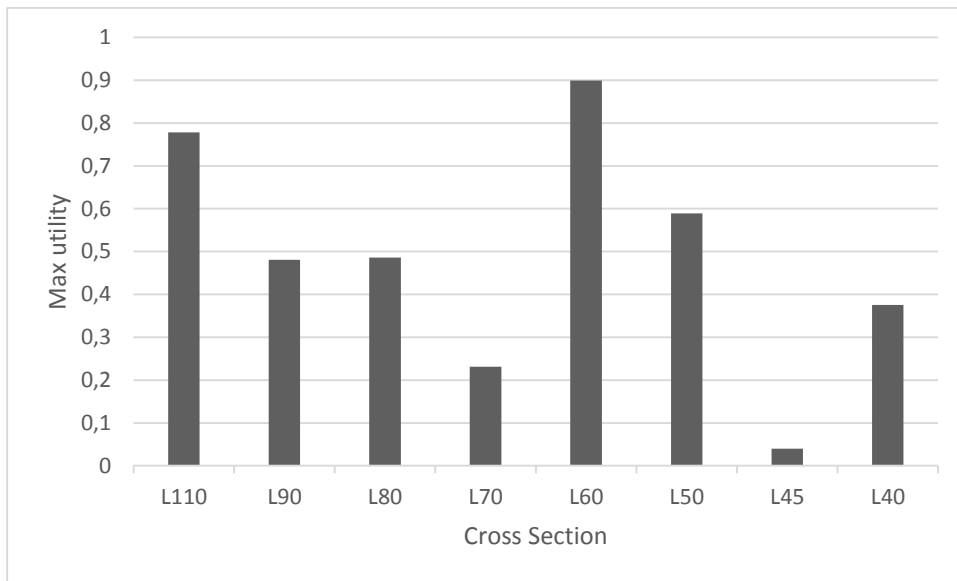


Σχήμα 6.11 Ροπή Βάσης κατά τη διεύθυνση του άξονα των x



Σχήμα 6.12 Ροπή Βάσης κατά τη διεύθυνση του άξονα των y

Η μέγιστη ροπή που αναπτύχθηκε κατά τον άξονα των x ήταν  $M_{\max,x}=3474$  kN\*m, ενώ η μέγιστη ροπή που αναπτύχθηκε κατά τον άξονα των y ήταν  $M_{\max,y}=3500$  kN\*m. Οι τιμές των μέγιστων ροπών παρατηρούμε ότι είναι περίπου ίσες.



Σχήμα 6.12 Μέγιστη αξιοποίηση γωνιακών διατομών

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## 4 Συνδέσεις

### 4.1 Έλεγχος συνδέσεων

Τα μέλη του φορέα συνδέονται αρθρωτά με κοχλίες ,με συνδέσεις άντυγας. Όλοι οι κοχλίες είναι ποιότητας 8.8 ( $f_{yb}=640$  Mpa και  $f_{ub}=800$ Mpa). Χρησιμοποιήθηκαν κοχλίες M12,M16 και M20.Οι έλεγχοι πραγματοποιήθηκαν για τις 3 συνδέσεις που περιγράφονται παρακάτω.

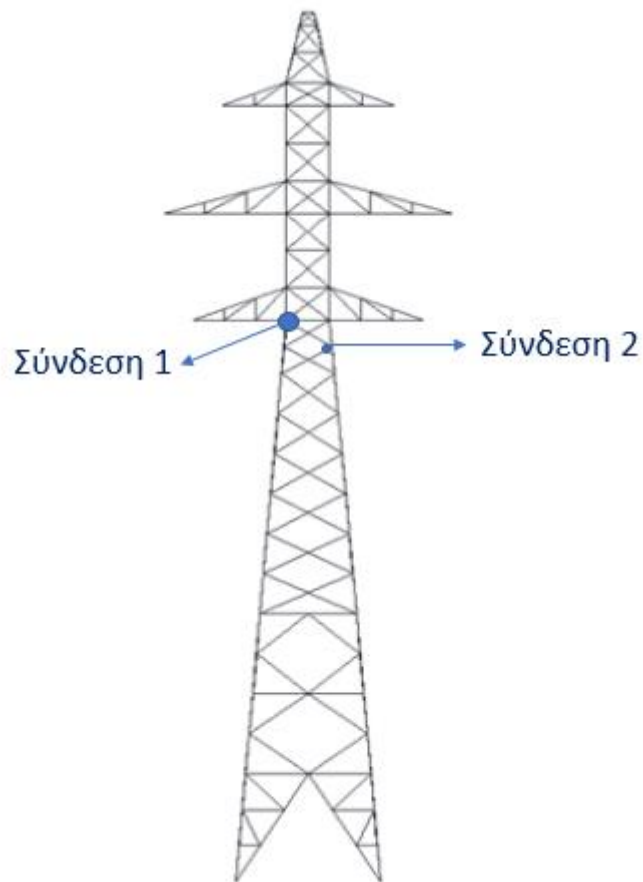
Πίνακας 4.1 Ονομαστικές τιμές ορίων διαρροής και θραύσης χάλυβα EN 1993-1-8 Πίν. 3.1)

Κατηγορία κοχλία	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	240	300	480	640	900
$f_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	400	500	600	800	1000

Πίνακας 4.2 Χαρακτηριστικά των κοχλιών

M	d [mm]	d <sub>m</sub> [mm]	p [mm]	A [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>s</sub> [mm <sup>2</sup> ]	A <sub>t</sub> [mm <sup>2</sup> ]	d <sub>0</sub> [mm]
12	12	20,5	1,75	113	84,3	76,3	d + 1
16	16	26	2	201	157	144	d + 2
20	20	32,5	2,5	314	245	225	
22	22	34,5	2,5	380	303	282	
24	24	39	3	452	353	324	d + 3
27	27	44	3	573	459	427	
30	30	49,5	3,5	707	561	519	
36	36	59,5	4	1018	817	759	
όπου: $A_s = \frac{n \cdot d_s^2}{4}$ ή $A_s = \frac{n \cdot (d - 0,94 \cdot p)^2}{4}$ και $d_s = \frac{d_1 + d_2}{2}$							
Η μέση διάμετρος της κεφαλής του κοχλία d <sub>m</sub> είναι ενδεικτική καθώς μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την ποιότητα και τις προδιαγραφές των κοχλιών.							

