



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ

*Σχεδιασμός υδραυλικής σεισμικής τράπεζας δυο βαθμών  
ελευθερίας για την επιβολή ισχυρών κατακόρυφων σεισμικών  
κινήσεων σε κτήρια*

Διπλωματική Εργασία

ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΤΣΟΛΑΚΗΣ

Επιβλέπων : Αναπληρωτής Καθ. Β. Σπιτάς

ΑΘΗΝΑ 2014

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύσσεται και περιγράφεται ο σχεδιασμός σεισμικής τράπεζας δύο βαθμών ελευθερίας, για την επιβολή ισχύρων κινήσεων σε κτήρια. Η μελέτη αυτή εκπονήθηκε για το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στόχος της ήταν η μηχανή που σχεδιάστηκε να μπορεί να κατασκευαστεί εντός του Ιδρύματος. Ως εκ τούτου, ο πυρήνας αυτής, αφορούσε την επίτευξη υψηλών επιδόσεων με το ελάχιστο δυνατό κόστος ανάπτυξης. Για την υλοποίηση αυτού του στόχου, ο σχεδιασμός που προτείνεται διαφέρει από τις υπάρχουσες λύσεις που επικρατούν μέχρι σήμερα, στην βραδέως εξελισσόμενη περιοχή της σχεδίασης σεισμικών τραπεζών. Η προσέγγιση που ακολουθήθηκε αφορούσε την ελαχιστοποίηση των βιομηχανικών εξαρτημάτων ενεργοποίησης και ελέγχου της κίνησης, μέσω διάταξης ανεξάρτητων πλατφορμών και ανεξάρτητων υδραυλικών υπομονάδων. Στο κείμενο που ακολουθεί αναπτύσσονται εκτενώς τα χαρακτηριστικά αυτού του σχεδιασμού και δικαιολογούνται οι επιλογές που ληφθηκαν. Στην συνέχεια, προς επιβεβαίωση της αξιόπιστίας της λειτουργίας παρατείνονται έλεγχοι που έγιναν αναφορικά με τα στατικά και δυναμικά χαρακτηριστικά των κεντρικών στοιχείων της μηχανής. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν την διαδικασία και προτείνονται σχέδια μελενοντικής επέκτασης του σχεδιασμού.



# ABSTRACT

Near-source earthquakes are becoming increasingly frequent due to rapid urbanization of the environment and their repercussions in terms of property and life loss are getting more and more important despite the improvements in structural design and practice [1-2]. For simulating such events in the laboratory, two different approaches are being made: the first is to simulate the inertial-force loading through a single or multiple degrees-of-freedom (DOFs) on a moving platform (shaking table) [3-6], and the other is through a pseudo-dynamic loading of structures using high-capacity hydraulic actuators [7-9]. While the shaking table is deemed more suitable due to the intrinsic principle of operation, pertaining closer to the actual phenomenon than the pseudo-dynamic method[10], the associated installation and operational cost render it more costly and hard to find[11-12].

Despite the advances in manufacturing materials and their availability[i.e. lightweight aluminum-magnesium alloys and honeycombs, composite laminates and sandwich panels] the design of shaking tables is essentially unaltered during the last few decades. Existing designs involve single or multi-DOF arrangements, which are almost exclusively hydraulically servo-actuated through a series of linear actuators (cylinders) and focus on simulating mainly the horizontal components of strong ground motions.

Nevertheless recent recorded seismic events have illustrated that apart from the horizontal components, strong vertical ground motions can also occur ( IWATE, CHRISTCHURCH) [13-14] .Existing shake tables cannot simulate such events in terms of either acceleration, velocity, or displacement[11].

In this paper a new design of a shaking table is proposed for simulating strong vertical accelerations also coupled with a horizontal ground motion component. Contrary to existing designs, the proposed one employs a lightweight double-platform configuration, each actuated by dedicated servo-controlled hydraulic cylinder. Additional savings are being made through the use of an array of accumulators, which provide the energy required for testing. Important design issues regarding guiding systems and anti-sloshing solutions for the mounted tank are also discussed.



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική εργασία αποτελεί ίσως το σημαντικότερο κομμάτι των σπουδών ενός φοιτητή της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών καθότι συνοψίζει και αξιοποιεί ένα πολύ σημαντικό μέρος των γνώσεων που έλαβε κατά την διάρκεια τους. Προσωπικά όμως, η παρούσα διπλωματική εργασία, ήταν κάτι πολύ σημαντικότερο της σύνοψης γνώσεων που είχα ήδη λάβει κατά την φοίτησή μου στο Ε.Μ.Π., καθότι απέτέλεσε για μένα ίσως πιο σημαντικό τεχνικό εγχείρημα που είχα την τύχη να ασχοληθώ μέχρι τώρα. Περισσότερο όμως με βοήθησε να αντιληφθώ την έννοια της "τεχνικής προσωπικότητας" για έναν μηχανικό, αλλά και να καταλάβω πως τα όρια των δυνατοτήτων κάποιου τίθενται από την πρώτη στιγμή που, εκούσια ή ακούσια, αρχίζει να λαμβάνει γνώσεις επιλεκτικά.

Για τον λόγο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή και επιβλέποντα της εργασίας μου Δρ. Β. Σπιτά, που εκτός από την συνεχή ενασχόληση και υπομονή του, μου έδωσε την δυνατότητα να μελετήσω ένα πρόβλημα, η λύση του οποίου, την στιγμή που το ξεκίνησα, υπερέβαινε συνολικά τις δυνατότητές μου ως μηχανικό και ως χαρακτήρα. Κυρίως όμως, τον ευχαριστώ για την βοήθεια του να πιστεύω πως τα δεδομένα αυτά, είναι τελείως διαφορετικά την στιγμή της συγγραφής

Υπό το ίδιο ακριβώς πρίσμα, οφείλω να ευχαριστήσω ονομαστικά κάποια μέλη του Εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών. Αρχικά τον φίλο και συνεργάτη Τρύφωνα Λαμπρόπουλο, για την μεγάλη βοήθεια και στήριξη που προσέφερε, όταν ο προσωπικός του χρόνος ήταν ελάχιστος. Κυρίως όμως για την συμβολή του να μην υποπέσω σε τεχνικά σφάλματα που είχε ο ίδιος αντιμετωπίσει κατά την δική του διπλωματική εργασία στο εργαστήριο και να έχω ως εκ τούτου περισσότερο παραγωγικό χρόνο για την υπόλοιπη εργασία. Θα ήταν επίσης ατόπημα από μέρους μου να μην ευχαριστήσω

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

τον Γιώργο Μαυρίκα και τον Τέλη Νταρούις για τη προσωπική τους στήριξη και για τις πολύ χρήσιμες ιδέες και τεχνικές απόψεις που ανταλλάξαμε κατά την πορεία αυτής της εργασίας. Κάτι το οποίο έλαβα και από τον Άντρεά Μαυρίδη, τον Χρίστο Βακουφτσή και τον Νίκο Κομιτόπουλο. Για παρομοίους λόγους ευχαριστώ τους δύο προσωπικούς μου φίλους Γιώργο Βασιλείου και Νίκο Καψαμπέλη, τους Γιάννη Βασιλείου, Φίλιππο Μπεσμέρτη, Ιώαννη Κανελλόπουλο καθώς και τα υπόλοιπα παιδιά του Εργαστηρίου Στοιχείων Μηχανών.

Θα ήθελα επιπροσθέτως να ευχαριστήσω τον Δρ. Χ. Μουζάκη, του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., για την ενεργή επιστημονική και τεχνική του συνεισφορά κατά την διάρκεια της θέσπισης των παραμέτρων του σχεδιασμού αλλά και για όλες τις παραγωγικές συζητήσεις κατά την διάρκεια αυτής της δουλείας.

Τέλος για τα άτομα εκείνα που με στήριξαν και με στηρίζουν καθημερινά επιλέγω να μην αναφερθώ ονομαστικά, αφού η ίδια η ολοκλήρωση της παρούσας δουλείας εκφράζει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο την ευγνωμοσύνη μου.





Αφιερώνεται,  
στους γονείς μου



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>1. Εισαγωγή</b>	<b>σελ.15</b>
<b>2. Σχεδιαστικές Αποφάσεις</b>	<b>σελ.18</b>
2.1. Εισαγωγή	
2.2. Χαρακτηριστικά Σεισμικών Τραπεζών	
2.3 Χαρακτηριστικά Νέου Σχεδιασμού	
<b>3. Απαιτήσεις Λειτουργίας</b>	<b>σελ.27</b>
3.1 Εισαγωγή	
3.2 Οριακά Σεισμογραφήματα	
3.2.1 Οριζόντια Συνιστώσα	
3.2.2 Κατακόρυφη συνιστώσα	
3.3 Χαρακτηριστικά Μελετούμενου Δοκιμίου	
<b>4. Λειτουργίας Σερβοβαλβίδων</b>	<b>σελ.32</b>
4.1 Χαρακτηριστικά Σερβοβαλβίδων	

4.2 Απαιτήσεις συστήματος

**5. Υλοποίηση Σχεδιασμού** **σελ.38**

5.1 Εισαγωγή

5.2 Μονάδα Συσσωρευτών

5.2.1 Εκλογή Συσσωρευτών

5.2.2 Υλοποίηση Σταθερής Παροχής

5.3 Υδραυλικό Κύκλωμα

5.3.1 Ανάγκες Υδραυλικού

5.3.2 Φάσεις Πειράματος

5.3.3 Πίνακας Εξαρτημάτων

5.3.4 Μοναγραμμικό Διάγραμμα

5.4 Σχεδιασμός Φορέων

**6. Ενδοτικότητα Δικτυώματος** **σελ.56**

6.1 Εισαγωγή

6.2 Ιδιοσυχνότητες Άνω Φορέων

**7. Έλεγχοι Αντοχής** **σελ.66**

7.1 Εισαγωγή

7.2 Τμήματα Επενεργητών

7.2.1 Επενεργητές

7.2.2 Σύνδεση Εμβόλων

7.2.3 Βάκτρα

7.3 Δικτυώματα

**8. Σχολιασμός Αποτελεσμάτων** **σελ.75**

8.1 Εισαγωγή

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

8.2 Σύνοψη Αποτελεσμάτων

9. Μελλοντική Ανάπτυξη

σελ.81

10. Βιβλιογραφία

σελ.84



# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πρόσφατη ανάπτυξη του αστικού περιβάλλοντος και ο ταχύς ρυθμός με τον οποίο αυτή συντελείται, έχει εντείνει την επικινδυνότητα των σεισμών υψηλού εστιακού βάθους. Παρόλη την πρόσφατη τεχνολογική ανάπτυξη στο πεδίο των κατασκευών, τέτοιοι σεισμοί, εξακολουθούν να έχουν ιδιαίτερα σφοδρές επιπτώσεις, στοιχίζοντας τόσο σε ανθρώπινες ζωές όσο και περιουσίες.

Στην προσπάθεια προσομοίωσης αυτών των γεγονότων σε εργαστηριακό επίπεδο, έχουν αναπτυχθεί δύο κύριες τεχνικές. Η πρώτη αφορά αφορά την άμεση επιβολή αδρανειακών φορτίων σε κατασκευές, μέσω σεισμικών προσομοιωτών (shake table simulation) ενός η περισσότερων βαθμών ελευθερίας. Η δεύτερη αφορά την μίμηση αυτών των φορτίων με ψευδο-δυναμική άσκησή τους, μέσω υδραυλικών επενεργητών (reaction wall simulation). Ενώ τα πειράματα μέσω σεισμικών τραπεζών μπορούν να προσομοιάσουν πιστότερα την φυσική αρχή του φαινομένου από ότι τα αντίστοιχα ψευδοδυναμικά, το υψηλό κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας αυτών των μηχανών, τις καθιστά ιδιαίτερα σπάνιες.

Παρά την πρόοδο στον τομέα των υλικών, της μείωσης του κόστους και τις εμπορευσιμότητάς τους, αλλά και την εμφάνιση φορέων χαμηλού βάρους-υψηλής στιβαρότητας ( honeycombs , sandwich panels , aluminum-magnesium alloys ), ο σχεδιασμός των σεισμικών τραπεζών έχει μείνει πρακτικά στάσιμος κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Οι υπάρχουσες κατασκευές αποτελούνται από διατάξεις ενός ή περισσότερων βαθμών ελευθερίας και λειτουργούν σχεδόν αποκλειστικά μέσω σέρβο-υδραυλικών επενεργητών, ενώ οι περισσότερες από αυτές επικεντρώνονται κυρίως στην προσομοίωση της οριζόντιας συνιστώσας ενός σεισμού.



Πρόσφατα σεισμικά γεγονότα όμως έδειξαν ότι εκτός των οριζόντιων συνιστωσών, μπορεί σε έναν σεισμό να εμφανίζονται και ιδιαίτερα ισχυρές κατακόρυφες συνιστώσες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο σεισμός που έλαβε χώρα στη πόλη Iwate της Ιαπωνίας (2008), όπου κατεγράφησαν μετατοπίσεις εδάφους πάνω από 1,6m και επιταχύνσεις κοντά στα 4g. Οι υπάρχουσες σεισμικές τράπεζες αδυνατούν να προσομοιάσουν πλήρως ένα τέτοιο γεγονός, τόσο σε όρους μετατόπισης όσο και σε συνδυασμό μετατόπισης και επιτάχυνσης. Ως εκ τούτου η έρευνα αντισεισμικού σχεδιασμού έναντι τέτοιων γεγονότων παραμένει πρακτικά στάσιμη.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός και η μελέτη για την ανάπτυξη και την κατασκευή μιας σεισμικής τράπεζας που να δύναται να προσομοιάσει σεισμούς ισχυρής οριζόντιας συνιστώσας ( Kobe , Northridge ), αλλά κυρίως σεισμούς με ισχυρή κατακόρυφη, όπως αυτός του Iwate. Επιπλέον, επειδή ο στόχος είναι αυτή η μηχανή να κατασκευαστεί στα πλαίσια του Ε.Μ.Π., δομική προδιαγραφή του σχεδιασμού ήταν η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής και ανάπτυξής της.

Στα κεφάλαια που ακολουθούν, παρουσιάζονται όλα τα στάδια από την θέσπιση των προδιαγραφών της μηχανής μέχρι την τελική μορφή της, ενώ παράλληλα ερμηνεύονται οι επιλογές που έγιναν. Επιπλέον παρουσιάζονται οι αναγκαίοι έλεγχοι και υπολογισμοί που καθιστούν την μηχανή κατασκευάσιμη και ελέγξιμη. Τέλος δικαιολογείται η επιλογή των κύριων εμπορεύσιμων εξαρτημάτων της και ενώ παραθέτονται τα σχέδια των βασικών κατασκευάσιμων τμημάτων της.



## 2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΕΣ ΑΠΟΦΑΣΕΙΣ

### 2.1 . Εισαγωγή

Οι σεισμικές τράπεζες όπως και κάθε τεχνολογικό επίτευγμα, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν με σκοπό να υπηρετήσουν μια ανάγκη. Την ανάγκη να κατανοηθούν τα σεισμικά γεγονότα που έχουν πλήξει κατοικημένες περιοχές, να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά τους, με τελικό σκοπό να σχεδιαστούν κατασκευές, οι οποίες να είναι οχυρωμένες έναντι αυτών.

Όπως συμβαίνει πάντα όμως σε ένα τεχνολογικό πεδίο, η βελτίωση και οι αναβάθμιση του οδηγείται πάντοτε από μια νέα τεχνική πρόκληση. Στο πεδίο του αντισεισμικού σχεδιασμού, αυτή η πρόκληση ήταν τα σεισμικά γεγονότα όπως αυτά του Iwate (2008) και του Christchurch (2011), για τους λόγους που αναφέρθηκαν στο κεφ.1. Παρόλα αυτά, μια σειρά χαρακτηριστικών που εμφανίζονται σχεδόν σε κάθε design σεισμικής τράπεζας αν τον κόσμο, είναι και λόγος που μέχρι σήμερα έχει δράσει ανασταλτικά στην περαιτέρω βελτίωσή του.

Στον παρόν κεφάλαιο γίνεται η παράθεση αυτών των κύριων χαρακτηριστικών, εν συνεχεία σχολιάζονται τα μειονεκτήματά τους. Τέλος παρουσιάζονται οι βασικές σχεδιαστικές αποφάσεις που πάρθηκαν κατά την παρούσα διπλωματική εργασία, με σκοπό να κατασκευαστεί μια νέα σεισμική τράπεζα που να καλύπτει τις νέες ανάγκες στον πεδίο του αντισεισμικού σχεδιασμού, με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

## 2.2. Χαρακτηριστικά σεισμικών τραπεζών

Είναι αναγκαίο να γίνει σαφές ότι οι σεισμικές τράπεζες είναι μηχανές υψηλής τεχνολογικής αξίας και ένα από τα σημαντικότερα τεχνολογικά επιτεύγματα στο πεδίο δυναμικής και των μεταδόσεων κίνησης. Σε καμία περίπτωση λοιπόν ο σχεδιασμός τους δεν έχει μείνει στάσιμος για λόγους που έχουν να κάνουν με το εύρος των αντίστοιχων σύγχρονων τεχνολογικών δυνατοτήτων.

Αντίθετα λόγω της υψηλής ποιότητας του σχεδιασμού τους, αυτά τα μηχανήματα είναι ιδιαίτερος ακριβά. Χαρακτηριστικά αναφέρεται, πως για μια σχετικά απλή σεισμική τράπεζα ενός οριζόντιου βαθμού ελευθερίας, το κόστος της κυμαίνεται σε τάξη μεγέθους εκατομμυρίων ευρώ. Συνεπώς, η αναβάθμιση τους έτσι ώστε να καλύψουν τις ανάγκες ενός ασυνήθιστα μεγάλου σεισμού, συνεπάγεται και ένα αντίστοιχα αυξημένο κόστος, σε σχέση με το ήδη υψηλό.

Τρία είναι τα κύρια χαρακτηριστικά, που οδηγούν στο αυξημένο κόστος των επενεργητών από το πιο απλό στάδιο κατασκευής τους:

### 1. Τρόπος χρήσης των επενεργητών:

Σε κάθε προσομοιωτή πραγματικής κλίμακας, η κίνηση του δοκιμίου γίνεται με τη χρήση υδραυλικών επενεργητών. Οι επενεργητές αυτοί, λειτουργούν μέσω σερβοβαλβίδων, οι οποίες συγχρονίζουν την κίνησή τους με την κίνηση των υπολοίπων σύμφωνα με το σήμα του σεισμού. Τις περισσότερες φορές απαιτούνται περισσότεροι από ένας επενεργητές για την υλοποίηση μιας και μόνο κίνησης. Μάλιστα σχετικά με την υλοποίηση κατακόρυφων κινήσεων χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά ανά τέσσερις.

Ο λόγος για το πλήθος τους, είναι το γεγονός ότι εκτός από τον φυσικό τους ρόλο ( επιβολή κίνησης στο δοκίμιο ), οι κύλινδροι οφείλουν να παραλαμβάνουν και τα φορτία που προκύπτουν από την κίνηση των δοκιμίων. Οι ροπές ανατροπής όμως, είναι ανάλογες του δοκιμίου (βάρους και θέση κέντρου μάζας). Η παραλαβή τους λοιπόν επιβαρύνει ιδιαίτερα το μέγεθος των επενεργητών, καθώς και το σύστημα οδηγήσεών τους.

Ανάλογα με το μέγεθος του δοκιμίου λοιπόν, για την υλοποίηση ενός και μόνο βαθμού ελευθερίας της κίνησης του δοκιμίου, απαιτείται μεγάλος αριθμός

επενεργητών. Μάλιστα, για πειράματα πραγματικής κλίμακας, πολλές φορές η οδήγηση των επενεργητών, γίνεται μέσω ακριβών λύσεων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η σεισμική τράπεζα του E-DEFENSE στην Ιαπωνία, όπου ξεχωριστά υδραυλικά υποκυκλώματα ευθύνονται για την οδήγηση του βάκτρου του κάθε επενεργητή.

Το αποτέλεσμα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι οδηγεί σε χρήση περισσότερων των αναγκαίων EHSΑ για κάθε μια κίνηση. Περισσότεροι επενεργητές όμως σημαίνουν και χρήση περισσότερων των αναγκαίων σερβοβαλβίδων καθώς και αντίστοιχο κόστος ελέγχου και συγχρονισμού.

## 2. Είδος πηγών ισχύος:

Σχεδόν σε κάθε σεισμική τράπεζα πειραμάτων πραγματικής κλίμακας, η προσδιδόμενη ισχύς, που απαιτείται για την κίνηση του δοκιμίου, δίδεται από ένα σύστημα αντλιών θετικής μετατόπισης μεταβλητής παροχής. Οι αντλίες αυτές, εκτός του ότι είναι σχετικά ακριβά από την φύση τους, έχουν και δύο βασικούς περιορισμούς. Αρχικά, δεν μπορούν να διαχειριστούν ιδιαίτερα μεγάλες παροχές, για τον λόγο αυτό, σε περιπτώσεις όπου κάτι τέτοιο είναι αναγκαίο, ένα πλήθος τέτοιων αντλιών τοποθετούνται παράλληλα, αυξάνοντας το κόστος των μονάδων ισχύος κατ' αντιστοιχία με το μέγεθος της απαιτούμενης παροχής. Επιπλέον τόσο λόγω της ανάγκης διαχείρισης των υψηλών πιέσεων όσο και για την ανάγκη λειτουργίας με ελάχιστους παλμούς, αυτές οι αντλίες συνοδεύονται και από αντίστοιχα ρυθμιστικά υδραυλικά υποκυκλώματα, τα οποία αυξάνουν με την σειρά τους περαιτέρω το κόστος της μονάδας ισχύος.

## 3.Βάρος κινούμενων τμημάτων:

Ένα ακόμη χαρακτηριστικό που εμφανίζουν οι σεισμικές τράπεζες, είναι πως σχεδόν σε κάθε περίπτωση, το βάρος των μη ωφέλιμων κινούμενων τμημάτων ιδιαίτερα μεγάλο σε σχέση με εκείνο του δοκιμίου. Πολλές φορές μάλιστα αυτό καταλήγει να φτάνει σε τιμές που αγγίζουν μέχρι και το 80% του ωφέλιμου βάρους. Κάτι τέτοιο, όπως είναι λογικό, οδηγεί με την σειρά του στην ανάγκη περισσότερων και μεγαλύτερων υποσυστημάτων (πηγές ισχύος, επενεργητές, σερβοβαλβίδες κλπ.), αυξάνοντας αδικαιολόγητα το συνολικό κόστος της κατασκευής.

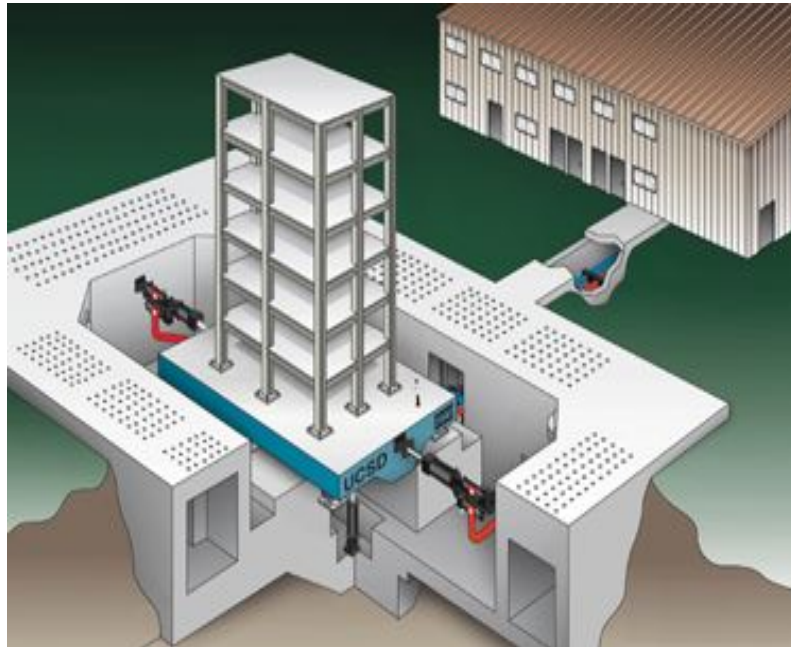
Στις παρακάτω φωτογραφίες, παρουσιάζονται μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα σεισμικών τραπεζών από διάφορα εργαστήρια να τον κόσμο. Στην πρώτη εικόνα

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

φαίνεται η σεισμική τράπεζα του E-DEFENSE, στην Ιαπωνία (πρόκειται για την μεγαλύτερη σεισμική τράπεζα στον κόσμο με κόστος κατασκευής που άγγιξε το 1 δισ. δολάρια), την σεισμική τράπεζα του San-Diego και την σεισμική τράπεζα της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. . Και τα τρία αυτά μηχανήματα ανήκουν στο "state of the art" της αντισεισμικής τεχνολογίας, έχουν όμως τα κοινά χαρακτηριστικά που προαναφέρθηκαν. Ως εκ τούτου το (κατά περίπτωση) κόστος κατασκευής τους είναι ιδιαίτερα υψηλό.



