

**ΑΝΩΤΑΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΣΤΕ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

# **ΜΕΛΕΤΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΑΡΧΑΙΩΝ ΚΙΟΝΩΝ**



**ΟΝΟΜΑ: ΑΡΜΠΕΝ**

**ΕΠΩΝΥΜΟ: ΜΕΡΚΑΙ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ Γεώργιος Γιαννόπουλος**

**ΠΑΤΡΑ 2014**

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την Πτυχιακή Εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολογίας του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Πάτρας και αναφέρεται στη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς ενός κίονα του ναού του Απόλλωνα των Βασσών. Είναι γνωστό ότι οι αρχαίοι ναοί υποφέρουν από σεισμικές δονήσεις κατά την διάρκεια της ζωής τους. Ειδικά στην Ελλάδα που είναι μια χώρα με ιδιαίτερο πλούτο από την αρχαιότητα επιβάλλεται η φροντίδα και συντήρηση τέτοιων μνημείων.

Στην αρχή πραγματοποιείται ο σχεδιασμός του κίονα Β5 του ναού σύμφωνα με τα αρχιτεκτονικά σχέδια. Στην συνέχεια ορίζονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σπονδύλων, καθορίζεται το στατικό φορτίο που ασκείται στον κίονα και ακολουθεί η στατική ανάλυση του προβλήματος. Μετά εφαρμόζεται στον κίονα σεισμική δόνηση όμοια με εκείνη που έλαβε χώρα στην Κεφαλονιά το 2014 και ακολουθεί η δυναμική ανάλυση του προβλήματος. Τέλος πραγματοποιήθηκε ο σχεδιασμός εφεδράνου με σκοπό τη σεισμική μόνωση του κίονα και τα αποτελέσματα της μελέτης της συμπεριφοράς του συγκρίνονται με τα προηγούμενα.

Ευχαριστώ θερμά τον Επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεώργιο Γιαννόπουλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολογίας, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που μου προσέφερε για την πραγματοποίηση της Εργασίας.

Μερκάλι Αρμπέν  
Σεπτέμβριος 2014

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μοντελοποίηση και η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς ενός κίονα του αρχαίου ναού Απόλλωνα των Βασσών με τη χρήση του προγράμματος Ansys. Πραγματοποιήθηκε στατική και δυναμική ανάλυση του μοντέλου χωρίς σεισμική μόνωση αλλά και δυναμική ανάλυση με χρήση δύο τύπων εφεδράνων. Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αναλυτικά και γραφικά και εξάγονται τα συμπεράσματα της έρευνας.

Η ανάπτυξη της εργασίας γίνεται σε επτά κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική του ναού. Στην συνέχεια περιγράφεται η ερείπωση η οποία έχει υποστεί ο ναός όλα αυτά τα χρόνια. Μετέπειτα παρουσιάζονται οι αναστηλώσεις-σωστικά έργα το οποία έχουν γίνει μέχρι και το στέγαστρο που τοποθετήθηκε το φθινόπωρο του 1987. Και τέλος γίνεται αναφορά για την απώλεια της έδρασης, την κλίση του κίονα και τις καθιζήσεις που έχει υποστεί ο ναός.

Στο δεύτερο κεφαλαίο δίνεται ο ορισμός της σεισμικής μόνωσης, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της και λαμβάνει χώρα μια σύντομη ιστορική αναδρομή. Στη συνέχεια δίνονται κάποια παραδείγματα κτιρίων στα οποία έχει εφαρμοστεί σεισμική μόνωση σε όλο τον κόσμο. Στην πορεία γίνεται ανάλυση των συσκευών της σεισμικής μόνωσης, παρουσιάζονται κάποιες κατηγορίες σεισμικών συσκευών όπως τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα, έδρανα ολίσθησης, επίπεδα εφέδρανα ολίσθησης, εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς και άλλα. Ακολουθεί σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τύπων ελαστομεταλλικών τύπων εφεδράνων, αλλά και η μαθηματική περιγραφή σεισμικής διέγερσης καθώς και περιγραφή του όρου μέτρο ελαστικότητας.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή για τα πεπερασμένα στοιχεία και για την αναγκαιότητα τους για την επίτευξη οποιασδήποτε προσομοίωσης. Επίσης παρουσιάζεται μια ιστορική αναδρομή των πεπερασμένων

Στο τέταρτο κεφάλαιο ασχολούμαστε με τον σεισμό. Δίνεται μια γενική περιγραφή του σεισμού και επίσης παρουσιάζονται κάποιες έννοιες που έχουν σχέση με τον σεισμό όπως: επίκεντρο, μέγεθος, ένταση, επακόλουθα κ.ά. Τέλος δίδονται κάποιες πληροφορίες για τον σεισμό που έγινε στην Κεφαλονιά και αποτέλεσε την επιβαλλόμενη φόρτιση στον κίονα στην παρούσα εργασία.

Στο πέμπτο κεφαλαίο περιγράφεται το αριθμητικό μοντέλο. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στη γεωμετρία του κίονα και των εφεδράνων, στις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται, στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του φορέα, στη διακριτοποίηση με τη δημιουργία πλέγματος του κίονα και των εφεδράνων και τέλος στην επιβολή των φορτίσεων και των συνοριακών συνθηκών.

Στο έκτο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα της στατικής και δυναμικής ανάλυσης του μοντέλου με και χωρίς χρήση εφεδράνων και συγκρίνονται.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτή την έρευνα.

Στο όγδοο κεφάλαιο αναγράφεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	ii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	iii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.ΝΑΟΣ ΕΠΙΚΟΥΡΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ ΒΑΣΣΩΝ.....	3
1.1 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ .....	3
1.2 Η ΕΡΕΙΠΩΣΗ .....	5
1.3 ΑΝΑΣΤΗΛΩΣΕΙΣ-ΣΩΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑ.....	6
1.4 ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΔΡΑΣΗΣ-ΚΛΙΣΗ ΚΙΟΝΑ.....	7
2. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ-ΕΦΕΔΡΑΝΑ.....	8
2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ.....	8
2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ.....	9
2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ .....	9
2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ .....	10
2.5 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ.....	16
2.6 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ.....	17
2.7 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ .....	18
2.8 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ.....	20
2.9 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ .....	22
2.10 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΜΕ ΠΥΡΗΝΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ(LEAD-RUBBER BEARINGS-LRB).....	22
2.11 ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	25
2.11.1 Υλικά κατασκευής.....	25
2.12 ΕΠΙΠΕΔΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (FLAT SLIDING BEARINGS) .....	26
2.13 ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΥΠΟΥ ΕΚΚΡΕΜΟΥΣ (PENDULUM SLIDERS-FPS).....	26
2.14 ERADIQUAKE ISOLATOR .....	30
2.15 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ .....	30
2.16 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	31
2.17 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ.....	31
2.18 TASS SYSTEM .....	32
3. ΣΕΙΣΜΟΣ.....	33

3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΙΣΜΟΥ .....	33
3.3 ΤΑ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΑ.....	34
3.4 ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ .....	34
4. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	36
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	36
4.2 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ .....	36
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ .....	37
5. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ .....	39
5.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΙΟΝΑ .....	39
5.2 ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ .....	41
5.3 Η ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ ΜΕ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ.....	41
5.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ .....	42
5.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ .....	43
5.5.1 Βάρος .....	43
5.5.2 Σεισμός.....	43
5.6 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ .....	45
5.6.1 Γεωμετρία εφεδράνων χωρίς μόλυβδο.....	45
5.6.2 Γεωμετρία εφεδράνου με μόλυβδο .....	47
5.7 ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΤΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ .....	49
5.8 Η ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ .....	49
5.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ ΚΑΙ ΚΙΟΝΑ.....	51
5.10 ΕΠΙΒΟΛΗ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ .....	51
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ .....	52
6.1 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΟΝΑ .....	53
Εικόνα 6.2 Μετατόπιση κίονα στην $x$ διεύθυνση .....	53
6.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΟΝΑ.....	57
6.3 ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ .....	67
6.3.1 Χωρίς εφέδρανο .....	67
6.3.2 Εφέδρανο τύπου 1.....	72
6.3.3 Εφέδρανο τύπου 2.....	77
6.3.4 Εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου .....	81
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	87
8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	88



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι αναγνωρισμένο από πολλές παλαιότερες μελέτες ότι οι πολυσπόνδυλοι κίονες παρουσιάζουν πάρα πολύ καλή συμπεριφορά απέναντι στη σεισμική δραστηριότητα. Κατά τη διάρκεια ενός σεισμού στα αρχαία μνημεία δημιουργείται ένα σύστημα απορρόφησης ενέργειας διαφορετικό από αυτό των σύγχρονων κατασκευών. Συγκεκριμένα, η απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας πραγματοποιείται μέσα από την ολίσθηση και τον λικνισμό των λίθων, είτε ανεξάρτητα, είτε και σε ομάδες.

Η πρώτη ανακοίνωση που αναφέρεται στη λικνιστική συμπεριφορά των αρχαίων κίωνων ασχολείται με τον προσδιορισμό των σεισμικών δυνάμεων. Υπολογίζεται η θεμελιώδης, φυσική ιδιοπερίοδος ορισμένων κίωνων της Ακρόπολης και του Θησείου και αποδεικνύεται ότι τα προκύπτοντα μεγέθη (3.90-5.20sec) είναι πολύ μεγάλα, συγκρινόμενα με τις συνήθεις δεσπόζουσες περιόδους των σεισμικών δονήσεων. Υπό το φως της διαπίστωσης αυτής επιχειρείται μια πρώτη προσέγγιση προσδιορισμού της σεισμικής τέμνουσας βάσεως των κίωνων αυτών.

Το 1983, στα πλαίσια της 2<sup>ης</sup> διεθνούς συνάντησης για την αποκατάσταση των μνημείων της Ακρόπολης, παρουσιάζεται, σε φάση προμελέτης, σεισμική ανάλυση της περίπτωσης του Παρθενώνα, με οριζόντια φορτία χαμηλής στάθμης, ώστε να πληρούνται οι απλοποιητικές παραδοχές της γραμμικής ανάλυσης. Το προσομοίωμα αποτελείται από ραβδόμορφα στοιχεία, ενώ η σεισμική φόρτιση λαμβάνεται ως ισοδύναμη στατική με σεισμικό συντελεστή  $\varepsilon=0.04$ , κατά τις επιταγές του αντισεισμικού κανονισμού που ίσχυε τότε. Γίνονται δύο αναλύσεις, της παρούσας κατάστασης του μνημείου και της μορφής που θα προκύψει με την υλοποίηση της πρότασης αποκατάστασης. Μολονότι, λόγω της μικρής σεισμικής δυνάμεως, ο φορέας βρίσκεται μακράν του λικνισμού, τα αποτελέσματα της ανάλυσης είναι συμβατά με τη συμπτωματολογία των βλαβών τόσο του σεισμού των Αλκυονίδων του 1981, όσο και προγενέστερων δράσεων.

Στην ίδια συνάντηση, ένας εκ των συνέδρων ασχολείται με την τρωτότητα των αρχαίων μνημείων. Εφαρμόζοντας το κριτήριο ανατροπής της φασματικής ταχύτητας, εξετάζεται η ευστάθεια 34 αρχαίων κίωνων, ιδρυμένων από τον 5<sup>ο</sup> αι. π.Χ. μέχρι τον 2<sup>ο</sup> αι. μ.Χ. Το αποτέλεσμα της έρευνας είναι ότι για την ανατροπή των αρχαίων κίωνων απαιτούνται σεισμικά πλήγματα πολύς μεγάλης ενστάσεως. Συνεπώς η διατήρηση μέχρι σήμερα όρθιων κίωνων σε διάφορες περιοχές, δεν σημαίνει αναγκαστικά ότι οι περιοχές αυτές δεν δοκίμασαν καταστρεπτικούς σεισμούς. Συγχρόνως δίνεται και μια ενδιαφέρουσα ποιοτική ερμηνεία για την ανθεκτικότητα των κίωνων σε σεισμική δράση, που βασίζεται στο τριμερές φάσμα απόκρισης. Σύμφωνα με την ερμηνεία αυτή, ο λικνισμός, ακόμη και σε μικρές γωνίες εκτροπής, σημαίνει μετατόπιση σε χαμηλότερες συχνότητες, που αντιστοιχούν και σε μικρότερες επιταχύνσεις. Στις μεγάλες γωνιές εκτροπής, βρισκόμαστε στη ζώνη των

μετατοπίσεων του φάσματος, όπου οι επιταχύνσεις είναι πλέον δραστικά μειωμένες. Η κίνηση του κίονα στην περιοχή των μεγάλων αποκλίσεων είναι πολύ αργή σε σχέση με την εδαφική κίνηση. Μια ακόμη αξιοπρόσεκτη παρατήρηση είναι ότι λιγυροί κίονες ιωνικού ή κορινθιακού ρυθμού, είναι σχετικά ευπρόσβλητοι από μακρινούς μεγάλους σεισμούς, καθώς και ανεμοθύελλες.

Από το 1985 ως το 1989 ερευνώνται τα ερείπια 3 μνημείων της ρωμαϊκής αγοράς: ο ναός του Βεσπασιανού, ο ναός του Κρόνου και η στήλη του Φωκά. Η προσέγγιση είναι διττή: αφενός προσδιορίζονται μέσω μικροδονήσεων τα δυναμικά χαρακτηριστικά των κατασκευών, αφετέρου εφαρμόζεται υπολογιστικά το μοντέλο του στερεού σώματος σε ελαστική θεμελίωση, συνυπολογιζόμενου του αποχωρισμού. Με χρήση κατάλληλων σταθερών για κάθε μνημείο, εκτιμάται η τρωτότητα και προτείνονται αναστηλωτικές δράσεις για το καθένα.

Το 1991 και το 1993 παρουσιάζονται δύο δημοσιεύσεις που καταπιάνονται με το πρόβλημα του σεισμικού κινδύνου, που απειλεί το δωρικό ναό του Επικούριου Απόλλωνα. Στην πρώτη εφαρμόζεται η θεωρία του λικνισμού σε αντιπροσωπευτικό κίονα της περίπτωσης. Το κύριο συμπέρασμα είναι, ότι ο εξεταζόμενος κίονας, μέσω της λικνιστικής του απόκρισης, είναι σε θέση να συμπεριλάβει σοβαρά σεισμικά γεγονότα. Στην παρούσα όμως κατάσταση του ερειπίου, όπου πολλοί κίονες αποκλίνουν σημαντικά από την κατακόρυφο και η έδρασή τους είναι ατελής, τα περιθώρια στενεύουν.

Τέλος, το 1998, παρουσιάζεται μελέτη της σεισμικής απόκρισης πολύ-σπόνδυλων κίωνων, που βασίζεται σε προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων με την παραδοχή συντελεστή τριβής κατά Coulomb και παράλληλη θεώρηση του μονόπλευρου χαρακτήρα των εδράσεων. Εξετάζονται αριθμητικά επίπεδες ημιτονοειδείς και σεισμικές διεγέρσεις, σε σώμα ύψους 9.12μ και πλάτους 1.72μ (μονολιθικό ή και αποτελούμενο από 10 σπονδύλους). Συμπεραίνεται ότι δεν εκδηλώνεται ανατροπή ακόμα και για μακροπερίοδες διεγέρσεις ( $T=1.6s$ ) υψηλής στάθμης επιταχύνσεων ( $3-4m/s^2$ ). Διαπιστώνεται επίσης, ότι ο λικνισμός, μειώνει την οριζόντια τέμνουσα βάσεως, αν και παρατηρούνται μεγάλες κατακόρυφες δυνάμεις κατά τη διάρκεια της κρούσης.

Όσο αφορά τη σεισμική μόνωση των αρχαίων μνημείων έχουν γίνει λίγες μελέτες. Εξ αυτών ελάχιστες έχουν χρησιμοποιήσει εφέδρανα και μάλιστα ελαστομεταλλικά. Τέλος καμία εξ' αυτών δεν έχει εστιάσει στο ναό του Επικούριου Απόλλωνα Βασσών. Από αυτή την άποψη η παρούσα πτυχιακή εργασία παρουσιάζει ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον.



# 1.ΝΑΟΣ ΕΠΙΚΟΥΡΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ ΒΑΣΣΩΝ

## 1.1 Η ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Κοντά στην αρκαδική πόλη Φιγάλεια, σε απόσταση 14 χιλιομέτρων από την Ανδρίτσεινα, πάνω σε ένα από τα φυσικά πλατώματα (Βάσσαι) του όρους Κωτύλιου, και σε υψόμετρο 1130μ., βρίσκεται ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα. Ο ναός χτίστηκε περίπου το 420–400 π.Χ. από τον αρχιτέκτονα του Παρθενώνα, τον Ικτίνο.

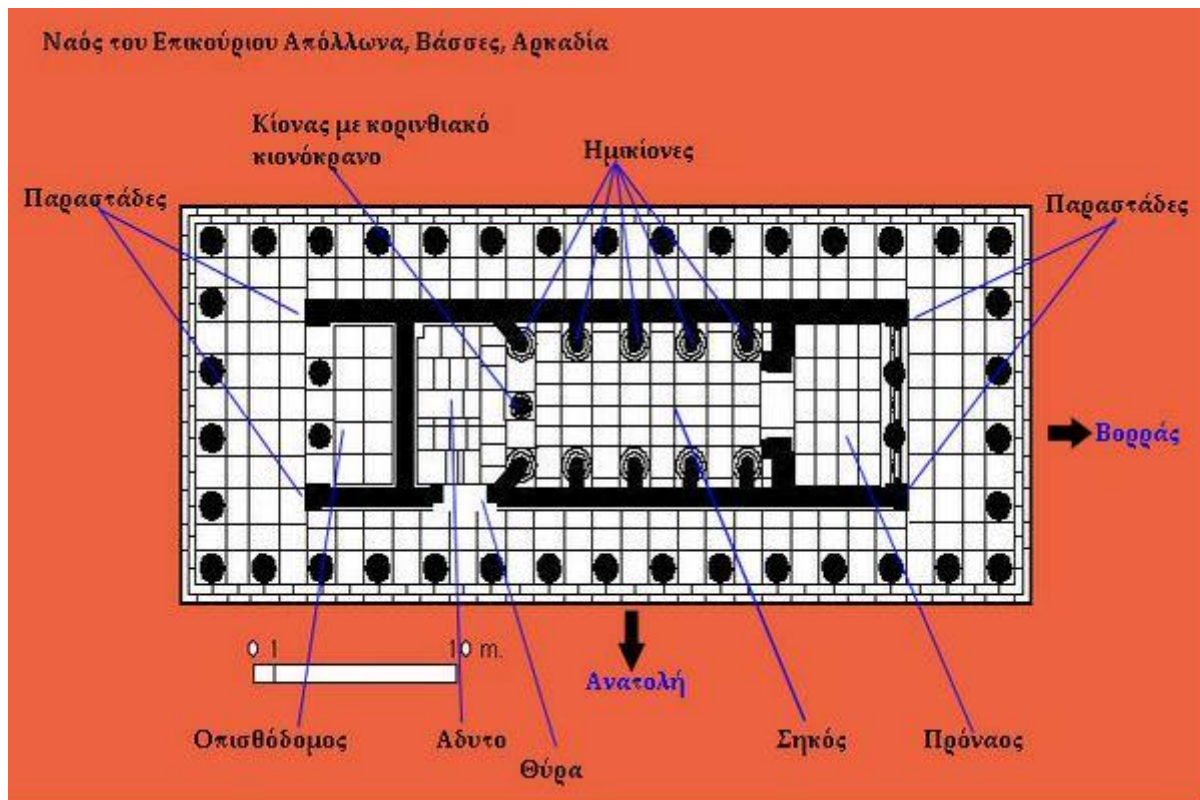


**Εικόνα 1.1** : Ναός Επικουρίου Απόλλωνα

Ο ναός που βλέπει σήμερα ο επισκέπτης δεν είναι ο αρχαιότερος που κτίστηκε στο χώρο. Ο πρώτος ναός του Απόλλωνα οικοδομήθηκε γύρω στα τέλη του 7ου αι. π.Χ., πιθανότατα στην ίδια θέση. Ακολούθησαν μία ή δύο οικοδομικές φάσεις του, γύρω στο 600 και γύρω στο 500 π.Χ., αντίστοιχα, από τις οποίες σώζονται πολυάριθμα αρχιτεκτονικά μέλη, όπως το κεντρικό δισκοειδές πήλινο ακρωτήριο με την πλούσια πολύχρωμη γραπτή διακόσμηση, κεραμίδια και πήλινα ακροκέραμα.

Ο κλασικός ναός έχει θεμελιωθεί πάνω στο φυσικό βράχο, σε ειδικά διαμορφωμένο πλάτωμα. Δεν έχει το συνήθη προσανατολισμό Α-Δ, αλλά Β-Ν, ίσως για λατρευτικούς λόγους, που συνδέονται με την αρκαδική θρησκευτική παράδοση, δεδομένου ότι και άλλοι ναοί στην περιοχή παρουσιάζουν τον ίδιο προσανατολισμό.

Ο ναός είναι ο **μοναδικός** που συνδυάζει στοιχεία των τριών αρχιτεκτονικών ρυθμών της αρχαιότητας. Είναι δωρικός, περίπτερος, δίτυλος εν παραστάσι, με πρόναο, σηκό, άδυτο και οπισθόδομο. Έχει 6 κίονες στις στενές και 15 στις μακρές πλευρές, αντί της καθιερωμένης για την εποχή αναλογίας 6 x 13. Έτσι, η μορφή του είναι περισσότερο επιμήκης, όπως στους αρχαϊκούς ναούς. Στο εσωτερικό του σηκού, κατά μήκος των μακρών πλευρών υπάρχουν από πέντε ιωνικοί ημικίονες, που αποτελούν απόληξη κάθετων στον τοίχο τοιχαρίων, τα οποία διαμορφώνουν κόγχες. Το τελευταίο ζεύγος των ημικίωνων τέμνουν διαγώνια τον τοίχο του σηκού και όχι κάθετα όπως οι υπόλοιποι. Ανάμεσα σε αυτούς υπήρχε ένας κίονας, που έφερε το **αρχαιότερο** γνωστό ως σήμερα στην αρχαία ελληνική αρχιτεκτονική **κορινθιακό κιονόκρανο**, το οποίο γνωρίζουμε από τα σχέδια των πρώτων περιηγητών (θραύσματά του φυλάσσονται στο Εθνικό Αρχαιολογικό Μουσείο).



**Εικόνα 1.2 :** Μέρη του ναού του Επικούριου Απόλλωνα

Το κτίριο είναι κατασκευασμένο κατά το μεγαλύτερο μέρος του από τον σκληρό ασβεστόλιθο της περιοχής, ανοιχτού γκρίζου χρώματος. Από μάρμαρο, προερχόμενο πιθανόν από τα λατομεία των Δολιανών ή υοθ Ταινάρου, ήταν κατασκευασμένα:

- τα ιωνικά ημικιονόκρανα και το κορινθιακό κιονόκρανο
- οι φατνωματικές πλάκες του Β. και Ν. πτερού και του πρόναου, καθώς και οι δοκοί της οροφής
- οι μετόπες πρόναου-οπισθόναου και η ιωνική ζωφόρος
- η κεράμωση της στέγης

## 1.2 Η ΕΡΕΙΠΩΣΗ

Η πρώτη και η τελευταία μνεία του μνημείου στα αρχαία χρόνια είναι το γνωστό απόσπασμα του Πausανία, που περιηγήθηκε την Αρκαδία το 174 μ.Χ.: « ναών δε όσοι Πελοποννησίους εισί, μετά γε τον Τεγέα προτιμώντο ούτος αν του λίθου τε εις κάλλος και της αρμονίας ένεκα». Η φράση αυτή διασώζει και κάποια πληροφορία, ας πούμε δομικής φύσεως, γιατί μνημονεύοντας την αρμονία των λίθων υπαινίσσεται την τέλεια συναρμογή και καλή εφαρμογή των μελών. Έτσι έξι αιώνες μετά την αποπεράτωση του ο ναός διατηρείται σε καλή κατάσταση, παραμένει τουλάχιστον αξιοθέατος.

Από τότε ακολουθεί μια μακρά περίοδος σιωπής έως ότου, το Νοέμβρη του 1765 ο Ιωακείμ Bocher, Γάλλος αρχιτέκτονας ερχόμενος από τη Ζάκυνθο, ανακαλύπτει τυχαία μέσα σε ένα μοναδικό αρκαδικό τοπίο ένα απρόσμενο ερείπιο, που το ταυτίζει σωστά με το ναό του Επικούριου Απόλλωνα. Η περιγραφή του Bocher είναι αρκετά λεπτομερέστερη της μαρτυρίας του Πausανία. 36 από τους 38 κίονες του περιστυλίου στέκουν ακόμη όρθιοι, λείπουν μόνο οι δύο γωνιακοί κίονες της νότιας πλευράς, ενώ τα περισσότερα επιστύλια με τα αντιθήματα τους διατηρούνται επίσης στη θέση τους. Ο ναός είναι μισοχωμένος, στο μέρος που βρισκόταν ο σηκός υψώνεται ένας σωρός από λίθους ύψους τεσσάρων μέτρων. Έγστερα από πενήντα χρόνια η ομάδα των αρχαιόφιλων ερευνητών που ψάχνει για τη ζωφόρο βρίσκει το ναό στην ίδια κατάσταση.

Τι συνέβη στα 1600 χρόνια και ο αξιοθέατος ναός μεταβλήθηκε σε ερείπιο; Από δομική άποψη ως πιθανότερη διαδικασία φθοράς φαίνεται η εξής. Οι ξύλινες δοκοί που στηρίζουν τη στέγη σαπίζουν, το βάρος των λίθινων κεραμιδιών δεν μπορεί πια να συγκρατηθεί και η στέγη καταρρέει τμηματικά, συμπαρασύροντας στην πτώση της τους υψηλότερα ευρισκόμενους δόμους και την οροφή. Οι τοίχοι του ναού αποσυναρμολογούνται από τους ανθρώπους που ψάχνουν για μολύβι και σίδηρο και σιγά-σιγά υψώνεται ο λιθοσωρός στο κέντρο του ναού. Όλες σχεδόν οι μετακίονιες πλάκες απομακρύνονται επιτρέποντας έτσι την αρπαγή των μεταλλικών συνδέσμων που ενώνουν τους υποκείμενους δόμους. Για την ανεύρεση και των υπολοίπων συνδέσμων της κρηπίδας πελεκώνται ή θραύονται οι υπερκείμενοι λίθοι και αποκαλύπτονται οι μεταλλικοί σύνδεσμοι του αμέσως κατώτερου βαθμού. Η αφαίρεση των συνδέσμων, αλλά και η φθορά που προκαλείται από τις θραύσεις και τους καταναγκασμούς για την εξόρυξη του μολυβιού βλάπτουν καίρια τη στερεότητα της κρηπίδας. Ο ναός σε κατάσταση ερείπωσης παρουσιάζεται στην εικόνα 1.3.



**Εικόνα 1.3 :** Ναός του Επικούριου Απόλλωνα σε κατάσταση ερείπωσης

Μεγάλες βλάβες πρέπει να προκλήθηκαν στα μέλη του ναού το 1812 κατά την περίοδο που η γνωστή ομάδα των Hallerstein, Broendted, Stackellberg κ.ά. ψάχνει για το γλυπτό διάκοσμο του σηκού. Είναι γνωστό ότι την εποχή αυτή οργανώνεται ένα πολυπληθές συνεργείο από κατοίκους της περιοχής που, κάτω από τις οδηγίες των ξένων, μετακινούν με λιστούς τα ογκώδη λίθινα μέλη με σκοπό την ανεύρεση του ζωφόρου. Η μετακίνηση αυτή θα προξένησε σίγουρα πολλές καταστροφές στα ήδη τραυματισμένα από την πτώση αρχιτεκτονικά μέλη. Περί τα 1830, ο γειτονικός κίονας, ο δεύτερος από το νότο της δυτικής πλευράς, καταρρέει επίσης. Παρ' όλες τις οικοδομικές περιπέτειες, το μνημείο σήμερα διατηρεί ποσοστό 62% των λίθων της περίστασης (69% κατά βάρος), 60% των λίθων του σηκού (62% κατά βάρος) και 61% του συνολικού πλήθους των λίθων του (66% κατά βάρος). Εκτός τούτου και το πλήθος των διάσπαρτων λίθων είναι εντυπωσιακό.

### **1.3 ΑΝΑΣΤΗΛΩΣΕΙΣ-ΣΩΣΤΙΚΑ ΕΡΓΑ**

Το 1902 η εν Αθήναις Αρχαιολογική Εταιρεία αναλαμβάνει μια σοβαρή και ευρείας εκτάσεως προσπάθεια αναστήλωσης και αποκατάστασης του μνημείου. Αναστηλώνεται το μεγαλύτερο μέρος των τοίχων του σηκού, οι δύο ακραίοι νότιοι κίονες της δυτικής πλευράς και συμπληρώνεται μέρος της κατεστραμμένης κρηπίδας. Μετά τους σεισμούς της περιόδου 1965-66 σχεδιάζεται από τη Διεύθυνση Αναστήλωσης επέμβαση σε τρία επιστύλια που κρίθηκαν ετοιμόρροπα.

Το 1985 τοποθετείται ένα νέο ικρίωμα στο ναό, σε αντικατάσταση του παλιού ξύλινου ικριώματος που προστάτευε με υπερβολικό τρόπο τα επιστύλια από την πτώση.

Η Επιτροπή Συντηρήσεως του Ναού Επικούριου Απόλλωνος, προκειμένου να προστατεύσει το ναό από περιβαλλοντικές δράσεις, κατέληξε στη λύση της επικάλυψής του με προσωρινό στέγαστρο το οποίο τοποθετήθηκε το φθινόπωρο του 1987. Ο ναός πλέον έχει τη μορφή που παρουσιάζεται στην εικόνα 1.4.



**Εικόνα 1.4 :** Αναστήλωση ναού Επικούριου Απόλλωνα

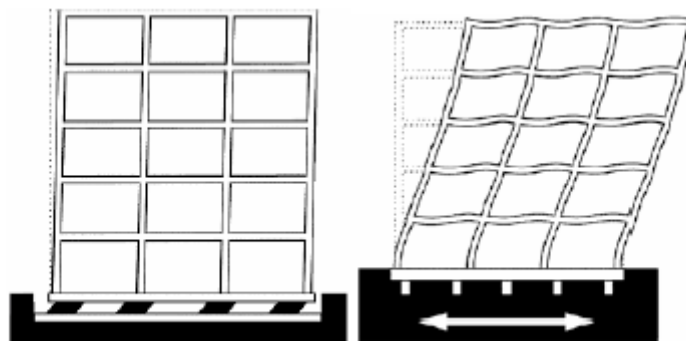
#### **1.4 ΑΠΩΛΕΙΑ ΕΔΡΑΣΗΣ-ΚΛΙΣΗ ΚΙΟΝΑ**

Λόγω καθιζήσεων, όλοι σχεδόν οι κίονες έχουν απωλέσει την αυθεντική τους έδραση. Εξαιτίας των θραύσεων του στυλοβάτη η αρχική επιφάνεια έδρασης έχει μεταβληθεί σε τυχαίο πολύγωνο μικρότερου εμβαδού. Όλοι οι κίονες της περίπτωσης παρουσιάζουν απώλεια εδράσεως που κυμαίνεται από 6% έως 57% της αυθεντικής εδράσεως. Μείωση της επιφάνειας εδράσεως σημαίνει μείωση της απόστασης μεταξύ των πόλων περιστροφής σε περίπτωση σεισμικής καταπόνησης, πράγμα που αυξάνει τη «λυγηρότητα» του κίονα και άρα την πιθανότητα ανατροπής του. Ως εκ τούτου, ο λικνισμός του κίονα, που κανονικά αποτελεί μηχανισμό απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας, μεταβάλλεται, λόγω της ατελούς εδράσεως, σε επισφαλή και απρόβλεπτο μηχανισμό, που αλλοιώνει την απόκριση και μάλιστα όχι προς την πλευρά της ασφάλειας. Εξ άλλου η εκθετική αύξηση των θλιπτικών τάσεων με τη μείωση της εδραζόμενης επιφάνειας μπορεί να προκαλέσει υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής και να οδηγήσει σε νέες ρηγματώσεις.

## 2. ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΟΝΩΣΗ-ΕΦΕΔΡΑΝΑ

### 2.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Η σεισμική μόνωση είναι μέθοδος τροποποίησης της σεισμικής απόκρισης ενός συστήματος. Σε αντίθεση με τις συμβατικές μεθόδους αντισεισμικού σχεδιασμού, που αυξάνουν την αντοχή της κατασκευής ώστε να ανταποκριθεί στις σεισμικές δυνάμεις, η σεισμική μόνωση έχει σαν στόχο όχι την αύξηση της αντοχής της κατασκευής αλλά τη μείωση των σεισμικών δυνάμεων που προκαλούν ένταση στο έργο απομονώνοντας (αποδεσμεύοντας) κατά το δυνατό την κατασκευή από την εδαφική κίνηση, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1 . Η απόκριση της κατασκευής εξαρτάται από την ιδιοπερίοδό της, που είναι συνάρτηση της μάζας και της ακαμψίας της, αλλά και της απόσβεσής της, που εξαρτάται από το υλικό και το σχήμα της(αεροδυναμικότητα) .Επομένως τα συστήματα ελέγχου της απόκρισης παρεμβαίνουν στη μάζα, την ακαμψία ή την απόσβεση της κατασκευής. Σκοπός είναι η αντισεισμικότητα της κατασκευής, δηλαδή αυτή ,με την ελάχιστη δυνατή δαπάνη να είναι ασφαλής και να συνεχίζει να λειτουργεί για ορισμένα επίπεδα σεισμού, ενώ δεν καταρρέει, ούτε μέλος της ούτε ολόκληρη, σε μεγαλύτερους σεισμούς. Υπό το σεισμό σχεδιασμού η αντισεισμική κατασκευή θα υποστεί τις ελάχιστες και επιδιορθώσιμες ζημιές, μέσω της μείωσης των σεισμικών δυνάμεων και παραμορφώσεων, με έμφαση συνήθως στις οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής σεισμικής διέγερσης.



**Εικόνα 2.1 :** Σεισμική απόκριση πολυώροφου κτιρίου με σεισμική μόνωση και χωρίς

## 2.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Με τη χρησιμοποίηση συστημάτων σεισμικής μόνωσης οι τυχούσες βλάβες θα εμφανιστούν στα ίδια τα συστήματα και όχι στην κατασκευή. Αυτό σημαίνει πρώτον ότι το κόστος αποκατάστασης είναι μικρότερο σε σχέση με την αποκατάσταση βλαβών στα φέροντα στοιχεία του έργου, αλλά κυρίως, όπως γίνεται φανερό, δεν επηρεάζει τη στατική της λειτουργία. Τα συστήματα απόκρισης που υπέστησαν βλάβες μπορούν να αφαιρεθούν και να επισκευαστούν χωρίς η κατασκευή να διακόψει την λειτουργία της, εφόσον αυτά δεν έχουν σχεδιαστεί να αναλαμβάνουν φορτία βαρύτητας. Τα πλεονεκτήματα της σεισμικής μόνωσης δε συνοψίζονται μόνο στη βελτίωση της αντισεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής και στο χαμηλό κόστος εφαρμογής της μεθόδου αλλά περιλαμβάνουν και τη δυνατότητα αναβάθμισης της αντισεισμικής λειτουργίας παλαιότερων κατασκευών που δεν ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών. Η συμβατική μέθοδος ενίσχυσης κατασκευών που έχουν πληγεί από σεισμούς ή απλά δεν ανταποκρίνονται στους νέους κανονισμούς περιλαμβάνει μανδύες, πρόσθετες στρώσεις σκυροδέματος, ελάσματα, επιπλέον περίσφιξη των οπλισμών, συνδέσμους δυσκαμψίας κ.ά. που γενικά έχουν σαν στόχο τη δημιουργία ενός ελαστοπλαστικού μηχανισμού ικανού να απορροφήσει τη σεισμική ενέργεια. Ο δεύτερος τρόπος είναι η σεισμική μόνωση. Η βασική διαφορά της σεισμικής μόνωσης είναι ότι εφαρμόζεται σε μία μόνο στάθμη (επίπεδο) της κατασκευής οπότε δεν παρεμβαίνει στην εμφάνιση. Αυτό την καθιστά ιδανική μέθοδο παρέμβασης σε κτίσματα με αξία αρχιτεκτονική, ιστορική και πολιτισμική όπως είναι οι αρχαίοι ναοί.

## 2.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Παρόλο που η σεισμική μόνωση ξεκίνησε να χρησιμοποιείται επίσημα σαν μέθοδος σχεδιασμού των κατασκευών πριν από τέσσερις περίπου δεκαετίες, η ιδέα της τροποποίησης της απόκρισης των κατασκευών σε δυναμικές φορτίσεις χρονολογείται από τα τέλη του 19ου αιώνα. Ο Βρετανός σεισμολόγος John Milne, ο «πατέρας της σύγχρονης σεισμολογίας», ο οποίος διετέλεσε καθηγητής του Πανεπιστημίου του Τόκιο από το 1876 έως το 1895, έκανε εκτεταμένη έρευνα για τα σεισμικά φαινόμενα και ανέπτυξε πρωτοποριακά για την εποχή συστήματα για την παρακολούθησή τους, όπως σειμοσκόπια και σειμογράφους. Ο Milne, ενόσω βρισκόταν στο Τόκιο, ενδιαφέρθηκε ιδιαίτερα για το σχεδιασμό κτιρίων σε σειсмоγενείς περιοχές και στα πλαίσια της έρευνάς του πάνω στον αντισεισμικό σχεδιασμό, κατασκεύασε ένα σεισμικά μονωμένο κτίριο θεμελιωμένο σε πασσάλους πάνω από τους οποίους τοποθέτησε μπάλες και πάνω από τις μπάλες, ελαφρώς κυρτές πλάκες από χάλυβα. Το σύστημα αυτό με τις μπάλες και τις κυρτές πλάκες χάλυβα είναι ο πρόδρομος της σεισμικής μόνωσης όπως την γνωρίζουμε σήμερα. Πολλοί μηχανισμοί έχουν χρησιμοποιηθεί στη διάρκεια του τελευταίου αιώνα με σκοπό την απομόνωση του κτιρίου από την καταστροφική δράση των σεισμών, όπως κυλίσεις, μπάλες, καλώδια, και στρώσεις άμμου. Κτίρια έχουν κτιστεί πάνω σε μπάλες όπως ένα πενταώροφο σχολείο στο Μεξικό, ή πάνω σε στρώσεις άμμου ανάμεσα στη θεμελίωση και την ανωδομή, ειδικά σχεδιασμένες να κινούνται πλευρικά σε περίπτωση σεισμού, όπως ο τετραώροφος κοιτώνας του State Seismological Observatory στο Πεκίνο.

## 2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ

Στη δεκαετία του '30 εμφανίστηκε για πρώτη φορά η θεωρία του εύκαμπτου πρώτου ορόφου και τρεις δεκαετίες αργότερα η θεωρία του μαλακού πρώτου ορόφου. Το στατικό σύστημα των κτιρίων που κατασκευάστηκαν σύμφωνα με αυτές τις θεωρήσεις έχει σκοπό να συγκεντρώσει τις σεισμικές μετακινήσεις στα ισόγεια.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα κτιρίου που κατασκευάστηκε με βάση τη θεωρία του εύκαμπτου πρώτου ορόφου είναι το Δημαρχείο του Σαν Φρανσίσκο, εικόνα 2.2. Οικοδομήθηκε το 1912 για να αντικαταστήσει το κτίσμα που προϋπήρχε αλλά καταστράφηκε από το σεισμό του 1906 και το 1998 μονώθηκε σεισμικά με 530 ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου ακριβώς πάνω από τη θεμελίωση και στη βάση των υποστυλωμάτων και των εξωτερικών φερόντων τοίχων.



**Εικόνα 2.2:** Όψη του Δημαρχείου του San Francisco

Οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής έχουν συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη και καθιέρωση της μεθόδου της σεισμικής μόνωσης με εκτεταμένες έρευνες σε πολλά πανεπιστήμια. Ειδικά στην Καλιφόρνια, κατασκευάστηκαν τα πρώτα σεισμικά μονωμένα κτίρια και ακόμα και σήμερα μεγάλο μέρος των εφαρμογών της σεισμικής μόνωσης βρίσκεται στην ευρύτερη περιοχή. Το διάσημο ρήγμα του Αγίου Ανδρέα διατρέχει όλη την πολιτεία, έχει έκταση 800 μίλια και δίνει πολύ μεγάλους σεισμούς σε τακτά χρονικά διαστήματα. Είναι υπεύθυνο για το σεισμό του 1857 στο Fort Tejon (μέγεθος 8.0), το σεισμό του 1906 στο Σαν Φρανσίσκο (7.8), του 1989 στο Loma Prieta (7.1) και του 1994 στο Northridge, ο οποίος προκάλεσε δεκάδες ανθρώπινες απώλειες αλλά και ζημιές 20 δισεκατομμυρίων δολαρίων, και κατατάσσεται έτσι στις πιο επιζήμιες φυσικές καταστροφές στην ιστορία των Η.Π.Α.

Το πρώτο υφιστάμενο κτίριο στον κόσμο που ενισχύθηκε με σεισμική μόνωση βρίσκεται στο Salt Lake City της Γιούτα (City and County Building), εικόνα 2.3. Κατασκευάστηκε το 1893 και ενισχύθηκε το 1989 με 208 ελαστικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου και 239 ελαστομεταλλικά. Χρησιμοποιήθηκαν ειδικές διατάξεις για την τοποθέτησή τους κάτω από τους φέροντες τοίχους.





