

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΓΕΝΙΚΟ ΤΜΗΜΑ**



**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**  
**ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ : «ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

**ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΦΕΡΟΝΤΟΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΝΟΤΙΟΑΝΑΤΟΛΙΚΟΥ**  
**ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΦΡΟΥΡΙΟΥ ΚΟΥΛΕ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ**  
**ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ**

**ΜΑΥΡΑΚΗΣ ΜΙΧΑΛΗΣ**

**Επιβλέπουσα : Σταυρουλάκη Μαρία, Επίκουρος Καθηγήτρια**

**ΧΑΝΙΑ , 2015**

Η παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών του τομέα Μηχανικής του Γενικού Τμήματος του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Το Φρούριο Κούλε δεσπόζει στο ενετικό λιμάνι του Ηρακλείου και αποτελεί ένα εξαιρετικής σημασίας και σπουδαιότητας μνημείο της πόλης. Η συνολική διερεύνηση της στατικότητας του είναι επίκαιρη και αναγκαία. Κρίθηκε σκόπιμο με την παρούσα διατριβή να ερευνηθεί η συμπεριφορά του νοτιανατολικού τμήματος (του τμήματος με τις σημαντικότερες δομικές φθορές ) σε διάφορες δράσεις με σκοπό την ερμηνεία των παρουσιαζόμενων φθορών.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής και στην ολοκλήρωση των σπουδών μου για την απόκτηση μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης συνέβαλλαν σε σημαντικό βαθμό και ποικιλοτρόπως οι εξής επιστήμονες τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω :

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας Επίκουρη Καθηγήτρια του Π.Κ. κ. Μαρία Σταυρουλάκη, για την άποψη συνεργασία και την υποστήριξη που μου παρείχε για την ολοκλήρωση όχι μόνο της εργασίας αλλά και των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή του Π.Κ. κ. Σκουτέλη Νικόλαο ο οποίος με παρότρυνε τόσο στο να συνεχίσω τις σπουδές μου όσο και στο να ασχοληθώ με το σημαντικό αυτό μνημείο. Θερμά ευχαριστώ και τον Καθηγητή του Π.Κ. κ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη για τις πλούσιες γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την διάρκεια των μεταπτυχιακών μαθημάτων. Ευχαριστώ πολύ τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Π.Κ. κ. Ιωάννη Τσομπανάκη, για τη αμέριστη συμπαράσταση του κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου, και για την σημαντική βοήθεια του στην υλοποίηση της εργασίας .

Οφείλω να ευχαριστήσω θερμά την προϊσταμένη της Αρχαιολογικής Υπηρεσίας Ηρακλείου για την ουσιαστική της συνεισφορά δίνοντας μου στοιχεία από το αρχαιακό υλικό της υπηρεσίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην Ελευθερία μου, που με εμπνέει να προσπαθώ και να κατακτώ τους στόχους μου, καθώς και στους γονείς μου διότι το αξίζουν. Ευχαριστώ...

Μιχάλης Εμμ. Μαυράκης  
Χανιά, Απρίλιος 2015

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση και η εκτίμηση της παθολογίας του νοτιοανατολικού τμήματος του σημαντικότερου μνημείου της πόλης του Ηρακλείου του Φρουρίου ΚΟΥΛΕ με σύγχρονες μεθόδους επίλυσης και ανάλυσης κατασκευών.

Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων η οποία πλεονεκτεί λόγω της ευκολίας με την οποία αντιμετωπίζει σύνθετα προβλήματα ( πχ πολύπλοκες γεωμετρίες ), του ευχερέστερου προγραμματισμού της στον Η/Υ [ 1 ] και έχει εκτενώς χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές σε αντίστοιχες μελέτες. Για τη μοντελοποίηση και ανάλυση της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο MSC.MARC της εταιρίας Marc Analysis Corp. Πρόκειται για ένα πρόγραμμα γενικής εφαρμογής στο οποίο μπορούν να μελετηθούν φορείς υπό διάφορες φορτίσεις και υλικά, με την χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων..

Η μελέτη, η οποία έγινε με παραδοχή ελαστικής συμπεριφοράς, έχει ως στόχο να αποτελέσει το πρώτο βήμα της διαδικασίας ενίσχυσης και αποκατάστασης του μνημείου. Το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων που υλοποιήθηκε απεικονίζει λεπτομερώς την παρούσα γεωμετρία του φρουρίου, ( μικροί και μεγάλοι θόλοι, κανονιοθυρίδες κτλ ) . Τα μηχανικά χαρακτηριστικά του φορέα ελήφθησαν από ελέγχους δοκιμών του Περιφερειακού Εργαστηρίου Κρήτης.

Ειδικότερα έγινε προσπάθεια να ερευνηθεί το κατά πόσο οι σπηλαιώσεις στην θεμελίωση που οφείλονται στην γειτνίαση του φρουρίου με την θάλασσα επιβαρύνουν την κατασκευή. Στα πλαίσια της έρευνας έγιναν αναλύσεις του υπό εξέταση τμήματος για το ίδιο βάρος της κατασκευής, για επιβαλλόμενη βύθιση ως αποτέλεσμα των σπηλαιώσεων της θεμελίωσης. Έγινε επίσης ιδιομορφική ανάλυση για την εύρεση των δυναμικών χαρακτηριστικών της κατασκευής δηλαδή ιδιοσυχνοτήτων και ιδιομορφών που καθορίζουν την δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής. Τέλος έγινε δυναμική ανάλυση για το σεισμό του Αιγίου ο οποίος έπληξε την περιοχή της Αχαΐας στις 16-06-1995 και ήταν μεγέθους  $M=6.10$  βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ.

Κατόπιν αυτού έγιναν συγκρίσεις των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με την υπάρχουσα κατάσταση του φορέα, και επαληθεύτηκαν οι ευάλωτες περιοχές της κατασκευής, οι οποίες παρουσιάζουν ήδη σημάδια φθοράς και ρωγμές.

Συμπερασματικά διαπιστώνεται ότι λόγω των επιβαλλόμενων δράσεων το τμήμα αυτό του Φρουρίου έχει την τάση να αναπτύσσει εφελκυστικές τάσεις οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις ξεπερνούν την εφελκυστική αντοχή των δομών του Φρουρίου με συνέπεια να δημιουργούνται ρηγματώσεις στο σώμα του Φρουρίου. Εάν σε αυτά προστεθεί το γεγονός της βιολογικής φθοράς λόγω της άμεσης γειτνίασης του Φρουρίου με την θάλασσα ερμηνεύονται με σαφήνεια τα εμφανιζόμενα προβλήματα του Φρουρίου.

Στο τέλος της εργασίας παρουσιάζονται τα μέτρα που έχουν ληφθεί για την βελτιστοποίηση της κατάστασης του Φρουρίου και δίνονται κατευθύνσεις ώστε να αξιοποιηθεί η παρούσα εργασία σε μελλοντική έρευνα.



# **STRUCTURAL EVALUATION OF SOUTHEAST PART OF FORTRESS KOULE WITH THE FINITE ELEMENT METHOD**

## **SUMMARY**

The main goal in this survey is to investigate and assess the pathology of the southeast part of the most important monument of Heraklion city the KOULE Fortress with modern computational methods of analysis.

The method used for the present work is the finite element method which is advantageous because of the ease with which faces complex problems (eg complicated geometries), to facilitate programming of the H / Y and has been used extensively by many researchers in corresponding studies. For the modeling and analysis of construction MSC.MARC software package from the company Marc Analysis Corp was used. This is a generic program which can be studied structures under various loadings and materials, using the finite element method.

For the structural analysis, elastic behavior of the material was assumed, as a first step for monument study and rehabilitation process. The mechanical characteristics of the structure were taken from samples controls of the Regional Workshop Crete. The finite element model implemented depicts in detail the present geometry of the fortress (small and large domes, cannon etc.).

Particular effort was made to investigate whether the cavities in foundations due to proximity of the fortress with the sea affect the construction. During the investigation, the considered part which was modeled, were analyzed for the same weight of the structure and for foundation movement sinking as a result of cavitations of the foundation. It also with modal analysis the dynamic characteristics of the structure ie resonance frequencies and modal shapes that determine the dynamic behavior of the construction were estimated. Finally dynamic analysis was done, for the Aigion earthquake that hit the region of Achaia in 06.16.1995 and was sized  $M = 6.10$  on the Richter scale.

Subsequently comparisons were made of the analysis results with the current situation of the fortress, and vulnerable areas of manufacturing verified, which already show signs of wear and cracks. This leads to estimation of possible mechanisms of structural failure.

It is noted that because of the imposed actions, part of the Fortress has a tendency to develop tensile stresses which in many cases exceed the tensile strength of the fortress structures thus created cracks in the body of the Fortress. Adding to these the fact of biological deterioration due to the direct proximity of the fortress with the sea, a good interpretation of Fortress problems can be done.

At the end of the work the measures which must be taken to optimize the current state of the Fortress are presented and directions to exploit this study in future research are given.

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΣΧΗΜΑΤΩΝ, ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	viii
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	
1.1 Ιστορικές κατασκευές- Αξίες Αποκατάστασης.....	1
1.2 Αρχές αποκατάστασης.....	2
1.3 Συνηθέστερες μέθοδοι αποκατάστασης.....	6
1.4 Ανάλυση κατασκευών από τοιχοποιία.....	7
1.5 Αντικείμενο μελέτης.....	9
Κεφάλαιο 2 - Ιστορική –Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση	
2.1 Ιστορικά στοιχεία.....	11
2.2 Δομικά και αρχιτεκτονικά στοιχεία.....	16
Κεφάλαιο 3 - Υφιστάμενη κατάσταση μνημείου	
3.1 Ιστορικό επεμβάσεων.....	19
3.2 Ορατές ζημιές.....	21
3.3 Δομικά δεδομένα μνημείου.....	24
3.4 Τμήμα προς διερεύνηση.....	25
Κεφάλαιο 4 Ανάλυση κατασκευής.	
4.1 Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	28
4.2 Εξίσωση κίνησης.....	28
4.3 Ελεύθερη ταλάντωση συστήματος χωρίς απόσβεση.....	29
4.4 Επαναληπτικές μέθοδοι επίλυσης μη γραμμικών συστημάτων.....	31

4.4.1 Γενικά.....	31
4.4.2 Η μέθοδος Newton – Raphson.....	31
4.5 Μοντελοποίηση του φορέα.....	33
4.6 Είδος πεπερασμένων στοιχείων.....	39
4.7 Μοντελοποίηση με contact bodies.....	40
4.8 Παραδοχές προσομοίωσης – Συνοριακές συνθήκες – Φορτίσεις.....	41
4.9 Ορισμός των ιδιοτήτων του υλικού .....	44
4.10 Ορισμός των συνθηκών ανάλυσης.....	45
Κεφάλαιο 5 - Ανάλυση της κατασκευής.	
5.1 Ανάλυση κατασκευής για Loadcase 1 - Σενάριο-1.....	47
5.2 Ανάλυση κατασκευής για Loadcase 2 - Σενάριο 1.....	51
5.3 Ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής Loadcase 4 - Σενάριο 1.....	57
5.4 Δυναμική ανάλυση της κατασκευής – Σενάριο 1.....	66
5.5 Ανάλυση κατασκευής για Loadcase 1-Σενάριο-2.....	74
5.6 Ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής Loadcase 4 - Σενάριο 2.....	77
5.7 Δυναμική ανάλυση της κατασκευής – Σενάριο 2.....	86
5.8 Επεξεργασία αποτελεσμάτων.....	90
Κεφάλαιο 6 – Συμπεράσματα	
6.1 Γενικά.....	99
6.2 Προτεινόμενες εργασίες αποκαταστασης.....	102
6.3 Μελλοντική έρευνα.....	104
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	106

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ, ΣΧΗΜΑΤΩΝ, ΠΙΝΑΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικ. 1 : Άποψη του φρουρίου (Σχέδιο του 17ου αιώνα).....	9
Εικ. 2 : Βορειοανατολική άποψη του ΚΟΥΛΕ.....	11
Εικ. 3 : Δυτική άποψη του ΚΟΥΛΕ.....	12
Εικ. 4 : Σύγχρονη άποψη του φρουρίου.....	12
Εικ. 5 : Άποψη νότιου τμήματος από τις επισκευές του 2007.....	15
Εικ.6 : Άποψη περιοχής που υπάρχει κατάρρευση.....	15
Εικ. 7 : Αποτύπωση του φρουρίου έτους 1967.....	16
Εικ. 8 : Βόρεια πλευρά του μνημείου.....	18
Εικ. 9 : Αποτύπωση όψεων του φρουρίου 1967.....	20
Εικ.10 : Εξωτερική άποψη στο νοτιοανατολικό τμήμα με την κατακόρυφη διαμπερή ρωγμή.....	22
Εικ. 11: Εσωτερική άποψη θόλου 3. Στο βάθος οι μικροί θόλοι 1-2-3.....	22
Εικ. 12: Άποψη εισόδου στον θόλο 3.....	23
Εικ. 13: Άποψη κανονιοθυρίδας «ενισχυμένης».....	23
Πιν. 1 : Αποτελέσματα δοκιμών.....	24
Σχ.1 : Κάτοψη του προς διερεύνηση τμήματος. Απεικόνιση θόλων και κανονιοθυρίδων.....	26
Σχ.2 : Κάτοψη του προς διερεύνηση τμήματος. Απεικόνιση μικρών θόλων και τοίχων.....	26

Πιν. 2 : Στοιχεία θόλων.....	27
Σχ.3 : Μέθοδος Newton – Rampson.....	32
Πιν. 3 : Πεπερασμένα στοιχεία ανά ομάδα.....	34
Πιν. 4 : Μέγεθος μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία και κόμβους.....	34
Σχ.4 : Ομάδα κανονιοθυρίδων.....	35
Σχ.5 : Ομάδα μικρών θόλων ( κάτοψη ).....	35
Σχ.6 : Ομάδα μεγάλων θόλων.....	36
Σχ.7 : Ομάδα τοίχων.....	36
Σχ.8 : Νοτιοανατολική άποψη προσομοιώματος.....	37
Σχ.9 : Βορειοανατολική άποψη προσομοιώματος.....	37
Σχ.10 : Δυτική άποψη προσομοιώματος.....	38
Σχ.11 : Άνοψη προσομοιώματος.....	38
Σχ. 12 : Εξαεδρικό στοιχείο οκτώ κόμβων (Hex).....	39
Σχ. 13 : Περιβάλλον MARC για τα σώματα σε επαφή.....	40
Σχ. 14 : Απεικόνιση των contact bodies σε κάτοψη.....	41
Σχ. 15 : Απεικόνιση συνθηκών στήριξης του προσομοιώματος με την συνέχεια του Φορέα.....	42
Σχ.16 : Πίνακας με την βύθιση των τοίχων 3-4-5-6.....	43
Σχ.17 : Περίπτωση φόρτισης με την βύθιση των τοίχων 3-4-5-6.....	43
Σχ.18 : Το γράφημα των μετατοπίσεων στον x άξονα του σεισμού του Αιγίου το 1995.....	44
Σχ. 19 : Περιβάλλον MARC για τους παραμέτρους της δυναμικής ανάλυσης.....	46
Σχ. 20 : Ισοδύναμες τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	47
Σχ. 21 : Μέγιστες κύριες τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	48
Σχ. 22 : Μέγιστες κύριες τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης (θόλοι 1&3–τοίχος 11).....	48
Σχ. 23 : Απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τους άξονες X-Y-Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	49
Σχ. 24 : Συνολικές μετατοπίσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	50
Πιν. 5 : Loadcase 1 μετατοπίσεις κατά τους τρεις άξονες.....	50
Σχ. 25 : Απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τους άξονες X-Y-Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	51-52
Πιν. 6 : Loadcase 2 μετατοπίσεις κατά τους τρεις άξονες.....	53
Σχ. 26 : Loadcase 2 : απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	53
Σχ. 27 : Loadcase 2 : απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z για το τελευταίο βήμα	

της ανάλυσης (φορτιζόμενοι τοίχοι και ομάδες εκατέρωθεν αυτών).....	54
Σχ. 28 : Loadcase 2 : απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης (θόλοι 1&3 και τοίχος 11).....	54
Σχ. 29 : Κύριες εφελκυστικές τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	55
Σχ. 30 : Εφελκυστικές τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	56
Πίν. 7 : Συχνότητες ιδιομορφικής ανάλυσης.....	57
Σχ.31 : 1 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 32.422 Hz.....	58
Σχ.32 : 1 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 32.422 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	58
Σχ.33 : 2 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 34.522 Hz.....	59
Σχ.34 : 2 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 34.522 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	59
Σχ.35 : 3 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 38.78 Hz.....	60
Σχ.36 : 3 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 38.78 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	60
Σχ.37 : 4 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 43.04 Hz.....	61
Σχ.38 : 4 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 43.04 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	61
Σχ.39 : 5 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 44.13 Hz.....	62
Σχ.40 : 5 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 44.13 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	62
Σχ.41 : 6 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 50.53 Hz .....	63
Σχ.42 : 6 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 50.53 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	63
Σχ.43 : 7 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 53.15 Hz.....	64
Σχ.44 : 7 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 53.15 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	64
Σχ.45 : 8 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 54.00 Hz.....	65
Σχ.46 : 8 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 54.00 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	65
Πιν.8 : Μέγιστες μετακινήσεις δυναμικής ανάλυσης.....	66
Σχ. 47 : Οι μετακινήσεις κατά τον X-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	66

Σχ. 48 : Οι μετακινήσεις κατά τον Y-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	67
Σχ. 49 : Οι μετακινήσεις κατά τον Z-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	67
Σχ. 50 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	68
Σχ. 51 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης (θόλος 2 & μικρός θόλος 7 - κάτοψη).....	69
Σχ. 52 : Οι μέγιστες κύριες εφελκυστικές τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( θόλος 2).....	69
Σχ. 53 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( θόλος 1 & 2).....	70
Σχ. 54 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( θόλος 3 - ).....	70
Σχ. 55 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( θόλος 3 - κάτοψη ) .....	71
Σχ. 56 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( μικρός θόλος 1 & 11 ) .....	71
Σχ. 57 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( μικρός θόλος 1 & 2 ) .....	72
Σχ. 58 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης( μικρός θόλος 3 & 4 ) .....	72
Πιν.9 : Θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις ανά σετ.....	73
Σχ.59 : Ισοδύναμες τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης .....	74
Σχ.60 : Εφελκυστικές τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( Άνοψη φορέα ).....	75
Πίν.10 : Loadcase 1 μετατοπίσεις κατά τους τρεις άξονες – Σενάριο 2.....	75
Σχ.61 : Απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τους άξονες X-Y-Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	76
Πίν. 11 : Συχνότητες ιδιομορφικής ανάλυσης.....	77
Σχ.62 : 1η ιδιομορφή συχνότητα 32.39 Hz .....	78



Σχ.63 : 1η ιδιομορφή συχνότητα 32.39 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	78
Σχ.64 : 2η ιδιομορφή συχνότητα 32.52 Hz .....	79
Σχ.65 : 2η ιδιομορφή συχνότητα 32.52 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	79
Σχ.66 : 3 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 38.72 Hz .....	80
Σχ.67 : 3 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 38.72 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	80
Σχ.68 : 4 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 42.56 Hz .....	81
Σχ.69 : 4 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 42.56 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	81
Σχ.70 : 5 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 43.74 Hz.....	82
Σχ.71 : 5 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 43.74 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	82
Σχ.72 : 6 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 50.22 Hz.....	83
Σχ.73 : 6 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 50.22 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος).....	83
Σχ.74 : 7 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 53.20 Hz.....	84
Σχ.75 : 7 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 53.20 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος)....	84
Σχ.76 : 8 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 55.99 Hz.....	85
Σχ.77 : 8 <sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 55.99 Hz.....	85
Πιν.12 : Μέγιστες μετακινήσεις δυναμικής ανάλυσης.....	86
Σχ. 78 : Οι μετακινήσεις κατά τον X-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	86
Σχ. 79 : Οι μετακινήσεις κατά τον Y-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	87
Σχ. 80 : Οι μετακινήσεις κατά τον Z-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	87
Σχ. 81 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.....	88

Πιν.13 : Θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις ανά σετ.....	89
Σχ.82 : Διάγραμμα επιταχύνσεων κόμβου 27770 ( X: 422.62 – Y: 13.082 – Z: 0.00).....	91
Σχ.83 : Θόλος 3 – Θέση κόμβων 49862 & 24351.....	91
Σχ.84 : Θόλος 3 – Θέση κόμβων 40122 & 48437.....	92
Σχ.85 : Διάγραμμα μετατοπίσεων κατά X-άξονα κόμβων 24351 & 49862.....	92
Σχ.86 : Διάγραμμα μετατοπίσεων κατά X-άξονα κόμβων 40122 & 48437.....	93
Σχ.87 : Κανονιοθυρίδα 6 & 7 και τοίχος 7.....	94
Σχ.88 : Διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος της τομής του Σχ.86.....	94
Σχ.89 : Συγκριτικό διάγραμμα ιδιομορφών των 2 σεναρίων.....	95
Σχ. 90 : Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των 2 σεναρίων για τα σετ των κανονιοθυρίδων.....	96
Σχ. 91 : Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των 2 σεναρίων για τα σετ των μικρών θόλων.....	97
Σχ. 92 : Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των 2 σεναρίων για τα σετ των μικρών θόλων.....	97
Σχ. 93 : Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των 2 σεναρίων για τα σετ των τοίχων.....	98

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Ιστορικές κατασκευές – Αξίες αποκατάστασης

Η συμβολική αξία χαρακτηρίζει εξ ορισμού όλα ανεξαιρέτως τα ιστορικά κτήρια. Αψευδείς μάρτυρες παλαιότερων εποχών, ιστορικών γεγονότων και προσώπων, αισθητικών και κατασκευαστικών τάσεων, κοινωνικών και πολιτιστικών συνθηκών, οι ιστορικές κατασκευές αποτελούν φορείς συμβολικού περιεχομένου το οποίο, αναλόγως της έντασης και της απήχησης του στους σημερινούς πολίτες, καθιστά ορισμένες από αυτές βασικά σημεία αναφοράς και ιστορικής συνειδητοποίησης. Ενίοτε, την ιδιότητά τους αυτή επαυξάνει μια πρόσθετη μορφή συμβολικότητας, αυτή του **τοπόσημου**, με άλλα λόγια του κτηρίου που χάρη στη χαρακτηριστική παρουσία του μέσα στο οικιστικό σύνολο που το ενσωματώνει καταλήγει να εκλαμβάνεται ως σύμβολό του. Σε κάθε περίπτωση, αναφερόμαστε σε πόλους ισχυρούς, όσο και δυσαναπλήρωτους, η καταστροφή των οποίων έχει ευρύ αντίκτυπο στο κοινωνικό σύνολο και διαταράσσει την ομαλή λειτουργία του. Σε περίπτωση, δε, τοπόσημων, δημιουργεί επιπρόσθετα παρενέργειες στον τρόπο βίωσης του τόπου στον οποίο εντάσσονται.

Για τα κτήρια αυτά, κατεξοχήν δημόσια και πρωτίστως ιστορικά, η ισχυρή συμβολική αξία αποτελεί στις μέρες μας επαρκές επιχείρημα για την επιχείρηση της ολοκληρωμένης ανάκτησής τους, όταν αυτά καταστρέφονται από απρόοπτα φυσικά φαινόμενα, όπως ο σεισμός, ή περνούν σε φάση ραγδαίας αποσύνθεσης, έχοντας υποστεί καταστροφή από φυσικούς ή ανθρωπογενείς παράγοντες. Η αποκατάσταση της λειτουργίας τους ως βασικών σημείων αναφοράς και ιστορικής συνειδητοποίησης, επουλώνει, το βαθύ κοινωνικό τραύμα που προκαλεί η καταστροφή τους, ακόμη κι όταν η επούλωση προϋποθέτει μεγάλης κλίμακας ανακατασκευές [ 4 ]

## 1.2 Αρχές αποκατάστασης

*Η γνώση της ιστορίας ενός μνημείου αποτελεί προϋπόθεση για οποιαδήποτε επέμβαση σε αυτό.*

Η βασική αυτή αρχή αποτελεί τον θεμέλιο λίθο για να διερευνηθεί ο τρόπος επισκευής και προστασίας των ιστορικών μνημείων. Ο σεβασμός προς την αυθεντική δομή της ιστορικής κατασκευής αποτελεί το κυριότερο μέλημα της οποιασδήποτε αναστηλωτικής επέμβασης, στόχος της οποίας είναι πρώτιστα η διαφύλαξη της πολιτιστικής και ιστορικής αξίας του μνημείου και μεταγενέστερα η οποιαδήποτε πρόταση επανάχρησης και επαναλειτουργίας. Έξαλλου η δομητική αποκατάσταση ενός μνημείου αρχιτεκτονικής κληρονομιάς δεν είναι αυτοσκοπός αλλά ένα μέσο προς τον τελικό σκοπό, που είναι η προστασία του κτηρίου ως συνόλου [ 9 ].

Η συντήρηση, ενίσχυση και αποκατάσταση της αρχιτεκτονικής κληρονομιάς είναι ένα σύνθετο τεχνικό έργο. Η εξέλιξη του γίνεται κατά φάσεις και απαιτεί προσέγγιση από διεπιστημονική ομάδα που πρέπει να συνεργάζεται από τα πρώτα βήματα της μελέτης

Προηγείται η ιστορική - αρχαιολογική διερεύνηση (η οποία έχει καθορίσει τις αξίες του μνημείου), ακολουθεί η μελέτη επεμβάσεων και το έργο ολοκληρώνεται με την εφαρμογή των επεμβάσεων και την κατοχύρωση ενός συστήματος παρακολούθησης και συντήρησης για το μέλλον. [ 8 ]

Οι φάσεις της Μελέτης κατατάσσονται, συνήθως, σε τρεις ενότητες:

### ❖ Τεκμηρίωση

### ❖ Αποτίμηση

### ❖ Ανασχεδιασμός

Οι ενότητες αυτές περιλαμβάνουν επιμέρους μελέτες όπως :

- Ιστορική - Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση

Ο σκοπός της Ιστορικής και Αρχιτεκτονικής τεκμηρίωσης είναι να κατανοήσουμε τον σχεδιασμό και την σημασία του κτιρίου, τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή

του, τις μεταγενέστερες μεταβολές τόσο στη δομή όσο και στο περιβάλλον της κατασκευής και τα τυχόν γεγονότα που μπορεί να έχουν προκαλέσει ζημιές.

- Αποτύπωση Φέροντος Οργανισμού

Κύριοι στόχοι της αποτύπωσης του φέροντος Οργανισμού είναι :

- i) Η αναγνώριση των φθορών και των βλαβών και η εκτίμηση της σοβαρότητας τους.
- ii) Η διαπίστωση περί του εάν τα φαινόμενα έχουν ολοκληρωθεί ή βρίσκονται σε εξέλιξη, δηλαδή υπάρχουσες ρωγμές, αστοχίες είναι ενεργές ή όχι
- iii) Η απόφαση περί υπάρξεως αμέσων κινδύνων και η συνακόλουθη ανάγκη για την λήψη άμεσων μέτρων π.χ. άρση ετοιμορροπίας
- iv) Η διαπίστωση συνεχιζόμενων επιπτώσεων του περιβάλλοντος στο δόμημα.

π.χ. διαβρωτικό περιβάλλον ως προς τα υλικά δόμησης.

- Έρευνα πεδίου και Εργαστηριακές Δοκιμές

Οι επί τόπου μετρήσεις καθώς και οι εργαστηριακές δοκιμές στοχεύουν συνήθως στην αναγνώριση των μηχανικών χαρακτηριστικών (αντοχή, παραμορφωσιμότητα κλπ), των φυσικών ιδιοτήτων (πορώδες κλπ), των χημικών χαρακτηριστικών των υλικών (σύνθεση κλπ), των τάσεων και των παραμορφώσεων της κατασκευής, καθώς και της παρουσίας ασυνεχειών εντός της δομής, κ.λ.π. Για τις δοκιμές αυτές συνήθως προτιμώνται μη καταστρεπτικές μέθοδοι αποτίμησης υλικών χωρίς όμως να αποκλείεται και καταστροφικές μέθοδοι όπως πχ λήψη δοκιμίων από το σώμα του μνημείου.

- Περιγραφή και προσομοίωση του δομητικού συστήματος.

Η προσομοίωση που λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση αποτελεί συνήθως ένα συμβιβασμό μεταξύ μιας ρεαλιστικής αλλά υπερβολικά περίπλοκης αναπαράστασης της πραγματικότητας και μιας μη ρεαλιστικής αλλά απλής κατά τους υπολογισμούς αναπαράστασης. Το υπολογιστικό προσομοίωμα πρέπει να λαμβάνει υπ' όψη τις αλλοιώσεις και τις μειώσεις της φέρουσας ικανότητας, όπως ρωγμές, ασυνέχειες, θλιπτικές αστοχίες, τις αποκλίσεις απ' την κατακόρυφο, κλπ, των οποίων η επιρροή στην δομητική συμπεριφορά είναι σημαντική.

- Προσδιορισμός δράσεων

Ως «δράσεις» ορίζονται όλοι οι παράγοντες (δυνάμεις, παραμορφώσεις, κλπ) οι οποίοι προκαλούν τάσεις και παραμορφώσεις στο δόμημα, καθώς και κάθε φαινόμενο (χημικό, βιολογικό, κλπ) το οποίο επηρεάζει τα υλικά, μειώνοντας συνήθως την αντοχή τους.

Οι δράσεις είναι πολλές και διαφορετικές, με ποικίλες επιδράσεις στο δόμημα και στα υλικά. Οι δράσεις διακρίνονται σε μηχανικές, οι οποίες επηρεάζουν το δόμημα, και σε χημικές και βιολογικές, οι οποίες επηρεάζουν τα υλικά. Οι μηχανικές δράσεις είναι στατικές (άμεσες ή έμμεσες) ή δυναμικές [ 9 ].

- Προκαταρκτική Ανάλυση

Η προκαταρκτική ανάλυση για στατικές ή ακόμα και δυναμικές φορτίσεις μας υποδεικνύει τα ευπαθή τμήματα του φορέα, το πώς ο φορέας συμπεριφέρεται κάτω από τις επιβαλλόμενες δράσεις και το πως απεικονίζονται οι δράσεις αυτές υπό μορφή τάσεων .

- Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Η διάγνωση και η εκτίμηση των περιθωρίων ασφαλείας του δομήματος αποτελούν δύο διαδοχικά και συναφή στάδια επί τη βάσει των οποίων καθορίζεται η ουσιαστική ανάγκη για μέτρα θεραπείας και ο βαθμός έκτασής τους. Κρίση βασιζόμενη σε ελλιπή ή λανθασμένα στοιχεία μπορεί να οδηγήσει είτε σε συντηρητικές (και, επομένως, βαριές) επεμβάσεις είτε σε ανεπαρκή στάθμη ασφαλείας.

Η εκτίμηση της ασφάλειας ενός δομήματος πρέπει να στηρίζεται τόσο σε ποιοτικές μεθόδους (όπως η τεκμηρίωση, η παρατήρηση κ.λπ.) όσο και σε ποσοτικές μεθόδους (όπως πειραματικές, υπολογιστικές, κλπ), μέσω των οποίων λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των διαφόρων φαινομένων στην δομοστατική συμπεριφορά του μνημείου.

- Απόφαση για την επέμβαση

Η οποιαδήποτε απόφαση για την επέμβαση συναντά ένα σαφή προβληματισμό. Την υιοθέτηση μιας ευέλικτης προσέγγισης η οποία θα βελτιώσει την στατική συμπεριφορά της κατασκευής χωρίς η κατασκευή να απολέσει τον ιστορικό της χαρακτήρα.

- Επιλογή είδους επεμβάσεων

Η τελική απόφαση για το είδος των επεμβάσεων θα προκύψει από συνεκτιμήσεις των τριών παραγόντων: Αξίες Μνημείου - Κίνδυνος - Οικονομία

- Ανάλυση του φορέα στη νέα μορφή

Η ανάλυση του φορέα μετά την εφαρμογή στο προσομοίωμα των βελτιωτικών επεμβάσεων μας υποδεικνύει τις θετικές ή αρνητικές επιδράσεις στην συμπεριφορά του φορέα μετά την υλοποίηση των επεμβάσεων αυτών. Μας υποδεικνύει πως ανακατανέμονται οι τάσεις στον φορέα και τα σημεία που υπάρχει βελτίωση στην κατανομή των τάσεων από την εφαρμογή των μεθόδων επέμβασης.

- Διαστασιολόγηση και Λεπτομέρειες επεμβάσεων

Η διαστασιολόγηση των επεμβάσεων είτε επεμβάσεις ενίσχυσης είτε επεμβάσεις επισκευής είναι αυτές μαζί με τα σχέδια λεπτομερειών που τις συνοδεύουν αποτελούν το επιστέγασμα όλων των προαναφερθέντων ενοτήτων. Έχει ιδιαίτερη σημασία η ορθή εφαρμογή τους στο φορέα γι' αυτό και είναι αναγκαία η οποιαδήποτε λεπτομέρεια θα βοηθήσει τον επισκευαστή στην ορθή υλοποίηση τους.

- Τεχνική Περιγραφή και Προδιαγραφές

Οι πιο πάνω φάσεις (ή δραστηριότητες) δεν είναι πλήρως αυτόνομες και η ένταξη τους σε μία ενότητα είναι σχετική. Παρατηρείται συχνά αλληλεπίδραση μεταξύ των φάσεων, δηλαδή από τα αποτελέσματα μιας φάσης να προκύπτει η ανάγκη επιστροφής σε προηγούμενες [ 8 ] .

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι οι επεμβάσεις σε μνημεία θέτουν στους μελετητές προβληματισμούς τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Είναι προφανές ότι κάθε σύγχρονη επέμβαση σε ένα πολιτιστικό αγαθό δεν θεωρείται αποκατάσταση, τουλάχιστον όπως αυτή ορίζεται στη θεωρία του C. Brandi και στο Χάρτη της Βενετίας (1964) [ 10 ]. Επομένως καίριο ρόλο παίζει η αξιολόγηση και η διερεύνηση της συμβολής των επεμβάσεων που προτείνονται στη διαχρονική ιστορία του μνημείου.

### 1.3 Συνηθέστεροι μέθοδοι αποκατάστασης

Γενικά με τον όρο επισκευή εννοούμε την επαναφορά του βλαβέντος στοιχείου στην κατάσταση προ της βλάβης ενώ με τον όρο ενίσχυση εννοούμε το σύνολο των μέτρων που λαμβάνονται έτσι ώστε το στοιχείο να αυξήσει την αντοχή του έναντι ενός συνδυασμού δράσεων. Η λήψη της απόφασης για επισκευή ή ενίσχυση και ειδικότερα για την εκλογή της κατάλληλης μεθόδου για την αντιμετώπιση προβλημάτων σε κτίρια – μνημεία λαμβάνει υπόψη την πολιτιστική, ιστορική, και καλλιτεχνική αξία του δομήματος, το κόστος σε σχέση με την αξία του δομήματος, τις προθέσεις για την νέα χρήση και άλλους παράγοντες. Οι αρχές που διέπουν την συντήρηση και προστασία των μνημείων πηγάζουν από διεθνείς συμβάσεις και συμφωνίες που έχουν υπογραφεί από όλες τις χώρες (Χάρτα Βενετίας 1964, Διακήρυξη του Άμστερνταμ 1975, Διεθνής Χάρτα για την Προστασία των Ιστορικών Πόλεων 1987) [ 18 ].

Οι μέθοδοι επεμβάσεων διακρίνονται σε ολικές και τοπικές επεμβάσεις. Οι ολικές επεμβάσεις μεταβάλλουν τη συμπεριφορά της κατασκευής σαν σύνολο, ενισχύουν τη συνεργασία των διαφόρων τμημάτων του φορέα ή ακόμα και τροποποιούν το δομικό σύστημα [ 17 ].

Στην περίπτωση ιστορικών κατασκευών δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των ολικών επεμβάσεων και συνήθως επιλέγονται τεχνικές όπως η προσθήκη ελκυστήρων και τενόντων, μια τεχνική που είναι εύκολα αντιστρέψιμη και συνήθως συνυπάρχει στο τελικό σχήμα επέμβασης με κάποιες από τις άλλες τεχνικές, η κατασκευή διαζωμάτων, η ενίσχυση θεμελίων, η δημιουργία διαφραγμάτων .

Οι τοπικές επεμβάσεις δρουν ευεργετικά σε τοπικό επίπεδο και καλύπτουν αποτελεσματικά τοπικές υπερβάσεις τάσεων, τοπικές αστοχίες. Συνήθεις τοπικές επεμβάσεις είναι ενέσεις σε ρωγμές, ομογενοποίηση μάζας, βαθιά αρμολογήματα, προσθήκη ριζοπλισμών, η συρραφή κατακόρυφων και λοξών ρωγμών κ.α. [ 17 ] .

Για όλο το εύρος των μη αντιστρεπτών επεμβάσεων παράλληλα με τις αρχές που εφαρμόζονται για την επισκευή και ενίσχυση των συνηθισμένων κατασκευών θα πρέπει, πέραν αυτών που αναφέρθηκαν προηγουμένως, να λαμβάνονται υπόψη και δύο επιπλέον απαιτήσεις:



- Η συμβατότητα των υλικών επισκευής και ενίσχυσης με τα υλικά που συνιστούν τον αρχικό ιστό του έργου.
- Η αντοχή των νέων υλικών για μακρό χρονικό διάστημα (ανθεκτικότητα).

#### **1.4 Ανάλυση κατασκευών από τοιχοποιία**

Η ανάγκη για την αποτίμηση της αντοχής ιστορικών κατασκευών συντέινει στην ανάπτυξη μεθόδων για την ανάλυση φορέων από τοιχοποιία. Οι δύο κύριες προσεγγίσεις για στατική ανάλυση τόξων και θολωτών κατασκευών από τοιχοποιία είναι η (α) *οριακή ανάλυση ευστάθειας* (διεθνώς αναφέρεται ως ultimate stability analysis, limit/equilibrium analysis, rigid-plastic analysis ή thrust-line method) και (β) *ανάλυση τάσεων* για περιγραφή της εντατικής κατάστασης της κατασκευής (Block et al. 2006). [19]

Για τις ιστορικές κατασκευές από τοιχοποιία και ιδιαίτερα για εκείνες που είναι κατασκευασμένες από ογκώδεις λίθους, η πρώτη προσέγγιση ήταν και η πιο σημαντική, καθώς οι θλιπτικές τάσεις είναι μία τάξη μεγέθους μικρότερες από την τάση αστοχίας, ενώ το κρίσιμο ζήτημα παρέμενε η ευστάθεια.

Από την εποχή του Hooke (1635-1709) κατασκευάζονταν οι πρώτες τοξωτές κατασκευές (γέφυρες, καθεδρικοί ναοί κλπ...) κάνοντας χρήση της οριακής ανάλυσης ευστάθειας, την οποία εξέλιξε και εδραίωσε στα πλαίσια της θεωρίας οριακής αντοχής ο Heyman (1966).

Από τότε, πλήθος ερευνητών ασχολήθηκε με την διερεύνηση της ευστάθειας προσπαθώντας να αμβλύνουν τις αρχικές απλοποιητικές παραδοχές της μεθόδου (η τοιχοποιία έχει μηδενική εφελκυστική αντοχή, οι λίθοι είναι απαραμόρφωτοι - απείρου θλιπτικής αντοχής, δεν μπορεί να συμβεί σχετική ολίσθηση ανάμεσα στους λίθους) μέσω καταστατικών σχέσεων που συνυπολογίζουν την παραμορφωσιμότητα λίθου και κονιάματος (γραμμικοί και μη γραμμικοί νόμοι συμπεριφοράς), την σχετική ολίσθηση λίθων, τα φαινόμενα δευτέρας τάξεως κ.ά. Τα τελευταία χρόνια, στην διάθεση των επιστημών υπάρχει το υπολογιστικό εργαλείο των διακριτών στοιχείων (distinct elements), το οποίο έχει την δυνατότητα πολύ αναλυτικών προσομοιώσεων όλων των παραπάνω παραμέτρων.

Για τον δεύτερο βασικό τρόπο ανάλυσης κατασκευών από φέρουσα τοιχοποιία, τοξωτές και θολωτές κατασκευές, εδώ και μερικές δεκαετίες χρησιμοποιείται η ευρέως

διαδεδομένη μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων [28], [29], [30] . Στα προσομοιώματα ανάλυσης χρησιμοποιούνται επίπεδα ή τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία, συνήθως γραμμικά ή, σπανιότερα, μη-γραμμικά. Ο λόγος που αποφεύγεται η μη-γραμμική ανάλυση είναι ότι, εκτός από τα εξειδικευμένα προγράμματα και το σημαντικά μεγαλύτερο υπολογιστικό χρόνο που απαιτεί, δεν οδηγεί πάντοτε σε αξιόπιστα αποτελέσματα. Αβεβαιότητες όπως : οι πραγματικοί καταστατικοί νόμοι που διέπουν τη μεταλαστική συμπεριφορά των υλικών που είναι εν πολλοίς άγνωστοι, η ακριβής προσομοίωση της κατασκευής που είναι πρακτικά αδύνατη, η ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε μικρές αλλαγές των παραμέτρων δεν είναι εύκολο να ελεγχθεί και η αξιοπιστία των προγραμμάτων υπολογισμού σε πολύπλοκες γεωμετρίες, όπως αυτές των μνημείων, καθιστούν την μη γραμμική ανάλυση δυσχερή [21] παρόλο που μερικές φορές η υπόθεση μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης με χρήση ετερογενούς υλικού οδηγεί σε ορθότερα αποτελέσματα σε σχέση με την χρήση ομογενούς υλικού [ 22 ]. Γι' αυτό συνήθως προτιμούνται οι γραμμικές αναλύσεις, τα αποτελέσματα των οποίων όμως πρέπει να εξετάζονται με προσοχή και σωστή κρίση μηχανικού πριν χρησιμοποιηθούν για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις κατάλληλες επεμβάσεις αποκατάστασης του μνημείου.

Στις αναλύσεις αυτές συνήθως υπολογίζουμε τις πρώτες ιδιομορφές και τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής οι οποίες και συγκρίνονται με τυχόν πειραματικά δεδομένα που υπάρχουν. Γίνεται ανάλυση για τα φορτία βαρύτητας και διαπιστώνονται πιθανές θέσεις θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων. Τέλος με την σεισμική ανάλυση για κάποιο σεισμό δεν ερευνούμε αυτή καθαυτή την συμπεριφορά της κατασκευής στον σεισμό αυτό, αλλά λαμβάνουμε μια εικόνα των εσωτερικών τάσεων που συμβαίνουν στην περίπτωση ενός καταστροφικού σεισμού.

Λόγω της μη γραμμικότητας της τοιχοποιίας ακόμα και για χαμηλά επίπεδα εξωτερικών δράσεων προτείνεται και η μέθοδος της υπερωθητικής ανάλυσης (Pushover Analysis) [25] .

Είναι φανερό ότι πραγματοποιείται συνεχής βελτίωση στην έρευνα για την εξέλιξη των μεθόδων αντιμετώπισης των προβλημάτων που συναντώνται στις μνημειακές κατασκευές ολόένα και με νεότερες μεθόδους.

## 1.5 Αντικείμενο μελέτης

Η έννοια του τοπόσημου που αναφέρθηκε στην ενότητα 1.1 αποκτά για την πόλη του Ηρακλείου στην Κρήτη, την πιο ολοκληρωμένη έκφραση της, στην οντότητα του Φρουρίου Κούλε. Είναι το χαρακτηριστικό έμβλημα στην άκρη του ενετικού λιμανιού και η στατική διερεύνηση του δομικού συστήματος του νοτιοανατολικού τμήματος του, αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.



