

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΑΡΑΞΕΩΝ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΣΟΥΛΙΩΤΗΣ Μ. ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ

Επιβλέπων : Καθηγητής Εμμανουήλ Σ. Σαμουηλίδης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2012

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Εμ. Σ. Σαμουηλίδη για τη συνεργασία και τις πολύτιμες συμβουλές του στην εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Επίσης, τον Ειδικό Επιστήμονα κ. Μ. Τουλιο και τους Υποψήφιους Διδάκτορες, κ. Η. Ζηλάκο και κ. Ι. Μαρινάτο για την βοήθειά τους στο θέμα των πεπερασμένων στοιχείων. Τέλος τον Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Χ. Πολλαλι για την αναντικατάστατη υποστήριξή του σε πάσης φύσεως θέματα και φυσικά την οικογένειά μου, που ήταν πάντα δίπλα μου στην εκπόνηση αυτής της διπλωματικής όπως και σε όλα τα στάδια της ζωής μου.

Πίνακας περιεχομένων

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	5
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	7
ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	7
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	9
1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Σενάρια προσάραξης	13
1.3 Εξωτερική μηχανική προσαράξεων	15
1.4 Εσωτερική μηχανική προσαράξεων	15
1.5 Μεθοδολογίες και εργαλεία για μη γραμμική ανάλυση κατασκευών.....	17
1.6 Υπάρχουσες αναλυτικές μοντελοποιήσεις	19
1.7 Μη γραμμική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων	20
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	22
2.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	22
2.2 Στάδια της προσομοίωσης	23
2.3 Μη γραμμική ανάλυση	24
2.4 Σύγκριση άμεσων (explicit) και έμμεσων (implicit) μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων	25
2.5 Άμεση μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων.....	26
2.6 Προτερήματα της άμεσης μεθόδου χρονικής ολοκλήρωσης.....	28
2.7 Όριο ευστάθειας και χρονική διακριτοποίηση της άμεσης μεθόδου	29
2.8 Παράγοντες που επηρεάζουν το όριο ευστάθειας	30
2.9 Δομή και λειτουργία του ABAQUS	31
3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	33
3.1 Περιγραφή του προβλήματος	33
3.2 Περιγραφή του πλοίου προς μοντελοποίηση	34
3.3 Μοντελοποίηση της μέσης τομής του πλοίου	37
3.3.1 Γεωμετρική μοντελοποίηση	37
3.3.2 Μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων	38
3.4 Μοντελοποίηση των υφάλων	40
3.4.1 Γεωμετρική μοντελοποίηση	40
3.4.2 Μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων	42
3.5 Ιδιότητες υλικού του μοντέλου και κριτήριο αστοχίας	43
3.6 Ταχύτητα διεξόδου και τροχιά κίνησης του βράχου	44
3.7 Αλληλεπίδραση πλοίου βράχου	47
3.8 Σενάρια ανάλυσης	47

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	49
4.1 Ανάλυση προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 1]	49
4.1.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 1].....	52
4.1.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 1].....	53
4.2 Ανάλυση προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 2]	55
4.2.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 2].....	58
4.2.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 2].....	59
4.3 Ανάλυση προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 3]	61
4.3.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 3].....	64
4.3.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 3].....	65
4.4 Ανάλυση προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 4]	67
4.4.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 4].....	70
4.4.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 4].....	71
5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	73
5.1 Ανάλυση προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 1]	73
5.1.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 1].....	76
5.1.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 1].....	77
5.2 Ανάλυση προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 2]	79
5.2.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 2].....	82
5.2.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 2].....	83
5.3 Ανάλυση προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 3]	85
5.3.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 3].....	88
5.3.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 3].....	89
5.4 Ανάλυση προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 4]	91
5.4.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 4].....	94
5.4.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 4].....	95

6.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο	97
	6.1 <i>Συγκεντρωτικά συμπεράσματα/αποτελέσματα αναλύσεων όλων των σεναρίων για παραβολοειδή βράχο</i>	97
	6.1.1 <i>Δυνάμεις αντίδρασης σεναρίων</i>	98
	6.1.2 <i>Κατακόρυφες Μετατοπίσεις σεναρίων</i>	100
	6.2 <i>Συγκεντρωτικά συμπεράσματα/αποτελέσματα αναλύσεων όλων των σεναρίων για κωνικό βράχο</i>	101
	6.2.1 <i>Δυνάμεις αντίδρασης σεναρίων</i>	102
	6.2.2 <i>Κατακόρυφες Μετατοπίσεις σεναρίων</i>	103
	6.3 <i>Σύγκριση παραβολοειδούς και κωνικού βράχου</i>	104
7.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο	105
	7.1. <i>Διατύπωση προβλήματος ισορροπίας πλοίου</i>	105
	7.2. <i>Μέθοδος εύρεσης θέσης ισορροπίας</i>	106
	7.3. <i>Υδροστατικοί υπολογισμοί</i>	109
	7.4. <i>Εφαρμογή μεθόδου και αποτελέσματα</i>	113
8.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο	118
	8.1 <i>Γενικά συμπεράσματα</i>	118
	8.2 <i>Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση</i>	119
9.	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	120

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

<i>Εικόνα 1-1</i> : Νέος κανονισμός για ΔΕ/Π απο τον IMO.....	11
<i>Εικόνα 1-2</i> : Σύγκριση ΔΕ/Π μονού, διπλού τοιχώματος και ενδιάμεσου καταστρώματος.....	12
<i>Εικόνα 1-3</i> : Πείραμα από σχίσμο πλάκας (αριστερά) και ένα αναλυτικό μοντέλο της διαδικασίας σχίσματος (δεξιά) (Zhang, 2002, σελ. 103).....	14
<i>Εικόνα 1-4</i> : Σκαρίφημα της μετακινούμενης ζώνης παραμόρφωσης σε πείραμα σχάση ελάσματος πυθμένα (Simonsen, 1997b, σελ. 523).....	14
<i>Εικόνα 1-5</i> : Σχηματική απεικόνιση πειραμάτων (Ζηλάκος 2008).....	18
<i>Εικόνα 1-6</i> : Πειραματική διάταξη : (a) σχηματική απεικόνιση (b) φωτογραφία της διάταξης (Ζηλάκος 2008).....	18
<i>Εικόνα 1-7</i> : Πειραματική διάταξη δοκιμών προσάραξης που διεξήχθησαν από το NSWC στα HI-Test Laboratories, Virginia, USA.....	19
<i>Εικόνα 2-1</i> : Παράδειγμα διακριτοποίησης μιας πλατφόρμας με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων.....	24
<i>Εικόνα 3-1</i> : Σχέδιο γενικής διάταξης του, προς μοντελοποίηση, πλοίου.....	35
<i>Εικόνα 3-2</i> : Σχέδιο μέσης τομής του, προς μοντελοποίηση, πλοίου.....	36
<i>Εικόνα 3-3</i> : Μοντελοποίηση τμήματος της μέσης τομής του πλοίου μήκους 16 μέτρων.....	37
<i>Εικόνα 3-4</i> : Πλέγμα στοιχείων μοντέλου.....	39
<i>Εικόνα 3-5</i> : Πλέγμα στην περιοχή σύγκρουσης.....	39
<i>Εικόνα 3-6</i> : Τμήματα μετάβασης απο πυκνό πλέγμα, σε αραιό.....	39
<i>Εικόνα 3-7</i> : Μοντέλου βράχου – κωνικό εμπόδιο (Samuelides et al, 2007)	40
<i>Εικόνα 3-8</i> : Σκαρίφημα του πρώτου βράχου που μοντελοποιήθηκε – κωνικό εμπόδιο.....	40
<i>Εικόνα 3-9</i> : Σκαρίφημα του δεύτερου βράχου που μοντελοποιήθηκε – παραβολοειδές εμπόδιο.....	41
<i>Εικόνα 3-10</i> : Τρισδιάστατες απεικονίσεις των βράχων μετά τη σχεδίαση τους στο ABAQUS/CAE.....	41
<i>Εικόνα 3-11</i> : Πλέγμα στοιχείων βράχων.....	42
<i>Εικόνα 3-12</i> : Μοντέλοποίηση του διπύθμενου για προσομοιώσεις διαφορετικών ταχυτήτων διείσδυσης.....	45
<i>Εικόνα 3-13</i> : Απόκριση διπυθμένου σε προσομοίωση προσάραξης.....	45
<i>Εικόνα 3-14</i> : Απόκριση διπυθμένου σε προσομοίωση προσάραξης.....	46
<i>Εικόνα 3-15</i> : Σενάρια ανάλυσης προσάραξης.....	48
<i>Εικόνα 4-1</i> : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.....	49
<i>Εικόνα 4-2</i> : Απεικόνιση Σεναρίου 1 με κωνικό βράχο.....	50
<i>Εικόνα 4-3</i> : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.....	50
<i>Εικόνα 4-4</i> : Ρήγμα ελάσματος εσωτερικού πυθμένα.....	51
<i>Εικόνα 4-5</i> : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.....	51
<i>Εικόνα 4-6</i> : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	53
<i>Εικόνα 4-7</i> : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	53
<i>Εικόνα 4-8</i> : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.....	55
<i>Εικόνα 4-9</i> : Απεικόνιση Σεναρίου 2 με κωνικό βράχο.....	56
<i>Εικόνα 4-10</i> : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.....	56
<i>Εικόνα 4-11</i> : Ρήγμα ελάσματος εσωτερικού πυθμένα.....	57

<i>Εικόνα 4-12</i> : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.....	57
<i>Εικόνα 4-13</i> : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	59
<i>Εικόνα 4-14</i> : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	59
<i>Εικόνα 4-15</i> : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.....	61
<i>Εικόνα 4-16</i> : Απεικόνιση Σεναρίου 3 με κωνικό βράχο.....	62
<i>Εικόνα 4-17</i> : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.....	62
<i>Εικόνα 4-18</i> : Ρήγμα ελάσματος εσωτερικού πυθμένα.....	63
<i>Εικόνα 4-19</i> : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.....	63
<i>Εικόνα 4-20</i> : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	65
<i>Εικόνα 4-21</i> : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	65
<i>Εικόνα 4-22</i> : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.....	67
<i>Εικόνα 4-23</i> : Απεικόνιση Σεναρίου 4 με κωνικό βράχο.....	68
<i>Εικόνα 4-24</i> : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.....	68
<i>Εικόνα 4-25</i> : Τοπική αστοχία ελάσματος νομέα.....	69
<i>Εικόνα 4-26</i> : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.....	69
<i>Εικόνα 4-27</i> : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	71
<i>Εικόνα 4-28</i> : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	71
<i>Εικόνα 5-1</i> : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.....	73
<i>Εικόνα 5-2</i> : Απεικόνιση Σεναρίου 1 με παραβολοειδή βράχο.....	74
<i>Εικόνα 5-3</i> : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.....	74
<i>Εικόνα 5-4</i> : Απόκριση εσωτερικού πυθμένα.....	75
<i>Εικόνα 5-5</i> : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.....	75
<i>Εικόνα 5-6</i> : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	77
<i>Εικόνα 5-7</i> : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	77
<i>Εικόνα 5-8</i> : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.....	79
<i>Εικόνα 5-9</i> : Απεικόνιση Σεναρίου 2 με παραβολοειδή βράχο.....	80
<i>Εικόνα 5-10</i> : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.....	80
<i>Εικόνα 5-11</i> : Απόκριση εσωτερικού πυθμένα.....	81
<i>Εικόνα 5-12</i> : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.....	81
<i>Εικόνα 5-13</i> : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	83
<i>Εικόνα 5-14</i> : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	83
<i>Εικόνα 5-15</i> : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.....	85
<i>Εικόνα 5-16</i> : Απεικόνιση Σεναρίου 3 με παραβολοειδή βράχο.....	86
<i>Εικόνα 5-17</i> : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.....	86

<i>Εικόνα 5-18</i> : Απόκριση εσωτερικού πυθμένα.....	87
<i>Εικόνα 5-19</i> : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.....	87
<i>Εικόνα 5-20</i> : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	89
<i>Εικόνα 5-21</i> : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	89
<i>Εικόνα 5-22</i> : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.....	91
<i>Εικόνα 5-23</i> : Απεικόνιση Σεναρίου 4 με παραβολοειδή βράχο.....	92
<i>Εικόνα 5-24</i> : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.....	92
<i>Εικόνα 5-25</i> : Απόκριση εσωτερικού πυθμένα.....	93
<i>Εικόνα 5-26</i> : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.....	93
<i>Εικόνα 5-27</i> : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	95
<i>Εικόνα 5-28</i> : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.....	95
<i>Εικόνα 6-1</i> : Απεικόνιση όλων των σεναρίων για παραβολοειδή	97
<i>Εικόνα 6-2</i> : Απεικόνιση όλων των σεναρίων για κωνικό βράχο.....	101
<i>Εικόνα 7-1</i> : Πρόβλημα προσάραξης και ισορροπίας πλοίου. Χρονική στιγμή πρώτης επαφής με τον θαλάσσιο πυθμένα.....	106
<i>Εικόνα 7-2</i> : Ναυπηγικές γραμμές του υπο μελέτη πλοίου μετά τη σχεδίαση και επεξεργασία τους στο πρόγραμμα TRIBON AVEVA / LINES.....	110
<i>Εικόνα 7-3</i> : : Επιφάνεια γάστρας του υπό μελέτη πλοίου μετα τη σχεδίαση της στο πρόγραμμα TRIBON AVEVA / SURFACE & COMPARTMENT.....	110

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

<i>Πίνακας 3-1</i> : Επιλογή παραμέτρων για τον τύπο κρίσιμης πλαστικής παραμόρφωσης κατα των Lechmann & Peschmann.....	44
<i>Πίνακας 4-1</i> : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.....	49
<i>Πίνακας 4-2</i> : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.....	55
<i>Πίνακας 4-3</i> : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.....	61
<i>Πίνακας 4-4</i> : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.....	67
<i>Πίνακας 5-1</i> : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.....	73
<i>Πίνακας 5-2</i> : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.....	79
<i>Πίνακας 5-3</i> : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.....	85
<i>Πίνακας 5-4</i> : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.....	91
<i>Πίνακας 7-1</i> : Υδροστατικά στοιχεία του πλοίου στο βύθισμα σχεδίασης με μηδενική διαγωγή.....	111
<i>Πίνακας 7-2</i> : Υδροστατικοί υπολογισμοί για έμπρυμη διαγωγή 0.65 m.....	112
<i>Πίνακας 7-3</i> : : Αποτελέσματα επαναληπτικής μεθόδου. Θέσεις ισορροπίας πλοίου.....	114

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

<i>Διάγραμμα 1-1</i> : Ατυχήματα πλοίων κατά εκατοντάδες ανα έτος (Ζηλάκος, 2008).....	10
<i>Διάγραμμα 1-2</i> : Τοποθεσία συγκρούσεων-προσαράξεων (Samuelides, 1999).....	10
<i>Διάγραμμα 1-3</i> : Δείγμα δεδομένων απο το πρόγραμμα του IMO, “HARDER”	12

<i>Διάγραμμα 1-4</i> : Δυναμικό όριο διαρροής ως προς το ρυθμό παραμόρφωσης για χάλυβες.....	16
<i>Διάγραμμα 2-1</i> : Δομή του εμπορικού πακέτου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ABAQUS	31
<i>Διάγραμμα 3-1</i> : Καμπύλη σ - ϵ ναυπηγικού χάλυβα S235JR EN10025 (Alsos et al, 2008).....	43
<i>Διάγραμμα 3-2</i> : Καμπύλες δύναμης αντίδρασης-διείσδυσης για ταχύτητες 1m/s και 10m/s σε μοντέλο διπύθμενου δεξαμενόπλοιου.....	46
<i>Διάγραμμα 4-1</i> : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.....	52
<i>Διάγραμμα 4-2</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.....	54
<i>Διάγραμμα 4-3</i> : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.....	58
<i>Διάγραμμα 4-4</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.....	60
<i>Διάγραμμα 4-5</i> : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.....	64
<i>Διάγραμμα 4-6</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.....	66
<i>Διάγραμμα 4-7</i> : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.....	70
<i>Διάγραμμα 4-8</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.....	72
<i>Διάγραμμα 5-1</i> : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.....	76
<i>Διάγραμμα 5-2</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.....	78
<i>Διάγραμμα 5-3</i> : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.....	82
<i>Διάγραμμα 5-4</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.....	83
<i>Διάγραμμα 5-5</i> : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.....	88
<i>Διάγραμμα 5-6</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.....	90
<i>Διάγραμμα 5-7</i> : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.....	94
<i>Διάγραμμα 5-8</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.....	96
<i>Διάγραμμα 6-1</i> : Κατακόρυφες δυνάμεις αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου για τα τέσσερα σενάρια προσάραξης.....	98
<i>Διάγραμμα 6-2</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος για τα τέσσερα σενάρια προσάραξης.....	100
<i>Διάγραμμα 6-3</i> : Κατακόρυφες δυνάμεις αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου για τα τέσσερα σενάρια προσάραξης.....	102
<i>Διάγραμμα 6-4</i> : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος για τα τέσσερα σενάρια προσάραξης.....	103
<i>Διάγραμμα 7-1</i> : <i>Διάγραμμα 7-1</i> : Σχηματική απεικόνιση επαναληπτικής μεθόδου.....	108
<i>Διάγραμμα 7-2</i> : Μεταβολή του εκτοπίσματος του πλοίου όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται.....	115
<i>Διάγραμμα 7-3</i> : Μεταβολή του μέσου βυθίσματος του πλοίου όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται.....	115
<i>Διάγραμμα 7-4</i> : Μεταβολή της διαγωγής του πλοίου όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται.....	116
<i>Διάγραμμα 7-5</i> : Διείσδυση του βράχου στο πλοίο όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται.....	116
<i>Διάγραμμα 7-6</i> : Φόρτιση του πλοίου απο το θαλάσσιο πυθμένα και θέσεις ισορροπίας.....	117

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

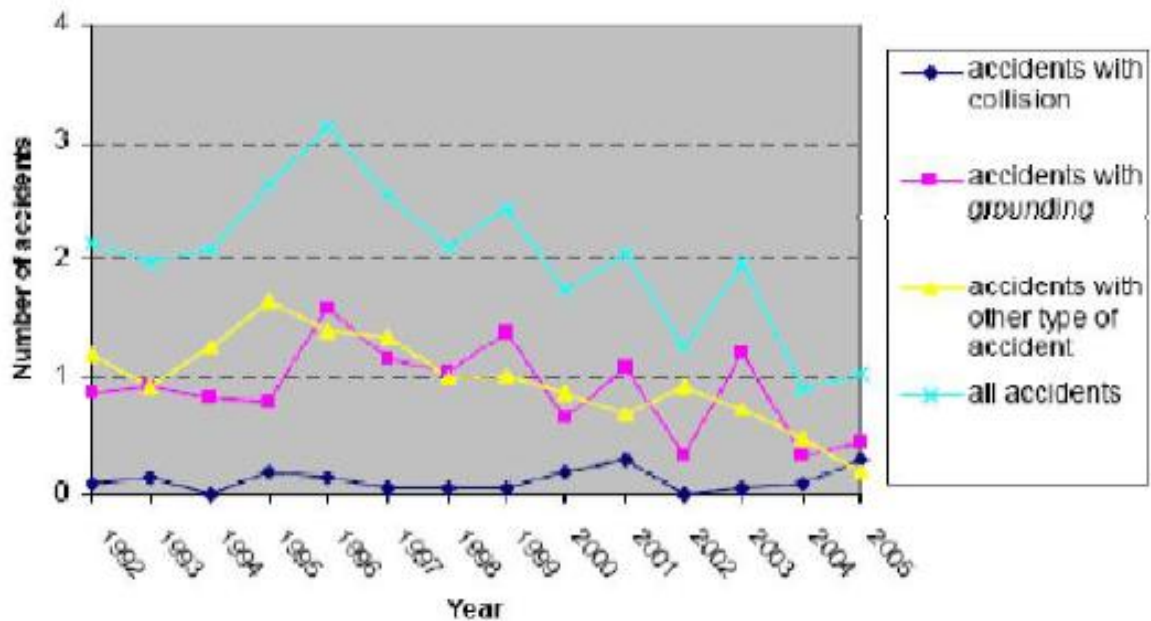
1.1. Εισαγωγή

Οι προσαράξεις και οι συγκρούσεις έχουν, μεταξύ των θαλασσιών ατυχημάτων, τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης καθώς και πρόκλησης υλικών και περιβαλλοντικών ζημιών. Ένα παράδειγμα στα ελληνικά χωρικά ύδατα είναι το ατύχημα του Ε/Γ-Ο/Γ “Express Samina” που οδήγησε στην τραγική απώλεια ογδόντα δύο ανθρώπων και τη βύθιση του πλοίου, το Σεπτέμβριο του 2000. Το πιο σύνηθες αποτέλεσμα μίας προσάραξης, ωστόσο, είναι η έκχυση πετρελαίου στη θάλασσα με παραδείγματα, το πετρελαιοφόρο “Sea Empress” ,απο το οποίο χύθηκαν 65,000 τόνοι ακατέργαστου πετρελαίου στη θαλάσσια περιοχή της Ουαλίας το 1996, και το πετρελαιοφόρο “Eckon Valdez” στην περιοχή της Αλάσκας τον Μάρτιο του 1989. Ακόμα πλήθος ατυχημάτων έχουν συμβεί στις νορβηγικές ακτές και έχουν προκαλέσει δημόσια ανησυχία. Το φθινόπωρο του 2000 το φορτηγό πλοίο “John R” κόπηκε στα δύο λόγω προσάραξης και οι ευνοϊκές καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν, ήταν η αιτία που η περιβαλλοντική καταστροφή δεν πήρε τεράστιες διαστάσεις (Alsos et al, 2007).

Ο σχεδιασμός των συμβατικών πλοίων στοχεύει στη δημιουργία μιας κατασκευής που θα διαθέτει ικανά υψηλότερη αντοχή απο την ελάχιστη απαιτούμενη, ώστε να αποφευχθεί κατασκευαστική αστοχία απο λειτουργικά ή/και άλλα φορτία. Φορτίσεις που προκαλούνται απο ατυχήματα δε λαμβάνονται υπ’ όψιν στο σχεδιασμό συμβατικών πλοίων, με εξαίρεση εκείνων που ενεργούν ως αποτέλεσμα εισαγωγής υδάτων, σύμφωνα με τις υποθέσεις που γίνονται απο τους κανονισμούς του IMO (Ζηλάκος, 2008).

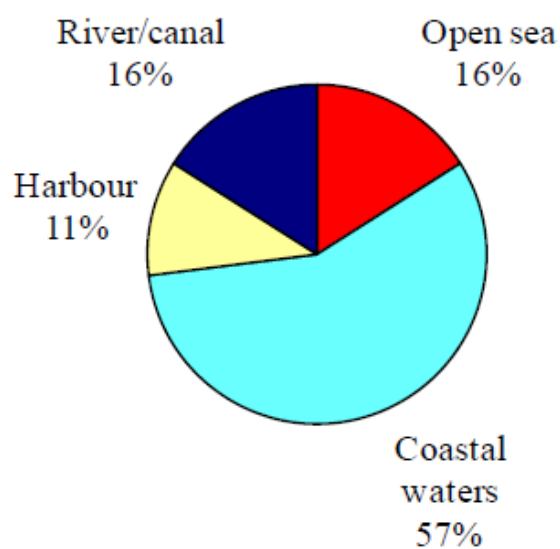
Παρόλα αυτά, όπως ήδη αναφέρθηκε, ατυχήματα που προκαλούνται απο επαφή δύο πλοίων και άλλων πλωτών ή αγκυρωμένων κατασκευών (π.χ. προσκρούσεις) ή και με το θαλάσσιο πυθμένα (π.χ. προσαράξεις), μπορούν να προκαλέσουν μεγάλο ενδιαφέρον, όσον αφορά την ασφάλεια των κατασκευών και το θαλάσσιο περιβάλλον. Και το ενδιαφέρον αυτο μεγαλώνει, για πλοία που μεταφέρουν ανθρώπους ή επικίνδυνα φορτία.

Συγκριτικές μελέτες που διεξήχθησαν με βάσεις δεδομένων ατυχημάτων, του LR, DNV, Υπ. Εμπ. Ν. και άλλων φορέων, από τη σχολή Ν.Μ.Μ. του Ε.Μ.Π. και παρουσιάστηκαν στο τέταρτο παγκόσμιο Συνέδριο της ASRANet τον Ιούνιο του 2008 στην Αθήνα, δεικνύουν ξεκάθαρα τη βαρύτητα και τη συχνότητα των προσαράξεων έναντι άλλων ατυχημάτων. Η μελέτη αυτή περιελάμβανε πλοία άνω των 100 GT, με ελληνική σημαία, από το έτος 1992 μέχρι το 2005. Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της μελέτης, που τονίζουν τη σημασία της διεξοδικότερης διερεύνησης του φαινομένου της προσάραξης, είναι η συχνότητα εμφάνισής της. Οι προσαράξεις ή ατυχήματα που οδήγησαν σε προσάραξη αποτελούν το 45% των συνολικών αναφερθέντων θαλάσσιων ατυχημάτων. Αναλυτικότερα ποσοστά παρατίθενται στο Διάγραμμα 1-1 (Ζηλάκος, 2008).



Διάγραμμα 1-1 : Ατυχήματα πλοίων κατά εκατοντάδες ανα έτος (Ζηλάκος, 2008).

Επιπλέον στο Διάγραμμα 1-2, στο οποίο φαίνεται το ποσοστό προσάραξης ή σύγκρουσης πλοίων ανα περιοχή, παρατηρείται ότι το πιο πιθανό φαινόμενο είναι να υπάρξει ατύχημα σε παράκτιες περιοχές, με αποτέλεσμα οι καταστροφές να είναι ανυπολόγιστες.



Διάγραμμα 1-2 : Τοποθεσία συγκρούσεων-προσαράξεων (Samuelides, 1999).

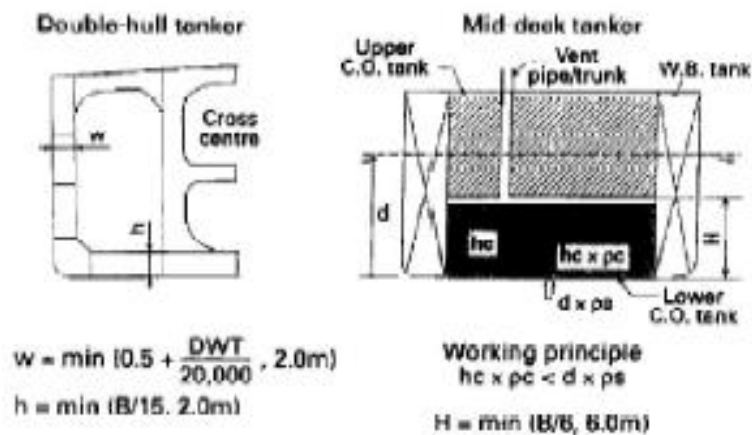
Έτσι προκειμένου να μειωθούν οι συνέπειες από συγκρούσεις και προσaráξεις πλοίων, οι σχεδιαστές έχουν προτείνει σχεδιαστικές τροποποιήσεις, που έχουν δείξει σχετικά βελτιωμένη συμπεριφορά των πλοίων, (Εικόνα 1-2), κατά τη διάρκεια τέτοιων συμβάντων, (Ohtsubo et al, 1994). Με τη σειρά τους οι αρχές έχουν εκδώσει κανόνες και οδηγίες, που καθορίζουν τις απαιτήσεις, που μια κατασκευή πρέπει να πληρεί, προκειμένου να μειώσει τη διακινδύνευση, όταν αναμιχθεί σε τέτοια συμβάντα. Οι παρακάτω κανονισμοί εφαρμόστηκαν προκειμένου να αποφευχθεί η ρύπανση από έκχυση πετρελαίου σε δεξαμενόπλοια (Ζηλάκος, 2008):

1971 περιορισμός στο μέγεθος των δεξαμενών

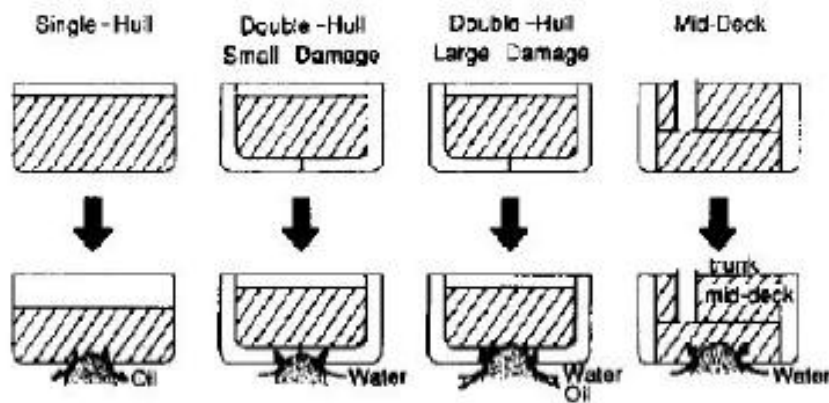
1973 ξεχωριστές δεξαμενές έρματος, αποκλειστικά για τη χρήση αυτή

1978 προστατευμένες θέσεις αυτών των δεξαμενών

Μετά το ατύχημα του Exxon Valdez νέοι κανονισμοί εφαρμόστηκαν στα δεξαμενόπλοια, οι οποίοι εκδόθηκαν από το Αμερικάνικο Κογκρέσο (OPA) και στη συνέχεια τον IMO, προκειμένου να μειωθεί η μόλυνση. Βάσει των κανονισμών αυτών, τα νέα δεξαμενόπλοια πρέπει να διαθέτουν διπλά τοιχώματα ή ενδιάμεσο κατάστρωμα όπως φαίνεται και στα παρακάτω σχέδια:

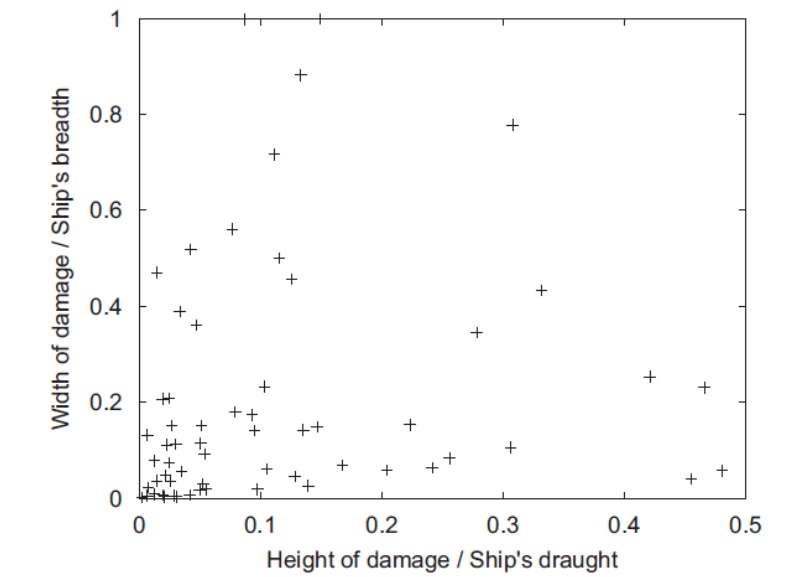


Εικόνα 1-1: Κανονισμός για ΔΕ/Π απο τον IMO.



Εικόνα 1-2: Σύγκριση ΔΕ/Π μονού, διπλού τοιχώματος και ενδιάμεσου καταστρώματος.

Πάνω στην έρευνα των προσαράξεων στη συνέχεια, ο IMO ξεκίνησε ένα πρόγραμμα το 2000 που ολοκληρώθηκε τον Μάιο του 2003 με την ονομασία “HARDER”. Σκοπός αυτού του προγράμματος ήταν, να αναπτύξει μια γενική ιδέα πιθανοθεωρητικής ευστάθειας πλοίων μετά απο βλάβη. Έτσι δημιουργήθηκε μία βάση δεδομένων με συγκρούσεις και προσαράξεις. Τα δεδομένα αυτά επεξεργάστηκαν στατιστικά, στη συνέχεια, και κατέληξαν σε διάφορα σενάρια σύγκρουσης-προσαράξης και γεωμετρίας βλάβης. (Lützen et al. 2003). Μία ενδιαφέρουσα απεικόνιση, φαίνεται στο Διάγραμμα 1-3.



Διάγραμμα 1-3 : Δείγμα δεδομένων απο το πρόγραμμα του IMO, “HARDER” .

Αν και τα σημεία του διαγράμματος είναι διασκορπισμένα, μπορούν να προκύψουν συμπεράσματα. Όταν οι παραμορφώσεις εμφανίζονται βαθιά μέσα στη γάστρα του πλοίου, οι κατασκευαστικές αστοχίες είναι πιθανά τοπικές. Αντίθετα, όταν μεγάλη έκταση του πλάτους του πλοίου παθαίνει ζημιά, η εισχώρηση του θαλάσσιου πυθμένα είναι μικρή. Με άλλα λόγια, οι κατασκευαστικές αστοχίες ενός προσαραγμένου πλοίου, σχετίζονται άμεσα από το μέγεθος και το σχήμα του θαλάσσιου πυθμένα.

1.2. Σενάρια Προσάραξης

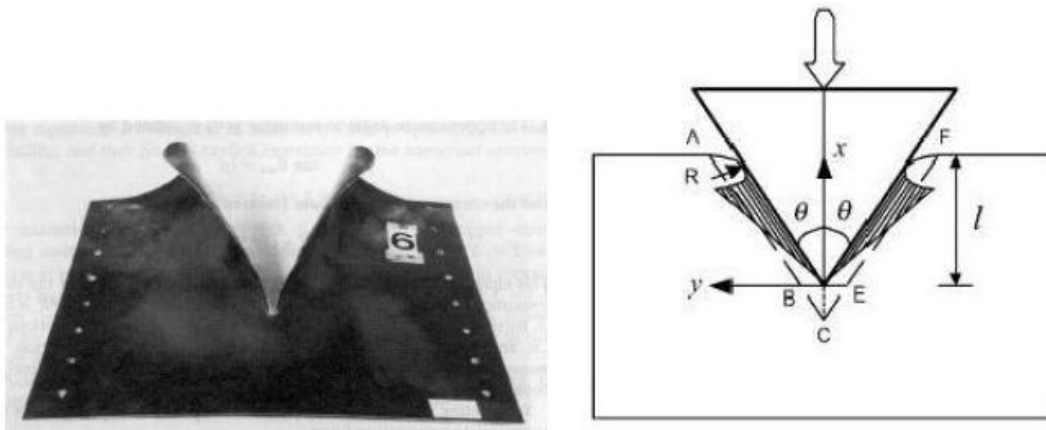
Οι παράμετροι που καθορίζουν ένα σενάριο προσάραξης είναι η ταχύτητα του πλοίου, η κατάσταση φόρτωσης, το βύθισμα και η διαγωγή, το βάθος του νερού καθώς και το φαινόμενο της παλίρροιας. Περαιτέρω, η προσάραξη μπορεί να αναλυθεί σε τρεις κατηγορίες.

- Η πρώτη περιέχει καταστάσεις όπου το πλοίο έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα, με τέτοιο τρόπο ώστε να ασκούνται κυρίως κατακόρυφες δυνάμεις στον πυθμένα του (stranding).
- Στη δεύτερη κατηγορία, το πλοίο κινείται πάνω σε προεξέχοντα βράχια διανύοντας κάποια απόσταση μέχρι να σταματήσει (raking). Οι δυνάμεις αντίδρασης από τα βράχια έχουν κυρίως, σε αυτή την περίπτωση, διεύθυνση, τη διαμήκη διεύθυνση του πλοίου.
- Τέλος στην τρίτη κατηγορία προσάραξης το πλοίο έρχεται σε επαφή με επικλινή θαλάσσιο πυθμένα και αναλύεται σε δύο φάσεις (grounding on a slopping sea floor). Αρχικά το πλοίο δέχεται μια απότομη φόρτιση λόγω της αιφνίδιας επαφής του με το έδαφος, ενώ μετέπειτα το πλοίο ολισθαίνει, έχοντας συνεχώς επαφή με τον επικλινή θαλάσσιο πυθμένα (ISSC Committee, 2003).

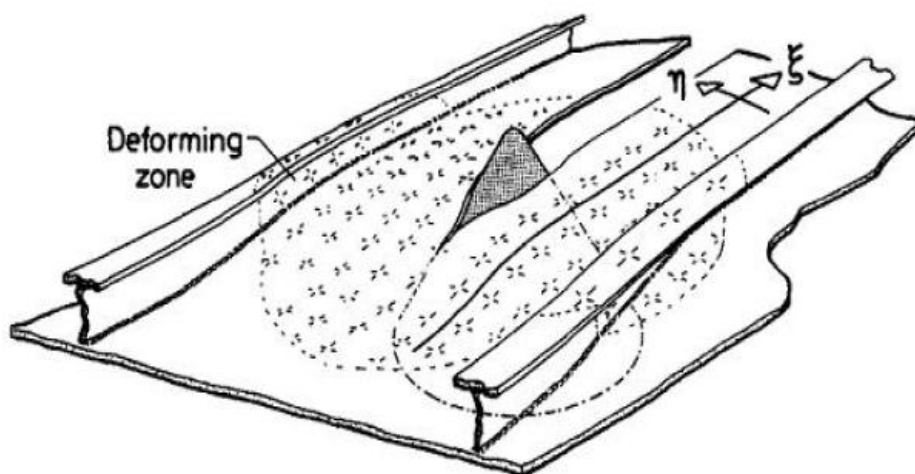
Τα εμπορικά πλοία πλέουν κυρίως σε ταχύτητα υπηρεσίας ή ταχύτητα ελιγμών. Η ταχύτητα προσάραξης της δεύτερης κατηγορίας (raking) είναι πολύ πιθανόν να βρίσκεται ανάμεσα σε αυτές τις δύο ταχύτητες (Rawson *et al* 1998). Για αυτήν την κατηγορία προσάραξης, ο βράχος μπορεί να προσομοιωθεί ως σφήνα, η οποία χαρακτηρίζεται από τις γωνίες ανοίγματος και κλίσης καθώς και την ακτίνα της κορυφής της (Ζηλάκος, 2008).

Εάν ένα πλοίο έχει προσαράξει εξαιτίας της παλίρροιας, η συνεχής μείωση της άνωσης, καθώς το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται, οδηγεί σε περαιτέρω φόρτιση της κατασκευής και μεγαλύτερης έκτασης ζημιά στο πλοίο λόγω της αύξησης των διαμηκών καμπτικών ροπών και διατμητικών δυνάμεων.

Στην πρώτη κατηγορία προσάραξης, τα υποθαλάσσια εμπόδια συχνά μοντελοποιούνται ως άκαμπτοι κώνοι (βλ.Εικόνα 1-3), των οποίων τα χαρακτηριστικά είναι η γωνία ανοίγματος και η ακτίνα της κορυφής (Ζηλάκος, 2008). Οι Wang *et al* (2000) παρουσίασαν ότι το σχήμα του εμποδίου έχει σημαντική επίδραση στη ζημιά που προκαλείται στο πλοίο. Οι Ravn *et al* (2001) ανέλυσαν τις προσαράξεις ταχύπλοων μονόγαστρων και δίγαστρων πλοίων χρησιμοποιώντας λύσεις κλειστής μορφής, συμπεριλαμβάνοντας και φαινόμενα της σχάσης του πυθμένα (rupture) (βλ.Εικόνα 1-4).



Εικόνα 1-3 : Πείραμα από σχίσσιμο πλάκας (αριστερά) και ένα αναλυτικό μοντέλο της διαδικασίας σχισίματος (δεξιά) (Zhang, 2002, σελ. 103).



Εικόνα 1-4 :Σκαρίφημα της μετακινούμενης ζώνης παραμόρφωσης σε πείραμα σχάσης ελάσματος πυθμένα (Simonsen, 1997b, σελ. 523).

Στη τελευταία κατηγορία προσάραξης, ένα μέρος της κινητικής ενέργειας, που δεν έχει εκτονωθεί μέχρι το τέλος της προαναφερθείσας πρώτης φάσης, γίνεται δυναμική ενέργεια και ένα άλλο μέρος διαμοιράζεται σε τριβή και παραμόρφωση. Ο θαλάσσιος πυθμένας μπορεί να μοντελοποιηθεί ως επικλινές επίπεδο. Η αλληλεπίδραση πυθμένα πλοίου μπορεί να χαρακτηριστεί από ένα συντελεστή τριβής και ένα συντελεστής διαπερατότητας αμμώδους ή βραχώδους εδάφους (Pedersen 1994, Simonsen & Pedersen 1995, Sterndorff & Pedersen 1996, Simonsen 1997).

1.3. Εξωτερική Μηχανική Προσαράξεων

Η μηχανική της προσάραξης μελετάται διακρίνοντάς την σε δύο μέρη:

- Εξωτερική (Grounding Mechanics) και
- Εσωτερική μηχανική (Internal Mechanics).

Η εξωτερική μηχανική μελετά την κίνηση του πλοίου ως στερεό σώμα, υπό την επίδραση των φορτίων προσάραξης και των υδροδυναμικών πιέσεων της βρεχόμενης επιφάνειας, χωρίς να λαμβάνονται υπόψιν οι παραμορφώσεις της κατασκευής.

Οι υδροδυναμικές πιέσεις μπορούν να αναλυθούν σε αδρανειακές δυνάμεις (πρόσθετη μάζα), δυνάμεις επαναφοράς (άντωση-βαρύτητα), δυνάμεις συνεκτικότητας και δυνάμεις κυματισμού (Petersen 1982, Pedersen 1995, Suzuki *et al* 2000, Le Sourne *et al* 2001).

1.4. Εσωτερική Μηχανική Προσαράξεων

Η εσωτερική μηχανική προσάραξης περιλαμβάνει την εκτίμηση της απόκρισης του εμπλεκόμενου πλοίου και είναι αρκετά περίπλοκη. Οι παραμορφώσεις είναι αρκετά μεγαλύτερες των παχών των κατασκευαστικών στοιχείων και μεγάλο μέρος της ενέργειας διοχετεύεται σε ανελαστική παραμόρφωση, η οποία εμφανίζεται τοπικά σε ορισμένα τμήματα.

Τα τμήματα της κατασκευής που δέχονται σε αξονική διεύθυνση κρουστική φόρτιση απορροφούν λιγότερη ενέργεια ανά μονάδα όγκου. Η σχάση είναι μορφή αστοχίας που σχετίζεται με πολύ μικρό διαμοιρασμό της ενέργειας, διότι έχει τοπικό χαρακτήρα. Η έναρξη και η διάδοση της αστοχίας είναι τοπικό φαινόμενο, που επηρεάζεται και από τοπικούς παράγοντες, όπως συγκολλήσεις, αρχικές ατέλειες ή ρωγμές.

Υπάρχουν δύο παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν, από δυναμικής πλευράς κατά τη μελέτη τέτοιων φαινομένων :

- Η επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων και
- Ο ρυθμός παραμόρφωσης.

Η επίδραση των αδρανειακών δυνάμεων μπορεί να χωρισθεί επιπλέον σε δύο κατηγορίες, αυτή των κρουστικών φορτίων και αυτή των γρήγορα επιβαλλόμενων φορτίων. Όσον αφορά τη πρώτη, η εξέλιξη του τασικού κύματος πρέπει να ληφθεί υπ' όψη, καθώς κάθε χρονική στιγμή η κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων είναι ανομοιογενής (Jones 1997, Paik & Thayamballi 2002). Στα περισσότερα συμβάντα προσάραξης, η φόρτιση επιβάλλεται σχετικά αργά, έτσι ώστε ο χρόνος που απαιτείται για την επίτευξη του κρίσιμου φορτίου είναι πολύ μεγαλύτερος από το χρόνο που απαιτεί το τασικό κύμα να διανύσει την απόσταση μεταξύ των δύο άκρων ενός τμήματος της κατασκευής, και η φόρτιση της κατασκευής μπορεί να θεωρηθεί στατική.

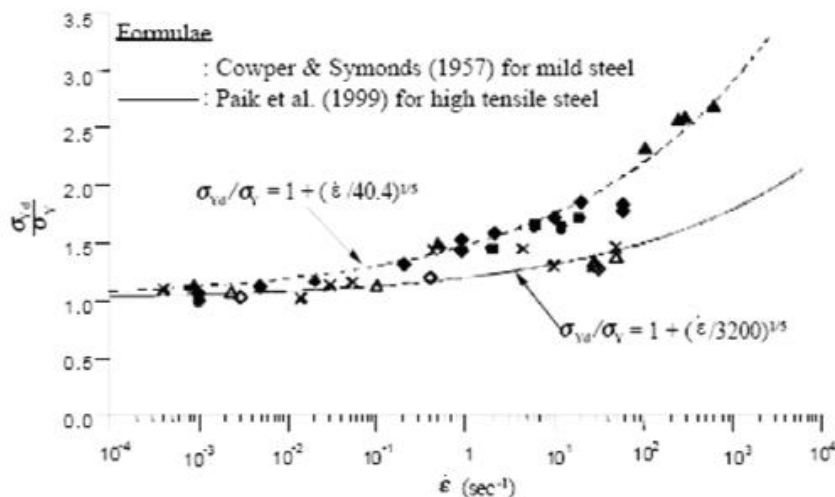
Μία άλλη σημαντική δυναμική παράμετρος είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης. Με αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης, το όριο διαρροής του υλικού αυξάνεται, ενώ η ολκιμότητα μειώνεται. Η πιο κοινά αποδεκτή σχέση που σχετίζεται με την ευαισθησία του ορίου διαρροής έναντι του

ρυθμού παραμόρφωσης είναι αυτή που προτάθηκε από τους Cowper & Symonds (1957), και παρατίθεται κάτωθι:

$$\frac{\sigma_{Yd}}{\sigma_Y} = 1.0 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{1/q}$$

όπου C, q είναι συντελεστές που προσδιορίζονται πειραματικά, σ_Y , σ_{Yd} στατικό και δυναμικό όριο διαρροής και $\dot{\epsilon}$ είναι ο ρυθμός παραμόρφωσης

Στο Διάγραμμα 1-4 παρουσιάζεται η καμπύλη που προκύπτει από τον τύπο των Cowper-Symonds μαζί με τους αντίστοιχους συντελεστές για κοινό και υψηλής αντοχής χάλυβα. Από το παρακάτω διάγραμμα φαίνεται επίσης ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός παραμόρφωσης, τόσο αυξάνεται και το δυναμικό όριο διαρροής. Έχει βρεθεί επίσης ότι για χάλυβες υψηλής αντοχής το ποσοστό αύξησης του λόγου δυναμικού προς στατικού ορίου διαρροής είναι μικρότερο από εκείνο του κοινού ναυπηγικού χάλυβα.



Διάγραμμα 1-4 : Δυναμικό όριο διαρροής, σ_{Yd} (κανονικοποιημένο ως προς το στατικό όριο διαρροής, σ_Y) ως προς το ρυθμό παραμόρφωσης, $\dot{\epsilon}$, για κοινούς και υψηλής αντοχής χάλυβες (Paik & Thayamaballi 2002).

Οι επιδράσεις της κρούσης και η αντοχή σε διαρροή αυξάνονται καθώς η επιβολή της φόρτισης γίνεται γρηγορότερα. Αντίθετα οι αστοχίες ή η σχάση του χάλυβα (και των συγκολλήσεων) της κατασκευής τείνουν να συμβούν νωρίτερα (ISSC Committee, 2003). Ο παρακάτω προσεγγιστικός τύπος, που είναι η αντιστροφή του τύπου των Cowper-Symonds για το δυναμικό όριο διαρροής, είναι αρκετά χρήσιμος για την εκτίμηση της τιμής της δυναμικής παραμόρφωσης θραύσης ως συνάρτηση του ρυθμού παραμόρφωσης (Jones 1989):

$$\frac{\varepsilon_{Fd}}{\varepsilon_F} = \left[1.0 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/q} \right]^{-1}$$

όπου ε_F , ε_{Fd} είναι η στατική και δυναμική παραμόρφωση θραύσης.

1.5. Μεθοδολογίες και Εργαλεία για μη γραμμική ανάλυση κατασκευών

Οι παρακάτω μεθοδολογίες χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μη γραμμική ανάλυση κατασκευών, κάθε μια από τις οποίες διαθέτει τα δικά της μειονεκτήματα και πλεονεκτήματα, (J.K.Paik,2008) :

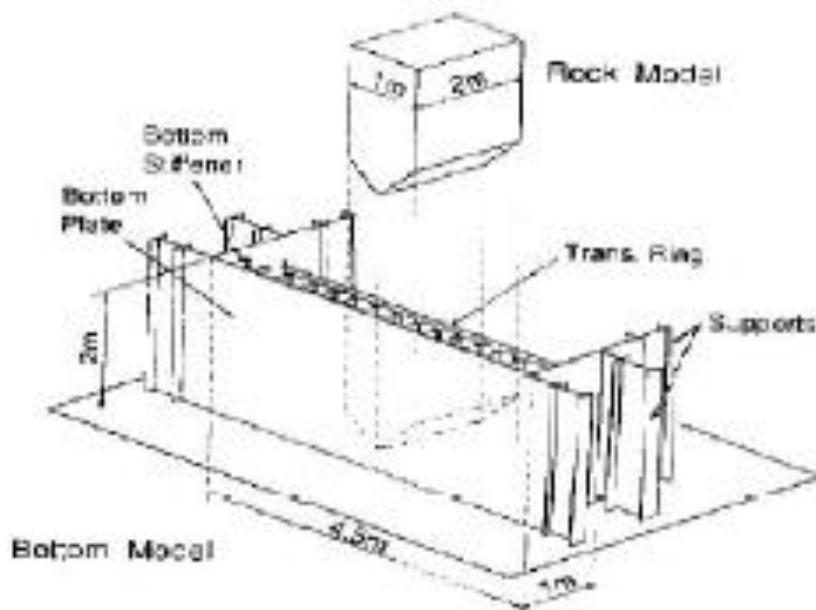
- Αναλυτικές μέθοδοι
- Αριθμητικές μέθοδοι
- Πειραματικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές λύσεις, οι οποίες προκύπτουν συνήθως από την απευθείας επίλυση μη γραμμικών συστημάτων, είναι καταλληλότερες για τη δημιουργία κανονισμών, γιατί εξάγουν άμεσα τύπους- συνήθως αξιόπιστους- για τους σχεδιαστές. Βέβαια δεν είναι πάντα εύκολη και δυνατή, η εξαγωγή αναλυτικών λύσεων, όταν η προς μελέτη κατασκευή, μεταξύ άλλων, είναι αρκετά σύνθετη, με πολύπλοκη γεωμετρία και οριακές συνθήκες, με πολλές διαφορετικές καταστάσεις φόρτισης και αποκρίσεις. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα συχνά, μετά από απαραίτητες απλουστεύσεις, να επιλύεται ένα πρόβλημα που απέχει αρκετά από το αρχικό και κατά συνέπεια να εξάγονται αποτελέσματα που δεν περιγράφουν πλήρως και ολοκληρωμένα τις αποκρίσεις τις κατασκευής.

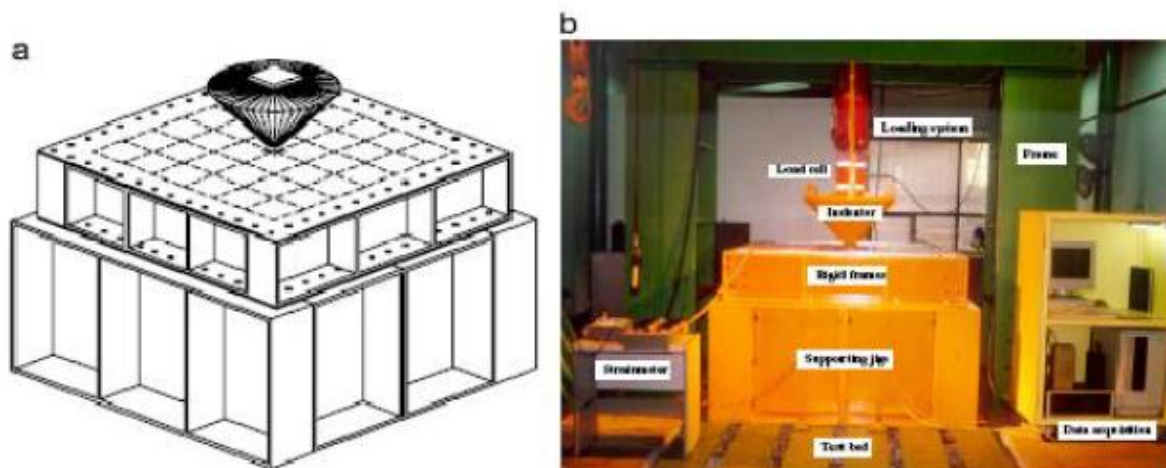
Οι αριθμητικές μέθοδοι έχουν αναγνωρισθεί σήμερα, ως πολύ σημαντικό εργαλείο στη μη γραμμική ανάλυση. Όντως, τα μη γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία είναι πολύ χρήσιμα στο προσδιορισμό των μη γραμμικών αποτελεσμάτων μιας κατασκευής. Οι αριθμητικές μέθοδοι είναι επίσης χρήσιμες στην ανάλυση δυναμικών προβλημάτων όπως η σφυρόκρουση, εκρήξεις από φωτιά ή αέρια, προσαράξεις ή συγκρούσεις κ.α. Από την άλλη μεριά, οι αριθμητικές μέθοδοι απαιτούν αρκετή υπολογιστική ισχύ και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζεται σημαντικά από την επάρκεια και την καταλληλότητα των εργαλείων και των μεθόδων μοντελοποίησης που υιοθετήθηκαν. Παρά την εξέλιξη στον τομέα των Η/Υ καθώς και την ανάπτυξη πολλών αξιόλογων εμπορικών πακέτων εφαρμογών πεπερασμένων στοιχείων, οι αριθμητικές μέθοδοι είναι αρκετά χρονοβόρες όσον αφορά την ολοκλήρωση μιας ανάλυσης.

Οι πειραματικές μέθοδοι, με τη σειρά τους, απαιτούν εξειδικευμένες εγκαταστάσεις, καθιστώντας τις έτσι εξαιρετικά ακριβές. Επιπλέον οι παραδοχές που υποχρεωτικά γίνονται κατά τη μοντελοποίηση του πειράματος μπορεί να οδηγήσει σε ανακριβή συμπεράσματα. Παρόλα αυτά τέτοιου είδους μέθοδοι μπορούν να δημιουργήσουν μια πιο λεπτομερή βάση δεδομένων και να δώσει την ευκαιρία στους μελετητές για πιο εξονυχιστική ματιά στα

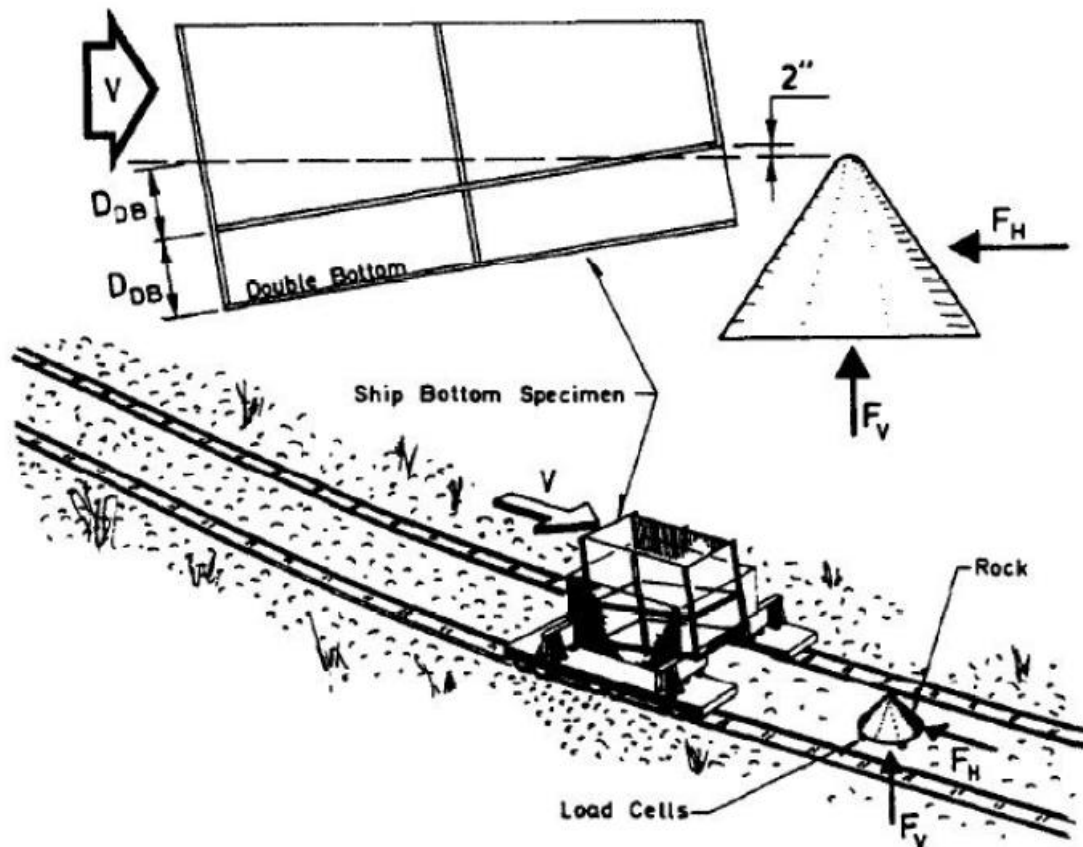
φαινόμενα και στους μηχανισμούς αστοχίας. Σχέδια τέτοιων διατάξεων παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες :



Εικόνα 1-5 : Σχηματική απεικόνιση πειραμάτων (Ζηλάκος 2008).



