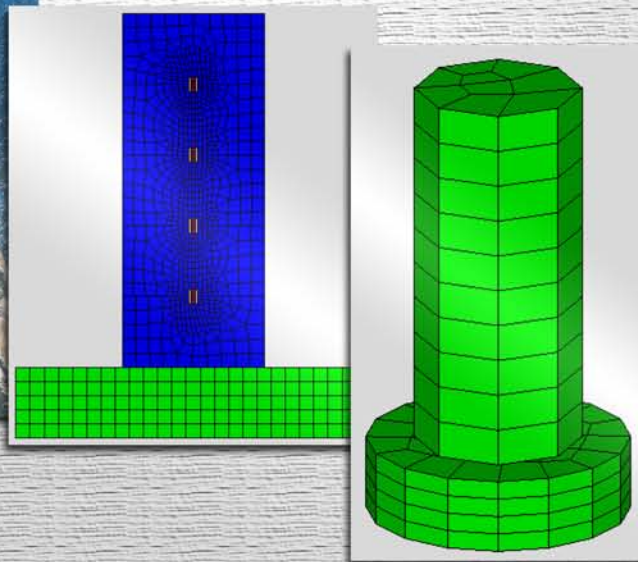
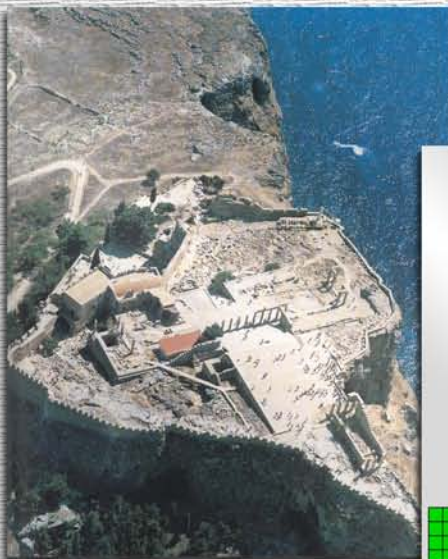


ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Διπλωματική

Μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς
συνδέσεων σπονδύλων μνημείων και
σπονδυλωτών κατασκευών. Εφαρμογή
στην Ακρόπολη της Αίνδου.

Υπεύθυνοι:
Κ. Πιπλάκης
Αν. Σέξτος



Όνομα μεταπτυχιακού φοιτητή:
Οικονόμου Θεμιστοκλής

Σεπτέμβριος 2003

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ – ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ»

«Εκφώνηση Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας»

Να μελετηθεί η συμπεριφορά σπονδύλων αρχαιοελληνικών μνημείων υπό στατική και δυναμική φόρτιση συνεκτιμώντας τον ρόλο των εμπολίων. Ειδικότερα, ζητούνται τα εξής:

1. Να γίνει η προσομοίωση σε δύο και τρεις διαστάσεις κίονων με πέντε (5) σπονδύλους με το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ANSYS. Να προσομοιωθεί η δυνατότητα (ταυτόχρονου) λικνισμού και ολίσθησης των εν επαφή σπονδύλων υπό στατική και δυναμική φόρτιση.
2. Να τροποποιηθεί κατάλληλα το αρχείο εισαγωγής δεδομένων του λογισμικού ώστε να είναι εφικτή η πολυεπίπεδη αλλαγή των δεδομένων και η δυνατότητα επίλυσης διαφορετικών προσομοιωμάτων υπό το ίδιο αρχείο μέσω διακοπών (switches) και λογικών συναρτήσεων (βρόγχων if.. then..)
3. Να αποτιμηθεί η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος των σπονδύλων υπό στατική και δυναμική φόρτιση σε επίπεδο μονίμων μετακινήσεων με τη χρήση ημιτονοειδών παλμών και πραγματικών χρονοϊστοριών επιτάχυνσης.
4. Να μελετηθεί η επιρροή της ύπαρξης εμπολίων μεταξύ των σπονδύλων και η συνακόλουθη διαφοροποίηση της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος.
5. Να εξακριβωθεί ο ρόλος του κατακόρυφου φορτίου σε σχέση με τους μηχανισμούς τριβής και ολίσθησης.
6. Να γίνει εφαρμογή των υπό μόρφωση προσομοιωμάτων για την περίπτωση κίονα επτά σπονδύλων στην Ακρόπολη της Λίνδου, με την θεώρηση των πραγματικών γεωμετρικών, μηχανικών και σεισμολογικών δεδομένων.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η εργασία ασχολείται με την ανάλυση του προβλήματος επαφής που αναπτύσσεται μεταξύ των σπονδύλων αρχαιοελληνικών μνημείων με προαιρετική προσθήκη εμπολίων. Βασίζεται σε παλαιότερες μελέτες που έχουν προσεγγίσει το πρόβλημα θεωρητικά, πειραματικά και αριθμητικά. Προτιμήθηκε ο τελευταίος τρόπος προσέγγισης στο εν λόγω πρόβλημα, με την αρωγή του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων **ANSYS 7.1 Multiphysics**. Αναπτύχθηκε κώδικας πλέον των 1000 γραμμών με τη μορφή αρχείου εισαγωγής για το εν λόγω πρόγραμμα. Στην κορυφή του αρχείου αυτού υπάρχουν *διακόπτες* και *μεταβλητές*, με την βοήθεια των οποίων μπορεί κανείς να αλλάξει το μοντέλο σε βάθος. Για παράδειγμα, μπορεί κανείς να κάνει **δισδιάστατη ή τρισδιάστατη** ανάλυση, να καθορίσει τις **συνοριακές συνθήκες, τα υλικά, τις φορτίσεις, τις διαστάσεις** κλπ με απλή εισαγωγή των κατάλληλων τιμών στις μεταβλητές για κάθε πρόβλημα. Αφιερώνεται ένα κεφάλαιο στην όσο τη δυνατόν βαθύτερη **επεξήγηση των εντολών** του αρχείου εισαγωγής, πάντα σε σχέση με το εγχειρίδιο οδηγιών του ANSYS.

Γίνεται μια σειρά **ελέγχων** για την πιστοποίηση της εύρυθμης λειτουργίας του κώδικα εισαγωγής. **Συγκρίνεται** τόσο με **θεωρητικές λύσεις**, όσο και με τα **αποτελέσματα παλαιότερων μελετών**. Γίνεται ιδιομορφική ανάλυση διαφόρων μοντέλων για την διερεύνηση πιθανών αδυναμιών των κίονων. Ακολουθεί μια **εκτεταμένη παραμετρική ανάλυση** με μεταβλητές *είδη μοντέλων, τιμές τριβής* καθώς και άλλα μεγέθη. Γίνεται μελέτη για **αρμονική ταλάντωση** με συχνотικά χαρακτηριστικά κοντά στην 1^η ιδιομορφή του μοντέλου για διερεύνηση της επικινδυνότητας κατάρρευσης. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά σε **διαγράμματα**, ενώ στη διάθεση κάθε ενδιαφερόμενου υπάρχουν και πολλά *βίντεο* των αναλύσεων.

Η εν λόγω εργασία έγινε με αφορμή τις **αναστυλωτικές εργασίες** που έγιναν πρόσφατα στην **Ακρόπολη της Λίνδου στην Ρόδο**. Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια αυτής της εργασίας παρουσιάζονται περισσότερες πληροφορίες για τις αναστυλωτικές αυτές εργασίες. Επιπρόσθετα, **επιλύεται ένα μοντέλο που προσεγγίζει έναν πραγματικό κίονα στην Ακρόπολη της Λίνδου** για το **σεισμό της Ρόδου** και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

Η εργασία ολοκληρώνεται με τα **γενικά συμπεράσματά της**, ενώ προσφέρεται και ο **κώδικας** που χρησιμοποιήθηκε για κάθε ανάλυση.

ABSTRACT

This report analyses the contact phenomena that take place between Ancient Greek multi-drum (or multi-block) columns with the optional presence of wooden shear connectors between them. This analysis is based on previous studies that have approached similar problems theoretically, experimentally, or numerically. The latter way was chosen to approach the aforementioned problem, with the help of the finite element analysis program **ANSYS 7.1 Multiphysics**. More than 1000 lines of code were developed in the form of an input file to help better understand the contact problem. The top part of this file contains switches and variables that help shape the model in a profound way. For instance, one can choose to perform a two-dimensional or a three-dimensional analysis, define the restraints, the materials, the loads, the dimensions, etc. by placing the desired values to the corresponding variables. One chapter is dedicated towards the better understanding of the input file commands, using references to the ANSYS manual itself.

In order to certify that the code functions in a properly manner, a series of trials is performed. The results from the models created using the code are verified using corresponding known theoretical results. They are also cross-referenced with the results of previous publications. Also, a modal analysis carried out to diagnose the weaknesses of multi-drum columns. A wide parametric analysis is performed. The corresponding variables are the model-types, the friction coefficients, and other elements. A specific modal analysis using the 1st eigenvalue helps us investigate the danger of collapse under relevant excitation. The results of all the above analyses are presented compediously in diagrams and relevant video clips can be given to anyone interested.

An addition aim of this report was also to complement a previous study (by others) that dealt with the rehabilitation of the Lindos Acropolis at the island of Rhodes. For this, a bit of information is presented about this project. Additionally, a realistic model that is similar to a real column of the Acropolis of Lindos is also solved and its results are furthermore commented.

The report ends with its general remarks and conclusions. The code of the input file is presented for everyone to see and comment.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----------|
| 1) ΕΙΣΑΓΩΓΗ – ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ. | 11 |
| 1.1) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ. | 11 |
| 1.2) ΠΑΛΑΙΟΤΕΡΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ. | 13 |
| 1.3) ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ. | 14 |
| 1.4) ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ. | 14 |
| 2) STATE OF THE ART. | 16 |
| 2.1) ΜΟΝΤΕΛΑ ΑΡΧΑΙΟΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΠΟΥ ΥΠΟΚΕΙΝΤΑΙ ΣΕ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΒΑΣΕΩΣ. ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΩΝ ΤΟΥΣ {3}. | 16 |
| 2.1.1) ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ. | 16 |
| 2.1.2) ΛΕΙΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ. | 16 |
| 2.1.3) ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΡΩΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 17 |
| 2.1.4) ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΔΕΥΤΕΡΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 18 |
| 2.1.5) ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ. | 19 |
| 2.2) ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΜΝΗΜΕΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ {4}. | 20 |
| 2.2.1) ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ. | 20 |
| 2.2.2) ΛΕΙΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΤΟΥ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 20 |
| 2.2.3) ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΜΠΛΟΚ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. | 22 |
| 2.2.4) ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. | 23 |
| 2.2.5) ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ. | 24 |
| 2.3) ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΑΡΧΑΙΟ-ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΥΠΟ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ {5}. | 25 |
| 2.3.1) ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ. | 25 |
| 2.3.2) ΜΟΝΤΕΛΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ. | 25 |
| 2.3.3) ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΑΡΜΟΝΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ. | 27 |
| 2.3.4) ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΣΕ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ. | 29 |
| 2.3.5) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ. | 32 |
| 2.4) ΜΕΛΕΤΗ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΡΧΑΙΟΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΚΑΙ ΚΙΟΝΟΣΤΟΙΧΙΩΝ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΜΕ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ {6}. | 33 |
| 2.4.1) ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ. | 33 |
| 2.4.2) ΛΕΙΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΜΟΝΤΕΛΩΝ. | 33 |
| 2.4.3) ΛΕΙΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ. | 34 |
| 2.4.4) ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ. | 35 |
| 2.4.5) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ. | 38 |
| 2.5) ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΑΡΧΑΙΟΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΣΤΥΛΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ {7}. | 39 |
| 2.5.1) ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ. | 39 |
| 2.5.2) ΕΙΣΑΓΩΓΗ. | 39 |
| 2.5.3) Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ. | 39 |
| 2.5.4) ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ. | 41 |
| 2.5.5) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ. | 42 |
| 2.5.6) ΣΥΓΚΡΙΣΗ 2D ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΜΕ ΤΗΝ 3D ΑΝΑΛΥΣΗ. | 42 |
| 2.5.7) ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. | 43 |
| 2.5.8) ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ. | 44 |

| | |
|---|-----------|
| 2.6) ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΔΙΚΝΙΣΜΟ ΚΑΙ ΑΝΑΤΡΟΠΗ ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΩΝ ΥΠΟ ΟΡΙΖΟΝΤΙΕΣ, ΠΑΛΜΙΚΟΥ ΤΥΠΟΥ, ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ {8}. | 45 |
| 2.6.1) ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΛΗΨΗ. | 45 |
| 2.6.2) ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 45 |
| 2.6.3) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗΣ. | 46 |
| | |
| <u>3) ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΚΟΛΩΝΑ ΤΗΣ ΑΚΡΟΠΟΛΗΣ ΤΗΣ ΛΙΝΔΟΥ ΣΤΗ ΡΟΔΟ.</u> | 48 |
| | |
| 3.1) ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ (CASE STUDY). | 50 |
| 3.2) ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 53 |
| 3.2.1) ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ. | 53 |
| 3.2.2) ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ ΥΛΙΚΩΝ. | 53 |
| 3.2.3) ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ. | 54 |
| 3.2.4) ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ. | 54 |
| | |
| <u>4) ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΤΟΥ ΑΡΧΕΙΟΥ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ANSYS.</u> | 55 |
| | |
| 4.1) ΔΙΑΚΟΠΤΕΣ (“SWITCHES”). | 56 |
| 4.2) ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ. | 56 |
| 4.3) ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ. | 59 |
| 4.3.1) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 59 |
| 4.3.2) ΒΑΡΟΣ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ. | 59 |
| 4.3.3) ΒΑΡΟΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ. | 59 |
| 4.3.4) ΤΕΛΙΚΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑ ΔΥΝΑΜΗ. | 59 |
| 4.3.5) ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ FRACTURING ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ. | 60 |
| 4.4) ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ “ΠΕΡΙΟΧΩΝ” Η “ΟΓΚΩΝ”. | 61 |
| 4.4.1) ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ “ΠΕΡΙΟΧΩΝ” ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ. | 61 |
| 4.4.2) ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ “ΟΓΚΩΝ” ΓΙΑ ΤΟ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ. | 62 |
| 4.5) ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ “ΤΥΠΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ” (“ELEMENT TYPES”). | 62 |
| 4.5.1) “ΤΥΠΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ” (“ELEMENT TYPES”) ΓΙΑ ΤΟ 2D ΜΟΝΤΕΛΟ. | 63 |
| 4.5.2) “ΤΥΠΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ” (“ELEMENT TYPES”) ΓΙΑ ΤΟ 3D ΜΟΝΤΕΛΟ. | 64 |
| 4.5.3) “ΤΥΠΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ” ΕΠΑΦΗΣ (“ELEMENT TYPES”) ΓΙΑ ΤΟ 2D ΜΟΝΤΕΛΟ. | 65 |
| 4.5.4) “ΤΥΠΟΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ” ΕΠΑΦΗΣ (“ELEMENT TYPES”) ΓΙΑ ΤΟ 3D ΜΟΝΤΕΛΟ. | 67 |
| 4.5.5) ΕΙΔΙΚΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΠΛΗΡΟΥΣ (“BONDED”) ΕΠΑΦΗΣ. | 68 |
| 4.6) ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ. | 68 |
| 4.6.1) ΥΛΙΚΟ ΕΔΑΦΟΥΣ (ΒΑΣΗΣ). | 68 |
| 4.6.2) ΥΛΙΚΟ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ. | 69 |
| 4.6.3) ΥΛΙΚΟ ΣΥΝΔΕΣΜΩΝ ΔΙΑΤΜΗΣΗΣ (ΕΜΠΟΛΙΩΝ). | 69 |
| 4.6.4) ΥΛΙΚΟ ΕΠΑΦΗΣ 1. | 70 |
| 4.6.5) ΥΛΙΚΟ ΕΠΑΦΗΣ 2. | 70 |
| 4.7) ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ “ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΕΡΩΝ” (“REAL CONSTANTS”). | 70 |
| 4.7.1) ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΑΝΗΚΟΥΝ ΣΤΗ ΒΑΣΗ. | 71 |
| 4.7.2) ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΑΝΗΚΟΥΝ ΣΤΟΥΣ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥΣ. | 71 |
| 4.7.3) ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΑΝΗΚΟΥΝ ΣΤΑ ΕΜΠΟΛΙΑ. | 71 |
| 4.7.4) ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ ΓΙΑ ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΦΗ ΜΕΤΑΞΥ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ, ΚΑΤΩ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ–ΒΑΣΗΣ ΚΑΙ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ–ΕΜΠΟΛΙΩΝ. | 72 |
| 4.8) ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ. | 77 |
| 4.8.1) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 77 |
| 4.8.2) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ. | 79 |
| 4.8.3) ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ. | 80 |
| 4.9) ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΕΠΑΦΗΣ. | 80 |
| 4.9.1) ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ ΕΔΑΦΟΥΣ–ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ ΚΑΙ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΟΥΣ. | 81 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| 4.9.2) | ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΠΑΦΗΣ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ–ΕΜΠΟΛΙΩΝ. | 81 |
| 4.10) | ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ. | 81 |
| 4.10.1) | ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟ ΕΠΙΛΥΣΗΣ. | 82 |
| 4.10.2) | ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΕΠΙΒΟΛΗΣ ΦΟΡΤΙΩΝ. | 82 |
| 4.10.3) | 1 ^Η ΟΜΑΔΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ: ΣΥΝΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ. | 83 |
| 4.10.4) | 2 ^Η ΟΜΑΔΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ. | 83 |
| 4.10.5) | 2 ^Η ΟΜΑΔΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΒΟΛΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ. | 84 |
| 4.10.6) | 3 ^Η ΟΜΑΔΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (ΜΟΝΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΟΡΙΖΟΝΤΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ). | 84 |
| 4.11) | ΤΥΠΟΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ. | 84 |
| 4.11.1) | ΓΕΝΙΚΟΣ ΤΡΟΠΟΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ (GENERAL POSTPROC). | 85 |
| 4.11.2) | ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΟΝΟΪΣΤΟΡΙΑ (TIMEHIST POSTPRO). | 86 |
| 5) | <u>ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ (TRIAL TESTS) ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ANSYS.</u> | 87 |
| 5.1) | 1 ^{ΟΣ} ΕΛΕΓΧΟΣ: ΈΝΑΡΞΗ ΔΙΚΝΙΣΜΟΥ (2D). | 87 |
| 5.2) | 2 ^{ΟΣ} ΕΛΕΓΧΟΣ: ΈΝΑΡΞΗ ΔΙΚΝΙΣΜΟΥ (3D). | 88 |
| 5.3) | 3 ^{ΟΣ} ΕΛΕΓΧΟΣ: ΈΝΑΡΞΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (2D). | 90 |
| 5.4) | 4 ^{ΟΣ} ΕΛΕΓΧΟΣ: ΈΝΑΡΞΗ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (3D). | 92 |
| 5.5) | 5 ^{ΟΣ} ΕΛΕΓΧΟΣ: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΕΝΑ ΕΚ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΤΩΝ ΜΑΚΡΗ–ΡΟΥΣΣΟ (§2.6), {8}. | 93 |
| 6) | <u>ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΝΑΜΕΩΝ.</u> | 95 |
| 6.1) | ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ. | 95 |
| 6.1.1) | ΜΟΝΤΕΛΟ Α: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΠΛΟΚ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ. | 95 |
| 6.1.2) | ΜΟΝΤΕΛΟ Β: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 5 ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ (ΧΩΡΙΣ ΕΜΠΟΛΙΑ). | 97 |
| 6.1.3) | ΜΟΝΤΕΛΟ Γ: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 5 ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ (ΧΩΡΙΣ ΕΜΠΟΛΙΑ). | 99 |
| 6.1.4) | ΜΟΝΤΕΛΟ Δ: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 5 ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ (ΜΕ ΕΜΠΟΛΙΑ). | 101 |
| 6.1.5) | ΜΟΝΤΕΛΟ Ε: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 5 ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ (ΜΕ ΕΜΠΟΛΙΑ) ΚΑΙ ΕΠΙΦΟΡΤΙΣΗ. | 103 |
| 6.2) | ΙΔΙΟΜΟΡΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ. | 105 |
| 6.2.1) | ΜΟΝΤΕΛΟ Α: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΠΛΟΚ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ. | 105 |
| 6.2.2) | ΜΟΝΤΕΛΟ Β: ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 5 ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ (ΧΩΡΙΣ ΕΜΠΟΛΙΑ). | 106 |
| 6.2.3) | ΜΟΝΤΕΛΟ Γ: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 5 ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ (ΧΩΡΙΣ ΕΜΠΟΛΙΑ). | 107 |
| 6.2.4) | ΜΟΝΤΕΛΟ Δ: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 5 ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ (ΜΕ ΕΜΠΟΛΙΑ). | 108 |
| 6.3) | ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ. | 109 |
| 6.3.1) | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΩΝ. | 109 |
| 6.3.2) | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ F-Δ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ. | 110 |
| 6.4) | ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΕ ΗΜΙΤΟΝΟΕΙΔΗ ΠΑΛΜΟ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ D ΚΑΙ E. | 114 |
| 6.4.1) | ΜΟΝΤΕΛΟ D: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 5 ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ (ΜΕ ΕΜΠΟΛΙΑ). | 114 |
| 6.4.2) | ΜΟΝΤΕΛΟ Ε: ΔΙΣΔΙΑΣΤΑΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ 5 ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ (ΜΕ ΕΜΠΟΛΙΑ) ΚΑΙ ΑΞΟΝΙΚΟ ΕΠΙΣΤΥΛΙΟΥ. | 116 |
| 6.4.3) | ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΜΟΝΤΕΛΩΝ D ΚΑΙ E. | 118 |
| 7) | <u>ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ (LINDOS CASE STUDY).</u> | 119 |
| 7.1) | ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ (ΣΕΙΣΜΟΣ ΡΟΔΟΥ). | 119 |
| 7.2) | ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΠΙΛΥΣΗΣ (C). | 121 |
| 7.3) | ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ. | 123 |
| 7.4) | ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΗΣ ΡΟΔΟΥ. | 125 |
| 8) | <u>ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.</u> | 126 |

9) ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ & ΠΑΡΑΠΟΜΠΕΣ. 128

10) ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΤΟ ΑΡΧΕΙΟ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΣΤΟ ANSYS. 129



ΠΙΝΑΚΕΣ, ΣΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

- [11] **Ευκ. 1-1:** Εφαρμογή του αναστυλωτικού προγράμματος.
 [12] **Ευκ. 1-2:** Ζημιές στους σπονδύλους.
- [16] **Σχήμα 2-1:** Λικνισμός.
 [16] **Σχήμα 2-2:** Μοντέλο.
 [17] **Σχήμα 2-3:** Όρια ημιτονοειδούς διέγερσης.
 [18] **Σχήμα 2-4:** Απόκριση μοντέλου για ημιτονοειδείς φορτίσεις.
 [18] **Σχήμα 2-5:** Απόκριση μοντέλου για το σεισμό του El Centro.
 [20] **Σχήμα 2-6:** Διακριτοποίηση των μοντέλων.
 [22] **Σχήμα 2-7:** Λεπτομέρειες μοντέλου.
 [23] **Σχήμα 2-8:** Μεμονωμένα και σπονδυλωτά στοιχεία.
 [26] **Σχήμα 2-9:** Σχηματική απεικόνιση υφιστάμενων κατασκευών.
 [26] **Σχήμα 2-10:** Σχηματική απεικόνιση ατελειών.
 [27] **Σχήμα 2-11:** Όρια ευστάθειας.
 [28] **Σχήμα 2-12:** Διαγράμματα περιόδου–πλάτους.
 [28] **Σχήμα 2-13:** Επίδραση ατελειών.
 [29] **Σχήμα 2-14:** Σεισμοί εισαγωγής.
 [30] **Σχήμα 2-15:** Διάγραμμα μέγιστης σχετικής μετακίνησης με PGA.
 [31] **Σχήμα 2-16:** Διάγραμμα μέγιστης σχετικής μετακίνησης με PGA.
 [32] **Σχήμα 2-17:** Διάγραμμα δεσπόζουσας περιόδου διέγερσης με πλάτος ταλάντωσης.
 [33] **Σχήμα 2-18:** Πρώτο μοντέλο.
 [33] **Σχήμα 2-19:** Δεύτερο μοντέλο.
 [34] **Σχήμα 2-20:** Τρίτη διάταξη.
 [35] **Σχήμα 2-21:** Όρια λικνισμού.
 [36] **Σχήμα 2-22:** Δοκιμές pull out.
 [37] **Σχήμα 2-23:** Επίδραση καλωδίων.
 [37] **Σχήμα 2-24:** Ευεργετικός χαρακτήρας καλωδίων.
 [41] **Σχήμα 2-25:** Διάταξη μετρητών.
 [42] **Σχήμα 2-26:** Διακριτοποίηση σπονδύλου.
- [48] **Ευκ.3-1:** Άλωση της Ακρόπολης της Λίνδου στη Ρόδο.
 [49] **Ευκ.3-2:** Αεροφωτογραφία της Ακρόπολης της Λίνδου στη Ρόδο.
 [49] **Σχήμα 3-3:** Σχέδιο της Ακρόπολης της Λίνδου στη Ρόδο.
 [49] **Ευκ.3-4:** Δείγμα φθορών σε κίονα.
 [49] **Ευκ.3-5:** Σχέδιο και σημερινή μορφή.
 [50] **Ευκ.3-6:** Πρότερες αναστηλωτικές εργασίες.
 [50] **Ευκ.3-7:** Πρότερες αναστηλωτικές εργασίες.
 [50] **Ευκ.3-8:** Πρότερες αναστηλωτικές εργασίες.
 [51] **Σχήμα 3-9:** Αποτύπωση ενός εκ των υφιστάμενων σπονδύλων.
 [51] **Ευκ.3-10:** Σπόνδυλος μετά την πρώτη αποκατάσταση.
 [52] **Ευκ.3-11:** Αρχαίο ξύλινο εμπόλιο και σχηματική απεικόνιση λειτουργίας.
 [52] **Σχήμα 3-12:** Δείγμα αποτύπωσης δύο κίωνων.
- [60] **Σχήμα 4-1:** Συγκέντρωση τάσεων στη μέση του εμπολίου.
 [61] **Σχήμα 4-2:** Δημιουργία περιοχών-δισδιάστατο μοντέλο.
 [62] **Σχήμα 4-3:** Δημιουργία όγκων-τρισδιάστατο μοντέλο.
 [63] **Σχήμα 4-4:** Τύπος στοιχείου PLANE82 {12}.
 [64] **Σχήμα 4-5:** Τύπος στοιχείου SOLID45 {12}.
 [65] **Σχήμα 4-6:** Το φαινόμενο hourglass (δεξιά) και ενεργοποίηση ελέγχου (αριστερά) {12}.
 [65] **Σχήμα 4-7:** Τύπος στοιχείου TARGE169 {12}.
 [65] **Σχήμα 4-8:** Τύπος στοιχείου CONTA172 {12}.
 [67] **Σχήμα 4-9:** Τύπος στοιχείου TARGE170 {12}.
 [67] **Σχήμα 4-10:** Τύπος στοιχείου CONTA174 {12}.
 [73] **Σχήμα 4-11:** FTOLN, μέγιστη επιτρεπόμενη διείσδυση {12}.
 [73] **Σχήμα 4-12:** ICONT, μετακίνηση επιφάνειας επαφής {12}.
 [74] **Σχήμα 4-13:** Μετακίνηση μέσω PMIN & PMAX {12}.
 [75] **Σχήμα 4-14:** Συνοχή COHE και μέγιστη τριβή TAUMAX {12}.
 [76] **Διάγραμμα 4-15:** FACT, συντελεστής στατικής προς δυναμική τριβή {12}.

- [77] **Σχήμα 4-16:** Τρισδιάστατο και δισδιάστατα μοντέλα.
 [77] **Σχήμα 4-17:** Διακριτοποίηση εδάφους-βάσης 2D.
 [78] **Σχήμα 4-18:** Διακριτοποίηση σπονδύλων 2D.
 [78] **Σχήμα 4-19:** Διακριτοποίηση σπονδύλων & εμπολίων 2D.
 [79] **Σχήμα 4-20:** Διακριτοποίηση εδάφους-βάσης 3D.
 [79] **Σχήμα 4-21:** Διακριτοποίηση σπονδύλων 3D.
 [80] **Σχήμα 4-22:** Σχηματική απεικόνιση επαφής {12}.
 [83] **Σχήμα 4-23:** Άμεσος και σταδιακός τρόπος επιβολής φορτίων {12}.
 [85] **Σχήμα 4-24:** Δείγμα General Postproc.
 [85] **Σχήμα 4-25:** Δείγμα κομματιού μοντέλου στο General Postproc.
 [86] **Σχήμα 4-26:** Τάσεις στο χρόνο από TimeHist Postpro.
 [86] **Σχήμα 4-27:** Τάσεις με τάσεις από TimeHist Postpro.
- [87] **Σχήμα 5-1:** Φόρτιση για έναρξη λικνισμού 2D.
 [88] **Διάγραμμα 5-2:** Ανύψωση βάσης στο λικνισμό 2D.
 [89] **Σχήμα 5-3:** Φόρτιση για έναρξη λικνισμού 3D.
 [89] **Διάγραμμα 5-4:** Ανύψωση βάσης στο λικνισμό 3D.
 [90] **Σχήμα 5-5:** Φόρτιση για έναρξη ολίσθησης 2D.
 [91] **Διάγραμμα 5-6:** Διάγραμμα μετακίνησης της βάσης 2D.
 [91] **Διάγραμμα 5-7:** Τάσεις σε τυχαίο σημείο της βάσης 2D.
 [92] **Σχήμα 5-8:** Φόρτιση για έναρξη ολίσθησης 3D.
 [93] **Διάγραμμα 5-9:** Διάγραμμα μετακίνησης της βάσης 3D.
 [94] **Διάγραμμα 5-10:** Καμπύλες λικνισμού ημιτονοειδούς φόρτισης.
- [95] **Σχήμα 6-1:** Μοντέλο A: τρισδιάστατο μπλοκ σπονδύλου.
 [96] **Διάγραμμα 6-2:** Μοντέλο A: διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων.
 [97] **Σχήμα 6-3:** Μοντέλο B: τρισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων.
 [98] **Διάγραμμα 6-4:** Μοντέλο B: διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων.
 [99] **Σχήμα 6-5:** Μοντέλο C: δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (χωρίς εμπόλια).
 [100] **Διάγραμμα 6-6:** Μοντέλο C: διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων.
 [101] **Σχήμα 6-7:** Μοντέλο D: δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (με εμπόλια).
 [102] **Διάγραμμα 6-8:** Μοντέλο D: διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων.
 [103] **Σχήμα 6-9:** Μοντέλο E: δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (με εμπόλια) και επιφόρτιση.
 [104] **Διάγραμμα 6-10:** Μοντέλο E: διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων.
 [105] **Σχήμα 6-11:** Ιδιομορφές μοντέλου A.
 [106] **Σχήμα 6-12:** Ιδιομορφές μοντέλου B.
 [107] **Σχήμα 6-13:** Ιδιομορφές μοντέλου C.
 [108] **Σχήμα 6-14:** Ιδιομορφές μοντέλων D & E.
 [109] **Πίνακας 6-15:** Συγκεντρωτικός πίνακας των ιδιομορφών.
 [110] **Διάγραμμα 6-16:** Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή (σημείο & σπόνδυλος 5).
 [110] **Διάγραμμα 6-17:** Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή του σπονδύλου 4.
 [111] **Διάγραμμα 6-18:** Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή του σπονδύλου 3.
 [111] **Διάγραμμα 6-19:** Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή του σπονδύλου 2.
 [112] **Διάγραμμα 6-20:** Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή του σπονδύλου 1.
 [112] **Διάγραμμα 6-21:** Σύγκριση των μοντέλων στη βάση (σημείο 0).
 [114] **Σχήμα 6-22:** Μέγιστη παραμόρφωση μοντέλου D στα 0.36g και 0.50g.
 [115] **Σχήμα 6-23:** Διάγραμμα δ-t μοντέλου D στα 0.36g και 0.50g.
 [116] **Σχήμα 6-24:** Μέγιστη παραμόρφωση μοντέλου E στα 0.36g και 0.50g.
 [117] **Διάγραμμα 6-25:** Διάγραμμα δ-t μοντέλου E στα 0.36g και 0.50g.
 [118] **Διάγραμμα 6-26:** Σύγκριση μετακινήσεων μοντέλων D και E στα 0.36g.
 [118] **Διάγραμμα 6-27:** Σύγκριση μετακινήσεων μοντέλων D και E στα 0.50g.
- [119] **Διάγραμμα 7-1:** Σεισμός της Ρόδου, επιταχύνσεις.
 [120] **Διάγραμμα 7-2:** Σεισμός της Ρόδου, ταχύτητες.
 [120] **Διάγραμμα 7-3:** Σεισμός της Ρόδου, μετακινήσεις.
 [121] **Διάγραμμα 7-4:** Σεισμός της Ρόδου, φάσματα.
 [121] **Σχήμα 7-5:** Μοντέλο C δισδιάστατο μοντέλο 7 σπονδύλων (χωρίς εμπόλια).
 [123] **Σχήμα 7-6:** Διάγραμμα δ-t μοντέλου E με 7 σπονδύλους και σεισμό πλάτους 0,36g.
 [123] **Σχήμα 7-7:** Διάγραμμα δ-t μοντέλου E με 7 σπονδύλους και σεισμό πλάτους 0,72g.
 [124] **Σχήμα 7-8:** Διάγραμμα δ-t μοντέλου E με 7 σπονδύλους και σεισμό πλάτους 1,08g.
 [124] **Σχήμα 7-9:** Σύγκριση δ-t μοντέλου E με 7 σπονδύλους και σεισμό με διάφορα πλάτη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έγινε πραγματικότητα χάρη στην έμμεση ή άμεση συνεισφορά πολλών ανθρώπων. Πολύτιμη και βαθιά καθοδηγητική ήταν η συμβολή του καθηγητή Α.Π.Θ. Κ^ου Πιτιλάκη Κυριαζή, επιβλέποντα της εργασίας αυτής. Η υπέρβαση πολλών δυσκολιών, η τακτοποίηση των σκέψεων και η πηγή πολλών διαφωτιστικών σχολίων, προτάσεων και διορθώσεων ανήκουν επίσης στον Λέκτορα Α.Π.Θ. Αναστάσιο Σέξτο, η συνεισφορά του τελευταίου υπήρξε εξίσου πολύτιμη.

Ο γράφων οφείλει να ευχαριστήσει, επίσης, κάθε έναν από τους καθηγητές του στο τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ., τόσο προπτυχιακά, όσο και μεταπτυχιακά για την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγηση που του πρόσφεραν επί σειρά ετών.

Η διπλωματική αυτή αφιερώνεται στους γονείς μου και στην Μαρίνα Μανιά.

1) Εισαγωγή – Αντικείμενο της έρευνας.

1.1) Περιγραφή του προβλήματος.



Εικ. 1-1: Εφαρμογή του αναστυλωτικού προγράμματος.

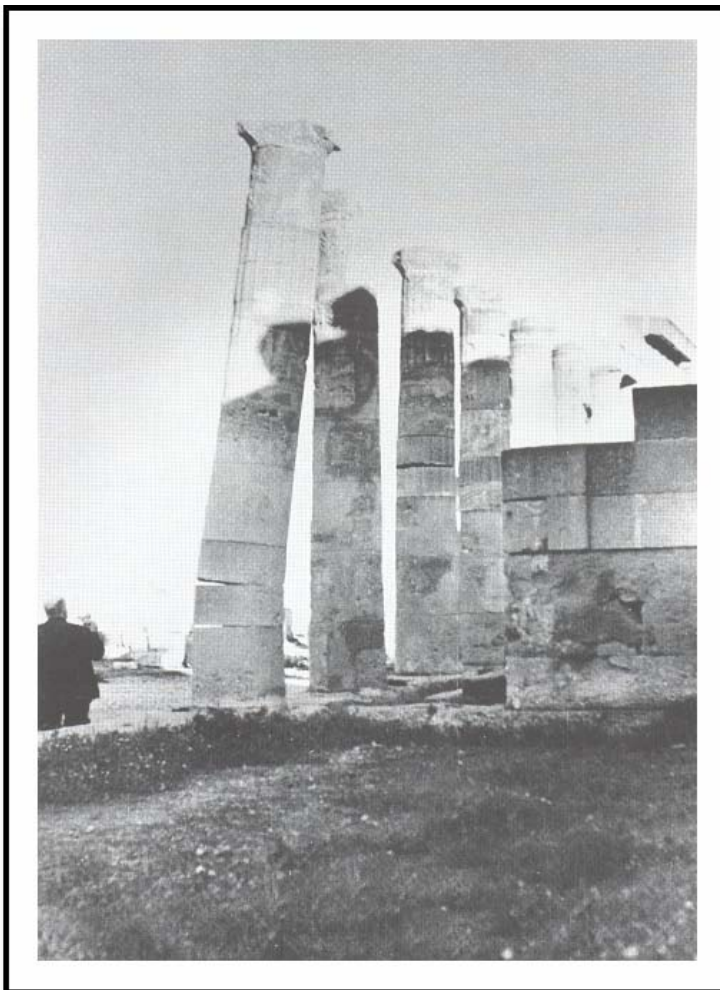
Από την αρχή της ιστορίας ως σήμερα, ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά που ακολουθούν τον άνθρωπο είναι η θέλησή του να αφήνει τα σημάδια του στις επόμενες γενιές. Από τον πιο απλό τρόπο, την τεκνοποίηση, ως έναν από τους πιο ισχυρούς, τη δημιουργία κατασκευών που θα αντέξουν στον χρόνο ως περήφανοι φάροι της μηχανικής του σκέψης, πάντοτε θα βρίσκει τρόπους να προσπαθεί να υπερνικήσει τη φθαρτότητα που χαρακτηρίζει τη φύση του.

Η αδιάκοπη πάλη του ανθρώπου με τη φύση έχει ως αποτέλεσμα παγκοσμίως να υπάρχουν κάποιες κατασκευές που έχουν αφηφίσει τα χτυπήματα του χρόνου, των φυσικών φαινομένων αλλά ακόμα και των κακόβουλων ανθρωπίνων επιρροών. Από τους πιο σημαντικούς εκπροσώπους τέτοιων κατασκευών είναι οι αρχαίοι ελληνικοί ναοί και κατασκευές μεγάλου μεγέθους. Σημαντικός αριθμός αυτών των κατασκευών στέκονται, άλλοτε ελάχιστα λαβωμένοι, άλλοτε με σημαντικές πληγές, αγέρωχοι μάρτυρες μιας εποχής απέραντα σημαντικής για την πορεία της ανθρωπότητας στο διηνεκές του χρόνου. Αν το γεγονός αυτό συνδυαστεί με το ότι η έκταση που αυτοί βρίσκονται διασκορπισμένοι πάνω στη Γη είναι εντυπωσιακή ακόμα και για τα σημερινά δεδομένα, μόνο περηφάνια μπορεί να γεννηθεί στις καρδιές των απογόνων των ανθρώπων αυτών.

Στη σημερινή εποχή, δεν μπορούμε να συναντήσουμε αρχαιοελληνικό ναό σε άθικτη κατάσταση. Όμως, το επίπονο έργο των αρχαιολόγων σε συνδυασμό με την αρωγή των μηχανικών μας έχει επιτρέψει να μπορούμε να υπολογίζουμε με αρκετή ακρίβεια τη μορφή τους την εποχή που κατασκευάζονταν. Η συνηθισμένη περίπτωση είναι η ύπαρξη κιονοστοιχιών στις τέσσερις διευθύνσεις ή/και σε σειρές με ύπαρξη ή μη επιστυλίων. Ανάλογα κυρίως με τη γεωγραφική τοποθεσία του μνημείου, οι κίονες αυτοί μπορεί να είναι ιωνικού, δωρικού ή κορινθιακού ρυθμού.

Η κατασκευαστική προσέγγιση των κίωνων ήταν η κοπή κομματιών μαρμάρου από το πλησιέστερο λατομείο, η μεταφορά τους στο σημείο κατασκευής του ναού και η επιτόπου επεξεργασία τους για να δημιουργηθεί το επιθυμητό σχήμα. Συνηθισμένο φαινόμενο ήταν η ανομοιομορφία στο πάχος των κομματιών αυτών («σπόνδυλοι») λόγω των περιορισμών στα τεχνικά μέσα της εποχής. Οι σπόνδυλοι αυτοί τοποθετούνταν ο ένας πάνω στον άλλο, δημιουργώντας τον κίονα. Το είδος αυτό της κατασκευής ήταν ουσιαστικά το φέρον σύστημα του κτιρίου, αφού μέσω των επιστυλίων τα υπερκείμενα φορτία της στέγης οδηγούνταν στους κίονες και από εκεί στη βάση και τελικώς στο έδαφος.

Αξιοσημείωτη λεπτομέρεια στην κατασκευαστική πορεία των κίωνων ήταν η δημιουργία ζεύγους οπών στο κέντρο κάθε σπονδύλου στο σημείο σύνδεσης με τον υπερκείμενό του. Οι οπές αυτές ήταν στην ουσία υποδοχή για ένα σύστημα εμπολίου (συνήθως ξύλινου) που με τη σημερινή ορολογία θα μπορούσαμε να ονομάσουμε «διατμητικό σύνδεσμο». Η φιλοσοφία του εκτιμάται σήμερα ότι ήταν ο περιορισμός υπερβολικών διαφορικών μετακινήσεων μεταξύ των σπονδύλων ως μία πρώτη άμυνα έναντι σεισμικών καταπονήσεων ώστε να προστατεύσει το περιβάλλον μάρμαρο μέχρι το ξύλο να θραυστεί.



Εικ. 1-2: Ζημιές στους σπονδύλους.

Ο συλλογισμός ότι η φιλοσοφία του ικανοτικού σχεδιασμού (φιλοσοφία που θεωρείται ότι είναι προϊόν σχετικά πρόσφατης επιστημονικής σκέψης) είχε συλληφθεί (ακόμα και σε πρώιμο, ίσως, στάδιο) από το μυαλό των αρχιτεκτόνων της ελληνιστικής εποχής για τις κατασκευές τους, είναι ένα ελκυστικό θέμα προς διερεύνηση από το σύγχρονο μηχανικό.

Η επιθυμία για τη διατήρηση και την προστασία των αρχαιοελληνικών μνημείων για όσο το δυνατόν περαιτέρω χρονικό διάστημα απαιτεί τη σε βάθος ανάλυση της συμπεριφοράς τους, τον εντοπισμό των αδυναμιών τους και την επινοήση τρόπων υπέρβασης των τελευταίων.

Η συγκεκριμένη μελέτη προσπαθεί να βοηθήσει σε αυτήν ακριβώς την προσέγγιση. Τόσο ο αριθμός των παλαιότερων μελετών πάνω στο θέμα, όσο και η πρόοδος των υπολογιστικών εργαλείων της σημερινής εποχής, μπορούν να συνεπικουρήσουν στην διερεύνηση ενός πραγματικά πολύπλοκου, ισχυρά μη γραμμικού στατικού συστήματος.

Έτσι, λοιπόν, το στατικό σύστημα προς διερεύνηση είναι ο συνδυασμός βάσης, σπονδύλων με εμπόλια και προαιρετικά επιστυλίου στην κορυφή. Η επιρροή του επιστυλίου περιορίζεται στην δημιουργία αξονικού φορτίου και όχι στην πιθανή σύζευξη σειράς κίωνων.

Το τελευταίο έγινε για διάφορους λόγους. Στόχος ήταν να απομονωθεί το φυσικό φαινόμενο του

λικνισμού και της ολίσθησης των σπονδύλων, σκοπός που θα αντιμετώπιζε δυσχέρειες αν ο κίονας δεν ήταν μεμονωμένος. Επιπρόσθετα, η ανάλυση μιας κινοστοιχίας θα απαιτούσε πολλαπλάσιο υπολογιστικό κόστος και ίσως θα αποτελέσει μελλοντικό πόνημα. Άλλωστε, οι μελέτες και η επιστημονική σκέψη εστιάζονται γύρω από το προαναφερθέν στατικό σύστημα, αφού είναι αυτό που επικρατεί αριθμητικά πλέον στη σημερινή εποχή από τις κατασκευές των Αρχαίων Ελλήνων. Είναι αυτό, επίσης, που φαίνεται να είναι και το πιο ευαίσθητο στις επιδράσεις του Εγκέλαδου, οπότε είναι δικαιολογημένη η αυξημένη προσοχή σε αυτό.

1.2) Παλαιότερες μελέτες.

Μία σειρά από μελέτες που ασχολούνται με το φαινόμενο έχουν ήδη δημοσιευτεί. Ασχολούνται τόσο από πειραματική όσο και από θεωρητική και αριθμητική σκοπιά. Το φαινόμενο του λικνισμού ενός μεμονωμένου μπλοκ γύρω από δύο σημεία περιστροφής έχει μελετηθεί σε θεωρητικό επίπεδο ήδη από τη δεκαετία του 1970 από τον **Housner {1}**, ενώ μεταγενέστερες μελέτες έχουν προχωρήσει το θέμα με μικροδιορθώσεις και προσπάθειες ανάλυσής του σε μεγαλύτερο βάθος.

Παράλληλα, έχουν γίνει προσπάθειες πειραματικής επιβεβαίωσης των θεωρητικών δεδομένων σε διάφορες αντίστοιχες εγκαταστάσεις ανά τον κόσμο, τόσο με απλά, όσο και με πιο πολύπλοκα μοντέλα. Η πρόοδος στον πειραματικό τομέα επέτρεψε την προοδευτικά λεπτομερέστερη προσέγγιση του φαινομένου που δείχνει να συμβαδίζει με την αντίστοιχη πρόοδο των θεωρητικών αναλύσεων και των αναλυτικών εργαλείων.

Είναι προφανές ότι λόγω του ότι αρχαιοελληνικοί ναοί βρίσκονται κατά κύριο λόγο συγκεντρωμένοι στον σημερινό Ελλαδικό χώρο, οι αντίστοιχες επιστημονικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα προέρχονται κυρίως από επιστήμονες στην Ελλάδα ή έλληνες επιστήμονες στο εξωτερικό. Αυτό, φυσικά, δεν μειώνει την ποιότητα και χρησιμότητα άλλων μελετών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από εξαιρετική ποιότητα, μιας και το φαινόμενο έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον κορυφαίων ξένων επιστημόνων.

Ο μεγάλος αριθμός των αντίστοιχων μελετών έχουν δώσει σημαντικά αποτελέσματα και απαντήσεις γύρω από το πρόβλημα του λικνισμού και της ολίσθησης σπονδυλωτών αρχαιοελληνικών κατασκευών. Λεπτομέρειες για τα αποτελέσματα αυτά δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο που ασχολείται ειδικά με αυτές τις μελέτες.

Γενικά, όμως, μπορεί να λεχθεί ότι λόγω του ισχυρά μη γραμμικού χαρακτήρα του φαινομένου, τα αποτελέσματα των όποιων μοντέλων δεν μπορούν να συγκριθούν εύκολα με απλά συστήματα με γνωστές λύσεις, παρά μόνο αν γίνει μια σειρά από απαραίτητες παραδοχές. Από την άλλη, πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν να επιβεβαιώνουν τα θεωρητικά και αναλυτικά ευρήματα. Παρά το γεγονός αυτό, ο τρισδιάστατος χαρακτήρας του φαινομένου, η διασπορά ενέργειας λόγω των κρούσεων, η μεταφορά δυνάμεων με φαινόμενα τριβής δια μέσου των σπονδύλων, καθώς και πληθώρα άλλων συνιστωσών, είναι θέματα που δεν έχουν ακόμα προσεγγιστεί σε ικανοποιητικό βάθος μέχρι στιγμής.



1.3) Αντικειμενικοί στόχοι της παρούσης μελέτης.

Ο αντικειμενικός στόχος της μελέτης αυτής είναι να προσπαθήσει να προσεγγίσει ένα τόσο πολύπλοκο φαινόμενο με αριθμητικό τρόπο και πιο συγκεκριμένα με τη βοήθεια του προγράμματος πεπερασμένων στοιχείων **ANSYS 7.1 Multiphysics**. Οι δυνατότητες που το τελευταίο παρέχει είναι πολύτιμες στη διερεύνηση των μη γραμμικών φαινομένων που αναπτύσσονται σε μία σπονδυλωτή κατασκευή με εμπόλια κατά τη διάρκεια **σεισμικών φορτίσεων** ή σε τεχνητές φορτίσεις με θεωρητικό ενδιαφέρον, όπως η φόρτιση στην κορυφή για την εύρεση της **καμπύλης pushover**.

Είναι προφανές ότι για τη διαφύλαξη της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, θα χρειαστεί να υπάρχουν οι απαραίτητοι έλεγχοι, τόσο με απλά θεωρητικά μοντέλα, όσο και με αποτελέσματα παλαιότερων μελετών. Για το λόγο αυτό, όπου υπάρχουν αποκλίσεις των αποτελεσμάτων σε σχέση με παλαιότερα ευρήματα, γίνεται προσπάθεια διερεύνησης των αντίστοιχων αιτιών.

Τα αποτελέσματα θα προέλθουν από κυρίως δύο τομείς, από την *παραμετρική διερεύνηση διαφόρων συνιστωσών του προβλήματος*, καθώς και από την *εφαρμογή σε μία πραγματική κατασκευή*, και πιο συγκεκριμένα σε συγκεκριμένο στύλο που αποτελεί τμήμα της **ακρόπολης της Λίνδου στη Ρόδο {2}**.

1.4) Διάρθρωση της διπλωματικής.

Η μελέτη αποτελείται από **9 κεφάλαια** και το **παράρτημα**. Μετά από αυτή την **εισαγωγή** (που περιλαμβάνει την περιγραφή του προβλήματος, μια μικρή αναφορά σε παλαιότερες μελέτες, τους στόχους της μελέτης, καθώς και περιγραφού του σκελετού της), ακολουθεί ένα σχετικά εκτεταμένο κεφάλαιο με την περιγραφή επιλεγμένων μελετών πάνω στο θέμα (“**state of the art**”).

Το τρίτο κεφάλαιο περιέχει **γενικές πληροφορίες για την εφαρμογή στην πραγματική κατασκευή**, για να δοθούν, ταυτόχρονα, περισσότερες πληροφορίες για το πρόβλημα που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική.

Το τέταρτο κεφάλαιο ασχολείται με τις **λεπτομέρειες του μοντέλου** που χρησιμοποιήθηκε στο ANSYS, όπως με τους διακόπτες του και τις μεταβλητές του. Μέσω των βήμα-προς-βήμα περιγραφών του, θα προσφέρει στο γνώστη του ANSYS πολύτιμες πληροφορίες για τη γενικότερη φιλοσοφία του μοντέλου, γεγονός που μπορεί να επιτρέψει την προσεκτική ανάλυσή του καθώς και την μελλοντική εξέλιξή του. Το κεφάλαιο αυτό αποδεικνύει την μεγάλη παραμετροποίηση που το μοντέλο επιδέχεται, καθιστώντας το χρήσιμο για ένα πολύ μεγάλο εύρος μελετών, δισδιάστατων ή τρισδιάστατων.

Το πέμπτο κεφάλαιο ασχολείται με **σειρά ελέγχων (trial tests)** του μοντέλου με απλούστερες θεωρητικές λύσεις, καθώς και με συγκρίσεις με πιο περίπλοκα μοντέλα παλαιότερων μελετών από διάφορους ερευνητές.

Στο έκτο κεφάλαιο συναντούμε την **παραμετρική μελέτη της μεταφοράς δυνάμεων**, αναλύονται αποτελέσματα από πέντε διακριτά μοντέλα (που όλα μπορούν να δημιουργηθούν από το ίδιο αρχείο εισαγωγής, χάρη στην ύπαρξη διακοπών και μεταβλητών), ενώ αναφέρονται διάφορα συμπεράσματα από τη σύγκριση μεταξύ τους. Σε αυτά τα πέντε διακριτά μοντέλα γίνεται ιδιομορφική ανάλυση για τη διερεύνηση των ιδιοσυχνοτήτων που μπορεί να είναι επικίνδυνες για την κατασκευή. Αναλύεται ο μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων (*pushover loading*) της σπονδυλωτής κολώνας για αυξανόμενη πολυπλοκότητα προσομοίωσης και επιλέγεται το πλέον βέλτιστο διακριτό μοντέλο. Σημαντική είναι η μελέτη και για αρμονική ταλάντωση με συχνοτικά χαρακτηριστικά κοντά στην 1^η ιδιομορφή του μοντέλου που περιγράφεται στο ίδιο κεφάλαιο.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται η **εφαρμογή** του αρχείου δεδομένου προσαρμοσμένου έτσι ώστε να

προσεγγίζεται μια **πραγματική κατάσταση**, μία κολώνα με *σπονδύλους στην Ακρόπολη της Λίνδου στη Ρόδο*, για επιβαλλόμενη διέγερση **το σεισμό της Ρόδου**. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής είναι η δημιουργία διαγραμμάτων μετατοπίσεων-χρόνου για διάφορα επίπεδα έντασης.

Στο όγδοο κεφάλαιο αναφέρονται **οι παρατηρήσεις και τα συμπεράσματα** της εργασίας αυτής.

Στο ένατο κεφάλαιο αναφέρονται **οι παραπομπές και η βιβλιογραφία** που χρησιμοποιήθηκε για την όσο το δυνατόν καλύτερη θεωρητική τεκμηρίωσης της διπλωματικής αυτής.

Στο παράρτημα παρατίθεται **ο πηγαίος κώδικας του αρχείου εισαγωγής στο ANSYS** για μελλοντική μελέτη και ανάλυση.

2) State of the art.

2.1) Μοντέλα αρχαιοελληνικών στύλων που υπόκεινται σε οριζόντιες κινήσεις βάσεως. Μελέτη των δυναμικών και σεισμικών συμπεριφορών τους {3}.

2.1.1) Γενικές πληροφορίες και περίληψη.

Παρουσιάστηκε στο **11^ο Ευρωπαϊκό Συνέδριο Σεισμικής Μηχανικής**, στο Ρότερνταμ το 1998, από τους καθηγητές **Μάνο, Γ.** και **Δημοσθένους, Μ.**

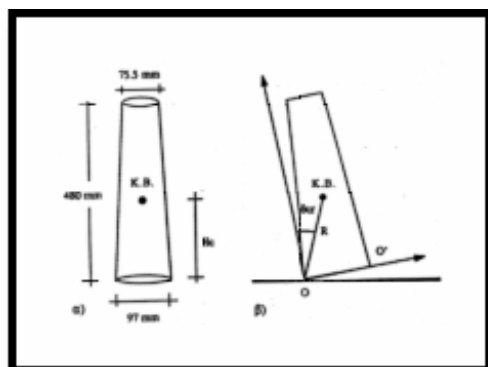
Η ανωτέρω μελέτη είχε έντονα *πειραματικό* χαρακτήρα, ενώ τα μοντέλα προσομοίωσης των αρχαιοελληνικών στύλων ήταν σχετικά *απλά* και *άκαμπτα*. Ελέγχθηκε, επίσης, ένα μοντέλο που αποτελείται από δύο στύλους που υποστηρίζουν ένα συμπαγές επιστύλιο. Τέλος, για λόγους δυναμικής διερεύνησης της επιρροής κατάλληλα τοποθετημένων συρματοσκοινων στα μοντέλα, έγιναν πειράματα τόσο με αυτά, όσο και χωρίς αυτά.

Τα πειράματα έγιναν με την εισαγωγή διαφόρων κινήσεων βάσης στη σεισμική τράπεζα του *Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης*.

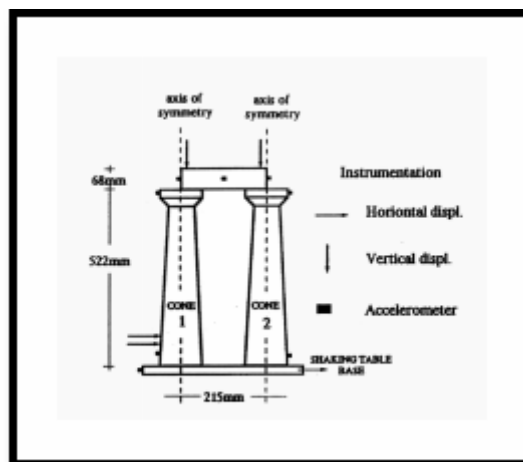
2.1.2) Λεπτομέρειες μοντέλων.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιώσουν την πραγματική συμπεριφορά των αρχαιοελληνικών στύλων ήταν κατασκευασμένα από **χάλυβα** σε κλίμακα **20** φορές μικρότερη από το φυσικό μέγεθος.

Οι βασικές διατάξεις ήταν δύο. Η πρώτη ήταν απλά ένας χαλύβδινος κόλουρος κώνος που προσομοιώνει *μονολιθικό στύλο με απλή έδραση*. Η δεύτερη διάταξη αποτελούνταν από δύο κόλουρος κώνους, ίδιους με αυτόν της πρώτης διάταξης, *με την προσθήκη ορθογωνίου συμπαγούς επιστύλιου*, το οποίο στηρίχθηκε σε αυτούς, όπως και κατάλληλων *μετρητικών διατάξεων*. Ένα ιδιαίτερα *άκαμπτο μεταλλικό πλαίσιο* εφαρμόστηκε γύρω από το μοντέλο της πρώτης διάταξης για να το προστατεύσει από μεγάλες λικνιστικές κινήσεις, αλλά και για να γίνεται μέτρηση του μεγέθους των τελευταίων.



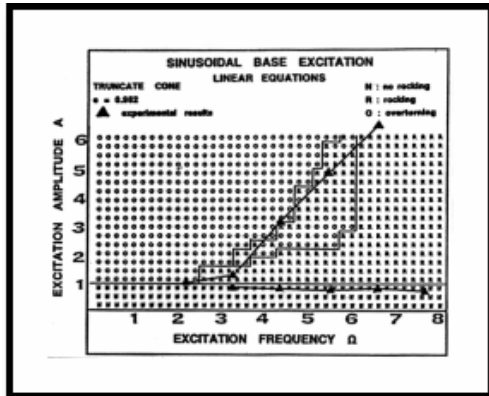
Σχήμα 2-1: Λικνισμός.



Σχήμα 2-2: Μοντέλο.

2.1.3) Δυναμική συμπεριφορά του πρώτου μοντέλου.

- Οι δυναμικές φορτίσεις που επιβλήθηκαν σε όλα τα μοντέλα ήταν *περιοδικές ημιτονοειδείς* (με ένα καλό εύρος συχνοτήτων και πλατών) και η ιστορία του *σεισμού του El Centro του 1940*.
- Η συμπεριφορά των δοκιμών σε *δυναμική φόρτιση* (σεισμική ή ημιτονοειδή) κυριαρχείται από το φαινόμενο του **λκνισμού**. Πιο συγκεκριμένα για διεγέρσεις σχετικά μικρού πλάτους, το φαινόμενο εμφανίζεται με υπο-αρμονική μορφή για να γίνει πλήρως αρμονική για μεγαλύτερα πλάτη διεγέρσεων.
- Όταν το πλάτος διεγέρσης γίνει υπερβολικά μεγάλο τότε, εκτός από την *τάση ανατροπής* του δοκιμίου, εμφανίζεται και το φαινόμενο της **ολίσθησης** στη βάση, όπως και του λκνισμού *εκτός επιπέδου* ως προς τη διεγερση.
- Τα πειραματικά αποτελέσματα με τη βοήθεια του **συντελεστή αποκατάστασης**, ανάγονται στα θεωρητικά αποτελέσματα από αριθμητική επίλυση από προηγούμενες μελέτες (*Μάνος και Δημοσθένους 1990, Μάνος και Δημοσθένους 1991*) και γίνεται έλεγχος για ευστάθεια και σύγκλιση με τη βοήθεια μιας *εκτεταμένης παραμετρικής μελέτης* (*Δημοσθένους, 1994*).
- Όταν η αδιάστατη συχνότητα διεγέρσης αυξάνεται, το όριο στο οποίο αρχίζει ο ασταθής λκνισμός αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό.
- Για μικρές τιμές της αδιάστατης συχνότητας, το μεταβατικό στάδιο από το μη-λκνισμό στην ανατροπή, σε σχέση με το αδιάστατο πλάτος, είναι πολύ μικρό και συμβαίνει για μικρή αύξηση του πλάτους.
- Η ανωτέρω συμπεριφορά περιγράφεται από το παρακάτω διάγραμμα αδιάστατης συχνότητας-αδιάστατου πλάτους διεγέρσης:

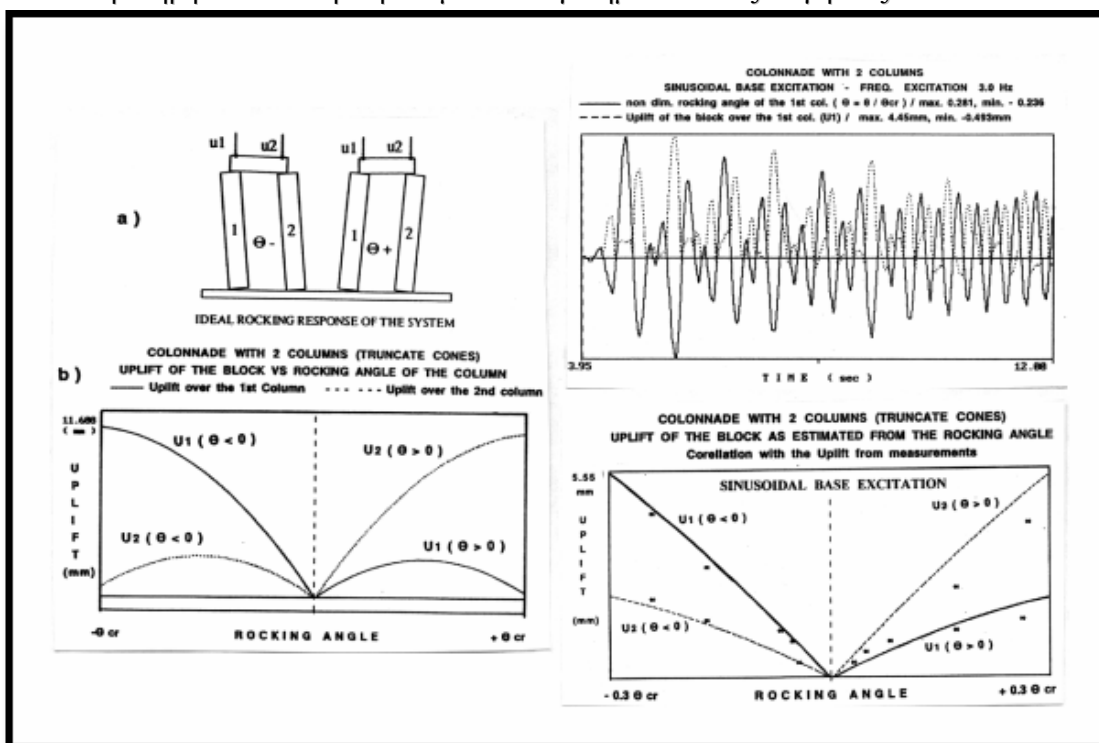


Σχήμα 2-3: Όρια ημιτονοειδούς διεγέρσης.

- Για μικρές τιμές της αδιάστατης συχνότητας, το μεταβατικό στάδιο από το μη-λκνισμό στην ανατροπή, σε σχέση με το αδιάστατο πλάτος, είναι πολύ μικρό και συμβαίνει για μικρή αύξηση του πλάτους.
- Τέλος, έγινε ακόμη μία αριθμητική παραμετρική μελέτη με βάση τις αδιάστατες γραμμικές εξισώσεις για ημιτονοειδή διεγερση που αναπτύχθηκαν από τους *Spanos και Koh (1984)*, πάντα διορθωμένες με τον **συντελεστή αποκατάστασης**.

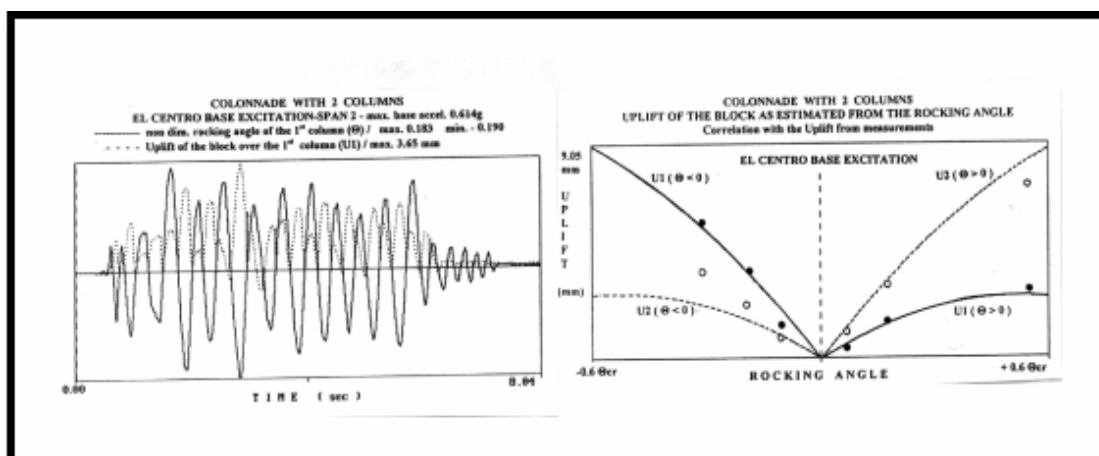
2.1.4) Δυναμική συμπεριφορά του δεύτερου μοντέλου.

- Οι δυναμικές φορτίσεις που επιβλήθηκαν σε όλα τα μοντέλα ήταν *περιοδικές ημιτονοειδείς* (με ένα εύρος συχνοτήτων 3Hz~7Hz και διαφόρων πλατών) και η χρονοϊστορία του *σεισμού του El Centro του 1940*.
- Η απόκριση του μοντέλου στα 7Hz ήταν 10 φορές μικρότερη από την αντίστοιχη στα 3Hz (περίπου ό,τι ακριβώς συνέβη και στο πρώτο μοντέλο).
- Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα που συγκρίνουν την θεωρητική και την παρατηρηθείσα απόκριση του μοντέλου για ημιτονοειδείς διεγέρσεις:



Σχήμα 2-4: Απόκριση μοντέλου για ημιτονοειδείς φορτίσεις.

- Αντίστοιχα διαγράμματα για το σεισμό του El Centro, είναι τα εξής:



Σχήμα 2-5: Απόκριση μοντέλου για το σεισμό του El Centro.

2.1.5) Γενικές παρατηρήσεις και συμπεράσματα.

- Η θεωρητική λύση του προβλήματος για το όριο στο οποίο αρχίζει ο ασταθής λικνισμός συμπίπτει με αρκετή ακρίβεια με τα αποτελέσματα του πειράματος.
- Οι τάσεις προς λικνισμό του συστήματος δύο στύλων με επιστύλιο συμφωνούν ποιοτικά με την περίπτωση του απλού επιστυλίου. Για το ίδιο πλάτος διέγερσης, δηλαδή, όσο πιο μεγάλη είναι η συχνότητα της διέγερσης, τόσο το πλάτος του λικνισμού μικραίνει.
- Για όχι ιδιαίτερα μεγάλες γωνίες λικνισμού, η απόκριση του σύνθετου μοντέλου τόσο για ημιτονοειδή όσο και για σεισμική διέγερση είναι εντός επιπέδου και συμφωνεί με τη θεωρητική, αρκεί να μην υπάρξει διαφορετική ολίσθηση μεταξύ των στύλων στη βάση ή με το επιστύλιο στην κορυφή τους.

2.2) Αριθμητική ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς σπονδυλωτών μνημειακών κατασκευών {4}.

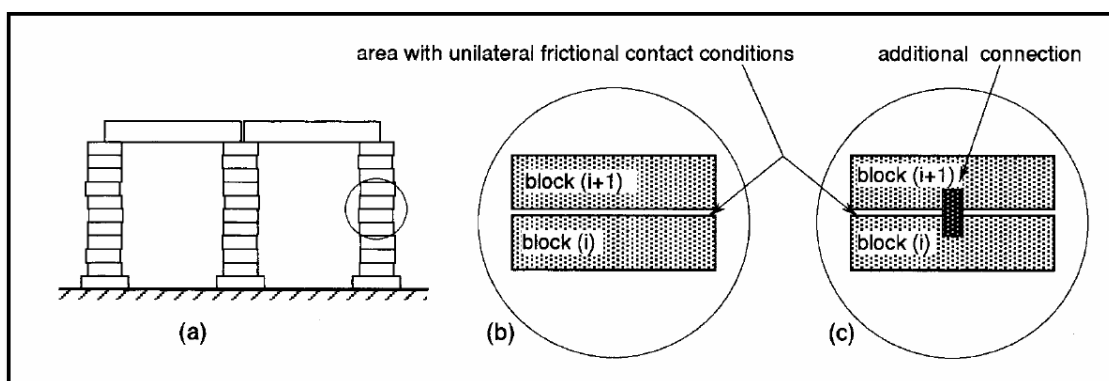
2.2.1) Γενικές πληροφορίες και περίληψη.