**Εικόνα 2.3:** Όψη κτιρίου (City and County Building)

Το κτίριο Court of Appeals στο San Francisco, εικόνα 2.4, που κατασκευάστηκε το 1905 ενισχύθηκε με εφέδρανα εκκρεμούς τριβής (FPS). Όταν ολοκληρώθηκε η ενίσχυση το 1994 ήταν το μεγαλύτερο υπάρχον κτίριο στον κόσμο με σεισμική μόνωση. Η κατασκευή αποτελείται από 4 ορόφους και ένα υπόγειο και έχει πολύ σημαντική αρχιτεκτονική και ιστορική σημασία. Τα 256 FPS που τοποθετήθηκαν του δίνουν τη δυνατότητα να μετακινείται κατά 35εκ.



**Εικόνα 2.4 :** Όψη Court of Appeals, Σαν Φρανσίσκο

Το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο που κατασκευάστηκε στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι το Κέντρο Foothill ( Foothill Communities Law and Justice Center) στην ευρύτερη περιοχή του Λος Άντζελες, μια περιοχή μεγάλης σεισμικής επικινδυνότητας. Το κτίριο βρίσκεται σε απόσταση μόλις 21 χλμ. από το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα. Πρόκειται για το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο στις Ηνωμένες Πολιτείες αλλά και το πρώτο παγκοσμίως που για την σεισμική του μόνωση χρησιμοποιήθηκαν ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης, 98 στον αριθμό. Το κτίριο είναι τετραώροφο με υπόγειο και σχεδιάστηκε να αντέχει σεισμό μεγέθους 8.3 της κλίμακας Ρίχτερ. Η κατασκευή του ολοκληρώθηκε το 1985 με συνολικό κόστος 38 εκατ. δολάρια.

Άλλες εφαρμογές στις Η.Π.Α. περιλαμβάνουν νοσοκομεία, δημόσια κτίρια, κτίρια γραφείων και οι συσκευές που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα. Χρήση συνδυασμένου συστήματος με ελαστομεταλλικά εφέδρανα και μονωτήρες τριβής έγινε για τη σεισμική αποκατάσταση κτιρίων του Πανεπιστημίου της Νεβάδα, το 1992.

Το δημαρχείο του Όκλαντ, στην Καλιφόρνια αποκαταστάθηκε σεισμικά με σεισμική μόνωση και για χρόνια ήταν το υψηλότερο σεισμικά μονωμένο κτίριο παγκοσμίως, έχασε όμως αυτή την πρωτιά μετά την ολοκλήρωση της σεισμικής αποκατάστασης του δημαρχείου του Λος Άντζελες, εικόνα 2.5, το οποίο είναι ως και σήμερα το υψηλότερο σεισμικά μονωμένο κτίριο στον κόσμο. Έχει ύψος 132 μέτρα, 28 ορόφους και σχεδιάστηκε να αντέχει σε σεισμό μεγέθους 8.2 της κλίμακας Ρίχτερ.

Στο σεισμό του 1994, το κτίριο υπέστη εκτεταμένες ζημιές, ιδιαίτερα στους μαλακούς ορόφους, τον 25ο και τον 26ο. Η σεισμική μόνωση περιλαμβάνει 475 ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης, σε συνδυασμό με 60 μονωτήρες τριβής και 52 ιξώδεις αποσβεστήρες στο επίπεδο της σεισμικής μόνωσης. Επιπλέον 12 ιξώδεις αποσβεστήρες θα τοποθετηθούν ανάμεσα στον 24ο και τον 26ο όροφο για να μειωθούν οι σχετικές μετακινήσεις (interstory drifts) των μαλακών ορόφων. Το συνολικό κόστος της αποκατάστασης εκτιμήθηκε στα 150εκατ. δολάρια.



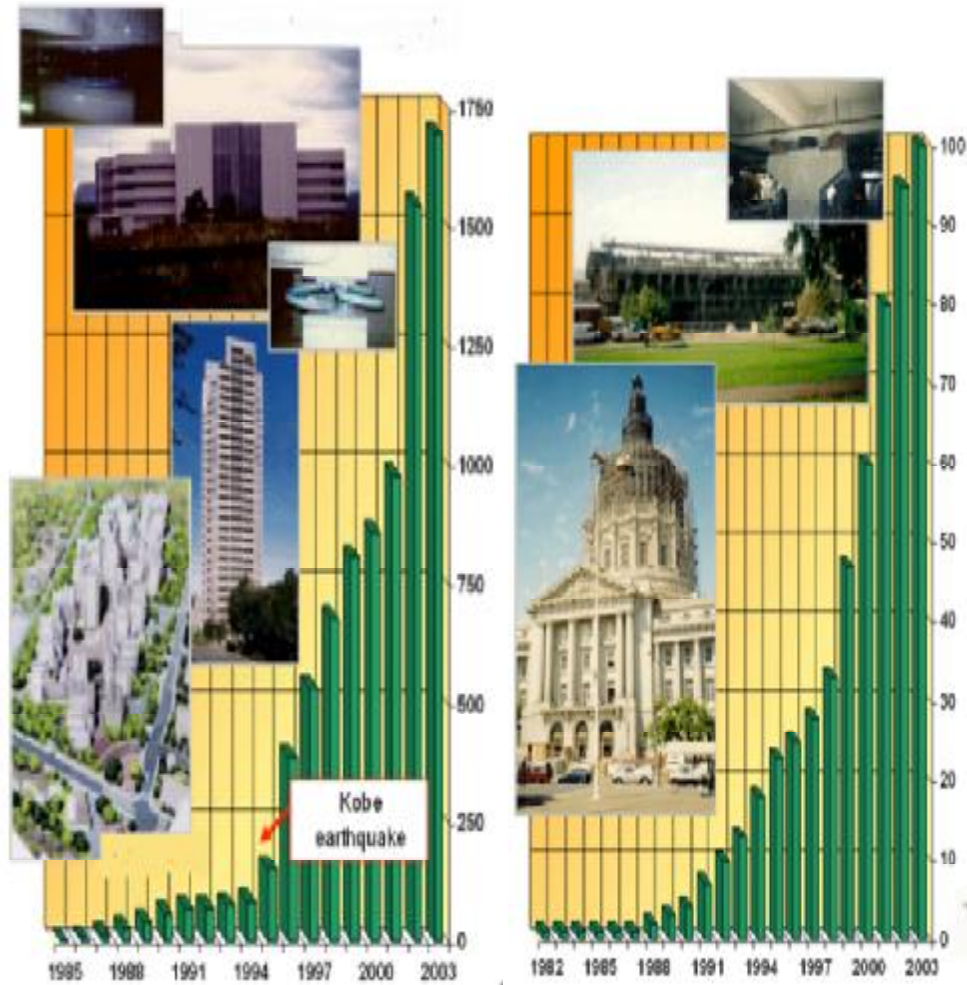
**Εικόνα 2.5 :** Όψη του Δημαρχείου του Λος Άντζελες

Το Διεθνές Αεροδρόμιο του Σαν Φρανσίσκο είναι σήμερα το μεγαλύτερο σεισμικά μονωμένο κτίριο παγκοσμίως και σχεδιάστηκε για σεισμό μεγέθους 8 Ρίχτερ. Η χρήση μονωτήρων τριβής FPS επέτρεψε τη μείωση των διαστάσεων των υποστυλωμάτων και των δοκών. Υπολογίστηκε ότι με συμβατική μέθοδο κατασκευής θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν επιπλέον 680 τόνοι δομικού χάλυβα.

Εκτός από τις Η.Π.Α. άλλες χώρες στις οποίες εφαρμόζεται η σεισμική μόνωση είναι η Ιαπωνία, η Κίνα, η Νέα Ζηλανδία, η Ινδονησία, η Ελλάδα και η Ιταλία, όλες περιοχές μεγάλης σεισμικής επικινδυνότητας.

Στην Ιαπωνία, ο αντισεισμικός σχεδιασμός υπήρξε ανέκαθεν προτεραιότητα των μηχανικών, οι οποίοι συχνά δοκιμάζουν ακριβές και εξεζητημένες λύσεις. Η σεισμική μόνωση εφαρμοζόταν περιορισμένα στην αρχή γιατί η κατασκευή με σεισμική μόνωση απαιτούσε ειδική άδεια από το Υπουργείο Κατασκευών (Ministry of Construction-MOC). Το πρώτο σύγχρονο σεισμικά μονωμένο κτίριο στην Ιαπωνία ολοκληρώθηκε το 1986. Μετά το σεισμό του Kobe ο αριθμός των αδειών από το Υπουργείο για κατασκευή σεισμικά μονωμένων κτιρίων αυξήθηκε κατακόρυφα και σήμερα πολλά από αυτά έχουν δοκιμαστεί σε σειμούς. Έτσι, η Ιαπωνία συμβάλλει σημαντικά στη συλλογή στατιστικών στοιχείων για τη συμπεριφορά σεισμικά μονωμένων και μη κτιρίων σε πραγματικούς σειμούς. Σε κάθε περίπτωση, η σύγκριση είναι υπέρ των σεισμικά μονωμένων κατασκευών, ιδιαίτερα για εδαφικές δονήσεις με υψηλές επιταχύνσεις.

Στα παρακάτω διαγράμματα, εικόνα 2.6, παρουσιάζεται ο αριθμός των κατασκευών που κατασκευάζονταν εκ νέου ή ενισχύονταν με σεισμική μόνωση κάθε χρόνο, από το 1985 έως το 2003 στην Ιαπωνία και από το 1982 έως το 2003 στις Η.Π.Α. Είναι φανερό η κατακόρυφη αύξηση στην εφαρμογή της μεθόδου στην Ιαπωνία αμέσως μετά το σεισμό του Kobe το 1995.



**Εικόνα 2.6 :** Αριθμός σεισμικά μονωμένων κατασκευών ετησίως, αριστερά η Ιαπωνία, δεξιά οι Η.Π.Α.

Ως και το 2003 στις Ηνωμένες Πολιτείες τα σεισμικά μονωμένα κτίρια ήταν περισσότερα από 200, σύμφωνα με έκθεση του Οργανισμού NEHRP (Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Part 2: Commentary (FEMA 450-2/2003 edition)).

Η Νέα Ζηλανδία, αν και χώρα μέτριας σεισμικότητας, έχει αναπτύξει ιδιαίτερα την αντισεισμική τεχνολογία και φιλοσοφία, με κανονισμούς που εφαρμόζονται παγκοσμίως. Η μέθοδος της σεισμικής μόνωσης έχει εφαρμοστεί στη χώρα σε αρκετές περιπτώσεις, όπως κτίρια διατηρητέα, μεγάλης ιστορικής και πολιτιστικής αξίας. Το πρώτο σεισμικά μονωμένο κτίριο στη Νέα Ζηλανδία είναι και το πρώτο παγκοσμίως στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου. Πρόκειται για το William Clayton Building στο Wellington, η κατασκευή του οποίου ολοκληρώθηκε το 1981. Η Βουλή της Νέας Ζηλανδίας, κτίριο του 1922 έχει αναβαθμιστεί σεισμικά με περισσότερα από 514 ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου. Ιδιαίτερη περίπτωση σεισμικά μονωμένου κτιρίου αποτελεί και το τυπογραφείο στην περιοχή Petone κοντά στο Wellington, όπου σκοπός είναι να προστατευθούν οι πρέσες του τυπογραφείου, μηχανήματα ογκώδη και με ύψος ίσο με ένα τετραώροφο κτίριο.

Από τις ευρωπαϊκές χώρες, η σεισμική μόνωση μελετάται πιο ενεργά στην Ιταλία υπό την αιγίδα του Εθνικού Κέντρου Εργασιών για τη Σεισμική Μόνωση

(Gruppo di Lavoro Isolamento Sismico–GLIS). Στα σεισμικά μονωμένα κτίρια συμπεριλαμβάνονται δημόσια κτίρια, όπως το Υπουργείο Αμύνης και ο Εθνικός Οργανισμός Τηλεπικοινωνιών στην Ανκόνα αλλά και μεσαιωνικά κτίρια με μεγάλη ιστορική σημασία, όπως ο καθεδρικός ναός του Αγίου Πέτρου στο Φριτζέντο.

Στην Ελλάδα, οι διάσημες εφαρμογές της σεισμικής μόνωσης είναι πολλές. Η πρώτη που θα αναφερθεί είναι παγκοσμίως γνωστή, οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) στη νήσο Ρεβυθούσα των Μεγάρων, εικόνες 2.7 και 2.8. Πρόκειται για τα μεγαλύτερα και βαρύτερα σεισμικά μονωμένα σιλό παγκοσμίως. Τα σιλό περιέχουν 152 εκατομμύρια τόνους φυσικού αερίου και έχουν διάμετρο 69m και ύψος 33m. Εκτός από τις υψηλές αντισεισμικές απαιτήσεις της κατασκευής λόγω του εξαιρετικά εύφλεκτου υλικού και της υψηλής σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής οι κατασκευαστές έπρεπε να λάβουν υπόψη τις θερμοκρασιακές μεταβολές και τη γήρανση σε παραθαλάσσιο περιβάλλον. Για τη σεισμική μόνωση χρησιμοποιήθηκαν 212 μονωτήρες εκκρεμούς-τριβής (FPS) και υπολογίζεται ότι για το σεισμό σχεδιασμού το σύστημα σεισμικής μόνωσης μειώνει τις τέμνουσες δυνάμεις κατά 80%.



**Εικόνα 2.7:** Δεξαμενή αποθήκευσης υγροποιημένου φυσικού αερίου **Εικόνα 2.8:** Άποψη δεξαμενής στη Ρεβυθούσα

Στην περίπτωση της Ωνασείου Στέγης Γραμμάτων και Τεχνών οι αρχιτεκτονικές απαιτήσεις και οι υψηλές σεισμικές προδιαγραφές του έργου οδήγησαν στην εφαρμογή σεισμικής μόνωσης. Οι σεισμικές απαιτήσεις συνοψίζονται σε: εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού  $a = 0.24$ , διπλάσια από την προβλεπόμενη από τον Ε.Α.Κ. για την περιοχή, σπουδαιότητα έργου  $\gamma = 1.15$ , οιονεί ελαστική συμπεριφορά με συντελεστή συμπεριφοράς  $q = 1.50$ . Η σεισμική μόνωση υλοποιείται με 46 εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς που διατάσσονται σε ενιαία στάθμη κάτω από την πλάκα του υπογείου πάχους 1.50m. Έτσι διαχωρίζεται οριζόντια η ανωδομή από το υπόγειο. Τα εφέδρανα ολίσθησης τοποθετήθηκαν σε ανεστραμμένη διάταξη, με τη σφαιρική επιφάνεια ολίσθησης προς τα πάνω, ώστε οι πρόσθετες ροπές από τη μετακίνηση σε σεισμό να μην καταπονούν τα υποστυλώματα στα οποία εδράζονται αλλά την υπερκείμενη πλάκα. Η μέγιστη οριζόντια μετακίνησή τους είναι  $\pm 255\text{mm}$  και διαστασιολογήθηκαν για φορτία λειτουργικότητας 11000 kN και σεισμικά φορτία 25000 kN. Στο σχεδιασμό λήφθηκε υπόψη και η κατακόρυφη συνιστώσα, ως παράμετρος ελέγχου της πιθανής ανύψωσης των εφεδράνων.

Για το νέο μουσείο της Ακρόπολης, το οποίο θα ανοίξει τις πύλες του στο κοινό τον Ιούλιο του 2009, η σεισμική μόνωση θεωρήθηκε ως η κατάλληλη μέθοδος για την προστασία του κτιρίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.9. Οι λόγοι είναι προφανείς. Η σπουδαιότητα του κτιρίου ως χώρος μαζικής συγκέντρωσης και η

τεράστια ιστορική αξία των εκθεμάτων δεν αφήνει περιθώρια για βλάβες στο σκελετό του κτιρίου, ενώ το αρχιτεκτονικό σχέδιο προέβλεπε μεγάλους ανοιχτούς χώρους στο εσωτερικό, ώστε να υπάρχει απρόσκοπτη θέα προς την Ακρόπολη. Κάτι τέτοιο δε θα ήταν εφικτό με χρήση παραδοσιακών μεθόδων αντισεισμικού σχεδιασμού, που θα περιελάμβαναν ογκώδεις κολώνες και πολλά μεγάλων διαστάσεων τοιχία στο εσωτερικό. Το σύστημα σεισμικής μόνωσης περιλαμβάνει 94 εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς, από τον ίδιο προμηθευτή, όπως και στην Ωνάσειο Στέγη Γραμμάτων και Τεχνών (Maurer- Soehne Structural Protection). Το επίπεδο της σεισμικής μόνωσης βρίσκεται κάτω από την πλάκα σκυροδέματος διαστάσεων 110m x 70m που στηρίζει το ύψους 40m τετραώροφο κτίριο, το οποίο σε μερικά χρόνια θα στεγάζει τα μάρμαρα του Παρθενώνα. Τα εφέδρανα είναι σχεδιασμένα να αναλαμβάνουν κατακόρυφο φορτίο 16000 kN, και έχουν δυνατότητα μέγιστης μετακίνησης +/-250mm.



**Εικόνα 2.9:** Εφέδρανα ολίσθησης στο Μουσείο της Ακρόπολης

## 2.5 ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΜΟΝΩΣΗΣ

Τα μέσα σεισμικής μόνωσης ονομάζονται αλλιώς και συστήματα ελέγχου απόκρισης των κατασκευών (structural control systems) και σκοπός τους είναι αφενός η απομόνωση της κατασκευής από την κίνηση του εδάφους, αφετέρου ο έλεγχος των ταλαντώσεων, δηλαδή η ελεγχόμενη απόκρισή της σε μια δυναμική φόρτιση. Τα συστήματα αποκρίσεως διακρίνονται ανάλογα με το σημείο τοποθέτησής τους σε:

- ∅ εξωτερικά, που συνήθως είναι συστήματα σεισμικής μόνωσης, που τοποθετούνται ανάμεσα στο κατάστρωμα και τα βάθρα της κατασκευής και σε
- ∅ εσωτερικά, που συνήθως είναι συστήματα απορροφήσεως ενέργειας και τοποθετούνται εντός του καταστρώματος

Διακρίνονται επίσης ανάλογα με το αν απαιτούν προσφορά εξωτερικής ενέργειας για τη λειτουργία τους, οπότε έχουμε :

- ∅ Τα συστήματα παθητικού ελέγχου (passive control devices), που δεν απαιτούν προσφορά ενέργειας

- ∅ Τα συστήματα ενεργητικού ελέγχου(active control devices),που απαιτούν ιδιαίτερα μεγάλες ποσότητες εξωτερικής ενέργειας
- ∅ Τα συστήματα ημιενεργητικού ελέγχου(semi- active control devices),που απαιτούν πολύ λιγότερη εξωτερική ενέργεια, σε σχέση με τα προηγούμενα
- ∅ Τα υβριδικά συστήματα (hybrid control devices),που λειτουργούν κυρίως παθητικά και χρησιμοποιούν ενεργητικούς μηχανισμούς για διορθώσεις με σκοπό τη βέλτιστη απόκριση.

Φυσικά, τα συστήματα ελέγχου απόκρισης κατηγοριοποιούνται και ανάλογα με το χαρακτηριστικό που μεταβάλλουν, το οποίο μπορεί να είναι η ακαμψία, η μάζα, η απόσβεση ή κάποιος συνδυασμός τους. Συνοπτικά λειτουργούν ως εξής :

- ∅ Αυξάνοντας τη μάζα της κατασκευής, αυξάνεται η ιδιοπερίοδος, άρα μειώνονται οι επιταχύνσεις και οι σεισμικές δυνάμεις
- ∅ Μειώνοντας την ακαμψία (αυξάνοντας την ευκαμψία) του συστήματος, αυξάνεται η ιδιοπερίοδος, άρα μειώνονται οι επιταχύνσεις και οι σεισμικές δυνάμεις
- ∅ Αυξάνοντας την απόσβεση, δηλαδή την απορρόφηση εισερχόμενης ενέργειας, το σύστημα εμφανίζει πολύ μειωμένες δυναμικές μετακινήσεις ,ενώ δευτερευόντως μειώνονται και οι επιταχύνσεις και σεισμικές δυνάμεις
- ∅ Διαθέτοντας επαρκή στιβαρότητα, ανταποκρίνονται επαρκώς στα φορτία λειτουργίας

Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα σεισμικής μονώσεως είναι:

1. Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με χαμηλής, υψηλής απόσβεσης ή με πυρήνα μολύβδου (elastomeric bearings)
2. Τα εφέδρανα ολισθήσεως σε διάφορες παραλλαγές (sliders)
3. Τα συστήματα απόσβεσης/ κατανάλωσης ενέργειας (dissipators)
4. Οι αρμοί διαστολής (expansion joints)

Είναι προφανές ότι αν ο χρησιμοποιούμενος τύπος εφεδράνου δεν έχει την επιθυμητή απόσβεση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε συνδυασμό με κάποιο σύστημα απορρόφησης ενέργειας, δηλαδή αποσβεστήρα (συνήθως ιξώδη) .

## **2.6 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ**

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα μονώσεως χρησιμοποιούνται ευρέως τα τελευταία 50 χρόνια κυρίως για την αντιμετώπιση των επιδράσεων των θερμοκρασιακών μεταβολών. Για σεισμική μόνωση, η εφαρμογή τους περιορίζεται στην τελευταία δεκαετία και εμφανίζει σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η ανεκτικότητα σε οριζόντιες μετακινήσεις και η ελάχιστες απαιτήσεις για συντήρηση. Τα κυριότερα είδη ελαστομεταλλικών εφεδράνων σεισμικής μονώσεως είναι :

1. Ελαστομεταλλικά από καουτσούκ χαμηλής απόσβεσης, χρησιμοποιούμενα πάντα σε συνδυασμό με ιξώδεις αποσβεστήρες.
2. Ελαστομεταλλικά με πυρήνα μολύβδου
3. Ελαστομεταλλικά από καουτσούκ υψηλής απόσβεσης, με περιορισμένη εφαρμογή λόγω αβεβαιότητας για τη συμπεριφορά τους σε ερπυσμό.

## 2.7 ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Τα χρησιμοποιούμενα υλικά για τη κατασκευή των ελαστομεταλλικών εφεδράνων είναι:

### 1) Καουτσούκ

Το καουτσούκ ανήκει στην οικογένεια των πολυμερών. Τα πολυμερή είναι μεγάλα μόρια που σχηματίζονται από την επαναλαμβανόμενη διασύνδεση πολλών εκατοντάδων ή χιλιάδων μονομερών μονάδων, που παρασκευάζονται από την αντίδραση απλών αλκενίων με έναν εκκινήτη ριζών, σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, τα θερμοπλαστικά, που μαλακώνουν με την αύξηση της θερμοκρασίας, τα thermosetting plastics, που σκληραίνουν με την ιδιότητα να αντέχουν σε υψηλές παραμορφώσεις χωρίς διάρρηξη. Το καουτσούκ ανήκει στην τρίτη κατηγορία. Στην πραγματικότητα καουτσούκ ονομάζεται το μονομερές cis-1,4-isoprene από το οποίο αποτελείται βασικά το πολυμερές στο οποίο αναφερόμαστε, με χημική ονομασία cis-1,4-polyisoprene. Σήμερα κατασκευάζονται διάφορα συνθετικά υλικά με παραπλήσιες ιδιότητες, και από αυτά πιο κοντά στο φυσικό προϊόν είναι τα trans-polyisoprene και cis-polybutadiene. Ωστόσο, η χρήση των συνθετικών είναι περιορισμένη, γιατί τα μηχανικά και χημικά τους χαρακτηριστικά δεν είναι ανώτερα από το φυσικό προϊόν, ενώ ταυτόχρονα έχουν αυξημένο κόστος παραγωγής. Το φυσικό καουτσούκ παράγεται από τουλάχιστον 400 διαφορετικά φυτά. Κυριότερη πηγή του όμως είναι το καουτσουκόδεντρο, η *Hevea Brasiliensis*, από την οποία περισυλλέγεται η ακατέργαστη πρώτη ύλη. Ο πρώτος εξαγωγέας ακατέργαστου καουτσούκ στον κόσμο είναι η Μαλαισία. Η πρώτη ύλη, το ακατέργαστο καουτσούκ περισυλλέγεται από τα δέντρα σε υδαρή μορφή, υφίσταται έκπλυση, ξήρανση και στερεοποίηση με θέρμανση στον αέρα. Αυτό το ακατέργαστο στερεοποιημένο υλικό είναι τόσο μαλακό και κολλώδες, ώστε δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, παρά μόνο όταν υποστεί σκλήρυνση, αφού αναμιχθεί με 25%wt στοιχειακό θείο και θερμανθεί στους 150 °C σε ένα καλούπι από χάλυβα. Αυτή η κατεργασία αποτελείται βουλκανισμός και επινοήθηκε το 1839 από τον Charles Goodyear. Ο βουλκανισμός (vulcanisation) μέσω μιας σειράς μηχανισμών που δεν είναι ακόμα απόλυτα κατανοητοί, προκαλεί σταυροειδείς δεσμούς ανάμεσα στις αλυσίδες του καουτσούκ, σχηματίζοντας μεταξύ τους δεσμούς άνθρακα-θείου, οπότε το πολυμερές γίνεται σκληρό και δύσκαμπτο, με ιδιαίτερα βελτιωμένη συμπεριφορά στις φθορές και τα γδαρσίματα. Ο ακριβής βαθμός σκληρότητας ποικίλλει ανάλογα τη χρήση για την οποία προορίζεται το υλικό. Κατά τη διαδικασία του βουλκανισμού προστίθενται αντιοξειδωτικά και άλλα πρόσθετα για τη διαμόρφωση των επιθυμητών ιδιοτήτων, αν απαιτείται, όπως συμβαίνει συνήθως στην παραγωγή καουτσούκ που θα χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές πολιτικού μηχανικού. Το σημαντικότερο από αυτά τα πρόσθετα είναι ο άνθρακας (blacks- carbon) που συμβάλλει στην αύξηση της αντοχής και της ακαμψίας. Για τα εφέδρανα η περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να ανέρχεται ακόμα και στο 1/3 του συνολικού προϊόντος. Ο άνθρακας μπορεί να είναι είτε ενισχυτικός (reinforcing), που βελτιώνει την αντοχή σε απόξεση και αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας, αυξάνει το βρόχο υστέρησης και το συντελεστή ερπυσμού, είτε μη ενισχυτικός, ο οποίος συμβάλλει ελάχιστα στα παραπάνω. Για αυτό όταν προστίθεται



ο μη ενισχυτικός άνθρακας αναμιγνύεται σε μεγαλύτερη αναλογία σε σχέση με τον ενισχυτικό. Συνοπτικά, οι ιδιότητες του φυσικού καουτσούκ είναι οι εξής :

1. Καλές διηλεκτρικές ιδιότητες
2. Άριστη ανθεκτικότητα
3. Καλή απόσβεση
4. Καλή αντοχή σε σκίσιμο, γδαρσίματα (tear)
5. Χημική αντοχή σε μη οξειδωτικά διαλυτά άλατα και αλκάλια
6. Ελάχιστη χημική αντοχή σε οξειδωτικά όπως οξυγόνο, όζον, έλαια, βενζίνη, κετόνες και στα παράγωγα του πετρελαίου
7. Ευαίσθητα στην υπεριώδη ακτινοβολία

Η έκθεση στο οξυγόνο της ατμόσφαιρας και στην ηλιακή ακτινοβολία οδηγούν υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων και σε γρήγορη εμφάνιση φαινομένων ερπυσμού και χαλάρωσης. Η έκθεση σε υψηλή θερμοκρασία οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα. Η προσθήκη αντιοξειδωτικών και άνθρακα μπορεί να αποτελέσει μια μετριοπαθή λύση για τα παραπάνω ενώ για την προστασία από το όζον τα εφέδρανα κερώνονται. Η επαφή με παράγωγα του πετρελαίου είναι απίθανη, οπότε δε λαμβάνονται προληπτικά μέτρα. Αν όμως κάποιο βυτιοφόρο εκτραπεί από τη γέφυρα και τα εφέδρανα εμποτιστούν με πετρέλαιο ή παράγωγά του, αυτά θα πρέπει να καθαριστούν άμεσα. Οι σχετικά μεγάλες διαστάσεις τους δίνουν ένα χρονικό περιθώριο για τον καθαρισμό πριν προλάβουν να διογκωθούν και ουσιαστικά να καταστούν μη χρησιμοποιήσιμα.

## 2) Χάλυβας

Χαλύβδινες πλάκες τοποθετούνται στο άνω και κάτω μέρος του εφεδράνου αλλά και πλευρικά για προστασία του ελαστομερούς. Στο εσωτερικό του ελαστομερούς τοποθετούνται λεπτές πλάκες χάλυβα παράλληλες στο οριζόντιο επίπεδο αλλά και στο εξωτερικό του κομμάτι, πάνω και κάτω. Ο χάλυβας είναι κράμα με βασικό συστατικό το σίδηρο (Fe) και διάφορα άλλα μη μεταλλικά στοιχεία σε μικρή αναλογία, όπως άνθρακας (C), μαγγάνιο (Mn), πυρίτιο (Si). Η ποσοστιαία συμμετοχή αυτών επηρεάζει τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του χάλυβα (αντοχή, συγκολλησιμότητα, ευαισθησία στη διάβρωση, ολκιμότητα κ.ά.) και μικρή μεταβολή στην αναλογία τους οδηγεί σε δημιουργία διαφορετικού είδους χάλυβα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα του χάλυβα είναι :

- Μεγάλη αντοχή ή μεγάλος λόγος αντοχής προς ίδιο βάρος
- Ομογένεια υλικού
- Μονιμότητα
- Ελαστικότητα
- Ολκιμότητα
- Μικρό βάρος
- Ευχέρεια διάνοιξης οπών

## 3) Μόλυβδος

Ο μόλυβδος (Pb) είναι ένα από τα βαρέα μέταλλα. Έχει μεγάλη πυκνότητα, είναι ελατό, όλκιμο, πολύ μαλακό και με χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Λόγω της μεγάλης ανθεκτικότητάς του στη διάβρωση, χρησιμοποιείται συχνά στις κατασκευές,

ενώ συχνά σκληρύνεται με προσθήκη άλλων στοιχείων, όπως είναι το αντιμόνιο. Σπανίως συναντάται καθαρός στη φύση αλλά εξάγεται από σιδηρομεταλλεύματα ή ανακυκλώνεται από παλιοσίδερα. Οι εφαρμογές του είναι πολλές και συναντάται συχνά σε προϊόντα καθημερινής χρήσης, όπως μπαταρίες και καλώδια. Οι βασικές του ιδιότητες είναι :

- Όπως όλα τα μέταλλα ξαναπαίρνει το αρχικό του σχήμα (recrystallises) μετά από παραμόρφωση σχεδόν αμέσως αλλά είναι από τα ελάχιστα που το κάνει σε θερμοκρασία δωματίου.
- Δεν αστοχεί σε κόπωση πρακτικά ποτέ.
- Διατηρεί αμετάβλητες τις ιδιότητές του με το πέρασμα του χρόνου.
- Έχει υψηλό συντελεστή ερπυσμού. Αυτό σημαίνει ότι παραμορφώνεται χωρίς αντίσταση λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών οπότε δεν αναπτύσσει ένταση.

## 2.8 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ

Ο πιο απλός τύπος ελαστομεταλλικού εφεδράνου είναι το κυλινδρικό η ορθογωνικό εφέδρανο από καουτσούκ που κλείνεται πλευρικά από πλάκες χάλυβα. Επειδή όμως η απόσβεση του είναι αμελητέα (max 5%) , είναι ασταθές υπό μη σεισμικές δράσεις και παρουσιάζει υψηλή παραμορφωσιμότητα υπό μη σεισμικά φορτία δε χρησιμοποιείται.

Ο απλούστερος χρησιμοποιούμενος τύπος ελαστομεταλλικού εφεδράνου είναι παραλλαγή του προηγούμενου. Η διαφορά είναι ότι προστίθενται λεπτές πλάκες χάλυβα στο εσωτερικό. Οι λεπτές εσωτερικές χαλύβδινες πλάκες παρέχουν την απαραίτητη κατακόρυφη ακαμψία και φέρουσα ικανότητα για παραλαβή των κατακόρυφων φορτίων και την απαραίτητη ευστάθεια υπό μη σεισμικές δράσεις, όπως ο άνεμος, ενώ μειώνουν τόσο την κατακόρυφη όσο και την πλευρική παραμορφωσιμότητα υπό στατικά φορτία.

Η τιμή της απόσβεσης κυμαίνεται από 2% έως 6% αλλά εξαρτάται και από την ταχύτητα. Η απόκριση είναι γραμμική και εξαρτάται αποκλειστικά από το ελαστομερές. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους είναι :

Η Κατακόρυφη φέρουσα ικανότητα είναι :

$$W < A'GS_{y,z} \quad (2.1)$$

όπου  $W$  το βάρος που αναλαμβάνει το εφέδρανο,  $A'$  το επικαλυπτόμενο εμβαδό σε κατάσταση μέγιστης παραμόρφωσης,  $S$  ο συντελεστής σχήματος,  $y,z$  η επιτρεπόμενη διαμητική παραμόρφωση.

Ο συντελεστής σχήματος  $S$  είναι :

$$S = \frac{D}{4t} \quad (2.2)$$

όπου  $D$  η διάμετρος του εφεδράνου (για κυκλικό εφέδρανο),  $t$  το πάχος μιας στρώσης ελαστομερούς.

$$K_b = \frac{GA}{h} \quad (2.3)$$

Η ιδιοπερίοδος εφεδράνου είναι :

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k_b}} \quad (2.4)$$

Αν αντικαταστήσουμε τη μάζα και την ακαμψία από τις παραπάνω σχέσεις η ιδιοπερίοδος είναι :

$$T_b = 2\pi \sqrt{\frac{ASHy_{xz}}{gA}} \quad (2.5)$$

Η κατακόρυφη ακαμψία είναι:

$$K_z = \frac{6GS^2AK}{(6GS^2+K)h} \quad (2.6)$$

όπου K το μέτρο συμπίεσεως του ελαστομερούς.

Η επιτρεπόμενη σεισμική μετακίνηση:

$$\Delta = B \left(1 - \frac{A'}{A}\right) \quad (2.7)$$

Τα βασικά πλεονεκτήματα των ελαστομεταλλικών εφεδράνων χαμηλής απόσβεσης είναι η απλή κατασκευή, τα σταθερά και αναλλοίωτα μηχανικά χαρακτηριστικά, που δεν επηρεάζονται από το χρόνο, τη θερμοκρασία και την ιστορία της φόρτισης. Μειονεκτούν όμως στο ότι πρέπει να συνδυάζονται απαραίτητως με συστήματα απόσβεσης, συνήθως ιξώδεις αποσβεστήρες οι οποίοι απαιτούν λεπτομερείς συνδέσεις και συχνά είναι ευαίσθητοι σε κόπωση.

## **2.9 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΥΨΗΛΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ**

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά από τον Ερευνητικό Οργανισμό των Μαλαισιανών Παραγωγών καουτσούκ του Ηνωμένου Βασιλείου (Malaysian Rubber Producers' Research Association). Γεωμετρικά δε διαφέρουν σε τίποτα από τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα χαμηλής απόσβεσης με εσωτερικές πλάκες χάλυβα. Η βασική διαφορά τους έγκειται στη σύσταση του καουτσούκ, το οποίο αποκτά αυξημένη υστερητική απόσβεση με την προσθήκη άνθρακα (carbon blocks),ελαίων και ρητινών. Με τον τρόπο αυτό, και με πανομοιότυπη τη διαδικασία κατασκευής του εφεδράνου, επιτυγχάνεται απόσβεση 10-20% σε 100% διατμητική παραμόρφωση, δηλαδή περίπου 4 φορές υψηλότερη της συμβατικής τιμής. Ο βρόχος υστέρησης είναι το ενδιάμεσο μεταξύ των βρόχων ιξώδους απόσβεσης ,που είναι τετραγωνικός, και υστερητικής που είναι γραμμικός. Ένα βασικό πλεονέκτημα των ελαστομεταλλικών εφεδράνων υψηλής απόσβεσης είναι η «βολική» μεταβολή των ιδιοτήτων του υλικού ανάλογα με τη διατμητική παραμόρφωση. Πιο συγκεκριμένα, αν γ 20% (οριακή κατάσταση λειτουργικότητας) το υλικό είναι μη γραμμικό, έχει αυξημένη ακαμψία και αυξημένη απόσβεση . Έτσι φιλτράρει υψίσυχνες δονήσεις από την κυκλοφορία ή από κοντινούς σιδηροδρόμους. Για τις διατμητικές παραμορφώσεις στο εύρος 20-120% (σεισμός σχεδιασμού) το μέτρο διάτμησης είναι πιο χαμηλό και σταθερό. Η ακαμψία είναι μειωμένη και η σταθερότητα των τιμών καθιστά πιο ακριβή την προσομοίωση. Για  $\gamma \geq 120\%$  (δηλαδή για αναπάντεχα μεγάλες δυναμικές φορτίσεις) το μέτρο διάτμησης αυξάνει και πάλι λόγω του φαινομένου κρυστάλλωσης του καουτσούκ, παρέχοντας την απαραίτητη σταθερότητα στην κατασκευή.

Τα βασικότερα μειονεκτήματα των ελαστομεταλλικών εφεδράνων υψηλής απόσβεσης είναι η αβεβαιότητα στην προσομοίωσή τους και η αδύνατη πρόβλεψη της απόκρισής τους. Αυτό συμβαίνει γιατί η απόκριση εξαρτάται από την ιστορία της φόρτισης, το μέτρο της ακαμψίας δίνεται με ακρίβεια +/- 50%, και μέχρι στιγμής η έρευνα δεν μας παρέχει αρκετά στοιχεία για να προβλέψουμε με ακρίβεια τις επιδράσεις της χρονοϊστορίας και της θερμοκρασίας.

## **2.10 ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΜΕ ΠΥΡΗΝΑ ΜΟΛΥΒΔΟΥ(LEAD-RUBBER BEARINGS-LRB)**

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου εφευρέθηκαν στη Νέα Ζηλανδία και είναι τα πιο συνηθισμένα σε περιπτώσεις σεισμικής μόνωσης γεφυρών. Συναντώνται ορθογωνικά και κυλινδρικά. Το ύψος του εφεδράνου είναι συνήθως λιγότερο από το μισό της διαμέτρου ή της πλευράς, επειδή με την αύξηση του ύψους το εφέδρανο κινδυνεύει και από λυγισμό. Στο εμπόριο διατίθενται διάμετροι έως και 1m. Κατασκευάζονται από βουλκανισμένο καουτσούκ και στο κέντρο τους περιέχουν τον πυρήνα μολύβδου, που είναι κυλινδρικός και συμπαγής. Σε κάποιες περιπτώσεις περιέχουν παραπάνω από έναν πυρήνα.

Οι διαστάσεις του πυρήνα είναι σύμφωνα με τον AASHTO :

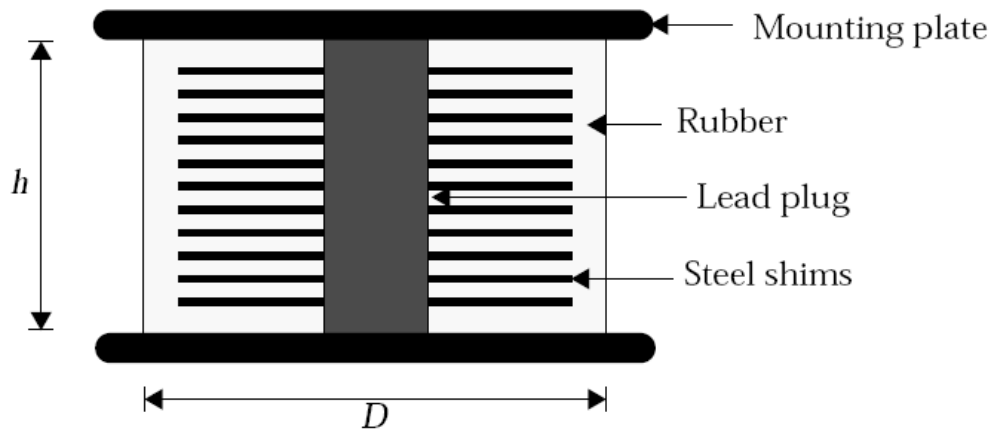
$$\frac{B}{6} \leq dL \leq \frac{B}{3} \quad (2.8)$$

όπου  $dL$  η διάμετρος του πυρήνα μολύβδου και  $B$  το πλάτος (ή η διάμετρος) του εφεδράνου.

Ο ρόλος του πυρήνα μολύβδου είναι ο εξής :

- ∅ αυξάνει την απορρόφηση ενέργειας (την απόσβεση) στις οριζόντιες μετατοπίσεις λόγω σεισμού
- ∅ αναλαμβάνει φορτία ανέμου και πεδησεως
- ∅ ελαχιστοποιεί τις μετακινήσεις στην οριακή κατάσταση λειτουργικότητας
- ∅ ο υψηλός συντελεστής ερπυσμού επιτρέπει στην κατασκευή να μην επηρεαστεί ουσιαστικά στην περίπτωση θερμοκρασιακών μεταβολών, και κάθε άλλου είδους αργά επιβαλλόμενης φόρτισης
- ∅ διαρρέει σε σχετικά χαμηλή τιμή ( 9 MPa) και απορροφά ενέργεια από σεισμικά φορτία. Μετά τη διαρροή η πλευρική δυσκαμψία μειώνεται σημαντικά. Επομένως, οι διαστάσεις του εφεδράνου και του πυρήνα επιλέγονται τέτοιες κατά το σχεδιασμό, ώστε να συμπεριφέρεται ελαστικά για τα φορτία της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας και να διαρρέει για σεισμικά φορτία.

