



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
Δ.Π.Μ.Σ. ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ ΜΝΗΜΕΙΩΝ
Β' ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΠΕΜΒΑΣΕΙΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

**Αποτίμηση της σεισμικής απόκρισης του ναού του Πύθιου Απόλλωνα στην
αρχαία Ακρόπολη της Ρόδου**



Κόνιαρης Βασίλειος – Ευάγγελος

Πολιτικός Μηχανικός

A.M. : 41001913

Επιβλέποντες : Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχολή Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Καθ. Ι. Ψυχάρης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Επικ. Καθ .Χ. Μουζάκης, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, 2019

Επιτροπή Επίβλεψης και Υποστήριξης

- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ (Συνεπιβλέπουσα)
- Καθ. Ι. Ψυχάρης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ (Συνεπιβλέπων)
- Επίκ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ (Συνεπιβλέπων)
- Δρ. Κ. Λαμπρόπουλος, ΕΔΙΠ Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- ΥΔ Μ. Αποστολοπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- ΥΔ Β. Κεραμίδας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- ΥΔ Μ. Κρουσταλλάκη, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Μ. Μιχαηλίδου, Έφορος Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου

Επιτροπή Εξέτασης

- Καθ. Α. Μοροπούλου, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ (Επιβλέπουσα)
- Καθ. Ι. Ψυχάρης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ (Συνεπιβλέπων)
- Επίκ. Καθ. Χ. Μουζάκης, Σχ. ΠΜ ΕΜΠ (Συνεπιβλέπων)
- Αν. Καθ. Α. Μπακόλας, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ
- Ομ. Καθ. Γ. Μπατής, Σχ. ΧΜ ΕΜΠ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας υλοποιήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Προστασία Μνημείων», Β' Κατεύθυνση : Υλικά και Επεμβάσεις Συντήρησης, με αντικείμενο μελέτης τον Ναό του Πύθιου Απόλλωνα στην Αρχαία Ακρόπολη της Ρόδου.

Σκοπός της εργασίας είναι η είναι η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του ναού του Πύθιου Απόλλωνα στην Αρχαία Ακρόπολη της Ρόδου και ο εντοπισμός των περιοχών όπου οι υπερβάσεις των μηχανικών αντοχών του θα προκαλέσουν δομικές βλάβες. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης γίνεται εξαγωγή συμπερασμάτων για την ευστάθεια του μνημείου, καθώς και για την έκταση και σοβαρότητα των βλαβών που σημειώνονται σε αυτό. Εν συνεχεία διατυπώνονται προτάσεις για τη δομική ενίσχυση του με στόχο την βελτίωση της σεισμικής απόκρισης του.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου προς τους επιβλέποντες της μεταπτυχιακής εργασίας μου.

Την Καθ. Α. Μοροπούλου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση του θέματος, την ευκαιρία που μου έδωσε να είμαι μέλος μιας διεπιστημονικής ομάδας μελέτης για την αποκατάσταση ενός μνημείου σε πραγματικό χρόνο και τη συνεχή υποστήριξη της.

Τον Καθ. Ι. Ψυχάρη για τη δυνατότητα που μου έδωσε να μελετήσω ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα, αποκομίζοντας ιδιαίτερα χρήσιμες γνώσεις στο πεδίο της αντισεισμικής μελέτης μέσα από τη συνεργασία μαζί του, τη διαρκή καθοδήγηση και βοήθεια του.

Τον Καθ. Χ. Μουζάκη για την καθοριστική συμβολή του στον προσδιορισμό των μηχανικών αντοχών των εξεταζόμενων υλικών μέσα από την διενέργεια των εργαστηριακών δοκιμών στο εργαστήριο αντισεισμικής τεχνολογίας του ΕΜΠ.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω όλη την ερευνητική ομάδα του ΕΜΠ που με βοήθησε από την πρώτη στιγμή. Τον Υ.Δ. Β. Κεραμίδα για την συνεχή υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια της μεταπτυχιακής, την καθοριστική συνδρομή του στην ολοκλήρωση των πειραματικών δοκιμών και τη διαρκή ενθάρρυνση του. Την Υ.Δ. Μ. Κρουσταλλάκη για την άριστη συνεργασία, την καθοριστική συμβολή της στο στάδιο της ανάλυσης των αποτελεσμάτων και την συνεχή καθοδήγηση της. Τον Υ. Δ. Ε. Αυγενάκη για την κατασκευή του αριθμητικού προσομοιώματος και την παροχή βοήθειας σε τεχνικά ζητήματα, την Υ.Δ. Μ. Αποστολοπούλου για τη βοήθεια της στο πειραματικό σκέλος και τον Δρ. Κ. Λαμπρόπουλο για την παροχή αποτελεσμάτων επί τόπου μετρήσεων στο μνημείο.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω και στην Έφορο Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου κα. Μ. Μιχαηλίδου καθώς και τη δημοτική αρχή και τον τέως δήμαρχο Ρόδου κ. Φ. Χατζηδιάκο που επέτρεψαν την πρόσβαση μας στο μνημείο για τη διενέργεια αυτοψίας. Ακόμα θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τους συμφοιτητές μου με τους οποίους μελετήσαμε από κοινού την αποκατάσταση του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα για την εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε, το σύνολο των συμφοιτητών μου για την υποστήριξη τους, τους φίλους μου για την συμπαράσταση τους.

Και τέλος, φυσικά την οικογένεια μου που ήταν όπως πάντα δίπλα μου και σε αυτή την προσπάθεια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς του ναού του Πύθιου Απόλλωνα στην Αρχαία Ακρόπολη της Ρόδου και ο εντοπισμός των περιοχών όπου οι υπερβάσεις των μηχανικών αντοχών των υλικών του θα προκαλέσουν δομικές βλάβες σε αυτόν. Μέσα από την αποτίμηση της ευστάθειας και της παθολογίας του μνημείου γίνεται ο προσδιορισμός των κατάλληλων μέτρων δομικής ενίσχυσης για την σεισμική θωράκιση του.

Απαραίτητη για τη μελέτη του μνημείου ήταν η κατασκευή ακριβούς αριθμητικού προσομοιώματος με τη χρήση του κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, στο οποίο έγινε εισαγωγή της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων του. Η μελέτη του ναού, σύμφωνα με την πρόταση αποκατάστασης του, γίνεται για τον αναστηλωμένο φορέα που θα επαναφέρει την αρχική πολυσπονδυλωτή λειτουργία έναντι της υφιστάμενης μονολιθικής. Επομένως δεδομένης της πολυσπονδυλωτής λειτουργίας η σεισμική ανάλυση πραγματοποιήθηκε θεωρώντας ελαστική τη συμπεριφορά των υλικών και μη γραμμική τη συμπεριφορά στις θέσεις αρμών, ώστε να ληφθούν υπόψη τα φαινόμενα του λικνισμού και της ολίσθησης. Επιλέχθηκαν σεισμικά σενάρια κοντινού και μακρινού πεδίου, τα οποία παρουσιάζουν συμβατότητα με τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής του μνημείου. Οι τιμές των μηχανικών αντοχών για τα υλικά που εξετάστηκαν προέκυψαν ύστερα από εργαστηριακές δοκιμές.

Στο φορέα που δημιουργήθηκε στο υπολογιστικό μοντέλο επιβλήθηκαν οι σεισμικές διεγέρσεις που επιλέχθηκαν. Εν συνεχεία έγινε διερεύνηση της ευστάθειας του και εντοπίστηκαν οι περιοχές των μελών της κατασκευής στις οποίες αναμένεται υπέρβαση της θλιπτικής ή της εφελκυστικής αντοχής των υλικών από τις τάσεις που αναπτύσσονται, με έμφαση αυτές που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες και οδηγούν σε σημαντικές βλάβες. Για την επιβεβαίωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση, έγινε διερεύνηση του βαθμού στον οποίο ανταποκρίνονται στην παθολογία του μνημείου. Έτσι, μέσα από την κατανόηση των μηχανισμών που οδηγούν σε αστοχία έγινε εξαγωγή συμπερασμάτων για την έκταση και τη σοβαρότητα των βλαβών που αναμένονται να συμβούν στους σεισμούς που εξετάστηκαν, ώστε να διατυπωθούν προτάσεις για την στατική ενίσχυση και δομική αποκατάσταση του.

Μια σύνοψη των περιεχομένων της παρούσας εργασίας ανά κεφάλαιο πραγματοποιείται παρακάτω :

Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε γενικά θεωρητικά στοιχεία που αφορούν τη σεισμική συμπεριφορά, τον τρόπο δόμησης και την παθολογία των αρχαίων μνημείων και τις αρχές που πρέπει να διέπουν τις επεμβάσεις αποκατάστασης τους.

Στο 2^ο Κεφάλαιο, περιγράφονται τα ειδικά θεωρητικά στοιχεία που αφορούν το Ναό του Πύθιου Απόλλωνα στη Ρόδο. Γίνεται παράθεση ιστορικών και αρχιτεκτονικών στοιχείων για το ναό, αναφορά στο δομικό σύστημα του, περιγραφή της ιταλικής αναστήλωσης κατά την οποία πήρε τη σημερινή μορφή του και καταγραφή των φυσικοχημικών φθορών και δομικών βλαβών του.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που

πραγματοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής, θλιπτικής και διατμητικής αντοχής των υλικών που αναμένεται να χρησιμοποιηθούν κατά την αποκατάσταση του μνημείου.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του αριθμητικού προσομοιώματος που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη του ναού, παρουσίαση των παραδοχών που λήφθηκαν σε αυτό και καταγραφή των χαρακτηριστικών των σεισμικών καταγραφών που επιλέχθηκαν για την ανάλυση του μνημείου.

Στο 5^ο Κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν για την αποτίμηση της ευστάθειας του ναού υπό την επιβολή σεισμικών καταπονήσεων, γίνεται προσδιορισμός των περιοχών όπου οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπερβαίνουν τις μηχανικές αντοχές των υλικών που θεωρήθηκαν ότι θα χρησιμοποιηθούν στο μνημείο καθώς σε αυτές τις περιοχές αναμένεται να εκδηλωθούν βλάβες.

Στο 6^ο Κεφάλαιο γίνεται εξαγωγή συμπερασμάτων με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την αποτίμηση της ευστάθειας του μνημείου και της καταλληλότητας των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στην αποκατάσταση του.

Στο 7^ο Κεφάλαιο με βάση τα συμπεράσματα που προέκυψαν, επιχειρείται η διατύπωση προτάσεων για την ενίσχυση της φέρουσας ικανότητας του μνημείου και την θωράκιση του έναντι σεισμού.

Όπως καταγράφεται και στο κεφάλαιο με τα συμπεράσματα, από την ανάλυση προκύπτει η ύπαρξη σημαντικής πιθανότητας για τη δημιουργία σημαντικών δομικών βλαβών τόσο στα αρχαία, όσο και στα νέα δομικά μέλη του ναού κατά τη διάρκεια μίας ισχυρής σεισμικής διέγερσης. Οι βλάβες αυτές μπορεί να είναι εκτεταμένες και μέσω της απότμησης, αποσάθρωσης και θραύσης μεγάλων τμημάτων του ναού να οδηγήσουν ακόμα και σε μερική ή ολική κατάρρευση του. Για την θωράκιση του μνημείου έναντι των βλαβών αυτών προτείνεται η χρήση ενεμάτων τόσο στον νέο, όσο και στον νέο αρχαίο λίθο εφόσον αυτό είναι δυνατόν, καθώς και η τοποθέτηση πρόσθετου σπλισμού από ράβδους τιτανίου για τη σύνδεση των αρχαίων με τους νέους λίθους καθώς το κονίαμα σύνδεσης δεν επαρκεί.

ABSTRACT

The main objective of this thesis is the investigation of the seismic response of the temple of Pythian Apollo in the ancient Acropole in Rhodes Island and the determination of the regions of the structural members of the temple, where the exceedance of the selected materials strength will cause serious damages. The prediction of the overall stability and the vulnerability of the monument provides the required information for the determination of the suitable methods of structural reinforcement.

The study of the monument demanded the development of a precise numerical model with the use of finite element code ABAQUS, which allows the insertion of the geometry of the temple and the selected materials properties. The analysis of the temple according to the proposed restoration of the monument is based on the original multidrum function of the columns, instead of the current monolithic one. By result, the seismic analysis considers elastic mechanical behavior of the materials used and nonlinear behavior in the mortar between the ancient and the new parts, as well as the interface between the drums, in order to allow rocking and sliding. The analysis was performed ground motions recorded both near and far the fault, compatible with the seismicity and the tectonics and of the region. The material strength values considered in the analyses were derived from laboratory tests.

To estimate the overall stability of the temple the selected seismic excitations were applied to the model. The regions, in which the compressive or the tensile strength of both the ancient stone and the new stone is exceeded, and especially those across the interfaces, were determined. To confirm that the predicted damage derived from the analysis is compatible with the damage caused by a strong earthquake, the correlation between the stress exceedances predicted by the numerical model and the existing damage in the ancient parts of the monument was evaluated. The volume of the expected damages and their effect on increasing the vulnerability of the structure is evaluated, in order to conclude to the suitable methods of structural reinforcement of the monument.

A summary of the contents of this thesis divided by chapter is given below:

The 1st chapter includes the general theoretical information about the seismic response, the structural system and the pathology of the ancient monuments and the principles that should be taken in consideration during the restoration process.

In the 2nd chapter, the specific theoretical information concerning the Temple of Pythian Apollo in Rhodes Island is presented. This includes historical and architectural information about the temple, the description of its structural system and the diagnosis of the structural and physicochemical damages that are evident on both the ancient and the new materials of the structural members.

The 3rd chapter contains the results of the laboratory tests for the investigation of the compressive, tensile and shear strength of the materials that are expected to be used during the restoration of the monument.

The 4th chapter includes the complete description of the numerical model used for the

study of the temple, the assumptions made and the characteristics of the seismic excitations that were selected for the analysis presented in this study.

In the 5th chapter, the overall stability of the temple is determined based on the results of the analysis for the selected seismic excitations, as long as the damages expected due to the stress levels that will exceed the strength of the materials used in the structural members of the monument.

In the 6th chapter conclusions are drawn, based on the latter results of the analysis, about the stability of the monument and the adequacy or not of the strength of the proposed materials that are expected to be used in the restoration.

In the 7th chapter based on the conclusions that were presented in the previous chapter, suggestions are made in order to reinforce the overall stability of the monument.

As described in the conclusions, there is a significant possibility that severe structural damages will be observed in both the ancient and the new stone parts of the structural members of the temple during a strong ground motion. These damages can be extensive and could result not only in local cracking, small edge cut-offs and detachment of small pieces but, also in through-and-through cuts, leading to loss of support for the superstructure and by consequence to partial or total collapse. To prevent these damages a useful step would be the use of grout, on both the new and the ancient stone, that could increase the total strength of the structure. To ensure the integrity of the connected members of the temple, the addition of reinforcement with titanium bars seems necessary, due to the low strength and poor adhesion of the connective mortar with the new and ancient materials.

Πίνακας περιεχομένων

1.ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ	10
1.1 Σεισμική συμπεριφορά και παθολογία αρχαίων ναών	10
1.2 Βασικές αρχές Αποκατάστασης	13
2. ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ	18
2.1 Ιστορικά στοιχεία του ναού του Πύθιου Απόλλωνα	18
2.2 Αρχιτεκτονικά στοιχεία του ναού του Πύθιου Απόλλωνα	18
2.3 Περιγραφή επεμβάσεων κατά την Ιταλική Αναστήλωση	21
2.4 Δομικά υλικά και παθολογία του ναού του Πύθιου Απόλλωνα	25
2.5 Δομικό σύστημα και ευστάθεια στο ναό του Πύθιου Απόλλωνα	27
2.5.1 Αρχαίο δομικό σύστημα.....	27
2.5.2 Δομικές βλάβες	28
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	31
3.1 Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς εξεταζόμενων υλικών	31
3.1.1 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης δίσκων (Brazilian test).....	32
3.1.2 Δοκιμή θλιπτικής αντοχής.....	33
3.3.3 Δοκιμή πρόσφυσης κονιάματος αρμού	35
4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	38
4.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων	38
4.2 Προσομοίωμα υπολογισμού	39
4.2.1 Μεθοδολογία αποκατάστασης	39
4.2.2 Εισαγωγή γεωμετρίας φορέα	41
4.2.3 Παραδοχές μοντέλου	45
4.3 Στάδια ανάλυσης	47
4.4 Επιλογή σεισμικών διεγέρσεων.....	48
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	56
5.1 Συνολική ευστάθεια – Κίνδυνος κατάρρευσης.....	56
5.2 Τάσεις που αναπτύσσονται – Τοπικές αστοχίες.....	64
5.2.1 Αρχαίοι λίθοι.....	67
5.2.2 Νέοι λίθοι.....	75
5.2.3 Τεχνητοί λίθοι.....	86
5.2.4 Κονιάματα σύνδεσης.....	93
5.2.5 Μεταλλικοί σύνδεσμοι θριγκού.....	96
5.3 Επιβεβαίωση αποτελεσμάτων από υφιστάμενες βλάβες.....	97
5.3.1 Αποτμήσεις ακμών σπονδύλων	98
5.3.2 Αποφλοίωση τμήματος της εξωτερικής παρειάς των σπονδύλων	99
5.3.3 Θραύση σπονδύλων.....	99
5.3.4 Απότμηση τμημάτων και βλάβες στα κιονόκρανα	100

5.3.5 Βλάβες στους νέους λίθους της ιταλικής αναστήλωσης	101
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	102
7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	105
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	107
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	110
Π.1 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε αρχαίους λίθους	110
Π.1.1 Εφελκυσμός	110
Π.1.2 Θλίψη	126
Π.2 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε νέους λίθους.....	139
Π.2.1 Εφελκυσμός	139
Π.2.2 Θλίψη	169
Π.3 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε τεχνητούς λίθους.....	196
Π.3.1 Εφελκυσμός	196
Π.3.2 Θλίψη	208
Π.4 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε κονιάματα σύνδεσης	215
Π.4.1 Εφελκυσμός	215
Π.4.2 Θλίψη	223

1. ΓΕΝΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

1.1 Σεισμική συμπεριφορά και παθολογία αρχαίων ναών

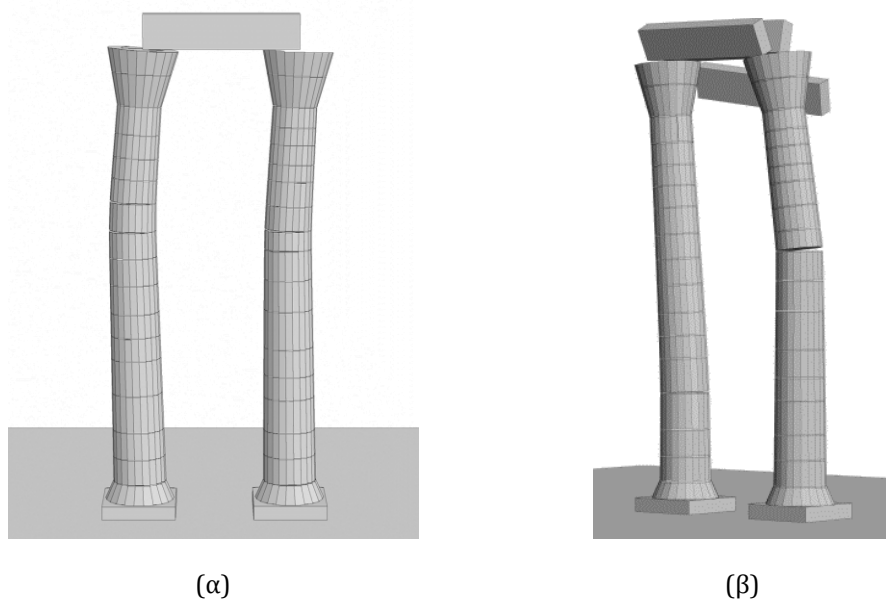
Οι αρχαίοι ναοί δομούνταν με τη χρήση ανεξάρτητων φυσικών λίθων. Οι δομικοί αυτοί λίθοι λαξεύονταν επιμελώς ώστε να παρουσιάζουν άριστη επαφή μεταξύ τους και εν συνεχεία γινόταν η τοποθέτηση του ενός πάνω στον άλλο, εν ξηρώ, απουσία συνδετικού υλικού. Επομένως είχαν συμπεριφορά σπονδυλωτών κατασκευών. Λόγω του μεγάλου μεγέθους των λίθων που επιλέγονταν, οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονταν ήταν ικανές να συγκρατήσουν το μνημείο σε περιπτώσεις σεισμικών καταπονήσεων, διασφαλίζοντας την δομική ευστάθεια του. Παράλληλα ο λικνισμός και η ολίσθηση που αναπτύσσονταν μεταξύ των μελών των ναών κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης λειτουργούσαν σαν ένας μηχανισμός απόσβεσης, απορροφώντας σημαντικό μέρος της σεισμικής ενέργειας.

Η συμμετρική δομή των ναών, και εν γένει των αρχαίων κτισμάτων συνέβαλε θετικά στην ευστάθειά τους. Τα ίδια βάρη του θριγκού μεταβιβάζονταν μέσω των δοκών του επιστυλίου στους κίονες και τους τοίχους του ναού και μέσω αυτών στη θεμελίωση και εν τέλει στο έδαφος. Τα επιστύλια λειτουργούσαν σαν αμφιέριστες δοκοί, μεταβιβάζοντας τα κατακόρυφα φορτία στους κίονες και αυξάνοντας τη δυσκαμψία του φορέα.

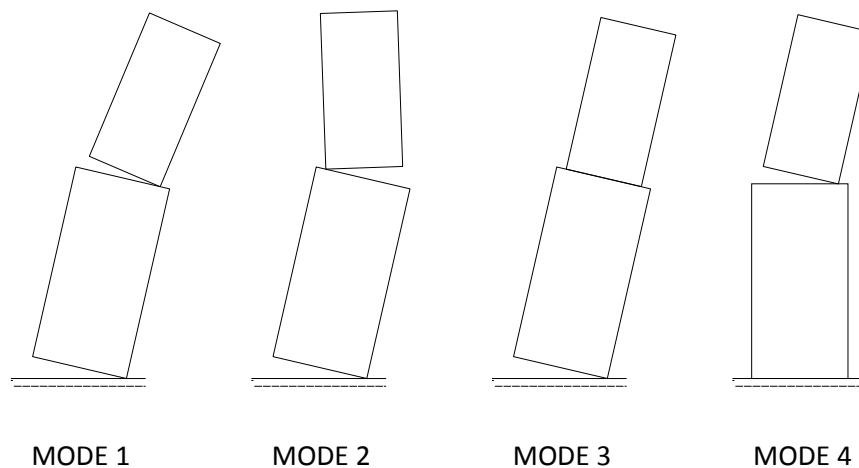
Για την μεταφορά και τοποθέτηση των σπονδύλων χρησιμοποιούνταν πόλοι και εμπόλια. Πρόκειται για ξύλινους συνδέσμους που δεν συνείσφεραν όμως στην παραλαβή των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονταν από τα οριζόντια σεισμικά φορτία. Σε λίγες περιπτώσεις, κυρίως κατά την ελληνιστική και ρωμαϊκή εποχή, για τη σύνδεση των κατακόρυφων μελών του ναού χρησιμοποιήθηκαν και μεταλλικοί γόμφοι οι οποίοι αν είναι επαρκώς σφηνωμένοι, όπως στο Ολυμπίο της Αθήνας, παραλάμβαναν τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονταν.

Όπως αναφέρθηκε, η δεσπόζουσα μορφή ταλάντωσης στις περιπτώσεις κίωνων και κιονοστοιχιών είναι ο λικνισμός (Psycharis *et al.* 2000 & 2003, Mouzakis *et al.* 2002, Parantonopoulos *et al.* 2002, Dasiou *et al.* 2009a&b). Το πλήθος των πιθανών μορφών λικνισμού αυξάνεται εκθετικά συναρτήσει του πλήθους των σπονδύλων. Στο ανώτερο τμήμα των κίωνων σημειώνεται ολίσθηση μεταξύ των σπονδύλων, καθώς οι επιταχύνσεις που αναπτύσσονται είναι ικανές να υπερνικήσουν τις δυνάμεις τριβής. Επίσης σε σπονδύλους κυκλικής διατομής, όπως είναι οι σπόνδυλοι των κίωνων, συμβαίνει και περιστροφική κίνηση (wobbling).

Ένας πολυσπόνδυλος κίονας παρουσιάζει πολλές μορφές ταλάντωσης. Μπορεί να συμβεί άνοιγμα αρμών ταυτόχρονα σε πολλούς σπονδύλους, ή σε ορισμένες μόνο θέσεις και ολόκληρα τμήματα του κίονα να συμπεριφέρονται σα να ήταν ήταν μονολιθικά. Στις εικόνες που ακολουθούν φαίνονται οι μορφές ταλάντωσης των σπονδύλων των κίωνων.



Εικόνα 1. Αναπαράσταση σεισμικής απόκρισης κίονων: (α) άνοιγμα αρμών σε πολλές θέσεις, (β) άνοιγμα αρμών σε περιορισμένες θέσεις (Psycharis 2007).



Εικόνα 2. Οι 4 μορφές ταλάντωσης ενός συστήματος δύο στερεών σωμάτων για επίπεδη κίνηση (Psycharis 1990).

Οι αρχαίοι ναοί ως σπονδυλωτές κατασκευές παρουσιάζουν πολύπλοκη, μη-γραμμική σεισμική συμπεριφορά. Ακόμα και μικρές μεταβολές στην γεωμετρία του φορέα και τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης μπορεί να παρουσιαστεί πολύ διαφορετική απόκριση. Δεν διαθέτουν ιδιομορφές με την κλασική έννοια καθώς η περίοδος ελεύθερων ταλαντώσεων ενός λικνιζόμενου κίονα εξαρτάται από το πλάτος της ταλάντωσης και μειώνεται με το πλήθος των κρούσεων που συμβαίνουν στη βάση.

Η συμπεριφορά τους είναι πλήρως μη γραμμική αφού κάθε ταλάντωση που κάνει ο φορέας κατά την υποβολή του σε σεισμική καταπόνηση έχει διαφορετική μορφή όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Έτσι μια σπονδυλωτή κατασκευή μπορεί να ανατρέπεται σε ένα σεισμό αλλά ταυτόχρονα να διατηρεί την ευστάθειά του στον ίδιο σεισμό με τη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση του μεγεθυμένη με κατάλληλο συντελεστή.

Οι πλέον καθοριστικοί παράγοντες για την σεισμική απόκριση των σπονδυλωτών κατασκευών είναι η δεσπόζουσα περίοδος της σεισμικής κίνησης και το μέγεθος της

κατασκευής. Κατά κανόνα κατασκευές μεγάλου μεγέθους παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευστάθεια από αντίστοιχες παρόμοιας γεωμετρίας, αλλά μικρότερου μεγέθους.

Η αύξηση της περιόδου της εδαφικής κίνησης έχει δυσμενή επίδραση στην ευστάθεια των αρχαίων ναών. Ένας υψίσυχνος σεισμός μπορεί να προκαλέσει περιορισμένες παραμορφώσεις στην κατασκευή λόγω της ολίσθησης των σπονδύλων του. Αντίθετα ένας μακροπερίοδος σεισμός με ίδια ή ακόμα και μικρότερη μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, στην οποία κυριαρχεί ο λικνισμός, μπορεί να οδηγήσει ακόμα και στην κατάρρευση του ναού.

Τα συμπεράσματα αυτά για την απόκριση των αρχαίων μνημείων προκύπτουν από τη μελέτη πλήθους θεωρητικών και πειραματικών ερευνών (Psycharis 1990, Psycharis *et al.* 2000, Psycharis *et al.* 2003, Psycharis *et al.* 2013, Mouzakis *et al.* 2002, Allen *et al.* 1986, Sinopoli 1989, Winkler *et al.* 1995, Konstantinidis & Makris 2005, Papaloizou & Komodromos 2009, Papantonopoulos *et al.* 2002, Dasiou *et al.* 2009a&b).

Η ευαισθησία της απόκρισης των αρχαίων ναών ακόμα και σε μικρές αλλαγές των παραμέτρων που αφορούν τη γεωμετρική διαμόρφωση της κατασκευής και τα χαρακτηριστικά της διέγερσης έχει επιβεβαιωθεί και πειραματικά, αφού επανάληψη του ίδιου πειράματος έδωσε αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα (Mouzakis *et al.* 2002, Dasiou *et al.* 2009a). Επίσης η ευαισθησία φαίνεται και από την σημαντική τροποποίηση των αποτελεσμάτων για μικρή μεταβολή των παραμέτρων κατά την αριθμητική ανάλυση σε υπολογιστικό προσομοίωμα.

Συμπερασματικά τα αρχαία μνημεία παρουσιάζουν μια ικανοποιητική απόκριση σε σεισμικές διεγέρσεις παρά την πολύπλοκη, μη γραμμική συμπεριφορά τους, η οποία απορρέει από την σπονδυλωτή δομή τους. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στη διάσωση πολλών αρχαίων κτισμάτων μέχρι σήμερα. Όμως οι βλάβες που έχουν σημειωθεί στον φέροντα οργανισμό τους με το πέρασμα του χρόνου είναι πολλές και οφείλονται σε σεισμικές καταπονήσεις, φυσική φθορά των υλικών τους, ελλιπή συντήρηση τους και μη συμβατές επεμβάσεις αποκατάστασης τους. Οι βλάβες αυτές εκδηλώνονται με τη μορφή απότμησης γωνιακών τμημάτων τους, μόνιμης μετακίνησης σπονδύλων, αποσάθρωσης επιφανειών, θραύσης μελών που οδηγεί σε απώλεια στήριξης των υπερκείμενων μελών, διάρρηξης λίθων από την οξείδωση μεταλλικών συνδέσμων, κρυστάλλωση αλάτων και κυψέλωση των επιφανειών τους καθώς και πολλών άλλων μορφών τοπικής αστοχίας. Τέτοιες βλάβες μειώνουν κατακόρυφα την ευστάθεια του μνημείου σε ένα ενδεχόμενο ισχυρό σεισμό και μπορεί να οδηγήσουν σε περαιτέρω βλάβες στο αυθεντικό υλικό τους, σε ανατροπή και αποκόλληση τμημάτων τους, αλλά ακόμα και σε μερική ή ολική κατάρρευση τους. Για τον λόγο αυτό, τέτοιες βλάβες χρήζουν άμεσης αποκατάστασης με τη χρήση κατάλληλων τεχνικών ενίσχυσης που θα βελτιώσουν την φέρουσα ικανότητα του μνημείου και θα το θωρακίσουν έναντι ισχυρών σεισμικών δράσεων.

1.2 Βασικές αρχές Αποκατάστασης

Η αποκατάσταση των αρχαίων ναών και των μνημείων εν γένει, που αποτελούν πανανθρώπινη πολιτιστική παρακαταθήκη ανεκτίμητης αξίας, λόγω της σπουδαιότητας τους πρέπει να πραγματοποιείται βάσει κάποιων σαφώς ορισμένων προτύπων και κάποιων κοινά αποδεκτά αρχών. Μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα οι επεμβάσεις στα μνημεία δεν γινόταν βάσει μίας ενιαίας καταγεγραμμένης θεώρησης. Στηριζόταν στην εμπειρία προηγούμενων επεμβάσεων και τις θεωρητικές προσεγγίσεις που κυριαρχούσαν σε κάθε περίοδο.

Μια πρώτη απόπειρα καταγραφής των θεωρητικών και εμπειρικών προσεγγίσεων στην αποκατάσταση των μνημείων έγινε με τη σύνταξη του “Χάρτη των Αθηνών” το 1931 κατά τη διάρκεια της Διεθνούς Συνδιάσκεψης των Αθηνών του Οκτωβρίου του 1931. Σε αυτό το κείμενο τονίζεται η σημασία της διάσωσης των μνημείων, τα οποία αποτελούν στοιχείο της πολιτιστικής κληρονομιάς και η αναγκαιότητα λήψης συντονισμένης κρατικής μέριμνας για το σκοπό αυτό. Προκρίνεται τη διατήρηση της αρχικής μορφής και χρήσης των μνημείων, και σε περίπτωση που η αποκατάσταση κρίνεται αναγκαία θα πρέπει να σέβεται και να μην αλλοιώνει την φυσιογνωμία τους. Η χρήση νέων αρχιτεκτονικών μελών θα πρέπει να αποφεύγεται αλλά σε περίπτωση που είναι απαραίτητη, τότε αυτά θα πρέπει να είναι διακριτά. Αναδεικνύει την αναγκαιότητα της διεπιστημονικής συνεργασίας.

Τον “Χάρτη των Αθηνών” διαδέχτηκε ο “Χάρτη της Βενετίας” (ICOMOS, 1965), ο οποίος διατυπώθηκε κατά τη διάρκεια του Β’ Διεθνούς Συνεδρίου των Αρχιτεκτόνων και των Τεχνικών των Ιστορικών Μνημείων στη Βενετία το Μάιο του 1964. Ο Χάρτης αυτός, ξεκινάει στη βάση της συνέχισης του “Χάρτη των Αθηνών” επικαιροποιώντας το περιεχόμενο του με βάση τα νέα δεδομένα και τις θεωρήσεις της εποχής. Στο κείμενο του διατυπώνεται η αναγκαιότητα της διαρκούς συντήρησης των μνημείων και υπογραμμίζεται η σημασία της διεπιστημονικής προσέγγισης για τη διάσωση τους. Η αποκατάσταση θα πρέπει να σέβεται την αρχική μορφή του μνημείου και να μην την αλλοιώνει με τροποποιήσεις και προσθήκες. Οι επεμβάσεις θα πρέπει να αποφεύγονται και σε περίπτωση που είναι αναγκαίες να πραγματοποιούνται μέχρι το βαθμό που τεκμαίρεται ότι ανταποκρίνονται στην αρχική μορφή του μνημείου και σε καμία περίπτωση να βασίζονται σε υποθέσεις και εκτιμήσεις. Όλες οι οικοδομικές ιστορικές φάσεις του μνημείου αποτελούν μέρος της εικόνας του και θα πρέπει να γίνονται σεβαστές. Η χρήση νέων μελών και υλικών για συμπλήρωση των αυθεντικών θα πρέπει να αποφεύγεται και σε περίπτωση που είναι αναπόφευκτη θα πρέπει να είναι εμφανώς διακριτή στον επισκέπτη. Θεμελιώνεται η αναγκαιότητα της τεκμηρίωσης της επέμβασης. Τέλος η ανακατασκευή απαγορεύεται και προκρίνεται η αναστήλωση και αποκατάσταση.

Στη συνέχεια με τη Διακήρυξη του Άμστερνταμ (1975) διατυπώθηκε η έννοια της ολοκληρωμένης διατήρησης, που περιλαμβάνει πέρα από την αναγκαιότητα προστασίας του μεμονωμένου μνημείου και το περιβάλλον του, καθώς και ολόκληρες περιοχές και πόλεις πολιτιστικού ενδιαφέροντος.

Βάσει αυτών που αναφέρθηκαν, οι επεμβάσεις που πραγματοποιούνται σε μνημεία σήμερα πρέπει να διέπονται από τη γενικότερη δεοντολογία των επεμβάσεων

συντήρησης και αποκατάστασης, όπως αυτή αποτυπώνεται στην Χάρτα της Βενετίας και με βάση και τις σύγχρονες προσεγγίσεις. Θα πρέπει να διασφαλίζεται η διατήρηση της αυθεντικότητας του μνημείου και η αντιστρεψιμότητα της επέμβασης στο μέτρο του δυνατού. Ιδιαίτερη σημασία θα πρέπει να δίνεται στη διεπιστημονική προσέγγιση που είναι αναγκαία για την ολοκληρωμένη προστασία των μνημείων.

Σε ότι αφορά τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν, θα πρέπει να προσομοιάζουν τις ορυκτολογικές, φυσικοχημικές και μηχανικές ιδιότητες των αυθεντικών υλικών ώστε να υπάρχει συμβατότητα μεταξύ τους. Σε ότι αφορά τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά ζητούμενο είναι η ύπαρξη ανάλογης μικροδομής και η χημική συγγένεια με ιστορικά υλικά ώστε να διασφαλίζεται η χημική πρόσφυση πέρα από τη μηχανική και η απουσία παραγωγής παραπροϊόντων που μπορεί να βλάψουν τα υπό γειτνίαση δομικά υλικά. Σε ότι αφορά τα μηχανικά χαρακτηριστικά θα πρέπει να παρουσιάζουν αντίστοιχες τιμές εφελκυστικών, θλιπτικών αντοχών καθώς και αντοχής σε κάμψη με το ιστορικό υλικό και παρόμοιο μέτρο ελαστικότητας και συντελεστή θερμικής διαστολής. Ακόμα θα πρέπει να είναι συμβατά από αισθητικής πλευράς και να έχει μελετηθεί η συμπεριφορά και η ανθεκτικότητα τους στο χρόνο (Rodrigues & Grossi, 2007).

Οι επεμβάσεις συντήρησης και αποκατάστασης σε ένα μνημείο θα πρέπει να εντάσσονται στο πλαίσιο ενός γενικότερου στρατηγικού σχεδιασμού, που θα επιτρέπει την καταγραφή και αξιολόγηση της κατάστασης στην οποία αυτό βρίσκεται, που μετά από κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν να καταλήγει στην κατάστρωση ενός ολοκληρωμένου σχεδίου δράσης. Το σχέδιο αυτό θα προέρχεται έπειτα από αναλυτική περιγραφή της αναγκαιότητας επέμβασης, διερεύνηση και επιλογή της βέλτιστης πρότασης αποκατάστασης και αιτιολογημένη τεκμηρίωση της αναμενόμενης επίδρασης που θα έχει στο μνημείο. Για την επίτευξη ενός ολοκληρωμένου σχεδίου επέμβασης κρίνεται αναγκαία η διεπιστημονική συνεργασία όλων των σχετικών με το αντικείμενο ειδικοτήτων και η υιοθέτηση μίας πρότυπης μεθοδολογίας επεμβάσεων.

Μία τέτοια μεθοδολογία περιλαμβάνει τα ακόλουθα στάδια :

- Προκαταρκτική μελέτη
- Διαγνωστική μελέτη
- Τελική μελέτη επεμβάσεων

Αρχικά κατά το στάδιο της προκαταρκτικής μελέτης συλλέγονται όλα τα αναγκαία στοιχεία που αφορούν το μνημείο και είναι απαραίτητα για τη μελέτη του. Πραγματοποιείται μακροσκοπικός έλεγχος μέσω του οποίου γίνεται μία πρώτη αναγνώριση και καταγραφή των υλικών που απαρτίζουν το μνημείο, των τύπων της φυσικοχημικής φθοράς που εντοπίζονται σε αυτό και τροποποιήσεις που προέκυψαν κατά τις ιστορικές φάσεις του ή από προηγούμενες επεμβάσεις. Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν μια πρώτη εκτίμηση της κατάστασης του μνημείου και επιτρέπουν την κατάστρωση του σχεδίου δράσης που θα ακολουθηθεί κατά την επέμβαση.

Ακολουθεί η διαγνωστική μελέτη αφορά τη μελέτη ιδιοτήτων των αυθεντικών υλικών και των μηχανισμών φθοράς τους. Της διαγνωστικής μελέτης έπεται η τελική μελέτη επεμβάσεων που περιλαμβάνει την αρχιτεκτονική μελέτη αποκατάστασης, τη μελέτη

δομικής αποκατάστασης και ενίσχυσης του μνημείου, τη γεωτεχνική μελέτη, τη μελέτη επιλογής των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν και τη μελέτη των επεμβάσεων καθαρισμού και συντήρησης που θα εφαρμοστούν στο μνημείο.

Ειδικότερα για τη διαγνωστική μελέτη, το πρώτο στάδιο είναι αυτό της τεκμηρίωσης, που περιλαμβάνει :

- την ιστορική τεκμηρίωση
- τη γεωμετρική τεκμηρίωση,
- την αρχιτεκτονική αποτύπωση
- την καταγραφή των υλικών,
- τη χαρτογράφηση φθορών
- την καταγραφή προηγούμενων επεμβάσεων
- την ανάλυση δομικού συστήματος και βλαβών

Η ιστορική τεκμηρίωση αντλεί πληροφορίες έπειτα από ενδελεχή βιβλιογραφική και ιστορική έρευνα και αναζήτηση φωτογραφικών αρχείων για την τεκμηρίωση της τόσο υφιστάμενης κατάστασης, όσο και της χρονικής εξέλιξης του μνημείου και των ιστορικών οικοδομικών φάσεων του.

Η αρχιτεκτονική αποτύπωση έχει στόχο την σχεδιαστική αποτύπωση του μνημείου (όψεις, κατόψεις, τομές), την καταγραφή της θέσης και του προσανατολισμού του, την μορφολογική τυπολογική ανάλυση του, τη μελέτη της λειτουργικής του διάρθρωσης και την μελέτη των οικοδομικών του φάσεων. την εμπειριστατωμένη διεύρυνση των γνώσεων για τις συνθήκες κατασκευής, τις οικοδομικές φάσεις και τα οικοδομικά προβλήματα της υπάρχουσας κατάστασης. Αποτελείται από πέντε στάδια, που όμως δεν συνιστούν υποχρεωτικά χωριστές φάσεις.

Η γεωμετρική τεκμηρίωση επιτρέπει την ακριβή καταγραφή της μορφής και της θέσης του μνημείου. Με τις σύγχρονες φωτογραμμετρικές τεχνικές μπορεί να παράγει εικονιστικά προϊόντα υψηλής ποιότητας τόσο σε δισδιάστατο, όσο και σε τρισδιάστατο επίπεδο.

Το επόμενο στάδιο αφορά τον μακροσκοπικό έλεγχο μέσω του οποίου γίνεται μία πρώτη αναγνώριση και καταγραφή των υλικών που απαρτίζουν το μνημείο, των τύπων της φυσικοχημικής φθοράς που εντοπίζονται και τροποποίησης στο μνημείο που προέκυψαν κατά τις ιστορικές φάσεις του ή από προηγούμενες επεμβάσεις. Αυτές οι πληροφορίες επιτρέπουν μια πρώτη εκτίμηση της κατάστασης του μνημείου και επιτρέπουν την κατάστρωση του σχεδίου δράσης που θα ακολουθηθεί κατά την επέμβαση.

Η δομοστατική ανάλυση του μνημείου αποσκοπεί στην καταγραφή του δομικού συστήματος του μνημείου. Με αυτή προσδιορίζεται ο φέρων οργανισμός μέσω του οποίου πραγματοποιείται η μεταφορά των φορτίων. Εξετάζεται η ευστάθεια του μνημείου και προσδιορίζεται η αντοχή και οι διαστάσεις των δομικών μελών του. Γίνεται καταγραφή των βλαβών και των μηχανισμών αστοχίας που αναπτύσσονται. Εφόσον κρίνεται αναγκαίο πραγματοποιείται γεωτεχνική μελέτη. Στη συνέχεια με βάση τα στοιχεία που αντλούνται γίνεται προσομοίωση του μνημείου σε αριθμητικό υπολογιστικό μοντέλο. Μετά από κατάλληλη εισαγωγή της γεωμετρίας, των υλικών και των

παραμέτρων του μνημείου, καθώς και μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας της περιοχής στην οποία βρίσκεται, από την αριθμητική ανάλυση που πραγματοποιείται για κατάλληλες σεισμικές διεγέρσεις εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με την σεισμική απόκριση του, την ευστάθεια του και την κατανομή των τάσεων και παραμορφώσεων που αναπτύσσονται.

Το επόμενο στάδιο της διαγνωστικής μελέτης είναι οι επί τόπου μακροσκοπικές παρατηρήσεις για την κατάσταση των υλικών. Ερευνάται η κατάσταση των υλικών, η τυπολογία των φαινομένων φθοράς και γίνεται καταγραφή τυχόν επεμβάσεων.

Ακολουθεί η τεκμηρίωση, παρακολούθηση και μέτρηση περιβαλλοντικών παραμέτρων. Οι παράμετροι αυτοί αφορούν το μικροκλίμα (θερμοκρασία, υγρασία, βροχοπτώσεις, ταχύτητα ανέμων) , τους ρύπους (στερεολύματα, υδρολύματα, αερολύματα, τη χημική ανάλυση εδάφους και παρακολούθηση ανερχόμενης υγρασίας και της ύπαρξης αλάτων σε υγρή ή στερεή φάση.

Στη συνέχεια γίνεται χρήση επί τόπου μη καταστρεπτικών μετρήσεων για τη χαρτογράφηση των υλικών, τη χαρτογράφηση της φθοράς και την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Γίνεται ταυτοποίηση των δομικών υλικών και έρευνα προέλευσής τους σε ότι αφορά την πετρογραφική, ορυκτολογική, φυσική, χημική, φυσικοχημική, μηχανική σύσταση τους έπειτα από μελέτη και δείγματα από το μνημείο.

Ακολουθεί μελέτη της φθοράς στο εργαστήριο με συστηματική αντιπροσωπευτική δειγματοληψία όλων των μορφών φθοράς από χαρακτηριστικά σημεία του μνημείου, μελέτη ιδιοτήτων των φθαρμένων υλικών (ορυκτολογική, φυσική, φυσικοχημική, χημική, μηχανική) και μελέτη των προϊόντων της φθοράς (ορυκτολογική, χημική) . Γίνεται σύγκριση αποτελεσμάτων υγιών και φθαρμένων υλικών με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων για το είδος και το βαθμό διάβρωσης, την κατάσταση των προϊόντων διάβρωσης, τη φυσική κατάσταση της διαβρωμένης πέτρας και τον προσδιορισμό των αιτίων φθοράς.

Έπεται η συσχέτιση ενδογενών και εξωγενών παραγόντων της φθοράς στην κλίμακα του μνημείου, η εκτίμηση αιτίων και μηχανισμών των φαινομένων της φθοράς με αξιολόγηση των εργαστηριακών δεδομένων, καθώς και αυτών που προκύπτουν από τα αποτελέσματα των επί τόπου μη καταστρεπτικών μετρήσεων για την εξαγωγή συμπερασμάτων. Τέλος γίνεται παραμετρική ανάλυση – προσομοίωση των φαινομένων στο εργαστήριο σε συνθήκες επιταχυνόμενης γήρανσης για την επιβεβαίωση της εκτίμησης για τα αίτια και τους μηχανισμούς της φθοράς.

Οι τεχνικές που θα εφαρμοστούν επί τόπου είναι ιδιαίτερα σημαντικές καθώς πραγματοποιούν εξέταση επιφανειών επί τόπου χωρίς λήψη δειγμάτων δίνουν πληροφορίες για τη στρωματογραφία υλικών, τοιχοποιιών και επικαλυμμένων επιφανειών , τη χαρτογράφηση των υλικών και της φθοράς, τον έλεγχο ποιότητας υλικών, τον έλεγχο συμβατότητας υλικών και επεμβάσεων συντήρησης. Έτσι παρέχουν τη δυνατότητα καταγραφής και επεξεργασίας οπτικών πληροφοριών και τη μετατροπή τους βάσει φυσικοχημικών κριτηρίων σε δείκτες ποιότητας της επιφάνειας ή φθοράς.

Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω :

- Υπέρυθρη θερμογραφία για τη διάγνωση επιφανειακής φθοράς τοιχοποιιών και αρχιτεκτονικών επιφανειών, την αποφλοίωση χρωμάτων και επικαλύψεων, τον έλεγχο ατελειών και ασυνεχειών , την ύπαρξη ρωγμών σε υλικά και κατασκευές και την ανίχνευση ανερχόμενης και παραμένουσας υγρασίας και συμπύκνωσης σε τοιχοποιίες.
- Υπερηχοσκόπηση για την ανίχνευση ατελειών και διεπιφανειών , την απεικόνιση του βάθους φθοράς του υλικού, την αποτίμηση του βάθους διείσδυσης υλικού στερέωσης.
- Γεωραντάρ για την αποκάλυψη εσωτερικής δομής τοιχοποιιών, ανίχνευση ρηγματώσεων, τη διερεύνηση ύπαρξης οπλισμών και μεταλλικών στοιχείων εντός της τοιχοποιίας , αποκάλυψη θεμελιώσεων ιστορικών κτισμάτων και υπολείμματα διαφόρων κατασκευών στο υπέδαφος.
- Μικροκύματα με τα οποία επιτυγχάνεται η στρωματογράφηση επιφανειών, ο υπολογισμός πάχους κάθε στρώματος και η αναγνώριση των υλικών.
- Γαμμαγραφία για την ανίχνευση μεταλλικών αντικειμένων που βρίσκονται σε μνημεία, γλυπτά και σύγχρονες κατασκευές και τον προσδιορισμό του είδους και του μεγέθους τους.
- Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας με την οποία καθίσταται δυνατή η αναγνώριση των λιθοτύπων και των μορφών φθοράς.
- Οπτικές ίνες με τις οποίες εξετάζεται η μορφολογία των επιφανειών , γίνεται ταξινόμηση σύνθετων υλικών και παρατήρηση διεπιφανειακών δράσεων, γίνεται ανίχνευση των ατελειών σε δομικά υλικά και αναγνώριση των τύπων φθοράς τους.

2. ΕΙΔΙΚΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ

2.1 Ιστορικά στοιχεία του ναού του Πύθιου Απόλλωνα

Η Ακρόπολη της Ρόδου βρίσκεται στο Λόφο του Μόντε Σμιθ Στέφανο στο δυτικό μέρος της πόλης σε μικρή απόσταση από την θάλασσα. Σε αυτή δέσποζε πλήθος σημαντικών κτισμάτων όπως ο ναός του Πύθιου Απόλλωνα, ο ναός της Αθηνάς Πολιάδος και του Διός, το Ωδείο, τα Νύμφαια, το Στωϊκό κτίσμα, το Αρτεμίσιο, το Στάδιο, η Βιβλιοθήκη και το Γυμνάσιο, τα οποία χρονολογούνται στην Ελληνιστική και Υστεροελληνιστική εποχή (3^{ος}–2^{ος} αιώνας π.Χ.), όπως προκύπτει από τις επιγραφές που εντοπίστηκαν στον χώρο. Δεν είχε οχυρωματικό χαρακτήρα όπως οι περισσότερες αρχαίες ακροπόλεις αλλά προοριζόταν για λατρευτικές, παιδαγωγικές και αθλητικές δραστηριότητες αποτελώντας το πολιτιστικό και πνευματικό κέντρο της πόλης. Ήταν δομημένη σε κλιμακωτά επίπεδα με τα οικοδομήματα θεμελιωμένα σε πλατώματα που συγκρατούνταν από ενισχυμένους αναλημματικούς τοίχους.



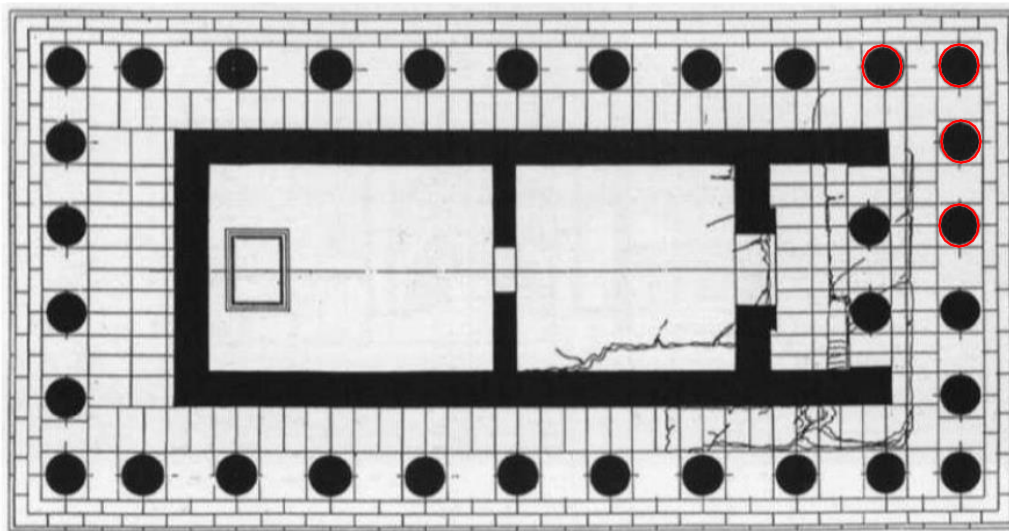
Εικόνα 3. Ο ναός του Πυθίου Απόλλωνα στην Αρχαία Ακρόπολη της Ρόδου

2.2 Αρχιτεκτονικά στοιχεία του ναού του Πύθιου Απόλλωνα

Ο ναός του Πύθιου Απόλλωνα, που αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας μελέτης ήρθε στο φως έπειτα από ανασκαφές που πραγματοποιήθηκαν από την Ιταλική Αρχαιολογική Σχολή κατά την περίοδο από το 1920 έως το 1930. Πρόκειται για περίπτερο ναό δωρικού ρυθμού, δομημένου από πωρόλιθο που είναι ο τοπικός λίθος της περιοχής. Έχει προσανατολισμό από την ανατολή στη δύση και θεμελιώνονταν σε σηκό πάχους 3,5 μέτρων από πωρόλιθο. Σύμφωνα με τα επιγραφικά ευρήματα πρόκειται για ναό αρχικών διαστάσεων 37.70 m και 20.05 m που αποτελούταν από 11 κίονες στη μεγάλη διάσταση

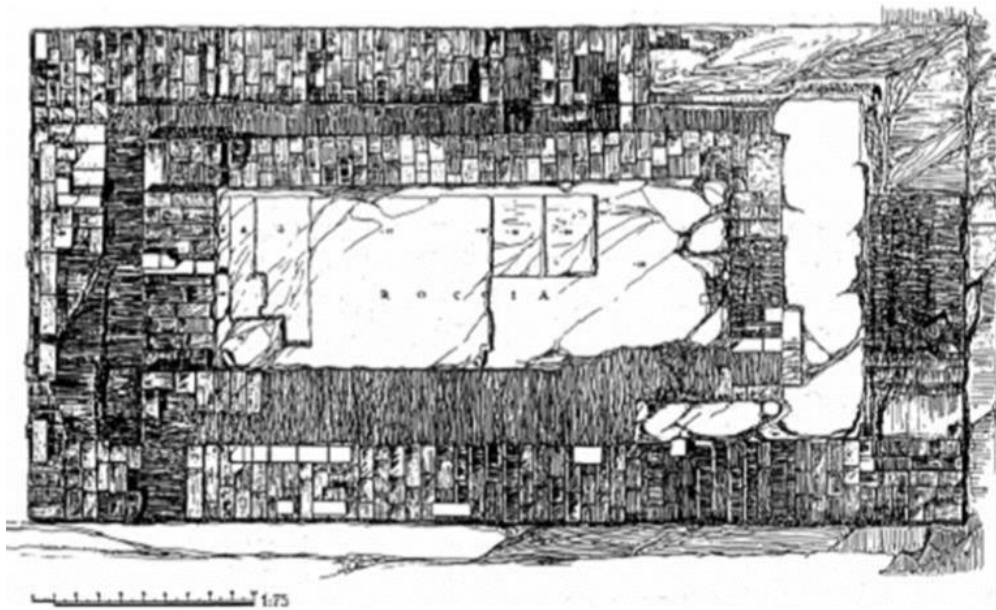
και 6 στη μικρή. Κάθε κίονας είχε ύψος 11.52 m και διάμετρο στη στάθμη της βάσης του 1.78 m όπως τεκμαίρεται από την αξιολόγηση των στοιχείων που βρέθηκαν. Εξέχουσα σημασία από αρχιτεκτονική άποψη παρουσιάζει η τράπεζα που υπήρχε στο κέντρο του και η οποία ήταν θεμελιωμένη επί ειδικά διαμορφωμένου τεχνητού βράχου, όπως και η ύπαρξη υπόγειων δωματίων εγκιβωτισμένων στα θεμέλια του ναού στα οποία η πρόσβαση επιτυγχάνονταν μέσω μιας κυκλικής λαξευτής στο βράχο κλίμακας.

Κατά την πρώτη ανασκαφή του 20ου αιώνα (1912-1936), το μνημείο βρέθηκε σε επίπεδο θεμελίωσης και εντοπίστηκαν διάσπαρτα λιγοστά τμήματα από τα ερείπια του ναού στο δυτικό τμήμα της τάφρου θεμελίωσης. Σύμφωνα με τα στοιχεία που προέκυψαν από τις ανασκαφές που πραγματοποιήθηκαν επιχειρείται μία ανάλυση της αρχιτεκτονικής φυσιογνωμίας του ναού και των ιδιαίτερων γνωρισμάτων των επιμέρους τμημάτων που τον αποτελούν.



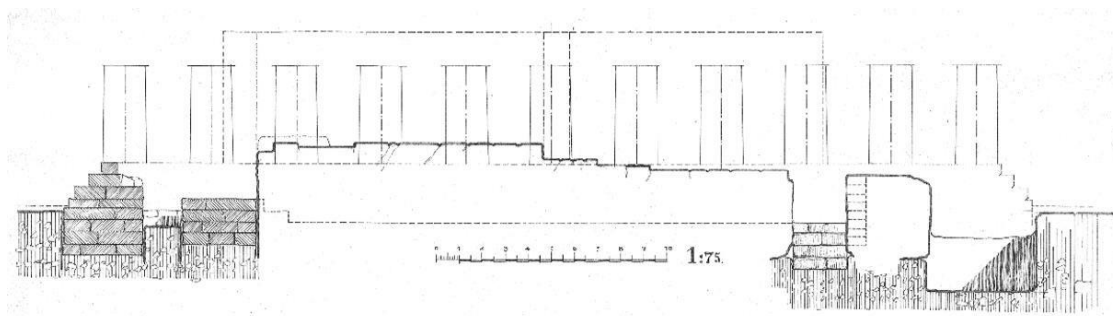
Εικόνα 4. Κάτοψη του Ναού του Πυθίου Απόλλωνα (Paolini, PD 212, in Livadioti and Rocco 1996). Με κόκκινο χρώμα επισημαίνονται οι αναστηλωμένοι κίονες.

Η θεμελίωση του ναού περιμετρικά γίνεται σε 2-3 στρώσεις λίθων στη νότια και δυτική πλευρά, όπως επίσης και στο μεγαλύτερο μέρος της βόρειας. Σε ένα μικρό τμήμα της βόρειας πλευράς μόνο, καθώς και στο σύνολο της ανατολικής η θεμελίωση πραγματοποιείται σε 4-5 στρώσεις λίθων (Εικόνα 7). Σε ότι αφορά το σηκό, αυτός θεμελιώνεται σε υψηλότερη στάθμη όπως και οι κίονες του Προνάου που εδράζονται σε αρκετά υψηλότερη στάθμη επί του φυσικού βράχου.



Εικόνα 5. Κάτοψη της θεμελίωσης του ναού μετά την Ιταλική ανασκαφή (Paolini, PD 211, in Livadioti and Rocco 1996).

Οι στρώσεις των λίθων που αποτελούν τη θεμελίωση των κίωνων είναι εγκλιβωτισμένες στο έδαφος και επομένως δεν έχουν δική τους ταλάντωση σε περίπτωση σεισμού. Για το λόγο αυτό, στην επίλυση που ακολουθεί υιοθετείται η παραδοχή της έδρασης των κίωνων επί στερεού εδάφους, ενώ οι παραμορφώσεις της θεμελίωσης αγνοούνται.

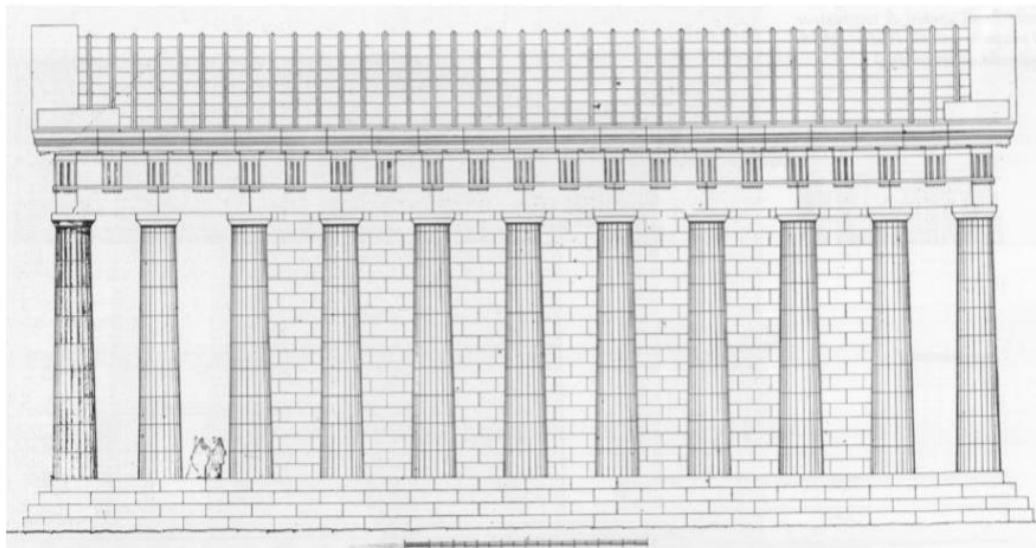


Εικόνα 6. Διαμήκης τομή της Θεμελίωσης του Ναού κατά Paolini, 1938 (Paolini, PD 217, in Livadioti and Rocco 1996).

Η κρηπίδα εδράζεται επί της στάθμης της θεμελίωσης. Η πρώτη βαθμίδα της κρηπίδας λειτουργεί σαν ευθυντήρια και διαμορφώνεται σε 2 επίπεδα. Πάνω στην κρηπίδα εδράζεται ο στυλοβάτης.

Οι ραβδώσεις των κίωνων παρουσιάζουν πολλές ανομοιομορφίες μεταξύ τους. Το πλάτος

τους δεν είναι σταθερό αλλά κυμαίνεται από 21.5 έως 27 εκ. και πολλές φορές μεταβάλλεται ακόμα και καθ' ύψος του ίδιου σπονδύλου.



Εικόνα 7. Βόρεια προοπτική – γραφική απεικόνιση του ναού (Paolini, PD 220, in Livadioti and Rocco 1996).

Για το επιστύλιο δεν υπάρχουν πολλές πληροφορίες καθώς δεν διασώζεται κανένα αυθεντικό τμήμα του. Αντίθετα από τη ζωφόρο διασώζεται ένα μεγάλο τμήμα είναι καλά τεκμηριωμένη λόγω μεγάλου σχεδόν ακέραιου μέλους που βρέθηκε με δύο τρίγλυφα και μία μετόπη. Το τύμπανο του αετώματος βρισκόταν σε εισχώρηση 77 εκ. και όχι στο ίδιο μέτωπο με τα γείσα όπως λανθασμένα έχει αναστηλωθεί.

2.3 Περιγραφή επεμβάσεων κατά την Ιταλική Αναστήλωση

Την περίοδο 1937-1938 υλοποιείται η ιταλική αναστήλωση του ναού η οποία είναι υπεύθυνη σε μεγάλο βαθμό για τη σημερινή εικόνα του, με τον αρχιτέκτονα Paolini να τοποθετείται επικεφαλής. Επειδή ήταν δύσκολο να εκτιμηθεί η αρχική εικόνα του ναού πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη ανασκαφή που επέτρεψε την αποκάλυψη της θεμελίωσης του. Με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν ο Paolini κατέληξε στην αποτύπωση της αρχικής μορφής του και αποφάσισε την αναδόμησή της ανατολικής γωνίας του ναού χρησιμοποιώντας τα υπάρχοντα τμήματα της ανωδομής του ναού που βρέθηκαν στο δυτικό μέρος της τάφρου θεμελίωσης κατά την ανασκαφή όπως φαίνεται και από αρχειακές φωτογραφίες. Σήμερα σώζονται τέσσερις κίονες, οι οποίοι απαρτίζονται από αυθεντικούς αλλά και πρόσθετους από αναστηλώσεις σπονδύλους, και ένα μέρος του αναστηλωμένου αετώματος που εδράζεται σε τρεις από αυτούς (εικόνα 7). Έτσι ανακατασκευάστηκαν στην ανατολική γωνία 3 κίονες από αυθεντικό και νέο υλικό επί των οποίων εδράζεται ο θριγκός που περιλαμβάνει τμήμα του αετώματος που διασώζεται καθώς και ένας τέταρτος ελεύθερα ιστάμενος κίονας, ώστε να επιτευχθεί μια ασφαλής και στοχευμένη αναστήλωση που θα αναδεικνύει την αρχική εικόνα του ναού όπως την οραματιζόταν ο Paolini.

Κατά την ιταλική αναστήλωση εφαρμόστηκε μικτό σύστημα δόμησης με βάση τον σκυροδετημένο πυρήνα κίωνων που διατρέχεται από κατακόρυφους οπλισμούς και ο οποίος περιβάλλεται εξωτερικά από λίθινο μανδύα αποτελούμενο από αυθεντικό πωρόλιθο και λίθο αποκατάστασης. Χρησιμοποιήθηκαν σύγχρονα υλικά με βάση το τσιμέντο όπως οπλισμένο και άοπλο σκυρόδεμα, τσιμεντοκονιάματα και τσιμέντο για επίχρισμα, καθώς και μεταλλικά υλικά για τη μηχανική στερέωση των λίθων .

Αρχικά έγινε η τοποθέτηση της κρηπίδας πάνω στο βράχο. Η διαμόρφωση της έγινε με τη δημιουργία πυρήνα από άοπλο σκυρόδεμα που περιβάλλεται εξωτερικά από μανδύα από πωρόλιθο. Πάνω σε αυτή τοποθετήθηκε ο στυλοβάτης που αποτελείται από κομμάτια λιθόπλινθων.

Οι αρχαίοι σπόνδυλοι λαξεύτηκαν εσωτερικά για τη δημιουργία πυρήνων διαμέτρου 0.80 έως 1.00 m στον οποίο χυτεύτηκε σκυρόδεμα. Για τους σπονδύλους από νέο υλικό ο λίθινο μανδύας που περιβάλλει τον σκυροδετημένο πυρήνα των κίωνων αποτελείται από 3 έως 4 τοιχώματα νέου λίθου βιοκαλκαρενίτη, ενώ τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του κονιάματος που εφαρμόστηκε είναι αμμοχάλικο μικρών και μεσαίων διαστάσεων διαμέτρου 2 mm - 50 mm και σκύρα με διάμετρο έως και 15 cm. Στα τμήματα των σπονδύλων που παρουσίαζαν αποκολλήσεις και έχριζαν συμπλήρωσης με λίθο ακανόνιστου σχήματος προκρίθηκε η εφαρμογή σκυροδέματος με χρωστική ουσία ώστε να προσομοιάζει το φυσικό χρώμα του λίθου για την αποφυγή έντονης χρωματικής αντίθεσης που θα αλλοίωνε την φυσιογνωμία του μνημείου. Σε μεγάλα τμήματα της επιφάνειας των κίωνων κυριαρχούν οι τσιμεντιτικές αποχρώσεις.



Εικόνα 8. Λάξευση πυρήνα στο αρχαίο κιονόκρανο, 1938

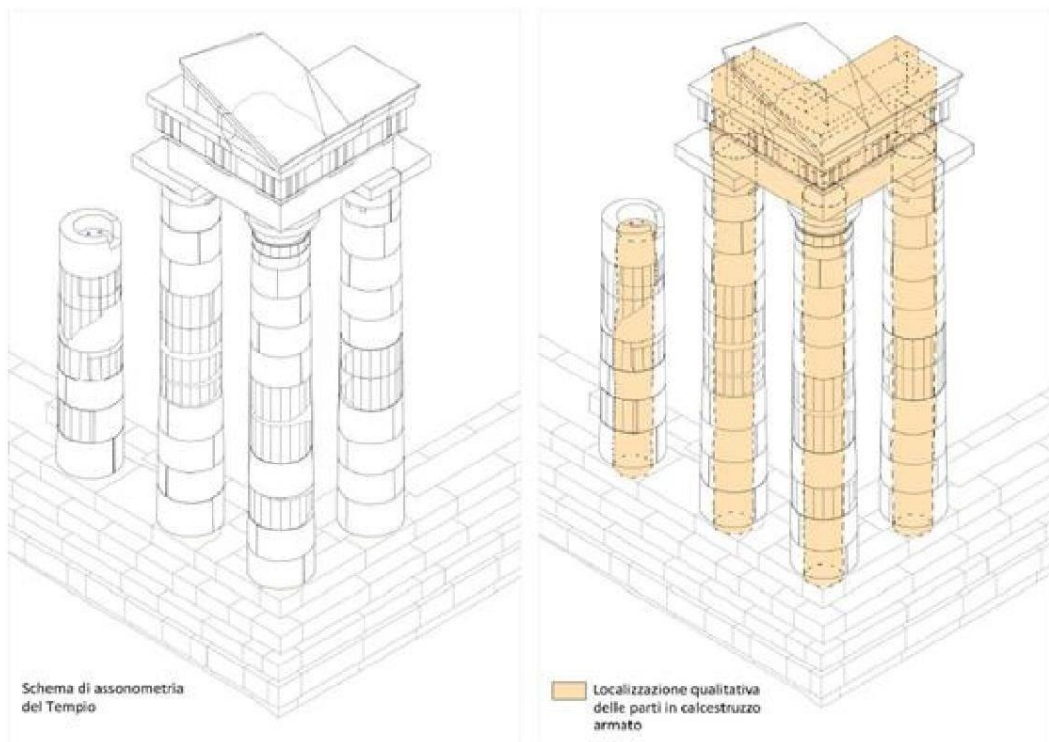
Για την μεταφορά και τοποθέτηση των σπονδύλων στις θέσεις που προέβλεπε η μελέτη του Ραολίνι γινόταν κοπή κάθε αρχαίου σπονδύλου σε δύο ή περισσότερα τεμάχια, ενώ για τους σπονδύλους από νέο λίθο κατασκευάζονταν δύο λίθινοι ημιδακτύλιοι ανά σπόνδυλο, ίδιων διαστάσεων με τους αρχαίους. Η επίτευξη της σύνδεσης των δύο ημιδακτυλίων γινόταν με τη χρήση δύο χαλύβδινων πύσχημων συνδέσμων εν ξηρώ,

δηλαδή χωρίς χρήση κονιάματος στη διεπιφάνεια. Στη συνέχεια ακολουθούσε η διάνοιξη οπών στο κέντρο των πλευρικών επιφανειών των σπονδύλων για την τοποθέτηση ξύλινων ή μεταλλικών στοιχείων που θα επέτρεπαν την ανύψωση τους στο ακριβές σημείο επανατοποθέτησής τους. Εκεί γινόταν η συγκόλληση των σπονδύλων μέσω ενός μεταλλικού συνδετήρα σχήματος πεπλατυσμένου « \cap » εισερχόμενου σε οπές που βρισκόταν στην κορυφή των λίθων και τη χρήση τσιμεντοκονιάς. Παράλληλα τοποθετήθηκαν χαλύβδινες ράβδοι χωρίς νευρώσεις που διατρέχουν όλο το ύψος των κίωνων μέχρι και το κιονόκρανο. Στον έβδομο σπόνδυλο του ελεύθερα ιστάμενου κίονα έγινε χρήση ενός ενιαίου κομματιού λίθου το οποίο διατρήθηκε για την έγχυση σκυροδέματος στον πυρήνα του. Από τον σκυροδετημένο πυρήνα του σπονδύλου αυτού προεξέχουν πέντε μεταλλικοί σύνδεσμοι μορφής « \cap » που χρησιμοποιήθηκαν για τη μεταφορά και σωστή τοποθέτησή του στον κίονα.



Εικόνα 9. Διαμόρφωση πυρήνα από οπλισμένο σκυρόδεμα στον κίονα κατά την ιταλική αναστήλωση

Η σύνδεση του άνω τμήματος του κιονόκρανου με το υπερκείμενο επιστύλιο που κατασκευάστηκε από οπλισμένο σκυρόδεμα επιτεύχθηκε μέσω χαλύβδινων αναμονών. Για τη σταθεροποίηση του επισυλίου τοποθετήθηκε μεταλλικό πλέγμα στην κάτω πλευρά του. Τα υπόλοιπα μέλη του θριγκού, εκτός από μέρος του αυθεντικού αετώματος που διασώζονταν αυτούσιο κατασκευάστηκαν ως σύμμεικτη κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα και συμπληρώματα λίθου. Για την πλήρωση των κενών σε λίθους και το κλείσιμο των αρμών έγινε χρήση τσιμεντοκονιαμάτων.



Εικόνα 10. Αξονομετρικό σχέδιο ποιοτικής απεικόνισης των θέσεων έγχυσης οπλισμένου σκυροδέματος (Fain *et al.* 2015).



Εικόνα 11. Συμπυγμένη όψη γωνίας του ναού μετά την αναστήλωση Paolini (Paolini, PD 219, in Livadioti and Rocco 1996).

Μετά από τις εκτεταμένες φθορές που προκλήθηκαν στο μνημείο κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου από βομβαρδισμούς αλλά και την τοποθέτηση πυροβόλων όπλων σε αυτό κατέστη επιτακτική η διενέργεια εργασιών συντήρησης και αποκαταστάσεις σε αυτό. Από το 1945 και έπειτα διενεργήθηκαν συντηρήσεις στο ναό λόγω των εκτεταμένων ζημιών που προκλήθηκαν από βομβαρδισμούς κατά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Το 1960 και 1970 η ελληνική αρχαιολογική υπηρεσία πραγματοποίησε εργασίες αναστήλωσης στο δυτικό θεμέλιο του ναού με τελευταία αυτή του 1996. Παράλληλα η ζώνη που περιβάλλει την αρχαία Ακρόπολη συνολικής έκτασης 1250 στρεμμάτων χαρακτηρίστηκε αρχαιολογικός χώρος.

Στα τέλη της προηγούμενης δεκαετίας στο ναό τοποθετήθηκαν σκαλωσιές για την ενίσχυση της στατικής του επάρκειας και την εκτέλεση εργασιών αποκατάστασης σε αυτόν, ενώ ακόμα εκκρεμεί η ανασκαφή σε όλη την έκταση της αρχαίας Ακρόπολης.



Εικόνα 12. Σημερινή εικόνα του Ναού με την τοποθέτηση ικριωμάτων

2.4 Δομικά υλικά και παθολογία του ναού του Πύθιου Απόλλωνα

Ο ναός, είναι δομημένος από βιοκλαστικό ψαμμιτικό ασβεστόλιθο. Η συγκολλητική ουσία που χρησιμοποιείται είναι ασβεστιτικής προέλευσης, με κλαστικούς κρυστάλλους κυρίως χαλαζία και ασβεστίτη.

Οι αναβαθμοί του μνημείου είναι κατασκευασμένοι από πωρόλιθο. Οι κίονες του ναού είναι δομημένοι από δυο διαφορετικούς λίθους, τον αυθεντικό λίθο και τον λίθο αποκατάστασης οι οποίοι παρουσιάζουν παρόμοια φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Ο λίθος αποκατάστασης κυριαρχεί στους κίονες αυτούς, αφού λίγα κομμάτια αυθεντικού λίθου σώζονται. Ο αυθεντικός λίθος βρίσκεται σε καλύτερη

κατάσταση από τον λίθο αποκατάστασης που είναι αποσαθρωμένος και ρηγματωμένος. Ο αυθεντικός λίθος που διασώζεται παρουσιάζει υψηλές συγκεντρώσεις χλωριούχων αλάτων, μέτριες συγκεντρώσεις θεικών αλάτων, σημαντικές απώλειες υλικού και βιοδιάβρωση. Ο λίθος αποκατάστασης εμφανίζει μέτριες συγκεντρώσεις χλωριόντων, πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις θεικών ιόντων, πολύ έντονες απώλειες υλικού, αποχρωματισμούς και λευκές εξανθήσεις .

Για την ορυκτολογική σύσταση των λίθων του ναού μετά από εξέταση τους, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

Ο τοπικός συμπαγής υπόλευκος ασβεστόλιθος έχει κύρια ορυκτολογική φάση τον ελαφρώς μαγνησιακό ασβεστίτη και δευτερεύουσες τον γύψο, το χαλαζία και τον αραγωνίτη . Ο υποκίτρινος ασβεστόλιθος που χρησιμοποιήθηκε στην αποκατάσταση, έχει κύρια ορυκτολογική φάση τον ελαφρώς μαγνησιακό ασβεστίτη και δευτερεύουσες τον αλίτη, το χαλαζία και τον αραγωνίτη . Ο γκρίζος πορώδης ασβεστόλιθος του νότιου κίονα έχει και αυτός κύρια ορυκτολογική φάση τον ελαφρώς μαγνησιακό ασβεστίτη και δευτερεύουσες το χαλαζία και τον αραγωνίτη.

Το σκυρόδεμα αποτελείται από αμμοχάλικο μικρών και μεσαίων διαστάσεων διάμετρο που κυμαίνεται μεταξύ 2 mm - 50 mm καθώς και σκύρα των οποίων η διάμετρος φτάνει έως 15 cm. Η μεταφορά διαλυτών αλάτων από το σκυρόδεμα στους λίθους του ναού επιτείνει τη φθορά των τελευταίων. Η κατάσταση αυτή εμποδίζει την διαπνοή των αυθεντικών υλικών, λόγω ασύμβατης μικροδομής και εντείνει την συσσώρευση υγρασίας στα αυθεντικά υλικά. Παράλληλα, λόγω ασυμβατότητας των υλικών ασκούνται τάσεις στα αυθεντικά υλικά.



Εικόνα 13. Συμπληρώσεις αρχαίου λίθου με τσιμέντο στον θριγκό

Τα κονιάματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την αποκατάσταση του ναού αποτελούνται από ασβεστίτη κατά κύριο λόγο, σε συνδυασμό με γύψο, χαλαζία και αραγωνίτη.

Τα λιγοστά αυθεντικά επιχρίσματα που διασώζονται αποτελούνται από μαγνησιακό

ασβεστίτη κατά κύριο λόγο, σε συνδυασμό με αραγωνίτη και χαλαζία, και παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρώσεις διαλυτών αλάτων.

Στα τσιμεντοκονιάματα του ναού παρατηρούνται μεγάλες συγκεντρώσεις θειικών αλάτων και αποφλοιώσεις.



Εικόνα 14. Φαινόμενα σπηλαιώσης στους σπονδύλους των κίωνων

Από τα πειραματικά αποτέλεσμα γίνεται αντιληπτή η ύπαρξη του μηχανισμού τριχοειδούς αναρρίχησης της υγρασίας από τους αναβαθμούς του ναού στους κίονες, ο οποίος επιταχύνει την αποσάθρωση των σπονδύλων βάσης και την μηχανική αστάθεια των κίωνων.

2.5 Δομικό σύστημα και ευστάθεια στο ναό του Πύθιου Απόλλωνα

2.5.1 Αρχαίο δομικό σύστημα

Το δομικό σύστημα του ναού κατά την αρχική του μορφή παρουσιάζει ομοιότητες με τα αντίστοιχα δομικά συστήματα των λατρευτικών ναών της ελληνιστικής περιόδου.

Τα ίδια βάρη του θριγκού μεταβιβάζονταν μέσω των δοκών του επιστυλίου στους κίονες και τους τοίχους του ναού και μέσω αυτών στη θεμελίωση και εν τέλει στο έδαφος. Τα επιστύλια λειτουργούσαν σαν αμφιέριστες δοκοί, μεταβιβάζοντας τα κατακόρυφα φορτία και αυξάνοντας τη δυσκαμψία του φορέα.

Η θεμελίωση του ναού ήταν συνεχής κατά μήκος των κατακόρυφων φερόντων στοιχείων και γινόταν απευθείας στο φυσικό βράχο. Οι στρώσεις των λίθων που αποτελούν τη θεμελίωση των κίωνων είναι εγκιβωτισμένες στο έδαφος και επομένως δεν έχουν δική τους ταλάντωση σε περίπτωση σεισμού. Επομένως ικανοποιείται η παραδοχή της έδρασης των κίωνων επί στερεού εδάφους, ενώ οι παραμορφώσεις της θεμελίωσης αγνοούνται.

Η ευστάθεια του ναού επιτυγχάνονταν χάρη στον τρόπο δόμησης του. Όπως συνηθίζονταν

στην αρχαία Ελλάδα ο ναός παρουσιάζει συμμετρία στην κύρια διεύθυνση του, γεγονός που ευνοεί την σεισμική απόκριση του. Οι δομικοί λίθοι του λαξεύτηκαν επιμελώς ώστε να παρουσιάζουν άριστη επαφή μεταξύ τους και εν συνεχεία τοποθετήθηκαν εν ξηρώ, απουσία κονιάματος ο ένας πάνω στον άλλο. Λόγω του μεγάλου μεγέθους τους οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονταν ήταν ικανές να συγκρατήσουν το μνημείο σε περιπτώσεις σεισμικών καταπονήσεων, διασφαλίζοντας την δομική ευστάθεια του. Παράλληλα η ολίσθηση και ο λικνισμός των κίωνων κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης λειτουργούσε σαν ένας μηχανισμός απόσβεσης, απορροφώντας σημαντικό μέρος της σεισμικής ενέργειας.

Για την σύνδεση των κατακόρυφων μελών εικάζεται πως χρησιμοποιήθηκαν γόμφοι, οι οποίοι και παραλαμβάνουν τις διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονταν, ενώ για την παραλαβή των εφελκυστικών τάσεων χρησιμοποιούνταν εμπόλια, όπως τεκμαίρεται και από τις εντορμίες που έχουν εντοπιστεί στο γείσο.

2.5.2 Δομικές βλάβες

Η λάξευση των αρχαίων μελών για την πλήρωση του πυρήνα τους με σκυρόδεμα, οδήγησε σε σημαντικές βλάβες που εκδηλώθηκαν με αποτμήσεις και θραύσεις τμημάτων τους. Η μετατροπή του αρχικού πολυσπονδυλωτού δομικού συστήματος σε μονολιθικό μετέβαλλε σημαντικά την σεισμική απόκριση του. Οι δυνάμεις τριβής μεταξύ των σπονδύλων μειώθηκαν, ενώ στο μονολιθικό σύστημα δεν εκδηλώνονται φαινόμενα λικνισμού και ολίσθησης, μέσω των οποίων εκτονώνονταν η σεισμική ενέργεια στο πολυσπονδυλωτό σύστημα.

Παράλληλα οι χαμηλές μηχανικές αντοχές του τοπικού πωρόλιθου της Ρόδου, από τον οποίο είναι δομημένος ο ναός συνέβαλε στην υποβάθμιση της στατικής επάρκειας του.

Ο κύριος μηχανισμός αστοχίας προκύπτει από τη διόγκωση των μεταλλικών συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ιταλική αναστήλωση. Η μηχανική στήριξη των λίθων, μεταξύ τους, έγινε με τη χρήση τσιμεντοκονιάματος και τη χρήση μεταλλικών συνδέσμων, οι οποίοι έχουν οξειδωθεί και διογκωθεί με αποτέλεσμα την περαιτέρω φθορά των λίθων.



Εικόνα 15. Διαβρωμένος μεταλλικός σύνδεσμός

Η διόγκωση τους, που οφείλεται στην οξείδωση και τη διάβρωση της επιφάνειας τους, οδήγησε σε διάρρηξη τους λίθους. Σημειώθηκαν αποτμήσεις και θραύσεις τμημάτων τους, γεγονός που οδήγησε στην μείωση της επιφάνειας έδρασης των υπερκείμενων

μελών. Η απώλεια της επιφάνειας στήριξης εγκυμονεί κινδύνους για τη δομοστατική επάρκεια του μνημείου. Χαρακτηριστικό είναι ότι στους νέους σπονδύλους παρατηρείται αστοχία στη θέση αγκύρωσης των οπλισμών.

Η αστοχία των σιδηρών συνδέσμων συνέβαλε στην αποκόλληση των θραυσμένων λίθων και στη διεύρυνση των παρειών των δύο τμημάτων σπονδύλων από νέο υλικό. Κάποιες ρηγματώσεις επεκτείνονται κατακόρυφα από τον ένα σπόνδυλο στον άλλο, λόγω της συνάφειας που έχει δημιουργηθεί ανάμεσα τους. Πολύ έντονες ρηγματώσεις παρουσιάζονται στους 2 ακραίους κίονες του συμπλέγματος κίωνων – ανωδομής. Επίσης η τοποθέτηση σκυροδέματος στον πυρήνα των κίωνων οδήγησε σε σημαντικές βλάβες στον εξωτερικό λίθινο μανδύα λόγω της φυσικοχημικής ασυμβατότητας των δύο υλικών.

Πολλές πλευρικές επιφάνειες των σπονδύλων των κίωνων έχουν αποσαθρωθεί, πολλά τμήματα τους έχουν υποστεί θραύση και άλλα είναι ετοιμόρροπα. Οι απώλειες υλικού μειώνουν την επιφάνεια στήριξης των υπερκείμενων μελών και ενδέχεται να οδηγήσουν σε ανατροπή τους, αλλά ακόμα και σε μερική ή ολική κατάρρευση του ναού στην περίπτωση μίας ισχυρής σεισμικής διέγερσης.



Εικόνα 16. Συμπληρώσεις σπονδύλου με τσιμέντο

Ακόμα, παρατηρείται μείωση της επιφάνειας επαφής ανάμεσα στο αρχαίο κιονόκρανο του γωνιακού κίονα και την υπερκείμενη δοκό του επιστυλίου, γεγονός που οφείλεται στην θραύση τμημάτων της τελευταίας, καθώς και στην μεταφορά διαλυτών αλάτων από το σκυρόδεμα του επιστυλίου στον αρχαίο λίθο.



Εικόνα 17. Βλάβες στο αρχαίο κιονόκρανο

Στο επιστύλιο η οξείδωση του οπλισμού του οδήγησε στην θραύση όλης της επικάλυψης του στην κάτω επιφάνεια του.



Εικόνα 18. Αποκόλληση επικάλυψης σκυροδέματος στην κάτω επιφάνεια του επιστυλίου

Αντίστοιχη εικόνα παρατηρείται και στα υπόλοιπα μέλη του θριγκού, που αποτελούνται από σκυρόδεμα σε συνδυασμό με λιγοστά θραύσματα και τμήματα από το αρχαίο υλικό που διασώζονται. Οι μεταλλικοί οπλισμοί που τοποθετήθηκαν διαβρώθηκαν, οδηγώντας σε διάρρηξη του σκυροδέματος και στην αποκόλληση ολόκληρων τμημάτων του. Σε όλη την έκταση του θριγκού παρατηρούνται αποτμήσεις γωνιών και έντονες ρηγματώσεις.

Οι βλάβες αυτές, σε συνδυασμό με τις φυσικοχημικές φθορές που παρατηρούνται στο ναό, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη διερεύνησης και αποτίμησης της ευστάθειας του σε περίπτωση σεισμικής καταπόνησης για την εύρεση κατάλληλων μέτρων ενίσχυσης της φέρουσας ικανότητας του μνημείου.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Μελέτη μηχανικής συμπεριφοράς εξεταζόμενων υλικών

Στο παρών κεφάλαιο γίνεται διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς του λίθου και του κονιάματος που εξετάζονται.

Ο λίθος που μελετάται προέρχεται από τη θέση Α του λατομείου των Σφουγγαριών στη Ρόδο στην περιοχή Αρχάγγελος με την κωδική ονομασία PAR_Sa και προσομοιώνει επαρκώς από ορυκτολογική άποψη τον αρχαίο δομικό λίθο του μνημείου. Έχει υψηλό μακροπορώδες και ικανοποιητική συμπεριφορά στην κρυστάλλωση αλάτων.

Το κονίαμα που εξετάζεται είναι το Master Emaco S 285 TIX της BASF (ME), το οποίο είναι κονίαμα υδρασβέστου – ποζολάνης, με ποταμίσις πυριτικά αδρανή και ορυκτές οργανικές ίνες. Πρόκειται για κονίαμα τοιχοποιίας τύπου M15 κατά EN 998/2 με ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές σε εφελκυσμό και διάτμηση καθώς και σε θλίψη με τιμές θλιπτικής αντοχής μεγαλύτερες από 15 MPa. Η επιτελεστικότητα του είναι εξαιρετική και η υψηλή διαπερατότητα του επιτρέπει τη διαπνοή των δομικών υλικών με τα οποία έρχεται σε επαφή, ενώ η χαμηλή περιεκτικότητά του σε υδατοδιαλυτά άλατα εξασφαλίζει την αποφυγή φαινομένων φθοράς που σχετίζονται με την κρυστάλλωση αλάτων. Η πλήρης απουσία τσιμέντου στο προϊόν το καθιστά συμβατό με τα περισσότερα παραδοσιακά δομικά υλικά εξαιρετική επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα τη σύζευξη ιστορικών, τεχνολογικών, δομικών και εκτελεστικών απαιτήσεων. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έτοιμου κονιάματος σύμφωνα με το τεχνικό δελτίο παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα και αφορούν νωπό κονίαμα συνεκτικότητας 160-170 mm, κατά EN 1015/3.