Παρουσιάστηκε στο **11^ο Ευρωπαϊκό Συνέδριο Σεισμικής Μηχανικής**, στο Ρότερνταμ το 1998, από τους καθηγητές **Μητσοπούλου, Ε., Δουδούμη, Ι.** και **Πασχαλίδη, Β.**

Η ανωτέρω μελέτη είχε έντονα *θεωρητικό* χαρακτήρα. Αναπτύχθηκε πρόγραμμα που εξετάζει τα φαινόμενα τριβής και αποκόλλησης των σπονδύλων μεταξύ τους («*μονόπλευρη*»– «*unilateral*» επαφή). Τα στατικά φορτία των μοντέλων (τύπου απλού αρχαιοελληνικού στύλου με ή χωρίς σπονδύλους) είναι μόνο το ίδιο βάρος τους. Τα μοντέλα βρίσκονταν σε συνθήκες πλήρους πάκτωσης και ελέγχθηκαν για απόκριση σε *ελεύθερο λικνισμό*, σε *ημιτονοειδή διέγερση* και σε *εισαγωγή σεισμικής διέγερσης*. Η λύση του φαινομένου ακολούθησε τη μέθοδο της *χρονικής* (σε *χρονικά βήματα*) και *χωρικής διακριτοποίησης* (με *πεπερασμένα στοιχεία*) του προβλήματος με την διαμόρφωση και επίλυση ενός *συμπληρωματικού γραμμικού προβλήματος για κάθε χρονικό βήμα*.

Τα τελικά αποτελέσματα είχαν ικανοποιητική σύμπτωση με αντίστοιχα θεωρητικά που είχαν προκύψει από αντίστοιχες μελέτες (*Housner 1963, Wong & Tso 1989, Shenton & Jones 1991, Demosthenous 1994*).

Παρακάτω παρουσιάζεται η διακριτοποίηση των μοντέλων:



Σχήμα 2-6: Διακριτοποίηση των μοντέλων.

2.2.2) Λεπτομέρειες του μαθηματικού μοντέλου.

Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει την πραγματική συμπεριφορά των αρχαιοελληνικών στύλων έχει ως υποθέσεις και λεπτομέρειες τις κάτωθι:

- Τα μέλη του σπονδυλωτού συστήματος διακριτοποιήθηκαν χωρικά από δισδιάστατο πλέγμα στοιχείων με n διακριτούς κόμβους. Η συμπεριφορά του συστήματος δόθηκε από το διάνυσμα μεγέθους $(3 \times n)$ των κομβικών μετακινήσεων (δύο μετακινήσεις και μία περιστροφή) στο γενικό καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων.
- t_n ήταν κάθε χρονική στιγμή που γίνεται *επαφή-αποκόλληση*, ή που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη *μετακινήσεις μεγάλου μεγέθους*. Σε αυτήν την περίπτωση, χρειάστηκε να υπολογιστούν ξανά μητρώα όπως π.χ. το \mathbf{D} που περιγράφεται παρακάτω.



- Όταν δεν υπάρχει το φαινόμενο της επαφής–αποκόλλησης, το πρόβλημα της συμπεριφοράς του συστήματος τη στιγμή t περιγραφόταν από τις κάτωθι διαφορικές εξισώσεις και από τις αρχικές συνθήκες τη στιγμή $t=t_A$:

$$\mathbf{M} \times \ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{C} \times \dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K} \times \mathbf{u} = \mathbf{p}(t)$$

- \mathbf{K} : μητρώο δυσκαμψίας
- \mathbf{M} : θετικά ορισμένο μητρώο μάζας
- \mathbf{C} : μητρώο απόσβεσης
- $\mathbf{p}(t)$: διάνυσμα επικόμβιων φορτίων
- $\ddot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{u}}, \mathbf{u}$: διανύσματα επικόμβιων επιταχύνσεων, ταχυτήτων και μετακινήσεων.

- Ως προς τη χρονική διακριτοποίηση, εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος των Zienkiewicz et al. (1980), ο οποίος είναι ευσταθής χωρίς περιορισμούς (unconditionally stable), με παραμένονσα στάθμιση (weighted residual). Ο αλγόριθμος αυτός κάνει ανεξάρτητα παρεμβολή των διανυσμάτων μετακινήσεων και ταχυτήτων και έτσι δεν χρειάζεται να υπολογιστούν οι όροι επιταχύνσεων (αποφεύγεται έτσι και ο υπολογισμός των «αρχικών» επιταχύνσεων κάθε χρονική στιγμή t_A που γίνεται το φαινόμενο της πρόσκρουσης–επαφής). Το αποτέλεσμα είναι οι ανωτέρω διαφορικές εξισώσεις να μετασχηματιστούν σε ένα σύνολο αλγεβρικών εξισώσεων που για κάποιο διακριτό χρονικό διάστημα $\{t_A \sim t\}$ έχουν τη μορφή:

$$\mathbf{K}^* \times \mathbf{u}^* = \mathbf{P}^*$$

- Έτσι, για το προαναφερθέν χρονικό διάστημα, το πρόβλημα έπαιρνε τη μορφή ενός *ισοδύναμου στατικού προβλήματος μονόπλευρης επαφής* ενός συστήματος Ω με μητρώο δυσκαμψίας \mathbf{K}^* (το οποίο περιλαμβάνει όρους για το φαινόμενο μεγάλων μετακινήσεων), διανύσματος φόρτισης \mathbf{P}^* και μετακινήσεων \mathbf{u}^* .
- Οι συνοριακές συνθήκες των ορίων Γ_s θεωρήθηκε ότι είναι αφενός μεν *μονόπλευρη επαφή* (τύπος **Signorini**), αφετέρου δε *στατική τριβή* (νόμος **Coulomb**). Το σύνολο των διακριτών κόμβων που μετέχουν στο πρόβλημα των συνοριακών συνθηκών ήταν \mathbf{m} , από τους οποίους *κάθε στιγμή t_A που παρουσιάζεται το φαινόμενο πρόσκρουσης ή ολίσθησης, μετέχει στο τελευταίο, αριθμός \mathbf{m}_i κόμβων*. Το πρόβλημα των συνοριακών συνθηκών επιλύθηκε με βάση τις κάτωθι εξισώσεις:

$$\mathbf{D} \times \Delta \mathbf{U} + \mathbf{P}_o = \mathbf{S}$$

με

$$\mathbf{P}_o = \Delta \mathbf{S}_o + \mathbf{S}_{t_A}$$

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{N}_i \times \mathbf{S}_i$$

$$\Delta \mathbf{U}_i = \mathbf{V}_i \times \Delta \lambda_i$$

$$-\mathbf{f}_i \geq \mathbf{0}$$

$$\Delta \lambda_i \geq \mathbf{0}$$

$$-\mathbf{f}_i^T \times \Delta \lambda_i = \mathbf{0}$$

SN, ST: Οι κάθετες και εφαπτόμενες αντιδράσεις στα σημεία επαφής i

UN, UT: Οι σχετικές μετακινήσεις των σημείων επαφής i

$\Delta \mathbf{UN}, \Delta \mathbf{UT}$: Οι σχετικές αυξήσεις που αντιστοιχούν στις ανωτέρω μετακινήσεις.

D: Το μητρώο $[2m_i \times 2m_i]$ συντελεστών επιρροής που διαμορφώθηκε μέσω του *αμφίπλευρου συστήματος Ω_o* που προκύπτει από το *στατικό σύστημα Ω* με την υπόθεση ότι *όλοι οι κόμβοι \mathbf{m} έχουν σχετική μηδενική μετακίνηση* εκτός από αυτούς που τη χρονική στιγμή t_A έχουν **διαχωρισμό** ως αρχική *συνθήκη επαφής*. Κάθε χρονική στιγμή t_A , το μητρώο **D** υπολογιζόταν ξανά. Κάθε όρος D_{ik} προκύπτει ως η αντίδραση στην κατεύθυνση i λόγω *μοναδιαίου σχετικού καταναγκασμού* στην κατεύθυνση k ($U_k=1$) του συστήματος Ω_o .

$\Delta \mathbf{S}_o$: Το γνωστό διάνυσμα αντιδράσεων στα \mathbf{m}_i ζεύγη κόμβων σε επαφή στο σύστημα Ω_o , λόγω αύξησης της εξωτερικής φόρτισης στο χρονικό διάστημα Δt .

$$\mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} S_{Ti} \\ S_{Ni} \end{bmatrix} \quad \Delta U_i = \begin{bmatrix} \Delta U_{Ti} \\ \Delta U_{Ni} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{N}_i = \begin{bmatrix} -1 & \mu_i \\ 1 & \mu_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{V}_i = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \Delta \lambda_i = \begin{bmatrix} |\Delta U_{Ti}|^+ \\ |\Delta U_{Ti}|^- \\ \Delta U_{Ni} \end{bmatrix}$$

με (i=1,2,...,m₁) και:

$$\mathbf{f} = [\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2, \dots, \mathbf{f}_{m_1}]^T \quad \Delta \lambda = [\Delta \lambda_1, \Delta \lambda_2, \dots, \Delta \lambda_{m_1}]^T \quad \Delta \mathbf{U} = [\Delta \mathbf{U}_1, \Delta \mathbf{U}_2, \dots, \Delta \mathbf{U}_{m_1}]^T$$

$$\mathbf{S} = [\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_{m_1}]^T \quad \mathbf{N} = \text{diag}[\mathbf{N}_1, \mathbf{N}_2, \dots, \mathbf{N}_{m_1}]^T \quad \mathbf{V} = \text{diag}[\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \dots, \mathbf{V}_{m_1}]^T$$

- Οι ανωτέρω εξισώσεις δημιούργησαν το **Γραμμικό Πρόβλημα Συμπληρωματικότητας**, το οποίο λύθηκε με τον αλγόριθμο του **Lemke**.

$$-\mathbf{f} = \mathbf{D}^* \times \Delta \mathbf{U} + \mathbf{P}_o^*$$

με

$$-\mathbf{f} \geq 0 \quad \Delta \lambda \geq 0 \quad -\mathbf{f}^T \times \Delta \lambda = 0$$

- Με την επίλυση του παραπάνω προβλήματος λήφθηκαν οι τελικές συνθήκες για κάθε ζεύγος κόμβων στο όριο Γ_s , όπως και οι σχετικές μετακινήσεις U και αντιδράσεις S στα ζεύγη κόμβων m_1 . Με το συνδυασμό των ήδη υπολογισμένων τιμών μετακινήσεων U και αντιδράσεων S στο όριο Γ_s με το διάνυσμα φόρτισης στο χρονικό βήμα Δt , παραλήφθηκαν οι μετακινήσεις και τάσεις του συστήματος και έγινε προώθηση στο επόμενο χρονικό βήμα.

2.2.3) Απόκριση μεμονωμένου μπλοκ και σχόλια αποτελεσμάτων.

- Αναλύθηκε το παρακάτω μοντέλο, του οποίου η φυσική συχνότητα λικνισμού είναι:

$$P = \sqrt{\frac{M \times g \times R}{I_o}} \text{ με}$$

M: μάζα του στύλου

R: απόσταση του κέντρου βάρους από τον πόλο λικνισμού

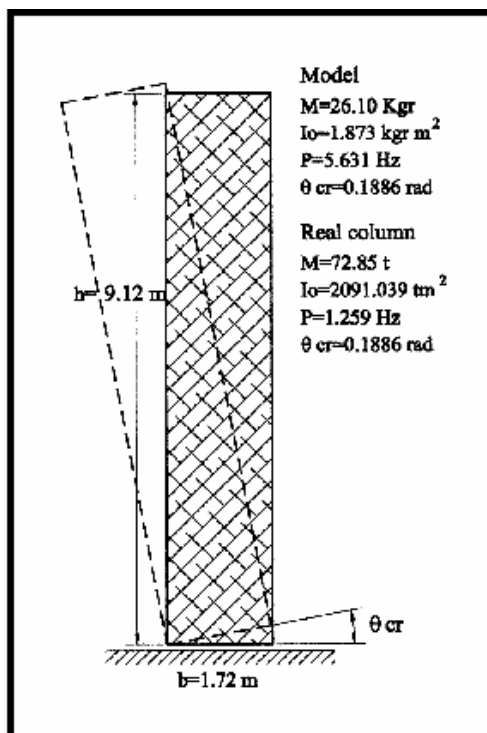
I_o: μαζική ροπή αδράνειας του στύλου ως προς το πόλο λικνισμού

g: επιτάχυνση της βαρύτητας

- Ορίστηκε η κρίσιμη γωνία στροφής (η γωνία πέραν της οποίας τα φορτία βαρύτητας ανατρέπουν το πρίσμα) ως:

$$\theta_{cr} = \arctan(b/h)$$

- Σημαντικός είναι ο λόγος $\Omega = \omega/P$ της συχνότητας της διέγερσης ως προς τη φυσική συχνότητα P του πρίσματος, όπως σημαντικός είναι το πλάτος της διέγερσης α_{max} (m/sec²).
- Η επιτάχυνση που οδηγεί το πρίσμα στο να

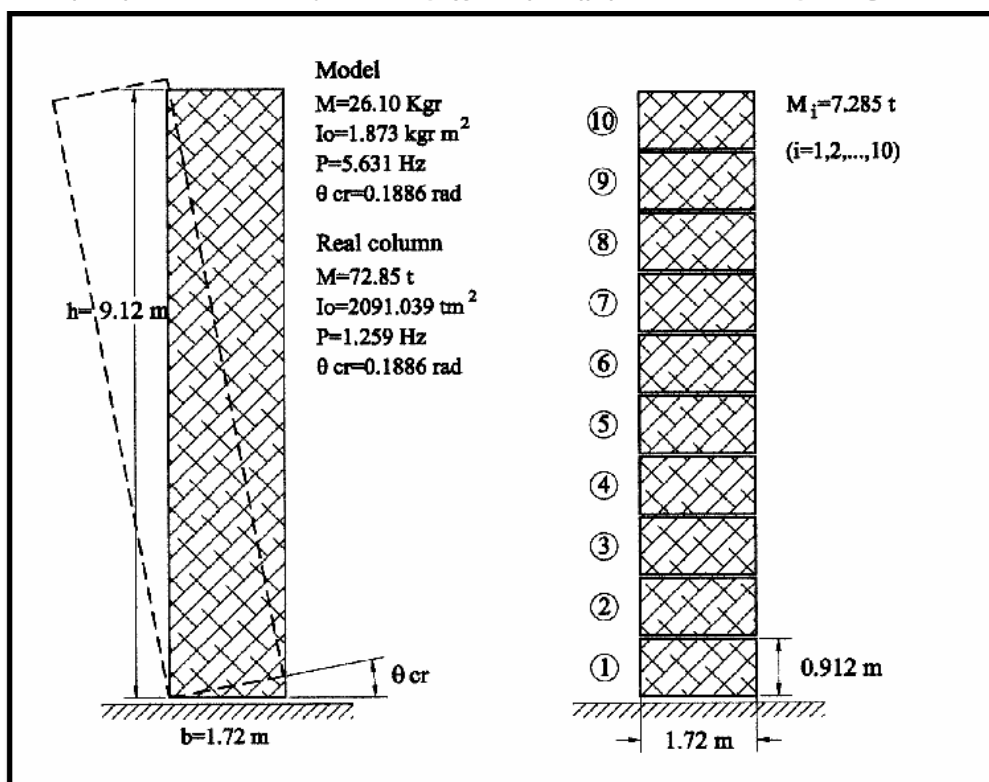


Σχήμα 2-7: Λεπτομέρειες μοντέλου.

πάρει κλίση είναι ανεξάρτητη της συχνότητας διέγερσης και ήταν ίση με:

$$\alpha_0 = g \times \theta_{cr}$$

- Τα αποτελέσματα εξαναγκασμένης φόρτισης ημιτονοειδούς μορφής συμφωνούσαν με τα πειραματικά αποτελέσματα (Δημοσθένους, 1994) για συγκεκριμένες τιμές ω , θ_{max}/θ_{cr} και α_{max} .
- Η αριθμητική διερεύνηση μεγάλου εύρους αντίστοιχων τιμών έδωσε ότι η αύξηση της συχνότητας της διέγερσης Ω συνεπάγεται αύξηση της ευστάθειας του πρίσματος, ακόμα και αν είχαμε μεγάλες τιμές του πλάτους α_{max} .
- Στην περίπτωση που δοθεί κάποια αρχική μετακίνηση στην κορυφή του πρίσματος και αφεθεί να ταλαντωθεί, ακόμα και αν δεν δοθεί ιξώδης απόσβεση στο μαθηματικό μοντέλο, το πλάτος της κίνησης μειώνεται λόγω των συνεχών προσκρούσεων σύμφωνα με τους τύπους του Housner (1963). Αντίθετα, οι τιμές των επιταχύνσεων παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια του λικνισμού (όπως έχει παρατηρηθεί και από τους Wong & Tso, 1989).



Σχήμα 2-8: Μεμονωμένα και σπονδυλωτά στοιχεία.

2.2.4) Απόκριση μεμονωμένων και σπονδυλωτών στύλων και σχόλια αποτελεσμάτων.

- Θεωρήθηκαν υλικά κατασκευής ασβεστόλιθος ή μάρμαρο με πυκνότητα $\rho=2,7 \text{ t/m}^3$.
- Οι μεμονωμένοι στύλοι θεωρήθηκαν ως λεπτότοιχες διατομές ($h > b$), ενώ οι σπονδυλωτοί στύλοι θεωρήθηκαν ως αριθμός τεμαχίων που βρίσκονται με απλή έδραση το ένα πάνω στο άλλο.
- Η γωνία τριβής θεωρήθηκε με εύρος $25^\circ \sim 35^\circ$, δηλαδή ο συντελεστής τριβής ήταν $\mu=0,47 \sim 0,70$.
- Για το μεμονωμένο στύλο πάρθηκαν τιμές $P=1,259 \text{ Hz}$ ($T_c=0,794 \text{ sec}$), $\theta_{cr}=0,1886 \text{ rad}$

και επιτάχυνση που άρχιζε να γέρνει ίση με $\alpha_0 = 1,886 \text{ m/sec}^2$.

- Τα αποτελέσματα δεν δείχνουν να επηρεάζονται από διάφορες τιμές του *συντελεστή αποκατάστασης* e , ο οποίος επηρεάζει τα αποτελέσματα ταχυτήτων των σημείων επαφής όταν η τελευταία λαμβάνει χώρα.
- Η απόκριση των δύο μοντέλων (*μεμονωμένου και σπονδυλωτού στύλου*) για το σεισμό του φράγματος *Rasoitma* (κυρίαρχες συχνότητες διάφορες του P, δηλαδή $\Omega=2,5\sim 8\text{Hz}$) ήταν παρόμοια για την ταλάντευση των γωνιακών κόμβων στη βάση τους. Πιο συγκεκριμένα, η μέγιστη κατακόρυφη μετακίνηση έγινε στο ίδιο χρόνο $t=3,95 \text{ sec}$ και για το *μεμονωμένο στύλο* ήταν $0,128\text{m}$ ($\theta=0,0747$), ενώ για το σπονδυλωτό στύλο ήταν $0,145\text{m}$ ($\theta=0,0844 < \theta_{cr}$).
- Ο *συντελεστής τριβής* $\mu=0,5$ ήταν ικανός να *αποτρέψει ολίσθηση των διεπιφανειών*, ακόμα και στα ανώτερα στρώματα και για το λόγο αυτό δεν κρίθηκε απαραίτητη η ύπαρξη συνδέσμων διάτμησης μεταξύ των τεμαχίων.
- Η πιθανότητα *ολίσθησης* μεταξύ των κορυφαίων σπονδύλων ήταν μεγαλύτερη στα κορυφαία στρώματα (ο λόγος των οριζοντίων προς κατακόρυφων αντιδράσεων σε αυτά τα στρώματα ήταν μεγαλύτερος).
- Ο *λκνισμός* λάμβανε χώρα ιδιαίτερα στα χαμηλότερα στρώματα, ενώ είναι πιο ήπιος στα μεσαία στρώματα (όπου γίνεται στιγμιαία και φανερώνεται από τη προσωρινή μηδενική τιμή των κατακορύφων μετακινήσεων).
- Ο σεισμός της Θεσσαλονίκης του 1978 δεν προκάλεσε στα μοντέλα ούτε καν *ανύψωση* γιατί οι μέγιστες επιταχύνσεις ήταν της τάξεως των $1,3 \text{ m/sec}^2$. Ακόμα και με αύξηση των επιταχύνσεων κατά 2,5 φορές, η τιμή $\theta=0,02$ ήταν ακόμα πολύ μικρότερη του θ_{cr} . Ούτε το γεγονός ότι δεσπόζουσες συχνότητες του συγκεκριμένου σεισμού ήταν κοντά στο P έδειξε να επηρεάζει την ανωτέρω παρατήρηση.

2.2.5) Γενικές παρατηρήσεις και συμπεράσματα.

- Οι στύλοι με γεωμετρικά και μαζικά χαρακτηριστικά κοντά στα εξετασθέντα δεν ανατρέπονταν, ακόμα και για *δυναμικές φορτίσεις μεγάλης περιόδου* ($T=1,6 \text{ sec}$) και *μεσαίου πλάτους* ($\alpha=3\sim 4\text{m/sec}^2$).
- Για τους περισσότερους πραγματικούς σεισμούς, οι σπονδυλωτοί στύλοι ανέπτυσαν *λκνιστικά φαινόμενα* για *μικρά χρονικά διαστήματα* με $\theta < \theta_{cr}$. Αυτό οφείλεται στο ότι οι μεγάλες επιταχύνσεις που είναι υπεύθυνες για τυχόν ανατροπή *δρουν για πολύ μικρό διάστημα με άμεση πιθανότητα ανακούφισης*.
- Ο *λκνισμός* *μείωνε την τέμνουσα βάσης* (οριζόντια αντίδραση), αλλά η *πρόσκρουση* με το έδαφος δημιουργούσε *μεγάλες τέμνουσες*.
- Η *σταθερότητα* των *σπονδυλωτών στύλων* ήταν ελάχιστα υποδεέστερη των *μεμονωμένων στύλων*, αν και γενικά ιδιαίτερα ικανοποιητική για τους περισσότερους των συνηθέστερων σεισμών.

2.3) Παραμετρική διερεύνηση της ευστάθειας αρχαιο-ελληνικών στύλων υπό αρμονική και σεισμική διέγερση {5}.

2.3.1) Γενικές πληροφορίες και περίληψη.

Παρουσιάστηκε στο **11^ο Ευρωπαϊκό Συνέδριο Σεισμικής Μηχανικής**, στο Ρότερνταμ το 1998, από τους καθηγητές **Ψυχάρη, Ι., Παπασταματίου, Δ.** και **Αλεξανδρή, Α.** υπό τον τίτλο “Αρμονική και σεισμική απόκριση ενός κλασσικού στύλου”. Στη συνέχεια συμπληρώθηκε με νέα στοιχεία και δημοσιεύτηκε με τον παρόντα τίτλο στην περιοδική έκδοση **“Earthquake Engineering and Structural Dynamics”**, τεύχος **29**, έτος **2000**.

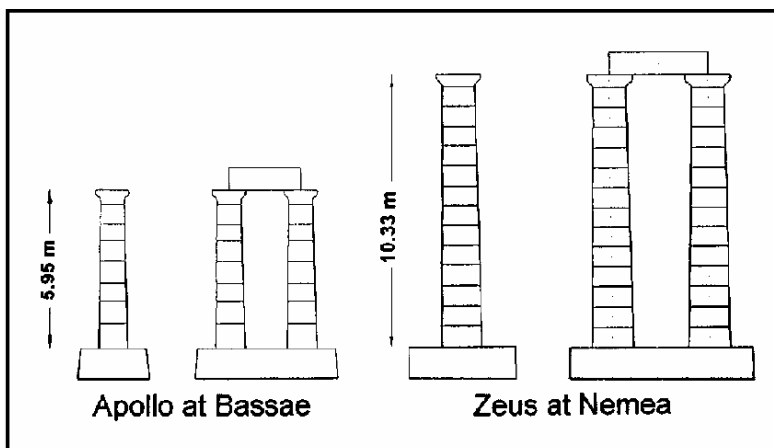
Η ανωτέρω μελέτη είχε *θεωρητικό* χαρακτήρα. Χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα UDEC (από την ITASCA co.) για δισδιάστατη ανάλυση (με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων) σπονδυλωτών στύλων. Η μελέτη αυτή έδωσε ιδιαίτερη βαρύτητα στη διερεύνηση της αλλαγής της συμπεριφοράς κατασκευών αυτού του τύπου όταν εισαχθούν στο μοντέλο διαφόρων ειδών ατέλειες. Επίσης, αναγνωρίζει ότι τα φαινόμενα που αναπτύσσονται είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα, μη γραμμικά και δεν έχουν διερευνηθεί σε βάθος μέχρι στιγμής και γι’ αυτό το λόγο, μέθοδοι που προκύπτουν από τη μηχανική του συνεχούς μέσου δεν είναι ικανοποιητικές για την πλήρη κατανόηση των φαινομένων αυτών.

Η μελέτη έχει επηρεαστεί από τη Μέθοδο των Διακριτών Στοιχείων (Cundall P., 1971) καθώς και από αντίστοιχη μελέτη του Ε.Μ.Π. (Καρύδης, 1995) που είχε χρησιμοποιήσει τρισδιάστατο πρόγραμμα (3DEC) για τη μελέτη κολώνας του Παρθενώνα. Τα μοντέλα (παραλαγή των οποίων αποτελεί και ένα με επιστύλιο) ελέγχονται σε αρμονικές και σεισμικές δράσεις.

Τέλος, αναγνωρίζει ότι ενώ η δισδιάστατη μελέτη είναι ικανοποιητική για παραμετρικές αναλύσεις, εν τούτοις δεν είναι σε θέση να αποδώσει με σαφήνεια όλες τις πλευρές της κανονικής απόκρισης της κατασκευής, όπως την στρέψη γύρω από τον κάθετο άξονα και τον ταυτόχρονο λικνισμό στις δύο κύριες διευθύνσεις. Επιπρόσθετα, η δισδιάστατη ανάλυση δίνει την εντύπωση ότι η κατασκευή είναι πιο σταθερή απ’ ό,τι θα έδιναν αποτελέσματα τρισδιάστατης ανάλυσης.

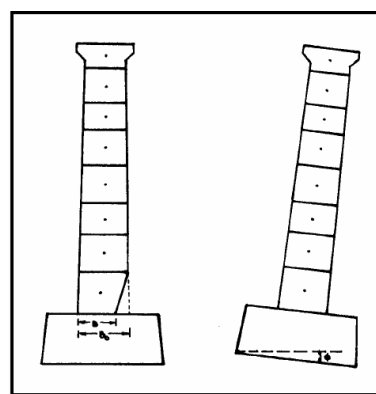
2.3.2) Μοντέλα και μέθοδος ανάλυσης.

- Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση εξομοιώνουν πραγματικές κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα, μελετήθηκε ο 9^{ος} στύλος της ανατολικής πτέρυγας του ναού του Απόλλωνα του Επικούριου στις Βάσσαι, Πελοπόννησος, καθώς και απομεινάρια του ναού του Δία στη Νεμέα.
- Τα δύο κύρια μοντέλα έχουν ως εξής: Για το ναό του Απόλλωνα είναι ένας μεμονωμένος σπονδυλωτός στύλος με διαφορετικά πάχη λίθων με τις διπλάνες διαστάσεις (στη βάση η διάμετρος είναι 1,11m) και δύο ίδιοι στύλοι με αντίστοιχο περιστύλιο στην κορυφή (για τη διερεύνηση της επιρροής του επιπλέον βάρους και του καταναγκασμού που αυτό επιβάλλει). Για το ναό του Δία σημειώνουμε την πολύ μεγαλύτερη λυγηρότητα των στύλων (η μεγαλύτερη για στύλο στην Ελλάδα), ενώ οι διαστάσεις φαίνονται στα αντίστοιχα σχήματα που ακολουθούν.



Σχήμα 2-9: Σχηματική απεικόνιση υφιστάμενων κατασκευών.

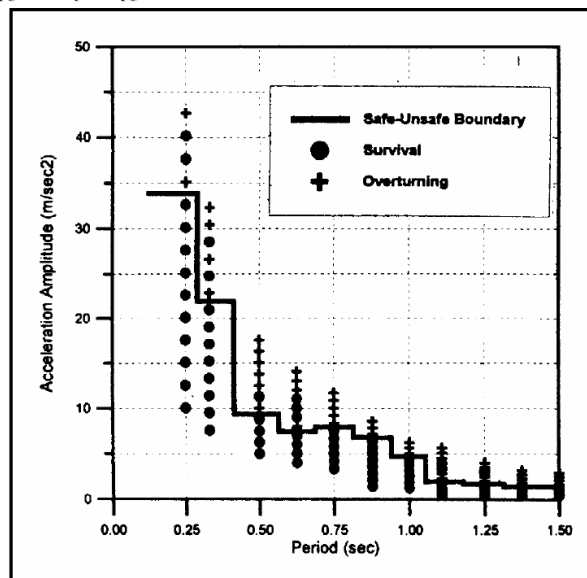
- Μια παραλλαγή των δύο μοντέλων στύλων του ναού του Απόλλωνα είναι τα ίδια δύο μοντέλα με εσκεμμένες εισηγμένες ατέλειες:
- Η πρώτη παραλλαγή προβλέπει κοπή της βάσης (αποτέλεσμα αποτυχημένων ανατινάξεων τη διάρκεια του μεσαίωνα) ώστε από την αρχική διάμετρο βάσης B_0 να οδηγούμαστε στη νέα, μικρότερη διάμετρο B .
- Η δεύτερη προβλέπει την αρχική κλίση της βάσης κατά γωνία φ για να εξομοιώσει τις πραγματικές διαφορικές καθιζήσεις που υπάρχουν στο ναό.
- Για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα UDEC. Το ασυνεχές μέσο παρουσιάζεται ως ένα σύνολο διακριτών τεμαχίων. Επιτρέπονται πεπερασμένες μετακινήσεις και στροφές, μέχρι πλήρους αποκόλλησης. Γίνεται αυτόματος έλεγχος επανακόλλησης καθώς συνεχίζονται οι υπολογισμοί και η γεωμετρία αλλάζει λόγω μεγάλων μετακινήσεων.
- Κάθε φορά που εμφανίζεται νέα επαφή μεταξύ δύο τεμαχίων, τα ορθά και διατμητικά ελατήρια κινητοποιούνται για τον υπολογισμό των δυνάμεων μεταξύ τους και την εξομοίωση της κρούσης.
- Λόγω της μεγάλης τιμής μετακινήσεων που λαμβάνουν χώρα μεταξύ των κόμβων λόγω ανύψωσης ή ολίσθησης, η παραμορφωσιμότητα των τεμαχίων μπορεί να αγνοηθεί και έτσι χρειάζεται να μοντελοποιηθούν μόνο οι μηχανικές ιδιότητες των κόμβων.
- Οι σημαντικές παράμετροι επαφής είναι ο συντελεστής τριβής, η ορθή και διατμητική δυσκαμψία των επαφών (ιδεατά ελατήρια) και η απόσβεση κατά Reyleigh (ιδεατοί αποσβεστήρες).
- Ο συντελεστής τριβής ευρέθη εύκολα με κλασσικές πειραματικές μεθόδους σε πραγματικούς σπόνδυλους. Η τιμή της γωνίας τριβής κυμαινόταν από 38° έως 54° αλλά χρησιμοποιήθηκε ίση με 35° για να ταιριάζει με την δυναμική έννοια της κίνησης σε μικρές ορθές τάσεις και σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση.
- Η ορθή και διατμητική δυσκαμψία των ιδεατών ελατηρίων λήφθηκε ίση με 5×10^9 Pa/m από σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Η απόσβεση δεν δείχνει να επηρεάζει το κομμάτι της ισχυρής εδαφικής κίνησης, όμως στο τέλος της σεισμικής δράσης (όπου παρατηρούνται ελεύθερες ταλαντώσεις) είναι υπεύθυνη για το γρήγορο ή μη ρυθμό απόσβεσης του φαινομένου του λικνισμού. Για το λόγο αυτό λήφθηκε μηδενική απόσβεση.



Σχήμα 2-10: Σχηματική απεικόνιση ατελειών.

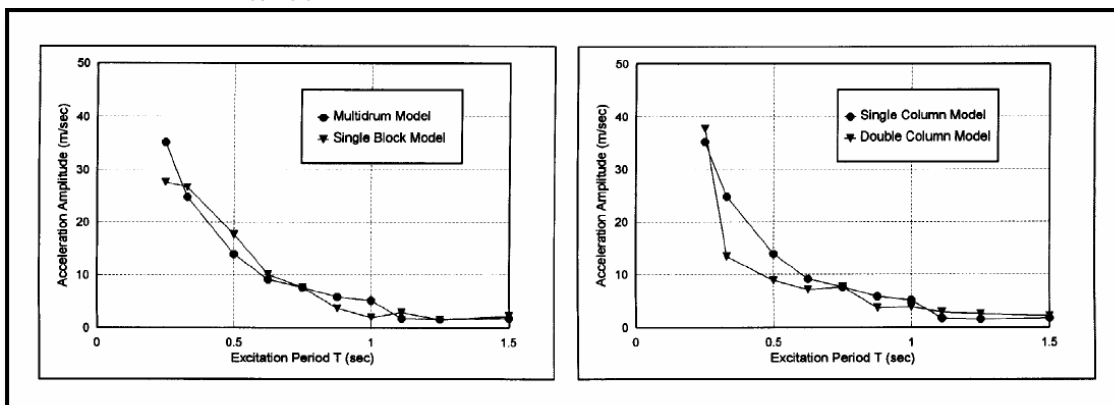
2.3.3) Αποκριση των μοντέλων σε αρμονική διέγερση.

- Επιλέχθηκε να γίνει ανάλυση σε αρμονική διέγερση γιατί αφενός μεν πολλές σεισμικές καταγραφές περιέχουν μια δεσπόζουσα αρμονική συνιστώσα, αφετέρου δε επειδή δίνει πληροφορίες για την επίδραση του συχνотικού περιεχομένου ενός σεισμού στην πιθανότητα κατάρρευσης.
- Επισημαίνεται ο σημαντικός ρόλος που παίζει η περίοδος διέγερσης στην απόκριση της κατασκευής.
- Είναι δυνατόν να γίνει κάποιου είδους αντιστοίχισης μεταξύ των αποτελεσμάτων της αρμονικής διέγερσης με τα αντίστοιχα της σεισμικής.
- Έγινε σειρά αναλύσεων με αρμονικές διεγέρσεις περιόδου 0,25 sec μέχρι 1,5 sec. Η διάρκειά τους ήταν 25 κύκλοι φόρτισης.
- Σε κάθε σειρά φορτίσεων με συγκεκριμένη περίοδο, το πλάτος της διέγερσης αυξανόταν προοδευτικά μέχρι να παρουσιαστεί κατάρρευση, σύμφωνα και με το διπλανό διάγραμμα, που αναφέρεται στην περίπτωση του ναού του Απόλλωνα (σημειώνεται όμως ότι ήταν επίσης δυνατόν να παρουσιαστεί μη κατάρρευση σε μεγαλύτερο πλάτος):
- Τα αποτελέσματα σχεδόν όλων των αναλύσεων παρουσιάζονται με τη μορφή σημείων κατάρρευσης σε διαγράμματα περιόδου-πλάτους διέγερσης.
- Η ανάλυση έδειξε ότι οι άθικτοι σπόνδυλοι μπορούν να αντέξουν μεγάλες αρμονικές διεγέρσεις δίχως κατάρρευση (τόσο μεγάλες όσο π.χ. περιόδου 0,25 sec και επιτάχυνσης 3g).
- Αύξηση της περιόδου διέγερσης σημαίνει και δραματική πτώση της ευστάθειας της σπονδυλωτής κατασκευής. Στο διάγραμμα φαίνεται αυτή η λογαριθμικού τύπου πτώση του ορίου κατάρρευσης.
- Έτσι, λοιπόν, κινήσεις μεγάλης περιόδου προκαλούν κατάρρευση από λικνισμό πολύ πιο εύκολα απ’ ότι οι μικρής περιόδου, οι οποίες χρειάζονται πολύ μεγάλο πλάτος διέγερσης για να καταφέρουν το ίδιο. Αυτό το συμπέρασμα συμφωνεί και με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του Housner, 1963. Επίσης, οι υψίσυχνες διεγέρσεις οδηγούν σε ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων και σε κατάρρευση του κορυφαίου τμήματος του στύλου. Αντίθετα, οι διεγέρσεις χαμηλών συχνοτήτων οδηγούν σε απόκριση της κατασκευής ως «μονολιθική», αμέσως μετά την ανύψωση της βάσης.
- Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δείχνουν ότι ενώ ο ναός του Δία έχει κολώνες πολύ πιο λυγρές απ’ ότι οι κολώνες του ναού του Απόλλωνα, εντούτοις είναι πιο σταθερός. Το γεγονός αυτό εξηγείται μέσω του “size effect”, δηλαδή μικρότερες κατασκευές ανατρέπονται πιο εύκολα απ’ ότι μεγαλύτερες ίδιας λυγρότητας. Αυτό ισχύει τόσο για τους μεμονωμένους μονολιθικούς στύλους όσο και για τους σπονδυλωτούς.
- Η συμπεριφορά του σπονδυλωτού στύλου παρουσιάζει εντυπωσιακές ομοιότητες με την αντίστοιχη του αντίστοιχου «μεμονωμένου» (μονολιθικού, ιδίων διαστάσεων), κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει στη χρησιμοποίηση του απλούστερου, μονολιθικού μοντέλου στις διάφορες μελλοντικές αναλύσεις.



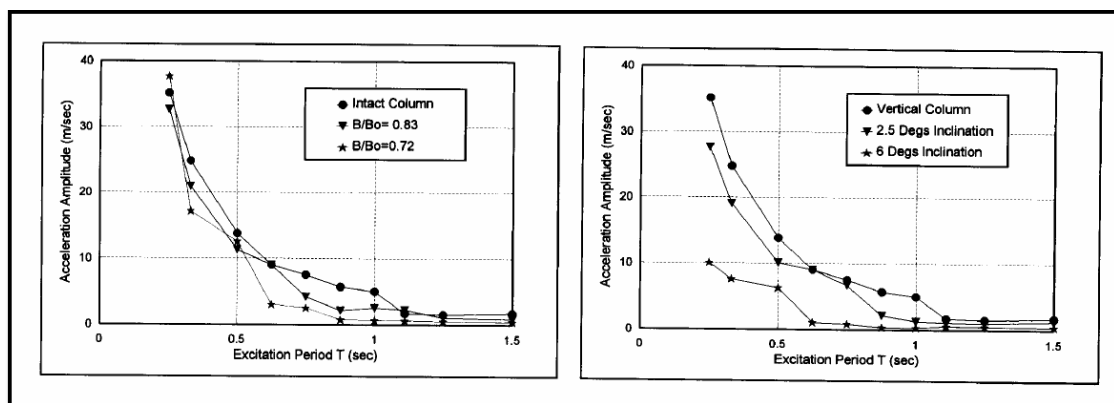
Σχήμα 2-11: Όρια ευστάθειας.

- Το σύστημα δύο στύλων με επιστύλιο παρουσιάζει επίσης παρόμοια συμπεριφορά σε σχέση με τον ένα στύλο. Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει αύξηση της ευστάθειας και σε κάποιες όχι. Σε άλλες αναλύσεις (Ψυχάρης, 1996), στις οποίες υπήρχε παραμετρική ανάλυση του βάρους του επιστυλίου, τα αποτελέσματα συμφωνούσαν με την παρατήρηση αυτή. Γενικά, πάντως, το πιο πιθανό να συμβεί είναι πτώση εκτός επιπέδου του επιστυλίου, που όμως και σε αυτήν την περίπτωση δεν δείχνει να επηρεάζει την ευστάθεια των στύλων.
- Οι ανωτέρω δύο παρατηρήσεις για την περίπτωση του ναού του Απόλλωνα φαίνονται στο κάτωθι διπλό διάγραμμα:



Σχήμα 2-12: Διαγράμματα περιόδου–πλάτους.

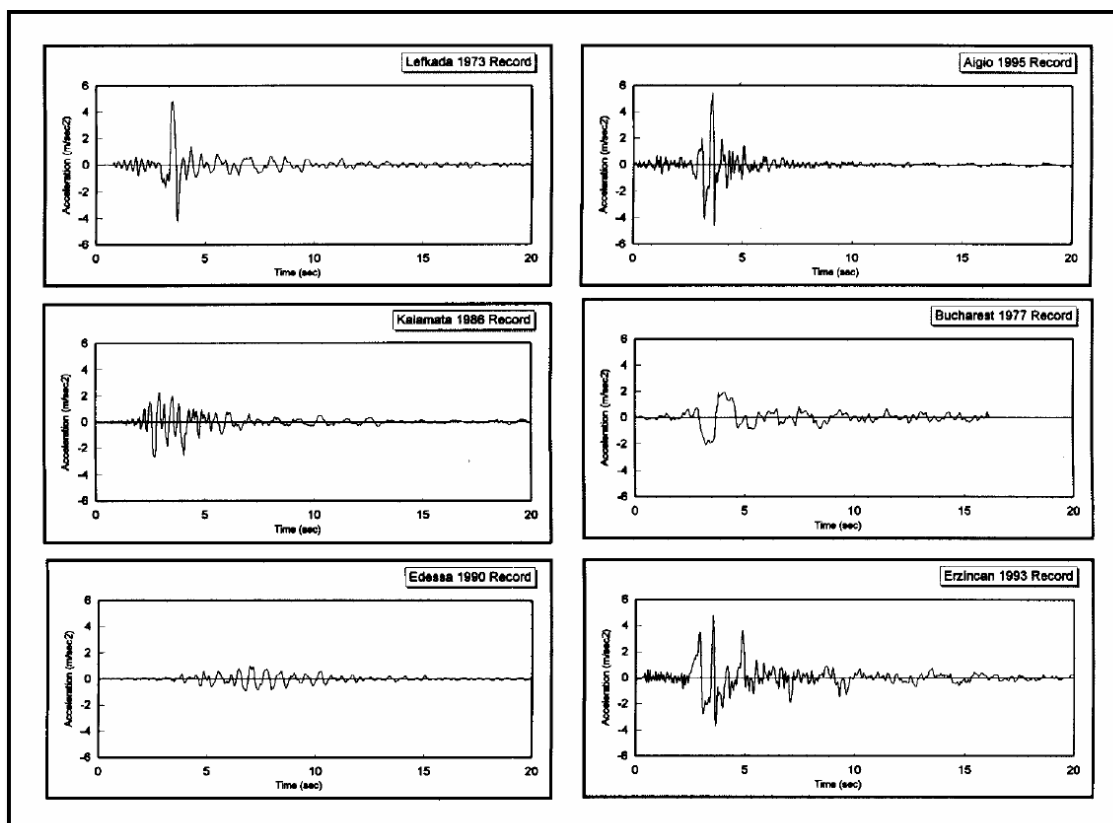
- Οι πραγματικοί σπόνδυλοι έφεραν σημάδια ατελειών. Ένα από αυτά ήταν η μειωμένη διατομή βάσης λόγω ανεπιτυχών προσπαθειών κατεδάφισης στο μεσαίωνα, επίδρασης του χρόνου και των καιρικών συνθηκών ή ακόμα και της φωτιάς. Έγινε ανάλυση για μείωση της διατομής βάσης στο 83% και στο 72%. Το αποτέλεσμα ήταν η δραματική μείωση της ευστάθειας των στύλων, ιδιαίτερα στην περιοχή περιόδων 0,5sec με 1,0 sec.
- Οι στύλοι ελέγχθηκαν επίσης σε κλίση 2,5° και 6° για την εξομοίωση πραγματικών συνθηκών διαφορετικών καθιζήσεων. Το αποτέλεσμα ήταν μεγάλη αύξηση της πιθανότητας κατάρρευσης, ιδιαίτερα για της μεσαίας και μεγάλης συχνότητας διεγέρσεις. Έτσι, λοιπόν, τέτοιου είδους ατέλειες κάνουν τους στύλους επιρρεπείς σε κατάρρευση από μεγάλης συχνότητας (τοπικούς, δηλαδή, κατά κύριο λόγο) σεισμούς μεσαίας έντασης.
- Η επίδραση των δύο ειδών ατελειών που παρουσιάστηκαν παραπάνω συνοψίζεται στο παρακάτω διπλό διάγραμμα:



Σχήμα 2-13: Επίδραση ατελειών.

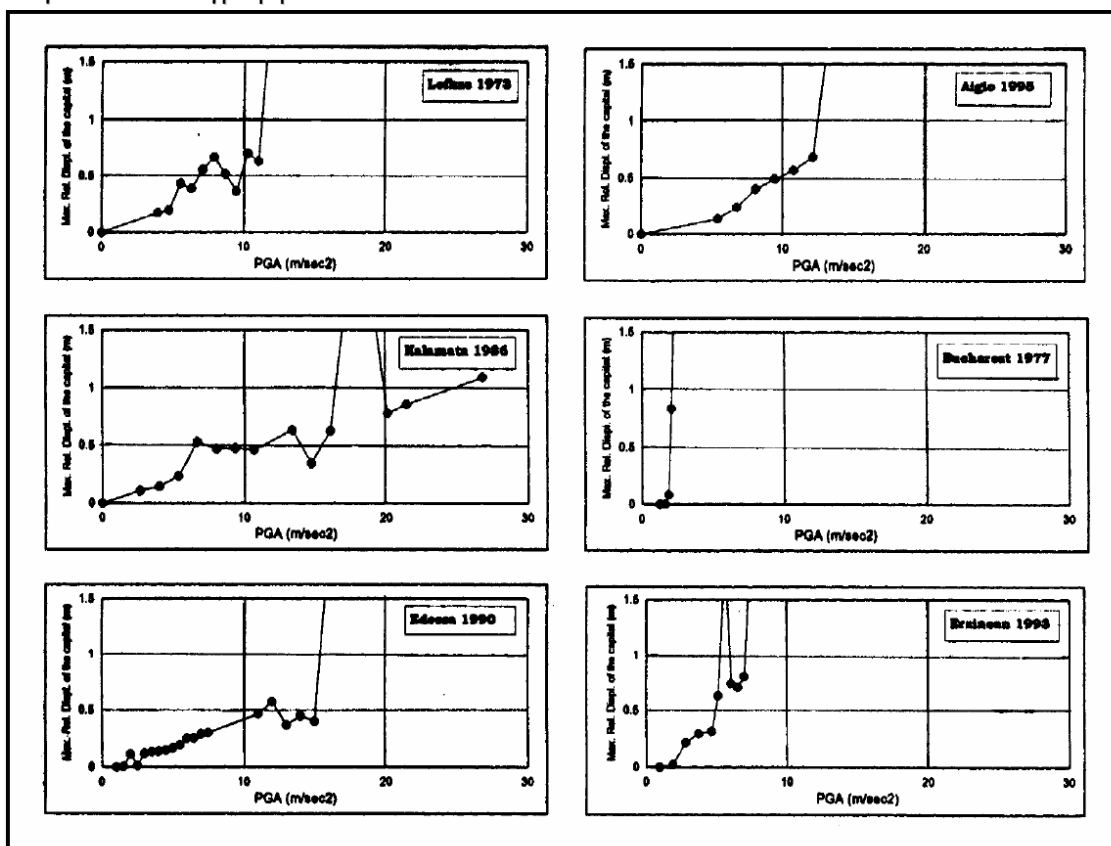
2.3.4) Συμπεριφορά των μοντέλων σε σεισμική διέγερση.

- Χρησιμοποιήθηκαν διάφορων ειδών σεισμικές καταγραφές για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ποικιλία χαρακτηριστικών (Λευκάδα 1973 σε μαλακό έδαφος, Καλαμάτα 1986 σε συνθήκες κοντινού πεδίου, Έδεσσα 1990 με ισχυρούς παλμούς, Αίγιο 1995 κοντά στο ρήγμα, Βουκουρέστι Ρουμανίας 1977, Ερτζικάν Τουρκίας 1992 κοντά στο ρήγμα):



Σχήμα 2-14: Σεισμοί εισαγωγής.

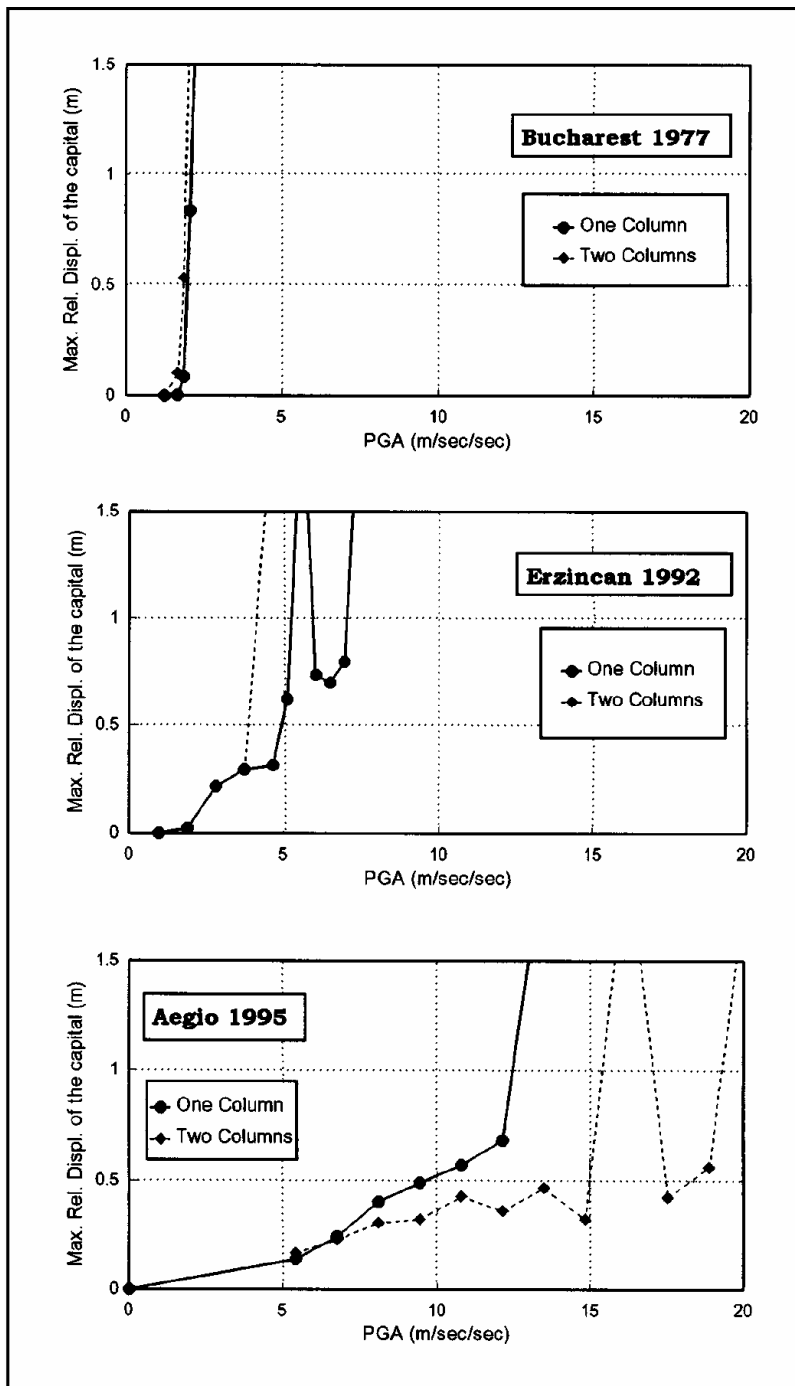
- Κατάρρευση θεωρείται όταν υπάρξει μετακίνηση 1,5 m στην κορυφή.
- Η ανάλυση προβλέπει την προοδευτική αύξηση του πλάτους των διεγέρσεων από τις καταγραφές, μέχρι την κατάρρευση. Για κάθε καταγραφή γίνεται διάγραμμα μέγιστης σχετικής μετακίνησης στην κεφαλή του στύλου σε σχέση με τη βάση με τετμημένες τις PGA για κάθε καταγραφή:



Σχήμα 2-15: Διάγραμμα μέγιστης σχετικής μετακίνησης με PGA.

- Στους σεισμούς του Βουκουρεστίου και του Ερτζικάν παρατηρήθηκαν καταρρεύσεις για πολύ μικρές τιμές PGA (κοντά στις πραγματικές), κάτι που οφείλεται στο ότι η δεσπόζουσα περίοδος της διέγερσης είναι μεγάλου μεγέθους, το οποίο φανερώνει την αστάθεια του συστήματος όταν κάτι τέτοιο συμβαίνει. Για τους υπόλοιπους σεισμούς χρειάζονται πολύ μεγαλύτερα πλάτη, οπότε ισχύει το συμπέρασμα που δόθηκε στην περίπτωση των αρμονικών διεγέρσεων (μεγάλη περίοδος ή δεσπόζουσα περίοδος → μεγαλύτερος κίνδυνος κατάρρευσης).
- Η διάρκεια της διέγερσης και ο αριθμός των ισχυρών παλμών (όπως του σεισμού της Έδεσσας) δεν φαίνεται να παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατάρρευση.

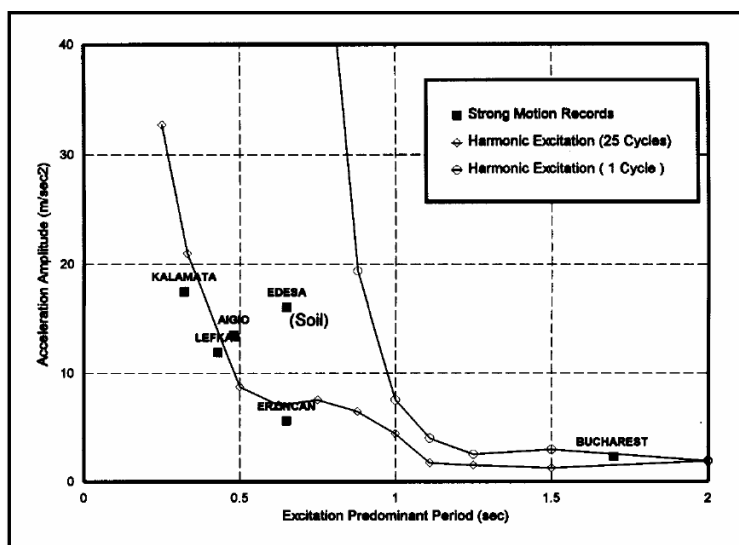
- Η ύπαρξη επιστυλίου μπορεί να αλλοιώσει τα αποτελέσματα και προς τις δύο μεριές. Για παράδειγμα, για το σεισμό του Βουκουρεστίου, η σύζευξη που προκαλεί το επιστύλιο δεν δείχνει να προκαλεί κάποια αλλαγή και γίνεται κατάρρευση ξανά για μικρά πλάτη επιτάχυνσης βάσης. Για το σεισμό του Ερτζικάν, η κατάρρευση γίνεται για χαμηλότερα επίπεδα επιτάχυνσης απ’ ότι χρειάζεται ο μεμονωμένος στύλος, ενώ το αντίθετο συμβαίνει για το σεισμό του Αιγίου:



Σχήμα 2-16: Διάγραμμα μέγιστης σχετικής μετακίνησης με PGA.

- Σε σεισμό μικρής δεσπόζουσας περιόδου (Καλαμάτα, 1986) στο μοντέλο με το σπονδυλωτό στύλο εμφανίζεται έντονο το φαινόμενο της ολίσθησης και της αποκόλλησης στη μέση του ύψους. Αντίθετα, στο σεισμό μεγάλης δεσπόζουσας περιόδου (Ερτζικάν, 1992) ο ίδιος στύλος αποκρίνεται σαν να ήταν μονολιθικός με ανύψωση να λαμβάνει χώρα μόνο στη βάση.

- Έγινε, επίσης, διάγραμμα δεσπόζουσας περιόδου διέγερσης με πλάτος ταλάντωσης που χρειάζεται για την ανατροπή των στύλων τόσο για τις αρμονικές διεγέρσεις, όσο και για τις σεισμικές. Τα σημεία αυτά ελέγχονται με τα αντίστοιχα σημεία για ημιτονοειδείς διεγέρσεις τόσο 20 κύκλων φόρτισης όσο και ενός κύκλου φόρτισης.



Σχήμα 2-17: Διάγραμμα δεσπόζουσας περιόδου διέγερσης με πλάτος ταλάντωσης.

- Οι αρμονικές διεγέρσεις μεγάλης περιόδου (πάνω από 1 sec) είχαν ως αποτέλεσμα την κατάρρευση από τον πρώτο κύκλο φόρτισης. Αντίθετα, διεγέρσεις με μικρή περίοδο έχουν αρκετή διαφορά στα αποτελέσματα για ένα και είκοσι κύκλους φόρτισης.
- Οι σεισμοί ισχυρής εδαφικής κίνησης (εκτός της Έδεσσας) έχουν παρόμοιο όριο κατάρρευσης με την αρμονική διέγερση πολλών κύκλων φόρτισης παρόμοιας περιόδου με την δεσπόζουσα περίοδο του σεισμού. Αυτό ισχύει και για το σεισμό της Λευκάδας που έχει μία και μόνη προέχουσα περίοδο.

2.3.5) Συμπεράσματα.

- Η περίοδος της διέγερσης παίζει σημαντικό ρόλο στην πιθανότητα και το είδος της κατάρρευσης, με σαφή επικινδυνότητα τις μεγάλες περιόδους ή δεσπόζουσες περιόδους.
- Η επιτάχυνση για την ανατροπή σπονδυλωτού στύλου είναι κοντά σε αυτήν για τον ισοδύναμο μονολιθικό. Για το μεμονωμένο στύλο, άρα, ενδεικνύεται μια πρώτη αναγνωριστική ανάλυση θεωρώντας τον μονολιθικό.
- Η ύπαρξη επιστυλίου στα μοντέλα δεν επηρεάζει πολύ τα αποτελέσματα και το αντίστοιχο μοντέλο μπορεί να είναι τόσο λιγότερο όσο και περισσότερο ασταθές απ' ότι χωρίς αυτό.
- Οι ατέλειες «μειωμένη διατομή βάσης» και «αρχική κλίση» μειώνουν σημαντικά την ευστάθεια του συστήματος. Έτσι, ενώ οι άθικτοι στύλοι είναι πολύ ευσταθείς στο σεισμό, οι ατέλειες αυτές εισάγουν μεγάλο παράγοντα αστάθειας. Το αποτέλεσμα συνδυασμού ατελειών θα μπορούσε να είναι αθροιστικό, για την ύπαρξη πάνω από μίας στο ίδιο μοντέλο και θα μπορούσε να είναι υπεύθυνο για την απώλεια ευστάθειας και πιθανή κατάρρευση εγκαταλελειμμένων μνημείων από μελλοντικό σεισμό.
- Για πραγματικές σεισμικές δονήσεις, το επίπεδο επιτάχυνσης που χρειάζεται για κατάρρευση είναι πάρομοιο με αυτό που ασκεί μία αρμονική διέγερση τριών κύκλων φόρτισης με περίοδο ίδια με τη δεσπόζουσα περίοδο της σεισμικής καταγραφής. Φαίνεται ότι οι στύλοι καταρρέουν στους αρχικούς κύκλους φόρτισης της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

2.4) Μελέτη δυναμικής και σεισμικής συμπεριφοράς αρχαιοελληνικών στύλων και κιονοστοιχιών με και χωρίς την εισαγωγή καλωδίων με χαρακτηριστικά απόσβεσης ενέργειας {6}.

2.4.1) Γενικές πληροφορίες και περίληψη.

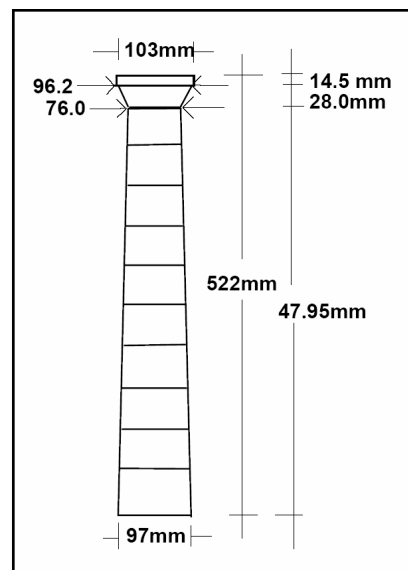
Παρουσιάστηκε στο **12^ο Παγκόσμιο Συνέδριο Σεισμικής Μηχανικής**, στη Νέα Ζηλανδία το 2000, από τους καθηγητές **Μάνο, Γ.** και συνεργάτες.

Η ανωτέρω μελέτη είχε έντονα πειραματικό χαρακτήρα, ενώ τα μοντέλα προσομοίωσης των αρχαιοελληνικών στύλων ήταν σχετικά σύνθετα, αφού περιελάμβαναν πολύπλοκες μετρητικές διατάξεις, ενώ η κλίμακά τους ήταν 1:20. Τέλος, για λόγους δυναμικής διερεύνησης της επιρροής κατάλληλα τοποθετημένων συρματόσκοινων στα μοντέλα, έγιναν πειράματα τόσο με αυτά, όσο και χωρίς αυτά.

Τα πειράματα έγιναν με την εισαγωγή διαφόρων κινήσεων βάσης στη σεισμική τράπεζα του *Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης*.

2.4.2) Λεπτομέρειες μοντέλων.

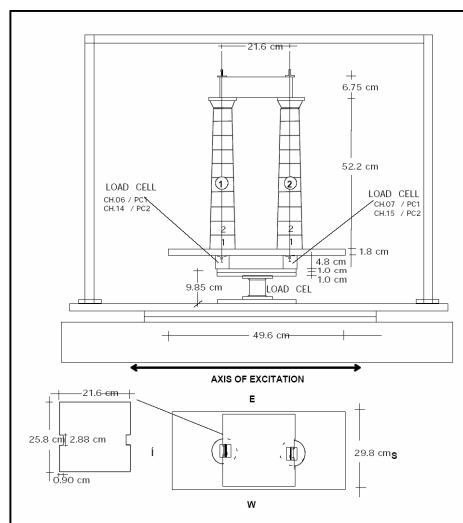
- Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για να προσομοιώσουν την πραγματική συμπεριφορά των αρχαιοελληνικών στύλων ήταν κατασκευασμένα από **χάλυβα** σε κλίμακα **20** φορές μικρότερη από το φυσικό μέγεθος και οι βασικές διατάξεις ήταν τρεις.
- Η πρώτη διάταξη ήταν απλά ένας χαλύβδινος κόλουρος κώνος που προσομοιώνει *μονολιθικό στύλο με απλή έδραση*. Σύμφωνα με παλαιότερη μελέτη, (Μάνος και Δημοσθένους, 1997), αυτού του τύπου οι στύλοι, όπως και αυτοί που θα ακολουθήσουν, κατασκευάστηκαν με τέτοιο τρόπο, που θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν τόσο σπονδυλωτό στύλο, όσο και μονολιθικό. Τα αποτελέσματα που απορρέουν από τη



Σχήμα 2-18: Πρώτο μοντέλο.

μελέτη, αναφέρονται στην περίπτωση μονολιθικού στύλου.

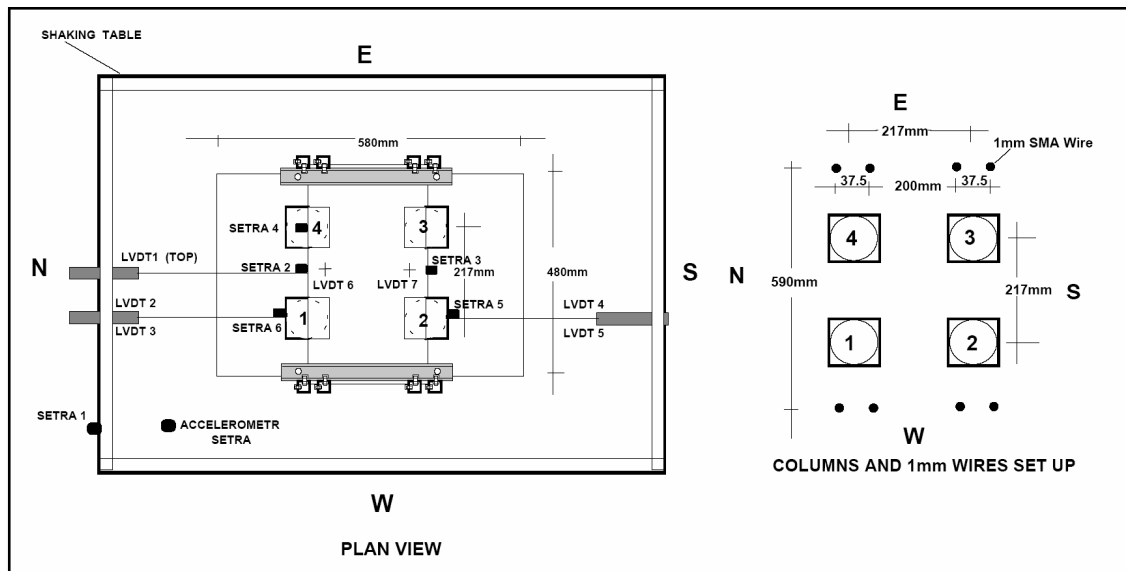
- Η δεύτερη διάταξη αποτελούνταν από δύο χαλύβδινους κόλους κώνους, με ίδια χαρακτηριστικά όπως στην πρώτη διάταξη, με τη διαφορά ότι πλέον στηρίζουν ένα επιστύλιο που είναι κατασκευασμένο από συμπαγή χάλυβα, αντιπροσωπεύοντας, έτσι, την απλούστερη μορφή κιονοστοιχίας. Το βάρος του επισυλίου ήταν μεταβλητό, με δύο τυπικές τιμές του βάρους (286Nt και 605Nt). Σε μικρό σχετικά αριθμό από δοκιμές (λόγω πολυπλοκότητας), το σύστημα της κιονοστοιχίας εδραζόταν σε ειδική βάση πάνω από τη σεισμική τράπεζα για τη μέτρηση των μεταφερόμενων δυνάμεων από το σύστημα στη



Σχήμα 2-19: Δεύτερο μοντέλο.

βάση, αλλιώς υπήρχε κατευθείαν έδραση του συστήματος στην τράπεζα.

- Η τρίτη διάταξη περιλαμβάνει τέσσερις χαλύβδινους κόλινους κώνους, ίδιας γεωμετρίας με τις προηγούμενες. Στην κορυφή τους εδραζόταν ορθογωνικό χαλύβδινο επιστύλιο σε πλήρη επαφή. Η οριζόντια κίνηση της σεισμικής τράπεζας συμπίπτει με τη διεύθυνση Βορράς–Νότος (N–S). Το σύστημα είναι συμμετρικό ως προς τις κύριες διευθύνσεις Βορρά–Νότου και Ανατολής–Δύσης. Λόγω συμμετρίας, θα μπορούσαν να γίνουν κάποιες συσχετίσεις με την αμέσως προηγούμενη διάταξη. Σε κάτοψη η διάταξη έχει ως εξής:



Σχήμα 2-20: Τρίτη διάταξη.

- Παραλλαγή των ανωτέρω τριών διατάξεων αποτελεί η εισαγωγή σε αυτά, ειδικών καλωδίων τα οποία έχουν ειδικά χαρακτηριστικά απόσβεσης ενέργειας και τα οποία τοποθετήθηκαν σε στρατηγικά σημεία για να προσδώσουν συν τοις άλλοις και αυξημένη αντίσταση. Τα καλώδια ήταν διαμέτρου 1mm και προήλθαν από ένα πρόγραμμα συνεργασίας μεταξύ ερευνητικών κέντρων της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το μεγαλύτερο μέρος πειραματικού ελέγχου τους ως μεμονωμένα καλώδια έγινε στην Ιταλία και το μικρότερο στο Εργαστήριο Αντοχής Υλικών του Α.Π.Θ. (Πλήρης δυναμική μονοαξονική διερεύνησή τους σε πλήρεις ανακυκλιζόμενες φορτίσεις). Ως τελικά αποτελέσματα αναφέρουμε σχεδόν πλαστικά πλατώ, με ανάκτηση όμως της πλαστικής παραμόρφωσης και για το λόγο αυτό ονομάστηκαν SMA (Shape Memory Alloy). Τα καλώδια αυτά μπήκαν σε διαφορετικές θέσεις, ανάλογα με τη διάταξη.

2.4.3) Λεπτομέρειες πειράματος.