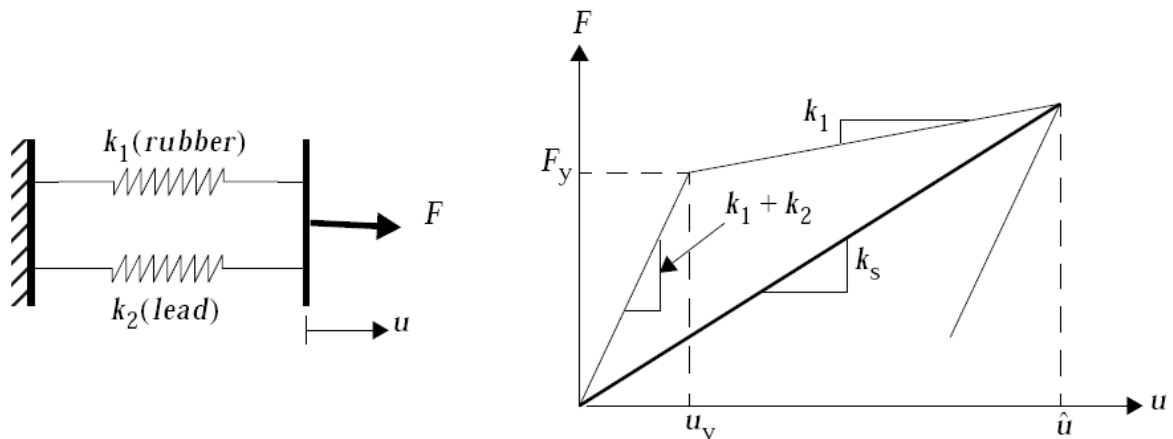
Πειράματα έχουν δείξει ότι η ενεργός δύναμη διαρροής του πυρήνα μολύβδου είναι στην πραγματικότητα υπερδιπλάσια και υπερτριπλάσια της τιμής που δίνει ο κατασκευαστής/προμηθευτής. Στο εσωτερικό του εφεδράνου τοποθετούνται λεπτές πλάκες χάλυβα(steel shims). Η βασική τους λειτουργία είναι ότι αυξάνουν την κατακόρυφη δυσκαμψία, παραλαμβάνοντας καλύτερα τα κατακόρυφα φορτία και μειώνοντας την καθίζηση του εφεδράνου και την πλευρική διόγκωση. Στην περίπτωση του πυρήνα μολύβδου, δεν τον τέμνουν αλλά ο πυρήνας είναι ενιαίος και οι πλάκες τον περιορίζουν και είναι αυτές που αναγκάζουν τον πυρήνα να παραμορφωθεί πλευρικά. Για αυτό και είναι απαραίτητο ο πυρήνας μολύβδου να εφάπτεται ακριβώς στις εσωτερικές πλάκες χάλυβα, εικόνα 2.10. Για να επιτευχθεί αυτό ο όγκος του είναι ελάχιστα μεγαλύτερος από τον όγκο της οπής, στην οποία στη συνέχεια σφηνώνεται. Το εφέδρανο επικαλύπτεται πλευρικά από καουτσούκ επικαλύψεως για την προστασία των εσωτερικών πλακών χάλυβα και του εσωτερικού καουτσούκ από τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Πάνω και κάτω κλείνεται από πλάκες χάλυβα που προστατεύουν τον πυρήνα μολύβδου και επιτρέπουν τη σύνδεση του εφεδράνου με την ανωδομή και την υποδομή αντίστοιχα.



**Εικόνα 2.10 :** Τομή ελαστομεταλλικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου

Ο πυρήνας μολύβδου σχεδιάζεται ώστε να διαρρέυσει υπό σεισμικά φορτία. Μόλις πραγματοποιηθεί η διαρροή η πλευρική δυσκαμψία του εφεδράνου μειώνεται αισθητά, ενώ οι στρώσεις του ελαστομερούς μπορούν πλέον να παραμορφωθούν αρκετά ώστε να επιμηκύνουν την ιδιοπερίοδο της κατασκευής και να απορροφήσουν την σεισμική ενέργεια. Το εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου προσομοιώνεται όπως απεικονίζεται στην εικόνα 2.11.

Θεωρείται ότι αποτελείται από δύο στοιχεία, ένα γραμμικό βισκοελαστικό υλικό, που αντιστοιχεί στο ελαστομερές και ένα γραμμικό-ιδεωδώς πλαστικό υλικό ,που αντιστοιχεί στον πυρήνα μολύβδου. Το μοντέλο θεωρεί ότι η απόκριση του συστήματος είναι διγραμμική .



**Εικόνα 2.11:** Προσομείωση του ελαστομεταλλικού εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ελαστομεταλλικών εφεδράνων πυρήνα μολύβδου είναι:

- Ø Για μεγάλο εύρος συχνοτήτων, που περιλαμβάνει και τις συνήθεις σεισμικές συχνότητες έχουν little strain-rate dependence
- Ø Παρουσιάζουν σταθερή συμπεριφορά σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση
- Ø Δεν εξαρτώνται ουσιαστικά από τη θερμοκρασία. 30% force variation για μεταβολή θερμοκρασίας κατά 60
- Ø Έχουν καλή συμπεριφορά σε «ερπυστικές» φορτίσεις και το ελαστομερές διατηρεί την ελαστική δυνατότητα επαναφοράς του εφεδράνου στην αρχική του θέση
- Ø Αποτελούν μια οικονομική λύση γιατί χρησιμοποιείται μία συσκευή τόσο για την αύξηση της περιόδου όσο και για την αύξηση της απόσβεσης

## 2.11 ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ

Ιστορικά η ολίσθηση είναι η πρώτη μέθοδος σεισμικής μόνωσης που προτάθηκε στις αρχές του 20ού αιώνα. Η αρχική ιδέα ήταν η στήριξη του κτιρίου πάνω σε στρώση ταλκ ή άμμου που βρισκόταν ανάμεσα στην ανωδομή και τη θεμελίωση. Η σημερινή μορφή της ενιαίας στρώσης υλικού πάνω στο οποίο ολισθαίνει η κατασκευή είναι τα εφέδρανα ολίσθησης. Οι πιο χαρακτηριστικοί τύποι εφεδράνων ολίσθησης είναι :

- Flat sliding bearings – επίπεδα εφέδρανα ολίσθησης
- Friction Pendulum Bearing – Εφέδρανο ολίσθησης τύπου εκκρεμούς
- TASS System
- Eradiquake isolator

### 2.11.1 Υλικά κατασκευής

#### 1)Ανοξειδωτος χάλυβας

Πρόκειται για κράμα χάλυβα το οποίο παρουσιάζει μεγάλη αντίσταση σε οξείδωση και διάβρωση. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη τουλάχιστον 11% w/w χρωμίου, το οποίο σχηματίζει μια παθητική στρώση οξειδίου του χρωμίου (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) όταν εκτίθεται στο οξυγόνο και προστατεύει έτσι το υλικό, τόσο από την ατμόσφαιρα όσο και από την υγρασία. Στην περίπτωση των εφεδράνων ολίσθησης μπορεί να είναι λιπασμένο ή όχι, ανάλογα το συντελεστή τριβής που έχει επιλεχθεί κατά το σχεδιασμό. Ο πιο συνηθισμένος τύπος ανοξειδωτου χάλυβα που χρησιμοποιείται είναι ο austenitic, είτε ο τύπος 304 είτε ο 316 που περιέχει και μόλυβδο και έχει βελτιωμένες ιδιότητες έναντι διάβρωσης.

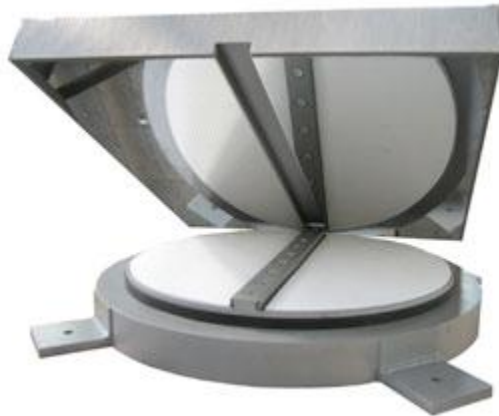
#### 2)PTFE/ Teflon:

Το Teflon (πολυτετραφθοροαιθυλένιο) είναι ένα αδρανές πολυμερές πλαστικό με μοναδικές ιδιότητες ,όπως μεγάλο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (-200 έως +250 ), ανθεκτικότητα σε όλα σχεδόν τα διαβρωτικά χημικά, άριστες μονωτικές ιδιότητες σε ηλεκτρισμό, είναι άφλεκτο, δεν απορροφά υγρασία, ανθεκτικό στην

υπεριώδη ακτινοβολία και με πολύ χαμηλό συντελεστή τριβής. Αυτή η τελευταία ιδιότητά του το καθιστά κατάλληλο για την εφαρμογή του ως επικάλυμμα του ολισθαίνοντος σώματος του εφεδράνου ολίσθησης.

## 2.12 ΕΠΙΠΕΔΑ ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ (FLAT SLIDING BEARINGS)

Ο απλούστερος τύπος εφεδράνου ολίσθησης είναι ο επίπεδος εικόνα 2.12. Αυτό σημαίνει ότι η χαλύβδινη πλάκα πάνω στην οποία ολισθαίνει το ολισθαίνον σώμα είναι επίπεδη. Εμφανίζεται όμως σε διάφορες παραλλαγές. Το ολισθαίνον σώμα μπορεί να είναι κι αυτό μια λεπτή επίπεδη πλάκα, ή μπορεί να είναι ένα ημισφαιρικό σώμα , επίπεδο στην πλευρά που εφάπτεται με την επίπεδη πλάκα και σφαιρικό από την άλλη. Είναι πάντα επικαλυμμένο με PTFE για χαμηλό συντελεστή τριβής. Από τις παραλλαγές αυτές προτιμάται περισσότερο αυτή με το ημισφαιρικό ολισθαίνον σώμα γιατί έχει τη μικρότερη στρεπτική αντίσταση και εμφανίζει έτσι την πιο ευνοϊκή διανομή πίεσης στη διεπιφάνεια ολίσθησης.



**Εικόνα 2.12:** Παράδειγμα επίπεδου εφεδράνου ολίσθησης

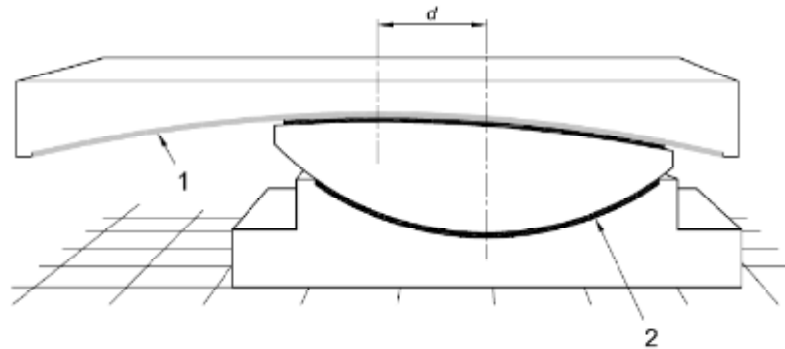
Σε κάθε περίπτωση, το βασικό τους μειονέκτημα είναι η έλλειψη δύναμης επαναφοράς που σε πολλές περιπτώσεις οδήγησε σε μεγάλες παραμένουσες παραμορφώσεις. Για αυτό χρησιμοποιούνται πλέον αποκλειστικά σε συνδυασμό με ελαστομεταλλικά εφέδρανα δημιουργώντας έτσι υβριδικά συστήματα με μεγάλη γκάμα ακαμψιών και αποσβέσεων ανάλογα με τις ανάγκες κάθε έργου.

## 2.13 ΕΦΕΔΡΑΝΑ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΤΥΠΟΥ ΕΚΚΡΕΜΟΥΣ (PENDULUM SLIDERS-FPS)

Το εφέδρανο ολίσθησης τύπου εκκρεμούς ονομάζεται αλλιώς και σφαιρικό εφέδρανο (spherical bearing) εικόνα 2.13 . Τα βασικά μέρη του FPS είναι μια κοίλη πλάκα από χάλυβα, το αρθρωτό εφέδρανο (articulated slider) και μια δεύτερη πλάκα που ονομάζεται housing plate. Το στοιχείο που περιστρέφεται είναι κατά το ήμισυ σφαιρικό και κατά το ήμισυ κυρτό, από ανοξείδωτο χάλυβα. Η κυρτή πλευρά, επικαλυμμένη πάντα με συνθετικό υλικό χαμηλής τριβής, εφάπτεται στην κοίλη πλάκα σχηματίζοντας τη διεπιφάνεια ολίσθησης. Η κοίλη πλάκα από χάλυβα μπορεί να βρίσκεται είτε στο κάτω είτε στο άνω μέρος του εφεδράνου. Η σφαιρική πλευρά του στοιχείου επικαλύπτεται με ανοξείδωτο χάλυβα και σφηνώνεται σε μια κοιλότητα



που βρίσκεται στο μέσον της housing plate, η οποία είναι επικαλυμμένη με υλικό με χαμηλό συντελεστή τριβής.



**Εικόνα 2.13:** Εφέδρανο ολίσθησης τύπου εκκρεμούς

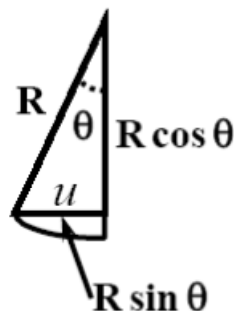
Επειδή είναι κατασκευασμένο από χάλυβα, μπορεί να παραλαμβάνει πολύ μεγάλα αξονικά (κατακόρυφα) φορτία και άρα παραλαμβάνει με επιτυχία το ίδιο βάρος και τα φορτία της ανωδομής. Είναι προφανές ότι η πλευρική του ευκαμψία είναι η αποτέλεσμα της δυνατότητας περιστροφής του πάνω στη σφαιρική διεπιφάνεια, όπως συμβαίνει με όλους τους τύπους εφεδράνων ολίσθησης. Το εύρος της δυνατής πλευρικής μετακίνησης εξαρτάται από τις διαστάσεις του σφαιρικού εφεδράνου. Η γεωμετρία του παρέχει τη δύναμη επαναφοράς καταργώντας έτσι το βασικό μειονέκτημα των επίπεδων εφεδράνων ολίσθησης. Κατά την κίνηση, η μάζα ανυψώνεται και έτσι ενεργοποιείται η δύναμη επαναφοράς, η βαρύτητα, που τείνει να επαναφέρει το εφέδρανο σε κατάσταση ευσταθούς ισορροπίας, ακριβώς όπως το εκκρεμές επανέρχεται πάντα στην αρχική του θέση. Επιπλέον, η αντίσταση της τριβής λειτουργεί επικουρικά σαν δύναμη επαναφοράς.

Η βαρύτητα είναι :

$$F_w = w \sin \theta \quad (2.9)$$

Η αντίσταση τριβής είναι :

$$F_r = \mu W \cos \theta \quad (2.10)$$



**Εικόνα 2.14 :** Μοντέλο εκκρεμούς

Αν η μετακίνηση  $D$  είναι πολύ μικρή, τότε  $\cos\theta=1$  και  $\sin\theta=\frac{D}{\tau}$ . Οπότε η συνολική δύναμη επαφής  $F$  είναι (Naeim and Kelly, 1999) :

$$F = \mu w + \frac{W}{r} D \quad (2.11)$$

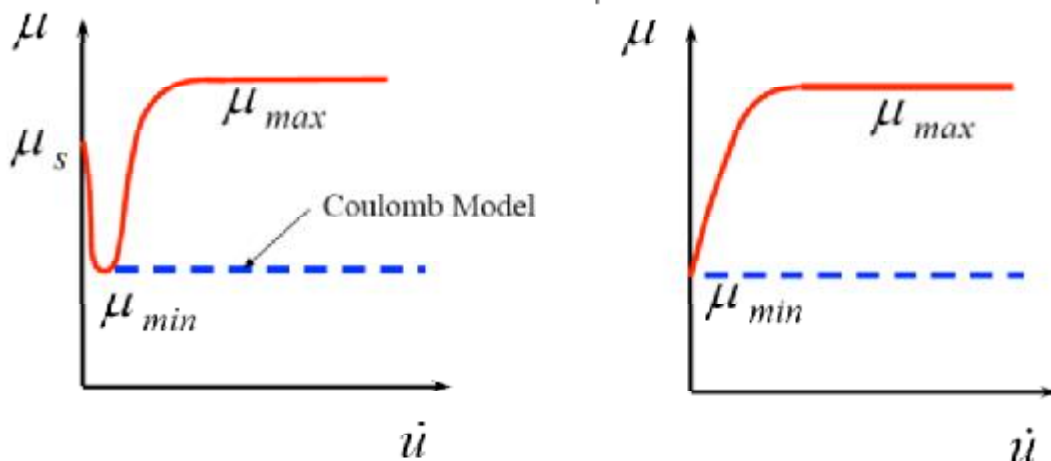
Η περίοδος του FPS εξαρτάται αποκλειστικά από την ακτίνα και όχι από τη μάζα του εφεδράνου, όπως συμβαίνει με τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα. Έτσι ο μελετητής επιλέγοντας την ακτίνα  $r$ , επιλέγει και καθορίζει την περίοδο αλλά και την ακαμψία του εφεδράνου .

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{r}{g}} \quad (2.12)$$

$$k = \frac{W}{r} \quad (2.13)$$

όπου  $r$  η ακτίνα καμπυλότητας,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $W$  το βάρος του εφεδράνου.

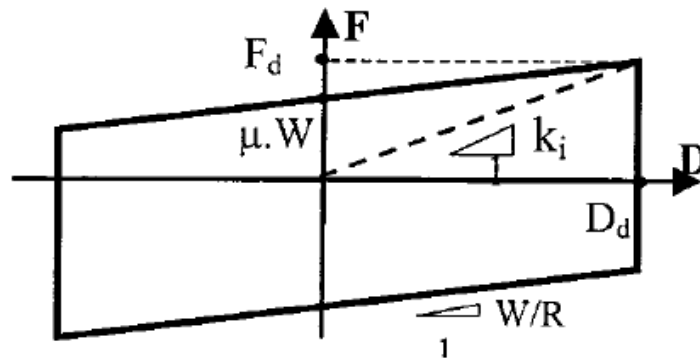
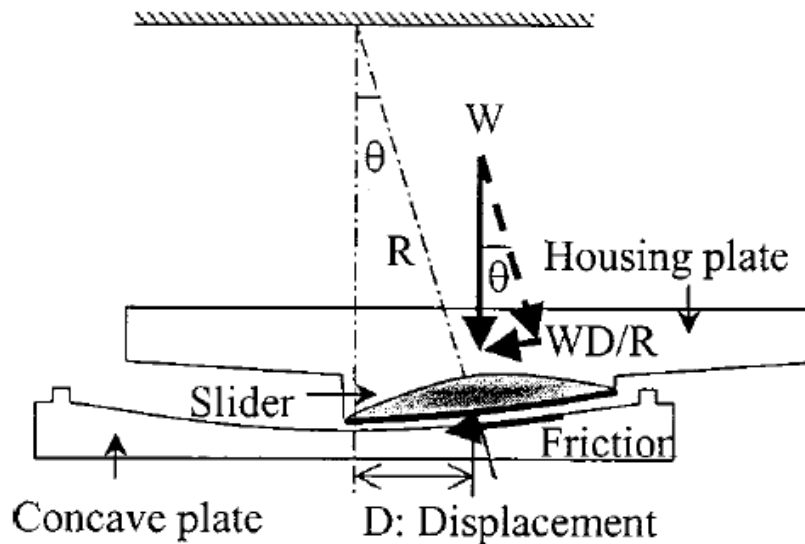
Ο συντελεστής τριβής για διεπιφάνεια PTFE- ανοξειδωτου χάλυβα είναι 0.02- 0.03 για χαμηλές ταχύτητες κίνησης (θερμοκρασιακές μεταβολές, ερπυσμός) και 0.10- 0.15 για σεισμικές ταχύτητες. Οι διακυμάνσεις του συντελεστή τριβής λοιπόν διαφοροποιούν την απόκριση του εφεδράνου ανάλογα το είδος της φόρτισης. Αν το οριζόντιο φορτίο είναι μικρότερο από το συντελεστή στατικής τριβής του εφεδράνου αυτό παραμένει ακίνητο, ενώ αν ξεπεράσει αυτή την τιμή αυτό ταλαντώνεται (ολισθαίνει), όπως δείχνει η εικόνα 2.15.



**Εικόνα 2.15 :** Πραγματική και προσεγγιστική μεταβολή του συντελεστή τριβής  $\mu$  συναρτήσει της ταχύτητας

Η απόσβεση του εφεδράνου εξαρτάται από το συντελεστή τριβής που επιλέγεται στη διεπιφάνεια. Για να έχουμε αξιόλογη κατανάλωση ενέργειας, η επιφάνεια PTFE δεν πρέπει να είναι λιπασμένη. Ο βρόχος υστέρησης είναι απολύτως πλαστικός υστερητικός, που σημαίνει ότι καταναλώνεται μεγάλο ποσοστό ενέργειας.

Ο βρόχος, ακριβώς όπως και η δύναμη επαναφοράς, οφείλεται σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι η βαρύτητα ( $F_r$ ) και η δεύτερη η αντίσταση της τριβής ( $F_f$ ). Η κλίση της καμπύλης  $F_r - u$  είναι  $W/r$ . Σε περίπτωση που  $F_r > F_f$  το εφέδρανο δε θα επανέλθει στην αρχική του θέση. Αυτό είναι πιο πιθανό να συμβεί όταν το εφέδρανο σχεδιάζεται με μεγάλη ακτίνα καμπυλότητας όπως δείχνει η εικόνα 2.16.



FPB Hysteretic Behavior

**Εικόνα 2.16:** Τελικός βρόχος υστέρησης εφεδράνου ολίσθησης τύπου εκκρεμούς

Η ισοδύναμη ακαμψία του εφεδράνου υπολογίζεται αν διαιρέσουμε την οριζόντια δύναμη με την αντίστοιχη μετακίνηση  $D$ .

$$K_{\text{eff}} = \frac{\mu W}{D} + \frac{W}{r} \quad (2.14)$$

Το εμβαδό του υστερητικού βρόχου είναι  $\text{Area} = 4Mwd$  οπότε η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση είναι (Naeim and Kelly, 1999) :

$$B_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\mu}{\mu + \frac{D}{r}} \right) \quad (2.15)$$

## 2.14 ERADIQUAKE ISOLATOR

Ένας δεύτερος τρόπος εισαγωγής μιας δύναμης επαναφοράς είναι το εφεδρανο Eradiquake. Ένας κυλινδρικός δίσκος κλείνεται από δύο επίπεδες χαλύβδινες πλάκες άνω και κάτω. Περιβάλλεται από τέσσερα ελατήρια ουρεθάνης που χρησιμοποιούνται για να επαναφέρουν το μονωτήρα στην αρχική του θέση μετά από μια πλευρική μετατόπιση. Έως σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως σε ζώνες χαμηλής ή μέτριας σεισμικότητας.

Όπως και στην περίπτωση του εφεδράνου ολίσθησης τύπου εκκρεμούς, η δύναμη επαναφοράς οφείλεται σε δύο μηχανισμούς.

Ο πρώτος είναι η αντίσταση της τριβής :

$$F_r = Mw \quad (2.16)$$

Και ο δεύτερος είναι η δύναμη επαναφοράς των ελατηρίων :

$$F_b = K_d D \quad (2.17)$$

όπου  $K_d$  η ακαμψία των ελατηρίων

Η συνολική δύναμη επαναφοράς είναι το άθροισμα των παραπάνω :

$$K_{\text{eff}} = \frac{\mu W}{D} + K_d \quad (2.18)$$

Το εμβαδό του υστερητικού βρόχου είναι:

$$\text{Area} = 4Mwd \quad (2.19)$$

Η ισοδύναμη ιξώδης απόσβεση είναι :

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{2}{\pi} \left( \frac{\mu}{\mu + \frac{K_d w}{D}} \right) \quad (2.20)$$

## 2.15 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ

Απλά ελαστομεταλλικά εφεδρανα χαμηλής απόσβεσης δεν επαρκούν για την αποτελεσματική σεισμική μόνωση γεφυρών. Ο πρώτος λόγος είναι ότι ελλείπει πρόσθετη απόσβεση, η επιμήκυνση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής οδηγεί σε μεγάλες σεισμικές μετακινήσεις στις διεπιφάνειες εφεδράνων-κατασκευής που μπορούν να αποδειχθούν επιζήμιες για την κατασκευή. Απαιτούν επομένως

συνδυασμό με αποσβεστήρες και έτσι αυξάνουν το κόστος. Επιπλέον, τα απλά ελαστομεταλλικά εφέδρανα αστοχούν σε χαμηλότερες γωνιακές παραμορφώσεις(150%) από αυτές που τίθενται ως στόχος από τον κανονισμό(200%).

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα υψηλής απόσβεσης και με πυρήνα μολύβδου αποτελούν πιο οικονομικές λύσεις αφού αυξάνουν και την απόσβεση, πέρα από την ιδιοπερίοδο και την ευκαμψία. Τα υψηλής απόσβεσης έχουν εκτεταμένη χρήση, παρά το γεγονός ότι είναι δύσκολη η ακριβής γνώση των ιδιοτήτων και των μηχανικών χαρακτηριστικών τους, ειδικά η πρόβλεψη της επίδρασης που έχουν η ιστορία της φόρτισης και οι μεταβολές της θερμοκρασίας.

Τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα με πυρήνα μολύβδου προσφέρουν αποτελεσματικότερη σεισμική μόνωση, λόγω αυξημένης απόσβεσης της τάξης του 16% της κρίσιμης και λόγω της υψηλότερης γωνιακής παραμόρφωσης αστοχίας της τάξης του 170%, πάλι όμως χαμηλότερη από την τιμή των κανονισμών. Επιπλέον, η σταθερότητα των χαρακτηριστικών τους σε μεταβολές θερμοκρασίας, σε ερπυστικές φορτίσεις και σε επαναλαμβανόμενη φόρτιση παρέχουν σιγουριά στο μελετητή κατά το σχεδιασμό της σεισμικής μόνωσης εικόνα .

## **2.16 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΥΠΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ**

Η έλλειψη δύναμης επαναφοράς στα επίπεδα εφέδρανα ολίσθησης και ο απαραίτητος συνδυασμός τους είτε με συστήματα απόσβεσης είτε με ελαστομεταλλικά εφέδρανα καθιστά την επιλογή τους αντισεσμική. Αντίθετα, τα εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς παρέχουν ικανή δύναμη επαναφοράς αλλά και καλή απόσβεση για αυτό η χρήση τους είναι περισσότερο διαδεδομένη.

## **2.17 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΛΑΣΤΟΜΕΤΑΛΛΙΚΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ**

Θα ασχοληθούμε με τη σύγκριση των χρησιμοποιούμενων τύπων εφεδράνων από κάθε κατηγορία, δηλαδή με τα ελαστομεταλλικά εφέδρανα πυρήνα μολύβδου και με τα εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς.

Από τα παραπάνω έγινε φανερό ότι η ακαμψία και η απόσβεση στην περίπτωση των εφεδράνων ολίσθησης τύπου εκκρεμούς εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και είναι εξαρχής γνωστά και καθορισμένα από το μελετητή. Αντίθετα στην περίπτωση των ελαστομεταλλικών εφεδράνων η ακαμψία και η απόσβεση εξαρτώνται από το υλικό, γεγονός που εμπεριέχει μεγάλη αβεβαιότητα. Πρώτον γιατί τα στοιχεία που δίνει ο κατασκευαστής μπορεί να μην είναι ακριβή και δεύτερον γιατί με την πάροδο των χρόνων οι ιδιότητες του υλικού μεταβάλλονται.

Όσον αφορά στη φέρουσα ικανότητα κατακόρυφων φορτίων, την οριζόντια ευκαμψία και την ιδιοπερίοδο, εφέδρανα LRB και FPS παρόμοιων διαστάσεων δίνουν ίδιες τάξεις μεγέθους.

Η μέγιστη επιτρεπόμενη μετακίνηση καθορίζει τις διαστάσεις κατόψεως του εφεδράνου ολίσθησης και του ελαστομεταλλικού. Στην περίπτωση των ελαστομεταλλικών το όριο για την επιτρεπόμενη μετακίνηση είναι περίπου το 1/5 της

πλευράς, ενώ για τα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς είναι το  $1/5$  της ακτίνας καμπυλότητας.

Στις περιπτώσεις όπου το κατάστρωμα της γέφυρας είναι σχετικά ελαφρύ, η αύξηση της ιδιοπεριόδου της κατασκευής μέσω μείωσης της ακαμψίας δεν είναι αποτελεσματική. Συγκεκριμένα, η fixed-base period βρίσκεται στο πρώτο τμήμα (περιοχή σταθερών φασματικών επιταχύνσεων) και αύξηση της σημαίνει μετακίνηση στο δεύτερο τμήμα της καμπύλης (περιοχή σταθερών φασματικών ταχυτήτων) οπότε αύξηση των μετακινήσεων αντί για μείωσή τους. Στις περιπτώσεις αυτές η χρήση των ελαστομεταλλικών εφεδράνων δεν ενδείκνυται, γιατί η ιδιοπερίοδός τους εξαρτάται από τη μάζα της ανωδομής. Τα εφέδρανα ολίσθησης τύπου εκκρεμούς λύνουν το πρόβλημα αφού η ιδιοπερίοδός τους δεν εξαρτάται από τη μάζα αλλά μόνο από την ακτίνα καμπυλότητας δηλαδή από τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά.

## 2.18 TASS SYSTEM

Το σύστημα TASS αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία. Η εφαρμογή αυτή έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε τα κατακόρυφα φορτία να φέρονται από τα στοιχεία που είναι κατασκευασμένα από PTFE και ανοξείδωτο χάλυβα. Το εφέδρανο περιλαμβάνει όμως και έναν κυλινδρικό ή τετραγωνικό όγκο από νεοπρέν με εσωτερικά ενσωματωμένες πλάκες χάλυβα, που δε φέρει φορτία αλλά παρέχει την απαραίτητη δύναμη επαναφοράς. Ο συντελεστής τριβής κυμαίνεται από 0.05 έως 0.15 ανάλογα με την ταχύτητα ολίσθησης, με την τιμή του να αυξάνεται όταν αυξάνεται και η ταχύτητα. Το μεγάλο εύρος του συντελεστή τριβής καθιστά δύσκολη την πρόβλεψη της απόκρισης του εφεδράνου. Επιπλέον, το γεγονός ότι το ελαστομερές τμήμα του εφεδράνου δε φέρει κατακόρυφα φορτία το κάνει να καταπονείται εφελκυστικά ,με κίνδυνο τη θραύση του.

## 3. ΣΕΙΣΜΟΣ

### 3.1 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΕΙΣΜΟΥ

Σεισμός είναι η δόνηση ή η ξαφνική κίνηση της επιφάνειας της Γης. Ο σεισμός δημιουργείται συνήθως μέσα στο γήινο φλοιό. Το σημείο, βαθιά μέσα στο φλοιό της γης, στο οποίο "γεννιέται" ο σεισμός, ξεκινά δηλαδή το σπάσιμο των πετρωμάτων που προκαλεί το σεισμό, ονομάζεται εστία ή υπόκεντρο. Όταν συμβεί ένας σεισμός σε μια περιοχή, όλοι μιλούν συνήθως για τρία πράγματα: το επίκεντρο, το μέγεθος και την ένταση.

**Επίκεντρο** είναι το σημείο που βρίσκεται στην επιφάνεια της γης, ακριβώς κατακόρυφα πάνω από την εστία.

**Μέγεθος** είναι η ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται με ένα σεισμό. Αυτή η ποσότητα είναι συγκεκριμένη, μοναδική για κάθε σεισμό και υπολογίζεται με μαθηματικούς τύπους, χρησιμοποιώντας στοιχεία που καταγράφουν ειδικά όργανα τα οποία ονομάζονται σειсмоγράφοι. Οι μετρήσεις του μεγέθους γίνονται με βάση την κλίμακα Ρίχτερ. Σεισμοί με μέγεθος μικρότερο των 4,0 Ρίχτερ δεν προκαλούν συνήθως ζημιές, ενώ αυτοί με μέγεθος μικρότερο των 2,0 Ρίχτερ δεν γίνονται αισθητοί. Αντίθετα εκείνοι με μέγεθος μεγαλύτερο των 5,0 Ρίχτερ μπορούν να προκαλέσουν καταστροφές. Οι σεισμοί μπορούν να γίνουν αισθητοί σε ακτίνα πολλών χιλιομέτρων και έχουν διάρκεια μικρότερη του ενός λεπτού. Μέχρι σήμερα ο τόπος, ο χρόνος και το μέγεθος ενός σεισμού δεν μπορούν να προβλεφθούν, αλλά οι επιστήμονες εργάζονται για το σκοπό αυτό.

**Ένταση** είναι η φυσική ποσότητα που δίνει το μέτρο των αποτελεσμάτων ενός σεισμού στους ανθρώπους και στις ανθρώπινες κατασκευές. Μετρείται σε βαθμούς της αναθεωρημένης κλίμακας Mercalli (MM) ή σε βαθμούς της κλίμακας Mercalli-Sieberg (MKS). Δεν είναι ένας αριθμός μοναδικός, όπως το μέγεθος και διαφέρει από μέρος σε μέρος. Σε μια τοποθεσία κοντά στο επίκεντρο, η ένταση του σεισμού μπορεί να είναι μεγαλύτερη απ' ό,τι μακριά από αυτό.

Το αναμενόμενο τελικό αποτέλεσμα της σεισμικής κίνησης σε μια περιοχή (θάνατοι, υλικές ζημιές κλπ) και η αναγκαιότητα σύγκρισής του με εκείνο σε μια άλλη περιοχή οδήγησε τους επιστήμονες στην υιοθέτηση μιας ποσότητας που ονομάζεται **σεισμικός κίνδυνος**. Ο σεισμικός κίνδυνος εξαρτάται από τη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής και από τη τρωτότητα των τεχνικών κατασκευών που βρίσκονται στη περιοχή. Η σεισμική επικινδυνότητα μιας περιοχής εκφράζεται με μία ποσότητα το μέτρο της οποίας είναι η αναμενόμενη ένταση της σεισμικής κίνησης στη περιοχή αυτή, ενώ η τρωτότητα των τεχνικών κατασκευών εκφράζεται με το μέτρο των ιδιοτήτων των κατασκευών (π.χ ποιότητα κατασκευής, ιδιοπερίοδο, τοπικές γεωτεχνικές συνθήκες κλπ).

Η Ελλάδα κατέχει την πρώτη θέση στην Ευρώπη από πλευράς σεισμικότητας και την έκτη παγκοσμίως. Η γεωγραφική της θέση συμπίπτει με την περιοχή του πλανήτη μας όπου λαμβάνουν χώρα μεγάλα γεωτεκτονικά φαινόμενα όπως η

σύγκλιση της αφρικανικής με την ευρω-ασιατική λιθοσφαιρική πλάκα με αποτέλεσμα τη μεγάλη σεισμικότητα που παρατηρείται στη περιοχή αυτή.

Το σοβαρότερο σεισμικό συμβάν στην Ελλάδα τα τελευταία εκατό χρόνια είναι ο σεισμός μεγέθους 7.2R που έγινε στις 12 Αυγούστου 1953 στη Κεφαλονιά. Προκάλεσε τεράστιες υλικές καταστροφές κυρίως σε Κεφαλονιά, Ζάκυνθο και Ιθάκη με αποτέλεσμα να σκοτωθούν 476 άνθρωποι και να τραυματιστούν άλλοι 2412. Σε σύνολο 33.000 σπιτιών που υπήρχαν τότε στα νησιά αυτά, υπήρξαν 27.659 καταρρεύσεις, σοβαρές υλικές ζημιές σε 2.780 σπίτια και ελαφρές σε 2.394 σπίτια.

### **3.3 ΤΑ ΕΠΑΚΟΛΟΥΘΑ**

Ο σεισμός εκτός από τις άμεσες επιπτώσεις έχει ως επακόλουθα την ενεργοποίηση άλλων γεωλογικών φαινομένων όπως η ρευστοποίηση εδαφών, οι καταπτώσεις βράχων, οι κατολισθήσεις και τα θαλάσσια κύματα βαρύτητας (τσουνάμι) με εξίσου σοβαρές επιπτώσεις. Τα θαλάσσια κύματα βαρύτητας προκαλούνται από μεγάλους υποθαλάσσιους σεισμούς. Το σημαντικότερο ως προς το ύψος θαλάσσιο κύμα βαρύτητας που έχει παρατηρηθεί στην Ελλάδα τα τελευταία πενήντα χρόνια δημιουργήθηκε στις 9 Ιουλίου 1956 στη θαλάσσια περιοχή της Αμοργού μετά από σεισμό μεγέθους 7.5R

### **3.4 ΣΕΙΣΜΟΣ ΚΕΦΑΛΟΝΙΑΣ**

Στις 03/02/2014 και ώρα 03:08:46.0 UTC, στην τοποθεσία με γεωγραφικές συντεταγμένες 38.29 N 20.31 E και σε βάθος 10 χιλιόμετρα εκδηλώθηκε ένας ισχυρός 6.1R ( αρχικά είχε δοθεί ως 6.4R) μετασεισμός, υποθαλάσσιος, σύμφωνα με το EMSC-Ευρωμεσογειακό Σεισμολογικό Κέντρο. Το επίκεντρο του σεισμού καταγράφηκε 20 χιλιόμετρα ΒΔ από το Αργοστόλι στις 03/02/2014 και τοπική ώρα 05:08:46. Κατά το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο ο σεισμός εκδηλώθηκε σε χερσαίο χώρο κοντά στην περιοχή Αγ.Θέκλη , ήταν μεγέθους 5.7R με εστιακό βάθος 12 χλμ (εικόνα 5.1).





**Εικόνα 3.1 :** Σεισμός Κεφαλονιάς 3/2/14

Οι αποκλίσεις στα δεδομένα είναι λογικό να υπάρχουν αφού τα δεδομένα εξαρτώνται από το σεισμολογικό δίκτυο που είναι εγκατεστημένο. Όσο πληρέστερο είναι το δίκτυο (με περισσότερους σειсмоγράφους) τόσο καλύτερα δεδομένα μπορείς να πάρεις. Το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο έχει εγκαταστήσει φορητό δίκτυο τον τελευταίο καιρό για τον λόγο αυτό πρέπει να υιοθετήσουμε τις μετρήσεις του εγχώριου κέντρου. Όλοι οι μεγάλοι επιφανειακοί σεισμοί ακολουθούνται από μετασεισμούς. Οι μετασεισμοί (οι εστίες των) κατανέμονται κατά τις πρώτες 2 ημέρες μέσα στο σεισμικό χώρο του κύριου σεισμού και σιγά σιγά εξαπλώνονται στην ευρύτερη περιοχή. Οι μετασεισμοί έχουν σχέση με το μέγεθος του ρήγματος που έσπασε, για τον λόγο αυτό πρέπει να γνωρίζουμε που έγινε το σπάσιμο. Εάν το ξέρουμε τότε μπορούμε να δούμε πως θα συμπεριφερθεί το ρήγμα. Σύμφωνα με έρευνες οι μετασεισμοί μειώνονται με τον χρόνο. Στατιστικά την 2η ημέρα ο αριθμός τους είναι 46%, μετά από μία εβδομάδα πέφτει το ποσοστό στο 11% και ούτω καθεξής. Όταν η εστία του κυρίου σεισμού έχει παρατηρηθεί στο ένα άκρο του ρήγματος τότε η μετασεισμική δράση επεκτείνεται στο άλλο άκρο του ίδιου ρήγματος, για τον λόγο αυτό ο μετασεισμός πολλές φορές μπορεί να προβλεφθεί. Κατά την μετασεισμική δραστηριότητα μιας περιοχής που βρίσκεται σε σεισμική έξαρση οι κάτοικοι πρέπει να παραμένουν έξω από τα σπίτια τους σε ειδικούς καταυλισμούς οι οποίοι πρέπει να είναι μακριά από καταπονημένα κτίρια, δεξαμενές, την θάλασσα (και σε κάποιο υψόμετρο για τυχόν τσουνάμι) και χώρους φιλικούς προς κατολίσθηση εάν ο κύριος σεισμός είναι μεγαλύτερος από τα 5.5-6.5R. Ευτυχώς καταγράφηκαν μόνο υλικές ζημιές σε κτίρια του νησιού με αρκετούς δρόμους κλειστούς από κατολισθήσεις και μόνο δέκα ελαφρά τραυματίες.