Η πρώτη αφορά τη σύνδεση του υποστυλώματος γωνιακής διατομής L90 και του οριζόντιου συνδέσμου της γέφυρας στη στάθμη 21m.Η δεύτερη αφορά τη σύνδεση του χιαστί συνδέσμου γωνιακής διατομής L50 με το υποστώλωμα γωνιακής διατομής L90 σε στάθμη 20m.



Εικόνα 4.1 Σημεία ελέγχου συνδέσεων

### Σύνδεση 1

Η σύνδεση έγινε με 2 κοχλίες M<sub>12</sub> ποιότητας 8.8 .Τα χαρακτηριστικά του κοχλία είναι:

D<sub>0</sub>=13 mm, που είναι η διάμετρος οπής

A=1,13 cm<sup>2</sup>, που είναι το εμβαδόν του κοχλία

A<sub>s</sub>=0,84 cm<sup>2</sup>

f<sub>yb</sub>=640 Mpa, που είναι το όριο διαρροής του χάλυβα

f<sub>ub</sub>=800 Mpa, που είναι το όριο θραύσης του χάλυβα

αν=0,6, για ποιότητα κοχλία 8.8

f<sub>u</sub>=510 Mpa

e<sub>1</sub>=25 mm

e<sub>2</sub>=25 mm

$$p_2=35 \text{ mm}$$

$t=5 \text{ mm}$ , για γωνιακή διατομή L50x5

$$\alpha b=0,64$$

$$k=2,5$$

$A_{net}=1,8 \text{ cm}^2$  είναι το εμβαδό της απομειωμένης διατομής

Η τιμή της ροπής  $M_{Ed,z}$  είναι αρκετά μικρή άρα λαμβάνεται απλοποιητικά  $F_{Ed,y}=0$ , οπότε η αξονική δύναμη σχεδιασμού είναι ίση με  $N_{Ed}=F_{Ed,x}=23,26 \text{ kN}$

Η αντοχή του κορμού του κοχλίου σε διάτμηση είναι :

$$F_v, Rd = \frac{\alpha v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma M_2} = 43,39 \text{ kN}$$

Η αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας των οπών είναι:

$$F_b, Rd = \frac{\alpha b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma M_2} = 36,94 \text{ kN}$$

Όπου:

$$\alpha b = \min\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right) = 0,64$$

$$k_1 = \min\left(\frac{2,8 \cdot e_2}{d_0} - 1,7, 2,5\right) = 2,5$$

Η τελική αντοχή της σύνδεσης  $F_{Rd}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{Rd} = \min(F_{v,Rd}, F_{b,Rd}) = 36,94 \text{ kN}$$

Η αντοχή της απομειωμένης διατομής  $N_{u,Rd}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{u, Rd} = \frac{2 \cdot t \cdot f_u \cdot (e_2 - 0,5 \cdot d_0)}{\gamma M_2} = 75,48 \text{ kN}$$

Η αντοχή της απομειωμένης διατομής λαμβάνοντας υπόψη την εκκεντρότητα της σύνδεσης είναι ίση με:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 \cdot A_{net} \cdot f_u}{\gamma M_2} = 90,57 \text{ kN}$$

$$\beta_2 = 0,4 \text{ για } p_1 \leq 1,5 d_0$$

## Σύνδεση 2

Η σύνδεση έγινε με 1 κοχλία M14 ποιότητας 8.8. Τα χαρακτηριστικά του κοχλία είναι:

$D_0=16$  mm, που είναι η διάμετρος οπής

$A=1,44$  cm<sup>2</sup>, που είναι το εμβαδόν του κοχλία

$A_s=1,57$ cm<sup>2</sup>

$f_{yb}=640$  Mpa, που είναι το όριο διαρροής του χάλυβα

$f_{ub}=800$  Mpa, που είναι το όριο θραύσης του χάλυβα

$\alpha_v=0,6$ , για ποιότητα κοχλία 8.8

$f_u=510$  Mpa

$e_1=25$  mm

$e_2=25$  mm

$p_2=35$  mm

$\alpha_b=0,52$

$k=2,5$

Η αντοχή του κορμού του κοχλία σε διάτμηση είναι :

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} = 77,18 \text{ kN}$$

Η αντοχή σε σύνθλιψη άντυνας των οπών είναι:

$$F_{b,Rd} = \frac{\alpha_b \cdot k_1 \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = 53,39 \text{ kN}$$

Όπου:

$$\alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1\right) = 0,52$$

$$k_1 = \min\left(\frac{2,8 \cdot e_2}{d_0} - 1,7, 2,5\right) = 2,5$$

Η τελική αντοχή της σύνδεσης  $F_{Rd}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_{Rd} = \min(F_{v,Rd}, F_{b,Rd}) = 53,39 \text{ kN}$$

Η αντοχή της απομειωμένης διατομής  $N_{u,Rd}$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$N_{u,Rd} = \frac{2 \cdot t \cdot f_u \cdot (e_2 - 0,5 \cdot d_0)}{\gamma_{M2}} = 69,36 \text{ kN}$$

Τα αποτελέσματα των ελέγχων που προέκυψαν ήταν τα εξής:

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα ελέγχων των συνδέσεων

	Σύνδεση 1	Σύνδεση 2
$F_{v,Rd}$ (kN)	43,39	77,18
$F_{b,Rd}$ (kN)	36,94	53,39
$N_{u,Rd}$ (kN)	90,57	69,36
$N_{ed}$ (kN)	23,26	13,4





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5 Εναλλακτικός σχεδιασμός πυλώνα