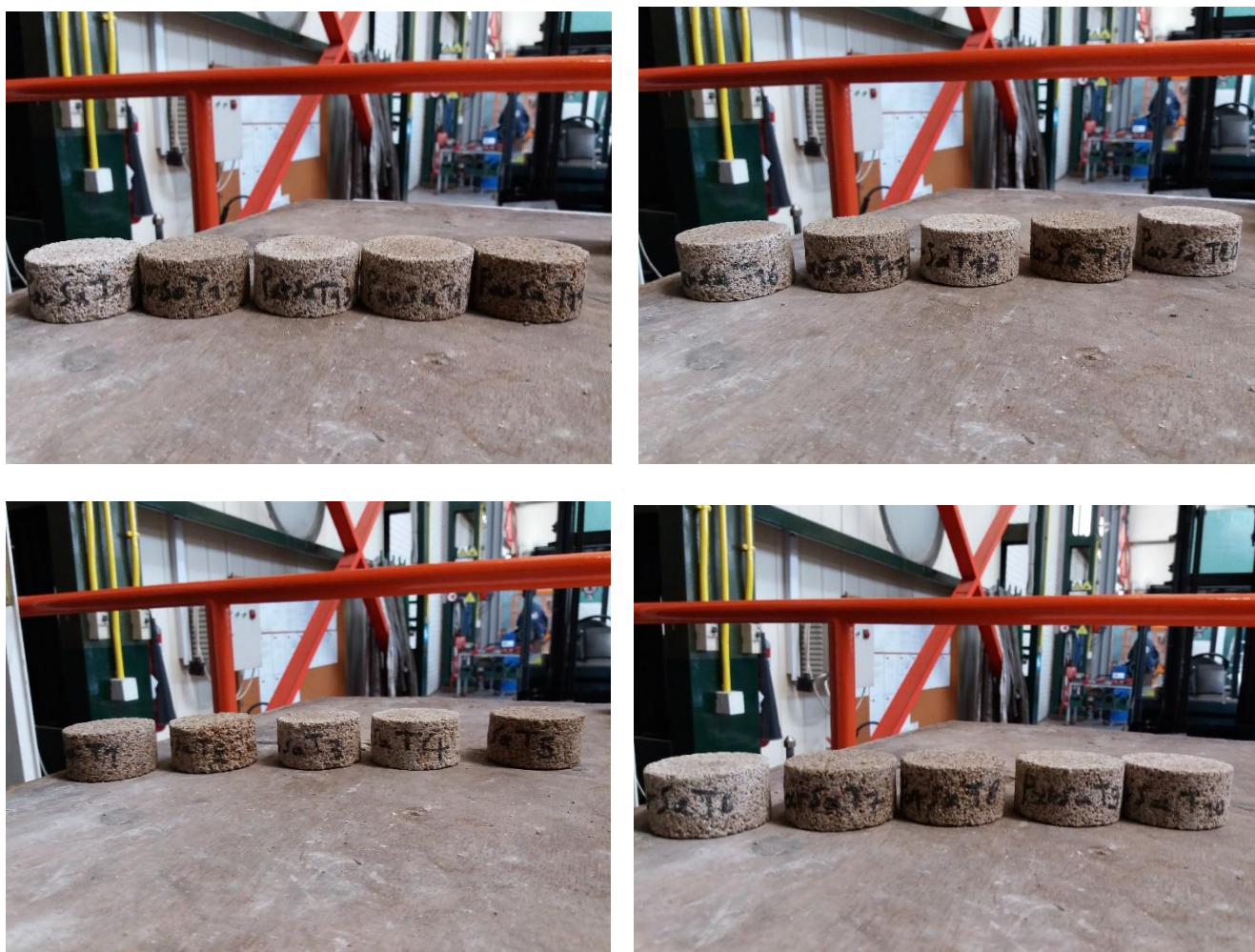
Αντοχή σε θλίψη EN 1015/11	18 MPa, κονίαμα τύπου M15
Συντελεστής διάχυσης υδρατμών, EN 1745	$\mu < 35$
Υδατοδιαλυτά άλατα (κονίαμα μετά την σκλήρυνση)	$< 80 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
Ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα, Normal 13/83	$\text{SO}_4^{2-} < 0.1\%$
Ιοντική χρωματογραφία, Normal 26/87	$\text{Na}^+ < 0.05\%$
	$\text{K}^+ < 0.05\%$
Συντελεστής τριχοειδούς ρόφησης, EN 1015/18	$0,2 \text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-0.5}$
Συμπεριφορά σε φωτιά EN 13501/1	Euroclass A1
Αντοχή pull out σε ράβδους χάλυβα και MBar, Rilem-CEM-FIP RC6-78	$> 6 \text{ MPa}$
Στατικό μέτρο ελαστικότητας UNI 6556	16.000 MPa
Πρόσφυση στο υπόστρωμα – EN 1015/12 (με άμεσο εφελκυσμό)	$> 0,6 \text{ MPa}$ (θραύση τύπου A (διεπιφάνεια κονιάματος – υποστρώματος))
EN 1052/3 (με διάτμηση)	$\tau_o > 0,80 \text{ MPa}$

Πίνακας 1. Τεχνικά χαρακτηριστικά έτοιμου κονιάματος Master Emaco

Μέσω των δοκιμών που παρουσιάζονται παρακάτω γίνεται αποτίμηση της μηχανικής συμπεριφοράς του συστήματος λίθου κονιάματος καθώς και της καταλληλότητας του τύπου του λίθου και του κονιάματος που εξετάζονται.

3.1.1 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης δίσκων (Brazilian test)

Για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του λιθότυπου Σφουγγάρια Α πραγματοποιήθηκε δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης δίσκων σε 6 κυλινδρικά δοκίμια σύμφωνα με το πρότυπο ISRM 1978. Τα δοκίμια αυτά προέρχονται από τη θέση Α λατομείου της Ρόδου και έχουν διάμετρο 5.7cm και ύψους 3cm. Τα δοκίμια που εξετάστηκαν παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 19. Κυλινδρικά Δοκίμια λίθων από τη θέση Α του Λατομείου της Ρόδου

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής για καθένα από τα 6 κυλινδρικά δοκίμια που εξετάστηκαν.

α/α Δοκιμίου	Όνομα	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	F_{max} (kN)	f_t (kPa)
1	ParSa T1	56.9	30.7	2.0	0.73
2	ParSa T7	57.2	30.8	2.4	0.87
3	ParSa T15	57.1	30.8	1.7	0.62
4	ParSa T16	57.1	30.4	3.4	1.25
5	ParSa T17	57.3	31.0	2.2	0.79
6	ParSa T18	57.1	30.5	2.4	0.88

Πίνακας 2. Τιμές εφελκυστικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων

Η μέση και η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής των λίθων από τη θέση Α λατομείου της Ρόδου όπως προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα.

Δείγμα	Μέση εφελκυστική αντοχή (MPa)	Χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή (MPa)
PAR_Sa_T	2.35	0.86

Πίνακας 3. Μέση και χαρακτηριστική τιμή θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της δοκιμής η εφελκυστική αντοχή του λίθου από τη θέση Α του λατομείου της Ρόδου είναι αρκετά μικρή.

3.1.2 Δοκιμή θλιπτικής αντοχής

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του λιθότυπου Σφουγγάρια Α επιλέχθηκαν 6 κατάλληλα κυλινδρικά δοκίμια λίθων από τη θέση Α του λατομείου της Ρόδου με διάμετρο 7.4cm και ύψος 14.8cm. Τα δοκίμια αυτά υποβλήθηκαν σε δοκιμή θλίψης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM D7012 – 10.



Εικόνα 20. Κυλινδρικά Δοκίμια λίθων από τη θέση Α του Λατομείου της Ρόδου

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται τα στοιχεία που προέκυψαν από τη δοκιμή θλίψης των κυλινδρικών δοκιμίων στο εργαστήριο.

α/α Δοκιμίου	Όνομα	Διάμετρος (mm)	Ύψος (mm)	S (mm ²)	Fm (KN)	Rm (N/mm ²)	Def 1 Max (μm)
1	ParSa C1	74.00	14.80	4300.84	39.8	9.26	300.84
2	ParSa C2	74.00	14.80	4300.84	42.5	9.87	281.77
3	ParSa C5	74.00	14.80	4300.84	47.2	10.98	316.86
4	ParSa C6	74.00	14.80	4300.84	40.4	9.38	344.73
5	ParSa C7	74.00	14.80	4300.84	41.2	9.57	253.69
6	ParSa C10	74.00	14.80	4300.84	54.0	12.55	289.00

Πίνακας 4 Τιμές θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων

Οι τιμές της μέσης και χαρακτηριστικής τιμή της θλιπτικής αντοχής των λίθων από τη θέση Α του λατομείου της Ρόδου παρουσιάζονται παρακάτω.

	Fm (KN)	Rm (N/mm ²)	Def 1 Max (μm)
xm	44.2	10.27	297.82
N. of Tests	6	6	6
Stdn.Dev	5.5	1.28	31.16
Var.Coeff.	0.124	0.124	0.124
Lower Lim 95 %	38.4	8.93	265.12
Upper Lim 95%	49.9	11.61	330.51
Min	39.8	9.26	253.69
Max	54.0	12.55	344.73

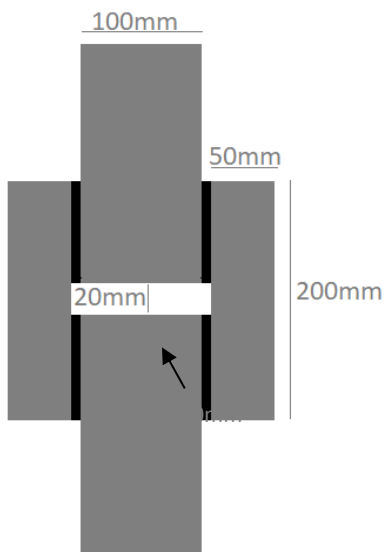
Δείγμα	Μέση θλιπτική αντοχή (MPa)	Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή (MPa)
PAR_Sa_C	10.27	8.93

Πίνακας 5 Μέση και χαρακτηριστική τιμή θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων

3.3.3 Δοκιμή πρόσφυσης κονιάματος αρμού

Η δοκιμή πρόσφυσης πραγματοποιείται για την διερεύνηση της επιτελεστικότητας του κονιάματος αρμού από Master Emaco σε ότι αφορά τη συνάφεια και την πρόσφυση με το λίθο αποκατάστασης και την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας του για την ανάληψη διατμητικών τάσεων. Η διασφάλιση ικανοποιητικής μηχανικής αντοχής είναι αναγκαία ώστε να διασφαλίζεται η ικανοποιητική στατική και δυναμική απόκριση του σύνθετου συστήματος λίθος αποκατάστασης – κονίαμα – αυθεντικός λίθος . Το κονίαμα αρμού συνδέει το τμήμα από το νέο λίθο αποκατάστασης με το τμήμα που αποτελείται από αυθεντικό υλικό και θα πρέπει να είναι συμβατό και με τα δύο τόσο σε ότι αφορά τις φυσικοχημικές όσο και τις μηχανικές ιδιότητες και να επιτυγχάνει ικανοποιητική συνάφεια και πρόσφυση τόσο με το νέο λίθο όσο και με τον αυθεντικό ώστε να διασφαλίζει ότι το σύνθετο σύστημα λίθος αποκατάστασης – κονίαμα – αυθεντικός λίθος συμπεριφέρεται μηχανικά ως ένα ομογενές σώμα.

Για τον προσδιορισμό της πρόσφυσης του κονιάματος Master Emaco στο λίθο από τη θέση Α του λατομείου της Ρόδου πραγματοποιήθηκε πιλοτικά δοκιμή αντοχής του κονιάματος σε διάτμηση σε πέντε ειδικά διαμορφωμένα δοκίμια. Όλοι οι λίθοι που χρησιμοποιήθηκαν στα δοκίμια αυτά έχουν επίπεδη και λεία επιφάνεια επαφής με το κονίαμα, χωρίς να έχουν υποστεί επεξεργασία. Το μήκος όλων των λίθων που χρησιμοποιούνται είναι 20 cm ενώ σε ότι αφορά το πλάτος οι λίθοι που τοποθετούνται στο μέσο της διάταξης έχουν πλάτος 10 cm και οι λίθοι που τοποθετούνται εξωτερικά έχουν πλάτος 5 cm. Στο κέντρο της διάταξης ανάμεσα στους λίθους υπάρχει κενό 2 cm. Η ακριβής διάταξη των δοκιμίων για τον πειραματικό προσδιορισμό της συνάφειας και πρόσφυσης λίθου - κονιάματος παρουσιάζεται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 21. Διάταξη των δοκιμών για τον πειραματικό προσδιορισμό της συνάφειας λίθου – κονιάματος.

Οι τιμές της διατμητικής αντοχής του κονιάματος για κάθε ένα από τα σύνθετα που εξετάστηκαν στο εργαστήριο παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι η αντοχή σε συνάφεια του κονιάματος Master Emaco με τον νέο λίθο από την περιοχή Σφουγγάρια Α είναι αρκετά μικρή.

Σύνθετο	Μέση διατμητική αντοχή(MPa)
PAR_Sa_ME_1	0,204
PAR_Sa_ME_2	0,106
PAR_Sa_ME_3	0,100
PAR_Sa_ME_4	0,085
PAR_Sa_ME_5	0,458
Μέση τιμή διατμητικής αντοχής κονιάματος αρμού Master Emaco	0,191

Πίνακας 6 Μέση τιμή διατμητικής αντοχής του κονιάματος



Εικόνα 22. Πειραματικός προσδιορισμός της συνάφειας λίθου – κονιάματος στο εργαστήριο

Η δοκιμή διάτμησης που πραγματοποιήθηκε έγινε πιλοτικά καθώς δεν αντιστοιχεί σε κάποιο πρότυπο. Η τροποποίηση των παραμέτρων εφαρμογής όπως είναι το πάχος του κενού μεταξύ των λίθων και το πάχος του αρμού του κονιάματος μπορεί να οδηγήσει στην ανάδειξη της βέλτιστης λύσης σε όρους μηχανικής αντοχής. Επίσης σημαντική παράμετρος είναι και το κατά πόσο η επιφάνεια επαφής του λίθου με το κονίαμα είναι λεία η τραχεία επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα της. Μια τραχεία επιφάνεια όπως αυτή του αυθεντικού λίθου παρουσιάζει αυξημένη συνάφεια με το κονίαμα όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της δοκιμής. Μέσα από την αποτίμηση των αποτελεσμάτων που εξάγονται από τη δοκιμή αυτή εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να οδηγήσουν στην μελλοντική βελτιστοποίηση της διάταξης και της εφαρμογής και την αξιοποίηση των μελλοντικών αποτελεσμάτων της.

4. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 1 οι αρχαίοι ναοί, όπως ο ναός του Πύθιου Απόλλωνα, παρουσιάζουν πολύπλοκη και μη-γραμμική σεισμική συμπεριφορά. Ο ναός αυτός λόγω της πολυσπονδυλωτής δομής των κιόνων του, κατά τη διάρκεια της σεισμικής ταλάντωσης του παρουσιάζει έντονα φαινόμενα λικνισμού και ολίσθησης μεταξύ των σπονδύλων του. Για το λόγο αυτό για την μελέτη της απόκρισης του σε δυναμικά φορτία, κρίνεται αναγκαία η χρήση λογισμικών προγραμμάτων που λαμβάνουν υπόψη τα φαινόμενα λικνισμού και ολίσθησης που αναφέρθηκαν. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη του προς εξέταση μνημείου είναι η μέθοδος των διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method – DEM, Cundall 1988), της οποίας η καταλληλότητα επιβεβαιώνεται από προηγούμενες μελέτες και συγκρίσεις με πειραματικά αποτελέσματα (Parantonopoulos *et al.* 2002, Dasiou *et al.* 2009a, Dasiou 2009b).

Η επίλυση του φορέα που γίνεται με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων θα πρέπει να δίνει ιδιαίτερη έμφαση στην επιλογή των σωστών παραμέτρων στους αρμούς με χρήση των κατάλληλων στοιχείων επαφής (contact elements), ενώ ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί και στην επιλογή σεισμικών διεγέρσεων συμβατών με τα σεισμοτεκτονικά δεδομένα της περιοχής. Στην παρούσα εργασία, όλες οι αριθμητικές επιλύσεις έγιναν με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

4.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είναι μια αριθμητική μέθοδος υπολογισμού με χρήση Η/Υ για τον υπολογισμό προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων. Η χρήση της μεθόδου είναι ευρύτατα διαδεδομένη καθώς αποτελεί ένα εργαλείο για τη στατική και δυναμική γραμμική και μη-γραμμική ανάλυση των κατασκευών από ραβδωτούς, επιφανειακούς και χωρικούς φορείς ή συνδυασμό τους, για οποιοδήποτε γεωμετρικό Εικόνα, φόρτιση και συνοριακές συνθήκες.

Με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων το εξεταζόμενο μνημείο υποδιαιρείται σε ένα πλήθος στοιχείων πεπερασμένων διαστάσεων που συνδέονται μεταξύ τους μέσω των κόμβων στα σύνορα τους. Έτσι δημιουργείται ένα δίκτυο (mesh) μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η διακριτοποίηση του φορέα ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο πυκνότητας των πεπερασμένων στοιχείων του δικτύου αυτού.

Κάθε τέτοιο πεπερασμένο στοιχείο μελετάται ξεχωριστά από το σύμπλεγμα των στοιχείων που συνθέτουν την κατασκευή για τον προσδιορισμό της μηχανικής συμπεριφοράς του και έπειτα αφού μελετηθεί και καθορισθεί η μηχανική συμπεριφορά κάθε στοιχείου γίνεται επανασύνδεση των στοιχείων προς σχηματισμό της διακριτοποιημένης κατασκευής.

Επειδή το Abaqus δεν έχει προκαθορισμένες μονάδες για κανένα φυσικό μέγεθος, εκτός από τις περιστροφές και τις γωνίες οι μονάδες μέτρησης που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει να ανήκουν σε ένα ενιαίο και σταθερό σύστημα μονάδων όπως είναι το διεθνές σύστημα μονάδων SI που επιλέχθηκε στο παρών μοντέλο. Το μήκος εκφράζεται σε m (μέτρα), η μάζα σε Mg, ο χρόνος σε sec (δευτερόλεπτα) και η δύναμη σε kN. Σε ότι αφορά τους βαθμούς

ελευθερίας για μετατόπιση κατά την διεύθυνση των αξόνων x , y , z οι δείκτες που χρησιμοποιούνται είναι 1, 2, 3 αντίστοιχα.

Το αριθμητικό προσομοίωμα υπολογισμού που χρησιμοποιήθηκε στις αναλύσεις περιγράφεται ενδελεχώς στην επόμενη ενότητα.

4.2 Προσομοίωμα υπολογισμού

4.2.1 Μεθοδολογία αποκατάστασης

Η εισαγωγή της γεωμετρίας και των ιδιοτήτων των υλικών του ναού στο μοντέλο λαμβάνει υπόψη την πρόταση αποκατάστασης που υιοθετήθηκε και η οποία παρουσιάζεται παρακάτω.

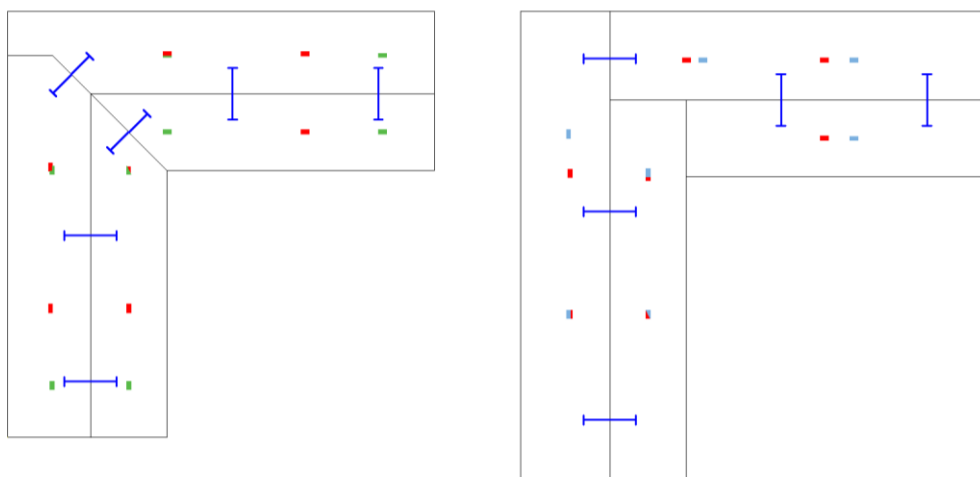
Η αποκατάσταση των κίωνων πραγματοποιείται στη βάση της απουσίας σύνδεσης των σπονδύλων μεταξύ τους για την διασφάλιση της συμπεριφοράς του μνημείου ως πολυσπονδυλωτής κατασκευής, όπως ήταν η ευρέως χρησιμοποιούμενη δομή των αρχαίων ναών, και όχι ως μονολιθικής. Συγκεκριμένα προβλέπει :

- Απομάκρυνση των νέων λίθων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ιταλική αναστήλωση και καθαίρεση του πυρήνα από σκυρόδεμα .
- Πλήρη ανακατασκευή από νέο ενιαίο λίθο (χωρίς την κυλινδρική οπή της ιταλικής αναστήλωσης) των σπονδύλων του ναού που δεν περιέχουν αρχαίο υλικό.
- Συμπλήρωση με νέο λίθο των σπονδύλων που περιέχουν τμήματα αυθεντικού υλικού. Η σύνδεση νέου και αρχαίου λίθου θα επιτυγχάνεται με χρήση κονιάματος πάχους 1 cm.
- Πλήρωση με κονίαμα της κεντρικής κυλινδρικής οπής των αρχαίων λίθων από τους οποίους έχει αφαιρεθεί το σκυρόδεμα.
- Συμπλήρωση με κονίαμα των ακμών και γωνιών του αρχαίου λίθου που έχουν αποκολληθεί για την αποκατάσταση της αρχικής τους γεωμετρίας. Τέτοιες αποτμήσεις σημειώνονται σε πολλές στάθμες των κίωνων, με την πλέον χαρακτηριστική να είναι αυτή του γωνιακού κιονόκρανου, που χρήζει αποκατάστασης για να είναι σε θέση να φέρει τα φορτία του υπερκείμενου επιστυλίου.

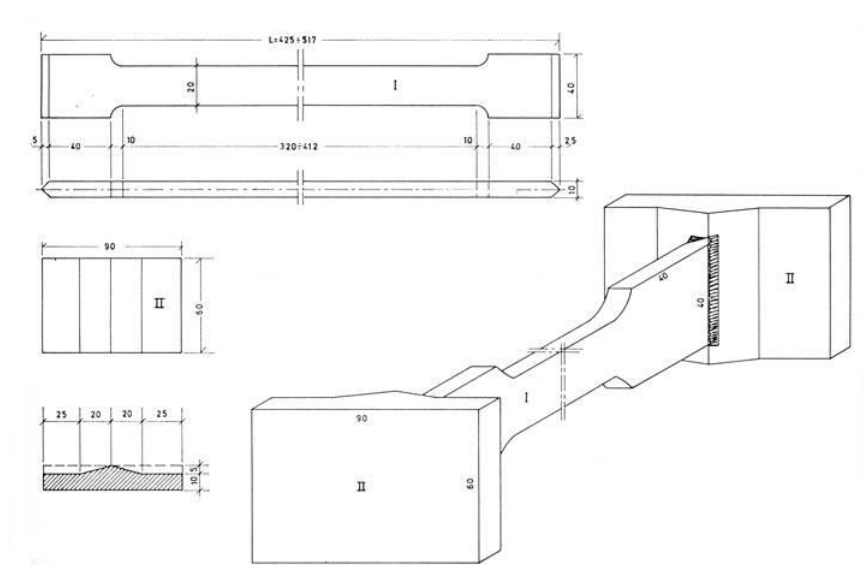
Η αποκατάσταση των μελών του θριγκού προβλέπει :

- Ανακατασκευή του επιστυλίου και των υπόλοιπων μελών του θριγκού από τεχνητό λίθο από κονίαμα, με ενσωμάτωση των αρχαίων θραυσμάτων και του τμήματος του αρχαίου αετώματος που διασώζεται. Η επιλογή του τεχνητού λίθου προκρίνεται έναντι του φυσικού λίθου, καθώς είναι δύσκολη η εύρεση τεμαχίων φυσικού λίθου καλής ποιότητας και επαρκώς μεγάλων διαστάσεων, όπως απαιτούνται στο μνημείο.
- Οι δύο πρώτες στάθμες του θριγκού αποτελούν το επιστύλιο και απαρτίζονται από τέσσερις δοκούς, δύο σε κάθε διεύθυνση. Για τον καθορισμό της μορφής τους αντλήθηκαν στοιχεία από τη δομή του επιστυλίου άλλων αρχαίων ναών αυτού του ρυθμού, καθώς και από τη μορφή των σωζόμενων αρχαίων μελών του μνημείου όπως συνέβη στη γωνία της δεύτερης στάθμης.

- Η σύνδεση των δοκών επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης οριζόντιων συνδέσμων τιτανίου , διατομής 2 cm × 1 cm και μήκους 50 cm, η διάταξη των οποίων φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες.
- Η σύνδεση των κιονόκρανων με τα υπερκείμενα επιστύλια, καθώς και των δοκών της κάτω και άνω στάθμης του θριγκού επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης κατακόρυφων βλήτρων διατομής 2 cm², οι θέσεις των οποίων φαίνεται επίσης στις εικόνες που ακολουθούν .



Εικόνα 23. Αποτύπωση της θέσης των συνδέσμων στην κάτοψη της πρώτης (αριστερά) και δεύτερης (δεξιά) στάθμης του θριγκού. Το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στις θέσεις των οριζόντιων συνδέσμων, ενώ με πράσινο, κόκκινο και γαλάζιο χρώμα αποτυπώνονται τα βλήτρα κάτω από την πρώτη, τη δεύτερη και την τρίτη στάθμη αντίστοιχα.



Εικόνα 24. Απεικόνιση της μορφής των οριζόντιων συνδέσμων τιτανίου των δοκών του θριγκού.

4.2.2 Εισαγωγή γεωμετρίας φορέα

Η εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS σύμφωνα με τη μεθοδολογία αποκατάστασης που αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, βασίστηκε στην ψηφιακή αποτύπωση του μνημείου με τη χρήση του προγράμματος Geomagis από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του Τομέα Τοπογραφίας της Σχολής Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου με επιστημονικό υπεύθυνο τον καθηγητή Χαράλαμπο Ιωαννίδη, η οποία φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.

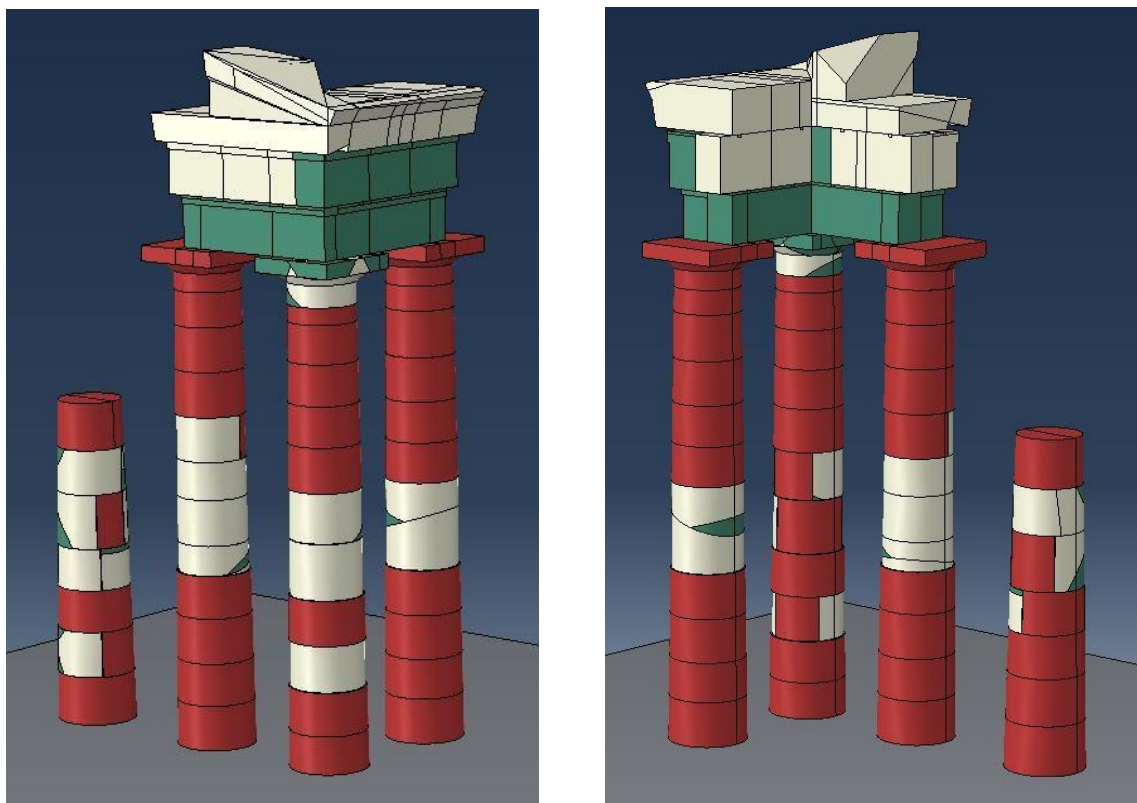


Εικόνα 25. Τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση του μνημείου από το Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας του Ε.Μ.Π.

Για τη σχεδίαση των κίωνων, τα ύψη στις στάθμες των σπονδύλων προέκυψαν από τις θέσεις των αρμών, όπως αυτές φαίνονται στην ψηφιακή αποτύπωση. Αρχικά σχεδιάστηκαν οι σπόνδυλοι των κίωνων ξεχωριστά ως παραμορφώσιμα σώματα στο χώρο (3D deformable bodies) με την εντολή "create part". Η προσομοίωση των σπονδύλων στο μοντέλο έγινε με σχεδίαση τους ως κόλουργων κώνων. Έπειτα από επιλογή πολλών σημείων στην πλευρική επιφάνεια κάθε κίονα, έγινε επιλογή του βέλτιστου κόλουργου κώνου για την επιφάνεια αυτή, μέσω ενός αλγορίθμου ελαχιστοποίησης των τετραγώνων της διαφοράς των σημείων αυτών από την παράπλευρη επιφάνεια του βέλτιστου κόλουργου κώνου. Οι κόλουργοι κώνοι για τους σπονδύλους από νέο λίθο διαφέρουν από αυτούς για αρχαίο που έχουν ελαφρώς μικρότερη διάμετρο. Για τους σπόνδουλους από αρχαίο λίθο η εσωτερική διάμετρος διάτρησης θεωρήθηκε 0.78 m, όπως προέκυψε από την τρισδιάστατη ψηφιακή αποτύπωση. Ακολούθως με την ομάδα εντολών "assembly" συναρμολογήθηκαν όλα τα μέρη του μοντέλου και αυτό απέκτησε την τελική του μορφή.

Επειδή ο εντοπισμός των αρχαίων λίθων από την ψηφιακή αποτύπωση του ναού δεν ήταν εύκολος ο ακριβής εντοπισμός των αρχαίων λίθων, ειδικά στο θριγκό, αντλήθηκαν πληροφορίες και από την πρόταση της Αρχιτεκτονικής μελέτης αποκατάστασης (Αντωνίου 2016). Ακόμα όμως και αν υπάρχουν κάποιες αναντιστοιχίες ανάμεσα στο φορέα του μοντέλου και την πραγματική εικόνα του ναού στις θέσεις των νέων και αρχαίων λίθων, αυτό δεν επηρεάζει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων καθώς η πυκνότητα των δύο υλικών δεν διαφέρει σημαντικά. Ακόμα όπως προκύπτει και από τα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 5, οι τάσεις που αναπτύσσονται στο θριγκό δεν είναι πολύ μεγάλες και επομένως η διαφοροποίηση στο μέτρο ελαστικότητας των δύο υλικών δεν επηρεάζει αισθητά τα αποτελέσματα.

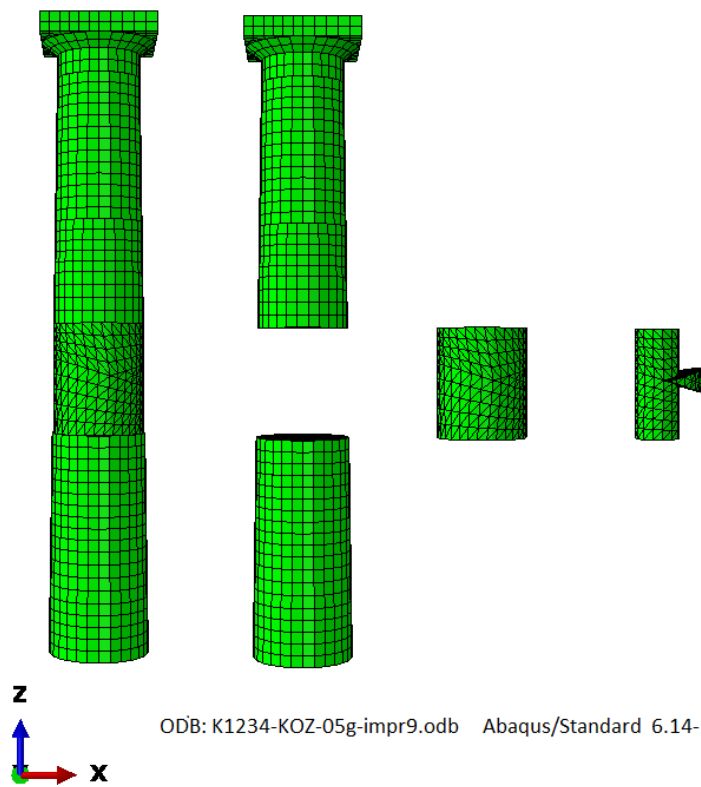
Η προσομοίωση του ναού στο πρόγραμμα ABAQUS φαίνεται στο ακόλουθο Εικόνα, όπου το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο νέο φυσικό λίθο, το λευκό στον αρχαίο και το πράσινο στον τεχνητό λίθο και το κονίαμα των συμπληρωμάτων στους κίονες.



Εικόνα 26. Εισαγωγή της γεωμετρίας του φορέα στο πρόγραμμα ABAQUS. Το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στο νέο φυσικό λίθο, το λευκό στον αρχαίο και το πράσινο στον τεχνητό λίθο και το κονίαμα των συμπληρωμάτων.

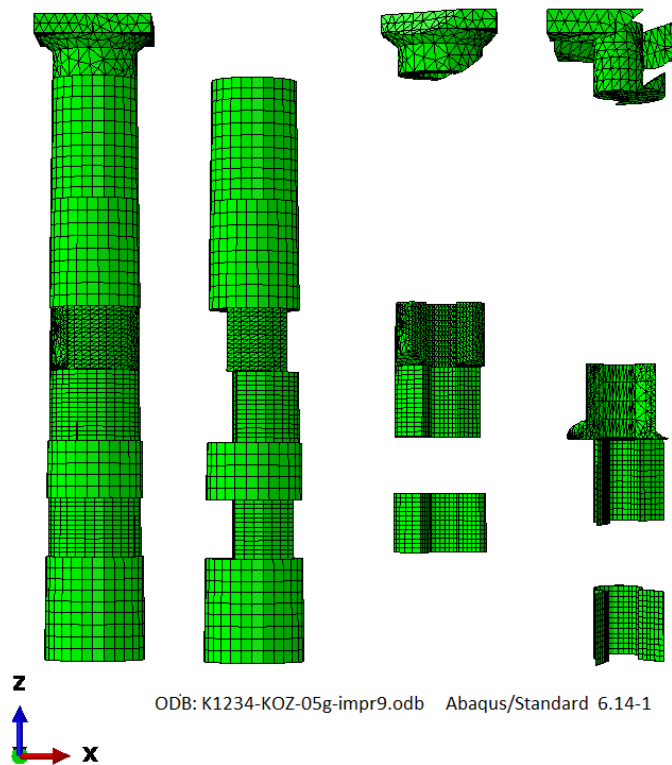
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά η διάρθρωση της δομής κάθε μέλους του ναού ξεχωριστά σε αρχαίο λίθο, νέο λίθο και κονίαμα :

- Κίονας K1



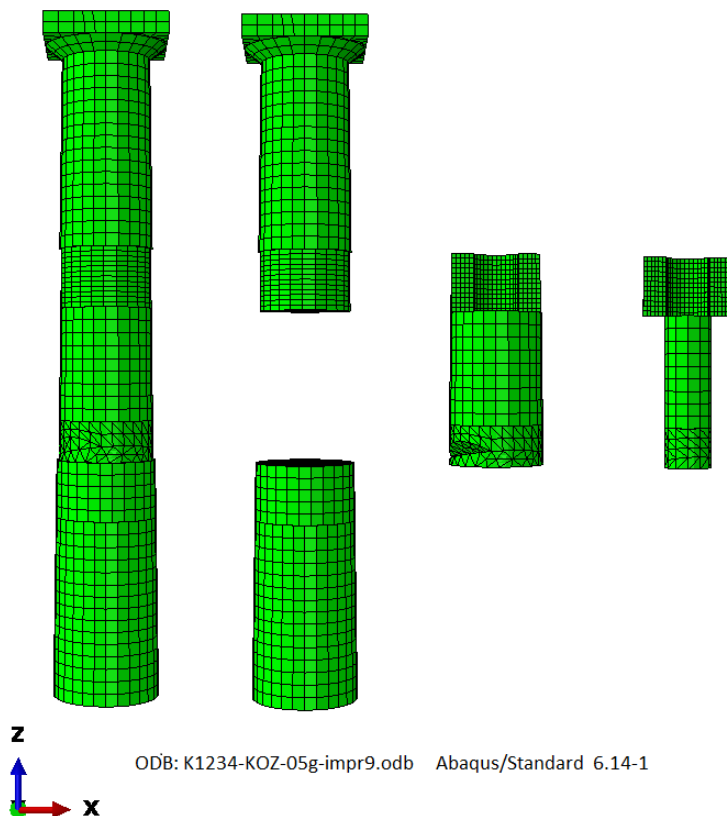
Εικόνα 27. Δομή κίονα K1 σε τμήματα (τμήμα 1ο: ολόκληρος κίονας, τμήμα 2ο: νέος λίθος, τμήμα 3ο: αρχαίος λίθος, τμήμα 4ο: κονιάματα).

- Κίονας K2



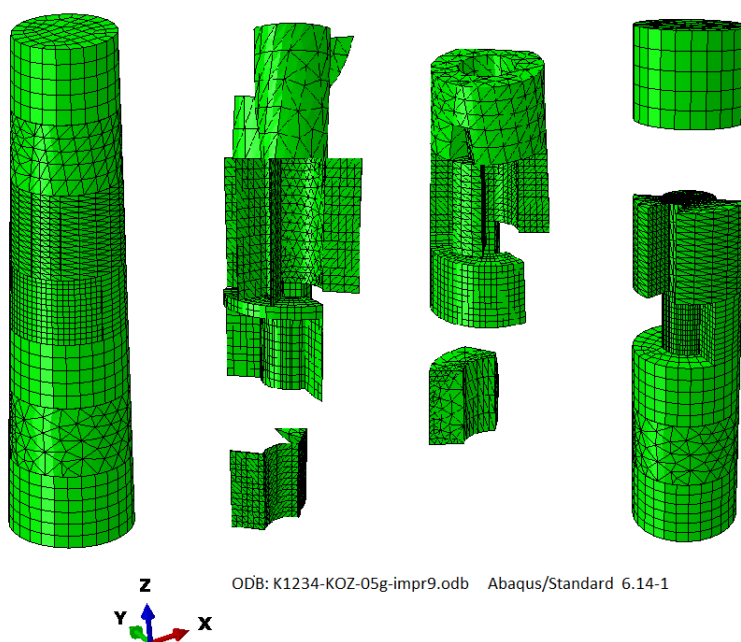
Εικόνα 28. Δομή κίονα K2 σε τμήματα (τμήμα 1ο: ολόκληρος κίονας, τμήμα 2ο: νέος λίθος, τμήμα 3ο: αρχαίος λίθος, τμήμα 4ο: κονιάματα).

Κίονας K3



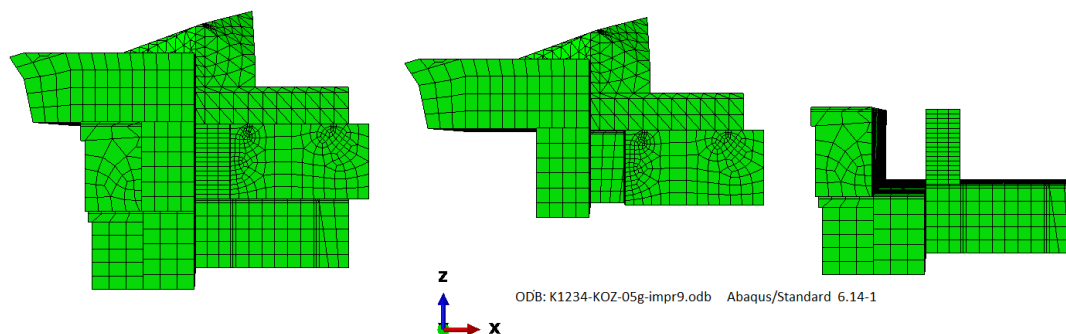
Εικόνα 29. Δομή κίονα K3 σε τμήματα (τμήμα 1ο: ολόκληρος κίονας, τμήμα 2ο: νέος λίθος, τμήμα 3ο: αρχαίος λίθος, τμήμα 4ο: κονιάματα).

Κίονας K4



Εικόνα 30. Δομή κίονα K4 σε τμήματα (τμήμα 1ο: ολόκληρος κίονας, τμήμα 2ο: νέος λίθος, τμήμα 3ο: αρχαίος λίθος, τμήμα 4ο: κονιάματα).

Θριγκός



Εικόνα 31. Δομή Θριγκού σε τμήματα (τμήμα 1ο: ολόκληρος ο Θριγκός, τμήμα 2ο: αρχαίος λίθος, τμήμα 3ο: κονιάματα).

4.2.3 Παραδοχές μοντέλου

Για τις αριθμητικές επιλύσεις που ακολουθούν τα λιθοσώματα θεωρήθηκαν παραμορφώσιμα, ώστε να είναι δυνατός ο υπολογισμός των τάσεων που αναπτύσσονται σε αυτά. Οι αρμοί δηλώθηκαν στο μοντέλο ως «hard contacts» ώστε να αναπτύσσονται μόνο θλιπτικές και όχι εφελκυστικές τάσεις, ενώ η αντοχή σε διάτμηση προκύπτει από τις δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται. Στα μέλη του ναού που έχει χρησιμοποιηθεί κονίαμα για την συγκόλληση τους, αυτό δηλώνεται σαν ξεχωριστό στοιχείο πάχους 1 cm θεωρώντας τις επιφάνειες σύνδεσης επίπεδες. Η προσομοίωση των μεταλλικών πόλων και συνδέσμων του θριγκού στο μοντέλο έγινε με τη χρήση ελατηρίων.

Οι επιλύσεις πραγματοποιήθηκαν με θεώρηση ελαστικών ιδιοτήτων υλικών, καθώς η ανελαστική ανάλυση θα ήταν εξαιρετικά χρονοβόρα. Έγινε εισαγωγή των ιδιοτήτων των υλικών χρησιμοποιώντας τις εντολές "property". Ως μονάδες μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν για την πυκνότητα τα Mg/m^3 και για το μέτρο ελαστικότητας (Young) τα GPa. Αναλυτικά οι ελαστικές μηχανικές ιδιότητες των επιλεγόμενων υλικών παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα :

Πίνακας 7. Ελαστικές μηχανικές ιδιότητες των υλικών

Ιδιότητα	Υλικό	Τιμή	
Μέτρο ελαστικότητας	Αρχαίος λίθος	7	GPa
	Νέος λίθος	7	GPa
	Κονίαμα	16	GPa
	Σύνδεσμοι τιτανίου	105	GPa
Πυκνότητα	Αρχαίος λίθος	2.2	Mg/m^3
	Νέος λίθος	2.0	Mg/m^3
	Κονίαμα	1.9	Mg/m^3
Λόγος Poisson	Αρχαίος λίθος	0.25	
	Νέος λίθος	0.25	
	Κονίαμα	0.25	

Όμως όπως αναφέρθηκε, στους αρχαίους ναούς όπως είναι ο ναός του Πύθιου Απόλλωνα, η δεσπόζουσα μορφή ταλάντωσης των κιόνων είναι ο λικνισμός (Psycharis *et al.* 2000 & 2003, Mouzakis *et al.* 2002, Papantonopoulos *et al.* 2002, Dasiou *et al.* 2009a&b μεταξύ άλλων) ,ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσεται και σημαντική ολίσθηση μεταξύ των σπονδύλων τους. Επομένως στους αρμούς ανάμεσα στα μέλη του ναού έγινε θεώρηση μη γραμμικών ιδιοτήτων, ώστε να είναι εφικτή η ύπαρξη ολίσθησης και λικνισμού κατά τον οποίο οι επιφάνειες αποκολλούνται μεταξύ τους.

Έγινε εισαγωγή των μελών του ναού ως ανεξάρτητα αυτοτελή τμήματα (parts) στο μοντέλο. Καθώς τα μέλη αυτά δεν είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους με κάποιο κονίαμα, έγινε θεώρηση σύνδεσης τους με ειδικά στοιχεία επαφής (contacts). Έγινε επιλογή hard contacts που επιτρέπουν την ανάπτυξη μόνο θλιπτικών τάσεων και όχι εφελκυστικών. Οι θλιπτικές τάσεις επαφής αναπτύσσονται μόνο εφόσον οι επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους, ενώ αν αυτές απομακρυνθούν οι τάσεις μηδενίζονται. Στη διατμητική διεύθυνση των αρμών έγινε εφαρμογή του νόμου τριβής μέσω της μεθόδου ποινής (penalty method) με συντελεστή τριβής $\mu = 0.7$.

Για τη σύνδεση των μελών του θριγκού μεταξύ τους χρησιμοποιούνται τόσο σύνδεσμοι τιτανίου στην οριζόντια διεύθυνση, όσο και βλήτρα στην κατακόρυφη διεύθυνση.

Για την εισαγωγή στο μοντέλο των συνδέσμων τιτανίου στα επιστύλια και τα υπόλοιπα μέλη του θριγκού έγινε προσομοίωση τους με ραβδωτά στοιχεία δικτυώματος (truss elements) που παρουσιάζουν ανελαστική συμπεριφορά. Για την καλύτερη υπολογιστική συμπεριφορά των στοιχείων αυτών και την αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων, τα άκρα τους συνδέθηκαν με τους κόμβους σε μια επιφάνεια 9 cm x 6 cm κάθετα στα στοιχεία σε κάθε άκρο (επιφάνεια αντίστοιχη με αυτήν των παρειών των συνδέσμων) μέσω κινηματικών περιορισμών στερεάς κίνησης.

Για την εισαγωγή στο μοντέλο των βλήτρων που συνδέουν τα μέλη του θριγκού στην κατακόρυφη διεύθυνση μεταξύ τους, καθώς και με τα υποκείμενα κιονόκρανα στο οποίο εδράζονται τα επιστύλια, έγινε προσομοίωση τους με διατμητικά ελατήρια μεταξύ των αντίστοιχων κόμβων στις διεπιφάνειες. Λόγω περιορισμών του μοντέλου στο ABAQUS στην εισαγωγή διατμητικών ελατηρίων με μη γραμμική συμπεριφορά, έγινε θεώρηση ότι τα ελατήρια αυτά είναι ελαστικά. Όμως τα ελατήρια αυτά, με ενεργό μήκος 2 cm διαρρέουν για σχετική μετακίνηση στην οριζόντια διεύθυνση των μελών που συνδέουν ίση με 8×10^{-5} m. Επομένως διαρρέουν ακόμα και σε σεισμούς μικρής έντασης και δεν συμμετέχουν ουσιαστικά στην παραλαβή των σεισμικών δράσεων.

4.3 Στάδια ανάλυσης

Όπως προαναφέρθηκε όλες οι αναλύσεις που έγιναν χρησιμοποιούν αριθμητικές επιλύσεις με τον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS.

Η ανάλυση του φορέα στο μοντέλο ακολούθησε τα ακόλουθα στάδια:

- Στατική επίλυση του φορέα, με επιβολή του ιδίου βάρους του ναού για των υπολογισμό των κατακόρυφων φορτίων. Για την επιβολή της βαρύτητας χρησιμοποιείται η εντολή "apply gravity" με επιτάχυνση $9,81 \text{ m/s}^2$.
- Δυναμική ανάλυση για κάθε μία από τις σεισμικές διεγέρσεις που επιλέχθηκαν. Σε αυτό το στάδιο έγινε επιβολή της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης ως συνοριακής συνθήκης σε κάθε βαθμό ελευθερίας της επιφάνειας έδρασης της βάσης του ναού με τη χρήση της εντολής "apply acceleration" για την εκτέλεση της δυναμικής ανάλυσης. Η πλέον δυσμενής συνοριακή συνθήκη είναι η επιβολή της ισχυρής κίνησης στη διεύθυνση της διχοτόμου της ορθής γωνίας που σχηματίζουν οι τρεις κίονες, καθώς αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα ανατροπής της ανωδομής του ναού.

Επειδή κατά την επιβολή της δυναμικής φόρτισης στο ναό κυριαρχεί ο λικνισμός, η ταλάντωση του δεν παρουσιάζει την απόσβεση που έχουν οι συνήθεις κατασκευές και για το λόγο αυτό η απόσβεση Rayleigh μπορεί να θεωρηθεί μηδενική (Parantonopoulos *et al.* 2002). Αν και θα ήταν επιθυμητή η επιβολή μιας απόσβεσης μετά την ολοκλήρωση της σεισμικής δράσης για την επίτευξη της ισορροπίας του φορέα, εν τούτοις περιορισμοί του κώδικα ABAQUS δεν το επιτρέπουν και για αυτό η απόσβεση θεωρείται μηδενική καθ' όλη τη διάρκεια της ανάλυσης.

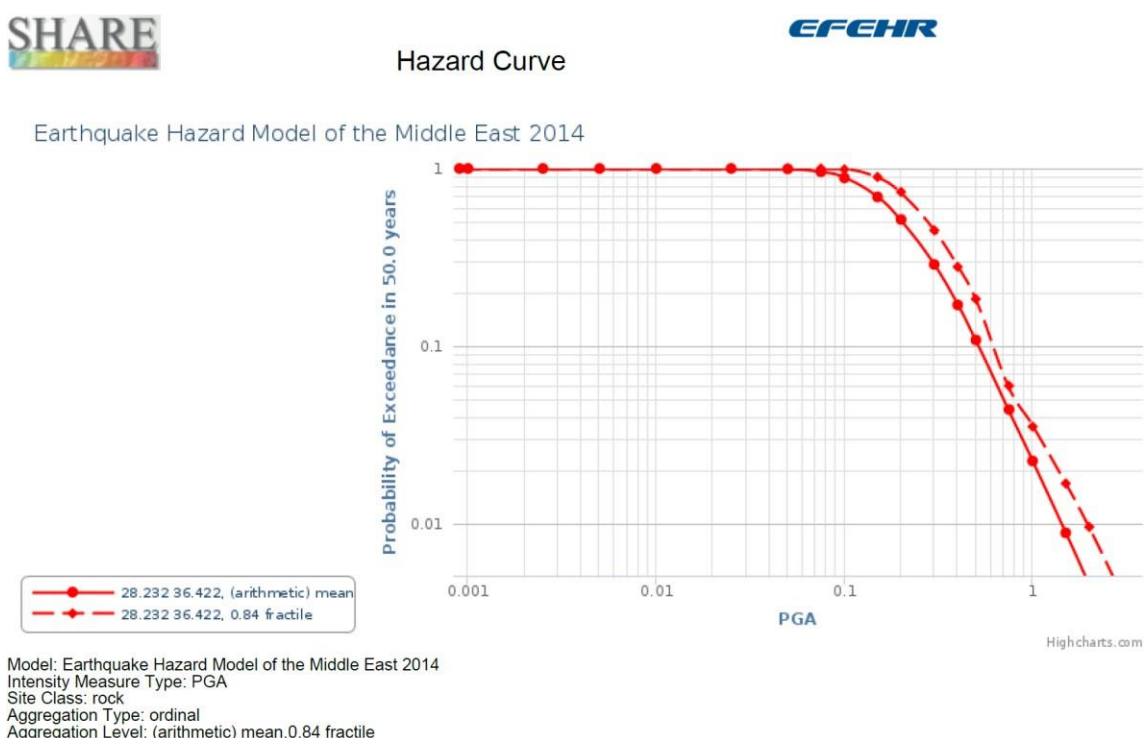
Στο υπολογιστικό μοντέλο τα βήματα ανάλυσης δηλώνονται στο module "steps". Το αρχικό βήμα "initial step", το οποίο δημιουργείται αυτόματα από το Abaqus, ορίζει τις συνοριακές συνθήκες και τις ιδιότητες αλληλεπίδρασης. Ακολουθεί το δεύτερο βήμα κατά το οποίο γίνεται η επιβολή της βαρύτητας με την εντολή "apply gravity" με επιτάχυνση $9,81 \text{ m/s}^2$. Το τρίτο βήμα αφορά την επιβολή της χρονοϊστορίας της επιτάχυνσης ως συνοριακής συνθήκης σε κάθε βαθμό ελευθερίας της επιφάνειας έδρασης της βάσης του ναού με τη χρήση της εντολής "apply acceleration" για την εκτέλεση της δυναμικής ανάλυσης. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, με την εντολή "interaction" ορίζονται οι επιφάνειες αλληλεπίδρασης, δηλαδή οι βάσεις και οι κορυφές των σπονδύλων, η κάτω επιφάνεια των επιστύλιων, η άνω του στυλοβάτη και οι επιφάνειες των μελών της ανωδομής στα σημεία σύνδεσής τους.

Τα φορτία υπολογίζονται στο module "load". Τα ίδια βάρη των μελών του φορέα υπολογίζονται από την πυκνότητα των υλικών τους. Για τον ορισμό των συνοριακών συνθηκών, δηλαδή των συνθηκών στήριξης του φορέα χρησιμοποιήθηκε η ομάδα εντολών "BCs--> create-->Type: Displacement/Rotation" αφού η βάση θεωρείται πακτωμένη, λόγω του φυσικού βράχου επί του οποίου έχει θεμελιωθεί ο ναός. Αυτό σημαίνει ότι δεσμεύονται όλοι οι βαθμοί ελευθερίας στις βάσεις των κίωνων κατά το βήμα "apply gravity" ενώ κατά το βήμα "apply acceleration" η διεύθυνση στην οποία ασκείται επιτάχυνση ελευθερώνεται, μεταβάλλοντας τη συνοριακή συνθήκη στις δύο οριζόντιες συνιστώσες της κίνησης.

4.4 Επιλογή σεισμικών διεγέρσεων

Η επιλογή των κατάλληλων σεισμικών διεγέρσεων στις οποίες θα υποβληθεί ο φορέας στο στάδιο της δυναμικής ανάλυσης είναι καθοριστικής σημασίας για τον προσδιορισμό της σεισμικής απόκρισης του. Τα σεισμικά σενάρια θα πρέπει να παρουσιάζουν συμβατότητα με τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής του μνημείου. Για το σκοπό αυτό είναι σημαντικό να πραγματοποιείται μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας για τη θέση του μνημείου, ώστε τα επιταχυνσιογραφήματα που θα εφαρμοστούν στο στάδιο της δυναμικής ανάλυσης να προσομοιάζουν τα επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών που είναι πιθανό να συμβούν στην περιοχή. Παράλληλα τα σεισμικά σενάρια που θα επιλεγούν πρέπει να καλύπτουν ολόκληρο το εύρος του αναμενόμενου συχνοτικού περιεχομένου της εδαφικής κίνησης, και ιδιαίτερα της δεσπόζουσας ιδιοπεριόδου του μνημείου.

Για τον προσδιορισμό της αναμενόμενης εδαφικής επιτάχυνσης στην αρχαία Ακρόπολη της Ρόδου, όπου βρίσκεται το μνημείο αρχικά έγινε πιθανοτική εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Αυτή έγινε χρησιμοποιώντας τη βάση δεδομένων European Facility for Earthquake Hazard and Risk, EFEHR. Για τις συντεταγμένες του μνημείου που είναι 36.44° βόρειο πλάτος και 28.23° ανατολικό μήκος, από τη βάση δεδομένων EFEHR προέκυψε η ακόλουθη πιθανοτική καμπύλη εδαφικής επιτάχυνσης (Hazard Curve).



Εικόνα 32. Πιθανοτική καμπύλη εδαφικής επιτάχυνσης (Hazard Curve) στην αρχαία Ακρόπολη της Ρόδου σύμφωνα με τη βάση δεδομένων EFEHR. Η συνεχής καμπύλη αντιστοιχεί στη μέση τιμή και η διακεκομμένη στη μέση τιμή συν μία τυπική απόκλιση.

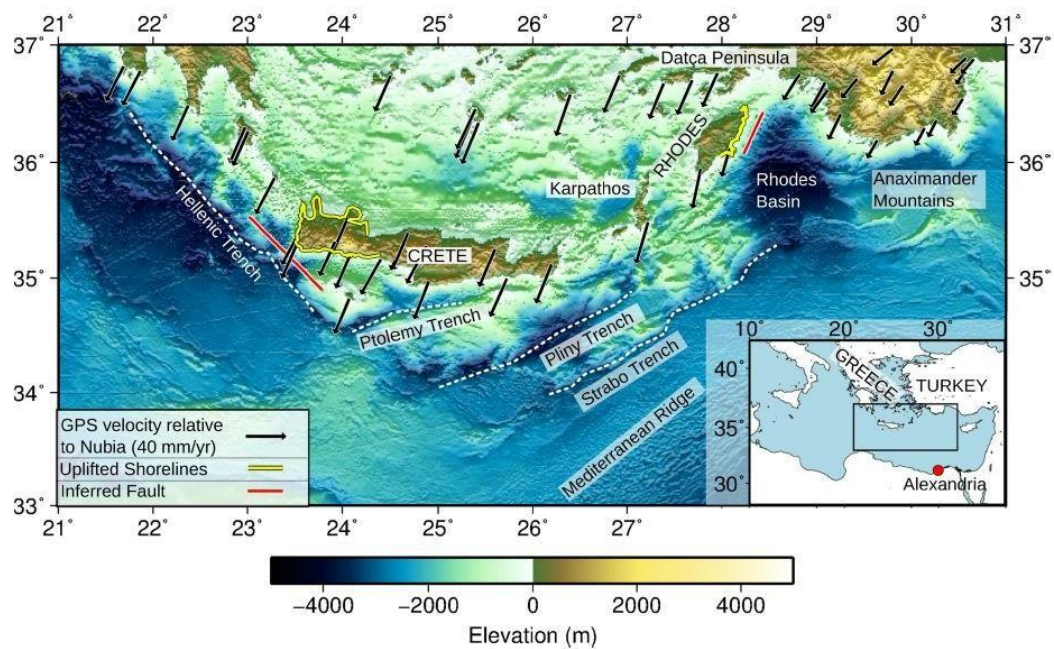
Οι αναμενόμενες τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης για την αρχαία Ακρόπολη της Ρόδου ανάλογα με την πιθανότητα υπέρβασης που θεωρείται, όπως προέκυψαν μέσα από τη

βάση δεδομένων ΕΦΕΗΡ παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Περίοδος επανάληψης	Πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη	ΕΦΕΗΡ: PGA (g)		ΕΚ8: a_g (g)
		Μέση τιμή	Μέση τιμή + 1 τ.α.	
500 έτη	10%	0.51	0.62	0.24
1000 έτη	5%	0.70	0.81	0.31
2000 έτη	2.5%	0.93	1.20	0.40

Πίνακας 8. Τιμές της εδαφικής επιτάχυνσης στην Αρχαία Ακρόπολη της Ρόδου συναρτήσει της περιόδου επανάληψης σύμφωνα με ΕΦΕΗΡ και ΕΚ8-1.

Στη συνέχεια από τη ντετερμινιστική εκτίμηση της σεισμικής διέγερσης που θα προκύψει αν ενεργοποιηθεί το ρήγμα που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 20 km ανατολικά της Ρόδου και φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, η μέση τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) συναρτήσει της απόστασης από το ρήγμα δίνεται στον πίνακα που ακολουθεί :



Εικόνα 33. Οριζοντιογραφική αποτύπωση της θέσης του ρήγματος ανατολικά της Ρόδου (Howell et al. 2015)

Μοντέλο	R_x (km)							
	0	2.5	5	10	20	30	40	50
ASK14	0.665	0.668	0.652	0.606	0.533	0.485	0.446	0.407
BSSA14	0.469	0.469	0.469	0.469	0.469	0.469	0.469	0.469
CB14	0.482	0.496	0.494	0.467	0.411	0.374	0.346	0.321
CY14	0.709	0.784	0.859	0.898	0.749	0.601	0.494	0.417
IM14	0.839	0.742	0.654	0.525	0.367	0.277	0.218	0.178
ITA10	1.062	1.062	1.062	1.062	1.062	1.062	1.062	1.062
ABS13	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563	0.563
Μέσος όρος	0.684	0.683	0.679	0.656	0.593	0.547	0.514	0.488

Πίνακας 9. Εκτιμώμενη μέση τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA (g) συναρτήσει της απόστασης από το ρήγμα που βρίσκεται ανατολικά της Ρόδου.

Η αναζήτηση των σεισμικών σεναρίων που θα χρησιμοποιηθούν έγινε για σεισμούς μεγέθους 6.5 έως 7.5 που προέρχονται από κανονικά ή ανάστροφα ρήγματα και έχουν καταγραφεί σε σκληρό έως βραχώδες έδαφος, ώστε να προσομοιάζουν τις εδαφικές συνθήκες στη θέση του μνημείου. Ακόμα λήφθηκε μέριμνα ώστε οι σεισμικές αυτές διεγέρσεις να βρίσκονται πλησίον του ρήγματος, σε απόσταση έως και 20 km από αυτό.

Μία ακόμα πολύ σημαντική παράμετρος που λήφθηκε υπόψη κατά την επιλογή των σεισμικών καταγραφών είναι η ανάγκη διαφοροποίησης των σεισμών μεταξύ τους ώστε να καλύπτουν το μεγαλύτερο δυνατό συχνοτικό εύρος στο φάσμα απόκρισης τους. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στην επιλογή σεισμικών καταγραφών που παρουσιάζουν φαινόμενα κατευθυντικότητας καθώς η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων ναών έχει δείξει ότι τέτοιες καταγραφές δημιουργούν πολύ σημαντικές βλάβες σε αυτούς. Πρόκειται για σεισμικές διεγέρσεις που εντοπίζονται πλησίον του ρήγματος, εγγύς πεδίου, και περιέχουν παλμούς κατευθυντικότητας. Οι παλμοί αυτοί είναι μεγάλης σχετικά περιόδου και δημιουργούν σημαντικά προβλήματα στην ευστάθεια των αρχαίων ναών. Επομένως έγινε επιλογή και τέτοιων σεισμικών καταγραφών, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για την απόκριση του ναού σε τέτοιες δυσμενείς περιπτώσεις. Με βάση τα κριτήρια που αναφέρθηκαν έγινε η επιλογή των σεισμικών σεναρίων που θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση. Πρόκειται για σεισμικές διεγέρσεις που έχουν καταγραφεί τόσο στην Ελλάδα (Κοζάνη), όσο και στην Ιταλία (Campano), καθώς και τις Η.Π.Α. (Northridge, Loma Prieta).

Από τις 6 καταγραφές που επιλέχθηκαν, οι 4 κρίθηκε αναγκαίο να στραφούν κατάλληλα ώστε η L συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης να αντιστοιχεί στη διεύθυνση που μεγιστοποιείται ο δείκτης παλμικότητας (Kardoutsou *et al.* 2017).

Τα χαρακτηριστικά των σεισμικών διεγέρσεων που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα :

Σεισμός	Ημερομηνία	Mw	Καταγραφή	Συμβολισμός	Rx(km)	pga(cm/s ²)	Tr1 (sec)	Tr2 (sec)	Μεγέθυνση PGA=0.5g	Μεγέθυνση PGA=0.5g
Campano Lugano, Italy	1980	6.9	Bagnoli-Irpinio	BGI	8	L : 183.68 T : 123.44	1.28 1.22	2.18 2.18	3.257	4.560
Northridge, California	1994	6.7	Santa Susana Ground	SSU	17	L : 279.90 T : 227.10	1.08 0.58	1.90 1.94	1.945	2.724
Northridge, California	1994	6.7	L.A. 00	LAO	19	L : 365.23 T : 282.52	0.74 0.54	1.50 1.16	1.527	2.138
Northridge, California	1994	6.7	L.A. Dam	LDM	6	L : 462.11 T : 347.28	1.30 2.36	— 1.12	1.224	1.714
Loma Prieta, California	1989	6.9	Los Gatos-Lexing Dam	LEX	5	L : 432.85 T : 446.75	1.06 1.06	— —	1.115	1.562
Kozani, Greece	1995	6.6	Kozani Prefect. Blg	KOZ	20	L : 203.90 T : 139.60	1.16 0.40	0.56 1.08	2.907	4.070

1. Στις στραμμένες καταγραφές, η συνιστώσα L αντιστοιχεί στη διεύθυνση του ισχυρότερου δυνατού παλμού.
2. Περίοδος κύριου παλμού. Αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος ψευδοταχυτήτων ($T > 0.4$ s) για απόσβεση 5%.
3. Περίοδος δεύτερου παλμού. Αντιστοιχεί στην 2^η κορυφή του φάσματος ψευδοταχυτήτων πέραν της Tr-1.

Πίνακας 10. Χαρακτηριστικά σεισμικών καταγραφών

Στην παρούσα εργασία για λόγους πληρότητας έγιναν αναλύσεις για δύο στάθμες επιτελεστικότητας, τόσο αυτής για σεισμούς με περίοδο επαναφοράς 500 χρόνια, όσο και τη δυσμενέστερη για σεισμούς με περίοδο επαναφοράς τα 1000 χρόνια. Αντιθέτως δεν

πραγματοποιήθηκε ανάλυση για σεισμικές διεγέρσεις με περίοδο επανάληψης τα 2000 χρόνια (που αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 2%) καθώς είναι εξαιρετικά δυσμενής, ενώ άλλωστε η εξέταση της απόκρισης του μνημείου στις δύο προηγούμενες στάθμες επιτελεστικότητας δίνει αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για την συμπεριφορά του μνημείου, όπως θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 5.

Η σεισμική διέγερση με περίοδο επανάληψης τα 500 έτη αντιστοιχεί στο επίπεδο σεισμικής δράσης με το οποίο σχεδιάζονται σύγχρονες κατασκευές συνήθους σπουδαιότητας. Αντιστοιχεί στην στάθμη επιτελεστικότητας για άμεση χρήση μετά το σεισμό κατά την οποία αναμένεται ότι καμιά λειτουργία του κτιρίου δεν διακόπτεται κατά τη διάρκεια και μετά τον σεισμό, εκτός ενδεχομένως από μερικές δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Είναι πιθανό να παρουσιασθούν ορισμένες πολύ αραιές τριχοειδείς ρωγμές καμπτικού τύπου στον φέροντα οργανισμό.

Η σεισμική διέγερση με περίοδο επανάληψης τα 1000 έτη αντιστοιχεί στο επίπεδο σεισμικής δράσης με το οποίο σχεδιάζονται σύγχρονες κατασκευές μεγάλης σπουδαιότητας (μεγαλύτερης από Σ3 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8). Αντιστοιχεί στην στάθμη επιτελεστικότητας για την προστασία ζωής, όπου αναμένεται να παρουσιαστούν επισκευάσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου, χωρίς όμως να συμβεί θάνατος ή σοβαρός τραυματισμός ατόμων εξαιτίας των βλαβών αυτών, και χωρίς να συμβούν μεγάλης κλίμακας βλάβες στην κατασκευή.

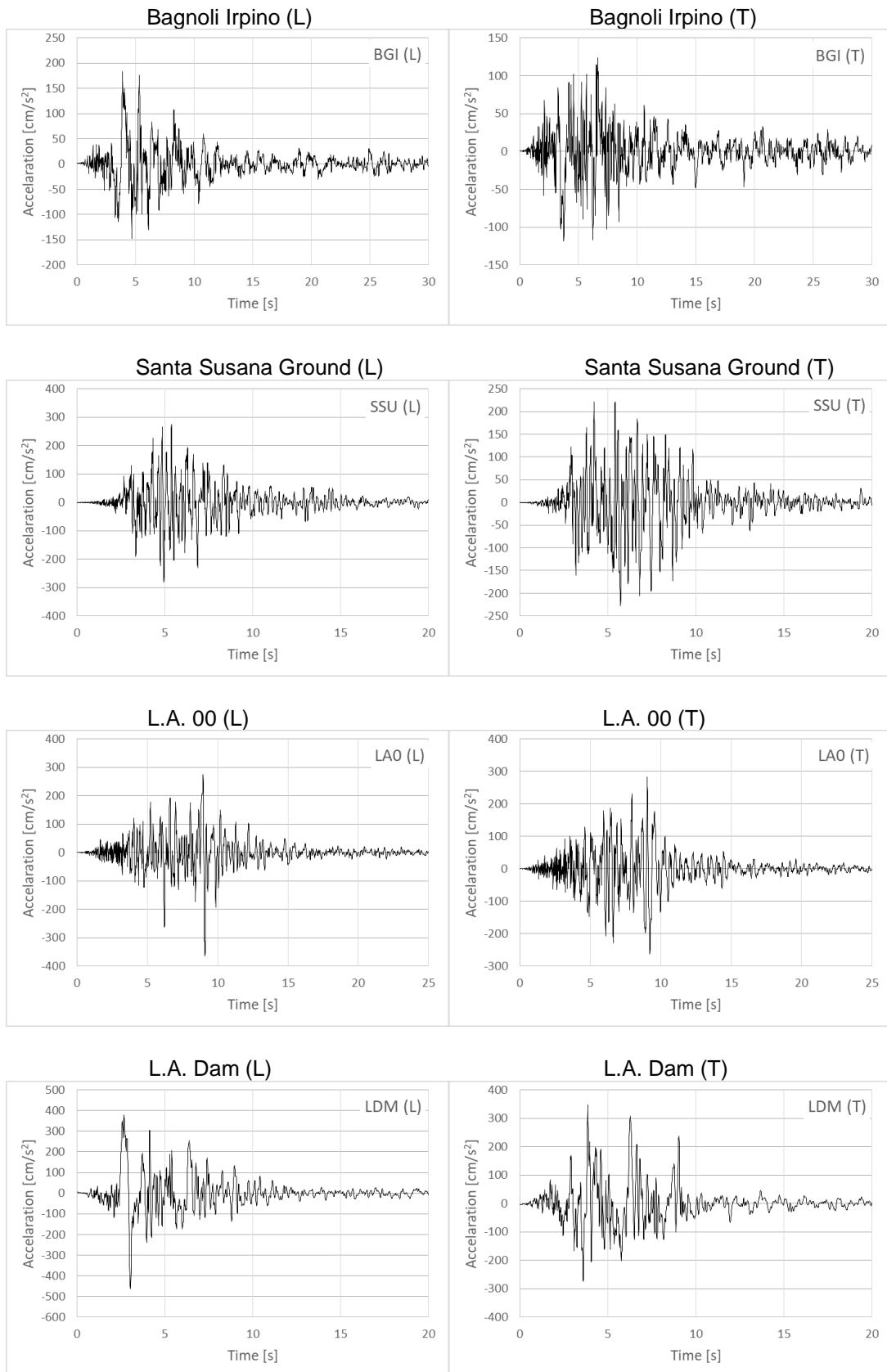
Για κάθε σεισμική καταγραφή που επιλέχθηκε, υπολογίστηκε ο γεωμετρικός μέσος των δύο οριζόντιων συνιστωσών της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) , που είναι ίσος με την τετραγωνική ρίζα του γινομένου τους. Στη συνέχεια έγινε πολλαπλασιασμός των γεωμετρικών μέσων με κατάλληλους συντελεστές κλιμάκωσης όπως φαίνεται στις δύο τελευταίες στήλες του προηγούμενου πίνακα, ούτως ώστε ο γεωμετρικός μέσος της μέγιστης επιτάχυνσης των δύο οριζόντιων συνιστωσών να είναι :

- 0.50 g για κλιμάκωση σε σεισμούς με περίοδο επανάληψης 500 έτη
- 0.70 g για κλιμάκωση σε σεισμούς με περίοδο επανάληψης 1000 έτη.

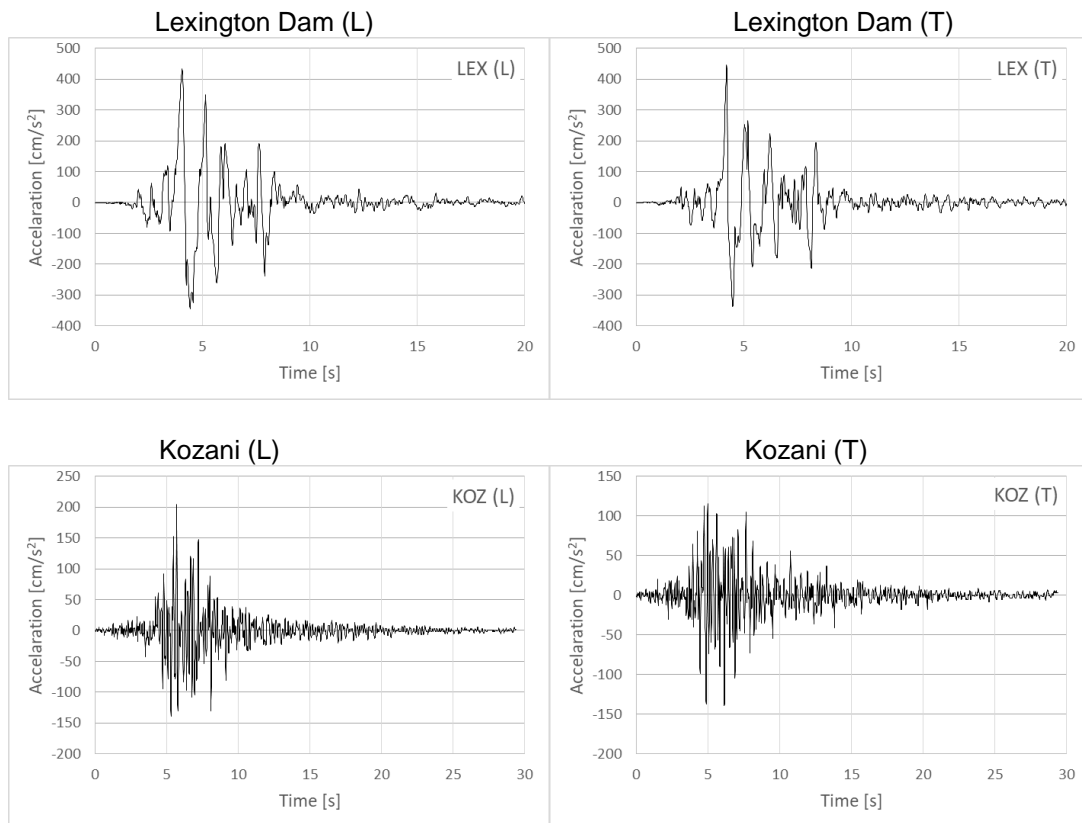
Αυτές οι τιμές της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης *PGA* αντιστοιχούν στις αντίστοιχες μέσες τιμές της *PGA* που προέκυψαν από την πιθανοτική εκτίμηση της σεισμικής κίνησης και ταυτόχρονα καλύπτουν και τη μέση τιμή της εκτιμώμενης επιτάχυνσης που προκύπτει από την ντετερμινιστική εκτίμηση των διαφόρων μοντέλων για $RX=20$ km).

Μέσα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για τις δύο διαφορετικές περιόδους επαναφοράς γίνεται μια ολοκληρωμένη αποτίμηση της σεισμικής απόκρισης του μνημείου. Η τελική επιλογή της πρώτης η της δεύτερης κατηγορίας γίνεται ανάλογα με το μέγεθος των βλαβών στο μνημείο και συναρτήσει της αποδεκτής πιθανότητας αστοχίας σε μία σεισμική δράση μεγάλης κλίμακας. Ο βαθμός προστασίας του μνημείου και ιδιαίτερα των μελών του από αυθεντικό υλικό, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες επέμβασης και αποκατάστασης που είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν στο ναό μπορεί να οδηγήσουν στην επιλογή της ζητούμενης περιόδου επαναφοράς. Επίσης, αν το μνημείο είναι επισκέψιμο από κόσμο, τότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η προστασία ζωής των επισκεπτών καθώς ο ναός θα είναι σε αυτή την περίπτωση κτίσμα μεγάλης σπουδαιότητας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χρονοϊστορίες των δύο οριζόντιων συνιστωσών των επιταχυνσιογραφημάτων των 6 σεισμικών διεγέρσεων που επιλέχθηκαν :

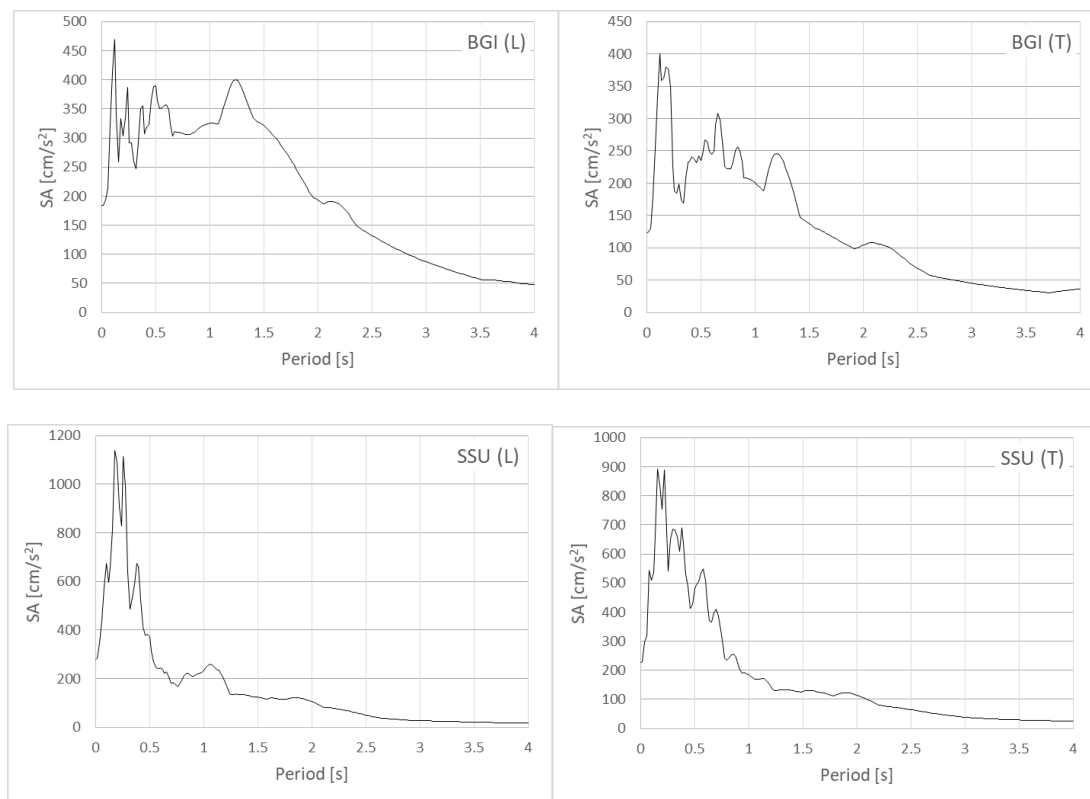


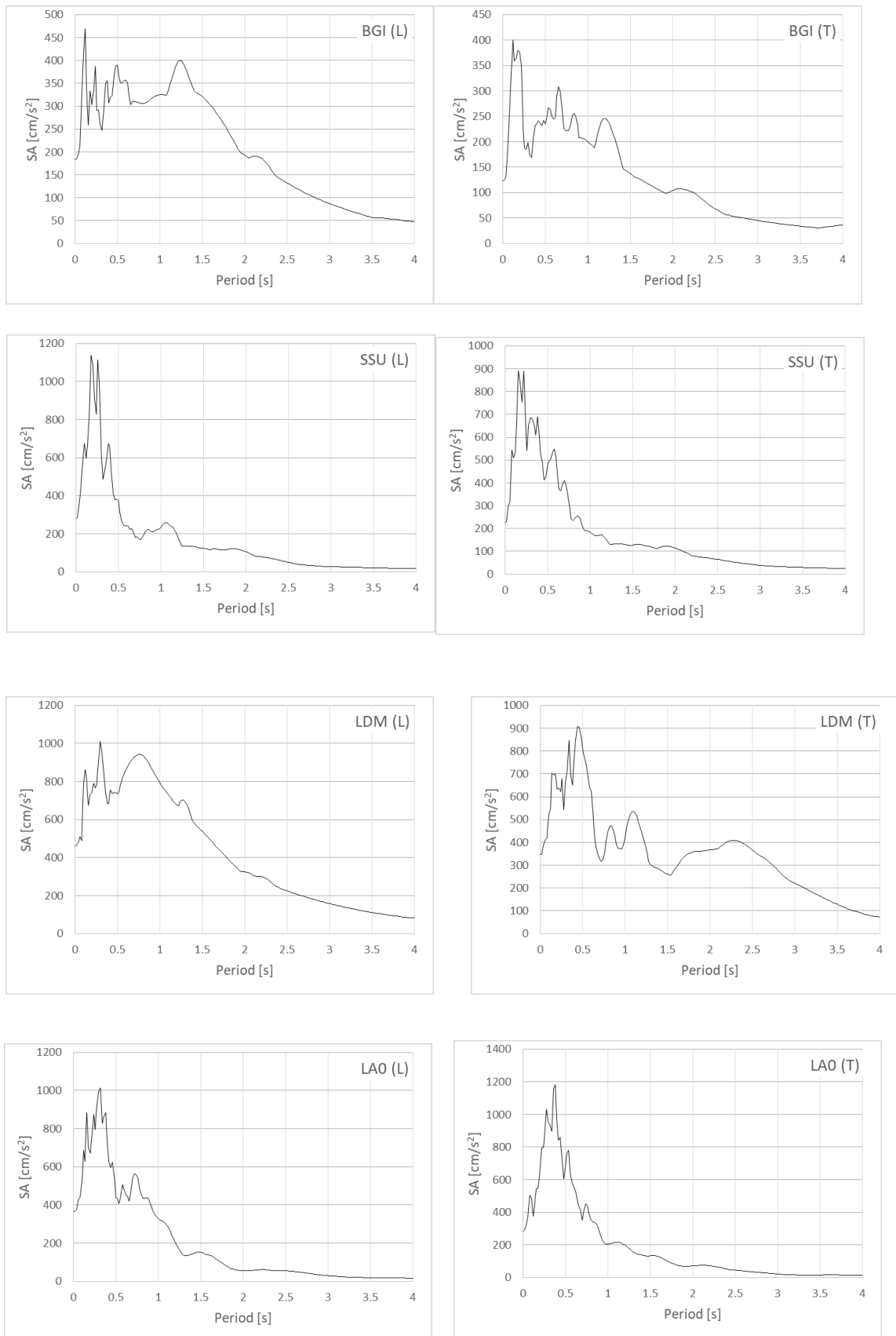
Εικόνα 34. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των σεισμικών καταγραφών (BGI,SSU,LAO,LDM)



Εικόνα 35. Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των σεισμικών καταγραφών (LEX,LDM)

Τα φάσματα επιταχύνσεων για τις 6 σεισμικές καταγραφές που επιλέχθηκαν αποτυπώνονται στα παρακάτω διαγράμματα :

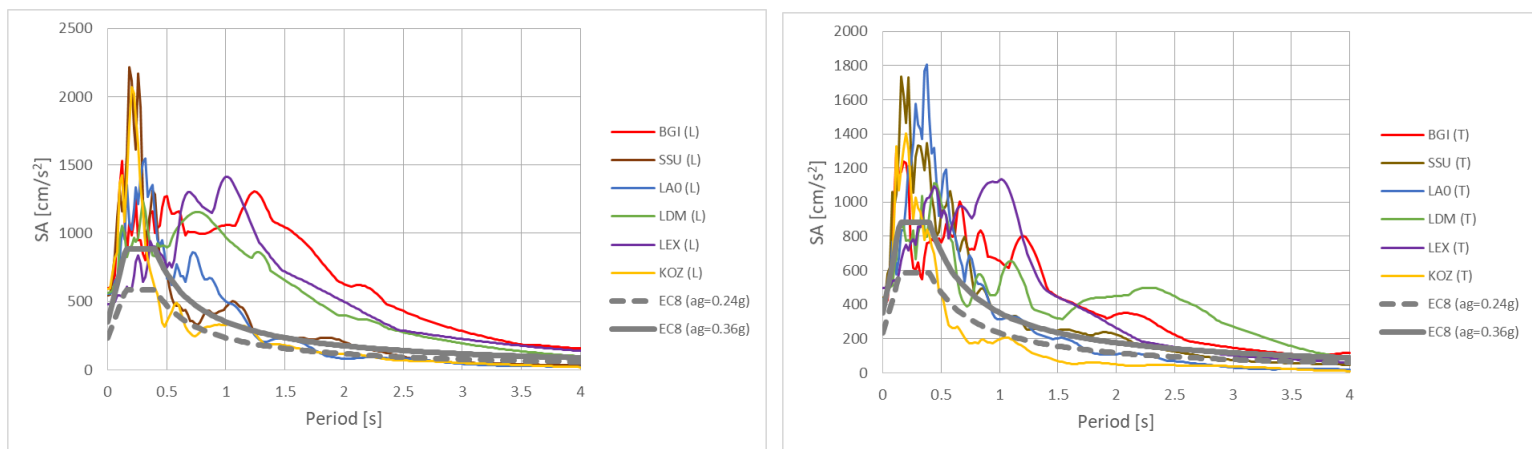




Εικόνα 36. Φάσματα επιταχύνσεων ($\zeta=5\%$) των σεισμικών καταγραφών

Παρακάτω γίνεται σύγκριση των οριζόντιων συνιστωσών L και T των φασμάτων επιταχύνσεων ($\zeta=5\%$) των σεισμικών καταγραφών που επιλέχθηκαν, κανονικοποιημένων σε $PGA = 0.5 \text{ g}$, με το φάσμα του EK8-1 για έδαφος κατηγορίας A για ζώνη Z2 με $a_g=0.24 \text{ g}$, καθώς και για ζώνη Z3 με $a_g=0.36 \text{ g}$.

Η σύγκριση με Το φάσμα του EK8-1 για $a_g=0.36 \text{ g}$ λαμβάνεται υπόψη στη σύγκριση, καθώς η εδαφική επιτάχυνση a_g του EK8-1 αντιστοιχεί στην ενεργό επιτάχυνση (EPA) των αναμενόμενων σεισμικών διεγέρσεων και όχι στην PGA που είναι περίπου 50% μεγαλύτερη.



Εικόνα 37. Σύγκριση των οριζόντιων συνιστωσών L και T των φασμάτων επιταχύνσεων ($\zeta=5\%$) των σεισμικών καταγραφών που επιλέχθηκαν, κανονικοποιημένων σε $PGA = 0.5 \text{ g}$, με το φάσμα του EK8-1 για έδαφος κατηγορίας A για ζώνη Z2 με $a_g=0.24 \text{ g}$, καθώς και για ζώνη Z3 με $a_g=0.36 \text{ g}$.

Από τα παραπάνω φάσματα είναι εμφανές, ότι οι σεισμικές καταγραφές που επιλέχθηκαν, κανονικοποιημένες σε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA=0.50 \text{ g}$, είναι αισθητά μεγαλύτερες, τόσο από το σεισμό σχεδιασμού του EK8-1 με $a_g=0.24 \text{ g}$ για τη ζώνη Z2 στην οποία ανήκει η Ρόδος, όσο και του δυσμενέστερου σεισμού σχεδιασμού με $a_g=0.36 \text{ g}$ που αντιστοιχεί σε ζώνη Z3.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω φάσματα επιταχύνσεων οι σεισμικές διεγέρσεις BGI, LEX και LDM παρουσιάζουν υψηλές τιμές φασματικής επιτάχυνσης για περιόδους (T) μεγαλύτερες από 0.6 sec . Οι υψηλές αυτές τιμές παρουσιάζονται, καθώς τα επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών αυτών περιέχουν παλμούς κατευθυντικότητας. Αυτός είναι και ο λόγος επιλογής τους καθώς είναι σκόπιμο να εξεταστεί η απόκριση του μνημείου σε σειμούς εγγύς πεδίου που είναι ιδιαίτερα δυσμενείς για κατασκευές όπως ο προς εξέταση ναός.