## 4. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εισαγωγή και ανάπτυξη των Ηλεκτρονικών Υπολογιστών άνοιξε νέους ορίζοντες στις επιστήμες. Αναπτύχθηκαν θεωρίες προσαρμοσμένες στον Η/Υ υπό μορφή μητρώων ή σειρών καθώς και υπολογιστικές μέθοδοι για να επιλύουν προβλήματα που ήταν αδύνατον να λυθούν παλαιότερα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite element method) αναπτύχθηκε λόγω των Η/Υ και χρησιμεύει για την επίλυση προβλημάτων της Μηχανικής, της Θερμότητας, της Ρευστομηχανικής, του Ηλεκτρομαγνητισμού και άλλων. Είναι δημοφιλής, δυνατή και χρησιμοποιείται στις κατασκευές και μελέτες αεροσκαφών, πλοίων, αυτοκινήτων, παντός είδους μηχανημάτων, γεφυρών, σηράγγων, πολυκατοικιών, θεμελιώσεων, οδοστρωμάτων και άλλων εφαρμογών. Τα πεπερασμένα στοιχεία εισάγουν την νέα τεχνολογία και την επανάσταση στην επιστήμη και στην βιομηχανία, και για αυτό τον λόγο διδάσκονται ως βασικό μάθημα σε όλα τα Ανώτατα ιδρύματα, των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, της Ευρώπης και της Ελλάδας. Επίσης όλα τα Ανώτατα ιδρύματα, τα ερευνητικά κέντρα, οι βιομηχανίες, οι τεχνικές εταιρείες και οι μελετητές μηχανικοί, χρησιμοποιούν εμπορικά προγράμματα πεπερασμένων στοιχείων για την λύση των προβλημάτων.

### 4.2 Η ΙΣΤΟΡΙΑ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Το 1909 ο Γερμανός μαθηματικός Ritz ανέπτυξε τις αρχές της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1915 ο Ρώσος μαθηματικός Galerkin ανέπτυξε σε βάθος την θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Η απουσία του ηλεκτρονικού υπολογιστή καθυστέρησε την διάδοση και περαιτέρω ανάπτυξη της μεθόδου και παρέμεινε στάσιμη μέχρι της ανακαλύψεως του υπολογιστή. Με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή η μέθοδος έγινε γνωστή και διαδόθηκε στους ερευνητές. Η ιδέα της ανάπτυξης της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων γεννήθηκε στην αεροναυπηγική από την ανάγκη της εύρεσης λύσης στα δύσκολα προβλήματα που αντιμετώπιζαν στην κατασκευή των αεροσκαφών.

Το 1941 ο Hrenikoff εισήγαγε την καλούμενη framework method (μέθοδο του πλαισίου) με την οποία ένα επίπεδο ελαστικό μέσο μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο σύστημα ράβδων και δοκών.

Το 1943 ο Γερμανός μαθηματικός Courant έλυσε το πρόβλημα της στρέψης χρησιμοποιώντας τριγωνικά στοιχεία με την αρχή της ελαχίστης δυναμικής ενέργειας (minimum potential energy) και την ονόμασε Rayleigh-Ritz μέθοδο. Επειδή τότε δεν υπήρχε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής, η θεωρία του Courant δεν μπορούσε να εφαρμοσθεί και ξεχάστηκε μέχρι που ανακαλύφθηκε ο υπολογιστής και οι επιστήμονες ξανά θεμελίωσαν την μέθοδο.

Το 1955 ο Έλληνας Ι. Αργύρης έγραψε ένα βιβλίο με θέμα 'Ενεργειακά Γενικά περί των Πεπερασμένων Στοιχείων 21 θεωρήματα και η μέθοδος των μητρώων' και εισήγαγε τις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1956 οι Αμερικανοί Turner, Clough, Martin και Top υπολόγισαν το μητρώο δυσκαμψίας της ράβδου και άλλων στοιχείων.

Το 1960 ο Ι. Αργύρης και ο Kelsey δημοσίευσαν την εργασία τους η οποία βασιζόταν στις αρχές των πεπερασμένων στοιχείων.

Το 1960 ο Clough καθηγητής του πανεπιστημίου 'University of California, Berkeley' της Αμερικής, χρησιμοποίησε για πρώτη φορά το όνομα 'Πεπερασμένα στοιχεία' (Finite elements) στην εργασία του και από τότε όλοι χρησιμοποιούν την παραπάνω ονομασία.

Το 1967 οι Zienkiewicz και Chung έγραψαν το πρώτο βιβλίο των πεπερασμένων στοιχείων. Από τότε ένας μεγάλος αριθμός δημοσιεύσεων και βιβλίων ακολούθησε με αντικείμενο την εφαρμογή των πεπερασμένων στοιχείων στην μηχανική, στα ρευστά, τη θερμότητα, την ακουστική, την κατεργασία των μετάλλων, τον ηλεκτρισμό και ηλεκτρομαγνητισμό και σε πολλές άλλες επιστήμες.

### 4.3 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων αν και είναι ισχυρή, η αρχή της είναι απλή και λογική. Είναι αδιαμφισβήτητα ο συνδυασμός μαθηματικής ευστροφίας με μια απλή γεωμετρική ερμηνεία που οδήγησε στο να είναι μια από τις δημοφιλέστερες μεθόδους σε ευρεία μηχανολογικά και επιστημονικά πεδία.

Δύο εναλλακτικές μέθοδοι παράγουν τις εξισώσεις κίνησης ενός συστήματος. Η μία μέθοδος είναι οι *γενικευμένες συντεταγμένες*. Αρχικά υπολογίζονται οι δυνάμεις και οι ροπές που δημιουργούνται από την ελαστική παραμόρφωση που βασίζεται στις αλλαγές σε αυτές τις συντεταγμένες. Για μικρές εκτροπές, αυτές οι δυνάμεις και οι ροπές, που συλλογικά καλούνται *γενικευμένες δυνάμεις*, είναι γραμμικές συναρτήσεις των γενικευμένων συντεταγμένων. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα για να εξισώσει το ρυθμό μεταβολής της ορμής στο σύστημα με τις δυνάμεις που εμφανίζονται στο σύστημα, και τα δύο από την ελαστική παραμόρφωση και τις εξωτερικά εφαρμοζόμενες δυνάμεις. Το αποτέλεσμα είναι ένα σετ διαφορικών εξισώσεων δευτέρας τάξεως ως προς τις γενικευμένες συντεταγμένες. Η εναλλακτική μέθοδος είναι να εκφράσεις την κινητική ενέργεια, την ενέργεια παραμόρφωσης και το δυναμικό των εφαρμοζόμενων φορτίων ως προς τις γενικευμένες συντεταγμένες. Έπειτα οι εξισώσεις κίνησης εξάγονται από τις εξισώσεις Lagrange. Και οι δύο προσεγγίσεις οδηγούν στις ίδιες εξισώσεις κίνησης. Ο νόμος του Νεύτωνα είναι οικείος αλλά μπορεί να γίνει ιδιαίτερα πολύπλοκος όταν έρχεται αντιμέτωπος με μεγάλα συστήματα ή συστήματα με περιστρεφόμενα πλαίσια αναφοράς. Οι εξισώσεις Lagrange δεν είναι ιδιαίτερα διαισθητικές αλλά έχουν το πλεονέκτημα ότι αθροίζουν βαθμωτές ποσότητες.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα βήματα, ως εξής:

### 1. Ορισμός του πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων

Η δομή χωρίζεται σε περιοχές απλών γεωμετριών που ονομάζονται *στοιχεία*. Αυτό ονομάζεται *διακριτοποίηση*. Ο τύπος αυτών των περιοχών εξαρτάται από το πώς θα μοντελοποιηθεί το πραγματικό σύστημα. Για την περιγραφή των αξόνων συνήθως χρησιμοποιούνται μονοδιάστατα μοντέλα ράβδου και δοκού. Περιορίζοντας τα μοντέλα σε μονοδιάστατα μέρη ουσιαστικά παρουσιάζεται μείωση του υπολογιστικού χρόνου. Συμμετρία, αξονοσυμμετρία και περιοδικότητα σε συστήματα επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μειώσουν τον αριθμό των στοιχείων που απαιτούνται σε ένα μοντέλο και έτσι, τον αριθμό των βαθμών ελευθερίας, δίνοντας τη δυνατότητα να επιτευχθεί πιο γρήγορα η ανάλυση.

Μία δοκός εύκολα υποδιαιρείται σε μικρότερες δοκούς που μπορούν να αναπαρασταθούν με γραμμές ίδιου μήκους ως στοιχεία. Οι πλάκες χωρίζονται σε δισδιάστατα σχήματα, συνήθως τρίγωνα και τετράπλευρα. Τα τρισδιάστατα σχήματα διαιρούνται σε τετράεδρα, σφήνες και κυβοειδή. Αυτά τα στοιχεία συνδέονται σε σημεία που ονομάζονται *κόμβοι*. Οι κόμβοι τοποθετούνται στα άκρα των πεπερασμένων στοιχείων της δοκού, στις γωνίες των τριγωνικών ή τετράπλευρων στοιχείων και στις κορυφές τετράεδρων ή κυβοειδών στοιχείων. Κόμβοι επίσης μπορούν να τοποθετηθούν σε ενδιάμεσα σημεία. Οι εξισώσεις κίνησης του συστήματος διατυπώνονται σε όρους μεταφοράς και περιστροφής στους κόμβους. Αυτές οι παραμορφώσεις αποτελούν τις γενικευμένες συντεταγμένες στο πρόβλημα των πεπερασμένων στοιχείων.

2. Έκφραση των ελαστικών, αδρανειακών και εξωτερικών δυνάμεων σε κάθε στοιχείο  
Οι δυνάμεις και οι ροπές σε κάθε στοιχείο πρέπει να εκφραστούν ως προς τις τοπικές συντεταγμένες για το στοιχείο. Οι τοπικές συντεταγμένες είναι η μετατόπισεις και οι περιστροφές στους κόμβους του στοιχείου. Για την ανάλυση των ταλαντώσεων, οι παραμορφώσεις συνήθως θεωρούνται μικρές και οι δυνάμεις και ροπές είναι γραμμικές συναρτήσεις των τοπικών συντεταγμένων και των παραγώγων τους. Βασικά, η διαδικασία προσεγγίζει τις δυνάμεις και ροπές που κατανέμονται σε κάθε σημείο του στοιχείου και παράγει τις ισοδύναμες δυνάμεις στους κόμβους του στοιχείου. Η ισχύς της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων εν μέρει γίνεται φανερή επειδή αυτό πρέπει να γίνει μόνο μια φορά για κάθε διαφορετική περιγραφή ενός στοιχείου.

### 3. Σύνθεση των στοιχείων

Οι δυνάμεις και οι ροπές από όλα τα στοιχεία πρέπει να συντεθούν για να δημιουργήσουν τις ισοδύναμες γενικευμένες δυνάμεις στο συνολικό σύστημα ως προς τις γενικευμένες συντεταγμένες. Κάθε δύναμη ή ροπή που έχει που έχει παραχθεί από ένα στοιχείο πρέπει να συσχετιστεί με την ισοδύναμή της γενικευμένη δύναμη και κάθε τοπική συντεταγμένη πρέπει να ταιριάζει με την αντίστοιχη γενικευμένη συντεταγμένη. Κάποια στοιχεία δύναται να παράγουν μόνο αδρανειακές δυνάμεις και κάποια μόνο ελαστικές.

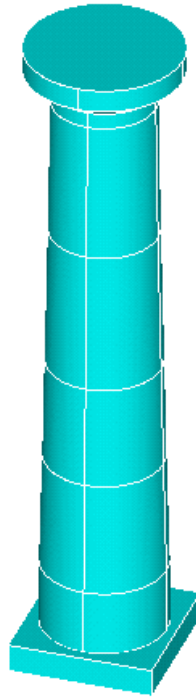
### 4. Ανάλυση

Εφόσον έχουν διατυπωθεί οι εξισώσεις κίνησης, μπορούν να επιλυθούν με χρήση κατάλληλων τεχνικών.

## 5.ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

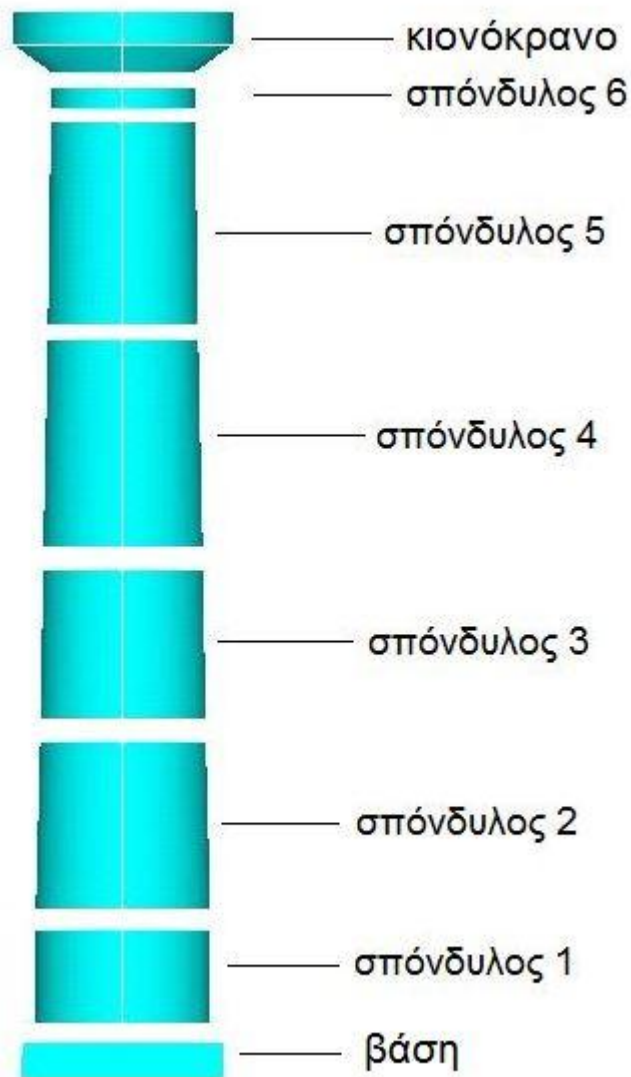
### 5.1 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΚΙΟΝΑ

Η γεωμετρία του κίονα παρουσιάζεται στην εικόνα 5.1, όπως σχεδιάστηκε στο Ansys.



**Εικόνα 5.1 :** Γεωμετρία κίονα στο ansys

Ο κίονας αποτελείται από έξι κυλινδρικούς σπονδύλους διαφορετικού ύψους, των οποίων η διάμετρος μειώνεται προς τα πάνω, δηλαδή έχουν ένταση. Ο κατώτατος σπόνδυλος συνδέεται με μία βάση και ο ανώτατος με το κιονόκρानο. Τα μέρη του κίονα απεικονίζονται ξεκάθαρα στην εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2 : Τα μέρη του κίονα

Στον πίνακα 5.1 αναγράφονται οι διαστάσεις των παραπάνω μερών του κίονα:

Πίνακας 5.1 Διαστάσεις μερών κίονα

Όνομασία	Ύψος(m)	Διάμετρος (m)	
Σπόνδυλος 1	0,620	1,158	
Σπόνδυλος 2	1,100	1,158	
Σπόνδυλος 3	0,990	1,098	
Σπόνδυλος 4	1,360	1,058	
Σπόνδυλος 5	1,340	0,998	
Σπόνδυλος 6	0,152	0,958	
		<b>Μικρή διάμετρος(m)</b>	<b>Μεγάλη διάμετρος(m)</b>
Κιονόκρανο	0,397	0,958	1,458
		<b>Μήκος</b>	<b>Πλάτος</b>
Βάση	0,264	1,338	1,366

## 5.2 ΤΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ

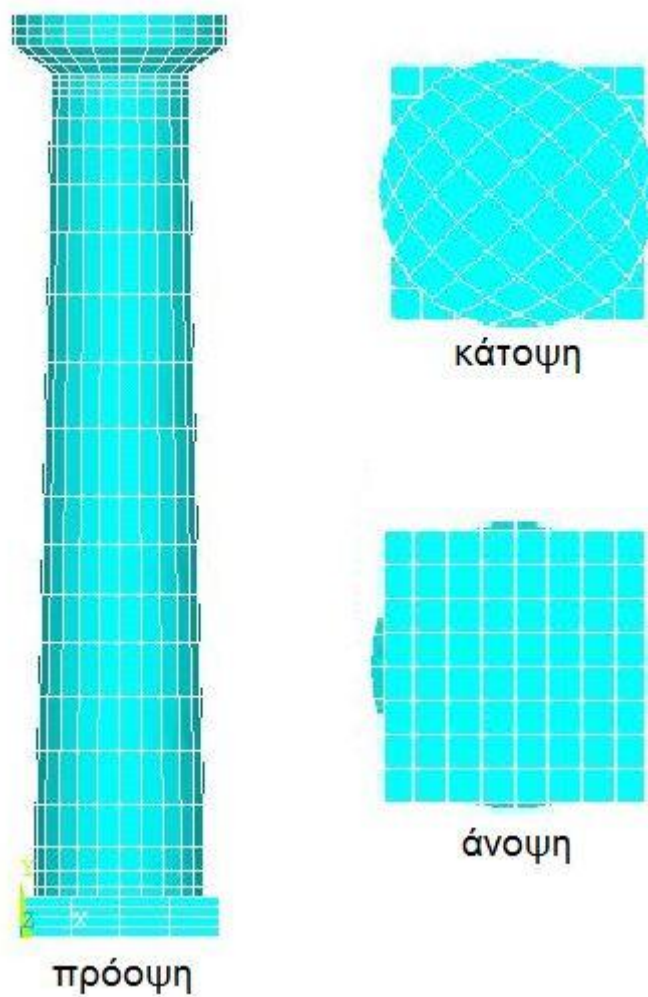
Ολόκληρος ο φορέας που εξετάζεται στην εργασία αυτή είναι από μάρμαρο. Το μάρμαρο είναι πέτρωμα αποτελούμενο κατά το μέγιστο ποσοστό του από ασβεστίτη. Είναι προϊόν ανακρυστάλλωσης ασβεστόλιθων. Χαρακτηρίζεται από μεγάλη δυσκαμψία που ουσιαστικά το καθιστά άκαμπτο. Όμως όσον αφορά τις μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου, διαπιστώνεται στη βιβλιογραφία μεγάλη διασπορά τιμών, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson. Η διασπορά αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο στις διαφορετικές συνθήκες πραγματοποίησης των πειραμάτων και στο γεγονός ότι το υλικό είναι εγκαρσίως ισότροπο. Οι ιδιότητες του μαρμάρου που ορίστηκαν στο Ansys παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Μηχανικές ιδιότητες μαρμάρου

<b>Μέτρο ελαστικότητας (GPa)</b>	40
<b>Λόγος poisson (<math>\nu</math>)</b>	0.3
<b>Πυκνότητα <math>\rho</math> (<math>\frac{kg}{m^3}</math>)</b>	2600

## 5.3 Η ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ ΜΕ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

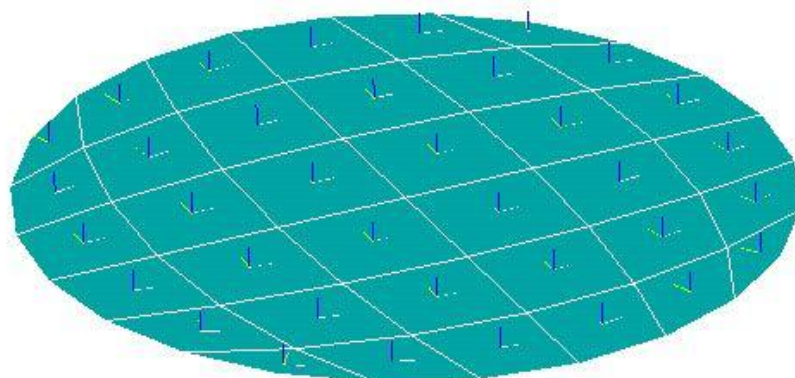
Η διακριτοποίηση του κίονα, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.3, υλοποιήθηκε με τη χρήση εξάεδρων πεπερασμένων στοιχείων. Επίσης επιλέχθηκε η πύκνωση του πλέγματος όσο πλησιάζουμε στο κιονόκρανο και τη βάση για μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα αφού οι περιοχές αυτές παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον.



**Εικόνα 5.3 :** Διακριτοποίηση κίονα

#### 5.4 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΣΠΟΝΔΥΛΩΝ

Ο ορισμός των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σπονδύλων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση συντελεστή τριβής μεταξύ των σπονδύλων, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.4. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η εντολή `contact pair` στην οποία ορίστηκε στατικός συντελεστής τριβής 0.75 και δυναμικός συντελεστής τριβής 0.63.



**Εικόνα 5.4 :** Δυνάμεις τριβής στις επιφάνειες επαφής σπονδύλων

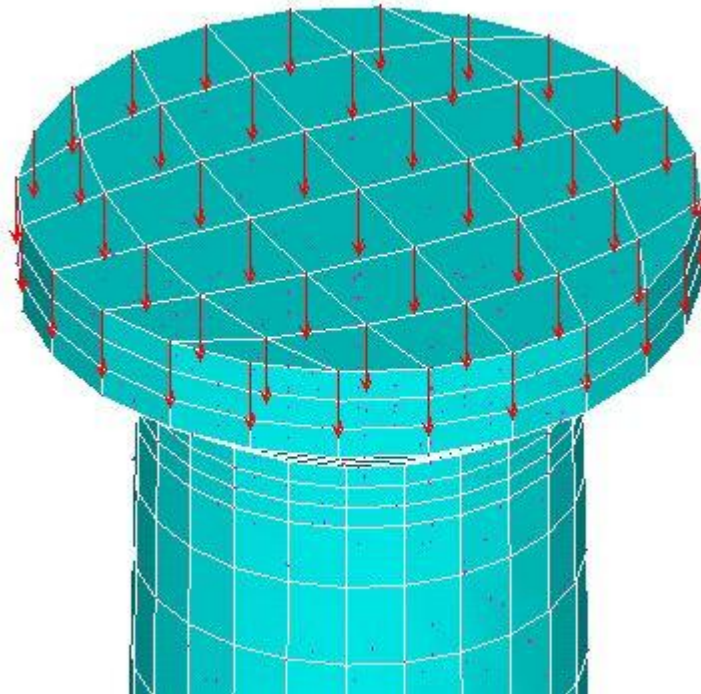


## 5.5 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΠΙΒΑΛΛΟΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Τα εν δυνάμει επιβαλλόμενα φορτία είναι το βάρος και ο σεισμός. Στη μεν στατική ανάλυση θα επιβληθεί μόνο το βάρος, ενώ στη δυναμική ανάλυση το βάρος και ο σεισμός.

### 5.5.1 Βάρος

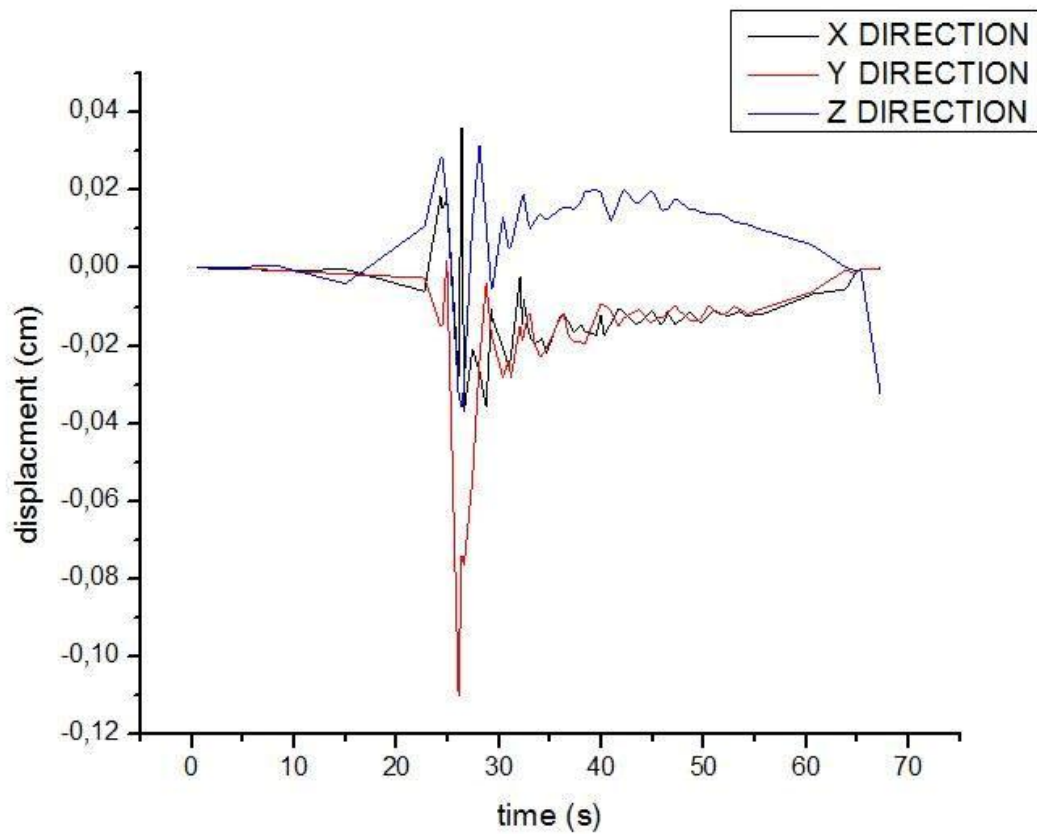
Η δύναμη του βάρους, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 5.5 εφαρμόζεται στην άνω επιφάνεια του κιονόκranου. Είναι 1700 kg ή 16677 N, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, και κατανέμεται ισόποσα σε 49 κόμβους.



**Εικόνα 5.5 :** Κατανεμημένο βάρος στον κίονα

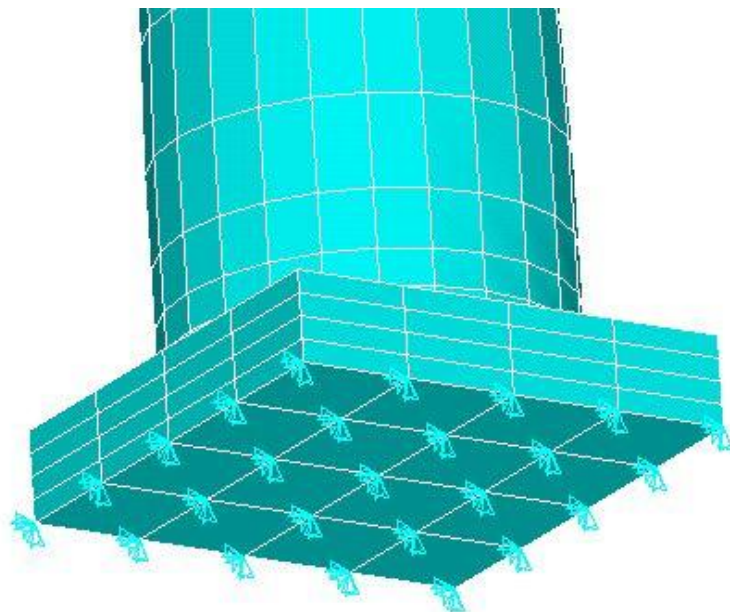
### 5.5.2 Σεισμός

Ο σεισμός που χρησιμοποιήθηκε, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, είναι αυτός της Κεφαλονιάς που έγινε στις 3 Φεβρουαρίου του 2014. Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις του σεισμού στις τρεις διευθύνσεις. Αξίζει να αναφερθεί ότι έχουν επιλεγεί τα 70 σημεία με τη μεγαλύτερη μετατόπιση για να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση με το πρόγραμμα Ansys.

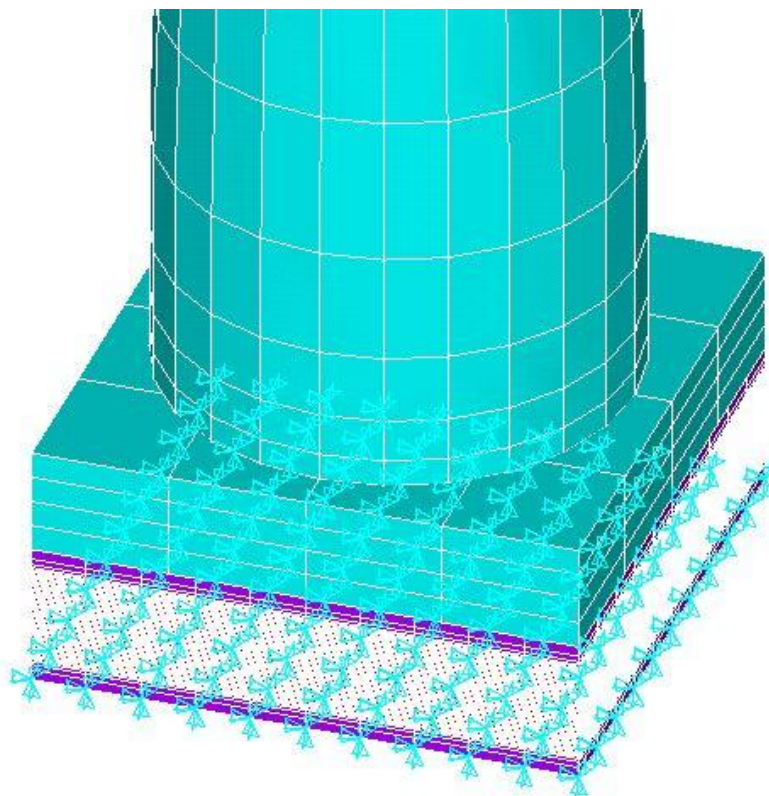


**Σχήμα 5.6 :** Μετατοπίσεις του σεισμού της Κεφαλονιάς

Επίσης στην εικόνα 5.7 αναπαρίσται η επιβολή της σεισμικής φόρτισης στον κίονα, ενώ στην εικόνα 5.8 προστίθεται και εφέδρανο.



**Εικόνα 5.7 :** Επιβολή σεισμικής φόρτισης στον κίονα

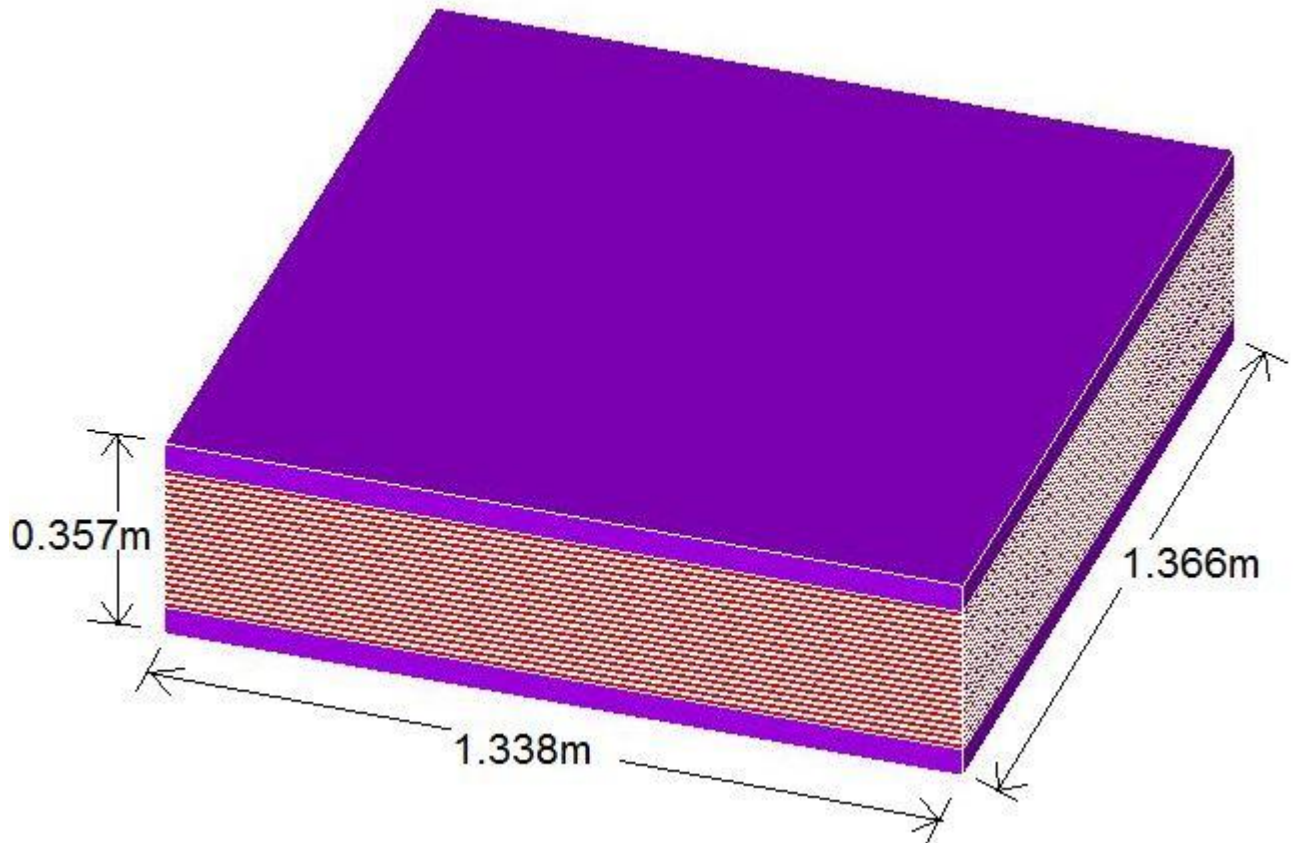


**Εικόνα 5.8 :** Επιβολή σεισμικής φόρτισης σε κίονα με εφέδρανο

## **5.6 ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ**

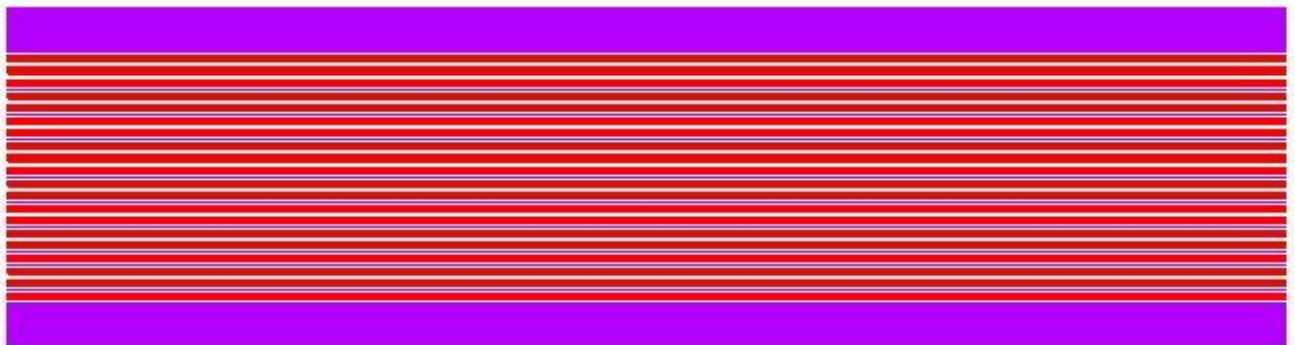
### **5.6.1 Γεωμετρία εφεδράνων χωρίς μόλυβδο**

Η γεωμετρία είναι όμοια και για τα δύο εφέδρανα χωρίς μόλυβδο που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση και φαίνεται στην εικόνα 5.9.



**Εικόνα 5.9 :** Γεωμετρία εφεδράνων χωρίς μόλυβδο

Τα εφέδρανα χωρίς μόλυβδο αποτελούνται από 41 στρώσεις στις οποίες εναλλάσσονται χάλυβας και ελαστομερές(rubber). Στο εφέδρανο τύπου 1 οι 21 είναι στρώσεις χάλυβα και οι 19 ελαστομερούς και κάθε στρώση χάλυβα εναλλάσσεται με μία στρώση ελαστομερούς. Στο εφέδρανο τύπου 2 οι 11 είναι στρώσεις χάλυβα και οι 29 ελαστομερούς. Επίσης μία στρώση χάλυβα εναλλάσσεται με τρεις στρώσεις ελαστομερούς.

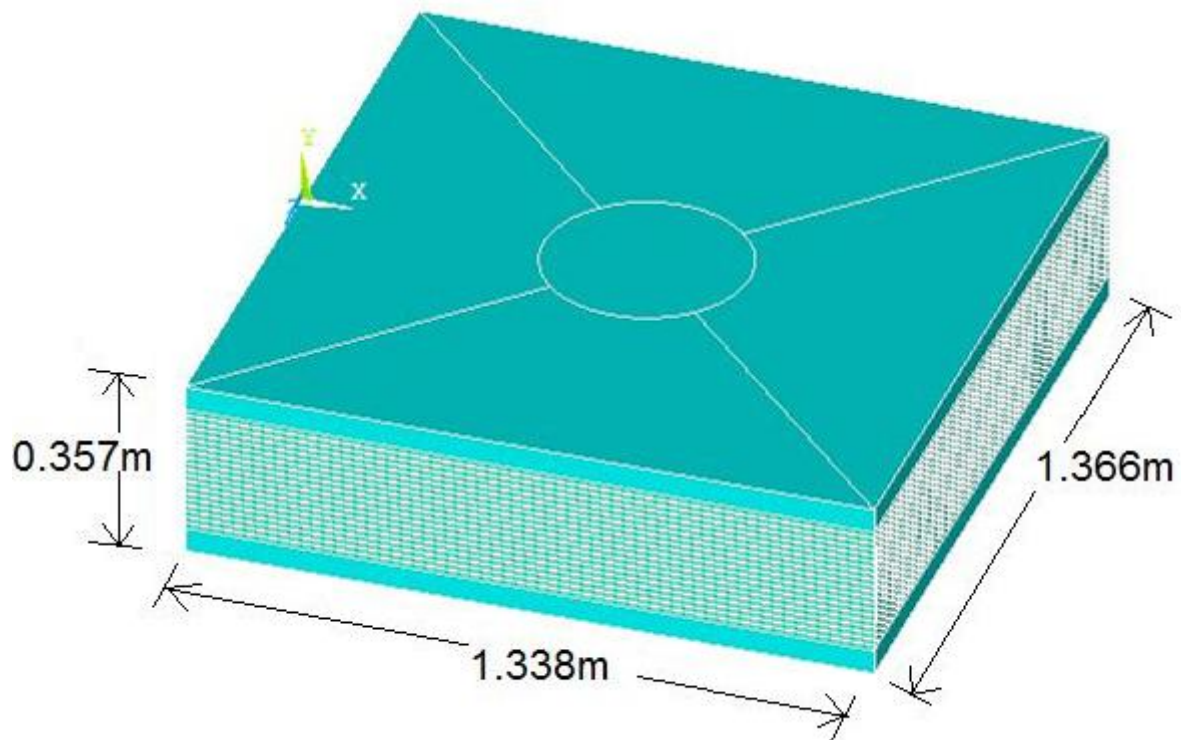


**Εικόνα 5.10 :** Πρόοψη εφέδρανου

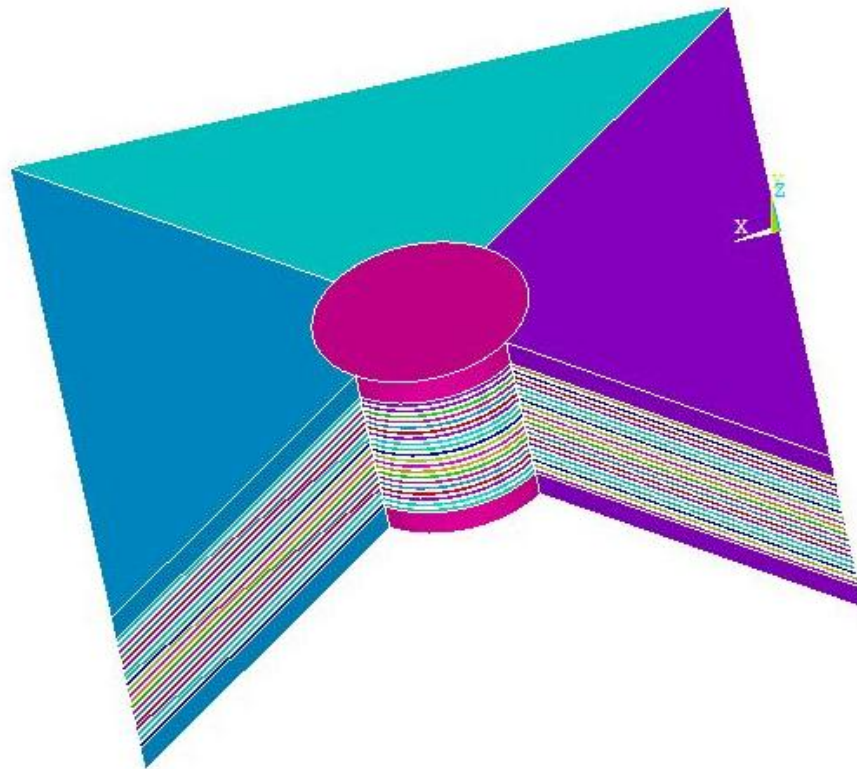
Με μωβ χρώμα στην εικόνα 5.10 αναπαρίστανται οι στρώσεις από χάλυβα. Οι δύο εξωτερικές και μεγαλύτερες στρώσεις είναι πάχους 50mm, ενώ οι εσωτερικές πάχους 3mm. Με κόκκινο χρώμα στην εικόνα 5.10 αναπαρίστανται οι στρώσεις από ελαστομερές (rubber) οι οποίες είναι πάχους 10mm.

