

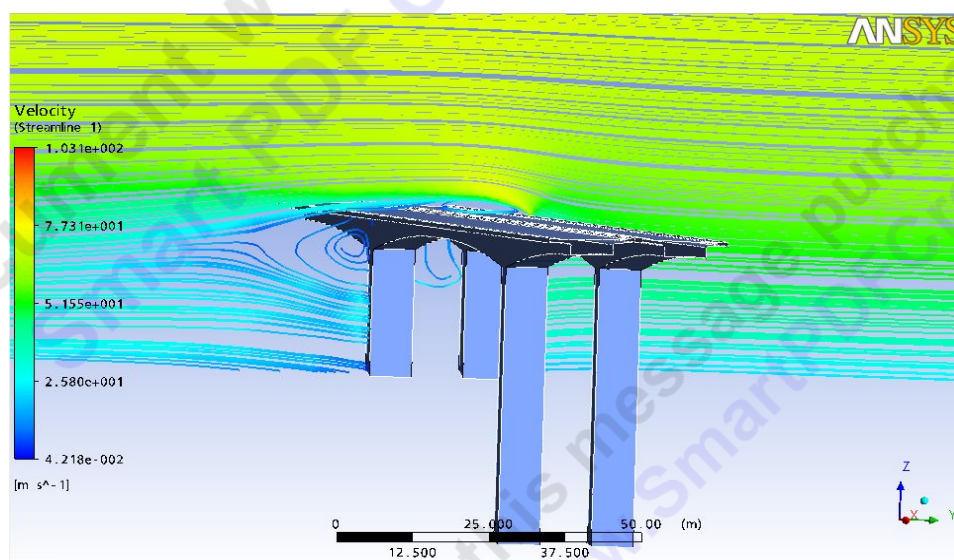


ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Διπλωματική Εργασία

Αριθμητική επίλυση του τριδιάστατου πεδίου ροής γύρω από γέφυρα



Υπό

Χατζημανωλάκη Μαρίας

ΑΜ: 2004010095

Επιβλέπων: Ιωάννης Κ. Νικολός, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά, Ιούνιος 2010

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας και των σπουδών μου νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον κ. Ι. Νικολό, ο οποίος ήταν ο επιβλέπων της εργασίας αυτής. Η προσφορά του, ηθική και διδακτική, είναι πολύ μεγάλη και δεν περιορίζεται μόνο στην πολύ καλή συνεργασία και καθοδήγηση. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους γονείς μου, για τη συμπαράσταση και την υπομονή τους, καθώς και τους φίλους μου, που ήταν πάντα στο πλευρό μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κτιστάκη Παναγιώτη, για την πολύτιμη βοήθεια του, καθώς μαζί αρχίσαμε να δουλεύουμε πάνω στη συγκεκριμένη μεθοδολογία και τον κ. Σαρακήνο Σωτήρη για τις χρήσιμες συμβουλές του.

Ευχαριστίες προς την Εγνατία Α.Ε. που έδωσε τα στοιχεία (και ειδικά προς τους συγκεκριμένους μηχανικούς) και προς την κατασκευαστική που έδωσε τα σχέδια.

ΝΑ ΞΑΝΑΓΙΝΟΥΝ

ΠΕΡΙΧΟΜΕΝΑ.....	2
ΠΕΡΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	4
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	8
ΠΕΡΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	
1.1 ΚΑΛΩΔΙΩΤΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ.....	10
1.1.1 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	11
1.1.2 ΑΠΟΚΟΛΗΣΗ ΔΥΝΩΝ.....	11
1.1.3 ΑΣΤΑΘΕΙΑ ΠΤΕΡΥΓΙΣΜΟΥ.....	13
1.1.4 BUFFETING.....	15
1.1.5 ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	16
1.1.6 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ.....	17
1.1.7 ΛΥΣΕΙΣ.....	18
1.2 ΠΥΡΓΟΙ, ΚΕΡΑΙΕΣ, ΚΤΙΡΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥ ΥΨΟΥΣ.....	19
1.3 ΛΕΠΤΟΙ ΠΥΡΓΟΙ	
1.3.1 ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΟΥ ΑΕΡΑ.....	21
1.3.2 ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΑΘΕΤΗ ΣΤΟΥ ΑΕΡΑ.....	22
1.4 ΠΥΡΓΟΙ ΨΥΞΗΣ.....	25
1.5 ΙΣΤΟΙ.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΦΥΡΕΣ ΑΠΟ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	28
2.2 ΥΛΙΚΑ.....	32
2.2.1 Σκυρόδεμα.....	33
2.2.1.1 Αντοχή σε θλίψη.....	33
2.2.1.2 Αντοχή σε εφελκυσμό.....	35
2.2.2 ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΜΕ ΧΑΛΥΒΑ.....	36
2.2.2.1 Γεωμετρία ράβδων ενίσχυσης.....	36
2.2.2.2 Ιδιότητες.....	37
2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΓΕΦΥΡΩΝ.....	37
2.3.1 SLAB.....	38
2.3.2 T-BEAM.....	39
2.3.3 BOX-GIRDER.....	39
2.4 ΦΟΡΤΙΑ.....	41
2.4.1 ΦΟΡΤΙΑ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ.....	41
2.4.1.1 Μόνιμα φορτία.....	41
2.4.1.2 Προσωρινά φορτία.....	42

2.4.2 ΚΟΠΩΣΗ.....	44
2.4.3 ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ.....	44
2.4.4 ΦΥΓΟΚΕΝΤΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ.....	45
2.4.5 ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΣΕΙΣ.....	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΓΕΦΥΡΑΣ	
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	47
3.2 ΣΚΟΠΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	47
3.3 ΠΛΕΥΡΙΚΑ (LATERAL) ΦΟΡΤΙΑ.....	49
3.4 ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ.....	49
3.5 ΤΥΡΒΗ ΑΝΕΜΟΥ.....	51
3.6 ΕΞΙΣΩΣΗ BERNOULLI.....	52
3.7 ΑΡΙΘΜΟΣ REYNOLDS.....	52
3.8 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	53
3.9 ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΓΙΑ ΓΕΦΥΡΕΣ.....	54
3.10 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	58
3.11 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	61
3.11.1 ΑΕΡΟΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	62
3.11.2 VORTEX SHEDDING.....	64
3.11.3 FLUTTER.....	69
3.11.4 Τυρβώδης ροή.....	74
3.11.5 BUFFETING.....	74
3.11.6 GALLOPING.....	79
3.11.7 ΑΠΟΚΛΙΣΗ QUASI-STATIC.....	80
3.12 ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΚΑΤΑΣΤΡΩΜΑΤΟΣ.....	81
3.13 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΤΗΝ ΑΕΡΟΣΗΡΑΓΓΑ.....	82
3.13.1 Εισαγωγή.....	82
3.13.2 Sectional model.....	83
3.13.3 Taut strip model.....	83
3.13.4 Aeroelastic model.....	84
3.14 ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗ.....	87
3.15 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΑΤΙΑ	
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	90
4.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	92
4.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΛΑΦΟΥΣ.....	100
4.4 ΤΕΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΦΥΡΑΣ.....	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ, ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ	
5.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	108
5.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	109
5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ.....	118
5.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΕΠΙΛΥΤΗ.....	126

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΗΣΗΣ	
6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	128
6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	144
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	146
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	153

ΝΑ ΞΑΝΑΓΙΝΟΥΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Γέφυρα Akashi-Kaikyo στην Ιαπωνία

Εικόνα 1.2: Γέφυρα Tatara Bridge στην Ιαπωνία

Εικόνα 1.3: Τυπικές διευθύνσεις αέρα και καλωδίων για την ύπαρξη ταλάντωσης.

Εικόνα 1.4: Διαχωρισμός της ροής που προκαλείται από το νερό της βροχής.

Εικόνα 1.5: Επιφάνειες καλωδίων με διαφορετικές τραχύτητες.

Εικόνα 1.6: Κατακόρυφα καλώδια στήριξης.

Εικόνα 1.7: Σύγκριση πειραματικών και τυποποιημένων τιμών C_D .

Εικόνα 1.8: Αεροελαστικό μοντέλο του πύργου Macau σε πειράματα αεροσήραγας

Εικόνα 1.9: Αστοχία των πύργων ψύξης στο Ferrybridge στη Βρετανία

Εικόνα 2.1: Γέφυρα Taft Bridge με κατάστρωμα οπλισμένου σκυροδέματος

Εικόνα 2.2: Key Bridge

Εικόνα 2.3: Γέφυρα Arlington Memorial

Εικόνα 2.4: Γέφυρα Bixby Creek

Εικόνα 2.5: Γέφυρα Rouge River με προεντεταμένο σκυρόδεμα.

Εικόνα 2.6: Γέφυρα Nara River τύπου girder.

Εικόνα 2.7: Μορφή γέφυρας επιτόπιας χύτευσης

Εικόνα 2.8: Κατηγορίες διατομές υπερκατασκευών γέφυρας οπλισμένου σκυροδέματος

Εικόνα 2.9: Τύπος γέφυρας κατηγορίας slab

Εικόνα 2.10: Τύπος γέφυρας κατηγορίας T-Beam

Εικόνα 2.11: Τύπος γέφυρας κατηγορίας Box-Girder

Εικόνα 2.12: Ανάλυση φορτηγού τριών αξόνων σε γέφυρα
Εικόνα 2.13: Ανάλυση οχήματος δυο αξόνων σε γέφυρα
Εικόνα 2.14: Ανάλυση δύο τριαξονικών οχημάτων σε γέφυρα
Εικόνα 2.15: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος για φυγοκεντρικές δυνάμεις
Εικόνα 2.16: Διάγραμμα ελεύθερου σώματος για δυνάμεις επιβράδυνσης
Εικόνα 3.1: Αντικείμενο σε ασυμπιεστή ροή
Εικόνα 3.2: Κατανομή ταχύτητας στο οριακό στρώμα
Εικόνα 3.3: Δημιουργία δινών σε αιχμηρές γεωμετρίες
Εικόνα 3.4: Οι δυο κατηγορίες συστημάτων συντεταγμένων.
Εικόνα 3.5: Κατανομή πίεσης για κατάστρωμα με κατακόρυφες μετατοπίσεις.
Εικόνα 3.6: Κατανομή συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τιμές V_r
Εικόνα 3.7: Αστοχία της γέφυρας Brighton Chain Pier
Εικόνα 3.8: Επίδραση αεροελαστικών φορτίων στην γέφυρα Tacoma Narrows
Εικόνα 3.9: Αποκόλληση δινών από τη ροή σε διαφορετικές γεωμετρίες καταστρώματος γέφυρας
Εικόνα 3.10: Φορτία λόγω αποκόλλησης δυνών και επακόλουθες μετατοπίσεις
Εικόνα 3.11: Φαινόμενο lock-in και ταλαντώσεις στο κατάστρωμα της γέφυρας
Εικόνα 3.12: Αστοχία της γέφυρας Tacoma Narrow λόγω στρεπτικών ροπών
Εικόνα 3.13: Αναπαράσταση των δινών που οδήγησαν στην αστοχία της γέφυρας
Εικόνα 3.14: Κυματισμός καταστρώματος γέφυρας.
Εικόνα 3.15: Μετατοπίσεις από την ροή αέρα εξαιτίας του buffeting
Εικόνα 3.16: Σχετική κίνηση και galloping κάθετα στον άνεμο.
Εικόνα 3.17: Απόκλιση λόγω στρέψης στο κατάστρωμα γέφυρας.
Εικόνα 3.18: Μηχανισμοί βελτίωσης αεροδυναμικής συμπεριφοράς καταστρώματος
Εικόνα 3.19: Μοντέλο τμήματος του καταστρώματος με κατασκευασμένες τις λεπτομέρειες.
Εικόνα 3.20: Μοντέλο τμήματος καταστρώματος για μελέτη δυναμικής συμπεριφοράς
Εικόνα 3.21: Κανονικό αεροελαστικό μοντέλο γέφυρας.
Εικόνα 3.22: Πλέγμα για την μοντελοποίηση της ροής στο κατάστρωμα της γέφυρας
Εικόνα 3.23: Αναπαράσταση της ροής με την βοήθεια CFD.
Εικόνα 4.1: Πλάγια όψη αριστερού κλάδου
Εικόνα 4.2 : Πλάγια όψη δεξιά κλάδου
Εικόνα 4.3 : Τομή καταστρώματος γέφυρας
Εικόνα 4.4 : Τοπογραφικό περιοχής κατασκευής γέφυρας Παναγιάς-Γρεβενά
Εικόνα 4.5 : Σχεδιασμός διατομών σε διαφορετικά επίπεδα
Εικόνα 4.6 : Ενδεικτικό sketch διατομής σε κάποιο επίπεδο
Εικόνα 4.7 : Fill δυο διαδοχικών διατομών
Εικόνα 4.8 : Πρότυπο κομμάτι για τον σχεδιασμό του καταστρώματος
Εικόνα 4.9 : Αριστερό κατάστρωμα της γέφυρας
Εικόνα 4.10: CloseSurface αριστερού καταστρώματος

Εικόνα 4.11 : Δεξιό κατάστρωμα γέφυρας
Εικόνα 4.12 : Διατομές κολώνων της γέφυρας
Εικόνα 4.13 : Τρισδιάστατο μοντέλο γέφυρα
Εικόνα 4.14 : Ισοϋψείς Καμπύλες
Εικόνα 4.15 : Επιφάνεια Εδάφους
Εικόνα 4.16 : Προέκταση Επιφάνειας Εδάφους
Εικόνα 4.17 : Κλειστή επιφάνεια εδάφους
Εικόνα 4.18 : Τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους
Εικόνα 4.19 : Add Τρισδιάστατου μοντέλου
Εικόνα 4.20 : Sketch απλοποιημένου σχεδίου
Εικόνα 4.21 : Fill απλοποιημένου σχεδίου εδάφους
Εικόνα 4.22 : Τρισδιάστατο μοντέλο απλοποιημένου σχεδίου εδάφους
Εικόνα 4.23 : Τελικό Extrude
Εικόνα 4.24 : Όγκος αέρα
Εικόνα 5.1: Αφαίρεση τμήματος αρχικού όγκου του μοντέλου
Εικόνα 5.2: Τελικός όγκος αέρα
Εικόνα 5.3: Επιφάνειες Inlet-Atmosphere-Symmetry
Εικόνα 5.4: Επιφάνειες Outlet-Atmosphere-Ground
Εικόνα 5.5: Default 2D Region
Εικόνα 5.6: Face Spacing 1
Εικόνα 5.7: Face Spacing 2
Εικόνα 5.8: Παράμετροι Face Spacing 1
Εικόνα 5.9: Παράμετροι Face Spacing 2
Εικόνα 5.10: Πίνακας με τιμές του Inflation
Εικόνα 5.11: Inflated Boundary 1
Εικόνα 5.12: Inflated Boundary 2
Εικόνα 5.13: Πλέγμα για τις επιφάνειες Inlet-Atmosphere-Symmetry
Εικόνα 5.14: Πλέγμα για τις επιφάνειες Outlet-Atmosphere-Ground
Εικόνα 5.15: Πλέγμα γύρω από τη γέφυρα
Εικόνα 5.16: Πλέγμα στο έδαφος
Εικόνα 5.17: Πλέγμα στις γωνίες
Εικόνα 5.18: Πλέγμα (Χαρακτηριστικά)
Εικόνα 5.19: Ορισμός Πεδίου Ροής
Εικόνα 5.20: Επιφάνεια Default Domain
Εικόνα 5.21: Επιφάνεια Γέφυρας
Εικόνα 5.22: Οριακές Συνθήκες στη Γέφυρα
Εικόνα 5.21: Επιφάνεια Ατμόσφαιρας
Εικόνα 5.22: Οριακές Συνθήκες στην Ατμόσφαιρα
Εικόνα 5.23: Επιφάνεια του Εδάφους
Εικόνα 5.24: Οριακές Συνθήκες στο Έδαφος
Εικόνα 5.25: Επιφάνεια της Εισόδου
Εικόνα 5.26: Προφίλ ταχύτητας
Εικόνα 5.27: Οριακές Συνθήκες στην Είσοδο
Εικόνα 5.28: Επιφάνεια της Εξόδου

Εικόνα 5.29: Οριακές Συνθήκες στην Έξοδο

Εικόνα 5.30: Επιφάνεια Συμμετρίας

Εικόνα 5.31: Οριακές Συνθήκες στην Συμμετρική Επιφάνεια

Εικόνα 5.32: Ορισμός των παραμέτρων του επιλύτη.

Εικόνα 5.33: Τυπικό γράφημα πορείας της σύγκλισης για τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας (κόκκινο χρώμα: υπόλοιπο εξίσωσης συνέχειας, πράσινο χρώμα: υπόλοιπο εξίσωσης x-ορμής, γαλάζιο χρώμα: υπόλοιπο y-ορμής, πορτοκαλί χρώμα: υπόλοιπο z-ορμής).

Εικόνα 6.1: Γραμμές ροής στην επιφάνεια του εδάφους

Εικόνα 6.2: Γραμμές Ροής στον πρώτο πυλώνα της γέφυρας

Εικόνα 6.3: Γραμμές Ροής στον δεύτερο πυλώνα της γέφυρας

Εικόνα 6.4: Γραμμές Ροής στη επιφάνεια Συμμετρίας

Εικόνα 6.5: Vectors στον πρώτο πυλώνα της γέφυρας

Εικόνα 6.6: Vectors στον δεύτερο πυλώνα της γέφυρας

Εικόνα 6.7: Vectors στη συμμετρική επιφάνεια

Εικόνα 6.8: Οριακό στρώμα στην είσοδο

Εικόνα 6.9: Οριακό στρώμα 80m πριν τη γέφυρα

Εικόνα 6.10: Οριακό στρώμα ανάμεσα στα δύο καταστρώματα της γέφυρας

Εικόνα 6.11: Οριακό στρώμα 30m μετά τη γέφυρα

Εικόνα 6.12: Isosurface στα 20 m/s

Εικόνα 6.14: Isosurface στα 40 m/s

Εικόνα 6.13: Isosurface στα 60 m/s

Εικόνα 6.15: Isosurface στα 70 m/s

Εικόνα 6.16: Isosurface στα 80 m/s

Εικόνα 6.17: Πίεση πάνω στη γέφυρα(1)

Εικόνα 6.18: Πίεση πάνω στη γέφυρα (2)

Εικόνα 6.19: Πίεση στην επιφάνεια της ατμόσφαιρας

Εικόνα 6.20: Πίεση στην επιφάνεια των πρώτων πυλώνων

Εικόνα 6.21: Πίεση στην επιφάνεια των δεύτερων πυλώνων

Εικόνα 6.22: Πίεση στην επιφάνεια συμμετρίας

Εικόνα 6.23: Πίεση στην είσοδο

Εικόνα 6.24: Πίεση ανάμεσα στα δύο καταστρώματα της γέφυρας

Εικόνα 6.25: Πίεση 30m μετά τη γέφυρα

Εικόνα 6.26: Isosurface στα 900 Pa

Εικόνα 6.27: Isosurface στα 450 Pa

Εικόνα 6.28: Isosurface στα 0 Pa

Εικόνα 6.29: Isosurface στα -300 Pa

Εικόνα 6.30: Isosurface στα -1300 Pa

Εικόνα 6.31: Δύναμη που ασκείται στη γέφυρα στην κατεύθυνση των τριών αξόνων

Εικόνα Π1: 1^η κάθετος

Εικόνα Π2: 2^η κάθετος

Εικόνα Π3: 3^η κάθετος

Εικόνα Π4: 4^η κάθετος

Εικόνα Π5: 5^η κάθετος

Εικόνα Π6: 6^η κάθετος

ΝΑ ΞΑΝΑΓΙΝΟΥΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1: Ταλαντώσεις από αποκόλληση δινών σε γέφυρες.

Πίνακας 1.2 : Επιπτώσεις ανά ήπειρο των φυσικών καταστροφών

Πίνακας 2.1: Κατηγορίες σκυροδέματος και ιδιότητες

Πίνακας 2.2: Τυποποίηση ράβδων οπλισμού σκυροδέματος

Πίνακας 2.3: Ιδιότητες υλικών που χρησιμοποιούνται σε μια γέφυρα.

Πίνακας 3.1: Επιπτώσεις ανά ήπειρο των φυσικών καταστροφών

Πίνακας 3.2: Τιμές για τις σταθερές Νο και Ζο

Πίνακας 4.1: Δεδομένα μηχανολογικού σχεδίου

Πίνακας Π1: Αρχείο Οριακού Στρώματος

ΝΑ ΞΑΝΑΓΙΝΟΥΝ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1.1: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών κρίσιμων τιμών ταχύτητας πτερυγισμού.

Διάγραμμα 1.2: Σύγκριση πειραματικών και τυποποιημένων τιμών C_D .

Διάγραμμα 1.3: Περιοχές ταλάντωσης κάθετα στην φορά του ανέμου για πύργους και καμινάδες εργοστασίου.

Διάγραμμα 1.4: Ανάλυση σε διάτμηση, κάμψη ιστού ύψους 295 m.

Διάγραμμα 1.5: Ζημιές ανά έτος από φυσικές καταστροφές σε δισεκατομμύρια δολάρια

Διάγραμμα 2.1: Καμπύλες αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος.

Διάγραμμα 2.2: Καμπύλες τάνυσης των ράβδων οπλισμένου σκυροδέματος

Διάγραμμα 3.1: Ζημιές ανά έτος από φυσικές καταστροφές σε δισεκατομμύρια δολάρια

Διάγραμμα 3.2 : Κατανομές συντελεστή πίεσης για διαφορετικές γεωμετρίες
Καταστρώματος

Διάγραμμα 3.3: Συντελεστές δυνάμεων και ροπής και διαφορετικές γεωμετρίες.

Διάγραμμα 3.4: Κατακόρυφη μετατόπιση για στρωτή και τυρβώδη ροή

Διάγραμμα 3.5: Δεδομένα για την διεύθυνση του ανέμου, την ταχύτητά του, βέλος κάμψης, κατακόρυφη μετατόπιση

Διάγραμμα 3.6: Κατακόρυφες και οριζόντιες μετατοπίσεις αεροελαστικού μοντέλου γέφυρας σε διαφορετικές ταχύτητες

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση της ροής γύρω από τη γέφυρα Παναγιάς της Εγνατίας Οδού, με σκοπό να υπολογιστούν τα φορτία, που αναπτύσσονται στην κατασκευή από την ροή του αέρα. Η γέφυρα που θα μελετήσουμε ανήκει στην κατηγορία οπλισμένου σκυροδέματος.

Ξεκινώντας παραθέτουμε μια συνοπτική ανάλυση των κατασκευών που παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον όσον αφορά στην αεροδυναμική συμπεριφορά τους. Η ανάλυση περιλαμβάνει συγκεκριμένους τύπους γεφυρών, αλλά και κατασκευές όπως πύργοι, κεραιές, δικτυωτές κατασκευές και ψυκτικοί πύργοι. Στη συνέχεια επικεντρωνόμαστε στις γέφυρες οπλισμένου σκυροδέματος, που αφορούν και στο αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Κατόπιν παραθέτουμε μια ανάλυση των αεροδυναμικών φορτίων, λόγω της ροής του αέρα, αλλά και τις επακόλουθες αντιδράσεις της κατασκευής μας στη ροή. Ανάλογα με την ταχύτητα και την τύρβη της ροής, ο αέρας προκαλεί στην γέφυρα φαινόμενα όπως ταλαντώσεις του καταστρώματος, στρέψη αυτού και καταπονήσεις, που πρέπει να μελετηθούν με ακρίβεια για την αξιόπιστη κατασκευή μιας γέφυρας.

Ακολουθεί ο σχεδιασμός του ψηφιακού μοντέλου της γέφυρας που θα μελετήσουμε. Ο σχεδιασμός πραγματοποιήθηκε με το εμπορικό λογισμικό CATIA, ενώ παρουσιάζεται βήμα προς βήμα η διαδικασία που ακολουθήθηκε, εξηγώντας τις επιλογές που έγιναν σε κάθε σημείο.

Αφού ολοκληρωθεί το μοντέλο της γέφυρας δημιουργείται το υπολογιστικό πλέγμα, που περιβάλλει το μοντέλο, για την προσομοίωση της ροής. Στη συνέχεια γίνεται ο ορισμός των οριακών συνθηκών της ροής. Στο παράρτημα, που βρίσκεται στο τέλος της εργασίας, παρουσιάζεται ο τρόπος εισαγωγής του προφίλ του οριακού στρώματος στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου. Η αριθμητική προσομοίωση της ροής πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του εμπορικού λογισμικού ANSYS-CFX.

Τέλος στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αεροδυναμικής ανάλυσης της γέφυρας. Εξάγονται συμπεράσματα, που αφορούν στην ταχύτητα και στην πίεση της ροής του αέρα κατά την διέλευσή της από την γέφυρα, ενώ υπολογίζονται τα αεροδυναμικά φορτία που καλείται να αντιμετωπίσει η γέφυρα.

ΔΩΣΕ ΑΝΑΦΟΡΕΣ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΠΟΥ ΕΧΕΙΣ ΒΑΛΕΙ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΚΑΙ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

1.1 ΚΑΛΩΔΙΩΤΕΣ ΓΕΦΥΡΕΣ

Οι καλωδιωτές γέφυρες αναδύθηκαν την δεκαετία του '50 στην Γερμανία σαν ένας αποτελεσματικός τρόπος κάλυψης του ενδιάμεσου ανοίγματος μιας γέφυρας. Με το τέλος όμως του εικοστού αιώνα το ανάπτυγμα σε κρεμαστές και καλωδιωτές γέφυρες έχει φτάσει σε μεγαλύτερα επίπεδα. Η πιο μεγάλη σε μήκος κρεμαστή γέφυρα στο τέλος του εικοστού αιώνα είναι η γέφυρα Akashi-Kaikyo Straits, Εικόνα 1.1, στην Ιαπωνία, η οποία έχει συνολικό μήκος σχεδόν 4 χλμ., με κύριο ανάπτυγμα 1990 μέτρα. Η σχεδίαση αυτής της γέφυρας βασίστηκε στα αεροδυναμικά χαρακτηριστικά της.



Εικόνα 1.1: Γέφυρα Akashi-Kaikyo στην Ιαπωνία [αναφορά].

Η μεγαλύτερη καλωδιωτή γέφυρα είναι η Tatara Bridge, επίσης στην Ιαπωνία, με συνολικό μήκος 1480 μέτρα, και ανάπτυγμα 890 μέτρα, Εικόνα 1.2. Καθώς το ανάπτυγμα αυξάνεται, οι δυνάμεις που προκαλούνται από τον αέρα αποκτούν μεγαλύτερη σημασία στον σχεδιασμό μιας γέφυρας, και για τις πιο μεγάλες σε μήκος κρεμαστές και καλωδιωτές γέφυρες, εκπονούνται εκτενείς αεροδυναμικές μελέτες. Τα δυναμικά φορτία, που προκαλούνται από τον αέρα, προκαλούν ισχυρές αποκρίσεις και οι αεροελαστικές δυνάμεις, λόγω της

αλληλεπίδρασης της ροής και του ελαστικού σώματος της γέφυρας, πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι γέφυρες με μεγάλο ανάπτυγμα συνήθως διασχίζουν μεγάλες εκτάσεις με νερό, και είναι πιθανό να είναι εκτεθειμένες σε ροές με σχετικά χαμηλό επίπεδο τύρβης, τουλάχιστον σε χαμηλής ταχύτητας αέρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανίζονται μερικές περιπτώσεις όπου προκαλούνται δονήσεις στο κατάστρωμα της γέφυρας που δημιουργούνται από στροβιλισμούς. Το φαινόμενο της παραγωγής στροβιλισμών (vortex shedding) συμβαίνει είτε η ροή πριν συναντήσει την κατασκευή μας είναι τυρβώδης είτε όχι και οι επαγόμενες επιφανειακές πιέσεις στην κατασκευή μας, που εμφανίζουν διακύμανση, μπορούν να διακριθούν από τις προκαλούμενες από την διακύμανση της ροής που πλησιάζει την κατασκευή.



Εικόνα 1.2: Γέφυρα Tatara Bridge στην Ιαπωνία [αναφορά].

Ο μηχανισμός που προκαλεί τη δημιουργία των στροβιλισμών (όταν η ροή συναντήσει μια μεγάλη μήκους κατασκευή) είναι η τάση του αποκολλημένου οριακού στρώματος να κινηθεί ανοδικά εναλλάξ στην μια πλευρά και μετά στην άλλη πλευρά της κατασκευής. Είναι πιθανό οι ταλαντώσεις, που θα δημιουργηθούν στην κατασκευή μας (από την επίδραση των στροβίλων), να ενισχύσουν την ένταση των στροβίλων, ενώ η συχνότητα των στροβίλων να γίνει η συχνότητα δόνησης της κατασκευής, ένα φαινόμενο γνωστό ως lock-in. Επίσης, καθώς κάθε στρόβιλος διαχέεται, προκαλείται μια ισχυρή δύναμη κάθετη στην διεύθυνση της κατασκευής μας και, καθώς οι στρόβιλοι προκαλούνται εναλλάξ από την ροή που διέρχεται της κατασκευής, η κάθετη

δύναμη έχει μια αρμονική, ημιτονοειδή, μορφή. Για δεδομένες γεωμετρίες διατομών η συχνότητα των στροβίλων που διαχέονται, n_s , είναι ανάλογη με την ταχύτητα της ροής που προσεγγίζει την κατασκευή και αντιστρόφως ανάλογη του πλάτους της κατασκευής. Μπορεί να εκφραστεί ως αδιάστατο μέγεθος, γνωστό και ως αριθμός Strouhal, που δίνεται από την παρακάτω σχέση [3,5].

$$St = \frac{n_s b}{\bar{U}}$$

όπου

b : είναι το πλάτος της διατομής της κατασκευής

\bar{U} : η μέση ταχύτητα της ροής του αέρα

1.1.1 Δυναμική απόκριση γέφυρας μεγάλου τόξου

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί, για αρκετά εύρη ταχύτητας της ροής του αέρα, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν δυναμική απόκριση στο κατάστρωμα μιας γέφυρας μεγάλου τόξου, όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Στροβιλισμοί που διαχέονται, το οποίο συνήθως συμβαίνει σε χαμηλές ταχύτητες ροής του αέρα και συνθήκες χαμηλής τύρβης.
- Πτερυγισμός και αστάθειες διαφορετικών τύπων που προκαλεί αυτός. Συμβαίνει σε πολύ υψηλές ταχύτητες αέρα για αεροδυναμικώς σταθερά καταστρώματα, κυρίως εξαιτίας της επικράτησης αεροδυναμικών φορτίων. Συνήθως προκαλούνται στρεπτικές ροπές, ενώ μπορεί να περιλαμβάνονται και κατακόρυφες καμπτικές μετατοπίσεις.
- Μεταβλητές φορτίσεις, που προκαλούνται από δυνάμεις που οφείλονται στην τύρβη. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει για μεγάλο εύρος ταχυτήτων ροής αέρα, ενώ αυξάνει όσο αυξάνεται η ταχύτητα του αέρα.

Η φύση των μηχανισμών αυτών αναλύεται στη συνέχεια.

1.1.2 Αποκόλληση δινών (vortex shedding)

Το φαινόμενο αυτό είναι δίνες που αποκολλούνται ασύμμετρα, μια από τη μία πλευρά και μια από την άλλη πλευρά του στερεού. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, αυτές οι δίνες μπορεί να προκαλέσουν σημαντική, αλλά περιορισμένη, ενίσχυση των ταλαντώσεων. Οι συνθήκες, που απαιτούνται για να συμβεί αυτό το φαινόμενο, είναι μερικές ή όλες από τις παρακάτω:

- Διεύθυνση του ανέμου εναρμονισμένη με τον διαμήκη άξονα της γέφυρας.
- Συνθήκες χαμηλής τύρβης (τυπικά μικρότερη από 0,05).
- Η ταχύτητα του αέρα σε ένα κρίσιμο εύρος τιμών (5-12 m/s).

➤ Χαμηλή υγρασία (1% ή χαμηλότερη)

Οι παραπάνω συνθήκες μπορούν να ικανοποιηθούν τόσο για τις μικρού όσο και για τις μεσαίου μήκους καλωδιωτές τοξωτές γέφυρες αλλά και πιο μεγάλες κρεμαστές τοξωτές γέφυρες. Για αριθμό Strouhal σε ένα εύρος τιμών από 0,1 έως 0,2, ανάλογα με το βάθος της διατομής του καταστρώματος, κανονικές συχνότητες σε ένα εύρος τιμών 0,1 έως 0,6 Hz, κρίσιμες τιμές ταχύτητας για την ροή αέρα από 6 έως 15 m/s μπορούν να παράγουν σημαντικές δυναμικές φορτίσεις. Συνθήκες χαμηλής τύρβης μπορούν να συμβούν σε “σταθερές” ατμοσφαιρικές συνθήκες, συχνά νωρίς τις πρωινές ή απογευματινές ώρες. Καταγεγραμμένα παραδείγματα αυτής της συμπεριφοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Σε δοκιμές που έγιναν σε αεροσήραγγα για στρωτή ροή συγκεντρώθηκαν δεδομένα ικανά να δώσουν τη δυνατότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς μιας γέφυρας σε πραγματικό μέγεθος. Για την περίπτωση της γέφυρας Long Creek, όπου οι ταλαντώσεις ήταν αρκετά ισχυρές ώστε να απαιτηθούν επανορθωτικές παρεμβάσεις, προστέθηκαν τριγωνικά αεροδυναμικά τμήματα (fairing) στα τελειώματα και ένα έλασμα κάτω από το κατάστρωμα, με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Στην κρεμαστή γέφυρα Great Belt East (τύπου box girder), χρησιμοποιήθηκαν πτερύγια καθοδήγησης στις χαμηλότερες γωνίες, μια μέθοδος που είναι γνωστή για την ικανότητά της να περιορίζει επιτυχώς τις δονήσεις που οφείλονται στις δίνες που αποκολλώνται, φαινόμενο που δημιουργούνται σε τέσσερις διαφορετικές συχνότητες και σε ένα μεγάλο εύρος ταχυτήτων ροής αέρα [3,5].

Όνομα	Φυσική Συχνότητα (Hz)	Κρίσιμη ταχύτητα (m/s)	Μέγιστο πλάτος ταλάντωσης (mm)
Long's Creek Bridge	0.6	12	100-170
Wye Bridge	0.46	7.5	35
Waal River	0.44	9-12	50
Great Belt East	0.13-0.21	4.5-9	320

Πίνακας 1.1: Ταλαντώσεις από αποκόλληση δινών σε γέφυρες [αναφορά].

1.1.3 Αστάθεια πτερυγισμού

Για την ανάλυση αυτού του φαινομένου, το οποίο περιλαμβάνει ένα ζεύγος κινήσεων, περιστροφή και κατακόρυφη μετατόπιση, έχει αναπτυχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο δύο εξισώσεων που περιγράφουν αυτές τις κινήσεις. Το μέγεθος της επιρροής του πτερυγισμού στο κατάστρωμα μιας γέφυρας εξαρτάται από την τιμή και το πρόσημο ενός μεγέθους που ονομάζεται αεροελαστική παράγωγος. Μέσα στο μαθηματικό μοντέλο υπάρχουν περίπου

δεκαοχτώ τέτοιες παράγωγοι, άλλες με μεγαλύτερες και άλλες με μικρότερες τιμές, ως συνάρτηση της ταχύτητας του αέρα. Για παράδειγμα μια θετική τιμή σε μια συγκεκριμένη παράγωγο είναι ένδειξη ύπαρξης πτερυγισμού σε καθαρά περιστροφική κίνηση.

Λεδομένα για τις τιμές των παραγώγων A_i και H_i αποκτώνται με τη διεξαγωγή πειραματικών μετρήσεων σε αεροδυναμική σήραγγα. Τα πειράματα στην αεροδυναμική σήραγγα πραγματοποιούνται για στρωτή ροή, χαμηλό επίπεδο τύρβης, καθώς έχει βρεθεί από παλαιότερες έρευνες ότι η επίδραση της τύρβης στις τιμές των παραγώγων του μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει το φαινόμενο αυτό είναι μικρή.

Παρόλο που το μέγεθος των παραγώγων μας δίνει μια ένδειξη για την συμπεριφορά ενός συγκεκριμένου τμήματος σε αεροδυναμικά παραγομένη αστάθεια στο στάδιο του σχεδιασμού μιας γέφυρας μεγάλου τόξου, είναι συνηθισμένη πρακτική να προσπαθούν οι υπεύθυνοι να προσδιορίσουν μια κρίσιμη τιμή για την ταχύτητα όπου σημειώνεται πτερυγισμός για την διατομή της γέφυρας. Στην περίπτωση που η ταχύτητα της ροής του αέρα δεν ξεπερνά την ταχύτητα σχεδιασμού (που έχει χρησιμοποιηθεί για τον αέρα στο ύψος του καταστρώματος) γίνονται τροποποιήσεις στο κατάστρωμα της γέφυρας.

Μερικές μέθοδοι, που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της κρίσιμης τιμής της ταχύτητας που εμφανίζεται πτερυγισμός, είναι οι παρακάτω:

- Εμπειρικές μέθοδοι.
- Πειραματικός προσδιορισμός με την χρήση μοντέλων προσομοίωσης της κατασκευής.
- Θεωρητική ανάλυση χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν το φαινόμενο του πτερυγισμού με τις τιμές των παραγώγων να προκύπτουν από πειραματικές μετρήσεις.

Ο Selberg το 1963 [αναφορά] πρότεινε μια εμπειρική εξίσωση για τον προσδιορισμό της κρίσιμης ταχύτητας πτερυγισμού U_F , η οποία σε μια απλοποιημένη μορφή διατυπώνεται:

$$U_F = 0,44 * d * \sqrt{(\omega_T^2 - \omega_V^2) * \frac{\sqrt{v}}{\mu}}$$

όπου

$$v = 8 * \left(\frac{r}{d}\right)^2, \text{ με } r \text{ την ακτίνα της ροπής αδράνειας}$$

$$\mu = \frac{\pi * \rho_a * d^2}{4 * m}$$

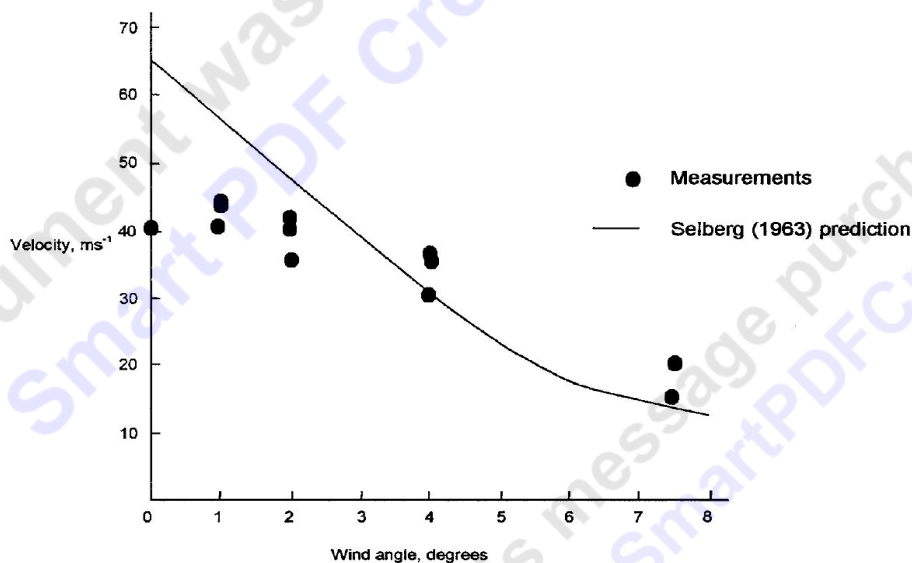
$$\omega_T = 2 * \pi * n_T$$

$\omega_v = 2 * \pi * n_v$, είναι οι κυκλικές συχνότητες για την στρέψη και την κάμψη αντίστοιχα

(ΔΕΝ ΕΞΗΓΕΙΣ ΟΛΑ ΤΑ ΣΥΜΒΟΛΑ)

Το Διάγραμμα 1.1 παρουσιάζει μετρήσεις που έγιναν στο παρελθόν για τον υπολογισμό της ταχύτητας πτερυγισμού σε διαφορετικά τμήματα του καταστρώματος μιας γέφυρας και συγκρίνονται με την αντίστοιχη πρόβλεψη σύμφωνα με τον τύπο του Selberg.

Εύκολα συμπεραίνει κανείς από το διάγραμμα ότι υπάρχει μια αρκετά καλή προσέγγιση των πειραματικών με τα υπολογιστικά δεδομένα, τόσο για μεσαίες όσο και για υψηλές τιμές γωνιών προσβολής της ροής του αέρα. Σημειώνεται όμως μια μεγαλύτερη απόκλιση για χαμηλότερες γωνίες προσβολής [3,5].



Διάγραμμα 1.1: Σύγκριση πειραματικών και υπολογιστικών κρίσιμων τιμών ταχύτητας πτερυγισμού [αναφορά].

1.1.4 Buffeting

Μια γέφυρα, όπως είδαμε μέχρι τώρα, έχει μελετηθεί και σχεδιαστεί με βάση τα δύο προηγούμενα φαινόμενα, όπως αυτά παρουσιάστηκαν νωρίτερα. Ωστόσο ακόμα και όταν μια γέφυρα παρουσιάζει σταθερότητα σε πτερυγισμό για μεγάλες ταχύτητες στη ροή του αέρα και δεν υποφέρει από δονήσεις προκαλούμενες από δίνες σε χαμηλές ταχύτητες ροής αέρα, θα πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί δυναμικές φορτίσεις από την ατμοσφαιρική τύρβη, γνωστό ως buffeting σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων αέρα. Η ικανότητα να

διαχειριστεί την ατμοσφαιρική τύρβη θα καθορίσει το μέγεθος των δομικών στοιχείων και χρειάζεται να γίνει μια εκτίμηση για το μέγεθος αυτών στο στάδιο του σχεδιασμού.

Ο Davenport ήταν ο πρώτος που μελέτησε το φαινόμενο και ανέπτυξε ένα μοντέλο, το οποίο αργότερα αξιολογήθηκε και σε αντιδιαστολή με το μοντέλο μελέτης του οριακού στρώματος της τυρβώδης ροής.

Η ανάλυση, που βασίζεται στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το φαινόμενο αυτό, εμφανίζει καλή ακρίβεια συγκρινόμενη με μετρήσεις σε αεροελαστικά μοντέλα σε αεροσήραγγα και μετρήσεις, που γίνονται με τις ακριβείς διαστάσεις. Ωστόσο, για γέφυρες με μεγάλα τόξα, οι πύργοι και τα καλώδια διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην συνολική συμπεριφορά της γέφυρας, οπότε η πρακτική που ακολουθείται είναι να γίνονται μελέτες σε αεροελαστικά μοντέλα για τυρβώδη ροή, όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια αναλυτικότερα [3,5].

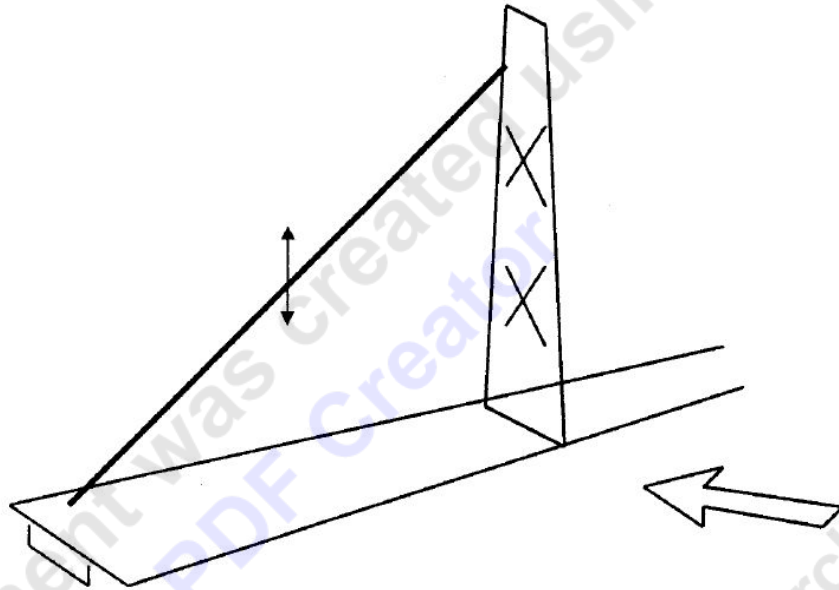
1.1.5 Ταλάντωση καλωδίων γέφυρας

Οι διαρκώς αυξανόμενες απαιτήσεις για την κατασκευή γεφυρών έχει οδηγήσει σε μεγαλύτερα τόξα στις καλωδιωτές γέφυρες και σε καλώδια μεγαλύτερου μήκους. Όμως όσο αυξάνει το μήκος τόσο οι ταλαντώσεις τους καθίστανται σημαντικό πρόβλημα. Ένας από τους μηχανισμούς που μελετάται ιδιαίτερα είναι το φαινόμενο “rain-wind”.

Το πρώτο περιστατικό, όπου έγινε ξεκάθαρα φανερό η επιρροή του αέρα, ο οποίος προκαλούσε ταλάντωση στα καλώδια, ενώ ταυτόχρονα η παρουσία της βροχής έπαιξε σημαντικό ρόλο, καταγράφηκε κατά την κατασκευή της γέφυρας Nishi Bridge το 1984. Χαμηλής συχνότητας ταλάντωση (1-3 Hz) μερικών καλωδίων με διπλάσιο πλάτος ταλάντωσης (έως 300 mm) παρατηρήθηκε για ένα διάστημα 5 μηνών. Η συγκεκριμένη γέφυρα έχει ένα κυρίως τόξο μήκους 405 m με καλώδια διαμέτρου έως 165 mm και μήκους από 65 έως 200 m. Οι ταλαντώσεις προκλήθηκαν από ταχύτητες αέρα 7 έως 14 m/s. Αυτές οι ταχύτητες υπερέβαιναν αρκετά τις κρίσιμες τιμές της ταχύτητας για αποκόλληση δινών σε τόσο χαμηλές συχνότητες όσο αυτές που παρατηρήθηκαν. Χρησιμοποιώντας ένα κομμάτι από τον σωλήνα περιβλήματος από πολυαιθυλένιο από την πρωτότυπη κατασκευή πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε αεροσήραγγα, με και χωρίς την προσομοίωση της βροχής. Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ξεκάθαρο, η βροχή ήταν απαραίτητη για να προκαλέσει τις ταλαντώσεις σε ένα καθορισμένο εύρος ταχυτήτων ροής του αέρα.

Το φαινόμενο αυτό παρατηρήθηκε και σε άλλες γέφυρες την εποχή εκείνη. Ένα κοινό χαρακτηριστικό τους ήταν ότι τα καλώδια που ταλαντώνοντουσαν συνήθως εκτρέπονταν προς τα κάτω, σε μια κατακόρυφη διεύθυνση στη φορά του ανέμου, ο οποίος πλησίαζε κάθετα στο επίπεδο των καλωδίων (Εικόνα 1.3). Επίσης ταλαντώσεις παρατηρήθηκαν μόνο σε καλώδια με περίβλημα πολυαιθυλενίου.

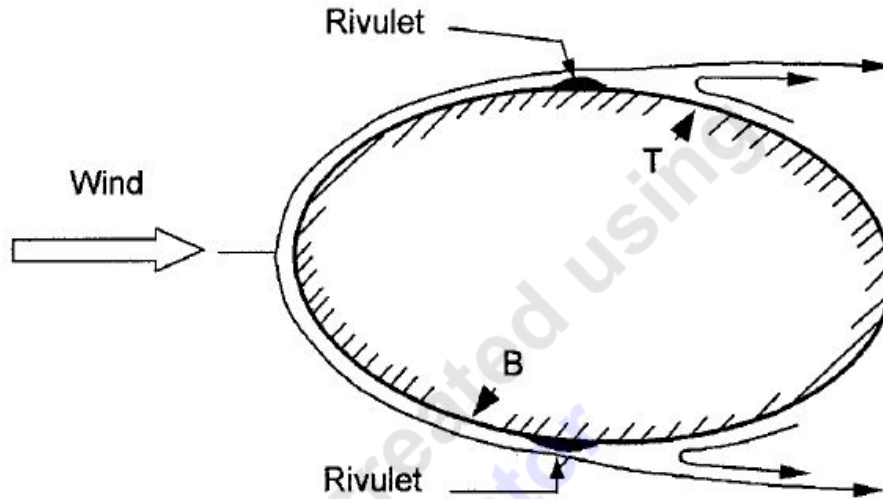
Τέτοια φαινόμενα παρατηρήθηκαν και σε γέφυρες σε άλλες χώρες. Σε μερικές από αυτές τις περιπτώσεις το φαινόμενο οφείλονταν στην ύπαρξη αποκόλλησης δινών σε υψηλές συχνότητες, ενώ σε άλλες περιπτώσεις ο ακριβής μηχανισμός δεν προσδιορίστηκε επακριβώς ή και καθόλου [5].