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας εκτός από τον σχεδιασμό ενός πυλώνα,ο οποίος αποτελείται από μέλη γωνιακών διατομών(L),πραγματοποιήθηκε παράλληλα και ο σχεδιασμός ενός άλλου πυλώνα,ο οποίος αποτελείται από μέλη κυκλικών διατομών(CHS).Συγκεκριμένα,στην περίπτωση του πυλώνα με μέλη κυκλικών διατομών χρησιμοποιήθηκαν οι εξής διατομές:

CHS90x5 ,αντί για L110

CHS80x5 ,αντί για L90

CHS70x5 ,αντί για L80

CHS50x5 ,αντί για L70

CHS45x3 ,αντί για L60

CHS40x3 ,αντί για L50

CHS35x3 ,αντί για L45

CHS30x3 ,αντί για L40

#### 5.1 Φορτία ανέμου

---

Τα φορτία του ανέμου στην περίπτωση που ο πυλώνας αποτελείται μόνο από κυκλικές διατομές (CHS) υπολογίζονται με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2.3 με τη διαφορά ότι αλλάζει ο συντελεστής δύναμης  $c_{f,s,o}$  όπως και το εμβαδό  $A$  της κάθετης προβολής των στοιχείων.Αναλυτικότερα:

$$C_{f,s,o} = c_{f,o,f} \cdot \frac{A_f}{A_s} + c_{f,o,c} \cdot \frac{A_c}{A_s} + c_{f,o,c,sup} \cdot \frac{A_{c,sup}}{A_s}$$

Όπου:

$$c_{f,o,f} = 1.76 \cdot C_1 \cdot [1 - C_2 \cdot \varphi + \varphi^2]$$

$$c_{f,o,c} = C_1 \cdot (1 - C_2 \cdot \varphi) + (C_1 + 0.875) \cdot \varphi^2$$

$$c_{f,o,c,sup} = 1.9 - \sqrt{(1 - \varphi) \cdot (2.8 - 1.14C_1 + \varphi)}$$

$C1= 2.25$  και  $C2= 1.5$  ,για πυλώνες τετραγωνικής κάτοψης.

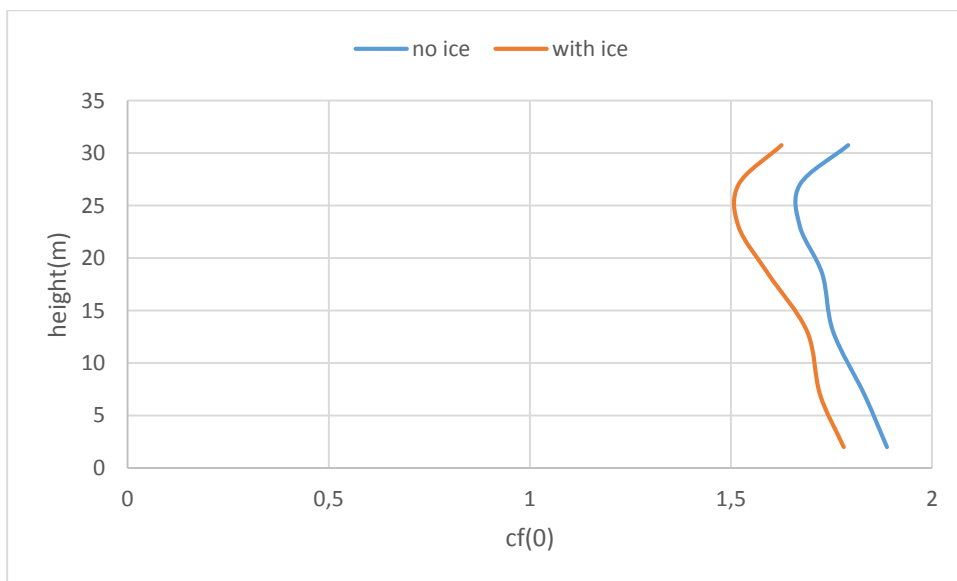
$A_f$  είναι η συνολική κάθετη προβολή της επιφάνειας όλων των στοιχείων γωνιακής διατομής,συμπεριλαμβανομένου και του χιονιού όπου απαιτείται.

$A_c$  είναι η συνολική κάθετη προβολή της επιφάνειας όλων των στοιχείων κυκλικής διατομής στις υπό κρίσιμες περιοχές, συμπεριλαμβανομένου και του χιονιού όπου απαιτείται.

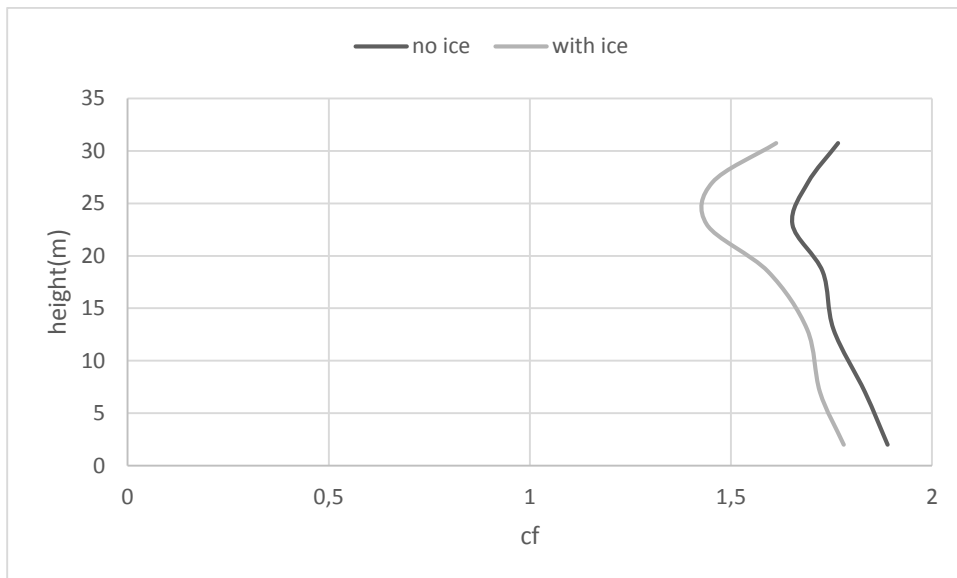
$A_{c,sup}$  είναι η συνολική κάθετη προβολή της επιφάνειας όλων των στοιχείων κυκλικής διατομής σε υπέρ-κρίσιμες περιοχές και δεν καλύπτονται από χιόνι.