### 5.6.2 Γεωμετρία εφεδράνου με μόλυβδο

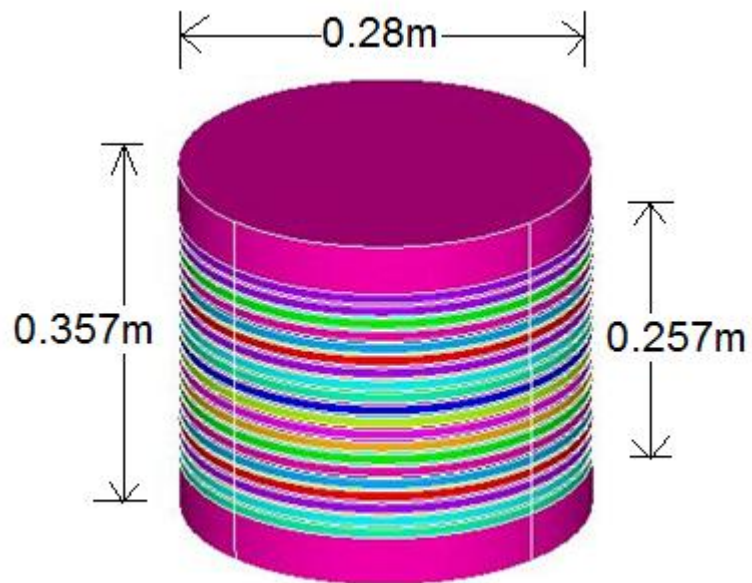
Η γεωμετρία του εφεδράνου με μόλυβδο φαίνεται στις εικόνες 5.11 και 5.12. Στην εικόνα 5.12 έχει αφαιρεθεί ένα κομμάτι του εφεδράνου για την ανάδειξη της εσωτερικής δομής του. Το κομμάτι του μολύβδου παρουσιάζεται και μόνο του στην εικόνα 5.13. Να σημειωθεί ότι στην εικόνα 5.13 η πρώτη και η τελευταία στρώση του όγκου έχουν τις ιδιότητες του χάλυβα.



**Εικόνα 5.11** : Γεωμετρία εφεδράνου με μόλυβδο



**Εικόνα 5.12 :** Γεωμετρία εφεδράνου-εσωτερική δομή



**Εικόνα 5.13 :** Γεωμετρία μολύβδου

## 5.7 ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΤΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΚΑΙ ΟΙ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥΣ

Στους πίνακες 5.3 ,5.4 και 5.5 αναγράφονται οι ιδιότητες των υλικών από τα οποία αποτελούνται τα εφέδρανα και ορίστηκαν στο Ansys.

Πίνακας 5.3 : Ιδιότητες χάλυβα

Χάλυβας	
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	210
Όριο διαρροής (MPa)	250
Λόγος poisson ( $\nu$ )	0.3
Πυκνότητα $\rho(\frac{kg}{m^3})$	7850
Λόγος απόσβεσης	0.00015

Πίνακας 5.4: Ιδιότητες ελαστομερούς(rubber)

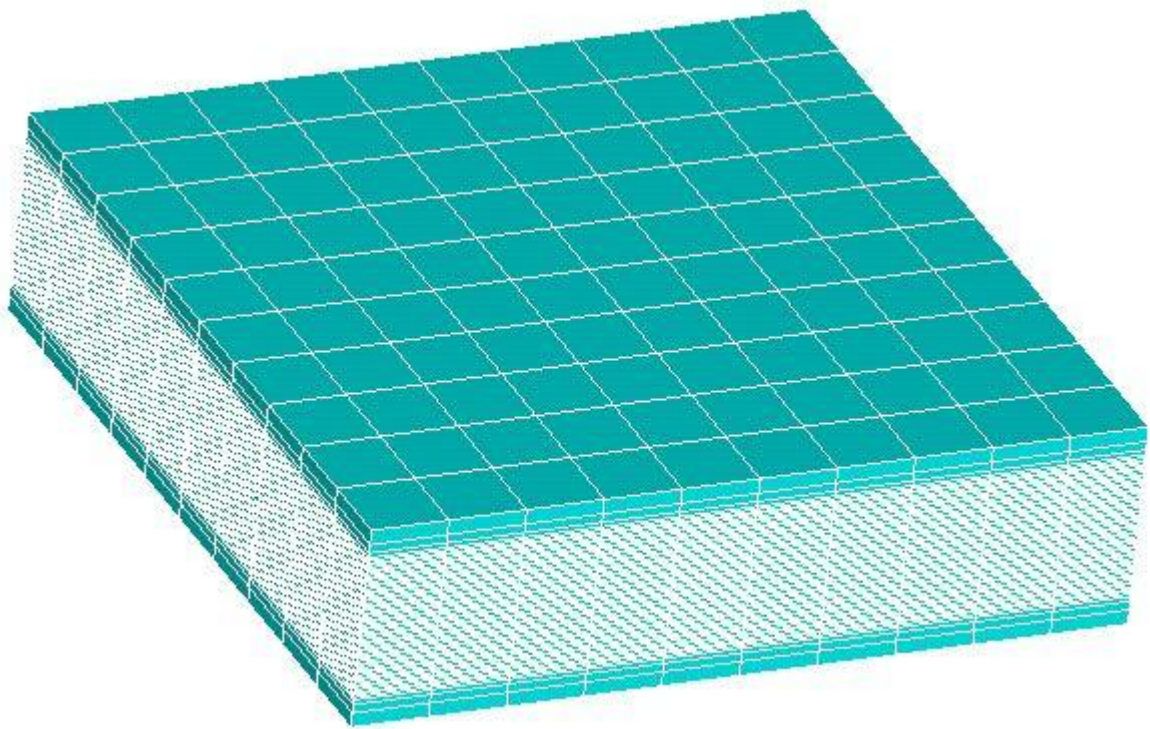
Ελαστομερές(rubber)	
Πυκνότητα $\rho(\frac{kg}{m^3})$	1100
c1 (Pa)	1.6E5
c2(Pa)	95000
d	1.028E-8
Λόγος απόσβεσης	0.05

Πίνακας 5.5: Ιδιότητες μολύβδου

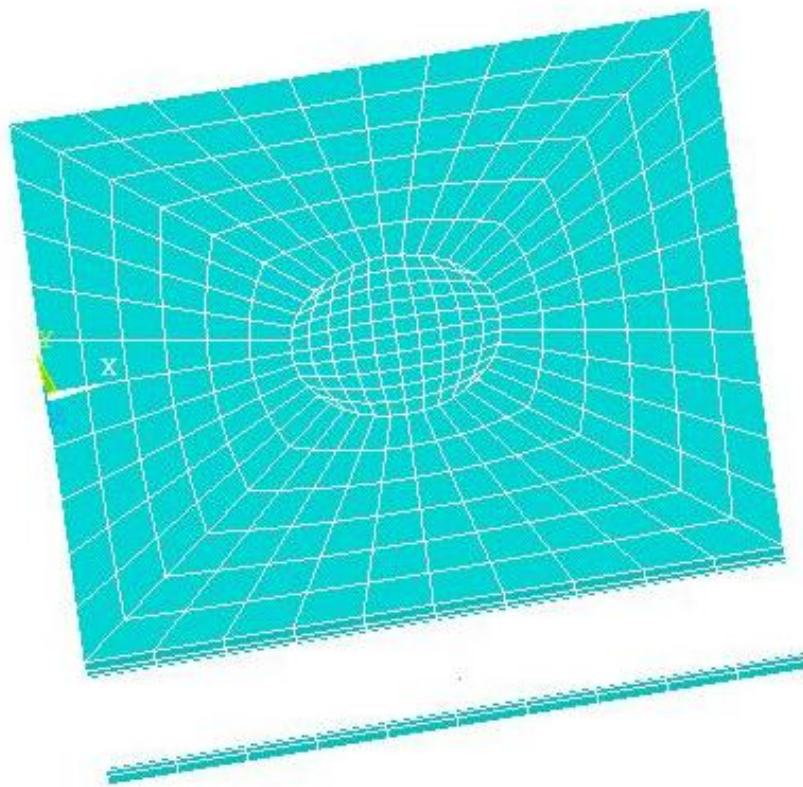
Μόλυβδος	
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	16
Όριο διαρροής (MPa)	17
Λόγος poisson ( $\nu$ )	0.44
Πυκνότητα $\rho(\frac{kg}{m^3})$	11340
Λόγος απόσβεσης	0.5

## 5.8 Η ΔΙΑΚΡΙΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΦΕΔΡΑΝΩΝ ΜΕ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΠΛΕΓΜΑΤΟΣ

Η διακριτοποίηση των εφεδράνων, όπως φαίνεται στις εικόνες 5.14 και 5.15 υλοποιήθηκε με τη χρήση εξάεδρων πεπερασμένων στοιχείων. Ο όγκος χωρίστηκε σε 10 πεπερασμένα στοιχεία κατά τις οριζόντιες διευθύνσεις. Για την κάθετη διεύθυνση στις εξωτερικές και μεγαλύτερες στρώσεις από χάλυβα ορίστηκαν 3 πεπερασμένα στοιχεία ανά στρώση. Στην πάνω στρώση επιλέχθηκε spacing ratio=1/3 και στην κάτω spacing ratio=3. Στην κάθετη διεύθυνση στις εσωτερικές στρώσεις από χάλυβα ορίστηκε 1 στοιχείο ανά στρώση και 2 στοιχεία ανά στρώση ελαστομερούς.



**Εικόνα 5.14 :** Διακριτοποίηση εφεδράνου χωρίς μόλυβδο

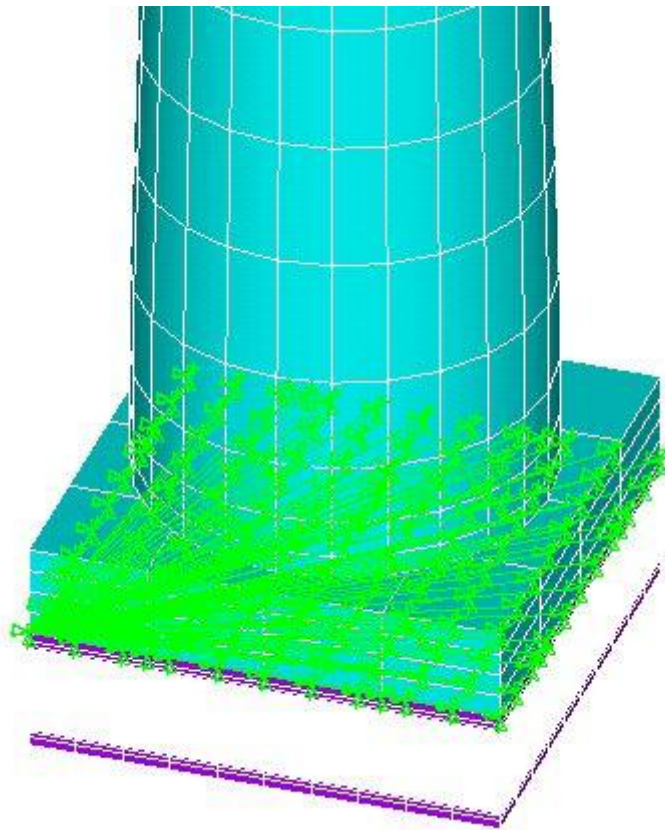


**Εικόνα 5.15 :** Διακριτοποίηση εφεδράνου με μόλυβδο



## 5.9 ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΕΦΕΔΡΑΝΟΥ ΚΑΙ ΚΙΟΝΑ

Ο ορισμός των αλληλεπιδράσεων μεταξύ εφεδράνου και κίονα, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.16, πραγματοποιήθηκε με τη σύζευξη των βαθμών ελευθερίας της κάτω επιφάνειας της βάσης και της πάνω επιφάνειας του εφεδράνου. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε η εντολή `couple DOFs` για όλους τους βαθμούς ελευθερίας των παραπάνω επιφανειών.



Εικόνα 5.16 : Σύζευξη βαθμών ελευθερίας κίονα-εφεδράνου

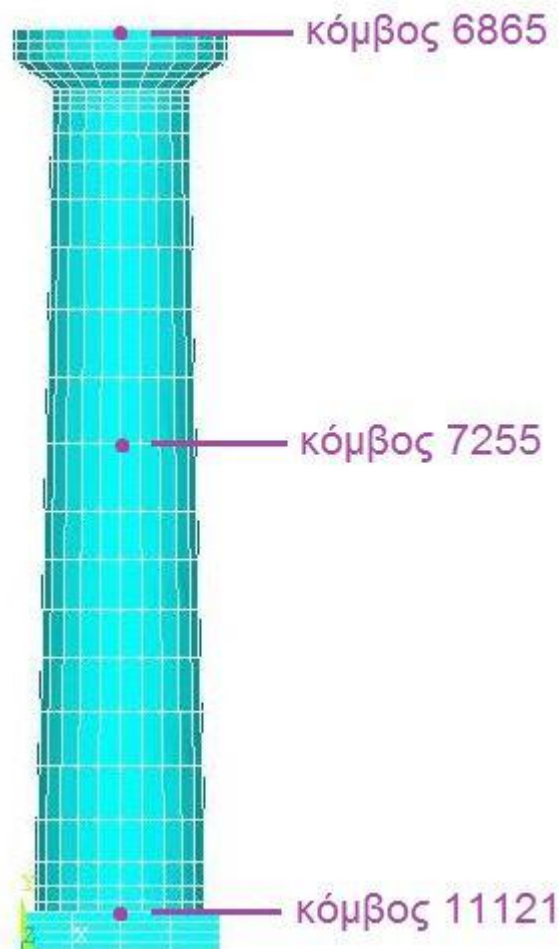
## 5.10 ΕΠΙΒΟΛΗ ΣΥΝΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΝΘΗΚΩΝ

Η συνοριακή συνθήκη που επιβάλλεται στη στατική ανάλυση είναι η πάκτωση. Στο επόμενο βήμα, όμως, που ήταν η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του κίονα με και χωρίς εφέδρανο, ελευθερώθηκαν οι διευθύνσεις στις οποίες επιβλήθηκαν οι μετατοπίσεις του σεισμού, δηλαδή και οι τρεις, αναιρώντας ουσιαστικά την πάκτωση.

## 6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Η μελέτη που λαμβάνει χώρα σκιαγραφεί πέντε περιπτώσεις. Αρχικά γίνεται η στατική ανάλυση του κίονα με μόνη δύναμη που εφαρμόζεται το βάρος, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 5.5.1. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η δυναμική ανάλυση του κίονα χωρίς εφέδρανο και με επιβολή της προαναφερθείσας σεισμικής δόνησης. Ακολουθεί η μελέτη της συμπεριφοράς του κίονα υπό σεισμική φόρτιση με χρήση δύο τύπων εφεδράνων. Τέλος, γίνεται χρήση εφεδράνου με πυρήνα μολύβδου.

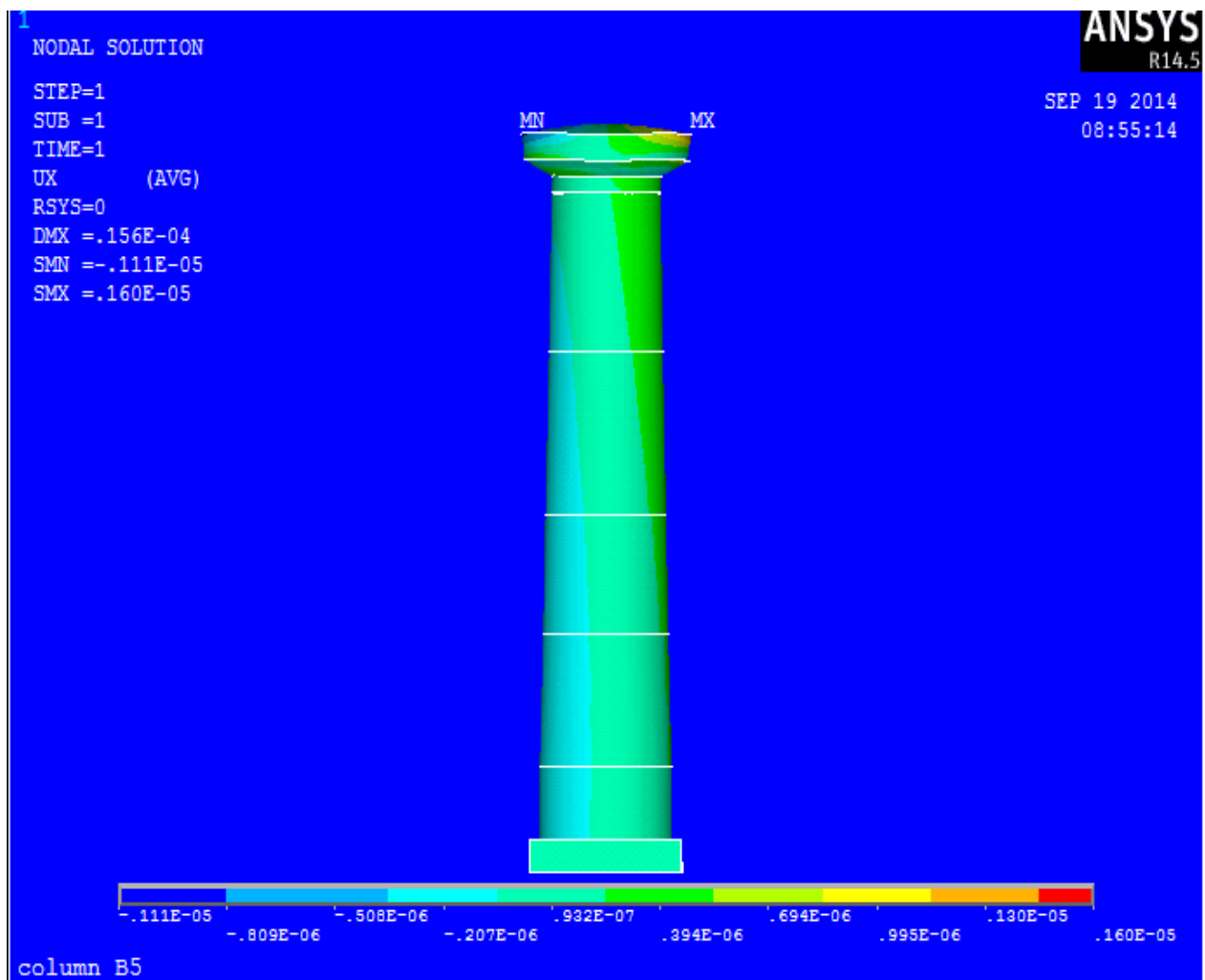
Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων κρίνεται απαραίτητη η επιλογή κρίσιμων κόμβων των οποίων η θέση στη γεωμετρία του κίονα γίνεται φανερή στην εικόνα 6.1.



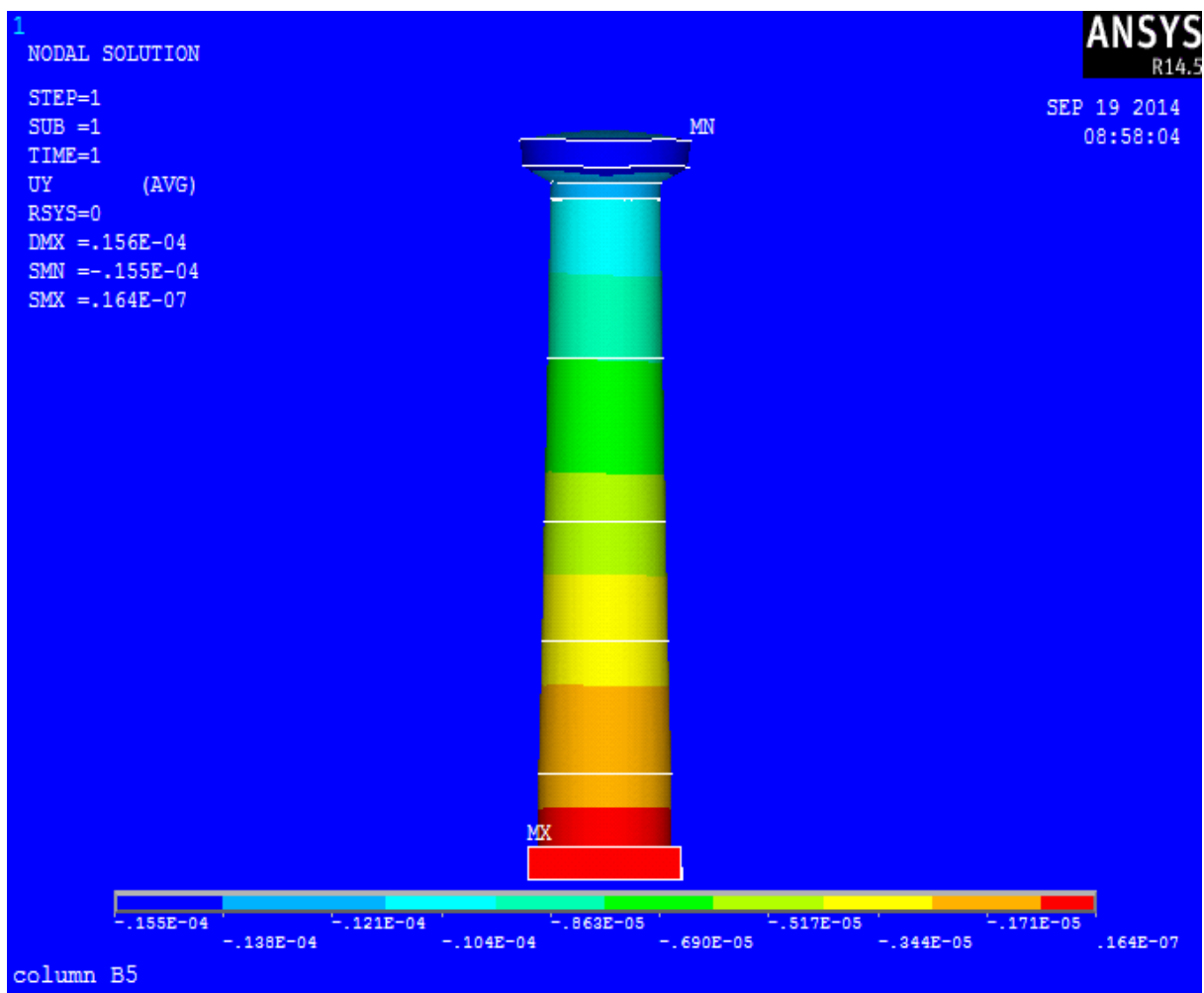
**Εικόνα 6.1 :** Κόμβοι στους οποίους θα αναφέρονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης

## 6.1 ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΟΝΑ

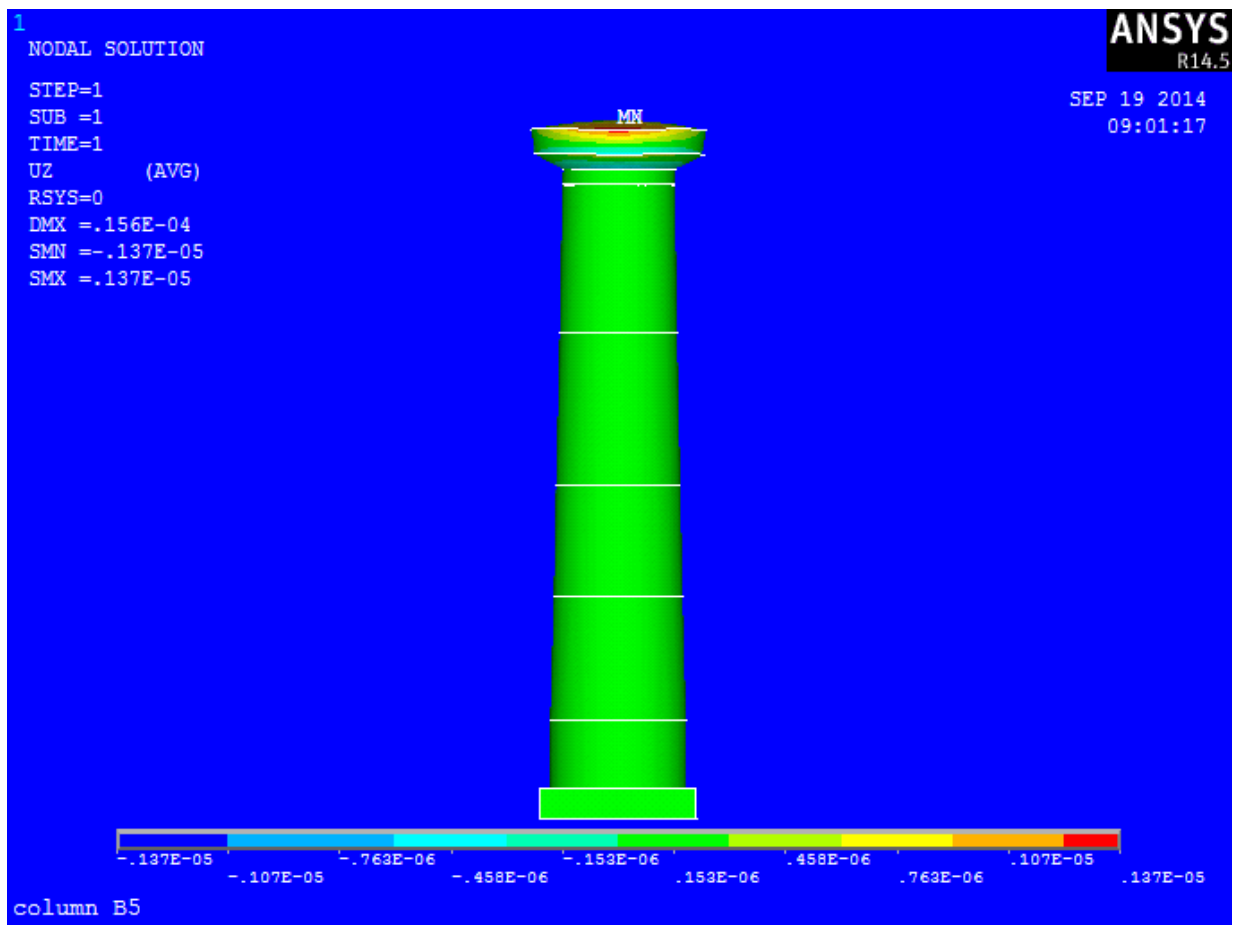
Στις εικόνες 6.2, 6.3 και 6.4 παρουσιάζονται η μετατόπιση του κίονα από την στατική μελέτη στις τρεις διευθύνσεις.



Εικόνα 6.2 Μετατόπιση κίονα στην x διεύθυνση

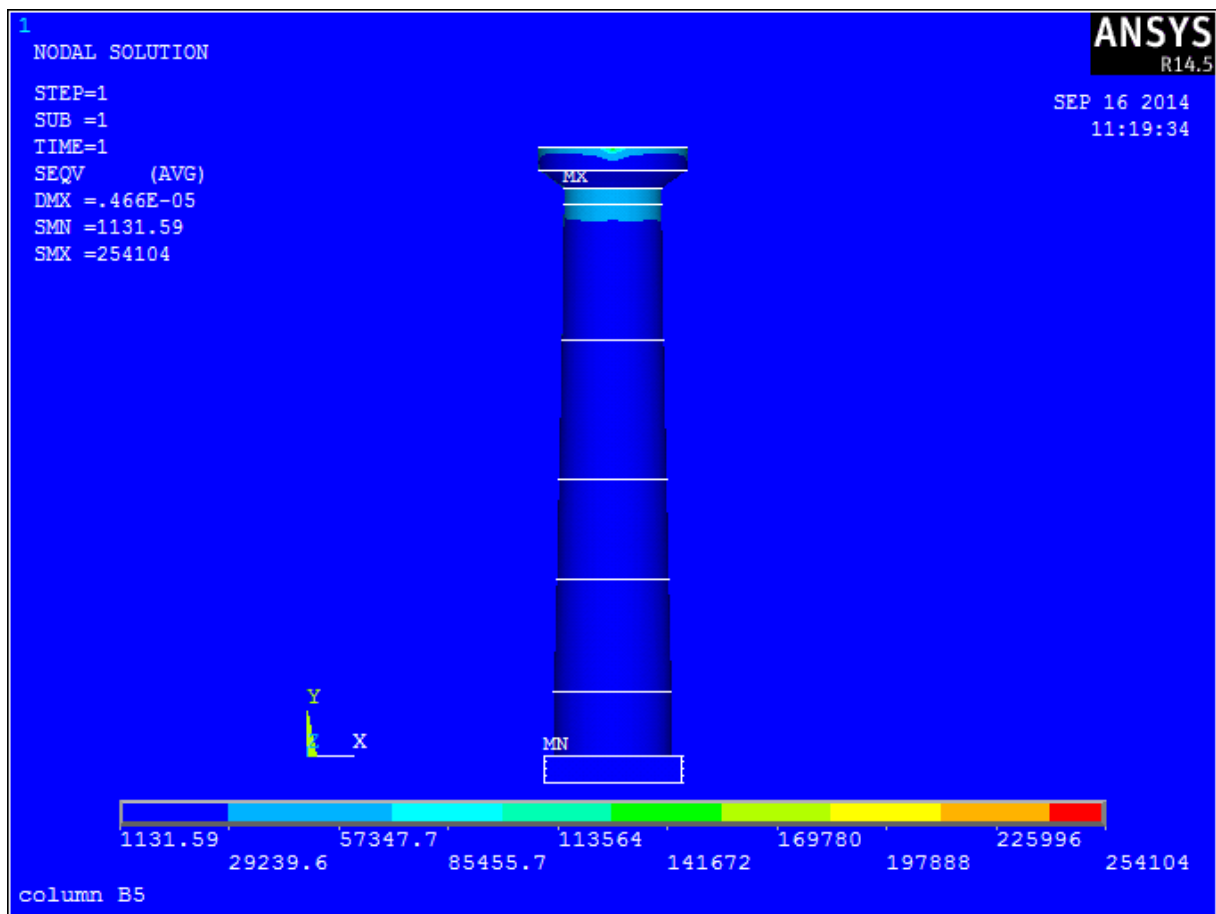


**Εικόνα 6.3 :** Μετατόπιση κίονα στην y διεύθυνση



**Εικόνα 6.4 :** Μετατόπιση κίονα στην z διεύθυνση

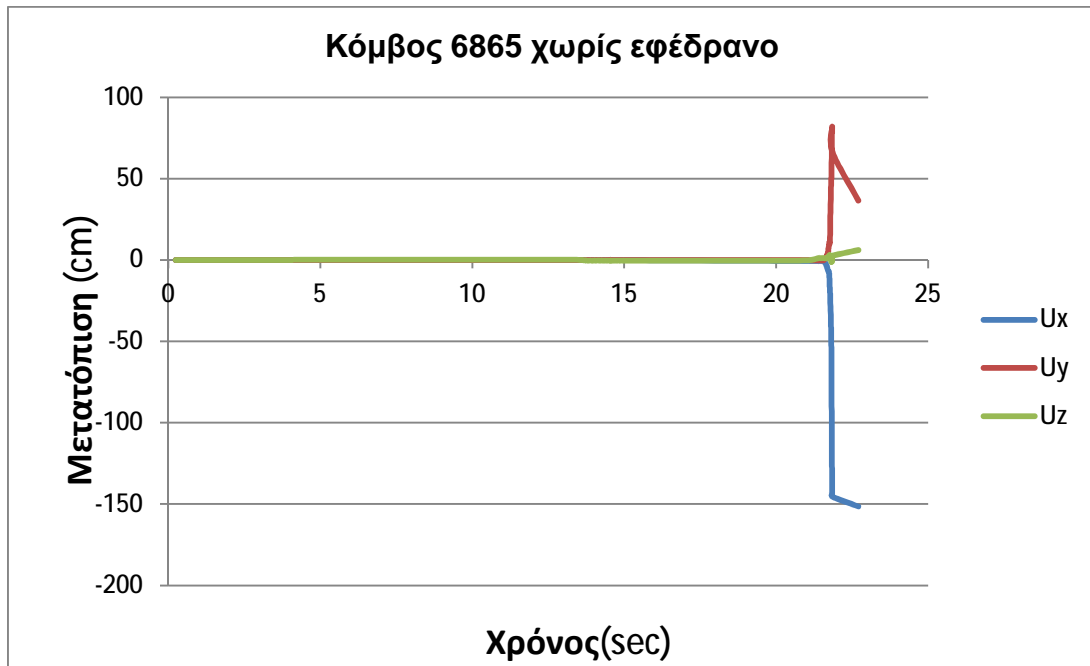
Στην εικόνα 6.5 παρουσιάζεται η κατανομή της ισοδύναμης τάσης Von Mises επάνω στον κίονα και παρατηρούμε ότι η τάση δεν ξεπερνάει το όριο θραύσης του μαρμάρου που είναι 7MPa.



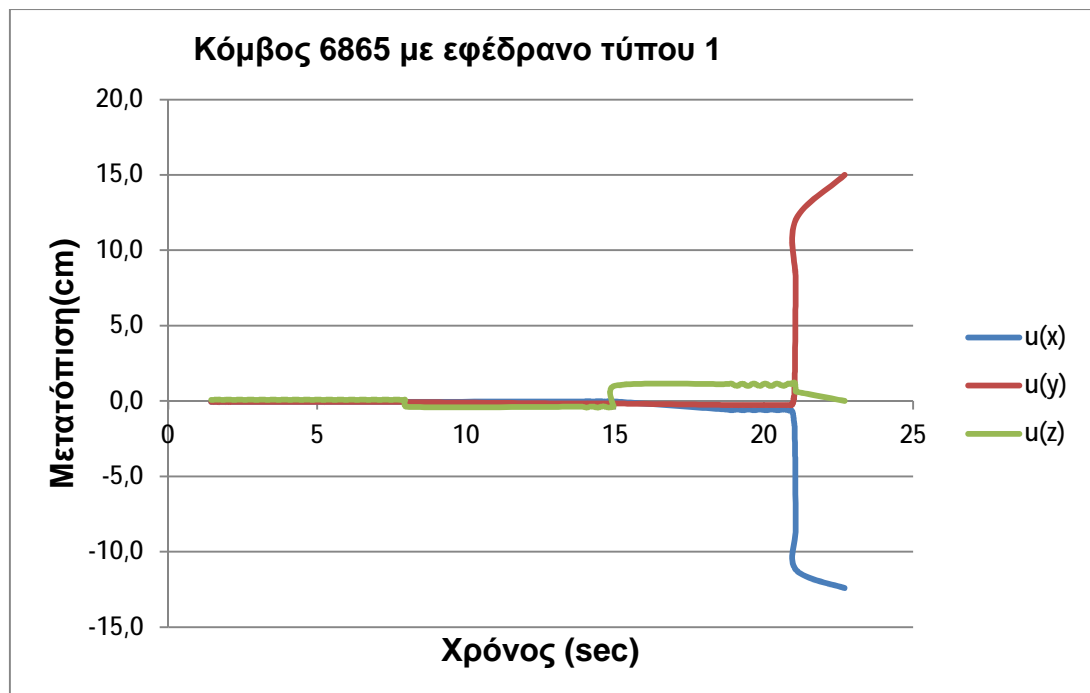
**Εικόνα 6.5 :** Κατανομή τάσης Von Mises στον κίονα

## 6.2 ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΙΟΝΑ

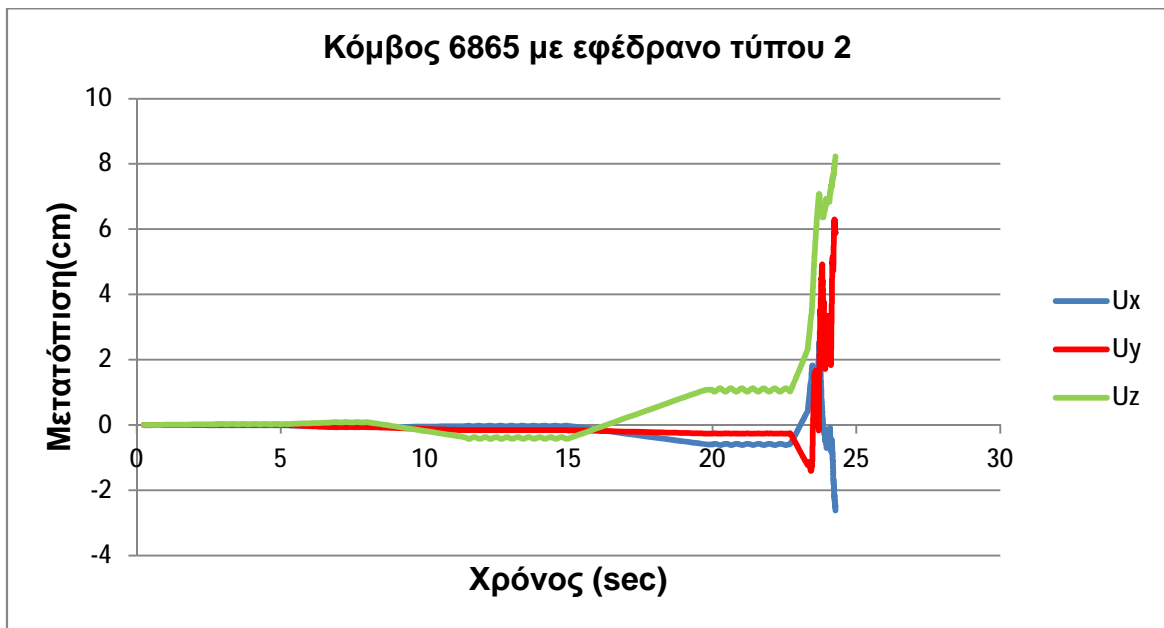
Στα σχήματα 6.1,6.2,6.3 και 6.4 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις τρεις διευθύνσεις του κόμβου 6865 στον κίονα για όλες τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν.



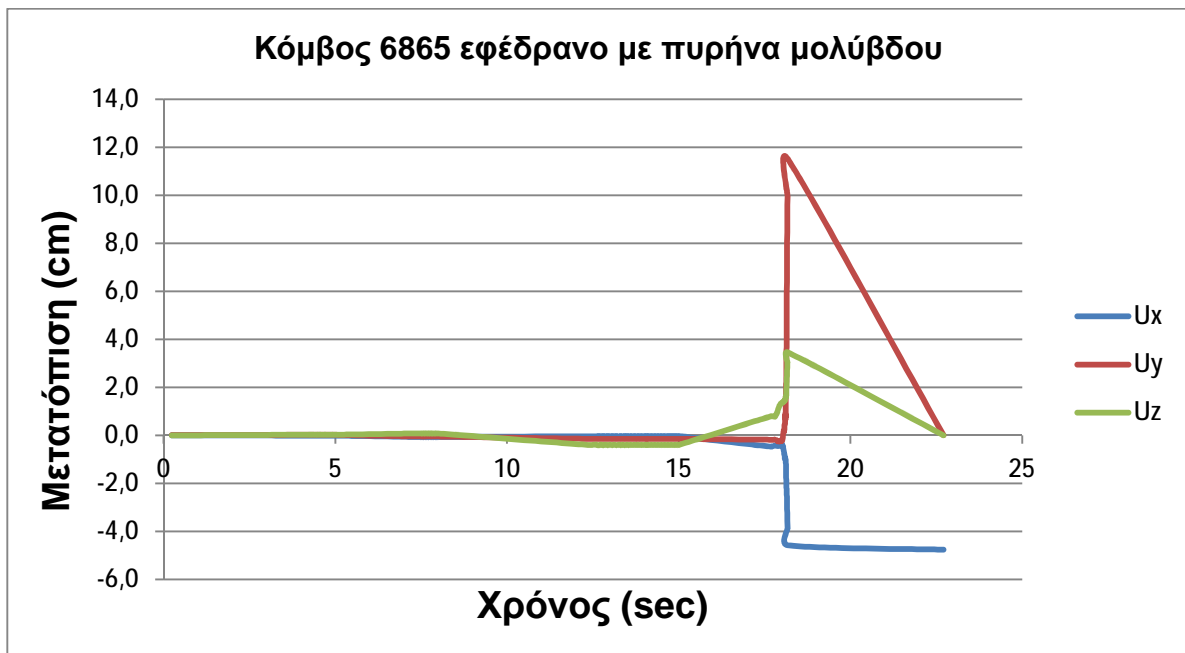
Σχήμα 6.1: Μετατοπίσεις του κόμβου 6865 στον κίονα χωρίς εφέδρανο



Σχήμα 6.2: Μετατοπίσεις του κόμβου 6865 στον κίονα με εφέδρανο τύπου 1



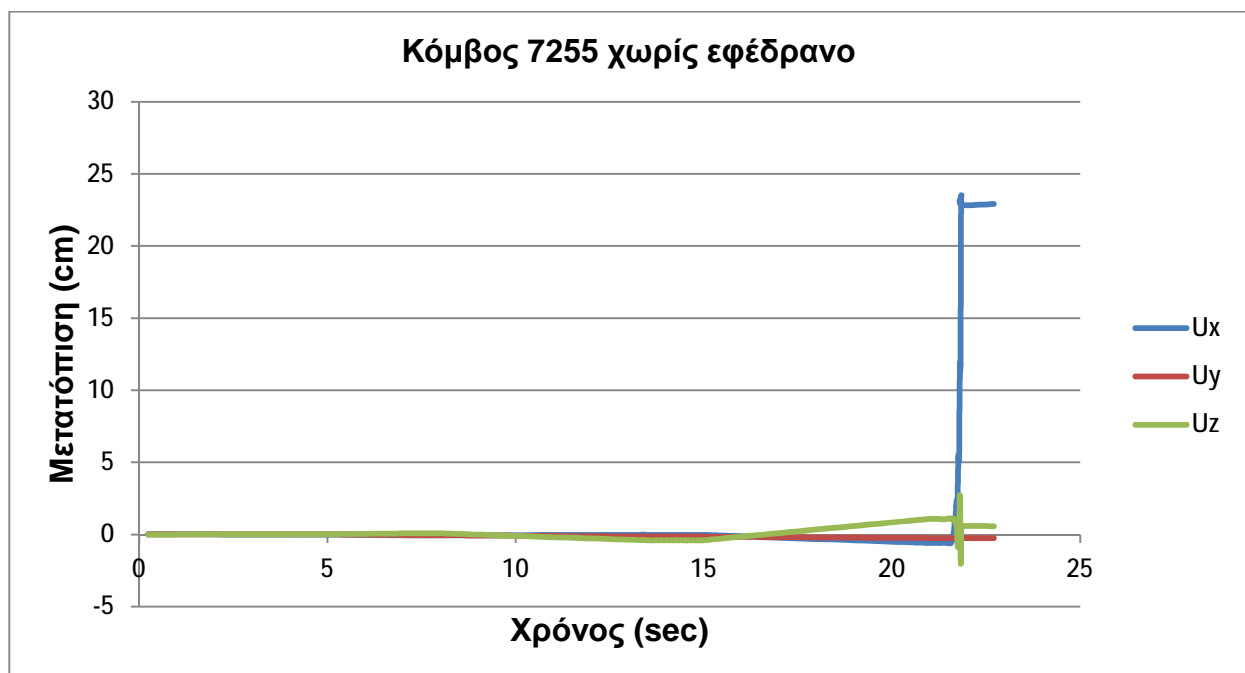
**Σχήμα 6.3:** Μετατοπίσεις του κόμβου 6865 στον κίονα με εφέδρανο τύπου 2



**Σχήμα 6.4:** Μετατοπίσεις του κόμβου 6865 στον κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου



Όπως φαίνεται στα παραπάνω διαγράμματα για τον κόμβο 6865 υπάρχει έντονη μείωση της μετατόπισης του κόμβου πριν και μετά το εφέδρανο, ειδικά στην διεύθυνση x όπου η μετατόπιση με τη χρήση εφεδράνου τύπου 1 είναι έως και 10 φορές μικρότερη από εκείνη χωρίς εφέδρανο. Συνεπώς το εφέδρανο δουλεύει και απορροφάει τις μεγάλες μετατοπίσεις του σεισμού. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι και από τα τρία είδη εφεδράνων αυτό που δουλεύει καλύτερα είναι αυτό του τύπου 2 διότι και απορροφά τις μεγάλες μετατοπίσεις του σεισμού, άρα μειώνει αυτές του κόμβου, και αντέχει πιο πολύ στο χρόνο. Επίσης παρατηρούμε ότι το εφέδρανο με τον πυρήνα μολύβδου είναι αυτό που διατηρεί για λιγότερη ώρα την ισορροπία του κίονα.



