

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΤΟΜΕΑΣ

Διπλωματική Εργασία

**Προσεγγιστική Εξαναγκασμένη Καμπτική
Ταλάντωση Χαλύβδινου Πύργου
Ανεμογεννήτριας Μορφής Λεπτότοιχου
Κόλουρου Κώνου υπό Προσομοιωμένες
Εδαφικές Σεισμικές Διεγέρσεις**

Φοιτήτρια : Παναγιώτα Γεωργοπούλου

Επιβλέπων : Δ. Σοφιανόπουλος

Επίκουρος Καθηγητής

ΠΤ – ΠΜ
2012
ΓΕΩ

Βόλος, Σεπτέμβριος 2012



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ & ΚΕΝΤΡΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 11090/1
Ημερ. Εισ.: 31-01-2013
Δωρεά: Συγγραφέα
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΠΜ
2012
ΓΕΩ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

σελίδα

Εισαγωγή –Σκοπός και Αντικείμενο i

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΜΟΝΤΕΡΝΑ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΓΙΑ ΤΗΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΣΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ 1

1.1. Γενικές Επισημάνσεις 1

1.2. Γραμμικό Υπολογιστικό Μοντέλο 2

1.3. Μοντέρνο Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων 4

1.4 Στρατηγικές προσομοίωσης – μόρφωσηςμοντέλου 5

1.4.1. Στρατηγική 1^η: Γραμμικό Μοντέλο 5

1.4.2. Στρατηγική 2^η: Απλό FEMοντέλο 7

1.4.3. Στρατηγική 3^η: Λεπτομερές FEMοντέλο 9

1.5. Δυναμική απόκριση υπό σεισμικά φορτία 12

1.6 Συμπερασματικά σχόλια 13

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ – ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

ΚΑΙ ΤΗΣ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ 15

2.1. Γενικές Πληροφορίες 15

2.2. Γεωμετρικά και άλλα χαρακτηριστικά NDK 500/37 15

2.3. Απλουστευμένα προσομοιώματα της κατασκευής 23

2.3.1. Προσομοίωμα ΑΠ1 23

2.3.2. Προσομοίωμα ΑΠ2 26

2.4. Προσομοιώματα εδαφικών κινήσεων 27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ 32

3.1. Ελεύθερη καμπτική ταλάντωση του ΑΠ2 32

3.2. Εξαναγκασμένη καμπτική ταλάντωση του ΑΠ2 33

3.3 Ελεύθερη καμπτική ταλάντωση του ΑΠ1 35

3.4 Αριθμητικά αποτελέσματα του ΑΠ2 38

3.4.1. Ελεύθερη καμπτική ταλάντωση 38

3.4.2 Εξαναγκασμένη καμπτική ταλάντωση 39

3.5 Αριθμητικά Αποτελέσματα Εξαναγκασμένης
Ταλάντωσης του ΑΠ1 58

3.6 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων – Σχολιασμός και
Συμπεράσματα 62

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 64

ΕΙΣΑΓΩΓΗ : ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ
ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται την σεισμική δυναμική απόκριση δύο απλουστευμένων προσομοιωμάτων μιας υφιστάμενης μεταλλικής κατασκευής πύργου ανεμογεννήτριας, του τύπου NDK 500/37, που έχει εγκατασταθεί σε πολλές περιοχές της γης και ιδιαίτερα στη βόρεια Ευρώπη.

Το 1^ο προσομοίωμα (ΑΠ1) είναι μια ομοιόμορφης κυλινδρικής διατομής (με σταθερό πάχος καθ' ύψος) κελυφωτή δοκός σε πρόβολο, η οποία εισάγεται στο λογισμικό SAP 2000. Εκεί πραγματοποιείται τόσο ιδιομορφική ανάλυση, όσο και σεισμική ανάλυση, που βασίζεται σε κατάλληλο φάσμα απόκρισης. Το ΑΠ1 αποτελεί ουσιαστικά μια ισοδύναμη μορφή του μοντέλου κόλουρου κώνου της πραγματικής κατασκευής, με μάζα στην κορυφή κατάλληλα κατανεμημένη στους κόμβους και περιορισμούς σε εκείνους τους κόμβους καθ' ύψος που αντιστοιχούν σε δακτυλίους σύνδεσης.

Το 2^ο προσομοίωμα είναι ακόμα απλούστερο, και πρόκειται για πρόβολο ομοιόμορφης διατομής και ροπής αδράνειας με συγκεντρωμένη μάζα και περιστροφική αδράνεια στην κορυφή. Μετά την επίλυση του προβλήματος της ελεύθερης καμπτικής ταλάντωσης του και τον υπολογισμό των ιδιοπεριόδων του, υπολογίζεται αναλυτικά η σεισμική απόκριση του χωρίς απόσβεση για σεισμικές διεγέρσεις προσομοιωμένων κοντινών και μακρινών σεισμών.

Για αμφότερα τα μοντέλα υπολογίζονται πέραν των ιδιομορφικών χαρακτηριστικών, το βέλος κορυφής και οι τέμνουσες αλλά και ροπές βάσης. Τα μεγέθη αυτά συγκρίνονται μεταξύ τους (αλλά και με μετρημένα χαρακτηριστικά της πραγματικής κατασκευής) και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για τον προκαταρκτικό δομοστατικό σχεδιασμό.

Η Εργασία απαρτίζεται από τρία (3) Κεφάλαια και Βιβλιογραφία, όπως αυτά περιγράφονται αναλυτικά στη συνέχεια.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή Σοφιανόπουλο Δημήτριο, ο οποίος ως επιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας ήταν παρών και πρόθυμος να βοηθήσει σε κάθε δυσκολία την οποία αντιμετώπισα. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καγιά Ματία-Ευστάθιο, ο οποίος με βοήθησε σημαντικά στις δυσκολίες που αντιμετώπισα με το άγνωστο μέχρι τότε για μένα πρόγραμμα Mathematica το οποίο μου ήταν απαραίτητο για την εκπόνηση της παρούσης διπλωματικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΜΟΝΤΕΡΝΑ ΠΡΑΚΤΙΚΗ ΓΙΑ ΤΗΝ

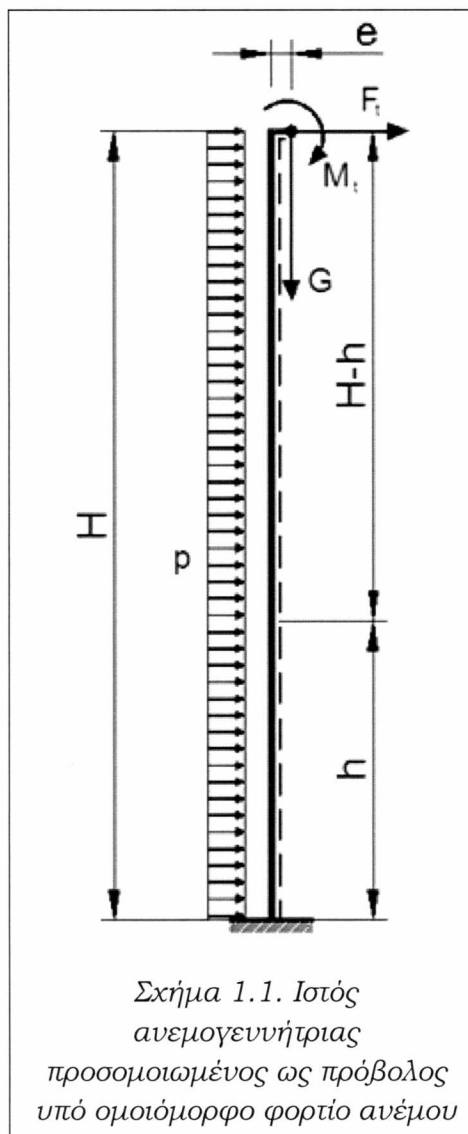
ΑΝΑΛΥΣΗ ΙΣΤΩΝ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΩΝ

1.1. Γενικές Επισημάνσεις

Η τρέχουσα και παράλληλα κατά κόρον εφαρμοζόμενη πρακτική, για την ανάλυση μεταλλικών ιστών ανεμογεννητριών υπό τα προβλεπόμενα από τους Κανονισμούς φορτία, προκρίνει τη χρήση της μεθόδου των Πεπερασμένων Στοιχείων. Ειδικότερα, η εν λόγω μέθοδος ανάλυσης (με χρήση κατάλληλου λογισμικού - Finite Element Analysis), μπορεί να χρησιμοποιηθεί για

- Την ανάλυση όλου του ιστού
- Την λεπτομερή ανάλυση των ανοιγμάτων (κατά τεκμήριο της εισόδου προσωπικού στη βάση του ιστού) και
- Την λεπτομερή ανάλυση των συνδέσεων

Από πλευράς στατικής λειτουργίας και προσομοίωσης, ο ιστός μιας ανεμογεννήτριας είναι ένας απλός πρόβολος. Υποθέτοντας ομοιόμορφη πίεση ανέμου καθ' ύψος, μπορεί κανείς άμεσα να υπολογίσει τις τέμνουσες δυνάμεις και τις ροπές σε κάθε σημείο του φορέα, ανεξάρτητα από τη γεωμετρία του (ως Σχήμα 1). Ακόμα και αν η πίεση του ανέμου θεωρηθεί συνάρτηση του ύψους της κατασκευής, οι δυνάμεις και οι ροπές στη βάση (θεμελίωση) μπορούν να ευρεθούν μέσω απλών ολοκληρώσεων της συνάρτησης αυτής.



Επίσης, οι τάσεις στους μεσημβρινούς (meridional stresses), που απαιτούνται για την ανάλυση φαινομένων τοπικού

λυγισμού μπορεί επίσης να υπολογιστούν εύκολα με το χέρι. Πλην όμως, οι μετατοπίσεις αλλά και οι ιδιοσυναρτήσεις (τόσο ταλάντωσης όσο και λυγισμού) δεν είναι εφικτό να ευρεθούν με απλούς υπολογισμούς, και απαιτείται προς τούτο η χρήση – υιοθέτηση ενός υπολογιστικού μοντέλου (computational model).

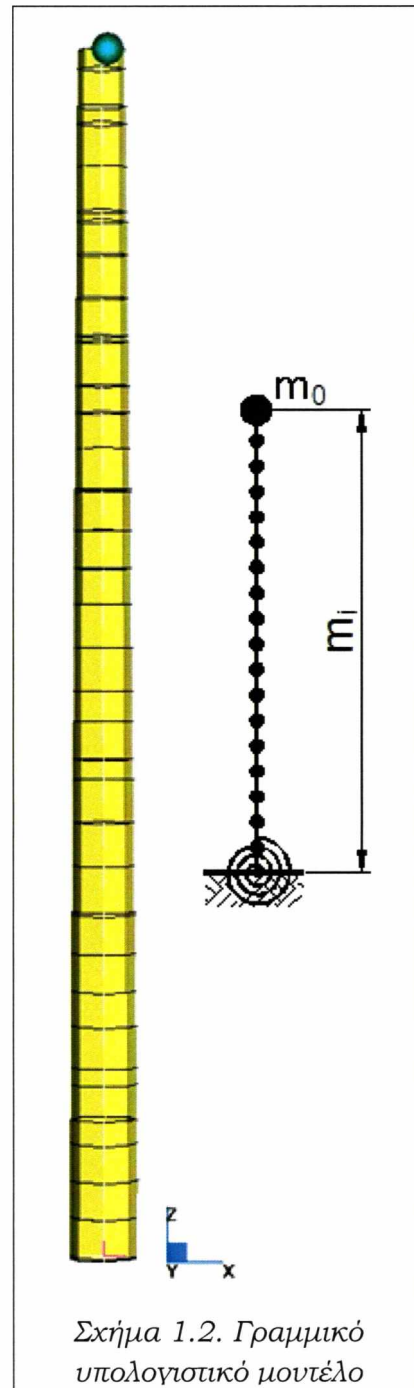
1.2. Γραμμικό Υπολογιστικό

Μοντέλο

Σύμφωνα με το Σχήμα 1.2, ένα τέτοιο μοντέλο προσομοιάζει όλα τα επί μέρους μέλη – στοιχεία του ιστού μέσω γραμμικών στοιχείων δοκού, ενώ ο κινητήρας περιστροφής – γεννήτρια και ο έλικας μοντελοποιείται σαν μια μάζα στη κορυφή του ιστού, τοποθετημένη με κάποια εκκεντρότητα. Η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής μπορεί να προσομοιωθεί με τη χρήση ενός (περι)στροφικού ελατηρίου κατάλληλης δυσκαμψίας στη βάση του ιστού. Η χρήση ενός τέτοιου γραμμικού μοντέλου μπορεί να οδηγήσει σε ακριβή αποτελέσματα τόσο αναφορικά με τις μετατοπίσεις όσο και με τις ιδιοτιμές. Προκύπτει συνεπώς το ερώτημα «ποιος ο λόγος χρήσης μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων;».

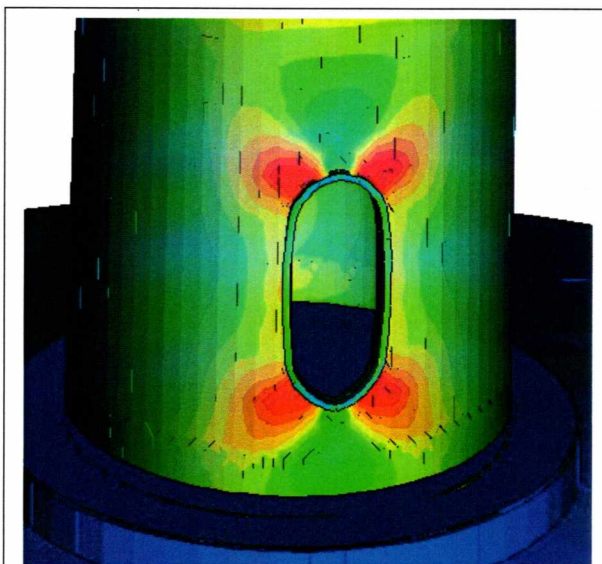
Η απάντηση στο ερώτημα αυτό επιμερίζεται ως εξής:

- ♦ Η διατομή του ιστού παραμορφώνεται λόγω ανεμοφόρτισης
- ♦ Υπάρχει αναμφισβήτητη συγκέντρωση τάσεων στη θέση της εισόδου, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3.

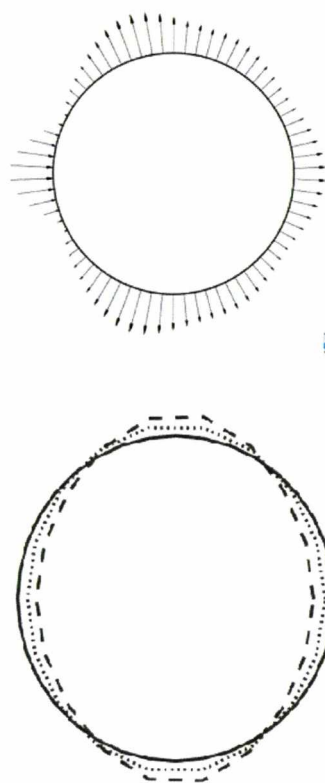


- Απαιτείται υπολογισμός των δυνάμεων αγκύρωσης αλλά και οι τάσεις στο σκυρόδεμα της θεμελίωσης.
- Η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής επηρεάζει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του ιστού καθώς και τις μετατοπίσεις του λόγω φορτίων ανέμου.

Αναλυτικότερα, η κατανομή των πιέσεων του ανέμου στην περίμετρο της διατομής του ιστού έχει σαν αποτέλεσμα η κυκλική διατομή να παραμορφώνεται και λαμβάνει ελλειπτική μορφή (ovalling), ως Σχήμα 1.4 (ωραίο Σχήμα έχει και Ευρωκώδικας). Τούτο όμως δεν ισχύει για τις θέσεις εκείνες όπου η διατομή του ιστού είναι πολύ πιο δύσκαμπτη, όπως στα επίπεδα των συνδετικών δακτυλίων και στη στήριξη, και παραμένει εκ κατασκευής κυκλική (Σχήμα 1.5). Πέραν δε τούτων, ο έλεγχος σε λυγισμό σύμφωνα

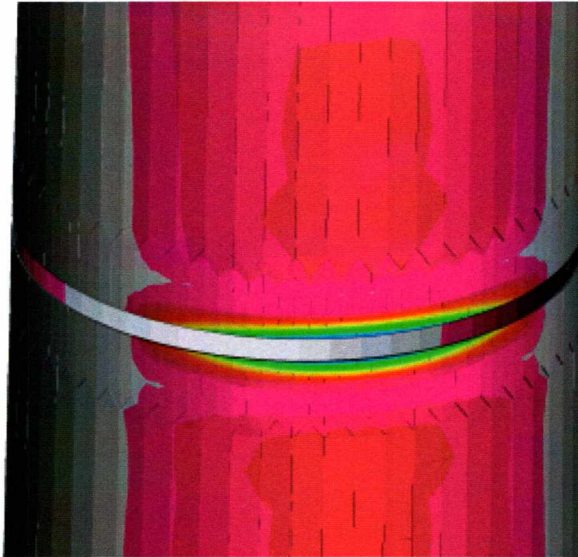


Σχήμα 1.3. Συγκέντρωση τάσεων στη θέση εισόδου του πύργου



Σχήμα 1.4. Ovalling λόγω πιέσεων ανέμου

με το Μέρος 1-6 του Ευρωκώδικα 3 (Αντοχή και ευστάθεια κελυφωτών κατασκευών) περιλαμβάνει συνδυασμούς τάσεων όχι μόνο κατά τους μεσημβρινούς (δλδ. κατά μήκος του ιστού) αλλά τόσο στην περίμετρο όσο και διατμητικών.



Σχήμα 1.5. Επίπεδο σύνδεσης με δακτύλιο με τη διατομή να παραμένει κυκλική

1.3. Μοντέρνο Λογισμικό Πεπερασμένων Στοιχείων

Πριν από μερικά χρόνια, η ανάπτυξη ενός σύνθετου – πολύπλοκου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων ήταν πολύ δύσκολη καθόσον:

- ◆ Υπήρχε η ανάγκη μεγάλων (σε όγκο και υπολογιστική ισχύ) ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς και ακριβούς λογισμικού για τη πραγματοποίηση μη-γραμμικής ανάλυσης.

- ◆ Απαιτείτο πολύ μεγάλη προσπάθεια και εξειδικευμένη γνώση για το σχεδιασμό και υλοποίηση της γεωμετρίας του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων και την εισαγωγή των φορτίσεων.

- ◆ Ήταν πάρα πολύ κοπιώδης η ερμηνεία των αποτελεσμάτων μέσω υπολογισμών με το χέρι.

Πλην όμως, το υφιστάμενο μοντέρνο λογισμικό Πεπερασμένων στοιχείων, που μπορεί άνετα να τρέξει (ακόμα και σύνθετες μη γραμμικές αναλύσεις) σε έναν προσωπικό Η/Υ προσφέρει:

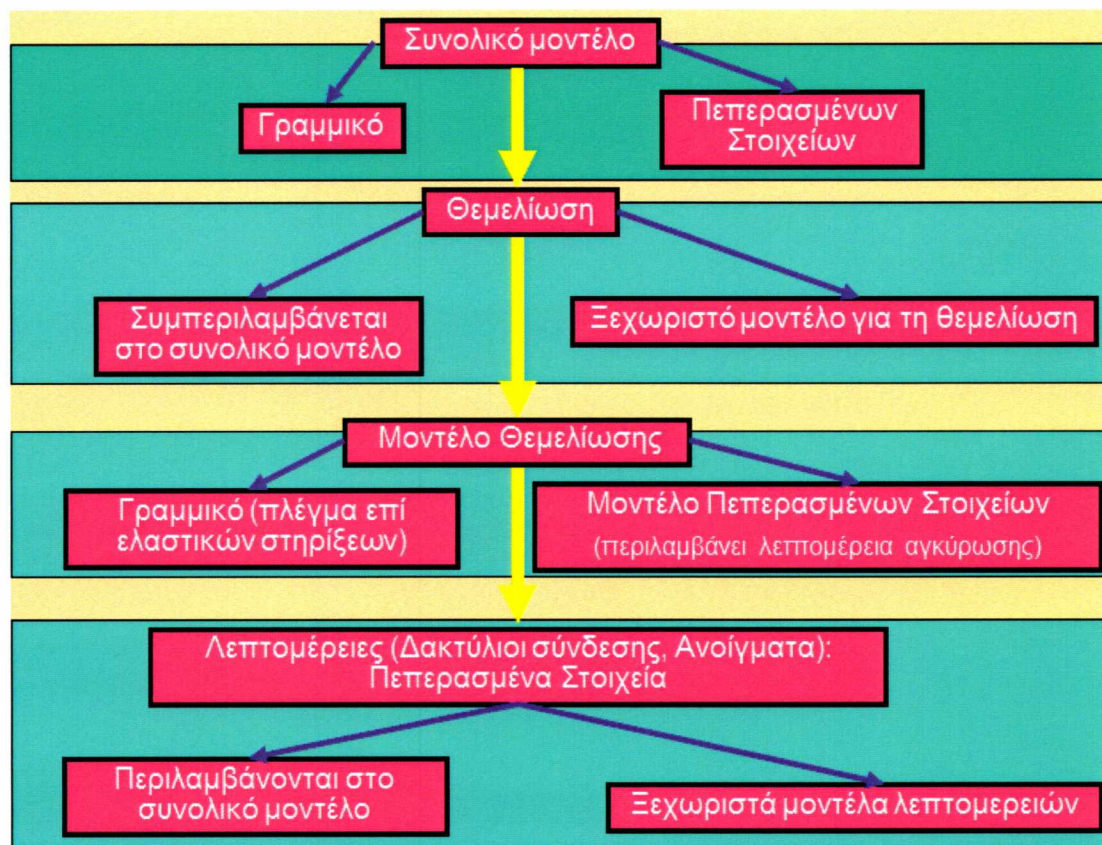
- ◆ Δυνατότητα απ' ευθείας εισαγωγής της γεωμετρίας από σχεδιαστικό λογισμικό (CAD)

- ◆ Ενσωματωμένες εύχρηστες σχεδιαστικές δυνατότητες – εντολές για περαιτέρω επεξεργασία του εισαγμένου μοντέλου

- ◆ Δυνατότητες ανάλυσης με γεωμετρική μη – γραμμικότητα και με μη- γραμμικότητα υλικού
- ◆ Δυνατότητες μονομερούς επαφής με τριβή
- ◆ Αυτοματοποιημένες διαδικασίες ερμηνείας και αξιολόγησης αποτελεσμάτων
- ◆ Άμεση σύνδεση με λογισμικού σχεδιασμού (interfaces)

1.4. Στρατηγικές προσομοίωσης – μόρφωσης μοντέλου

Αυτές μπορούν να περιγραφούν από το διάγραμμα ροής του Σχήματος 1.6. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τρεις διαφορετικές στρατηγικές.

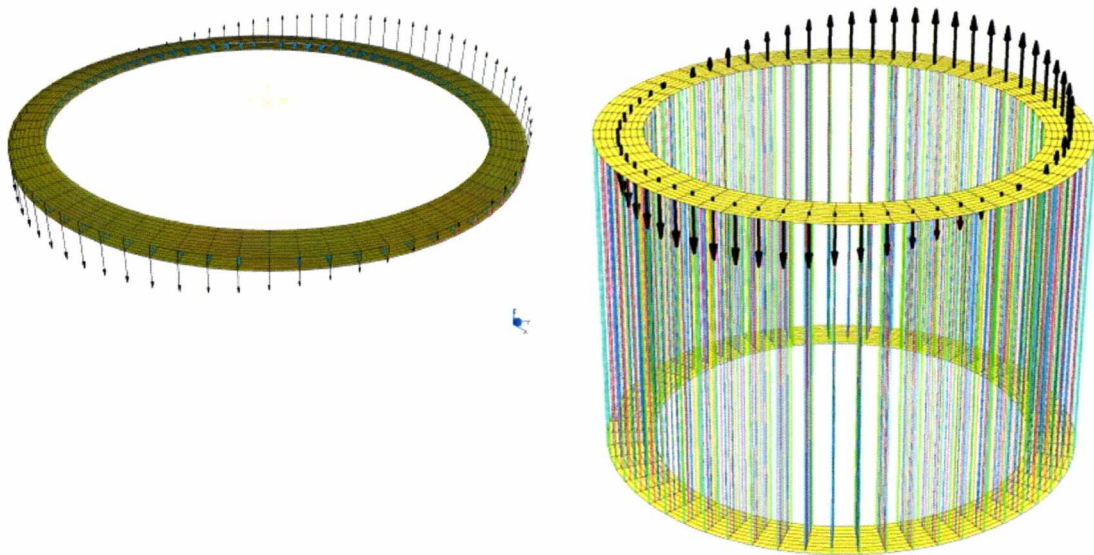


Σχήμα 1.6. Διάγραμμα ροής στρατηγικών προσομοίωσης

1.4.1. Στρατηγική 1η : Γραμμικό Μοντέλο

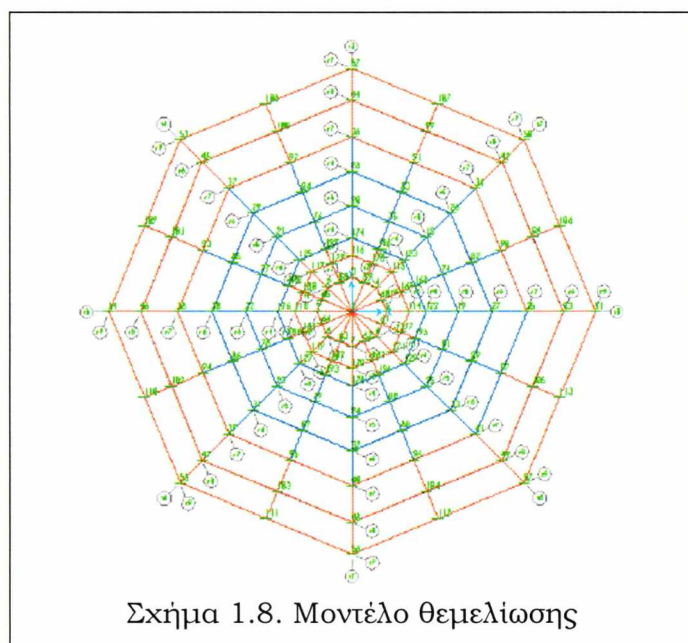
Σε αυτή γίνεται χρήση γραμμικού μοντέλου για τον πύργο και αναλυτικών μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων για τις θύρες, τις θέσεις των συνδετικών δακτυλίων – φλαντζών και το σύστημα

αγκύρωσης – θεμελίωσης. Αναλυτικότερα, και σύμφωνα με το Σχήμα 1.7, οι δακτύλιοι σύνδεσης προσομοιάζονται με χρήση στοιχείων πλάκας (plate elements) και οι κοχλίες τους τοποθετούνται σαν γραμμικά στοιχεία δρώντα μόνο σε εφελκυσμό. Όλοι οι υπόλοιποι κόμβοι συνδέονται μέσω στοιχείων μονόπλευρης επαφής (unilateral contact elements), ενώ οι δυνάμεις και οι ροπές δρουν καταναμεμημένες στην περίμετρο.