Εικόνα 1.3: Τυπικές διευθύνσεις αέρα και καλωδίων για την ύπαρξη ταλάντωσης [αναφορά].

1.1.6 Μηχανισμοί διέγερσης

Από τα πειράματα που έγιναν στην αεροσήραγγα για τη διερεύνηση των ταλαντώσεων, που παρατηρήθηκαν στην γέφυρα Meiko-Nishi, επισημάνθηκε ότι η κίνηση αυτή προκαλούνταν από την παρουσία δύο συγκεντρώσεων νερού που παλινδρομούσαν σε περιμετρικές θέσεις με την κίνηση των ίδιων των καλωδίων. Στην αρχή, σε χαμηλές ταχύτητες αέρα υπήρχε μόνο μια ενιαία συγκέντρωση που σχηματιζόταν στο κάτω μέρος. Η κίνηση των καλωδίων άρχιζε σε υψηλότερες ταχύτητες αέρα όταν μια δεύτερη συγκέντρωση σχηματίστηκε στην επάνω επιφάνεια των καλωδίων. Αυτές οι συγκεντρώσεις λειτουργούν σαν σημεία που προκαλούν τον διαχωρισμό της ροής στα καλώδια που ταλαντώνονταν, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4: Διαχωρισμός της ροής, που προκαλείται από το νερό της βροχής [αναφορά].

Κάποιοι μελετητές έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η περιμετρική κίνηση των συγκεντρώσεων νερού δεν συμβαίνει στις δύο διαστάσεις και ότι το ύψος και το πλάτος στην επάνω επιφάνεια δεν είναι το ίδιο με αυτής στην κάτω επιφάνεια, αλλά μικρότερο.

Άλλες μελέτες σε αεροσήραγγες απέδειξαν ότι οι ρύποι που παράγονται από την καύση και περιέχουν άνθρακα όταν επικαθήσουν πάνω στο περίβλημα του καλωδίου ήταν ένας παράγοντας που οδηγούσε σε αεροδυναμική αστάθεια, καταδεικνύοντας με αυτό τον τρόπο το ρόλο των επιφανειακών τάσεων στο να επιτρέψουν τον σχηματισμό συγκεντρώσεων νερού.

Μελέτες μοντέλων έχουν διεξαχθεί σε αεροσήραγγες για την αεροδυναμική συμπεριφορά των κεκλιμένων καλωδίων, με και χωρίς βροχή, για μεγάλο εύρος γωνιών pitch και yaw αλλά και για τη θέση των συγκεντρώσεων νερού. Βρέθηκε ότι υπήρχαν δύο κατηγορίες αεροδυναμικών μεταβολών, αυτές που έκαναν την εμφάνισή τους πάνω από ένα μικρό εύρος ταχυτήτων αέρα και οφείλονται στην αποκόλληση των δινών και αυτές που ξεκινούσαν σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα και αυξάνοντας σταδιακά σε πλάτος [5,14].

1.1.7 Λύσεις

Οι λύσεις που επιτυχημένα έχει αποδειχτεί ότι μπορούν να εξαφανίσουν ή να περιορίσουν δραστικά τις δονήσεις στα καλώδια μιας γέφυρας (που οφείλονται στο φαινόμενο rain-wind) είναι οι ακόλουθες:

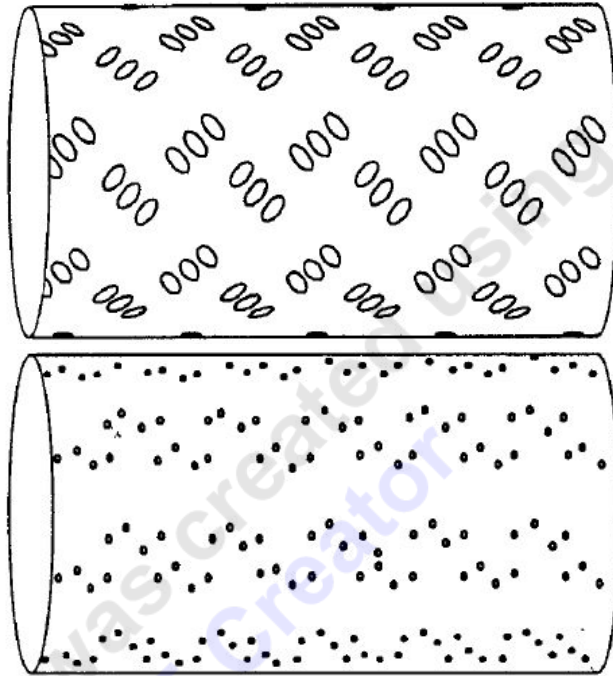
- Αεροδυναμικές βελτιώσεις, γεωμετρικές διαμορφώσεις του εξωτερικού περιβλήματος του καλωδίου.

- Βοηθητικά σημεία στήριξης του καλωδίου.
- Βοηθητικά διαφράγματα

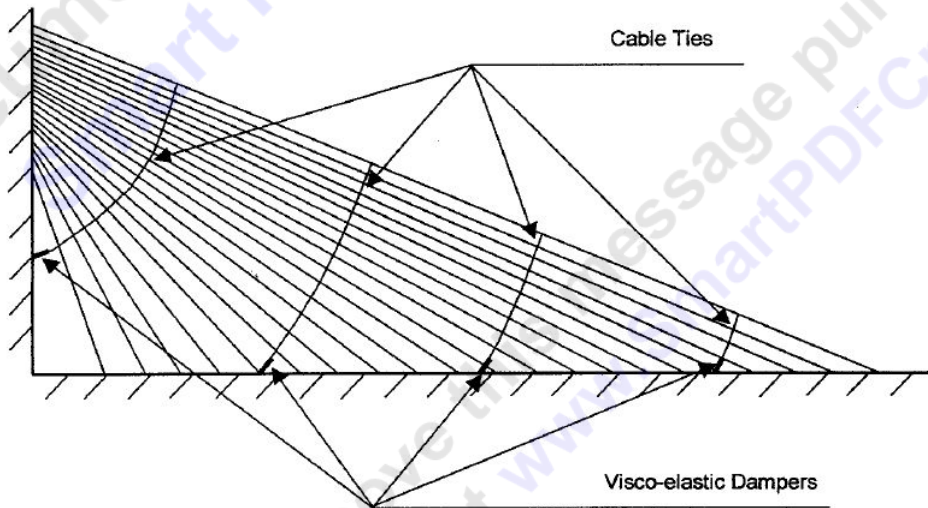
Κατά το παρελθόν έχουν γίνει μετρήσεις σε κομμάτια καλωδίου με διάμετρο ίδια με την διάμετρο του πραγματικού καλωδίου με επιφάνειες που έχουν υποστεί διαφορετικές επεξεργασίες ώστε να αποκτήσουν διαφορετική τραχύτητα (Εικόνα 1.5). Επιπρόσθετη τραχύτητα, περίπου 1% της διαμέτρου, βρέθηκε να είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος ώστε να καταπολεμηθούν οι δονήσεις που προκαλεί το φαινόμενο rain-wind. Η βασική αρχή, που εξηγεί την αποτελεσματικότητα αυτής της μεθόδου, είναι ότι οι τιμές τις υπερκρίσιμης ροής μεταφέρονται σε χαμηλότερες τιμές Reynolds από αυτές στις οποίες θα εμφανίζονταν τέτοια ροή για την περίπτωση που είχαμε καλώδια με ομαλή επιφάνεια. Από πειράματα σε αεροσήραγγες επίσης βρέθηκε ένας τρόπος να περιοριστεί ο συντελεστής οπισθέλκουσας στην περιοχή των τιμών του αριθμού Reynolds που εμφανίζεται υπερκρίσιμη ροή. Η λύση για να περιοριστεί αυτή η αύξηση ήταν η χρήση διπλών ελικοειδών spiral, ύψους 1,3 mm, 2 mm πλάτους και με βήμα 0,6 m. Η λύση αυτή εφαρμόστηκε στην γέφυρα Normandie Bridge.

Συνήθως μόνο ένα ή δύο από τα καλώδια στήριξης θα πρέπει να αντιμετωπίσουν δονήσεις εξαιτίας του φαινομένου rain-wind σε συγκεκριμένες ατμοσφαιρικές συνθήκες. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε στην υιοθέτηση μιας λύσης που είχε χρησιμοποιηθεί και σε μερικές γέφυρες μεμονωμένα μέχρι τότε, τα κατακόρυφα καλώδια στήριξης (Εικόνα 1.6).

Μελέτες για τα καλώδια στήριξης και για την αποτελεσματικότητα των κατακόρυφων καλωδίων στήριξης (εκτελώντας μετρήσεις σε καλώδια μιας τυπικής καλωδιωτής γέφυρας) έδειξαν ένα εύρος κρίσιμων λόγων διαφράγματος, από 0,001 μέχρι 0,003, για τον πρώτο τρόπο ταλάντωσης και χαμηλότερες τιμές όσο αυξάνονταν η προ-φόρτιση του καλωδίου. Εργαστηριακά πειράματα σε κατακόρυφα καλώδια στήριξης έδειξαν ότι άκαμπτα κατακόρυφα καλώδια λειτουργούν σαν μέσο μεταφοράς ενέργειας λόγω δονήσεων σε ένα καλώδιο που φορτίζεται με δονήσεις από το ίδιο σε γειτονικά. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας “εύκαμπτα” κατακόρυφα καλώδια στήριξης, ενέργεια από το δονούμενο καλώδια μπορούσε να απορροφηθεί και από το κατακόρυφο καλώδιο και ο μηχανισμός αντιμετώπισης αυτό του φαινομένου να γίνει πιο αποδοτικός.



Εικόνα 1.5: Επιφάνειες καλωδίων με διαφορετικές τραχύτητες [αναφορά].



Εικόνα 1.6: Κατακόρυφα καλώδια στήριξης [αναφορά].

Η απορρόφηση ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί επίσης με τη χρήση βοηθητικών αποσβεστήρων τοποθετημένων μεταξύ των καλωδίων και της κύριας δοκού της γέφυρας, κοντά στα σημεία σύνδεσης. Αυτή η λύση είναι πιο ακριβή σε σχέση με την χρήση κατακόρυφων καλωδίων στήριξης, αλλά πιο ευχάριστη αισθητικά. Για τον σκοπό αυτό υπάρχουν δύο κατηγορίες, η μια είναι αποσβεστήρες λαδιού και η άλλη είναι βισκοελαστικοί αποσβεστήρες [αναφορά].

1.2 ΠΥΡΓΟΙ, ΚΕΡΑΙΕΣ, ΚΤΗΡΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥ ΥΨΟΥΣ

Σε αυτό το τμήμα θα μελετηθεί η επίδραση του ανέμου αλλά και η αντίδραση κάποιων κατασκευών, όπως των πύργων, των κτιρίων με πολύ μεγάλο ύψος κ.α. Θα παρουσιαστούν κάποιες μεθοδολογίες για τον προσδιορισμό των φορτίων και των αντιδράσεων στη ροή του αέρα.

Η βασική εξίσωση που δίνει τον συντελεστή αντίστασης για ροή υπό γωνία σε πύργους τύπου χωροδικτυώματος δίδεται:

$$D = C_D A_Z q_Z$$

Όπου

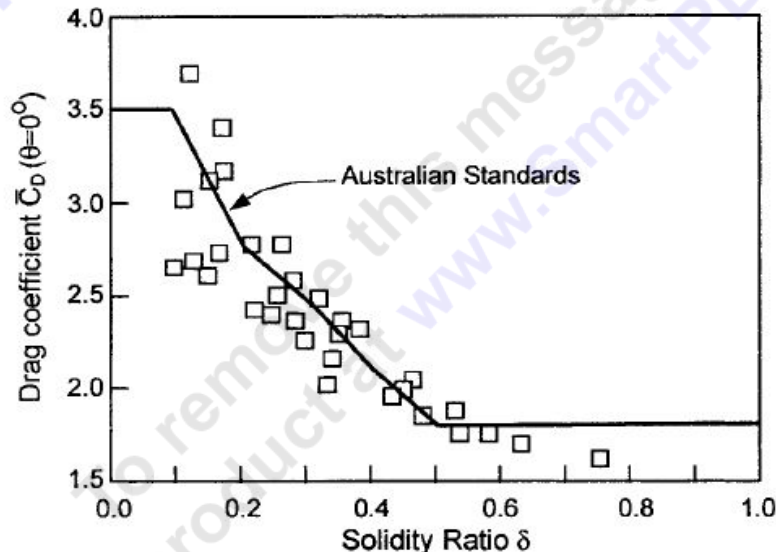
D : η συνολική δύναμη οπισθέλκουσας και για τις τέσσερις πλευρές του πύργου.

C_D : ο συνολικός συντελεστής οπισθέλκουσας του πύργου

A_Z : επιφάνεια των τμημάτων της πλευράς του πύργου

q_Z : η δυναμική πίεση

Στο Διάγραμμα 1.2 παρουσιάζεται η μεταβολή του συντελεστή οπισθέλκουσας ως συνάρτηση της βαθμού στερεότητας (solidity ratio) σε σύγκριση με πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από πειράματα σε αεροσήραγγα [5].



Διάγραμμα 1.2: Σύγκριση πειραματικών και τυποποιημένων τιμών C_D [αναφορά].

1.3 ΛΕΠΤΟΙ ΠΥΡΓΟΙ

1.3.1 Αντίδραση κατά τη διεύθυνση του ανέμου

Για λεπτούς πύργους απαιτείται μια τροποποίηση στη μέθοδο κατανομής ισοδύναμων στατικών φορτίων σε κατασκευές μεγάλου ύψους στη διεύθυνση του ανέμου. Η τροποποίηση αυτή απαιτείται για τον προσδιορισμό της συμπεριφοράς λεπτών πύργων ανάλογα με το ύψος s , όπου θα εφαρμοστεί το αεροδυναμικό φορτίο και πρέπει να μελετηθεί η συμπεριφορά του. Για το λόγο αυτό εισάγουμε έναν συντελεστή που πολλαπλασιάζεται με τη μέση κατανομή πίεσης και συμβολίζεται σαν G_q για διατμητικές δυνάμεις, και G_m για καμπτικές ροπές. Οι εξισώσεις τους παρουσιάζονται στη συνέχεια [αναφορά].

$$G_q = 1 + \frac{r \sqrt{g_B^2 B_s F_2 + g_r^2 \left(\frac{SE}{\eta_1} \right) F_3 F_4 F_5}}{F_1}$$

$$G_m = 1 + \frac{r \sqrt{g_B^2 B_s F_7 + g_r^2 \left(\frac{SE}{\eta_1} \right) F_3 F_4 F_8}}{F_6}$$

Όπου

r : η τραχύτητα

B_s : συντελεστής μείωσης των φορτίων στο ύψος s συγκριτικά με την κορυφή του πύργου.

g_b, g_r : συντελεστές που εξαρτώνται από τη φυσική συχνότητα n_1 της κατασκευής

S : αεροδυναμικός συντελεστής υπολογιζόμενος για τη φυσική συχνότητα της κατασκευής

E : αδιάστατη έκφραση του εύρους της πυκνότητας υπολογισμένη για την φυσική συχνότητα.

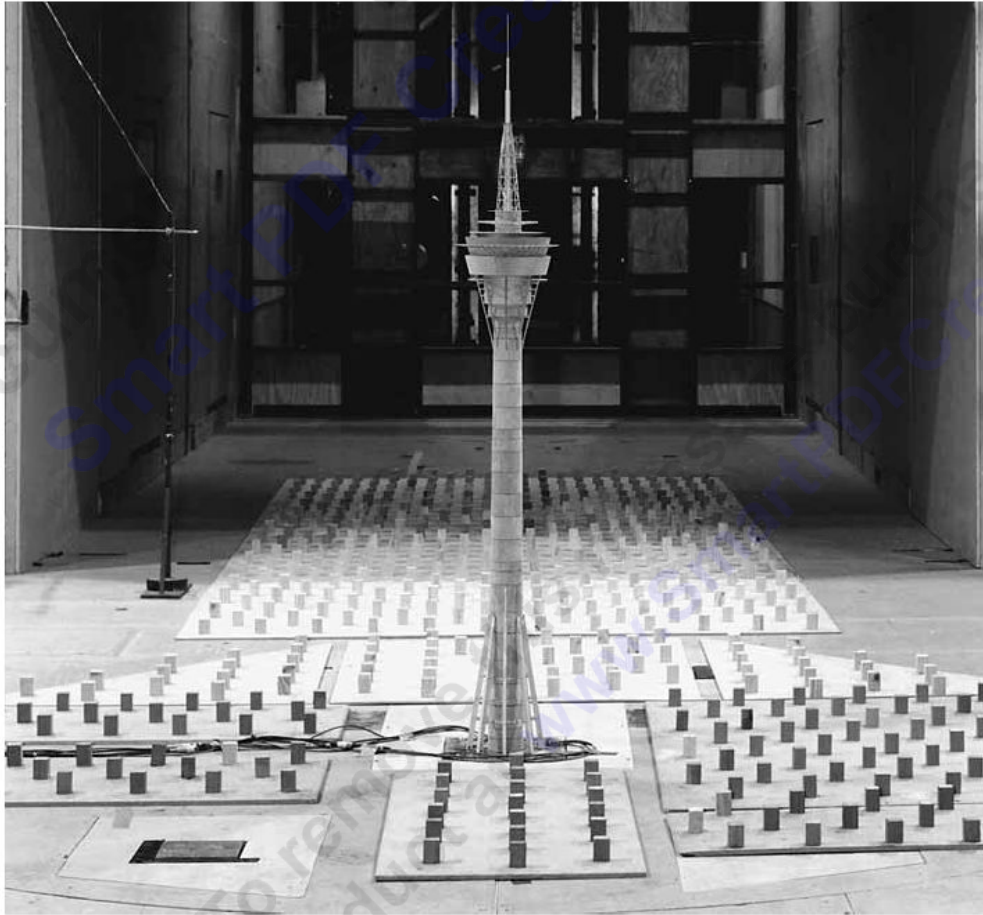
η_1 : κρίσιμος λόγος μείωσης για τον πρώτο τρόπο (mode) ταλάντωσης

$F_1 \dots F_8$: συντελεστές αδιάστατοι εξαρτώμενοι από ιδιότητες του ανέμου και γεωμετρικά, δυναμικά χαρακτηριστικά του πύργου.

Γίνεται κατανοητό από τις παραπάνω εξισώσεις ότι ο συντελεστής αντίδρασης εξαρτάται από τον τύπο του φορτίου και από το ύψος του πύργου [5].

1.3.2 Αντίδραση σε διεύθυνση κάθετη στον άνεμο

Η ένταση από την αποκόλληση των δινών από τους πύργους είναι συχνά αρκετά δυνατή ώστε να προκαλέσει φορτία λόγω δυναμικής συμπεριφοράς σε διεύθυνση κάθετη σε αυτή της ροής του ανέμου. Αν η απόσβεση (από έναν λεπτό πύργο) είναι μικρή, μπορεί να συμβεί μεγάλη αύξηση στις ταλαντώσεις αν η συχνότητα, που πραγματοποιείται η αποκόλληση των δινών, ταυτιστεί με τη φυσική συχνότητα του πύργου. Η ταχύτητα, που συμβαίνει αυτό, ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα. Αν η κρίσιμη ταχύτητα είναι μεγάλη, δεν θα προκύψει κάποιο πρόβλημα, ενώ αν η κρίσιμη ταχύτητα είναι μικρή πάλι δεν θα δημιουργηθεί πρόβλημα καθώς τα αεροδυναμικά φορτία που θα προκύψουν θα είναι μικρά. Ωστόσο ταλαντώσεις που θα επηρεάσουν τον πύργο θα προκύψουν αν η κρίσιμη ταχύτητα είναι μεταξύ 10 και 40 m/s [αναφορά].



Εικόνα 1.8: Αεροελαστικό μοντέλο του πύργου Macau σε πειράματα σε αεροσήραγγα [αναφορά].

Εξαιτίας του μεγαλύτερου ρυθμού αποκόλλησης δινών για πύργο κυκλικής διατομής σε σύγκριση με τετράγωνης ή παραλληλόγραμμης διατομής για το ίδιο πλάτος ταχύτητας, η κρίσιμη ταχύτητα είναι χαμηλότερη.

Οι μέθοδοι, για τον υπολογισμό της αντίδρασης λεπτών πύργων σε διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση της ροής, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- Η αντίδραση βασίζεται σε ημιτονοειδή διέγερση. Σε αντίθεση με άλλα μοντέλα φορτίων στην αεροναυπηγική, η διέγερση στο συγκεκριμένο μοντέλο είναι ντετερμινιστική παρά τυχαία, οπότε και η αντίδραση είναι επίσης ημιτονοειδής. Αυτό το μοντέλο εμφανίζει καλή εφαρμογή για περιπτώσεις μεγάλων ταλαντώσεων, και η αποκόλληση των δινών περιγράφεται από το φαινόμενο lock-in, όπως αυτό θα περιγραφεί σε άλλο σημείο. Η μέγιστη τιμή της ταλάντωσης (y_{\max}) σε σχέση με την κρίσιμη ταχύτητα δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$y_{\max}/b = K_w K C_{lat} (1/St^2)(1/Sc)$$

όπου

K_w : Συντελεστής

K : συντελεστής μηχανισμού ταλάντωσης

C_{lat} : συντελεστής δύναμης, στην περίπτωση μας C_l

St : αριθμός Strouhal

Sc : αριθμός Scruton,

- Μοντέλο τυχαίας διέγερσης, όπου η τιμή της ενίσχυσης της ταλάντωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{\hat{y}}{b} = \frac{A}{[(Sc/4\pi) - K_{ao}(1 - y^2/y_L^2)]^{1/2}}$$

Όπου

A : αδιάστατη παράμετρος

y : η τετραγωνική ρίζα της ενίσχυσης της ταλάντωσης

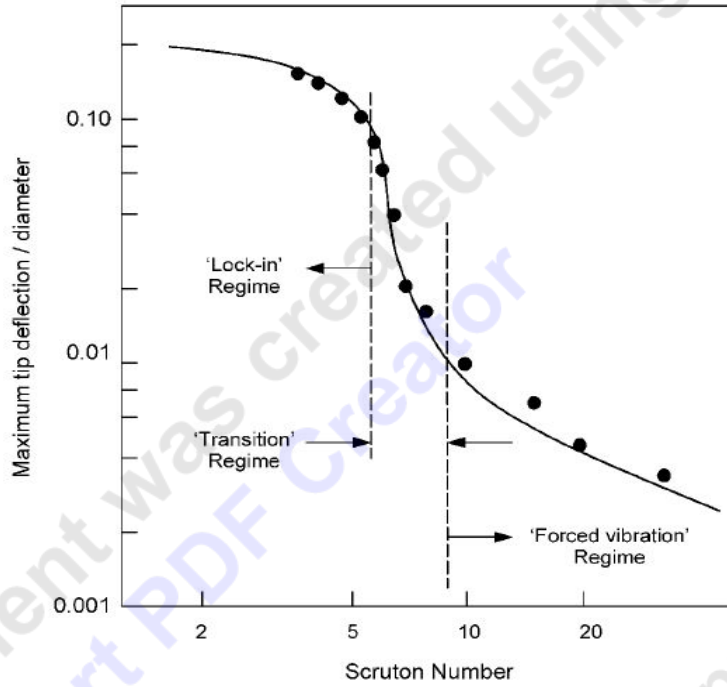
y_L : η τετραγωνική ρίζα της μειούμενης ενίσχυσης

K_{ao} : αδιάστατη παράμετρος, που σχετίζεται με τα αεροδυναμικά εμπόδια

Το μοντέλο αυτό μπορεί να περιγράψει τρεις περιπτώσεις

1. Ένα καθεστώς από “τυχαίες” εξαναγκασμένες ταλαντώσεις σε μεγάλες τιμές του αριθμού Scruton.
2. Ένα καθεστώς για χαμηλές τιμές του αριθμού Scruton, όπου υπάρχει το φαινόμενο lock-in, όπου η αντίδραση καθορίζεται από αρνητικές αεροδυναμικές αμβλύνσεις και είναι ανεξάρτητες του A .
3. Την μεταβατική περιοχή μεταξύ των δύο προηγούμενων.

Οι περιοχές αυτές αναπαρίστανται στο Διάγραμμα 1.3 και συγκρίνονται με πειραματικά δεδομένα ενός μοντέλου καμινάδας εργοστασίου [5].



Διάγραμμα 1.3: Περιοχές ταλάντωσης κάθετα στην φορά του ανέμου για πύργους και καμινάδες εργοστασίου [αναφορά].

1.4 ΠΥΡΓΟΙ ΨΥΞΗΣ

Το γεγονός ότι κατασκευές όπως οι μεγάλοι πύργοι ψύξης είναι ευάλωτοι στην επίδραση του αέρα φάνηκε το 1960 όταν κατέρρευσαν οι πύργοι Ferrybridge στην Βρετανία. Μετά από έρευνες σε αεροσήραγγες, για να μελετηθεί η ευαισθησία τους, φάνηκε ότι οι παράγοντες που τους επηρεάζουν είναι [5]:

- Η μερικώς συσχετιζόμενη φύση της διακύμανσης της πίεσης του αέρα σε τέτοιες μεγάλες κατασκευές, το οποίο σημαίνει ότι τα σχέδια των μερικώς σταθερών πιέσεων είναι ακατάλληλα.
- Η μη γραμμική φύση του ενισχυμένου σκυροδέματος.
- Τα αποτελέσματα της αεροδυναμικής αλληλεπίδρασης των γειτονικών παρόμοιων κτηρίων.



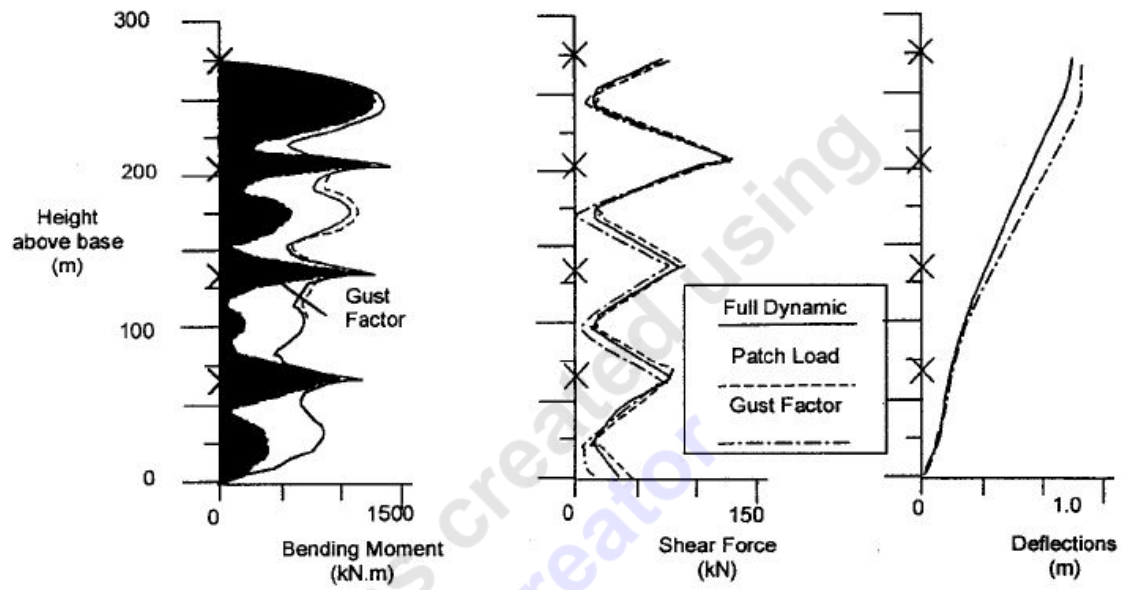
Εικόνα 1.9: Αστοχία των πύργων ψύξης στο Ferrybridge στη Βρετανία [αναφορά].

1.5 ΙΣΤΟΙ

Οι περισσότεροι ιστοί είναι δικτυωτές κατασκευές, συνήθως με τριγωνική διατομή, οπότε τα πειράματα σε αεροσήραγγες δεν είναι κατάλληλα ούτε είναι απαραίτητα. Χρησιμοποιούνται συνήθως αναλυτικές μέθοδοι. Βέβαια εμπεριέχουν ένα βαθμό πολυπλοκότητας για τους παρακάτω λόγους:

- Η συμπεριφορά της κατασκευής τους είναι μη-γραμμική.
- Οι γραμμές επίδρασης των φορτίων είναι περίπλοκες.
- Για ύψος ιστού μεγαλύτερο από 150 m στην δυναμική αντίδραση της κατασκευής συμμετέχουν πολλά modes, συνήθως συνδεδεμένα.

Στο Διάγραμμα 1.4 που ακολουθεί παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης ενός ιστού ύψους 295 m με δύο διαφορετικές μεθόδους [5].



Διάγραμμα 1.4: Ανάλυση σε διάτμηση και κάμψη ιστού ύψους 295 m [αναφορά].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΦΥΡΕΣ ΑΠΟ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αντίθεση με τις γέφυρες που κατασκευάζονται από υλικά όπως ο χάλυβας και το ξύλο, οι γέφυρες από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν μικρότερη ιστορία. Το 1824 ο Joseph Aspdin παρασκεύασε σκυρόδεμα θερμαίνοντας ασβεστόλιθο και άργιλο σε κλίβανο. Αυτό το σκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε στην κατασκευή των σιδηρόδρομων κάτω από τον ποταμό Τάμεση, λόγω καλύτερης ανθεκτικότητας στο νερό. Λίγα χρόνια αργότερα διαδόθηκε η χρήση του και στην Αμερική.

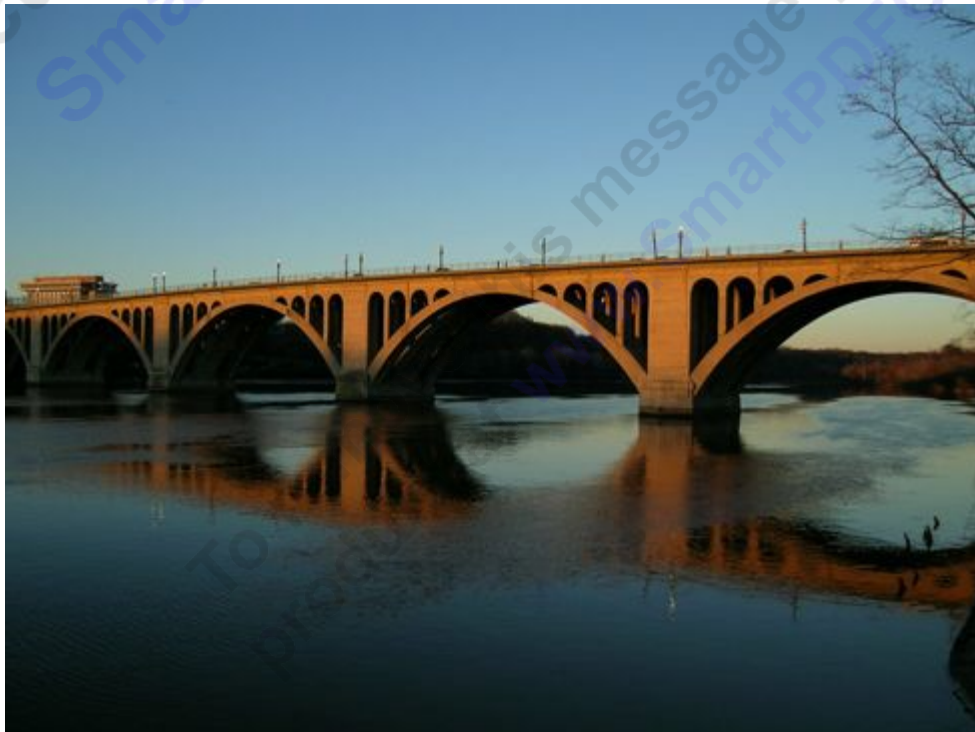
Το 1867 απονεμήθηκε πατέντα για την εφεύρεση σκυροδέματος οπλισμένου με σίδηρο στον Joseph Monier. Η πρώτη γέφυρα που κατασκευάστηκε με χρήση οπλισμένου σκυροδέματος ήταν η Alford Lake το 1889. Είχε μήκος 6 m, πλάτος 19,5 m και βρίσκεται ακόμα σε λειτουργία.

Μετά την επιτυχημένη κατασκευή της πρώτης γέφυρας ξεκίνησε σταδιακά η κατασκευή γεφυρών που αντικατέστησαν την χρήση της πέτρας. Μια από τις γέφυρες που υπάρχουν από το 1895 μέχρι τις μέρες μας είναι η Eden Park Bridge, με μήκος 42 m. Χρησιμοποιούσε κομμάτια χάλυβα με διατομή τύπου I καλυμμένα από σκυρόδεμα στην κάτω επιφάνεια του καταστρώματος. Αυτή ήταν και η βάση πάνω στην οποία αναπτύχθηκε η ιδέα του οπλισμένου σκυροδέματος ως κατασκευαστικό μέσο για γέφυρες. Επόμενο σημαντικό έργο ήταν η κατασκευή της γέφυρας Taft Bridge (Εικόνα 2.1) το 1897, που αποτελούνταν από πέντε τόξα μη οπλισμένου σκυροδέματος, υποστηρίζοντας το κατάστρωμα, που κατασκευάστηκε με οπλισμένο σκυρόδεμα. Η γέφυρα πρόσφατα ανακαινίστηκε και είναι σε θέση να εξυπηρετήσει το κοινό για πολλά χρόνια ακόμα [αναφορά].

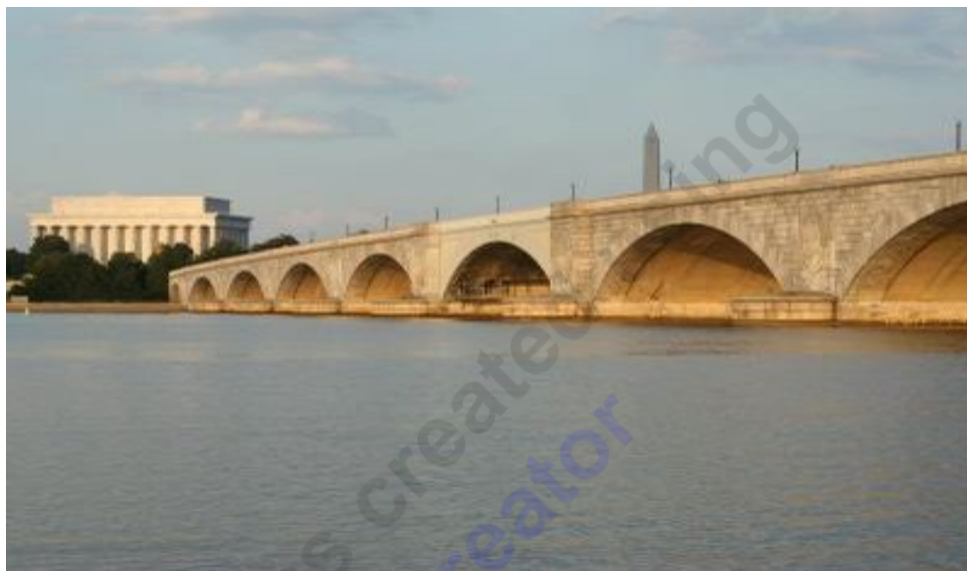


Εικόνα 2.1: Γέφυρα Taft Bridge με κατάστρωμα οπλισμένου σκυροδέματος [αναφορά].

Από τις πρώτες γέφυρες που κατασκευάστηκαν με τόξα οπλισμένου σκυροδέματος ήταν η Key Bridge (Εικόνα 2.2), που ολοκληρώθηκε το 1923 και αποτελούνταν από επτά τόξα με στύλους ενίσχυσης σε κατακόρυφη διάταξη.

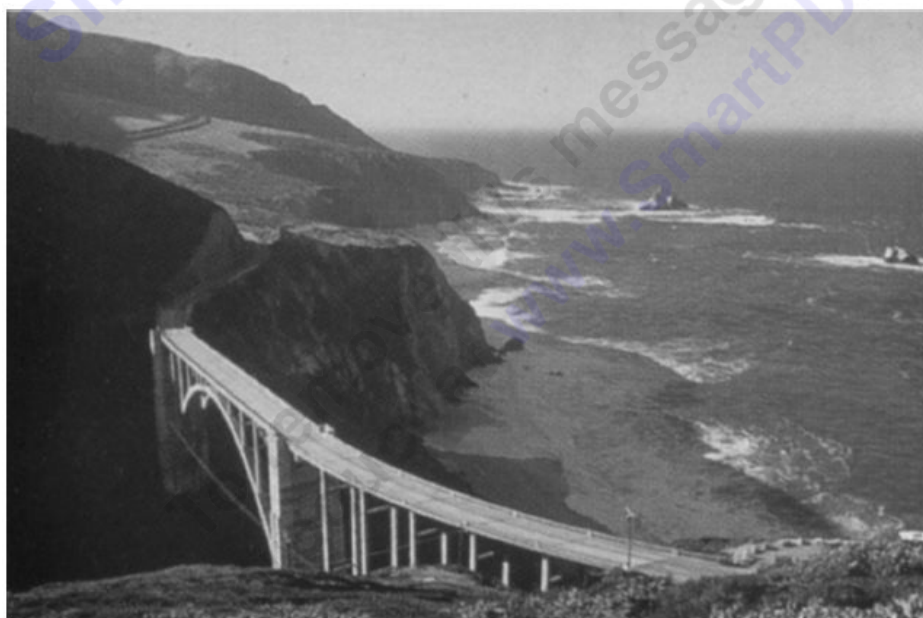


Εικόνα 2.2: Key Bridge [αναφορά].



Εικόνα 2.3: Γέφυρα Arlington Memorial [αναφορά].

Ακολούθησε η γέφυρα Arlington Memorial (Εικόνα 2.3), που ολοκληρώθηκε το 1932 και αποτελούνταν από εννέα τόξα οπλισμένου σκυροδέματος, ενώ σημαντική στιγμή ήταν η ολοκλήρωση της γέφυρας Bixby Creek το 1933 για τον αυτοκινητόδρομο της πολιτείας της Καλιφόρνια (Εικόνα 2.4), μήκους 100 m.



Εικόνα 2.4: Γέφυρα Bixby Creek [αναφορά].

Μια καινοτομία, που παρουσιάστηκε το 1931, ήταν η κατασκευή τόξων με προεντεταμένο σκυρόδεμα για την γέφυρα Rouge River (Εικόνα 2.5). Η επιτυχημένη λειτουργία αυτής της γέφυρας οδήγησε στην ευρεία χρήση αυτής της μεθόδου ως κατασκευαστικό εργαλείο.



Εικόνα 2.5: Γέφυρα Rouge River με προεντεταμένο σκυρόδεμα [αναφορά].

Οι γέφυρες κύριας δοκού (girder bridge) είναι οι πιο πολυάριθμες γέφυρες για χρήση σε αυτοκινητόδρομους. Η συνεισφορά τους στην εξυπηρέτηση των κυκλοφοριακών αναγκών συχνά επισκιαζεται από τις κρεμαστές, καλωδιωτές και τόξου με ενισχυμένο σκυρόδεμα. Το μήκος τους μπορεί να υπερβαίνει τα 150 m, αν και αρκετές είναι μικρότερες από 50 m, και χρησιμοποιούνται πολύ συχνά.

Οι γέφυρες αυτής της κατηγορίας για μικρά και μεσαία μήκη είναι ανταγωνιστικές των δικτυωτών γεφυρών (truss bridge) λόγω μικρότερης μάζας χρησιμοποιούμενου υλικού. Παρόλο που δεν έχουν την ίδια επίδοση στην αντοχή φορτίων, κυρίως σε μεγάλα μήκη, έχουν μεγαλύτερη δυσκαμψία και είναι λιγότερο ευάλωτες στις δονήσεις.

Ακολουθώντας την επιτυχία της γέφυρας Walnut Lane στη Φιλαδέλφεια το 1950, η κατασκευή με προεντεταμένο σκυρόδεμα έγινε δημοφιλής. Με την πάροδο του χρόνου και τη βελτίωση της μεθόδου κατασκευής, το μήκων των γεφυρών αυξήθηκε ώστε να εξυπηρετεί μεγαλύτερες ανάγκες. Στην Εικόνα 2.6 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τέτοιας γέφυρας [6].



Εικόνα 2.6: Γέφυρα Napa River τύπου girder [αναφορά].

2.2 ΥΛΙΚΑ

Οι πρώτες ύλες του σκυροδέματος, που αποτελείται από νερό, αδρανή υλικά και τσιμέντο, μπορούν να βρεθούν στις περισσότερες περιοχές του κόσμου και μπορούν να αναμιχθούν για να διαμορφώσουν ποικίλες δομικές μορφές. Η μεγάλη διαθεσιμότητα και η ευελιξία των υλικών του σκυροδέματος και οι βέργες ενίσχυσης έχουν καταστήσει το οπλισμένο σκυρόδεμα μια πολύ ανταγωνιστική εναλλακτική λύση για την κατασκευή γεφυρών. Οι γέφυρες οπλισμένου σκυροδέματος μπορούν να κατασκευαστούν από σκυρόδεμα που περιέχει στοιχεία, που κατασκευάζονται σε εγκαταστάσεις παραγωγής και μεταφέρονται για την χρησιμοποίησή τους στο εργοτάξιο, ή σκυρόδεμα επιτόπιας χύτευσης, το οποίο διαμορφώνεται και χρησιμοποιείται στο εργοτάξιο. Οι κατασκευές, που κατασκευάζονται με σκυρόδεμα επιτόπιας χύτευσης (Εικόνα 2.7), χρησιμοποιούνται ευρέως, καθώς παρέχουν χαμηλότερο κόστος συντήρησης και καλύτερη αντισεισμική προστασία [2,3].



Εικόνα 2.7: Μορφή γέφυρας επιτόπιος χύτευσης [αναφορά].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ ΓΕΦΥΡΑΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συγκεκριμένοι τύποι γέφυρας μεσαίου και μεγάλου μήκους υπόκεινται σε αεροδυναμικά φορτία εξαιτίας της μετατόπισης των τμημάτων τους. Αυτές οι κινήσεις αποκαλούνται αυτό-διεγυρόμενες και στην συνέχεια επηρεάζονται από τα αεροδυναμικά φορτία που αυτές παράγουν. Η συμπεριφορά που σχετίζεται με την αυτό-διεγυρόμενη μετατόπιση σωμάτων ονομάζεται αεροελαστικότητα.

Τα αεροελαστικά φαινόμενα, που μας ενδιαφέρουν στις γέφυρες, διαφέρουν από αυτά που μελετούνται στην αεροναυπηγική λόγω τριών παραγόντων:

1. Οι κατασκευές αυτές θεωρείται ότι ανήκουν στην κατηγορία bluff body, αν και οι μοντέρνες κρεμαστές και καλωδιωτές γέφυρες χρησιμοποιούν καταστρώματα διαφορετικού τύπου.
2. Το κατάστρωμα της γέφυρας διαθέτει εξαρτήματα, όπως τα κιγκλιδώματα, στηθαία, κεντρικές μπαριέρες, σχάρες θεμελίωσης και άλλα, που μπορούν να επηρεάσουν τη ροή και τις αεροελαστικές δυνάμεις.
3. Η ροή στις περισσότερες περιπτώσεις είναι τυρβώδης.

Οι γέφυρες μικρού μήκους αποτελούνται από δοκούς με απλούς τρόπους στήριξης, όπου η επίδραση του ανέμου είναι μικρή [αναφορά].

3.2 ΣΚΟΠΟΣ ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΓΕΦΥΡΩΝ

Οι ζημιές σε κτήρια και κατασκευές εξαιτίας του ανέμου είναι μια πραγματικότητα εδώ και πολλά χρόνια. Από το 19^ο αιώνα ξεκίνησε η χρήση του χάλυβα και του οπλισμένου σκυροδέματος ως υλικά κατασκευής, καθώς και η εισαγωγή της μεθόδου ανάλυσης κόπωσης. Η τελευταία αναπτύχθηκε περισσότερο τον 20^ο αιώνα, με τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων. Παρόλα αυτά μέχρι τις μέρες μας έχουν σημειωθεί σημαντικές αστοχίες σε κατασκευές λόγω της ροής αέρα, γεγονός που προκάλεσε το έντονο ενδιαφέρον των μηχανικών. Αξίζει να σημειωθούν κάποιες από τις πιο σημαντικές από αυτές, όπως της γέφυρας Brighton Chain Pier στην Βρετανία, της γέφυρας Tay στην Σκωτία και της Tacoma Narrow στις Η.Π.Α., εξαιτίας της επίδρασης του ανέμου στις κατασκευές [αναφορά].

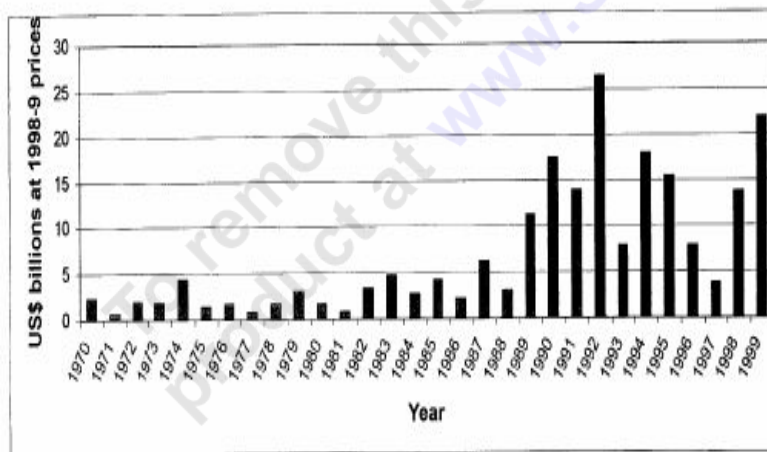
Ωστόσο μεγάλες κατασκευές, εκτός από τις γέφυρες, έχουν υποστεί ζημιές από τον άνεμο, για παράδειγμα η κατάρρευση των πύργων ψύξης στο Ferrybridge της Βρετανίας αλλά και η μόνιμη παραμόρφωση στο κτήριο Great Plains Life στο Τέξας κατά την διάρκεια ενός τυφώνα. Μια άλλη κατηγορία κατασκευών, που υποφέρει από τα αεροδυναμικά φορτία, είναι οι ιστοί, καθώς σε μια

δεκαετία, από το 1980 έως το 1990 είχαν σημειωθεί ογδοντατρείς περιπτώσεις αστοχίας παγκοσμίως. Τα περιστατικά αυτά είναι σημαντικά όχι μόνο σαν καταστροφές από μόνες τους αλλά επειδή σηματοδότησαν την αφετηρία για την έρευνα των φορτίων, που επιδρούν σε κατασκευές από την ροή του αέρα [αναφορά].

Για να καταστεί καλύτερα κατανοητή η σημασία της μελέτης των κατασκευών μας και η ολοένα καλύτερη αντιμετώπιση των φορτίων που καταπονούν αυτές λόγω των ανέμων, παρουσιάζεται στη συνέχεια το Διάγραμμα 3.1 και ο Πίνακας 3.1, όπου παρατίθενται οι ζημιές σε δισεκατομμύρια δολάρια από όλες τις καταστροφές που οφείλονται σε φυσικά αίτια, με αυτές που οφείλονται στον άνεμο να αποτελούν το 70% αυτών. Γίνεται αντιληπτό ότι οι ζημιές είναι μεγαλύτερες τα τελευταία χρόνια, το οποίο είναι κατανοητό καθώς οι κατασκευές έχουν να αντιμετωπίσουν πιο έντονα φαινόμενα καθώς αλλάζει και το κλίμα στον πλανήτη, όπως οι τροπικοί κυκλώνες, ειδικότερα στην Βόρεια Αμερική. Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται ενδεικτικές περιπτώσεις συνολικών καταστροφών ανά ήπειρο και οι επιπτώσεις αυτών σε ανθρώπινες ζωές που χάθηκαν [5].

