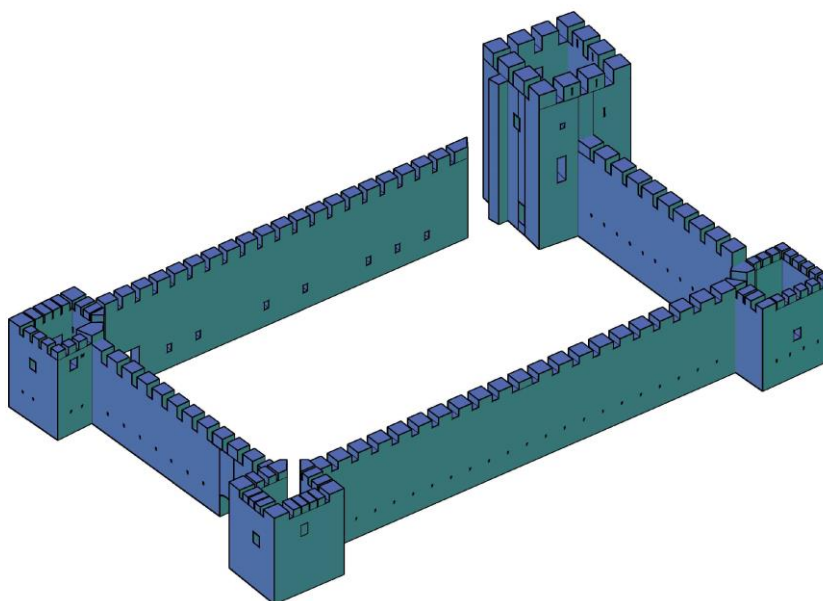




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
«Συστήματα Παραγωγής»

Εισαγωγή στην διπλωματική εργασία με θέμα :

**Διερεύνηση λίθινης κατασκευής με την
μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων**



Μεταπτυχιακός Φοιτητής :
Επιβλέπων καθηγητής :

Ανεζάκης Μανώλης,
Γεώργιος Σταυρουλάκης

Σεπτέμβριος 2017

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η έρευνα που πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί την ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού προγράμματος «Συστήματα Παραγωγής» στο Πολυτεχνείο Κρήτης στο τμήμα των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης. Το αντικείμενο της διπλωματικής αυτής διατριβής πραγματεύεται την τρισδιάστατη αναπαράσταση του Κάστρου στο Φραγκοκάστελλο και την μελέτη του μέσω πεπερασμένων στοιχείων σε γραμμική και μη γραμμική ανάλυση, στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Abaqus.

Κύριο μέλημα, της προσπάθειας αυτής είναι η συνέχιση της ήδη υφιστάμενης έρευνας του βενετσιάνικου κτίσματος, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για την παροντική του κατάσταση καθώς και προτάσεις για το μέλλον.

Το θέμα της διπλωματικής μου εργασίας, επιλέχθηκε με κύριο κριτήριο το ενδιαφέρον μου όσον αφορά την γενική συμπεριφορά παλαιών κτισμάτων και της αποκατάστασής τους.

Σε αυτό το σημείο επιθυμώ να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας μου Καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη που με εμπιστεύθηκε για την εκπόνηση ενός ιδιαίτερα ενδιαφέροντος θέματος και με καθοδήγησε καθ' όλη την διάρκεια του.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον μετα-διδάκτωρα στο τμήμα των Μ.Π.Δ. κ. Γεώργιο Δροσόπουλο, την επίκουρο καθηγήτρια στην σχολή Αρχιτεκτόνων μηχανικών κα. Μαρία Σταυρουλάκη και τον συνάδελφο μου κ. Παναγιώτη Κουτσιανίτη, για την ιδιαίτερα χρήσιμη βοήθεια τους κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Χανιά Σεπτέμβριος 2017

Περιεχόμενα

Πρόλογος – Ευχαριστίες	1
1. Εισαγωγή	4
2. Περιγραφή και Διερεύνηση Κάστρου	7
3. Στήσιμο και ανάλυση μοντέλου	13
3.1. Μοντελοποίηση	13
3.2. Γραμμική ανάλυση	15
3.3. Μη γραμμική ανάλυση	20
4. Συμπεράσματα	32

1. Εισαγωγή

Το Φραγκοκάστελλο Κρήτης είναι ένα μικρό χωριό στα νότια του νομού Χανίων, στην επαρχία Σφακίων. Βρίσκεται 70 περίπου χιλιόμετρα νότια της πόλης των Χανίων και περίπου 15 χιλιόμετρα ανατολικά της πρωτεύουσας της επαρχίας Σφακίων, τη Χώρα Σφακίων. Το χωριό Φραγκοκάστελλο πήρε το όνομά του από το Ενετικό του Κάστρο. Το κάστρο, που χτίστηκε τον 14ο αιώνα από τους Ενετούς, ονομαζόταν “Castel Franco”.

Σύμφωνα με βενετικά αρχεία, το κάστρο χτίστηκε στο διάστημα 1371-74 από τους Βενετούς, κυρίαρχους τότε του νησιού της Κρήτης, για να προστατεύει τη γύρω περιοχή από τις πειρατικές επιδρομές, αλλά και για να δώσει τη δυνατότητα στους Ενετούς να ελέγχουν πιο αποτελεσματικά τον ντόπιο πληθυσμό των Σφακιανών, ο οποίος είναι γνωστός για την αγάπη του για ελευθερία και ανεξαρτησία.



1. Το κάστρο του Φραγκοκάστελλου

Το κάστρο έχει απλό ορθογώνιο σχήμα με πύργο σε κάθε γωνία του. Τα τείχη του είναι κατακόρυφα και σχετικά αδύνατα, σύμφωνα με τις αρχές της φρουριακής αρχιτεκτονικής που εφαρμόζονταν από την αρχαιότητα, πριν την ανακάλυψη της πυρίτιδας και την επικράτηση του «προμαχωνικού συστήματος» φρουριακής αρχιτεκτονικής με τα ισχυρά τείχη και το κεκλιμένο εξωτερικό μέτωπο για την αντιμετώπιση κανονιοβολισμών. Το «προμαχωνικό σύστημα» των Βενετών διαδόθηκε στην Κρήτη το πρώτο μισό του 16ου αι., αλλά εφαρμόστηκε κυρίως στα μεγαλύτερης στρατηγικής σημασίας οχυρά των βόρειων παραλίων.

Η κύρια είσοδος του Φραγκοκάστελλου βρίσκεται στα νότια και στη σημερινή της μορφή αποτελεί ανακατασκευή του 19ου αιώνα. Πάνω από την πύλη σώζεται ανάγλυφο με το λιοντάρι του Αγίου Μάρκου, το έμβλημα της Γαληνοτάτης Δημοκρατίας της Βενετίας. Σώζονται επίσης οικόσημα επιφανών Βενετικών οικογενειών. Τα κτίσματα που υπάρχουν σήμερα στο εσωτερικό του κάστρου είναι ανακατασκευασμένα κατά την περίοδο της Οθωμανικής κατοχής του κάστρου. Κατά μήκος του εσωτερικού των τοίχων υπάρχουν κακώς συντηρημένα ορθογώνια κτίρια, τα οποία χρησίμευαν ως στάβλοι, αποθήκες, στρατώνες. Η τελευταία ανακατασκευή έγινε από τον Ναϊλή Πασά, ο οποίος το 1828 νίκησε τον Χατζήμichael Νταλιάνη, στην Μάχη του φραγκοκάστελου, έχοντας καταστρέψει το κάστρο. Το κάστρο έχει ανακατασκευαστεί σε διάφορες φάσεις της ιστορίας του. Ανακατασκευάστηκε την περίοδο 1593-1597 από το γενικό προβλεπτή Νικολό Ντόνα (Nicolo Dona), το 1645 και την περίοδο 1866-1869 κατά τη διάρκεια της κρητικής Επανάστασης. Ως συνέπεια, από το 1645 μέχρι τον Ορλώφ, δεν υπάρχουν πηγές που να καταγράφουν στοιχεία για το κάστρο. Η αφαίρεση των ξύλινων δοκαριών και των ακρόλιθων των νοτίων πύργων είναι γεγονός που αναφέρεται συχνά κατά την περίοδο άλλων ιστορικών περιόδων.

Παρόλο που είχε κατασκευαστεί πολύ καλά, δεν μπορούσε να αντέξει τις συνεχείς επιθέσεις των επαναστατών, και ιδίως την επίθεση των Οθωμανών, μετά την επανάσταση του 1866. Επίσης σημαντική παρέμβαση ήταν η επιδιόρθωση του πάχους των τοίχων σε 3 πυργίσκους προκειμένου να επιτευχθεί η δημιουργία προηγμένων φυλακίων τουφεκίου στα συγκεκριμένα αυτά μέρη του κάστρου.

Μέσω προχωρημένης αριθμητικής ανάλυσης, επιτεύχθηκε σημαντική πληροφόρηση για την κατανόηση των αιτιών της υφιστάμενης ζημιάς καθώς και για τον επαρκή σχεδιασμό ενδυνάμωσης του κάστρου. Με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων και τρισδιάστατη αναπαράσταση, ο Milani, σύγκρινε την παροντική κατάσταση με την υποθετικά αρχική κατάσταση του κάστρου του Μανιάκι στις Συρακούσες της Ιταλίας, και ο Tiberti, για να μελετήσει την συμπεριφορά του κάστρου Finale Emilia υπό την συχνότητα του Ρωμαϊκού σεισμού. Ο Κάταρι (Cattari) παρουσίασε το 2014 την σεισμική ευαισθησία του μεσαιωνικού κάστρου στην Εμίλια της Ιταλίας η οποία είναι υψηλή κυρίως λόγω κατασκευαστικών και δυναμικών χαρακτηριστικών. Αρχίζοντας από την ανάλυση των γεωμετρικών και κατασκευαστικών χαρακτηριστικών, η εξήγηση της σεισμικής ευαισθησίας βασίζεται σε ακριβή εκτίμηση της ζημιάς και στηρίζεται σε αριθμητικά αποτελέσματα τυπικών σχεδιασμών. Ιδιαίτερα, οι πύργοι έχουν δείξει διαφορετική σεισμική απόκριση λόγω: των διάφορων επεμβάσεων στις οποίες υποβλήθηκαν, την διαφορετική γεωμετρική τοποθέτηση τους και το βαθμό σύνδεσης με τον περιμετρικό τοίχο (ο οποίος καθορίζεται από ανωμαλίες στην κάτοψη και στην όψη) και την ποιότητα της σύνδεσης με τα υπόλοιπα μέρη του κάστρου. Η χρήση κάποιων διεπιφανειών κατά μήκος των ρωγμών και άλλου είδος ζημιάς που εμφανίζεται,

είναι μια υποσχόμενη εναλλακτική σύμφωνα με την κα. Σταυρουλάκη και τον κ. Σταυρουλάκη. Η έρευνα διάφορων σεναρίων ζημιάς στην λίθινη γέφυρα της Πλάκας στην Ήπειρο, με χρήση μονομερών μοντέλων επαφής κατά μήκος των διεπιφανειών, και χρησιμοποιώντας την θεωρία του μηχανισμού συνεχούς ζημιάς, ύπο στατικά φορτία για την σύγκριση μοντέλων, έδωσε καλή συσχέτιση μεταξύ τους. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και η έρευνα του Ford το 2003. Αυτές οι διεπιφάνειες μοντελοποιήθηκαν με την χρήση μονομερών μοντέλων επαφής, παροντικά διαθέσιμων γενικής χρήσης πεπερασμένα στοιχεία. Επιπλέον, ο Betti χρησιμοποίησε τις μονομερείς διεπιφάνειες επαφής για την αξιολόγηση αστοχίας σε λίθινα τόξα.