- Τα ανωτέρω μοντέλα υπέστησαν διάφορες κινήσεις βάσεως με ή χωρίς τα καλώδια. Μετρήθηκαν επιταχύνσεις και μετακινήσεις για τον υπολογισμό ολίσθησης και λικνισμού. Ένα πολύ άκαμπτο αλλά ελαφρύ πλαίσιο τοποθετήθηκε για την προστασία από υπερβολικό λικνισμό αλλά και για την μέτρηση αντιστοίχων γωνιών.
- Οι κινήσεις βάσεως που εισήχθησαν ήταν ημιτονοειδείς και σεισμικές. Η περίπτωση των πολύ ισχυρών κινήσεων βάσης επέτρεψε τη μελέτη της ευστάθειας των μοντέλων καθώς και την επήρεια των καλωδίων στον τύπο των ιδιομορφών κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης.
- Έγιναν, τέλος, ειδικές δοκιμές (Pull Out Static Tests) σύμφωνα με τις οποίες επεβλήθη ελεγχόμενη μετακίνηση στην κορυφή των μοντέλων με αργό ρυθμό. Καταγράφηκε η

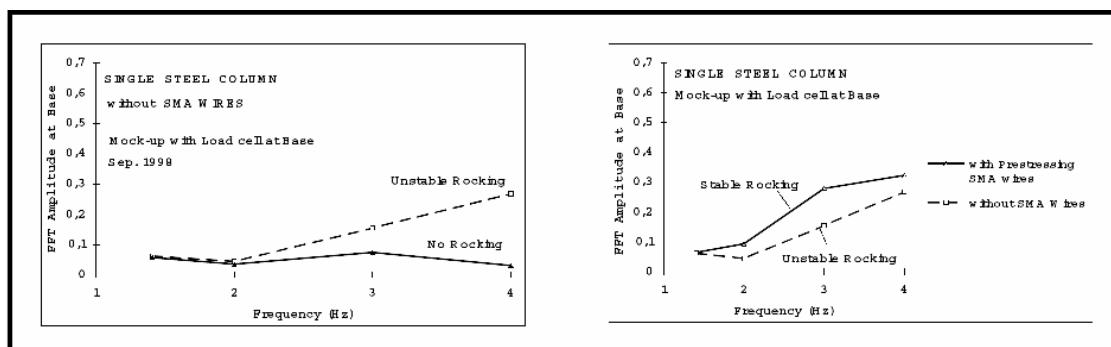
απόκριση του μοντέλου καθώς και το οριζόντιο φορτίο που αναπτύχθηκε στην κορυφή από την μετακίνηση αυτή που επιβλήθηκε.

2.4.4) Πειραματικά αποτελέσματα.

2.4.4.1) Μοντέλο μεμονωμένου στύλου χωρίς καλώδια.

2.4.4.1.1) Ημιτονοειδείς φορτίσεις.

- Η συχνότητα εδώ ήταν μεταξύ 1,5Hz και 4Hz. Για την ίδια συχνότητα υπήρχε ομάδα δοκιμών με αυξανόμενο πλάτος και αντλήθηκαν τα αντίστοιχα μέγιστα αποτελέσματα απόκρισης.
- Για μικρά πλάτη διεγέρσεων δεν υπάρχει λικνισμός. Η κίνηση του μοντέλου ακολουθεί αυτήν της βάσης.
- Όταν η κίνηση αυξάνεται, εμφανίζεται λικνισμός (υπο-αρμονικός στην αρχή, αρμονικός στη συνέχεια).
- Μεγαλύτερη αύξηση του πλάτους οδηγεί σε υπερβολικό λικνισμό που οδηγεί στην ανατροπή του μοντέλου. Παρατηρείται, επίσης, και ολίσθηση στη βάση και φαινόμενα κινήσεων και περιστροφών εκτός επιπέδου.
- Από αντίστοιχα διαγράμματα συχνότητας-πλάτους, φαίνεται ότι το όριο ευστάθειας-αστάθειας στο πλάτος αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό με την αύξηση της συχνότητας.
- Για μικρές τιμές της συχνότητας διέγερσης, το μεταβατικό στάδιο από το μη λικνισμό στην ανατροπή, σε σχέση με το πλάτος, είναι πολύ μικρό και συμβαίνει για μικρές αυξήσεις πλάτους. Τα δύο αυτά συμπεράσματα φαίνονται στο κάτωθι σχήμα:



Σχήμα 2-21: Όρια λικνισμού.

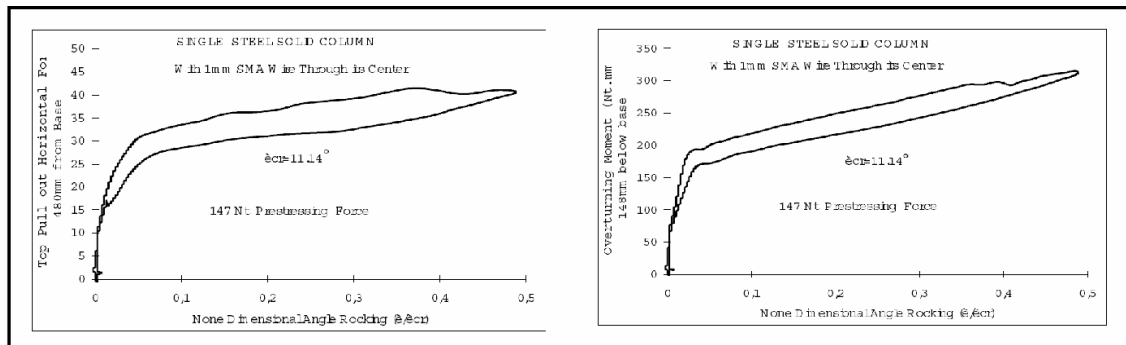
2.4.4.2) Μοντέλο μεμονωμένου στύλου με καλώδια.

2.4.4.2.1) Ημιτονοειδείς και σεισμικές φορτίσεις.

- Στην περίπτωση αυτή, για την προστασία των καλωδίων (και λόγω περιορισμών της ίδιας της σεισμικής τράπεζας), τα μοντέλα δεν οδηγήθηκαν στην ανατροπή. Δεν νοείται, λοιπόν, όριο ευστάθειας-αστάθειας όπως προηγουμένως, όμως επειδή η εισαγωγή αντίστοιχων φορτίσεων που οδήγησαν τα μοντέλα χωρίς καλώδια στην ανατροπή, τώρα δεν είναι ικανές να το ανατρέψουν, συμπεραίνουμε ότι τα καλώδια δρουν σαφώς με ωφέλιμο τρόπο και ότι το αντίστοιχο όριο βρίσκεται σε ανώτερες τιμές πλάτους.
- Στο δεύτερο μέρος του ανωτέρω διαγράμματος βρίσκεται και η περίπτωση της εισαγωγής καλωδίων. Φαίνεται, έτσι, ο ευεργετικός ρόλος της παρουσίας τους. Ο ίδιος ευεργετικός ρόλος διαφαίνεται και για σεισμικές φορτίσεις.

2.4.4.2.2) Δοκιμές “Pull Out Static Tests”

- Οι δοκιμές αυτές έγιναν με ελεγχόμενη επιβαλλόμενη μετακίνηση στην κορυφή των στύλων. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αποτυπώθηκαν σε διαγράμματα με τεταγμένες την αδιάστατη γωνία λικνισμού και τετμημένες είτε το επιβαλλόμενο οριζόντιο φορτίο, είτε τη ροπή ανατροπής. Τα διαγράμματα αυτά δείχνουν ότι η εισαγωγή των καλωδίων οδήγησε σε μία σχεδόν ελαστοπλαστική απόκριση δύναμης–μετακίνησης. Η αποφόρτιση οδηγεί σε ανάκτηση των πλαστικών παραμορφώσεων. Ακολουθεί δείγμα αυτών των διαγραμμάτων:



Σχήμα 2-22: Δοκιμές pull out.

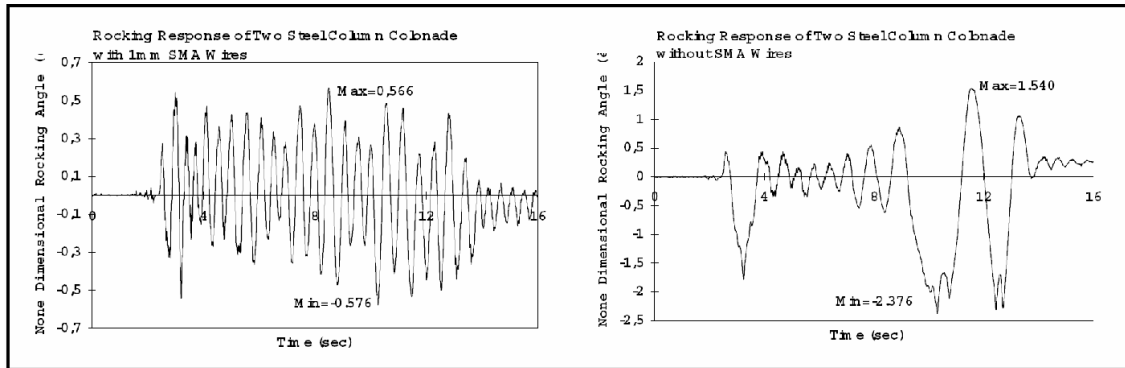
2.4.4.3) Μοντέλο κιονοστοιχίας δύο στύλων με και χωρίς καλώδια.

2.4.4.3.1) Ημιτονοειδείς φορτίσεις.

- Η συμπεριφορά της κιονοστοιχίας δύο στύλων χωρίς καλώδια σε ημιτονοειδή φόρτιση είναι παρόμοια με αυτή μεμονωμένου στύλου χωρίς καλώδια όσον αφορά στην επιρροή που ασκεί η συχνότητα της φόρτισης στο πλάτος λικνισμού (όσο πιο υψηλή είναι αυτή, τόσο πιο μεγάλο χρειάζεται να είναι το πλάτος φόρτισης για να ανατραπεί το δοκίμιο).
- Το μοντέλο για μεσαίες γωνίες λικνισμού τείνει να κινείται εντός επιπέδου. Αυτό συμβαίνει και για τις σεισμικές δράσεις.
- Η αύξηση του βάρους του επιστυλίου δε συνεπάγεται αντίστοιχη αύξηση της σταθερότητας. Στα αντίστοιχα διαγράμματα συχνότητας–πλάτους, μεταξύ δύο πολύ διαφορετικών στο βάρος επιστυλίων δεν υπάρχει αξιοσημείωτη απόκλιση στα μεταξύ τους αποτελέσματα. Φαίνεται ότι η επιπρόσθετη σταθερότητα που προσφέρει το αυξημένο βάρος αντισταθμίζεται από τις δυνάμεις αδράνειας.
- Παρατηρείται αντίστοιχη ευεργετική συνεισφορά των καλωδίων όπως και στην προηγούμενη περίπτωση των μεμονωμένων στύλων.

2.4.4.3.2) Σεισμικές φορτίσεις.

- Το βάρος του επιστυλίου έμεινε σταθερό, ίσο με 286Nt. Οι σεισμοί εισαγωγής ήταν του El Centro (1940) και του Kern County (1953).
- Δημιουργήθηκαν διαγράμματα χρόνου-αδιάστατης γωνίας λικνισμού (γωνία λικνισμού προς κρίσιμη γωνία λικνισμού). Όταν αυτή η αδιάστατη γωνία ξεπερνά σε τιμή τη μονάδα, έχουμε ανατροπή. Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα, τα καλώδια επέτρεψαν στο μοντέλο να κινηθεί δίχως ανατροπή:

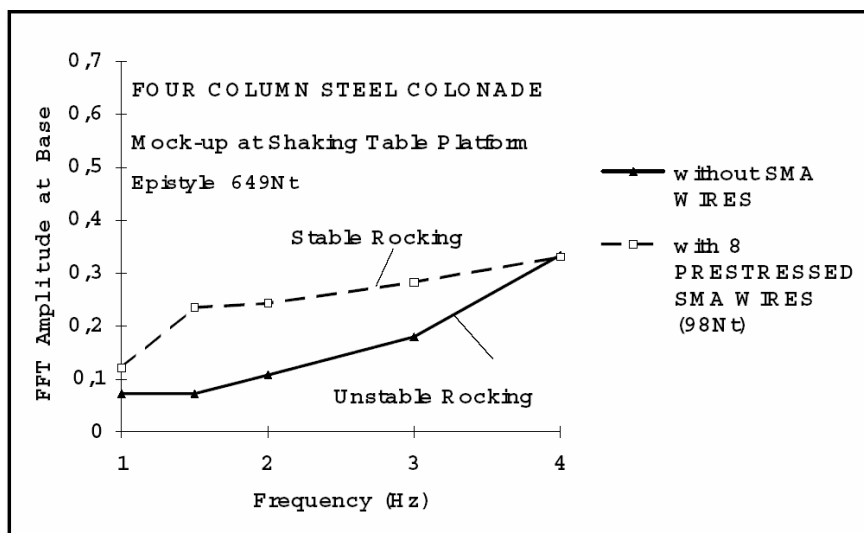


Σχήμα 2-23: Επίδραση καλωδίων.

2.4.4.4) Μοντέλο κοινοστοιχίας 4 στύλων με και χωρίς καλώδια.

2.4.4.4.1) Ημιτονοειδείς και σεισμικές φορτίσεις.

- Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε προηγουμένως, βρήκε εφαρμογή και στην περίπτωση αυτή. Το βάρος του επιστυλίου ήταν σταθερό, ίσο με 649Nt, το οποίο λόγω του ότι υπήρχε σε κάθε περίπτωση (με ή χωρίς καλώδια) η διάταξη σταθεροποίησης των καλωδίων αυξήθηκε συνολικά στα 706Nt. Εφαρμόστηκαν δύο διατάξεις καλωδίων: Μία με 8 καλώδια και άλλη μία με 4 καλώδια.
- Ο ενεργητικός χαρακτήρας των καλωδίων εμφανίζεται για ακόμη μία φορά:



Σχήμα 2-24: Ενεργητικός χαρακτήρας καλωδίων.

- Η παρουσία των τεσσάρων στύλων σε ορθογωνική διάταξη οδήγησε το λικνισμό εντός επιπέδου ακόμα και για μεγάλες γωνίες λικνισμού, χωρίς την ανάπτυξη τάσεων δράσης εκτός επιπέδου.

2.4.5) Συμπεράσματα.

- Τα μοντέλα υπό εξέταση ανέπτυξαν παρόμοια δυναμική συμπεριφορά, όσον αφορά την ευστάθεια, σε σχέση με την επάρεια που το πλάτος και η συχνότητα διέγερσης ασκούν στο πλάτος λικνισμού και στην επακόλουθη ανατροπή των μοντέλων.
- Η εισαγωγή των καλωδίων πρόσδωσε αξιοσημείωτα ευεργετικό χαρακτήρα στην ευστάθεια των μοντέλων. Η απόκρισή τους σε μεγαλύτερα πλάτη από αυτά που οδήγησαν τα μοντέλα δίχως καλώδια σε ανατροπή, ήταν σταθερή, κάτι που είναι περισσότερο εμφανές σε μικρότερες συχνότητες.

2.5) Αριθμητική πρόβλεψη της σεισμικής απόκρισης αρχαιοελληνικών στύλων με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων {7}.

2.5.1) Γενικές πληροφορίες και περίληψη.

Παρουσιάστηκε στην περιοδική έκδοση του “*Earthquake Engineering And Structural Dynamics*”, τεύχος **31**, σε δύο μέρη, με το δεύτερο να ασχολείται με λεπτομέρειες των πειραματικών μεθόδων. Υπεύθυνοι για τη δημοσίευση αυτή ήταν οι **Παπαντωνόπουλος, Ψυχάρης, Παπασταματίου, Λαιμός, και Μουζάκης**. Στο τομέα του πειράματος, επίσης, προστίθενται τα ονόματα των **Καρύδη και Ζάμπα**.

Η ανωτέρω μελέτη είχε έντονα χαρακτήρα σύγκρισης αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων, ενώ τα μοντέλα (τόσο στα πειράματα, όσο και στο αριθμητικό μοντέλο) προσπάθησαν να προσομοιώσουν κάποιο μεμονωμένο σπονδυλωτό στύλο του πρόναου του Παρθενώνα. Οι συγκρίσεις των αποτελεσμάτων έγιναν σχεδόν αποκλειστικά μέσω διαγραμμάτων απόκρισης (μετακινήσεων) του στύλου.

Τα πειράματα έγιναν με την εισαγωγή σεισμικών κινήσεων βάσης στη σεισμική τράπεζα (6 βαθμοί ελευθερίας) του *Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.*

2.5.2) Εισαγωγή.

- Παλαιότερες μελέτες έδειξαν ότι παρόμοιου τύπου κατασκευές αν είναι άθικτες, είναι ευάλωτες μόνο σε μεγάλης δεσπόζουσας περιόδου σεισμούς. Αν υπάρχουν ατέλειες (κομμένες γωνίες, μετακινημένοι σπόνδυλοι, κεκλιμένοι στύλοι κλπ), αυτές είναι πολύ πιο ασταθείς.
- Η ύπαρξη τέτοιων στύλων σε διάφορες περιοχές μαρτυρά το γεγονός ότι δεν έχει γίνει καταστροφικός σεισμός στις περιοχές αυτές, ενώ πιο λεπτομερείς μελέτες μπορούν ίσως να αποκαλύψουν χαρακτηριστικά παλιότερων σεισμών.
- Η απόκριση των σπονδυλωτών αρχαιοελληνικών στύλων (κομμάτια μάρμαρου συνήθως, τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο δίχως κονίαμα και με προαιρετική την προσθήκη σύνδεσμου διάτμησης συνήθως ξύλινου) σε ισχυρές κινήσεις είναι ολίσθηση και λικνισμός μεταξύ μεμονωμένων ή ενός συνόλου σπονδύλων μεταξύ τους. Η απόκριση αυτή είναι ιδιαίτερα μη-γραμμική και περίπλοκη, γιατί υπάρχει συνεχής αλλαγή της κατασκευής για την ίδια διέγερση μεταξύ διαφορετικών ιδιομορφών δόνησης, καθεμία με το δικό της σύνολο εξισώσεων να την κυβερνά. Για το λόγο αυτό, η επίλυση με αναλυτικές μεθόδους είναι δυσχερής ως αδύνατη, ακόμα και για μεμονωμένο μονολιθικό στύλο, γιατί και η παραμικρή αλλαγή στις παραμέτρους του προβλήματος δημιουργεί αποτελέσματα με μεγάλη απόκλιση.
- Διάφορες μελέτες με τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων έχουν δώσει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και για το λόγο αυτό η μέθοδος βρήκε εφαρμογή και στην παρούσα μελέτη.

2.5.3) Η μέθοδος διακριτών στοιχείων.

- Για την ανάλυση του προβλήματος χρειάζεται κώδικας που να χειρίζεται την ανεξάρτητη κίνηση των σπονδύλων που δημιουργείται από το λικνισμό, την ολίσθηση, μέχρι και την πλήρη αποκόλληση των στους κόμβους. Για το λόγο αυτό, προγράμματα που χρησιμοποιούν μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων, συνοριακών στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών



Lagrange, αν και μπορούν να προσομοιώσουν ασυνεχή υλικά, εν τούτοις αντιμετωπίζουν ένα σύνολο προβλημάτων που δυσχεραίνουν την χρησιμοποίησή τους στην πράξη. Τα προβλήματα αυτά μπορεί να είναι η αδυναμία επίλυσης μεγάλου αριθμού διασταυρούμενων σημείων επαφής, η ανυπαρξία αυτοματοποιημένης διαδικασίας για την αναγνώριση νέων επαφών, η δυσκολία προσέγγισης μοντέλων με πυκνή διακριτοποίηση ή/και με μεγάλες μετακινήσεις στα όρια ασυνέχειας, η αυξημένη δυσχέρεια της αξιολόγησης των πολύπλοκων αποτελεσμάτων των δυναμικών φαινομένων, ή συνδυασμός των ανωτέρω.

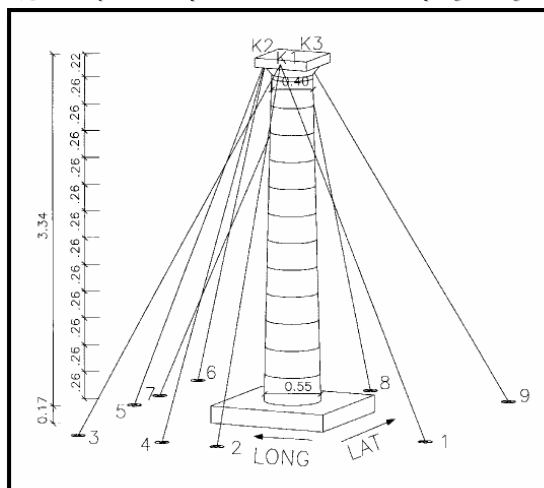
- Η μέθοδος διακριτών στοιχείων αναπτύχθηκε το 1970 από τον Cundall, προβλέπει την αναπαράσταση του συστήματος ως συγκέντρωση διακριτών τεμαχίων με τους κόμβους να είναι σημεία επαφής μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό, η ασυνέχεια γίνεται συνοριακή συνθήκη. Οι μετακινήσεις και οι αντιδράσεις στα σημεία επαφής υπολογίζονται μέσω της κίνησης των τεμαχίων αυτών. Κάθε τεμάχιο θεωρείται ανεξάρτητο και μπορεί να αναπτύξει «άπειρη» μετακίνηση και στροφή. Δημιουργούνται συσχετίσεις για κάθε επαφή μεταξύ των τεμαχίων, που συνδέουν τις κύριες και διατμητικές τάσεις με τις μετακινήσεις. Οι σχέσεις αυτές μπορεί να είναι γραμμικές (όπως ελατηριακές σταθερές) ή μη-γραμμικές. Η μέθοδος βρίσκει εφαρμογή σε συστήματα, η συμπεριφορά των οποίων κυβερνάται από ασυνέχειες και δεν εξαρτάται τόσο από τις ελαστικές ιδιότητες των υλικών. Παρ' όλ' αυτά, είναι δυνατόν να θεωρηθούν και παραμορφώσιμα τεμάχια τα οποία στη συνέχεια μπορούν να διακριτοποιηθούν σε πεπερασμένα στοιχεία.
- Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η ελεύθερη, πεπερασμένη κίνηση και στροφή των τεμαχίων, μέχρι του σημείου της πλήρους αποκόλλησης μεταξύ τους, και της αναγνώρισης της εκ νέου επαφής τους. Οι υπολογισμοί εναλλάσσονται μεταξύ του νόμου δύναμης-μετακίνησης σε όλες τις επαφές και του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα σε όλα τα τεμάχια.
- Ο νόμος δύναμης-μετακίνησης χρησιμοποιείται για να παρθούν οι δυνάμεις από γνωστές (και σταθερές) μετακινήσεις. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα δίνει την κίνηση των τεμαχίων με βάση τις δυνάμεις που ασκούνται σε αυτά.
- Η δυναμική απόκριση γίνεται με βάση αλγόριθμο χρονικού βήματος, με μέγεθος ικανά μικρό για να θεωρηθούν τόσο σταθερές ταχύτητες και επιταχύνσεις μέσα σε αυτό, όσο και αδυναμία μεταφοράς σφαλμάτων από το ένα τεμάχιο στο άλλο στο ίδιο βήμα. Η επίλυση ακολουθεί την ίδια μέθοδο με την αντίστοιχη πεπερασμένων διαφορών του συνεχές μέσου. Το δε χρονικό βήμα επηρεάζεται από τη μάζα των τεμαχίων, την δυσκαμψία και την απόσβεση των επαφών.
- Οι απώλειες ενέργειας λόγω των ολισθήσεων και των εσωτερικών και εξωτερικών (αέρας ή υγρά) τριβών υπολογίζονται με την απόσβεση κατά Reyleigh, που περιλαμβάνει δύο ιξώδη συστατικά: Ταχύτητας (ή μάζας) και δυσκαμψίας. Η απόσβεση λόγω ταχύτητας δρά στις ιδιομορφές χαμηλής συχνότητας (συνήθως παρατηρείται κίνηση συνόλου τεμαχίων ως ένα), ενώ η απόσβεση λόγω ταχύτητας αποσβένει δονήσεις υψηλής συχνότητας, ανάμεσα στα τεμάχια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μητρικό απόσβεσης να περιλαμβάνει μια συνιστώσα ανάλογη με το μητρικό μάζας και μια συνιστώσα ανάλογη με το μητρικό δυσκαμψίας.
- Η απόσβεση κατά Rayleigh είναι γενικά εξαρτημένη από την συχνότητα. Η απόσβεση από τη δυσκαμψία αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα, αναλογικά με το ρυθμό καταπόνησης, ενώ η απόσβεση μάζας μειώνεται μη-γραμμικά με τη συχνότητα, αναλογικά με τη ταχύτητα. Έτσι, προσπάθεια καταβάλλεται ώστε να επιλεγεί η σωστή απόσβεση για τις επικρατούσες συχνότητες του προβλήματος. Γενικά, η δεσπόζουσα συχνότητα ενός συστήματος που υποβάλλεται σε δυναμική φόρτιση είναι ένας συνδυασμός των συχνοτήτων που εισάγονται και των φυσικών ιδιομορφών ταλάντωσης του συστήματος.
- Οι αρχαιοελληνικές κολώνες, όμως, δεν έχουν φυσικές ιδιομορφές με την κλασσική έννοια, και οι περίοδοι ελεύθερης ταλάντωσης έχουν εξάρτηση από το πλάτος. Για το λόγο αυτό, η τιμή της απόσβεσης πρέπει να αλλάζει μέσα στην απόκριση. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από τη σύγκριση των πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων.

- Προτείνεται η χρησιμοποίηση απόσβεσης που εξαρτάται μόνο από τη δυσκαμψία, επειδή η απόσβεση που εξαρτάται από τη μάζα δείχνει να περιορίζει τεχνητά την κίνηση των τεμαχίων και για το λόγο αυτό καλό είναι να αποφεύγεται. Η σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων συμφωνεί με την παρατήρηση αυτή, αφού η χρησιμοποίηση ακόμα και ιδιαίτερα μικρής απόσβεσης μάζας, οδηγεί σε υπερβολική απόσβεση, πολύ περισσότερη από τις πειραματικές παρατηρήσεις.
- Η σχετική με τη δυσκαμψία συνιστώσα της απόσβεσης Rayleigh επηρεάζει ιδιαίτερα το κρίσιμο χρονικό βήμα. Το τελευταίο πρέπει να μειώνεται με την αύξηση της απόσβεσης.
- Η εφαρμογή της μεθόδου των διακριτών στοιχείων έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος τρισδιάστασης ανάλυσης 3DEC από την εταιρία Itasca.

2.5.4) Αξιολόγηση των πειραματικών δεδομένων.

- Το μοντέλο που προσομοίωσε το στύλο στο Πρόναο του Παρθενώνα ήταν σε κλίμακα 1:3 και τοποθετήθηκε στην σεισμική τράπεζα του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Το συνολικό ύψος του μοντέλου ήταν 3,34 m, ήταν κατασκευασμένο από μάρμαρο, από το ίδιο υλικό κατασκευής του Παρθενώνα. Αποτελούνταν από 12 σπόνδλους και ένα κιονόκρανο και μεταξύ αυτού και της τράπεζας υπήρχε σταθερή μαρμάρινη βάση. Στη περιμετρο κάθε σπόνδλου μία ζώνη 1,0cm χαρακτήκε κατά 0,5mm για να προστατευθούν οι άκρες τους.

- Οι μετρητές μετακινήσεων ήταν 9. Ανά τρεις ήταν συνδεδεμένοι σε τρία σημεία του κιονόκρανου. Η διάταξη αυτή επέτρεψε τον ακριβή προσδιορισμό των μετακινήσεων του κιονόκρανου σε όλες τις διαστάσεις.



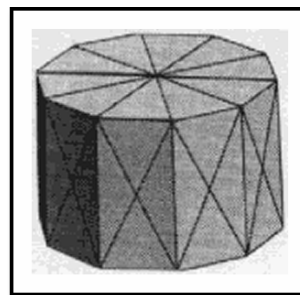
Σχήμα 2-25: Διάταξη μετρητών.

- Τα πειράματα έγιναν με την εισαγωγή διαφόρων σεισμών που έγιναν στην Ελλάδα, υπό κατάλληλη κλίμακα, με στόχο να καλύψουν μια σειρά από δύσκολα χαρακτηριστικά και αντιπροσωπεύουν σχετικά καταστρεπτικούς σεισμούς. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι σεισμοί της Κεφαλονιάς (καταγραφή Αργοστολίου, 1983) , της Καλαμάτας (1986), και της Έδεσσας (1990). Το πλάτος αυξήθηκε κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μπορούν να δημιουργήσουν μεγάλες δονήσεις ώστε αφενός μεν να δημιουργήσουν ανοίγματα και κλεισίματα μαζί με ολίσθηση στους κόμβους, αφετέρου δε όμως να μην βάλουν την ακεραιότητα του δοκιμίου σε κίνδυνο.
- Η φύση των εν λόγω πειραμάτων και τα πολύπλοκα φαινόμενα που συνεπάγονται, κάνουν την αναγωγή των αποτελεσμάτων μοντέλων υπό κλίμακα σε πραγματικές συνθήκες από αδύνατη ως ρεαλιστικώς άστοχη.
- Η παραμένουσα μετακίνηση στο τέλος κάθε πειράματος δεν ήταν ενδεικτικό των μεγίστων μετακινήσεων κατά τη διάρκειά του. Πράγματι, στην περίπτωση του 17^{ου} πειράματος η παραμένουσα μετακίνηση ήταν πολύ μικρή, ενώ αντίθετα το μοντέλο περιήλθε κατά τη διάρκεια του πειράματος από σχετικά μεγάλες μετακινήσεις. Για το λόγο αυτό, δεν είναι δυνατόν να αποφανθεί κανείς από την παραμένουσα μετακίνηση αν ένας στύλος έφτασε κοντά στο όριο κατάρρευσης.
- Ακόμα και για επίπεδη φόρτιση, εμφανίστηκαν εκτός επιπέδου δράσεις. Η κυκλική διατομή

μπορεί να επιτρέψει περιστροφή γύρω από την περίμετρο της βάσης. Η επιφάνεια επαφής κατά τη διάρκεια του λικνισμού είναι πολύ μικρή και εννοούνται εκτός επιπέδου φαινόμενα. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι μεγαλύτερες μετακινήσεις εμφανίστηκαν σε σημεία ατελειών.

2.5.5) Περιγραφή της αριθμητικής ανάλυσης.

- Έγινε με τη βοήθεια του προγράμματος 3DEC της Itasca Co.
- Μία διαφορά του μοντέλου από το αντίστοιχο πειραματικό ήταν ότι ενώ το πειραματικό είχε κυκλική διατομή, το πρώτο είχε πολυγωνική διατομή 10 κόμβων.
- Τα τεμάχια που προσομοίωναν τους σπόνδλους συμπεριφέρονταν ως άκαμπτα σώματα.
- Τα σημεία επαφής που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι αντίστοιχες κορυφές και οι τομές των πλευρών. Κάθε επαφή μεταξύ συνεχόμενων τεμαχίων προσομοιώθηκε με μερικές υπο-επαφές δύο τύπων: από κορυφή σε επιφάνεια και από άκρη σε άκρη. Κάθε υπο-επαφή είχε κάποια επιφάνεια επιρροής για να υπολογιστεί η τοπική δυσκαμψία του σημείου (σχέση κίνησης-μετακίνησης) σε σχέση με την καθορισμένη δυσκαμψία της επιφάνειας ασυνέχειας (σε μονάδες τάσης/μετακίνησης).
- Για να διευκολυνθούν οι υπολογισμοί επαφής, οι άνω και κάτω επιφάνειες των άκαμπτων τεμαχίων τριγωνοποιήθηκαν, ώστε οι κόμβοι επαφής να βρίσκονται μέσα στις αρχικές πολυγωνικές επιφάνειες, κάτι που έκανε πιο αποτελεσματική τη διακριτοποίηση των δυνάμεων αλληλεπίδρασης μεταξύ των τεμαχίων.
- Τα ακτινικά άκρα επέτρεψαν την ομαλή μετάβαση μεταξύ των δύο τύπων υπο-επαφών, στην περίπτωση που κάποιος σπόνδυλος ολισθήσει σε σχέση με κάποιον άλλο και κάποιες κορυφές ξεφύγουν από την αρχική επιφάνεια επαφής.
- Το πρόγραμμα υπέστη μικρές τροποποιήσεις στον κώδικά του (στη μηχανή δημιουργίας πολυγώνων, εισαγωγή ειδικής ρουτίνας για την δημιουργία των τεμαχίων, αλλαγή στον τρόπο εισαγωγής της ιστορίας και την ανάπτυξη ρουτίνας για τη δημιουργία πλέγματος μέσα σε όσα τεμάχια χρειάστηκε να θεωρηθούν παραμορφώσιμα).
- Το σημείο ελέγχου των μετακινήσεων βρισκόταν στο κιονόκρανο γιατί επηρεάζεται από όλες τις ιδιομορφές της κίνησης.
- Τα χαρακτηριστικά της τριβής και των δυσκαμψιών λήφθηκαν κοντά στις πραγματικές τιμές του μάρμαρου, με τιμές που μεταβαλλόταν ελαφρά για να ταιριάζουν στις απαιτήσεις κάθε πειράματος. Γενικά, οι τιμές αυτές ήταν $1,0 \sim 2,0 \times 10^9$ Pa/m για τη δυσκαμψία στις κύριες και στην εφαπτομενική έννοια, ενώ η γωνία τριβής κυμαινόταν μεταξύ $35 \sim 37^\circ$
- Συνήθως, η απόσβεση είχε μηδενική τιμή. Παρ' όλ' αυτά, σε μερικές περιπτώσεις δόθηκαν μη μηδενικές τιμές για την διερεύνηση της συμπεριφοράς των μοντέλων.



Σχήμα 2-26:
Διακριτοποίηση
σπονδύλου.

2.5.6) Σύγκριση 2D ανάλυσης με την 3D ανάλυση.

- Παρά τη συμμετρία ως προς τον κατακόρυφο άξονα αλλά και τη φόρτιση, υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ δισδιάστατης και τρισδιάστατης ανάλυσης. Αυτό οφείλεται στο ότι ακόμα και για ελάχιστες διακυμάνσεις κάθετα στο επίπεδο λικνισμού υπάρχει μεγάλη αλλαγή στη συμπεριφορά και ενίσχυση του αποτελέσματος.
- Η δισδιάστατη ανάλυση αποτυγχάνει να αποτυπώσει όλες τις παραμέτρους της πραγματικής απόκρισης, ιδιαίτερα της στρέψης γύρω από τον κάθετο άξονα για τον ταυτόχρονο λικνισμό στις δύο κάθετες διευθύνσεις. Ο πόλος στροφής στους κυλινδρικούς

σπόνδυλους αλλάζει συνεχώς και κινείται στην περιφέρεια της βάσης του σπονδύλου.

- Η δισδιάστατη ανάλυση προσδίδει ένα ψευδές αίσθημα ευστάθειας. Ως παράδειγμα, αναφέρθηκε η ανατροπή του στύλου μέσα σε 7 sec όταν ενεργοποιήθηκε η εγκάρσια συνιστώσα του σεισμού, ενώ χωρίς αυτήν (δισδιάστατη ανάλυση) υπήρχε αίσθημα ευστάθειας ακόμα και για το σεισμό της Καλαμάτας, αυξημένο κατά 50%. Το ευαισθησία στις τρισδιάστατες φορτίσεις επιβεβαιώθηκε και στη σεισμική τράπεζα.
- Για το λόγο αυτό, λήφθηκαν υπόψη μόνο τα αποτελέσματα τρισδιάστατων αναλύσεων (δύο οριζόντιες σεισμικές συνιστώσες και μία κατακόρυφη).

2.5.7) Σύγκριση αριθμητικών και πειραματικών αποτελεσμάτων.

2.5.7.1) Σεισμός Καλαμάτας.

- Οι δυσκαμψίες τόσο στην κάθετη έννοια όσο και εφαπτομενικά ήταν $k_n=k_s=10^9$ Pa/m, ενώ η γωνία τριβής ήταν 37°
- Έγινε παραμετρική ανάλυση της επίδρασης της απόσβεσης δυσκαμψίας με τρεις τιμές της: $d=0$, $d=0,005$ (πολύ μικρή σχετικά τιμή) και $d=0,01$ (μικρή σχετικά τιμή), από τις οποίες ικανοποιητικά αποτελέσματα έδωσε εν γένει η μηδενική απόσβεση. Η ευαισθησία του μοντέλου στις υπόλοιπες παραμέτρους του προβλήματος έκανε δύσκολη ως πρακτικά αδύνατη την πλήρη συμφωνία πειραματικών και αριθμητικών μοντέλων.
- Η επανάληψη του ίδιου πειράματος έδινε ελαφρώς διαφοροποιημένες τιμές, κάτι που επιβεβαιώνει την ανωτέρω παρατήρηση.
- Η εισαγωγή αποσβέσεων άλλαξε αρκετά τα αποτελέσματα, ενώ έκανε πιο πιθανή την σύμπτωση πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων προς το τέλος της σεισμικής κίνησης. Ως αρνητικό αναφέρεται η μείωση του πλάτους της απόκρισης, οπότε δεν είναι δυνατόν να διατηρηθεί η τιμή της απόσβεσης σταθερή για όλη τη διάρκεια της κίνησης. Η μηδενική απόσβεση ταιριάζει περισσότερο στη διάρκεια της ισχυρής σεισμικής κίνησης, ενώ μη μηδενική απόσβεση (1%~5%) ταιριάζει στις διαφόρων ειδών αποσβέσεις ενέργειας (κρούσεις και ολισθήσεις) που συμβαίνουν προς το τέλος της κίνησης.
- Ο καθορισμός μεταβλητής απόσβεσης κατά τη διάρκεια της ίδιας της κίνησης δεν είναι πάντα εφικτός. Στην περίπτωση αυτή, από μηχανικής απόψεως, ενδεικνύεται η χρησιμοποίηση μηδενικής απόσβεσης, αφού η ισχυρή εδαφική κίνηση είναι αυτή που ενδιαφέρει περισσότερο.

2.5.7.2) Σεισμός Έδεσσας.

- Οι δυσκαμψίες τόσο στην κάθετη έννοια όσο και εφαπτομενικά ήταν $k_n=k_s=2 \times 10^9$ Pa/m, ενώ η γωνία τριβής ήταν 35° (συντελεστής τριβής $f_t=0,70$)
- Οι μέγιστες και παραμένουσες τιμές των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο αναλύσεων ήταν σε ικανοποιητική σύμπτωση.
- Η καταγραφή περιείχε παλμούς μεγάλης περιόδου και το αποτέλεσμα ήταν κυρίως λικνισμός, με μεγάλες γωνίες περιστροφής.

2.5.7.3) Σεισμός Αργοστολίου.

- Οι δυσκαμψίες στην κάθετη έννοια και εφαπτομενικά ήταν $k_n=2 \times 10^9$ Pa/m και $k_s=10^9$ Pa/m αντίστοιχα, ενώ η γωνία τριβής ήταν 35° και θεωρήθηκε μηδενική απόσβεση.
- Το πείραμα επαναλήφθηκε με τις ίδιες παραμέτρους, αλλά εντοπίστηκε μέγιστη διαφορά στα αποτελέσματα της τάξεως των 2% λόγω μικρών διαταράξεων στη κίνηση της τράπεζας.
- Τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο αναλύσεων ήταν σε ικανοποιητική σύμπτωση.
- Τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ευαίσθητα σε πολύ μικρές αλλαγές στις παραμέτρους του προβλήματος, ιδιαίτερα στις παραμένουσες μετακινήσεις από ολίσθηση, τόσο στα πειράματα, όσο και στην αριθμητική ανάλυση.

- Η σεισμική καταγραφή ήταν υψίσουχη και για το λόγο αυτό η απόκριση στην κάθετη έννοια είχε ως χαρακτηριστικά χαμηλής περιόδου ταλαντώσεις μικρού πλάτους, που οδήγησε σε περιορισμένου μεγέθους μόνο λικνισμό. Τα αντίστοιχα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης είναι περίπου το 50% των αντιστοιχών της πειραματικής ανάλυσης, αν και η μορφή τους ήταν η ίδια περίπου.

2.5.8) Συμπεράσματα.

- Η μέθοδος διακριτών στοιχείων είναι σε θέση να αναπαράγει τα βασικά σημεία της πειραματικά παρατηρηθείσας δυναμικής απόκρισης τέτοιων κατασκευών, αλλά πρέπει να έχουμε υπόψη μας την ευαισθησία του προβλήματος στις παραμέτρους του (αρχικές συνθήκες και φορτιστική διάταξη), κάτι που αποδεικνύεται και από την απόκλιση αποτελεσμάτων μεταξύ «ίδιων» πειραμάτων. Μικρές διαφορές στην θέση των σπονδύλων, αλλαγή των συνθηκών επαφής μεταξύ τους (από τομές στην περίμετρό τους από προηγούμενες κρούσεις), επίδραση της μαρμαρόσκονης που εισήλθε στους κόμβους από φαινόμενα τριβής, μικροδιαταράξεις στην κίνηση της σεισμικής τράπεζας από υψίσουχα σήματα εισόδου και άλλοι παράγοντες είναι δυνατόν να είναι υπεύθυνοι για το φαινόμενο των αποκλίσεων μεταξύ πειραμάτων που θα έπρεπε υπό κανονικές συνθήκες να έδιναν ίδια αποτελέσματα.
- Το μοντέλο για την αριθμητική ανάλυση είχε μικρές διαφορές από το αντίστοιχο των πειραμάτων, όπως η μορφή του (πολυγωνικό έναντι κυλινδρικού) και την αγνόηση μικρών ατελειών (όπως ανομοιομορφία στην τραχύτητα, ή διαταράξεις των αρχικών συνθηκών).
- Η σύγκριση των αποτελεσμάτων έγινε στη χρονοϊστορία των μετακινήσεων του κιονόκρανου, με έμφαση στη μέγιστη μετακίνηση στη διαμήκη, στην εγκάρσια και την κατάκορη έννοια, στο συχνотικό περιεχόμενο και στην παραμένουσα ολίσθηση.
- Τα αποτελέσματα ήταν σε ικανοποιητική συμφωνία, παρά τα προβλήματα ευαισθησίας. Τα προβλήματα αυτά περιορίζουν το κατά πόσο μπορεί να προβλεφθεί η πραγματική απόκριση των στύλων.
- Από μηχανικής απόψεως, ενδιαφέρει ο υπολογισμός της μέγιστης μετακίνησης του στύλου για αναμενόμενες σεισμικές μετακινήσεις, γιατί ενώ οι συνηθισμένες σεισμικές δονήσεις δεν φαίνονται ικανές να ανατρέψουν την κατασκευή, μπορούν να προκαλέσουν μεγάλες μετακινήσεις που με τη σειρά τους μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα στο πάνω μέρος του συστήματος.
- Οι παράμετροι των κόμβων που χρησιμοποιούνται στην αριθμητική ανάλυση παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση και πρέπει να επιλέγονται προσεκτικά, σύμφωνα με τις ιδιότητες των υλικών. Οι τιμές στη μελέτη είχαν μικρές αποκλίσεις από τις πραγματικές για να ταιριάζουν καλύτερα στα πειραματικά δεδομένα.
- Η απόσβεση επηρεάζει το πλάτος της απόκρισης και θα πρέπει να αλλάζει κατά τη διάρκειά της για να προσεγγίζεται η πραγματική απόκριση. Αν αυτό δεν είναι εφικτό, ικανοποιητικά αποτελέσματα δίνει η λήψη μηδενικής απόκρισης, ιδιαίτερα στο τμήμα της ισχυρής εδαφικής κίνησης, κάτι που έχει ιδιαίτερη σημασία από μηχανικής απόψεως.

2.6) Απόκριση σε λικνισμό και ανατροπή μηχανημάτων υπό οριζόντιες, παλμικού τύπου, διεγέρσεις {8}.

2.6.1) Γενικές πληροφορίες και περίληψη.

Εκπονήθηκε από τους καθηγητές **Μακρή, Ν.** και **Ρούσσο, Ι.** του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια, Μπέρκλεϋ και ολοκληρώθηκε τον Οκτώβριο του 1998.

Η ανωτέρω μελέτη είχε τόσο *αναλυτικό*, όσο και *αριθμητικό* χαρακτήρα, ενώ τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δισδιάστατα ορθογωνικού τύπου με διάφορες διαστάσεις.

Τα πειράματα έγιναν με την εισαγωγή διαφόρων κινήσεων βάσης, τόσο σεισμικών, όσο και παλμικού τύπου με πλάτος ικανό για την ανατροπή των μοντέλων.

Η μελέτη είναι βασισμένη σε παλαιότερη θεωρητική μελέτη του **Housner (1963) {1}**, με τη διόρθωση όμως ότι η ανατροπή συμβαίνει στην πραγματικότητα λίγο αργότερα απ’ ό,τι δέχεται η παλαιότερη μελέτη.

2.6.2) Λεπτομέρειες μαθηματικού μοντέλου.

Τα μοντέλα είναι ορθογωνικού τύπου με διαστάσεις $b \times h$. Τα μοντέλα βρίσκονται επί επιφάνειας με την παραδοχή άπειρης τριβής ούτως ώστε ο λικνισμός να συντελείται επί δύο σταθερών σημείων. Το κέντρο βάρους τοποθετείται επί του γεωμετρικού κέντρου των μοντέλων.

Τα χαρακτηριστικά των μοντέλων είναι τα εξής:

$$I_o = \frac{4}{3} \times m \times R^2$$

$$p = \sqrt{\frac{3 \times g}{4 \times R}}$$

$$R = \sqrt{b^2 + h^2}$$

$$\tan a = \frac{b}{h}$$

Η γωνία λικνισμού θ συγκρίνεται με την αντίστοιχη γωνία a και γίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα στο χρόνο. Θεωρείται ανατροπή όταν το διάγραμμα θ/a δεν επιστρέφει χρονικά στο εύρος $-1 \leq \theta/a \leq 1$.

Η θεωρητική λύση, που συμφωνεί με την αντίστοιχη του Housner, είναι η εξής:

$$-\theta(t) = \alpha + \frac{\alpha}{1 + \frac{\omega_p^2}{p^2}} \times \left[\frac{\omega_p}{p} \times \frac{\cos \psi}{\sin \psi} \times \sinh(p \times t) - \frac{\omega_p^2}{p^2} \times \cosh(p \times t) - \frac{\sin(\omega_p \times t + \psi)}{\sin \psi} \right], \quad \psi = \frac{\alpha \times g}{\alpha_p}$$

Η εισαγωγή σεισμικών κινήσεων έγινε αρχικά έμμεσα. Για την ακρίβεια, κάθε σεισμός αντικαταστάθηκε από «ισοδύναμο» ημιτονοειδή (ή κυκλοειδή) παλμό με χαρακτηριστικά που πλησίαζαν τα αντίστοιχα της σεισμικής κίνησης, και έγινε επίλυση κατά τα γνωστά. Κάθε τύπος παλμού ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του, πήρε διάφορες ονομασίες, π.χ. Τύπου Β, κλπ κλπ.

Σε επόμενο στάδιο, χρησιμοποιήθηκε το MATLAB και έγινε εισαγωγή της σεισμικής κίνησης απευθείας. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε έλαβε υπόψη του και μη γραμμικά φαινόμενα.

2.6.3) Αποτελέσματα και σχόλια ανάλυσης.

- Η εν λόγω μελέτη απέδειξε ότι, αντίθετα με αυτό που είχε κάνει ως παραδοχή ο Housner, η ανατροπή του μοντέλου υπό κατάλληλο πλάτος διέγερσης 0,5 δευτερολέπτου μισού ημιτονοειδούς παλμού θα έρθει κατά τη διάρκεια της ελεύθερης ταλάντωσής του και όχι τη στιγμή που παύει ο παλμός.
- Αυτό οδηγεί στον υπολογισμό ότι το απαραίτητο πλάτος για την ανατροπή είναι στην πραγματικότητα μικρότερο από την αντίστοιχη παραδοχή του Housner. Για παράδειγμα, μισός ημιτονοειδής παλμός 0,5 δευτερολέπτου σε μοντέλο 0,2 x 0,6 m, χρειάζεται πλάτος 0,5545g για την ανατροπή και όχι 0,673g.
- Για πολύ μικρή αλλαγή στο πλάτος κοντά στο αντίστοιχο για την ανατροπή, υπάρχει μεγάλη ευαισθησία στο χρόνο στον οποίο γίνεται η αλλαγή του λικνισμού.
- Για οριζόντια διέγερση, οι παράμετροι που παίζουν ρόλο στην ανατροπή είναι οι εξής τρεις:

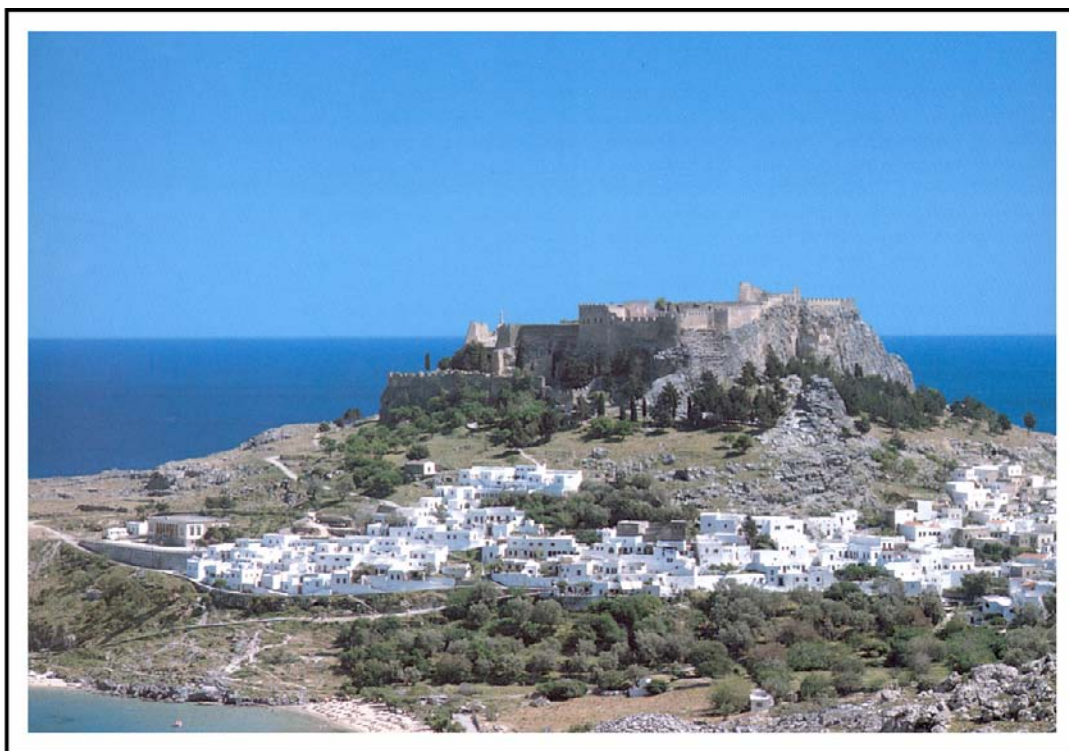
Η **κανονικοποιημένη παλμική επιτάχυνση** $\frac{\alpha_p}{a \times g}$, ο **λόγος των συχνοτήτων** $\frac{\alpha_p}{a \times g}$ και η **λυγηρότητα α** .

- Για δύο μπλοκ με το ίδιο χαρακτηριστικό μέγεθος $\frac{\omega_p}{p}$, αποδεικνύεται από τη μη γραμμική επίλυση ότι θα χρειαστούν διαφορετικές τιμές $\frac{\alpha_p}{a \times g}$ για την ανατροπή τους.
- Για μεγάλη λυγηρότητα ($\alpha=10^\circ$) το πλάτος της ταλάντωσης για ανατροπή ενός μπλοκ είναι πολύ κοντά στη γραμμική λύση. Όσο αυτή η λυγηρότητα μειώνεται (π.χ. $\alpha=20^\circ$, $\alpha=30^\circ$) η μη γραμμική λύση εγκαταλείπει την αντίστοιχη γραμμική και μετακινείται προς τη μη συντηρητική γραμμική λύση του Housner.
- Κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και για κυκλοειδείς παλμούς τύπου B και Cn, με χαρακτηριστικό παράδειγμα ότι για γωνία $\alpha=30^\circ$, η μη γραμμική επίλυση δίνει πλάτος διπλάσιο από τη γραμμική επίλυση.
- Η διερεύνηση για το τι προκαλεί την ανατροπή, η ύπαρξη παλμών μικρής ή μεγάλης περιόδου σε μια διέγερση αποκάλυψε ότι γενικά υπάρχει στην ανατροπή επικρατούν παλμοί μικρής περιόδου τύπου C₁ για τιμές $\frac{\omega_p}{p} < 2$, ενώ μεγάλης περιόδου τύπου B για $\frac{\omega_p}{p} > 2$.

- Επίσης, για τιμές $\frac{\omega_p}{p} < 3$ (όριο χαμηλών συχνοτήτων), το κανονικοποιημένο πλάτος επιτάχυνσης για ανατροπή $\left(\frac{\alpha_{p,o}}{a \times g}\right)$ είναι μεγαλύτερο της μονάδας και αυξάνει γραμμικά με το λόγο $\frac{\omega_p}{p}$. Αντίστοιχα, για τιμές $\frac{\omega_p}{p} > 3$, το κανονικοποιημένο πλάτος επιτάχυνσης για ανατροπή αυξάνεται μη γραμμικά με το λόγο $\frac{\omega_p}{p}$, αναπτύσσοντας φαινόμενα δυσκαμψίας και η στατική επίλυση (με το τύπο του West) γίνεται αυξανόμενα μη συντηρητική με την ανάλογη αύξηση του λόγου $\frac{\omega_p}{p}$.
- Η ανατροπή μικρότερων μπλοκ είναι πιο ευαίσθητη στην PGA, ενώ τα μεγαλύτερα μπλοκ είναι πιο ευαίσθητα στην ταχύτητα εδάφους.
- Δεν λήφθηκαν υπόψη φαινόμενα όπως η κατακόρυφη σεισμική διέγερση και η απώλεια ενέργειας λόγω πλαστικών παραμορφώσεων στα σημεία περιστροφής
- Στη μελέτη περιγράφεται επίσης μια μέθοδος για τον προσεγγιστικό υπολογισμό του ικανού επιπέδου του πλάτους της εκάστοτε ταλάντωσης για την ανατροπή των δοκιμίων.

3) Γενικές πληροφορίες για την εφαρμογή σε κολώνα της Ακρόπολης της Λίνδου στη Ρόδο.

Αφορμή για την **εφαρμογή πραγματικής κατάστασης (“case study”)** αποτέλεσαν οι πρόσφατες αναστηλωτικές εργασίες από το Υπουργείου Πολιτισμού στην Ακρόπολη της Ρόδου.

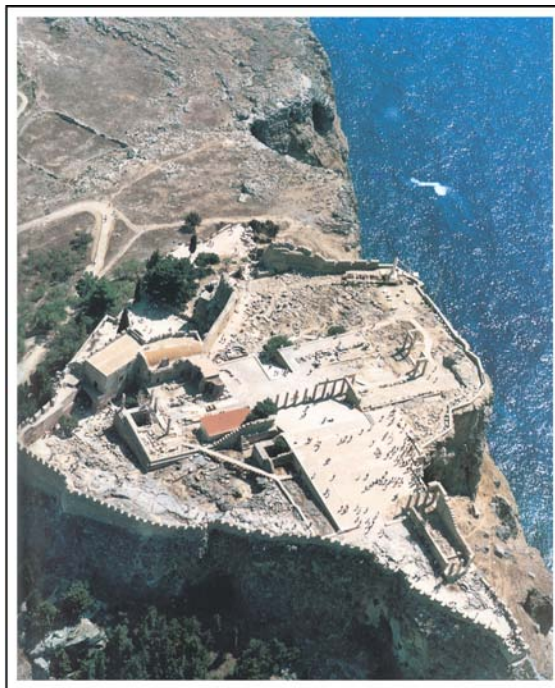
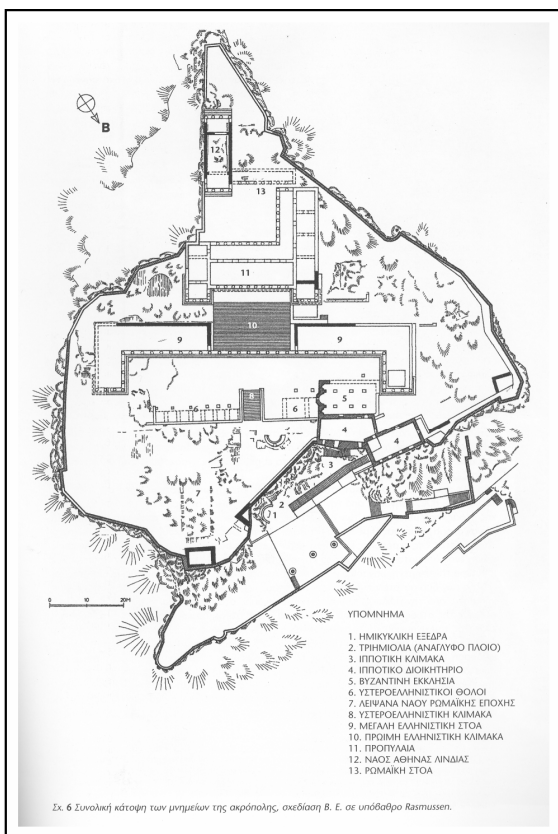


Εικ. 3-1: Άποψη της Ακρόπολης της Λίνδου στη Ρόδο.

Λεπτομέρειες για την προσπάθεια αυτή αναφέρεται σε αντίστοιχη έκδοση του Υπουργείου με τον τίτλο {2}:

Υπουργείο Πολιτισμού
Ταμείο Διαχείρισης Πιστώσεων για την Εκτέλεση Αρχαιολογικών Έργων
Επιτροπή Στερεώσεως και Αναστηλώσεως Μνημείων Ακροπόλεως Λίνδου
“*Αναστηλωτικές Εργασίες στην Ακρόπολη της Λίνδου I, Ελληνιστική Στοά (Α)*” (2002)

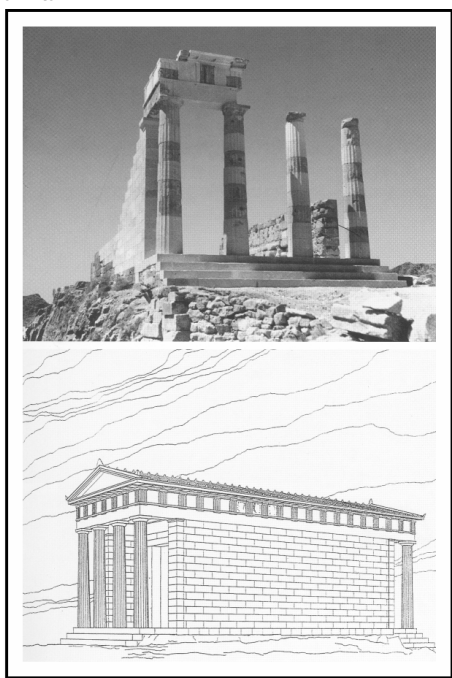
Το έργο είναι ένα εκτεταμένο πρόγραμμα αναστηλώσεων στον αρχαιολογικό χώρο της Λίνδου, αφού δεν ασχολείται μόνο με την Ελληνιστική Στοά, αλλά με τον ευρύτερο χώρο της Ακρόπολης.



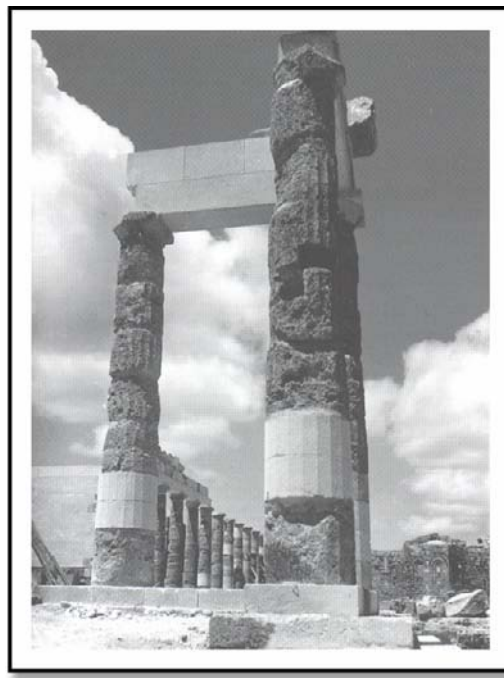
Εικ. 3-2: Αεροφωτογραφία της Ακρόπολης της Λίνδου στη Ρόδο.

Σχήμα 3-3: Σχέδιο της Ακρόπολης της Λίνδου στη Ρόδο.

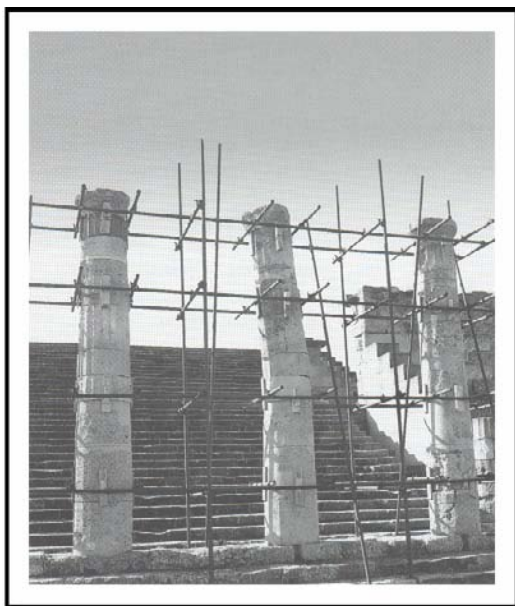
Οι παλαιότερες αναστηλωτικές εργασίες (1938) όχι μόνο δεν ήταν επιτυχημένες, αλλά τα πρώτα σημάδια των ατυχών αυτών επεμβάσεων φάνηκαν ήδη δύο δεκαετίες αργότερα. Για το λόγο αυτό, αδήριτη ήταν η ανάγκη εκ νέου ανάληψη ενεργειών για την αντιστροφή των φυσικών φθορών του μνημείου.



Εικ. 3-5: Σχέδιο και σημερινή μορφή.



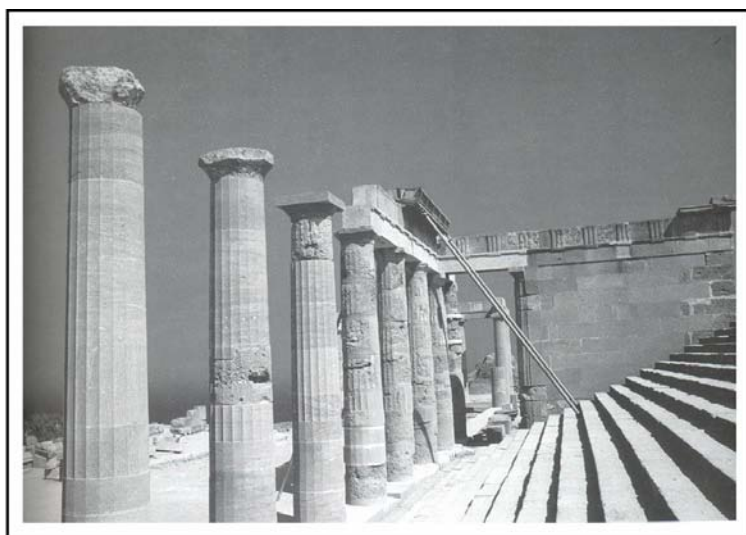
Εικ. 3-4: Δείγμα φθορών σε κίονα.



Εικ. 3-7: Πρότερες αναστηλωτικές εργασίες.



Εικ. 3-6: Πρότερες αναστηλωτικές εργασίες.



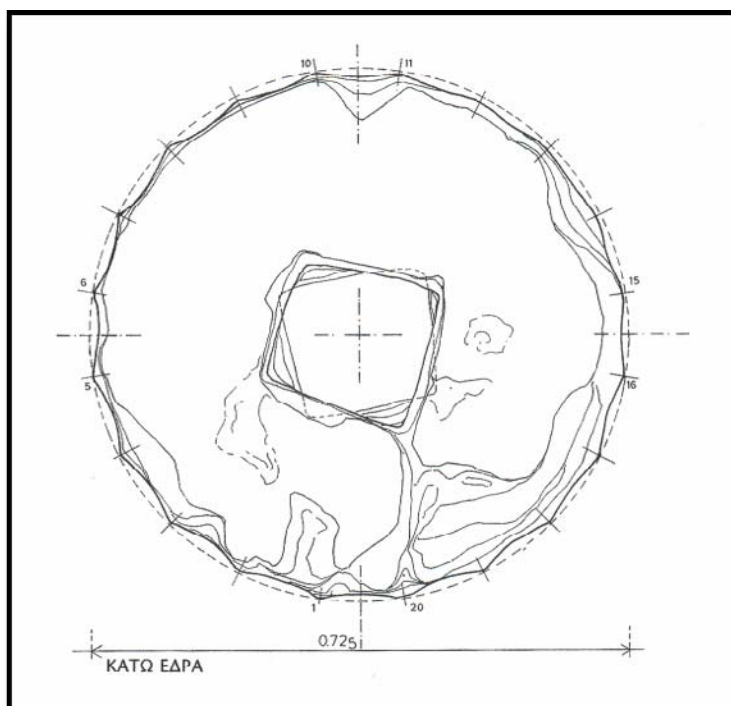
Εικ. 3-8: Πρότερες αναστηλωτικές εργασίες.

3.1) Περιγραφή της πραγματικής κατάστασης (case study).

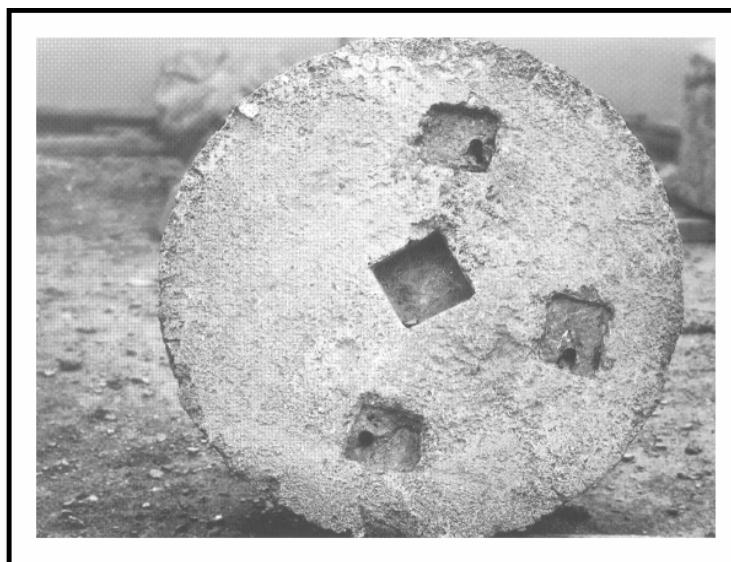
Ως πραγματική κατάσταση επιλέχθηκε μεμονωμένη αρχαιοελληνική κολώνα, τμήμα της Ελληνιστικής Στοάς της Ακρόπολης της Λίνδου. Ο λόγος που δεν επιλέχθηκε κάτι πιο περίπλοκο ήταν για να μπορούν να εξαχθούν σαφή συμπεράσματα που υπό άλλες συνθήκες θα ήταν δύσκολο να απομονωθούν.

Έτσι, λοιπόν, ο πραγματικός κίονας που θα αναλυθεί αργότερα ως “case study”, είναι ύψους περίπου 5 μέτρων (μαζί με το κιονόκρανο ύψους ~32 cm), αποτελείται από 7 ανισούψεις σπονδύλους ύψους από 64 έως 73 εκατοστών ο καθένας. Μέχρι ύψους 1,68m οι σπόνδυλοι έχουν πολυγωνική διατομή. Η υποδοχή για τα εμπόλια είναι διατομής 10 x 10 x 7 εκατοστών. Η κάτω διάμετρος των σπονδύλων είναι περίπου 77~78 cm, ενώ η άνω διάμετρος των σπονδύλων

είναι περίπου 62~64 cm.



Σχήμα 3-9: Αποτύπωση ενός εκ των υφισταμένων σπονδύλων.