Year	Name	Country or region	Economic losses \$USmill	Lives lost
1974	Cyclone 'Tracy'	Australia	500	52
1987	Gales	W. Europe	3700	17
1989	Hurricane 'Hugo'	Caribbean, U.S.A.	9000	61
1990	Gales	W. Europe	15000	230
1992	Hurricane 'Andrew'	U.S.A.	30000	44
1999	Gales	France	10000	140

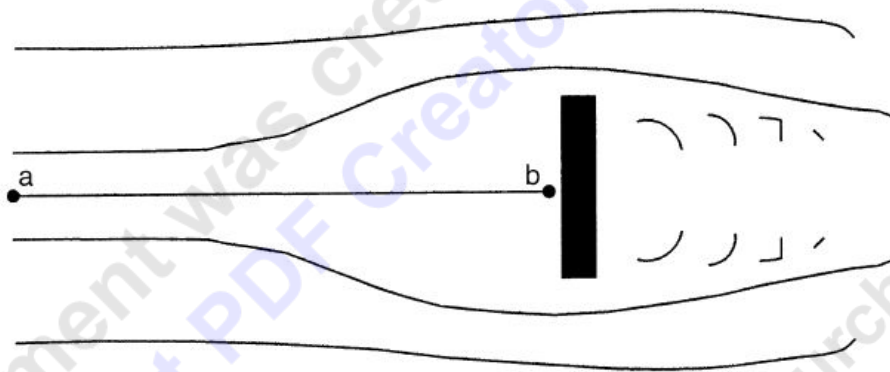
Πίνακας 3.1: Επιπτώσεις ανά ήπειρο των φυσικών καταστροφών [αναφορά].



Διάγραμμα 3.1: Ζημιές ανά έτος από φυσικές καταστροφές σε δισεκατομμύρια δολάρια [αναφορά].

3.3 ΠΛΕΥΡΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

Οι δυνάμεις σε ένα δομικό στοιχείο εξαιτίας της ροής ρευστού, είτε νερό είτε αέρας, περιγράφονται σε συνδυασμό με εμπειρικά καθιερωμένους συντελεστές αντίστασης. Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται ένα αντικείμενο που το προσβάλλει ασυμπίεστη ροή. Με την χρήση της εξίσωσης Bernoulli μπορεί να περιγραφεί η διατήρηση ενέργειας για δύο θέσεις, α και β, όπου α είναι ένα σημείο πολύ πριν προσβάλλει η ροή το αντικείμενο και το β είναι σημείο στραγγαλισμού, όπου η ταχύτητα είναι μηδέν.



Εικόνα 3.1: Αντικείμενο σε ασυμπίεστη ροή [αναφορά].

Στο σημείο ανακοπής παρατηρείται η μέγιστη πίεση καθώς όλη η κινητική ενέργεια που έχει η ροή στο σημείο α μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια. Ο συντελεστής αντίστασης είναι συνάρτηση του σχήματος του αντικειμένου και των χαρακτηριστικών της ροής. Με γνωστό τον συντελεστή αντίστασης η μέση πίεση γύρω από ένα αντικείμενο περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση.

(ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ Η ΕΞΙΣΩΣΗ;)

Αξίζει να τονιστεί ότι η πίεση του ρευστού και οι σχετιζόμενες με αυτήν δυνάμεις είναι ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας, δηλ. μια αύξηση της ταχύτητας κατά 25% προκαλεί αύξηση κατά 50% στην πίεση του ρευστού [6].

3.4 ΟΡΙΑΚΟ ΣΤΡΩΜΑ

Η ταχύτητα του ανέμου μεταβάλλεται με την απόσταση πάνω από το έδαφος αλλά και την τραχύτητα του εδάφους, οπότε και η πίεση σε μια κατασκευή, όπως είναι η γέφυρα, είναι συνάρτηση των προηγούμενων παραμέτρων. Η ταχύτητα αυξάνεται με την απόσταση από το έδαφος αλλά με μειούμενο ρυθμό, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 3.2. Αν το έδαφος είναι ομαλό τότε η

ταχύτητα αυξάνεται πιο γρήγορα καθώς μεγαλώνει η υψομετρική απόσταση από το έδαφος. Στην Εικόνα 3.2 αναπαρίσταται μια τυπική κατανομή ταχύτητας. Αξίζει να σημειώσουμε ότι δ είναι το πάχος του οριακού στρώματος, δηλ. το ύψος πάνω από το έδαφος όπου η μετρούμενη ταχύτητα είναι 0,99 της ταχύτητας της άπειρης ροής.

Η εξίσωση που περιγράφει την κατανομή του οριακού στρώματος πάνω από μια επιφάνεια, όπως είναι αυτή της **Εικόνας ****, είναι η ακόλουθη **[αναφορά]**:

$$V_{DZ} = 2.5V_o(V_{30}/V_B)\ln(Z/Z_o)$$

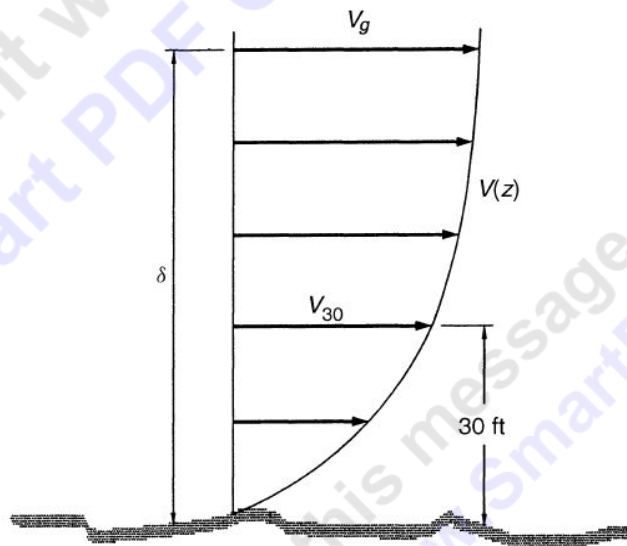
όπου

V_{DZ} : είναι η ταχύτητα του αέρα σε ύψος Z από την επιφάνεια

Z_o, V_o : σταθερές που εξαρτώνται από την επιφάνεια

V_{30} : η ταχύτητα σε ύψος 30 ft από το έδαφος

V_B : σταθερή ταχύτητα 100 mph



Εικόνα 3.2: Κατανομή ταχύτητας στο οριακό στρώμα **[αναφορά]**.

Οι τιμές, που μπορεί να πάρουν οι σταθερές V_o και Z_o , δίνονται από τον παρακάτω πίνακα, ανάλογα με την περιοχή που θα κατασκευαστεί η γέφυρα [6].

Περιοχή	Υπαιθρος	Προάστια	Πόλη
V_o , mph (Km/h)	8.20 (13.2)	10.90 (17.6)	12.00 (19.3)
Z_o , ft (mm)	0.23 (70)	3.28 (1000)	8.20 (2500)

Πίνακας 3.2: Τιμές για τις σταθερές V_o και Z_o **[αναφορά]**.

3.5 ΤΥΡΒΗ ΑΝΕΜΟΥ

Ο ατμοσφαιρικός αέρας προκαλείται από διαφορές θερμοκρασίας, ως αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Όταν ο αέρας φυσά κοντά στο έδαφος, καθυστερείται από διάφορα εμπόδια, που καθιστούν τη μέση ταχύτητα στην επιφάνεια του εδάφους ίση με μηδέν. Αυτό το στρώμα μηδενικής ταχύτητας καθυστερεί το ανωτέρω στρώμα και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου η ταχύτητα του αέρα γίνεται σταθερή. Η απόσταση μεταξύ της επιγειακής επιφάνειας και του ύψους της σταθερής ταχύτητας ανέμου ποικίλλει μεταξύ 300 m και 1 km. Αυτό το στρώμα αναφέρεται ως οριακό στρώμα ταχύτητας, στο οποίο η ροή του αέρα είναι τυρβώδης εξαιτίας της αλληλεπίδρασής του με την τύρβη της επιφάνειας του εδάφους. Η μεταβολή της μέσης ταχύτητας του αέρα με το ύψος επάνω από το έδαφος ακολουθεί συνήθως έναν λογαριθμικό ή εκθετικό νόμο, όπως περιγράφηκε και παραπάνω.

Η ταχύτητα του ανέμου εντός του οριακού στρώματος καθορίζεται από τρία συστατικά: το τμήμα κατά μήκος της ροής του αέρα που αποτελείται από τη μέση ταχύτητα αέρα, \bar{U} , συν τη συνιστώσα λόγω τύρβης στην ίδια διεύθυνση $u(t)$, την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας λόγω τύρβης $v(t)$, και την κάθετη στις δύο προηγούμενες τυρβώδη συνιστώσα $w(t)$. Η τύρβη περιγράφεται με όρους έντασης τύρβης, ακέραιου μήκους, και φάσματος. Η ένταση τύρβης περιγράφεται από την εξίσωση

$$I = \frac{\sigma}{\bar{U}}$$

όπου

σ : η τυπική απόκλιση των συνιστωσών του ανέμου

\bar{U} : η μέση ταχύτητα του ανέμου

Το ακέραιο μήκος της τύρβης είναι μια μέτρηση του μέσου μεγέθους των στροβίλων λόγω τύρβης στη ροή. Υπάρχουν συνολικά εννέα ακέραια μήκη (τρία για κάθε συνιστώσα τύρβης). Παραδείγματος χάριν, το ακέραιο μήκος της $u(t)$ στην x διεύθυνση προσδιορίζεται ως

$$L_u^x = \frac{1}{\sigma_u^2} \int_0^\infty R_{u1u2}(x) dx$$

όπου

R_{uu2} : η συν-διακύμανση της $u(t)$ για μια χωρική απόσταση x .

Το φάσμα του αέρα είναι μια περιγραφή της ενέργειας του αέρα προς τις συχνότητες του αέρα. Το φάσμα δίνεται σε αδιάστατη μορφή από την σχέση

$$\frac{nS(n)}{\sigma^2} = \frac{4 \frac{nL}{\bar{U}}}{\left[1 + 70,8 \left(\frac{nL}{\bar{U}}\right)^2\right]^{5/6}}$$

όπου

N : συχνότητα (Hz)

L : μήκος της τύρβης

$S(n)$: συνάρτηση φάσματος

Το μήκος της τύρβης δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί. Συνήθως εκτιμάται αντιπαραβάλλοντας τις καμπύλες από το μοντέλο του φάσματος με τα μετρούμενα δεδομένα [5,11].

3.6 ΑΠΟΚΟΛΛΗΣΗ ΟΡΙΑΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

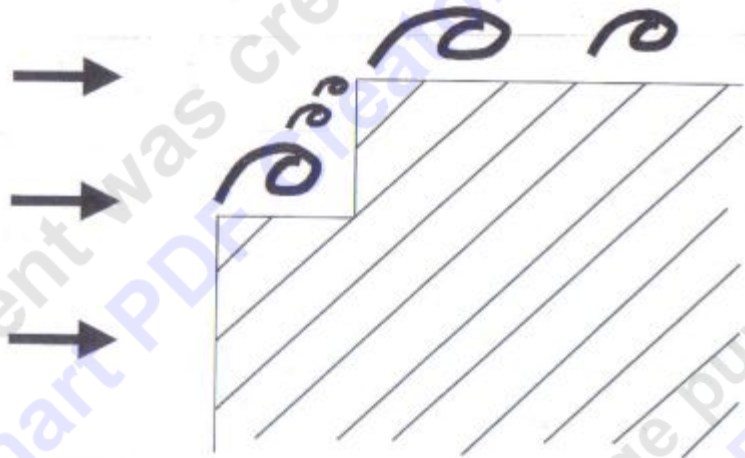
Η τριβή, που προκαλεί τον μηδενισμό της ταχύτητας στο όριο της ροής, δηλ. στην επιφάνεια του στερεού σώματος, επιβραδύνει τη ροή μέσα στο οριακό στρώμα, όπου εμφανίζονται ισχυρές διατμητικές τάσεις. Το φαινόμενο της επιβράδυνσης είναι πιο αδύναμο καθώς η απόσταση από την επιφάνεια του στερεού αυξάνεται. Έξω από το οριακό στρώμα η επίδραση της τριβής είναι αμελητέα.

Καθώς μια ροή διέρχεται από ένα στένωμα, π.χ. ακροφύσιο, η ταχύτητα της ροής αυξάνεται σε σχέση με την ταχύτητα της ροής πριν από αυτό, καθώς πρέπει να περάσει η ίδια ποσότητα ροής ανά μονάδα χρόνου και από τις δύο επιφάνειες. Το ίδιο ακριβώς συμβαίνει και με τους λόφους. Συμπεριφέρονται ως ακροφύσια και επιταχύνουν την ροή. Αντίθετα αν η επιφάνεια που διέρχεται η ροή αυξηθεί τότε η ταχύτητα μειώνεται. Επιπλέον η μείωση της ταχύτητας λόγω της τριβής της επιφάνειας προκαλεί επιπρόσθετη επιβράδυνση. Αυτός ο συνδυασμός μπορεί να οδηγήσει είτε σε αναστροφή της ροής είτε αποκόλληση του οριακού στρώματος.

Για δεδομένο αριθμό Reynolds η ροή είναι πιο επιρρεπής στην αποκόλληση αν η ακτίνα καμπυλότητας της επιφάνειας είναι μικρή. Σε αιχμηρές πλευρές, όπου η ακτίνα καμπυλότητας είναι μικρή ή μηδενική θα γίνει αποκόλληση εκτός αν ο αριθμός Reynolds είναι πολύ μικρός. Ανάλογα με το είδος της ροής και τη γεωμετρία της επιφάνειας σε μια ροή με αποκόλληση οριακού στρώματος

μπορεί να συμβεί επανακόλληση οριακού στρώματος. Σε περιοχές με αποκόλληση οριακού στρώματος, ένα αντικείμενο υπόκειται σε αρνητικές πιέσεις οι οποίες συχνά μεταβάλλονται χρονικά. Το αποτέλεσμα αυτών των πιέσεων, σε συνδυασμό με τις διατμητικές τάσεις στην επιφάνεια, είναι η δύναμη οπισθέλκουσας (και αντίστοιχα η δύναμη άωσης σε κάθετη διεύθυνση στη ροή).

Ένα αρκετά μεγάλο τμήμα της ανατάραξης της ροής μπορεί να συμβεί λόγω της επίδρασης του ιξώδους σε αριθμούς Re από 500 έως 2000 ή και λιγότερο. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η ροή γύρω από κιγκλιδώματα, στηθαία ή πυλώνες, των οποίων οι γωνίες έχουν σχήμα βαθμίδας όπως στην Εικόνα 3.3 [1,11].



Εικόνα 3.3: Δημιουργία δινών σε αιχμηρές γεωμετρίες [αναφορά].

3.9 ΒΑΣΙΚΟΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΓΙΑ ΓΕΦΥΡΕΣ

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα ο όρος $\frac{1}{2}\rho V^2$ εκφράζει πίεση, πιο συγκεκριμένα δυναμική πίεση, οπότε μπορούμε να ορίσουμε ένα συντελεστή πίεσης σύμφωνα με την εξίσωση

$$C_p = \frac{p - p_o}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

Οι συντελεστές δύναμης ορίζονται με παρόμοιο αδιάστατο τρόπο, όπως οι συντελεστές πίεσης, ως ο λόγος του ολικού αεροδυναμικού φορτίου προς μια πίεση αναφοράς (όχι απαραίτητα στην περιοχή στην οποία ενεργεί η δύναμη). Παρακάτω δίνεται μια εξίσωση υπολογισμού του συντελεστή δύναμης.

$$C_F = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho_a U_0^2 A}$$

Παρομοίως μπορούμε να ορίσουμε συντελεστές άνωσης και οπισθέλκουσας ως λόγους δυνάμεων άνωσης και οπισθέλκουσας προς τον όρο $\frac{1}{2}\rho V^2 A$ αντίστοιχα. Το ίδιο ισχύει και για τους συντελεστές ροπής. Σε περιπτώσεις αντικειμένων με μεγάλο μήκος ή δυο διαστάσεων χρησιμοποιείται και ο συντελεστής δύναμης ανά μονάδα μήκους.

Η ροή γύρω από ένα "bluff body", όπως αυτά στις περιπτώσεις α και β του Διαγράμματος 3.2 χαρακτηρίζεται από την παρουσία και κατακόρυφης κίνησης από δίνες και εξαρτάται από την διαμόρφωση του σώματος και την φύση της επερχόμενης ροής. Στο Διάγραμμα 3.2 παρουσιάζονται οι συντελεστές πίεσης για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Τα δύο πρώτα είναι κύλινδροι τετραγωνικής διατομής, με λόγο διαστάσεων $B/D=2$, $B/D=3$, και το άλλο κατάστρωμα τύπου κουτιού με πλαϊνές προεξοχές. Για όλες τις περιπτώσεις η γωνία προσβολής είναι μηδέν, ενώ τα σώματα δεν κινούνται. Η πίεση στην προσήνεμη επιφάνεια είναι θετική. Οι πιέσεις στην ανώτερη, την κατώτερη επιφάνεια και στην πλευρά του απορεύματος είναι αρνητικές. Η θετικές και αρνητικές πιέσεις προκαλούν την δύναμη οπισθέλκουσας [1].

Για τον κύλινδρο τετράγωνης διατομής με λόγο διαστάσεων $B/D=2$ και για κατάστρωμα γέφυρας τύπου κουτιού για στρωτή ροή η κατανομή πίεσης στην πάνω και κάτω επιφάνεια είναι σχεδόν ομοιόμορφα κατανεμημένη. Για ροή με ένταση τύρβης $Iu=10\%$ οι αρνητικές πιέσεις γίνονται πιο αδύναμες στην πλευρά του απορεύματος του σώματος. Αυτό οφείλεται στην επίδραση της τύρβης στον διαχωρισμό των στρωμάτων ροής, καθώς αυτά έρχονται πιο κοντά στην άνω και κάτω επιφάνεια του σώματος.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι διαφορές πίεσης προκαλούν οπισθέλκουσα, άνωση και ροπή στρέψης. Οι δυνάμεις και η ροπή εκφράζονται με όρους δυναμικής πίεσης και επιφάνειας του σώματος όπως πιο κάτω.

$$D = \frac{1}{2}\rho V^2 A C_D$$

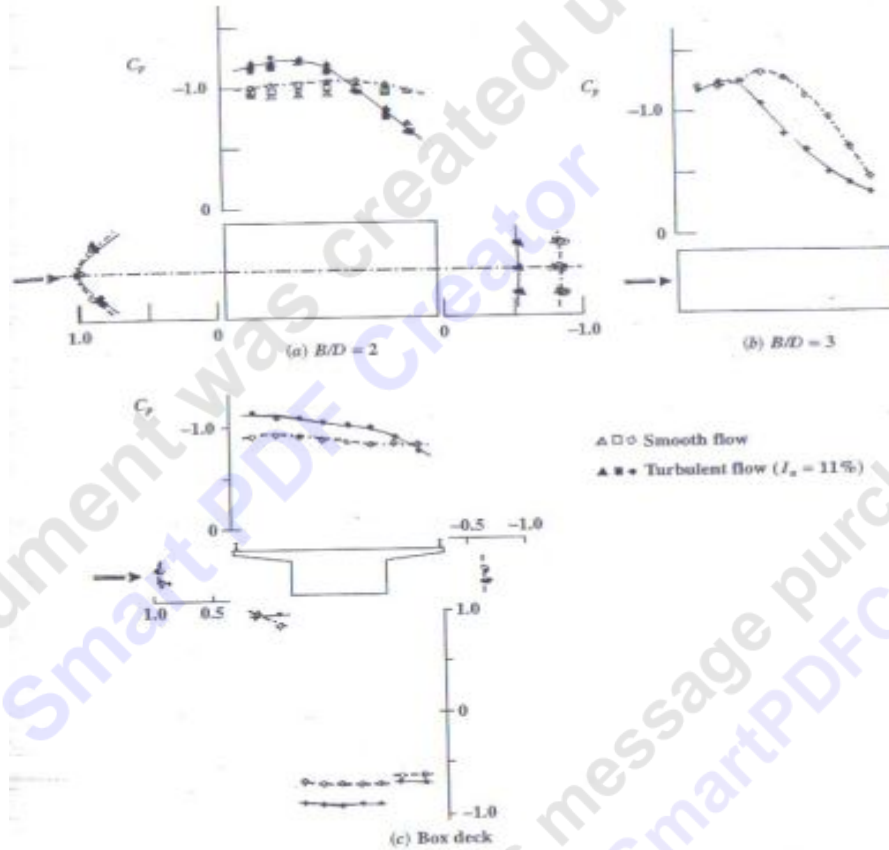
$$L = \frac{1}{2}\rho V^2 B C_L$$

$$M = \frac{1}{2}\rho V^2 B^2 C_M$$

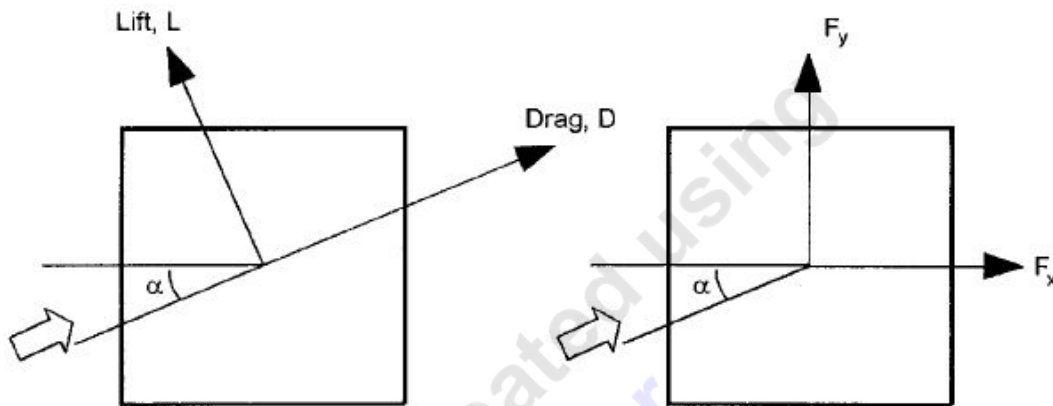
Τα αεροδυναμικά φορτία μπορούν να αναλυθούν σε ένα ορθογώνιο σύστημα συντεταγμένων. Σε αυτό το σύστημα η μια διεύθυνση μπορεί να είναι

παράλληλη και η άλλη διεύθυνση κάθετη με την διεύθυνση ροής του ανέμου. Μπορεί όμως να είναι ο ένας άξονας παράλληλος και ο άλλος κάθετος με τους άξονες του αντικειμένου, Εικόνα 3.4.

Η σχέση μεταξύ των δυνάμεων και των συντελεστών δυνάμεων μπορεί να προκύψει από τριγωνομετρικές σχέσεις, λαμβάνοντας υπόψη τη γωνία α , η οποία είναι η γωνία προσβολής της ροής του αέρα [5].

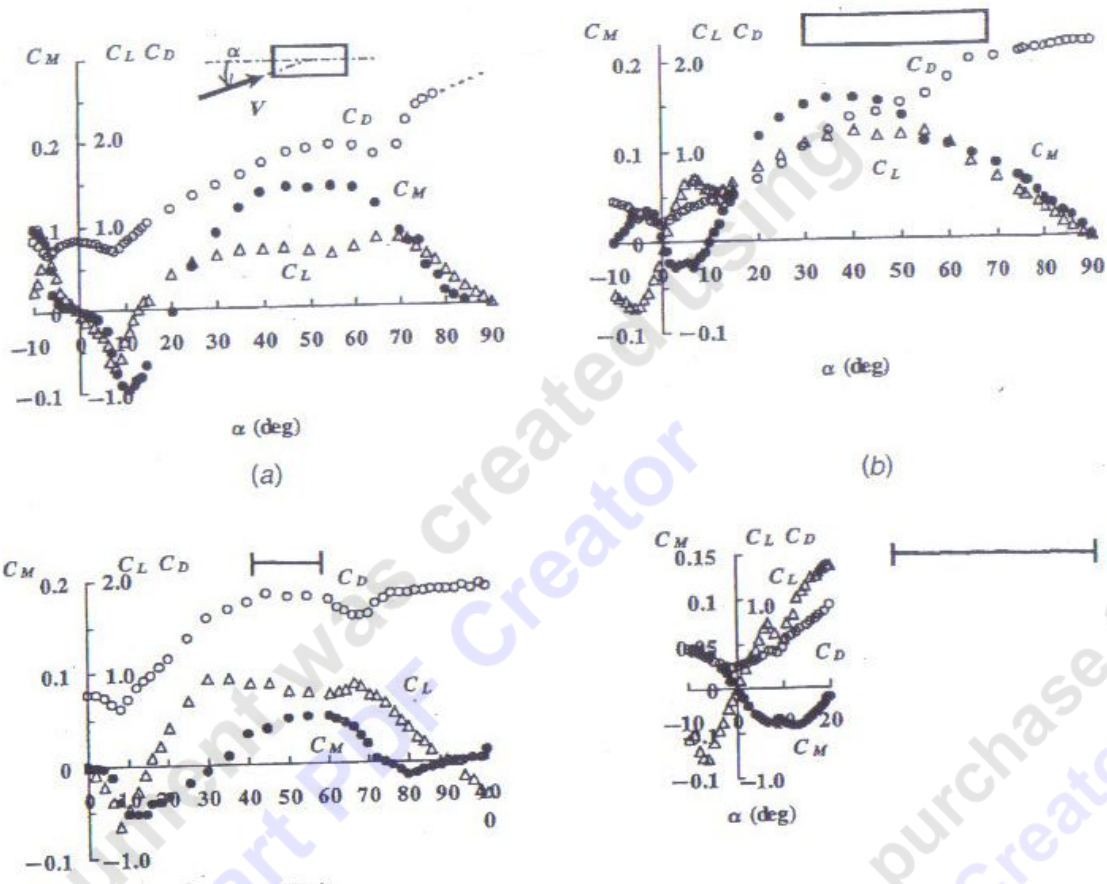


Διάγραμμα 3.2: Κατανομές συντελεστή πίεσης για διαφορετικές γεωμετρίες καταστρώματος [αναφορά].



Εικόνα 3.4: Οι δυο κατηγορίες συστημάτων συντεταγμένων [αναφορά].

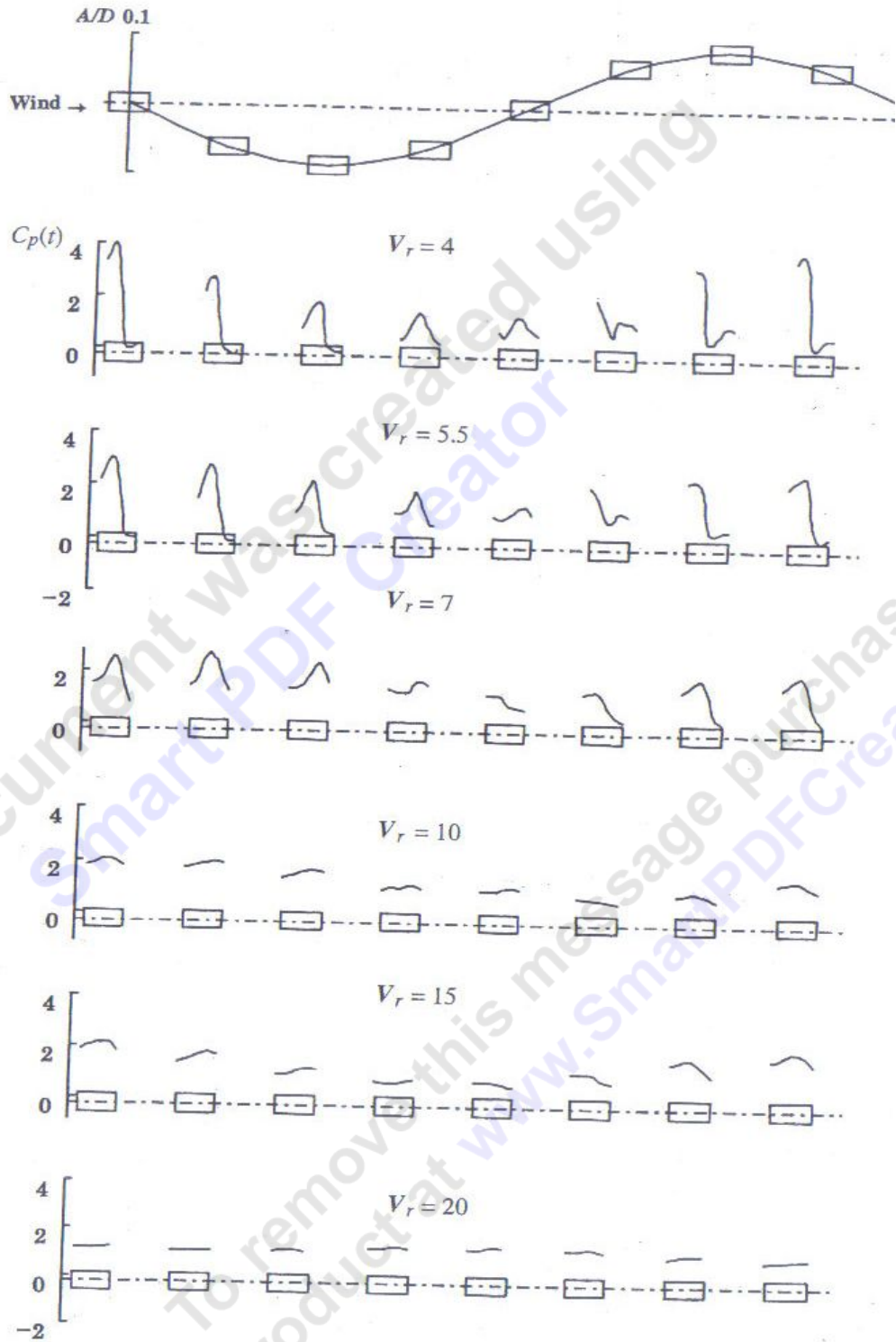
Στο Διάγραμμα 3.3 παρουσιάζονται οι τρεις συντελεστές των φορτίων που προκαλεί η ροή του αέρα σε γέφυρες με ορθογωνική διατομή και λόγους διαστάσεων $B/D=2$ και $B/D=5$ και διατομής τύπου H με τους ίδιους λόγους διαστάσεων σαν συνάρτηση της γωνίας προσβολής, α , της ροής. Παρατηρούμε ότι για μηδενική γωνία προσβολής, $\alpha=0$, ισχύει $dC_M/da < 0$ για όλες τις διατομές. Για λόγο διαστάσεων $B/D=2$ ο ρυθμός μεταβολής του συντελεστή άνωσης είναι αρνητικός, $dC_L/da < 0$, και θετικός για λόγο διαστάσεων $B/D=5$. Πρέπει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός μεταβολής των συντελεστών άνωσης και ροπής μας ενδιαφέρουν για την αεροελαστική συμπεριφορά της γέφυρας [1].



Διάγραμμα 3.3: Συντελεστές δυνάμεων και ροπής και διαφορετικές γεωμετρίες [αναφορά].

3.10 ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΤΑΛΑΝΤΕΥΟΜΕΝΗΣ ΓΕΦΥΡΑΣ

Εύκαμπτες γέφυρες αντιμετωπίζουν ταλαντώσεις, που προκαλούν την αλλαγή της γωνίας προσβολής της ροής του αέρα. Εφόσον όμως η πίεση εξαρτάται από τη γωνία προσβολής, οι ταλαντώσεις αλλάζουν επίσης και την πίεση. Στην **Εικόνα ***, για κάθε διάστημα ίσο με το ένα όγδοο της περιόδου ταλάντωσης αναπαρίσταται η διανομή του συντελεστή πίεσης στην άνω και κάτω επιφάνεια μιας κατασκευής που αντιμετωπίζει κατακόρυφες μετατοπίσεις [1].



Εικόνα 3.5: Κατανομή πίεσης για κατάστρωμα με κατακόρυφες μετατοπίσεις [αναφορά].

Το σώμα είναι κύλινδρος ορθογωνικής διατομής με λόγο διαστάσεων $B/D=2$, η γωνία προσβολής είναι μηδέν, $\alpha=0$, και η αδιάστατη ενίοχυση λόγω

ταλάντωσης, $A/D=0,1$. Παρουσιάζονται κατανομές για έξι τιμές του αδιάστατου λόγου V_r .

$$V_r = \frac{V}{nD}$$

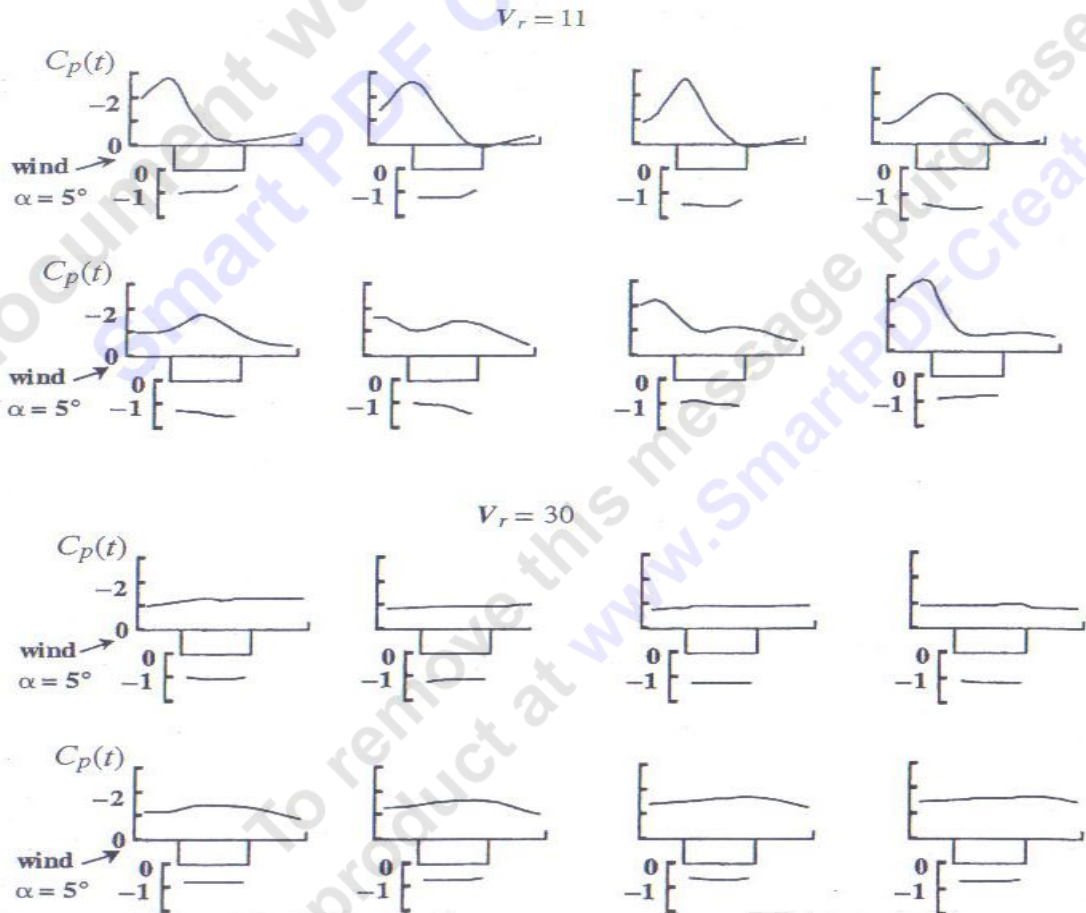
όπου

V : η ταχύτητα του αέρα

D : χαρακτηριστική διάσταση του σώματος, στην περίπτωση μας η κατακόρυφη διάσταση

n : η συχνότητα ταλάντωσης

Στο συνέχεια παρουσιάζονται διαγράμματα, Εικόνα 3.6, για κατάστρωμα τύπου κιβωτίου με πλαϊνά στηρίγματα στις πλευρές, γωνία προσβολής, $\alpha=5^\circ$, και για δύο τιμές του V_r [1].



Εικόνα 3.6: Κατανομή συντελεστή πίεσης για διαφορετικές τιμές V_r [αναφορά].

3.11 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΓΕΦΥΡΑΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΤΟΞΟΥ

Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί, για αρκετά εύρη ταχύτητας της ροής του αέρα, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν δυναμική απόκριση στο κατάστρωμα μιας γέφυρας μεγάλου ανοίγματος.

- Στροβιλισμοί που διαχέονται, το οποίο συμβαίνει συνήθως σε χαμηλές ταχύτητες ροής του αέρα και συνθήκες χαμηλής τύρβης.
- Πτερυγισμός και αστάθειες διαφορετικών τύπων, που προκαλεί αυτός. Συμβαίνει σε πολύ υψηλές ταχύτητες αέρα για αεροδυναμικώς σταθερά καταστώματα, κυρίως εξαιτίας της επικράτησης αεροδυναμικών φορτίων. Συνήθως αυτές είναι στρεπτικές ροπές, ενώ μπορεί να περιλαμβάνουν και κατακόρυφες καμπτικές μετατοπίσεις.
- Φορτίσεις που προκαλούνται από δυνάμεις μεταβλητές που οφείλονται στην τύρβη. Αυτό το φαινόμενο συμβαίνει για μεγάλο εύρος ταχυτήτων ροής αέρα, ενώ αυξάνει όσο αυξάνει και η ταχύτητα του αέρα.

Ο αέρας μπορεί να προκαλέσει αστάθεια και υπερβολική δόνηση στις γέφυρες. Η αστάθεια είναι μια μετατόπιση που έχει την τάση να αυξάνεται ενώ η δόνηση είναι μια κυκλική μετακίνηση που προκαλείται από τα αποτελέσματα δυναμικών φαινομένων. Δεδομένου ότι και οι αστοχίες λόγω αστάθειας και οι αστοχίες λόγω δονήσεων εμφανίζονται στην πραγματικότητα σε πεπερασμένες μετατοπίσεις, είναι συχνά δύσκολο να κριθεί εάν μια δομή αστόχησε λόγω της αστάθειας ή της υπερβολικής ζημίας από προκαλούμενες ταλαντώσεις.

Η αστάθεια που προκαλείται από την αλληλεπίδραση μεταξύ της κίνησης του αέρα και μιας δομής καλείται αεροελαστική ή αεροδυναμική αστάθεια. Ο όρος αεροελαστική υπογραμμίζει τη συμπεριφορά των παραμορφωμένων αντικειμένων, και ο αεροδυναμικός υπογραμμίζει τη δόνηση των άκαμπτων αντικειμένων. Δεδομένου ότι πολλά προβλήματα περιλαμβάνουν και την παραμόρφωση και τη δόνηση, αυτοί οι δύο όροι χρησιμοποιούνται εναλλακτικά στη συνέχεια. Οι αεροδυναμικές αστάθειες των γεφυρών περιλαμβάνουν την απόκλιση, τον καρπασμό, και τον κυματισμό. Οι χαρακτηριστικές δονήσεις που προκαλούνται από τον αέρα αποτελούνται από την αποκόλληση των δινών και το buffeting. Αυτοί οι τύποι ασταθειών και δονήσεων μπορούν να εμφανιστούν μεμονωμένα ή σε συνδυασμό μεταξύ τους.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ της δόνησης της γέφυρας και του αέρα οδηγεί σε δύο είδη δυνάμεων: των εξαρτώμενων και των ανεξάρτητων από την κίνηση δυνάμεων. Η πρώτη κατηγορία εξαφανίζεται εάν οι κατασκευές κατασκευάζονται με αυξημένη ακαμψία. Η δεύτερη κατηγορία, που εξαρτάται καθαρά από τα χαρακτηριστικά της ροής του αέρα και τη γεωμετρία των τμημάτων, υπάρχει είτε η γέφυρα κινείται είτε όχι.

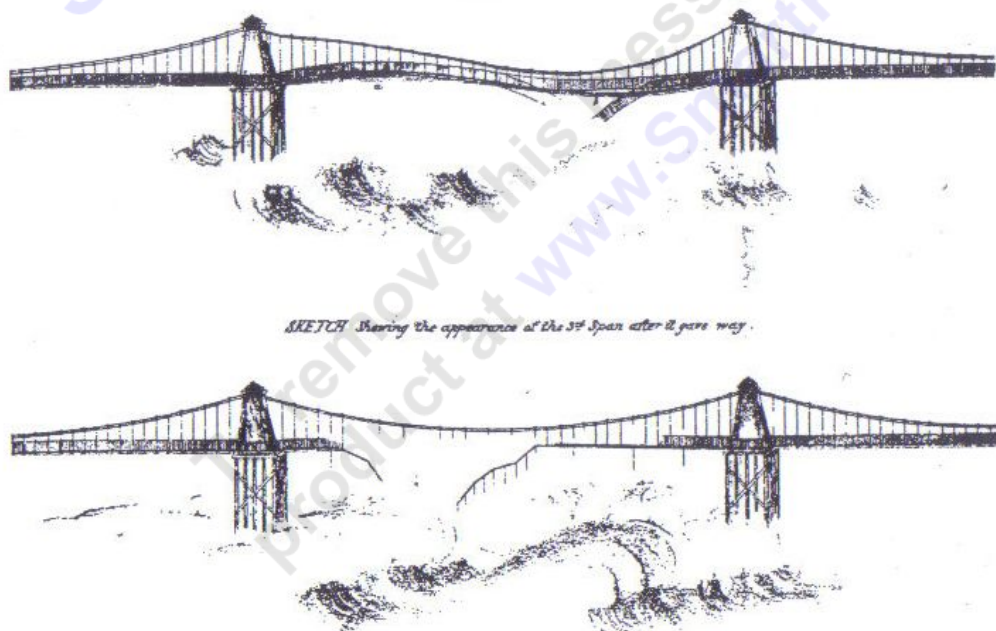
Η δύναμη που είναι εξαρτώμενη από την κίνηση προκαλεί αεροδυναμική αστάθεια και το ανεξάρτητο από την κίνηση φορτίο μαζί με το εξαρτώμενο από την κίνηση φορτίο προκαλεί την παραμόρφωση. Η διαφορά μεταξύ της γέφυρας

μικρής έκτασης και μεγάλης έκτασης βρίσκεται στο εξαρτώμενο από την κίνηση φορτίο. Για τις γέφυρες μικρής έκτασης, το εξαρτώμενο από την κίνηση φορτίο είναι ασήμαντο και δεν υπάρχει καμία ανησυχία για την αεροδυναμική αστάθεια. Για τις εύκαμπτες δομές, όπως οι γέφυρες μεγάλης έκτασης και η αστάθεια και η δόνηση πρέπει να ερευνηθούν προσεκτικά [4].

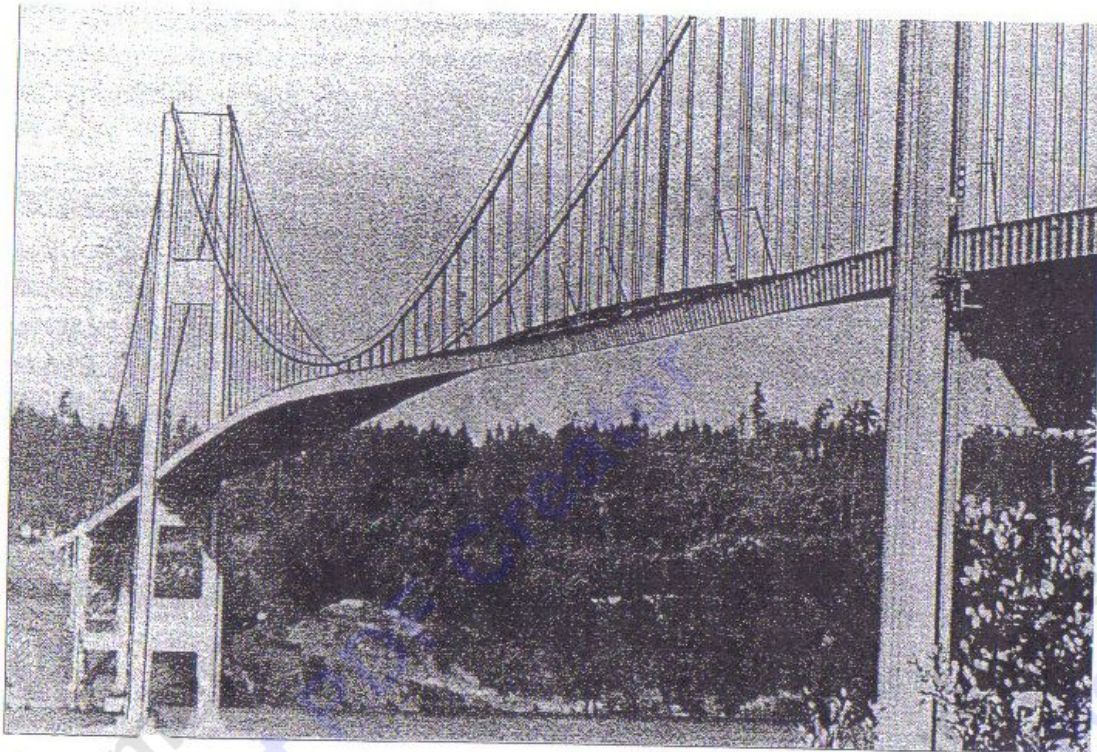
3.11.1 Αεροελαστικότητα

Καθώς μια ροή αέρα προσβάλλει μια κατασκευή όπως είναι η γέφυρα θα προκαλέσει κάποιες μετατοπίσεις στα δομικά τμήματά της. Αυτά με την σειρά τους, λόγω της κίνησής τους θα επηρεάσουν την ροή που διέρχεται, τροποποιώντας την με αποτέλεσμα να προκαλούν αλλαγές στην κίνηση των δομικών στοιχείων. Έξεκινά λοιπόν μια αλυσίδα δράσης αντίδρασης μεταξύ της ροής και της κατασκευής, όπου η μια επιδρά στην άλλη συνεχώς. Τα δομικά τμήματα που αυξάνουν την αεροδυναμική επίδραση της ροής στα ίδια ονομάζονται αυτό-διεγυρόμενα, και η συμπεριφορά τους ονομάζεται αεροελαστική. Παραδείγματα τέτοιας συμπεριφοράς είναι η γέφυρα Brighton Chain Pier και η Tacoma Narrows.

Για να περιγραφεί η αλληλεπίδραση μεταξύ αεροδυναμικών φορτίων και της κίνησης της κατασκευής, που αυτά προκαλούν, θα πρέπει να επιλυθούν οι εξισώσεις κίνησης που περιγράφουν την ροή, με χρονικά μεταβαλλόμενες οριακές συνθήκες, που επιβάλλονται από τα κινούμενα τμήματα. Για την μελέτη του φαινομένου χρησιμοποιείται τόσο η υπολογιστική ρευστοδυναμική όσο και τα πειράματα σε αεροσήραγγες.



Εικόνα 3.7: Αστοχία της γέφυρας Brighton Chain Pier [αναφορά].



Εικόνα 3.8: Επίδραση αεροελαστικών φορτίων στην γέφυρα Tacoma Narrows [αναφορά].

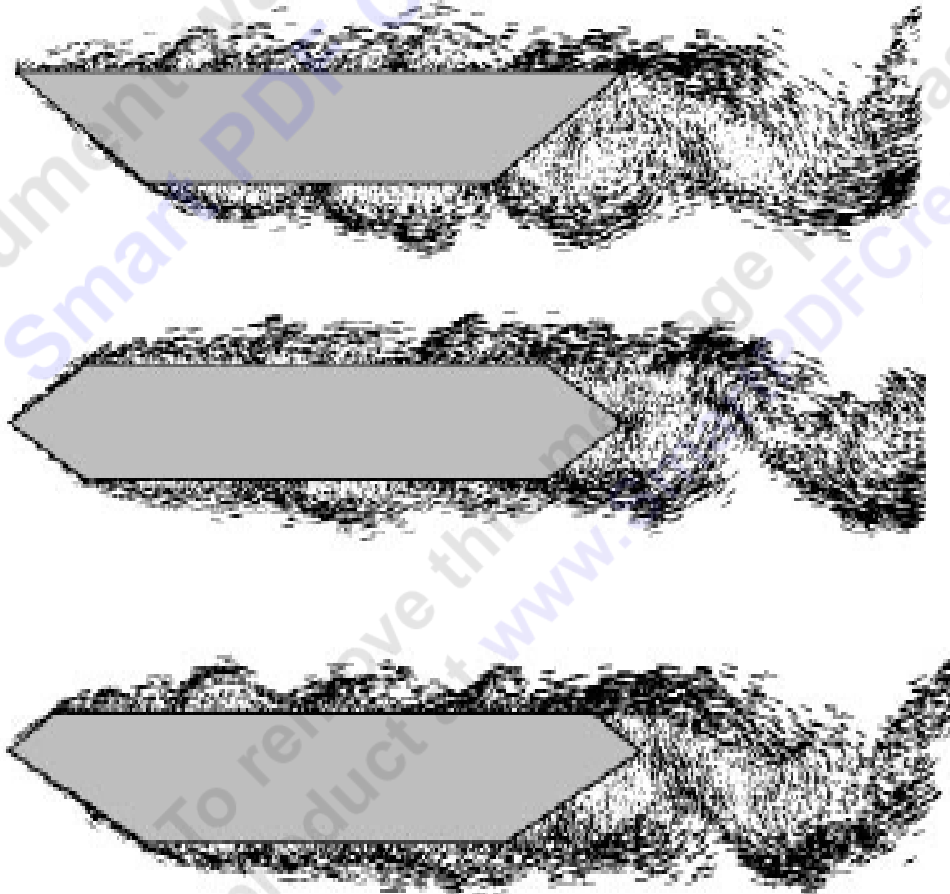
Η αλληλεπίδραση ροής-κατασκευής χαρακτηρίζεται σαν σταθεροποιητική ή αποσταθεροποιητική, εάν υπάρχει μεταφορά ενέργειας από την ροή στην κατασκευή και από την κατασκευή στην ροή αντίστοιχα. Σε αντίστοιχία με τις δυνάμεις αντίδρασης λόγω ιξώδους, που τείνουν να μειώσουν την ενέργεια ενός ταλαντευόμενου σώματος, οι αεροελαστικές δυνάμεις αναφέρονται ως αρνητικά αεροδυναμικά φορτία αντίδρασης αν τείνουν να αυξήσουν την ενέργεια ταλάντωσης του αντικείμενου, δηλ. αν είναι αποσταθεροποιητικά. Αντίστοιχα σταθεροποιητικά αεροελαστικά φορτία αναφέρονται ως θετικά αεροδυναμικά φορτία αντίδρασης.