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις αναλύσεις σε ότι αφορά την ευστάθεια του μνημείου και την κατανομή των τάσεων σε αυτό με σκοπό μέσα από την αξιολόγηση τους να γίνει αποτίμηση της δυναμικής συμπεριφοράς του ναού. Σημειώνεται ότι ενδελεχής καταγραφή του συνόλου των αποτελεσμάτων γίνεται στο Παράρτημα.

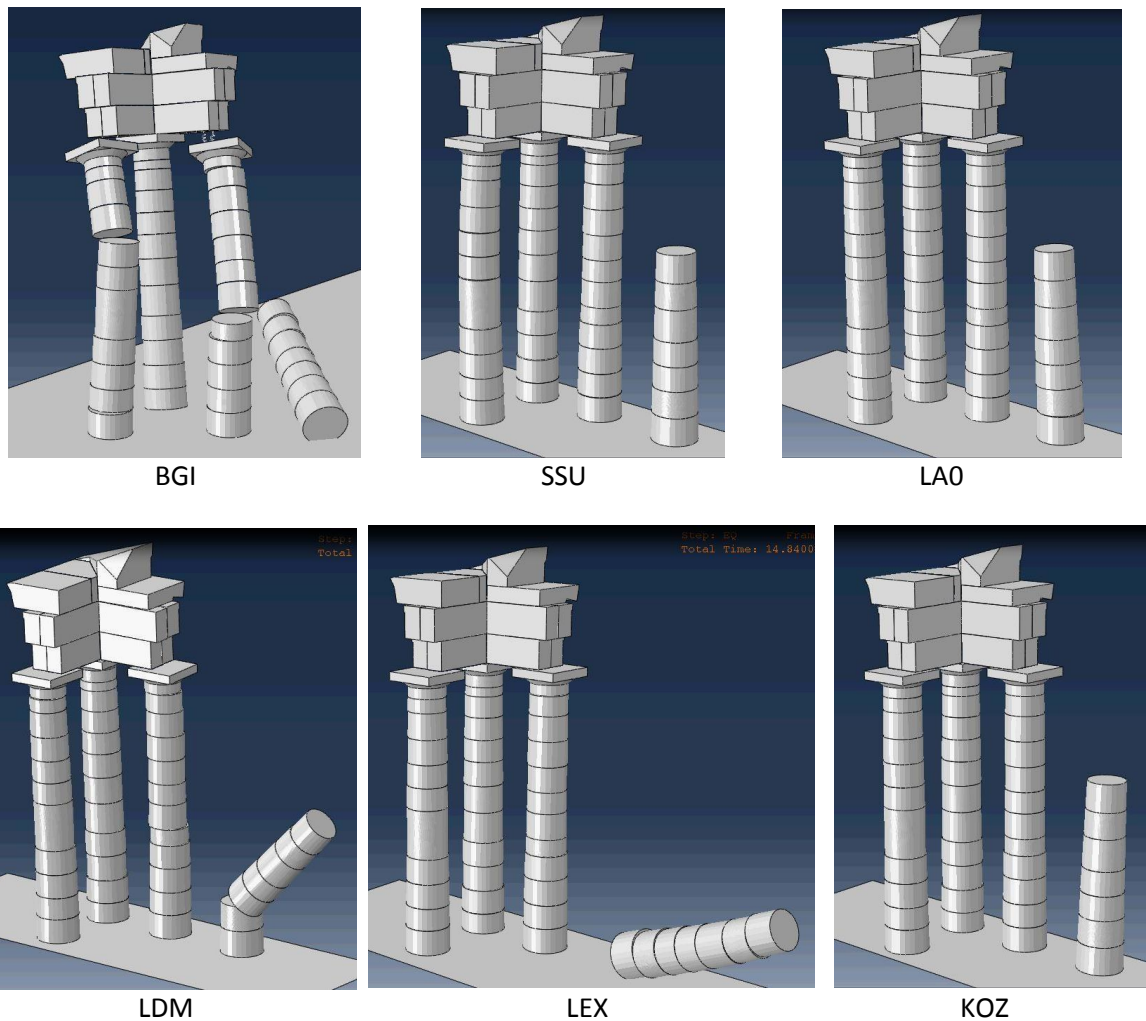
5.1 Συνολική ευστάθεια – Κίνδυνος κατάρρευσης

Για τη διερεύνηση της απόκρισης του μνημείου έγινε η παραδοχή στο στάδιο της ανάλυσης ότι τα δομικά μέλη του ναού δεν υφίστανται βλάβες κατά τη διάρκεια των σεισμικών διεγέρσεων και επομένως διατηρούν στο ακέραιο την επιφάνεια τους και τις μηχανικές αντοχές τους. Στην πραγματικότητα όμως, όταν το μνημείο υποβάλλεται σε σεισμικές δράσεις μεγάλης έντασης συντελούνται σημαντικές αστοχίες υλικού σε αυτό. Αυτές μπορούν να προκαλέσουν αποφλοιώση τμήματος της εξωτερικής παρειάς των σπονδύλων, αποτμήσεις ακμών ή και μεγαλύτερων τμημάτων τους, αποκόλληση συνδεδεμένων μελών και θραύση τμημάτων τους μειώνοντας σημαντικά την φέρουσα ικανότητα του ναού. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε τοπική απώλεια στήριξης και κατάρρευση κίωνων, ενώ βλάβες και παραμένουσες παραμορφώσεις και μετακινήσεις μελών από προηγούμενους σεισμούς εφόσον δεν αποκατασταθούν δυσχεραίνουν αισθητά την αντοχή του μνημείου. Για το λόγο αυτό η πιθανότητα μερικής ή τοπικής κατάρρευσης του ναού είναι αυξημένη στην πραγματικότητα σε σχέση με αυτή που υπολογίστηκε στις αναλύσεις.

Έτσι θεωρώντας τις αντοχές των δομικών μελών του ναού μεγάλες και τις βλάβες που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια των σεισμών αμελητέες, ακολούθως παρουσιάζεται η απόκριση του κατά την εφαρμογή των σεισμικών διεγέρσεων που εξετάστηκαν. Αρχικά παρουσιάζεται η δυναμική απόκριση του μνημείου για τους 6 σεισμικές διεγέρσεις (BGI, SSU, LAO, LDM, LEX, KOZ) που κανονικοποιήθηκαν σε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA = 0.5 \text{ g}$ και εν συνεχεία για τις ίδιες 6 σεισμικές διεγέρσεις (BGI, SSU, LAO, LDM, LEX, KOZ) που κανονικοποιήθηκαν σε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA = 0.7 \text{ g}$.

Στην πρώτη περίπτωση, όπου το μνημείο υποβάλλεται σε σεισμικές διεγέρσεις κανονικοποιημένες σε $PGA = 0.5 \text{ g}$ από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι :

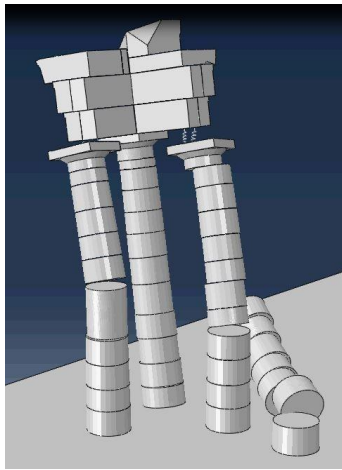
- Στους σεισμούς SSU, LAO, KOZ το μνημείο διατηρεί την ευστάθεια του με σημαντικές όμως μετατοπίσεις των μελών του που οδηγούν σε μόνιμες παραμορφώσεις.
- Στους σεισμούς LDM και LEX καταρρέει μόνο ο ελεύθερα ιστάμενος κίονας K4, ενώ οι τρεις κίονες στους οποίους εδράζεται ο θριγκός αν και υφίστανται σημαντικές παραμορφώσεις από την σχετική μετατόπιση και τη στροφή των σπονδύλων καταφέρνουν να διατηρήσουν την δομική ευστάθεια τους.
- Στον σεισμό BGI καταρρέει το σύνολο του μνημείου.



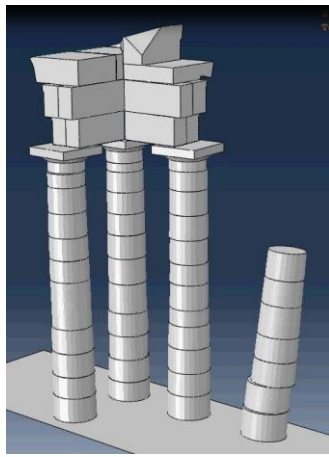
Εικόνα 38. Απόκριση του μνημείου κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης στους σεισμούς που εξετάστηκαν κανονικοποιημένους, σε $PGA = 0.5 \text{ g}$. Ο μεμονωμένος κίονας καταρρέει στους σεισμούς BGI, LDM και LEX, ενώ οι τρεις συνδεδεμένοι κίονες καταρρέουν μόνον στο σεισμό BGI.

Στη δεύτερη περίπτωση που το μνημείο υποβάλλεται σε σεισμικές διεγέρσεις κανονικοποιημένες σε $PGA = 0.7 \text{ g}$, από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι :

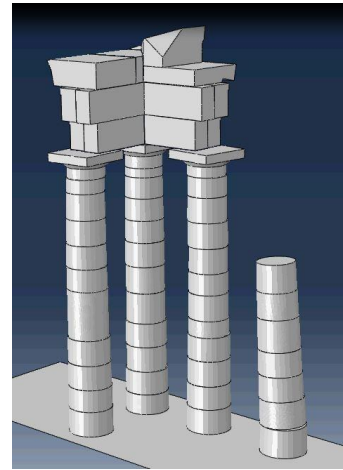
- Στους σεισμούς SSU, LAO, KOZ, LEX το μνημείο διατηρεί την ευστάθεια του με σημαντικές όμως μετατοπίσεις των μελών του που οδηγούν σε μόνιμες παραμορφώσεις.
- Στον σεισμό LDM καταρρέει μόνο ο ελεύθερα ιστάμενος κίονας K4, ενώ οι τρεις κίονες στους οποίους εδράζεται ο θριγκός αν και υφίστανται σημαντικές παραμορφώσεις από την σχετική μετατόπιση σπονδύλων καταφέρνουν να διατηρήσουν την δομική ευστάθειά τους.
- Στον σεισμό BGI καταρρέει το σύνολο του μνημείου.



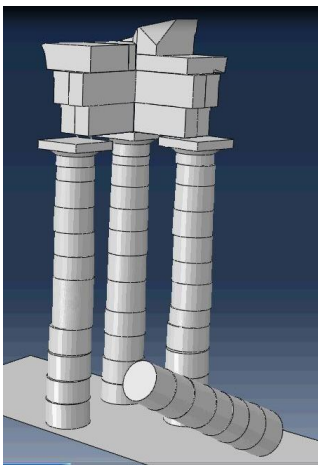
BGI



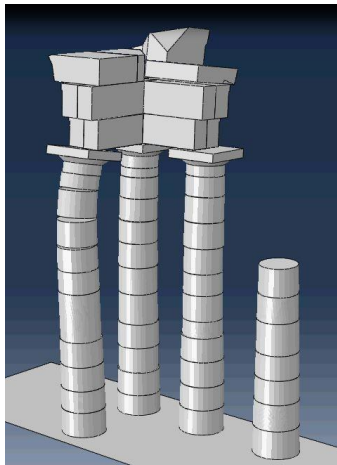
SSU



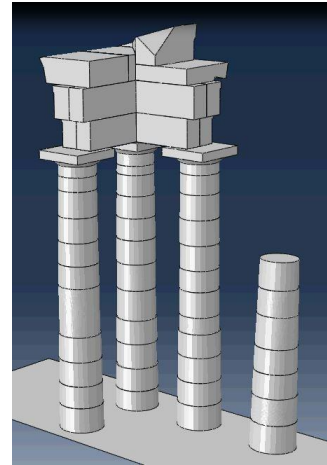
LAO



LDM



LEX



KOZ

Εικόνα 39. Απόκριση του μνημείου κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης στους σεισμούς που εξετάστηκαν κανονικοποιημένους σε $PGA = 0.7 \text{ g}$. Ο μεμονωμένος κίονας καταρρέει στους σεισμούς BGI και LDM, ενώ οι τρεις συνδεδεμένοι κίονες καταρρέουν μόνον στο σεισμό BGI.

Το μνημείο παρουσιάζει προβλήματα ευστάθειας και οδηγείται σε μερική ή ολική κατάρρευση στους σεισμούς BGI, LDM και LEX στους οποίους παρατηρούνται παλμοί μεγάλης περιόδου που δημιουργούν μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις για περίοδο που κυμαίνεται κοντά στο 1 sec. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς πρόκειται για σεισμούς με επίκεντρο πλησίον του ρήγματος γεγονός που τους καθιστά ιδιαίτερα επικίνδυνους για αρχαία μνημεία, όπως είναι ο ναός του Πύθιου Απόλλωνα. Ακόμα όμως και στους σεισμούς που ο ναός δεν καταρρέει οι σχετικές μετακινήσεις των μελών του, οδηγούν σε σημαντικές παραμένουσες παραμορφώσεις, οι οποίες χρήζουν άμεσης αποκατάστασης καθώς μειώνουν κατακόρυφα τη φέρουσα ικανότητα του καθιστώντας το ευάλωτο σε μελλοντικές σεισμικές διεγέρσεις.

Τέλος, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, ο ελεύθερος κίονας είναι σαφώς πιο ευάλωτος από τους υπόλοιπους τρεις που είναι συνδεδεμένοι με το θριγκό. Αυτό συμβαίνει καθώς η πρόσθετη μάζα του επιστυλίου αυξάνει την ευστάθεια των τριών συνδεδεμένων κίωνων (Makris & Vassiliou 2013), ενώ καθοριστική σημασία στην τρωτότητα του διαδραματίζει το αισθητά μικρότερο του μέγεθος σε σχέση με τους υπόλοιπους κίονες (Psycharis *et al.* 2000).

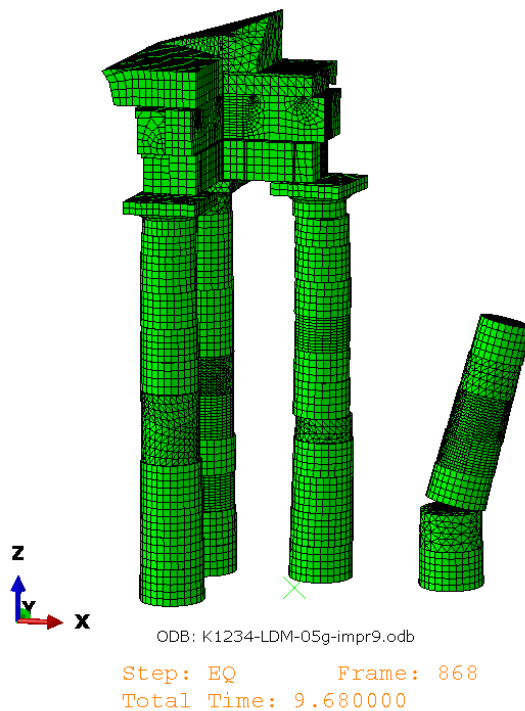
Συνολικά ο μεμονωμένος κίονας K4 καταρρέει σε 5 σεισμικά σενάρια :

- LDM με κανονικοποίηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA σε 0.5g
- LEX με κανονικοποίηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA σε 0.5g
- LDM με κανονικοποίηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA σε 0.7g
- BGI με κανονικοποίηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA σε 0.5g (οπού καταρρέει όλος ο ναός)
- BGI με κανονικοποίηση της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης PGA σε 0.7g (οπού καταρρέει όλος ο ναός)

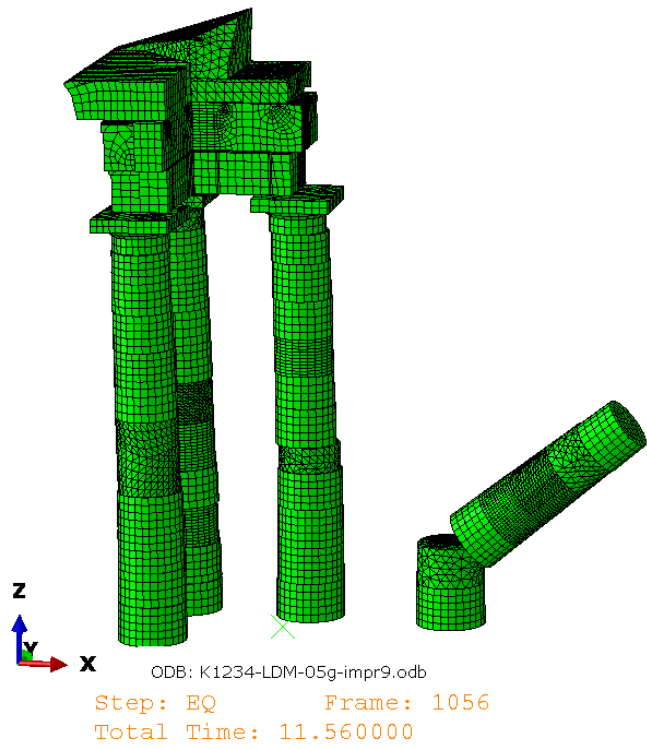
Χαρακτηριστικές εικόνες από την κατάρρευση του παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες :

- **LDM 0.5 g**

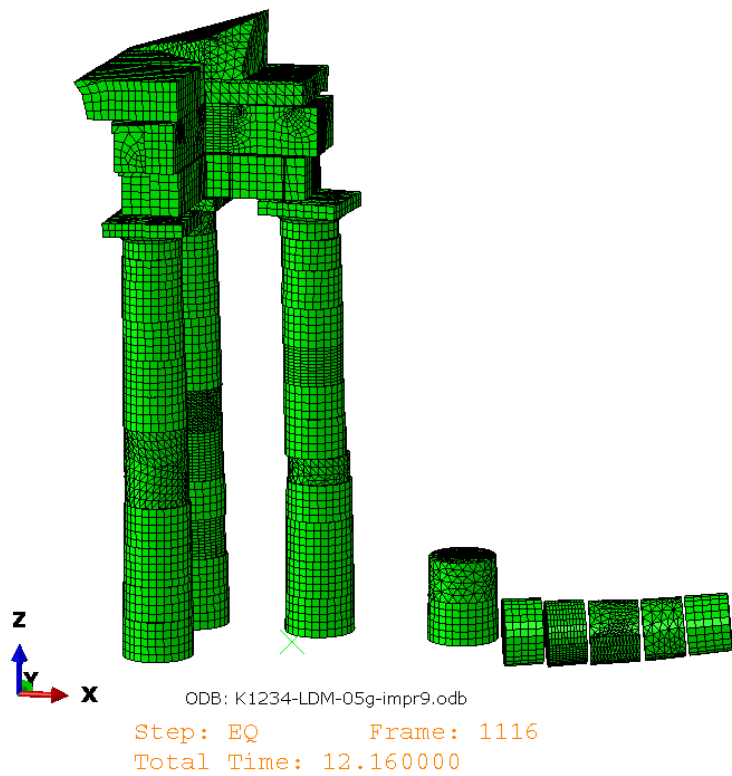
Καταγράφεται πτώση του κίονα K4 για το σεισμικό σενάριο LDM με PGA=05g και οι χρονικές στιγμές από την απόκλιση του από την κατακόρυφο μέχρι τη σύγκρουσή του με το έδαφος φαίνονται στις κάτωθι εικόνες.



Εικόνα 40. Η πρώτη απόκλιση του κίονα K4 από την κατακόρυφο τη χρονική στιγμή 9.68sec



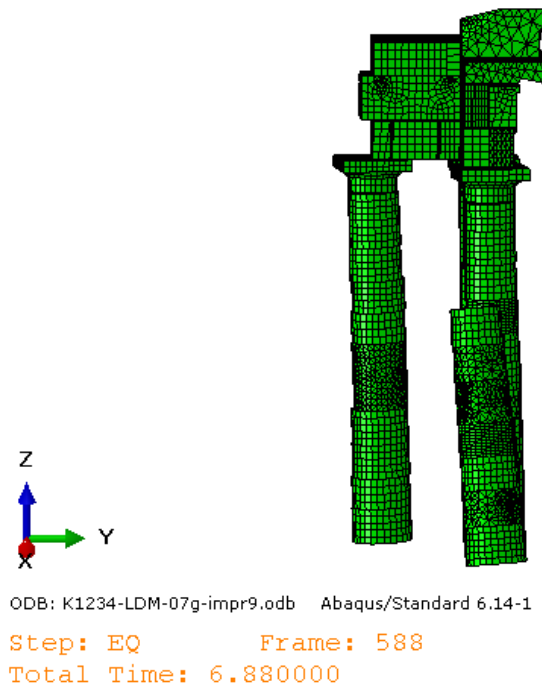
Εικόνα 41. Η στιγμή της πτώσης $t=11.56\text{sec}$



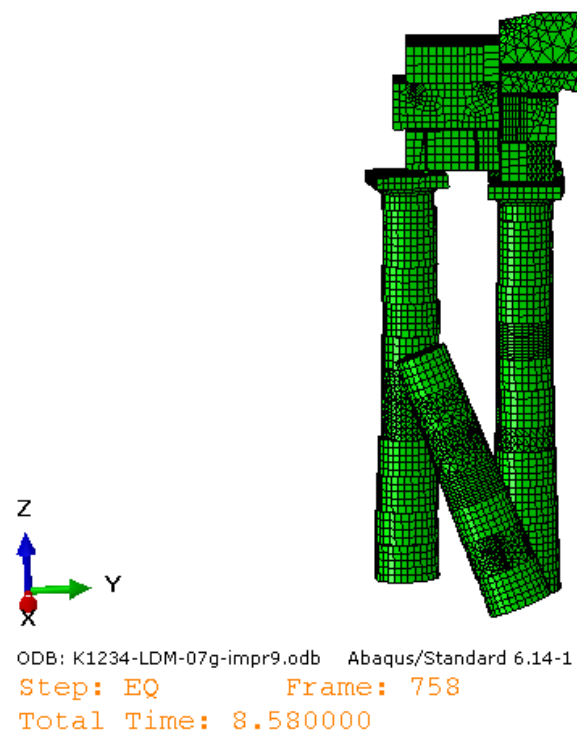
Εικόνα 42. Η χρονική στιγμή της σύγκρουσης με το έδαφος $t=12.16$

- **LDM 0.7g**

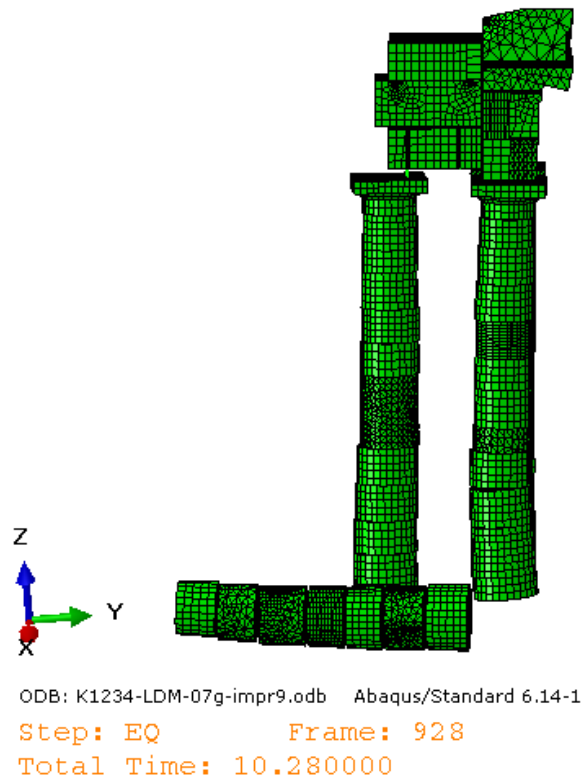
Καταγράφεται πτώση του κίονα K4 για το σεισμικό σενάριο LDM με PGA=07g και οι χρονικές στιγμές από την απόκλιση του από την κατακόρυφο μέχρι τη σύγκρουσή του με το έδαφος φαίνονται στις κάτωθι εικόνες.



Εικόνα 43. Η πρώτη απόκλιση του κίονα K4 από την κατακόρυφο τη χρονική στιγμή $t=6.88\text{sec}$



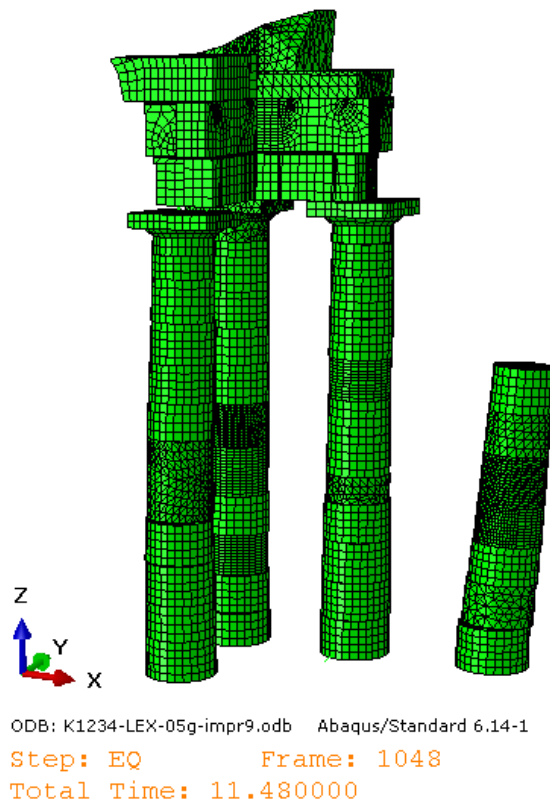
Εικόνα 44. Η στιγμή της πτώσης $t=8.58\text{ sec}$



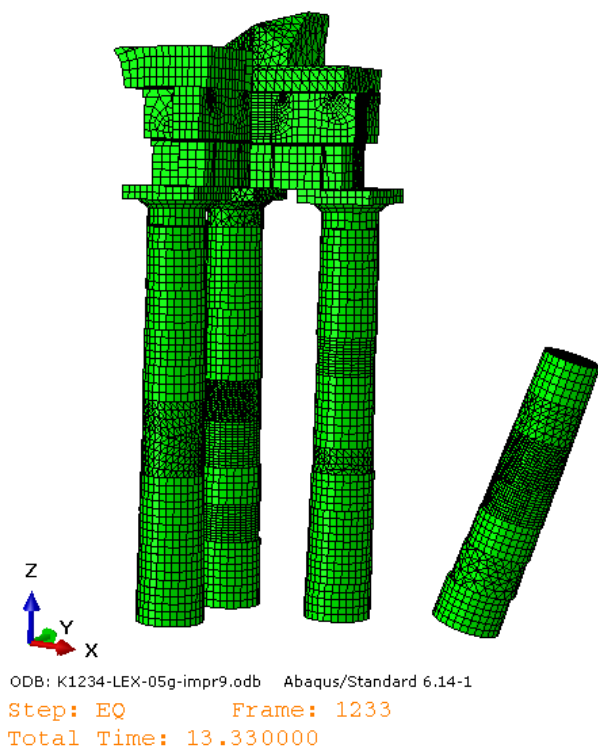
Εικόνα 45. Η χρονική στιγμή της σύγκρουσης με το έδαφος $t=10.28 \text{ sec}$

- **LEX 0.5g**

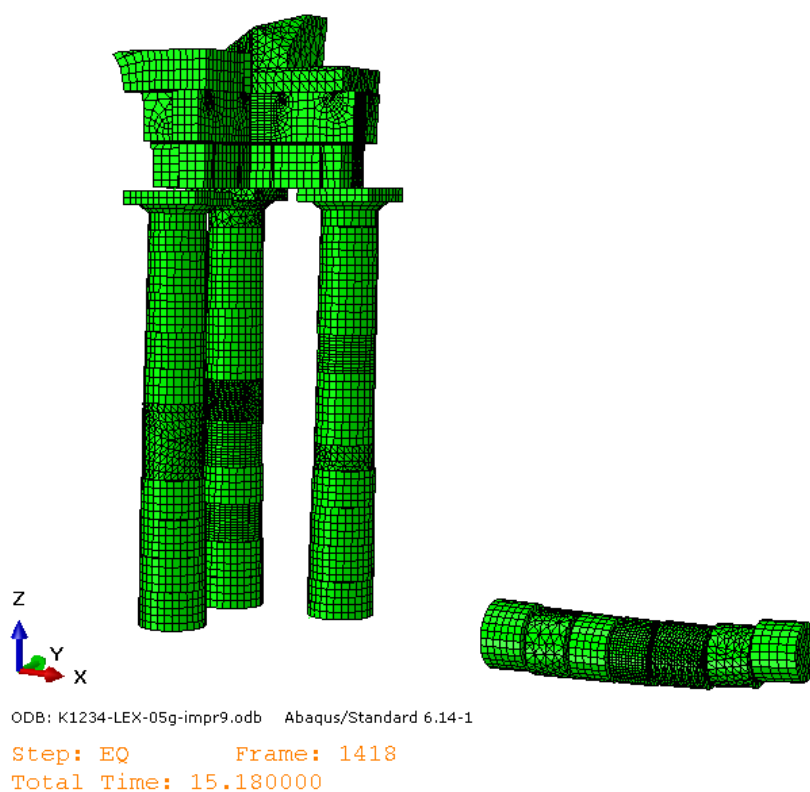
Καταγράφεται πτώση του κίονα K4 για το σεισμικό σενάριο LEX με $PGA=0.5g$ και οι χρονικές στιγμές από την απόκλιση του από την κατακόρυφο μέχρι τη σύγκρουσή του με το έδαφος φαίνονται στις κάτωθι εικόνες.



Εικόνα 46. Η πρώτη απόκλιση του κίονα K4 από την κατακόρυφο τη χρονική στιγμή $t=11.48$ sec



Εικόνα 47. Η στιγμή της πτώσης $t=13.33$ sec



Εικόνα 48. Η χρονική στιγμή της σύγκρουσης με το έδαφος $t=15.18$ sec

5.2 Τάσεις που αναπτύσσονται – Τοπικές αστοχίες

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για τις κύριες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στα επιμέρους δομικά μέλη του ναού κατά τη διάρκεια του των σεισμικών δονήσεων που εξετάστηκαν. Στη συνέχεια γίνεται προσδιορισμός των περιοχών όπου οι αναπτυσσόμενες κύριες τάσεις που υπολογίστηκαν στην ανάλυση υπερβαίνουν την αντοχή των υλικών του μνημείου. Κατά αυτό τον τρόπο προσδιορίζονται οι θέσεις όπου δημιουργούνται αστοχίες, δεδομένου ότι για τα υλικά θεωρήθηκαν ελαστικές μηχανικές ιδιότητες.

Οι τιμές των αντοχών για τα δομικά μέλη του ναού προέκυψαν ύστερα από την πειραματική διαδικασία που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3 για τα υλικά που επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν. Στους ελέγχους που πραγματοποιούνται, χρησιμοποιούνται οι χαρακτηριστικές τιμές της εφελκυστικής και θλιπτικής των υλικών.

Επειδή όμως οι τιμές αυτές είναι σε κάποιες περιπτώσεις πολύ μικρές (όπως η εφελκυστική αντοχή του αρχαίου και του νέου φυσικού λίθου που προέκυψε ίση με 0.40 MPa), έγινε εξέταση των αποτελεσμάτων και για την περίπτωση που οι αντοχές υλικών θεωρηθούν μεγαλύτερες.

Για τον νέο φυσικό λίθο, η θλιπτική αντοχή λήφθηκε ίση με 9 MPa, όπως προέκυψε από τις δοκιμές θλίψης σε δοκίμια από λίθο από την περιοχή Σφουγγάρια Α. Για την εφελκυστική αντοχή χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από δοκιμές Brazilian test (tensile splitting test) που έδωσαν 0.86 MPa ως μέση τιμή και 0.50 MPa ως χαρακτηριστική τιμή. Επειδή η εφελκυστική αντοχή που προκύπτει από αυτή τη δοκιμή είναι περίπου 30% μεγαλύτερη από αυτή του άμεσου εφελκυσμού, η χαρακτηριστική τιμή της εφελκυστικής αντοχής του νέου φυσικού λίθου λήφθηκε ίση με: $0.50/1.30 \approx 0.40$ MPa. Όμως το γεγονός πως τα αποτελέσματα προέκυψαν από σχετικά μικρό δείγμα (6 δοκιμές) και η τιμή αυτή είναι αισθητά μικρότερη αυτής της συνήθους παραδοχής ότι η εφελκυστική αντοχή λαμβάνεται ίση με το 10% της θλιπτικής, γίνεται εξέταση των αποτελεσμάτων και για διπλάσια τιμή εφελκυστικής αντοχής, ίσης με 0.80 MPa.

Για τον αρχαίο λίθο, τα μόνα διαθέσιμα αποτελέσματα προέρχονται από κρουσιμετρήσεις που δίνουν θλιπτική αντοχή ίση με 12.5 MPa ως μέση τιμή και τυπική απόκλιση 3.53 MPa (για συνολικά 10 μετρήσεις). Επειδή όμως οι κρουσιμετρήσεις είναι πιθανόν να υπερεκτιμούν την πραγματική αντοχή του λίθου λόγω επιφανειακής κρυστάλλωσης του, υιοθετούνται και για τον αρχαίο λίθο ίδιες τιμές αντοχών με τον νέο.

Για τα κονιάματα που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των τεχνητών λίθων του θριγκού, καθώς και των συμπληρωμάτων που θα τοποθετηθούν στους κίονες εξετάστηκαν δύο περιπτώσεις για λόγους σύγκρισης :

- βιομηχανοποιημένο κονίαμα τύπου MASTER EMACO με θλιπτική αντοχή 15 MPa και εφελκυστική αντοχή 1.5 MPa
- επιτόπου κατασκευασμένο κονίαμα με θλιπτική αντοχή 9 MPa και εφελκυστική 0.8 MPa

Για τα κονιάματα σύνδεσης εξετάστηκαν πάλι δύο περιπτώσεις :

- κονίαμα θλιπτικής αντοχής 11.5 MPa και εφελκυστικής 1.2 MPa
- κονίαμα θλιπτικής αντοχής 7.5 MPa και εφελκυστικής 0.75 MPa

Για όλες τις περιπτώσεις κονιαμάτων η εφελκυστική αντοχή θεωρήθηκε ίση με το 10% της θλιπτικής. Αναλυτικά οι τιμές των μηχανικών αντοχών των υλικών που εξετάστηκαν δίνονται στον ακόλουθο πίνακα :

Πίνακας 11. Αντοχές υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στους ελέγχους.

Υλικό	Ιδιότητα	Τιμή
Αρχαίος λίθος	Θλιπτική αντοχή	9.0 MPa
	Εφελκυστική αντοχή	0.4 MPa
Νέος λίθος	Θλιπτική αντοχή	9.0 MPa
	Εφελκυστική αντοχή	0.4 MPa
Κονίαμα τεχνητού λίθου	Θλιπτική αντοχή	9.0/15.0 MPa
	Εφελκυστική αντοχή	0.8/1.5 MPa
Κονίαμα σύνδεσης	Θλιπτική αντοχή	7.5/11.5 MPa
	Εφελκυστική αντοχή	0.75/1.2 MPa
Σύνδεσμοι τιτανίου	Τάση διαρροής	300 MPa
	Τάση αστοχίας (ε _υ =20%)	420 MPa

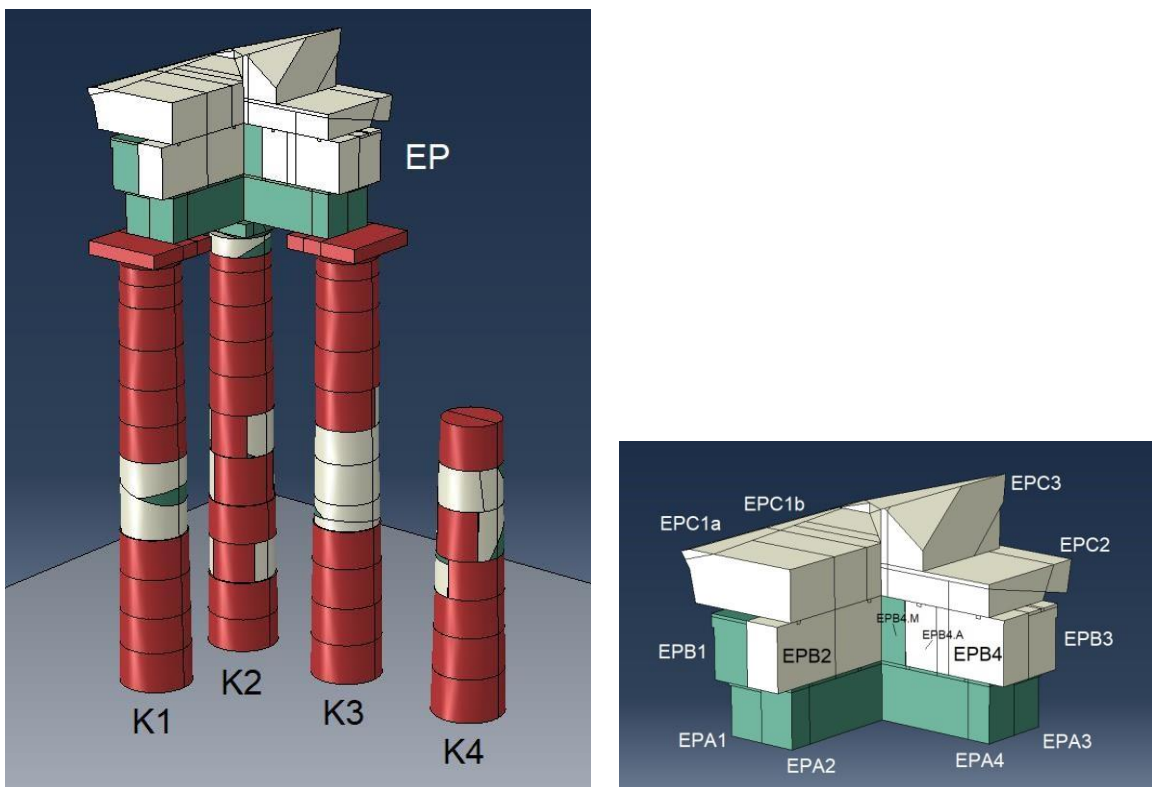
Οι εικόνες που ακολουθούν αποτυπώνουν τις μέγιστες υπερβάσεις αντοχών που σημειώθηκαν σε κάθε μέλος ξεχωριστά, τόσο σε όρους απόλυτης τιμής, όσο και σε όρους έκτασης της επιφάνειας που καλύπτει η υπέρβαση. Κύριες εφελκυστικές τάσεις που υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή των υλικών υποδηλώνουν διατμητική αστοχία λόγω λοξού εφελκυσμού. Αυτή οδηγεί σε αποτμήσεις ακμών, καθώς και μεγαλύτερων τμημάτων από τα μέλη του ναού. Υπέρβαση τάσεων στο κονίαμα σύνδεσης συνεπάγεται αστοχία του που θα οδηγήσει σε απώλεια σύνδεσης των δομικών μελών. Στην περίπτωση αυτή κρίνεται επιβεβλημένη η ενίσχυση της σύνδεσης με την χρησιμοποίηση συνδετικών ράβδων τιτανίου.

Η έκταση της περιοχής που πραγματοποιείται η υπέρβαση τάσης καθορίζει και την έκταση της περιοχής όπου θα σημειωθεί βλάβη. Υπερβάσεις που καλύπτουν πολύ μεγάλη επιφάνεια μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία και αποκόλληση μεγάλου τμήματος που με τη σειρά του ενδέχεται να οδηγήσει σε μείωση της επιφάνειας στήριξης των υπερκείμενων μελών και εν τέλει την κατάρρευση τους, ή ακόμα και σε μερική ή ολική κατάρρευση του μνημείου. Για αυτό δίνεται μεγάλη σημασία στον εντοπισμό των δυσμενών χρονικών στιγμών της απόκρισης του μνημείου όπου οι επιφάνειες στις οποίες σημειώνονται υπερβάσεις αντοχής μεγιστοποιούνται. Οι χρονικές αυτές στιγμές διαφοροποιούνται έντονα από μέλος σε μέλος ακόμα και κατά τη διάρκεια του ίδιου σεισμού, λόγω και της μη γραμμικής συμπεριφοράς του πολυσπονδυλωτού ναού. Είναι ενδεικτικό της χαμηλής

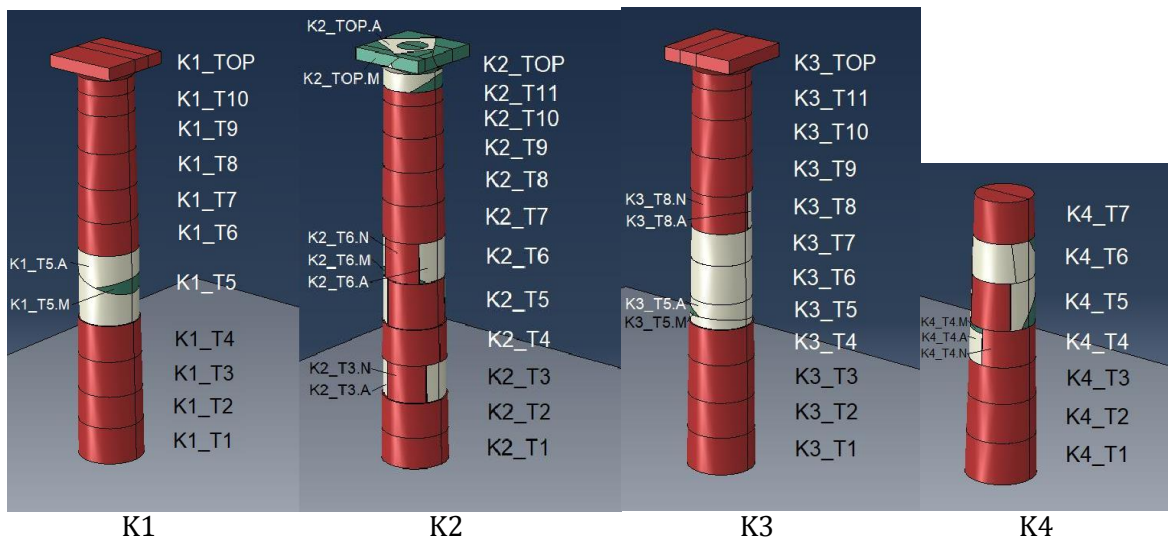
αντοχής των υλικών του ναού ότι υπερβάσεις τάσεων καταγράφονται συνεχώς στα περισσότερα μέλη του ναού κατά το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα του ισχυρού τμήματος της σεισμικής δόνησης και μάλιστα σε διαφορετικές περιοχές κάθε φορά. Επειδή είναι αδύνατο να παρουσιαστούν όλες αυτές εδώ, έγινε επιλογή των πλέον αντιπροσωπευτικών. Δεν θα πρέπει να παραγνωρίζεται όμως, το γεγονός πως τοπικές αστοχίες λόγω υπέρβασης αντοχών μπορούν να σημειωθούν και σε άλλες θέσεις του μνημείου που δεν ήταν εφικτό να παρουσιαστούν στα ακόλουθα σχήματα.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται ανά κατηγορία υλικού του ναού, δηλαδή για αρχαίο, νέο και τεχνητό λίθο, καθώς και για κονίαμα σύνδεσης με τις αντίστοιχες τιμές εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής. Για το σεισμό BGI δεν κρίθηκε σκόπιμο να γίνει παρουσίαση των αποτελεσμάτων σε όρους τάσεων καθώς σε αυτόν καταρρέει το σύνολο του ναού τόσο για $PGA = 0.5 \text{ g}$ όσο και για $PGA = 0.7 \text{ g}$. Αναλυτικά το σύνολο των αποτελεσμάτων που προέκυψε από την ανάλυση παρουσιάζεται στο Παράρτημα.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται λεπτομερώς η αρίθμηση των κιώνων, των σπονδύλων και των δοκών του θριγκού.



Εικόνα 49. Αρίθμηση κιώνων και δοκών θριγκού



Εικόνα 50. Αρίθμηση σπονδύλων των κίωνων

5.2.1 Αρχαίοι λίθοι

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στους αρχαίους σπονδύλους των κίωνων, καθώς και το κιονόκρανο του γωνιακού κίονα K2 που αποτελείται από αυθεντικό υλικό.

Για τις κύριες εφελκυστικές τάσεις γίνεται εξέταση τόσο με βάση την τιμή της αντοχής που θεωρήθηκε ίση με αυτή του νέου φυσικού λίθου (0.4 Mpa), όσο και για θεώρηση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8 Mpa). Οι περιοχές στις οποίες σημειώνεται υπέρβαση αντιστοιχούν σε καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα για αντοχή ίση με 0.4 Mpa και σε πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα για αντοχή ίση με 0.8 Mpa.

Από τη μελέτη της κατανομής των τάσεων στον αρχαίο λίθο για αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 0.4 Mpa προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

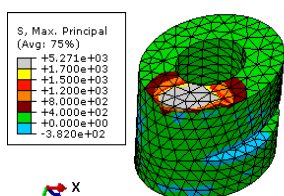
- Οι τιμές των κύριων εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται σε όλους τους σεισμούς που εξετάστηκαν υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή του αρχαίου λίθου τόσο για τιμή ίση με 0.4 Mpa, όπως λήφθηκε από τις πειραματικές διαδικασίες, όσο και για θεώρηση διπλάσιας αντοχής (0.8 Mpa).
- Οι υπερβάσεις των τάσεων στους σπονδύλους τις περισσότερες φορές περιορίζονται σε μία επιφανειακή στρώση στις επιφάνειες επαφής και οφείλονται στις μεγάλες ορθές και διατμητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τον λικνισμό. Οι υπερβάσεις αυτές αναμένεται να οδηγήσουν στη δημιουργία έντονων ρηγματώσεων στις επιφανειακές αυτές στρώσεις. Έτσι είναι πιθανό να σημειωθούν αποσπασίματα στις επιφάνειες επαφής των σπονδύλων, καθώς και αποτμήσεις ακμών και μικρών τμημάτων στα άκρα τους.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, όπως κατά τη διάρκεια των σεισμικών διεγέρσεων LEX και SSU οι περιοχές υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής επεκτείνονται σε μεγάλο βάθος που μπορεί να καλύπτει ακόμα και όλο το ύψος του σπονδύλου. Αυτό

μπορεί να προκαλέσει απότμηση μεγάλου τμήματος του, που με τη σειρά της ενδέχεται να οδηγήσει σε απώλεια στήριξης των υπερκείμενων σπονδύλων και εν τέλει σε κατάρρευση του κίονα.

- Στο αρχαίο κιονόκρανο του γωνιακού κίονα K2 οι τιμές των κύριων εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται σε όλους τους σεισμούς που εξετάστηκαν υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή του και μάλιστα σε πολύ μεγάλες περιοχές τόσο στην πάνω όσο και στην κάτω επιφάνεια του. Αναμένεται επομένως η ανάπτυξη έντονων ρηγματώσεων και βλαβών σε αυτό κατά τη διάρκεια μίας έντονης σεισμικής διέγερσης σαν αυτές που εξετάστηκαν.

Για θεώρηση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής του αρχαίου λίθου (0.8 MPa) παρατηρούνται επίσης περιοχές στις οποίες σημειώνονται σημαντικές υπερβάσεις τάσεων. Οι αναμενόμενες βλάβες θα είναι μικρότερης κλίμακας σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, αλλά παραμένει υπαρκτός ο κίνδυνος δημιουργίας ρηγματώσεων, αποκοπής και απότμησης τμημάτων από τους σπονδύλους σε ένα ισχυρό σεισμό.

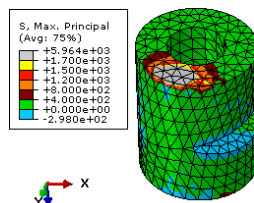
K1_T5.A



Step: EQ Frame: 687
Total Time: 7.870000

ODB: K1234-KOZ-05g-impr9.odb

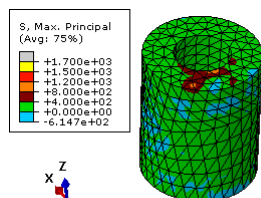
KOZ - PGA=0.5g



Step: EQ Frame: 588
Total Time: 6.880000

ODB: K1234-KOZ-07g-impr9.odb

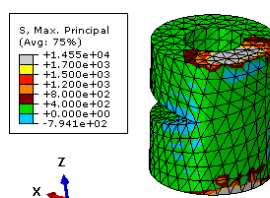
KOZ - PGA=0.7g



Step: EQ Frame: 928
Total Time: 10.280000

ODB: K1234-LAO-05g-impr9.odb

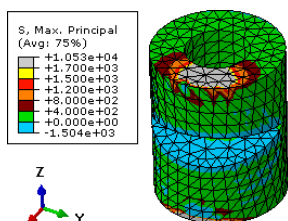
LAO - PGA=0.5g



Step: EQ Frame: 923
Total Time: 10.230000

ODB: K1234-LAO-07g-impr9.odb

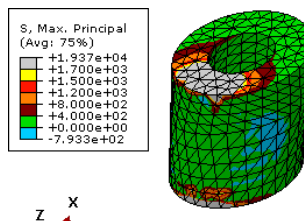
LAO - PGA=0.7g



Step: EQ Frame: 548
Total Time: 6.480000

ODB: K1234-LDM-05g-impr9.odb

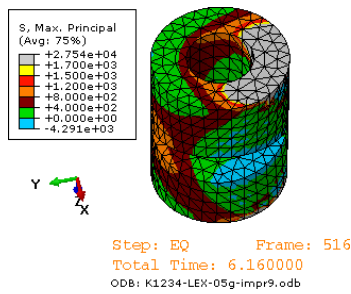
LDM - PGA=0.5g



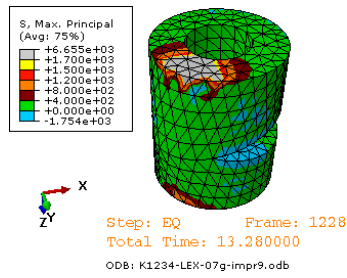
Step: EQ Frame: 343
Total Time: 4.430000

ODB: K1234-LDM-07g-impr9.odb

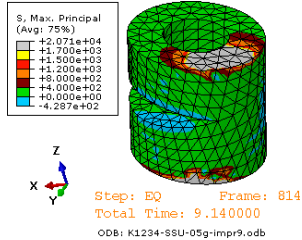
LDM - PGA=0.7g



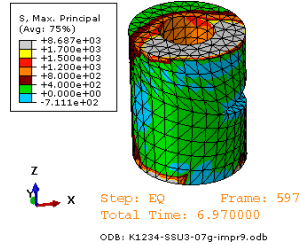
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



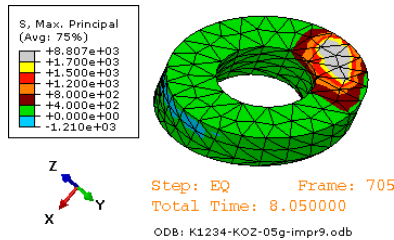
SSU - PGA=0.5g



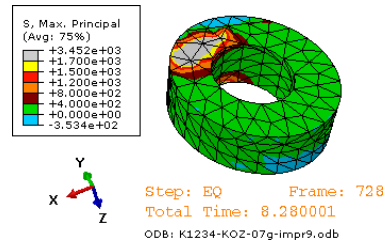
SSU - PGA=0.7g

Εικόνα 51. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στον αρχαίο σπόνδυλο K1_T5.A. Οι περιοχές με καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του Πίνακα 2 (0.4 MPa), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8 MPa).

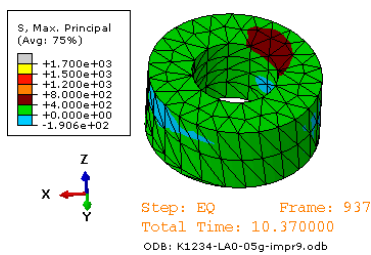
K3_T5.A



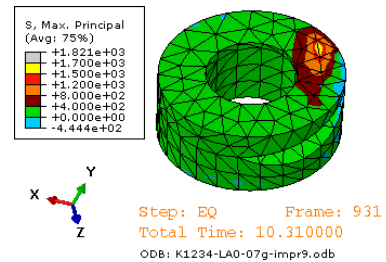
KOZ - PGA=0.5g



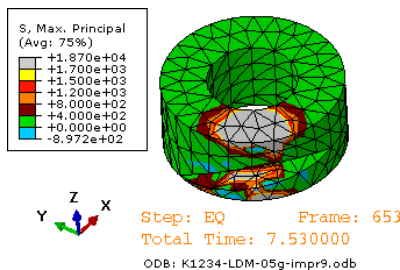
KOZ - PGA=0.7g



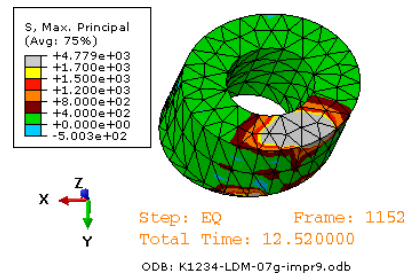
LAO - PGA=0.5g



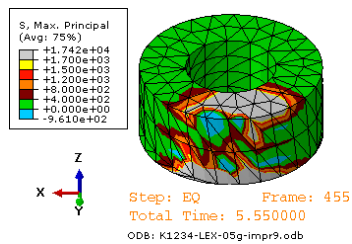
LAO - PGA=0.7g



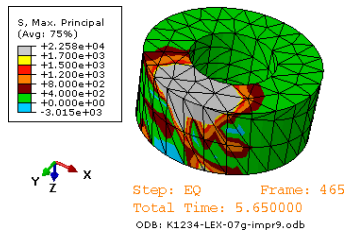
LDM - PGA=0.5g



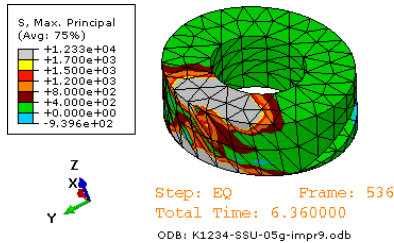
LDM - PGA=0.7g



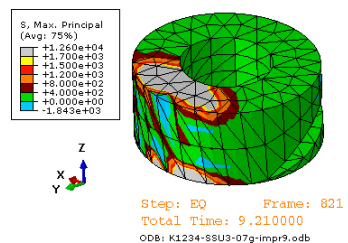
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



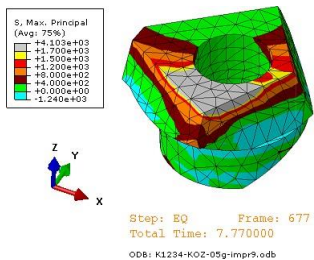
SSU - PGA=0.5g



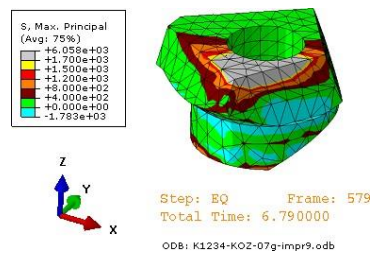
SSU - PGA=0.7g

Εικόνα 52. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στον αρχαίο σπόνδυλο K3_T5.A. Οι περιοχές με καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του Πίνακα 2 (0.4 MPa), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8 MPa).

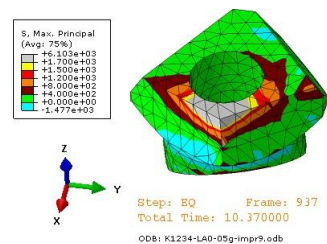
K2_TOP.A



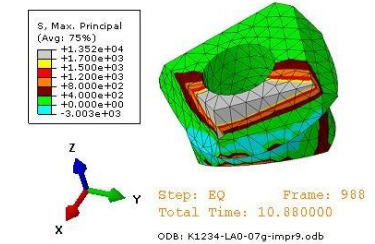
KOZ - PGA=0.5g



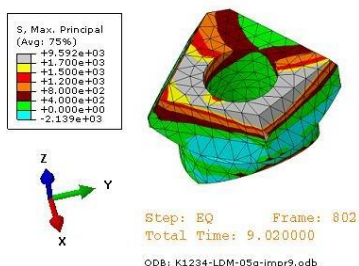
KOZ - PGA=0.7g



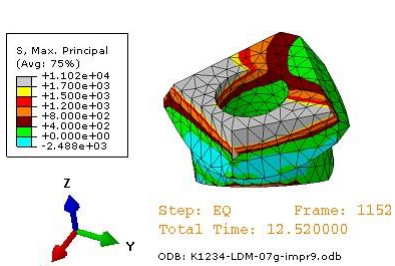
LAO - PGA=0.5g



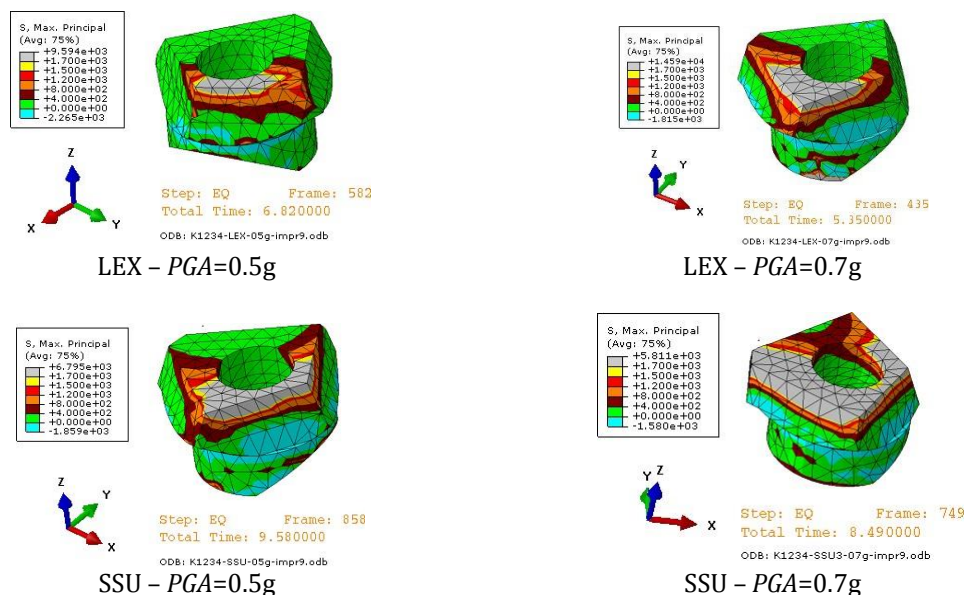
LAO - PGA=0.7g



LDM - PGA=0.5g



LDM - PGA=0.7g

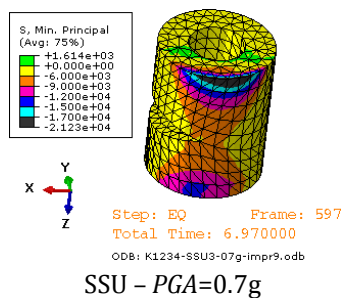
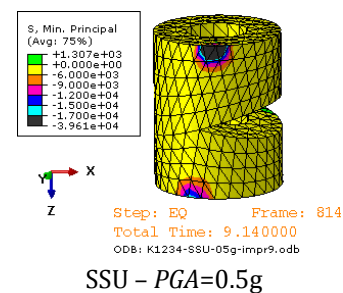
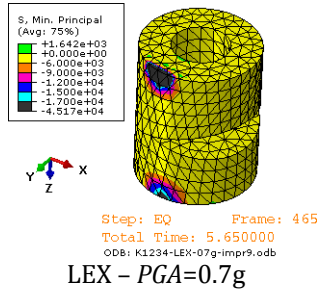
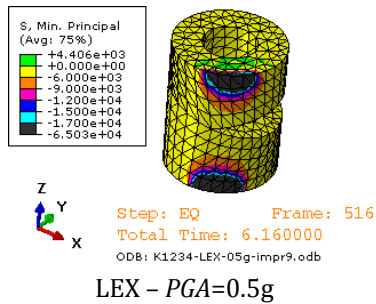
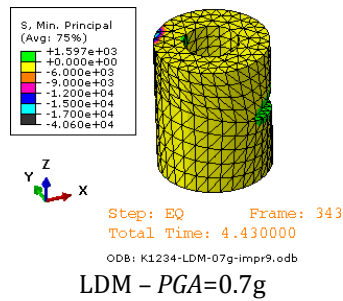
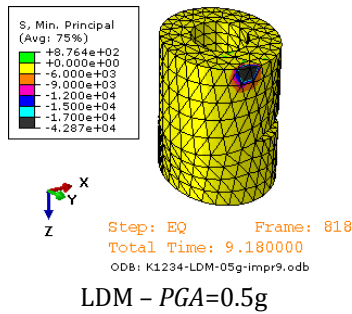
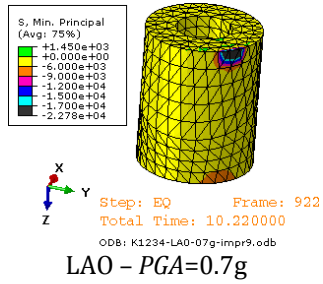
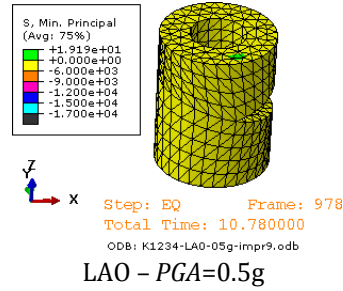
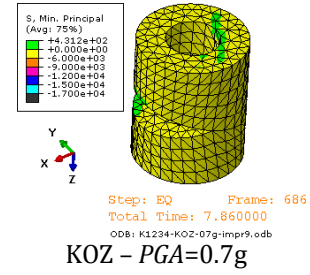
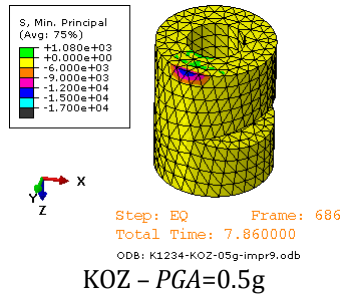


Εικόνα 53. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στο αρχαίο κιονόκρανο του κίονα K2. Οι περιοχές με καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του Πίνακα 2 (0.4 MPa), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8 MPa).

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι κύριες θλιπτικές τάσεις. Οι περιοχές στις οποίες παρατηρείται υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του αρχαίου λίθου η οποία σύμφωνα με τον παραπάνω Πίνακα είναι ίση με 9.0 MPa είναι περιορισμένης έκτασης και αναμένεται να οδηγήσουν σε περιορισμένες βλάβες και αποτμήσεις ακμών. Οι υπερβάσεις αυτές δηλώνονται με ροζ, μπλέ, θαλασσί και μαύρο χρώμα στις εικόνες που ακολουθούν.

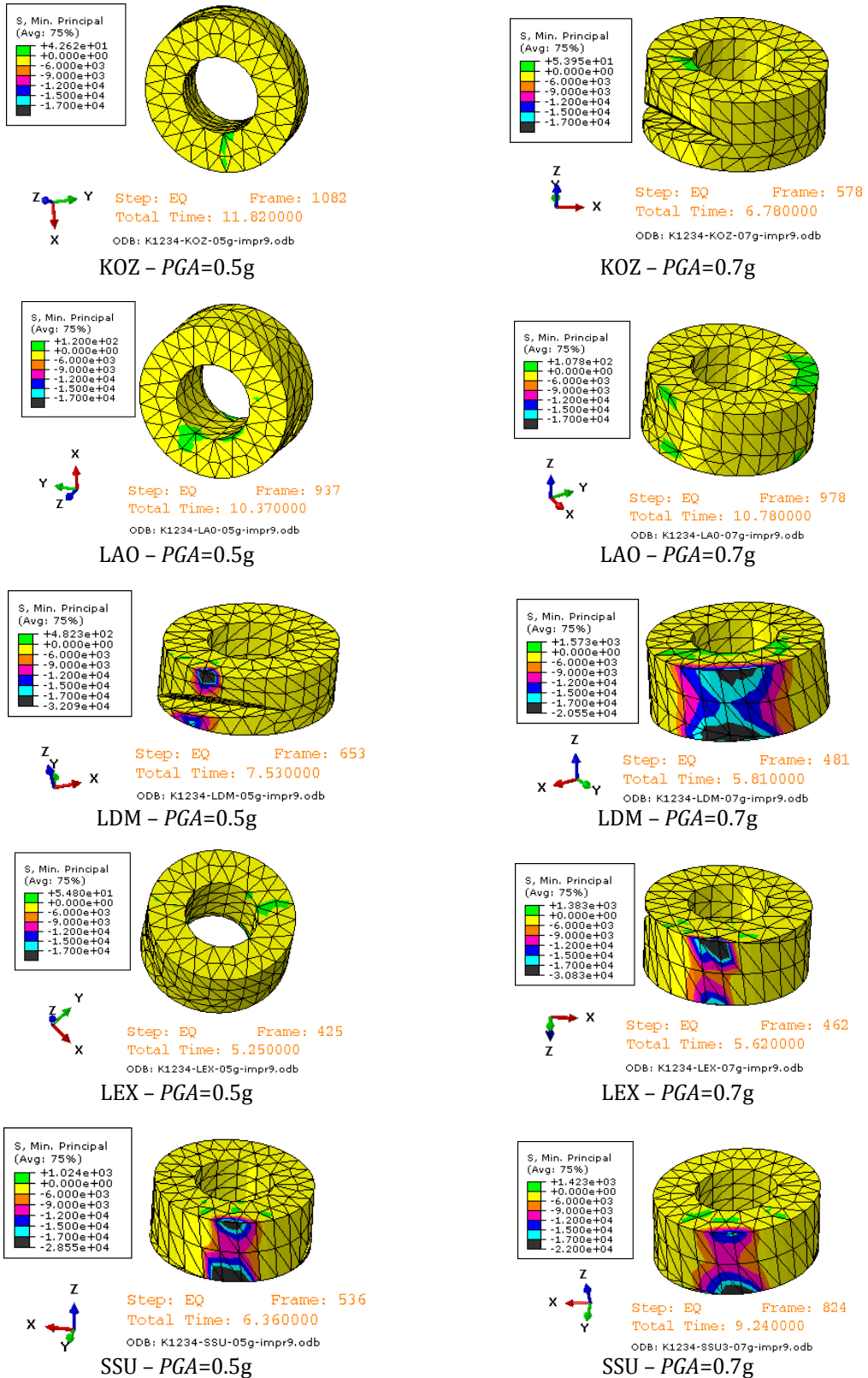
Σε περιπτώσεις που πραγματοποιείται υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής σε μία επιφανειακή στρώση που καλύπτει όλο το ύψος του σπονδύλου, αναμένεται λόγω της τοπικής αστοχίας που δημιουργείται να προκληθεί επιφανειακή αποφλοιώσή του σε αυτή την περιοχή. Το γεγονός αυτό αιτιολογεί τις αποφλοιώσεις που παρατηρούνται σε αρκετούς αρχαίους λίθους, οι οποίες πρέπει να προήλθαν κατά την υποβολή του μνημείου σε σεισμικές διεγέρσεις αντίστοιχου μεγέθους κατά το παρελθόν., όπως θα αναλυθεί και σε επόμενη ενότητα. Χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιας υπέρβασης παρατηρείται στο Εικόνα 24, για υποβολή του μνημείου στη σεισμική καταγραφή LDM, κανονικοποιημένης σε PGA = 0.7 g.

K1_T5.A



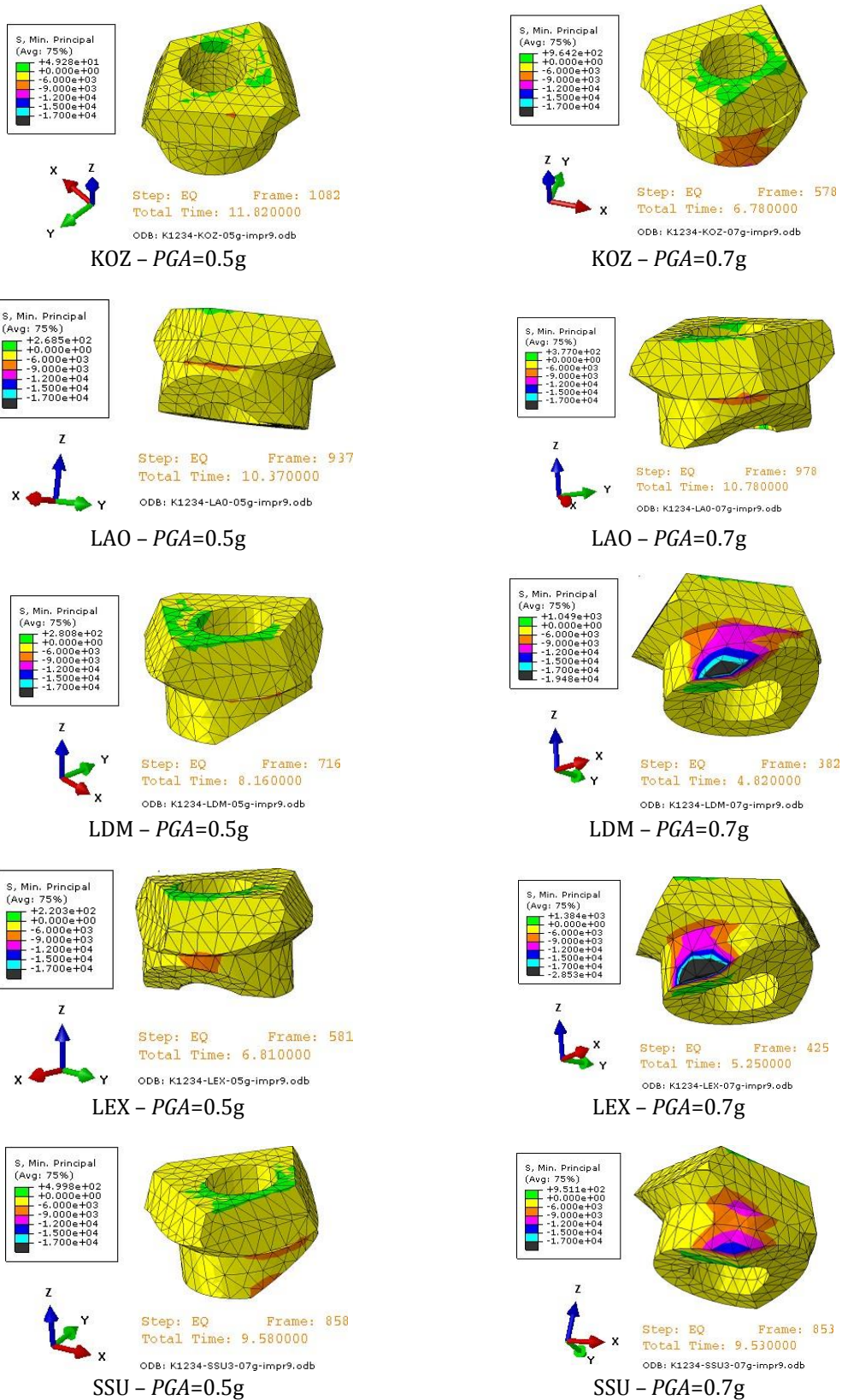
Εικόνα 54. Κύριες θλιπτικές τάσεις στον αρχαίο σπόνδυλο K1_T5.A. Οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του Πίνακα 2 (9.0 MPa).

K3_T5.A



Εικόνα 55. Κύριες θλιπτικές τάσεις στον αρχαίο σπόνδυλο K3_T5.A. Οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του Πίνακα 2 (9.0 MPa).

K2_TOP.A



Εικόνα 56. Κύριες θλιπτικές τάσεις στο αρχαίο κιονόκρανο του κίονα K2. Οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του Πίνακα 2 (9.0 MPa).

5.2.2 Νέοι λίθοι

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στους νέους λίθους των σπονδύλων των κιόνων ή τα συμπληρώματά τους από νέο φυσικό λίθο.

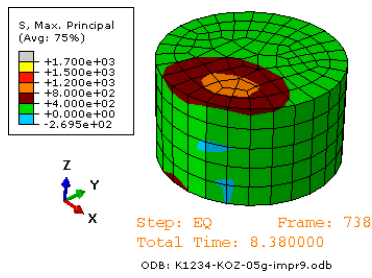
Για τις κύριες εφελκυστικές τάσεις γίνεται εξέταση τόσο με βάση τις τιμές της αντοχής που προέκυψαν από την πειραματική διαδικασία (0.4Μρα), όσο και για θεώρηση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8Μρα). Οι περιοχές στις οποίες σημειώνεται υπέρβαση αντιστοιχούν σε καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα για αντοχή ίση με 0.4 Μρα και σε πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα για αντοχή ίση με 0.8 Μρα.

Από τη μελέτη της κατανομής των τάσεων στον νέο λίθο για αντοχή σε εφελκυσμό ίση με 0.4 Μρα προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα, κατά αντιστοιχία με τον αρχαίο λίθο :

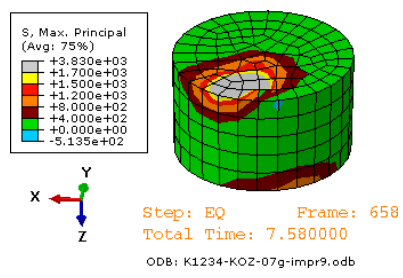
- Οι τιμές των κύριων εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται σε όλους τους σεισμούς που εξετάστηκαν υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή του νέου λίθου τόσο για τιμή ίση με 0.4 ΜΡα, όπως λήφθηκε από τις πειραματικές διαδικασίες, όσο και για θεώρηση διπλάσιας αντοχής (0.8 Μρα).
- Οι υπερβάσεις των τάσεων στους σπονδύλους τις περισσότερες φορές περιορίζονται σε μία επιφανειακή στρώση στις επιφάνειες επαφής και οφείλονται στις μεγάλες ορθές και διατμητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά τον λικνισμό. Οι υπερβάσεις αυτές αναμένεται να οδηγήσουν στη δημιουργία έντονων ρηγματώσεων στις επιφανειακές αυτές στρώσεις. Έτσι είναι πιθανό να σημειωθούν αποσαθρώσεις στις επιφάνειες επαφής των σπονδύλων, καθώς και αποτμήσεις ακμών και μικρών τμημάτων στα άκρα τους.
- Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, όπως κατά τη διάρκεια των σεισμικών διεγέρσεων LEX, SSU και LDM οι περιοχές υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής επεκτείνονται σε μεγάλο βάθος που μπορεί να καλύπτει ακόμα και όλο το ύψος του σπονδύλου. Αυτό μπορεί να προκαλέσει απότμηση μεγάλου τμήματος του, που με τη σειρά της ενδέχεται να οδηγήσει σε απώλεια στήριξης των υπερκείμενων σπονδύλων και εν τέλει σε κατάρρευση του κίονα.
- Στα κιονόκρανα των κιόνων Κ1 και Κ3 οι τιμές των κύριων εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται σε όλους τους σεισμούς που εξετάστηκαν υπερβαίνουν την εφελκυστική αντοχή τους και μάλιστα σε πολύ μεγάλες περιοχές τόσο στην πάνω όσο και στην κάτω επιφάνεια τους. Αναμένεται επομένως η ανάπτυξη έντονων ρηγματώσεων και βλαβών σε αυτά κατά τη διάρκεια μίας έντονης σεισμικής διέγερσης σαν αυτές που εξετάστηκαν.

Για θεώρηση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής του νέου φυσικού λίθου (0.8 ΜΡα) παρατηρούνται επίσης περιοχές στις οποίες σημειώνονται σημαντικές υπερβάσεις τάσεων. Οι αναμενόμενες βλάβες θα είναι μικρότερης κλίμακας σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση, αλλά παραμένει υπαρκτός ο κίνδυνος δημιουργίας ρηγματώσεων, αποκοπής και απότμησης τμημάτων από τους σπονδύλους σε ένα ισχυρό σεισμό.

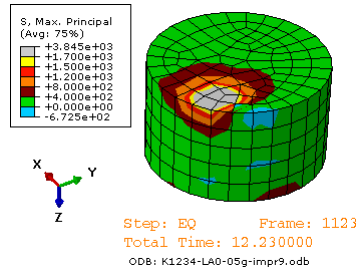
K1_T1.N



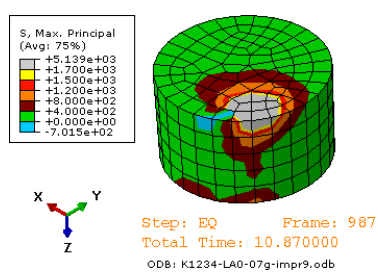
KOZ - PGA=0.5g



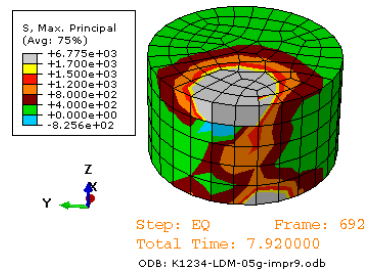
KOZ - PGA=0.7g



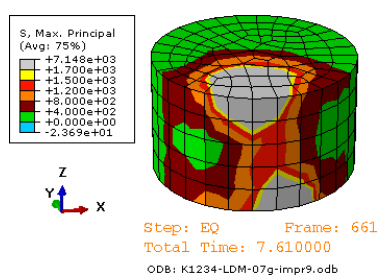
LAO - PGA=0.5g



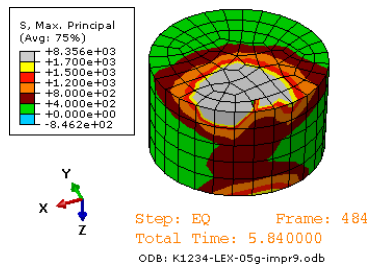
LAO - PGA=0.7g



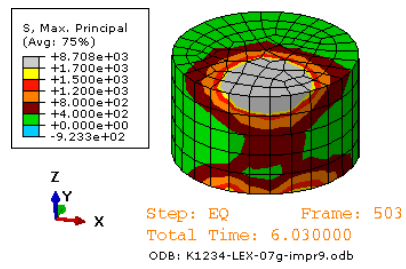
LDM - PGA=0.5g



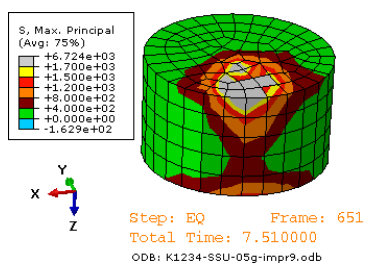
LDM - PGA=0.7g



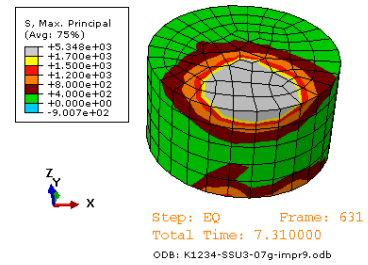
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



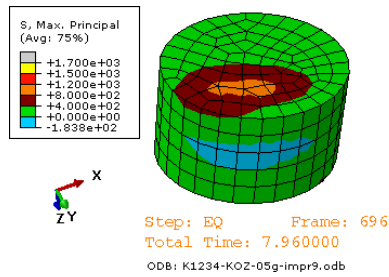
SSU - PGA=0.5g



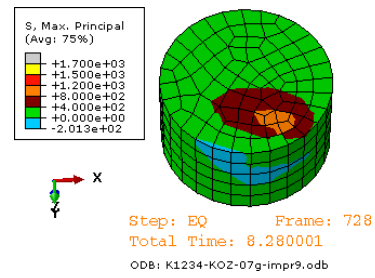
SSU - PGA=0.7g

Εικόνα 57. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στον νέο σπόνδυλο K1_T1.N. Οι περιοχές με καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του Πίνακα 2 (0.4 MPa), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8 MPa).

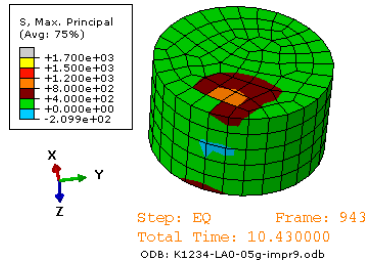
K2_T2.N



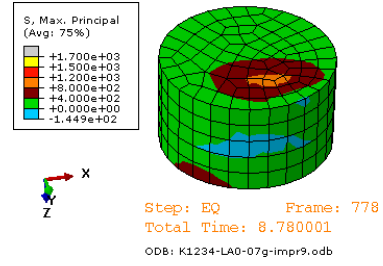
KOZ - PGA=0.5g



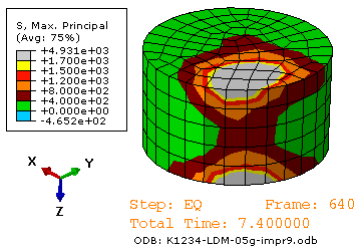
KOZ - PGA=0.7g



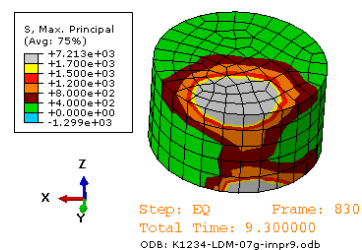
LAO - PGA=0.5g



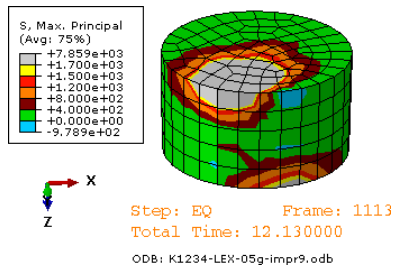
LAO - PGA=0.7g



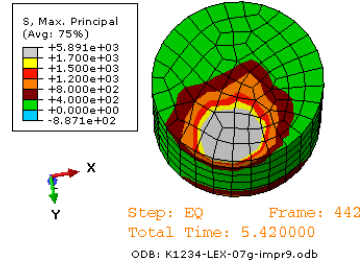
LDM - PGA=0.5g



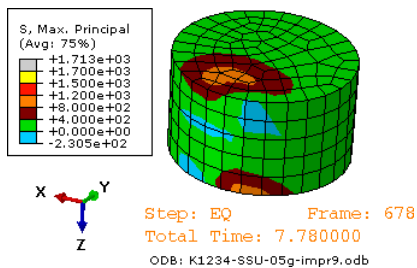
LDM - PGA=0.7g



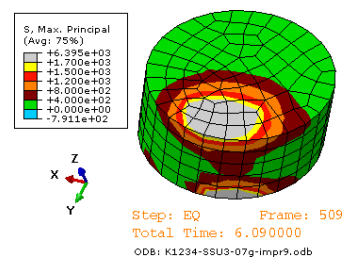
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



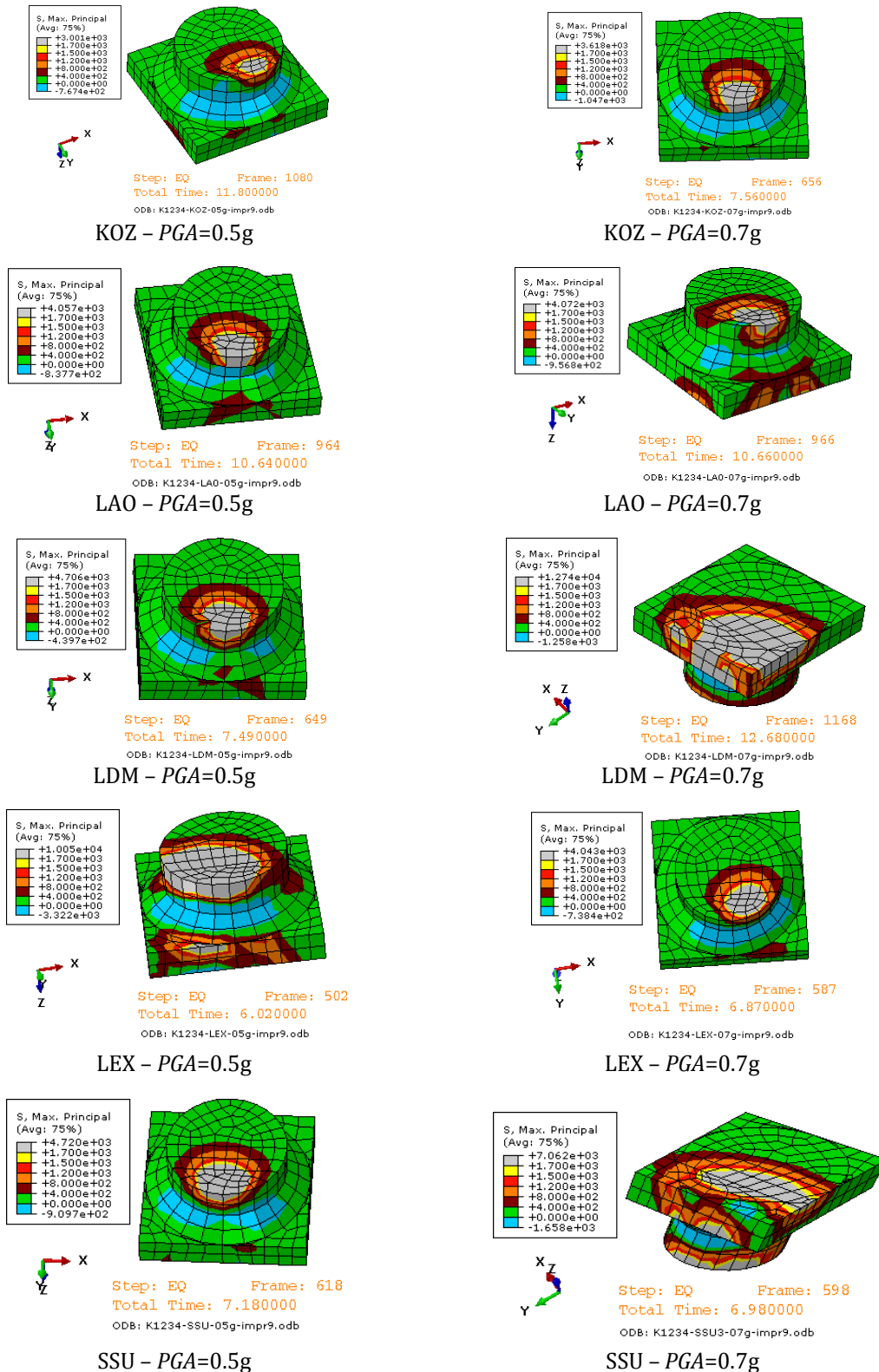
SSU - PGA=0.5g



SSU - PGA=0.7g

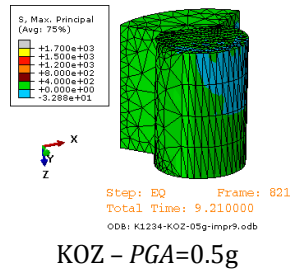
Εικόνα 58. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στον νέο σπόνδυλο K2_T2.N. Οι περιοχές με καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του Πίνακα 2 (0.4 MPa), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8 MPa).

K1_TOP.N

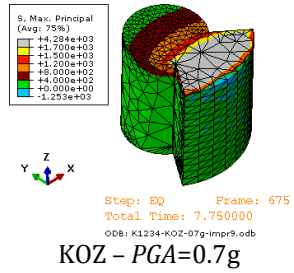


Εικόνα 59. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στο νέο κιονόκρανο του κίονα K1. Οι περιοχές με καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του Πίνακα 2 (0.4 MPa), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8 MPa).