Σχήμα 1.7. Προσομοίωση δακτυλίων σύνδεσης και κοχλιών

Η θεμελίωση προσομοιάζεται με γραμμικά στοιχεία (κάναβο δοκών επί ελαστικών στηρίξεων μονόπλευρης επαφής) και έτσι επιτυγχάνεται η υλοποίηση μοντέλου για την αλληλεπίδραση του εδάφους με την κατασκευή. (Σχήμα 1.8).



Σχήμα 1.8. Μοντέλο θεμελίωσης

Παρά ταύτα δεν παρέχονται πληροφορίες για τις τάσεις στο σύστημα αγκύρωσης μέσω της παραπάνω προσομοίωσης.

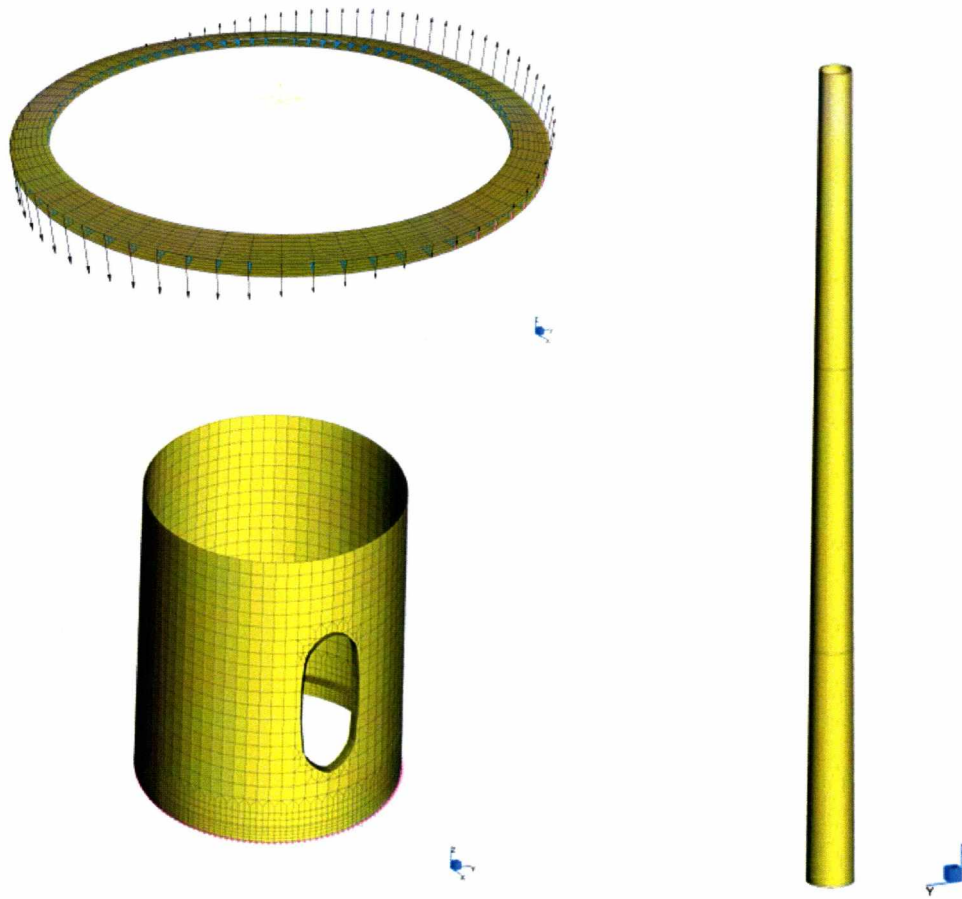
Η στρατηγική αυτή έχει ως πλεονεκτήματα την εύκολη μόρφωση τόσο του γενικού μοντέλου όσο και αυτών των επί μέρους τμημάτων και απαιτεί μικρή υπολογιστική ισχύ, οδηγώντας σε γρήγορους υπολογισμούς ακόμα και σε απλά PC (άμεσα λύνεται το συνολικό μοντέλο και σε περίπου 10 – 15 λεπτά βρίσκονται και οι μη γραμμικές μορφές των δακτυλίων). Διαθέτει όμως και αρκετά μειονεκτήματα που συνοψίζονται στα ακόλουθα:

- ◆ Δεν μπορούν να εισαχθούν διαφοροποιήσεις των φορτίων του πύργου περιμετρικά
- ◆ Οι συνοριακές συνθήκες για τα επί μέρους μοντέλα πρέπει να εκτιμηθούν προσεγγιστικά
- ◆ Υπολογίζονται τάσεις μόνο κατά μήκος του πύργου (μεσημβρινές – meridional)
- ◆ Αμελούνται διατμητικές τάσεις και τάσεις στην περίμετρο (circumferencial)
- ◆ Για τον έλεγχο έναντι λυγισμού σύμφωνα με το Μέρος 1-6 του Εθρωκώδικα 3 απαιτείται η γνώση της πλήρους κατανομής – κατάστασης τάσεων (μεσημβρινών, περιμετρικών, διαμητικών)
- ◆ Μόνο αξονικές και διατμητικές δυνάμεις καθώς και ροπές δύνανται να εφαρμοστούν στα επί μέρους μοντέλα. Η εντός επιπέδου παραμόρφωση του πύργου λόγω της κατανομής των φορτίων ανέμου καθ' ύψος αμελείται και
- ◆ Στο συνολικό μοντέλο η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής είτε αμελείται πλήρως (πάκτωση στη θεμελίωση) είτε χρειάζεται να εκτιμηθεί εισάγοντας στη στήριξη ένα στροφικό ελατήριο.

1.4.2. Στρατηγική 2η : Απλό FE Μοντέλο

Στη περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται απλό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τον πύργο και αναλυτικά τέτοια

μοντέλα για τις θύρες και τις φλάντζες (δακτυλίους) σύνδεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9, που ακολουθεί.



Σχήμα 1.9 Απλό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Και η στρατηγική αυτή διαθέτει πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα, που έχουν ως εξής:

Πλεονεκτήματα

- ◆ Γρήγοροι υπολογισμοί σε PC (περίπου 1-2 λεπτά για το γενικό μοντέλο και 10-15 λεπτά για τις μη γραμμικές αναλύσεις των αναλυτικών επί μέρους μοντέλων).

- ◆ Εκτίμηση όλων των ειδών των τάσεων σε οποιοδήποτε σημείο της κατασκευής.

Μειονεκτήματα

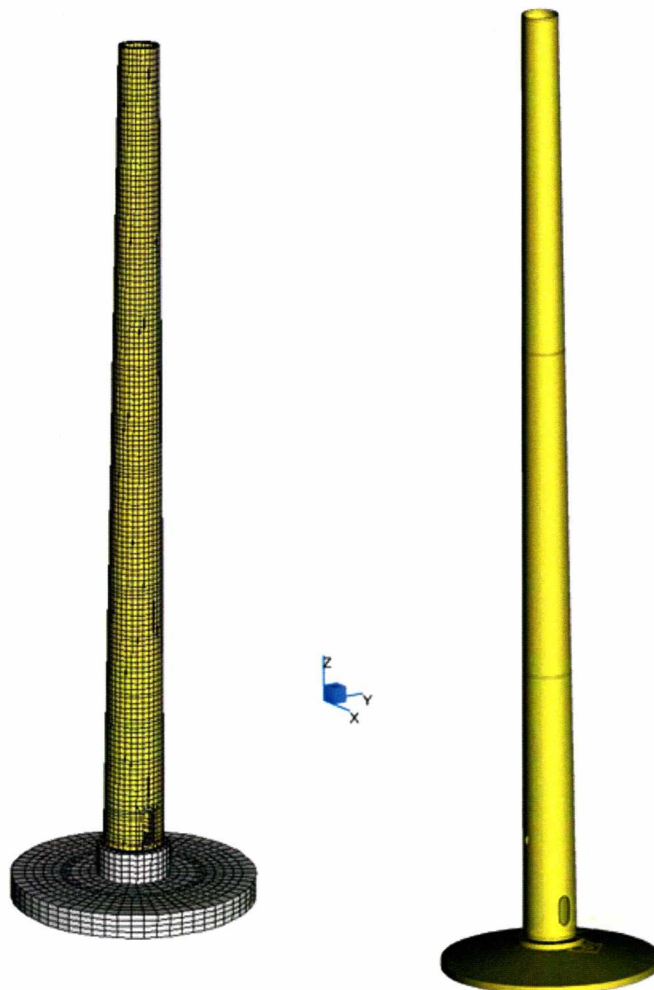
- ◆ Ανάγκη εκτίμησης των συνοριακών συνθηκών για τα επί μέρους μοντέλα.

- ♦ Μεγάλη προσπάθεια (με το χέρι) για τη μεταφορά της κατανομής των τάσεων από μια διατομή του πύργου στην αντίστοιχη του επί μέρους τμήματος.

- ♦ Η αλληλεπίδραση εδάφους – κατασκευής είτε αμελείται είτε εκτιμάται μέσω εισαγωγής ελατηρίων στη στήριξη.

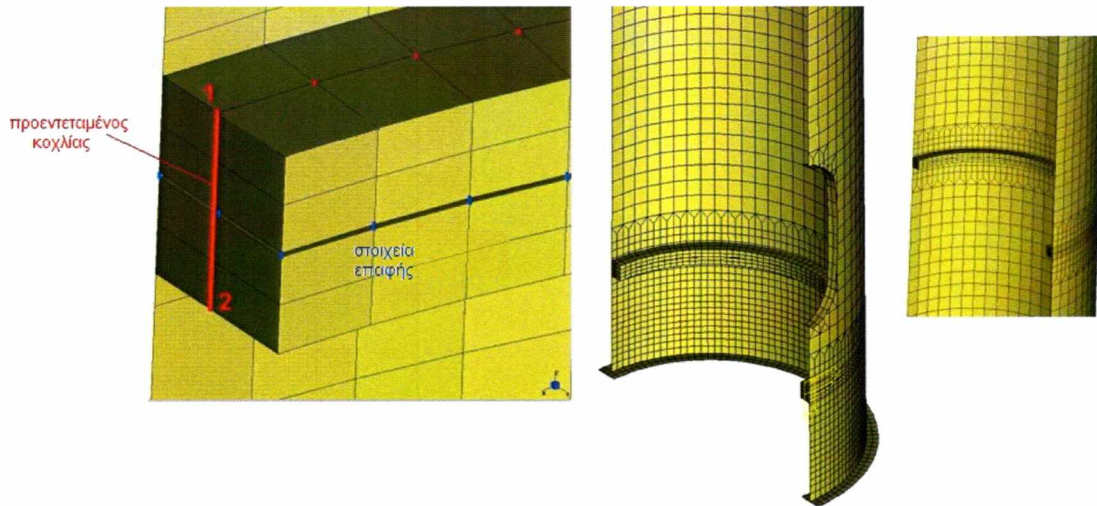
1.4.3. Στρατηγική 3η : Λεπτομερές FE Μοντέλο

Εισάγεται και αναλύεται ένα πλήρες και λεπτομερές προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων για όλη την κατασκευή (ως Σχήμα 1.10). Πιο συγκεκριμένα, για τον πύργο χρησιμοποιούνται στοιχεία κελύφους (shell elements), ενώ οι φλάντζες και η θεμελίωση προσομοιάζονται μέσω εξαεδρικών στερεών στοιχείων (brick elements). Επίσης προβλέπεται μονομερούς μορφής επαφή (unilateral contact) με το έδαφος.

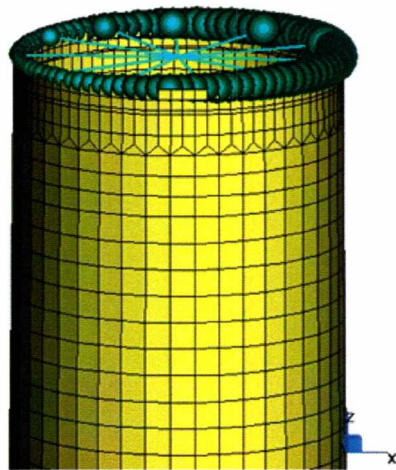


Σχήμα 1.10. Λεπτομερές μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων

Ειδικότερα, σε ότι αφορά λεπτομέρειες προσομοίωσης στις θέσεις των φλάντζων – δακτυλίων σύνδεσης, αυτές δίδονται στο Σχήμα 1.11, ενώ στη κορυφή του πύργου μοντελοποιείται τόσο η εκκεντρότητα της γεννήτριας όσο και η μη-παραμορφωσιμότητα της φλάντζας κορυφής εντός επιπέδου μέσω δύσκαμπτων συνδέσμων (rigid links), σύμφωνα με το Σχήμα 1.12.



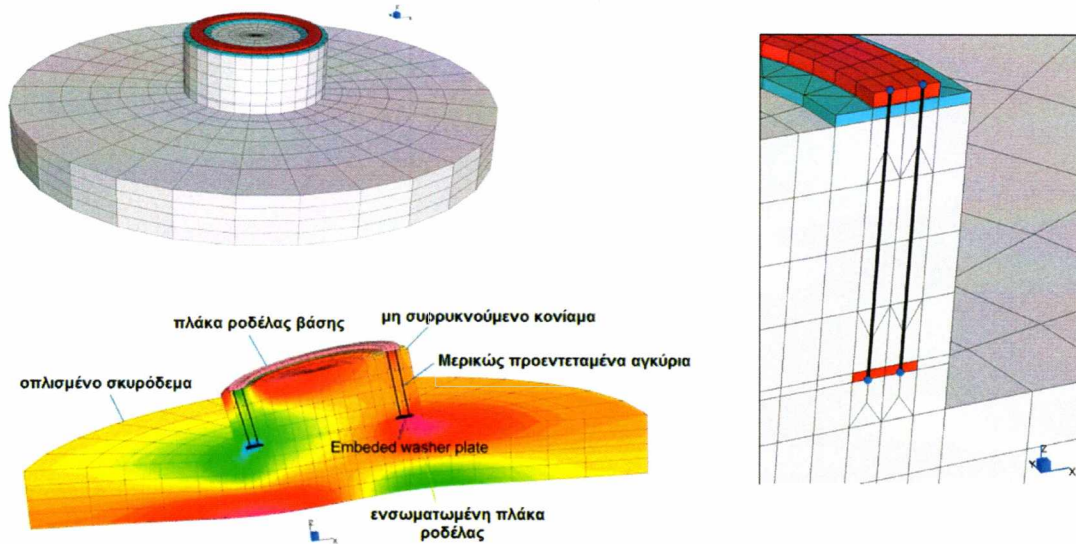
Σχήμα 1.11. Προσομοίωμα συνδετικού δακτυλίου



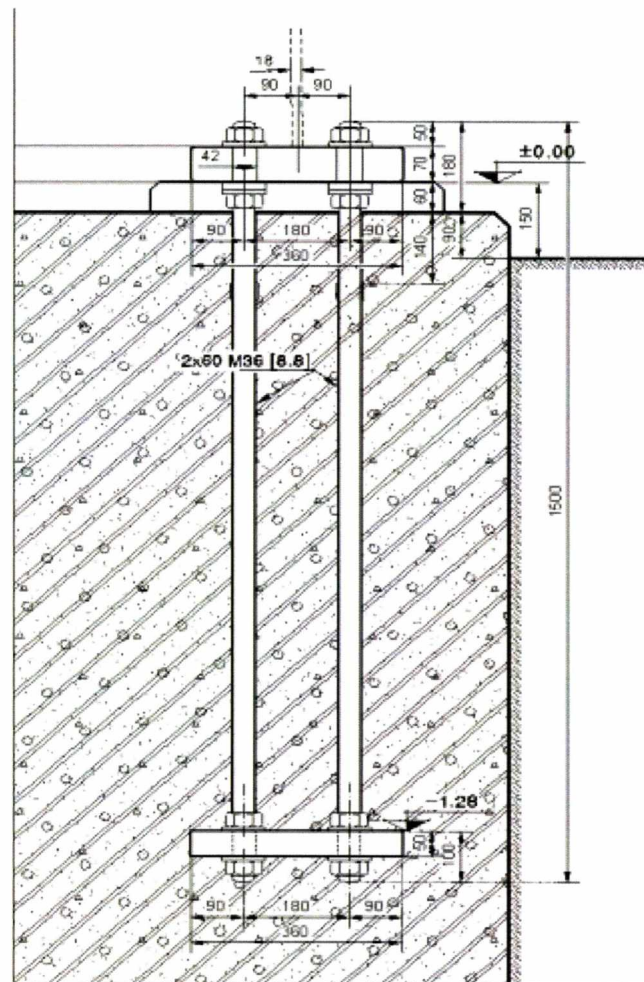
Σχήμα 1.12. Προσομοίωμα κορυφής πύργου

Αντίστοιχα, το εξευγενισμένο προσομοίωμα της θεμελίωσης περιλαμβάνει στοιχεία ορθογώνιου παραλληλεπιπέδου (μια διαφορετική μετάφραση του όρου brick elements) για το σκυρόδεμα και το μη-συρρικνούμενο κονίαμα, στοιχεία πλάκας για τις ροδέλες, στοιχεία τύπου καλωδίου ενεργά μόνο σε εφελκυσμό για τα αγκύρια και μονομερή επαφή με το έδαφος. Χαρακτηριστικά τέτοια μοντέλα

παρατίθενται στο Σχήμα 1.13, ενώ ένα παράδειγμα τέτοιας αγκύρωσης στην πράξη φαίνεται στο Σχήμα 1.14.



Σχήμα 1.13. Προσομοίωση θεμελίωσης και αγκυρίων



Σχήμα 1.14. Παράδειγμα αγκύρωσης στη θεμελίωση

Με βάση την τρέχουσα προσέγγιση υπολογίζονται πλήρως όλων των ειδών οι τάσεις σε κάθε σημείο, πραγματοποιείται η βέλτιστη προσέγγιση με την πραγματική κατασκευή, δεν απαιτείται μεταφορά δυνάμεων από ένα μοντέλο σε άλλο (γίνεται αυτόματα) και δεν χρειάζεται ούτε εκτίμηση συνοριακών συνθηκών σε κανένα μερικό (τμηματικό) μοντέλο). Όμως, η μόρφωση και ανάπτυξη του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων είναι ιδιαίτερα κοπιώδης, αλλαγές στο μοντέλο είναι πολύ δύσκολες και οι μη γραμμικές αναλύσεις απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό χρόνο (4 – 5 ώρες σε μοντέρνο προσωπικό υπολογιστή).

1.5. Δυναμική απόκριση υπό σεισμικά φορτία

Σεισμός καλείται η βίαιη κίνηση του εδάφους, η οποία προκαλείται από τη διατάραξη της ισορροπίας των γήινων πετρωμάτων. Πρόκειται για καθαρά δυναμικό φαινόμενο και εντελώς απρόβλεπτο, τόσο ως προς το χρόνο εμφάνισης στου όσο και ως προς την ένταση. Δυνατή είναι μόνο η πιθανολόγηση του (με ιδιαίτερα μεγάλο εύρος σφάλματος) από στατιστικά στοιχεία.

Ο τρόπος μετάδοσης και η διαδρομή των σεισμικών κυμάτων (δηλαδή των κυμάτων που μεταδίδουν τον σεισμικό κραδασμό και θέτουν σε κίνηση – ταλάντωση τα εδαφικά μόρια) εξαρτάται κυρίως από δύο παραμέτρους. Την απόσταση και τον τρόπο ανάκλασης – διάθλασης των κυμάτων μέσα από τα διάφορα εδαφικά στρώματα του γήινου φλοιού, που συναντούν κατά τη διαδρομή τους. Προφανώς, η τελική διέγερση (με την έννοια της μορφής του κύματος αλλά και του κραδασμού) σε κάποιο σημείο στην επιφάνεια του εδάφους επηρεάζεται άμεσα από την ανομοιογένεια των εδαφών.

Ο τελικός σεισμικός κραδασμός, που υφίσταται μια κατασκευή είναι μια πολύπλοκη καμπύλη – συνάρτηση της μετακίνησης, της ταχύτητας ή της επιτάχυνσης των εδαφικών μορίων ως προς το χρόνο. Για ένα δεδομένο σεισμό μπορεί επίσης να παραχθεί (από τα μετρούμενα χαρακτηριστικά του) το καλούμενο **φάσμα απόκρισης**, που είναι - απλουστευτικά οριζόμενο - η περιβάλλουσα της

συμπεριφοράς μονοβάθμιων ταλαντωτών ως προς την ιδιοπερίοδο τους και για δεδομένη απόσβεση. Αν δε με τον όρο «**συμπεριφορά**» θεωρήσουμε τα μέγιστα εύρη ταλαντώσεων, θα έχουμε το *φάσμα σχετικών μετακινήσεων*, και αντίστοιχα το *φάσμα ταχυτήτων* και το *φάσμα επιταχύνσεων*.

Σύμφωνα με τους μοντέρνους αντισεισμικούς κώδικες (όπως π.χ. ο Ευρωκώδικας 8 – Μέρος 1) η σεισμική κίνηση σε ένα δεδομένο σημείο στην επιφάνεια του εδάφους αναπαρίσταται μέσω ενός ελαστικού εδαφικού φάσματος απόκρισης επιταχύνσεων (elastic ground acceleration response spectrum), που καλείται «ελαστικό φάσμα απόκρισης». Εναλλακτικά, η σεισμική δράση μπορεί να αναπαρασταθεί είτε μέσω χρόνο – ιστοριών (time history) επιτάχυνσης είτε μέσω συναρτήσεων χρόνου – ταχύτητας ή χρόνου – μετατόπισης. Αυτό γίνεται να επιτευχθεί μέσω τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, που παράγονται σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα απόκρισης και απόσβεση 5%, είτε μέσω καταγεγραμμένων ή προσομοιωμένων επιταχυνσιογραφημάτων. Τέλος, για κατασκευές με ειδικά χαρακτηριστικά, για τις οποίες η παραδοχή ίδιας διέγερσης σε όλες τις στηρίξεις δεν ισχύει, πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα λεγόμενα χωρικά μοντέλα σεισμικής δράσης (spatial models of seismic action).

Στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής εργασίας θα εφαρμοστεί η εναλλακτική αναπαράσταση της σεισμικής δράσης μέσω προσομοιωμένων επιταχυνσιογραφημάτων κοντινών και μακρινών σεισμών, όπως αυτή θα παρουσιαστεί στο επόμενο Κεφάλαιο.

1.6. Συμπερασματικά σχόλια

Παρόλο που η χρήση συνολικού σύνθετου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί μεγαλύτερη υπολογιστική προσπάθεια, είναι αναγκαία για να βρεθεί η πραγματική κατανομή τάσεων στην κατασκευή. Η σχετική μη γραμμική ανάλυση μπορεί να τρέξει σε προσωπικό υπολογιστή και είναι σχετικά φθηνή, αν συγκριθεί με τον προϋπολογισμό ενός απλού αιολικού πάρκου.

Πάντως, και τα απλουστευμένα μοντέλα (γραμμικά) είναι επίσης απαραίτητα εν παραλλήλω για τον **αρχικό σχεδιασμό**, για την απόκτηση μιας πρώτης εικόνας της απόκρισης της κατασκευής αλλά και τον έλεγχο των αποτελεσμάτων από το σύνθετο μοντέλο.

Στην παραπάνω διαπίστωση βασίζεται και η παρούσα Διπλωματική, που πραγματεύεται την καμπτική δυναμική απόκριση απλών προσομοιωμάτων υπό προσομοιωμένες σεισμικές διεγέρσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ - ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ

ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ

2.1. Γενικές Πληροφορίες

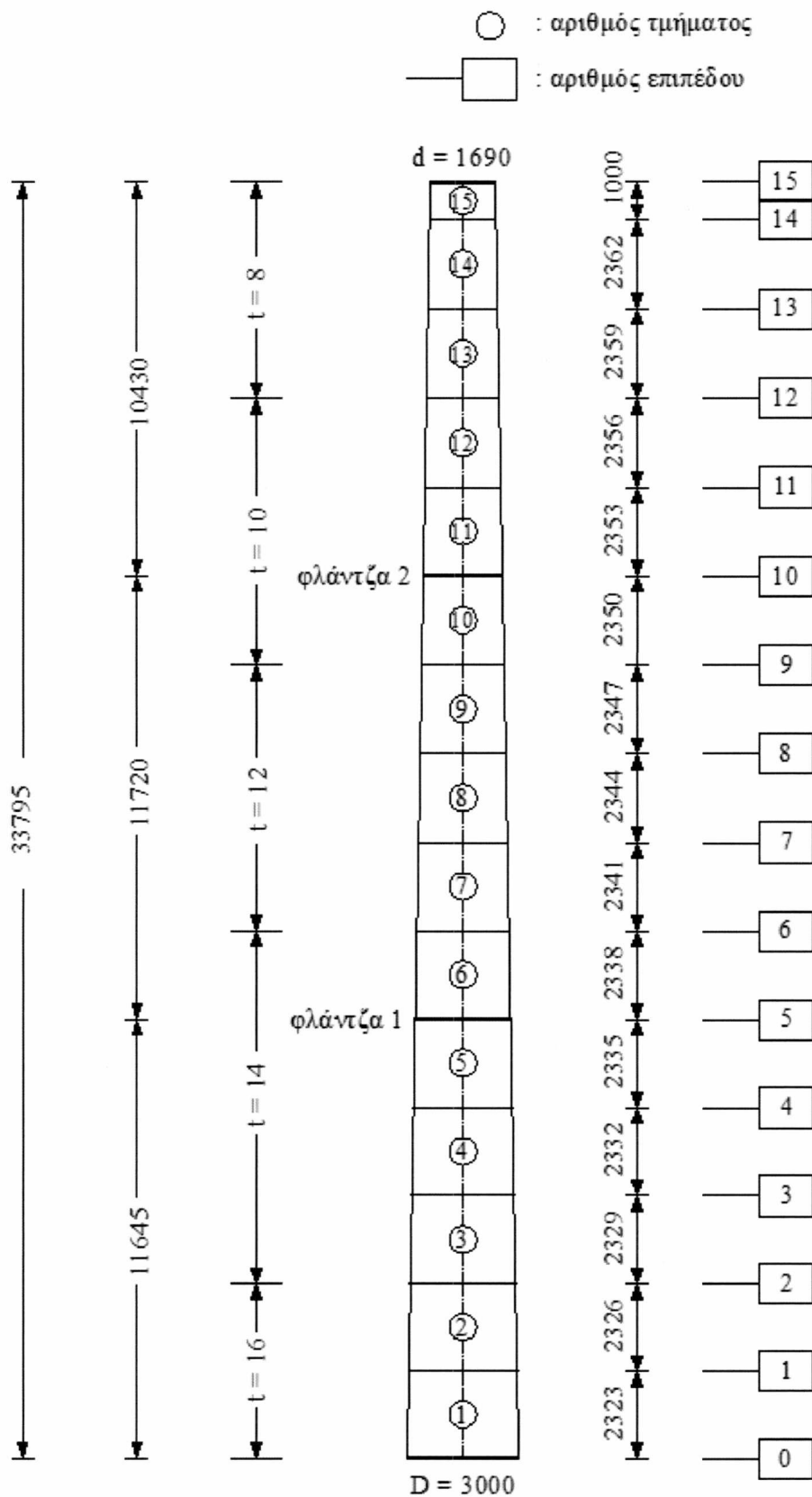
Μια από τις χώρες στην Ευρώπη που υπήρξε πρωτοπόρα στην μελέτη, κατασκευή και εγκατάσταση ανεμογεννητριών είναι η Δανία, που λόγω της γεωγραφικής της θέσης διαθέτει ισχυρό κίνητρο (λόγω των ανέμων που πνέουν εκεί) για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας. Μια από τις πρώτες ιδιωτικές εταιρείες της Δανίας που ασχολήθηκε με το αντικείμενο ήταν η NordtankEnergyGroupAS, που ιδρύθηκε περί τα μέσα της δεκαετίας του 1970 και δραστηριοποιήθηκε στο χώρο αυτόνομα μέχρι το 1997, οπότε συγχωνεύτηκε με την παρόμοιου αντικειμένου εταιρεία MiconAS, οπότε προέκυψε η NEGMiconAS. Αυτή, το 2004 συγχωνεύτηκε – απορροφήθηκε από την διεθνών συμφερόντων εταιρεία Vestas, η οποία λειτουργεί τις μέρες μας.