Εικόνα 1-6 : Πειραματική διάταξη : (a) σχηματική απεικόνιση (b) φωτογραφία της διάταξης (Ζηλάκος 2008)



Εικόνα 1-7 : Πειραματική διάταξη δοκιμών προσάραξης που διεξήχθησαν από το NSWC στα HI-Test Laboratories, Virginia, USA.

1.6. Υπάρχουσες αναλυτικές μοντελοποιήσεις

Απο τα τέλη του '90, έχουν αναπτυχθεί και προταθεί διάφορα απλοποιημένα μοντέλα προσαράξεων για διπύθμενα, από τους Simonsen (1997) και Wang, Arita και Liu (2000). Πολλά από τα θεωρητικά μοντέλα για κατασκευές πλοίων έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια του προγράμματος « MIT-Industry Program on Tanker Safety», από το 1992 μέχρι το 1999. Το αποτέλεσμα της παραπάνω εργασίας είναι η δημιουργία ενός προγράμματος για ηλεκτρονικούς υπολογιστές, με την ονομασία «DAMAGE», που χρησιμοποιείται για υπολογισμούς αντοχής και έκτασης ζημιάς σε μία προσάραξη (Wang, Arita και Liu, 2000).

Οι αναλυτικές μέθοδοι (λύσεις κλειστής μορφής) γενικώς αποτελούνται από τα εξής βήματα (Wang, Spencer και Chen, 2002) :

- Αναγνώριση και προσδιορισμός μορφών αστοχίας των κατασκευαστικών στοιχείων μέσω της φυσικής παρατήρησης.
- Ανάπτυξη ιδανικών θεωρητικών μοντέλων και εξαγωγή θεωρητικών τύπων, προκειμένου να περιγραφούν τα βασικά χαρακτηριστικά της μορφής της αστοχίας.

- Ανάπτυξη καθολικών μοντέλων προσομοίωσης όλων των αστοχιών που επήλθαν στη γάστρα.
- Συνδυασμός των καθολικών μοντέλων με μαθηματικές σχέσεις για κάθε κατασκευαστικό στοιχείο ξεχωριστά.

Οι Wang, Arita και Liu (2000) διεξήγαγαν μια σειρά εννέα δοκιμών σε ένα μοντέλο αναπαριστώντας την πλευρά και τον πυθμένα ενός πλοίου, προκειμένου να προσδιορίσουν πώς συμπεριφέρεται ένα διπύθμενο σε σενάρια προσαράξεων και συγκρούσεων. Χρησιμοποιήθηκαν διάφορα μοντέλα διείσδυσης, με διαφορετικές καμπυλότητες στο άκρο επαφής, με σκοπό να αναπαρασταθούν ποικίλες συνθήκες προσάραξης.

1.7. Μη-γραμμική ανάλυση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Η εσωτερική μηχανική ενός ατυχήματος προσάραξης περιλαμβάνει διαρροή υλικού, σχάση και θραύση. Οπότε οποιοδήποτε πλέγμα μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων πρέπει να είναι αρκετά λεπτομερές ώστε να περιγράφει ικανοποιητικά τέτοια μη γραμμικά φαινόμενα.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και στους υπολογιστικούς αλγόριθμους έχουν μετατρέψει την ανάλυση με χρήση μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων σε ένα πολύ ισχυρό και χρήσιμο εργαλείο στη διερεύνηση των μηχανισμών που δρουν κατά τη διάρκεια μιας προσάραξης. Δύο μεθοδολογίες πεπερασμένων στοιχείων επικρατούν, οι έμμεσες και οι άμεσες. Οι έμμεσες μεθοδολογίες απαιτούν την επίλυση ενός συστήματος εξισώσεων ταυτόχρονα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εξάντληση των υπολογιστικών πόρων, κυρίως της μνήμης του υπολογιστή. Οι άμεσες μέθοδοι δε βασίζονται στην ταυτόχρονη επίλυση εξισώσεων, το ισοζύγιο επιτυγχάνεται με διαφορετικό τρόπο (λεπτομερέστερη σύγκριση και ανάλυση των δύο μεθόδων ακολουθεί σε παρακάτω κεφάλαιο). Παρόλα αυτά, πολύ μικρά χρονικά βήματα απαιτούνται, προκειμένου να είναι συμβατές με τις απαιτήσεις αλγοριθμικής ευστάθειας. Άμεσες μεθόδους επίλυσης χρησιμοποιούν εμπορικά πακέτα προγραμμάτων όπως το Abaqus/Explicit, DYTRAN, LS-DYNA, PAM-CRASH και RADIOSS, ενώ έμμεσες μεθόδους το Abaqus/Standard, ANSYS, MARC και NASTRAN.

Υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη μοντελοποίηση με χρήση μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων : ο τύπος των στοιχείων που θα χρησιμοποιηθεί και η λεπτομέρεια του πλέγματος. Στοιχεία υψηλής τάξης παρέχουν γενικά καλύτερη ακρίβεια και επιτρέπουν λιγότερο πυκνό πλέγμα, αλλά απαιτούν πολλούς υπολογιστικούς πόρους. Η επίδραση της λεπτομέρειας (πυκνό/αραιό) του πλέγματος καθώς και επιλογή του τύπου των στοιχείων έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές (Amdal & Kavlie 1992, Kitamura 1997, 2002, Servis *et al* 2002). Έχει παρατηρηθεί ότι πολύ μεγάλος αριθμός στοιχείων απαιτείται προκειμένου να επιτευχθεί ακρίβεια στα αποτελέσματα, που προκύπτουν από παραμόρφωση κατασκευαστικών στοιχείων λόγω αξονικών δυνάμεων σύγκρουσης.

Μία μεγάλη πρόκληση στην ανάλυση με χρήση μη γραμμικών πεπερασμένων στοιχείων, είναι η πρόβλεψη και η προσομοίωση της έναρξης και εξέλιξης της αστοχίας. Αυτό είναι απαραίτητο για το προσδιορισμό της εκλύομενης ενέργειας, κυρίως για τμήματα της κατασκευής που υπόκεινται σε μεγάλες μεμβρανικές τάσεις, ενώ λιγότερο σημαντικό για εκείνα που υπόκεινται σε διαμήκεις δυνάμεις σύγκρουσης. Η απλούστερη προσέγγιση στην επίδραση της αστοχίας,

είναι η αφαίρεση στοιχείων όταν η κρίσιμη παραμόρφωση επιτευχθεί. Αυτό είναι εξαιρετικά απλό σε έναν άμεσο κώδικα, διότι δεν υπάρχει η ανάγκη να καταστρωθεί και να αναστραφεί το ενεργό μητρώο ακαμψίας. Παρόλα αυτά η διαγραφή στοιχείων δεν αντιμετωπίζει με ακρίβεια το πρόβλημα, από τη σκοπιά ότι υψηλές τάσεις μπορούν να αναπτυχθούν γύρω από την περιοχή αστοχίας, ειδικά στη διεύθυνση παράλληλα με τις ρωγμές. Για αυτό το λόγο πολλοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την ανάπτυξη και βελτίωση τεχνικών μοντελοποίησης της αστοχίας.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

2.1. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (ΜΠΣ) χρησιμοποιείται ευρέως στην ανάλυση πολύπλοκων κατασκευών και κατατάσσεται στην πρώτη θέση μεταξύ των μοντέρνων εργαλείων σχεδιασμού στην ναυπηγική, αεροναυπηγική βιομηχανία, αυτοκινητοβιομηχανία όπως και σε εφαρμογές πολιτικών μηχανικών. Οι βάσεις της μεθόδου αυτής τέθηκαν τη δεκαετία του '40 '50 προκειμένου να χρησιμοποιηθούν ως εργαλείο σχεδιασμού και βελτιστοποίησης πάσης φύσεως κατασκευής. Οι βασικοί ημιεμπειρικοί κανόνες και οι λύσεις κλειστής μορφής αδυνατούν να αποδώσουν επαρκώς τα πεδία μετατοπίσεων, παραμορφώσεων και τάσεων σε προβλήματα που παρουσιάζουν πολυπλοκότητα ως προς την συμπεριφορά των υλικών, τη γεωμετρία των δομικών στοιχείων, το είδος των φορτίσεων και των συνοριακών συνθηκών.

Κατ' αυτόν τον τρόπο η ΜΠΣ αποτελεί μια υπολογιστική μέθοδο που επιλύει με προσεγγιστικές μεθόδους τις θεμελιώδεις εξισώσεις που διέπουν μια ευρεία ομάδα προβλημάτων συνεχούς μέσου τα οποία έχουν αυθαίρετη γεωμετρία, συνοριακές συνθήκες και φόρτιση. Βασική ιδέα της μεθόδου είναι η διακριτοποίηση του συνεχούς μέσου σε επιμέρους τμήματα, όπου τα τμήματα αυτά ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Στην απόλυτα ορισμένη αυτή περιοχή κάθε πεπερασμένου στοιχείου επιλύονται οι εξισώσεις ισορροπίας, και εν συνεχεία γίνεται συναρμολόγηση όλων των εξισώσεων αυτών για την επίλυση τους στα πλαίσια του συνεχούς μέσου. Έτσι η μέθοδος επιλύει κάθε πρόβλημα που περιγράφεται από μια μερική διαφορική εξίσωση (προβλήματα παραμορφώσιμων στερεών, μετάδοσης θερμότητας, μηχανικής των ρευστών, κλπ), η οποία προσεγγίζεται από ένα σύστημα γραμμικών εξισώσεων, το οποίο επιλύεται προσεγγιστικά με τεχνικές γραμμικής άλγεβρας. Συγκεκριμένα για την ανάλυση των τάσεων των μελών ενός δικτυώματος η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων ακολουθεί την εξής διαδικασία:

1. Υπολογισμός των μητρώων δυσκαμψίας και των ανυσμάτων φόρτισης κάθε στοιχείου.
2. Συναρμολόγηση των επιμέρους μητρώων δυσκαμψίας για την δημιουργία του ολικού μητρώου δυσκαμψίας.
3. Επίλυση του συστήματος των γραμμικών εξισώσεων για τον υπολογισμό των άγνωστων κομβικών βαθμών ελευθερίας του συστήματος (μετατοπίσεις) και των αντιδράσεων στα σημεία (κόμβους) όπου οι μετατοπίσεις έχουν προκαθορισμένη τιμή.
4. Χρήση των υπολογισμένων, από το παραπάνω βήμα, κομβικών μετατοπίσεων για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων των και εν συνεχεία των τάσεων των πεπερασμένων στοιχείων.

Η εν λόγω μέθοδος μπορεί να θεωρηθεί ως μία ειδική διατύπωση των μεθόδων Rayleigh – Ritz και ενεργειακών μεθόδων (Galerkin), η οποία όμως πλεονεκτεί σαφώς ως προς τις αρχικές διατυπώσεις των μεθόδων αυτών, λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας με την οποία αντιμετωπίζει τις πολύπλοκες γεωμετρίες και του ευχερέστερου προγραμματισμού στον Η/Υ. Η μέθοδος, αν και επινοήθηκε και εφαρμόστηκε, αρχικά για την στατική ανάλυση φορέων, έχει καθολικότερη εφαρμογή σε μια ευρύτερη κατηγορία προβλημάτων του μηχανικού, όπως για παράδειγμα στη ρευστομηχανική, στη μεταφορά θερμότητας, στην ακουστική, στον ηλεκτρομαγνητισμό, στην εμβιομηχανική (Μ.Παπαδρακάκης, 2001). Η εξέλιξη των Η/Υ με τις ολοένα και μεγαλύτερες

δυνατότητες διαχείρισης μεγάλου όγκου δεδομένων, αλλά και με την αύξηση της ταχύτητας εκτελέσεως των αριθμητικών πράξεων κατέστησε εφικτή την επίλυση, με την εν λόγω μέθοδο, σύνθετων προβλημάτων του μηχανικού.

2.2. Στάδια της προσομοίωσης

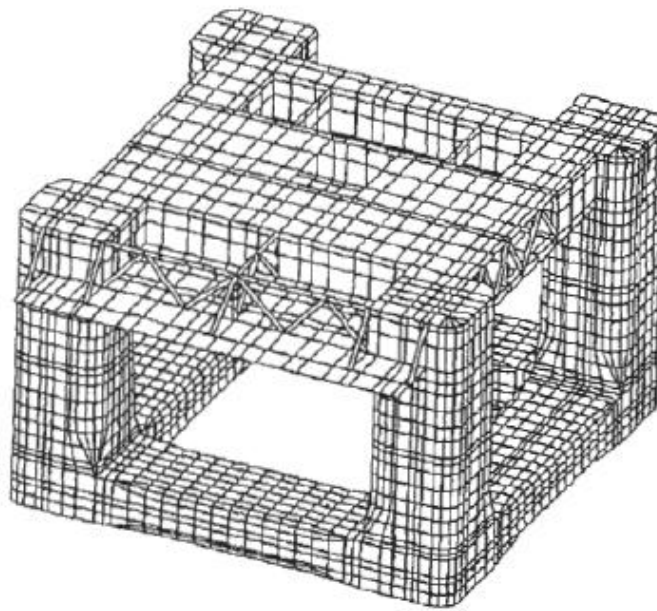
Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στην ουσία αποτελεί μια προσεγγιστική μέθοδο επίλυσεως των διαφορικών εξισώσεων και ως εκ τούτου χρειάζεται κάποια κριτήρια ελέγχου της ποιότητας των αποτελεσμάτων, δεδομένου ότι η αναλυτική λύση κλειστής μορφής του προβλήματος δεν είναι γνωστή. Στην περίπτωση της αναλύσεως των κατασκευών ακολουθούνται τα εξής στάδια (Μ.Παπαδρακάκης, 2001):

1) Μετάβαση από το φυσικό πρόβλημα που είναι η κατασκευή στο μαθηματικό πρόβλημα. Κατά το στάδιο αυτό γίνεται η εξιδανίκευση της κατασκευής ως προς τη μορφή και τη δομητική λειτουργία των μελών της. Ταξινομούνται τα μέλη σε ράβδους δικτύωματος ή δοκού, σε δισδιάστατα μέλη τοιχίων, δίσκων ή πλακών, σε κελύφη ή τρισδιάστατα μέλη. Καθορίζονται οι ιδιότητες των υλικών των μελών της κατασκευής καθώς και η συμπεριφορά τους κατά τη φόρτιση της κατασκευής (γραμμικώς ελαστικά, ελαστικά απολύτως πλαστικά, μη ελαστικά κλπ.). Προσδιορίζονται τα φορτία που φορτίζουν την κατασκευή και οι συνοριακές συνθήκες (εξιδανίκευση της θεμελίωσης, δεσμευμένες μετατοπίσεις, κλπ.). Το μαθηματικό προσομοίωμα διέπεται από τις κυρίαρχες διαφορικές εξισώσεις ισορροπίας και τις συνοριακές που χαρακτηρίζουν τη συμπεριφορά των μελών του φορέα.

2) Μετάβαση από το μαθηματικό πρόβλημα στο προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων. Κατά το στάδιο αυτό γίνεται η επιλογή των πεπερασμένων στοιχείων για την προσφορότερη προσομοίωση των μελών του φορέα. Μορφώνεται το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων για όλα τα μέλη του φορέα. Υπολογίζονται τα μητρώα δυσκαμψίας και οι ισοδύναμες δράσεις των στοιχείων και μορφώνεται η τελική μητρική εξίσωση ισορροπίας του φορέα.

3) Μετάβαση από το προσομοίωμα των πεπερασμένων στοιχείων στο υπολογιστικό προσομοίωμα. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την αριθμητική επεξεργασία του προσομοιώματος των πεπερασμένων στοιχείων από τον Η/Υ. Υπολογίζεται το καθολικό μητρώο στιβαρότητας και το καθολικό διάνυσμα των ισοδύναμων δράσεων. Ακολουθεί η επίλυση των εξισώσεων ισορροπίας και ο υπολογισμός των τάσεων και εντατικών μεγεθών.

Στην Εικόνα 2-1 παρουσιάζεται ένα δείγμα εφαρμογής της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων για την καθολική ανάλυση μιας θαλάσσιας κατασκευής.



Εικόνα 2-1 : Παράδειγμα διακριτοποίησης μιας πλατφόρμας με τη χρήση των πεπερασμένων στοιχείων.

Σε κάθε στάδιο όμως, της μεθόδου υπάρχει ο κίνδυνος παρείσφρησης σφαλμάτων, τα οποία ανάλογα με τη σοβαρότητά τους μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά την αξιοπιστία της ανάλυσης. Τα σφάλματα αυτά διακρίνονται σε: (α) **σφάλματα προσομοίωσης**, τα οποία επηρεάζονται από το βαθμό της πιστότητας του φορέα προς την κατασκευή, (β) **σφάλματα διακριτοποίησης**, που εξαρτώνται από τον τύπο και την πυκνότητα του δικτύου των πεπερασμένων στοιχείων, (γ) **σφάλματα αριθμητικά**, τα οποία οφείλονται στην πεπερασμένη ακρίβεια με την οποία εκτελούνται οι πράξεις από τον Η/Υ και τα οποία είναι δυνατόν να αλλοιώσουν σημαντικά τα τελικά αποτελέσματα. Στην παρούσα εργασία για τη σχεδίαση των κατασκευών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο ABAQUS/CAE (στάδιο 1), ενώ για την ανάλυση του προσομοιώματος καθώς και για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων (post – processing), το λογισμικό πακέτο ABAQUS/Explicit και ABAQUS/Viewer, αντίστοιχα (στάδιο 2 και 3).

2.3. Μη γραμμική ανάλυση

Ένα πρόβλημα καλείται μη γραμμικό, όταν το μητρώο δυσκαμψίας που υπολογίζεται σύμφωνα με την προηγούμενη θεματική ενότητα, μεταβάλλεται με την παραμόρφωση της κατασκευής. Η εξίσωση που εκφράζει τη μη γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου φορτίου και των μετατοπίσεων είναι η ακόλουθη:

$$f = k(U)U$$

όπου το μητρώο δυσκαμψίας είναι πλέον μια συνάρτηση εξαρτώμενη από τις μετατοπίσεις. Επιγραμματικά, η μη γραμμικότητα μπορεί να προέρχεται: (α) από την καταστατική συμπεριφορά του υλικού (β) από την μεταβολή των συνοριακών συνθηκών (π.χ. πρόβλημα επαφής) (γ) από τη γεωμετρία της κατασκευής (θεωρία μεγάλων στροφών και παραμορφώσεων). Τα φαινόμενα που θα εξελιχθούν κατά τη διάρκεια της προσάραξης του διπυθμένου μπορούμε με ασφάλεια, να ισχυριστούμε ότι παρουσιάζουν τα τρία (3) μη γραμμικά χαρακτηριστικά.

2.4. Σύγκριση άμεσων (explicit) και έμμεσων (implicit) μεθόδων πεπερασμένων στοιχείων

Και στις δύο μεθόδους χρονικής ολοκλήρωσης, το ισοζύγιο ορίζεται σε σχέση με τις εξωτερικές εφαρμοζόμενες δυνάμεις, \mathbf{P} , τις εσωτερικές δυνάμεις των στοιχείων, \mathbf{I} , και τις κομβικές επιταχύνσεις:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I},$$

όπου το \mathbf{M} είναι το μητρώο μάζας. Και οι δύο μέθοδοι λύνουν ως προς τις κομβικές επιταχύνσεις και χρησιμοποιούν τον ίδιο υπολογισμό στοιχείων για να προσδιορίσουν τις εσωτερικές δυνάμεις. Η ουσιαστική διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στο τρόπο υπολογισμού των κομβικών επιταχύνσεων. Στην έμμεση μέθοδο μία ομάδα γραμμικών εξισώσεων λύνεται με κάποια απευθείας μέθοδο επίλυσης. Το υπολογιστικό κόστος (κυρίως μνήμης) της επίλυσης αυτό των εξισώσεων είναι πολύ μεγάλο σε σύγκριση με το σχετικά χαμηλότερο κόστος των κομβικών υπολογισμών με την άμεση μέθοδο.

Αρχικά στην παραπάνω εξίσωση αντικαθίστανται οι επιταχύνσεις συναρτήσει των μετατοπίσεων στην ίδια χρονική στιγμή, ολοκληρώνοντας με την μέθοδο Newmark. Έτσι προκύπτει ένα μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων με αγνώστους τις μετατοπίσεις. Για την επίλυση των εξισώσεων χρησιμοποιείται η επαναληπτική μέθοδος Newton. Η Newton αναζητά να ικανοποιήσει το δυναμικό ισοζύγιο στο τέλος κάθε χρονικού βήματος $t + \Delta t$ και υπολογίζει τις μετατοπίσεις σε αυτό το χρόνο. Το χρονικό βήμα, Δt , μπορεί να είναι σχετικά μεγάλο σε σχέση με αυτό που χρησιμοποιείται στην άμεση μέθοδο, διότι στην έμμεση μέθοδο είναι απόλυτα σταθερό (unconditionally stable). Σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα κάθε βήμα, συνήθως, απαιτεί τόσες επαναλήψεις όσες απαιτούνται ώστε να μειωθούν οι υπολειπόμενες δράσεις εντός επιθυμητών ορίων. Κάθε επανάληψη της Newton επιλύει για μία διόρθωση, \mathbf{c}_j , των στοιχειωδών μετατοπίσεων, $\Delta \mathbf{u}_j$. Έτσι κάθε επανάληψη απαιτεί τη ταυτόχρονη επίλυση μιας ομάδας εξισώσεων,

$$\hat{\mathbf{K}}_j \mathbf{c}_j = \mathbf{P}_j - \mathbf{I}_j - \mathbf{M}_j \ddot{\mathbf{u}}_j,$$

που είναι μία υπολογιστικά ακριβή διαδικασία για μεγάλα μοντέλα. Το μητρώο δυσκαμψίας, K_j , αποτελεί ένα γραμμικό συνδυασμό του εφαπτομενικού μητρώου δυσκαμψίας και του μητρώου μάζας, για κάθε επανάληψη. Οι επαναλήψεις συνεχίζονται έως ότου αρκετές ποσότητες – υπολειπόμενες δράσεις, διορθώσεις μετατοπίσεων, κτλ. - βρεθούν εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων. Για μια λεία μη γραμμική απόκριση η μέθοδος Newton παρουσιάζει τετραγωνική ταχύτητα σύγκλισης, όπως διαφαίνεται και παρακάτω :

Επαναλήψεις	Σχετικό Σφάλμα
1	1
2	10^{-2}
3	10^{-4}
.	.
.	.
.	.

Βέβαια, εάν το μοντέλο περιέχει πολλές ασυνεχείς διεργασίες, όπως επαφές σωμάτων και τριβή, η τετραγωνική σύγκλιση είναι πιθανόν να μην επιτευχθεί και μεγάλος αριθμός επαναλήψεων να απαιτηθεί. Αυτό καθιστά αρκετά πιθανή τη μείωση στο χρονικό βήμα, προκειμένου να ικανοποιηθεί το ισοζύγιο (Hibbitt *et al*, 1996).

Έτσι λοιπόν, ενώ στην έμμεση ανάλυση πρέπει να γίνουν πολλές επαναλήψεις για να προσδιοριστεί η λύση σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα, στη άμεση ανάλυση η λύση προσδιορίζεται χωρίς επαναλήψεις, αλλά προοδεύοντας άμεσα τη κινηματική κατάσταση από το προηγούμενο χρονικό βήμα στο επόμενο. Στην άμεση μέθοδο δεν απαιτείται τριγωνοποίηση των μητρώων για την επίλυση συστημάτων, όντας διαγώνια, κάτι που την καθιστά ταχύτερη και την «απελευθερώνει» από προβλήματα αντιστροφής μητρώων, επιτρέποντας, κατά συνέπεια, ένα μοντέλο να είναι υποστατικό. Οπότε μια ολόκληρη κατασκευή ή μέρος αυτής μπορεί να είναι τελείως ελεύθερη και να πραγματοποιεί κίνηση στερεού σώματος. Ακόμα και όταν μία στατική ανάλυση απαιτεί μεγάλο αριθμό χρονικών βημάτων, χρησιμοποιώντας την άμεση μέθοδο, αυτή μπορεί να είναι πιο αποδοτική από ότι η ανάλυση με έμμεση μέθοδο που θα απαιτούσε πολλές επεξεργαστικά ακριβές επαναλήψεις. Υπογραμμίζοντας την αποδοτικότητα της μεθόδου, αναφέρεται ότι στη περίπτωση όπου η ανάλυση ενός προβλήματος με τις δύο μεθόδους, έχει συγκρίσιμο υπολογιστικό κόστος, τα πραγματικά χρησιμοποιούμενα αποθέματα μνήμης και σκληρού δίσκου είναι μικρότερα στην άμεση μέθοδο, καθιστώντας την ελκυστικότερη.

2.5. Άμεση μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων

Το ABAQUS/Explicit χρησιμοποιεί τον κανόνα κεντρικών διαφορών προκειμένου να ολοκληρώσει τις εξισώσεις κίνησης, άμεσα, ως προς το χρόνο, χρησιμοποιώντας τις κινηματικές συνθήκες του ενός βήματος για να υπολογίσει τις κινηματικές συνθήκες του επόμενου. Στην αρχή κάθε χρονικού βήματος το πρόγραμμα επιλύει ως προς το δυναμικό ισοζύγιο, το οποίο

δηλώνει ότι το κομβικό μητρώο της μάζας, \mathbf{M} , πολλαπλασιαζόμενο επί τις κομβικές επιταχύνσεις, ισούται με τις συνολικές κομβικές δυνάμεις (τη διαφορά, δηλαδή, των εξωτερικά εφαρμζόμενων φορτίων, \mathbf{P} , με των εσωτερικών δυνάμεων των στοιχείων, \mathbf{I}):

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} = \mathbf{P} - \mathbf{I}.$$

Οι επιταχύνσεις στην έναρξη του χρονικού βήματος t υπολογίζονται ως εξής:

$$\ddot{\mathbf{u}}|_{(t)} = (\mathbf{M})^{-1} \cdot (\mathbf{P} - \mathbf{I})|_{(t)}.$$

Εφόσον, στην άμεση μεθοδολογία πάντα χρησιμοποιούνται διαγώνια μητρώα μάζας, η επίλυση ως προς τις επιταχύνσεις είναι επουσιώδης. Δεν υπάρχουν εξισώσεις προς ταυτόχρονη επίλυση. Η επιτάχυνση οποιοδήποτε κόμβου καθορίζεται πλήρως από τη μάζα του και την καθαρή δύναμη που ασκείται πάνω του, καθιστώντας έτσι τους κομβικούς υπολογισμούς, υπολογιστικά φθηνούς.

Οι επιταχύνσεις ολοκληρώνονται ως προς το χρόνο, χρησιμοποιώντας το κανόνα των κεντρικών διαφορών, ο οποίος υπολογίζει την αλλαγή στην ταχύτητα, υποθέτοντας ότι η επιτάχυνση είναι σταθερή. Η αλλαγή αυτή στην ταχύτητα προστίθεται στην ταχύτητα στη μέση του προηγούμενου βήματος, ώστε να προσδιοριστούν οι ταχύτητες στη μέση του τρέχοντος βήματος:

$$\dot{\mathbf{u}}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{\mathbf{u}}|_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{\Delta t|(t+\Delta t)+\Delta t|(t)}{2} \ddot{\mathbf{u}}|_{(t)}.$$

Οι ταχύτητες ολοκληρώνονται ως προς χρόνο και προστίθενται στις μετατοπίσεις στην αρχή κάθε χρονικού βήματος (t), ώστε να προσδιοριστούν οι μετατοπίσεις στο τέλος κάθε χρονικού βήματος ($t+\Delta t$):

$$\mathbf{u}|_{(t+\Delta t)} = \mathbf{u}|_{(t)} + \Delta t|(t+\Delta t) \dot{\mathbf{u}}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})}.$$

Έτσι, ικανοποιώντας το δυναμικό ισοζύγιο στην αρχή κάθε χρονικού βήματος προκύπτουν οι επιταχύνσεις. Γνωρίζοντας τις επιταχύνσεις, οι ταχύτητες και οι μετατοπίσεις προκύπτουν άμεσα (explicitly) μέσω του χρόνου. Ο όρος άμεσα αναφέρεται στο γεγονός ότι η κατάσταση στο τέλος κάθε χρονικού βήματος βασίζεται μόνο στις μετατοπίσεις, στις ταχύτητες και στις επιταχύνσεις στην αρχή του βήματος. Αυτή η μέθοδος ολοκληρώνει ακριβώς σταθερές επιταχύνσεις. Προκειμένου η μέθοδος να παράγει ακριβή αποτελέσματα, τα χρονικά βήματα πρέπει να είναι αρκετά μικρά, έτσι ώστε οι επιταχύνσεις να είναι σχεδόν σταθερές σε ένα χρονικό βήμα. Εφόσον το χρονικό βήμα είναι μικρό, τυπικά, η ανάλυση απαιτεί πολλές χιλιάδες χρονικά βήματα. Ευτυχώς, όπως προαναφέρθηκε, κάθε βήμα είναι υπολογιστικά φθινό, διότι δεν υπάρχουν εξισώσεις προς ταυτόχρονη λύση. Το μεγαλύτερο υπολογιστικό έξοδο έγκειται στους υπολογισμούς των στοιχείων προκειμένου να προσδιοριστούν οι εσωτερικές δυνάμεις των στοιχείων που δρουν στους κόμβους. Οι υπολογισμοί των στοιχείων, συμπεριλαμβάνουν το προσδιορισμό των παραμορφώσεων των στοιχείων και εφαρμζοντας τις καταστατικές

παραμέτρους του υλικού, το προσδιορισμό των τάσεων και κατ' επέκταση, τις εσωτερικές δυνάμεις.

Παρακάτω ακολουθεί μια σύντομη και περιληπτική παρουσίαση του αλγόριθμου της άμεσης μεθόδου :

1. Κομβικοί υπολογισμοί.

α. Δυναμικό ισοζύγιο.

$$\ddot{\mathbf{u}}|_{(t)} = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{P}_{(t)} - \mathbf{I}_{(t)})$$

β. Άμεση ολοκλήρωση ως προς το χρόνο.

$$\dot{\mathbf{u}}_{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \dot{\mathbf{u}}_{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \frac{\Delta t_{(t+\Delta t)} + \Delta t_{(t)}}{2} \ddot{\mathbf{u}}_{(t)}$$

$$\mathbf{u}|_{(t+\Delta t)} = \mathbf{u}|_{(t)} + \Delta t|_{(t+\Delta t)} \dot{\mathbf{u}}|_{(t+\frac{\Delta t}{2})}$$

2. Υπολογισμοί στα σημεία ολοκλήρωσης των σημείων.

α. Υπολογισμός των παραμορφώσεων, σε κάθε βήμα ολοκλήρωσης.

β. Υπολογισμός των τάσεων, $\boldsymbol{\sigma}$, απο τις καταστατικές εξισώσεις.

$$\boldsymbol{\sigma}_{(t+\Delta t)} = \mathbf{f}(\boldsymbol{\sigma}_{(t)}, d\boldsymbol{\varepsilon})$$

γ. Συγκέντρωση κομβικών εσωτερικών δυνάμεων, $\mathbf{I}_{(t+\Delta t)}$.

3. Εναλλαγή $\mathbf{t}+\Delta\mathbf{t}$ σε \mathbf{t} και επιστροφή στο 1^ο βήμα.

2.6. Προτερήματα της άμεσης μεθόδου χρονικής ολοκλήρωσης

Η άμεση μέθοδος είναι κυρίως κατάλληλη για την επίλυση μη-γραμμικών δυναμικών προβλημάτων, που απαιτούν πολύ μικρή χρονική διαμέριση προκειμένου να μελετηθούν υψίσυχνα φαινόμενα. Εάν η διάρκεια του μεταβατικού φαινομένου είναι μικρή, μπορεί να επιτευχθεί λύση αποδοτική (από χρονικά υπολογιστική μεριά).

Προβλήματα που εμφανίζουν επαφή τμημάτων της κατασκευής ή άλλης μορφής μεταβατικών συνθηκών (συνοριακών ή/και φορτίσεων) έχουν ήδη διατυπωθεί αλγοριθμικά στην άμεση μέθοδο και μπορούν να εφαρμοστούν σε κομβικό επίπεδο, χωρίς να απαιτούνται επαναλήψεις. Οι κομβικές επιταχύνσεις μπορούν προσαρμοστούν ώστε να ικανοποιούν το ισοζύγιο των εξωτερικών και εσωτερικών δυνάμεων κατά τη διάρκεια τη επαφής.

Το πιο σημαντικό προτέρημα της άμεσης μεθόδου είναι η έλλειψη του καθολικού μητρώου επαπτομενικής δυσκαμψίας (global tangent stiffness matrix), που απαιτείται στη έμμεσες μεθόδους ενώ επαναλήψεις και όρια σύγκλισης δεν απαιτούνται, εφόσον η κατάσταση του μοντέλου εξελίσσεται άμεσα.

2.7. Όριο ευστάθειας και χρονική διακριτοποίηση της άμεσης μεθόδου

Με την άμεση μέθοδο, το μοντέλο εξελίσσεται διαμέσου ενός χρονικού βήματος, Δt , που βασίζεται στη κατάσταση του μοντέλου στην έναρξη του βήματος τη χρονική στιγμή t . Εάν το χρονικό βήμα γίνει μεγαλύτερο από το μέγιστο συνολικό χρόνο, τότε θεωρείται ότι το βήμα έχει υπερβεί το *όριο ευστάθειας*. Ένα πιθανό αίτιο που μπορεί να προκαλέσει αυτή την υπέρβαση, είναι μία αριθμητική αστάθεια, που θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια εκτός ορίων λύση. Γενικά δεν είναι πιθανό να μπορεί να προσδιοριστεί το όριο ευστάθειας επακριβώς, οπότε αντί αυτού πραγματοποιούνται συντηρητικές εκτιμήσεις. Το όριο ευστάθειας επηρεάζει σημαντικά την αξιοπιστία και την ακρίβεια, οπότε πρέπει να προσδιορίζεται με συνέπεια και συντηρητικά. Για λόγους υπολογιστικής αποδοτικότητας το ABAQUS/Explicit επιλέγει το χρονικό βήμα όσο το δυνατόν κοντά στο όριο ευστάθειας χωρίς να το υπερβαίνει.

Το όριο ευστάθειας ορίζεται σε αντιστοιχία προς την υψηλότερη συχνότητα του συστήματος (ω_{max}). Η μαθηματική έκφραση του ορίου ευστάθειας, χωρίς απόσβεση, ορίζεται ως εξής :

$$\Delta t_{stable} = \frac{2}{\omega_{max}},$$

ενώ συμπεριλαμβανομένης της απόσβεσης,

$$\Delta t_{stable} = \frac{2}{\omega_{max}} \left(\sqrt{1 + \xi^2} - \xi \right),$$

όπου το ξ είναι το κλάσμα της κρίσιμης απόσβεσης της ιδιομορφής με τη μέγιστη συχνότητα. Ίσως αντίθετα με τη διαίσθηση του μηχανικού, η απόσβεση πάντα μειώνει το όριο ευστάθειας.

Η πραγματική υψηλότερη συχνότητα στο σύστημα βασίζεται σε ένα πολύπλοκο σύστημα αλληλεπιδρώντων παραγόντων, και είναι υπολογιστικά ανέφικτο να προσδιοριστεί η ακριβής τιμή της. Εναλλακτικά, χρησιμοποιείται μια απλή, συντηρητική και αποδοτική εκτίμηση. Αντί να ερευνάται ολόκληρο το μοντέλο, εκτιμάται η υψηλότερη συχνότητα καθενός στοιχείου του

μοντέλου ξεχωριστά. Μπορεί να δειχθεί ότι η υψηλότερη συχνότητα στοιχείου, που προσδιορίζεται από μια στοιχείο προς στοιχείο (element-by-element) προσέγγιση, είναι πάντα μεγαλύτερη από την υψηλότερη συχνότητα του συνολικού μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων.

Βάσει της στοιχείο προς στοιχείο προσέγγισης, το όριο ευστάθειας μπορεί να επαναπροσδιοριστεί χρησιμοποιώντας το μήκος στοιχείου, L^e , και την ταχύτητα μετάδοσης του κύματος (wave speed) του συνεχούς μέσου, c_d :

$$\Delta t_{stable} = \frac{L^e}{c_d}.$$

Για τους περισσότερους τύπους στοιχείων – ένα παραμορφωμένο τετραεδρικό στοιχείο, για παράδειγμα – η παραπάνω εξίσωση είναι μόνο μία εκτίμηση του πραγματικού, στοιχείο προς στοιχείο, προσδιορισμένου ορίου ευστάθειας, διότι δεν είναι ξεκάθαρο πως θα προσδιοριστεί το μήκος στοιχείου. Ως μία προσέγγιση, η μικρότερη απόσταση στοιχείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί, αλλά η προκύπτουσα εκτίμηση δεν είναι πάντα συντηρητική. Όσο πιο μικρή είναι αυτή η απόσταση, τόσο μικρότερο είναι το όριο ευστάθειας. Η ταχύτητα κύματος είναι ιδιότητα του υλικού:

$$c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

όπου το E , είναι το μέτρο ελαστικότητας κατά Young και ρ η πυκνότητα. Όσο πιο άκαμπτο είναι το υλικό, τόσο μεγαλύτερη η ταχύτητα του κύματος, καταλήγοντας σε χαμηλότερο όριο ευστάθειας. Όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα του υλικού, τόσο υψηλότερο το όριο ευστάθειας.

Με τον απλοποιημένο αυτό ορισμό του ορίου ευστάθειας που χρησιμοποιεί το ABAQUS/Explicit παρέχεται μια διαισθητική κατανόηση. Το όριο ευστάθειας είναι ο χρόνος που απαιτείται για ένα κύμα παραμόρφωσης να διανύσει την απόσταση που ορίζεται από το χαρακτηριστικό μήκος στοιχείου. Εάν είναι γνωστό το μέγεθος της διάστασης του μικρότερου στοιχείου και την ταχύτητα κύματος στο συνεχές μέσο, μπορεί να εκτιμηθεί το όριο ευστάθειας. Για παράδειγμα, εάν η διάσταση του μικρότερου στοιχείου είναι 5 mm και η ταχύτητα κύματος 5000 m/s, το ευσταθές χρονικό βήμα είναι 1×10^{-6} s.

2.8. Παράγοντες που επηρεάζουν το όριο ευστάθειας

1. Επίδραση της συμπεριφοράς του υλικού στο όριο ευστάθειας.

Το υλικό ενός μοντέλου επηρεάζει το όριο ευστάθειας, όπως προαναφέρθηκε, μέσω της ταχύτητας του κύματος. Σε ένα υλικό με γραμμική συμπεριφορά η ταχύτητα κύματος είναι σταθερή, οπότε οι μόνες αλλαγές στο όριο ευστάθειας κατά τη διάρκεια της ανάλυσης προκύπτουν από τις αλλαγές στη διάσταση του μικρότερου στοιχείου κατά την ανάλυση. Σε ένα υλικό με μη γραμμική συμπεριφορά, όπως η πλαστική συμπεριφορά ενός μετάλλου, η ταχύτητα

κύματος αλλάζει καθώς το υλικό διαρρέει και η ακαμψία του υλικού αλλάζει. Το ABAQUS/Explicit παρακολουθεί τις ταχύτητες κύματος του μοντέλου κατά τη διάρκεια της ανάλυσης και χρησιμοποιεί την κατάσταση του υλικού σε κάθε στοιχείο για εκτιμήσεις ευστάθειας. Μετά τη διαρροή, η ακαμψία μειώνεται, ελαττώνοντας την ταχύτητα κύματος και κατά συνέπεια αυξάνεται το όριο ευστάθειας (Hibbitt *et al*, 1996).

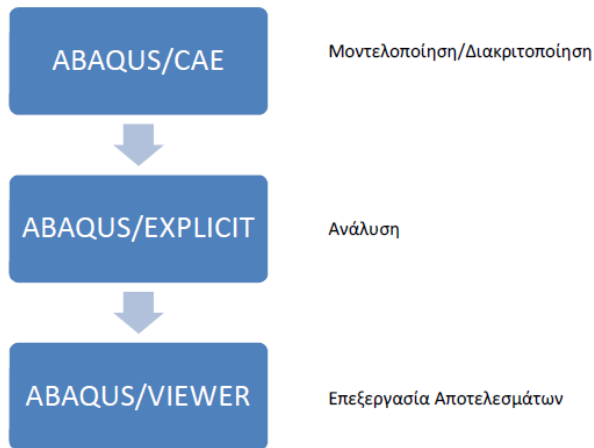
2. Επίδραση του πλέγματος στο όριο ευστάθειας.

Εφόσον το όριο ευστάθειας είναι προσεγγιστικά ανάλογο της μικρότερης διάστασης στοιχείου, είναι ευνοϊκό να διατηρηθεί το μέγεθος του στοιχείου όσο μεγάλο γίνεται. Δυστυχώς όμως για μία ακριβή ανάλυση είναι απαραίτητο συχνά η χρήση πιο πυκνού πλέγματος. Για να αποκτηθεί, λοιπόν, το μέγιστο δυνατό όριο ευστάθειας και ταυτόχρονα να χρησιμοποιείται το απαιτούμενης πυκνότητας πλέγμα, η καλύτερη προσέγγιση είναι η διατήρηση όσο μεγαλύτερης ομοιομορφίας στο πλέγμα είναι δυνατή. Αφού το όριο ευστάθειας εξαρτάται από τη διάσταση του μικρότερου στοιχείου στο μοντέλο, ακόμη και ένα μόνο μικρό ή διαστρεβλωμένου σχήματος στοιχείο μπορεί να μειώσει το όριο ευστάθειας δραστικά. Το ABAQUS/Explicit παρέχει τη δυνατότητα εύρεσης των δέκα στοιχείων με το χαμηλότερο όριο ευστάθειας. Όταν παρατηρείται μεγάλη διαφορά στα όρια ευστάθειας των στοιχείων αυτών με εκείνα του υπόλοιπου πλέγματος της κατασκευής, η διαδικασία της επαναδιακριτοποίησης της κατασκευής με μεγαλύτερη ομοιογένεια στοιχείων καθίσταται άξια ενασχόλησης (Hibbitt *et al*, 1996).

2.9. Δομή και λειτουργία του ABAQUS

Το εμπορικό πακέτο ABAQUS αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο μηχανικής προσομοίωσης, που βασίζεται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, παρέχοντας τη δυνατότητα επίλυσης μεγάλου εύρους απλών γραμμικών προβλημάτων καθώς επίσης και πολύπλοκων μη γραμμικών προβλημάτων. Η εκτενής βιβλιοθήκη στοιχείων και υλικών που διαθέτει καθιστά αρκετά εύκολη τη μοντελοποίηση και διακριτοποίηση οποιασδήποτε γεωμετρίας και υλικού. Στις περισσότερες αναλύσεις, οι απαιτήσεις του προγράμματος σε δεδομένα εισαγωγής, από το χρήστη, είναι η γεωμετρία, η συμπεριφορά του επιλεγμένου υλικού, οι οριακές συνθήκες και τα εφαρμοζόμενα φορτία. Στην περίπτωση όπου αναλύεται ένα δυναμικό πρόβλημα το ABAQUS υπολογίζει αυτόματα τη χρονική διαμέριση, κάνοντας συγχρόνως συνεχείς προσαρμογές κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, προκειμένου να επιτευχθεί η απαιτούμενη ακρίβεια και αποδοτικότητα στη λύση. Με αυτό τον τρόπο η επέμβαση του χρήστη, στον έλεγχο της λύσης, καθίσταται σπανίως απαραίτητη (όχι όμως και απαγορευτική).

Το προαναφερθέν πακέτο προγραμμάτων αποτελείται από τις εξής τρεις δομές, όπως φαίνονται στο Διάγραμμα 2-1, με τη σειρά χρήσης τους :



Διάγραμμα 2-1 : Δομή του εμπορικού πακέτου ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία ABAQUS .

Το ABAQUS/CAE πρόκειται για ένα διαδραστικό σχεδιαστικό πρόγραμμα (προεπεξεργαστής/preprocessor) που επιτρέπει τη σχεδίαση ή ακόμα και την εισαγωγή γεωμετρίας μοντέλων, από άλλα σχεδιαστικά προγράμματα, καθώς και τη διακριτοποίηση της με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Με τη χρήση αυτού του προγράμματος καθορίζονται επίσης οι ιδιότητες του υλικού, τα φορτία, το είδος των στοιχείων καθώς και οι οριακές συνθήκες. Μετά το πέρας της μοντελοποίησης, που πραγματοποιείται σε αυτό το πρώτο στάδιο της μελέτης, οποιουδήποτε προβλήματος, ο προεπεξεργαστής γράφει ένα αρχείο δεδομένων για τον επιλύτη, ABAQUS/EXPLICIT.

Το ABAQUS/EXPLICIT πρόκειται για μια αυτοτελή λογισμική μονάδα που χρησιμοποιεί άμεσες μεθόδους ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, για αυτό ακριβώς καθίσταται κατάλληλη για ανάλυση μη μόνιμων δυναμικών φαινομένων, όπως προσκρούσεις ή κρουστικά προβλήματα καθώς επίσης είναι πολύ αποδοτική στην επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων που περιλαμβάνουν εναλλαγή συνθηκών επαφής.

Το ABAQUS/VIEWER πρόκειται για ένα εργαλείο επεξεργασίας δεδομένων, που προκύπτουν από την ανάλυση ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων. Διαθέτει ένα διαδραστικό γραφικό περιβάλλον, με πληθώρα εργαλείων και επιλογών που βοηθούν το χρήστη στη εξαγωγή, μελέτη και επεξεργασία των δεδομένων και αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

3.1. Περιγραφή του προβλήματος

Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία είναι αυτό της προσάραξης χωρίς πρόσω κίνηση όπου το πλοίο έρχεται σε επαφή με τον θαλάσσιο πυθμένα λόγω κατακόρυφης κίνησης του με αποτέλεσμα να ασκούνται σε αυτό κυρίως κατακόρυφες δυνάμεις (stranding). Η κίνηση αυτή του πλοίου, είναι απόρροια της εξέλιξης του φαινομένου της άμπωτης.

Στόχος είναι ο προσδιορισμός της απόκρισης του προσαραγμένου πλοίου όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται. Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στο σύστημα πλοίο-θαλάσσιος πυθμένας, καθορίζονται από την κατανομή του βάρους του πλοίου, τη γεωμετρία της γάστρας του και την στιβαρότητα της κατασκευής του.

Κατά την επικάθιση, ο πυθμένας του πλοίου παραμορφώνεται λόγω της φόρτισης που δέχεται από το βράχο. Όσο η φόρτιση αυτή αυξάνεται, οι παραμορφώσεις γίνονται εντονότερες και οδηγούν σε αστοχίες της κατασκευής.

Η αντίσταση της κατασκευής του πυθμένα στη διείδυση του βράχου μελετάται με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Προσομοιώσεις προσάραξης σε διάφορες θέσεις στον πυθμένα του πλοίου, αλλά και για διάφορες μορφές θαλάσσιου πυθμένα, λαμβάνουν χώρα ώστε να εξεταστεί η επίδραση αυτών των παραμέτρων στη συμπεριφορά της κατασκευής.

Οι κινήσεις του πλοίου σαν στέρεο σώμα, και η τελική του θέση προσδιορίζονται με τη χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου που βασίζεται στην ικανοποίηση των εξισώσεων ισορροπίας δυνάμεων και ροπών.

3.2. Περιγραφή του πλοίου προς μοντελοποίηση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το πλοίο που χρησιμοποιήθηκε ως βάση μοντελοποίησης και προσομοιώσεων προσάραξης, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, είναι το δεξαμενόπλοιο διπλού τοιχώματος “Astilleros” , εγγεγραμμένο στον νηογνόμωνα DNV, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

$$L_{OA} = 265.00 \text{ m}$$

$$L_{BP} = 256.50 \text{ m}$$

$$B = 42.50 \text{ m}$$

$$D = 22.00 \text{ m}$$

$$\Delta = 151125 \text{ t}$$

$$T_D = 15.00 \text{ m}$$

$$C_B = 0.879$$

$$V_s = 14.5 \text{ Kn}$$

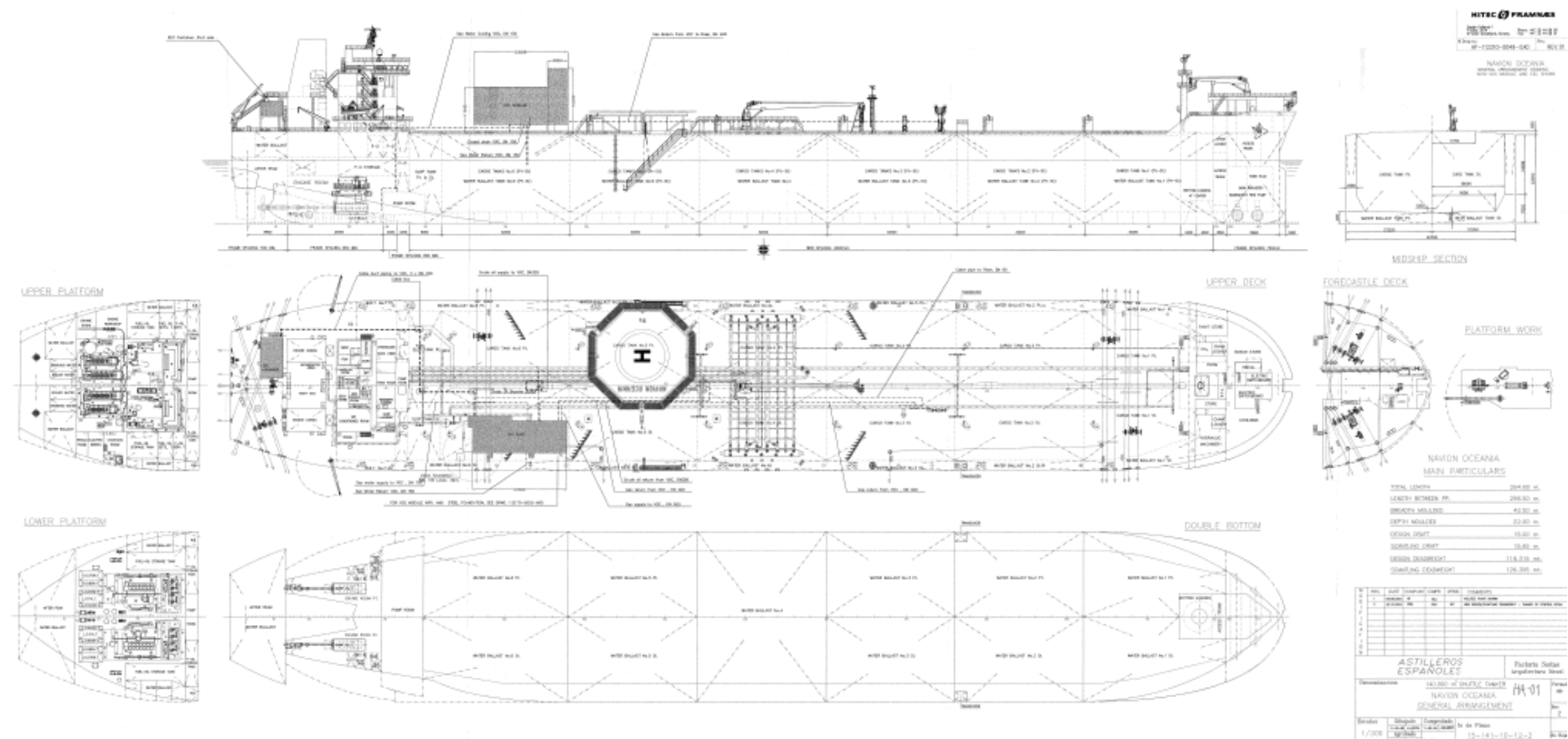
Η ισαπόσταση των κατασκευαστικών νομέων του πλοίου είναι :

F.S. _{peaks} = 700 mm , στο προωαίο και στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου,

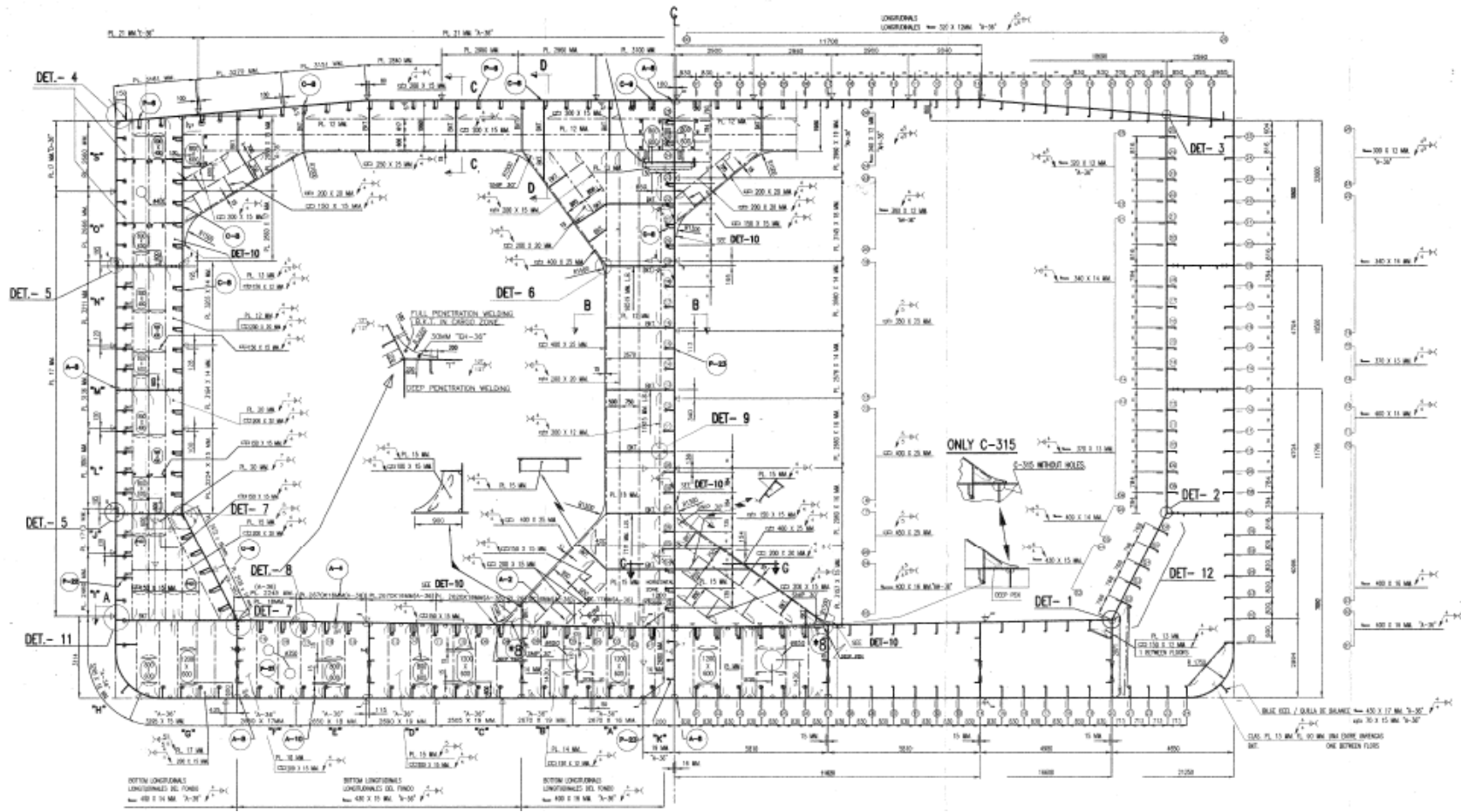
F.S. _{er} = 960 mm , στο τμήμα του μηχανοστασίου και

F.S. _{cargo} = 4000 mm, στο μέσο τμήμα του πλοίου, το οποίο και θα μοντελοποιηθεί.