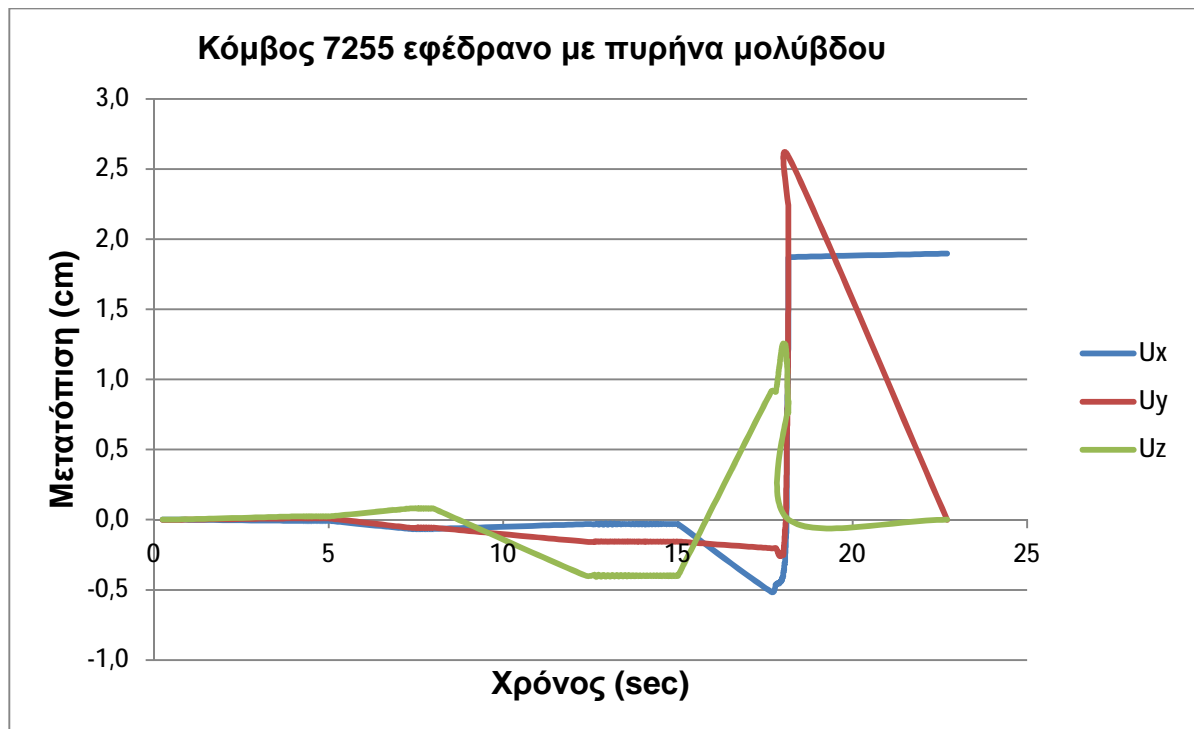
**Σχήμα 6.5:** Μετατοπίσεις του κόμβου 7255 στον κίονα χωρίς εφέδρανο



Σχήμα 6.6: Μετατοπίσεις του κόμβου 7255 στον κίονα με εφέδρανο τύπου 1

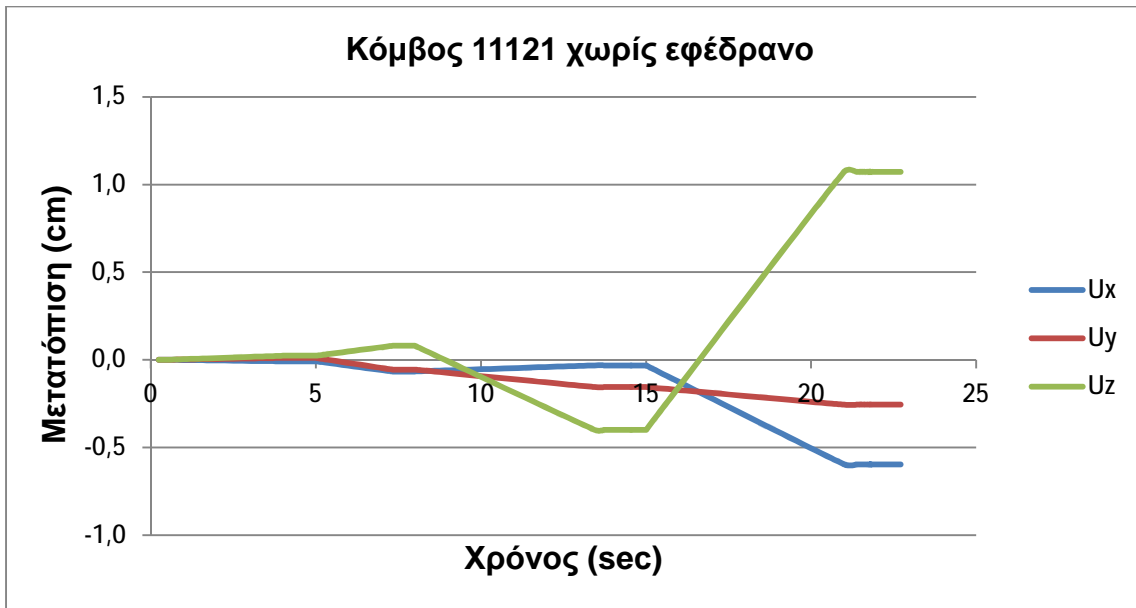


Σχήμα 6.7: Μετατοπίσεις του κόμβου 7255 στον κίονα με εφέδρανο τύπου 2

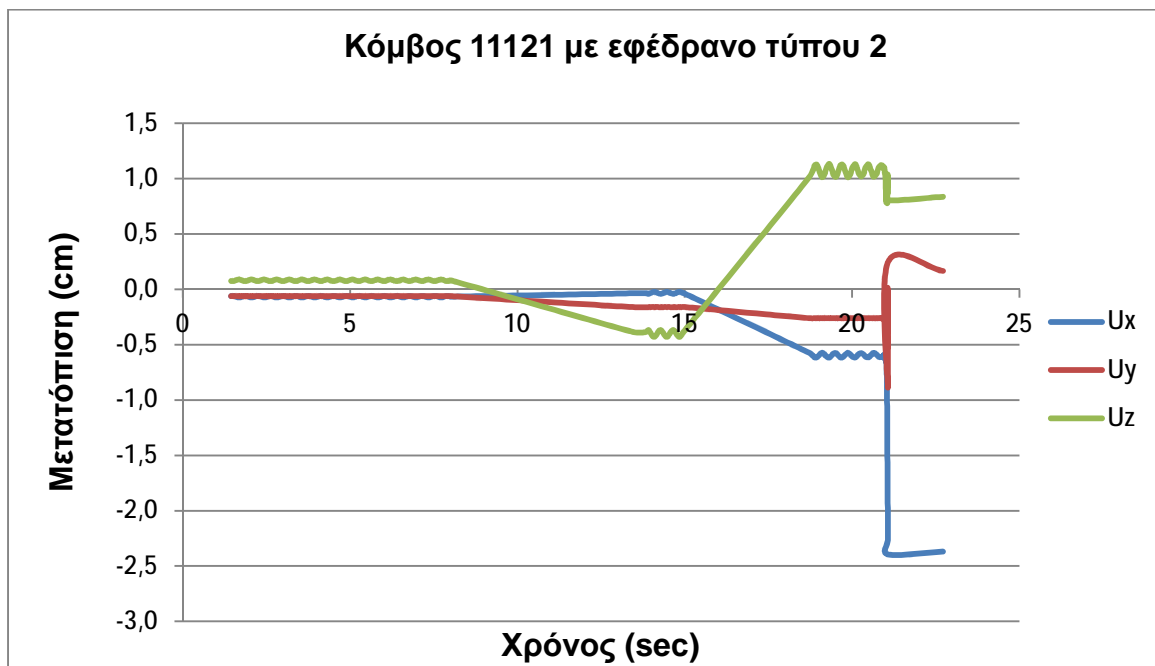


**Σχήμα 6.8:** Μετατοπίσεις του κόμβου 7255 στον κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου

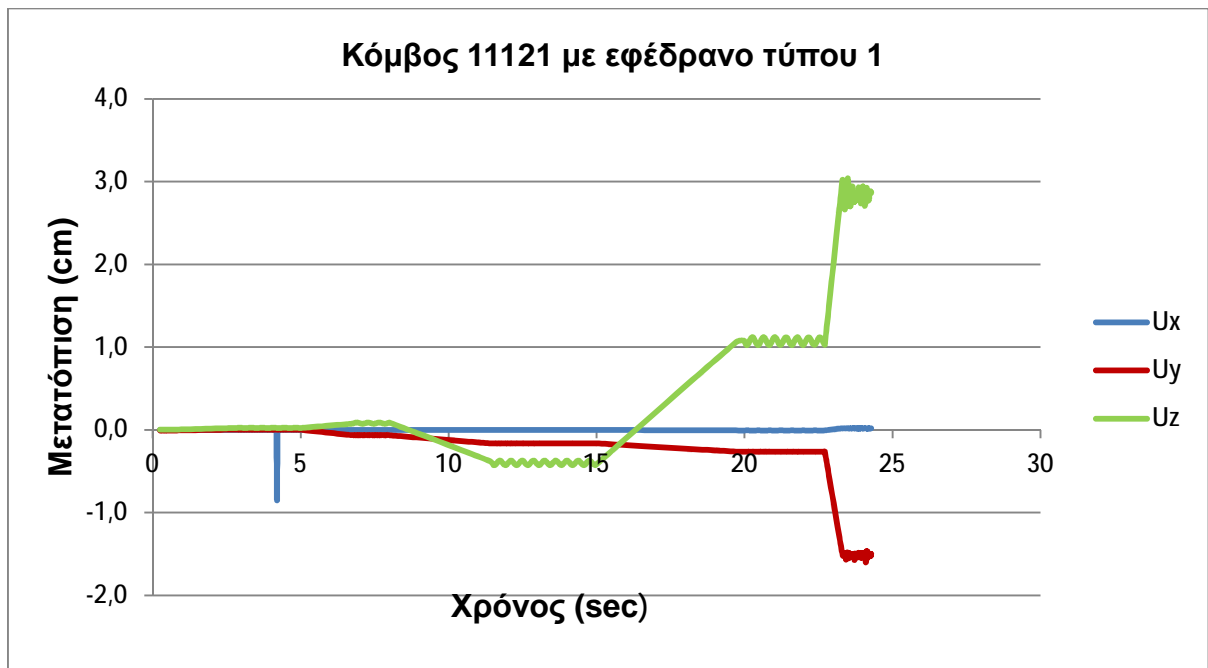
Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.5,6.6,6.7 και 6.8 στον κόμβο 7255 παρατηρούμε πάλι την ίδια συμπεριφορά με αυτήν του κόμβου 6865,δηλαδή χωρίς εφέδρανο έχουμε πολύ μεγάλες μετατοπίσεις του κόμβου, με εφέδρανο τύπου 1 μειώνονται και με εφέδρανο τύπου 2 μειώνονται ακόμα περισσότερο. Αυτό μας αποδεικνύει ότι το εφέδρανο με τις πολλές χοντρές στρώσεις καουτσούκ απορροφά καλύτερα την σεισμική διέγερση. Για το εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου δεν αλλάζει κάτι. Μειώνει μεν τις μετατοπίσεις του κόμβου αλλά διατηρεί για λιγότερη ώρα από όλα την ισορροπία του κίονα.



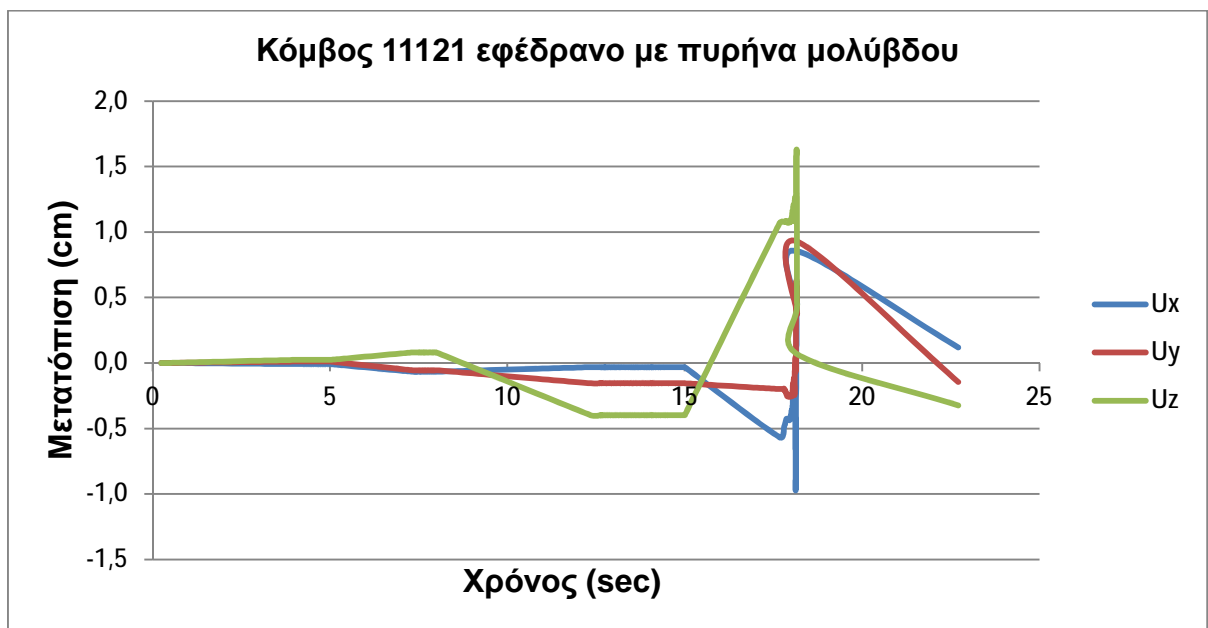
**Σχήμα 6.9:** Μετατοπίσεις του κόμβου 11121 στον κίονα χωρίς εφέδρανο



**Σχήμα 6.10:** Μετατοπίσεις του κόμβου 11121 στον κίονα με εφέδρανο τύπου 2

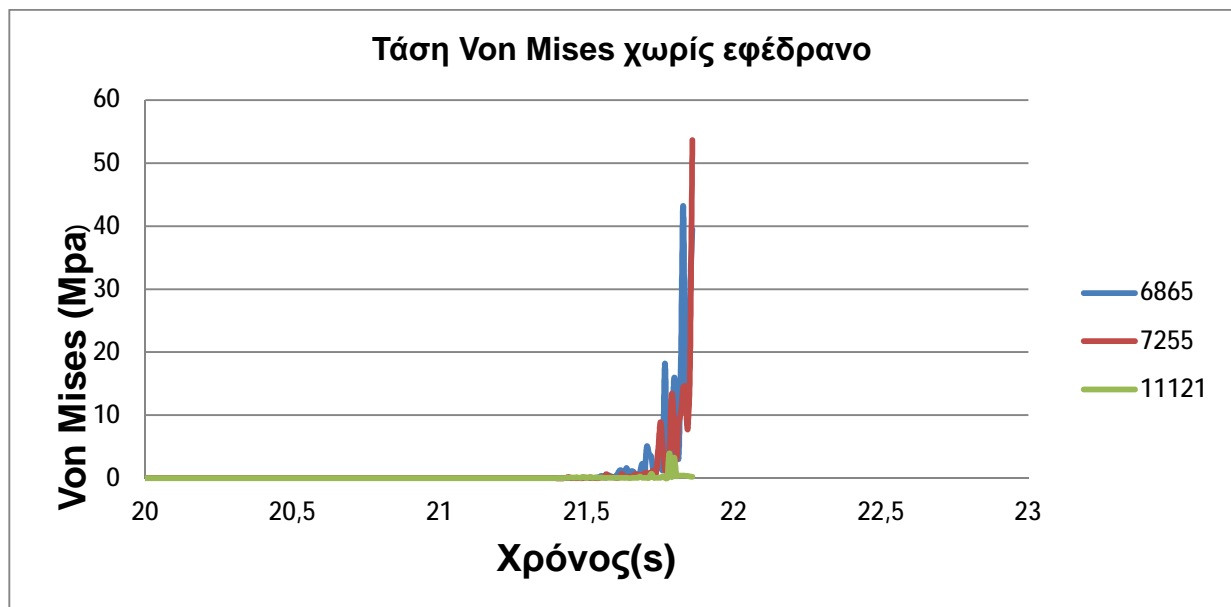


**Σχήμα 6.11:** Μετατοπίσεις του κόμβου 11121 στον κίονα με εφέδρανο τύπου 1

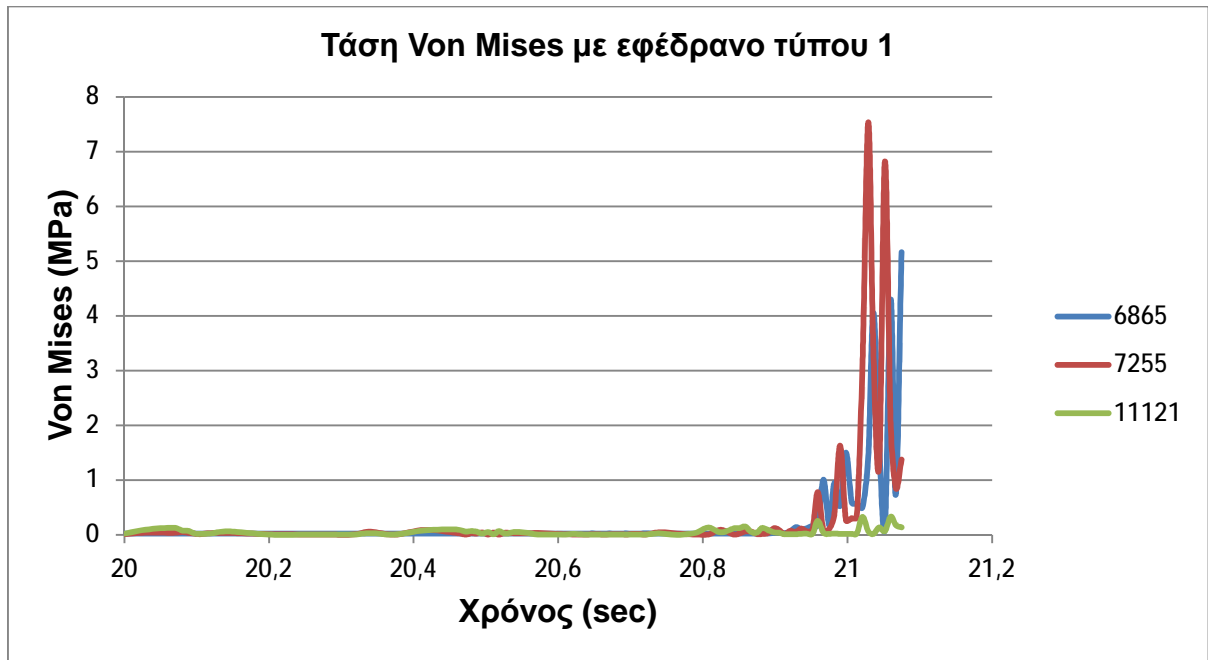


**Σχήμα 6.12:** Μετατοπίσεις του κόμβου 11121 στον κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου

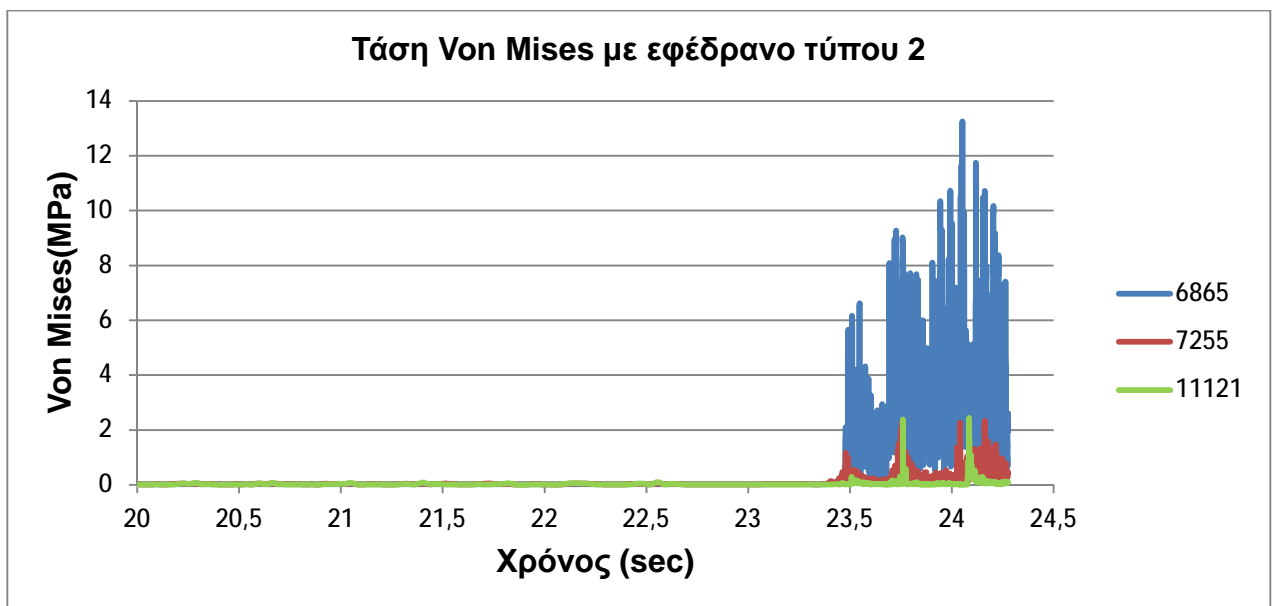
Όπως παρατηρούμε στα σχήματα 6.9, 6.10, 6.11 και 6.12 στον κόμβο 11121 παρατηρούμε τελείως διαφορετική συμπεριφορά των μετατοπίσεων του κόμβου. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση που ο κίονας υποβάλλεται σε σεισμική διέγερση χωρίς εφέδρανο οι μετατοπίσεις είναι μικρότερες από τις άλλες δύο περιπτώσεις με εφέδρανο τύπου 1 και τύπου 2. Αυτό όμως είναι λογικό διότι η σεισμική διέγερση και στις δύο περιπτώσεις με εφέδρανα τύπου 1 και 2 έχει διανύσει περισσότερο χρόνο από την πρώτη περίπτωση χωρίς εφέδρανο και επομένως έχουν αυξηθεί οι μετατοπίσεις του κόμβου που δεν φαίνονται στο διάγραμμα χωρίς εφέδρανο γιατί εκεί έχει επέλθει η ανατροπή του κίονα. Άρα λοιπόν και σε αυτήν την περίπτωση οι σεισμική μονωτήρες απορρόφησαν σημαντική σεισμική ενέργεια και περισσότερο ο μονωτήρας τύπου 2. Το εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου να μεν έχει μικρές μετατοπίσεις αλλά σε εκτρέπεται σε πολύ λιγότερο χρονικό διάστημα.



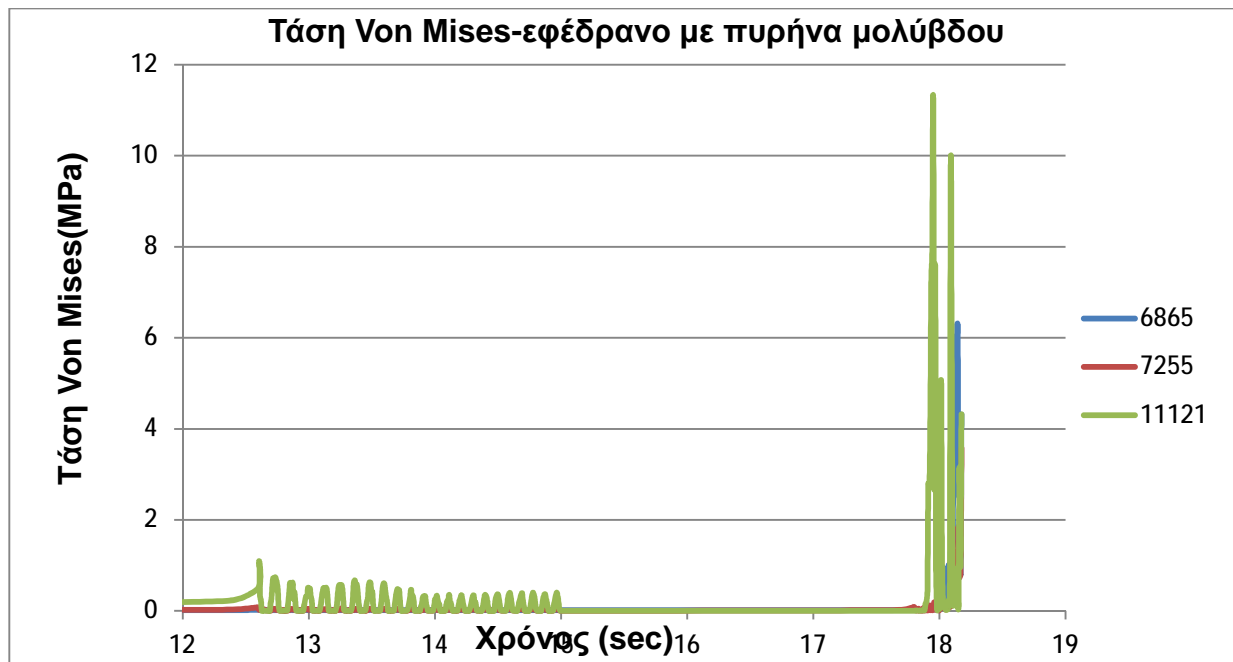
**Σχήμα 6.13:** Τάση Von Mises στον κίονα χωρίς εφέδρανο



**Σχήμα 6.14:** Τάση Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 1



**Σχήμα 6.15:** Τάση Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 2



**Σχήμα 6.16:** Τάση Von Mises στον κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου

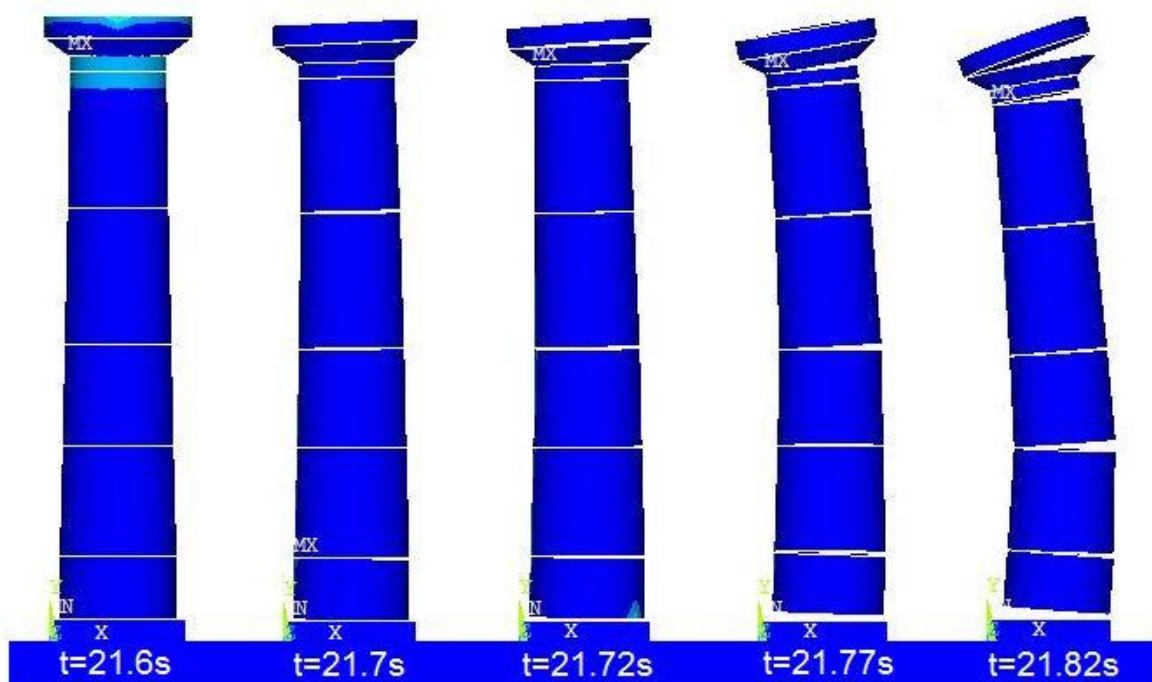
Όπως φαίνεται στα σχήματα 6.13,6.14,6.15 και 6.16 η τάση μειώνεται κατά 10 φορές σχεδόν με την χρήση σεισμικού μονωτήρα σε σχέση με αυτήν χωρίς την χρήση του. Στα διαγράμματα με τα δύο είδη διαφορετικών εφεδράνων χωρίς μόλυβδο, ναι μεν η τάση μεγαλώνει με τη χρήση του εφεδράνου τύπου 2 αλλά διατηρεί την ισορροπία του κίονα για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Στο εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου παρατηρούμε ότι οι τάσεις είναι αυξημένες σε σχέση με τα εφέδρανα τύπου 1 και τύπου 2 για αντίστοιχους χρόνους.



## 6.3 ΣΤΙΓΜΙΟΤΥΠΑ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΚΙΟΝΑ

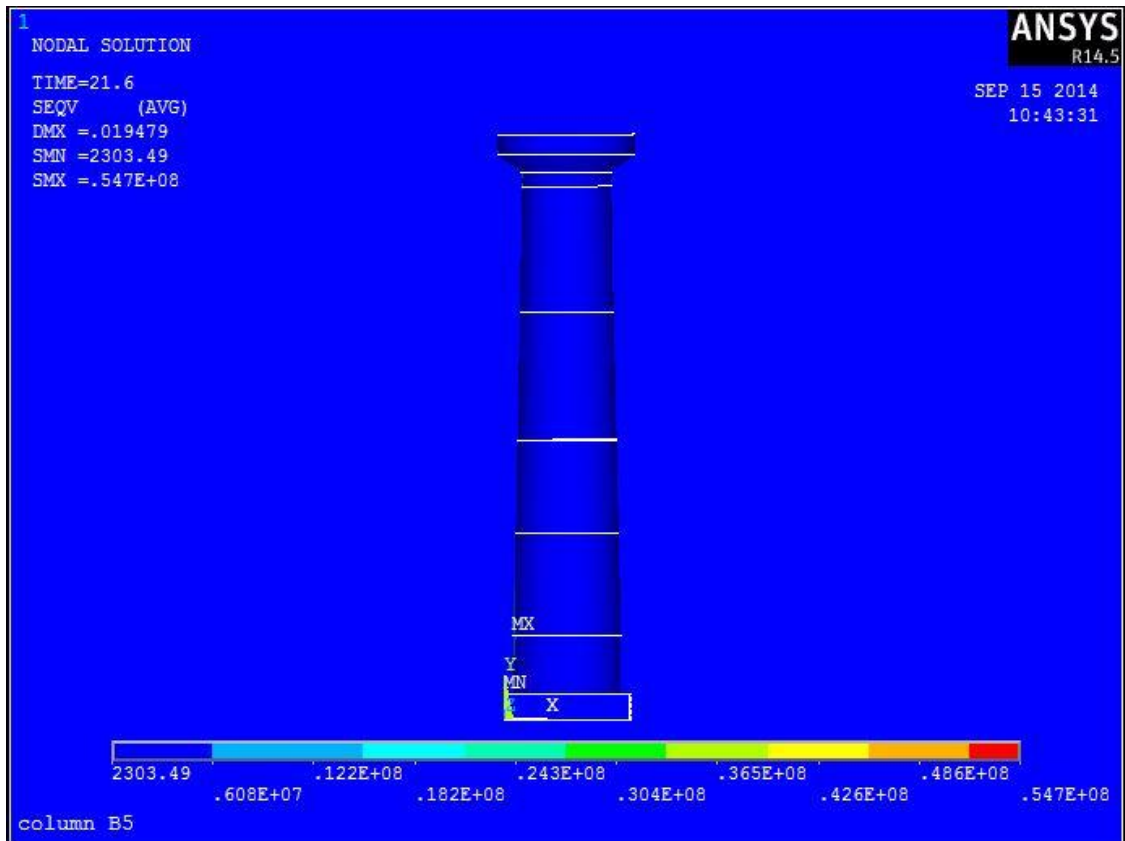
### 6.3.1 Χωρίς εφέδρανο

Στην εικόνα 6.4 απεικονίζεται σε πέντε διαδοχικές χρονικές στιγμές ο κίονας χωρίς εφέδρανο υπό τη σεισμική διέγερση.

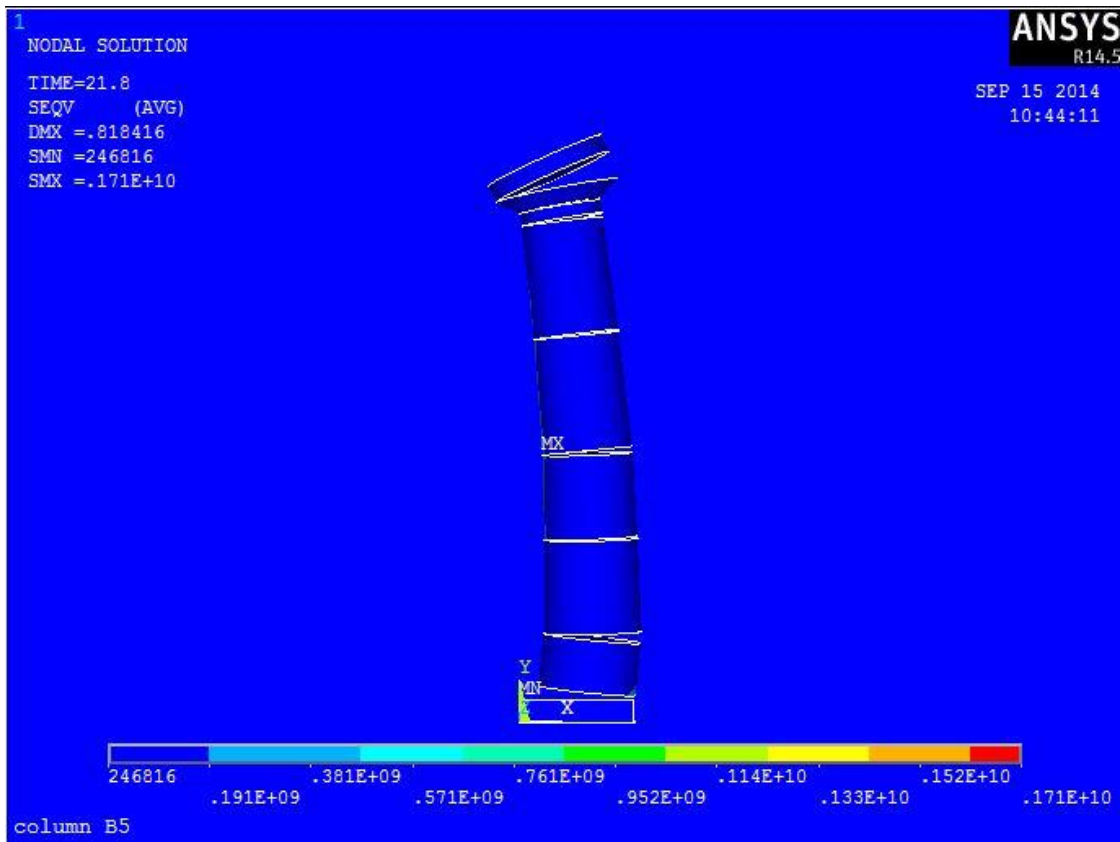


**Εικόνα 6.6 :** Κίονας χωρίς εφέδρανο σε πέντε διαδοχικές στιγμές

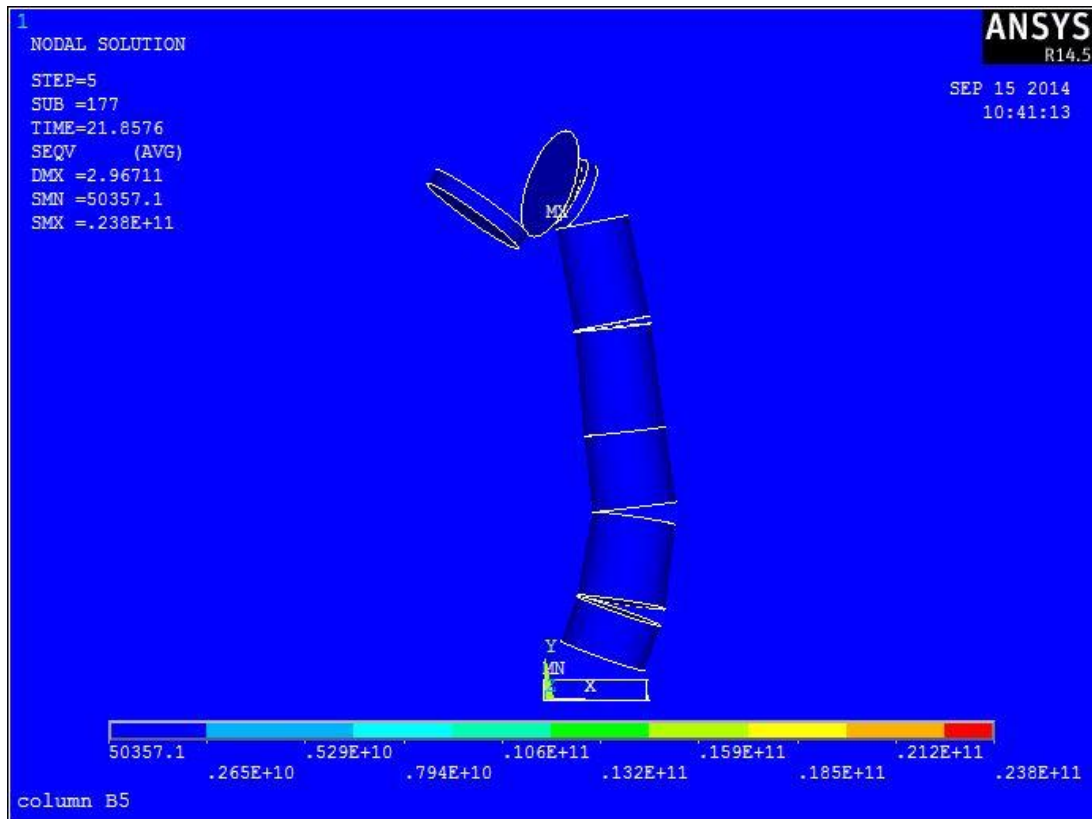
Στη συνέχεια παρατίθενται αποτελέσματα από το Ansys. Συγκεκριμένα οι εικόνες 6.7, 6.8, 6.9 αναπαριστούν τις τάσεις Von Mises στον κίονα χωρίς εφέδρανο σε διάφορες χρονικές στιγμές. Παράλληλα παρατίθενται και οι εικόνες 6.10, 6.11, 6.12, 6.13, και 6.14 που αναπαριστούν τις μετατοπίσεις του κίονα στη x-διεύθυνση, επίσης σε διάφορες χρονικές στιγμές.