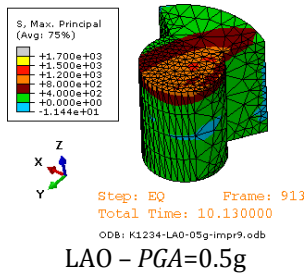
K2_T6.N



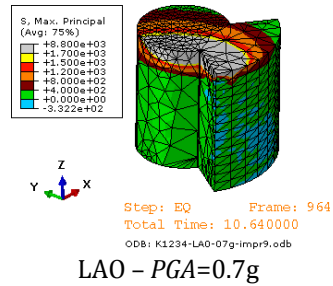
KOZ – PGA=0.5g



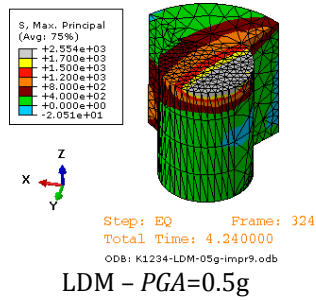
KOZ – PGA=0.7g



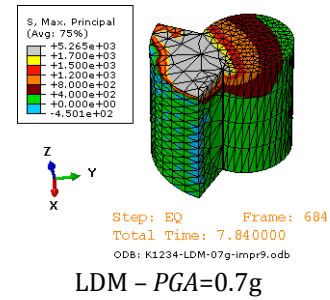
LAO – PGA=0.5g



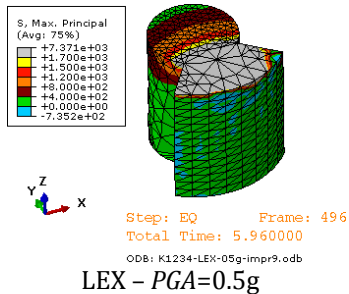
LAO – PGA=0.7g



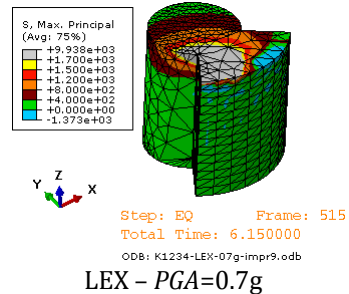
LDM – PGA=0.5g



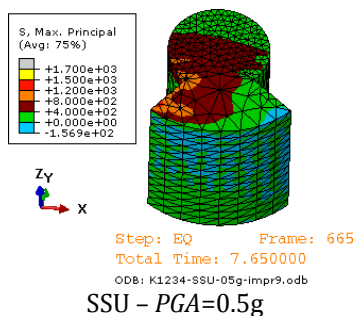
LDM – PGA=0.7g



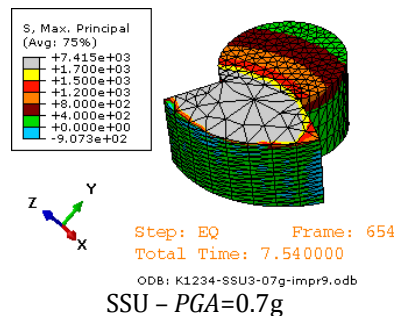
LEX – PGA=0.5g



LEX – PGA=0.7g



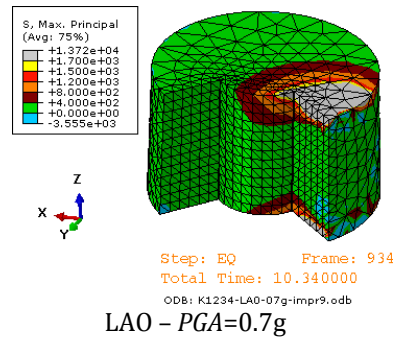
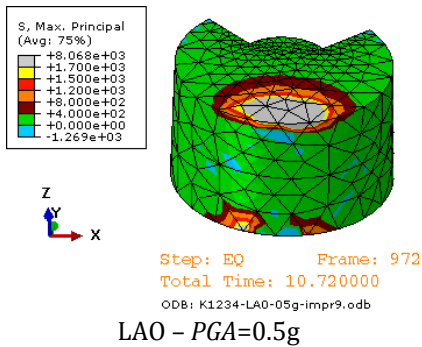
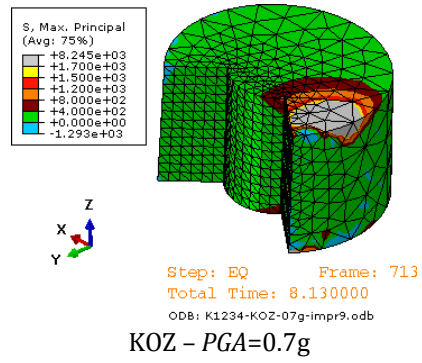
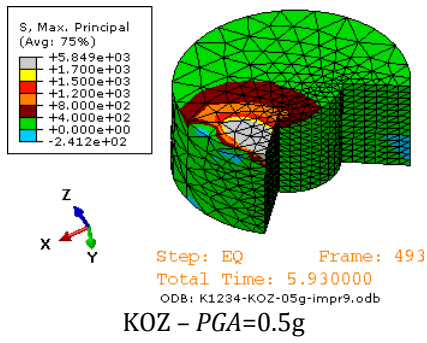
SSU – PGA=0.5g



SSU – PGA=0.7g

Εικόνα 60. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στο συμπλήρωμα του σπονδύλου K2_T6.N από νέο λίθο. Οι περιοχές με καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του Πίνακα 2 (0.4 MPa), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8 MPa).

K4_T2.N

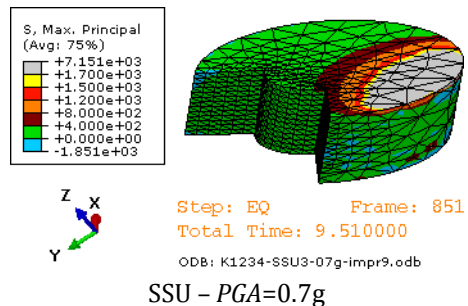
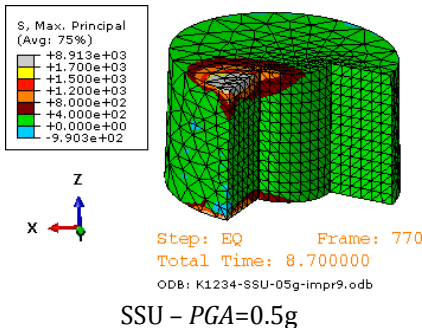
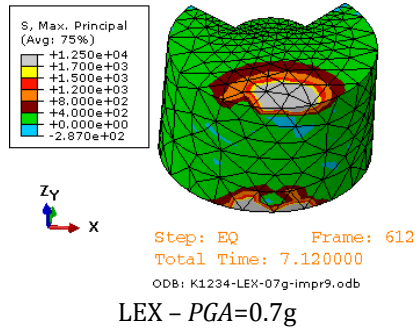
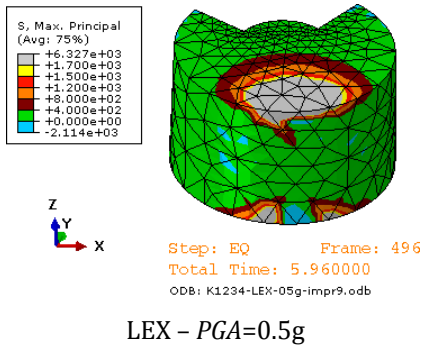


Ο κίονας καταρρέει

Ο κίονας καταρρέει

LDM - PGA=0.5g

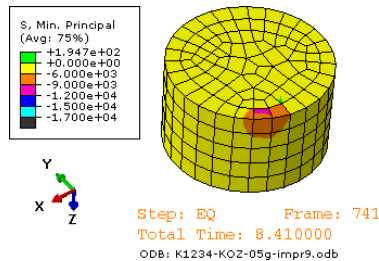
LDM - PGA=0.7g



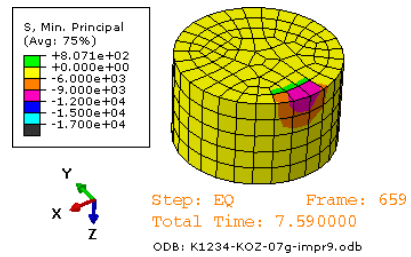
Εικόνα 61. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στο συμπλήρωμα του σπονδύλου K4_T2.N από νέο λίθο. Οι περιοχές με καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του Πίνακα 2 (0.4 MPa), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση διπλάσιας εφελκυστικής αντοχής (0.8 MPa).

Σε ότι αφορά τις κύριες θλιπτικές τάσεις που παρουσιάζονται στις ακόλουθες εικόνες οι υπερβάσεις της θλιπτικής αντοχής, που λήφθηκε ίση με 9.0 Μρα, δηλώνονται με ροζ, μπλέ, θαλασσί και μαύρο χρώμα. Οι περιοχές αυτές είναι περιορισμένης έκτασης και αναμένεται να οδηγήσουν σε περιορισμένες βλάβες και αποτιμήσεις ακμών. Κυρίως σημειώνονται υπερβάσεις σε επιφανειακές στρώσεις.

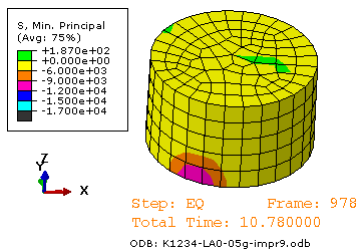
K1_T1.N



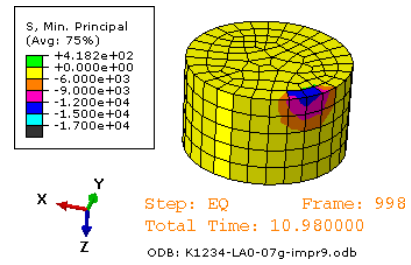
KOZ - PGA=0.5g



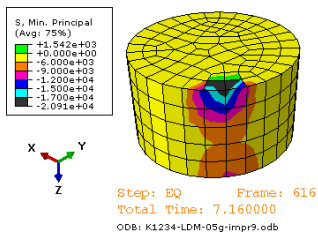
KOZ - PGA=0.7g



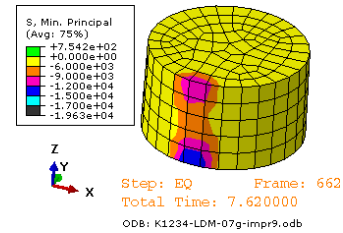
LAO - PGA=0.5g



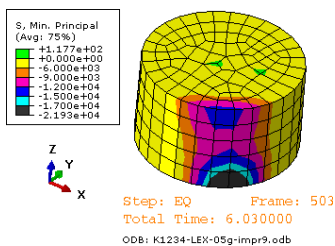
LAO - PGA=0.7g



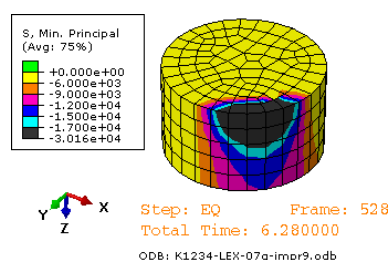
LDM - PGA=0.5g



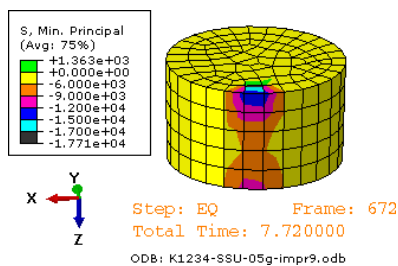
LDM - PGA=0.7g



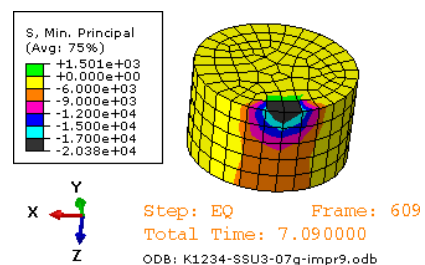
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



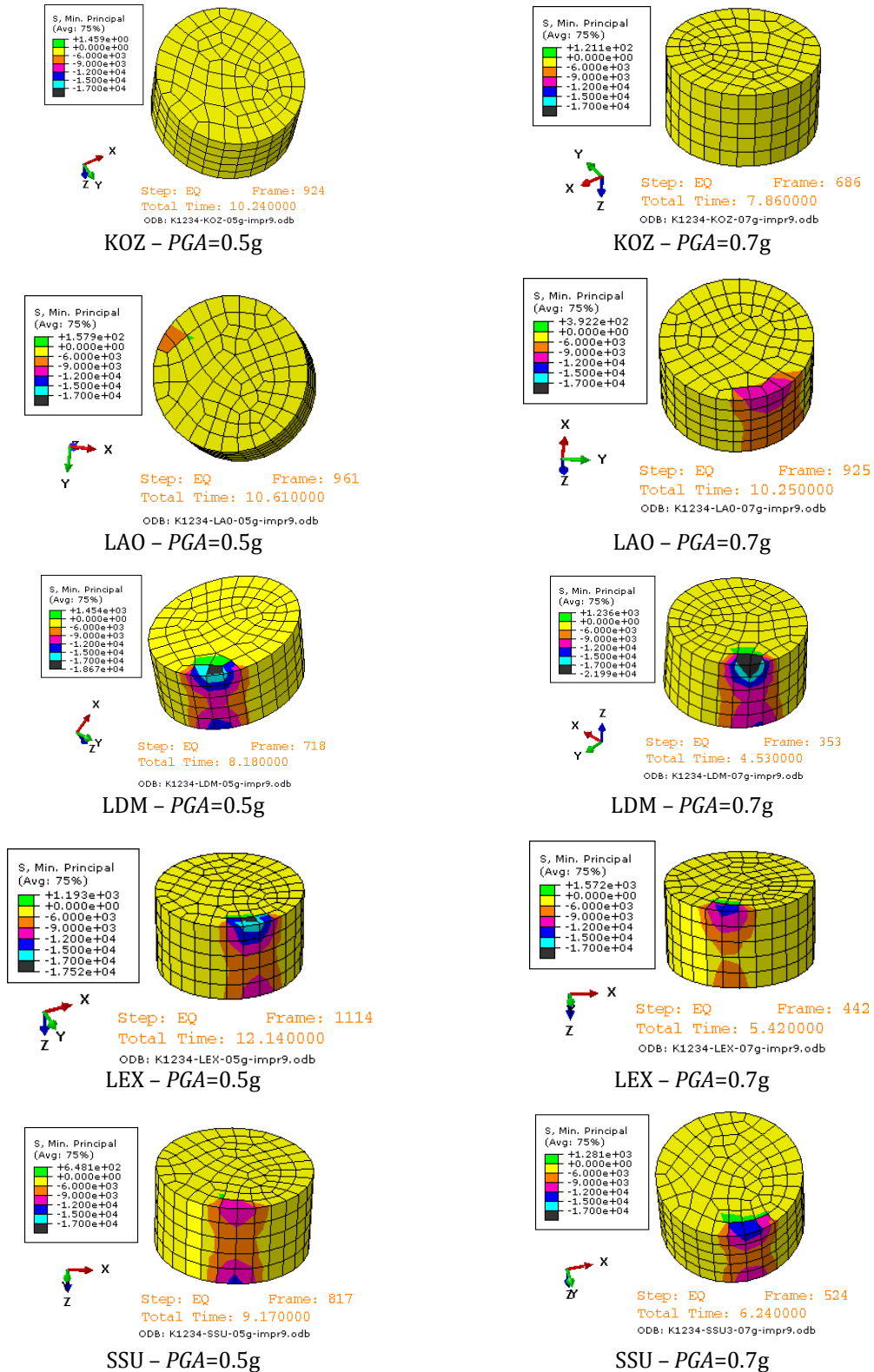
SSU - PGA=0.5g



SSU - PGA=0.7g

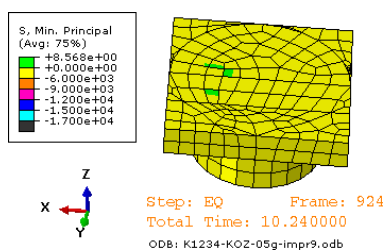
Εικόνα 62. Κύριες θλιπτικές τάσεις στον νέο σπόνδυλο K1_T1.N. Οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής (9.0 MPa).

K2_T2.N

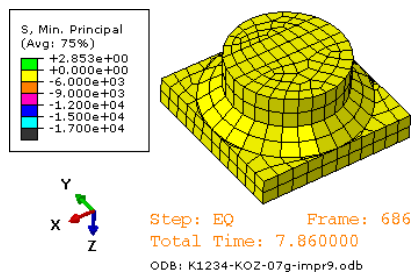


Εικόνα 63. Κύριες θλιπτικές τάσεις στον νέο σπόνδυλο K2_T2.N. Οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής 9.0 MPa.

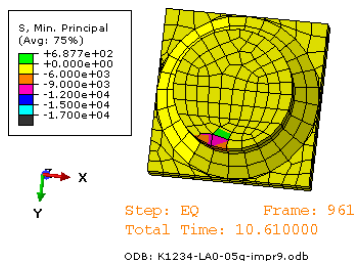
K1_TOP.N



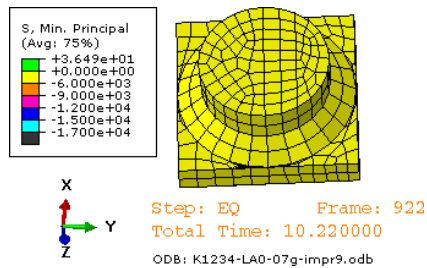
KOZ - PGA=0.5g



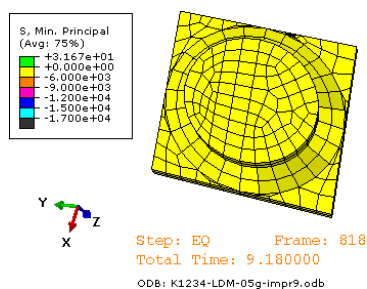
KOZ - PGA=0.7g



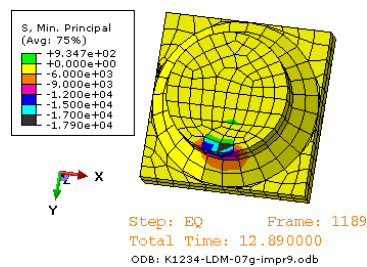
LAO - PGA=0.5g



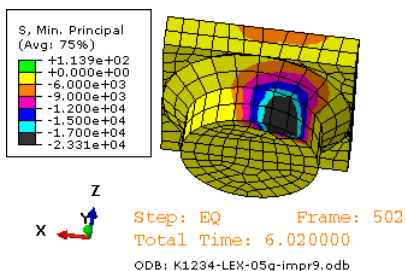
LAO - PGA=0.7g



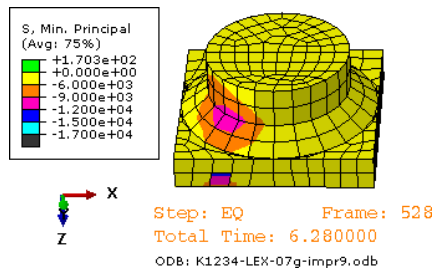
LDM - PGA=0.5g



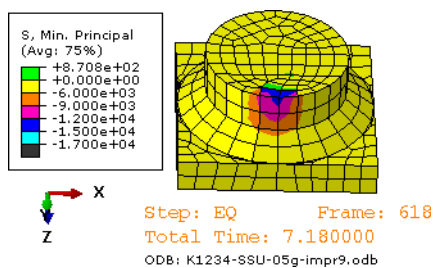
LDM - PGA=0.7g



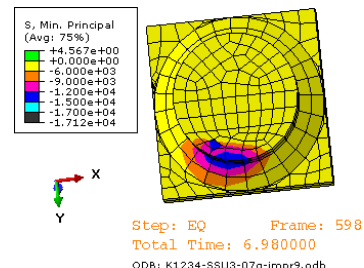
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



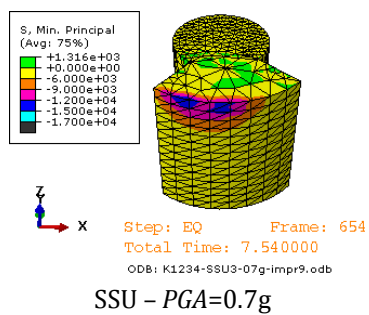
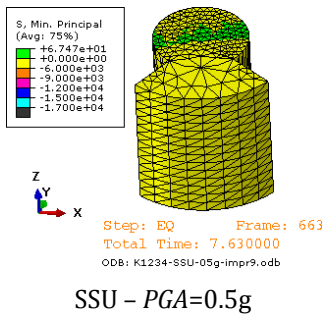
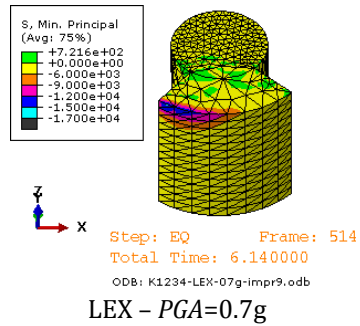
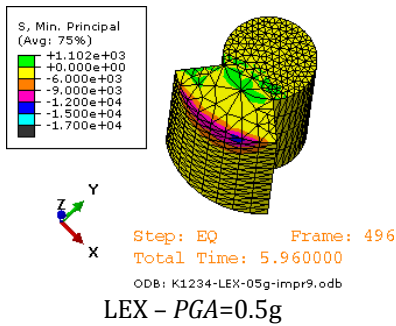
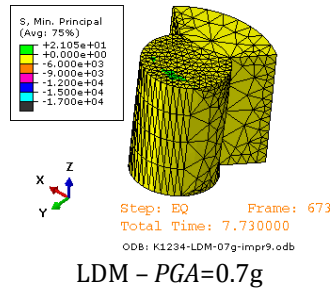
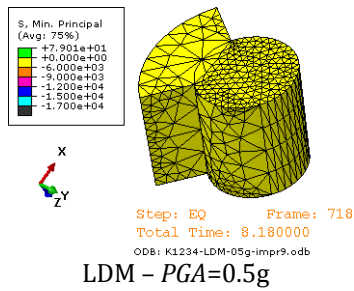
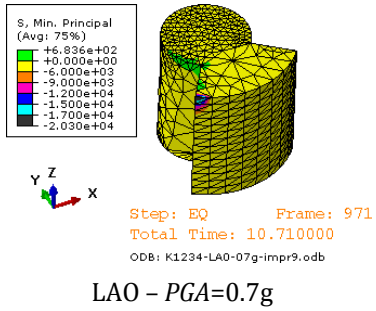
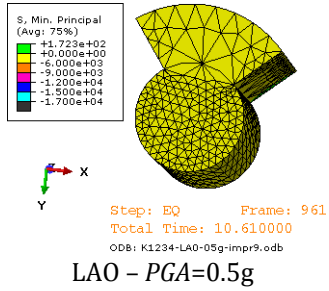
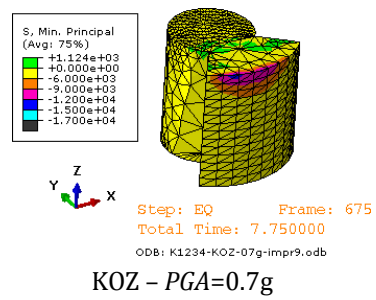
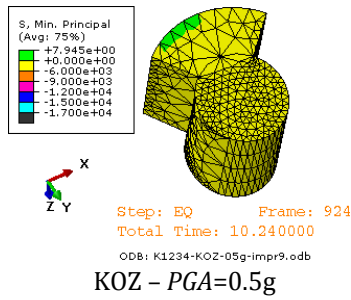
SSU - PGA=0.5g



SSU - PGA=0.7g

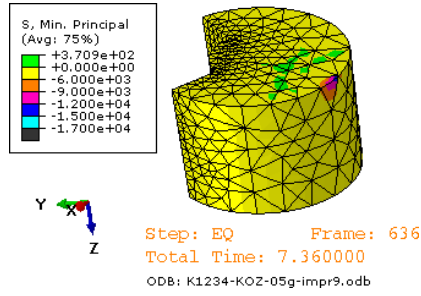
Εικόνα 64. Κύριες θλιπτικές τάσεις στο νέο κιονόκρानο του κίονα K1. Οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του Πίνακα 2 (9.0 MPa).

K2_T6.N

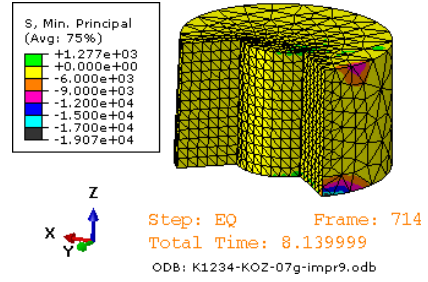


Εικόνα 65. Κύριες θλιπτικές τάσεις στο συμπλήρωμα από νέο λίθο του σπονδύλου K2_T6.N. Οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του Πίνακα 2 (9.0 MPa).

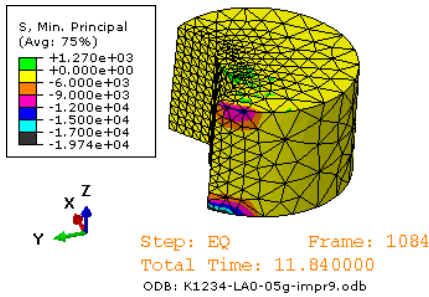
K4_T2.N



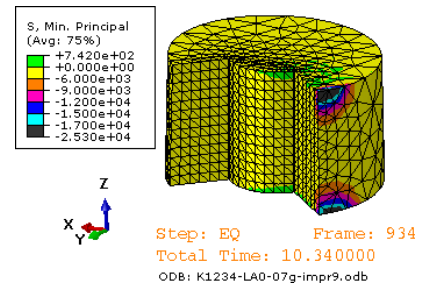
KOZ - PGA=0.5g



KOZ - PGA=0.7g



LAO - PGA=0.5g



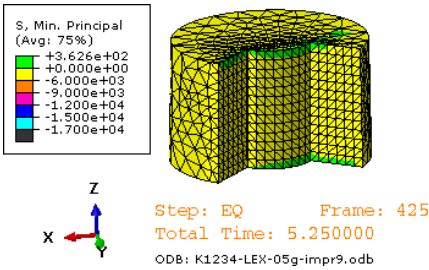
LAO - PGA=0.7g

Ο κίονας καταρρέει

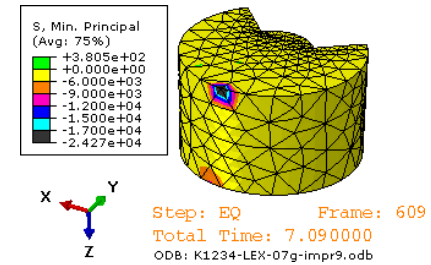
Ο κίονας καταρρέει

LDM - PGA=0.5g

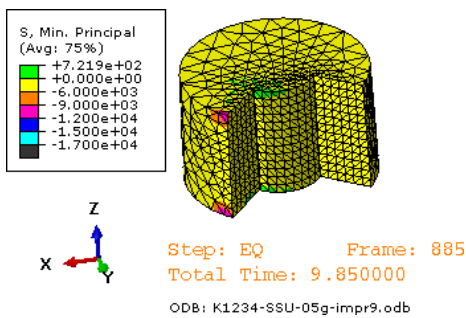
LDM - PGA=0.7g



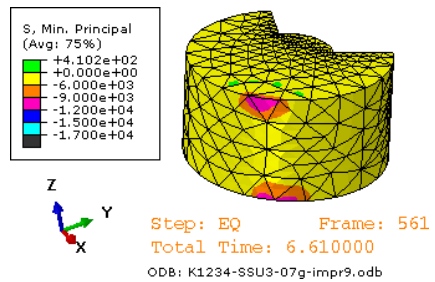
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



SSU - PGA=0.5g



SSU - PGA=0.7g

Εικόνα 66. Κύριες θλιπτικές τάσεις στο συμπλήρωμα από νέο λίθο του σπονδύλου K4_T2.N. Οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του Πίνακα 2 (9.0 MPa).

5.2.3 Τεχνητοί λίθοι

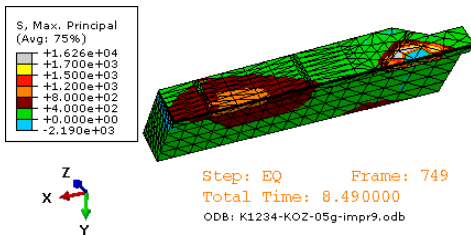
Τεχνητοί λίθοι από MASTER EMACO ή άλλο αντίστοιχο κονίαμα προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν στις δοκούς του θριγκού και για τα συμπληρώματα του αρχαίου κιονόκρανου του κίονα K2 καθώς και για συμπληρώματα αρχαίων σπονδύλων, για την πλήρωση της κεντρικής οπής και σε θέσεις που είναι δύσκολη η κατασκευή τους από νέο λίθο, κυρίως λόγω μικρού τους μεγέθους.

Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για τις κύριες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στους τεχνητούς λίθους του θριγκού και στα συμπληρώματα του κιονόκρανου. Οι περιοχές με κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 1.5 Μpa (MASTER EMACO), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 0.8 Μpa (επί τόπου κατασκευασμένο κονίαμα). Αντίστοιχα σε θλίψη οι περιοχές με θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 15.0 ΜPa (MASTER EMACO), ενώ οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 9.0 Μpa (επί τόπου κατασκευασμένο κονίαμα).

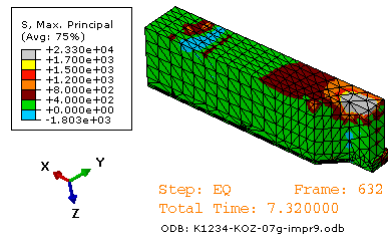
Τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα ακόλουθα :

- Στην περίπτωση που επιλεγεί η χρήση MASTER EMACO θλιπτικής αντοχής 15 Μpa στο θριγκό, οι υπερβάσεις της θλιπτικής αντοχής περιορίζονται μόνον σε κάποιες γωνίες των δοκών, οι οποίες μπορεί να αποτηθούν σε περίπτωση σεισμού χωρίς όμως να δημιουργούν πρόβλημα στην ευστάθεια της κατασκευής.
- Στην περίπτωση που επιλεγεί η χρήση MASTER EMACO που έχει εφελκυστική αντοχής 1.5 Μpa στο θριγκό, θα παρουσιαστούν σημαντικές υπερβάσεις της αντοχής σε εφελκυσμό σε όλα τα σεισμικά σενάρια που επιλέχθηκαν. Όταν οι υπερβάσεις αυτές περιορίζονται στις επιφάνειες επαφής δεν θεωρούνται ανησυχητικές. Όταν όμως επεκτείνονται σε μεγάλη επιφάνεια των δοκών του θριγκού μπορεί να οδηγήσουν σε απότμηση κάποιου τμήματος της, οδηγώντας σε απώλεια της επιφάνειας έδρασης των υπερκείμενων δοκών και μελών.
- Στην περίπτωση που προτιμηθεί το κονίαμα εφελκυστικής αντοχής 0.8 ΜPa για την κατασκευή του τεχνητού λίθου οι περιοχές υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής σε ένα ισχυρό σεισμό αυξάνονται αισθητά και αναμένεται να οδηγήσουν σε βλάβες μεγαλύτερης κλίμακας στο θριγκό
- Στο κονίαμα που τοποθετείται ως συμπλήρωμα στο αρχαίο κιονόκρανο του γωνιακού κίονα K2 οι κύριες εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται σε όλους τους σεισμούς που εξετάστηκαν υπερβαίνουν σε μεγάλης έκτασης περιοχές την εφελκυστική αντοχή τόσο του κονιάματος MASTER EMACO με εφελκυστική αντοχή 1.5 Μpa, όσο και του κονιάματος με αντοχή 0.8 Μpa. Οι υπερβάσεις αυτές της αντοχής των κονιαμάτων αναμένεται να προκαλέσουν σημαντικές ρηγματώσεις, ακόμα και αποκολλήσεις στα συμπληρώματα του κιονόκρανου.

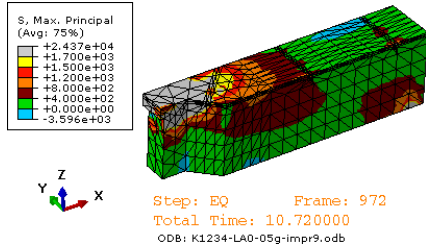
EPA3.M



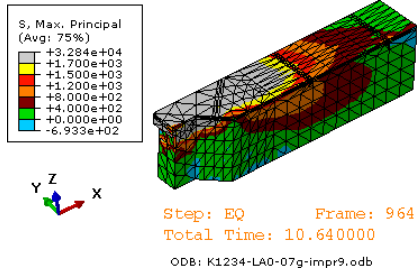
KOZ - PGA=0.5g



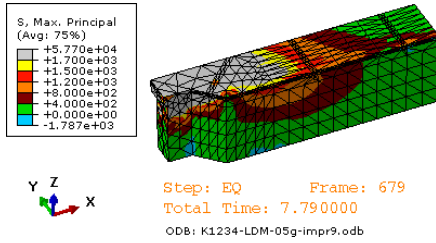
KOZ - PGA=0.7g



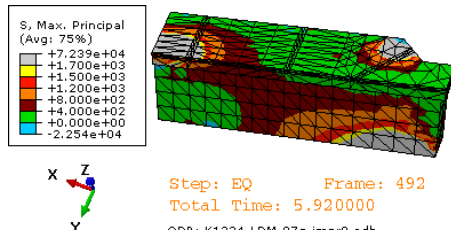
LAO - PGA=0.5g



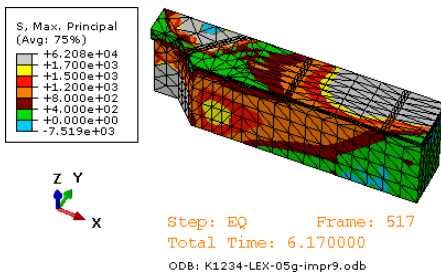
LAO - PGA=0.7g



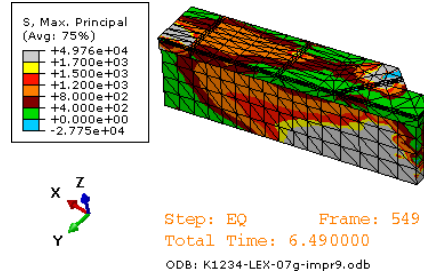
LDM - PGA=0.5g



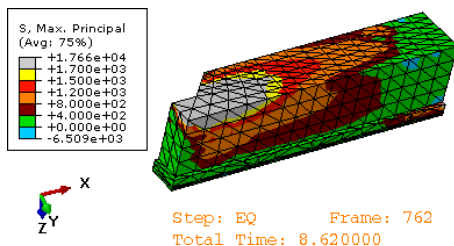
LDM - PGA=0.7g



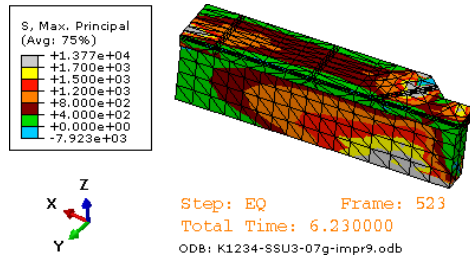
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



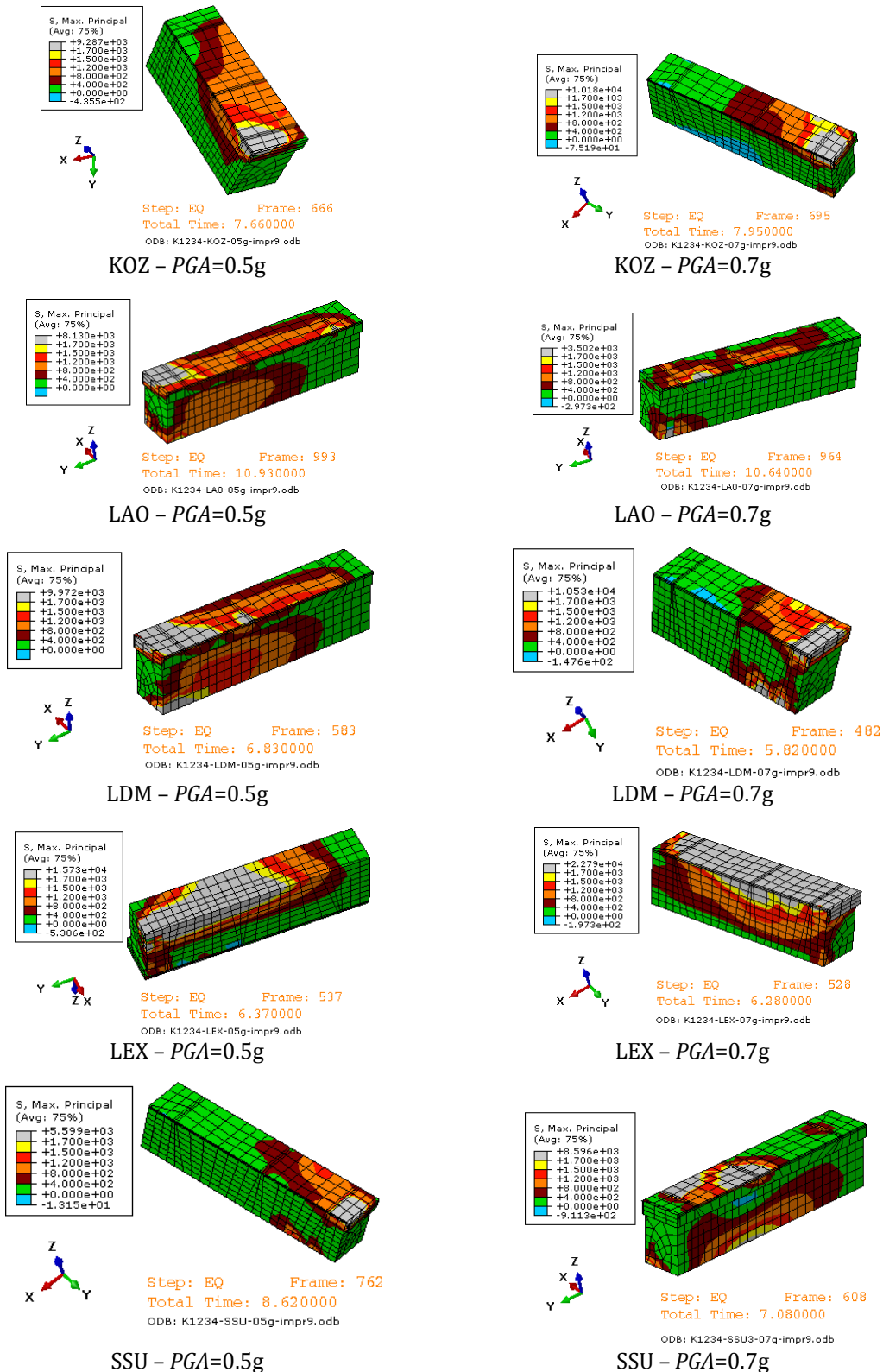
SSU - PGA=0.5g



SSU - PGA=0.7g

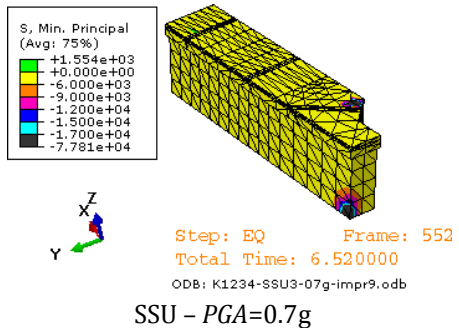
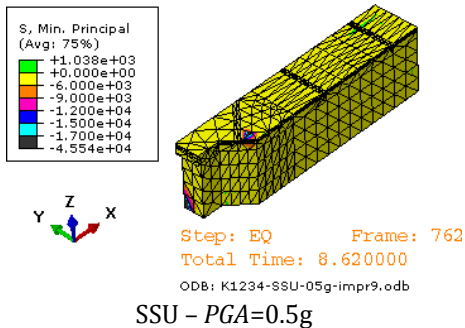
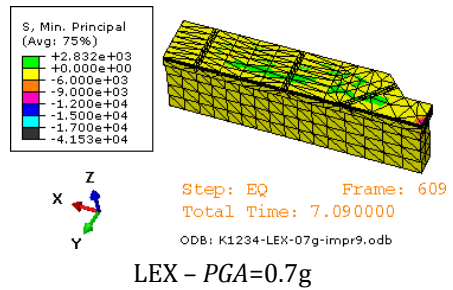
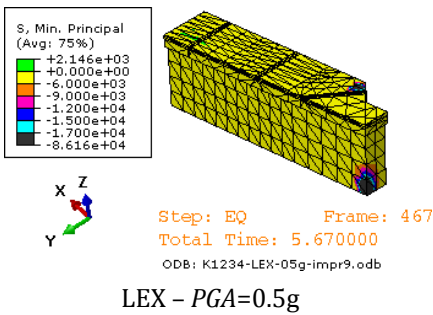
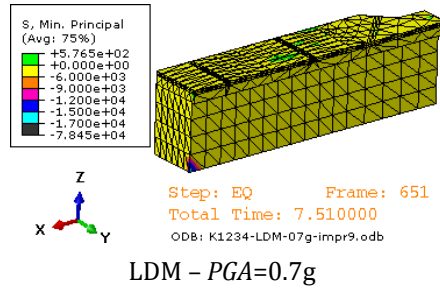
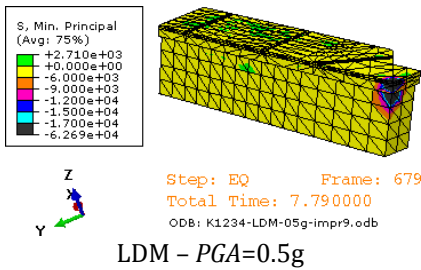
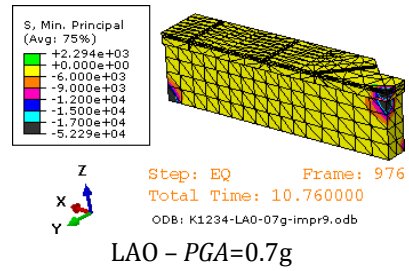
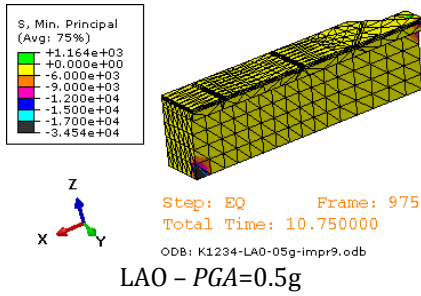
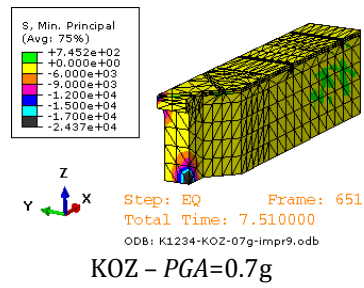
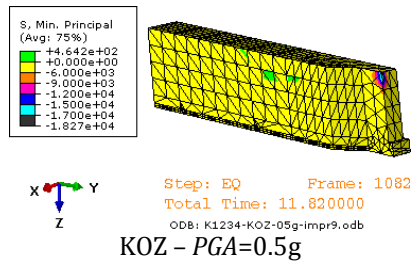
Εικόνα 67. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στη δοκό EPA3.M του θριγκού. Οι περιοχές με κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 1.5 MPa (Πίνακας 2), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 0.8 MPa.

EPB1.M



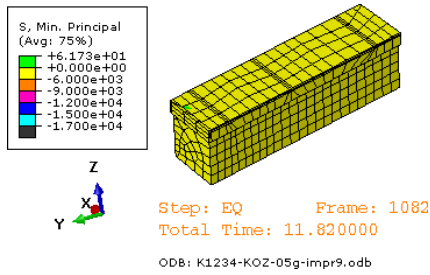
Εικόνα 68. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στη δοκό EPB1.M του θριγκού. Οι περιοχές με κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 1.5 MPa (Πίνακας 2), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 0.8 MPa.

EPA3.M

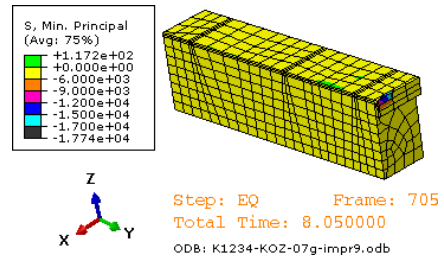


Εικόνα 69. Κύριες θλιπτικές τάσεις στη δοκό EPA3.M του θριγκού. Οι περιοχές με θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 15.0 MPa (Πίνακας 2), ενώ οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 9.0 MPa.

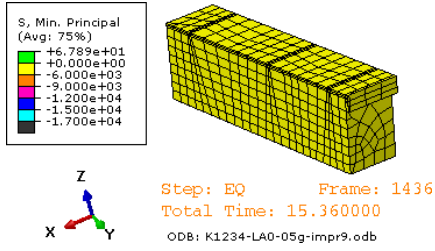
EPB1.M



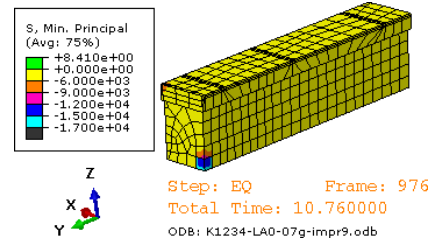
KOZ - PGA=0.5g



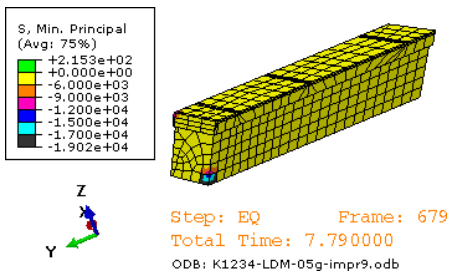
KOZ - PGA=0.7g



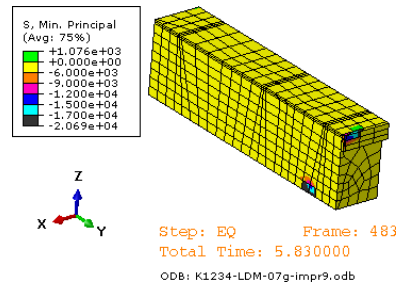
LAO - PGA=0.5g



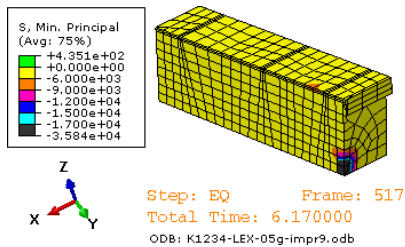
LAO - PGA=0.7g



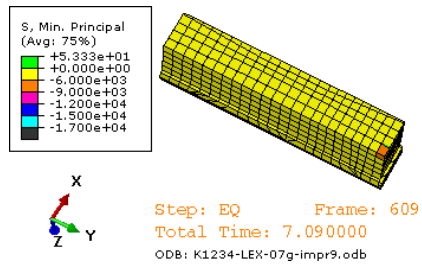
LDM - PGA=0.5g



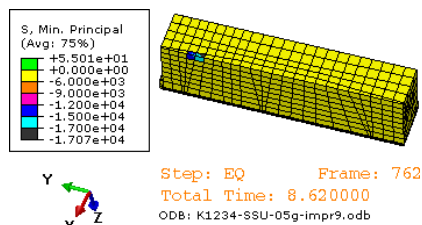
LDM - PGA=0.7g



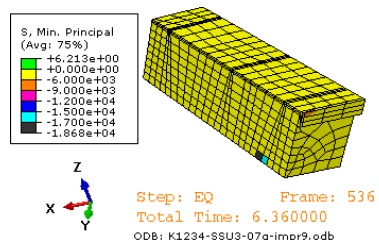
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



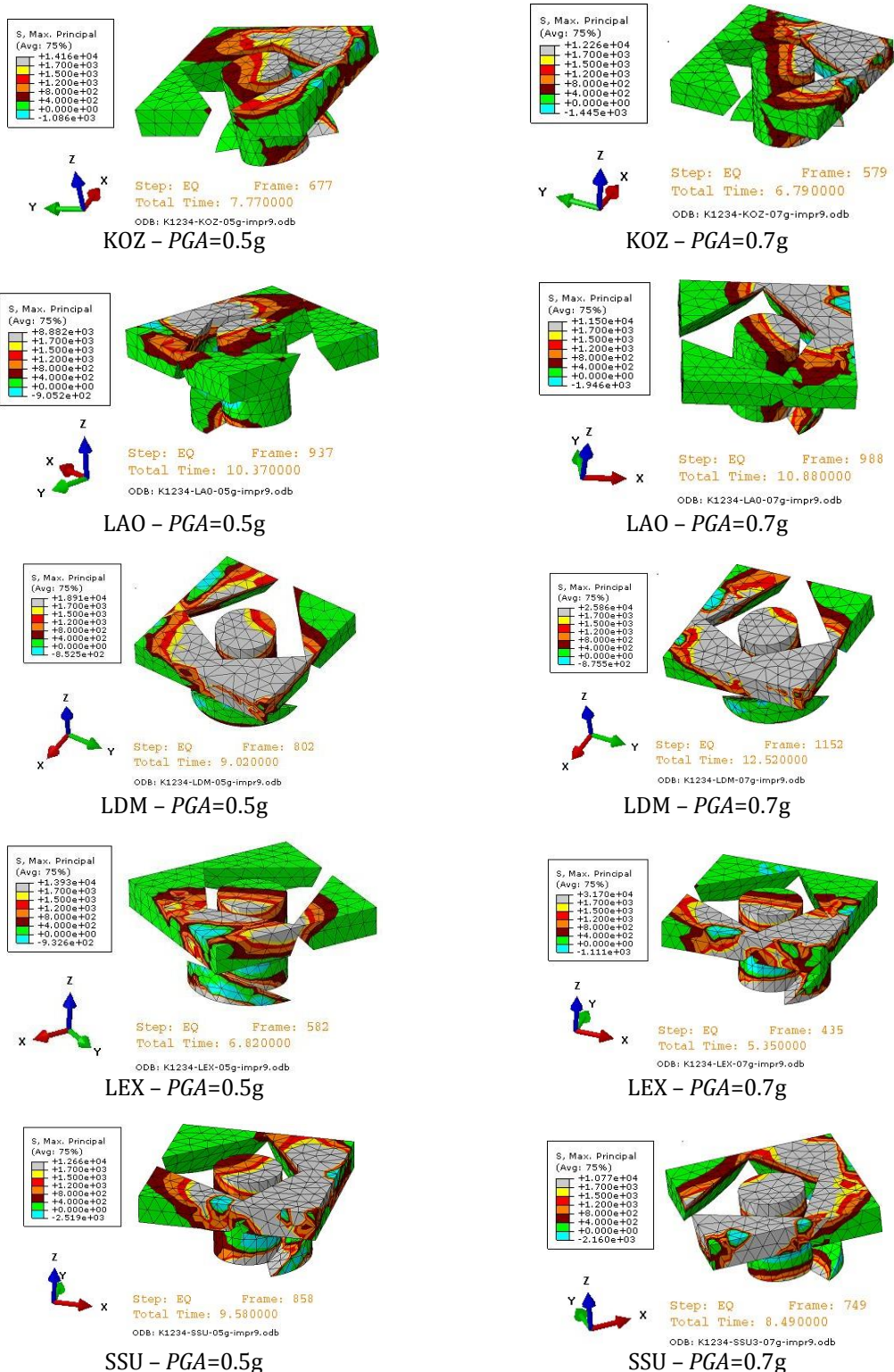
SSU - PGA=0.5g



SSU - PGA=0.7g

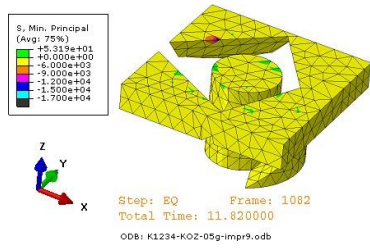
Εικόνα 70. Κύριες θλιπτικές τάσεις στη δοκό EPB1.M του θριγκού. Οι περιοχές με θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 15.0 MPa (Πίνακας 2), ενώ οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 9.0 MPa.

K2_TOP.M

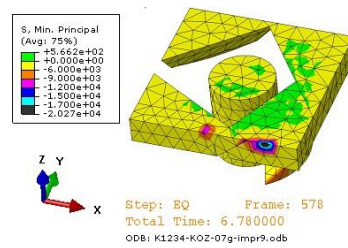


Εικόνα 71. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στα συμπληρώματα από τεχνητό λίθο του αρχαίου κιονοκράνου του κίονα K2. Οι περιοχές με κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 1.5 MPa (Πίνακας 2), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 0.8 MPa.

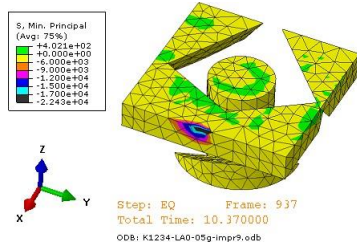
K2_TOP.M



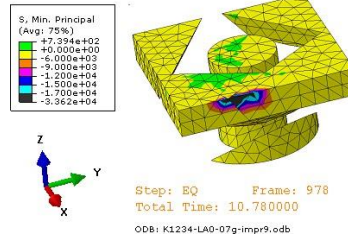
KOZ - PGA=0.5g



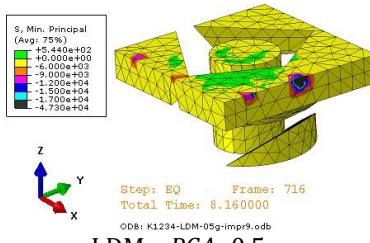
KOZ - PGA=0.7g



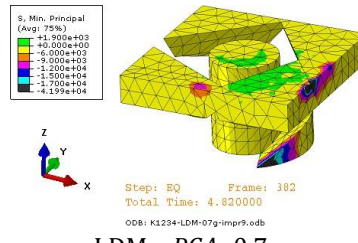
LAO - PGA=0.5g



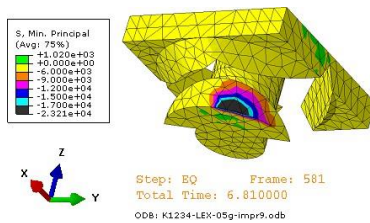
LAO - PGA=0.7g



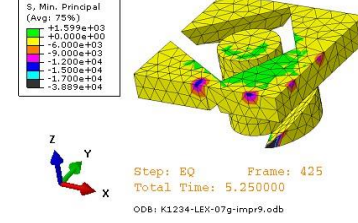
LDM - PGA=0.5g



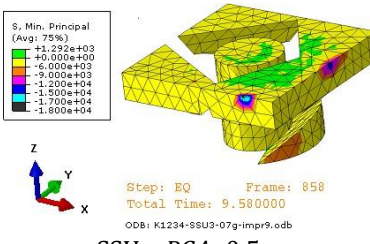
LDM - PGA=0.7g



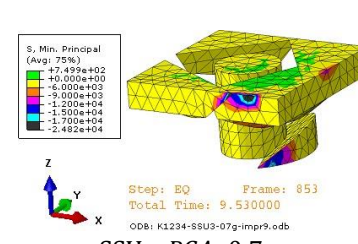
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



SSU - PGA=0.5g



SSU - PGA=0.7g

Εικόνα 72. Κύριες θλιπτικές τάσεις στα συμπληρώματα από τεχνητό λίθο του αρχαίου κιονοκράνου του κίονα K2. Οι περιοχές με θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 15.0 MPa (Πίνακας 2), ενώ οι περιοχές με ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 9.0 MPa.

5.2.4 Κονιάματα σύνδεσης

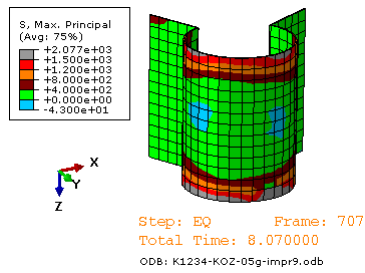
Το κονίαμα σύνδεσης χρησιμοποιείται για τη σύνδεση τμημάτων σπονδύλων από νέο λίθο με τα διασωζόμενα μέλη από αρχαίο υλικό. Η εισαγωγή του στο υπολογιστικό μοντέλο έγινε ως ξεχωριστό υλικό πάχους 1 cm για να υπολογιστούν οι τάσεις που αναπτύσσονται σε αυτό.

Στις εικόνες που ακολουθούν δίνονται αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα για τις κύριες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στα κονιάματα σύνδεσης. Οι υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής για θεωρούμενη τιμή αντοχής 1.2 MPa αποδίδονται με κόκκινο και γκρι χρώμα, ενώ για τιμή αντοχή 0.8 MPa αποδίδονται με πορτοκαλί, κόκκινο και γκρι χρώμα.

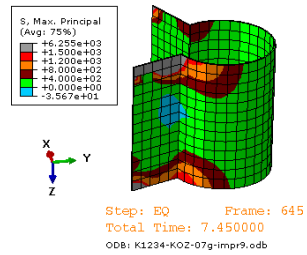
Προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

- Οι υπερβάσεις της θλιπτικής αντοχής είναι περιορισμένης κλίμακας.
- Οι υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής καλύπτουν μεγάλες περιοχές του κονιάματος σύνδεσης και αναμένεται να οδηγήσουν σε ρηγμάτωση και αποσάθρωση του κονιάματος, με συνέπεια την αποκόλληση των συνδεόμενων τμημάτων. Οι αστοχίες αυτές συμβαίνουν και για την περίπτωση χρήσης κονιάματος ικανοποιητικών μηχανικών αντοχών (θλιπτική αντοχή 11.5 MPa και εφελκυστική αντοχή 1.2 MPa).
- Για να αναπτυχθούν οι τάσεις που φαίνονται στις εικόνες προϋποτίθεται ότι η συνάφεια θα είναι επαρκής, ώστε να μην προηγηθεί αστοχία των συνδέσεων. Από τις δοκιμές συνάφειας που έγιναν, προέκυψε ότι η αντοχή σε συνάφεια του κονιάματος με τον νέο λίθο από την περιοχή Σφουγγάρια Α είναι πολύ μικρή και επομένως οι συνδέσεις αναμένεται να αστοχήσουν πολύ πριν αστοχήσει το ίδιο το κονίαμα λόγω μεγάλων θλιπτικών ή εφελκυστικών τάσεων.
- Επομένως είναι προφανής η αναγκαιότητα χρήσης πρόσθετου οπλισμού από ράβδους τιτανίου για τη σύνδεση των αρχαίων με τους νέους λίθους καθώς το κονίαμα σύνδεσης δεν επαρκεί. Για τη διαστασιολόγηση των ράβδων τιτανίου (υπολογισμό της διατομής και του πλήθους των απαιτούμενων ράβδων σε κάθε θέση) πρέπει να γίνει εισαγωγή των ράβδων στο αριθμητικό προσομοίωμα για να υπολογιστούν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτούς.. Παράλληλα κρίσιμος είναι και ο έλεγχος των τάσεων που αναπτύσσονται στο λίθο (τάσεις άντυγος), ώστε να διασφαλίζεται ότι οι δυνάμεις μπορούν να μεταφερθούν στα συνδεόμενα τμήματα χωρίς υπέρβαση της αντοχής των υλικών. Η παραδοχή που θεωρείται σε αυτή την περίπτωση, είναι ότι η αντοχή των ράβδων οπλισμού πρέπει να είναι μικρότερη από την αντοχή των λίθων, ιδιαίτερα των αρχαίων, ώστε σε περίπτωση αστοχίας, αυτή να συμβεί στους συνδέσμους και όχι στους λίθους.

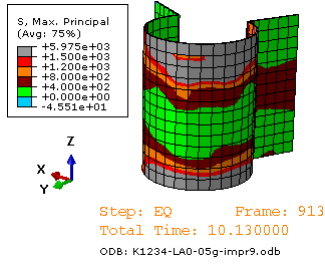
K2_T3.M



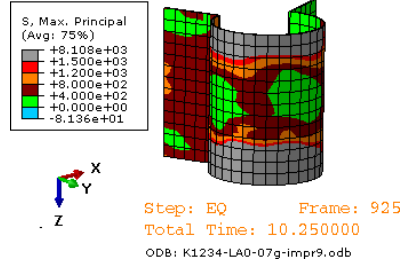
KOZ - PGA=0.5g



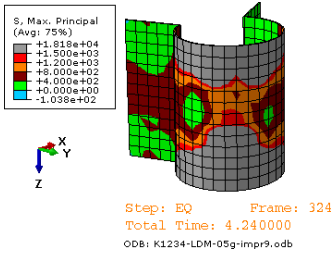
KOZ - PGA=0.7g



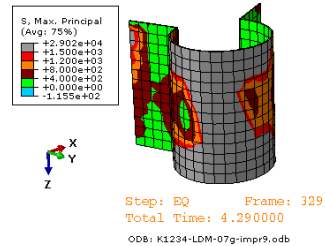
LAO - PGA=0.5g



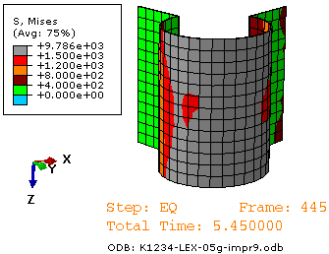
LAO - PGA=0.7g



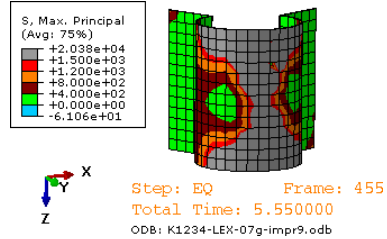
LDM - PGA=0.5g



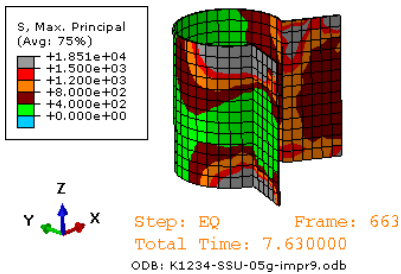
LDM - PGA=0.7g



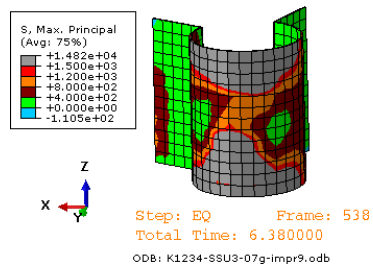
LEX - PGA=0.5g



LEX - PGA=0.7g



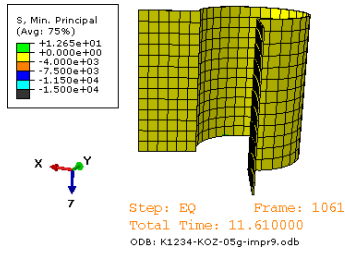
SSU - PGA=0.5g



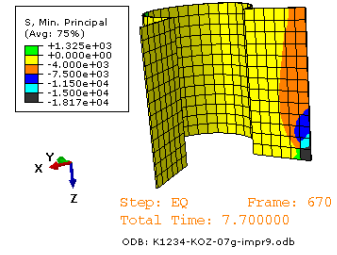
SSU - PGA=0.7g

Εικόνα 73. Κύριες εφελκυστικές τάσεις στο κονίαμα σύνδεσης αρχαίων και νέων λίθων στον σπόνδυλο K2_T3. Οι περιοχές με κόκκινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 1.2 MPa (Πίνακας 2), ενώ οι περιοχές με πορτοκαλί, κόκκινο και γκρι χρώμα δηλώνουν υπέρβαση εφελκυστικής αντοχής 0.8 MPa.

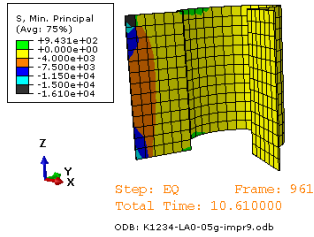
K2_T3.M



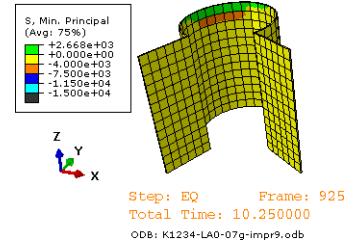
KOZ – PGA=0.5g



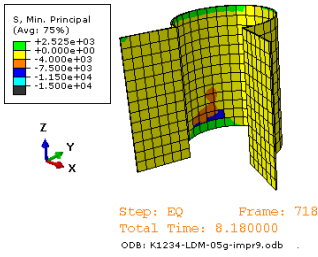
KOZ – PGA=0.7g



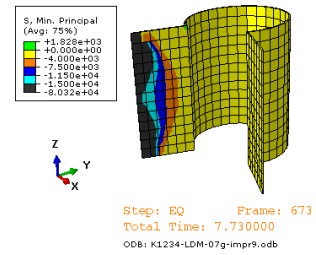
LAO – PGA=0.5g



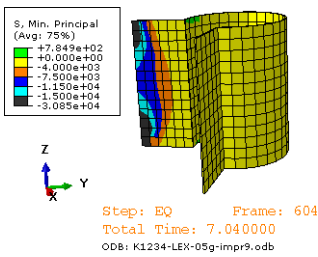
LAO – PGA=0.7g



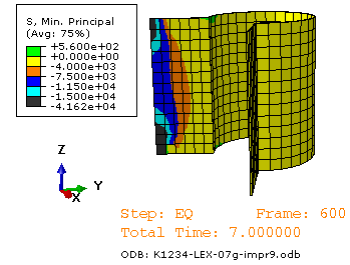
LDM – PGA=0.5g



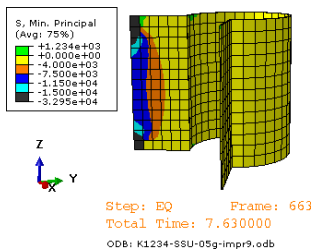
LDM – PGA=0.7g



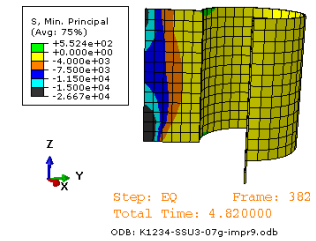
LEX – PGA=0.5g



LEX – PGA=0.7g



SSU – PGA=0.5g

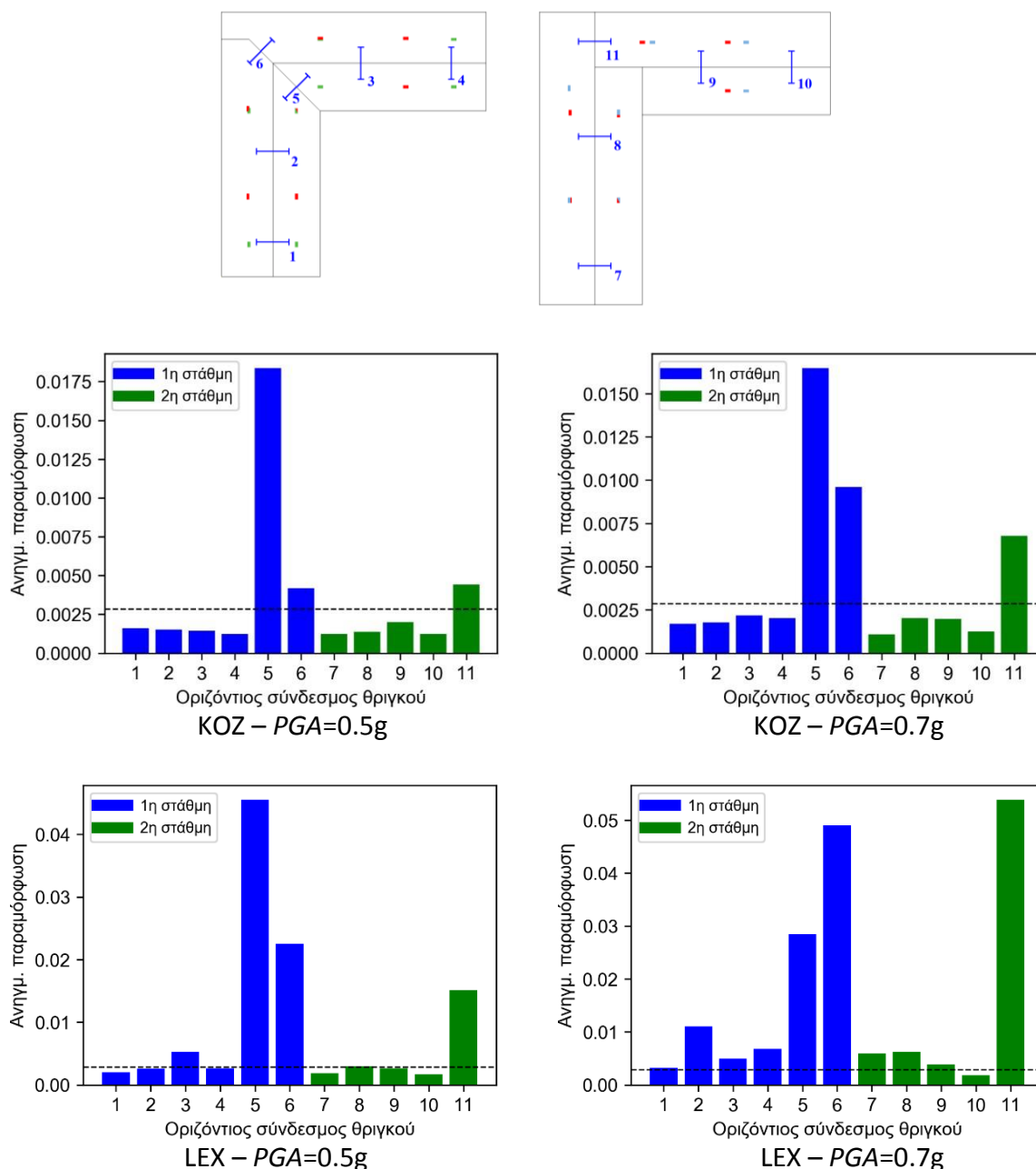


SSU – PGA=0.7g

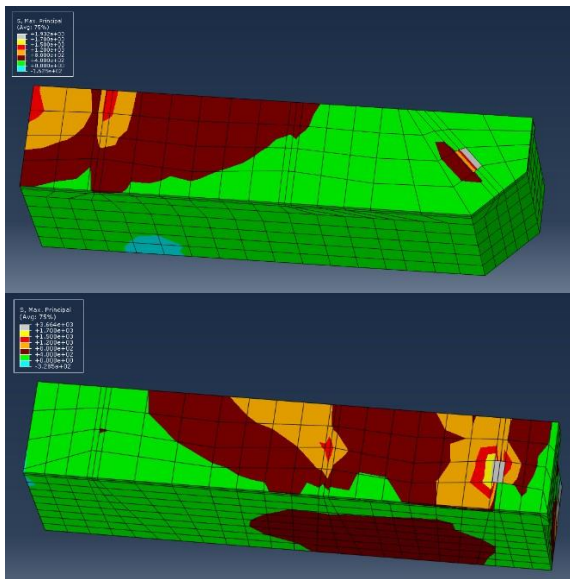
Εικόνα 74. Κύριες θλιπτικές τάσεις στο κονίαμα σύνδεσης αρχαίων και νέων λίθων στον σπόνδυλο K2_T3. Οι περιοχές με θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 11.5 MPa (Πίνακας 2), ενώ οι περιοχές με μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα δηλώνουν υπέρβαση θλιπτικής αντοχής 7.5 MPa.

5.2.5 Μεταλλικοί σύνδεσμοι θριγκού

Οι οριζόντιοι σύνδεσμοι από τιτάνιο που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των δοκών του θριγκού ενδέχεται να διαρρεύσουν κατά τη διάρκεια μιας ισχυρής σεισμικής καταπόνησης. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης για ένα υψίσυχο σεισμό μακρινού πεδίου (KOZ) και ένα σεισμό κοντινού πεδίου με παλμό κατευθυντικότητας (LEX), οι τιμές της αξονικής ανηγμένης παραμόρφωσης των συνδέσμων παρουσιάζεται στις ακόλουθες εικόνες.



Εικόνα 75. Ανηγμένες αξονικές παραμορφώσεις των οριζοντίων συνδέσμων του θριγκού για τις σεισμικές διεγέρσεις KOZ και LEX, κανονικοποιημένες σε μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA=0.5\text{ g}$ (αριστερή στήλη) και $PGA=0.7\text{ g}$ (δεξιά στήλη). Με διακεκομμένη γραμμή δείχνεται η παραμόρφωση διαρροής.



Εικόνα 76. Τοπικές μικρές υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής (γκρι χρώμα) στις θέσεις στήριξης των οριζόντιων μεταλλικών συνδέσμων στη γωνία του θριγκού.

Την μεγαλύτερη καταπόνηση υφίστανται οι λοξοί σύνδεσμοι 5 και 6 της πρώτης στάθμης πάνω από τον γωνιακό κίονα K2 και ο σύνδεσμος 11 της 2ης στάθμης στην ίδια θέση. Οι συγκεκριμένοι σύνδεσμοι διαρρέουν σε όλους τους σεισμούς που εξετάστηκαν χωρίς όμως να αστοχούν, αφού η παραμόρφωση αστοχίας θεωρείται ότι είναι της τάξης του 20%. Όμως, λόγω της μεγάλης πλαστιμότητας που αναπτύσσουν, αναμένεται ότι θα έχουν παραμένουσα επιμήκυνση, η οποία θα οδηγήσει σε άνοιγμα των αρμών μετά το τέλος του σεισμού. Οι υπόλοιποι σύνδεσμοι συμπεριφέρονται, γενικώς, ελαστικά εκτός από πολύ ισχυρούς κοντινούς σεισμούς, στους οποίους κάποιοι διαρρέουν αλλά με μικρή αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα.

Επομένως αναμένεται άνοιγμα των αρμών των λίθων του θριγκού στη γωνία, λόγω της παραμένουσας επιμήκυνσης των συνδέσμων που προκύπτει μετά από μία ισχυρή σεισμική καταπόνηση. Επιπρόσθετα λόγω των υπερβάσεων της αντοχής του λίθου που σημειώνονται στις θέσεις στήριξης των συνδέσμων, ενδέχεται να προκληθούν τοπικές αστοχίες σε αυτόν με τη μορφή της θραύσης τμημάτων του.

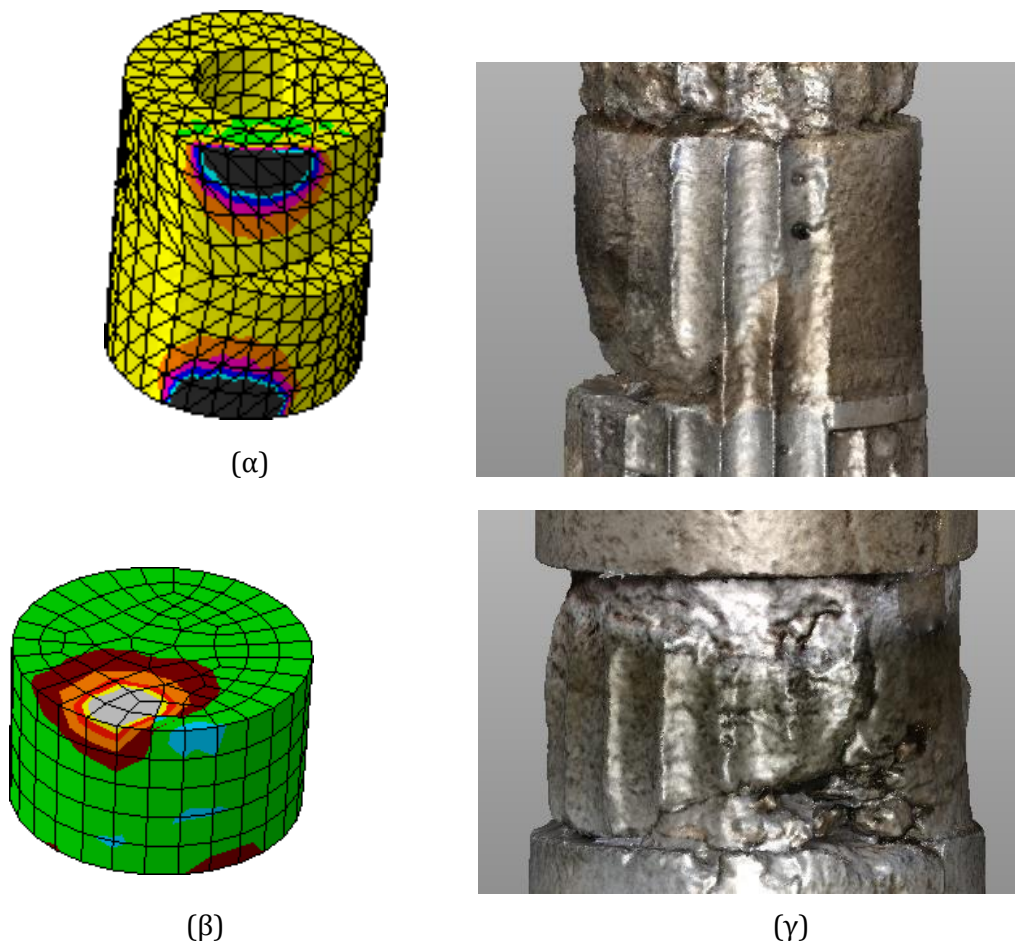
5.3 Επιβεβαίωση αποτελεσμάτων από υφιστάμενες βλάβες

Σε αυτή την ενότητα πραγματοποιείται η σύνδεση των αναμενόμενων τοπικών αστοχιών όπως αυτές προκύπτουν από την ανάλυση, με τις υφιστάμενες βλάβες για την επιβεβαίωση της ορθότητας των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε. Οι θέσεις και η μορφή των βλαβών που εντοπίζονται στο μνημείο έρχονται σε πλήρη αντιστοιχία με τις θέσεις και τη μορφή που εκδηλώνονται οι υπερβάσεις των αντοχών στο μοντέλο. Κατά αυτό τον τρόπο καθίσταται εφικτή η ερμηνεία της παθολογίας του ναού και ο εντοπισμός των μηχανισμών αστοχίας σε αυτό ώστε να εξαχθούν τα αναγκαία συμπεράσματα για

τη μεθοδολογία αποκατάστασης του.

5.3.1 Αποτμήσεις ακμών σπονδύλων

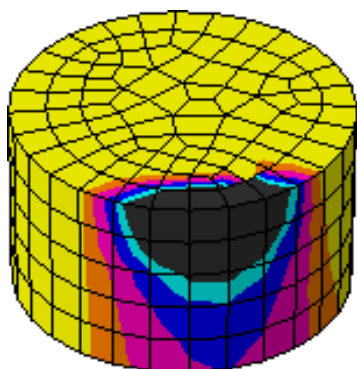
Αποτμήσεις ακμών σπονδύλων συμβαίνουν είτε λόγω υπέρβασης θλιπτικών τάσεων, είτε λόγω διατμητικής αστοχίας. Η διατμητική αστοχία οφείλεται σε υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του λίθου λόγω λοξού εφελκυσμού. Πρόκειται για συνήθεις βλάβες σε αρχαία μνημεία που οφείλονται στη μεγάλη συγκέντρωση τάσεων κοντά στις ακμές των σπονδύλων κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης λόγω των φαινομένων λικνισμού. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η αντιστοιχία που υπάρχει ανάμεσα στην περιοχή που παρατηρείται υπέρβαση αντοχής στο μοντέλο υπολογισμού και την περιοχή και το είδος της βλάβης που παρατηρείται στο αρχαίο τμήμα των σπονδύλων του ναού του Πύθιου Απόλλωνα στην κλίμακα του μνημείου.



Εικόνα 77. (α) Υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής (ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα) και (β) υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής (καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα) που δηλώνουν ότι θα συμβεί απότμηση της ακμής του σπονδύλου. (γ) Υφιστάμενες αποτμήσεις ακμών σε αρχαίους σπονδύλους του μνημείου που αποδίδονται σε αντίστοιχες υπερβάσεις αντοχών κατά τη διάρκεια προηγούμενων σεισμών.

5.3.2 Αποφλοΐωση τμήματος της εξωτερικής παρειάς των σπονδύλων

Υπερβάσεις θλιπτικής αντοχής σε μεγάλο τμήμα της πλευρικής επιφάνειας του σπονδύλου προκαλούν τη δημιουργία ρηγματώσεων σε αυτό. Επειδή οι ρηγματώσεις αυτές αναπτύσσονται σε μεγάλη έκταση μπορούν να οδηγήσουν σε αποδιοργάνωση του σπονδύλου στην περιοχή αυτή και τελικά σε αποφλοΐωση εξωτερικής στρώσης του. Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται η συσχέτιση ανάμεσα στην υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής στην πλευρική επιφάνεια του σπονδύλου στο μοντέλο και τον αποφλοΐωση της εξωτερικής παρειάς του αρχαίου λίθου στο μνημείο.



(α)



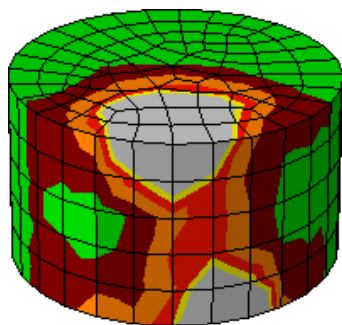
(β)

Εικόνα 78. (α) Υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής (ροζ, μπλε, θαλασσί και μαύρο χρώμα) στην εξωτερική παρειά του σπονδύλου που μπορεί να οδηγήσει σε αποφλοΐωσή του σε αυτή την περιοχή. (β) Υφιστάμενη αποφλοΐωση της εξωτερικής παρειάς σε αρχαίο σπόνδυλο του μνημείου που εκτιμάται ότι οφείλεται σε ανάλογη υπέρβαση της θλιπτικής αντοχής του λίθου κατά τη διάρκεια προηγούμενων σεισμών.

5.3.3 Θραύση σπονδύλων

Σε περίπτωση που σημειώνεται υπέρβαση εφελκυστικής τάσης σε πολύ μεγάλη περιοχή του σπονδύλου είναι πιθανό να δημιουργηθούν ρηγματώσεις σε ολόκληρη αυτή την περιοχή. Η ρηγματώση μιας μεγάλης επιφάνειας μπορεί να οδηγήσει σε θραύση του τμήματος στο οποίο συμβαίνει η υπέρβαση της αντοχής. Μια τέτοια βλάβη απομειώνει την επιφάνεια του σπονδύλου, περιορίζοντας την επιφάνεια έδρασης του υπερκείμενου τμήματος του κίονα, δημιουργώντας πρόβλημα στην ευστάθεια του μνημείου που μπορεί να οδηγηθεί ακόμα και σε κατάρρευση. Το φαινόμενο της θραύσης τμημάτων των σπονδύλων είναι σύνθητες σε αρχαίους ναούς και επιβεβαιώνεται από την εύρεση τμημάτων μόνο του αρχικού σπονδύλου σε ανασκαφές καθώς το υπόλοιπο μπορεί να έχει αποκοπεί λόγω θραύσης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται κυρίως σε σπονδύλους από λίθο χαμηλής σχετικά

αντοχής όπως είναι ο πωρόλιθος της Ρόδου, καθώς σπόνδυλοι από μάρμαρο που παρουσιάζει πολύ υψηλή αντοχή, διασώζονται συνήθως ολόκληροι. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται χαρακτηριστική περίπτωση τμήματος λίθου που έχει αστοχήσει πιθανότατα λόγω θραύσης.



(α)

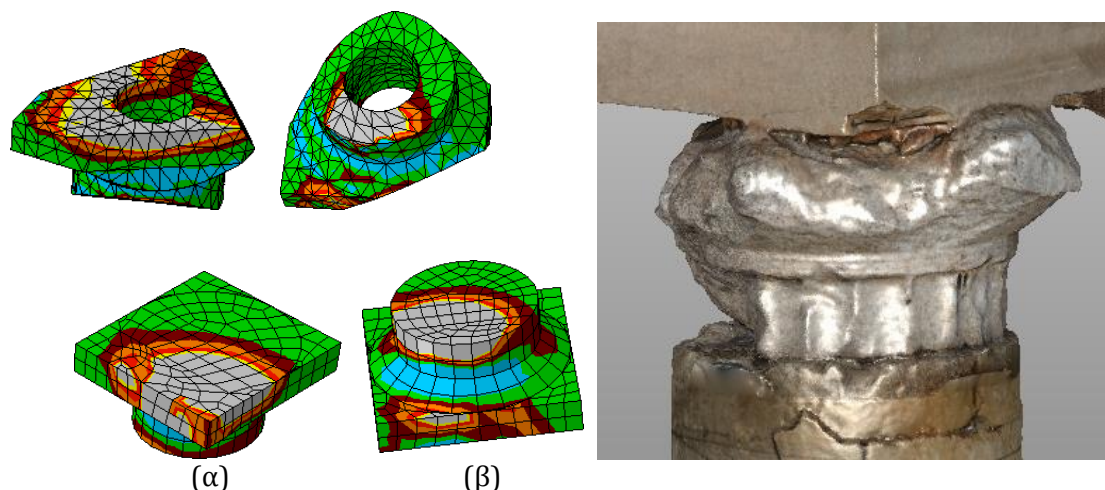


(β)

Εικόνα 79. (α) Ανάπτυξη κύριων εφελκυστικών τάσεων μεγαλύτερων από την εφελκυστική αντοχή του λίθου (καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα) σε μεγάλη περιοχή του σπονδύλου που μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του αντίστοιχου τμήματος και θραύση του σπονδύλου. (β) Τμήμα αρχαίου σπονδύλου που είναι πιθανόν να έχει προκύψει από αστοχία του υπολοίπου τμήματος του σπονδύλου κατά τη διάρκεια προηγούμενων σεισμών.

5.3.4 Απότμηση τμημάτων και βλάβες στα κιονόκρανα

Κατά τη διάρκεια των σεισμών αναπτύσσονται τόσο στη βάση, όσο και την κορυφή των κιονόκρανων σημαντικές περιοχές υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής. Αυτές οι υπερβάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε απότμηση των τμημάτων της κεφαλής του κιονοκράνου που βρίσκονται εκτός της περιμέτρου της βάσης και η αποδιοργάνωση της άνω παρειάς, καθώς και απότμηση ακμών στη βάση. Χαρακτηριστική περίπτωση τέτοιας βλάβης είναι οι αποτμήσεις στη βάση και την κεφαλή του αρχαίου κιονόκρανου K2 που διασώζεται σε κακή κατάσταση, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 80. (α) Υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής (καφέ, πορτοκαλί, κόκκινο, κίτρινο και γκρι χρώμα) στην κεφαλή και τη βάση του κιονόκρανου του κίονα K2 (πάνω) και του κιονόκρανου του κίονα K1 (κάτω) που οδηγεί σε έντονες ρηγματώσεις με αποτέλεσμα την αποδιοργάνωση της επιφάνειας έδρασης και τις αποτμήσεις μεγάλων τμημάτων. (β) Υφιστάμενες αποτμήσεις της κεφαλής και της βάσης του αρχαίου κιονόκρανου του κίονα K2 και βλάβες στην άνω επιφάνεια έδρασης που εκτιμάται ότι οφείλονται στην ανάπτυξη αντίστοιχων μεγάλων κύριων εφελκυστικών τάσεων σε προηγούμενους σεισμούς.

5.3.5 Βλάβες στους νέους λίθους της ιταλικής αναστήλωσης

Οι βλάβες που εντοπίζονται στους νέους λίθους της ιταλικής αναστήλωσης και εκτιμάται ότι συνέβησαν κατά τη διάρκεια του μεγάλου σεισμού του 1957, ή και άλλων μικρότερης έντασης, αποτελούν απόδειξη της χαμηλής αντοχής του πωρόλιθου που χρησιμοποιήθηκε στην ιταλική αναστήλωση. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι βλάβες αυτές σημειώνονται παρά το γεγονός της μονολιθικής λειτουργίας των κίωνων μέσω του ενιαίου σκυροδετημένου πυρήνα τους.

Οι φθορές αυτές που φαίνονται στην παρακάτω εικόνα, επιβεβαιώνουν το συμπέρασμα που προκύπτει από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας, πως σε περίπτωση ισχυρού σεισμού αναμένονται σημαντικές βλάβες στο μνημείο και τα δομικά υλικά του.



Εικόνα 81 Αποτμήσεις τμημάτων και ρωγμές στους νέους λίθους της ιταλικής αναστήλωσης

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την ανάλυση της απόκρισης του ναού του Πύθιου Απόλλωνα στις σεισμικές διεγέρσεις που εξετάστηκαν, προέκυψαν πολύ σημαντικά συμπεράσματα σε ότι αφορά τη σεισμική απόκριση του μνημείου και την αξιολόγηση της μηχανικής αντοχής των επιμέρους δομικών μελών που τον απαρτίζουν.

Οι εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις που αναπτύσσονται στους σπονδύλους των κίωνων κατά τη διάρκεια όλων των σεισμών που εξετάστηκαν υπερβαίνουν τις αντοχές τόσο των αρχαίων λίθων από αυθεντικό υλικό, όσο και των νέων λίθων των κίωνων από λίθο από την περιοχή Σφουγγάρια Α. Αντίστοιχες υπερβάσεις εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων συμβαίνουν στα κιονόκρανα, ενώ στο θριγκό οι υπερβάσεις αυτές αν και μικρότερης κλίμακας, δεν παύουν να είναι σημαντικές.

Αναλυτικότερα, τα συμπεράσματα που εξάγονται για τα επιμέρους δομικά μέλη του ναού παρουσιάζονται παρακάτω.

Στους σπονδύλους των κίωνων, η υπέρβαση τάσεων περιορίζεται συνήθως στις επιφανειακές στρώσεις των επιφανειών επαφής τους. Παρά το μικρό τους βάθος όμως οι υπερβάσεις αυτές μπορούν να προκαλέσουν τοπικές αστοχίες στους σπονδύλους, οι οποίες εκδηλώνονται με τη μορφή ρηγματώσεων και μπορούν να οδηγήσουν σε αποφλοιώση τμήματος της εξωτερικής παρειάς τους και απότμηση ακμών και τμημάτων μικρού μεγέθους τους. Οι βλάβες αυτές οδηγούν σε απώλεια μέρους της επιφάνειας των σπονδύλων, μείωση της αντοχής τους καθώς και σε απώλεια της συνοχής στα σημεία που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Στις περιπτώσεις που η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής καλύπτει μεγάλη περιοχή του σπονδύλου, η υπέρβαση αυτή μπορεί να οδηγήσει στην θραύση και αποκόλληση μεγάλου τμήματος του. Αυτό ενδέχεται να προκαλέσει μείωση της επιφάνειας έδρασης των υπερκείμενων σπονδύλων, οδηγώντας σε αποδιοργάνωση τον κίονα και εν τέλει ακόμα και στην κατάρρευση του.