Ισχύει  $A_s=A_f +A_c + A_{c,sup}$

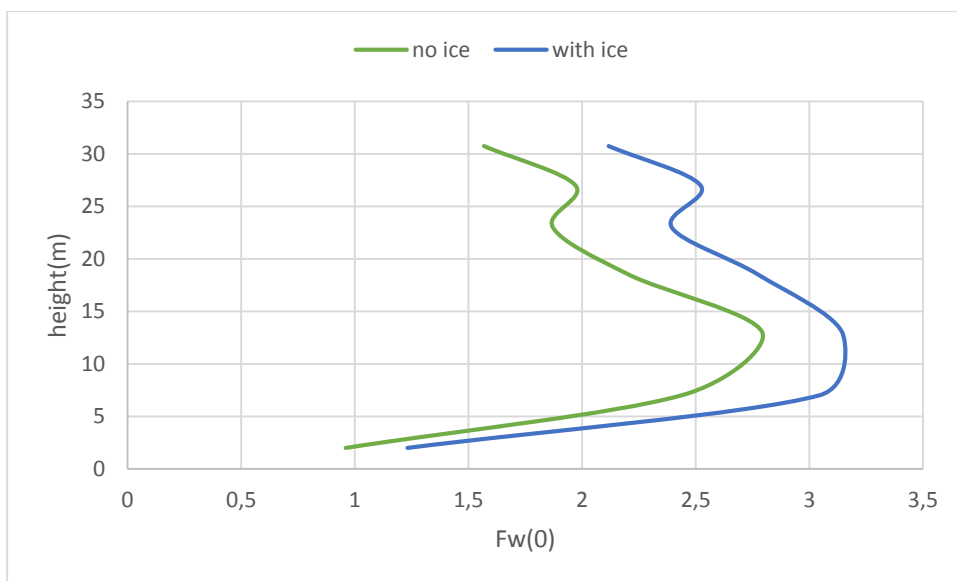
Παρουσιάζονται ακολούθως ο συντελεστής δύναμης και τα φορτία ανέμου σε διεύθυνση 0 και 90 μοιρών:



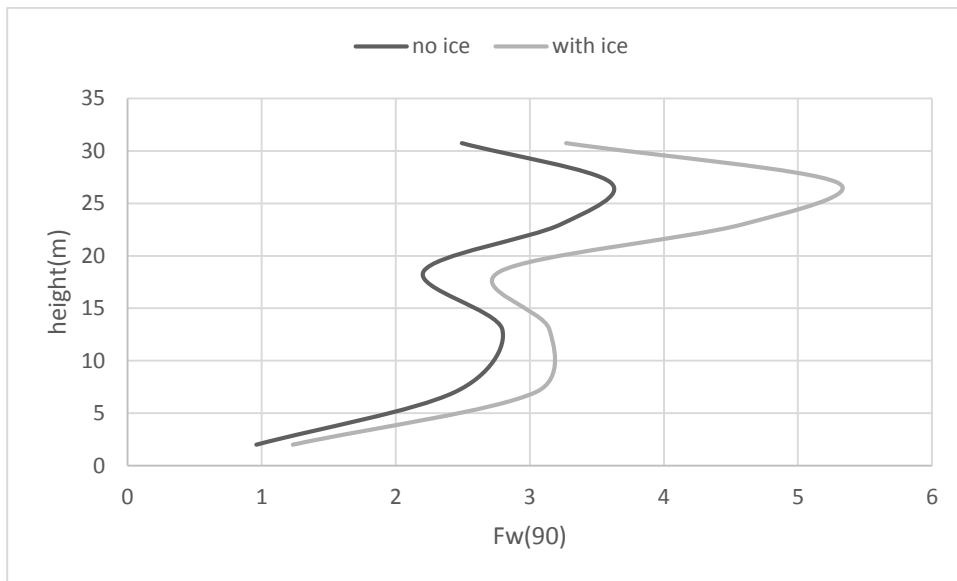
Σχήμα 5.1 Συντελεστής δύναμης cf για κυκλικές διατομές σε διεύθυνση 0 μοιρών



Σχήμα 5.2 Συντελεστής δύναμης  $c_f$  για κυκλικές διατομές σε διεύθυνση 90 μοιρών



Σχήμα 5.3 Δυνάμεις ανέμου  $F_w$  σε διεύθυνση 0 μοιρών για κυκλικές διατομές



Σχήμα 5.4 Δυνάμεις ανέμου  $F_w$  σε διεύθυνση 90 μοιρών για κυκλικές διατομές

## 5.2 Φορτία χιονιού

Τα φορτία του χιονιού υπολογίστηκαν όπως και στην περίπτωση των γωνιακών διατομών, θεωρώντας πάχος χιονιού 2,5cm περιμετρικά των διατομών. Τα φορτία του χιονιού για κάθε κυκλική διατομή ξεχωριστά συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα