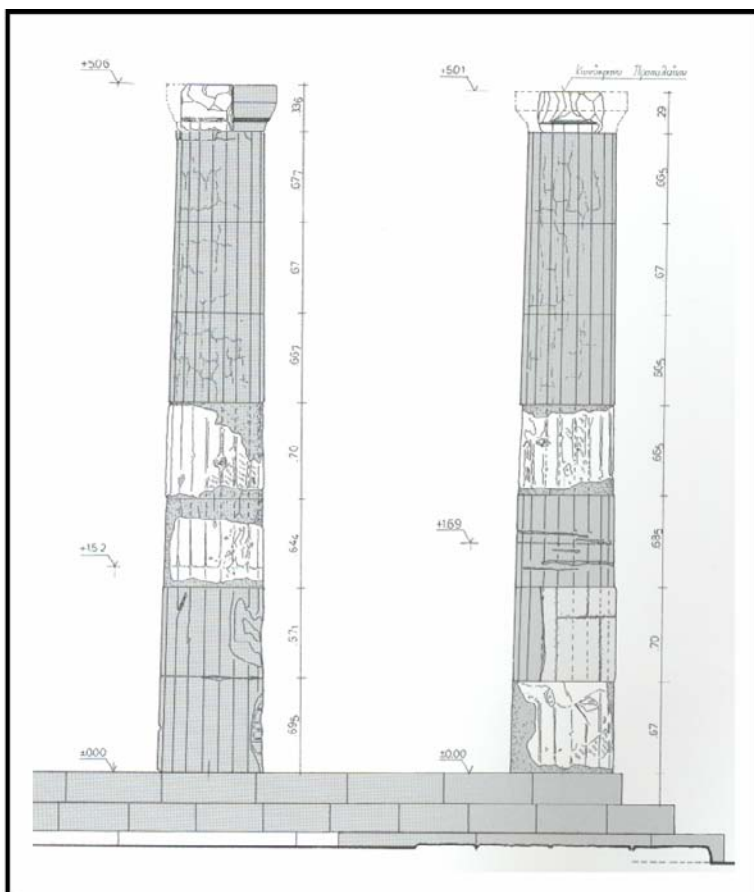
Εικ. 3-10: Σπόνδυλος μετά την πρώτη αποκατάσταση.

Όσον αφορά στο επιστύλιο, μόνο εκτιμήσεις μπορούν να γίνουν, γιατί δεν έχει διασωθεί. Έτσι, λοιπόν, θεωρείται ότι είχε πάχος περίπου 75 cm, ενώ το ύψος του εκτιμάται στα 45 cm. Το δε μήκος του, τοποθετείται επίσης ότι στην περιοχή των 2,62 m, αν συγκριθεί με το αντίστοιχο επιστύλιο του τοίχου.

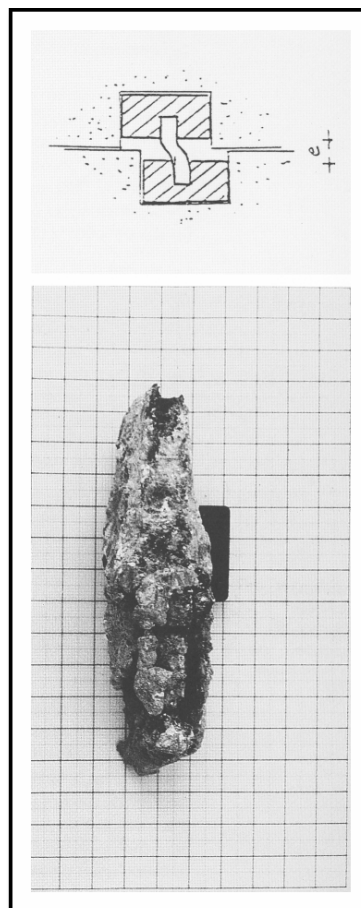
Το υλικό από το οποίο αποτελούνται οι σπόνδυλοι ήταν αρχαίος πωρόλιθος (βιοκλαστικός φαμμιτικός ασβεστόλιθος με ιστό τύπου grainstone) και αποτελείται από το λατομείο του

Φανού, που βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή της Λίνδου {2}.

Το υλικό του εμπόλιου ήταν ξύλο. Λόγω του ότι τόσο ο πόλος, όσο και το εμπόλιο, δε βρέθηκαν στον αρχαιολογικό χώρο της Λίνδου, μόνο έμμεσα μπορεί να αναχθούν οι αντίστοιχες διαστάσεις. Σύμφωνα με το τεύχος του Υπουργείου Πολιτισμού {2}, με αναγωγή στα διασωθέντα εμπόλια του Παρθενώνα, τα αντίστοιχα εμπόλια της Ακρόπολης της Λίνδου υπολογίστηκαν να έχουν διάμετρο 3 cm και μήκος 7 cm.



Σχήμα 3-12: Δείγμα αποτύπωσης δύο κίωνων.



Εικ. 3-11: Αρχαίο ξύλινο εμπόλιο και σχηματική απεικόνιση λειτουργίας.



3.2) Παραδοχές για την ανάλυση του μοντέλου.

3.2.1) Γεωμετρικές παραδοχές.

Όπως θα αναφερθεί σε μεταγενέστερο κεφάλαιο, το δισδιάστατο μοντέλο με ύπαρξη εμπολίων και αξονικού φορτίου λόγω επιστυλίου προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με το τρισδιάστατο μοντέλο και για το λόγο αυτό, για την προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί αυτό το μοντέλο. Υπενθυμίζουμε ότι λόγω της θεώρησης μεταβλητού κατά βούληση βάθους δισδιάστατου μοντέλου, πρέπει να γίνουν οι απαραίτητες αλλαγές στη γεωμετρία του δισδιάστατου μοντέλου για να ταιριάζει στην πραγματική κατάσταση.

Το αρχείο εισαγωγής για το ANSYS με μικρές μετατροπές μπορεί να δεχτεί ανισοϋφείς σπόνδυλους προς ανάλυση. Για λόγους απλότητας όμως και αρμονίας αποτελεσμάτων, όμως, έγινε η παραδοχή ότι οι σπόνδυλοι έχουν το ίδιο ύψος. Αυτό το ύψος θα είναι:

$$h = (5,00 - 0,31) / 7 = 0,67 \text{ m}$$

Όπως φαίνεται από την ανωτέρω σχέση, στο αριθμητικό μοντέλο δεν έχει ληφθεί υπόψη η ύπαρξη του κιονόκρανου. Επιπρόσθετα, η μοναδική επιρροή του επιστυλίου είναι η επιβολή αξονικού φορτίου. Λεπτομέρειες για το μέγεθος του φορτίου αυτού αναφέρεται παρακάτω.

Για τον ίδιο λόγο, επιλέχθηκε η διάμετρος των σπονδύλων να παραμένει σταθερή καθ' ύψος. Δεδομένου ότι η διάμετρος των σπονδύλων κυμαίνεται από 77~78 εκατοστά μέχρι 62~64 εκατοστά, δεχόμαστε ότι στο μοντέλο μας το αντίστοιχο μέγεθος θα είναι κοινό και ίσο με 70 εκατοστά. Έτσι, λοιπόν, οι αντίστοιχη διάσταση είναι η εξής:

$$\frac{\pi \times d^2}{4} = l^2 \Rightarrow l = \frac{0,70}{2} \times \sqrt{\pi} \approx 0,62 \text{ m}$$

Καθότι οι κίονες δε στηρίζονται ποτέ απευθείας στο έδαφος, έχει προβλεφθεί η ύπαρξη βάσης μήκους 2,5 μέτρων και ύψους 0,5 μέτρων, το δε βάθος της είναι ίδιο με το βάθος των υπερκειμένων σπονδύλων.

3.2.2) Παραδοχές υλικών.

Το **υλικό βάσης** επελέχθηκε να είναι τέτοιου τύπου ώστε να είναι επαρκώς άκαμπτο σε σχέση με τους σπονδύλους. Για το λόγο αυτό, έγινε η παραδοχή ενός πλήρως ελαστικού υλικού με μέτρο ελαστικότητας **E=30 GPa**. Ο λόγος Poisson λήφθηκε ίσος με **ν=0,3**. Η πυκνότητα του εδάφους λήφθηκε ίσο με **ρ=2500 kg/m³**. Αν και δεν είναι απαραίτητο για το μοντέλο, ο συντελεστής τριβής του υλικού λήφθηκε ίσος με **T=0,31**.

Η επιλογή του **υλικού σπονδύλων** έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να συμφωνεί με τα παλαιότερα ευρήματα του τεύχους του Υπουργείου Πολιτισμού **{2}**. Έτσι, λοιπόν, το μέτρο ελαστικότητας του πωρόλιθου λήφθηκε ίσο με **E=1044 MPa**. Δεν υπάρχει αναφορά για λόγο Poisson, οπότε έγινε η παραδοχή μιας γενικής τιμής ίσης με **ν=0,3**. Αναφορές για την πυκνότητα του υλικού δεν υπάρχουν, για το λόγο αυτό λάβαμε υπόψη μας μια γενική μέση τιμή ίση με **ρ=2000 kg/m³**. Όπως και προηγουμένως, ο συντελεστής τριβής του υλικού έγινε δεκτός με την τιμή **T=0,31**. Εδώ, όπως και προηγουμένως, θεωρήσαμε το υλικό πλήρως ελαστικό, αφότου δεν υπάρχει σοβαρή ένδειξη για να θεωρήσουμε κάτι διαφορετικό.

Για το **υλικό των εμπολίων**, έπρεπε να ανατρέξουμε σε εξωτερικές πηγές. Το τεύχος του Υπουργείου Πολιτισμού δεν ήταν διαφωτιστικό στο σημείο αυτό, κυρίως αφού σημασία είχε δοθεί στο υλικό αποκατάστασης, που ήταν ορείχαλκος και όχι ξύλο. Δυστυχώς, όμως, υπήρχαν σοβαρά προβλήματα σύγκλισης του μοντέλου αν στον περιορισμένο χώρο του

εμπολίου είχε δοθεί υλικό με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (όπως ο ορείχαλκος), οπότε έπρεπε να παραμείνουμε στο ξύλο. Μεγάλη βοήθεια στο συγκεκριμένο βήμα αποτέλεσε το βιβλίο *“Ιδιότητες και αξιοποίηση του ξύλου”* από τον καθηγητή του Α.Π.Θ. Γεώργιο Τσουμή {11}. Με βάση αυτόν τον οδηγό, οι ιδιότητες του ξύλινου εμπολίου ήταν οι εξής: Μέτρο ελαστικότητας $E=20 \text{ MPa}$. Ο λόγος Poisson ήταν $\nu=0,3$. Η πυκνότητά του ήταν $\rho=500 \text{ kg/m}^3$. Αρχική σκέψη ήταν η εφαρμογή διγραμμικού διαγράμματος τάσεων–παραμορφώσεων. Για λόγους, όμως, εγγενών αδυναμιών του ANSYS, χρησιμοποιήθηκε ένα τέχνασμα, σύμφωνα με το οποίο γινόταν χειροκίνητη εύρεση της χρονικής στιγμής υπέρβασης της διατμητικής αντοχής του ξύλου και επανεπίλυση του μοντέλου με τα καινούρια δεδομένα.

Η διατμητική αντοχή του ξύλινου εμπολίου, με βάση το ανωτέρω βιβλίο προσδιορίστηκε στα $\tau=130 \text{ KPa}$.

Για λόγους πληρότητας του μοντέλου, υπάρχει (απενεργοποιημένη όμως) η δυνατότητα για διγραμμικά διαγράμματα τάσεων–παραμορφώσεων και των τριών υλικών.

3.2.3) Φορτίσεις.

Ο μοναδικός τύπος φόρτισης που εφαρμόστηκε στη μελέτη εφαρμογής (**case study**) ήταν ο **σεισμός της Ρόδου**. Οι υπόλοιποι τύποι φορτίσεων (για τη δημιουργία *καμπυλών pushover*) καλύφθηκαν εκτεταμένα σε άλλο κομμάτι της διπλωματικής, σε αυτό που πραγματεύεται την παραμετρική μελέτη της μεταφοράς δυνάμεων.

Το πλάτος της εν λόγω διέγερσης αυξομειωνόταν κατάλληλα ούτως ώστε να πάρουμε κατάλληλα χρήσιμα αποτελέσματα. Αυτό που θέλουμε είναι κυρίως να εντοπίσουμε το επίπεδο της σεισμικής έντασης που είναι αρκετό τόσο για να αρχίσει το φαινόμενο του λικνισμού στο μοντέλο, όσο και (αν αυτό αυξηθεί περαιτέρω) για να πλησιάσει το όριο κατάρρευσης του συστήματος. Λόγω όμως των ιδιαίτερως αυξημένων απαιτήσεων σε υπολογιστική ισχύ για την επίλυση του φαινομένου επαφής 7 σπονδύλων, έγιναν αναλύσεις σε τρία επίπεδα φορτίσεων του ίδιου σεισμού.

Σημειώνουμε την ύπαρξη αξονικού φορτίου στην κορυφή του μοντέλου, το οποίο προέρχεται από την ύπαρξη του επιστυλίου. Το τελευταίο δεν υπάρχει ως οντότητα στο μοντέλο, θεωρείται όμως ότι προκαλεί ικανό σεισμικό φορτίο. Αν λάβουμε υπόψη μας τις γεωμετρικές διαστάσεις του καθώς και την παραδοχή ίδιας πυκνότητας με τον πωρόλιθο, το μέτρο της εν λόγω φόρτισης θα είναι το κάτωθι:

$$V = 2,62 \times 0,75 \times 0,45 \times 2000 \times 9,81 = 17348,99 \text{ N}$$

Το ανωτέρω αξονικό δεν εισήχθη στο τελικό μοντέλο γιατί δημιούργησε προβλήματα στη σύγκλιση του μοντέλου, για την υπέρβαση των οποίων, θα έπρεπε να γίνεται περαιτέρω χρονική διακριτοποίηση.

3.2.4) Αποτελέσματα.

Τα αποτελέσματα της μελέτης εφαρμογής παρουσιάζονται σε ξεχωριστό κεφάλαιο αργότερα στην παρούσα διπλωματική.



4) Λεπτομέρειες του αρχείου εισαγωγής του ANSYS.

- Για την ανάλυση του προβλήματος της ολίσθησης και του λικνισμού που παρουσιάζουν οι σπονδυλωτές κατασκευές, αναπτύχθηκε ένα **πρόγραμμα με τη μορφή αρχείου εισόδου στο πρόγραμμα ANSYS 7.1.**
- Το αρχείο εισόδου είναι τύπου κειμένου και περιέχει όλες τις πληροφορίες που είναι απαραίτητες για να γίνει σχεδόν οποιουδήποτε τύπου ανάλυση για το εν λόγω πρόβλημα. Σχεδόν κάθε σειρά δεδομένων συνοδεύεται από αντίστοιχα σύντομα σχόλια. Επίσης, το αρχείο εισόδου περιέχει τους κατάλληλους διακόπτες (“**switches**”) που καθοδηγούν το πρόγραμμα στη δημιουργία π.χ. δισδιάστατης ή τρισδιάστατης ανάλυσης, καθώς και άλλων λεπτομερειών.
- Στο ίδιο αρχείο εισόδου περιέχονται πολλές **μεταβλητές** που μπορούν να διαφοροποιούν το μοντέλο κατά βούληση. Έτσι, είναι δυνατόν κάποιος να δώσει μεγαλύτερη ή μικρότερη τριβή μεταξύ των σπονδύλων ή μεταξύ διεπιφανειών σπονδύλων–ξύλινων συνδέσμων διάτμησης. Επίσης είναι δυνατόν να δώσει κανείς γραμμικά ή διγραμμικά διαγράμματα τάσεων–παραμορφώσεων υλικών. Το σύνολο των μεταβλητών παρουσιάζονται με λεπτομέρεια σε μεταγενέστερη παράγραφο.
- Βάσει των διακοπών και των μεταβλητών, στο ίδιο αρχείο εισόδου γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί και **έλεγχοι** που οδηγούν κάθε φορά στο μοντέλο που θέλει αυτός που επεμβαίνει στο αρχείο αυτό. Έτσι, για παράδειγμα, υπολογίζονται τα μέτρα των δυνάμεων συναρτήσεως των διαστάσεων, του ειδικού βάρους των σπονδύλων κλπ. Αν κάτι έχει απενεργοποιηθεί μέσω των διακοπών δεν λαμβάνεται υπόψη από το ANSYS. Επίσης, όπου χρειάζεται γίνεται επανάληψη συγκεκριμένων κινήσεων ανάλογα π.χ. του αριθμού των σπονδύλων που έχουμε δηλώσει.
- Στη συνέχεια δημιουργείται, με βάση τα δεδομένα που έχουμε δηλώσει, το δισδιάστατο ή τρισδιάστατο μοντέλο με τον αριθμό σπονδύλων που έχουμε δηλώσει ως “**περιοχές**” (“**areas**”). ή ως “**όγκοι**” (“**volumes**”).
- Δηλώνεται ο τύπος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν για τη διακριτοποίηση.
- Δημιουργούνται (με βάση τα δεδομένα που έχουμε δώσει) τα απαραίτητα **υλικά**.
- Δημιουργούνται (με βάση τα δεδομένα που έχουμε δώσει) οι **σταθερές “real”** που δίνουν πληροφορίες για κάθε element (είτε ανήκει σε κάποια “περιοχή”, είτε είναι element επαφής).
- Γίνεται διακριτοποίηση των “περιοχών” σε πεπερασμένα στοιχεία.
- Δημιουργούνται στοιχεία επαφής μεταξύ των επιφανειών με κύρια χαρακτηριστικά την τριβή επαφής και την κάθετη αντίσταση.
- Γίνεται επίλυση του προβλήματος.
- Ακολουθούν λεπτομέρειες για κάθε τι από τα ανωτέρω:



4.1) Διακόπτες (“switches”).

SW₀ = 2 → Δισδιάστατη ανάλυση.

SW₀ = 3 → Τρισδιάστατη ανάλυση. Αυτό, επίσης, επιβάλλει ότι SW₂=0.

SW₁ = 1 → Ανάλυση για οριζόντια δύναμη (pushover). Σε αυτήν την περίπτωση, γίνεται δημιουργία ενός πίνακα που περιέχει ζεύγη τιμών χρόνου-μέγεθος οριζόντιας δύναμης (που μπορεί να είναι αύξουσα ή φθίνουσα). Ο πίνακας αυτός έχει τη δυνατότητα να κάνει δώσει μέσω γραμμικής παρεμβολής τιμές που δεν περιέχει άμεσα.

SW₁ = 2 → Ανάλυση για σεισμική ή ημιτονοειδή διέγερση. Σε αυτήν την περίπτωση, γίνεται ανάγνωση δύο αρχείων που περιλαμβάνουν το μεν τις τιμές χρόνου και το δε τις επιταχύνσεις που τους αντιστοιχούν. Δημιουργείται ένας πίνακας που περιέχει τα ζεύγη των τιμών, ο οποίος έχει τη δυνατότητα της γραμμικής παρεμβολής τιμών μεταξύ δύο τιμών χρόνου.

SW₂ = 0 → Το δισδιάστατο μοντέλο δε θα έχει ξύλινους συνδέσμους διάτμησης.

SW₂ = 1 → Εισαγωγή ξύλινων συνδέσμων διάτμησης στο δισδιάστατο μοντέλο.

SW₃ = 0 → Όλες οι επιφάνειες συνδέονται μεταξύ τους μέσω της τριβής.

SW₃ = 3 → Ειδική περίπτωση όπου όλες οι επιφάνειες είναι κολλημένες μεταξύ τους, εκτός από τη διεπιφάνεια βάσης-πρώτου σπονδύλου, η οποία στο ένα άκρο της έχει άρθρωση. Αυτό έγινε για να υπάρχει σύγκριση με τα αντίστοιχα μοντέλα του Μακρή-Ρούσσου του πανεπιστήμιου του Μπέρκλεϋ, Καλιφόρνια.

SW₄ = 0 → Στην περίπτωση της οριζόντιας δύναμης, η τελευταία μπαίνει στη διεπιφάνεια βάσης-πρώτου σπονδύλου.

SW₄ = 1 → Στην περίπτωση της οριζόντιας δύναμης, η τελευταία μπαίνει στην κορυφή.

SW₅ = 0 → Γενική περίπτωση. Χωρίς πάκτωση στη διεπιφάνεια βάσης-πρώτου σπονδύλου.

SW₅ = 1 → Ειδική περίπτωση. Εισαγωγή πάκτωσης στη διεπιφάνεια βάσης-πρώτου σπονδύλου. Αυτό γίνεται στη περίπτωση που θέλουμε να αγνοήσουμε τα χαρακτηριστικά της βάσης και να θεωρήσουμε τον πρώτο σπόνδυλο πακτωμένο στο έδαφος.

SW₆ = 0 → Χωρίς φαινόμενα fracture των ξύλινων διατμητικών συνδέσμων.

SW₆ = 1 → Με εισαγωγή φαινομένων fracture των ξύλινων διατμητικών συνδέσμων.

SW₇ = 0 → Χωρίς αναπροσδιορισμό της οριζόντιας δύναμης.

SW₇ = 1 → Με αναπροσδιορισμό της οριζόντιας δύναμης για τη διερεύνηση περίπτωσης F-δ.

upordown=1 → Το οριζόντιο φορτίο που θα δοθεί, θα έχει μηδενική τιμή για χρόνο 0 και θα αυξάνεται γραμμικά μέχρι την τελική τιμή του για χρόνο **T₁**.

upordown=2 → Το οριζόντιο φορτίο που θα δοθεί, θα έχει τη μέγιστη τιμή του για χρόνο 0 και θα μειώνεται γραμμικά μέχρι μηδενισμού για χρόνο **T₁**.

4.2) Μεταβλητές.

Οι κάτωθι μεταβλητές έχουν άμεση επίρρηση στο είδος του τελικού μοντέλου. Οι τιμές πρέπει να δίνονται στο σύστημα SI.

syxnoths → Συντελεστής που καθορίζει τον τελικό χρόνο ανάλυσης. Κυρίως εισήχθη για να

γίνει ανάλυση με ημιτονοειδή φόρτιση περιόδου ίση με τη συγκεκριμένη τιμή. Υπό κανονικές συνθήκες, ο συντελεστής αυτός είναι ίσος με τη μονάδα.

numpoints → Αν προτιμηθεί σεισμική ανάλυση ($SW_1=2$), τότε αυτή η μεταβλητή ορίζει πόσα ζεύγη τιμών χρόνου–επιτάχυνσης θα αναγνωστούν από το πρόγραμμα.

seiscale → Συντελεστής με τον οποίο πολ/νται οι τιμές του πίνακα σεισμικής φόρτισης.

DT → Στη δυναμική ανάλυση (μέθοδος που χρησιμοποιείται για την επίλυση του εν λόγω προβλήματος) το ANSYS απαιτεί τον καθορισμό χρονικών βημάτων (“load steps”) μέσα στα οποία έχουμε καθορισμένα μεγέθη φόρτισης. Παρότι προβλέπεται η αυτόματη ή μη τομή τους σε αριθμό υπο-βημάτων (“sub-steps”), είναι προφανές ότι παίρνουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα με μεγάλο αριθμό χρονικών βημάτων (έστω και με λίγα υπο-βήματα το καθένα), παρά με μικρό αριθμό χρονικών βημάτων (με πολλά υπο-βήματα), ειδικά στην περίπτωση σεισμικής φόρτισης, αφού λαμβάνεται η τιμή της επιτάχυνσης του επιταχυνσιογραφήματος τη χρονική στιγμή της αρχής του χρονικού βήματος. Το μέγεθος **DT** δίνει το μέγεθος κάθε χρονικού βήματος.

T1 → Το τέλος (σε sec) της οριζόντιας ή της σεισμικής διέγερσης.

PI → Ο αριθμός π.

E**** → Μέτρο ελαστικότητας κάθε υλικού.

v**** → Λόγος Poisson κάθε υλικού.

P**** → Πυκνότητα κάθε υλικού.

T**** → Συντελεστής τριβής υλικού (δεν παίζει ρόλο στα φαινόμενα επαφής).

PD**** → Αν είναι «0», τότε ο νόμος τάσης–παραμόρφωσης είναι γραμμικός, αλλιώς:

y**** → Τιμή διαρροής του υλικού.

Q**** → Κλίση πλαστικής περιοχής.

όπου **** → **** = **soil** για τη βάση,
 **** = **coll** για τους σπονδύλους,
 **** = **wood** για τους συνδέσμους διάτμησης.

katwmhkos → Είναι το μήκος της περιοχής στην οποία εδράζονται οι σπόνδυλοι.

katwypsos → Είναι το ύψος της περιοχής στην οποία εδράζονται οι σπόνδυλοι.

panwmhkos → Είναι το μήκος κάθε σπόνδουλου.

panwypsos → Είναι το ύψος κάθε σπόνδουλου.

depth1 → Είναι το βάθος της βάσης και των σπονδύλων στο δισδιάστατο μοντέλο.

holex → Είναι η διάμετρος της οπής.

holey → Είναι το ύψος της οπής.

depth2 → Είναι το βάθος της οπής του δισδιάστατου μοντέλου. Προεπιλογή: *holex*.

woodx → Είναι το πάχος του ξύλινου συνδέσμου διάτμησης. Προφανώς $woodx < holex$.

depth3 → Είναι το βάθος του ξύλινου συνδέσμου διάτμησης. Προεπιλογή: *woodx*.

temaxia → Είναι ο αριθμός των σπονδύλων.

gravidad → Είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.81 m/sec^2).

overforce → Συντελεστής υπερφόρτισης οριζόντιας δύναμης.

vertforce → Συνολικό κατακόρυφο φορτίο από τυχόν ύπαρξη επιστυλίου.

trivius1 → Αδιάστατος συντελεστής τριβής μεταξύ των σπονδύλων.

trivius2 → Αδιάστατος συντελεστής τριβής μεταξύ σπονδύλων–συνδέσμων διάτμησης. Η εξορισμού τιμή του είναι το ένα δέκατο της τιμής *trivius1* γιατί παρατηρήθηκε ότι το πρόβλημα λύνεται ευκολότερα αν αυτή η τιμή βρίσκεται εντός κάποιων ορίων που εξαρτώνται από την τιμή *trivius1*.

To → Η πρώτη χρονική στιγμή μετά την επιβολή των αρχικών συνθηκών (πακτώσεις, ίδιο βάρος, βάρος επιστυλίου κλπ). Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί ένα μικρό χρονικό διάστημα ($0 \sim 1e^{-5}$) για την επιβολή των αρχικών συνθηκών. Η επίλυση για τα φορτία που επιβάλλουμε εμείς αρχίζει από το χρόνο *To*.

numkomv → Σε περίπτωση αλλαγής των διαστάσεων του δισδιάστατου ή τρισδιάστατου μοντέλου, ο αριθμός των κόμβων στη κορυφή ή στη βάση των σπονδύλων μοιραία θα αλλάξει μόλις αυτοί διακριτοποιηθούν. Επειδή για λόγους πληρότητας οι δυνάμεις δίνονται στα σημεία (“nodes”) που δημιουργεί η διακριτοποίηση, ο αριθμός των σημείων αυτών δεν είναι συγκεκριμένος. Έτσι, είναι απαραίτητο να δοθεί αυτός ο αριθμός εκ των προτέρων (αφού γίνει έλεγχος μετά τη διακριτοποίηση) για να είναι σίγουρο ότι η σωστή οριζόντια δύναμη θα κατανεμηθεί στη βάση ή στην κορυφή των σπονδύλων.

4.3) Υπολογισμοί.

4.3.1) Περίπτωση τρισδιάστατου μοντέλου.

Σε αυτήν την περίπτωση, και για να υπάρχει όσο το δυνατόν καλύτερη συμφωνία με το δισδιάστατο μοντέλο (δεδομένου ότι το τελευταίο επιδέχεται μεταβλητό βάθος), υπάρχει αλλαγή της δοθείσας διάστασης σπονδύλων και βάσης.

Πιο συγκεκριμένα, με τη θεώρηση ίσων εμβαδών (για την ανάπτυξη ίδιων αδρανειακών δυνάμεων λόγω ίδιας μάζας) μεταξύ δισδιάστατου και τρισδιάστατου μοντέλου, έχουμε ότι:

$$\frac{\pi \times d_{3,k}^2}{4} = depth1 \times katwmhkos \Rightarrow d_{3,k} = 2 \times \sqrt{\frac{katwmhkos \times depth1}{\pi}}$$

$$\frac{\pi \times d_{3,p}^2}{4} = depth1 \times panwmhkos \Rightarrow d_{3,p} = 2 \times \sqrt{\frac{panwmhkos \times depth1}{\pi}}$$

Οι τιμές *panwmhkos* και *katwmhkos*, δηλαδή, αλλάζουν από αυτές που δίνει ο χρήστης και παίρνουν την ανάλογη τιμή $d_{3,p}$ και $d_{3,k}$.

Τα αποτελέσματα δείχνουν να δικαιώνουν την ανωτέρω προσέγγιση και για το λόγο αυτό (σε συνδυασμό με την επιλογή περιορισμού των υπολογισμών) περισσότερο βάρος έχει δοθεί στο δισδιάστατο, παρά στο τρισδιάστατο μοντέλο.

4.3.2) Βάρος συνδέσμων.

Στην περίπτωση που έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε συνδέσμους διάτμησης (δισδιάστατο μοντέλο μόνο), το πρόγραμμα υπολογίζει το βάρος των συνδέσμων, το οποίο είναι ίσο με:

$$\mathbf{syndweight} = (temaxia-1) \times holey \times woodx \times depth3 \times Pwood \times gravidad \quad \{\text{σε N}\}.$$

4.3.3) Βάρος σπονδύλων.

Για την περίπτωση δισδιάστατης ανάλυσης υπολογίζεται με βάση τα κάτωθι:

Το βάρος κάθε σπονδύλου είναι:

$$\mathbf{sponweight} = (panwmhkos \times panwypsos \times depth1 - holex \times depth2 \times holey / 2) \times Pcoll \times gravidad$$

Συνολικά έχουμε:

$$\mathbf{restweight} = (panwmhkos \times panwypsos \times depth1 \times temaxia - (temaxia-1) \times holex \times depth2 \times holey) \times Pcoll \times gravidad$$

Για την περίπτωση τρισδιάστατης ανάλυσης υπολογίζεται με βάση τα κάτωθι:

Το βάρος κάθε σπονδύλου είναι:

$$\mathbf{sponweight} = (PI \times panwmhkos \times panwypsos / 4 \times panwypsos) \times Pcoll \times gravidad$$

Συνολικά έχουμε:

$$\mathbf{restweight} = (PI \times panwmhkos \times panwypsos / 4 \times panwypsos \times temaxia) \times Pcoll \times gravidad \quad \{\text{σε N}\}.$$

4.3.4) Τελική οριζόντια δύναμη.

Τα ανωτέρω δύο βάρη χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για τον υπολογισμό της τελικής

οριζόντιας δύναμης που θα δοθεί σταδιακά στο μοντέλο. Οι μάζες (και η επιτάχυνση της βαρύτητας) χρησιμοποιούνται εσωτερικά από το πρόγραμμα για όλες τις άλλες περιπτώσεις, μιας και δίνουν πιο σωστά αποτελέσματα.

Στη γενική περίπτωση, αυτή η οριζόντια δύναμη θα είναι:

$$\mathbf{finalforce} = (\text{restweight} + \text{syndweight} + \text{vertforce}) \times \text{trivius1} \times \text{overforce} \quad \{\text{σε N}\}.$$

εκτός αν έχουμε τη διερεύνηση της περίπτωσης F-δ, οπότε η τελική κορυφαία δύναμη είναι:

$$\mathbf{finalforce} = (\text{sponweight} + \text{vertforce}) \times \text{trivius1} \times \text{overforce}$$

Στην περίπτωση αυτή (και αν το φορτίο δοθεί στη βάση των σπονδύλων), η τιμή **finalforce** (αν η τιμή **overforce** είναι ελάχιστη μεγαλύτερη της μονάδας) είναι αυτή που θα οδηγήσει στην ομάδα σπονδύλων να ολισθήσει οριακά λίγο πριν την τιμή **T1** (αποδεικνύοντας έτσι ότι η θεωρητική και η αριθμητική λύση συγκλίνουν).

Στην ειδική περίπτωση που έχουμε άρθρωση στη μία άκρη των σπονδύλων και συγκόλληση μεταξύ τους (έχοντας ένα μπλοκ μόνο, δηλαδή), η οριζόντια δύναμη θα είναι:

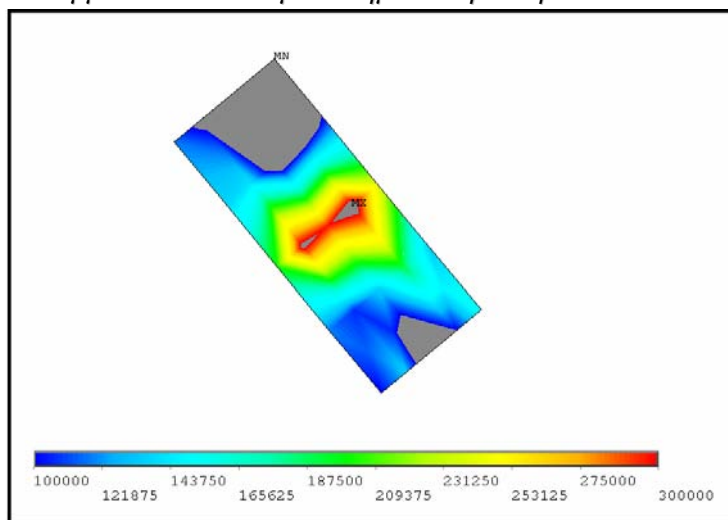
$$\mathbf{finalforce} = (\text{restweight} + \text{syndweight} + \text{vertforce}) \times \text{overforce} \times \text{panwmhkos} / (2 \times \text{temaxia} \times \text{panwypsos})$$

Ο τύπος αυτός υπολογίζεται από την θεώρηση ισορροπίας ροπών βάρους και οριζόντιας δύναμης στην άρθρωση στην αριστερή άκρη της βάσης του μπλοκ.

4.3.5) Λεπτομέρειες fracturing συνδέσμων διάτμησης.

Σε περίπτωση που έχει ενεργοποιηθεί η αντίστοιχη επιλογή, το πρόγραμμα ANSYS κατά τη διάρκεια της επίλυσης, θα ρωτήσει το χρήστη τόσες φορές όσοι οι σύνδεσμοι διάτμησης για τη χρονική στιγμή που επιθυμούμε κάθε σύνδεσμος (από τη βάση προς την κορυφή) να απενεργοποιηθεί λόγω θραύσης.

Δυστυχώς, δεν υπάρχει κάποιος αυτόματος τρόπος για να γίνεται αυτή η απενεργοποίηση, επειδή εμείς ενδιαφερόμαστε για την απενεργοποίηση των δημιουργηθέντων στοιχείων επαφής και όχι μόνο των στοιχείων διάτμησης (που είναι δυνατόν να γίνει αυτόματα). Για το λόγο αυτό, ενδείκνυται το τρέξιμο του προγράμματος χωρίς fracturing, ο εντοπισμός μέσω διαγραμμάτων τάσης της χρονικής στιγμής που γίνεται υπέρβαση της αντοχής των συνδέσμων. Σημειώνουμε ότι συνήθως γίνεται υπέρβαση της αντοχής στα άκρα του συνδέσμου, κάτι που δεν έχει τόση σημασία, όση η υπέρβαση της αντοχής του κεντρικού κομματιού που αυτόματα σημαίνει θραύση όλου του συνδέσμου.



Σχήμα 4-1: Συγκέντρωση τάσεων στη μέση του εμπολίου.

Μετά την καταγραφή της χρονικής στιγμής που θραύεται ο πρώτος σύνδεσμος, πρέπει να ενεργοποιηθεί ο διακόπτης για το fracturing, να δοθεί η χρονική στιγμή θραύσης για το συγκεκριμένο σύνδεσμο (για τους υπόλοιπους αρκεί μια πολύ μεγάλη τιμή, πέρα του χρονικού διαστήματος ανάλυσης), να ξαναγίνει επίλυση, να εντοπιστεί τυχόν θραύση δεύτερου συνδέσμου κ.ο.κ.

4.4) Λεπτομέρειες δημιουργίας “περιοχών” ή “όγκων”.

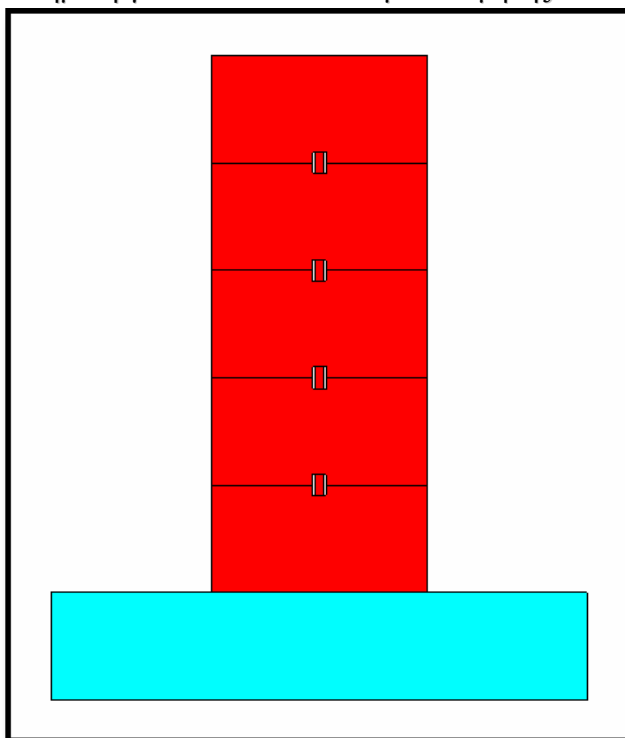
Το ANSYS έχει τις εξής δύο διακρίσεις:

- **Το στερεό μοντέλο.** Το μοντέλο αυτό αποτελείται από **σημεία (keypoints)**, από **γραμμές (lines)**, **περιοχές (areas)** και **όγκους (volumes)**. Θα μπορούσε κανείς να πει ότι είναι το περίγραμμα του μοντέλου που αργότερα θα διακριτοποιηθεί.
- **Το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων.** Το μοντέλο αυτό προκύπτει από τη διακριτοποίηση του σταθερού μοντέλου. Έτσι, περιέχει έναν πολύ μεγαλύτερο αριθμό από **κόμβους (nodes)** και **στοιχεία (elements)**, απόρροια της διακριτοποίησης.

Για λόγους συνοχής, αντενδείκνυται να υπάρχουν ταυτόχρονα φορτία ή/και καταναγκασμοί και στο στερεό μοντέλο και στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, διότι αυτά που έχουν δοθεί στο πρώτο μοντέλο δύνανται να αντικαταστήσουν τα αντίστοιχα του δεύτερου.

4.4.1) Δημιουργία “περιοχών” για το διδιάστατο μοντέλο.

Στο σημείο αυτό του προγράμματος, με βάση τις αντίστοιχες μεταβλητές και διακόπτες, δημιουργούνται περιοχές τύπου “παραλληλογράμμων” (“rectangles”) που με κατάλληλες διεργασίες “ενώσεων” και “τομών” (“unions” & “intersections”) δημιουργούνται οι εγκοπές-υποδοχές των συνδέσμων διάτμησης. Προαιρετικά, δημιουργούνται και οι σύνδεσμοι διάτμησης.

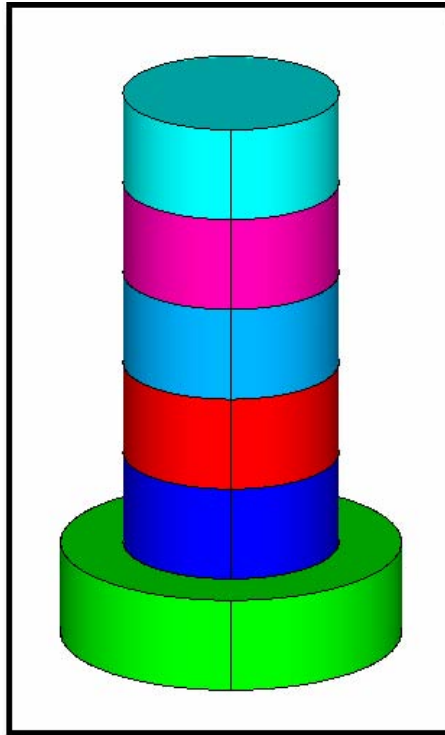


Σχήμα 4-2: Δημιουργία περιοχών-διδιάστατο μοντέλο.

4.4.2) Δημιουργία “όγκων” για το τρισδιάστατο μοντέλο.

Στο σημείο αυτό του προγράμματος, με βάση τις αντίστοιχες μεταβλητές και διακόπτες, τόσο η βάση, όσο και οι σπόνδυλοι δίνονται ως “κύλινδροι” (“cylinders”).

Υπενθυμίζουμε ότι οι διαστάσεις προσαρμόζονται αυτόματα από το πρόγραμμα για να υπάρχει συμφωνία με τα αποτελέσματα του δισδιάστατου μοντέλου.

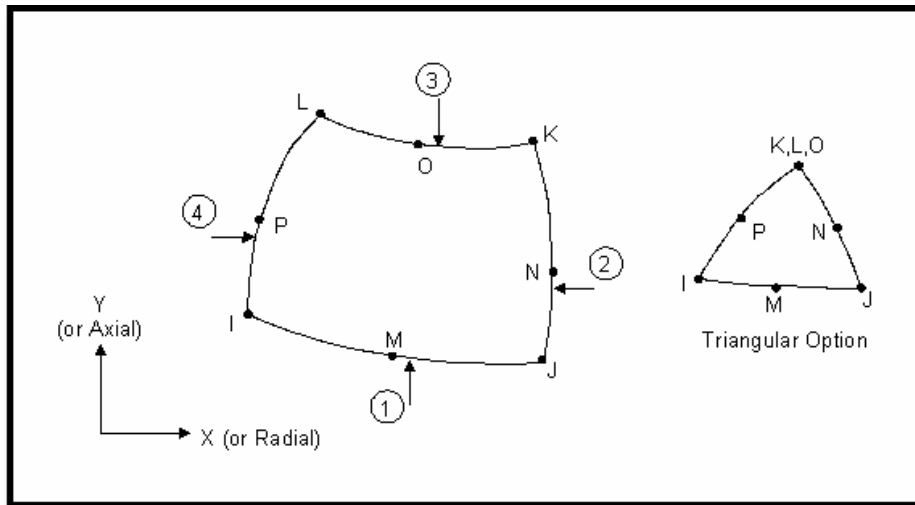


Σχήμα 4-3: Δημιουργία
όγκων-τρειςδιάστατο
μοντέλο.

4.5) Λεπτομέρειες “τύπων στοιχείων” (“element types”).

Οι “τύποι στοιχείων” είναι μια επιλογή από μια πολύ μεγάλη βιβλιοθήκη στοιχείων που διαθέτει το ANSYS. Ο “τύπος στοιχείου” που θα επιλέξουμε για να αντιστοιχηθεί στα δημιουργηθέντα “στοιχεία” (“elements”) δισδιάστατου ή τρισδιάστατου μοντέλου πρέπει να έχει ως ιδιότητες αυτές που είναι απαραίτητες για την όσο το δυνατόν πιο καλή περιγραφή του φυσικού φαινομένου.

4.5.1) “Τύποι στοιχείων” (“element types”) για το 2D μοντέλο.



Σχήμα 4-4: Τύπος στοιχείου PLANE82 {12}.

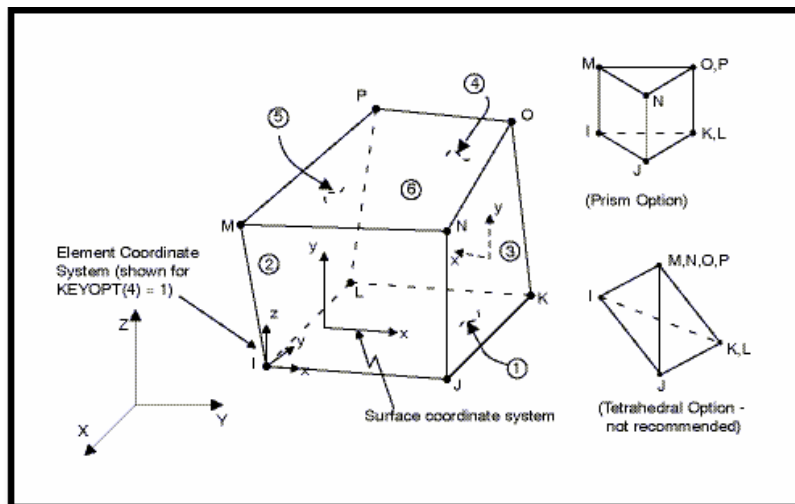
Για τη διακριτοποίηση του δισδιάστατου μοντέλου, τόσο για τη βάση, όσο και για τους σπόνδουλους και τους συνδέσμους διάτμησης, επιλέχθηκε ο “τύπος στοιχείου” **PLANE82**. Ο τύπος αυτός έχει τις εξής ιδιότητες:

- Είναι ένα **οκτάκομβο** στοιχείο **μεγάλης τάξης**.
- Μπορεί να είναι τόσο **τετράπλευρο**, όσο και **τρίπλευρο**.
- Δίνει μεγάλης αξιοπιστίας αποτελέσματα ακόμη και για **ανάμειξη** τετράπλευρων με τρίπλευρα στοιχεία στην ίδια “περιοχή”.
- Δεν χάνει την αξιοπιστία του, ακόμα και για μη συνήθη σχήματα.
- Κάθε κόμβος έχει **δύο βαθμούς ελευθερίας**, κατά **x** και κατά **y**.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επίπεδο στοιχείο ή ως αξονοσυμμετρικό στοιχείο.
- Υποστηρίζει **πλαστικότητα**, **ερυσισμό**, **αλλαγή όγκου**, **αύξηση ακαμψίας λόγω τάσης**, και **φαινόμενα μεγάλων τροπών**.

Οι ρυθμίσεις του τύπου στοιχείου **PLANE82** είναι οι εξής (σημειώνουμε ότι επιλογές του τύπου **KEYOPT(x)=0** είναι οι εξ ορισμού που δίνονται από το πρόγραμμα ANSYS):

- **KEYOPT(3)=3** → Επίπεδη ένταση με χειροκίνητη εισαγωγή πάχους στοιχείου.
- **KEYOPT(5)=2** → Επίλυση έντασης στους κόμβους.
- **KEYOPT(6)=2** → Επίλυση επίπεδης έντασης αλλά και στα άκρα του στοιχείου.
- **KEYOPT(9)=0** → Χωρίς εισαγωγή αρχικής έντασης.

4.5.2) “Τύποι στοιχείων” (“element types”) για το 3D μοντέλο.



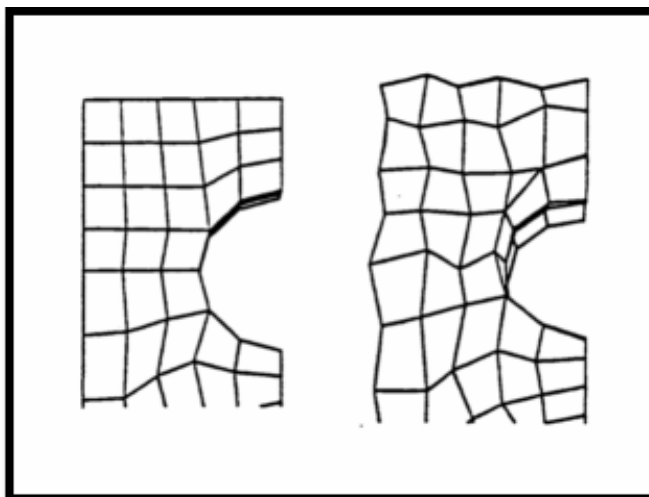
Σχήμα 4-5: Τύπος στοιχείου SOLID45 {12}.

Για τη διακριτοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου, τόσο για τη βάση, όσο και για τους σπόνδουλους και τους συνδέσμους διάτμησης, επιλέχθηκε ο “τύπος στοιχείου” **SOLID45**. Ο τύπος αυτός έχει τις εξής ιδιότητες:

- Είναι ένα οκτάκομβο στοιχείο χαμηλότερης τάξης.
- Μπορεί να είναι τόσο εξάπλευρο, όσο και πρίσμα ή τετράεδρο.
- Κάθε κόμβος έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας, μετακινήσεις κατά **x**, **y**, και **z**.
- Υποστηρίζει πλαστικότητα, ερπυσμό, αλλαγή όγκου, αύξηση ακαμψίας λόγω τάσης, και φαινόμενα μεγάλων τροπών.

Οι ρυθμίσεις του τύπου στοιχείου **SOLID45** είναι οι εξής (σημειώνουμε ότι επιλογές του τύπου **KEYOPT(x)=0** είναι οι εξ ορισμού που δίνονται από το πρόγραμμα ANSYS):

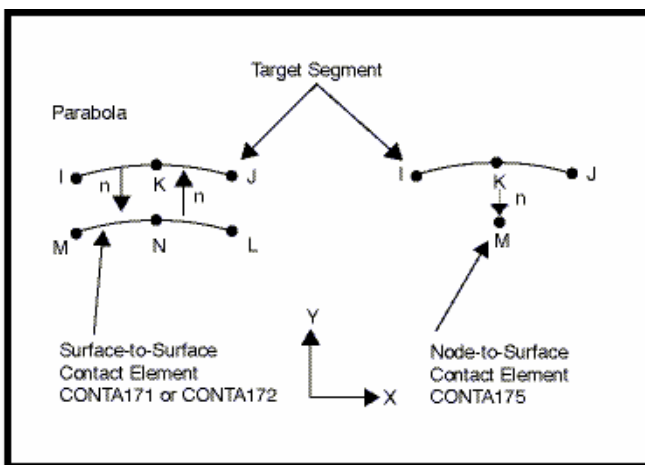
- **KEYOPT(1)=0** → Συμπεριλαμβάνονται επιπλέον στοιχεία μετακινήσεων, όμως η επόμενη ρύθμιση ακυρώνει την παρούσα και απομακρύνει τα επιπλέον στοιχεία μετακινήσεων, τα οποία δεν χρειάζονται πλέον.
- **KEYOPT(2)=1** → Ενεργοποίηση ελέγχου για την αποφυγή του φαινομένου “**hourglass**”. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ευαισθησία του αλγόριθμου μειωμένης ολοκλήρωσης σε ιδιομορφές μηδενικής ενέργειας με χαρακτηριστικά την ταλάντωση των κόμβων με μορφή ζιγκ-ζαγκ. Το φαινόμενο “**hourglass**” μπορεί να εμφανιστεί με τη χρησιμοποίηση του αλγόριθμου μειωμένης ολοκλήρωσης και οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα. Για το λόγο αυτό γίνεται εσωτερικός έλεγχος από το πρόγραμμα για την αποφυγή του. Σημειώνουμε ότι δεν χρησιμοποιούμε τον αλγόριθμο πλήρους ολοκλήρωσης για το λόγο ότι είναι ιδιαίτερα απαιτητικός σε υπολογιστική ισχύ.
- **KEYOPT(4)=0** → Το σύστημα συντεταγμένων στοιχείου είναι παράλληλο στο Κύριο Σύστημα Συντεταγμένων.
- **KEYOPT(5)=1** → Βασική επίλυση με επανάληψη επίλυσης σε όλα τα σημεία ολοκλήρωσης.
- **KEYOPT(6)=1** → Επιφανειακή επίλυση με επιπλέον επίλυση και για την πλευρά I-J-N-M.
- **KEYOPT(9)=0** → Χωρίς εισαγωγή αρχικής έντασης.



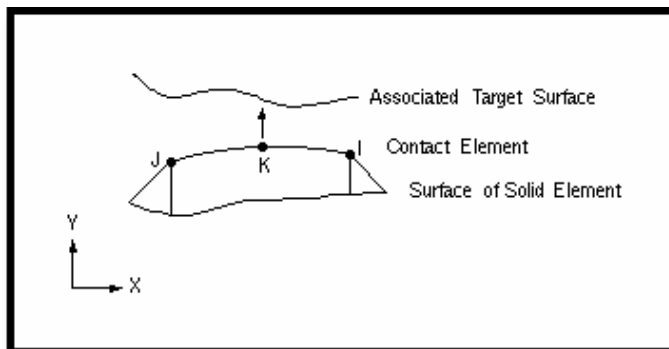
Σχήμα 4-6: Το φαινόμενο hourglass (δεξιά) και ενεργοποίηση ελέγχου (αριστερά) {12}.

Σημειώνουμε ότι θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε το μεγαλύτερης αξιοπιστίας τύπο στοιχείου *SOLID95*. Όμως λόγω υπολογιστικού κόστους και είδους διακριτοποίησης, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι και το *SOLID45* έδινε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, μας οδήγησε στην επιλογή του τελευταίου τύπου.

4.5.3) “Τύποι στοιχείων” επαφής (“element types”) για το 2D μοντέλο.



Σχήμα 4-7: Τύπος στοιχείου TARGET169 {12}.



Σχήμα 4-8: Τύπος στοιχείου CONTA172 {12}.



Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίλυση προβλημάτων επαφής μέσω του ANSYS είναι η δημιουργία ζεύγους στοιχείων επαφής μεταξύ των αντίστοιχων επιφανειών. Από τη λίστα των αντίστοιχων στοιχείων, έγινε επιλογή του ζεύγους τύπων στοιχείου **TARGE169** και **CONTA172**. Οι αντίστοιχες ιδιότητές τους είναι:

TARGE169:

- Είναι τρίκομβο στοιχείο επαφής (στόχου). Προσφέρει, δηλαδή, καλύτερη αξιοπιστία απ' ότι τα δίκομβο στοιχεία επαφής (στόχου).
- Συνδυάζεται με το στοιχείο **CONTA172** (και άλλα) για τον ορισμό ζεύγους επαφής-στόχου.

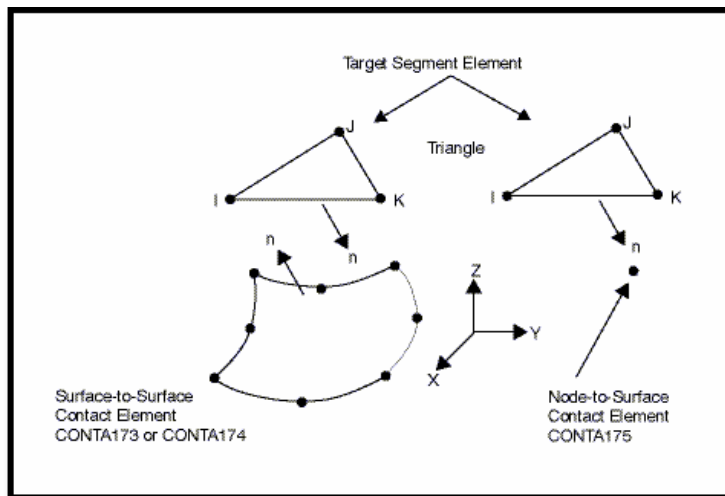
CONTA172:

- Είναι τρίκομβο στοιχείο επαφής. Προσφέρει, δηλαδή, καλύτερη αξιοπιστία απ' ότι τα δίκομβο στοιχεία επαφής (CONTA171).
- Συνδυάζεται με το στοιχείο **TARGE169** (και άλλα) για τον ορισμό ζεύγους επαφής-στόχου.

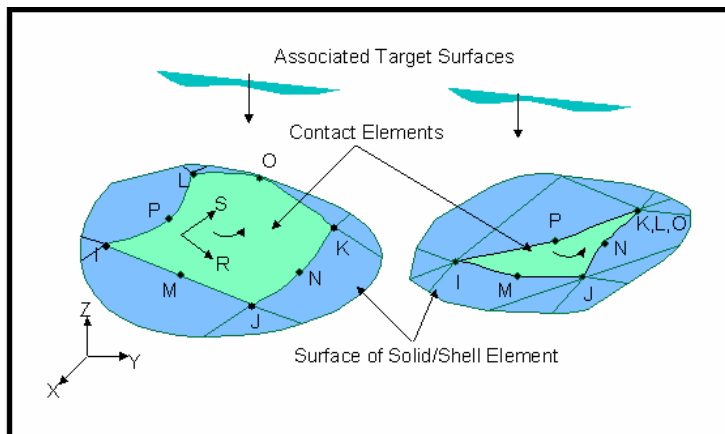
Το στοιχείο **CONTA172** είναι αυτό που περιέχει τις ρυθμίσεις που επηρεάζουν το φαινόμενο της επαφής, αλλά και την αντίστοιχη συμπεριφορά του **TARGE169**. Οι ρυθμίσεις αυτές είναι οι εξ ορισμού και επεξηγούνται παρακάτω:

- **KEYOPT(1)=0** → Κάθε κόμβος έχει δύο μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας.
- **KEYOPT(2)=0** → Το ANSYS χρησιμοποιεί τη μέθοδο “Penalty function + Lagrange multiplier” για την επίλυση του φαινομένου της επαφής.
- **KEYOPT(3)=0** → Γίνεται χρήση στοιχείων h (όχι, δηλαδή, υπερστοιχείων μέσω substructuring).
- **KEYOPT(4)=0** → Χρησιμοποιείται σημείο Gauss για την διερεύνηση της επαφής.
- **KEYOPT(5)=0** → Χωρίς αυτόματο κλείσιμο των κενών (οι επιφάνειες είναι ήδη σε επαφή).
- **KEYOPT(7)=0** → Χωρίς αυτόματο έλεγχο της αύξησης του επιπέδου χρόνου του στοιχείου (έχουμε ήδη πυκνή χρονική διακριτοποίηση).
- **KEYOPT(8)=0** → Δε χρειάζεται αφού έχουμε ασυμμετρική επαφή.
- **KEYOPT(9)=0** → Επιρροή αρχικής διείσδυσης ή κενού (δε χρειάζεται, έχουμε πλήρη επαφή εξαρχής).
- **KEYOPT(10)=0** → Χωρίς αλλαγή της δυσκαμψίας επαφής σε κάθε βήμα, υποβήμα ή επανάληψη (επειδή έχουμε θέσει χειροκίνητα τις αντίστοιχες επιλογές).
- **KEYOPT(11)=0** → Χωρίς δευτερεύοντα φαινόμενα πάχους στοιχείων (αλλιώς θα έχουμε αστάθεια στα αποτελέσματα και θα απομακρυνόμαστε από το δισδιάστατο φαινόμενο).
- **KEYOPT(12)=0** → Κανονική συμπεριφορά επαφής (πχ. Άλλες επιλογές δίνουν πλήρη ένωση των επιφανειών επαφής ή μόνο τριβή, ή χωρίς τριβή κλπ).

4.5.4) “Τύποι στοιχείων” επαφής (“element types”) για το 3D μοντέλο.



Σχήμα 4-9: Τύπος στοιχείου **TARGE170** {12}.



Σχήμα 4-10: Τύπος στοιχείου **CONTA174** {12}.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίλυση προβλημάτων επαφής μέσω του ANSYS είναι η δημιουργία ζεύγους στοιχείων επαφής μεταξύ των αντίστοιχων όγκων. Από τη λίστα των αντίστοιχων στοιχείων, έγινε επιλογή του ζεύγους τύπων στοιχείου **TARGE170** και **CONTA174**. Οι αντίστοιχες ιδιότητές τους είναι:

TARGE170:

- Είναι τρίκομβο επιφανειακό στοιχείο επαφής (στόχου). Είναι το μοναδικό στοιχείο για αλληλεπίδραση με επιφανειακά στοιχεία επαφής.
- Συνδυάζεται με το στοιχείο **CONTA174** (και άλλα) για τον ορισμό επιφανειακού ζεύγους επαφής-στόχου.

CONTA174:

- Είναι οκτάκομβο τρισδιάστατο στοιχείο επαφής. Προσφέρει, δηλαδή, καλύτερη αξιοπιστία απ' ότι τα τετράκομβα τρισδιάστατα στοιχεία επαφής (CONTA173).
- Συνδυάζεται με το στοιχείο **TARGE170** για τον ορισμό επιφανειακού ζεύγους επαφής-στόχου.



Το στοιχείο **CONTA174** είναι αυτό που περιέχει τις ρυθμίσεις που επηρεάζουν το φαινόμενο της επαφής, αλλά και την αντίστοιχη συμπεριφορά του **TARGE170**. Οι ρυθμίσεις αυτές είναι οι εξ ορισμού και επεξηγούνται παρακάτω:

- **KEYOPT(1)=0** → Κάθε κόμβος έχει τρεις μεταφορικούς βαθμούς ελευθερίας.
- **KEYOPT(2)=0** → Το ANSYS χρησιμοποιεί τη μέθοδο “Penalty function + Lagrange multiplier” για την επίλυση του φαινομένου της επαφής.
- **KEYOPT(4)=0** → Χρησιμοποιείται σημείο Gauss για την διερεύνηση της επαφής.
- **KEYOPT(5)=0** → Χωρίς αυτόματο κλείσιμο των κενών (οι επιφάνειες είναι ήδη σε επαφή).
- **KEYOPT(7)=0** → Χωρίς αυτόματο έλεγχο της αύξησης του επιπέδου χρόνου του στοιχείου (έχουμε ήδη πυκνή χρονική διακριτοποίηση).
- **KEYOPT(8)=0** → Δε χρειάζεται αφού έχουμε ασυμμετρική επαφή.
- **KEYOPT(9)=0** → Επιρροή αρχικής διείσδυσης ή κενού (δε χρειάζεται, έχουμε πλήρη επαφή εξαρχής).
- **KEYOPT(10)=0** → Χωρίς αλλαγή της δυσκαμψίας επαφής σε κάθε βήμα, υποβήμα ή επανάληψη (επειδή έχουμε θέσει χειροκίνητα τις αντίστοιχες επιλογές).
- **KEYOPT(11)=0** → Χωρίς δευτερεύοντα φαινόμενα πάχους στοιχείων (αλλιώς θα έχουμε αστάθεια στα αποτελέσματα).
- **KEYOPT(12)=0** → Κανονική συμπεριφορά επαφής (πχ. Άλλες επιλογές δίνουν πλήρη ένωση των επιφανειών επαφής ή μόνο τριβή, ή χωρίς τριβή κλπ).

4.5.5) Ειδική περίπτωση πλήρους (“bonded”) επαφής.

Αν έχουμε επιλέξει το διακόπτη **SW3=3**, τότε έχουμε στην ουσία ενεργοποιήσει μια ειδική περίπτωση του προβλήματος για τη διενέργεια συγκρίσεων με τα μοντέλα των Μακρή-Ρούσσου.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρείται άρθρωση στη κάτω δεξιά γωνία του χαμηλότερου σπονδύλου (για να ακυρώσουμε τυχόν ολισθήσεις ή φαινόμενα τριβών). Επιπρόσθετα, οι σπόνδυλοι γίνονται ένα μεμονωμένο μπλοκ με τη θεώρηση πλήρους επαφής μεταξύ τους. Αυτό γίνεται με την ενεργοποίηση του διακόπτη **KEYOPT(12)=3** που αναλύθηκε ακριβώς ανωτέρω.

4.6) Ιδιότητες υλικών.

4.6.1) Υλικό εδάφους (βάσης).

Επελέχθηκε η χρησιμοποίηση γραμμικού νόμου τάσεων-παραμορφώσεων, δεδομένου ότι ακόμα και σε συνθήκες αυξημένων τάσεων, η βάση (αλλά και οι σπόνδυλοι) παραμένει πρακτικά απαραμόρφωτη.

Για το λόγο αυτό, είναι ανάγκη να δώσουμε μόνο το μέτρο ελαστικότητας του εδάφους ίσο με **E=30 GPa**. Η τιμή αυτή είναι μια γενική προσέγγιση κάποιου υλικού όπως το μάρμαρο. Ο δε λόγος Poisson λήφθηκε ίσος με **ν=0,3**.

Η πυκνότητα του εδάφους λήφθηκε ίσο με **ρ=2500 kg/m³**. Αν και δεν είναι απαραίτητο για τη διαδικασία επίλυσης, ο συντελεστής τριβής του υλικού λήφθηκε ίσος με **T=0,31**.

Το πρόγραμμα επιτρέπει, μέσω της ενεργοποίησης του διακόπτη **PDsoil=1**, να δώσουμε διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων. Στην περίπτωση αυτή, θα χρειαστεί επιπλέον να δώσουμε την τάση διαρροής του υλικού της βάσης, όπως και την κλίση της πλαστικής περιοχής.

Σημειώνεται ότι η εισαγωγή απόσβεσης υλικού δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του φαινομένου

λικνισμού με ολίσθηση, και για το λόγο αυτό δεν εισήχθη απευθείας στο υλικό, παρά μόνο έμμεσα, όπως περιγράφεται σε μεταγενέστερο τμήμα της διπλωματικής.

4.6.2) Υλικό σπονδύλων.

Επελέχθηκε η χρησιμοποίηση γραμμικού νόμου τάσεων–παραμορφώσεων, δεδομένου ότι ακόμα και σε συνθήκες αυξημένων τάσεων, οι σπόνδυλοι παραμένουν πρακτικά απαραμόρφωτοι.

Για το λόγο αυτό, είναι ανάγκη να δώσουμε μόνο το μέτρο ελαστικότητας των σπονδύλων ίσο με **$E=1044 \text{ MPa}$** . Η τιμή αυτή λήφθηκε από παλαιότερη μελέτη του Υπουργείου Πολιτισμού {2} μετά από αντίστοιχα πειράματα στα εργαστήρια του Ε.Μ.Π. Ο δε λόγος Poisson λήφθηκε ίσος με **$\nu=0,3$** .

Η πυκνότητα των σπονδύλων λήφθηκε ίσο με **$\rho=2000 \text{ kg/m}^3$** . Είναι πολύ κοντά στην πυκνότητα του εδάφους, οπότε το πρόβλημα δεν έχει ευαισθησία μεταξύ της διαφοράς πυκνότητας εδάφους–βάσης. Αν και δεν είναι απαραίτητο για τη διαδικασία επίλυσης, ο συντελεστής τριβής του υλικού λήφθηκε ίσος με **$T=0,31$** .

Το πρόγραμμα επιτρέπει, μέσω της ενεργοποίησης του διακόπτη **$PDcoll=1$** , να δώσουμε διγραμμικό διάγραμμα τάσεων–παραμορφώσεων. Στην περίπτωση αυτή, θα χρειαστεί επιπλέον να δώσουμε την τάση διαρροής του υλικού των σπονδύλων, όπως και την κλίση της πλαστικής περιοχής.

Σημειώνεται ότι η εισαγωγή απόσβεσης υλικού δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του φαινομένου λικνισμού με ολίσθηση (τουλάχιστον όπως φάνηκε από δοκιμαστικές φορτίσεις), και για το λόγο αυτό δεν εισήχθη απευθείας στο υλικό, παρά μόνο έμμεσα, όπως περιγράφεται σε μεταγενέστερο τμήμα της διπλωματικής.

4.6.3) Υλικό συνδέσμων διάτμησης (εμπολίων).

Επελέχθηκε η χρησιμοποίηση γραμμικού νόμου τάσεων–παραμορφώσεων. Παρότι το ξύλο είναι ένα ορθοτροπικό υλικό, η επιλογή να έχουμε ένα γραμμικό, ιστροπικό υλικό στη θέση του δεν είναι παράλογο. Αυτό, γιατί στο πρόβλημα μας ενδιαφέρει μόνο η διατμητική τάση στο μέσο του σπόνδου (υπεύθυνη για τη θραύση μέσω των επιβαλλόμενων μετακινήσεων από την διαφορική κίνηση διαδοχικών σπονδύλων), η οποία άλλωστε κυριαρχεί λόγω του είδους της φόρτισης. Επιπρόσθετα, η θραύση επέρχεται απότομα, οπότε τα φαινόμενα πλαστικοποίησης δεν επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό τα αποτελέσματα.

Για τις ακριβείς τιμές των χαρακτηριστικών του ξύλου, έπρεπε να ανατρέξουμε σε εξωτερικές πηγές. Το τεύχος του Υπουργείου Πολιτισμού δεν ήταν διαφωτιστικό στο σημείο αυτό, κυρίως αφού σημασία είχε δοθεί στο υλικό αποκατάστασης, που ήταν ορείχαλκος και όχι ξύλο. Δυστυχώς, όμως, υπήρχαν σοβαρά προβλήματα σύγκλισης του μοντέλου αν στον περιορισμένο χώρο του εμπολίου είχε δοθεί υλικό με μεγάλο μέτρο ελαστικότητας (όπως ο ορείχαλκος), οπότε έπρεπε να παραμείνουμε στο ξύλο. Μεγάλη βοήθεια στο συγκεκριμένο βήμα αποτέλεσε το βιβλίο “Ιδιότητες και αξιοποίηση του ξύλου” {11} από τον καθηγητή του Α.Π.Θ. Γεώργιο Τσουμή.

Με βάση αυτόν τον οδηγό, οι ιδιότητες του ξύλινου εμπολίου ήταν οι εξής: Μέτρο ελαστικότητας **$E=20 \text{ MPa}$** . Ο λόγος Poisson ήταν **$\nu=0,3$** . Η πυκνότητά του ήταν **$\rho=500 \text{ kg/m}^3$** .

Σημειώνουμε ότι για λόγους, εγγενών αδυναμιών του ANSYS, χρησιμοποιήθηκε ένα τέχνασμα, σύμφωνα με το οποίο γινόταν χειροκίνητη εύρεση της χρονικής στιγμής υπέρβασης της διατμητικής αντοχής του ξύλου και επανεπίλυση του μοντέλου με τα καινούρια δεδομένα.