Στην Εικόνα 3-1, φαίνεται το σχέδιο γενικής διάταξης του πλοίου αυτού, ενώ στην Εικόνα 3-2, το κατασκευαστικό σχέδιο της μέσης τομής του, απο το οποίο λήφθηκαν όλα τα απαραίτητα στοιχεία σχετικά με τη μοντελοποίηση τμήματος του πλοίου στο πρόγραμμα ABAQUS/CAE.



Εικόνα 3-1 : Σχέδιο γενικής διάταξης του, προς μοντελοποίηση, πλοίου.



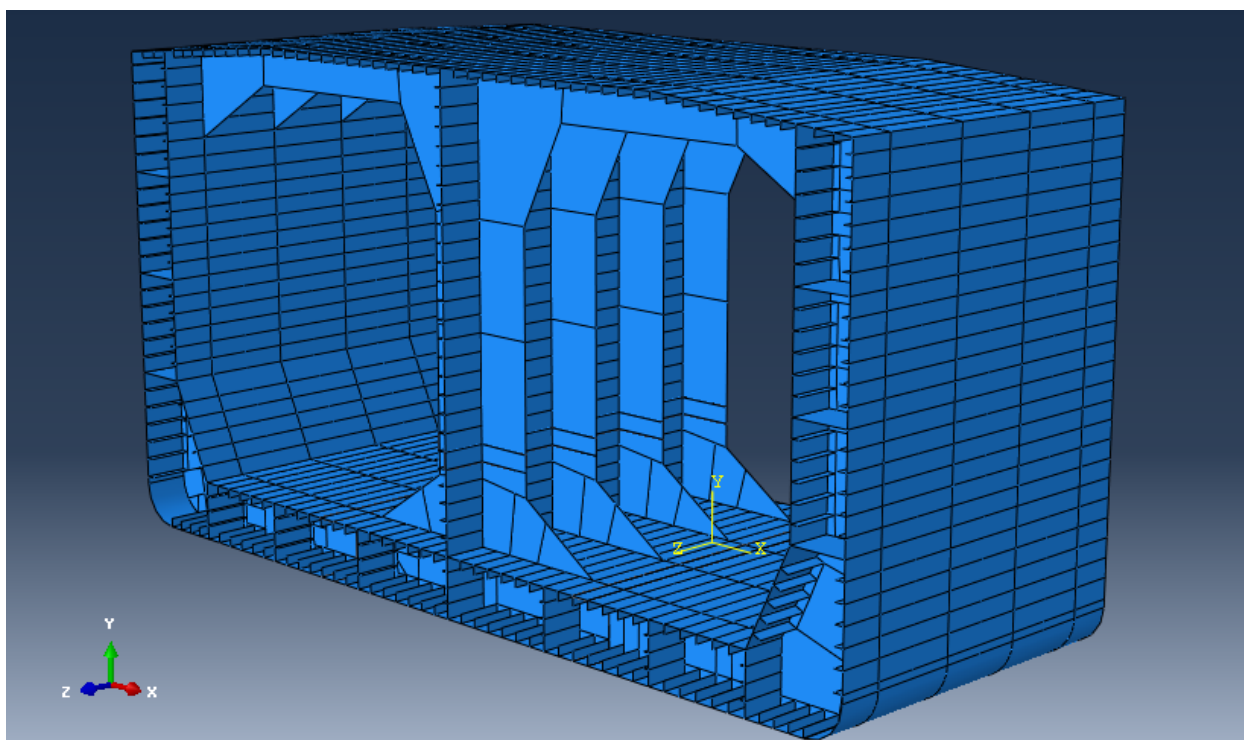
Εικόνα 3-2 : Σχέδιο μέσης τομής του, προς μοντελοποίηση, πλοίου.

3.3. Μοντελοποίηση της μέσης τομής του πλοίου

3.3.1. Γεωμετρική μοντελοποίηση

Το τμήμα του πλοίου που μοντελοποιήθηκε με χρήση πεπερασμένων στοιχείων είναι αυτό της μέσης τομής, από το βασικό επίπεδο αναφοράς (Base Line), μέχρι και το κύριο κατάστρωμα (Main Deck). Κατασκευάστηκαν δύο μοντέλα μήκους 16 και 20 μέτρων (τεσσάρων και πέντε νομέων αντίστοιχα). Κατά τη σχεδίαση του, στο ABAQUS/CAE, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στο να αποδοθούν, όσο πιο ρεαλιστικά δύναται, όλες οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες του τμήματος (Εικόνα 3-3). Σε αυτό, εκτός από τα κύρια ελάσματα, συμπεριλαμβάνονται :

- Οι κατασκευαστικοί νομείς, όπου ο πρώτος και ο τελευταίος απέχουν 2 μέτρα από τα ελεύθερα άκρα του μοντέλου (Web Frames)
- Η κεντρική και οι πλευρικές σταθμίδες του διπύθμενου (Girders)
- Τα πλευρικά ελάσματα υδρορροής (Stringers)
- Όλες οι διαμήκεις ενισχύσεις τύπου “flat bars”, στον εσωτερικό και στον εξωτερικό πυθμένα, στις εσωτερικές και στις εξωτερικές πλευρές, στο κατάστρωμα, στην κεντρική διαμήκη φρακτή, στην κεντρική και τις πλευρικές σταθμίδες του διπύθμενου (Stiffeners).



Εικόνα 3-3 : Μοντελοποίηση τμήματος της μέσης τομής του πλοίου μήκους 16 μέτρων.

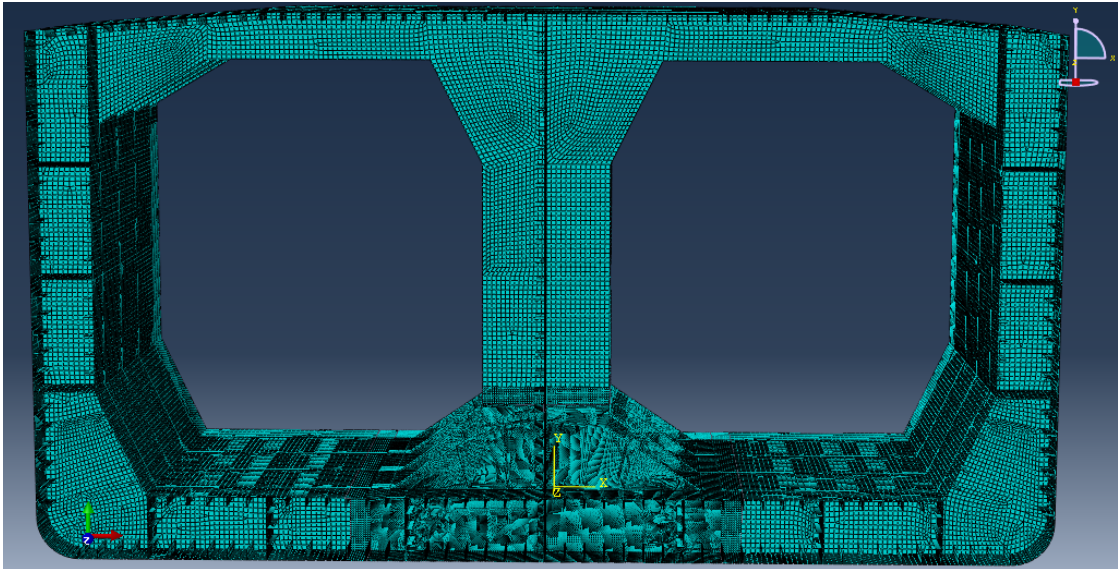
3.3.2. Μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα ανάλυση, επιλέχτηκαν από τη βιβλιοθήκη του ABAQUS/Explicit και έχουν την κωδική ονομασία S4R. Πρόκειται για τετρακομβικά στοιχεία κελύφους, όπου κάθε κόμβος έχει 6 βαθμούς ελευθερίας, τρεις μετατοπίσεις και τρεις στροφές ως προς τρισδιάστατο ορθοκανονικό σύστημα αξόνων. Η επίδραση του πάχους έχει ληφθεί υπόψη με τη χρήση πέντε (5) σημείων ολοκλήρωσης κατά το πάχος και επτά (7) σημείων ολοκλήρωσης, κατά το πάχος, στη περιοχή της σύγκρουσης. Επιπλέον για λόγους επεξεργαστικής οικονομίας, τα επιλεγμένα στοιχεία έχουν μειωμένο αριθμό σημείων ολοκλήρωσης στο επίπεδό τους (ένα σημείο ολοκλήρωσης στο επίπεδό τους). Η επιλογή τους έγινε υιοθετώντας συγκριτική μελέτη με τα στοιχεία S4, τα οποία διαθέτουν πλήρη αριθμό σημείων ολοκλήρωσης (4 σημεία ολοκλήρωσης στο επίπεδό τους), στα πλαίσια της διπλωματικής του κ. Ηλ. Ζηλάκου 2008.

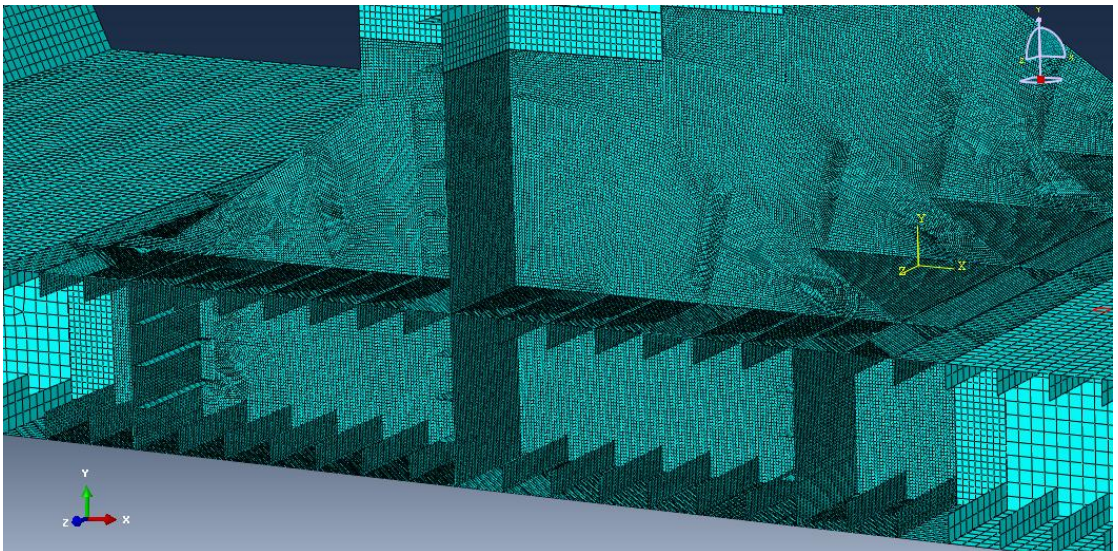
Το μοντέλο απαρτίζεται από στοιχεία μήκους πλευρών 200 mm, εκτός των στοιχείων που βρίσκονται στην περιοχή της σύγκρουσης, τα οποία επιλέχθηκαν με μήκος πλευρών 50 mm. Ως περιοχή συγκρούσεως, θεωρήθηκε το τμήμα του μοντέλου που έρχεται σε επαφή με τον ύφαλο κατά την εξέλιξη του φαινομένου της προσάραξης καθώς και η γύρω περιοχή. Σημειώνεται ότι, η εκλογή στοιχείων των 50 mm για τη διακριτοποίηση της περιοχής της σύγκρουσης, βασίστηκε στη μελέτη που πραγματοποιήθηκε πάνω στη σύγκλιση πλεγμάτων στοιχείων διαφορετικού μήκους, στην εργασία των M. Samuelides *et al*, 2007. Με τη χρήση της συγκεκριμένης διάστασης επιτεύχθηκε καλή ακρίβεια στους υπολογισμούς και τουλάχιστον οκτώ στοιχεία μεταξύ των διαμήκων ενισχύσεων (flat bars). Η επιλογή των στοιχείων με μήκος 200 mm έγινε, ώστε, τουλάχιστον δύο στοιχεία να παρεμβάλονται στις διαμήκεις ενισχύσεις (Zilakos *et al*). Αυτός είναι και ο λόγος που δεν επιλέχθηκε ακόμα πιο αραιό πλέγμα στην περιοχή, μακριά από τη σύγκρουση, κάτι που θα μείωνε σαφέστατα την απαιτούμενη επεξεργαστική ισχύ του συστήματος, για τις προσομοιώσεις.

Η σύνδεση του πυκνού πλέγματος (50 mm) με το αραιό (100 mm) έγινε με κάποια μικρά τμήματα με στοιχεία μήκους 100 mm ώστε η μετάβαση από το ένα πλέγμα στο άλλο να είναι πιο ομαλή, ενώ χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Tie constraints που προσφέρεται από το ABAQUS/Explicit, ώστε να σύνδεθούν τα διαφορετικά πλέγματα μεταξύ τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η κίνηση των ελεύθερων κόμβων να συμβαδίζει με αυτή του επιπέδου των γειτονικών στοιχείων και να μην είναι ανεξάρτητη. Τα διαφορετικής πυκνότητας πλέγματα και τα τρία τμήματα μετάβασης, από το πιο πυκνό πλέγμα στο πιο αραιό, φαίνονται στις Εικόνες 3-4, 3-5 και 3-6.

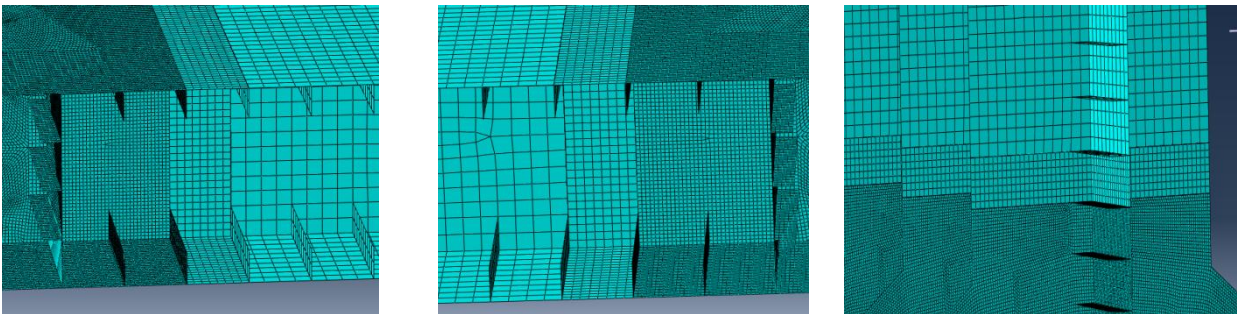
Τέλος, χρησιμοποιήθηκε η επιλογή Structured Mesh, ούτως ώστε το πλέγμα να σχεδιαστεί, κατά το δυνατόν, ομοιόμορφο και συγκροτημένο με σκοπό την επίτευξη ενός ικανοποιητικού ορίου ευστάθειας της άμεσης μεθόδου χρονικής ολοκλήρωσης. Στις περιοχές όπου το ABAQUS δεν μπορούσε να αποδώσει ομοιόμορφο πλέγμα, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας της κατασκευής, αυτή χωρίστηκε σε μικρότερα και πιο απλά τμήματα με την επιλογή Auto Partition. Έτσι επιτεύχθη ομοιόμορφη διακριτοποίηση σε ολόκληρο το μοντέλο με σχετικά μικρή απόκλιση των στοιχείων όσον αφορά το μέγεθος και τη στρέβλωση τους.



Εικόνα 3-4 : Πλέγμα στοιχείων μοντέλου.



Εικόνα 3-5 : Πλέγμα στην περιοχή σύγκρουσης.



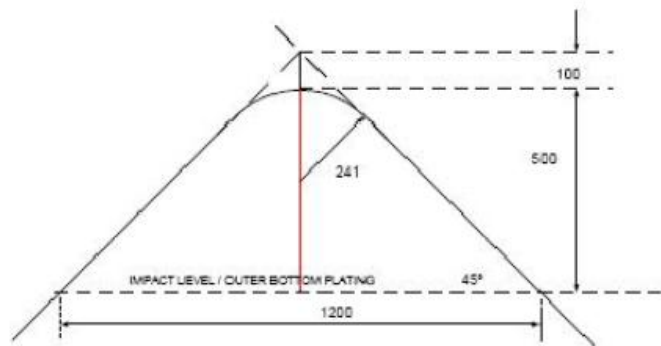
Εικόνα 3-6 : Τμήματα μετάβασης από πυκνό πλέγμα, σε αραιό.

3.4. Μοντελοποίηση των υφάλων

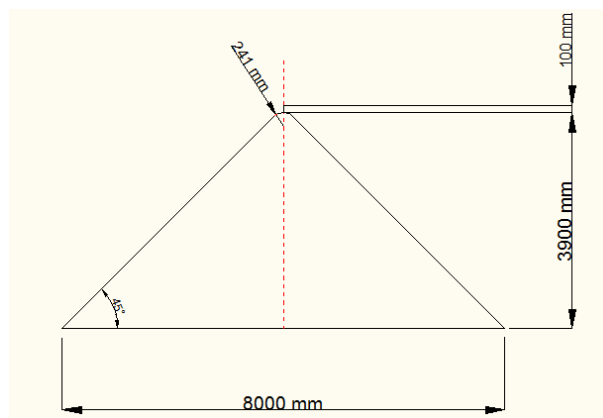
3.4.1. Γεωμετρική μοντελοποίηση

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, διερευνήθηκε και η επίδραση της γεωμετρίας του υφάλου στο φαινόμενο της προσάραξης. Κάτω από αυτή τη σκοπιά, δημιουργήθηκαν δύο μοντέλα βράχου, διαφορετικού σχήματος.

Το πρώτο προσομοίωμα βράχου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη, προέρχεται από την εργασία των Samuelides *et al*, 2007 (Εικόνα 3-7). Στην Εικόνα 3-8 φαίνεται το σκαρίφημα του βράχου που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις αυτής της εργασίας με μόνη διαφορά, το μεγαλύτερο ύψος που επιλέχθηκε με σκοπό την εισχώρηση του σε μεγάλο βαθμό στον πυθμένα του πλοίου. Πρόκειται για ένα κωνικό, στερεό, άκαμπτο σώμα του οποίου η κορυφή αντικαθίσταται από σφαιρικό τμήμα ακτίνας 241 mm. Η βάση του κώνου επιλέχθηκε με διάμετρο 8 μέτρα και ύψος 3,9 μέτρα όπως προκύπτει λόγω της σταθερής γωνίας κλίσης του κώνου ($\varphi = 45^\circ$).

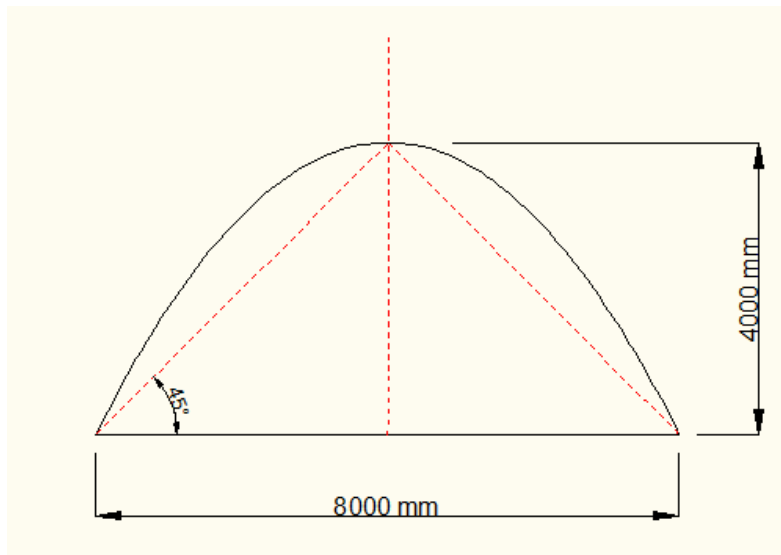


Εικόνα 3-7 : Μοντέλου βράχου – κωνικό εμπόδιο (Samuelides *et al*, 2007) .

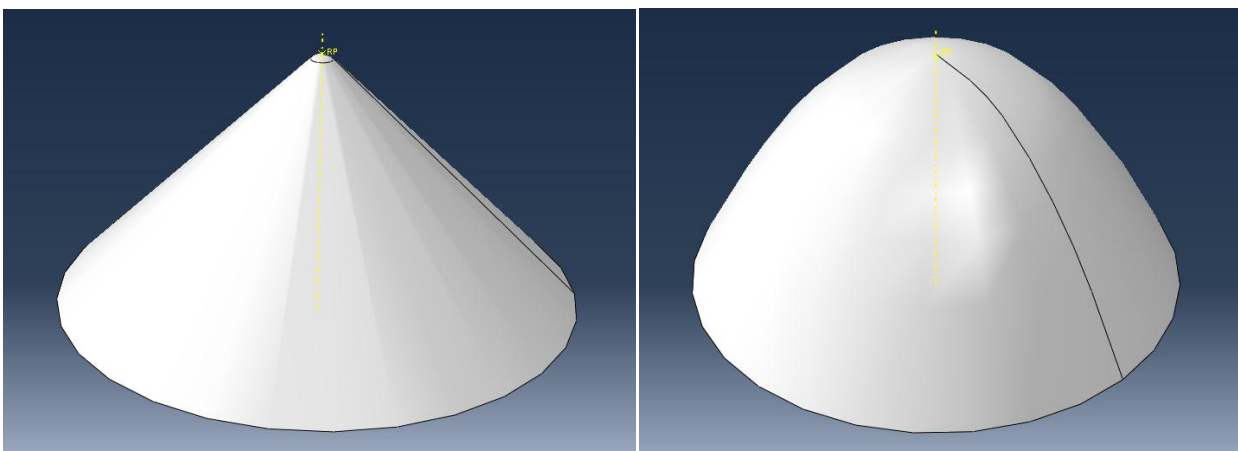


Εικόνα 3-8 : Σκαρίφημα του πρώτου βράχου που μοντελοποιήθηκε – κωνικό εμπόδιο.

Το δεύτερο προσομοίωμα βράχου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη, προέρχεται από την εργασία των Amdahl *et al*, 2007. Το άκαμπτο αυτό εμπόδιο που έρχεται σε επαφή με το διπύθμενο φαίνεται στην Εικόνα 3-9. Πρόκειται για ένα παραβολοειδές, στερεό, άκαμπτο σώμα με διάμετρο βάσης ίση με 8 μέτρα και ύψος 4 μέτρα. Επi της ουσίας, εκτός από τη μορφή, οι δύο βράχοι έχουν ίδιες βασικές διαστάσεις, με μία μικρή διαφορά στο ύψος, που οφείλεται στην αντικατάσταση της ακμής του κώνου από το σφαιρικό τμήμα. Κατ' αυτό τον τρόπο, θα συγκρίνουμε απόλυτα την επίδραση της μορφής του υφάλου, χωρίς να υπάρχει επίδραση του μεγέθους του.



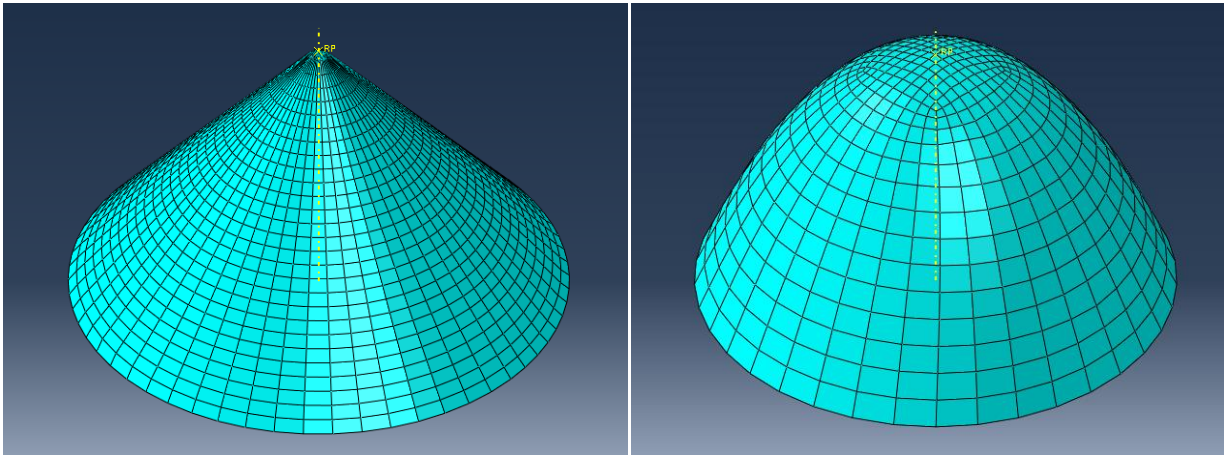
Εικόνα 3-9 : Σκαρίφημα του δεύτερου βράχου που μοντελοποιήθηκε – παραβολοειδές εμπόδιο.



Εικόνα 3-10 : Τρισδιάστατες απεικονίσεις των βράχων μετά τη σχεδίαση τους στο ABAQUS/CAE.

3.4.2. Μοντελοποίηση με χρήση πεπερασμένων στοιχείων

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη μοντελοποίηση των βράχων, επιλέχθηκαν από τη βιβλιοθήκη στοιχείων του ABAQUS/Explicit. Η κωδική ονομασία των στοιχείων είναι R3D3 και R3D4. Πρόκειται για άκαμπτα τρικομβικά και τετρακομβικά στοιχεία αντίστοιχα, κατάλληλα για τρισδιάστατη ανάλυση. Στην παρακάτω Εικόνα 3-11 παρουσιάζεται μια τρισδιάστατη απεικόνιση των μοντέλων των βράχων με τα προαναφερθέντα στοιχεία.



Εικόνα 3-11 : Πλέγμα στοιχείων βράχων.

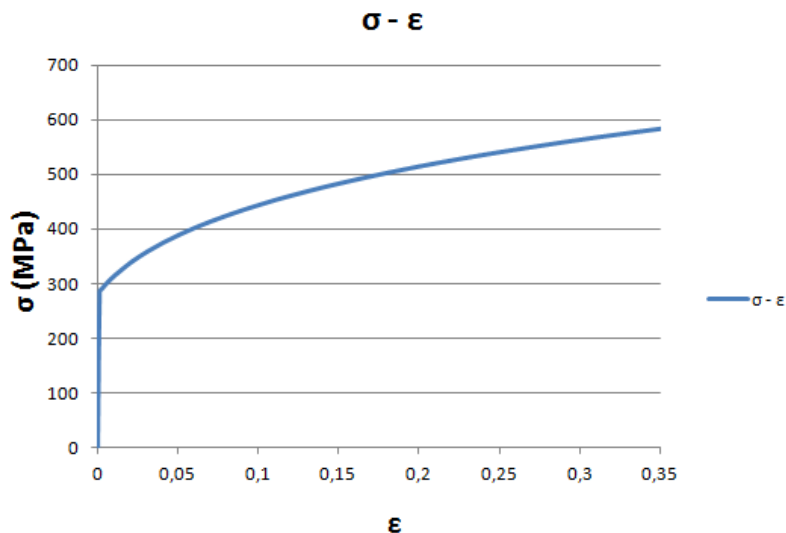
Σε αυτή τη φάση, για την σχεδίαση ομοιόμορφου και συγκροτημένου πλέγματος, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής επιλογές:

- Η επιλογή Sweep Mesh στην περίπτωση του κωνικού βράχου, με μέγεθος στοιχείων 200 mm, και
- Η επιλογή Free Mesh αναπτυγμένου κατά τον κατακόρυφο άξονα που περνά από την κορυφή του βράχου με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της αυτόματης ρύθμισης μεγέθους στοιχείων κατά τη μετάβαση από κάτω (περιοχή μεγάλης επιφάνειας) προς τα πάνω (περιοχή μικρής επιφάνειας) στην περίπτωση του παραβολοειδούς υφάλου, και μέγεθος στοιχείων 400 mm.

Αξίζει να σημειωθεί πως, λόγω της φύσης των μοντέλων των υφάλων (άκαμπτα, στέρα σώματα) το μέγεθος των στοιχείων του πλέγματος δεν έχει σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα και επομένως αυτό επιλέγεται με γνώμονα την επίτευξη ικανοποιητικά ομοιόμορφου πλέγματος με ελαχιστοποίηση των στρεβλώσεων.

3.5. Ιδιότητες υλικού του μοντέλου και κριτήριο αστοχίας

Για την παρούσα μελέτη, το τμήμα του πλοίου μοντελοποιήθηκε με ναυπηγικό χάλυβα (S235JR EN10025), πλήρως ισοτροπικό, με μέτρο ελαστικότητας ίσο με 206 GPa, πυκνότητα 7.85 t/m³, τάση διαρροής 285 MPa και λόγο Poisson 0.3. Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων φαίνεται στο Διάγραμμα 3-1 (Alsos et al, 2008).



Διάγραμμα 3-1 : Καμπύλη σ - ϵ ναυπηγικού χάλυβα S235JR EN10025 (Alsos et al, 2008).

Όσον αφορά την αστοχία του υλικού, επιλέχθηκε το κριτήριο της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (Equivalent plastic strain Criterion). Αυτή είναι μία απλή και επεξεργαστικά οικονομική μέθοδος κατα την οποία, όταν κάποιο στοιχείο του μοντέλου αποκτήσει μία τιμή πλαστικής παραμόρφωσης ίση με μία κρίσιμη τιμή, τότε το εν λόγω στοιχείο αποκτά μηδενική ακαμψία και δε συνεχίζει να συμβάλλει στην αντοχή του μοντέλου. Επι της ουσίας το συγκεκριμένο στοιχείο αφαιρείται από το πλέγμα και τα παραλαμβανόμενα από αυτό φορτία μεταφέρονται αυτόματα στα γειτονικά του στοιχεία, εφόσον αυτά παρουσιάζουν τιμή πλαστικής παραμόρφωσης χαμηλότερη της κρίσιμης.

Η τιμή της κρίσιμης πλαστικής παραμόρφωσης λαμβάνεται από τον τύπο των Lechmann & Peschmann (2002) που φαίνεται παρακάτω:

$$e_{fcr} = e_g + \alpha \cdot (t/l)$$

όπου e_{fcr} , η κρίσιμη τιμή πλαστικής παραμόρφωσης ενώ t και l , το μέσο πάχος των ελασμάτων και το μήκος των στοιχείων στην περιοχή της σύγκρουσης αντίστοιχα. Οι τιμές των παραμέτρων e_g και α λαμβάνονται από τον Πίνακα 3-1.

Το συγκεκριμένο μοντέλο επιλογής της κρίσιμης πλαστικής παραμόρφωσης, είναι κατάλληλο για προσομοιώσεις μεγάλης κλίμακας όπου η κατασκευή έχει μοντελοποιηθεί με στοιχεία κελύφους.

Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό, η κρίσιμη τιμή της πλαστικής παραμόρφωσης εξαρτάται από το πάχος των ελασμάτων και το μήκος των στοιχείων. Για την παρούσα μελέτη, αυτές οι τιμές είναι:

$$t = 19 \text{ mm}$$

$$l = 50 \text{ mm}$$

Τελικά καταλήξαμε σε τιμή κρίσιμης πλαστικής παραμόρφωσης $e_{fcr} = 0.33$

Plate thickness	e_g	α
5 mm	0.10	0.80
any – average value	0.08	0.65

Πίνακας 3-1 : Επιλογή παραμέτρων για τον τύπο κρίσιμης πλαστικής παραμόρφωσης κατά των Lechmann & Peschmann.

3.6. Ταχύτητα διείδυσης και τροχιά κίνησης του βράχου

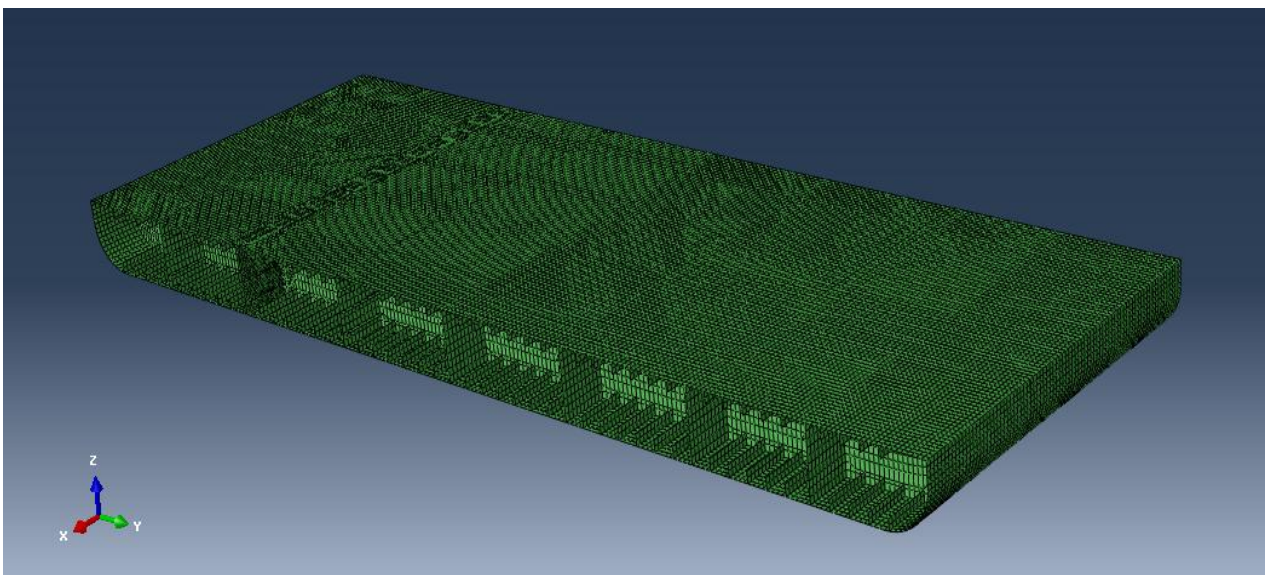
Στην παρούσα μελέτη, το πρόβλημα αποτελείται από ένα ακίνητο πλοίο (πιθανότατα αγκυροβολημένο) το οποίο λόγω εκτενών μεταβολών της παλίρροιας επικάθεται στον θαλάσσιο πυθμένα. Τότε μελετάται η απόκριση της κατασκευής όσο το φαινόμενο της παλίρροιας εξελίσσεται. Η πρόσομοίωση του φαινομένου επιτυγχάνεται, επιβάλλοντας διείδυση του μοντέλου του βράχου στο μοντέλο της κατασκευής, ακολουθώντας συγκεκριμένη τροχιά και με συγκεκριμένη ταχύτητα.

Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω η τροχιά της κίνησης του βράχου είναι κατακόρυφη. Ακόμα επειδή ο θαλάσσιος πυθμένας παραμένει ανεπηρέαστος από τις συνθήκες που επικρατούν αλλά και από τη συμπεριφορά του πλοίου, οριακές συνθήκες επιβλήθηκαν στην κορυφή του βράχου. Αυτές έχουν να κάνουν με περιορισμό της μεταφοράς στους εναπομείναντες δύο άξονες και περιορισμό της στροφής και στα τρία επίπεδα, ως προς τρισδιάστατο ορθοκανονικό σύστημα αξόνων.

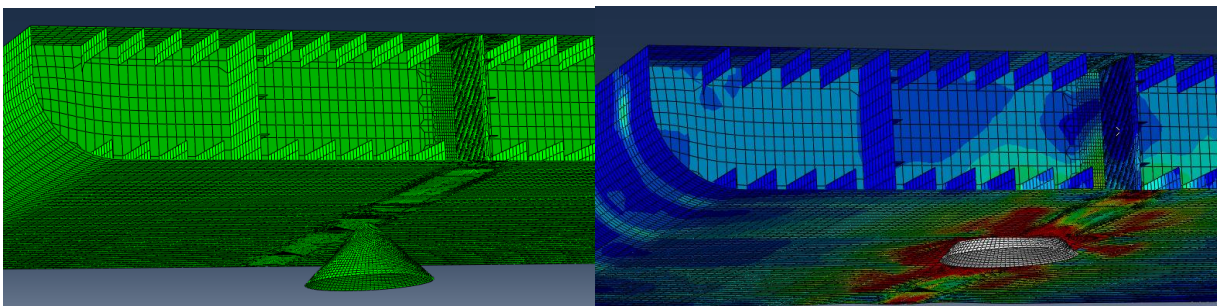
Ακόμα, εφόσον το φαινόμενο της παλίρροιας εξελίσσεται πολύ αργά, η επιλογή της ταχύτητας διείδυσης πρέπει να είναι κατά το δυνατόν χαμηλή, ούτως ώστε η ανάλυση να προσομοιάζει ρεαλιστικά το φαινόμενο. Ωστόσο πολύ χαμηλές ταχύτητες διείδυσης, κατά την προσομοίωση, καθιστούν την ανάλυση υπερβολικά χρονοβόρα και επεξεργαστικά απαιτητική. Έτσι, η επιλογή της ιδανικής ταχύτητας διείδυσης έγινε μετά από κατάλληλη μελέτη, ώστε να μην γίνει αντιοικονομική η ανάλυση, αλλά ταυτόχρονα να ληφθούν ακριβή αποτελέσματα.

Σε αυτό το στάδιο, έγιναν προσομοιώσεις για διάφορες ταχύτητες διείδυσης σε μοντελοποιημένο διπύθμενο πλοίου. Το μοντέλο αυτό, δημιουργήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του κ. Ηλ. Ζηλάκου, και ήταν κατάλληλο σε αυτό το στάδιο της μελέτης γιατί αποτελούσε μοντελοποίηση του ίδιου πλοίου. Ακόμα το γεγονός ότι το μοντέλο ήταν πολύ

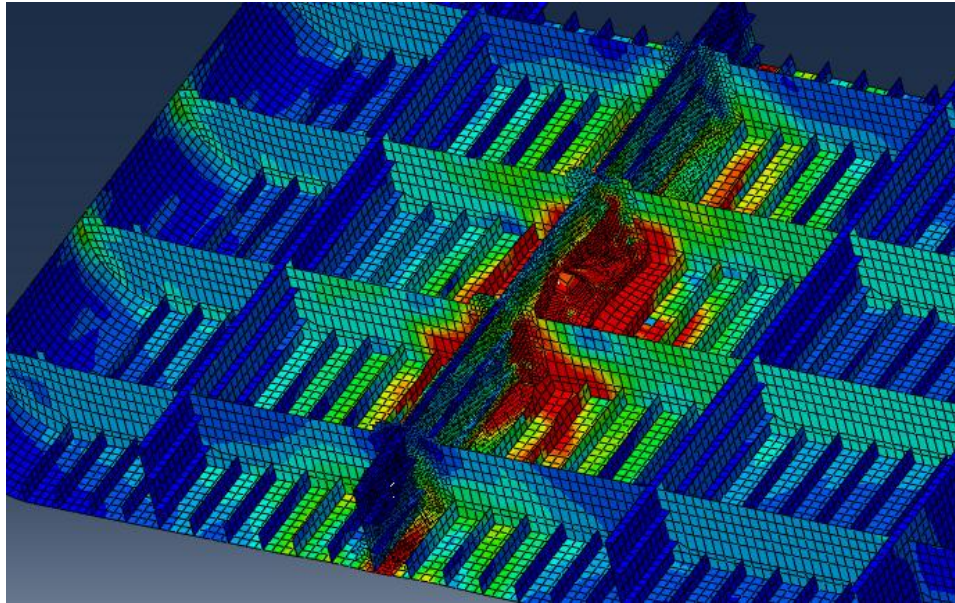
μικρότερης έκτασης, λόγω μοντελοποίησης μόνο του διπυθμένου, κατέστησε δυνατή τη διεξαγωγή αρκετών προσομοιώσεων σε εύλογο χρονικό διάστημα. Στην Εικόνα 3-12 φαίνεται το μοντέλο στο οποίο έγιναν οι παραπάνω προσομοιώσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι, στα πλαίσια της διπλωματικής του κ. Ηλ. Ζηλάκου οι προσομοιώσεις έγιναν με τη χρήση του ABAQUS/EXPLICIT, ωστόσο η σχεδίαση του μοντέλου έγινε σε άλλο εμπορικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων. Κατι τέτοιο, κατέστησε αδύνατες, αλλαγές στο πλέγμα του μοντέλου και έτσι οι προσομοιώσεις διείσδυσης έγιναν στην προεπιλεγμένη περιοχή σύγκρουσης. Ακόμη το υλικό του μοντέλου είναι ίδιο με αυτό που επιλέχθηκε στην παρούσα μελέτη, χωρίς όμως σε αυτό να περιλαμβάνεται κριτήριο αστοχίας.



Εικόνα 3-12 : Μοντέλοποίηση του διπύθμενου για προσομοιώσεις διαφορετικών ταχυτήτων διείσδυσης.

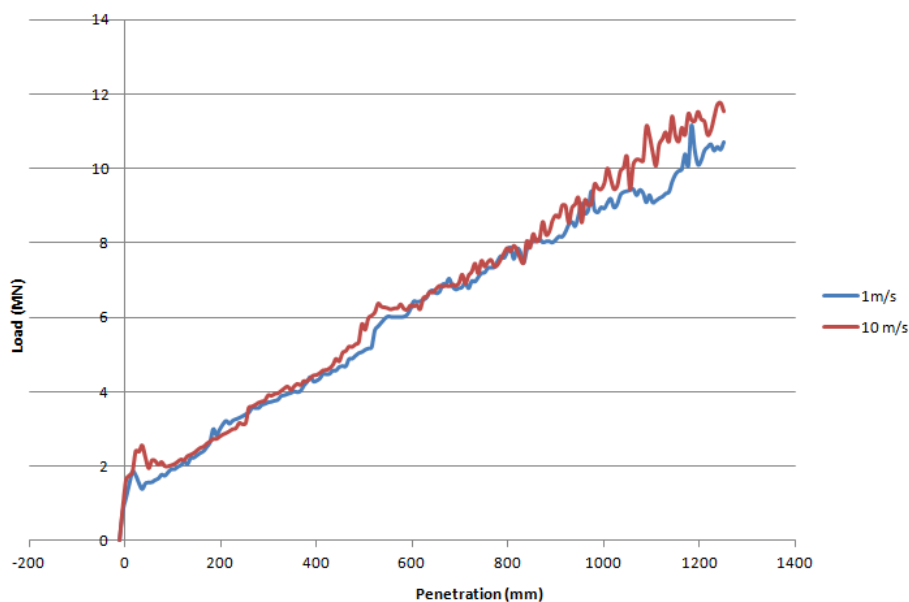


Εικόνα 3-13 : Απόκριση διπύθμενου σε προσομοίωση προσάραξης.



Εικόνα 3-14 : Απόκριση διπυθμένου σε προσομοίωση προσάραξης.

Το συμπέρασμα που εξήχθη είναι ότι η επίδραση της ταχύτητας διείσδυσης του βράχου στην απόκριση της κατασκευής και στους υπολογισμούς των δυνάμεων αντίδρασης είναι πολύ μικρή, καθώς επίσης και η εκλογή της ταχύτητας των 10 m/s είναι επεξεργαστικά συμφέρουσα. Κάτι τέτοιο φαίνεται ξεκάθαρα στο Διάγραμμα 3-2 που ακολουθεί. Σημειώνεται επίσης ότι, στις προσομοιώσεις δεν λήφθηκε υπόψιν η επίδραση της ταχύτητας παραμόρφωσης στο όριο διαρροής του υλικού, το οποίο ορίστηκε σταθερό και ίσο με το στατικό όριο διαρροής (285 MPa). Η συγκεκριμένη παραδοχή εξηγείται από το γεγονός ότι η φόρτιση σε αυτή την περίπτωση προσάραξης επιβάλλεται σχετικά αργά.



Διάγραμμα 3-2 : Καμπύλες δύναμης αντίδρασης-διείσδυσης για ταχύτητες 1m/s και 10m/s σε μοντέλο διπύθμενου δεξαμενόπλοιου.

3.7. Αλληλεπίδραση πλοίου-βράχου

Κατα την διείδυση του βράχου στην κατασκευή, αυτός έρχεται σταδιακά σε επαφή με διάφορες επιφάνειες (ελάσματα, ενισχυτικά, σταθμίδες κτλ). Σε αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκε η επιλογή General Contact έτσι ώστε τα πλέγματα του μοντέλου και του βράχου να αλληλεπιδράσουν μεταξύ τους και να μην εμφωλευθεί το ένα στο άλλο. Σε αυτή την αλληλεπίδραση, υπεισέρχονται και φαινόμενα τριβής τα οποία πρέπει να αξιολογηθούν και να εισαχθούν στην ανάλυση, ούτως ώστε να εξαχθούν ρεαλιστικά αποτελέσματα.

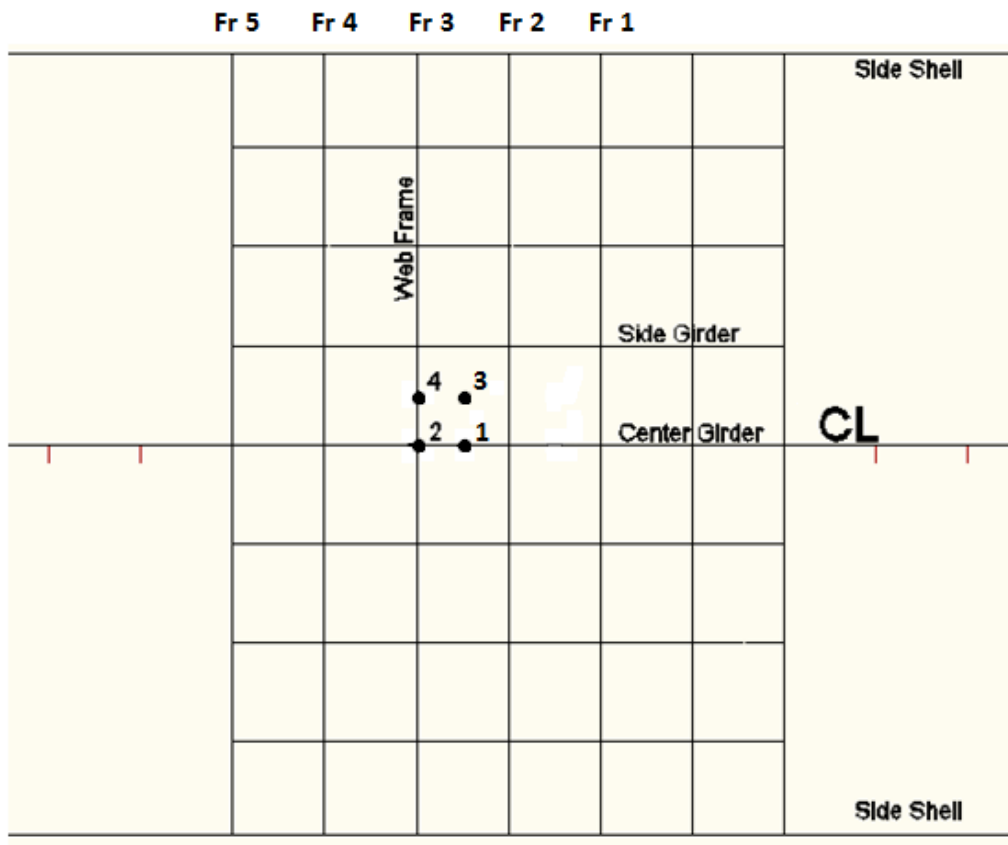
Συνήθως, για επαφή χάλυβα με χάλυβα ή χάλυβα με βράχο, υιοθετούνται τιμές συντελεστή τριβής απο 0.2 έως 0.4 . Ωστόσο, η επιλεγμένη τιμή μπορεί να διαφέρει σημαντικά, εξαρτώμενη απο διάφορες παραμέτρους όπως, θαλάσσιοι οργανισμοί προσκολλημένοι στο βράχο, έκχυση πετρελαίου ή τραχύτητα της επιφάνειας του ελάσματος. Στην εργασία των Zhang et al, 2006, ερευνήθηκε η επίδραση της τριβής σε ένα πλήθος αναλύσεων προσάραξης συνοδευόμενες απο κίνηση του πλοίου κατά το διάμηκες και παρατηρήθηκαν μεγάλες διαφορές στα επίπεδα φορτίσεων της κατασκευής για συντελεστές τριβής μικρότερους απο την τιμή 0.3 . Είναι προφανές όμως ότι, η προσάραξη με ταυτόχρονη κίνηση του πλοίου παρουσιάζει μεγάλες διαφορές στους μηχανισμούς διάρρηξης των ελασμάτων σε σχέση με την απλή επικάθηση στον θαλάσσιο πυθμένα. Στην τελευταία περίπτωση η επίδραση της τριβής αναμένεται να είναι πολύ μικρή με αποτέλεσμα, στην παρούσα ανάλυση να επιλεγθεί τιμή συντελεστή τριβής ίση με 0.3 (Amdahl et al, 2007) .

3.8. Σενάρια ανάλυσης

Είναι εύκολα αντιληπτό πως, η προσάραξη ενός πλοίου, λόγω του φαινομένου της παλίνρροιας είναι τυχαίο γεγονός καθώς δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί η ακριβής θέση του πυθμένα του πλοίου που θα έρθει σε επαφή με τον θαλάσσιο πυθμένα αλλά ούτε και η έκταση της διείδυσης.

Το πρώτο σκέλος του προβλήματος αυτού, αντιμετωπίζεται με το να αναλύθουν διάφορα σενάρια προσάραξης, ανάλογα με τη θέση του πυθμένα του πλοίου στην οποία πραγματοποιείται διείδυση του βράχου. Η κατασκευή του πυθμένα ενός δεξαμενοπλοίου είναι αρκετά πολύπλοκη όσον αφορά τα κατασκευαστικά του στοιχεία. Έτσι για λόγους πληρότητας και κάλυψης μεγάλου εύρους ενδεχομένων προσάραξης, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις προσομοιώσεις στις παρακάτω θέσεις, που αποτελούν και τα διαφορετικά σενάρια της ανάλυσης (Εικόνα 3-15) :

- **Σενάριο 1** : Προσάραξη μεταξύ δύο κατασκευαστικών νομέων, στην κεντρική σταθμίδα του πλοίου.
- **Σενάριο 2** : Προσάραξη σε κατασκευαστικό νομέα, στην κεντρική σταθμίδα του πλοίου.
- **Σενάριο 3** : Προσάραξη μεταξύ δύο κατασκευαστικών νομέων, μεταξύ κεντρικής και πλευρικής σταθμίδας του πλοίου.
- **Σενάριο 4** : Προσάραξη σε κατασκευαστικό νομέα, μεταξύ κεντρικής και πλευρικής σταθμίδας του πλοίου.



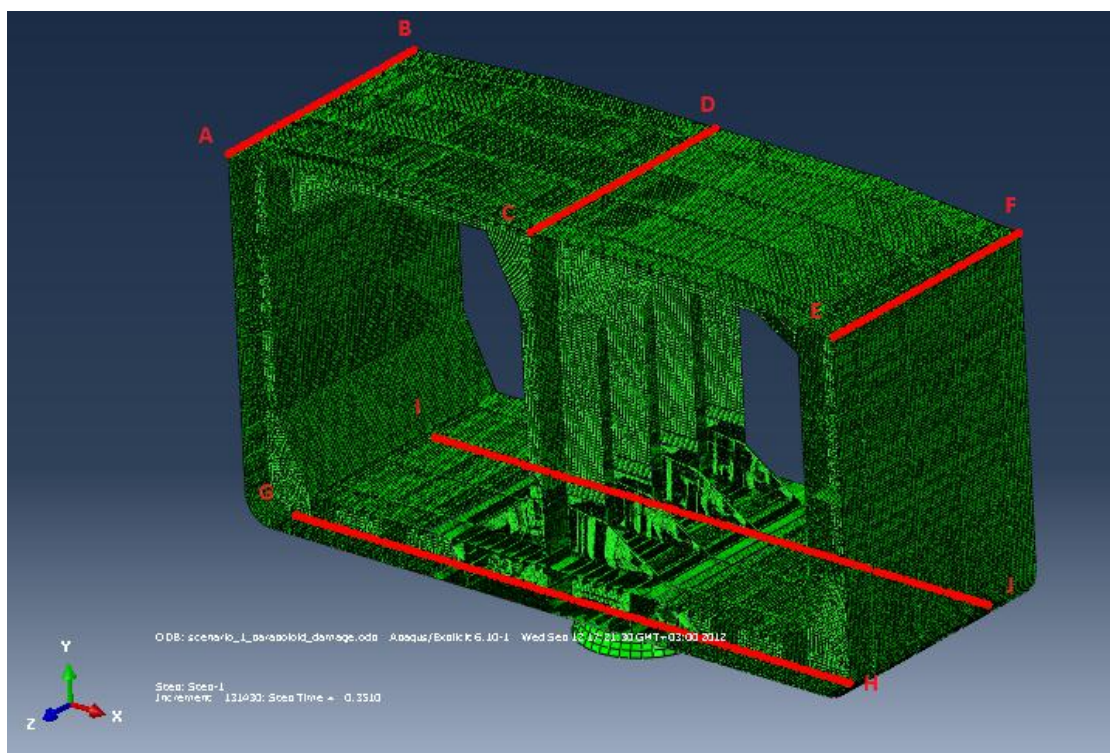
Εικόνα 3-15 : Σενάρια ανάλυσης προσάραξης.

Όσον αφορά το δεύτερο σκέλος του προβλήματος, αυτό αντιμετωπίζεται με το να γίνουν προσομοιώσεις προσάραξης μέχρι μία ικανοποιητική διείσδυση. Στην παρούσα μελέτη, αναλύθηκε διείσδυση του βράχου 3,5 μέτρα κατά το ύψος. Έτσι καλύπτουμε την περιοχή του διπύθμενου, που παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον, ενώ πρόβλεπεται ότι μίας τέτοιας έκτασης διείσδυση θα προκαλέσει την αστοχία και του εσωτερικού πυθμένα ο οποίος, στο τμήμα του πλοίου που μοντελοποιήσαμε, βρίσκεται στα 2,68 μέτρα από το εξωτερικό έλασμα

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

4.1. Ανάλυση προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 1]

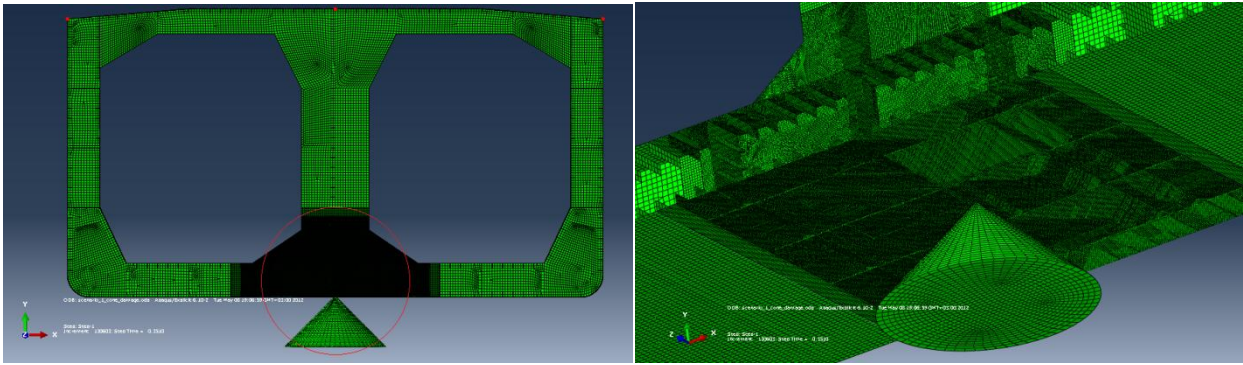
Στο παρόν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μήκους 16 μέτρων και ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσάραξης σε κωνικό βράχο ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του πλοίου μεταξύ δύο κατασκευαστικών νομέων στην κεντρική σταθμίδα του πλοίου (Εικόνα 4-2). Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθησαν στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Εικόνα 4-1 : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης

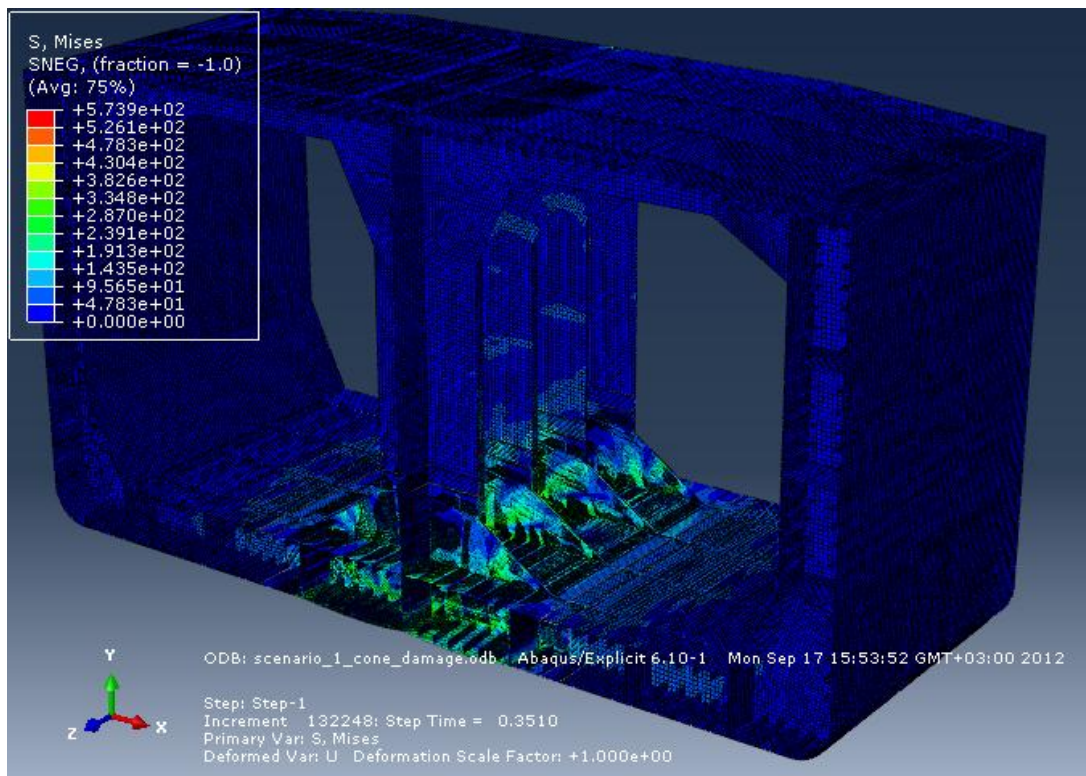
ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
AB, CD, EF	$U_Y, U_Z = 0$
GH, IJ	$U_Y, U_Z = 0$
Node D	$U_X, U_Z = 0$

Πίνακας 4-1 : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.