Εικόνα 1 : Άποψη του φρουρίου (Σχέδιο του 17<sup>ου</sup> αιώνα) [ 13 ]

Επιλέχθηκε η διερεύνηση του Φρουρίου στο νοτιοανατολικό τμήμα του, διότι αυτό είναι το τμήμα το οποίο εμφανίζει τις σοβαρότερες φθορές, τόσο στην τοιχοποιία του όσο και στον κεντρικό μεγάλο θόλο, και επιπλέον ο όγκος εργασίας για την διερεύνηση ολόκληρου του μνημείου θα ξέφευγε από τα όρια μίας μεταπτυχιακής εργασίας. Η γειτνίαση του Φρουρίου με την θάλασσα έχει σαν αποτέλεσμα σοβαρά αναγνωρισμένα προβλήματα σπηλαιώσεως της θεμελίωσης τα οποία εμφανίζονται ως σημαντικές ρωγμές και καθιζήσεις.

Αρχικά έγινε ιστορική και αρχιτεκτονική τεκμηρίωση με υλικό που συγκεντρώθηκε από την 13<sup>η</sup> Εφορεία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων. Το υλικό αυτό αποτελούνταν από αποτυπώσεις

προγενέστερες και πιο σύγχρονες, μελέτες επεμβάσεων, φωτογραφικό υλικό κα. και το οποίο παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 2.

Ακολούθως και σε επιτόπιες επισκέψεις έγινε καταγραφή των προβλημάτων του φορέα (εμφανείς ρωγμές – καθιζήσεις – προβλήματα διαποτισμού τοίχων από υγρασία), τα οποία περιγράφονται στο κεφάλαιο 2.

Με την προσομοίωση του φορέα με πεπερασμένα στοιχεία και την ανάλυση του για διάφορες δράσεις (κεφάλαιο 4), έγινε εφικτή η κατανόηση της συμπεριφοράς του φορέα καθώς και η συσχέτιση των εμφανιζομένων αστοχιών στην πραγματική κατασκευή με τα αποτελέσματα της αριθμητικής ανάλυσης (κεφάλαιο 5).

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων, στο τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας γίνεται μια αρχική αποτίμηση της τρωτότητας του νοτιοανατολικού τμήματος του μνημείου, δίνονται πρώτες προτάσεις για τις επεμβάσεις που απαιτούνται και θα χρειαστεί να μελετηθούν και προτείνονται συστάσεις για μελλοντική έρευνα.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

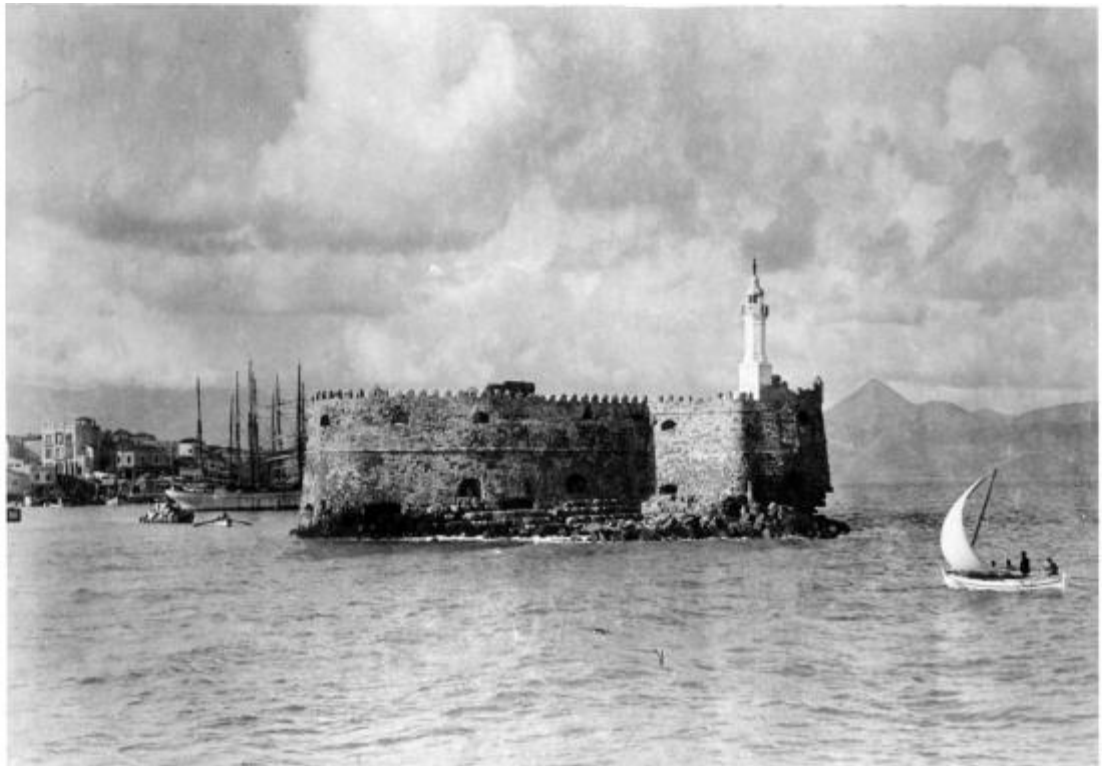
### Ιστορική –Αρχιτεκτονική τεκμηρίωση

#### 2.1 Ιστορικά στοιχεία

*Κούλες, Καστέλλο ντελ Μόλο (Castello del Molo), Ρόκκα α Μάρε (Rocca al Mare).*

*Rocca al Mare θα πει βράχος της θάλασσας και Castello ή Κούλες σημαίνει ...κάστρο της θάλασσας!*

Είναι το έμβλημα του Ηρακλείου, είναι το φρούριο που έχει αντέξει χρόνια τώρα κάθε κακουχία και όλη την αλμύρα της θάλασσας , είναι το πιο όμορφο κτίριο στην άκρη του ενετικού λιμανιού, είναι ο ένας και μοναδικός Κούλες ή Κουλές όπως είναι η σωστή του γραφή και η ονομασία αυτή που προέρχεται από την Τουρκοκρατία, έχει επικρατήσει μέχρι και σήμερα (εικόνες 2-4).



Εικ. 2 : Βορειοανατολική άποψη του ΚΟΥΛΕ [ 14 ]



Εικ. 3 : Δυτική άποψη του ΚΟΥΛΕ [ 15 ]



Εικ. 4 : Σύγχρονη άποψη του φρουρίου [ 12 ]

Η Κρήτη από τη Μινωική ακόμα εποχή δεν είχε τείχη. Το νησί θεωρείτο ασφαλές και χωρίς αυτά. Η ίδια νοοτροπία επεκράτησε κατά τη Ρωμαϊκή και την πρώιμη Βυζαντινή περίοδο. Όταν από τον 7ο αιώνα εμφανίστηκαν οι Σαρακηνοί στο Αιγαίο, αυτό άλλαξε και οι Βυζαντινοί άρχισαν να κατασκευάζουν οχυρώσεις στην Κρήτη. Οι οχυρώσεις αυτές όμως δεν αποδείχτηκαν πολύ αποτελεσματικές όταν Σαρακηνοί πειρατές από την Ανδαλουσία αποβιβάστηκαν στο νησί, το 824, και πολύ σύντομα το κατέλαβαν ολόκληρο.

Οι Άραβες οχύρωσαν το Ηράκλειο με τείχος και τάφρο και το κατέστησαν κέντρο των πειρατικών τους επιδρομών. Το Ηράκλειο ονομάστηκε τότε Χάνδακας. Μετά από πολλές αποτυχημένες προσπάθειες, οι Βυζαντινοί επανέκτησαν τον Χάνδακα με τον Νικηφόρο Φωκά το 961, ενώ μετά από 250 χρόνια το Ηράκλειο κατακτήθηκε από τους Γενουάτες και μετά από λίγα χρόνια από τους Ενετούς.

Αναφορά για πύργο στην είσοδο του λιμανιού γίνεται στην β' Βυζαντινή περίοδο (10ος-13ος) ως *Castellum Communis*. Οι Ενετοί, όταν κατέλαβαν το νησί, έφτιαξαν νέα τείχη, τα οποία ήταν επιβλητικά και ο Χάνδακας ονομάστηκε Μεγάλο Κάστρο. Για τη μεγαλύτερη ασφάλεια του λιμανιού, κατασκεύασαν το φρούριο *Rocca al Mare*, δηλαδή το Φρούριο της Θάλασσας. Αυτό ήταν αρχικά ο μικρός πύργος που υπήρχε στη θέση του σημερινού φρουρίου.

Όταν μέσα του 14ου μ.Χ. αιώνα, κάνει την εμφάνισή της στην Ευρώπη η πυρίτιδα και ο τρόπος διεξαγωγής του πολέμου αλλάζει ριζικά, η αμυντική δυνατότητα των παλιών οχυρώσεων εκμηδενίζεται.

Έτσι τα μέσα του 15ου μ.Χ. αιώνα βρήκαν το Ηράκλειο ανεπαρκώς οχυρωμένο και τον πύργο του λιμανιού αμυντικά ανεπαρκή και ευάλωτο. Η Γερουσία της Βενετίας το 1462 εγκρίνει ένα ευρύ πρόγραμμα οχύρωσης της πόλης, που θα προστάτευε το Ηράκλειο και τα προάστια έξω από αυτό. Η νέα οχύρωση θα ακολουθούσε τα πρότυπα της νέας οχυρωματικής αρχιτεκτονικής με τους προμαχώνες. Στα πλαίσια αυτού του προγράμματος το 1523 κατεδαφίστηκε ο πύργος του λιμανιού και αντικαταστάθηκε με το φρούριο Κούλες, που σώζεται μέχρι σήμερα [ 12 ].

Τούτο το Κάστρο κτίστηκε πάνω σε ένα βραχώδες σημείο στην άκρη της θάλασσας για την καλύτερη προστασία του λιμένα της πόλης, που είχε εξέχουσα στρατηγική και

εμπορική σημασία. Επειδή όμως η επιφάνεια του βράχου στην οποία χτίστηκε ήταν μικρότερη, για να τη μεγαλώσουν αναγκάστηκαν να μεταφέρουν υλικό από το νησάκι Ντία ή νησί του Δία και από την περιοχή Φρασκιών (κάτω απ' τη Ρογδιά). Εκτεταμένες επιχωματώσεις κατάφεραν να δημιουργήσουν το χώρο για να χτιστεί το φρούριο έκτασης 3.600 τ.μ. περίπου. Οι επιχωματώσεις γίνονταν με μία πολύ ενδιαφέρουσα μέθοδο. Συνήθως γέμιζαν πέτρες παλιά άχρηστα πλοία και τα βύθιζαν μαζί με το φορτίο τους, στη βόρεια και δυτική πλευρά του βράχου. Δημιούργησαν έτσι μια μεγάλη επιφάνεια και πάνω της έκτισαν το μεγάλο φρούριο . Πάνω στην πόρτα του, το λιοντάρι των Ενετών και γύρω, τριγύρω του οι πολεμίστρες. Η οριστική του μορφή και κτίσιμο ξεκίνησε στα 1523 και ως το 1540 είχε ολοκληρωθεί.

Τα προβλήματα όμως του οχυρωματικού έργου Κούλε δεν άργησαν να έρθουν. Τα θεμέλιά του είχαν ανασκαφεί σε πολλά σημεία και είχαν δημιουργηθεί σπηλιές από την πλευρά που κτυπούσε η θάλασσα. Υπήρχαν περίοδοι κατά τις οποίες οι υποσκαφές στη βορειοδυτική πλευρά είχαν τεράστια έκταση, ώστε η θάλασσα να εισχωρεί μέσα στον Κούλε και το αλμυρό νερό να αναμειγνύεται με το γλυκό νερό της δεξαμενής του φρουρίου που υπήρχε στη πλευρά αυτή. Για την αντιμετώπιση της κατάστασης μεταφέρονταν κάθε χρόνο απ' τη Ντία και τον όρμο των Φρασκιών τεράστιες ποσότητες ογκολίθων με παλιά καράβια, τα οποία καταποντίζονταν μαζί με το φορτίο τους μπροστά από τις σπηλιές για να αποτελέσουν ισχυρό κυματοθραύστη, προστατεύοντας το φρούριο από την ορμή των κυμάτων. Με τη μέθοδο αυτή των αποθέσεων δόμησαν επίσης μια κατασκευή έξω από τη βόρεια πλευρά του φρουρίου που είχε μορφή μικρού ισχυρού μόλου με ημικυκλική απόληξη (sperone).

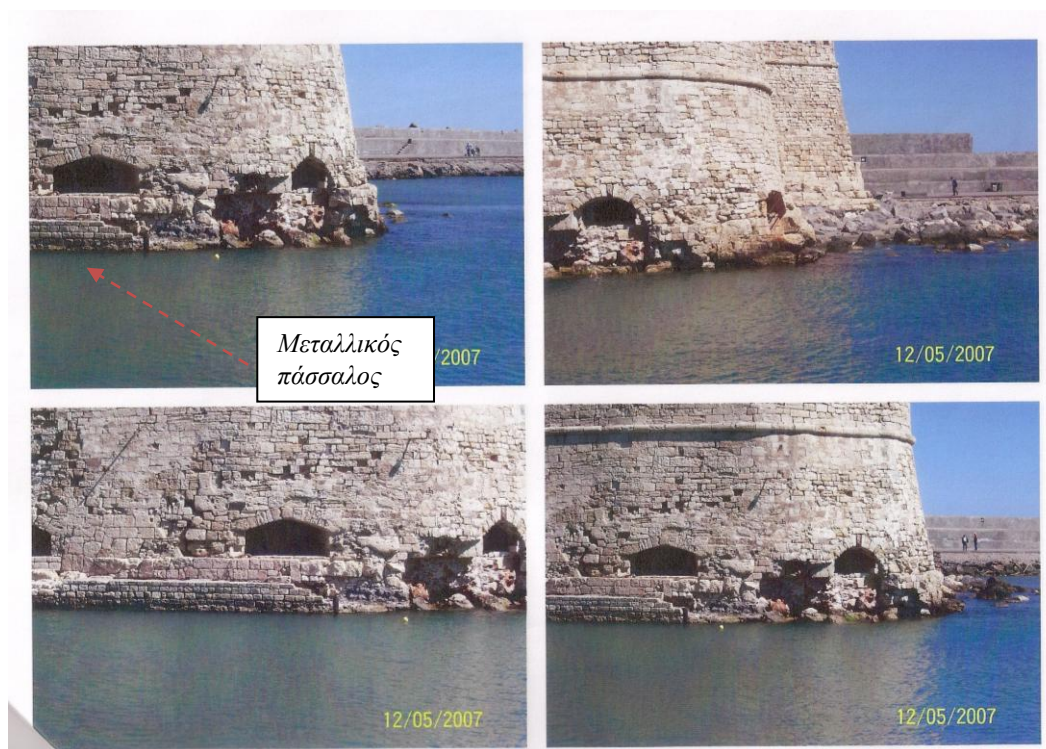
Μετά την κατάληψη Κρήτης από τους Τούρκους, το 1669, ο Κούλες χρησιμοποιήθηκε από τους νέους δυνάστες του κρητικού λαού, αφού πρώτα το επισκεύασαν από τις καταστροφές που είχε υποστεί εξαιτίας των βομβαρδισμών από αυτούς, έκτισαν επάλξεις και σκοπιές στην απόληξη του στηθαίου του δώματος του. Στους σκοτεινούς και υγρούς χώρους του βασανίσθηκαν και φυλακίστηκαν κρητικοί επαναστάτες.

Το 1719 κατέρρευσε, ασφαλώς από θαλασσοταραχή, ένα τμήμα της βορειοδυτικής πλευράς του. Γι' αυτό επισκευαστικές εργασίες έγιναν το 1753 και το 1754 ενώ και άλλες στερεωτικές εργασίες έγιναν στα πρώτα 100 χρόνια της τουρκοκρατίας [ 13 ].

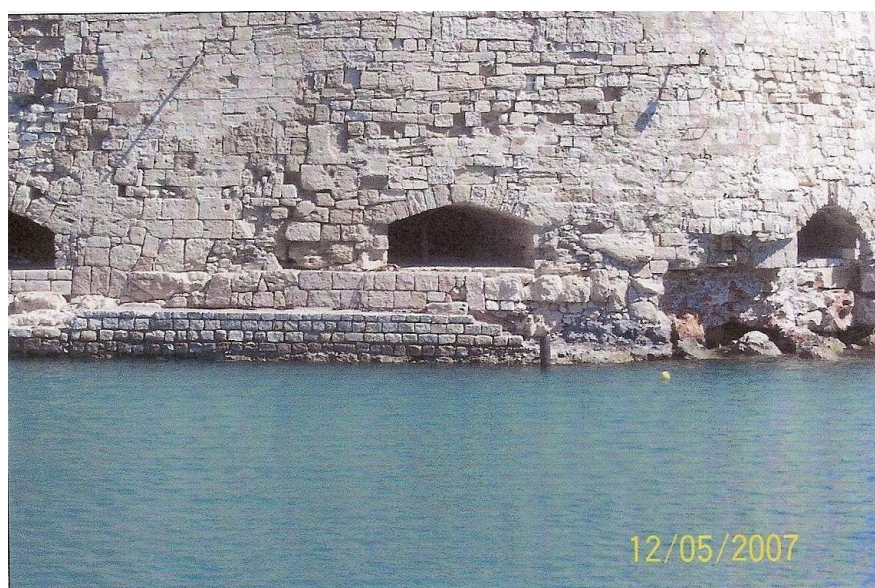
Στη συνέχεια δέχθηκε αλλεπάλληλες επισκευές λόγω φθοράς από τη δράση των κυμάτων. Οι συνεχείς επισκευές συνεχίστηκαν και μετά τα την κατάληψη του Χάνδακα



από τους Τούρκους το 1669. Το 1719 τμήμα της βορειοδυτικής πλευράς του Κούλε κατέρρευσε, αλλά ξαναεπισκευάστηκε. Παράλληλα λειτουργούσε ως φυλακή. Την δεκαετία του 2000 έγιναν μέτρα υποστήριξης της νότιας πλευράς επειδή είχε σπηλαιωθεί από τη θάλασσα (εικ. 5-6).



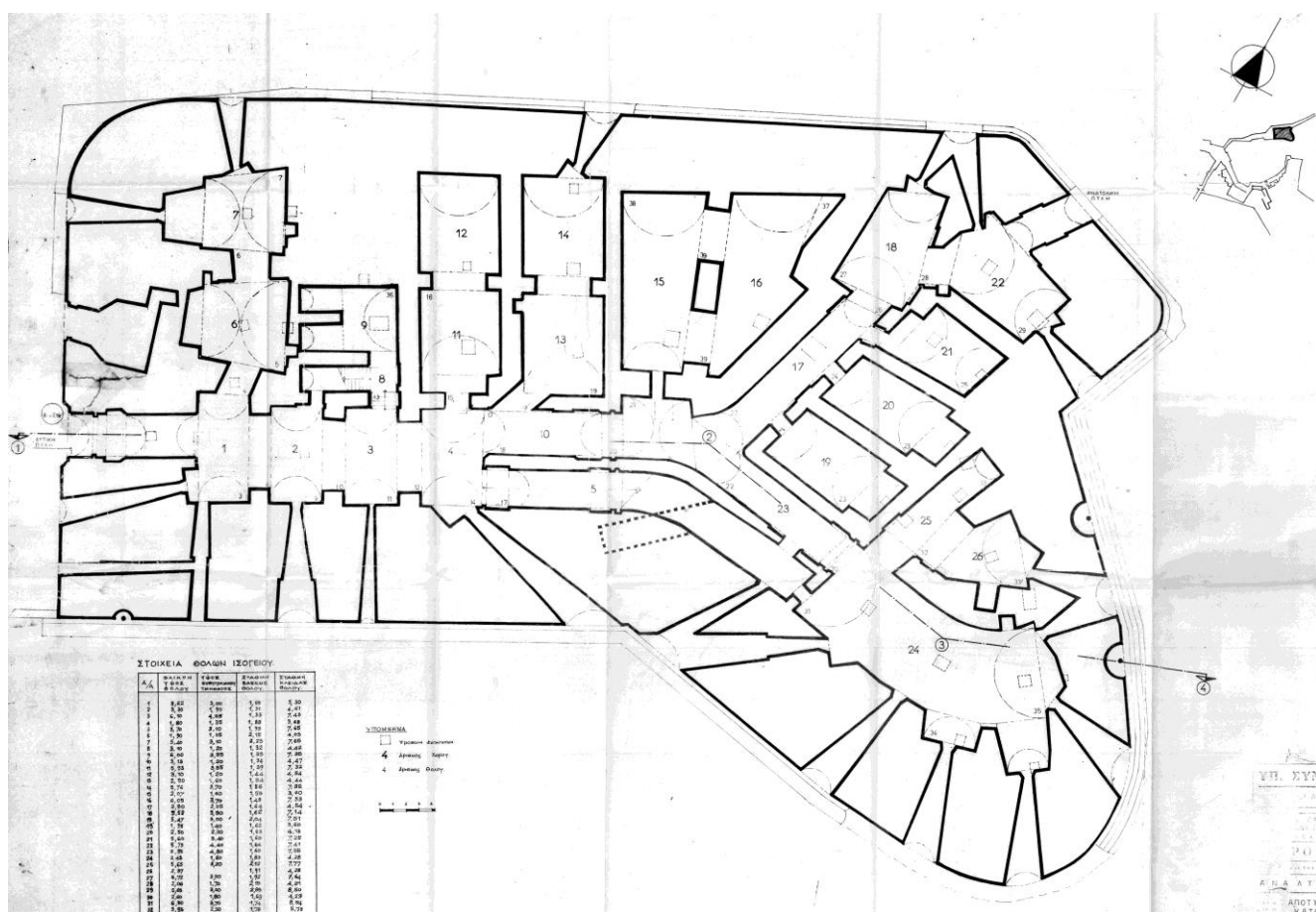
Εικ. 5 : Άποψη νότιου τμήματος από τις επισκευές του 2007 [ 16 ]



Εικ. 6 : Άποψη περιοχής που υπάρχει κατάρρευση [ 16 ]

## 2.2 Δομικά και αρχιτεκτονικά στοιχεία

Το φρούριο έχει τη μορφή ενός τετραπλεύρου με ένα έντονα προβαλλόμενο τμήμα, σε σχήμα ημικυκλίου στη Βορειοανατολική πλευρά. Η δόμηση έχει γίνει από ισχυρότατη τοιχοποιία. Οι εξωτερικοί τοίχοι έχουν πάχος σχεδόν 9 μέτρα, ενώ οι εσωτερικοί τοίχοι φτάνουν τα 3 μέτρα πάχος σε κάποια σημεία (εικ. 7).



Εικ. 7 : Αποτύπωση του φρουρίου έτους 1967 [ 16 ]

Αρχιτεκτονικά ο Κούλες αποτελείται από δύο επιμέρους τμήματα:

Το Νοτιοδυτικό : παραλληλόγραμμο, λίγο ψηλότερο

το Βορειοανατολικό : σε σχήμα μισής έλλειψης, ελαφρώς χαμηλότερο.

Για την είσοδο στο φρούριο υπήρχαν τρεις πύλες εισόδου: Δυτικά, Βόρεια και Νοτιοδυτικά, με κύρια πύλη την Δυτική.

Η κύρια πύλη του φρουρίου στη θάλασσα ανοίγεται στη δυτική πλευρά. Εκεί καταλήγει ο δυτικός μύλος, που ξεκινάει από την πύλη του μύλου. Η είσοδος ήταν προσεκτικά προστατευμένη: τρεις ξύλινες ισχυρές πόρτες υπήρχαν στο θολοσκεπή και ελαφριά κατωφερικό διάδρομο της εισόδου ο οποίος οδηγούσε στο εσωτερικό του φρουρίου. Το ένα σκέλος του διαδρόμου οδηγούσε στη βόρεια πλευρά του φρουρίου που υπήρχε δεύτερη πύλη προς το *sperone* και την ανοιχτή θάλασσα. Το άλλο σκέλος με ανατολική κατεύθυνση κατέληγε στο ανατολικό τμήμα του οχυρού, η κάτοψη του οποίου έχει σχήμα μισής έλλειψης. Στην νοτιοδυτική πλευρά του ισογείου υπήρχε και τρίτη δευτερεύουσα έξοδος, η οποία οδηγούσε στο χώρο του λιμανιού.

Στο δώμα του φρουρίου οδηγούσαν δύο διαβάσεις που ξεκινούσαν από τον κεντρικό διάδρομο: Ένα κεκλιμένο επίπεδο πάνω στο οποίο οι Βενετοί έσερναν τα κανόνια και τα άλλα εφόδια για να τα ανεβάσουν στο δώμα, κι ένα κλιμακοστάσιο.

Το φρούριο ήταν διώροφο. Το ισόγειο περιλάμβανε 26 διαφορετικά διαμερίσματα, που χρησιμοποιούνταν για διάφορους σκοπούς (λειτουργήσε μύλος, φούρνος, χώροι κατοικίας αξιωματικών, χώροι αποθήκευσης τροφίμων, πολεμοφοδίων, φυλάκισης, δεξαμενής νερού κτλ) Σ' αυτές τις φυλακές έκλεισαν οι Τούρκοι τον Δασκαλογιάννη πριν τον γδάρουν ζωντανό. Τα διαμερίσματα αυτά φωτίζονταν και αερίζονταν από ειδικά ανοίγματα στην οροφή τους, τα *sospirali lucernai* τα οποία κατέληγαν στο δώμα του φρουρίου (το δώμα είχε διαμορφωθεί ως μια ευρεία πλατεία την οποία όριζε ένα φαρδύ *parapetto*).

Το φρούριο είχε εξοπλιστεί με κανόνια στις κανονιοθυρίδες του, που βλέπουμε ακόμη και σήμερα να ανοίγονται στους τοίχους εξωτερικά. Στο ισόγειό του υπήρχαν 18 κανόνια στις κανονιοθυρίδες και 25 στις επάλξεις του ορόφου. Συγχρόνως ήταν εφοδιασμένο με 300 κιβώτια και 6.144 μπάλες διάφορων μεγεθών

Στον πάνω όροφο βρίσκονταν χώροι στρατωνισμού φρουράς, ενώ στη βόρεια γωνία είχε κατασκευαστεί ο πύργος του φάρου. Στις κύριες εξωτερικές πλευρές του φρουρίου, νότια, ανατολικά και βόρεια, είχε εντοιχιστεί το έμβλημα της Γαληνοτάτης Δημοκρατίας της

Βενετίας, το λιοντάρι, φιλοτεχνημένο πάνω σε λευκό μάρμαρο, ο γνωστός φτερωτός λέων του γιου Μάρκου. Το μυθικό ζώο τοποθετήθηκε στο κέντρο της παράστασης (εικ. 8). Σε όλη τη περίμετρο της οχύρωσης του Χάνδακα, σε διάφορα σημεία των τειχών, οι Βενετοί είχαν εντοιχίσει ανάγλυφες πλάκες με τα σύμβολα της Βενετίας και τα διάσημα των εκπροσώπων της στο νησί, καθώς και διάφορα εγχάρακτα κείμενα και χρονολογίες, που μαρτυρούσαν την πραγματοποίηση του τεράστιου αυτού έργου από την δοξασμένη τους πολιτεία.



Εικ. 8 : Βορειοανατολική πλευρά του μνημείου [ 14 ]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### Υφιστάμενη κατάσταση μνημείου

#### 3.1 Ιστορικό επεμβάσεων

Σήμερα το φρούριο Κούλε συνεχίζει να ατενίζει αγέρωχο το Κρητικό πέλαγος θυμίζοντας το μεγαλείο του ενετικού Χάνδακα. Η μακραίωνη ζωή και οι περιπέτειες του φρουρίου έχουν αποτυπωθεί στις όψεις του. Η δόμηση των λίθινων επιφανειών φαίνεται σήμερα σαν να έχει γίνει από ποικίλες και ανομοιόμορφες πέτρες, αποτέλεσμα διαδοχικών επισκευών και συμπληρώσεων.

Η καταγραφή της κατάστασης ενός κτιρίου τέτοιου μεγέθους και ιστορικής αξίας είναι μια επίπονη διαδικασία. Ο σημαντικότερος λόγος είναι ότι κατά καιρούς υλοποιούνται επεμβάσεις στα κτίρια αυτά, πολλές φορές και χωρίς κάποια ιδιαίτερη μελέτη με συνέπεια ο φορέας να χάνει την αρχική του δομή, να γίνονται επεμβάσεις επί επεμβάσεων γεγονός που καθιστά δύσκολη την ανακάλυψη της πραγματικής αιτίας κάποιας ορατής ζημιάς [ 3 ] . Αυτή η κατάσταση έχει αφήσει το στίγμα της και στο υπό εξέταση φρούριο.

Η επισκευαστική τάση για το μνημείο κατά τα νεότερα χρόνια ξεκινάει με την «μελέτη Λαμπάκη» το έτος 1966. Η υλοποίηση της μελέτης αυτής σε σημαντικό βαθμό, προξένησε προβλήματα στην όλη κατασκευή. Παρόλο που το βασικότερο πρόβλημα της ( η γειτνίαση με τη θάλασσα με συνέπεια τις σπηλαιώσεις στη θεμελίωση ) είχε από τότε αποκαλυφθεί δεν ελήφθησαν σοβαρά μέτρα για την επίλυση του, με αποτέλεσμα το πρόβλημα αυτό να συναντάται ακόμα και σήμερα (εικ. 8). Πέραν αυτού η κατασκευή ενισχυτικής πλάκας για την στήριξη των θόλων ύψους 30 εκατοστών προξένησε στατικά προβλήματα όπως την επιβάρυνση της κατασκευής με νεκρά φορτία σημαντικού μεγέθους καθώς και της διάβρωσης των δόμων των θόλων λόγω της διάβρωσης του σιδηρού οπλισμού

της νέας πλάκας που ήταν σε επαφή με την λιθοδομή. Η κατασκευή του δαπέδου από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε πολλά σημεία δεν έχει τις κατάλληλες κλίσεις με αποτέλεσμα να αποθηκεύονται σημαντικές ποσότητες νερού οι οποίες μεταβιβάζονται στους περιμετρικούς τοίχους καθώς και στην οροφή του ισογείου .



Εικ. 9 : Αποτύπωση όψεων του φρουρίου 1967 [ 16 ]. Αναφορά στις σπηλαιώσεις

Η έλλειψη διαρκούς συντήρησης του έργου και η μη λειτουργία του για πολλά χρόνια συνέβαλαν στο να μεγιστοποιηθούν τα προαναφερθέντα στατικά προβλήματα.

Το πρόβλημα των σπηλαιώσεων αντιμετωπίστηκε την δεκαετία του 2000 με την έμπηξη μεταλλικών πασάλων και την κατασκευή περιμετρικής υποθεμελίωσης από την νοτιοανατολική πλευρά του μνημείου. Μάλιστα το έτος 2006 και ενώ βρίσκεται σε εξέλιξη εργολαβία για τη κατασκευή της υποθεμελίωσης υπερθαλάσσιο τμήμα του νοτιοανατολικού άκρου του φρουρίου κατέπεσε.

Η γενική εικόνα του ισογείου αναδεικνύει την ύπαρξη προβλημάτων στο δομικό σύστημα που χρήζουν διερεύνηση σχετικά με την σοβαρότητά τους και την επίδρασή τους στην γενικότερη κατάσταση του φρουρίου. Πολλαπλά ρήγματα των τοίχων και των θόλων σε όλες τις κατευθύνσεις υποδηλώνουν την αποδιοργάνωση του φορέα.

Μεγάλη είναι και η ζημιά που έχει υποστεί λόγω της υποθαλάσσιας διάβρωσης στην νοτιοανατολική πλευρά (αυτό είναι και το υπό εξέταση τμήμα της παρούσας εργασίας). Τα σημαντικότερα προβλήματα εντοπίζονται στο τμήμα αυτό με σημαντικές ρηγματώσεις να εμφανίζονται τόσο στους τοίχους περιμετρικά όσο και στους θόλους.

Στη νότια πλευρά του τοίχου στο σημείο πάνω από τη θύρα που οδηγεί από τον χώρο της μεγάλης κανονιέρας στην αποθήκη των βλημάτων η ρηγματώση είναι διαμπερής και οφείλεται κύρια στην καθίζηση που έχει υποστεί η θεμελίωση του φρουρίου από την υποθαλάσσια διάβρωση στο νοτιοανατολικό τμήμα του.

Στόχος της εργασίας αυτής είναι να διερευνήσουμε το κατά πόσο οι υπάρχουσες ρηγματώσεις είναι αποτέλεσμα των σπηλαιώσεων στην θεμελίωση στο νοτιοανατολικό τμήμα του μνημείου.

### **3.2 Ορατές ζημιές**

Πλήθος ρωγμών παρουσιάζονται κύρια στην μεγάλη κανονιέρα εσωτερικά και πάνω στο θόλο οι οποίες κατά καιρούς έχουν υποστεί κάποιου είδους βελτιστοποίηση. Ο θόλος αυτός έχει μορφή σε κάτοψη κυρτή και οι ρωγμές συναντώνται όσο πλησιάζουμε προς το τμήμα που είναι κοντά στη θάλασσα. Εξωτερικά υπάρχει μεγάλη διαμπερής κατακόρυφη ρωγμή πίσω από τον δεύτερο μεγάλο θόλο (εικ. 10, 13). Μικρορωγμές εμφανίζονται στις συνδέσεις των θόλων με τους τοίχους (εικ. 11 -12).



Εικ.10 : Εξωτερική άποψη στο νοτιοανατολικό τμήμα με την κατακόρυφη διαμπερή ρωγμή



Εικ. 11 : Εσωτερική άποψη θόλου 3. Στο βάθος οι μικροί θόλοι 1-2-3





Εικ. 12 : Άποψη εισόδου στον θόλο 3



Εικ. 13 : Άποψη κανονιοθυρίδας «ενισχυμένης»

### 3.3 Δομικά δεδομένα μνημείου

Όπως είναι φανερό για ένα μνημείο τόσο μεγάλου όγκου δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία για την ποιότητα και την συμπεριφορά των υλικών που αποτελείται. Επίσης οι κατά καιρούς επεμβάσεις αλλοιώνουν τον δομικό χαρακτήρα των δομών του φορέα με ότι αυτό συνεπάγεται. Ο έλεγχος με τα επιστημονικά μέσα που διαθέτουμε (καρότα, κρουσιμετρήσεις, κτλ) συνοδεύεται με σημαντικό βαθμό σφάλματος όταν μιλάμε για τέτοιο όγκο κτιρίου. Ενδεικτικά είναι τα αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη, δοκιμής σε κάμψη και υδαταπορόφησης πετρωμάτων από τον φορέα του ΚΟΥΛΕ τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 1:

Πιν.1 : Αποτελέσματα δοκιμών [ 16 ]

	ΥΔΑΤΑΠΟΡΟΦΗΣΗ	ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟ 1	0.84 %	10 Mpa	30 Mpa / 35 Mpa
ΔΟΚΙΜΙΟ 2	1.1 %	17.7 Mpa	65 Mpa / 29.4 Mpa
ΔΟΚΙΜΙΟ 3	4.57 %	4.8 Mpa	21.3 Mpa / 24 Mpa

Οι δομικοί λίθοι του ενετικού φρουρίου Κούλε στο Ηράκλειο, όπως και της πλειονότητας των ενετικών μνημείων στην Κρήτη, είναι διάφοροι τύποι ανθρακικών πετρωμάτων. Έλεγχοι του Πολυτεχνείου Κρήτης για τη Ορυκτολογική και Πετρογραφική σύσταση τριών δειγμάτων μας δίνουν τα εξής αποτελέσματα.

ΔΕΙΓΜΑ 1 : Βιομικριτικός ασβεστόλιθος.

ΔΕΙΓΜΑ 2 : Μαργαϊκός Βιομικριτικός ασβεστόλιθος.

ΔΕΙΓΜΑ 3 : Ασβεστιτικός δολομίτης.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι τα δομικά χαρακτηριστικά του φορέα διαφέρουν από θέση σε θέση.

Για την παρούσα εργασία που αφορά το νοτιοανατολικό τμήμα του φρουρίου για το οποίο υπάρχουν πειραματικά δεδομένα λόγω των εργασιών της υποθεμελίωσης θα θεωρηθεί ότι οι δομοί του φρουρίου αποτελούνται από μαργαϊκό ασβεστόλιθο με χαρακτηριστικά.

Μέτρο Ελαστικότητας  $E = 8.82 \text{ e}+009 \text{ Pa}$  ή  $8.82 \text{ GPa}$

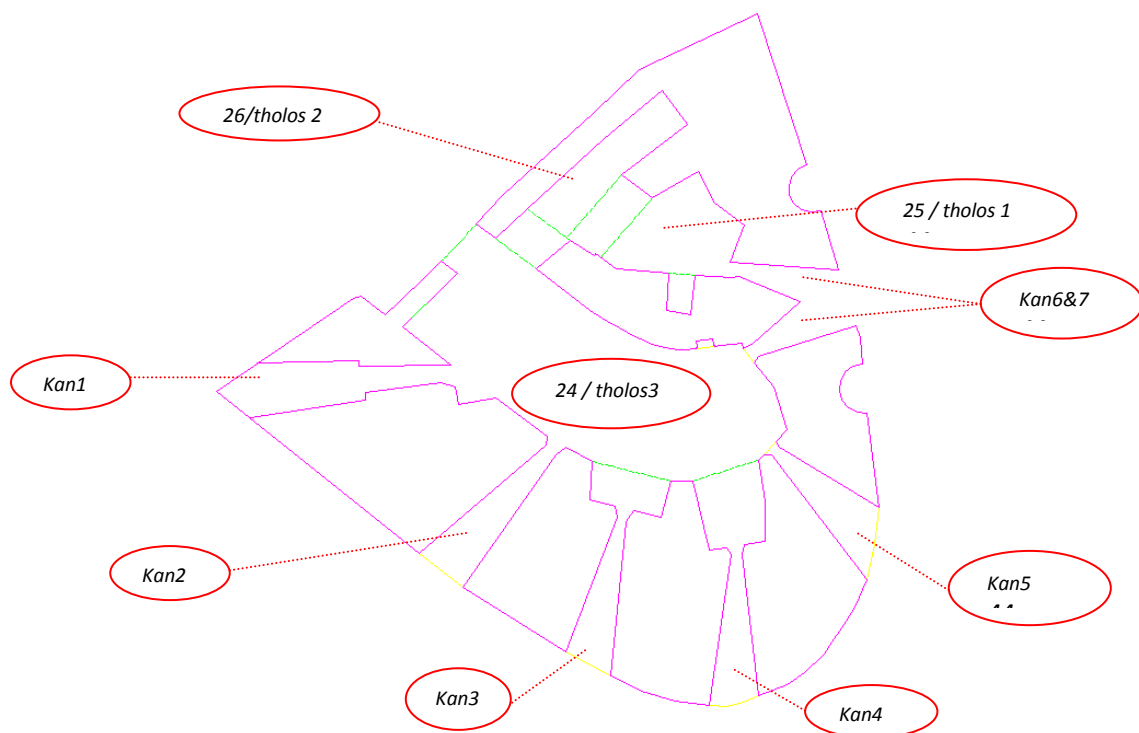
Λόγος Poisson  $\nu = 0.15$

Πυκνότητα υλικού  $= 1289.8 \text{ Kgr} / \text{m}^3$

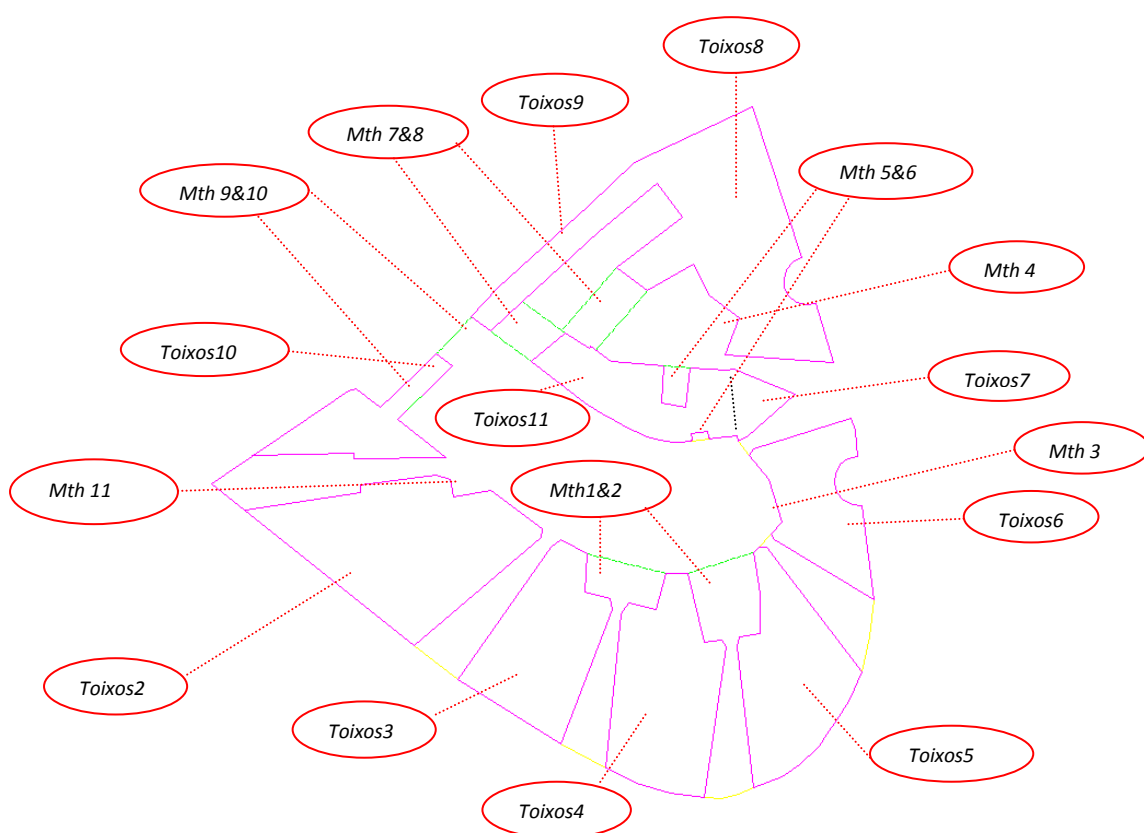
### **3.4 Τμήμα προς διερεύνηση.**

Το φρούριο ΚΟΥΛΕ είναι ένα τεράστιο οικοδόμημα επιφάνειας περίπου 3700.00 τ.μ. Η επιστημονική διερεύνηση του συνολικού οικοδομήματος με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων θα ξέφευγε από τα πλαίσια μιας μεταπτυχιακής διατριβής. Γι' αυτό προτιμήθηκε η μεταπτυχιακή αυτή μελέτη να επικεντρωθεί στο τμήμα αυτό του κτιρίου το οποίο παρουσιάζει και τα σοβαρότερα προβλήματα και να ερευνηθεί το κατά πόσο οι σπηλαιώσεις προξενούν και μεγιστοποιούν τις παρουσιαζόμενες ρωγμές και καθιζήσεις.

Το τμήμα αυτό όπως έχει λεχθεί και παραπάνω είναι το νοτιοανατολικό τμήμα του φρουρίου το οποίο στην κάτοψη έχει σχήμα μισής έλλειψης. Το κομμάτι αυτό που αποκόπηκε για την εργασία αυτή περιλαμβάνει τους χώρους 24, 25 και 26 όπως εμφανίζονται και παρακάτω (σχ. 1). Οι χώροι αυτοί είναι τρεις μεγάλοι θόλοι μαζί με την τοιχοποιία περιμετρικά τους. Εκτός του φρουρίου στην θέση αυτή υπάρχει η θάλασσα. Το υπόλοιπο τμήμα είναι στα δυτικά αυτού.