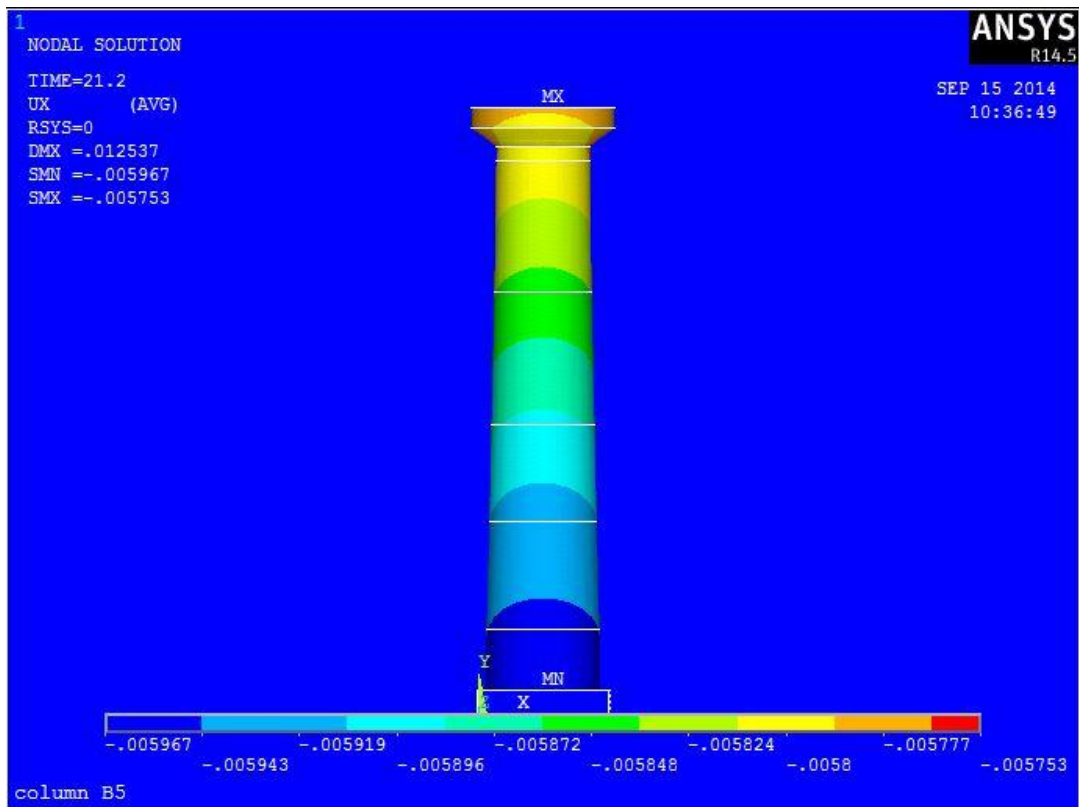
**Εικόνα 6.7 :** Τάσεις Von Mises στον κίονα χωρίς εφέδρανο για  $t=21.6s$



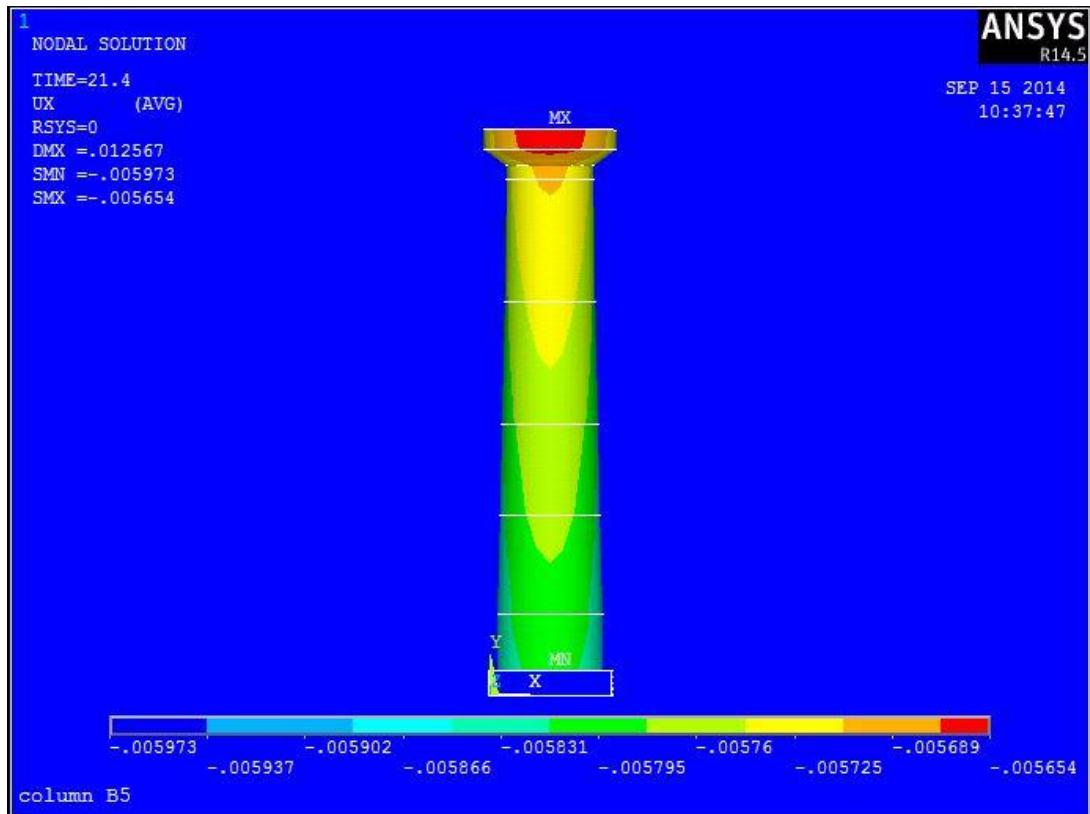
**Εικόνα 6.8 :** Τάσεις Von Mises στον κίονα χωρίς εφέδρανο για  $t=21.8s$



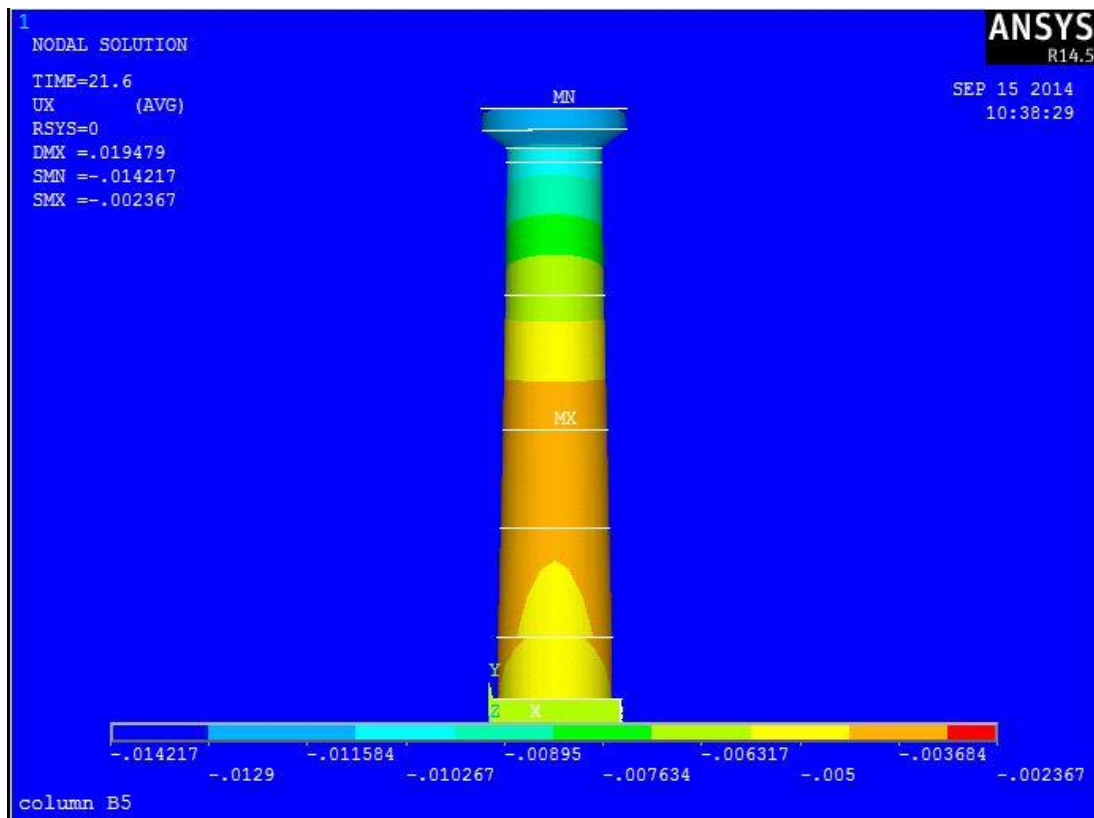
**Εικόνα 6.9 :** Τάσεις Von Mises στον κίονα χωρίς εφέδρανο για  $t=21.8576s$



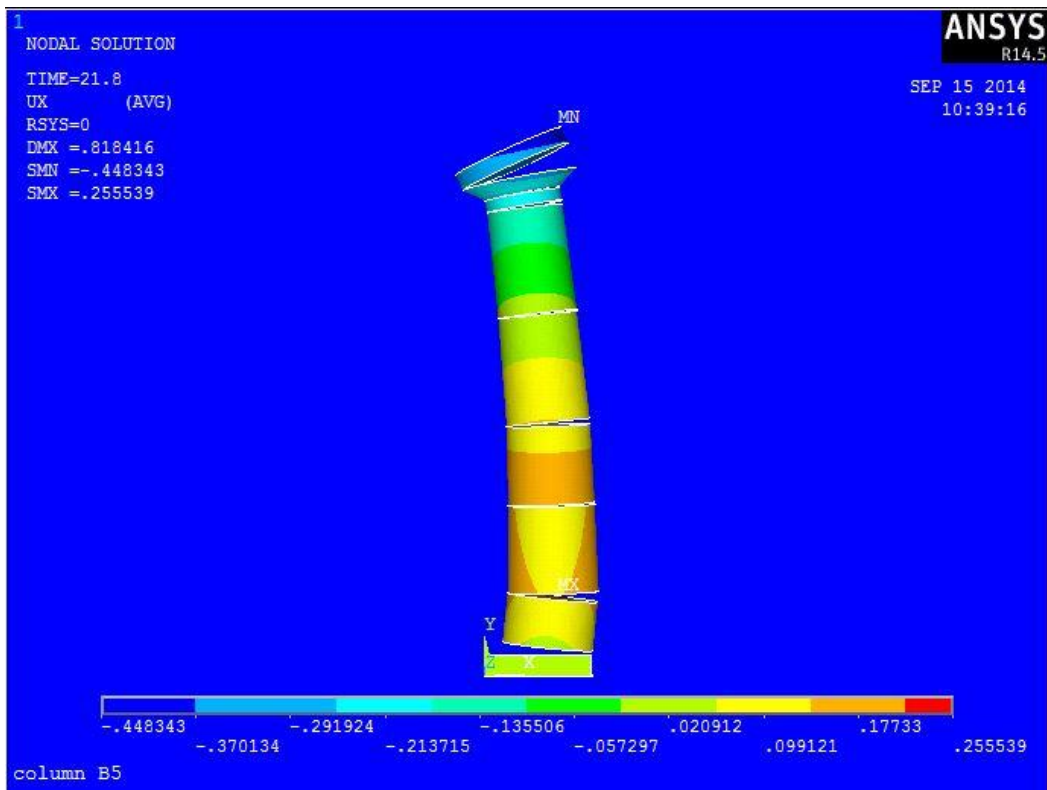
**Εικόνα 6.10 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα χωρίς εφέδρανο για  $t=21.2s$



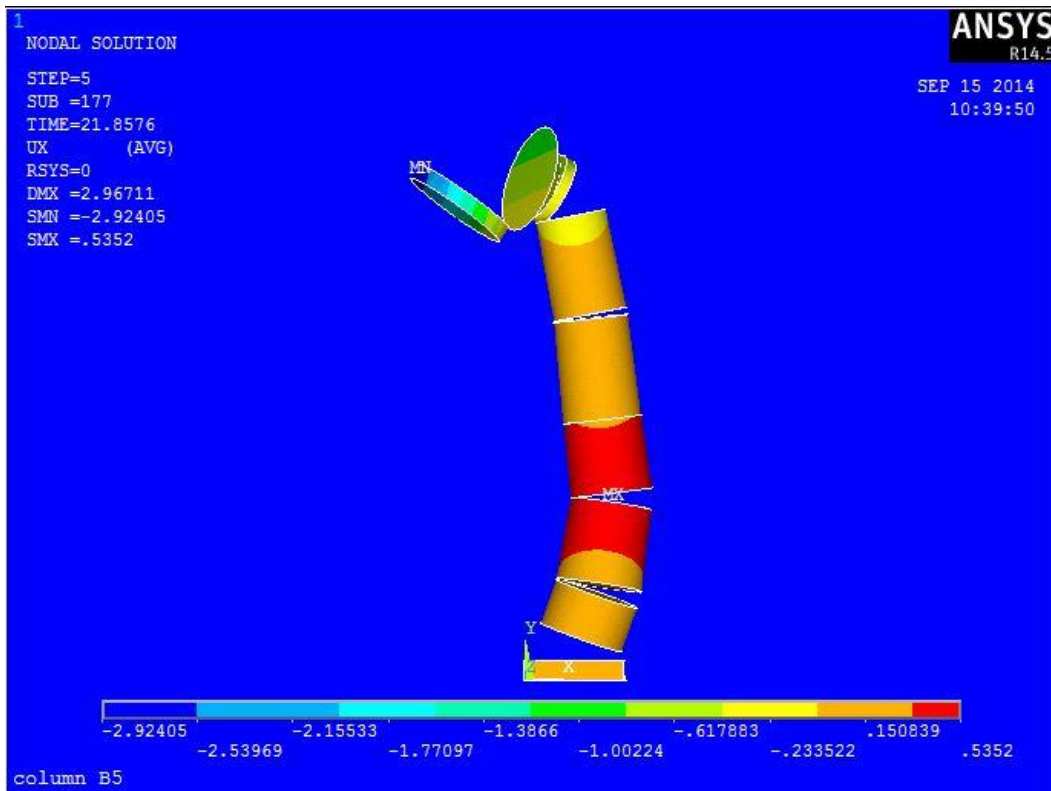
**Εικόνα 6.11 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα χωρίς εφέδρανο για  $t=21.4s$



**Εικόνα 6.12 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα χωρίς εφέδρανο για  $t=21.6s$

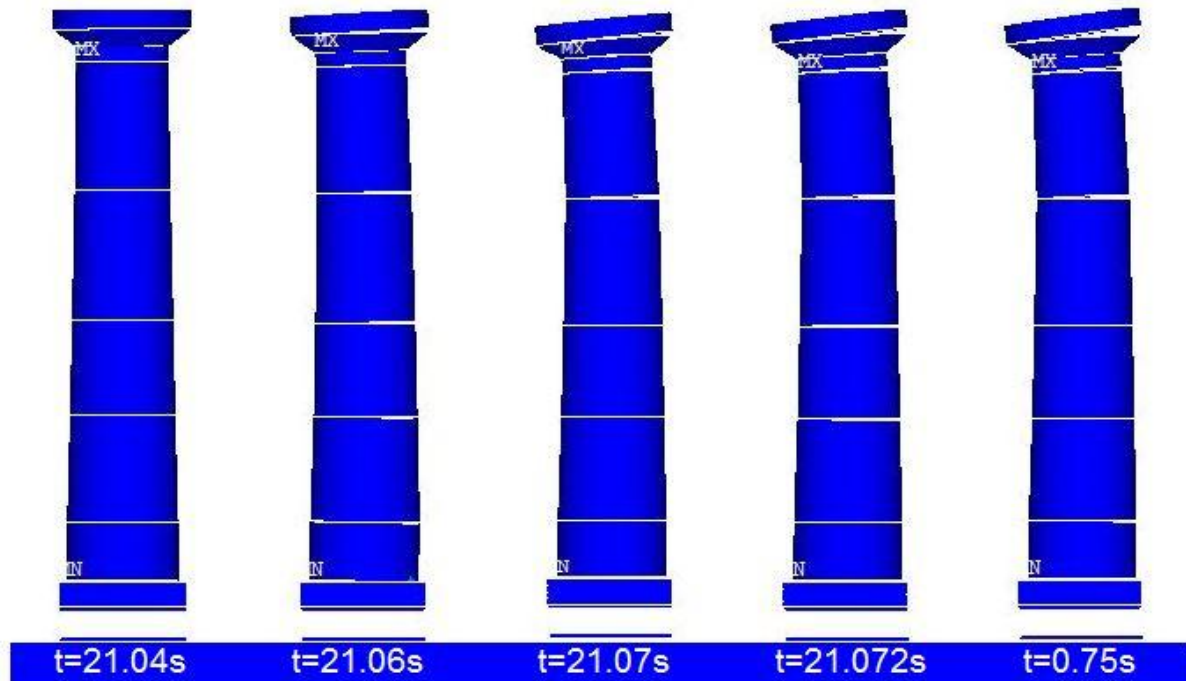


**Εικόνα 6.13 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα χωρίς εφέδρανο για  $t=21.8s$



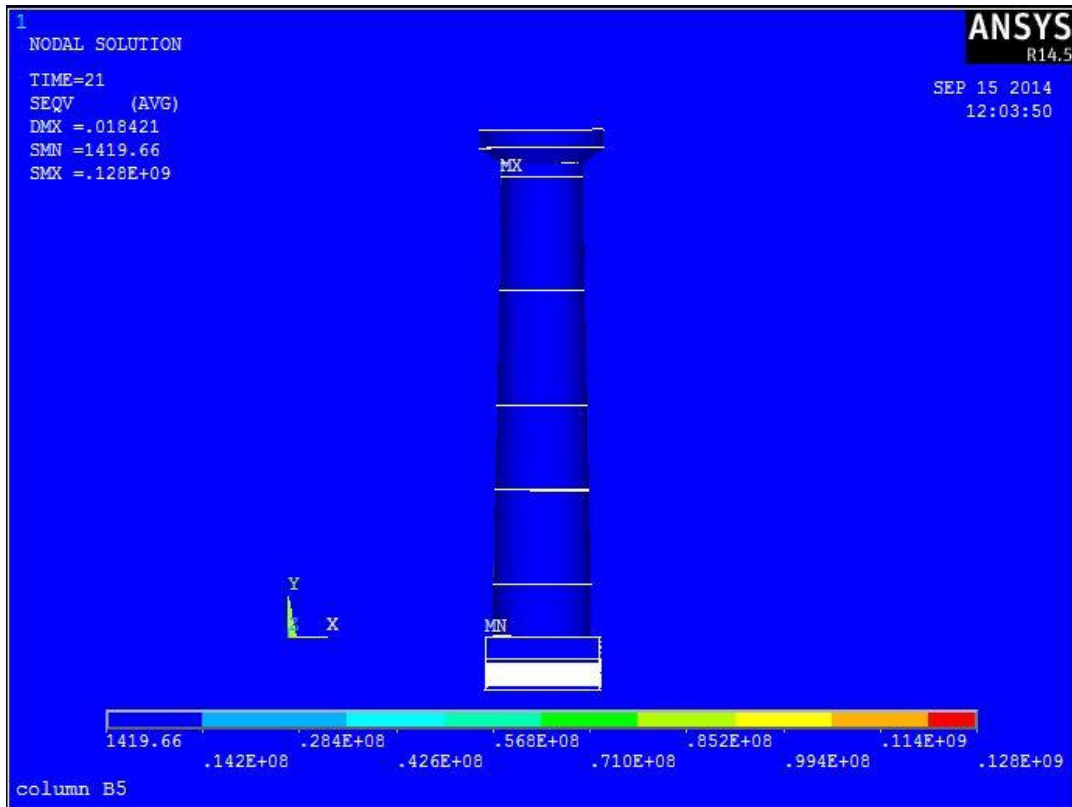
**Εικόνα 6.14 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα χωρίς εφέδρανο για  $t=21.8576s$

### 6.3.2 Εφέδρανο τύπου 1

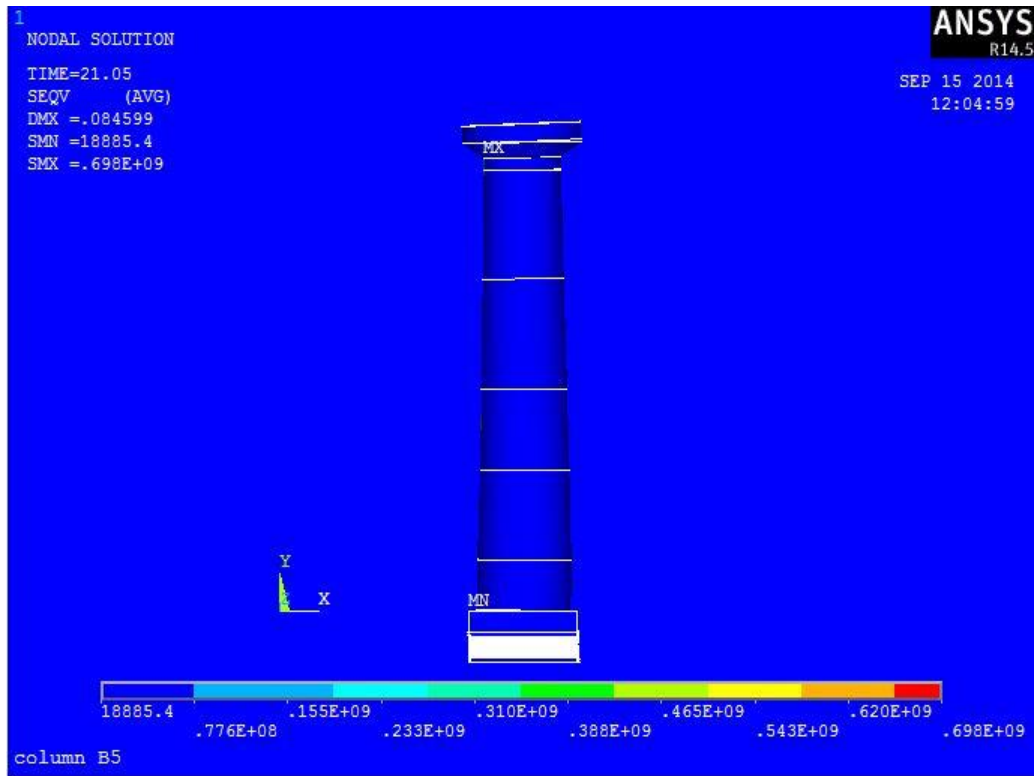


**Εικόνα 6.15 :** Κίονας χωρίς εφέδρανο σε πέντε διαδοχικές στιγμές

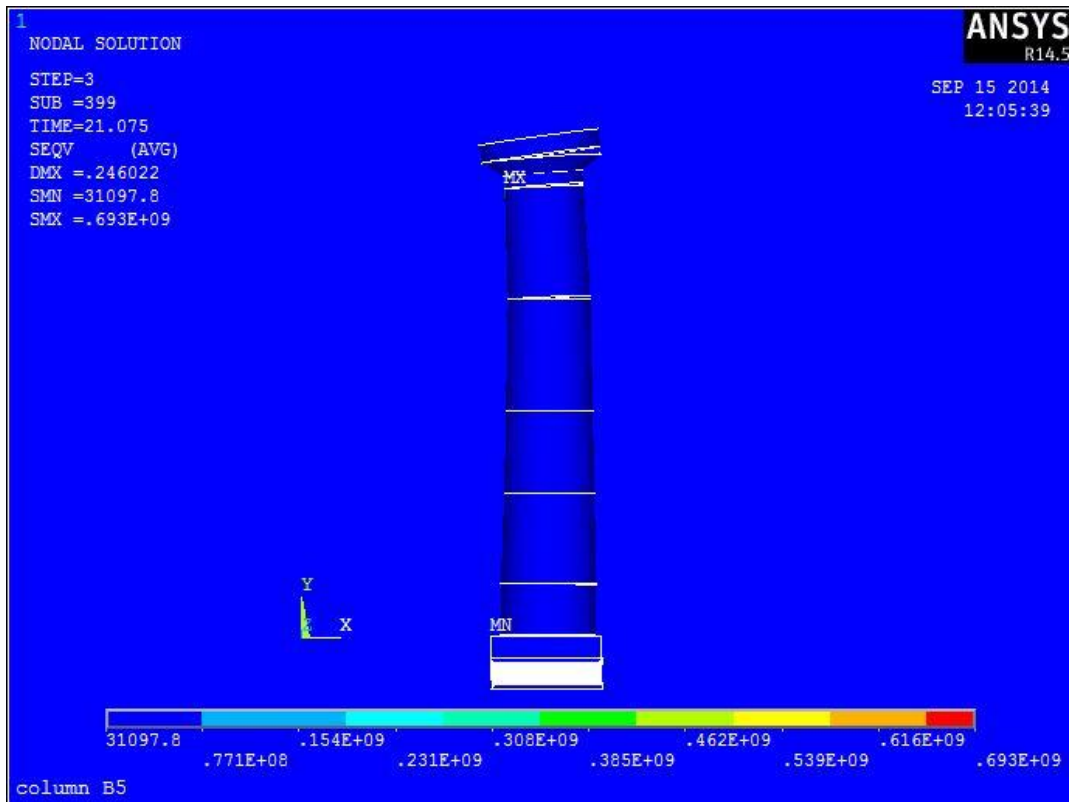
Οι εικόνες 6.16, 6.17, 6.18 αναπαριστούν τις τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 1 σε διάφορες χρονικές στιγμές. Παράλληλα παρατίθενται και οι εικόνες 6.19, 6.20 και 6.21 που αναπαριστούν τις μετατοπίσεις του κίονα στη x-διεύθυνση, επίσης σε διάφορες χρονικές στιγμές.



**Εικόνα 6.16 :** Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 1 για  $t=21s$

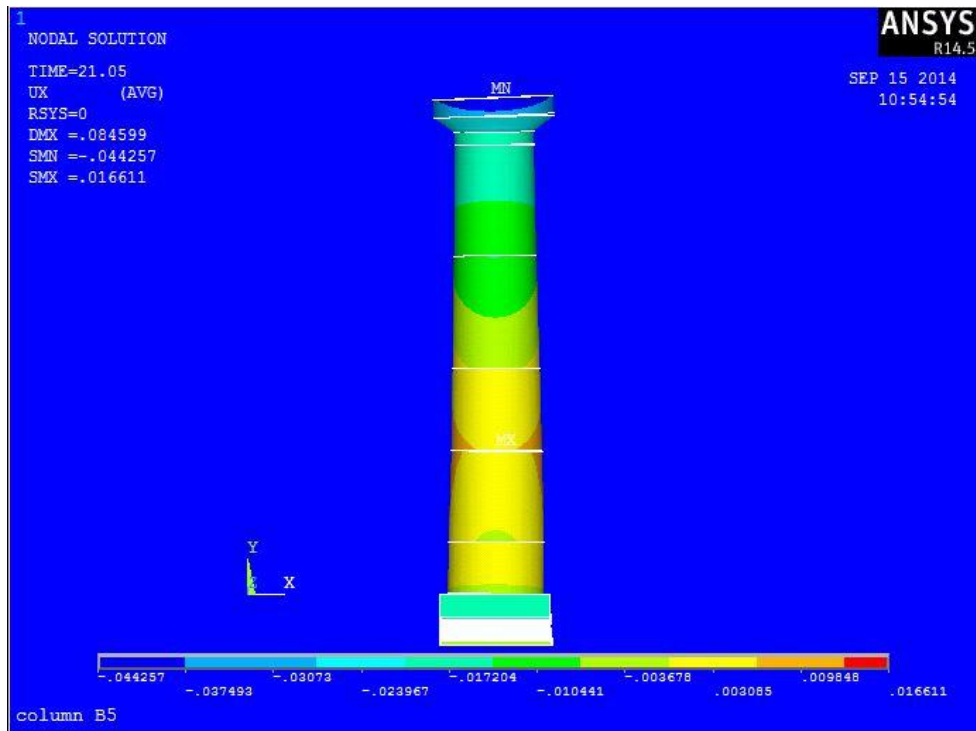


Εικόνα 6.17 : Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 1 για  $t=21.05s$

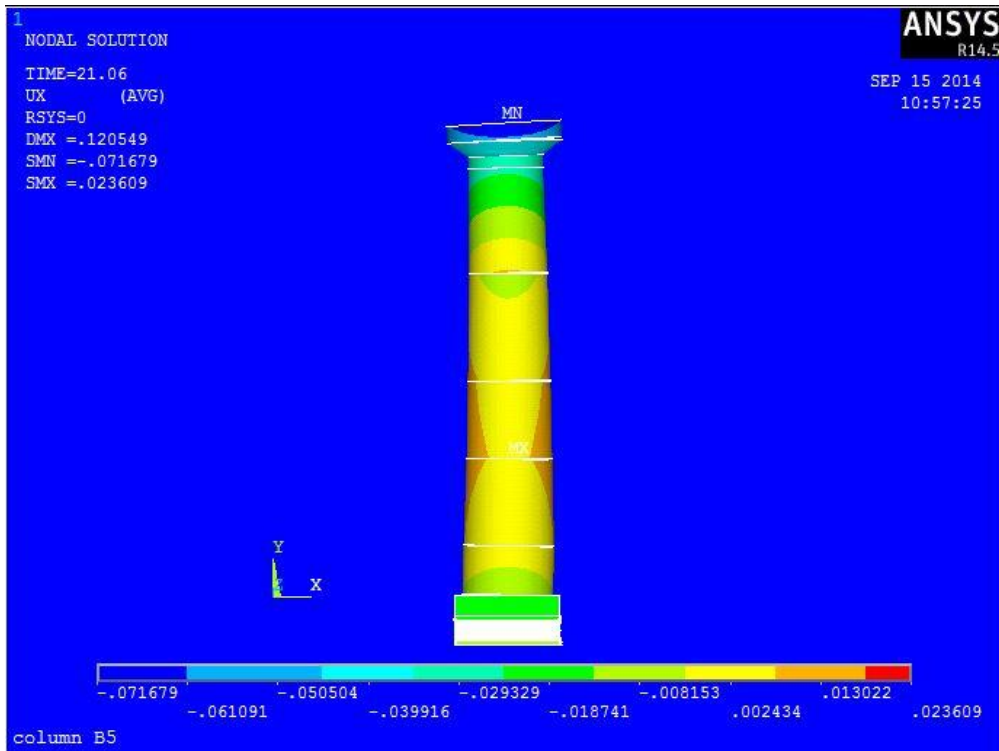


Εικόνα 6.18 : Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 1 για  $t=21.075s$

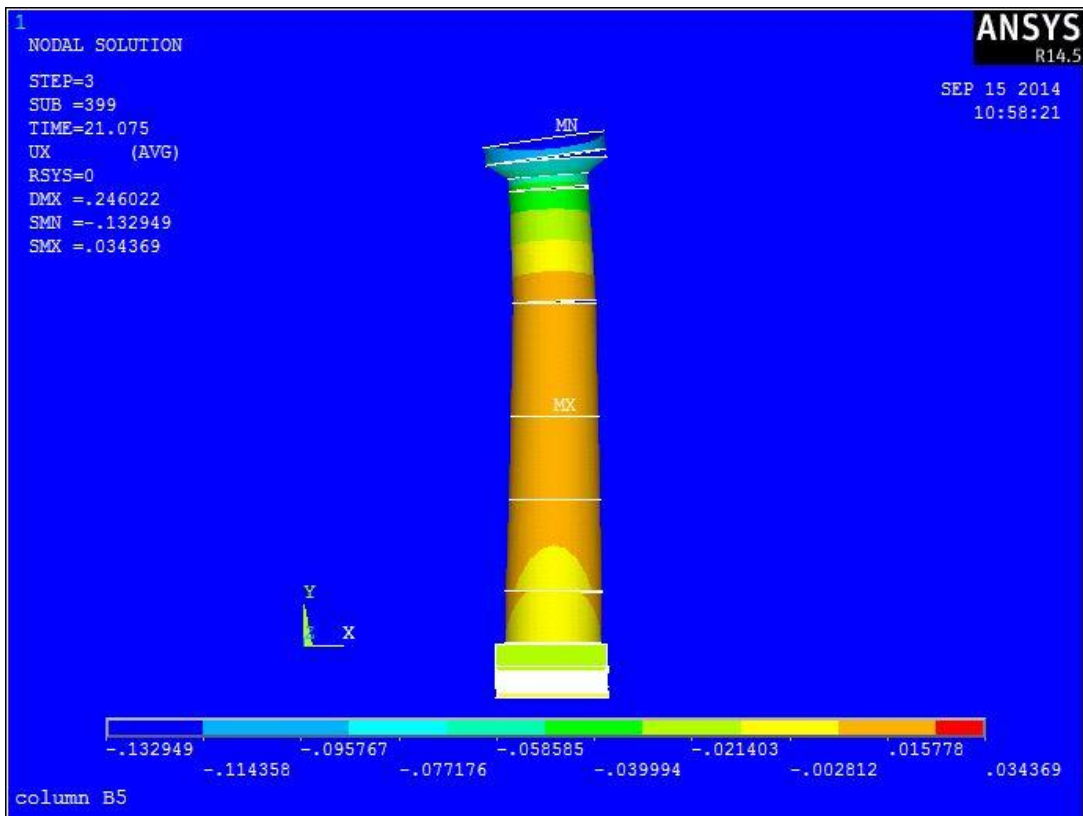




**Εικόνα 6.19 :** Μετατοπίσεις στη χ-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο τύπου 1 για  $t=21.05s$

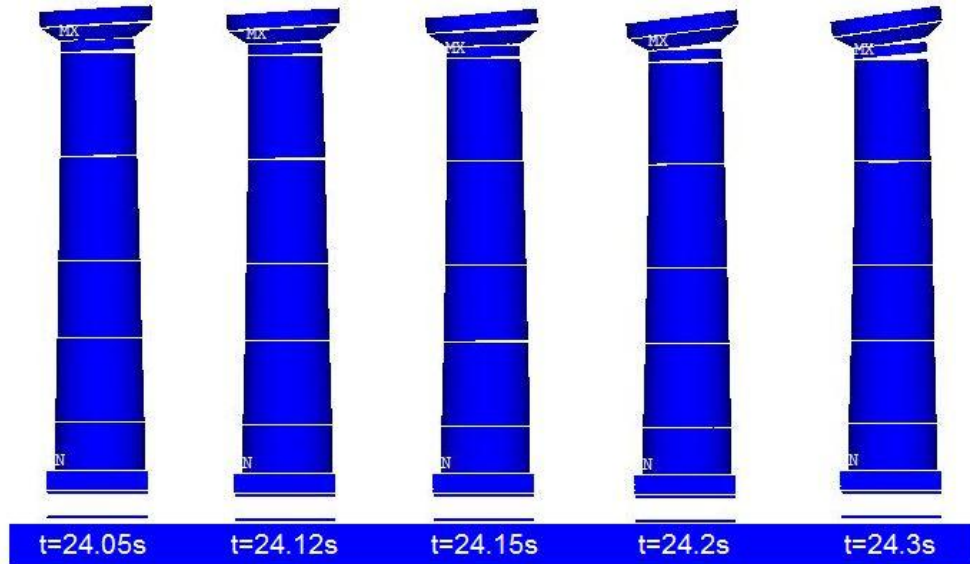


**Εικόνα 6.20 :** Μετατοπίσεις στη χ-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο τύπου 1 για  $t=21.06s$



**Εικόνα 6.21 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο τύπου 1 για  $t=21.075s$

### 6.3.3 Εφέδρανο τύπου 2

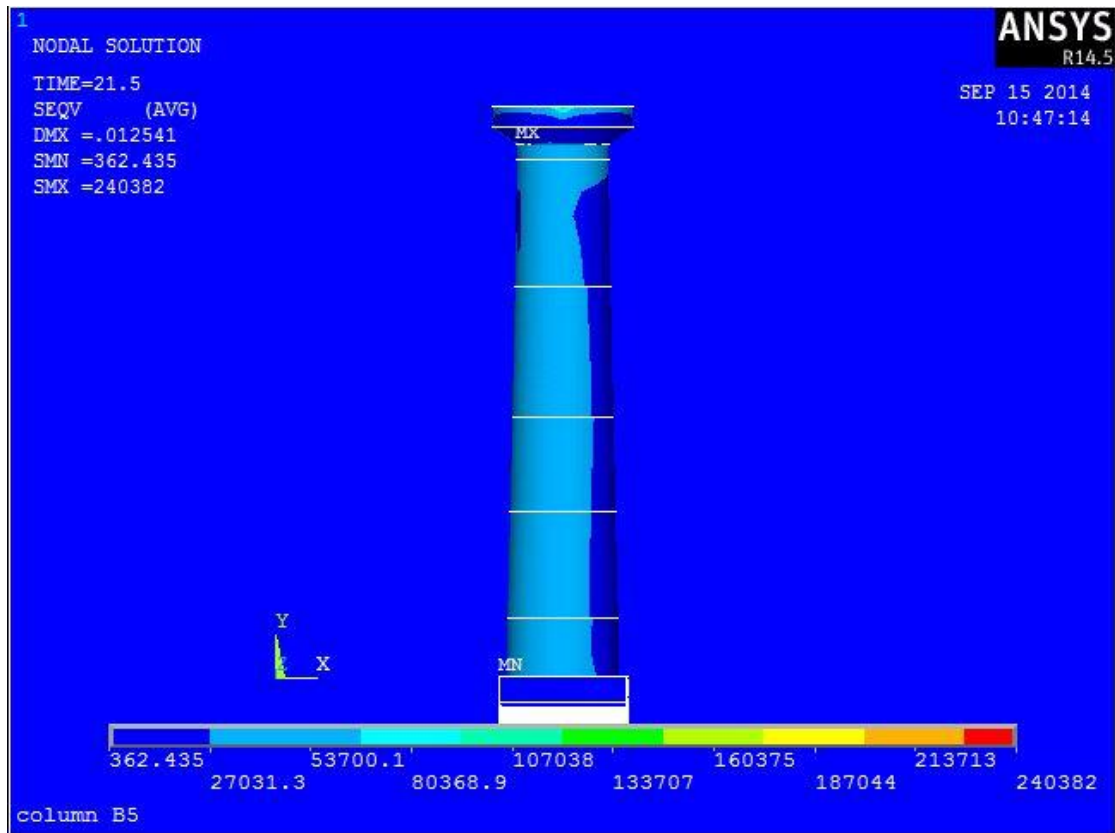


**Εικόνα 6.22 :** Κίονας χωρίς εφέδρανο σε πέντε διαδοχικές στιγμές

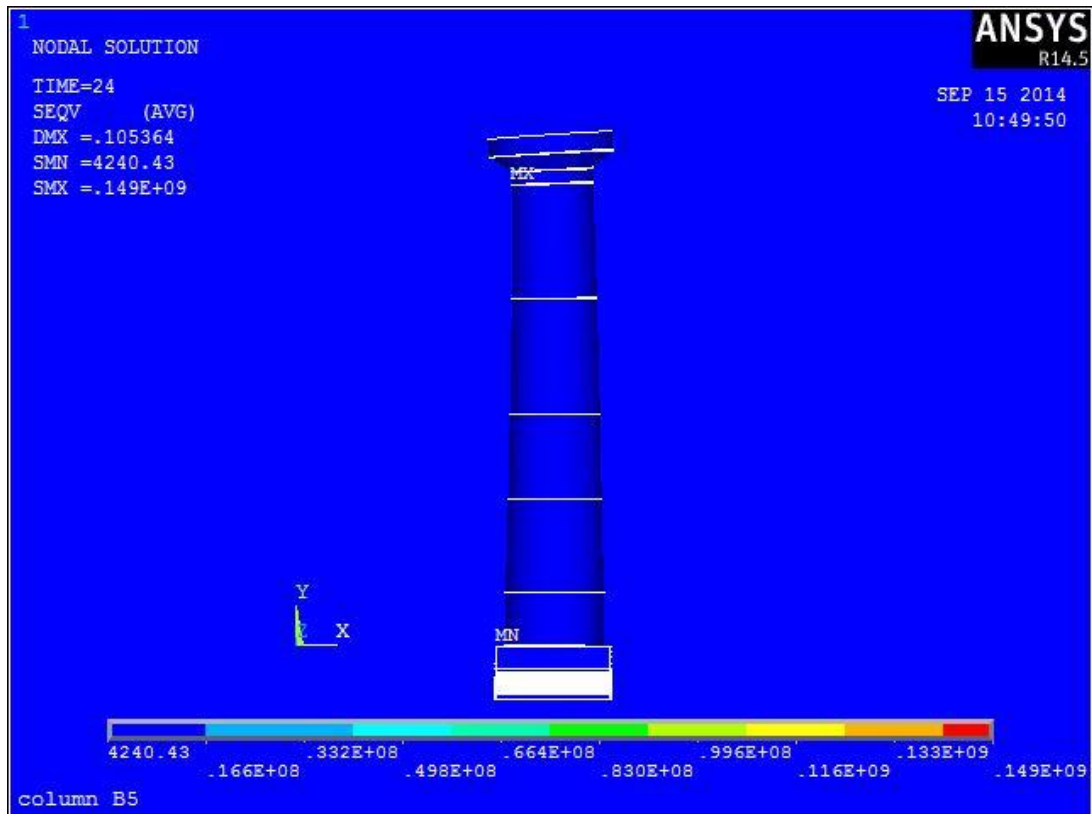
Οι εικόνες 6.23, 6.24, και 6.25 αναπαριστούν τις τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 2 σε διάφορες χρονικές στιγμές. Παράλληλα παρατίθενται και οι εικόνες 6.26, 6.27 και 6.28 που αναπαριστούν τις μετατοπίσεις του κίονα στη χ-διεύθυνση, επίσης σε διάφορες χρονικές στιγμές.