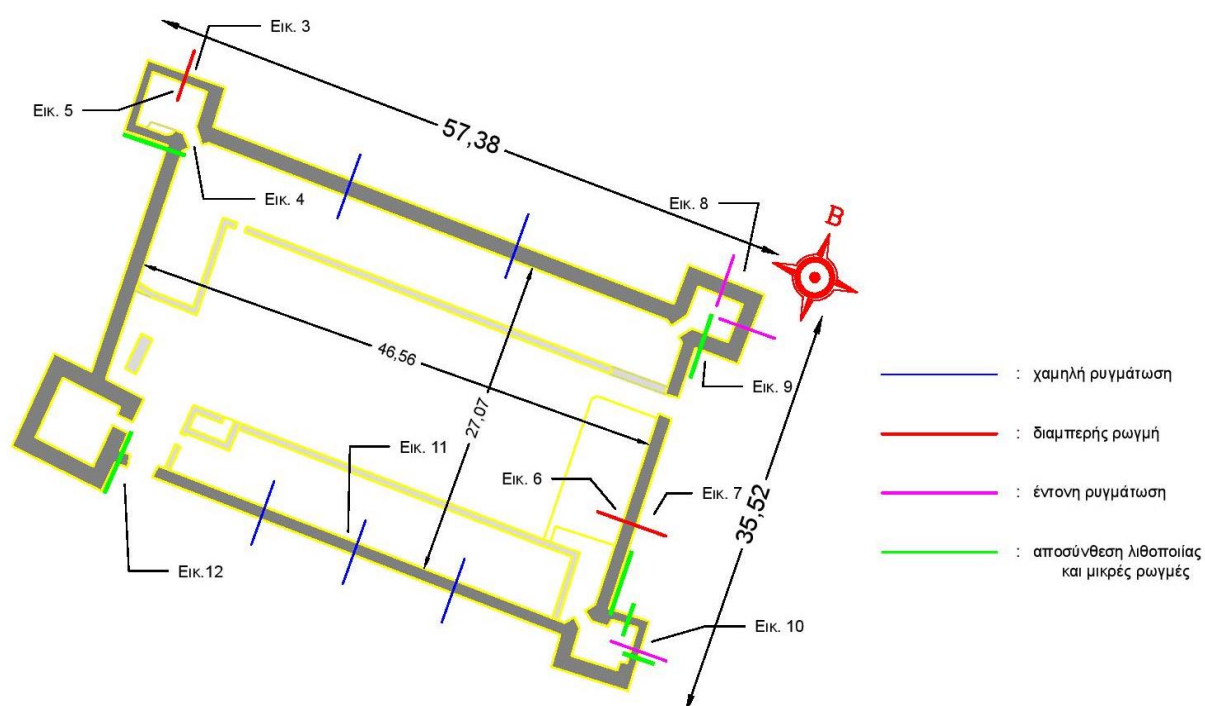
Σε αυτή την εργασία, η ανάλυση της κατασκευής του κάστρου του Φραγκοκάστελλου έγινε με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Για την μοντελοποίηση λήφθηκαν υπόψιν η υπάρχουσα γεωμετρία, το ιστορικό του μουσείου, η ποιότητα των υλικών κατασκευής και οι υπό το έδαφος συνθήκες. Για να ερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι αστοχίες της κατασκευής επηρεάζουν την συμπεριφορά του λίθινο κάστρου, λήφθηκαν υπόψιν στην ανάλυση οι υφιστάμενες ρωγμές και αστοχίες, όπως η αποσύνθεση υλικών.

Συγκεκριμένα, υπήρξε εστίαση στην κατάσταση του Βορειοδυτικού Πύργου, ο οποίος φέρει και τις σημαντικότερες ρωγμές. Αρχικά γίνεται γραμμική ανάλυση της συμπεριφοράς του και στην συνέχεια μη γραμμική με σκοπό την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στο παρακάτω κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η γεωμετρία του κάστρου, καθώς και οι ρωγμές και διάφορες ζημιές που έχει υποστεί ανά τα χρόνια.

2. Περιγραφή και Διερεύνηση Κάστρου

Το κάστρο του Φραγκοκάστελλου από τρεις μικρούς πυργίσκους και έναν τέταρτο μεγαλύτερο, ύψους 9μ. και 15μ. αντίστοιχα, καθώς και 4 περιμετρικούς τοίχους. Παρακάτω ακολουθεί μια κάτοψη του κάστρου, στην οποία παρουσιάζονται οι κύριες διαστάσεις καθώς και τα σημεία που εμφανίζεται ζημιά (Εικόνα 2).

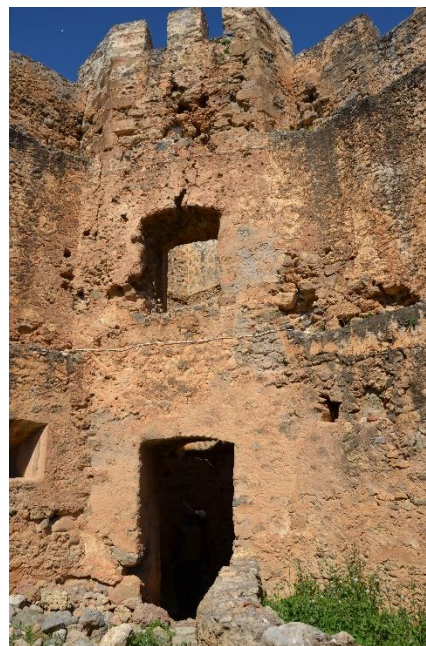


2. Κάτοψη κάστρου Φραγκοκάστελλο

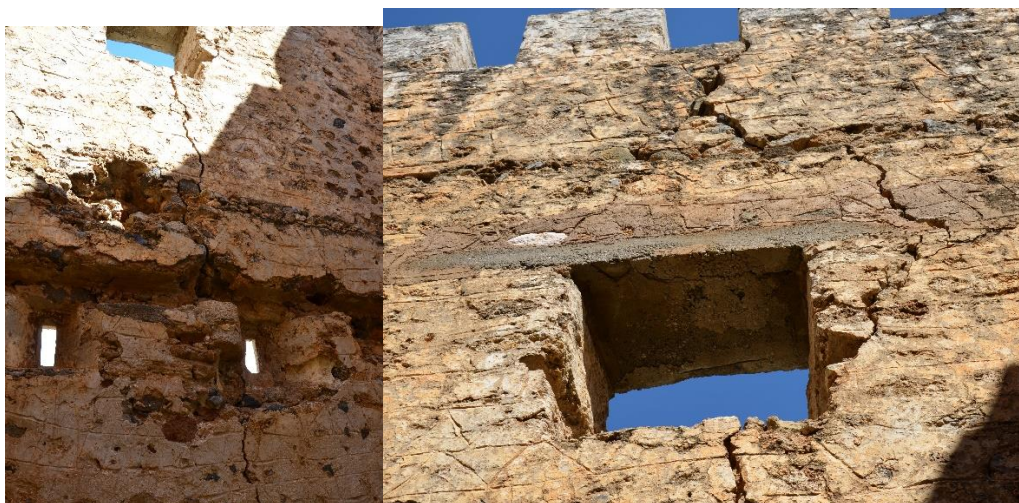
Η κύρια ζημιά εντοπίζεται στον Βορειοδυτικό πύργο, στον οποίο επικεντρώνεται και η παρούσα εργασία, όπου υπάρχει μια εμφανής κάθετη ρωγμή στην βόρεια πλευρά και δημιουργεί ένα άνοιγμα μερικών εκατοστών. Η ρωγμή εμφανίζεται κατά μήκος όλου του ύψους του πύργου (Εικόνα 3-5). Είναι μια εφελκυστική ρωγμή λυγισμού, εκτός του λυγισμένου επιπέδου του τοίχου, σε συνδυασμό με στροφή στον πύργο.



3. ΒΔ πύργος (ανατολική όψη)

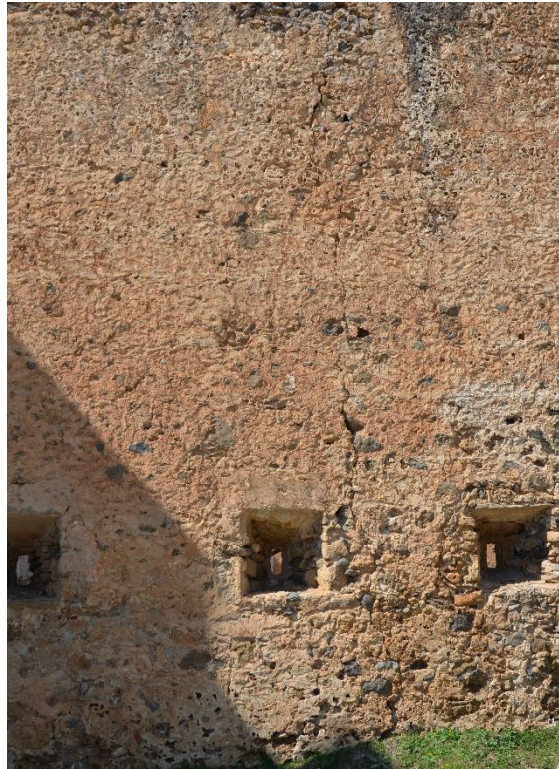


4. Είσοδος ΒΔ πύργου



5. μεγάλη εμφανής ρωγμή σε θόρεια πολεμίστρα του ΒΔ πύργου

Επιπρόσθετα, μια διαμπερής ρωγμή μικρότερου ανοίγματος παρουσιάζεται κατά μήκος όλου του ύψους του ανατολικού τοίχους (εικ.6 και εικ.7). Αυτή η ρωγμή προκλήθηκε επίσης από εκτός επιπέδου λυγισμό του τοίχου, ύψους 8 μέτρων και πάχους 1,25 μέτρων. Επιπλέον σημειώνεται, ότι ο δυτικός περιμετρικός τοίχος του κάστρου, μικρότερου μήκους και μεγαλύτερου πάχους (1,4μ.) δεν παρουσιάζει παρόμοια αστοχία.



6. εγκάρσια ρωγμή στον Ανατολικό τοίχο (εξωτερική όψη)



7. εγκάρσια ρωγμή στον Ανατολικό τοίχο (εσωτερική όψη)

Στην βόρεια πλευρά του βορειοανατολικού πύργου (εικ. 8), εμφανίζεται άλλη μια ρωγμή, όπου παρατηρείτε και το φαινόμενο της διάσπαση της τοιχοποιίας (εικ. 9).



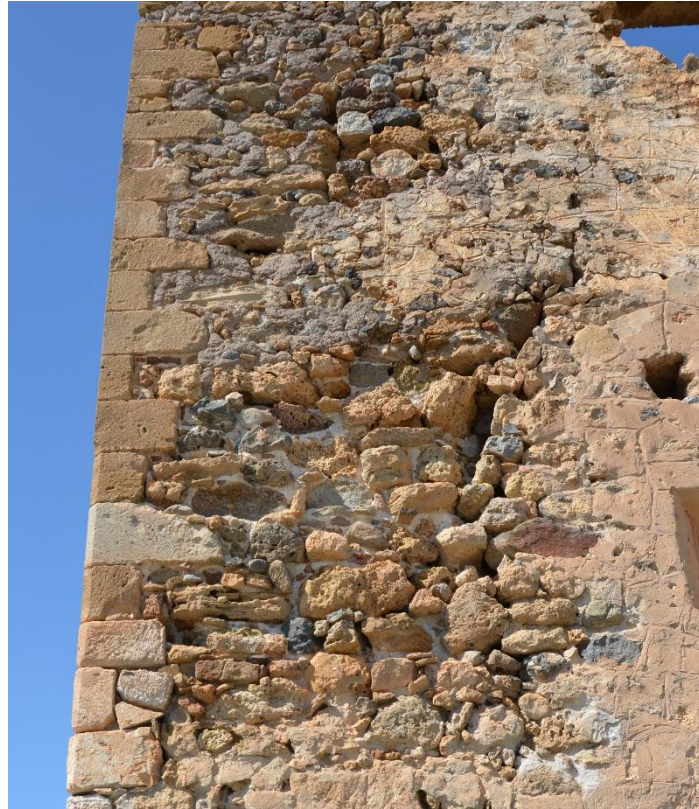
8. ρωγμή στο βόρειο πρόσωπο του ΒΑ πύργου



9. διάσπαση της τοιχοποιίας στην νότια πλευρά του ΒΑ πύργου

Μπορούμε να παρατηρήσουμε παρόμοια συμπεριφορά στον Νοτιοανατολικό πύργο, με ρωγμές στην ανατολική πλευρά (εικ. 10) και διάσπαση της τοιχοποιίας σε χαμηλότερα επίπεδα. Οι συγκεκριμένες ρωγμές παρουσιάστηκαν λόγω εκτός

επιπέδου λυγισμού και διατμητικής αστοχίας, που ξεκινά από το άνοιγμα και εμφανίζεται στην περιοχή όπου έχουμε μείωση της διατομής.



10. ρηγμάτωση και διάσπαση τοιχοποιίας στην ανατολική πλευρά του ΒΑ πύργου

Μικρότερες ρωγμές εμφανίζονται στον νότιο τοίχο (εικ. 11), λόγω του εκτός επιπέδου λυγισμού. Επιπρόσθετα, χαμηλότερα στον νότιο τοίχο και στην περιοχή σύνδεσης με τον πύργο (εικ. 12), εντοπίζεται έντονη διάσπαση τοιχοποιίας.