Σχ.1 : Κάτοψη του προς διερεύνηση τμήματος. Απεικόνιση θόλων και κανονιοθυρίδων



Σχ.2 : Κάτοψη του προς διερεύνηση τμήματος. Απεικόνιση μικρών θόλων και τοίχων

Τα στοιχεία των θόλων στο υπό εξέταση τμήμα δίνονται στον πίνακα 2 :

Πιν.2 : Στοιχεία θόλων

A/A	ΟΛΙΚΟ ΥΨΟΣ ΘΟΛΟΥ	ΥΨΟΣ ΕΥΘΥΓΡΑΜΜΟΥ ΤΜΗΜΑΤΟΣ	ΣΤΑΘΜΗ ΒΑΣΗΣ ΘΟΛΟΥ	ΣΤΑΘΜΗ ΚΛΕΙΔΑΣ ΘΟΛΟΥ
30	2.60 μ.	1.80 μ.	1.69 μ.	4.29 μ.
31		3.70 μ.	1.74 μ.	8.54 μ.
32	3.95 μ.	2.50 μ.	1.78 μ.	5.73 μ.
33	6.46 μ.	5.40 μ.	1.78 μ.	8.24 μ.
33'	6.46 μ.	4.40 μ.	1.78 μ.	8.24 μ.
34	2.63 μ.	1.90 μ.	1.79 μ.	4.42 μ.
35	2.50 μ.	1.85 μ.	1.68 μ.	4.18 μ.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### Ανάλυση κατασκευής

#### 4.1 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων (Finite Element Method)

Η χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων αποτελεί μία από τις πιο ισχυρές και έγκριτες μεθόδους αριθμητικής ανάλυσης για την επίλυση προβλημάτων δομικών κατασκευών. Αποτελεί επέκταση της μητρωικής ανάλυσης ραβδωτών κατασκευών στην ανάλυση πιο περίπλοκων ολόσωμων κατασκευών.

Θεμελιώδης αρχή της μεθόδου είναι η αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου του προβλήματος με ένα σύνολο απλών υποπεδίων τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία (finite elements). Τα στοιχεία αυτά διατηρούν τις ιδιότητες των επιμέρους υλικών της αρχικής κατασκευής, ενώ συνδέονται μεταξύ τους με κοινούς κόμβους (nodes). Όπως και στην μητρωϊκή ανάλυση, έτσι και εδώ υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των κομβικών μετατοπίσεων ή των κομβικών δυνάμεων σαν βασικών μεταβλητών του προβλήματος.

Η μέθοδος έχει τις ρίζες της σε διατυπώσεις του Hrenikoff το 1941, σε μελέτες του Courant το 1943 καθώς και σε επινοήσεις και εφαρμογές του I. Αργύρη το 1944 στους Η/Υ της τότε εποχής. Η μέθοδος διατυπώθηκε αναλυτικά το 1960 σε διατριβή των I. Αργύρη και Kelsey και σε εργασία του Clough. Από τότε μέχρι σήμερα, η συνεχής εξέλιξη των υπολογιστικών συστημάτων κατέστησε δυνατή την επίλυση προβλημάτων θεωρητικά απροσπέλαστων πριν μερικά χρόνια σε ολόκληρο το φάσμα προβλημάτων του μηχανικού. [25].

#### 4.2. Εξίσωση κίνησης

Κάθε μηχανικό σύστημα με μητρώο μάζας  $M$  και μητρώο ακαμψίας  $K$  που διεγείρεται από κάποια εξωτερική φόρτιση ταλαντώνεται και η εξίσωση κίνησης που περιγράφει την ταλάντωση αυτή διατυπώνεται ως εξής :

$$[M]\ddot{u} + [K]u = P(t) \quad (4.2.1)$$

όπου  $[M]$  και  $[K]$  το μητρώο μάζας και μητρώο ακαμψίας του συστήματος αντίστοιχα.

Σε περίπτωση που υπάρχει απόσβεση στο σύστημα η εξίσωση μετασχηματίζεται σε :

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = P(t) \quad (4.2.2)$$

με  $[C]$  το μητρώο απόσβεσης.

Στην περίπτωση που το σύστημα διεγείρεται από κάποια εδαφική επιτάχυνση (σεισμικό φορτίο) τότε η εξίσωση γίνεται:

$$[M]\ddot{u} + [C]\dot{u} + [K]u = -M \ddot{u}_g(t) \quad (4.2.3)$$

όπου:  $\ddot{u}_g$  Το διάνυσμα των εδαφικών επιταχύνσεων.

Η εξίσωση αυτή ορίζει ένα σύστημα  $N$  γραμμικών διαφορικών εξισώσεων δευτέρας τάξης.

### **4.3 Ελεύθερη Ταλάντωση Συστήματος χωρίς Απόσβεση**

Μία κατασκευή λέγεται ότι εκτελεί ελεύθερη ταλάντωση όταν απομακρύνεται από τη θέση στατικής ισορροπίας της και στην συνέχεια αφήνεται να ταλαντωθεί χωρίς καμία εξωτερική διέγερση. Δηλαδή  $P(t)=0$ . Δηλαδή, η μάζα του συστήματος έχει ως αρχικές συνθήκες κίνησης, μετακίνηση και ταχύτητα στο χρόνο  $t=0$ .

Για μηχανικά συστήματα χωρίς απόσβεση ο όρος  $[C]\dot{u}$  της απόσβεσης δεν συνεισφέρει στο σύστημα των εξισώσεων. Αντικαθιστώντας στην (4.2.2) το  $[C] = 0$  και  $P(t)=0$  προκύπτει το ομογενές σύστημα  $n$  γραμμικών διαφορικών εξισώσεων 2<sup>ης</sup> τάξης

$$[M]\ddot{u} + [K]u = 0 \quad (4.3.1)$$

το οποίο περιγράφει την απόκριση του μηχανικού συστήματος σε μη-μηδενικές αρχικές συνθήκες ή σωστότερα με αρχικές συνθήκες  $u=u(0)$  και  $\dot{u}=\dot{u}(0)$

Με βάση την θεωρία γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, η μη-μηδενική λύση του ομογενούς συστήματος (4.3.1) έχει τη μορφή

$$u(t) = \lambda e^{i\omega t} \quad (4.3.2)$$

όπου  $\lambda$  και  $\omega$  είναι σταθερές οι οποίες υπολογίζονται έτσι ώστε η (4.3.2) να ικανοποιεί το σύστημα (4.2.1). Αντικαθιστώντας την (4.3.2) στην (4.2.1) προκύπτει η εξίσωση για το  $\lambda$  και  $\omega$  στην μορφή

$$(K - \omega^2 M) \lambda e^{i\omega t} = 0 \quad (4.3.3)$$

Επειδή η παραπάνω εξίσωση θα πρέπει να ισχύει για κάθε τιμή του  $t$ , θα πρέπει να ισχύει και για  $t=0$

$$(K - \omega^2 M) \lambda = 0 \quad (4.3.4)$$

Η εξίσωση **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** αποτελεί **ιδιοπρόβλημα** με το άγνωστο ζευγάρι  $(\lambda, \omega)$  να είναι η λύση του ιδιοπροβλήματος. Είναι γνωστό ότι το ιδιοπρόβλημα έχει  $n$  λύσεις  $(\lambda_1, \omega_1), \dots, (\lambda_n, \omega_n)$ . Οι τιμές  $\omega_1^2, \dots, \omega_n^2$  καλούνται **ιδιοτιμές**, οι  $\omega_1, \dots, \omega_n$  καλούνται **ιδιοσυχνότητες** ενώ τα αντίστοιχα διανύσματα  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  καλούνται **ιδιομορφές** ή **ιδιοδιανύσματα**.

Η επίλυση του ιδιοπροβλήματος για την εύρεση των ιδιοσυχνοτήτων και των ιδιομορφών επιτυγχάνεται με βάση γνωστές θεωρίες από τη γραμμική άλγεβρα. Συγκεκριμένα, για να έχει το ομογενές γραμμικό αλγεβρικό σύστημα εξισώσεων **Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.**, με άγνωστες τα στοιχεία του,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  μη-μηδενική λύση θα πρέπει η ορίζουσα των συντελεστών των αγνώστων να είναι μηδέν, δηλαδή

$$\det (K - \omega^2 M) = 0 \quad (4.3.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την **χαρακτηριστική εξίσωση** για τον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων  $\omega_1, \dots, \omega_n$ . Η εξίσωση αυτή, μετά το ανάπτυγμα της ορίζουσας, δίνει ένα πολυώνυμο βαθμού  $n$  ως προς τις άγνωστες ιδιοτιμές  $\omega_1^2, \dots, \omega_n^2$ . Για βαθμό μέχρι και  $n=3$ , η επίλυση της χαρακτηριστικής εξίσωσης γίνεται αναλυτικά. Για βαθμό μεγαλύτερο του  $n=3$ , η επίλυση στις περισσότερες περιπτώσεις γίνεται μόνο αριθμητικά. Αποτελεσματικές αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης έχουν αναπτυχθεί για τον προσδιορισμό των ιδιοσυχνοτήτων αλλά και των ιδιομορφών του ιδιοπροβλήματος.

Οι ιδιομορφές μαζί με τις ιδιοσυχνότητες μιας κατασκευής αποτελούν εργαλείο διερεύνησης της παθολογίας της. Τα προγράμματα που χρησιμοποιούν πεπερασμένα



στοιχεία έχουν τη δυνατότητα εύρεσης αυτών των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων, σύμφωνα πάντα με τα θεωρητικά δεδομένα, τις παραδοχές και τις απλοποιήσεις που γίνονται.

Παράλληλα η σύγκριση των ιδιομορφών και ιδιοσυχνοτήτων που προσδιορίζονται υπολογιστικά από το τριδιάστατο μοντέλο, με αυτά που προκύπτουν από την επεξεργασία των επιτόπου μετρήσεων, βοηθά στον έλεγχο της αξιοπιστίας της προσομοίωσης του φορέα, καθώς και στον εντοπισμό τοπικών αστοχιών του. Τα στοιχεία αυτά σε συνδυασμό με τη γνώση της παθολογίας του, οδηγούν στην επιλογή των επιτρεπτών μεθόδων ενίσχυσης του [ 17 ].

#### **4.4 Επαναληπτικές μέθοδοι επίλυσης μη γραμμικών συστημάτων**

##### **4.4.1 Γενικά**

Η επίλυση συστημάτων τα οποία παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά, απαιτεί την αναπαράστασή τους από ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων. Η επίλυση ενός τέτοιου συστήματος δεν μπορεί να γίνει με αναλυτικό τρόπο, γι' αυτό και έχουν προταθεί διάφορες επαναληπτικές, αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης, οι οποίες έχουν την ικανότητα να συγκλίνουν σε μια αποδεκτή προσέγγιση της λύσης

##### **4.4.2 Η μέθοδος Newton – Raphson**

Η βάση της μεθόδου Newton – Raphson στην ανάλυση δομικών προβλημάτων, είναι ότι πρέπει να ικανοποιείται η ισορροπία του συστήματος. Αρχικά θεωρούμε τις παρακάτω εξισώσεις:

$$K(u)du = F - R(u) \quad (1)$$

όπου το  $u$  είναι το διάνυσμα της κομβικής μετατόπισης, το  $F$  είναι το διάνυσμα του εξωτερικού, κομβικού φορτίου, το  $R$  είναι το διάνυσμα της εσωτερικής, κομβικής αντίδρασης σε αυτό το φορτίο και το  $K$  αναπαριστά τον εφαπτόμενο πίνακα ακαμψίας. Το διάνυσμα της εσωτερικής κομβικής αντίδρασης προκύπτει από τις εσωτερικές τάσεις ως εξής

$$R = \sum_{elem} \int \beta^T \sigma dV$$

Σε αυτό το σύστημα εξισώσεων το μητρώο  $R$  και το μητρώο  $K$  είναι συναρτήσεις του  $u$ . Σε πολλές περιπτώσεις, και το  $F$  είναι συνάρτηση του  $u$ . Η μορφή των εξισώσεων επιτρέπει την επίλυση τους με τη μέθοδο **Newton – Raphson**.

Θεωρώντας ότι η τελευταία προσέγγιση είναι η  $u^{i-1}$ , όπου ο εκθέτης ( $i$ ) είναι ο αύξων αριθμός της επανάληψης, η εξίσωση (1) μπορεί να γραφεί ως εξής:

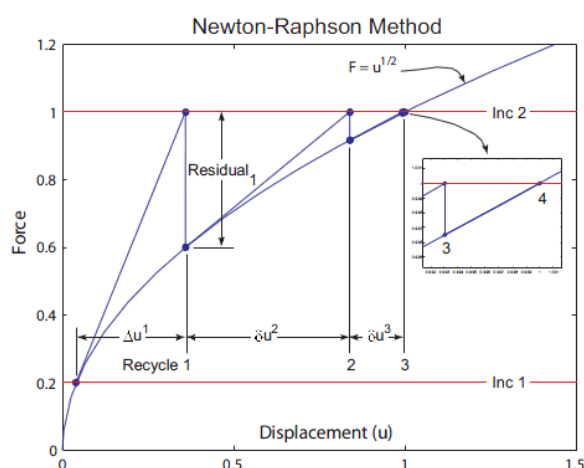
$$K(u_{n+1}^{i-1})\delta u = F - R(u_{n+1}^{i-1})$$

Αυτή η εξίσωση λύνεται ως προς  $\delta u^i$  και η επόμενη λύση προκύπτει από:

$$\Delta u^i = \Delta u^{i-1} + \delta u^i \quad \text{και} \quad u_{n+1}^i = u_{n+1}^{i-1} + \delta u^i$$

Η επίλυση αυτής της εξίσωσης ολοκληρώνει μια επανάληψη και η διαδικασία μπορεί να επαναληφθεί. Ο δείκτης  $n$  εννοεί τον αύξοντα αριθμό του βήματος και παρουσιάζει την κατάσταση  $t = n$ .

Η μέθοδος **Newton – Raphson** είναι η προεπιλεγμένη μέθοδος που χρησιμοποιεί το MSC.MARC 2005 για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων. Παρουσιάζει καλά αποτελέσματα για τα περισσότερα προβλήματα (βλ. Σχ.3), αλλά έχει υψηλό υπολογιστικό κόστος για πολύπλοκες τρισδιάστατες αναλύσεις.



Convergence Criteria:

Residual Checking

$$\frac{\|F_{residual}\|_{\infty}}{\|F_{reaction}\|_{\infty}} < TOL_1$$

Displacement Checking

$$\frac{\|\delta u\|_{\infty}}{\|\Delta u\|_{\infty}} < TOL_1$$

Σχ.3 : Μέθοδος Newton – Rampson

#### **4.5 Μοντελοποίηση του φορέα.**

Η μελέτη του προβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και για την υλοποίησή της χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα MSC.MARC-MENTAT της εταιρίας Marc Analysis Research Corporation. Το Mentat είναι ο προ-επεξεργαστής και μετ-επεξεργαστής που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση του προβλήματος και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ενώ το Marc αναλαμβάνει την επίλυσή του, μέσω των επαναληπτικών αλγορίθμων επίλυσης που διαθέτει.

Η γεωμετρία του φορέα εισήχθη στο MARC-MENTAT με την μορφή καμπύλων (curves) και επιφανειών (surfaces) στο επίπεδο X - Y. Με την εντολή του προγράμματος AUTOMESH πραγματοποιήθηκε ο χωρισμός των επιφανειών σε πεπερασμένα στοιχεία. Η πυκνότητα του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων καθορίστηκε μετά από διαδοχικές προσεγγίσεις. Λόγω της πολυπλοκότητας του φορέα ( τοίχοι – κανονιοθυρίδες - μικροί θόλοι- μεγάλοι θόλοι ) αποφασίσθηκε ο χωρισμός του φορέα σε πακέτα ( sets ) στα οποία θα μπορούσαν να δοθούν ακόμα και διαφορετικές ιδιότητες.

Τα «πακέτα αυτά» αποτελούν τα σώματα σε επαφή (contact bodies) και για τα οποία υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού των συνθηκών επαφής τους (συντελεστής τριβής - όριο αποκόλλησης των τμημάτων σε επαφή κτλ ) από το πρόγραμμα.

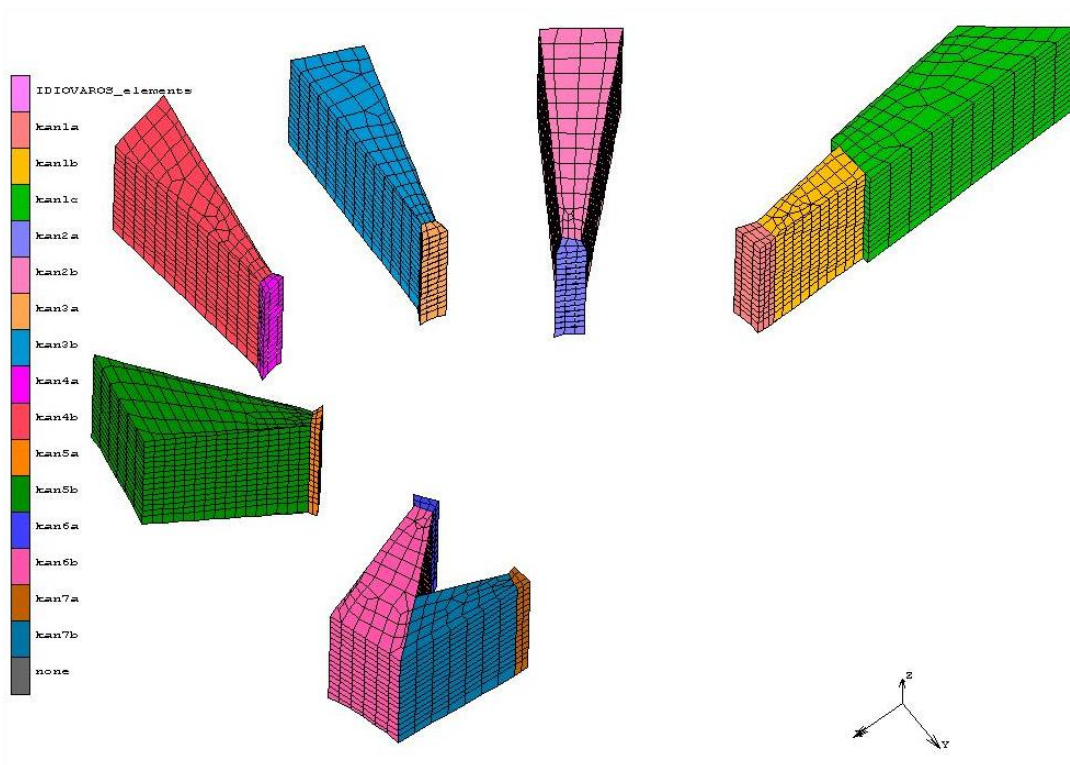
Για το καθένα από τα πακέτα αυτά έγινε ξεχωριστή διακριτοποίηση με βάση την εντολή AUTOMESH που περιγράφηκε παραπάνω. Λόγω της διαφορετικής γεωμετρίας του καθενός απ' αυτά και προκειμένου να υπάρξει οικονομία υπολογιστικού χρόνου έγινε πύκνωση στα ευαίσθητα τμήματα της κατασκευής (π.χ θόλοι ) και αραίωση σε τμήματα που δεν αναμένουμε αξιόλογα ευρήματα (π.χ εσωτερικό τοίχων λόγω του μεγάλου πάχους των). Έτσι έχουμε στοιχεία διαστάσεων  $0.50 * 0.50 * 0.50 \mu$ . σε περιοχές πύκνωσης και  $1.30 * 1.30 * 0.50 \mu$  σε περιοχές αραίωσης. Η τελική εικόνα της διακριτοποίησης λήφθηκε μετά από δοκιμαστικές αναλύσεις και διαφορετικές διακριτοποιήσεις. Ο αριθμός των πεπερασμένων στοιχείων του φορέα καθώς και η μορφή της διακριτοποίησης δίνονται αναλυτικά στου πίνακες 3-4 και εμφανίζονται στα σχήματα 4-11.

Πιν. 3 : Πεπερασμένα στοιχεία ανά σετ.

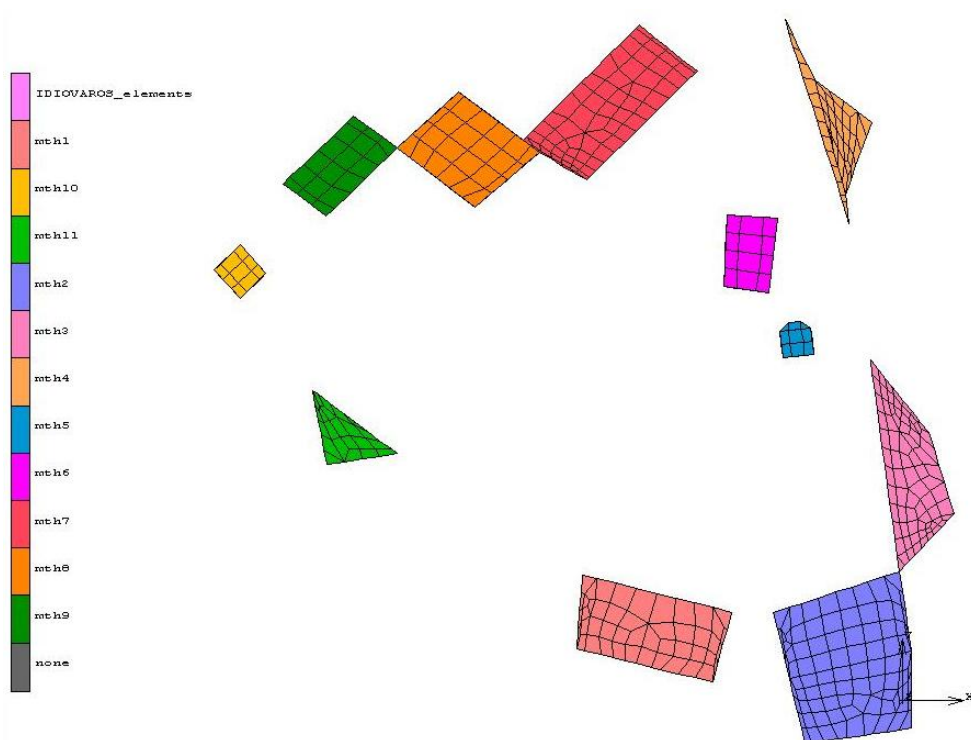
SETS	ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	SETS	ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	SETS	ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	SETS	ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	SETS	ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ
kan1a	135	meth1	552	toixos1	1428	tholos1	731	doma1	3196
kan1b	690	meth2	1068	toixos2	4726	tholos2	416	doma2	243
kan1c	1050	meth3	988	toixos3	2839	tholos3	1733		
kan2a	104	meth4	572	toixos4	3434				
kan2b	945	meth5	163	toixos5	3332				
kan3a	104	meth6	168	toixos6	3689				
kan3b	1065	meth7	603	toixos7	595				
kan4a	104	meth8	324	toixos8	3995				
kan4b	1065	meth9	216	toixos9	1071				
kan5a	120	meth10	129	toixos10	221				
kan5b	1575	meth11	276	toixos11	2414				
kan6a	90								
kan6b	900								
kan7a	90								
kan7b	555								

Πιν. 4 : Μέγεθος μοντέλου σε πεπερασμένα στοιχεία και κόμβους

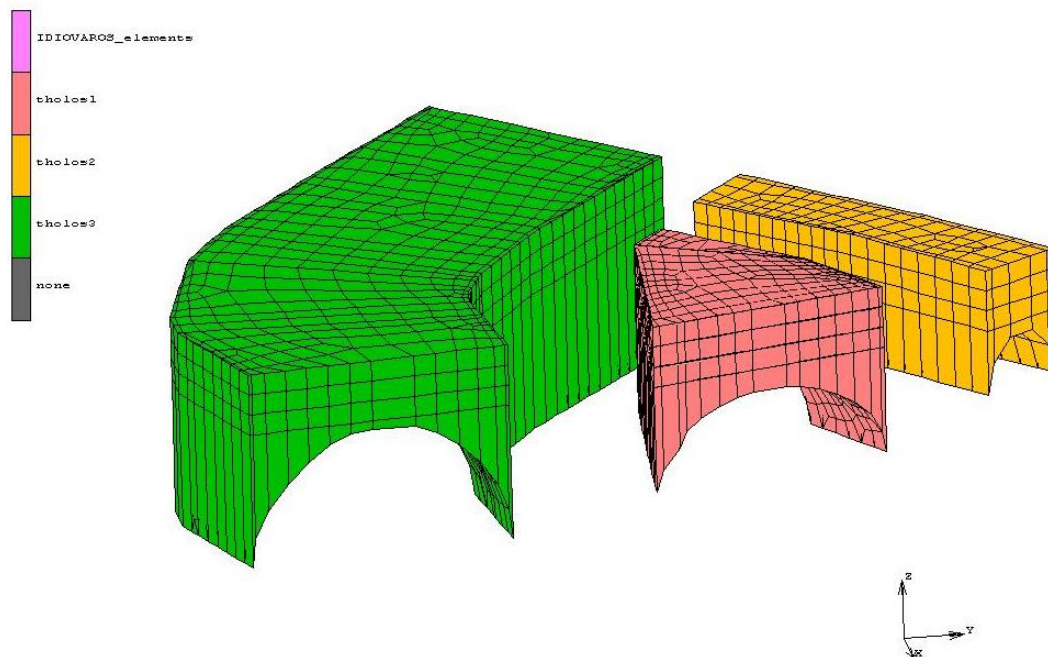
Μοντέλο	Πεπερασμένα στοιχεία	Κόμβοι
	47714	57425



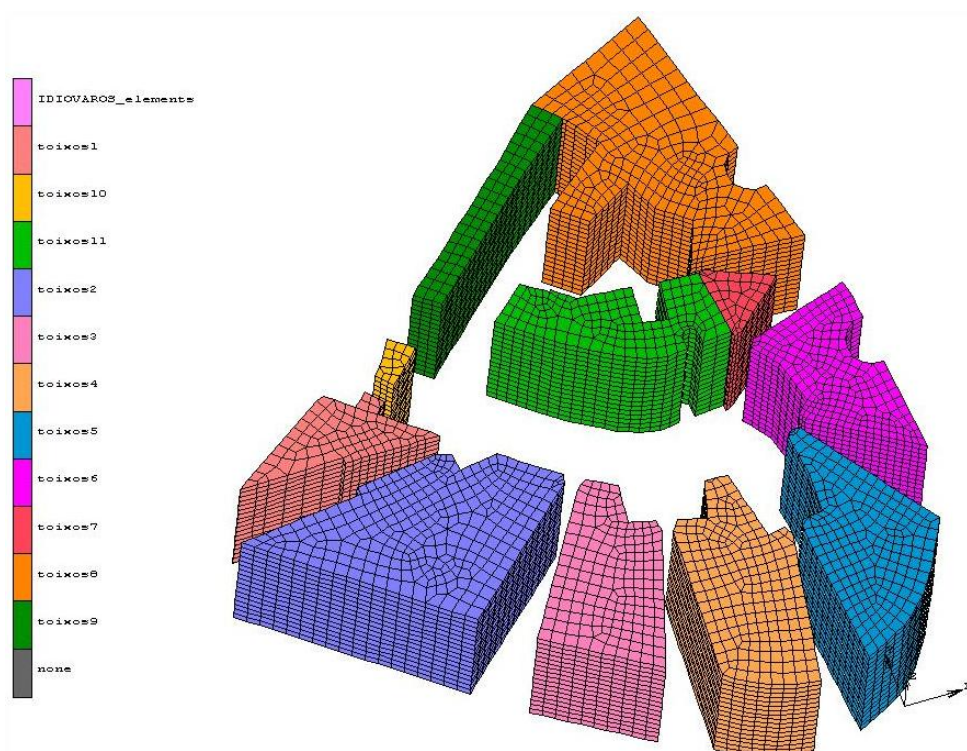
Σχ.4 : Ομάδα κανονιοθυρίδων



Σχ.5 : Ομάδα μικρών θόλων ( κάτοψη )

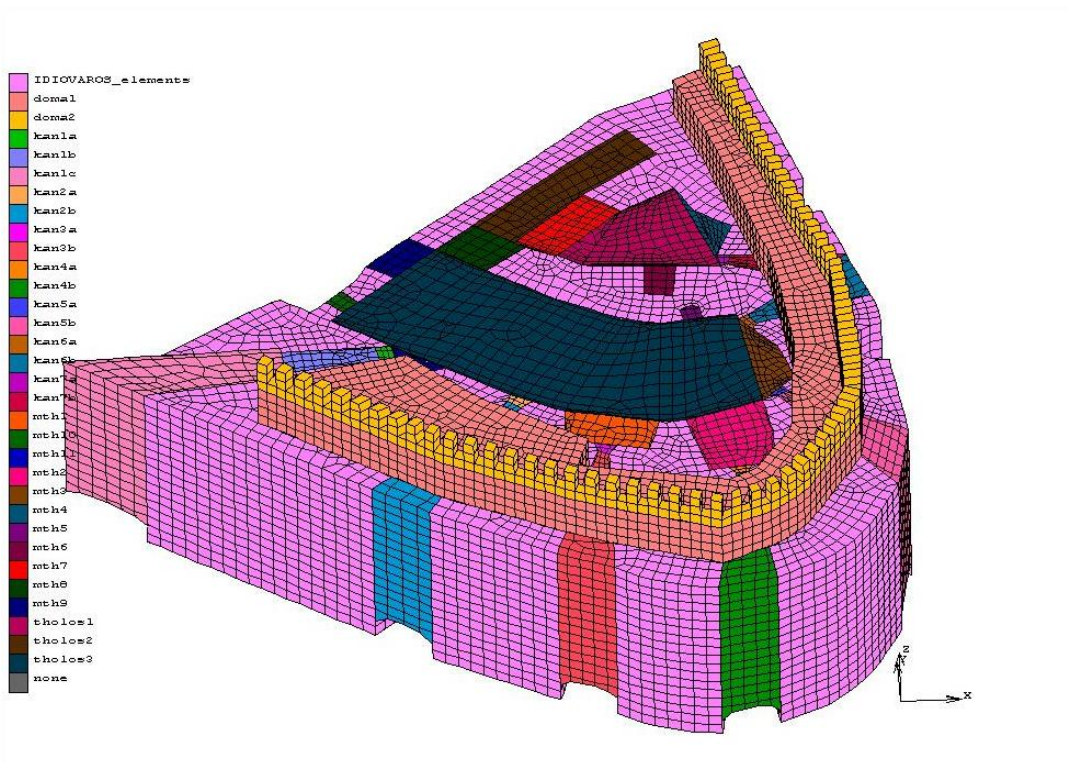


Σχ.6 : Ομάδα μεγάλων θόλων

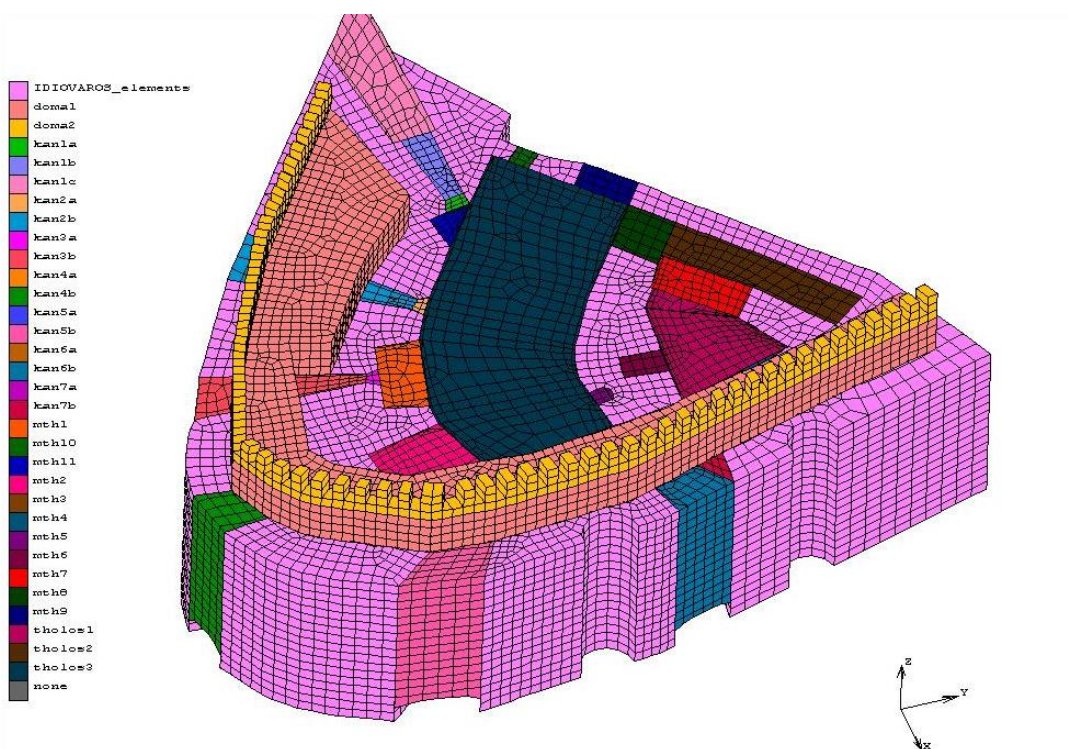


Σχ.7 : Ομάδα τοίχων

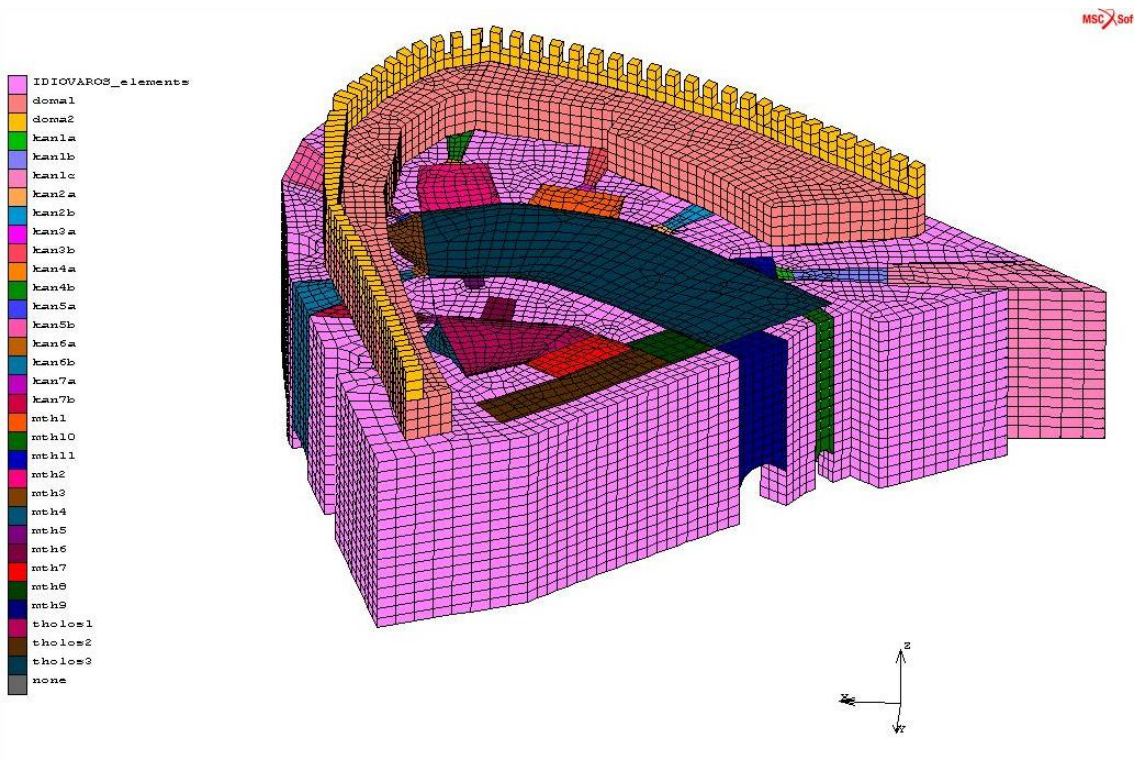




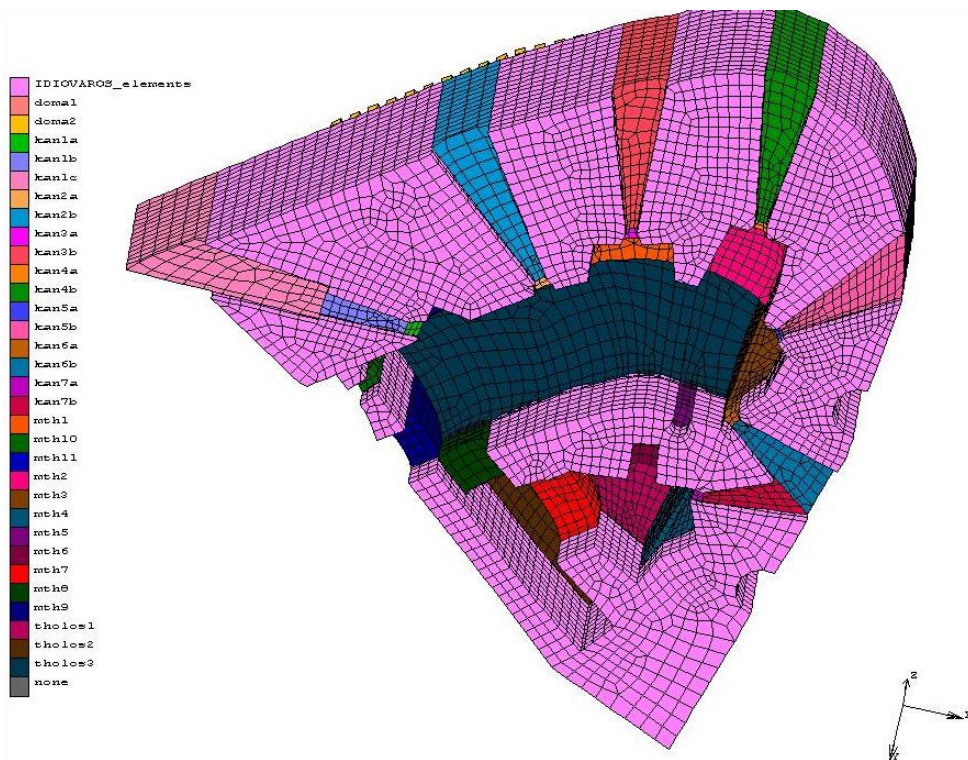
Σχ.8 : Νοτιοανατολική άποψη προσομοιώματος



Σχ.9 : Βορειοανατολική άποψη προσομοιώματος



Σχ.10 : Δυτική άποψη προσομοιώματος



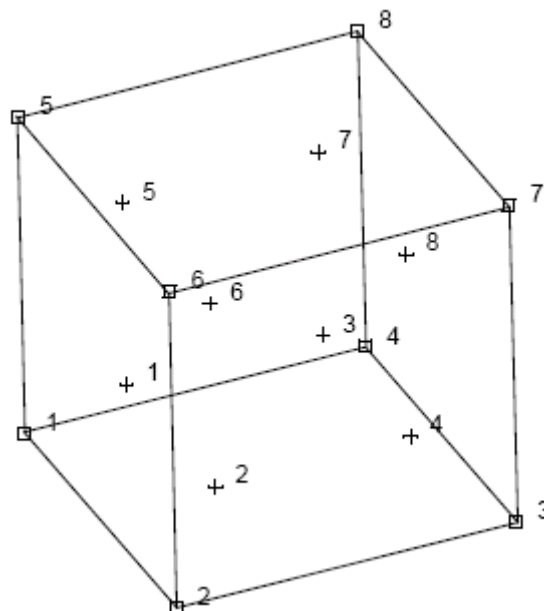
Σχ.11 : Άνοψη προσομοιώματος



#### 4.6 Είδος πεπερασμένων στοιχείων

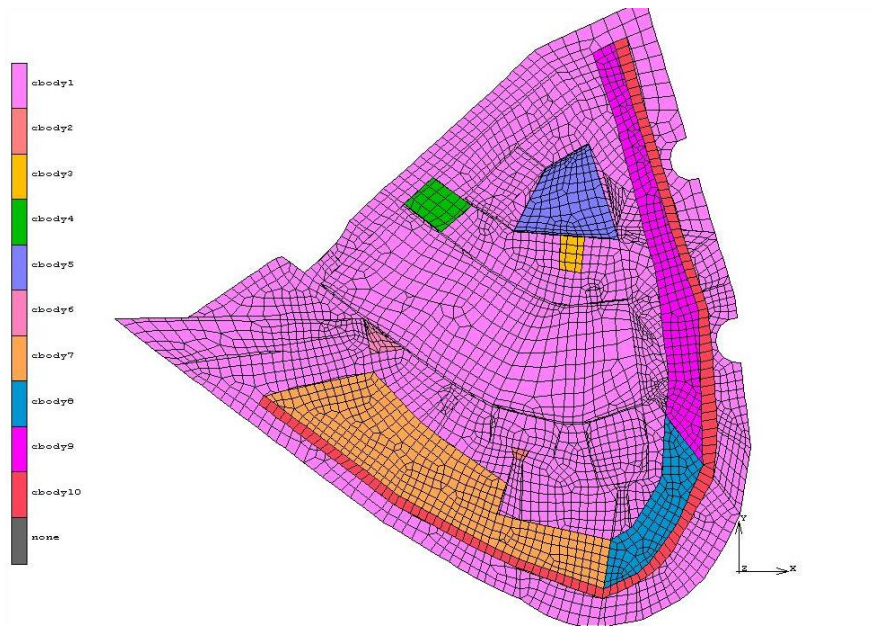
Για την διακριτοποίηση των μελών της κατασκευής χρησιμοποιήθηκαν ισοπαραμετρικά εξαεδρικά στοιχεία με οκτώ κόμβους (Σχ.12). Η ακαμψία του στοιχείου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας ολοκλήρωση οκτώ σημείων κατά Gauss [25].

Τα ισοπαραμετρικά στοιχεία προέκυψαν από την ανάγκη να κατασκευαστούν στοιχεία μη ορθογωνικά με καμπυλόγραμμα πλευρές. Η ισοπαραμετρική θεώρηση βασίζεται στην χρήση ενός δευτέρου συστήματος συντεταγμένων το οποίο ορίζεται στο καρτεσιανό σύστημα μέσω μιας απεικόνισης και ονομάζεται φυσικό σύστημα  $\{ \xi \} = [ \xi, \eta, \zeta ]^T$ . Για τον υπολογισμό του μητρώου ακαμψίας καταφεύγουμε σε αριθμητικό υπολογισμό του ολοκληρώματος. Ο υπολογισμός του μητρώου μετασχηματισμού  $[ J ]$  το οποίο εκφράζει την ιακωβιανή της απεικόνισης είναι απαραίτητος. Ο όρος ισοπαραμετρικός εξηγείται από το γεγονός ότι τόσο οι συνιστώσες της μετατόπισης  $u, v, w$  όσο και οι Καρτεσιανές συντεταγμένες  $x, y, z$  εκφράζονται ως προς τις αντίστοιχες επικόμβιες ποσότητες, με τις ίδιες συναρτήσεις παρεμβολής, δηλαδή εκφράζονται ως προς τις συντεταγμένες  $\xi, \eta, \zeta$ .



Σχ.12: Εξαεδρικό στοιχείο οκτώ κόμβων (Hex).





Σχ. 14 : Απεικόνιση των contact bodies σε κάτοψη

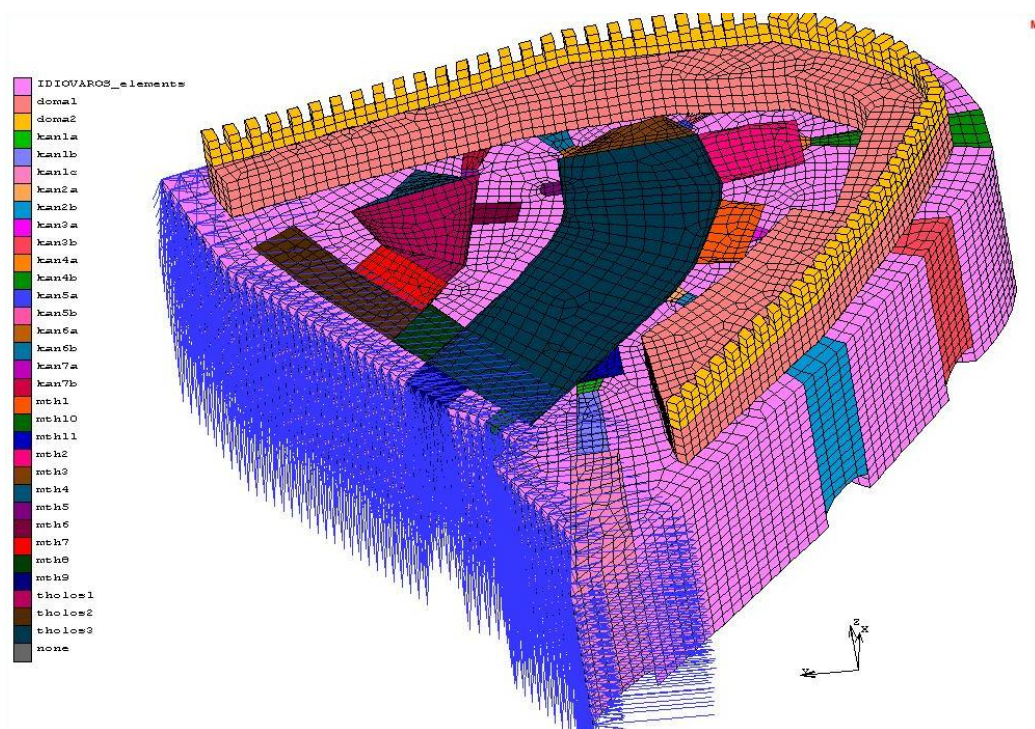
#### **4.8 Παραδοχές προσομοίωσης – Συνοριακές συνθήκες – Φορτίσεις**

1) Για τη προσομοίωση της επαφής της βάσης του φρουρίου με το έδαφος, επιβλήθηκε σε όλους τους κατώτερους κόμβους της βάσης της κατασκευής πλήρης περιορισμός μετατόπισης στους τρεις άξονες κίνησης.