Παρ’ όλ’ αυτά, αν επιθυμούμε, μέσω της ενεργοποίησης του διακόπτη **$PDwood=1$** , μπορούμε

να δώσουμε διγραμμικό διάγραμμα τάσεων–παραμορφώσεων. Στην περίπτωση αυτή, θα χρειαστεί επιπλέον να δώσουμε την τάση διαρροής του υλικού των εμπολίων, όπως και την κλίση της πλαστικής περιοχής.

Σημειώνεται ότι η εισαγωγή απόσβεσης υλικού δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του φαινομένου λικνισμού με ολίσθηση (τουλάχιστον όπως φάνηκε από δοκιμαστικές φορτίσεις), και για το λόγο αυτό δεν εισήχθη απευθείας στο υλικό, παρά μόνο έμμεσα, όπως περιγράφεται σε μεταγενέστερο τμήμα της διπλωματικής.

4.6.4) Υλικό επαφής 1.

Απαιτηση των τύπων στοιχείων **CONTAxxx** και **TARGExxx** είναι η απόδοση σε αυτά κάποιου υλικού με ιδιότητες τριβής. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του φαινομένου επαφής λαμβάνεται από τις ιδιότητες των περιοχών ή όγκων που εμπλέκονται στο φαινόμενο αυτό.

Έτσι, λοιπόν, στην περίπτωση της επαφής σπονδύλων–βάσης και σπονδύλων–σπονδύλων, επιλέχθηκε τιμή τριβής ίση με $T=0,31$ (ανάπτυξη οριζόντιας δύναμης τριβής με μέγιστη τιμή το 31% της κατακόρυφης τάσης, υπέρβαση της οποίας σημαίνει ενεργοποίηση της ολίσθησης). Σε μεταγενέστερο κομμάτι της διπλωματικής, η τιμή αυτή αλλάζει για λόγους παραμετρικής ανάλυσης του φαινομένου της μεταφοράς δυνάμεων μέσω τριβής διαμέσου των σπονδύλων.

Σημειώνεται ότι η εισαγωγή απόσβεσης υλικού δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του φαινομένου λικνισμού με ολίσθηση (τουλάχιστον όπως φάνηκε από δοκιμαστικές φορτίσεις), και για το λόγο αυτό δεν εισήχθη απευθείας στο υλικό, παρά μόνο έμμεσα, όπως περιγράφεται σε μεταγενέστερο τμήμα της διπλωματικής.

4.6.5) Υλικό επαφής 2.

Απαιτηση των τύπων στοιχείων **CONTAxxx** και **TARGExxx** είναι η απόδοση σε αυτά κάποιου υλικού με ιδιότητες τριβής. Τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του φαινομένου επαφής λαμβάνεται από τις ιδιότητες των περιοχών ή όγκων που εμπλέκονται στο φαινόμενο αυτό.

Έτσι, λοιπόν, στην περίπτωση της επαφής εμπολίων–σπονδύλων, επιλέχθηκε τιμή τριβής ίση με $T=0,031$ (ανάπτυξη οριζόντιας δύναμης τριβής με μέγιστη τιμή το 3,1% της κατακόρυφης τάσης, υπέρβαση της οποίας σημαίνει ενεργοποίηση της ολίσθησης).

Η τιμή αυτή της τριβής είναι αρκετά μεγάλη για να μην υπάρχει ανεξέλεγκτη κίνηση του εμπολίου στην οπή, αλλά αρκετά μικρή για να μην δημιουργήσει τάσεις που επηρεάζουν το γενικότερο φαινόμενο.

Σημειώνεται ότι η εισαγωγή απόσβεσης υλικού δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του φαινομένου λικνισμού με ολίσθηση (τουλάχιστον όπως φάνηκε από δοκιμαστικές φορτίσεις), και για το λόγο αυτό δεν εισήχθη απευθείας στο υλικό, παρά μόνο έμμεσα, όπως περιγράφεται σε μεταγενέστερο τμήμα της διπλωματικής.

4.7) Καθορισμός “πραγματικών σταθερών” (“real constants”).

Οι “πραγματικές σταθερές” είναι ιδιότητες που ακολουθούν ένα “τύπο στοιχείου” (“element type”). Κάθε “τύπος στοιχείου” απαιτεί μία σειρά από “πραγματικές σταθερές” για να έχει πλήρη περιγραφή. Κάποιες φορές ο απαιτούμενος αριθμός “πραγματικών σταθερών” είναι μηδενικός, κάποιες φορές είναι σχετικά αυξημένος. Οι πραγματικές σταθερές δίνονται ως ένας πίνακας–γραμμή (“array”) με κάθε στοιχείο να δίνει την τιμή της πρώτης, δεύτερης, κ.ό.κ. ιδιότητας.



4.7.1) Πραγματικές σταθερές για τα στοιχεία που ανήκουν στη βάση.

Μοντέλο 2D.

Απαιτείται μόνο μια πραγματική σταθερά, η τιμή της οποίας είναι το βάθος του στοιχείου που θα προσομοιώνει τη βάση στο δισδιάστατο μοντέλο:

- REAL(1)=depth1 → Στη διακριτοποίηση, τα δημιουργηθέντα επιφανειακά στοιχεία θα έχουν βάθος ίσο με το δοθέν βάθος *depth1*.

Μοντέλο 3D.

Απαιτείται μόνο μια πραγματική σταθερά, η τιμή της οποίας είναι ο παράγοντας ελέγχου του φαινομένου “hourglass”:

- REAL(1)=1 → Επειδή δεν βρέθηκε στη βιβλιογραφία κάτι αξιόλογο στο θέμα αυτό, επιλέχθηκε η εξ ορισμού τιμή που δίνει το πρόγραμμα ANSYS, το οποίο προτείνει η τιμή αυτή να μην αλλάζει χειροκίνητα.

4.7.2) Πραγματικές σταθερές για τα στοιχεία που ανήκουν στους σπόνδλους.

Μοντέλο 2D.

Απαιτείται μόνο μια πραγματική σταθερά, η τιμή της οποίας είναι το βάθος του στοιχείου που θα προσομοιώνει το σπόνδυλο στο δισδιάστατο μοντέλο:

- REAL(1)=depth1 → Στη διακριτοποίηση, τα δημιουργηθέντα επιφανειακά στοιχεία θα έχουν βάθος ίσο με το δοθέν βάθος *depth1*.

Μοντέλο 3D.

Απαιτείται μόνο μια πραγματική σταθερά, η τιμή της οποίας είναι ο παράγοντας ελέγχου του φαινομένου “hourglass”:

- REAL(1)=1 → Επειδή δεν βρέθηκε στη βιβλιογραφία κάτι αξιόλογο στο θέμα αυτό, επιλέχθηκε η εξ ορισμού τιμή που δίνει το πρόγραμμα ANSYS το οποίο προτείνει η τιμή αυτή να μην αλλάζει χειροκίνητα.

4.7.3) Πραγματικές σταθερές για τα στοιχεία που ανήκουν στα εμπόλια.

Τα εμπόλια χρησιμοποιούνται μόνο στο 2D μοντέλο.

Μοντέλο 2D.

Απαιτείται μόνο μια πραγματική σταθερά, η τιμή της οποίας είναι το βάθος του στοιχείου που θα προσομοιώνει τα εμπόλια στο δισδιάστατο μοντέλο:

- REAL(1)=depth3 → Στη διακριτοποίηση, τα δημιουργηθέντα επιφανειακά στοιχεία θα έχουν βάθος ίσο με το δοθέν βάθος *depth3*.

4.7.4) Πραγματικές σταθερές για τα στοιχεία που δημιουργούνται για την επαφή μεταξύ σπονδύλων, κάτω σπόνδυλου–βάσης και σπονδύλων–εμπολίων.

Στη σημείο αυτό δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ δισδιάστατου και τρισδιάστατου μοντέλου (εκτός, φυσικά, από το γεγονός ότι στο τρισδιάστατο δεν έχουμε εμπόλια):

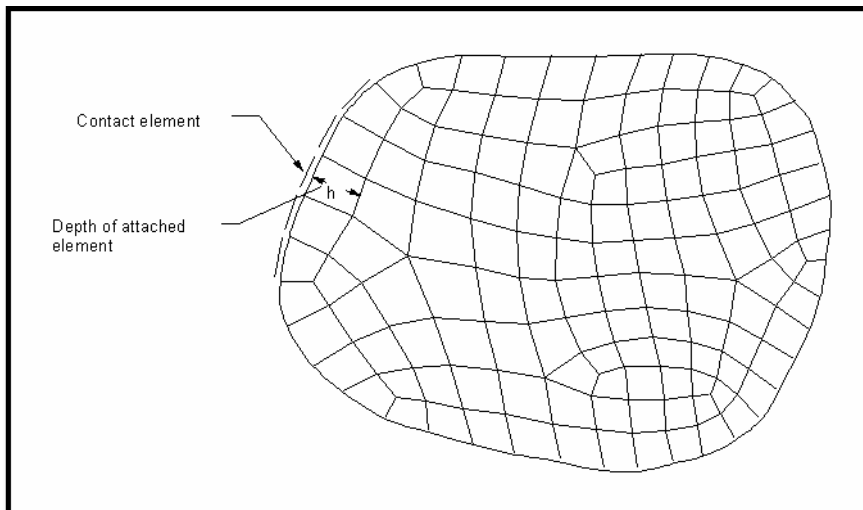
Μοντέλα 2D και 3D.

Απαιτείται ένας μεγάλος σχετικά αριθμός σταθερών που ουσιαστικά κυβερνούν το πρόβλημα της επαφής. Μετά από εκτεταμένο κύκλο διερευνητικών επιλύσεων, αποφασίστηκε η επιβολή των εξ ορισμού τιμών των σταθερών (αυτόματη διερεύνηση από το πρόγραμμα) εκτός από μερικές εξαιρέσεις.

Η επιβολή εξ ορισμού τιμών γίνεται με την εισαγωγή μηδενικών τιμών στις αντίστοιχες σταθερές. Όπου υπάρχει επισήμανση με αστερίσκο (*) τότε η τιμή της σταθεράς αν είναι αρνητική είναι κατ' απόλυτη τιμή, αν όμως η τιμή είναι θετική, τότε η τιμή είναι ένας πολλαπλασιαστής ποσοστού εξ ορισμού τιμής.

Έτσι, λοιπόν, έχουμε:

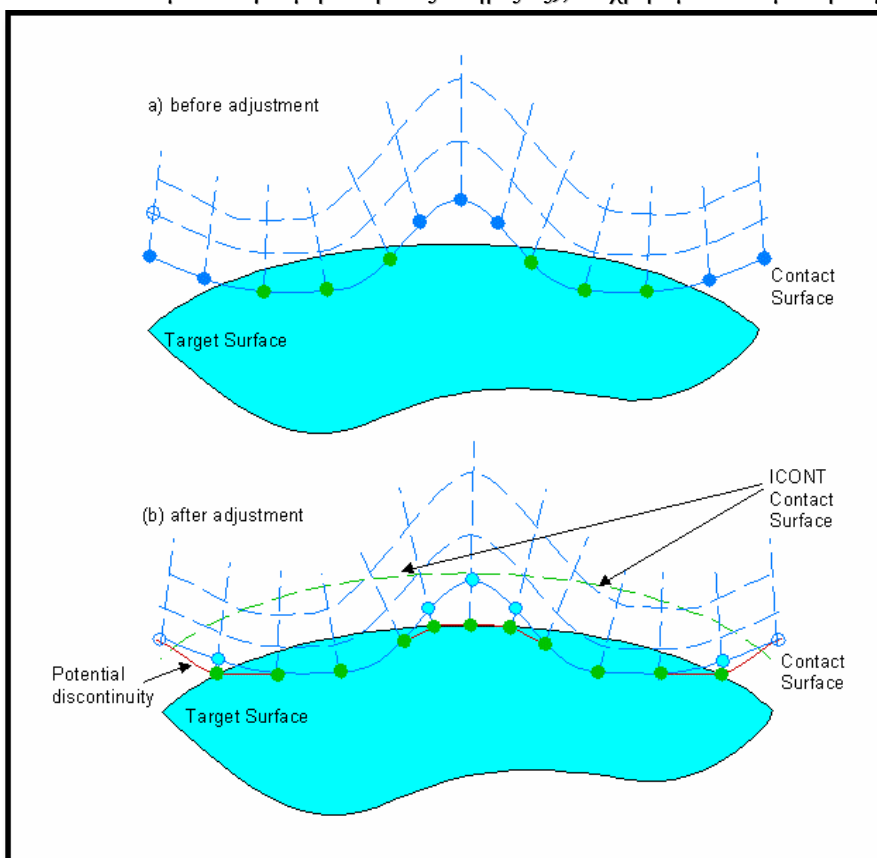
- **[R1] REAL(1)=0 Target Circle Radius.**
 Χωρίς επαρκή τεκμηρίωση. Επιβολή εξ ορισμού τιμής. Προτείνεται από το ANSYS η τιμή αυτή να μην αλλάζει χειροκίνητα.
- **[R2] REAL(2)=0 Superelement Thickness.**
 Χωρίς επαρκή τεκμηρίωση. Επιβολή εξ ορισμού τιμής. Προτείνεται από το ANSYS η τιμή αυτή να μην αλλάζει χειροκίνητα.
- ***[FKN] REAL(3)=-100e6 Normal Penalty Thickness.**
 Είναι η δυσκαμψία επαφής. Το πρόγραμμα ANSYS είναι πάρα πολύ ευαίσθητο σχετικά με την τιμή αυτή. Πολύ μεγάλες τιμές ή πολύ μικρές τιμές δημιουργούν προβλήματα ευστάθειας και η επίλυση σταματά. Η εξ ορισμού τιμή είναι πολύ μεγάλη τιμή από αυτή που δώσαμε χειροκίνητα και προκαλεί προβλήματα. Μία σειρά από δοκιμαστικές επιλύσεις οδήγησε στην ανωτέρω χειροκίνητη τιμή (**100 MPa**), η οποία, επειδή είναι απόλυτη, δόθηκε με αρνητική τιμή.
- ***[FTOLN] REAL(4)=0.05 Penetration Tolerance.**
 Είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη διεύσδυση. Χρησιμοποιείται με την αυξανόμενη μέθοδο Lagrange (η μέθοδος που χρησιμοποιούμε για το παρόν πρόβλημα επαφής). Αν υπάρξει εντοπισμός μεγαλύτερης διεύσδυσης, το επίλυση θεωρείται ως μη συγκλίνουσα, ακόμα και αν τα υπόλοιπα κριτήρια σύγκλισης (μετακινήσεις και δυνάμεις) ικανοποιούνται. Υπάρχει σχετική ευαισθησία στην συγκεκριμένη τιμή, η χειροκίνητη, όμως λύση είναι κοντά στην εξ ορισμού και δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η τιμή είναι θετική, οπότε αντιπροσωπεύει ένα ποσοστό. Πιο συγκεκριμένα, δεχόμαστε μέγιστη διεύσδυση ίση με το **5%** του βάθους του αντίστοιχου στοιχείου σε όλες τις περιπτώσεις επαφής εκτός της επαφής σπονδύλων–εμπολίων, όπου η αντίστοιχη τιμή λόγω του περιορισμένου χώρου έχει ανέρθει στο **100%** (χωρίς όμως να παρατηρούνται αρνητικές επιπτώσεις λόγω της μεγάλης αυτής τιμής).



Σχήμα 4-11: FTOLN, μέγιστη επιτρεπόμενη διείσδυση {12}.

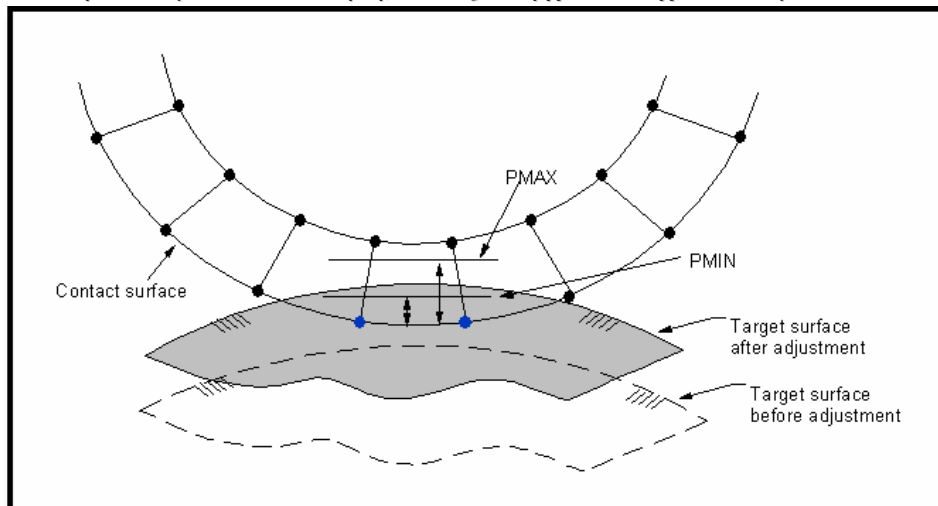
- `*[ICONT] REAL(5)=0`

Η τιμή αυτή δημιουργεί μια νοητή περιοχή (είτε με απόλυτο, είτε με σχετικό τρόπο) γύρω από την επιφάνεια-στόχο. Οι κόμβοι της επιφάνειας επαφής που βρίσκονται μέσα στην περιοχή αυτή “μετακινούνται” ώστε να έρθουν σε επαφή με την επιφάνεια-στόχο. Αυτό γίνεται για να αποφευχθούν προβλήματα υπερβολικής διείσδυσης ή μεγάλης απόστασης μεταξύ των επιφανειών επαφής. Το πρόβλημα είναι, φυσικά, ιδιαίτερο σε στατικά προβλήματα. Εμείς, λόγω του δυναμικού χαρακτήρα του φαινομένου (το πρόβλημα επιλύεται ακόμα και για μη επαρκείς στηρίξεις), δε χρησιμοποιούμε την τιμή αυτή.



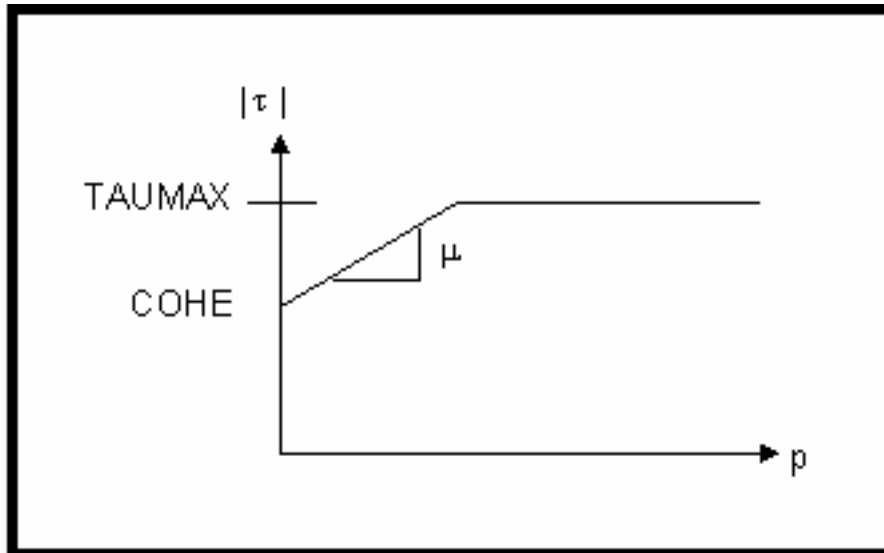
Σχήμα 4-12: ICONT, μετακίνηση επιφάνειας επαφής {12}.

- ***[PINB] REAL(6)=0 Pinball Region.**
 Δημιουργεί μία νοητή περιοχή. Ένα στοιχείο επαφής θεωρείται ότι εισέρχεται σε επαφή κοντινού πεδίου όταν εισέρχεται στην περιοχή αυτή, περιοχή η οποία είναι στο κέντρο του σημείου ολοκλήρωσης του στοιχείου επαφής. Για διδιάστατα προβλήματα, η τιμή αυτή είναι η ακτίνα ενός κύκλου, ενώ για τρισδιάστατα προβλήματα, είναι η ακτίνα μιας σφαίρας. Η επιλογή σωστής τιμής έχει επίπτωση στον υπολογιστικό χρόνο επίλυσης, όμως η εξορισμού τιμή έδινε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα χωρίς την απαίτηση μεγάλης υπολογιστικής ισχύος και για το λόγο αυτό προτιμήθηκε.
- ***[<PMAX] REAL(7)=0 Initial allowed Penetration.**
 Αν η αρχική διείσδυση έχει τιμή μεγαλύτερη από την τιμή της σταθεράς αυτής, τότε η επιφάνεια-στόχος μετακινείται για να περιοριστεί αυτή τη διείσδυση. Είναι απαραίτητο οι συνοριακές συνθήκες να επιτρέπουν μία τέτοια κίνηση, αλλιώς υπάρχει αποτυχία στο θέμα αυτό.
- ***[>PMIN] REAL(8)=0 Initial allowed Penetration.**
 Αν η αρχική διείσδυση έχει τιμή μικρότερη από την τιμή της σταθεράς αυτής (και βρισκόμαστε στην περιοχή pinball), τότε η επιφάνεια-στόχος μετακινείται για να εξασφαλιστούν συνθήκες αρχικής επαφής. Είναι απαραίτητο οι συνοριακές συνθήκες να επιτρέπουν μία τέτοια κίνηση, αλλιώς υπάρχει αποτυχία στο θέμα αυτό.



Σχήμα 4-13: Μετακίνηση μέσω PMIN & PMAX {12}.

- **[TAUMAX] REAL(9)=0 Maximum friction stress.**
 Το μοντέλο τριβής που χρησιμοποιείται είναι το βασικό **μοντέλο τριβής Coulomb**. Αυτό προβλέπει το γεγονός της έναρξης του φαινομένου της ολίσθησης μόλις η διατμητική τάση ξεπεράσει μία συγκεκριμένη τιμή. Μετά από εκείνο το σημείο, η διατμητική τάση παραμένει σταθερή και αρχίζει η ολίσθηση. Η τιμή της διατμητικής τάσης εξαρτάται από το συντελεστή τριβής (στις περισσότερες αναλύσεις μας, έχουμε θέση το συντελεστή τριβής ίσο με $\mu=0,31$), από τη συνοχή, καθώς και από ένα όριο πέρα από το οποίο, θεωρούμε ότι δεν αναπτύσσεται περαιτέρω διατμητική τάση. Το αντίστοιχο διάγραμμα που περιγράφει τα ανωτέρω είναι:



Σχήμα 4-14: Συνοχή COHE και μέγιστη τριβή TAUMAX {12}.

- [CNOF] REAL(10)=0 Contact surface offset.**
 Αν η αντίστοιχη επιλογή έχει ενεργοποιηθεί [*KEYOPT*(5)=1, 2, ή 3], τότε η τιμή που δίνουμε σε αυτή τη σταθερά προσδιορίζει το ποσό της μετακίνησης ολόκληρης της επιφάνειας επαφής προς την επιφάνεια-στόχο. Αρνητική τιμή οδηγεί σε αντίστοιχη απομάκρυνση. Επειδή εμείς έχουμε συνθήκες επαφής εξαρχής, δε χρειάζεται να δώσουμε τιμή στη σταθερά αυτή.
- *[FKOP] REAL(11)=0 Contact opening stiffness.**
 Η σταθερά αυτή απαιτεί ειδικές συνθήκες επαφής (“κολλημένη-bonded” ή “χωρίς αποκόλληση-no seperation”), δηλαδή [*KEYOPT*(12)=2, 3, 4, 5, ή 6]. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή της σταθεράς αυτή δίνει (είτε με απόλυτο, είτε με σχετικό τρόπο) δυσκαμψία όταν η επαφή ανοίγει. Με σχετικό τρόπο είναι το ποσοστό σε σχέση με την δυσκαμψία όταν η επαφή κλείνει, με απόλυτο τρόπο είναι η απευθείας τιμή δυσκαμψίας. Στο μοντέλο μας κάτι τέτοιο συμβαίνει μόνο για την περίπτωση σύγκρισης με τα μοντέλα των *Μακρή-Ρούσσο*, όπου τότε και μόνο τότε θέτουμε *KEYOPT*(12)=3. Όμως, δε χρειαζόμαστε τη συγκεκριμένη σταθερά αφού ακόμα και σε αυτή τη περίπτωση θέλουμε πλήρη επαφή, οπότε δεν την εισάγουμε.
- *[FKT] REAL(12)=0 Tangent penalty stiffness.**
 Είναι ένας συντελεστής (αν δοθεί με σχετικό τρόπο), ή μια πραγματική τιμή (αν δοθεί με απόλυτο τρόπο, δηλαδή με αρνητική τιμή). Υπό κανονικές συνθήκες, η τιμή της τριβής υπολογίζεται όπως έχουμε περιγράψει λίγο παραπάνω, όμως μπορούμε να παρακάμψουμε αυτήν τη διαδικασία, δίνοντας τη συγκεκριμένη σταθερά. Προφανώς, έχουμε επιλέξει τον κανονικό τρόπο και έτσι, αγνοούμε και αυτήν την πραγματική σταθερά.
- [COHE] REAL(13)=0 Contact cohesion.**
 Είναι η αρχική τιμή συνάφειας, δηλαδή η ανάπτυξη διατμητικής αντοχής έναντι ολίσθησης έστω και για μηδενική κατακόρυφη τάση. Αντίστοιχο διάγραμμα έχει ήδη παρουσιαστεί. Εμείς όμως έχουμε ήδη την επίδραση του βάρους και για το λόγο αυτό, δε χρειάζεται να δοθεί κάτι συγκεκριμένο στην τιμή της πραγματικής αυτής σταθεράς.

• **[FACT] REAL(21)=0 Static/dynamic ratio.**

Η τιμή της τριβής δύναται να εξαρτηθεί από τη σχετική ταχύτητα των επιφανειών που ολισθαίνουν μεταξύ τους. Είναι μια σκέψη που πλησιάζει πολύ την πραγματικότητα. Όμως, εμείς θέλουμε να έχουμε αποτελέσματα που θα μπορούσαν να επιβεβαιωθούν με το χέρι και κρίναμε ότι η επιπλέον προσέγγιση της πραγματικότητας δεν είναι τόσο σημαντική (ούτε δίνει ουσιαστικά διαφορετικά αποτελέσματα) ώστε να χρησιμοποιηθεί μία τέτοια επιλογή.

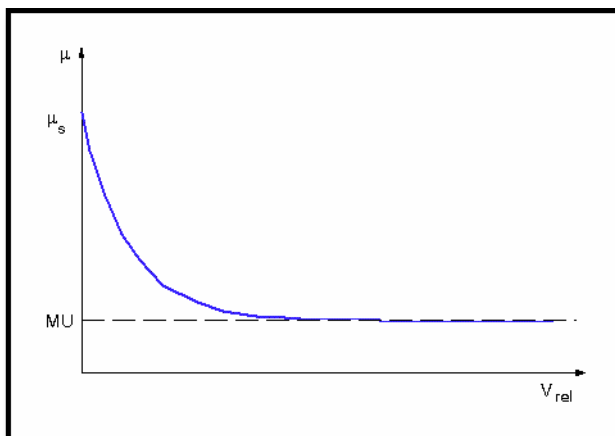
Η συγκεκριμένη σταθερά δίνει πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η στατική τριβή (η οποία πέφτει διαδοχικά, ανάλογα με το συντελεστή DC, καθώς αυξάνεται η σχετική ταχύτητα των ολισθαίνοντων επιφανειών) από τη δυναμική (τελική) τριβή.

Ο τύπος που δίνει την τελική τριβή της τριβής (αρχική τιμή συνήθως έχουμε $\mu = MU = 0,31$) είναι:

$$\mu = MU \times (1 + (FACT - 1) \exp(DC \times V_{rel}))$$

- όπου:
- μ → Ο τελικός συντελεστής τριβής.
 - MU → Ο συντελεστής τριβής που έχουμε δώσει μέσω των υλικών.
 - FACT → Ο συντελεστής στατικής προς δυναμική τριβή.
 - DC → Ο συντελεστής που δίνει την εξασθένηση της τριβής.
 - V_{rel} → Η σχετικός ρυθμός ολίσθησης (υπολογίζεται από το ANSYS).

Στο παρακάτω διάγραμμα έχουμε την απεικόνιση των ανωτέρω:



Διάγραμμα 4-15: FACT, συντελεστής στατικής προς δυναμική τριβή {12}.

• **[DC] REAL(22)=0 Exponential decay coef.**

Αν αποφασίσουμε να δώσουμε μη μοναδιαίο συντελεστή στατικής προς δυναμική τριβή (FACT), πρέπει να δώσουμε τιμή σε αυτή την πραγματική σταθερά. Αν δεν το κάνουμε, μόλις η επαφή μπει σε στάδιο ολίσθησης, θα υπάρξει απότομη μετάβαση από τη στατική τιμή τριβής στη δυναμική τιμή τριβής. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα προβλήματα σύγκλισης.

Μπορούμε να υπολογίσουμε την εν λόγω σταθερά αν ξέρουμε αν ξέρουμε τους στατικούς και δυναμικούς συντελεστές και επιπλέον ένα σημείο ($\mu_1, V_{rel,1}$) στο ανωτέρω διάγραμμα, μέσω του τύπου:

$$DC = -\frac{1}{V_{rel,1}} \times \ln\left(\frac{\mu_1 - MU}{(FACT - 1) \times MU}\right)$$

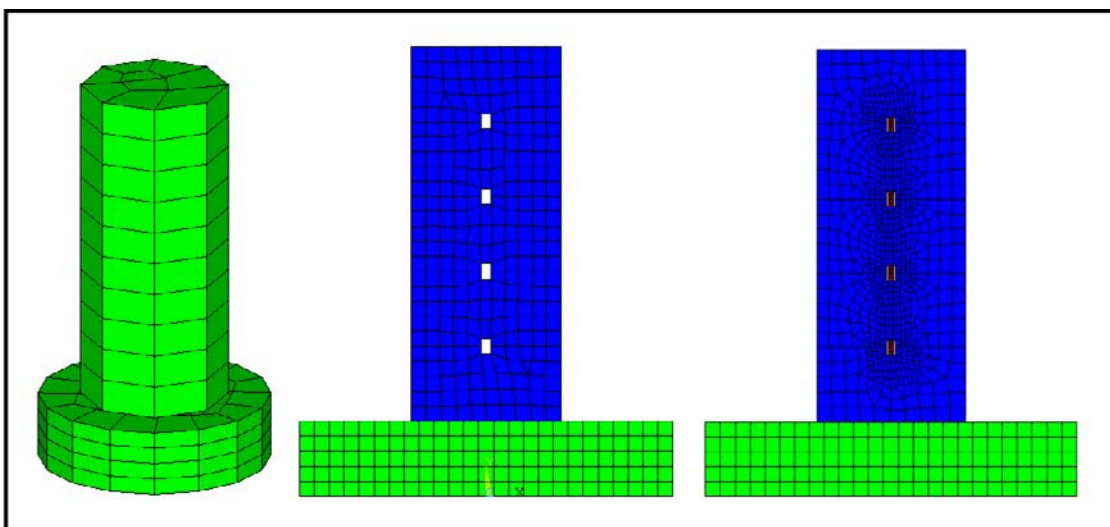
• ***[SLTOL] REAL(23)=0 Allowable elastic slip.**

Αν έχουμε επιλέξει να υπολογίζεται αυτόματα η τιμή FKT σε κάθε βήμα, υπο-βήμα, ή επανάληψη [KEYOPT(10)=1, 2, 3, 4, ή 5] τότε χρειάζεται να δώσουμε την εν λόγω

σταθερά. Δίνεται για να ρυθμιστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη ελαστική ολίσθηση. Η εξ ορισμού τιμή δίνει πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα, οπότε δεν κάναμε κάποια κίνηση αλλαγής της τιμής αυτής.

4.8) Διακριτοποίηση.

Η διακριτοποίηση “ενεργοποιεί” τις αποδόσεις χαρακτηριστικών που έχουμε ήδη δηλώσει σε όλες τις παραγράφους παραπάνω. Αποδίδει, δηλαδή, στα δημιουργηθέντα στοιχεία, τον “τύπο στοιχείου” με τα χαρακτηριστικά του, κάποιο υλικό από αυτά που έχουμε δηλώσει, καθώς και τις πραγματικές σταθερές που αντιστοιχούν στον “τύπο στοιχείου”. Στα κάτωθι σχήματα, παρουσιάζεται η διακριτοποίηση στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου, του δισδιάστατου χωρίς εμπόδια και του δισδιάστατου με εμπόδια.

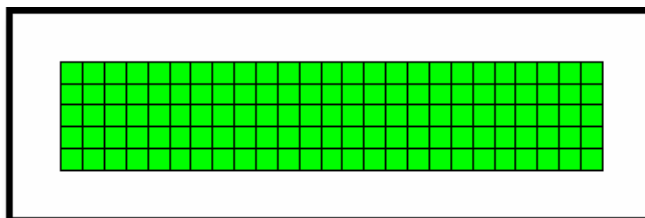


Σχήμα 4-16: Τρισδιάστατο και δισδιάστατα μοντέλα.

4.8.1) Περίπτωση δισδιάστατου μοντέλου.

Έδαφος-βάση.

Επιλέχθηκε διακριτοποίηση της “περιοχής” (“area”) που δηλώνει το έδαφος-βάση με πεπερασμένα στοιχεία πλευράς κατά μέγιστο **10cm**.



Σχήμα 4-17: Διακριτοποίηση εδάφους-βάσης **2D**.

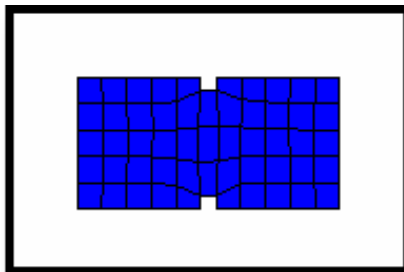
Στα στοιχεία αυτά αποδίδεται ο **τύπος στοιχείου 1**, δηλαδή τύπου **PLANE82**.

Το υλικό το οποίο αντιστοιχεί στα δημιουργηθέντα πεπερασμένα στοιχεία είναι το **υλικό έδαφους 1**. Είναι αυτό με χαρακτηριστικό το γραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων που αναλύσαμε ήδη στην **§4.6.1**.

Αποδίδουμε, τέλος, την “πραγματική σταθερά” 1 στα εν λόγω στοιχεία. Η συγκεκριμένη σταθερά δίνει το βάθος των δημιουργηθέντων στοιχείων.

Σπόνδυλοι.

Επiléχθηκε διακριτοποίηση των “περιοχών” (“areas”) που δηλώνουν τους σπονδύλους με πεπερασμένα στοιχεία πλευράς κατά μέγιστο **10cm**.



Σχήμα 4-18: Διακριτοποίηση σπονδύλων 2D.

Στα στοιχεία αυτά αποδίδεται ο **τύπος στοιχείου 2**, δηλαδή τύπου **PLANE82**.

Το υλικό το οποίο αντιστοιχεί στα δημιουργηθέντα πεπερασμένα στοιχεία είναι το **υλικό εδάφους 2**. Είναι αυτό με χαρακτηριστικό το γραμμικό νόμο τάσεων–παραμορφώσεων που αναλύσαμε ήδη στην §4.6.2.

Αποδίδουμε, τέλος, την “πραγματική σταθερά” 2 στα εν λόγω στοιχεία. Η συγκεκριμένη σταθερά δίνει το βάθος των δημιουργηθέντων στοιχείων.

Εμπόλια.

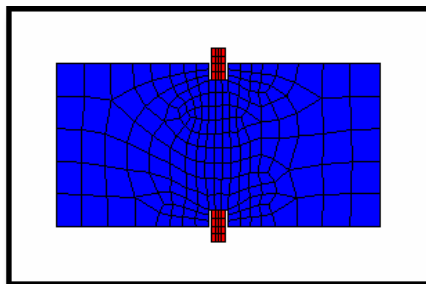
Επiléχθηκε διακριτοποίηση των “περιοχών” (“areas”) που δηλώνουν τα εμπόλια με πεπερασμένα στοιχεία πλευράς κατά μέγιστο **10cm**.

Στα στοιχεία αυτά αποδίδεται ο **τύπος στοιχείου 3**, δηλαδή τύπου **PLANE82**.

Το υλικό το οποίο αντιστοιχεί στα δημιουργηθέντα πεπερασμένα στοιχεία είναι το **υλικό εδάφους 3**. Είναι αυτό με χαρακτηριστικό το γραμμικό νόμο τάσεων–παραμορφώσεων που αναλύσαμε ήδη στην §4.6.3.

Αποδίδουμε, τέλος, την “πραγματική σταθερά” 3 στα εν λόγω στοιχεία. Η συγκεκριμένη σταθερά δίνει το βάθος των δημιουργηθέντων στοιχείων.

*Σημείωση: Η διακριτοποίηση των εμπολίων γίνεται μόνο για την περίπτωση που τα έχουμε εισάγει μέσω του διακόπτη **SW2=1**. Στην περίπτωση αυτή, η αρχική διακριτοποίηση (μέγιστη πλευρά 10cm) όπως είναι φυσικό δεν επαρκεί, δεδομένου της πολύ μικρής επιφάνειας των εμπολίων. Για το λόγο αυτό, και ειδικά για την περίπτωση μόνο των εμπολίων, κάνουμε μια διαδικασία πύκνωσης 4 επιπέδων της διακριτοποίησης των σπονδύλων και των εμπολίων σε μια μικρή περιοχή γύρω από αυτά.*

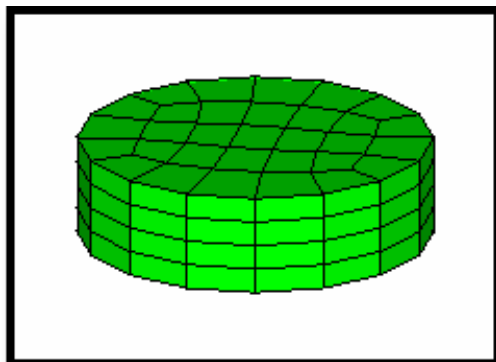


Σχήμα 4-19: Διακριτοποίηση σπονδύλων & εμπολίων 2D.

4.8.2) Περίπτωση τρισδιάστατου μοντέλου.

Έδαφος-βάση.

Επιλέχθηκε διακριτοποίηση του “όγκου” (“volume”) που δηλώνει το έδαφος-βάση με πεπερασμένα στοιχεία **επιπέδου διαστάσεων 4**. Αυτό οδηγεί στην κάτωθι εικόνα διακριτοποιηθέντων στοιχείων:



Σχήμα 4-20: Διακριτοποίηση εδάφους-βάσης 3D.

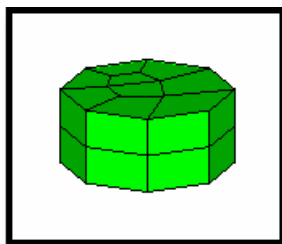
Στα στοιχεία αυτά αποδίδεται ο **τύπος στοιχείου 1**, δηλαδή τύπου **SOLID45**.

Το υλικό το οποίο αντιστοιχεί στα δημιουργηθέντα πεπερασμένα στοιχεία είναι το **υλικό εδάφους 1**. Είναι αυτό με χαρακτηριστικό το γραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων που αναλύσαμε ήδη στην **§4.6.1**.

Αποδίδουμε, τέλος, την “**πραγματική σταθερά**” **1** στα εν λόγω στοιχεία. Η συγκεκριμένη σταθερά δίνει τον παράγοντα ελέγχου του φαινομένου “hourglass”.

Σπόνδυλοι.

Επιλέχθηκε διακριτοποίηση του “όγκου” (“volume”) που δηλώνει το έδαφος-βάση με πεπερασμένα στοιχεία **επιπέδου διαστάσεων 2**. Αυτό οδηγεί στην κάτωθι εικόνα διακριτοποιηθέντων στοιχείων:



Σχήμα 4-21: Διακριτοποίηση σπονδύλων 3D.

Στα στοιχεία αυτά αποδίδεται ο **τύπος στοιχείου 2**, δηλαδή τύπου **SOLID45**.

Το υλικό το οποίο αντιστοιχεί στα δημιουργηθέντα πεπερασμένα στοιχεία είναι το **υλικό εδάφους 2**. Είναι αυτό με χαρακτηριστικό το γραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων που αναλύσαμε ήδη στην **§4.6.2**.

Αποδίδουμε, τέλος, την “**πραγματική σταθερά**” **2** στα εν λόγω στοιχεία. Η συγκεκριμένη σταθερά δίνει τον παράγοντα ελέγχου του φαινομένου “hourglass”.

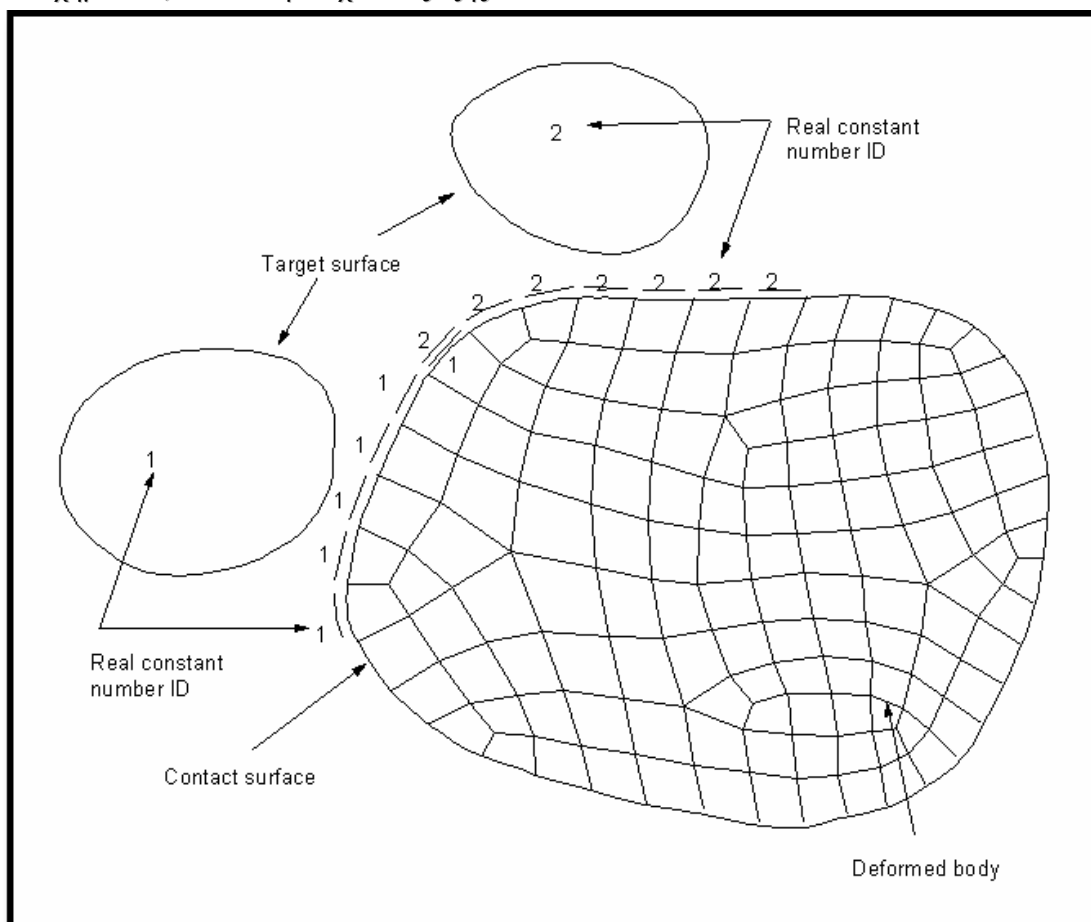
4.8.3) Παρατηρήσεις για τη διακριτοποίηση.

Το πρόγραμμα ANSYS κατά τη διαδικασία δημιουργίας των στοιχείων μέσω της διακριτοποίησης, κάνει κάποιους ελέγχους για το αν τα τελικά στοιχεία παραβιάζουν κάποιους κανόνες, όπως σχήμα, ύπαρξη κυρτών πλευρών, υπερβολικά μεγάλων ή μικρών γωνιών κλπ.

Οι εξ ορισμού τιμές που χρησιμοποιούμε στο αρχείο εισαγωγής είναι επιλεγμένες ώστε να μην παραβιάζεται καμία από τις συνθήκες αυτές. Αν κάποιες μεταβλητές αλλάξουν, μπορεί να προκύψει πιθανώς παραβίαση συνθηκών στο δισδιάστατο μοντέλο με τα εμπόλια (λόγω πύκνωσης της διακριτοποίησης) και στο τρισδιάστατο μοντέλο. Στην περίπτωση αυτή, σχεδόν πάντα το πλήθος των στοιχείων με παραβάσεις είναι πολύ μικρό για να μας ανησυχήσει. Σε αντίθετη περίπτωση, πρέπει να δοθούν διαφορετικές μεταβλητές για τη διακριτοποίηση.

4.9) Δημιουργία στοιχείων επαφής.

Το πρόβλημα της επαφής λύνεται από το ANSYS μέσω της δημιουργίας ζεύγους ομάδων στοιχείων επαφής σε μια γραμμή (πρόβλημα 2D επαφής) ή επιφάνεια (πρόβλημα 3D επαφής) πάνω στην οποία θεωρούμε ότι θα λάβει χώρα η αλληλεπίδραση της επιφάνειας/όγκου επαφής και της επιφάνειας/όγκου στόχου. Για κάθε πιθανό ζεύγος επιφάνειας/όγκου επαφής με επιφάνεια/όγκο στόχου, πρέπει να υπάρχει θεώρηση ίδιου σετ πραγματικών σταθερών. Σχηματικά, τα ανωτέρω έχουν ως εξής:



Σχήμα 4-22: Σχηματική απεικόνιση επαφής {12}.



4.9.1) Περίπτωση επαφής εδάφους–σπονδύλου και σπονδύλων μεταξύ τους.

Η σωστή διαδικασία για τη δημιουργία των στοιχείων επαφής είναι η εξής:

- Στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου **επιλέγονται** οι περιμετρικοί **κόμβοι** ενός σπονδύλου ή του εδάφους. Στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου (για αποφυγή επιπλέον υπολογισμών) **επιλέγονται** οι **κόμβοι** μιας εξωτερικής στρογγυλής επιφάνειας του σπονδύλου ή της βάσης.
- **Ενεργοποιείται** το **στοιχείο TARGE169** στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου, ή του **στοιχείου TARGE170** στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου. **Ενεργοποιείται**, επίσης, και στις δύο περιπτώσεις το **υλικό 4** (τριβή μεταξύ σπονδύλων ή κάτω σπονδύλου–βάσης).
- **Επιλέγεται** ένα **σετ πραγματικών σταθερών, ξεχωριστό** για κάθε επαφή μεταξύ σπονδύλων ή κάτω σπονδύλου–βάσης.
- **Επιλέγονται** οι **αντίστοιχοι κόμβοι** της εκατέρωθεν επιφάνειας.
- **Ενεργοποιείται** το στοιχείο **CONTA172** στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου, ή του στοιχείου **CONTA174** στην περίπτωση του τρισδιάστατου μοντέλου. **Ενεργοποιείται**, επίσης, και στις δύο περιπτώσεις το **υλικό 4** (τριβή μεταξύ σπονδύλων ή κάτω σπονδύλου–βάσης).
- **Επιλέγεται** το **ίδιο** ακριβώς **σετ πραγματικών σταθερών** με το βήμα λίγο πριν, για να μπορέσει το ANSYS να συνδυάσει τις επιφάνειες που θα έρθουν σε επαφή (*σημειώνουμε ότι κάτι τέτοιο είναι απολύτως απαραίτητο, όπως και το γεγονός ότι κάθε διαφορετικό ζεύγος επαφής πρέπει να έχει το δικό του σετ πραγματικών σταθερών*).

4.9.2) Περίπτωση επαφής σπονδύλων–εμπολίων.

Η σωστή διαδικασία για τη δημιουργία των στοιχείων επαφής είναι η εξής:

- Στην περίπτωση του δισδιάστατου μοντέλου **επιλέγονται** οι περιμετρικοί **κόμβοι** ενός εμπολίου.
- **Ενεργοποιείται** το **στοιχείο TARGE169**. **Ενεργοποιείται**, επίσης, το **υλικό 5** (τριβή μεταξύ σπονδύλων–εμπολίων).
- **Επιλέγεται** ένα **σετ πραγματικών σταθερών, ξεχωριστό** για κάθε επαφή μεταξύ σπονδύλων–εμπολίων.
- **Επιλέγονται** οι **αντίστοιχοι** περιμετρικοί **κόμβοι** των δύο επιφανειών (σπονδύλων) που περιβάλλουν τα εμπολία.
- **Ενεργοποιείται** το στοιχείο **CONTA172**. **Ενεργοποιείται**, επίσης, το **υλικό 5** (τριβή μεταξύ σπονδύλων–εμπολίων).
- **Επιλέγεται** το **ίδιο** ακριβώς **σετ πραγματικών σταθερών** με το βήμα λίγο πριν, για να μπορέσει το ANSYS να συνδυάσει τις επιφάνειες που θα έρθουν σε επαφή (*σημειώνουμε ότι κάτι τέτοιο είναι απολύτως απαραίτητο, όπως και το γεγονός ότι κάθε διαφορετικό ζεύγος επαφής πρέπει να έχει το δικό του σετ πραγματικών σταθερών*).

4.10) Επίλυση του προβλήματος.

Έχουμε **δύο διακριτές περιπτώσεις φορτίσεων**. Η πρώτη περίπτωση είναι η περίπτωση εισαγωγής αυξανόμενης ή μειούμενης **οριζόντιας δύναμης** στην κορυφή ή βάση των σπονδύλων. Η δεύτερη περίπτωση έγκειται στην **εισαγωγή επιτάχυνσης** στα μοντέλα μας, είτε αυτή η επιτάχυνση προέρχεται από κάποιο επιταχυνσιογράφημα, είτε είναι πχ. μια μισή ημιτονοειδής φόρτιση.



4.10.1) Γενικά στοιχεία για τον αλγόριθμο επίλυσης.

Για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιείται η “**μεταβατική δυναμική**” (“**dynamic transient**”) μέθοδος του ANSYS με τον **αλγόριθμο Newton–Raphson**, αφού το πρόβλημά μας δεν είναι στατικό.

Δισδιάστατο πρόβλημα με σεισμό.

Στην περίπτωση αυτή, θέτουμε εμείς χειροκίνητα τις ρυθμίσεις για τα όρια που κυβερνούν ποια επίλυση ικανοποιεί τα κριτήρια σύγκλισης. Το θετικό είναι ότι η πυκνή χρονική διακριτοποίηση που έχουμε δεχτεί για την περίπτωση του σεισμού, ακυρώνει τα προβλήματα που μπορούν να προκύψουν από τυχόν μεγάλη ανοχή των ορίων αυτών. Αυτό, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι τιμές που δώσαμε δεν είναι παράλογα μεγάλες, μας επιτρέπει να έχουμε μια ικανοποιητικά γρήγορη επίλυση χωρίς αριθμητικά προβλήματα.

Πιο συγκεκριμένα, επιλέξαμε ο έλεγχος σύγκλισης για τις **δυνάμεις** να γίνεται με τη **μέθοδο SRSS** με ικανοποιητικό όριο αποδεκτής σύγκλισης το **1%**, ενώ για τις **μετακινήσεις** με την ίδια μέθοδο, το αντίστοιχο όριο προσδιορίστηκε στο **0,1%**.

Επίσης, για λόγους διερεύνησης των αιτιών που θα μπορούσαν να προκαλέσουν αδυναμία επίλυσης του προβλήματος, τουλάχιστον στη φάση παραμετρικών επιλύσεων, ενεργοποιήσαμε την επιλογή να μη σταματά η ανάλυση αν δεν επιτευχθεί κάπου η σύγκλιση, παρά μόνο να γίνεται αντίστοιχη ειδοποίηση, ώστε να μπορούμε να κάνουμε τις απαραίτητες διορθώσεις.

Η επιλογή του τύπου του αλγορίθμου Newton–Raphson έχει αφαιρεθεί στο ANSYS.

Υπόλοιπες περιπτώσεις.

Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις (*δισδιάστατο πρόβλημα με αυξανόμενη/μειούμενη δύναμη ή τρισδιάστατο πρόβλημα*), ο έλεγχος για τα όρια σύγκλισης δίνεται χωρίς επέμβαση στο ίδιο το πρόγραμμα ANSYS, αφού κατά τη διάρκεια των δοκιμαστικών επιλύσεων, αποδείχτηκε ιδιαίτερα αποδοτικός και γρήγορος.

Για τους ίδιους λόγους, δε χρειάστηκε να ενεργοποιήσουμε την επιλογή να μη σταματά η ανάλυση αν δεν επιτευχθεί κάπου η σύγκλιση.

Επιλέχθηκε, τέλος, χειροκίνητα ο τύπος του αλγορίθμου Newton–Raphson να είναι **ασυμμετρικός**, που έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Σε όλες τις περιπτώσεις επιλύσεων, λήφθηκαν υπόψη **φαινόμενα μεγάλων μετακινήσεων ή/και τάσεων**, αφού το πρόβλημά μας είναι κατ’εξοχήν κάτι τέτοιο.

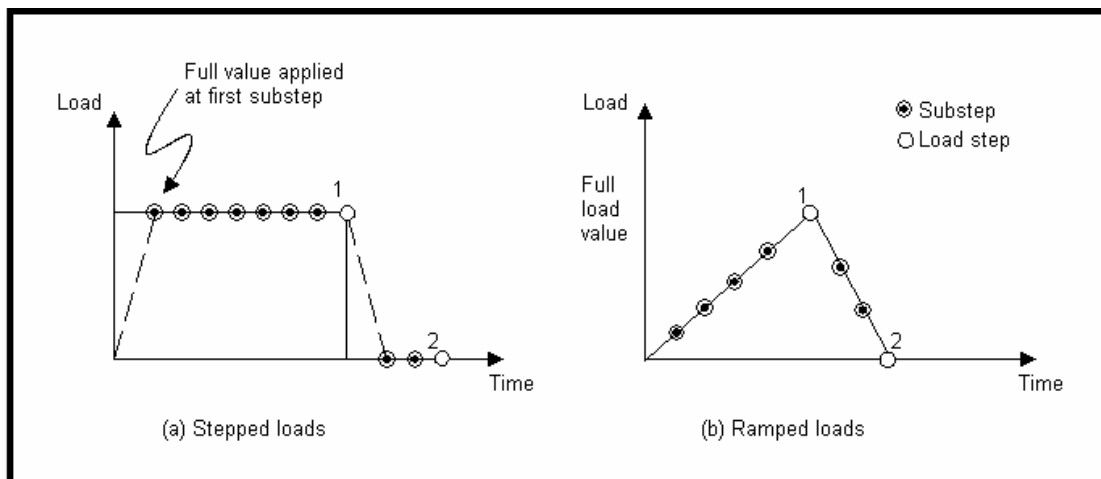
Τέλος, ενεργοποιήθηκε η επιλογή για “**πρόβλεψη**” (“**predictor**”) της επίλυσης του επόμενου βήματος, με βάση τα δεδομένα του προηγούμενου, που γενικά δίνει πιο γρήγορα αποτελέσματα.

4.10.2) Λεπτομέρειες για τον τρόπο επιβολής φορτίων.

Τα φορτία μπορούν να επιβάλλονται με την άμεση τιμή τους μέσα στο βήμα φόρτισης. Αυτός ο τρόπος λέγεται “**άμεσος**” (“**stepped**”).

Ο δεύτερος τρόπος επιβολής φορτίων μέσα στο χρονικό βήμα είναι ο “**σταδιακός**” τρόπος (“**ramped**”), όπου η τελική τιμή των φορτίων στο χρονικό βήμα γίνεται σταδιακά. Είναι ο προτιμότερος τρόπος εισαγωγής φορτίων στη δυναμική ανάλυση, γιατί δε “ταλαιπωρείται” ο αλγόριθμος επίλυσης με ξαφνικές αλλαγές φορτίων. Καλό, φυσικά, είναι να δίνονται πολλά βήματα φόρτισης με μικρό σχετικά χρόνο διάρκειας του καθενός.

Παρακάτω μπορούμε να δούμε σχηματικά τους δύο τρόπους φόρτισης:



Σχήμα 4-23: Άμεσος και σταδιακός τρόπος επιβολής φορτίων {12}.

4.10.3) 1^η ομάδα επίλυσης: Συνοριακές συνθήκες και αρχικά φορτία.

Επιβάλλουμε **μηδενικές μετακινήσεις** σε όλους τους κόμβους της βάσης, είτε στο δισδιάστατο μοντέλο, είτε στο τρισδιάστατο. Αν έχουμε επιλέξει ($SW5=1$) να επιβληθεί η πάκτωση στη διεπιφάνεια βάσης-σπόνδυλου, τότε η αντίστοιχη επιβολή μηδενικών μετακινήσεων γίνεται και στη διεπιφάνεια αυτή.

Στην ειδική περίπτωση που γίνεται η σύγκριση με τα μοντέλα των Μακρή-Ρούσο ($SW3 \neq 0$), τότε επιβάλλεται μια άρθρωση στον κάτω αριστερά κόμβο του κάτω σπόνδυλου, ώστε να αγνοηθούν οι επιδράσεις της τριβής και της ολίσθησης.

Επίσης, στους κόμβους κορυφής του μοντέλου επιβάλλεται το **φορτίο του επιστυλίου** ως κατακόρυφη φόρτιση (όχι, δηλαδή, κάθετα στην επιφάνεια, γιατί με τις υπόλοιπες φορτίσεις θα υπάρχει στροφή της).

Τέλος, επιβάλλεται η επιτάχυνση της βαρύτητας ($g=9,81 \text{ m/sec}^2$) σε ολόκληρο το μοντέλο.

Ο χρόνος επιβολής των ανωτέρω καταναγκασμών και φορτίων είναι πολύ μικρός (10^{-5} sec), αφού όντως ή άλλως οδηγούμε το ANSYS στο συγκεκριμένο βήμα να λύσει το πρόβλημα στατικά (παρά την αρχική μας δήλωση σε αυτό περί δυναμικής επίλυσης).

Στο δυναμικό πρόβλημα επιβάλλεται **απόσβεση τύπου Rayleigh** σε όλη την κατασκευή για να μην υπάρχει ες αεί ταλάντωσή του μετά την απομάκρυνση των δυνάμεων. Επιλέχθηκαν κατάλληλες τιμές για να έχουμε γενικά απόσβεση γύρω στο 7%.

Ειδικά σε αυτό το βήμα αγνοούνται τα δυναμικά μεταβατικά φαινόμενα, οπότε πρακτικά έχουμε στατική επίλυση με δύο υπο-βήματα (μέγεθος $0,5 \times 10^{-5} \text{ sec}$).

Γίνεται η επίλυση του συγκεκριμένου χρονικού βήματος και πλέον είμαστε έτοιμοι να δώσουμε τις όποιες εξωτερικές φορτίσεις προς επίλυση του μοντέλου.

Σημειώνουμε ότι αν είχαμε επιβάλλει ταυτόχρονα τις εξωτερικές δυνάμεις με τις συνοριακές και τα αρχικά φορτία, υπήρχε σοβαρή πιθανότητα την ταλάντωση του μοντέλου και την ακύρωση έτσι των όποιων χρήσιμων αποτελεσμάτων.

4.10.4) 2^η ομάδα επίλυσης για την επιβολή οριζοντίων φορτίων.

Ο χρόνος 10^{-5} sec μέχρι $T1 \text{ sec}$ διακριτοποιείται με **μικρά βήματα DT**. Σε κάθε τέτοιο βήμα, υπολογίζεται το **μέγεθος** της αυξανόμενης ή μειούμενης **οριζόντιας δύναμης**. Η δύναμη αυτή επιβάλλεται στην κορυφή ή τη βάση των σπονδύλων, ανάλογα με τις αρχικές επιλογές

μας. Ταυτόχρονα, συνεχίζει να επιβάλλεται η βαρύτητα. Ακολουθεί επίλυση για κάθε μικρό χρονικό βήμα φόρτισης. Αν έχουμε ενεργοποιήσει το διακόπτη $SW6=1$ (απομάκρυνση των εμπολίων λόγω θραύσης), τότε γίνεται έλεγχος αν βρισκόμαστε σε μεταγενέστερο χρόνο από αυτούς που έχουν δοθεί ως χρόνοι θραύσης για κάθε εμπόλιο. Αν αυτός ικανοποιείται, τότε τόσο τα στοιχεία που έχουν προέλθει από τη διακριτοποίηση των εμπολίων, όσο και τα στοιχεία που έχουν δημιουργηθεί από την επαφή εμπολίων–σπονδύλων, απομακρύνονται μέσω της διαδικασίας “**element kill**”. Περισσότερες πληροφορίες έχουν αναφερθεί σε προγενέστερο κεφάλαιο (§4.3.5).

4.10.5) 2^η ομάδα επίλυσης για την επιβολή σεισμικών φορτίων.

Στην περίπτωση σεισμικών φορτίων, έχουμε δημιουργήσει και εισάγει στο ANSYS έναν πίνακα χρόνου–επιταχύνσεων. Ο πίνακας αυτός έχει τη δυνατότητα γραμμικής παρεμβολής μεταξύ των στοιχείων του. Αρκεί, λοιπόν, να δοθεί στο πρόγραμμα μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή και το ANSYS μέσω “interpolation” ή “extrapolation” (η τελευταία, καλό είναι να αποφεύγεται) θα υπολογίσει τις αντίστοιχες τιμές επιτάχυνσης.

Πριν τη διαδικασία επίλυσης με βήματα DT, γίνεται ο έλεγχος αν έχουμε δώσει το διακόπτη $SW5=1$. Στην περίπτωση αυτή, επαναπακτώνονται οι κόμβοι στη διεπιφάνεια βάσης–κάτω σπόνδυλου, επιβεβαιώνοντας την αντίστοιχη δράση που είχε γίνει στην 1^η ομάδα επίλυσης για τα αρχικά φορτία.

Έτσι, ο χρόνος 10^{-5} sec μέχρι $T1$ sec διακριτοποιείται με **μεσαία βήματα DT**. Σε κάθε τέτοιο βήμα, υπολογίζεται το **μέγεθος της επιτάχυνσης**. Η δύναμη αυτή επιβάλλεται στο μοντέλο μας. Ταυτόχρονα, συνεχίζει να επιβάλλεται η βαρύτητα.

Αν έχουμε ενεργοποιήσει το διακόπτη $SW6=1$ (απομάκρυνση των εμπολίων λόγω θραύσης), τότε γίνεται έλεγχος αν βρισκόμαστε σε μεταγενέστερο χρόνο από αυτούς που έχουν δοθεί ως χρόνοι θραύσης για κάθε εμπόλιο. Αν αυτός ικανοποιείται, τότε τόσο τα στοιχεία που έχουν προέλθει από τη διακριτοποίηση των εμπολίων, όσο και τα στοιχεία που έχουν δημιουργηθεί από την επαφή εμπολίων–σπονδύλων, απομακρύνονται μέσω της διαδικασίας “**element kill**”. Περισσότερες πληροφορίες έχουν αναφερθεί σε προγενέστερο κεφάλαιο (§4.3.5).

4.10.6) 3^η ομάδα επίλυσης (μόνο για την περίπτωση οριζόντιας φόρτισης).

Σε αυτήν την περίπτωση ορίζεται **ένα χρονικό βήμα** (συνήθως $+0,2$ sec μετά το τέλος της 2^{ης} ομάδας επίλυσης) το οποίο **διακριτοποιείται σε μικρά χρονικά βήματα**. Σε αυτό το βήμα, ακυρώνεται η τυχόν ύπαρξη άρθρωσης στο κάτω αριστερά άκρο των σπονδύλων.

Επίσης, επιβεβαιώνεται η τυχόν ($SW5=1$) ύπαρξη πάκτωσης στη διεπιφάνεια κάτω σπονδύλου–βάσης. Η επιτάχυνση της βαρύτητας παραμένει.

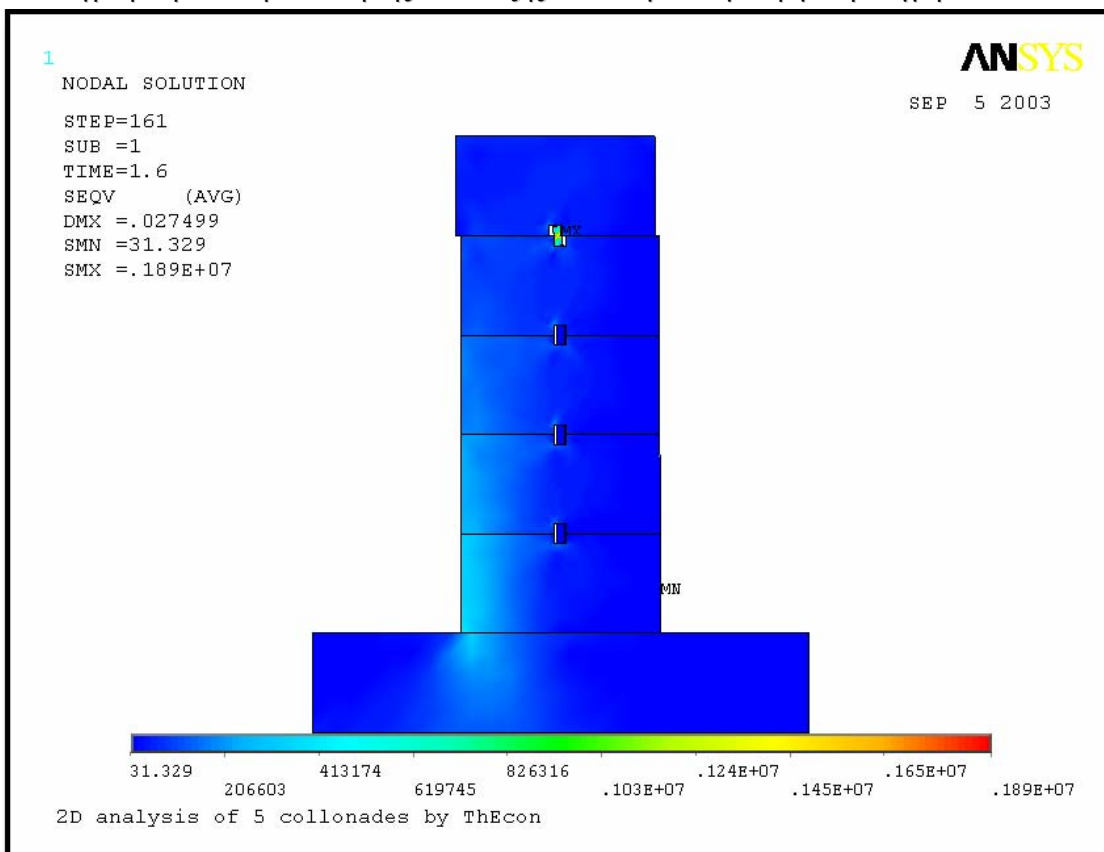
Το οριζόντιο φορτίο παραμένει πλέον σταθερό.

4.11) Τύποι ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

Το ANSYS προσφέρει δύο τρόπους ανάλυσης των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την επίλυση οποιοδήποτε προβλήματος, τον “**γενικό τρόπο**” ανάλυσης αποτελεσμάτων (“**General Postproc**”), και τον τρόπο ανάλυσης αποτελεσμάτων με βάση τη **χρονοϊστορία** (“**TimeHist Postpro**”).

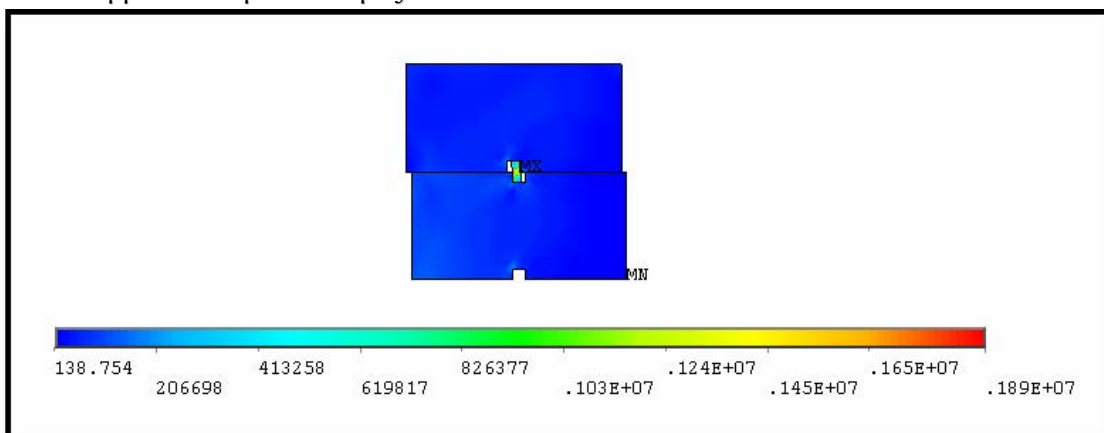
4.11.1) Γενικός τρόπος ανάλυσης αποτελεσμάτων (General Postproc).