11. διάσπαση στην κορυφή του νότιου τοίχου (εσωτερική όψη)



12. διάσπαση τοιχοποιίας στην περιοχή σύνδεσης με τον νότιο τοίχο και τον ΝΔ πύργο

Ο βόρειος τοίχος και ο νοτιοδυτικός πύργος βρίσκονται σε καλή κατάσταση, χωρίς σημαντικές ζημιές, όσον αφορά ρωγμές και διάσπαση τοιχοποιίας. Τοπικά προβλήματα μπορούν να λυθούν με ανάκτηση της συνέχειας της τοιχοποιίας.

Όπως προαναφέρθηκε, η παρούσα εργασία θα ερευνήσει την συμπεριφορά του βορειοδυτικού πύργου. Πέραν της κάθετης ρωγμής που αναφέραμε αρχικά στον ΒΔ πύργο, υπάρχει και μια αξονική που ξεκινάει από τον δυτικό περιμετρικό τοίχο και καταλήγει στον βόρειο με την διεύθυνσή της να φαίνεται στην κάτοψη παρακάτω (Εικόνα 13).



13. Αξονική ρωγμή Βόρειου-Δυτικού περιμετρικού Τοίχου.

3. Προετοιμασία και ανάλυση μοντέλου

3.1. Μοντελοποίηση

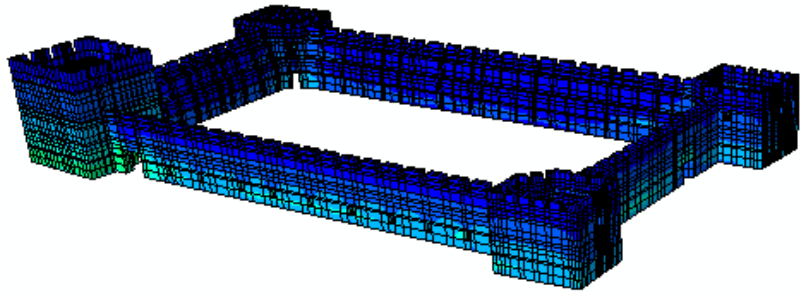
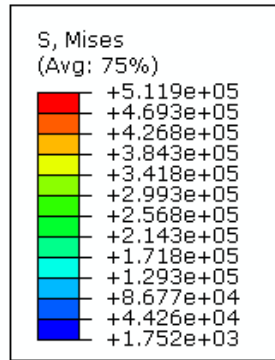
Ο τρισδιάστος σχεδιασμός του μοντέλου έγινε στο πρόγραμμα AutoCAD καθώς και στο CATIA. Όπως προαναφέρθηκε η ανάλυση έγινε στο abaqus στο οποίο αφού έγινε η εισαγωγή του τρισδιάστατου μοντέλου (CATIA), προσδιορίστηκαν οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του. Όλες οι μονάδες μέτρησης δόθηκαν στο SI όπως υποδεικνύονται παρακάτω στον πίνακα.

Quantity	SI
Length	m
Force	N
Mass	kg
Time	s
Stress	Pa (N/m ²)
Energy	J
Density	kg/m ³

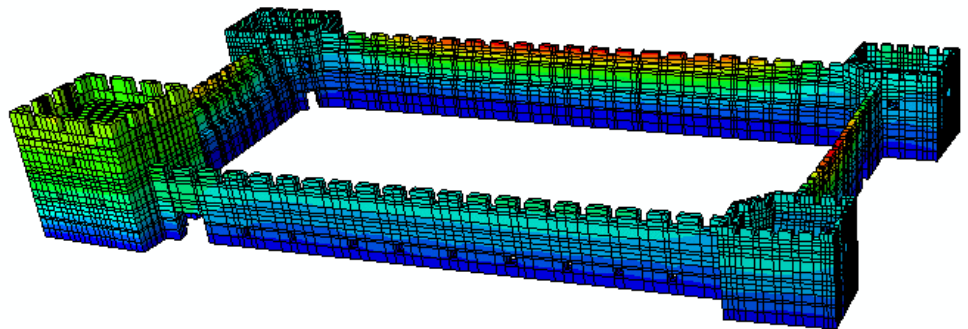
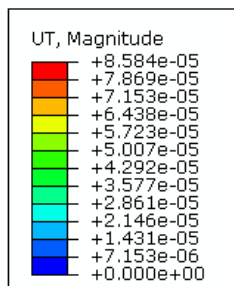
Πίνακας 1

Αρχικά δόθηκαν οι ιδιότητες της λίθινης τοιχοποιίας και συγκεκριμένα πυκνότητα $\rho=200$ και ελαστικότητα με μέτρο ελαστικότητας $E=25000000000$ και λόγο poisson $\nu=0,25$.

Έπειτα ορίστηκε η σειρά των βημάτων με τα οποία θα τρέξει η ανάλυση για να βγουν τα αποτελέσματα. Πρώτα το αρχικό, στην συνέχεια το ίδιο βάρος και τέλος το βήμα στο οποίο δηλώνουμε την τοπική μετατόπιση που θέλουμε να μελετήσουμε. Το ίδιο βάρος εφαρμόζεται σε όλο τον όγκο του μοντέλου με τιμή $g=9,81$. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τάσεις von mises και οι μετακινήσεις UT από την εφαρμογή του ιδίου βάρους (εικόνες 14,15).



14. τάσεις von mises από ίδιο βάρος



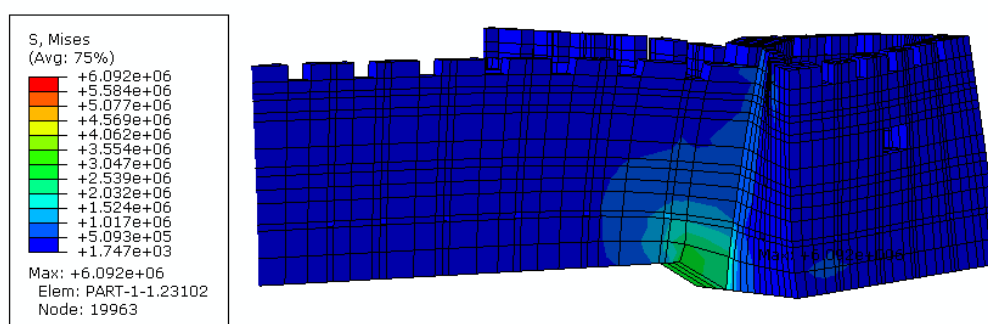
15. μετακινήσεις UT από ίδιο βάρος

Παρατηρείτε ότι οι τάσεις που ασκεί το ίδιο βάρος είναι στην βάση του μοντέλου κατά κύριο λόγο ενώ οι μετακινήσεις είναι εντονότερες στα ψηλότερα σημεία του και κυρίως στον βόριο και τον ανατολικό περιμετρικό τοίχο.

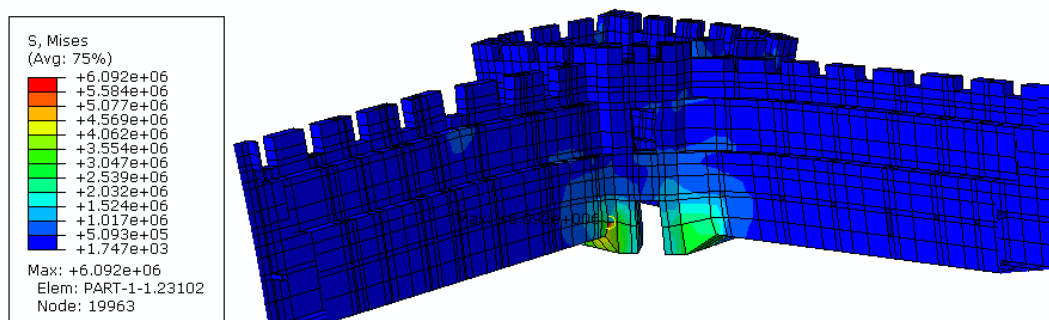
3.2. Γραμμική ανάλυση

Η παρούσα εργασία εστιάζει στον ΒΔ πύργο και συγκεκριμένα στην κάθετη ρωγμή στην βόρεια πλευρά του καθώς και στην αξονική που ξεκινάει από τον δυτικό περιμετρικό τοίχο και καταλήγει στον βόρειο. Η προσομοίωση της πρώτης γίνεται με υποχώρηση του βάθρου του πύργου. Η αξονική ρωγμή προσομοιώθηκε με παράλληλη προς το ρήγμα μετακίνηση του πύργου (βορειοδυτικά).

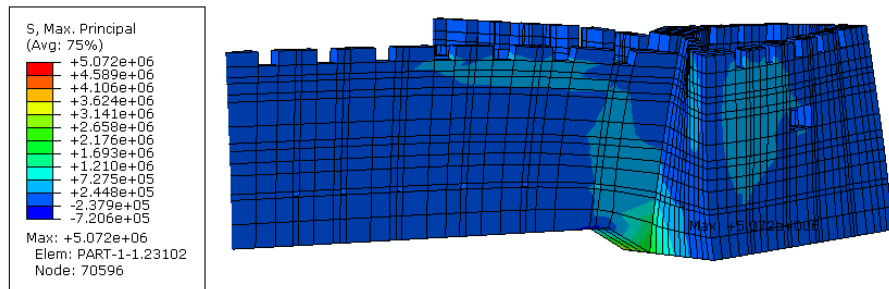
Σε πρώτη φάση υποβάλαμε το μοντέλο σε γραμμική ανάλυση με 40 εκ. υποχώρηση βάθρου, εξετάζοντας τις τάσεις von mises, τις συνολικές τάσεις και τις μετακινήσεις όπως παρουσιάζονται παρακάτω στις εικόνες 16-21. Στην συνέχεια ακολουθούν εικόνες από τα αντίστοιχα μεγέθη υποβάλλοντας το μοντέλο σε παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20 εκ. βορειοδυτικά (εικ. 23-28). Όλα τα μεγέθη των αποτελεσμάτων έχουν μεγεθυνθεί υπό κλίμακα 3000/1 για μεγαλύτερη ευκρίνεια των αποτελεσμάτων.



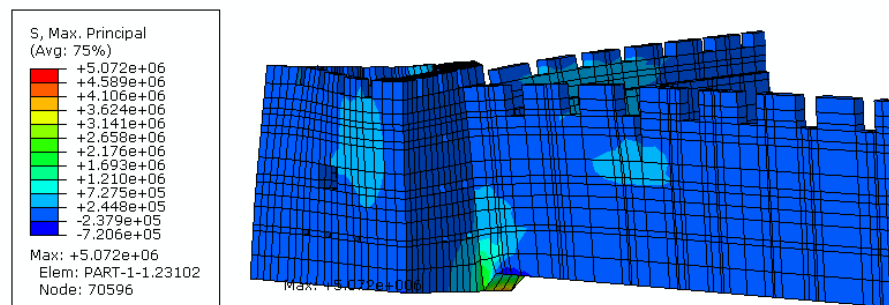
16. τάσεις von mises από υποχώρηση του βάθρου (βόρεια εξωτερική όψη)



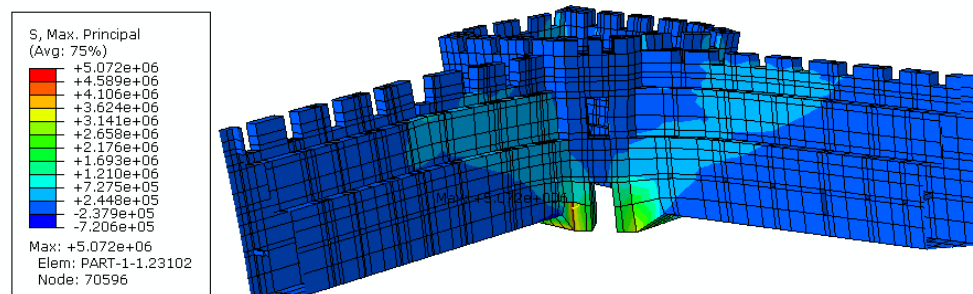
17. τάσεις von mises από υποχώρηση του βάθρου (εσωτερική όψη)