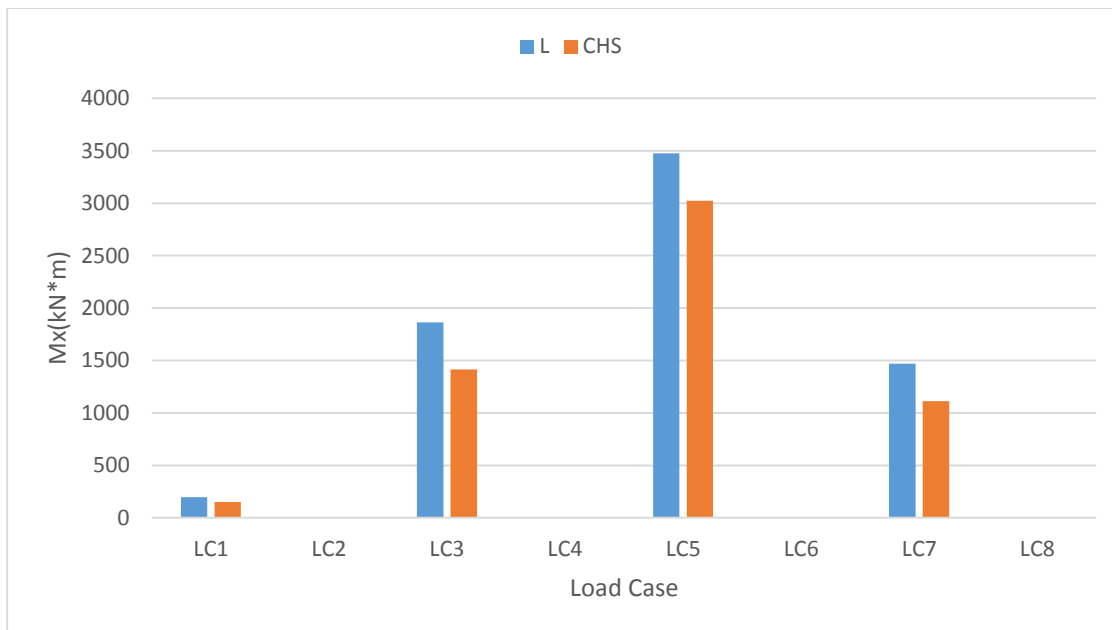
Πίνακας 5.1 Φορτία χιονιού για κυκλικές διατομές

	$Q_{ice}(kN/m)$
CHS90x5	0,0361
CHS80x5	0,0329
CHS70x5	0,0298
CH50x4	0,0235
CHS45x4	0,0219
CHS40x4	0,0204
CHS35x3	0,0188
CHS30x3	0,0172

### 5.3 Αποτελέσματα

Τα συμπεράσματα του κεφαλαίου αυτού αφορούν τη σύγκριση των δυνάμεων του ανέμου καθ' ύψος του πυλώνα στην περίπτωση των γωνιακών και των κυκλικών διατομών, τη σύγκριση του ποσοστού αξιοποίησης των διατομών των, τη σύγκριση της ροπής στη βάση του πυλώνα και τέλος τη διαφορά στο βάρος των 2 πυλώνων.

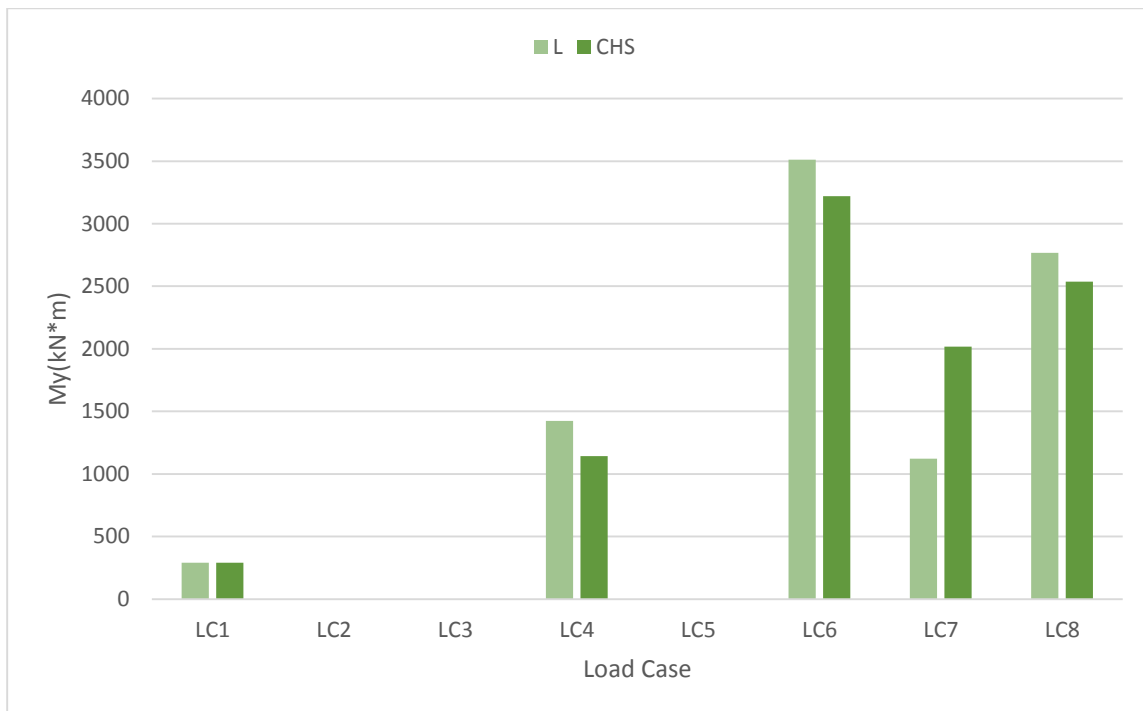
#### Ροπή βάσης κατά τον άξονα των x



Σχήμα 5.5 Σύγκριση ροπής βάσης κατά τον άξονα των x για γωνιακές και κυκλικές διατομές

Παρατηρούμε ότι η ροπή βάσης στην περίπτωση των γωνιακών διατομών είναι ελαφρώς μεγαλύτερη για όλα τα Load Cases. Η μέγιστη ροπή βάσης παρουσιάζεται στο Load Case 5 (Φόρτιση ανέμου σε διεύθυνση 0 μοιρών με ύπαρξη παγετού) και είναι ίση με 3025 kN\*m σε αντίθεση με την περίπτωση των γωνιακών διατομών που η μέγιστη ροπή είναι ίση με 3474 kN\*m. Παρατηρήθηκε μείωση της ροπής ίση με 12,9%