Σχήμα 2.1 : Σεισμική Τράπεζα E-DEFENSE



Σχήμα 2.2: Σεισμική Τράπεζα San Diego



Σχήμα 2.3 : Σεισμική Τράπεζα Ε.Μ.Π.

## 2.3 Χαρακτηριστικά νέου σχεδιασμού

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής ήταν ο σχεδιασμός μια σεισμικής τράπεζας δύο βαθμών ελευθερίας με δυνατότητα προσομοίωσης ισχυρών κατακόρυφων συνιστωσών. Η μεγαλύτερη όμως πρόκληση αυτού του εγχειρήματος, ήταν πως το συνολικό κόστος τους σχεδιασμού, δεν έπρεπε να ξεπερνάει τις 100.000 ευρώ. Ο λόγος που τέθηκε ένας τόσο αυστηρός περιορισμός σε αυτό το πεδίο, είχε να κάνει με την δυνατότητα κατασκευής της μηχανής στα πλαίσια του Ε.Μ.Π. . Είναι λοιπόν σαφές πως για την υλοποίηση του έπρεπε να ακολουθηθεί μια προσέγγιση διαφορετική από τις ήδη χρησιμοποιούμενες.

Έτσι μετά από ενδελεχή έρευνα στην υπάρχουσα τεχνολογία, αποφασίστηκε πως ο καθοριστικότερος παράγοντας στην συνολική αύξηση του κόστους είναι η φύση των επενεργητών και ο τρόπος που χρησιμοποιούνται. Ήταν λοιπόν ζωτικής σημασίας η νέα σεισμική τράπεζα να μην φέρει αυτά τα χαρακτηριστικά.

Σε αντίθεση λοιπόν με ό,τι συμβαίνει μέχρι τώρα σε αυτό το πεδίο σχεδιασμού, στην παρούσα διπλωματική εργασία, παρουσιάζεται μια νέα σεισμική τράπεζα, η οποία για την υλοποίηση κατακόρυφης κίνησης δοκιμίων σε πραγματική κλίμακα, χρησιμοποιεί πλέον ένα και μόνο επενεργητή. Το ίδιο μάλιστα συμβαίνει και στην οριζόντια κίνηση.

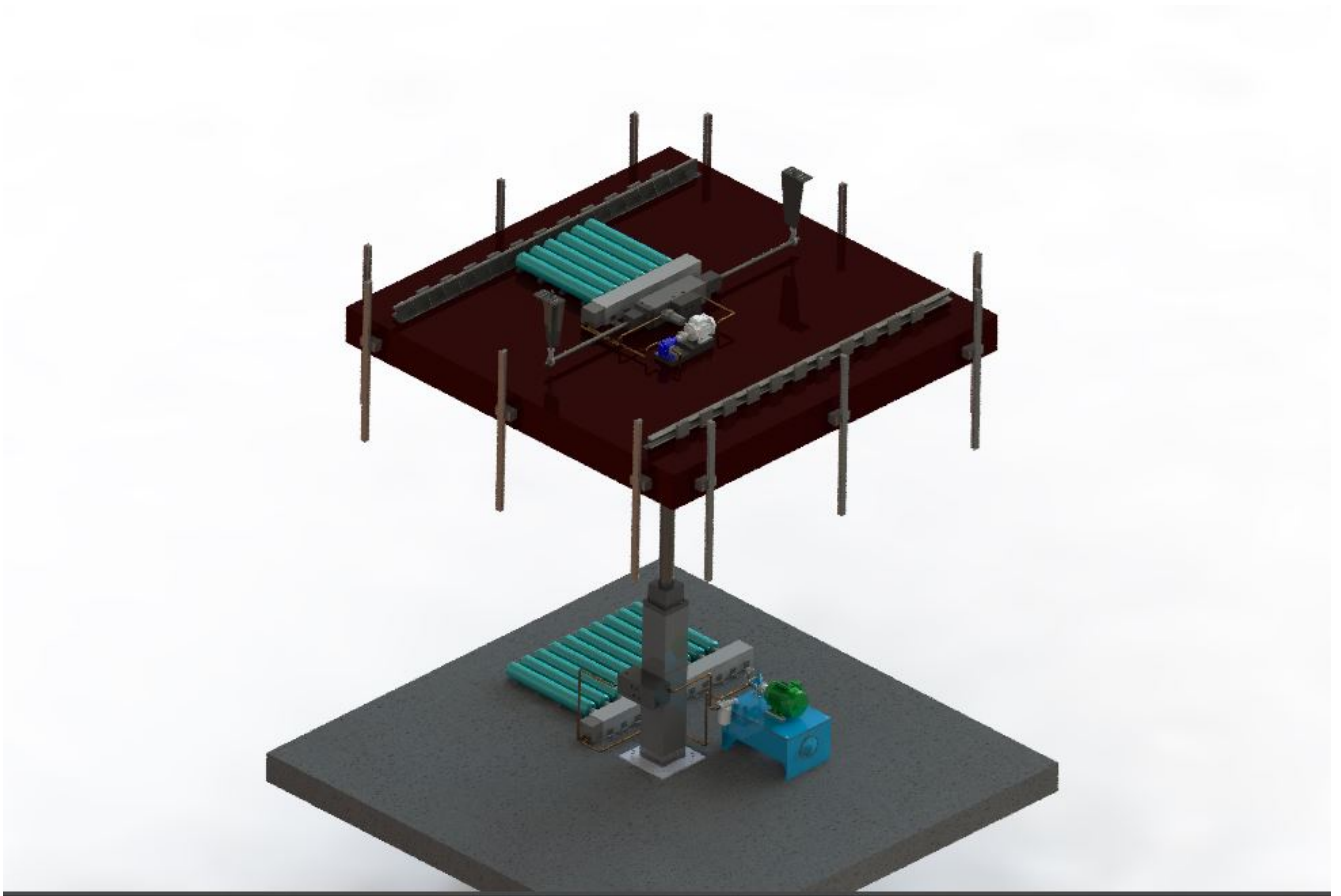
Αυτή η ελαχιστοποίηση του αναγκαίου αριθμού επενεργητών επιτεύχθηκε μέσω δύο κύριων επιλογών:

- Του σχεδιασμού μιας διάταξης αποτελούμενης από δυο διαφορετικές πλατφόρμες, κινούμενες από δύο ανεξάρτητα υδραυλικά υποσυστήματα.
- Της απεμπλοκής των αναγκών επιβολής κίνησης και παραλαβής φορτίων, μέσω της χρήσης γραμμικών οδηγήσεων.
- Της ανάρτησης της υδραυλικής μονάδας του ενός υποσυστήματος, επί της κινούμενης βάσης.



- Την χρήση συστοιχίας συσσωρευτών για την πρόσδοση της απαιτούμενης ισχύος, αντί των κλασικών διατάξεων με αντλίες μεταβλητής παροχής

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η συνολική άποψη της νέας μηχανής, προς αποσαφήνιση των ανωτέρω. Στην συνέχεια γίνεται η συνέχεια του σχολιασμού των σχεδιαστικών αποφάσεων.



Σχήμα 2.4: Συνολική όψη εσωτερικής δομής μηχανής

Από το σχήμα 2.4 φαίνονται οι οδηγήσεις της κάθε κίνηση καθώς και η ανάρτηση της υδραυλικής μονάδας που ευθύνεται για την οριζόντια κίνηση. Όλη η διάταξη τοποθετείται εντός μάζας αντίδρασης από ενισχυμένο σκυρόδεμα. Στην όψη λοιπόν που

φαίνεται και επί των οριζόντιων οδηγήσεων τοποθετείται ένα επιπλέον δικτύωμα, που δρα ως βάση για την πρόσδεση των δοκιμίων. Το δίκτυωμα αυτό φέρει επί της επιφάνειάς του υποδοχές για κοχλίες M30, ίδιος με αυτούς που χρησιμοποιούνται ήδη στο Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, για την πρόσδεση των δοκιμίων επί αυτού.

Είναι αναγκαίο επίσης να τονιστεί ότι στη μάζα αντίδρασης από ενισχυμένο σκυρόδεμα, που θα παραλαμβάνει τις αντιδράσεις της κίνησης, θα κατασκευαστούν οπές, μέσω των οποίων θα παροχετεύεται ο αέρας που υπάρχει κάτω από την πλατφόρμα, απευθείας στο περιβάλλον. Ο λόγος που επιλέχθηκε αυτή η ενέργεια, ήταν η ανάγκη εξάλειψης των ισχυρών υπερπιέσεων που θα αναπτύσσονταν διαφορετικά, στην κάτω πλευρά της πλατφόρμας, λόγω των ταχέων κινήσεων της. Με αυτόν τον τρόπο δρουν ανακουφιστικά στην ροή του συμπιεσμένου αέρα, επιτρέποντας την μηχανή να περιβάλλεται μόνο από ατμοσφαιρικές πιέσεις. Τέλος αναφέρεται πως επί την μάζα ανάδρασης θα υπάρχουν μανδαλώσεις η οποίες θα συγκρατούν την μηχανή στην θέση ισορροπίας της, κατά τις φάσεις που δεν θα διεξάγονται πειράματα.

Στην παρούσα φάση εσκεμμένα δεν τοποθετούνται άλλες όψεις του συνολικού και των επιμέρους σχεδιασμών. Αυτό θα γίνεται κατά την ανάλυση της λειτουργίας των διαφόρων υποσυστημάτων και συνολικά στο κεφάλαιο 8.



## 3. ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

### 3.1. Εισαγωγή

Αρχικό στάδιο του σχεδιασμού της παρούσας σεισμικής τράπεζας, ήταν η θέσπιση κάποιων προδιαγραφών, έτσι ώστε να καθοριστεί η αναμενόμενη λειτουργία της. Στην προσπάθεια να προσομοιαστεί και να μελετηθεί ένα εύρος ισχυρών που να παρουσιάζει έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον, έπρεπε να θεσπιστούν κάποια όρια που να το χαρακτηρίζουν επαρκώς. Παράλληλα με τα όρια των προς μελέτη σεισμών, χρειαζόταν να καθοριστεί το μέγεθος και το βάρος των δοκιμίων, επί των οποίων θα επιβαλλόντουσαν τα οριακά σειсмоγραφήματα. Αντίστοιχα και σε αυτή την περίπτωση τα όρια αφορούσαν το μέγεθος και το βάρος ενός δοκιμίου στα οριακά μελετώμενα σειсмоγραφήματα.

Με στόχο λοιπόν να εξασφαλισθεί η ερευνητική αξία των υπό μελέτη πειραμάτων, η θέσπιση των αρχικών αυτών προδιαγραφών έγινε σε συνεργασία με το Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. .Ως εκ τούτου, για κάθε ένα από τους βαθμούς ελευθερίας της σεισμικής τράπεζας επιλέχθηκε ένα χαρακτηριστικό σειсмоγράφημα και καθορίστηκε το δοκίμιο στο που κλήθηκε να επιβάλλει την επαλληλία τους. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένας συνοπτικός πίνακας απαιτήσεων λειτουργίας της σεισμικής τράπεζας και έπειτα αναλύονται τα χαρακτηριστικά του κάθε σειсмоγραφήματος.

Πίνακας 3.1 Απαιτήσεις Λειτουργίας

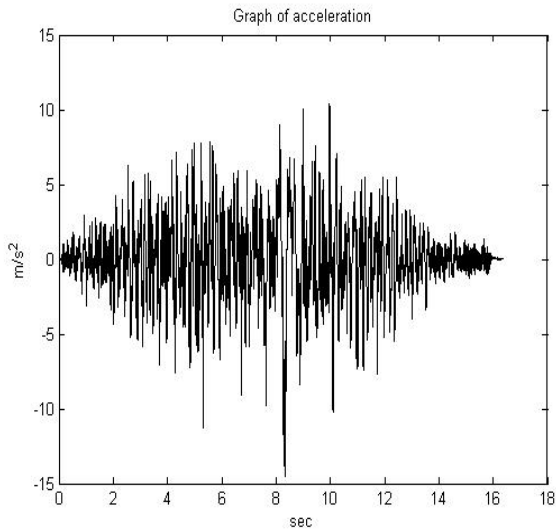
DESIGN SPECIFICATIONS	
Specimen Dimensions	3.2m X 3.2m
Specimen Weight	3000kg
Peak Vertical Acceleration	38.66m/s <sup>2</sup>
Peak Lateral Acceleration	14.49 m/s <sup>2</sup>
Peak Vertical Stroke	1.62m
Peak Lateral Stroke	0.57m
Peak Vertical Velocity	1.059m/s
Peak Lateral Velocity	1.63m/s

## 3.2. Οριζικά Σεισμογραφήματα

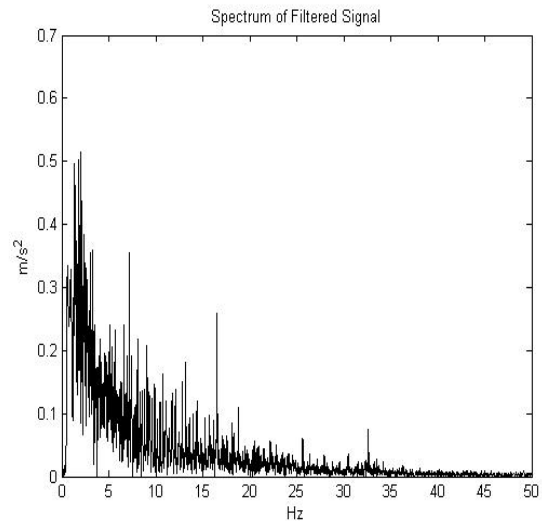
### 3.2.1. Οριζόντια συνιστώσα

Για το οριζόντιο υποσύστημα επιλέχθηκε ο παρακάτω σεισμός που χαρακτηρίζεται από το εικονιζόμενο προφίλ επιτάχυνσης. Πρόκειται για τεχνητό σεισμό, ισχυρότατης οριζόντιας συνιστώσας, τον οποίο ως προς τον συνδυασμό επιτάχυνσης, μετατόπισης και ταχύτητας, δύνανται να προσομοιάσουν μόνο μερικές από τις υπάρχουσες σεισμικές τράπεζες. Η διάρκειά του αγγίζει τα 41 δευτερόλεπτα, ενώ όπως συμβαίνει στους περισσότερους σεισμούς, το φάσμα του συγκεντρώνει την υψηλότερη ενέργεια στις χαμηλές συχνότητες.

Τα μεγέθη του κρίθηκαν ικανοποιητικής αξίας προς μελέτη και ο συνδυασμός τους καθόρισε την ισχύ και τη απόδοση του αντίστοιχου υποσυστήματος. Παρακάτω εικονίζεται το επιταχυνσιογράφημα ως προς τον χρόνο και ως προς την συχνότητα. Τα μεγέθη της ταχύτητας και της μετατόπισης φαίνονται στον πίνακα 2.1. .



Σχήμα 3.1 Επιτάχυνση ΙΕΕΕ

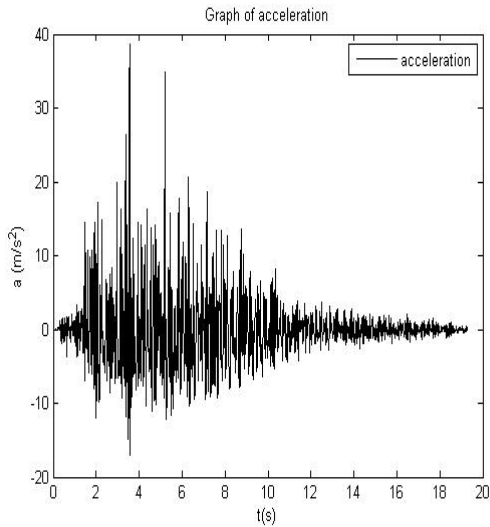


Σχήμα 3.2 Φάσμα Επιτάχυνσης ΙΕΕΕ

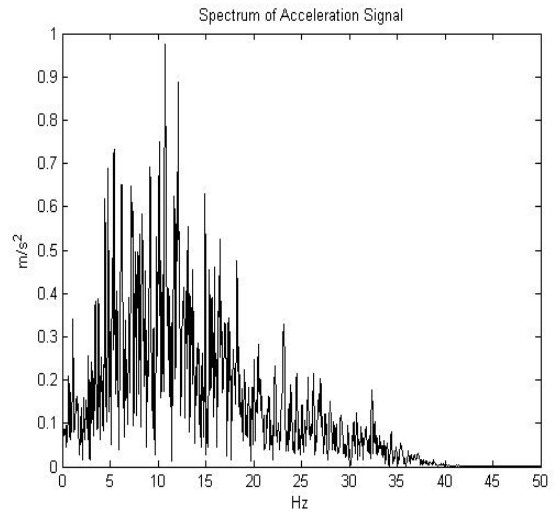
### 3.2.2. Κατακόρυφη συνιστώσα

Ειδικά για το υποσύστημα που ευθύνεται για την κατακόρυφη κίνηση των αναρτημένων δοκιμίων, επιλέχθηκε να προσομοιαστεί η κατακόρυφη συνιστώσα ενός σεισμού, τα χαρακτηριστικά της οποίας δεν έχουν ακόμα αποτυπωθεί σε πραγματική κλίμακα από τις υπάρχουσες σεισμικές τράπεζες. Πρόκειται για τον σεισμό που έλαβε χώρα στην πόλη Iwate της Ιαπωνίας το 2008. Ο σεισμός αυτός, λόγω της φύσης του, συνδύαζε, μια ισχυρή επιτάχυνση της τάξης των 3,86g στην κατακόρυφη διεύθυνση, με αντίστοιχη μετατόπιση εδάφους ίση με 1,62m. Πέρα όμως από την τιμή των μεγεθών αυτών ο σεισμός αυτός είχε το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό να συγκεντρώνει μεγάλο ποσό ενέργειας σε υψηλές τιμές του πεδίου της συχνότητας. Κάτι τέτοιο θεωρείται σχετικά ασυνήθιστο για την χαμηλή συχνότητα των κύριων σεισμικών συνιστωσών. (Στα σχήματα 3.3 και 3.4 παρουσιάζεται η επιτάχυνση του εν λόγω σειсмоγραφήματος στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας)

Ως εκ τούτου, η κατασκευή μιας σεισμικής τράπεζας που να δύναται να προσομοιάσει των συνδυασμό των ανωτέρω χαρακτηριστικών, έρχοζε ερευνητικής αξίας και δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην υλοποίησή της.



Σχήμα 3.3 Επιτάχυνση IWATE  
(Πεδίο χρόνου)



Σχήμα 3.4 Φάσμα Επιτάχυνσης  
IWATE

### 3.3 Χαρακτηριστικά Μελετούμενου Δοκιμίου

Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 3.1 το μελετούμενο δοκίμιο στην οριακή περίπτωση του συνδυασμού των δύο ανωτέρω σειсмоγραφημάτων, επιλέχθηκε να ζυγίζει 3 τόνους και η επιφάνειά του να είναι 3.2m X 3.2m. Όπως συμβαίνει και σήμερα στην σεισμική τράπεζα του Εργαστηρίου Αντισεισμικής Τεχνολογίας του Ε.Μ.Π., το δοκίμιο επιλέχθηκε να προσαρτάται επί του σώματος της τράπεζας μέσω κοχλιών, με την χρήση αντίστοιχης διαμόρφωσης.

Στο σημείο αυτό αναφέρεται ότι η ανωτέρω τιμές δεν χαρακτηρίζουν την ονομαστική ικανότητα ανάρτησης της μελετούμενης σεισμικής τράπεζας, καθότι όταν επιλέγεται η προσομοίωση χαμηλότερων κατακόρυφων επιταχύνσεων, τότε το ωφέλιμο βάρος του δοκιμίου (net payload) γίνεται αντίστοιχα υψηλότερο.





## 4. ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕΡΒΟΒΑΛΒΙΔΩΝ

### 4.1 Χαρακτηριστικά σερβοβαλβίδας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ένας από τους βασικούς σχεδιαστικούς στόχους ήταν η υλοποίηση κάθε κίνησης με χρήση μίας και μόνο σερβοβαλβίδας. Η σερβοβαλβίδα είναι ένα εξάρτημα υψηλής τεχνολογίας που χρησιμοποιείται για τον δυναμικό και πραγματικού χρόνου έλεγχο μηχανών. Τα ιδιαίτερα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της και η αρχή λειτουργίας της, την καθιστούν ένα υψηλής ποιότητας βιομηχανικό ελεγκτή, που χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου απαιτείται έλεγχος θέσης υψηλής ακριβείας υπό μεγάλα φορτία. Στην μηχανή που σχεδιάστηκε έπρεπε να επιλεγεί μια σερβοβαλβίδα η οποία να μπορεί να διαχειριστεί τις υψηλές παροχές που απαιτούνται για το σεισμό, χωρίς να εμφανίζει μη αποδεκτές πτώσεις πίεσης.

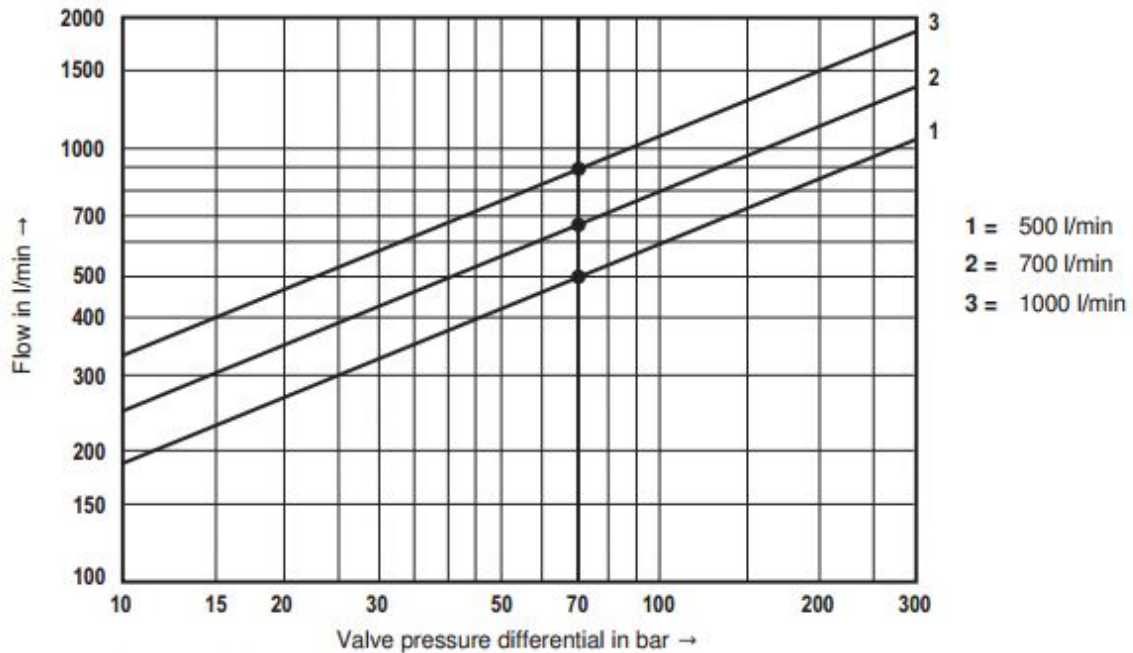
Λόγω της φύσης της λειτουργίας αυτών των εξαρτημάτων, όποτε διακινούν υψηλές παροχές, εμφανίζονται και πολύ υψηλές πτώσεις πίεσης. Μάλιστα από ένα σημείο λειτουργίας και μετά, και η παραμικρή αύξηση της διακινούμενης παροχής, οδηγεί την βαλβίδα σε τέτοιο στραγγαλισμό κέντρου, καθιστώντας την πρακτικά άχρηστη για το υπόλοιπο σύστημα.