Με τον τρόπο αυτό, επιλέγουμε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Τη στιγμή εκείνη, μπορούμε να πάρουμε (είτε γραφικά, είτε σε λίστα) αποτελέσματα όπως η ένταση, η τροπή, ο παραμορφωμένος φορέας κλπ. για το μοντέλο μας. Για παράδειγμα, παρακάτω έχουμε τη γραφική αναπαράσταση της ανάπτυξης τάσεων μια συγκεκριμένη στιγμή:



Σχήμα 4-24: Δείγμα General Postproc.

Φυσικά, μπορούμε να περιορίσουμε την γραφική αναπαράσταση σε συγκεκριμένα μόνο κομμάτια του μοντέλου μας:

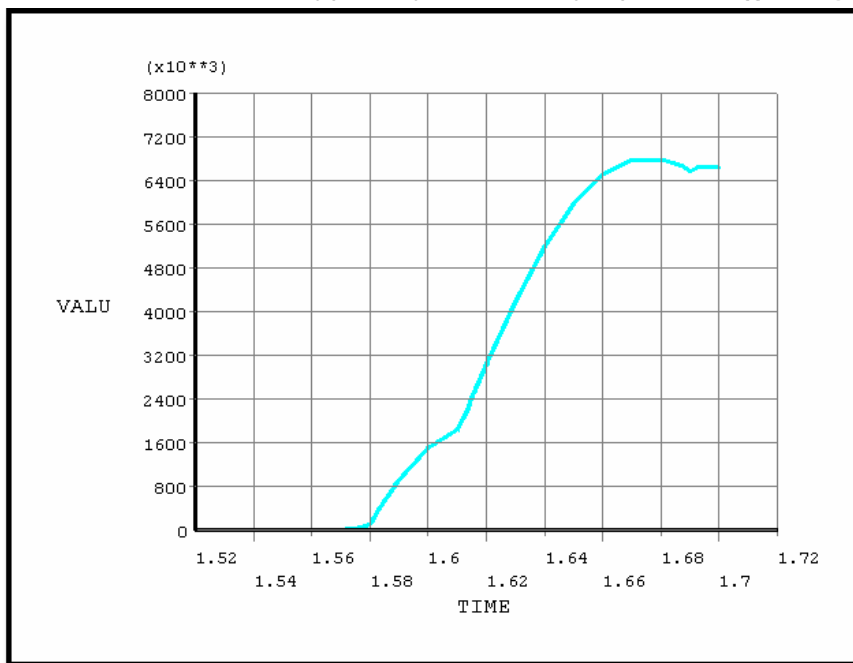


Σχήμα 4-25: Δείγμα κομματιού μοντέλου στο General Postproc.

Τέλος, είναι δυνατόν να δημιουργηθεί video με την διαδοχική παράθεση των αντίστοιχων γραφικών αναπαραστάσεων σε βάθος χρόνου. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει επιπλέον η επιλογή η κλίμακα των μεγεθών να είναι κοινή σε όλο το βάθος αυτό.

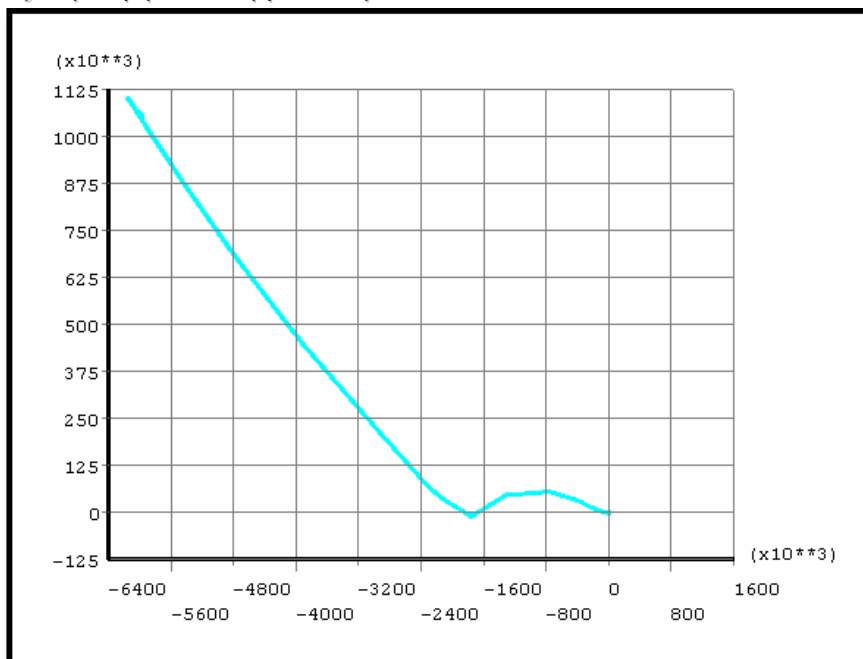
4.11.2) Ανάλυση των αποτελεσμάτων με χρονοϊστορία (Timehist Postpro).

Με τον τρόπο αυτό, επιλέγουμε ένα συγκεκριμένο τύπο αποτελέσματος. Το ANSYS μπορεί τότε να δημιουργήσει ένα διάγραμμα που να απεικονίζει την μεταβολή του αποτελέσματος αυτού στο χρόνο, ή απλά να δώσει μια λίστα με τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, η χρονική εξέλιξη (έχοντας περιορίσει το παράθυρο του χρόνου) της ανάπτυξης **τάσεων von Mises** σε ένα κόμβο του μοντέλου, θα μπορούσε να έχει το εξής διάγραμμα:



Σχήμα 4-26: Τάσεις στο χρόνο από TimeHist Postpro.

Φυσικά, το ANSYS επιτρέπει την εισαγωγή οποιασδήποτε σχεδόν ποσότητας στους δύο άξονες. Ως παράδειγμα, αναφέρουμε το διάγραμμα τάσεων κατά y ως συνάρτηση των τάσεων κατά x ενός συγκεκριμένου κόμβου του μοντέλου:



Σχήμα 4-27: Τάσεις με τάσεις από TimeHist Postpro.

5) Δοκιμές ελέγχου (trial tests) του μοντέλου ANSYS.

5.1) 1^{ος} έλεγχος: Έναρξη λικνισμού (2D).

Δεδομένα:

| | |
|--------------------------------|---|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, κατανεμημένη στους κόμβους κορυφής. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Ναι (δε χρειάζεται η εισαγωγή του φαινομένου της θραύσης). |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Πλήρης (χωρίς φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | Πρακτικά άπειρη (για αποφυγή φαινομένων ολίσθησης). |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . Εμπόλια → 500 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 1,00m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Διαστάσεις εμπολίων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,04m × 0,10 m × 0,04 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 2,62×0,75×0,45×2000×9,81 = 17348,99 N (βλέπε §3.2.3) |
| <u>Υπερφόρτιση:</u> | Στο 100% της δύναμης έναρξης λικνισμού. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |

Ζητούμενο:

Η εύρεση του μέτρου της δύναμης στην κορυφή, ικανής για την έναρξη λικνισμού.

Θεωρητική λύση:

Η έναρξη του λικνισμού αρχίζει τη στιγμή που ισχύει προσωρινά ότι:

$$(W_{\sigma\pi} + W_{\epsilon\pi\sigma\tau} + W_{\xi\nu\lambda}) \times \frac{x}{2} = F \times y \quad \{\text{Από ισορροπία ροπών στο σημείο λικνισμού}\}$$

$$F = \frac{(W_{\sigma\pi} + W_{\epsilon\pi\sigma\tau} + W_{\xi\nu\lambda}) \times x}{2 \times y}$$

$$W_{\sigma\pi} = [(1,00 \times 0,5 \times 1,0) \times 5 - (0,06 \times 0,10 \times 0,06) \times 4] \times 2000 \times 9,81 = 49021,75 \text{ N.}$$

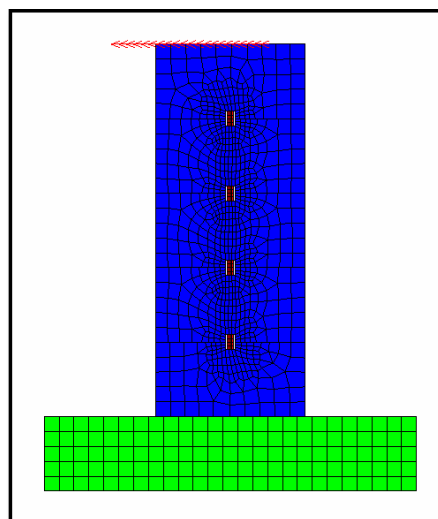
$$W_{\epsilon\pi\sigma\tau} = 17348,99 \text{ N.}$$

$$W_{\xi\nu\lambda} = (0,04 \times 0,10 \times 0,04) \times 4 \times 500 \times 9,81 = 3,14 \text{ N.}$$

$$x = 1,0 \text{ m.}$$

$$y = 5 \times 0,50 = 2,5 \text{ m.}$$

$$F = \frac{(49021,75 + 17348,99 + 3,14) \times 1,0}{2 \times 2,5} = 13274,78 \text{ N}$$



Σχήμα 5-1: Φόρτιση για έναρξη λικνισμού 2D.

Αναλυτική λύση με τη βοήθεια του ANSYS:

Το σύστημα των 5 σπονδύλων φορτίζεται με αυξανόμενη οριζόντια δύναμη κατανεμημένη στους κόμβους της κορυφής. Η δύναμη είναι $F=0,00 \text{ N}$ για το χρόνο $t=0,0 \text{ sec}$, και φτάνει γραμμικά μέχρι τη τιμή $F=13274,77 \text{ N}$ τη χρονική στιγμή $t=1,0 \text{ sec}$. Το φορτίο θα παραμείνει **σταθερό** μέχρι τη χρονική στιγμή $t=1,2 \text{ sec}$, όπου και τελειώνει η ανάλυση. Στο

σύστημα έχουν ήδη επιβληθεί οι αρχικές συνθήκες του ίδιου βάρους και της φόρτισης του επιστυλίου.

Η αναμενόμενη συμπεριφορά του μοντέλου είναι η καμπή της καμπύλης μετακινήσεων στο αντιδιαμετρικό με τον πόλο λικνισμού σημείου τη χρονική στιγμή $t=1,0$ sec. Το μοντέλο αναλύεται με τη βοήθεια του ANSYS και το διάγραμμα μετακινήσεων του εν λόγω σημείου με το χρόνο είναι το εξής:



Διάγραμμα 5-2: Ανύψωση βάσης στο λικνισμό 2D.

Ο έλεγχος ικανοποιείται.

5.2) 2^{ος} έλεγχος: Έναρξη λικνισμού (3D).

Δεδομένα:

| | |
|--------------------------------|--|
| <u>Μοντέλο:</u> | 3D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, κατανεμημένη στους κόμβους κορυφής. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Όχι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Πλήρης (χωρίς φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | Πρακτικά άπειρη (για αποφυγή φαινομένων ολίσθησης). |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,8921m και 0,50 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,5642m και 0,50 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | $2,62 \times 0,75 \times 0,45 \times 2000 \times 9,81 = 17348,99$ N (βλέπε §3.2.3) |
| <u>Υπερφόρτιση:</u> | Στο 100% της δύναμης έναρξης λικνισμού. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |

Ζητούμενο:

Η εύρεση του μέτρου της δύναμης στην κορυφή, ικανής για την έναρξη λικνισμού.

Θεωρητική λύση:

Η έναρξη του λικνισμού αρχίζει τη στιγμή που ισχύει προσωρινά ότι:

$$(W_{\sigma\pi} + W_{\epsilon\pi\sigma\tau}) \times \frac{x}{2} = F \times y \quad \{\text{Από ισορροπία ροπών στο}$$

σημείο λικνισμού\}

$$F = \frac{(W_{\sigma\pi} + W_{\epsilon\pi\sigma\tau}) \times x}{2 \times y}$$

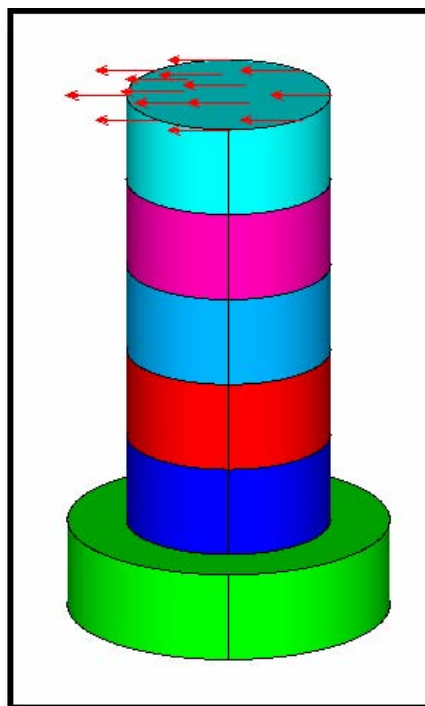
$$W_{\sigma\pi} = [(\pi \times 0,5642^2 \times 0,5) \times 5] \times 2000 \times 9,81 = 49050,00 \text{ N.}$$

$$W_{\epsilon\pi\sigma\tau} = 17348,99 \text{ N.}$$

$$x = 1,1284 \text{ m.}$$

$$y = 5 \times 0,50 = 2,5 \text{ m.}$$

$$F = \frac{(49050,00 + 17348,99) \times 1,1284}{2 \times 2,5} = 14984,92 \text{ N}$$



Σχήμα 5-3: Φόρτιση για έναρξη λικνισμού 3D.

Αναλυτική λύση με τη βοήθεια του ANSYS:

Το σύστημα των 5 σπονδύλων φορτίζεται με αυξανόμενη οριζόντια δύναμη κατανεμημένη στους κόμβους της κορυφής. Η δύναμη είναι $F=0,00 \text{ N}$ για το χρόνο $t=0,0 \text{ sec}$, και φτάνει γραμμικά μέχρι τη τιμή $F=14984,64 \text{ N}$ τη χρονική στιγμή $t=1,0 \text{ sec}$. Το φορτίο θα παραμείνει **σταθερό** μέχρι τη

χρονική στιγμή $t=1,2 \text{ sec}$, όπου και τελειώνει η ανάλυση. Στο σύστημα έχουν ήδη επιβληθεί οι αρχικές συνθήκες του ίδιου βάρους και της φόρτισης του επιστυλίου.

Η αναμενόμενη συμπεριφορά του μοντέλου είναι η καμπή της καμπύλης μετακινήσεων στο αντιδιαμετρικό με τον πόλο λικνισμού σημείο τη χρονική στιγμή $t=1,0 \text{ sec}$. Το μοντέλο αναλύεται με τη βοήθεια του ANSYS και το διάγραμμα μετακινήσεων του εν λόγω σημείου με το χρόνο είναι το εξής:



Διάγραμμα 5-4: Ανύψωση βάσης στο λικνισμό 3D.

Ο έλεγχος ικανοποιείται.

5.3) 3ος έλεγχος: Έναρξη ολίσθησης (2D).

Δεδομένα:

| | |
|--------------------------------|---|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, κατανεμημένη στους κόμβους βάσης. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Ναι (δε χρειάζεται η εισαγωγή του φαινομένου της θραύσης). |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 31% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . Εμπόλια → 500 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 1,00m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Διαστάσεις εμπολίων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,04m × 0,10 m × 0,04 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 2,62×0,75×0,45×2000×9,81 = 17348,99 N (βλέπε §3.2.3) |
| <u>Υπερφόρτιση:</u> | Στο 100% της δύναμης έναρξης ολίσθησης. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |

Ζητούμενο:

Η εύρεση του μέτρου της δύναμης στη βάση, ικανής για την έναρξη ολίσθησης.

Θεωρητική λύση:

Η έναρξη του ολίσθησης αρχίζει τη στιγμή που ισχύει προσωρινά ότι:

$$(W_{\sigma\pi} + W_{\epsilon\pi\sigma\tau} + W_{\xi\upsilon\lambda}) \times T = F \text{ \{Από ισορροπία δυνάμεων κατά x\}}$$

$$W_{\sigma\pi} = [(1,00 \times 0,5 \times 1,0) \times 5 - (0,06 \times 0,10 \times 0,06) \times 4] \times 2000 \times 9,81 = 49021,75 \text{ N.}$$

$$W_{\epsilon\pi\sigma\tau} = 17348,99 \text{ N.}$$

$$W_{\xi\upsilon\lambda} = (0,04 \times 0,10 \times 0,04) \times 4 \times 500 \times 9,81 = 3,14 \text{ N.}$$

$$x = 1,0 \text{ m.}$$

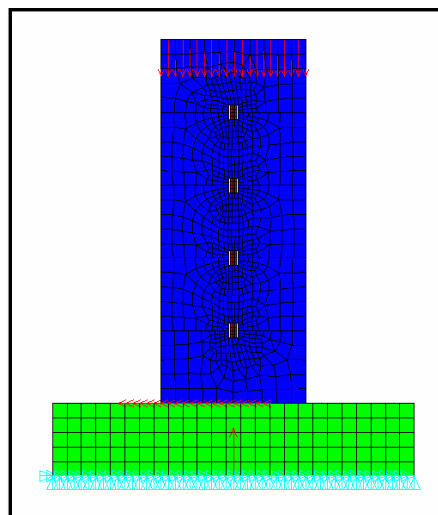
$$y = 5 \times 0,50 = 2,5 \text{ m.}$$

$$F = (49021,75 + 17348,99 + 3,14) \times 0,31 = 20575,90 \text{ N}$$

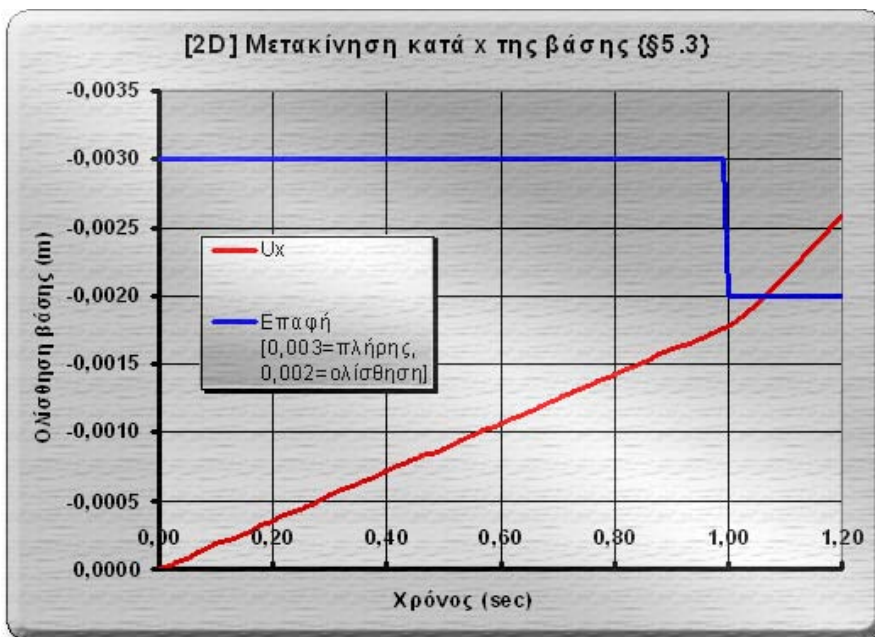
Αναλυτική λύση με τη βοήθεια του ANSYS:

Το σύστημα των 5 σπονδύλων φορτίζεται με αυξανόμενη οριζόντια δύναμη κατανεμημένη στους κόμβους της κορυφής. Η δύναμη είναι **F=0,00 N** για το χρόνο **t=0,0 sec**, και φτάνει γραμμικά μέχρι τη τιμή **F=20575,90 N** τη χρονική στιγμή **t=1,0 sec**. Το φορτίο θα παραμείνει **σταθερό** μέχρι τη χρονική στιγμή **t=1,2 sec**, όπου και τελειώνει η ανάλυση. Στο σύστημα έχουν ήδη επιβληθεί οι αρχικές συνθήκες του ίδιου βάρους και της φόρτισης του επιστυλίου.

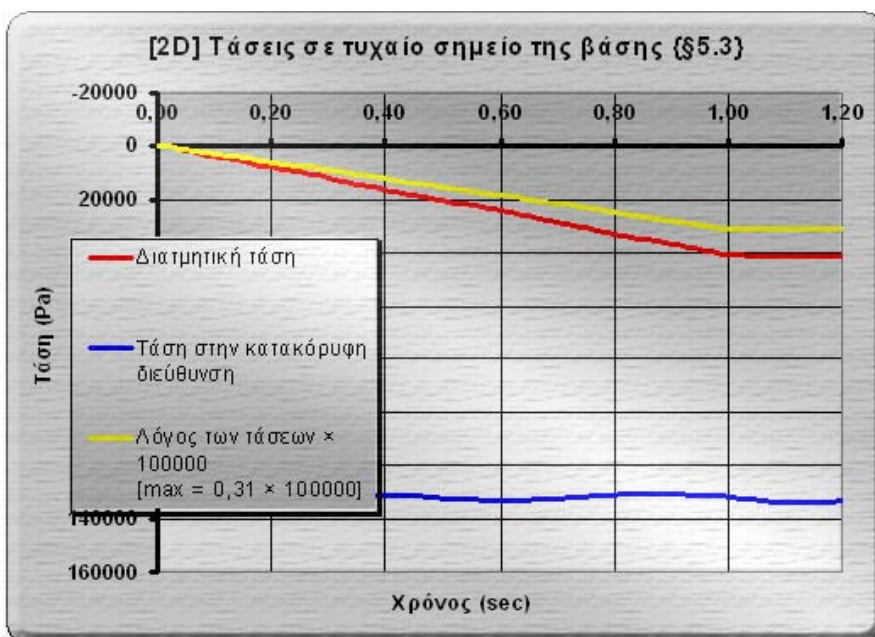
Η αναμενόμενη συμπεριφορά του μοντέλου είναι η καμπή της καμπύλης μετακινήσεων κατά x της βάσης τη χρονική στιγμή t=1,0 sec. Το μοντέλο αναλύεται με τη βοήθεια του ANSYS και το διάγραμμα μετακινήσεων του εν λόγω σημείου με το χρόνο είναι το εξής:



Σχήμα 5-5: Φόρτιση για έναρξη ολίσθησης 2D.



Διάγραμμα 5-6: Διάγραμμα μετακίνησης της βάσης 2D.



Διάγραμμα 5-7: Τάσεις σε τυχαίο σημείο της βάσης 2D.

Όπως επίσης φαίνεται, μόλις οι διατμητικές τάσεις πάρουν τη μέγιστη τιμή τους ($0,31 \times$ κατακόρυφη τάση), παραμένουν σταθερές και αρχίζει η ολίσθηση.

Ο έλεγχος ικανοποιείται.



5.4) 4^{ος} έλεγχος: Έναρξη ολίσθησης (3D).

Δεδομένα:

| | |
|--------------------------------|--|
| <u>Μοντέλο:</u> | 3D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, κατανεμημένη στους κόμβους βάσης. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Όχι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 31% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,8921m και 0,50 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,5642m και 0,50 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 2,62×0,75×0,45×2000×9,81 = 17348,99 N (βλέπε §3.2.3) |
| <u>Υπερφόρτιση:</u> | Στο 100% της δύναμης έναρξης ολίσθησης. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |

Ζητούμενο:

Η εύρεση του μέτρου της δύναμης στη βάση, ικανής για την έναρξη ολίσθησης.

Θεωρητική λύση:

Η έναρξη του ολίσθησης αρχίζει τη στιγμή που ισχύει προσωρινά ότι:

$$(W_{\sigma\pi} + W_{\epsilon\pi\sigma\tau}) \times T = F \quad \{ \text{Από ισορροπία δυνάμεων κατά } x \}$$

$$W_{\sigma\pi} = [(\pi \times 0,5642^2 \times 0,5) \times 5] \times 2000 \times 9,81 = 49050,00 \text{ N.}$$

$$W_{\epsilon\pi\sigma\tau} = 17348,99 \text{ N.}$$

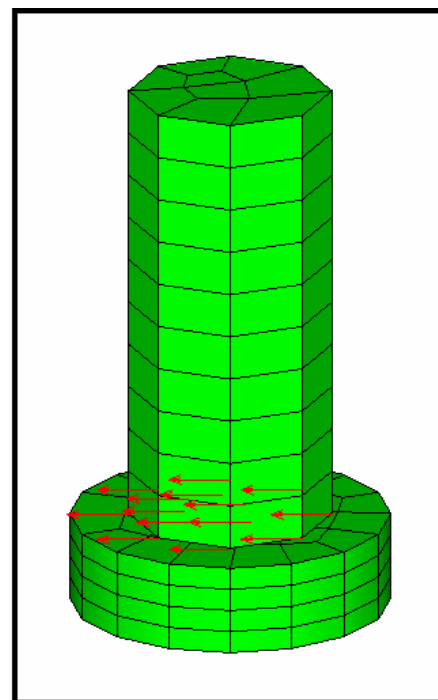
$$x = 1,1284 \text{ m.}$$

$$F = (49050,00 + 17348,99) \times 0,31 = 20583,69 \text{ N}$$

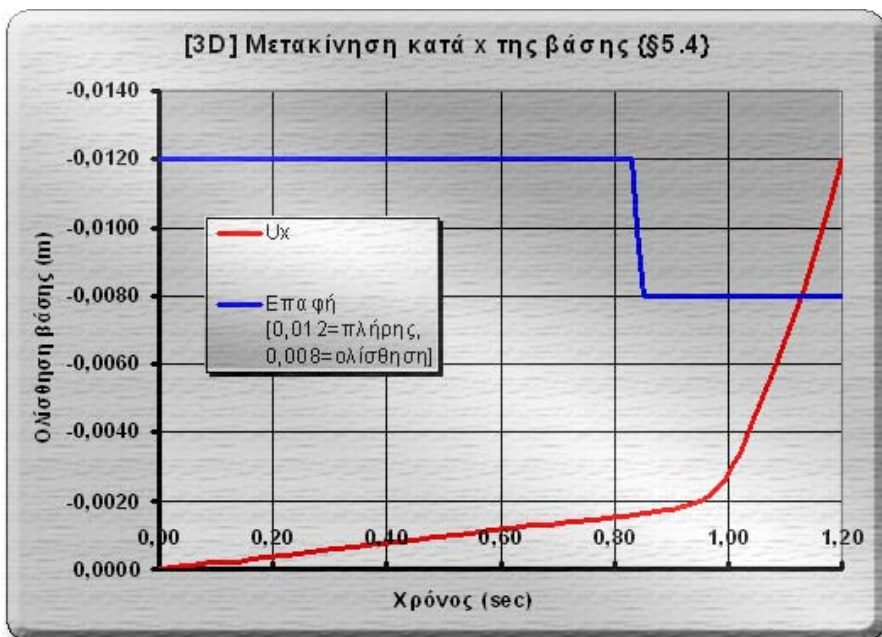
Αναλυτική λύση με τη βοήθεια του ANSYS:

Το σύστημα των 5 σπονδύλων φορτίζεται με αυξανόμενη οριζόντια δύναμη κατανεμημένη στους κόμβους της κορυφής. Η δύναμη είναι $F=0,00 \text{ N}$ για το χρόνο $t=0,0 \text{ sec}$, και φτάνει γραμμικά μέχρι τη τιμή $F=20583,69 \text{ N}$ τη χρονική στιγμή $t=1,0 \text{ sec}$. Το φορτίο θα παραμείνει **σταθερό** μέχρι τη χρονική στιγμή $t=1,2 \text{ sec}$, όπου και τελειώνει η ανάλυση. Στο σύστημα έχουν ήδη επιβληθεί οι αρχικές συνθήκες του ίδιου βάρους και της φόρτισης του επιστυλίου.

Η αναμενόμενη συμπεριφορά του μοντέλου είναι η καμπή της καμπύλης μετακινήσεων κατά x της βάσης τη χρονική στιγμή $t=1,0 \text{ sec}$. Το μοντέλο αναλύεται με τη βοήθεια του ANSYS και το διάγραμμα μετακινήσεων του εν λόγω σημείου με το χρόνο είναι το εξής:



Σχήμα 5-8: Φόρτιση για έναρξη ολίσθησης 3D.



Διάγραμμα 5-9: Διάγραμμα μετακίνησης της βάσης 3D.

Ο έλεγχος ικανοποιείται, με μια μικρή όμως απόκλιση στο χρόνο καμψής. Αυτό οφείλεται στη χαμηλή, σχετικά, διακριτοποίηση του μοντέλου, αφού οι κόμβοι επαφής των σπονδύλων δεν ταντίζονται πολύ ικανοποιητικά με τους κόμβους επαφής της βάσης.

5.5) 5^{ος} έλεγχος: Σύγκριση με ένα εκ των μοντέλων των Μακρή–Ρούσσο (§2.6), {8}.

Δεδομένα:

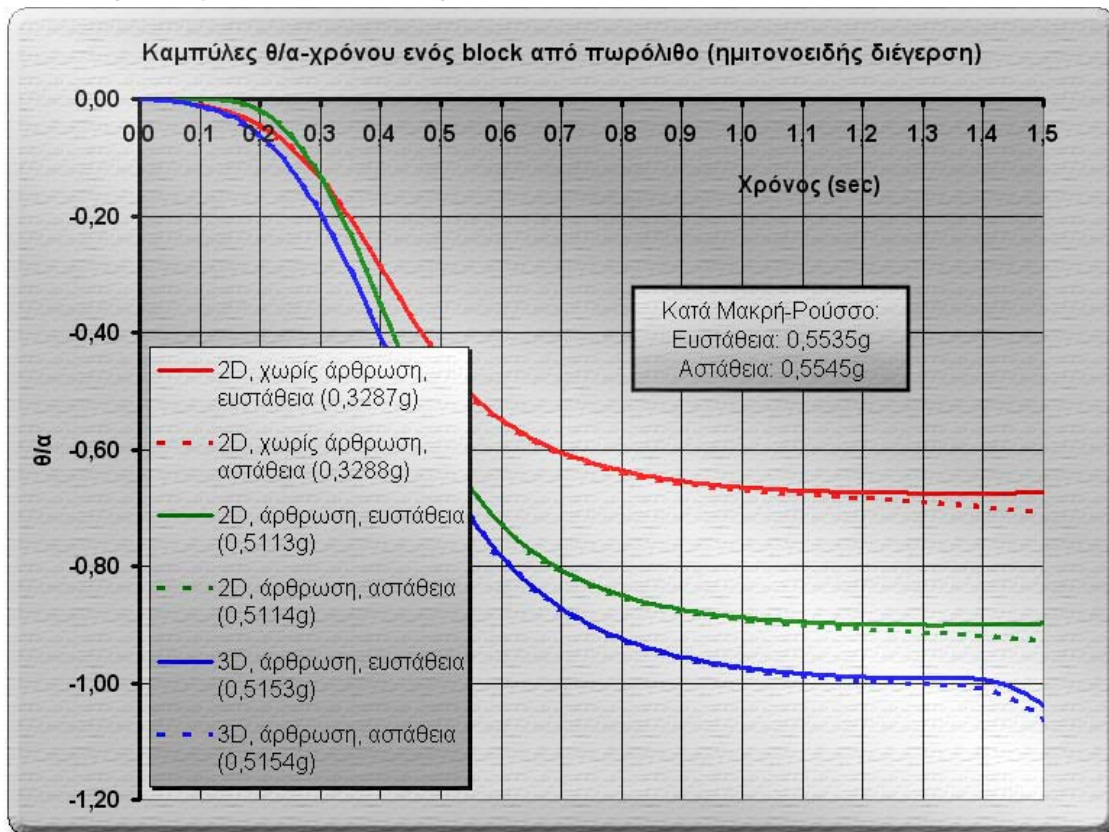
| | |
|--------------------------------|---|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D & 3D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Παλμική φόρτιση, ημιτονοειδούς τύπου 1 sec με μεταβλητό πλάτος. Εισαγωγή μόνο του πρώτου μισού (0,5 sec), δηλαδή δεν υπάρχει αντιστροφή προσήμου. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Όχι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Ανάλογα με το μοντέλο: Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης), αλλά και πλήρης (χωρίς φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | Ανάλογα με το μοντέλο: 31% της κατακόρυφης τάσης ή “άπειρη”. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | 2D μοντέλο: {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 1,00 m. 3D μοντέλο: {Ακτίνα και ύψος} 0,8921m και 0,50 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | 2D μοντέλο: {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,20m × 0,60 m × 0,20 m. 3D μοντέλο: {Ακτίνα και ύψος} 0,1128m και 0,50 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | 2D μοντέλο: {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 1 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 0 N. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |

Ζητούμενο:

Η σύγκριση του ικανού πλάτους του παλμού για την απώλεια ευστάθειας του μοντέλου με κάποιο από τα αντίστοιχα ευρήματα της εργασίας των Μακρή-Ρούσσου.

Αναλυτική λύση με τη βοήθεια του ANSYS:

Με τη βοήθεια του ANSYS, γίνονται επαναληπτικές επιλύσεις για τον προσδιορισμό του πλάτους του μισού ημιτονοειδούς παλμού που είναι ικανό για την ανατροπή ενός συμπαγούς μπλοκ πωρόλιθου με τις διαστάσεις που αναφέρονται παραπάνω. Υπολογίζεται, επίσης, ο λόγος θ/a (λόγος ευστάθειας). Θεωρούμε ότι έχουμε αστάθεια όταν το διάγραμμα θ/a μετά το χρόνο των 1 sec αλλάζει καμπή. Τα μοντέλα που ελέγχθηκαν ήταν το δισδιάστατο που στηρίζεται μόνο στη τριβή, το δισδιάστατο που έχει άρθρωση στη βάση των σπονδύλων, όπως και το τρισδιάστατο που έχει άρθρωση στη βάση των σπονδύλων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:



Διάγραμμα 5-10: Καμπύλες λικνισμού ημιτονοειδούς φόρτισης.

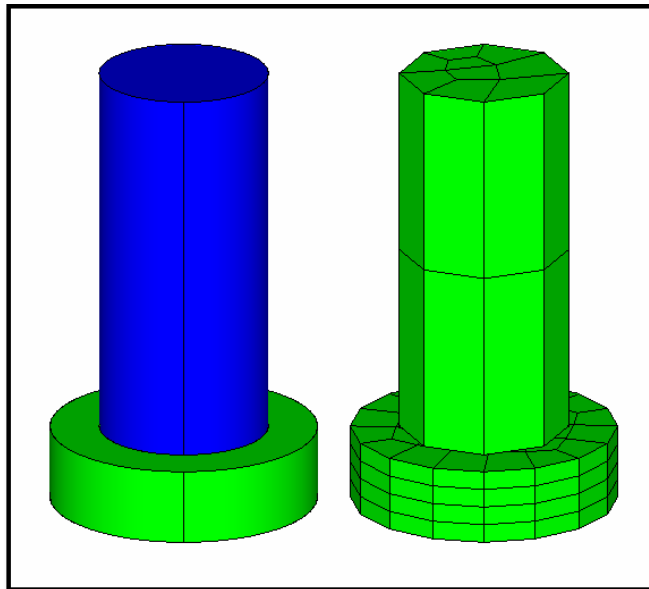
Παρατηρήσεις:

- Το όριο ευστάθειας που αναφέρουν οι Μακρή-Ρούσσος, δείχνει να είναι συντηρητικότερο σε σχέση με τα ευρήματα της αναλυτικής ανάλυσης. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που δε θεωρούμε το μπλοκ με άρθρωση στη βάση του, αλλά ο μόνος ανακουφιστικός παράγοντας είναι η τριβή (μέσω του βάρους του), η τιμή του πλάτους της διέγερσης που μπορεί να προκαλέσει ανατροπή είναι σημαντικά μικρότερη.
- Η μείωση του απαιτούμενου πλάτους διέγερσης που παρατηρείται μεταξύ των μοντέλων σε συνδυασμό με τη μείωση του λόγου ευστάθειας είναι φαινόμενο που χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

6) Παραμετρική διερεύνηση της μεταφοράς δυνάμεων.

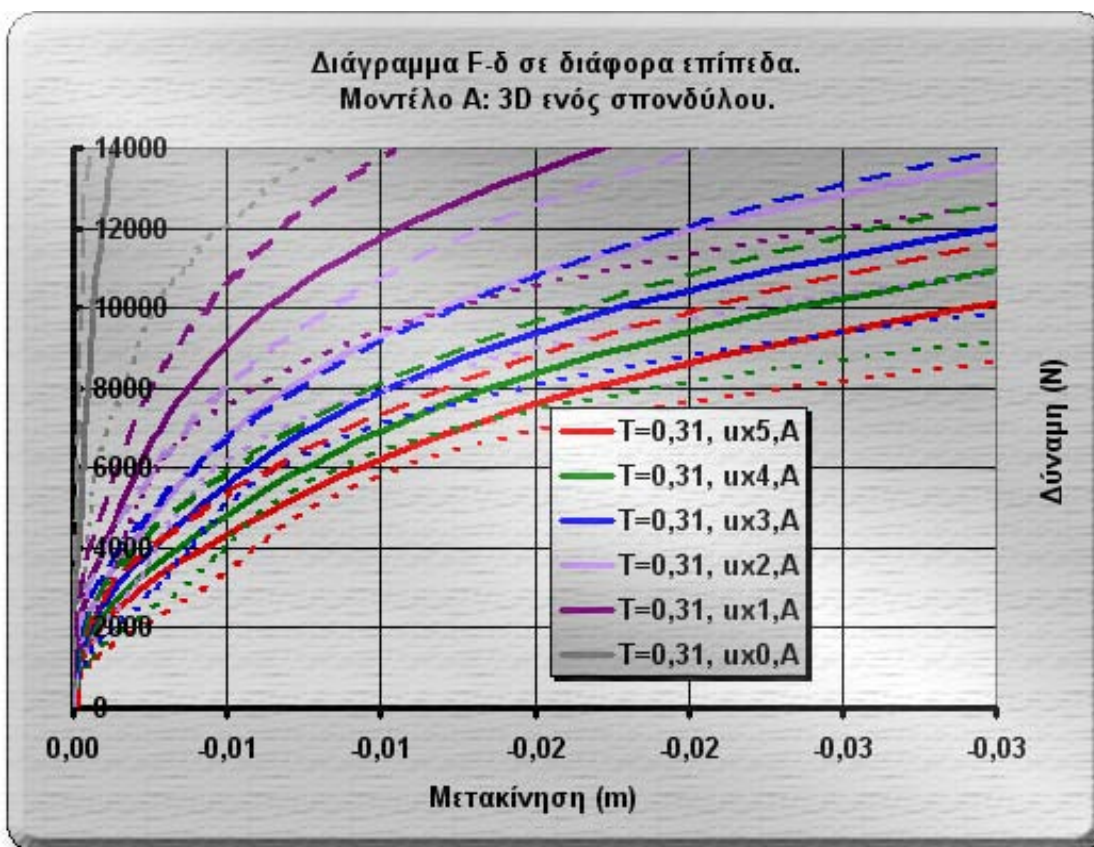
6.1) Περιγραφή των μοντέλων.

6.1.1) Μοντέλο Α: Τρισδιάστατο μπλοκ σπονδύλου.



Σχήμα 6-1: Μοντέλο Α: τρισδιάστατο μπλοκ σπονδύλου.

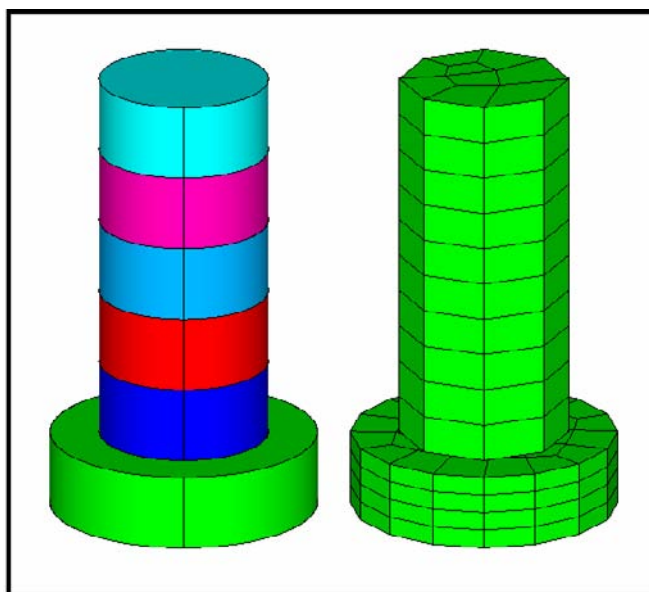
| | |
|--------------------------------|--|
| <u>Μοντέλο:</u> | 3D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, κατανεμημένη στους κόμβους κορυφής. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Όχι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 16%, 31% και 46% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,8921m και 0,50 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,5642m και 2,50 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 1 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 0 N. |
| <u>Υπερφόρτιση:</u> | Στο 200% της δύναμης έναρξης λικνισμού. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |
| <u>Ζητούμενο:</u> | Διάγραμμα F-δ σε τακτά διαστήματα. |



Παρατηρούμε ένα σχετικά ομαλό διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων. Όμως, το μοντέλο αυτό έχει πολύ χαμηλή λεπτομέρεια και αξιοπιστία, επειδή είναι απλά ένα μπλοκ πωρόλιθου σε απλή έδραση σε μια βάση. Δεν υπάρχουν φαινόμενα διακοπής της συνέχειας καθύψους και συμπεριφέρεται περίπου ως ένας πρόβολος με πλαστική άρθρωση στη βάση του.

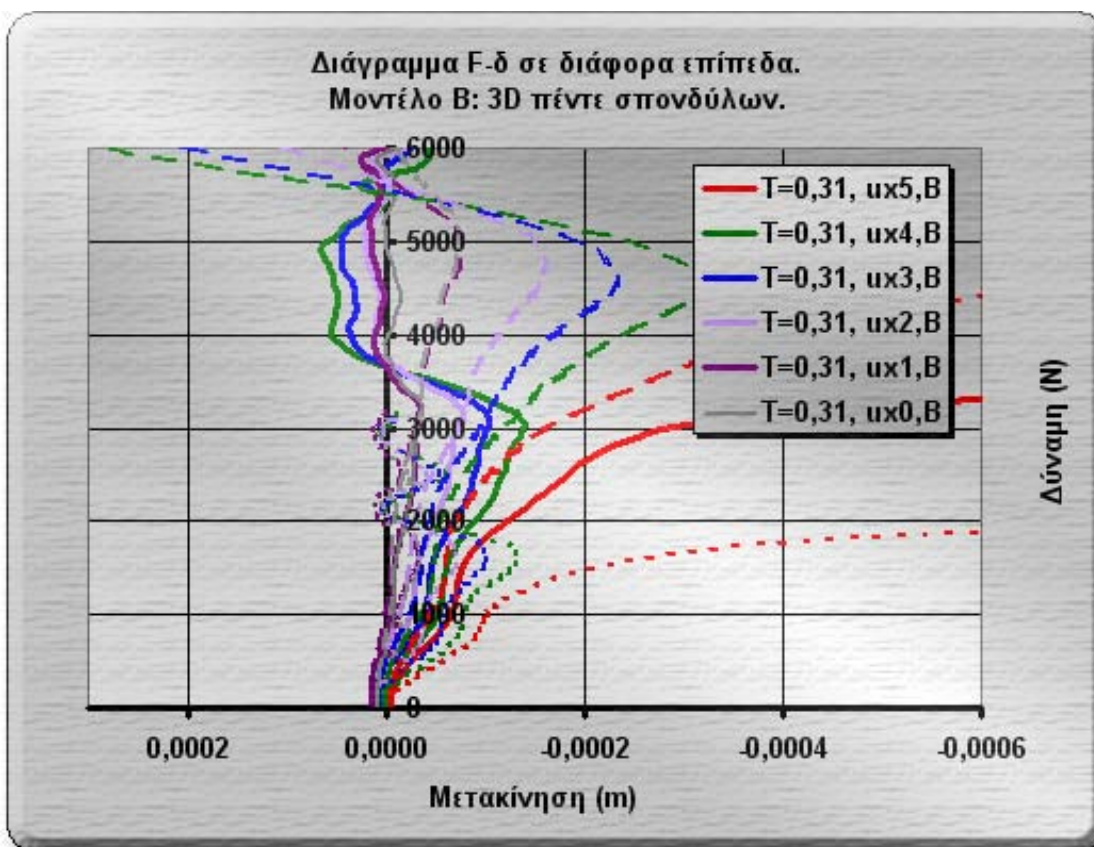
Η τριβή φαίνεται να επηρεάζει τα αποτελέσματα με αναλογικό τρόπο, αφού όντως ή αλλιώς έχουμε ένα και μόνο μπλοκ πωρόλιθου.

6.1.2) Μοντέλο Β: Τρισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (χωρίς εμπόλια).



Σχήμα 6-3: Μοντέλο Β: τρισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων.

| | |
|--------------------------------|--|
| <u>Μοντέλο:</u> | 3D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, κατανεμημένη στους κόμβους κορυφής. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Όχι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 16%, 31% και 46% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,8921m και 0,50 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,5642m και 0,50 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 0 N. |
| <u>Υπερφόρτιση:</u> | Στο 200% της δύναμης έναρξης λικνισμού. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |
| <u>Ζητούμενο:</u> | Διάγραμμα F-δ σε τακτά διαστήματα. |

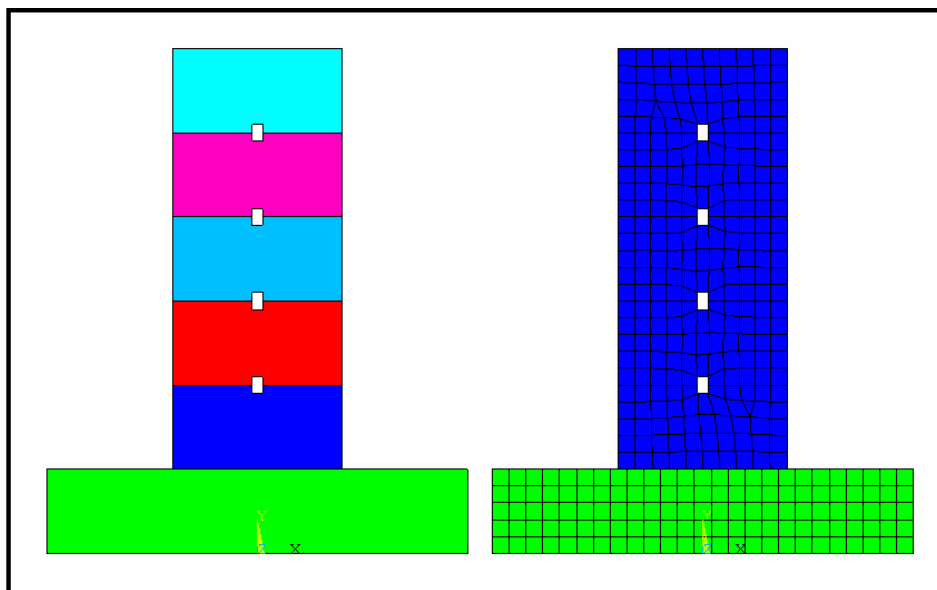


Διάγραμμα 6-4: Μοντέλο B: διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων.

Παρατηρούμε μια κίνηση παλινδρομική των σπονδύλων κάτω από τον κορυφαίο, ο οποίος κινείται πάντα στην ίδια διεύθυνση. Τα φαινόμενα τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ των σπονδύλων, μεταφέρουν την δύναμη από την κορυφή προς τη βάση. Αυτό, σε συνδυασμό με την πιθανή ανάπτυξη λικνισμού, καθώς και με την εναλλαγή κατάστασης επαφής και αποκόλλησης, δημιουργούν τα ανωτέρω παλινδρομικά φαινόμενα.

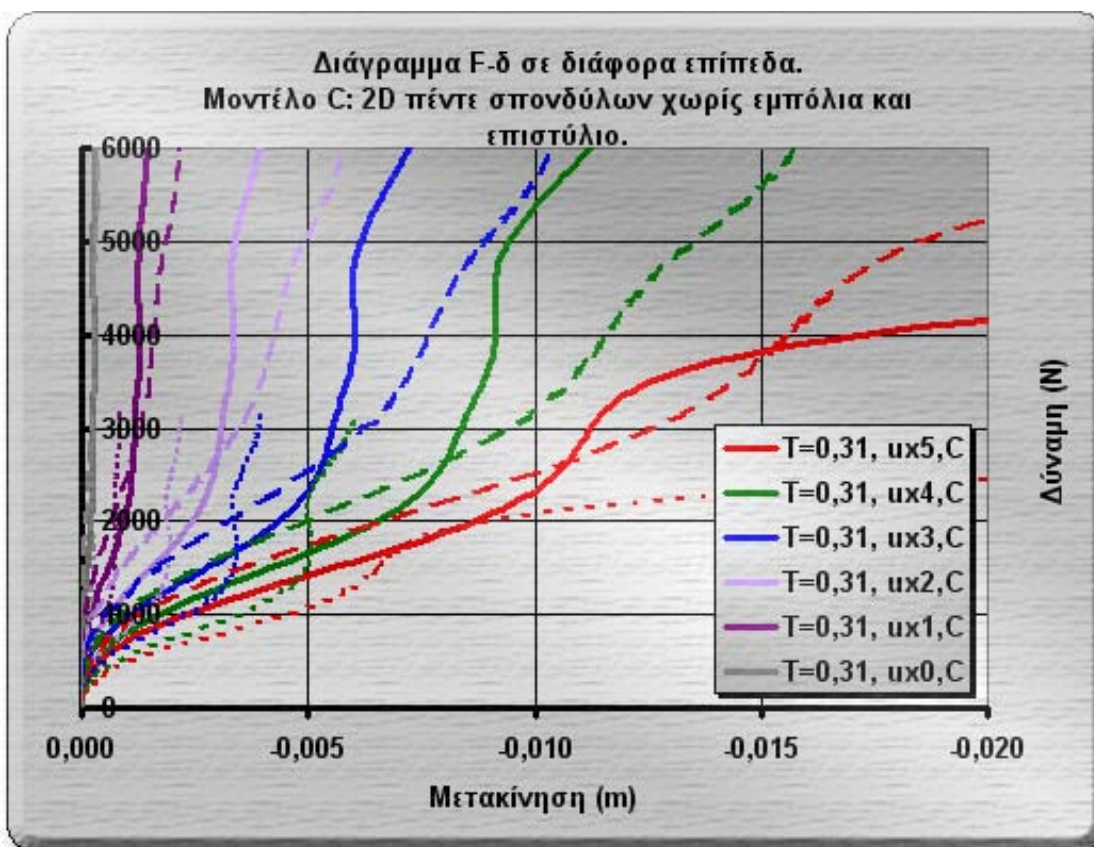
Εδώ αρχίζει να γίνεται ορατό το αποτέλεσμα του μη γραμμικού φαινομένου της τριβής, αφού υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων μοντέλων με διαφορετικό συντελεστή τριβής (ακόμα και αν αλλάξουμε την κλίμακα των αποτελεσμάτων για αυτά).

6.1.3) Μοντέλο C: Δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (χωρίς εμπόλια).



Σχήμα 6-5: Μοντέλο C: δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (χωρίς εμπόλια).

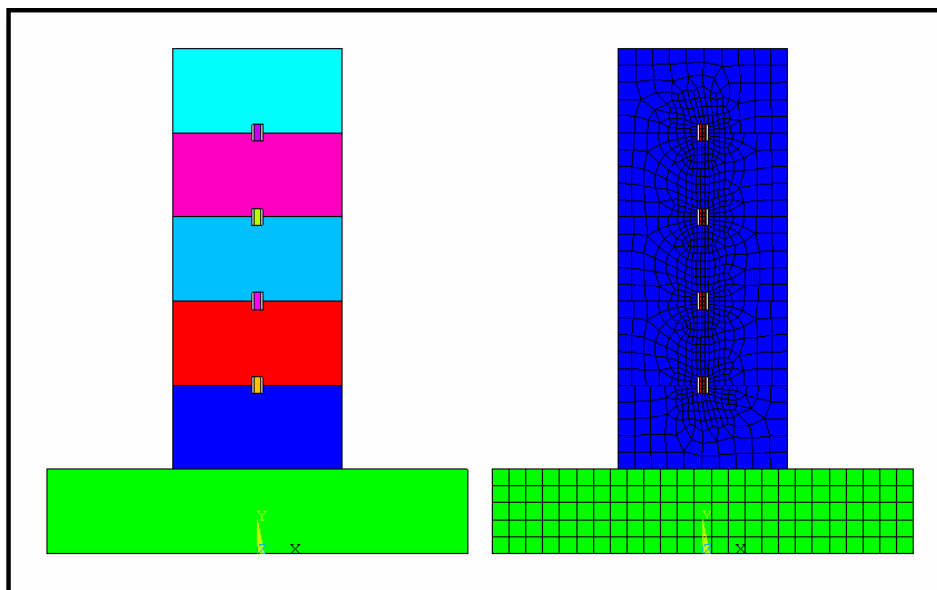
| | |
|--------------------------------|--|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, κατανεμημένη στους κόμβους κορυφής. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Όχι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 16%, 31% και 46% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 1,00m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 0 N. |
| <u>Υπερφόρτιση:</u> | Στο 200% της δύναμης έναρξης λικνισμού. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |
| <u>Ζητούμενο:</u> | Διάγραμμα F-δ σε τακτά διαστήματα. |



Διάγραμμα 6-6: Μοντέλο C: διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων.

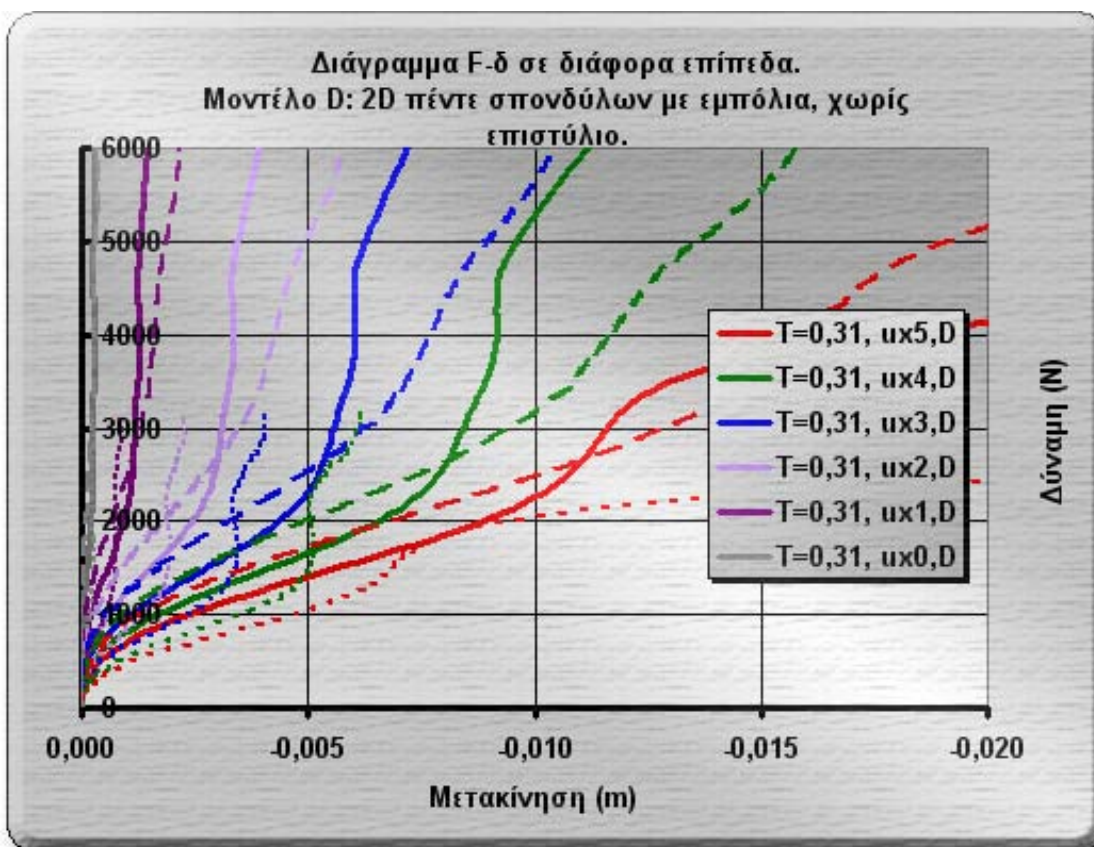
Σε αυτήν την περίπτωση έχουμε ένα πιο ομαλοποιημένο διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων. Ισχύουν όσα έχουν αναφερθεί στο παραπάνω μοντέλο. Παρότι κανείς θα ανέμενε ίσως μεγαλύτερες ομοιότητες με την προηγούμενη περίπτωση, οι διαφορές εξηγούνται ίσως από τη διαφορετική ιδιοπερίοδο των μοντέλων, το γεγονός της πολύ χαμηλότερης διακριτοποίησης του 3D, και από το ότι η σύνδεση μεταξύ των 2 μοντέλων έγινε μέσω κοινής μάζας, όχι δυσκαμψίας. Όσον αφορά στην τριβή, ισχύουν όσα έχουμε πει παραπάνω, μόνο που εδώ (δεδομένης και της διαφορετικής κλίμακας φόρτισης) φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ μοντέλων διαφορετικής τριβής είναι πιο αναλογική.

6.1.4) Μοντέλο D: Δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (με εμπόλια).



Σχήμα 6-7: Μοντέλο D: δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (με εμπόλια).

| | |
|--------------------------------|---|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, κατανεμημένη στους κόμβους κορυφής. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Ναι (θραύση στα 130 KPa). |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 16%, 31% και 46% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . Εμπόλια → 500 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 1,00m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Διαστάσεις εμπολίων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,04m × 0,10 m × 0,04 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 0 N. |
| <u>Υπερφόρτιση:</u> | Στο 200% της δύναμης έναρξης λικνισμού. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |
| <u>Ζητούμενο:</u> | Διάγραμμα F-δ σε τακτά διαστήματα. |

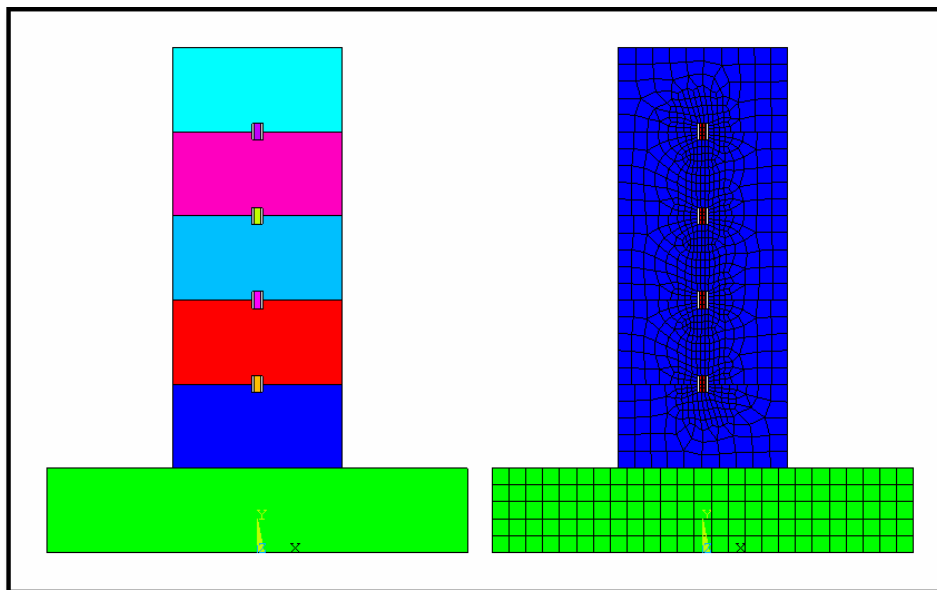


Διάγραμμα 6-8: Μοντέλο D: διάγραμμα δυνάμεων-μετακινήσεων.

Η περίπτωση αυτή είναι σχεδόν πανομοιότυπη με την παραπάνω. Η ύπαρξη εμπόλιου με χαμηλή σχετικά αντοχή (130 KPa) σε συνδυασμό με την συντριπτική πίεση που δέχεται από αυξανόμενη δύναμη, καθιστούν αυτήν την περίπτωση πολύ πιο κοντά στη συμπεριφορά χωρίς εμπόλιο, παρά στη συμπεριφορά με εμπόλιο “άπειρης” δυσκαμψίας. Σε επόμενη παράγραφο η ανωτέρω παρατήρηση αποτυπώνεται και με γραφικό τρόπο.

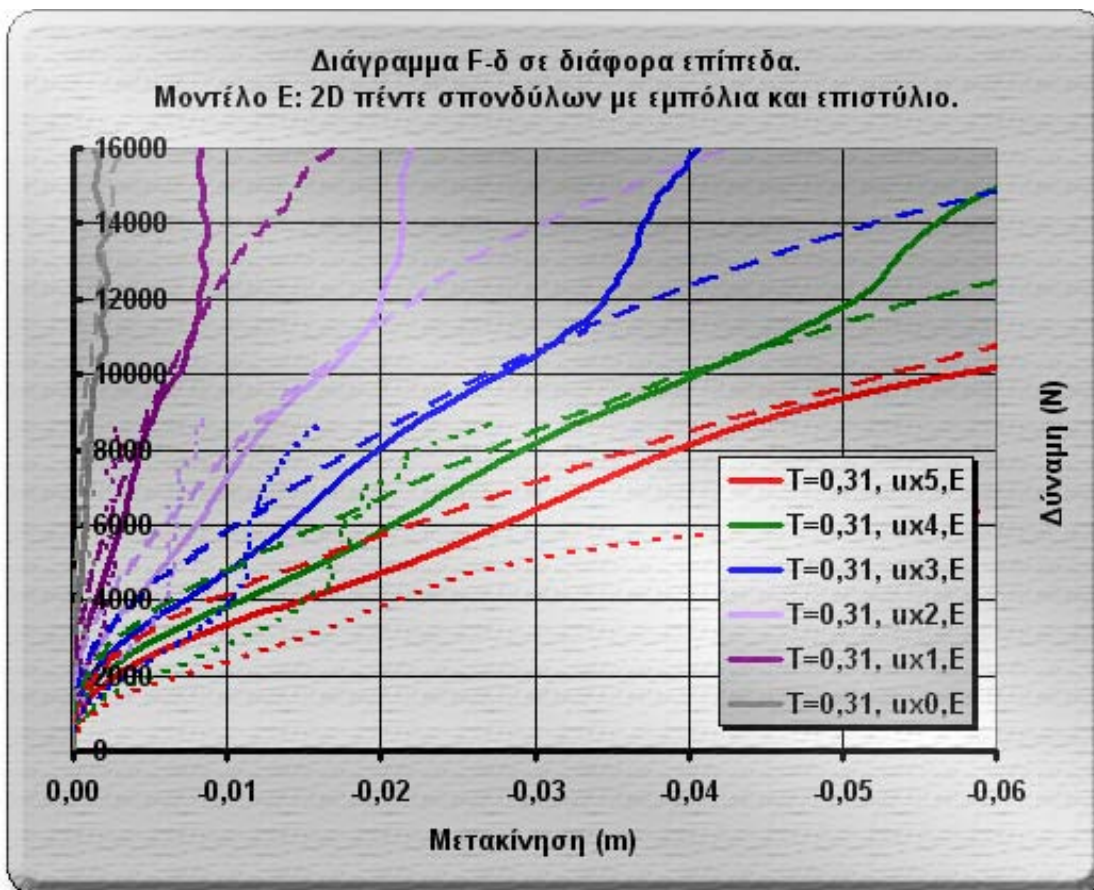
Και εδώ ισχύουν τα περί τριβής έχουμε πει στην προηγούμενη παράγραφο.

6.1.5) Μοντέλο Ε: Δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (με εμπόλια) και επιφόρτιση.



Σχήμα 6-9: Μοντέλο Ε: δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (με εμπόλια) και επιφόρτιση.

| | |
|--------------------------------|---|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Αυξανόμενη οριζόντια φόρτιση, κατανεμημένη στους κόμβους κορυφής. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Ναι (θραύση στα 130 KPa). |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 16%, 31% και 46% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . Εμπόλια → 500 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 1,00m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Διαστάσεις εμπολίων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,04m × 0,10 m × 0,04 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 2,62×0,75×0,45×2000×9,81 = 17348,99 N (βλέπε §3.2.3) |
| <u>Υπερφόρτιση:</u> | Στο 200% της δύναμης έναρξης λικνισμού. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 1 sec → επίλυση. |
| <u>Ζητούμενο:</u> | Διάγραμμα F-δ σε τακτά διαστήματα. |



Το διάγραμμα αυτό έχει την ίδια μορφή με το προηγούμενο, με τη διαφορά ότι τα μεγέθη είναι πολύ μεγαλύτερα λόγω της συνεισφοράς του επιστυλίου. Αυτό αποδεικνύει την ευεργετικότερη επίδραση του αξονικού του επιστυλίου στη γενικότερη συμπεριφορά μιας κολώνας με σπονδύλους. Το μοντέλο E είναι το πιο σύνθετο, περίπλοκο, αλλά και αξιόπιστο από τα πέντε που δοκιμάστηκαν. Εδώ το φαινόμενο της τριβής φαίνεται λιγότερο αναλογικό.

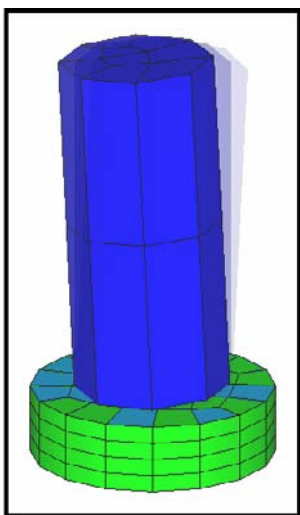
6.2) Ιδιομορφική ανάλυση των μοντέλων.

6.2.1) Μοντέλο Α: Τρισδιάστατο μπλοκ σπονδύλου.

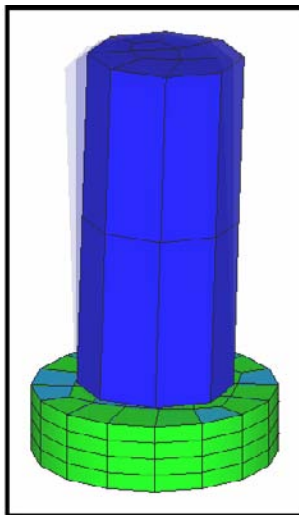
Δεδομένα μοντέλου.

| | |
|-------------------------|--|
| Μοντέλο: | 3D. |
| Εμπόλια: | Όχι. |
| Ένωση μεταξύ σπονδύλων: | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| Τριβή: | 31% της κατακόρυφης τάσης. |
| Πυκνότητες: | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . |
| Διαστάσεις βάσης: | {Ακτίνα και ύψος} 0,8921m και 0,50 m. |
| Διαστάσεις σπονδύλων: | {Ακτίνα και ύψος} 0,5642m και 2,50 m. |
| Αριθμός σπονδύλων: | 1 |
| Βαρύτητα: | 9,81 m/sec ² . |

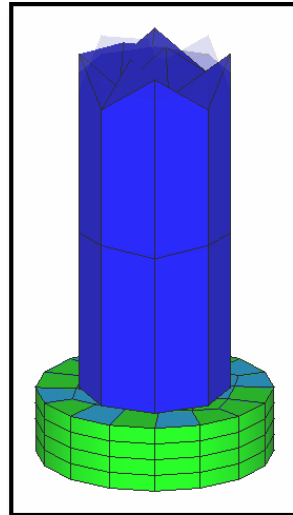
Ιδιομορφές.



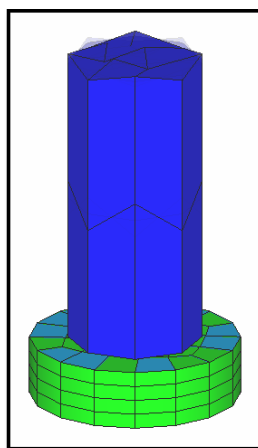
$T_{1,A} = 0,28641 \text{ sec,}$



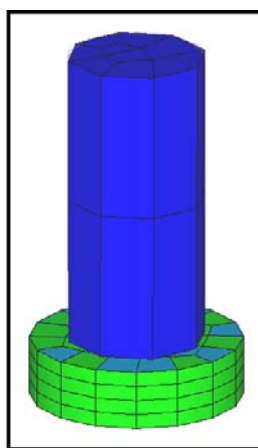
$T_{2,A} = 0,28467 \text{ sec,}$



$T_{3,A} = 0,12586 \text{ sec.}$



$T_{4,A} = 0,12586 \text{ sec,}$



$T_{5,A} = 0,097628 \text{ sec.}$

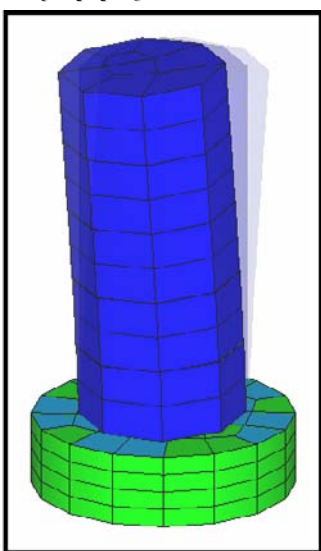
Σχήμα 6-11: Ιδιομορφές μοντέλου Α.