Στον Ευρωπαϊκό χώρο αλλά και σε άλλες περιοχές της γης υπάρχουν αυτή τη στιγμή εγκατεστημένα και σε λειτουργία πολλά αιολικά πάρκα με ανεμογεννήτριες κατασκευής Nordtank, όπως στη Νότιο Αμερική, την Άπω Ανατολή κ.α. Χαρακτηριστικό μοντέλο αποτελεί αυτό με κωδικό **NDK 500/37**, το οποίο έχει πάψει μιν να παράγεται, πλην όμως υπάρχει πληθώρα πληροφοριών σε ότι αφορά τη συμπεριφορά του σε συνθήκες λειτουργίας, αερο - ελαστικά μοντέλα αλλά και μετρήσεις επί τόπου. Ο πύργος της συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας, που θα περιγραφεί παρακάτω, και ιδιαίτερα η προσεγγιστική καμπική δυναμική συμπεριφορά του υπό προσομοιώματα εδαφικής κίνησης, αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

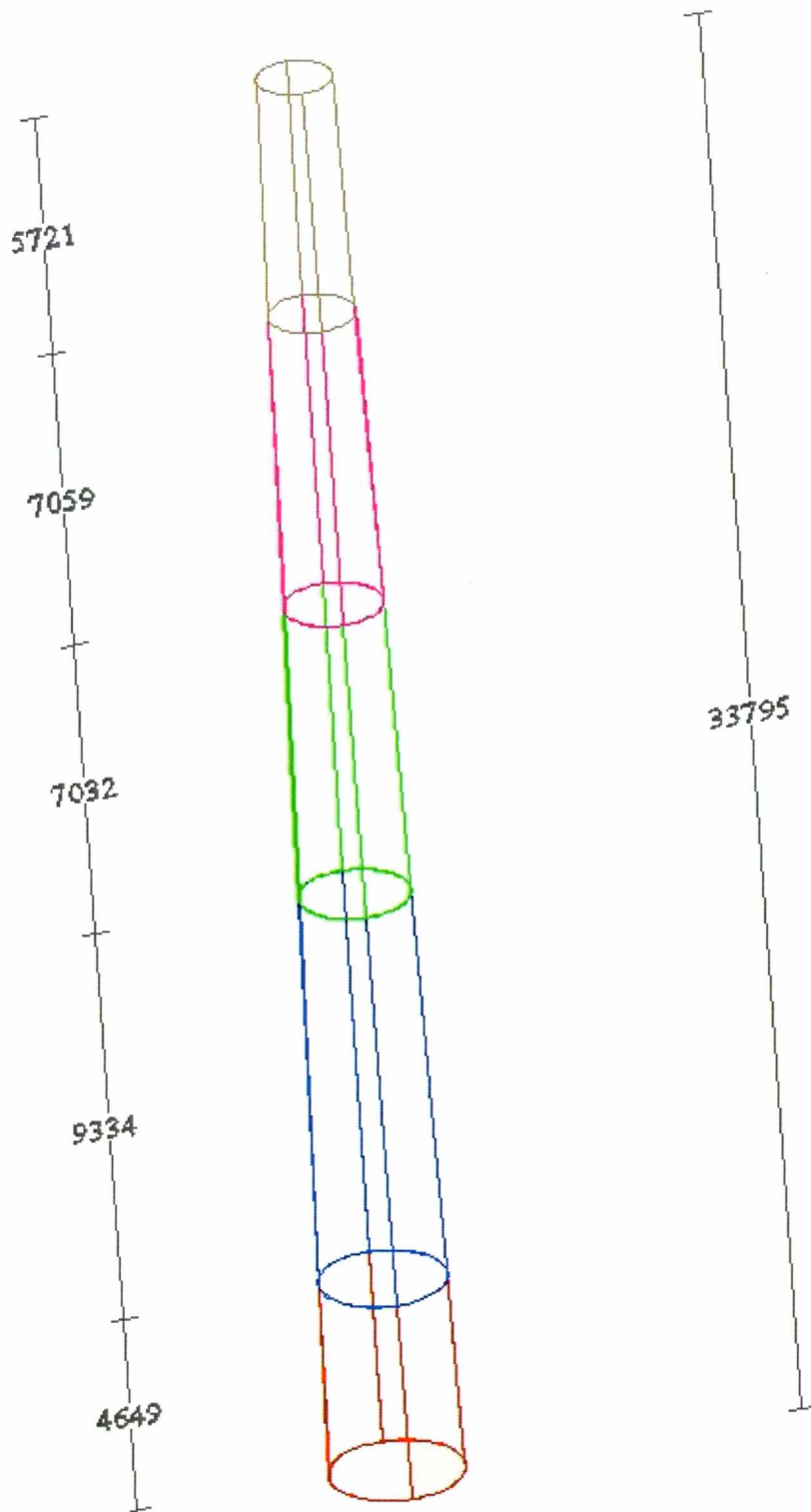
2.2. Γεωμετρικά και άλλα χαρακτηριστικά NDK 500/37

Ο πύργος, φέρων ιστός της ανεμογεννήτριας, είναι μια λεπτότοιχηκελυφωτή – σωληνωτή κατασκευή, συνολικού ύψους 33.795m, με διάμετρο βάσης $D = 3.00\text{m}$ και κορυφής $d = 1.69\text{m}$. Σε

όψη, οι ακριβείς διαστάσεις του πύργου φαίνονται στο Σχήμα 2.1, ενώ στο Σχήμα 2.2 αυτός απεικονίζεται τρισδιάστατα.

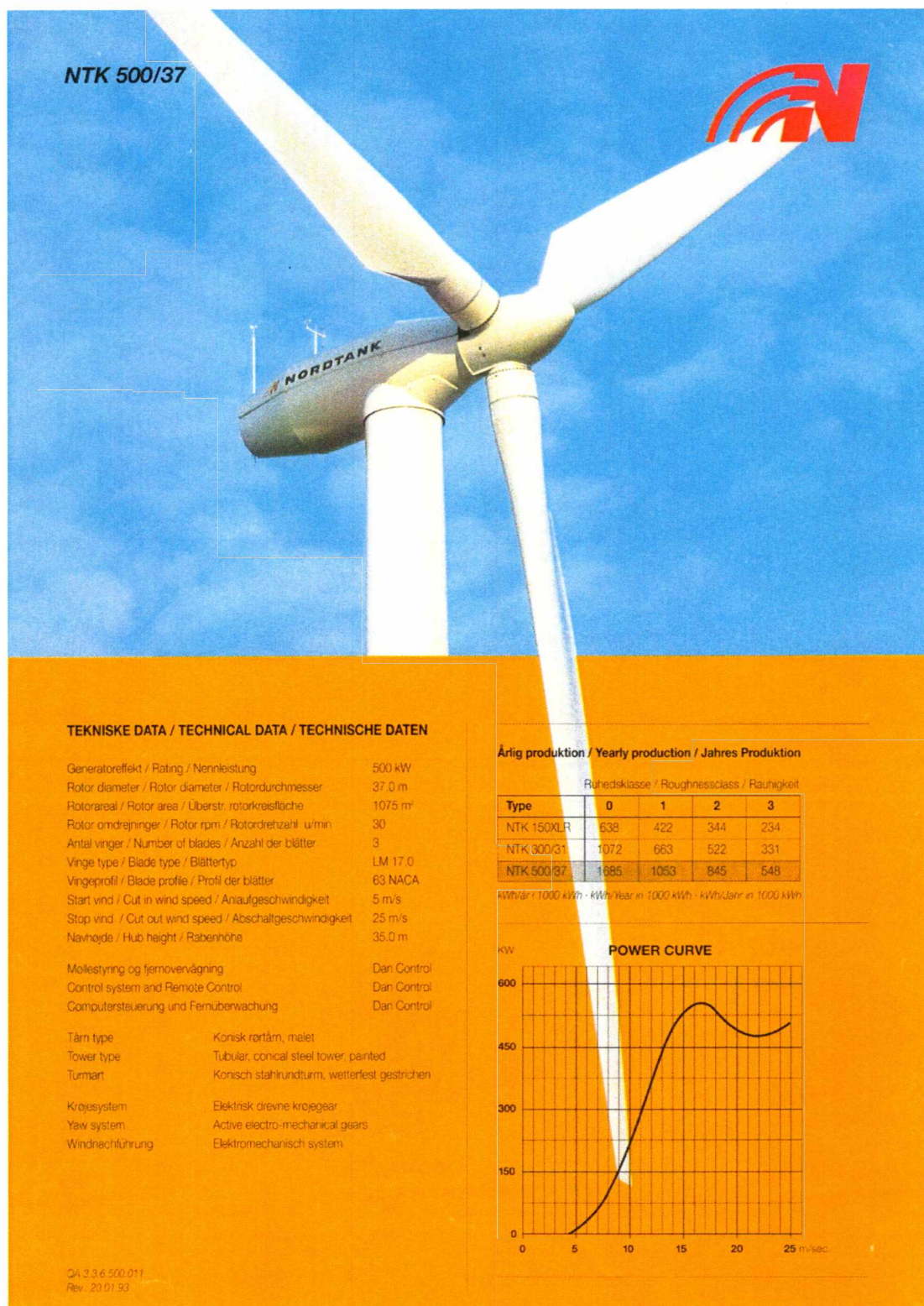


Σχήμα 2.1. Όψη και διαστάσεις του πύργου

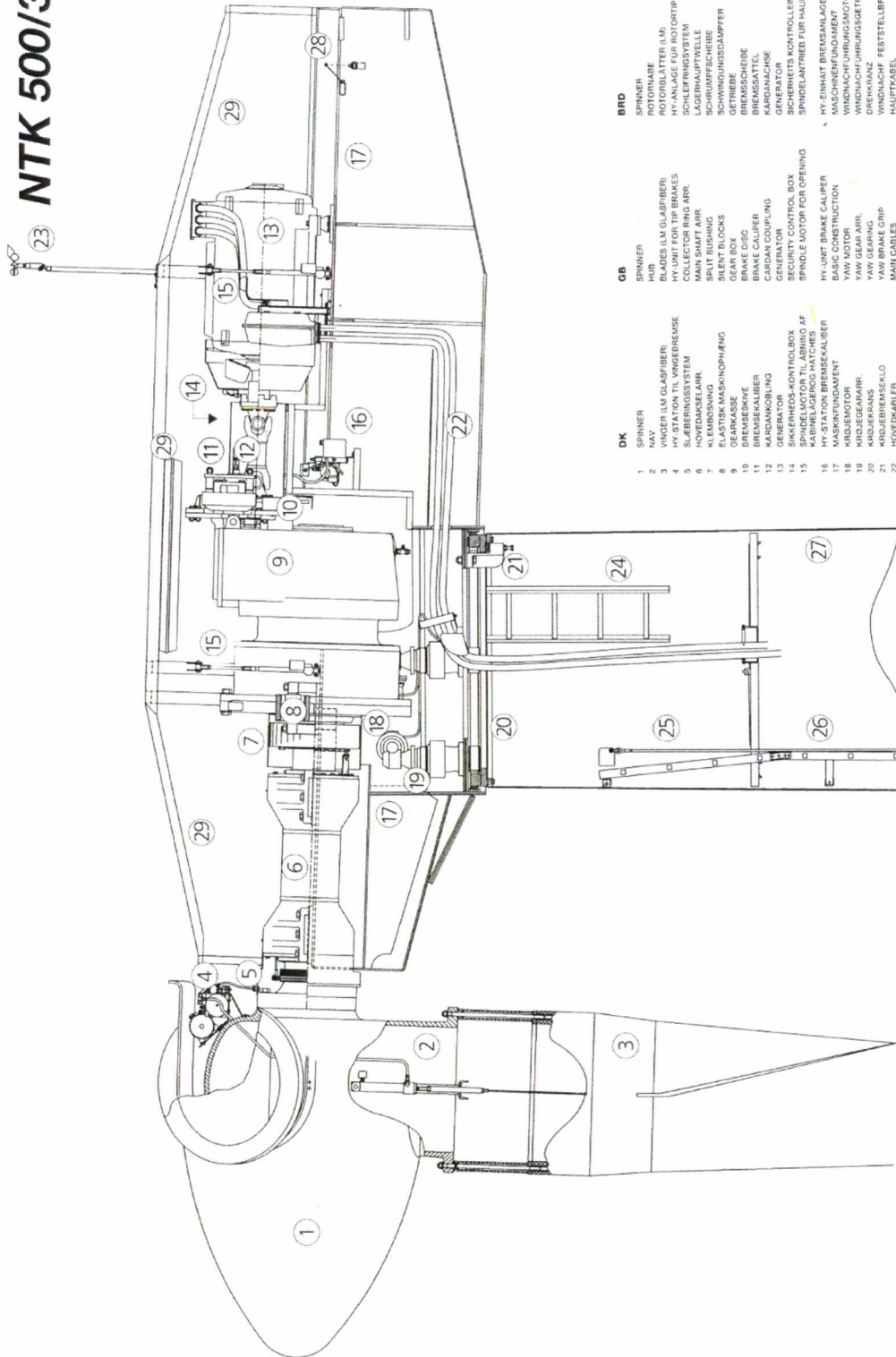


Σχήμα 2.2. Τρισδιάστατη απεικόνιση του πύργου

Αντίστοιχα, οι τεχνικές προδιαγραφές της όλης κατασκευής απεικονίζεται στις παρακάτω Εικόνες.



NTK 500/37



- | | | |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| DK | GB | BRD |
| 1 SPINNER | SPINNER | ROTORNAHE |
| 2 NAV | HUB | ROTORBLÄTTER (LM) |
| 3 VINGER (LM GLASFIBER) | BLADES (LM GLASFIBER) | HY-ANLAGE FÜR ROTORTIPBREMSSE |
| 4 HY-STATION TIL VINGEBREMSSE | HY-UNIT FOR TIP BRAKES | SCHLEIFBRINGSYSTEM |
| 5 SLÆBERINGSYSTEM | COLLECTOR RING ARR. | LEISTUNGSSCHWELBEN |
| 6 KØLEBØRSTEN | BRUSHES | SCHWUNDSCHIBRE |
| 7 KØLEBØRSTENARR. | BRUSH ARR. | SCHWUNDSCHIBRE |
| 8 ELASTISK MASKINOPHÆNG | SILENT BLOCKS | GETRIEBE |
| 9 GEARKASSE | GEAR BOX | BREMSSCHIED |
| 10 BREMSERHJØL | BRAKE DISC | LEISTUNGSSCHWELBEN |
| 11 BREMSKOLBER | BRAKE PAD | KARTRAGERSKIVE |
| 12 KØLEBØRSTENARR. | BRUSH ARR. | GENERATOR |
| 13 GENERATOR | GENERATOR | SPINDELANTRIEB FÜR HAUIRE |
| 14 SIKKERHEDS-KONTROLBOX | SECURITY CONTROL BOX | SPINDELANTRIEB FÜR HAUIRE |
| 15 SPINDELMOTOR TIL ÅBNING AF | SPINDLE MOTOR FOR OPENING | HY-EINHAIT BREMSANLAGE |
| 16 SPINDELMOTOR TIL ÅBNING AF | SPINDLE MOTOR FOR OPENING | MASCHINENFUNDAMENT |
| 17 HY-STATION BREMSKALIBER | HY-UNIT BRAKE CALIPER | WINDNACHFUHRUNGSGETRIEBE |
| 18 KØLEGEARARR. | YAW GEAR ARR. | WINDNACHFUHRUNGSGETRIEBE |
| 19 KØLEGEARANS | YAW GEAR ARR. | WINDNACHFUHRUNGSGETRIEBE |
| 20 KØLEGEAR | YAW GEAR | WINDNACHFUHRUNGSGETRIEBE |
| 21 HOVEDKABEL | MAIN CABLES | HAUPTKABEL |
| 22 HOVEDKABELER | MAIN CABLES | HAUPTKABEL |
| 23 VINDFANE & VINDMÅLER | WINDVANE & ANEMOMETER | AUFSTIEG ZUM MASCHINENHAUS |
| 24 STIGE OPSTIGNING I NACELLE | LADDER FOR NACELLE ASCENSION | SIKKERHEDSLENE |
| 25 SIKKERHEDSLENE | SAFETY LINE | LEISTUNGSSCHWELBEN |
| 26 TÅRN | TOWER | LEISTUNGSSCHWELBEN |
| 27 TÅRN | TOWER | LEISTUNGSSCHWELBEN |
| 28 RYSTEFØLER | VIBRATION SENSOR | VIBRATIONSFÜHLER |
| 29 MASKINABINDELAG | NACELLE COVER | MASCHINENHAUSE |

Το υλικό του πύργου είναι δομικός χάλυβας S355 και των κοχλιών σύνδεσης M8.8 και M10.9. Σύμφωνα δε με τις διαστάσεις

NORDTANK ENERGY GROUP
 Nydallevvej 8, DK-8444 Esbo - Denmark
 Phone: +45 86 33 72 00 · Telefax: +45 86 33 73 74
 Telex: 63405 nrmil dk

του Σχήματος 2.1, στον Πίνακα 2.1 παρατίθενται τα γεωμετρικά και αδραειακά χαρακτηριστικά των 15 επί μέρους τμημάτων αυτού (ροπή αδραειάς I σε m⁴ και ροπή αντίστασης W σε m³).

Πίνακας 2.1. Γεωμετρικά και αδραειακά χαρακτηριστικά των επί μέρους τμημάτων του πύργου.

Τμήμα No	Μέση διάμετρος (mm)		Πάχος t (mm)	Αδραειακά Χαρακτηριστικά					
	D ₁	D ₂		Βάσης		Κορυφής		Μέσου Επιπέδου	
				I	W	I	W	I	W
1	2984	2894	16	0.16695	0,44520	0.15230	0,41868	0.15951	0,43184
2	2894	2804	16	0.15230	0,41868	0.13852	0,39297	0.14530	0,40573
3	2804	2714	14	0.12121	0,34409	0.10991	0,32231	0.11547	0,33311
4	2714	2624	14	0.10991	0,32231	0.09933	0,30123	0.10453	0,31168
5	2624	2534	14	0.09933	0,30123	0.08946	0,28087	0.09431	0,29097
6	2534	2444	14	0.08946	0,28087	0.08026	0,26122	0.08478	0,27096
7	2444	2353	12	0.06879	0,22408	0.06139	0,20767	0.06502	0,21580
8	2353	2263	12	0.06139	0,20767	0.05461	0,19205	0.05794	0,19978
9	2263	2172	12	0.05461	0,19205	0.04829	0,17687	0.05139	0,18439
10	2172	2081	10	0.04024	0,14753	0.03539	0,13540	0.03776	0,14140
11	2081	1990	10	0.03539	0,13540	0.03095	0,12379	0.03312	0,12953
12	1990	1899	10	0.03095	0,12379	0.02689	0,11270	0.02887	0,11818
13	1899	1808	8	0.02151	0,09025	0.01857	0,08179	0.02000	0,08597
14	1808	1717	8	0.01857	0,08179	0.01590	0,07375	0.01720	0,07772
15	1717	1682	8	0.01590	0,07375	0.01495	0,07076	0.01542	0,07225

Ο υπολογισμός των τιμών των ροπών αδραειάς έγινε με βάση τον προσεγγιστικό τύπο για λεπτότοιχες διατομές κυκλικού δακτυλίου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$I = \pi r^3 t \quad (2.1)$$

όπου η μέση ακτίνα του δακτυλίου και το πάχος αυτού, ενώ της ροπής αντίστασης σύμφωνα με τη σχέση:

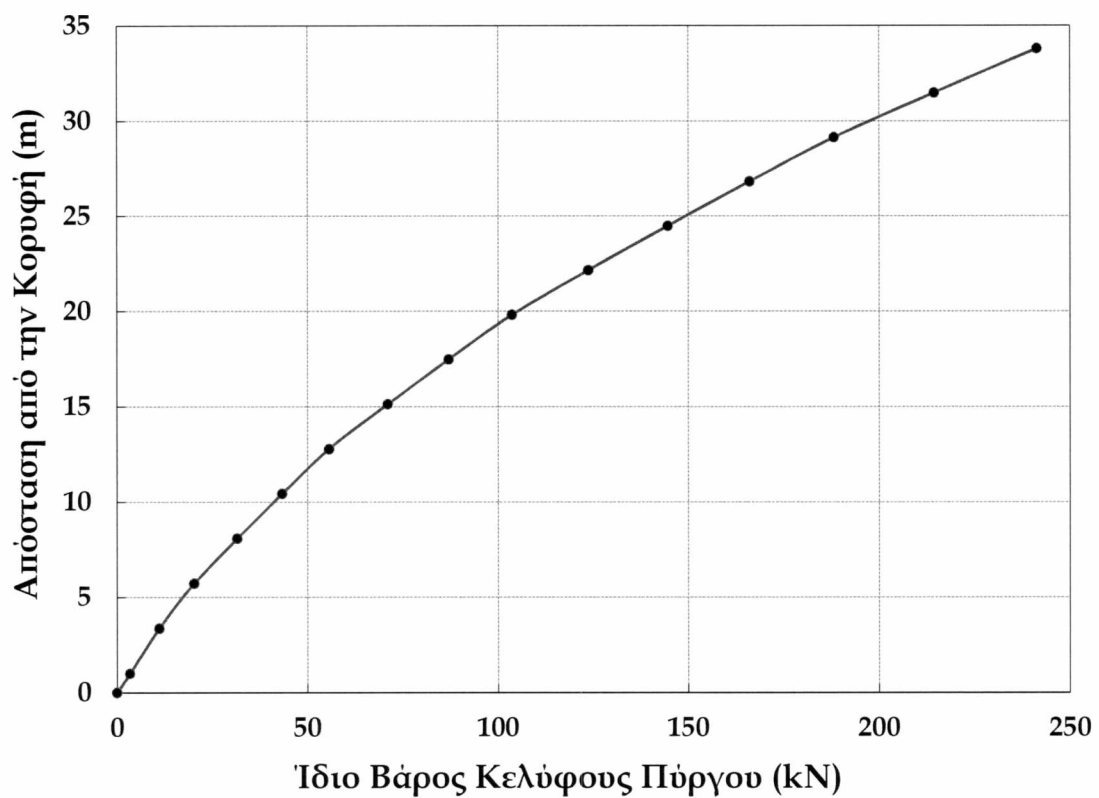
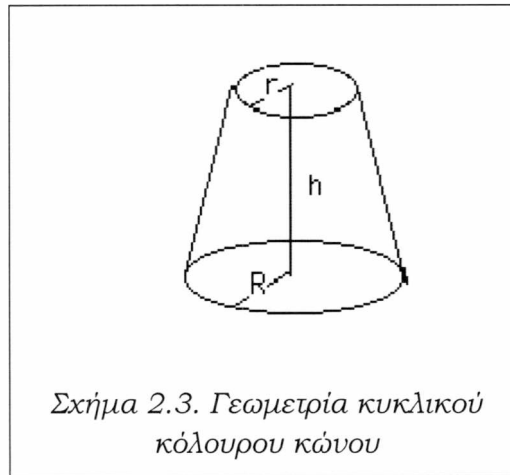
$$W = \frac{\pi}{16r_2} (d_2^4 - d_1^4) \quad (2.2)$$

όπου d_1 , d_2 η εσωτερική και εξωτερική διάμετρος του δακτυλίου αντίστοιχα.

Επίσης, λαμβάνοντας υπ' όψη την έκφραση του όγκου ενός κυκλικού κώλου, γεωμετρίας σύμφωνα με το Σχήμα 2.3, που είναι:

$$V = \frac{\pi h}{3} (R^2 + Rr + r^2) \quad (2.3)$$

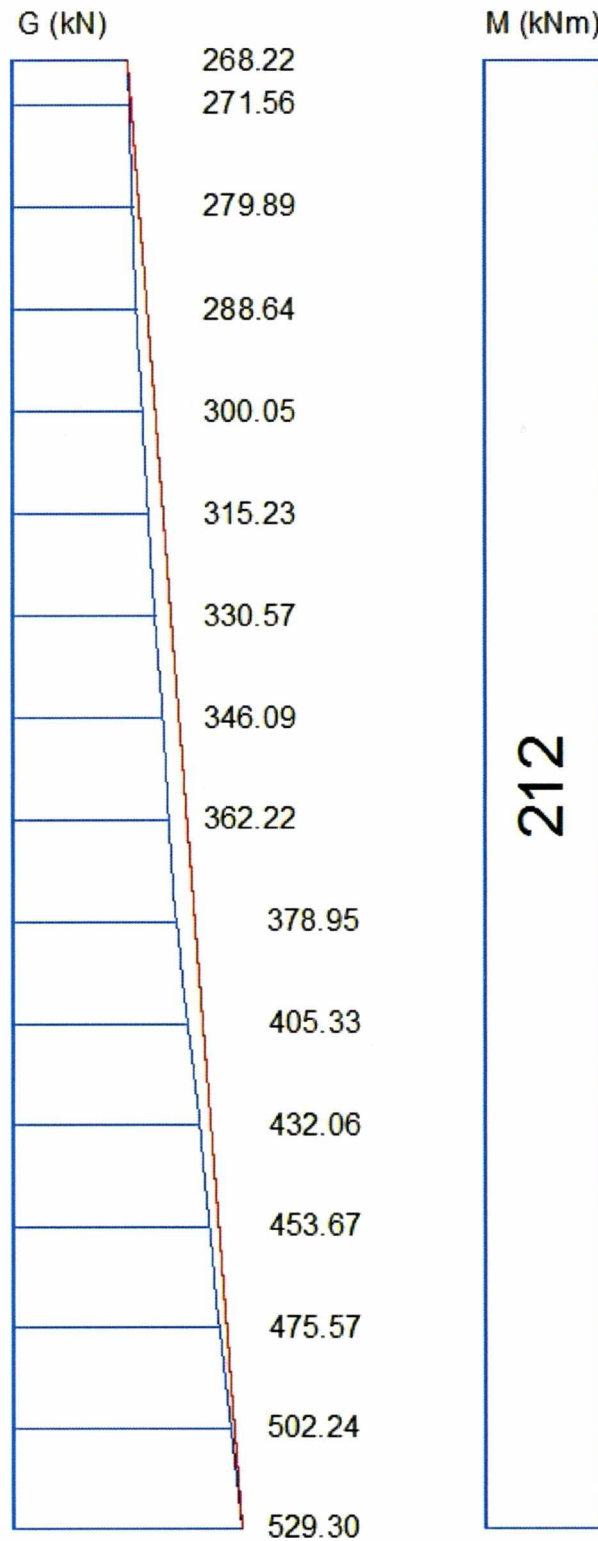
αλλά και σύμφωνα και με τα περιεχόμενα του Πίνακα 2.1, υπολογίζεται το ίδιο βάρος ενός εκάστου των κελυφωτώντημημάτων 1-15 του πύργου, η κατανομή καθ' ύψος αυτού απεικονίζεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4. Ίδιο βάρος κελύφους πύργου

Αν δε προστεθεί το ίδιο βάρος της γεννήτριας και του έλικα στη κορυφή, καθώς και αυτό των δακτυλίων σύνδεσης αλλά και της κλίμακας (εσωτερικά), η κατανομή του συνολικού βάρους της κατασκευής απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5 (πολύ κοντά σε γραμμική),

όπου επίσης φαίνεται και η σταθερή καθ' ύψος ροπή κάμψης λόγω της εκκεντρότητας 0.80 μτης ανεμογεννήτριας σε σχέση με τον κεντροβαρικό (κατακόρυφο) άξονα του κελύφους του πύργου.