(Displacement X= Displacement Y= Displacement Z = 0)

2) Στους κοινούς κόμβους της συνέχειας του υπό μελέτη τμήματος με το υπόλοιπο τμήμα του φρουρίου, επιβλήθηκε πλήρης περιορισμός μετατόπισης στον εγκάρσιο κατακόρυφο και οριζόντιο άξονα (σχ. 15).

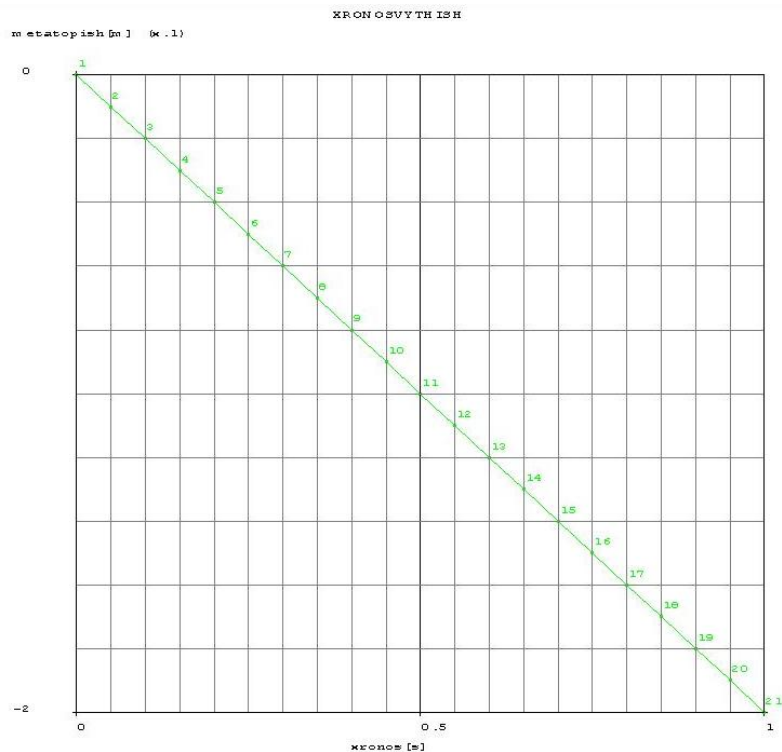
( Displacement X = Displacement Y= 0)



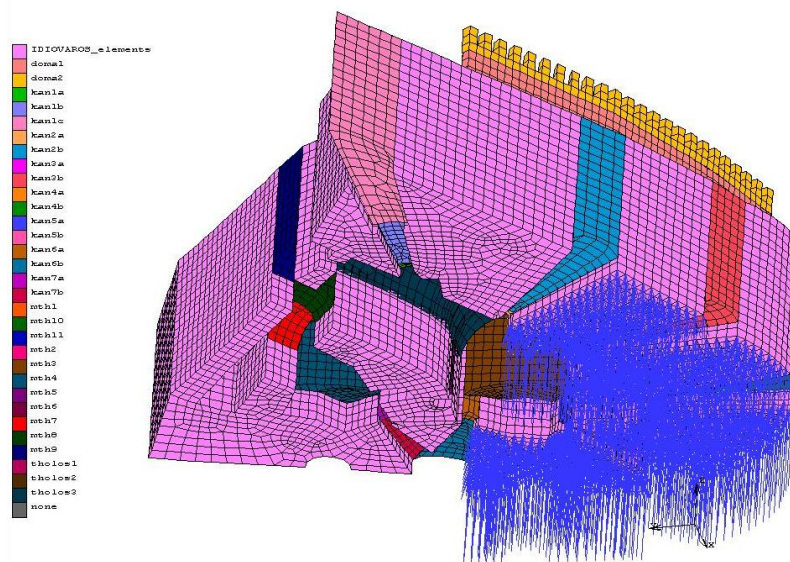
Σχ.15 : Απεικόνιση συνθηκών στήριξης του προσομοιώματος με την συνέχεια του φορέα

3) Επιβλήθηκε το φορτίο του ιδίου βάρους σε όλα τα πεπερασμένα στοιχεία της κατασκευής. Η εφαρμογή του φορτίου βάρους (φορτίο ανά μονάδα μάζας) επιτυγχάνεται με τη χρήση της επιτάχυνσης της βαρύτητας. Ορίζεται φορτίο λόγω ιδίου βάρους (Gravity load) της τάξης των  $F_{grav} = -10 \text{ m/sec}^2$

4) Επιβλήθηκε περίπτωση φόρτισης λόγω βύθισης στους κατώτερους κόμβους των τοίχων 3-4-5-6 (σχ.17) γραμμική από 0 έως 20 εκατοστά (σχ. 16).



Σχ.16 : Πίνακας (TABLE) με την βύθιση των τοίχων 3-4-5-6

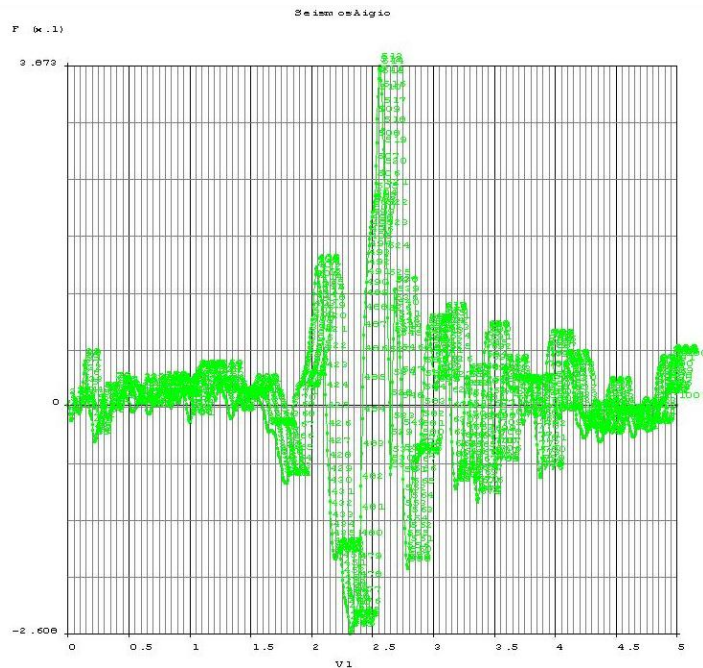


Σχ.17 : Περίπτωση φόρτισης με την βύθιση των τοίχων 3-4-5-6

5) Τέλος για την επιβολή της δυναμικής καταπόνησης επελέγη από το μενού Fixed Displacement μέσω του οποίου εισήχθη το γράφημα των μετατοπίσεων στον x άξονα του



σεισμού του Αιγίου (σχ. 18).



Σχ.18 : Το γράφημα των μετατοπίσεων στον x άξονα του σεισμού του Αιγίου το 1995.

Ο σεισμός του Αιγίου έπληξε την περιοχή της Αχαΐας στις 16-06-1995 και ήταν μεγέθους  $M=6.10$  βαθμών της κλίμακας Ρίχτερ . Η μέγιστη καταγεγραμμένη επιτάχυνση του σεισμού έφτασε το μέγεθος των  $0.38\text{ g}$ .

#### **4.9 Ορισμός των ιδιοτήτων του υλικού**

Όπως είναι φυσικό, για να αποδώσει αποτελέσματα μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, θα πρέπει να έχουν οριστεί οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών που απαρτίζουν τα προς μελέτη σώματα. Συνεπώς από το μενού Material Properties επελέγη ο ορισμός ισότροπου υλικού με τις ακόλουθες ιδιότητες

Μέτρο Ελαστικότητας  $E = 8.82 \text{ e}+009 \text{ Pa}$  ή  $8.82 \text{ GPa}$

Λόγος Poisson  $\nu = 0.15$

Πυκνότητα υλικού  $= 1289.8 \text{ Kgr} / \text{m}^3$

για το πρώτο σενάριο επίλυσης.

Διερευνήθηκε και ένα δεύτερο σενάριο επιλύσεων με

Μέτρο Ελαστικότητας  $E = 6.17 \text{ e}+009 \text{ Pa}$  ή  $6.17 \text{ GPa}$

Λόγος Poisson  $\nu = 0.10$

Πυκνότητα υλικού =  $902.3 \text{ Kgr} / \text{m}^3$

για τα γεμίσματα των μεγάλων θόλων. Χρησιμοποιήθηκε δηλαδή υλικό χαμηλότερης ποιότητας για τα γεμίσματα των μεγάλων θόλων. Υλικό με  $E=70\%$  του αρχικού και πυκνότητα υλικού =  $70\%$  της αρχικής.

#### **4.10 Ορισμός των συνθηκών ανάλυσης**

Σε αυτό το κομμάτι της μοντελοποίησης του προβλήματος, πραγματοποιείται η συγκέντρωση και καταχώριση όλων των παραμέτρων που έχουν καθοριστεί παραπάνω, σε μορφή που μπορεί να διαχειριστεί το λογισμικό του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Επιλέγεται ο τύπος του προς επίλυση προβλήματος, η διαδικασία επίλυσης, ορίζονται οι παράμετροι της επαναληπτικής διαδικασίας, καθορίζεται ο τύπος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν και τέλος, καθορίζονται οι παράμετροι για τις οποίες θα ανακτηθούν αποτελέσματα, καθώς και η συχνότητα ανάκτησης αυτών των αποτελεσμάτων.

Ο τύπος του προβλήματος επιλέγεται μέσα από το μενού Loadcase

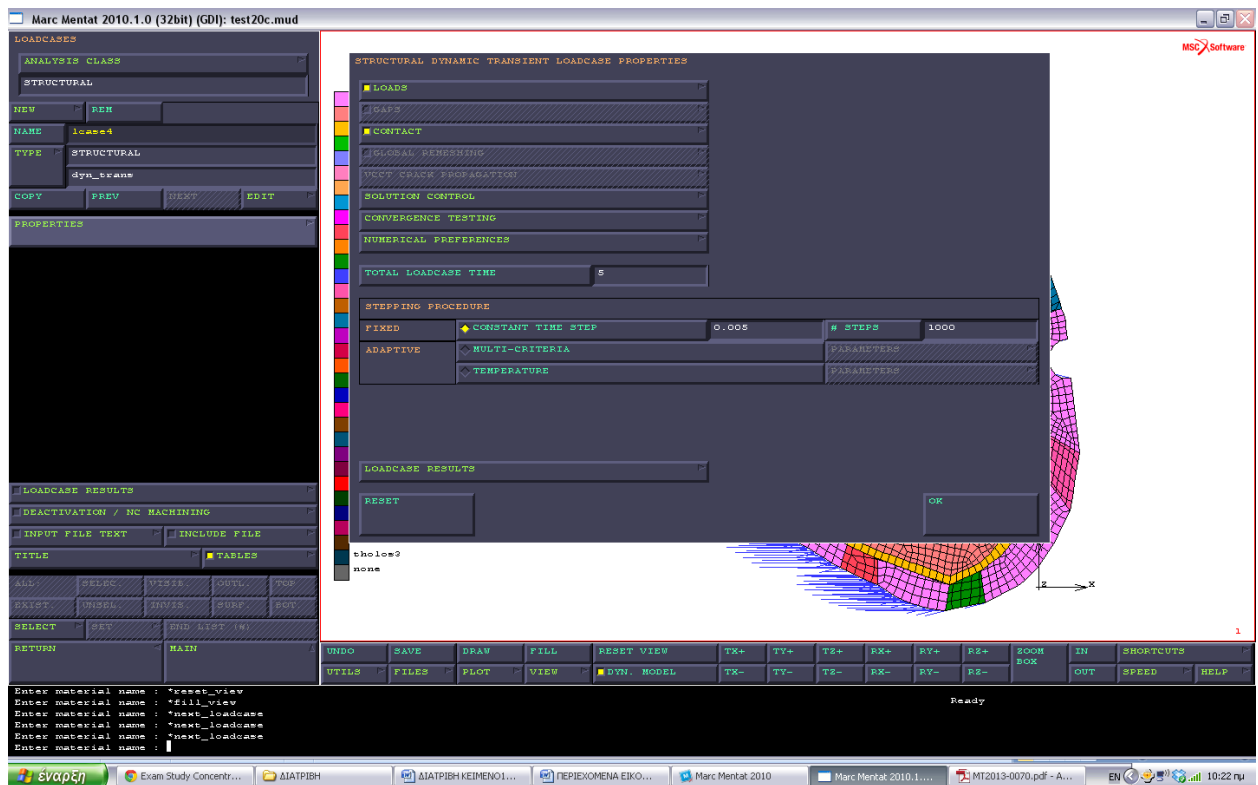
Για το συγκεκριμένο πρόβλημα τα Loadcases που καθορίστηκαν είναι τα εξής :

Loadcase 1 : Ανάλυση με ίδιο βάρος

Loadcase 2 : Ανάλυση με ίδιο βάρος συν την επιβαλλόμενη βύθιση

Loadcase 3 : Ανάλυση ιδιομορφών

Loadcase 4 : Ανάλυση με ίδιο βάρος συν τον σεισμό του Αιγίου



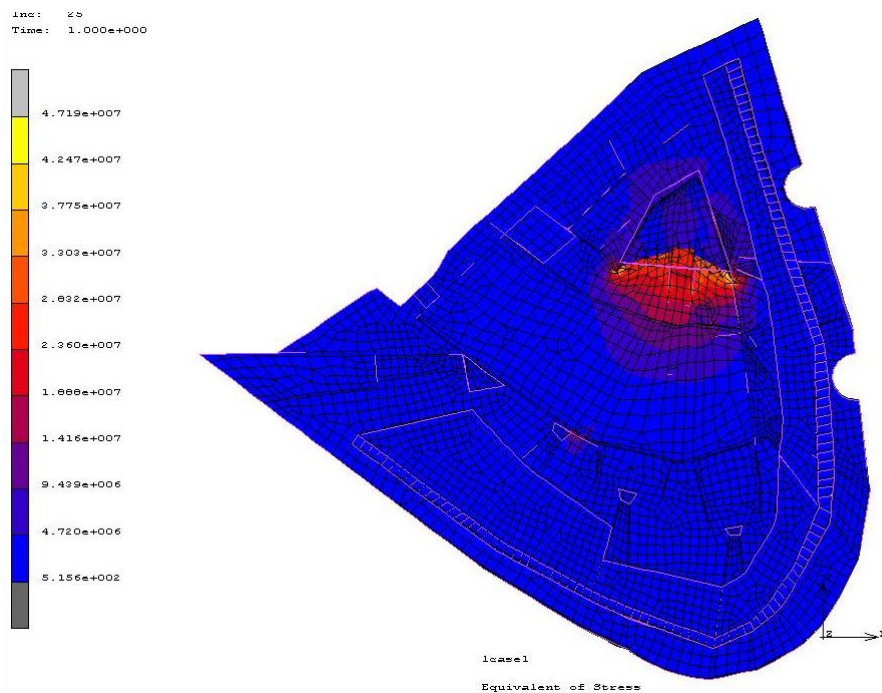
Σχ. 19 : Περιβάλλον MARC για τους παραμέτρους της δυναμικής ανάλυσης



## Αποτελέσματα ανάλυσης

### 5.1 Ανάλυση κατασκευής για Loadcase 1 – Ίδιο βάρος / Σενάριο 1

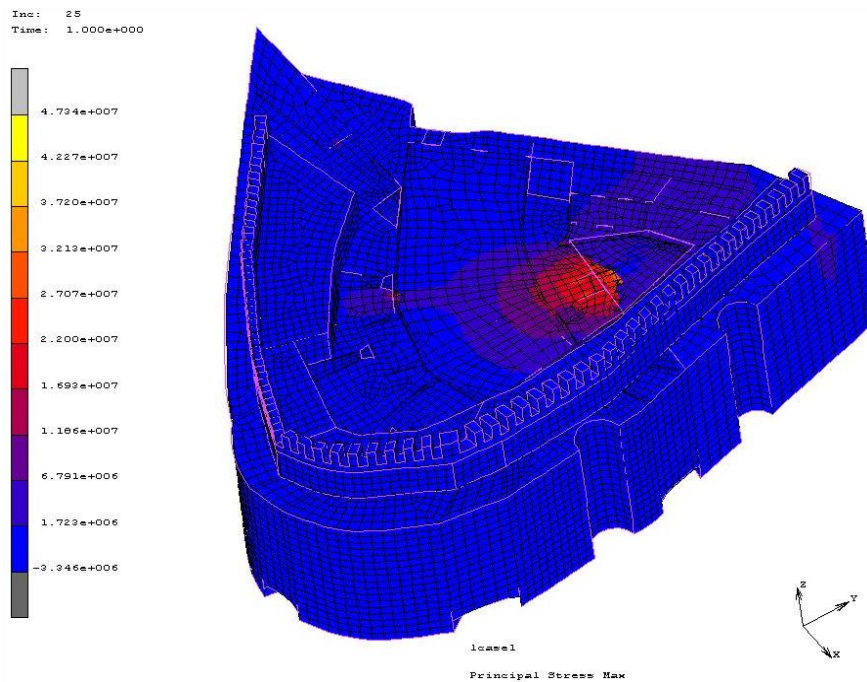
Αρχικά παρουσιάζονται το διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων Σχ. 20 και το διάγραμμα των εφελκυστικών τάσεων Σχ.21, τα οποία γραφικά με χρωματικές κλίμακες, για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



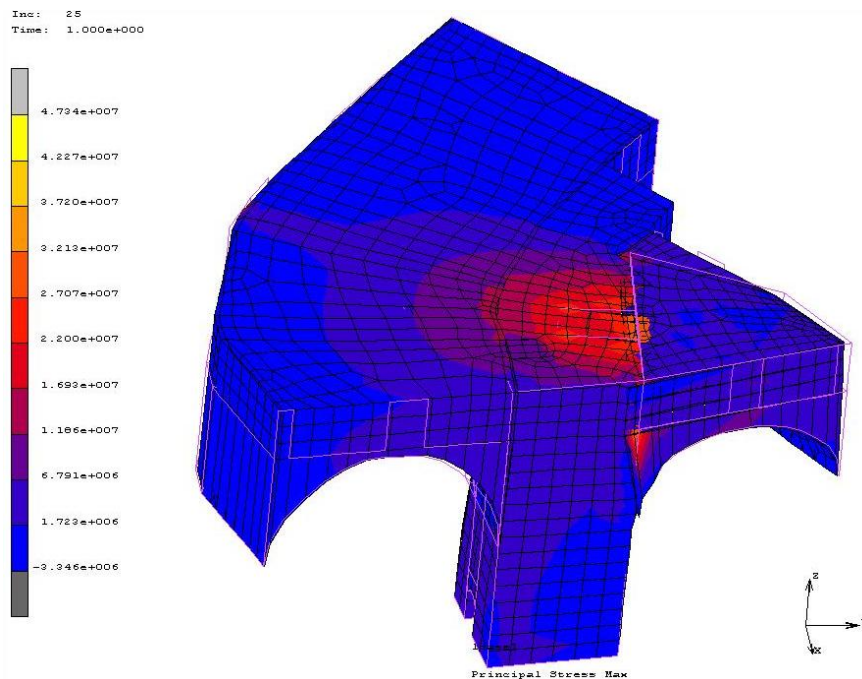
Σχ. 20 : Ισοδύναμες τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης

Οι επικρατούσες τάσεις για τον φορέα είναι οι θλιπτικές τάσεις όπως άλλωστε είναι και το αναμενόμενο, με μια μικρή επιφάνεια στην οποία κυριαρχούν οι εφελκυστικές τάσεις για την συγκεκριμένη φόρτιση του ίδιου βάρους. Η περιοχή αυτή βρίσκεται μεταξύ των θόλων 1 & 2 και είναι αναμενόμενο να περιμένουμε στον τοίχο αυτό εφελκυστικές τάσεις μιας και οι μεγάλοι θόλοι 1 και 3 τείνουν να ωθήσουν την κατασκευή προς την κατεύθυνση του αρνητικού z άξονα. Η εικόνα αυτή αποτυπώνεται στο Σχ. 20 στο οποίο παρουσιάζονται χρωματικά οι ισοδύναμες τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Σε μια

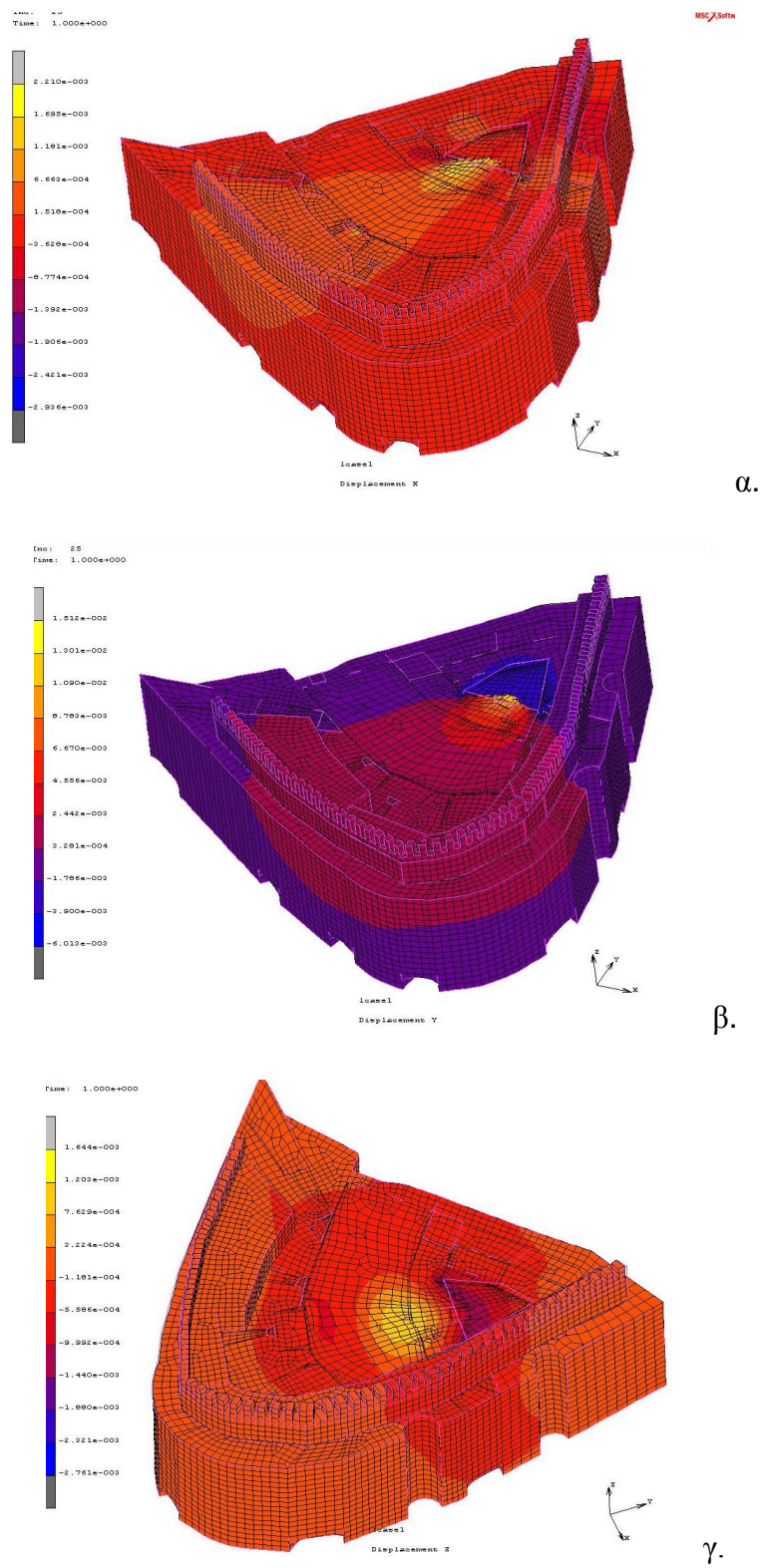
λεπτομερέστερη απεικόνιση στο Σχ.22 απεικονίζονται οι 2 θόλοι στους οποίους αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις. Η ανάπτυξη μέγιστων κύριων τάσεων κυμαίνεται από - 3.346 Mpa (θλιπτικές) έως 47.33 Mpa (εφελκυστικές).



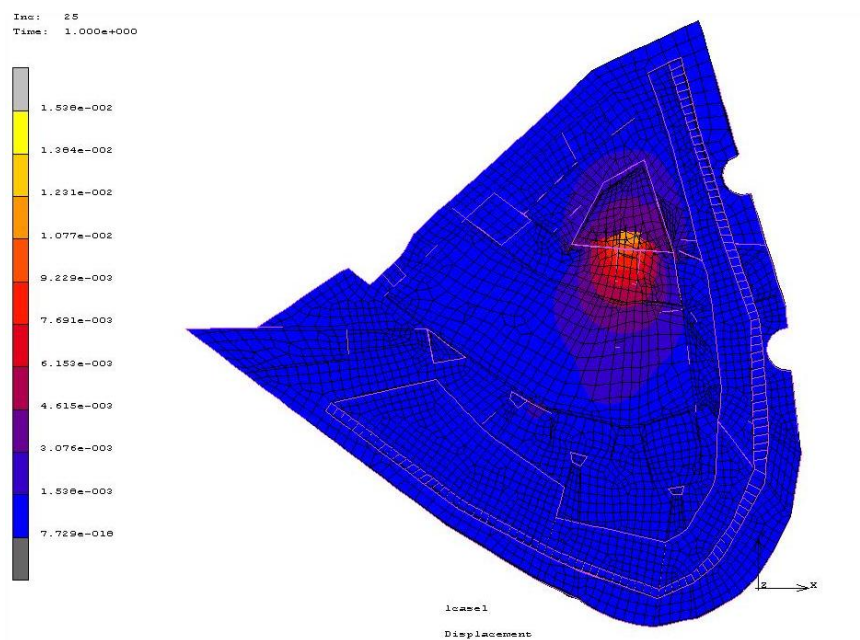
Σχ.21 : Μέγιστες κύριες τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης



Σχ.22 : Μέγιστες κύριες τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης (θόλοι 1&3 – τοίχος 11)



Σχ. 23 : Απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τους άξονες X-Y-Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης



Σχ. 24 : Συνολικές μετατοπίσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης

Οι μετατοπίσεις κατά τον τρεις άξονες παρουσιάζονται στα Σχ. 23 α, β, γ, και οι συνολικές μετατοπίσεις στο Σχ. 24 και στον πίνακα 5.

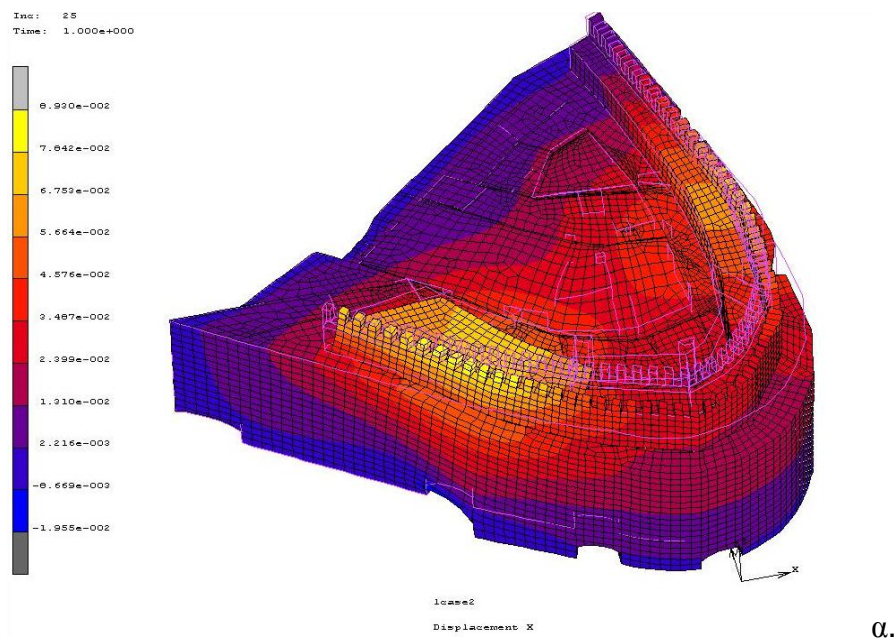
Πίν. 5 : Loadcase 1 μετατοπίσεις κατά τους τρεις άξονες.

Μετατοπίσεις	X- ΑΞΟΝΑΣ (mm)	Y- ΑΞΟΝΑΣ (mm)	Z- ΑΞΟΝΑΣ (mm)
Ελάχιστη	-2.94	-6.00	-2.76
Μέγιστη	2.2	15.00	1.64

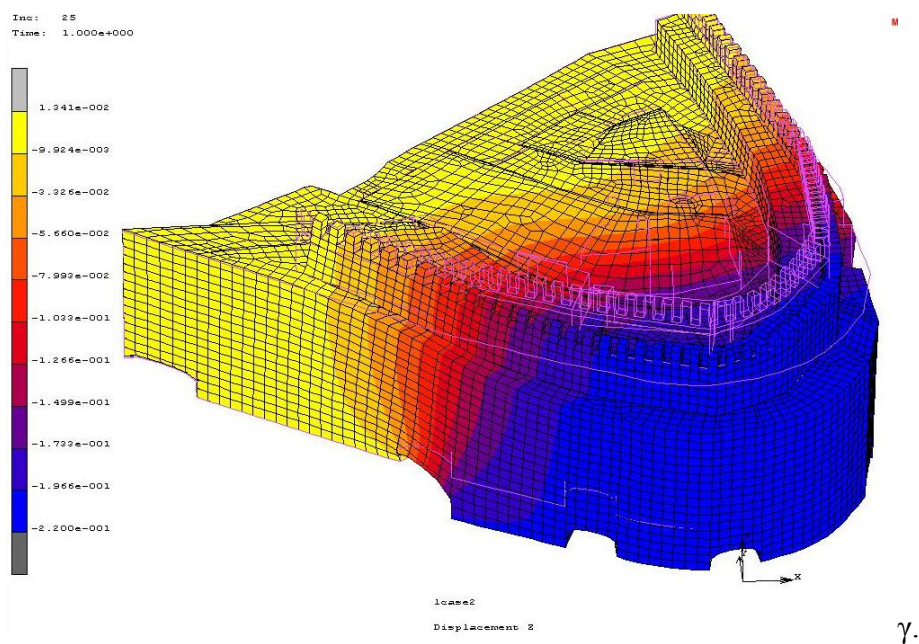
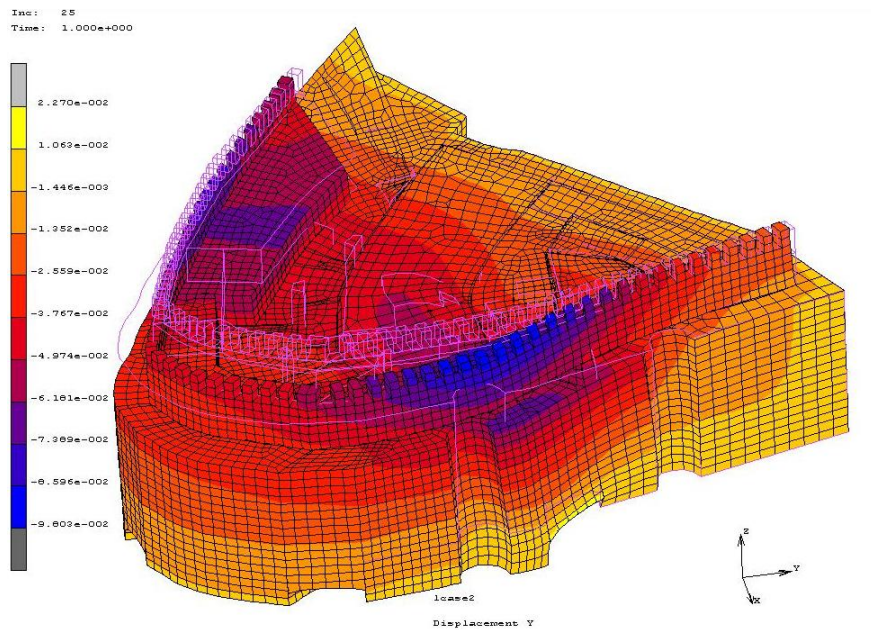


## 5.2 Ανάλυση κατασκευής για Loadcase 2 – Ιδιο βάρος συν επιβαλλόμενη βύθιση / Σενάριο 1

Αρχικά παρουσιάζονται οι συνολικές μετατοπίσεις της κατασκευής (σχ. 25 α,β,γ) όπως αποδίδονται γραφικά με χρωματικές κλίμακες, για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



α.



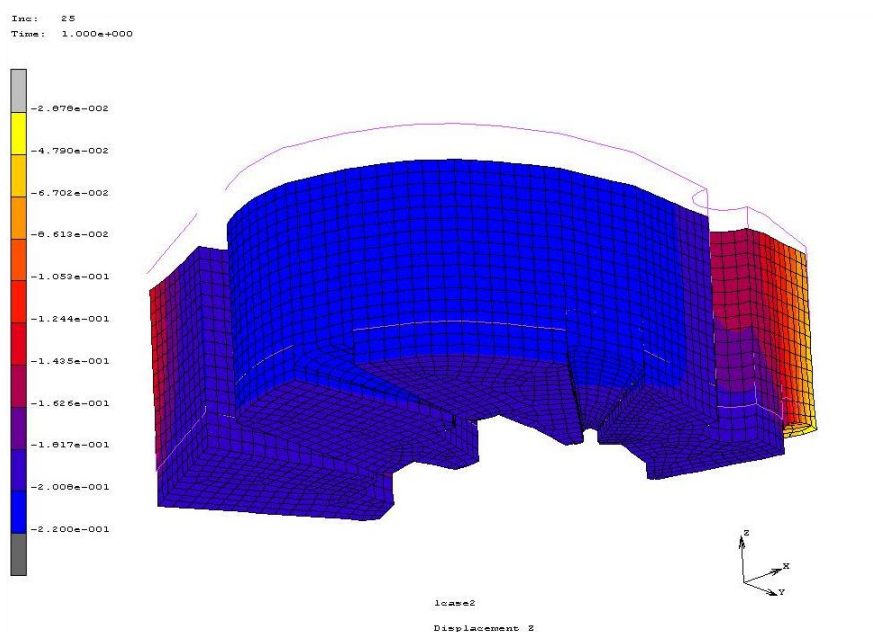
Σχ. 25 : Απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τους άξονες X-Y-Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης

Παρατηρούμε ότι η επιβαλλόμενη φόρτιση επηρεάζει μεγάλο τμήμα του φορέα και ότι μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από τους κόμβους εφαρμογής της επιβαλλόμενης μετακίνησης. Αυτό είναι φανερό στο Σχ. 25 που απεικονίζονται οι μετατοπίσεις κατά τους

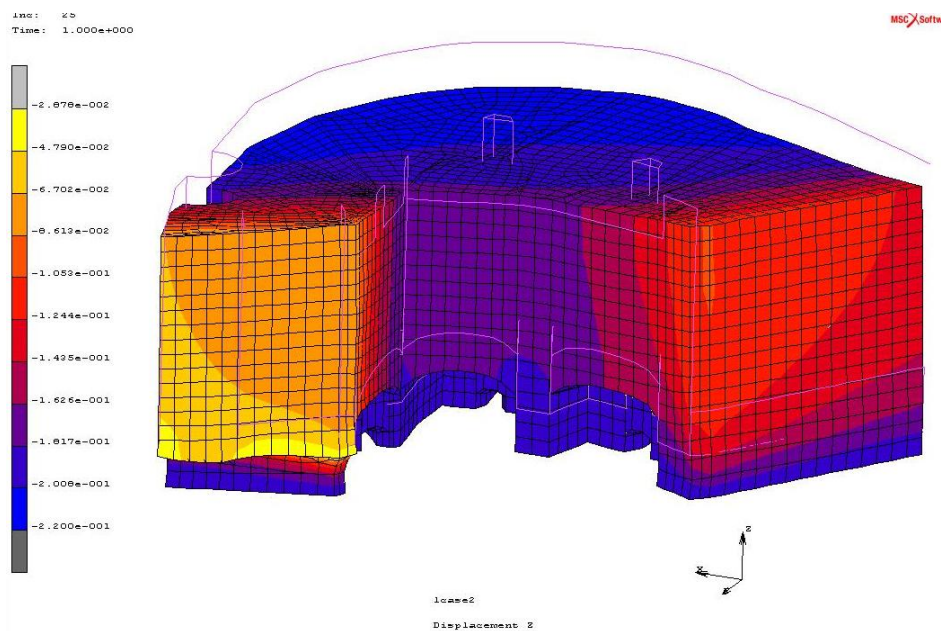
τρεις άξονες αλλά και ευκρινέστερα στο Σχ.28 στο οποίο απεικονίζεται πως η επιβαλλόμενη φόρτιση επηρεάζει τους θόλους 1&3 στους οποίους παρατηρούμε εσωτερικά ρηγματώσεις

Πίν. 6 : Loadcase 2 μετατοπίσεις κατά τους τρεις άξονες.

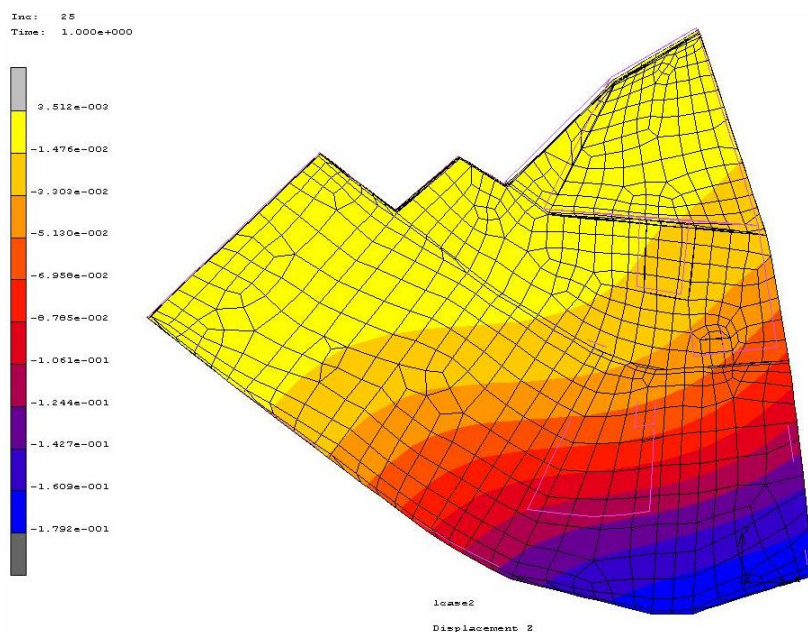
Μετατοπίσεις	X- ΑΞΟΝΑΣ (mm)	Y- ΑΞΟΝΑΣ (mm)	Z- ΑΞΟΝΑΣ (mm)
Ελάχιστη	-19.55	-22.70	-219.96
Μέγιστη	89.30	98.03	13.41



Σχ. 26 : Loadcase 2 : απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης



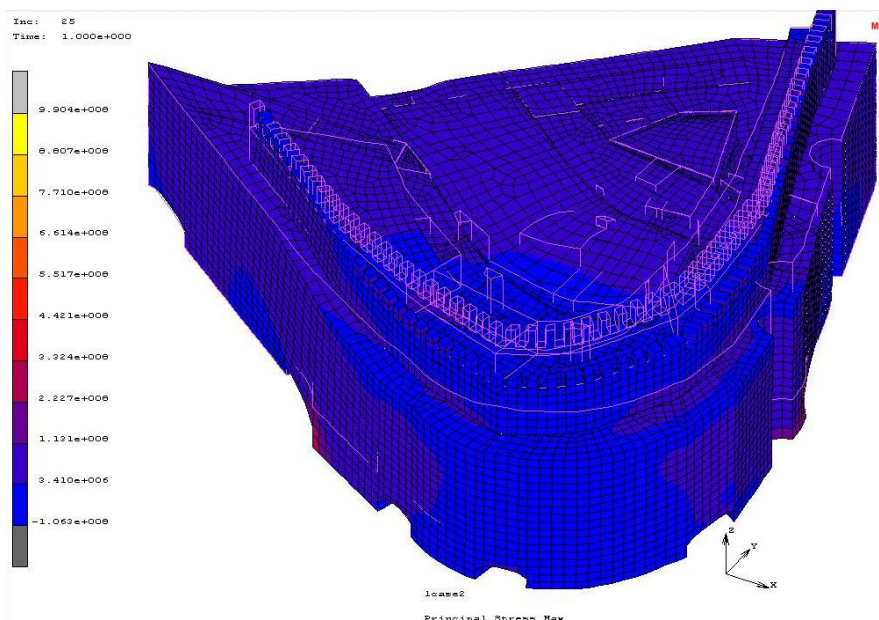
Σχ. 27 : Loadcase 2 : απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης (φορτιζόμενοι τοίχοι και sets εκατέρωθεν αυτών)



Σχ. 28 : Loadcase 2 : απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τον άξονα Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης (θόλοι 1&3 και τοίχος 11)

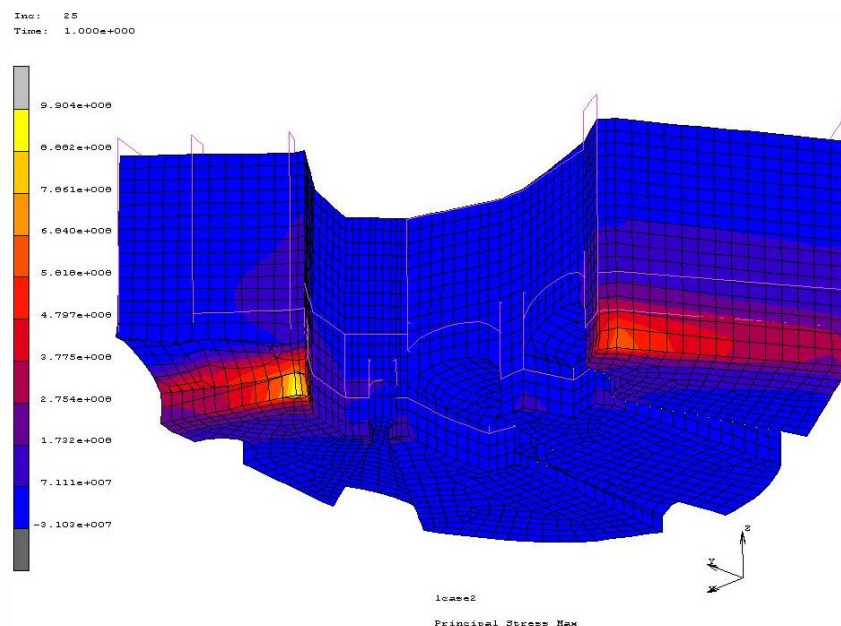


Στο Σχ. 26 ελέγχεται η ορθή εφαρμογή της φόρτισης. Από την χρωματική απεικόνιση φαίνεται ότι όλοι οι κόμβοι στους οποίους εφαρμόστηκε η φόρτιση έχουν την ίδια μετακίνηση των 20 εκατοστών άρα η εφαρμογή της φόρτισης έγινε ορθά.