Δεν αρκούσε λοιπόν να επιλεγεί η βαλβίδα που θα πληρούσε, θεωρητικά της ανάγκες του σεισμού, για τους όγκους και τα μεγέθη που εκλέχθηκαν σε πρώτη φάση για τα κύρια εξαρτήματα, αλλά απαιτούνταν ένας εκ νέου σχεδιασμός των επί μέρους γεωμετρικών χαρακτηριστικών των υποτημημάτων, ώστε να προσαρμοστούν σε εκείνα της βαλβίδας που εκλέχθηκε. Μόνον έτσι μπορούσε να εξασφαλισθεί η συντονισμένη λειτουργία τους.

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

Η βαλβίδα που εκλέχθηκε και για τους δυο σεισμούς ήταν η 4WSE3E της Bosch, και τα χαρακτηριστικά διαγράμματα λειτουργίας της φαίνονται παρακάτω:

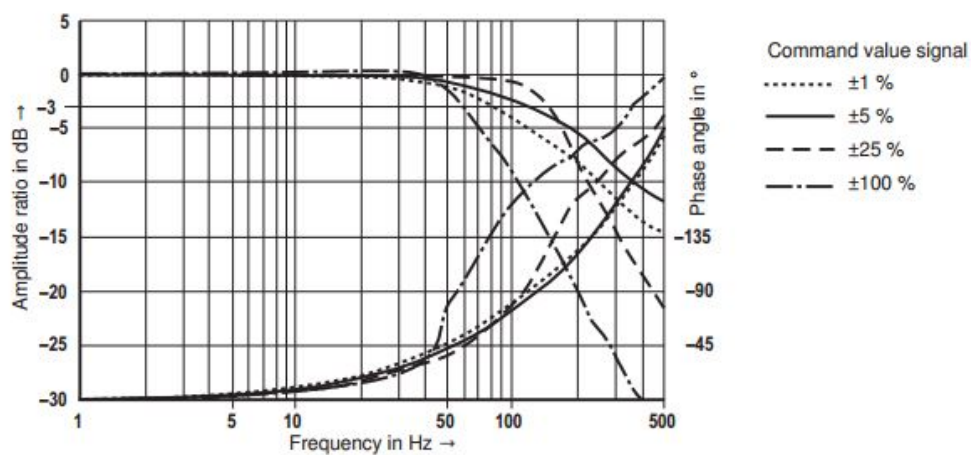
**Flow/load function (tolerance  $\pm 10\%$ ) with 100% command value signal**



$\Delta p$  = Valve pressure differential (inlet pressure  $p_p$  minus load pressure  $p_L$  minus return flow pressure  $p_T$ )

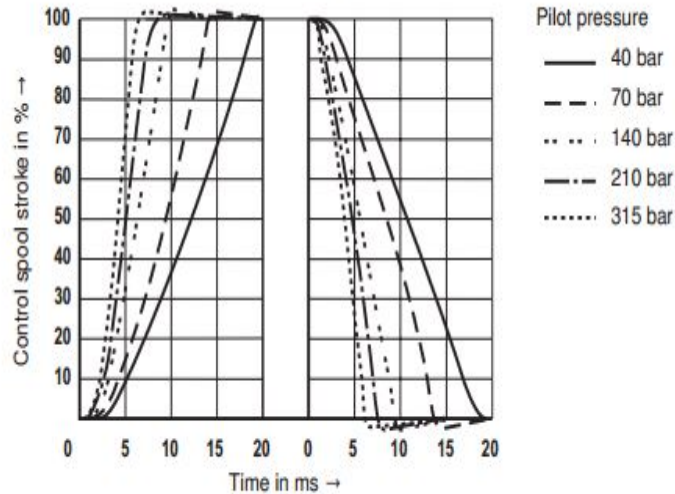
Σχήμα 4.1: Χαρακτηριστικό διάγραμμα σερβοβαλβίδας

**Frequency response at  $p_p = 315$  bar – measured with 315 bar pressure rating**



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Bode σερβοβαλβίδας

Transition function – measured with 315 bar pressure rating



Σχήμα 4.3: Απόκριση σερβοβαλβίδας

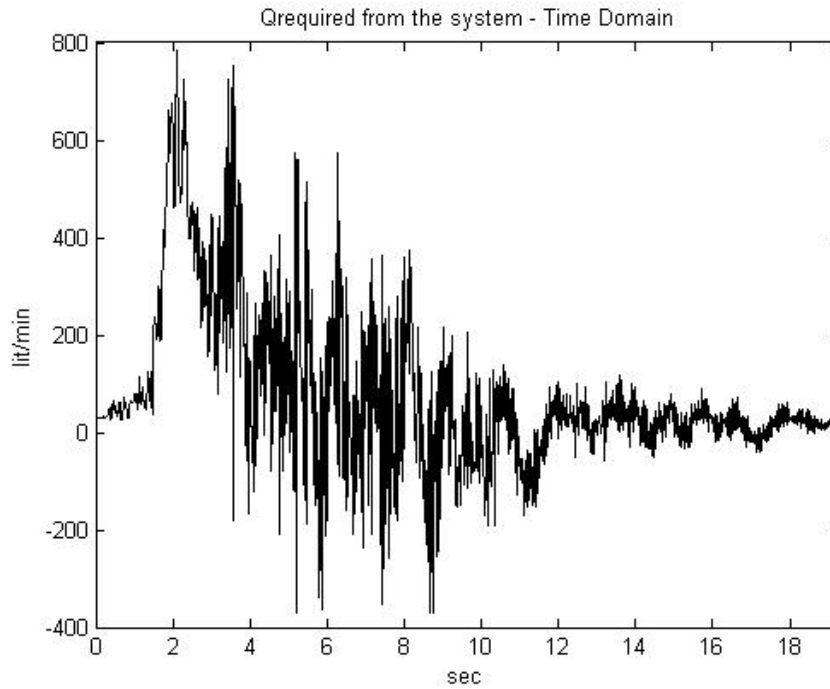
## 4.2 Απαιτήσεις συστήματος

Η σύντομη λειτουργία των υποσυστημάτων και της κάθε βαλβίδας, αφού είχε γίνει η αρχική εκλογή, εξαρτιόνταν κυρίως από την ενδοτικότητα του υδραυλικού ελαίου. Επειδή όμως η ενδοτικότητα αυτή σχετίζεται με τον όγκο που καταλαμβάνει αρχικά το ρευστό στα διάφορα τμήματα, το πρόβλημα αυτό επί της ουσίας μεταφράστηκε σε πρόβλημα σχεδιασμού της γεωμετρίας των τμημάτων που περιέχεται το ρευστό, καθώς και τον αρχικό όγκο αυτού. Επί της ουσίας αναζητήθηκε η βέλτιστη γεωμετρία των επενεργητών καθώς και η βέλτιστος όγκος των συσσωρευτών πίεσεως.

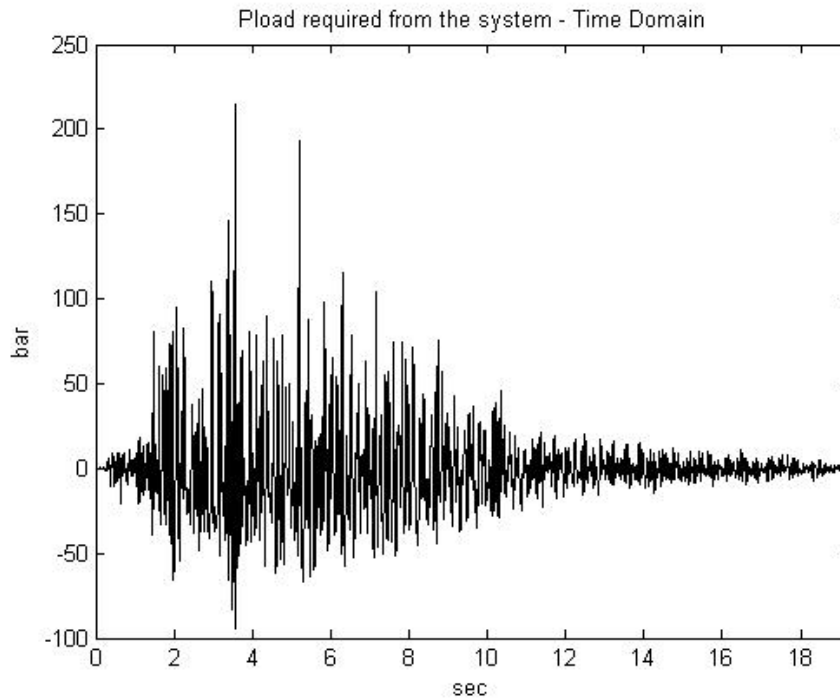
Λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο του ρευστού που συμπιέζονταν σε κάθε κύκλο, των πιέσεων που υπήρχαν εντός των συσσωρευτών αλλά και των κινηματικών μεγεθών του δοκιμίου, υπήρχε εξ αρχής ένα προφίλ απαιτούμενων πιέσεων και παροχών. Το προφίλ αυτό όμως δεν ήταν το τελικό. Για να προκύψει αυτό, έπρεπε τα διαγράμματα της σερβοβαλβίδας που παρέχονταν από τον κατασκευαστή, να μεταφραστούν σε απώλεια πληροφορίας, δηλαδή σε αύξηση της ζητούμενης παροχής, άρα και πτώση της

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

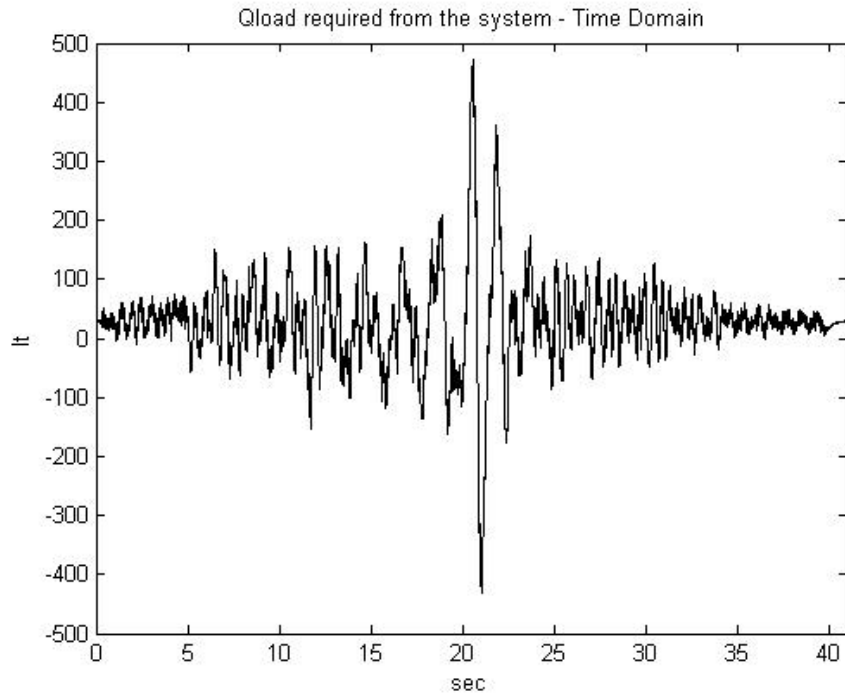
προσδιόμενης πίεσης. Με τον τρόπο λοιπόν αυτό, προέκυψαν τα τελικά διαγράμματα που πρέπει να δώσει το σύστημα ισχύος και να διαχειριστεί η σερβοβαλβίδα.



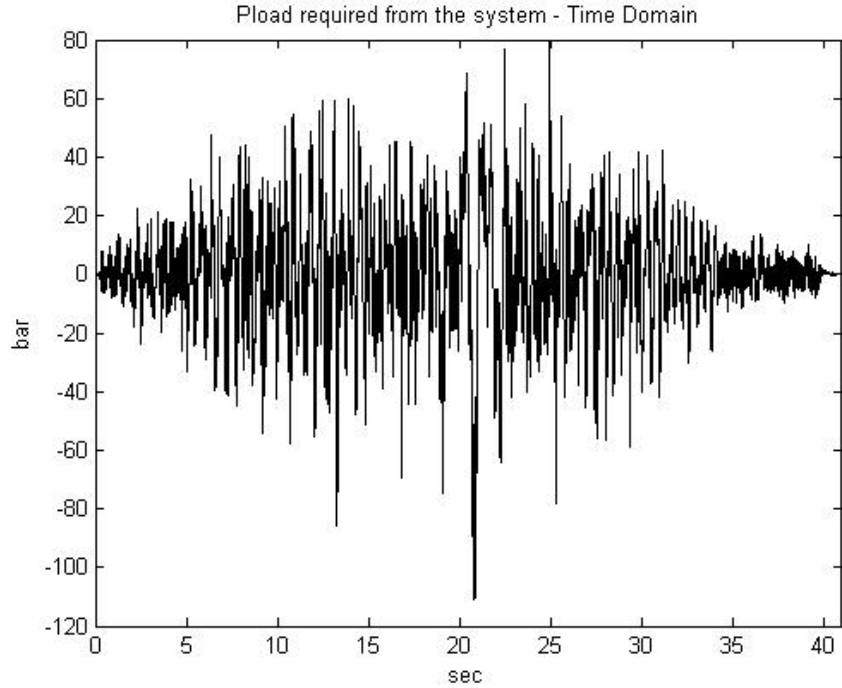
Σχήμα 4.3: Απαιτούμενη Παροχή  $Q_{req}(t)$  Iwate



Σχήμα 4.4 Απαιτούμενη Πίεση  $P_{req}(t)$  Iwate



Σχήμα 4.5 Απαιτούμενη Παροχή  $Q_{req}(t)$  ΙΕΕΕ



Σχήμα 4.6 Απαιτούμενη Πίεση  $P_{req}(t)$  ΙΕΕΕ



## 5. ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

### 5.1 Εισαγωγή

Στον κεφάλαιο αυτό γίνεται μια παράθεση των κυριότερων εξαρτημάτων και τμημάτων της κατασκευής και των ονομαστικών μεγεθών που συνέβαλαν στην επιλογή τους. Επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν αυτά τα οποία με την εκλογή τους όρισαν μονοσήμαντα την τελική μορφή της κατασκευής καθότι ήταν αυτά με την μεγαλύτερη αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους

### 5.2 Μονάδα Συσσωρευτών

Έχοντας προδιαγράψει τις τιμές των πιέσεων που θα πρέπει να επικρατούν στα διάφορα σημεία του κυκλώματος, το επόμενο στάδιο είναι να εκλεγούν τα διάφορα εξαρτήματά του και έπειτα να επαληθευθεί ότι λειτουργούν στις προδιαγεγραμμένες τιμές τους.

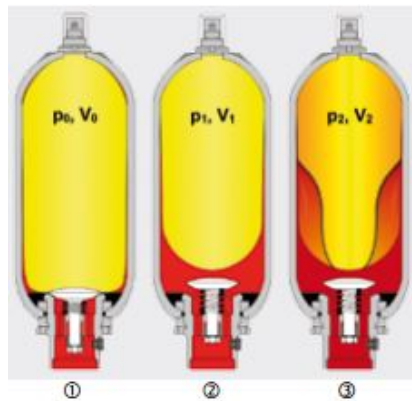
Πρώτο στάδιο λοιπόν ήταν η εκλογή των συσσωρευτών πίεσεως, που θα αποτελούν τα στοιχεία ισχύος για κάθε ένα από τα δύο κυκλώματα. Λόγω της φύσης των συσσωρευτών ως μονάδες ισχύος, έπρεπε εξ αρχής να εξασφαλισθεί τόσο η επάρκεια

ισχύος για την πραγματοποίηση του κάθε σεισμού αλλά και η συμφωνία τους , από δυναμικής πλευράς. Όλα αυτά, σε συνδυασμό με την απαίτηση ελάχιστου δυνατού βάρους ( αναρτημένο οριζόντιο υδραυλικό ), αλλά και την απαίτηση ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους της μονάδας ,κατέστησαν τον σχεδιασμό της, κομβικής σημασίας για όλη την μηχανή.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι αναγκαίοι υπολογισμοί για την εκλογή των συσσωρευτών, η παράλληλη τοποθέτησή τους σε κοινό μπλοκ εξόδου, το προφίλ των προσδιδόμενων πιέσεων και παροχών στο κύκλωμα και τα στοιχεία του κατασκευαστή προς επιβεβαίωση των επιλογών

### 5.2.1 Εκλογή Συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές αερίου (bladder accumulators) στηρίζονται στην περαιτέρω συμπίεση ενός προσυμπιεσμένου θαλάμου αερίου. Το υδραυλικό μέσο λόγω του αναπτυσσόμενου αδιαχώρητου αυξάνει έτσι την πίεση του. Στο παρακάτω Σχήμα παρουσιάζεται εποπτικά η αρχή λειτουργίας ενός bladder accumulator.



Σχήμα 5.1 Αρχή Λειτουργίας Bladder Accumulator

Η εξίσωση που περιγράφει την αρχή λειτουργίας των συσσωρευτών αυτών είναι:

$$V_{eff} = V_0 \left[ \left( \frac{P_0}{P_1} \right)^{\frac{1}{k_a}} - \left( \frac{P_0}{P_2} \right)^{\frac{1}{k_a}} \right] \quad (5.1)$$



Όπου :

- $P_0$  : Η πίεση προφόρτισης του αερίου.
- $P_1$  : Η ελάχιστη πίεση του λαδίου στον συσσωρευτή.
- $P_2$  : Η μέγιστη πίεση του λαδιού στον συσσωρευτή.
- $V_{ef}$  : Ο ωφέλιμος όγκος του συσσωρευτή.
- $V_0$  : Ο αρχικός όγκος που καταλαμβάνει το αέριο.
- $k_\varphi$  : Ο εκθέτης της πολυτροπικής μεταβολής για την φόρτιση.
- $k_{εκ}$  : Ο εκθέτης της πολυτροπικής μεταβολής για την εκφόρτιση

Επίσης για τον συνολικό όγκο λαδιού στην υδραυλική μονάδα έχουμε:

$$V_{tot} = nV_{eff} \quad (5.2)$$

όπου ,  $n$ , το συνολικό πλήθος των συσσωρευτών. Επιπλέον για την σχέση των πιέσεων λαδιού και αερίου, από τους καταλόγους του κατασκευαστή λαμβάνουμε τους εξής περιορισμούς:

$$p_o = 0.85 p_{\min}$$

$$\frac{P_{\max}}{P_{\min}} < 4 \quad (5.3)$$

Για κάθε ένα υδραυλικό, δεδομένων των χωροταξικών απαιτήσεων, και την λειτουργία της κάθε σερβοβαλβίδας έχει επιλεχθεί ένας κωδικός εξαρτήματος, από την εταιρεία HYDAC. Συγκεκριμένα:

- Για το οριζόντιο υδραυλικό επιλέχθηκε ο συσσωρευτής SB330-H-24, με τα εξής χαρακτηριστικά:

Maximum Operating Pressure (bar) :	330
Effective Gas Volume (lt) :	24
Weight (kg) :	69

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

Maximum Flow Rate (lt/s) : 25

Από τα προδιαγεγραμμένα μεγέθη, ισχύει ότι:

$$p_{max} = 310 \text{ bar}$$

$$p_{min} = 180 \text{ bar}$$

Ενώ για την πίεση προφόρτισης του αερίου έχουμε:

$$p_0 = 153 \text{ bar}$$

Άρα το τελικό πλήθος των συσσωρευτών ήταν 6 και το τελικό τους βάρος 412kg.

- Για το κατακόρυφο υδραυλικό επιλέχθηκε ο SB400-H-32, με τα εξής χαρακτηριστικά:

Maximum Operating Pressure (bar) :	400
Effective Gas Volume (lt) :	30
Weight (kg) :	105
Maximum Flow Rate (lt/s) :	15

Από τα προδιαγεγραμμένα μεγέθη που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, ισχύει ότι:

$$p_{max} = 370 \text{ bar}$$

$$p_{min} = 215 \text{ bar}$$

Ενώ για την πίεση προφόρτισης του αερίου έχουμε:

$$p_0 = 183 \text{ bar}$$

Άρα το τελικό πλήθος των συσσωρευτών ήταν 10 .

### 5.2.2 Υλοποίηση Σταθερής Παροχής

Έχοντας καταλήξει στην εκλογή των συσσωρευτών της κάθε μονάδας, σειρά είχε η τοποθέτησή τους με τέτοιο τρόπο, που τα πλεονεκτήματα που αυτή παρουσιάζει σε θεωρητικό επίπεδο έναντι των αντλιών θετικής μετατόπισης, να υλοποιείται στην πράξη. Πιο συγκεκριμένα, εάν θεωρήσουμε πως όλη η αναγκαία παροχή δίνεται από εάν και μόνο συσσωρευτή, τότε δεδομένου ότι δεν παραβιάζονται τα φυσικά του όρια ( μέγιστη παροχή και μέγιστη πίεση που μπορεί να δώσει ), τότε επιτυγχάνεται η πρόσδοση παροχής χωρίς παλμούς.

Έχοντας όμως εκλέγει ένα πλήθος συσσωρευτών, αντί για έναν κεντρικό, απαιτείται οι παροχές που δίνουν, να προστίθενται, δουλεύοντας πάντοτε στην ίδια πίεση. Επιθυμείται λοιπόν παράλληλη λειτουργία.

Οι πιο συχνά απαντούμενες υλοποιήσεις παράλληλης λειτουργίας, αφορούν είτε συνδεσμολογίας αστέρα είτε τοποθετήσεις σε κοινά μήκη σωληνογραμμών ( πχ: ανά τετράδες). Τέτοιες λύσεις κρίθηκαν ακατάλληλες για την παρούσα μηχανή, καθώς προσκρούουν στις αυστηρές απαιτήσεις και προδιαγραφές χωροταξίας. Αντίθετα, τοποθέτηση τους σε κοινή σωληνογραμμή καταλήγει σε εμφάνιση παλμών και δεν συνίσταται για μονάδες ισχύος.

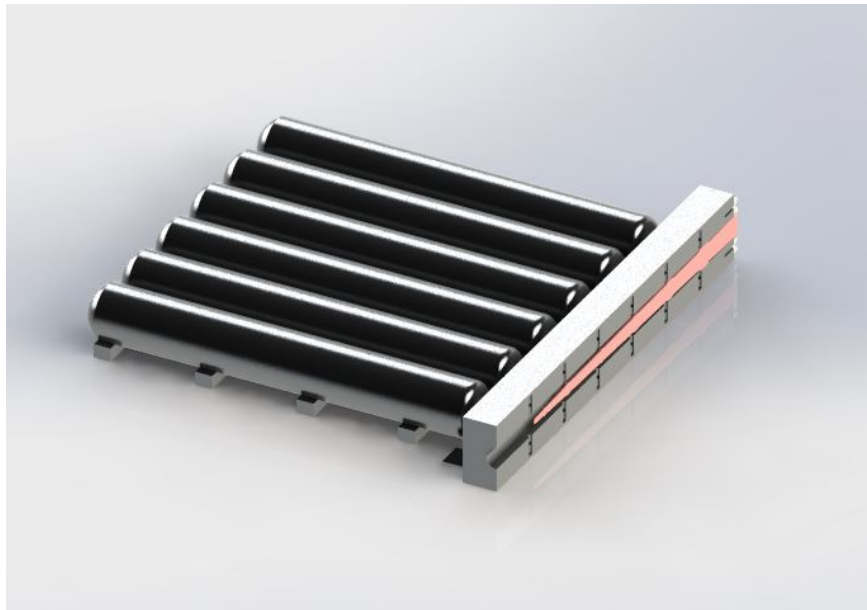
Η λύση που τελικά προκρίθηκε, αφορούσε στην τοποθέτησή τους κατά μήκος κοινού μπλόκ, το οποίο λάμβανε τον ρόλο της σωληνογραμμής. Συνδέοντας όμως εντός του ένα προκατασκευασμένο ένθετο κατάλληλης διαμορφωμένης διατομής, δημιουργήθηκε στένωση κατά μήκος της ροής, που ακλουθούσε το αντίστροφο της πτώσης πίεσης. Με αυτόν το τρόπο επιτεύχθηκε η εξισορρόπηση της πίεσης κατά μήκος (του φυσικού μεγέθους) της πηγής ισχύος.