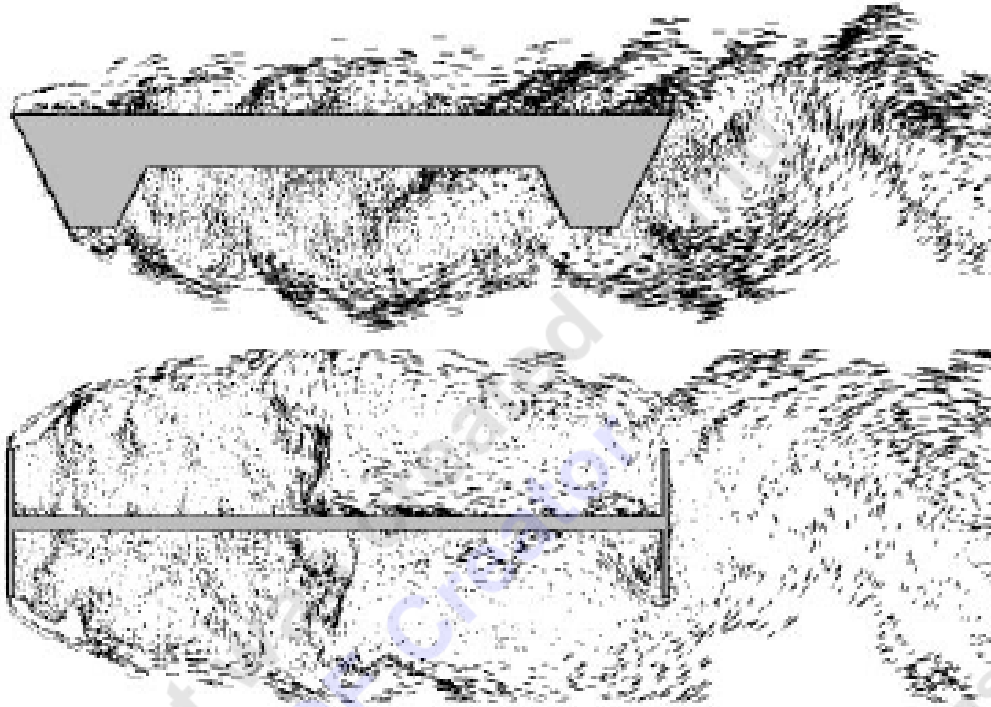
Χαρακτηριστικά είδη τέτοιας συμπεριφοράς είναι το vortex lock-in και το galloping. Συγκεκριμένα το galloping επειδή είναι μονοδιάστατο φαινόμενο, η συμπεριφορά του είναι σχετικά απλή και μας βοηθάει να κατανοήσουμε την αλληλεπίδραση ροής κατασκευής. Αυτό συμβαίνει σε κάποιες κατηγορίες αντικειμένων, τα οποία καθώς κινούνται, η γωνία προσβολής της ταχύτητας με το αντικείμενο αλλάζει. Με βάση το galloping μπορούμε να μελετήσουμε και το flutter (περυγιμός), που είναι πιο σύνθετο για δύο λόγους, πρώτα γιατί εμπεριέχει αποτελέσματα λόγω δυνάμεων, που είναι απόντες στο galloping, και

δεύτερον γιατί σχετίζεται με την κίνηση του αντικειμένου και στις τρεις διαστάσεις αντί μόνο μίας που μελετάμε στο galloping [1].

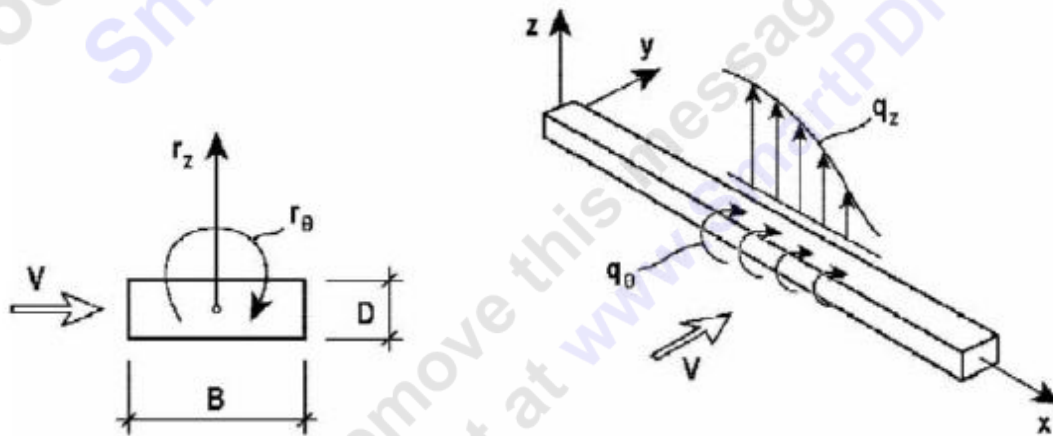
3.11.2 Vortex shedding

Όταν η ροή του αέρα μας συναντά τη γέφυρα ή τον πύργο, τότε θα συμβεί διαχωρισμός της ροής μας στην επιφάνεια της κατασκευής, προκαλώντας δίνες που θα αποκολλώνται εναλλάξ σε κάθε πλευρά της κατασκευής μας. Το φαινόμενο αυτό κατά το οποίο δίνες αποκολλώνται σε κάθε πλευρά του στερεού ονομάζεται vortex shedding, Εικόνα 3.9. Μια ασφαλής θεώρηση για την ανάλυση του φαινομένου είναι ότι οι επιπτώσεις από φορτία κατά την διεύθυνση της ροής του αέρα είναι αμελητέα, όμως σε διεύθυνση κάθετη με αυτή της ροής του αέρα παρατηρείται σημαντική ενίσχυση στα ταλαντωτικά φορτία q_z και την ροπή στρέψης q_θ , που έχει σαν αποτέλεσμα μετατοπίσεις r_z και r_θ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10 [1,8].





Εικόνα 3.9: Αποκόλληση δινών από τη ροή σε διαφορετικές γεωμετρίες καταστρώματος γέφυρας [αναφορά].



Εικόνα 3.10: Φορτία λόγω αποκόλλησης δινών και επακόλουθες μετατοπίσεις [αναφορά].

Η συχνότητα αποκόλλησης των δινών περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_s = St * \frac{V}{D}$$

όπου

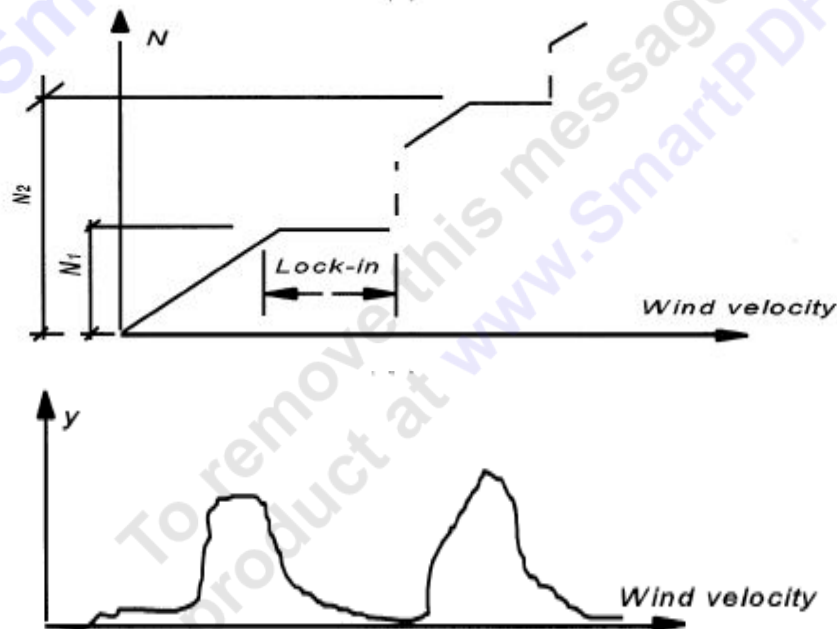
St : ο αριθμός Strouhal του οποίου η τιμή είναι γνωστή για μεγάλο αριθμό διατομών, με εύρος τιμών από 0,05 έως 0,2.

V : η μέση ταχύτητα της ροής του αέρα.

D : το πλάτος του καταστρώματος.

Όταν η ταχύτητα της ροής αυξάνεται τότε αυξάνεται και η συχνότητα αποκόλλησης των δινών και έτσι ταλαντώνεται πιο έντονα αλλά περιορίζεται όταν πλησιάσει την τιμή της ιδιοσυχνότητας, N1, της κατασκευής. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται lock-in και η ταχύτητα της ροής του αέρα που συμβαίνει ονομάζεται κρίσιμη ταχύτητα αποκόλλησης δινών.

Το φαινόμενο αυτό συμβαίνει για ένα μικρό εύρος τιμών ταχυτήτων ροής αέρα όπου η εξίσωση Strouhal παραβιάζεται καθώς όσο αυξάνεται η ταχύτητα της ροής ο αριθμός Strouhal μειώνεται για σταθερή συχνότητα αποκόλλησης δινών. Από ένα σημείο και μετά η περαιτέρω αύξηση της ταχύτητας της ροής του αέρα προκαλεί μείωση της έντασης των ταλαντώσεων και εξαφάνιση του φαινομένου lock-in. Η συχνότητα αποκόλλησης θα “κλειδώσει” σε μια άλλη ιδιοσυχνότητα, N2, σε ακόμη μεγαλύτερη ταχύτητα ροής αέρα και θα επαναληφθεί το ίδιο φαινόμενο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.11 [4,13].



Εικόνα 3.11: Φαινόμενο lock-in και ταλαντώσεις στο κατάστρωμα της γεφυρας [4].

Οι συνθήκες που απαιτούνται για να συμβεί αυτό το φαινόμενο είναι μερικές ή όλες από τις παρακάτω:

- Διεύθυνση του ανέμου εναρμονισμένη με τον διαμήκη άξονα της γέφυρας.
- Συνθήκες χαμηλής τύρβης.
- Η ταχύτητα του αέρα σε ένα κρίσιμο εύρος τιμών (5-12 m/s).
- Χαμηλή υγρασία.

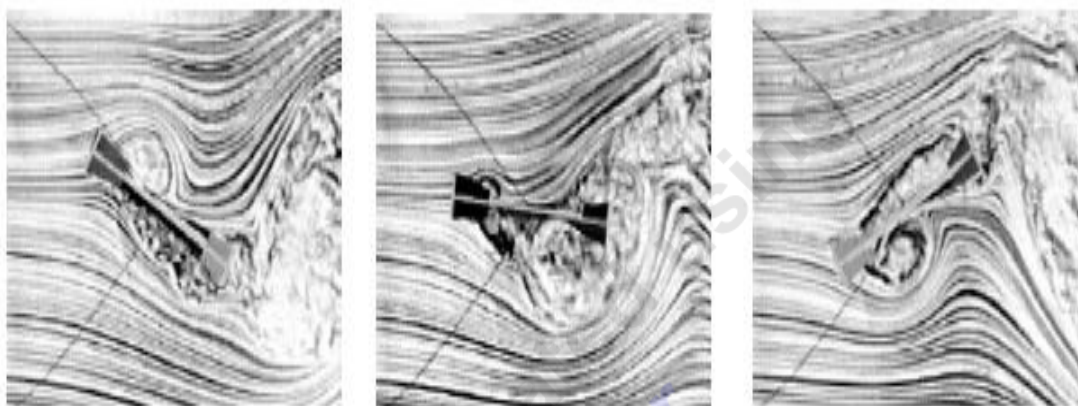
Η αποκόλληση των δινών μπορεί να συμβεί τόσο στην στρωτή όσο και στην τυρβώδη ροή. Για δεδομένη διατομή με γνωστό αριθμό Strouhal και γνωστές ιδιοσυχνότητες ταλάντωσης, υπολογίζονται οι ταχύτητες που παρατηρείται lock-in από την εξίσωση Strouhal. Ωστόσο οι υπολογιζόμενες ταχύτητες ροής αέρα που έχουμε lock-in είναι μικρότερες από τις μέγιστες τιμές της ροής του αέρα σε κάθε τοποθεσία που κατασκευάζεται μια γέφυρα. Έτσι λοιπόν η αποκόλληση δυνών είναι ένα αναπόφευκτο αεροδυναμικό φαινόμενο. Μια σχετικά μικρή απόσβεση είναι συχνά επαρκής για να εξαφανισθούν, ή να μειωθούν τουλάχιστον, οι δονήσεις σε αποδεκτά όρια.

3.11.3 Flutter

Ο περυγιωμός (flutter) είναι ένα από τα πρώτα και πιο επικίνδυνα αεροελαστικά φαινόμενα και συμβαίνει σε εύκαμπτα σώματα με σχετικά επίπεδη γεωμετρία. Ξεκινάει από αυτό-προκαλούμενες δυνάμεις, που εξαρτώνται από την κίνηση του σώματος. Εμπεριέχει ταλαντώσεις, που ενισχύονται με το χρόνο και μπορεί να προκαλέσουν αστοχία σε μια κατασκευή. Παράδειγμα επίδρασης του φαινομένου αυτού στο κατάστρωμα μιας γέφυρας είναι η γέφυρα Tacoma Narrows. Στην Εικόνα 3.12 φαίνονται στιγμιότυπα από τη στιγμή που ενεργούν τα στρεπτικά φορτία.



Εικόνα 3.12: Αστοχία της γέφυρας Tacoma Narrow λόγω στρεπτικών ροπών [αναφορά].



Εικόνα 3.13: Αναπαράσταση των δινών που οδήγησαν στην αστοχία της γέφυρας [αναφορά].

Η πιο μεγάλη δυσκολία για την για την μελέτη του φαινομένου αυτού είναι οι αυτό-διεγερόμενες δυνάμεις και η εξέλιξή τους. Για λεπτές αεροτομές σε ασυμπιεστή ροή οι δυνάμεις που δημιουργούνται λόγω μικρών μετατοπίσεων έχουν περιγραφεί από την αεροδυναμική θεωρία και τα αντίστοιχα μοντέλα. Όμως για τις γέφυρες η θεωρία της λεπτής αεροτομής δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Για να περιγράψουμε την αντίδραση της γέφυρας στο πρόβλημα του flutter εξαιτίας μικρών μετατοπίσεων του καταστρώματος χρησιμοποιούμε συναρτήσεις που ονομάζονται αεροδυναμικές παράγωγοι πτερυγισμού (flutter aerodynamic derivatives) [1,7].

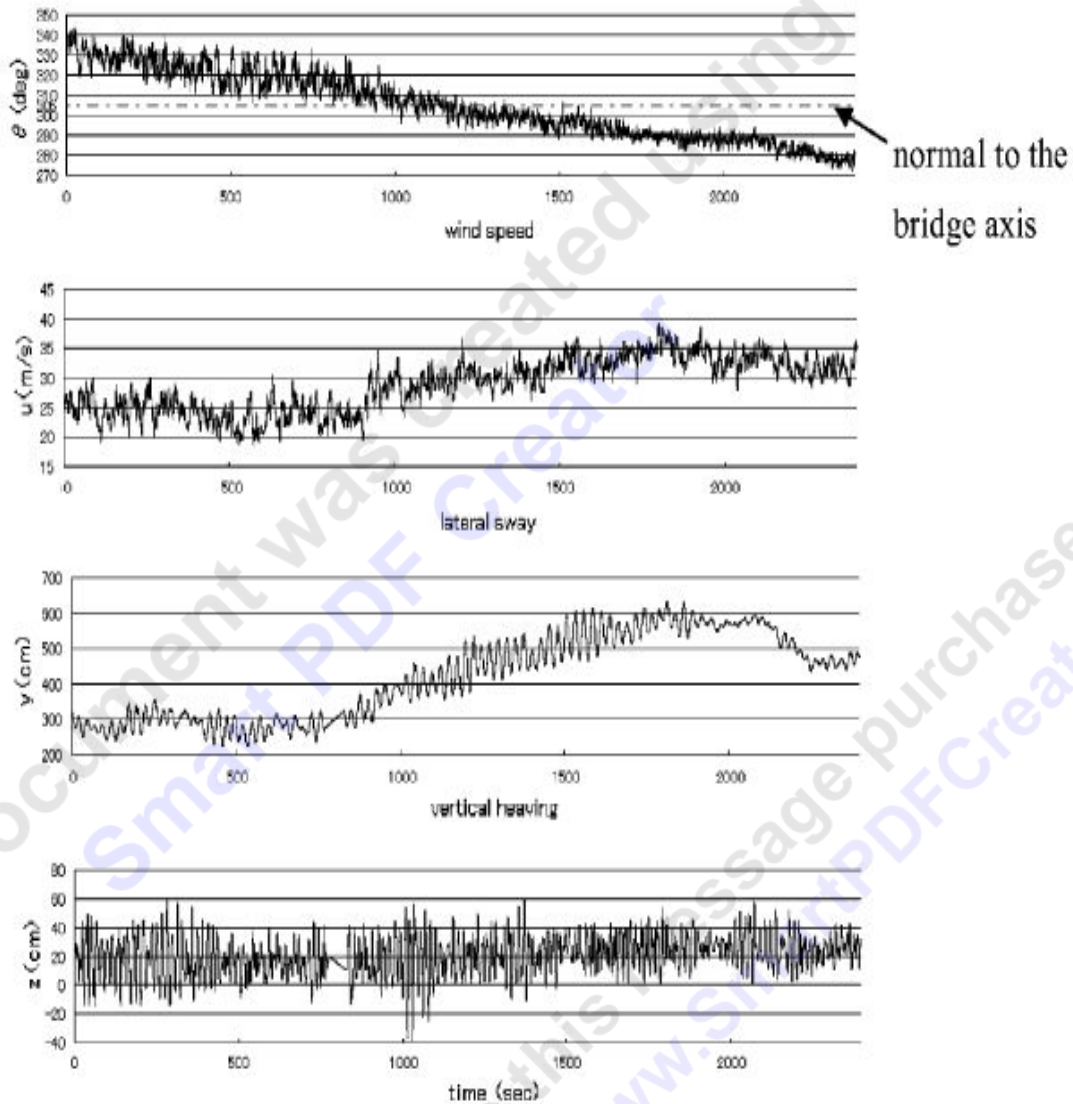
3.11.4 Buffeting

Ακόμα και όταν μια γέφυρα παρουσιάζει σταθερότητα σε πτερυγισμό για μεγάλες ταχύτητες στη ροή του αέρα και δεν υποφέρει από δονήσεις προκαλούμενες από δίνες σε χαμηλές ταχύτητες ροής αέρα θα πρέπει να μπορεί να διαχειριστεί δυναμικές φορτίσεις από την ατμοσφαιρική τύρβη, γνωστό ως buffeting, σε μεγάλο εύρος ταχυτήτων αέρα.

Ως buffeting ορίζεται η εξαναγκασμένη απόκριση μιας κατασκευής σε τυχαίο άνεμο και μπορεί να συμβεί μόνο σε τυρβώδεις ροές. Η τύρβη προκαλείται από τοπογραφικά ή δομικά εμπόδια ή μπορεί να προέρχεται από την ίδια την γέφυρα. Βέβαια οι συχνότητες της τύρβης που προκαλείται από την γέφυρα είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις φυσικές συχνότητες της γέφυρας, οπότε η επίδρασή τους στο buffeting είναι συνήθως μικρή.

Το buffeting είναι ένα πρόβλημα τυχαίων δονήσεων περιορισμένων μετατοπίσεων. Τα αποτελέσματα τόσο του buffeting όσο και του vortex shedding είναι παρόμοια, εκτός του ότι οι δονήσεις είναι τυχαίες στο πρώτο και περιοδικές στο δεύτερο φαινόμενο. Και τα δύο φαινόμενα επηρεάζουν την συμπεριφορά της γέφυρας και συμβάλλουν στις ζημιές λόγω κόπωσης και

μπορεί να οδηγήσει μέχρι αστοχία της κατασκευής. Γίνεται εύκολα φανερό ότι το buffeting επηρεάζει την αντοχή της γέφυρας.



Διάγραμμα 3.5: Δεδομένα για την διεύθυνση του άνεμου, την ταχύτητά του, βέλος κάμψης, κατακόρυφη μετατόπιση [αναφορά].

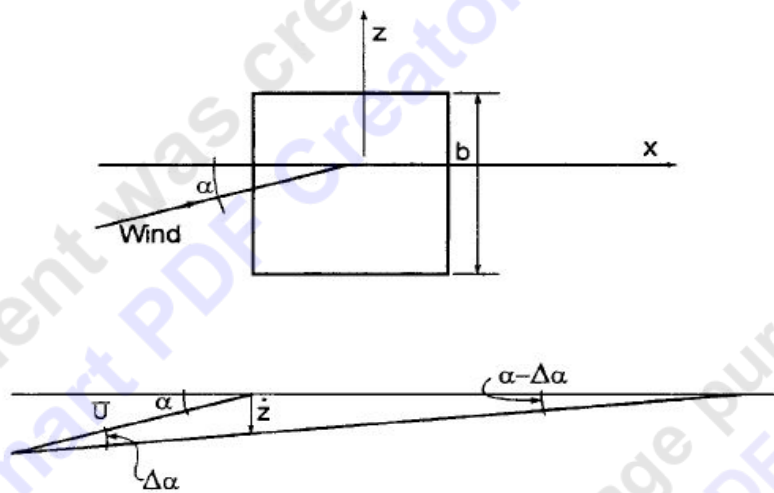
Η αντίδραση μιας γέφυρας στον τυρβώδη αέρα παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.5, το οποίο περιέχει καταγεγραμμένες τιμές της διεύθυνσης και της ταχύτητας του αέρα αλλά και τις οριζόντιες και κατακόρυφες αντιδράσεις της γέφυρας όταν η γέφυρα Akashi Kaikyo βρέθηκε αντιμέτωπη με ένα τυφώνα.

Η διεύθυνση του αέρα ποικίλει μεταξύ ± 30 σε μια διεύθυνση ίδια με αυτή του άξονα της γέφυρας. Παρατηρούμε ότι η αντίδραση της γέφυρας αυξάνεται με την ταχύτητα με πιο αργό ρυθμό για τις κατακόρυφες κινήσεις από ότι για τις οριζόντιες κινήσεις. Οι κινήσεις της γέφυρας οφείλονται στις

μεταβαλλόμενες πιέσεις λόγω του αέρα. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν προκλήθηκε αεροελαστική αντίδραση για τις τιμές της ταχύτητας που μετρήθηκαν.

3.11.5 Galloping

Το galloping είναι μια μορφή αεροδυναμικής αστάθειας ενός βαθμού ελευθερίας, το οποίο μπορεί να συμβεί σε αντικείμενα με μεγάλο μήκος και συγκεκριμένη διατομή. Για να κατανοήσουμε καλύτερα το φαινόμενο αυτό ας θεωρήσουμε ένα αντικείμενο όπως φαίνεται στη συνέχεια στην Εικόνα 3.14.



Εικόνα 3.14: Σχετική κίνηση και galloping κάθετα στον άνεμο [αναφορά].

Το αεροδυναμικό φορτίο ανά μονάδα μήκους, στην z διεύθυνση, εξάγεται από την δύναμη της άνωσης και της οπισθέλκουσας αν αλλάξουμε άξονες και επιλέξουμε άξονες με x διεύθυνση παράλληλη με την φορά του αέρα και y διεύθυνση κάθετη σε αυτή. Τότε η δύναμη αυτή δίνεται από την ακόλουθη σχέση.

$$F_z = D \sin a + L \cos a = \frac{1}{2} \rho_a \bar{U}^2 b (C_D \sin a + C_L \cos a)$$

Όταν παραγωγίσουμε την παραπάνω εξίσωση ως προς την γωνία προσβολής της ροής, a , και κατόπιν θέσουμε την γωνία προσβολής ίση με τον μηδέν, $a=0$, δηλ. η ροή του αέρα είναι παράλληλη με τον x άξονα προκύπτει η εξής σχέση.

$$\frac{dF_z}{da} = \frac{1}{2} \rho_a \bar{U}^2 b \left(C_D + \frac{dC_L}{da} \right)$$

Αν το αντικείμενό μας κινείται στην διεύθυνση z με μια ταχύτητα z , θα υπάρξει μια μείωση στη γωνία προσβολής της ροής κατά $\frac{z}{U}$ ή μια αύξηση της γωνίας προσβολής της ροής κατά $-\frac{z}{U}$.

Αν αντικαταστήσουμε στην παραπάνω εξίσωση όπου $\Delta\alpha = -\frac{z}{U}$ τότε έχουμε την νέα σχέση.

$$\Delta F_z = -\frac{1}{2}\rho_a \bar{U} b \left(C_D + \frac{dC_L}{da} \right) z$$

Αν ο όρος $\left(C_D + \frac{dC_L}{da} \right) < 0$, τότε θα υπάρξει ένα αεροδυναμικό φορτίο στην z διεύθυνση, ανάλογο με την ταχύτητα της κίνησης, z .

Σε περιπτώσεις που έχουμε τετράγωνα τμήματα όπου υπάρχει αρνητική κλίση $\left(\frac{dC_L}{da} \right)$ και για γωνία προσβολής α ίση με το μηδέν το παραπάνω φαινόμενο θα εμφανιστεί [5].

3.11.6 Ψευδο-στατική απόκλιση

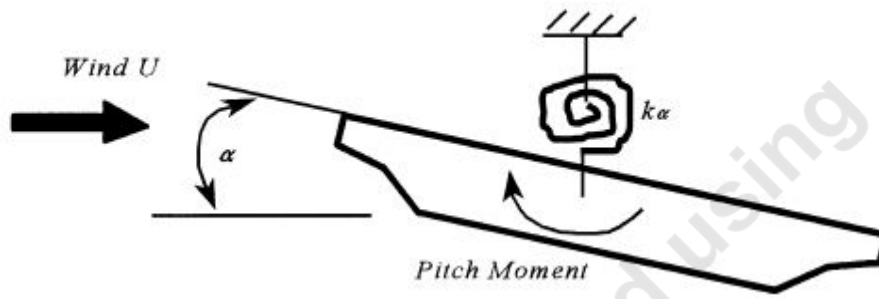
Όταν αέρας προσβάλλει μια κατασκευή ασκεί μια πίεση ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας της ροής. Η πίεση του αέρα γενικά προκαλεί τόσο δυνάμεις όσο και ροπές σε μια κατασκευή. Σε μια κρίσιμη τιμή ταχύτητας της ροής του αέρα η πλευρά της γέφυρας που φορτίζεται μπορεί να αποκλίνει κατά μια γωνία λόγω ροπής που προκαλείται από την ροή αέρα αυξημένη από μια γωνία γεωμετρικής συστροφής.

Αν θεωρήσουμε μια μικρή γωνία περιστροφής όπως φαίνεται στην πιο κάτω Εικόνα 3.15, τότε η ροπή περιστροφής υπολογίζεται ως εξής [αναφορά]:

$$M_a = \frac{1}{2}\rho U^2 B^2 \left[C_{M0} + \frac{dC_M}{da} \Big|_{a=0} a \right]$$

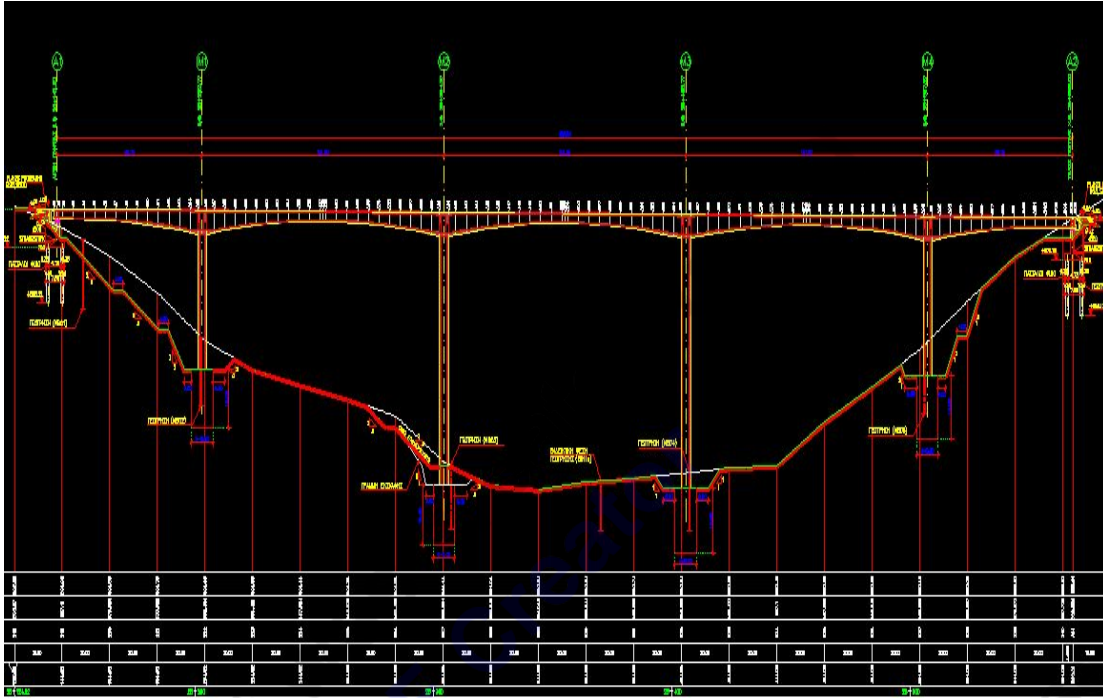
Από την εξίσωση αυτή προκύπτει η κρίσιμη ταχύτητα για απόκλιση λόγω στρέψης:

$$U_{cr} = \sqrt{\frac{2k_a}{\rho B^2 \frac{dC_M}{da} \Big|_{a=0}}}$$



Εικόνα 3.15: Απόκλιση λόγω στρέψης στο κατάστρωμα γέφυρας [αναφορά].

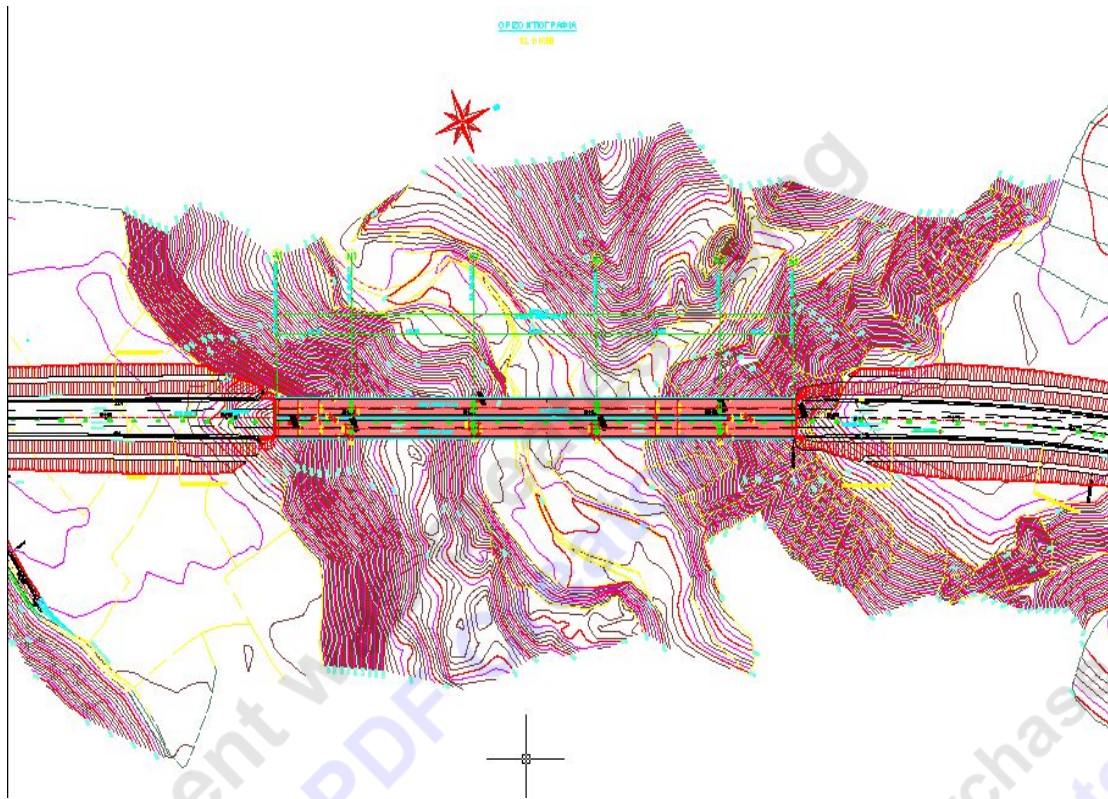
This document was created using
Smart PDF Creator
To remove this message purchase the
product at www.SmartPDFCreator.com



Εικόνα 4.2: Πλάγια όψη δεξιού κλάδου.



Εικόνα 4.3: Τομή καταστρώματος γέφυρας.



Εικόνα 4.4: Τοπογραφικό περιοχής κατασκευής γέφυρας Παναγίας-Γρεβενά.

4.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΕΦΥΡΑΣ

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, το πρώτο στάδιο της μελέτης μας αφορά στην δημιουργία του μοντέλου της γέφυρας στο σχεδιαστικό λογισμικό CATIA.

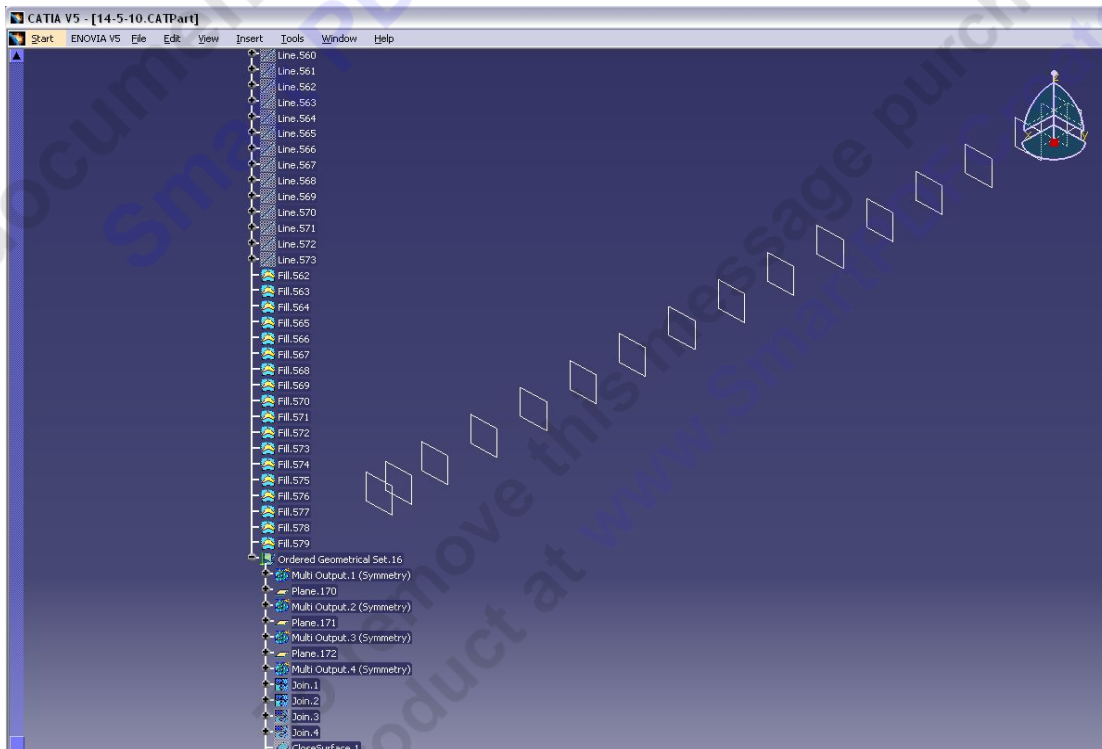
Ξεκινώντας, επιλέχθηκε ένα αρχικό σύστημα συντεταγμένων και ένα σημείο αναφοράς. Αφού σχεδιάστηκε το αρχικό επίπεδο, τοποθετήθηκαν, παράλληλα ως προς το αρχικό, τα υπόλοιπα επίπεδα για τη δημιουργία της επόμενης διατομής, στις προκαθορισμένες αποστάσεις, όπως σημειώνονται στον Πίνακα 4.1.

ΑΝΟΙΓΜΑ Α1 - Μ1				
ΔΙΑΤΟΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			
α/α	Αποστάθας από Α1	Υψος φορέα Η	Πλάτος κάτω πλάτης	Πλάτος άνω πλάτης
Δ0	-1.20m	2.510m-2.685m	0.625m-0.675m	0.400m
Δ1	0.00m	2.471m-2.725m	0.585m-0.614m	0.300m
Δ2	2.35m	2.600m	0.300m	0.300m
Δ3	6.80m	2.600m	0.300m	0.300m
Δ4	11.25m	2.602m	0.300m	0.300m
Δ5	15.70m	2.547m	0.300m	0.300m
Δ6	20.15m	2.650m	0.300m	0.300m
Δ7	24.60m	2.811m	0.300m	0.300m
Δ8	29.05m	3.029m	0.300m	0.300m
Δ9	33.50m	3.305m	0.365m	0.300m
Δ10	37.95m	3.639m	0.430m	0.300m
Δ11	42.40m	4.030m	0.495m	0.300m
Δ12	46.85m	4.479m	0.560m	0.300m
Δ13	51.30m	4.986m	0.625m	0.300m
Δ14	55.75m	5.551m	0.690m	0.300m
Δ15	59.00m	6.000m	0.960m	0.700m
ΑΝΟΙΓΜΑ Μ1 - Μ2				
ΔΙΑΤΟΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			
α/α	Αποστάθας από Μ1	Υψος φορέα Η	Πλάτος κάτω πλάτης	Πλάτος άνω πλάτης
ΔΜ1	0.00m	6.00m	0.960m	0.700m
Δ16	1.75m	6.00m	0.960m	0.700m
Δ17	5.00m	5.551m	0.690m	0.300m
Δ18	9.45m	4.986m	0.625m	0.300m
Δ19	13.90m	4.479m	0.560m	0.300m
Δ20	18.35m	4.030m	0.495m	0.300m
Δ21	22.80m	3.639m	0.430m	0.300m
Δ22	27.25m	3.305m	0.365m	0.300m
Δ23	31.70m	3.029m	0.300m	0.300m
Δ24	36.15m	2.811m	0.300m	0.300m
Δ25	40.60m	2.650m	0.300m	0.300m
Δ26	45.05m	2.547m	0.300m	0.300m
Δ27	49.50m	2.502m	0.300m	0.300m
Δ28	53.95m	2.500m	0.300m	0.300m
Δ29	58.00m	2.502m	0.300m	0.300m
Δ30	62.45m	2.547m	0.300m	0.300m
Δ31	66.90m	2.650m	0.300m	0.300m
Δ32	71.35m	2.811m	0.300m	0.300m
Δ33	75.80m	3.029m	0.300m	0.300m
Δ34	80.25m	3.305m	0.365m	0.300m
Δ35	84.70m	3.639m	0.430m	0.300m
Δ36	89.15m	4.030m	0.495m	0.300m
Δ37	93.60m	4.479m	0.560m	0.300m
Δ38	98.05m	4.986m	0.625m	0.300m
Δ39	102.50m	5.551m	0.690m	0.300m
Δ40	106.95m	6.000m	0.960m	0.700m

ΑΝΟΙΓΜΑ Μ2 - Μ3				
ΔΙΑΤΟΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			
α/α	Απόσταση από Μ2	Υψος φορέα Η	Πλάτος κάτω πλάτους	Πλάτος άνω πλάτους
ΔΜ2	0.00m	5.964m	0.960m	0.700m
Δ41	2.00m	5.964m	0.960m	0.700m
Δ42	5.00m	5.551m	0.690m	0.300m
Δ43	9.45m	4.986m	0.625m	0.300m
Δ44	13.90m	4.479m	0.560m	0.300m
Δ45	18.35m	4.030m	0.495m	0.300m
Δ46	22.80m	3.639m	0.430m	0.300m
Δ47	27.25m	3.305m	0.365m	0.300m
Δ48	31.70m	3.029m	0.300m	0.300m
Δ49	36.15m	2.811m	0.300m	0.300m
Δ50	40.60m	2.650m	0.300m	0.300m
Δ51	45.05m	2.547m	0.300m	0.300m
Δ52	49.50m	2.502m	0.300m	0.300m
Δ53	50.75m	2.500m	0.300m	0.300m
Δ54	52.00m	2.502m	0.300m	0.300m
Δ55	56.45m	2.547m	0.300m	0.300m
Δ56	60.90m	2.650m	0.300m	0.300m
Δ57	65.35m	2.811m	0.300m	0.300m
Δ58	69.80m	3.029m	0.300m	0.300m
Δ59	74.25m	3.305m	0.365m	0.300m
Δ60	78.70m	3.639m	0.430m	0.300m
Δ61	83.15m	4.030m	0.495m	0.300m
Δ62	87.60m	4.479m	0.560m	0.300m
Δ63	92.05m	4.986m	0.625m	0.300m
Δ64	96.50m	5.551m	0.690m	0.300m
Δ65	99.50m	5.964m	0.960m	0.700m
ΑΝΟΙΓΜΑ Μ3 - Μ4				
ΔΙΑΤΟΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			
α/α	Απόσταση από Μ3	Υψος φορέα Η	Πλάτος κάτω πλάτους	Πλάτος άνω πλάτους
ΔΜ3	0.00m	5.964m	0.960m	0.700m
Δ66	2.00m	5.964m	0.960m	0.700m
Δ67	5.00m	5.551m	0.690m	0.300m
Δ68	9.45m	4.986m	0.625m	0.300m
Δ69	13.90m	4.479m	0.560m	0.300m
Δ70	18.35m	4.030m	0.495m	0.300m
Δ71	22.80m	3.639m	0.430m	0.300m
Δ72	27.25m	3.305m	0.365m	0.300m
Δ73	31.70m	3.029m	0.300m	0.300m
Δ74	36.15m	2.811m	0.300m	0.300m
Δ75	40.60m	2.650m	0.300m	0.300m
Δ76	45.05m	2.547m	0.300m	0.300m
Δ77	49.50m	2.502m	0.300m	0.300m
Δ78	50.75m	2.500m	0.300m	0.300m
Δ79	52.00m	2.502m	0.300m	0.300m
Δ80	56.45m	2.547m	0.300m	0.300m
Δ81	60.90m	2.650m	0.300m	0.300m
Δ82	65.35m	2.811m	0.300m	0.300m
Δ83	69.80m	3.029m	0.300m	0.300m
Δ84	74.25m	3.305m	0.365m	0.300m
Δ85	78.70m	3.639m	0.430m	0.300m
Δ86	83.15m	4.030m	0.495m	0.300m
Δ87	87.60m	4.479m	0.560m	0.300m
Δ88	92.05m	4.986m	0.625m	0.300m
Δ89	96.50m	5.551m	0.690m	0.300m
Δ90	99.75m	6.00m	0.960m	0.700m

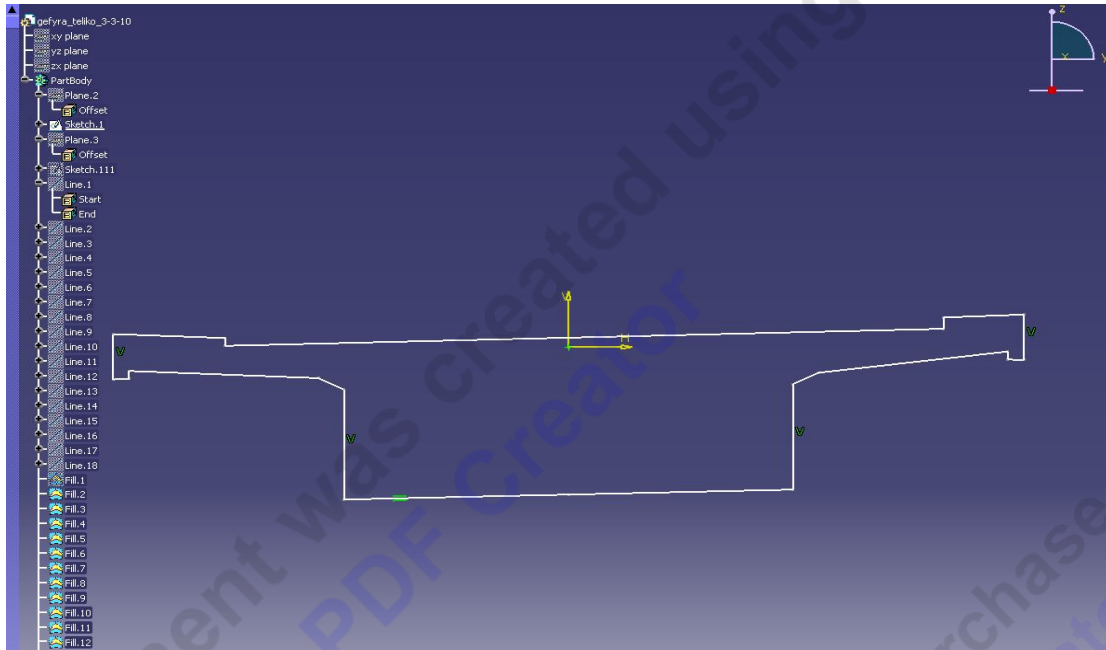
ΑΝΟΙΓΜΑ Μ4 - Α2				
ΔΙΑΤΟΜΕΣ	ΜΕΤΑΒΑΛΛΟΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΗΣ			
α/α	Απόσταση από Μ4	Υψος φορέα Η	Πλάτος κάτω πλάκας	Πλάτος άνω πλάκας
ΔΜ4	0.00m	6.000m	0.960m	0.700m
Δ91	1.75m	6.000m	0.960m	0.700m
Δ92	5.00m	5.551m	0.690m	0.300m
Δ93	9.45m	4.986m	0.625m	0.300m
Δ94	13.90m	4.479m	0.560m	0.300m
Δ95	18.35m	4.030m	0.495m	0.300m
Δ96	22.80m	3.639m	0.430m	0.300m
Δ97	27.25m	3.305m	0.365m	0.300m
Δ98	31.70m	3.029m	0.300m	0.300m
Δ99	36.15m	2.811m	0.300m	0.300m
Δ100	40.60m	2.650m	0.300m	0.300m
Δ101	45.05m	2.547m	0.300m	0.300m
Δ102	49.50m	2.502m	0.300m	0.300m
Δ103	53.95m	2.500m	0.300m	0.300m
Δ104	58.40m	2.500m	0.300m	0.300m
Δ105	60.75m	2.466-2.720m	0.585m-0.614m	0.500m
Δ106	61.95m	2.505-2.680m	0.525m-0.675m	0.400m

Πίνακας 4.1: Δεδομένα σχεδίου γέφυρας.



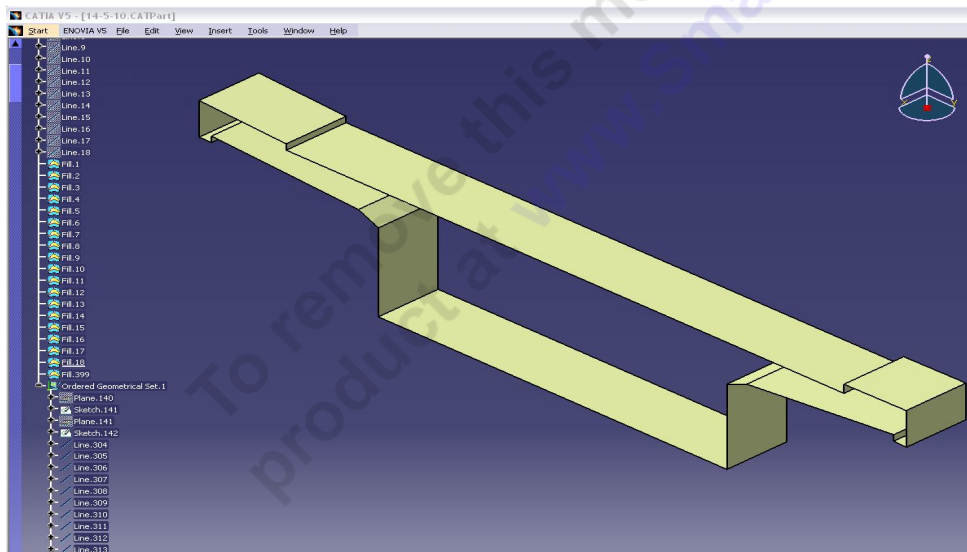
Εικόνα 4.5: Σχεδιασμός διατομών σε διαφορετικά επίπεδα.