Σχ. 29 : Κύριες εφελκυστικές τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης

Βλέπουμε ότι επηρεάζεται σημαντικά και ο θόλος 3 πράγμα που μπορεί να εξηγήσει εμφανείς ρωγμές στην εσωτερική επιφάνεια του θόλου όπως φαίνεται και στην απεικόνιση των κύριων εφελκυστικών τάσεων του Σχ.29. Αν συνυπολογιστεί σε αυτά το γεγονός ότι υπάρχουν και φωταγωγοί στον θόλο 3 ( οι οποίοι δεν ελήφθησαν υπόψη στην προσομοίωση ) δηλαδή σημεία που δημιουργούν αδύναμες επιφάνειες μπορούμε να εξηγήσουμε την δημιουργία ρωγμών στην εσωτερική επιφάνεια του θόλου.



Σχ. 30 : Εφελκυστικές τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης

Στα Σχ.29 & 30 απεικονίζονται οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στον φορέα με την εφαρμογή της φόρτισης 2. Οι μέγιστες κύριες τάσεις κυμαίνονται από -106.2 GPa (θλιπτικές) έως 990 GPa (εφελκυστικές).

Παρατηρείται ότι στα σημεία στήριξης των κανονιοθυρίδων με τους τοίχους έχουμε τις μέγιστες εφελκυστικές τάσεις πράγμα που υποδηλώνει πόσο ευαίσθητα είναι τα σημεία αυτά σε φορτίσεις τέτοιας μορφής είτε αυτές προέρχονται από καθιζήσεις λόγω των σπηλαιώσεων είτε αυτές οφείλονται όπως θα δούμε και παρακάτω σε σεισμικές δράσεις. Μπορούμε επίσης να συμπεράνουμε ότι η μορφή του τόξου των κανονιοθυρίδων (μεγάλο πλάτος με μικρό ύψος τόξου) δεν είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή για τις κατασκευές.

Συνεπώς η βύθιση του φορέα προκαλεί σημαντικές εφελκυστικές τάσεις σε μεγάλο τμήμα του φορέα γεγονός που εντείνουν οι ήδη σημαντικές ασυνέχειες στο συγκεκριμένο τμήμα του φρουρίου. Επίσης στην παρούσα εργασία θεωρήθηκε μια επιβαλλόμενη μετακίνηση κατά τον Z-άξονα της τάξης των 20 εκατοστών. Οι καθιζήσεις του Φρουρίου στην πάροδο των ετών δεν έχουν μετρηθεί με κάποια μέθοδο ώστε να έχουμε μια ακριβή εκτίμηση των εφελκυστικών τάσεων που μπορεί να έχουν αναπτυχθεί στην κατασκευή. Οπότε τα φαινόμενα έντονων ρηγματώσεων στο τμήμα αυτό εξηγούνται ικανοποιητικά.

### 5.3 Ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής Loadcase 4 – Σενάριο 1

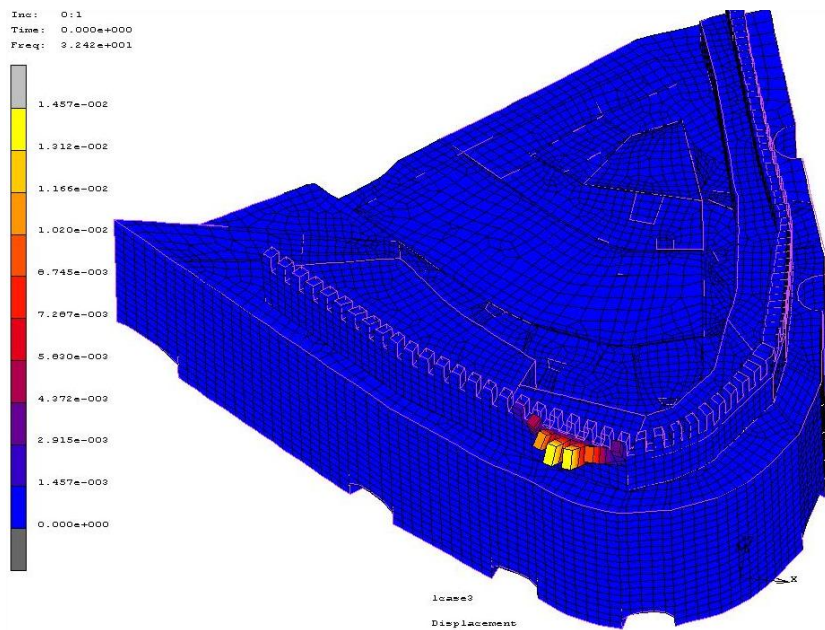
Στην παράγραφο αυτή της εργασίας θα μελετηθούν τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης με στόχο να εξαχθούν μερικά χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του φορέα. Στα Σχ.31-46 παρουσιάζονται οι 8 πρώτες ιδιομορφές του φορέα. Για την λεπτομερέστερη παρουσίαση τους για κάθε ιδιομορφή παρουσιάζονται 2 σχήματα. Στο πρώτο σχήμα εμφανίζεται το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων της ανάλυσης ενώ στο επόμενο έχουν αφαιρεθεί τα set του παραπέτου του δώματος.

Οι συχνότητες των ιδιομορφών που προέκυψαν από την ανάλυση του φορέα παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 7 :

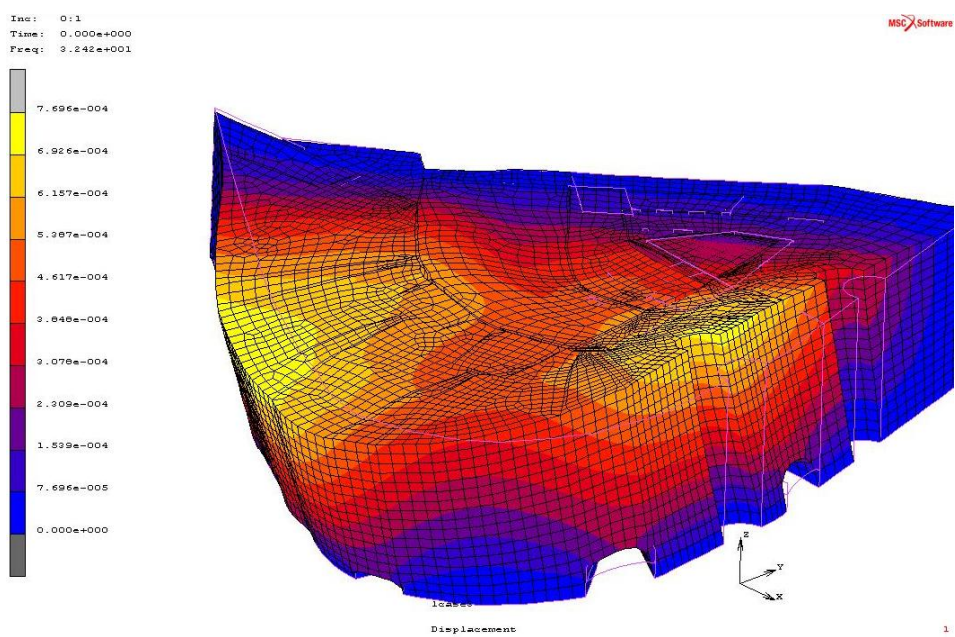
Πίν. 7 : Συχνότητες ιδιομορφικής ανάλυσης.

Ιδιομορφή	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	6 <sup>η</sup>	7 <sup>η</sup>	8 <sup>η</sup>
Συχνότητα (Hz)	32.422	34.522	38.78	43.04	44.13	50.53	53.15	54.00

Παρατηρούμε ότι οι ιδιομορφές διεγείρουν κατά κύριο λόγο το παραπέτο του δώματος πράγμα που το περιμέναμε διότι το παραπέτο του Φρουρίου είναι από τα στοιχεία που αρχίζουν πρώτα να ταλαντώνονται. Σταδιακά οι επόμενες ιδιομορφές αρχίζουν να διεγείρουν το μεγαλύτερο μέρος του παραπέτου ενώ μετά την τρίτη ιδιομορφή αρχίζει να αυξάνεται και η διέγερση του κύριου όγκου του φρουρίου (θόλοι-τοίχοι κα ).

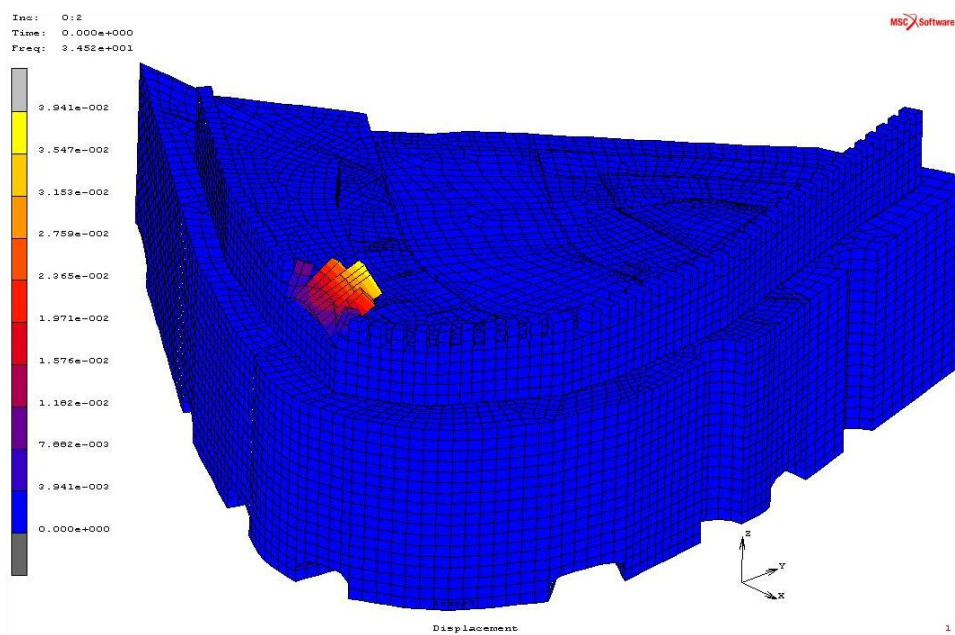


Σχ.31 : 1<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 32.422 Hz

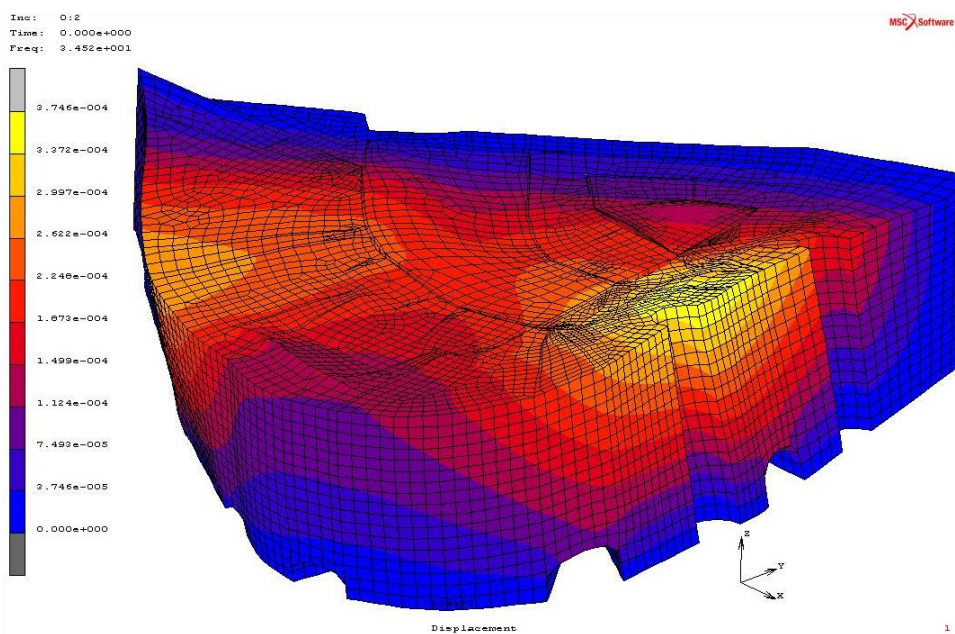


Σχ.32 : 1<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 32.422 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος)

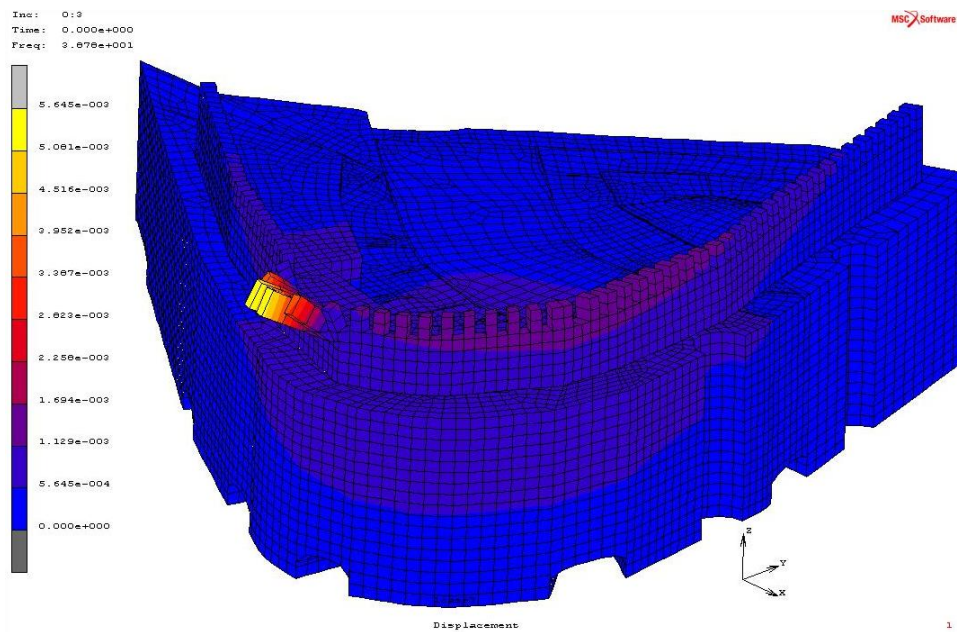




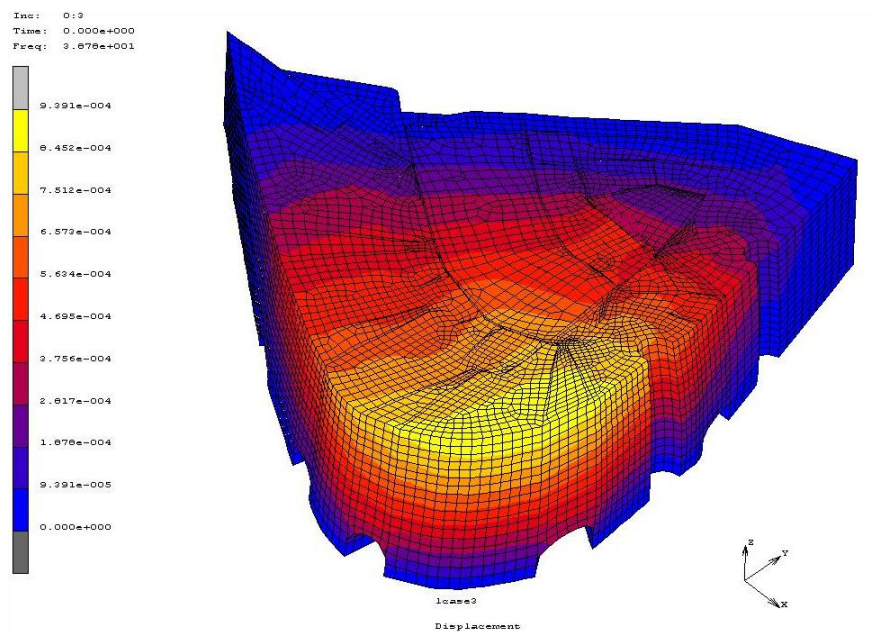
Σχ.33 : 2<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 34.522 Hz



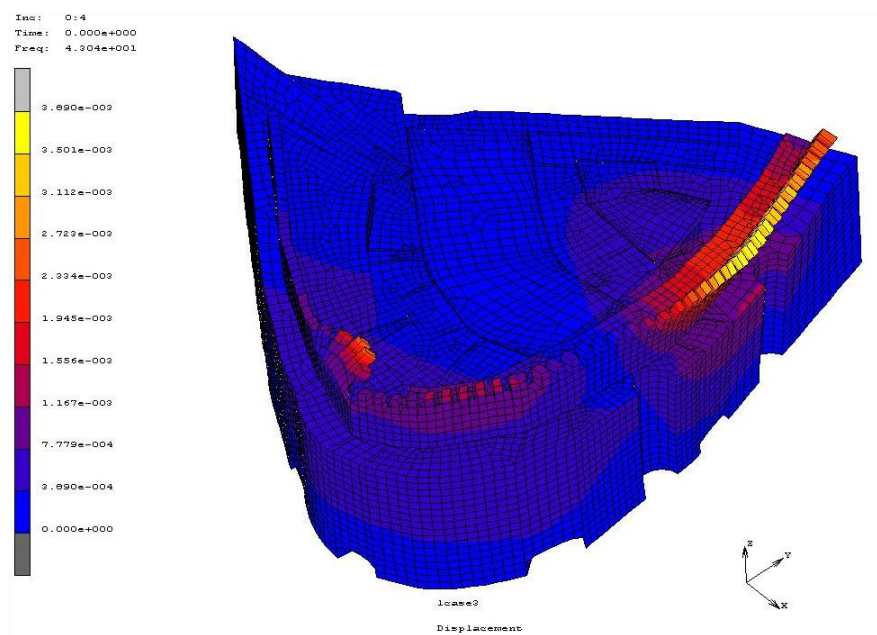
Σχ.34 : 2<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 34.522 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος)



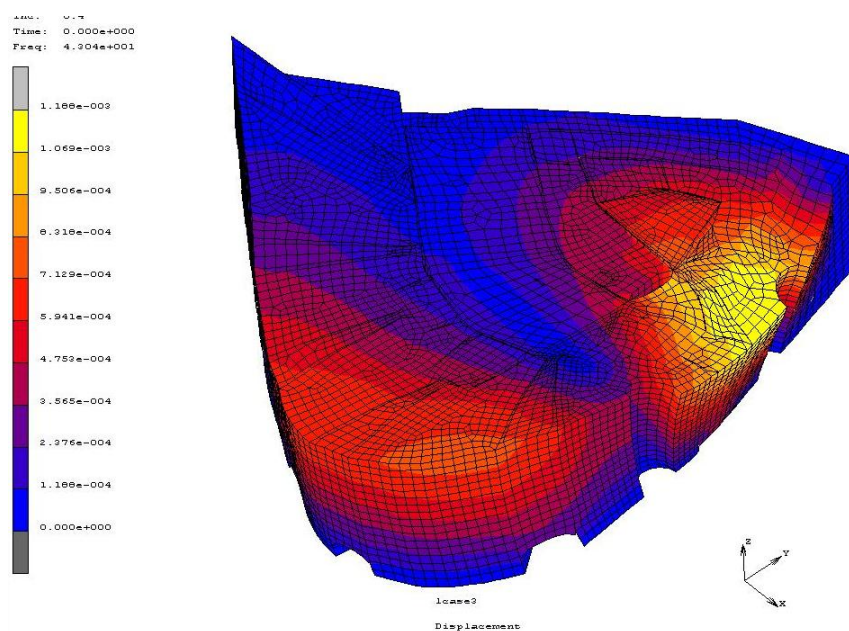
Σχ.35 : 3<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 38.78 Hz



Σχ.36 : 3<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 38.78 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος)

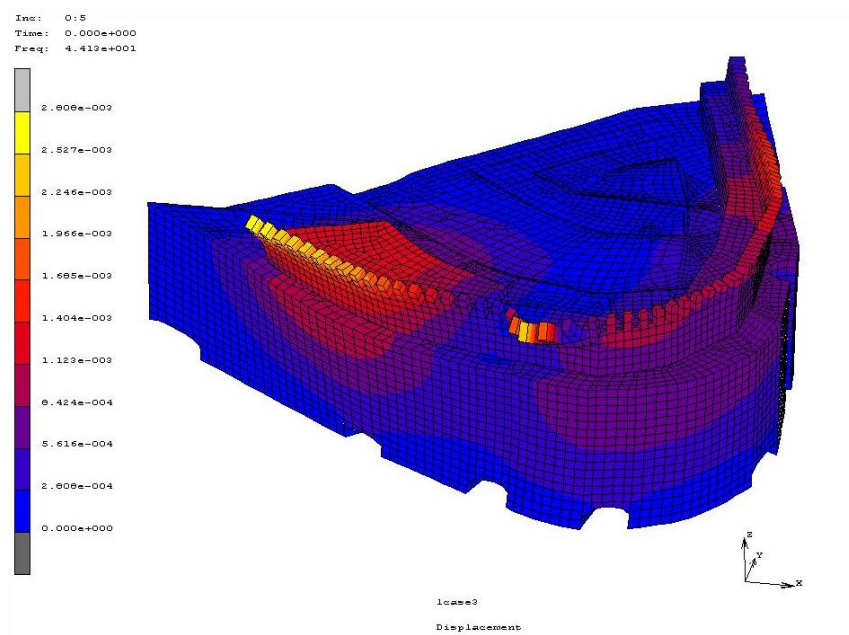


Σχ.37 : 4<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 43.04 Hz

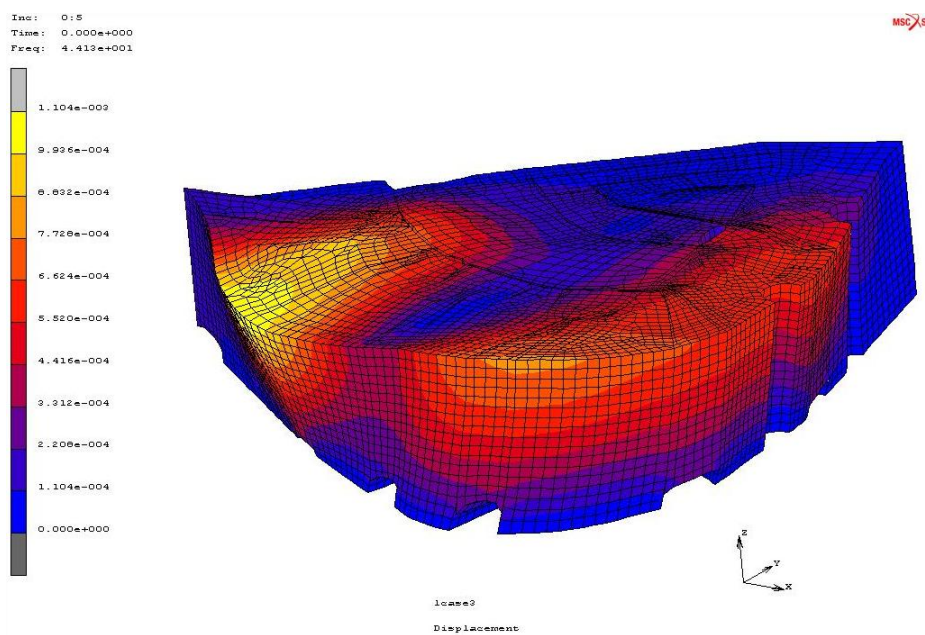


Σχ.38 : 4<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 43.04 Hz (απεικόνιση χωρίς το στήθαίο δώματος)

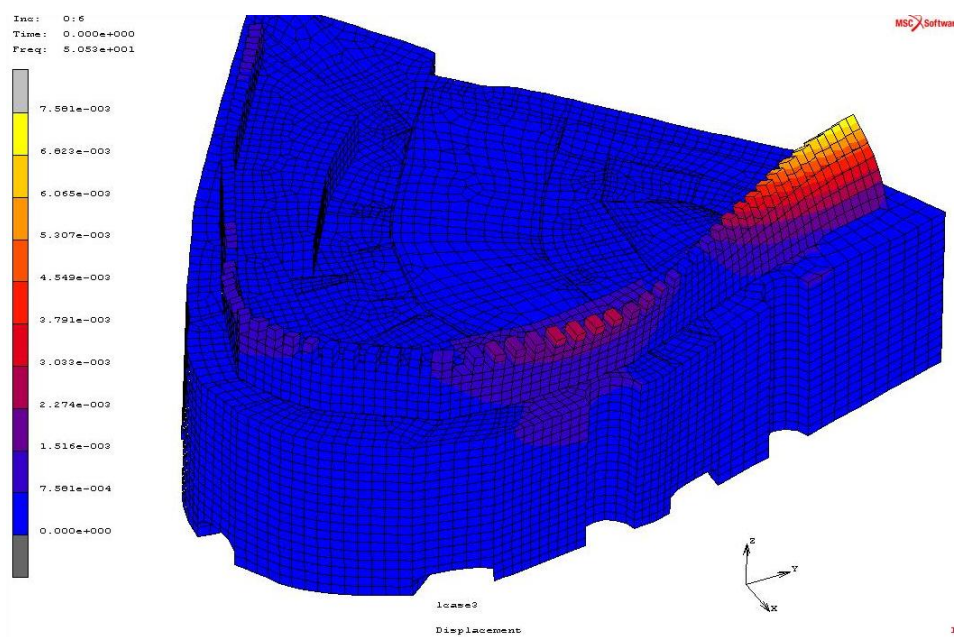




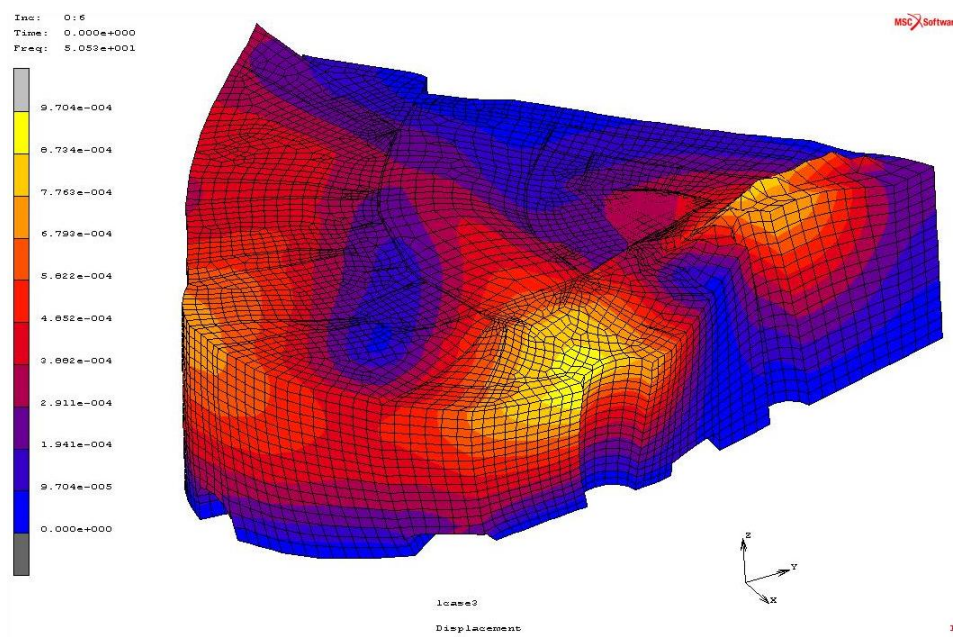
Σχ.39 : 5<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 44.13 Hz



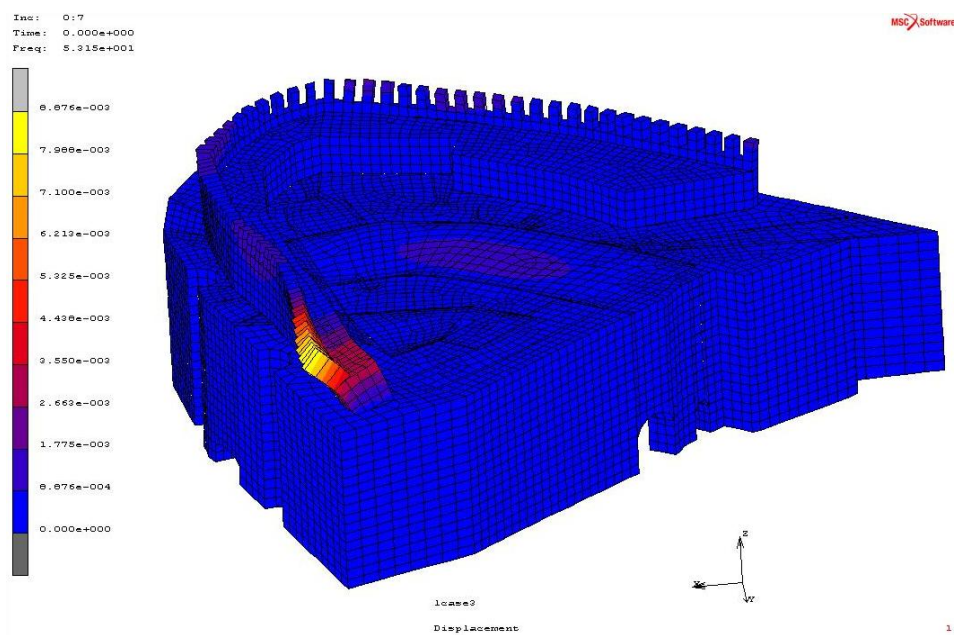
Σχ.40 : 5<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 44.13 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος)



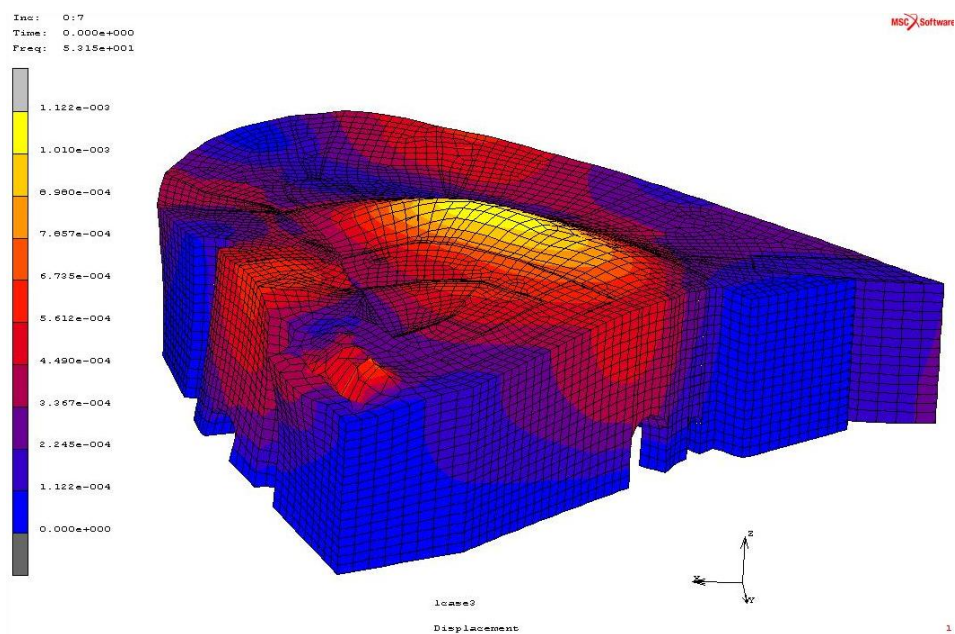
Σχ.41 : 6<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 50.53 Hz



Σχ.42 : 6<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 50.53 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος)

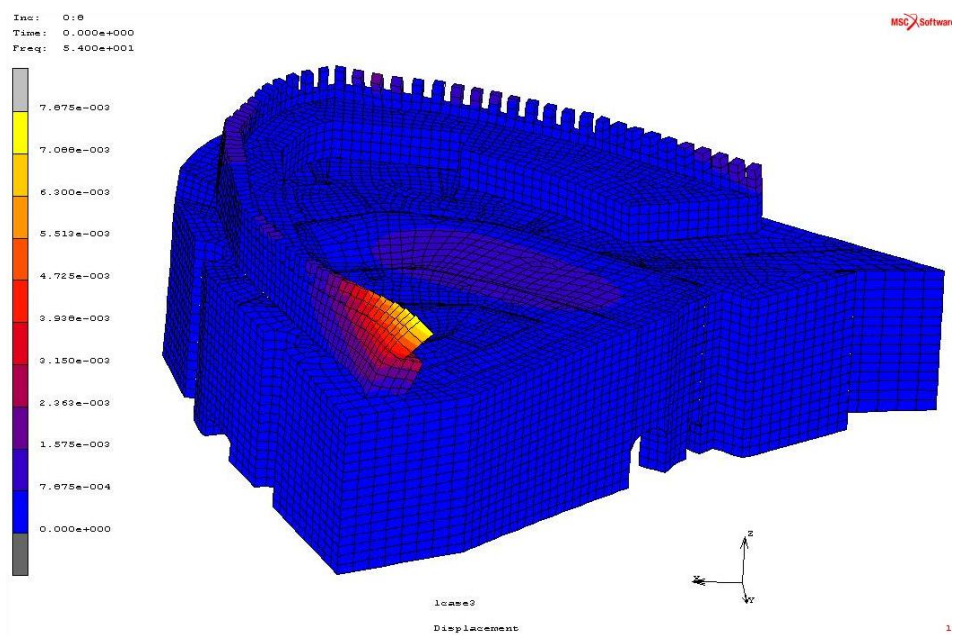


Σχ.43 : 7<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 53.15 Hz

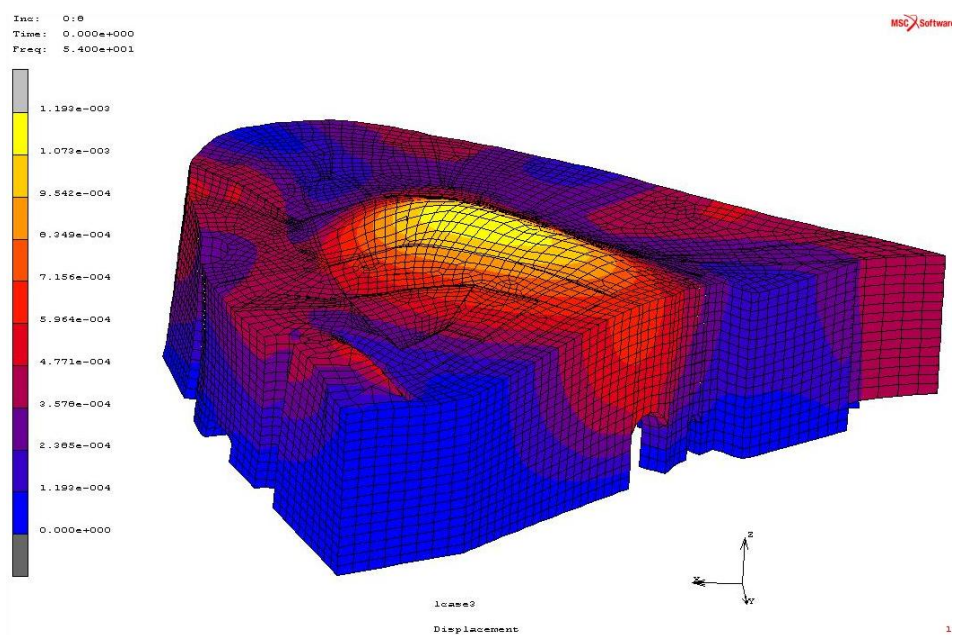


Σχ.44 : 7<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 53.15 Hz (απεικόνιση χωρίς το στήθαίο δώματος)





Σχ.45 : 8<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 54.00 Hz



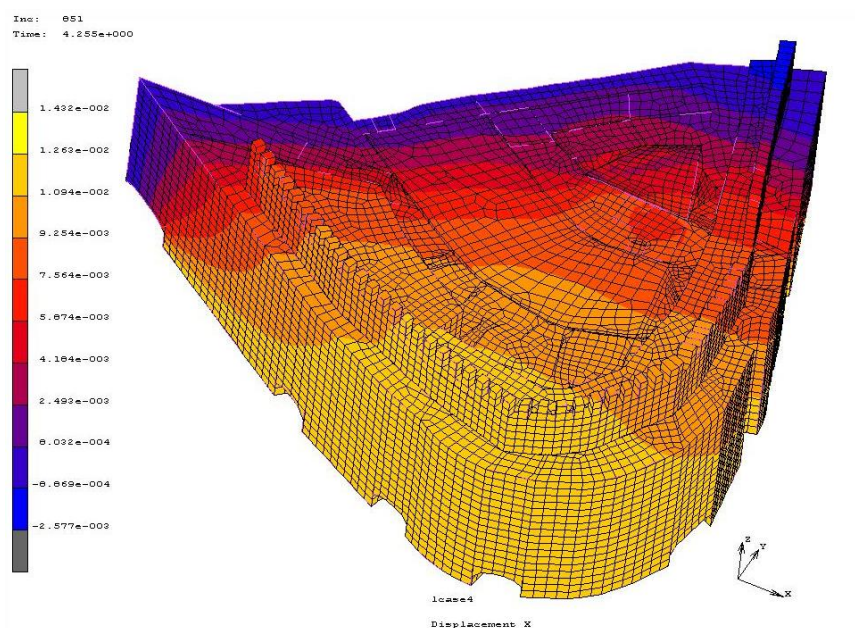
Σχ.46 : 8<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 54.00 Hz (απεικόνιση χωρίς το στήθαίο δώματος)

## 5.4 Δυναμική ανάλυση της κατασκευής – Σενάριο 1

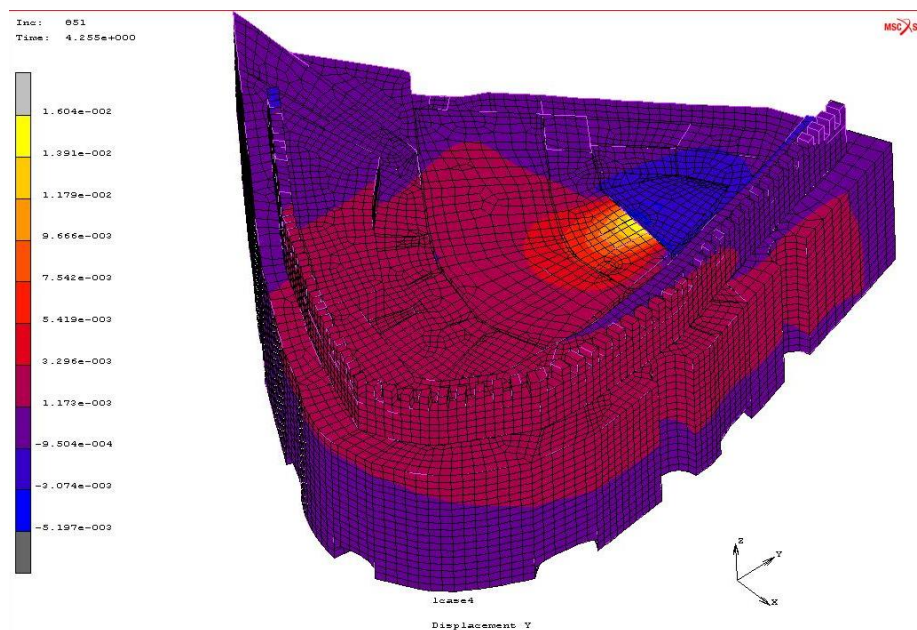
Αρχικά παρουσιάζονται οι συνολικές μετατοπίσεις της κατασκευής κατά τους τρεις άξονες και αποδίδονται γραφικά με χρωματικές κλίμακες, για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Οι μέγιστες μετατοπίσεις της κατασκευής αναγράφονται στον πίνακα 8.

Πιν.8 : Μέγιστες μετακινήσεις δυναμικής ανάλυσης

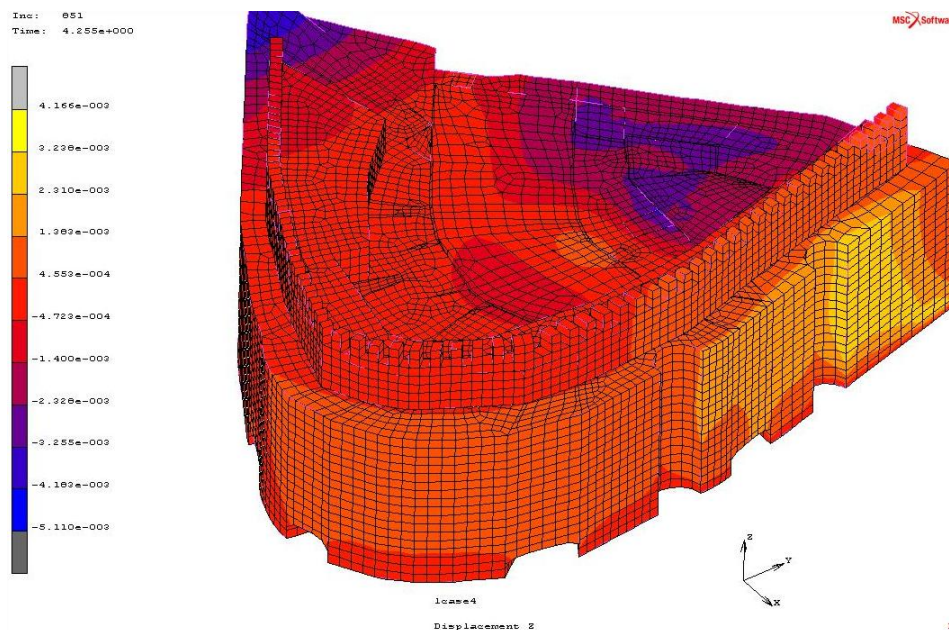
Μετακινήσεις (mm)	Dx	Dy	Dz
	14.32	16.04	-5.11



Σχ. 47 : Οι μετακινήσεις κατά τον X-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



Σχ. 48 : Οι μετακινήσεις κατά τον Y-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



Σχ. 49 : Οι μετακινήσεις κατά τον Z-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.

Στα Σχ. 47-48-49 παρατηρούμε τα εξής :

α) όσο απομακρυνόμαστε από τους κόμβους στους οποίους έχουμε ορίσει την συνέχεια της κατασκευής δηλαδή την περιοχή στήριξης του υπό μελέτη τμήματος της κατασκευής με την

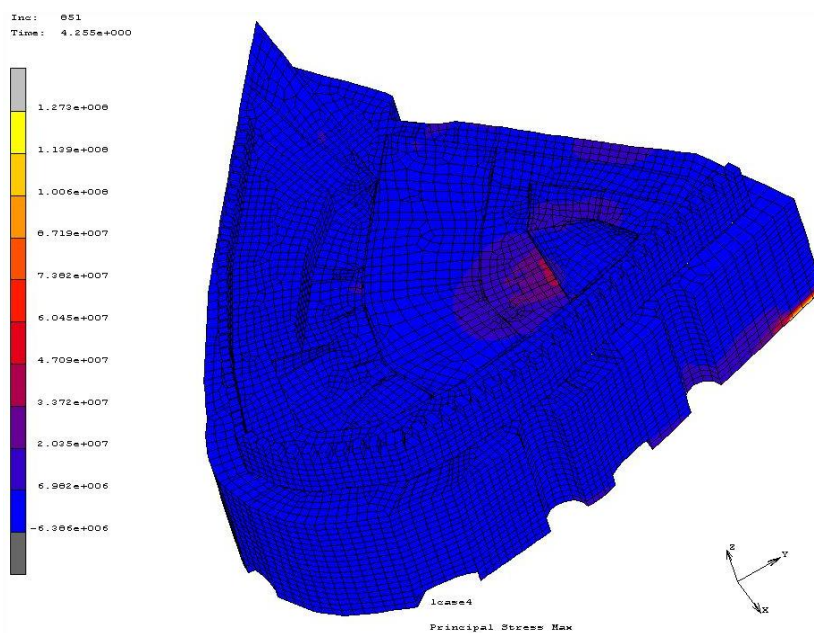


υπόλοιπη, αυξάνονται οι μετακινήσεις κατά τον X-άξονα. Ο άξονας X είναι ο άξονας που σχηματίζει γωνία 40 μοίρες με την νότια πλευρά του φρουρίου και κατ' επέκταση γωνία από 0-40 μοίρες με την κεντρική άνω ίνα του θόλου 3 . Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο θόλος 3 εμφανίζει μια καμπύλη μορφή σε κάτοψη.