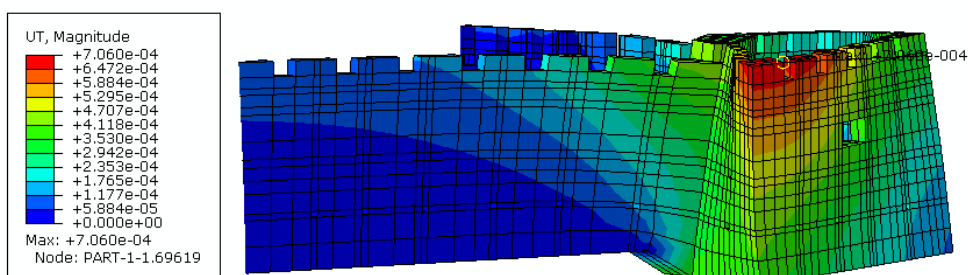
18. συνολικές τάσεις από υποχώρηση του βάθρου (βόρεια εξωτερική όψη)



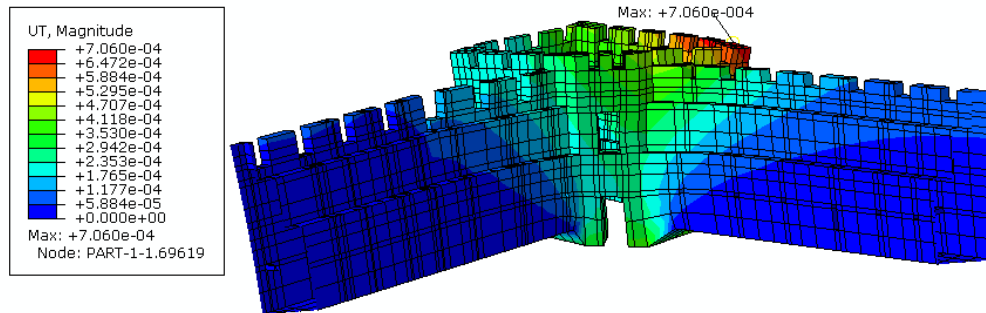
19. συνολικές τάσεις από υποχώρηση του βάθρου (δυτική εξωτερική όψη)



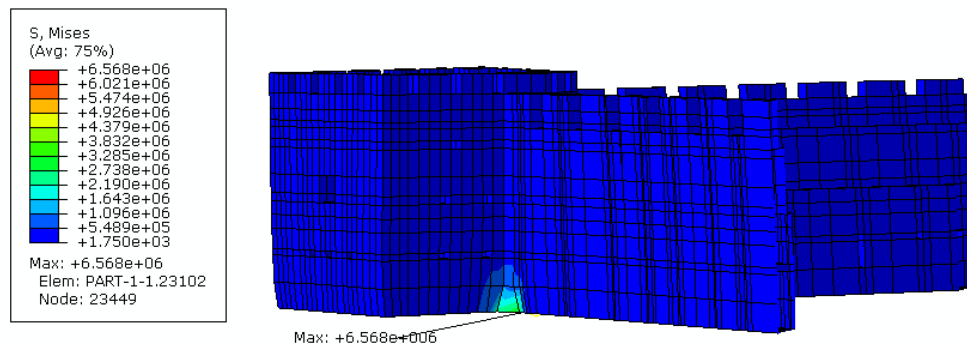
20. συνολικές τάσεις από υποχώρηση του βάθρου (εσωτερική όψη)



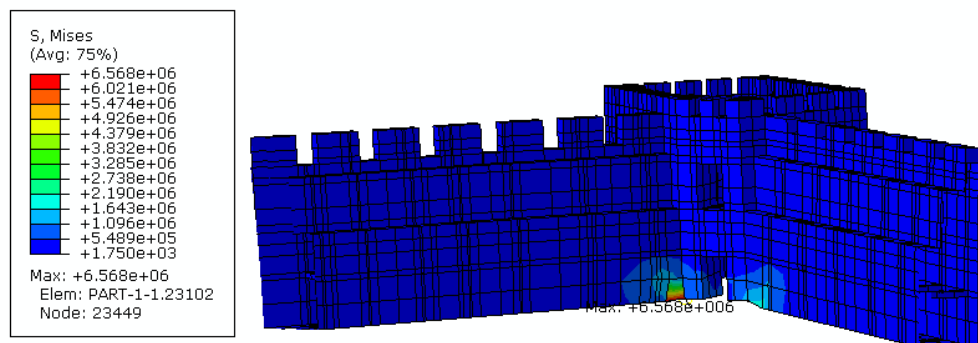
21. μετακινήσεις από υποχώρηση του βάθρου (βόρεια εξωτερική όψη)



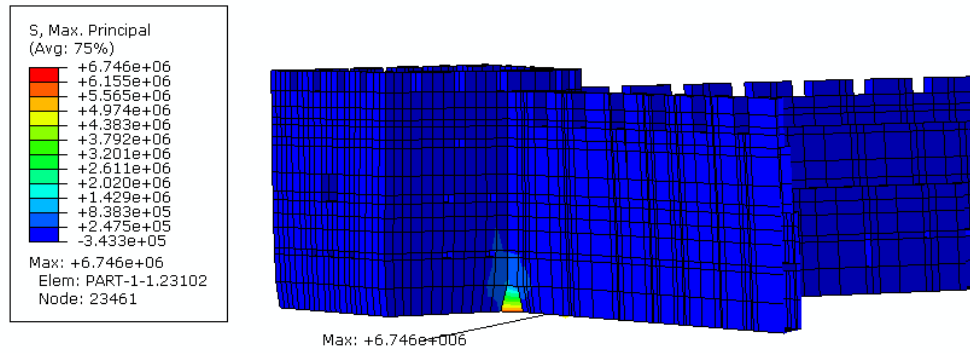
22. μετακινήσεις από υποχώρηση του βάθρου (εσωτερική όψη)



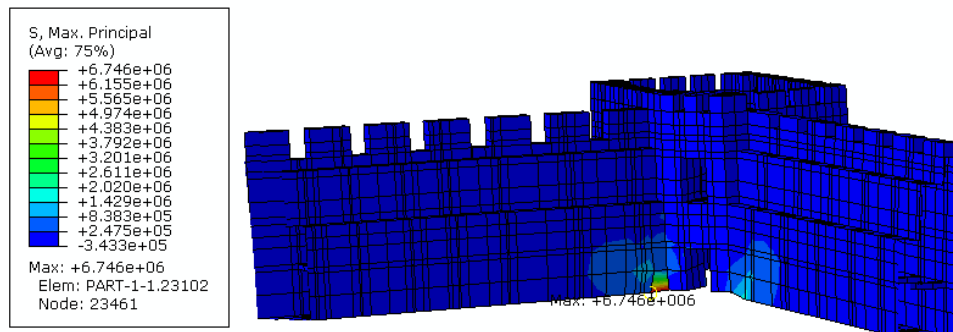
23. τάσεις von mises από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση (δυτική εξωτερική όψη)



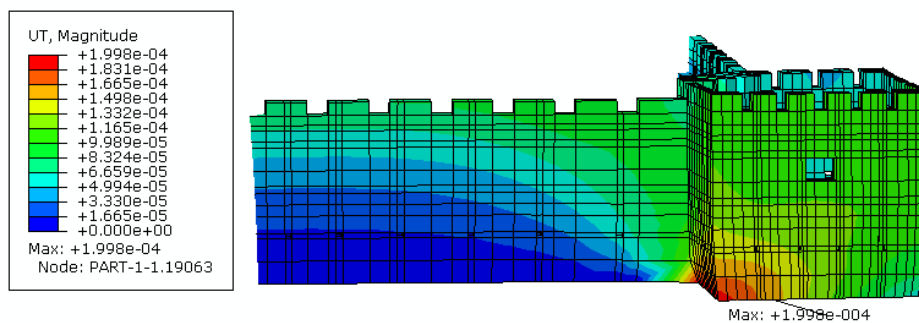
24. τάσεις von mises από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση (εσωτερική όψη)



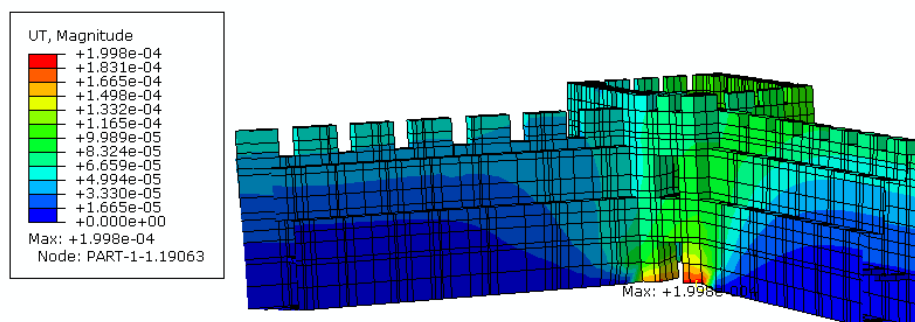
25.συνολικές τάσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση (εξωτερική όψη)



26.συνολικές τάσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση (εσωτερική όψη)



27. μετακινήσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση (εξωτερική όψη)



28.μετακινήσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση (εσωτερική όψη)

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω αποτελέσματα των 2 περιπτώσεων, παρατηρούμε ότι το μεγαλύτερο μέρος των τάσεων παρατηρείτε χαμηλά στις συνδέσεις του πύργου με τους περιφερειακούς τοίχους. Οι συνολικές τάσεις οι οποίες υποδεικνύουν και την ροή των εφελκυστικών τάσεων, αναπτύσσονται από τα χαμηλότερα σημεία σύνδεσης του πύργου με τα τοιχεία, διαγώνια με κλίση 45° , καθώς και όπου υπάρχουν οπές. Στην της παράλληλης στο ρήγμα μετακίνησης, οι συνολικές τάσεις φαίνονται ασθενέστερες όπως και αναμέναμε καθώς η τιμή μετακίνησης είναι αρκετά μικρότερη σε σχέση με την τιμή υποχώρησης βάθρου. Η κύρια διαφορά των δύο περιπτώσεων εμφανίζεται στις μετακινήσεις UT. Στην υποχώρηση βάθρου έχουμε τις μεγαλύτερες μετακινήσεις στα ψηλότερα σημεία του πύργου ενώ στην μετακίνηση παράλληλα του ρήγματος, οι μεγαλύτερες μετακινήσεις βρίσκονται χαμηλά.

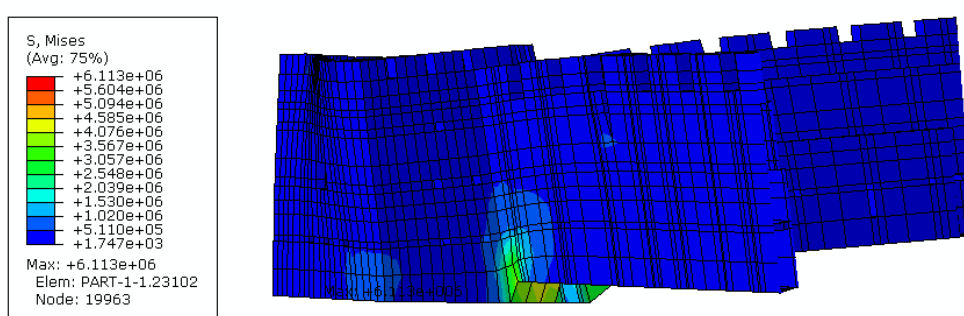
3.3. Μη γραμμική ανάλυση

Για την εφαρμογή της μη γραμμικής ανάλυσης προσθέσαμε στις ιδιότητες του υλικού την συμπεριφορά «concrete smear cracking», που αναφέρεται σε συμπεριφορά τσιμέντου με σκασίματα (το τσιμέντο έχει την πλησιέστερη συμπεριφορά με την λιθοδομία) και δώσαμε τιμές για να προσδιορίσουμε τον λόγο αστοχίας και την ένταση ακαμψίας. Τα όρια που ορίστηκαν για την μετάβαση από γραμμική ανάλυση σε μη γραμμική φαίνονται στον πίνακα 2 παρακάτω:

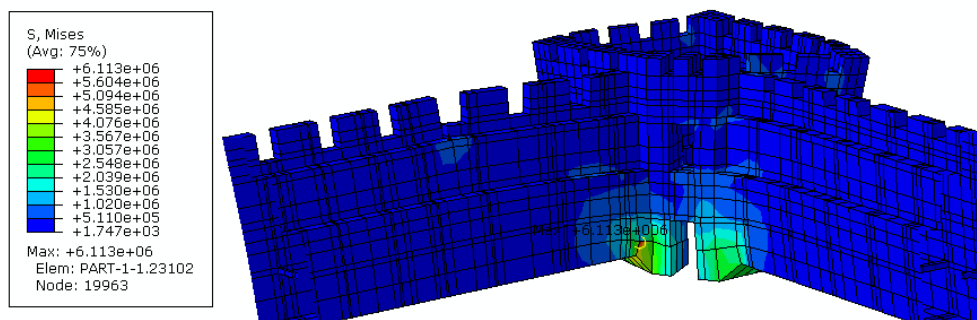
	Comp Stress	Plastic Strain
1	10000000	0
2	37000000	0.00092