### Ροπή βάσης κατά τον άξονα των y

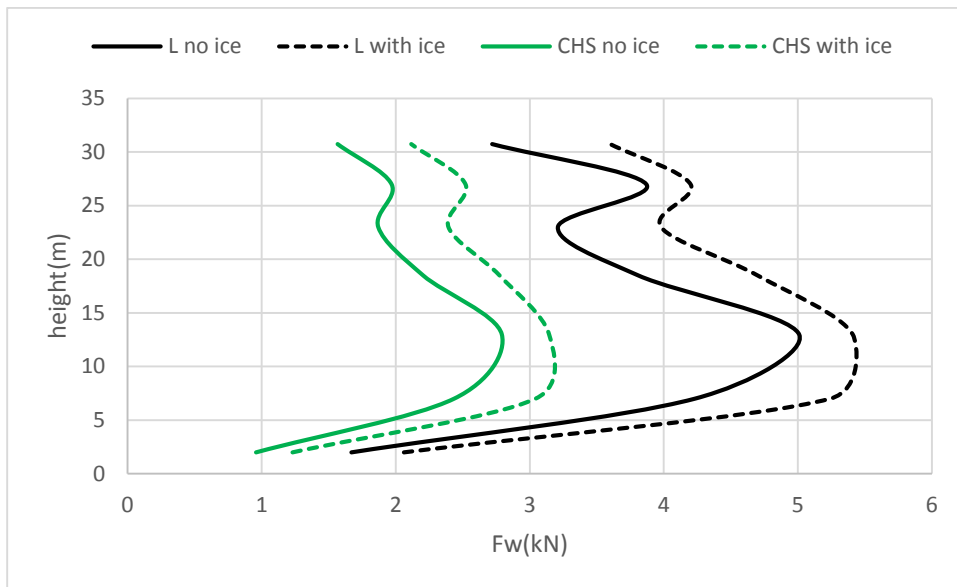


Σχήμα 5.6 Σύγκριση ροπής βάσης κατά τον άξονα των y για γωνιακές και κυκλικές διατομές

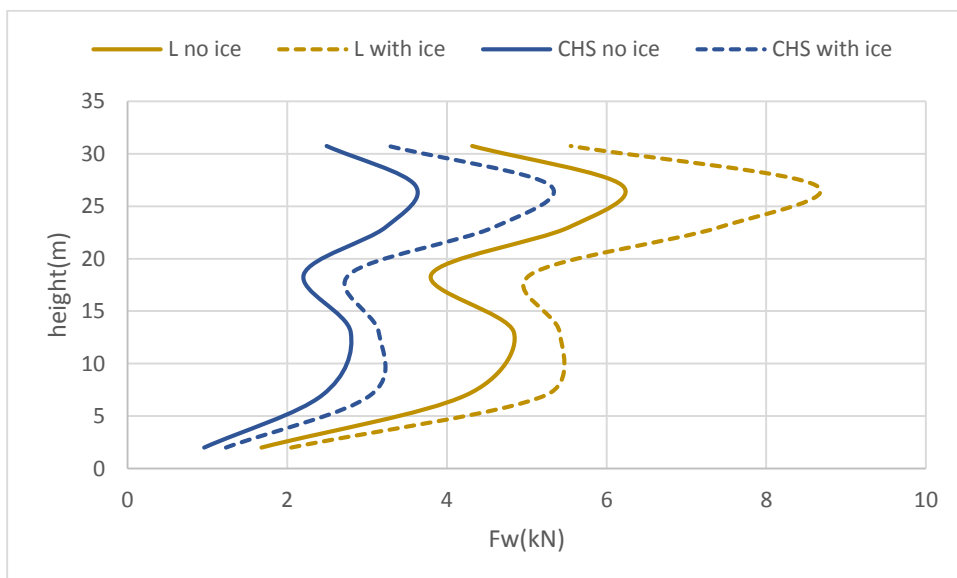
Εδώ παρατηρούμε ότι η ροπή βάσης κατά τον άξονα των y είναι περίπου ίδια με εξαίρεση το Load Case 7 (Φορτία ανέμου σε διεύθυνση 45 μοιρών) όπου υπάρχει σημαντική διαφορά. Μάλιστα η μέγιστη ροπή που αναπτύσσεται είναι ίση με 3219 kN\*m στην περίπτωση των κυκλικών διατομών, ενώ είναι ίση με 3512 kN\*m στην περίπτωση των γωνιακών διατομών. Παρατηρήθηκε μείωση της ροπής δηλαδή ίση με 8%.

### Φορτία ανέμου

Οι δυνάμεις ανέμου στην περίπτωση των κυκλικών διατομών είναι σημαντικά μικρότερες σε σχέση με την περίπτωση των γωνιακών διατομών σε όλες τις διευθύνσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί η κάθετη προβολή προς τον άνεμο της επιφάνειας των στοιχείων κυκλικής διατομής είναι μικρότερη απότι αυτής των στοιχείων γωνιακής διατομής. Επίσης, εκτός από το εμβαδόν  $A$ , μικρότερη τιμή έχει και ο συντελεστής δύναμης του ανέμου  $c_f$  στην περίπτωση των κυκλικών διατομών.



Σχήμα 5.7 Δυνάμεις ανέμου σε διεύθυνση 0 μοιρών για γωνιακές και κυκλικές διατομές.



Σχήμα 5.8 Δυνάμεις ανέμου σε διεύθυνση 90 μοιρών για γωνιακές και κυκλικές διατομές.