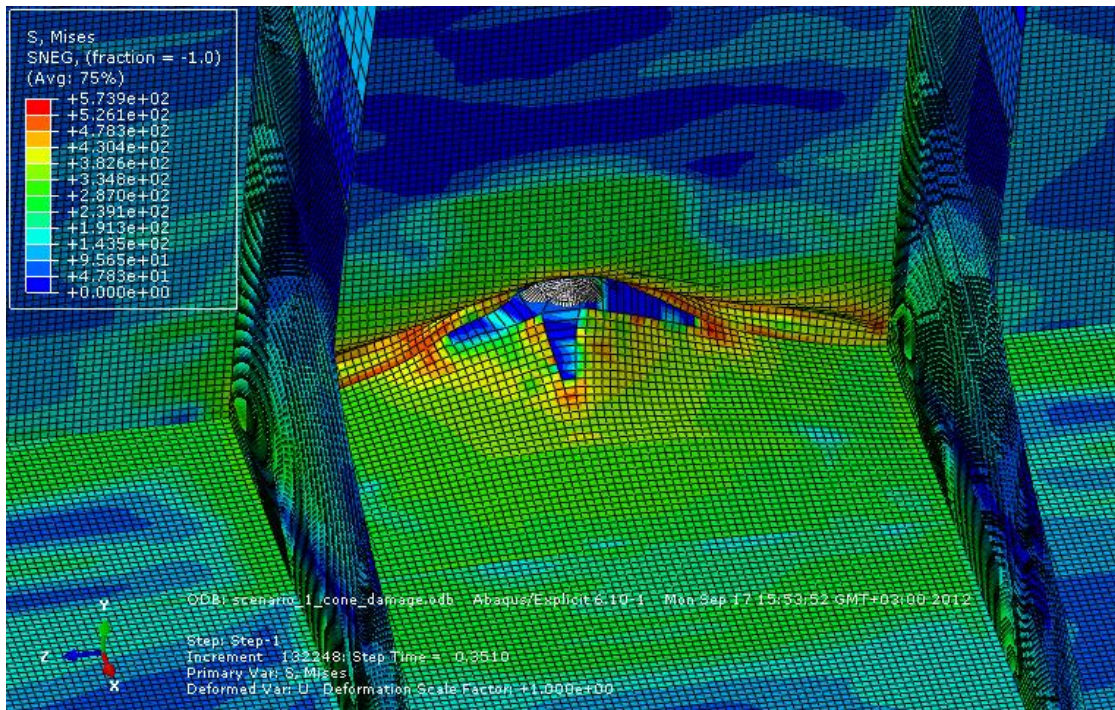


Εικόνα 4-2 : Απεικόνιση Σεναρίου 1 με κωνικό βράχο.

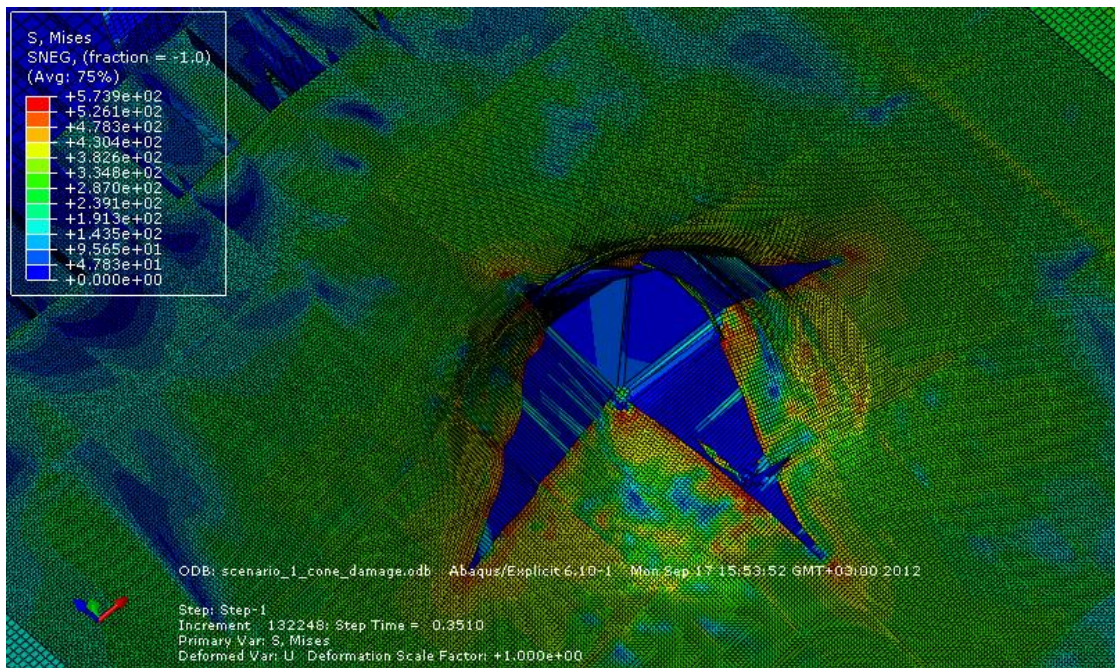
Μετά το πέρας της ανάλυσης, δημιουργήθηκε ένα ευρύ πεδίο τάσεων στην κατασκευή και παρουσιάστηκαν γενικές παραμορφώσεις. Η απόκριση της κατασκευής, καθώς και οι τιμές και οι θέσεις των τάσεων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Ακόμα στην Εικόνα 4-4, με έντονο μπλέ χρώμα φαίνεται το ρήγμα που δημιουργείται στο έλασμα του εσωτερικού πυθμένα, ενώ στην Εικόνα 4-5, αντίστοιχα το ρήγμα στο έλασμα του εσωτερικού πυθμένα. Σημειώνεται ότι, το ρήγμα εμφανίζεται με μπλέ χρώμα, που αντιπροσωπεύει τα στοιχεία με μηδενικές αναπτυσσόμενες τάσεις. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως εξηγήθηκε παραπάνω (βλ. Κεφάλαιο 3.4), τα στοιχεία που ξεπερνούν το όριο πλαστικής παραμόρφωσης που έχει οριστεί ως κρίσιμο, αποκτούν μηδενική ακαμψία και επομένως χάνουν την ικανότητα να φέρουν τάσεις.



Εικόνα 4-3 : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.

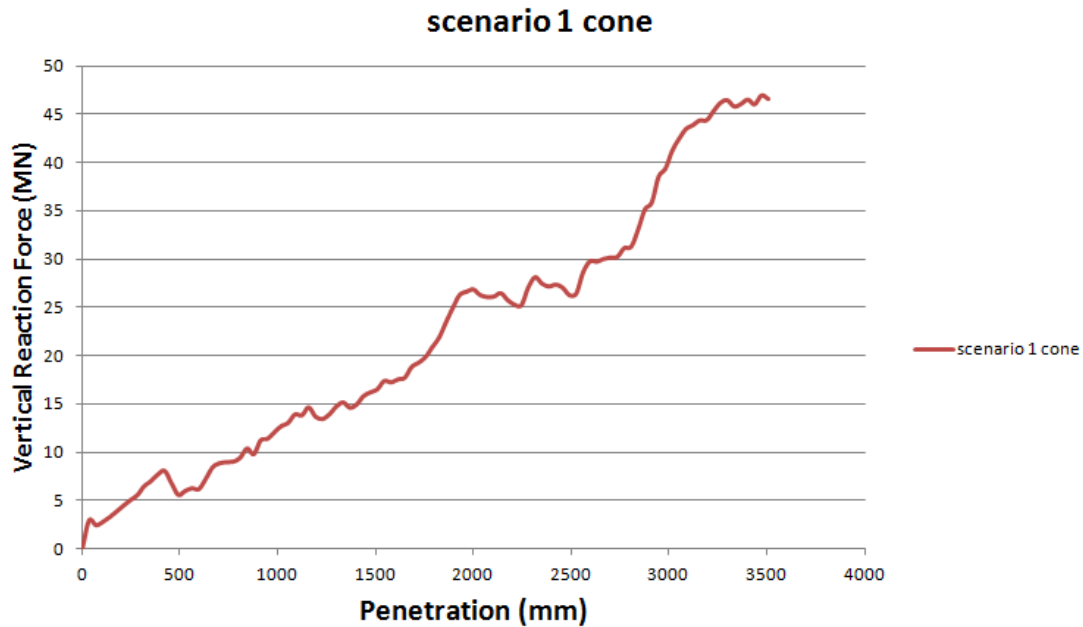


Εικόνα 4-4 : Ρήγμα ελάσματος εσωτερικού πυθμένα.



Εικόνα 4-5 : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.

4.1.1 Δυνάμεις Αντίδρασης λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 1]



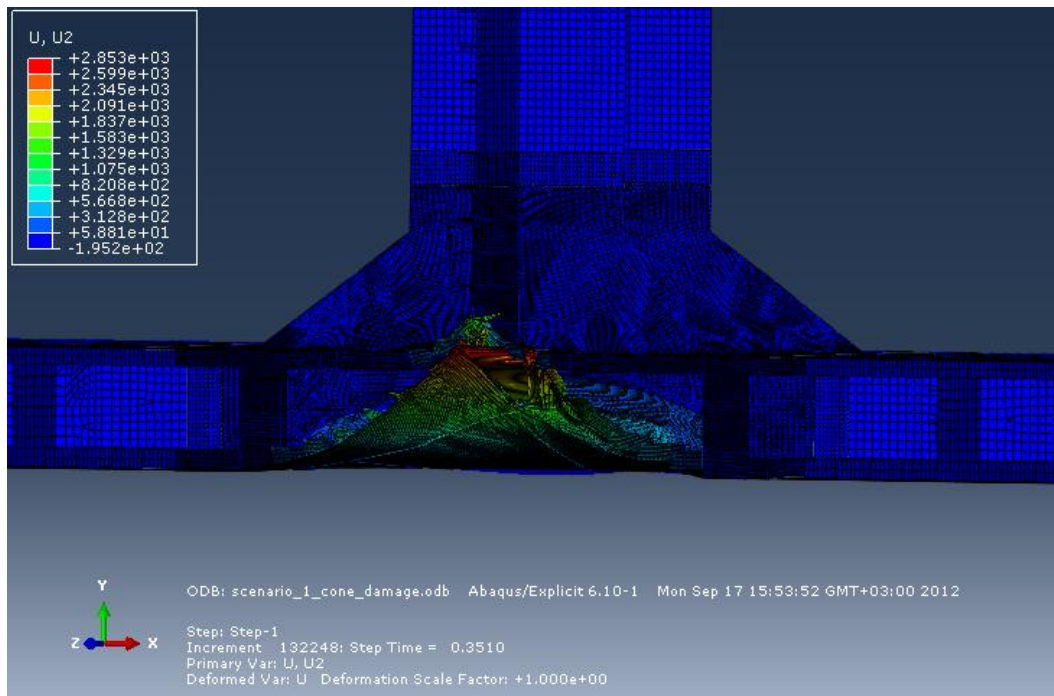
Διάγραμμα 4-1 : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.

Κατα τη διείσδυση του βράχου στον πυθμένα του μοντέλου αναπτύσσεται μία δύναμη αντίδρασης από το μοντέλο στο βράχο. Το μοντέλο αντιστέκεται στην εν λόγω διείσδυση εξ' αιτίας των επιβαλλόμενων οριακών συνθηκών. Η δύναμη αυτή εμφανίζεται συγκεντρωμένη στον κορυφαίο κόμβο του βράχου και επι της ουσίας είναι ίση και αντίθετη με τη δύναμη που θα ασκούσε ο βράχος στο πλοίο, σε πραγματικές συνθήκες προσάραξης.

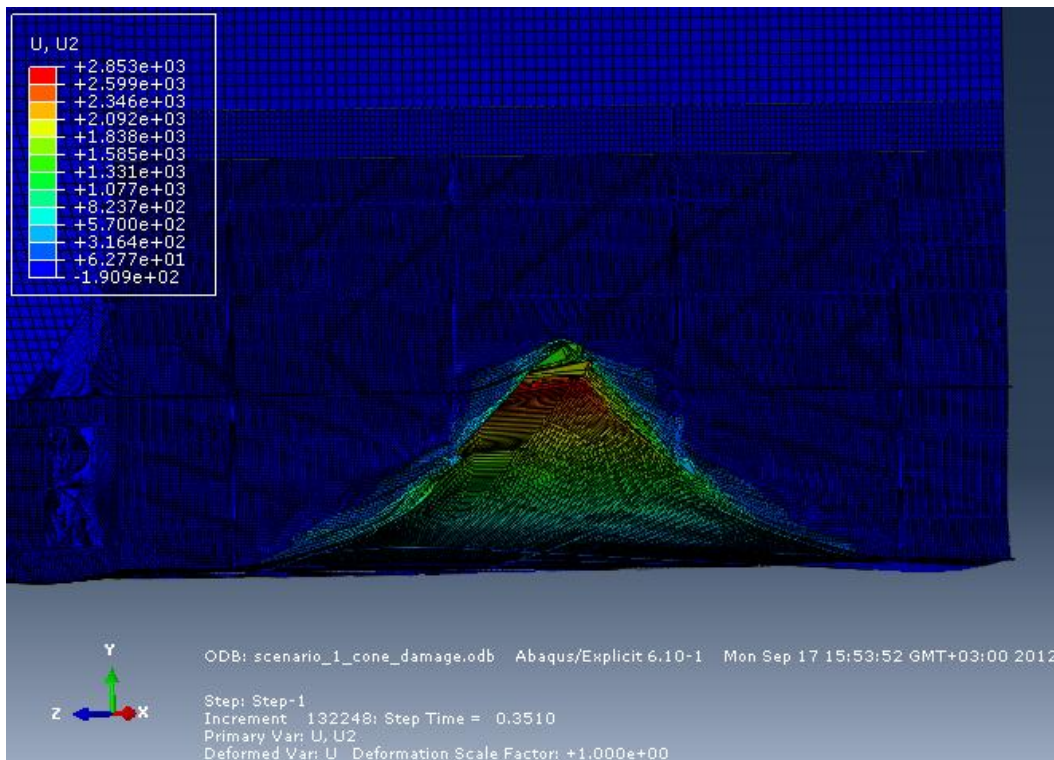
Παρατηρώντας την καμπύλη του διαγράμματος 4-1, δε φαίνεται κάποια περιοχή απότομης ανόδου ή πτώσης της δύναμης αντίδρασης κατά τη διείσδυση του βράχου. Αυτό σημαίνει ότι, εκτεταμένες αστοχίες ελασμάτων, σταθμίδων και ενισχυτικών δε συμβαίνουν σε διακριτές χρονικές στιγμές κατά τη διείσδυση αλλά συνεχώς, σχεδόν από τη στιγμή που ο βράχος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Αυτό μαρτυρούν και οι μικρές αλλά συχνές διακυμάνσεις της καμπύλης. Τελικά η δύναμη αντίδρασης παραμένει σε χαμηλά επίπεδα με μέγιστη τιμή τα 46.93 MN, για διείσδυση 3475 mm.

Το παραπάνω φαινόμενο παρουσιάζεται, καθώς ο κωνικός βράχος αποτελεί ένα αρκετά αιχμηρό μοντέλο υφάλου, στο οποίο δε παρουσιάζεται ιδιαίτερη αντίσταση κατά τη διείσδυση ενώ αντίθετα, "σχίζει" πιο εύκολα τον πυθμένα του πλοίου καθώς οι δυνάμεις συγκεντρώνονται σε σχετικά μικρή επιφάνεια.

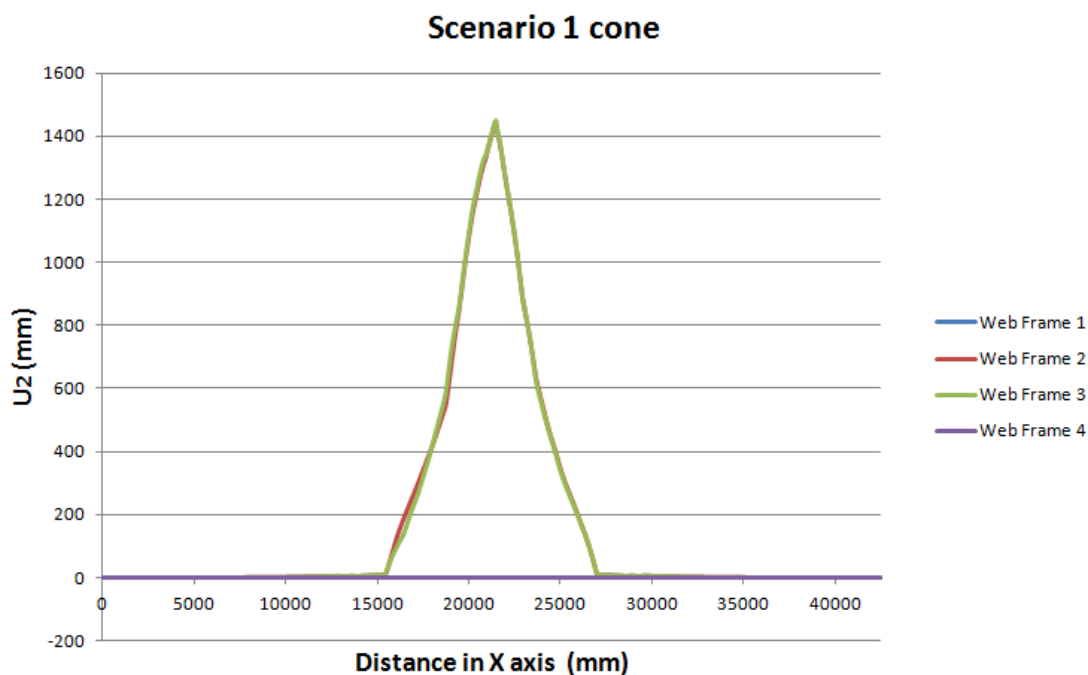
4.1.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 1]



Εικόνα 4-6 : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Εικόνα 4-7 : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.

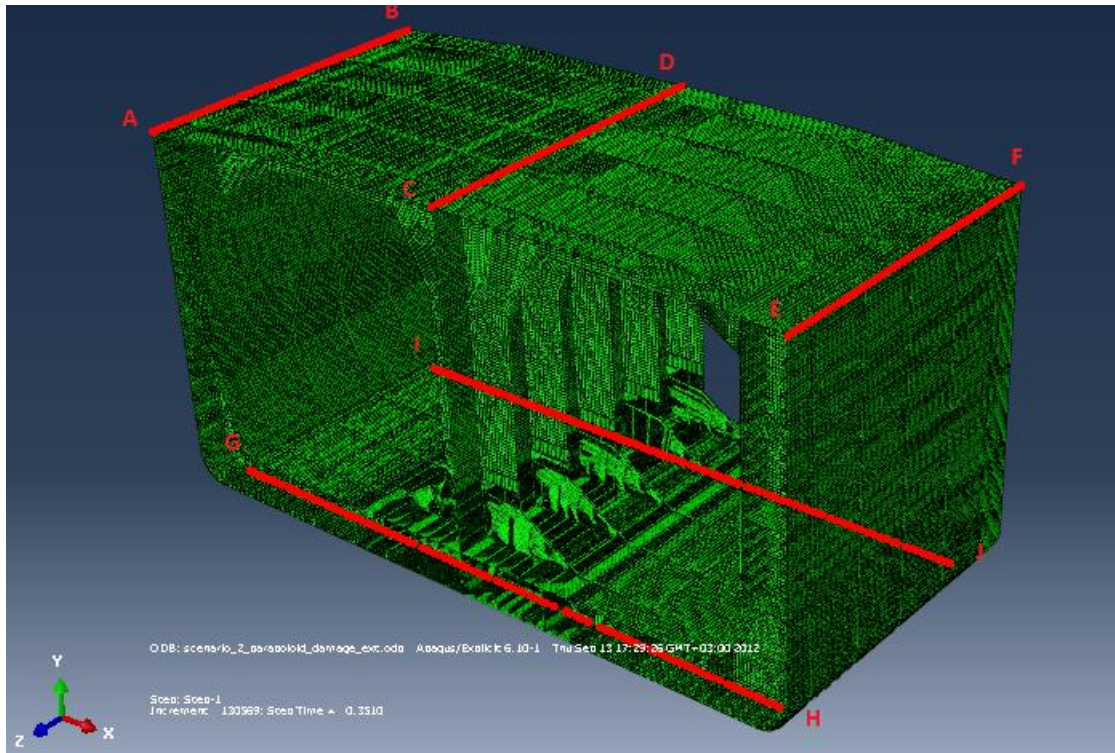


Διάγραμμα 4-2 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.

Στο Διάγραμμα 4-2, φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των κόμβων των κάτω ακμών κάθε ενός κατασκευαστικού νομέα στην περιοχή του πυθμένα, στο τέλος της ανάλυσης. Ο οριζόντιος άξονας αποτελεί το πλάτος του πυθμένα με 0 τη θέση του πρώτου κόμβου από αριστερά. Παρατηρείται ότι οι νομείς 2 και 3, που βρίσκονται εκατέρωθεν της περιοχής προσάραξης, παρουσιάζουν μεγάλες και σχεδόν ίδιες κατακόρυφες μετατοπίσεις μέχρι και 1450 mm, καθώς απέχουν το ίδιο από τον βράχο που έχει διεισδύσει στην κατασκευή. Αντίθετα οι ακραίοι νομείς 1 και 4 εμφανίζουν μηδενικές μετατοπίσεις λόγω των οριακών συνθηκών που τους έχουν επιβληθεί.

4.2. Ανάλυση προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 2]

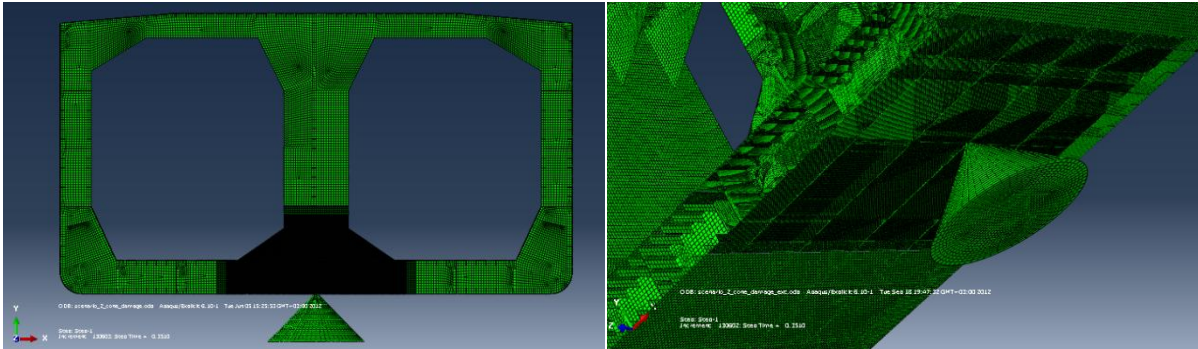
Στο παρόν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μήκους 20 μέτρων και ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσάραξης σε κωνικό βράχο ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του πλοίου, σε κατασκευαστικό νομέα, στην κεντρική σταθμίδα του πλοίου (Εικόνα 4-9). Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθησαν στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Εικόνα 4-8 : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.

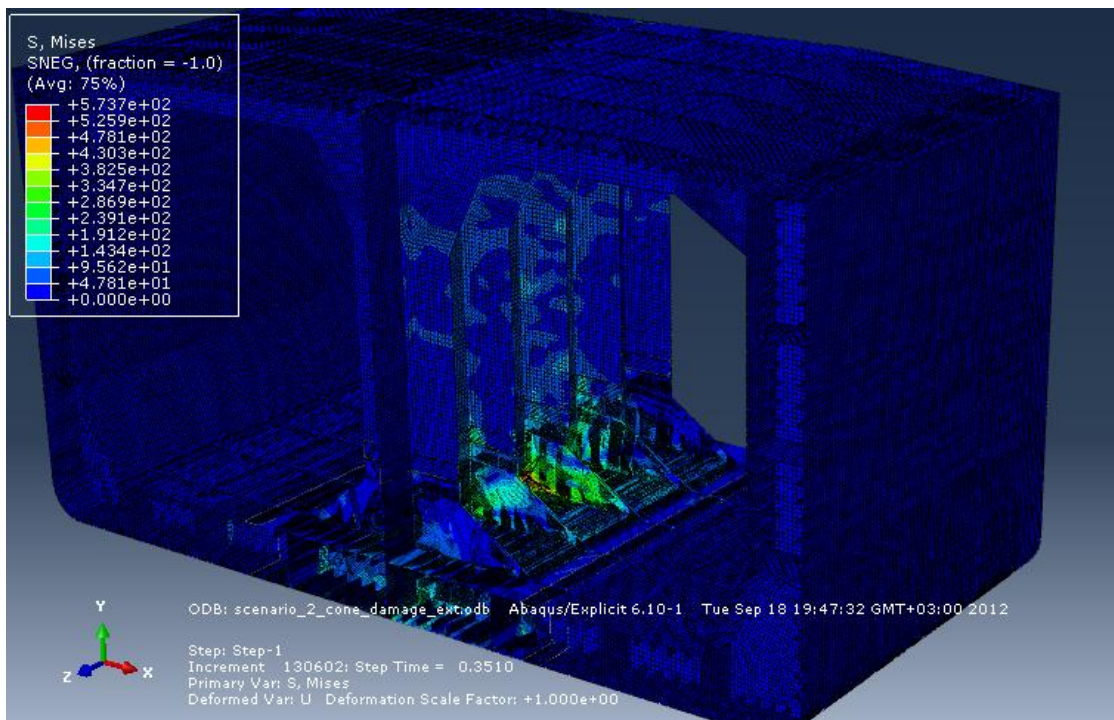
ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
AB, CD, EF	$U_Y, U_Z = 0$
GH, IJ	$U_Y, U_Z = 0$
Node D	$U_X, U_Z = 0$

Πίνακας 4-2 : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.

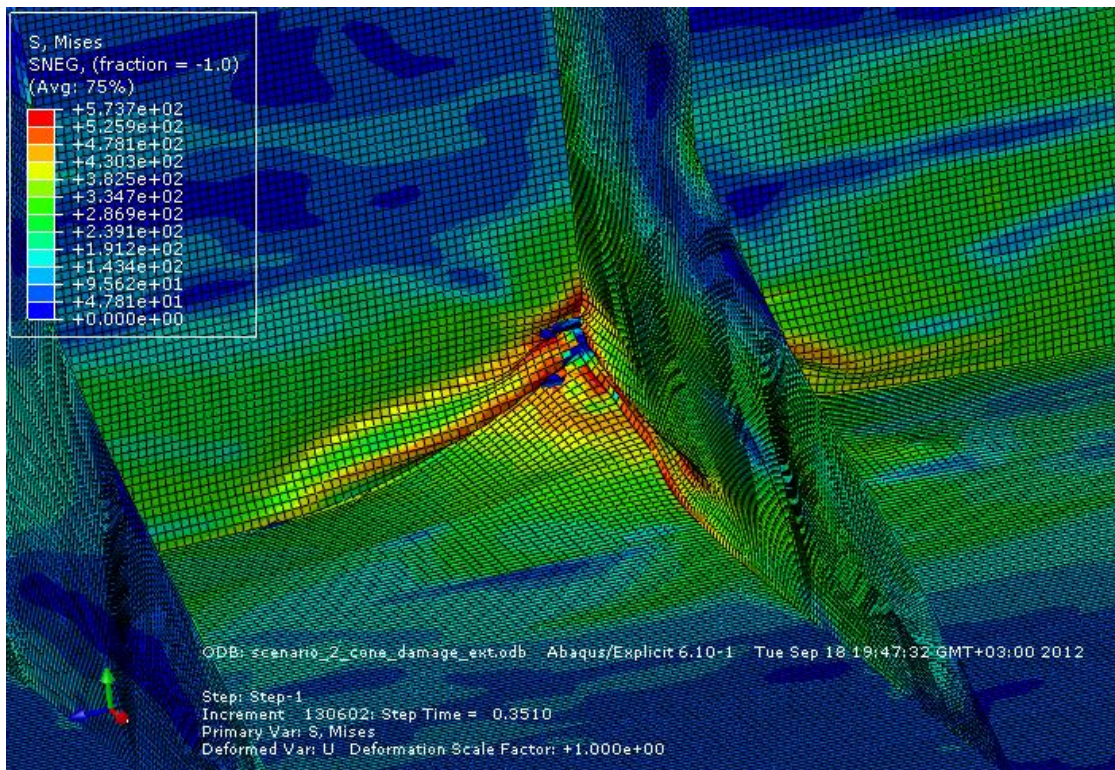


Εικόνα 4-9 : Απεικόνιση Σεναρίου 2 με κωνικό βράχο.

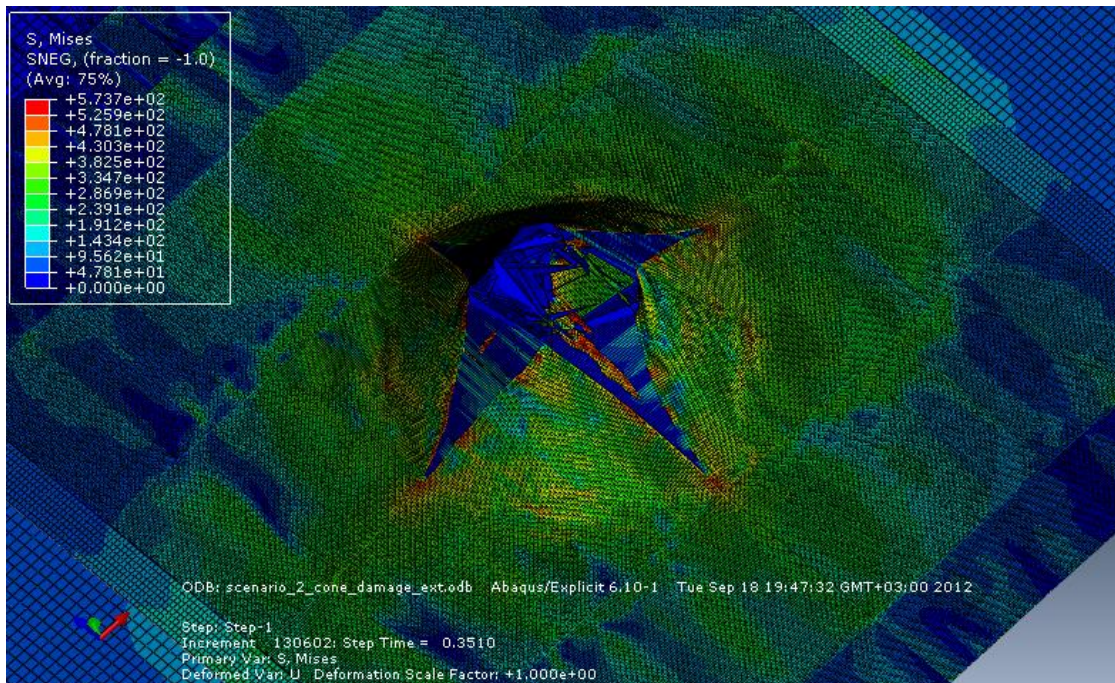
Μετά το πέρας της ανάλυσης, δημιουργήθηκε ένα ευρύ πεδίο τάσεων στην κατασκευή και παρουσιάστηκαν γενικές παραμορφώσεις. Η απόκριση της κατασκευής, καθώς και οι τιμές και οι θέσεις των τάσεων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικόνα 4-11 φαίνεται το ρήγμα που δημιουργείται στο έλασμα του εσωτερικού πυθμένα, ενώ στην Εικόνα 4-12, φαίνεται το ρήγμα στο έλασμα του εξωτερικού πυθμένα.



Εικόνα 4-10 : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.

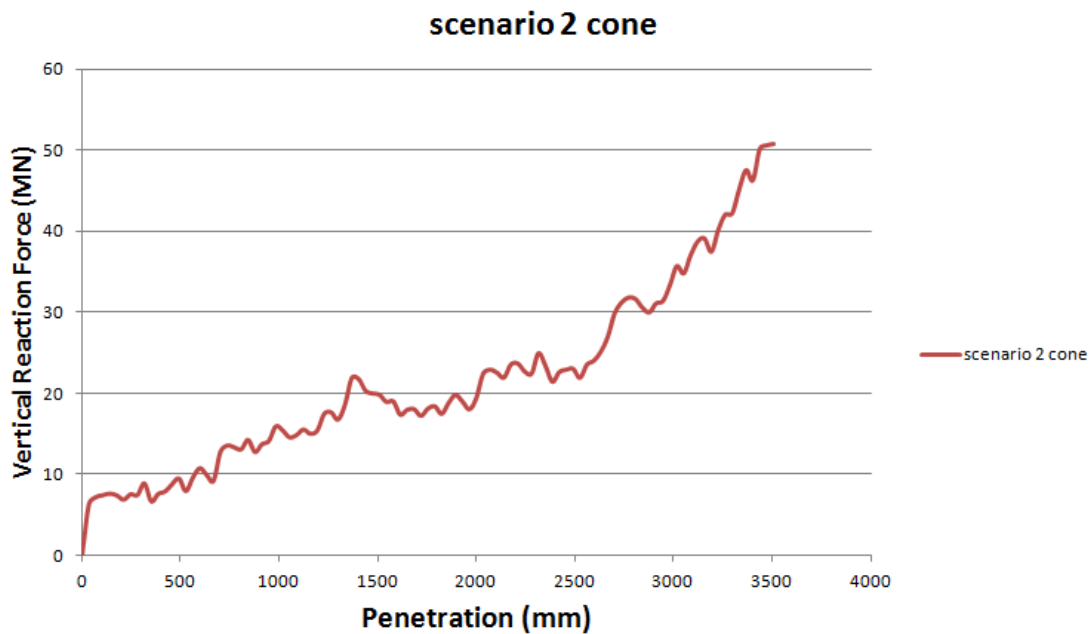


Εικόνα 4-11 : Ρήγμα ελάσματος εσωτερικού πυθμένα.



Εικόνα 4-12 : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.

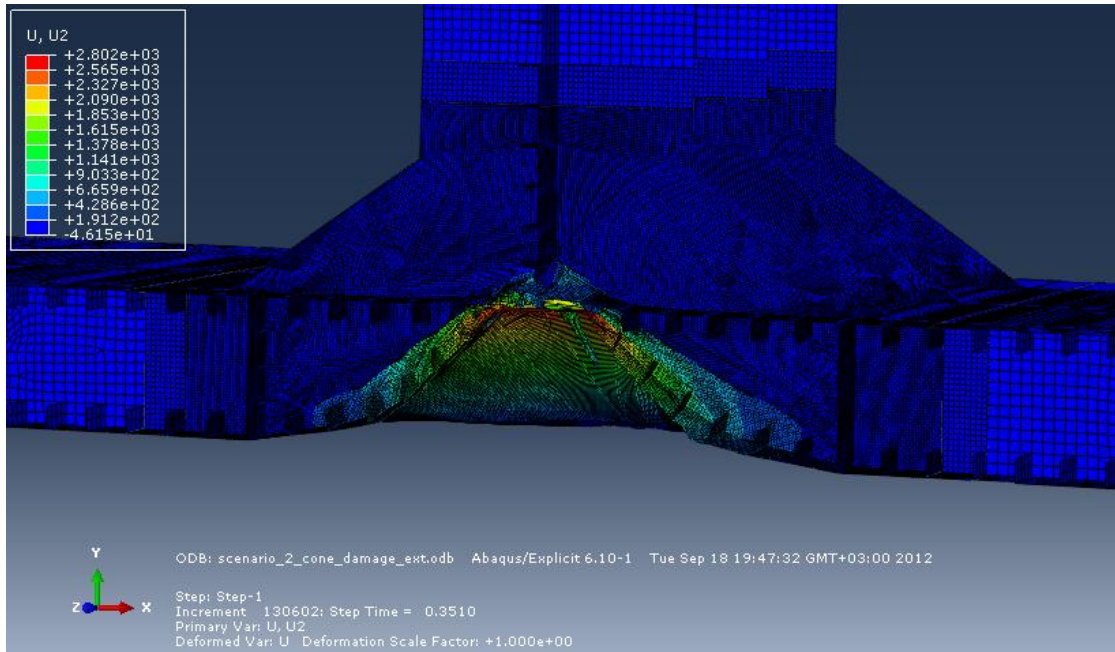
4.2.1 Δυνάμεις Αντίδρασης λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 2]



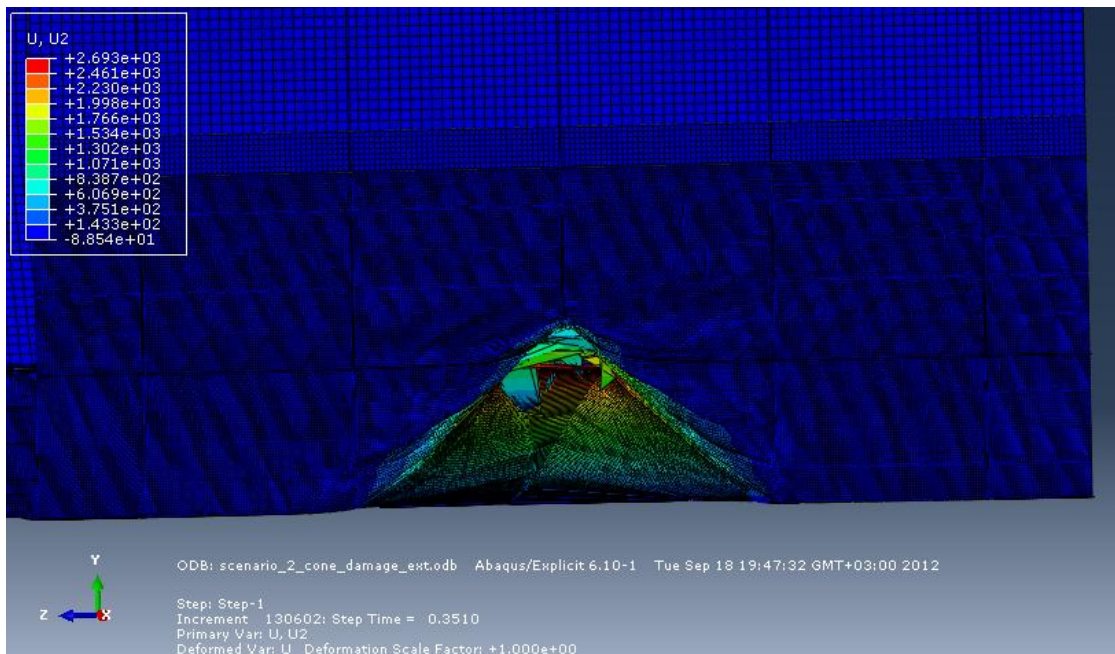
Διάγραμμα 4-3 : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.

Παρατηρώντας την καμπύλη στο Διάγραμμα 4-3, δεν παρατηρείται κάποια αξιοσημείωτη πτώση της δύναμης αντίδρασης. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι στο Σενάριο 2 ο βράχος έρχεται σε επαφή με την περιοχή του πυθμένα που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ακαμψία λόγω της παρουσίας του κατασκευαστικού νομέα και της κεντρικής σταθμίδας. Ακόμα, λόγω της μορφής του βράχου, παρατηρούνται τοπικές αστοχίες καθ'όλη τη διάρκεια της διείσδυσης χωρίς να ξεχωρίζει κάποια εκτενής και απότομη αστοχία. Στο έλασμα του εξωτερικού πυθμένα το ρήγμα επεκτείνεται λόγω του φαινομένου της σχάσης, ενώ όπως φαίνεται από τις παραπάνω εικόνες, ο εσωτερικός πυθμένας αστοχεί μόνο τοπικά στη σύνδεση του με τη διαμήκη φρακτή.

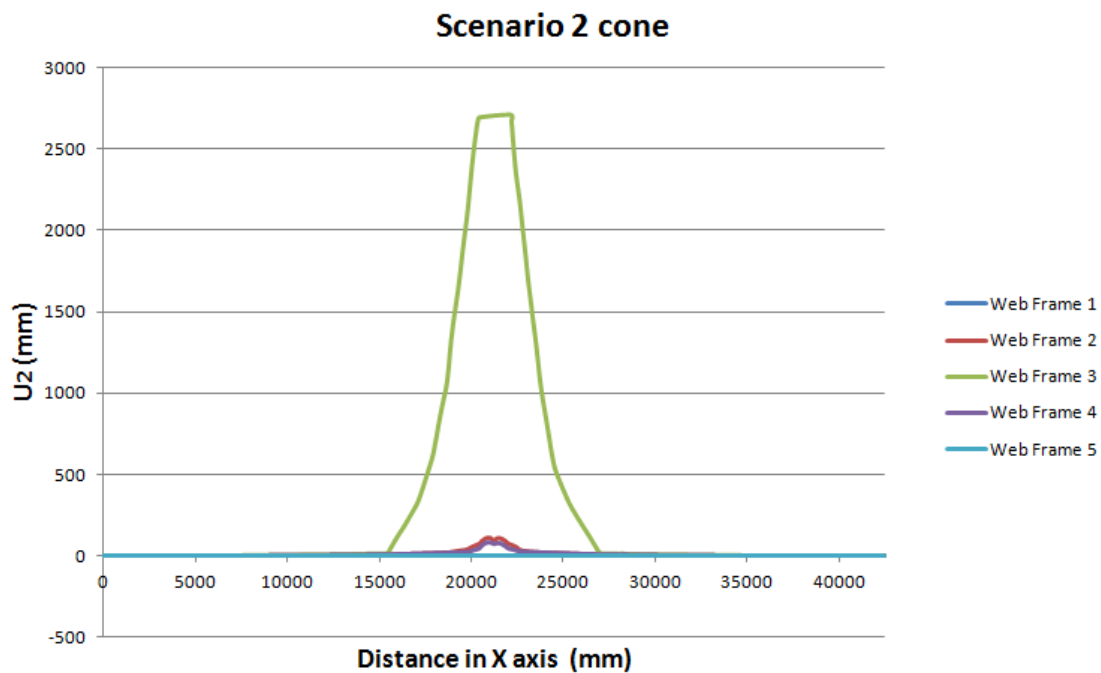
4.2.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 2]



Εικόνα 4-13 : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Εικόνα 4-14: Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Διάγραμμα 4-4 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.

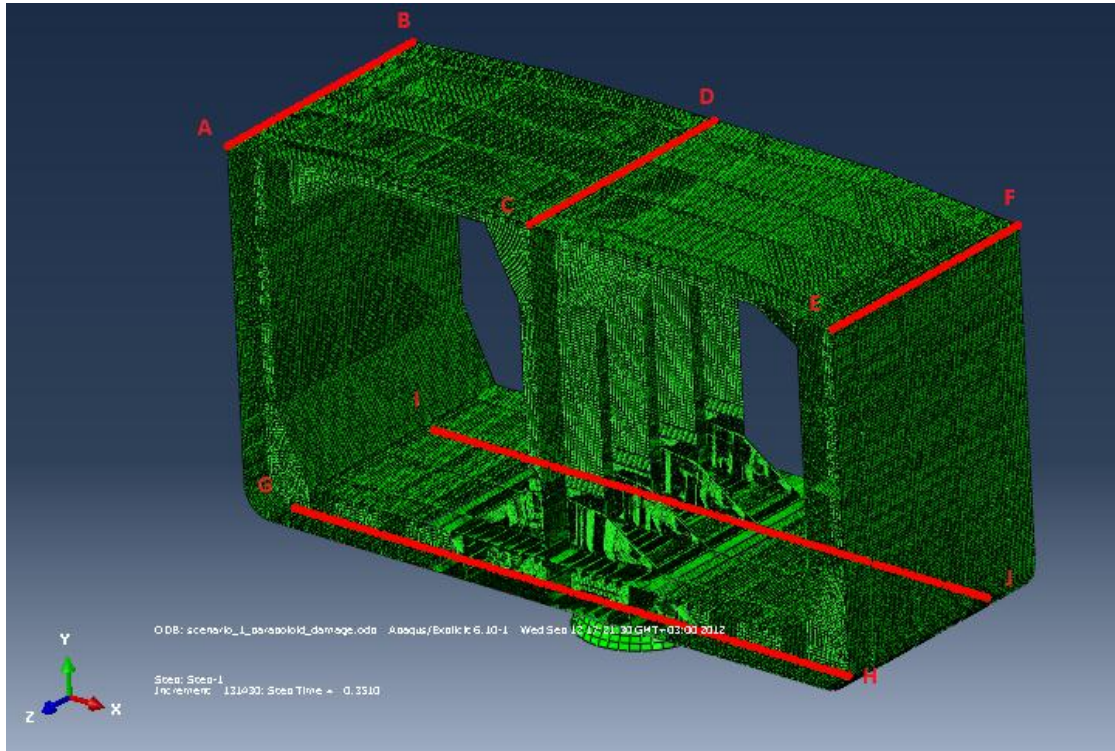
Στο Διάγραμμα 4-4, φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των κόμβων των κάτω ακμών κάθε ενός κατασκευαστικού νομέα στην περιοχή του πυθμένα, στο τέλος της ανάλυσης. Ο οριζόντιος άξονας αποτελεί το πλάτος του πυθμένα, με 0 τη θέση του πρώτου κόμβου από αριστερά.

Οι ακραίοι νομείς 1 και 5, εμφανίζουν μηδενικές κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω των οριακών συνθηκών που τους έχουν επιβληθεί. Οι νομείς 2 και 4, εμφανίζουν πολύ μικρές κατακόρυφες μετατοπίσεις στο μέσο του πλάτους (περιοχή προσάραξης) της τάξης των 100 mm και σε μικρή έκταση κατά το πλάτος.

Τέλος ο νομέας 3, πάνω στον οποίο προσκρούει ο βράχος, εμφανίζει μετατόπιση 2700 mm στην περιοχή όπου έρχεται σε επαφή με την κορυφή του βράχου. Ο λόγος που η μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση δεν είναι ίδια με τη διείδυση του βράχου (3500 mm) είναι πως εμφανίζεται αστοχία του νομέα στην περιοχή αυτή με αποτέλεσμα τα στοιχεία να αποκτούν μηδενική ακαμψία και να μη συνεχίζουν να συνεργάζονται με την υπόλοιπη κατασκευή. Αυτό φαίνεται εύκολα και στο διάγραμμα όπου η κορυφή της καμπύλης του νομέα 3 είναι σχεδόν οριζόντια.

4.3. Ανάλυση προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 3]

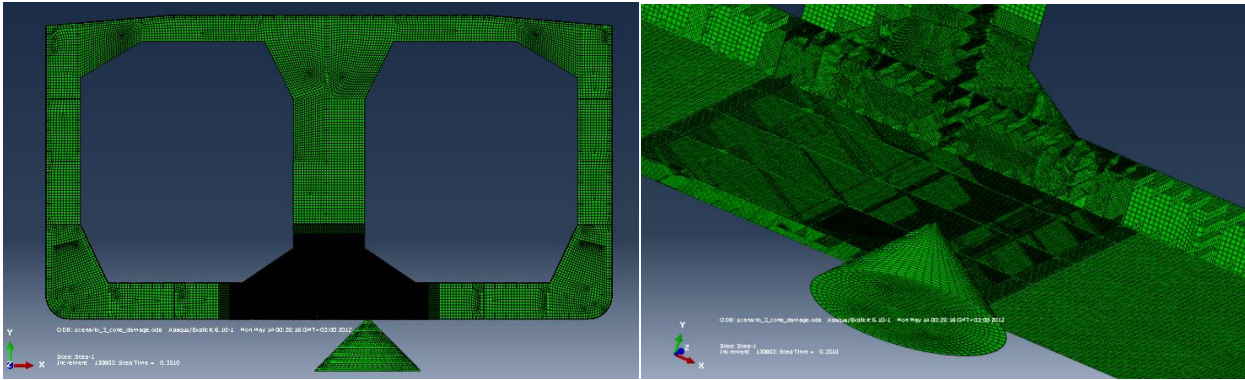
Στο παρόν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μήκους 16 μέτρων και ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσάραξης σε κωνικό βράχο ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του πλοίου, μεταξύ κατασκευαστικών νομέων και μεταξύ της κεντρικής και της πρώτης πλευρικής σταθμίδας του πλοίου (Εικόνα 4-16). Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Εικόνα 4-15 : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.

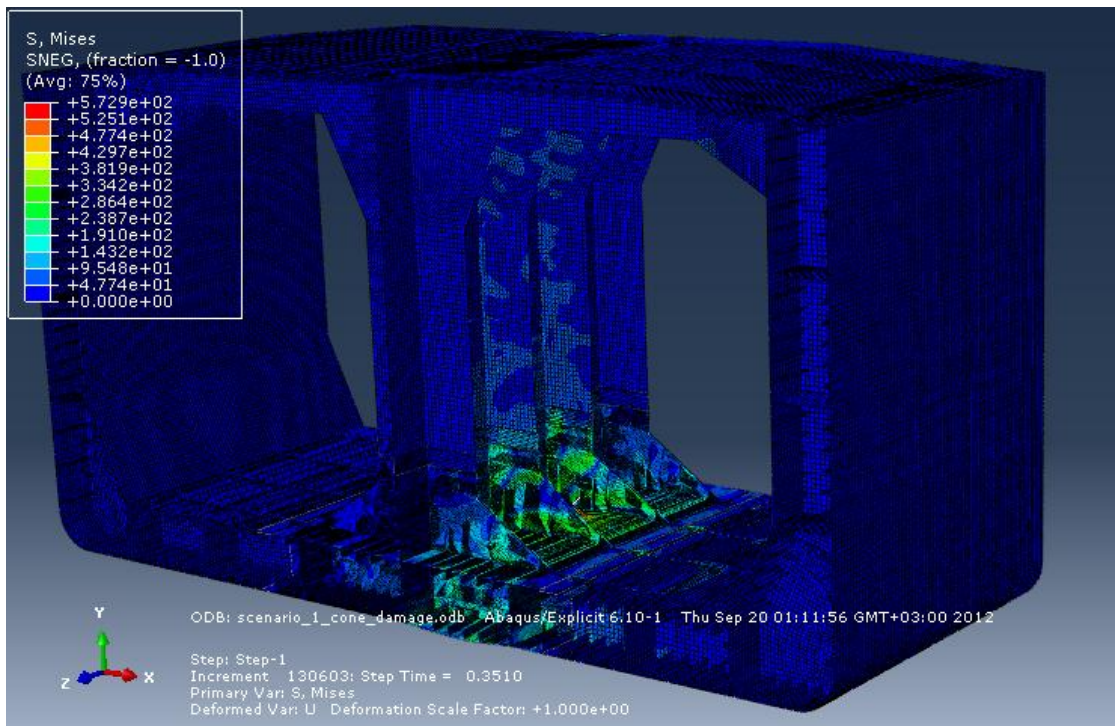
ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
AB, CD, EF	$U_Y, U_Z = 0$
GH, IJ	$U_Y, U_Z = 0$
Node D	$U_X, U_Z = 0$

Πίνακας 4-3 : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.

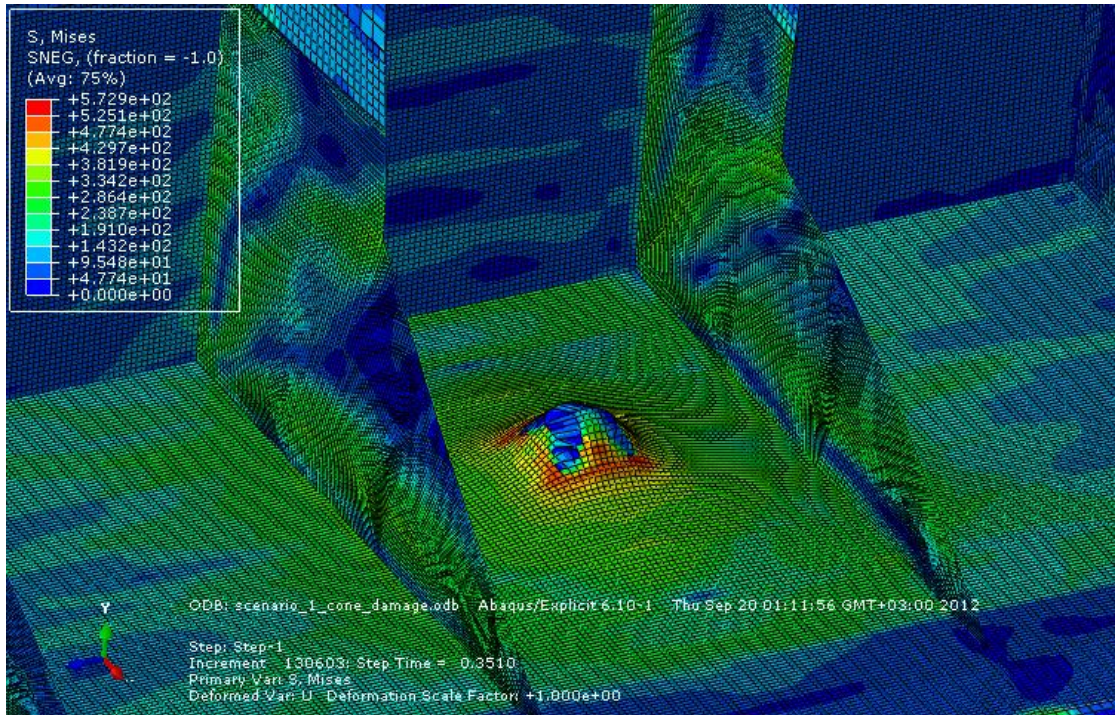


Εικόνα 4-16 : Απεικόνιση Σεναρίου 3 με κωνικό βράχο.