Σχήμα 2.5. Συνολικό κατακόρυφο φορτίο λόγω ιδίου βάρους της κατασκευής (πύργου και γεννήτριας) και ροπή λόγω εκκεντρότητας της γεννήτριας

Σημειώνεται ότι από πλευράς κατασκευαστικής διαμόρφωσης τα κελυφωτάκολλουρο - κωνικά μέρη 1-5 (= τμήμα 1), 6-10 (= τμήμα 2) και 11-15 (= τμήμα 3) συνδέονται μεταξύ τους συγκολλητά, και τα τρία αυτά τμήματα συνδέονται μέσω φλαντζών - δακτυλίων κοχλιωτά.

2.3. Απλουστευμένα προσομοιώματα της κατασκευής

Για τις ανάγκες της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας υιοθετούνται δύο απλουστευμένα προσομοιώματα της κατασκευής, τα οποία στο εξής αναφέρονται ως **ΑΠ1** και **ΑΠ2**. Αμφότερα βασίζονται στην παραδοχή ότι στην κορυφή του πύργου υφίσταται μια συγκεντρωμένη μάζα M , που αφορά τη γεννήτρια και τον έλικα, που διαθέτει περιστροφική αδράνεια J . Οι τιμές αυτών των παραμέτρων υπολογίζονται με βάση τα στοιχεία που δίδει ο κατασκευαστής και ισούνται με:

$$\mathbf{M = 27013 \text{ kgr}}$$

$$\mathbf{J = 9725 \text{ m}^4}$$

2.3.1. Προσομοίωμα ΑΠ1

Ο πύργος στο μοντέλο αυτό προσομοιάζεται στο λογισμικό SAP 2000 Nonlinear ως πρόβολος σταθερής κυκλικής διατομής με σταθερό πάχος, που φέρει στην κορυφή του κατάλληλα κατανομημένη τόσο τη μάζα M όσο και την περιστροφική αδράνεια J , ενώ στα προβλεπόμενα ύψη υπάρχει πρόβλεψη για δέσμευση της παραμορφωσιμότητας του σχήματος της διατομής (ώστε να παραμείνει κυκλική), μέσω εισαγωγής κατάλληλων constraints. Τούτο προκειμένου ληφθεί υπ' όψη η παρουσία των φλαντζών - δακτυλίων σύνδεσης της πραγματικής κατασκευής. Το σταθερό πάχος του κελύφους του πύργου στο προσομοίωμα αυτό και η διάμετρος υπολογίστηκαν ως εξής:

$$\text{Διάμετρος } D = \frac{D_{\beta\acute{\alpha}\sigma\eta\varsigma}}{2} + \frac{D_{\text{κορυφής}}}{2} = \frac{3000+1690}{2} \rightarrow \mathbf{D = 2345 \text{ mm}}$$

$$\text{Για } t = 16 \text{ mm} \quad L_{16} = 2323 + 2326 \rightarrow L_{16} = 4649 \text{ mm}$$

$$\text{Για } t = 14 \text{ mm} \quad L_{14} = 2329 + 2332 + 2335 + 2338 \rightarrow L_{14} = 9334 \text{ mm}$$

$$\text{Για } t = 12 \text{ mm} \quad L_{12} = 2341 + 2344 + 2347 \rightarrow L_{12} = 7032 \text{ mm}$$

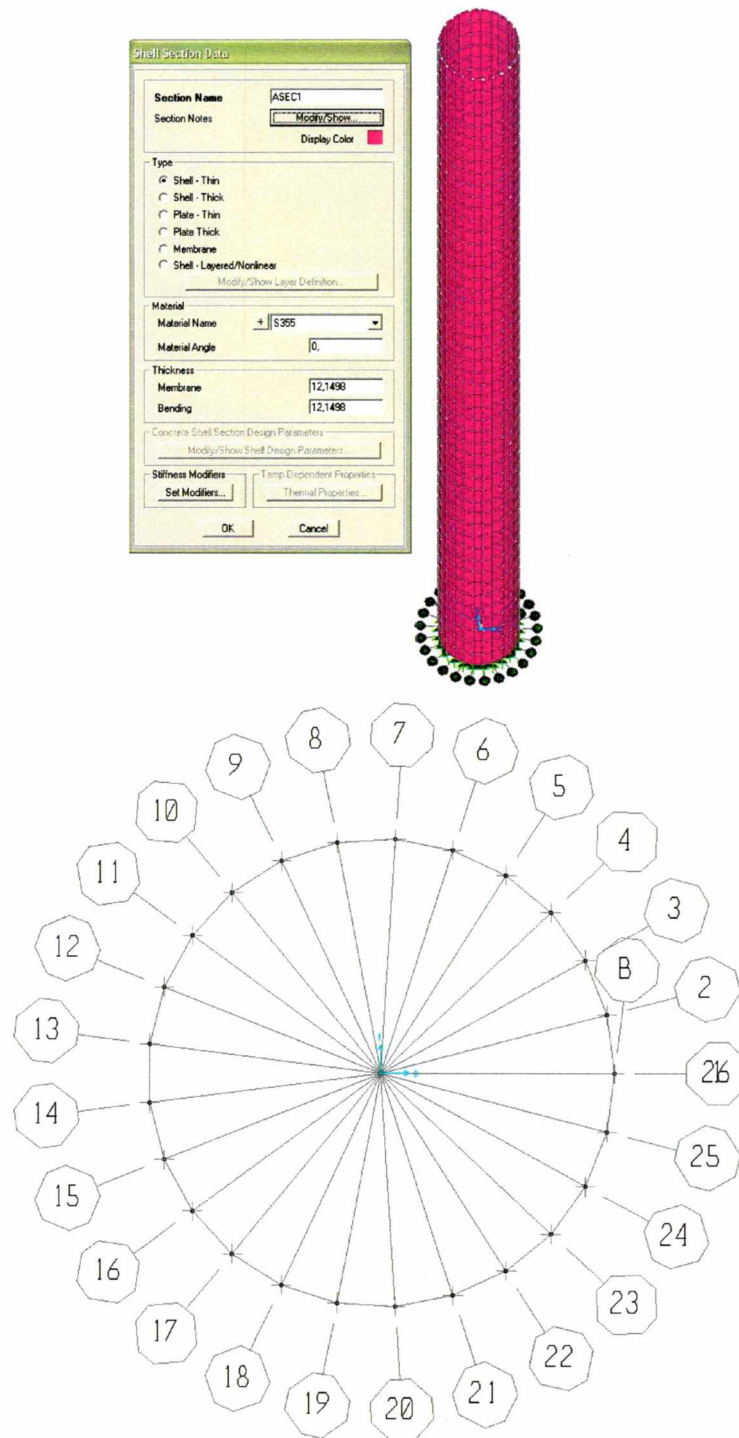
$$\text{Για } t = 10 \text{ mm} \quad L_{10} = 2350 + 2353 + 2356 \rightarrow L_{10} = 7059 \text{ mm}$$

$$\text{Για } t = 8 \text{ mm} \quad L_8 = 2359 + 2362 + 1000 \rightarrow L_8 = 5721 \text{ mm}$$

$$\text{Πάχος } t = \frac{16L_{16}+14L_{14}+12L_{12}+10L_{10}+8L_8}{L_{16}+L_{14}+L_{14}+L_{10}+L_{18}} = \frac{16 \times 4649 + 14 \times 9334 + 12 \times 7032 + 10 \times 7059 + 8 \times 5721}{33795}$$

οπότε **$t = 12.1498 \text{ mm}$** .

Στα Σχήματα 2.6, 2.7, 2.8 και 2.9 φαίνονται η γεωμετρία, το υλικό κατασκευής και οι διαστάσεις του κελύφους, όπως επίσης οι μάζες στην κορυφή και τα κατάλληλα constraints.



Σχήμα 2.6. Γεωμετρία και διαστάσεις πάχους κελύφους πύργου

Material Property Data

General Data

Material Name and Display Color: S355 ■

Material Type: Steel

Material Notes: [Modify/Show Notes...](#)

Weight and Mass

Weight per Unit Volume: 7.697E-08

Mass per Unit Volume: 7.849E-12

Units

KN, mm, C

Isotropic Property Data

Modulus of Elasticity, E: 210,

Poisson's Ratio, U: 0,3

Coefficient of Thermal Expansion, A: 1,170E-05

Shear Modulus, G: 80,7692

Other Properties for Steel Materials

Minimum Yield Stress, Fy: 0,355

Minimum Tensile Stress, Fu: 0,51

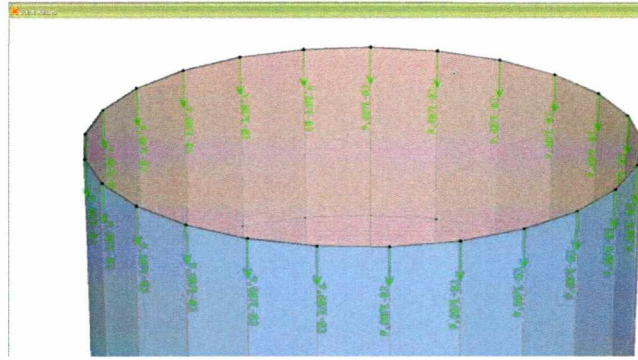
Effective Yield Stress, Fye: 0,355

Effective Tensile Stress, Fue: 0,51

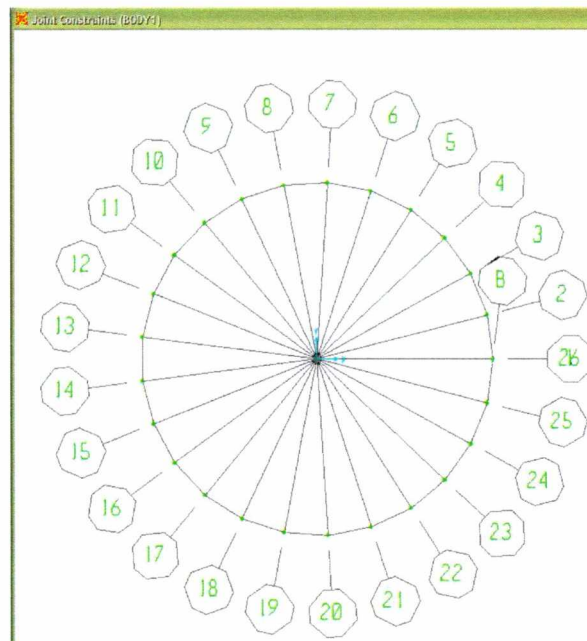
Switch To Advanced Property Display



Σχήμα 2.7. Γεωμετρία και υλικό κελύφους



Σχήμα 2.8. Μάζες κόμβων κορυφής



Σχήμα 2.9. Ενδιάμεσα constraints

Το εν λόγω προσομοίωμα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για ιδιομορφική ανάλυση (modal) προκειμένου υπολογιστούν οι καμπτικές ιδιοπερίοδοι, οι οποίες θα συγκριθούν στη συνέχεια τόσο με αυτές που θα προκύψουν από το 2^ο απλουστευμένο προσομοίωμα όσο και με αυτές του κατασκευαστή.

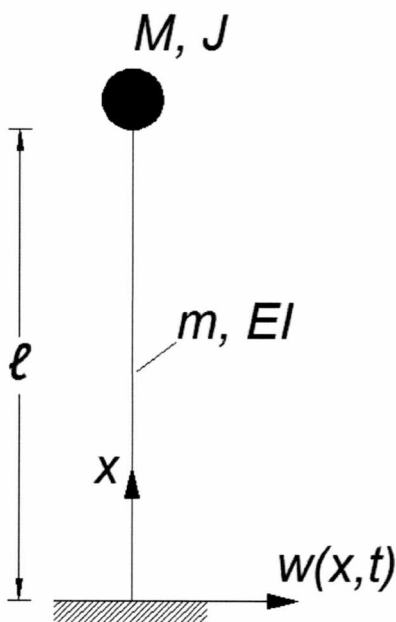
2.3.2. Προσομοίωμα ΑΠ2

Το 2^ο αυτό μοντέλο, η ελεύθερη και η εξαναγκασμένη καμπτική ταλάντωση του οποίου – υπό προσομοιωμένες εδαφικές κινήσεις – θα απασχολήσει το μεγαλύτερο μέρος του Κεφαλαίου 3 της παρούσας. Πρόκειται για τον απλό πρόβολο, μήκους

ίσου με αυτό του πύργου, με σταθερή διατομή (δηλαδή ενιαία ροπή αδράνειας I) και ομοιόμορφη κατανομή μάζας ανά μονάδα μήκους m , που φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Η μεν ροπή αδράνειας I θεωρείται ίση με τη μέση τιμή των αντίστοιχων του μέσου επιπέδου εκάστου τμήματος (ως Πίνακας 2.1), η δε μάζα ανά μονάδα μήκους υπολογίζεται ως η ανηγμένη τιμή της μάζας του πύργου διαιρούμενη δια του ύψους του. Άρα, οι τιμές αυτές διαμορφώνονται ως:

$$I = 0.0687 \text{ m}^4 \text{ και } m = 727.72 \text{ kgr/m}$$

Επιπρόσθετα δε, ο πρόβολος – προσομοίωμα φέρει στην κορυφή του συγκεντρωμένη μάζα M με περιστροφική αδράνεια J , που έχουν ήδη υπολογιστεί στην αρχή της τρέχουσας παραγράφου.



Σχήμα 2.10. Γεωμετρία και σύμβαση προσήμων του 2^{ου} απλουστευμένου προσομοιώματος

2.4. Προσομοιώματα εδαφικών κινήσεων

Σύμφωνα και με τα περιεχόμενα της Εισαγωγής, με σκοπό την εύρεση της (γραμμικοποιημένης) καμπτικής δυναμικής απόκρισης του πύργου υπό σεισμικές φορτίσεις, οι εδαφικές κινήσεις προσομοιάζονται υπό μορφή συναρτήσεων χρόνου-μετατόπισης $f(t)$, για κοντινούς και μακρινούς σεισμούς (σε σχέση με την απόσταση του επίκεντρου από την κατασκευή). Προς τούτο χρησιμοποιούνται δύο ειδών χρονικές συναρτήσεις εδαφικής κίνησης, που δίνονται από τις σχέσεις:

Για μακρινό σεισμό

Χρονική συνάρτηση $f(t) = Ate^{-\beta t} \sin \Omega t$ (2.4α)

Εδαφική επιτάχυνση

$$\ddot{f}(t) = -Ae^{-\beta t} [2\Omega(\beta t - 1) \cos \Omega t + \{2\beta - t(\beta^2 - \Omega^2)\} \sin \Omega t] \quad (2.4\beta)$$

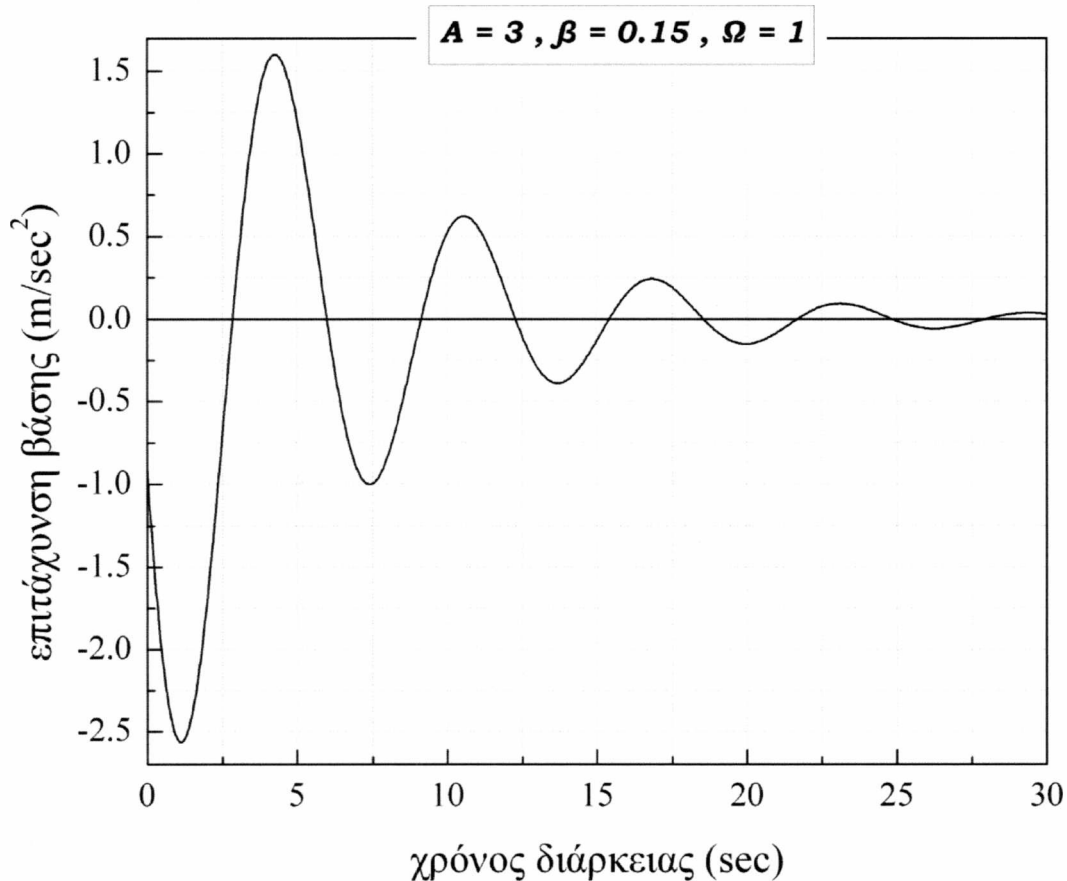
Για κοντινό σεισμό

Χρονική συνάρτηση $f(t) = Ae^{-\beta t} \sin \Omega t$ (2.5α)

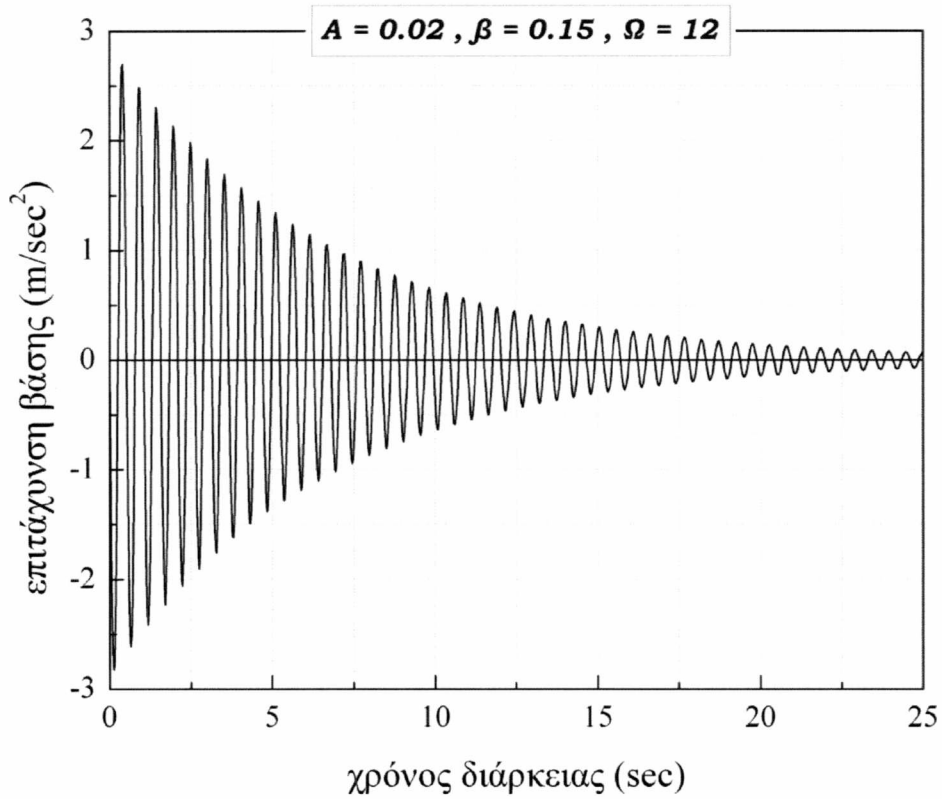
Εδαφική επιτάχυνση

$$\ddot{f}(t) = Ae^{-\beta t} [-2\beta\Omega \cos \Omega t + (\beta^2 - \Omega^2) \sin \Omega t] \quad (2.5\beta)$$

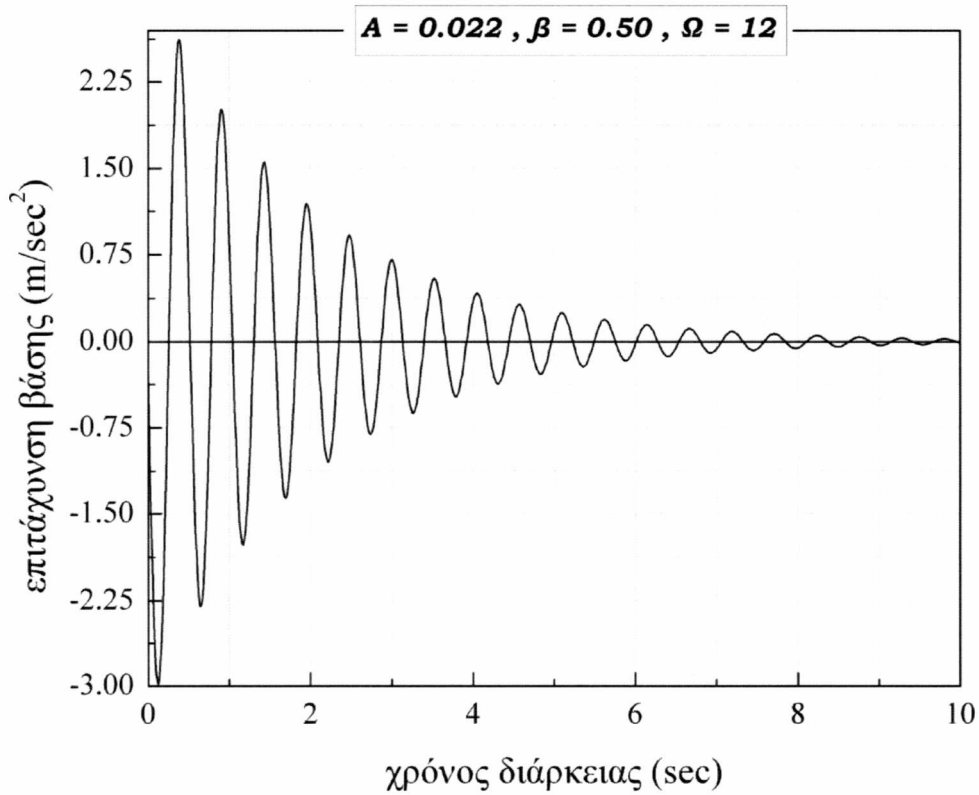
Με σκοπό η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (σε σύγκριση με αυτή της βαρύτητας) να έχει τιμές που να αντιστοιχούν σε πραγματικές σεισμικές διεγέρσεις, έγινε επιλογή προσομοιωμάτων τριών κοντινών και τριών μακρινών σεισμών αντίστοιχα, οι εδαφικές επιταχύνσεις των οποίων απεικονίζονται γραφικά στα Σχήματα 2.11 έως 2.16.