Δεδομένου ότι συσσωρευτής εκτονώνει μόλις εμφανιστεί στην είσοδό του πίεση μικρότερη από αυτή που έχει στο θάλαμό του. Έτσι ίδια πίεση κατά μήκος του μπλόκ, εξασφαλίζει ότι όλοι οι συσσωρευτές εκτονώνουν ταυτόχρονα δίνοντας το ίδιο κλάσμα της συνολικά απαιτούμενης παροχής. Το σύστημα λοιπόν αποκτά αυτορυθμιζόμενο χαρακτήρα.

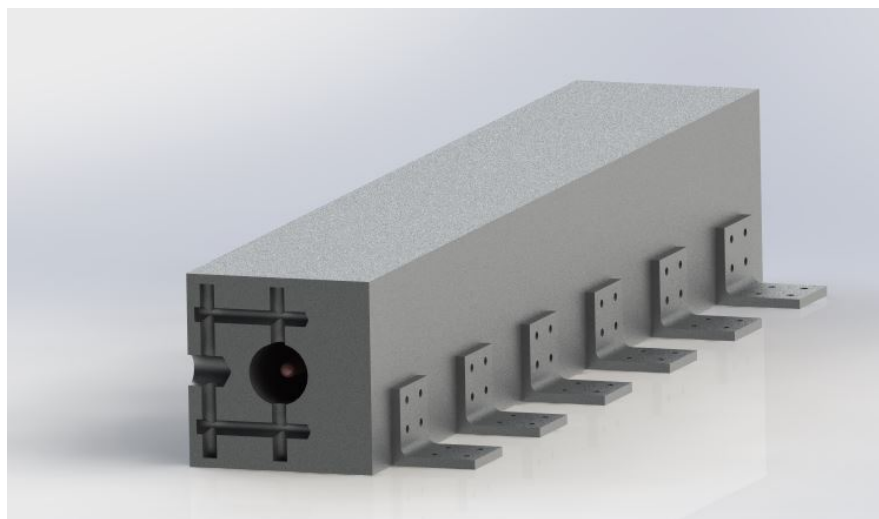
Παρακάτω φαίνονται το μπλόκ του συσσωρευτή και το αντίστοιχο ένθετο. Ειδικότερα για το μπλόκ του οριζόντιου υδραυλικού, λόγω της ανάγκης ελαχιστοποίησης του βάρους, ως υλικό κατασκευής του εκλέχθηκε το κράμα αλουμινίου T-7074. Για τα ένθετα

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

εξισορρόπησης πίεσης επιλέχθηκε το πολυμερές PET καθότι, λόγω των αλληλοεξουδετερωμένων φορτίων δεν υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις αντοχής.



Σχήμα 5.2 Μπλοκ Συσσωρευτών assembly



Σχήμα 5.3 Δίοδοι παροχής εντός του μπλοκ

## 5.3 Υδραυλικό Κύκλωμα

Δεδομένου του ότι το χρονικό διάστημα των μελετώμενων σεισμών είναι της τάξης των μερικών δεκάδων δευτερολέπτων, αλλά και του ότι επιλέχθηκε η ανωτέρω μονάδα συσσωρευτών ισχύος, ως κύρια πηγή πίεσης δομή που καλείται να λάβει το υδραυλικό σύστημα είναι σε μεγάλο βαθμό προκαθορισμένη. Κύριο χαρακτηριστικό είναι το ότι πληρεί δυο διακριτές λειτουργίες: α) την προετοιμασία του πειράματος και β) τη ταχεία αποτόνωση που συνιστά το ίδιο το πείραμα.

Δεδομένου του ότι η πολυπλοκότητα στο υδραυλικό κύκλωμα συνεπάγεται υψηλό κόστος εμπορεύσιμων, δυσκολία στον έλεγχο και αναξιοπιστία στην λειτουργία, κατά τον σχεδιάσμό τους δόθηκε ιδιαίτερη βάση στην (κατά το δυνατόν) σύμπτυξη των λειτουργιών και στη ελαχιστοποίηση των εξαρτημάτων. Ειδικότερα για το αναρτημένο σύστημα που ευθύνεται για την οριζόντια συνιστώσα του σεισμού, αυστηρές ανάγκες ελαχιστοποίησης βάρους και περιορισμών χωροταξία συνέβαλαν κατά μείζονα λόγο στην τελική του μορφή.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι απαιτήσεις του κάθε συστήματος, ο ρόλος των υποεξαρτημάτων στις φάσεις του πειράματος, το μονογραμμικό διάγραμμα του κάθε κυκλώματος και ο πίνακας των υλικών του:

### 5.3.1 Ανάγκες Υδραυλικού

- Οι ανάγκες του πειράματος να πληρούνται αποκλειστικά από την συστοιχία των συσσωρευτών.
- Οι συσσωρευτές να φορτίζονται από υπο-κύκλωμα αντλίας θετικής μετατόπισης.
- Λειτουργία κυκλώματος της αντλίας μόνο για την προφόρτιση των συσσωρευτών.
- Απομόνωση του υποκυκλώματος της αντλίας σε ελάχιστη πίεση, κατά την διάρκεια του πειράματος.
- Ταχεία επαναληψιμότητα του πειράματος.
- Απορρόφηση των πληγμάτων λειτουργίας στην θέση της σερβοβαλβίδας για ασφάλεια έναντι υπερπιέσεων.

- Ομαλή αποφόρτιση συστήματος σε περίπτωση απώλειας ισχύος.
- Ανάσχεση και παραλαβή αδρανειακών φορτίων και υπερπιέσεων, εντός του κυλίνδρου, σε περίπτωση απώλειας ισχύος.
- Χειροκίνητη επαναφορά του κυλίνδρου στην θέση ισορροπίας του μετά από απώλεια ισχύος.
- Χειροκίνητη απομόνωση των ανεξάρτητων τμημάτων του κυκλώματος και ανακούφιση σε πίεση περιβάλλοντος.
- Απαίτηση ελάχιστων σωληνογραμμών.
- Απαίτηση ελάχιστου βάρους.

### 5.3.2 Φάσεις Πειράματος

#### Φάση " 0"- Θέση ηρεμίας

- Λειτουργία της αντλίας σε ελάχιστη πίεση στο στάδιο εποπτικού ελέγχου και αναμονής. Κατά το στάδιο αυτό, όλη η διακινούμενη παροχή της αντλίας οδηγείται απευθείας στην δεξαμενή. Συνεπώς, η αναπτυσσόμενη πίεση προέρχονται καθαρά από την τριβή των εξαρτημάτων
- Όλες οι βαλβίδες που κατευθύνουν την ροή θα πρέπει να είναι Normally Open, έτσι να μην δημιουργούνται υπερπίεσης από την μη ελεγχόμενη αποτώνωση των συσσωρευτών στην περίπτωση απώλειας ισχύος.

#### Φάση " 1"- Απομόνωση τμημάτων και προετοιμασία φόρτισης συσσωρευτών

- Το λογικό στοιχείο του κυκλώματος (3-way poppet valve) που ευθύνεται για την παροχή ρευστού στην σερβοβαλβίδα κλείνει. Το μοναδικό τμήμα πλέον που μπορεί να αυξήσει την πίεσή του, είναι η συστοιχία των συσσωρευτών.
- Η αντλία εξακολουθεί να δουλεύει σε πίεση τριβών.

**Φάση " 2"- Φόρτιση των συσσωρευτών**

- Το λογικό στοιχείο του κυκλώματος που ευθύνεται (poppet valve) για το venting της αντλίας κλείνει.
- Η αντλία συνδέεται με το κύκλωμα των συσσωρευτών.
- Η πίεση του κυκλώματος αρχίζει να ανεβαίνει μέχρι την μέγιστη προκαθορισμένη.
- Ο πιεζοστάτης της συστοιχίας δίνει σήμα για την αποσύμπλεξη της αντλίας, ανοίγοντας το αντίστοιχο λογικό στοιχείο.

**Φάση " 3"- Κίνηση τράπεζας**

- Άνοιγμα της poppet που συνδέει την σερβοβαλβίδα με το κύκλωμα των συσσωρευτών
- Παροχή λαδιού στον κύλινδρο μέσω της σερβοβαλβίδας
- Τέλος του πειράματος

Στην περίπτωση όπου δεν απαιτείται δεύτερο συνεχόμενο πείραμα, τότε, η ολική απενεργοποίηση του συστήματος γίνεται αφού ο κάθε επενεργητής επιστρέψει στην θέση ηρεμίας του ( στην περίπτωση του κατακόρυφου, όταν αυτός προσδεθεί στις σχετικές μανδαλώσεις συγκράτησης) και εν συνεχεία ανακουφιστούν πλήρως όλα τα τμήματα του υδραυλικού κυκλώματος. Σε διαφορετική περίπτωση έχουμε επανάληψη από την Φάση "0".

**5.3.3 Πίνακας εξαρτημάτων**

Τα δύο υδραυλικά κυκλώματα είναι πανομοιότυπα ως προς την λειτουργία τους. Διαφέρουν μόνο ως προς το πλήθος και τον κωδικό ορισμένων εξαρτημάτων, λόγω των διαφορετικών απαιτήσεων ισχύος των κινήσεων που επιτελούν. Οι παρακάτω πίνακες

δείχνουν την τοποθέτηση των εξαρτημάτων τους στα διάφορα μπλοκ όπου αυτά προσαρτώνται.

Πίνακας 5.1: Μπλοκ Αντλίας

---

<b>ΜΠΛΟΚ ΑΝΤΛΙΑΣ</b>
<b>Αντλία</b>
<b>Ηλεκτροκινητήρας</b>
<b>Κόπλερ</b>
<b>Βάνα Μανομέτρου</b>
<b>Μανόμετροο</b>
<b>Φίλτρο Κατάθλιψης</b>
<b>Αντεπίστροφη Φίλτρου Κατάθλιψης</b>
<b>Βάνα Αλλαγής Φίλτρου Κατάθλιψης</b>
<b>Κεντρικό Ασφαλιστικό</b>
<b>Βαλβίδα Venting</b>
<b>Ασφαλιστικό Σωληνογραμμών</b>

Πίνακας 5.2: Μπλοκ συσσωρευτών

---

<b>ΜΠΛΟΚ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ</b>
<b>Αντεπίστροφη Φόρτισης</b>
<b>Πιεζοστάτης (Για Venting αντλίας)</b>
<b>Πιεζοστάτης (Για Poppet)</b>

---



---

Μανόμετρο (Γραμμής Συσσωρευτών)

Συσσωρευτής

Βάνα Μανομέτρου Συσσωρευτή

Μανόμετρο ( Συσσωρευτή)

Βάνα Απομόνωσης Συσσωρευτή

Βάνα Venting Συσσωρευτή

Porpet ( Με πιλότο)

Βάνα Απομόνωσης Γραμμής

Βάνα Venting Γραμμής

Ασφαλιστικό

Μανόμετρο Φίλτρων

Φίλτρο

Αντεπίστροφη Φίλτρων

---

Πίνακας 5.3: Μπλοκ κυλίνδρου

### ΜΠΛΟΚ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ

Σερβοβαλβίδα

Βάνα Επικοινωνίας Θαλάμων

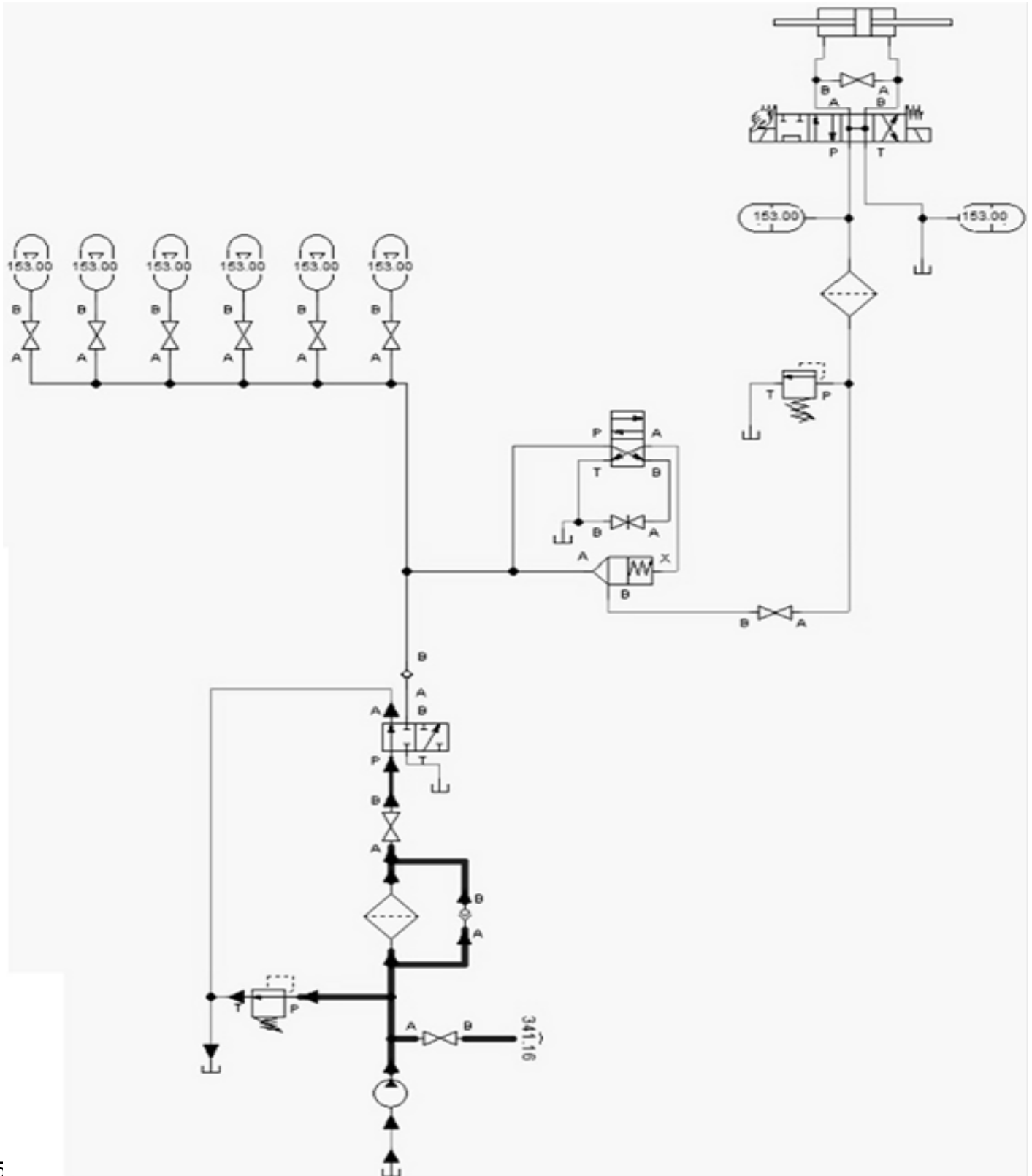
Συσσωρευτής Πληγμάτων (Κατάθλ.)

Συσσωρευτής Πληγμάτων (Επιστροφ.)

---

### 5.3.4 Μονογραμμικό Διάγραμμα

Το μονογραμμικό διάγραμμα του οριζόντιου υδραυλικού φαίνεται παρακάτω. (Στο κατακόρυφο υδραυλικό αλλάζει ο αριθμός των συσσωρευτών.)



## 5.4 Σχεδιασμός Φορέων

Ένα επιπλέον κομβικό σημείο για την υλοποίηση της σεισμικής τράπεζας, ήταν ο σχεδιασμός των δικτυωμάτων που αποτελούσαν πρακτικά της δύο πλατφόρμες της μηχανής. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια υπήρχε εξ'αρχής ένας πολύ αυστηρός περιορισμός ως προς το βάρος των αναρτημένων τμημάτων. Συγκεκριμένα, το συνολικό βάρος των τμημάτων που αναρτώνται επί του κατακόρυφου επενεργητή, χωρίς να υπολογίζεται το βάρος του δοκιμίου, επιλέχθηκε να είναι τέσσερις τόνοι. Από αυτούς τους τέσσερις τόνους τα 1700kg προέκυπταν από το συνολικό βάρος της αναρτημένης υδραυλικής μονάδας της οριζόντιας κίνησης. Αμέσως λοιπόν γίνεται σαφές πως το ο σχεδιασμός των πλατφορμών ήταν εξαιρετικά κομβικής σημασίας, καθότι ζυγίζοντας και οι δύο μαζί 2300kg, καλούνται σε πλήρες φορτίο να κινούν συνολική αδρανειακή μάζα 18.8 τόνων. Δηλαδή σχεδόν εννέα φορές το βάρος τους.

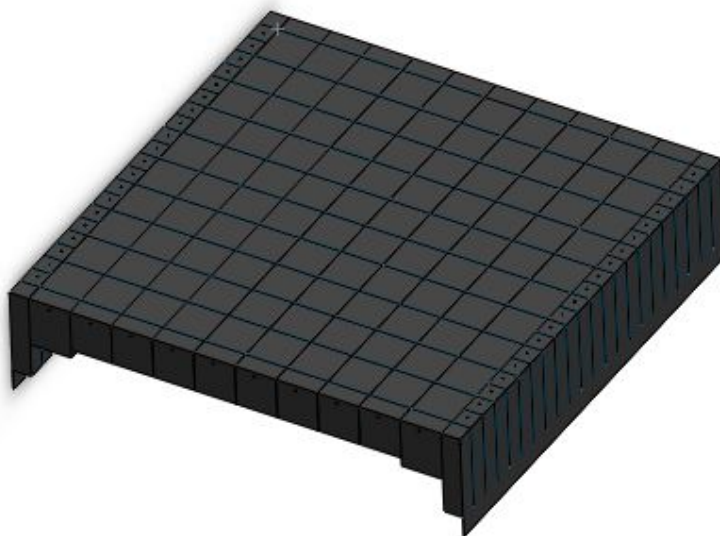
Πέραν όμως από τις ιδιαίτερες απαιτήσεις για χαμηλό βάρος, ένας επιπλέον περιορισμός αφορούσε καθαρά το μέγιστο επιτρεπόμενο βέλος κάμψης σε πλήρες συνδυασμένο οριζόντιο και κατακόρυφο φορτίο. Συγκεκριμένα, δεδομένου του ότι επί του άνω δικτυώματος, όπου προσαρτάται το δοκίμιο το συνολικό βέλος κάμψης δεν έπρεπε να ξεπερνάει τα 3mm. Ο λόγος για αυτή την τιμή ήταν ότι, επιβολή μεγαλύτερων μετατοπίσεων επί της βάσης δοκιμίου από σκυρόδεμα (θεωρητικά το πιο ψαθυρό υλικό που μπορεί να μελετηθεί), θα οδηγούσε σε αστοχία του τελευταίου.

Μια ακόμη δυσκολία στον σχεδιασμό αυτό ήταν ο προκαθορισμός των στηρίξεων των φορέων. Έχοντας καταλήξει στην μορφή που θα έχει η μηχανή (διάταξη ανεξάρτητων πλατφορμών και μοναδικότητα επενεργητή ανά κίνηση) για τους λόγους που έχουν ήδη εξηγηθεί, επί της ουσίας ορίστηκε μονοσήμαντα ο τρόπος με τον οποίο θα στηριζόντουσαν τα δικτυώματα. Συγκεκριμένα η επιλογή χρήσης διατάξεων γραμμικών οδηγήσεων καθόρισε το είδος των στηρίξεων. Οι τράπεζες που θα σχεδιάζονταν δεν θα μπορούσαν να εδράζονται σε διαφορετικά σημεία από αυτά των γραμμικών οδηγών, καθότι έτσι θα εμφάνιζαν διαφορετική δέσμευση κινήσεων από την επιθυμητή.

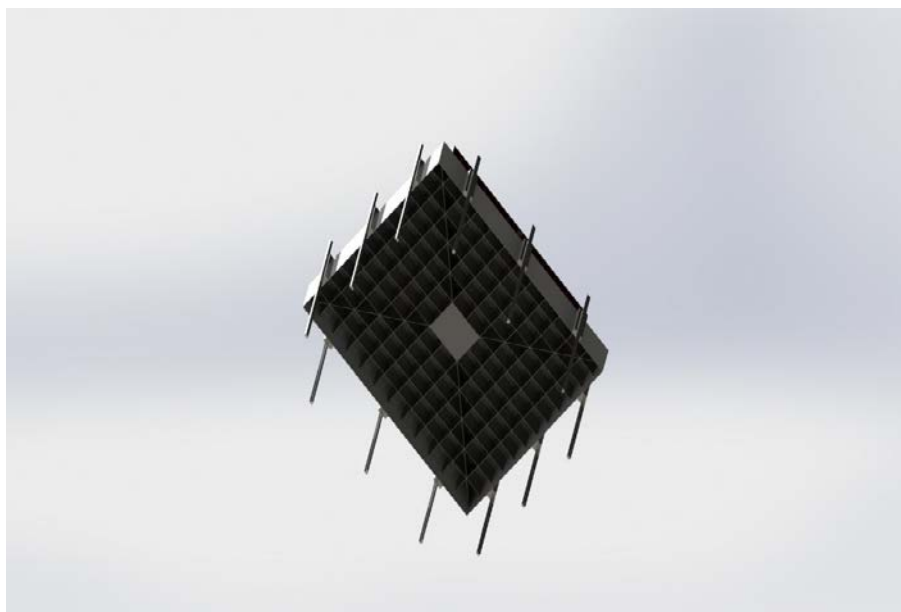
Τελικά λοιπόν αποφασίστηκε από την αρχή του σχεδιασμού πως η μορφή των φορέων της μηχανής θα έπρεπε να εμφανίζει χαρακτηριστικά δικτυώματος. Συγκεκριμένα τόσο για τη άνω όσο και για την κάτω πλάκα, επιλέχθηκε μια διάταξη τετραγωνικού πλέγματος από χαλύβδινες νευρώσεις χαμηλού πάχους και διαφορετικού μήκους κατά περίπτωση. Επιτεύχθηκε έτσι η διακριτοποίηση των επί μέρους ροπών αδρανείας, ανάλογα με την τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου ανά περιοχή. Με τον τρόπο αυτό σχεδιάστηκαν δύο φορείς αποτελούμενοι μόνο από συγκολλητά τμήματα από χάλυβα

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

κατασκευών, πολύ χαμηλού βάρους, καθότι η κατανομή της μάζας έγινε ευθέως ανάλογα με την αντίστοιχη φόρτιση. Στα σχήματα 5.5 και 5.6 που ακολουθούν φαίνονται οι δύο φορείς της σεισμικής τράπεζας.