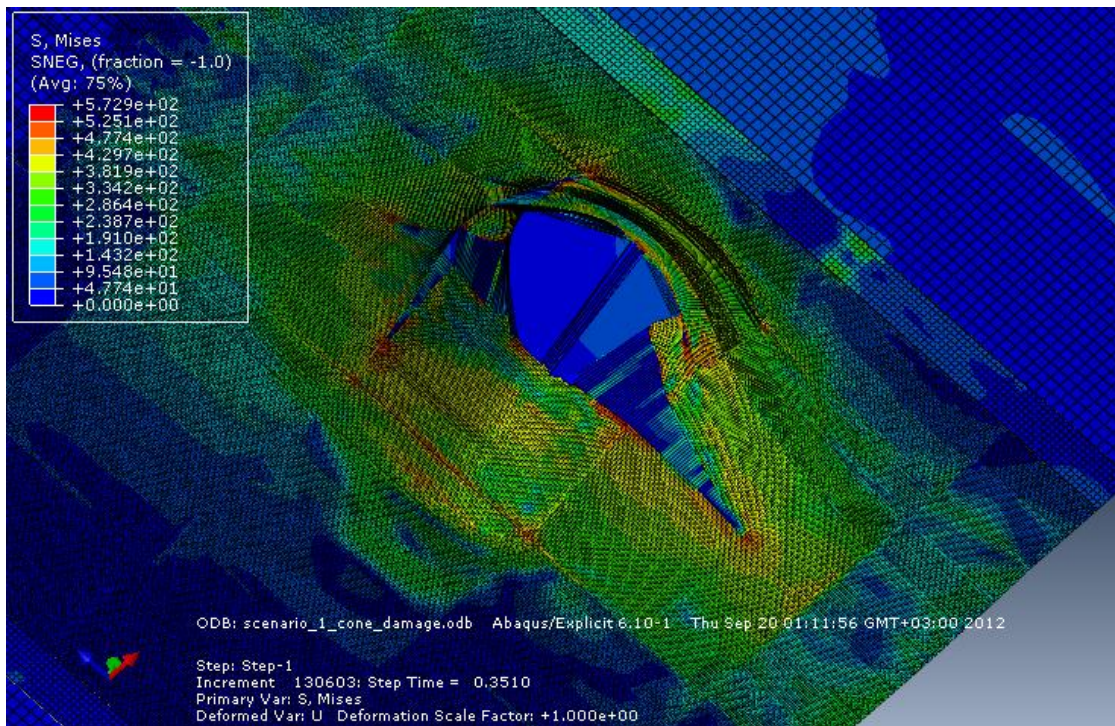
Μετά το πέρας της ανάλυσης, δημιουργήθηκε ένα ευρύ πεδίο τάσεων στην κατασκευή και παρουσιάστηκαν γενικές παραμορφώσεις. Η απόκριση της κατασκευής, καθώς και οι τιμές και οι θέσεις των τάσεων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικόνα 4-18, με έντονο μπλέ χρώμα φαίνεται το ρήγμα που δημιουργείται στο έλασμα του εσωτερικού πυθμένα, ενώ στην Εικόνα 4-19, αντίστοιχα το ρήγμα στο έλασμα του εξωτερικού πυθμένα. Όπως και παραπάνω, σημειώνεται ότι, το ρήγμα εμφανίζεται με μπλέ χρώμα, που αντιπροσωπεύει τα στοιχεία με μηδενικές αναπτυσσόμενες τάσεις.



Εικόνα 4-17 : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.

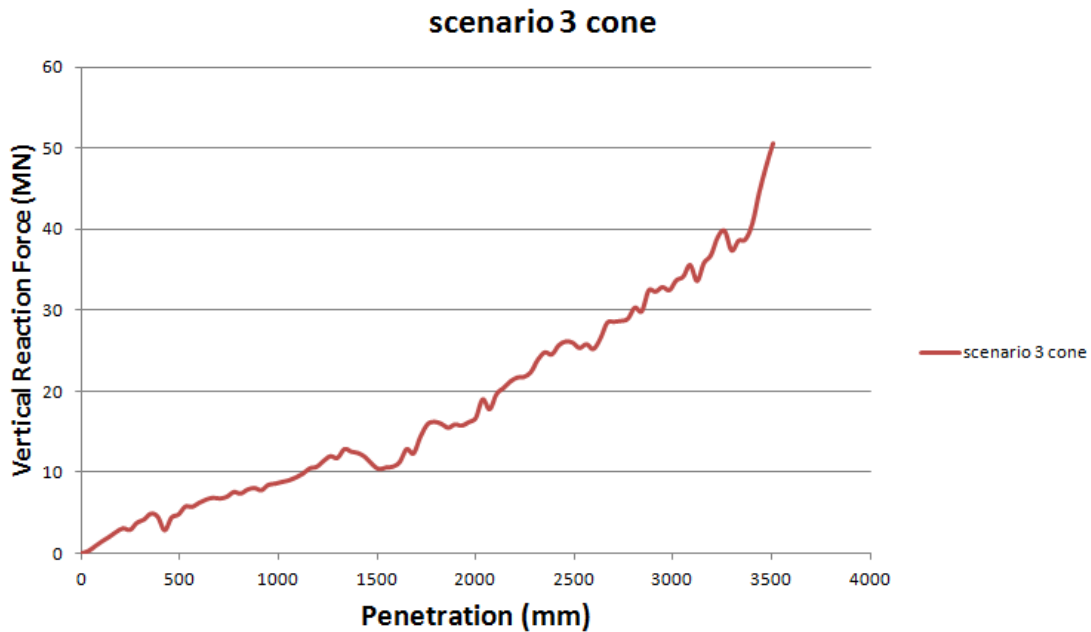


Εικόνα 4-18 : Ρήγμα ελάσματος εσωτερικού πυθμένα.



Εικόνα 4-19 : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.

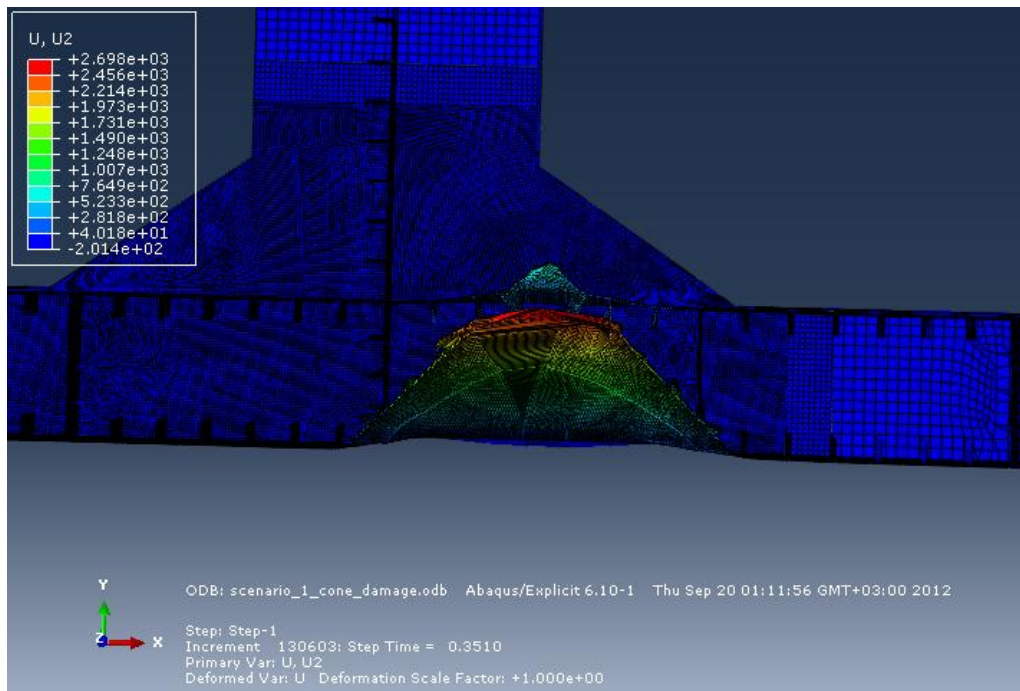
4.3.1 Δυνάμεις Αντίδρασης λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 3]



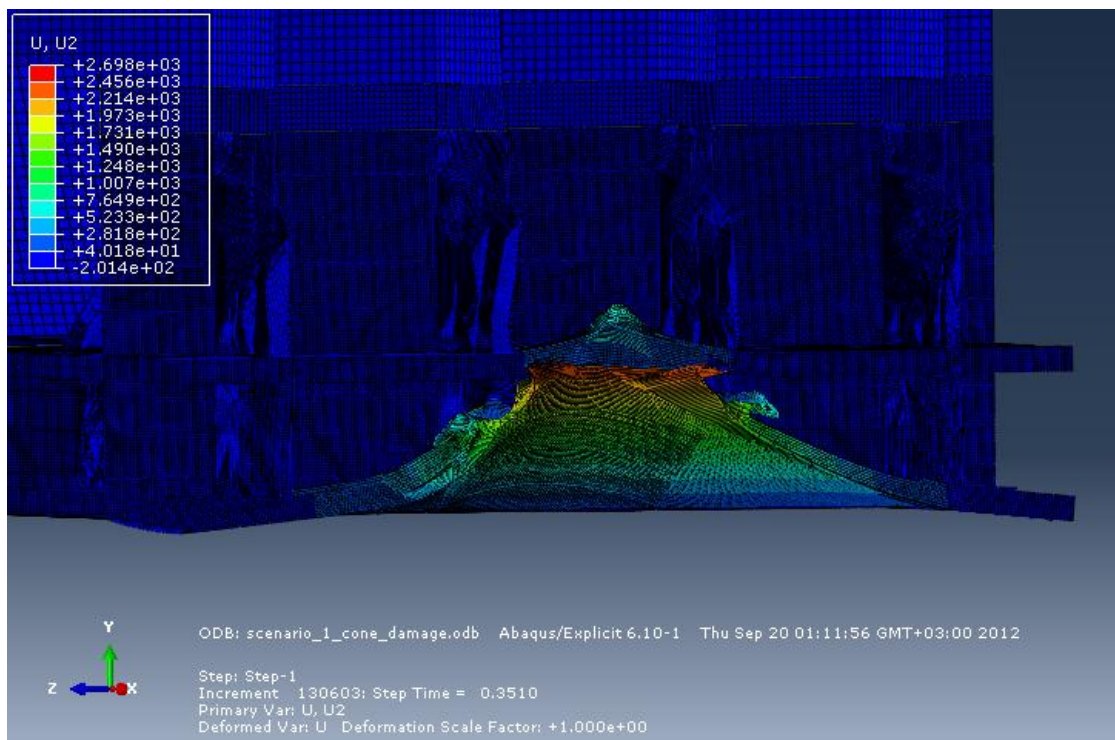
Διάγραμμα 4-5 : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.

Παρατηρώντας την καμπύλη του διαγράμματος 4-5, φαίνεται μια μικρή πτώση της δύναμης αντίδρασης περι τα 1400 mm διείσδυσης. Είναι η περιοχή όπου ο εξωτερικός πυθμένας αστοχεί σε μεγάλο βαθμό. Έπειτα, η δύναμη αντίδρασης αυξάνεται ομαλά μέχρι τα 40 MN για 3400 mm διείσδυσης. Απο αυτό το σημείο και μετά αυξάνεται απότομα μέχρι τα 50 MN για 3500 mm διείσδυσης. Είναι το σημείο όπου ο εσωτερικός πυθμένας έχει παραμορφωθεί αρκετά και αρχίζει να συμβάλει στην αντίσταση της κατασκευής στην εισχώρηση του βράχου. Υπενθυμίζεται ότι ο εσωτερικός πυθμένας βρίσκεται σε απόσταση 2680 mm απο τον εξωτερικό (0 mm).

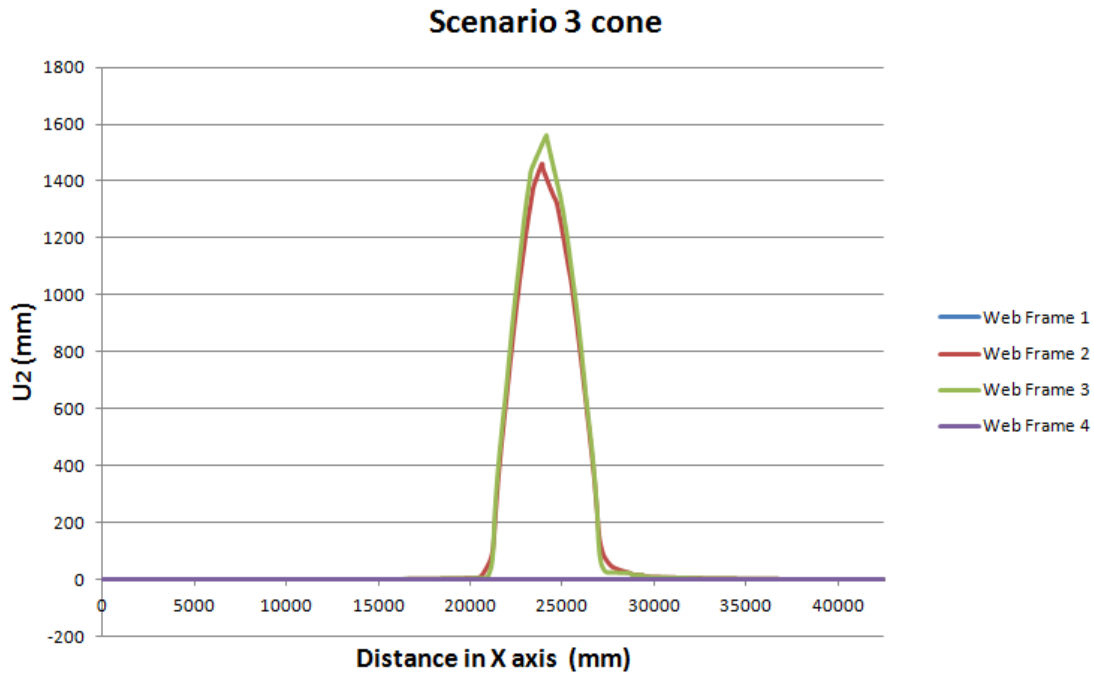
4.3.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 3]



Εικόνα 4-20 : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Εικόνα 4-21 : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Διάγραμμα 4-6 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.

Στο Διάγραμμα 4-6, φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των κόμβων των κάτω ακμών κάθε ενός κατασκευαστικού νομέα στην περιοχή του πυθμένα, στο τέλος της ανάλυσης. Ο οριζόντιος άξονας αποτελεί το πλάτος του πυθμένα, με 0 τη θέση του πρώτου κόμβου από αριστερά.

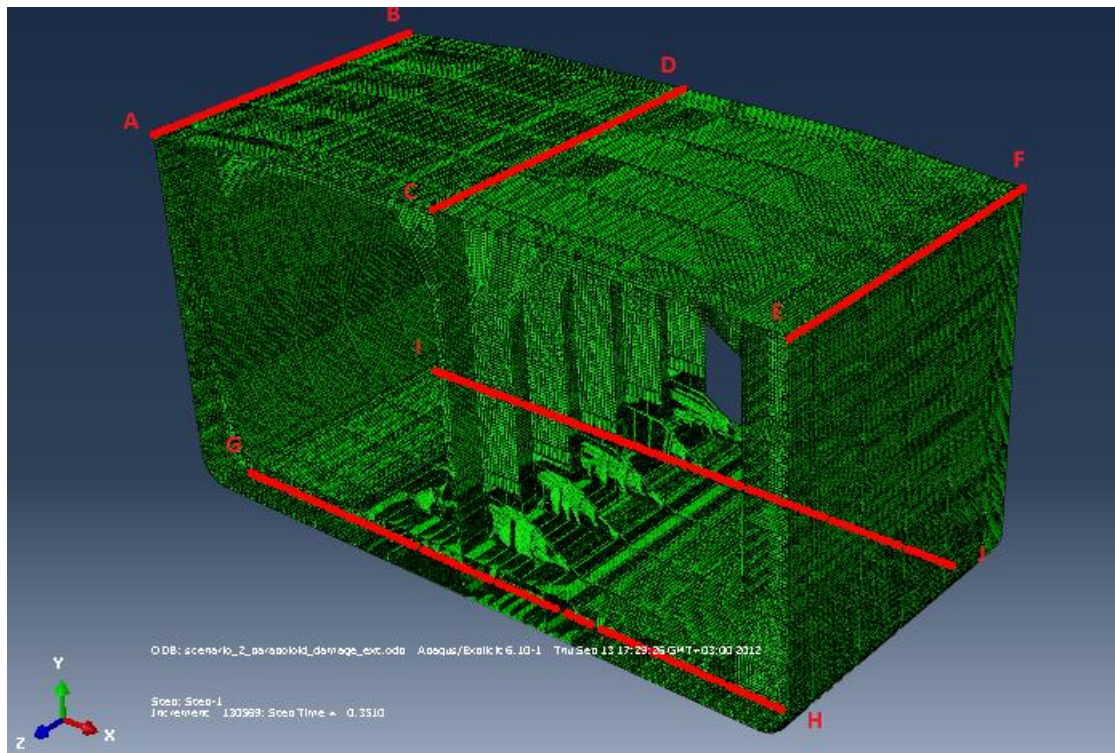
Οι νομείς 1 και 4, εμφανίζουν μηδενικές μετατοπίσεις λόγω των οριακών συνθηκών που τους έχουν επιβληθεί. Οι νομείς 2 και 3, εμφανίζουν κατακόρυφες μετατοπίσεις που φτάνουν τα 1500 mm, ενώ οι διαφορές μεταξύ τους είναι αμελητέες καθώς ισαπέχουν από την περιοχή της προσάραξης.

Οι γενικές μετατοπίσεις και αστοχίες συνεχίζουν να είναι εξαιρετικά τοπικές. Αυτό φαίνεται ακόμα και στους νομείς εκατέρωθεν της διείδυσης οι οποίοι μετατοπίζονται μόνο στους κόμβους που έρχονται σε επαφή με τον βράχο ενώ οι γύρω κόμβοι παραμένουν σχεδόν ανεπηρέαστοι.

Τέλος η δεξιά πλευρά των νομέων επηρεάζεται περισσότερο λόγω του μικρότερου πάχους, και επομένως μικρότερης αντοχής, των πλευρικών σταθμίδων σε σχέση με την κεντρική.

4.4. Ανάλυση προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 4]

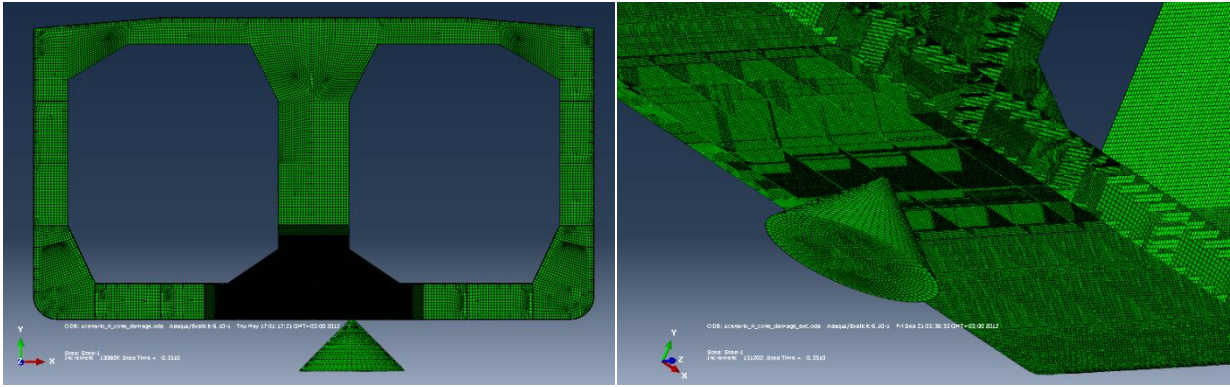
Στο παρόν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μήκους 20 μέτρων και ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσάραξης σε κωνικό βράχο ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του πλοίου, σε κατασκευαστικό νομέα και μεταξύ της κεντρικής και της πρώτης πλευρικής σταθμίδας του πλοίου (Εικόνα 4-23). Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθησαν στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Εικόνα 4-22 : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.

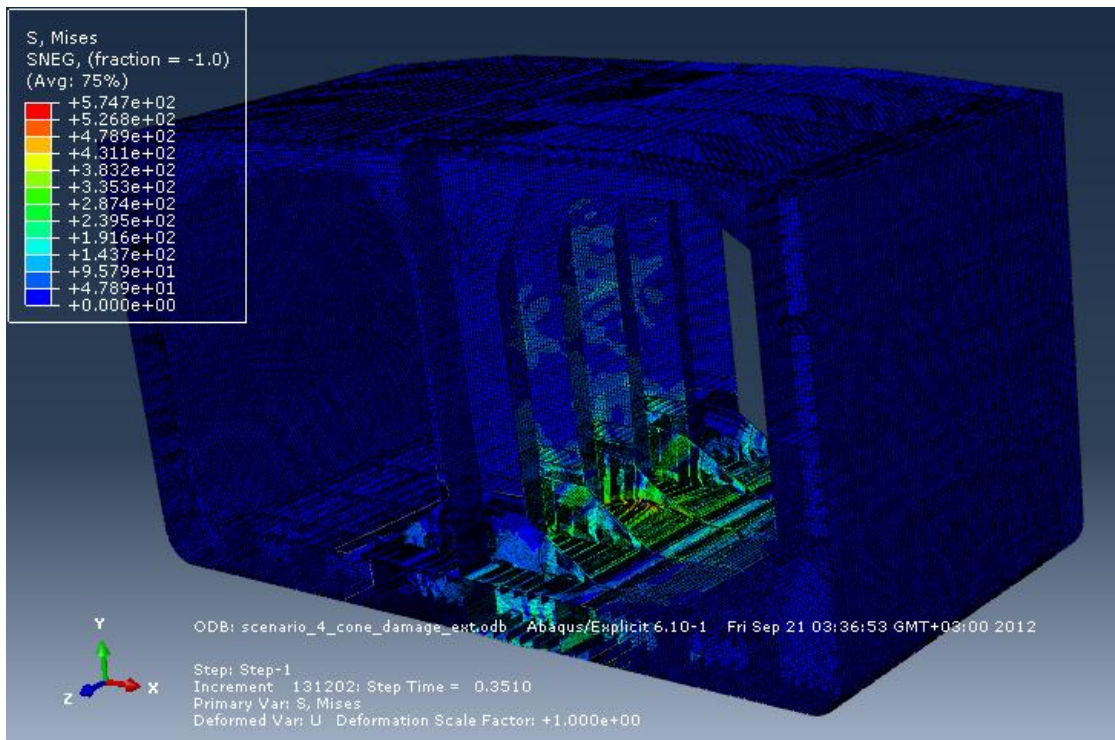
ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
AB, CD, EF	$U_Y, U_Z = 0$
GH, IJ	$U_Y, U_Z = 0$
Node D	$U_X, U_Z = 0$

Πίνακας 4-4 : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.

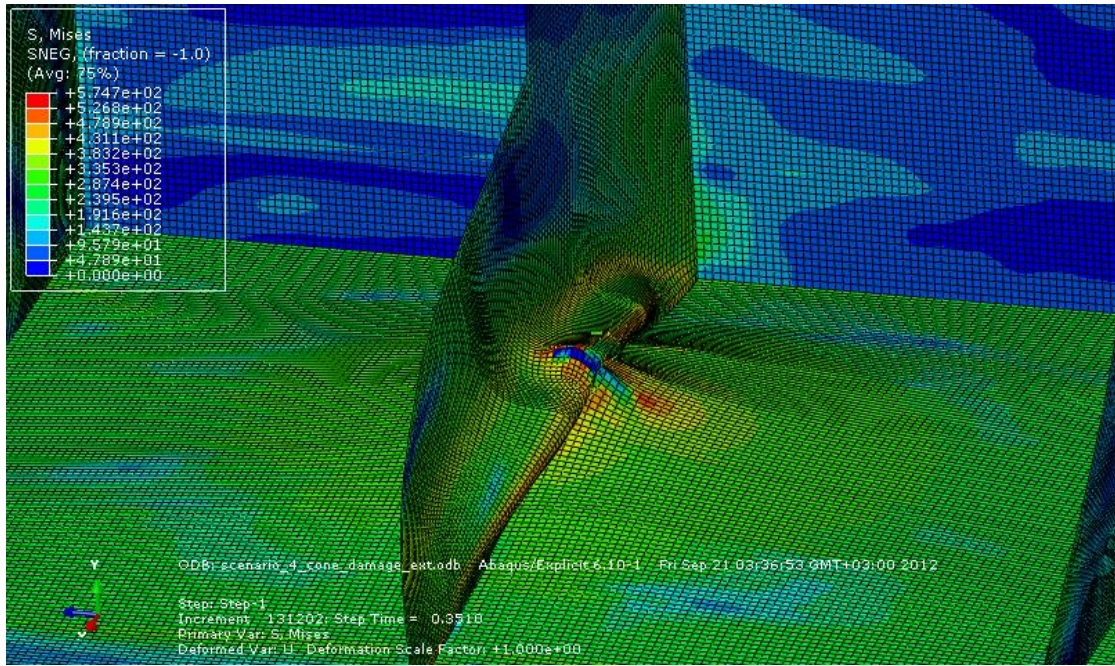


Εικόνα 4-23 : Απεικόνιση Σεναρίου 4 με κωνικό βράχο.

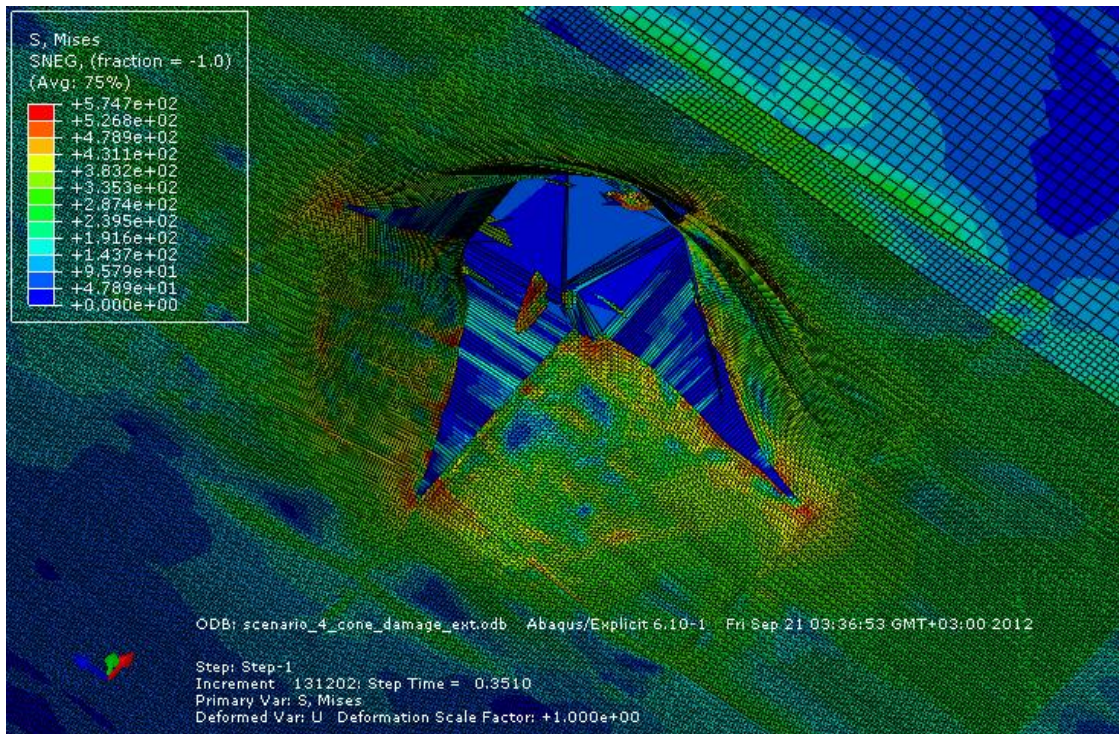
Μετά το πέρας της ανάλυσης, δημιουργήθηκε ένα ευρύ πεδίο τάσεων στην κατασκευή και παρουσιάστηκαν γενικές παραμορφώσεις. Η απόκριση της κατασκευής, καθώς και οι τιμές και οι θέσεις των τάσεων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικόνα 4-25, με έντονο μπλέ χρώμα φαίνεται μια τοπική αστοχία του νομέα στη σύνδεσή του με το έλασμα του εσωτερικού πυθμένα, ενώ στην Εικόνα 4-26, αντίστοιχα το ρήγμα στο έλασμα του εξωτερικού πυθμένα. Όπως και παραπάνω, σημειώνεται ότι, το ρήγμα εμφανίζεται με μπλέ χρώμα, που αντιπροσωπεύει τα στοιχεία με μηδενικές αναπτυσσόμενες τάσεις.



Εικόνα 4-24 : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.

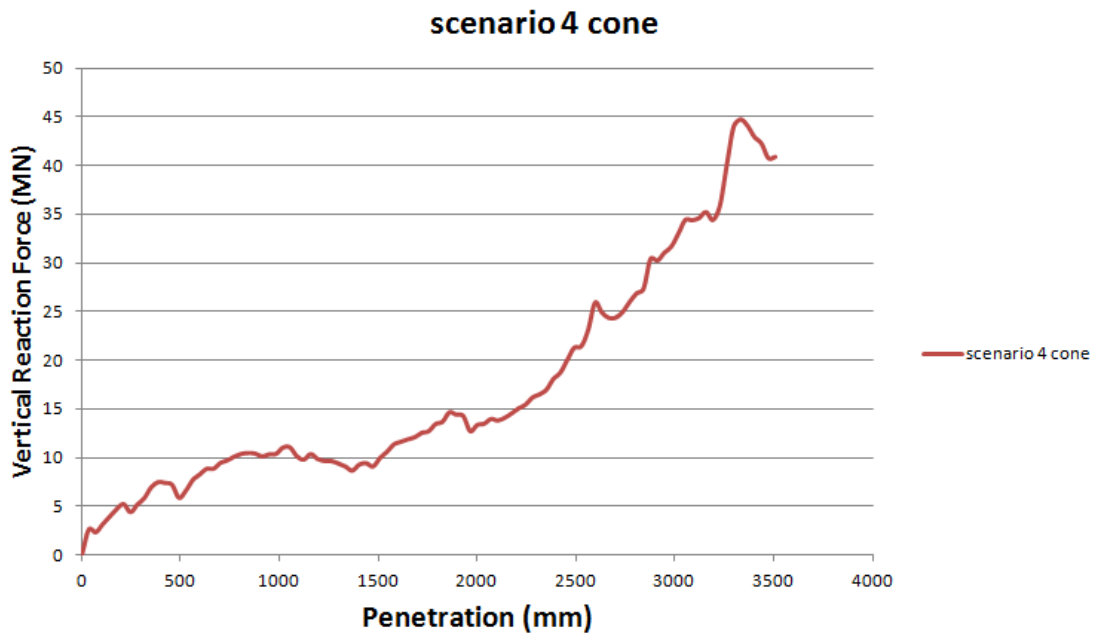


Εικόνα 4-25 : Τοπική αστοχία ελάσματος νομέα.



Εικόνα 4-26 : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα

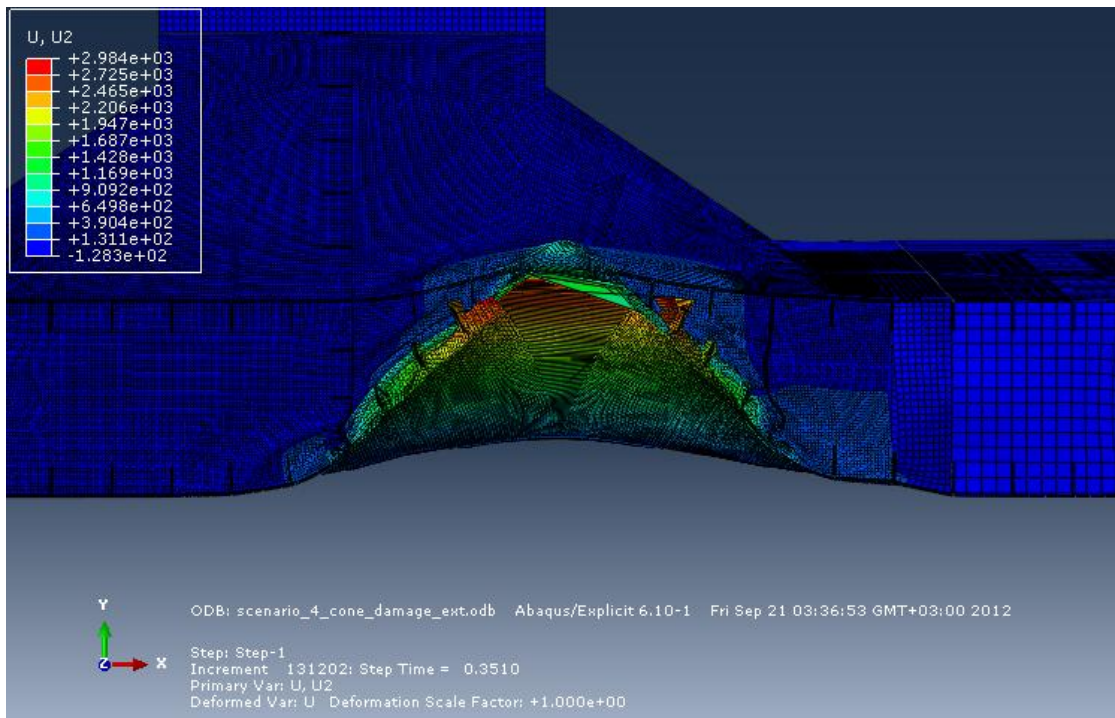
4.4.1 Δυνάμεις Αντίδρασης λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 4]



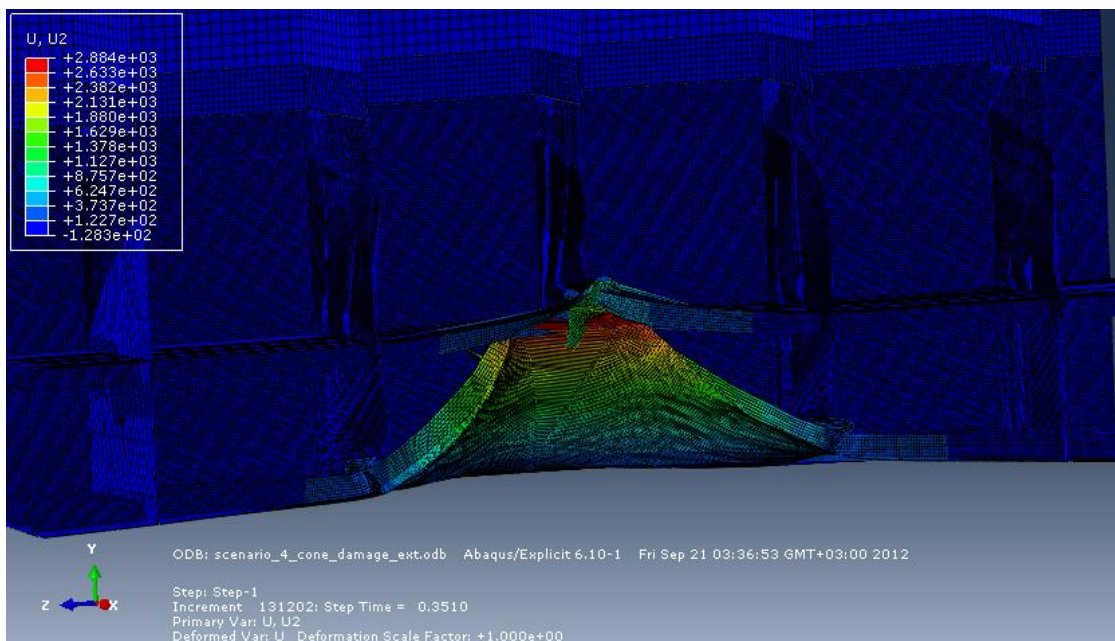
Διάγραμμα 4-7 : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.

Παρατηρώντας την καμπύλη του Διαγράμματος 4-7, δε φαίνονται περιοχές αξιοσημείωτης πτώσης της δύναμης αντίδρασης. Αυτό οφείλεται σε επιμέρους αστοχίες, όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, οι οποίες συμβαίνουν καθ'όλη τη διάρκεια της διείσδυσης του βράχου. Απο τα 2500 mm και έπειτα η δύναμη αντίδρασης αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό λόγω της αντίστασης του εσωτερικού πυθμένα, παρόλο που αυτός βρίσκεται στα 2680 mm, γιατί σε αυτό το σημείο έχει έρθει σε επαφή μαζί του το λυγισμένο έλασμα του νομέα που με τη σειρά του πιέζεται απο το βράχο. Η κάθετη δύναμη αντίδρασης φτάνει μέχρι τα 44.7 MN για 3330 mm διείσδυσης του βράχου. Σε αυτό το σημείο παρατηρείται μία μικρή πτώση της δύναμης που οφείλεται στην αστοχία του ελάσματος του νομέα (Εικόνα 4-25).

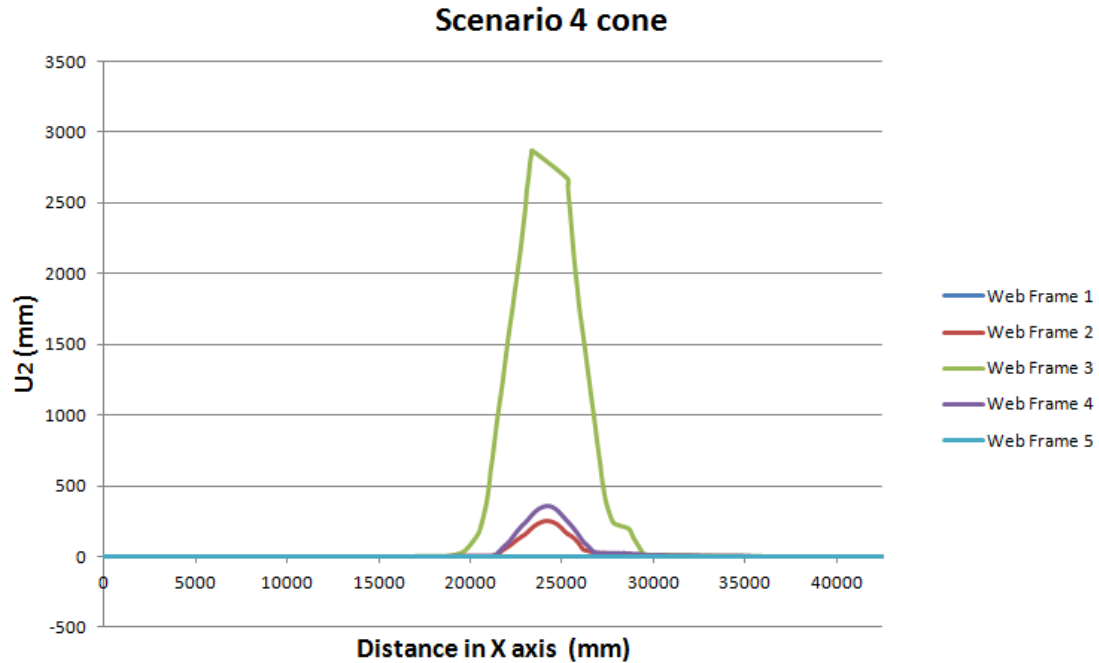
4.4.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε κωνικό βράχο / [Σενάριο 4]



Εικόνα 4-27 : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Εικόνα 4-28 : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Διάγραμμα 4-8 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.

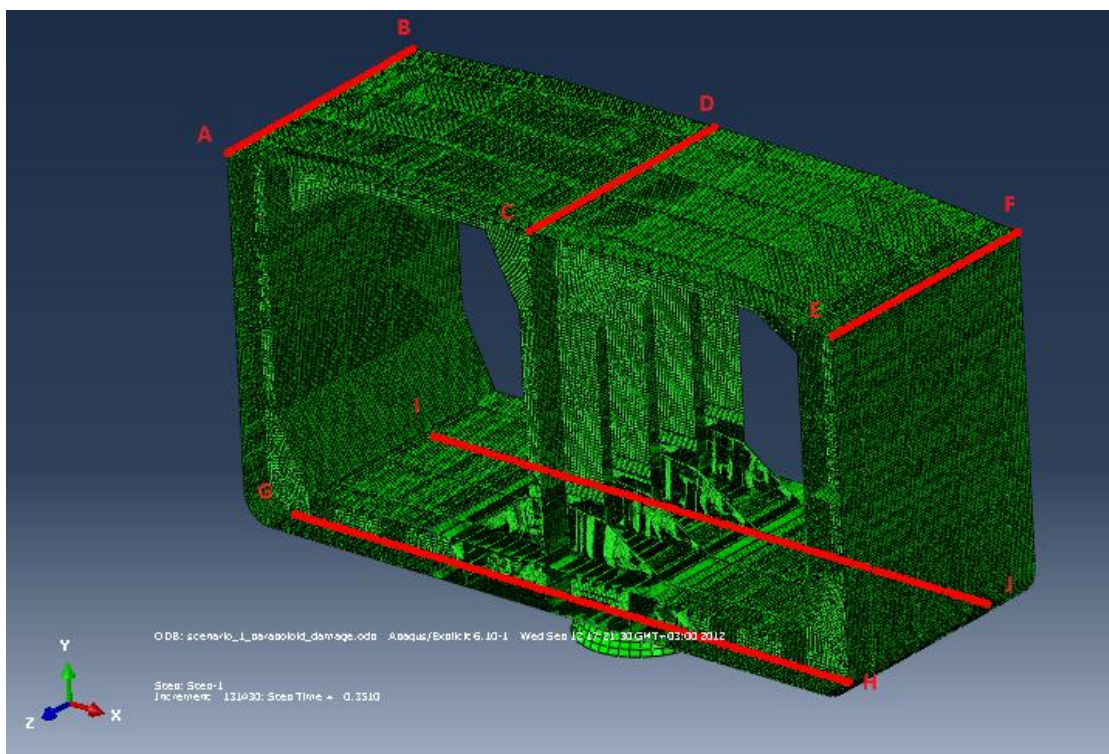
Στο Διάγραμμα 4-8, φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των κόμβων των κάτω ακμών κάθε ενός κατασκευαστικού νομέα στην περιοχή του πυθμένα, στο τέλος της ανάλυσης. Ο οριζόντιος άξονας αποτελεί το πλάτος του πυθμένα, με 0 τη θέση του πρώτου κόμβου από αριστερά.

Οι νομείς 1 και 5 εμφανίζουν μηδενικές κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω των οριακών συνθηκών που τους έχουν επιβληθεί. Οι νομείς 2 και 4 εμφανίζουν μικρές κατακόρυφες μετατοπίσεις της τάξης των 250 mm και 360 mm αντίστοιχα. Η μικρή αυτή διαφορά μεταξύ τους στη μέγιστη τιμή εξηγείται από το γεγονός ότι η αστοχία των ενισχυτικών του ελάσματος του εξωτερικού πυθμένα εμφανίζεται στη σύνδεση τους με τον νομέα 3, στην πλευρά προς τον νομέα 2. Έτσι ο νομέας 2 αποφορτίζεται κάπως κατά τη διείδυση και δε μετατοπίζεται με τον ίδιο τρόπο που μετατοπίζεται ο νομέας 4. Τέλος, ο νομέας 3 εμφανίζει κατακόρυφες μετατοπίσεις που φτάνουν μέχρι τα 2870 mm. Η αστοχία που παρατηρείται στα στοιχεία που έρχονται σε επαφή με την κορυφή του βράχου εξηγεί το γεγονός ότι οι κατακόρυφες μετατοπίσεις δε φτάνουν τα 3500 mm, όσο και η διείδυση του βράχου. Η εν λόγω αστοχία φαίνεται και στο παραπάνω διάγραμμα στην κορυφή της καμπύλης του νομέα 2.

5. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

5.1. Ανάλυση προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 1]

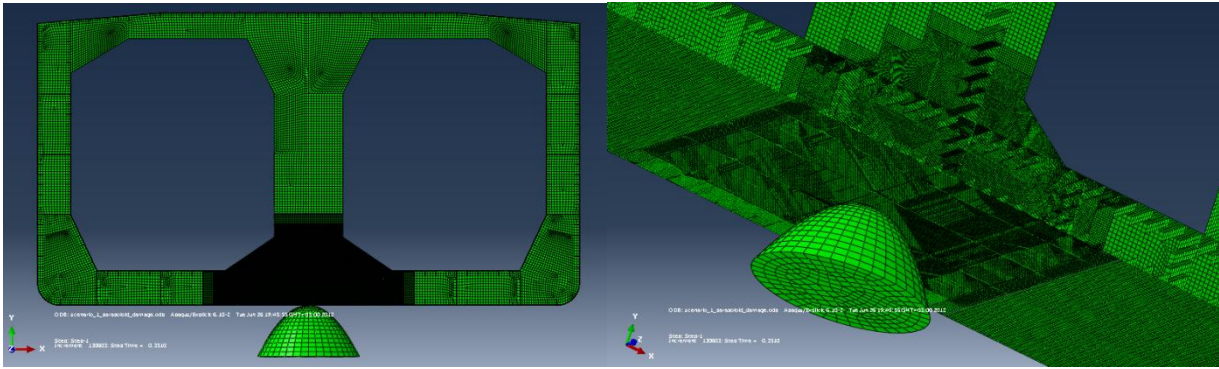
Στο παρόν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μήκους 16 μέτρων και ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του πλοίου μεταξύ δύο κατασκευαστικών νομέων στην κεντρική σταθμίδα του πλοίου (Εικόνα 5-2) Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθηκαν στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Εικόνα 5-1 : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.

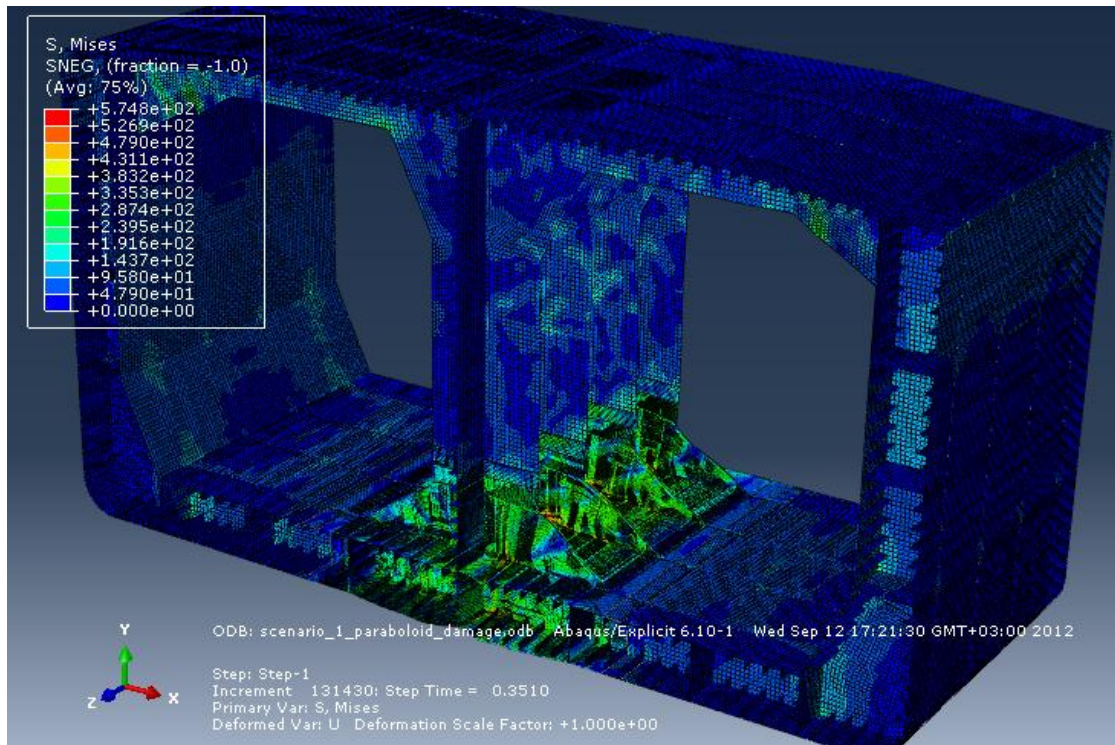
ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
AB, CD, EF	$U_Y, U_Z = 0$
GH, IJ	$U_Y, U_Z = 0$
Node D	$U_X, U_Z = 0$

Πίνακας 5-1 : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.

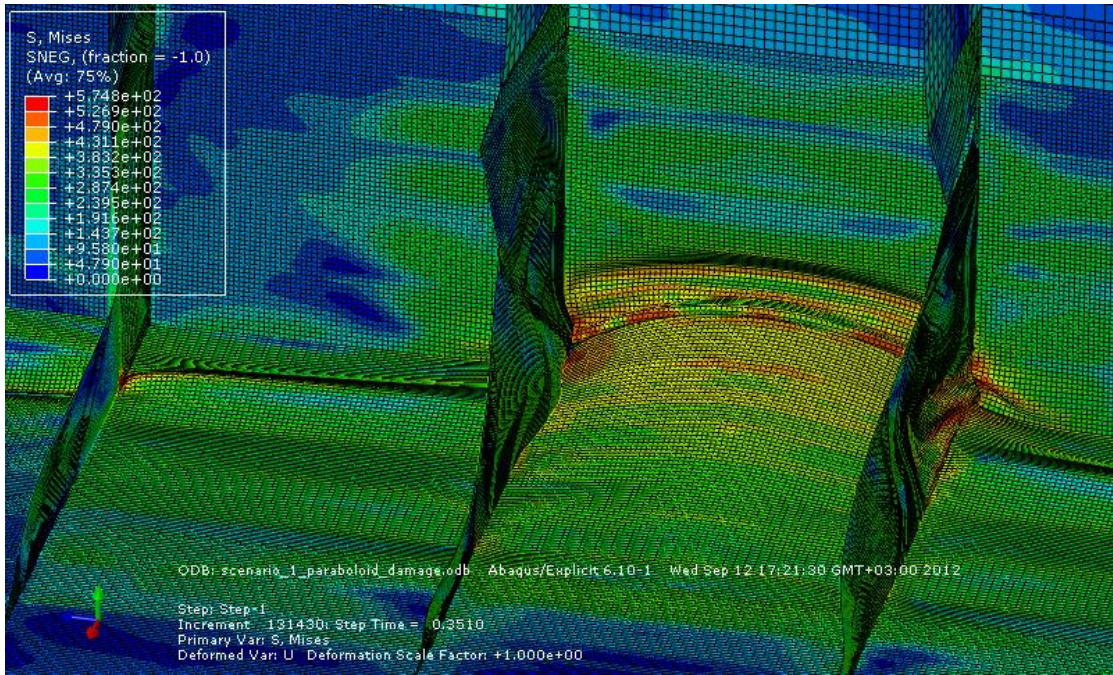


Εικόνα 5-2 : Απεικόνιση Σεναρίου 1 με παραβολοειδή βράχο.

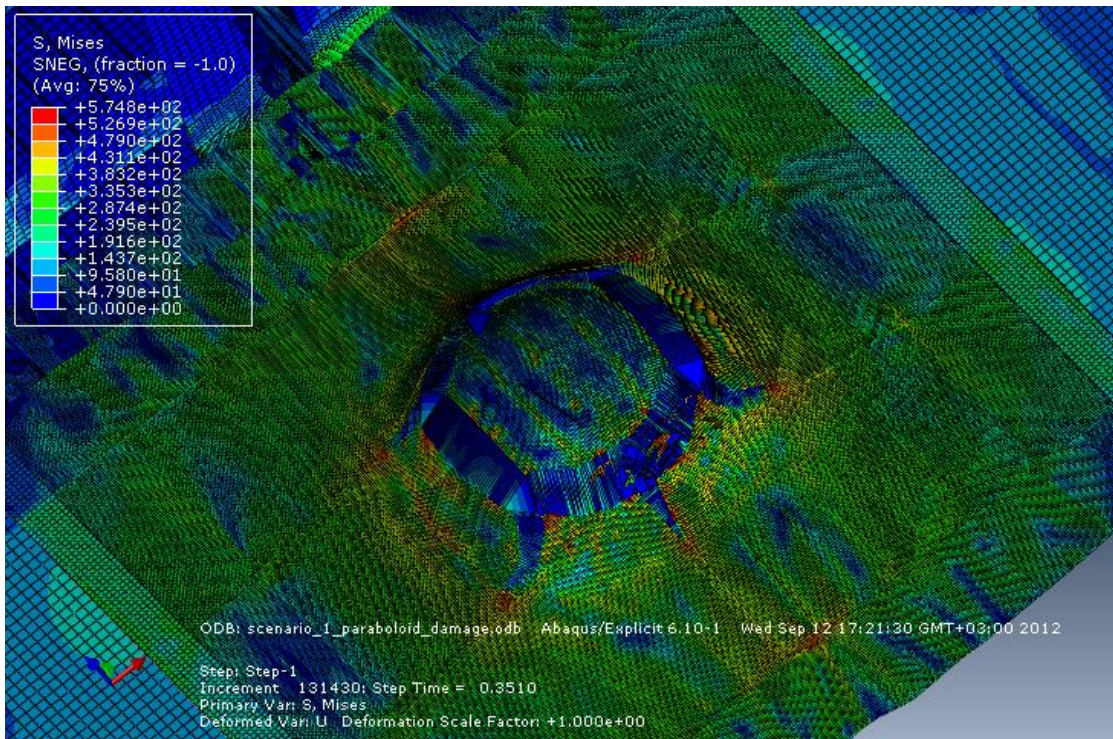
Μετά το πέρας της ανάλυσης, δημιουργήθηκε ένα ευρύ πεδίο τάσεων στην κατασκευή και παρουσιάστηκαν γενικές παραμορφώσεις. Η απόκριση της κατασκευής, καθώς και οι τιμές και οι θέσεις των τάσεων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικόνα 5-4, φαίνεται η απόκριση του εσωτερικού πυθμένα, ενώ στην Εικόνα 5-5, αντίστοιχα το ρήγμα στο έλασμα του εξωτερικού πυθμένα. Όπως και παραπάνω, σημειώνεται ότι, το ρήγμα εμφανίζεται με μπλέ χρώμα, που αντιπροσωπεύει τα στοιχεία με μηδενικές αναπτυσσόμενες τάσεις.



Εικόνα 5-3 : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.

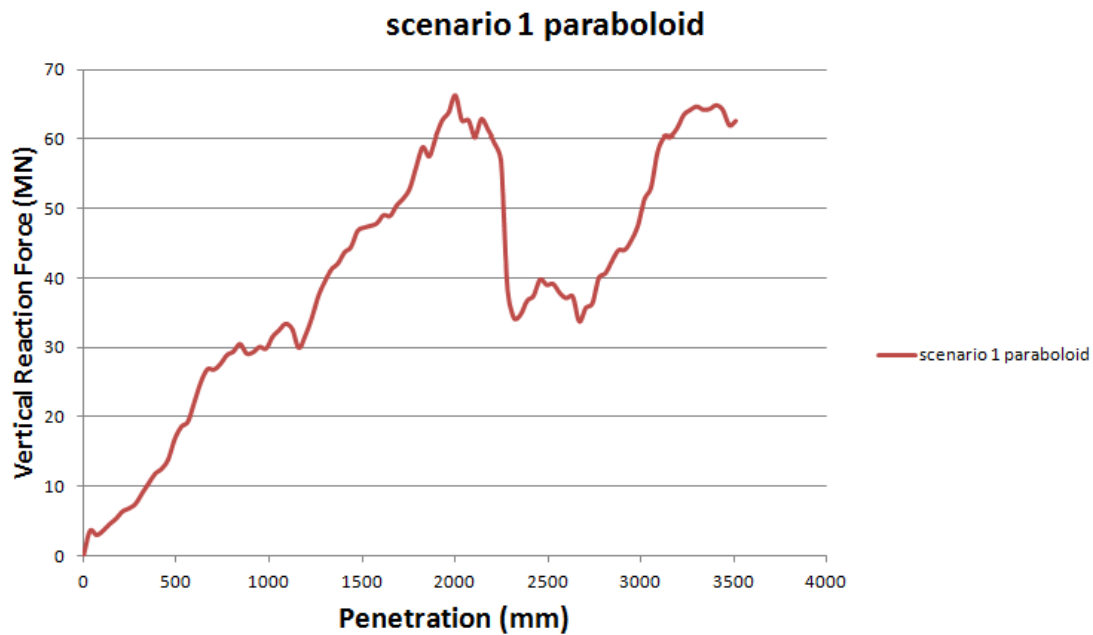


Εικόνα 5-4 : Απόκριση εσωτερικού πυθμένα.



Εικόνα 5-5 : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.