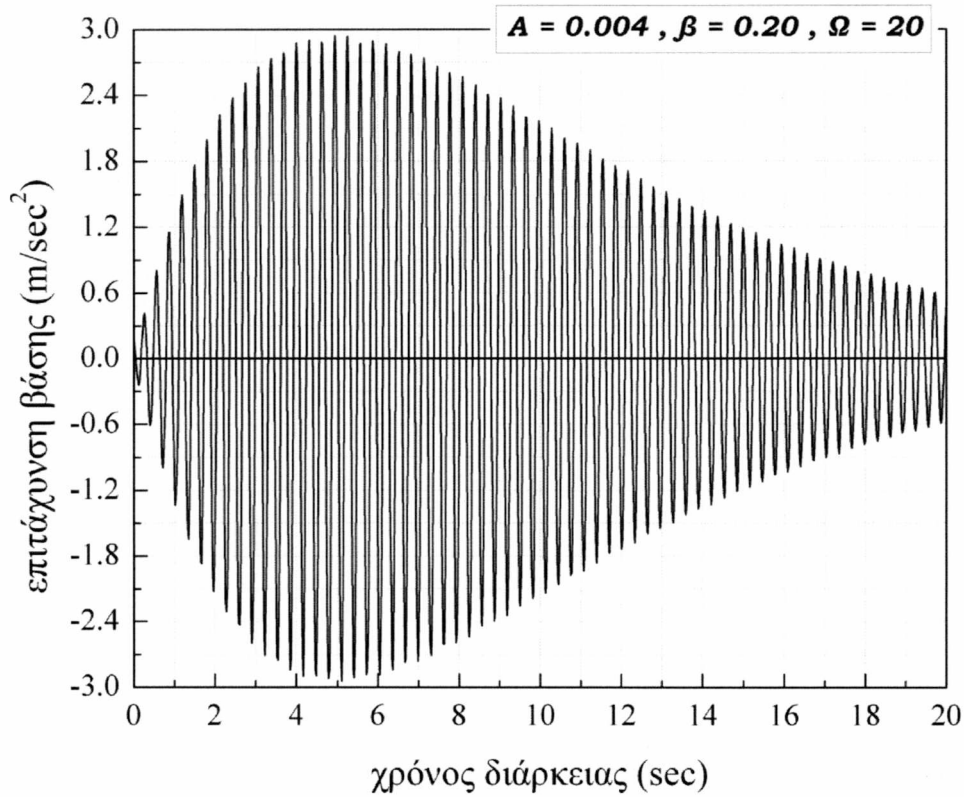
Σχήμα 2.11. Καμπύλη εδαφικής επιτάχυνσης 1^{ου} προσομοιώματος κοντινού σεισμού (K1)



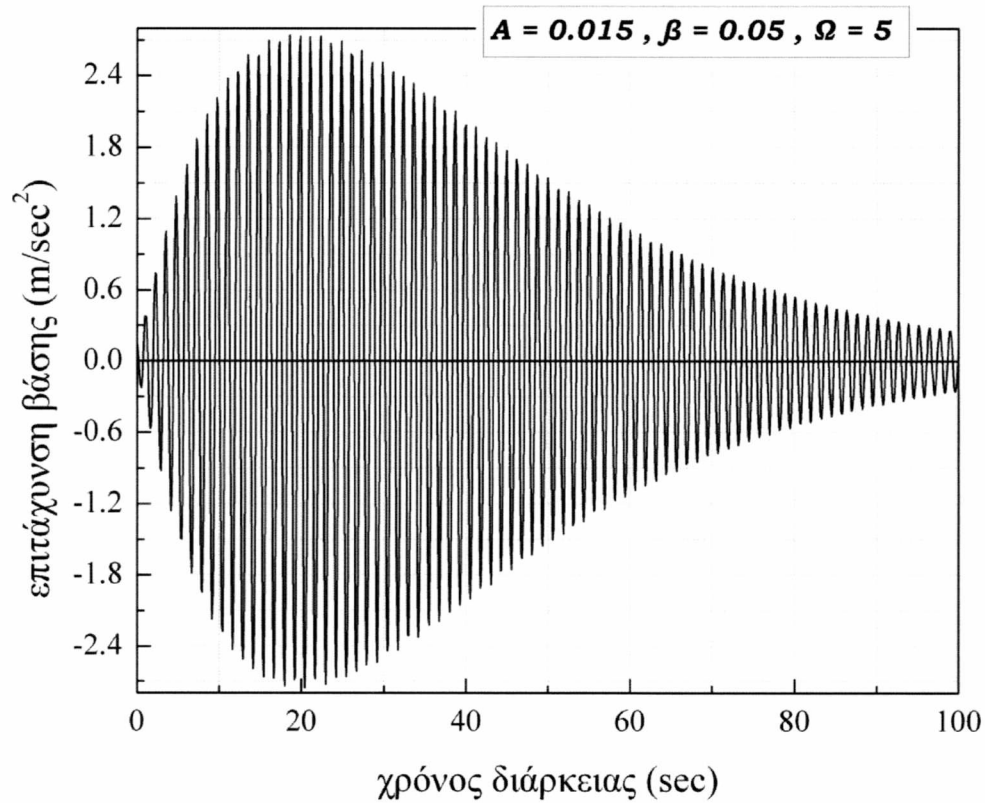
Σχήμα 2.12. Καμπύλη εδαφικής επιτάχυνσης 2^{ου}προσομοιώματος κοντινού σεισμού (K2)



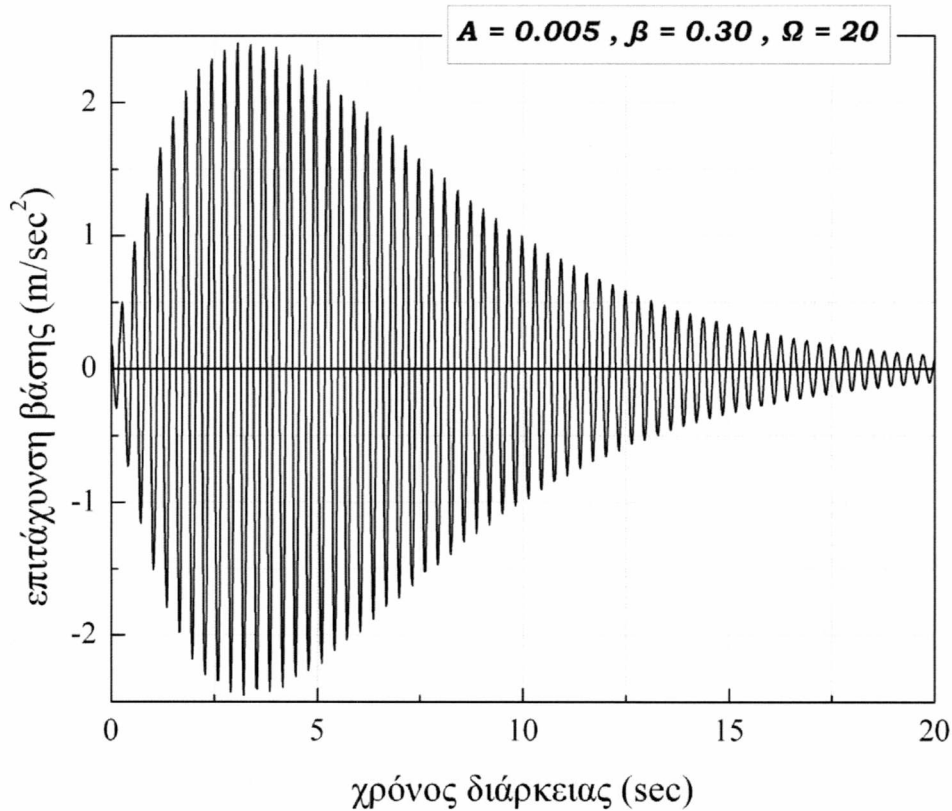
Σχήμα 2.13. Καμπύλη εδαφικής επιτάχυνσης 3^{ου}προσομοιώματος κοντινού σεισμού (K3)



Σχήμα 2.14. Καμπύλη εδαφικής επιτάχυνσης 1^{ου} προσομοιώματος μακρινού σεισμού (M1)



Σχήμα 2.15. Καμπύλη εδαφικής επιτάχυνσης 2^{ου} προσομοιώματος μακρινού σεισμού (M2)



Σχήμα 2.16. Καμπύλη εδαφικής επιτάχυνσης 3^{ου} προσομοιώματος μακρινού σεισμού (M3)

Οι μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις των ανωτέρω προσομοιωμάτων είναι ίσες με:

$$\max \ddot{f}_{K1} = 0.26124g$$

$$\max \ddot{f}_{K2} = 0.288g$$

$$\max \ddot{f}_{K3} = 0.30432g$$

$$\max \ddot{f}_{M1} = 0.30g$$

$$\max \ddot{f}_{M2} = 0.281g$$

$$\max \ddot{f}_{M3} = 0.248g$$

που αντιστοιχούν στη ζώνη III του ΕΑΚ 2000 και περαιτέρω αυτής, ενώ η μέση τιμή των ανωτέρω εδαφικών επιταχύνσεων ισούται με 0.280427g.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΤΙΚΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗ

ΑΝΑΛΥΣΗ

3.1. Ελεύθερη καμπτική ταλάντωση του ΑΠ2

Θεωρούμε εκ νέου το απλουστευμένο προσομοίωμα του πύργου ΑΠ2, όπως αυτό περιγράφηκε στην §2.3.2 του προηγούμενου Κεφαλαίου (Σχήμα 2.10). Η διαφορική εξίσωση που διέπει την ελεύθερη καμπτική ιδιοταλάντωση του προβόλου αυτού έχει ως εξής:

$$EIw''''(x, t) + m\ddot{w}(x, t) = 0 \quad (3.1)$$

Οι συνοριακές συνθήκες που συνδέονται με την (3.1) είναι:

$$w(0, t) = 0 \quad (3.2\alpha)$$

$$w'(0, t) = 0 \quad (3.2\beta)$$

$$-EIw''(\ell, t) - J\ddot{w}'(\ell, t) = 0 \quad (3.2\gamma)$$

$$-EIw'''(\ell, t) + M\ddot{w}(\ell, t) = 0 \quad (3.2\delta)$$

ενώ οι αρχικές συνθήκες θεωρούνται μηδενικές (η δοκός – προσομοίωμα βρίσκεται αρχικά σε ηρεμία), δηλαδή ισχύει ότι:

$$w(x, 0) = \dot{w}(x, 0) = 0 \quad (3.3)$$

Για ελεύθερη ταλάντωση υποθέτουμε ότι:

$$w(x, t) = X_n(x)e^{j\omega_n t} \quad (3.4)$$

όπου ω_n είναι η κυκλική συχνότητα της κίνησης και j η φανταστική μονάδα ($j^2 = -1$), ενώ $X_n(x)$ οι συναρτήσεις σχήματος της ελεύθερης καμπτικής ταλάντωσης. Αντικαθιστώντας της έκφραση (3.4) στην διαφορική εξίσωση (3.1) και τις συνοριακές συνθήκες (3.2) λαμβάνουμε:

$$X_n''''(x) - k_n^4 X_n(x) = 0, \quad k_n^4 = \frac{m\omega_n^2}{EI} \quad (3.5)$$

$$X_n(0) = 0 \quad (3.6\alpha)$$

$$X_n'(0) = 0 \quad (3.6\beta)$$

$$X_n''(\ell) - \varphi k_n^4 X_n'(\ell) = 0, \quad \varphi = \frac{J}{m} \quad (3.6\gamma)$$

$$X_n'''(\ell) + \rho k_n^4 X_n(\ell) = 0, \quad \rho = \frac{M}{m} \quad (3.6\delta)$$

Το γενικό ολοκλήρωμα της Δ.Ε. (3.5) δίνεται από την έκφραση:

$$X_n(x) = A_n \sin k_n x + B_n \cos k_n x + C_n \sinh k_n x + D_n \cosh k_n x \quad (3.7)$$

Εισάγοντας την ανωτέρω έκφραση και τις παραγώγους της στις σχέσεις (3.6) και καθόσον για μη τετριμμένη λύση η ορίζουσα των συντελεστών θα πρέπει να ισούται με το μηδέν, καταλήγουμε στην καλούμενη **εξίσωση συχνότητας**:

$$\det[a_{ij}] = 0 \quad (3.8)$$

$$a_{11} = -(\cos k_n \ell + \cosh k_n \ell) + \rho k_n (\sin k_n \ell - \sinh k_n \ell) \quad (3.9\alpha)$$

$$a_{12} = (\sin k_n \ell - \sinh k_n \ell) + \rho k_n (\cos k_n \ell - \cosh k_n \ell) \quad (3.9\beta)$$

$$a_{21} = -(\sin k_n \ell + \sinh k_n \ell) - \varphi k_n^3 (\cos k_n \ell - \cosh k_n \ell) \quad (3.9\gamma)$$

$$a_{22} = -(\cos k_n \ell + \cosh k_n \ell) + \varphi k_n^3 (\sin k_n \ell + \sinh k_n \ell) \quad (3.9\delta)$$

Η αριθμητική επίλυση της εξίσωσης συχνότητας οδηγεί στις τιμές των ιδιοσυχνοτήτων k_n για οποιαδήποτε μορφή και στη συνέχεια την έκφραση για την αντίστοιχη κανονική μορφή, ίση με:

$$X_n(x) = \sin k_n x - \sinh k_n x + B_n (\cos k_n x - \cosh k_n x) \quad (3.10)$$

$$B_n = \frac{\cos k_n \ell + \cosh k_n \ell - \rho k_n (\sin k_n \ell - \sinh k_n \ell)}{\sin k_n \ell - \sinh k_n \ell + \rho k_n (\cos k_n \ell - \cosh k_n \ell)} \quad (3.11)$$

Κάνοντας χρήση της εξίσωσης (3.5) και των συνοριακών συνθηκών (3.6) μετά από σχετική επεξεργασία ολοκληρώσεων και πρόσθεσης κατά μέλη προκύπτει η ακόλουθη **συσθήκη ορθογωνικότητας**, που είναι απαραίτητη για την ανάλυση της εξαναγκασμένης ταλάντωσης:

$$m \int_0^\ell X_n(x) X_k(x) dx + M X_n(\ell) X_k(\ell) + J X'_n(\ell) X'_k(\ell) = 0, \quad n \neq k \quad (3.12)$$

3.2. Εξαναγκασμένη καμπτική ταλάντωση του ΑΠ2

Θεωρούμε ότι το έδαφος θεμελίωσης του προσομοιώματος (και κατ' επέκταση του πύργου) υφίσταται διέγερση λόγω σεισμού, η οποία σχετίζεται με οριζόντια κίνηση χαρακτηριζόμενη από μια χρονική συνάρτηση $f(t)$. Η εξαναγκασμένη πλέον κίνηση του συστήματος χωρίς απόσβεση λόγω της διέγερσης αυτής θα διέπεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$EI w''''(x, t) + m \ddot{w}(x, t) = -M_{tot} \ddot{f}(t) \quad (3.13)$$

όπου M_{tot} η συνολική μάζα του προσομοιώματος, ίση με:

$$M_{tot} = M + m\ell \quad (3.14)$$

Εφαρμόζοντας ανάλυση η οποία βασίζεται στη διακριτοποίηση του συστήματος μέσω επαλληλίας κανονικών μορφών (ιδιομορφική ανάλυση), αναζητούμε λύση της (3.13) της μορφής:

$$w(x, t) = \sum_n X_n(x)T_n(t) \quad (3.15)$$

στην οποία οι μεν συναρτήσεις σχήματος $X_n(x)$ λαμβάνονται από τις σχέσεις (3.10) και (3.11), ενώ η χρονική συνάρτηση $T_n(t)$, με διαστάσεις μήκους, είναι το προσδιοριστέο ιδιομορφικό εύρος ταλάντωσης (modal amplitude). Σύμφωνα με το γνωστό ολοκλήρωμα του Duhamel, και κατά τη διάρκεια της εδαφικής κίνησης, η συνάρτηση αυτή δίνεται από την έκφραση:

$$T_n(t) = -\frac{\Gamma_n}{\omega_n} \int_0^t \ddot{f}(\tau) \sin \omega_n(t - \tau) d\tau \quad (3.16)$$

όπου

$$\Gamma_n = \frac{M_{tot} \int_0^\ell X_n(x) dx}{m \int_0^\ell X_n^2 dx + M X_n^2(\ell) + J X_n'^2(\ell)} \quad (3.17)$$

Οι επί μέρους ολοκληρωτικές εκφράσεις των συναρτήσεων σχήματος αλλά και του ολοκληρώματος Duhamel (για προσομοιωμένη μακρινή ή κοντινή σεισμική διέγερση, εκ των σχέσεων (2.4β) και (2.5β) αντίστοιχα) υπολογίστηκαν *συμβολικά* μέσω του *Mathematica* και βρέθηκαν ίσες με:

$$\int_0^\ell X_n(x) dx = -\frac{B_n(\sinh(k_n\ell) - \sin(k_n\ell)) + \cos(k_n\ell) + \cosh(k_n\ell) - 2}{k_n} \quad (3.18)$$

$$\int_0^\ell X_n^2(x) dx = \frac{1}{4kn} \left(4B_n^2 k_n \ell + (B_n^2 - 1) \sin(2k_n \ell) + B_n^2 \sinh(2k_n \ell) - 4(B_n^2 - 1) \cos(k_n \ell) \sinh(k_n \ell) - 4 \sin(k_n \ell) \left((B_n^2 + 1) \cosh(k_n \ell) + 2B_n \sinh(k_n \ell) \right) - 2B_n \cos(2k_n \ell) + 2B_n \cosh(2kn\ell k_n \ell) + \sinh(2k_n \ell) \right) \quad (3.19)$$

Για κοντινό σεισμό

$$\int_0^t \ddot{f}(\tau) \sin \omega_n(t - \tau) d\tau = \frac{(A(-\Omega \sin(t\omega)(\beta^4 + \beta^2(3\omega^2 + 2\Omega^2) - \omega^2\Omega^2 + \Omega^4) + \omega(\sin(t\Omega)(\beta^4 + \beta^2(\omega^2 + 2\Omega^2) - \omega^2\Omega^2 + \Omega^4) - 2\beta\omega^2\Omega \cos(t\Omega)) + 2\beta\omega^3\Omega \cos(t\omega))) / ((\beta^2 + \omega^2)^2 + 2\Omega^2(\beta - \omega)(\beta + \omega) + \Omega^4)}{e^{t\beta}} \quad (3.20)$$

Για μακρινό σεισμό

$$\int_0^t \ddot{f}(\tau) \sin \omega_n(t - \tau) d\tau = \frac{(A \omega (\sin(t \Omega) (t (\beta^2 + (\omega - \Omega)^2) (\beta^4 + \beta^2 (\omega^2 + 2 \Omega^2) - \omega^2 \Omega^2 + \Omega^4) (\beta^2 + (\omega + \Omega)^2) + 2 \beta \omega^2 (- (\beta^2 + \omega^2)^2 + 2 \Omega^2 (\beta - \omega) (\beta + \omega) + 3 \Omega^4))) + 2 \omega \Omega e^{t \beta} (-\omega \cos(t \omega) (-3 \beta^4 - 2 \beta^2 (\omega^2 + \Omega^2) + (\omega^2 - \Omega^2)^2) - \beta \sin(t \omega) (\beta^4 + 2 \Omega^2 (\beta^2 + \omega^2) - 2 \beta^2 \omega^2 - 3 \omega^4 + \Omega^4)) - 2 \omega^2 \Omega \cos(t \Omega) ((\beta^2 + \omega^2) (\beta^2 (t \beta + 3) + \omega^2 (t \beta - 1)) + 2 \Omega^2 (t \beta^3 - t \beta \omega^2 + \beta^2 + \omega^2) + \Omega^4 (t \beta - 1)))}{(e^{t \beta} ((\beta^2 + \omega^2)^2 + 2 \Omega^2 (\beta - \omega) (\beta + \omega) + \Omega^4)^2)} \quad (3.21)$$

όπου $\omega \rightarrow \omega_n$

3.3. Ελεύθερη καμπτική ταλάντωση του ΑΠ1

Αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω του προγράμματος SAP 2000 και υπολογίστηκαν οι τέσσερις πρώτες ιδιοπερίοδοι καμπτικής ταλάντωσης, ενώ αναπαραστάθηκαν γραφικά και οι αντίστοιχες συναρτήσεις σχήματος. Βρέθηκε ότι οι καμπτικές κανονικές μορφές (1^η έως 4^η) είναι αντίστοιχα η 1^η, η 7^η, η 32^η και η 75^η κανονική μορφή ταλάντωσης του προσομοιώματος (στις οποίες περιλαμβάνονται όλων των ειδών οι μορφές, ήτοι στρεπτικές, αξονικές, κελύφους, στρεπτοκαμπτικές και συνδυασμοί). Κατά συνέπεια, η συνεισφορά των δύο πρώτων καμπτικών μορφών (και για εξαντλητική ακρίβεια ίσως και της 3^{ης}) θα απαιτηθούν για τον προσδιορισμό της εξαναγκασμένης δυναμικής του

φορέα υπό οιοδήποτε είδος χρονικά εξαρτώμενης φόρτισης. Οι εν λόγω καμπτικές ιδιοπερίοδοι βρέθηκαν ίσες με:

$$T_1^{ΑΠ1} = 0.96428 \text{ sec}$$

$$T_2^{ΑΠ1} = 0.08054 \text{ sec}$$

$$T_3^{ΑΠ1} = 0.03055 \text{ sec}$$

$$T_4^{ΑΠ1} = 0.01685 \text{ sec}$$

Στο σημείο αυτό παρατίθενται οι αντίστοιχες καμπτικές ιδιοπερίοδοι $T_i^{κατ}$, όπως δόθηκαν από τον κατασκευαστή, προϊόν μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων βαθμονομημένες σε συσχετισμό με επί τόπου μετρήσεις.

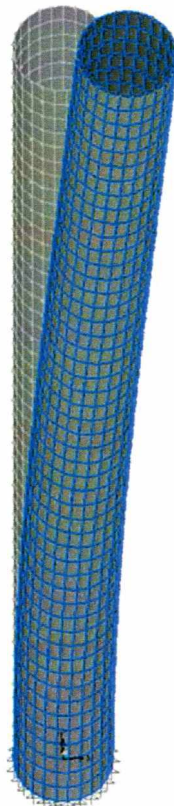
$$T_1^{κατ} = 1.044 \text{ sec}$$

$$T_2^{κατ} = 0.065 \text{ sec}$$

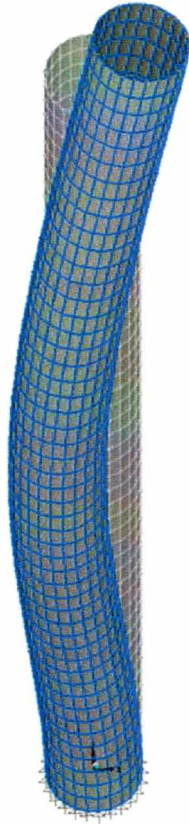
$$T_3^{κατ} = 0.031 \text{ sec}$$

$$T_4^{κατ} = 0.018 \text{ sec}$$

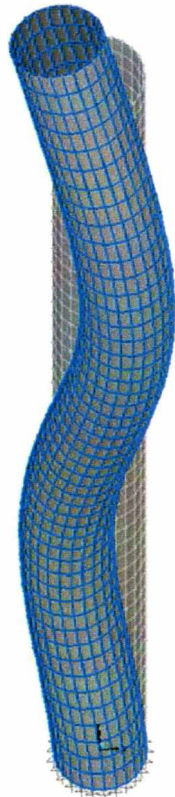
Η γραφική αναπαράσταση των τεσσάρων καμπτικών ιδιομορφών της ανάλυσης του ΑΠ1 δίδονται στο Σχήμα 3.1(α-δ).



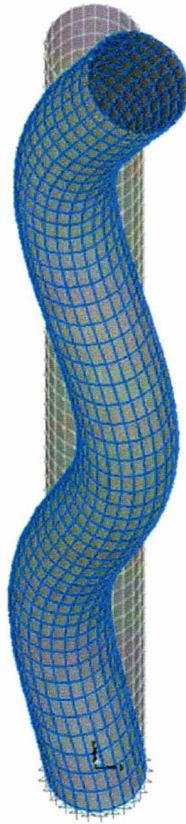
(α) 1^η ιδιομορφή



(β) 2^η ιδιομορφή



(γ) 3^η ιδιομορφή



(δ) 4^η ιδιομορφή

Σχήμα 3.1. Καμπτικές ιδιομορφές του ΑΠ1

3.4. Αριθμητικά αποτελέσματα του ΑΠ2

3.4.1. Ελεύθερη καμπτική ταλάντωση

Κάνοντας χρήση των γεωμετρικών και αδρανειακών παραμέτρων που βρέθηκαν σε προηγούμενο Κεφάλαιο, και επιλύοντας αριθμητικά την εξίσωση συχνότητας (3.8), υπολογίστηκαν οι τέσσερις πρώτες ιδιοπερίοδοι του ΑΠ2 και βρέθηκαν ίσες με:

$$T_{1}^{ΑΠ2} = 1.08617 \text{ sec}$$

$$T_{2}^{ΑΠ2} = 0.10127 \text{ sec}$$

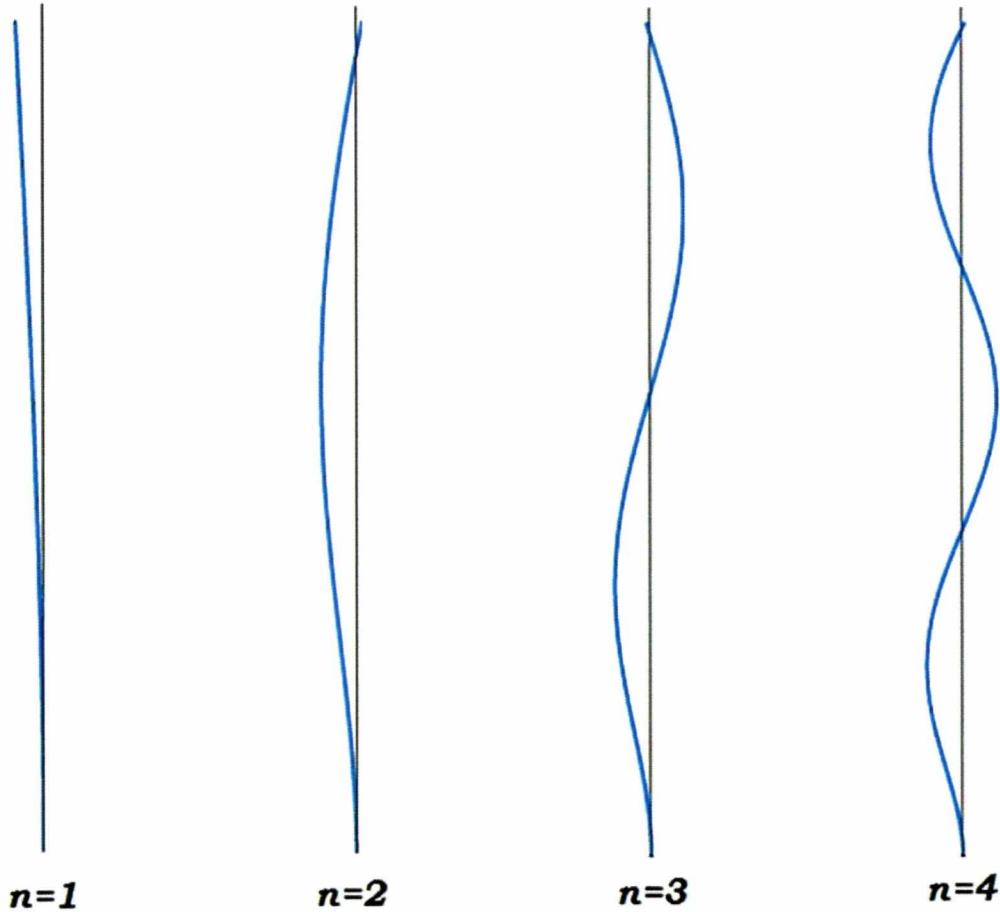
$$T_{3}^{ΑΠ2} = 0.03268 \text{ sec}$$

$$T_{4}^{ΑΠ2} = 0.01722 \text{ sec}$$

Παρατηρούμε ότι οι μεν καμπτικές ιδιοπερίοδοι του ΑΠ1 αποτελούν κάτω φράγματα και του ΑΠ2 άνω φράγματα των πραγματικών, και μάλιστα αυτές της

πραγματικής κατασκευής ισούνται περίπου με του μέσο όρο αυτών των ΑΠ1 και ΑΠ2.