β) αύξηση των μετακινήσεων στον Y-άξονα παρατηρείται στους κόμβους εκείνους των πεπερασμένων στοιχείων που βρίσκονται ψηλότερα από το σημείο στήριξης με το έδαφος. Από αυτό συνάγεται το συμπέρασμα ότι η σεισμική διέγερση διεγείρει το παραπέτο το οποίο με την ταλάντωση του επηρεάζει την κατασκευή στο ύψος του δώματος . Επισημαίνεται ότι ο άξονας Y είναι ο άξονας ο οποίος σχηματίζει γωνία 48 μοιρών με την περιοχή στήριξης του υπό μελέτη τμήματος της κατασκευής με την υπόλοιπη κατασκευή.

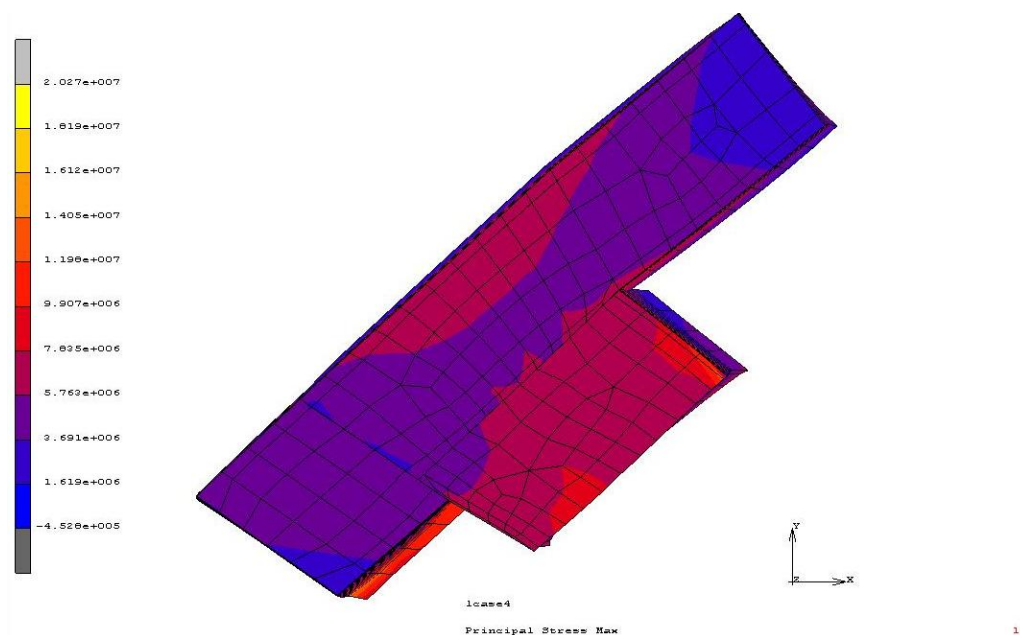
γ) οι μετακινήσεις κατά τον Z- άξονα είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές των άλλων αξόνων σε ποσοστά 60-70%. Αυτό μεταφράζεται στο ότι η γεωμετρία των θόλων είναι επιτυχής και δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες κατακόρυφες ταλαντώσεις.

Παρακάτω παρουσιάζονται διαγράμματα των κύριων εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή στο τελευταίο βήμα της φόρτισης.

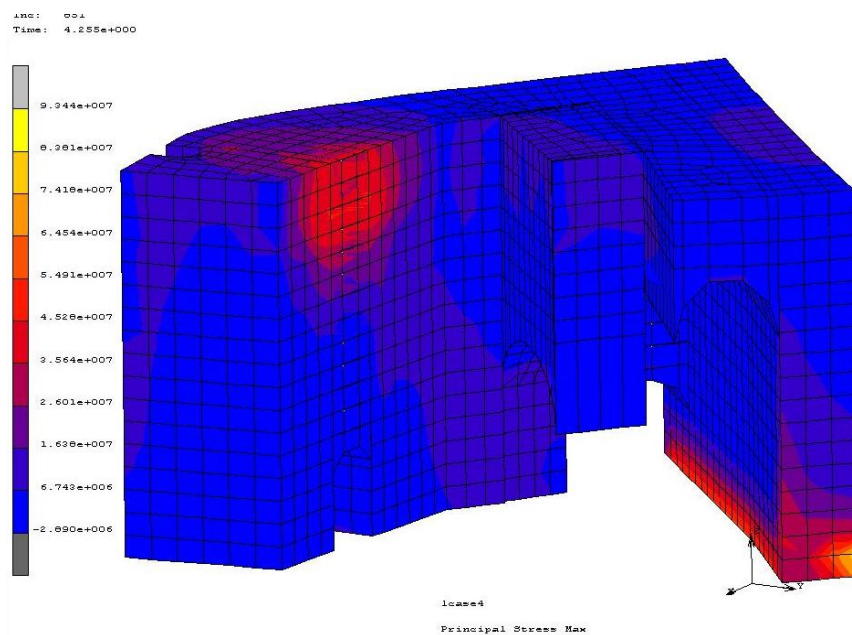


Σχ. 50 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.

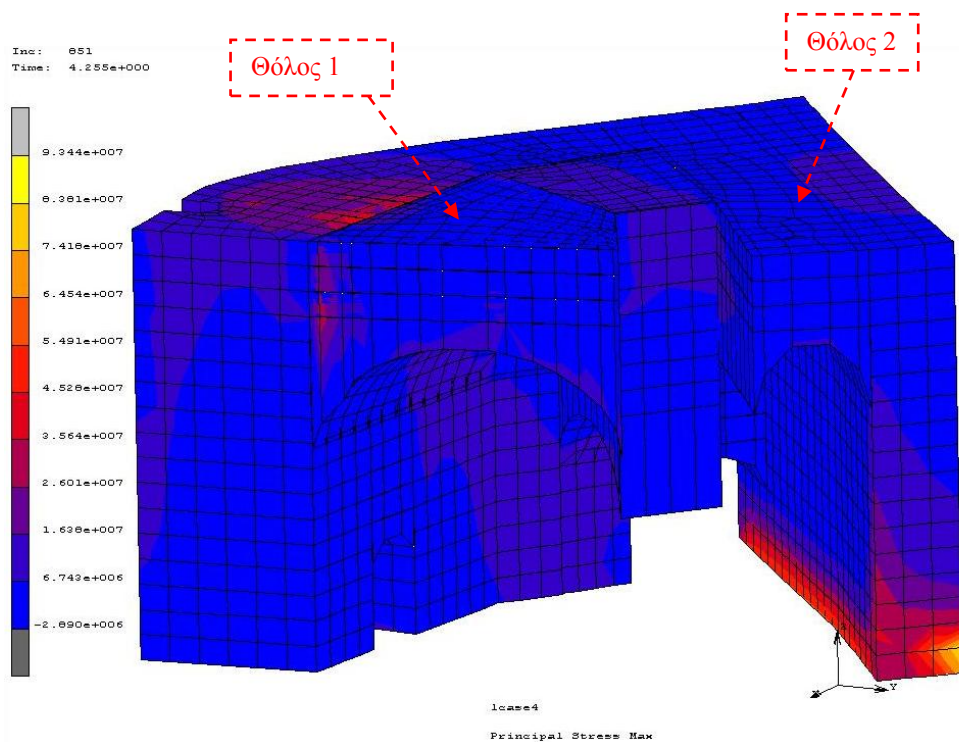




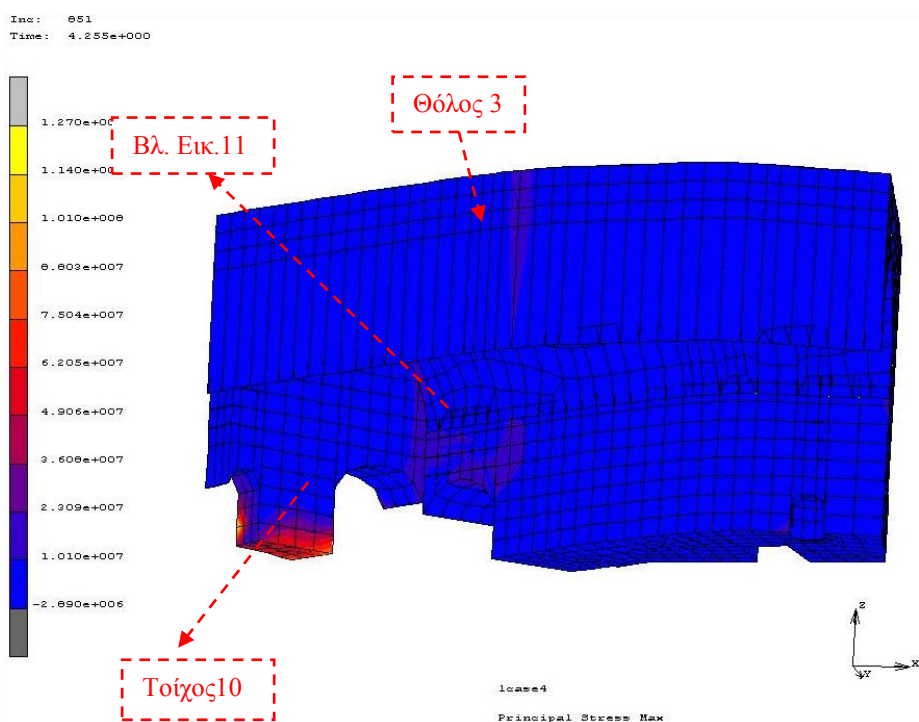
Σχ. 51 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης (θόλος 2 & μικρός θόλος 7 - κάτοψη).



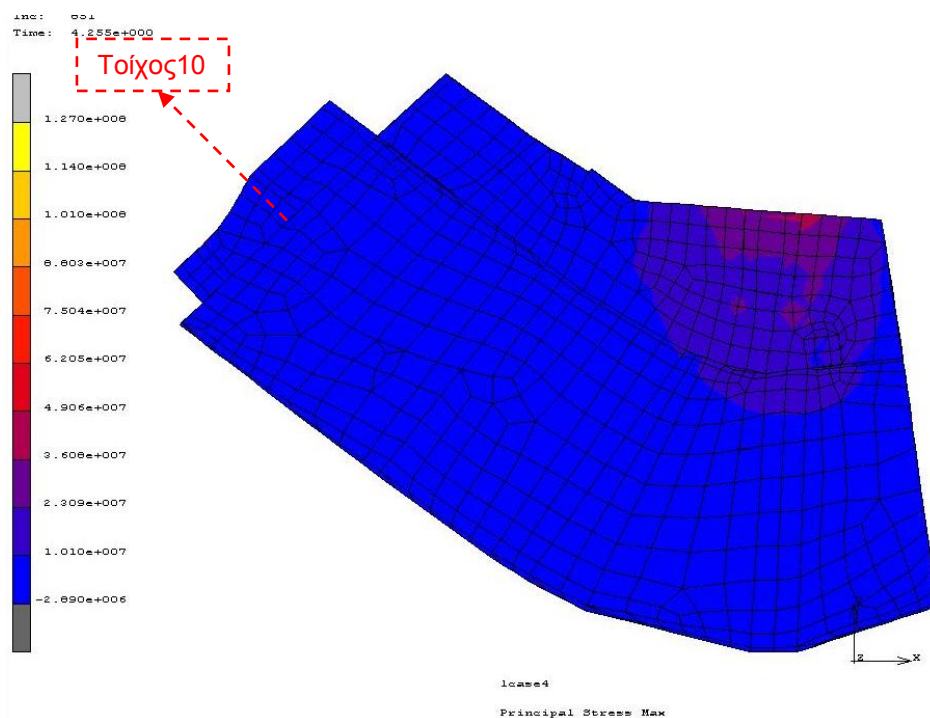
Σχ. 52 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης (θόλος 2).



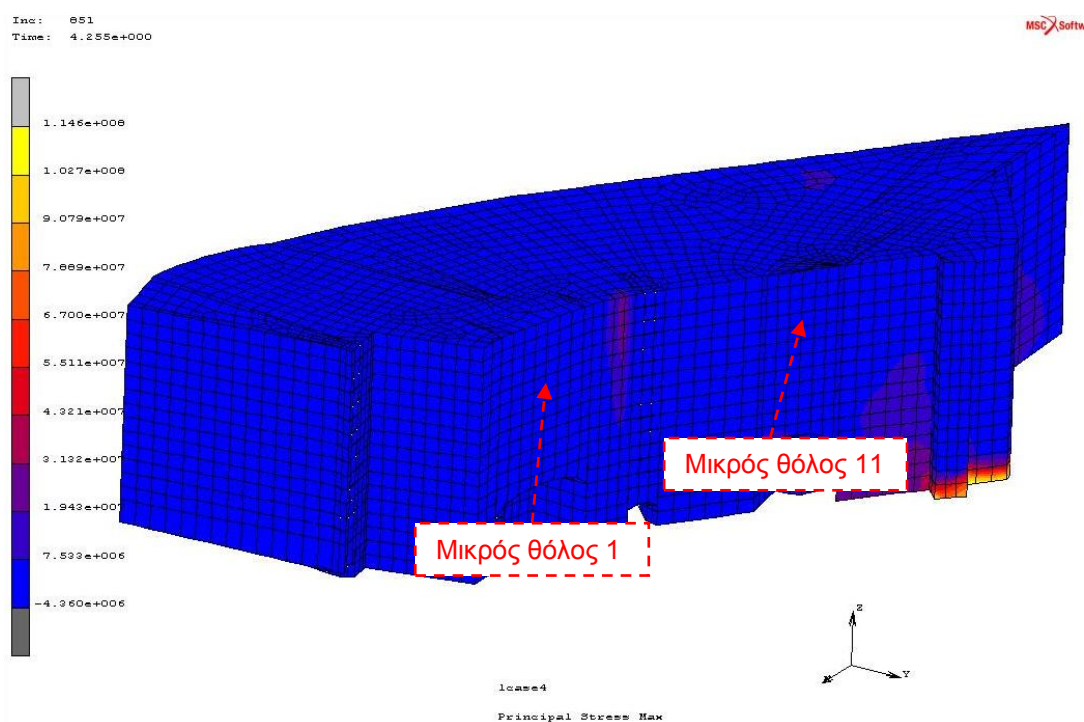
Σχ. 53 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( θόλος 1 & 2).



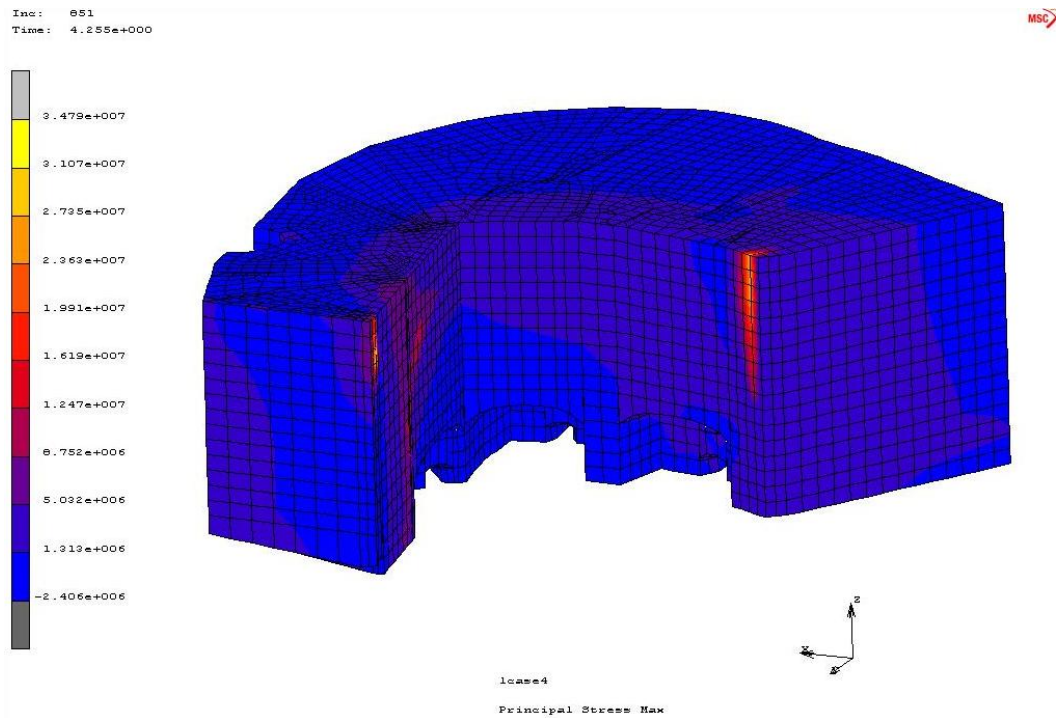
Σχ. 54 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( θόλος 3 ).



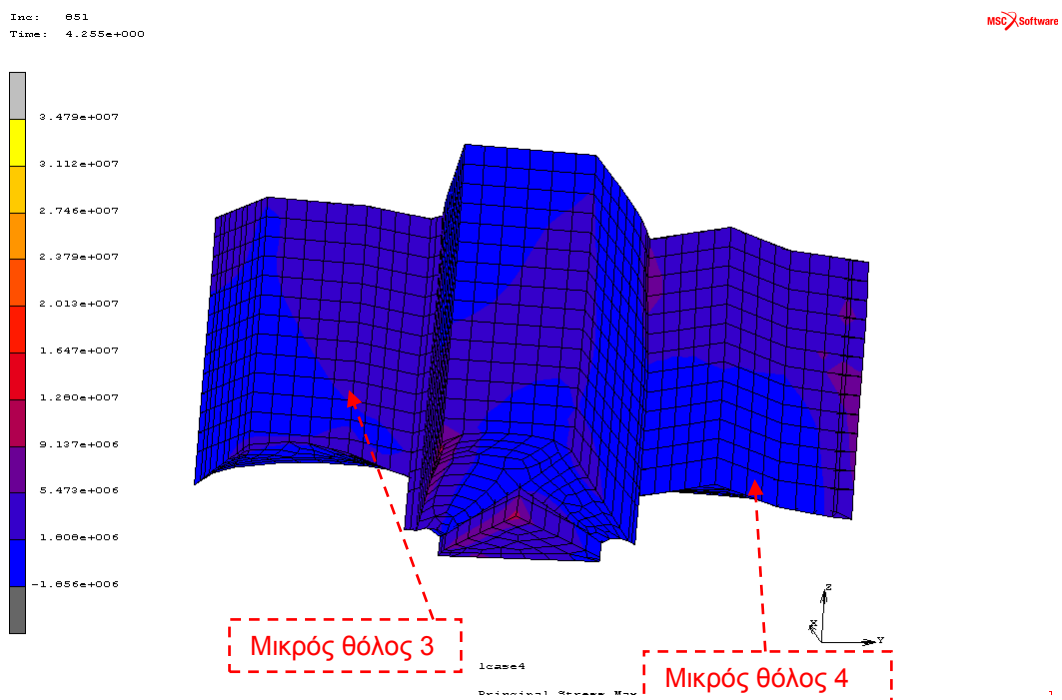
Σχ. 55 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( θόλος 3 - κάτοψη ) .



Σχ. 56 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( μικρός θόλος 1 & 11 ) .



Σχ. 57 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( μικρός θόλος 1 & 2 ) .



Σχ. 58 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( μικρός θόλος 3 & 4 ) .

Πιν.9 : Θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις ανά σετ

SET	min Sb (N/m <sup>2</sup> )	max Sb (N/m <sup>2</sup> )	SET	min Sb (N/m <sup>2</sup> )	max Sb (N/m <sup>2</sup> )
kan1	6.38E+05	2.38E+07	meth1	-1.42E+05	3.76E+06
kan2	-9.37E+05	8.03E+06	meth2	-1.32E+05	2.75E+06
kan3	-2.32E+06	1.02E+07	meth3	-5.48E+05	1.15E+07
kan4	-2.41E+07	7.28E+06	meth4	-1.86E+06	3.48E+07
kan5	-6.71E+04	4.27E+06	meth5	3.09E+05	1.77E+07
kan6	-1.48E+05	9.93E+06	meth6	7.65E+05	4.64E+07
kan7	-1.86E+06	3.48E+07	meth7	-4.53E+05	1.62E+07
			meth8	7.06E+05	2.03E+07
tholos1	-1.86E+06	4.71E+07	meth9	-6.11E+05	1.35E+07
tholos2	4.14E+05	1.79E+07	meth10	-9.40E+05	1.58E+07
tholos3	-1.77E+06	2.07E+07	meth11	2.69E+06	1.15E+07
toixos1	-4.36E+06	1.15E+08	toixos7	-1.86E+06	2.29E+07
toixos2	-1.83E+06	1.89E+07	toixos8	-6.39E+06	1.27E+08
toixos3	-2.71E+03	2.68E+07	toixos9	-9.04E+05	9.34E+07
toixos4	-1.67E+06	5.64E+06	toixos10	-1.43E+06	1.27E+08
toixos5	-4.96E+05	4.85E+06	toixos11	-2.89E+06	4.64E+07
toixos6	-2.50E+05	1.22E+07			

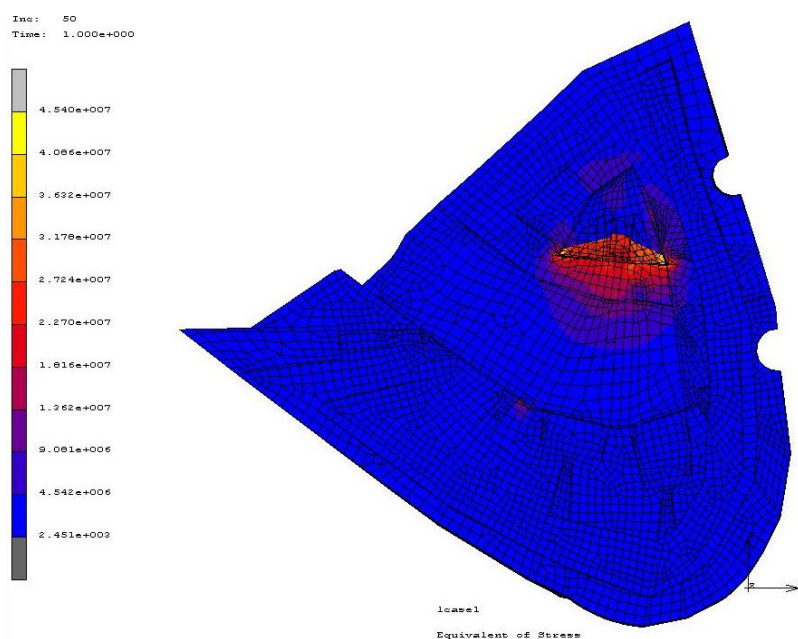
Στα Σχ. 50-58 παρατηρούμε την κατανομή των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή εξαιτίας της σεισμικής φόρτισης. Για ευκρινέστερη απεικόνιση στο κάθε σχήμα φαίνονται ξεχωριστά τμήματα της κατασκευής. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στον φορέα κυμαίνονται από -24.1 MPa (θλιπτικές) ως 127 MPa (εφελκυστικές). Η μέγιστη εφελκυστική τάση παρατηρείται στην βάση του φορέα στον τοίχο 8 βλ. Σχ.52-53. Επίσης παρατηρούμε έντονες εφελκυστικές τάσεις να αναπτύσσονται στα σημεία σύνδεσης των θόλων με τους τοίχους βλ. Σχ.54. καθώς και στα σημεία σύνδεσης των κανονιοθυρίδων με τους τοίχους και με τους θόλους βλ. Σχ.58. Στα σημεία αυτά έχουν αναπτυχθεί ρωγμές στον φορέα.



Με βάση τον Πίνακα 1 στον οποίο έχουν αναφερθεί οι μέγιστες θλιπτικές τάσεις των δοκιμίων παρατηρούμε ότι οι αναπτυσσόμενες θλιπτικές τάσεις δεν υπερβαίνουν την θλιπτική αντοχή των δομών του κτιρίου.

## 5.5 Ανάλυση κατασκευής για Loadcase 1- Σενάριο 2

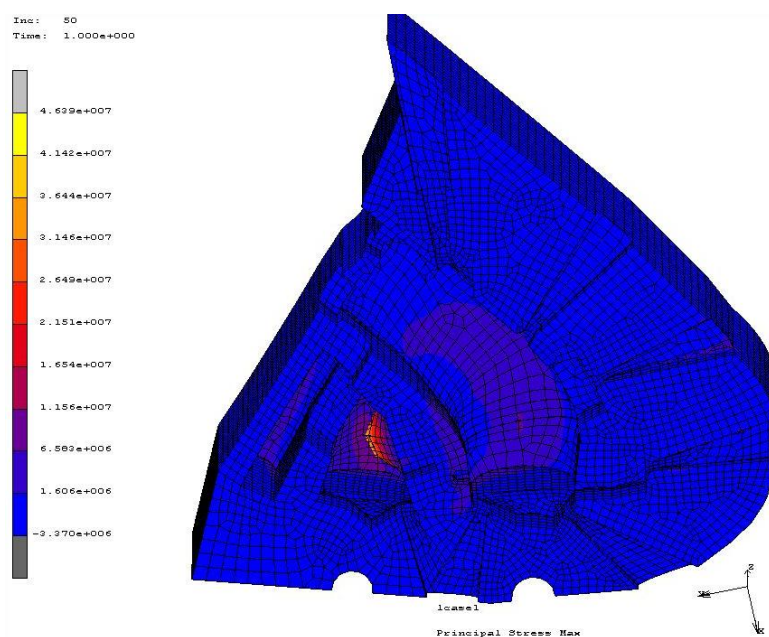
Αρχικά παρουσιάζονται το διάγραμμα ισοδύναμων τάσεων Σχ. 59 οι συνολικές μετατοπίσεις της κατασκευής Σχ.61 όπως αποδίδονται γραφικά με χρωματικές κλίμακες, για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



Σχ. 59 : Ισοδύναμες τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης

Και σε αυτή την περίπτωση οι επικρατούσες τάσεις για τον φορέα είναι οι θλιπτικές τάσεις όπως άλλωστε είναι και το αναμενόμενο, με μια μικρή επιφάνεια στην όποια κυριαρχούν οι εφελκυστικές τάσεις για την συγκεκριμένη φόρτιση του ιδίου βάρους. Η μορφή της επιφάνειας εμφάνισης μέγιστων και ελάχιστων τάσεων είναι αντίστοιχη με αυτή του σεναρίου 1 βλ. Σχ.20. Η περιοχή αυτή βρίσκεται μεταξύ των θόλων 1 & 2 και είναι αναμενόμενο να περιμένουμε στον τοίχο αυτό εφελκυστικές τάσεις μιας και οι μεγάλοι θόλοι 1 και 3 τείνουν να ωθήσουν την κατασκευή προς την κατεύθυνση του αρνητικού z άξονα.

Η ανάπτυξη μέγιστων κύριων τάσεων κυμαίνεται από -3.37 MPa (θλιπτικές) έως 46.39 MPa (εφελκυστικές). Στο Σχ.59 αποδίδονται γραφικά οι εφελκυστικές τάσεις στον φορέα για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



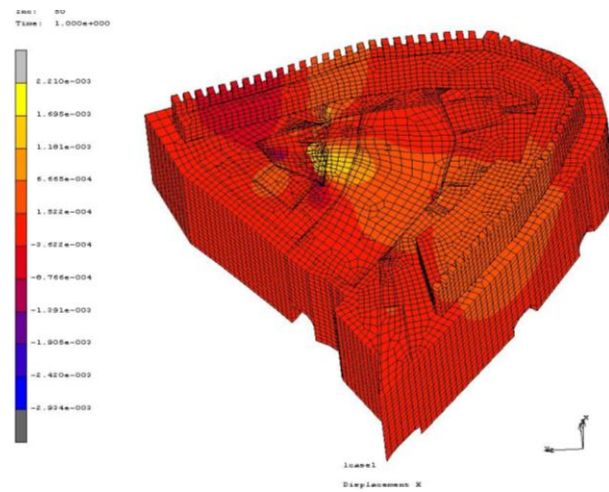
Σχ.60 : Εφελκυστικές τάσεις για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης ( Άνοψη φορέα )

Οι μετατοπίσεις κατά τον τρεις άξονες παρουσιάζονται στον πίνακα 10

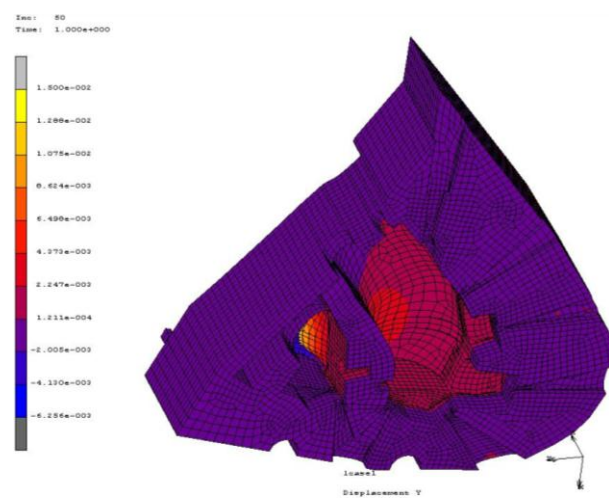
Πίν. 10 : Loadcase 1 μετατοπίσεις κατά τους τρεις άξονες – Σενάριο 2.

Μετατοπίσεις	X-ΑΞΟΝΑΣ (mm)	Y-ΑΞΟΝΑΣ (mm)	Z-ΑΞΟΝΑΣ (mm)
Ελάχιστη	-2.93	-6.26	-2.77
Μέγιστη	2.21	15.00	1.93

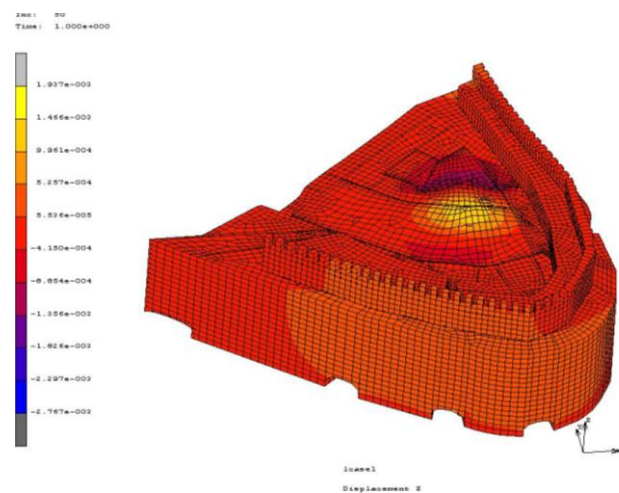




α.



β.



γ.

Σχ. 61 : Απεικόνιση μετατοπίσεων κατά τους άξονες X-Y-Z για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.

## 5.6 Ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής Loadcase 4 – Σενάριο 2

Στην παράγραφο αυτή της εργασίας θα μελετηθούν τα αποτελέσματα της ιδιομορφικής ανάλυσης με στόχο να εξαχθούν μερικά χρήσιμα συμπεράσματα για την συμπεριφορά του φορέα. Στα Σχ.62-77 παρουσιάζονται οι 8 πρώτες ιδιομορφές του φορέα. Για την λεπτομερέστερη παρουσίαση τους για κάθε ιδιομορφή παρουσιάζονται 2 σχήματα. Στο πρώτο σχήμα εμφανίζεται το σύνολο των πεπερασμένων στοιχείων της ανάλυσης ενώ στο επόμενο έχουν αφαιρεθεί τα set του παραπέτου του δώματος.

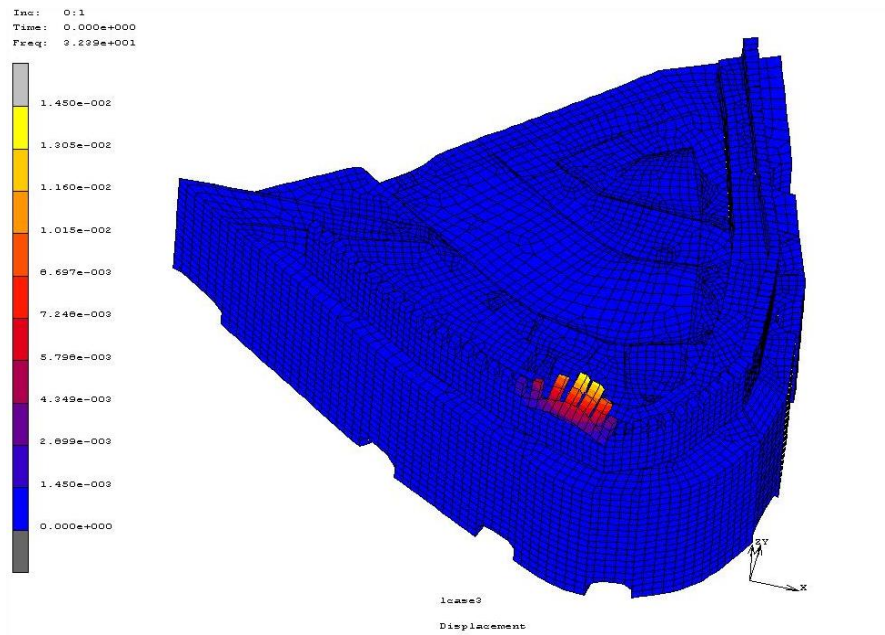
Οι συχνότητες των ιδιομορφών που προέκυψαν από την ανάλυση του φορέα παρουσιάζονται στον πίνακα 11 :

Πίν. 11 : Συχνότητες ιδιομορφικής ανάλυσης.

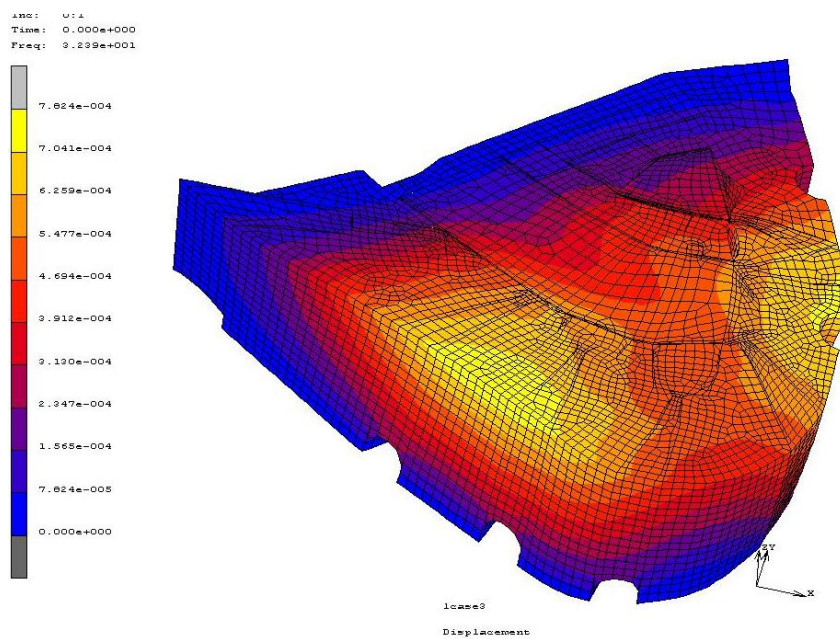
Ιδιομορφή	1 <sup>η</sup>	2 <sup>η</sup>	3 <sup>η</sup>	4 <sup>η</sup>	5 <sup>η</sup>	6 <sup>η</sup>	7 <sup>η</sup>	8 <sup>η</sup>
Συχνότητα (Hz)	32.39	34.52	38.72	42.56	43.74	50.22	53.20	55.99

Παρατηρούμε ότι οι ιδιομορφές διεγείρουν κατά κύριο λόγο το παραπέτο του δώματος πράγμα που το περιμέναμε διότι το παραπέτο του Φρουρίου είναι από τα στοιχεία που αρχίζουν πρώτα να ταλαντώνονται. Σταδιακά οι επόμενες ιδιομορφές αρχίζουν να διεγείρουν το μεγαλύτερο μέρος του παραπέτου ενώ μετά την τρίτη ιδιομορφή αρχίζει να αυξάνεται και η διέγερση του κύριου όγκου του φρουρίου (θόλοι-τοίχοι κα ).

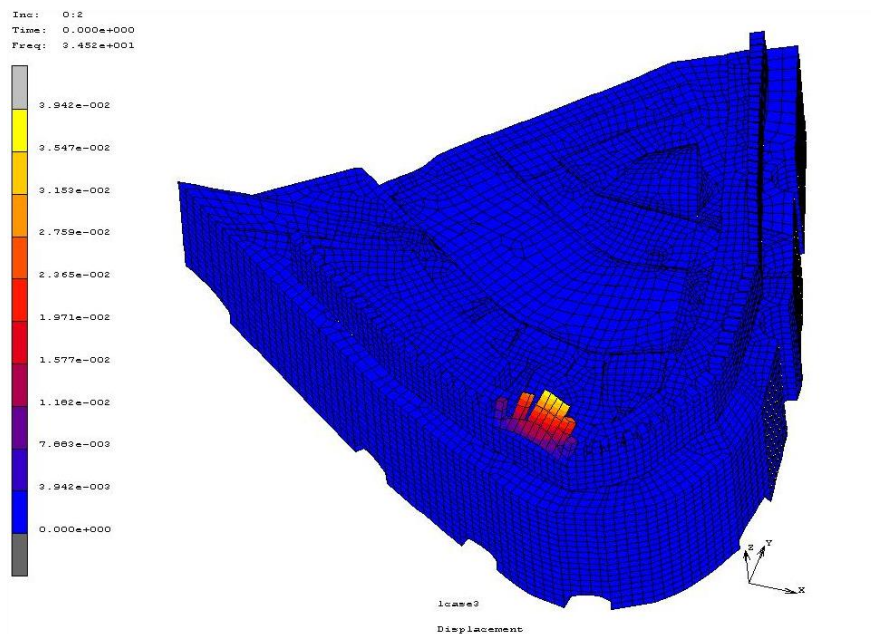
Παρατηρούμε ότι ελάχιστα επηρεάζεται η ιδιοσυχνότητα των ιδιομορφών από την χρήση υλικού με μικρότερη πυκνότητα και ελαστικότητα για τα γεμίσματα των θόλων σε σχέση με την ιδιοσυχνότητα των ιδιομορφών στο σενάριο 1 (βλ. Πιν.7 σελ.58)



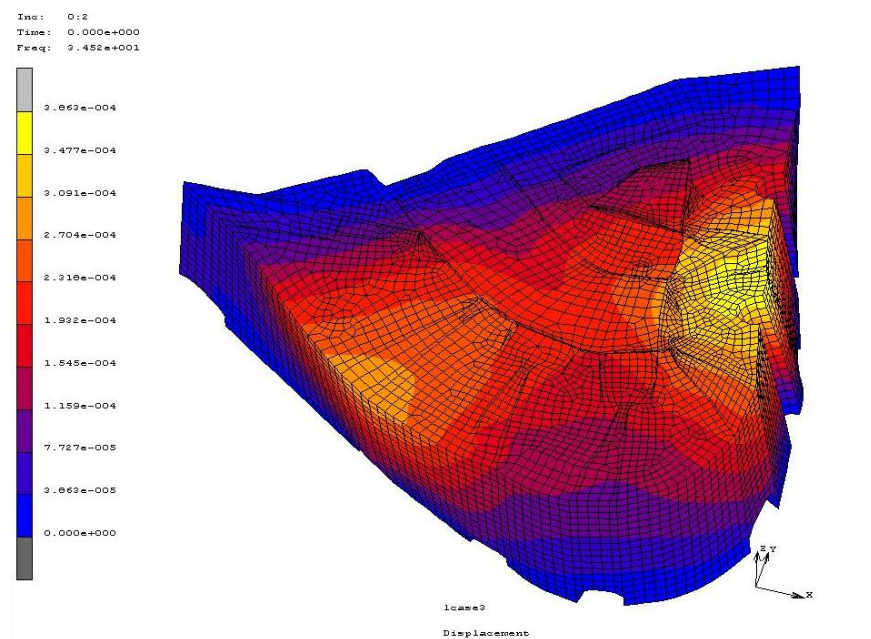
Σχ.62 : 1<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 32.39 Hz



Σχ.63 : 1<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 32.39 Hz (απεικόνιση χωρίς το στηθαίο δώματος)

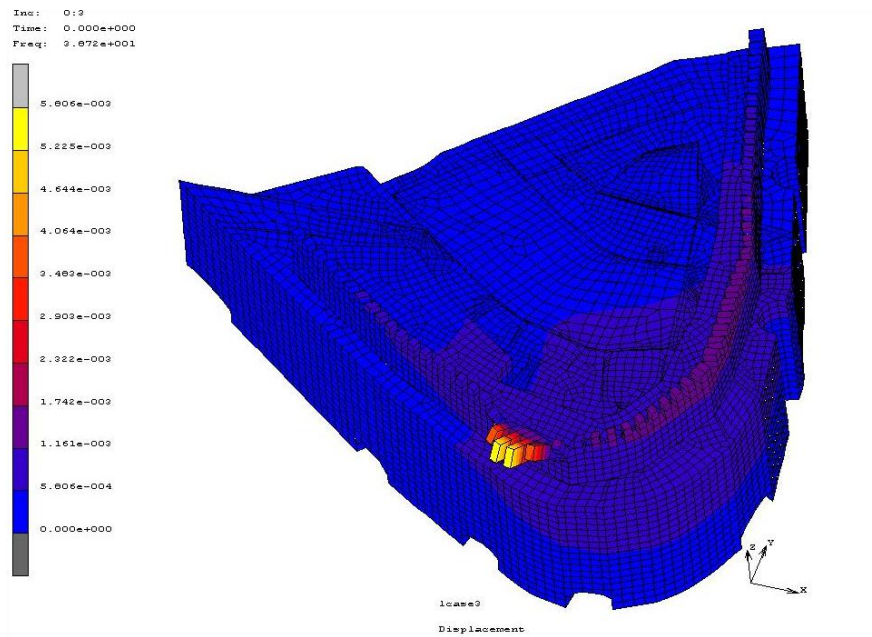


Σχ.64 : 2<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 32.52 Hz

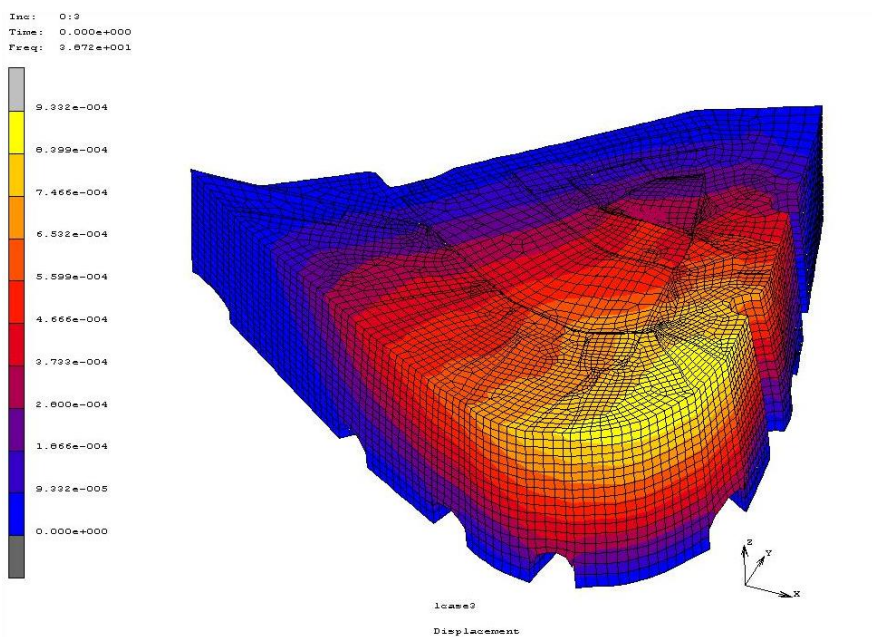


Σχ.65 : 2<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 32.52 Hz (απεικόνιση χωρίς το στήθαίο δώματος)