Σημειώνεται ότι ακόμα και στην περίπτωση που εφελκυστική αντοχή του αρχαίου και του νέου λίθου θεωρηθεί διπλάσια (0.8 Μρα) από αυτή που υπολογίστηκε κατά την πειραματική διαδικασία (0.4 Μρα), οι περιοχές υπέρβασης της αντοχής είναι μεν περιορισμένες, αλλά παραμένουν υπαρκτές και αναμένεται να οδηγήσουν στη δημιουργία σημαντικών βλαβών στους κίονες.

Στα κιονόκρανα, όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τις σεισμικές διεγέρσεις που επιλέχθηκαν παρατηρούνται σημαντικές υπερβάσεις εφελκυστικών και θλιπτικών τάσεων. Ειδικά στο αρχαίο κιονόκρανο του κίονα K2 που αποτελείται από αυθεντικό υλικό και συμπληρώματα που προβλέπεται να κατασκευαστούν από τεχνητό λίθο, οι εφελκυστικές τάσεις υπερβαίνουν κατά πολύ την εφελκυστική αντοχή του σε μεγάλες περιοχές του και στην βάση και στην κεφαλή του. Οι υπερβάσεις αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε απότμηση των τμημάτων της κεφαλής του κιονόκρανου που βρίσκονται εκτός της περιμέτρου της βάσης και σε αποδιοργάνωση της άνω παρειάς, καθώς και απότμηση ακμών στη

βάση. Επομένως βλάβες αναπτύσσονται τόσο στο αρχαίο, όσο και στο νέο υλικό του κιονόκρανου αυτού. Στα κιονόκρανα Κ1 και Κ3 στην περίπτωση υποβολής του ναού σε μία ισχυρή σεισμική καταπόνηση αναμένεται να υπάρξουν επίσης περιοχές όπου σημειώνεται υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του νέου λίθου από τον οποίο αποτελούνται, και η οποία υπέρβαση αναμένεται να οδηγήσει σε σημαντικές βλάβες.

Στο θριγκό για τεχνητό λίθο κατασκευασμένο από MASTER EMACO, από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της υποβολής του ναού σε ισχυρή σεισμική διέγερση, προκύπτουν σημαντικές υπερβάσεις της εφελκυστικής αντοχής του κονιάματος. Στις περιπτώσεις που περιορίζονται στις επιφάνειες επαφής και σε μικρό βάθος δεν θεωρούνται ανησυχητικές. Στις περιπτώσεις όμως, όπου οι περιοχές υπέρβασης της αντοχής επεκτείνονται σε μεγάλο τμήμα των δοκών, μπορεί να οδηγήσουν σε απότμηση κάποιου σημαντικού τμήματος της. Η απότμηση αυτή με τη σειρά της ενδέχεται να οδηγήσει σε μερική απώλεια στήριξης των υπερκείμενων δοκών, γεγονός που εγκυμονεί κινδύνους για την ευστάθεια της ανωδομής. Στην περίπτωση χρήσης κονιάματος μικρότερης αντοχής για την κατασκευή του τεχνητού λίθου, οι περιοχές υπέρβασης της εφελκυστικής αντοχής αυξάνονται αισθητά και αναμένεται να οδηγήσουν σε βλάβες μεγαλύτερης κλίμακας.

Στα κονιάματα σύνδεσης των τμημάτων των σπονδύλων από αρχαίο και νέο λίθο σημειώνονται σημαντικές υπερβάσεις της εφελκυστικής τους αντοχής που θα οδηγήσουν στην έντονη ρηγμάτωση της επιφάνειάς τους, και εν τέλει στην αποκόλληση των τμημάτων που συνδέουν.

Βέβαια σύμφωνα με τις πρώτες δοκιμές συνάφειας που πραγματοποιήθηκαν, οι συνδέσεις αναμένεται να αστοχήσουν λόγω ανεπαρκούς συνάφειας, πριν αστοχήσει το ίδιο το κονίαμα λόγω μεγάλων θλιπτικών ή εφελκυστικών τάσεων. Επομένως το κονίαμα δεν αρκεί για τη σύνδεση των τμημάτων αρχαίου και νέου λίθου και είναι αναγκαία η χρήση πρόσθετου σπλισμού από ράβδους τιτανίου.

Σημειώνεται ότι οι θέσεις και η μορφή των βλαβών που εντοπίζονται στα σωζόμενα αυθεντικά αλλά και νέα μέλη του μνημείου, έρχονται σε πλήρη αντιστοιχία με τις θέσεις και τη μορφή που εκδηλώνονται οι υπερβάσεις των αντοχών στο μοντέλο. Κατά αυτόν τον τρόπο επιβεβαιώνεται η ορθότητα των αποτελεσμάτων της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε.

Σε ότι αφορά την ευστάθεια του μνημείου, από τα αποτελέσματα της ανάλυσης προέκυψε ότι το σύνολο του ναού καταρρέει μόνο στο σεισμικό σενάριο κοντινού πεδίου ΒG1, στο οποίο παρουσιάζονται φαινόμενα κατευθυντικότητας. Αντίθετα ο μεμονωμένος κίονας Κ4 καταρρέει σε τρεις (ΒG1, LEX, LDM) από τους έξι σεισμούς που εξετάστηκαν, τόσο για αυτούς με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $PGA=0.7g$, όσο και για το ευμενέστερο σενάριο με $PGA = 0.5 g$ στο σεισμικό σενάριο LEX. Επομένως ο ελεύθερος κίονας είναι σαφώς πιο ευάλωτος από τους υπόλοιπους τρεις που

είναι συνδεδεμένοι με το θριγκό. Αυτό συμβαίνει καθώς, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, η πρόσθετη μάζα του επιστυλίου αυξάνει την ευστάθεια των τριών συνδεδεμένων κίονων (Makris & Vassiliou 2013), ενώ καθοριστική σημασία στην τρωτότητα του διαδραματίζει το αισθητά μικρότερο του μέγεθος σε σχέση με τους υπόλοιπους κίονες (Psycharis *et al.* 2000).

Ακόμα όμως και στους σεισμούς που ο ναός δεν καταρρέει οι σχετικές μετακινήσεις των μελών του, οδηγούν σε σημαντικές παραμένουσες παραμορφώσεις, οι οποίες χρήζουν άμεσης αποκατάστασης καθώς μειώνουν κατακόρυφα τη φέρουσα ικανότητα του καθιστώντας το ευάλωτο σε μελλοντικές σεισμικές διεγέρσεις. Στα δομικά μέλη του μνημείου αναπτύσσονται σημαντικές βλάβες λόγω αστοχίας υλικού, που οδηγούν σε αποτμήσεις γωνιών, αποσάθρωση επιφανειών και θραύση τμημάτων τους, που μπορούν να προκαλέσουν ακόμη και τοπική απώλεια στήριξης των κίονων και κατάρρευσή τους. Επομένως, συνεκτιμώντας τις βλάβες και τις παραμένουσες μετατοπίσεις των μελών του ναού, είναι προφανές ότι ο κίνδυνος μερικής ή ολικής κατάρρευσης του είναι ακόμα μεγαλύτερος από αυτόν που προέκυψε κατά τη δυναμική ανάλυση.

Όπως προκύπτει από τη δυναμική απόκριση του μνημείου για τις σεισμικές καταγραφές που εξετάστηκαν, ιδιαίτερη ευαισθησία παρουσιάζει σε σεισμούς που εμφανίζουν φαινόμενα κατευθυντικότητας, δηλαδή περιέχουν παλμούς μεγάλης περιόδου που δημιουργούν μεγάλες φασματικές επιταχύνσεις για περίοδο που κυμαίνεται κοντά στο 1 sec. Τέτοιοι παλμοί δημιουργούνται από σεισμούς κοντινού πεδίου. Τέτοιος σεισμός θα μπορούσε να προέλθει από το ρήγμα που βρίσκεται ανατολικά της Ρόδου. Τέτοιοι σεισμοί προκαλούν μεγάλες βλάβες, καθώς και σημαντικές παραμένουσες μετατοπίσεις των δομικών μελών του μνημείου. Σοβαρές βλάβες και μετακινήσεις μελών χρήζουν άμεσης αποκατάστασης καθώς αυξάνουν σημαντικά τον κίνδυνο κατάρρευσης του μνημείου σε μελλοντικές σεισμικές καταπονήσεις.

Επομένως το γενικό συμπέρασμα που εξάγεται από την ανάλυση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, είναι ότι υπάρχει σημαντική πιθανότητα για τη δημιουργία βλαβών τόσο στα αρχαία, όσο και στα νέα δομικά μέλη του ναού κατά τη διάρκεια μίας ενδεχόμενης ισχυρής σεισμικής διέγερσης. Οι βλάβες αυτές μπορεί να είναι εκτεταμένες και να οδηγήσουν ακόμα και σε μερική ή ολική κατάρρευση του μνημείου. Σημειώνεται όμως, ότι σε περίπτωση που νέες μετρήσεις δείξουν διαφοροποιήσεις στις τιμές των αντοχών από τις τιμές που θεωρήθηκαν στην παρούσα εργασία, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα.

7. ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Έπειτα από αξιολόγηση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης, διατυπώνονται κάποιες προτάσεις που στοχεύουν στην ενίσχυση της ευστάθειας του μνημείου και τον περιορισμό των βλαβών σε μία πιθανή σεισμική διέγερση. Οι προτάσεις αποκατάστασης που ακολουθούν περιλαμβάνουν τεχνικές που διέπονται από τη γενικότερη δεοντολογία των αποκαταστάσεων, όπως αυτή διατυπώνεται στον Χάρτη της Βενετίας και μάλιστα επικαιροποιημένες σύμφωνα με τις επιταγές της επιστημονικής γνώσης που έχει προκύψει από τη μελέτη προηγούμενων επεμβάσεων σε μνημεία. Προτείνονται οι λιγότερο παρεμβατικές τεχνικές, με ιδιαίτερη έμφαση στην αναστρεψιμότητα και την επιλογή και χρήση συμβατών δομικών υλικών με τον αυθεντικό λίθο του μνημείου.

Με βάση τις χαμηλές μηχανικές αντοχές που παρουσιάζει ο πωρόλιθος της περιοχής Σφουγγάρια Α, όπως προέκυψε από τις εργαστηριακές δοκιμές στις οποίες υποβλήθηκε, η χρήση του για την κατασκευή νέων μελών και συμπληρωμάτων του ναού, ενέχει σημαντικό κίνδυνο θραύσης και απότμησης μεγάλων τμημάτων των σπονδύλων σε ένα ισχυρό σεισμό. Οι βλάβες που δημιουργούνται μπορούν να οδηγήσουν ακόμα και σε μερική ή ολική κατάρρευση του μνημείου. Επομένως απαιτείται η χρήση φυσικού λίθου που να παρουσιάζει όσο το δυνατόν μεγαλύτερες μηχανικές αντοχές. Μία πρόταση που θα μπορούσε να γίνει θα ήταν η ενίσχυση του λίθου με ενέματα. Με τον τρόπο αυτό θα βελτιωθεί η μηχανική συμπεριφορά του και θα περιοριστεί η έκταση των βλαβών σε αυτόν. Όμως ακόμα και έτσι το πρόβλημα δεν εξαλείφεται, καθώς και πάλι θα παρατηρούνται υπερβάσεις των μηχανικών αντοχών του λίθου κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών καταπονήσεων.

Σημαντικός κίνδυνος θραύσεων υπάρχει και στους αρχαίους σπονδύλους, που θεωρήθηκε ότι παρουσιάζουν παρόμοια μηχανική συμπεριφορά με το νέο λίθο από την περιοχή Σφουγγάρια Α. Σημειώνεται όμως ότι για την εξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων απαιτείται να καθοριστεί με ακρίβεια η αντοχή του αρχαίου λίθου. Όμως από τη μελέτη των υφιστάμενων βλαβών του μνημείου, προέκυψε αντιστοιχία τους με αυτές που αναμένεται να συμβούν σε ένα μελλοντικό σεισμό, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Επομένως οι τιμές της αντοχής που λήφθηκαν υπόψη δεν απέχουν πολύ από την πραγματικότητα. Μία πρόταση που θα μπορούσε να γίνει θα ήταν η ενίσχυση του αρχαίου λίθου με ενέματα, εφόσον αυτό είναι εφικτό. Με τον τρόπο αυτό θα βελτιωθεί η μηχανική συμπεριφορά του και θα περιοριστεί η έκταση των βλαβών σε αυτόν. Όμως, όπως και στο νέο λίθο, το πρόβλημα δεν θεραπεύεται ολοκληρωτικά, καθώς και πάλι θα σημειώνονται υπερβάσεις των μηχανικών αντοχών του λίθου κατά τη διάρκεια ισχυρών σεισμικών διεγέρσεων.

Στο θριγκό, οι αναμενόμενες βλάβες αν και μικρότερης έκτασης από αυτές στους

σπονδύλους, παραμένουν σημαντικές και γι' αυτό το υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του τεχνητού λίθου θα πρέπει να παρουσιάζει μεγάλες μηχανικές αντοχές ώστε οι αστοχίες που θα προκληθούν να είναι περιορισμένες. Επιβεβλημένη κρίνεται η τοποθέτηση οπλισμού για την παραλαβή των εφελκυστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται. Η σύνδεση των δοκών του επιστυλίου επιτυγχάνεται με τη χρήση οριζόντιων συνδέσμων τιτανίου που παραλαμβάνουν τον εφελκυσμό, ενώ η κατακόρυφη σύνδεση των δοκών επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση βλήτρων που παραλαμβάνουν τα διατμητικά φορτία.

Στις θέσεις συνδέσεων συμπληρωμάτων με αρχαία μέλη, η συγκόλληση με κονίαμα όπως αναφέρθηκε στα συμπεράσματα δεν κρίνεται ικανοποιητική, καθώς ούτε καλή συνάφεια παρουσιάζει με τους συνδεόμενους λίθους ούτε επαρκεί για την παραλαβή των θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων. Επομένως είναι προφανής η αναγκαιότητα χρήσης πρόσθετου οπλισμού από ράβδους τιτανίου για τη σύνδεση των αρχαίων με τους νέους λίθους καθώς το κονίαμα σύνδεσης δεν επαρκεί. Για τη διαστασιολόγηση των ράβδων τιτανίου, δηλαδή τον υπολογισμό διατομής και του πλήθους των απαιτούμενων ράβδων σε κάθε θέση, πρέπει να γίνει εισαγωγή τους στο αριθμητικό προσομοίωμα για να υπολογιστούν οι δυνάμεις που αναπτύσσονται σε αυτούς. Παράλληλα κρίσιμος είναι και ο έλεγχος των τάσεων που αναπτύσσονται στο λίθο, οι λεγόμενες τάσεις άντυγος, ώστε να διασφαλίζεται ότι οι δυνάμεις μπορούν να μεταφερθούν στα συνδεόμενα τμήματα χωρίς υπέρβαση της αντοχής των υλικών. Η παραδοχή που θεωρείται σε αυτή την περίπτωση, είναι ότι η αντοχή των ράβδων οπλισμού πρέπει να είναι μικρότερη από την αντοχή των λίθων, ιδιαίτερα των αρχαίων, ώστε σε περίπτωση αστοχίας, αυτή να συμβεί στους συνδέσμους και όχι στους λίθους.

Όπως προκύπτει από την αξιολόγηση των συμπερασμάτων, η πρόκληση σημαντικών βλαβών στο ναό στην περίπτωση μίας ενδεχόμενης ισχυρής σεισμικής καταπόνησης είναι πολύ πιθανή και θα μπορούσε να οδηγήσει σε περαιτέρω φθορά των αυθεντικών μελών του, αλλά ακόμα και στην πλήρη κατάρρευση του. Για το λόγο αυτό μια εναλλακτική πρόταση θα ήταν η αναστήλωση του μνημείου με χρήση νέου υλικού που να παρουσιάζει υψηλές μηχανικές αντοχές και ικανοποιητική ανθεκτικότητα στις φυσικοχημικές φθορές που δημιουργούνται με το πέρασμα του χρόνου, με παράλληλη έκθεση των αυθεντικών αρχαίων μελών του μνημείου που διασώζονται σε μουσείο.

Τέλος, αυτό που θα πρέπει να διασφαλιστεί δεδομένου του κινδύνου μερικής ή ακόμη και ολικής κατάρρευσης του μνημείου σε μία ισχυρή σεισμική καταπόνηση, είναι η προστασία των επισκεπτών του. Θα πρέπει να ληφθούν κατάλληλα μέτρα για την απαγόρευση της προσέγγισης στο μνημείο, όπως είναι η περιοχίωση του περιμετρικά, για την αποφυγή έκθεσης των επισκεπτών σε κίνδυνο σε περίπτωση θραύσης και αποκόλλησης τμημάτων του, ή ακόμα και κατάρρευσης του σε μία ενδεχόμενη ισχυρή σεισμική διέγερση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. ABAQUS (2009). User's Manual. Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc.
2. Psycharis, I.N. (1990). Dynamic behaviour of rocking two-block assemblies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 19, 555–575.
3. Psycharis, I.N, Papastamatiou, D.Y., Alexandris, A.P. (2000). Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 29, 1093–1109.
4. Psycharis, I.N., Lemos, J. V., Papastamatiou, D.Y., Zambas, C., Papantonopoulos, C. (2003). Numerical study of the seismic behaviour of a part of the Parthenon Pronaos. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32, 2063–2084.
5. Psycharis, I.N. (2007). A Probe into the Seismic History of Athens, Greece from the Current State of a Classical Monument. *Earthquake Spectra*, 23(2), 393–415.
6. Psycharis, I., Fragiadakis, M., Stefanou, I. (2013). Seismic reliability assessment of classical columns subjected to near-fault ground motions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42, 2061–2079.
7. Moropoulou, A., Delegou, E.T., Avdelidis, N.P. and Athanasiadou, A., (2005b) Integrated diagnostics using advanced in situ measuring technology. In Proc. of the 10th International Conference on durability of building materials and components, Lyon, France, pp.1116-23.
8. Moropoulou, A., Kouli, M., Tsiourva, T., Kourteli, C. and Papisotiriou, D. (1997) Macro-and micro-non- destructive tests for environmental impact assessment on architectural surfaces. In Materials Research Society Proceedings (462) pp.343-349. Cambridge University Press.
9. Moropoulou, A., Labropoulos, K.C., Delegou, E.T., Karoglou, M. and Bakolas, A., (2013) Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*, 48, pp.1222-1239.
10. Allen, R.H., Oppenheim, I.J., Parker, A.P., Bielak, J. (1986). On the dynamic response of rigid body assemblies. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 14, 861– 876.
11. Cundall, P.A. (1988). Formulation of a three-dimensional distinct element model - Part I: A scheme to detect and represent contacts in a system composed of many polyhedral blocks. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 25, 107– 116.
12. Dasiou, M.-E., Mouzakis, H.P., Psycharis, I.N., Papantonopoulos, C., Vayas, I. (2009a). Experimental investigation of the seismic response of parts of ancient temples. Prohitech Conference, Rome, 21-24 June.
13. Dasiou, M.-E., Psycharis, I.N., Vayas, I. (2009b). Verification of numerical models used for the analysis of ancient temples. Prohitech Conference, Rome, 21-24 June.
14. Carydis P.G. , Measurement and evaluation of ambient vibrations on monuments, Part 18-I.3.
15. European Committee for Standardization (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions

and rules for buildings. EN 1998-1, Brussels.

16. European Facility for Earthquake Hazard and Risk (EFEHR), www.efehr.org
17. Fain, E., Di Biase, C., Faccio, P. (2015). Behaviour and durability of "mixed structures" in archaeological areas. The Temple of Pythian Apollo at the acropolis of Rhodes. *Patología de la Construcción, Tecnología de la Rehabilitación y Gestión del Patrimonio*.
18. Howell, A. Jackson, J., England, P., Higham, T. and Synolakis, C. (2015) Late Holocene uplift of Rhodes, Greece: Evidence for a large tsunamigenic earthquake and the implications for the tectonics of the eastern Hellenic Trench System. *Geophysical Journal International*, 203(1), 459–474.
19. Psycharis, I., Avgenakis, E., Taflampas, I. M., Kroustallaki, M, Farmakidou, E., Pikoula, M., Michailidou, M., Moropoulou, A. (2018). Seismic response of the Temple of Pythian Apollo in Rhodes Island and recommendations for its restoration.
20. Apostolopoulou, M., Keramidas, V., Galanaki, N., Kalofonou, M., Skoula, Ch., Karoglou, M., Delegou, E.T., Mouzakis, Ch., Bakolas, A. and Moropoulou, A. (2018). A study regarding the historical materials of the Pythian Apollo Temple in Rhodes for the design and selection of appropriate restoration materials.
21. Kardoutsou, V., Taflampas I. and Psycharis, I. N. (2017). A new pulse indicator for the classification of ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(3), 1356–1364.
22. Konstantinidis, D. and Makris, N. (2005). Seismic response analysis of multidrum classical columns. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1243–1270.
23. Livadiotti, M. and Rocco, G. (1996). La presenza italiana nel Dodecaneso tra il 1912 e il 1948: la ricerca archeologica, la conservazione, la scelte progettuali. Edizioni del Prisma.
24. Makris N. and Vassiliou M. F. (2013). Planar rocking response and stability analysis of an array of free-standing columns capped with a freely supported rigid beam. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 42, 431–449.
25. Mouzakis, H., Psycharis, I.N., Papastamatiou, D.Y., Carydis, P.G., Papantonopoulos, C. & Zambas, C. (2002). Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column. *Earthquake Engineering and Structures Dynamics*, 31, 1681–1698.
26. Papaloizou, L. and Komodromos, P. (2009). Planar investigation of the seismic response of ancient columns and colonnades with epistyles using a custom-made software. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29, 1437–1454.
27. Papantonopoulos, C., Psycharis, I.N., Papastamatiou, D.Y., Lemos, J.V., Mouzakis, H. (2002). Numerical prediction of the earthquake response of classical columns using the distinct element method. *Earthquake*

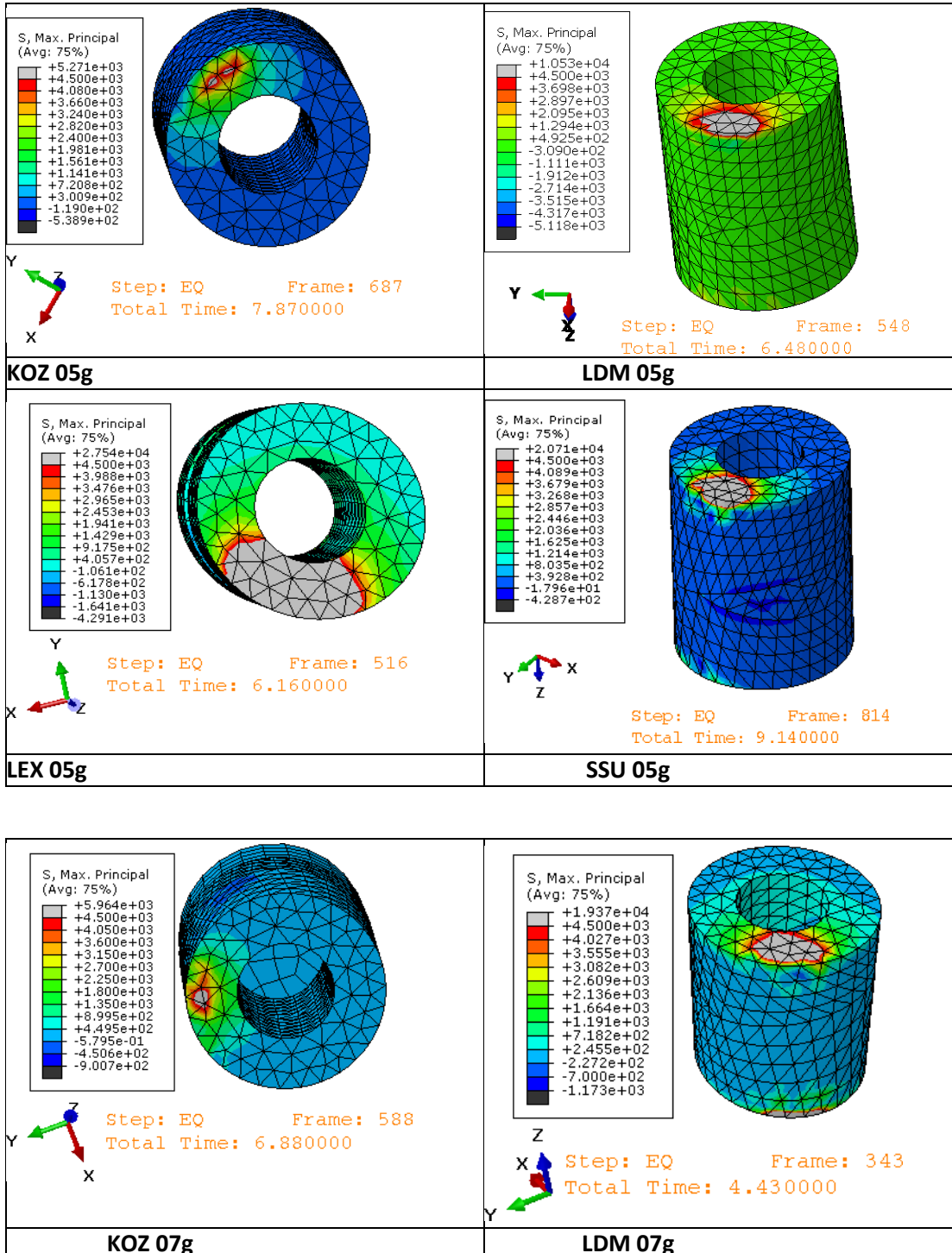
- Engineering and Structures Dynamics, 31, 1699–1717.
28. Sinopoli, A. (1989). Dynamic analysis of a stone column excited by a sine wave ground motion. Applied Mechanics Reviews Part 2, 44, 246–255.
 29. Winkler, T., Meguro, K., Yamazaki, F. (1995). Response of rigid body assemblies to dynamic excitation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 24, 1389– 1408.
 30. Rodrigues, J. and Grossi, A. (2007). Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions.
 31. Μοροπούλου, Α., (2015) Κριτήρια επιλογής υλικών και στρατηγικός σχεδιασμός επεμβάσεων συντήρησης. ΔΠΜΣ 'Προστασία Μνημείων', ΕΜΠ. Διαθέσιμο στο NTUA ACADEMIC OPEN COURSES.
 32. Κεραμίδας Β. (2017). Διαγνωστική μελέτη του Ναού του Πυθίου Απόλλωνος στη Ρόδο. Πρόταση υλικών στερέωσης και αποκατάστασης.
 33. Αδαμόπουλος Σ. (2017) Γεωμετρική τεκμηρίωση στο πλαίσιο ολοκληρωμένης διαγνωστικής μελέτης του αρχαίου ναού του Πυθίου Απόλλωνος στη Ρόδο
 34. Πίκουλα Μ. (2016) Μ. Μελέτη δομικής αποκατάστασης στον Ναό του Πύθιου Απόλλωνος , Τεύχος 1 , Ρόδος, ΥΠ.ΠΟ.Α – Εφορεία Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου.
 35. Ψυχάρης Ι., Ταφλαμπάς Ι., Αυγενάκης Ε., Κρουσταλλάκη Μ., Κόνιαρης Ε., Μαστροδήμου Κ., Καράπιττα Λ. (2018) Ανάλυση σεισμικής συμπεριφοράς και διερεύνηση εναλλακτικών προτάσεων δομητικής αποκατάστασης του ναού του Πύθιου Απόλλωνα στην αρχαία ακρόπολη της Ρόδου.
 36. Μυταρέλη Η. (2018) Αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα στη Ρόδο και της απαιτούμενης αντοχής των κονιαμάτων αποκατάστασης.
 37. Αντωνίου Γ.Π. (2016). Αρχιτεκτονική μελέτη αποκατάστασης του ναού του Πυθίου Απόλλωνος – Τεχνική Έκθεση αποκατάστασης.
 38. Μαλλούχου – Tufano, Φ., (2016) Προστασία και Διαχείριση Μνημείων. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.
 39. Ταβουκτσή Ελένη (2009) Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς σφονδυλωτών και μονολιθικών κιόνων στο Ναό του Απόλλωνα της Ρόδου και στην Ελληνιστική Στοά στη Λίνδο», Διπλωματική εργασία μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.
 40. Καραφαγκά Στέλλα (2013) Διερεύνηση της Σεισμικής Συμπεριφοράς Κιόνων – Η Περίπτωση Κίονα της Στοάς του Ψιθύρου στην Ακρόπολη της Λίνδου Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

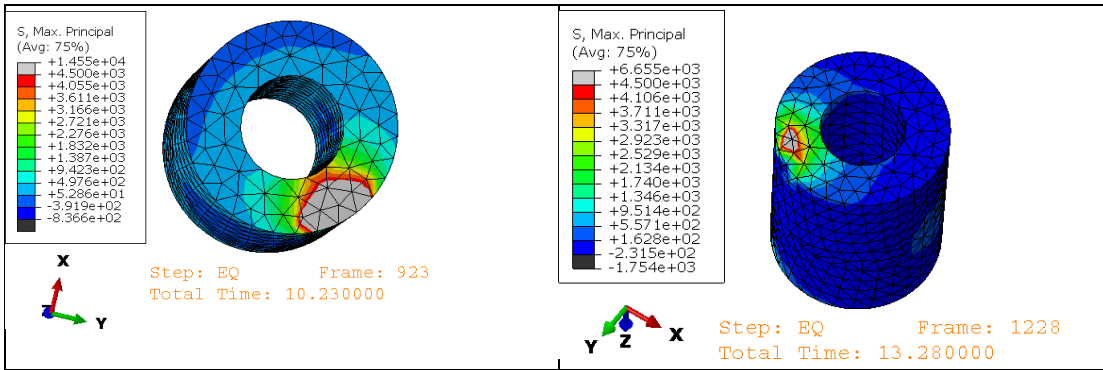
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π.1 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε αρχαίους λίθους

Π.1.1 Εφελκυσμός

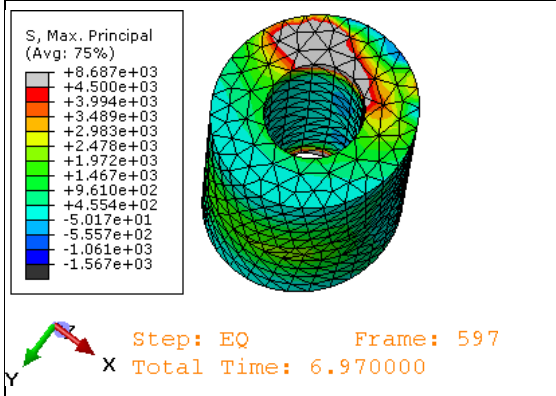
ΜΕΛΟΣ Κ1_T5.A





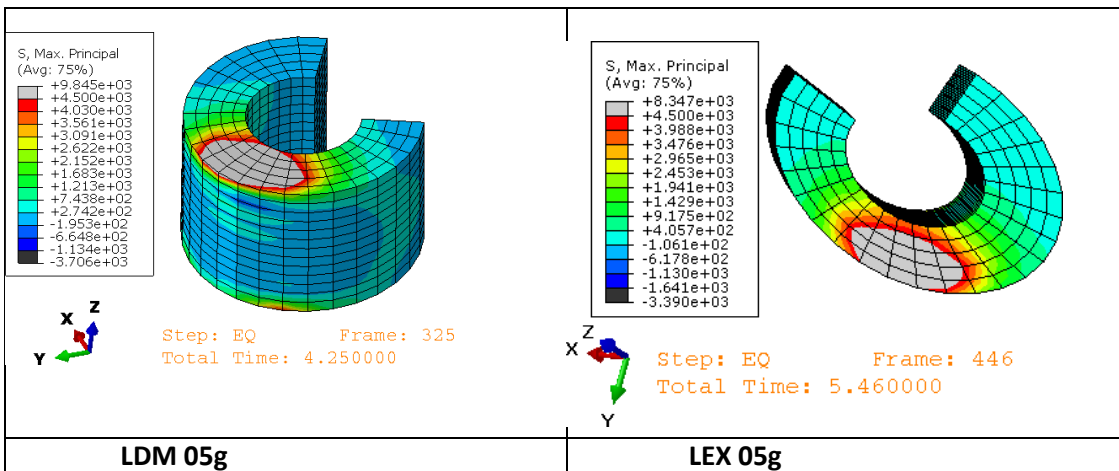
LAO 07g

LEX 07g



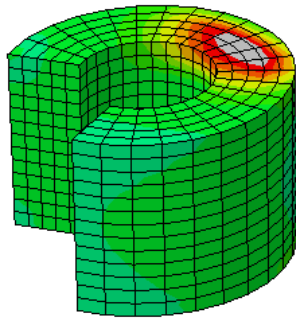
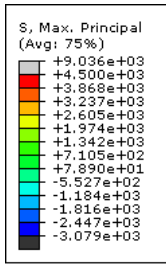
SSU 07g

ΜΕΛΟΣ Κ2_T3.A



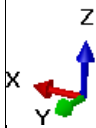
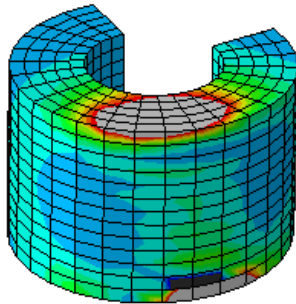
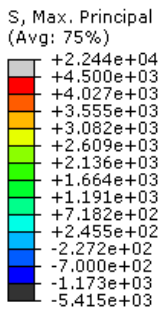
LDM 05g

LEX 05g



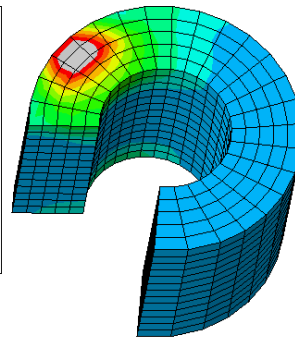
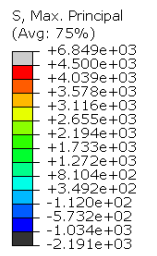
Step: EQ Frame: 511
Total Time: 6.110000

SSU 05g



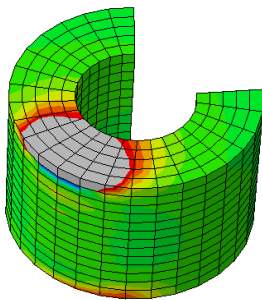
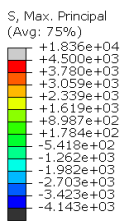
Step: EQ Frame: 334
Total Time: 4.340000

LDM 07g



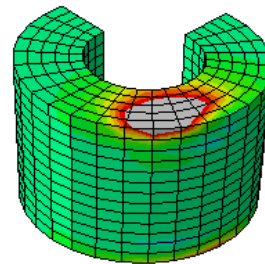
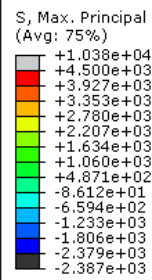
Step: EQ Frame: 958
Total Time: 10.580000

LAO 07g



Step: EQ Frame: 456
Total Time: 5.560000

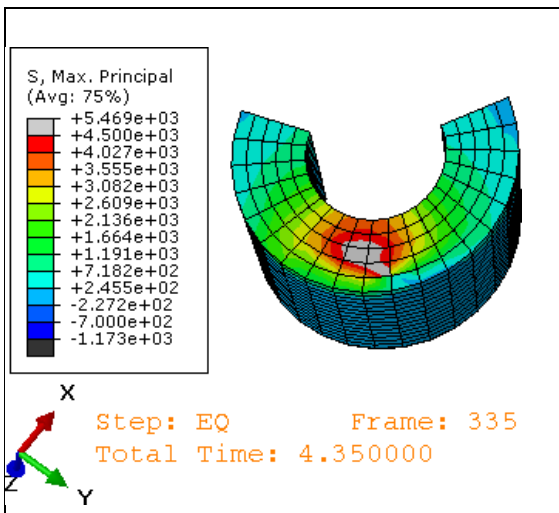
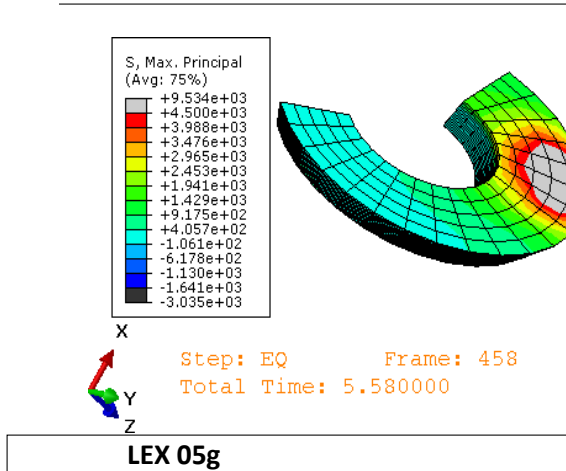
LEX 07g



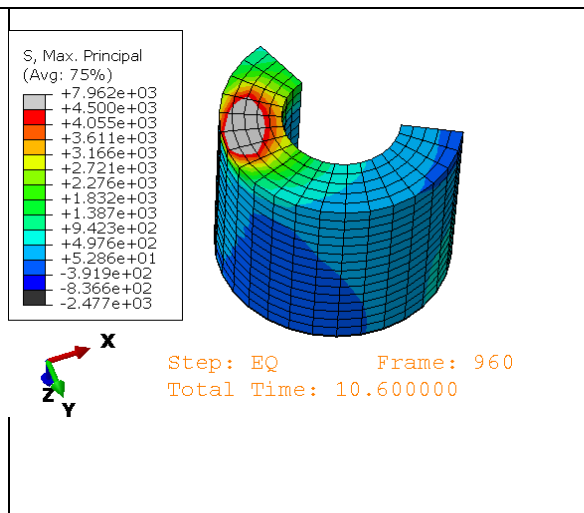
Step: EQ Frame: 539
Total Time: 6.390000

SSU 07g

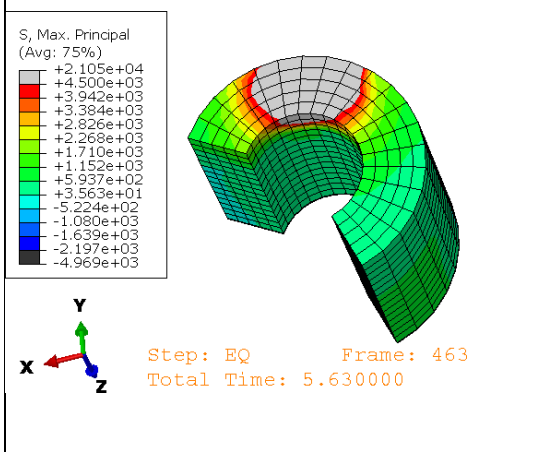
ΜΕΛΟΣ K2_T5.A



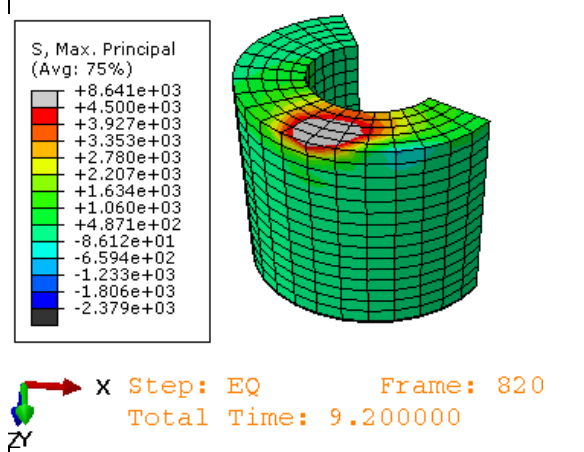
LDM 07g



LAO 07g

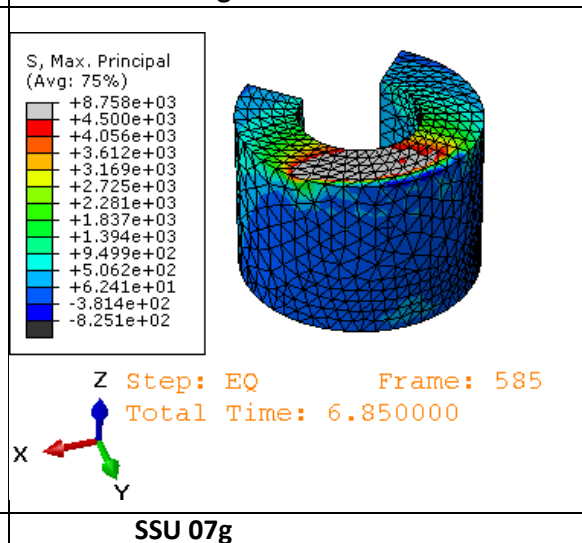
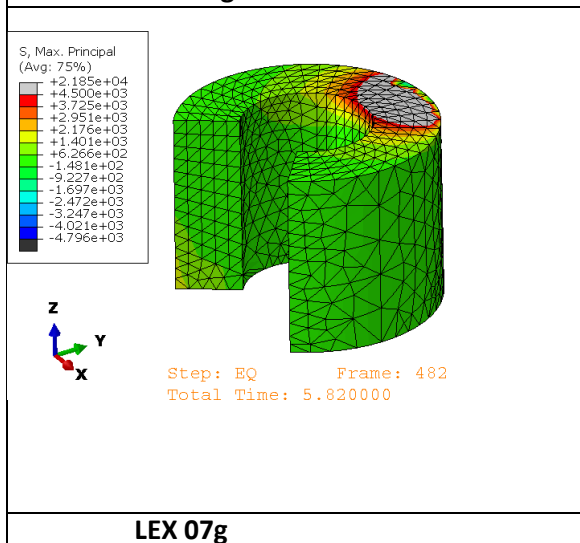
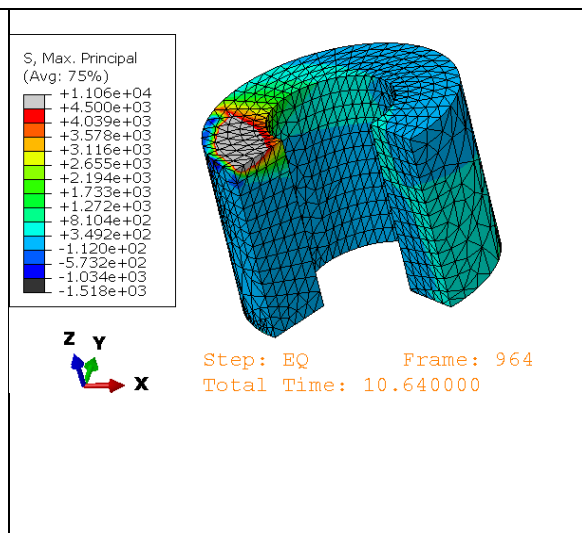
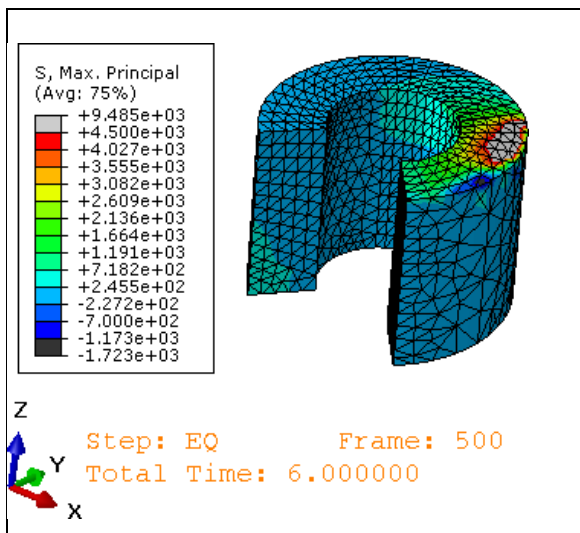
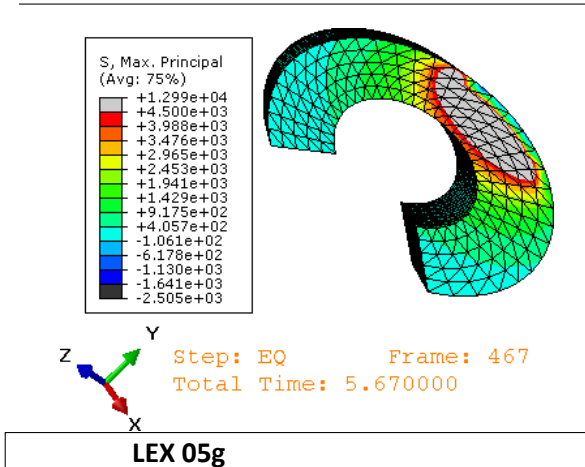


LEX 07g

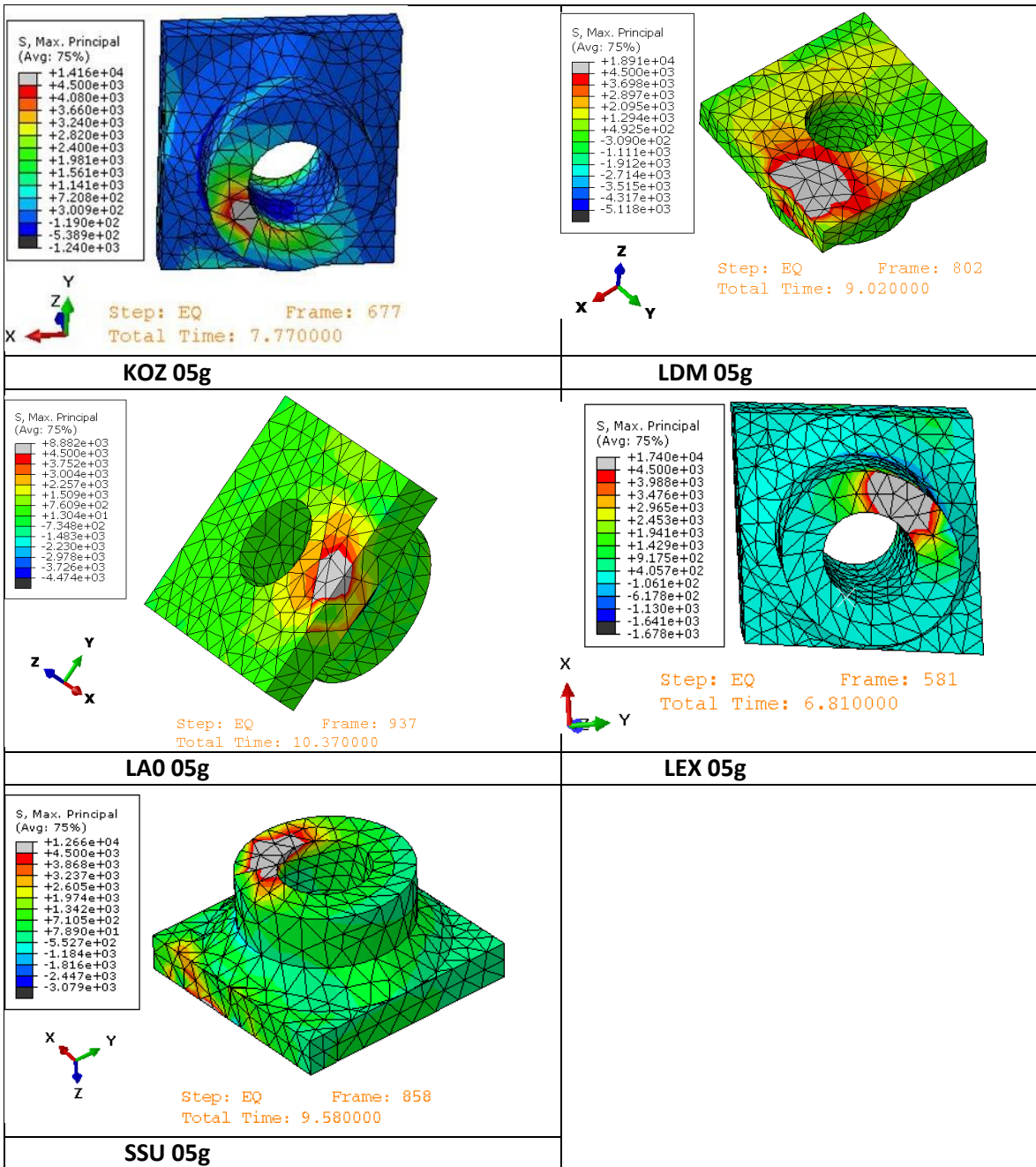


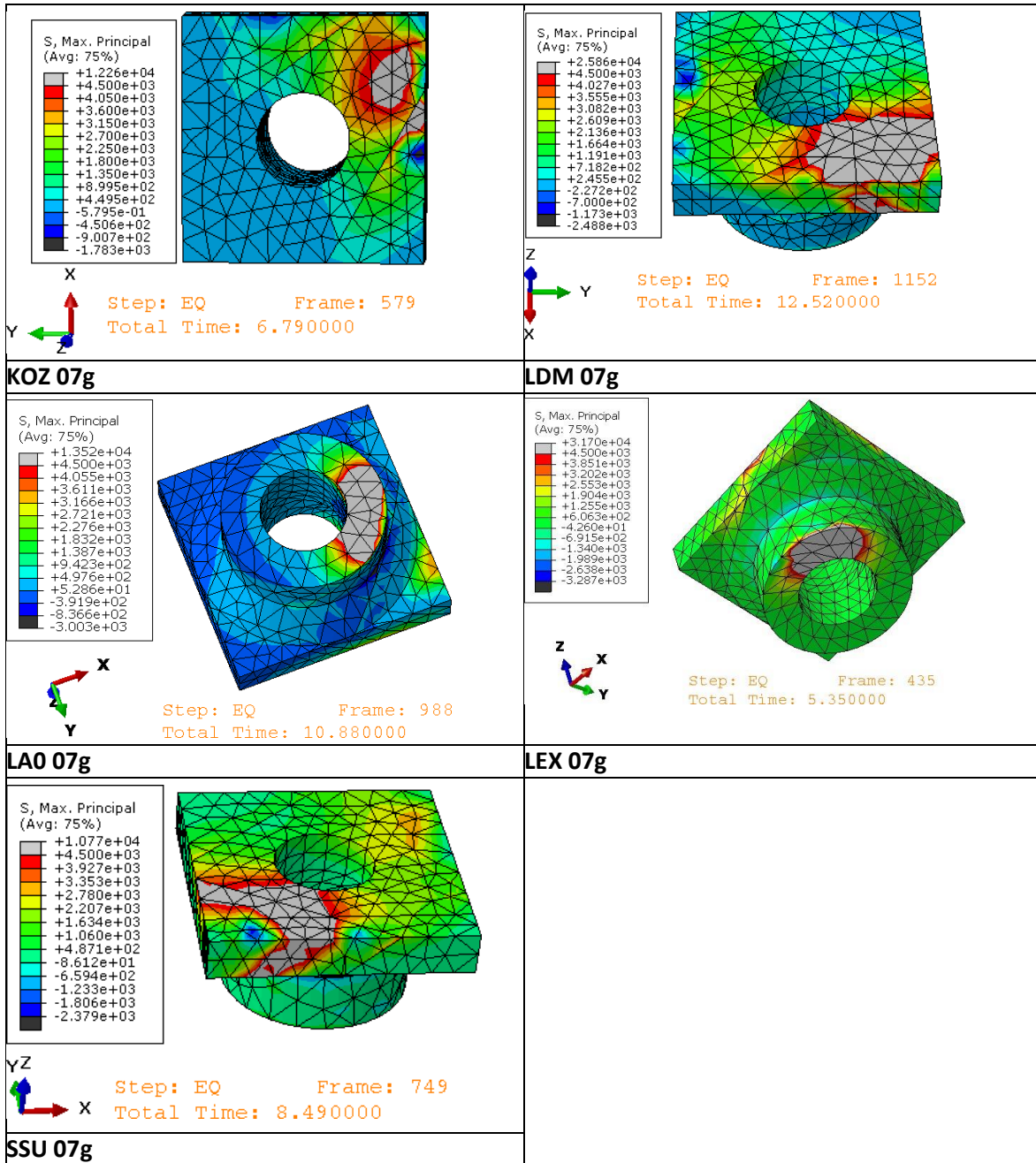
SSU 07g

ΜΕΛΟΣ K2_T6.A

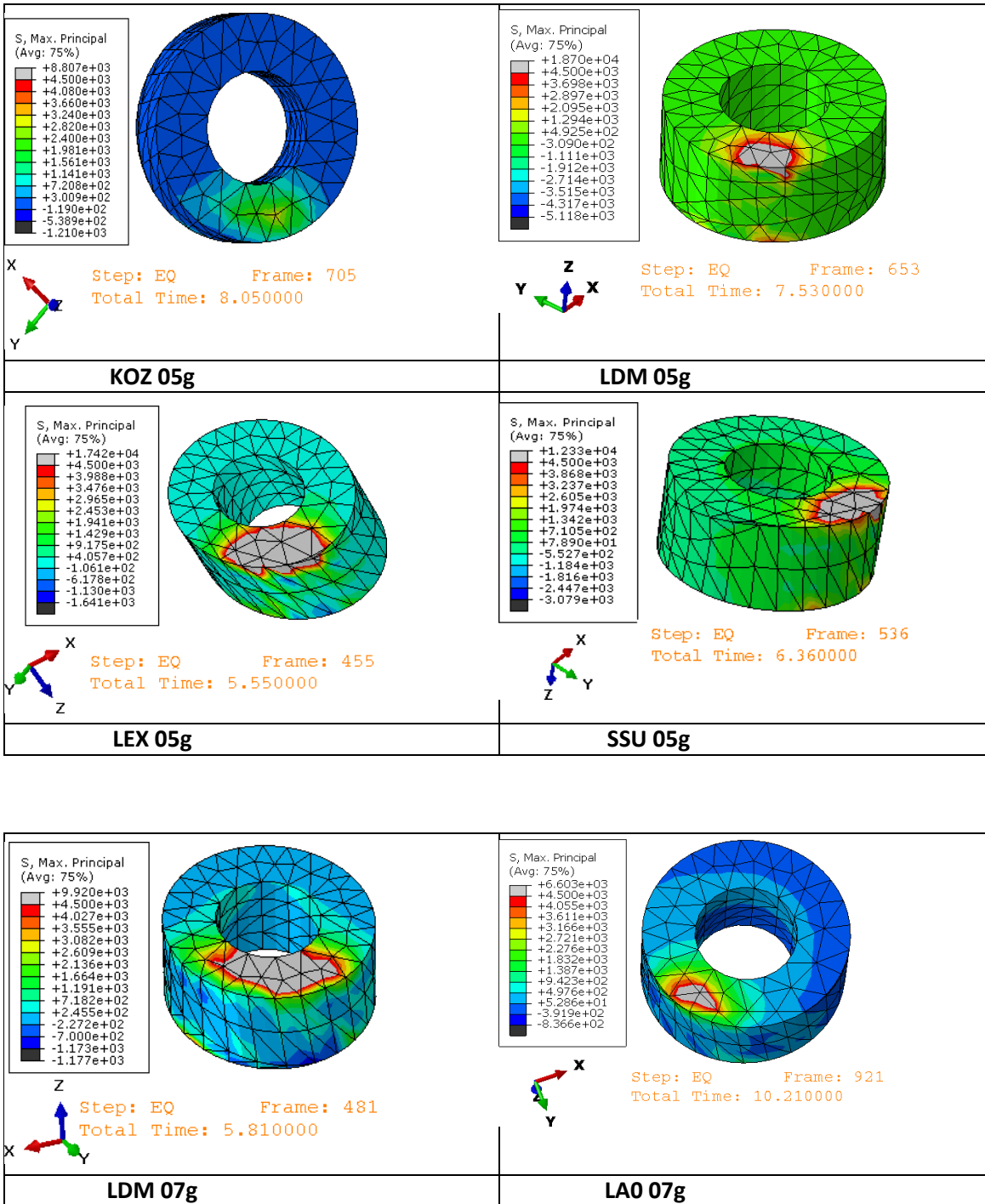


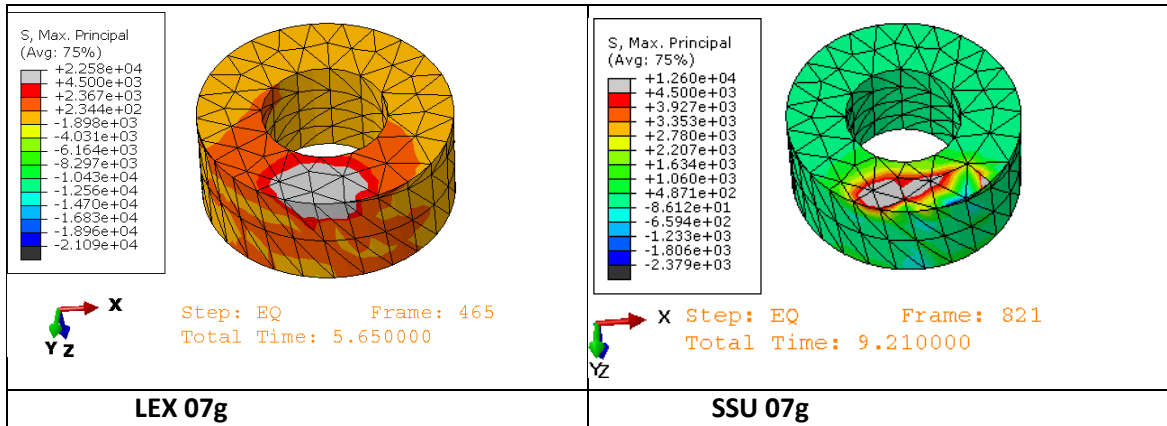
ΜΕΛΟΣ K2_TOP.A



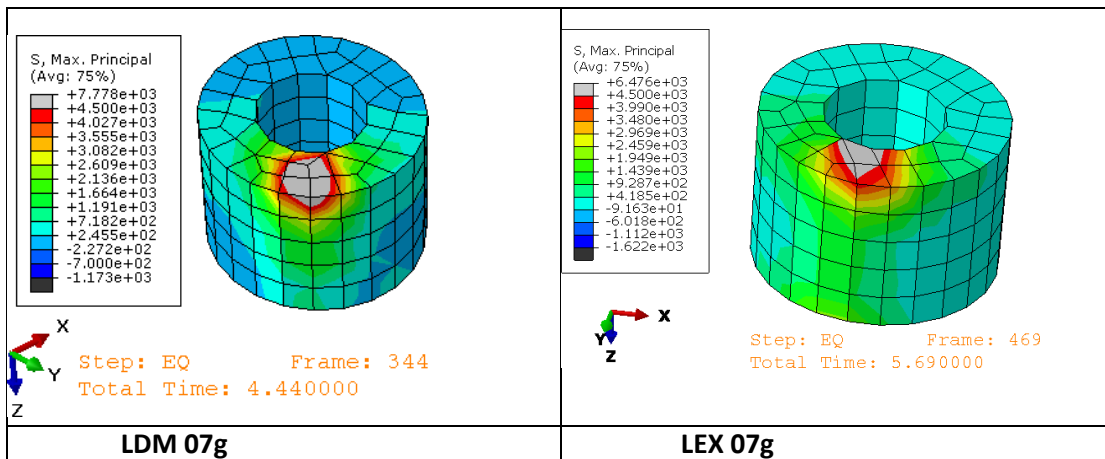
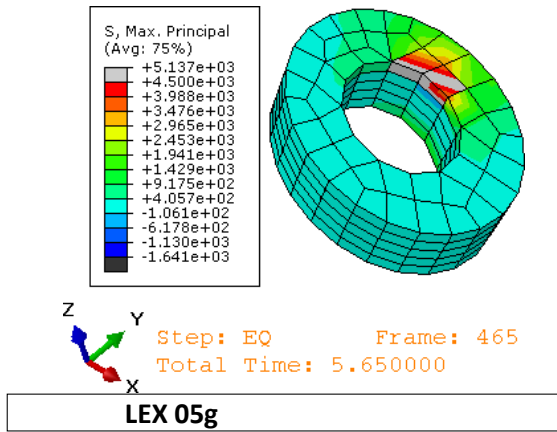


ΜΕΛΟΣ Κ3_T5.A

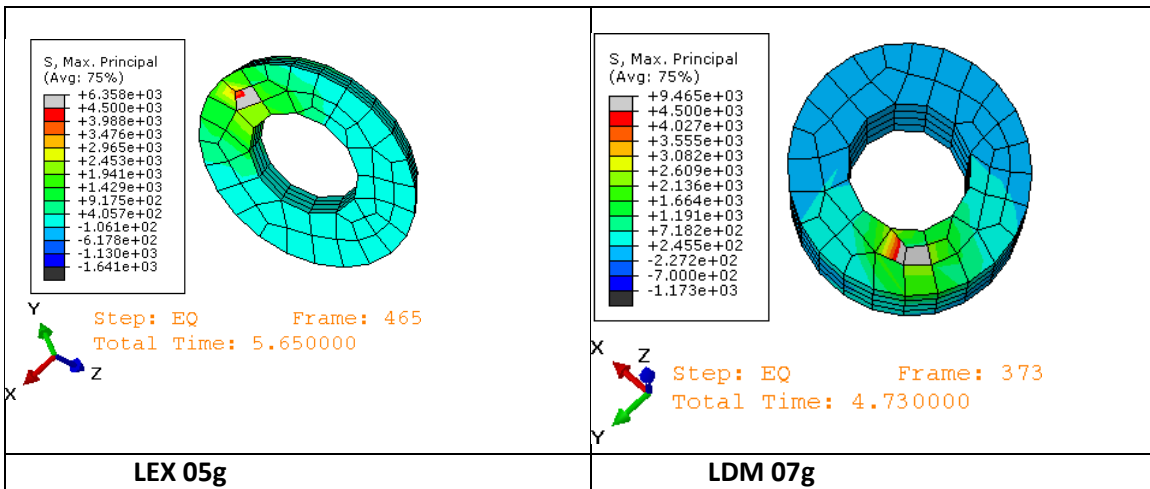




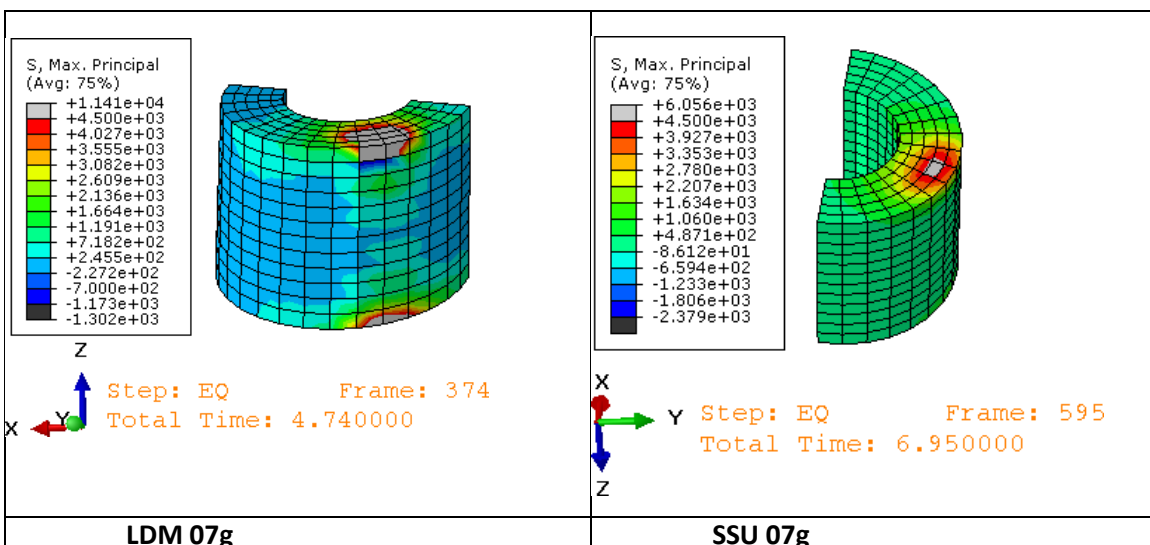
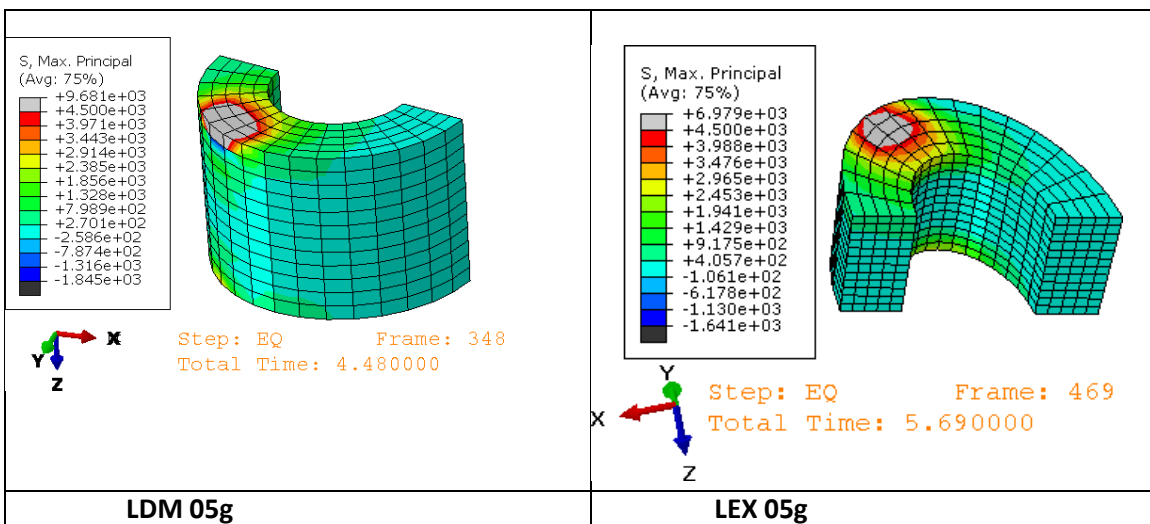
ΜΕΛΟΣ K3_T6.A



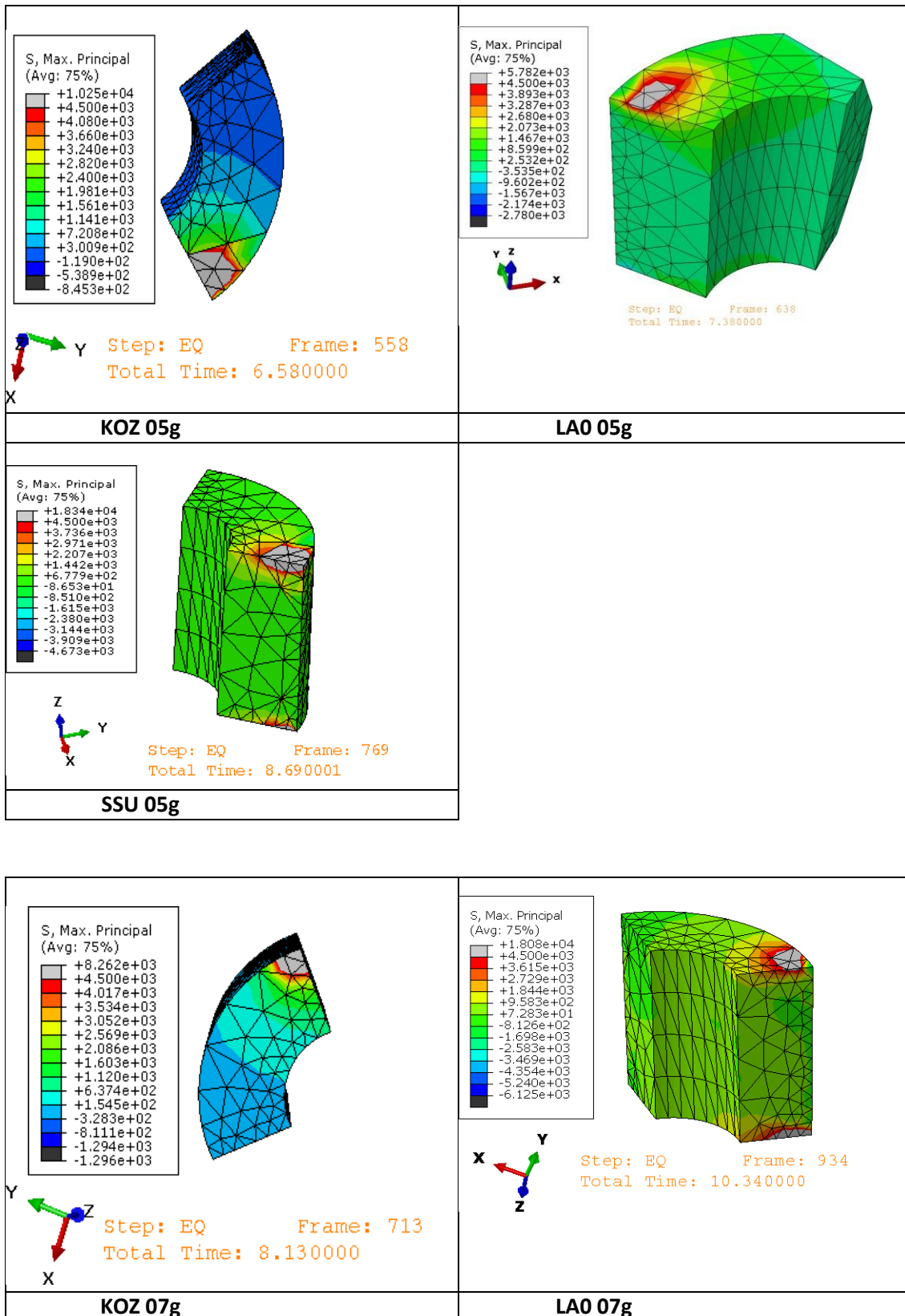
ΜΕΛΟΣ Κ3_T7.A

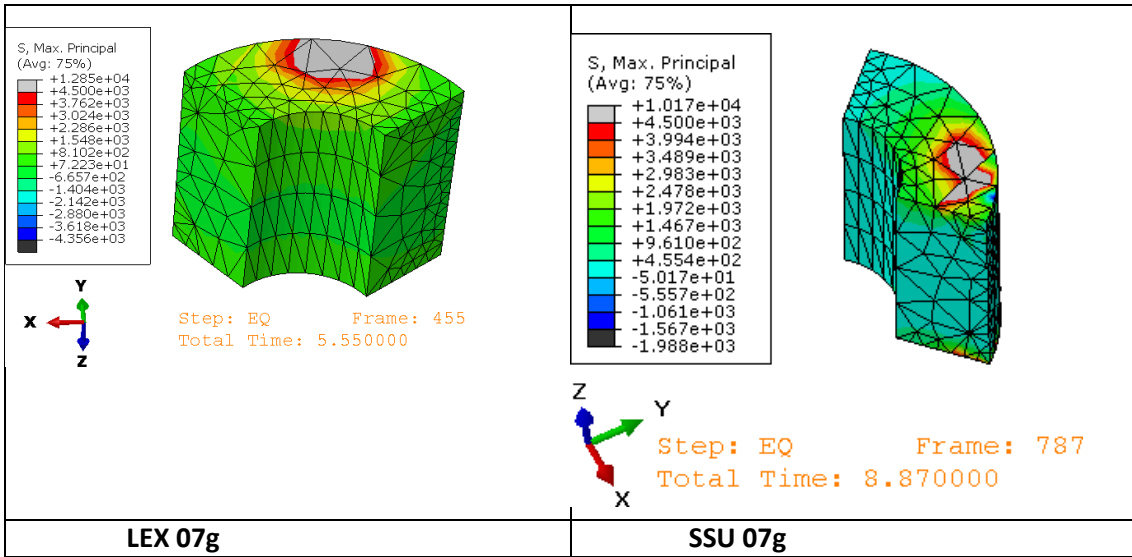


ΜΕΛΟΣ Κ3_T8.A

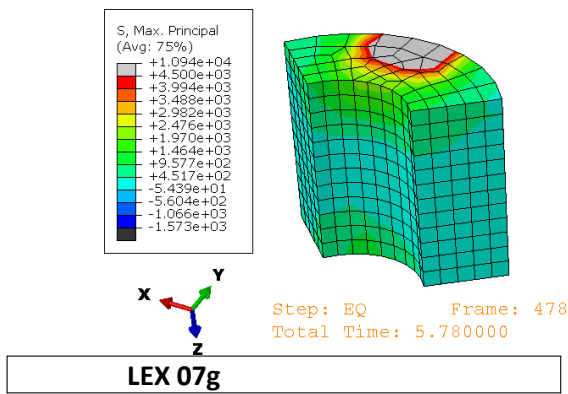


ΜΕΛΟΣ K4_T2.A

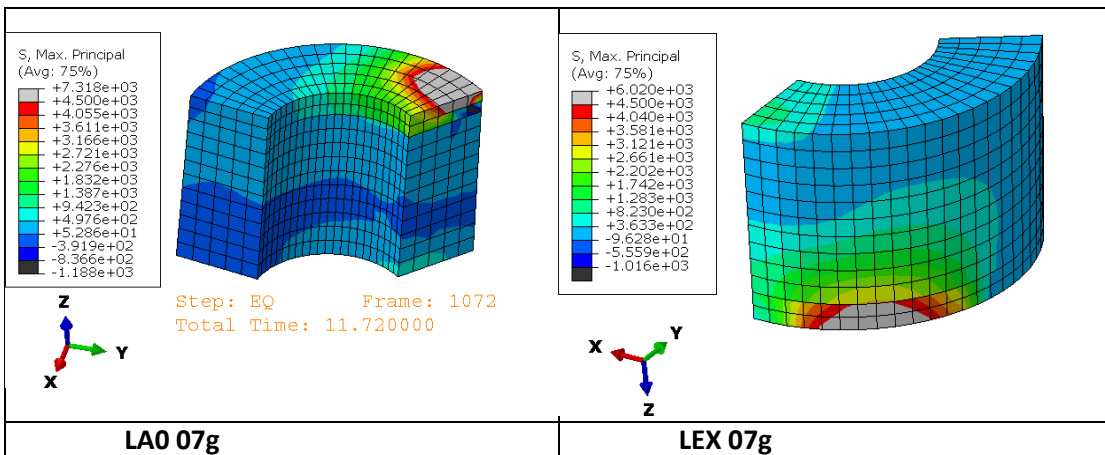




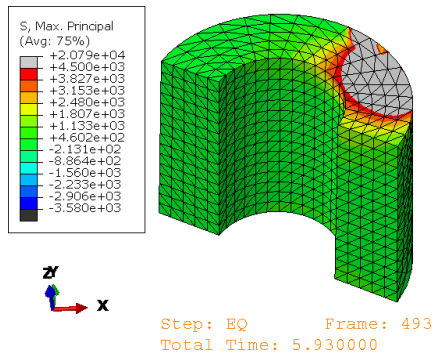
ΜΕΛΟΣ K4_T4.A



ΜΕΛΟΣ K4_T4.A

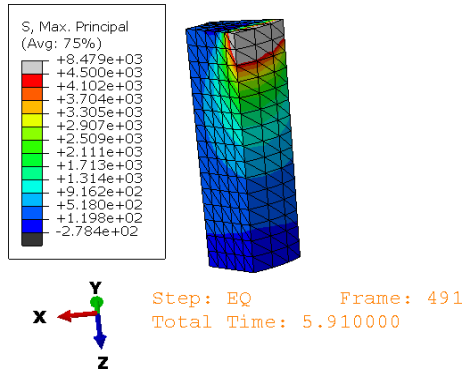


ΜΕΛΟΣ K4_T5.A



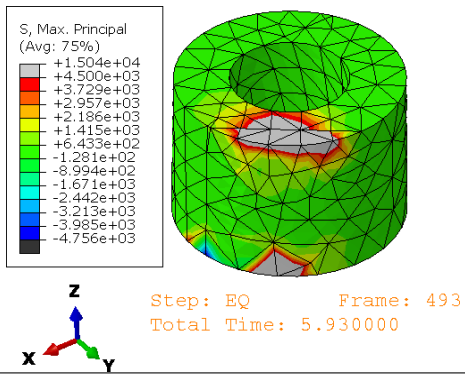
LEX 07g

ΜΕΛΟΣ K4_T5.A



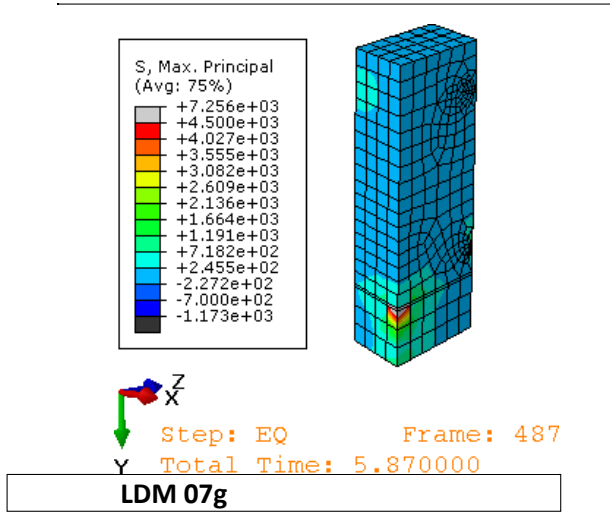
LEX 07g

ΜΕΛΟΣ K4_T6.A

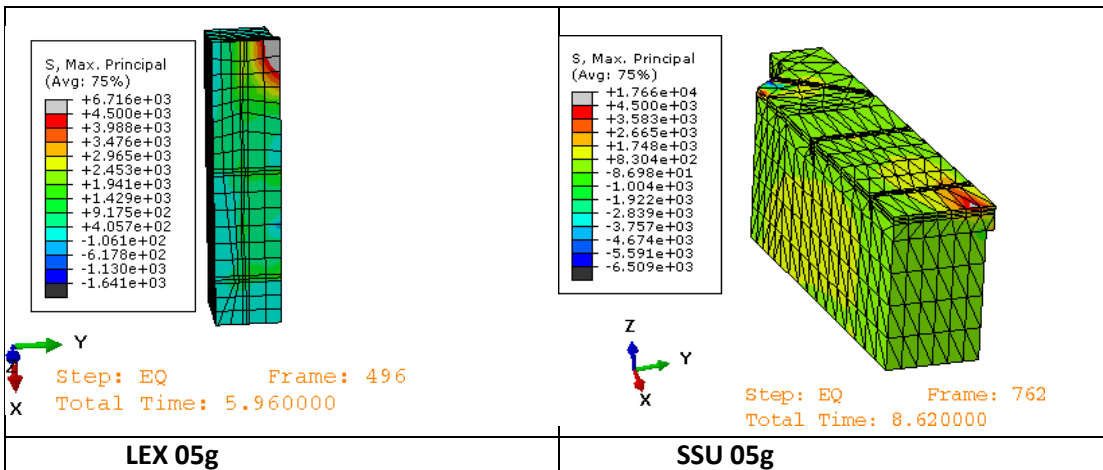


LEX 07g

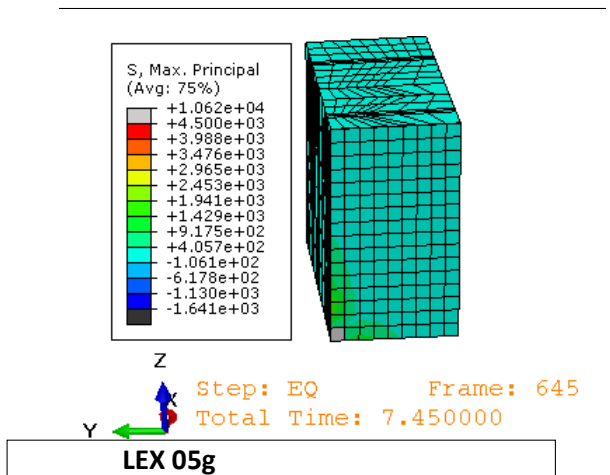
ΜΕΛΟΣ ΕΡΒ2.A



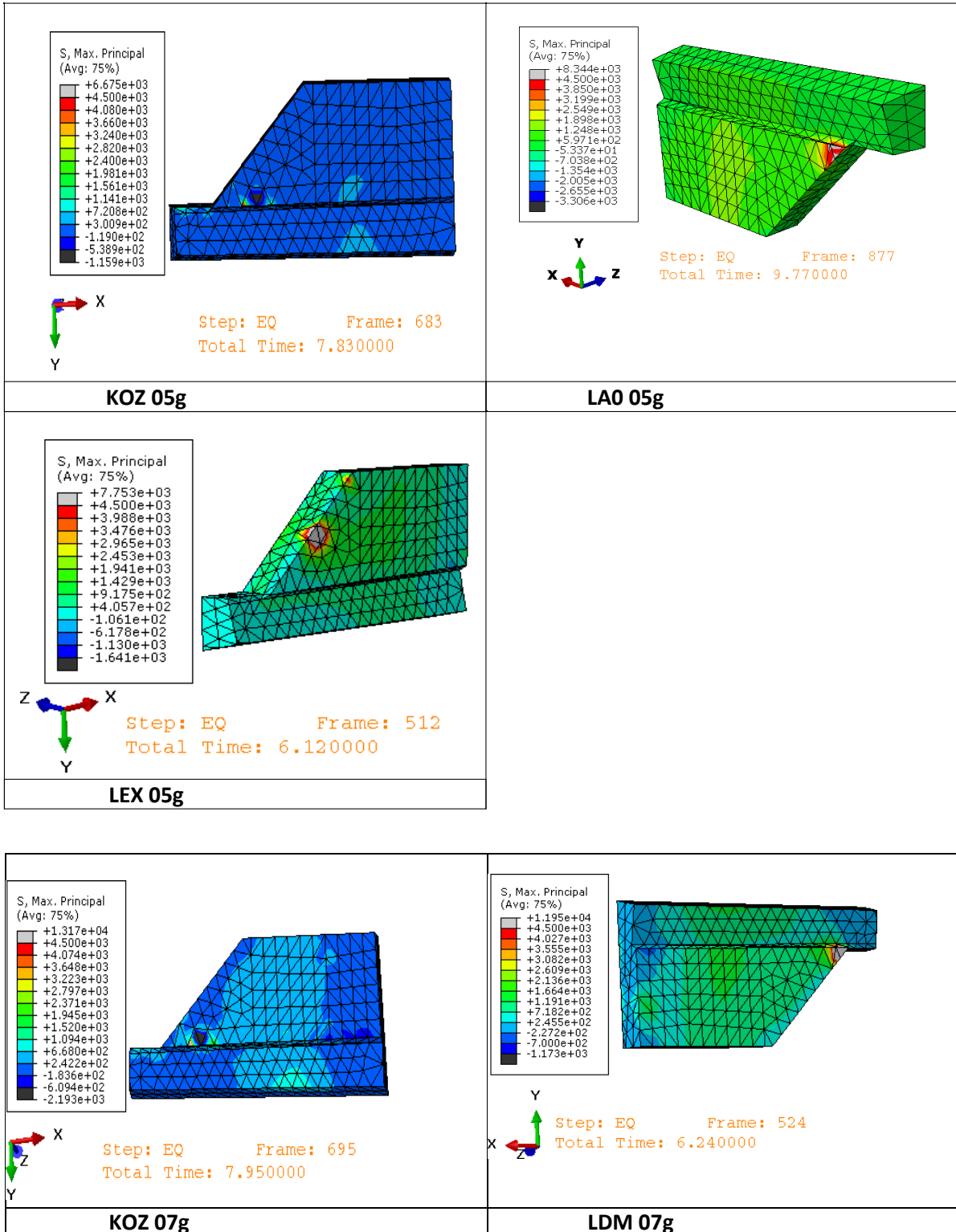
ΜΕΛΟΣ ΕΡΒ3.A

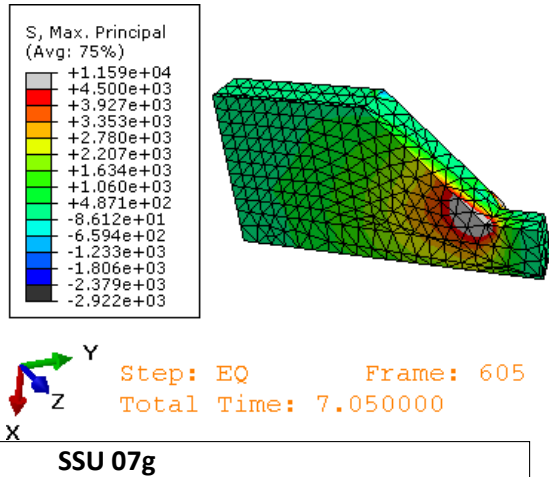


ΜΕΛΟΣ ΕΡΒ4.A

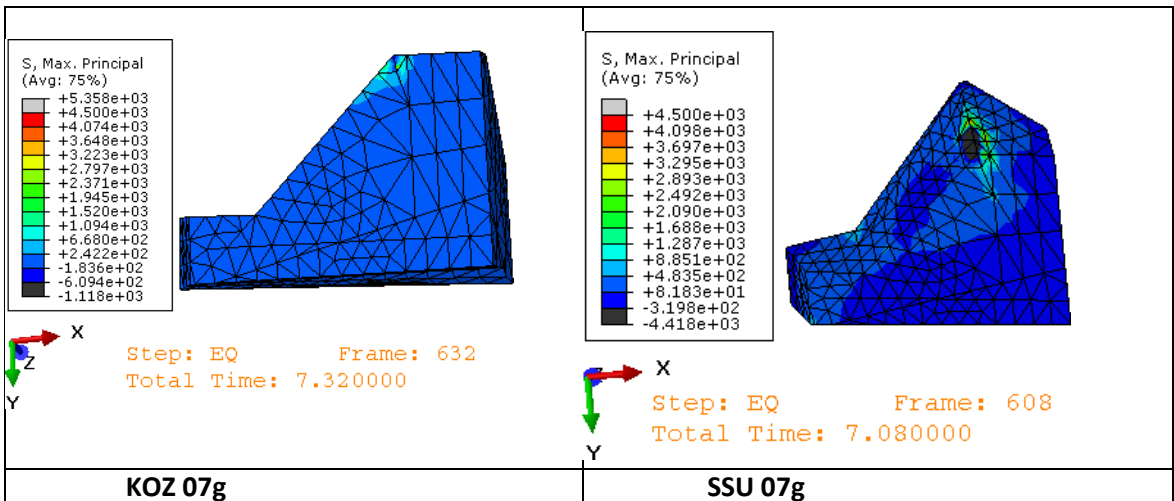
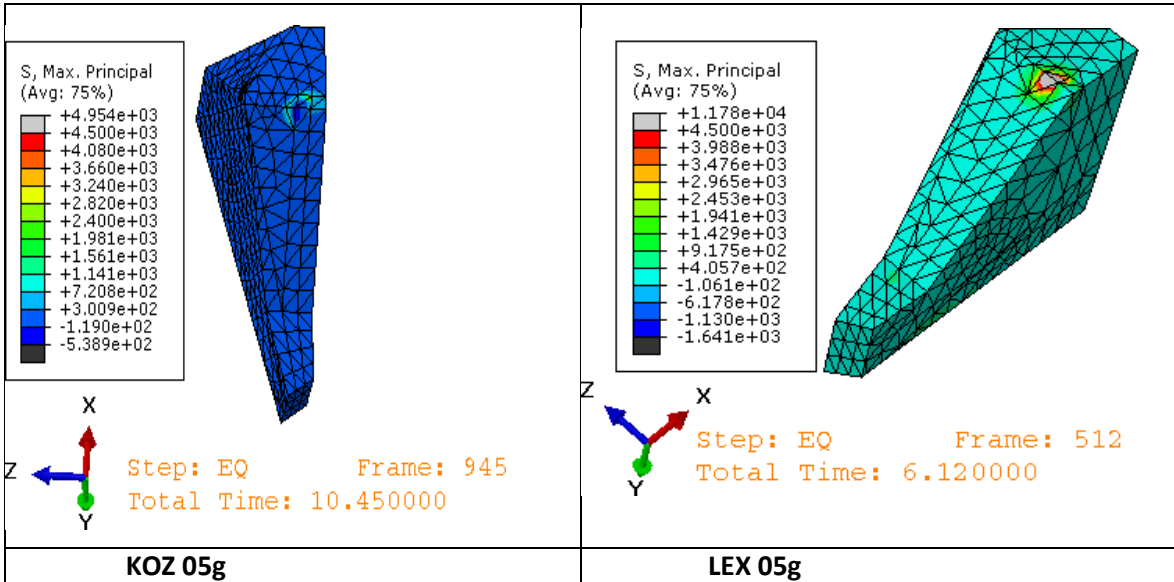