Πίνακας 2

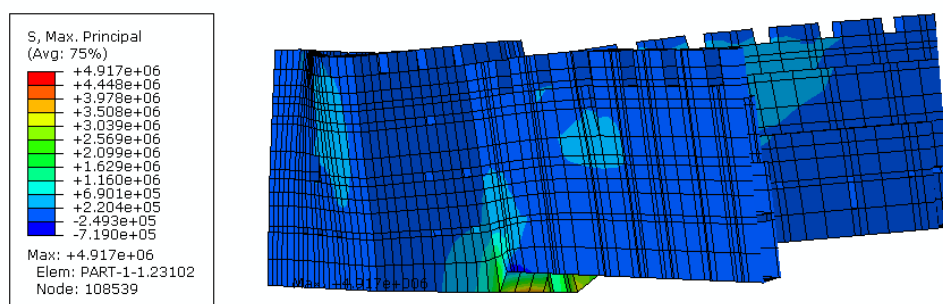
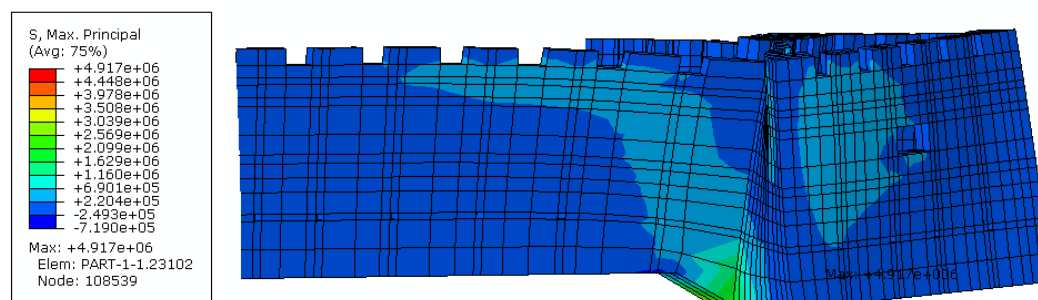
Έπειτα από δοκιμές, το μοντέλο παρουσίασε πλαστικές παραμορφώσεις με υποχώρηση βάθρου 40 εκ. ή μεγαλύτερη και αντίστοιχα 20 εκ. μετακίνηση παράλληλη στο ρήγμα ή μεγαλύτερη. Οπότε το μοντέλο μελετήθηκε με αυτές τις τιμές αντίστοιχα στην κάθε περίπτωση. Παρακάτω στις εικόνες 29-42 παρουσιάζονται οι τάσεις von mises, οι συνολικές τάσεις, οι μετακινήσεις και οι πλαστικές παραμορφώσεις για υποχώρηση βάθρου 40εκ. του ΒΔ πύργου, καθώς παρουσιάζονται και οι πλαστικές παραμορφώσεις για υποχώρηση 50εκ. και 60 εκ. για χάριν σύγκρισης.

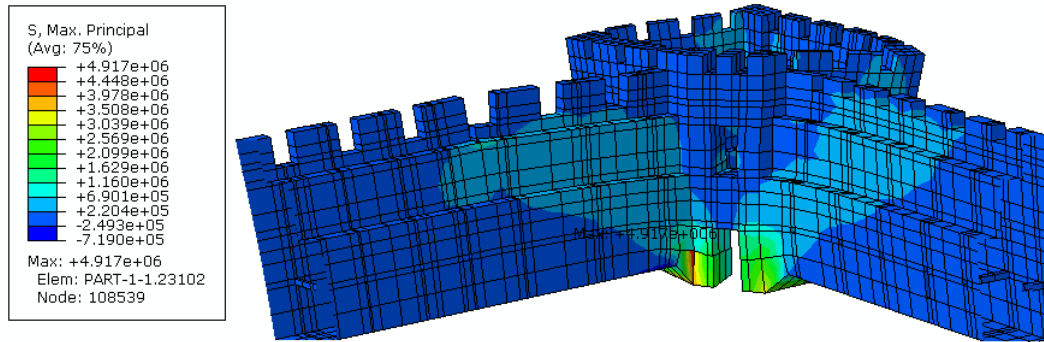
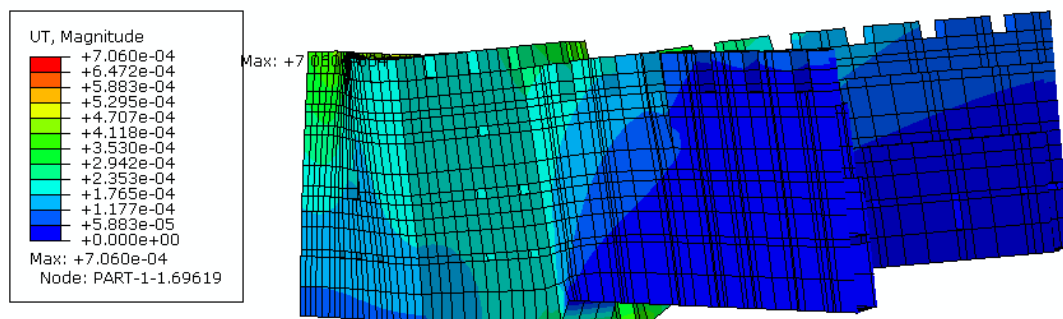
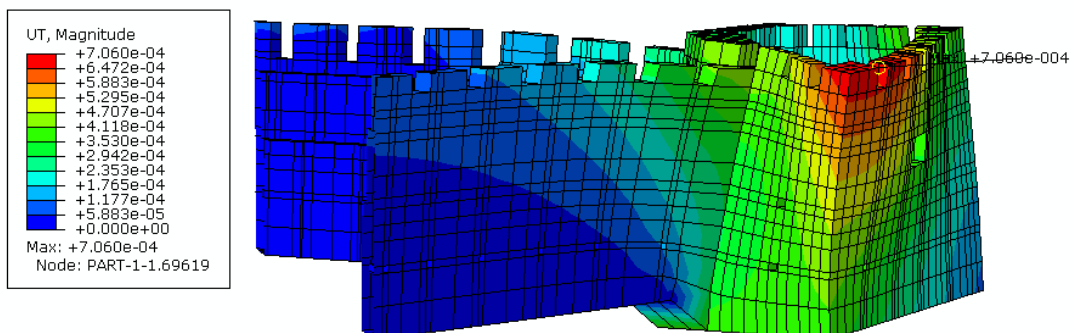


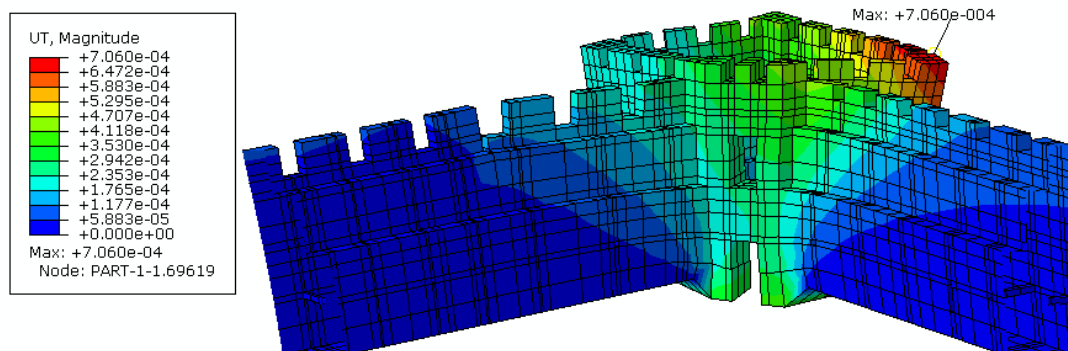
29. τάσεις von mises από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (δυτική εξωτερική όψη)

30. τάσεις von mises από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (εσωτερική όψη)

Βλέπουμε ότι η μέγιστη τάση έχει τιμή $6,113 \cdot 10^6$, έχοντας ελάχιστη διαφορά από την αντίστοιχη τιμή με γραμμική ανάλυση ($6,092 \cdot 10^6$). Αυτό οφείλεται επειδή σε αυτό το σημείο η πλαστική παραμόρφωση είναι ελάχιστη και δεν συμβάλει ουσιαστικά ακόμα.

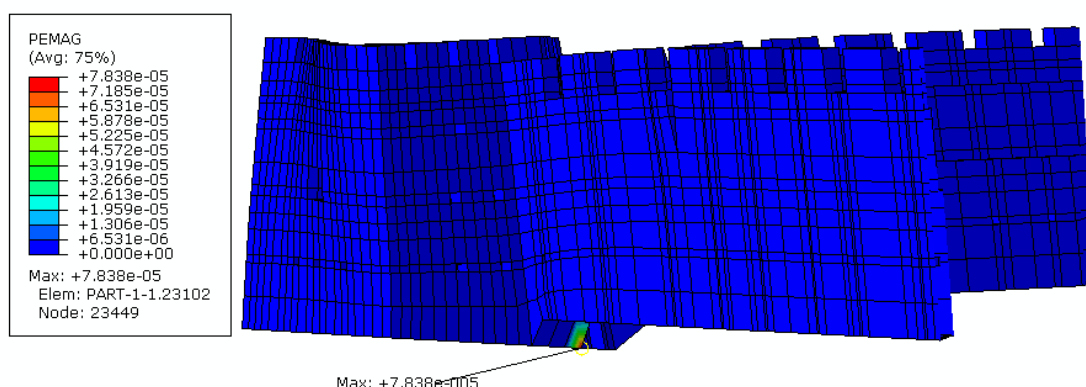
31.συνολικές τάσεις από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (δυτική εξωτερική όψη)32.συνολικές τάσεις από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (βόρεια εξωτερική όψη)

33. συνολικές τάσεις από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (εσωτερική όψη)34. μετακινήσεις από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (δυτική εξωτερική όψη)35. μετακινήσεις από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (βόρεια εξωτερική όψη)

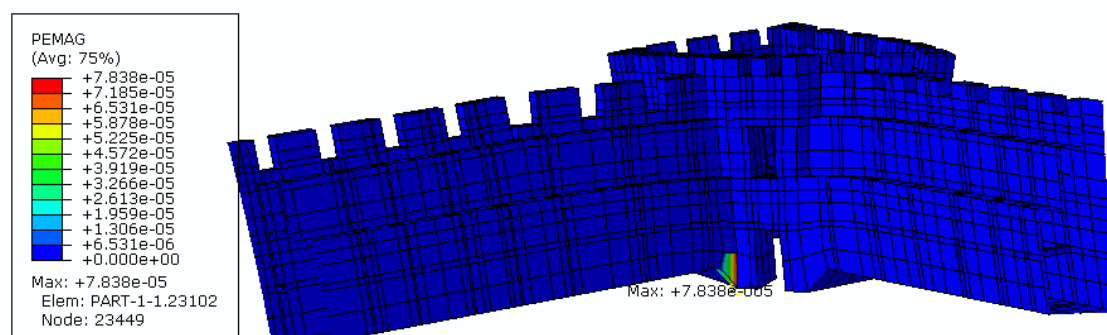


36. μετακινήσεις από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (εσωτερική όψη)

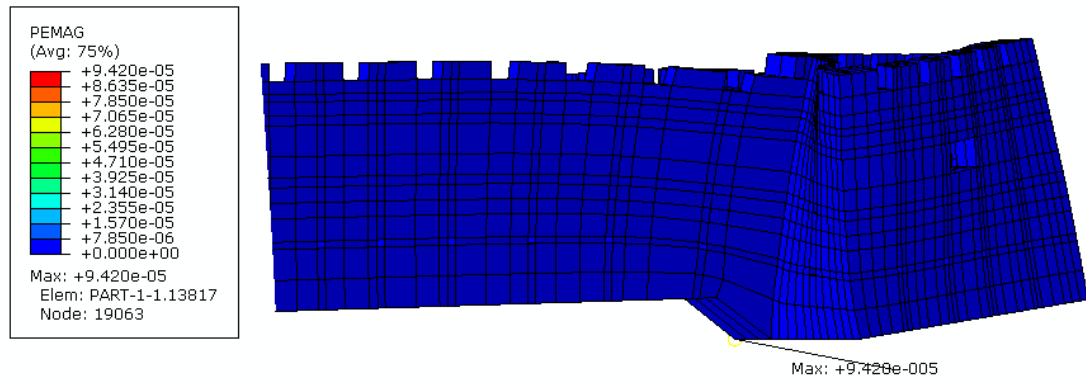
Αντίστοιχα η μέγιστη τιμή των συνολικών τάσεων ($4,917 \cdot 10^6$) και η μέγιστη σημειακή μετατόπιση ($7,060 \cdot 10^{-4}$), απέχουν ελάχιστα από αυτές που πήραμε μέσω της γραμμικής ανάλυσης ($5,072 \cdot 10^6$ και $7,060 \cdot 10^{-4}$) για τον ίδιο λόγο. Η αδυναμία σε εφελκυσμό εντοπίζεται επίσης στις ίδιες περιοχές.