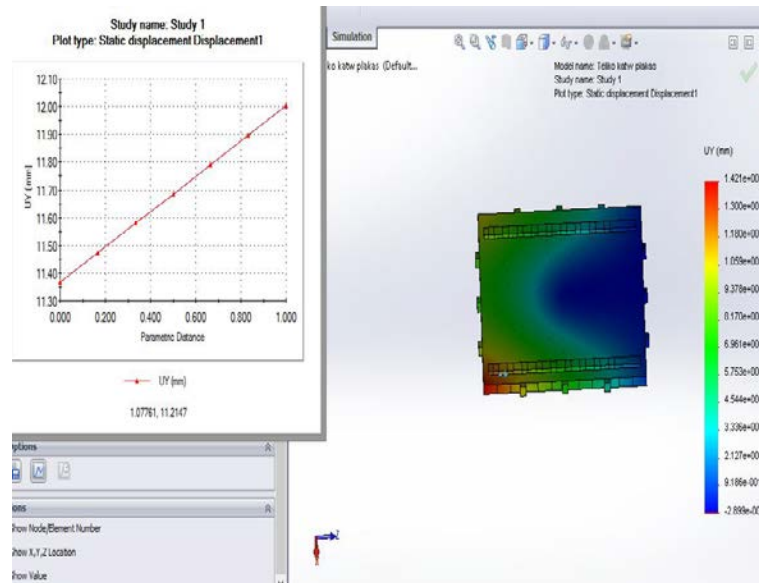


Σχήμα 5.5 Άνω φορέας

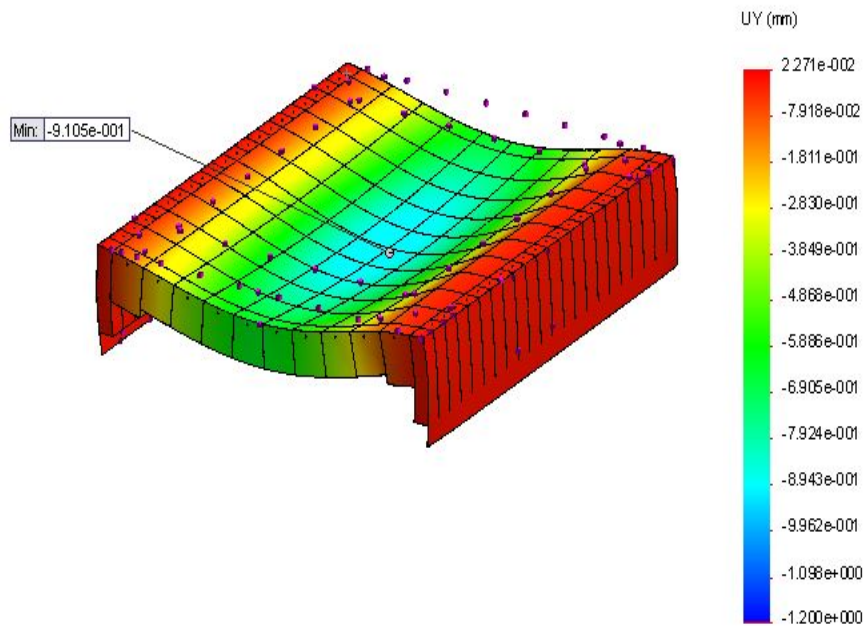


Σχήμα 5.6 Κάτω φορέας

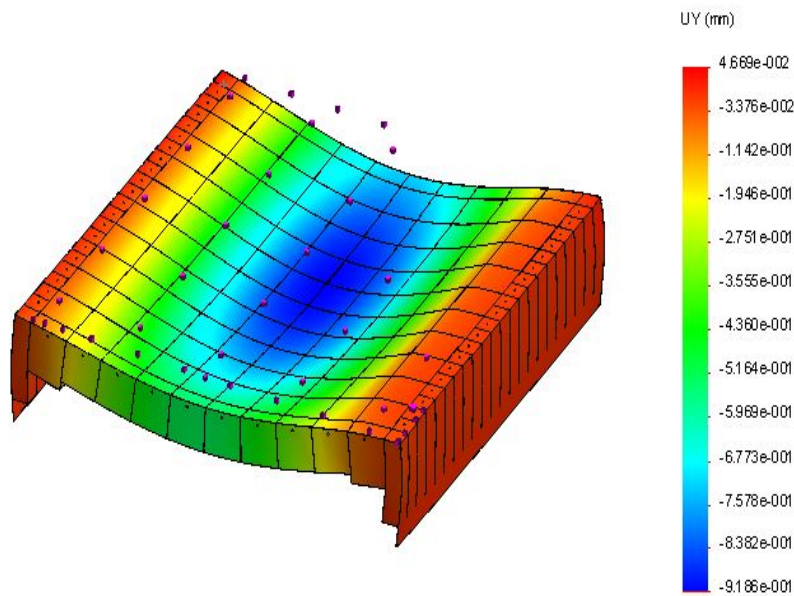
Παρόλα αυτά εκτός από τις προφανείς ανάγκες ενός φορέα να έχει το ελάχιστο δυνατό βάρος και τη μέγιστη δυνατή δυσκαμψία, στον παρόν σχεδιασμό εμφανίστηκαν δύο επιπλέον πολύ σημαντικές προκλήσεις. Η πρώτη αφορούσε το γεγονός ότι κάθε μία από τις πλατφόρμες δρούσε ως ελαστική βάση για τα τμήματα της κατασκευής που αναρτώνταν πάνω τους. Υπό αυτό το πρίσμα, η κάτω πλάκα δρούσε σαν ελαστική βάση για την πάνω πλατφόρμα. Όμως όσο η τελευταία κινούνταν κατά την οριζόντια διεύθυνση η κάτω πλάκα εμφάνιζε μια διαφορική μετατόπιση, ανάλογα με την θέση επιβολής του ασκούμενου φορτίου. Το πρόβλημα ήταν πως αυτή τη διαφορική μετατόπιση όφειλαν να την ακολουθήσουν και οι γραμμικοί οδηγοί της οριζόντιας κίνησης. Ο κατασκευαστής όμως δηλώνει πως η απόκλιση της θέσης μεταξύ δύο διαδοχικών οδηγών από την ευθεία δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από μερικές δεκάδες χιλιοστά. Για να επιβεβαιωθεί λοιπόν πως κάτι τέτοιο δεν θα συμβεί κατά την κίνηση της μηχανής, έγιναν αρκετές σχετικές αναλύσεις. Στο σχήμα 5.7 φαίνεται μια τέτοια ανάλυση από όπου προέκυψε ότι για πλήρες φορτίο και για υψηλή τιμή συγκέντρωσης του, η διαφορική τιμή της μετατόπισης έφτασε μόλις 600μm. Τιμή που κρίνεται αποδεκτή από τους καταλόγους του κατασκευαστή. Τέλος στα υπόλοιπα σχήματα φαίνονται οι τιμές μετατόπισης για τα οριακά φορτία. Τα αποτελέσματα σε αυτές ήταν σύμφωνα με τις προδιαγραφές.



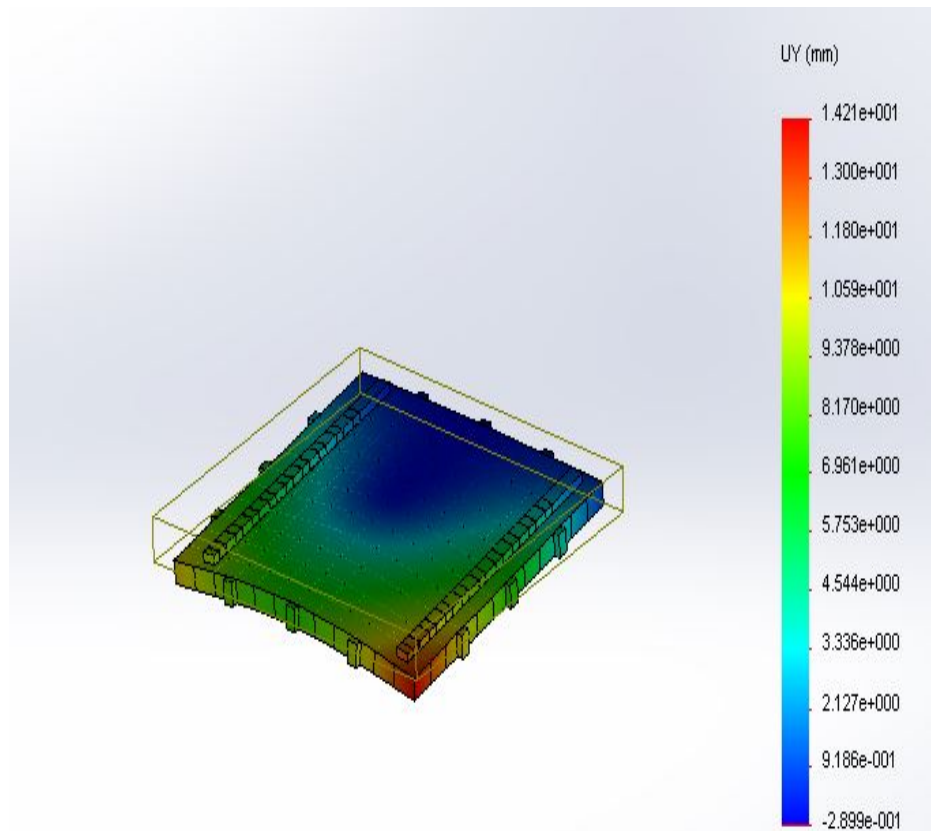
Σχήμα 5.7 : Διαφορική μετατόπιση οδηγών οριζόντιας κίνησης



Σχήμα 5.8 Βέλος κάμψης άνω φορέα υπό κατακόρυφο φορτίο



Σχήμα 5.9: Βέλος κάμψης άνω φορέα υπό συνδυασμένο φορτίο



Σχήμα 5.10: Βέλος κάμψης κάτω φορέα





## 6. ΕΝΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΟΣ

### 6.1. Εισαγωγή

Έχοντας καταλήξει στις βασικές σχεδιαστικές αποφάσεις, η αξιοπιστία της κατασκευής εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό, από την ελεγχιμότητα των διαφόρων τμημάτων της. Επιπλέον, λειτουργώντας πάντα υπό το πρίσμα του ελάχιστου δυνατού συνολικού κόστους, ο ζητούμενος έλεγχος απαιτούνταν να γίνει με χρήση όσο το δυνατόν απλούστερες τεχνικές. Κάτι τέτοιο πρακτικά σήμαινε ότι οι ιδιοσυχνότητες των διαφόρων τμημάτων της εγκατάστασης έπρεπε να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερες, ώστε τα κέρδη στου βρόγχους ελέγχου να είναι όσο το δυνατόν μικρότερα. Στο πλαίσιο αυτό χρειάστηκε κατά τον σχεδιασμό των διαφόρων τμημάτων, εκτός από τους δεδομένους περιορισμούς βάρους, κόστους και αντοχής, να ληφθούν υπόψη και περιορισμοί ιδιοσυχνοτήτων.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ανάλυση που έγινε και η προσέγγιση που ακολουθήθηκε ώστε να σχεδιαστούν εκ το προτέρων τμήματα της κατασκευής με πολύ καλά δυναμικά χαρακτηριστικά. Τα τμήματα αυτά αφορούν πρακτικά τα πιο ενδοτικά μέρη της, τα οποία δεν είναι άλλα από τα δικτυώματα και από το υδραυλικό έλαιο.

Στο κεφάλαιο 4 έγινε ήδη μια αναφορά στον κεντρικό βιομηχανικό ελεγκτή της μηχανής, την σερβοβαλβίδα. Παρουσιάστηκαν λοιπόν εκεί κάποια διαγράμματα τα οποία δήλωναν την τιμή της ζητούμενης πίεσης και ζητούμενης παροχής της μηχανής συνάρτηση του χρόνου. Στόχος τους όπως αναφέρθηκε, ήταν να εξακριβωθεί ότι οι βαλβίδες δύνανται να διαχειριστούν τις τιμές αυτές, χωρίς προβλήματα. Μέσα στις τιμές

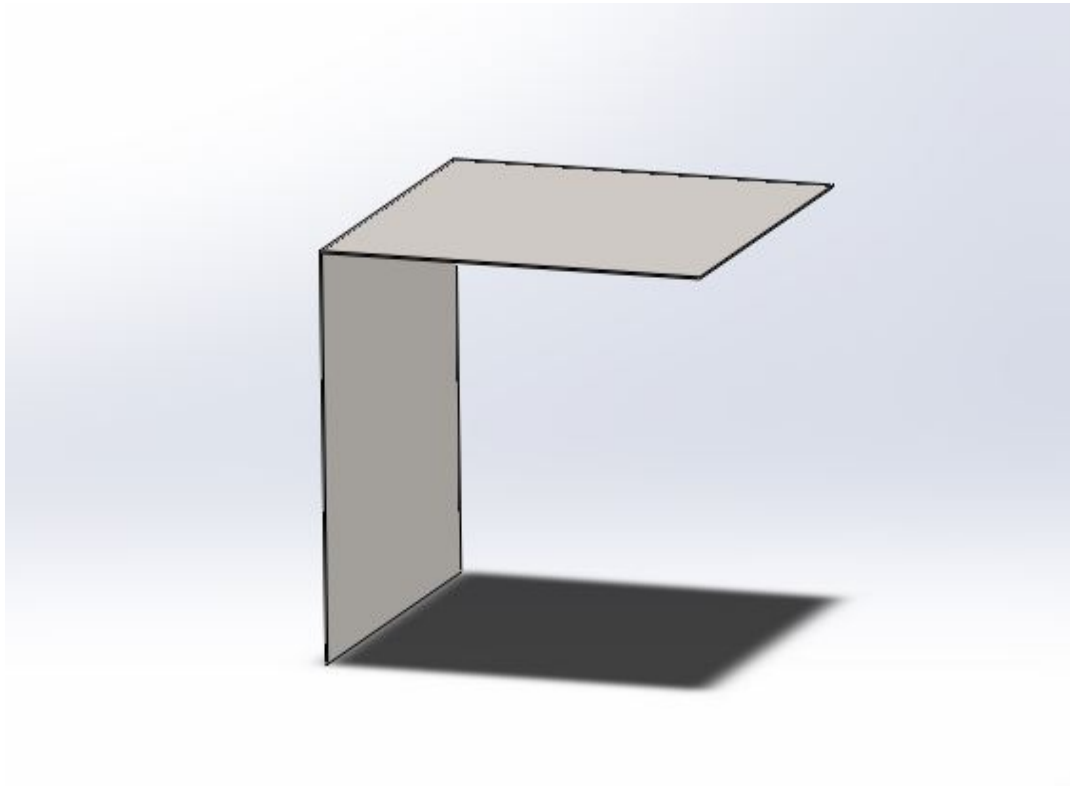
αυτές όμως συμπεριλαμβάνεται ο όγκος του ελαίου εντός των σωληνώσεων, των κυλίνδρων, όπως αναφέρθηκε αλλά και η οριακή τιμή της παραμόρφωσης για κάθε πλατφόρμα. Παρόλο που η εύρεση της κατάλληλης τιμής των διαφόρων όγκων δεν ήταν εύκολη διαδικασία, ουσιαστικά έγινε μέσω σειράς δοκιμών λαθών. Κάτι τέτοιο όμως δεν συνέβη στην σχεδίαση των φορέων.

### 6.2. Ιδιοσυχνότητες άνω φορέα

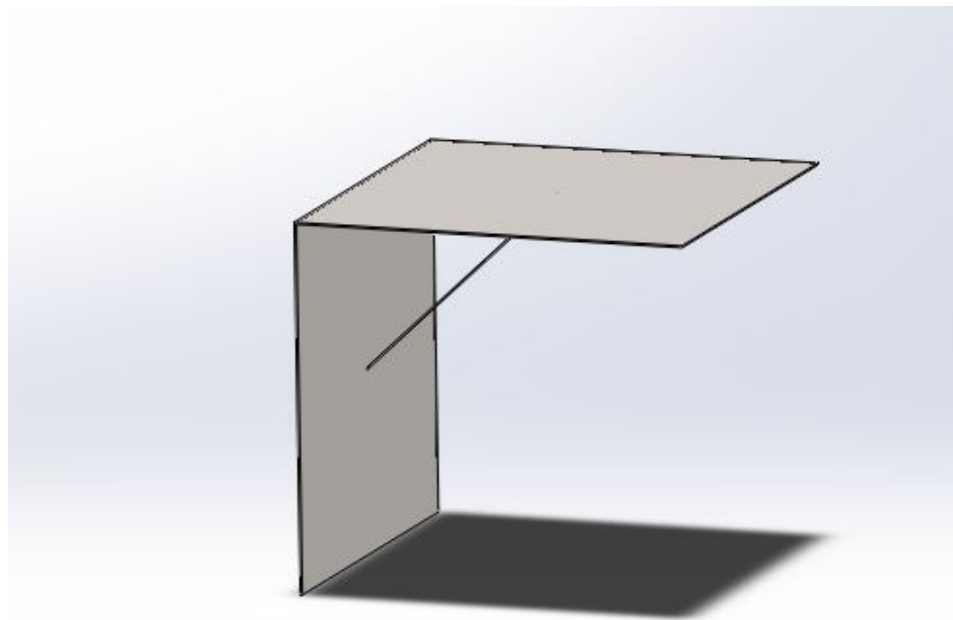
Ο σχεδιασμός που επιλέχθηκε για τη μορφή των πλακών κατάφερε εξ αρχής να δημιουργήσει φορείς αρκετά υψηλών ιδιοσυχνοτήτων, χάρη στην υψηλή τους στιβαρότητα και το χαμηλό βάρος. Όταν όμως έγινε μελέτη ενίσχυσης τους με το φάσμα των σειсмоγραφημάτων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, διαπιστώθηκε ότι αυτές οι τιμές για τις ιδιοσυχνότητες, έπρεπε να αυξηθούν περαιτέρω. Για τον λόγο αυτό αποφασίστηκε ότι κάθε φορέας έπρεπε να δέχεται κάποιο είδος προέντασης. Με τον τρόπο αυτό επιτεύχθηκε η αύξηση της στιβαρότητάς των, επιπλέον αύξηση του βάρους τους. Η προένταση αποφασίστηκε να δοθεί μέσω περαστών κοχλιώσεων σε κατάλληλες υποδιαμορφώσεις στην κάθε κατασκευή.

Πολύ σημαντικό στην όλη ανάλυση ήταν το πως θα αναγνώριζαν τα πακέτα των πεπερασμένων στοιχείων αυτήν την προένταση (η λύση της άμεσης επιβολής φορτίων και διεξαγωγής modal analysis δεν ήταν ικανοποιητική λόγω του μεγάλου υπολογιστικού χρόνου και της αβεβαιότητας των αποτελεσμάτων). Για τον λόγο αυτό κάθε δύναμη προέντασης μεταφράστηκε σε στιβαρότητα μέσω κατάλληλα υπολογισμένης πλεονάζουσας στιβαρότητας στα κρίσιμα σημεία της κατασκευής.

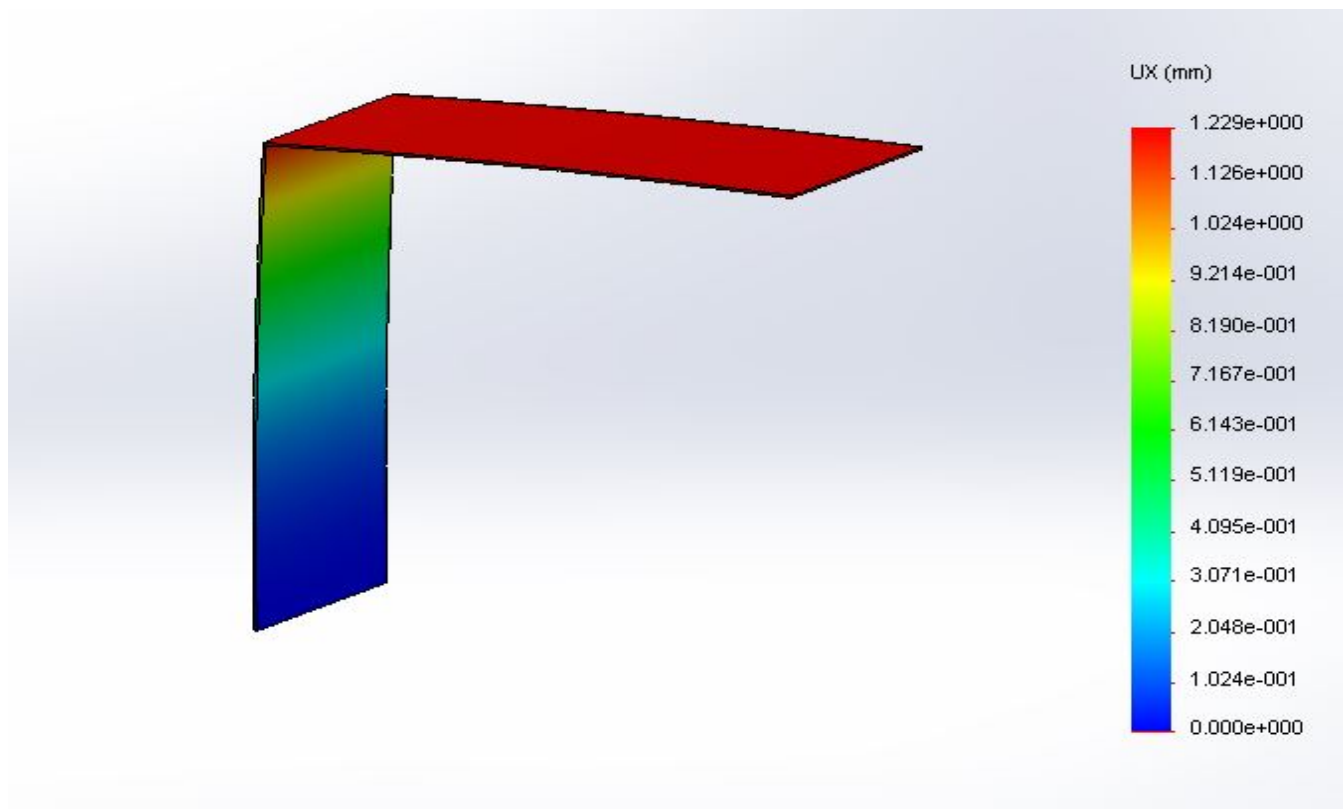
Η πλεονάζουσα στιβαρότητα, προέκυψε πρακτικά από την αλλαγή του πάχους των ελασμάτων, γύρω από τους κόμβους του δικτυώματος. Οι υπολογισμοί αυτοί βασίστηκαν στην μέθοδο του "Στοιχείων Χαρακτηριστικού Ογκου" (RVE). Σε κάθε τέτοιο στοιχείο, για μοναδιαία φορτία ασκούμενα στην άκρη τους, από θεωρία ελαστικότητας υπολογίστηκαν οι σχετικές μετατοπίσεις και πρόεκυψαν τα αντίστοιχα μέτρα δυστρεψίας. Συγκεκριμένα στο δεύτερο στοιχείο αντί για περαστό προεντεταμένο κοχλία σχεδιάστηκε ράβδος με αντίστοιχα υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Επείτα μετατρέποντας το ενισχυμένο στοιχείο σε στοιχείο γωνιάς ίδιο με το πρώτο, υπολογίστηκαν τα νέα ισοδύναμα πάχη που πρέπει να έχουν τα ελάσματα για να προκύπτει το μέτρο δυστρεψίας. Έτσι λοιπόν στην Modal Analysis που ακολούθησε, εισήχθηκε φορέας με ενισχυμένους κόμβους. Παρακάτω φαίνονται τα μοντέλα αυτής της διαδικασίας και οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν.