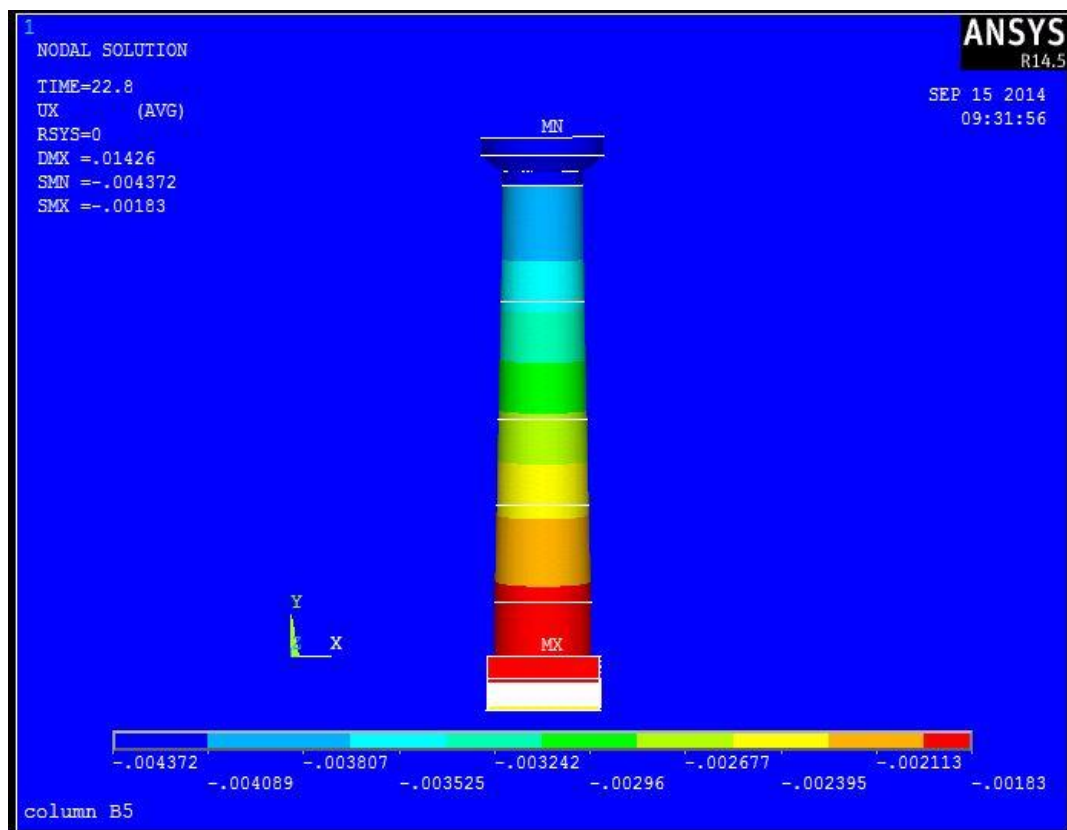
**Εικόνα 6.23 :** Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 2 για  $t=21s$



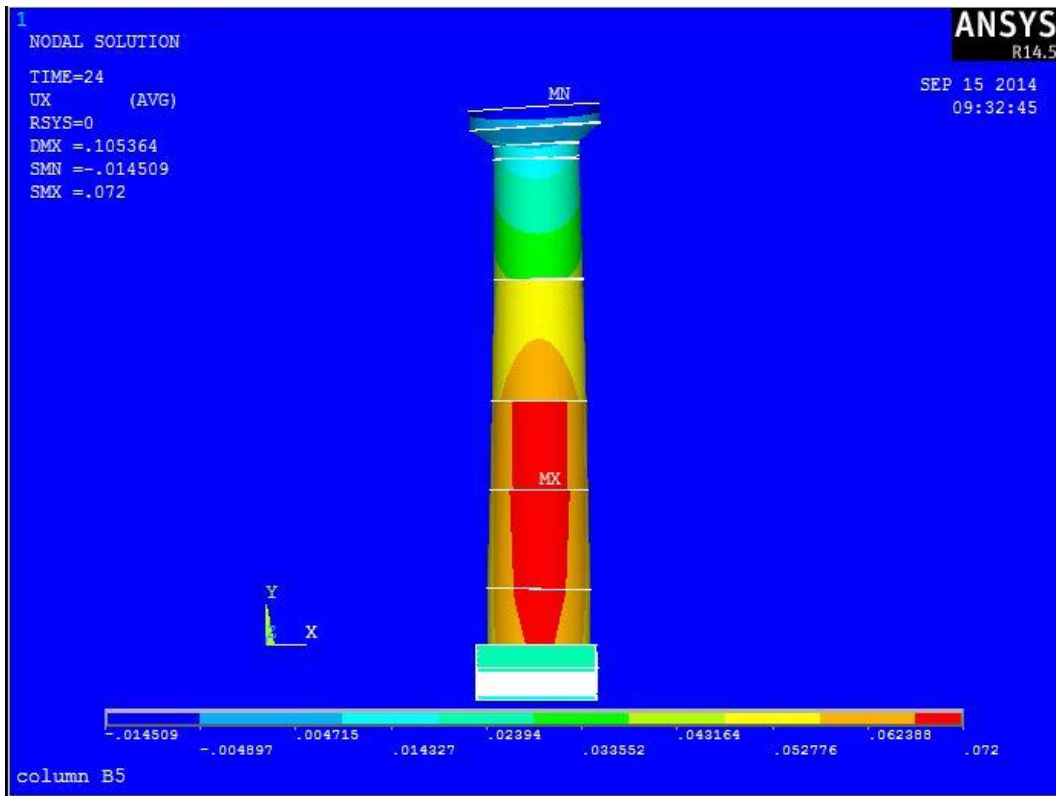
**Εικόνα 6.24 :** Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 2 για  $t=21.5s$



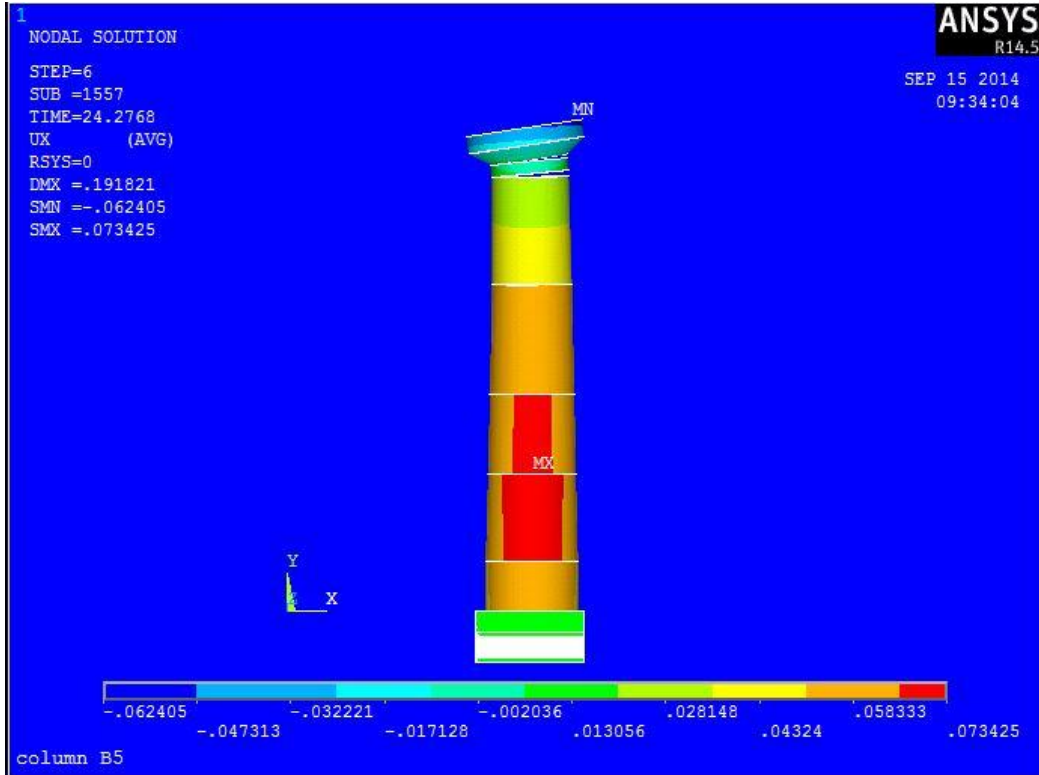
Εικόνα 6.25 : Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο τύπου 2 για  $t=24s$



Εικόνα 6.26 : Μετατοπίσεις στη χ-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο τύπου 2 για  $t=22.8$

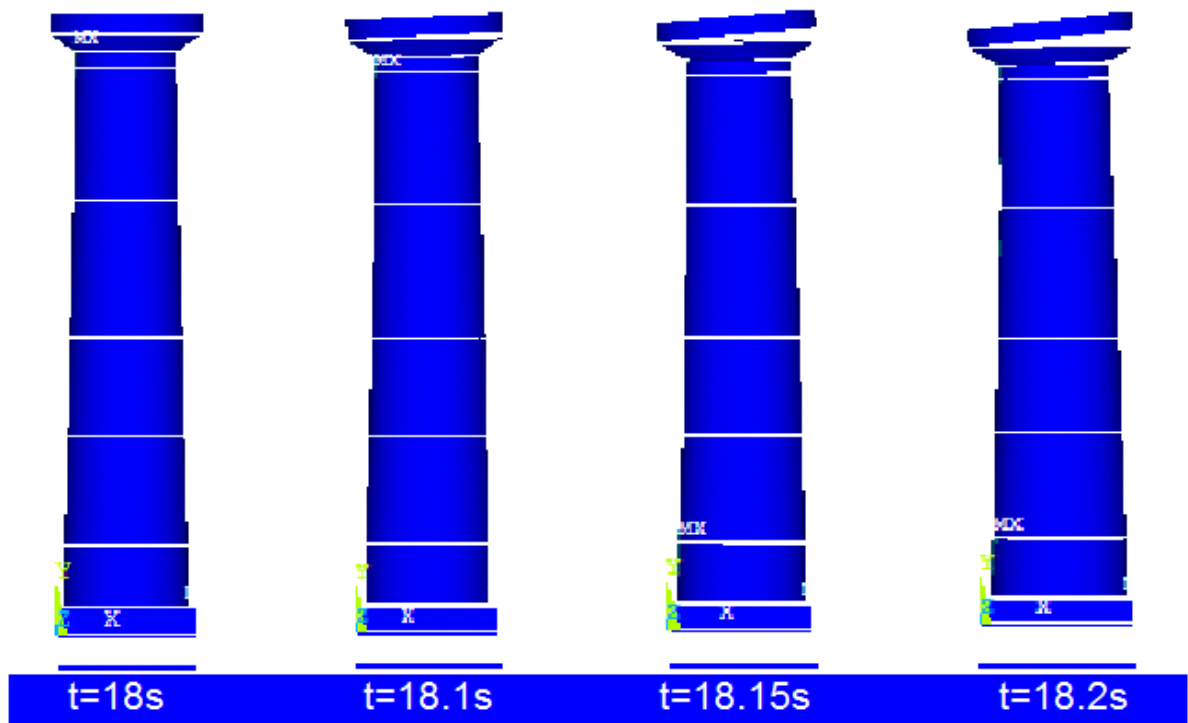


**Εικόνα 6.27 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο τύπου 2 για  $t=24s$



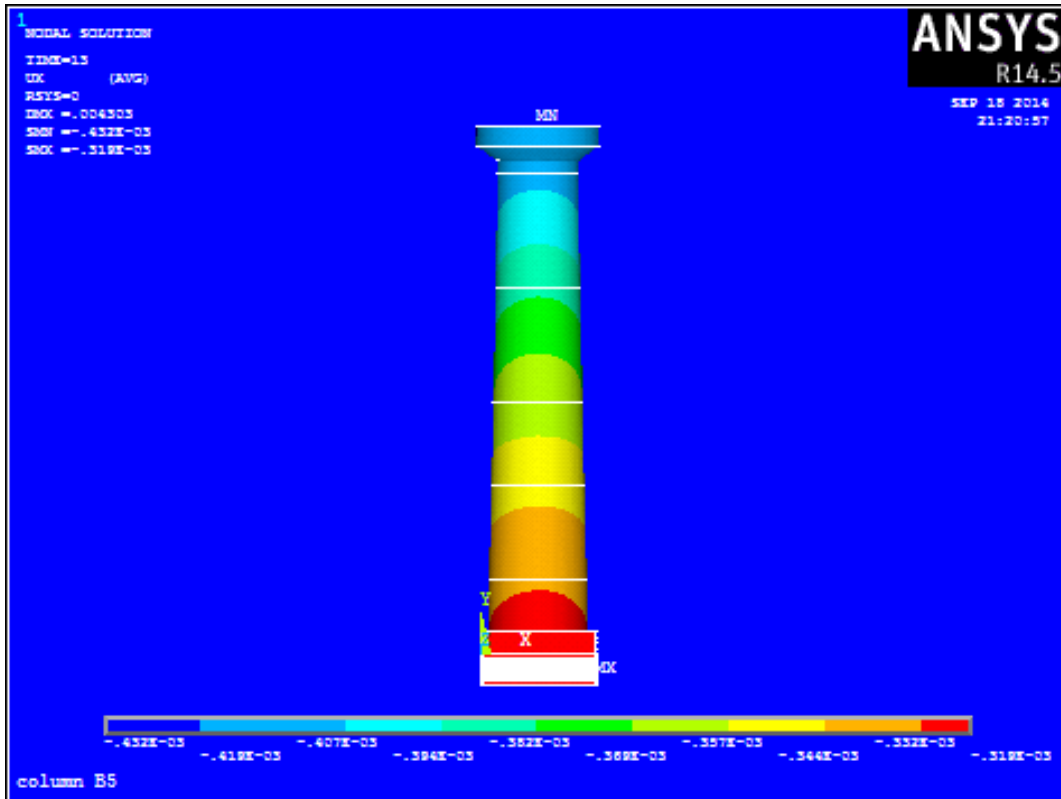
**Εικόνα 6.28 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο τύπου 2 για  $t=24.2768s$

### 6.3.4 Εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου

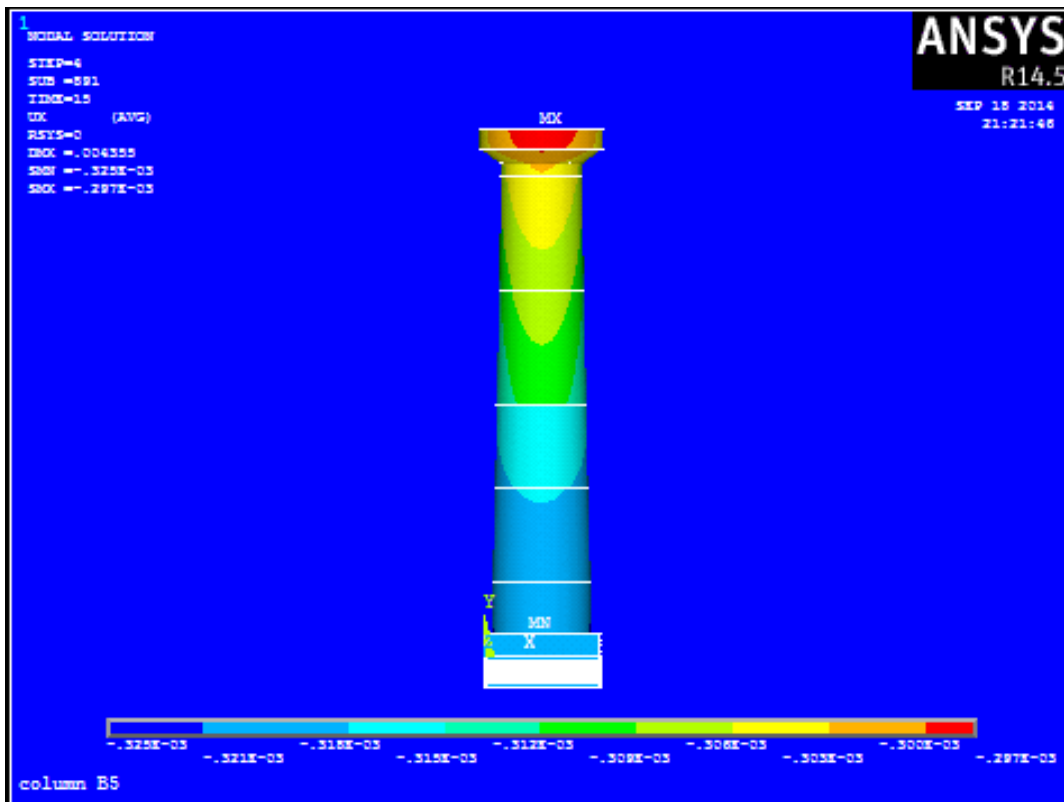


**Εικόνα 6.29 :** Κίονας με εφέδρανο πυρήνα μολύβδου σε τέσσερις διαδοχικές στιγμές

Οι εικόνες 6.30, 6.31, 6.32, 6.33 και 6.34 αναπαριστούν τις μετατοπίσεις του κίονα στη  $x$ -διεύθυνση, σε διάφορες χρονικές στιγμές. Παράλληλα παρατίθενται και οι εικόνες 6.35, 6.36, 6.37 και 6.38 που αναπαριστούν τις τάσεις Von Mises πάνω στον κίονα σε διάφορες χρονικές στιγμές.

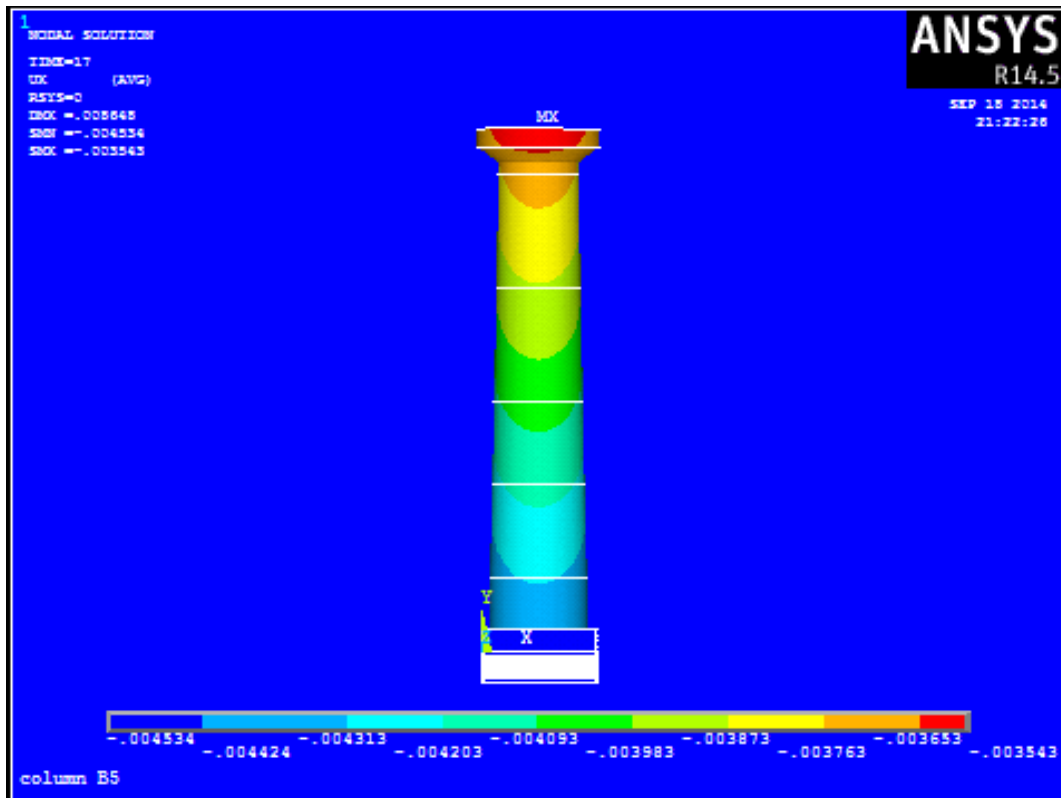


**Εικόνα 6.30 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου για  $t=13s$

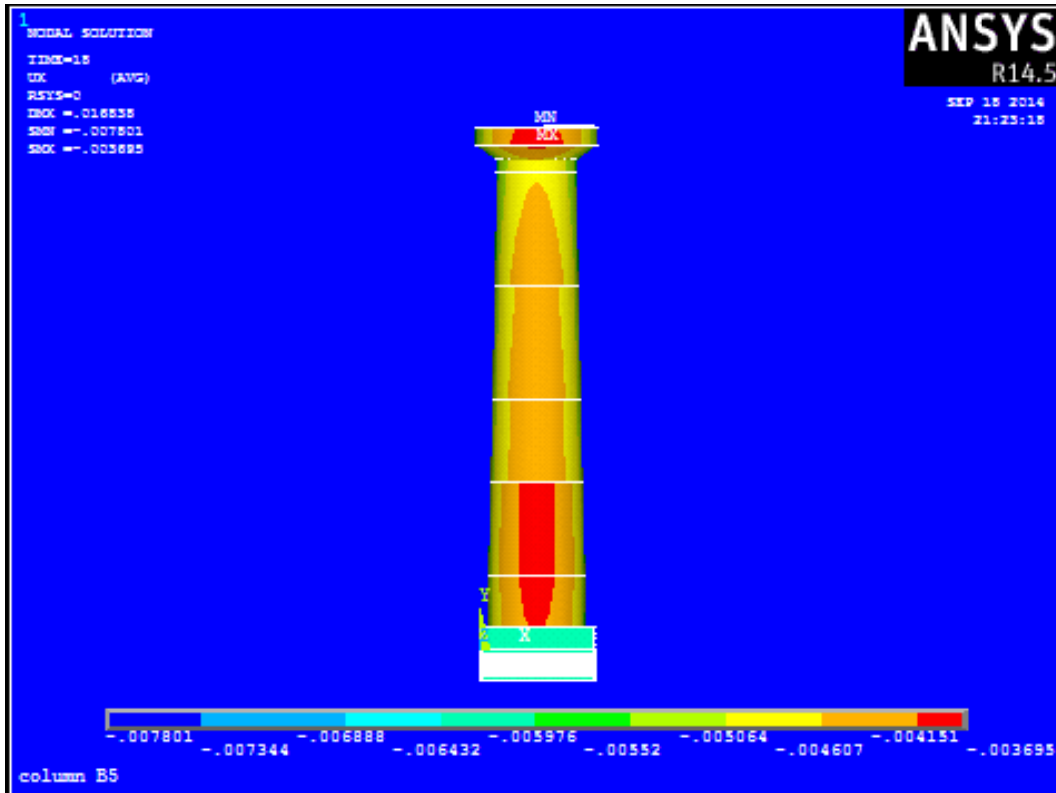


**Εικόνα 6.31 :** Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου για  $t=15s$

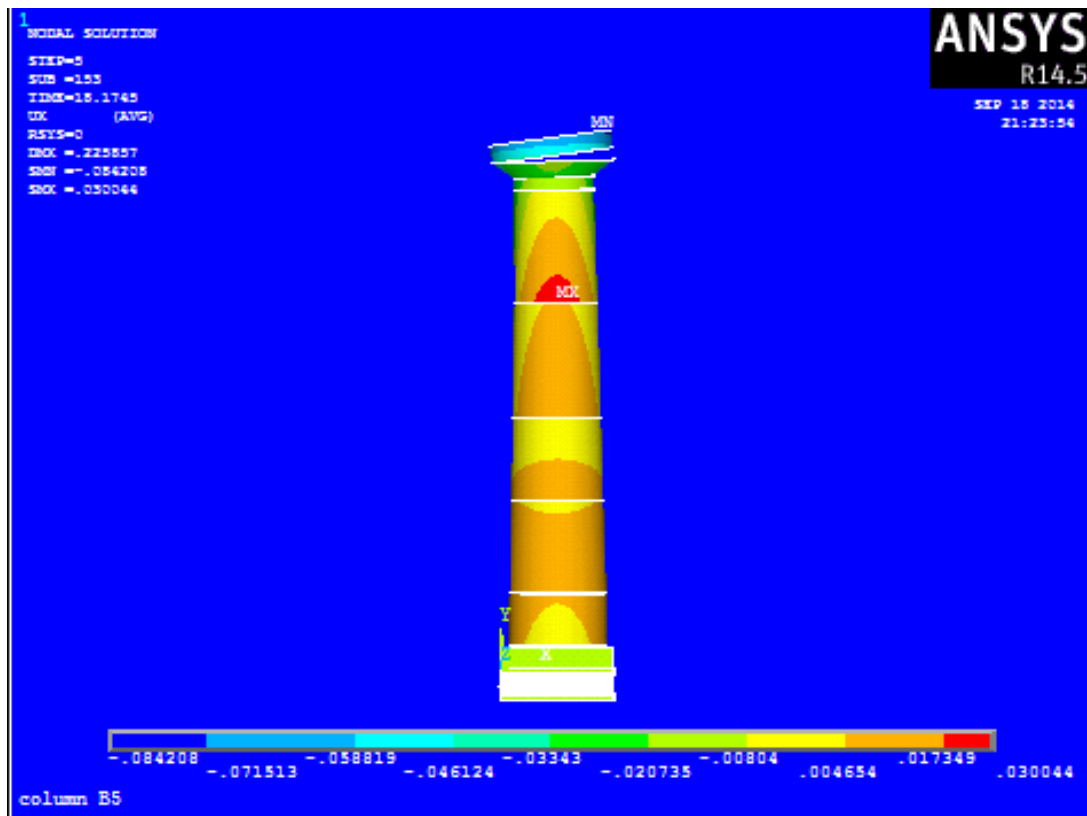




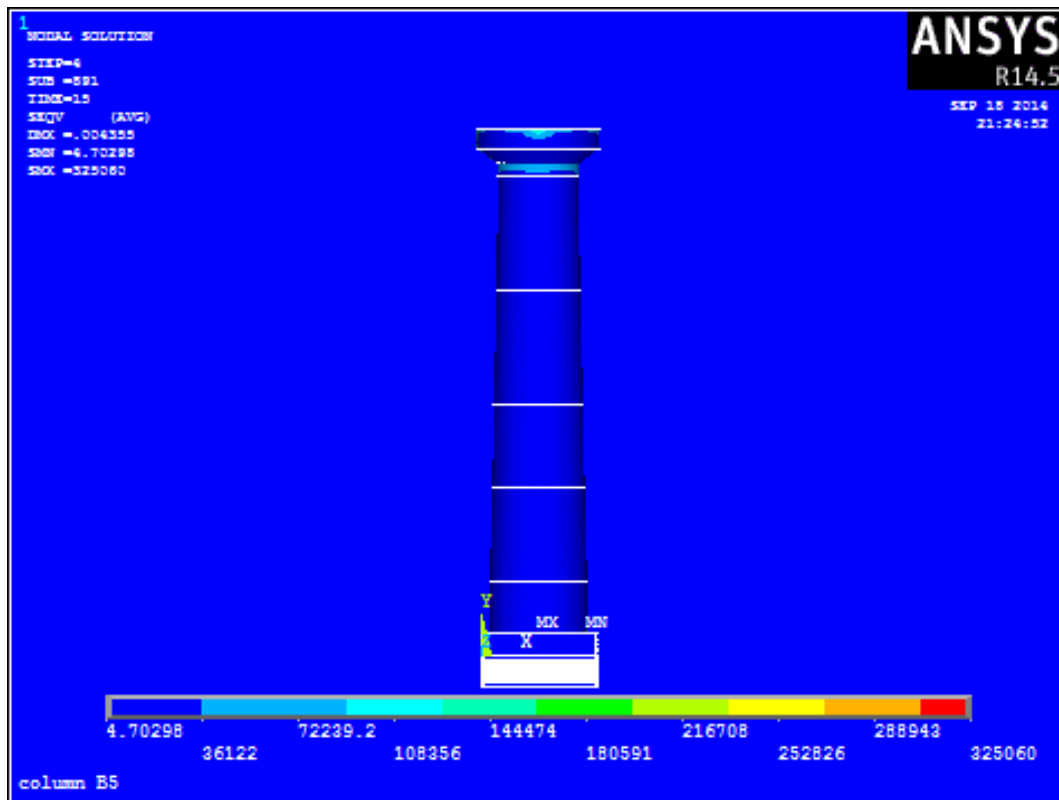
**Εικόνα 6.32 :** : Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου για t=17s



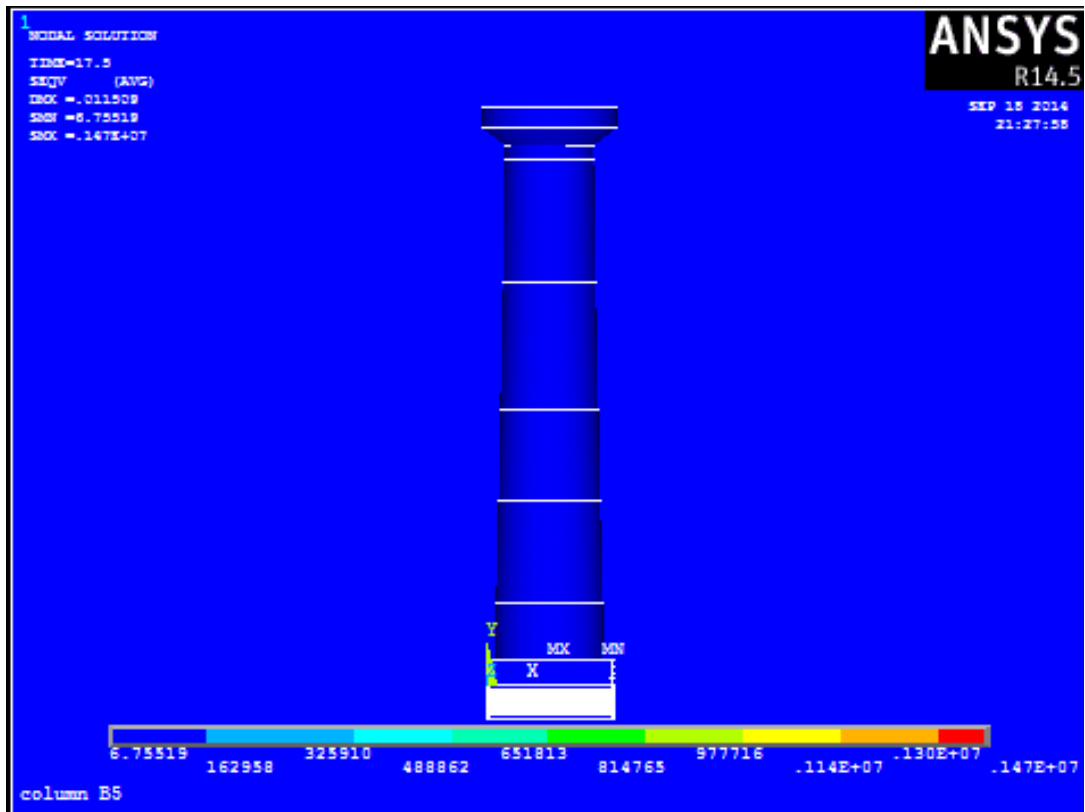
**Εικόνα 6.33 :** : Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου για t=18s



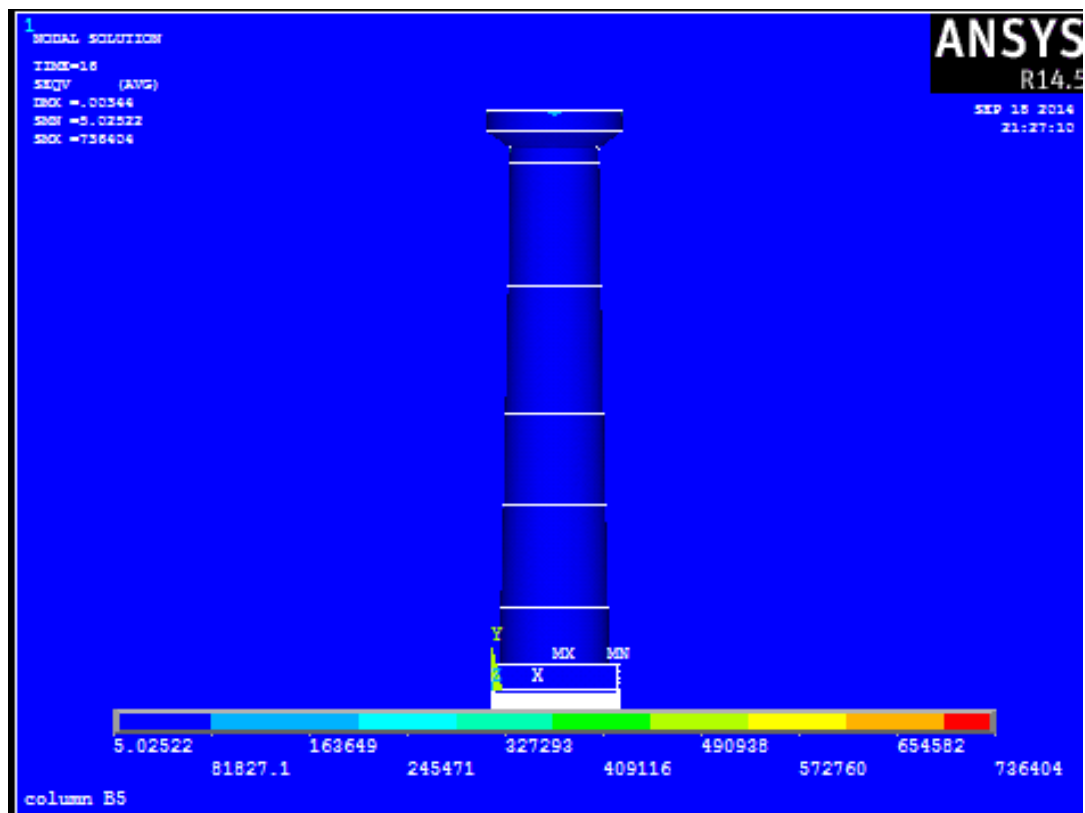
**Εικόνα 6.34** : : Μετατοπίσεις στη x-διεύθυνση του κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου για  $t=18.175s$



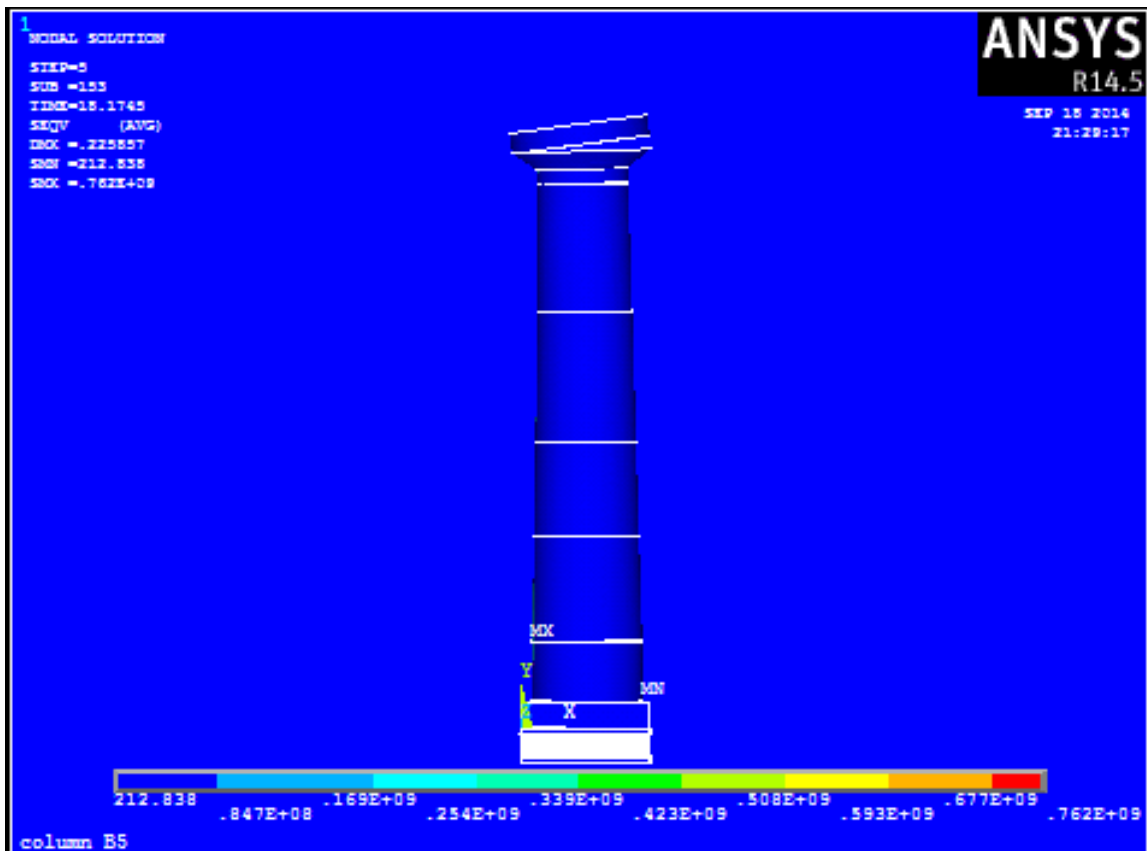
**Εικόνα 6.35** : Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου για  $t=15s$



Εικόνα 6.36 : Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου για  $t=17.5s$



Εικόνα 6.37 : Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου για  $t=18s$



**Εικόνα 6.38** : Τάσεις Von Mises στον κίονα με εφέδρανο με πυρήνα μολύβδου για  $t=18.175s$

## 7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη παρούσα πτυχιακή εργασία, μελετήθηκε η σεισμική απόκριση ενός αρχαίου σπονδυλωτού κίονα. Ο συγκεκριμένος κίονας αποτελεί μέρος του Επικούριου ναού του Απόλλωνα των Βασσών. Για το σκοπό αυτό υιοθετήθηκε η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων προκειμένου να μοντελοποιηθεί αριθμητικά το πρόβλημα. Κατά την μοντελοποίηση ακολουθήθηκε πιστή απεικόνιση της γεωμετρίας ενός κίονα του ναού βάσει πραγματικών αρχιτεκτονικών σχεδίων. Αρχικά θεωρήθηκε ότι ο κίονας εδράζεται άμεσα στο έδαφος όπως άλλωστε ισχύει στην πραγματικότητα. Μεταξύ των σπονδύλων θεωρήθηκαν κατάλληλες συντοριακές συνθήκες επαφής ώστε να προσομοιωθεί ξηρά επαφή τύπου Coulomb με κατάλληλο στατικό και κινητικό συντελεστή τριβής. Τέλος θεωρήθηκε ότι ο ναός φέρει συγκεκριμένο θλιπτικό φορτίο άνω μέρος του βάσει των στοιχείων που υποστυλώνει.

Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκε στατική ανάλυση της κολώνας όπου και αποδείχθηκε ότι οι αναπτυσσόμενες τάσεις δεν είναι ικανές να οδηγήσουν την κατασκευή σε αστοχία. Στη δεύτερη φάση της μελέτης θεωρήθηκε ένα σεισμικό φορτίο μεγάλης επιτάχυνσης. Συγκεκριμένα υιοθετήθηκε το έντονο σεισμικό φάσμα που παρατηρήθηκε προσφάτως (02/03/2014) στο νησιωτικό χώρο της Κεφαλονιάς. Η πρώτη ανάλυση απέδειξε ότι η συγκεκριμένη σεισμική φόρτιση οδηγεί σε ανατροπή τους σπονδύλους του κίονα στο χρονικό σημείο μέγιστη μετατόπισης του εδάφους. Η δε ανάλυση των τάσεων προφανώς έδειξε θραύση των άκρων των μαρμάρινων σπονδύλων πριν ακόμα την ανατροπή. Στο τρίτο στάδιο της παρούσας εργασίας εξετάστηκε η επίδραση της προσθήκης κατάλληλου αντισεισμικού εφεδράνου υψηλής απόσβεσης στο κάτω τμήμα του κίονα. Το συγκεκριμένο εφέδρανο θεωρήθηκε ότι φέρει εναλλάξ στρώσεις φυσικού καουτσούκ και χάλυβα. Η ανάλυση έδειξε ότι το εφέδρανο απλά καθυστερεί αλλά δεν αποτρέπει την ανατροπή του κίονα. Αυξάνοντας το συνολικό πάχος των στρώσεων καουτσούκ η ανάλυση έδειξε ότι η ανατροπή των σπονδύλων καθυστερεί ακόμα περισσότερο. Παρόλα ταύτα σε κάθε περίπτωση οι μετατοπίσεις που ελήφθησαν υπό την παρουσία του αντισεισμικού εφεδράνου μειώθηκαν αισθητά σε όλη τη διάρκεια του σεισμικού χρόνου και πριν φυσικά την ανατροπή.

Μελλοντική έρευνα αποτελεί η εύρεση των τελικών κατασκευαστικών λεπτομερειών, που ίσως απαιτούν την εισαγωγή πρόσθετων στοιχείων υψηλότερης απόσβεσης, ενός εφεδράνου που δύναται να αντιμετωπίσει ένα τόσο έντονο σεισμικό φαινόμενο από πλευράς επιτάχυνσης.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Δ. Σβολόπουλος, Ναός Επικούριου Ναού των Βασσών - Αρχιτεκτονική μελέτη, Αθήνα, 1995.
2. Παπαντωνόπουλος Κωνσταντίνος, Αρχαία μνημεία υπό σεισμική δράση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2000
3. Εφαρμογή της σεισμικής μόνωσης σαν μέθοδος σεισμικής αναβάθμισης υφιστάμενης γέφυρας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009
4. Michael I. Friswell, John E.T. Penny, Seamus D. Garvey, Arthur W.Lees, Dynamics of Rotating Machines, Cambridge University Press, New York, 2010
5. [www.gkdata.gr](http://www.gkdata.gr)
6. [www.geodifhs.com](http://www.geodifhs.com)