6.2.2) Μοντέλο Β: Τρισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (χωρίς εμπόλια).

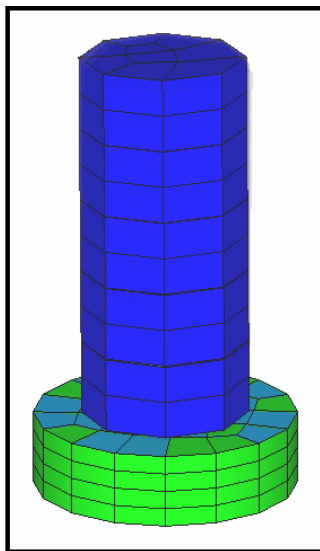
Δεδομένα μοντέλου.

| | |
|--------------------------------|--|
| <u>Μοντέλο:</u> | 3D. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Όχι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 31% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,8921m και 0,50 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Ακτίνα και ύψος} 0,5642m και 0,50 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |

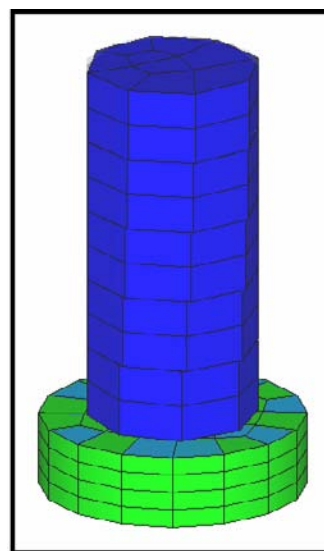
Ιδιομορφές.



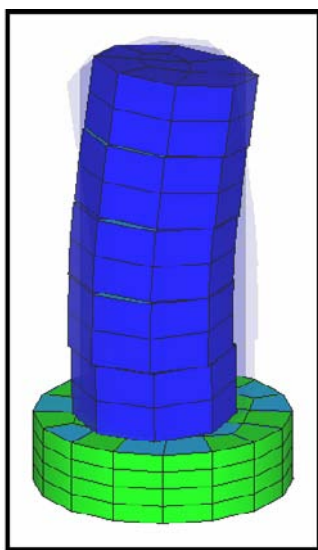
$T_{1,B} = 0,38114 \text{ sec,}$



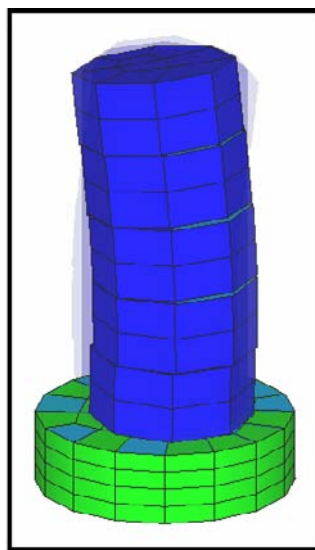
$T_{2,B} = 0,38152 \text{ sec,}$



$T_{3,B} = 0,20791 \text{ sec.}$



$T_{4,B} = 0,10045 \text{ sec,}$



$T_{5,B} = 0,099443 \text{ sec.}$

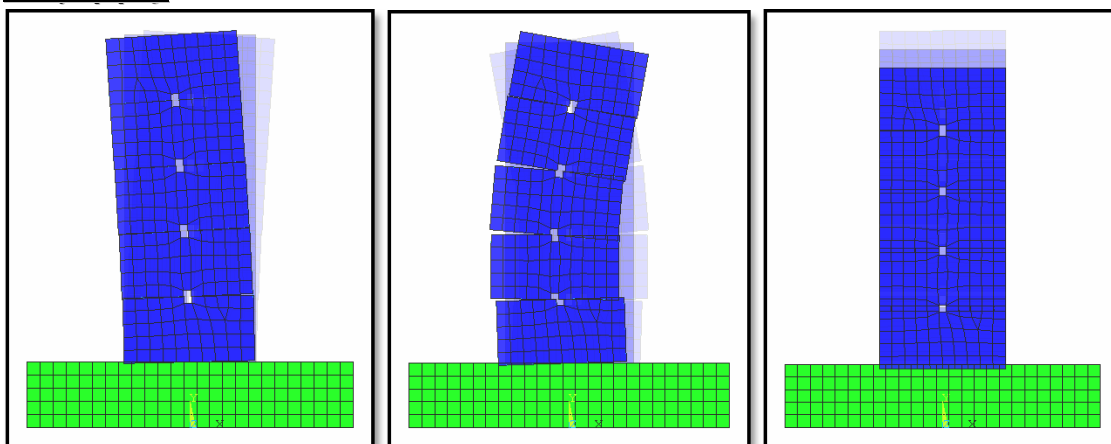
Σχήμα 6-12: Ιδιομορφές μοντέλου Β.

6.2.3) Μοντέλο C: Δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (χωρίς εμπόλια).

Δεδομένα μοντέλου.

| | |
|--------------------------------|---|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Όχι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 31% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση $\rightarrow 2500 \text{ kg/m}^3$. Σπόνδυλοι $\rightarrow 2000 \text{ kg/m}^3$. |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος \times Ύψος \times Βάθος} $2,50\text{m} \times 0,50 \text{ m} \times 1,00 \text{ m}$. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος \times Ύψος \times Βάθος} $1,00\text{m} \times 0,50 \text{ m} \times 1,00 \text{ m}$. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος \times Ύψος \times Βάθος} $0,06\text{m} \times 0,10 \text{ m} \times 0,06 \text{ m}$. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | $9,81 \text{ m/sec}^2$. |

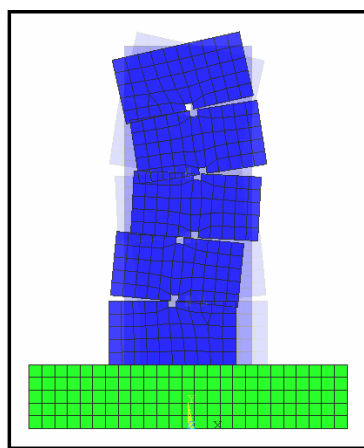
Ιδιομορφές.



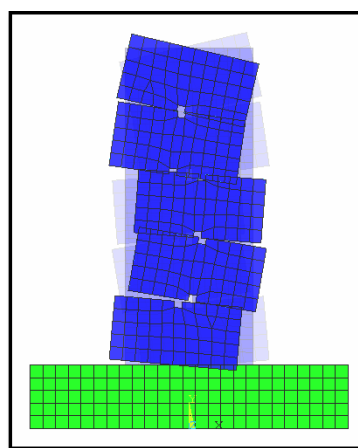
$T_{1,c} = 0,49228 \text{ sec}$,

$T_{2,c} = 0,11785 \text{ sec}$,

$T_{3,c} = 0,10550 \text{ sec}$.



$T_{4,c} = 0,055718 \text{ sec}$,



$T_{5,c} = 0,040517 \text{ sec}$.

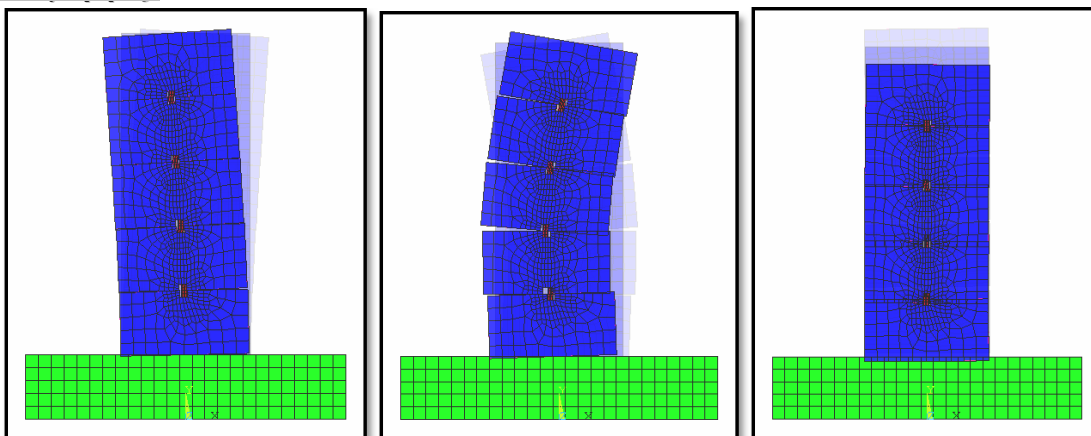
Σχήμα 6-13: Ιδιομορφές μοντέλου C.

6.2.4) Μοντέλο D: Δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (με εμπόλια).

Δεδομένα μοντέλου.

| | |
|--------------------------------|---|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Ναι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 31% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . Εμπόλια → 500 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 1,00m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Διαστάσεις εμπολίων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,04m × 0,10 m × 0,04 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |

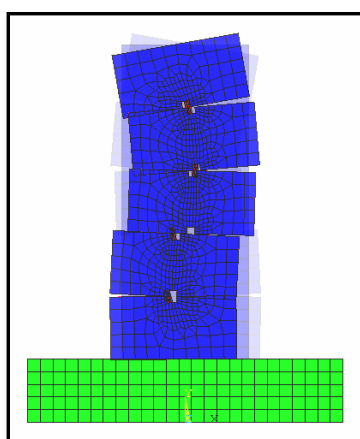
Ιδιομορφές.



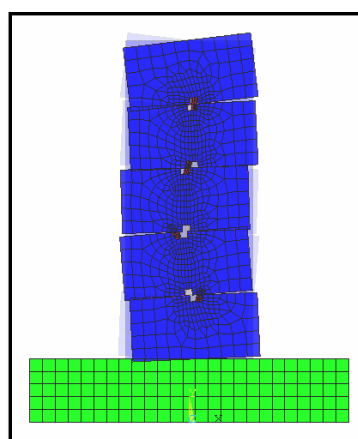
T_{1,D&E} = 0,49967 sec,

T_{2,D&E} = 0,12336 sec,

T_{3,D&E} = 0,10955 sec.



T_{4,D&E} = 0,060706 sec,



T_{5,D&E} = 0,041482 sec.

Σχήμα 6-14: Ιδιομορφές μοντέλων D & E.



6.3) Συγκρίσεις μεταξύ των μοντέλων.

| | 1 ^η ιδιοπερίοδος | 2 ^η ιδιοπερίοδος | 3 ^η ιδιοπερίοδος | 4 ^η ιδιοπερίοδος | 5 ^η ιδιοπερίοδος |
|-----------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Μοντέλο Α | 0,286410 | 0,284670 | 0,125860 | 0,125860 | 0,097628 |
| Μοντέλο Β | 0,381140 | 0,380520 | 0,207910 | 0,100450 | 0,099443 |
| Μοντέλο C | 0,492280 | 0,117850 | 0,105500 | 0,055718 | 0,040517 |
| Μοντέλο D | 0,499670 | 0,123360 | 0,109550 | 0,060706 | 0,041482 |
| Μοντέλο E | 0,499670 | 0,123360 | 0,109550 | 0,060706 | 0,041482 |

Πίνακας 6-15: Συγκεντρωτικός πίνακας των ιδιομορφών.

6.3.1) Σύγκριση ιδιοπεριόδων.

Η ύπαρξη η μη της κατακόρυφης δύναμης από το επιστύλιο δεν επηρεάζει την εν λόγω επίλυση και για το λόγο αυτό, στην προηγούμενη παράγραφο δεν αναλύθηκε το μοντέλο E (δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων με εμπόλια και ύπαρξη επιφόρτισης από επιστύλιο), αλλά πήραμε τα αποτελέσματα κατευθείαν από το μοντέλο D.

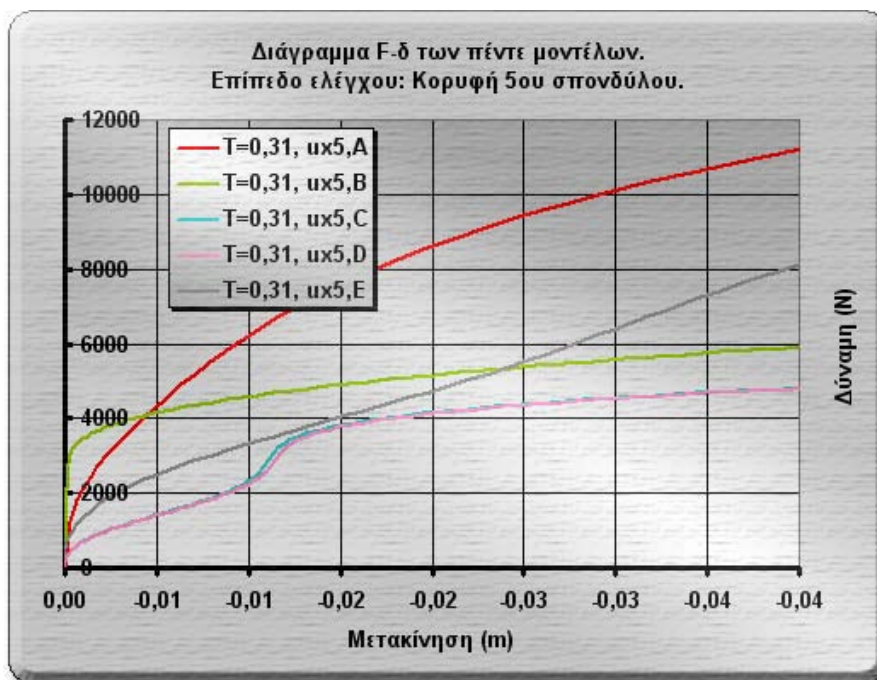
Όπως ήταν, ίσως, αναμενόμενο, παρά τις προσπάθειες σύγκλισης του τρισδιάστατου με το δισδιάστατο μοντέλο, υπάρχουν κάποιες διαφορές, έντονες στην περίπτωση των ιδιομορφών, αρκετά μικρότερες στην ανάλυση φαινομένων που διατηρούν ένα χαρακτήρα δισδιάστατο.

Η διαφορά στις ιδιομορφές έγκειται στο ότι έχουμε πλέον ενεργοποίηση της μάζας και σε άλλες διευθύνσεις. Μπορεί κανείς να εντοπίσει τις διαφορές στο σχήμα των ιδιομορφών στην αντίστοιχη παράγραφο που προηγείται της παρούσης. Η ασυμφωνία στα αποτελέσματα αυτά δεν ακυρώνει τη χρησιμότητα του τρισδιάστατου μοντέλου. Με την πρόοδο της υπολογιστικής ισχύος, η εισαγωγή εμπολίου στο 3D μοντέλο, όπως και η πυκνότερη και πιο απαιτητική διακριτοποίησή του, θα επιτρέψει τη μετάβαση από τη 2D στη 3D ανάλυση.

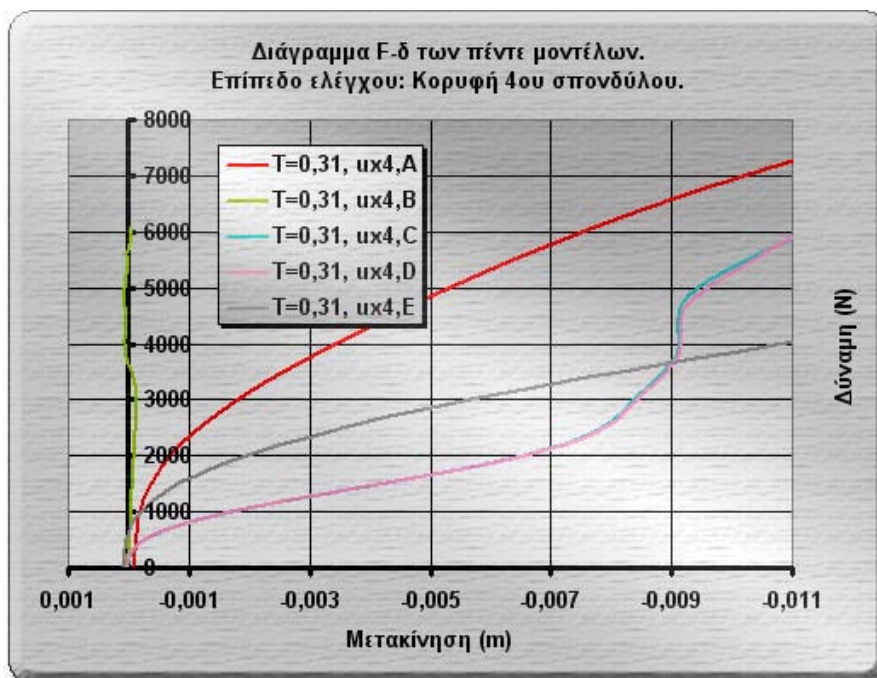
Στην παρούσα φάση, το τρισδιάστατο μοντέλο ήταν υπερβολικά απαιτητικό για να πιστοποιηθεί στο βαθμό που έγινε η αντίστοιχη προσπάθεια στο 2D μοντέλο. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να θεωρούμε τα αποτελέσματα της 2D ανάλυσης πιο αξιόπιστα από τα αποτελέσματα της 3D ανάλυσης.

Παρατηρούμε, τέλος, την μικρή διαφορά στις ιδιοπεριόδους μεταξύ των δισδιάστατων μοντέλων, αφού η εισαγωγή των εμπολίων με την ανεπαίσθητη μάζα δεν είναι ικανή να διαφοροποιήσει σημαντικά τα αποτελέσματα.

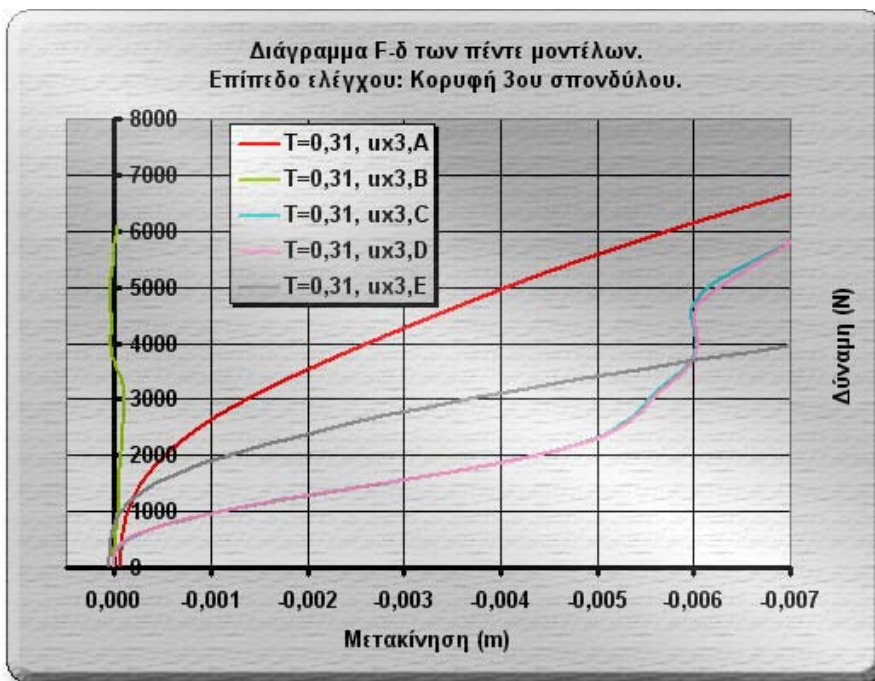
6.3.2) Σύγκριση διαγραμμάτων F-δ και γενικές παρατηρήσεις.



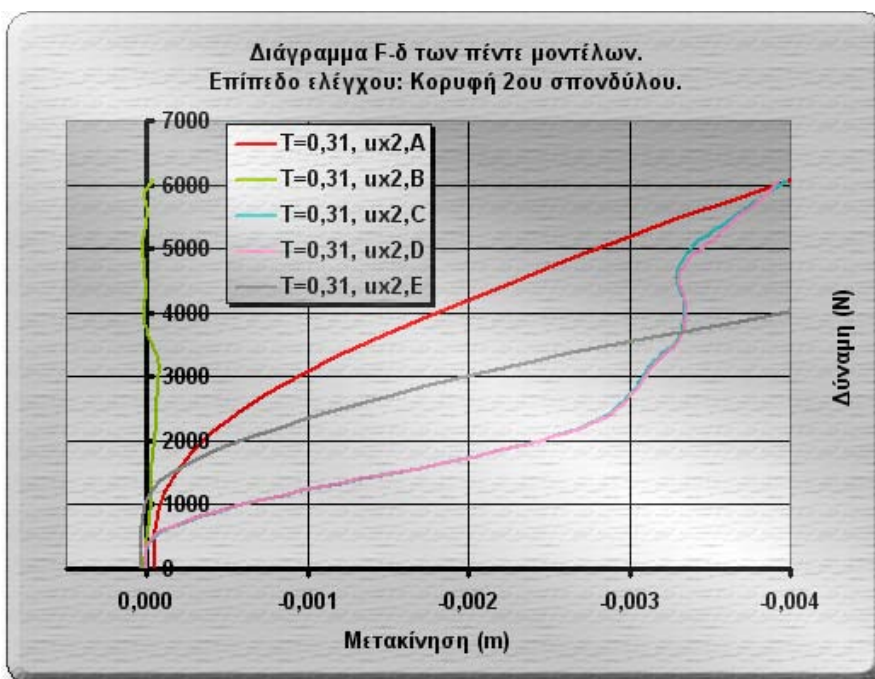
Διάγραμμα 6-16: Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή (σημείο & σπόνδυλος 5).



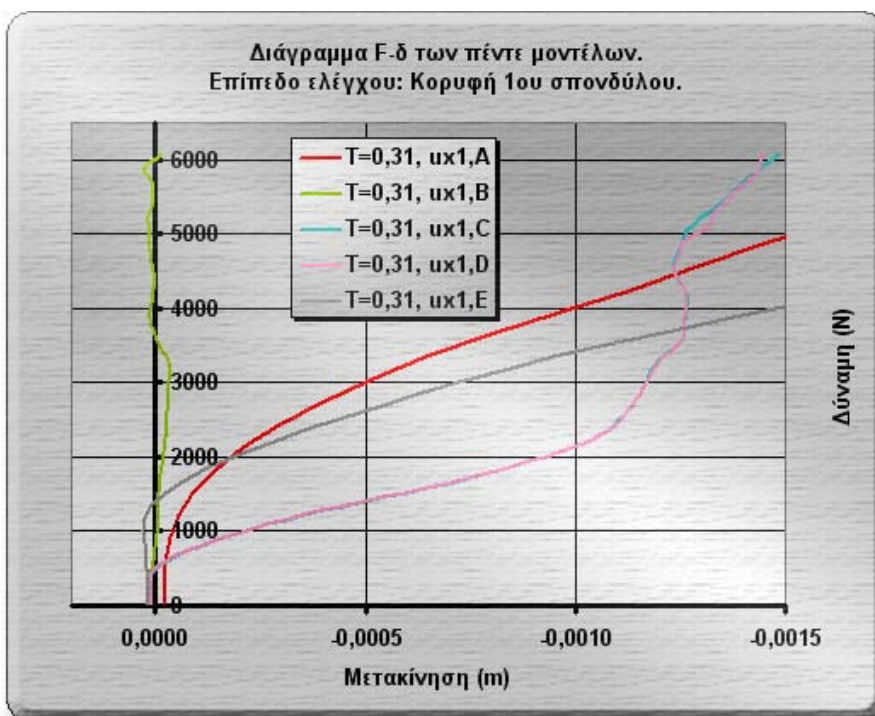
Διάγραμμα 6-17: Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή του σπονδύλου 4.



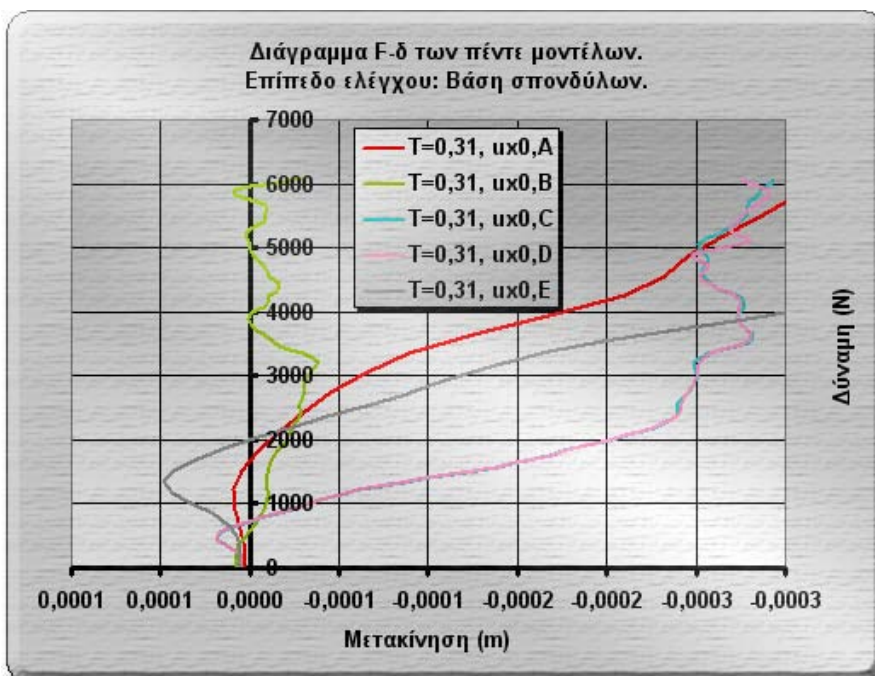
Διάγραμμα 6-18: Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή του σπονδύλου 3.



Διάγραμμα 6-19: Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή του σπονδύλου 2.



Διάγραμμα 6-20: Σύγκριση των μοντέλων στη κορυφή του σπονδύλου 1.



Διάγραμμα 6-21: Σύγκριση των μοντέλων στη βάση (σημείο 0).

- Αν εξαιρέσει κανείς το διάγραμμα κορυφής του πέμπτου σπονδύλου, η μορφή των γραφημάτων μεταξύ διαφορετικών επιπέδων είναι παρόμοια μεταξύ τους.
- Το μοντέλο A έχει διάγραμμα σχετικά απλής μορφής, αφού ουσιαστικά είναι το πιο απλό μοντέλο. Δεν υπάρχει καμία σχεδόν παρουσία φαινομένου τριβής, ή των άλλων πολύπλοκων φαινομένων που εμφανίζονται από την παρουσία των σπονδύλων και των, πιθανόν, εμπολίων.
- Το μοντέλο B έχει διάγραμμα μορφής που, τουλάχιστον όταν ελέγχουμε την απόκριση της κορυφής, αρχίζει να μοιάζει με το αντίστοιχα διαγράμματα των δισδιάστατων μοντέλων. Οι όποιες διαφορές μπορούν να εξηγηθούν ίσως από τη διαφορετικού επιπέδου διακριτοποίηση μεταξύ δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων.
- Παρατηρούμε, επίσης, την ταύτιση, σχεδόν, των διαγραμμάτων των μοντέλων C και D (με και χωρίς εμπόλιο). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε μια συντριπτική σχεδόν επιβολή φόρτισης που οδηγεί τους τεράστιους πωρόλιθους στην επιβολή ισχυρών καταναγκασμών στα εμπόλια. Ταυτόχρονα, λόγω εγγενών αδυναμιών του ANSYS, ο χρόνος θραύσης των εμπολίων έπρεπε να υπολογιστεί ημιαυτόματα, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν παρόντα φαινόμενα “καθυστερημένης” θραύσης των εμπολίων παρά την υπέρβαση της διατμητικής αντοχής τους. Στη διάρκεια ανάπτυξης του προγράμματος επιλύθηκαν και μοντέλα με εμπόλια “άπειρης” διατμητικής αντοχής. Ως συμπέρασμα έχουμε να παρατηρήσουμε ότι η συμπεριφορά μοντέλων με ξύλινα εμπόλια χαμηλής (μοιραία) αντοχής βρίσκεται κοντύτερα στη συμπεριφορά μοντέλων χωρίς εμπόλια παρά στη συμπεριφορά μοντέλων με εμπόλια “άπειρης” διατμητικής αντοχής.
- Επίσης, λόγω της ποιοτικής αλλά και ποσοτικής διαφοράς των φορτιστικών συνθηκών στο πέμπτο μοντέλο (επιβολή αξονικού από το επιστύλιο), δεν μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ του τελευταίου και των υπολοίπων δισδιάστατων. Αυτό, όμως, που μπορεί κανείς να συνάγει με σιγουριά είναι η σαφώς ευεργετική επίδραση του αξονικού στη γενικότερη συμπεριφορά του μοντέλου, τουλάχιστον στην κορυφή. Σε χαμηλότερα, όμως, επίπεδα, αυτό δεν ισχύει από μία τιμή φόρτισης και έπειτα. Εκεί, η ταλάντωση που δημιουργείται από το πολύπλοκο φαινόμενο επαφής στο μοντέλο χωρίς αξονικό επιστύλιο, συγκρατεί τη περαιτέρω μετακίνηση των χαμηλότερων σπονδύλων.
- Πρέπει να διερευνηθεί το φαινόμενο της αλλαγής καμπής του διαγράμματος F-δ χαμηλότερων σπονδύλων των μοντέλων B και C στο σημείο τομής τους με το αντίστοιχο διάγραμμα του μοντέλου E, σε συνδυασμό και με τις παρατηρήσεις της προηγούμενης παραγράφου.
- Τέλος, το τρισδιάστατο μοντέλο με τους πέντε σπονδύλους έχει αμελητέα μετακίνηση των υπολοίπων σπονδύλων που έρχεται σε ασυμφωνία με τα ευρήματα του πιο λεπτομερούς δισδιάστατου μοντέλου.
- Όσον αφορά στην επιρροή του φαινομένου της τριβής, φαίνεται ότι υπάρχει κάποια αναλογία στα αποτελέσματα στα περισσότερα, τουλάχιστον, μοντέλα, παρότι η επίλυση του όλου φαινομένου της επαφής είναι ισχυρά μη γραμμική. Στο τελευταίο μοντέλο, η αλλαγή της τριβής δείχνει να μη δημιουργεί αναλογικά αποτελέσματα.

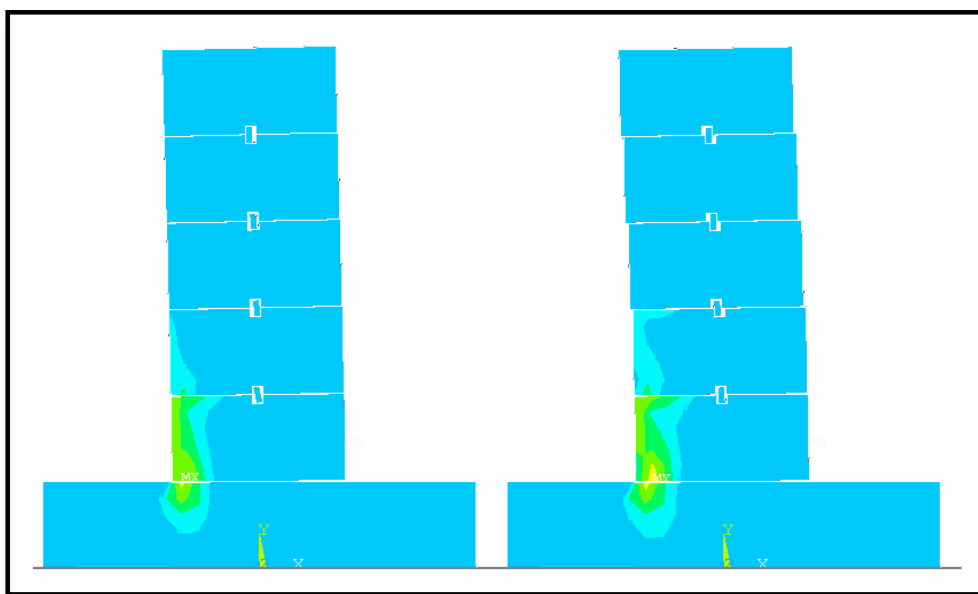
Με βάση τα ανωτέρω, αποφασίζουμε να υιοθετήσουμε τα δισδιάστατα μοντέλα C,D & E (ως πιο ακριβή και λεπτομερή) ως αυτά που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.



6.4) Απόκριση σε ημιτονοειδή παλμό και σύγκριση μεταξύ των μοντέλων D και E.

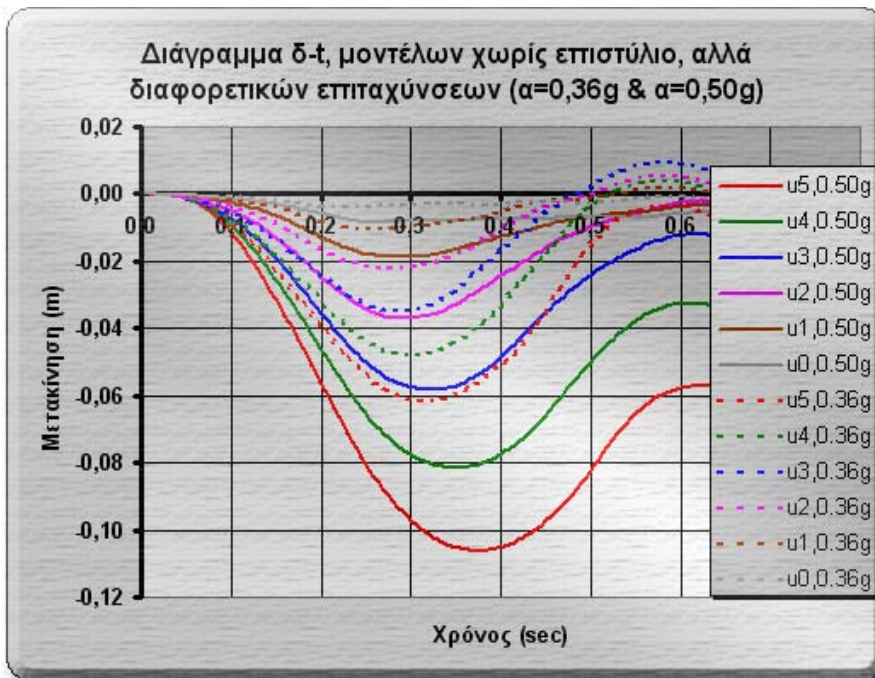
Τα μοντέλα D και E (με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που έχουμε δώσει παραπάνω) έχουν θεμελιώδη ιδιοπερίοδο $T=0,49967 \text{ sec}$. Θα υποβληθούν σε ένα μισό ημιτονοειδή παλμό με περίοδο αυτήν την τιμή για να δούμε την ευαισθησία τους σε μία τόσο δυσμενή φόρτιση. Τα πλάτη διέγερσης στην οποία θα υποβληθούν είναι σχετικά μεγάλα. Ο παλμός μεγάλου πλάτους κοντά στην ιδιοπερίοδο είναι κατά γενική ομολογία πιο δυσμενής απ' ό,τι σεισμική φόρτιση ίδιου μέγιστου πλάτους.

6.4.1) Μοντέλο D: Δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (με εμπόλια).



Σχήμα 6-22: Μέγιστη παραμόρφωση μοντέλου D στα 0,36g και 0,50g.

| | |
|--------------------------------|---|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Μισός ημιτονοειδής παλμός πλάτους 0,50g και 0,36g περιόδου 0,49967 sec. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Ναι (θραύση στα 130 KPa). |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 31% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . Εμπόλια → 500 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 1,00m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Διαστάσεις εμπολίων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,04m × 0,10 m × 0,04 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 0 N. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0~10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~1,5×0,49967 sec → επίλυση. |
| <u>Ζητούμενο:</u> | Διάγραμμα δ-t σε τακτά διαστήματα. |



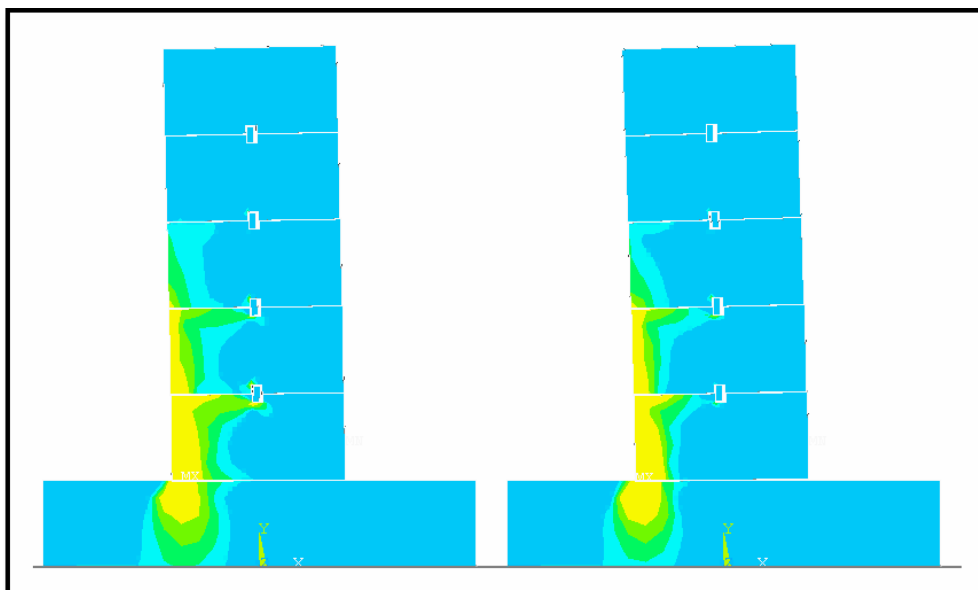
Σχήμα 6-23: Διάγραμμα δ-t μοντέλου D στα 0.36g και 0.50g.

Στην περίπτωση της μεγαλύτερης των δύο φορτίσεων υπάρχει θραύση των ανωτέρω δύο εμπολίων. Το διάγραμμα όμως, έχει το σχήμα του αντίστοιχου διαγράμματος όταν δεν έχουμε καθόλου εμπόλια. Ο λόγος έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Υπάρχει μια σχετική αναλογία μεταξύ των δύο φορτίσεων, πάντως ακόμα και ο μεγαλύτερος των δύο παλμός δεν ήταν ικανός να φέρει το μοντέλο έστω κοντά σε συνθήκες ανατροπής.

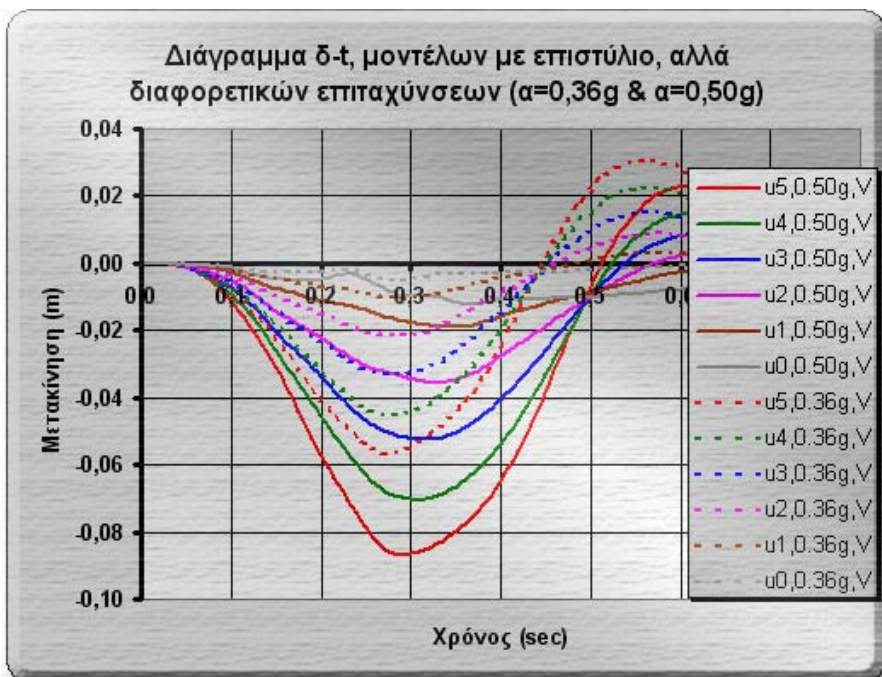
Εκτός από το φαινόμενο του λικνισμού, είχαμε και το φαινόμενο της ολίσθησης της βάσης, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα u0,50g και u0,36g.

6.4.2) Μοντέλο Ε: Δισδιάστατο μοντέλο 5 σπονδύλων (με εμπόλια) και αξονικό επιστυλίου.



Σχήμα 6-24: Μέγιστη παραμόρφωση μοντέλου Ε στα 0,36g και 0,50g.

| | |
|--------------------------------|---|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Μισός ημιτονοειδής παλμός πλάτους 0,50g και 0,36g περιόδου 0,49967 sec. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Ναι (θραύση στα 130 KPa). |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 31% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . Εμπόλια → 500 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 1,00m × 0,50 m × 1,00 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Διαστάσεις εμπολίων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,04m × 0,10 m × 0,04 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 5 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 2,62×0,75×0,45×2000×9,81 = 17348,99 N (βλέπε §3.2.3) |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0~10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~1,5×0,49967 sec → επίλυση. |
| <u>Ζητούμενο:</u> | Διάγραμμα δ-t σε τακτά διαστήματα. |



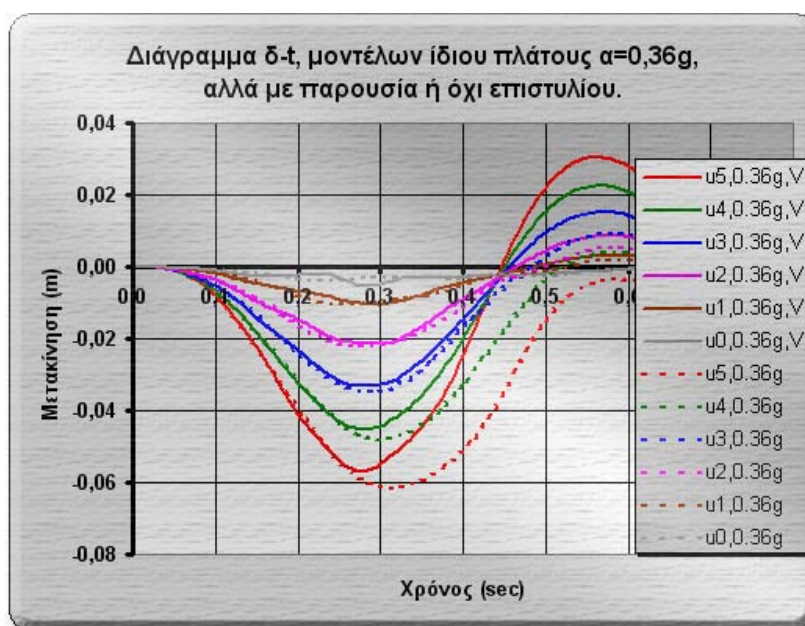
Διάγραμμα 6-25: Διάγραμμα δ-t μοντέλων Ε στα 0.36g και 0.50g.

Δεν παρατηρήθηκε θραύση των εμπολίων, χαρακτηριστικό της ενεργητικής συμπεριφοράς του αξονικού του επιστυλίου.

Εκτός της περίπτωσης στη βάση, υπάρχει μια σχετική αναλογία μεταξύ των δύο φορτίσεων, πάντως ακόμα και ο μεγαλύτερος των δύο παλμός δεν ήταν ικανός να φέρει το μοντέλο έστω κοντά σε συνθήκες ανατροπής.

Εκτός από το φαινόμενο του λικνισμού, είχαμε και το φαινόμενο της ολίσθησης της βάσης, όπως φαίνεται από τα διαγράμματα $u_{0,50g}$ και $u_{0,36g}$.

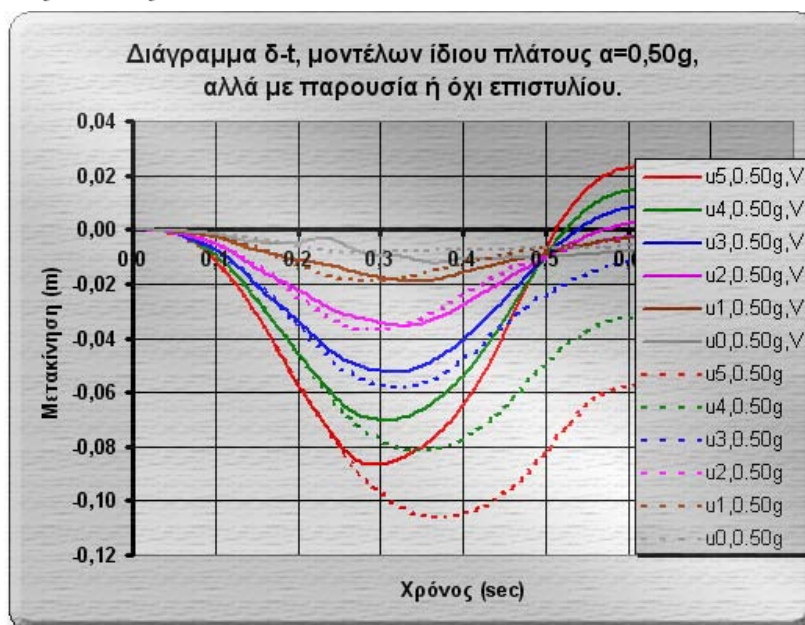
6.4.3) Σύγκριση μεταξύ μοντέλων D και E.



Διάγραμμα 6-26: Σύγκριση μετακινήσεων μοντέλων D και E στα 0,36g.

Στο ανωτέρω σχήμα φαίνεται το είδος της επιρροής στις μετακινήσεις που έχει η εισαγωγή αξονικής φόρτισης λόγω επιστυλίου.

Παρότι η διαφορά στην τελική μετακίνηση δεν είναι τόσο μεγάλη, το αξονικό αποτρέπει το λικνισμό που σε τελική ανάλυση είναι από τους ισχυρότερους παράγοντες ανατροπής στις αρχαιοελληνικές κολώνες.



Διάγραμμα 6-27: Σύγκριση μετακινήσεων μοντέλων D και E στα 0,50g.

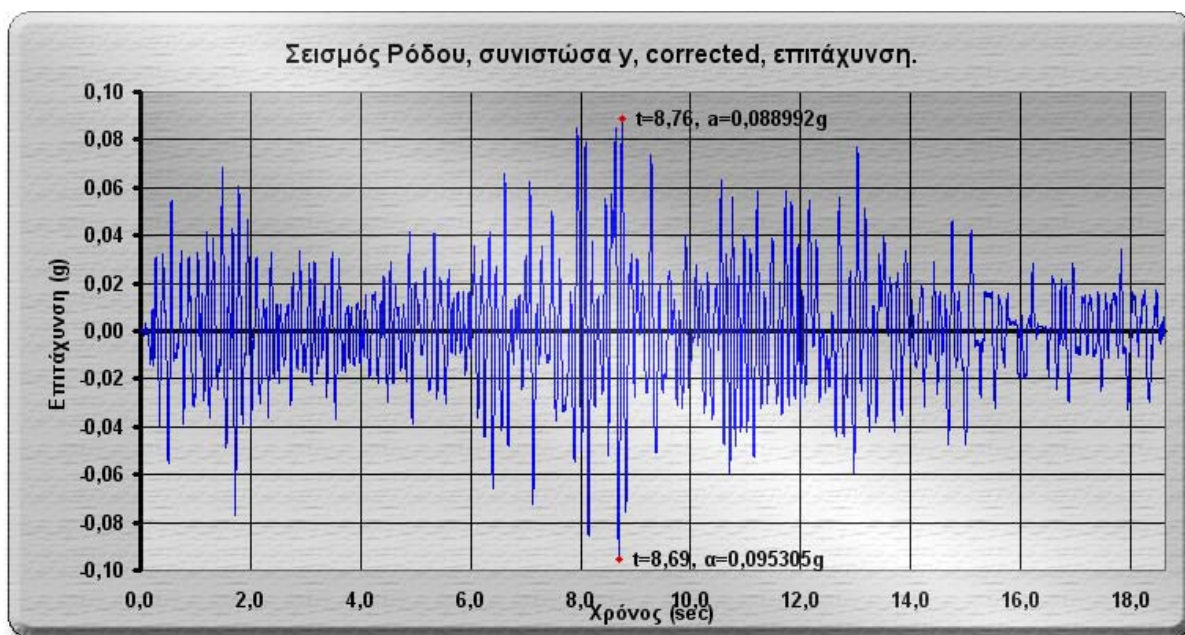
Στο ανωτέρω σχήμα, η εισαγωγή αξονικό επιστυλίου είχε ιδιαίτερος ενεργητική επίδραση τόσο στις τελικές μετακινήσεις, όσο και στην αποτροπή μεγάλου λικνισμού.

Έτσι, λοιπόν, μπορούμε να ισχυριστούμε ότι γενικά, **όσο πιο μεγάλη είναι η εξωτερική φόρτιση, τόσο ενεργητικότερη είναι η παρουσία αξονικού επιστυλίου.**

7) Εφαρμογή σε πραγματική κατάσταση (Lindos case study).

Το διδιάστατο μοντέλο (αυτό που δίνει γενικά πιο ακριβή αποτελέσματα) χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση ενός κίονα που πλησιάζει στα χαρακτηριστικά έναν κίονα της Ακρόπολης της Λίνδου. Ο σεισμός που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο σεισμός της Ρόδου, επιταχυνσιογράφημα του οποίου χρησιμοποιήθηκε με χορηγία του Internet-Site for European Strong-Motion Data (ISESD), του Imperial College, London {13}.

7.1) Λεπτομέρειες του σεισμού εισαγωγής (σεισμός Ρόδου).

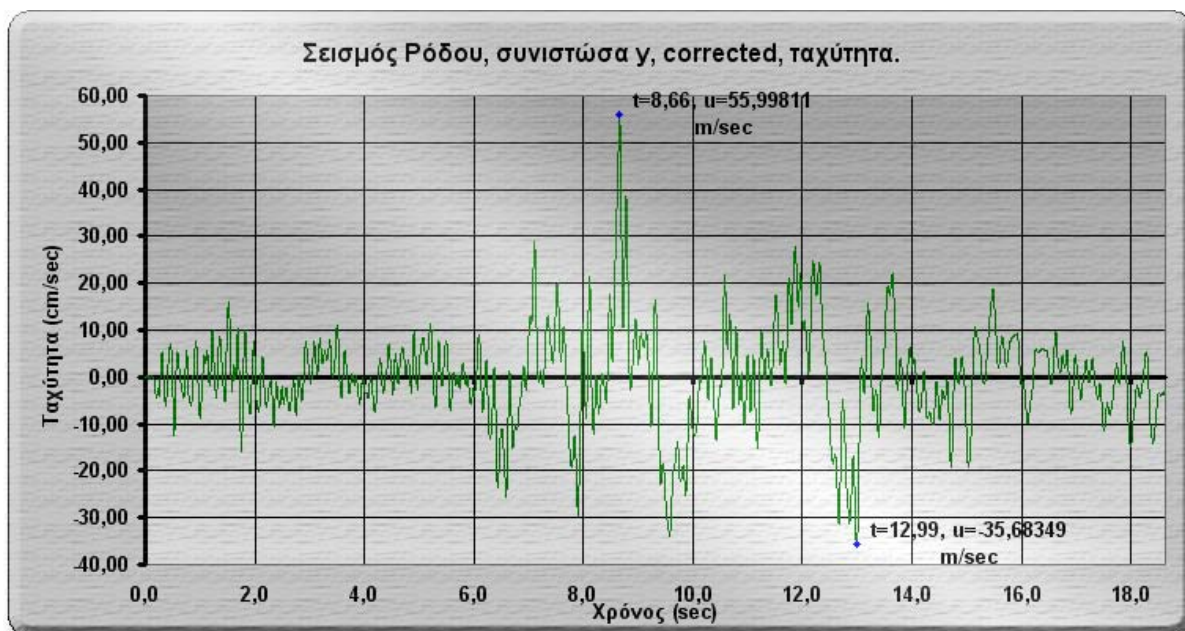


Διάγραμμα 7-1: Σεισμός της Ρόδου, επιταχύνσεις.

Στο μοντέλο μας εισήχθη ο σεισμός της Ρόδου, με τη συνιστώσα y, αφού σε ένταση Αγίας, μέγιστη ένταση κλπ ήταν πιο ισχυρή από τη συνιστώσα x. Τα παρακάτω είναι κάποιες από τις ιδιότητες του σεισμού, όπως αναλύθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος **SeismoSignal** από τη **SeismoSoft**:

- Μέγιστη Επιτάχυνση: **0,935g** στο χρόνο **t=8,69sec**.
- Μέγιστη Ταχύτητα: **55,998cm/sec** στο χρόνο **t=8,66sec**.
- Μέγιστη Μετακίνηση: **9,2286cm** στο χρόνο **t=12,45sec**.
- RMS επιτάχυνσης: **0,235g**.
- RMS ταχύτητας: **10,367cm/sec**.
- RMS μετακίνησης: **2,956cm**.
- Ένταση Αγίας: **15,846m/sec**.
- Πυκνότητα Ειδικής Ενέργειας: **2002,299cm²/sec**.
- Παράμετρος A95: **0,909g**.
- Μέγιστη Συνεχόμενη Επιτάχυνση (SMA): **0,758g**.
- Μέγιστη Συνεχόμενη Ταχύτητα: **34,063cm/sec**.
- Vmax / Amax: **59,895sec**.

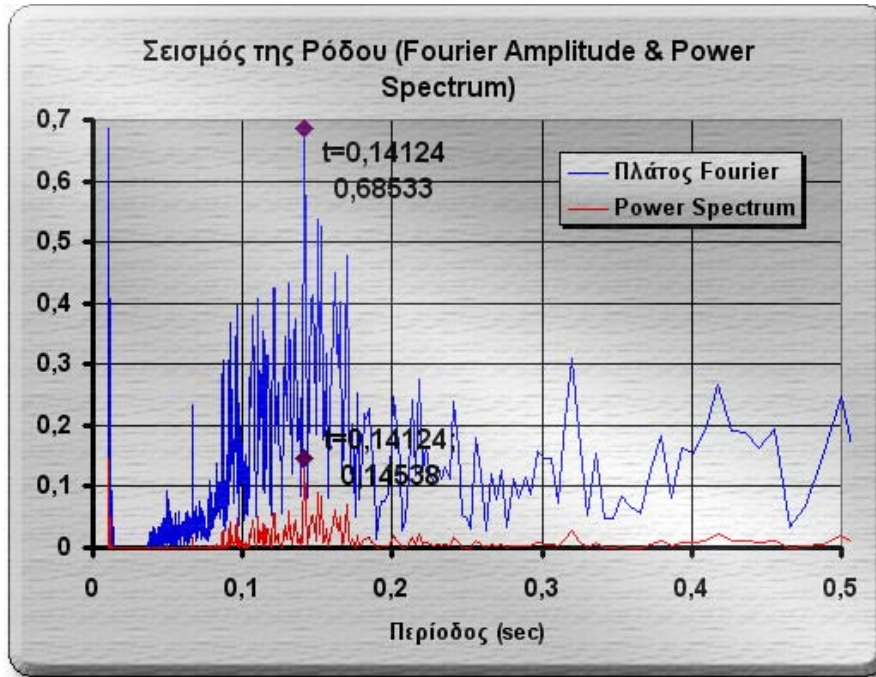
- Ενεργός Επιτάχυνση Σχεδιασμού (EDA): 0,760g.
- Χαρακτηριστική Ένταση (Ic): 0,492.
- Σωρευτική Απόλυτη Ταχύτητα (CAV): 3,338cm/sec.
- Ένταση Φάσματος Επιτάχυνσης (ASD): 0,668g.
- Ένταση Φάσματος Ταχύτητας (VSI): 171,853cm/sec.



Διάγραμμα 7-2: Σεισμός της Ρόδου, ταχύτητες.

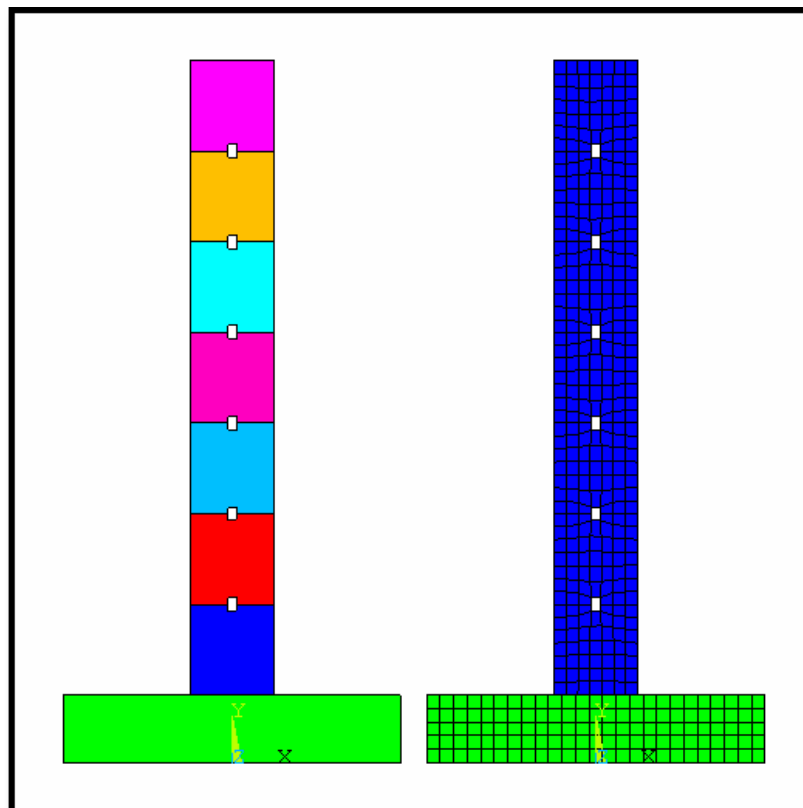


Διάγραμμα 7-3: Σεισμός της Ρόδου, μετακινήσεις.



Διάγραμμα 7-4: Σεισμός της Ρόδου, φάσματα.

7.2) Λεπτομέρειες του μοντέλου επίλυσης (C).



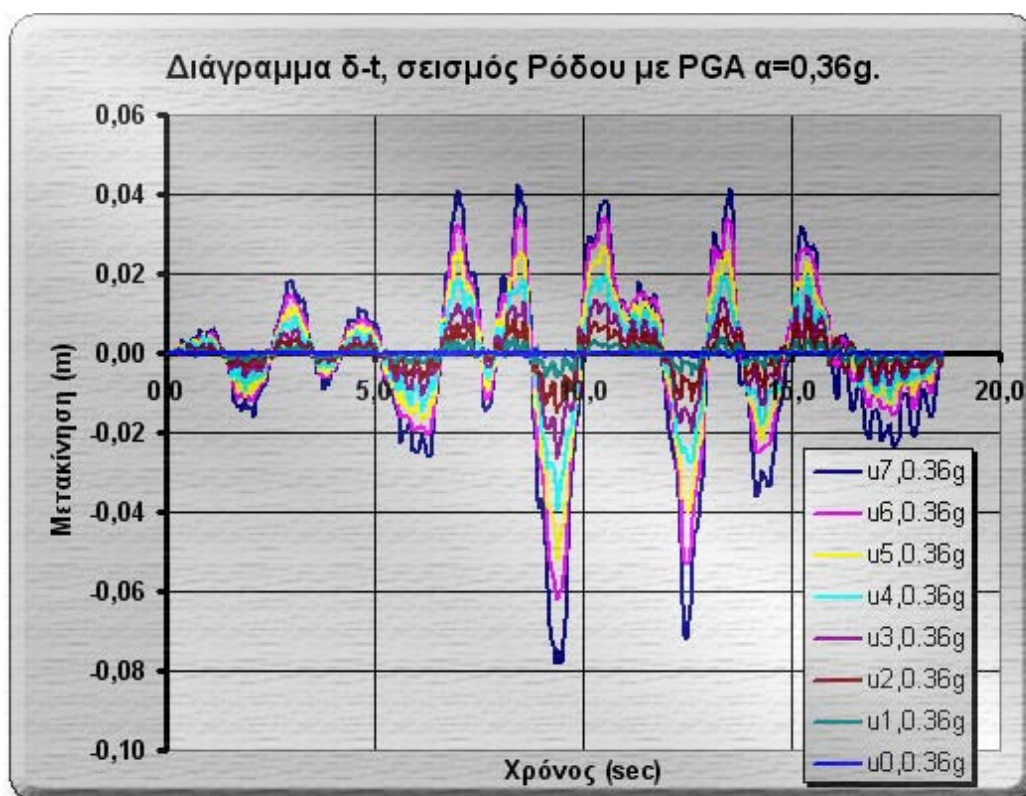
Σχήμα 7-5: Μοντέλο C δισδιάστατο μοντέλο 7 σπονδύλων (χωρίς εμπόλια).

| | |
|--------------------------------|--|
| <u>Μοντέλο:</u> | 2D. |
| <u>Φόρτιση:</u> | Σεισμική διέγερση (Σεισμός Ρόδου), με ένταση κορυφής, 0,36g, 0,72g και 1,08g. |
| <u>Εμπόλια:</u> | Όχι. |
| <u>Ένωση μεταξύ σπονδύλων:</u> | Απλή έδραση (με φαινόμενα τριβής και ολίσθησης). |
| <u>Τριβή:</u> | 31% της κατακόρυφης τάσης. |
| <u>Πυκνότητες:</u> | Βάση → 2500 kg/m ³ . Σπόνδυλοι → 2000 kg/m ³ . |
| <u>Διαστάσεις βάσης:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 2,50m × 0,50 m × 0,62 m. |
| <u>Διαστάσεις σπονδύλων:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,62m × 0,67 m × 0,62 m. |
| <u>Διαστάσεις οπών:</u> | {Μήκος × Ύψος × Βάθος} 0,06m × 0,10 m × 0,06 m. |
| <u>Αριθμός σπονδύλων:</u> | 7 |
| <u>Βαρύτητα:</u> | 9,81 m/sec ² . |
| <u>Φόρτιση Επιστυλίου:</u> | 0 N. |
| <u>Χρονική διακριτοποίηση:</u> | 0 ~ 10 ⁻⁵ sec → αρχικές συνθήκες. 10 ⁻⁵ ~ 18,63 sec → επίλυση. Βήμα επίλυσης → 0,004 sec |
| <u>Ζητούμενο:</u> | Διάγραμμα F-δ σε τακτά διαστήματα. |
| <u>Ιδιομορφική ανάλυση:</u> | 1 ^η ιδιομορφή: 2,0789 sec. 2 ^η ιδιομορφή: 0,35982 sec. 3 ^η ιδιομορφή: 0,16566 sec. 4 ^η ιδιομορφή: 0,14627 sec. 5 ^η ιδιομορφή: 0,080652 sec. |

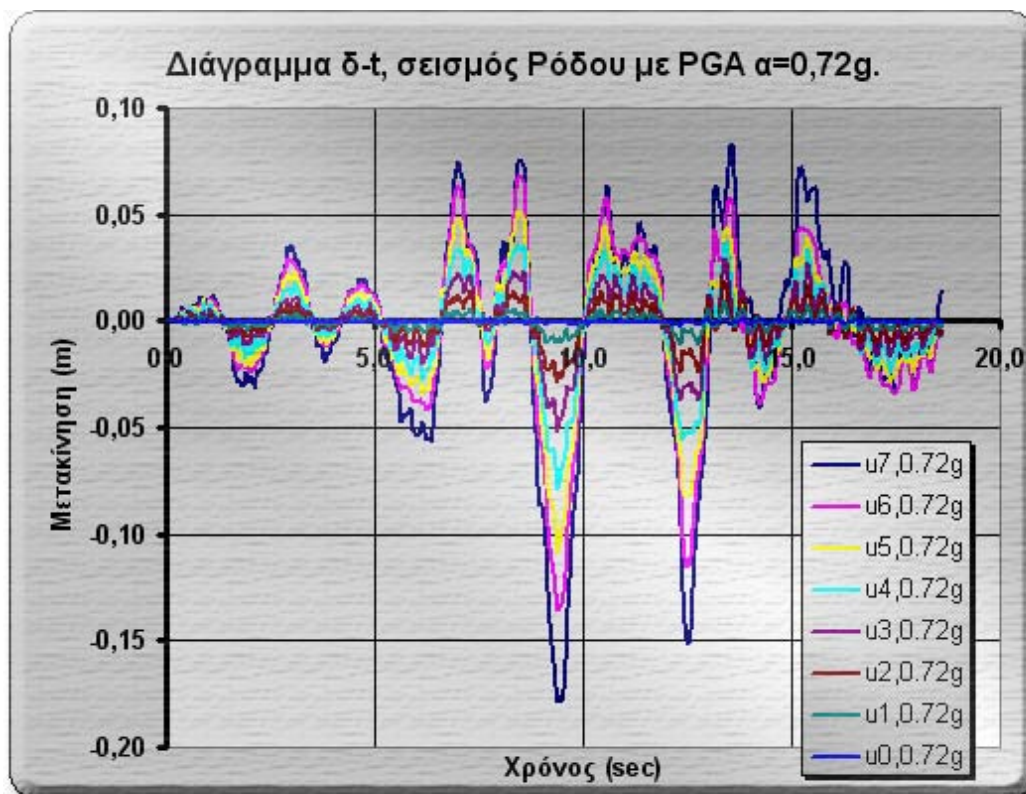
Παρατηρούμε ότι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος (2,0789 sec) είναι πολύ απομακρυσμένη από τη μέγιστη τιμή του φάσματος Fourier (0,14124 sec), κάτι που συνεισφέρει στην καλή συμπεριφορά του κίονα.

Επιλέξαμε να μη χρησιμοποιήσουμε εμπόλια γιατί η χρόνος επίλυσης και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς αυξάνεται εκθετικά με την εισαγωγή τους, ιδιαίτερα τώρα που έχουμε πλέον 7 σπόνδουλους προς επίλυση και όχι 5. Πρέπει, πάντως, να αναφέρουμε ότι η χρησιμοποίηση των ξύλινων εμπολίων θα άλλαζε ανεπαίσθητα μόνο τα αποτελέσματα, αφού έχουμε ήδη αποδείξει ότι δεν προσφέρουν κάτι το ουσιαστικό στη συμπεριφορά των μοντέλων. Επίσης, για να λάβουμε υπόψη μας τη δυσμενέστερη περίπτωση, δε χρησιμοποιήσαμε το αξονικό των επιστυλίων, αφού θα περιόριζε σε σημαντικό βαθμό το λικνισμό και τις μετακινήσεις.

7.3) Αποτελέσματα από την εισαγωγή του σεισμού της Ρόδου.



Σχήμα 7-6: Διάγραμμα δ-t μοντέλου E με 7 σπονδύλους και σεισμό πλάτους 0,36g.



Σχήμα 7-7: Διάγραμμα δ-t μοντέλου E με 7 σπονδύλους και σεισμό πλάτους 0,72g.



Σχήμα 7-8: Διάγραμμα δ-t μοντέλου E με 7 σπονδύλους και σεισμό πλάτους 1,08g.



Σχήμα 7-9: Σύγκριση δ-t μοντέλου E με 7 σπονδύλους και σεισμό με διάφορα πλάτη.



7.4) Παρατηρήσεις για τα αποτελέσματα της ανάλυσης για το σεισμό της Ρόδου.

- Η ανάλυση έγινε με εξαιρετικά πυκνή χρονική διακριτοποίηση (χρονικό βήμα ανά 0,004 sec), με αποτέλεσμα να κρατάει πολύ χρόνο και να απαιτεί άπλετο αποθηκευτικό χώρο για τα αποτελέσματα (της τάξης των 5+ GB) για κάθε επίλυση. Σε διαφορετική περίπτωση, συναντώνταν σοβαρά προβλήματα σύγκλισης. Η εισαγωγή εμπολίων συνεπάγεται την εκθετική αύξηση των ανωτέρω απαιτήσεων.
- Η μορφή της απόκρισης στις διάφορες στάθμες μεταξύ των τριών διαφορετικών διεγέρσεων είναι σε γενικές γραμμές παρόμοια. Αυτό παύει να ισχύει στο βαθμό αυτό στην περιοχή μεταξύ 10~15 sec της διέγερσης. Αυτό αποδεικνύει το μη γραμμικό χαρακτήρα του φαινομένου της επαφής, αφού υπό άλλες συνθήκες θα είχαμε σχεδόν πλήρη γραμμική σχέση μεταξύ της τιμής της έντασης και των μετακινήσεων.
- Δεν υπάρχουν πολύ μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις. Σε αυτό φαίνεται να συνηγορεί και η μορφή του σεισμού, αφού το επιταχυνσιογράφημα δίνει την εντύπωση της συμμετρίας μεταξύ των θετικών και των αρνητικών τιμών.
- Ο σεισμός της Ρόδου, ακόμα και με μεγάλα πλάτη διέγερσης δεν ήταν ικανός να ανατρέψει τον κίονα. Αντίθετα, όπως έχουμε δει προηγουμένως, κάποιος ημιτονοειδής παλμός θα μπορούσε να αποδειχτεί πολύ πιο καταστροφικός.
- Η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος (2,0789 sec) είναι πολύ απομακρυσμένη από τη μέγιστη τιμή του φάσματος Fourier (0,14124 sec), κάτι που συνεισφέρει στην καλή συμπεριφορά του κίονα.
- Σε γενικές γραμμές η μετακίνηση των μεσαίων σπονδύλων συμφωνεί με τις μετακινήσεις των ακραίων σπονδύλων.
- Για συμφωνία μεταξύ των δύο ανωτέρω ιδιοτιμών, η απόκριση του κίονα αναμένεται να είναι σαφώς πιο εντυπωσιακή, με αισθητές διαφορικές μετακινήσεις των σπονδύλων και με μεγαλύτερες πιθανότητες για ανατροπή.