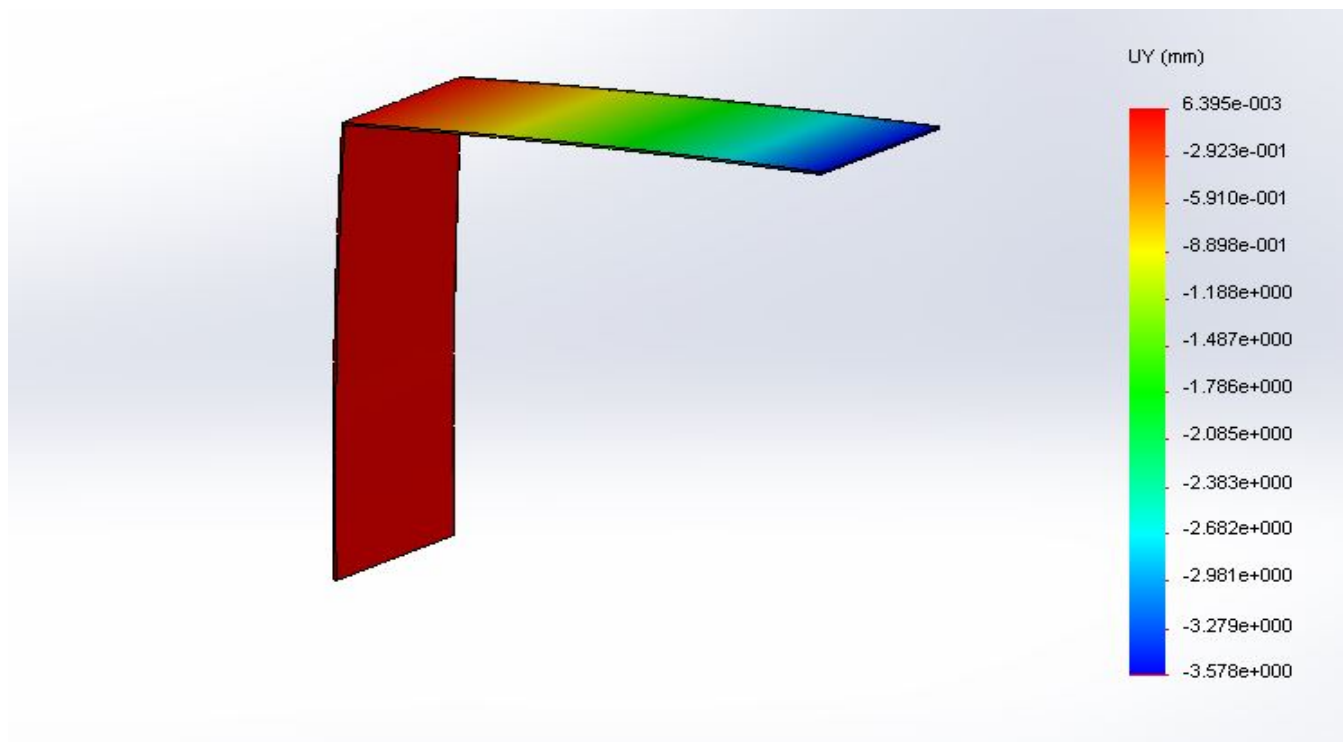
Σχήμα 6.1: Στοιχείο χωρίς ενίσχυση



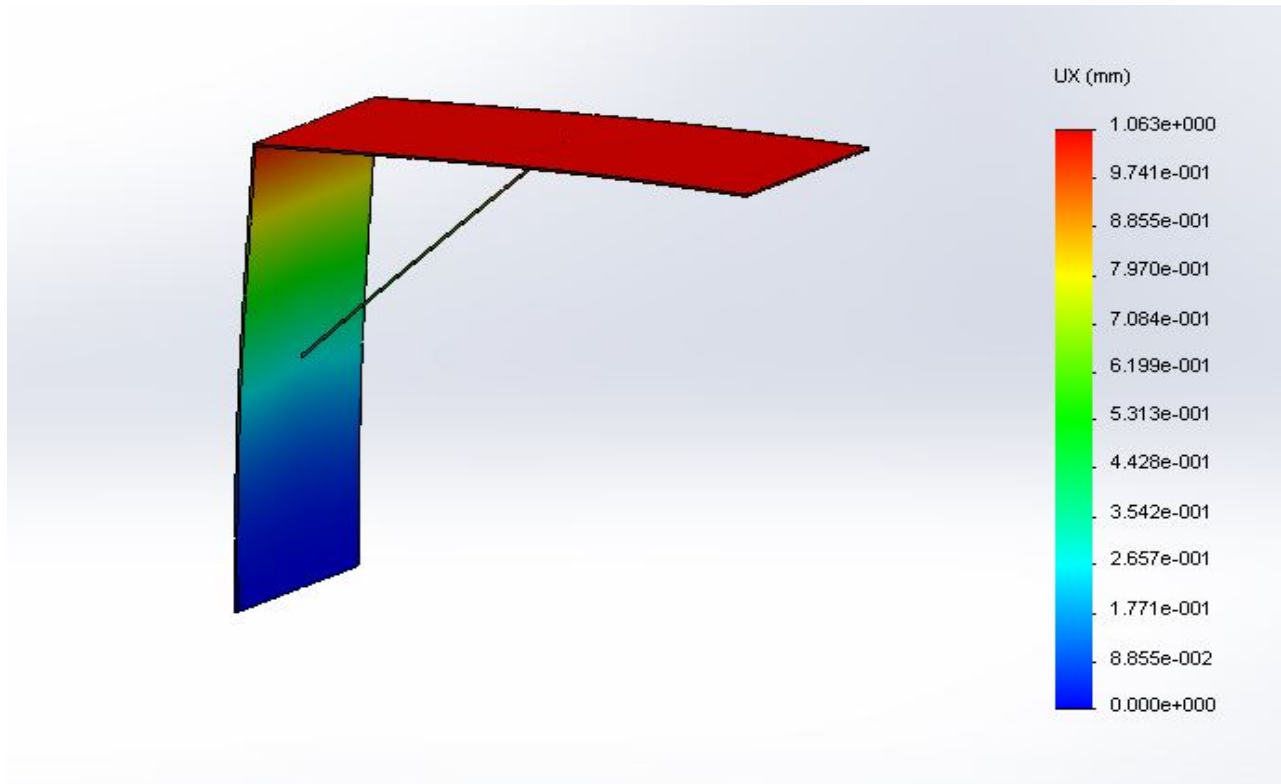
Σχήμα 6.2: Στοιχείο με ενίσχυση



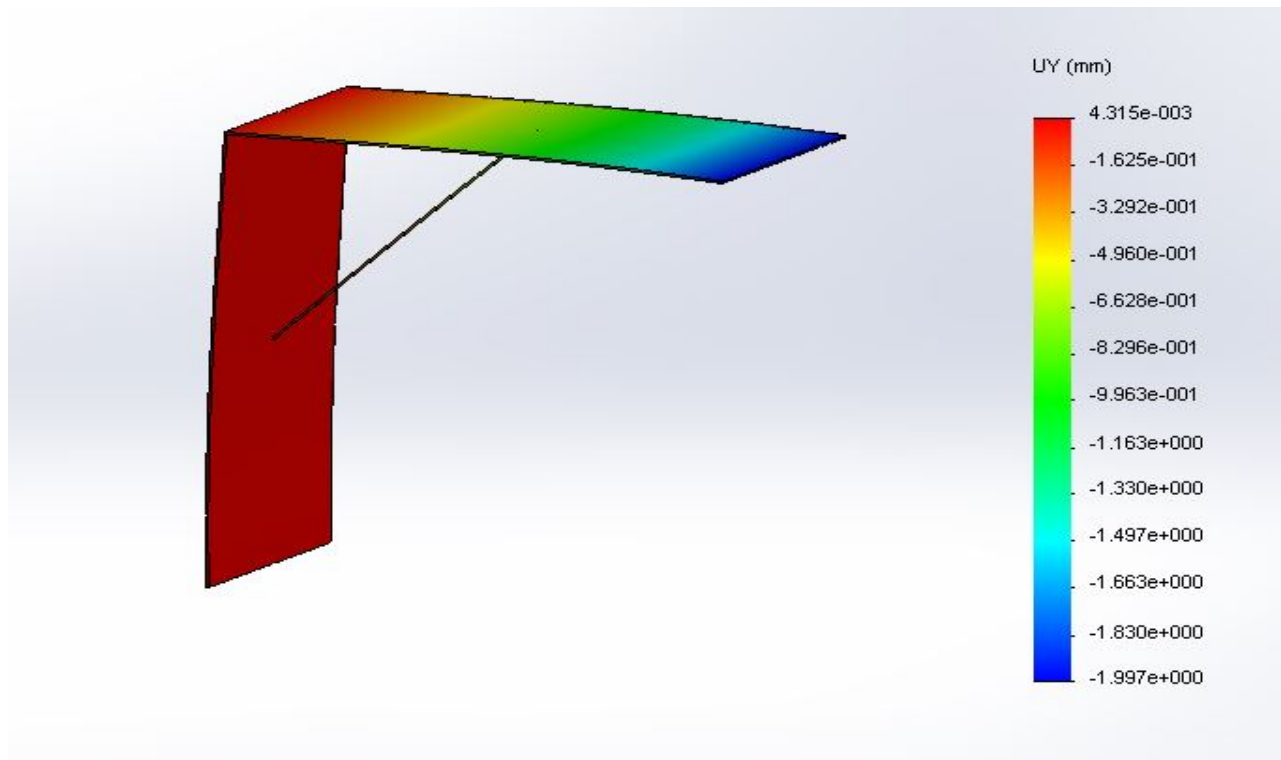
Σχήμα 6.3: Στοιχείο χωρίς ενίσχυση-Μετατόπιση  $U_x$



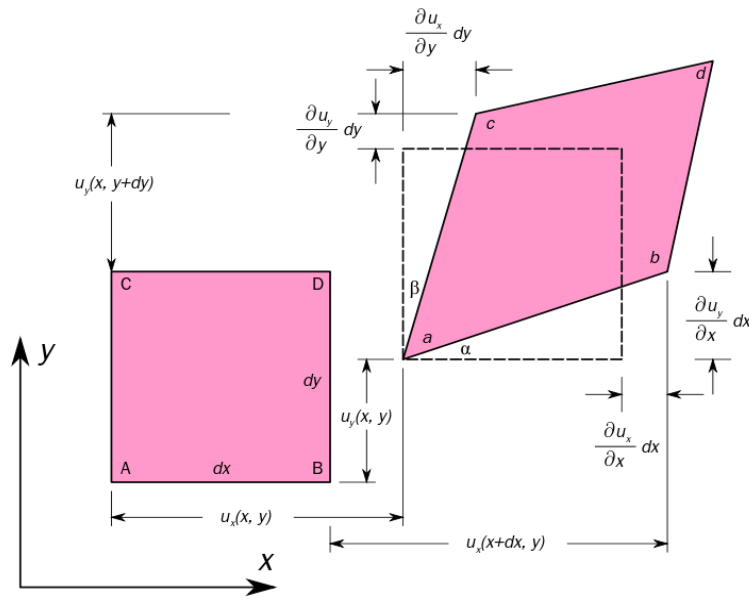
Σχήμα 6.4: Στοιχείο χωρίς ενίσχυση-Μετατόπιση  $U_y$



Σχήμα 6.4: Στοιχείο με ενίσχυση-Μετατόπιση  $U_x$



Σχήμα 6.6: Στοιχείο με ενίσχυση-Μετατόπιση  $U_y$



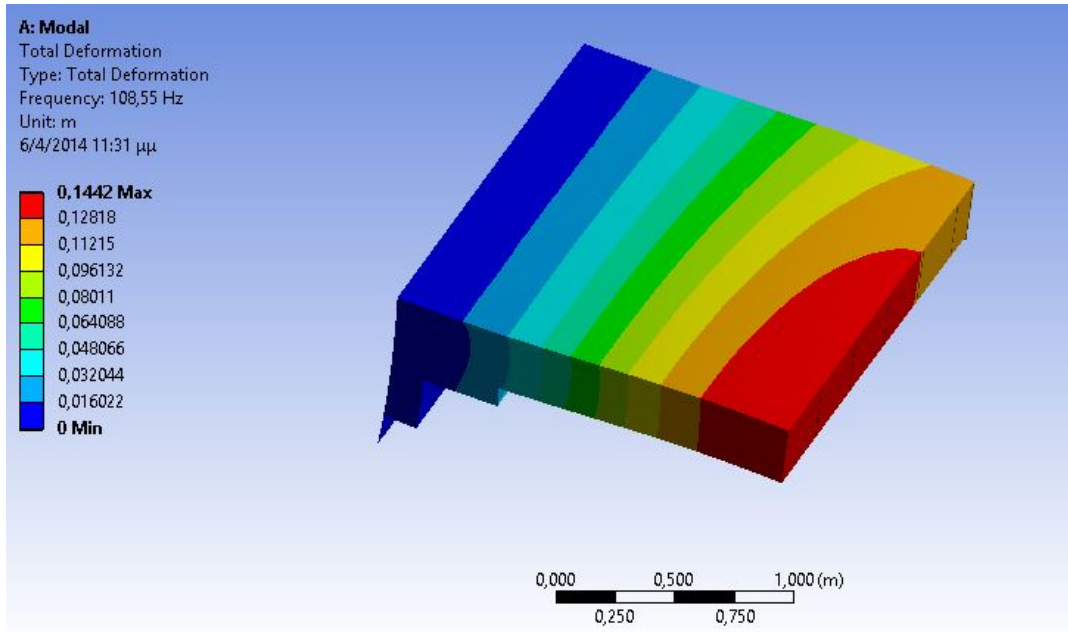
Σχήμα 6.7: Παραμόρφωση Στοιχειώδους Όγκου

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6.1)$$

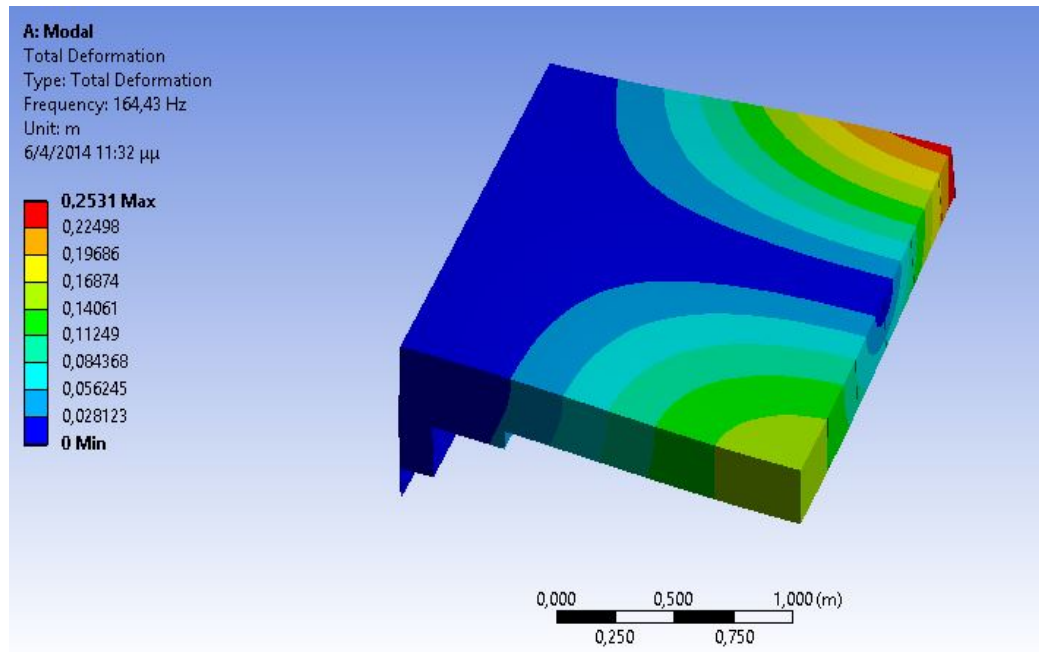
Στην συνέχεια φαίνονται οι τελικές τιμές που προέκυψαν για τις πέντε πρώτες ιδιοσυχνότητες του άνω φορέα με χρήση αυτής της ανάλυσης.

ίνακας 6.1: Ιδιοσυχνότητας άνω φορέα

Ιδιοσυχνότητες Πλάκας	
Πρώτη	108.55Hz
Δεύτερη	164.43Hz
Τρίτη	444.32Hz
Τέταρτη	459.1Hz
Πέμπτη	509.26Hz

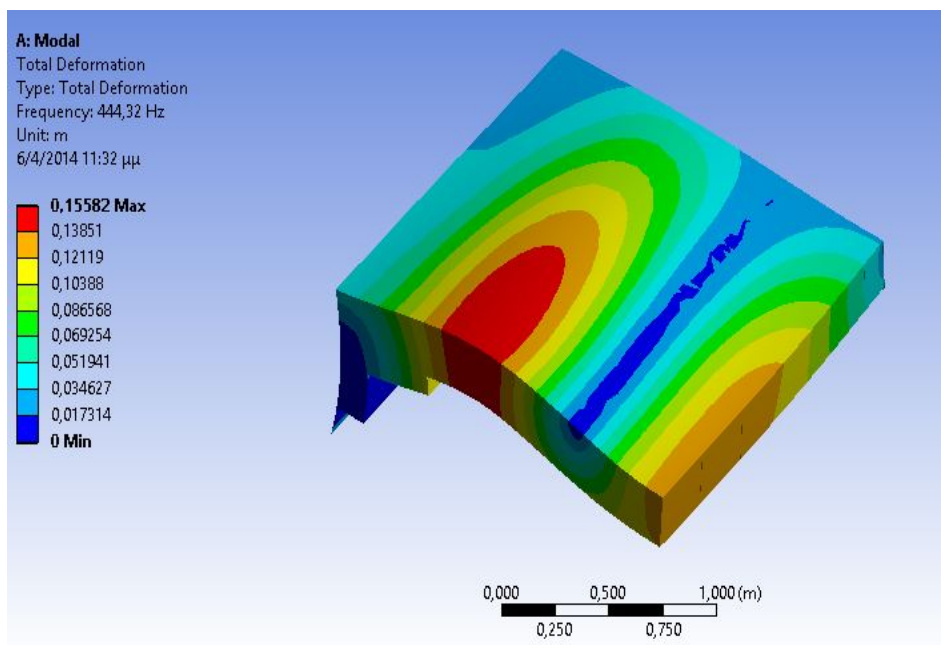


Σχήμα 6.8 Πρώτη ιδιοσυχνότητα άνω δικτυώματος

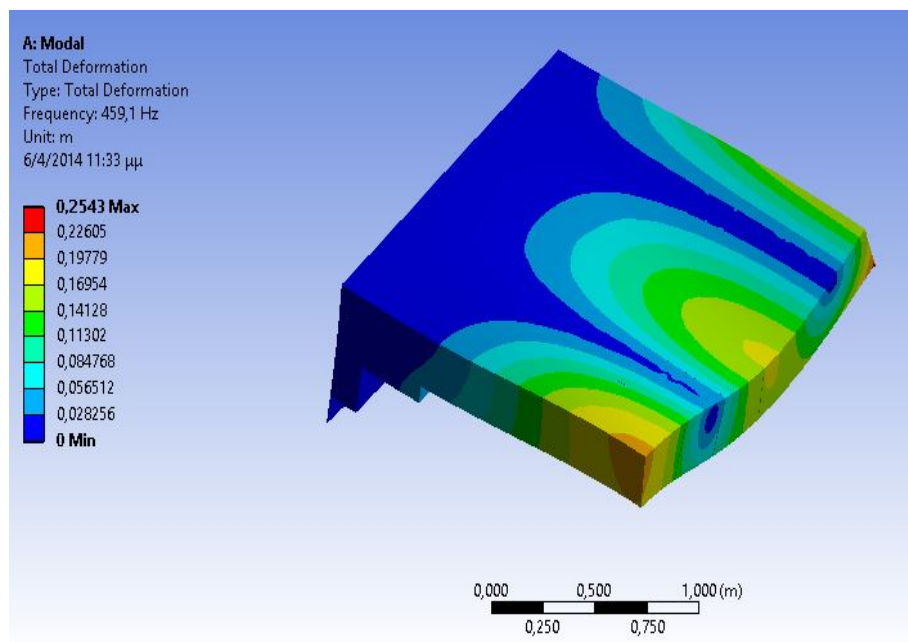


Σχήμα 6.9 Δεύτερη ιδιοσυχνότητα άνω δικτυώματος

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

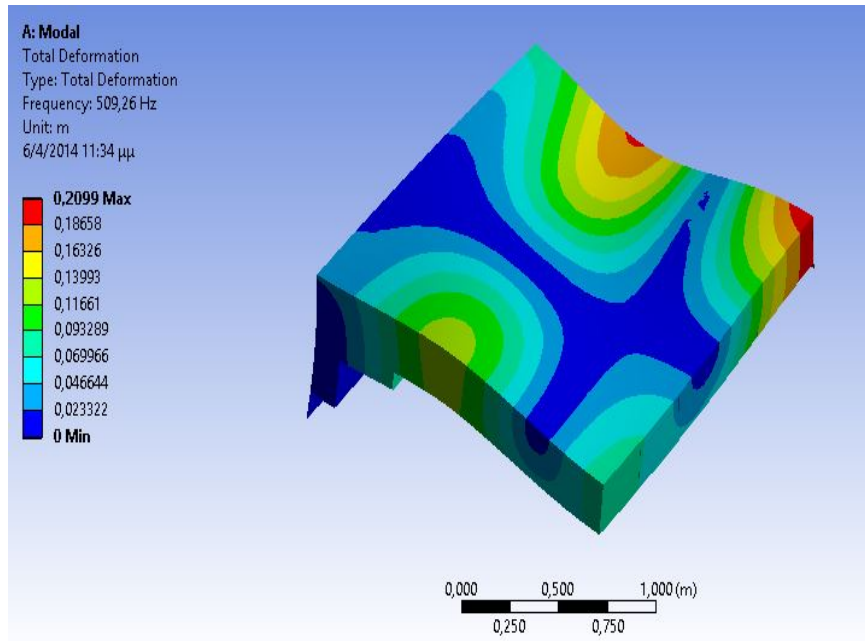


Σχήμα 6.10 Τρίτη ιδιοσυχνότητα άνω δικτυώματος



Σχήμα 6.11 Τέταρτη ιδιοσυχνότητα άνω δικτυώματος





Σχήμα 6.12 Πέμπτη ιδιοσυχνότητα άνω δικτυώματος



## 7. ΕΛΕΓΧΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ

### 7.1. Εισαγωγή

Έχοντας παρουσιάσει τα κυριότερα ζητήματα του αναπτυσσόμενου σχεδιασμού αλλά και έχοντας αναλύσει την δυναμική συμπεριφορά των υποσυστημάτων, η τελική αξιοπιστία του δίνεται εάν επιπλέον πληρούνται οι έλεγχοι αντοχής, πάντοτε κάτω από έναν συντελεστή ασφαλείας. Οι έλεγχοι αυτοί αφορούν τις στατικές και δυναμικές καταπονήσεις των διαφόρων τμημάτων ολόκληρης της κατασκευής και των διαφόρων στοιχείων της μεταξύ τους σύνδεσης.

Παρόλο που τα διάφορα τμήματα παρουσιάζονται με τον χαρακτήρα του ελέγχου ενός προκαθορισμένου στοιχείου μηχανής υπό δεδομένες καταπονήσεις, η όλη διαδικασία ήταν πολύ πιο σύνθετη. Συγκεκριμένα, για τα περισσότερα από αυτά τα στοιχεία υπήρξε έντονη αλληλεξάρτηση των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών καθώς και των υλικών τους, με άλλες προδιαγραφές, όπως οι επιμέρους δυσκαμψίες και βάρη.