Ακολούθως σχεδιάστηκαν οι διαφορετικές διατομές στο αντίστοιχο επίπεδο (Εικόνα 4.5), μεταβάλλοντας το ύψος σε κάθε σχέδιο διατομής, σύμφωνα με τις διαστάσεις του σχεδίου του Πίνακα 4.1 (Εικόνα 4.6).



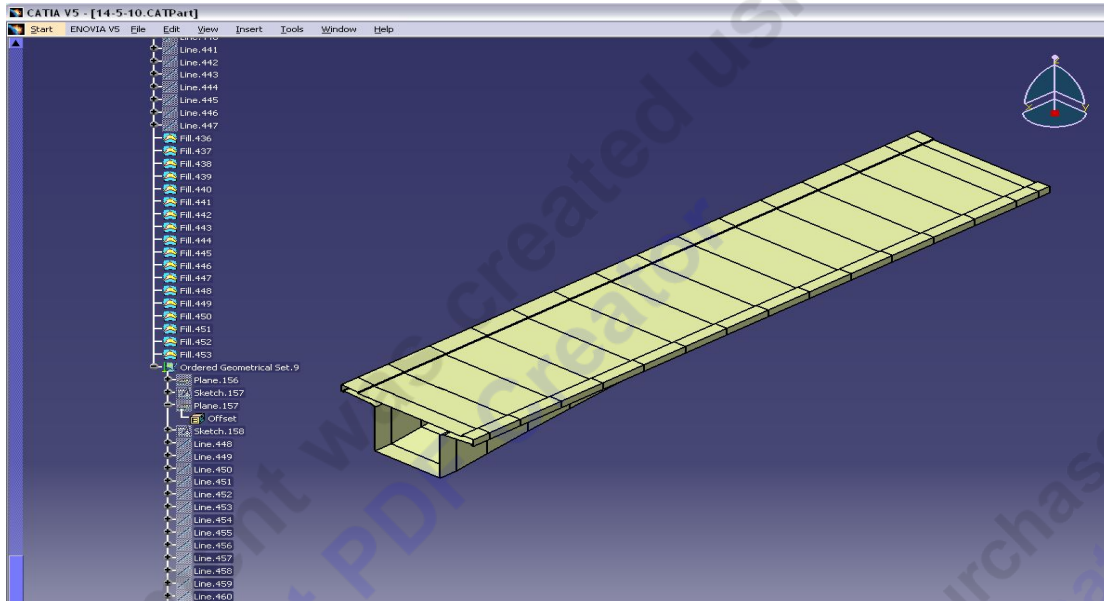
Εικόνα 4.6: Ενδεικτικό σχέδιο διατομής σε κάποιο επίπεδο.

Έχοντας ολοκληρώσει την κατασκευή των διατομών του καταστρώματος στις προκαθορισμένες θέσεις, δημιουργήθηκαν οι κλειστές επιφάνειες, μεταξύ δύο διαδοχικών διατομών, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7.

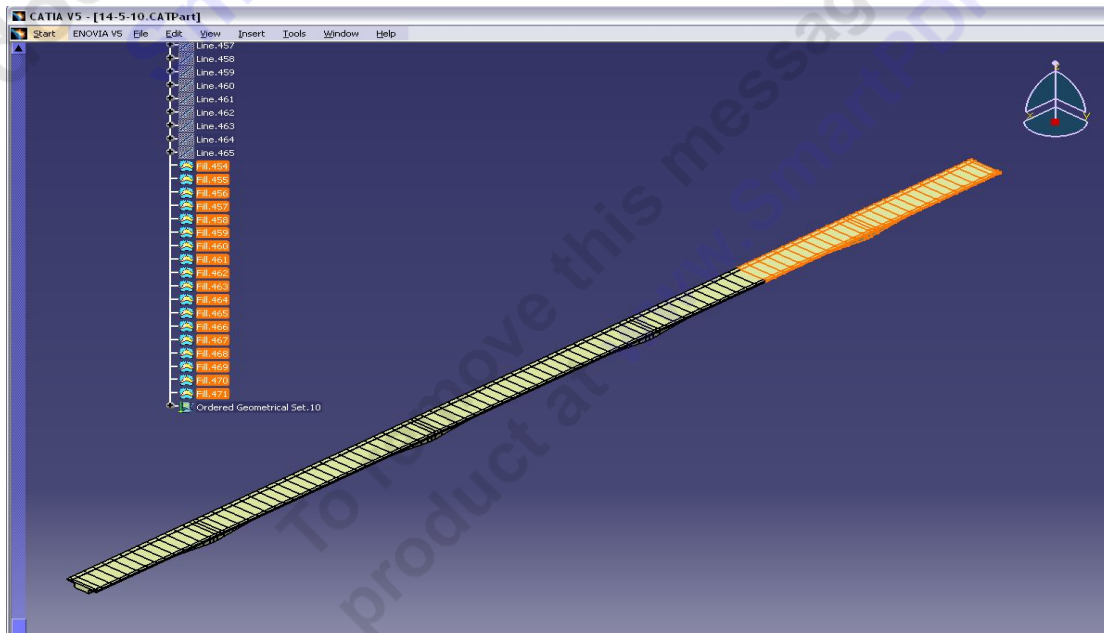


Εικόνα 4.7: Δημιουργία επιφανειών μεταξύ δυο διαδοχικών διατομών.

Παρατηρήθηκε ότι εξαιτίας των διαστάσεων του μηχανολογικού σχεδίου οι διατομές που θα σχεδιάζονταν επαναλαμβανόταν. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκε ένα πρότυπο κομμάτι της κατασκευής (Εικόνα 4.8) και χρησιμοποιώντας τα συμμετρικά του σχηματίστηκε το συνολικό αριστερό κατάστρωμα της γέφυρας (Εικόνα 4.9).

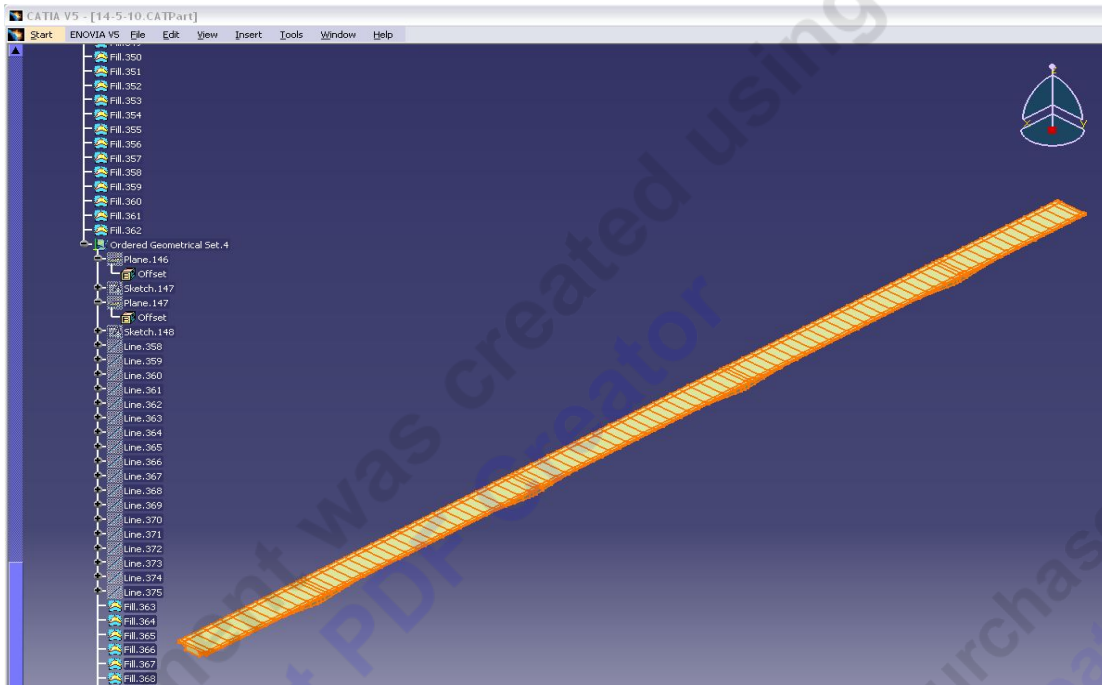


Εικόνα 4.8: Πρότυπο κομμάτι για τον σχεδιασμό του καταστρώματος.

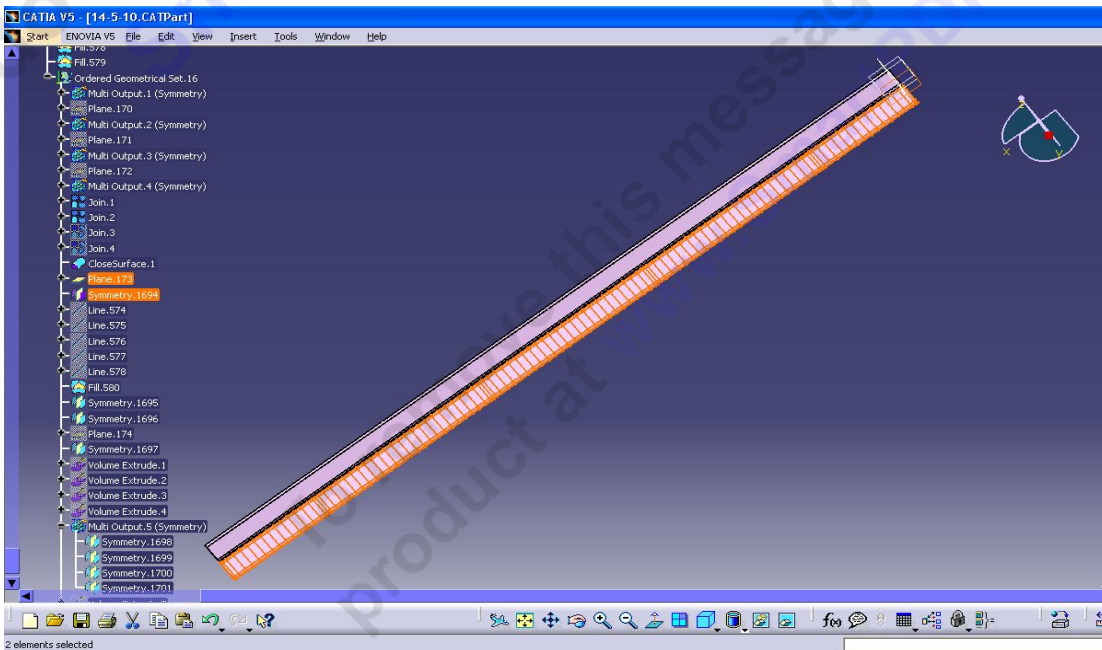


Εικόνα 4.9: Αριστερό κατάστρωμα της γέφυρας.

Κατόπιν ενσωματώθηκαν όλες τις επιμέρους επιφάνειες σε ένα ενιαίο τμήμα, με σκοπό τη δημιουργία μιας κλειστής επιφάνειας που θα περιέχει όλο το κατάστρωμα της γέφυρας.



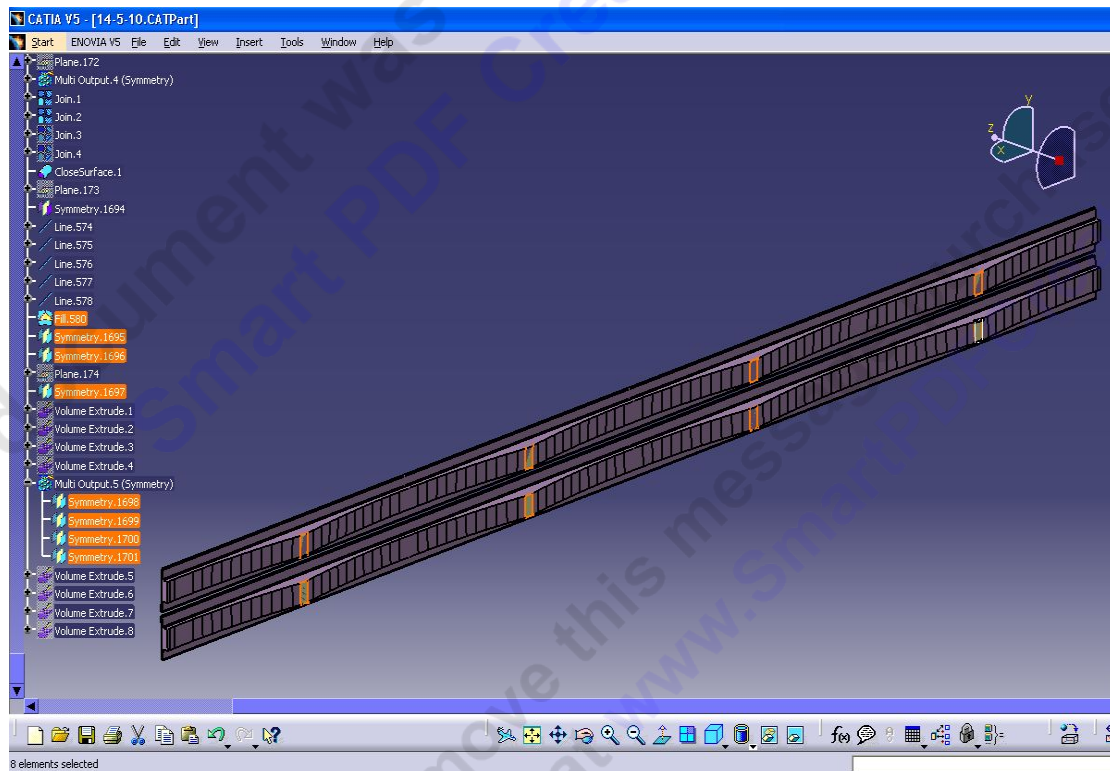
Εικόνα 4.10: CloseSurface αριστερού καταστρώματος.



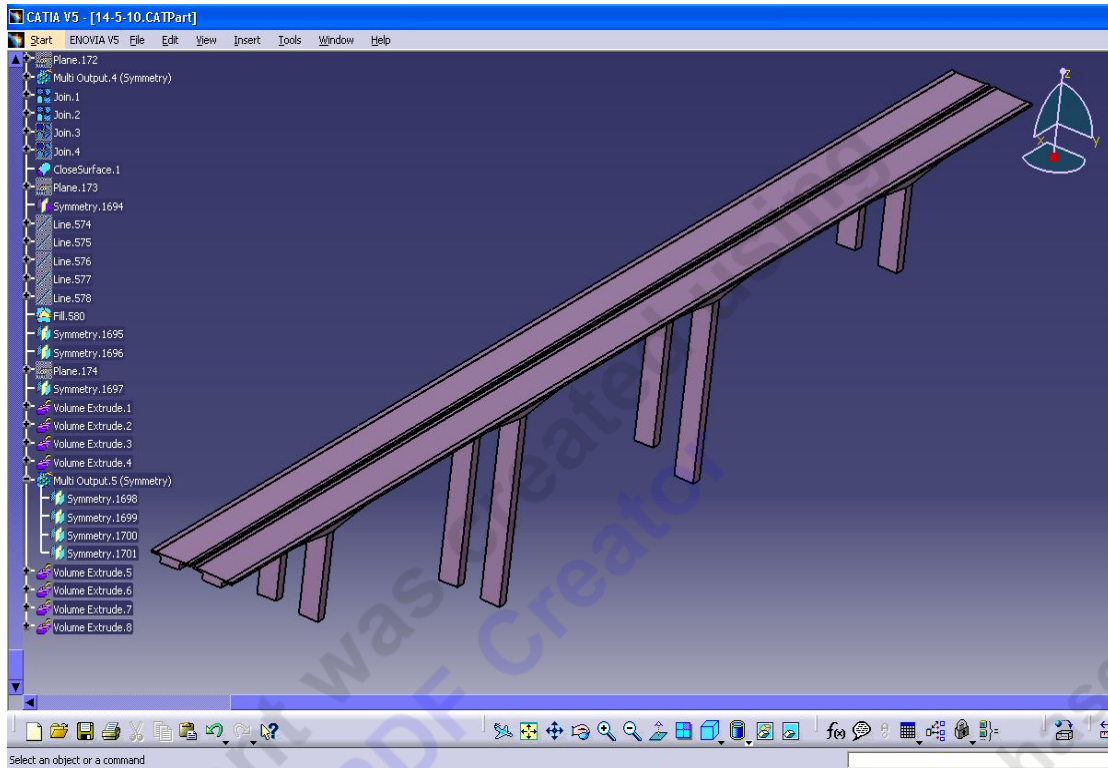
Εικόνα 4.11: Δεξιό κατάστρωμα γέφυρας.

Ο δεξιός κλάδος της γέφυρας δημιουργήθηκε φτιάχνοντας αρχικά ένα επίπεδο, στην κατάλληλη απόσταση από το αρχικό σύστημα συντεταγμένων, και στη συνέχεια χρησιμοποιώντας πάλι την ιδιότητα symmetry για τον αριστερό κλάδο ως προς αυτό το επίπεδο. Αυτό έγινε γιατί τα δύο καταστρώματα είχαν ακριβώς τις ίδιες διαστάσεις.

Έχοντας σχεδιάσει και το δεξιό κατάστρωμα της γέφυρας ολοκληρώθηκε το σκέλος που αφορούσε στο κατάστρωμα. Έπρεπε όμως να σχεδιαστούν και οι πυλώνες, που θα στήριζαν το κατάστρωμα. Για τον σκοπό αυτό αποφασίστηκε να σχεδιαστεί αρχικά η διατομή του κάθε πυλώνα στην προκαθορισμένη θέση και με τις αντίστοιχες αποστάσεις μεταξύ τους, που καθορίζονταν από το σχέδιο (Εικόνα 4.12). Στη συνέχεια, με κατάλληλη επέκταση της αρχικής επιφάνειας της κάθε διατομής, χρησιμοποιώντας το volume extrude και με ύψος το ύψος του κάθε πυλώνα, καταλήγουμε στο τελικό τρισδιάστατο μοντέλο της γέφυρας, Εικόνα 4.13.



Εικόνα 4.12: Διατομές πυλώνων της γέφυρας.



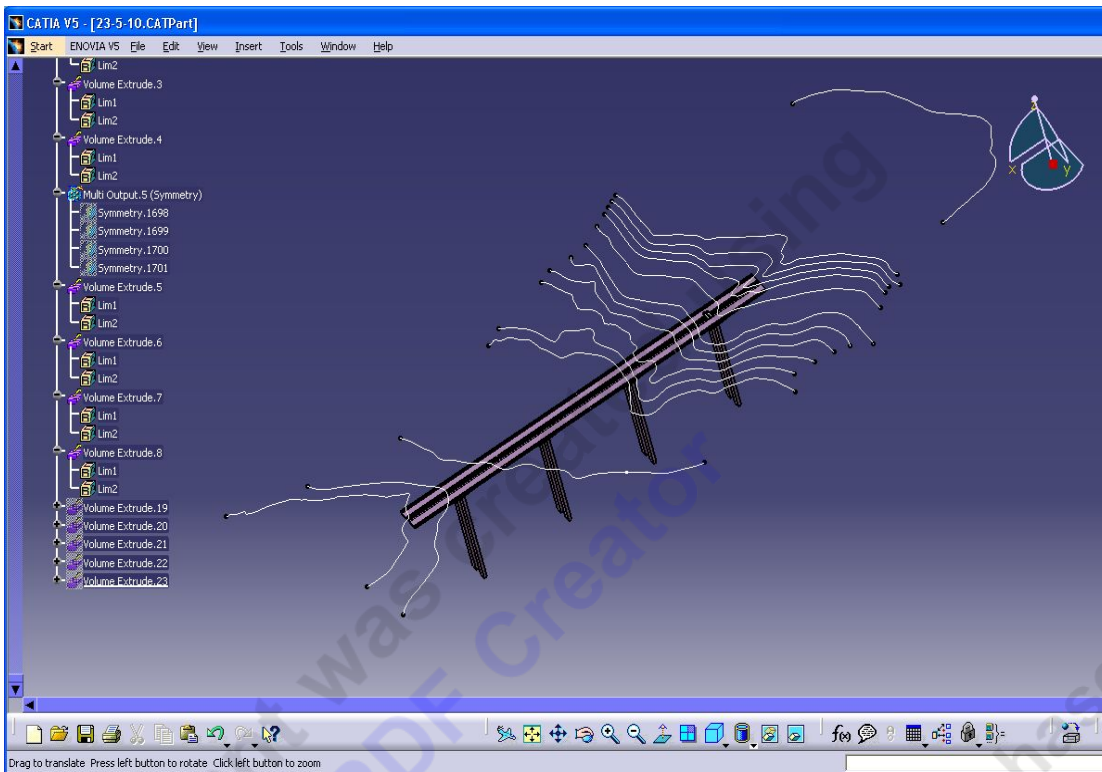
Εικόνα 4.13: Τριδιάστατο μοντέλο γέφυρας.

4.3 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

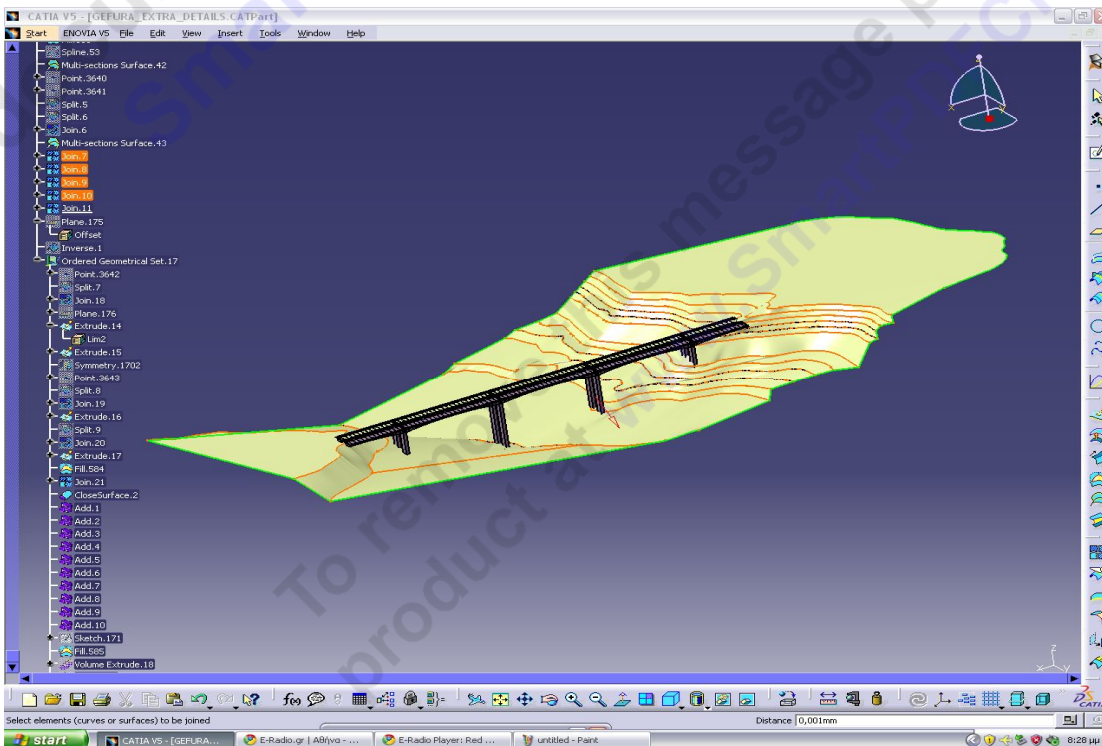
Σε αυτό το τμήμα της εργασίας, όπως υποδηλώνει το όνομα του τίτλου, ασχοληθήκαμε με τον σχεδιασμό του μοντέλου του εδάφους, που περιβάλλει τη γέφυρα.

Ξεκινώντας, το πρώτο μέλημά μας ήταν να δημιουργηθούν οι ισοϋψείς καμπύλες, που παρουσιάζονται στο τοπογραφικό, Εικόνα 4.4. Για να σχεδιαστούν αυτές, χρησιμοποιήθηκε η εντολή "List" στο λογισμικό AutoCAD (στο οποίο ήταν διαθέσιμα τα τοπογραφικά σχέδια), η οποία δίνει τις συντεταγμένες του κάθε σημείου.

Για να εκμεταλλευτούμε αυτά τα δεδομένα από το AutoCAD δημιουργήθηκε ένας κώδικας με τον Visual Basic Editor, ο οποίος εισήγαγε αυτόματα τις συντεταγμένες των σημείων στο CATIA, ώστε να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε την κάθε ισοϋψή καμπύλη, Εικόνα 4.14.



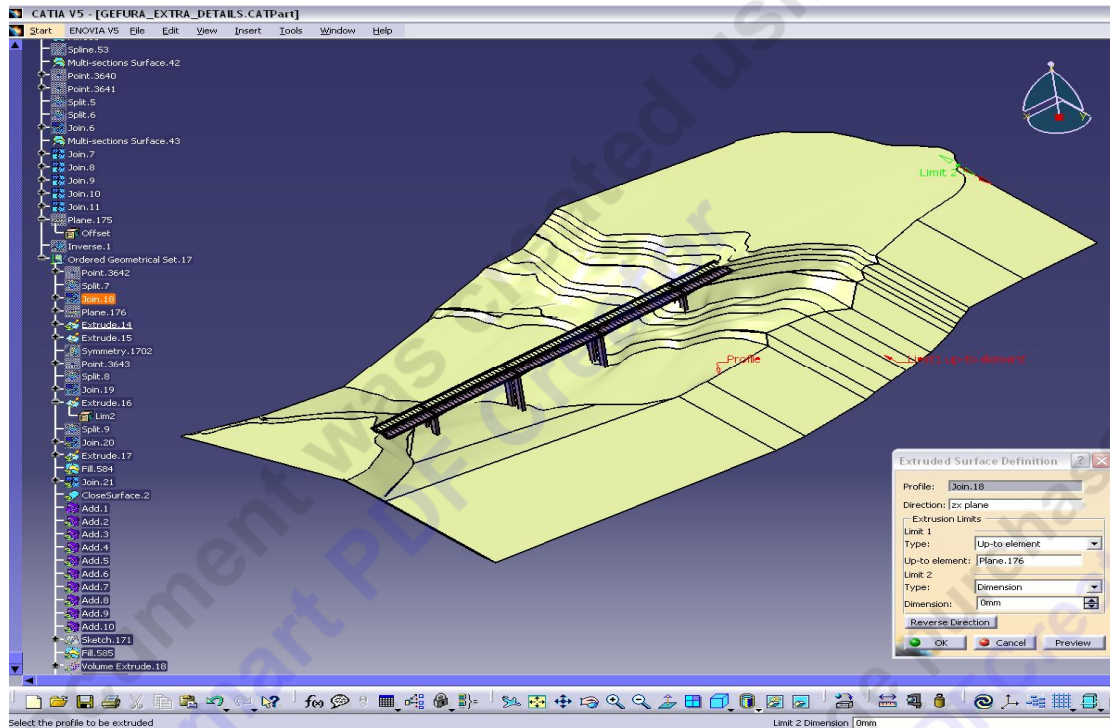
Εικόνα 4.14: Ισοϋψείς Καμπύλες του εδάφους.



Εικόνα 4.15: Επιφάνεια Εδάφους.

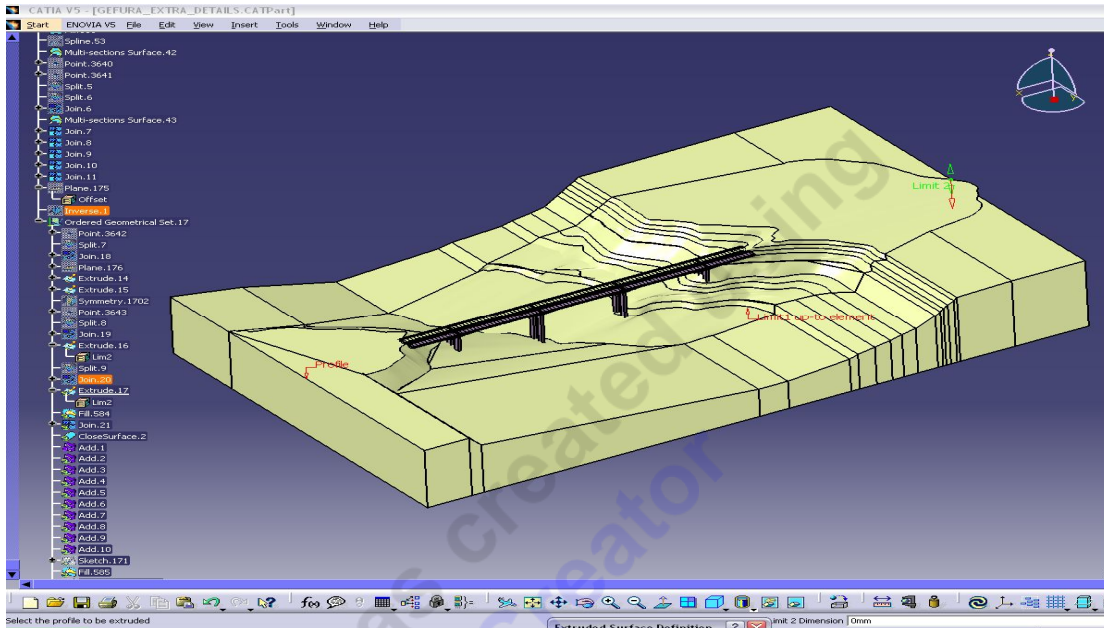
Έχοντας πλέον σχεδιάσει όλες τις ισοϋψείς καμπύλες, που μας ενδιέφεραν, τις ενώσαμε δημιουργώντας μια ενιαία επιφάνεια, το έδαφος, η οποία φαίνεται στην Εικόνα 4.15.

Στη συνέχεια, προεκτείνοντας στο οριζόντιο επίπεδο και τις δύο πλευρές της επιφάνειας του εδάφους, δημιουργείται η επιφάνεια της Εικόνας 4.16.



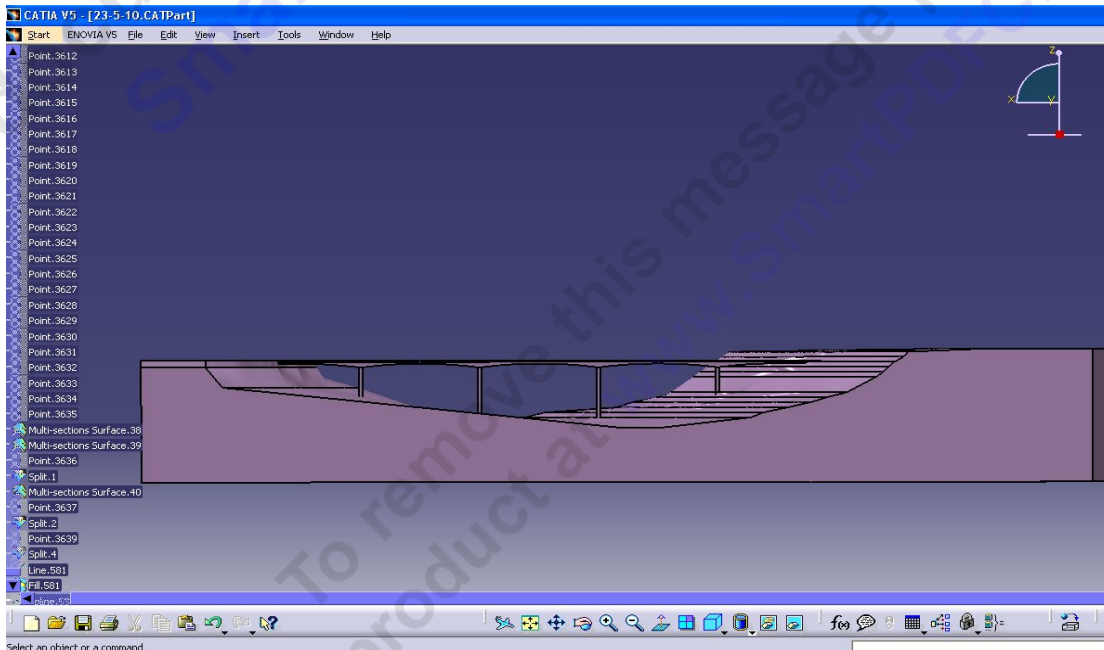
Εικόνα 4.16: Προέκταση Επιφάνειας Εδάφους

Για να δημιουργηθεί ένας ενιαίος όγκος, δηλ. ο όγκος του εδάφους που περικλείει την γέφυρά μας, προεκτάθηκαν οι ακμές της επιφάνειας, που δημιουργήθηκαν στο προηγούμενο βήμα, και με αυτό τον τρόπο προέκυψε ο όγκος που θέλαμε, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.17.



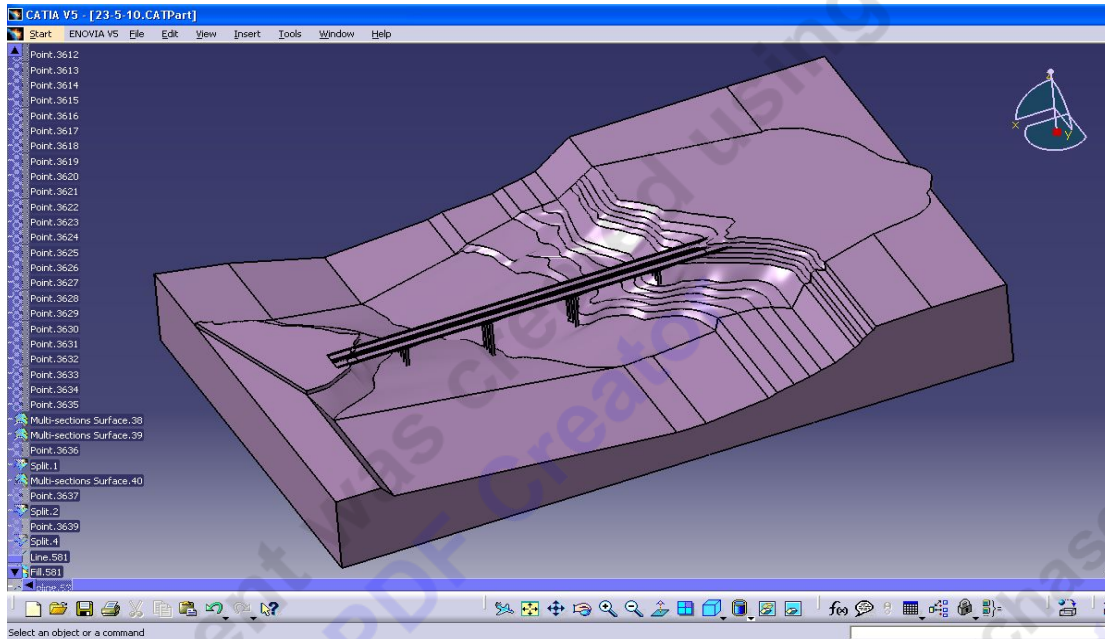
Εικόνα 4.17: Κλειστή επιφάνεια εδάφους.

Επιλέγοντας την εντολή "Close Surface" η παραπάνω κλειστή επιφάνεια μας δίνει το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο, που αντιπροσωπεύει το έδαφος της παρούσας μελέτης, Εικόνα 4.18.



Εικόνα 4.18: Τρισδιάστατο μοντέλο εδάφους.

Τέλος, με την εντολή "Add" και επιλέγοντας όλους τους επιμέρους όγκους (πυλώνες, καταστρώματα γέφυρας, έδαφος), προέκυψε το τελικό τριδιάστατο μοντέλο της εργασίας, Εικόνα 4.19.

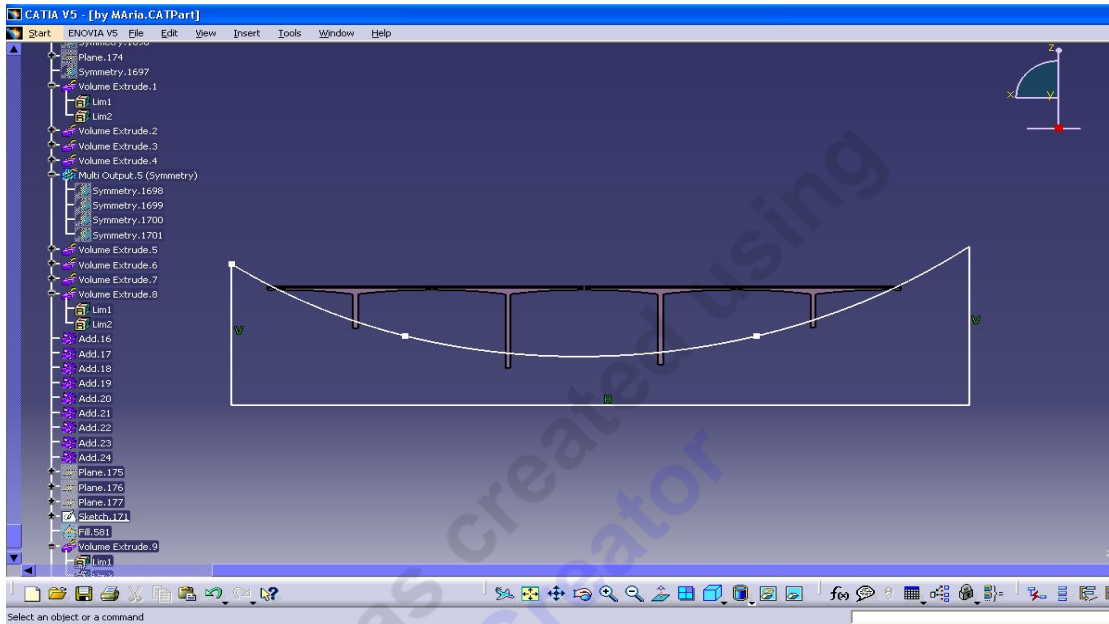


Εικόνα 4.19: Τελικός ενιαίος όγκος τριδιάστατου μοντέλου.

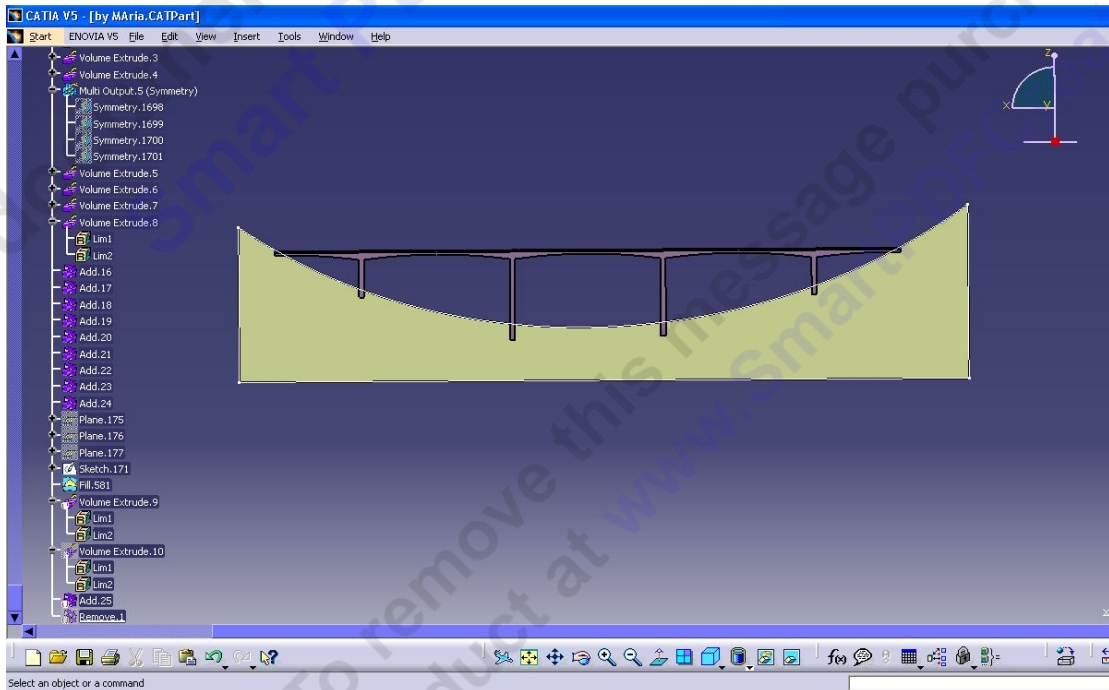
4.4 ΤΕΛΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΓΕΦΥΡΑΣ

Η μη συμβατότητα του τελικού μοντέλου με το λογισμικό ANSYS-CFX, λόγω πολυπλοκότητας σχεδιασμού, οδήγησε στη δημιουργία ενός απλοποιημένου μοντέλου για το έδαφος, για να εισαχθεί στο ANSYS-CFX, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η προσομοίωση της ροής.

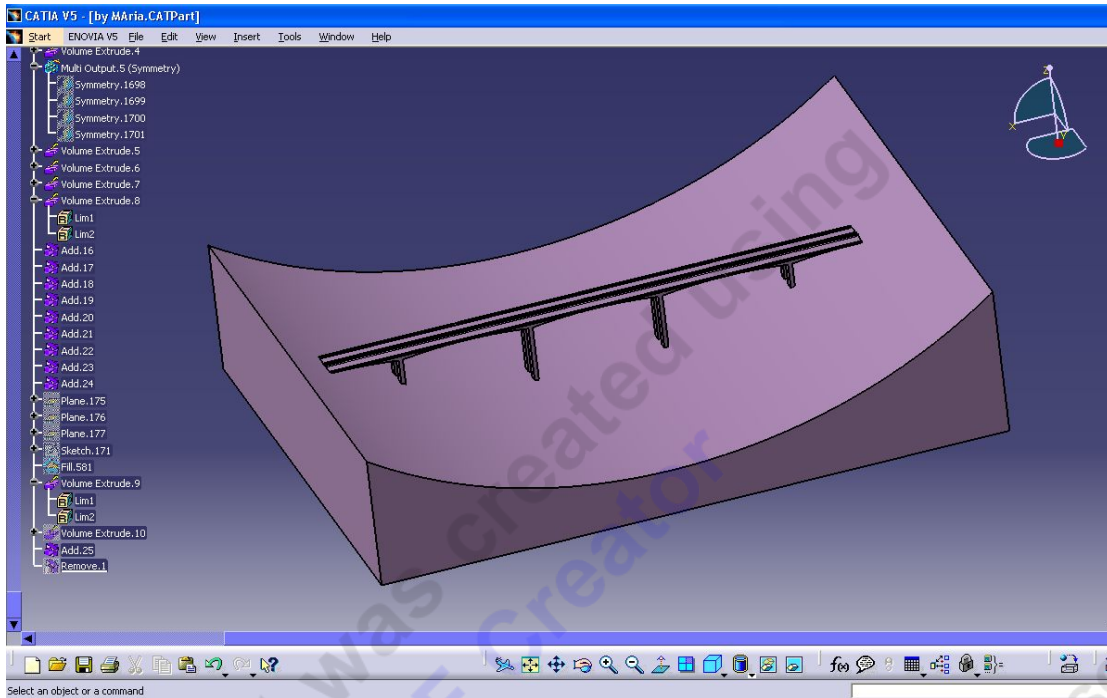
Μια ικανοποιητική προσέγγιση της περίπλοκης γεωμετρίας του εδάφους σχεδιάστηκε όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.20. Αρχικά δημιουργήθηκε το περιγράμμά της και στη συνέχεια δημιουργήθηκε η κλειστή επιφάνεια, Εικόνα 4.21. Επεκτείνοντας την κλειστή επιφάνεια, ώστε να αναπαρασταθεί το πλάτος της, δημιουργήθηκε ο τελικός όγκος του εδάφους, Εικόνα 4.22.



Εικόνα 4.20: Sketch απλοποιημένου σχεδίου εδάφους.

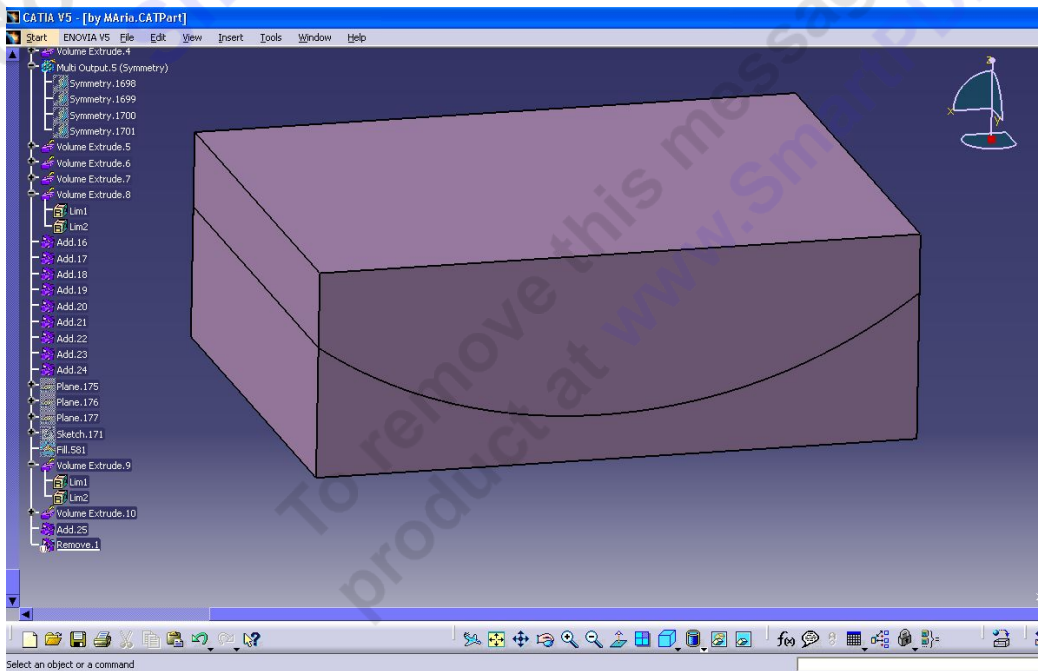


Εικόνα 4.21: Fill απλοποιημένου σχεδίου εδάφους.

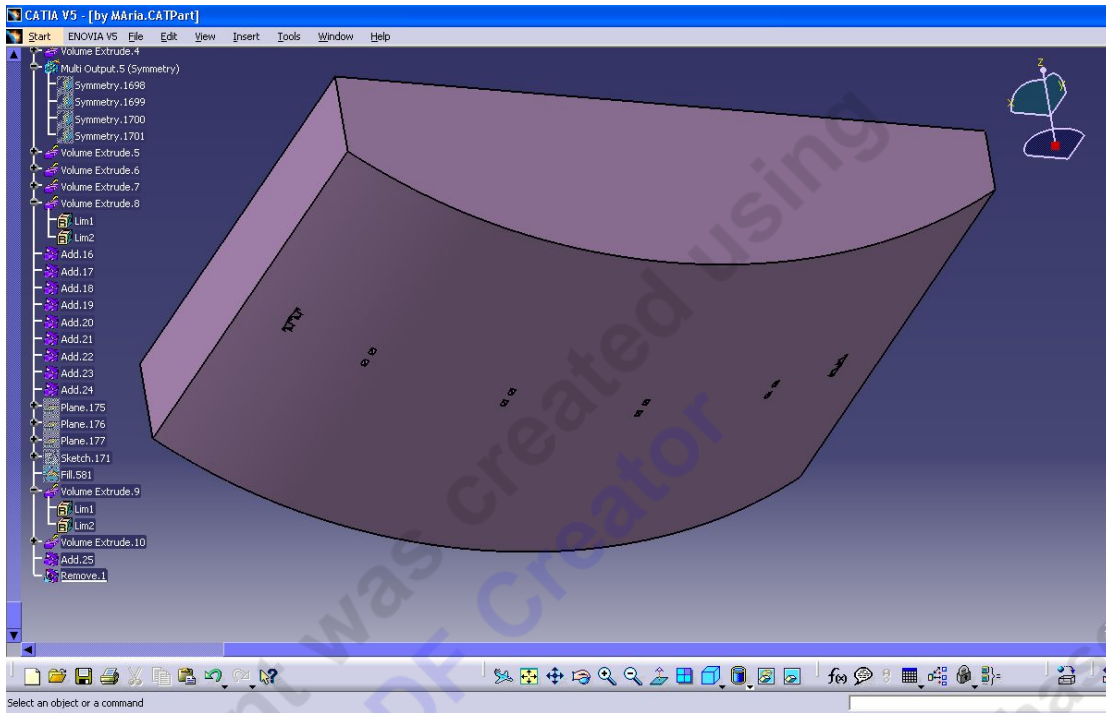


Εικόνα 4.22: Τριδιάστατο μοντέλο απλοποιημένου σχεδίου εδάφους.