ΜΕΛΟΣ EPC2.A



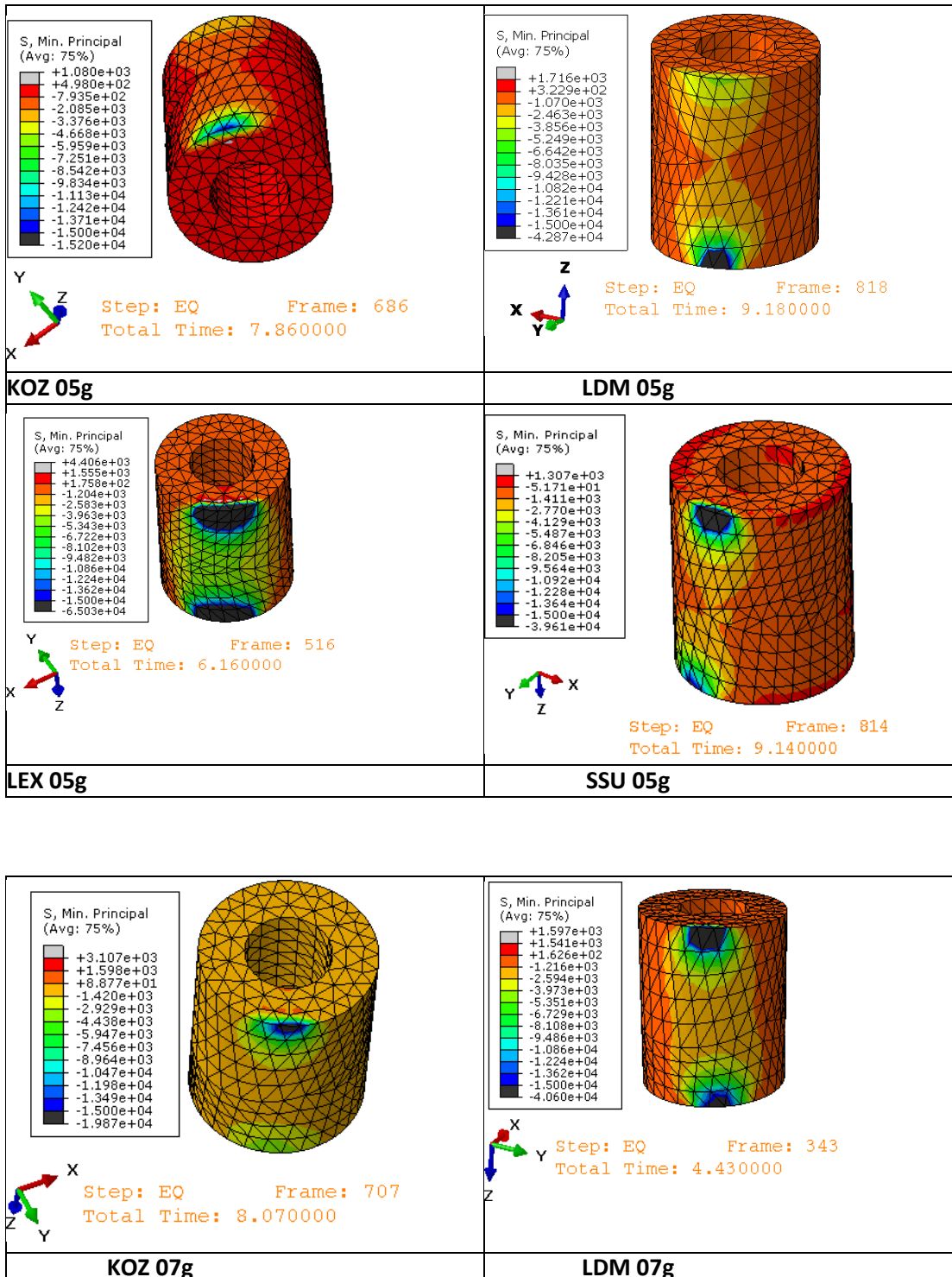


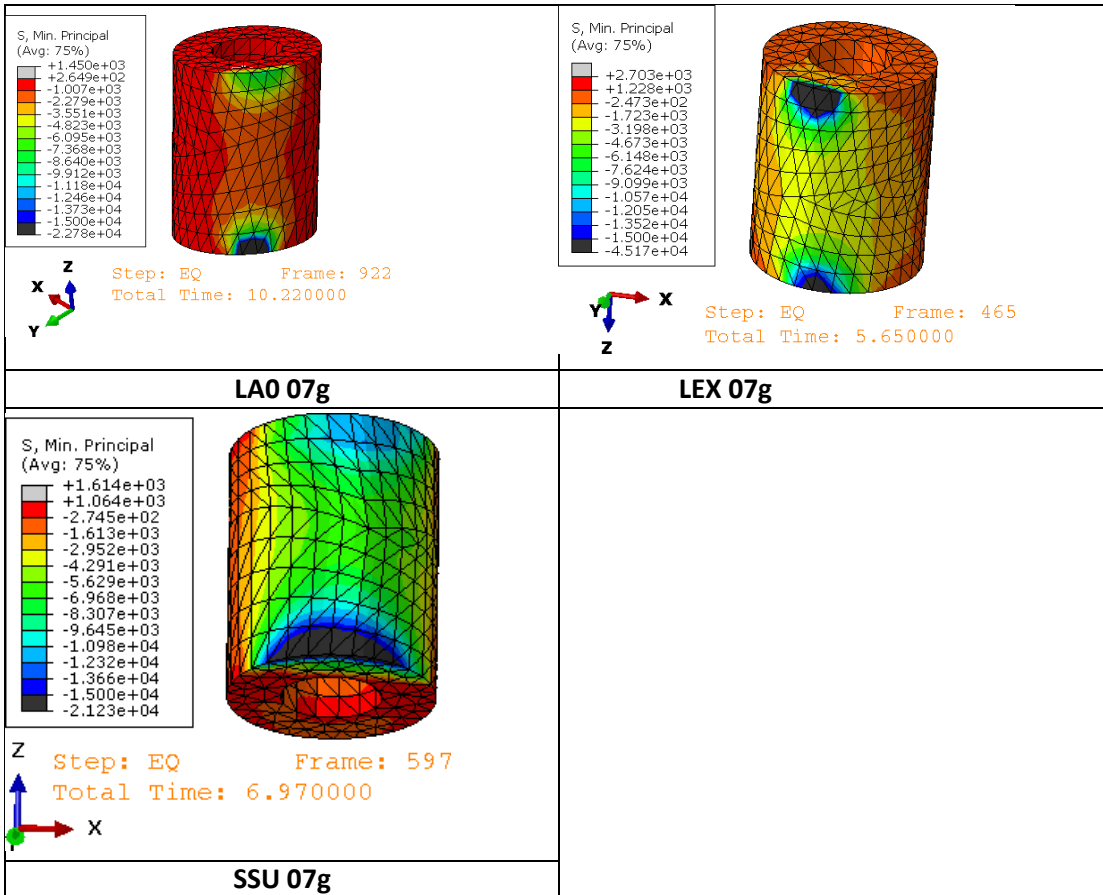
ΜΕΛΟΣ EPC3.A



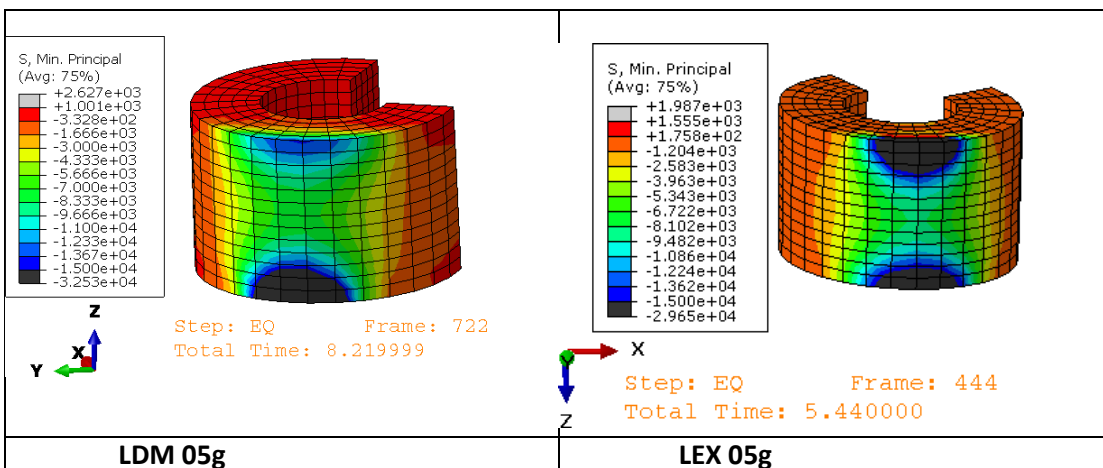
Π.1.2 Θλίψη

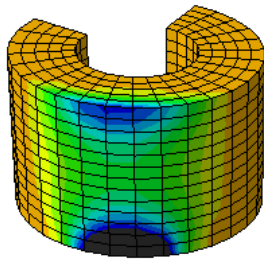
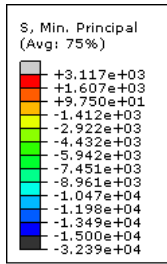
ΜΕΛΟΣ Κ1_T5.A





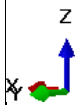
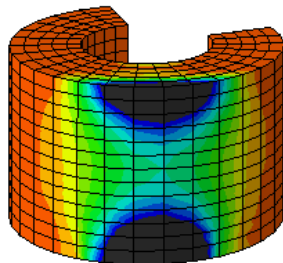
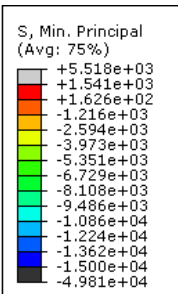
ΜΕΛΟΣ Κ2_T3.A





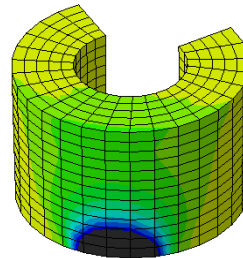
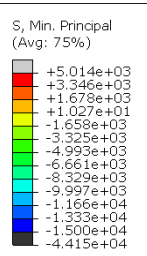
Step: EQ Frame: 818
Total Time: 9.180000

SSU 05g



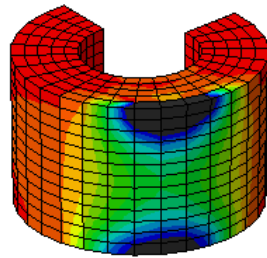
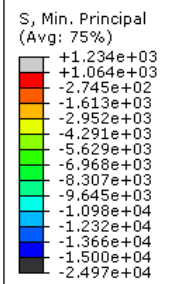
Step: EQ Frame: 332
Total Time: 4.320000

LDM 07g



Step: EQ Frame: 458
Total Time: 5.580000

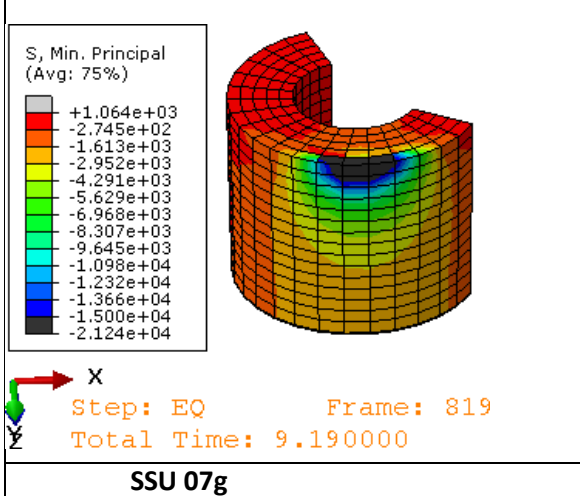
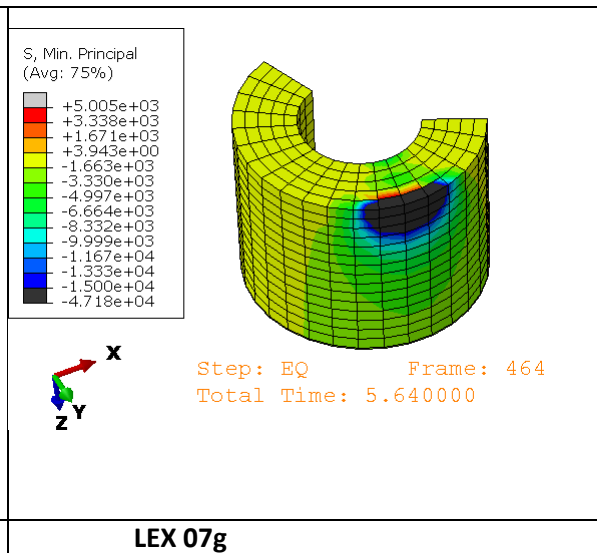
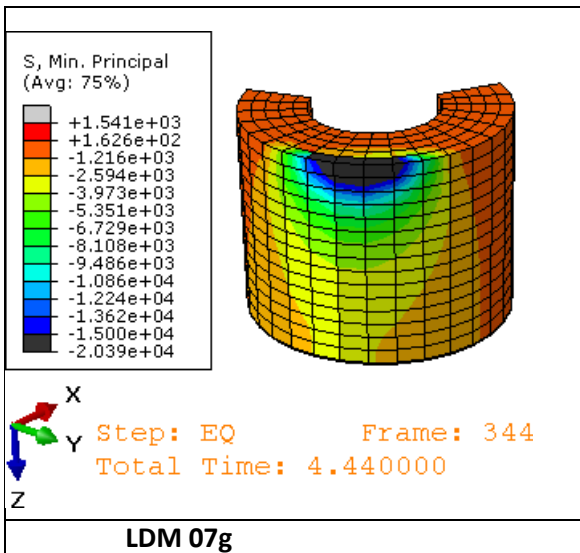
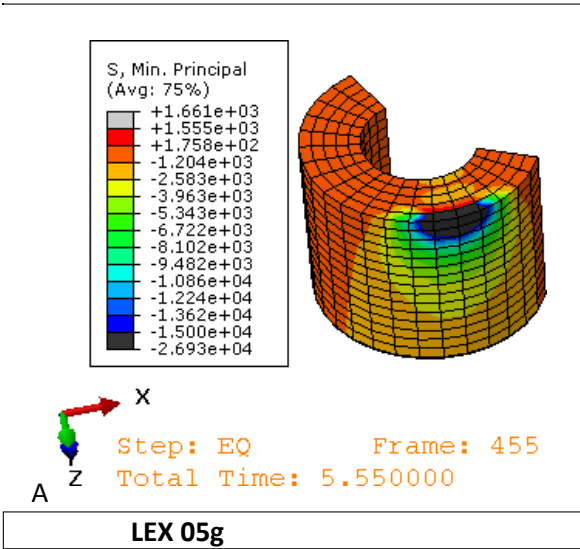
LEX 07g



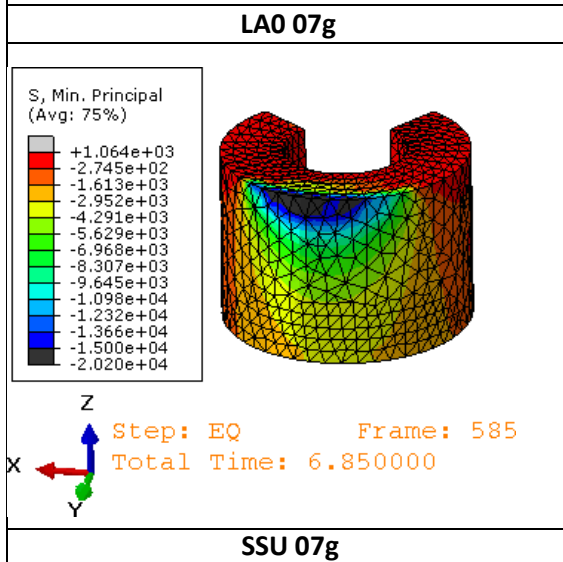
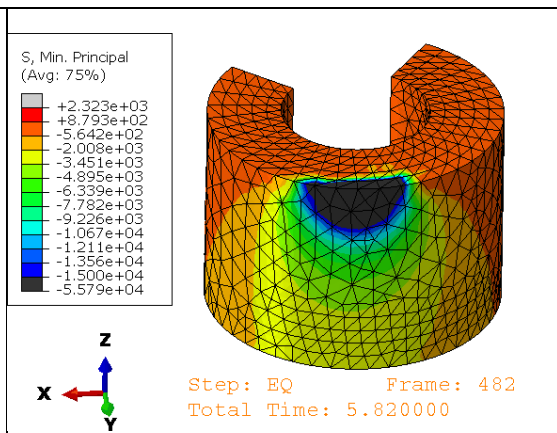
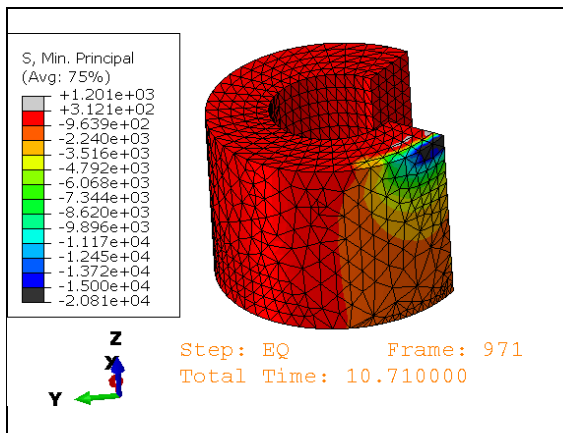
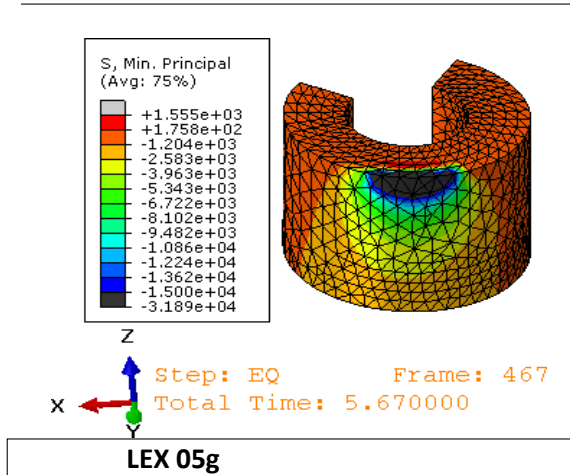
Step: EQ Frame: 512
Total Time: 6.120000

SSU 07g

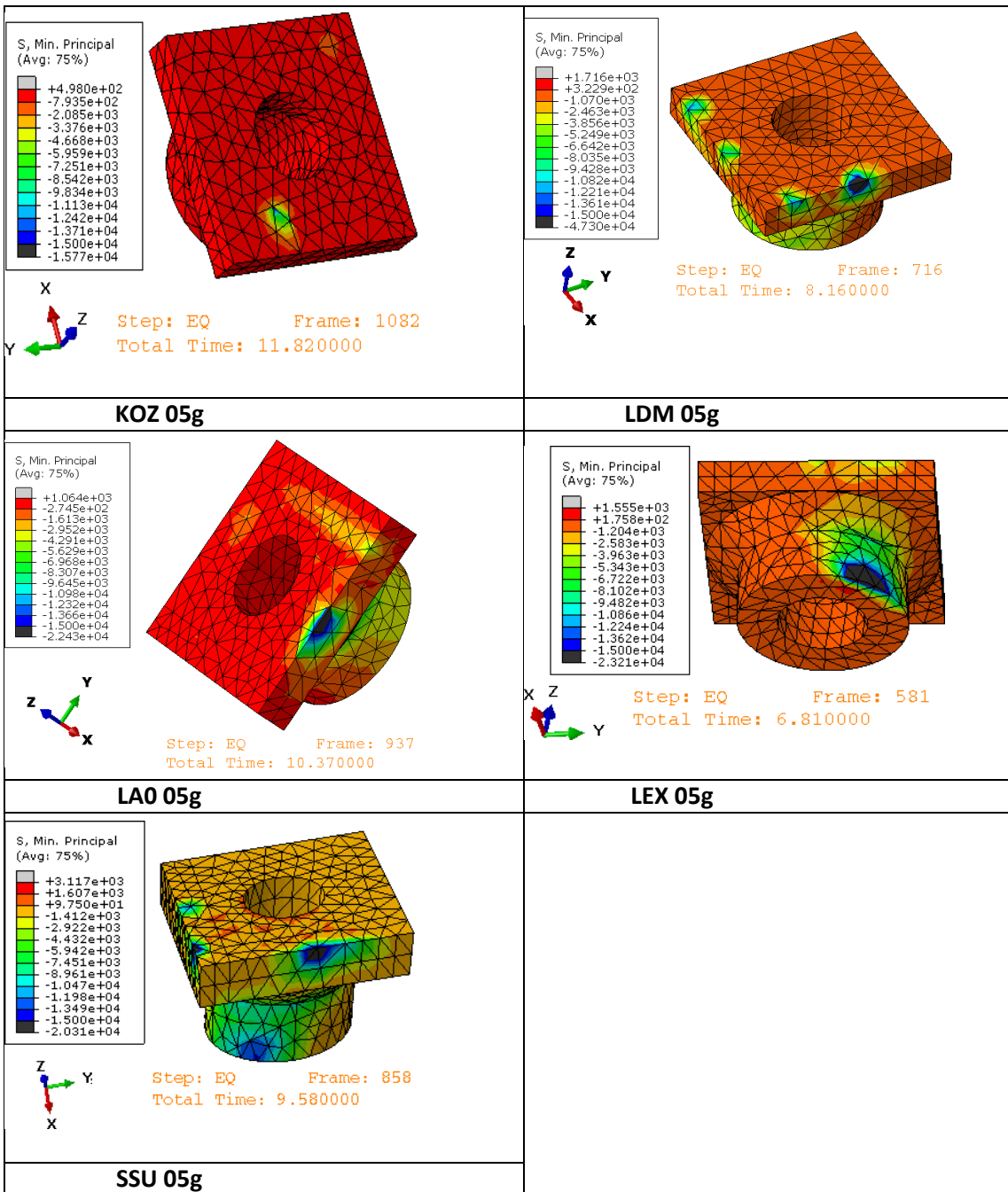
ΜΕΛΟΣ K2_T5.A

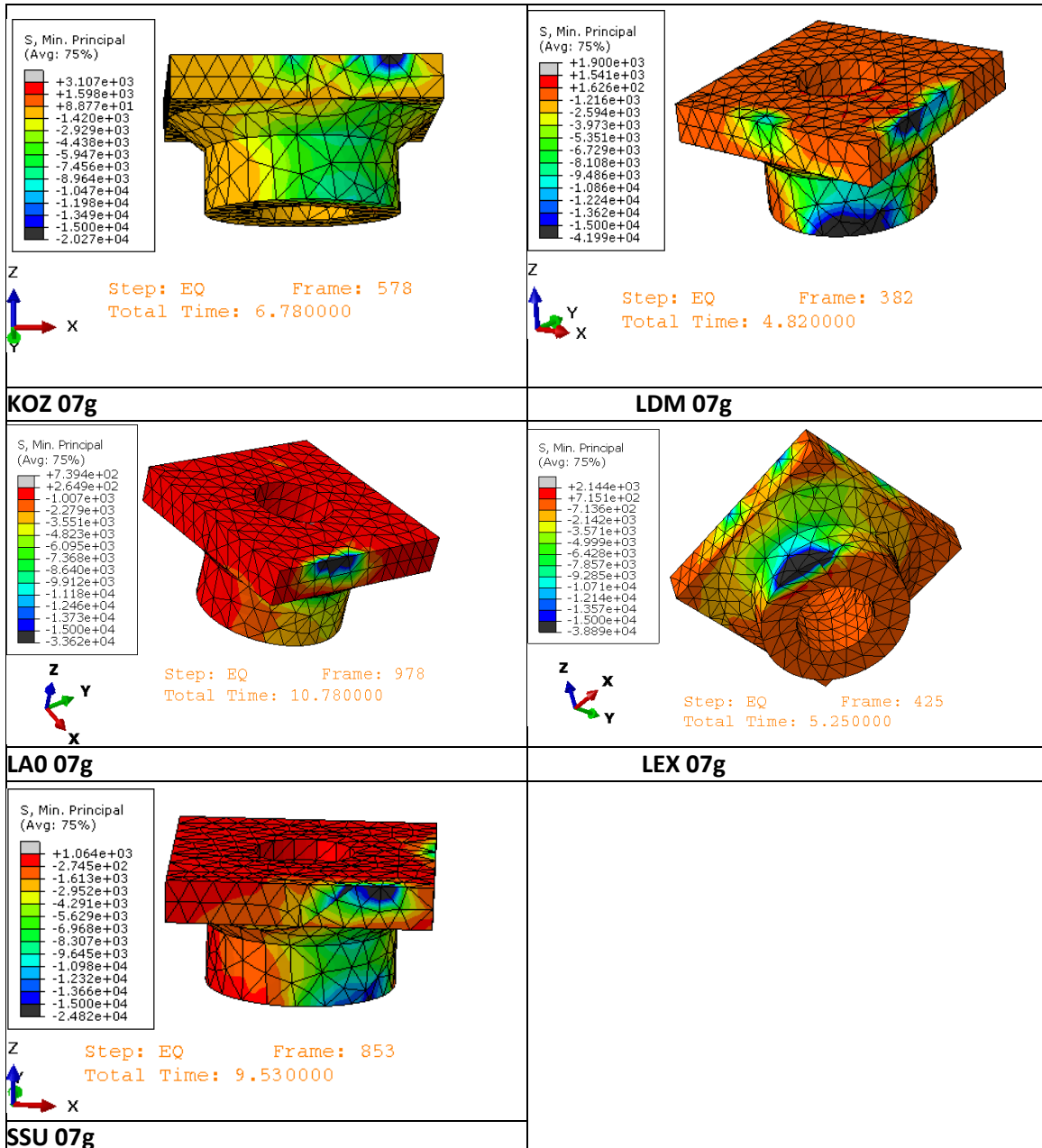


ΜΕΛΟΣ K2_T6.A

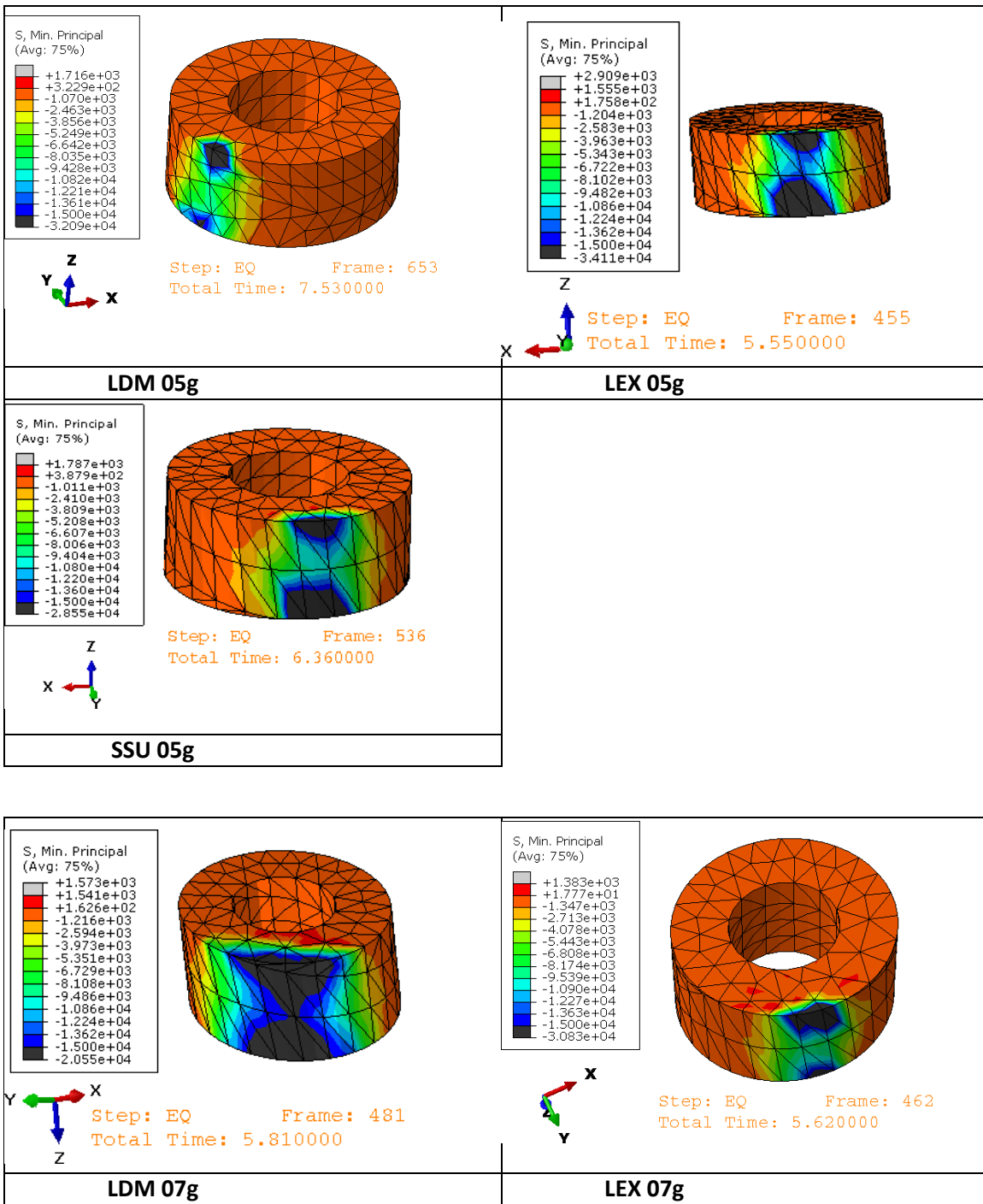


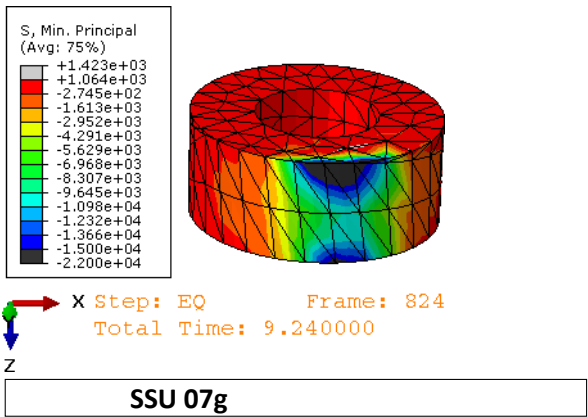
ΜΕΛΟΣ K2_TOP.A



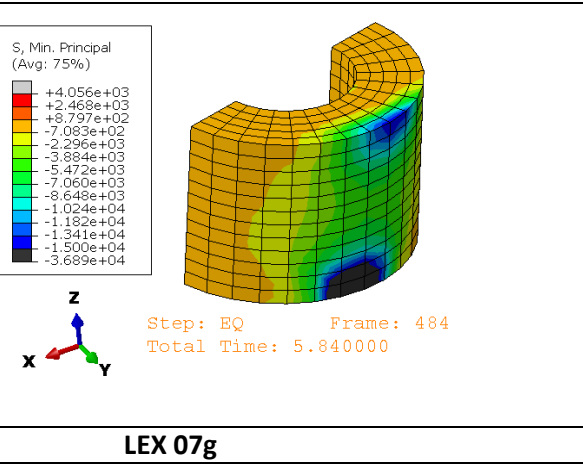
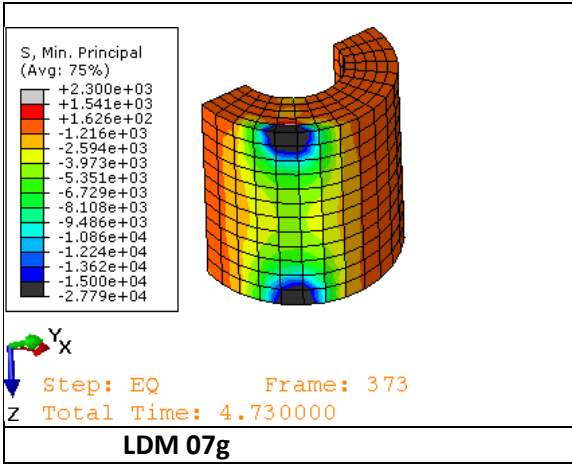
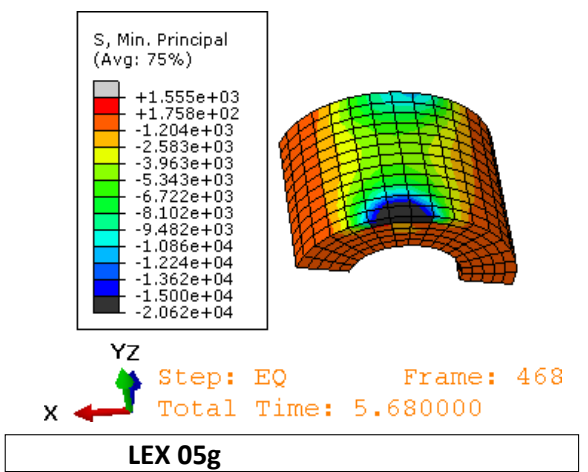


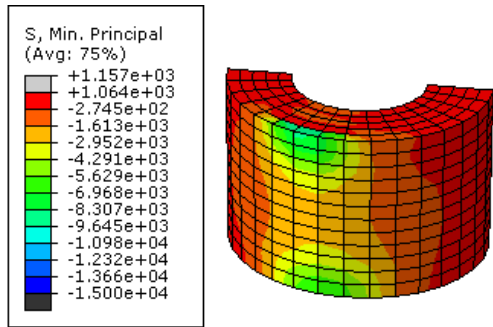
ΜΕΛΟΣ K3_T5.A





ΜΕΛΟΣ K3_T8.A

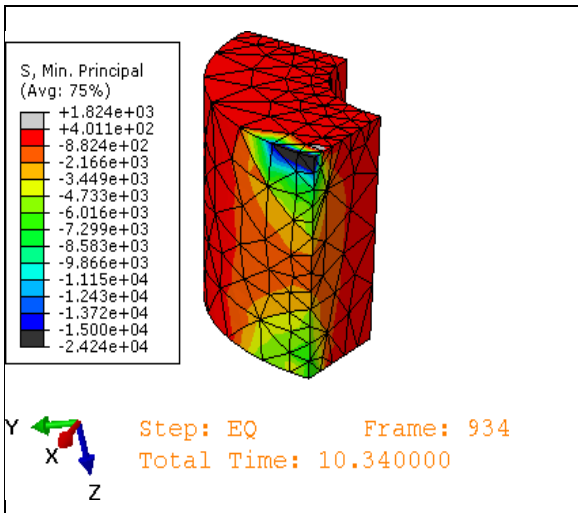




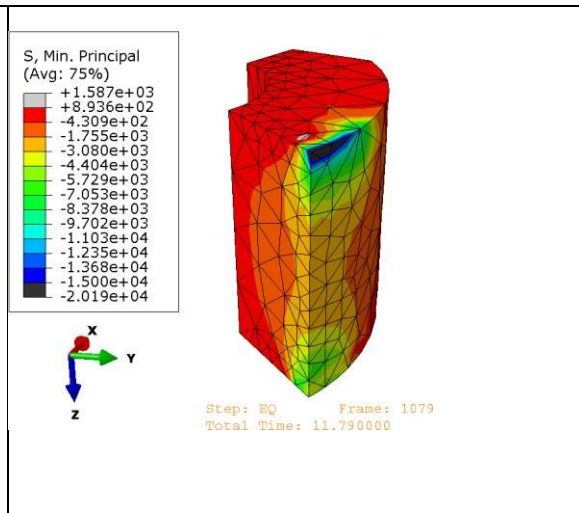
X Step: EQ Frame: 595
 Total Time: 6.950000
 Z

SSU 07g

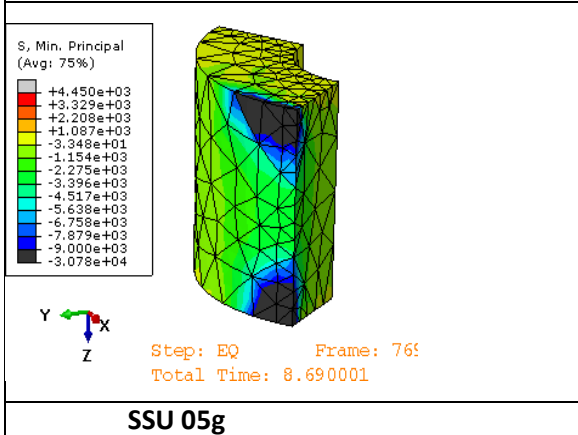
ΜΕΛΟΣ K4_T2.A



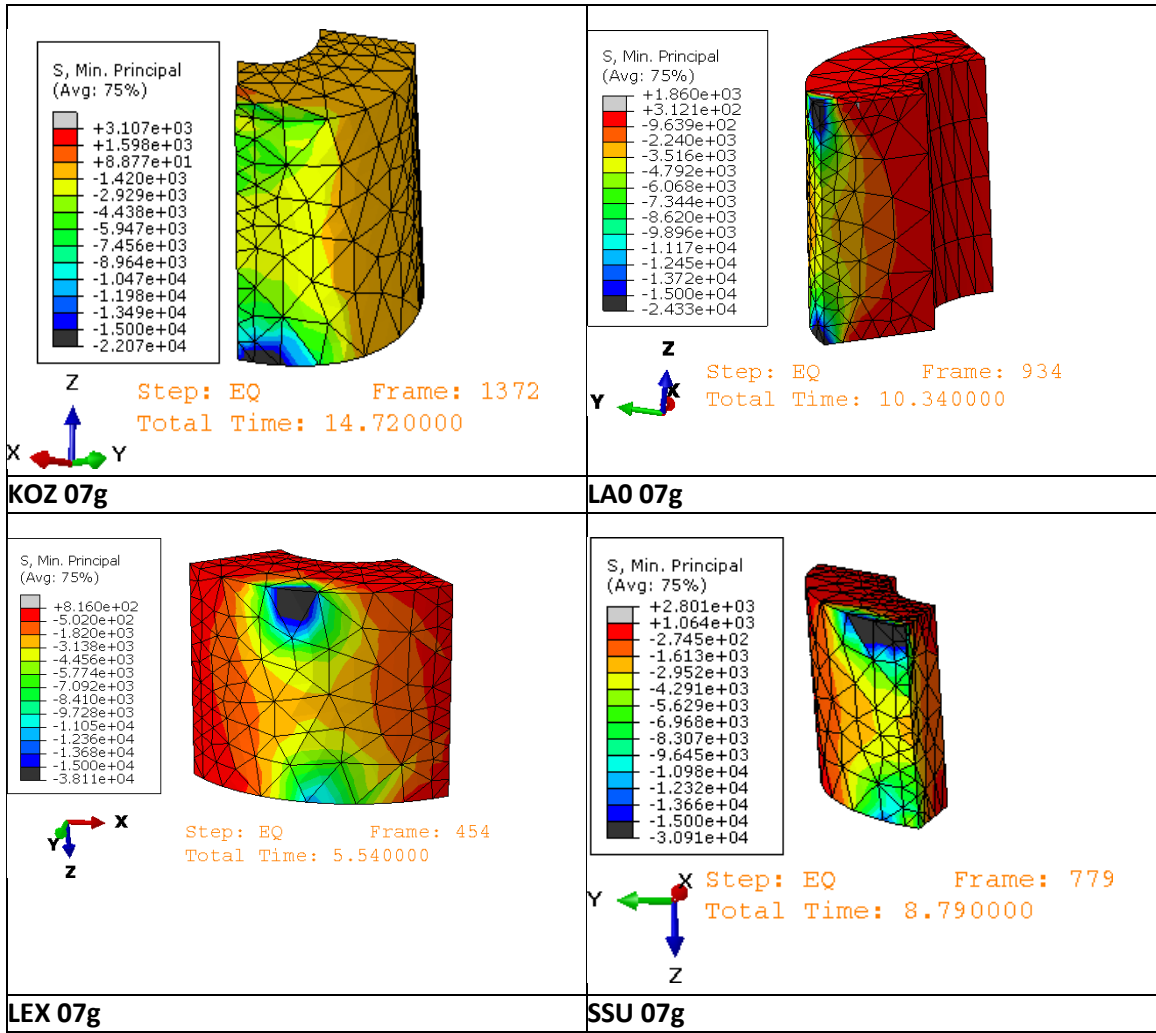
KOZ 05g



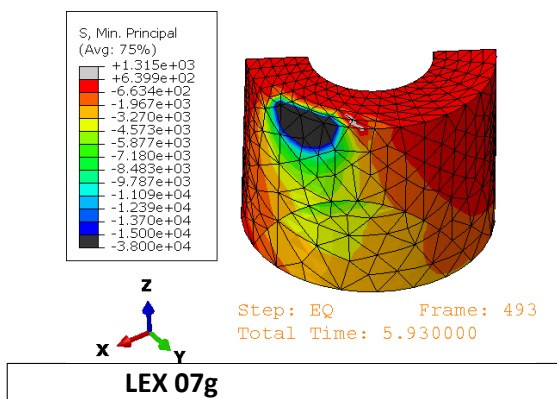
LA0 05g



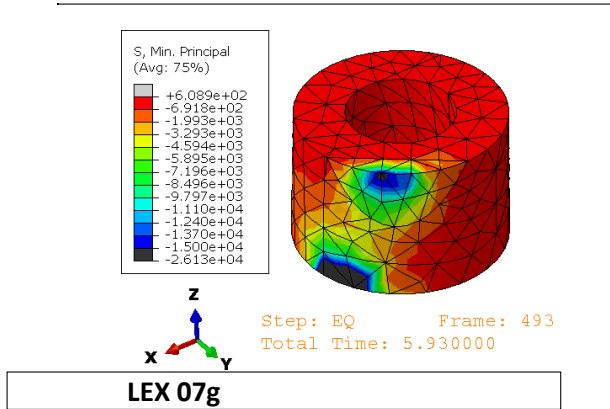
SSU 05g



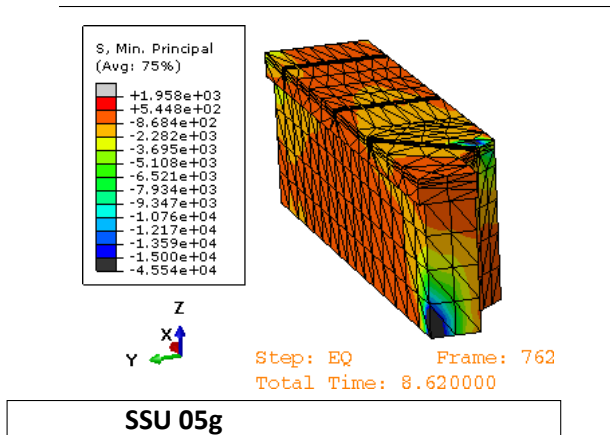
ΜΕΛΟΣ K4_T5.A



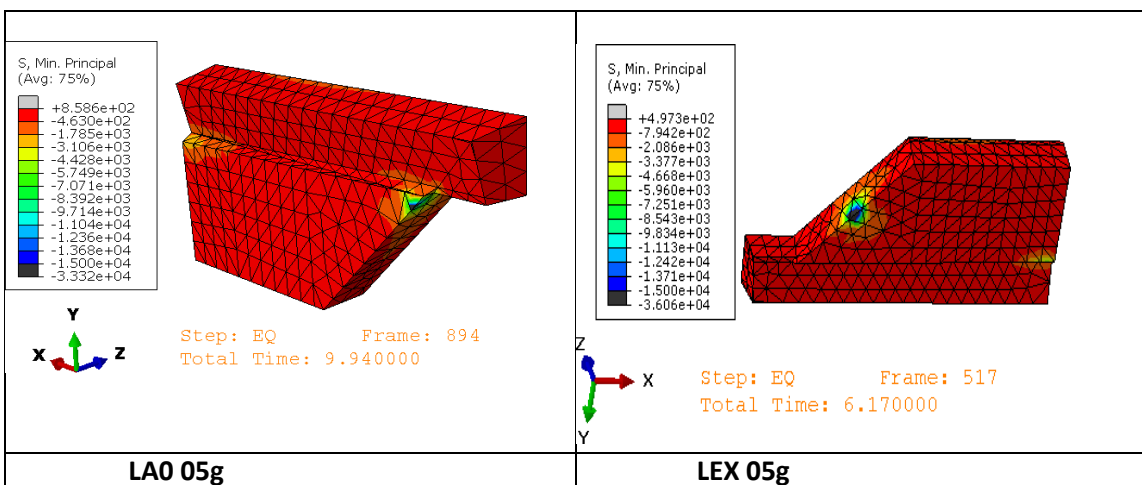
ΜΕΛΟΣ K4_T6.A

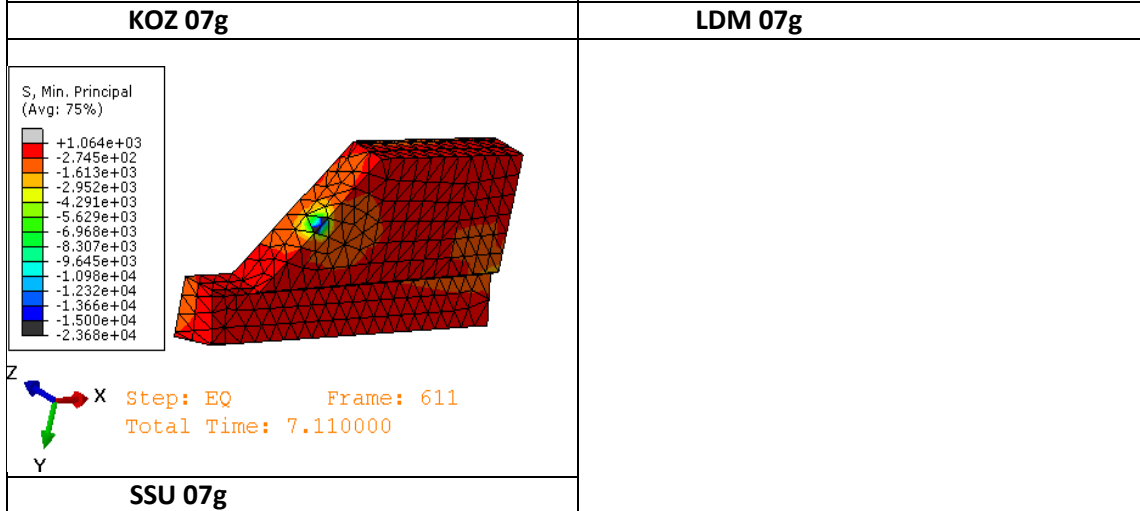
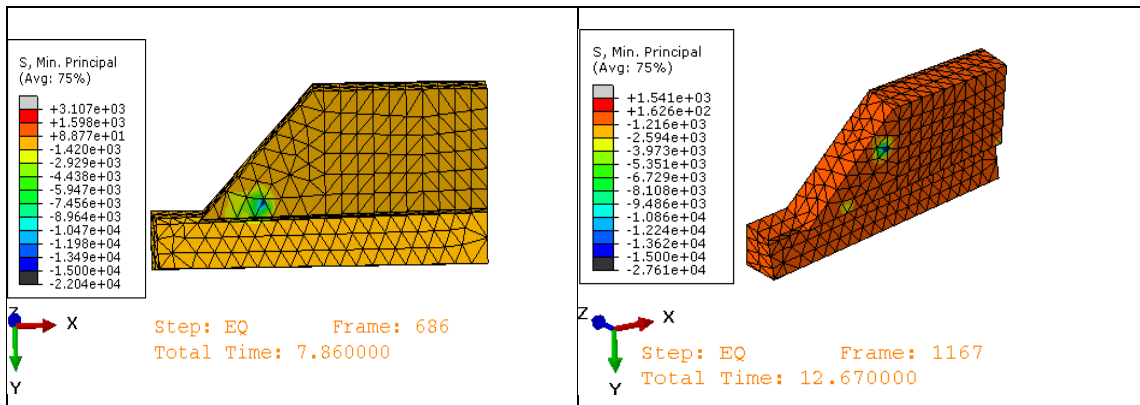


ΜΕΛΟΣ EPB3.A

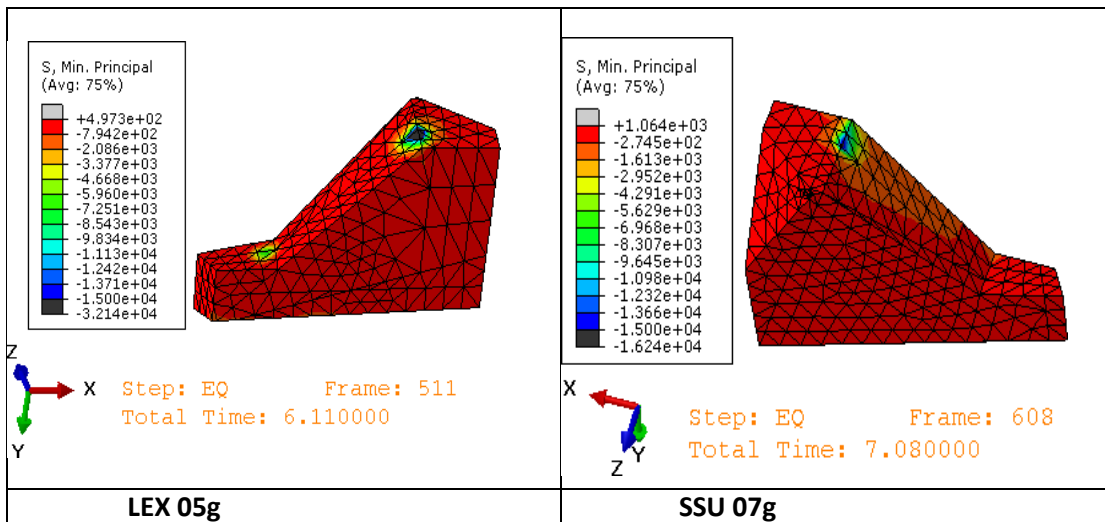


ΜΕΛΟΣ EPC2.A





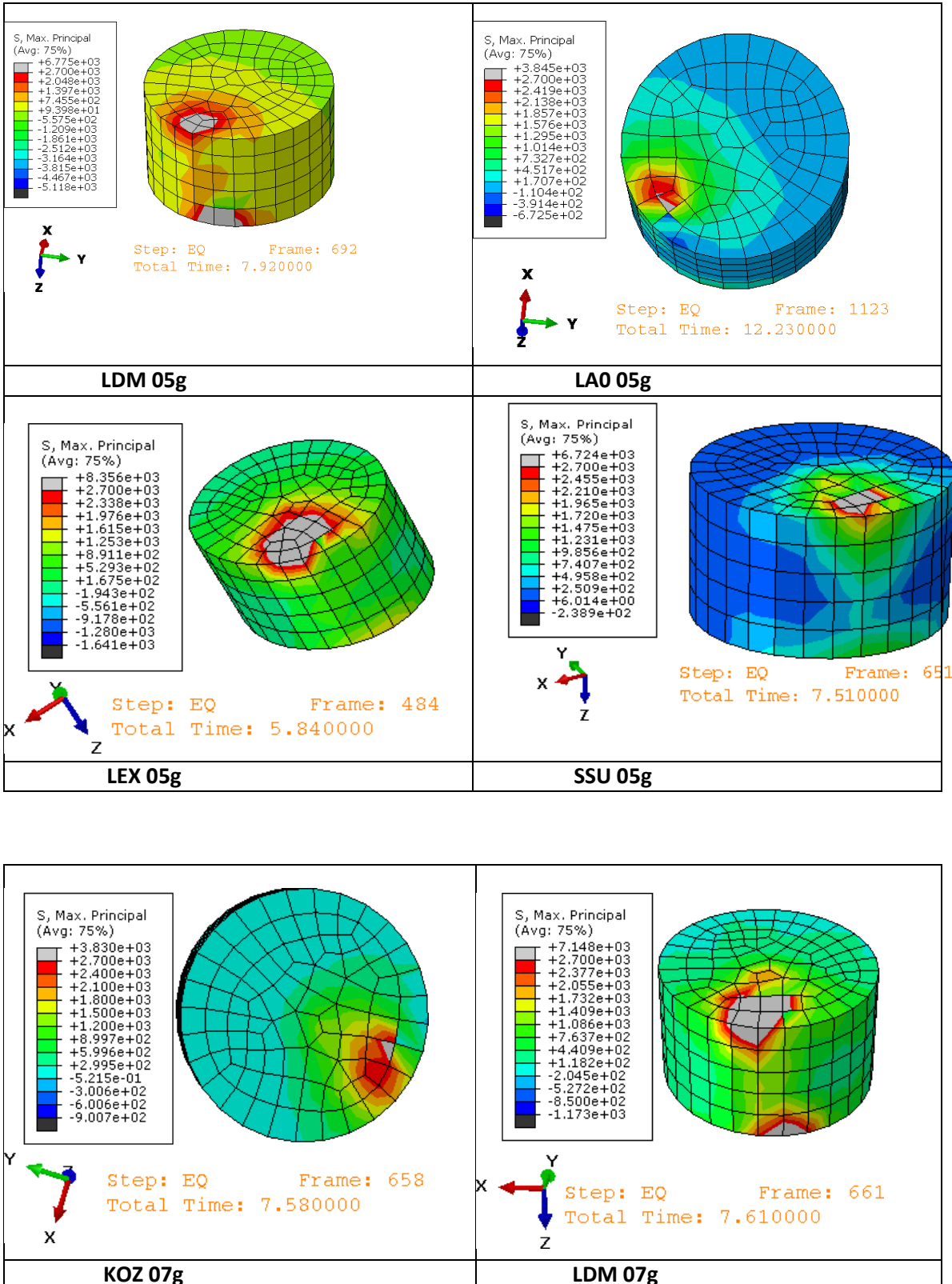
ΜΕΛΟΣ EPC3.A

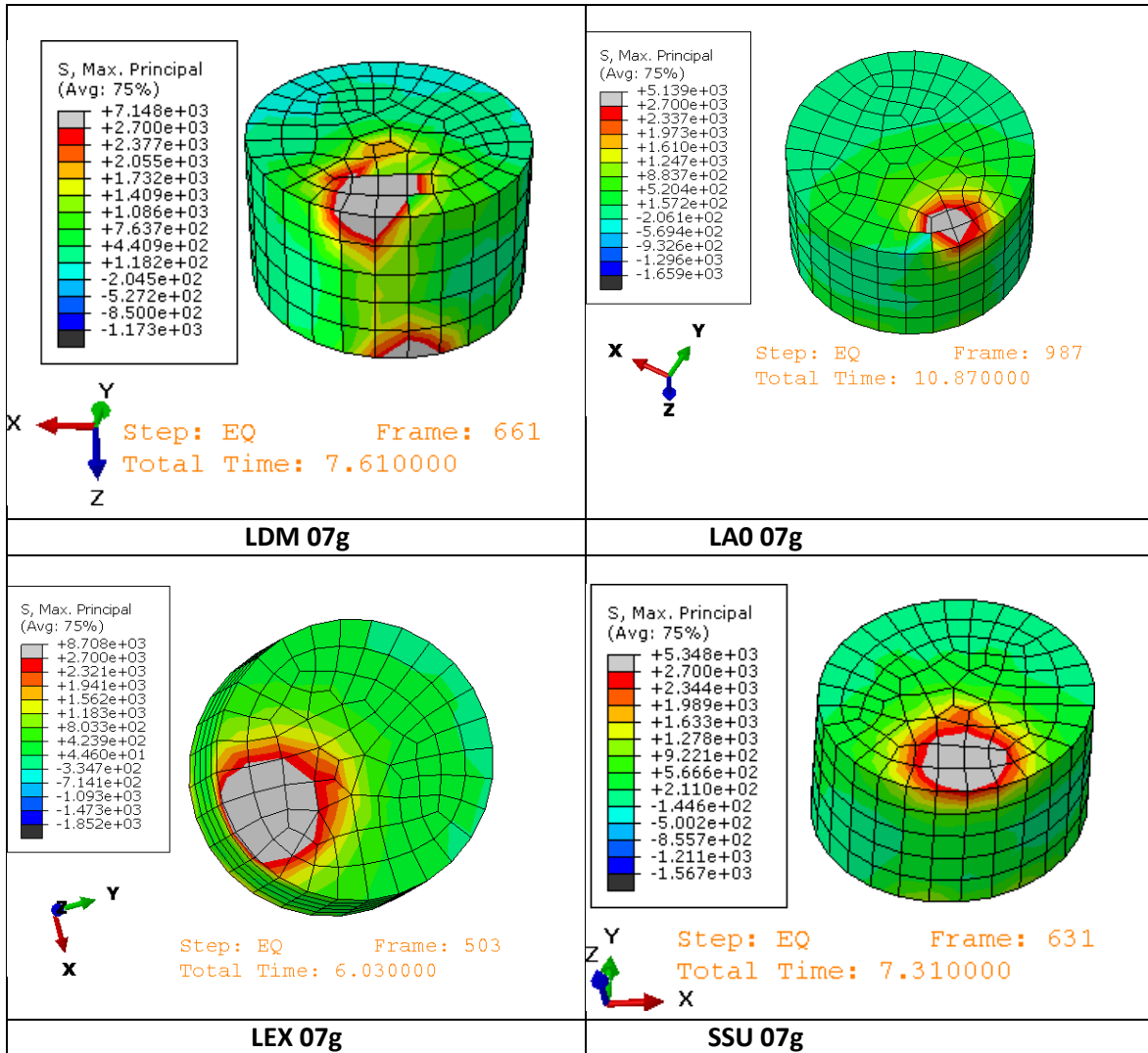


Π.2 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε νέους λίθους

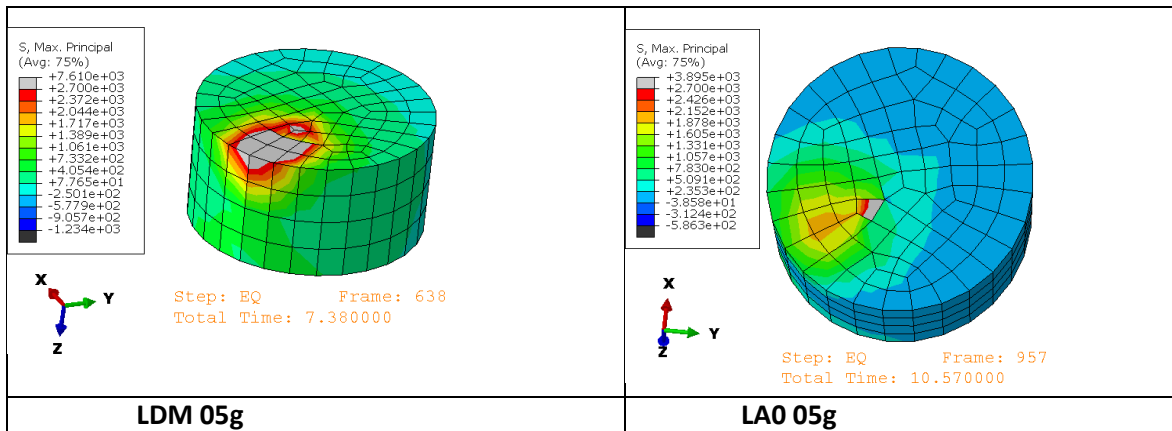
Π.2.1 Εφελκυσμός

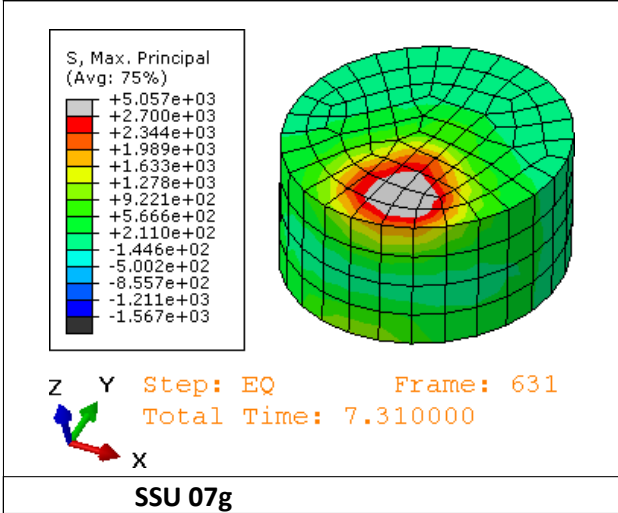
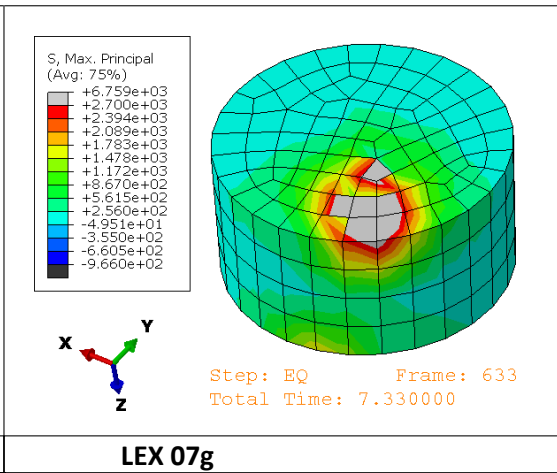
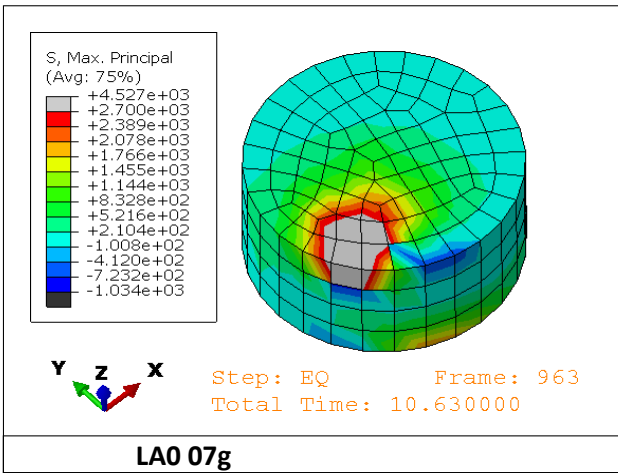
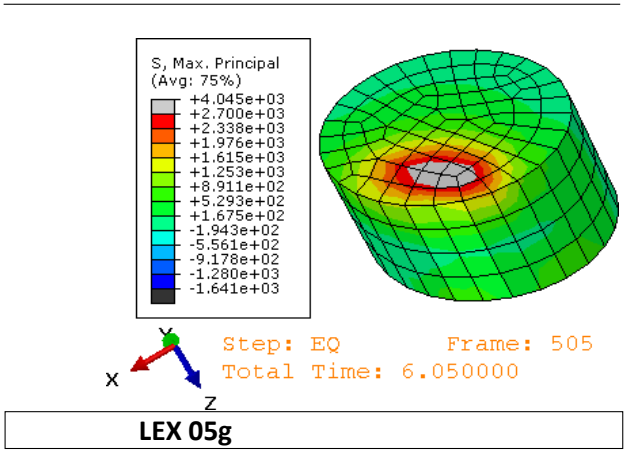
ΜΕΛΟΣ Κ1_T1.N



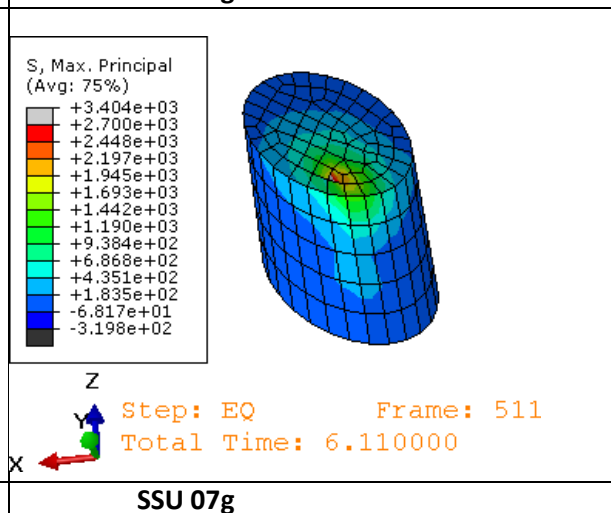
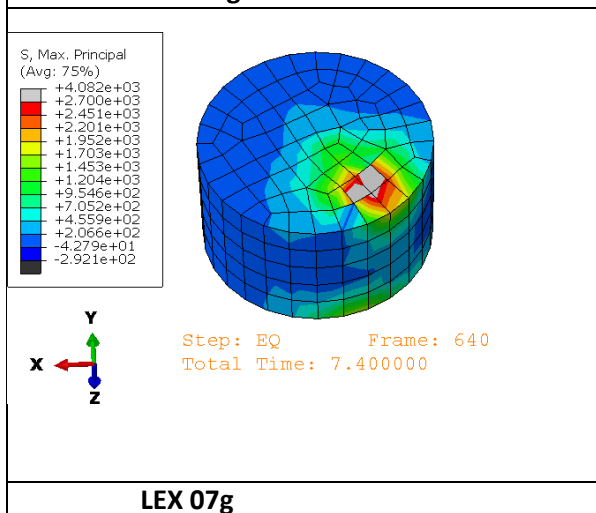
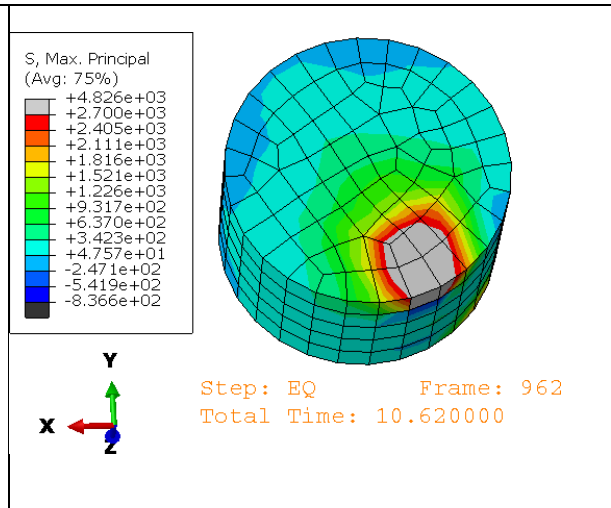
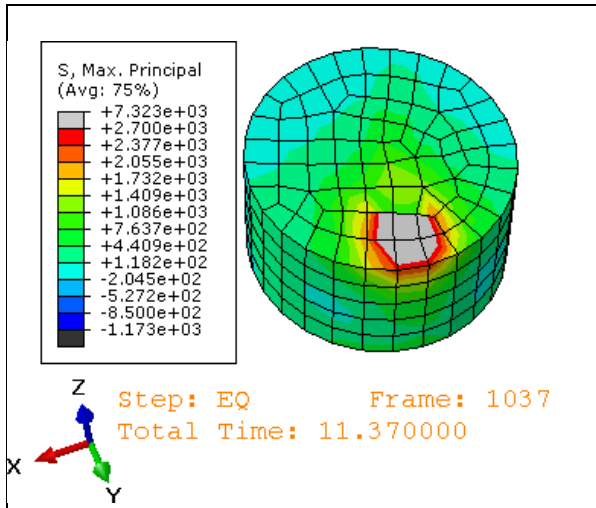
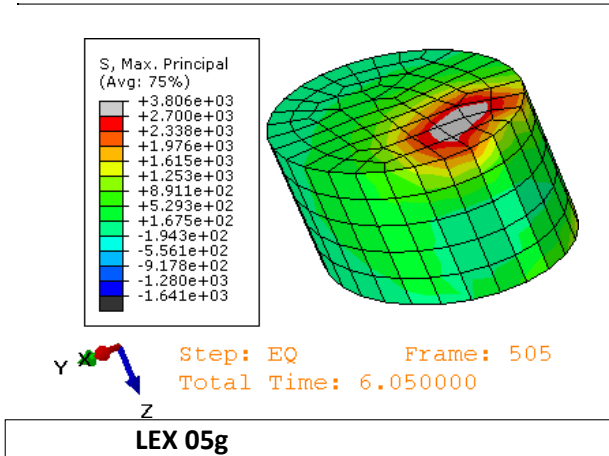


ΜΕΛΟΣ K1_T2.N

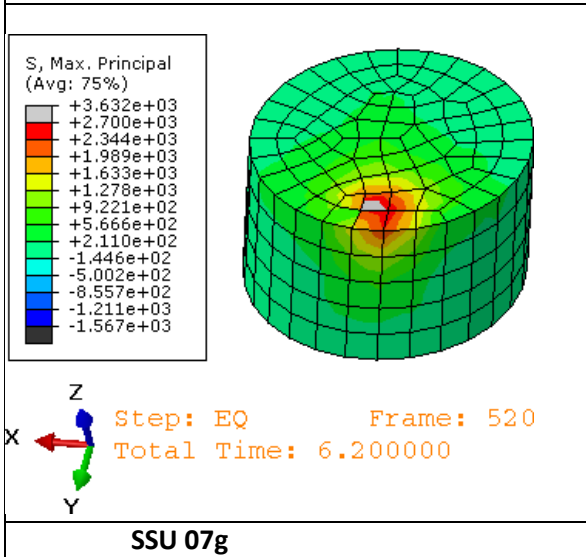
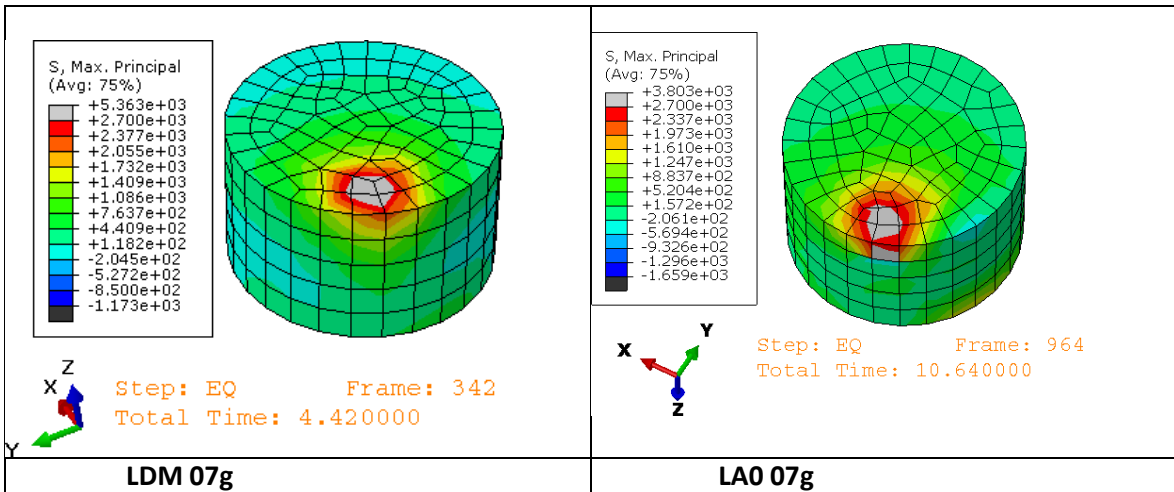
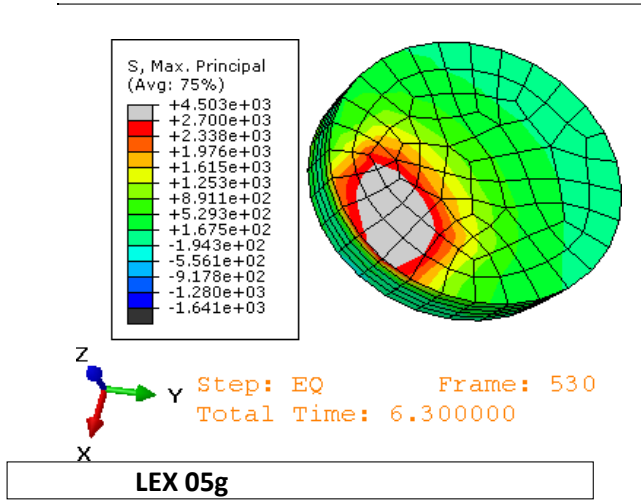




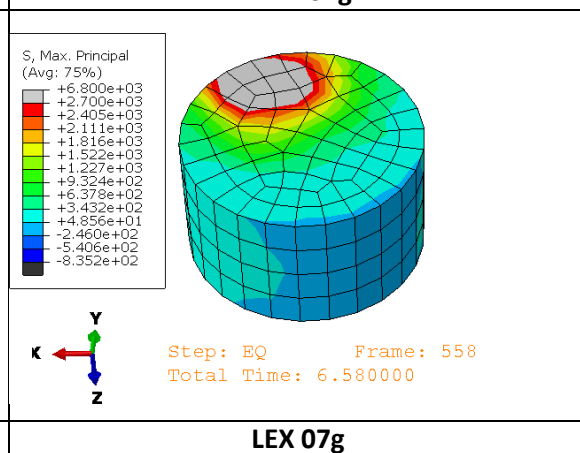
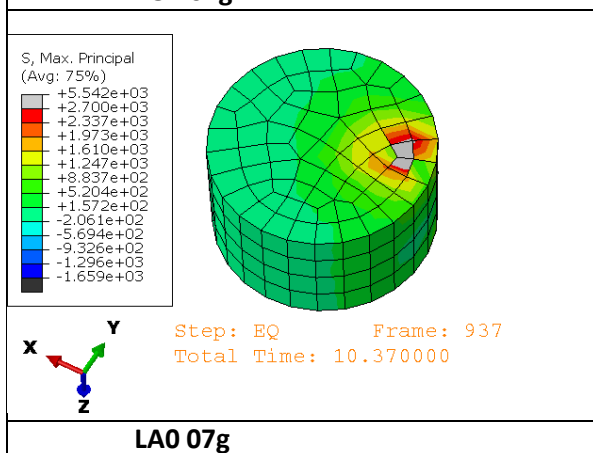
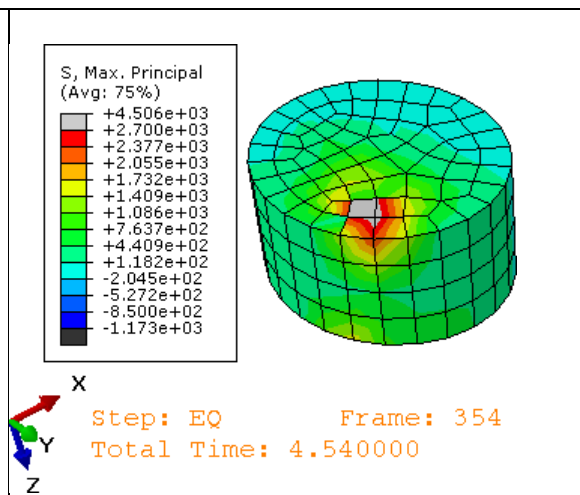
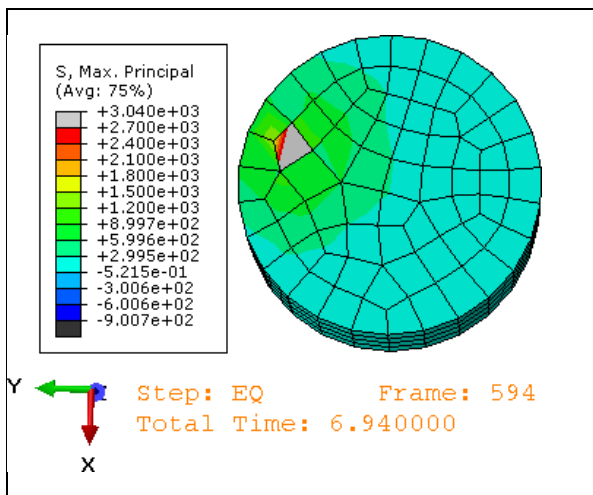
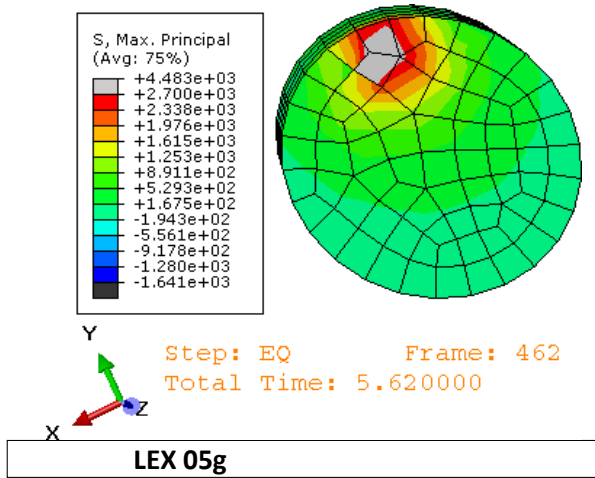
ΜΕΛΟΣ K1_T3.N

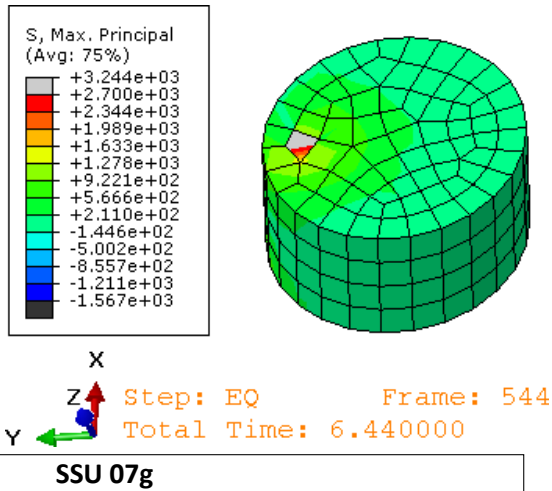


ΜΕΛΟΣ K1_T4.N

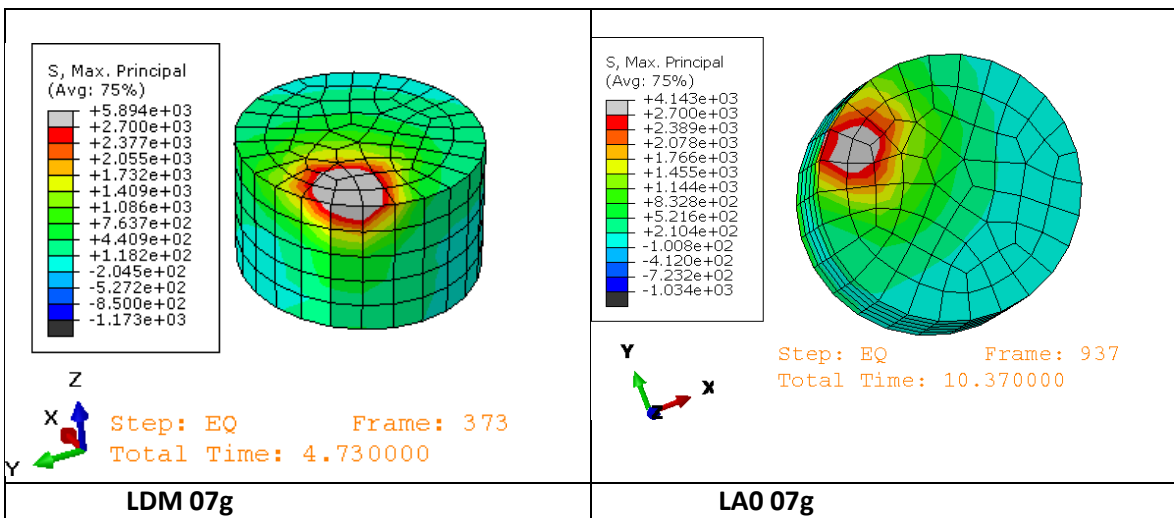
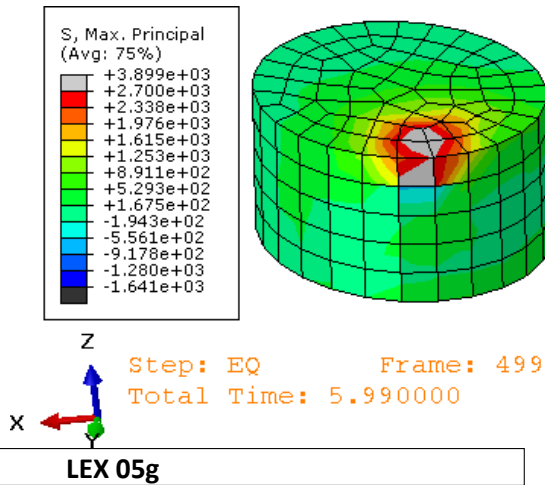


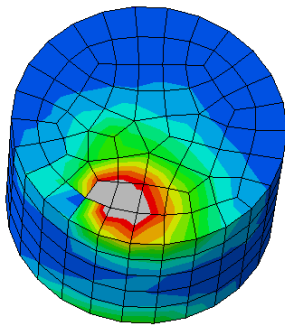
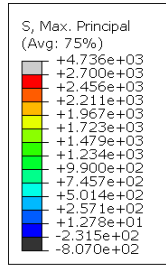
ΜΕΛΟΣ K1_T6.N





ΜΕΛΟΣ K1_T7.N

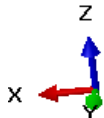
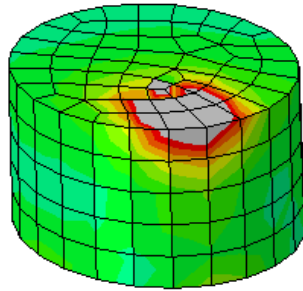
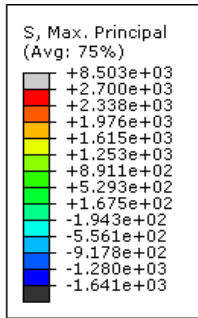




Step: EQ Frame: 559
Total Time: 6.590000

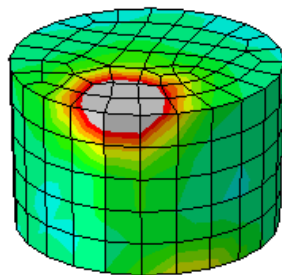
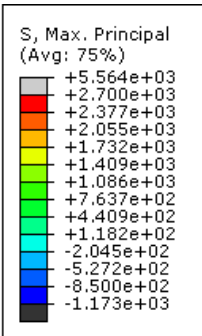
LEX 07g

ΜΕΛΟΣ Κ1_T8.N



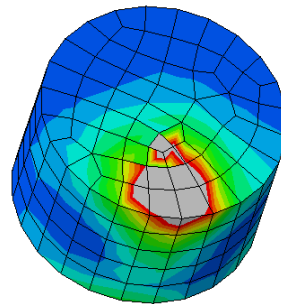
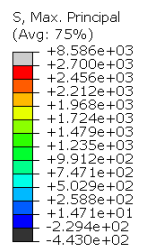
Step: EQ Frame: 484
Total Time: 5.840000

LEX 05g



Step: EQ Frame: 372
Total Time: 4.720000

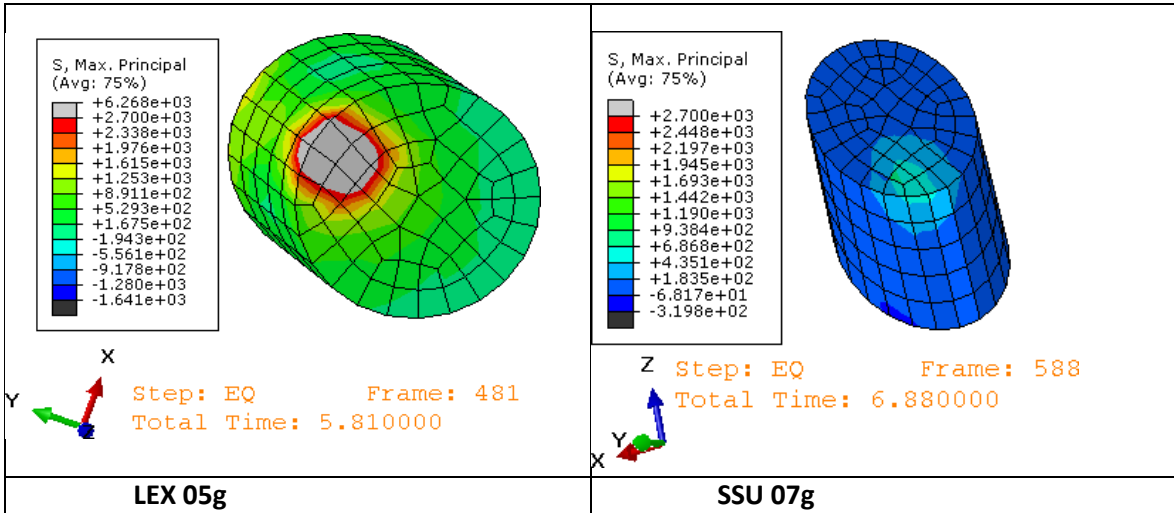
LDM 07g



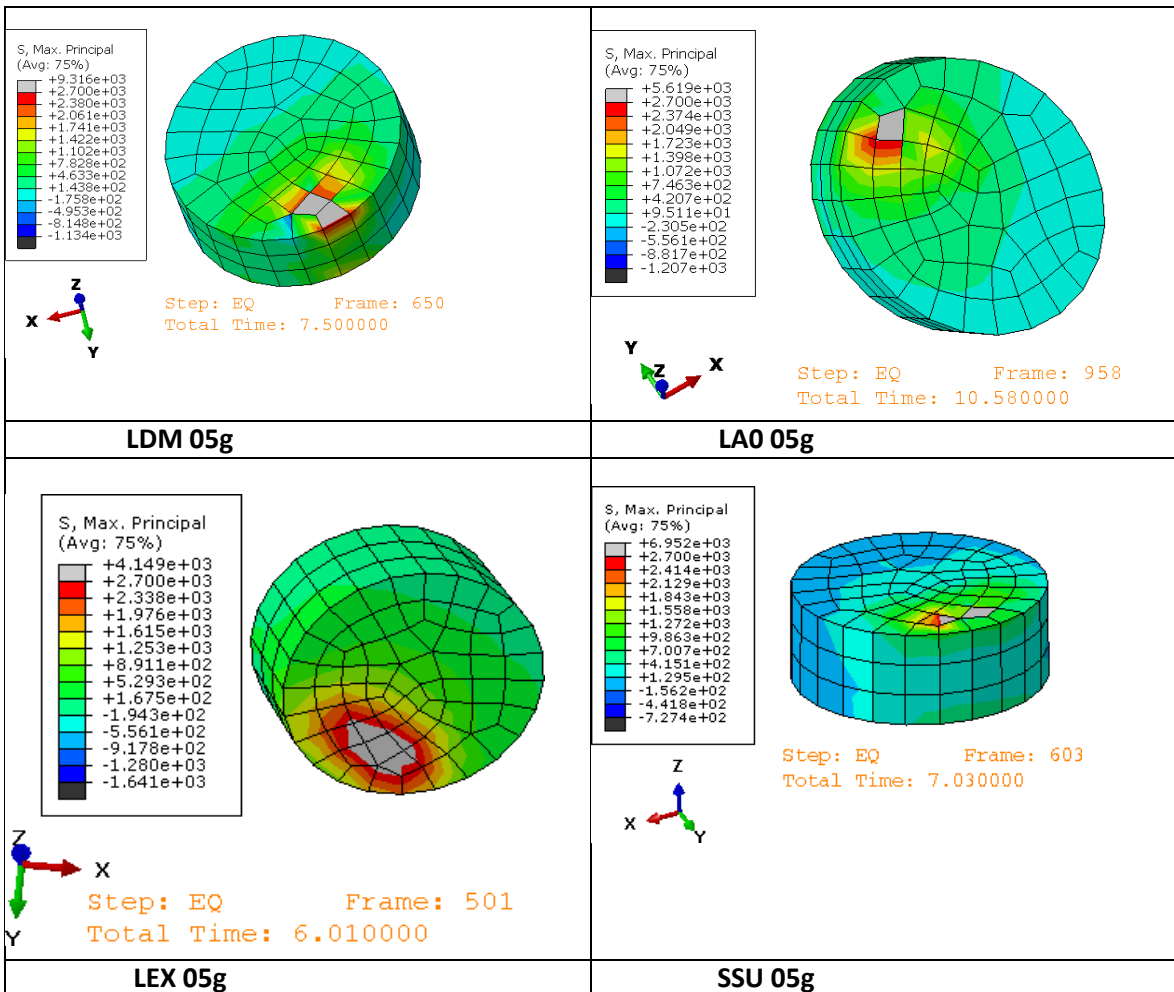
Step: EQ Frame: 516
Total Time: 6.160000