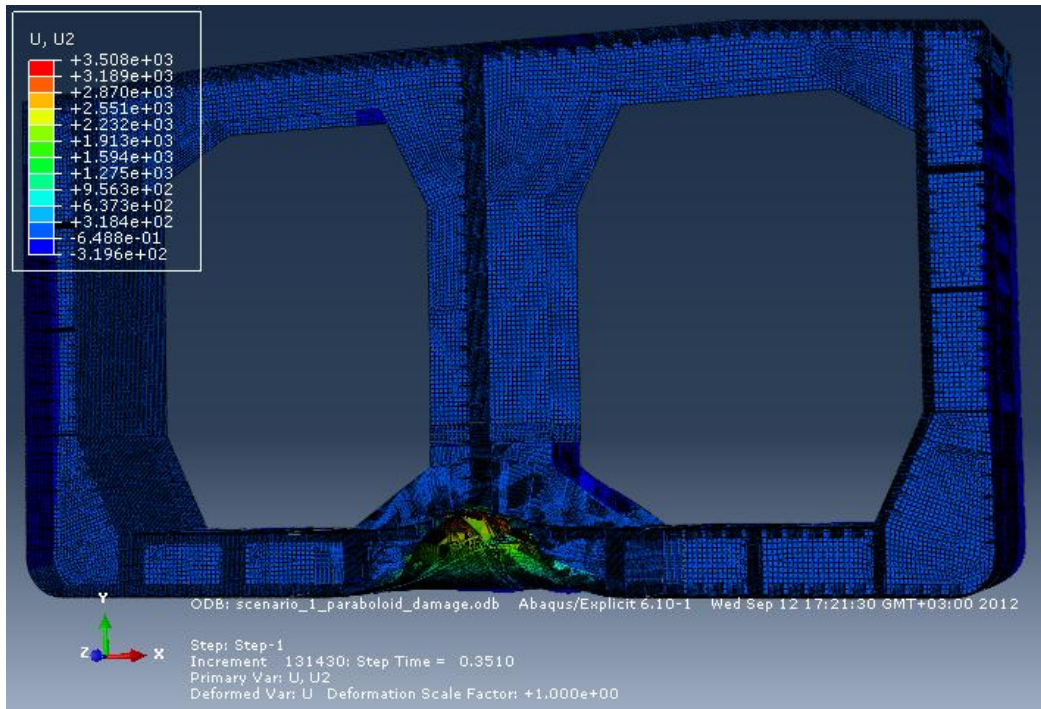
5.1.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 1]



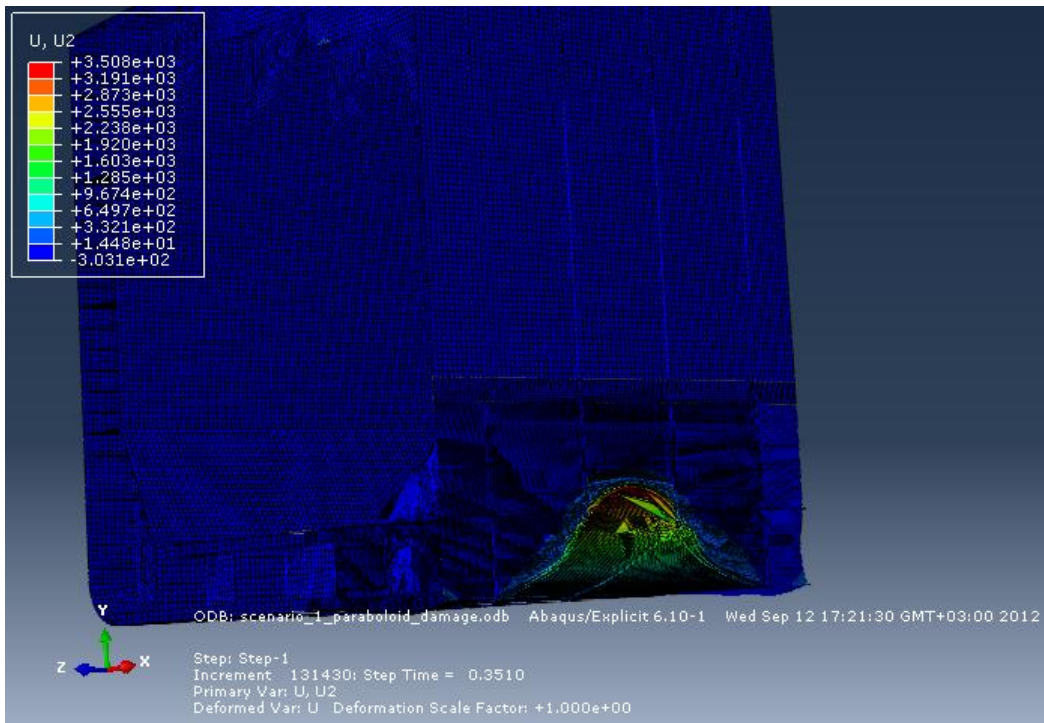
Διάγραμμα 5-1 : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.

Παρατηρώντας την καμπύλη του Διαγράμματος 5-1, φαίνεται μία κορυφή, στα 2000 mm, όπου η δύναμη αντίδρασης φτάνει μέχρι τα 66.2 MN. Έπειτα παρατηρείται μία ραγδαία πτώση της δύναμης μέχρι τα 34.3 MN που οφείλεται στην πλήρη αστοχία του ελάσματος του εξωτερικού πυθμένα. Η δύναμη αντίδρασης παραμένει για λίγο χαμηλά μέχρι ο βράχος να συναντήσει τον εσωτερικό πυθμένα στα 2680 mm. Τότε η δύναμη αυξάνεται μέχρι τα 64.8 MN για 3500 mm διείσδυσης που σηματοδοτεί και το τέλος της προσομοίωσης. Δεν παρατηρείται νέα πτώση της δύναμης αντίδρασης καθώς, όπως επιβεβαιώνεται και απο την Εικόνα 5-4, ο εσωτερικός πυθμένας δεν αστοχεί μέχρι το τέλος της φόρτισης.

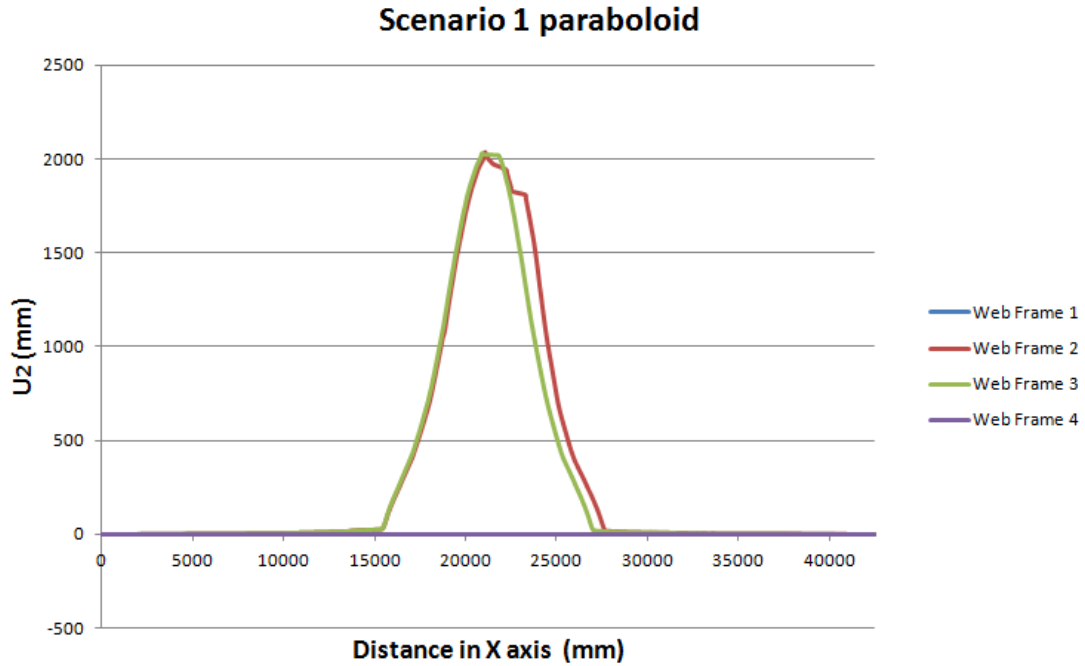
5.1.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 1]



Εικόνα 5-6 : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Εικόνα 5-7 : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



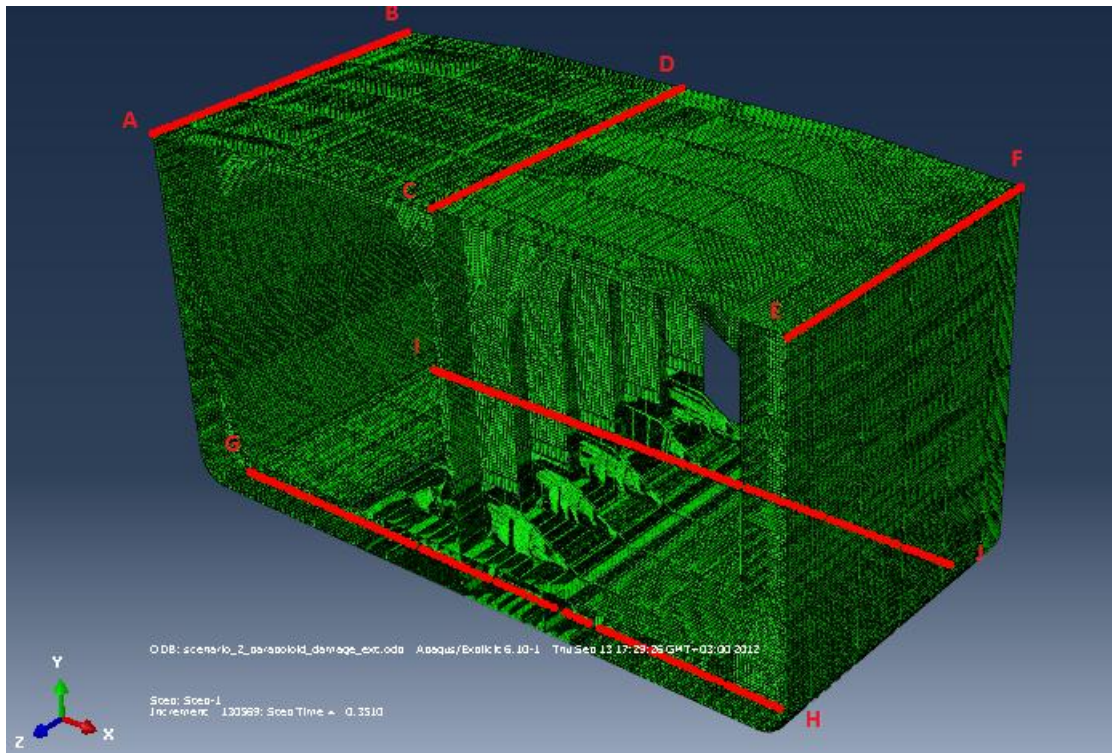
Διάγραμμα 5-2 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.

Στο Διάγραμμα 4-6, φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των κόμβων των κάτω ακμών κάθε ενός κατασκευαστικού νομέα στην περιοχή του πυθμένα, στο τέλος της ανάλυσης. Ο οριζόντιος άξονας αποτελεί το πλάτος του πυθμένα, με 0 τη θέση του πρώτου κόμβου από αριστερά.

Οι ακραίοι νομείς 1 και 4 παρουσιάζουν μηδενικές κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω των οριακών συνθηκών που τους έχουν επιβληθεί. Οι νομείς 2 και 3 που βρίσκονται εκατέρωθεν της περιοχής προσάραξης παρουσιάζουν μεγάλες και σχεδόν ίδιες κατακόρυφες μετατοπίσεις μέχρι και 2000 mm, καθώς απέχουν το ίδιο από το βράχο που έχει διεισδύσει στην κατασκευή. Οι μικρές διαφορές που εμφανίζουν στη δεξιά πλευρά οφείλονται σε τοπικές αστοχίες του νομέα 2.

5.2. Ανάλυση προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 2]

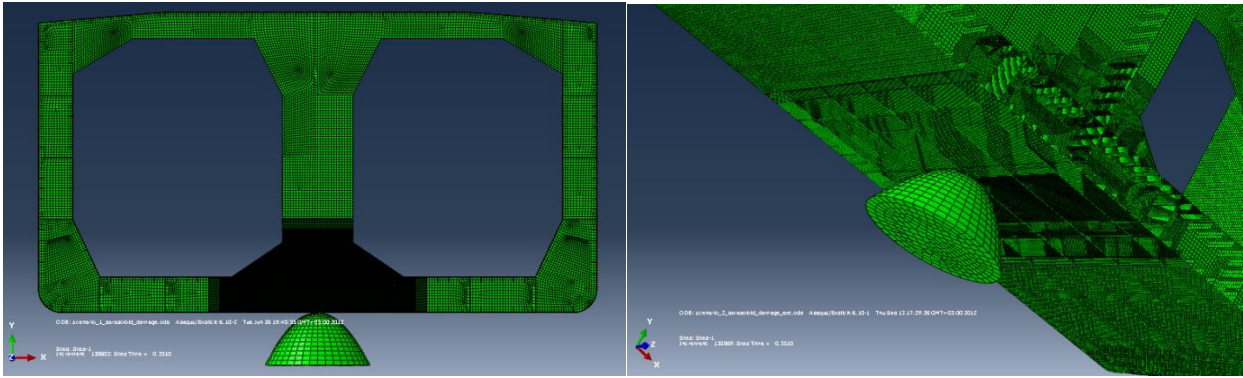
Στο παρόν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μήκους 20 μέτρων και ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του πλοίου σε κατασκευαστικό νομέα στην κεντρική σταθμίδα του πλοίου (Εικόνα 5-9). Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθησαν στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Εικόνα 5-8 : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.

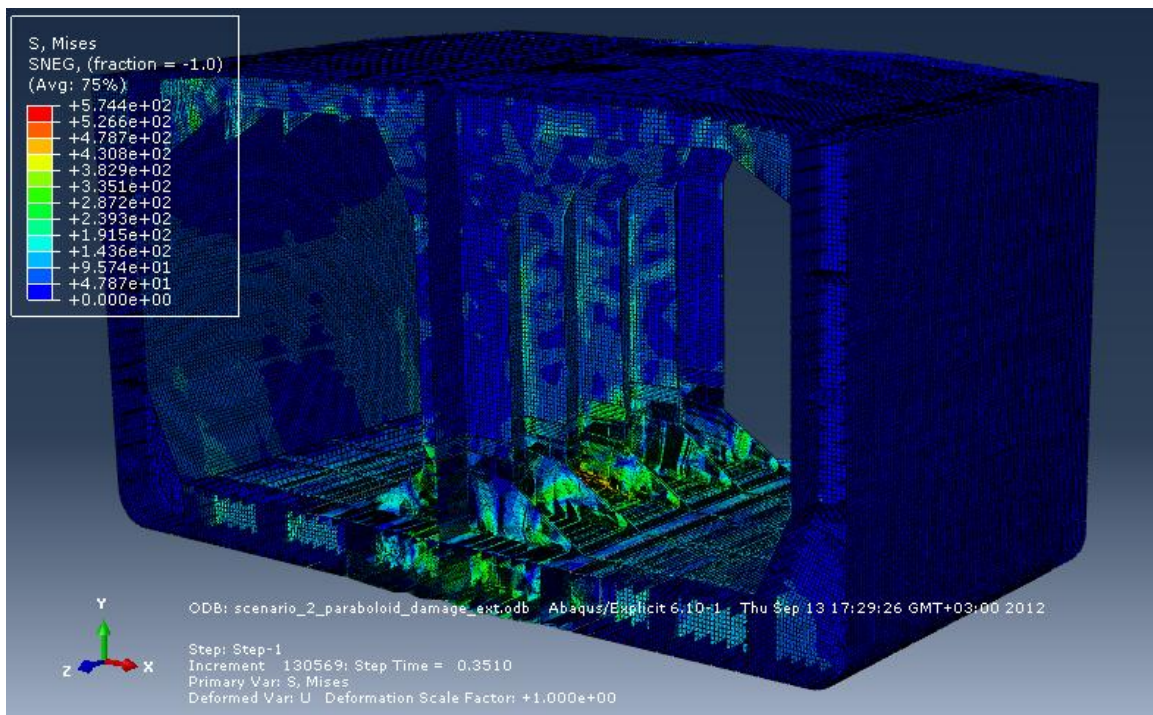
ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
AB, CD, EF	$U_Y, U_Z = 0$
GH, IJ	$U_Y, U_Z = 0$
Node D	$U_X, U_Z = 0$

Πίνακας 5-2 : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.

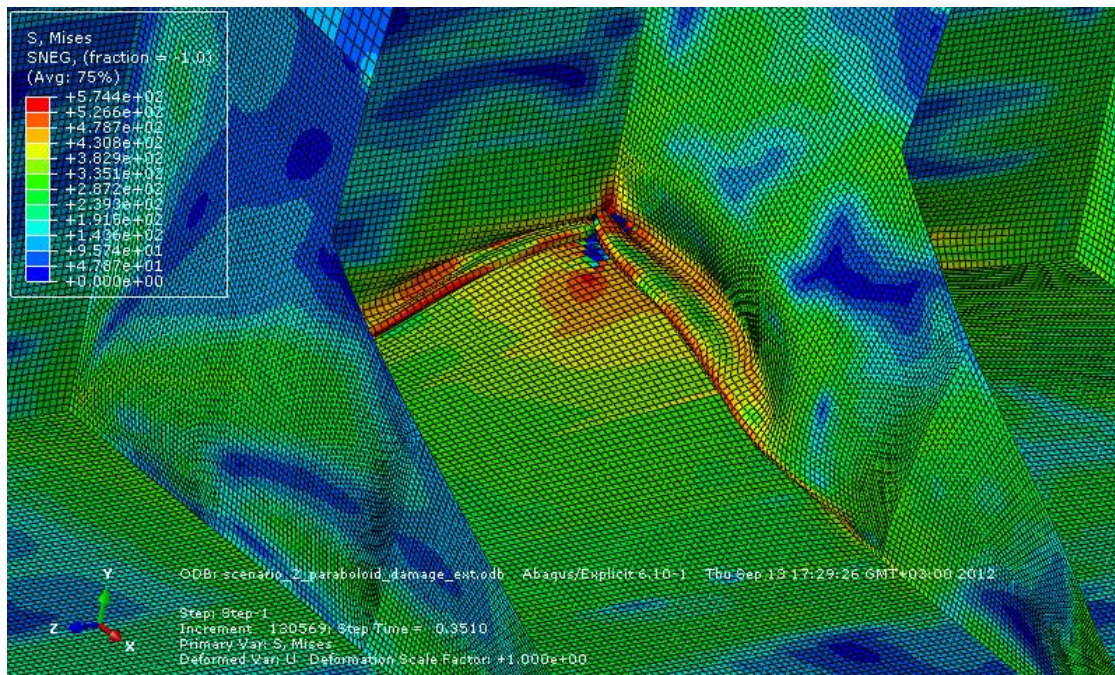


Εικόνα 5-9 : Απεικόνιση Σεναρίου 2 με παραβολοειδή βράχο.

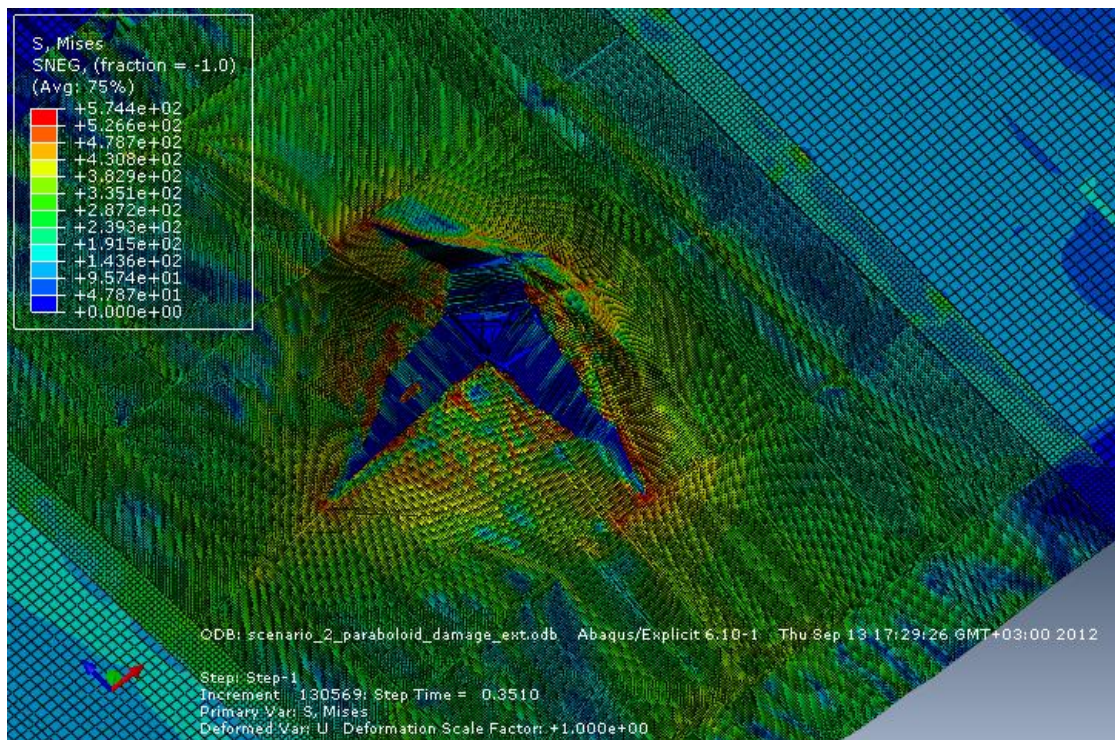
Μετά το πέρας της ανάλυσης, δημιουργήθηκε ένα ευρύ πεδίο τάσεων στην κατασκευή και παρουσιάστηκαν γενικές παραμορφώσεις. Η απόκριση της κατασκευής, καθώς και οι τιμές και οι θέσεις των τάσεων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικόνα 5-11, φαίνεται η απόκριση του εσωτερικού πυθμένα, ενώ στην Εικόνα 5-12, αντίστοιχα το ρήγμα στο έλασμα του εξωτερικού πυθμένα. Όπως παρατηρείται το έλασμα του εσωτερικού πυθμένα δεν καταρρέει, αλλά παρουσιάζει μια τοπική αστοχία στη σύνδεση του με το νομέα και τη διαμήκη φρακτή. Όπως και παραπάνω, σημειώνεται ότι, το ρήγμα εμφανίζεται με μπλέ χρώμα, που αντιπροσωπεύει τα στοιχεία με μηδενικές αναπτυσσόμενες τάσεις.



Εικόνα 5-10 : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.

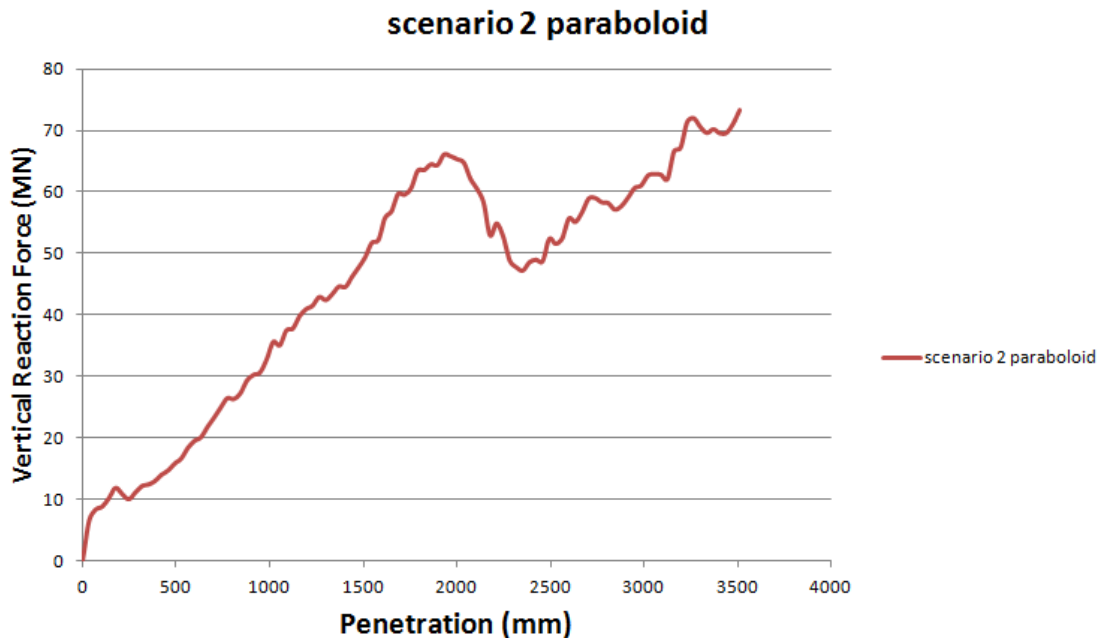


Εικόνα 5-11 : Απόκριση εσωτερικού πυθμένα.



Εικόνα 5-12 : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.

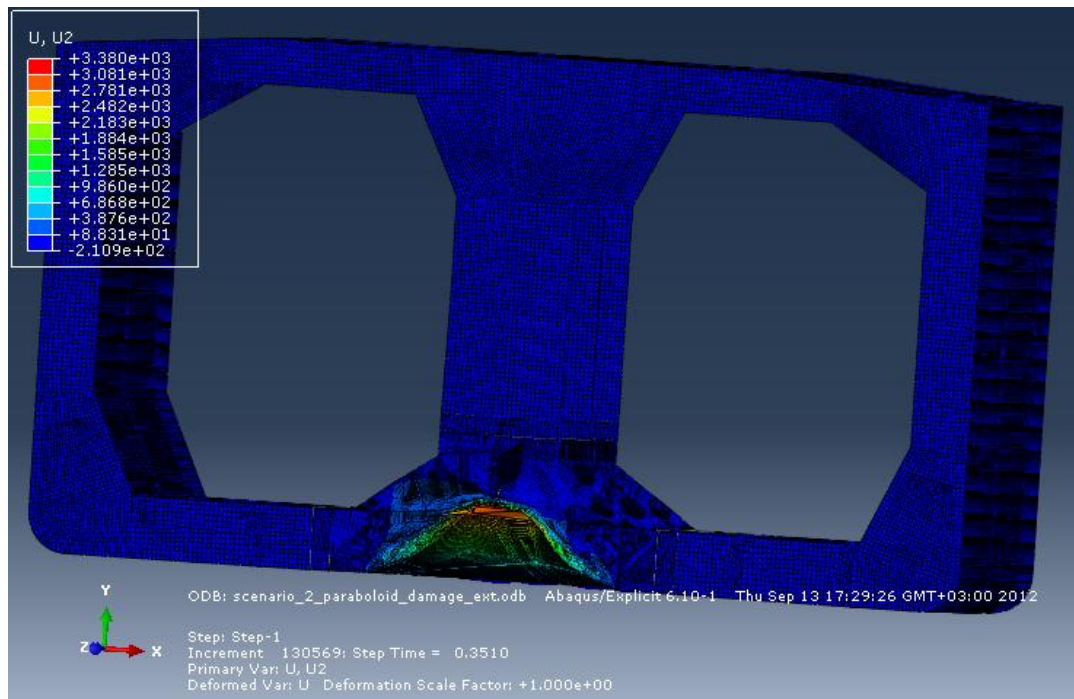
5.2.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 2]



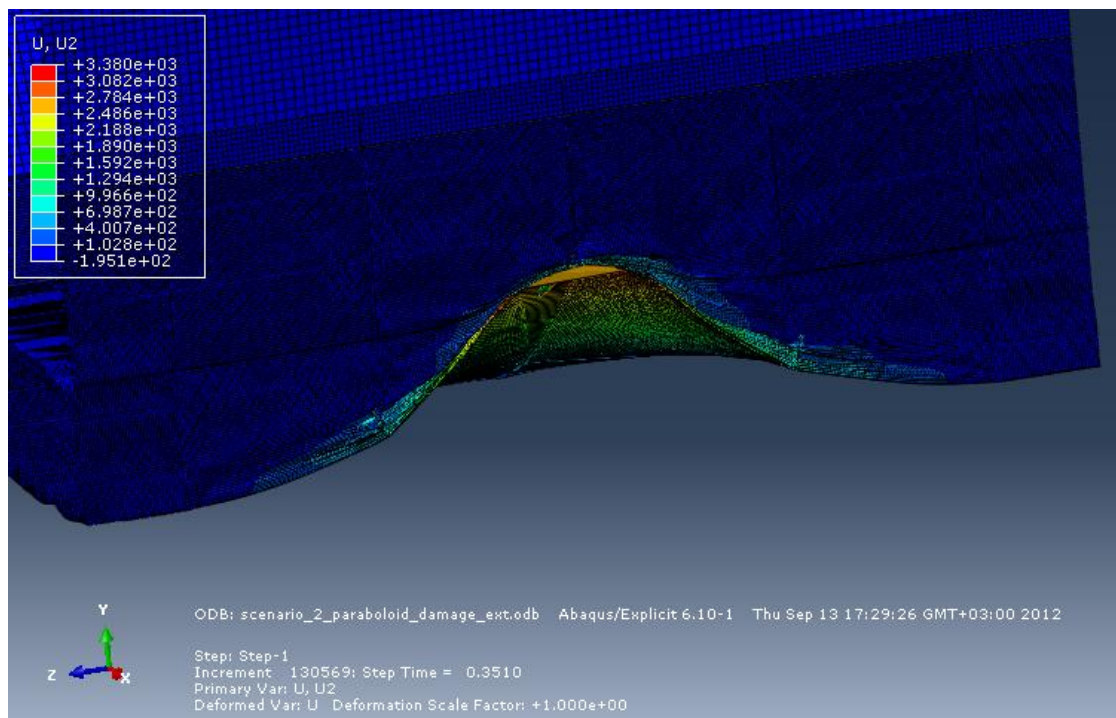
Διάγραμμα 5-3 : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.

Παρατηρώντας την καμπύλη του Διαγράμματος 5-3, φαίνεται μία σταθερή αύξηση της δύναμης αντίδρασης μέχρι τα 66.1 MN για 1930 mm διείσδυσης. Σε αυτό το σημείο ξεκινά η αστοχία του ελάσματος του εξωτερικού πυθμένα, ωστόσο η πτώση της δύναμης αντίδρασης δεν είναι δραματική λόγω της μεγάλης ακαμψίας στην κατασκευή από την παρουσία της κεντρικής σταθμίδας αλλά και του κατασκευαστικού νομέα. Έπειτα η δύναμη αντίδρασης αυξάνεται εκ νέου και αυτό συμβαίνει πριν ο βράχος έρθει σε επαφή με τον εσωτερικό πυθμένα. Αυτό οφείλεται στην ύπαρξη του κατασκευαστικού ο οποίος συνεισφέρει σε μεγάλο βαθμό στην αντίσταση της κατασκευής στη διείσδυση του βράχου. Στο τέλος της προσομοίωσης η δύναμη φτάνει τα 73.4 MN.

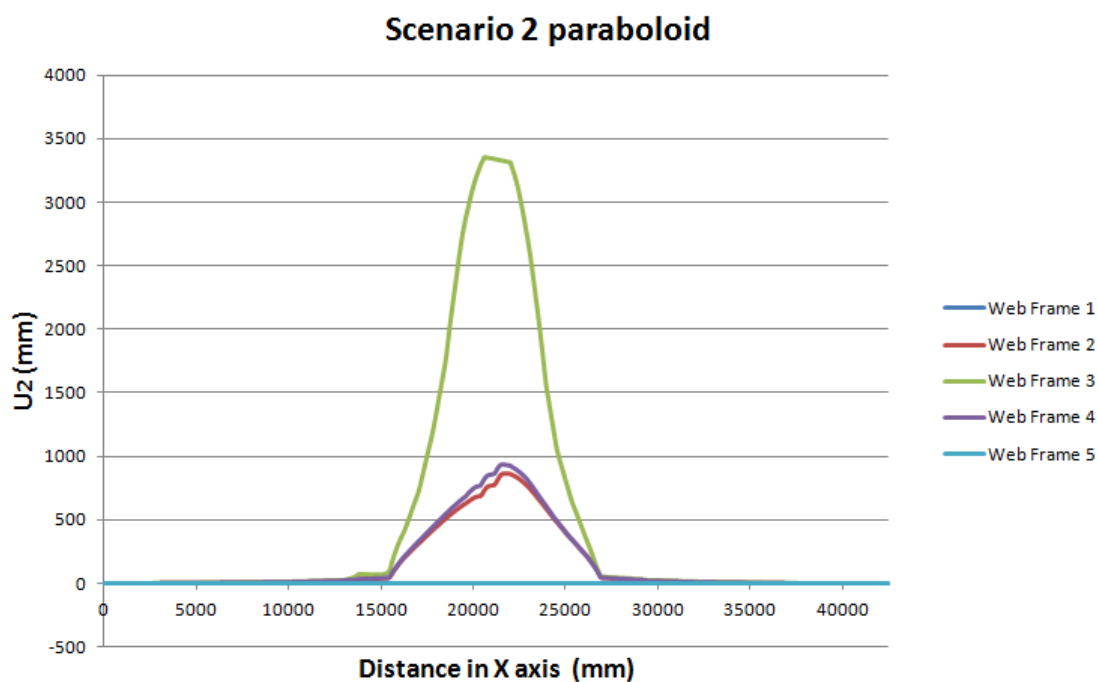
5.2.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 2]



Εικόνα 5-13 : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Εικόνα 5-14 : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



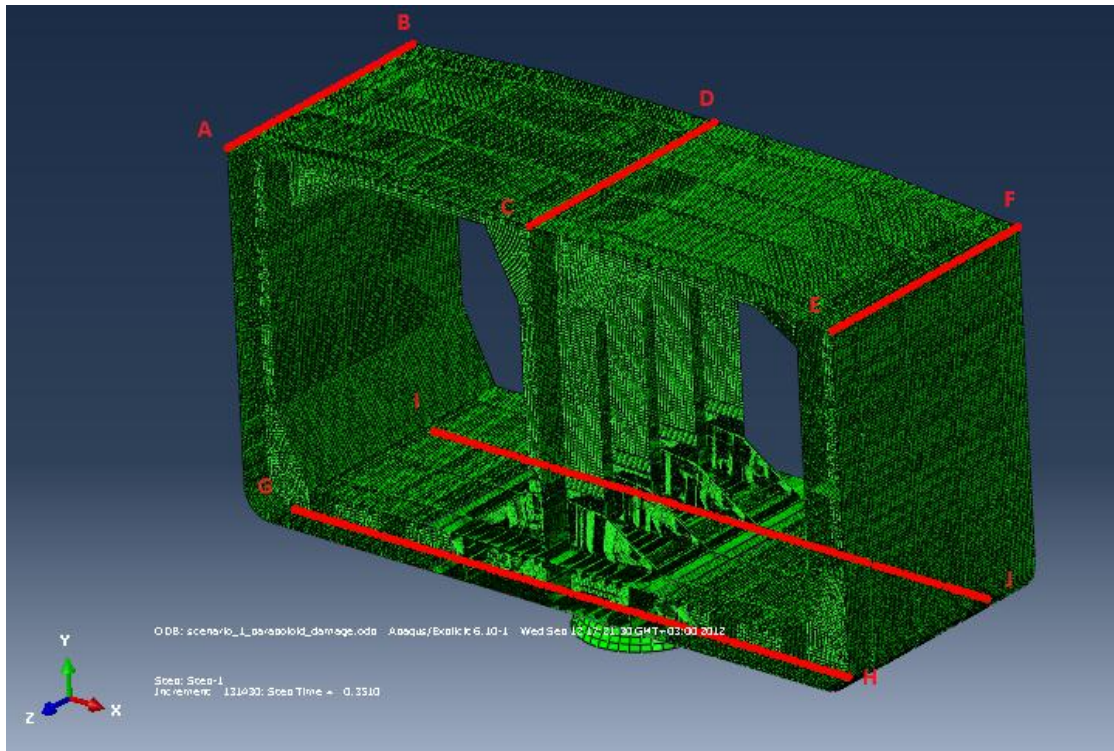
Διάγραμμα 5-4 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.

Στο Διάγραμμα 4-6, φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των κόμβων των κάτω ακμών κάθε ενός κατασκευαστικού νομέα στην περιοχή του πυθμένα, στο τέλος της ανάλυσης. Ο οριζόντιος άξονας αποτελεί το πλάτος του πυθμένα, με 0 τη θέση του πρώτου κόμβου απο αριστερά.

Οι ακραίοι νομείς 1 και 5 εμφανίζουν μηδενικές κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω των οριακών συνθηκών που τους έχουν επιβληθεί. Οι νομείς 2 και 4 που βρίσκονται εκατέρωθεν της περιοχής προσάραξης εμφανίζουν παραπλήσιες κατακόρυφες μετατοπίσεις περί τα 900 mm. Ο νομέας 3, πάνω στον οποίο προσκρούει ο βράχος, εμφανίζει κατακόρυφη μετατόπιση μέχρι και 3351 mm ενώ δέ φτάνει μέχρι τα 3500 mm, που είναι η πλήρης διείδυση του βράχου, λόγω αστοχίας του ελάσματος στην περιοχή που έρχεται σε επαφή με την κορυφή του βράχου.

5.3. Ανάλυση προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 3]

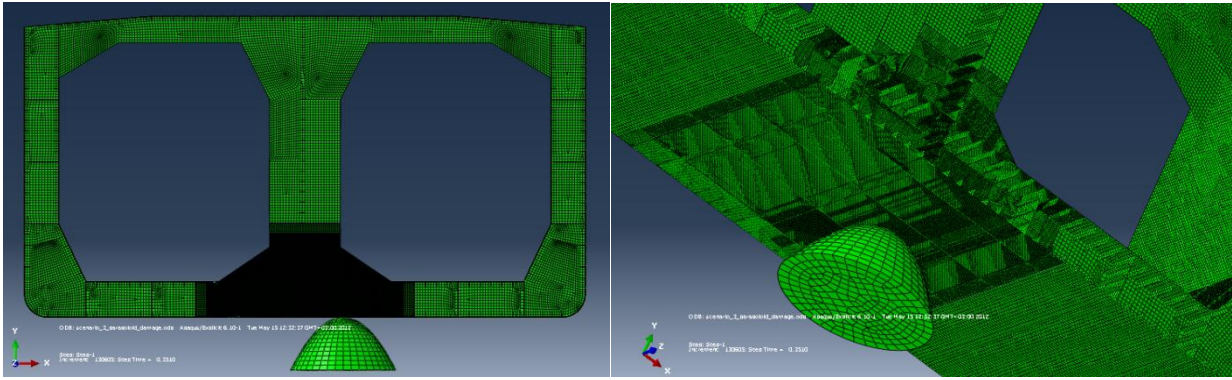
Στο παρόν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο 16 μέτρων και ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του πλοίου μεταξύ κατασκευαστικών νομέων και μεταξύ της κεντρικής και της πρώτης πλευρικής σταθμίδας του πλοίου (Εικόνα 5-16). Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθησαν στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Εικόνα 5-15 : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.

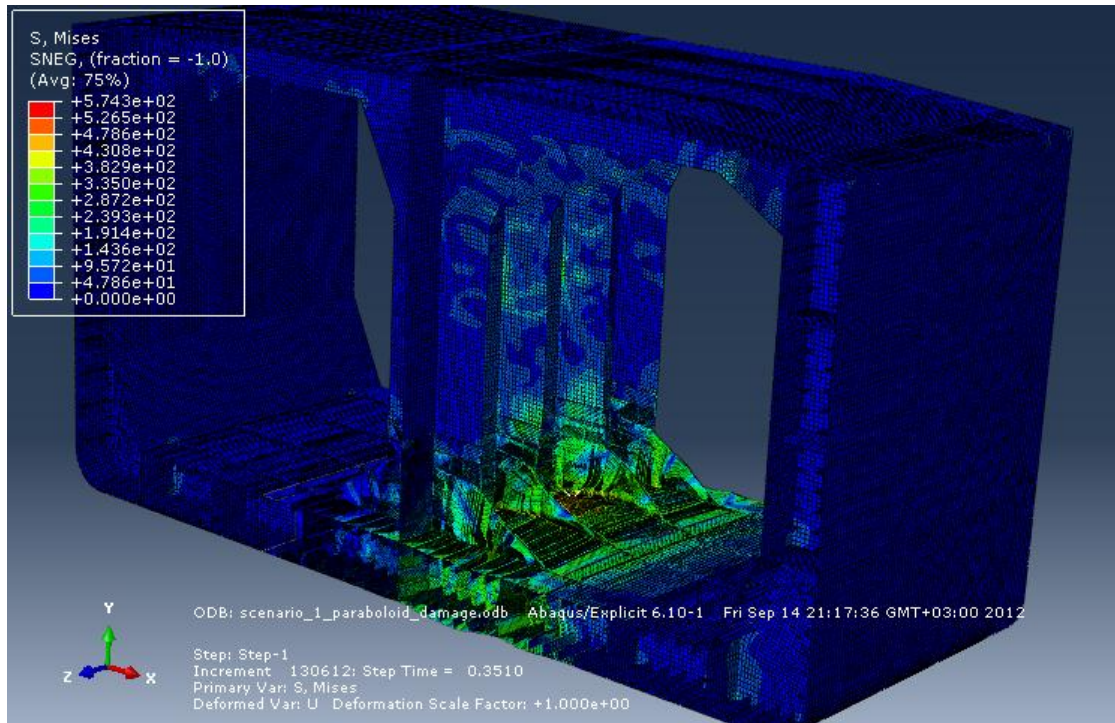
ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
AB, CD, EF	$U_Y, U_Z = 0$
GH, IJ	$U_Y, U_Z = 0$
Node D	$U_X, U_Z = 0$

Πίνακας 5-3 : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.

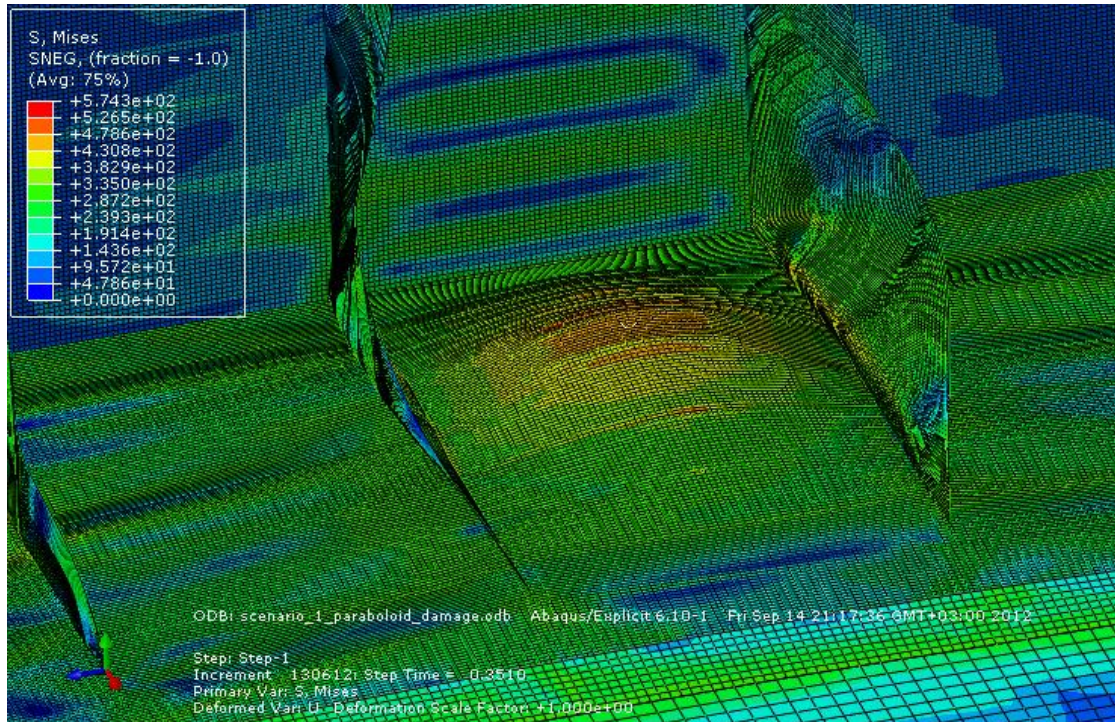


Εικόνα 5-16 : Απεικόνιση Σεναρίου 3 με παραβολοειδή βράχο.

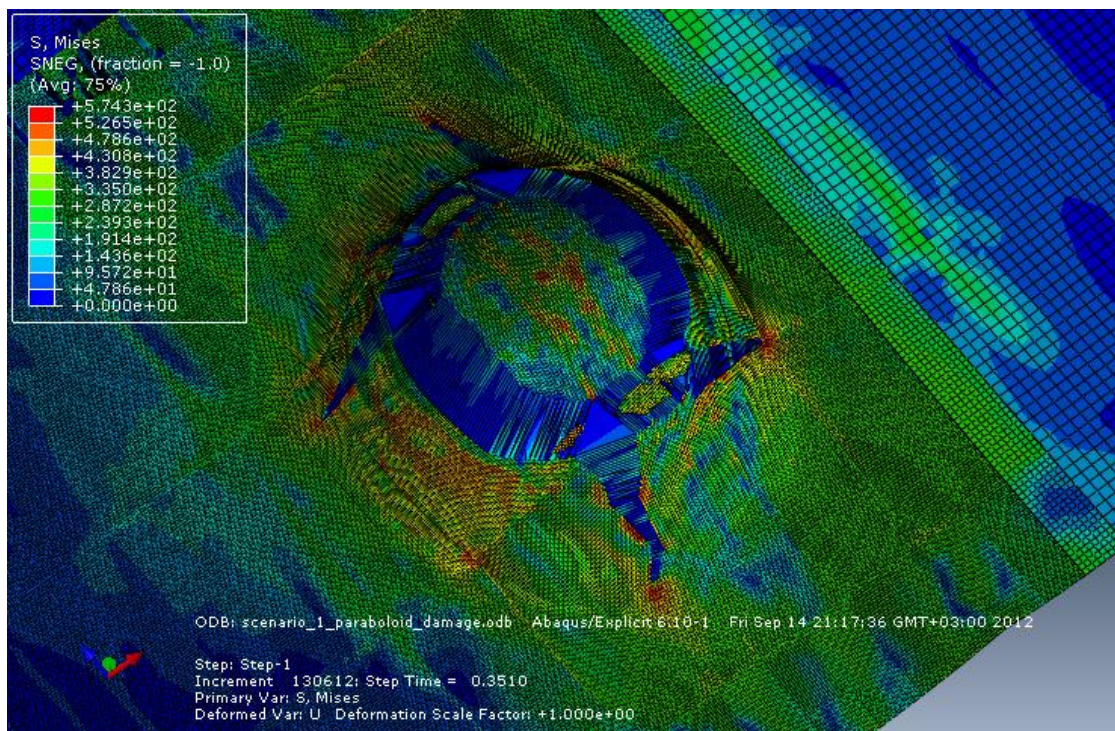
Μετά το πέρας της ανάλυσης, δημιουργήθηκε ένα ευρύ πεδίο τάσεων στην κατασκευή και παρουσιάστηκαν γενικές παραμορφώσεις. Η απόκριση της κατασκευής, καθώς και οι τιμές και οι θέσεις των τάσεων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικόνα 5-18, με έντονο μπλέ χρώμα φαίνεται το ρήγμα στο έλασμα του εσωτερικού πυθμένα, ενώ στην Εικόνα 5-19, αντίστοιχα το ρήγμα στο έλασμα του εξωτερικού πυθμένα. Όπως και παραπάνω, σημειώνεται ότι, το ρήγμα εμφανίζεται με μπλέ χρώμα, που αντιπροσωπεύει τα στοιχεία με μηδενικές αναπτυσσόμενες τάσεις.



Εικόνα 5-17 : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.

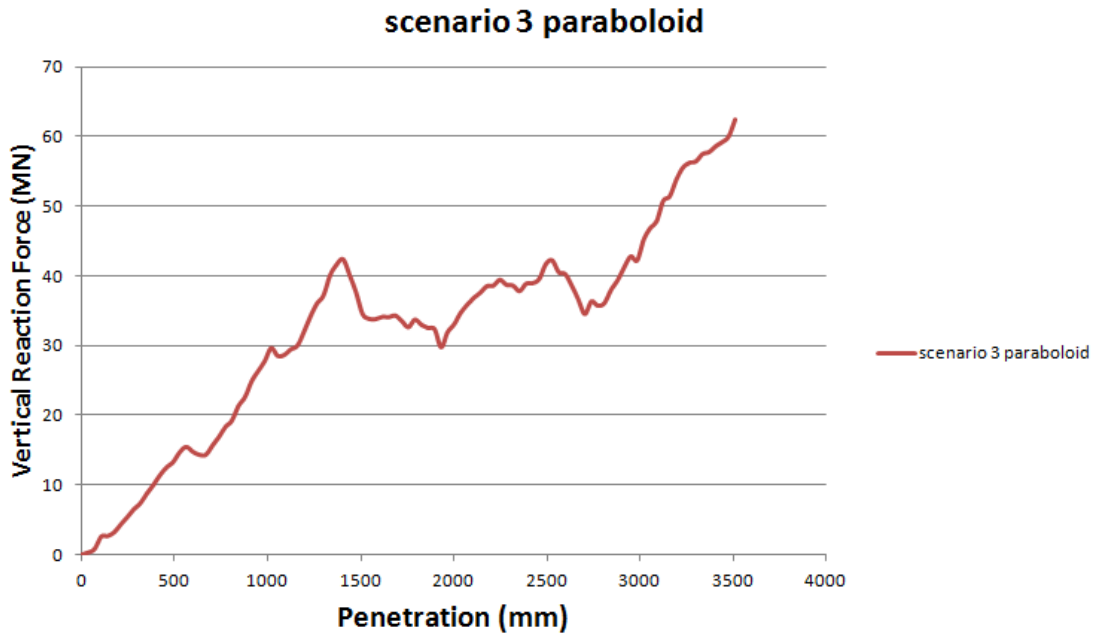


Εικόνα 5-18 : Απόκριση εσωτερικού πυθμένα.



Εικόνα 5-19 : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.

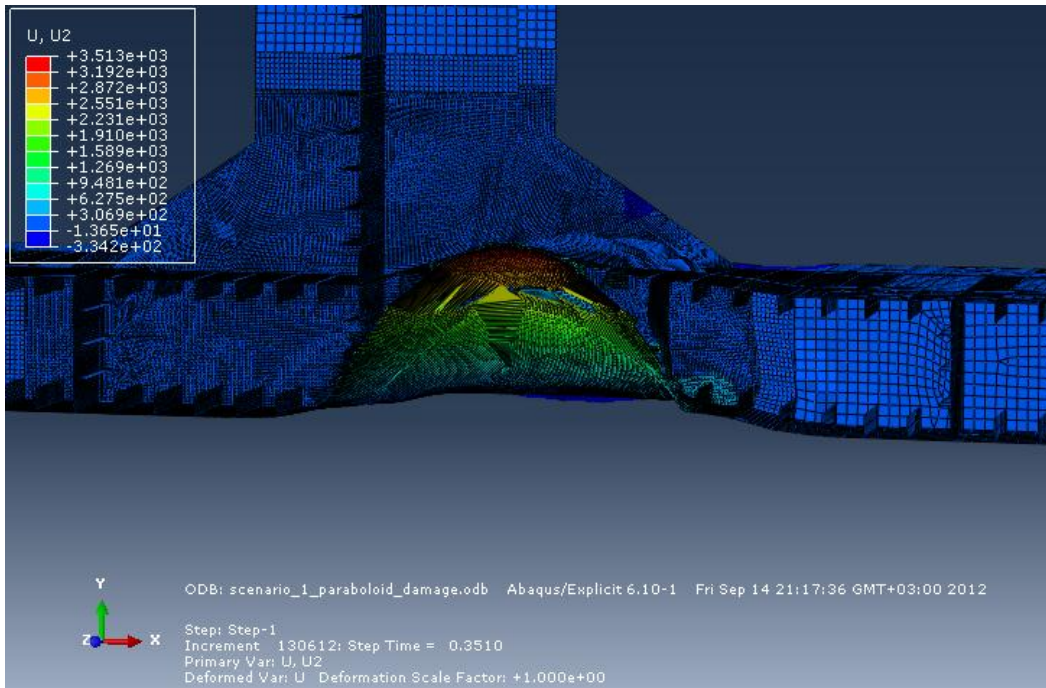
5.3.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 3]



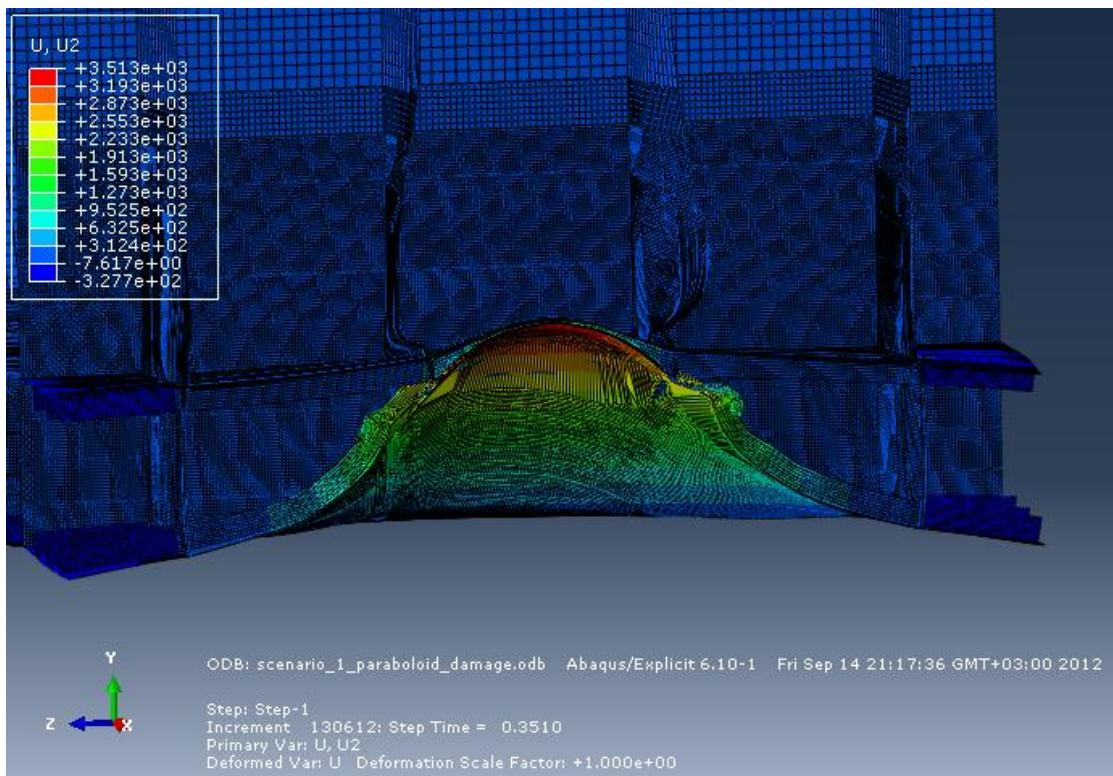
Διάγραμμα 5-5 : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.

Παρατηρώντας την καμπύλη του Διαγράμματος 5-3, φαίνεται μία σχεδόν σταθερή αύξηση της δύναμης αντίδρασης μέχρι τα 42.4 MN για 1400 mm διείσδυσης του βράχου ενώ ενδιάμεσα παρατηρούνται δύο μικρές πτώσεις της δύναμης που οφείλονται στον λυγισμό των ελασμάτων των γειτονικών νομέων. Έπειτα παρατηρείται μία πτώση μέχρι τα 30 MN, η οποία είναι αποτέλεσμα της αστοχίας του ελάσματος του εξωτερικού πυθμένα. Όταν ο βράχος έχει διεισδύσει κατά 2000 mm στην κατασκευή τα παραμορφωμένα ενισχυτικά του ελάσματος του εξωτερικού πυθμένα συμβάλουν στην αντίσταση της κατασκευής αυξάνοντας την δύναμη αντίδρασης. Μόλις αυτά αστοχούν περι τα 2500 mm η δύναμη πέφτει για να ξανα αυξηθεί όταν ο βράχος συναντήσει τον εσωτερικό πυθμένα. Τελικά αυτή φτάνει μέχρι τα 63 MN.