Τέλος, για τη δημιουργία του όγκου αέρα, Εικόνα 24, αφαιρέθηκε ο συνολικός όγκος του μοντέλου από ένα ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο κατάλληλων διαστάσεων, Εικόνα 4.23.



Εικόνα 4.23: Όγκος από τον οποίο θα αφαιρεθεί το στερεό μοντέλο.



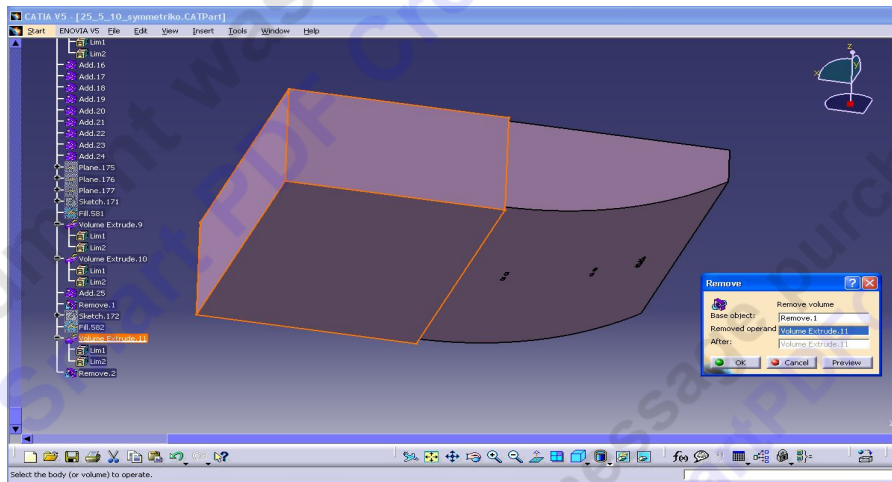
Εικόνα 4.24: Όγκος πεδίου ροής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

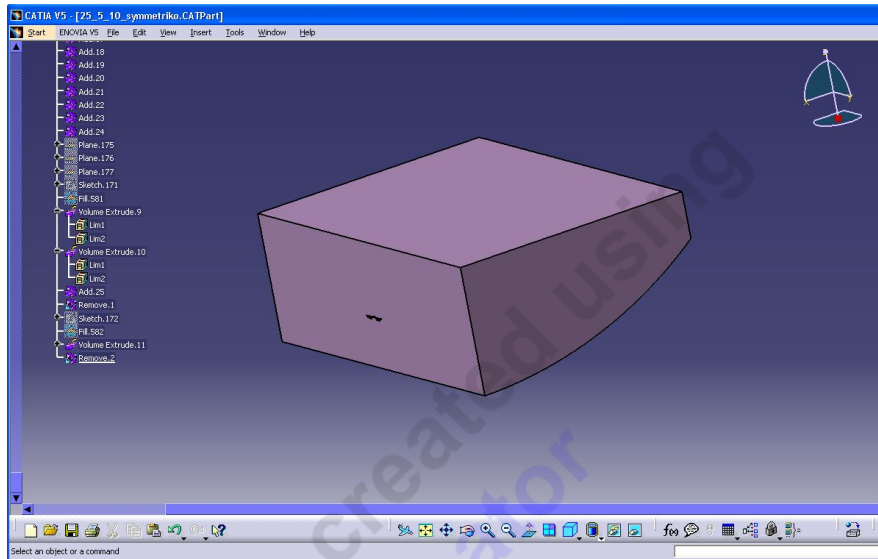
5.1 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΑΠΛΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η δημιουργία του πλέγματος που περιβάλλει τη γέφυρα και στη συνέχεια η μοντελοποίηση των οριακών συνθηκών πάνω σε αυτό. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ANSYS-CFX 11.0.

Το γεωμετρικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, Εικόνα 4.21, απλοποιήθηκε με αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά ο αρχικός του όγκος. Ο τελικός όγκος που χρησιμοποιήθηκε είναι ακριβώς ο μισός του αρχικού σχεδίου και δημιουργήθηκε με την εντολή Remove. Η διαδικασία παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1. Στην Εικόνα 5.2 φαίνεται ο τελικός όγκος αέρα με τον οποίο έγινε η αεροδυναμική ανάλυση της γέφυρας, με χρήση επιπέδου συμμετρίας.



Εικόνα 5.1: Αφαίρεση τμήματος αρχικού όγκου του μοντέλου.

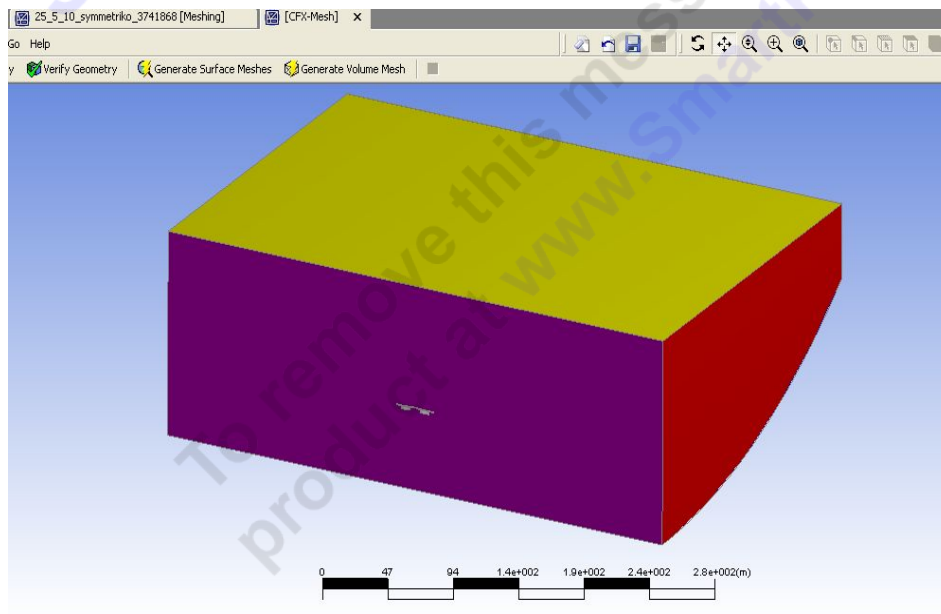


Εικόνα 5.2: Τελικός όγκος πεδίου ροής.

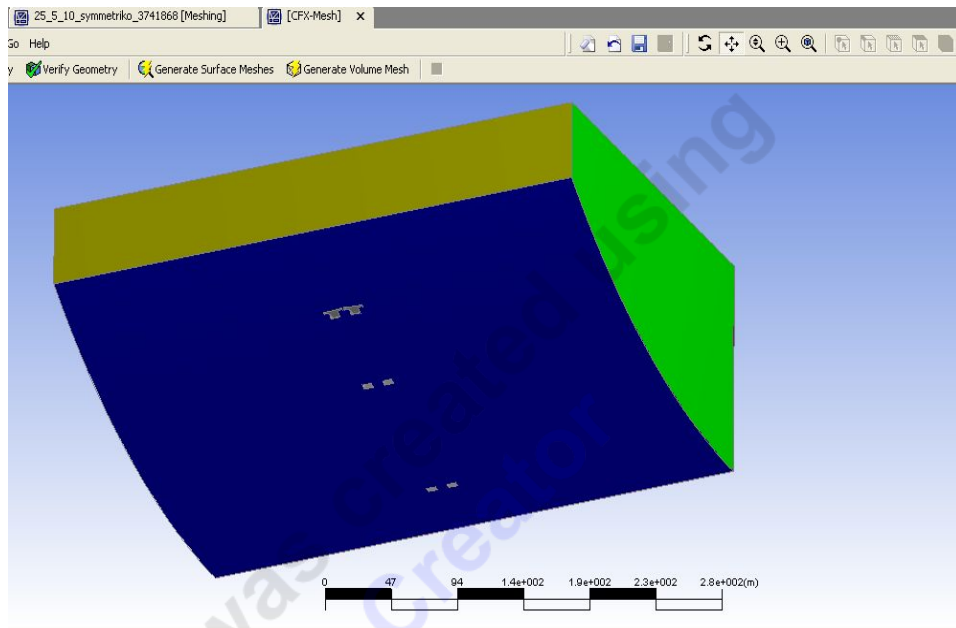
5.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Κατόπιν το συμμετρικό μοντέλο, Εικόνα 5.2, εισήχθη στο λογισμικό ANSYS-CFX 11.0 για τον καθορισμό των παραμέτρων για την δημιουργία του υπολογιστικού πλέγματος.

Αρχικά, δόθηκαν ονομασίες στις διάφορες επιφάνειες της γεωμετρίας, οι οποίες θα χρησιμοποιούνται από εδώ και στο εξής όταν αναφερόμαστε σε κάποια από αυτές, όπως φαίνονται και στις Εικόνες 5.3 και 5.4:

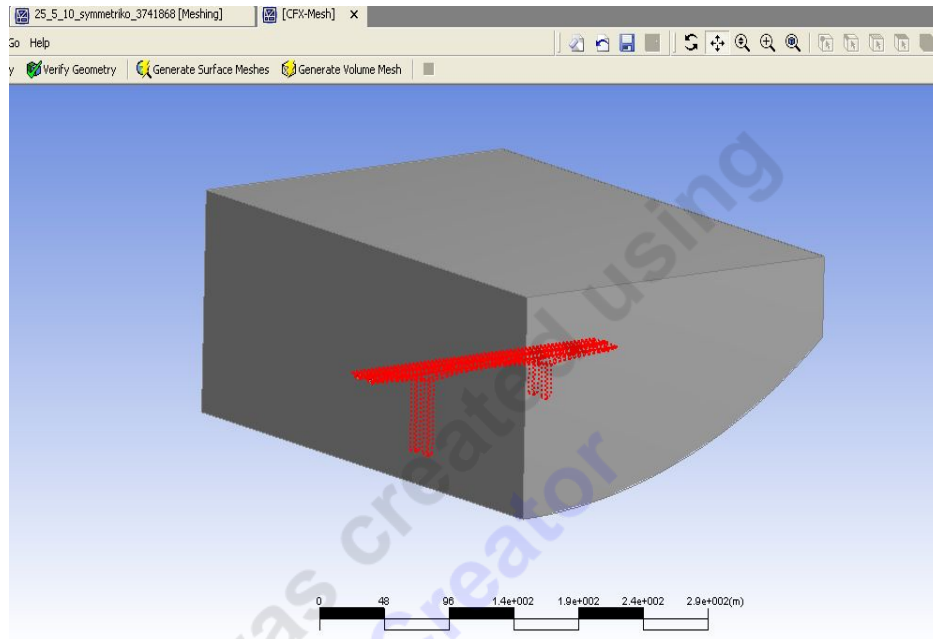


Εικόνα 5.3: Επιφάνειες Inlet, Atmosphere, Symmetry.

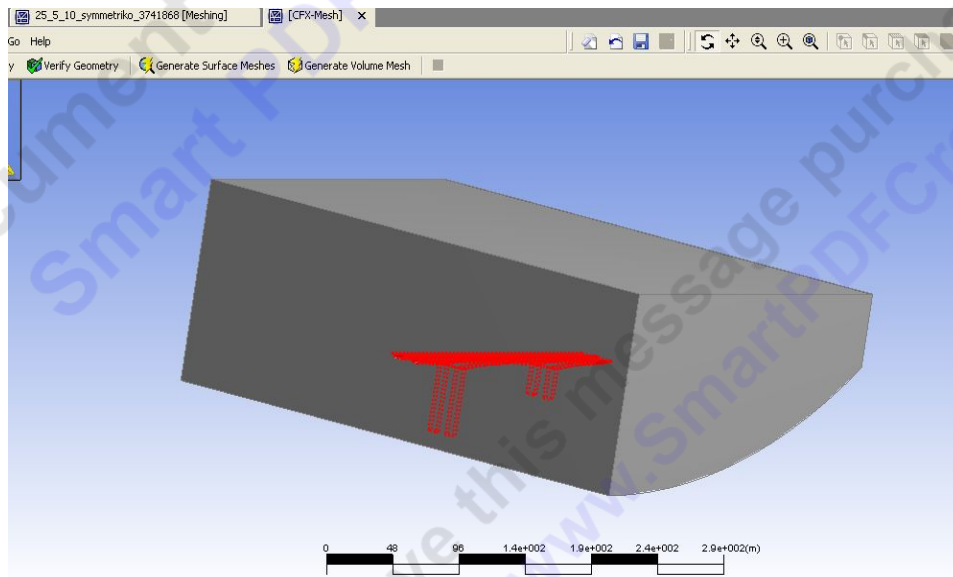


Εικόνα 5.4: Επιφάνειες Outlet, Atmosphere, Ground.

- INLET: Η είσοδος του ρευστού στο υπολογιστικό χωρίο (κόκκινο χρώμα).
- OUTLET: Η έξοδος του ρευστού από το υπολογιστικό χωρίο (λαχανί χρώμα).
- GROUND: Το έδαφος (μπλε χρώμα).
- ATMOSPHERE: Η ατμόσφαιρα γύρω από το μοντέλο (κίτρινο χρώμα).
- SYMMETRY: Η επιφάνεια συμμετρίας (μωβ χρώμα).



Εικόνα 5.5: Default 2D Region.

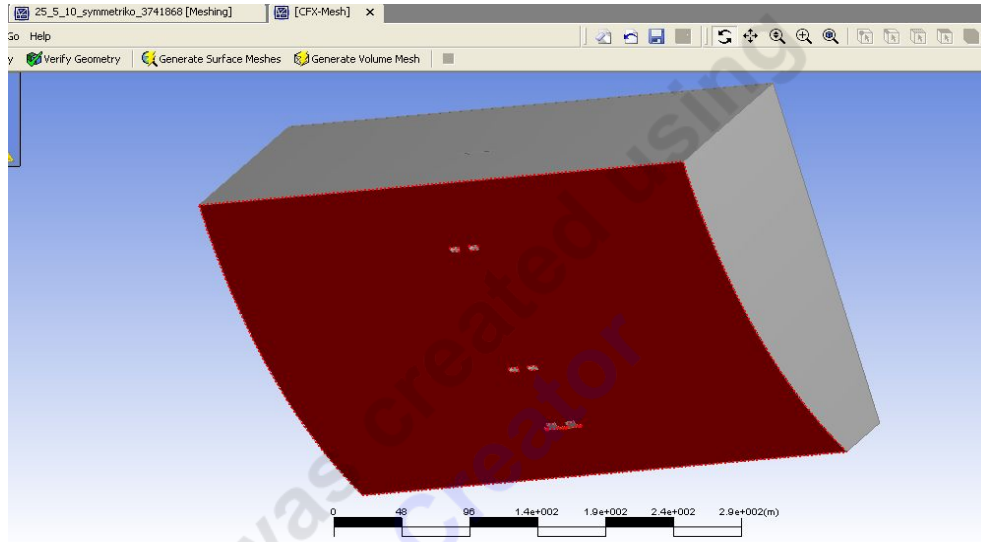


Εικόνα 5.6: Face Spacing 1.

Στην Εικόνα 5.5 παρουσιάζεται η επιφάνεια της γέφυρας, που ορίστηκε ως Default 2D Region.

Μετά τον ορισμό των επιφανειών (Regions), το επόμενο βήμα ήταν ο καθορισμός της κλίμακας μήκους πλέγματος (Spacing), στις επιφάνειες του υπολογιστικού χωρίου. Στη συγκεκριμένη περίπτωση ορίζονται δύο Face Spacing. Το πρώτο αναφέρεται στην επιφάνεια της γέφυρας, Face Spacing 1,

ενώ το δεύτερο στο έδαφος, Face Spacing 2. Και τα δύο παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.6 και 5.7.



Εικόνα 5.7 Face Spacing 2.

Οι παράμετροι που προσδιορίζουν τα "Face Spacings" είναι οι ακόλουθοι:

- Option: Το είδος του μήκους του πλέγματος, στην δική μας περίπτωση ορίστηκε ως σταθερό, Constant.
- Constant Edge Length: Το μήκος του πλέγματος (m).
- Radius of Influence: Σε πόση ακτίνα επηρεάζεται η κάθε επιφάνεια, Face.
- Expansion Factor: Πόσο γρήγορα αυξάνεται η κλίμακα μήκους πλέγματος μετά από την ακτίνα επιρροής.
- Location: Η περιοχή του Face Spacing.

Στις Εικόνες 5.8 και 5.9 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων των Face Spacing 1 και Face Spacing 2 αντίστοιχα:

Details View	
Face Spacing 1	
Option	Constant
Constant Edge Length [m]	10
Radius of Influence [m]	0
Expansion Factor	1.2
Location	1 Composite

Εικόνα 5.8: Παράμετροι Face Spacing 1.

Details View	
Face Spacing 2	
Option	Constant
Constant Edge Length [m]	10
Radius of Influence [m]	0
Expansion Factor	1.2
Location	1 Composite

Εικόνα 5.9: Παράμετροι Face Spacing 2.

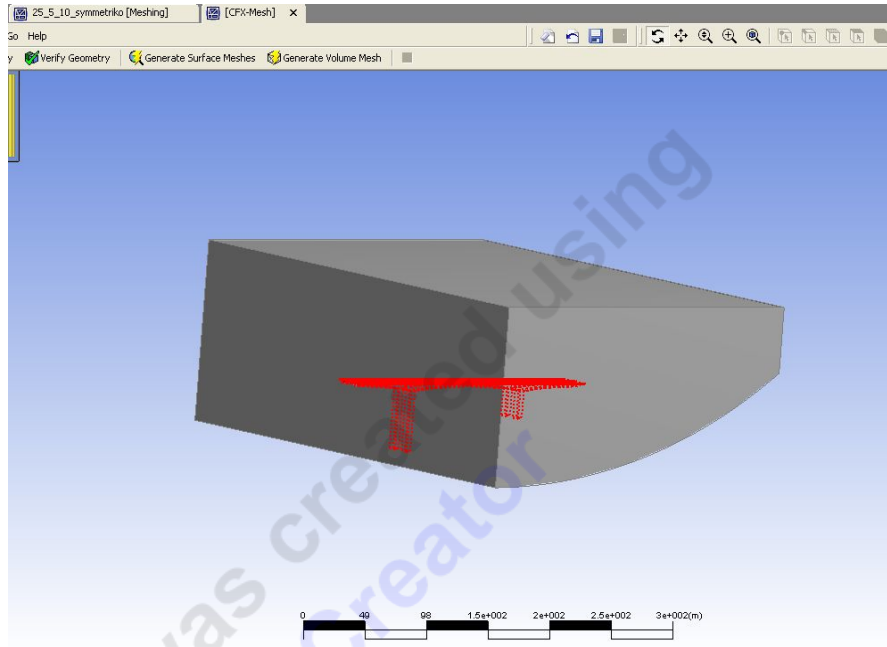
Αφού ποσοτικοποιήθηκαν οι παράμετροι σε κάθε επιφάνεια, ακολούθησε ο καθορισμός του Inflation. Το Inflation καθορίζει το πρισματικό πλέγμα στις στερεές επιφάνειες. Οι παράμετροι που καθορίζουν το πλέγμα στο συγκεκριμένο πεδίο είναι οι ακόλουθες:

- **Number of Inflated Layers:** Ο πραγματικός αριθμός των στρωμάτων, εκτός από τις περιοχές όπου τα στρώματα συγκρούονται μεταξύ τους και αφαιρούνται για λόγους βελτίωσης της ποιότητας του πλέγματος.
- **Expansion Factor:** Παράγοντας που δείχνει τον ρυθμό αύξησης του πάχους των στρωμάτων, καθώς απομακρυνόμαστε από την στερεή επιφάνεια.
- **Number of Spreading Iterations:** Καθορίζει τις επαναλήψεις που θα εκτελέσει ο αλγόριθμος.
- **Minimum Internal Angle [Degrees] - Minimum External Angle [Degrees]:** Καθορίζει την εσωτερική- εξωτερική γωνία του πρισματος για την επιλογή των στοιχείων που θα διαγραφούν.
- **First Prism Height:** Διευκρινίζει το πρώτο πάχος στρώματος, First Layer Thickness, με τον καθορισμό του πρώτου ύψους πρισμάτων.

Στην Εικόνα 5.10 παρουσιάζονται οι τιμές των παραπάνω παραμέτρων.

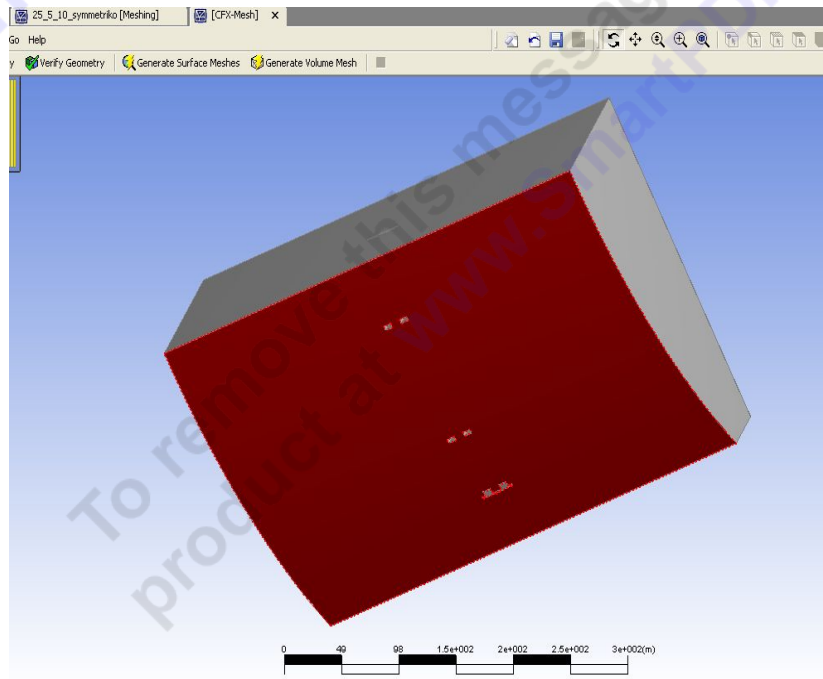
Details View	
Inflation	
Number of Inflated Layers	5
Expansion Factor	1.2
Number of Spreading Iterati...	0
Minimum Internal Angle [De...	2.5
Minimum External Angle [De...	10.0
Inflation Option	
Option	First Layer Thickness
Define First Layer By	First Prism Height
First Prism Height [m]	2
Extended Layer Growth	Yes
Layer by Layer Smoothing	No

Εικόνα 5.10: Πίνακας με τιμές του Inflation.



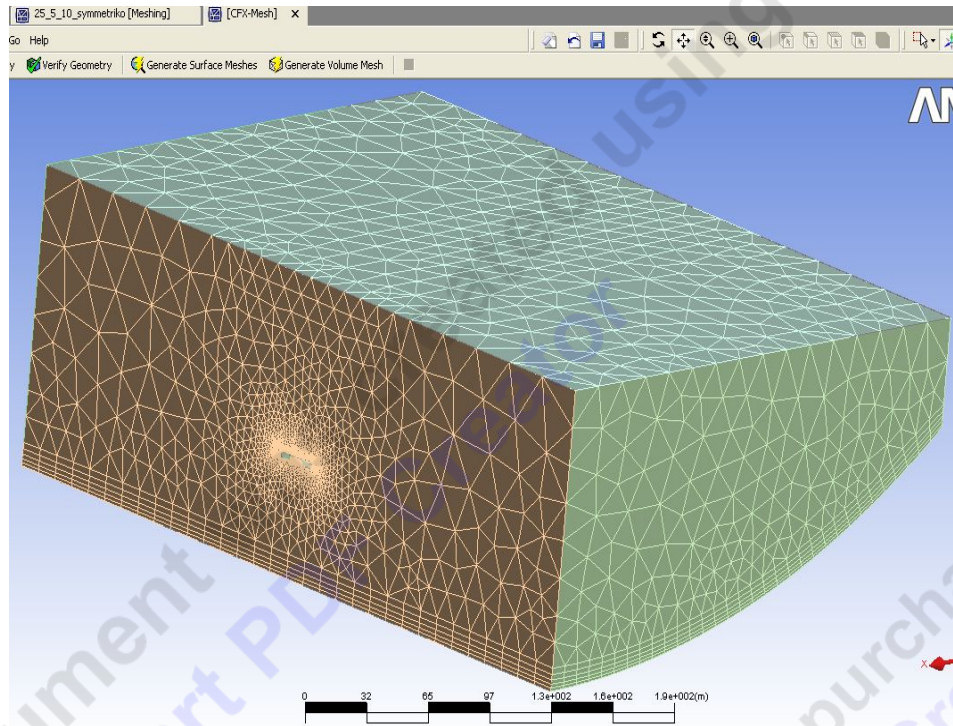
Εικόνα 5.11: Inflated Boundary 1.

Αντίστοιχα με τα Face Spacing και εδώ ορίστηκαν δύο Inflated Boundaries. Το Inflated Boundary 1 αναφέρεται στη γεωμετρία της γέφυρας, Εικόνα 5.11, ενώ το Inflated Boundary 2 αναφέρεται στο έδαφος, 5.12.

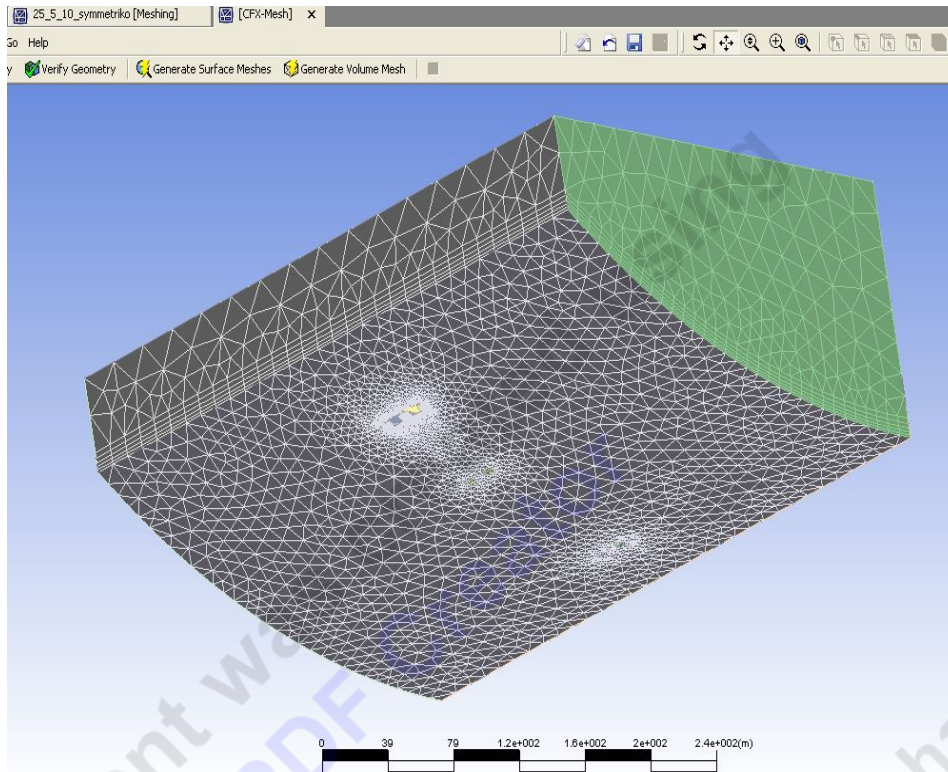


Εικόνα 5.12: Inflated Boundary 2.

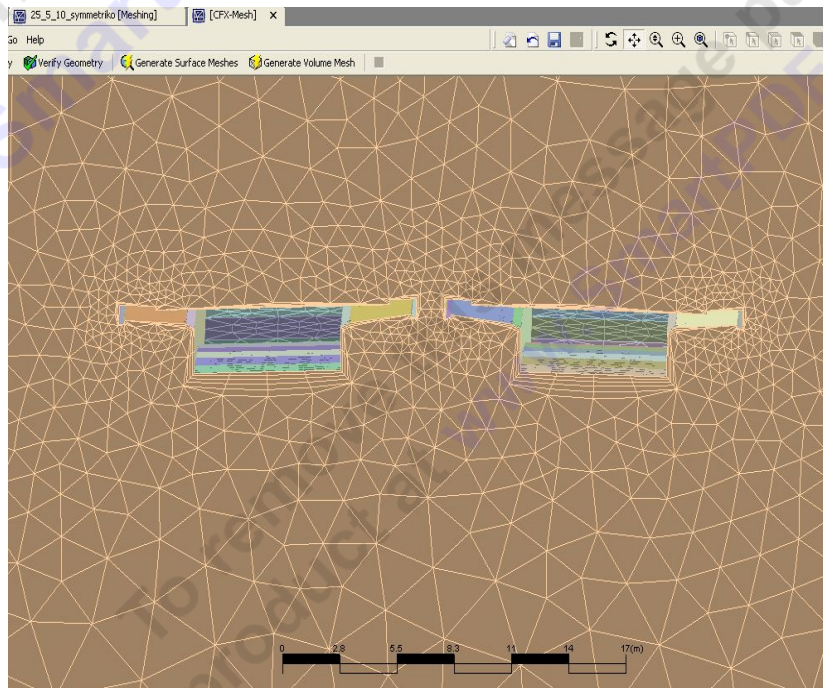
Στις Εικόνες 5.13, 5.14 και 5.15, 5.16 και 5.17 παρουσιάζεται η μορφή του πλέγματος, όπως διαμορφώθηκε σύμφωνα με τις παραπάνω παραμέτρους.



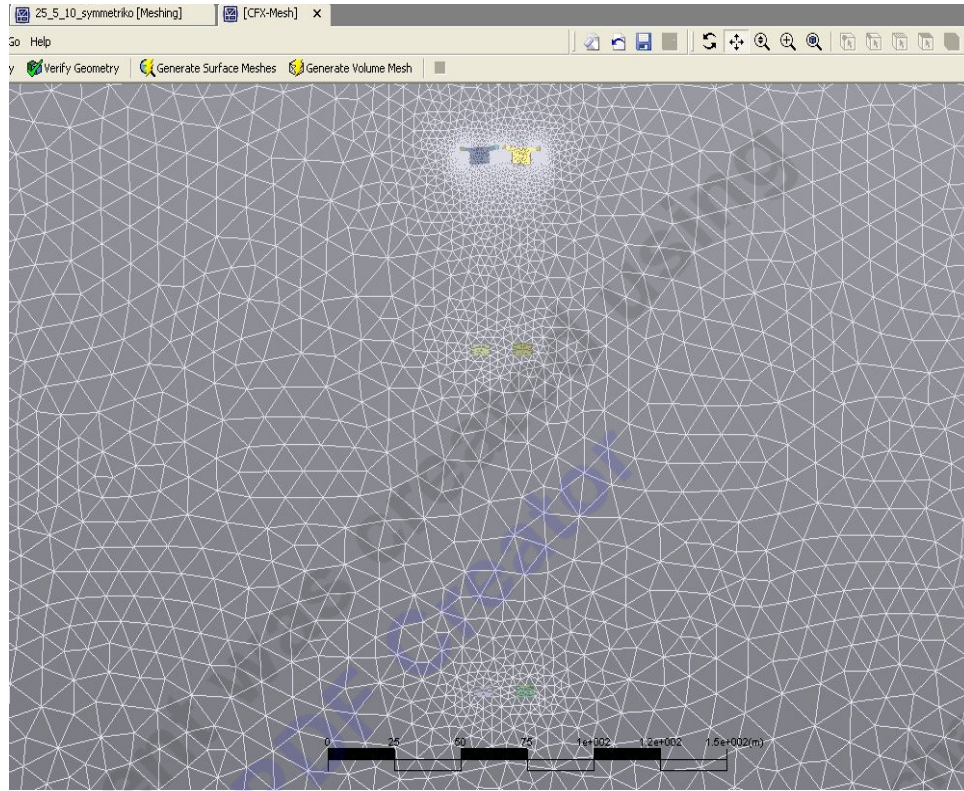
Εικόνα 5.13: Πλέγμα για τις επιφάνειες Inlet, Atmosphere, Symmetry.



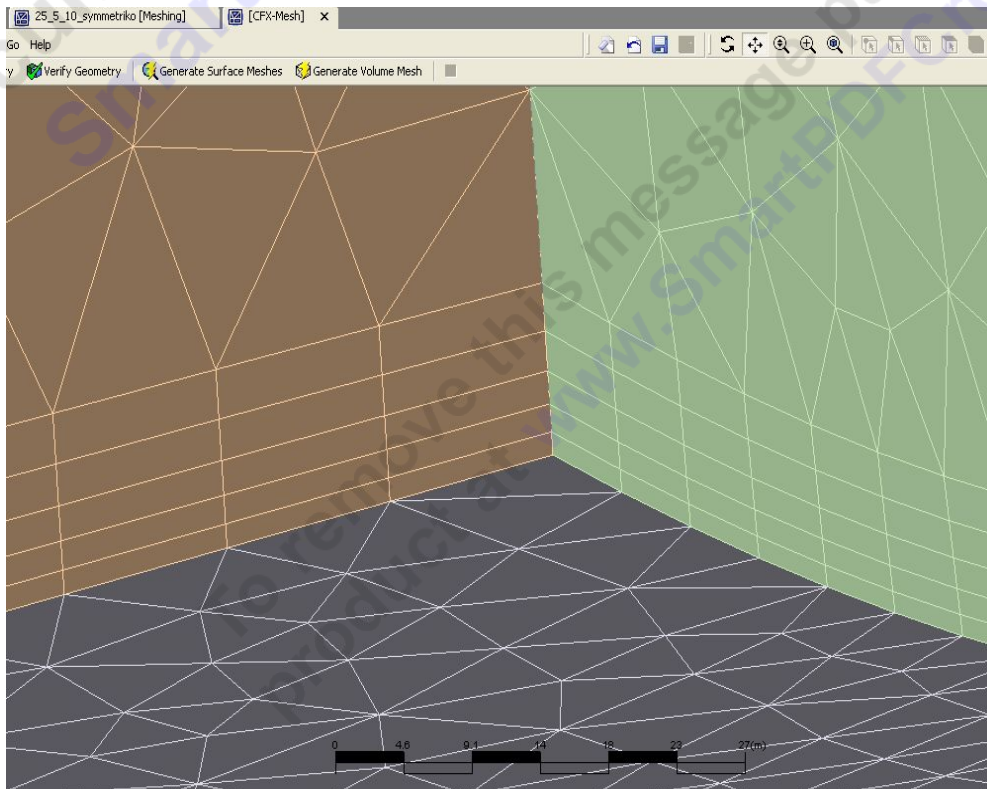
Εικόνα 5.14: Πλέγμα για τις επιφάνειες Outlet, Atmosphere, Ground.



Εικόνα 5.15: Πλέγμα γύρω από τη γέφυρα.



Εικόνα 5.16: Πλέγμα στο έδαφος.



Εικόνα 5.17: Πλέγμα στη γωνία του υπολογιστικού χωρίου.

Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος που δημιουργήθηκε διαμορφώθηκαν σύμφωνα με την Εικόνα 5.18.

Information

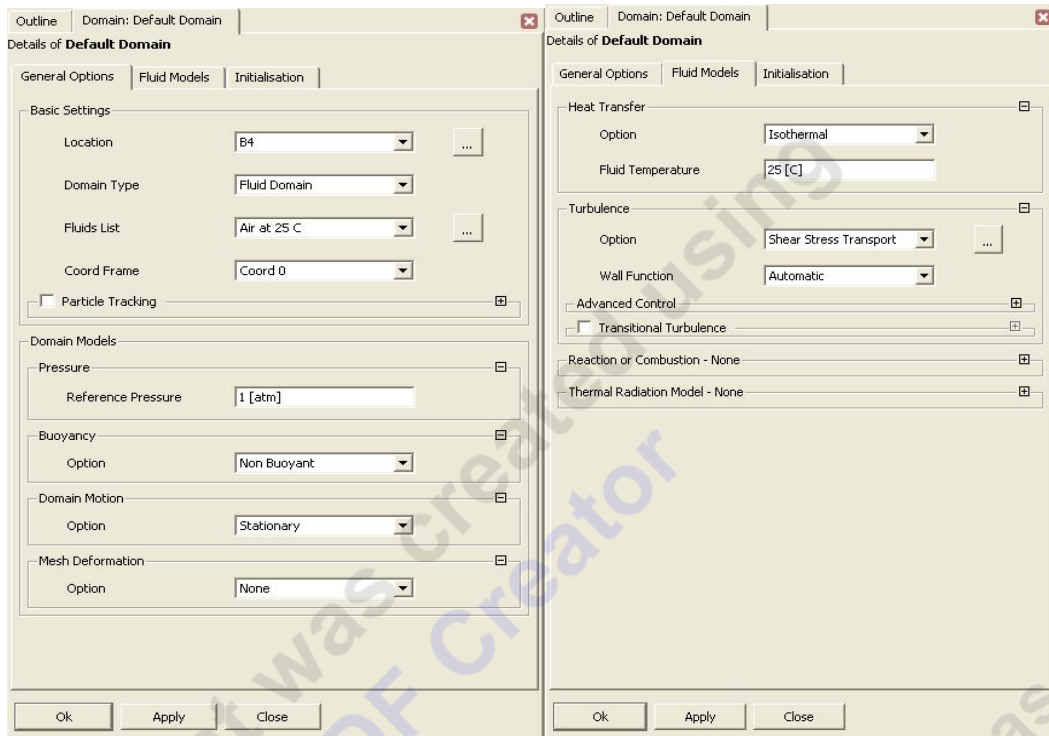
Mesh statistics

Total number of nodes	905957
Total number of tetrahedra	3049654
Total number of pyramids	5074
Total number of prisms	687140
<hr/>	
Total number of elements	3741868

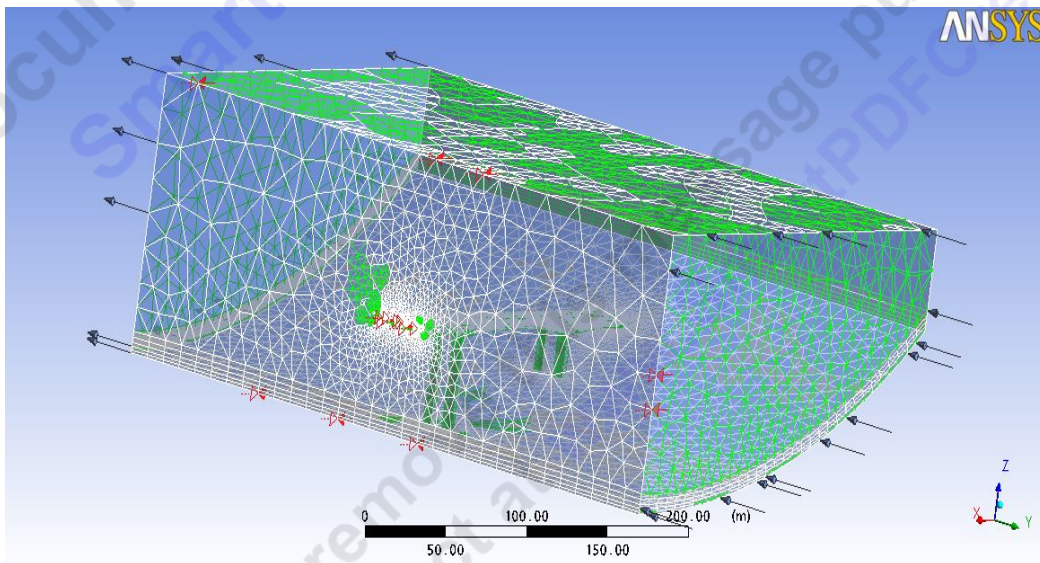
Εικόνα 5.18: Πλέγμα (Χαρακτηριστικά).

5.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Έχοντας ολοκληρώσει το πλέγμα μας, καθορίσαμε το πεδίο της ροής που θα προσβάλει την γέφυρα. Ορίζουμε, Εικόνα 5.19, το είδος του ρευστού, αέρας σε θερμοκρασία 25°C, την πίεση αναφοράς, 1 atm, και το είδος της ροής που επιλέγεται ως Μη Συνεκτική, Non Buoyant, δηλαδή το διάνυσμα της βαρύτητας είναι ίσο με μηδέν και δεν υπάρχει υδροστατική πίεση. Στην καρτέλα ορισμού του μοντέλου του ρευστού επιλέγουμε το ισοθερμικό μοντέλο επίλυσης για τη μεταφορά θερμότητας στους 25°C και ως Μοντέλο Τύρβης το Shear Stress Transport (SST), με αυτόματη επεξεργασία κοντά στα τοιχώματα, για τις wall functions.

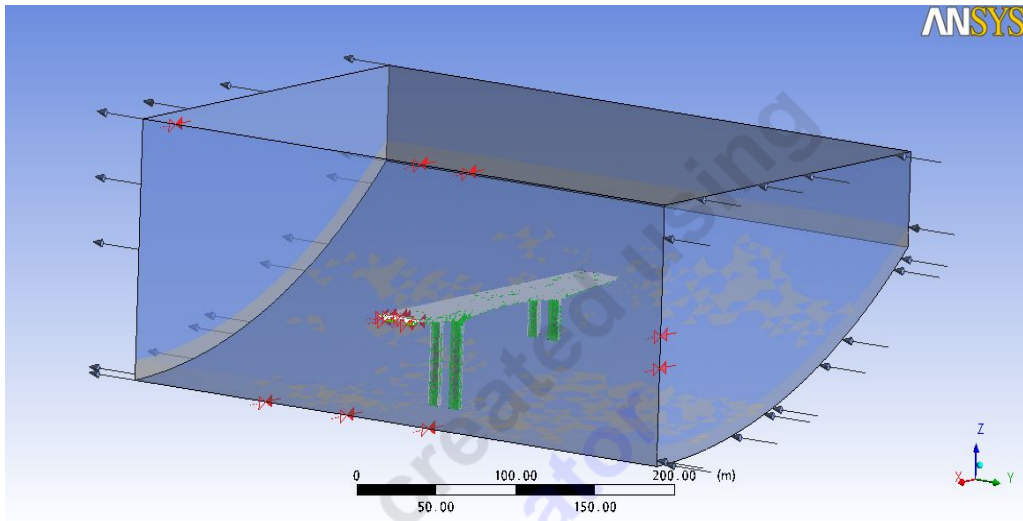


Εικόνα 5.19: Ορισμός χαρακτηριστικών πεδίου ροής.

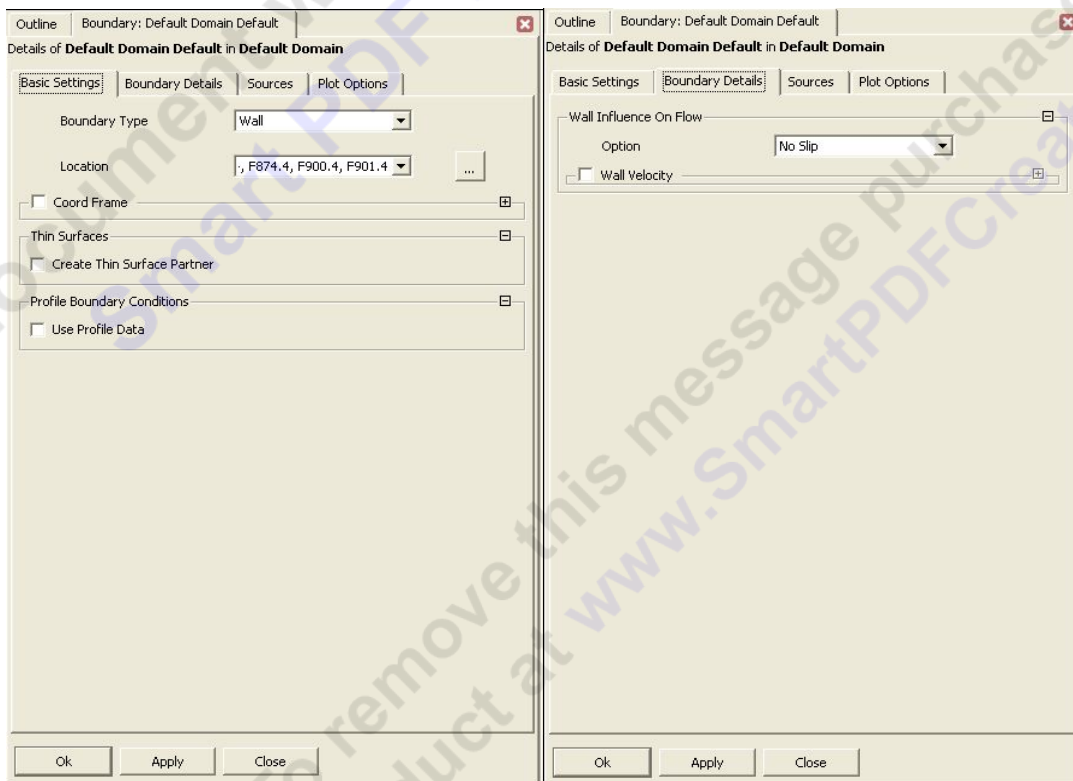


Εικόνα 5.20: Ορισμός πεδίου ροής (Default Domain).

Στη συνέχεια ορίσαμε διαδοχικά τις επιμέρους οριακές συνθήκες για όλο το μοντέλο. Αρχικά ορίσαμε τις συνθήκες που αφορούν τη γέφυρα, Εικόνα 5.20 και 5.21, και επιλέξαμε ως τύπο το στερεό (Wall), και συνθήκη μη ολίσθησης της ροής ως προς τα τοιχώματα (No Slip), όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.22.

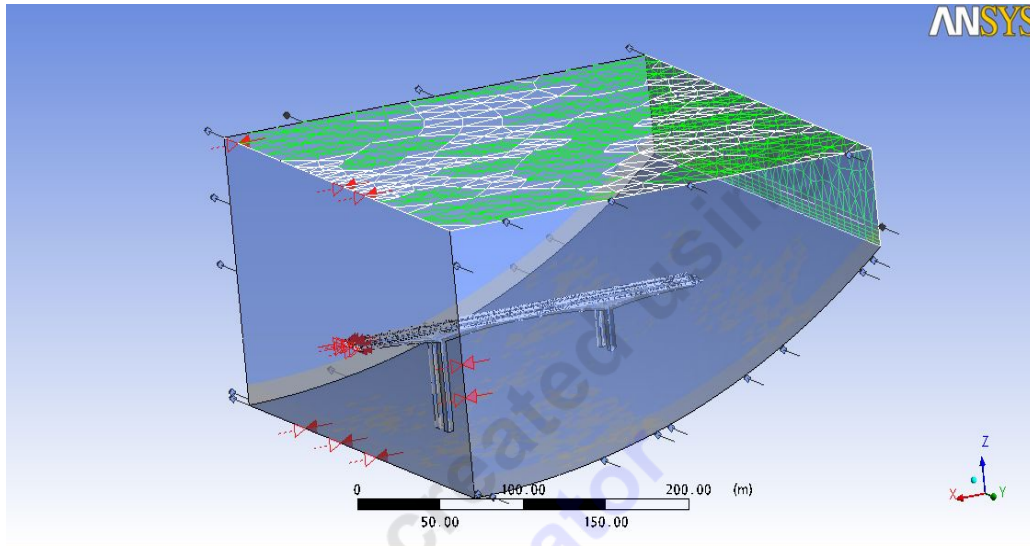


Εικόνα 5.21: Επιφάνεια Γέφυρας.