Πίνακας 5.2 Σύγκριση συνολικής δράσης ανέμου σε διεύθυνση 0 μοιρών

	Fw(0),no ice	Fw(0)with ice
<b>L</b>	24,52	29,19
<b>CHS</b>	13,8	17,22

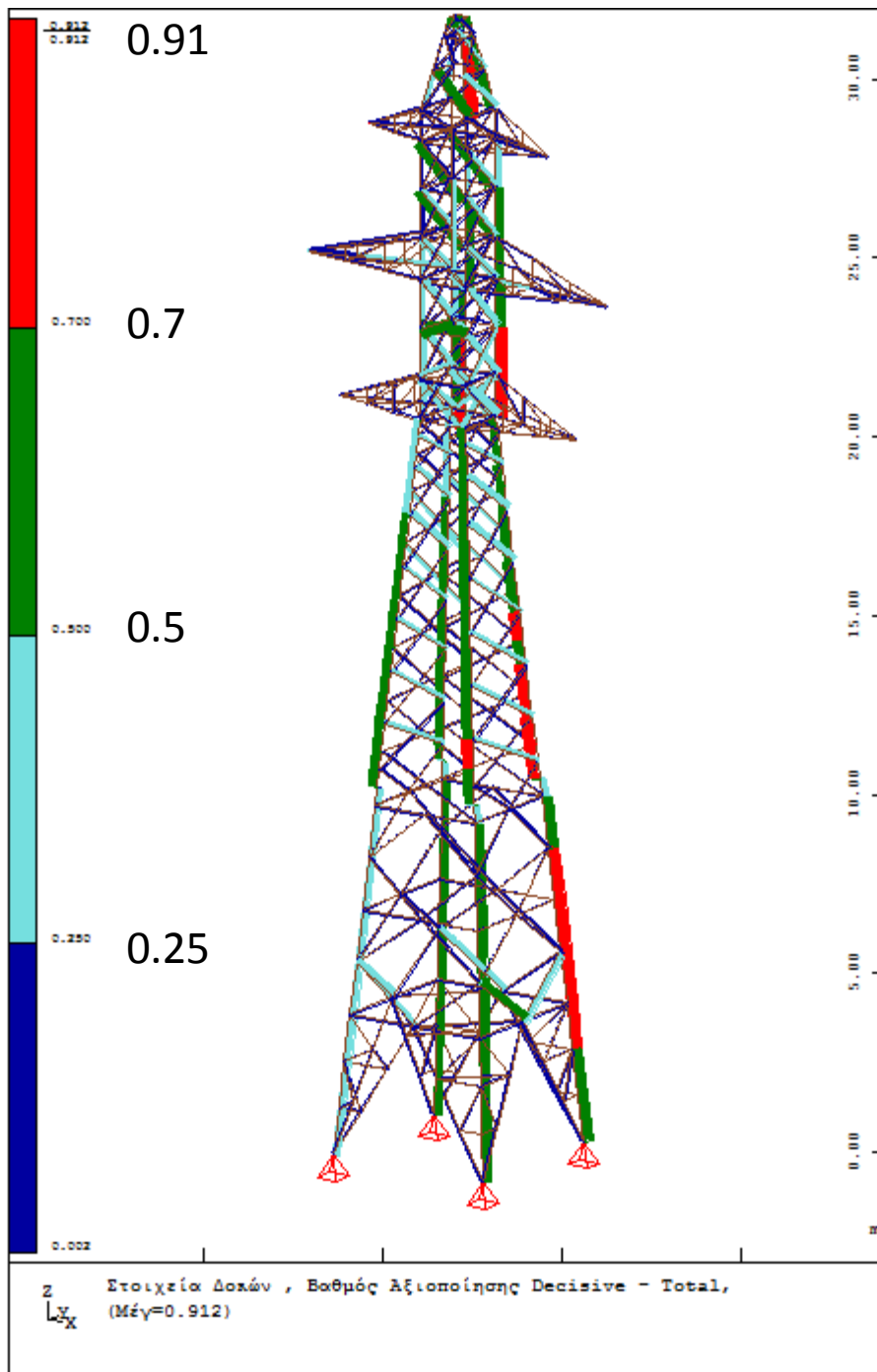
Πίνακας 5.3 Σύγκριση συνολικής δράσης ανέμου σε διεύθυνση 90 μοιρών