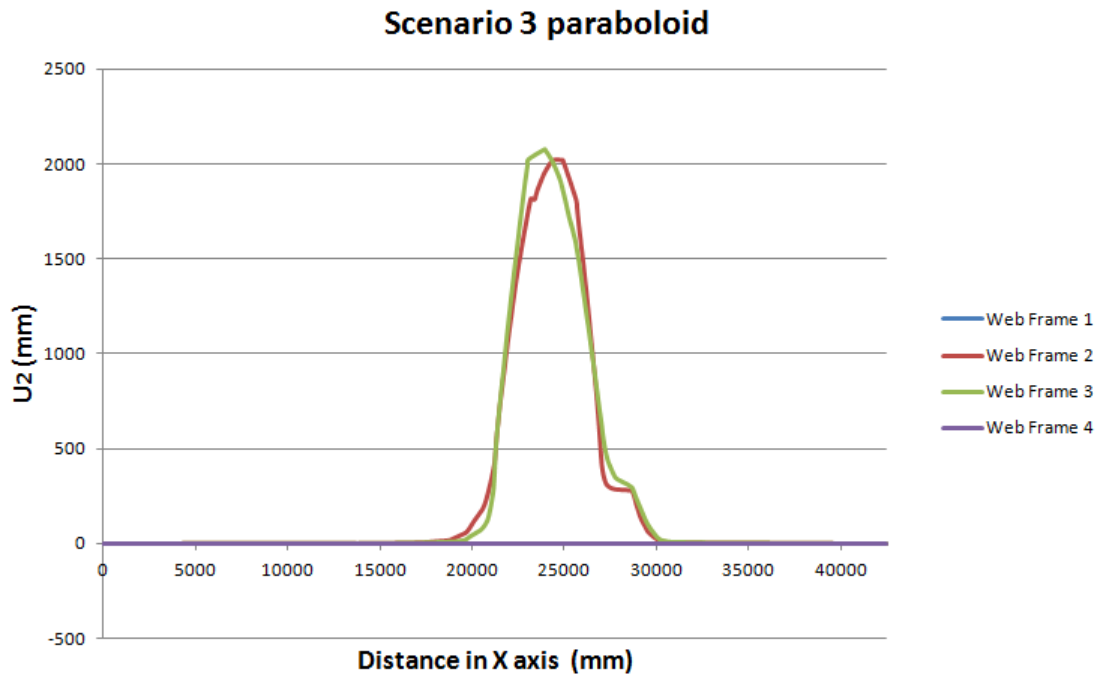
5.3.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 3]



Εικόνα 5-20 : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Εικόνα 5-21 : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



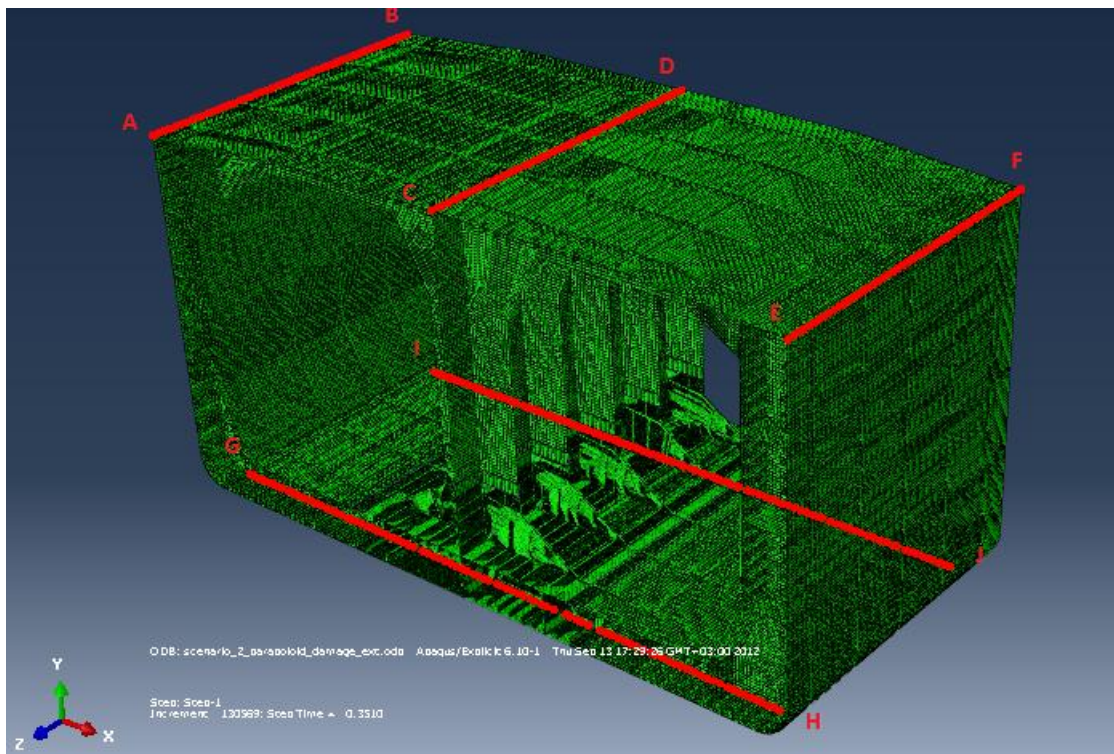
Διάγραμμα 5-6 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.

Στο Διάγραμμα 4-6, φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των κόμβων των κάτω ακμών κάθε ενός κατασκευαστικού νομέα στην περιοχή του πυθμένα, στο τέλος της ανάλυσης. Ο οριζόντιος άξονας αποτελεί το πλάτος του πυθμένα, με 0 τη θέση του πρώτου κόμβου από αριστερά.

Οι νομείς 1 και 4 εμφανίζουν μηδενικές κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω των οριακών συνθηκών που τους έχουν επιβληθεί. Οι νομείς 2 και 4 εμφανίζουν παραπλήσιες κατακόρυφες μετατοπίσεις που ξεπερνούν τα 2000 mm και οι μεταξύ τους διαφορές είναι ελάχιστες. Επίσης παρατηρείται πιο έντονα το φαινόμενο της μη συμμετρίας κατά το εγκάρσιο. Η δεξιά πλευρά των νομέων επηρεάζεται περισσότερο από την αριστερή λόγω της μικρότερης ακαμψίας της πλευρικής σταθμίδας σε σχέση με την κεντρική. Η πλευρική σταθμίδα ανυψώνεται στην περιοχή των νομέων κατά 300 mm επηρεάζοντας την απόκριση των νομέων.

5.4. Ανάλυση προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 4]

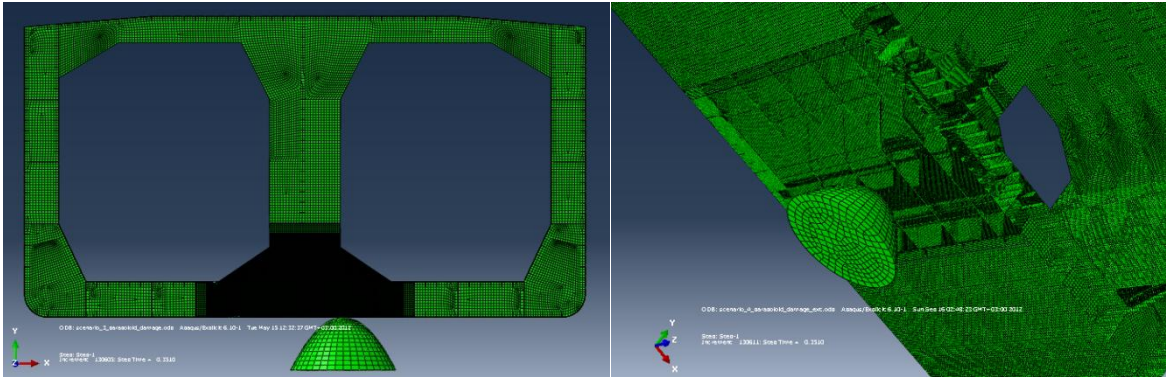
Στο παρόν χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο μήκους 20 μέτρων και ακολουθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο ο οποίος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του πλοίου σε κατασκευαστικό νομέα και μεταξύ της κεντρικής και της πρώτης πλευρικής σταθμίδας του πλοίου (Εικόνα 5-23). Οι οριακές συνθήκες που επιβλήθησαν στο μοντέλο φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.



Εικόνα 5-22 : Μοντέλο ανάλυσης προσάραξης.

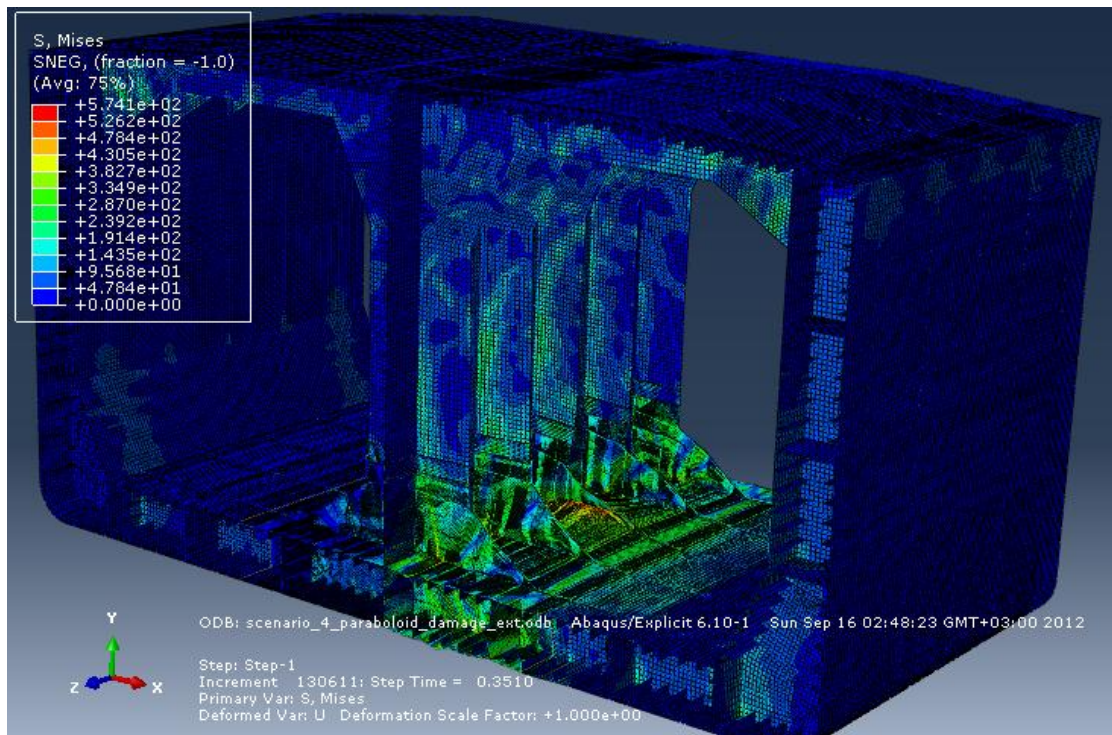
ΟΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	
AB, CD, EF	$U_Y, U_Z = 0$
GH, IJ	$U_Y, U_Z = 0$
Node D	$U_X, U_Z = 0$

Πίνακας 5-4 : Επιβαλλόμενες οριακές συνθήκες στο προς ανάλυση μοντέλο.

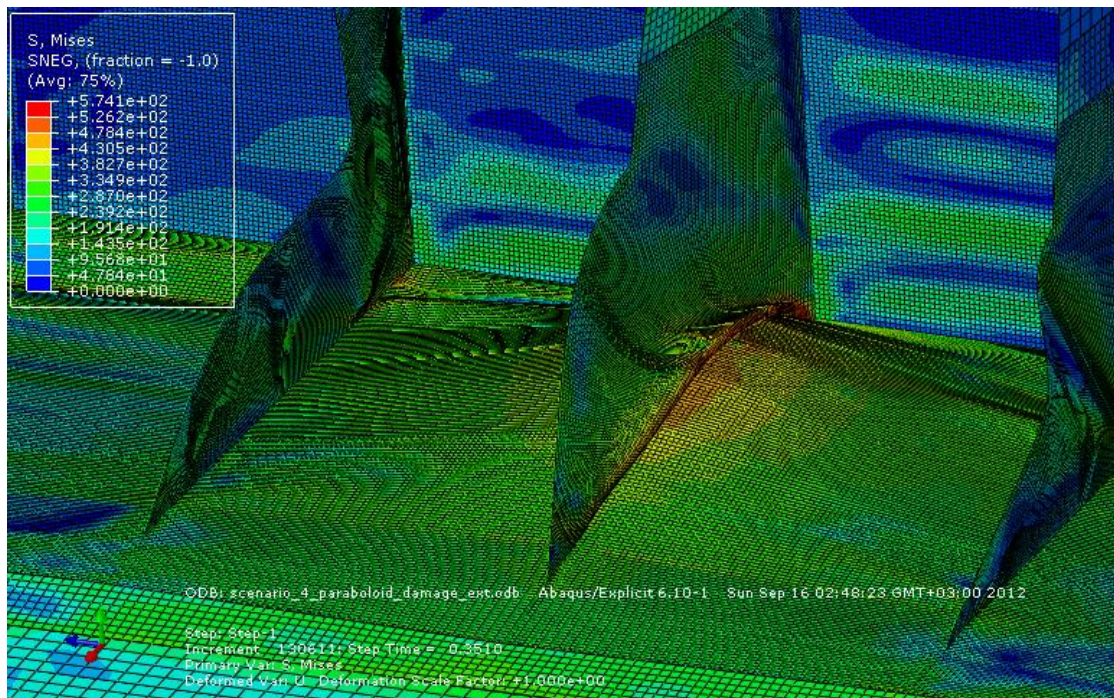


Εικόνα 5-23 : Απεικόνιση Σεναρίου 4 με παραβολοειδή βράχο.

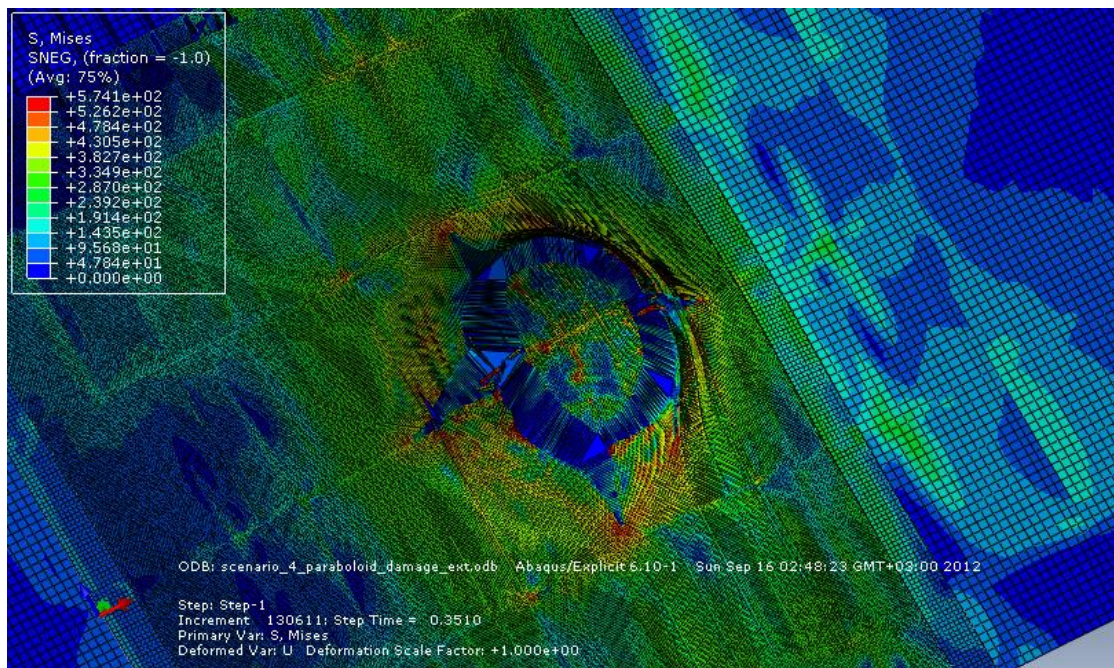
Μετά το πέρας της ανάλυσης, δημιουργήθηκε ένα ευρύ πεδίο τάσεων στην κατασκευή και παρουσιάστηκαν γενικές παραμορφώσεις. Η απόκριση της κατασκευής, καθώς και οι τιμές και οι θέσεις των τάσεων φάνονται στις παρακάτω εικόνες. Στην Εικόνα 5-25, φαίνεται η απόκριση του εσωτερικού πυθμένα καθώς και η μεγάλη παραμόρφωση του μπρακέτου του νομέα, ενώ στην Εικόνα 5-26, αντίστοιχα το ρήγμα στο έλασμα του εξωτερικού πυθμένα. Όπως και παραπάνω, σημειώνεται ότι, το ρήγμα εμφανίζεται με μπλέ χρώμα, που αντιπροσωπεύει τα στοιχεία με μηδενικές αναπτυσσόμενες τάσεις.



Εικόνα 5-24 : Αναπτυσσόμενες τάσεις σε ολόκληρη την κατασκευή.

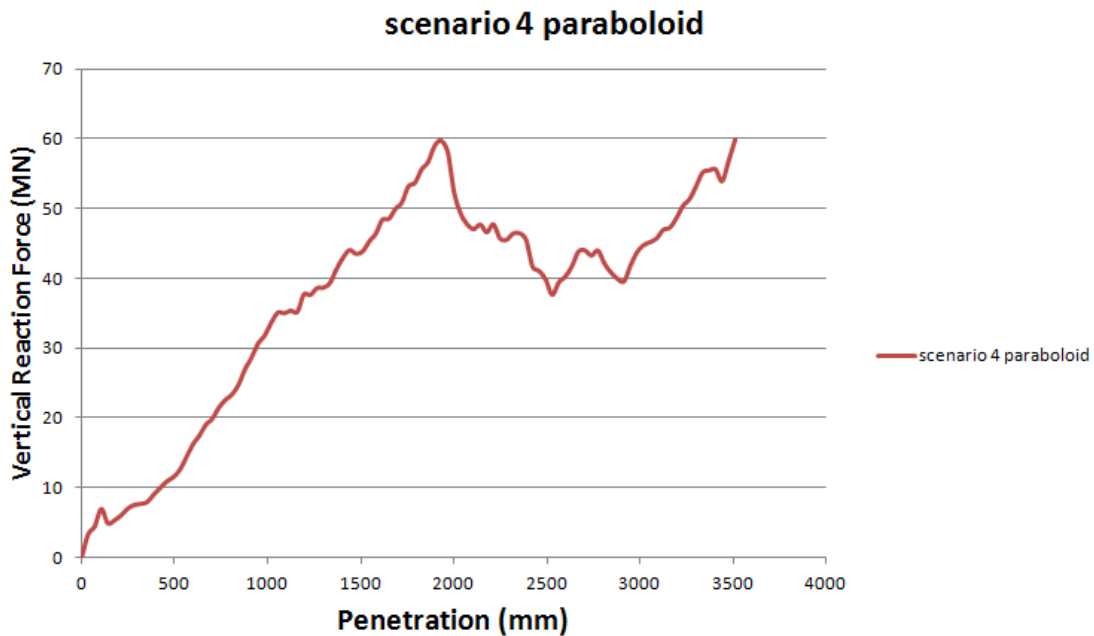


Εικόνα 5-25 : Απόκριση εσωτερικού πυθμένα.



Εικόνα 5-26 : Ρήγμα ελάσματος εξωτερικού πυθμένα.

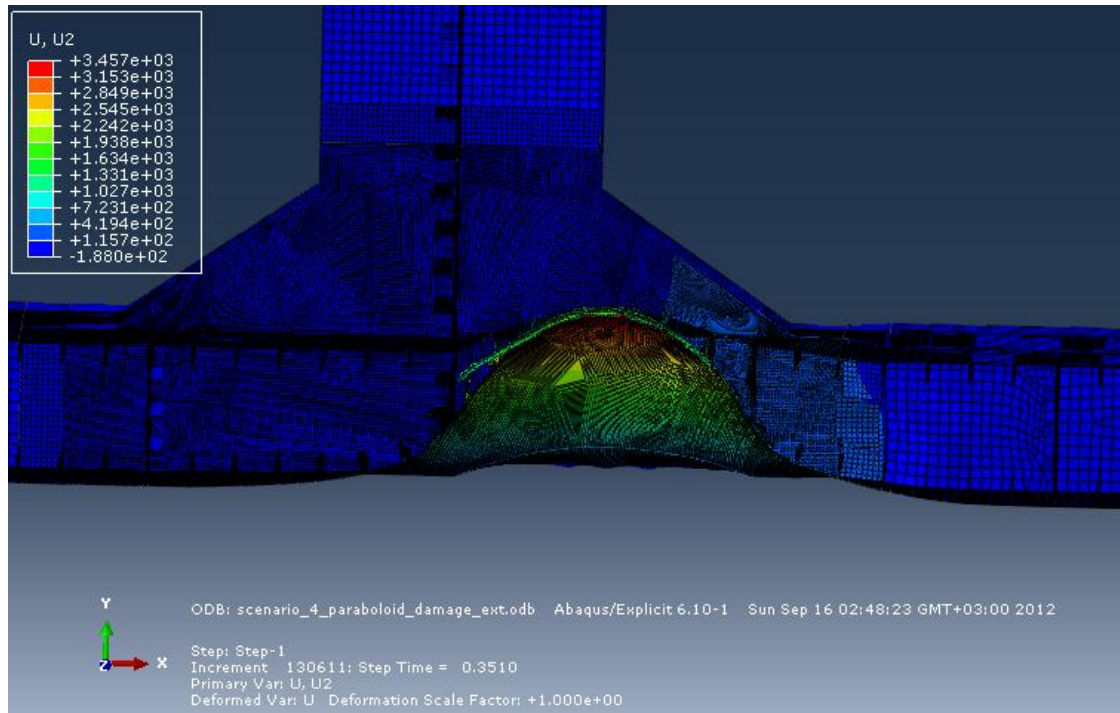
5.4.1 Δυνάμεις αντίδρασης λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 4]



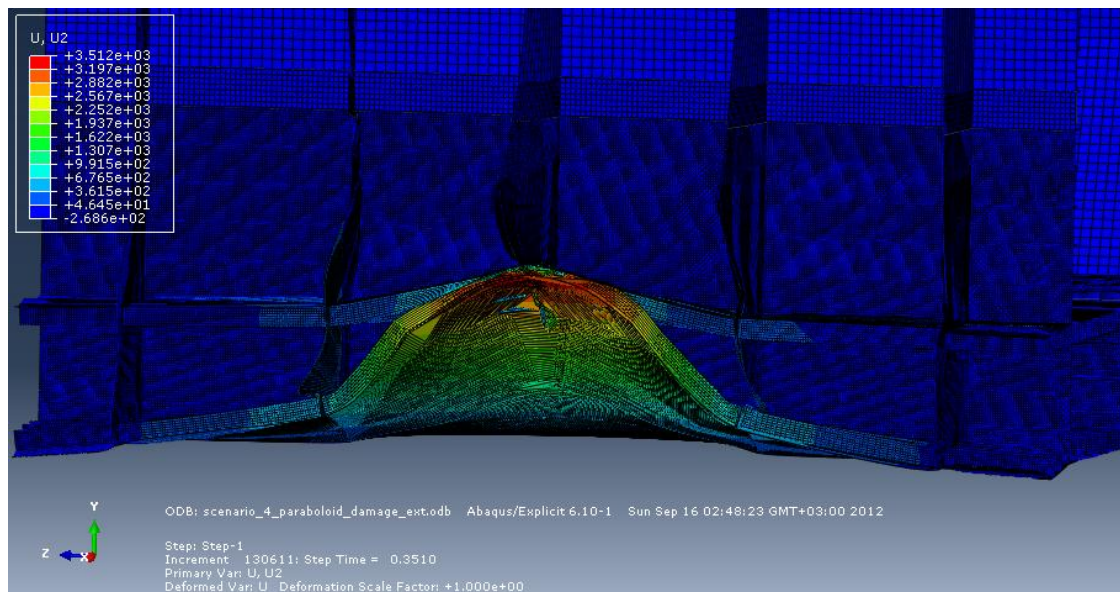
Διάγραμμα 5-7 : Κατακόρυφη δύναμη αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου.

Παρατηρώντας την καμπύλη του Διαγράμματος 5-3, φαίνεται μία σταθερή αύξηση της δύναμης αντίδρασης μέχρι τα 59.8 MN για 1930 mm διείσδυσης. Στο σημείο αυτό, το έλασμα του εξωτερικού πυθμένα αστοχεί σταδιακά με αποτέλεσμα η δύναμη να πέσει μέχρι τα 37.7 MN για 2530 mm διείσδυσης. Στα επόμενα 400 mm διείσδυσης η δύναμη εμφανίζει μια μικρή αυξομείωση καθώς αστοχούν τα ενισχυτικά του εξωτερικού πυθμένα που βρίσκονται γύρω από την περιοχή προσάραξης. Έπειτα η δύναμη αντίδρασης ακολουθεί ανοδική πορεία μέχρι τα 60 MN χωρίς να παρουσιάσει πτώση καθώς, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-25 το έλασμα του εσωτερικού πυθμένα σεν αστοχεί μέχρι και το τέλος της προσομοίωσης.

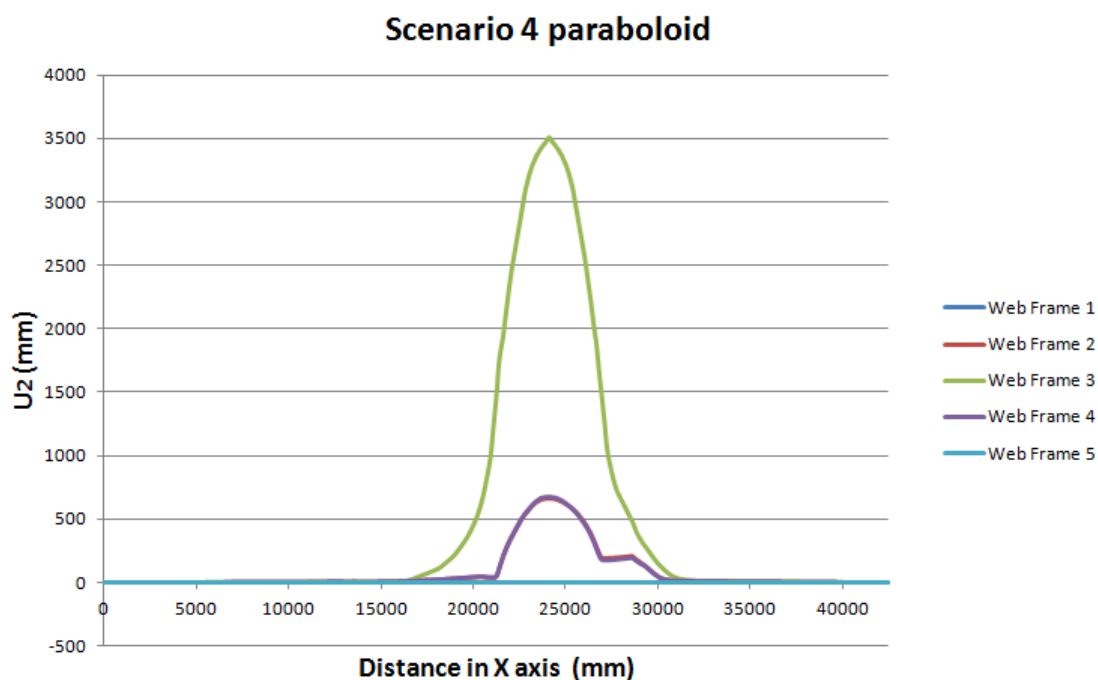
5.4.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις λόγω προσάραξης σε παραβολοειδή βράχο / [Σενάριο 4]



Εικόνα 5-27 : Εγκάρσια τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Εικόνα 5-28 : Διαμήκης τομή του μοντέλου με χρωματική απεικόνιση της κατακόρυφης μετατόπισης.



Διάγραμμα 5-8 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος.

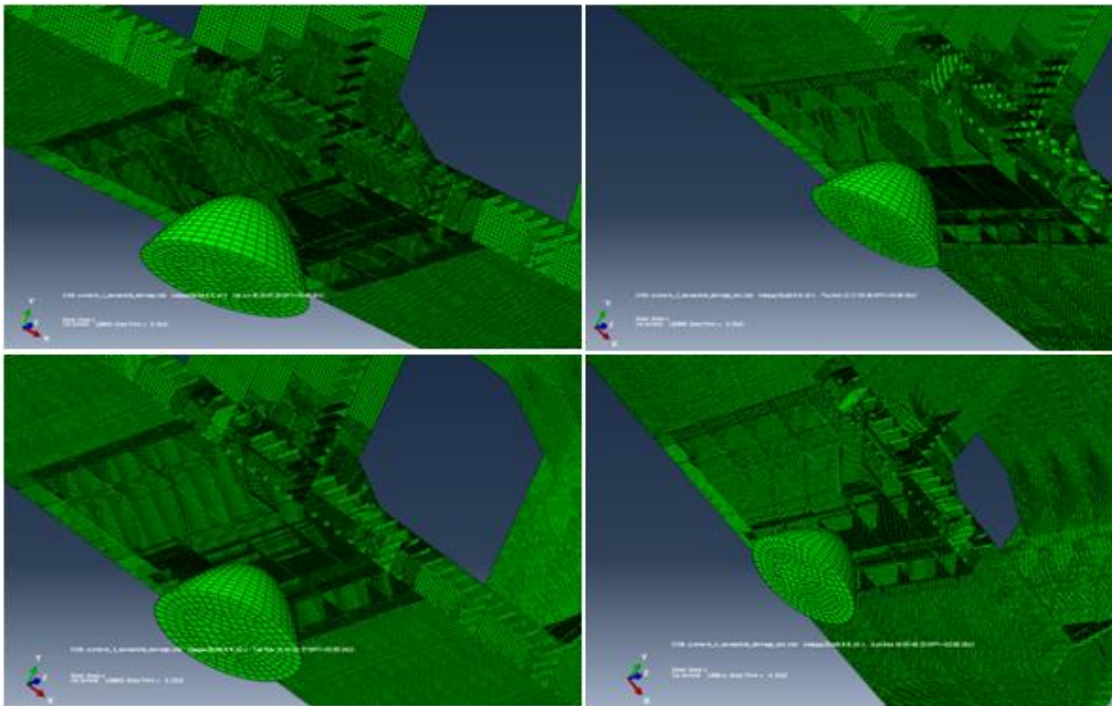
Στο Διάγραμμα 4-6, φαίνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις των κόμβων των κάτω ακμών κάθε ενός κατασκευαστικού νομέα στην περιοχή του πυθμένα, στο τέλος της ανάλυσης. Ο οριζόντιος άξονας αποτελεί το πλάτος του πυθμένα, με 0 τη θέση του πρώτου κόμβου από αριστερά.

Οι νομείς 1 και 5 εμφανίζουν μηδενικές κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω των οριακών συνθηκών που τους έχουν επιβληθεί. Από εκεί και πέρα παρατηρείται απόλυτη συμμετρία κατά το διάμηκες στην απόκριση των νομέων.

Οι νομείς 2 και 4 εμφανίζουν ακριβώς ίδιες κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά το πλάτος τους, οι οποίες φτάνουν τα 660 mm στην περιοχή προσάραξης. Όπως έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενα σενάρια, η δεξιά πλευρά των νομέων επηρεάζεται περισσότερο από τη διείδυση του βράχου λόγω της μικρότερης ακαμψίας της πλευρικής σταθμίδας σε σχέση με την κεντρική. Τέλος, ο νομέας 3 ακολουθεί πλήρως την κίνηση του βράχου και φτάνει μέχρι τα 3500 mm κατακόρυφης μετατόπισης. Κάτι τέτοιο σημαίνει πως κανένα στοιχείο της κάτω ακμής του νομέα δεν αστοχεί.

6. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

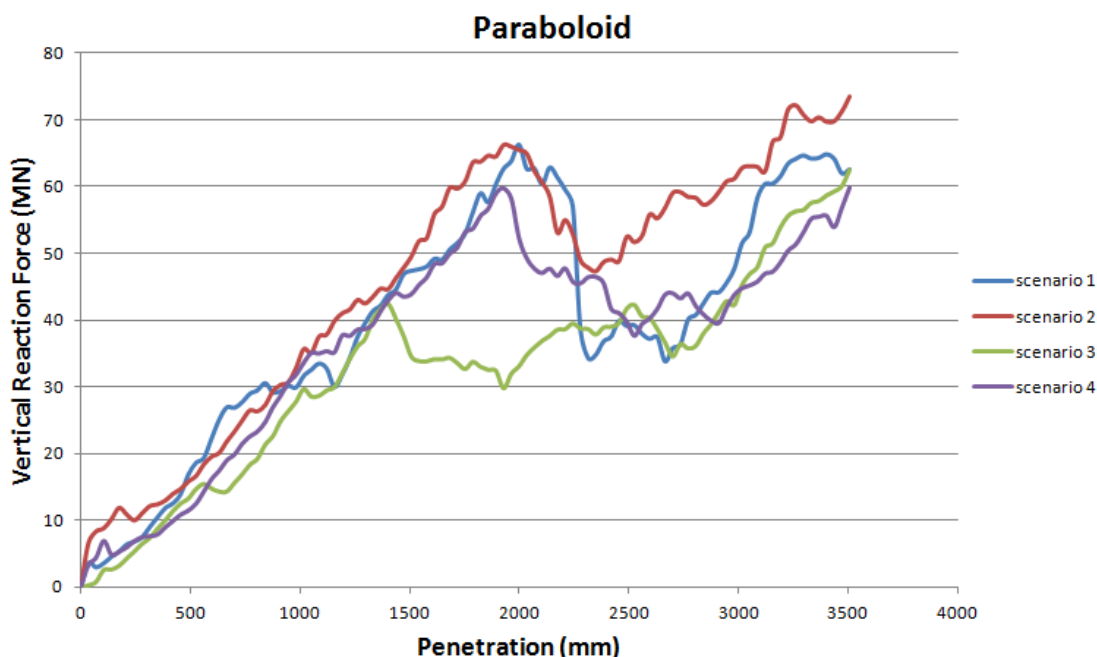
6.1. Συγκεντρωτικά συμπεράσματα/αποτελέσματα αναλύσεων όλων των σεναρίων για παραβολοειδή βράχο



Εικόνα 6-1 : Απεικόνιση όλων των σεναρίων για παραβολοειδή βράχο.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από όλα τα σενάρια με παραβολοειδή βράχο που αναλύθηκαν. Στο τέλος του κεφαλαίου εξάγονται τα συμπεράσματα από τη σύγκριση των αναλύσεων με αυτή τη μορφή βράχου για τις διάφορες θέσεις στις οποίες αυτός διεισδύει στην κατασκευή.

6.1.1 Δυνάμεις αντίδρασης σεναρίων



Διάγραμμα 6-1 : Κατακόρυφες δυνάμεις αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου για τα τέσσερα σενάρια προσάραξης.

Παρατηρώντας τις καμπύλες του διαγράμματος 6-1, διακρίνουμε τα εξής:

Μέχρι τα 1400 mm διείσδυσης, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφορές στη δύναμη αντίδρασης μεταξύ των τεσσάρων σεναρίων. Απο εκεί και πέρα εμφανίζονται διαφορές στην αντίσταση της κατασκευής στη διείσδυση του βράχου ανάλογα με την περιοχή της πρόσκρουσης.

Η μεγαλύτερη αντοχή του εξωτερικού πυθμένα παρατηρείται στο Σενάριο 1, όπου αυτός αστοχεί για κάθετη δύναμη απο το βράχο ίση με 66.2 MN και εισχώρηση 2000 mm. Σχεδόν τα ίδια επίπεδα αντοχής εμφανίζει ο εξωτερικός πυθμένας και κατά το Σενάριο 2, όπου η αστοχία του συμβαίνει για 66.1 MN κάθετης δύναμης και εισχώρηση βράχου στα 1930 mm. Στο Σενάριο 4, ο εξωτερικός πυθμένας αστοχεί για 59.8 MN κάθετης δύναμης και εισχώρηση βράχου στα 1930 mm. Η μικρότερη αντοχή του εξωτερικού πυθμένα, και μάλιστα με διαφορά, εμφανίζεται κατά το Σενάριο 3. Σε αυτό, ο εξωτερικός πυθμένας αστοχεί όταν η κάθετη δύναμη απο το βράχο γίνει ίση με 42.4 MN ενώ έχει εισχωρήσει μόλις 1400 mm στην κατασκευή.

Κατα την αστοχία του ελάσματος του εξωτερικού πυθμένα, η δύναμη αντίδρασης μειώνεται σε όλα τα σενάρια. Η μείωση αυτή διαφέρει σημαντικά σε κάθε περίπτωση καθώς επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό απο την περιοχή της προσάραξης στον πυθμένα του πλοίου.

Η μεγαλύτερη πτώση στη δύναμη αντίδρασης αλλά και η πιο απότομη παρατηρείται κατά το Σενάριο 1 όπου μειώνεται κατά 48% περίπου, αφού φτάνει, μέσα σε ελάχιστα χιλιοστά

περαιτέρω εισχώρησης, στα 34. MN. Κατα το Σενάριο 4 η δύναμη αντίδρασης πέφτει στα 37.7 MN, εμφανίζοντας μείωση της τάξης του 37%. Η μείωση της δύναμης αντίδρασης στο Σενάριο 3 είναι περίπου 30%, καθώς η δύναμη πέφτει στα 29.8 MN, ενώ η μικρότερη απώλεια της ικανότητας της κατασκευής να αντισταθεί στη διείδυση του βράχου εμφανίζεται στο Σενάριο 2 όπου η δύναμη πέφτει στα 47.3 MN, δηλαδή μειώνεται κατά 28%.

Μετά την πτώση της δύναμης αντίδρασης λόγω των εκάστοτε αστοχιών, η δύναμη αντίδρασης αυξάνεται εκ νέου σε όλα τα σενάρια. Το Σενάριο 2 είναι αυτό στο οποίο η αντίσταση της κατασκευής στη διείδυση του βράχου παραμένει συνεχώς σε υψηλότερα επίπεδα.

Τέλος σε κανένα σενάριο δεν εμφανίζεται εκτενής αστοχία του ελάσματος του εσωτερικού πυθμένα και για το λόγο αυτό η δύναμη αντίδρασης παραμένει ανοδική μέχρι το τέλος των προσομοιώσεων.

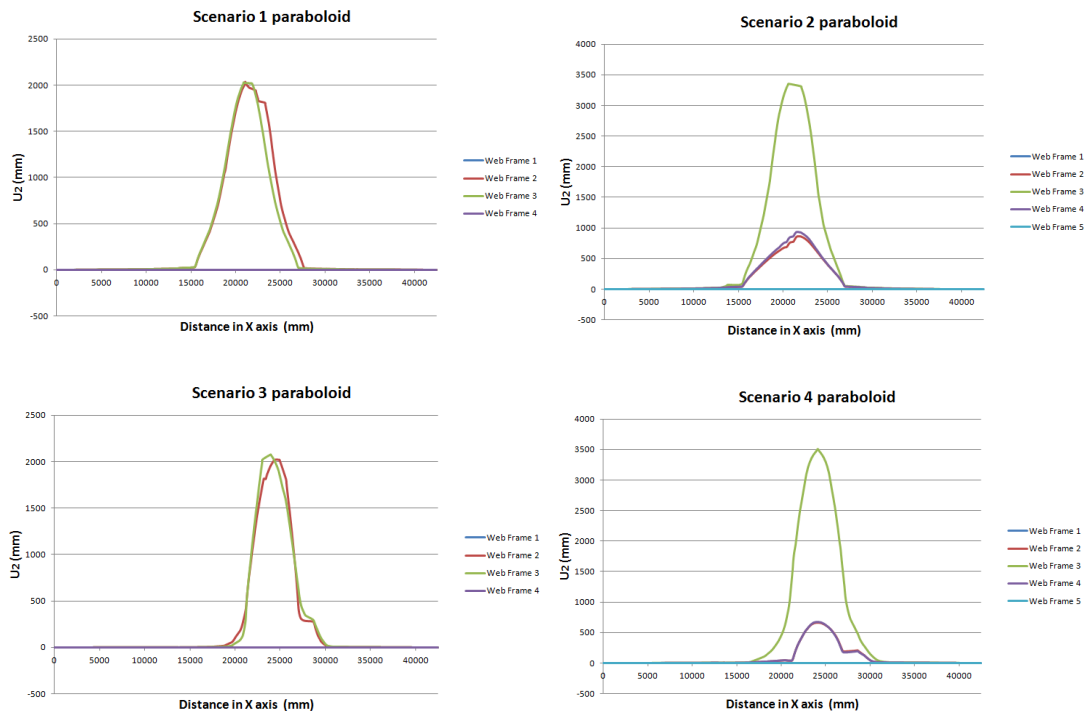
Τα συμπεράσματα που εξάγονται από τα παραπάνω είναι τα εξής:

Η μεγαλύτερη αντοχή του εξωτερικού πυθμένα εμφανίζεται όταν η προσάραξη γίνει σε περιοχές της κατασκευής που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ακαμψία σε σχέση με άλλες λόγω της παρουσίας κύριων κατασκευαστικών στοιχείων όπως σταθμίδες και νομείς. Αντίθετα, η αντοχή του εξωτερικού πυθμένα είναι μικρότερη όταν η προσάραξη γίνει σε περιοχές με μικρότερη ακαμψία ενώ όταν απουσιάζουν πλήρως κατασκευαστικά στοιχεία (Σενάριο 3) η αστοχία ξεκινά και για πολύ μικρότερη διείδυση του βράχου στην κατασκευή.

Η πτώση της δύναμης αντίδρασης κατά την αστοχία του εξωτερικού πυθμένα είναι μεγαλύτερη και πιο απότομη στις περιοχές που εμφανίζουν σχετικά μικρότερη ακαμψία καθώς η αντίσταση της κατασκευής στην διείδυση του βράχου οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αντοχή του ελάσματος του εξωτερικού πυθμένα. Όταν αυτό καταρεύσει δεν υπάρχουν κύρια κατασκευαστικά στοιχεία να συμβάλλουν άμεσα στην αντίσταση της κατασκευής σε περεταίρω διείδυση του βράχου. Αξίζει να σημειωθεί πως η μεγαλύτερη πτώση της δύναμης αντίδρασης εμφανίζεται στο Σενάριο 1, παρά την ύπαρξη της κεντρικής σταθμίδας, καθώς, σχεδόν ταυτόχρονα με την αστοχία του εξωτερικού πυθμένα, αστοχεί και η σταθμίδα με αποτέλεσμα η ακαμψία της κατασκευής να μειώνεται δραματικά κατά τη διάρκεια της προσάραξης.

Συνολικά η μεγαλύτερη αντίσταση της κατασκευής στη διείδυση του βράχου εμφανίζεται όταν η προσάραξη γίνει στην περιοχή με τη μεγαλύτερη ακαμψία (Σενάριο 2).

6.1.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις σεναρίων



Διάγραμμα 6-2 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος για τα τέσσερα σενάρια προσάραξης.

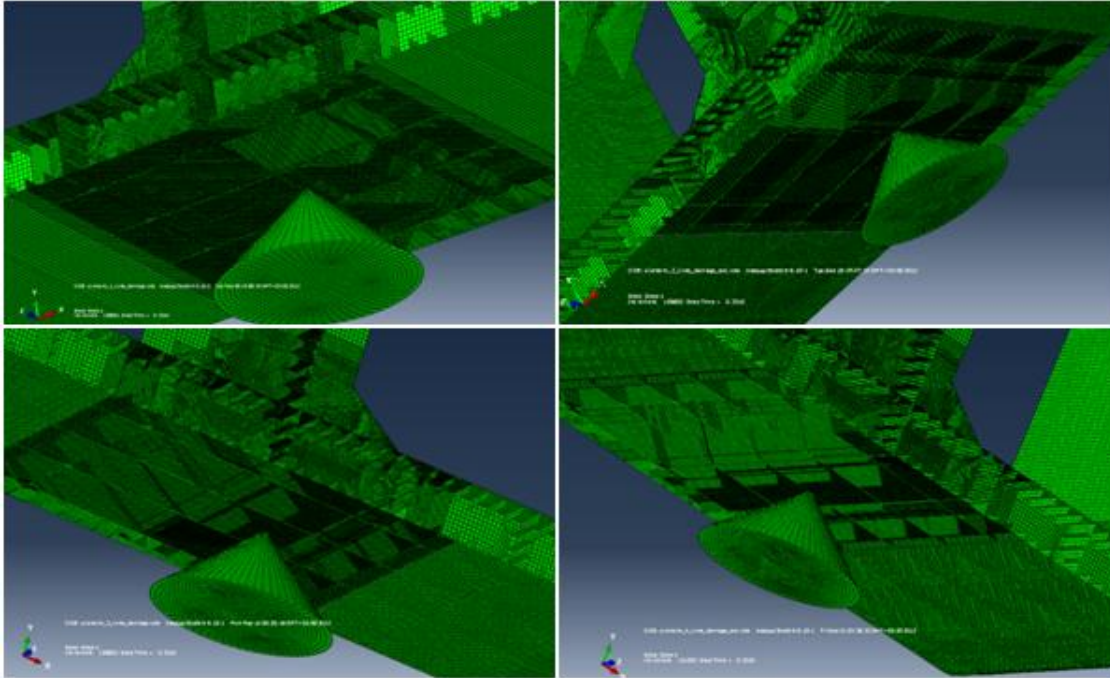
Παρατηρώντας τις καμπύλες του διαγράμματος 6-2, μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

Όταν ο βράχος προσκρούει μεταξύ κατασκευαστικών νομέων στην κεντρική σταθμίδα του μοντέλου οι δύο μεσαίοι νομείς, που βρίσκονται εκατέρωθεν της περιοχής προσάραξης επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό ενώ παρουσιάζουν και τοπικές αστοχίες στα σημεία των μέγιστων κατακόρυφων μετατοπίσεων.

Οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις νομέα παρατηρούνται κατά την πρόσκρουση του βράχου πάνω σε νομέα, μεταξύ κεντρικής και πλευρικής σταθμίδας. Είναι απόλυτα λογικό ο νομέας να επηρεάζεται περισσότερο όταν ο βράχος προσκρούει πάνω του αλλά το γεγονός ότι οι μετατοπίσεις αυτές είναι μεγαλύτερες στην προσάραξη μεταξύ σταθμίδων οφείλεται στη μεγαλύτερη ελευθερία κινήσεων των νομέων σε αυτό το σημείο και της μικρότερης ακαμψίας της κατασκευής.

Η απόκριση της κατασκευής δεν είναι εξαιρετικά τοπική και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σημείο στο οποίο ο βράχος θα έρθει σε επαφή με τον πυθμένα.

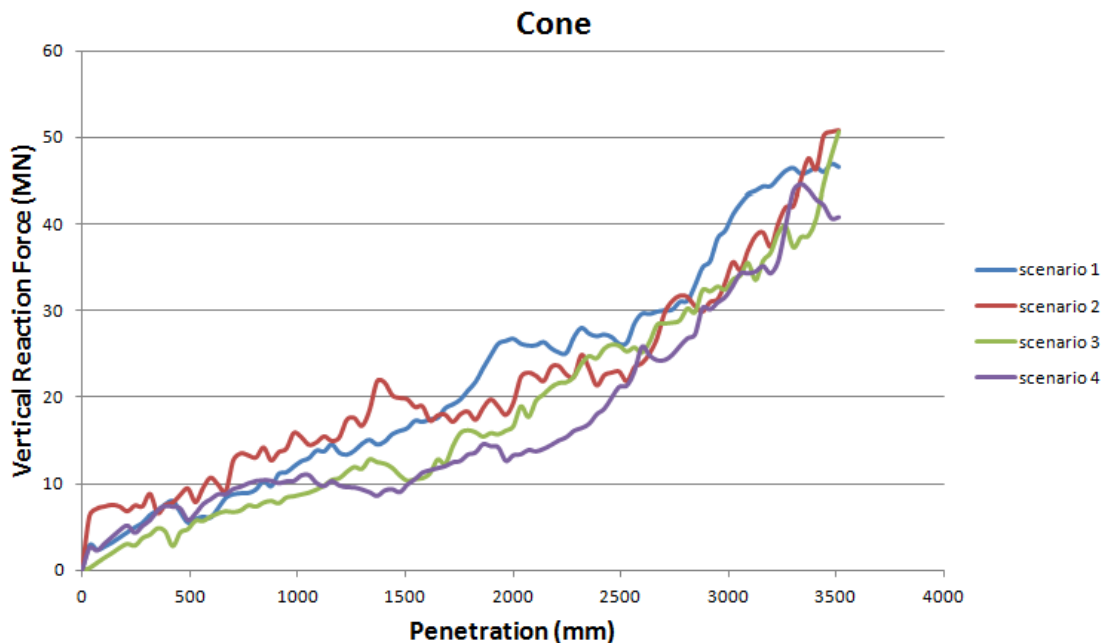
6.2. Συγκεντρωτικά συμπεράσματα/αποτελέσματα αναλύσεων όλων των σεναρίων για κωνικό βράχο



Εικόνα 6-2 : Απεικόνιση όλων των σεναρίων για κωνικό βράχο.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα από όλα τα σενάρια με κωνικό βράχο που αναλύθηκαν. Στο τέλος του κεφαλαίου εξάγονται τα συμπεράσματα από τη σύγκριση των αναλύσεων με αυτή τη μορφή βράχου για τις διάφορες θέσεις στις οποίες αυτός διεισδύει στην κατασκευή.

6.2.1 Δυνάμεις αντίδρασης σεναρίων



Διάγραμμα 6-3 : Κατακόρυφες δυνάμεις αντίδρασης ως προς τη διείσδυση του βράχου για τα τέσσερα σεναρία προσάραξης.

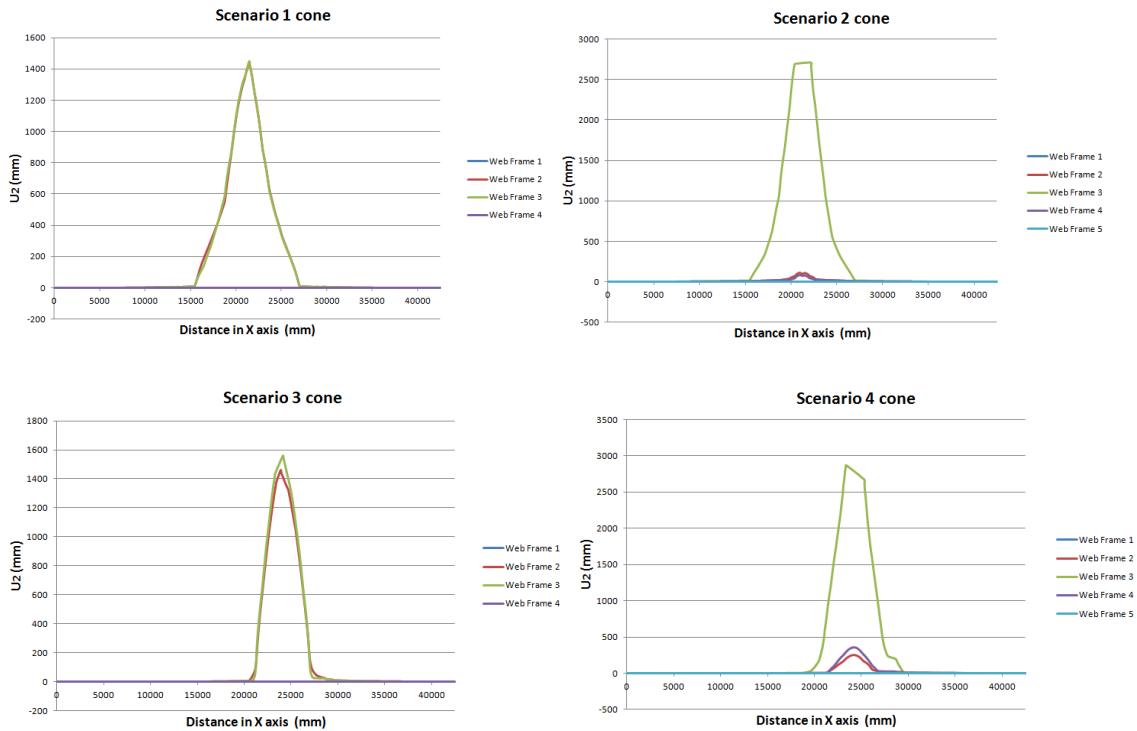
Παρατηρώντας τις καμπύλες του διαγράμματος 6-3, μπορούμε να εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα:

Κατα την διείσδυση κωνικού βράχου στο μοντέλο παρατηρούνται συνεχείς μικρές και εξαιρετικά τοπικές αστοχίες στην κατασκευή σε όλα τα σεναρια. Δεν παρατηρούνται λοιπόν διακριτές περιοχές εκτεταμένης αστοχίας στις οποίες η δύναμη αντίδρασης να μειώνεται σημαντικά.

Κατα την πρόσκρουση του βράχου πάνω στην κεντρική σταθμίδα παρατηρούνται κατά τι μεγαλύτερες δυνάμεις αντίδρασης σε σχέση με την πρόσκρουση μεταξύ σταθμίδων.

Κατα την πρόσκρουση του βράχου πάνω σε κατασκευαστικό νομέα, παρατηρούνται περιοχές όπου η πτώση της δύναμης αντίδρασης είναι ευδιάκριτη. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι τα ελάσματα αστοχούν σε μεγαλύτερο βαθμό όταν είναι συνδεδεμένα με κύρια κατασκευαστικά στοιχεία.

6.2.2 Κατακόρυφες Μετατοπίσεις σεναρίων



Διάγραμμα 6-4 : Κατακόρυφες Μετατοπίσεις κατασκευαστικών νομέων ως προς το πλάτος για τα τέσσερα σενάρια προσάραξης.

Οι μεγαλύτερες κατακόρυφες μετατοπίσεις εμφανίζονται κατά τη πρόσκρουση του βράχου πάνω σε κατασκευαστικό νομέα μεταξύ της κεντρικής και της πλευρικής σταθμίδας του πλοίου.

Στις περιπτώσεις όπου ο βράχος προσκρούει πάνω σε κατασκευαστικό νομέα, αυτός αστοχεί στην περιοχή όπου έρχεται σε επαφή με την κορυφή του βράχου. Αντίθετα, όταν ο βράχος προσκρούει μεταξύ κατασκευαστικών νομέων, οι εν λόγω νομείς παραμορφώνονται αλλά δεν αστοχούν.

Η απόκριση της κατασκευής είναι εξαιρετικά τοπική και δεν εξαρτάται τόσο από τη θέση της προσάραξης.

6.3. Σύγκριση παραβολοειδούς και κωνικού βράχου

Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν δύο μοντέλα βράχων διαφορετικής μορφής όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3. Ένας κωνικός και ένας παραβολοειδής ίδιων κύριων διαστάσεων. Παρατηρώντας και αναλύοντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων όλων των σεναρίων καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα :

Οι δυνάμεις αντίδρασης που αναπτύσσονται στο βράχο απο το μοντέλο, είναι κατα πολύ μεγαλύτερες στην περίπτωση του παραβολοειδούς βράχου σε όλα τα σενάρια προσάραξης και καθ'όλη τη διάρκειά της. Επομένως η κατασκευή εμφανίζει σαφώς μικρότερη αντίσταση στη διείδυση του βράχου, στην περίπτωση που αυτός είναι πιο αιχμηρός (κωνικός βράχος).

Οι αστοχίες που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια της διείδυσης του βράχου στην κατασκευή είναι πιο διακριτές στην περίπτωση του παραβολοειδούς βράχου και η πτώση της δύναμης αντίδρασης του μοντέλου στον βράχο είναι πιο εμφανής. Συγκεκριμένα, ο εξωτερικός πυθμένας του μοντέλου αστοχεί για συγκεκριμένη διείδυση του βράχου και η αστοχία αυτή είναι μεγάλης έκτασης, υποβαθμίζοντας άμεσα τη στιβαρότητα της κατασκευής. Αντίθετα, στην περίπτωση του κωνικού βράχου, οι αστοχίες είναι μικρές και τοπικές και συμβαίνουν καθ'όλη τη διάρκεια της διείδυσης. Έτσι η στιβαρότητα της κατασκευής υποβαθμίζεται σταδιακά, σχεδόν απο την αρχή μέχρι το τέλος της προσάραξης, χωρίς να διακρίνονται περιοχές απότομης μείωσης της ικανότητας της κατασκευής να αντιστέκεται στη διείδυση του βράχου.

Στην περίπτωση της διείδυσης του κωνικού βράχου στην κατασκευή, οι αστοχίες που εμφανίζονται είναι κυρίως αποτέλεσμα σχάσης καθώς σχετίζονται με πολύ μικρό διαμοιρασμό ενέργειας. Αυτό συμβαίνει λόγω της αιχμηρής σχετικά μορφής του κωνικού βράχου. Αντίθετα στην περίπτωση του παραβολοειδούς βράχου, οι αστοχίες είναι κυρίως αποτέλεσμα διαρροής υλικού. Λόγω της μορφής του βράχου, η ενέργεια διαμοιράζεται σε μεγαλύτερο τμήμα της κατασκευής. Σταδιακά, οι περιοχές υψηλής συγκέντρωσης τάσεων διαρρέουν μέχρι να καταρρεύσουν πλήρως, με γρήγορη διάδοση της αστοχίας.