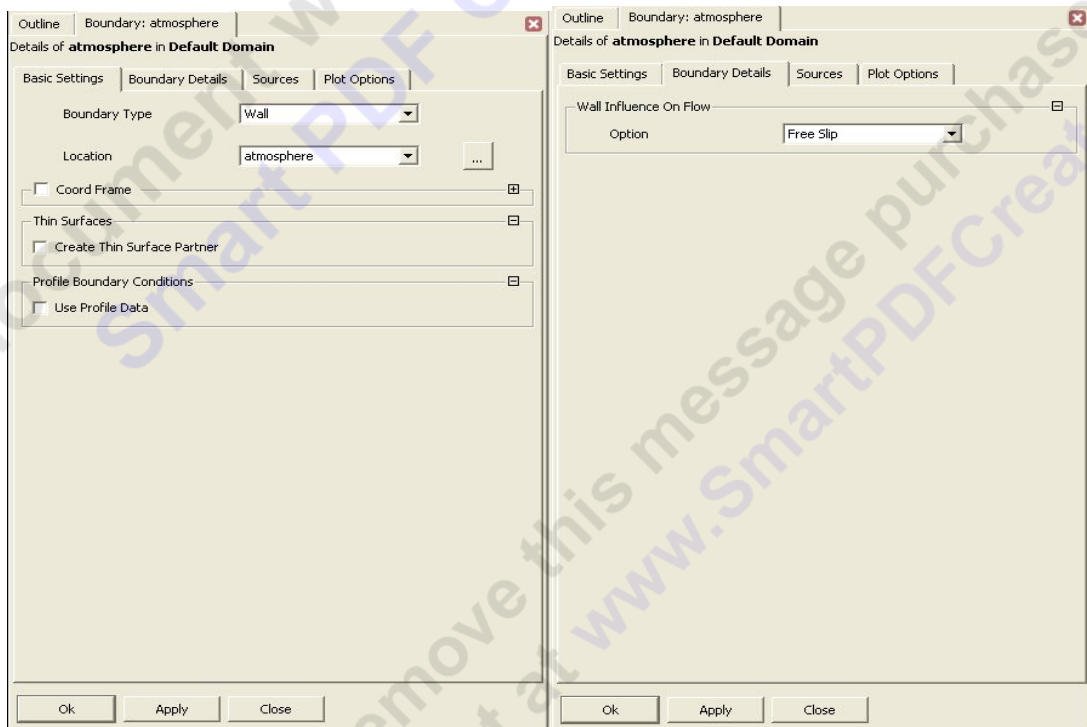


Εικόνα 5.22: Οριακές Συνθήκες στη Γέφυρα.

Κατόπιν καθορίσαμε τις οριακές συνθήκες στην ατμόσφαιρα (επιφάνεια atmosphere). Επιλέγουμε το είδος της επιφάνειας, στερεό, και συνθήκη ολίσθησης, Free Slip, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.22.

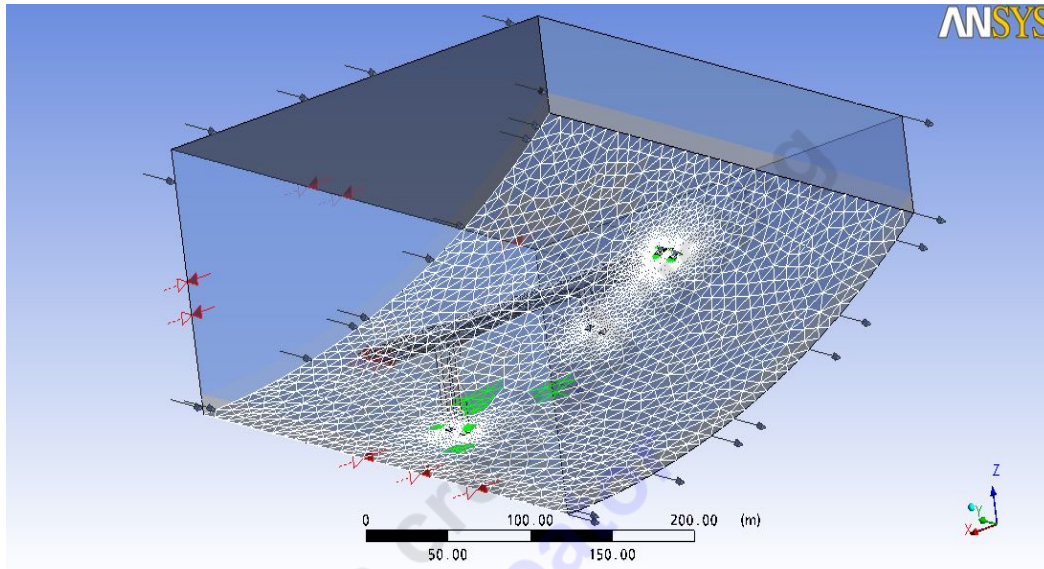


Εικόνα 5.21 Επιφάνεια Ατμόσφαιρας.

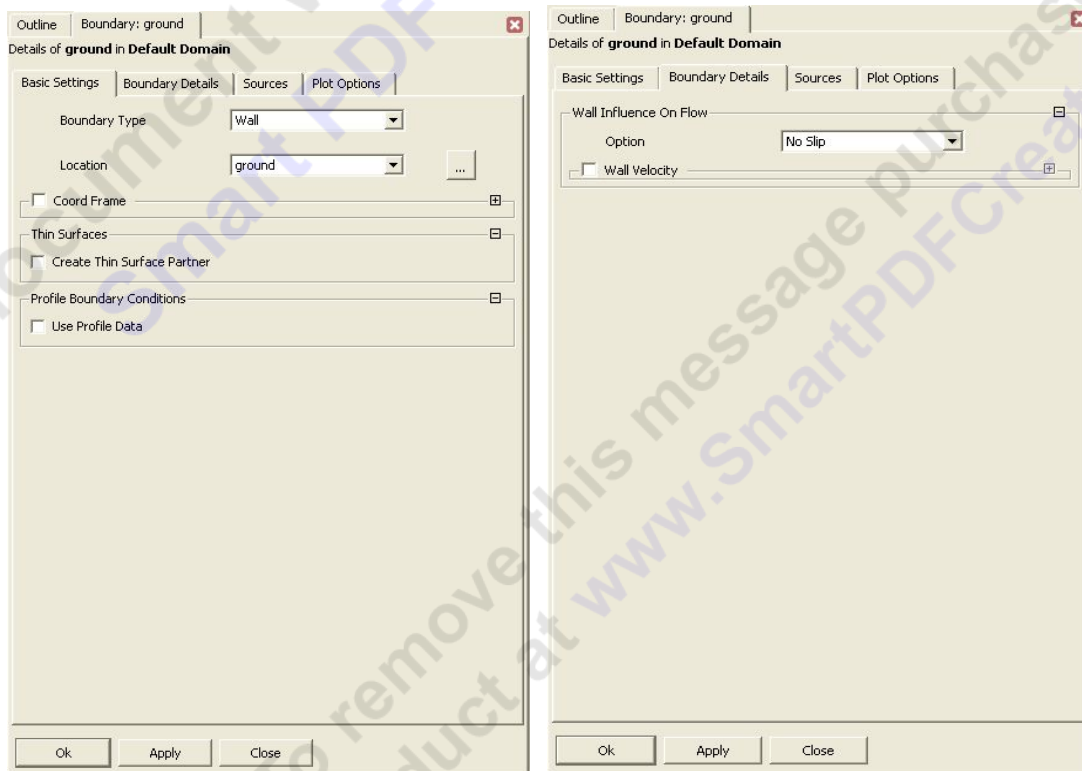


Εικόνα 5.22 Οριακές Συνθήκες στην Ατμόσφαιρα.

Επόμενο βήμα ήταν να προσδιορίσουμε τις συνθήκες που αφορούν το έδαφος, Εικόνα 5.23. Και εδώ ο τύπος του εδάφους ορίστηκε ως στερεό και επιλέχθηκε συνθήκη μη ολίσθησης της ροής ως προς τα τοιχώματα, Εικόνα 5.24.



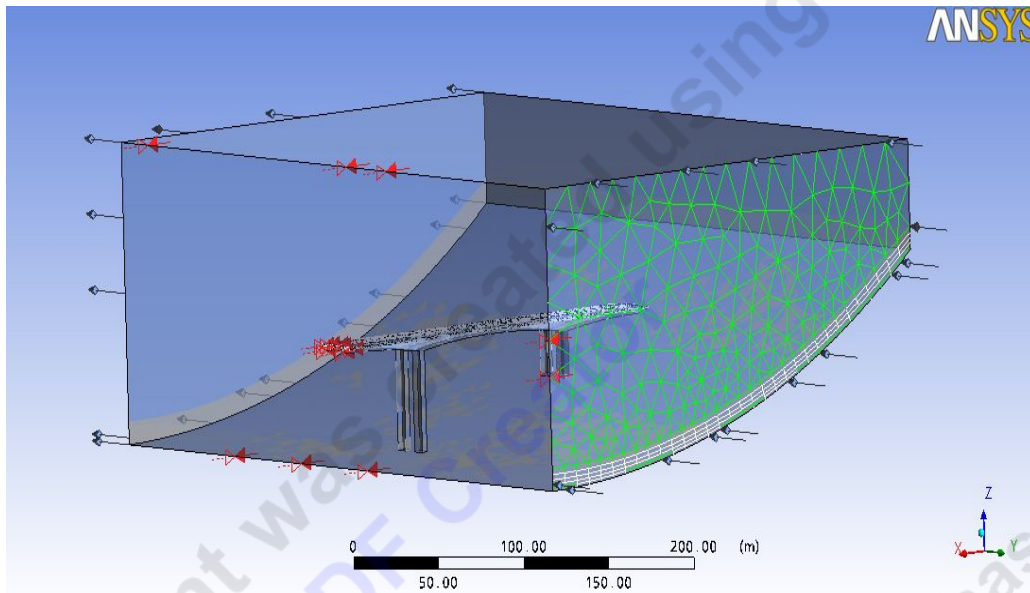
Εικόνα 5.23: Επιφάνεια του Εδάφους.



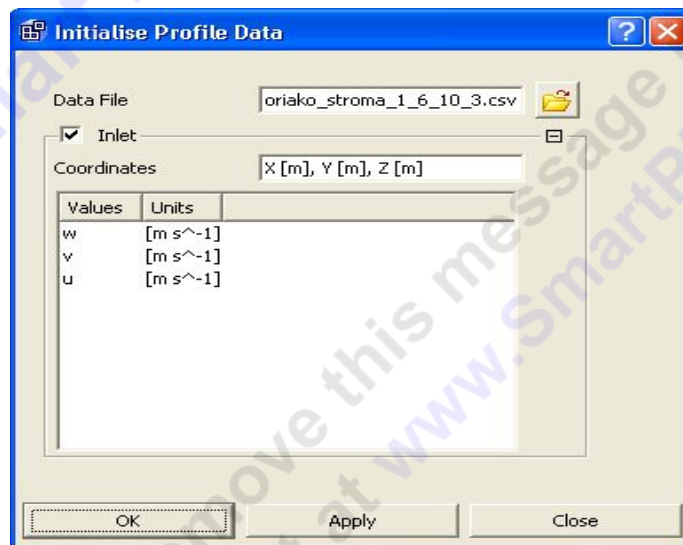
Εικόνα 5.24: Οριακές Συνθήκες στο Έδαφος.

Ακολούθησε ο ορισμός της εισόδου του ρευστού (στη θέση Inlet). Εφαρμόσαμε το προφίλ ταχύτητας, το οποίο φαίνεται στην Εικόνα 5.26. Οι τρεις συνιστώσες της ταχύτητας εμφανίζονται αυτόματα, αφού έχουμε εισάγει το προφίλ.

Επιλέγουμε ως επιφάνεια εισόδου την Boundary Type Inlet καθώς και Low Intensity 1% για το επίπεδο της τύρβης, Εικόνα 5.27. Οι λεπτομέρειες του οριακού στρώματος στην είσοδο περιγράφονται στο Παράρτημα.

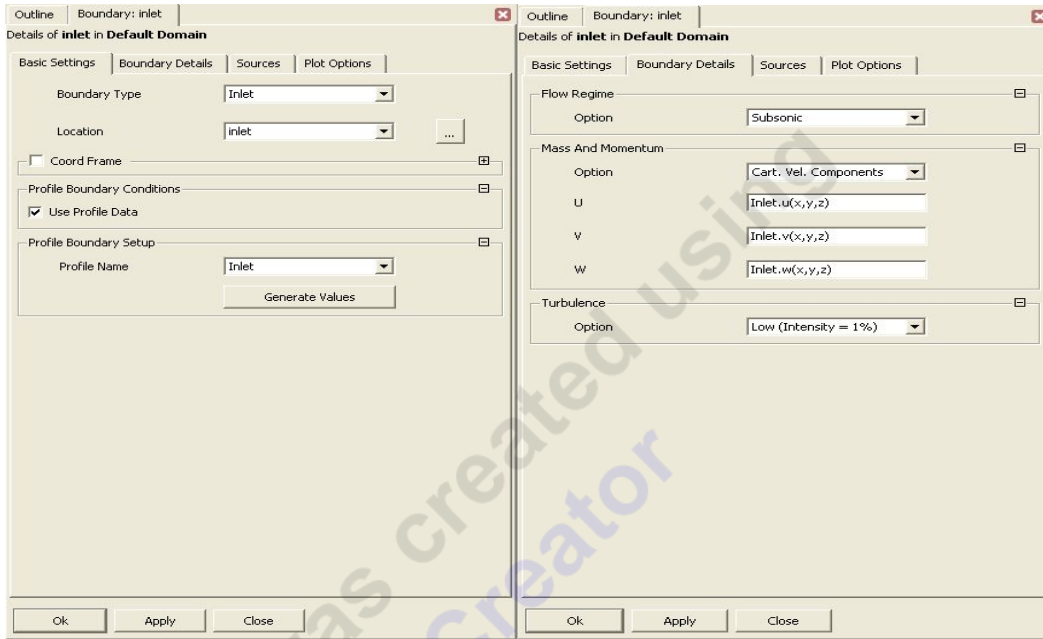


Εικόνα 5.25 Επιφάνεια της Εισόδου.

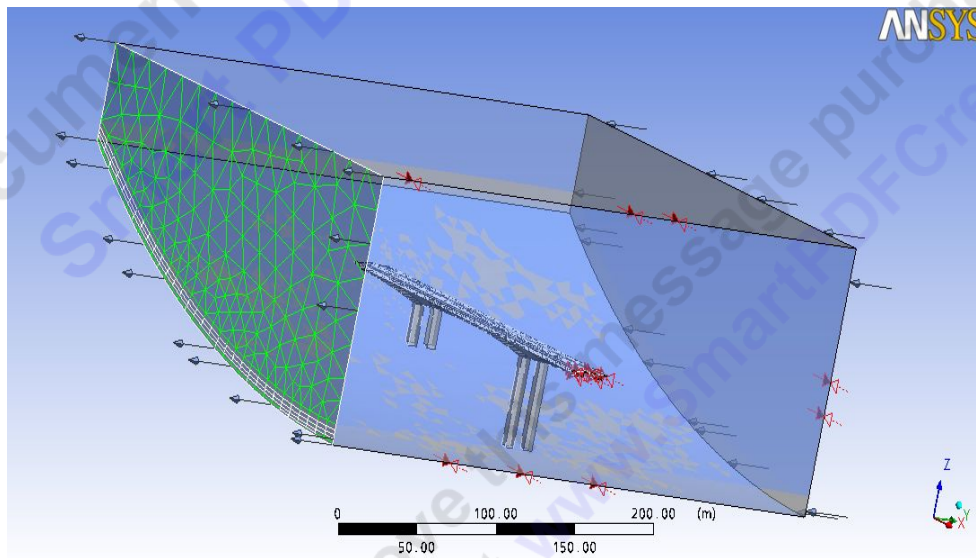


Εικόνα 5.26: Εισαγωγή προφίλ ταχύτητας.

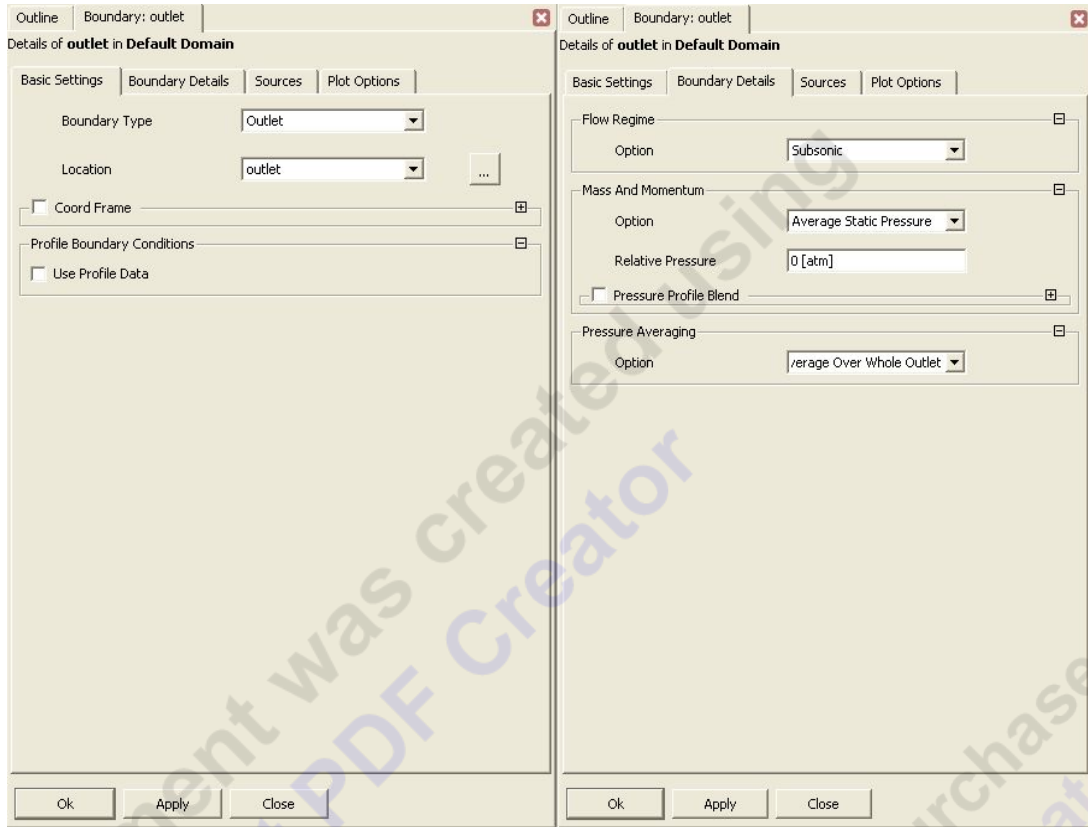
Αντίστοιχα ορίστηκαν οι οριακές συνθήκες στην έξοδο της διάταξης στη θέση Outlet, Εικόνα 5.28, με μέση στατική πίεση 0 atm, ως προς την πίεση αναφοράς και ως τύπο επιφάνειας εξόδου την Boundary Type Outlet. Επίσης, το καθεστώς της ροής στην έξοδο επιλέχθηκε ως υποηχητικό και το προφίλ που ορίστηκε για τον υπολογισμό της πίεσης είναι αυτό της εξόδου, Εικόνα 5.29.



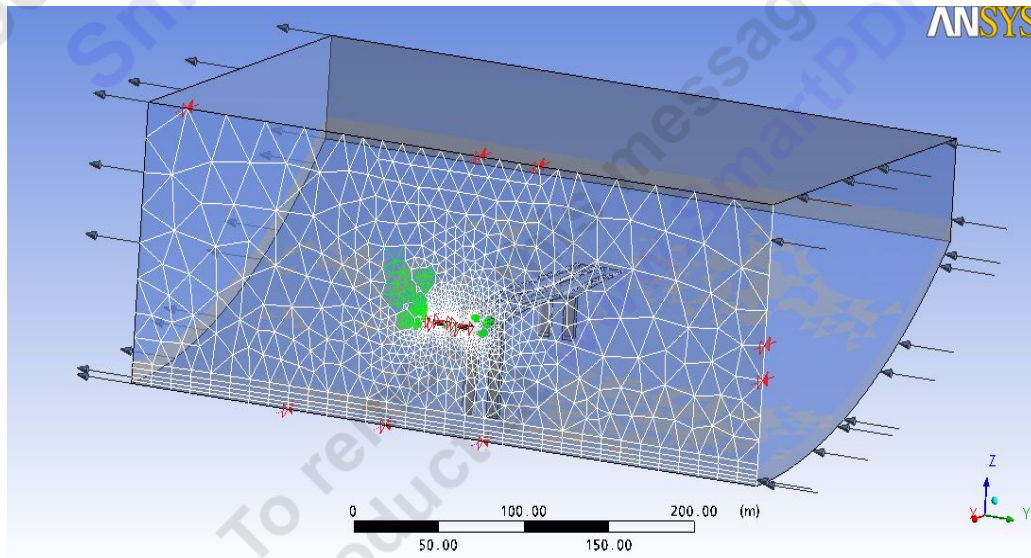
Εικόνα 5.27: Οριακές Συνθήκες στην Είσοδο.



Εικόνα 5.28: Επιφάνεια της Εξόδου.

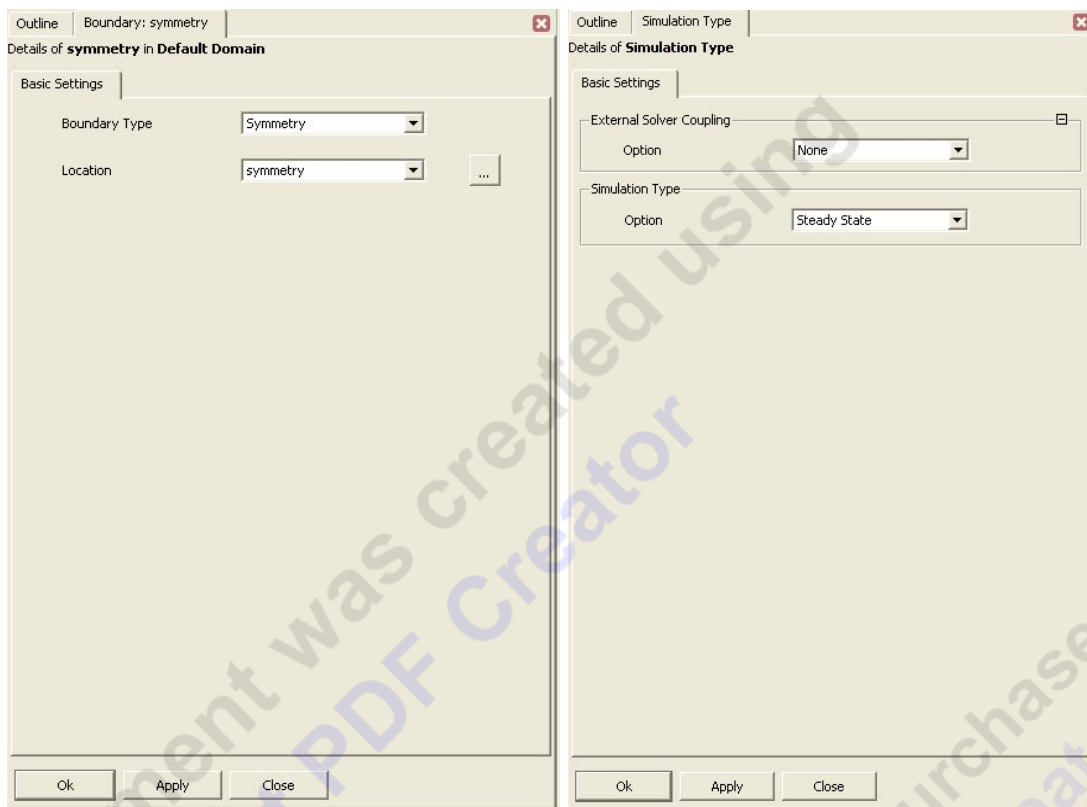


Εικόνα 5.29: Οριακές Συνθήκες στην Έξοδο.



Εικόνα 5.30: Επιφάνεια Συμμετρίας.

Η επιφάνεια που απομένει είναι η συμμετρική, Εικόνα 5.30, με τις αντίστοιχες οριακές συνθήκες, Εικόνα 5.31.

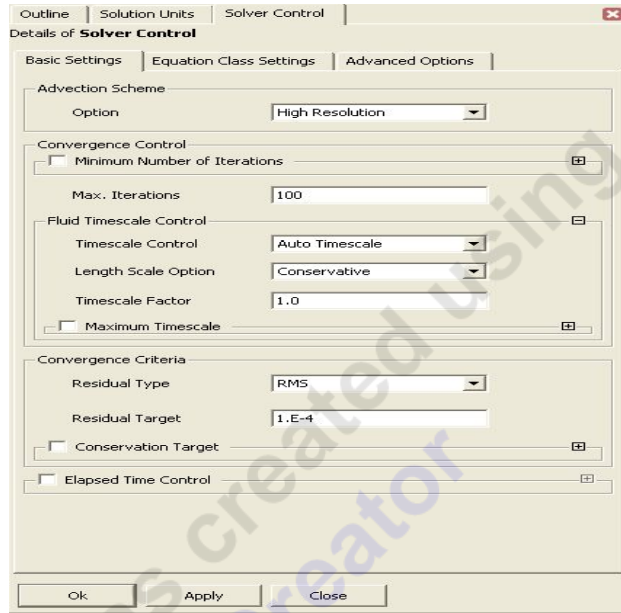


Εικόνα 5.31: Οριακές Συνθήκες στην Συμμετρική Επιφάνεια

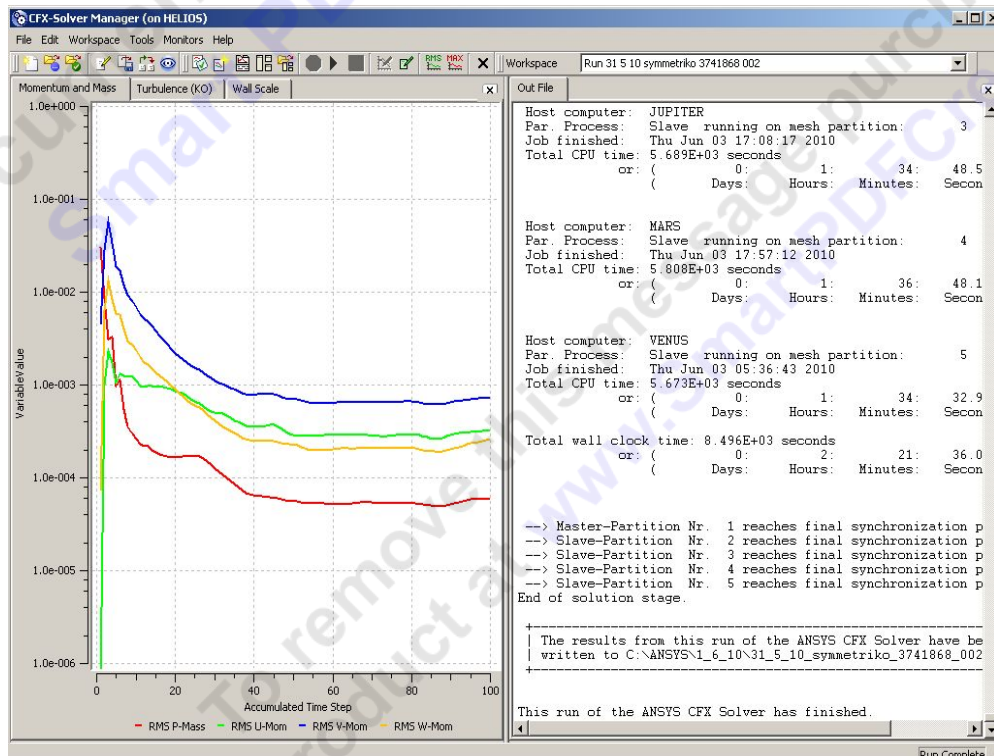
5.4 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΕΠΙΛΥΤΗ

Τελικό στάδιο στην ανάλυσή μας ήταν ο ορισμό των παραμέτρων της επίλυσης. Επιλέξαμε το σχήμα υψηλής ανάλυσης, αυτόματη χρονική κλίμακα, αριθμό επαναλήψεων ίσο με 100 και στόχο σύγκλισης το 0,0001, Εικόνα 5.32.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τον CFX-Solver, ξεκινήσαμε τη διαδικασία της επίλυσης, με δυνατότητα παρακολούθησης αναλυτικά της πορείας των μεγεθών προς επίλυση (των υπολοίπων των εξισώσεων) όπως της ορμής, της συνέχειας της ενέργειας. Στην Εικόνα 5.33 δίδεται ένα τυπικό ιστορικό σύγκλισης των εξισώσεων ορμής και συνέχειας για 100 επαναλήψεις.



Εικόνα 5.32: Ορισμός των παραμέτρων του επιλύτη.

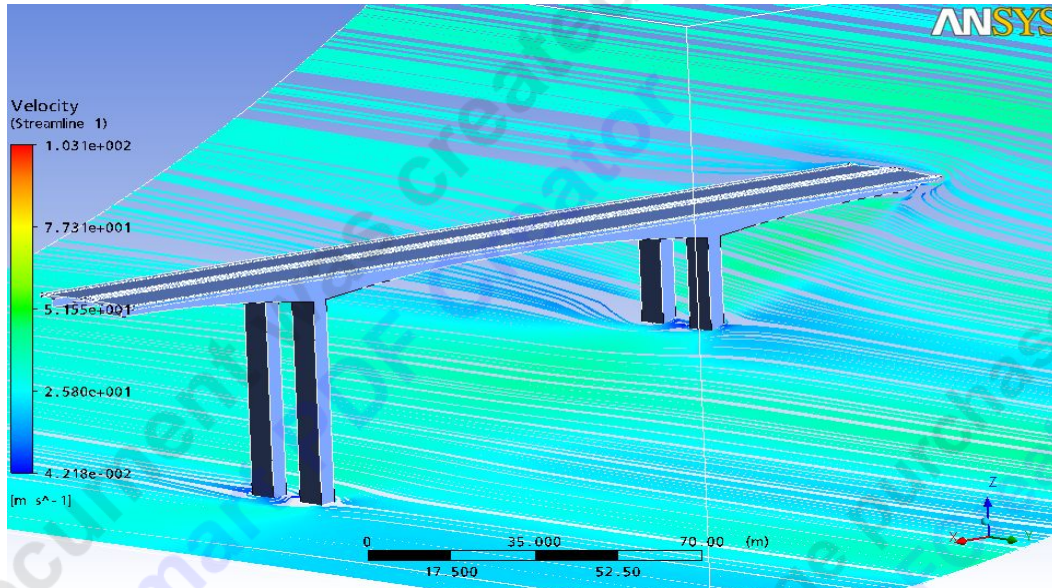


Εικόνα 5.33: Τυπικό γράφημα πορείας της σύγκλισης για τις εξισώσεις ορμής και συνέχειας (κόκκινο χρώμα: υπόλοιπο εξίσωσης συνέχειας, πράσινο χρώμα: υπόλοιπο εξίσωσης x-ορμής, γαλάζιο χρώμα: υπόλοιπο y-ορμής, πορτοκαλί χρώμα: υπόλοιπο z-ορμής).

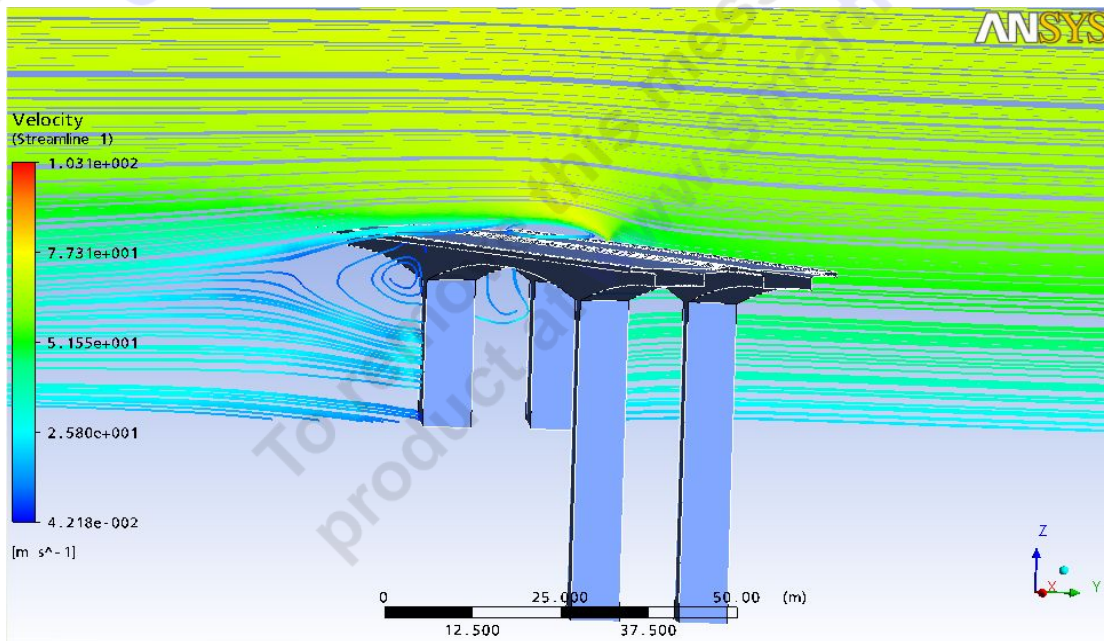
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

6.1 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

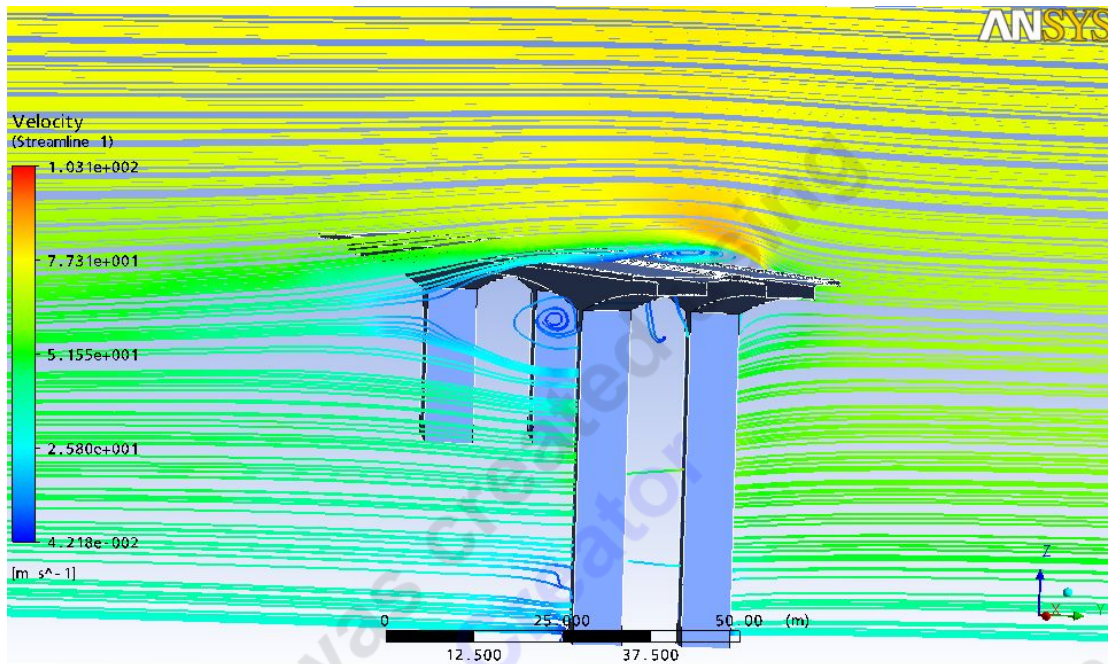
Στις Εικόνες 6.1 έως 6.4 παρουσιάζονται οι γραμμές ροής στις διάφορες επιφάνειες. Στα επίπεδα του πρώτου πυλώνα, του δεύτερου πυλώνα καθώς και στο συμμετρικό επίπεδο γίνεται φανερό το φαινόμενο της ανακυκλοφορίας, που προκαλείται από το μη αεροδυναμικό σχήμα των πυλώνων.



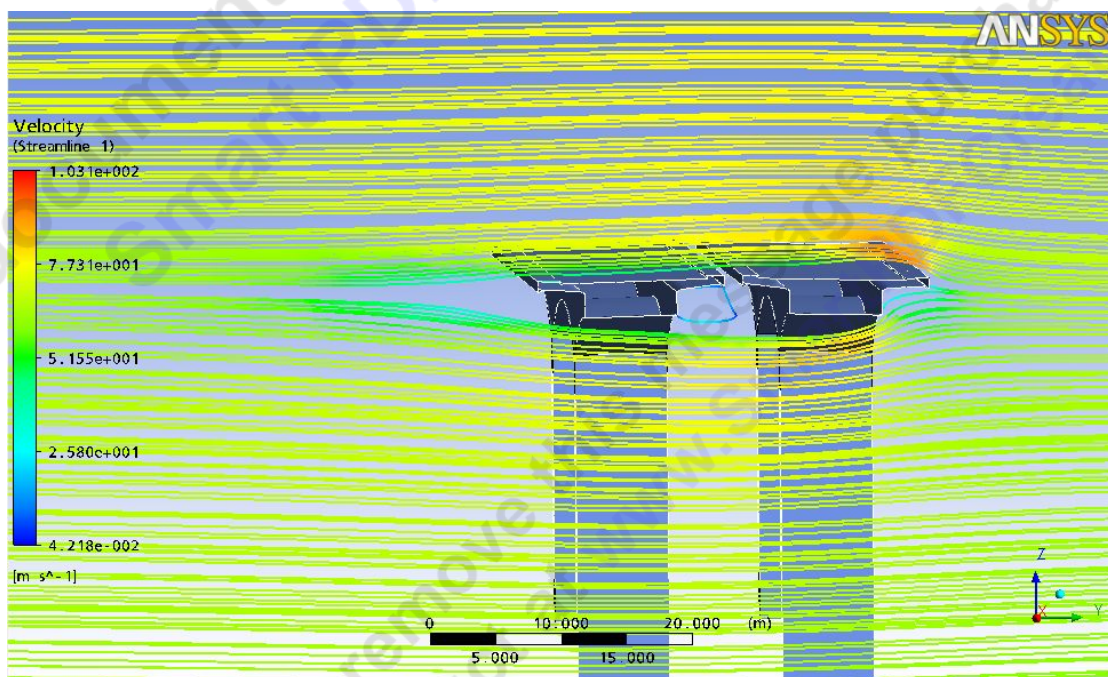
Εικόνα 6.1: Γραμμές ροής στην επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 6.2: Γραμμές ροής στον πρώτο πυλώνα της γέφυρας.

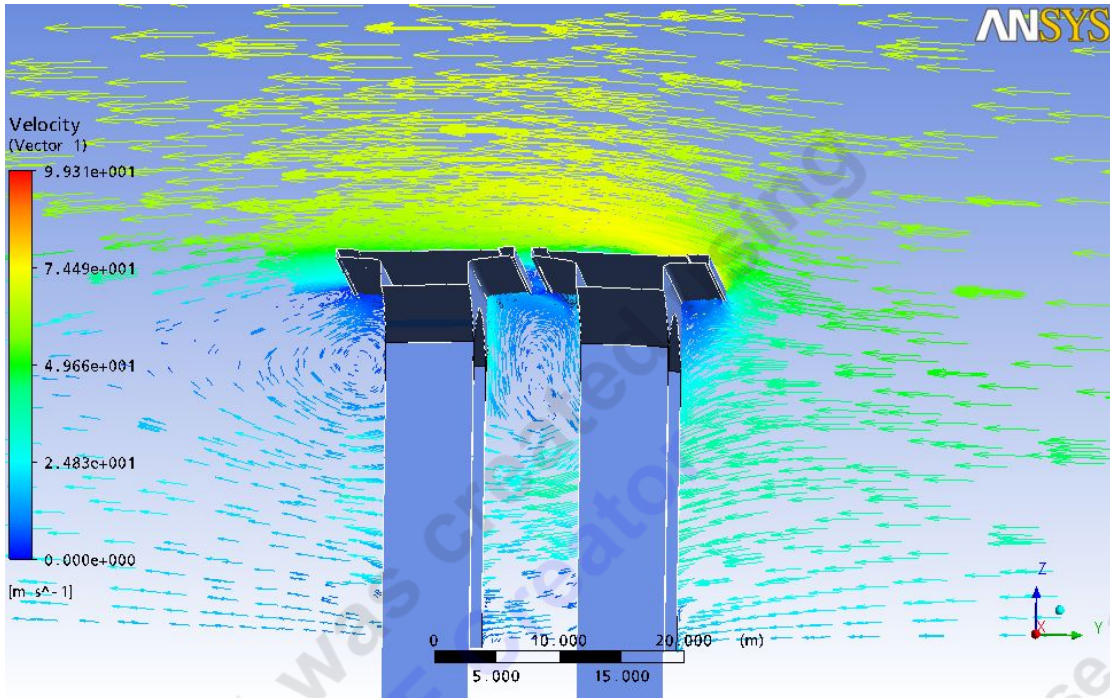


Εικόνα 6.3: Γραμμές ροής στον δεύτερο πυλώνα της γέφυρας.

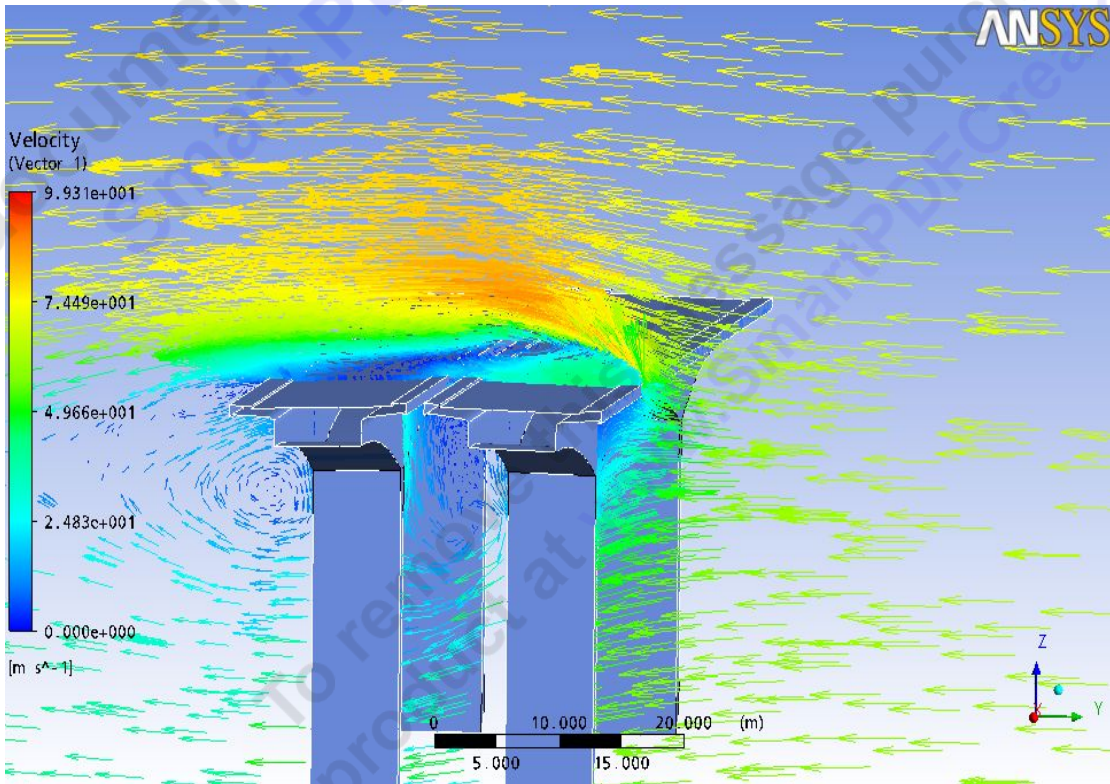


Εικόνα 6.4: Γραμμές ροής στη επιφάνεια συμμετρίας.

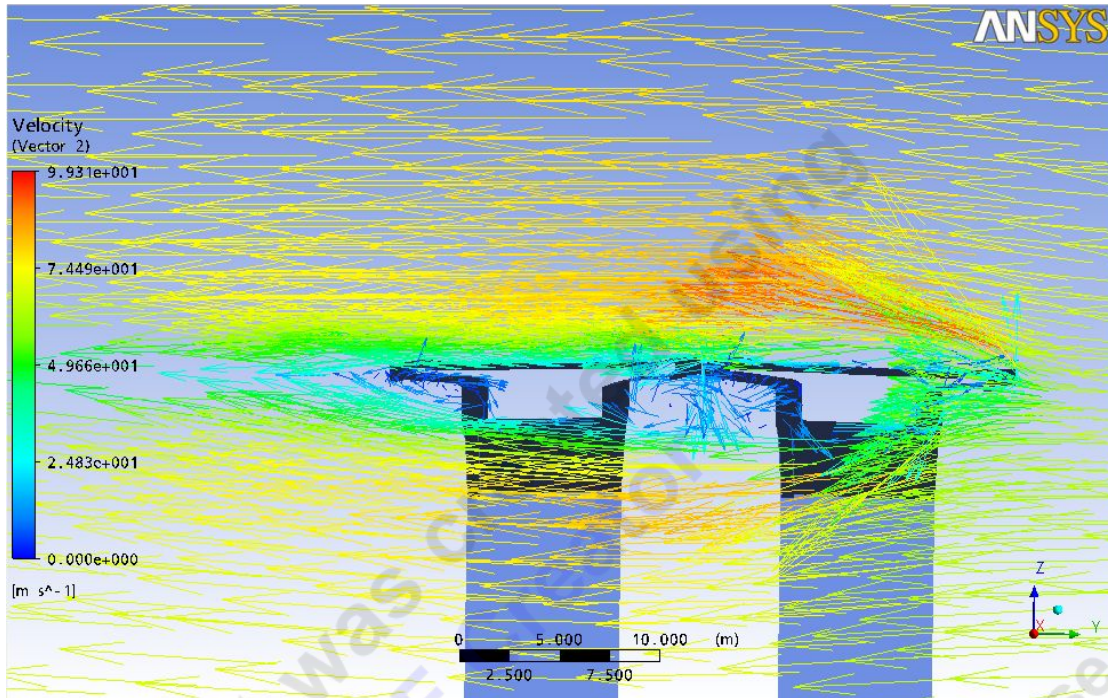
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διανύσματα της ταχύτητας στις δύο επιφάνειες των πυλώνων καθώς και στη συμμετρική (Εικόνα 6.5, 6.6, 6.7) (min 0 m/s max 99.134 m/s).



Εικόνα 6.5: Διανύσματα ταχύτητας στον πρώτο πυλώνα της γέφυρας.



Εικόνα 6.6: Διανύσματα ταχύτητας στον δεύτερο πυλώνα της γέφυρας.

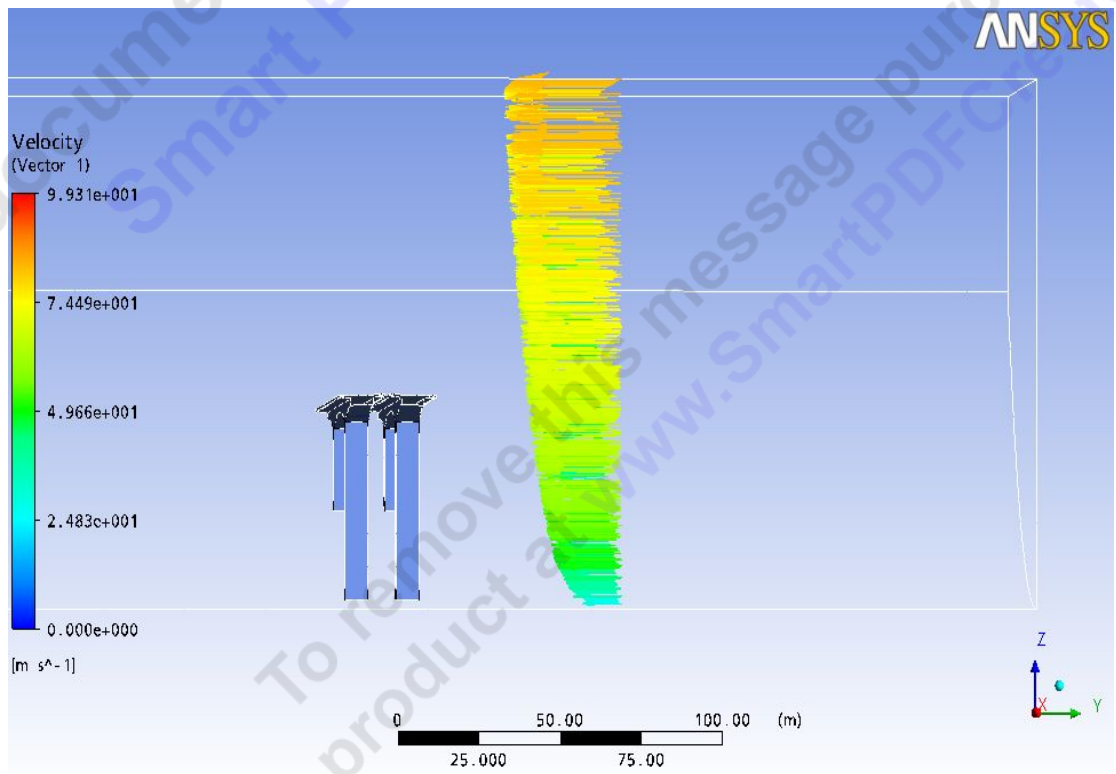


Εικόνα 6.7: Διανύσματα ταχύτητας στην επιφάνεια συμμετρίας.