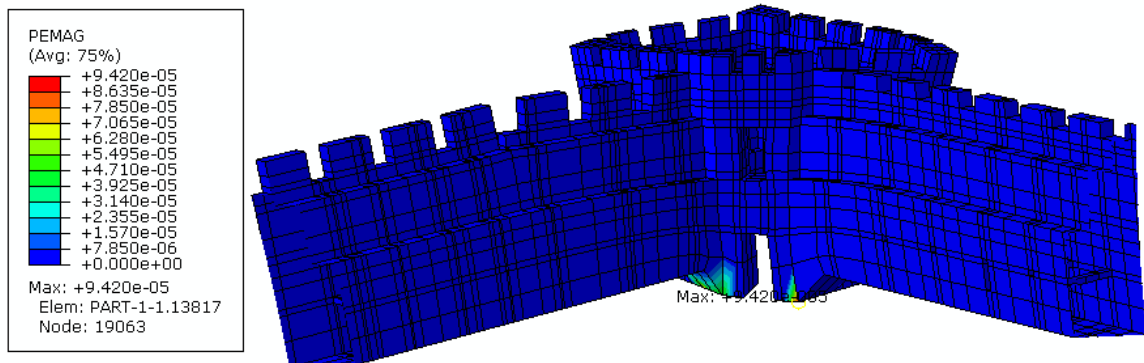
37. πλαστικές παραμορφώσεις από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (βόρεια εξωτερική όψη)



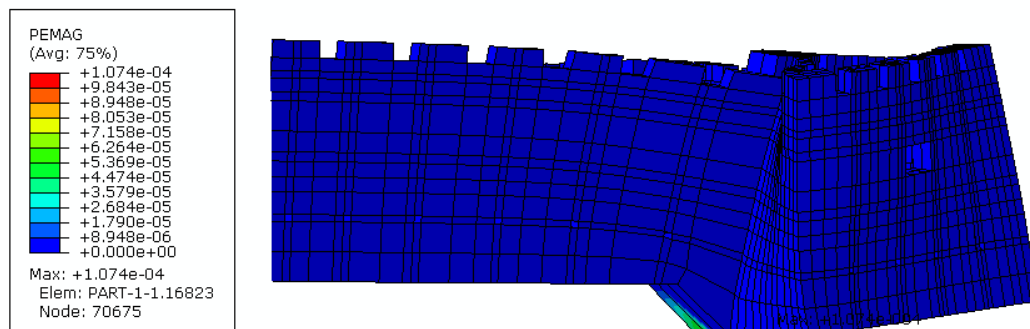
38. πλαστικές παραμορφώσεις από υποχώρηση του βάθρου 40εκ (εσωτερική όψη)



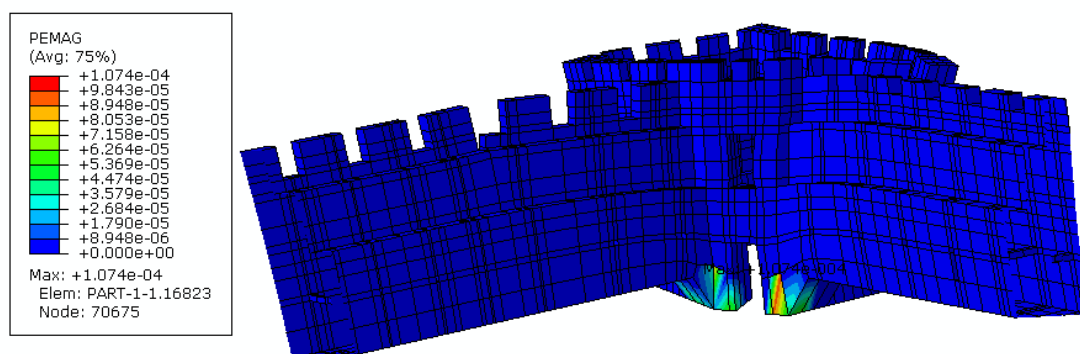
39. πλαστικές παραμορφώσεις από υποχώρηση του βάθρου 50εκ (βόρεια εξωτερική όψη)



40. πλαστικές παραμορφώσεις από υποχώρηση του βάθρου 50εκ (εσωτερική όψη)



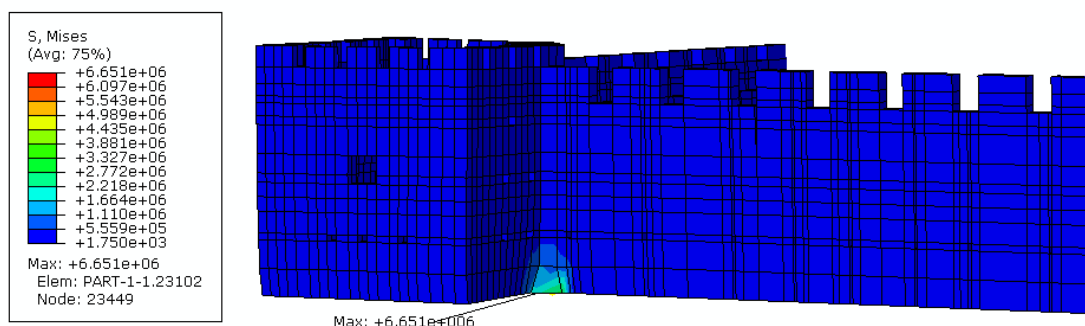
41. πλαστικές παραμορφώσεις από υποχώρηση του βάθρου 60εκ (βόρεια εξωτερική όψη)



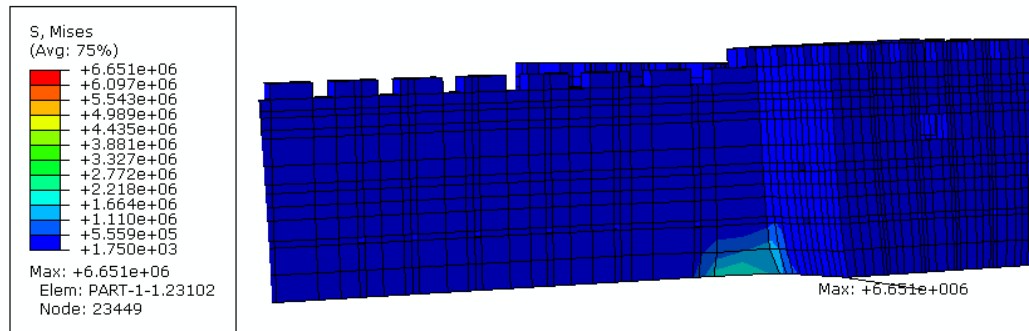
42. πλαστικές παραμορφώσεις από υποχώρηση του βάθρου 60εκ. (εσωτερική όψη)

Οι πλαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται εσωτερικά και χαμηλά στις ενώσεις των περιμετρικών τοιχίων με τον ΒΔ πύργο και εντονότερα από την πλευρά του δυτικού τοίχου. Οι τιμές για υποχώρηση βάθρου 40εκ. , 50 εκ. και 60 εκ. είναι $7,838 \cdot 10^{-5}$, $9,42 \cdot 10^{-5}$ και $1,074 \cdot 10^{-4}$ αντίστοιχα.

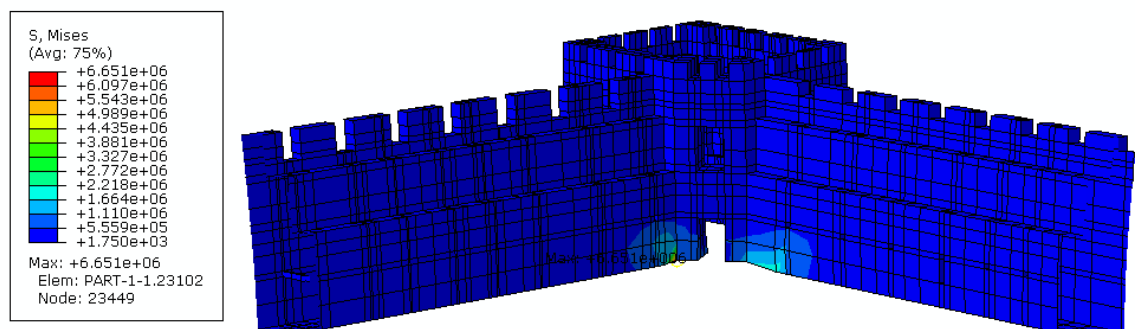
Στην συνέχεια στις εικόνες 43-60 παρουσιάζονται οι τάσεις von mises, οι συνολικές τάσεις, οι μετακινήσεις και οι πλαστικές παραμορφώσεις για παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση 20εκ. του ΒΔ πύργου, καθώς παρουσιάζονται και οι πλαστικές παραμορφώσεις για υποχώρηση 25εκ., 30 εκ., 35 εκ. και 40 εκ. για χάριν σύγκρισης.



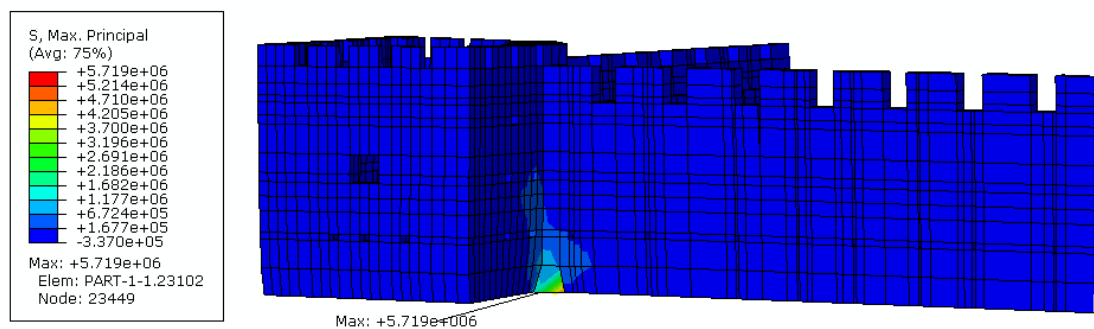
43. τάσεις von mises από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (δυτική εξωτερική όψη)



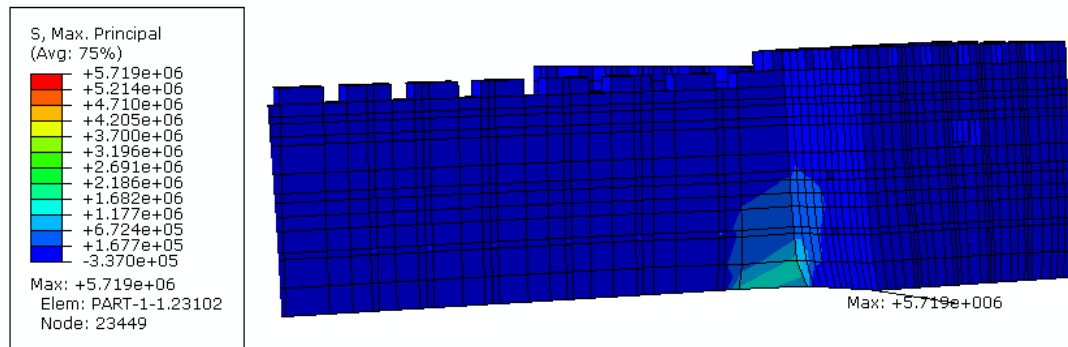
44. τάσεις von mises από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (δυτική εξωτερική όψη)