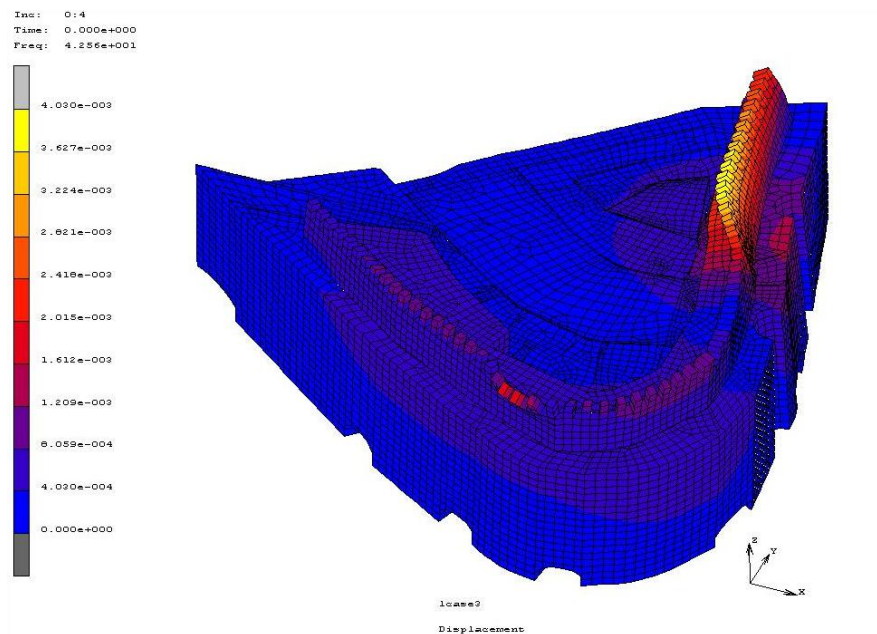




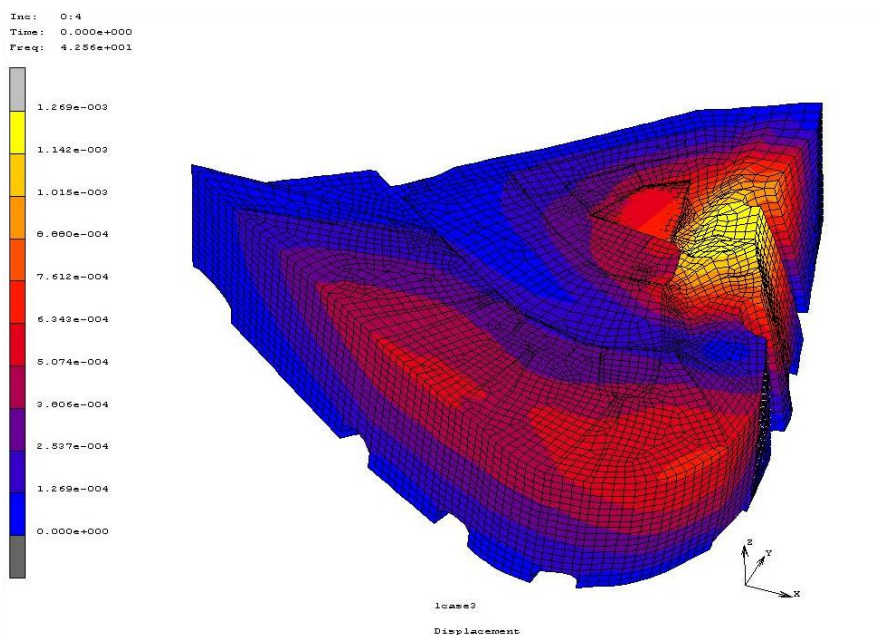
Σχ.66 : 3<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 38.72 Hz



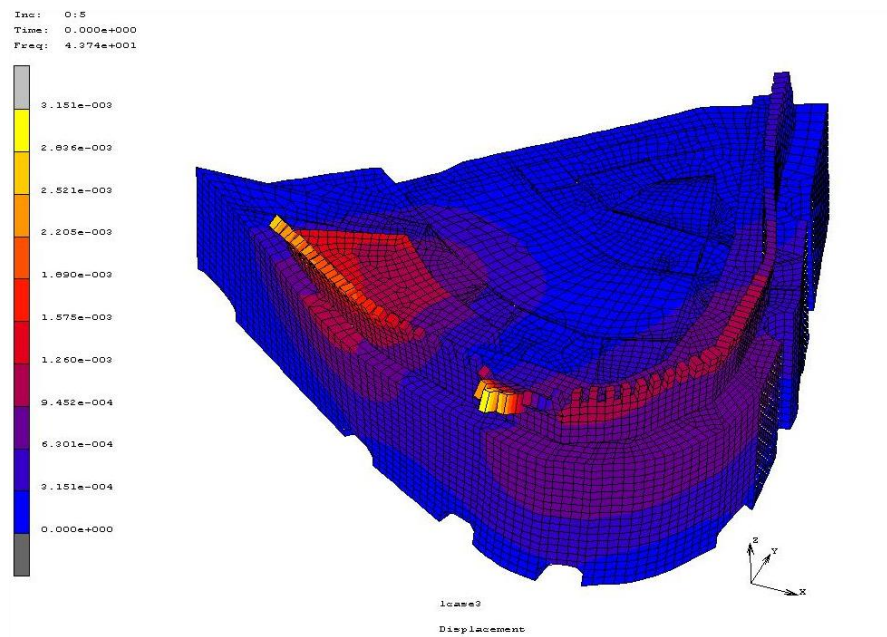
Σχ.67 : 3<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 38.72 Hz (απεικόνιση χωρίς το στήθαιο δώματος)



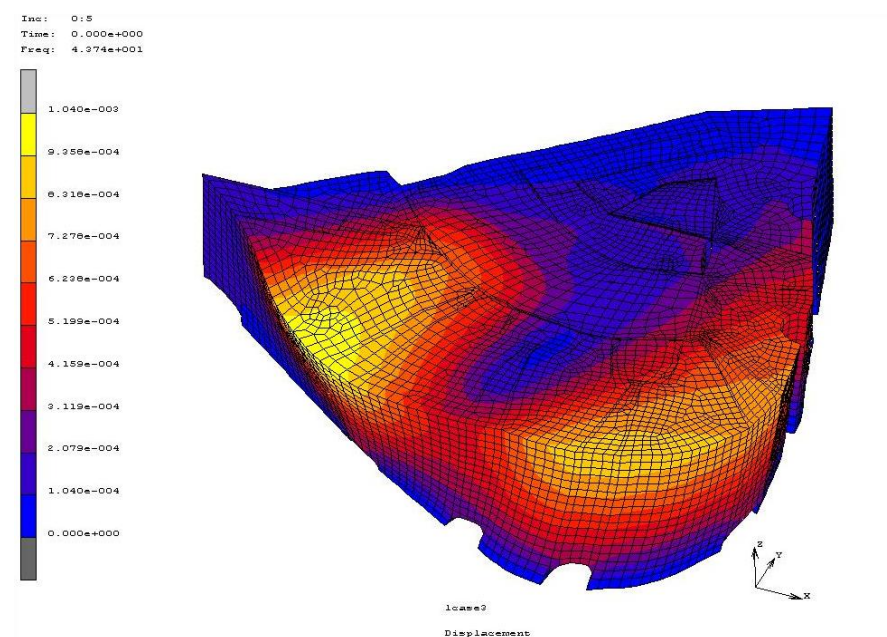
Σχ.68 : 4<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 42.56 Hz



Σχ.69 : 4<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 42.56 Hz (απεικόνιση χωρίς το στήθαίο δώματος)

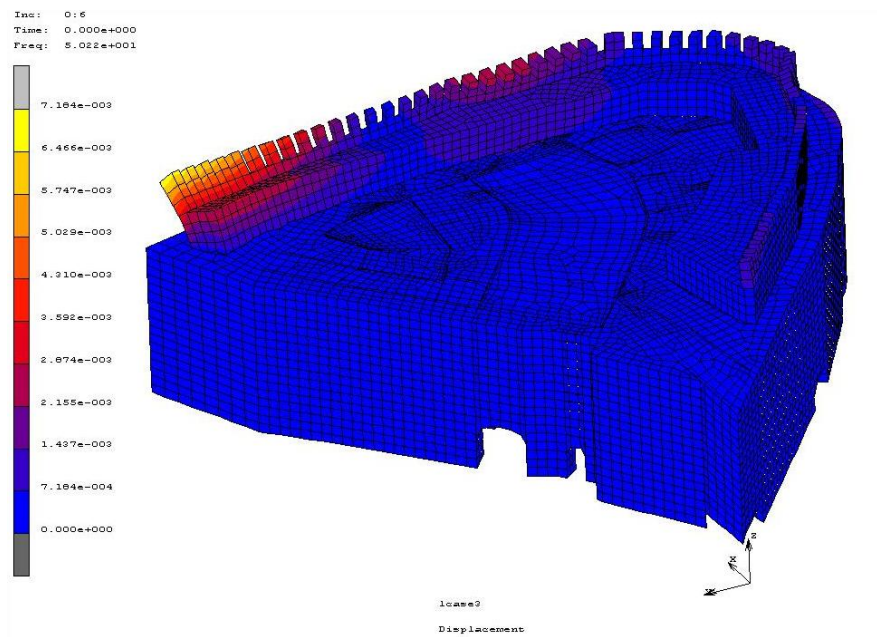


Σχ.70 : 5<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 43.74 Hz

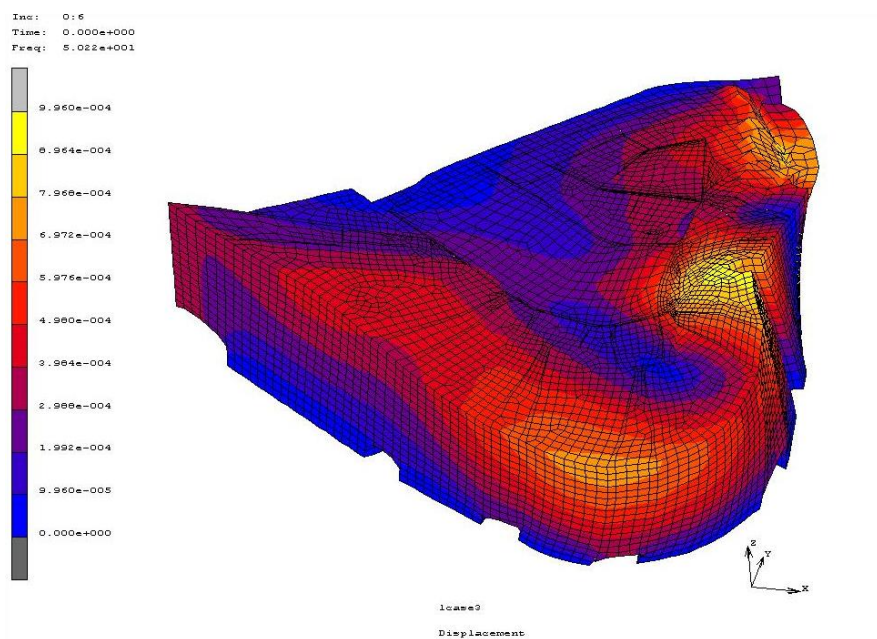


Σχ.71 : 5<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 43.74 Hz (απεικόνιση χωρίς το στήθαίο δώματος)

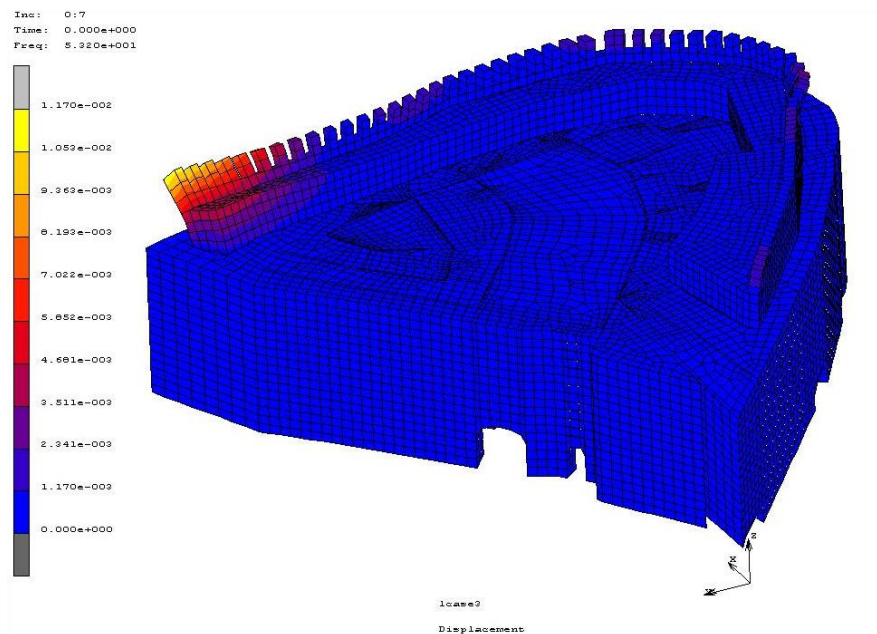




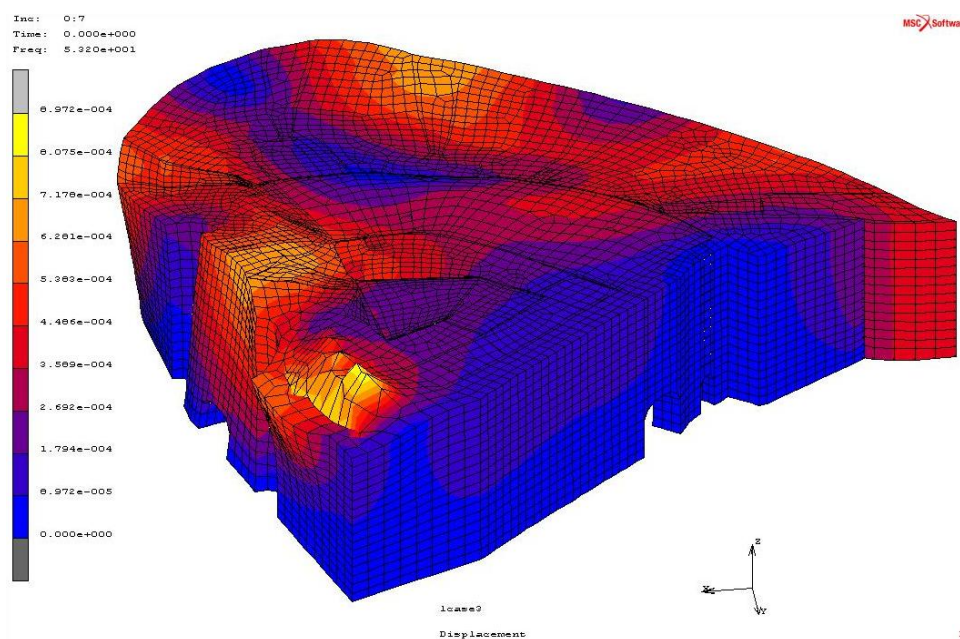
Σχ.72 : 6<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 50.22 Hz



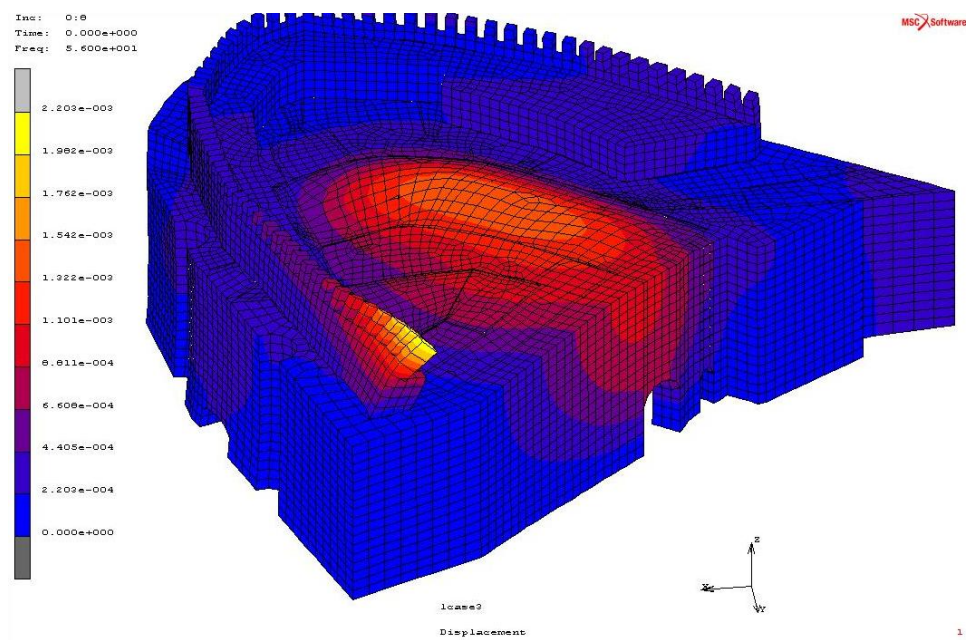
Σχ.73 : 6<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 50.22 Hz



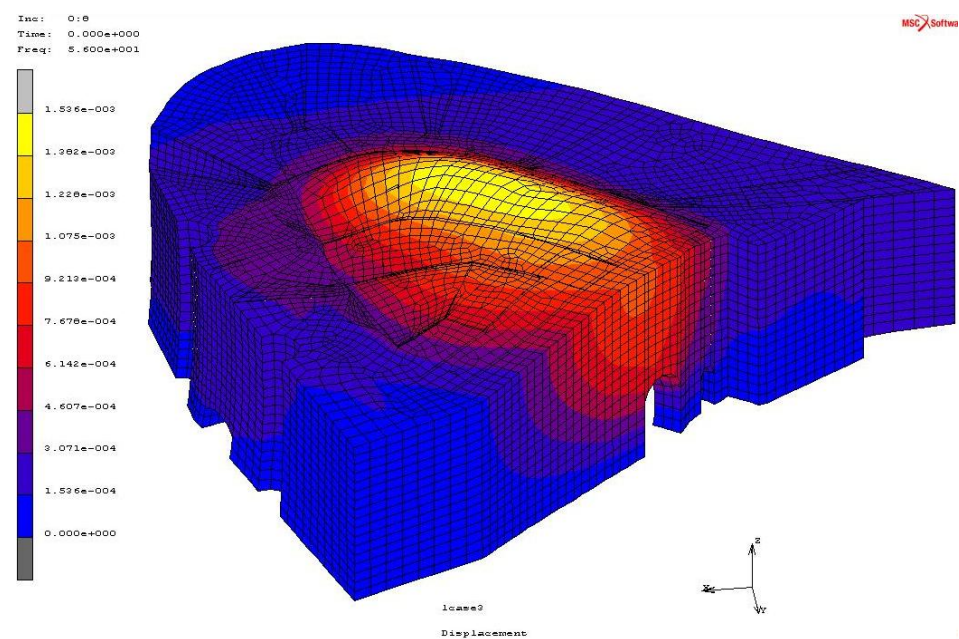
Σχ.74 : 7<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 53.20 Hz



Σχ.75 : 7<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 53.20 Hz



Σχ.76 : 8<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 55.99 Hz



Σχ.77 : 8<sup>η</sup> ιδιομορφή συχνότητα 55.99 Hz

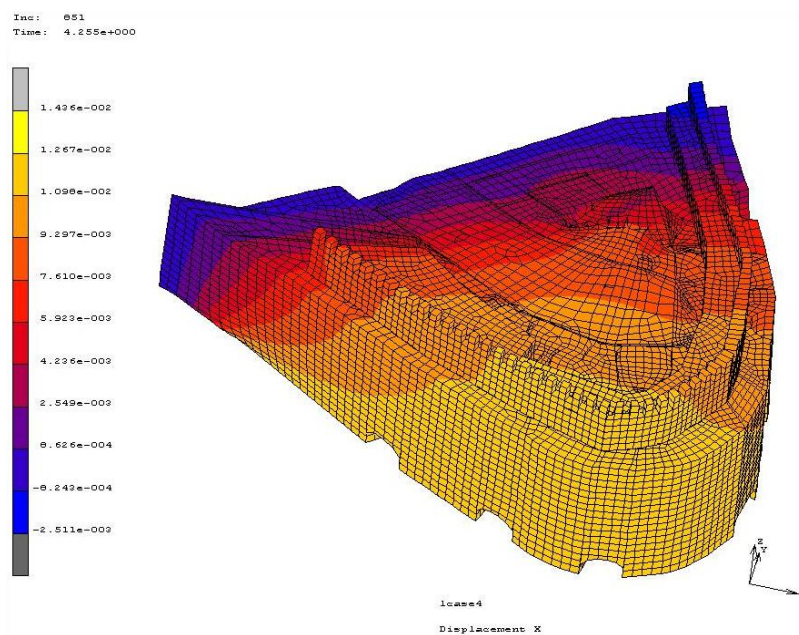


## 5.7 Δυναμική ανάλυση της κατασκευής - Σενάριο 2

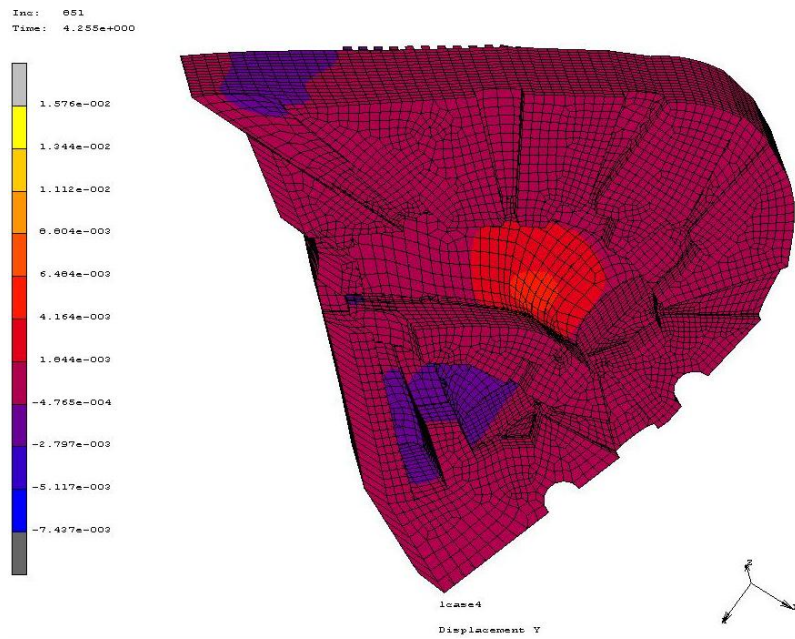
Αρχικά παρουσιάζονται οι συνολικές μετατοπίσεις της κατασκευής κατά τους τρεις άξονες όπως αποδίδονται γραφικά με χρωματικές κλίμακες, για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης. Οι μέγιστες μετατοπίσεις της κατασκευής αναγράφονται στον πίνακα 12 και απεικονίζονται στα Σχ.78,79,80 κατά τους άξονες X,Y,Z αντίστοιχα.

Πιν.12 : Μέγιστες μετακινήσεις δυναμικής ανάλυσης

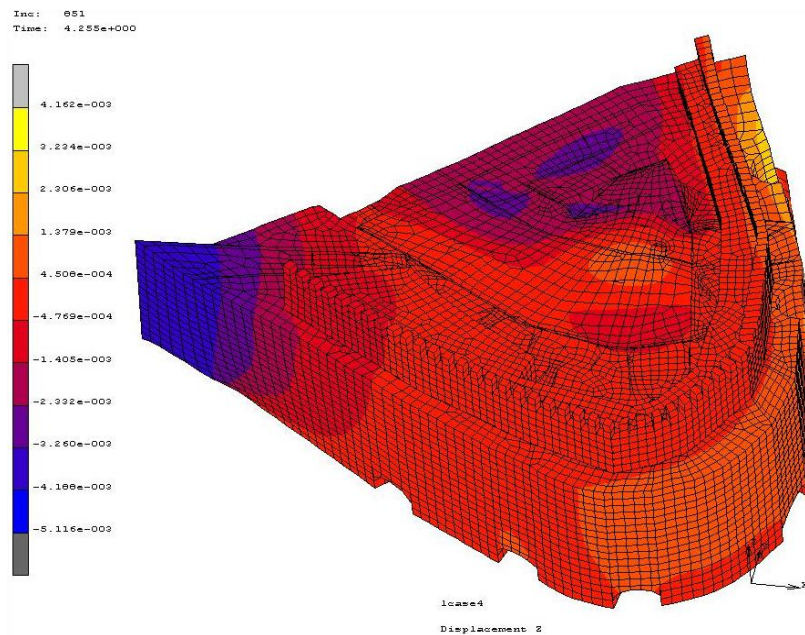
Μετακινήσεις (mm)	Dx	Dy	Dz
	14.35	15.76	-5.11



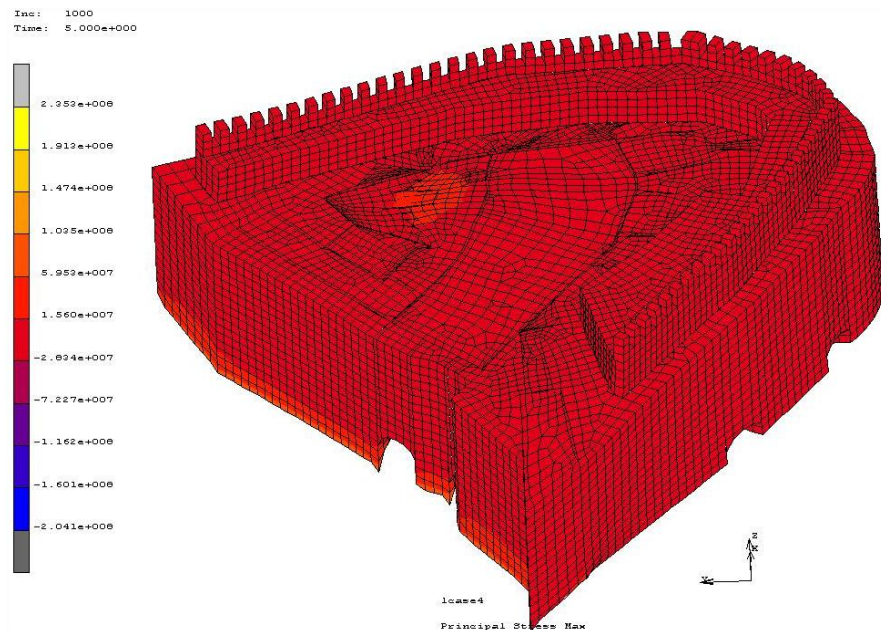
Σχ. 78 : Οι μετακινήσεις κατά τον X-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



Σχ. 79 : Οι μετακινήσεις κατά τον Y-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



Σχ. 80 : Οι μετακινήσεις κατά τον Z-άξονα της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.



Σχ. 81 : Οι μέγιστες κύριες τάσεις της κατασκευής για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης.

Στο Σχ. 81 παρατηρούμε την κατανομή των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται στην κατασκευή εξαιτίας της σεισμικής φόρτισης. Οι τάσεις που αναπτύσσονται στον φορέα κυμαίνονται από -204 MPa (θλιπτικές) ως 235 MPa (εφελκυστικές). Τόσο η μέγιστη εφελκυστική τάση όσο και η μέγιστη θλιπτική τάση παρατηρούνται στον θόλο 1. Στον Πίνακα 13 εμφανίζονται οι μέγιστες τάσεις θλιπτικές και εφελκυστικές ανά σετ.



Πιν.13 : Θλιπτικές και εφελκυστικές τάσεις ανά σετ

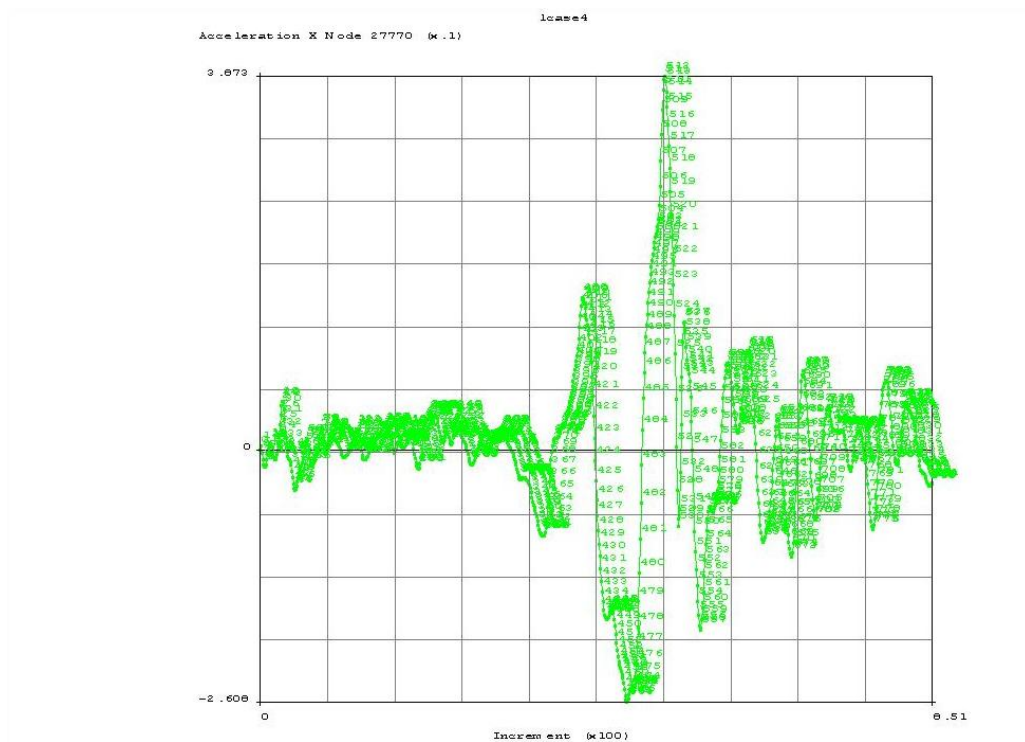
SET	min Sb (N/m <sup>2</sup> )	max Sb (N/m <sup>2</sup> )	SET	min Sb (N/m <sup>2</sup> )	max Sb (N/m <sup>2</sup> )
kan1	667366	1.83E+08	mth1	-821332	9.18E+07
kan2	-957675	8.05E+06	mth2	-2.248E+06	9.108E+07
kan3	-2.35E+06	1.01E+07	mth3	11712.7	1.148E+07
kan4	-2.43E+06	7.31E+06	mth4	-1.13E+08	1.169E+08
kan5	-1.30E+07	1.258E+07	mth5	435619	1.61E+07
kan6	-129668	9.72E+06	mth6	947345	4.57E+07
kan7	-2.56E+07	4.32E+07	mth7	-5.209E+07	2.169E+08
			mth8	-7.02E+06	1.101E+08
tholos1	-2.04E+08	2.35E+08	mth9	-627380	1.30E+07
tholos2	330063	1.91E+07	mth10	-916699	1.528E+07
tholos3	-1.016E+08	2.099E+08	mth11	1.80E+07	3.858E+07
toixos1	-4.25E+06	1.11E+08	toixos7	-9.87E+06	2.24E+07
toixos2	-1.81E+06	1.83E+07	toixos8	-2.34E+07	1.85E+08
toixos3	-95937.8	2.62E+07	toixos9	-843159	9.11E+07
toixos4	-1.80E+06	6.46E+06	toixos10	-1.40E+06	1.238E+08
toixos5	-465464	4.40E+06	toixos11	-2.17E+07	1.16E+08
toixos6	-205660	1.13E+07			

Μια σύγκριση των τιμών των μετατοπίσεων που αναγράφονται στον Πιν.12 με τις τιμές των μετατοπίσεων που εμφανίζονται στο σενάριο 1 (βλ. Πιν.7 σελ.58) μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η χρήση υλικού με χαμηλότερη πυκνότητα και μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με το υλικό του σεναρίου 1 ελάχιστη τροποποίηση επιφέρει στις μετατοπίσεις του φορέα λόγω της δυναμικής φόρτισης

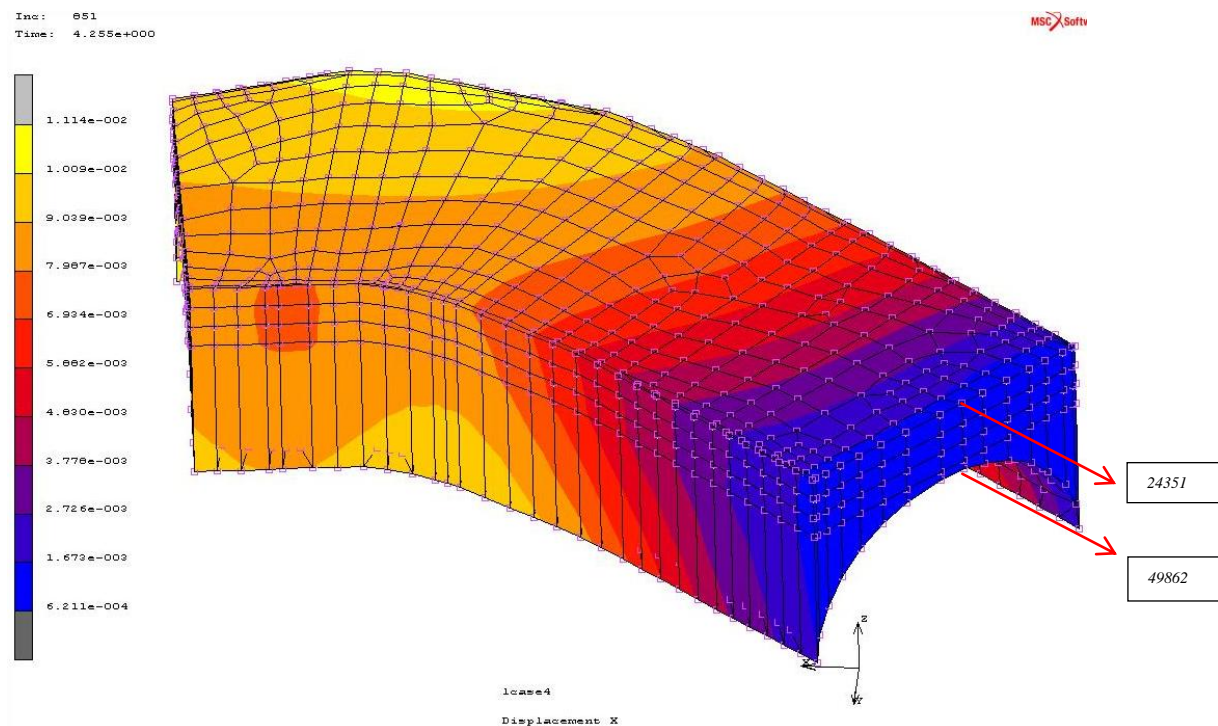
## **5.8 Επεξεργασία Αποτελεσμάτων**

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται κάποια διαγράμματα, τα οποία προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της επίλυσης για την σεισμική φόρτιση, του υπό μελέτη προβλήματος. Αυτά τα διαγράμματα αφορούν σε συγκεκριμένους κόμβους της κατασκευής και στην τιμή διαφόρων παραμέτρων τους καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Από την ερμηνεία αυτών των διαγραμμάτων προκύπτουν ενδιαφέροντα συμπεράσματα για την δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής.

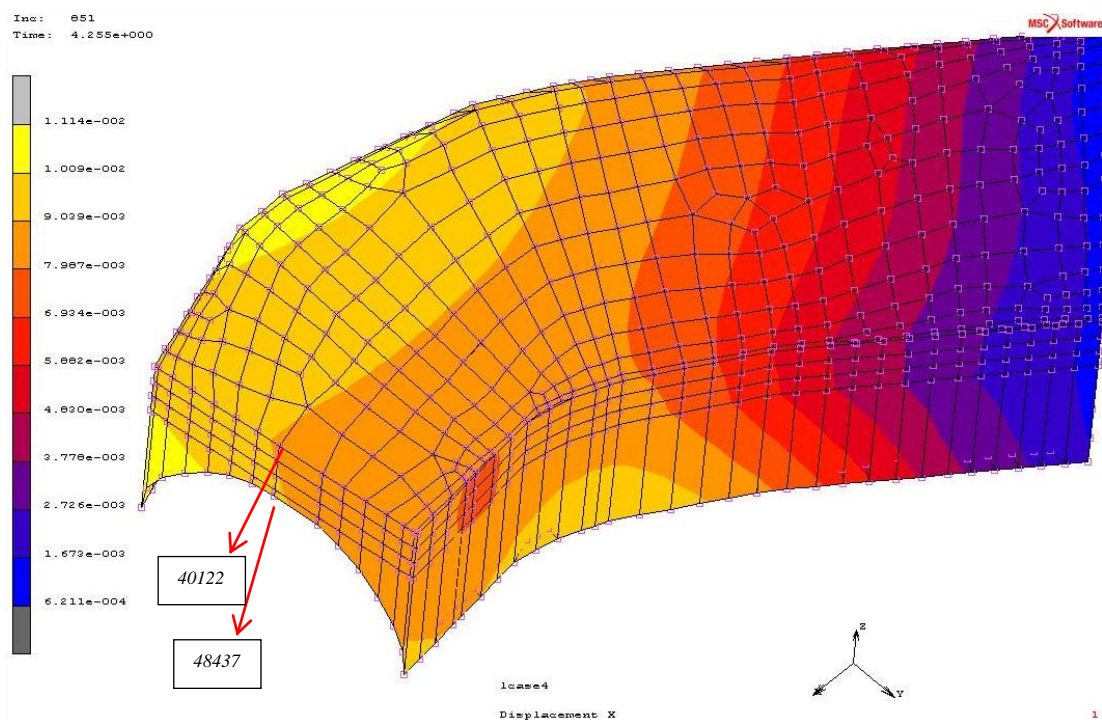
Πρώτα απ' όλα παρουσιάζεται το διάγραμμα επιτάχυνσης κατά X άξονα του κόμβου 27770 ο οποίος βρίσκεται στην βάση στήριξης του φρουρίου, στην οποία επεβλήθη η σεισμική διέγερση. Από την σύγκριση των διαγραμμάτων του Σχ.17 και του Σχ. 82, η οποία γίνεται για την επαλήθευση της ορθότητας της προσομοίωσης, συνάγεται το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή της δυναμικής καταπόνησης έγινε επιτυχώς, μιας και ο συγκεκριμένος κόμβος είναι ένας από εκείνους στους οποίους εφαρμόστηκε αυτή η συνοριακή συνθήκη. Υπενθυμίζεται ότι αυτή η συνοριακή συνθήκη εισήχθη σε όλους τους κόμβους των τοίχων με συντεταγμένη στον Z - άξονα 0. Τα επόμενα διαγράμματα ( Σχ.83-Σχ.86 ) αφορούν δύο κόμβους του θόλου 3 στην «αρχή» του θόλου κοντά στην στήριξη, και δύο στο ανατολικό άκρο του. Οι κόμβοι αυτοί βρίσκονται στην βάση του τόξου του θόλου και στην κορυφή και απέχουν απόσταση 1.699 μέτρα κατά z. Τα διαγράμματα αυτά είναι των μετατοπίσεων κατά τον άξονα X.



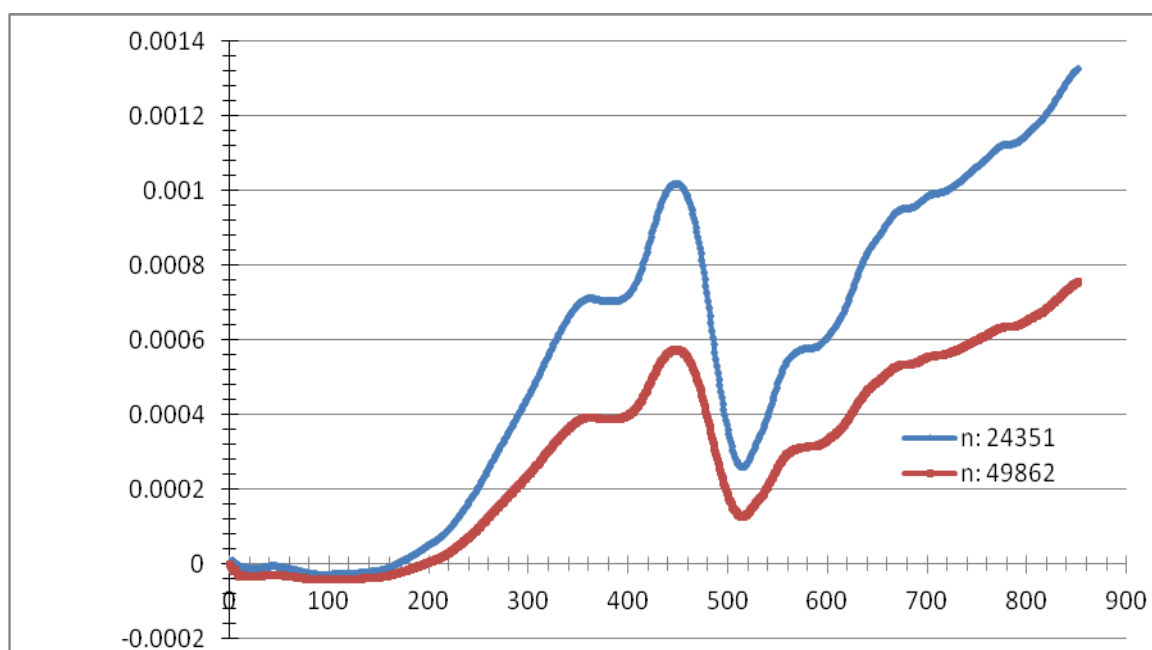
Σχ.82 : Διάγραμμα επιταχύνσεων κόμβου 27770 ( X: 422.62 – Y: 13.082 – Z: 0.00)



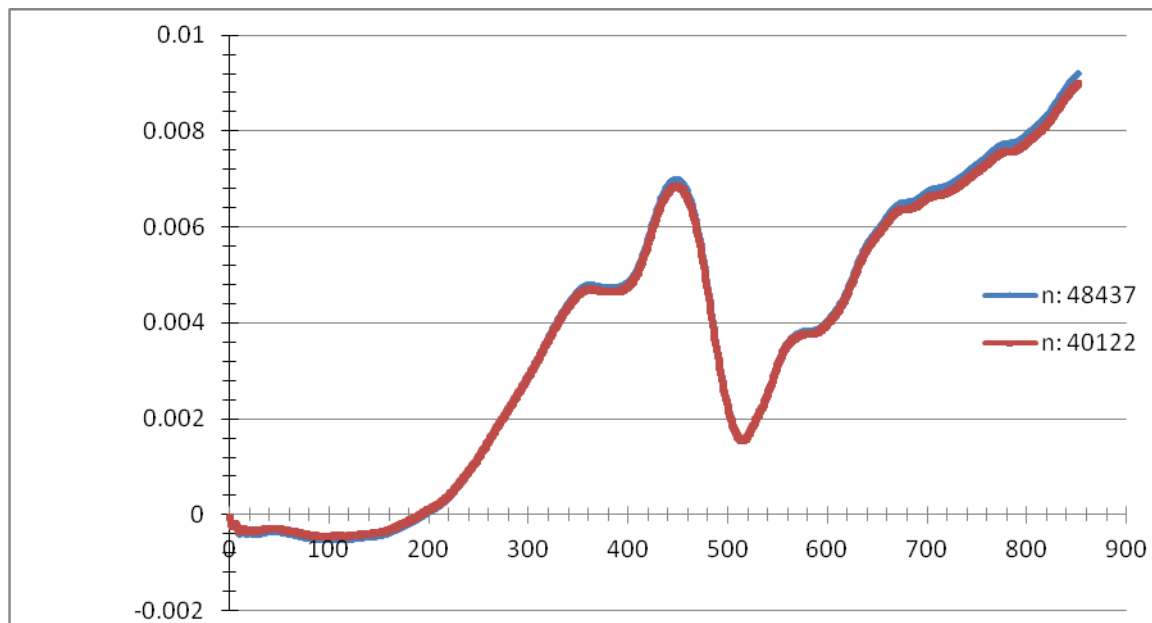
Σχ.83 : Θόλος 3 – Θέση κόμβων 49862 & 24351



Σχ.84 : Θόλος 3 – Θέση κόμβων 40122 & 48437

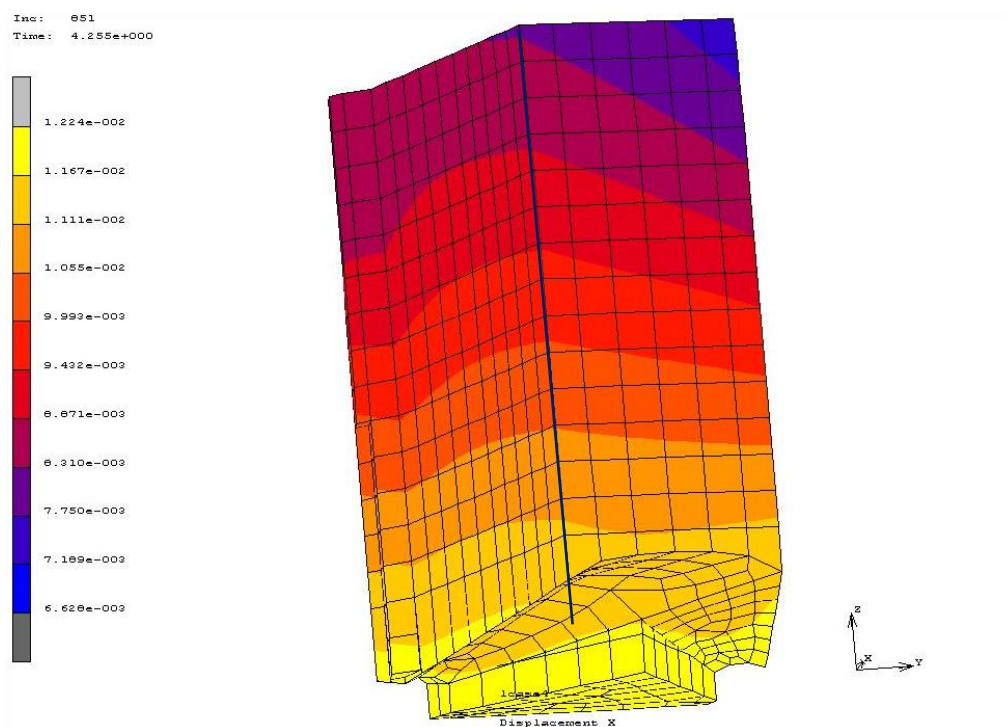


Σχ.85 : Διάγραμμα μετατοπίσεων κατά X-άξονα κόμβων 24351 & 49862

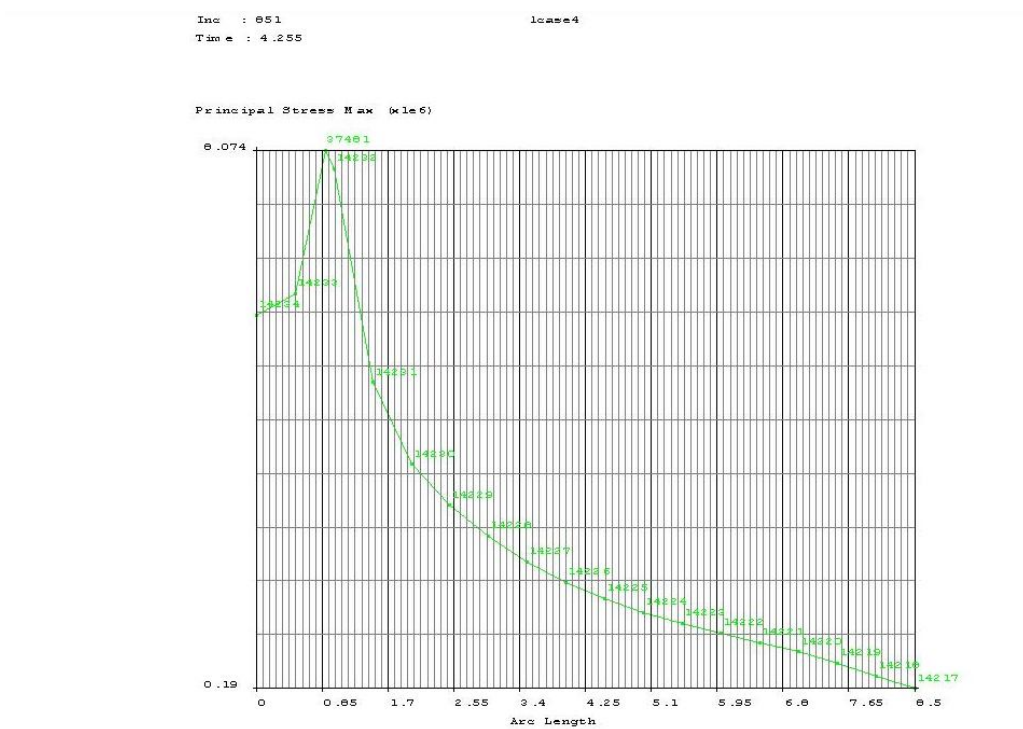


Σχ.86 : Διάγραμμα μετατοπίσεων κατά X-άξονα κόμβων 40122 & 48437

Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα των μετακινήσεων κατά x άξονα είναι της ίδιας μορφής παρουσιάζουν δηλαδή αντίστοιχες καμπύλες με διαφορετικό βέβαια μέγεθος. Όσο απομακρυνόμαστε από το σημείο στήριξης τόσο και ναι μεν μεγαλώνει το μέγεθος τους τόσο όμως και τείνουν οι δύο κόμβοι να έχουν την ίδια μετακίνηση. Η ποσοτική διαφορά των μετακινήσεων κατά τον X-άξονα των δύο κόμβων κοντά στην στήριξη είναι για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης είναι 57% για τους κόμβους που είναι κοντά στην στήριξη και 1% για τους δυο κόμβους που βρίσκονται πιο μακριά από αυτήν.