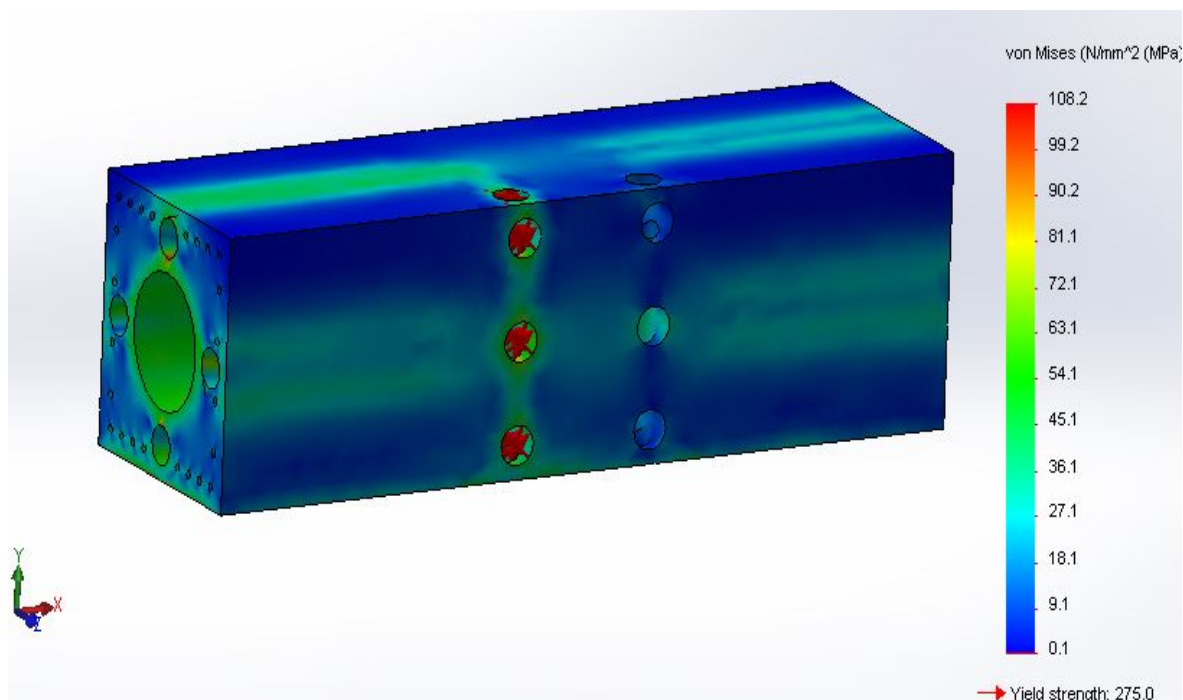
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι έλεγχοι που έγιναν, με την χρήση πακέτου πεπερασμένων στοιχείων στα σημαντικότερα από τα τμήματα της κατασκευής, κυρίως σε αυτά που αποτελούν τα δομικά στοιχεία του σχεδιασμού που έχει παρουσιαστεί μέχρι τώρα. Σε κάθε υποκεφάλαιο παραθέτονται οι τιμές των φορτίσεων που επιβλήθηκαν και αιτιολογείται το μέγεθός τους. Όπου κρίθηκε αναγκαίο έγινε περαιτέρω σχολιασμός των σχεδιαστικών αποφάσεων που παρουσιάζονται.

## 7.2. Τμήματα Επενεργητών

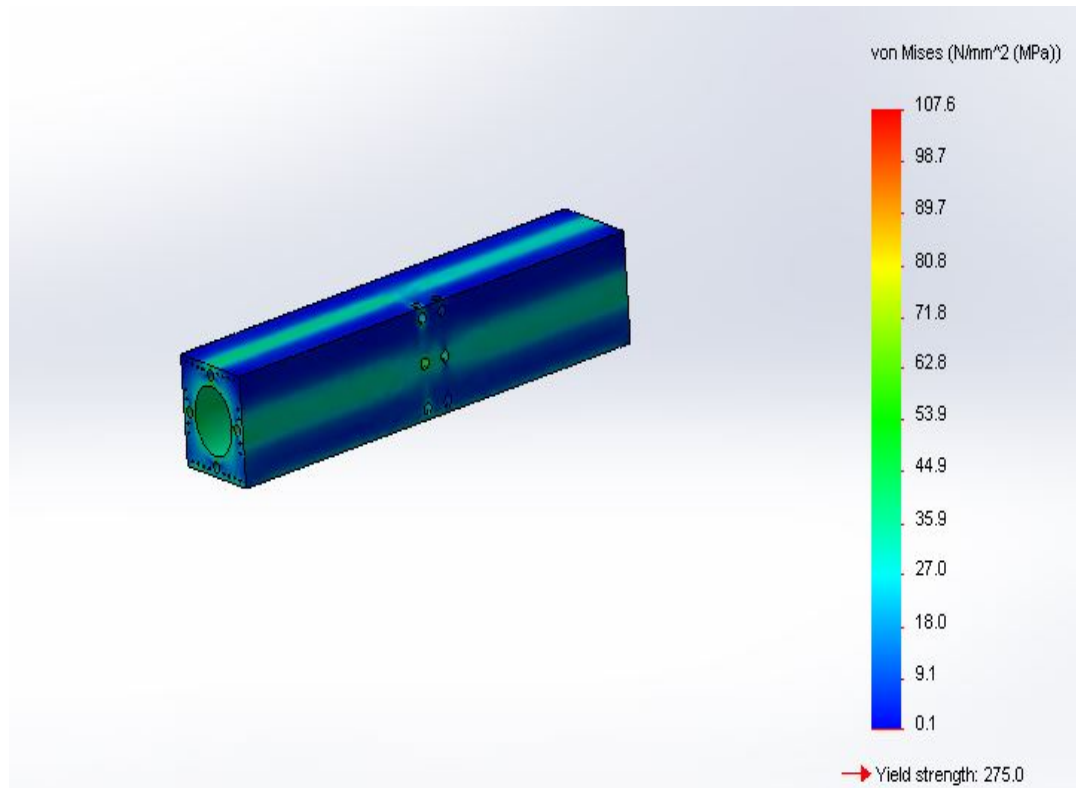
Στο κεφάλαιο αυτό, για κάθε έναν από τους δύο επενεργητές, παρατίθενται οι προκύπτουσες αναπτυσσόμενες τάσεις στα επιμέρους τμήματά τους. Κάθε σχήμα πρόεκυψε από την επιβολή των μέγιστων δυνατών, κατά περίπτωση, δυνάμεων και πιέσεων. Πιο συγκεκριμένα για τις πιέσεις επιλέχθηκαν οι μέγιστες εμφανιζόμενες τιμές στο κάθε στοιχείο, όπως αυτές παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5.

### 7.2.1. Επενεργητές

Στα σχήματα 7.1 και 7.2 φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις επί του σώματος των επενεργητών. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 5, λόγω της φύσης της ροής που επιθυμούμε εντός του κάθε κυλίνδρου υπάρχουν οι αντίστοιχες διαμορφώσεις. Όπως ήταν αναμενόμενο σε αυτά τα σημεία εμφανίζονται και αντίστοιχες συγκεντρώσεις τάσεων.



Σχήμα 7.1 Αναπτυσσόμενες Τάσεις - Οριζόντιος Επενεργητής



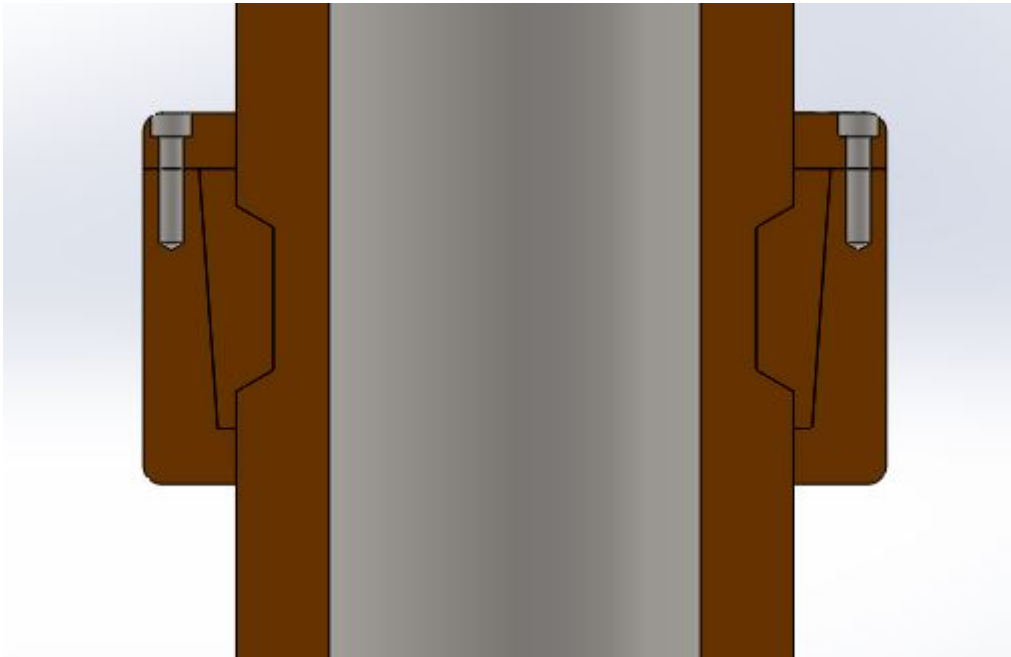
Σχήμα 7.2 Αναπτυσσόμενες Τάσεις - Κατακόρυφος Επενεργητής

Ως υλικό των κυλίνδρων επιλέχθηκε ο χάλυβας κατασκευών St50. Από τα διαγράμματα βλέπουμε λοιπόν, ότι :

1. Στον οριζόντιο κύλινδρο με πίεση εφαρμογής ίση με 180 bar προκύπτει συντελεστής ασφαλείας  $sf= 2,55$
2. Στον κατακόρυφο κύλινδρο με πίεση εφαρμογής ίση με 215 bar προκύπτει συντελεστής ασφαλείας  $sf= 2,75$

### 7.2.2. Σύνδεση Εμβόλων

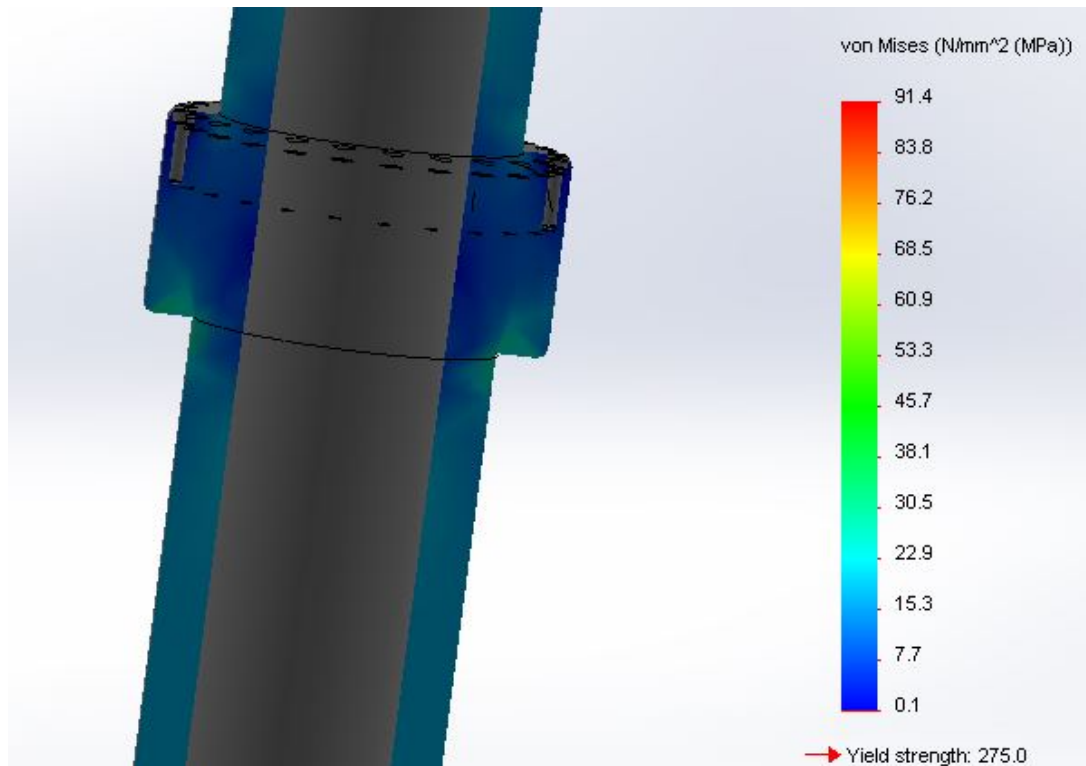
Για την σύνδεση των εμβόλων επί των διπλών βάκτρων επιλέχθηκε διαμόρφωση κωνικής σφήνας με καπάκι πρόσδεσης, με στόχο να διατηρείται η ευθυγραμμία. Η διαμόρφωση αυτή φαίνεται στο σχήμα 7.3 :



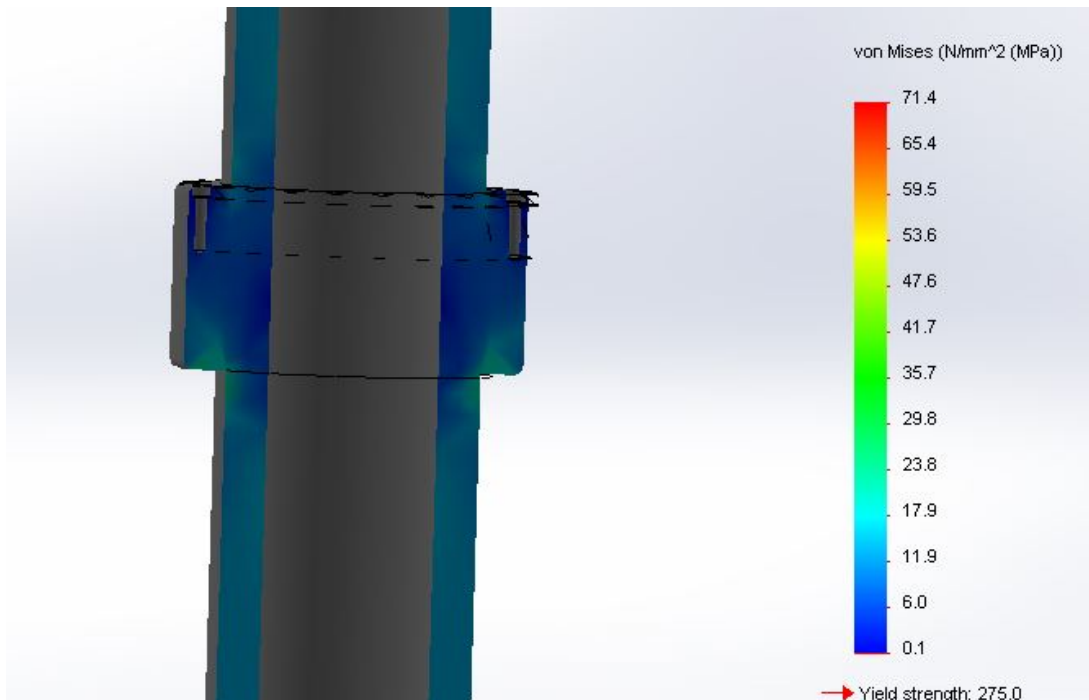
Σχήμα 7.3: Σύνδεση εμβόλου βάκτρου επενεργητών

Στα σχήματα 7.4 και 7.5 φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις στην κάθε σύνδεση. Ως υλικό κατασκευής των εξαρτημάτων επιλέχθηκε ο χάλυβας κατασκευών St50. Από τα διαγράμματα βλέπουμε ότι :

1. Για την σύνδεση του εμβόλου του οριζόντιου κυλίνδρου με πίεση εφαρμογής ίση με 180 bar, προκύπτει συντελεστής ασφαλείας  $sf=3.02$
2. Για την σύνδεση του εμβόλου του κατακόρυφου κυλίνδρου με πίεση εφαρμογής ίση με 215 bar, προκύπτει συντελεστής ασφαλείας  $sf=3.87$



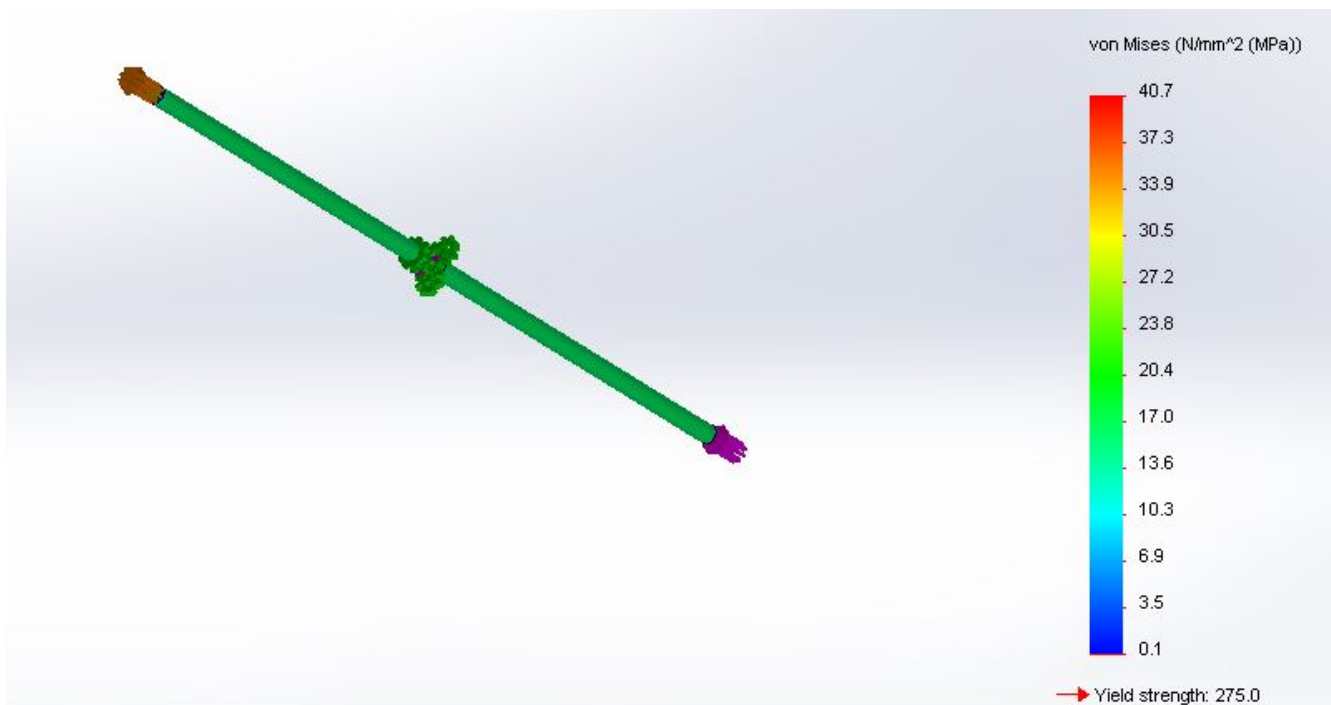
Σχήμα 7.4 Αναπτυσσόμενες Τάσεις - Σύνδεση Οριζόντιου Επενεργητή



Σχήμα 7.5 Αναπτυσσόμενες Τάσεις - Σύνδεση Κατακόρυφου Επενεργητή

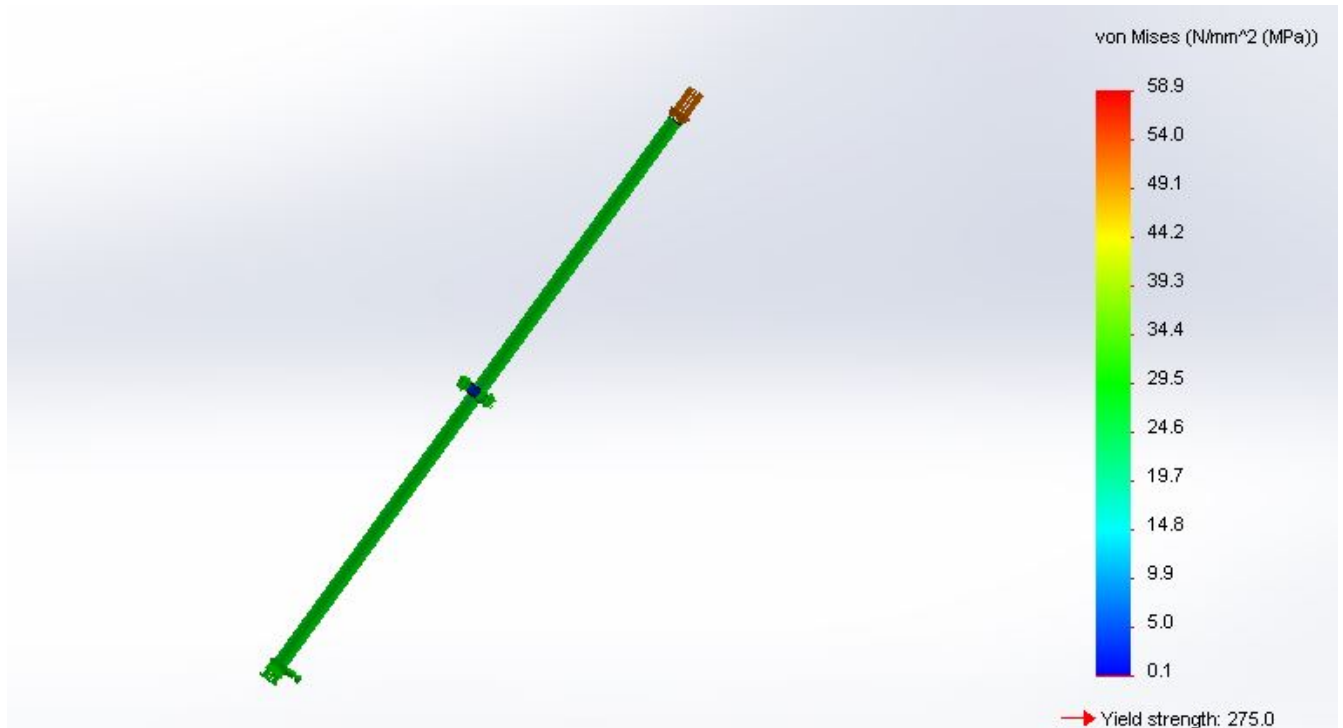
### 7.2.3. Βάκτρα

Τελευταίο τμήμα που ελέχθηκε σε κάθε επενεργητή, ήταν η αντοχή των αντίστοιχων βάρων σε λυγισμό. Σε αντίθεση με τις πιο πάνω μελέτες, για αυτήν την περίπτωση έγινε FE Buckling Analysis αντί για FE Static Analysis, καθώς σε αυτή λαμβανόντουσαν υπόψη και οι προκύπτουσες in-plane φορτίσεις που καταπονούν τα βάρια και είναι πιο κατάλληλη για μελέτη ευστάθειας κατασκευών. Ειδικά για το διπλό βάρια του οριζόντιου επενεργητή, λόγω της φύσης της σύνδεσης, κατά την κίνηση του σεισμού, το ένα τμήμα του υφίσταται λυγισμό, ενώ το άλλο εφελκύεται. Έτσι για την αποφυγή μιας εσφαλμένης μοντελοποίησης της κατανομής των φορτίων, ελέχθηκε κάθε τμήμα σαν να υφίσταται όλο το φορτίο υπό το είδος φόρτισης που του αντιστοιχεί. Ως υλικό κατασκευής επιλέχθηκε ο χάλυβας St50 με επικάλυψη χρωμίου. Στα σχήματα 7.6 και 7.7 φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις για κάθε ένα από τα δύο βάρια, στις ακραίες συνθήκες φόρτισης.