	Fw(90),no ice	Fw(90)with ice
<b>L</b>	30,6	39,3
<b>CHS</b>	17,72	23,34

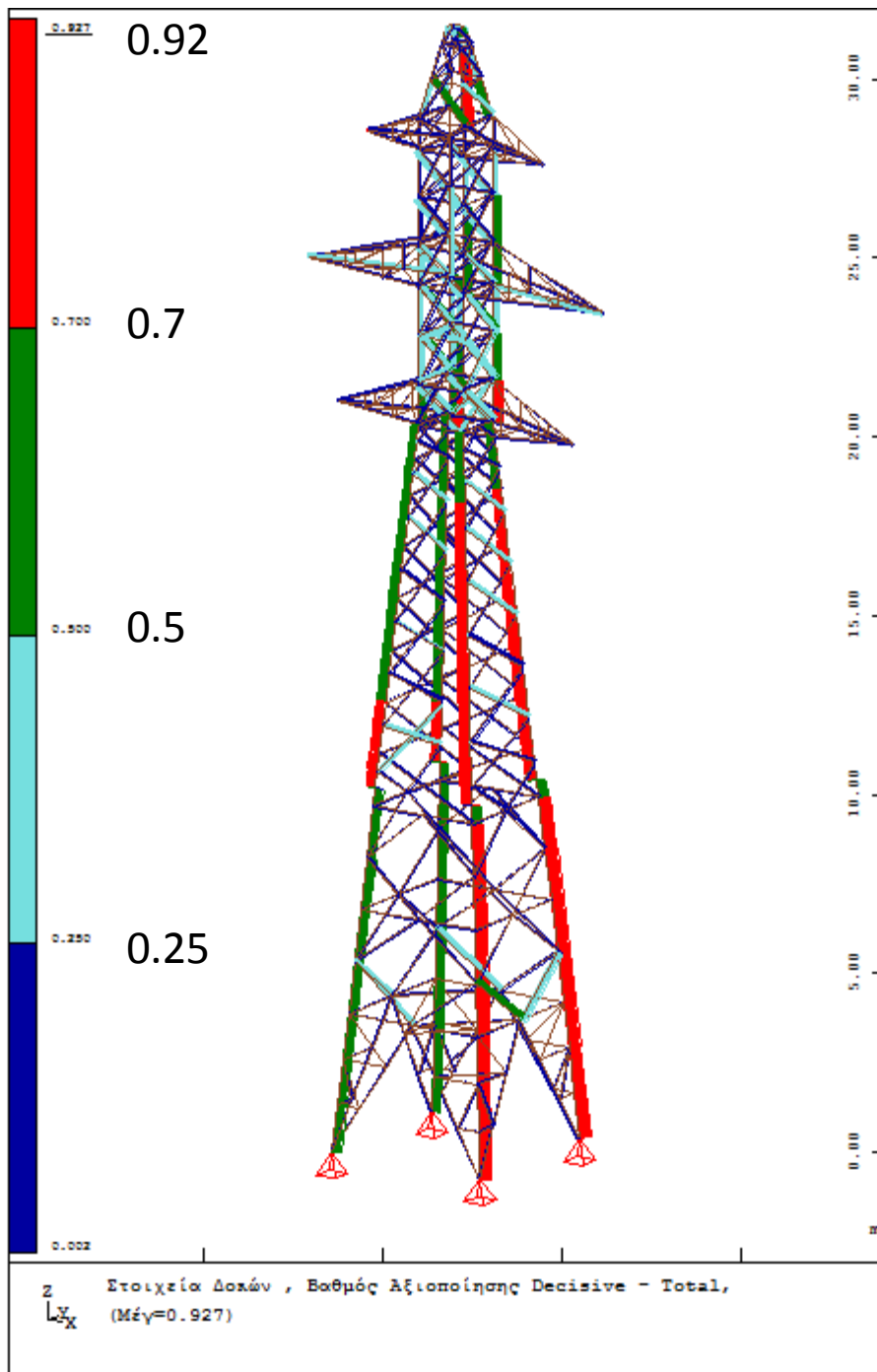
### Ποσοστό αξιοποίησης διατομών

Όσο αφορά το ποσοστό αξιοποίησης των διατομών παρατηρούμε ότι τα μέγιστα παρουσιάζονται σε διαφορετικές θέσεις, ενώ σε γενικές γραμμές οι μέγιστες τιμές τους είναι ίσες. Στην περίπτωση των κυκλικών διατομών το μέγιστο ποσοστό αξιοποίησης παρουσιάζεται στον ορθοστάτη της βάσης του πυλώνα διατομής CHS90x5 και έχει τιμή ίση με 0,927. Στην περίπτωση των γωνιακών διατομών το μέγιστο ποσοστό αξιοποίησης παρουσιάζεται στον ορθοστάτη στη κορυφή του πυλώνα και έχει τιμή ίση με 0,912. Παρατηρήθηκε αύξηση δηλαδή του μεγίστου ποσοστού αξιοποίησης ίση με 1,6%.





Εικόνα 5.1 Ποσοστό αξιοποίησης γωνιακών διατομών



Εικόνα 5.2 Ποσοστό αξιοποίησης κυκλικών διατομών

### Συνολικό βάρος του φορέα

Το βάρος του φορέα στην περίπτωση των κυκλικών διατομών προκύπτει ίσο με 37,1 kN, ενώ στην περίπτωση των γωνιακών διατομών προκύπτει ίσο με 55,4 kN. Παρατηρούμε ότι η μείωση του υλικού δηλαδή ισούται με 33%.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### 6 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνολικά από τη διπλωματική εργασία

#### 6.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας

Συνοψίζοντας ο πυλώνας με μέλη γωνιακής διατομής που μελετήθηκε αρχικά έχει συνολικό βάρος κατασκευής ίσο με 55,4 kN. Το φορτίο του ανέμου στη διεύθυνση 0 μοιρών με ύπαρξη παγετού σε συνδυασμό με το ίδιο βάρος του φορέα ήταν ο δυσμενέστερος συνδυασμός στην Οριακή Κατάσταση Αστοχίας.

Ο δεύτερος πυλώνας με μέλη κυκλικής διατομής έχει συνολικό βάρος 37,1 kN, δηλαδή είναι ελαφρύτερος κατά 33% από τον πρώτο. Τα φορτία του ανέμου σε αυτό το πυλώνα είναι σημαντικά μικρότερα, λόγω του μικρότερης προβολής της επιφάνειας των μελών του κάθετα στον άνεμο και της μικρότερης τιμής του συντελεστή δύναμης. Η μείωση των φορτίων του ανέμου σε συνδυασμό με τη μεγαλύτερη δυσκαμψία που παρουσιάζουν τα υποστυλώματα κυκλικής διατομής συντέλεσε σ' αυτή τη μείωση του συνολικού βάρους του πυλώνα.

#### 6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

---

Οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα παρουσιάζονται κάτωθι συνοπτικά:

1. Σχεδιασμός πυλώνα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με μέλη τα οποία θα αποτελούνται από διατομές που θα αξιοποιούνται πλήρως (βελτιστοποίηση διατομής).
2. Ανάλυση και διαστασιολόγηση πυλώνα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για διαφορετικό τύπο πυλώνα.
3. Ανάλυση και διαστασιολόγηση πυλώνα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για διαφορετική κατηγορία γραμμών.

4. Παραγωγή χρονοιστοριών ανέμου για διάφορα φάσματα σχεδιασμού.

5. Επίδραση της θέσης του σπασμένου αγωγού στην ανάλυση και στη διαστασιολόγηση ενός πυλώνα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

## **Βιβλιογραφία**

1. Ερμόπουλος Ι. ,Ευρωκώδικας 1, Βάσεις σχεδιασμού και δράσεις επί των κατασκευών. Ερμηνευτικά σχόλια και παραδείγματα εφαρμογής, εκδότης Κλειδάριθμος, Αθήνα 2005.
2. Ερμόπουλος Ι., Στοιχεία Σχεδιασμού Μεταλλικών Κατασκευών, έκδοση ΕΜΠ
3. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι. και Ιωαννίδης Γ., Σιδηρές Κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3,Τόμος Ι, εκδότης κλειδάριθμος, Αθήνα 2005.
4. Βάγιας Ι., Ερμόπουλος Ι. και Ιωαννίδης Γ., Σιδηρές Κατασκευές, παραδείγματα εφαρμογής του Ευρωκώδικα 3,Τόμος ΙΙ, εκδότης κλειδάριθμος, Αθήνα 1999.
5. Eurocode 0 ,Eurocode-Basis of Structural Design, European Standard EN 1990
6. Eurocode 1 ,Eurocode-Basis of Design and Actions on Structures, European Standard EN 1991