Σχ.87 : Κανονιοθυρίδα 6 & 7 και τοίχος 7

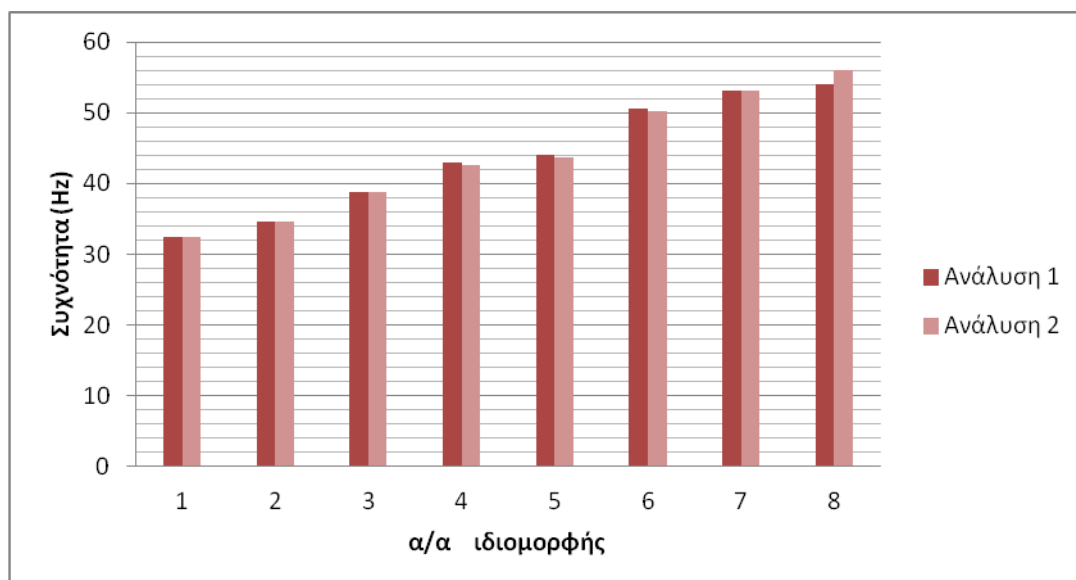


Σχ.88 : Διάγραμμα εφελκυστικών τάσεων κατά μήκος της τομής του Σχ.87



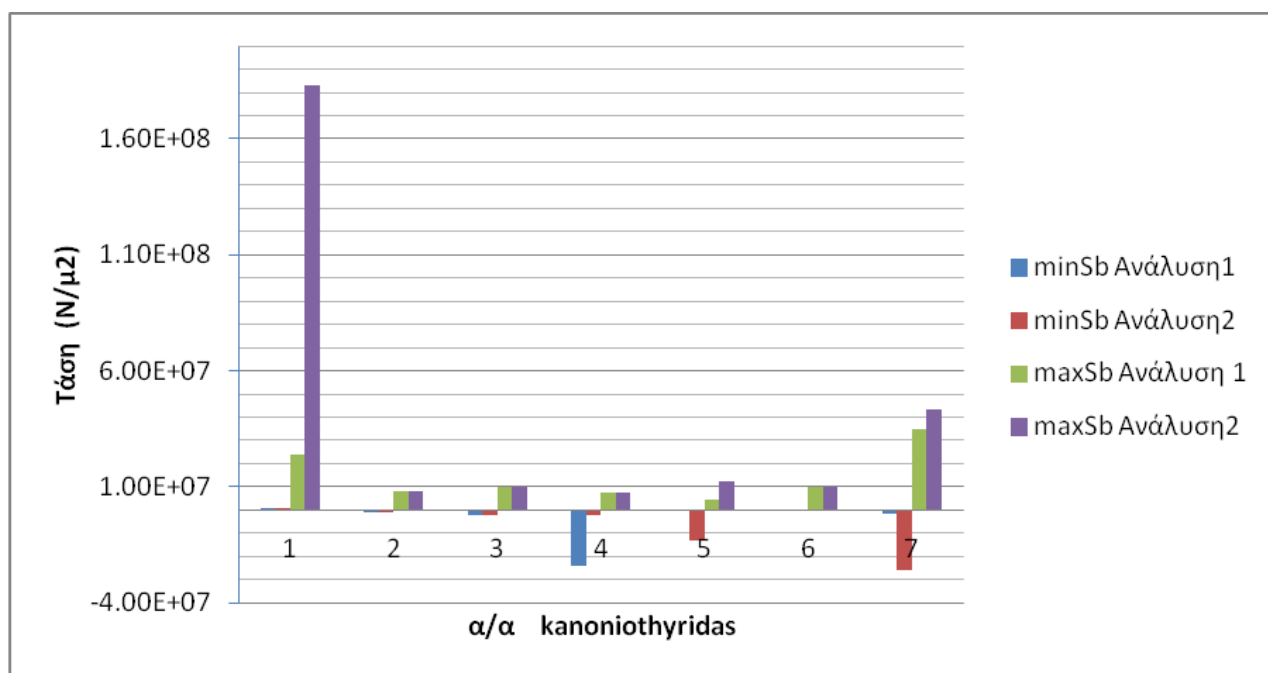
Ένα ακόμα ενδιαφέρον διάγραμμα παρουσιάζεται στο Σχ. 88. Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η κατανομή των εφελκυστικών τάσεων για το τελευταίο βήμα της ανάλυσης στην αριστερή ακμή της κανονιοθυρίδας 6 καθ' ύψος (σχ.87). Παρατηρούμε ότι η μέγιστη εφελκυστική τάση αναπτύσσεται αμέσως μετά το τόξο της κανονιοθυρίδας και φθίνει καθ' ύψος. Εάν κάνουμε σύγκριση με την Εικόνα 10 θα παρατηρήσουμε ότι στο ύψος αυτό παρουσιάζεται μια κατακόρυφη ρωγμή η οποία και αναπτύσσεται σε όλο το ύψος του Φρουρίου. Προφανώς η ρωγμή αυτή είναι αποτέλεσμα εφελκυστικών τάσεων που έχουν αναπτυχθεί από φορτίσεις τόσο σεισμικές όσο και φορτίσεις καθιζήσεων.

Στο επόμενο διάγραμμα Σχ.89 εμφανίζεται μια σύγκριση των ιδιοσυχνοτήτων για τις 8 πρώτες ιδιομορφές των δύο σεναρίων. Παρατηρούμε ότι ελάχιστα επηρεάζεται η ιδιοσυχνότητα των ιδιομορφών από την χρήση υλικού με μικρότερη πυκνότητα και ελαστικότητα για τα γεμίσματα των θόλων



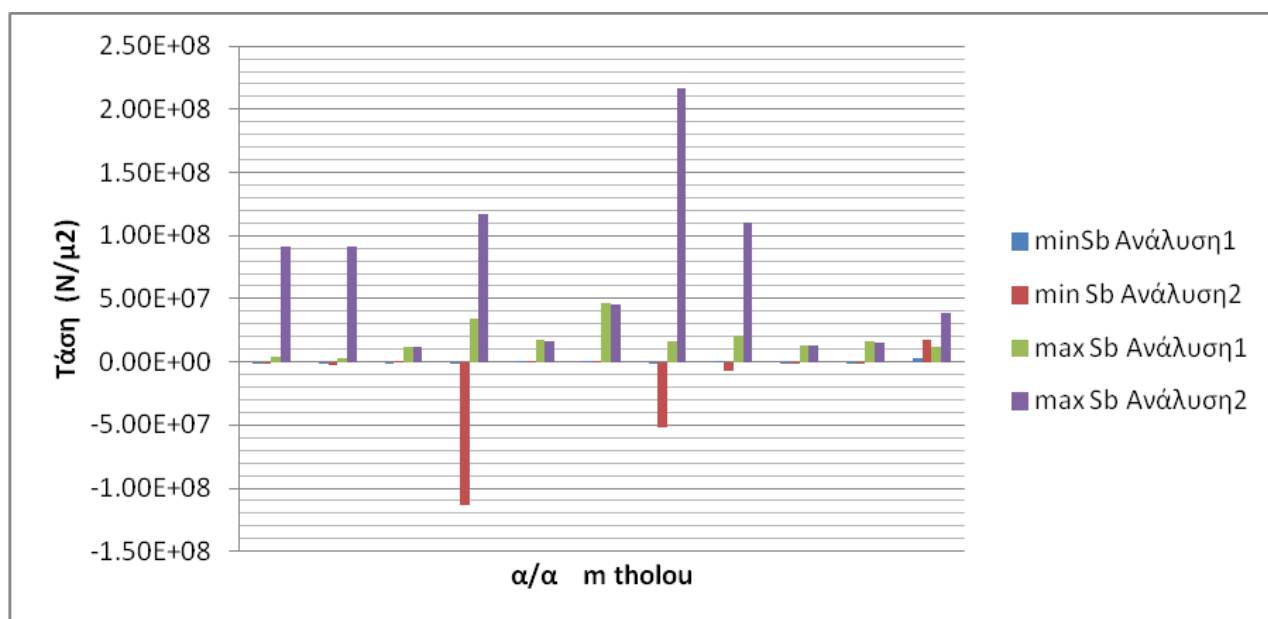
Σχ. 89 . Συγκριτικό διάγραμμα ιδιομορφών των 2 σεναρίων

Ακολουθούν συγκριτικά διαγράμματα που αφορούν τις εμφανιζόμενες ελάχιστες θλιπτικές και μέγιστες εφελκυστικές τάσεις για τα δύο σενάρια των αναλύσεων για τον σεισμό του Αιγίου. Για να είναι εμφανέστερα τα αποτελέσματα τα διαγράμματα αφορούν ομάδες διαφορετικών σετ. Δηλαδή στο Σχ. 90 εμφανίζονται οι ελάχιστες και μέγιστες τάσεις για τα σετ των κανονιοθυρίδων. Παρατηρούμε ότι εμφανίζεται σημαντική τροποποίηση ( αύξηση ) εφελκυστικών τάσεων στην κανονιοθυρίδα 1 στο δεύτερο σενάριο της ανάλυσης. Δηλαδή η χρήση υλικού χαμηλότερης ποιότητας στα γεμίσματα των θόλων οδηγεί σε μια ανακατανομή των τάσεων για την συγκεκριμένη περίπτωση φόρτισης που επηρεάζει σημαντικά το σημείο αυτό του φορέα.



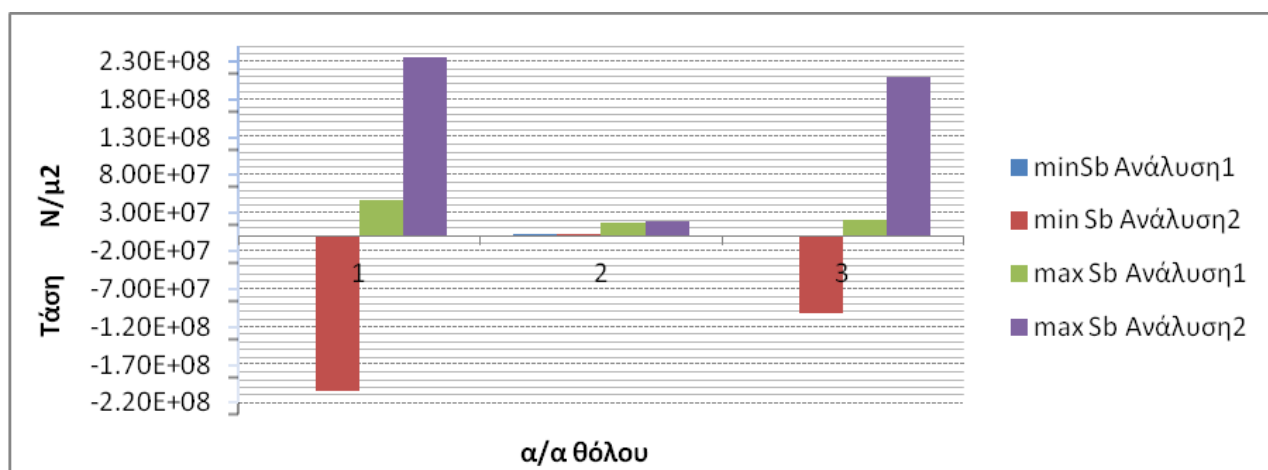
Σχ. 90 . Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των 2 σεναρίων για τα σετ των κανονιοθυρίδων

Στο επόμενο σχήμα Σχ. 91 εμφανίζονται τα σετ των μικρών θόλων στα οποία και παρατηρείται σημαντική τροποποίηση των εφελκυστικών τάσεων αλλά και των θλιπτικών τάσεων για τον μικρό θόλο 4 και τον μικρό θόλο 7.

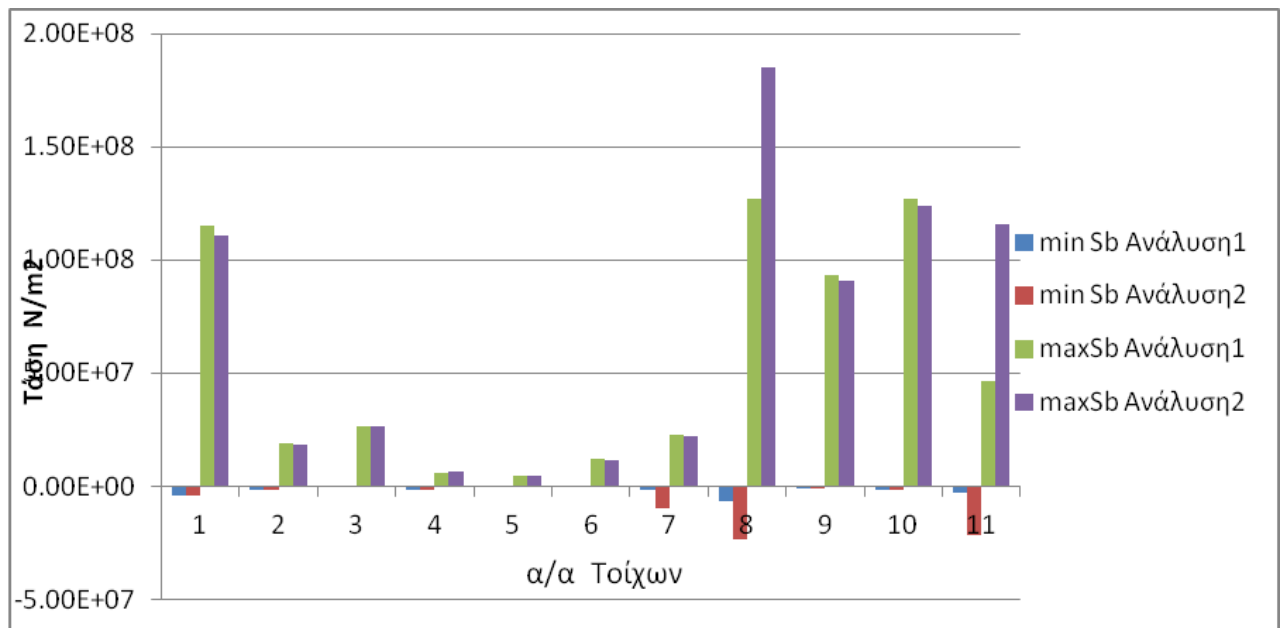


Σχ. 91 . Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των 2 σεναρίων για τα σετ των μικρών θόλων

Στο Σχ. 92 εμφανίζονται τα σετ των κύριων θόλων στο οποίο και παρατηρούμε την εμφανή μεγάλη αύξηση στα μεγέθη των εφελκυστικών τάσεων για το δεύτερο σενάριο της ανάλυσης τόσο στον θόλο 1 όσο και στον θόλο 3. Αντίθετα δεν εμφανίζεται σημαντική διαφοροποίηση στον θόλο 2.



Σχ. 92 . Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των 2 σεναρίων για τα σετ των μικρών θόλων



Σχ. 93 . Συγκριτικό διάγραμμα τάσεων των 2 σεναρίων για τα σεντ των τοίχων.

Τέλος στο συγκριτικό διάγραμμα που αφορά τα σεντ της τοιχοποιίας δεν παρατηρούμε σημαντικές διαφοροποιήσεις για τα δυο σενάρια παρά μόνο στον τοίχο 11. Ο τοίχος αυτός είναι και ο τοίχος μεταξύ των θόλων 1 και θόλου 3 οπότε είναι αναμενόμενο να έχουμε σημαντικές διαφοροποιήσεις εκεί μιας και οι δύο αυτοί θόλοι όπως είδαμε και στο προηγούμενο διάγραμμα επηρεάζονται παραπάνω από την χρήση διαφορετικού υλικού στα γεμίσματα τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

### Συμπεράσματα

#### 6.1 Γενικά

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς σε στατική και δυναμική καταπόνηση του ανατολικού τμήματος του Φρουρίου Κούλε. Το Φρούριο αυτό το οποίο δεσπόζει στην άκρη του ενετικού λιμανιού στο Ηράκλειο παρουσιάζει πολύπλευρο ενδιαφέρον. Ενδιαφέρον όχι μόνο από πολιτιστικής και αρχαιολογικής πλευράς μιας και είναι το χαρακτηριστικότερο ενετικό μνημείο της πόλης, αλλά και ενδιαφέρον από την σκοπιά του πολιτικού μηχανικού μιας και αντικατοπτρίζει μια κατασκευή με ιδιαίτερο δομικό σύστημα, πολυπλοκότητα αλλά και χρόνια λειτουργικά προβλήματα.

Η μελέτη της συγκεκριμένης κατασκευής πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος MSC.MARC. Με την προσομοίωση του φορέα με πεπερασμένα στοιχεία και την ανάλυση του για διάφορες δράσεις έγινε εφικτή η κατανόηση τόσο της συμπεριφοράς του φορέα όσο και των τρωτών σημείων.

Με βάση τα αποτελέσματα των αναλύσεων και με την συσχέτιση των αποτελεσμάτων με τις εμφανιζόμενες αστοχίες στην πραγματική κατασκευή γίνεται μια αρχική αποτίμηση, της τρωτότητας του νοτιοανατολικού τμήματος του μνημείου, δίνονται πρώτες προτάσεις για τις επεμβάσεις που απαιτούνται και θα χρειαστεί να μελετηθούν και προτείνονται συστάσεις για μελλοντική έρευνα.

Αναλυτικότερα τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι:

A. Η αντιμετώπιση κατασκευών με πολύπλοκη γεωμετρία με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και την προσομοίωση διαφόρων τμημάτων ως σώματα σε επαφή (contact bodies) οδηγεί σε αποδεκτές λύσεις με σημαντική εξοικονόμηση υπολογιστικού χρόνου. Η χρήση της λοιπόν σε μεγάλου μεγέθους προβλήματα ενδείκνυται.



Β. Η ανάλυση της κατασκευής ακόμα και για το ίδιο βάρος της μας έδωσε σημαντικές εφελκυστικές τάσεις. Η διαμόρφωση του τμήματος αυτού με την ιδιαίτερη μορφή που έχουν οι τρεις θόλοι οδηγεί στην εμφάνιση εξαρχής εφελκυστικών τάσεων, συνεπώς ένα ασθενές σημείο που οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση τους λόγω διαφόρων δράσεων. Χαρακτηριστικό σημείο είναι το ότι ενώ θα αναμέναμε τις μεγαλύτερες μετακινήσεις λόγω της φόρτισης του ιδίου βάρους κατά τον κατακόρυφο άξονα Ζ αυτές εμφανίζονται κατά τον άξονα Υ. Ο άξονας Υ είναι στραμμένος με γωνία 30 μοιρών προς την δύση σε σχέση με την κατεύθυνση του Βορρά.

Γ. Η επιβαλλόμενη γραμμική βύθιση που εφαρμόστηκε σε τμήμα του φορέα ώστε να ερευνηθεί το πρόβλημα των σπλαιώσεων της θεμελίωσης το οποίο έχει εντοπισθεί μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η φόρτιση αυτή επηρεάζει σημαντικό τμήμα της κατασκευής και οδηγεί στην ανάπτυξη υπερβολικών εφελκυστικών τάσεων σε αδύναμα σημεία της, όπως π.χ στα σημεία στηρίξεις των κανονιοθυρίδων. Οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτή την φόρτιση είναι 21 φορές μεγαλύτερες από αυτές που αναπτύσσονται στην φόρτιση του ιδίου βάρους.

Δ. Από την ιδιομορφική ανάλυση της κατασκευής εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι ιδιομορφές διεγείρουν αρχικά το παραπέτο του δώματος πράγμα που αναμέναμε διότι το παραπέτο του Φρουρίου είναι από τα στοιχεία που αρχίζουν πρώτα να ταλαντώνονται. Η συχνότητα της πρώτης ιδιομορφής είναι 32.422 Hz. Στην τρίτη ιδιομορφή με συχνότητα 38.78 Hz αρχίζει να επηρεάζεται ο κύριος όγκος του φρουρίου με την ταλάντωση του θόλου 3. Οι ιδιομορφές 7 και 8 παρουσιάζουν διέγερση του θόλου 3 στον κατακόρυφο άξονα.

Ε. Από τη δυναμική ανάλυση της κατασκευής με τον σεισμό του Αιγίου εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

Ε1) Οι μέγιστες μετακινήσεις στον Χ - άξονα συμβαίνουν όσο απομακρυνόμαστε από την στήριξη της κατασκευής (συνέχεια με τον υπόλοιπο φορέα). Ο άξονας Χ είναι στραμμένος με γωνία 60 μοιρών προς την ανατολή σε σχέση με την κατεύθυνση του Βορρά

Ε2) Λόγω της ταλάντωσης του παραπέτου οι υψηλότερες μετακινήσεις κατά τον Υ – άξονα παρατηρούνται στα πεπερασμένα στοιχεία που βρίσκονται ψηλά στην κατασκευή. Ο άξονας Υ είναι στραμμένος με γωνία 30 μοιρών προς την δύση σε σχέση με την κατεύθυνση του Βορρά.

E3) Έντονες εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται τόσο στα σημεία σύνδεσης των θόλων με τους τοίχους όσο και στα σημεία σύνδεσης των κανονιοθυρίδων με τους τοίχους βλ. Σχ.53 & Σχ.64. Στα σημεία αυτά υπάρχουν ρωγμές στον φορέα.

E4) Η μετακίνηση κατά τον X άξονα των ακραίων κατά το πάχος σημείων στην κορυφή του θόλου 3 είναι ίδια γεγονός που επιβεβαιώνει την δυσκαμψία της κατασκευής. Ο άξονας X είναι στραμμένος με γωνία 60 μοιρών προς την ανατολή σε σχέση με την κατεύθυνση του Βορρά

Z. Από την ανάλυση της κατασκευής με χαμηλότερης ποιότητας υλικό στα γεμίσματα των θόλων εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

Z1) Από την ιδιομορφική ανάλυση εξάγεται το συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει καμιά σημαντική διαφορά στην συχνότητα των ιδιομορφών. Και σε αυτή την ανάλυση παρατηρούμε ότι οι ιδιομορφές διεγείρουν αρχικά το παραπέτο του δώματος.

Z2) Παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση (αύξηση) τόσο στις εφελκυστικές όσο και στις θλιπτικές τάσεις που εμφανίζονται στο φορέα. Συγκεκριμένα στον μεγάλο θόλο 1 ενώ στο πρώτο σενάριο ανάλυσης οι θλιπτικές τάσεις είναι -1.86 MPa και οι εφελκυστικές τάσεις 47.10 MPa στο δεύτερο σενάριο έχουμε τις θλιπτικές τάσεις να είναι -204 MPa και τις εφελκυστικές τάσεις 235 MPa

Γενικότερα αναφέρουμε ότι οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στο τμήμα αυτό του φορέα του Κούλε είναι σημαντικές και σε κάποια σημεία φθάνουν ή και ξεπερνούν την εφελκυστική αντοχή των λιθοσωμάτων του φορέα. Εξαιτίας των τάσεων αυτών έχουν εμφανιστεί και αναπτυχθεί έντονες ρηγματώσεις σε αρκετά σημεία του φορέα.

Οι υπάρχουσες φθορές και αστοχίες αποτελούν τρωτά σημεία του φορέα, και σχετίζονται με το πρόβλημα των σπηλαιώσεων. Επίσης η γειτνίαση του Φρουρίου με τη θάλασσα και η συνεχής δυναμική και περιβαλλοντική καταπόνηση του μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω αστοχίες και έναρξη του μηχανισμού κατάρρευσης. Συνεπώς, η αποκατάσταση του δομικού συστήματος και η κατάλληλη ενίσχυση του φορέα στα σημεία όπου έχουμε απώλεια αντοχής κρίνεται απαραίτητη για τη συντήρηση του μνημείου. Εξαιρετικά κρίσιμος και αναγκαίος είναι ο συνεχής έλεγχος και η συντήρηση του φορέα.

## **6.2 Προτεινόμενοι μέθοδοι αποκατάστασης**

Η διεθνής νομοθεσία για τα μνημεία όπως έχουμε ήδη επισημάνει απαιτεί την ανάγκη ξεχωριστής αντιμετώπισης της κάθε επέμβασης, η τυποποίηση ειδικών συγκεκριμένων προδιαγραφών οι οποίες να έχουν απόλυτη εφαρμογή σ όλες τις επεμβάσεις είναι δύσκολη.

Δεδομένο είναι επίσης ότι η μελέτη τόσο σε επίπεδο επιλογών όσο και σε επίπεδο οικονομικού αντικειμένου ολοκληρώνεται παράλληλα με το έργο. Σε όλη την διάρκεια του έργου υπάρχει μια σχέση ανάμεσα στην μελέτη και την επέμβαση, ενώ αυξάνονται οι απαιτήσεις για όλους τους παράγοντες που συντελούν στην υλοποίηση του έργου (επίβλεψη, εργατοτεχνικό προσωπικό, υλικά κ.λ.π.).

Εξάλλου ιδιαίτερη έμφαση πρέπει να δίνεται:

- α) στην ασφάλεια του μνημείου για το οποίο πρέπει να αποφευχθεί η καταπόνηση από άστοχες ενέργειες.
- β) στην αντιμετώπιση των σοβαρότερων προβλημάτων που επηρεάζουν την αντοχή του μνημείου (διάβρωση της υποθεμελίωσης στο νοτιοδυτικό τμήμα του, παρατεταμένη υγρασία δευτερογενείς βλαπτικές αντιδράσεις από τις περιβαλλοντικές συνθήκες)
- γ) στα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν.
- δ) στην εξασφάλιση της αντοχής της επέμβασης στο χρόνο με την σταθερή παρακολούθηση ώστε να εντοπίζονται έγκαιρα και αποτελεσματικά οι τυχόν αστοχίες και την διαρκή συντήρηση.

Συνοπτικά από την μέχρι τώρα εκτίμηση του δομικού φορέα θα μπορούσαμε να δώσουμε κάποιες πρώτες εκτιμήσεις των επεμβάσεων που απαιτούνται. Οι επεμβάσεις αυτές μπορούν να χωρισθούν σε δυο φάσεις. Στην α' φάση μπορούν να συμπεριληφθούν οι εργασίες αποξηλώσεων και καθαιρέσεων και στην β' φάση οι εργασίες αποκαταστάσεων.

### **ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ Α' ΦΑΣΗΣ**

1. Αποξήλωση του δαπέδου στο επίπεδο του δώματος, καθαρισμός, εξυγίανση των σημείων στήριξης των πλακών οπλισμένου σκυροδέματος,

2. Καθαίρεση όλων των μεταλλικών τμημάτων όπως σιδεριές, μεταλλικές σχάρες κλπ., καθαρισμός, στερέωση και αποκατάσταση όλων των επιφανειών στήριξης των μεταλλικών στοιχείων.
4. Καθαίρεση όλων των λίθινων κατασκευών των φωταγωγών, αποκατάσταση των εσωτερι-κών επιφανειών προς το ισόγειο στέγαση με ειδικές σχάρες ανοξείδωτου χάλυβα.
5. Διερευνητικές τομές ώστε να εντοπισθούν μορφολογικά στοιχεία του δαπέδου του δώματος σε προγενέστερες ιστορικές φάσεις.
6. Καθαρισμός όλων των εσωτερικών επιφανειών του ισογείου τοίχων θόλων, κλπ. με χρήση αεροβολής και υδροβολής για απομάκρυνση του χαλαρού συνδετικού υλικού όπου απαιτείται.

#### **ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΕΡΓΑΣΙΕΣ Β' ΦΑΣΗΣ**

Μετά τις εργασίες καθαίρεσεων ακολουθούν οι προτεινόμενες εργασίες αποκαταστάσεων.

1. Αποκατάσταση του δαπέδου του δώματος με κατασκευή κλίσεων για την καλύτερη απορροή των όμβριων στα σημεία που θα προτείνει η οριστική μελέτη ύδρευσης – αποχέτευσης, στεγάνωση με μονωτικό υλικό υψηλών προδιαγραφών με ειδική αντοχή όσον αφορά την έκθεση στη θάλασσα.
2. Δημιουργία κατάλληλου συστήματος απορροής ομβρίων στον τελικό αποδέκτη. Αποκατάσταση δεξαμενών συλλογής ομβρίων.
3. Αποκατάσταση των ρωγμών με σχολαστικό καθαρισμό σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο βάθος για την απομάκρυνση των χαλαρών λίθων και του συνδετικού υλικού. Γέμισμα των ρωγμών με ένεμα υπό πίεση ώστε να διασφαλιστεί η πρόσφυση σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο βάθος και εύρος. Το κονίαμα καθώς και το υλικό του ενέματος θα πρέπει να είναι ειδικής σύνθεσης ώστε να αντέχει στο ιδιαίτερο περιβάλλον του Φρουρίου.
4. Λιθοσυμπληρώσεις. Η επαναδόμηση όπου απαιτείται να γίνει με χρήση υγιών λίθων και συνδετικό κονίαμα όπως των αρμολογημάτων.
5. Αρμολόγημα κενών ανάμεσα στους λίθους με κονίαμα κατάλληλης σύνθεσης και απόχρωσης που δεν αλλοιώνει το μνημείο. Καθαρισμός της επιφάνειας στο εύρος και

βάθος που απαιτείται απομάκρυνση του χαλαρού συνδετικού υλικού, καθαρισμός με πίεση αέρα και νερού και στη συνέχεια σφράγισμα του αρμού υπό πίεση.

### **6.3. Μελλοντική έρευνα**

Η έρευνα που παρουσιάστηκε με την εργασία αυτή αποτελεί την βάση για μελλοντική διερεύνηση του θέματος στατικής επάρκειας του μνημείου καθώς και την αναλυτικότερη μελέτη αποκατάστασης. Αντικείμενα τις προτεινόμενης μελλοντικής έρευνας είναι τα ακόλουθα: .

- Ακριβής αποτύπωση όλων των στοιχείων της παθολογίας του μνημείου. Για τις ρωγμές ειδικότερα θα πρέπει να αποτυπωθεί το εύρος, το μήκος, το βάθος, η σχετική μετατόπιση των χειλέων τα πιθανά τεκμήρια παλαιότητας τους και ο χρόνος δημιουργίας τους. Παράλληλα να αποδοθεί όσο το δυνατόν ακριβέστερα η πραγματικότητα που αφορά την μορφή την αναλογία και την δομή των υλικών και της κατασκευής. Παράλληλα η μελέτη της συμπεριφοράς και της συμβατότητας των σύγχρονων υλικών με το πρωτότυπο είναι σημαντικός πριν από την διεξαγωγή εκτενών εφαρμογών. [23]
- Έρευνα για την κατάσταση της υποθεμελίωσης από την Εφορεία εναλίων για να διαπιστωθεί το εύρος των ζημιών που έχει υποστεί.
- Έρευνα σε βάθος χρόνου με την τοποθέτηση συσκευών παρακολούθησης και καταγραφής παραμορφώσεων. Αυτά μπορεί να είναι από απλά επιμηκυνσιόμετρα μέχρι πολύπλοκες συσκευές laser. Έτσι θα έχουμε πλήρη γνώση των μετακινήσεων και καθιζήσεων που συμβαίνουν στο Φρούριο.
- Έρευνα για τον καθορισμό των αναγκαίων φυσικών και μηχανικών παραμέτρων της τοιχοποιίας με χρήση δοκιμών όπως (θερμική παρακολούθηση, γεωραντάρ, κ.λ.π.) , σε ένα ευρύτερο πεδίο του φρουρίου.
- Μέτρηση των δυναμικών καταπονήσεων τόσο λόγω των κυματισμών όσο και λόγω σεισμικών φορτίσεων και διερεύνηση τους.
- Ανάλυση όλου του φορέα με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.
- Ανάλυση του φορέα λαμβάνοντας υπόψη τις εδαφικές συνθήκες.



Το Φρούριο Κούλε διανύει τον τρίτο αιώνα της ύπαρξης του και με την παρουσία του στην βόρεια είσοδο της πόλης του Ηρακλείου μας ξυπνάει ένδοξες μνήμες από το παρελθόν. Μνήμες που μας εμπνέουν και γίνονται φωτεινός οδηγός της ανθρώπινης ύπαρξης.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [ 1 ] Μ. Παπαδρακάκης . Ανάλυση φορέων με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Εκδόσεις Παπασωτηρίου ΑΘΗΝΑ 2001
  
- [ 2 ] Περιφερειακό Εργαστήριο Κρήτης.
  
- [ 3 ] Φανή Αθανασίου . Αποκαθιστώντας την αποκατάσταση. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστηλώσεων. Αθήνα 21-24 Μαΐου 2009
  
- [ 4 ] Δημήτριος Μ. Ζυγομαλάς. Ολοκλήρωση ερειπωμένων ιστορικών κτηρίων: Οι σύγχρονες τάσεις.2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστηλώσεων. Αθήνα 21-24 Μαΐου 2009
  
- [ 5 ] Φανη Μαλλούχου Tufano. Μετά το Χάρτη της Βενετίας. Εξέλιξη ιδεών και προσεγγίσεων στην προστασία των μνημείων. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστηλώσεων. Αθήνα 21-24 Μαΐου 2009
  
- [ 6 ] Μαρία Ε. Σταυρουλάκη. Σεισμική συμπεριφορά ιστορικών κατασκευών με σύνθετο δομικό φορέα. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστηλώσεων. Αθήνα 21-24 Μαΐου 2009
  
- [ 7 ] Χαρ. Μπούρας. Σύγχρονες τάσεις στην Ελλάδα κατά την αποκατάσταση των μνημείων 2000-2009. 2ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αναστηλώσεων. Αθήνα 21-24 Μαΐου 2009
  
- [ 8 ] Π. Πλαϊνης. Κανονιστικό πλαίσιο για την μελέτη επεμβάσεων σε μνημεία.
  
- [ 9 ] ICOMOS. RECOMMENDATIONS FOR THE ANALYSIS, CONSERVATION AND STRUCTURAL RESTORATION OF ARCHITECTURAL HERITAGE. 22-05-2003
  
- [ 10 ] The Venice Charter 1964. IInd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, Venice 1964

- [ 11 ] Χρυσούλα Τσομπανάκη. Το Ηράκλειο εντός Τειχών. Εκδόσεις ΤΕΕ. Ηράκλειο 2000
- [ 12 ] Άρθρο για το Φρούριο Κούλε. Ιστοσελίδα [www.castra.eu](http://www.castra.eu)
- [ 13 ] Άρθρο για το Φρούριο Κούλε. Ιστοσελίδα [www.wordpress.gr](http://www.wordpress.gr)
- [ 14 ] Άρθρο για το Φρούριο Κούλε. Ιστοσελίδα [www.cretalive.gr/history](http://www.cretalive.gr/history)
- [ 15 ] Ιστοσελίδα [www.skia.gr](http://www.skia.gr)
- [ 16 ] Υλικό (Σχέδια, φωτογραφίες κ.α ) από 13 Εφορία Βυζαντινών Αρχαιοτήτων.
- [ 17 ] Τσιναράκης Θεόδωρος, Αποτίμηση φέροντος οργανισμού νοτίου ενετικού νεωρίου Χανίων ‘Benedetto Moro’ με ιδιομορφική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων, Διπλωματική διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης. ΧΑΝΙΑ 2011
- [ 18 ] Φυλλίτσα Β. Καραντώνη. Κατασκευές από τοιχοποιία. Εκδόσεις Παπασωτηρίου ΑΘΗΝΑ 2004
- [ 19 ] Νικόλαος Μακρής - Χαράλαμπος Δ. Αλεξάκης. Στατική Ανάλυση Θολωτής Διόδου του Σταδίου της Αρχαίας Νεμέας
- [ 20 ] Κων/νος Παπαδόπουλος. Αποκατάσταση της θεμελίωσης και ανάταξη λίθων στο βόρειο τμήμα του ναού του Επικούριου Απόλλωνα.
- [ 21 ] Ι. ΨΥΧΑΡΗΣ, Χ. ΜΟΥΖΑΚΗΣ, Ε. ΠΑΥΛΟΠΟΥΛΟΥ, Α. ΜΙΑΤΙΑΔΟΥ, Ι. ΤΑΦΛΑΜΠΑΣ Ανάλυση της Σεισμικής Απόκρισης Βυζαντινού Ναού Χωρίς και Με Επεμβάσεις
- [ 22 ] PAULO B. LOURENÇO. Analysis and restoration of ancient masonry structures Guidelines and Examples. University of Minho, Department of Civil Engineering, 4800-058 Guimarães, Portugal

- [ 23 ] Luigia Binda and Antonella Saisi Politecnico of Milano, Milano, Italy. Research on historic structures in seismic areas in Italy
- [ 24 ] Δημήτριος Κ. Ταμβάκης. Μεταπτυχιακή Διατριβή. «Δυναμική ανάλυση μνημειακής κατασκευής με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων». XANIA 2008
- [ 25 ] Siro Casolo, Gabriele Milani\*, Carlo Alberto Sanjust and Alberto Taliercio Maniace Castle in Syracuse, Italy: Comparison Between Present Structural Situation and Hypothetical Original Configuration by Means of Full 3D FE Models. *The Open Civil Engineering Journal*, 2012, 6, (Suppl 1-M6) 173-187
- [ 26 ] Κώστας Α. Συρμακέζης Αντισεισμικός Σχεδιασμός Ιστορικών Κατασκευών και Μνημείων. 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου, 2008 Άρθρο 1843
- [ 27 ] Marc® 2010. Volume A: Theory and User Information
- [ 28 ] Basil Leftheris, Maria E. Stavroulaki, Argyro C. Sapounaki, Georgios E. Stavroulakis, '*Computational methods for heritage structures*', WIT Press, Southampton, U.K., 2006.
- [ 29 ] Maria E. Stavroulaki, Vagelis B. Liarakos, 'Dynamic analysis of a masonry wall with reinforced lintels or tie beams', *Engineering Structures*, Elsevier, 44, pp. 23-33, 2012.
- [ 30 ] Maria E. Stavroulaki and Theodoros Tsinarakis, "Finite element analysis of masonry barrel vaults", 7th GRACM International Congress on Computational Mechanics, Athens, 30 June – 2 July 2011