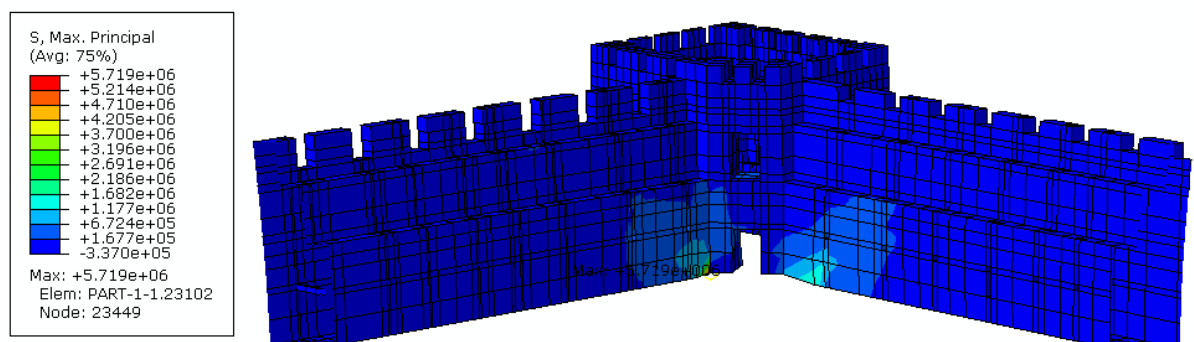
45. τάσεις von mises από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (εσωτερική όψη)



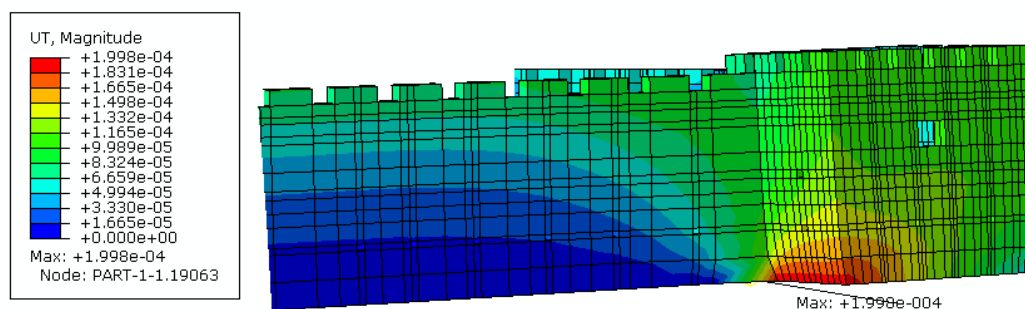
46. συνολικές τάσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (δυτική εξωτερική όψη)



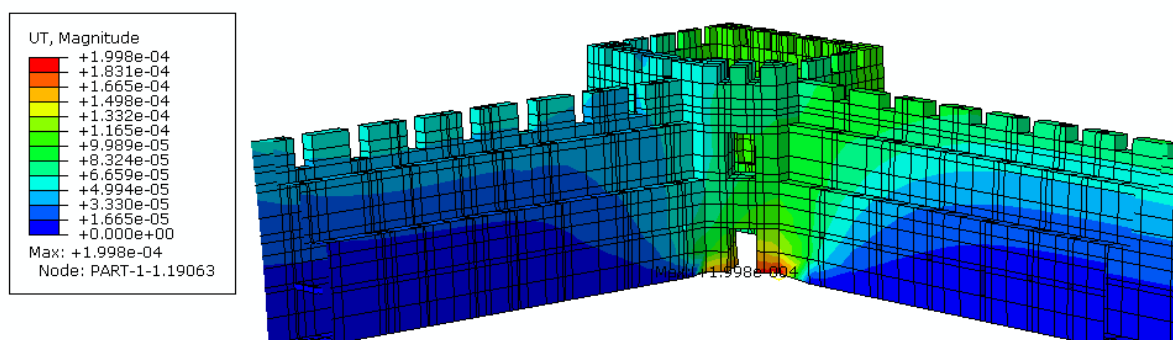
47. συνολικές τάσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (βόρεια εξωτερική όψη)



48. συνολικές τάσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (εσωτερική όψη)

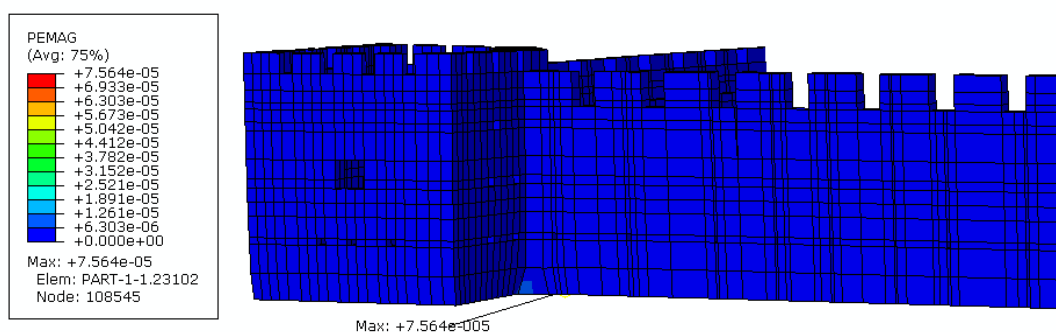


49. μετακινήσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (βόρεια εξωτερική όψη)

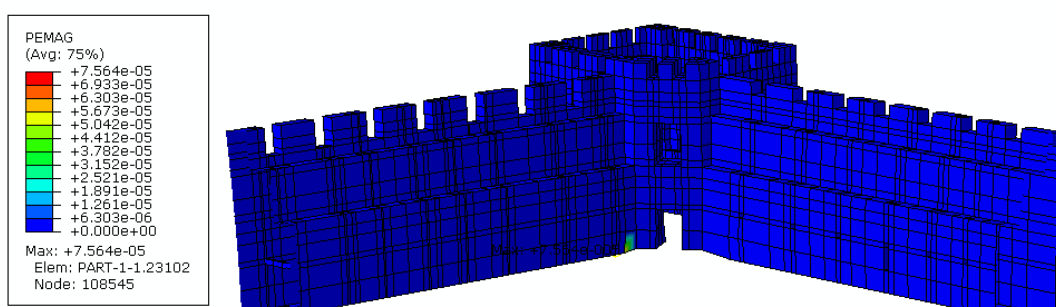


50. μετακινήσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (εσωτερική όψη)

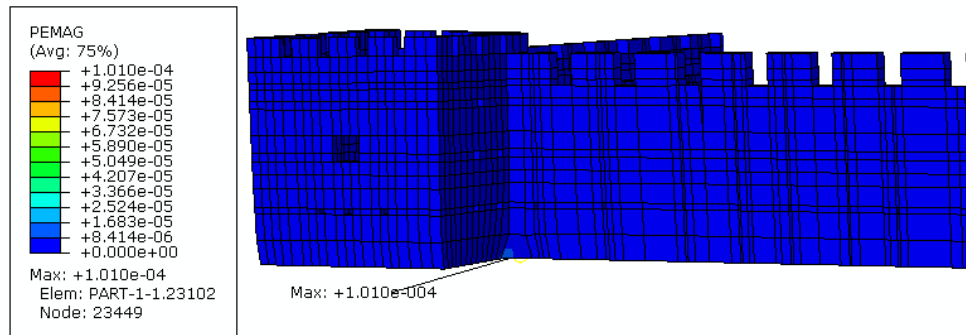
Η μέγιστη τάση έχει τιμή $6,113 \cdot 10^6$, η μέγιστη τιμή από τις συνολικές τάσεις είναι $5,719 \cdot 10^6$ και η μέγιστη μετακίνηση $1,998 \cdot 10^{-4}$. Οι αποκλίσεις των τιμών αυτών σε σχέση με τις αντίστοιχες από την γραμμική ανάλυση ($6,568 \cdot 10^6$, $6,746 \cdot 10^6$, $1,998 \cdot 10^{-4}$) είναι και πάλι μικρές λόγω της ελάχιστης πλαστικής παραμόρφωσης.



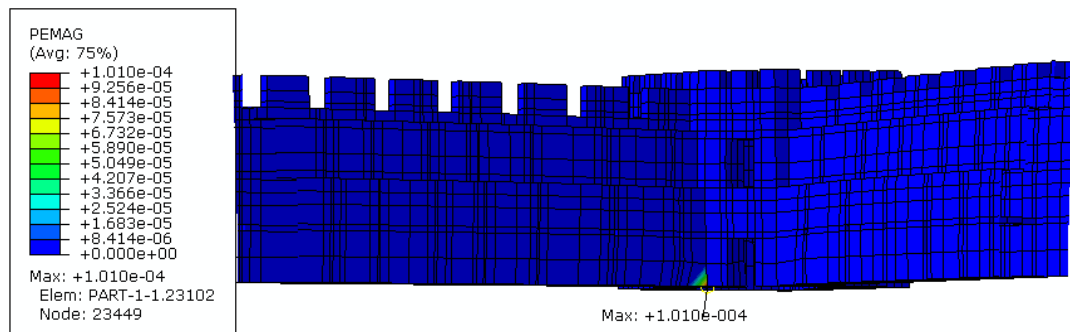
51. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (δυτική εξωτερική όψη)



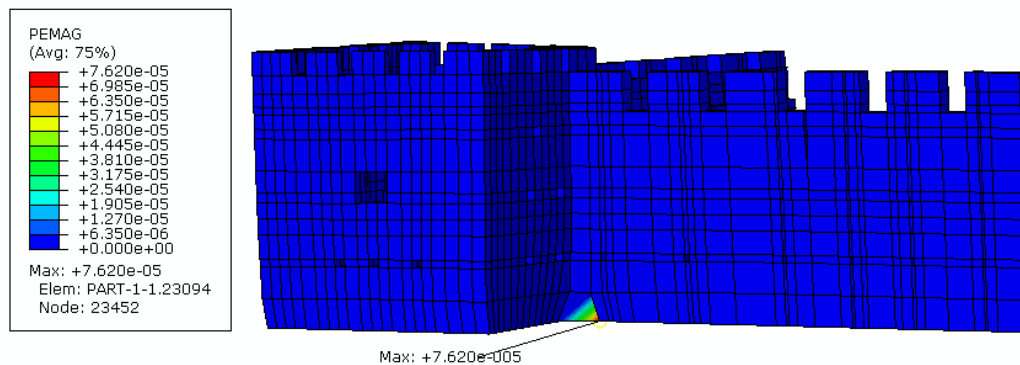
52. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 20εκ. (εσωτερική όψη)



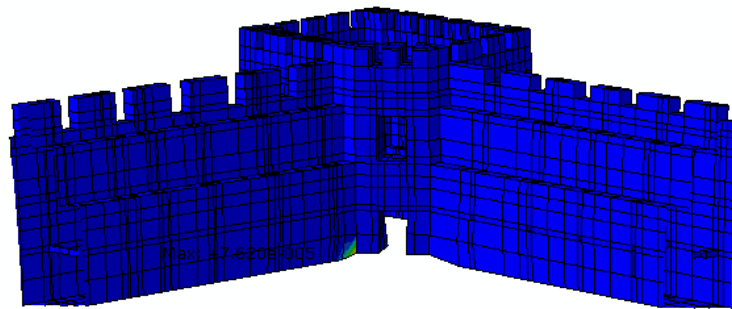
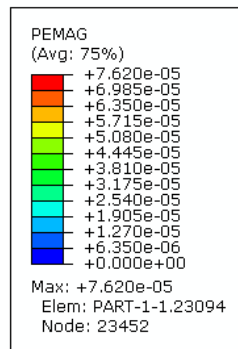
53. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 25εκ. (δυτική εξωτερική όψη)



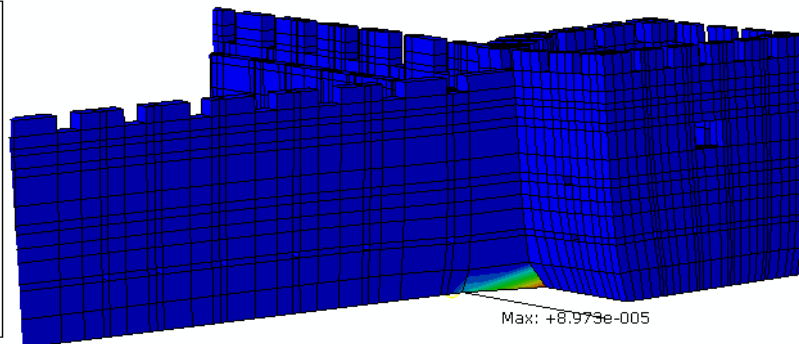
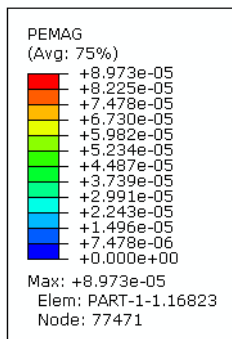
54. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 25εκ. (εσωτερική όψη)