Σχήμα 7.6 Αναπτυσσόμενες Τάσεις Λυγισμού - Βάρια Οριζόντιου Επενεργητή





Σχήμα 7.7 Αναπτυσσόμενες Τάσεις Λυγισμού - Βάκτρο Κατακόρυφου Επενεργητή

Απο τα σχήματα αυτά φαίνεται ότι:

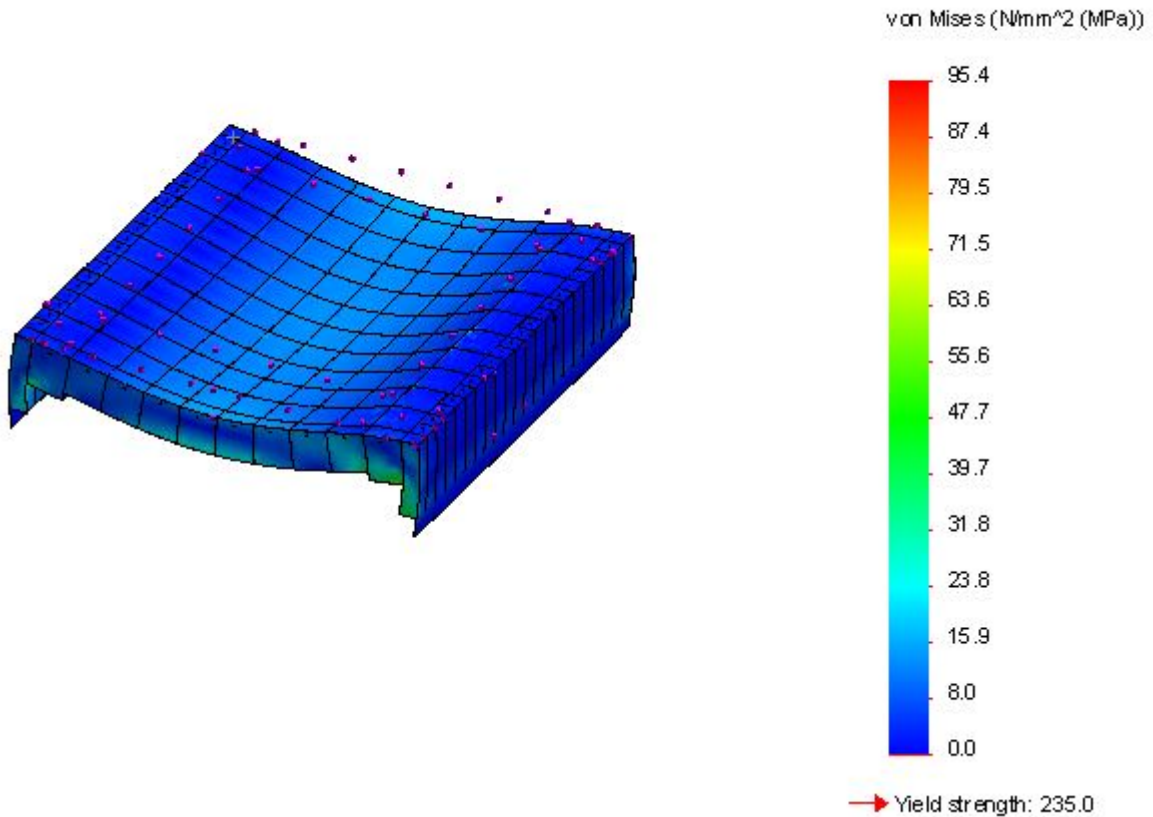
1. Για το βάκτρο του οριζόντιου επενεργητή υπό φορτίο ίσο με 6,75 kN, προκύπτει συντελεστής ασφαλείας  $sf=3.15$
2. Για το βάκτρο του οριζόντιου επενεργητή υπό φορτίο ίσο με 28 kN (για κάθε είδος καταπόνησης), προκύπτει συντελεστής ασφαλείας  $sf=3.42$

### 7.3. Δικτυώματα

Όπως αναφέρθηκε και στα κεφάλαια 5 και 6 ο σχεδιασμός των δικτυωμάτων ήταν βαρύνουσας σημασίας για λόγους που ήδη αναλύθηκαν. Ο σχεδιασμός τους όμως δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί εάν δεν επιβεβαιώνονταν και οι τιμές των αναπτυσσόμενων

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΡΑΠΕΖΑΣ

τάσεων σε αυτά. Στο σχήμα 7.8 φαίνονται οι αναπτυσσόμενες τάσεις στο άνω δικτύωμα, όταν αυτό καλείται να δουλέψει σε πλήρες φορτίο. Όπως φαίνεται ο συντελεστής ασφαλείας που προκύπτει είναι  $sf=2.47$ .



Σχήμα 7.8 Αναπτυσσόμενες Τάσεις - Άνω Δικτύωμα



## 8. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

### 8.1 Εισαγωγή

Με το πέρας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ολοκληρώθηκε μια προσπάθεια που αφορούσε την εκπόνηση μιας μελέτης, ώστε μετά το πέρας αυτής να είναι εφικτό με την λιγότερη δυνατή προσπάθεια και επίβλεψη, να κατασκευαστεί εντός του χώρου του Ε.Μ.Π., μια σεισμική τράπεζα υψηλών ονομαστικών επιδόσεων. Ο στόχος είναι αυτή η μηχανή εκτός του να μπορεί να είναι εφάμιλλη των σημερινών μηχανών σε αυτό το πεδίο, να δίνει την δυνατότητα στους ερευνητές του ιδρύματος να πραγματοποιήσουν πειράματα υψηλού επιστημονικού ενδιαφέροντος, τα οποία μέχρι την στιγμή της συγγραφής δεν έχουν πραγματοποιηθεί από κάποια ερευνητική ομάδα.

Για να είναι όμως δυνατό το εν λόγω μηχανήμα να μπορέσει να κατασκευαστεί εντός του ιδρύματος και με τους πόρους που αυτό διαθέτει, χρειάστηκε κατά τη φάση του σχεδιασμού του να ληφθούν αποφάσεις που να οδηγήσουν σε μεγάλη μείωση του κόστους, έναντι του υπάρχοντος κόστους ανάπτυξής του, χωρίς παράλληλα να αμφισβητηθεί η αξιοπιστία του.

Αναφορικά λοιπόν με την αξιοπιστία, σε κάθε φάση της παρούσας ανάπτυξης διεξήχθησαν ενδελεχής έλεγχοι που αφορούσαν τόσο στην εκλογή του πιο απλού εξαρτήματος (οδηγήσεις, στεγανώσεις, κοχλιώσεις, συγκολλήσεις) όσο και στην συμπεριφορά και αντοχή των κυριότερων υπομημάτων (σερβοβαλβίδες, υδραυλικά κυκλώματα, δικτύωματα). Οι έλεγχοι αυτοί εκτός του ότι καθόριζαν κάθε επόμενο βήμα

της σχεδίασης, έγιναν με στόχο να ορίσουν την τελική μορφή της μηχανής, πριν από το στάδιο της κατασκευής. Ο απώτερος στόχος ήταν με την έναρξη του σταδίου αυτού η μοναδική επιπρόσθετη μελετητική αξία να αφορά ζητήματα συντήρησης, ασφαλούς χρήσης και λειτουργίας καθώς και υλοποίησης ελέγχου.

Κρίθηκε λοιπόν από τον συγγραφέα, ότι παράθεση εκτενών και ενδελεχών υπολογισμών που έλαβαν χώρα κατά την μελέτη, όπως και παράθεση των διαφόρων αναλυτικών και αριθμητικών μοντέλων που συνόδευαν την φάση του σχεδιασμού, απομακρύνει τον αναγνώστη από την ουσία της εκπονηθείσας δουλειάς.

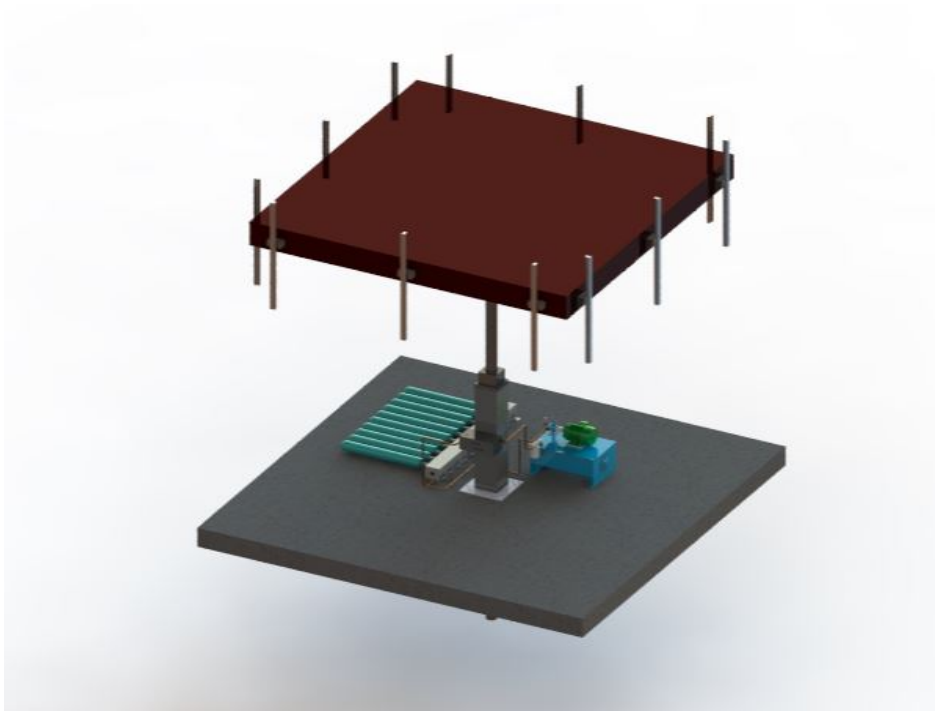
Στόχος εξ' αρχής ήταν να γίνει σαφής η συλλογιστική πορεία και ο προσανατολισμός της προσπάθειας που ακολουθήθηκε από τον συγγραφέα, σε στενή συνεργασία με τον επιβλέποντα, ώστε να αντιμετωπισθούν σημαντικές τεχνολογικές προκλήσεις που συνόδευσαν τον σχεδιασμό της μηχανής. Ως εκ τούτου τα κεφάλαια που παρατέθηκαν επιτέλεσαν αυτόν το σκοπό.

## 8.2 Σύνοψη αποτελεσμάτων

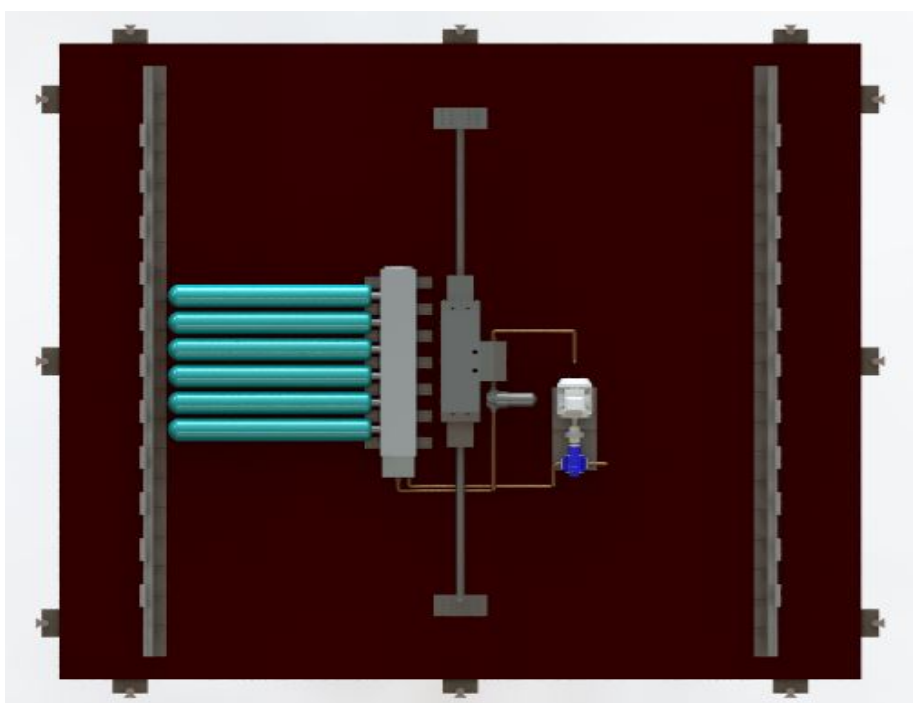
Οι βασικοί άξονες επί των οποίων κινήθηκε η μελέτη πρόεκυψαν από την ανάλυση των χαρακτηριστικών των σημερινών αντιστοιχών μηχανών και από την προσπάθεια αποδόμησης των παραγόντων που αναστέλλουν την εξέλιξή τους. Συγκεντρωτικά οι αποφάσεις που πάρθηκαν για αυτό τον σκοπό ήταν οι εξής:

1. Αποδέσμευση των βαθμών ελευθερίας του δοκιμίου με χρήση ξεχωριστών σερβουδραυλικών υποσυστημάτων ανά κίνηση.
2. Σχεδιασμός γεωμετρικών χαρακτηριστικών υποεξαρθημάτων με στόχο την επάρκεια χρήσης μιας και μόνο σερβοβαλβίδας ανά κίνηση.
3. Αποδέσμευση των υδραυλικών επενεργητών από την ανάγκη παραλαβής των ροπών που προέρχονται από την κίνηση του δοκιμίου, με χρήση ξεχωριστών διατάξεων γραμμικών οδηγών για αυτό το σκοπό.
4. Αποδέσμευση του συστήματος ελέγχου από την ανάγκη συγχρονισμού περισσότερων του ενός επενεργητή ανά κίνηση.
5. Ανάρτηση υδραυλικής μονάδας επί κινούμενης βάσης με χρήση δεξαμενής χωρίς ελεύθερη στάθμη.

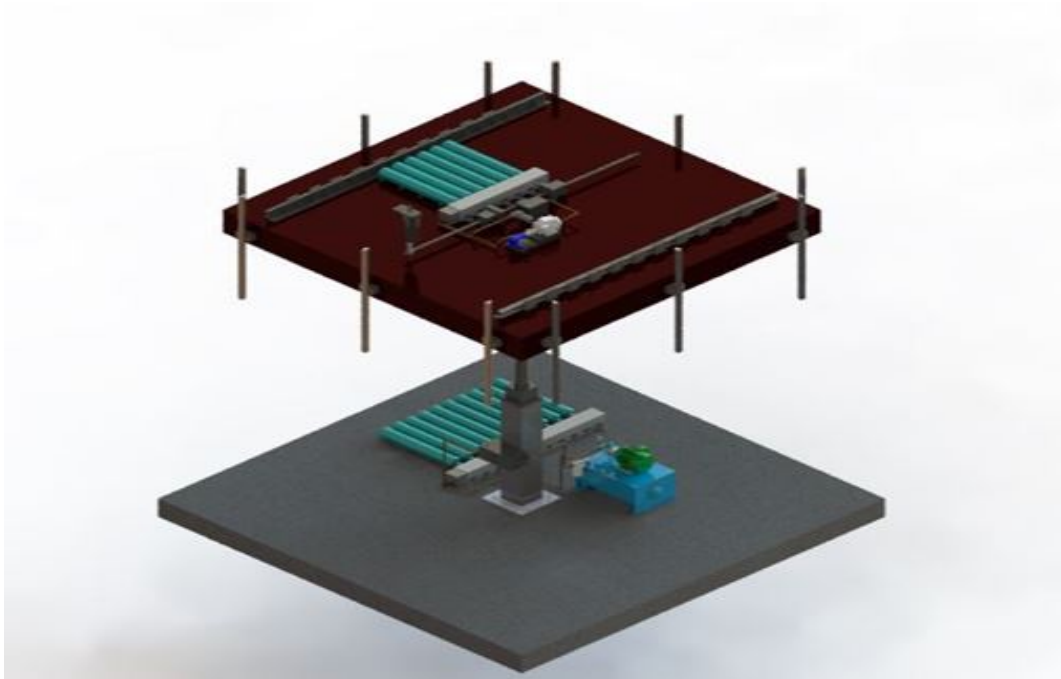
Στην συνέχεια φαίνονται τα σχήματα που συνοψίζουν αυτόν το σχεδιασμό:



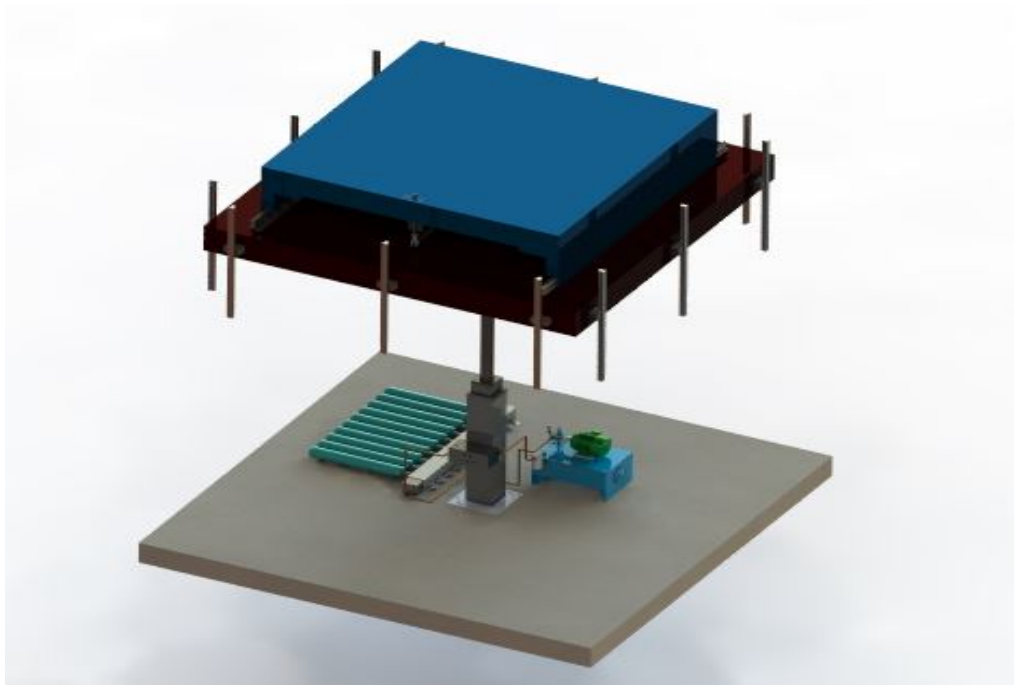
Σχήμα 8.1: Κατακόρυφο υποσύστημα



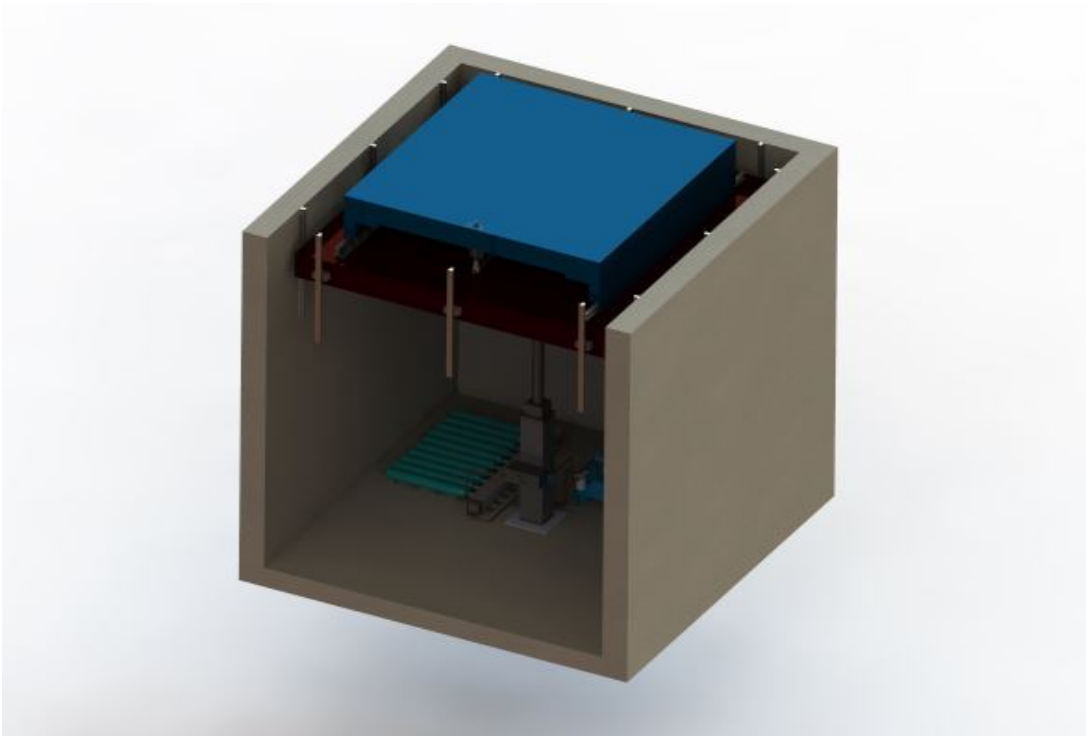
Σχήμα 8.2: Ανάγτηση οριζόντιου υποσυστήματος



Σχήμα 8.3: Σύνθεση μονάδων ισχύος



Σχήμα 8.4: Σύνθεση υποσυστημάτων



Σχήμα 8.5: Σεισμική τράπεζα-Τελικός σχεδιασμός



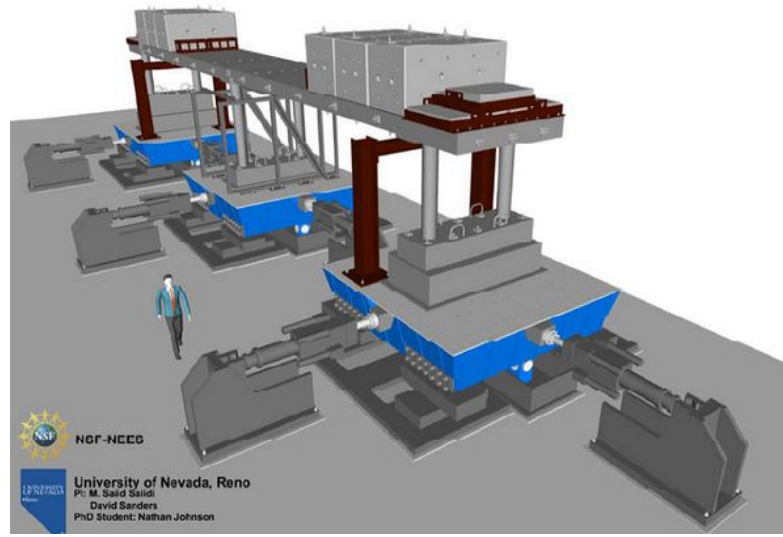


## 9. ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ

Δεομένου ότι κατά την υλοποίηση μιας νέας ιδέας, το δυσκολότερο στάδιο είναι η επιβεβαίωση της αρχής λειτουργίας της, κατά τη φάση του σχεδιασμού αυτή δεν σπαταλήθηκε ουσιαστικός χρόνος για να την μελέτη άνω των δύο βαθμών ελευθερίας. Υπάρχει όμως πλέον η πεποίθηση ότι προσέγγιση που ακολουθήθηκε, επιτρέπει την μελλοντική αναβάθμιση του σχεδιασμού σε περισσότερων του ενός βαθμού ελευθερίας καθώς και στην εφαρμογή του για μελέτη κατασκευών μεγάλου μήκους. Τα σχήματα που ακολουθούν δίνουν μια αίσθηση αυτής της χρήσης των σεισμικών τραπεζών όπως αυτές χρησιμοποιούνται στο Πανεπιστήμιο της Νεβάδα.



Σχήμα 9.1 Παράλληλη χρήση σεισμικών τραπεζών



Σχήμα 9.2 Παράλληλη χρήση σεισμικών τραπεζών



## 10.Βιβλιογραφία

- [1] Θ.Ν. Κωστόπουλος, Υδραυλικά και Πνευματικά Συστήματα, εκδόσεις Συμείων 2009
- [2] Hydraulic Components, Mannesmann Rexroth Catalogue
- [3] Fluid Power Seal Design Guide 5370 EPS Parker 2012
- [4] Ρ.Γραϊκούσης, Στοιχεία Μηχανών Ι, Τόμοι Ι-VIII, εκδόσεις Γιαχούδη 1983
- [5] Π.Α. Μακρή, Στοιχεία Μηχανών Ι, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π. 1998
- [6] Timoshenko, Theory Of Plates And Shells 2ndEdition
- [7] Warren Young Roarks, Formulas for Stress and Strain
- [8] Γ.Τ. Τσαμασφύρος, «Μηχανική Παραμορφωσίμου Σώματος Ι», εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα 1991
- 9] Anthony E. Armenákas, «Advanced Mechanics of Materials and Applied of Elasticity», Taylor & Francis
- [10] *Ansys Help*
- [11] Wikipedia-the free encyclopedia, <http://en.wikipedia.org/wiki/Plastic>
- [12] Anthony E. Armenákas, «Advanced Mechanics of Materials and Applied of Elasticity», Taylor & Francis