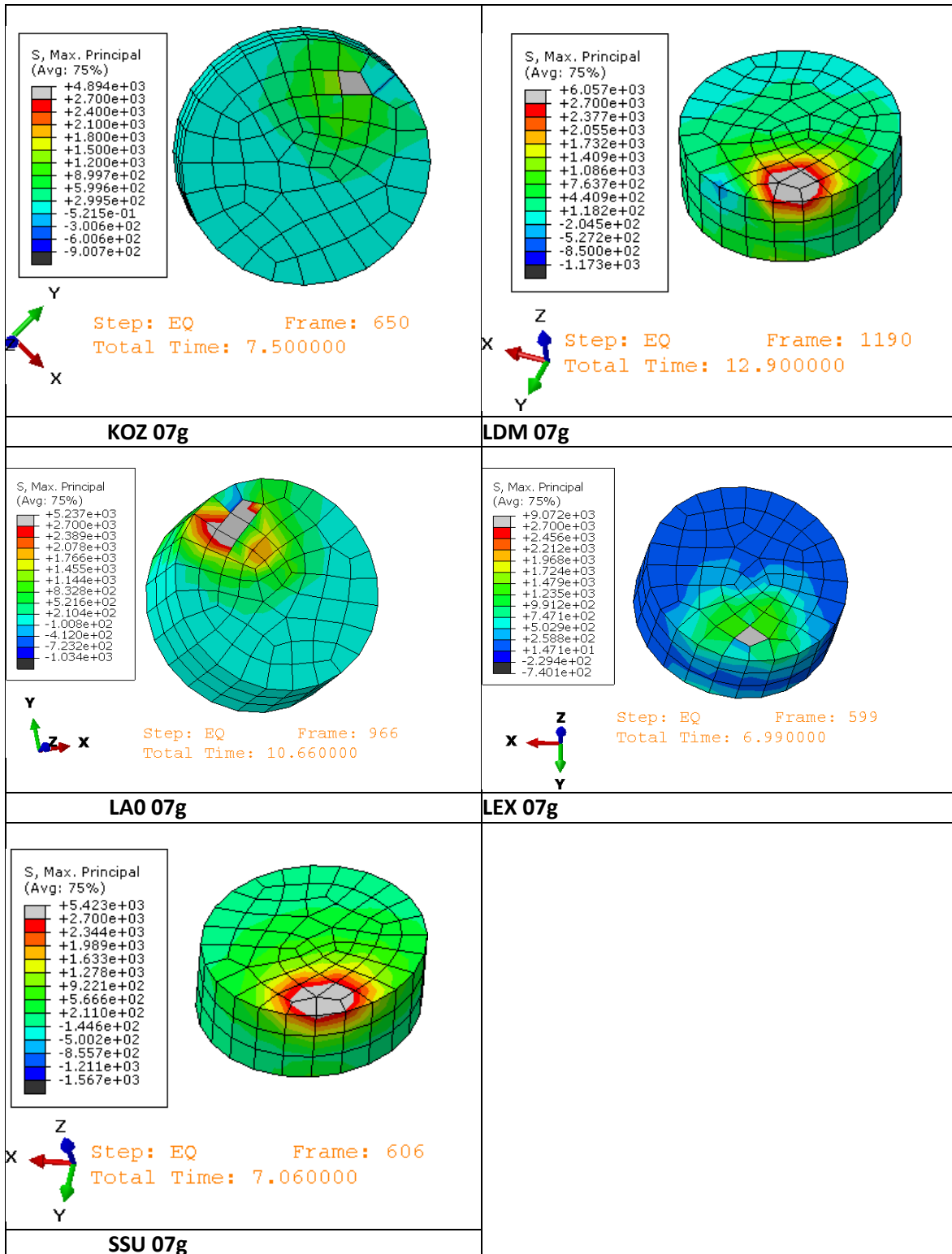
LEX 07g

ΜΕΛΟΣ K1_T9.N

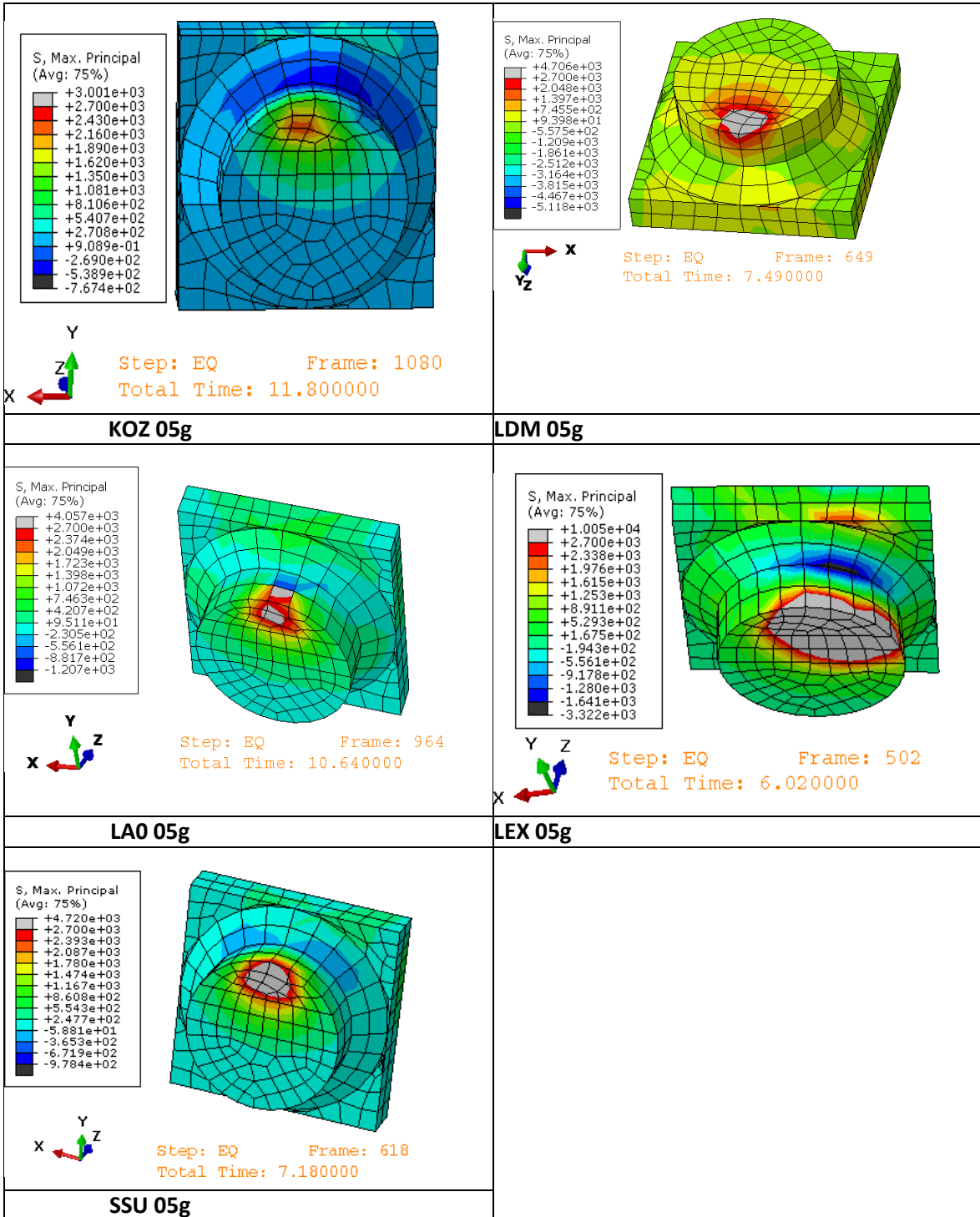


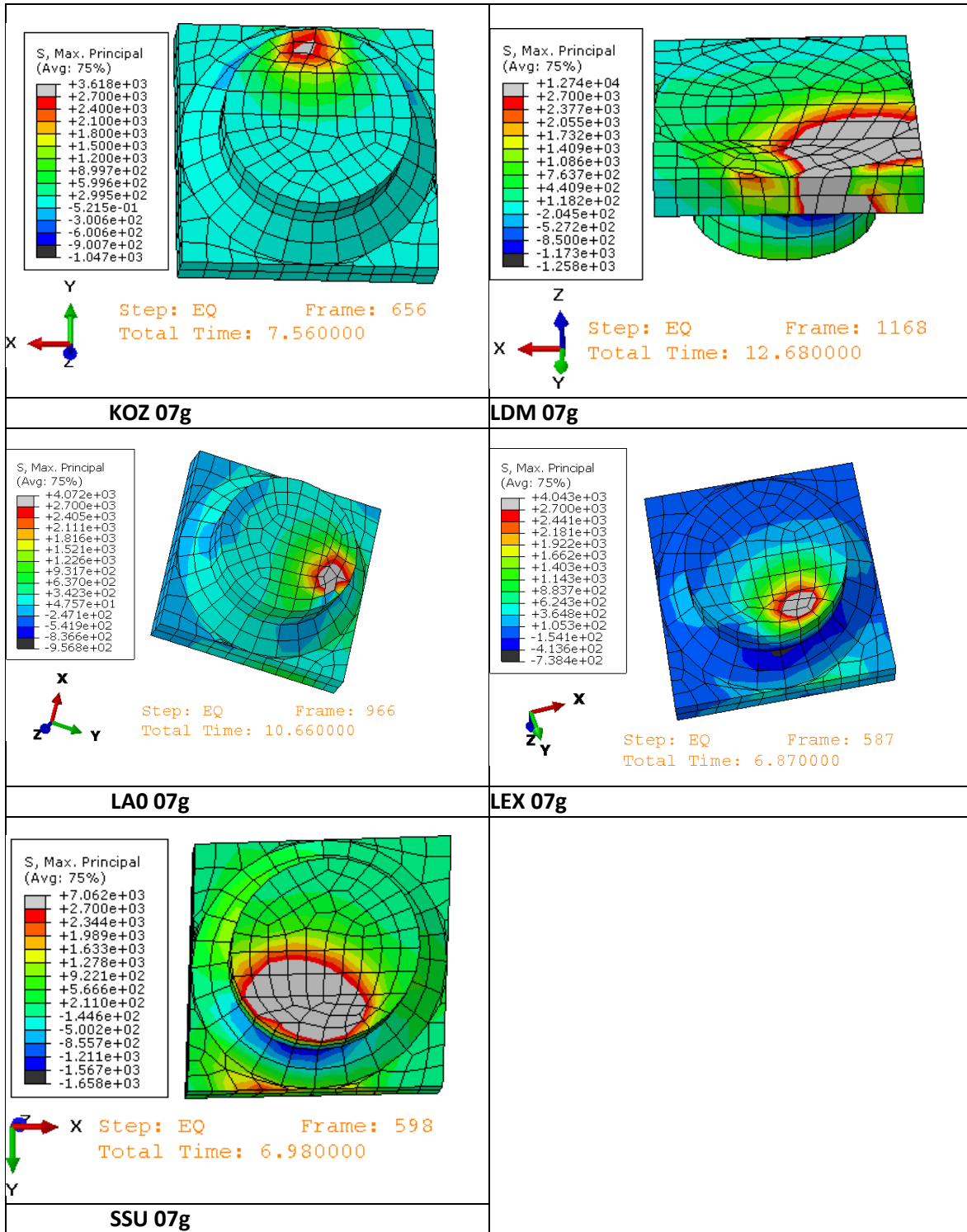
ΜΕΛΟΣ K1_T10.N



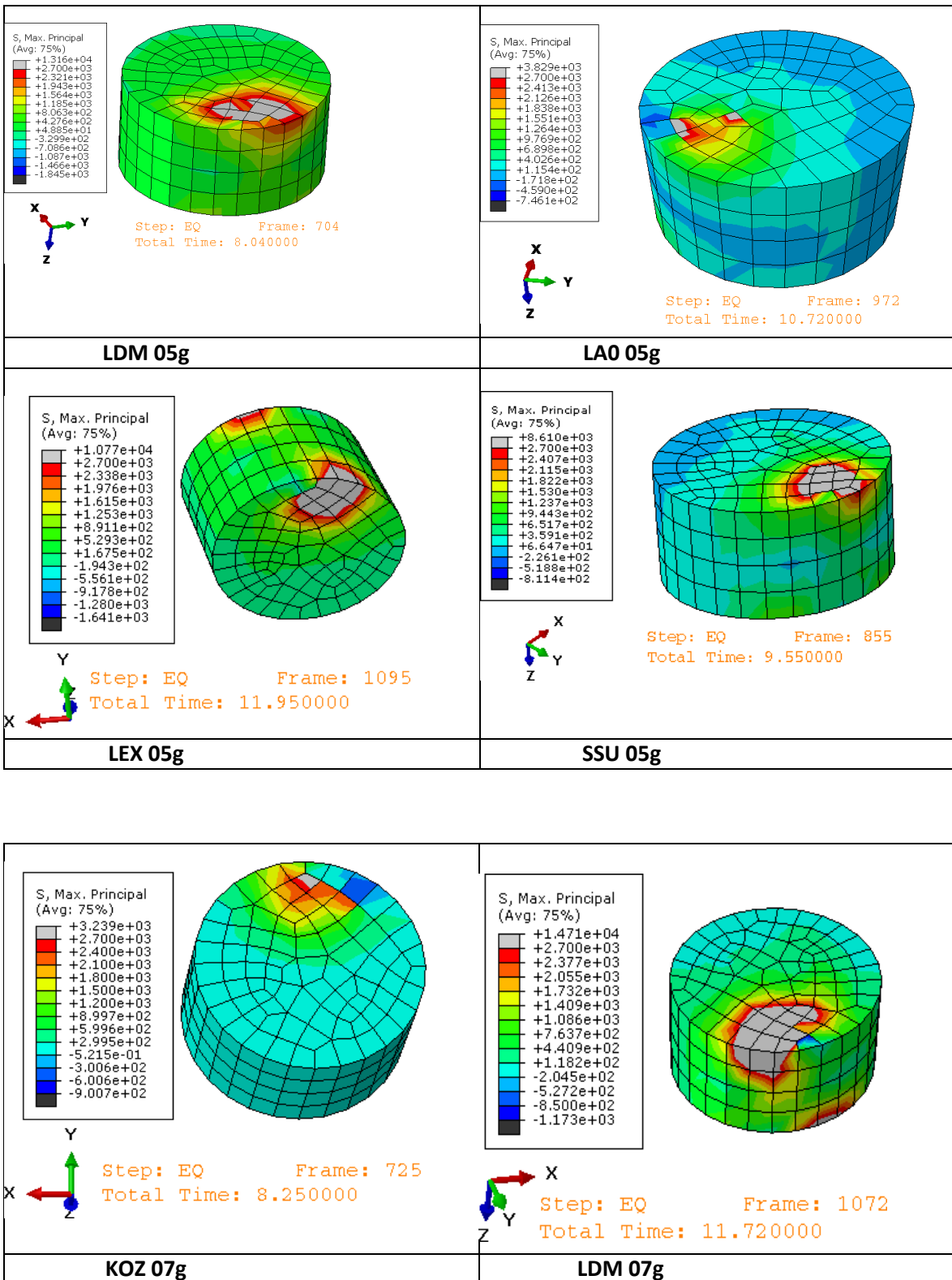


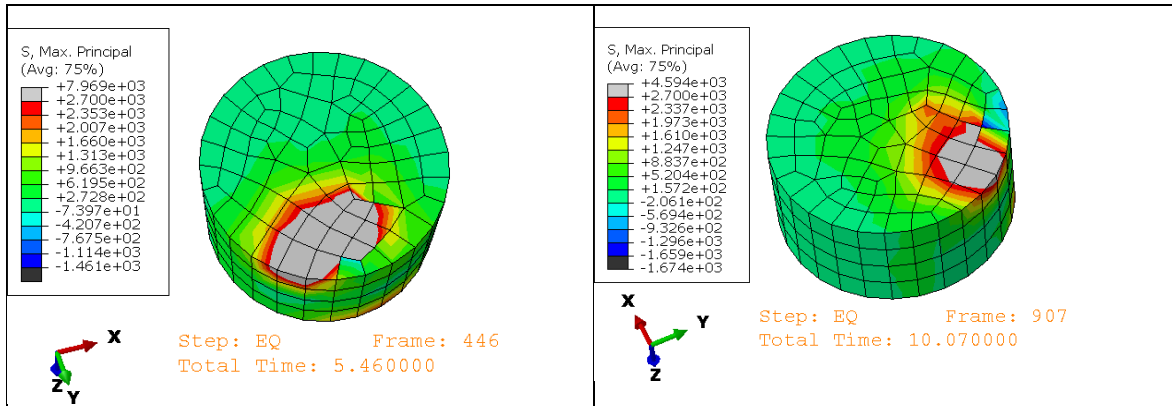
ΜΕΛΟΣ K1_TOP.N





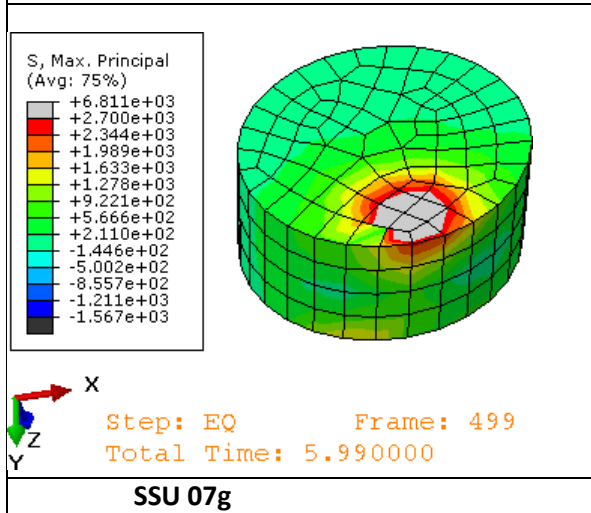
ΜΕΛΟΣ K2_T1.N





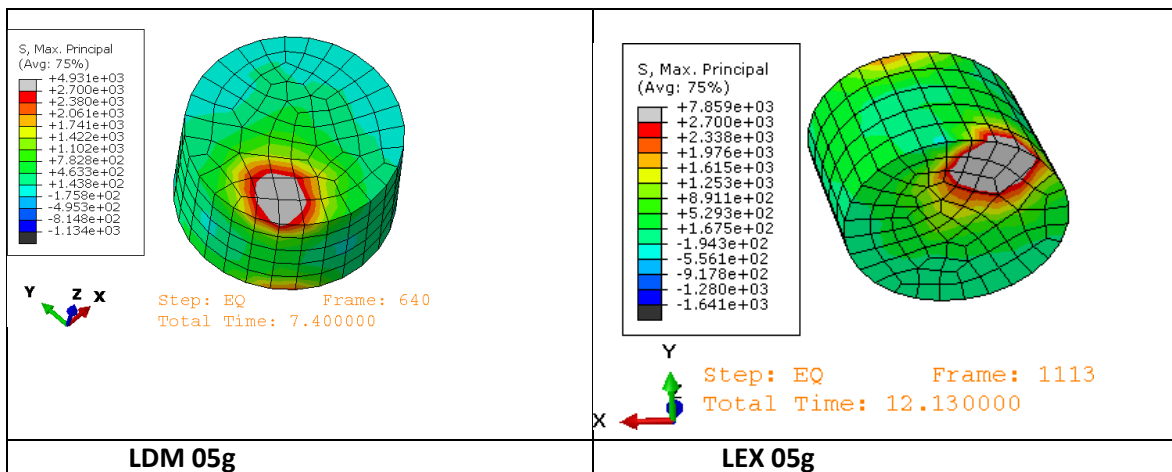
LEX 07g

LAO 07g



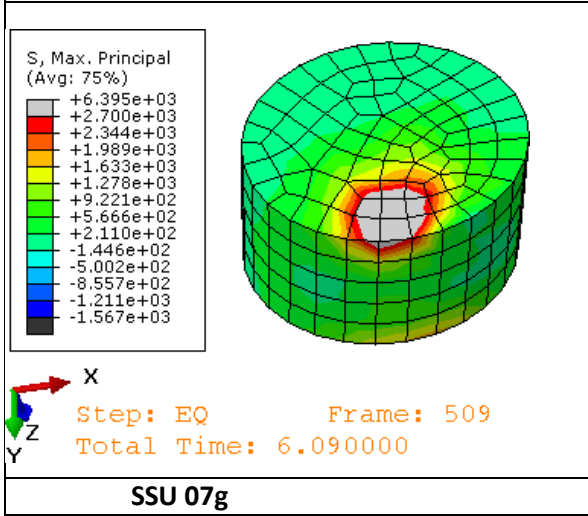
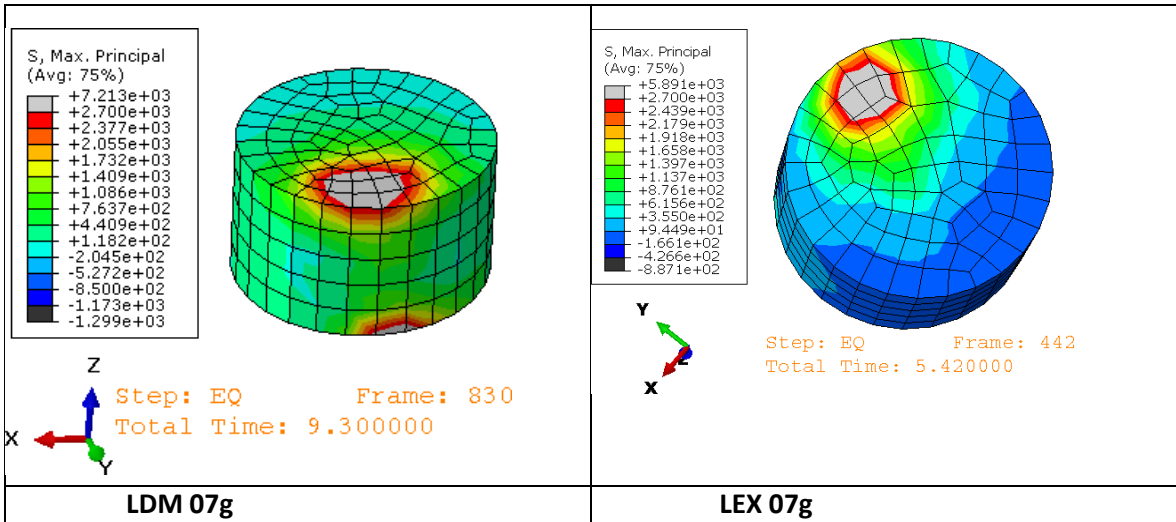
SSU 07g

ΜΕΛΟΣ Κ2_T2.N

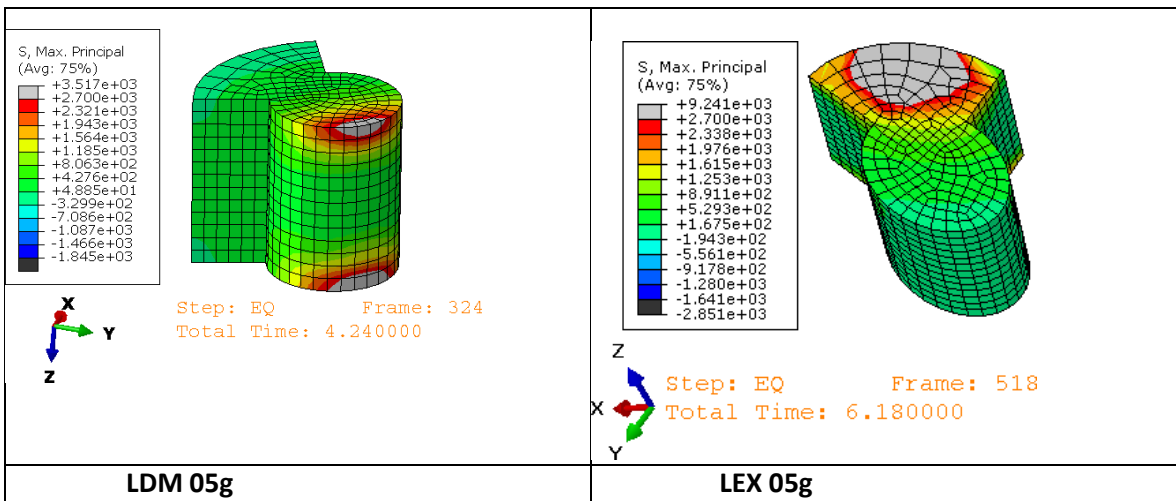


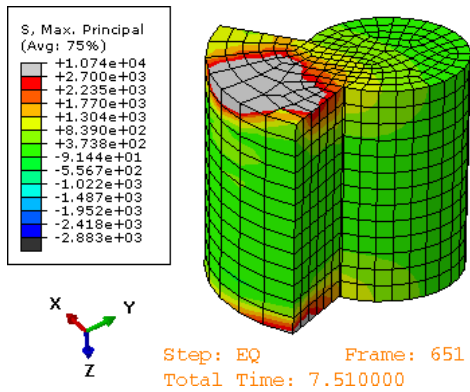
LDM 05g

LEX 05g

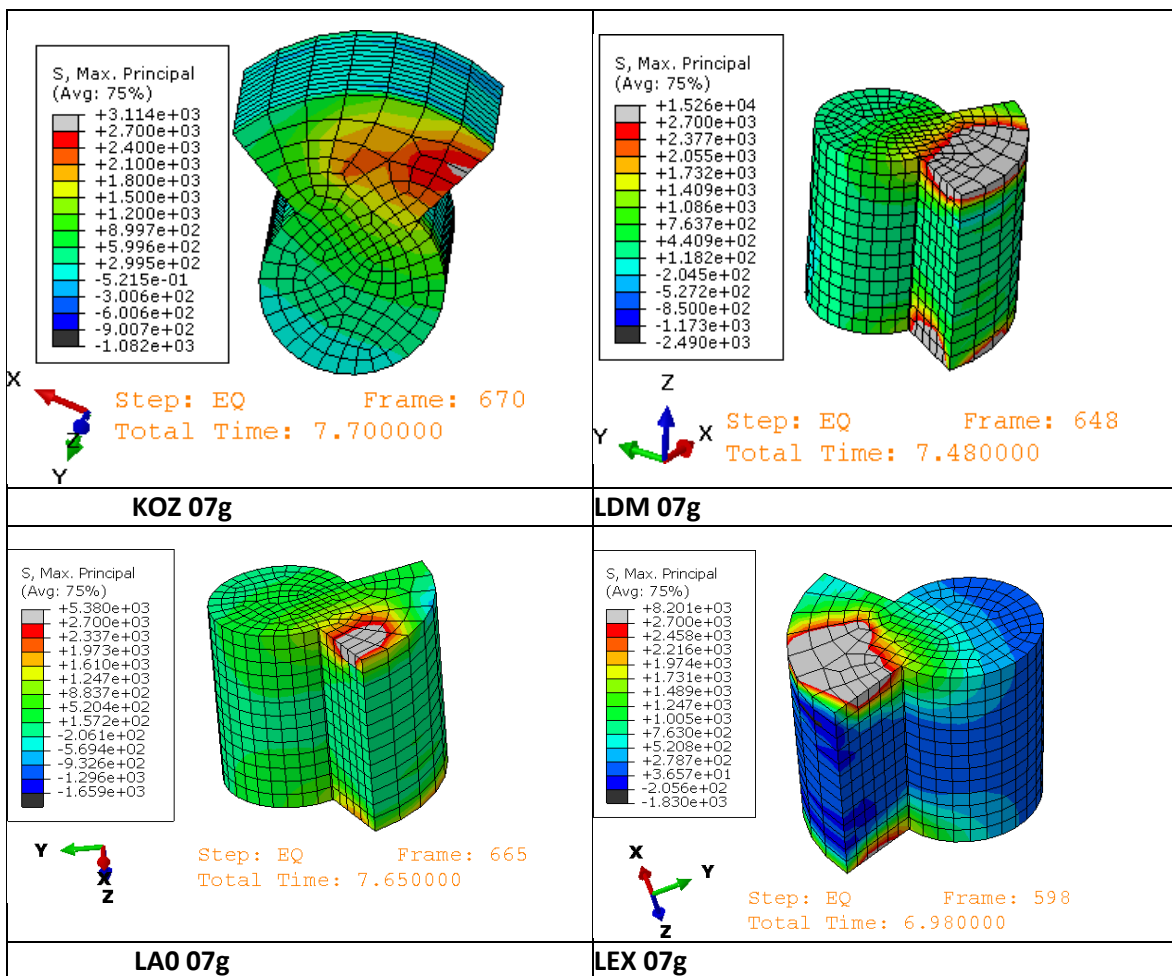


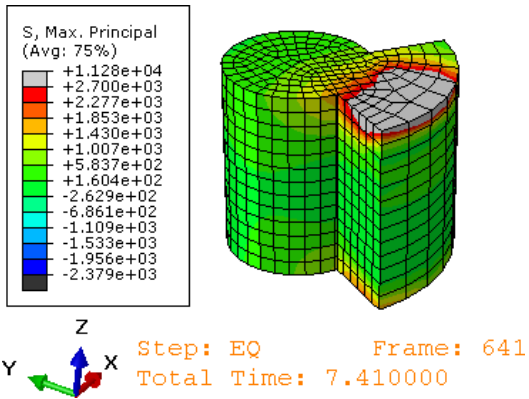
ΜΕΛΟΣ K2_T3.N





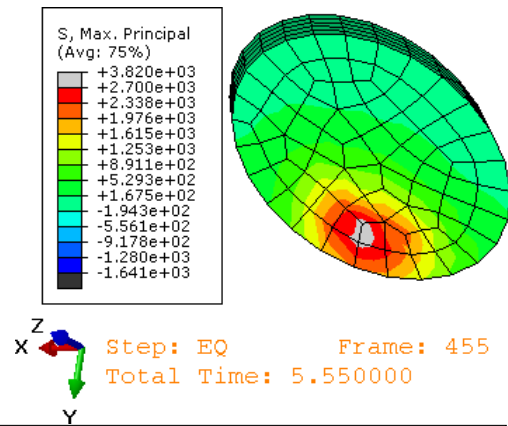
SSU 05g



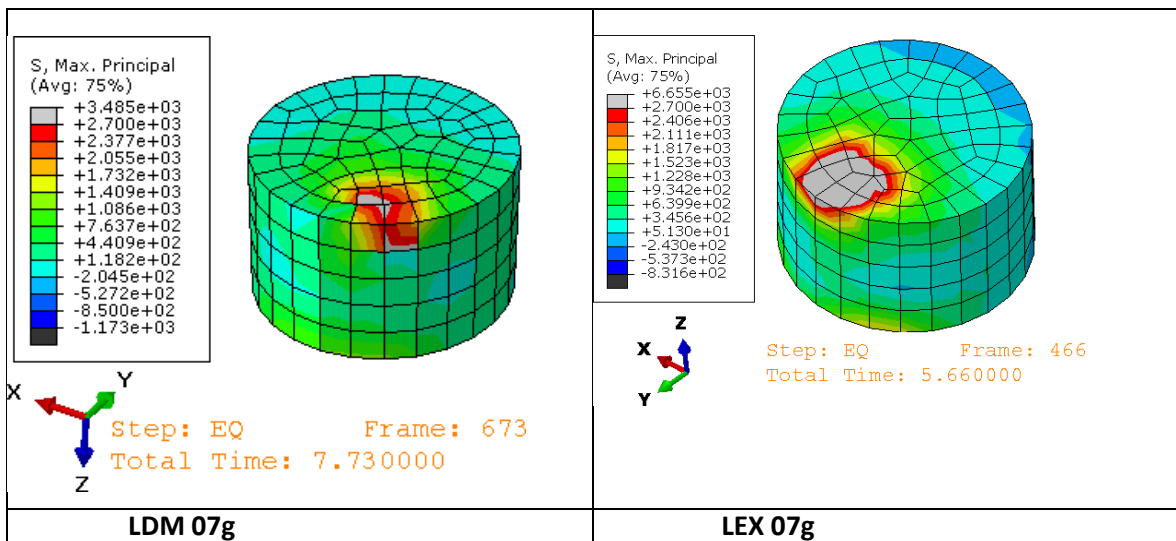


SSU 07g

ΜΕΛΟΣ K2_T4.N

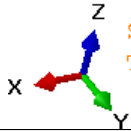
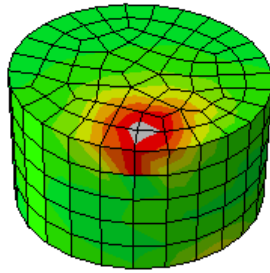
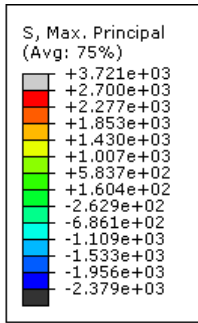


LEX 05g



LDM 07g

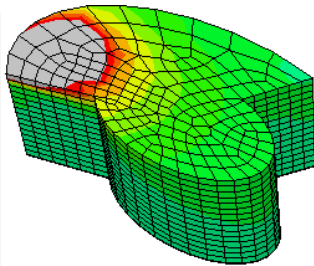
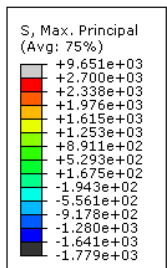
LEX 07g



Step: EQ Frame: 819
Total Time: 9.190000

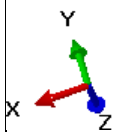
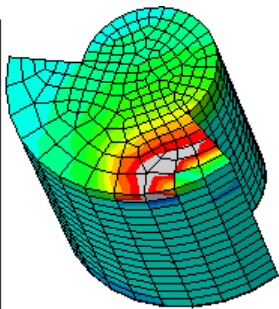
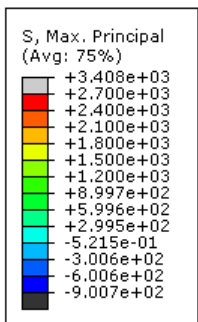
SSU 07g

ΜΕΛΟΣ K2_T5.N



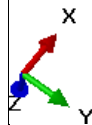
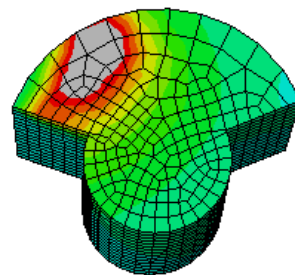
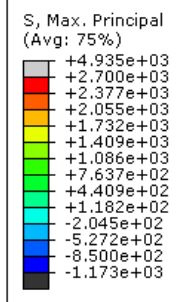
Step: EQ Frame: 529
Total Time: 6.290000

LEX 05g



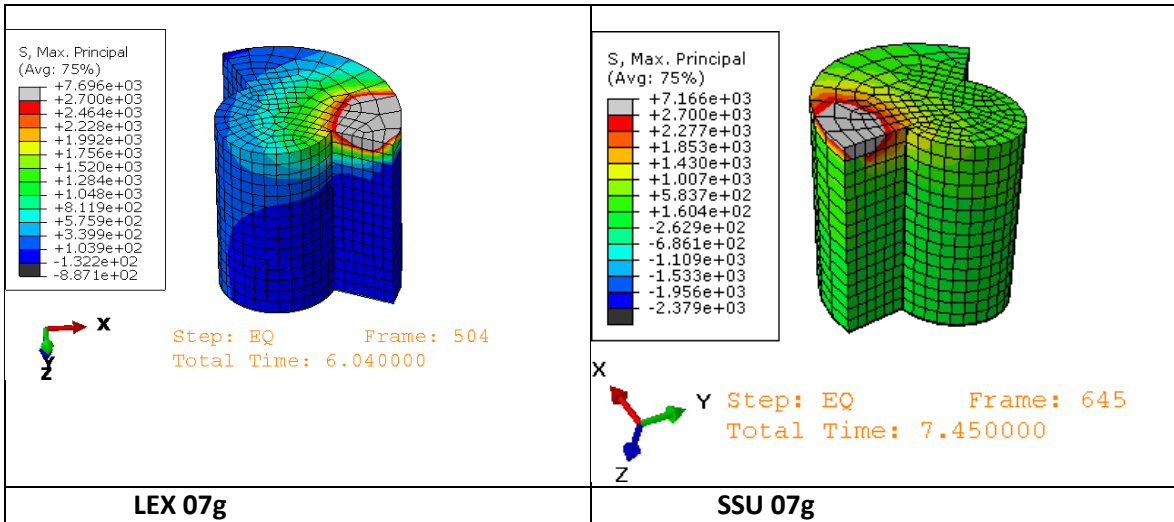
Step: EQ Frame: 673
Total Time: 7.730000

KOZ 07g

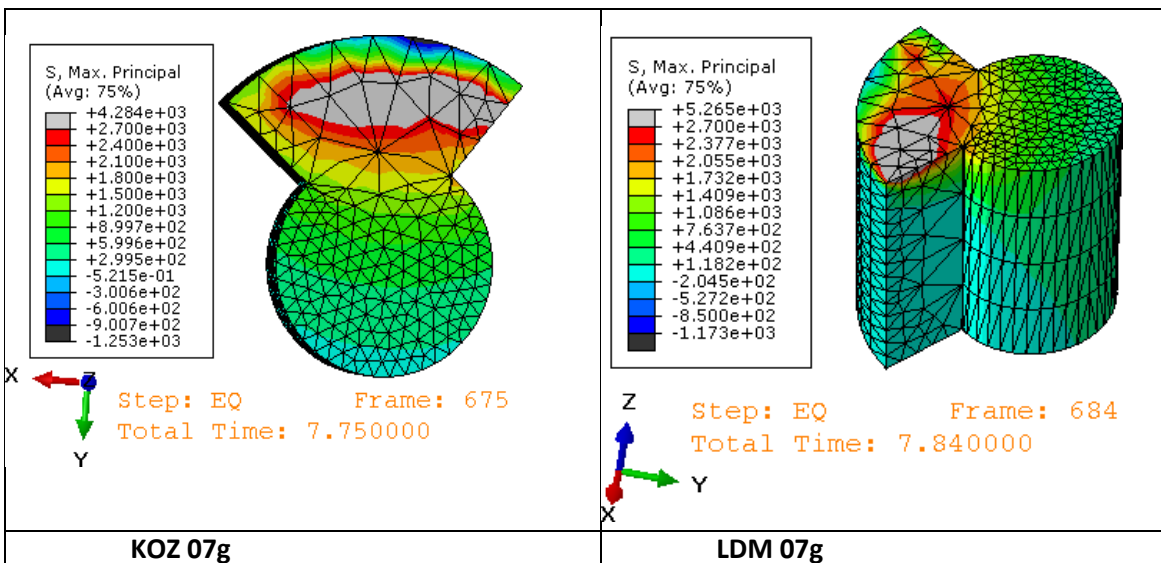
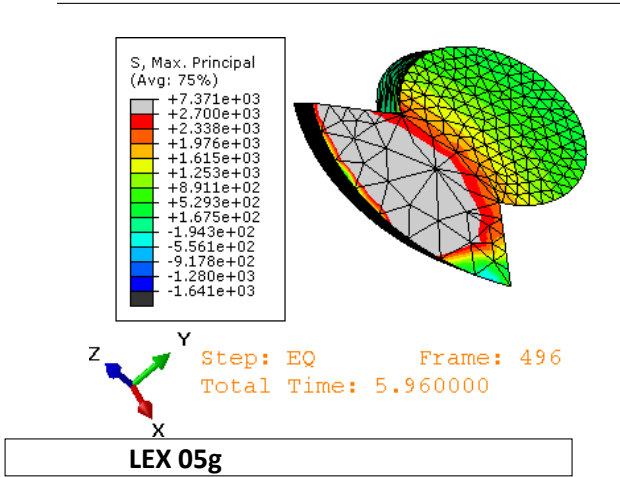


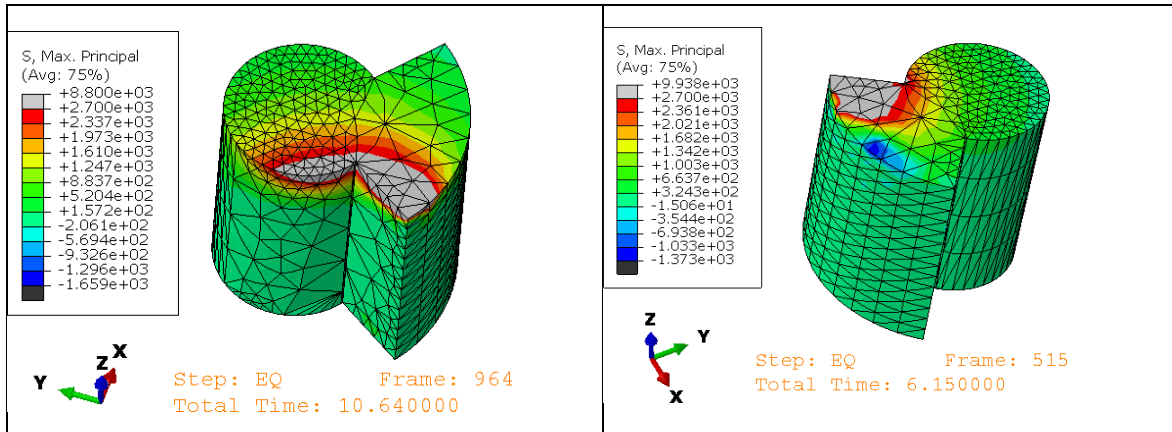
Step: EQ Frame: 653
Total Time: 7.530000

LDM 07g



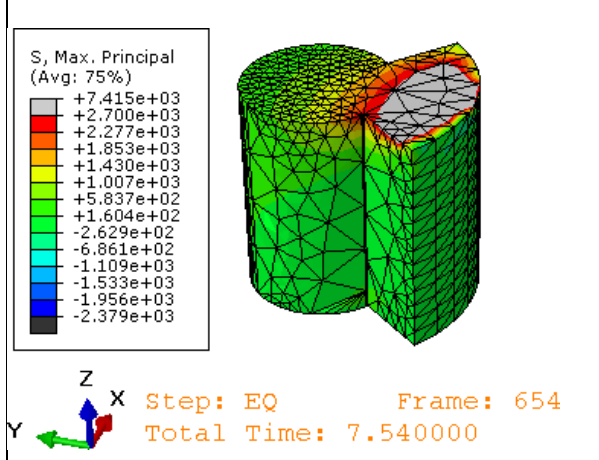
ΜΕΛΟΣ K2_T6.N





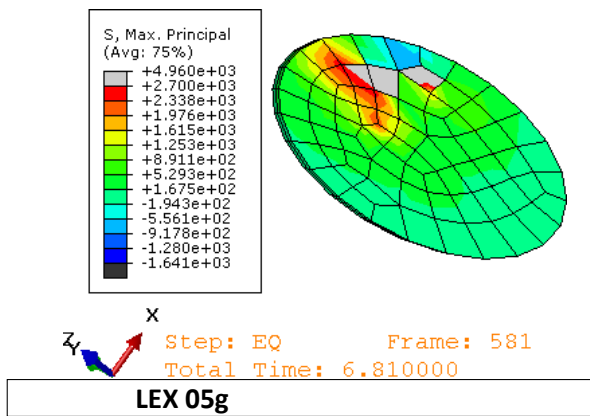
LA0 07g

LEX 07g

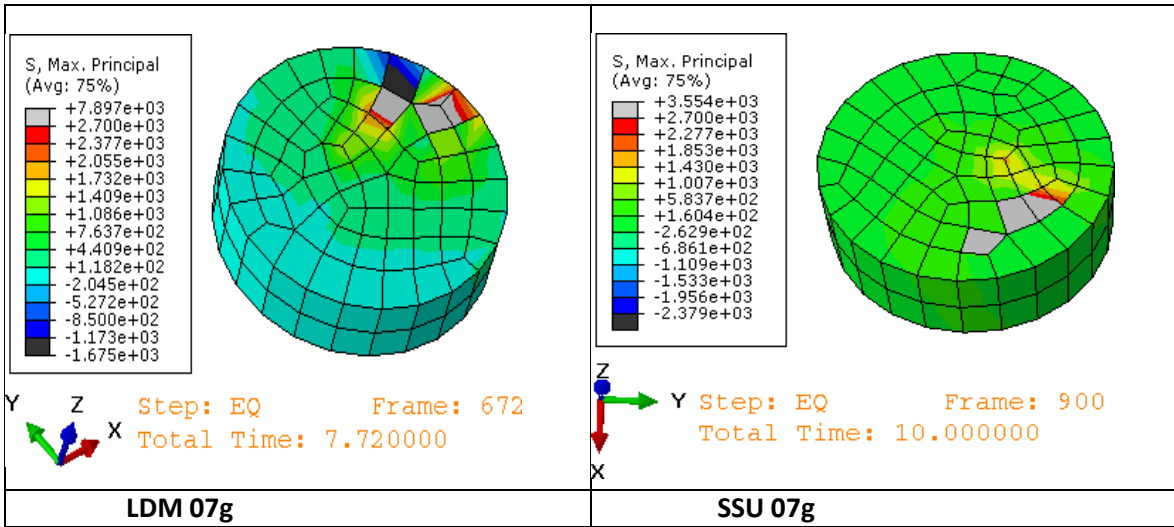


SSU 07g

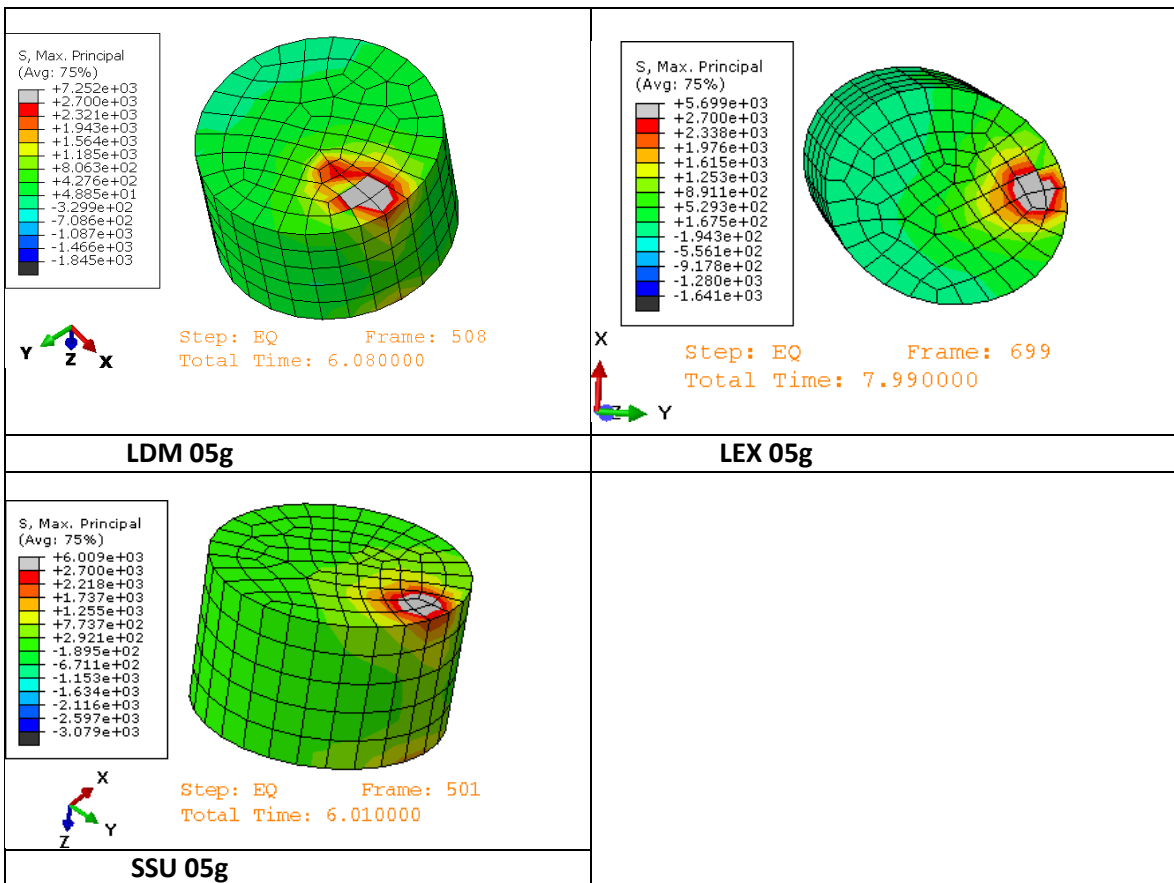
ΜΕΛΟΣ K2_T11.N

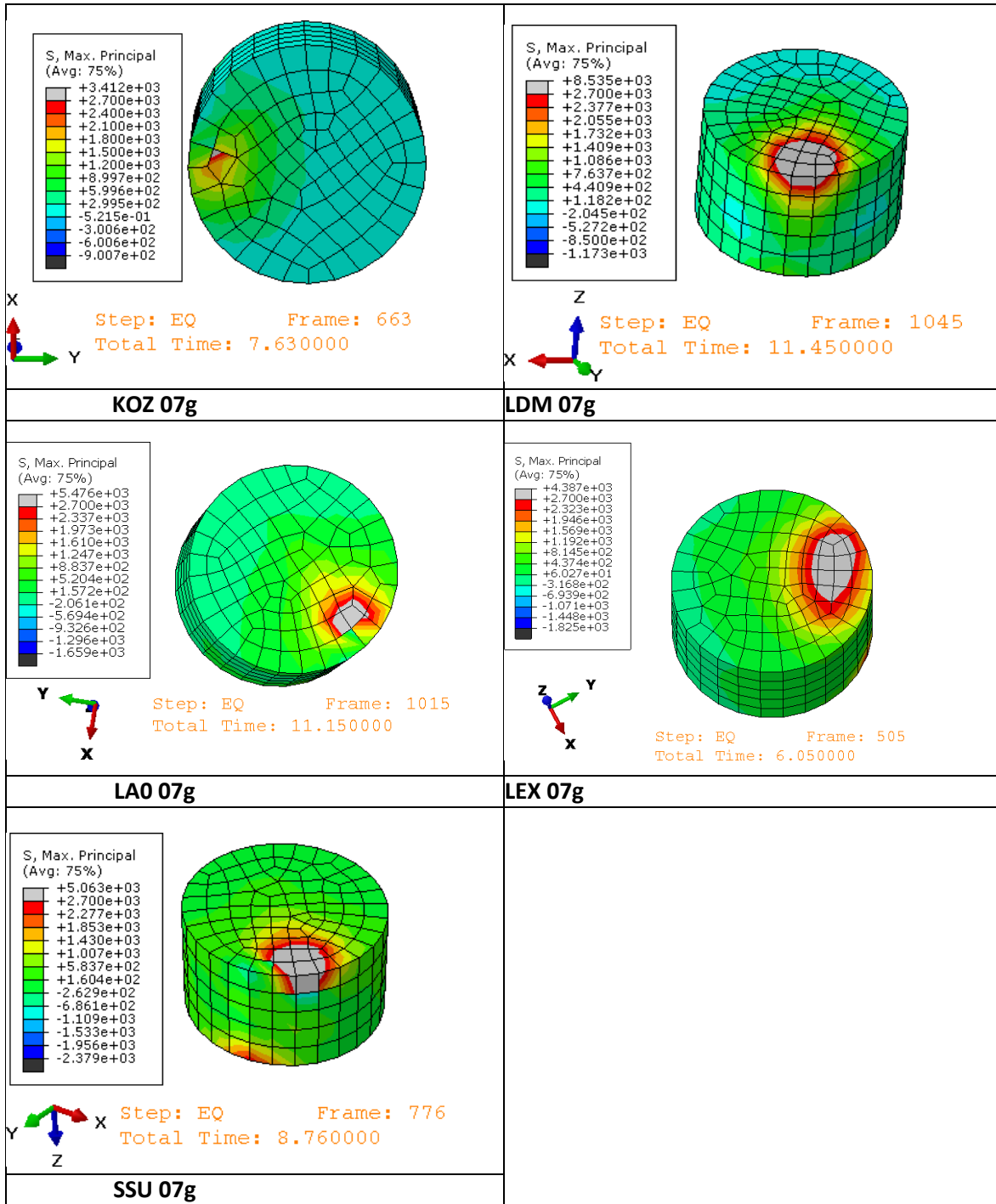


LEX 05g

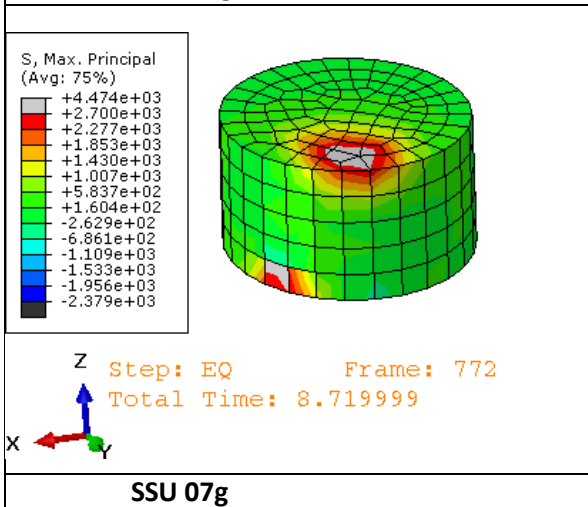
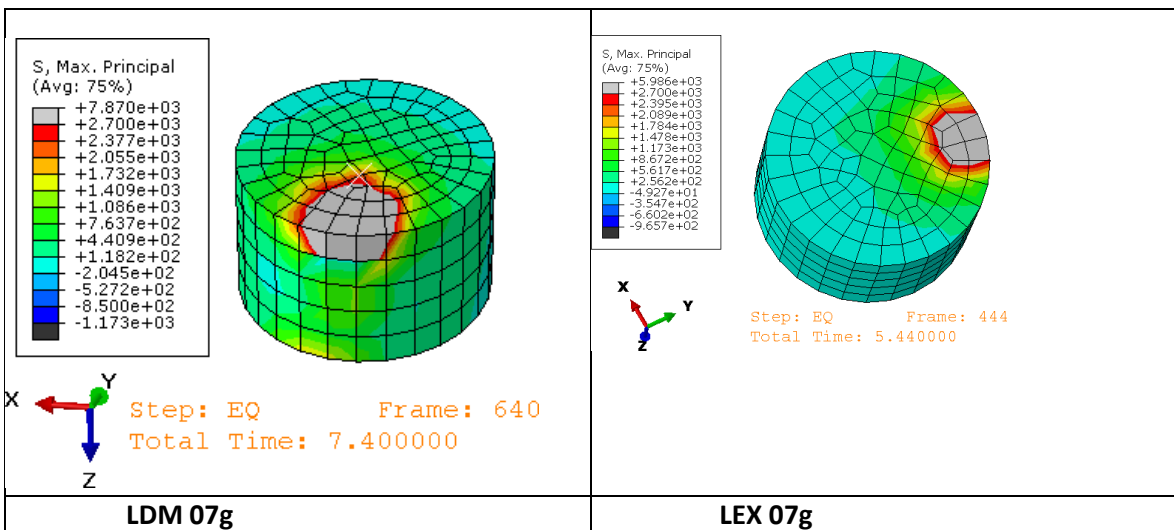
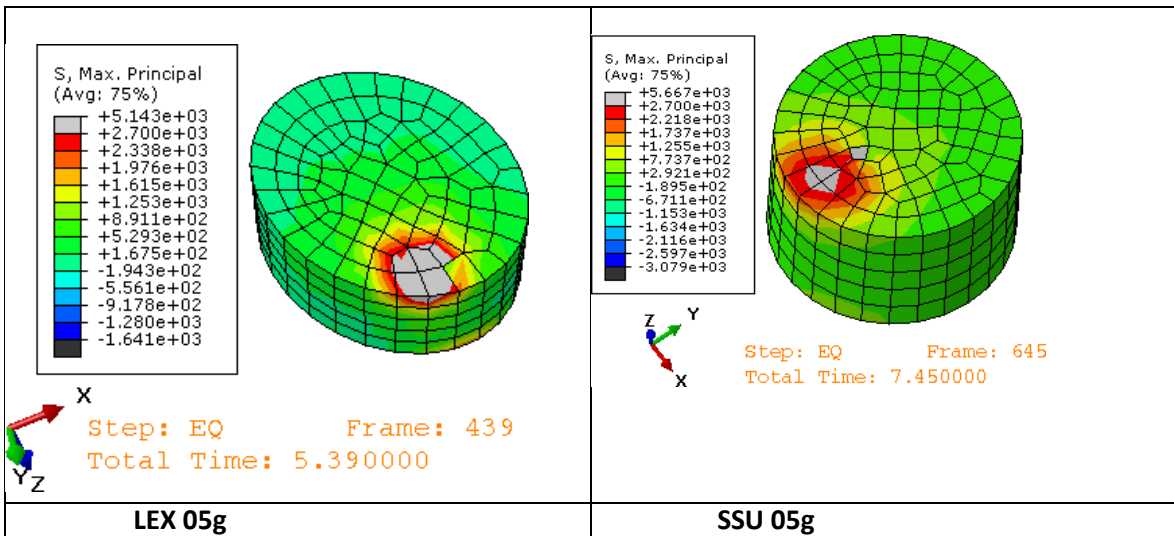


ΜΕΛΟΣ K3_T1.N

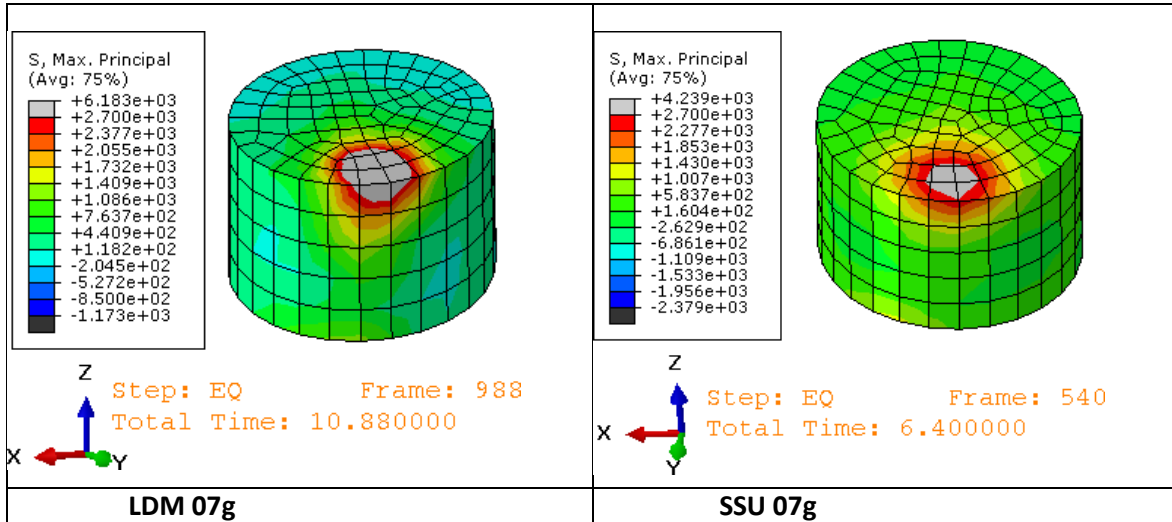




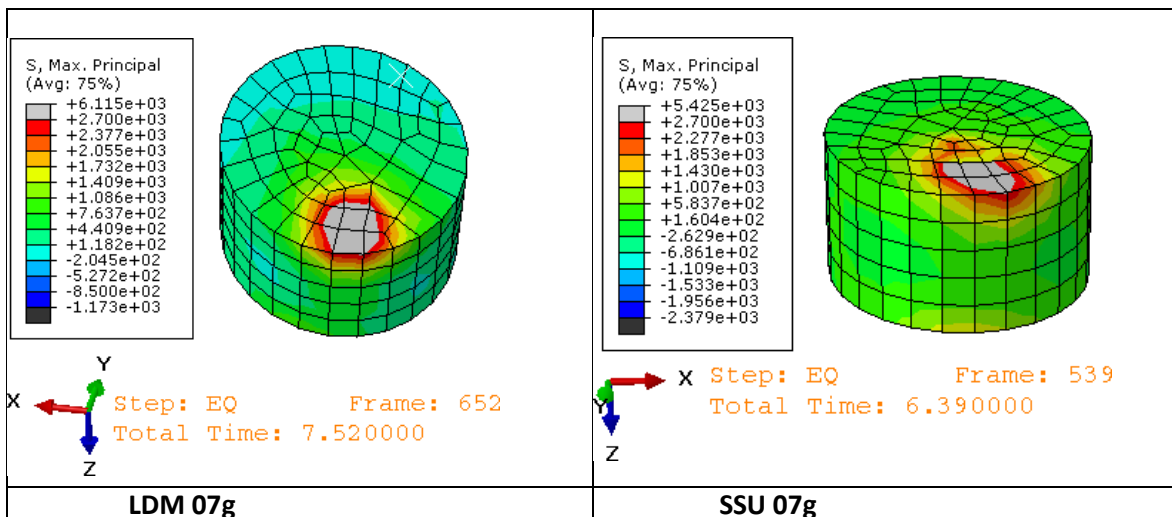
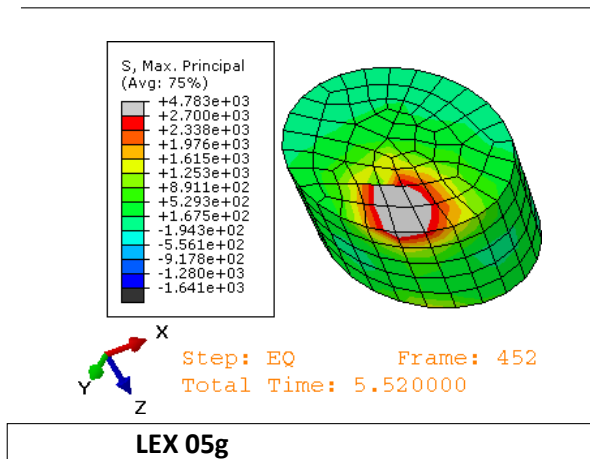
ΜΕΛΟΣ K3_T2.N



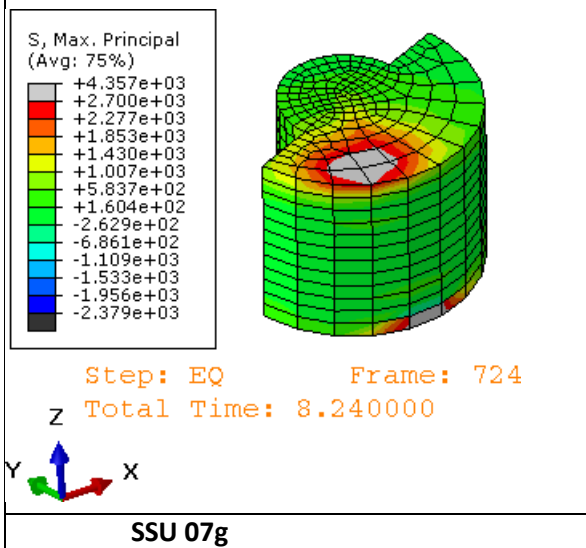
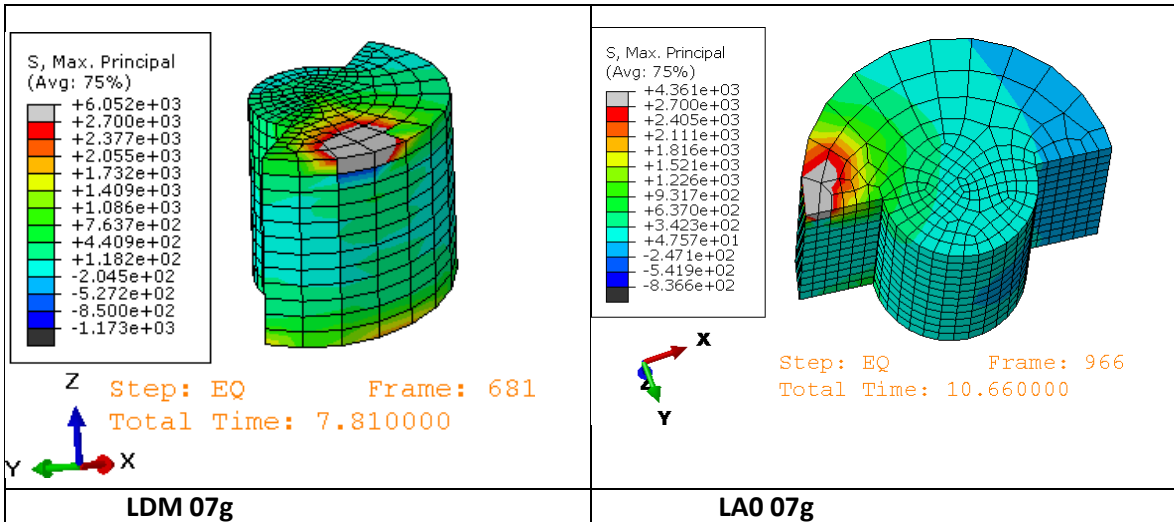
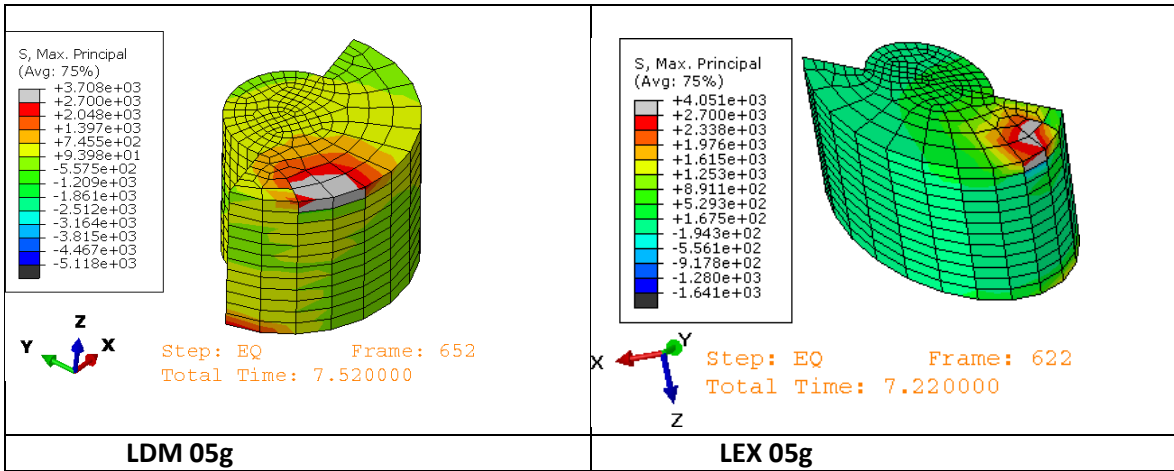
ΜΕΛΟΣ K3_T3.N



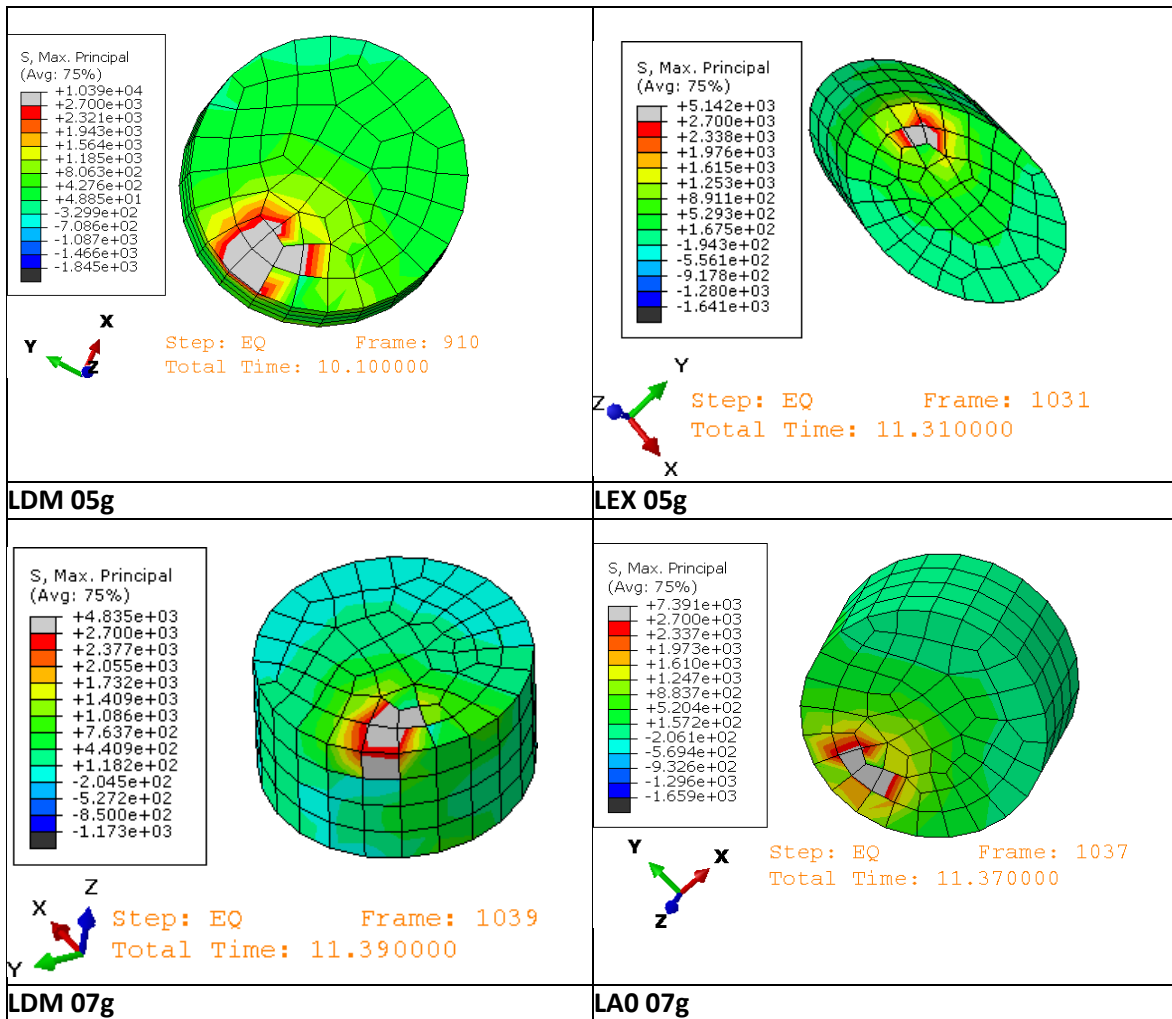
ΜΕΛΟΣ K3_T4.N



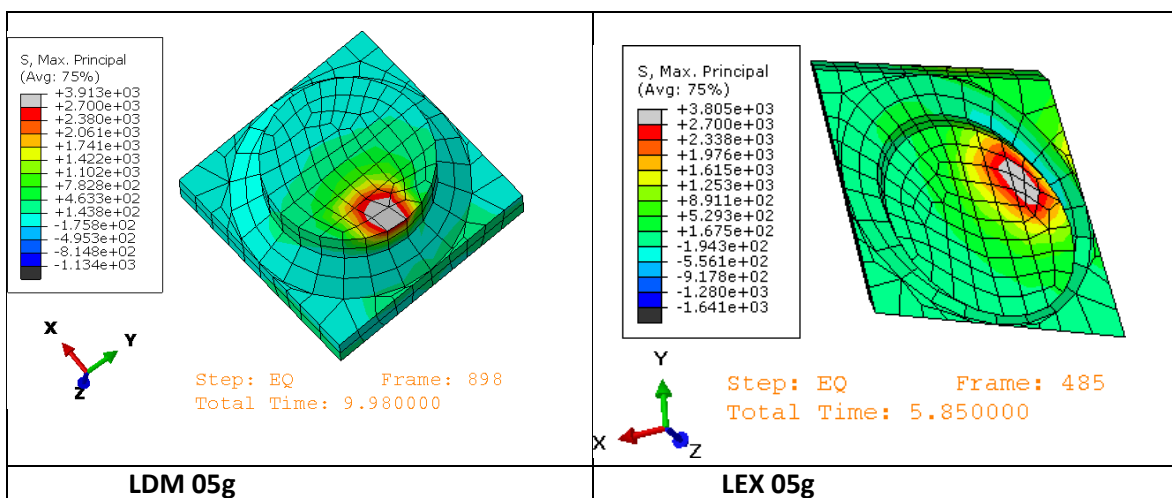
ΜΕΛΟΣ Κ3_T8.N

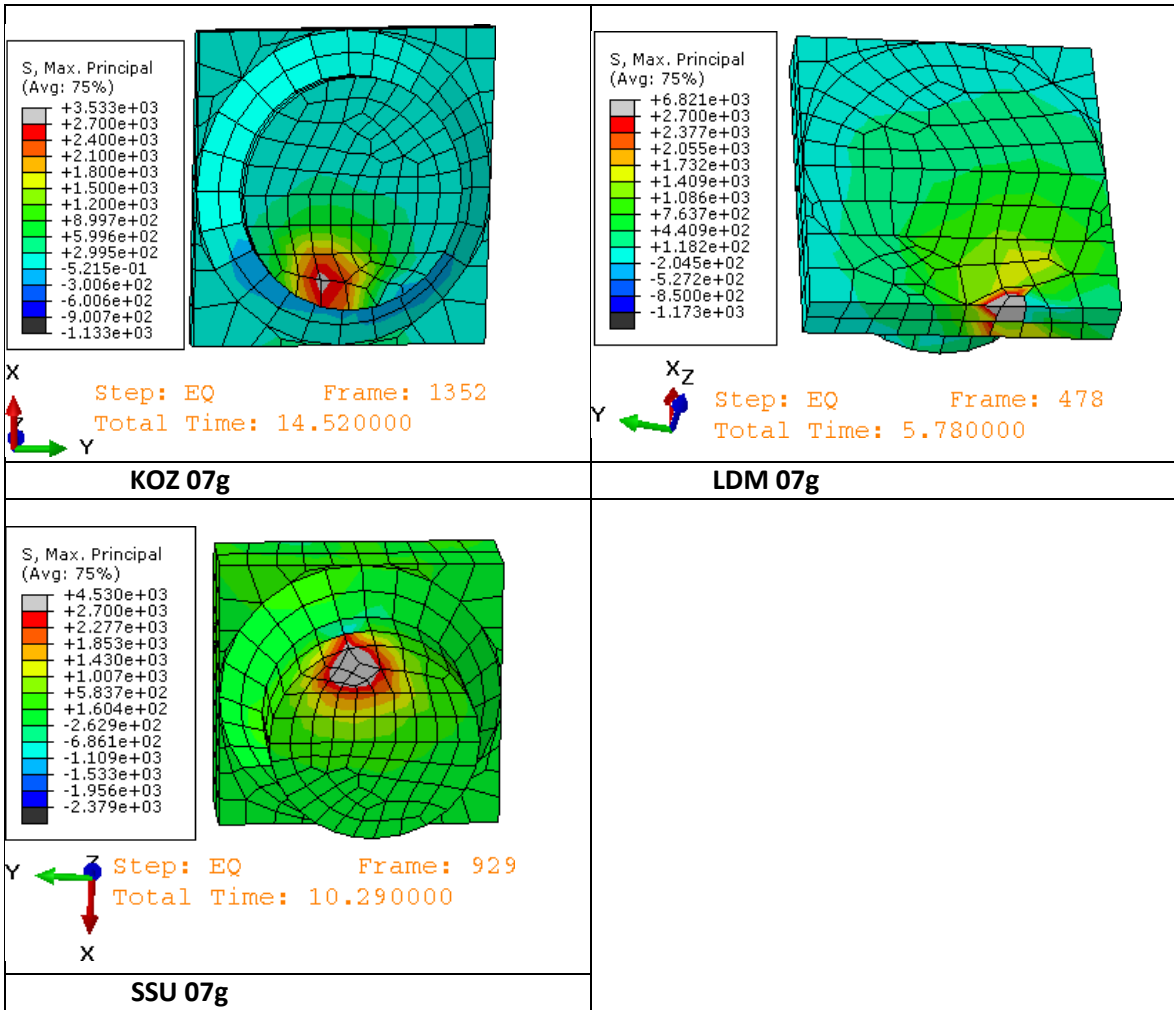


ΜΕΛΟΣ K3_T11.N

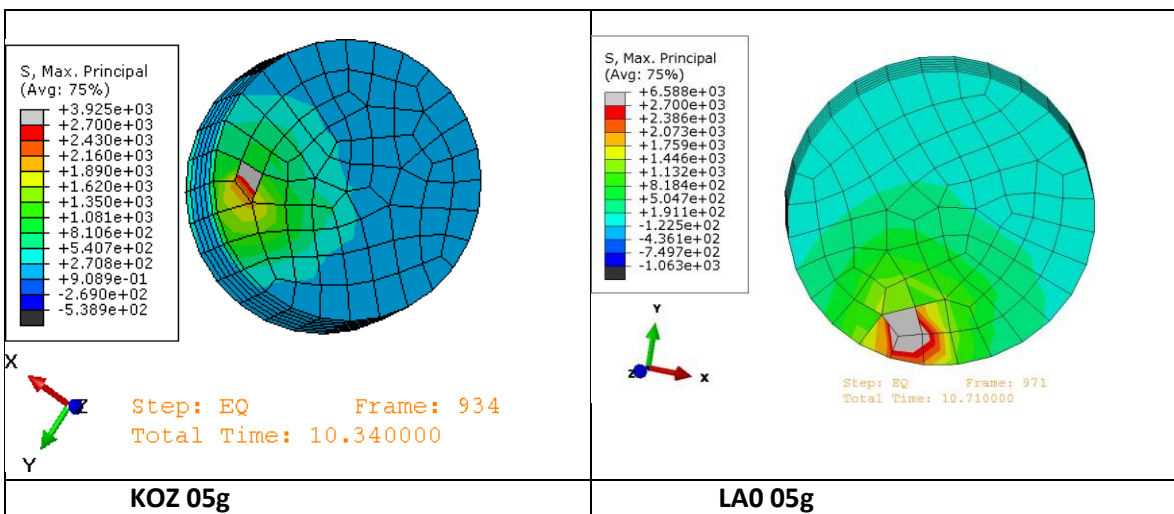


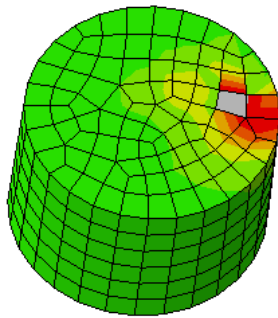
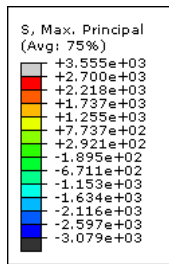
ΜΕΛΟΣ K3_TOP.N





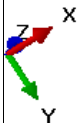
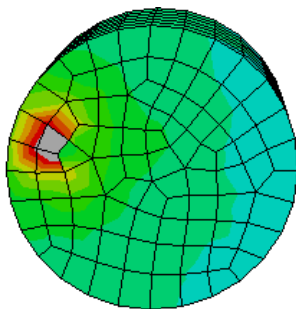
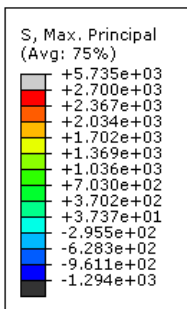
ΜΕΛΟΣ K4_T1.N





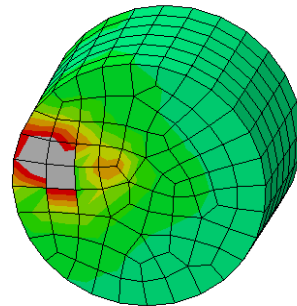
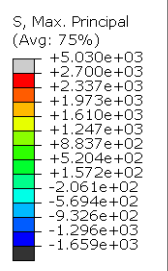
Step: EQ Frame: 877
Total Time: 9.770000

SSU 05g



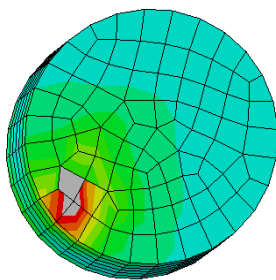
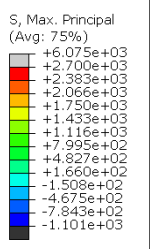
Step: EQ Frame: 1086
Total Time: 11.860000

KOZ 07g



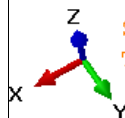
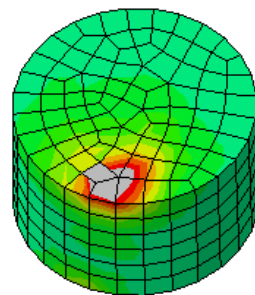
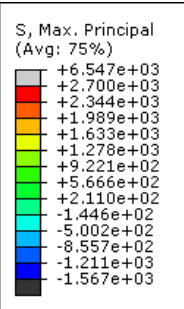
Step: EQ Frame: 919
Total Time: 10.190000

LAO 07g



Step: EQ Frame: 608
Total Time: 7.080000

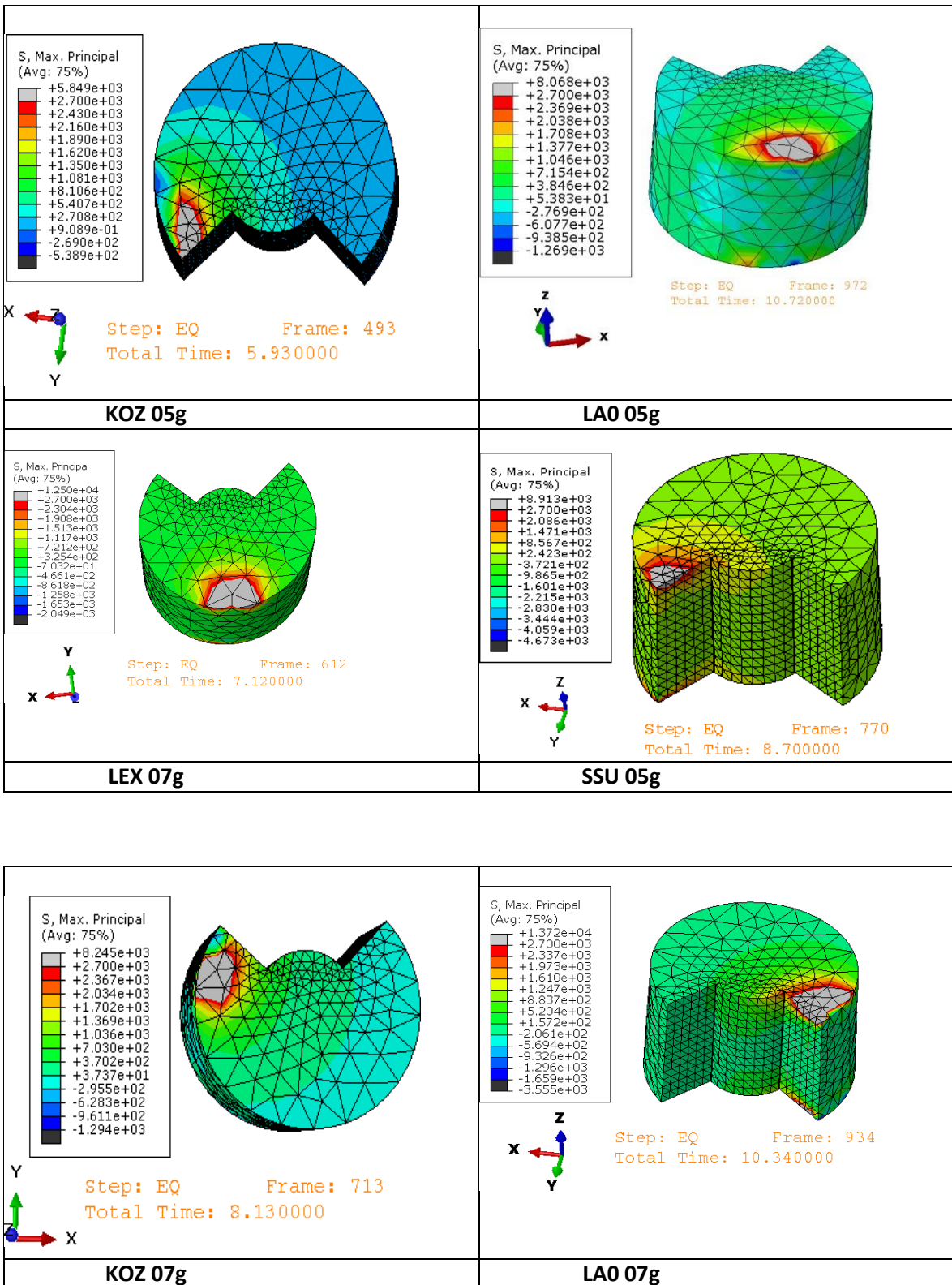
LEX 07g

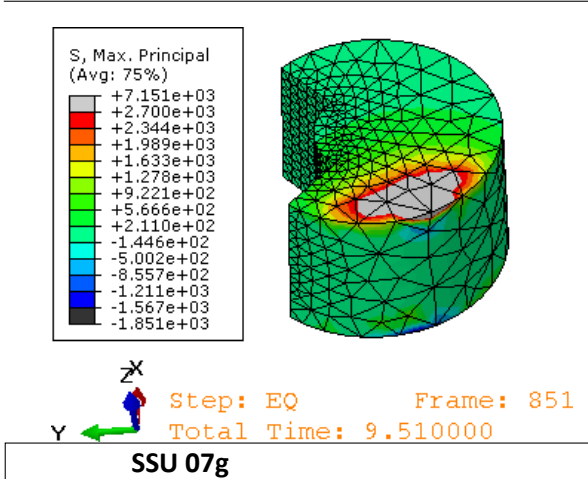


Step: EQ Frame: 772
Total Time: 8.719999

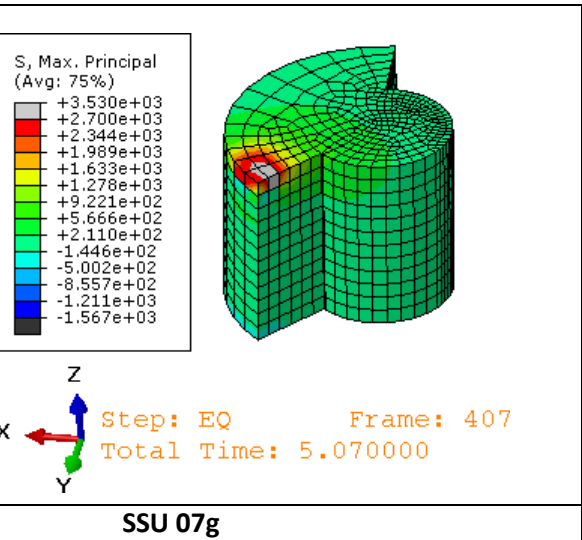
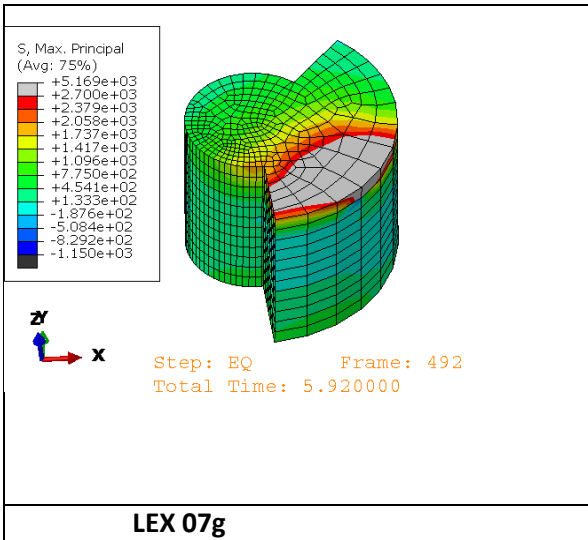
SSU 07g

ΜΕΛΟΣ K4_T2.N

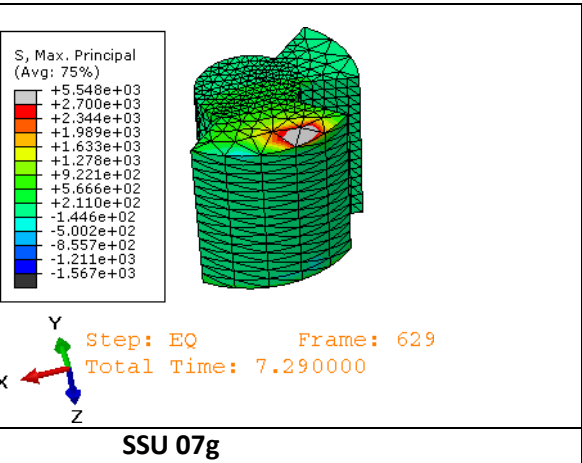
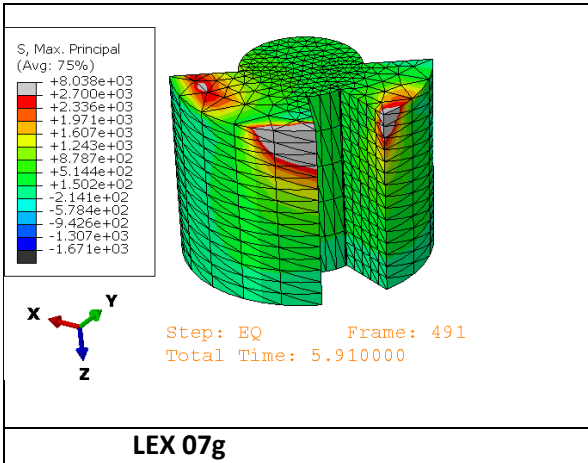