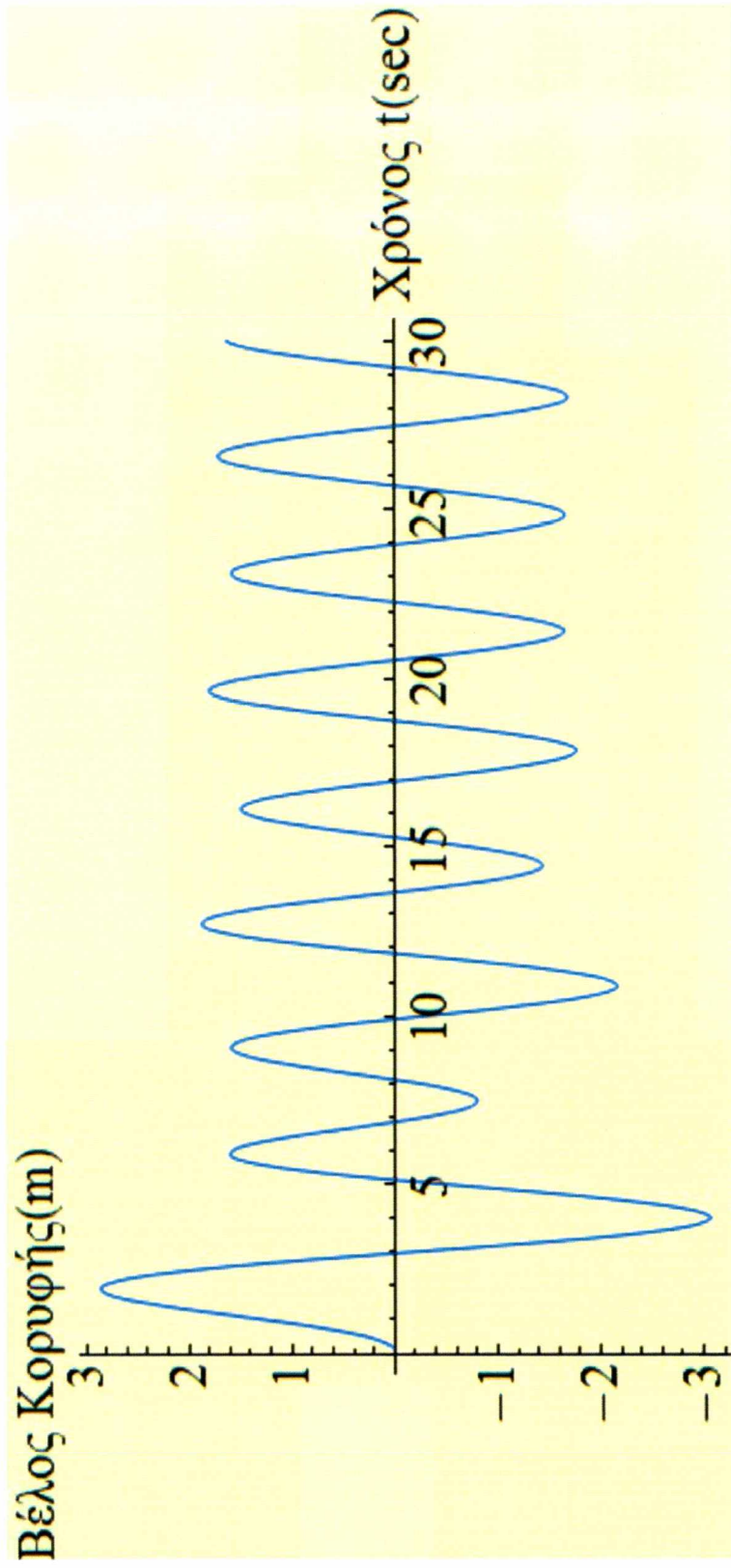
Για λόγους εποπτείας, στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται ποιοτικά οι τέσσερις πρώτες συναρτήσεις σχήματος, όπως προέκυψαν από την ανάλυση του ΑΠ2.



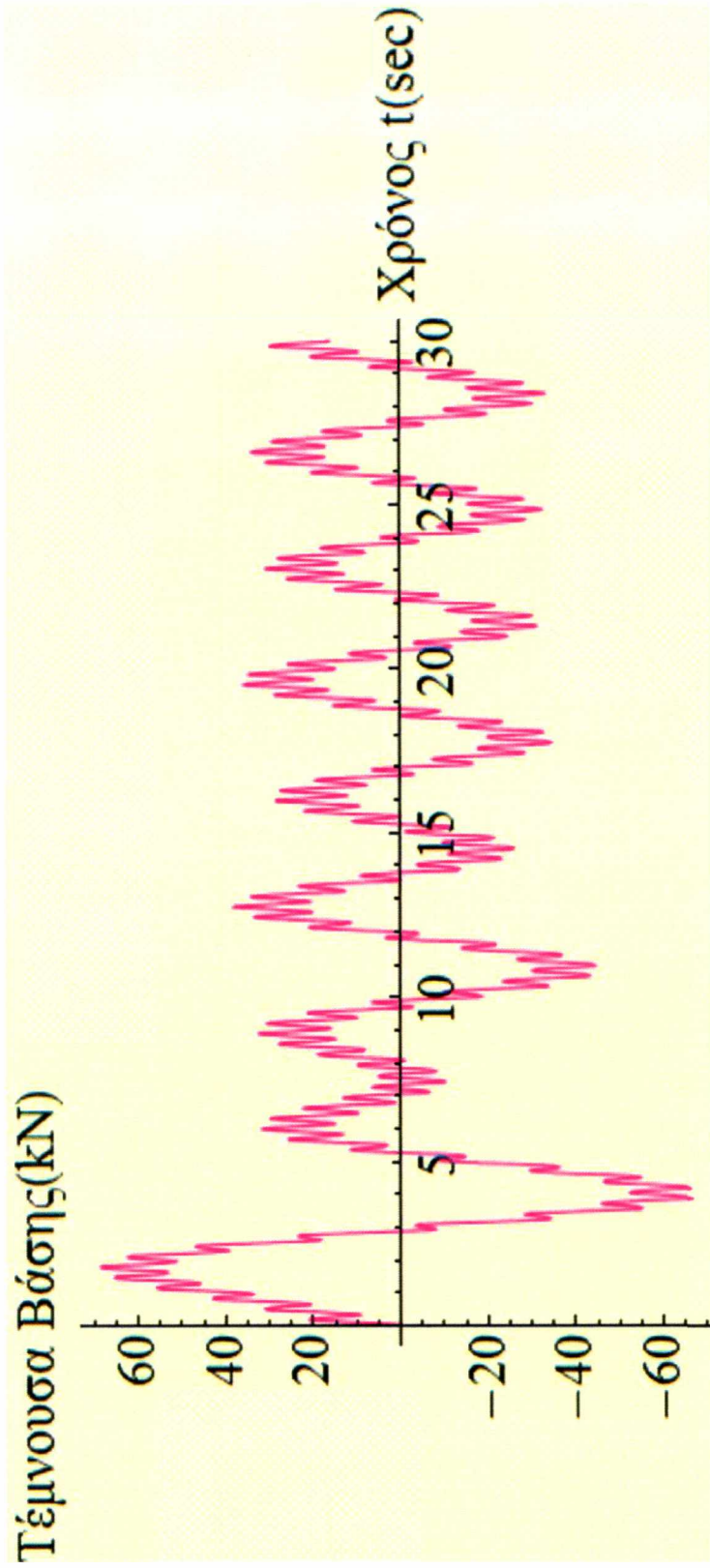
Σχήμα 3.2. Συναρτήσεις σχήματος του ΑΠ2

3.4.2. Εξαναγκασμένη καμπτική ταλάντωση

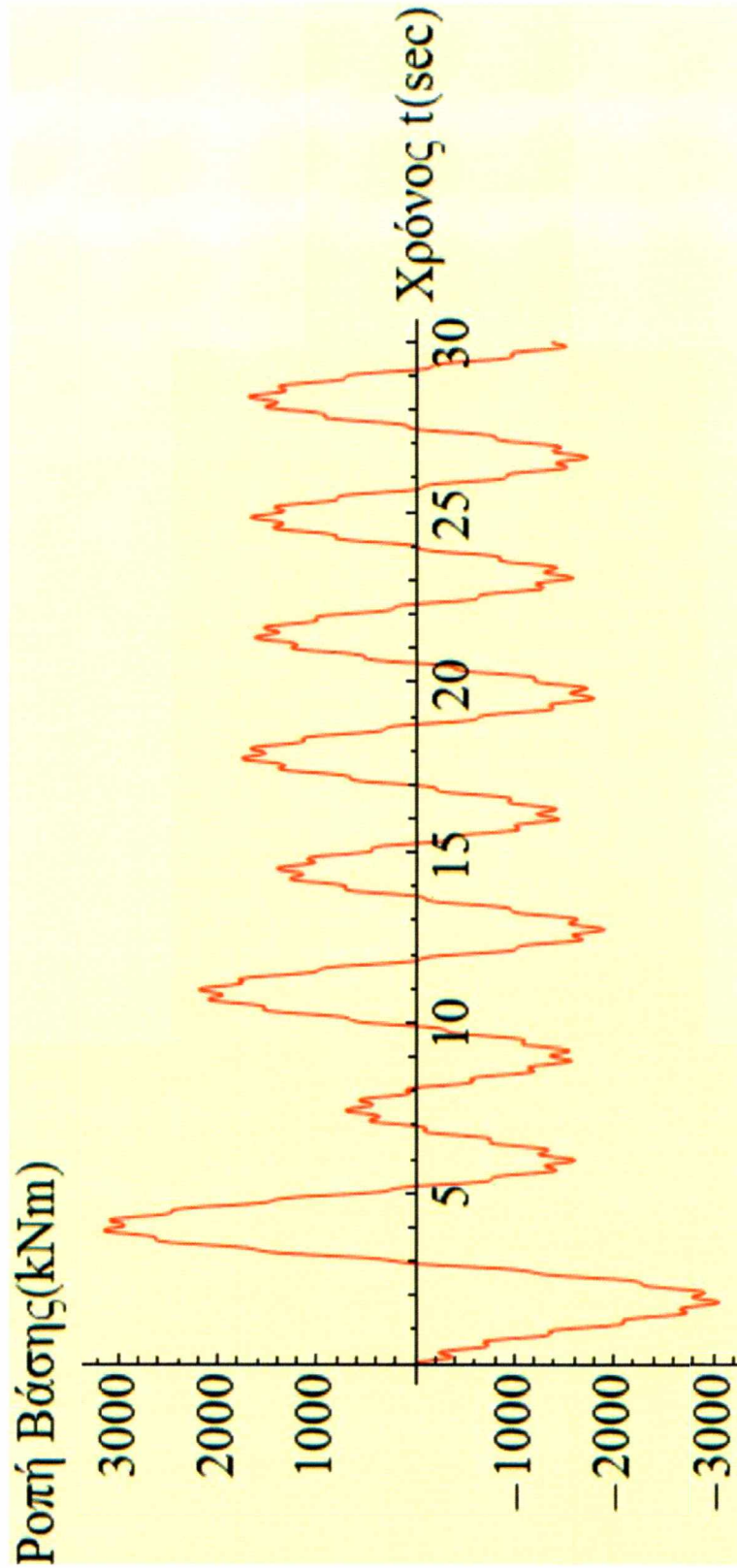
Με βάση την ανάλυση που προηγήθηκε, υπολογίστηκαν οι τιμές του δυναμικού βέλους κορυφής, της δυναμικής τέμνουσας βάσης και της δυναμικής ροπής βάσης του προσομοιώματος, με χρήση των τριών πρώτων ιδιομορφών για τα δύο είδη εδαφικών κινήσεων του Κεφαλαίου 2. Τα σχετικά διαγράμματα χρόνου – βέλους, χρόνου – τέμνουσας και χρόνου – ροπής παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.3 - 3.8, προϊόντα του *Mathematica*.



(a)

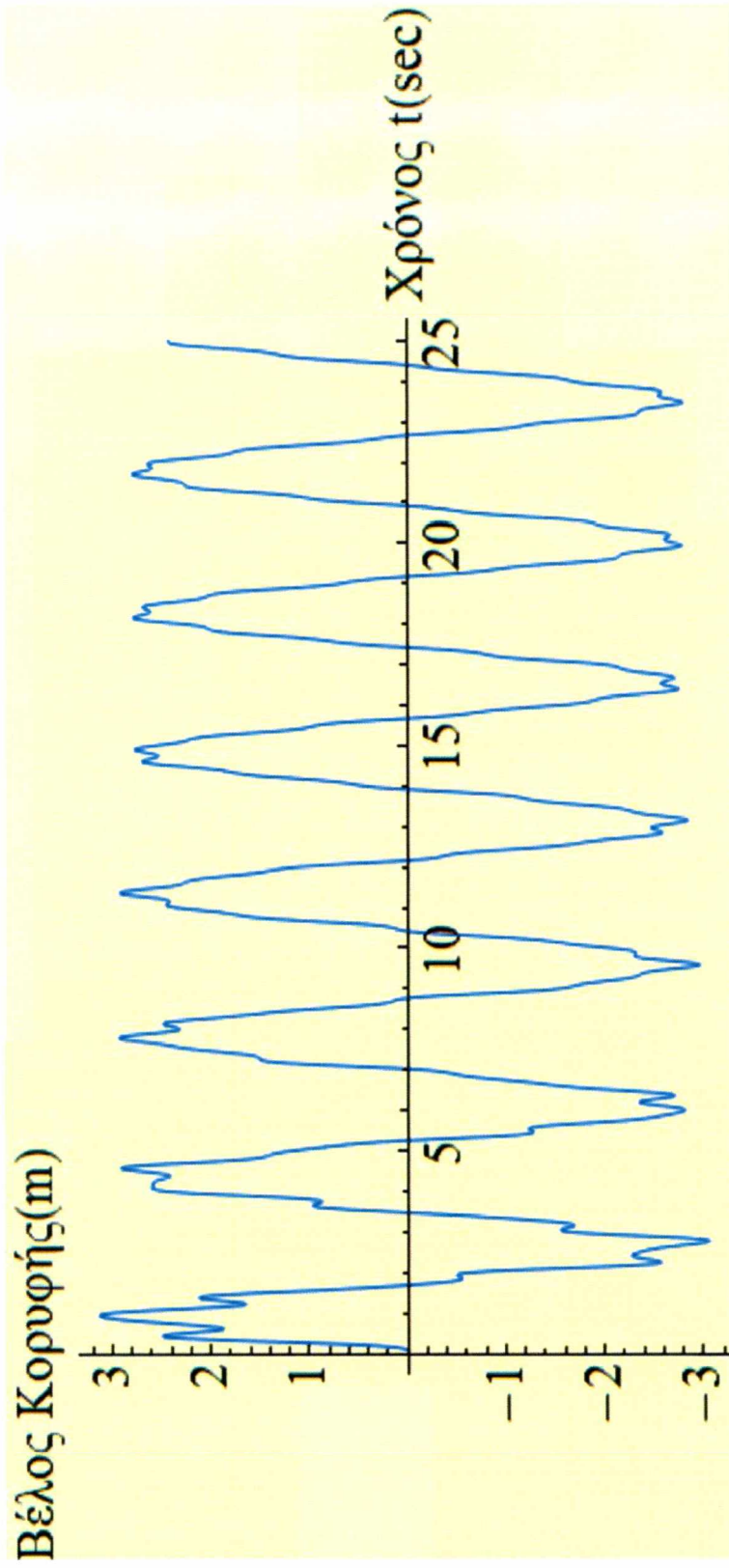


(β)

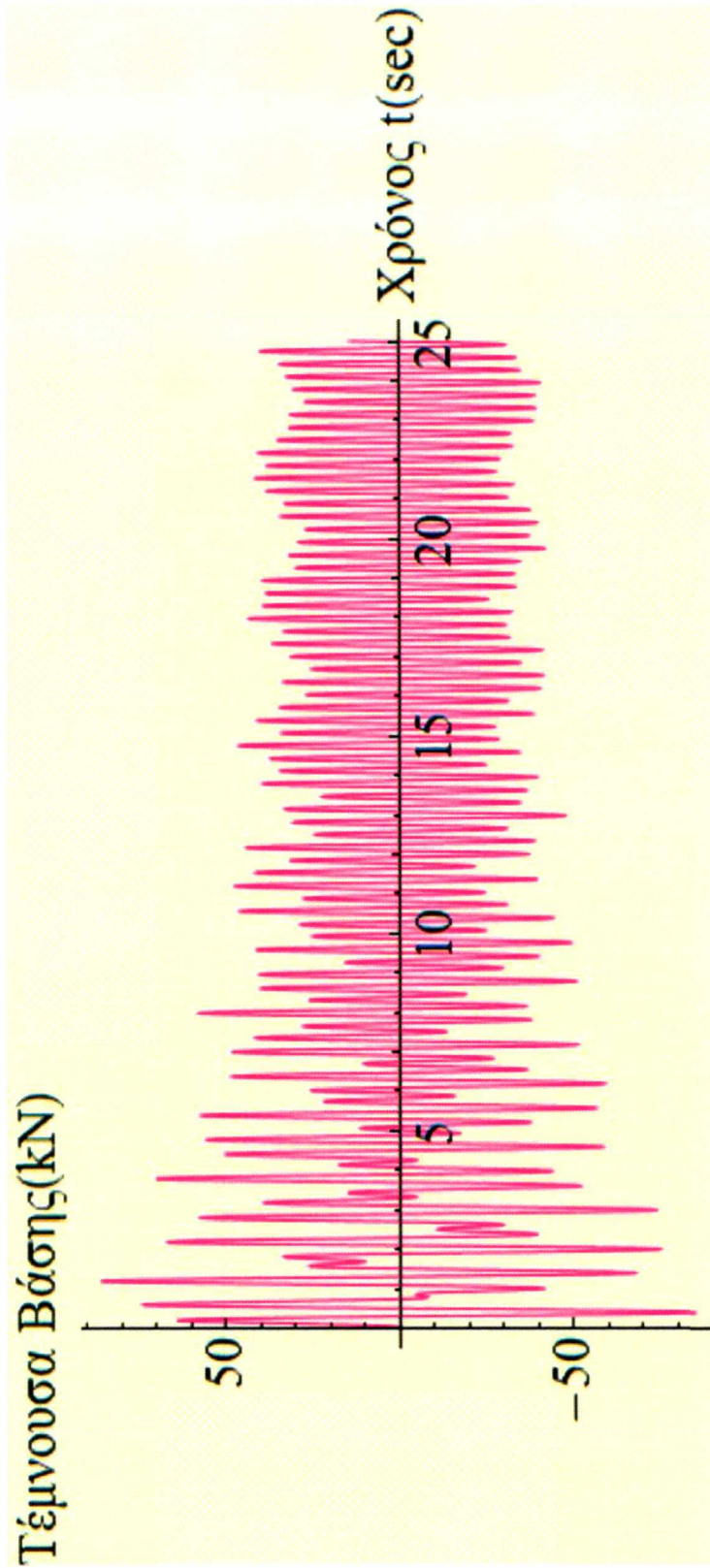


(γ)

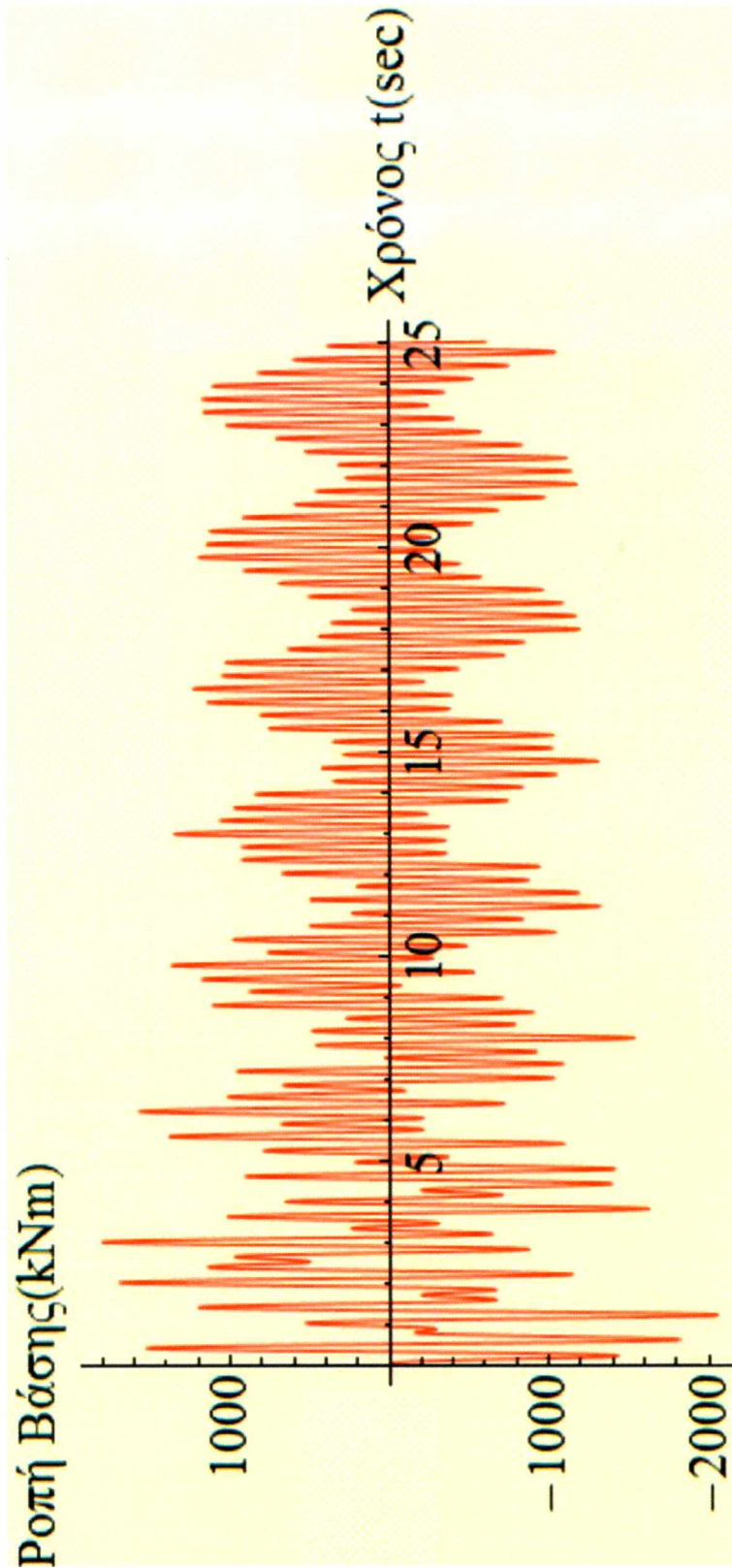
Σχήμα 3.3. Καμπύλη χρόνου – (α) βέλους κορυφής, (β) τέμνουσας βάσης και (γ) ροπής βάσης για τη σεισμική διέγερση Κ1



(a)

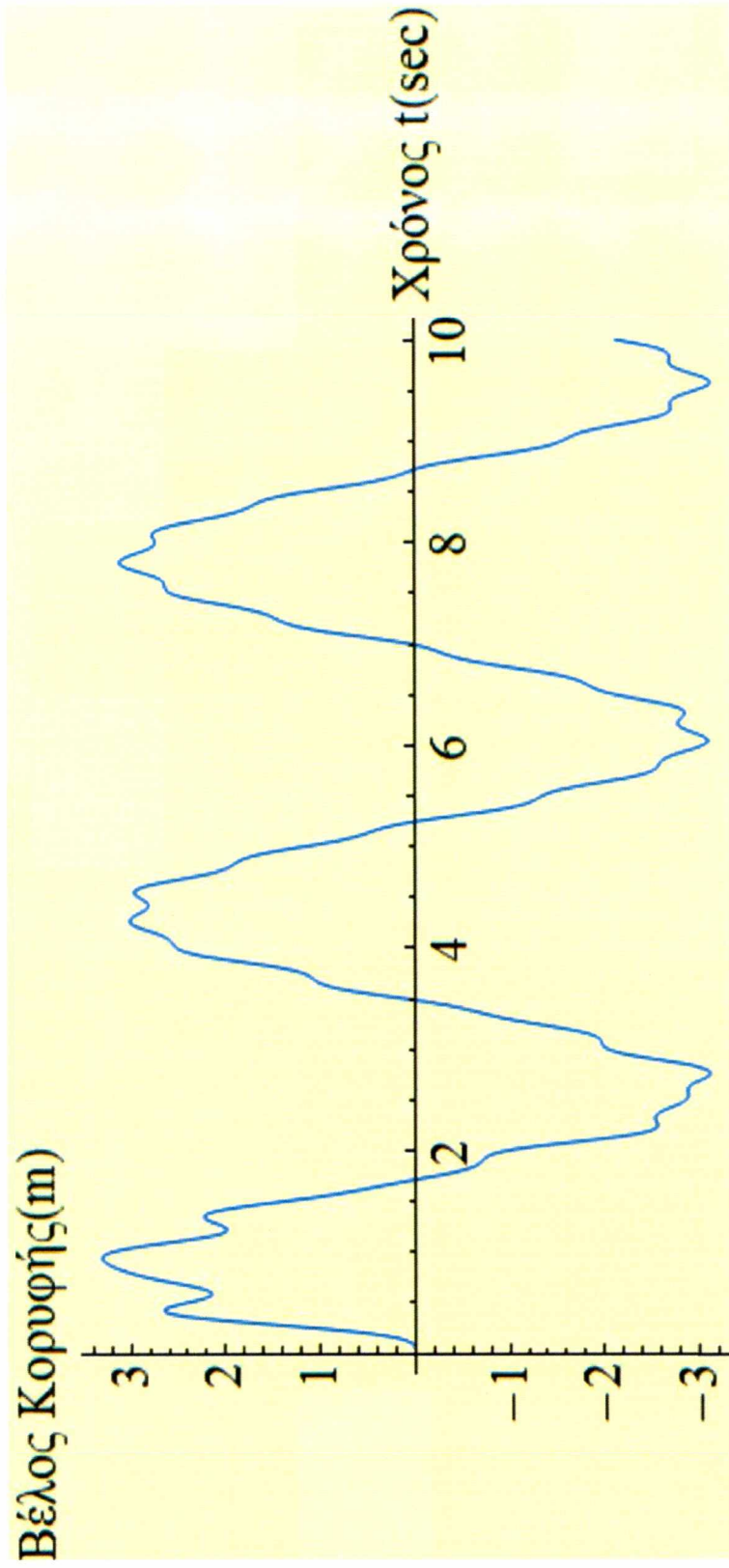


(β)