Η απόκριση της κατασκευής είναι εξαιρετικά τοπική στην περίπτωση διείδυσης του κωνικού βράχου. Οι παραμορφώσεις της κατασκευής είναι μεγάλες στην περιοχή της προσάραξης, ωστόσο, μακριά απο αυτήν είναι πολύ μικρές ή και μηδενικές. Στην περίπτωση του παραβολοειδούς βράχου, η απόκριση της κατασκευής είναι σχετικά τοπική αλλά όχι στον ίδιο βαθμό. Η κατασκευή, συνολικά, επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό απο την προσάραξη ακόμα και σε περιοχές αρκετά μακριά απο την περιοχή προσάραξης.

7. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο

7.1. Διατύπωση προβλήματος ισορροπίας πλοίου

Το παρόν κεφάλαιο σχετίζεται με την απόκριση του πλοίου συνολικά, και όχι τοπικά, κατά τη προσάραξη του στον θαλάσσιο πυθμένα. Οι κινήσεις και η τελική θέση του πλοίου είναι απόρροια του συνόλου των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό, οι οποίες δεν είναι άλλες από το βάρος του πλοίου, τις υδροστατικές δυνάμεις και τη φόρτιση του πυθμένα εξαιτίας της προσάραξης. Εκτός του βάρους, το οποίο είναι γνωστό, οι υπόλοιπες δυνάμεις μεταβάλλονται συνεχώς όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται. Η φόρτιση του πυθμένα καθώς ο βράχος εισχωρεί στην κατασκευή είναι γνωστή από την επίλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Κεφάλαια 4 & 5). Τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του πλοίου είναι ένα γεωμετρικό πρόβλημα και είναι δυνατό να υπολογιστούν με διάφορους τρόπους.

Λόγω της μεταβολής των δυνάμεων που ασκούνται στο πλοίο όσο το βάθος του νερού μειώνεται (άμπωτης), θα αναλυθεί το φαινόμενο σταδιακά.

Σημειώνεται ότι το βάρος του πλοίου είναι ίσο με το εκτόπισμά του σε κάθε κατάσταση. Επομένως υπολογίζεται από τις υδροστατικές μεθόδους παρακάτω.

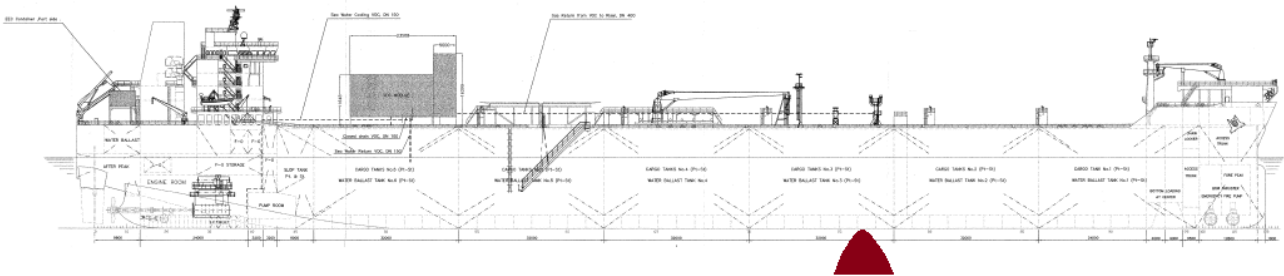
Αρχικά θεωρείται το πλοίο στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης μέχρι το βύθισμα σχεδίασης, με δεδομένη αρχική διαγωγή. Όσο το φαινόμενο της άντωσης εξελίσσεται, η στάθμη της θάλασσας κατεβαίνει και η απόσταση της κορυφής του βράχου από την επιφάνεια του νερού μειώνεται. Σε κάποια χρονική στιγμή, αυτή η απόσταση γίνεται ίση με το βύθισμα του πλοίου οπότε η κορυφή του βράχου έρχεται σε επαφή για πρώτη φορά με τον πυθμένα του πλοίου (Εικόνα 7-1). Εφόσον η διείσδυση του βράχου είναι ακόμα μηδενική, η δύναμη από το βράχο στο πλοίο είναι επίσης μηδενική σύμφωνα και με τις καμπύλες που έχουν εξαχθεί από τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Έτσι στο πλοίο συνεχίζουν να ασκούνται μόνο οι δυνάμεις του βάρους και της άντωσης, οπότε αυτό παραμένει ανεπηρέαστο.

Στο αμέσως επόμενο στάδιο, η απόσταση της κορυφής του βράχου από την επιφάνεια της θάλασσας έχει μειωθεί περαιτέρω. Το μέσο βύθισμα του πλοίου τείνει να μειωθεί λόγω της προσάραξης με αποτέλεσμα να μειώνεται και η υδροστατική άντωση. Το βάρος του πλοίου είναι στιγμιαία μεγαλύτερο της άντωσης και το πλοίο κινείται κατακόρυφα προς τα κάτω. Έτσι ο βράχος διεισδύει στον πυθμένα του πλοίου ασκώντας του δύναμη η οποία μαζί με την παραμένουσα άντωση ισορροπούν το βάρος του πλοίου.

Αν ο βράχος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα σε μία θέση διαφορετική του διαμήκους κέντρου βάρους, μεταβάλλεται η διαγωγή ούτως ώστε να επέλθει και ισορροπία των ροπών στο πλοίο. Ακόμα θεωρείται πώς ο βράχος έρχεται σε επαφή με τον πυθμένα του πλοίου στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας ώστε να μην υπάρχει και εγκάρσια κλίση που θα έκανε το πρόβλημα εξαιρετικά πολύπλοκο.

Τελικά το πλοίο ισορροπεί σε μία θέση με συγκεκριμένο μέσο βύθισμα και διαγωγή, στην οποία ικανοποιούνται ταυτόχρονα οι εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και ροπών. Όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται η θέση αυτή μεταβάλλεται, ώστε τελικά για κάθε τιμή της απόστασης

της κορυφής του βράχου απο την επιφάνεια της θάλασσας (όσο δηλαδή η στάθμη της θάλασσας πέφτει) να υπάρχουν και διαφορετικές θέσεις ισορροπίας.



Εικόνα 7-1 : Πρόβλημα προσάραξης και ισορροπίας πλοίου. Χρονική στιγμή πρώτης επαφής με τον θαλάσσιο πυθμένα.

7.2. Μέθοδος εύρεσης θέσης ισορροπίας.

Για την εύρεση των διάφορων σημείων ισορροπίας όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται αναπτύχθηκε, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, μία επαναληπτική μέθοδος που συνδυάζει υδροστατικούς υπολογισμούς με τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων. Η μέθοδος φαίνεται γραφικά στο Διάγραμμα 7-1.

Σε αυτή τη μέθοδο θεωρείται το πλοίο στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης (Full Load Departure Condition) με δεδομένη διαγωγή μέχρι να έρθει σε επαφή με τον θαλάσσιο πυθμένα. Σε αυτή τη κατάσταση είναι γνωστά το βάρος και η άντωση καθώς και τα διαμήκη κέντρα αυτών.

Σε επόμενη φάση θεωρείται ότι η στάθμη της θάλασσας έχει κατέβει τόσο ώστε το βύθισμα του πλοίου σε φυσιολογικές συνθήκες να είναι μεγαλύτερο απο την απόσταση της κορυφής του βράχου απο την επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι υπάρχει διείσδυση του βράχου στον πυθμένα του πλοίου με αποτέλεσμα να ασκείται απο αυτόν μία δύναμη αντίδρασης η οποία είναι γνωστή αν είναι γνωστή η διείσδυσή του, ενώ μειώνεται η δύναμη της άντωσης. Το βύθισμα και η διαγωγή του πλοίου μεταβάλλονται ώστε το πλοίο να ισορροπήσει υπο την επίδραση των νέων δυνάμεων.

Σε αυτό το σημείο θεωρούνται, ένα νέο μέσο βύθισμα μικρότερο του αρχικού βυθίσματος και μία έμπρυσμη διαγωγή ενώ είναι γνωστά το βάρος και το διάμηκες κέντρο αυτού, το μήκος του πλοίου, η διαμήκης θέση της προσάραξης καθώς και η απόσταση της κορυφής του βράχου απο την επιφάνεια της θάλασσας (βάθος νερού). Έτσι μπορούν να υπολογιστούν τα εξής :

Το εκτόπισμα και επομένως η άντωση και το διάμηκες κέντρο αυτής, μέσω των υδροστατικών υπολογισμών που έχουν γίνει και θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο.

$$T_m, TRIM \longrightarrow \Delta, LCB$$

Το βύθισμα σε οποιοδήποτε σημείο του πλοίου και επομένως και στο σημείο της προσάραξης. Έτσι γίνεται γνωστή η διείδυση του βράχου, καθώς είναι η διαφορά του βυθίσματος και του βάθους του νερού στο σημείο αυτό.

$$\varepsilon\varphi\varphi = \frac{TRIM}{LBP}$$

$$T_a = T_m + \frac{LBP}{2} \cdot \varepsilon\varphi\varphi$$

$$T_{gr} = T_a - X_{gr} \cdot \varepsilon\varphi\varphi$$

$$\delta = T_{gr} - h$$

Η δύναμη αντίδρασης του βράχου στο πλοίο από τα διαγράμματα που εξήχθησαν με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων, έχοντας γνωστή την υποτιθέμενη διείδυση.

$$\delta \longrightarrow P$$

Έχοντας γνωστά τα παραπάνω, εξετάζονται αν ισχύουν οι εξισώσεις ισορροπίας δυνάμεων και ροπών.

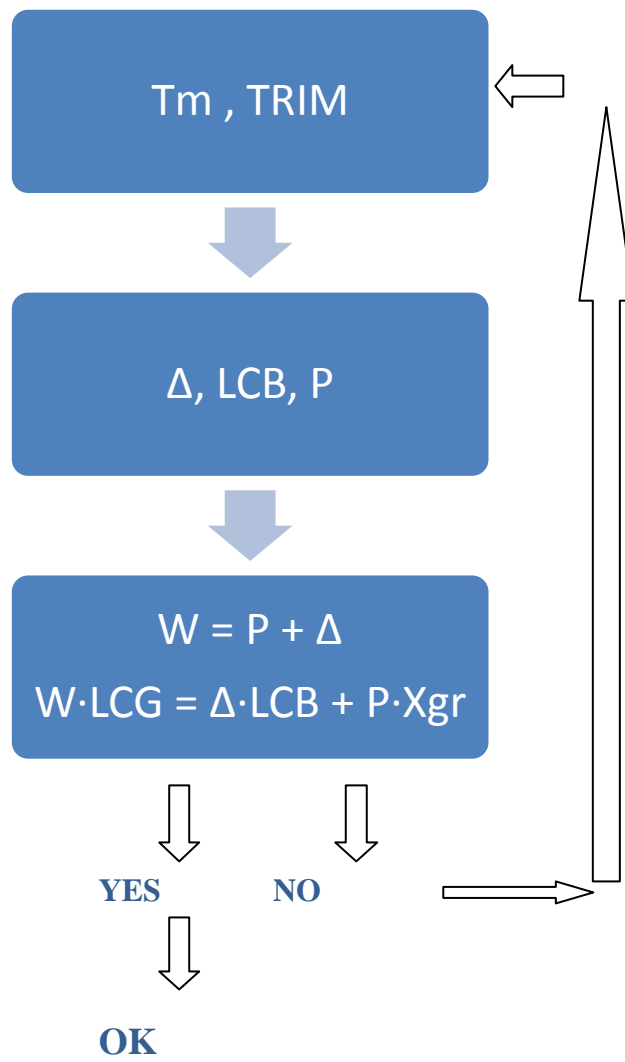
$$W = P + \Delta$$

$$W \cdot LCG = \Delta \cdot LCB + P \cdot X_{gr}$$

όπου, T_m το μέσο βύθισμα, $TRIM$ η διαγωγή, T_a το βύθισμα στην πρυμναία κάθετο, T_{gr} το βύθισμα στη θέση προσάραξης, δ η διείδυση του βράχου, h το βάθος του νερού, P η δύναμη αντίδρασης από το βράχο, W το βάρος του πλοίου, Δ το εκτόπισμα, LCG και LCB τα διαμήκη κέντρα βάρους και άντωσης και X_{gr} η απόσταση της θέσης προσάραξης από την πρυμναία κάθετο.

Αν αυτές δεν ικανοποιούνται, γίνονται νέες υποθέσεις μέσου βυθίσματος και διαγωγής στο πρώτο βήμα και η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρεθεί η θέση ισορροπίας.

Τέλος έχοντας βρεί μία θέση ισορροπίας η διαδικασία επαναλαμβάνεται εκ νέου, με υπόθεση διαφορετικού βάθους νερού ούτως ώστε να βρεθούν οι κινήσεις και οι ισορροπίες του πλοίου όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται.



Διάγραμμα 7-1 : Σχηματική απεικόνιση επαναληπτικής μεθόδου.

7.3. Υδροστατικοί υπολογισμοί

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, για να προσδιοριστεί η συνολική απόκριση του πλοίου, και οι θέσεις όπου ισορροπεί όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός των υδροστατικών στοιχείων του για ένα μεγάλο εύρος καταστάσεων του (μέσο βύθισμα – διαγωγή). Για το λόγο αυτό, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επιστρατεύτηκε το εμπορικό πακέτο λογισμικού TRIBON AVEVA, το οποίο διαθέτει όλα τα χρήσιμα εργαλεία προς αυτή την κατεύθυνση. Οι δομές του πακέτου που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται παρακάτω.

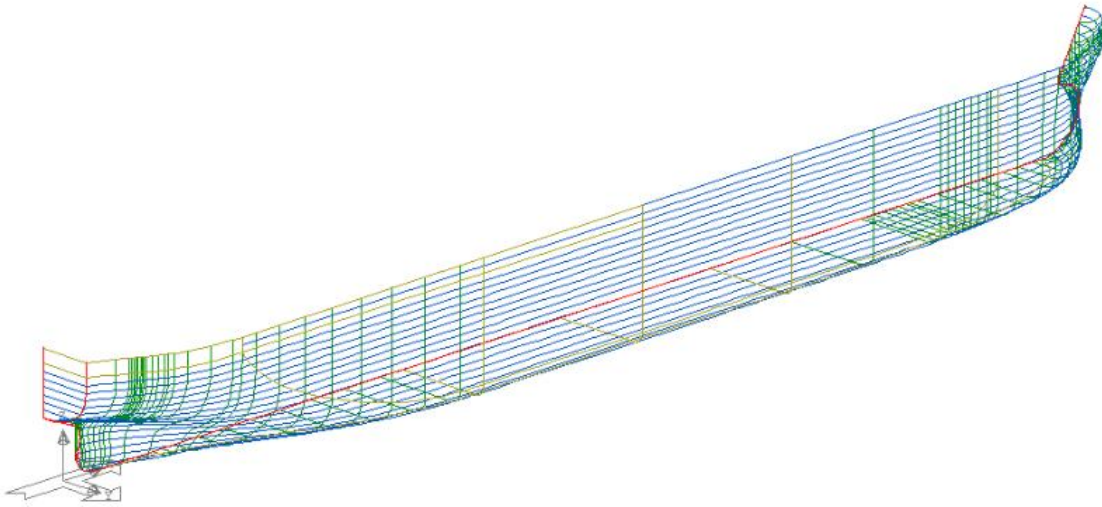
Το TRIBON AVEVA/ LINES, το οποίο περιλαμβάνεται σε μία σειρά προγραμμάτων του ναυπηγικού σχεδιαστικού πακέτου Initial Design του TRIBON, είναι ένα πρόγραμμα που επιτρέπει τη σχεδίαση και εξομόλυνση ναυπηγικών γραμμών πλοίων ή και την εισαγωγή γραμμών ως σημεία, από άλλα σχεδιαστικά προγράμματα. Δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα εισαγωγής όλων εκείνων των γεωμετρικών παραμέτρων που καθορίζουν τη μορφή της γάστρας ενός πλοίου.

Το TRIBON AVEVA/ SURFACE & COMPARTMENT, χρησιμοποιείται ουσιαστικά για να μοντελοποιηθεί η εσωτερική διαμέριση ενός πλοίου. Να οριστούν δηλαδή οι εσωτερικές επιφάνειες (εγκάρσιες φρακτές, διαμήκεις φρακτές, καταστρώματα), καθώς και τα διαμερίσματα τα οποία καταλαμβάνουν τον όγκο εσωτερικά της γάστρας του πλοίου. Στη συνέχεια όλες οι πληροφορίες μπορεί να εισαχθούν στο πρόγραμμα Calc του TRIBON έτσι ώστε να είναι δυνατή μία περαιτέρω επεξεργασία σε θέματα που αφορούν την άθικτη ευστάθεια, τη φόρτωση, την ευστάθεια μετά από βλάβη κ.α. Στην παρούσα μελέτη η χρησιμότητα αυτού του προγράμματος περιορίζεται στην κατασκευή της επιφάνειας της γάστρας, ώστε αυτή να εισαχθεί στο πρόγραμμα Calc του TRIBON και να εξαχθούν τα υδροστατικά στοιχεία της μορφής του πλοίου που μας ενδιαφέρουν.

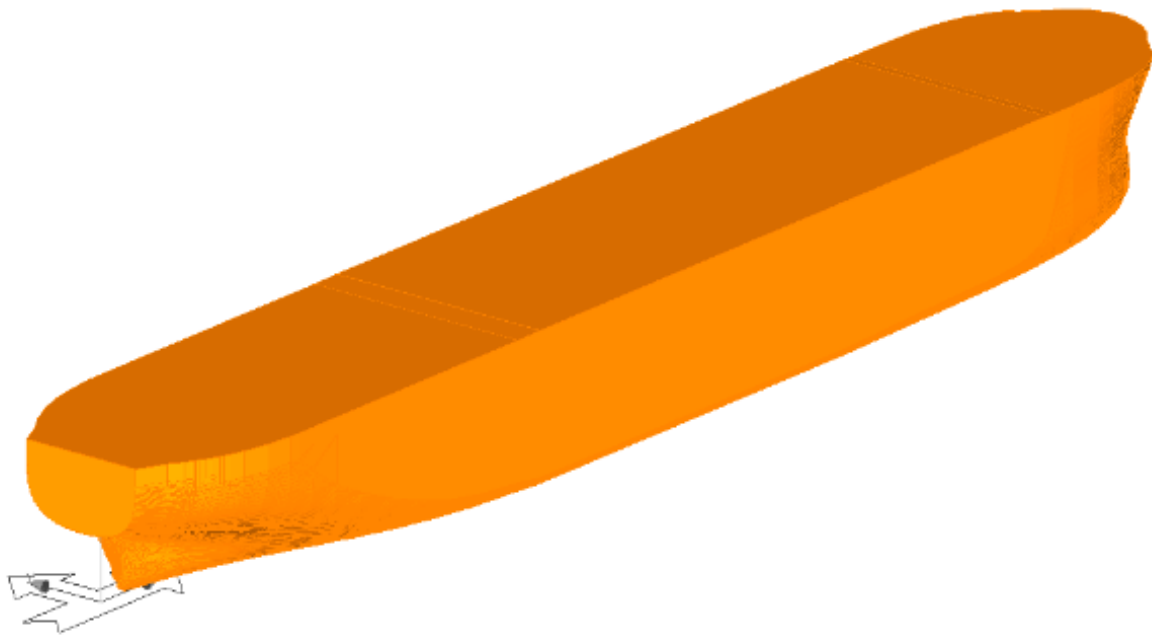
Το TRIBON AVEVA/ CALC & HYDRO, περιλαμβάνεται σε μία σειρά προγραμμάτων του ναυπηγικού σχεδιαστικού πακέτου TRIBON - Initial Design και παρέχει στο χρήστη τη δυνατότητα εκτέλεσης υδροστατικών υπολογισμών, υπολογισμών ευστάθειας, αντίστασης και πρόωσης, πηδαλιουχίας και συμπεριφοράς σε κυματισμούς.

Αρχικά σχεδιάστηκαν οι ναυπηγικές γραμμές του πλοίου στο πρόγραμμα LINES. Λόγω της έλλειψης των σχεδίων ναυπηγικών γραμμών του πλοίου ακολουθήθηκε η εξής μέθοδος με ικανοποιητικά αποτελέσματα. Εισήχθησαν στο πρόγραμμα γραμμές από όμοιο υπάρχον δεξαμενόπλοιο οι οποίες στη συνέχεια επεξεργάστηκαν με την εντολή Scale. Οι νέες γραμμές που προέκυψαν είχαν τις κύριες διαστάσεις του υπο μελέτη πλοίου. Έπειτα εισήχθησαν διάφορα στοιχεία όπως, η ακτίνα καμπυλότητας των κυρτών ελασμάτων του πυθμένα (Bilge Radius) η έκταση του παράλληλου τμήματος, ο συντελεστής γάστρας (C_B) κ.α. Έτσι, μετά και από μία στοιχειώδη εξομόλυνση, προέκυψαν προσεγγιστικά οι ναυπηγικές γραμμές του πλοίου που φαίνονται στην Εικόνα 7-2.

Στη συνέχεια, περάστηκαν κάποιοι επιπλέον νομείς σε περιοχές όπου η γάστρα αλλάζει έντονα μορφή, για λόγους επίτευξης μεγαλύτερης λεπτομέρειας, και όλοι οι νομείς εισήχθησαν στο πρόγραμμα Surface and Compartment ώστε να κατασκευαστεί η επιφάνεια της γάστρας του πλοίου που φαίνεται στην Εικόνα 7-3.



Εικόνα 7-2 : Ναυπηγικές γραμμές του υπό μελέτη πλοίου μετά τη σχεδίαση και επεξεργασία τους στο πρόγραμμα TRIBON AVEVA / LINES.



Εικόνα 7-3 : Επιφάνεια γάστρας του υπό μελέτη πλοίου μετα τη σχεδίαση της στο πρόγραμμα TRIBON AVEVA / SURFACE & COMPARTMENT.

Η επιφάνεια της γάστρας εισήχθη στο πρόγραμμα CALC & HYDRO, και πλέον ήταν δυνατοί όλοι οι υδροστατικοί υπολογισμοί της μορφής του πλοίου. Αρχικά βρέθηκαν τα υδροστατικά στοιχεία για το βύθισμα σχεδίασης με μηδενική διαγωγή που φαίνονται στον πίνακα 7-1.

Hydrostatics

Draft (m)	Displt (t)	LCB (m)	VCB (m)	WPA (m ²)	LCF (m)	KML (m)	KMT (m)	WSA (m ²)	TPC (t/cm)	MTC (t-m/cm)
15.00	147623.11	134.718	7.747	10420.72	126.015	376.529	18.005	17267.38	107.13	2122.45

Πίνακας 7-1 : Υδροστατικά στοιχεία του πλοίου στο βύθισμα σχεδίασης με μηδενική διαγωγή.

Απο τον παραπάνω πίνακα, και σύμφωνα με τις υποθέσεις που έχουν γίνει μπορούμε να συμπεράνουμε το βάρος του πλοίου και το διάμηκες κέντρο αυτού. Έτσι έχουμε :

$$W = 147623 \text{ t}$$

$$LCG = 134.718 \text{ m}$$

Έπειτα πραγματοποιήθηκαν οι υδροστατικοί υπολογισμοί, για ένα εύρος μέσων βυθισμάτων και για διάφορες διαγωγές. Ένα παράδειγμα αποτελεσμάτων φαίνεται στον Πίνακα 7-2. Ο συντελεστής c·γ που εισάγει στους υπολογισμούς την πυκνότητα του θαλασσινού νερού αλλά και τη διόρθωση του όγκου λόγω παρελκομένων λήφθηκε ίσος με 1.028, τιμή λογική για δεξαμενόπλοιο τέτοιου μεγέθους (Παπανικολάου, Μελέτη και Εξοπλισμός Πλοίου Ι).

Trim -0.65 metres
 Heel 0.00 degrees

Shell thickness 0.00000 mm
 Keel thickness 0.00000 mm
 Hog (+ve)/ Sag (-ve) 0.00000 metres
 Water density 102.800 tonnes/cu.m

Draft (m)	Displt (t)	LCB (m)	VCB (m)	WPA (m ²)	LCF (m)	KML (m)	KMT (m)	WSA (m ²)	TPC (t/cm)	MTC (t-m/cm)
14.60	143401.20	134.013	7.540	10409.65	126.017	386.056	18.083	17043.42	107.01	2116.16
14.61	143508.21	134.007	7.546	10410.34	126.010	385.849	18.082	17049.32	107.02	2116.56
14.62	143615.23	134.001	7.551	10411.02	126.004	385.642	18.080	17055.21	107.03	2116.95
14.63	143722.26	133.995	7.556	10411.71	125.997	385.436	18.079	17061.11	107.03	2117.34
14.64	143829.30	133.990	7.562	10412.39	125.991	385.229	18.077	17067.01	107.04	2117.73
14.65	143936.34	133.984	7.567	10413.07	125.984	385.022	18.076	17072.90	107.05	2118.11
14.66	144043.39	133.978	7.572	10413.75	125.978	384.816	18.074	17078.79	107.05	2118.50
14.67	144150.45	133.972	7.577	10414.42	125.972	384.609	18.073	17084.68	107.06	2118.88
14.68	144257.51	133.966	7.583	10415.09	125.966	384.403	18.071	17090.57	107.07	2119.27
14.69	144364.59	133.960	7.588	10415.76	125.959	384.196	18.070	17096.46	107.07	2119.65
14.70	144471.67	133.954	7.593	10416.42	125.953	383.989	18.068	17102.34	107.08	2120.02
14.71	144578.74	133.948	7.598	10417.07	125.947	383.781	18.066	17108.22	107.09	2120.39
14.72	144685.81	133.942	7.604	10417.72	125.941	383.574	18.065	17114.10	107.09	2120.76
14.73	144792.93	133.936	7.609	10418.36	125.936	383.366	18.063	17119.97	107.10	2121.13
14.74	144900.03	133.930	7.614	10419.01	125.930	383.159	18.062	17125.84	107.11	2121.50
14.75	145007.14	133.924	7.620	10419.65	125.924	382.952	18.061	17131.72	107.11	2121.87
14.76	145114.26	133.918	7.625	10420.31	125.918	382.746	18.059	17137.59	107.12	2122.24
14.77	145221.38	133.912	7.630	10420.97	125.912	382.540	18.058	17143.47	107.13	2122.61
14.78	145328.52	133.907	7.635	10421.63	125.906	382.335	18.056	17149.34	107.13	2122.98
14.79	145435.65	133.901	7.641	10422.29	125.900	382.130	18.055	17155.22	107.14	2123.35
14.80	145542.80	133.895	7.646	10422.95	125.894	381.924	18.054	17161.09	107.15	2123.72
14.81	145649.95	133.889	7.651	10423.60	125.888	381.719	18.052	17166.96	107.15	2124.09
14.82	145757.11	133.883	7.656	10424.26	125.882	381.514	18.051	17172.83	107.16	2124.46
14.83	145864.27	133.877	7.662	10424.91	125.876	381.309	18.049	17178.70	107.17	2124.83
14.84	145971.44	133.871	7.667	10425.55	125.870	381.104	18.048	17184.56	107.17	2125.19
14.85	146078.62	133.865	7.672	10426.20	125.864	380.899	18.047	17190.43	107.18	2125.56
14.86	146185.80	133.859	7.677	10426.84	125.859	380.694	18.045	17196.30	107.19	2125.92
14.87	146292.99	133.854	7.683	10427.48	125.853	380.490	18.044	17202.16	107.19	2126.28
14.88	146400.19	133.848	7.688	10428.11	125.847	380.285	18.043	17208.02	107.20	2126.64
14.89	146507.39	133.842	7.693	10428.75	125.842	380.080	18.041	17213.88	107.21	2127.00
14.90	146614.61	133.836	7.699	10429.38	125.836	379.876	18.040	17219.74	107.21	2127.35
14.91	146721.82	133.830	7.704	10430.01	125.830	379.671	18.039	17225.60	107.22	2127.71
14.92	146829.05	133.824	7.709	10430.63	125.825	379.467	18.037	17231.46	107.23	2128.06
14.93	146936.28	133.819	7.714	10431.26	125.819	379.263	18.036	17237.32	107.23	2128.42
14.94	147043.51	133.813	7.720	10431.89	125.814	379.059	18.035	17243.18	107.24	2128.77
14.95	147150.75	133.807	7.725	10432.52	125.808	378.856	18.033	17249.03	107.25	2129.13
14.96	147258.00	133.801	7.730	10433.15	125.803	378.653	18.032	17254.89	107.25	2129.49
14.97	147365.26	133.795	7.735	10433.77	125.798	378.450	18.031	17260.74	107.26	2129.84
14.98	147472.52	133.789	7.741	10434.40	125.793	378.247	18.030	17266.60	107.27	2130.20
14.99	147579.79	133.784	7.746	10435.02	125.787	378.045	18.028	17272.45	107.27	2130.55
15.00	147687.06	133.778	7.751	10435.64	125.782	377.842	18.027	17278.30	107.28	2130.90
15.01	147794.35	133.772	7.757	10436.26	125.777	377.640	18.026	17284.15	107.28	2131.26
15.02	147901.63	133.766	7.762	10436.88	125.772	377.438	18.025	17290.01	107.29	2131.61
15.03	148008.92	133.760	7.767	10437.50	125.767	377.236	18.023	17295.85	107.30	2131.96
15.04	148116.23	133.755	7.772	10438.11	125.762	377.033	18.022	17301.70	107.30	2132.30

Πίνακας 7-2 : Υδροστατικοί υπολογισμοί για έμπρυμη διαγωγή 0.65 m.

7.4. Εφαρμογή και αποτελέσματα

Έχοντας πλέον όλα τα απαραίτητα στοιχεία, η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για ένα συγκεκριμένο σενάριο, ώστε να αναλυθούν τα αποτελέσματα. Έτσι το σενάριο που επιλέχθηκε είναι αυτό της προσάραξης σε βράχο μεταξύ κατασκευαστικών νομέων στην κεντρική σταθμίδα του πλοίου, καθώς όπως προαναφέραμε, η ύπαρξη και πλευρικής εγκάρσιας κλίσης θα καθιστούσε τη μέθοδο εξαιρετικά πολύπλοκη.

Πιο αναλυτικά θεωρείται ότι ο βράχος διεισδύει στην κατασκευή στην κεντρική σταθμίδα του πλοίου και μεταξύ των κατασκευαστικών νομέων 75 και 76. Όπως μπορεί εύκολα να εξαχθεί από την Εικόνα 3-1, το σημείο αυτό απέχει από την πρυμναία κάθετο $X_{gr} = 166.2$ m (from AP). Η καμπύλη δύναμης αντίδρασης-διείσδυσης που θα χρησιμοποιηθεί είναι αυτή του Σεναρίου 1 για προσάραξη σε παραβολοειδή βράχο (Διάγραμμα 5-1). Αξίζει να σημειωθεί ότι το παράλληλο τμήμα του πλοίου εκτείνεται μέχρι τα 169 μέτρα, επομένως στη συγκεκριμένη περιοχή το τμήμα του πλοίου μπορεί να προσομοιωθεί από την παρούσα μοντελοποίηση της μέσης τομής χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα. Έτσι έχουμε γνωστά τα παρακάτω :

$$L_{BP} = 256.5 \text{ m}$$

$$W = 147623 \text{ t}$$

$$LCG = 134.718 \text{ m}$$

$$X_{gr} = 166.2 \text{ m}$$

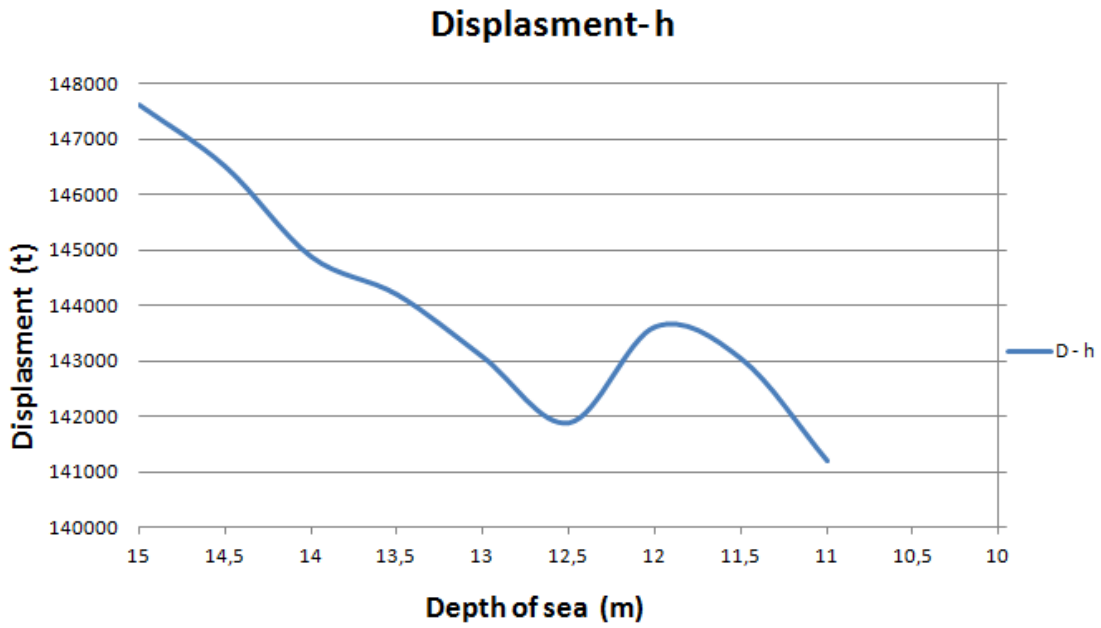
Η μέθοδος εφαρμόστηκε για διάφορες αποστάσεις της κορυφής του βράχου από την επιφάνεια της θάλασσας, h , και τα αποτελέσματα που προέκυψαν, όσον αφορά τις εκάστοτε θέσεις ισορροπίας του πλοίου φαίνονται στον Πίνακα 7-3.

Μετά το πέρας των επαναλήψεων, έγινε επαλήθευση των σημείων αυτών ως εξής. Για κάθε σημείο επιβλήθηκαν στη γάστρα του πλοίου δύο δυνάμεις στα διαμήκη κέντρα αυτών. Αυτή του βάρους και αυτή της αντίδρασης του βράχου που προέκυψε (αρνητική) με σκοπό να διαπιστωθεί αν η ίσαλος που θα προκύψει συμπίπτει με αυτήν που υπολογίστηκε με την επαναληπτική μέθοδο. Τα αποτελέσματα ήταν πέρα για πέρα ικανοποιητικά, καθώς πιστοποιήθηκε ότι η συγκεκριμένη επαναληπτική μέθοδος που καταστρατηγήθηκε έδινε με ακρίβεια χιλιοστού τη διαγωγή και τα διάφορα βυθίσματα του πλοίου για κάθε θέση ισορροπίας.

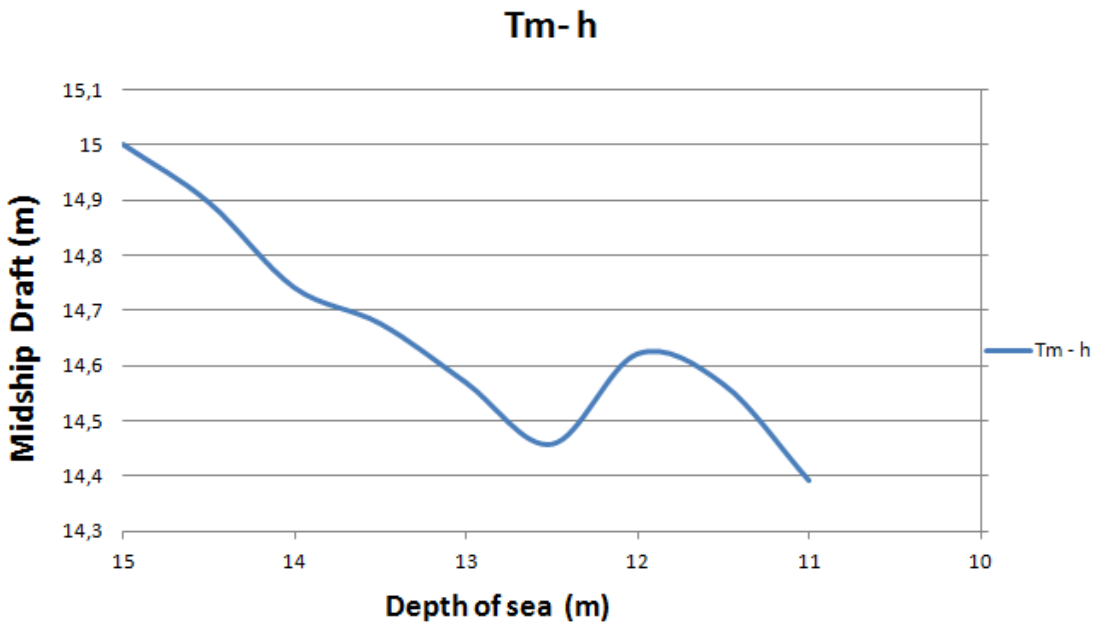
Τα αποτελέσματα φαίνονται γραφικά στα Διαγράμματα 7-2 έως 7-6 και αναλύονται παρακάτω ενώ αξίζει να σημειωθεί πως στη μέθοδο δεν υπεισέρχονται δεδομένα από τυχούσα απώλεια άντωσης και κατάκλυσης χώρων έρματος ή φορτίου του πλοίου.

<i>Θέσεις ισορροπίας πλοίου κατα την εξέλιξη του φαινομένου της άμπωτης</i>		
h = 15.0 m	T_m = 15.0 m	LCB = 134.718 m
	TRIM = 0.0 m	δ = 0.0 m
	Δ = 147623 t	P = 0 MN
h = 14.5 m	T_m = 14.895 m	LCB = 134.48 m
	TRIM = 0.21 m	δ = 0.364 m
	Δ = 146515 t	P = 10.87 MN
h = 14.0 m	T_m = 14.74 m	LCB = 134.12 m
	TRIM = 0.52 m	δ = 0.663 m
	Δ = 144888 t	P = 26.84 MN
h = 13.5 m	T_m = 14.675 m	LCB = 133.98 m
	TRIM = 0.64 m	δ = 1.08 m
	Δ = 144204 t	P = 33.5 MN
h = 13.0 m	T_m = 14.568 m	LCB = 133.72 m
	TRIM = 0.86 m	δ = 1.44 m
	Δ = 143075 t	P = 44.6 MN
h = 12.5 m	T_m = 14.456 m	LCB = 133.44 m
	TRIM = 1.09 m	δ = 1.794 m
	Δ = 141896 t	P = 56.2 MN
h = 12.0 m	T_m = 14.62 m	LCB = 133.84 m
	TRIM = 0.76 m	δ = 2.507 m
	Δ = 143626 t	P = 39.2 MN
h = 11.5 m	T_m = 14.565 m	LCB = 133.71 m
	TRIM = 0.87 m	δ = 2.936 m
	Δ = 143047 t	P = 44.9 MN
h = 11.0 m	T_m = 14.39 m	LCB = 133.28 m
	TRIM = 1.22 m	δ = 3.209 m
	Δ = 141208 t	P = 62.95 MN

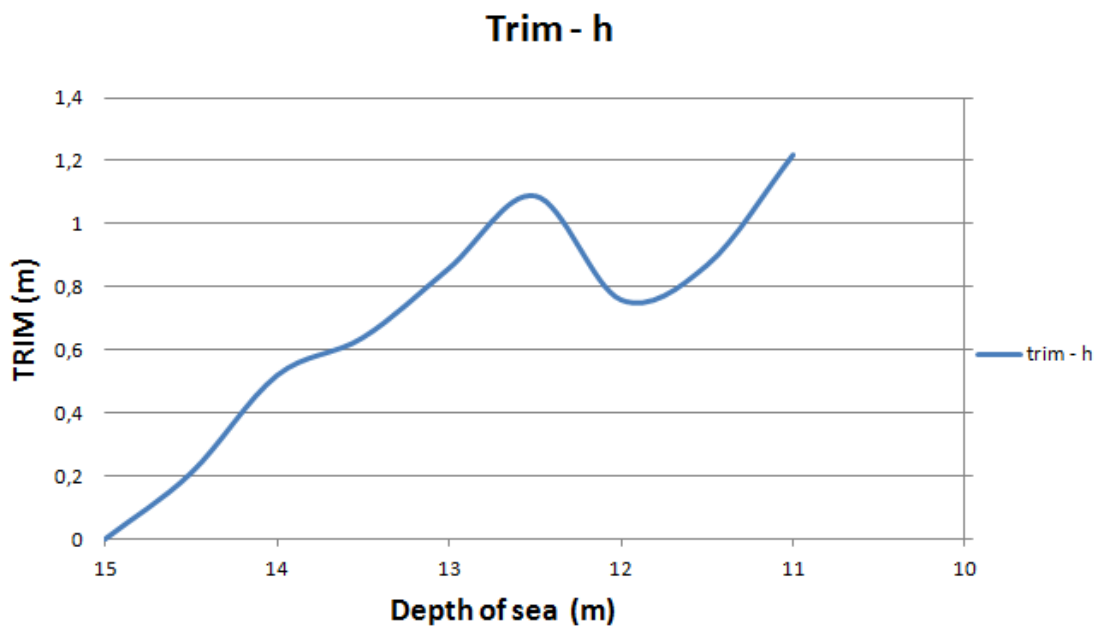
Πίνακας 7-3 : Αποτελέσματα επαναληπτικής μεθόδου. Θέσεις ισορροπίας πλοίου.



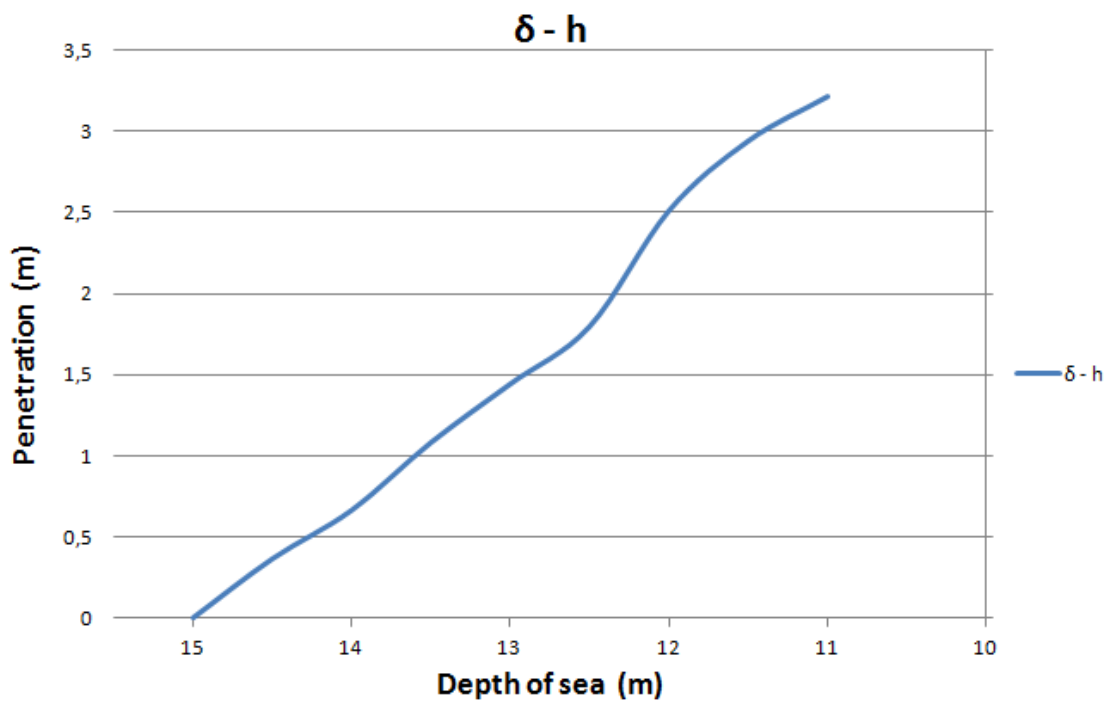
Διάγραμμα 7-2 : Μεταβολή του εκτοπίσματος του πλοίου όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται.



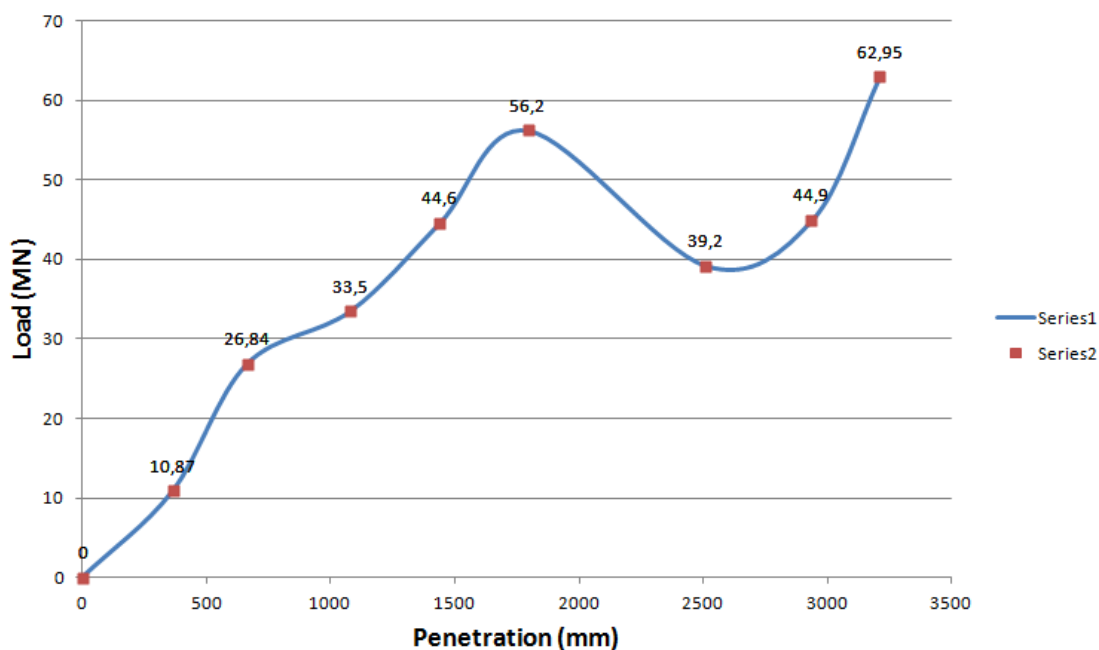
Διάγραμμα 7-3 : Μεταβολή του μέσου βυθίσματος του πλοίου όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται.



Διάγραμμα 7-4 : Μεταβολή της διαγωγής του πλοίου όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται.



Διάγραμμα 7-5 : Διείσδυση του βράχου στο πλοίο όσο το φαινόμενο της άμπωτης εξελίσσεται.



Διάγραμμα 7-6 : Φόρτιση του πλοίου απο το θαλάσσιο πυθμένα και θέσεις ισορροπίας.

Παρατηρώντας προσεκτικά τα διαγράμματα 7-2 έως 7-5, βλέπουμε ότι στην περιοχή όπου το βάθος του νερού βρίσκεται μεταξύ 12.5 μέτρων και 11.5 μέτρων, εμφανίζονται αλλαγές στην καμπυλότητα. Αυτή η αλλαγή εξηγείται στο διάγραμμα 7-6. Είναι η περιοχή όπου υπάρχει εκτενής κατασκευαστική αστοχία στον εξωτερικό πυθμένα του πλοίου λόγω της διείδυσης του βράχου. Έτσι συμβαίνουν τα εξής :

Η δύναμη στήριξης απο τον βράχο (δύναμη αντίδρασης) μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα το εκτόπισμα του πλοίου να αυξάνεται ούτως ώστε να εξισορροπήσει τη δύναμη του βάρους του. Αυτό επιτυγχάνεται με αύξηση του μέσου βυθίσματος του πλοίου.

Το διάμηκες κέντρο της δύναμης στήριξης βρίσκεται αρκετά πρόωραθεν του διαμήκους κέντρου βάρους. Έτσι, εφόσον αυτή η δύναμη μειώνεται και ταυτόχρονα αυξάνει η δύναμη της άντωσης, της οποίας το διάμηκες κέντρο βάρους βρίσκεται πιο κοντά σε αυτό του βάρους, η συνολική διαμήκης ροπή μειώνεται. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της διαγωγής του πλοίου.

Αντίθετα η διείδυση του βράχου μεταβάλλεται γραμμικά, συναρτήσει της μείωσης του βάθους, ωστόσο αυτή, στη συγκεκριμένη περιοχή που συζητάται, γίνεται με μεγαλύτερη ταχύτητα, κάτι που στο συγκεκριμένο διάγραμμα δε φαίνεται.

Μετα την πάροδο απο αυτή τη περιοχή, η δύναμη φόρτισης απο το βράχο αυξάνεται με αποτέλεσμα, το εκτόπισμα του πλοίου να ξανά μειώνεται σταδιακά όπως και το μέσο βύθισμα ενώ η διαγωγή αυξάνεται σταδιακά εκ νέου.

8. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο

8.1. Γενικά Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε η μοντελοποίηση προσάραξης προσάραξης με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Ελλείπει πειραματικών δεδομένων, η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε μέσω των αρχών της μηχανικής.

Διερευνήθηκαν τέσσερα σενάρια προσάραξης, για δύο διαφορετικές μορφές θαλάσσιου πυθμένα με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, όπου το υλικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν χάλυβας στον οποίο συμπεριλήφθηκε κριτήριο αστοχίας με βάση μία κρίσιμη τιμή πλαστικής παραμόρφωσης. Επιπλέον δε λήφθηκε υπόψη στη μοντελοποίηση η ύπαρξη του περιρρέοντος ρευστού.

Στα πλαίσια της αναζήτησης της επίδρασης της παραμέτρου της ταχύτητας της διείσδυσης του βράχου, στα αποτελέσματα των δυνάμεων αντίδρασης, πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις χρησιμοποιώντας μικρότερες ταχύτητες. Η ευαισθησία των τιμών αυτών, βρέθηκε μικρή.

Η επίδραση της γεωμετρίας του βράχου, στο φαινόμενο της προσάραξης, αποτέλεσε μια παράμετρο προς μελέτη στα πλαίσια αυτής της έρευνας. Η σύγκριση προσομοιώματος κωνικού και παραβολοειδούς βράχου έδειξε την μεγάλη επίδραση της μορφής του θαλάσσιου πυθμένα. Όσο πιο αιχμηρό είναι το εμπόδιο που διεισδύει στην κατασκευή τόσο μικρότερες οι δυνάμεις αντίδρασης που αναπτύσσονται και τόσο πιο τοπικό το φαινόμενο των αστοχιών και της γενικής απόκρισης της κατασκευής.

Κατα τη μελέτη της επίδρασης της θέσης προσάραξης στον πυθμένα του μοντέλου παρατηρήθηκε μεγαλύτερη αντίσταση της κατασκευής, μέχρι την αστοχία του ελάσματος του εξωτερικού πυθμένα, στις περιοχές μεγαλύτερης ακαμψίας. Ταυτόχρονα, η υποβάθμιση της ικανότητας της κατασκευής να παραλάβει επιπλέον φορτία, μετά την αστοχία του εξωτερικού πυθμένα, είναι μεγαλύτερη και πιο απότομη στις περιοχές που εμφανίζουν σχετικά μικρότερη ακαμψία.

Μελετώντας τη συνολική απόκριση του πλοίου κατα την προσάραξη λόγω παλιρροιακών φαινομένων, παρατηρήθηκε ότι, η κίνηση αυτού επηρεάζεται άμεσα από την αντίσταση της κατασκευής στη διείσδυση του βράχου και τις αστοχίες που λαμβάνουν χώρα. Σε αυτή την περίπτωση μεταβάλλονται τα συνολικά φορτία του πλοίου κατα τρόπο μή μονότονο με αποτέλεσμα τη μεταβολή των διατημητικών δυνάμεων και των καμπτικών ροπών.

8.2. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Ως επακόλουθο της παρούσας εργασίας, προκύψαν κάποια θέματα προς περαιτέρω διερεύνηση, τα οποία ενδεικτικά παρατίθενται παρακάτω :

Η επίδραση της γεωμετρίας του βράχου μπορεί να αναλυθεί εκτενέστερα μοντελοποιώντας ακόμα περισσότερες μορφές θαλάσσιου πυθμένα και αξιολογώντας την απόκριση της κατασκευής σε περιπτώσεις που το φαινόμενο δεν έχει τοπικά αποτελέσματα.

Μια άλλη παράμετρος προς περαιτέρω έλεγχο είναι η επίδραση των επιβαλλόμενων οριακών συνθηκών. Διαφορετικές οριακές συνθήκες μπορούν να επιβληθούν στο μοντέλο με σκοπό την αξιολόγηση της πιστότητας των αποτελεσμάτων και την προσομοίωση με όσο το δυνατόν ρεαλιστικότερο τρόπο.

Για μια πιο ρεαλιστική προσομοίωση των ιδιοτήτων του υλικού, μπορούν να εισαχθούν και άλλα κριτήρια αστοχίας, πιο πολύπλοκα από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη.

Κατά την εφαρμογή της επαναληπτικής μεθόδου για την εύρεση της απόκρισης του πλοίου δεν συμπεριλήφθηκαν δεδομένα πιθανής απώλειας άντωσης και κατάκλυσης διαμερισμάτων. Περαιτέρω εξέλιξη της μεθόδου προτείνεται με στόχο την αποτύπωση της ρεαλιστικής συνολικής απόκρισης του υπό μελέτη πλοίου.

Η ακεραιότητα της κατασκευής μετά από προσάραξη, αποτελεί ένα ενδιαφέρον θέμα προς μελέτη. Μετά από το πέρας της ανάλυσης προσάραξης της κατασκευής θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στο προσομοίωμα λειτουργικά φορτία (wave hogging-sagging, load cases) προκειμένου να διερευνηθεί η περαιτέρω ικανότητα της κατασκευής να δεχθεί φορτία. Προς αυτή την όδο, μεγάλο εφόδιο αποτελεί η μέθοδος εύρεσης των θέσεων του πλοίου κατά την εξέλιξη του φαινομένου της άμπωτης.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Hutton, David V. 2004. Fundamentals of finite element analysis. Library of Congress Cataloging-in-publication data.

Jacob Fish, Ted Belytschko 2007. A first course in finite elements. John Wiley & Sons Ltd.

ABAQUS. 2008. Theory Manual, Version 6.8. Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence: RI, USA.

Παπαδρακάκης Μ. 2001. Ανάλυση Φορέων με τη Μέθοδο Πεπερασμένων Στοιχείων.

Samuelides, M. S., Voudouris, G., Toullos, M., Amdahl, J., Dow, R. 2007. Simulation of the behavior of double bottoms subjected to grounding actions. In: International Conference on Collision and Grounding of Ships; International Conference for Collision and Groundings ICCGS2007, September 2007. Hamburg Germany

Samuelides MS, Ventikos NP, Gemelos IC. 2008. Survey on Grounding Incidents: Statistical Analysis and Risk Assessment.

Rodd, J.L. and MacCampbell, S. Double hull tanker grounding experiments, 1994. In The Advanced (unidirectional) Double-Hull Technical Symposium, Gaithersburg, Maryland.

Samuelides, M. S. 2008. Designing for protection against collision. National Technical University of Athens.

Hagbart S. Alsos, Jorgen Amdahl, 2007. On the resistance of tanker bottom structures during stranding. Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

Samuelides, M. S., J. Amdahl, R. Dow, 2007. Studies on the behavior of bottom structures during grounding. National Technical University of Athens, Zografos, Greece. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway. University of Newcastle, Newcastle, UK

Ζηλάκος Η. 2008. Αντίσταση του διπύθμενου σε προσάραξη με τη χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων. Διπλωματική Εργασία, Τομέας Θαλάσσιων Κατασκευών.

Ohtsubo, H., Astrup, O. C., Cazzulo, R., Kim, O. H., Luh, P. A., Spangenberg, S., Spencer, J. S., Sucharski, D. (1994), Report on the Committee e V.6 – Structural Design for Pollution Control. Proceedings of the 12th International Ship and Offshore Structures Congress, St. Johns, Canada, 1994.

Hagbart S. Alsos, Jorgen Amdahl, Odd S. Hopperstad, 2008. On the resistance to penetration of stiffened plates, Part II: Numerical analysis. Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology, Otto Nielsens V. 10, 7491 Trondheim, Norway, Structural Impact Laboratory (SIMLab); Center for Research-based Innovation; Department of Structural Engineering; Norwegian University of Science and Technology, Richard Birkelandsv. 1a, 7491 Trondheim, Norway