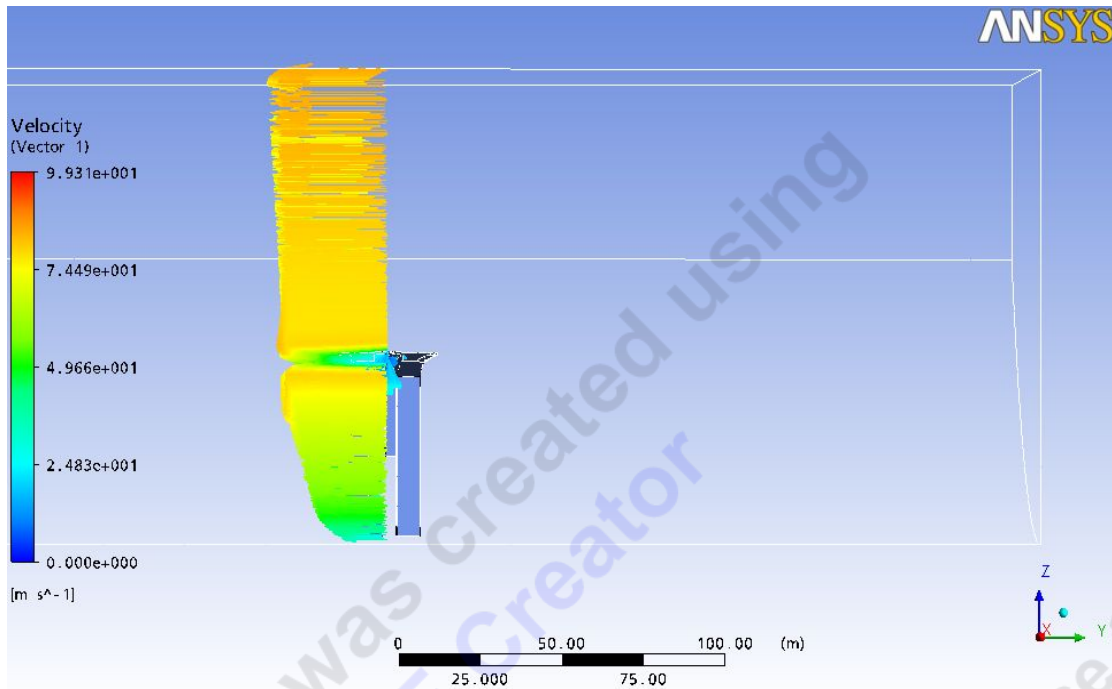
Στις τέσσερις επόμενες εικόνες παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της δημιουργίας του οριακού στρώματος ταχύτητας. Οι επιφάνειες που ακολουθούν είναι αντίστοιχα στην είσοδο (Εικόνα 6.8), 80m πριν τη γέφυρα (Εικόνα 6.9), ανάμεσα στα δύο καταστρώματα της γέφυρας (Εικόνα 6.10) και 30m μετά τη γέφυρα (Εικόνα 6.11). Πάνω στη γέφυρα (Εικόνα 6.9) παρουσιάζονται κάποιες αρκετά χαμηλές ταχύτητες στο επίπεδο των πυλώνων και συνεχίζονται ακόμα και 30m μετά, οπτικοποιώντας τον ομόρου (Εικόνα 6.10).



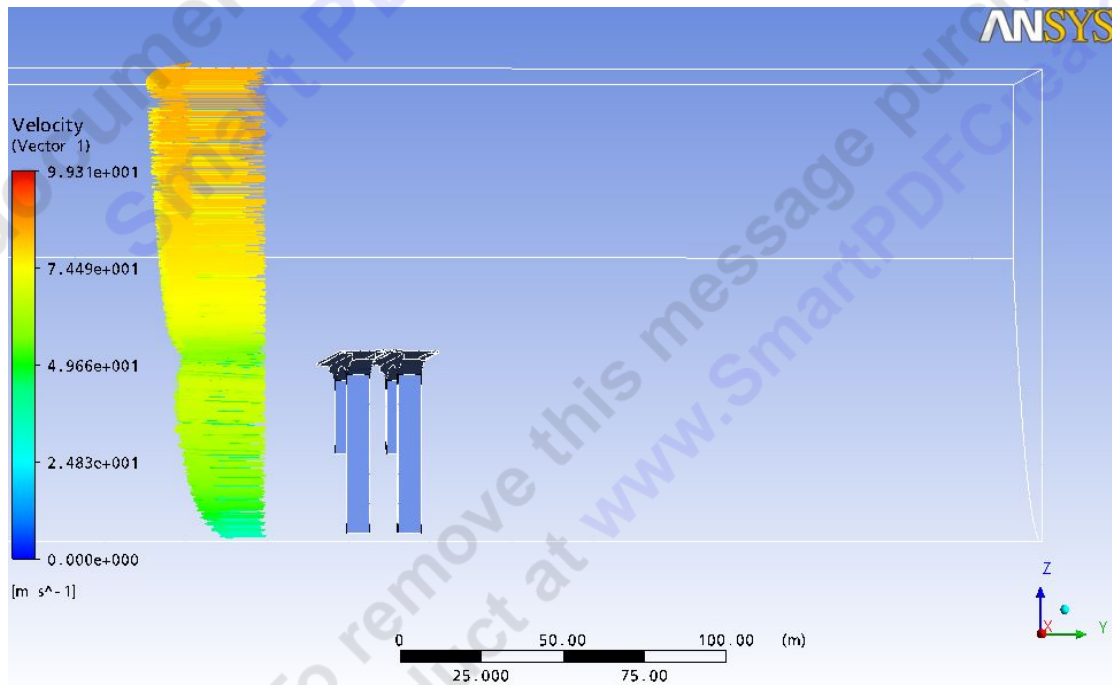
Εικόνα 6.8: Οριακό στρώμα στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου.



Εικόνα 6.9: Οριακό στρώμα 80m πριν τη γέφυρα.



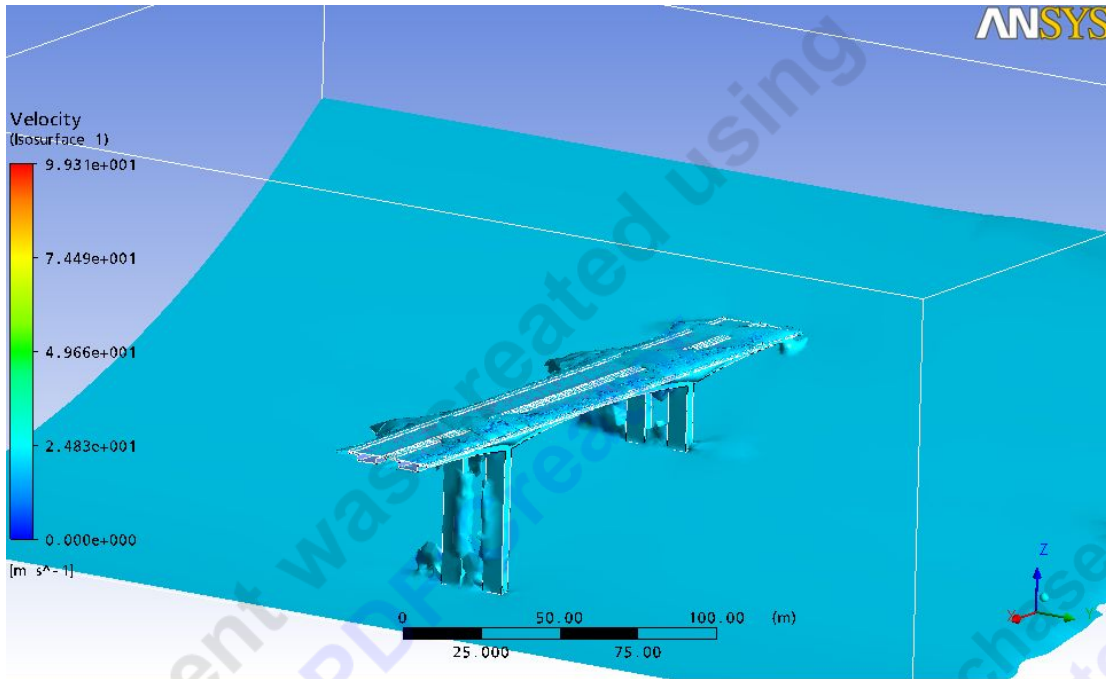
Εικόνα 6.10: Οριακό στρώμα ανάμεσα στα δύο καταστρώματα της γέφυρας.



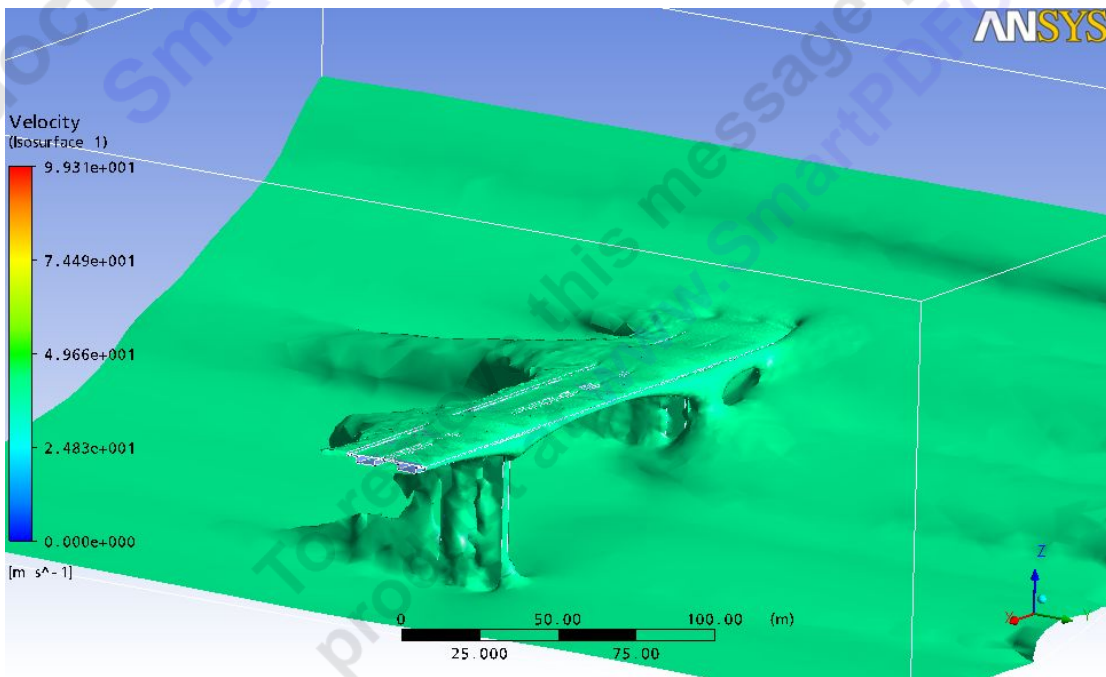
Εικόνα 6.11: Οριακό στρώμα 30m μετά τη γέφυρα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται με τη σειρά οι επιφάνειες πάνω στις οποίες η τιμή της ταχύτητας είναι παντού σταθερή (ισοεπιφάνειες ταχύτητας 20, 40, 60, 70, 80 m/s, Εικόνες 6.12, 6.13, 6.14, 6.15, 6.16). Εδώ παρουσιάζονται τα wakes

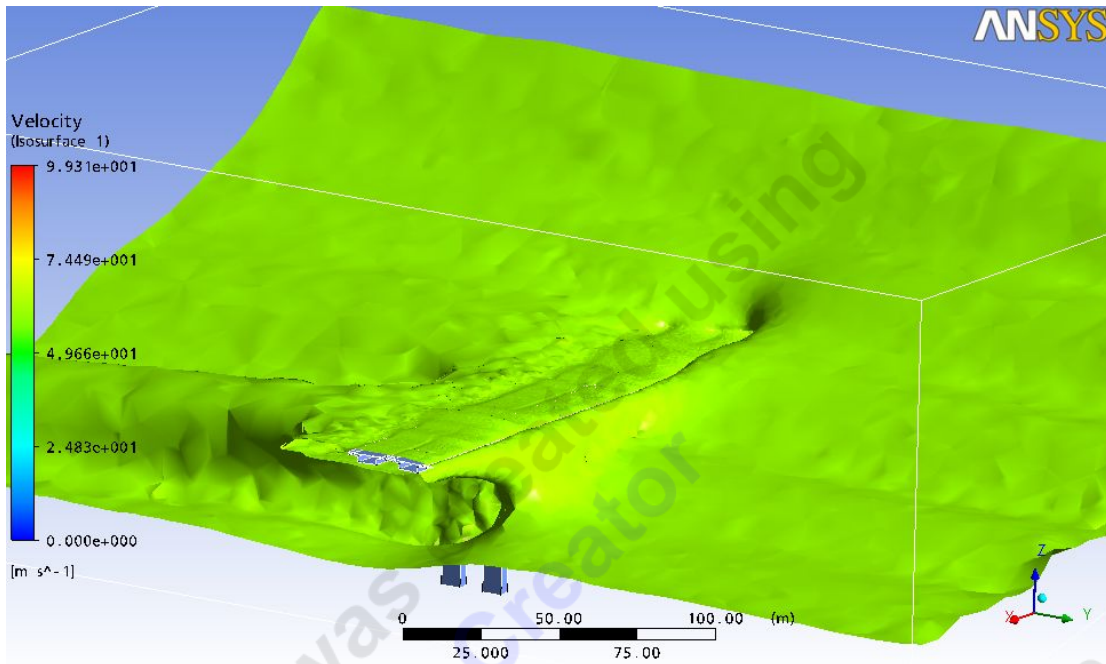
της ταχύτητας μετά τη γέφυρα, τα οποία είναι πύο έντονα πίσω από το κατάστρωμα και πίσω από τους πυλώνες.



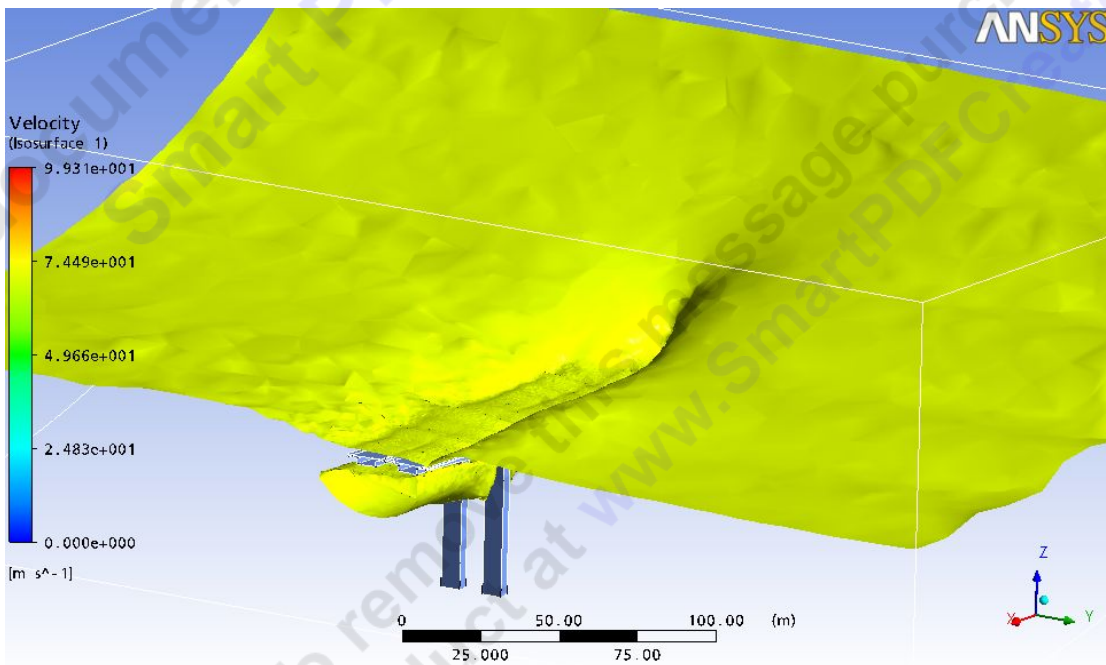
Εικόνα 6.12: Ισοεπιφάνεια 20 m/s.



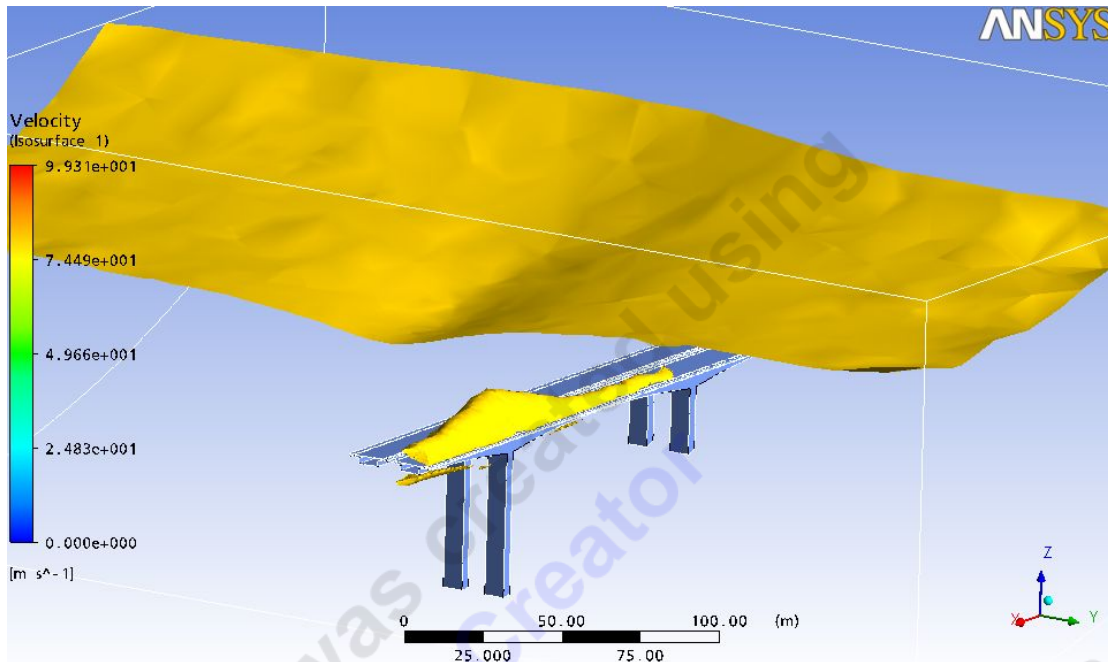
Εικόνα 6.14: Ισοεπιφάνεια 40 m/s.



Εικόνα 6.13: Ισοεπιφάνεια 60 m/s.

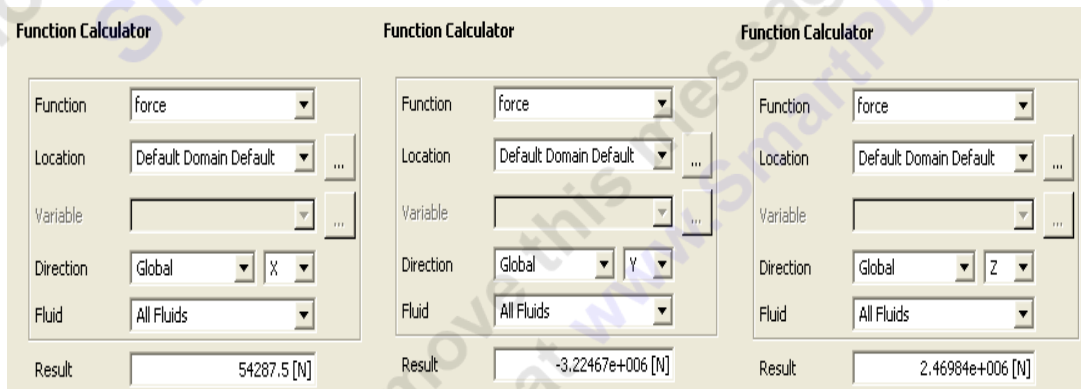


Εικόνα 6.15: Ισοεπιφάνεια 70 m/s.



Εικόνα 6.16: Ισοειπιφάνεια 80 m/s.

Στην Εικόνα 6.17 εμφανίζεται η τιμή της δύναμης που ασκείται στην γέφυρα στις διάφορες κατευθύνσεις. Συγκεκριμένα: στον άξονα X η δύναμη είναι 54287,5 N, στον άξονα Y, στην κατεύθυνση δηλαδή του ανέμου, είναι $3,22467 \cdot 10^6$ N και τέλος η δύναμη άνωσης (στον άξονα Z) είναι $2,46984 \cdot 10^6$ N.



Εικόνα 6.17: Δύναμη που ασκείται στη γέφυρα στην κατεύθυνση των τριών αξόνων.

6.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ροή γύρω από τη γέφυρα μελετήθηκε χωρίς να ληφθούν υπόψη μη μόνιμα φαινόμενα (vortex shedding). Έγινε μια αρχική μελέτη της ροής για να εντοπιστούν οι περιοχές ανακυκλοφορίας και να υπολογιστούν οι αεροδυναμικές φορτίσεις από το μόνιμο πεδίο ροής.

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του πεδίου ροής εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα. Οι ταχύτητες της ροής στον δεύτερο πυλώνα στο χείλος προσβολής του καταστρώματος είναι μεγαλύτερες, προσεγγίζουν τα 103 m/s, σε σχέση με το χείλος προσβολής του πρώτου πυλώνα όπου η ροή έχει ταχύτητα περίπου 77.3 m/s. Επίσης μετά τον δεύτερο πυλώνα η ροή του αέρα έχει μεγαλύτερη ταχύτητα, 51.5 m/s, σε αντίθεση με την ροή μετά τον πρώτο πυλώνα που έχει ταχύτητα περίπου 2.6 m/s. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο ύψος του αντίστοιχου πυλώνα.

Η παρουσία των πυλώνων επηρεάζει το πεδίο ροής στο κατάστρωμα της γέφυρας, δημιουργώντας μεγάλες περιοχές ανακυκλοφορίας που καταλαμβάνουν σχεδόν ολόκληρο το κατάστρωμα της πρώτης γέφυρας. Αυτό μπορεί να έχει επίδραση στις αεροδυναμικές φορτίσεις που αναπτύσσονται στα οχήματα που κινούνται στην γέφυρα.

Η ροή στην επιφάνεια συμμετρίας παρουσιάζει μεγάλες τιμές ταχύτητας στο χείλος προσβολής του καταστρώματος αλλά (σε αντίθεση με την ροή στους δύο πυλώνες) στο χείλος εκφυγής της ροής δεν έχουμε τόσο έντονο το φαινόμενο του σχηματισμού στροβιλισμών, με εξαίρεση το διάκενο ανάμεσα στα δύο καταστρώματα.

Οι ταχύτητες στο χείλος προσβολής είναι μεγαλύτερες από ότι στον πρώτο πυλώνα και μας δίνουν μια εκτίμηση των στροβίλων στο χείλος εκφυγής του καταστρώματος. Βλέπουμε ότι η συμπεριφορά της γέφυρας είναι παρόμοια και στις δύο αυτές θέσεις. Λιγότερο έντονο είναι το φαινόμενο των στροβιλισμών στο χείλος εκφυγής της επιφάνειας συμμετρίας όπου σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η ανεμπόδιστη ροή του αέρα στην κάτω επιφάνεια του καταστρώματος που εμποδίζει την εξάπλωση του φαινομένου.

Η μέγιστη πίεση σημειώνεται στα σημεία ανακοπής, όπου η ταχύτητα είναι μηδενική, και αυτά βρίσκονται στην πλαϊνή προέκταση του καταστρώματος της γέφυρας που είναι το πρώτο αντικείμενο που συναντά η ροή μας. Στα σημεία ανακοπής η πίεση είναι 3.6 MPa. Επίσης σημαντικές τιμές πίεσης παρατηρούνται και στην μετωπική, ως προς την ροή, επιφάνεια των πυλώνων της γέφυρας, με τιμές της τάξης των 1.2 MPa.

Η χρησιμοποίηση του λογισμικού ANSYS-CFX αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική για τον υπολογισμό του πεδίου ροής γύρω από τη γέφυρα, και με τη χρήση ενός όχι ιδιαίτερα πυκνού πλέγματος (για το μέγεθος του υπολογιστικού χωρίου) έγινε δυνατή η προσομοίωση πολύπλοκων χαρακτηριστικών της ροής, όπως οι στροβιλισμοί ανάμεσα στις δύο γέφυρες και πίσω από την δεύτερη.

Αποδείχθηκε ότι το λογισμικό CATIA δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τη μοντελοποίηση του εδάφους σε συνδυασμό με το ANSYS-CFX, αφού δεν κατέστη δυνατή η συνεργασία των δύο για την εισαγωγή του πραγματικού εδάφους στο δεύτερο.

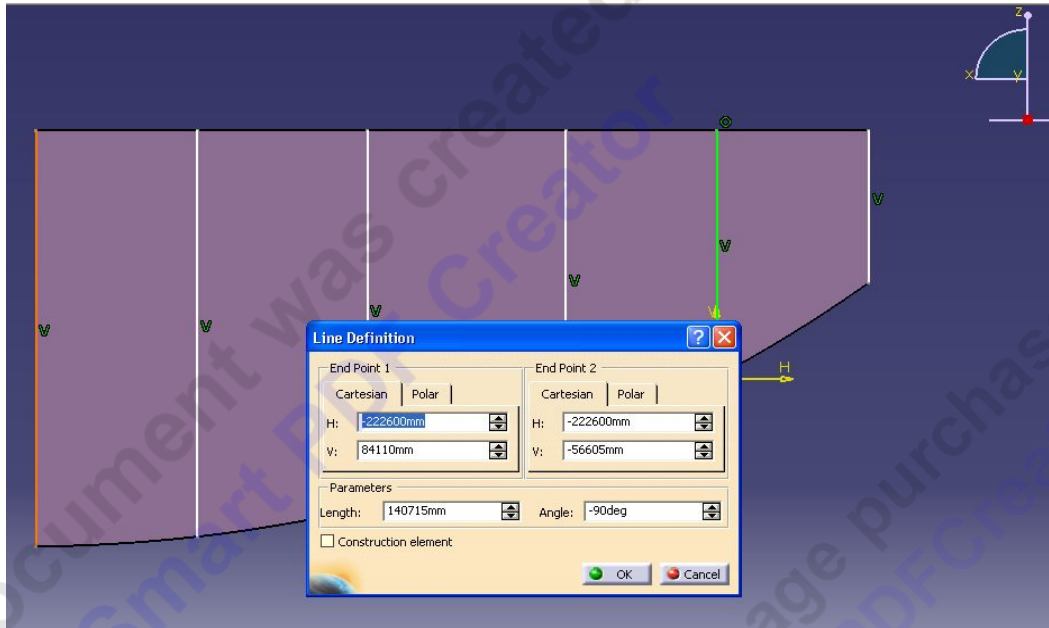
Επόμενο βήμα είναι η προσπάθεια επίλυσης της μη μόνιμης ροής γύρω από τη γέφυρα, ώστε να διαπιστωθεί εάν εμφανίζεται vortex shedding, και πόσο αυτό επηρεάζει τα πεδία ταχυτήτων και πίεσης στην επιφάνεια της γέφυρας.

This document was created using
Smart PDF Creator
To remove this message purchase the
product at www.SmartPDFCreator.com

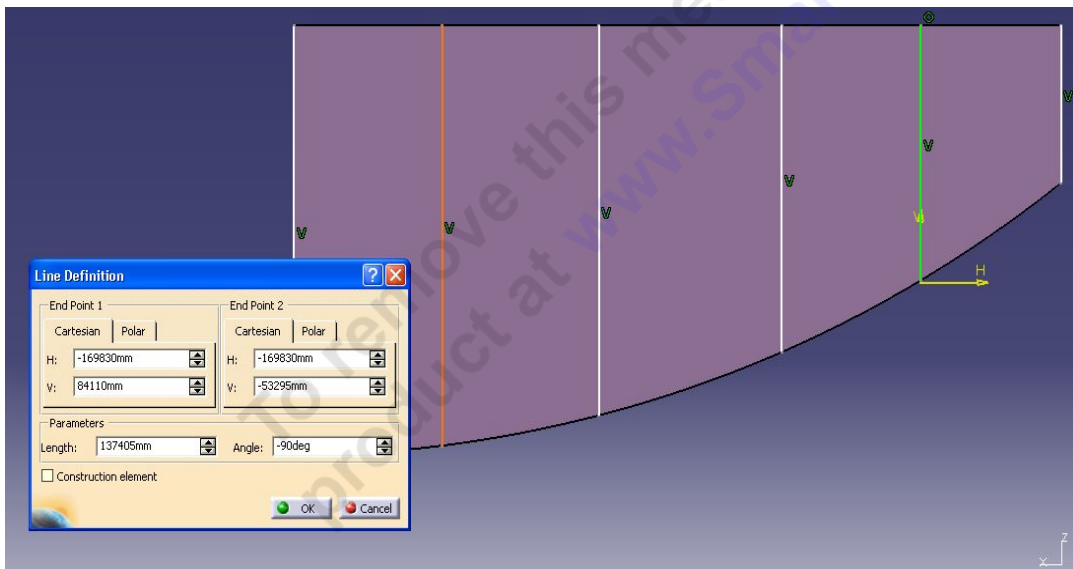
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Για τον προσδιορισμό του προφίλ της ταχύτητας του ανέμου στην είσοδο ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

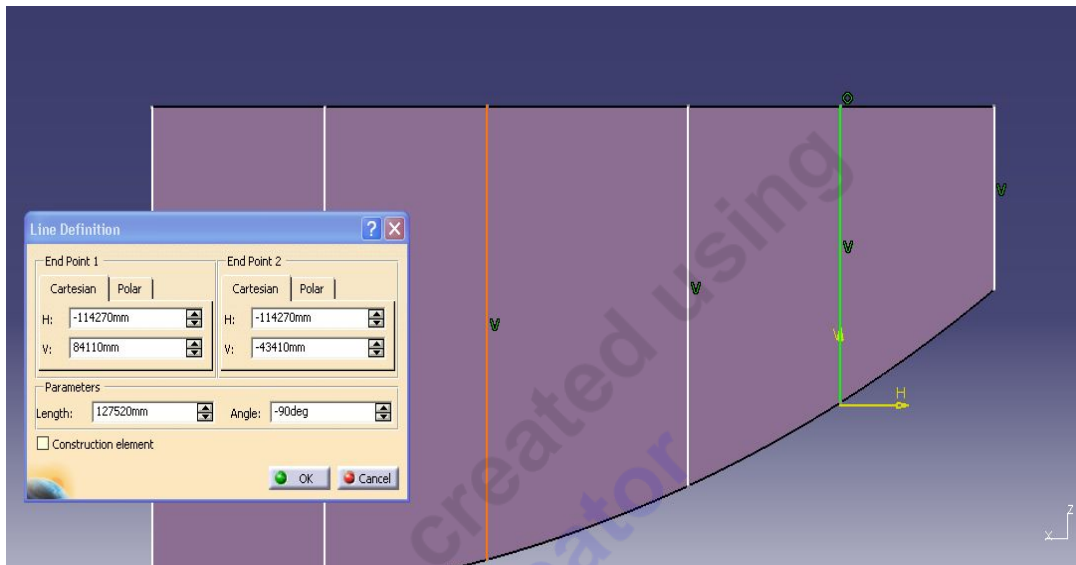
Αρχικά βρέθηκαν οι συντεταγμένες διαφόρων σημείων στη επιφάνεια της εισόδου. Στη συνέχεια με γραμμική παρεμβολή βρέθηκαν τα ενδιάμεσα αυτών των σημείων.



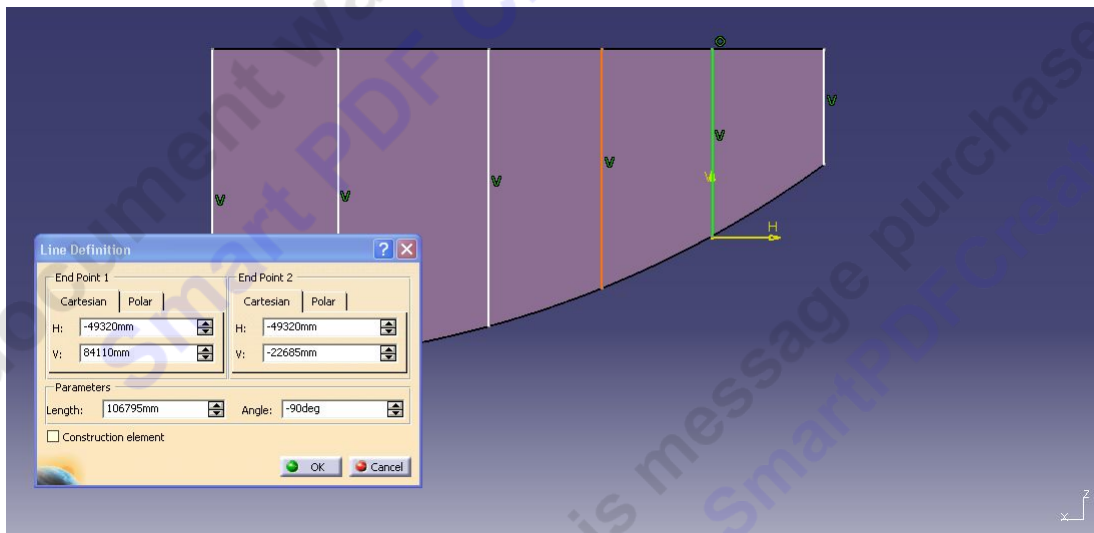
Εικόνα Π1: 1^η κάθετος.



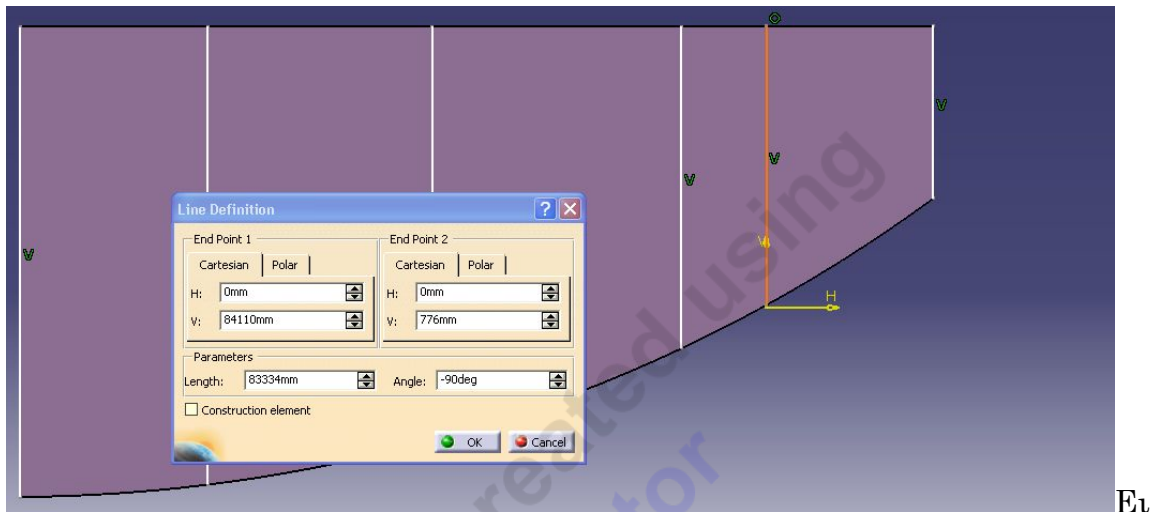
Εικόνα Π2: 2^η κάθετος.



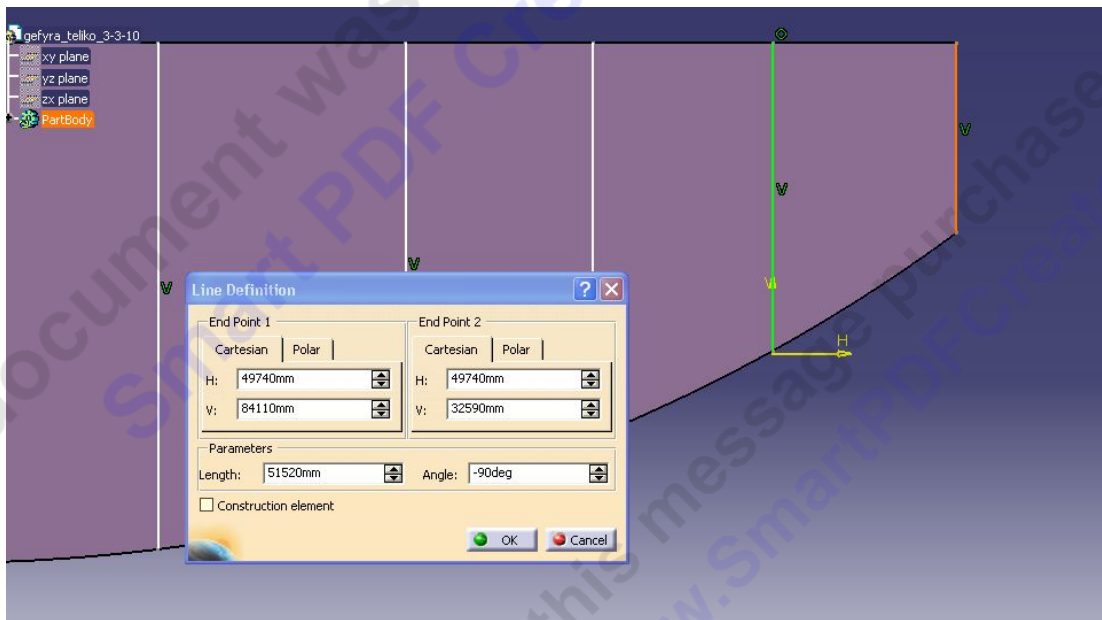
Εικόνα Π3: 3^η κάθετος.



Εικόνα Π4: 4^η κάθετος.



Εικόνα Π5: 5^η κάθετος.



Εικόνα Π6: 6^η κάθετος.

Η εξίσωση που περιγράφει την κατανομή του οριακού στρώματος που δημιουργήθηκε είναι η ακόλουθη:

$$V_{DZ} = V_o \cdot (Z/Z_o)^{0.2}$$

όπου

V_{DZ} : είναι η ταχύτητα του αέρα σε ύψος Z από την επιφάνεια
 Z_o, V_o : σταθερές που εξαρτώνται από την επιφάνεια (στη δική μας περίπτωση $Z_o=115m$ και $V_o=80m/s$).

Σύμφωνα με τα παραπάνω και με τη βοήθεια του Microsoft Office Excel προκύπτει το αρχείο του οριακού στρώματος ταχύτητας στην είσοδο του υπολογιστικού χωρίου.

X [m]	Y [m]	Z [m]	u [m s ⁻¹]	v [m s ⁻¹]	w [m s ⁻¹]
222.6	-20	-56.605	0	0	0
222.6	-20	-55.605	0	-30.970657	0
222.6	-20	-54.605	0	-35.575943	0
222.6	-20	-53.605	0	-38.581106	0
222.6	-20	-52.605	0	-40.866027	0
222.6	-20	-51.605	0	-42.731134	0
222.6	-20	-46.605	0	-49.085184	0
222.6	-20	-41.605	0	-53.231496	0
222.6	-20	-36.605	0	-56.38407	0
222.6	-20	-31.605	0	-58.957413	0
222.6	-20	-26.605	0	-61.146932	0
222.6	-20	-21.605	0	-63.061461	0
222.6	-20	-16.605	0	-64.768288	0
222.6	-20	-11.605	0	-66.312121	0
222.6	-20	-6.605	0	-67.724284	0
222.6	-20	-1.605	0	-69.027629	0
222.6	-20	3.395	0	-70.23938	0
222.6	-20	8.395	0	-71.372858	0
222.6	-20	13.395	0	-72.438596	0
222.6	-20	18.395	0	-73.445074	0
222.6	-20	23.395	0	-74.399226	0
222.6	-20	28.395	0	-75.306802	0
222.6	-20	33.395	0	-76.172625	0
222.6	-20	38.395	0	-77.000783	0
222.6	-20	43.395	0	-77.794773	0
222.6	-20	48.395	0	-78.557613	0
222.6	-20	53.395	0	-79.291924	0
222.6	-20	58.395	0	-80	0
222.6	-20	63.395	0	-80.68386	0
222.6	-20	68.395	0	-81.345292	0
222.6	-20	73.395	0	-81.985885	0
222.6	-20	78.395	0	-82.607061	0
222.6	-20	83.395	0	-83.210097	0
222.6	-20	84.11	0	-83.294917	0
169.83	-20	-53.295	0	0	0
169.83	-20	-52.295	0	-30.970657	0

169.83	-20	-51.295	0	-35.575943	0
169.83	-20	-50.295	0	-38.581106	0
169.83	-20	-49.295	0	-40.866027	0
169.83	-20	-48.295	0	-42.731134	0
169.83	-20	-43.295	0	-49.085184	0
169.83	-20	-38.295	0	-53.231496	0
169.83	-20	-33.295	0	-56.38407	0
169.83	-20	-28.295	0	-58.957413	0
169.83	-20	-23.295	0	-61.146932	0
169.83	-20	-18.295	0	-63.061461	0
169.83	-20	-13.295	0	-64.768288	0
169.83	-20	-8.295	0	-66.312121	0
169.83	-20	-3.295	0	-67.724284	0
169.83	-20	1.705	0	-69.027629	0
169.83	-20	6.705	0	-70.23938	0
169.83	-20	11.705	0	-71.372858	0
169.83	-20	16.705	0	-72.438596	0
169.83	-20	21.705	0	-73.445074	0
169.83	-20	26.705	0	-74.399226	0
169.83	-20	31.705	0	-75.306802	0
169.83	-20	36.705	0	-76.172625	0
169.83	-20	41.705	0	-77.000783	0
169.83	-20	46.705	0	-77.794773	0
169.83	-20	51.705	0	-78.557613	0
169.83	-20	56.705	0	-79.291924	0
169.83	-20	61.705	0	-80	0
169.83	-20	66.705	0	-80.68386	0
169.83	-20	71.705	0	-81.345292	0
169.83	-20	76.705	0	-81.985885	0
169.83	-20	81.705	0	-82.607061	0
169.83	-20	84.11	0	-82.899312	0
114.27	-20	-43.41	0	0	0
114.27	-20	-42.41	0	-30.970657	0
114.27	-20	-41.41	0	-35.575943	0
114.27	-20	-40.41	0	-38.581106	0
114.27	-20	-39.41	0	-40.866027	0
114.27	-20	-38.41	0	-42.731134	0
114.27	-20	-33.41	0	-49.085184	0
114.27	-20	-28.41	0	-53.231496	0
114.27	-20	-23.41	0	-56.38407	0
114.27	-20	-18.41	0	-58.957413	0

114.27	-20	-13.41	0	-61.146932	0
114.27	-20	-8.41	0	-63.061461	0
114.27	-20	-3.41	0	-64.768288	0
114.27	-20	1.59	0	-66.312121	0
114.27	-20	6.59	0	-67.724284	0
114.27	-20	11.59	0	-69.027629	0
114.27	-20	16.59	0	-70.23938	0
114.27	-20	21.59	0	-71.372858	0
114.27	-20	26.59	0	-72.438596	0
114.27	-20	31.59	0	-73.445074	0
114.27	-20	36.59	0	-74.399226	0
114.27	-20	41.59	0	-75.306802	0
114.27	-20	46.59	0	-76.172625	0
114.27	-20	51.59	0	-77.000783	0
114.27	-20	56.59	0	-77.794773	0
114.27	-20	61.59	0	-78.557613	0
114.27	-20	66.59	0	-79.291924	0
114.27	-20	71.59	0	-80	0
114.27	-20	76.59	0	-80.68386	0
114.27	-20	81.59	0	-81.345292	0
114.27	-20	84.11	0	-81.670663	0
49.32	-20	-22.685	0	0	0
49.32	-20	-21.685	0	-30.970657	0
49.32	-20	-20.685	0	-35.575943	0
49.32	-20	-19.685	0	-38.581106	0
49.32	-20	-18.685	0	-40.866027	0
49.32	-20	-17.685	0	-42.731134	0
49.32	-20	-16.685	0	-44.318053	0
49.32	-20	-11.685	0	-50.029822	0
49.32	-20	-6.685	0	-53.923046	0
49.32	-20	-1.685	0	-56.93696	0
49.32	-20	3.315	0	-59.421702	0
49.32	-20	8.315	0	-61.549249	0
49.32	-20	13.315	0	-63.417763	0
49.32	-20	18.315	0	-65.088939	0
49.32	-20	23.315	0	-66.604257	0
49.32	-20	28.315	0	-67.993039	0
49.32	-20	33.315	0	-69.276833	0
49.32	-20	38.315	0	-70.471966	0
49.32	-20	43.315	0	-71.591128	0
49.32	-20	48.315	0	-72.644391	0

49.32	-20	53.315	0	-73.639891	0
49.32	-20	58.315	0	-74.584301	0
49.32	-20	63.315	0	-75.483166	0
49.32	-20	68.315	0	-76.34115	0
49.32	-20	73.315	0	-77.162211	0
49.32	-20	78.315	0	-77.949744	0
49.32	-20	84.11	0	-78.824387	0
0	-20	0.776	0	0	0
0	-20	1.776	0	-30.970657	0
0	-20	2.776	0	-35.575943	0
0	-20	3.776	0	-38.581106	0
0	-20	4.776	0	-40.866027	0
0	-20	5.776	0	-42.731134	0
0	-20	10.776	0	-49.085184	0
0	-20	15.776	0	-53.231496	0
0	-20	20.776	0	-56.38407	0
0	-20	25.776	0	-58.957413	0
0	-20	30.776	0	-61.146932	0
0	-20	35.776	0	-63.061461	0
0	-20	40.776	0	-64.768288	0
0	-20	45.776	0	-66.312121	0
0	-20	50.776	0	-67.724284	0
0	-20	55.776	0	-69.027629	0
0	-20	60.776	0	-70.23938	0
0	-20	65.776	0	-71.372858	0
0	-20	70.776	0	-72.438596	0
0	-20	75.776	0	-73.445074	0
0	-20	80.776	0	-74.399226	0
0	-20	84.11	0	-75.009257	0
-49.74	-20	32.59	0	0	0
-49.74	-20	33.59	0	-30.970657	0
-49.74	-20	34.59	0	-35.575943	0
-49.74	-20	35.59	0	-38.581106	0
-49.74	-20	36.59	0	-40.866027	0
-49.74	-20	37.59	0	-42.731134	0
-49.74	-20	42.59	0	-49.085184	0
-49.74	-20	47.59	0	-53.231496	0
-49.74	-20	52.59	0	-56.38407	0
-49.74	-20	57.59	0	-58.957413	0
-49.74	-20	62.59	0	-61.146932	0
-49.74	-20	67.59	0	-63.061461	0

-49.74	-20	72.59	0	-64.768288	0
-49.74	-20	77.59	0	-66.312121	0
-49.74	-20	82.59	0	-67.724284	0
-49.74	-20	84.11	0	-68.13113	0

This document was created using
Smart PDF Creator

To remove this message purchase the
product at www.SmartPDFCreator.com

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Emil Simiu, Toshio Miyata, *Design of Buildings and Bridges for Wind*, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, 2006.
2. Wai Fah Chen, Lian Duan, *Bridge Engineering, Construction and Maintenance*, 2003.
3. Wai Fah Chen, Lian Duan, *Bridge Engineering Handbook*, 2000.
4. Einar N. Strommen, *Theory of Bridge Aerodynamic*, 2006.
5. John D. Holmes, *Wind Loading of Structures*, 2001.
6. Richard Barker, Jay Puckett, *Design of Highway Bridges*, 2007.
7. Toshio Miyata, "Historical view of long-span bridge aerodynamics", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91 (2003), 1393–1410.
8. Allan Larsen, Jens H. Walther, "Discrete vortex simulation of flow around five generic bridge deck sections", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 77&78 (1998), 591-602.
9. Ilyong Yoo, Einkeun Kwak, Seungsoo Lee, Beom Soo Kim and Si Hyong Park, "Computational study on aerodynamics of long-span bridges", *Journal of Mechanical Science and Technology*, 23 (2009), 802-813.
10. Alan Davenport, J. Peter, C. King, "The foundation and the future of wind engineering of long span bridges", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91 (2003), 1529–1546.
11. Peter A. Irwin, "Bluff body aerodynamics in wind engineering", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96 (2008), 701–712.
12. Yuh-Yi Lin, Chii-Ming Cheng, Jong-Chen Wu, Tsang-Lien Lan, Kuo-Ting Wu, "Effects of Deck Shape and Oncoming Turbulence on Bridge Aerodynamics", *Journal of Science and Engineering*, 8 (2005), 43-56.
13. Allan Larsen, Jens H. Walther, "A Two Dimensional Discrete Vortex Method for Bridge Aerodynamics Applications" **ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΠΛΗΡΗΣ Η ΑΝΑΦΟΡΑ.**
14. Nicholas P. Jones, Jon D. Raggett, Ender Ozkan, "Prediction of cable-supported bridge response to wind: coupled flutter assessment during retrofit", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91 (2003), 1445-1464.

Στα βιβλία πρέπει να δώσεις και τον εκδότη