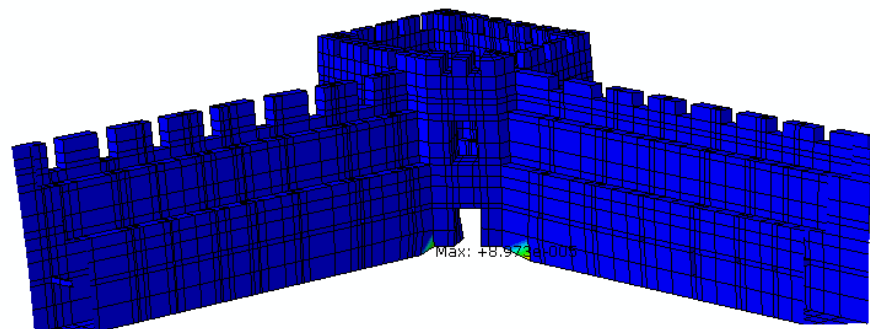
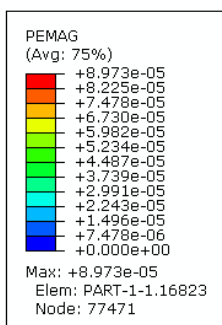
55. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 30εκ. (δυτική εξωτερική όψη)



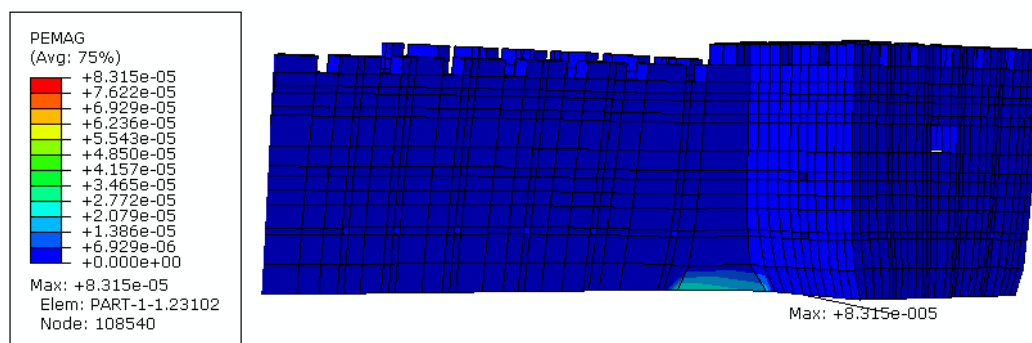
56. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 30εκ. (εσωτερική όψη)



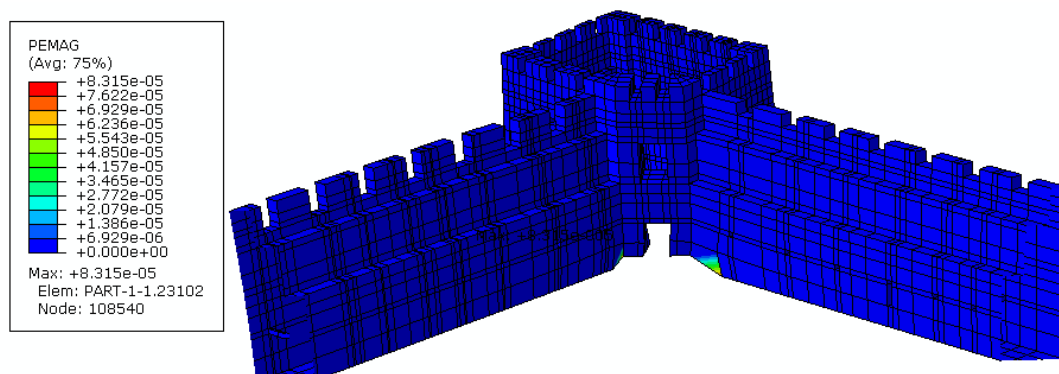
57. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 35εκ. (βόρεια εξωτερική όψη)



58. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 35εκ. (εσωτερική όψη)



59. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 40εκ. (βόρεια εξωτερική όψη)

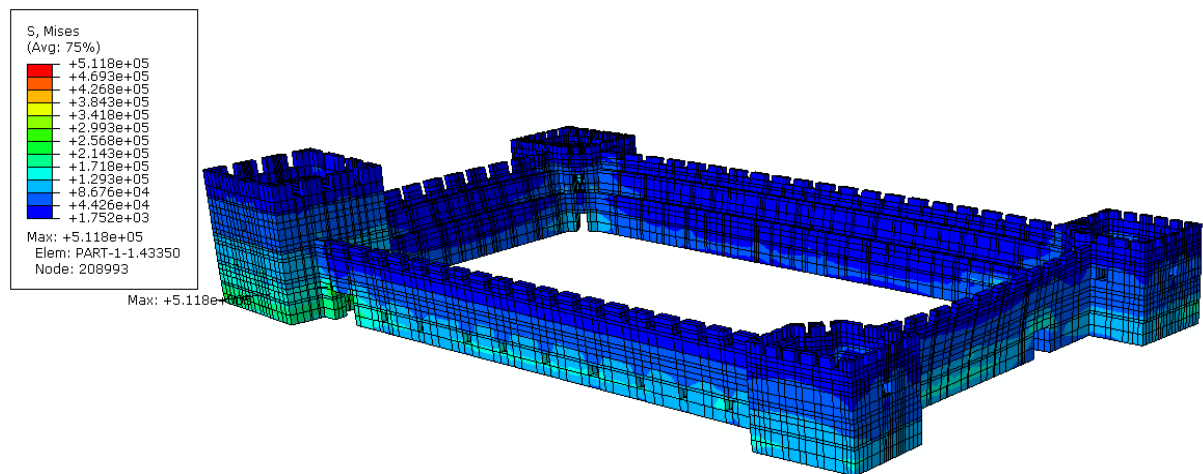


60. πλαστικές παραμορφώσεις από παράλληλη στο ρήγμα μετακίνηση κατά 40εκ. (εσωτερική όψη)

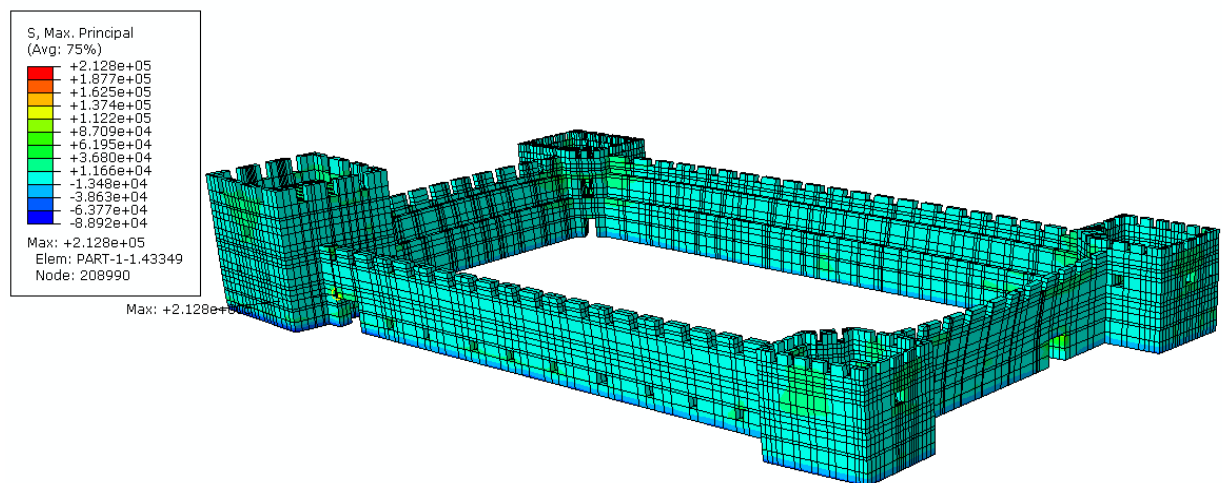
Οι πλαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται εσωτερικά και χαμηλά στις ενώσεις των περιμετρικών τοιχίων με τον ΒΔ πύργο και εντονότερα από την πλευρά του δυτικού τοίχου όπως και στην περίπτωση της υποχώρησης του βάθρου. Οι τιμές της παράλληλης στο ρήγμα μετακίνησης είναι 20εκ. , 25 εκ., 30 εκ., 35 εκ. και 40 εκ. είναι $7,564 \cdot 10^{-5}$, $1,010 \cdot 10^{-4}$, $7,62 \cdot 10^{-5}$, $8,973 \cdot 10^{-5}$ και $8,315 \cdot 10^{-5}$ αντίστοιχα.

4. Συγκρίσεις και Συμπεράσματα

Χάριν έρευνας και σύγκρισης αποτελεσμάτων, δοκιμάσαμε και την περίπτωση του σεισμού με διανεμημένο φορτίο σε όλο τον όγκο του κάστρου, κατεύθυνσης ανατολικής και έντασης ίση με 8% του ιδίου βάρους. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τάσεις για την περίπτωση του σεισμού με τις παραμορφώσεις υπό κλίμακα 12000/1.



61. τάσεις von mises από σεισμό έντασης 8% του ιδίου βάρους



62. συνολικές τάσεις από σεισμό έντασης 8% του ιδίου βάρους

Όπως ήταν αναμενόμενο δεν υπάρχουν πλαστικές παραμορφώσεις. Η δράση των τάσεων λαμβάνει χώρα κατά κύριο λόγο στις βάσεις των περιμετρικών τοιχίων και πύργων. Η μέγιστη τάση von mises έχει τιμή $5,118 \cdot 10^{-5}$, ενώ η μέγιστη τιμή των συνολικών τάσεων είναι $2,128 \cdot 10^{-5}$.

Παρατηρούμε επίσης, πως οι τάσεις που δημιουργούνται από σεισμό έντασης 8% του ιδίου βάρους είναι περίπου υπό δεκαπλάσιες συγκριτικά με τις αντίστοιχες τάσεις από υποχώρηση βάθρου 40 εκατοστών στον ΒΔ πύργο. Αυτό σημαίνει πως μια πιθανή υποχώρηση βάθρου του ΒΔ πύργου θα έπρεπε να αντιμετωπιστεί με ενίσχυση και ιδιαίτερα στην βάση του.

Αναφορές

- [1] Maria E. Stavroulaki, Georgios A. Drosopoulos, Efstathia Tavlopoulou & Nikos Skoutelis, Georgios E. Stavroulakis 'Investigation of the structural behavior of a masonry castle by considering the actual damage'
- [2] M. Betti, G. A. Drosopoulos, G. E. Stavroulakis 'Two nonlinear finite elements models developed for the assessment of failure of masonry arches'
- [3] Yasunori Mizushima, Yoichi Mukai, and Tomoharu Saruwatari 'Detailed FEM analysis for full scale steel structure considering fracture of beam ends'
- [4] Debra F. Laefer, Linh Truong Hong, Aykut Erkal, Jmaes H. Long, Edward J. Cording 'Manufacturing, assembly, and testing, of scaled historic masonry of one-gravity, pseudo-static, soil structure experiments'
- [5] Francesca Ceroni, Stefania Sica, Maria Rosaria Pecce, Angelo Garofano 'Evaluation of the natural vibration frequencies of a historical masonry building accounting for SSI'
- [6] F Ceroni, S. Sica, M Pecce and A. Garofano 'Effect of soil-structure interaction on the dynamic behavior of masonry and RC buildings'
- [7] S. Degli Abati, A. M. D'Altri, D. Ottonelli, G. Castellazzi, S. Cattari, S. de Miranda, S. Lagomarsino 'Seismic assessment of complex assets through nonlinear static analyses: The fortress in San Felice Sul Panaro hit by 2012 earthquake in Italy'
- [8] Glenda Abate, Michele Gatto, Maria Rossella Massimino, Dimitris Pitilakis 'Large scale soil-foundation-structure model in Greece: dynamic tests vs FEM simulation'
- [9] S.V.Chaudhari, M.A.Chakrabarti 'Modeling of concrete for nonlinear analysis using Finite Element code Abaqus'
- [10] Muthukrishnan Sathyamoorthy 'Nonlinear analysis of structures'
- [11] Serena Cattari, Sergio Lagomarsino, Gabriele Milani, Michela Rossi, Michele Simoni, Antonio Tralli 'Non linear modelling of Fornasini tower after the 2012 Emilia earthquake (Italy)'