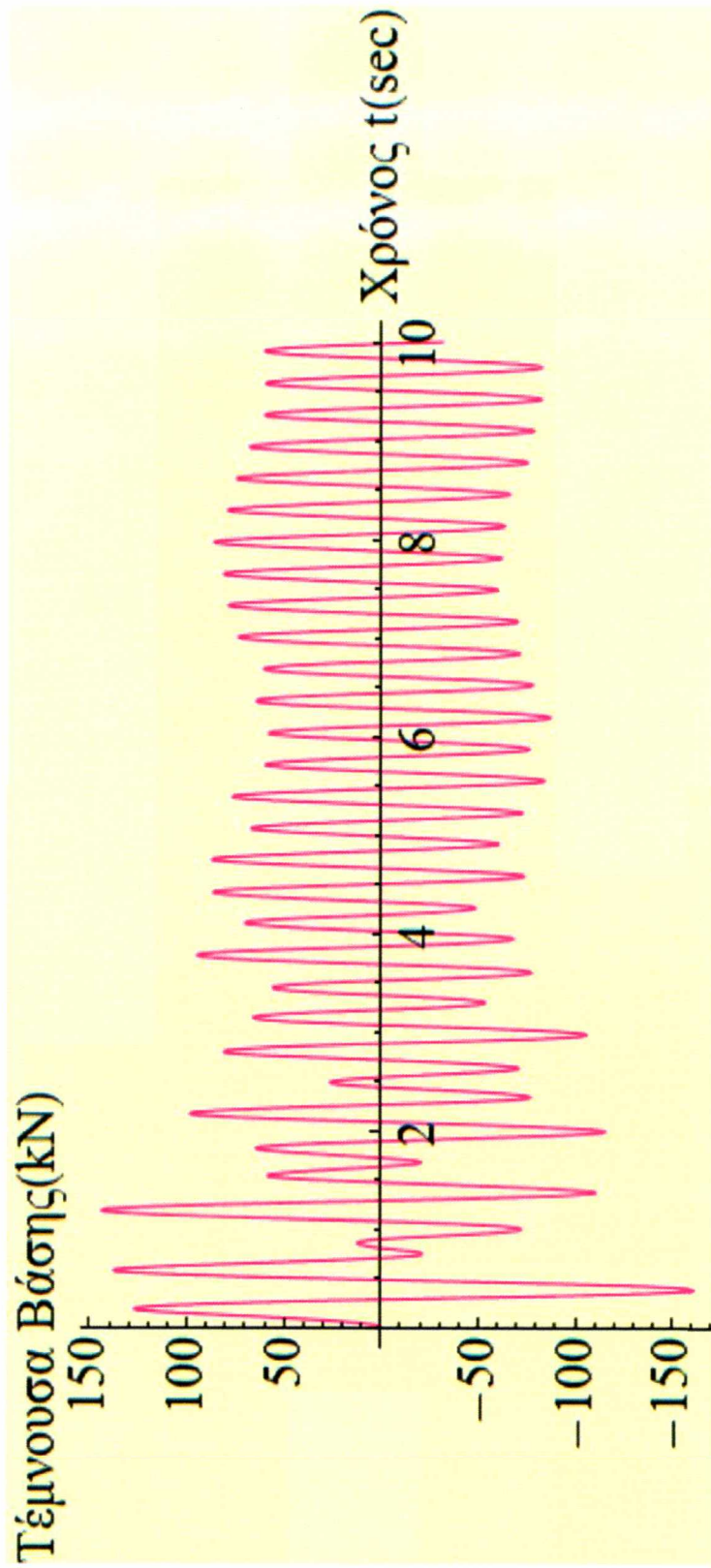


(γ)

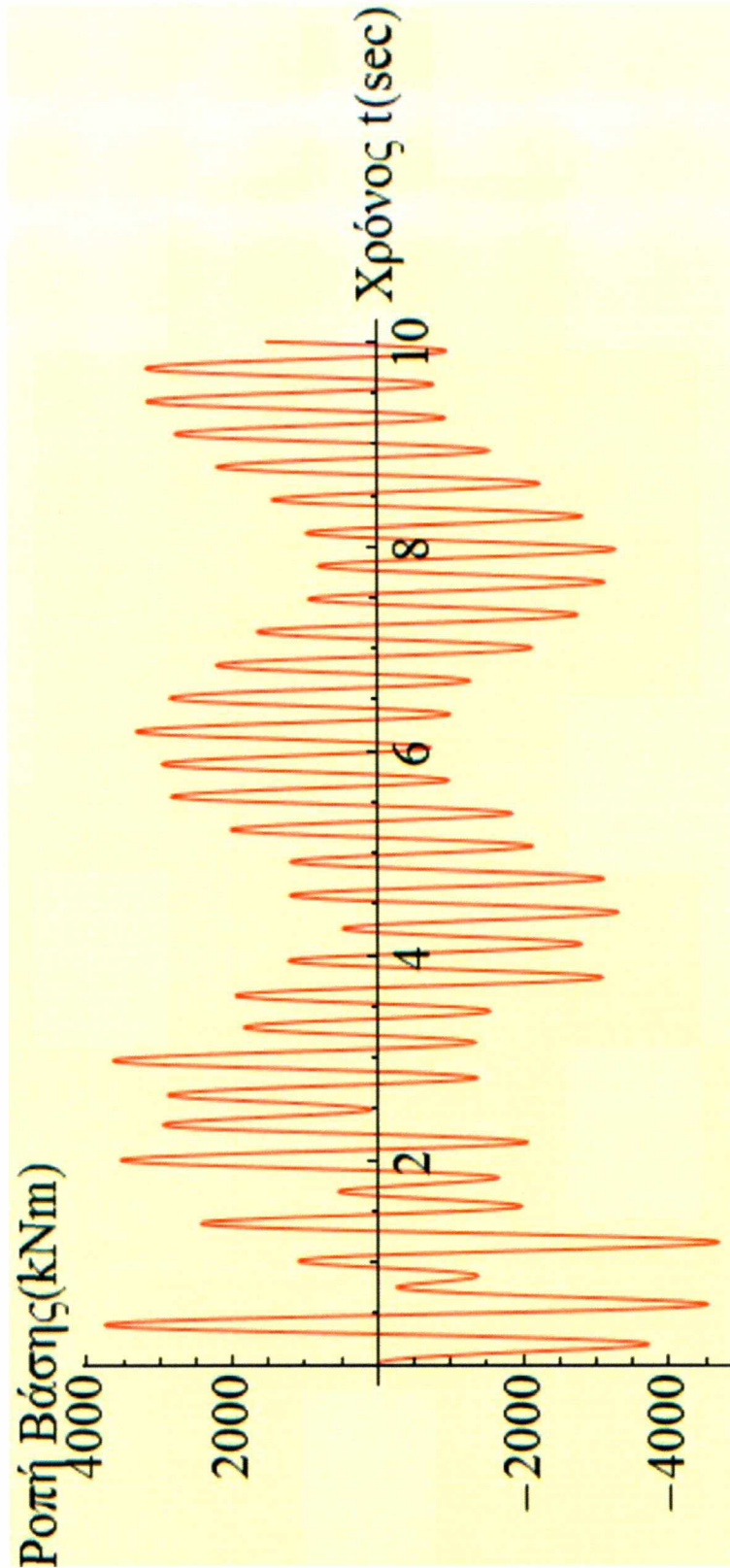
Σχήμα 3.4. Καμπύλη χρόνου – (α) βέλους κορυφής, (β) τέμνουσας βάσης και (γ) ροπής βάσης για τη σεισμική διέγερση K2



(a)

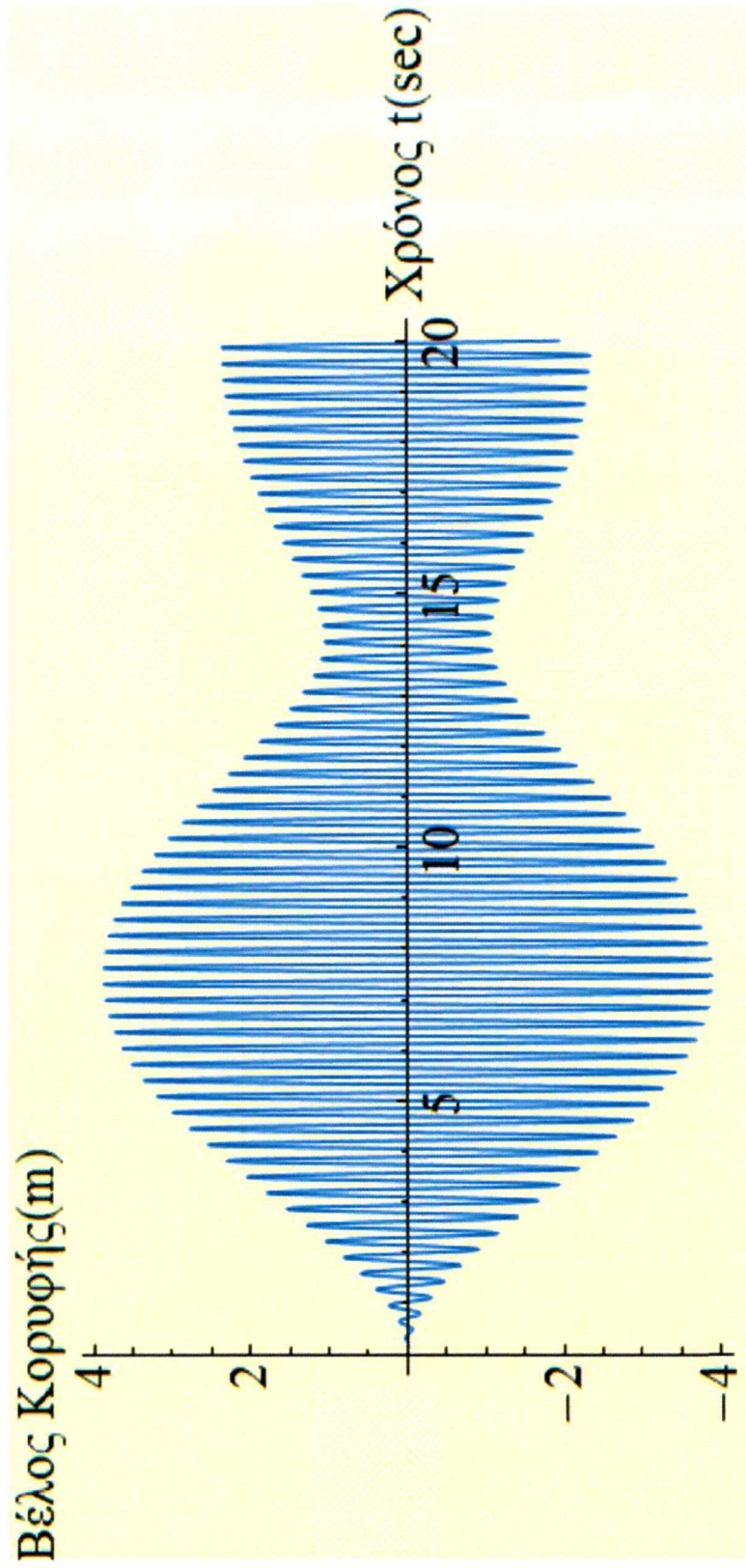


(β)

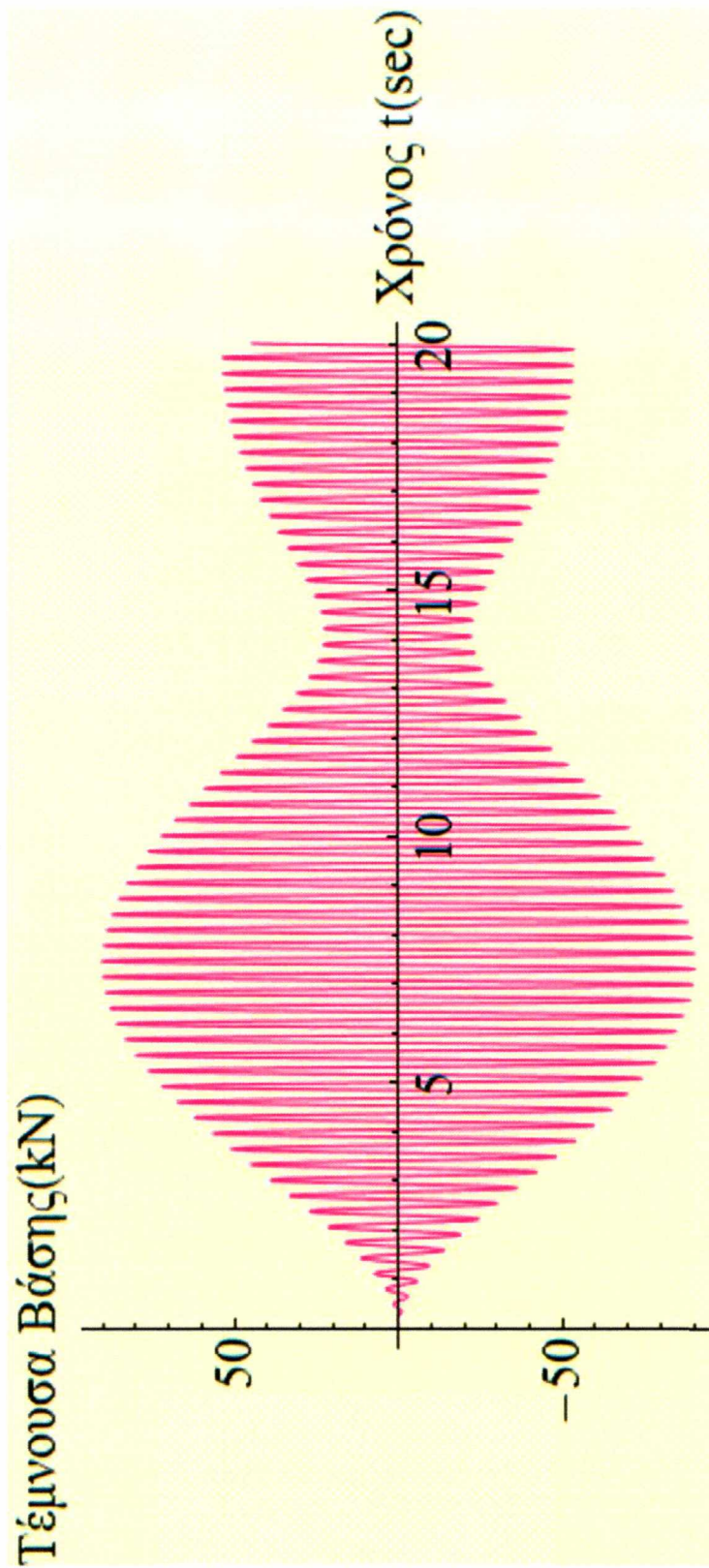


(γ)

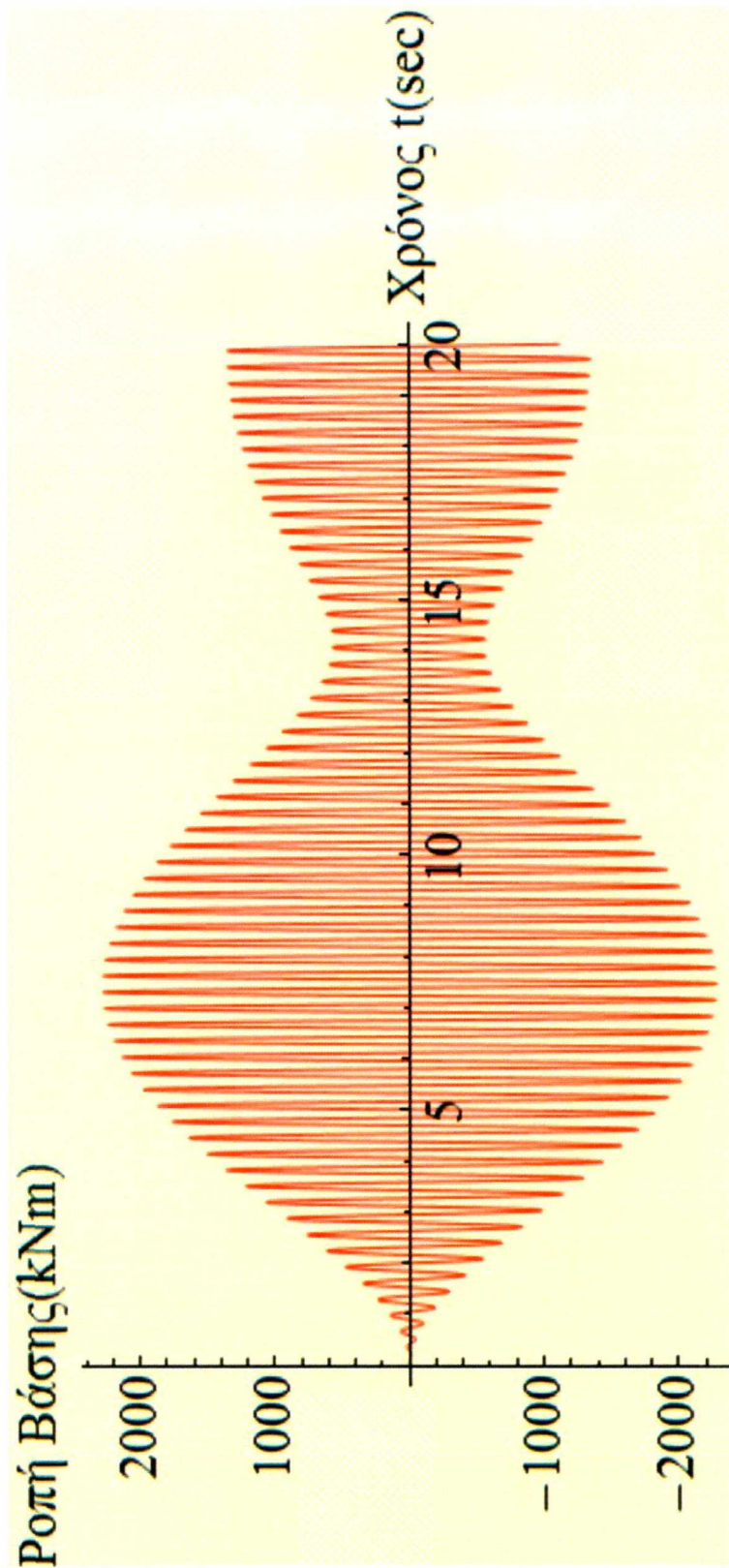
Σχήμα 3.5. Καμπύλη χρόνου – (α) βέλους κορυφής, (β) τέμνουσας βάσης και (γ) ροπής βάσης για τη σεισμική διέγερση Κ3



(a)

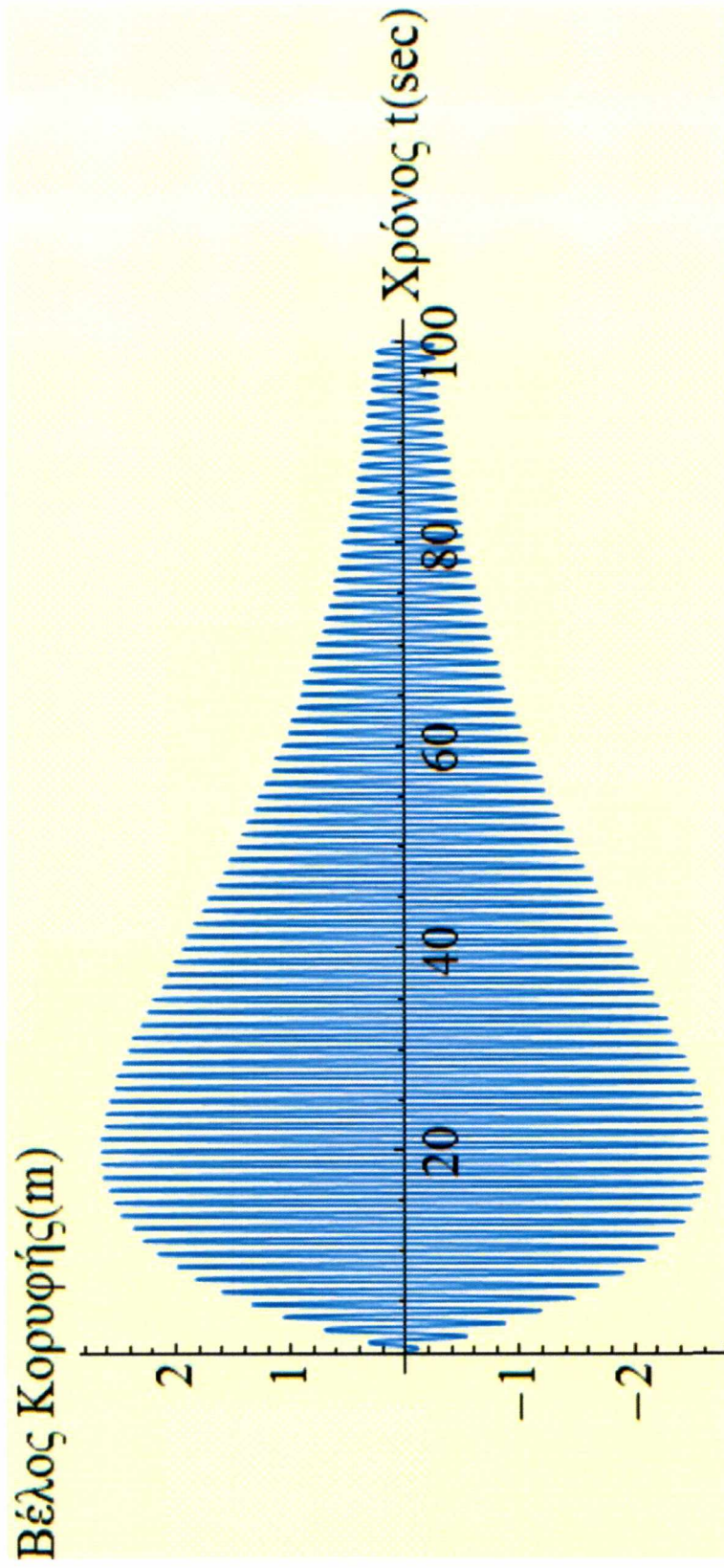


(β)

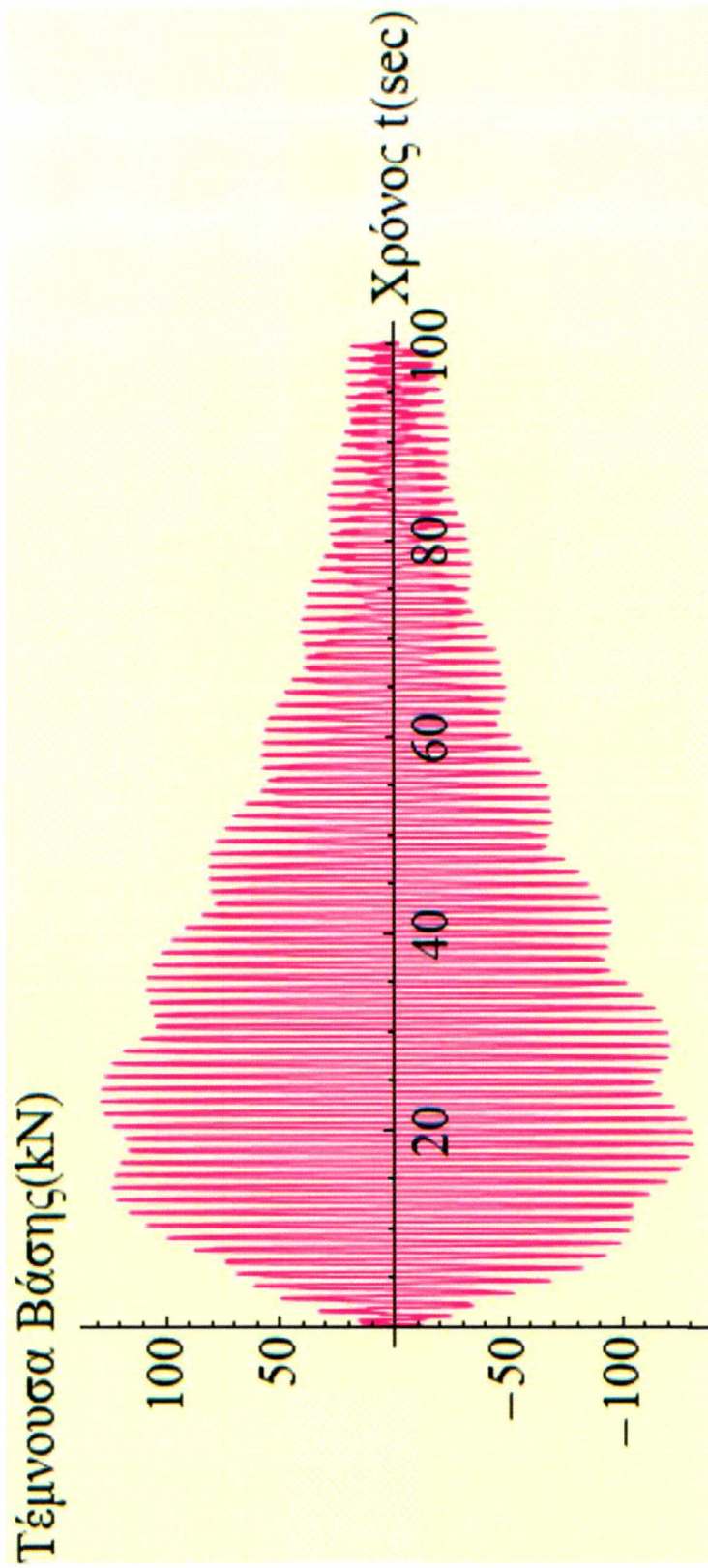


(γ)

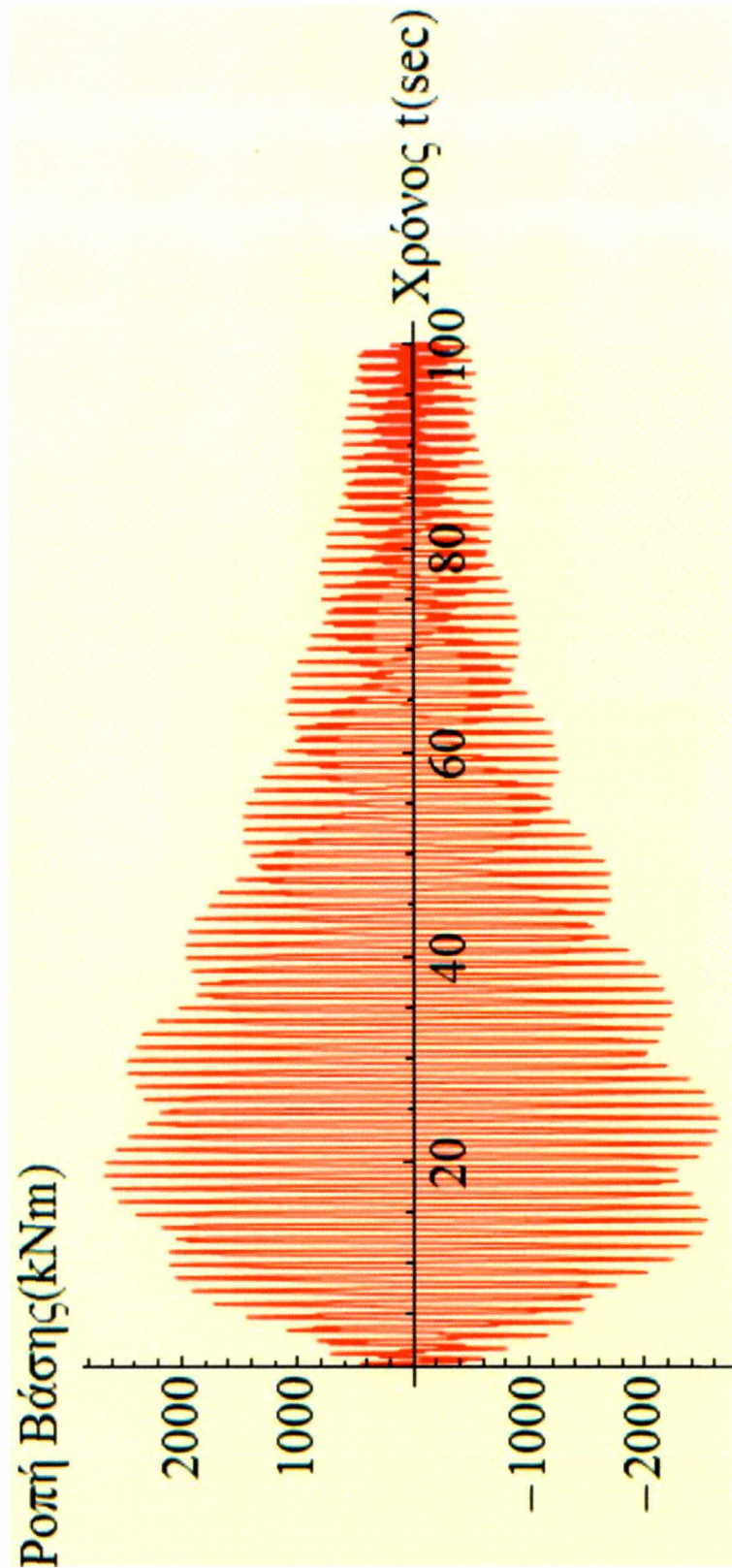
Σχήμα 3.6. Καμπύλη χρόνου – (α) βέλους κορυφής, (β) τέμνουσας βάσης και (γ) ροπής βάσης για τη σεισμική διέγερση M1