8) Παρατηρήσεις και γενικά συμπεράσματα.

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η πολύπλοκη μη γραμμική συμπεριφορά των αρχαιοελληνικών κίωνων με σπονδύλους και προαιρετικά εμπόλια, που υπόκεινται σε διάφορες διεγέρσεις, όπως σεισμικές και ημιτονοειδείς. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στο δισδιάστατο πρόβλημα (μένοντας, έτσι, στην ανάλυση εντός επιπέδου), παρότι κάποια βήματα έγιναν και προς την τρισδιάστατη έννοια, με κύρια εμπόδια τις υψηλές υπολογιστικές απαιτήσεις της τελευταίας. Παρουσιάστηκε και ελέγχθηκε το φαινόμενο του λικνισμού και της ολίσθησης των σπονδύλων. Τα γενικά συμπεράσματα από την αποτίμηση της εν λόγω συμπεριφοράς των κίωνων καθώς και κάποιες παρατηρήσεις παρατίθενται συνοπτικά παρακάτω:

- Το τρισδιάστατο μοντέλο είναι ιδιαίτερα απαιτητικό σε υπολογιστική ισχύ κι έτσι μοιραία περιορίστηκε ο βαθμός χρησιμοποίησής του στην παρούσα εργασία. Μελλοντικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί (με παράλληλη αύξηση της ακρίβειάς του) στην ανάλυση του φαινομένου της επαφής σε τρισδιάστατα προβλήματα. Αυτό, σύμφωνα και με παλαιότερες μελέτες, θα επιτρέψει την καλύτερη διερεύνηση της εκτός επιπέδου απόκρισης των κίωνων με σπονδύλους. Πάντως, κάποια φαινόμενα τέτοιου είδους μπορεί κανείς να παρατηρήσει ακόμα και στο απλό τρισδιάστατο μοντέλο, αν και αυτά μάλλον οφείλονται στην ατελή γεωμετρική συμμετρία λόγω χαμηλού επιπέδου διακριτοποίησης.
- Για τον κύριο όγκο των αναλύσεων, χρησιμοποιήθηκε το δισδιάστατο μοντέλο, που, αν εξαιρέσει κανείς την αδυναμία ανάλυσης εκτός επιπέδου, τα αποτελέσματα που έδωσε ήταν πολύτιμα για την προσπάθεια καλύτερης κατανόησης του φαινομένου της επαφής μεταξύ σπονδύλων.
- Στην αρχαιότητα χρησιμοποιούνταν τόσο ξύλινα όσο και ορειχάλκινα εμπόλια για τον καλύτερο έλεγχο των διαφορικών μετακινήσεων μεταξύ των σπονδύλων, δημιουργώντας στην ουσία τη λογική του ικανοτικού σχεδιασμού. Στην παρούσα φάση του μοντέλου, στάθηκε δυνατή μόνο η εισαγωγή ξύλινων εμπολίων, αφού υπήρχαν προβλήματα σύγκλισης για υλικά μεγάλης δυσκαμψίας όπως ο ορειχάλκος. Η ανάλυση με ξύλινα εμπόλια έδειξε ότι έχουν περιορισμένη χρησιμότητα. Η συντριπτική διαφορά δυσκαμψίας μεταξύ του πωρόλιθου των σπονδύλων και των ξύλινων εμπολίων είχε ως αποτέλεσμα την σχεδόν άμεση θραύση τους με την εισαγωγή των καταναγκασμών λόγω διαφορικής κίνησης μεταξύ των σπονδύλων. Η μελλοντική βελτίωση του μοντέλου θα επιτρέψει την διερεύνηση της αντίστοιχης συνεισφοράς υλικών, όπως ο ορειχάλκος, στον περιορισμό των μετακινήσεων αυτών. Εικάζεται, πάντως, ότι η χρήση ορειχάλκινων εμπολίων θα έχει σαφώς ευνοϊκότερη συνεισφορά στη λογική του πρώιμου αυτού ικανοτικού σχεδιασμού, προσφέροντας μια πρώτη γραμμή άμυνας έναντι περιορισμένων μετακινήσεων, κυρίως λόγω του ελατού και όλκιμου χαρακτήρα των αντίστοιχων υλικών, που έρχονται σε αντίθεση με το ψαθυρό χαρακτήρα των εμπολίων από ξύλο.
- Η απόκριση των αρχαιοελληνικών σπονδυλωτών κίωνων (τουλάχιστον οι μεμονωμένοι, οι οποίοι και εξετάστηκαν) στην χωρίς ζημιές (τέλεια) κατάσταση τους δείχνουν αξιοσημείωτη αντοχή σε σεισμικές φορτίσεις, ακόμα και ιδιαίτερα μεγάλου πλάτους. Ενδεικτικά αναφέρεται η αξιοθαύμαστη αντίσταση του κίονα με 7 σπόνδλους σε μεγάλη σεισμική επιπόνηση (τεχνητά αυξημένος σεισμός Ρόδου με τιμή μέγιστης επιτάχυνσης τα 1,08g). Η παραμένουσα μετακίνηση κάθε σπονδύλου ήταν αρκετά κάτω από την τιμή των 5 εκατοστών, επιτρέποντας τη σχετικά εύκολη επισκευή των ζημιών ακόμα και από έναν σεισμό τέτοιου μεγέθους. Σημειώνουμε ότι ευρήματα παλαιότερων ερευνών έδειξαν ότι οι



ατέλειες δημιουργούν σοβαρά προβλήματα ευστάθειας στους κίονες. Αυτό μας οδηγεί στην εικασία ότι είναι μάλλον η ανθρώπινη αρνητική παρέμβαση ή η φυσική φθορά είναι περισσότερο υπεύθυνοι για την κατάρρευση των περισσότερων κίωνων και όχι τόσο ένας σημαντικό μεγέθους σεισμός.

- Η συνεισφορά του αξονικού φορτίου του επιστυλίου δρά εξαιρετικά θετικά στην απόκριση των κίωνων. Ενδεικτικά αναφέρουμε ότι σε ανάλυση pushover, για την μετακίνηση 3 εκατοστών του άνω σπόνδυλου απαιτήθηκε δύναμη περίπου 6,5 KN όταν υπήρχε επιφόρτιση 17 KN, έναντι περίπου 4,5 KN όταν η επιφόρτιση απουσίαζε. Αντίστοιχη συμπεριφορά παρατηρήθηκε και σε σεισμική ή ημιτονοειδή ένταση, με την αξιοσημείωτη παρατήρηση ότι η συνεισφορά αυτή του αξονικού λόγω επιστυλίου γινόταν πιο έντονη για μεγαλύτερη τιμή του εξωτερικού αιτίου. Για παράδειγμα αναφέρουμε τον σημαντικό περιορισμό των μετακινήσεων από το μοντέλο υπό φόρτιση μεγέθους 0,50g με την εισαγωγή αξονικού επιστυλίου, ενώ αντίστοιχα για 0,36g η αντίστοιχη μείωση ήταν λιγότερο αισθητή. Αιτία για την ευνοϊκή συμπεριφορά του αξονικού λόγω επιστυλίου είναι η ανάπτυξη πρόσθετων διατμητικών τάσεων τριβής μεταξύ των σπονδύλων, αποτρέποντας την ολίσθηση. Για το λόγο αυτό, μπορούμε να εικάσουμε ότι διαχρονικά, η τυχόν απώλεια του επιστυλίου σε μία αρχαιοελληνική κατασκευή συνεπαγόταν την απώλεια μιας γραμμής άμυνας έναντι διεγέρσεων μεγάλης έντασης.
- Αναλύσεις έγιναν τόσο με αυξανόμενη οριζόντια δύναμη στην κορυφή ή στη βάση, όσο και με ημιτονοειδείς ή σεισμικές φορτίσεις. Σημειώνουμε πάντως ότι τα διάφορα μοντέλα ήταν πιο ευαίσθητα σε ανατροπή υπό ημιτονοειδείς φορτίσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ημιτονοειδής φόρτιση περικλείει σημαντικά μεγαλύτερο ποσό ενέργειας συγκριτικά με σεισμική φόρτιση μέγιστης τιμής ίση με το πλάτος της ημιτονοειδούς. Για το λόγο αυτό τα αποτελέσματα μεταξύ σεισμικών και ημιτονοειδών φορτίσεων δεν είναι άμεσα συγκρίσιμα (πχ. χρησιμοποιώντας μόνο τις μέγιστες τιμές τους). Η διαφορά στην ενέργεια μεταξύ των δύο δυναμικών φαινομένων ήταν η αιτία που η ανάπτυξη λικνιστικής συμπεριφοράς ήταν ιδιαίτερα έκδηλη στην ανάλυση με την εισαγωγή παλμού ημιτονοειδούς τύπου. Η σεισμική ένταση (τουλάχιστον του σεισμού της Ρόδου) δεν μπόρεσε να εισάγει το φαινόμενο του λικνισμού σε αντίστοιχο επίπεδο.
- Γνώμη μας είναι ότι η αποκατάσταση των σπονδυλωτών κατασκευών πρέπει να γίνεται με υλικά όσο το δυνατόν εγγύτερα στα αρχικά. Η υπερβολική εμπιστοσύνη στο σκυρόδεμα κατέστρεψε, αντί να διορθώσει, τους κίονες στη προπολεμική προσπάθεια αποκατάστασής τους από τους Ιταλούς (1938).
- Το κύριο σκεπτικό των όποιων παρεμβάσεων πρέπει να είναι εναρμονισμένο με το αντίστοιχο χαρακτήρα των κίωνων στην εποχή κατασκευής τους. Πρέπει η αρχή του ικανοτικού σχεδιασμού να μην παραβιάζεται (πχ με ιδιαίτερα ισχυρά ή ασθενή εμπόλια) και να μην εισάγονται στοιχεία που θα μπορούσαν να βλάψουν τη συμμετρία του κίονα ή τη σχετική δυσκαμψία μεταξύ των υλικών. Πρέπει να γίνεται διάγνωση των φθορών του μοντέλου και η επισκευή με αντίστοιχα υλικό. Πρέπει να υπολογίζονται χαρακτηριστικά όπως το τελικό βάρος, οι συντελεστές τριβής, και η ιδιοπερίοδος του μοντέλου για να μπορέσει η παρέμβαση να είναι επιτυχημένη και να έχει βάθος χρόνου.
- Κλείνοντας, αναφέρουμε ότι η μελέτη επιδέχεται μελλοντικών βελτιώσεων και προσθηκών, κυρίως στον τομέα του τρισδιάστατου μοντέλου. Η εκθετική αύξηση της υπολογιστικής ισχύος με το χρόνο θα διευκολύνει την ακριβέστερη ανάλυση με πυκνότερη διακριτοποίηση τόσο στο δισδιάστατο τομέα, όσο και στο τρισδιάστατο.

9) Βιβλιογραφία & παραπομπές.

- {1} G.W. Housner, “The behavior of inverted pendulum structures during Earthquakes”, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 53, 404-417, (1963).
- {2} Ζερβουδάκη Η., “Αναστηλωτικές εργασίες στην Ακρόπολη της Λίνδου, Ι, Ελληνιστική Στοά (Α)”, *Υπουργείο Πολιτισμού, Ταμείο διαχείρισης πιστώσεων για την εκτέλεση αρχαιολογικών έργων, Επιτροπή στερεώσεως και αναστηλώσεως μνημείων Ακρόπολης Λίνδου*, (2002).
- {3} Manos G. et al, “Models of ancient columns and colonnades subjected to horizontal base motions: study of their dynamic and earthquake behaviour”, *11th European Conference of Earthquake Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam*, (1998).
- {4} Mitsopoulou E. et al, “Numerical analysis of the dynamic seismic response of multi-block monumental structures”, *11th European Conference of Earthquake Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam*, (1998).
- {5} Psycharis I. et al, “Harmonic and earthquake response of a classical column”, *11th European Conference of Earthquake Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam*, (1998).
- {6} Manos G. et al, “Study of the dynamic and earthquake behavior of ancient columns and colonnades with and without the inclusion of wires with energy dissipation characteristics”, *12th World Conference on Earthquake Engineering, New Zealand Society for Earthquake Engineering, Upper Hutt, New Zealand, Paper No. 0235*, (2000).
- {7} Papantonopoulos C. et al, “Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, (2002).
- {8} Makris N., Roussos Y., “Rocking Response and Overturning of Equipment Under Horizontal Pulse-Type Motions”, Report PEER-1998/05, *Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley*, (1998).
- {9} Mouzakis H. et al, “Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, (2002).
- {10} Psycharis I. et al, “Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 29, (2000).
- {11} Τσουμής Γ., “Ιδιότητες και αξιοποίηση του ξύλου”, *εκδόσεις Α.Π.Θ.*, (1978).
- {12} ANSYS, “Documentation”, (2003).
- {13} Internet-Site for European Strong-Motion Data (ISESD), Imperial College.



10) ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Το αρχείο εισαγωγής στο ANSYS.

```

! Δισδιάστατο ή τρισδιάστατο μοντέλο πέντε σπονδύλων σε ολίσθηση (με
! αυξανόμενη οριζόντια δύναμη στη διεπιφάνεια κάτω σπόνδυλου-εδάφους) και
! σε λικνισμό (με σεισμό). Τα δισδιάστατα μοντέλα περιέχουν ξύλινους
! διατμητικούς συνδέσμους.
! Χρησιμοποιήθηκε "transient analysis" πλήρους τύπου.
! Προσοχή θέλει αν αλλάξει η διακριτοποίηση, στην επιλογή του numkcomv
! όπως και στο τέλος το ποιοι κόμβοι θα παρουσιαστούν στην postproc26.
!
!
! ,=:~;+??%&, .-, ,::~;+&&&~
! -#####@;~:* -#@, :##@?+;;;=.
! =*,.###* .@##* &#@,
! .@##= &#: ,~+-- -##= .; &~. *~&~. ,~; .; &~.
! .%#+ =#?~::~?#@ .S###&&&&&~ .+?:=?#: =?+::+#% %?;~::##~
! ;#$ . ,@##* &#& ;##%;;~:- -@: =:..?+. #@ ;##~. ,##,
! *##- .%#&. -#@. ,##% *@~ .%; =#~ -#@- .%#;
! %#? ;##. .@##= +##* &#. ;#. -@; ,@##- ;##.
! =##* -#@. ?#& @##. .,:; * @##- .; &-@##- .-&@= ?#; -##,
! %#&. @: =#$, ;#####S&- :#####@; .#####: . =##. %#~
! -. * . , * , -=-, . ---, ,=-. , , -.
!
/psmacro ! Τα περιεχόμενα των κληθέντων input files θα περιλαμβάνονται
! στο αντίστοιχο αρχείο .log.
/config,nres,5000 ! Αριθμός αποτελεσμάτων: 5000.
SW0=2 ! Αν 2, τότε 2D ανάλυση, αν 3, τότε 3D ανάλυση.
*if,SW0,eq,2,then
/title, 2D analysis of 7 collonades by ThEcon
*elseif,SW0,eq,3,then
/title, 3D analysis of 7 collonades by ThEcon
*endif
/prep7
SW1=2 ! Αν 1, τότε οριζόντια δύναμη, αν 2, τότε σεισμός.
SW2=0 ! Αν 0, τότε χωρίς συνδέσμους διάτμησης, αν 1, τότε με συνδέσμους
! διάτμησης.
SW3=0 ! Αν 0, τότε υπάρχει απλή επαφή με τριβή, αν 3, τότε υπάρχει
! άρθρωση με πλήρη ένωση όλων των επιφανειών επαφής συνδέσμων
! εκτός πρώτου με βάση.
SW4=1 ! Αν 0 και SW1=1, τότε η δύναμη μπαίνει στη βάση, αν 1, τότε στην
! κορυφή.
SW5=0 ! Αν 1, τότε πάκτωση στη διεπιφάνεια βάσης-σπόνδυλου.
SW6=0 ! Αν 1, τότε θα υπάρχει απομάκρυνση των στοιχείων διάτμησης για
! τιμές ίσες με ywood.
SW7=0 ! Αν 1, τότε θα γίνει υπολογισμός της κατάλληλης δύναμης για F-δ.
upordown=1 ! 1 για αυξανόμενο φορτίο, 2 για μειούμενο.
*if,SW0,eq,3,then
SW2=0
*endif
syxnths=1!0.499670 ! Συχνότητα ημιτονοειδούς φόρτισης.
*if,SW1,eq,2,then
numpoints=1863!223!51 ! Αριθμός ! Για rocking (SW1=2)
! δεδομένων (σειρών) επιταχυνσιογραφήματος.
/INPUT,'__insertquake','inp',,, 0 ! Εισαγωγή αρχείου με τα δεδομένα του σεισμού.
A1(numpoints,1)=0 ! Επιτάχυνση τέλους μηδενική.
seiscale=9.81*1.08/0.09531!3/9.81 ! Scale factor για το σεισμό.
*vpplot,A1(1,0),A1(1,1) ! Παρουσίαση του πίνακα επιταχύνσεων.
DT=syxnths*0.004!0.05 ! Βήμα χρονικής διακριτοποίησης.
T1=syxnths*18.63!18.63!1.5!12.5 ! Τελικός χρόνος για τη χρονική διακριτοποίηση.
*endif
PI=3.1415926535897932384626433832795
Esoil=30e9 ! ΥΛΙΚΟ ΕΔΑΦΟΥΣ:Μέτρο ελαστικότητας 30 GPa.
vsoil=0.3 ! Λόγος Poisson.

```

```

Psoil=2500 ! Πυκνότητα (Kg/m^3).
Tsoil=0.31 ! Συντελεστής τριβής {Δεν παίζει ρόλο}.
PDsoil=0! ! Αν 0, τότε το διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων είναι
! απενεργοποιημένο, αλλιώς είναι ενεργοποιημένο.
ysoil=8e6 ! Διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων: Διαρροή στα 8 ΜΡα.
Qsoil=Esoil/100 ! Κλίση πλαστικής περιοχής.
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
Ecoll=1.044e9 ! ΥΛΙΚΟ ΣΤΥΛΟΥ: Μέτρο ελαστικότητας 1044 ΜΡα.
vcoll=0.3 ! Λόγος Poisson.
Pcoll=2000 ! Πυκνότητα (Kg/m^3).
Tcoll=0.31 ! Συντελεστής τριβής {Δεν παίζει ρόλο}.
PDcoll=0! ! Αν 0, τότε το διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων είναι
! απενεργοποιημένο, αλλιώς είναι ενεργοποιημένο.
ycoll=5e6 ! Διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων: Διαρροή στα 5 ΜΡα.
Qcoll=Ecoll/100 ! Κλίση πλαστικής περιοχής.
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
Ewood=20e6 ! ΥΛΙΚΟ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ: Εύλο. Μέτρο ελαστικότητας 20 ΜΡα.
vwood=0.3 ! Λόγος Poisson.
Pwood=500 ! Πυκνότητα (Kg/m^3).
Twood=0.31 ! Συντελεστής τριβής {Δεν παίζει ρόλο}.
PDwood=0! ! Αν 0, τότε το διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων είναι
! απενεργοποιημένο, αλλιώς είναι ενεργοποιημένο.
ywood=130000 ! Διγραμμικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων: Διαρροή στα 130 ΚΡα.
Qwood=Ewood/100 ! Κλίση πλαστικής περιοχής.

katwmhkos=2.5 ! Μήκος κάτω περιοχής (έδαφος) 2.5m.
katwypsos=0.5 ! Ύψος κάτω περιοχής (έδαφος) 0.5m.
panwmhkos=0.62!1.0!0.2 ! Μήκος πάνω περιοχής (σπόνδυλοι) 1.0m.
panwypsos=0.67!0.5!*5!0.6 ! Ύψος πάνω περιοχής (σπόνδυλοι) 0.5m.
depth1=0.62!1.0!0.2 ! Πάχος δισδιάστατου μοντέλου.
holex=0.06 ! Διάμετρος οπής.
holey=0.10 ! Ύψος οπής.
depth2=holex ! Βάθος οπής δισδιάστατου μοντέλου.
woodx=holex-0.02 ! Εύλινοσ σύνδεσμος διάτμησης.
depth3=woodx ! Βάθος ξύλινου συνδέσμου διάτμησης δισδιάστατου μοντέλου.
temaxia=7!5!/5 ! Αριθμός σπονδύλων.
gravidad=9.81 ! Επιτάχυνση βαρύτητας.
overforce=1.0!1.05 ! Συντελεστής υπερφόρτισης.
vertforce=0*2.62*0.75*0.45*Pcoll*gravidad ! Συνολικό κατακόρυφο φορτίο από επιστύλιο {N}.
trivius1=0.31 ! Συντελεστής τριβής (contact friction/pressure) μεταξύ σπονδύλων.
trivius2=trivius1/10 ! Συντελεστής τριβής (contact friction/pressure) μεταξύ σπονδύλων
! και συνδέσμων.

T0=0.01*syxnths ! Αρχικός χρόνος για τη χρονική διακριτοποίηση.
*if,SW0,eq,2,then
    numkomv=21 ! Αριθμός κόμβων στη διεπιφάνεια βάσης (Πρέπει να αλλάξει αν
! αλλάξει η διακριτοποίηση!).
*elseif,SW0,eq,3,then
    numkomv=14!39 ! Αριθμός κόμβων στη διεπιφάνεια βάσης (Πρέπει να αλλάξει αν
! αλλάξει η διακριτοποίηση!).
*endif

!----- ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ -----
/cval,1,0,100000,130000,160000,200000,1000000,5000000,10000000 ! Σημεία αλλαγής χρωμάτων διαγραμμάτων.
*if,SW0,eq,3,then
    panwmhkos=2*SQRT(panwmhkos*depth1/PI)
    katwmhkos=2*SQRT(katwmhkos*depth1/PI)
*endif
*if,SW2,eq,0,then !!Για την περίπτωση ανυπαρξίας συνδέσμων διάτμησης
    syndweight=0 ! Μηδενικό βάρος συνδέσμων.
*elseif,SW2,eq,1,then !!Για την περίπτωση ύπαρξης συνδέσμων διάτμησης!!!
    syndweight=(temaxia-1)*holey*woodx*depth3*Pwood*gravidad ! Υπολογισμός βάρους συνδέσμων.
*endif
*if,SW0,eq,2,then
    sponweight=(panwmhkos*panwypsos*depth1-holex*depth2*holey/2)*Pcoll*gravidad
    restweight=(panwmhkos*panwypsos*depth1*temaxia-(temaxia-1)*holex*depth2*holey)*Pcoll*gravidad
*elseif,SW0,eq,3,then
    sponweight=(PI*panwmhkos*panwmhkos/4*panwypsos)*Pcoll*gravidad
    restweight=(PI*panwmhkos*panwmhkos/4*panwypsos*temaxia)*Pcoll*gravidad
*endif
*if,SW3,ne,0,then ! Για πλήρη ένωση όλων των
! επιφανειών εκτός αυτών
! με τη βάση.
    
```




```

*if, SW7, eq, 1, then
    finalforce=(sponweight+vertforce)*trivius1*overforce
*else
    finalforce=(restweight+syndweight+vertforce)*overforce*panwmhkos/(2*temaxia*panwypsos)
*endif

! Για F-δ.
! Για τις άλλες περιπτ.
! Τελική οριζόντια δύναμη
! στην κορυφή.
! Για απλή επαφή με τριβή.
! Για F-δ.

*else
*if, SW7, eq, 1, then
    finalforce=(sponweight+vertforce)*trivius1*overforce
*else
    finalforce=(restweight+syndweight+vertforce)*trivius1*overforce
! Για τις άλλες περιπτ.
! Τελική οριζόντια δύναμη
! στη βάση για την
! ολίσθηση.

*endif
*endif
*if, SW4, eq, 0, then
    yloc=katwypsos
    narea=2
*elseif, SW4, eq, 1, then
    yloc=katwypsos+temaxia*panwypsos
    narea=temaxia+1
*endif
*if, SW2, eq, 1, then
! Αν έχουμε συνδέσμους
! διάτμησης και
! αν έχουμε fracture, τότε:
! Εισαγωγή πίνακα χρονικών
! τιμών fracture συνδέσμων
! διάτμησης.
! Τίτλος τιμών χρόνου "1.0".

    *if, SW6, eq, 1, then
        *dim, SW6tab, table, temaxia-1, 1

        SW6tab(0, 1)=1.0
        *do, i, 1, temaxia-1
            SW6tab(i, 0)=i
! Τιμή κάθε συνδέσμου
! διάτμησης (από κάτω προς
! τα πάνω).

        *ask, SW6tab(i, 1), Fracture time of block i (blocks from bottom to top), 9999
! Χειροκίνητη εισαγωγή χρόνου fracture για
! κάθε κομμάτι.

    *enddo
*endif
*endif
!----- ΤΕΛΟΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΩΝ -----

!----- ΣΥΝΕΧΕΙΑ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ -----
*if, SW1, eq, 1, then
! Για sliding (SW1=1)
    DT=0.01
! Βήμα χρονικής διακριτοποίησης.
    T1=1.0!2.5
! Τελικός χρόνος για τη χρονική διακριτοποίηση.
    *dim, FF1, table, 2, 1
! Πίνακας φόρτισης (επιτρέπει γραμμική παρεμβολή).
    FF1(1, 0)=0.0
! Χρόνος 0.0 sec.
    FF1(2, 0)=T1
! Χρόνος T1 sec.
    FF1(0, 1)=1.0
! Τίτλος επιταχύνσεων "1.0".
    FF1(upordown, 1)=0.0
! Δύναμη 0.0 (N) για χρόνο 0.0 sec.
    FF1(3-upordown, 1)=finalforce
! Δύναμη finalforce (N) για χρόνο T1 sec.
    *vplot, FF1(1, 0), FF1(1, 1)
! Παρουσίαση του πίνακα φόρτισης.
*endif

!=====
!*****
!***** ΤΕΛΟΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ *****
!*****
!=====

*if, SW0, eq, 2, then
    rectng, -katwmhkos/2, katwmhkos/2, 0, katwypsos
! Προσδιορισμός
! της περιοχής
! εδάφους.

    *do, i, 1, temaxia, 1
! Προσδιορισμός
! της περιοχής
! σπονδύλων.

    rectng, -panwmhkos/2, panwmhkos/2, katwypsos+panwypsos*(i-1), katwypsos+panwypsos*i
    *if, i, ne, 1, then

```



```

rectng,-holex/2,holex/2,katwypsos+panwypsos*(i-1),katwypsos+panwypsos*(i-1)+holey/2
asba,i+1,i+2
numcmp,area
*endif
*if,i,ne,temaxia,then
rectng,-holex/2,holex/2,katwypsos+panwypsos*i-hole/2,katwypsos+panwypsos*i
asba,i+1,i+2
numcmp,area
*endif
*enddo

*if,SW2,eq,1,then
! Προσδιορισμός
! της περιοχής
! συνδέσμων.

*do,i,1,temaxia-1,1
rectng,-woodx/2,woodx/2,katwypsos+panwypsos*i-hole/2,katwypsos+panwypsos*i+holey/2-0.005
*enddo
*endif
aplot
*elseif,SW0,eq,3,then
/view,1,1,0,1
/ang,1,-90,zs,1
/ang,1,-25,xs,1
/rep,fast

cyl4,0,0,katwmhkos/2,,,,katwypsos
! Προσδιορισμός
! της περιοχής
! εδάφους.

*do,i,1,temaxia,1
! Προσδιορισμός
! της περιοχής
! σπονδύλων.

cyl4,0,0,panwmhkos/2,,,,panwypsos
allsel
vsel,s,volu,,i+1,i+1,,1
vgen,,all,,,,katwypsos+panwypsos*(i-1),,,1
*enddo
allsel
vplot
*endif

!----- Οι αρχικοί τύποι στοιχείων.

*if,SW0,eq,2,then
et,1,plane82,,,3,,2! Στοιχείο 1, τύπου plane82 (οκτάκομβο), εισαγωγή συγκεκριμένου πάχους,
! επίπεδη ένταση, τάσεις στους κόμβους, δεδομένα εξόδου επιπέδου.
type,1
! Ενεργοποίηση στοιχείου 1, είναι μόνο για το έδαφος.
r,1,depth1
! Δημιουργία real σταθεράς με την ταμπέλα "1", με το πάχος του μοντέλου.
*elseif,SW0,eq,3,then
et,1,solid45,,1,,1,1! Στοιχείο 1, τύπου solid45 (οκτάκομβο), τάσεις στους κόμβους, δεδομένα
! εξόδου επιπέδου.
type,1
! Ενεργοποίηση στοιχείου 1, είναι μόνο για το έδαφος.
r,1,1
! Δημιουργία real σταθεράς με την ταμπέλα "1", με το συντελεστή Hourglass.
*endif
real,1
! Ενεργοποίηση real σταθεράς για το στοιχείο 1.

*if,SW0,eq,2,then
et,2,plane82,,,3,,2! Στοιχείο 2, τύπου plane82 (οκτάκομβο), εισαγωγή συγκεκριμένου πάχους,
! επίπεδη ένταση, τάσεις στους κόμβους, δεδομένα εξόδου επιπέδου.
type,2
! Ενεργοποίηση στοιχείου 2, για τους σπόνδυλους.
r,2,depth1
! Δημιουργία real σταθεράς με την ταμπέλα "2", με το πάχος του μοντέλου.
*elseif,SW0,eq,3,then
et,2,solid45,,1,,1,1! Στοιχείο 2, τύπου solid45 (οκτάκομβο), τάσεις στους κόμβους, δεδομένα
! εξόδου επιπέδου.
type,2
! Ενεργοποίηση στοιχείου 2, για τους σπόνδυλους.
r,2,1
! Δημιουργία real σταθεράς με την ταμπέλα "2", με το συντελεστή Hourglass.
*endif
real,2
! Ενεργοποίηση real σταθεράς για το στοιχείο 2.

*if,SW2,eq,1,then
et,3,plane82,,,3,,2! Στοιχείο 3, τύπου plane82 (οκτάκομβο), εισαγωγή συγκεκριμένου πάχους,
! επίπεδη ένταση, τάσεις στους κόμβους, δεδομένα εξόδου επιπέδου.

```



```

type,3
r,3,depth3
real,3
*endif

! Ενεργοποίηση στοιχείου 3, για τους συνδέσμους.
! Δημιουργία real σταθεράς με την ταμπέλα "3", με το αντίστοιχο πάχος.
! Ενεργοποίηση real σταθεράς για το στοιχείο 3.

*if,SW0,eq,2,then
    et,4,targel69
    et,5,contal72,,,,,
    *elseif,SW0,eq,3,then
        et,4,targel70,0
        et,5,contal74,,,,,
    *endif
! Τέταρτο στοιχείο, "target".
! Πέμπτο στοιχείο, "contact".

*elseif,SW0,eq,3,then
    et,4,targel70,0
    et,5,contal74,,,,,
    *endif
! Τέταρτο στοιχείο, "target".
! Πέμπτο στοιχείο, "contact".

*endif
!keyopt,5,7,3
!keyopt,5,8,0
!keyopt,5,10,2
keyopt,5,12,0
! Minimum T/L increment (απενεργοποιημένο).
! Asymmetric Contact off (0), on (2).
! Αλλαγή δυσκαμψίας επαφής σε κάθε iteration (απενεργοποιημένη).
! Απλή επαφή με τριβή.

*if,SW0,eq,2,then
    et,6,targel69
    et,7,contal72,,,,,
    *elseif,SW0,eq,3,then
        et,6,targel70,0
        et,7,contal74,,,,,
    *endif
! Έκτο στοιχείο, "target".
! Εβδομο στοιχείο, "contact".

*elseif,SW0,eq,3,then
    et,6,targel70,0
    et,7,contal74,,,,,
    *endif
! Έκτο στοιχείο, "target".
! Εβδομο στοιχείο, "contact".

*endif
!keyopt,7,7,3
!keyopt,7,8,0
!keyopt,7,10,2
keyopt,7,12,SW3
! Minimum T/L increment (απενεργοποιημένο).
! Asymmetric Contact off (0), on (2).
! Αλλαγή δυσκαμψίας επαφής σε κάθε iteration (απενεργοποιημένη).
! Απλή ή bonded επαφή, ανάλογα με το διακόπτη SW3.

type,5
! Ενεργοποίηση στοιχείου 5.

!----- Ιδιότητες υλικών.

mp,ex,1,Esoil
mp,nuxy,1,vsoil
mp,mu,1,Tsoil
mp,dens,1,Psoil
*if,PDsoil,ne,0,then
    tb,biso,1
    tbdata,1,ysoil
    tbdata,2,Qsoil
*endif
! ΥΛΙΚΟ ΕΔΑΦΟΥΣ

mp,ex,2,Ecoll
mp,nuxy,2,vcoll
mp,mu,2,Tcoll
mp,dens,2,Pcoll
*if,PDcoll,ne,0,then
    tb,biso,2
    tbdata,1,ycoll
    tbdata,2,Qcoll
*endif
! ΥΛΙΚΟ ΣΤΥΛΟΥ

*if,SW2,eq,1,then
    mp,ex,3,Ewood! ΥΛΙΚΟ ΣΥΝΔΕΣΜΟΥ
    mp,nuxy,3,vwood
    mp,mu,3,Twood
    mp,dens,3,Pwood
    *if,PDwood,ne,0,then
        tb,biso,3
        tbdata,1,ywood
        tbdata,2,Qwood
    *endif
*endif

mp,mu,4,trivius1! ΥΛΙΚΟ ΕΠΑΦΗΣ 1: Συντελεστής τριβής.

*if,SW2,eq,1,then
    mp,mu,5,trivius2
*endif
! ΥΛΙΚΟ ΕΠΑΦΗΣ 2: Συντελεστής τριβής.

!*do,i,1,5
! mp,damp, i,0.05
! Απόσβεση 5% απενεργοποιημένη.
    
```


!*enddo

!----- Καθορισμός real σταθερών.

```
*do,i,4,temaxia+3,1 ! Καθορισμός μιας real σταθεράς για κάθε επιφάνεια επαφής.
r,i
!rmodif,i,1, ! Target Circle Radius [R1] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,2, ! Superelement Thickness [R2] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
rmodif,i,3,-100e6 ! *Normal Penalty Thickness [FKN] {100 MPa}.
rmodif,i,4,0.05 ! *Penetration Tolerance [FTOLN]{5% του στοιχείου}.
!rmodif,i,5,-1e-4 ! *[ICONT] {0.1mm}.
!rmodif,i,6, ! *Pinball Region [PINB] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,7, ! *Ini. allow. penetration [<PMAX] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,8, ! *Ini. allow. penetration [>PMIN] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,9,1e5 ! Max. friction stress [TAUMAX] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,10,! Contact surface offset [CNOF] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,11,! *Contact opening stiffness [FKOP] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,12,! *Tangent penalty stiffness [FKT] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,13,1e5 ! Contact cohesion [COHE] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,21,! Static/dynamic ratio [FACT] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,22,! Exponential decay coeft [DC] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,23,! *Allowable elastic slip [SLTOL] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
*enddo
```

*if,SW2,eq,1,then

*do,i,temaxia+4,2*temaxia+2,1! Καθορισμός μιας real σταθεράς για κάθε επιφάνεια επαφής.

```
r,i
!rmodif,i,1, ! Target Circle Radius [R1] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,2, ! Superelement Thickness [R2] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
rmodif,i,3,-100e6 ! *Normal Penalty Thickness [FKN] {100 MPa}.
rmodif,i,4,1.00 ! *Penetration Tolerance [FTOLN]{5% του στοιχείου}.
!rmodif,i,5,-1e-4 ! *[ICONT] {0.1mm}.
!rmodif,i,6, ! *Pinball Region [PINB] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,7, ! *Ini. allow. penetration [<PMAX] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,8, ! *Ini. allow. penetration [>PMIN] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,9,1e5 ! Max. friction stress [TAUMAX] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,10,! Contact surface offset [CNOF] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,11,! *Contact opening stiffness [FKOP] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,12,! *Tangent penalty stiffness [FKT] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,13,1e5 ! Contact cohesion [COHE] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,21,! Static/dynamic ratio [FACT] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,22,! Exponential decay coeft [DC] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
!rmodif,i,23, ! *Allowable elastic slip [SLTOL] {Αυτόματα από το πρόγραμμα}.
*enddo
```

*endif

!----- Διακριτοποίηση.

*if,SW0,eq,2,then,

```
esize,0.1 ! ΕΔΑΦΟΣ: Μέγεθος στοιχείων διακριτοποίησης 0.1m.
type,1 ! Ενεργοποίηση στοιχείου 1.
mat,1 ! Ενεργοποίηση υλικού 1.
real,1
amesh,1 ! Διακριτοποίηση περιοχής.
```

*do,i,1,temaxia,1

```
esize,0.1 ! ΣΠΟΝΔΥΛΟΙ: Μέγεθος στοιχείων διακριτοποίησης 0.1m.
type,2 ! Ενεργοποίηση στοιχείου 2.
mat,2 ! Ενεργοποίηση υλικού 2.
real,2
amesh,i+1 ! Διακριτοποίηση περιοχής.
```

*enddo

*if,SW2,eq,1,then

```
*do,i,temaxia+1,2*temaxia-1,1
esize,0.1 ! ΣΥΝΔΕΣΜΟΙ: Μέγεθος στοιχείων διακριτοποίησης 0.1m.
type,3 ! Ενεργοποίηση στοιχείου 3.
mat,3 ! Ενεργοποίηση υλικού 3.
real,3
amesh,i+1 ! Διακριτοποίηση περιοχής.
```

*enddo

*endif

```

allsel
*if,SW2,eq,1,then
    *do,i,1,temaxia-1
        nrefine,node(0,katwypsos+panwypsos*i-hole/2,0),,1,1
        nrefine,node(0,katwypsos+panwypsos*i-hole/2,0),,1,1
        nrefine,node(0,katwypsos+panwypsos*i,0),,1,1
        nrefine,node(0,katwypsos+panwypsos*i+hole/2,0),,1,1
    *enddo
*endif

/color,num,gree,1
/color,num,cyan,6
/color,num,blue,2
/color,num,bmag,10
/color,num,red,3
/rnum,mat,1
/number,1
epplot
*elseif,SW0,eq,3,then
    type,1
    mat,1
    real,1
    cm,_y,volu
    vsel,,,,1
    cm,_y1,volu
    chkmsch,'volu'
    cmsel,s,_y
    esize,,4
    vsweep,_y1
    cmdele,_y
    cmdele,_y1
    cmdele,_y2

    *do,i,1,temaxia,1
        type,2
        mat,2
        real,2
        cm,_y,volu
        vsel,,,,i+1
        cm,_y1,volu
        chkmsch,'volu'
        cmsel,s,_y
        esize,,2
        vsweep,_y1
        cmdele,_y
        cmdele,_y1
        cmdele,_y2
    *enddo

/color,num,gree,1
/color,num,cyan,6
/color,num,blue,2
/color,num,bmag,10
/color,num,red,3
/rnum,volu,1
vplot
*endif

!----- Ορισμός κόμβων επαφής και στοιχείων.

*do,i,1,temaxia,1
    ! Πρώτα οι κόμβοι επαφής
    allsel
    *if,SW0,eq,2,then
        asel,s,area,,i+1
        nsla,r,1
    *elseif,SW0,eq,3,then
        vsel,s,volu,,i+1
        nsel,r,loc,z,katwypsos+panwypsos*(i-1)
    *endif
    *if,i,eq,1,then
        type,4

```

```

*else
    type,6
    ! Ενεργοποίηση στοιχείου 6.
*endif
mat,4
! Ενεργοποίηση υλικού 4.
real,i+3
! Κάθε ζεύγος έχει την ίδια real σταθερά, διαφορετική ανά
! ζεύγη.
esurf
! Δημιουργία επιφάνειας επαφής ("target").

! Μετά, οι κόμβοι στοχοι
allsel
*if,SW0,eq,2,then
    asel,s,area,,i
    ! Επιλογή περιοχής "κάτω".
    nsla,r,1
    ! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής.
*elseif,SW0,eq,3,then
    vsel,s,volu,,i
    ! Επιλογή όγκου "κάτω".
    nsel,r,loc,z,katwypsos+panwypsos*(i-1)
    ! Επιλογή όλων των κόμβων με z στη διεπιφάνεια
*endif
*if,i,eq,1,then
    type,5
    ! Ενεργοποίηση στοιχείου 5.
*else
    type,7
    ! Ενεργοποίηση στοιχείου 7.
*endif
mat,4
! Ενεργοποίηση υλικού 4.
real,i+3
! Κάθε ζεύγος έχει την ίδια real σταθερά, διαφορετική ανά ζεύγη.
esurf
! Δημιουργία επιφάνειας επαφής ("contact").
*enddo

*if,SW2,eq,1,then
    *do,i,temaxia+1,2*temaxia-1,1
    ! Πρώτα οι κόμβοι επαφής
    allsel
    asel,s,area,,i+1
    ! Επιλογή συνδέσμου.
    nsla,r,1
    ! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής.
    type,4
    ! Ενεργοποίηση στοιχείου 4.
    mat,5
    ! Ενεργοποίηση υλικού 5.
    real,i+3
    ! Κάθε ζεύγος έχει την ίδια real σταθερά, διαφορετική ανά ζεύγη.
    esurf
    ! Δημιουργία επιφάνειας επαφής ("target").

    ! Μετά, οι κόμβοι στοχοι
    allsel
    asel,s,area,,i+1-temaxia
    ! Επιλογή περιοχής "κάτω".
    asel,a,area,,i+2-temaxia
    ! Επιλογή περιοχής "κάτω".
    nsla,r,1
    ! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής.
    type,5
    ! Ενεργοποίηση στοιχείου 5.
    mat,5
    ! Ενεργοποίηση υλικού 5.
    real,i+3
    ! Κάθε ζεύγος έχει την ίδια real σταθερά, διαφορετική ανά ζεύγη.
    esurf
    ! Δημιουργία επιφάνειας επαφής ("contact").
    *enddo
*endif

allsel
finish

!----- Επίλυση.

/solu
antype,4
! Μεταβατική Δυναμική Μέθοδος.
*if,SW1,eq,2,then
    *if,SW0,eq,2,then
        !trnopt,full
        ! Πλήρους τύπου.
        !lumpm,0
        ! Εξ ορισμού δημιουργία μητρώου μάζας.
        !cnvtol,f,,0.01,2,10.0
        ! Σύγκλιση ικανοποιητική για 1% για τις δυνάμεις, SRSS, ελάχιστη τιμή 10.0
        !cnvtol,u,,0.001,2
        ! Σύγκλιση ικανοποιητική για 0.1% για τις μετακινήσεις, SRSS.
        !ncnv,0
        ! Να μην ακυρωθεί η ανάλυση όταν δεν επιτευχθεί κάπου σύγκλιση.
        !nropt,unsym
        ! Newton-Raphson ασυμμετρική (CPU-intensive).
    *elseif,SW0,eq,3,then
        trnopt,full
        lumpm,0
        !cnvtol,f,,0.01,2,10.0
        !cnvtol,u,,0.001,2
        !ncnv,0
        !nropt,unsym
    *endif

```



```

*elseif,SW1,eq,1,then
    trnopt,full
    lumpm,0
    !cnvtol,f,,0.01,2,10.0
    !cnvtol,u,,0.001,2
    !ncnv,0
    nropt,unsym
*endif

nlgeom,1          ! Φαινόμενα μεγάλων μετακινήσεων ή τάσεων.
pred,on           ! Ενεργοποίηση "predictor" για δυναμική ανάλυση.

allsel
*if,SW0,eq,2,then
    nsel,s,loc,y,katwypsos+panwypsos*temaxia    ! Επιλογή όλων των κόμβων κορυφής.
    f,all,fy,-vertforce/numkomv                ! Επιβολή κατακόρυφου φορτίου επιστυλίου.
    allsel                                       ! Επιλογή όλων.
    nsel,s,loc,y,0                               ! Επιλογή όλων των κόμβων με y=0 m.
*elseif,SW0,eq,3,then
    nsel,s,loc,z,katwypsos+panwypsos*temaxia    ! Επιλογή όλων των κόμβων κορυφής.
    f,all,fz,-vertforce/numkomv                ! Επιβολή κατακόρυφου φορτίου επιστυλίου.
    allsel                                       ! Επιλογή όλων.
    nsel,s,loc,z,0                               ! Επιλογή όλων των κόμβων με z=0 m.
*endif
d,all,all,0     ! Πάκτωση των επιλεγμένων κόμβων (πάκτωση βάσης, δηλαδή).
allsel

*if,SW5,eq,1,then
    allsel
    *if,SW0,eq,2,then
        asel,s,area,,2          ! Επιλογής περιοχής 2.
        nsla,r,1                ! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
        nsel,r,loc,y,katwypsos ! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με τη βάση.
    *elseif,SW0,eq,3,then
        vsel,s,volu,,2         ! Επιλογής όγκου 2.
        nslv,r,1                ! Επιλογή όλων των κόμβων του όγκου,
        nsel,r,loc,z,katwypsos ! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με τη βάση.
    *endif
    d,all,all,0                ! και πάκτωση τους (πάκτωση βάσης, δηλαδή).
    allsel
*endif

*if,SW3,ne,0,then          ! Για πλήρη ένωση όλων των επιφανειών εκτός αυτών με τη βάση.
    *if,SW0,eq,2,then
        asel,s,area,,2          ! Επιλογής περιοχής 2.
        nsla,r,1                ! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
        nsel,r,loc,y,katwypsos ! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με τη βάση,
        nsel,r,loc,x,-panwmhkos/2 ! και από αυτούς, επιλογή του πιο αριστερά κόμβου.
        d,all,ux,0,,,,uy        ! Επιβολή άρθρωσης στον κόμβο αυτό.
    *elseif,SW0,eq,3,then
        vsel,s,volu,,2         ! Επιλογής όγκου 2.
        nslv,r,1                ! Επιλογή όλων των κόμβων του όγκου,
        nsel,r,loc,x,0          ! και από αυτούς, επιλογή κόμβου με x=0,
        nsel,r,loc,y,-panwmhkos/2 ! και από αυτούς, επιλογή του πιο αριστερά κόμβου,
        nsel,r,loc,z,katwypsos ! και από αυτούς, επιλογή του κόμβου έδρασης με τη βάση.
        d,all,ux,0,,,,uy        ! Επιβολή άρθρωσης στον κόμβο αυτό.
    *endif
    allsel
*endif

time,1.0e-5          ! Διάστημα χρόνου μικρό για την επιβολή των αρχικών συνθηκών.

!
! Απόσβεση κατά Rayleigh (χρειάζονται οι τιμές α και β).
alphad,1.2566        ! Οι εν λόγω τιμές έχουν δοθεί τέτοιες ώστε να παίρνουμε
betad,7.07355E-4     ! D=0.07 για f=1.5Hz και f=30Hz.
outres,all,all       ! Έξοδος όλων των αποτελεσμάτων.
!
timint,off           ! Αρχικές συνθήκες (ίδιο βάρος), δηλαδή να μην ληφθούν υπόψη φαινόμενα transient.
deltim,0.5E-5       ! Μέγεθος χρονικού βήματος.
kbc,1                ! Άμεση επιβολή φορτίου.
*if,SW0,eq,2,then
    acel,,gravidad    ! Επιτάχυνση βαρύτητας.
*elseif,SW0,eq,3,then

```

```

    acel,,,gravidad      ! Επιτάχυνση βαρύτητας.
*endif
allsel

solve                  ! Επίλυση για τις αρχικές συνθήκες (ίδιο βάρος και βάρος επιστυλίου).

timint,on              ! Λαμβάνονται υπόψη δυναμικά φαινόμενα transient.
kbc,0                  ! Σταδιακή επιβολή (ramped) φορτίου.
deltim,DT              ! Χρονικό βήμα ίσο με αυτό που έχει δοθεί στην αρχή του παρόντος.

*if,SW1,eq,1,then
!autots,on              ! Αυτόματη χρονική διακριτοποίηση {απενεργοποιημένη}.
nsubst,1,50,1,off      ! Αριθμός υπο-βημάτων (βήματα, αριθμός μέγιστων βημάτων, ελάχιστων
! αριθμός βημάτων), carry-over key.

*do,T,T0,T1,DT          ! Βρόχος από T0 μέχρι T1 με βήματα DT (η εκάστοτε τιμή θα είναι T)
outres,all              ! Έξοδος όλων των αποτελεσμάτων.
time,T                  ! Χρόνος T.
FFF=FF1(T)/numkomv      ! Τρέχουσα δύναμη ανά κόμβο έδρασης η δύναμη A1(T) με χρονική
! παρεμβολή.

allsel
*if,SW0,eq,2,then
    acel,,gravidad      ! Επιβολή επιτάχυνσης βαρύτητας.
    asel,s,area,,narea   ! Επιλογή κατάλληλης περιοχής.
    nsla,r,1              ! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
    nsel,r,loc,y,yloc     ! και από αυτούς, επιλογή των κατάλληλων κόμβων.
    f,all,fx,-FFF         ! Επιβολή τρέχοντος οριζόντιου φορτίου στους κόμβους διεπιφάνειας.
    allsel
    nsel,s,loc,y,katwypsos+panwypsos*temaxia      ! Επιλογή όλων των κόμβων κορυφής.
    f,all,fy,-vertforce/numkomv                  ! Επιβολή κατακόρυφου φορτίου επιστυλίου.
*elseif,SW0,eq,3,then
    acel,,gravidad      ! Επιβολή επιτάχυνσης βαρύτητας.
    vsel,s,volu,,narea   ! Επιλογής κατάλληλου "όγκου".
    nslv,r,1              ! Επιλογή όλων των κόμβων του όγκου,
    nsel,r,loc,z,yloc     ! και από αυτούς, επιλογή των κατάλληλων κόμβων.
    f,all,fy,-FFF         ! Επιβολή τρέχοντος οριζόντιου φορτίου στους κόμβους διεπιφάνειας.
    allsel
    nsel,s,loc,z,katwypsos+panwypsos*temaxia      ! Επιλογή όλων των κόμβων κορυφής.
    f,all,fz,-vertforce/numkomv                  ! Επιβολή κατακόρυφου φορτίου επιστυλίου.
*endif
allsel
solve                  ! Επίλυση για το συγκεκριμένο στάδιο.
*if,SW2,eq,1,then      ! Αν έχουμε σύνδεσμους διάτμησης και
    *if,SW6,eq,1,then   ! αν έχουμε επιλέξει να απομακρύνονται τα elements
                        ! με τάση μεγαλύτερη ή ίση του ywood τότε:
                        ! Βρόχος από 1 μέχρι τον αριθμό των συνδέσμων.
                        *do,i,1,temaxia-1
                            *if,T,ge,SW6tab(i),then
                                ! Αν βρισκόμαστε σε χρόνο μεγαλύτερο ή ίσο από το
                                ! χρόνο που έχει σπάσει το κομμάτι i τότε:
                                esel,s,real,,temaxia+3+i,temaxia+3+i      ! Επιλογή των contact elements που ανήκουν στο
                                ! κομμάτι που σπάει και
                                ekill,all                                  ! απενεργοποίησή τους.
                                asel,s,area,,temaxia+1+i,temaxia+1+i      ! Επιλογή της area που ανήκει στο κομμάτι που
                                ! σπάει και
                                esla,r                                  ! από αυτήν, επιλογή των elements που την
                                ! αποτελούν και
                                ekill,all                                  ! απενεργοποίησή τους.
                                allsel                                  ! Επιλογή όλων.
                            *endif
                        *enddo
                    *endif
                *endif
            *endif
        *endif
    *endif
*enddo                  ! Τέλος ελέγχου χρόνου.
                        ! Τέλος βρόχου.
                        ! Τέλος ελέγχου SW6=1.
                        ! Τέλος ελέγχου SW2=1.
                        ! Τέλος βρόχου.

timint,on              ! Λαμβάνονται υπόψη δυναμικά φαινόμενα transient.
kbc,0                  ! Σταδιακή επιβολή (ramped) φορτίου.
outres,all              ! Έξοδος όλων των αποτελεσμάτων.
*if,1,eq,2,then
    time,T1+0.2!2      ! Τέλος χρόνου 0.2 δευτερόλεπτα μετά το προηγούμενο
                        ! χρονικό εύρος.

    deltim,0.01
    autots,on          ! Αυτόματη χρονική διακριτοποίηση.
    *if,SW3,ne,0,then  ! Για πλήρη ένωση όλων των επιφανειών εκτός αυτών με τη

```



```

! βάση.

*if,SW0,eq,2,then
  asel,s,area,,2
  nsla,r,1
  nsel,r,loc,y,katwypsos
  nsel,r,loc,x,-panwmhkos/2
*elseif,SW0,eq,3,then
  vsel,s,volu,,2
  nslv,r,1
  nsel,r,loc,x,0
  nsel,r,loc,y,-panwmhkos/2
  nsel,r,loc,z,katwypsos
*endif
ddele,all,all
allsel
*endif
*if,SW5,eq,1,then
  allsel
  *if,SW0,eq,2,then
    asel,s,area,,2
    nsla,r,1
    nsel,r,loc,y,katwypsos
  *elseif,SW0,eq,3,then
    vsel,s,volu,,2
    nslv,r,1
    nsel,r,loc,z,katwypsos
  *endif
  d,all,all,0
  allsel
*endif

allsel
*if,SW0,eq,2,then
  acel,,gravidad
  asel,s,area,,narea
  nsla,r,1
  nsel,r,loc,y,yloc

  f,all,fx,-FF1(T1)/numkomv

  allsel
  nsel,s,loc,y,katwypsos+panwypsos*temaxia
  f,all,fy,-vertforce/numkomv
*elseif,SW0,eq,3,then
  acel,,gravidad
  vsel,s,volu,,narea
  nslv,r,1
  nsel,r,loc,z,yloc

  f,all,fy,-FF1(T1)/numkomv

  allsel
  nsel,s,loc,z,katwypsos+panwypsos*temaxia
  f,all,fz,-vertforce/numkomv
*endif
allsel
solve
*endif
*elseif,SW1,eq,2,then
  autots,on
  outres,all
  nsubst,1,10,1,off

*if,SW3,ne,0,then

  *if,SW0,eq,2,then
    asel,s,area,,2
    nsla,r,1
    nsel,r,loc,y,katwypsos
    nsel,r,loc,x,-panwmhkos/2
  *elseif,SW0,eq,3,then
    vsel,s,volu,,2
    nslv,r,1

```

! Επιλογής περιοχής 2.
! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με τη βάση.
! και από αυτούς, επιλογή του πιο αριστερά κόμβου.

! Επιλογής περιοχής 2.
! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
! και από αυτούς, επιλογή του κόμβου με x=0,
! και από αυτούς, επιλογή του πιο αριστερά κόμβου,
! και από αυτούς, επιλογή του κόμβου έδρασης με τη βάση.

! Ακύρωση της δέσμευσης των βαθμών ελευθερίας.

! Επιλογής περιοχής 2.
! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με τη βάση.

! Επιλογής όγκου 2.
! Επιλογή όλων των κόμβων του όγκου,
! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με τη βάση.

! και πάκτωση τους (πάκτωση βάσης, δηλαδή).

! Επιβολή επιτάχυνσης βαρύτητας.
! Επιλογής περιοχής "άνω".
! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με το
! έδαφος.
! Επιβολή τελικού (σταθερού) οριζόντιου φορτίου
! στους κόμβους διεπιφάνειας.

! Επιβολή όλων των κόμβων κορυφής.
! Επιβολή κατακόρυφου φορτίου επιστυλίου.

! Επιβολή επιτάχυνσης βαρύτητας.
! Επιλογής περιοχής "άνω".
! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με το
! έδαφος.
! Επιβολή τελικού (σταθερού) οριζόντιου φορτίου
! στους κόμβους διεπιφάνειας.

! Επιβολή όλων των κόμβων κορυφής.
! Επιβολή κατακόρυφου φορτίου επιστυλίου.

! Επίλυση για το συγκεκριμένο στάδιο.

! Αυτόματη χρονική διακριτοποίηση.
! Έξοδος όλων των αποτελεσμάτων.
! Αριθμός υπο-βημάτων (βήματα, αριθμός ελάχιστων μέγιστων
! βημάτων, αριθμός ελάχιστων βημάτων), carry-over key.
! Για πλήρη ένωση όλων των επιφανειών εκτός αυτών με τη
! βάση.

! Επιλογής περιοχής 2.
! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με τη βάση.
! και από αυτούς, επιλογή του πιο αριστερά κόμβου.

! Επιλογής όγκου 2.
! Επιλογή όλων των κόμβων του όγκου,



```

nset,r,loc,x,0 ! και από αυτούς, επιλογή του κόμβου με x=0,
nset,r,loc,y,-panwmhkos/2 ! και από αυτούς, επιλογή του πιο αριστερά κόμβου,
nset,r,loc,z,katwypsos ! και από αυτούς, τομή με τους κόμβους έδρασης με τη βάση.
*endif
!ddelete,all,all ! Ακύρωση της δέσμησης των βαθμών ελευθερίας.
allsel
*endif
*if,SW5,eq,1,then
allsel
*if,SW0,eq,2,then
asel,s,area,,2 ! Επιλογής περιοχής 2.
nsla,r,1 ! Επιλογή όλων των κόμβων της περιοχής,
nset,r,loc,y,katwypsos ! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με τη βάση.
*elseif,SW0,eq,3,then
vsel,s,volu,,2 ! Επιλογής όγκου 2.
nslv,r,1 ! Επιλογή όλων των κόμβων του όγκου,
nset,r,loc,z,katwypsos ! και από αυτούς, επιλογή των κόμβων έδρασης με τη βάση.
*endif
d,all,all,0 ! και πάκτωση τους (πάκτωση βάσης, δηλαδή).
allsel
*endif
*do,T,T0,T1,DT ! Βρόχος από T0 μέχρι T1 με βήματα DT (η εκάστοτε τιμή θα
! είναι T).
outres,all ! Εξοδος όλων των αποτελεσμάτων.
time,T ! Χρόνος T.
AX=A1(T) ! Τρέχουσα επιτάχυνση η επιτάχυνση A1(T) με χρονική
! παρεμβολή.
*if,SW0,eq,2,then
accel,AX*seiscale,gravidad ! Επιβολή επιτάχυνσης (τόσο της ανωτέρω όσο και
! της βαρύτητας).
allsel
nset,s,loc,y,katwypsos+panwypsos*temaxia ! Επιλογή όλων των κόμβων κορυφής.
f,all,fy,-vertforce/numkomv ! Επιβολή κατακόρυφου φορτίου επιστυλίου.
*elseif,SW0,eq,3,then
accel,,AX*seiscale,gravidad ! Επιβολή επιτάχυνσης (τόσο της ανωτέρω όσο και
! της βαρύτητας).
allsel
nset,s,loc,z,katwypsos+panwypsos*temaxia ! Επιλογή όλων των κόμβων κορυφής.
f,all,fz,-vertforce/numkomv ! Επιβολή κατακόρυφου φορτίου επιστυλίου.
*endif
allsel
solve ! Επίλυση για το συγκεκριμένο στάδιο.
*if,SW2,eq,1,then ! Αν έχουμε σύνδεσμοι διάτμησης και
*if,SW6,eq,1,then ! αν έχουμε επιλέξει να απομακρύνονται τα elements
! με τάση μεγαλύτερη ή ίση του ywood τότε:
*do,i,1,temaxia-1 ! Βρόχος από 1 μέχρι τον αριθμό των συνδέσμων.
*if,T,ge,SW6tab(i),then ! Αν βρισκόμαστε σε χρόνο μεγαλύτερο ή ίσο από το
! χρόνο που έχει σπάσει το κομμάτι i τότε:
esel,s,real,,temaxia+3+i,temaxia+3+i ! Επιλογή των contact elements που ανήκουν στο
! κομμάτι που σπάει και
! απενεργοποίησή τους.
ekill,all ! Επιλογή της area που ανήκει στο κομμάτι που
! σπάει και
! από αυτήν, επιλογή των elements που την
! αποτελούν και
! απενεργοποίησή τους.
asel,s,area,,temaxia+1+i ! Επιλογή της area που ανήκει στο κομμάτι που
! σπάει και
! από αυτήν, επιλογή των elements που την
! αποτελούν και
! απενεργοποίησή τους.
esla,r ! Επιλογή όλων.
ekill,all ! Τέλος ελέγχου χρόνου.
allsel ! Τέλος βρόχου.
*endif ! Τέλος ελέγχου SW6=1.
*enddo ! Τέλος ελέγχου SW2=1.
*endif ! Τέλος βρόχου.
*enddo
*endif
*enddo
*endif
finish
save ! Σώσιμο στη βάση δεδομένων.
*if,SW0,eq,2,then ! Για δισδιάστατη ανάλυση...
*if,SW1,eq,2,then ! Για σεισμική φόρτιση...
*if,2,eq,1,then ! Απλός, χειροκίνητος διακόπτης...
/post1 ! Επιλογή τύπου post-processor 1.
/cont,1,128,auto ! Διαγράμματα countour 128 επιπέδων.
set,first ! Ανάγνωση πρώτου σετ αποτελεσμάτων.

```

```

    antime,150,0.5, ,1,2,0,0      ! Προβολή τάσεων κατά ψ (πχ για κρούσεις)      {απενεργοποιημένη}
    plns,s,eqv                    ! Προβολή von Mises.
    antime,313,0.04, ,1,2,0,0    ! 313 frames, 25 frames/sec, για όλους τους χρόνους.
*else
/post26                          ! Επιλογή τύπου post-processor 26.
numvar,200                      ! Αριθμός μεταβλητών: 200 (για να ενεργοποιηθεί το κομπιουτεράκι).
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! Αρχή διαδικασίας για τον υπολογισμό του "θ" !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Name: DUx
! ID: 2
! Function: nsol(454 ,U,X)-nsol(437 ,U,X)
nsol,200,454,U,X
nsol,199,437,U,X
prod,197,199,194
add,2,200,197,,DUx
!
filldata,192,,,,0,0
filldata,193,,,,1,0
filldata,194,,,,-1,0
filldata,195,,,,1,1
varname,195,nset
!
! Name: DUy
! ID: 3
! Function: {PANWYPSOS}-nsol(454 ,U,Y)+nsol(437 ,U,Y)
nsol,200,454,U,Y
filldata,198,,,,PANWYPSOS,0
realvar,198,198
prod,197,200,194
add,199,198,197
nsol,197,437,U,Y
add,3,199,197,,DUy
!
filldata,191,,,,1,1
realvar,191,191
filldata,192,,,,0,0
filldata,193,,,,1,0
filldata,194,,,,-1,0
filldata,195,,,,1,1
varname,195,nset
!
! Name: Theta
! ID: 4
! Function: {DUx}/{DUy}
quot,4,2,3,,Theta
!
filldata,191,,,,1,1
realvar,191,191
xvar,1
plvar,4,
*endif
*elseif,sw1,eq,1,then          ! Για οριζόντια φόρτιση.
/post26                        ! Επιλογή τύπου post-processor 26.
numvar,200                    ! Αριθμός μεταβλητών: 200 (για να ενεργοποιηθεί το κομπιουτεράκι).
*if,SW7,eq,1,then
    ansol,2,1042,cont,stat,C_STAT_TR!1228
    force,total
    ansol,3,1068,cont,stat,C_STAT_TL!1211
    nsol,4,1238,U,X, UX_5
    nsol,5,1042,U,X, UX_4
    nsol,6,846,U,X, UX_3
    nsol,7,650,U,X, UX_2
    nsol,8,458,U,X, UX_1
    nsol,9,438,U,X, UX_0
    plvar,2,3
*else
    nsol,2,438,u,x, UX_2        ! Χρονοϊστορία: Μεταβολή κατά X κάτω δεξιά γωνίας κάτω
                                ! σπόνδυλου {m}.
    nsol,3,438,u,y, UY_2      ! Χρονοϊστορία: Μεταβολή κατά Y κάτω δεξιά γωνίας κάτω
                                ! σπόνδυλου {m}.
    ansol,4,78,cont,stat,C_STAT_R ! Χρονοϊστορία: Τύπος επαφής (3=sticking, 2=sliding, κλπ.) κάτω
                                ! δεξιά κόμβου διεπιφάνειας.
    ansol,5,96,cont,stat,C_STAT_L ! Χρονοϊστορία: Τύπος επαφής (3=sticking, 2=sliding, κλπ.) κάτω
                                ! αριστερά κόμβου διεπιφάνειας.

```

```

ansol,6,78,cont,sfric,C_FRIC_R ! Χρονοϊστορία: Τριβή στον κάτω δεξιά κόμβο διεπιφάνειας {Pa}.
ansol,7,96,cont,sfric,C_FRIC_L ! Χρονοϊστορία: Τριβή στον κάτω αριστερά κόμβο διεπιφάνειας {Pa}.
ansol,8,78,cont,pres,C_PRES_R ! Χρονοϊστορία: Κάθετη πίεση στον κάτω δεξιά κόμβο
! διεπιφάνειας {Pa}.
ansol,9,96,cont,pres,C_PRES_L ! Χρονοϊστορία: Κάθετη πίεση στον αριστερά κόμβο
! διεπιφάνειας {Pa}.
plvar,4,5 ! Προβολή χρονοϊστορίας τύπου επαφής ακριανών κόμβων διεπιφάνειας.
*endif
*endif
*elseif,SW0,eq,3,then ! Για τρισδιάστατη ανάλυση...
/post26 ! Επιλογή τύπου post-processor 26.
numvar,200 ! Αριθμός μεταβλητών: 200 (για να ενεργοποιηθεί το κομπιουτεράκι).
*if,SW1,eq,2,then ! Για σεισμική φόρτιση...
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!! Αρχή διαδικασίας για τον υπολογισμό του "θ" !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
! Name: DUy
! ID: 2
! Function: nsol(215 ,U,Y)-nsol(235 ,U,Y)
nsol,200,215,U,Y
nsol,199,235,U,Y
prod,197,199,194
add,2,200,197,,DUy
filldata,192,,,,0,0
filldata,193,,,,1,0
filldata,194,,,,-1,0
filldata,195,,,,1,1
varname,195,nset
!
! Name: DUz
! ID: 3
! Function: {PANWYPSOS}+nsol(215 ,U,Z)-nsol(235 ,U,Z)
nsol,200,215,U,Z
filldata,198,,,,PANWYPSOS,0
realvar,198,198
add,199,198,200
nsol,200,235,U,Z
prod,197,200,194
add,3,199,197,,DUz
filldata,191,,,,1,1
realvar,191,191
filldata,192,,,,0,0
filldata,193,,,,1,0
filldata,194,,,,-1,0
filldata,195,,,,1,1
varname,195,nset
!
! Name: Theta
! ID: 4
! Function: {DUy}/{DUz}
quot,4,2,3,,Theta
filldata,191,,,,1,1
realvar,191,191
xvar,1
plvar,4,
*else
*if,SW7,eq,1,then
ansol,2,346,cont,stat,C_STAT_TR!393
force,total
ansol,3,341,cont,stat,C_STAT_TL!403
nsol,4,388,U,X, UX_5
nsol,5,346,U,X, UX_4
nsol,6,304,U,X, UX_3
nsol,7,262,U,X, UX_2
nsol,8,220,U,X, UX_1
nsol,9,225,U,X, UX_0
plvar,2,3
*else
*endif
*endif
!(nsol(454 ,U,X)-nsol(437 ,U,X))/({PANWYPSOS}-nsol(454 ,U,Y)+nsol(437 ,U,Y))
!(nsol(215 ,U,Y)-nsol(235 ,U,Y))/({PANWYPSOS}+nsol(215 ,U,Z)-nsol(235 ,U,Z))
*if,1,eq,2,then
nsol,2,1501,U,X, UX_7
nsol,3,1327,U,X, UX_6

```

```
nsol,4,1153,U,X, UX_5  
nsol,5,979,U,X, UX_4  
nsol,6,805,U,X, UX_3  
nsol,7,631,U,X, UX_2  
nsol,8,452,U,X, UX_1  
nsol,9,438,U,X, UX_0  
*endif
```