(a)

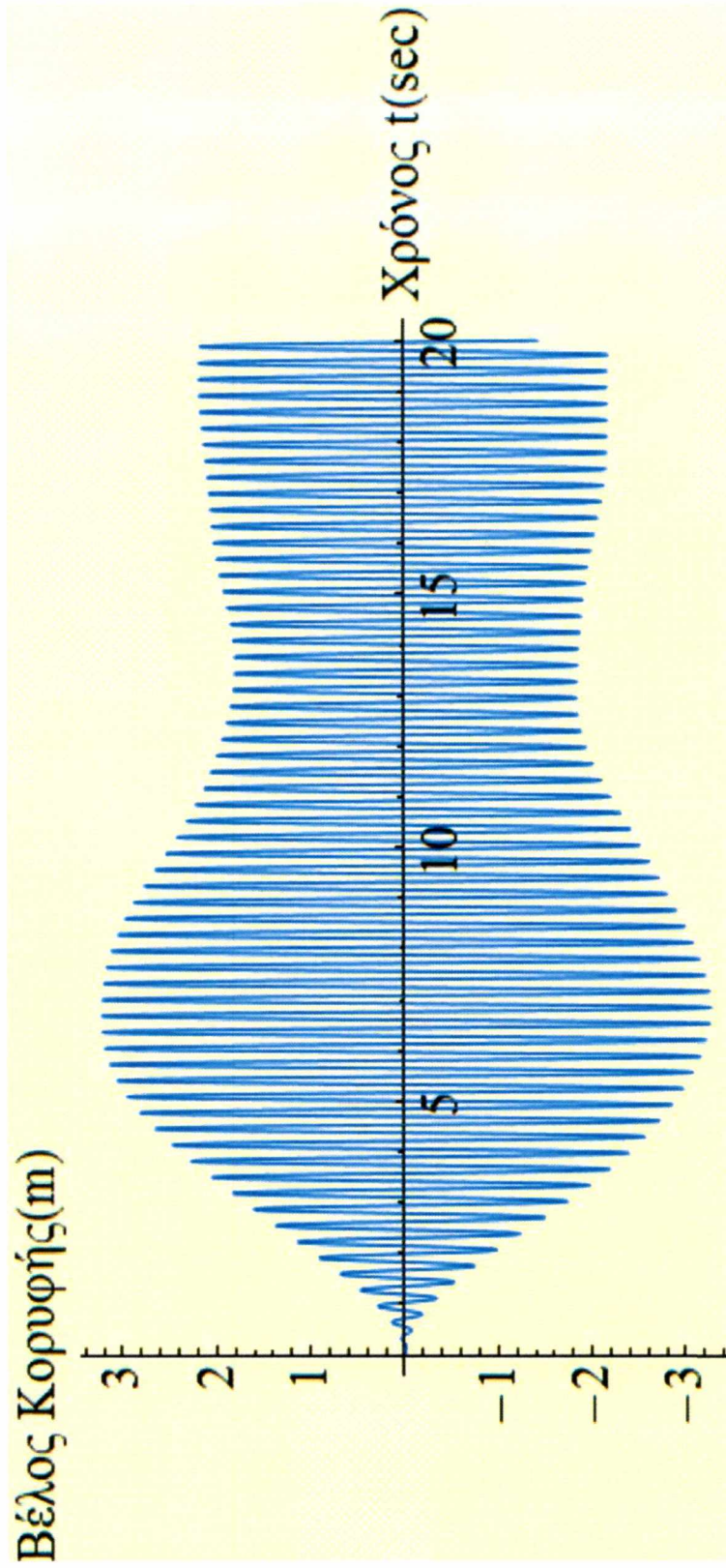


(β)

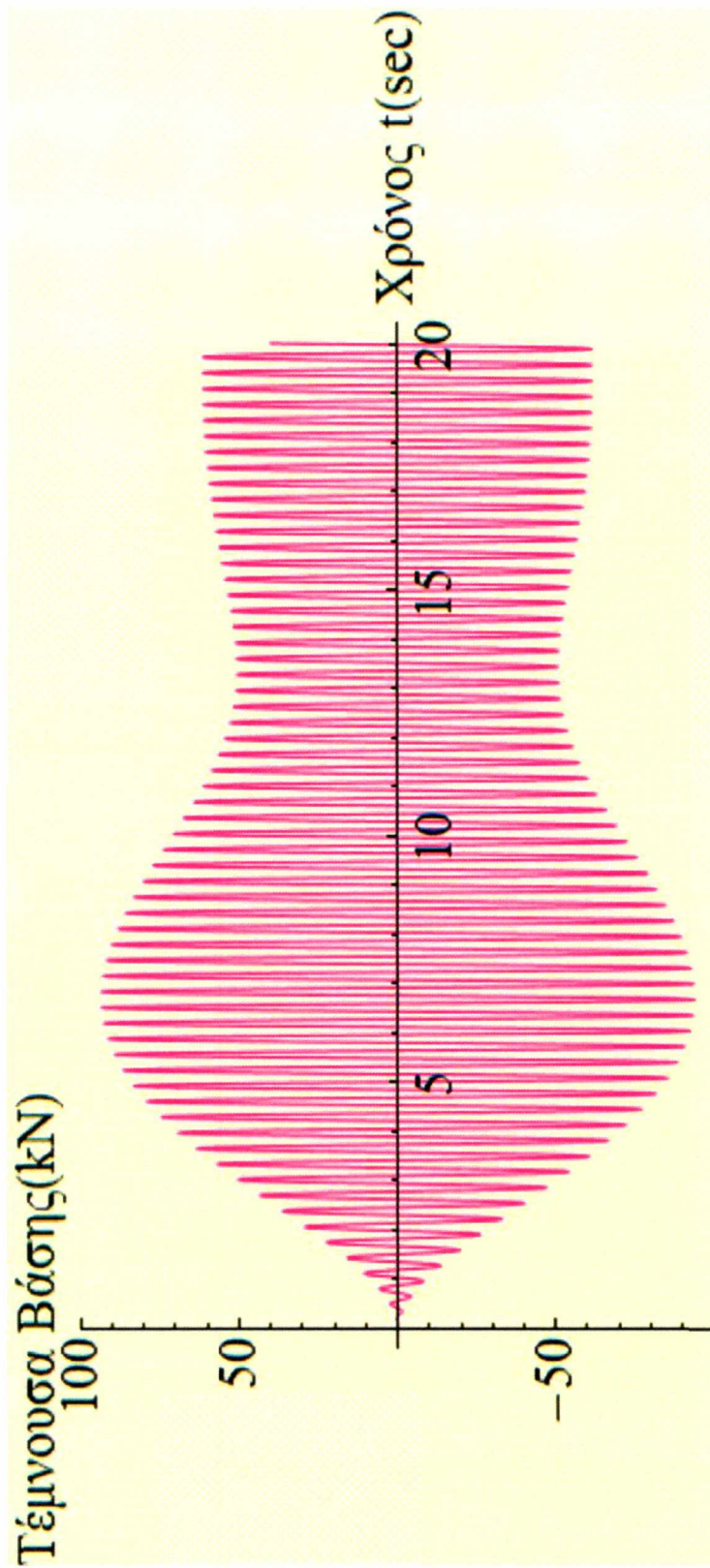


(γ)

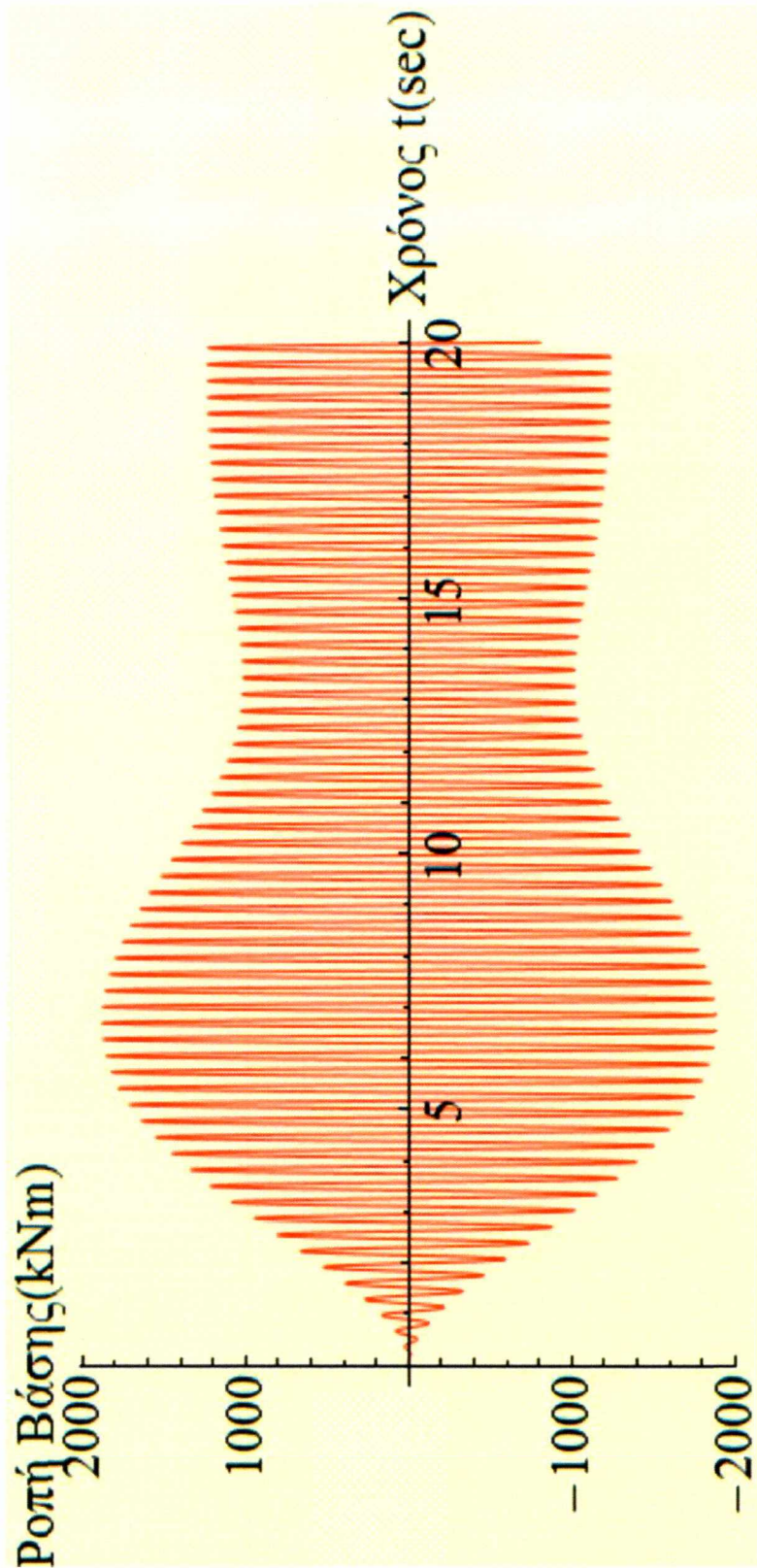
Σχήμα 3.7. Καμπύλη χρόνου – (α) βέλους κορυφής, (β) τέμνουσας βάσης και (γ) ροπής βάσης για τη σεισμική διέγερση M2



(a)



(β)



(γ)

Σχήμα 3.8. Καμπύλη χρόνου – (α) βέλους κορυφής, (β) τέμνουσας βάσης και (γ) ροπής βάσης για τη σεισμική διέγερση M3

Από τα ως άνω διαγράμματα, πέραν των διαφορών στη δυναμική απόκριση – ανάλογα με το είδος της διέγερσης – παρατηρείται ότι:

(α) Η μέγιστη δυναμική πλευρική μετατόπιση της κορυφής δεν υπερβαίνει τα 4m,

(β) Η μέγιστη δυναμική τέμνουσα βάσης δεν υπερβαίνει τα 150 kN και

(γ) Η μέγιστη δυναμική ροπή κάμψης στη βάση δεν υπερβαίνει τα 4000 kNm.

Τα ακριβή μέγιστα των ως άνω μεγεθών, και η χρονική στιγμή που εμφανίζονται μπορούν εύκολα να ευρεθούν, πλην όμως τούτο είναι ήσσονος σημασίας στα πλαίσια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας, όπου προέχει η σύγκριση των δυναμικών αναλύσεων μεταξύ των προτεινόμενων προσομοιωμάτων αλλά και της πραγματικής κατασκευής, όπου υπάρχει η προς τούτο δυνατότητα.

3.5. Αριθμητικά Αποτελέσματα Εξαναγκασμένης

Ταλάντωσης του ΑΠ1

Πραγματοποιήθηκε σεισμική δυναμική ανάλυση του προσομοιώματος ΑΠ1 μέσω του λογισμικού SAP 2000, με βάση φάσμα απόκρισης κατά Ευρωκώδικα 8, με απόσβεση 5% και χρήση των 50 πρώτων ιδιομορφών. Το φάσμα, τα χαρακτηριστικά του οποίου απεικονίζονται στο Σχήμα 3.9, σχεδιάστηκε κατά τρόπον ώστε η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση να είναι περίπου 0.30g, ώστε να υπάρχει αναλογία με τις μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις των προσομοιωμένων σεισμικών διεγέρσεων M1 – M3 και K1 – K3, σύμφωνα με την παράγραφο 2.4 του προηγούμενου Κεφαλαίου. Από την ανάλυση αυτή υπολογίστηκαν οι αντιδράσεις στη βάση και οι μετατοπίσεις στην κορυφή της κατασκευής, που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.10 – 3.13. Αυτά έχουν προκύψει μετά από απ' ευθείας γραφική αναπαράσταση, κατά περίπτωση, με βάση το ως άνω λογισμικό.

Load Case Data - Response Spectrum

Load Case Name: ACASE1 Set Def Name Modify/Show... Notes: Modify/Show... Load Case Type: Response Spectrum Design...

Modal Combination:

- CQC
- SRSS
- Absolute
- GMC
- NRC 10 Percent
- Double Sum

 GMC f1: 1.0
 GMC f2: 0.0
 Periodic + Rigid Type: SRSS

Directional Combination:

- SRSS
- Absolute

 Scale Factor:

Modal Load Case: Use Modes from this Modal Load Case: MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	FUNC2	1
Accel	U1	FUNC2	1

Add Modify Delete

Show Advanced Load Parameters

Other Parameters: Modal Damping: Constant at 0.05 Modify/Show...

OK Cancel

Response Spectrum EuroCode 8 - 2004 Function Definition

Function Name: FUNC2 Function Damping Ratio: 0.05

Parameters:

- Country: CEN Default
- Direction: Horizontal
- Horizontal Ground Accel., Ag: 0.2
- Spectrum Type: 1
- Ground Type: B
- Soil Factor, S: 1.2
- Acceleration Ratio, Avg/Ag:
- Spectrum Period, Tb: 0.15
- Spectrum Period, Tc: 0.5
- Spectrum Period, Td: 2.
- Lower Bound Factor, Beta: 0.2
- Behavior Factor, q: 2.

Define Function:

Period	Acceleration
0.	0.16
0.05	0.2067
0.1	0.2533
0.15	0.3
0.5	0.3
0.75	0.2
1.	0.15
1.25	0.12
1.5	0.1

Add Modify Delete

Function Graph:

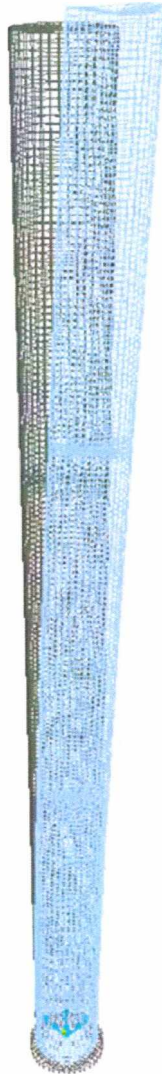
Convert to User Defined Display Graph

OK Cancel

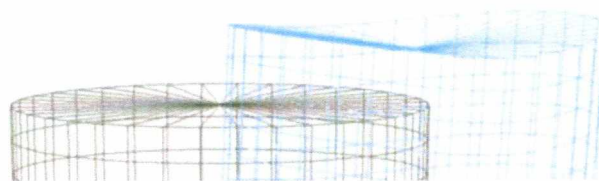
Σχήμα 3.9. Φάσμα απόκρισης για το ΑΠ1

TABLE: Αντιδράσεις Βάσης								
OutputCase	CaseType	StepType	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ
Text	Text	Text	KN	KN	KN	KN-m	KN-m	KN-m
ACASE1	LinRespSpec	Max	190,362	83,114	0,0000995	2011,9373	4584,6687	0,0031

Σχήμα 3.10. Μέγιστα εντατικά μεγέθη βάσης (z ο κατακόρυφος άξονας)

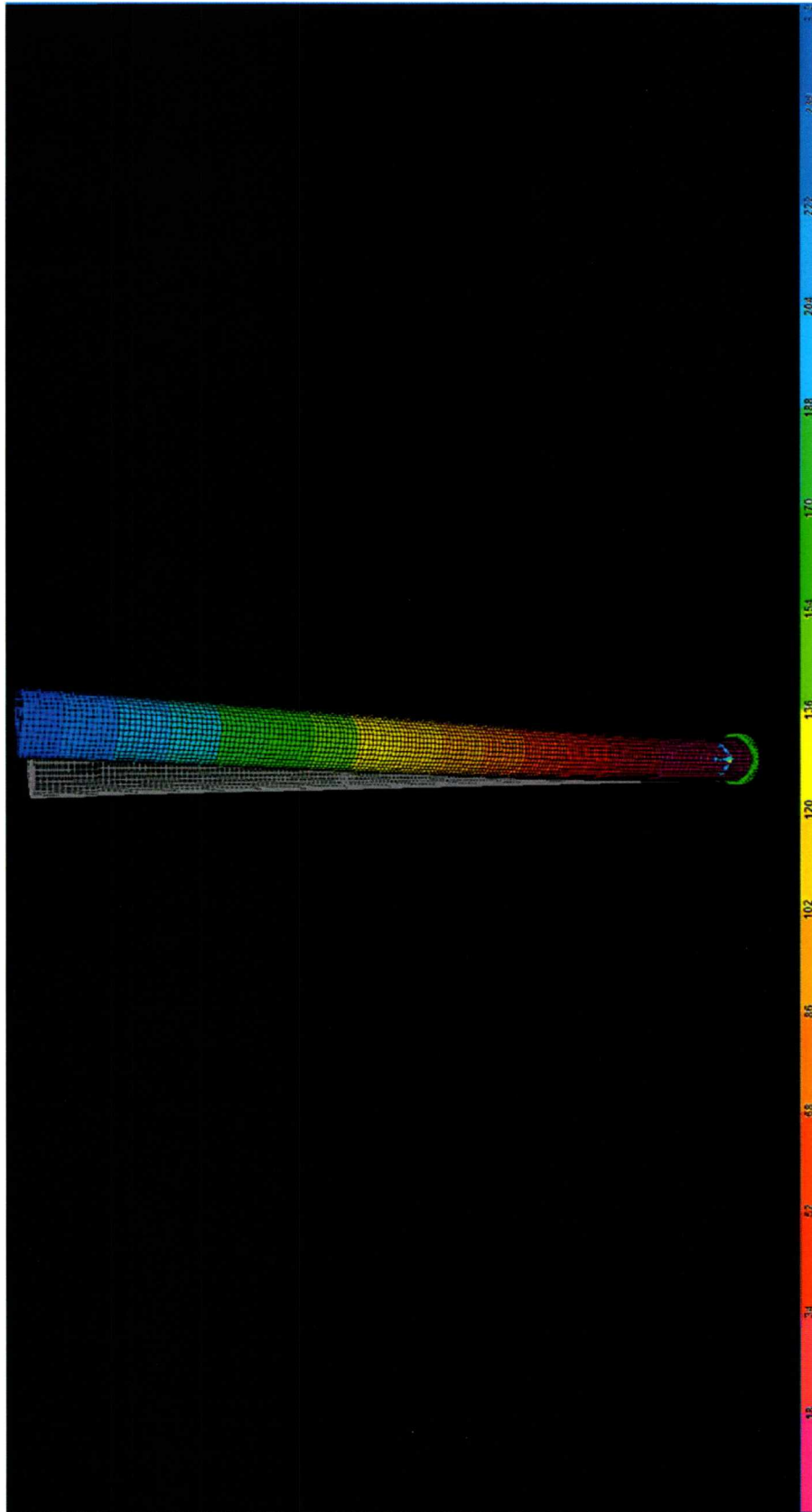


(a)



(β)

Σχήμα 3.11. Τρισδιάστατη απεικόνιση περιβάλλουσας σεισμικών παραμορφώσεων (α) και λεπτομέρεια στην κορυφή (β)



Σχήμα 3.12. Περιβάλλουσα σεισμικών πλευρικών μετακινήσεων

3.6. Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων – Σχολιασμός και

Συμπεράσματα

Σε συνέχεια των ιδιαίτερα χρήσιμων συμπερασμάτων, τα οποία εξήχθησαν από τη σύγκριση των καμπτικών ιδιοπεριόδων των ΑΠ1, ΑΠ2 και της πραγματικής κατασκευής (§3.4.1), στην παρούσα παράγραφο επιχειρείται συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εξαναγκασμένης (σεισμικής) ταλάντωσης των δύο προτεινόμενων απλουστευμένων προσομοιωμάτων, που παρουσιάστηκαν προηγούμενα.

Σε ότι αφορά την πλευρική μετατόπιση κορυφής, το ΑΠ1 εμφάνισε μέγιστη τιμή ίση με 2.42m, ενώ το ΑΠ2 από 3 – 4 m περίπου. Παρατηρείται συνεπώς μια αύξηση τάξης 24 – 67%, δοθέντος δε του γεγονότος ότι το ΑΠ1 είναι μοντέλο κελύφους με συγκεντρωμένη μάζα και αδράνεια στην κορυφή, ότι το υλικό του διαθέτει απόσβεση και ακόμα ότι οι ιδιομορφές του δεν είναι μόνο καμπτικές, η αύξηση αυτή ήταν λογική και αναμενόμενη.

Αντίθετα, λόγω της τρισδιάστασης έντασης που αναπτύσσεται στη βάση, οι μέγιστες τέμνουσες και ροπές κάμψης εκεί για το μοντέλο ΑΠ1 υπολογίστηκαν 190 kN και 4585 kNm αντίστοιχα, που συγκριτικά με αυτές του ΑΠ2 (150 kN, 4000 kNm) είναι μεγαλύτερες. Το ποσοστό αύξησης τους βρέθηκε περίπου 27% για την τέμνουσα βάση και 14.7% για την καμπτική ροπή. Σημειωτέον επίσης ότι οι ταλαντώσεις του ΑΠ2 ήταν εντός ενός επιπέδου και μόνο καμπτικές, ενώ του ΑΠ1 στο χώρο. Κατά συνέπεια, η αύξηση της έντασης δικαιολογείται, παρόλη την απόσβεση, η επιρροή της οποίας είναι έκδηλη σε μεγαλύτερα ύψη.

Θα ήταν ιδεώδες να είχαν ευρεθεί μετρήσεις σχετικές με την απόκριση της κατασκευής σε σεισμικά συμβάντα, τούτο όμως δεν κατέστη δυστυχώς δυνατόν, έτσι ώστε να υπάρξει συνολική σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Συμπερασματικά, αμφότερα τα μοντέλα παρέχουν άκρως χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τα χαρακτηριστικά ελεύθερης και σεισμικής ταλάντωσης της κατασκευής και σε μπορούν σε ικανοποιητικό

βαθμό να δώσουν προκαταρκτικές πληροφορίες στο μελετητή, σε ότι αφορά αναμενόμενα μέγιστα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη, τα οποία θα αποτελέσουν μέτρο για την ανάλυση μέσω εξειδικευμένου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων που οπωσδήποτε πρέπει να πραγματοποιηθεί. Πιθανολογείται δε ότι αν η ανάλυση του ΑΠ2 περιείχε και απόσβεση, η διαφορά της απόκρισης μεταξύ των δύο προτεινόμενων απλουστευμένων προσομοιωμάτων θα ήταν μικρότερη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Das, S.C. and Linscott, B.S. (1977): “Approximate Method for Calculating Free Vibrations of a Large-Wind-Turbine Tower Structure”, Report ERDA/NASAn1028-77/12, NASA TM-73754, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, USA.
2. Κουνάδης, Α.Ν.: *Δυναμική των Συνεχών Ελαστικών Συστημάτων, Τόμος Α': Γραμμικοί Φορείς*, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 1989.
3. Farlow, S.L.: *Partial Differential Equations for Scientists and Engineers*, Dover Publications, 1993.
4. Vølund, P. and Petersen S.M. (1998): “Validation of Aeroelastic Model for Nordtank 500/37”, Report Risø-R-1006(EN), Risø National Laboratory, Roskilde Denmark.
5. ΕΑΚ 2000, *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός*, ΟΑΣΠ.
6. Bazeos, N., Hatzigeorgiou, G.D., Hondros, I.D., Karamaneas, H. Karabalis, D.L., Beskos, D.E. (2002): “Static, seismic and stability analysis of a prototype wind turbine steel tower”, *Engineering Structures* 24, 1015 – 1025.
7. Dubin, D.H.E.: *Numerical and Analytical Methods for Scientists and Engineers, Using Mathematica*, Wiley-Interscience, 2003.
8. Lavassas, I., Nikolaidis, G., Zervas, P. Efthimiou, E, Doudoumis, I.N. Baniotopoulos, C.C. (2003): “Analysis and Design of a steel 1-MW wind turbine tower”, *Engineering Structures* 25, 1097 – 1106.
9. Ευρωκώδικας 8: *Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών – Μέρος 1: Γενικοί Κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια*, ΕΛΟΤ EN 1998.01, 2004.
10. Ευρωκώδικας 3: *Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα – Μέρος 3-1: Πύργοι, ιστοί και καπνοδόχοι – Πύργοι και ιστοί*, ΕΛΟΤ EN 1993.03.01, 2006.
11. Ευρωκώδικας 3: *Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα – Μέρος 1-6: Αντοχή και ευστάθεια κελυφωτών κατασκευών*, ΕΛΟΤ EN 1993.01.06, 2007.

12. CSI. SAP 2000: *Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures: Analysis Reference*, Computer and Structure Inc., University of California, Berkeley, 2007.
13. Clough, R.W. and Penzien, J.: *Dynamics of Structures* (2nd revised edition), Computers and Structures Inc., 2010.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ



004000114164