ΜΕΛΟΣ Κ4_T4.N

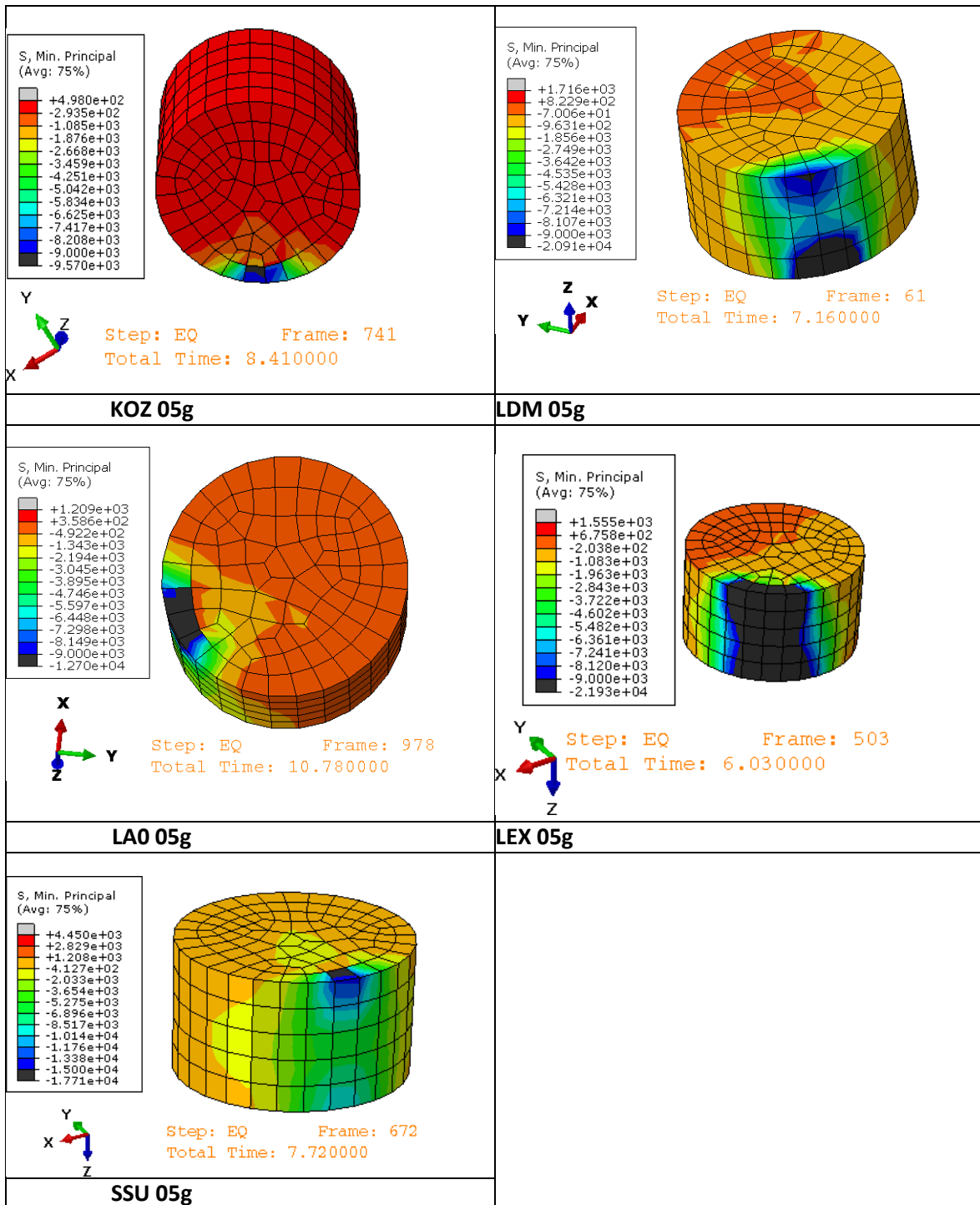


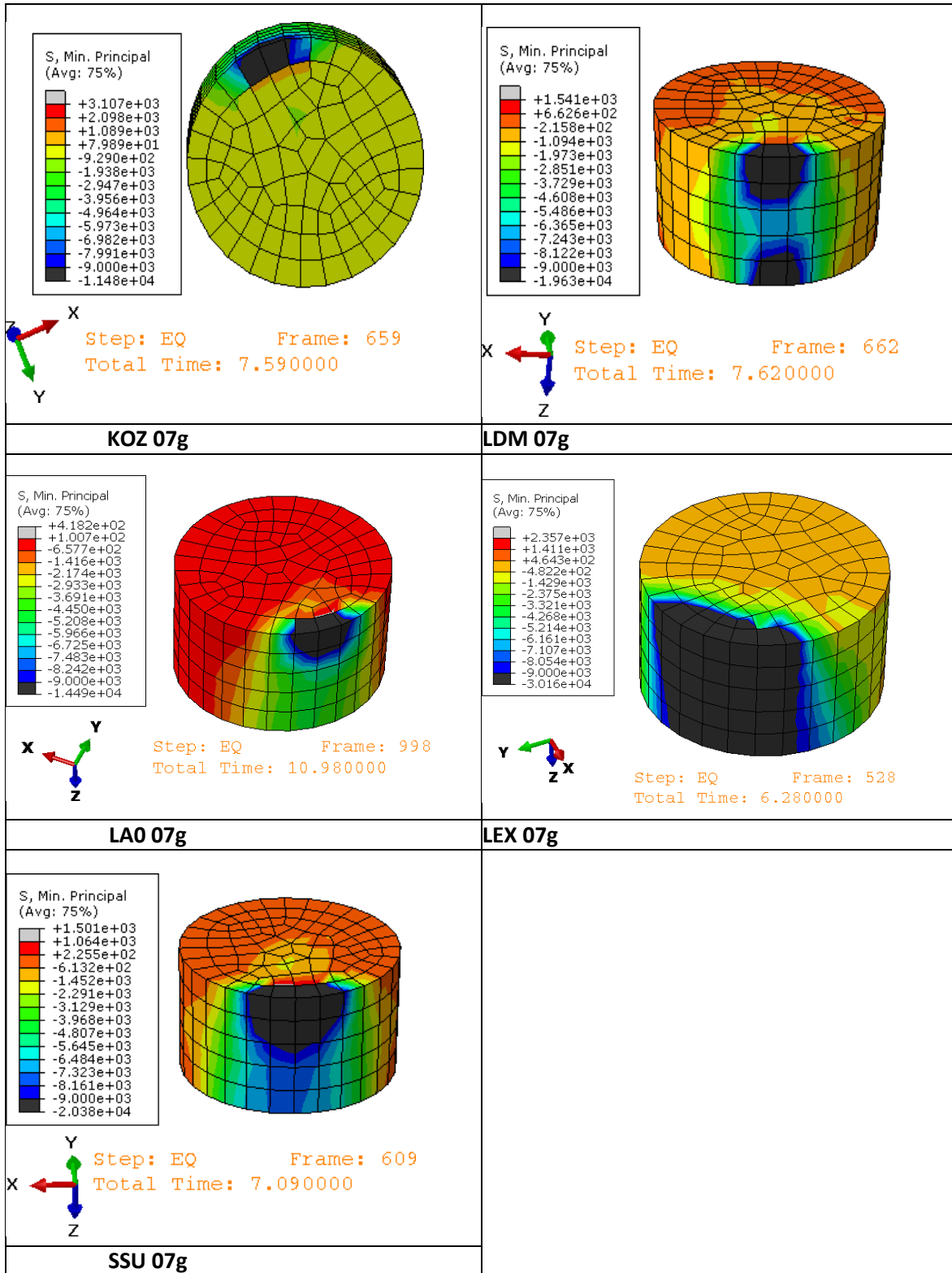
ΜΕΛΟΣ Κ4_T5.N



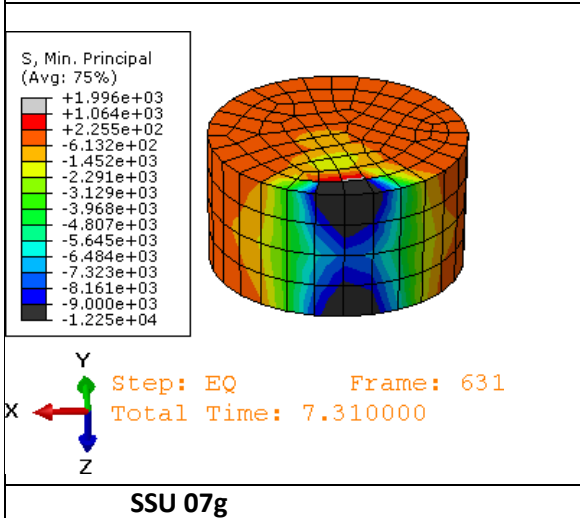
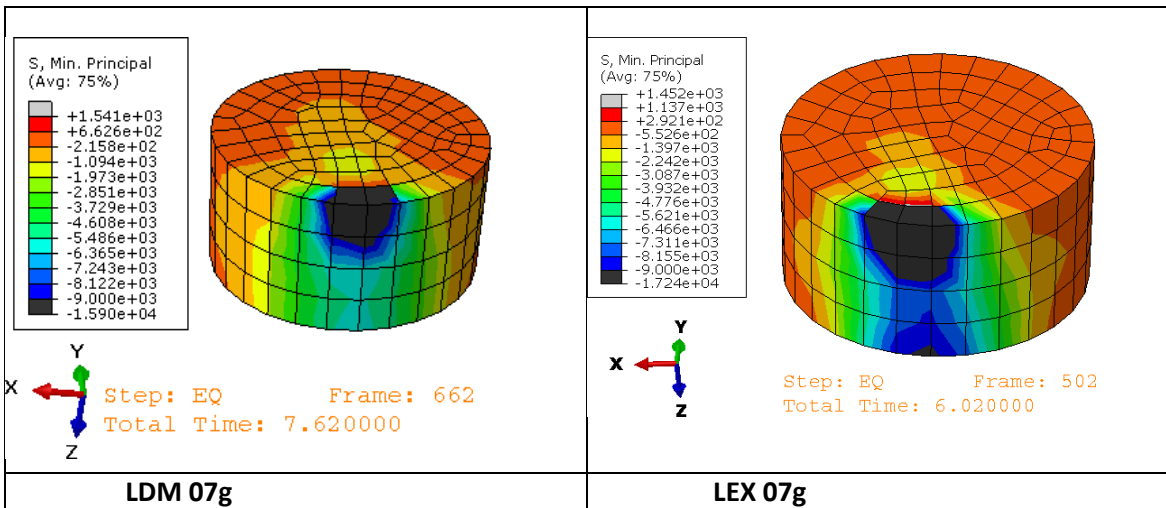
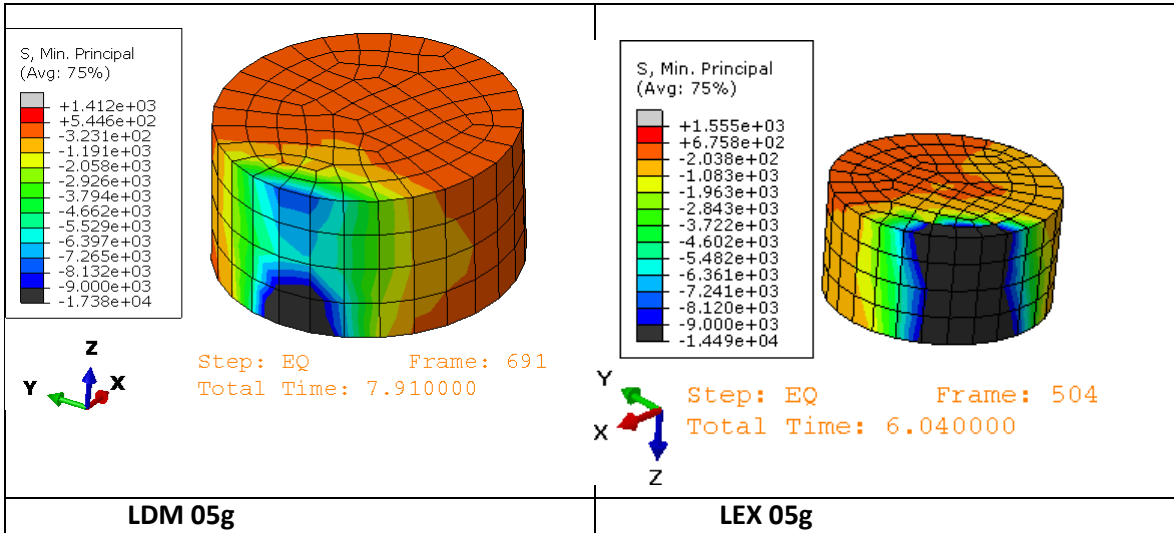
Π.2.2 Θλίψη

ΜΕΛΟΣ Κ1_T1.N

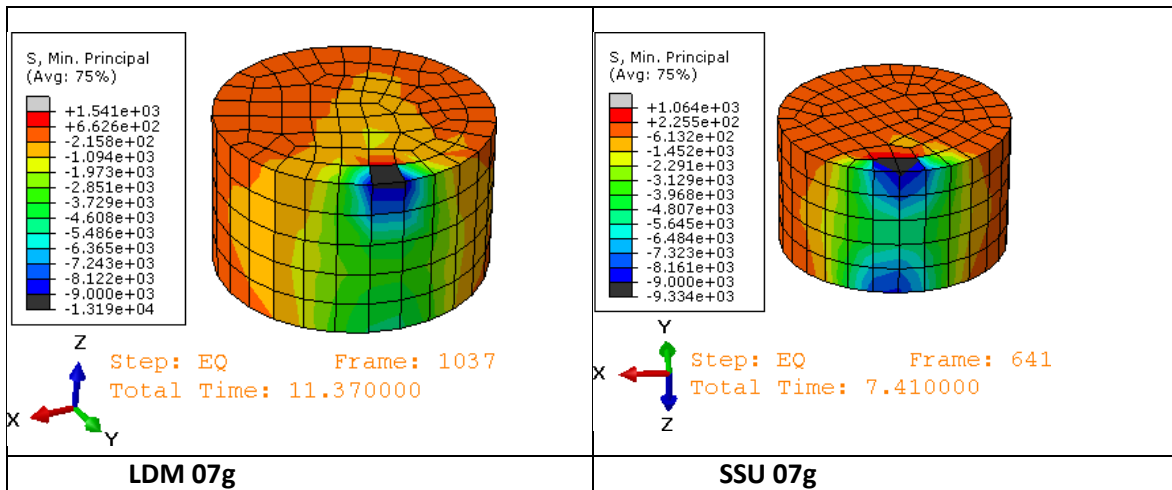
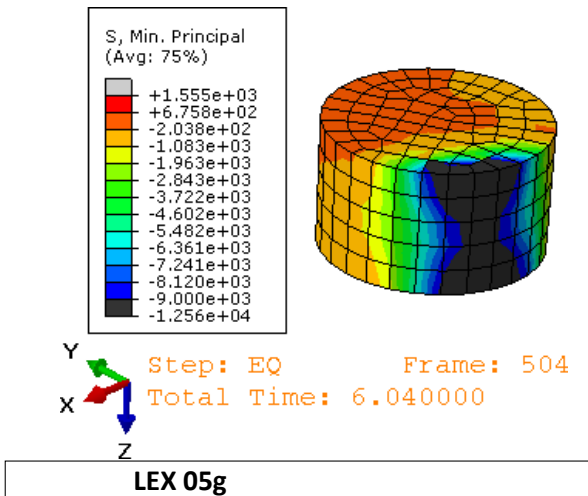




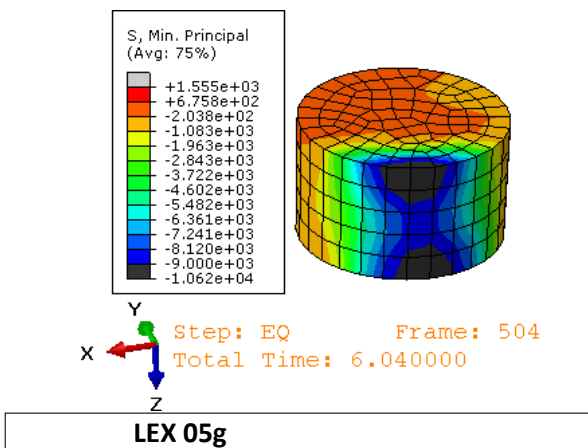
ΜΕΛΟΣ K1_T2.N

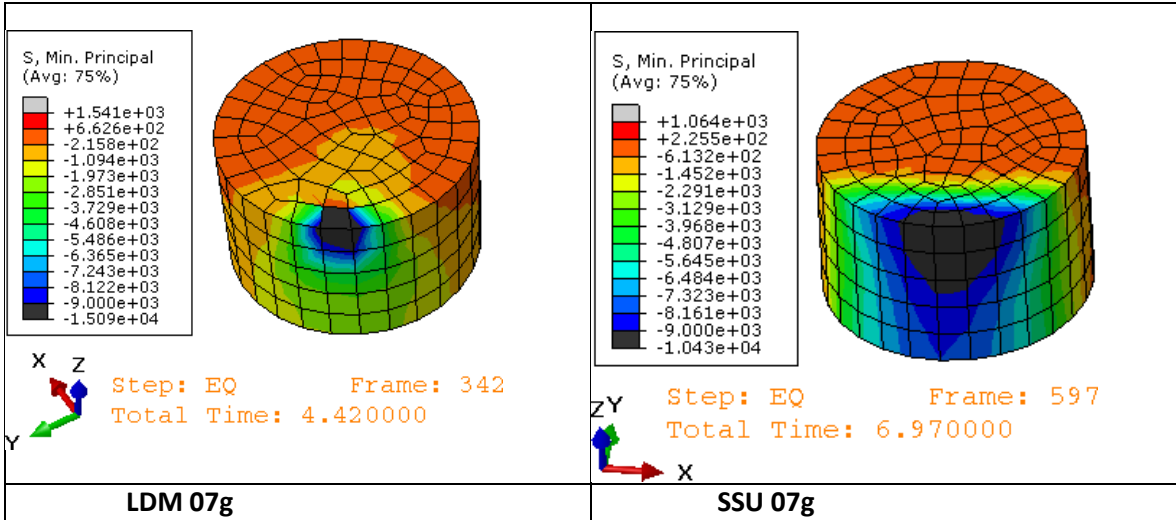


ΜΕΛΟΣ K1_T3.N

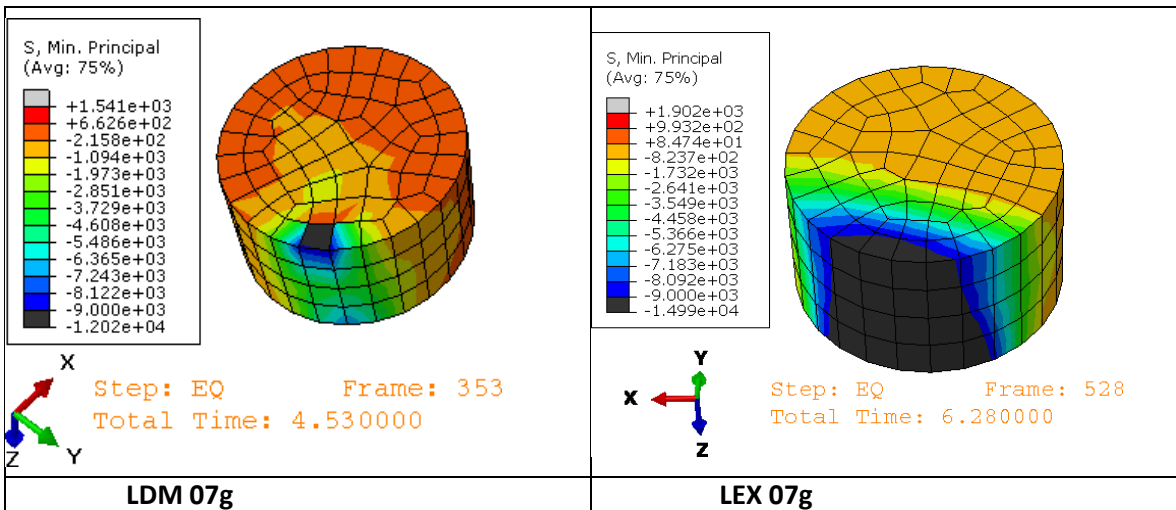
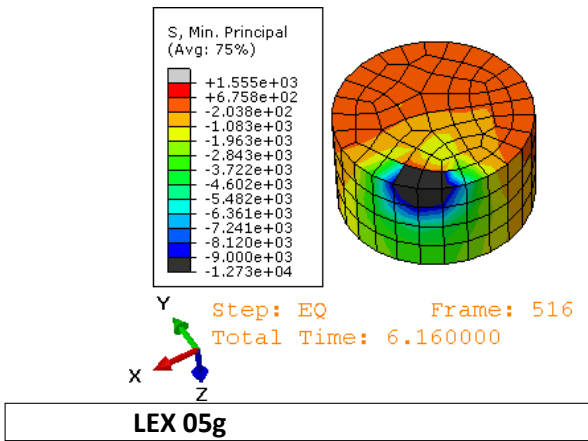


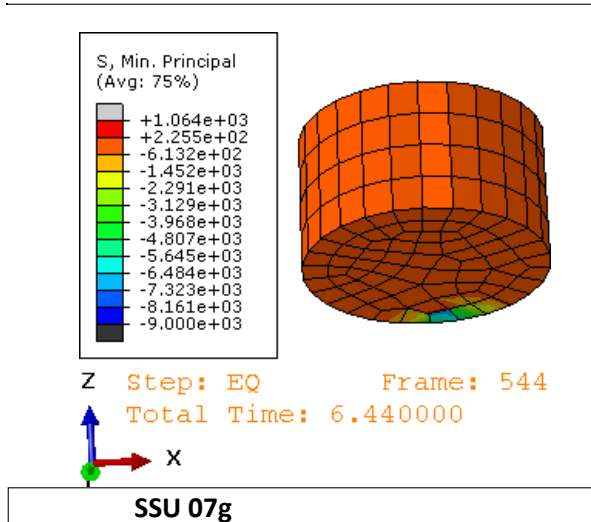
ΜΕΛΟΣ K1_T4.N



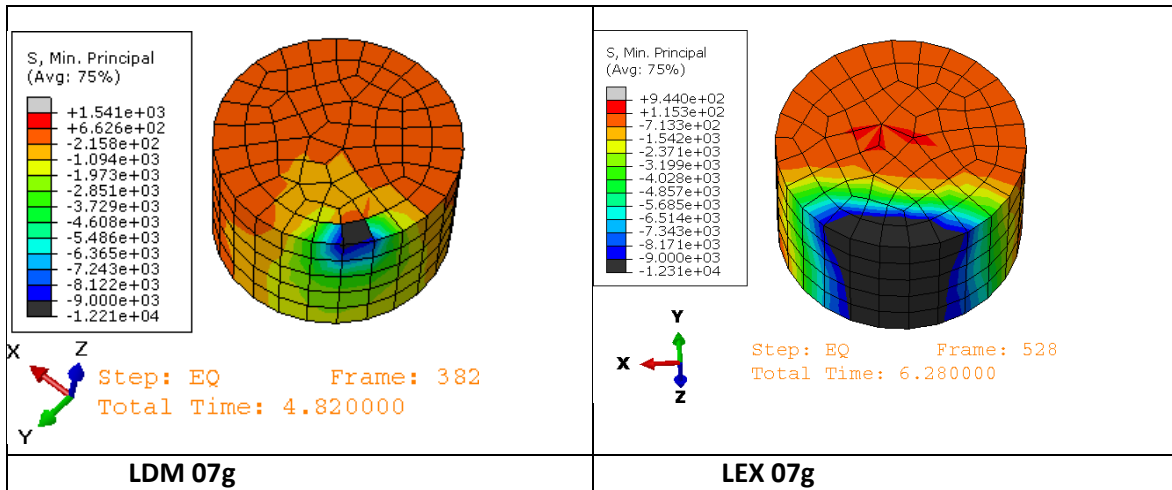


ΜΕΛΟΣ K1_T6.N

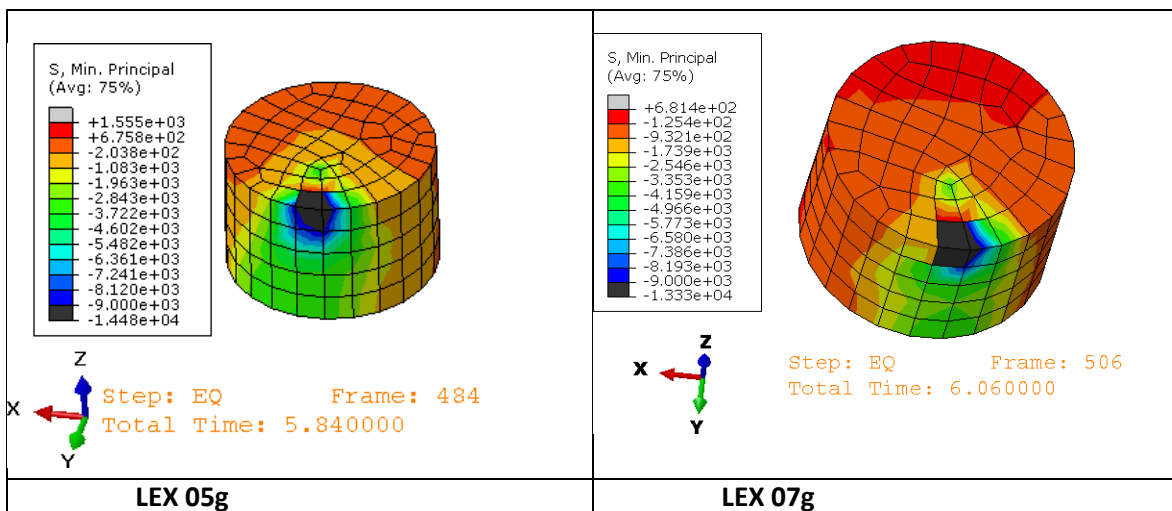




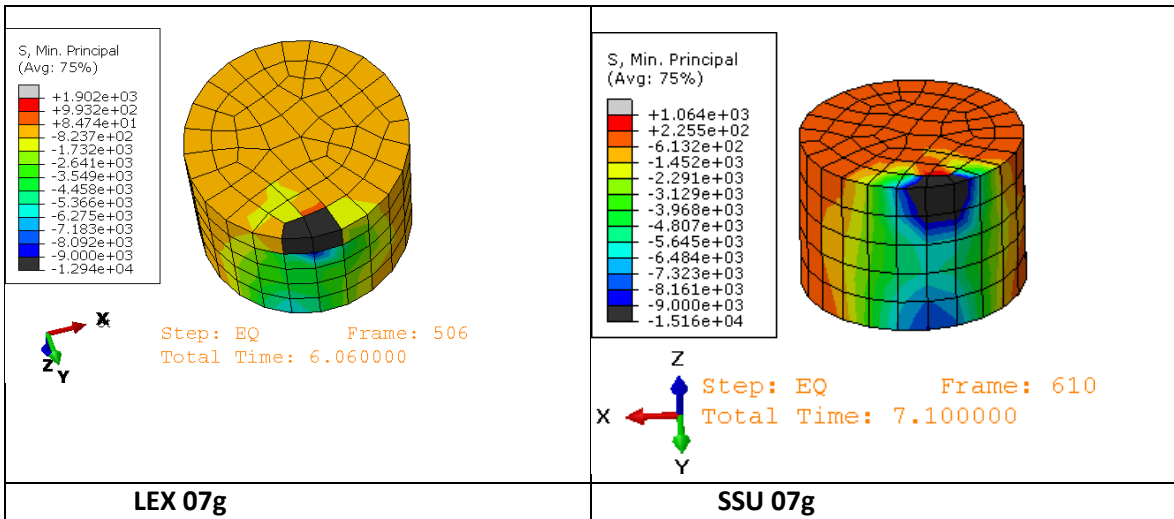
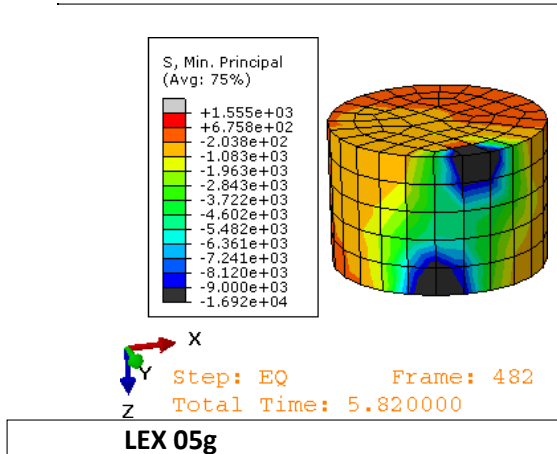
ΜΕΛΟΣ K1_T7.N



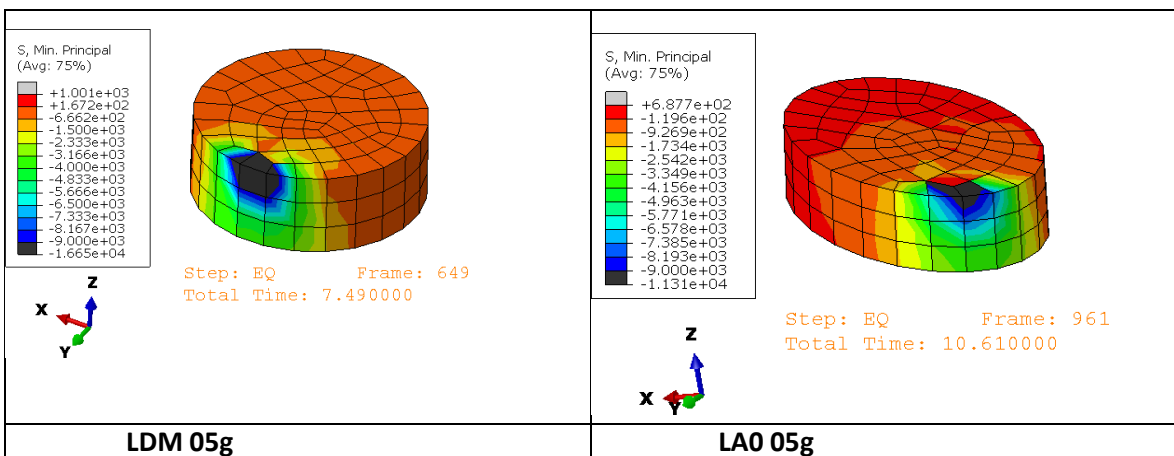
ΜΕΛΟΣ K1_T8.N

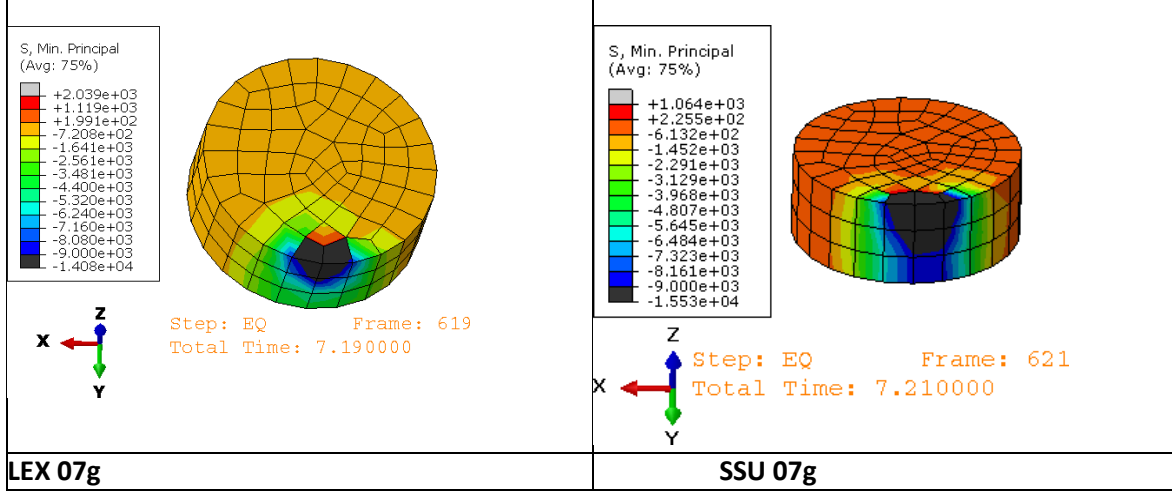
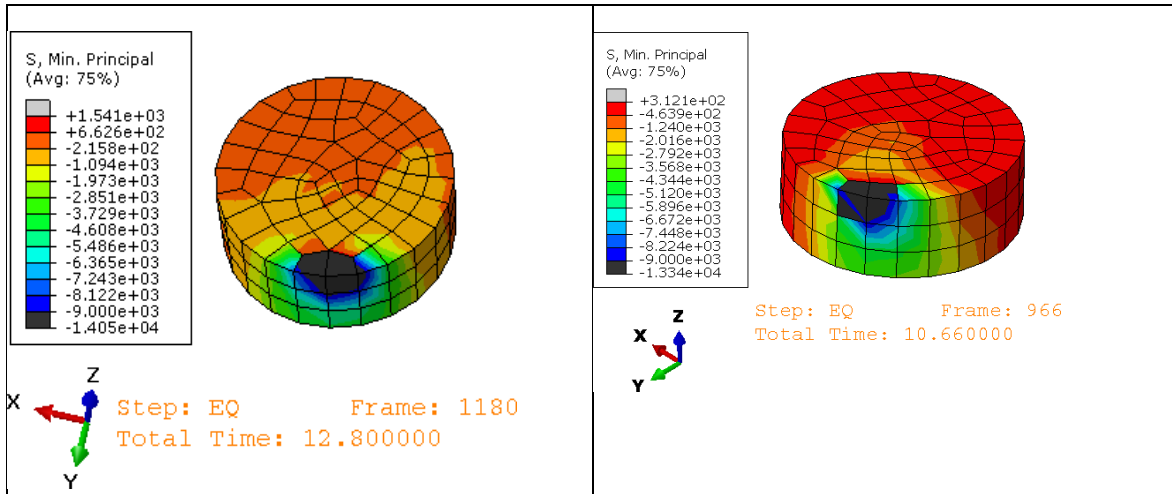
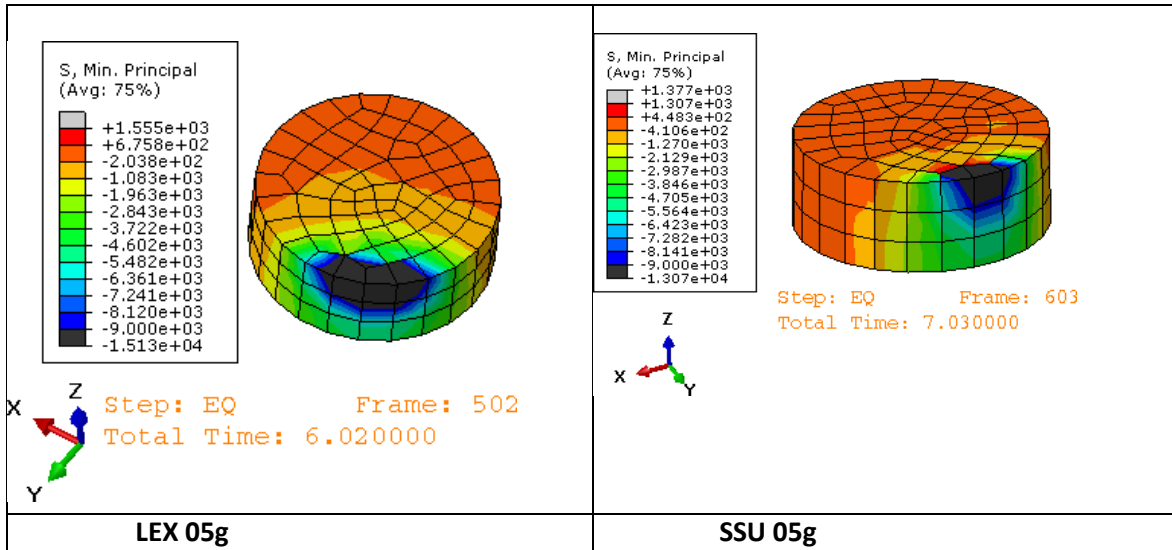


ΜΕΛΟΣ K1_T9.N

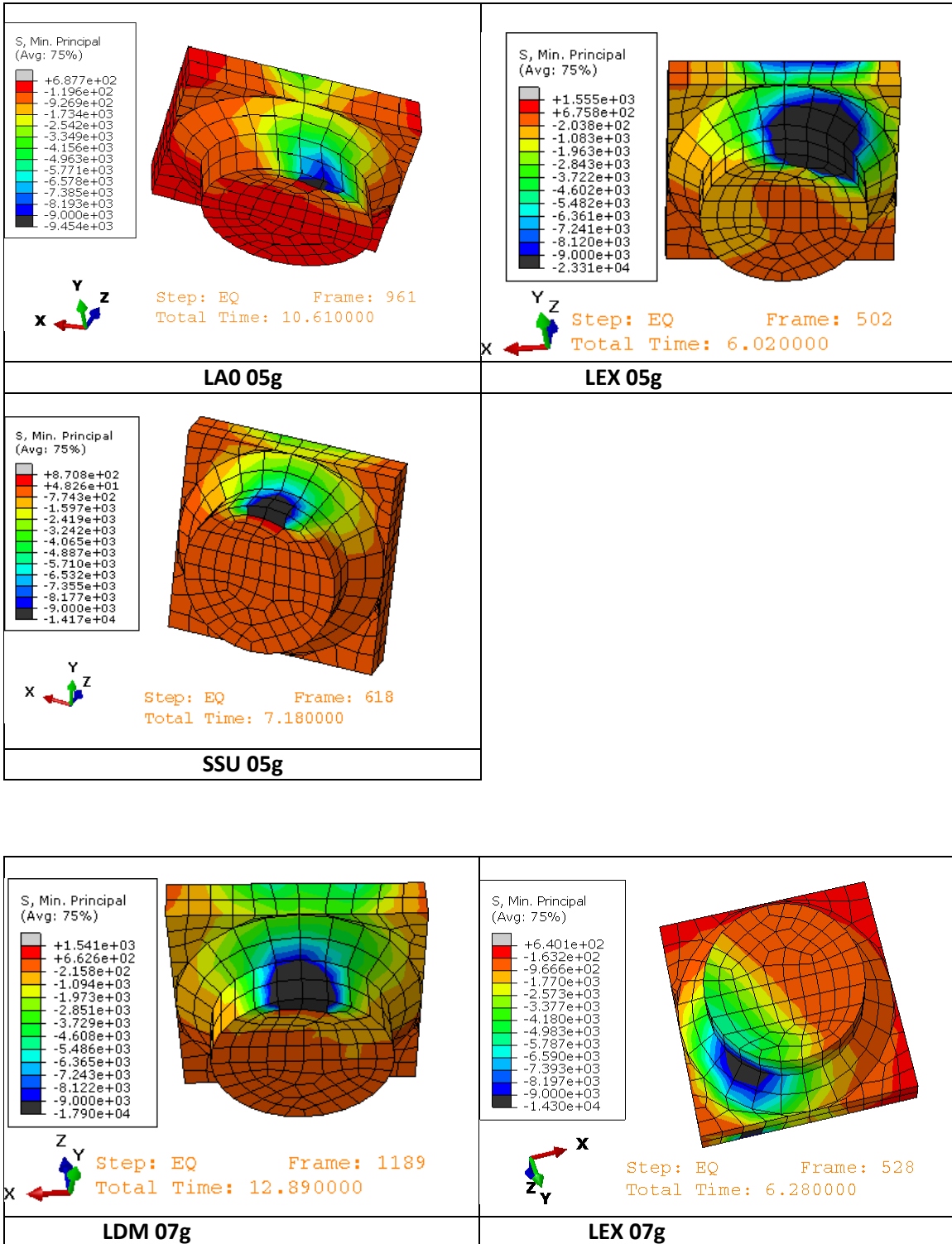


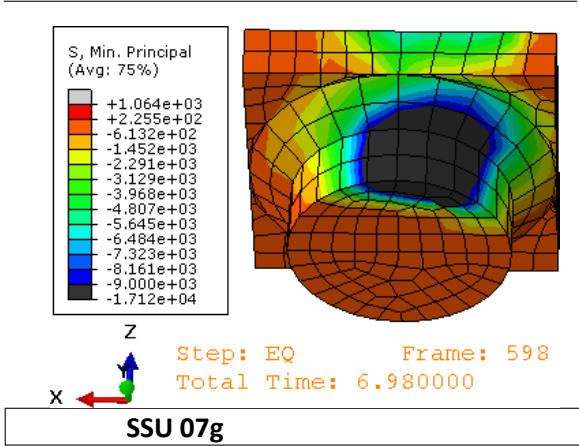
ΜΕΛΟΣ K1_T10.N



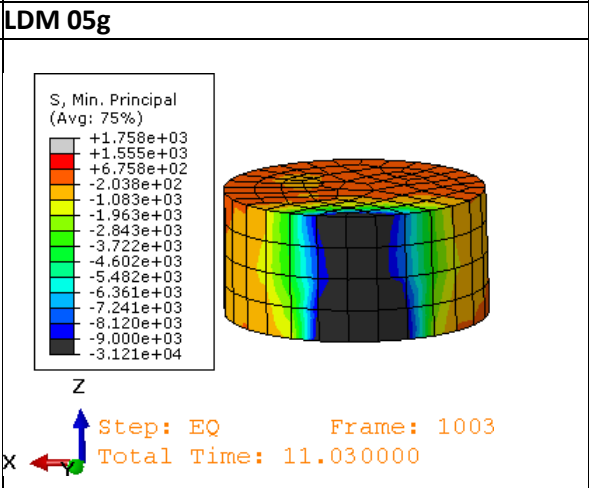
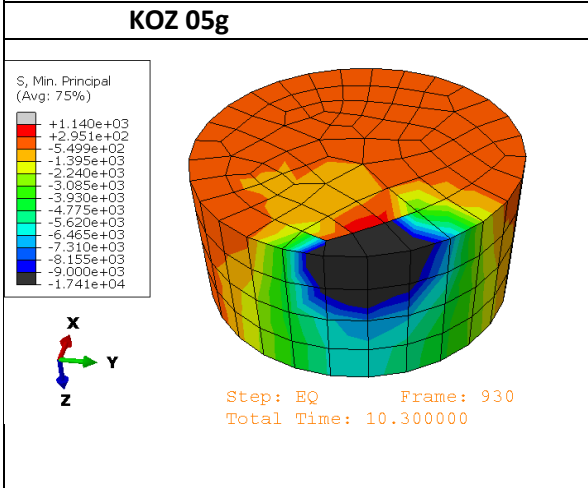
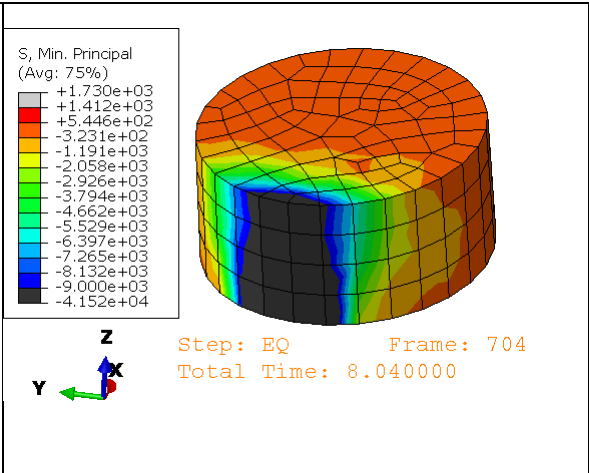
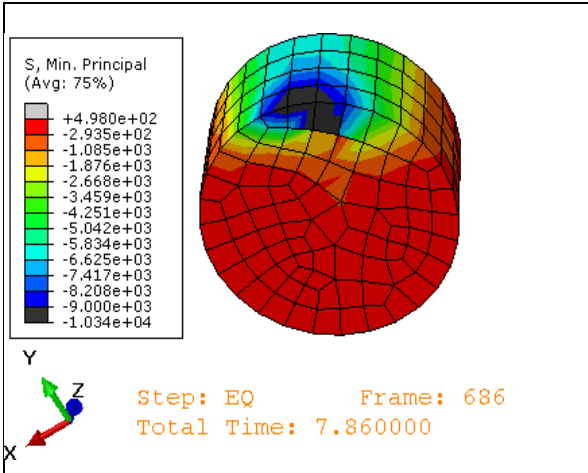


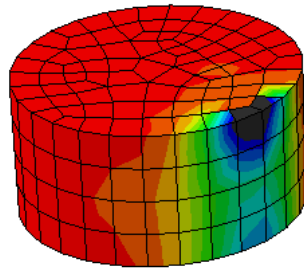
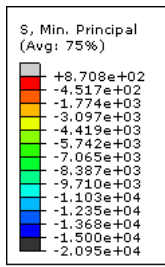
ΜΕΛΟΣ K1_TOP.N





ΜΕΛΟΣ K2_T1.N

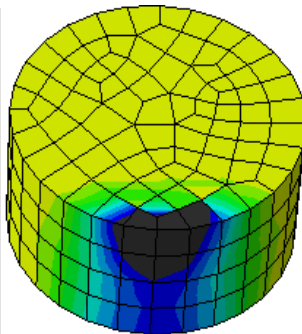
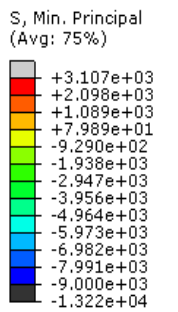




Step: EQ Frame: 536
Total Time: 6.360000

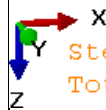
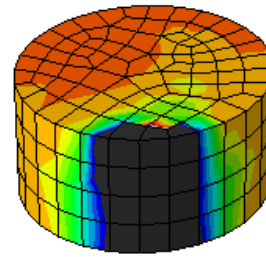
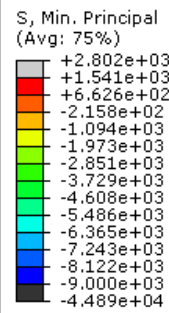


SSU 05g



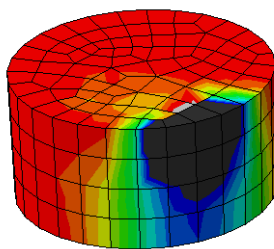
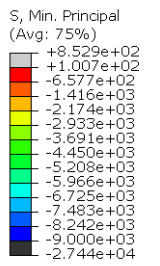
Step: EQ Frame: 734
Total Time: 8.340000

KOZ 07g



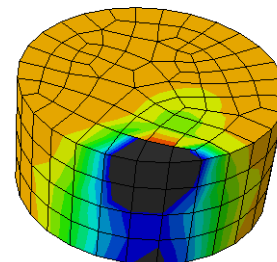
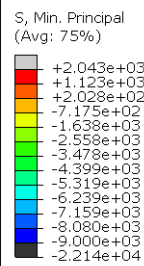
Step: EQ Frame: 861
Total Time: 9.610000

LDM 07g



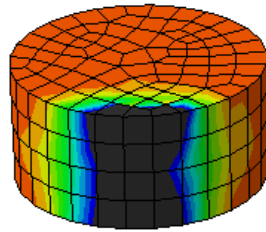
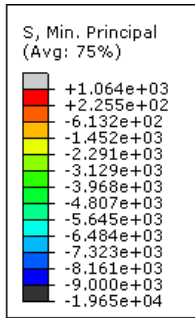
Step: EQ Frame: 938
Total Time: 10.380000

LAO 07g



Step: EQ Frame: 424
Total Time: 5.240000

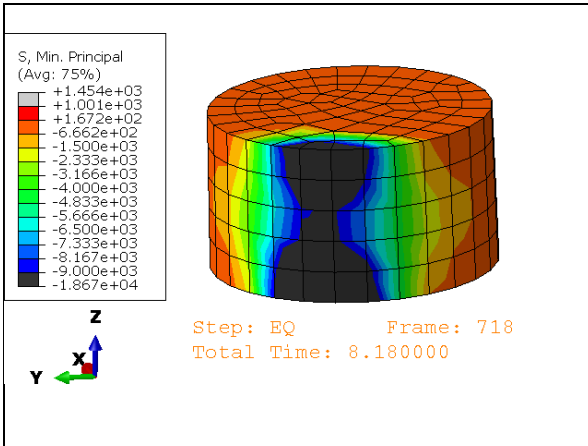
LEX 07g



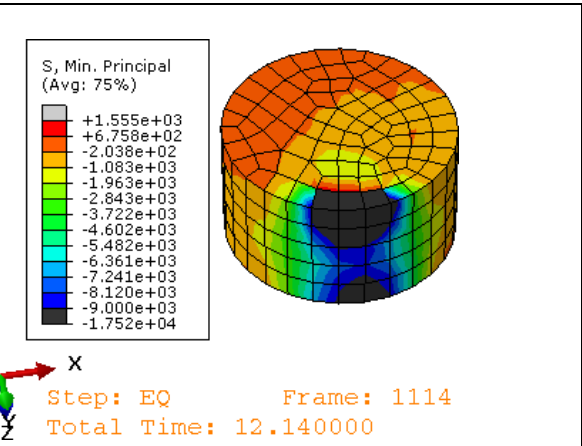
X Step: EQ Frame: 836
Z Total Time: 9.360000

SSU 07g

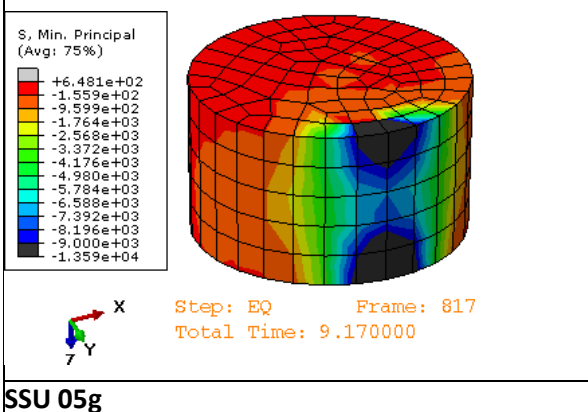
ΜΕΛΟΣ K2_T2.N



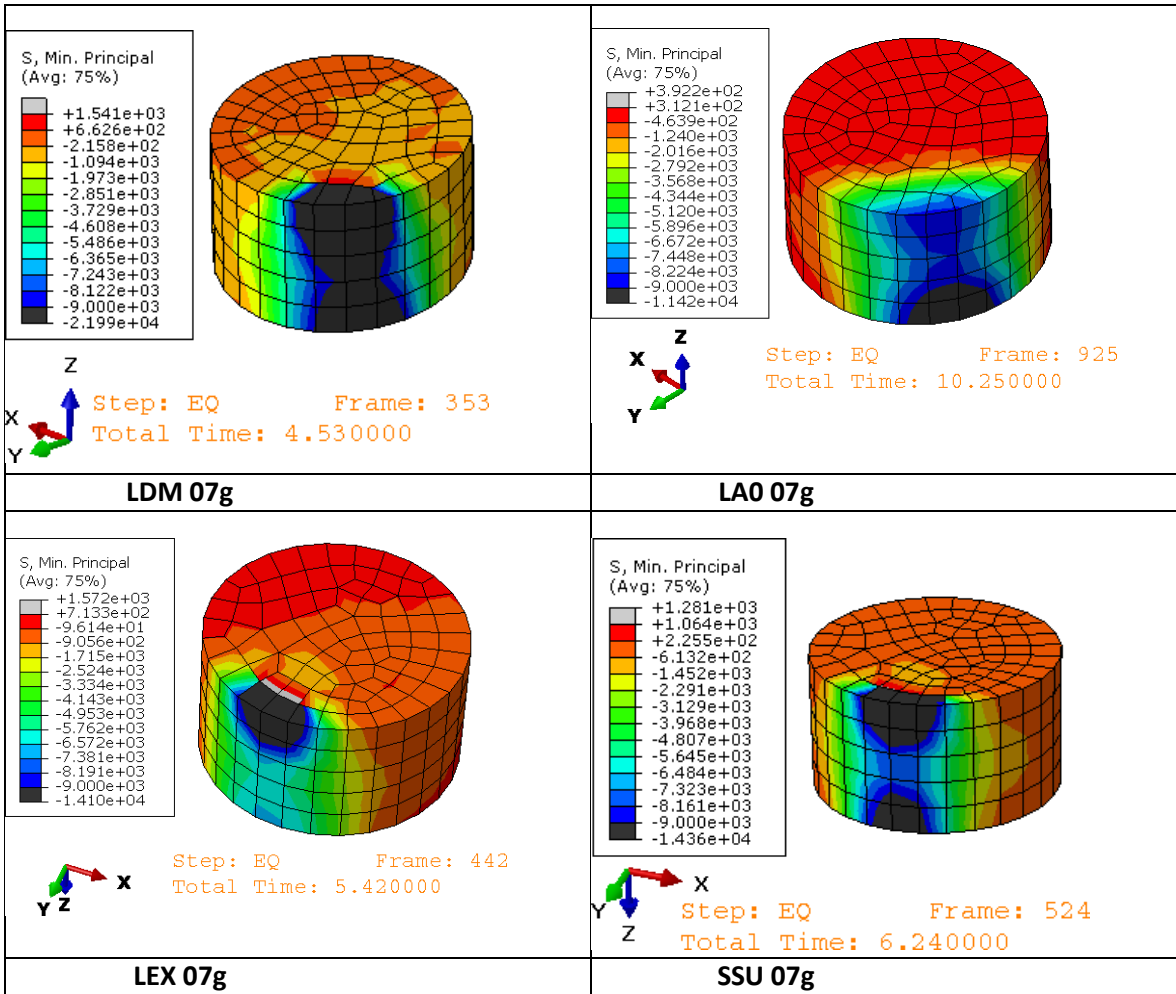
LDM 05g



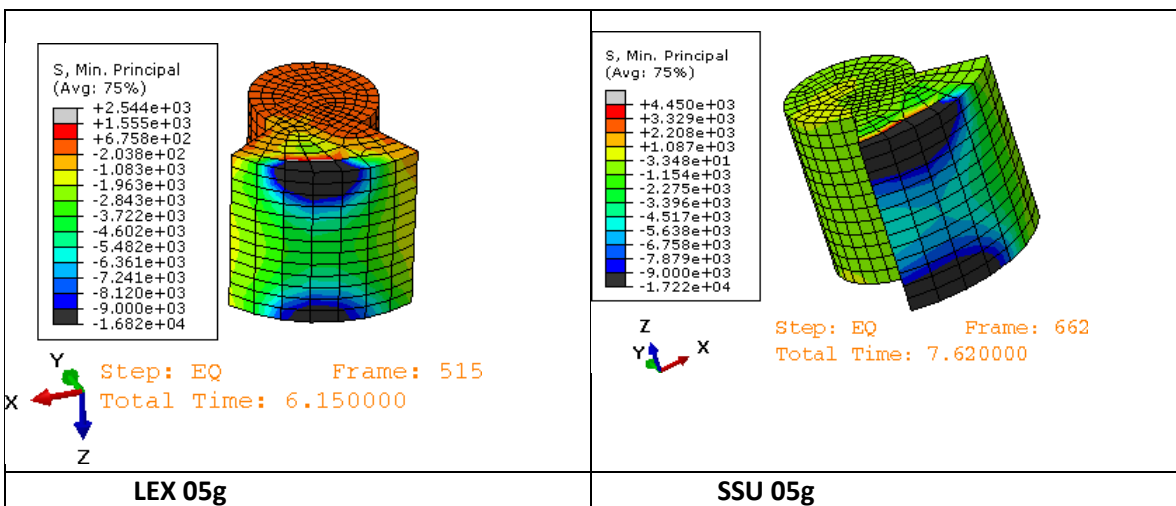
LEX 05g

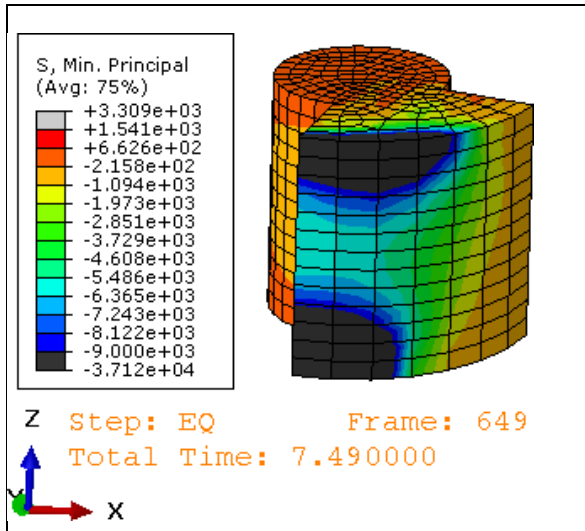


SSU 05g

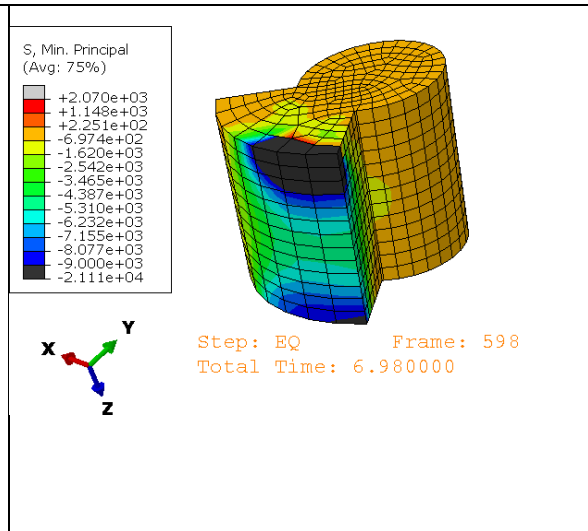


ΜΕΛΟΣ Κ2_T3.N

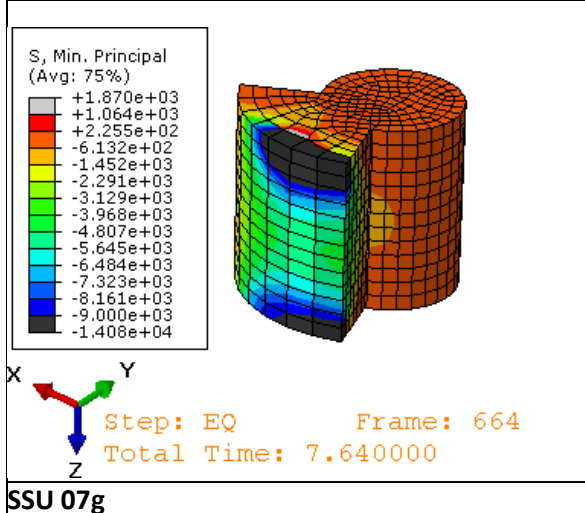




LDM 07g

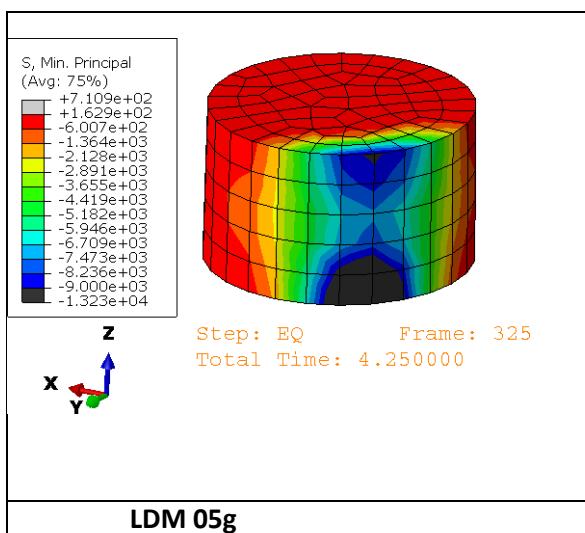


LEX 07g

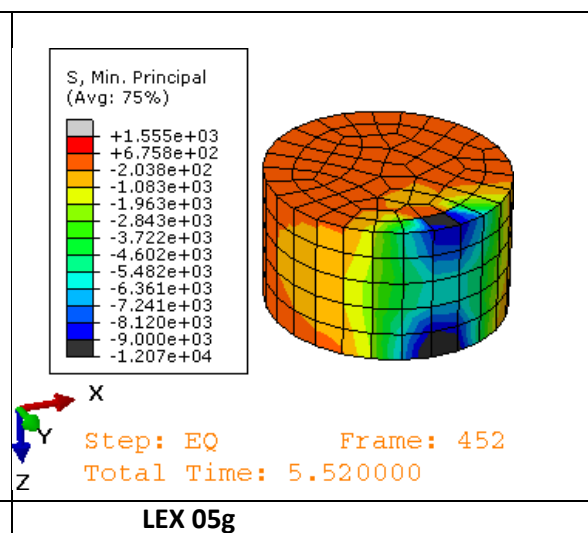


SSU 07g

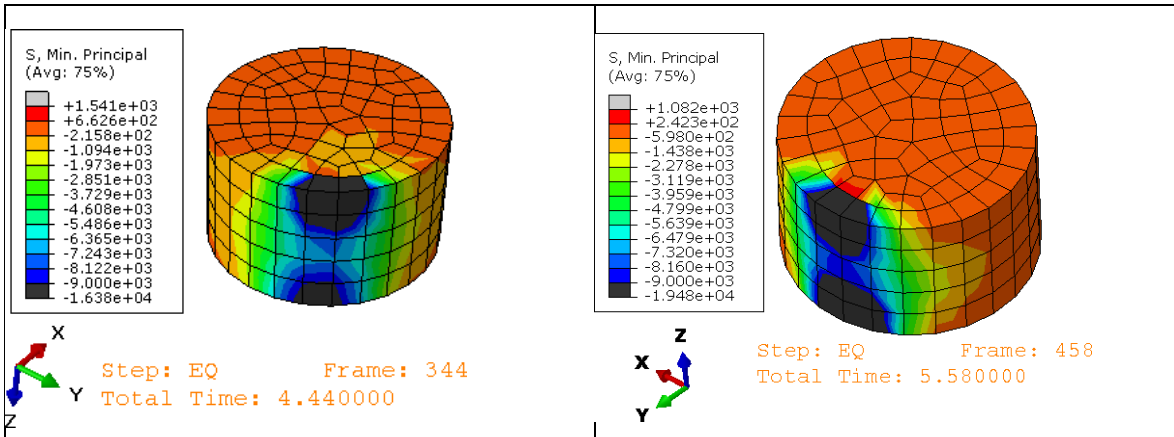
ΜΕΛΟΣ Κ2_T4.N



LDM 05g

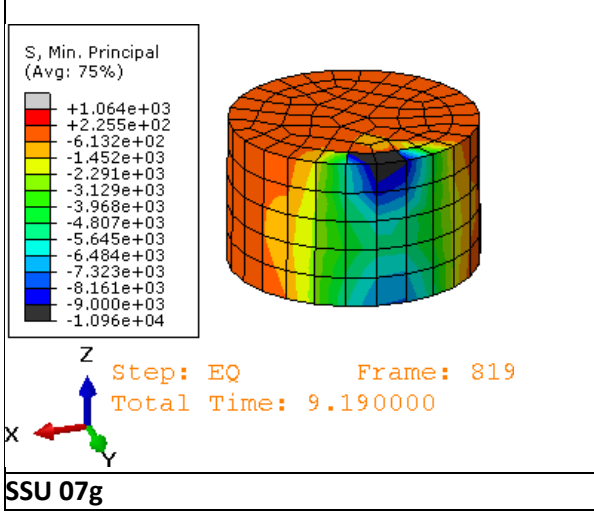


LEX 05g



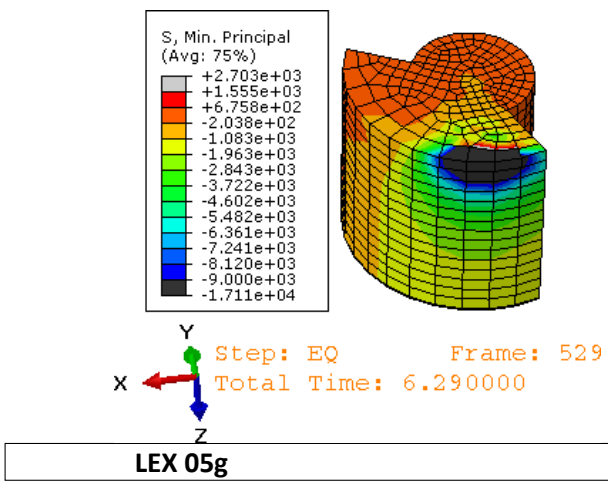
LDM 07g

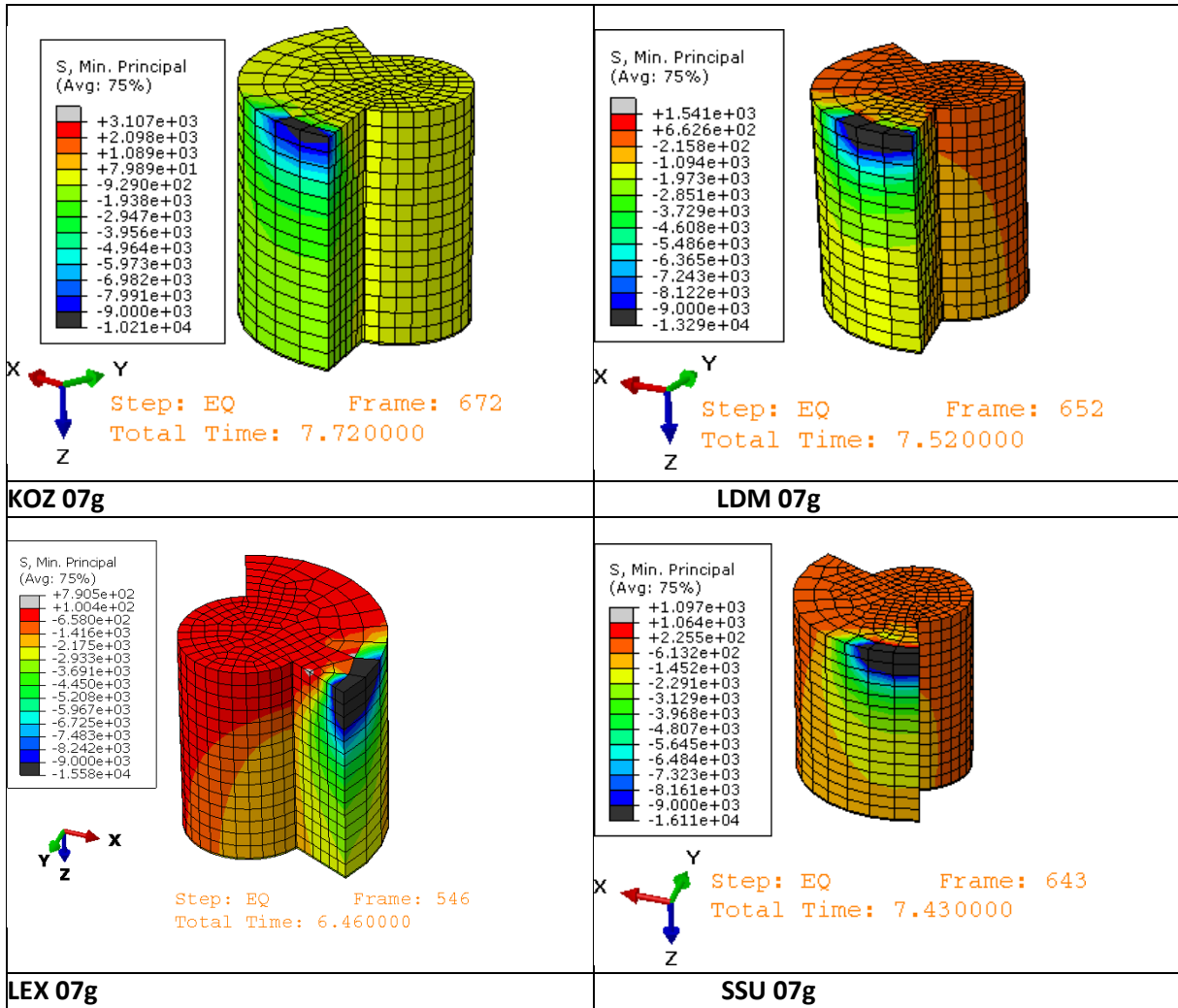
LEX 07g



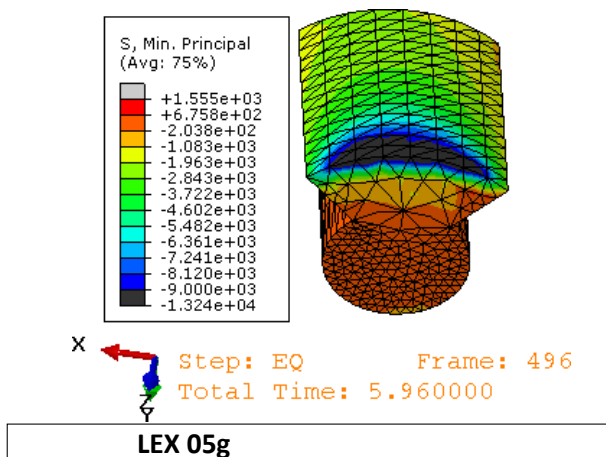
SSU 07g

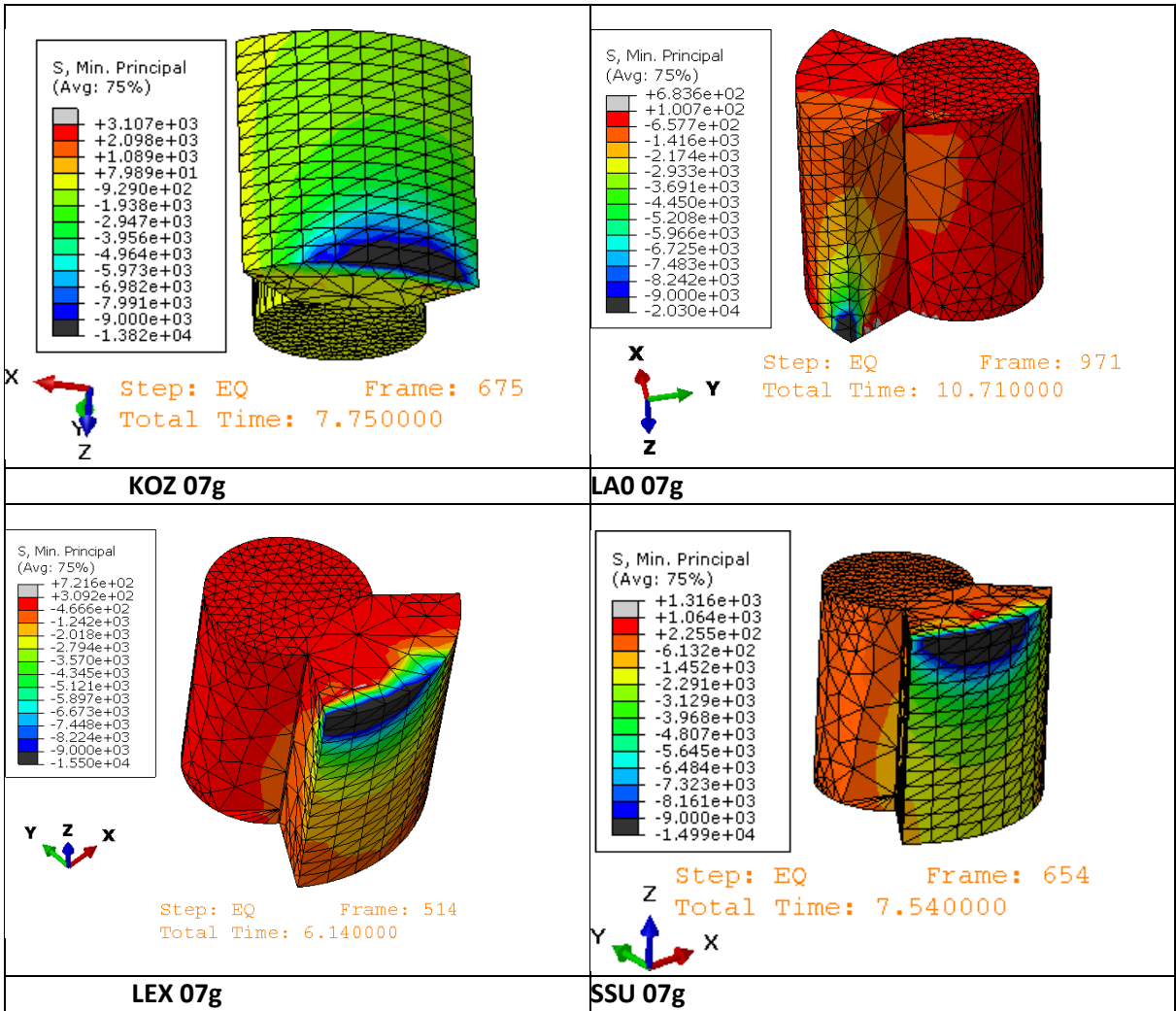
ΜΕΛΟΣ K2_T5.N



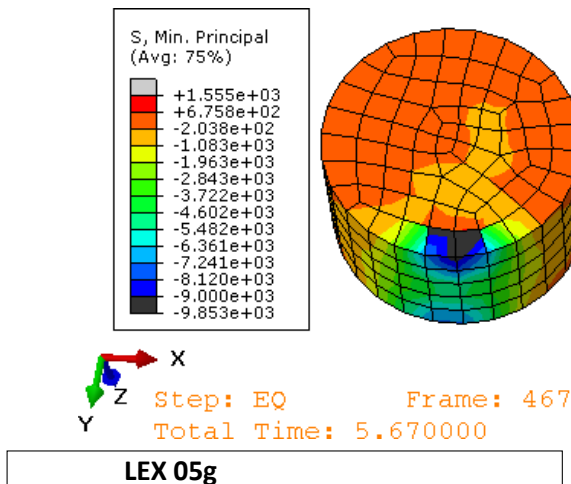


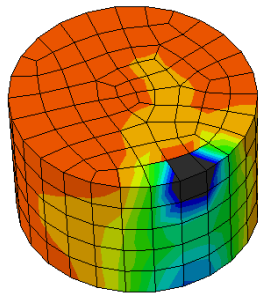
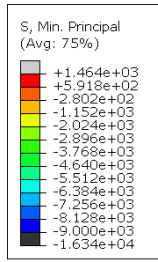
ΜΕΛΟΣ Κ2_T6.N





ΜΕΛΟΣ K2_T7.N

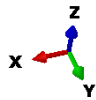
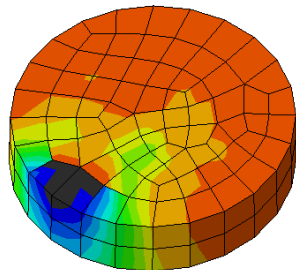
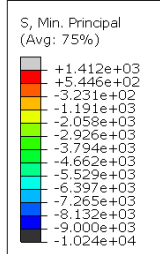




Step: EQ Frame: 479
Total Time: 5.790000

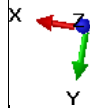
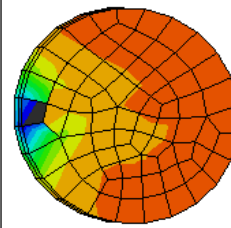
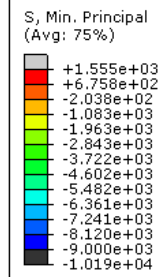
LEX 07g

ΜΕΛΟΣ K2_T11.N



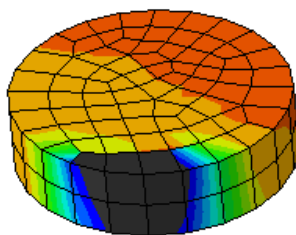
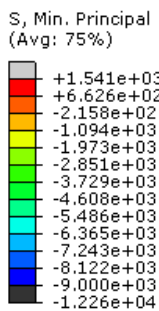
Step: EQ Frame: 604
Total Time: 7.040000

LDM 05g



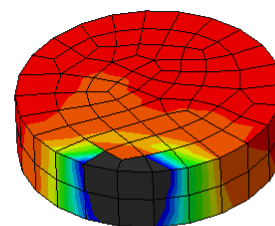
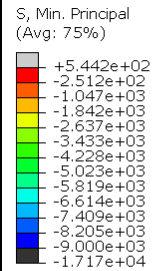
Step: EQ Frame: 591
Total Time: 6.910000

LEX 05g



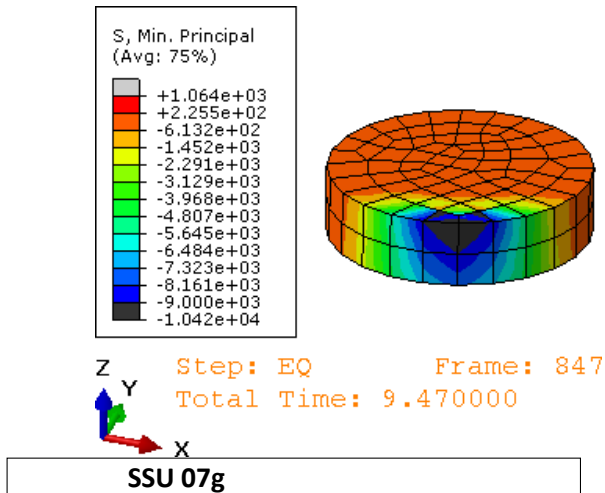
Step: EQ Frame: 383
Total Time: 4.830000

LDM 07g

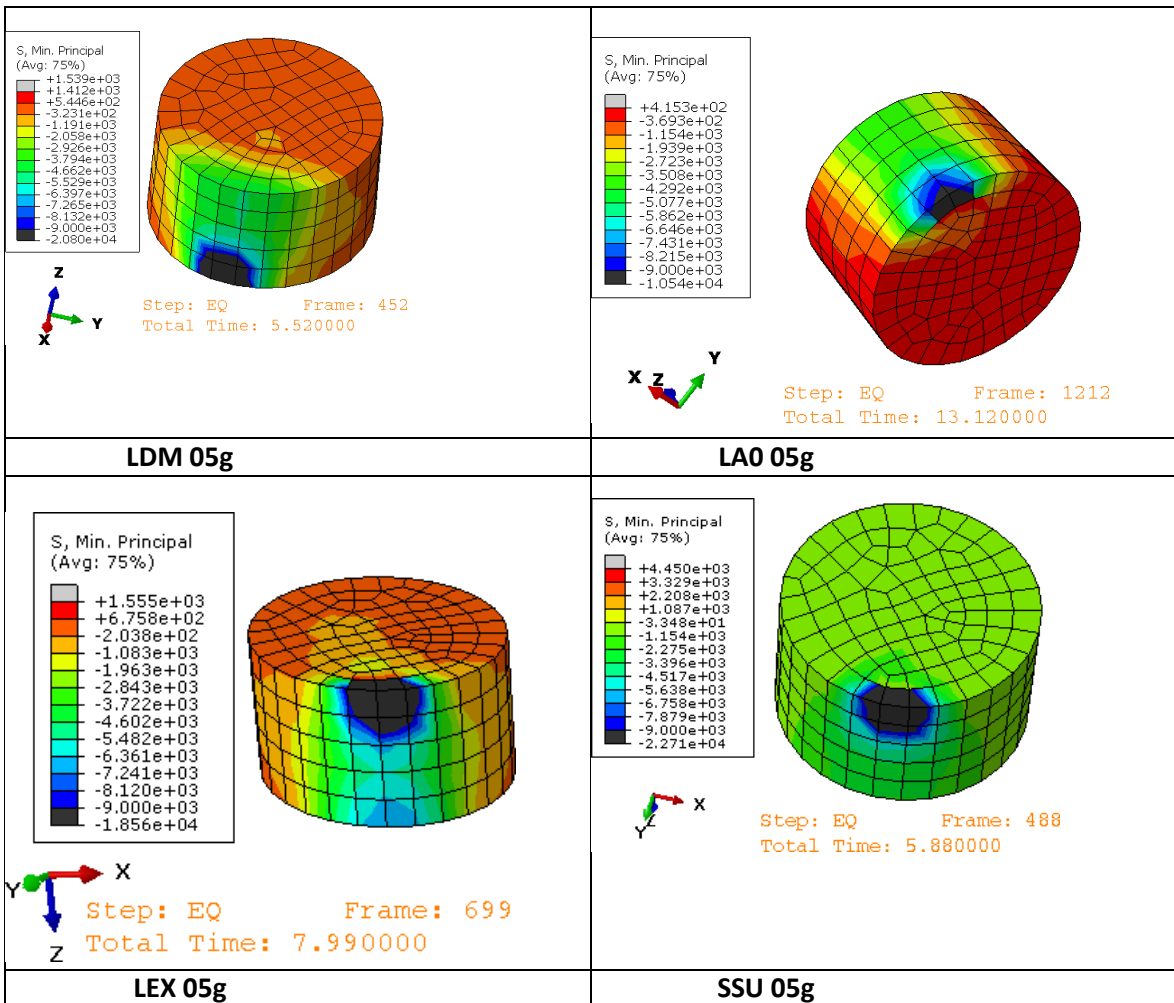


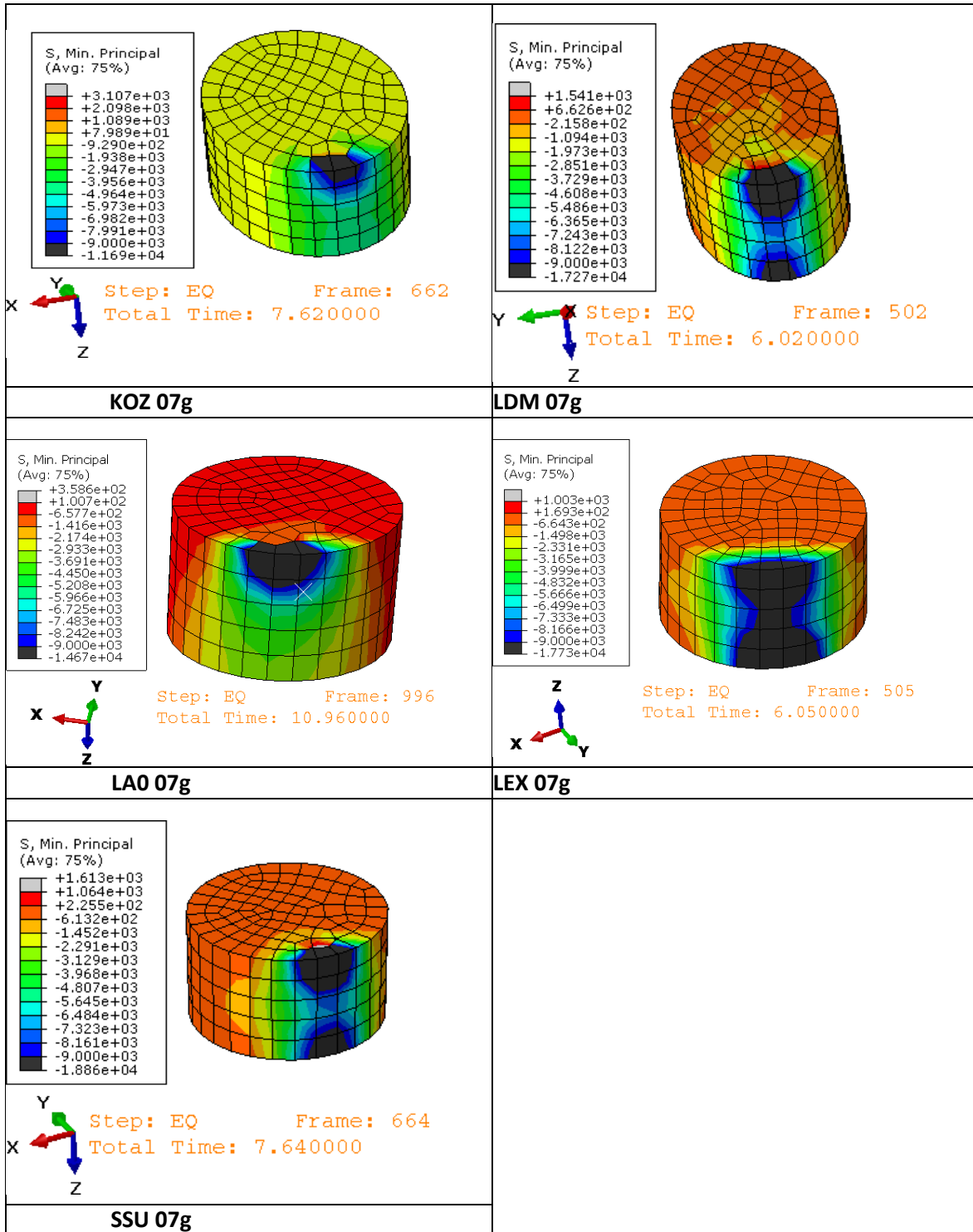
Step: EQ Frame: 424
Total Time: 5.240000

LEX 07g

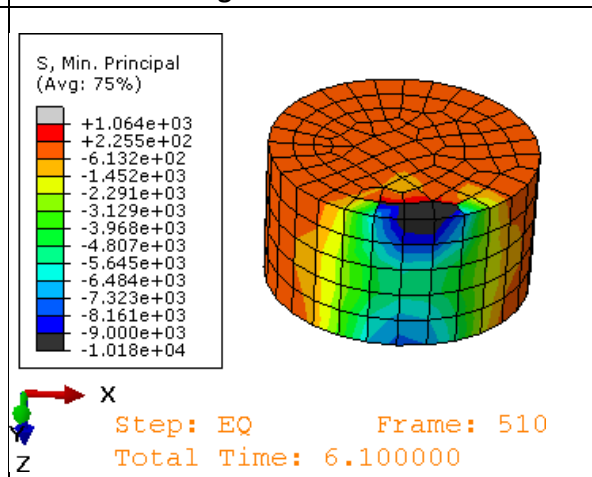
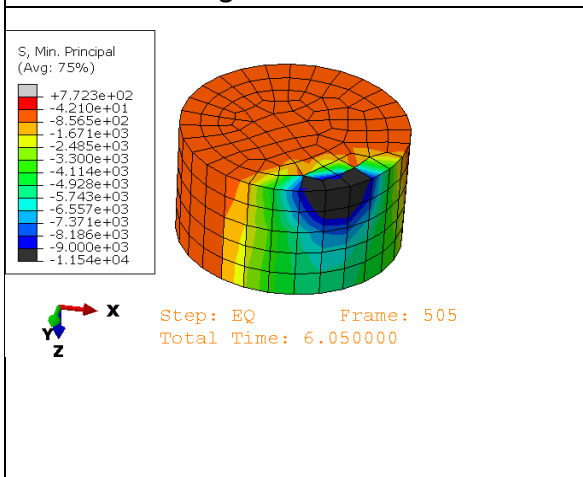
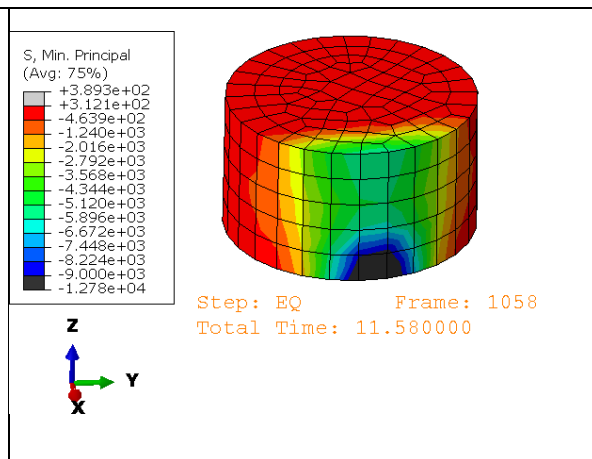
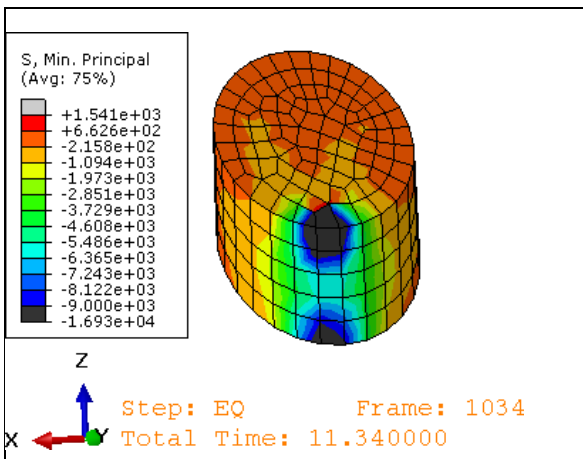
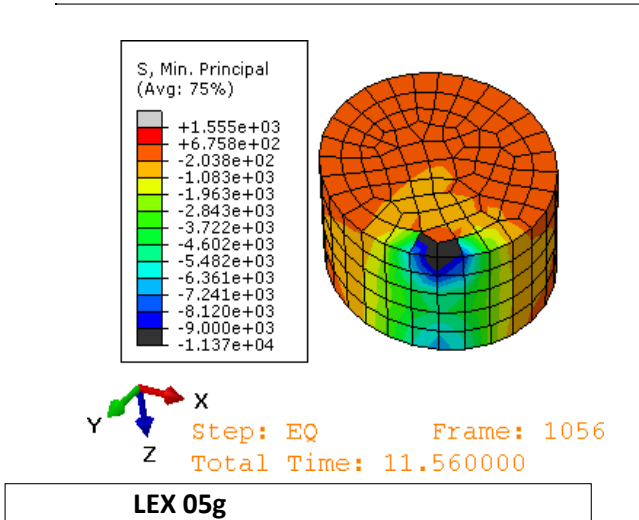


ΜΕΛΟΣ Κ3_T1.N

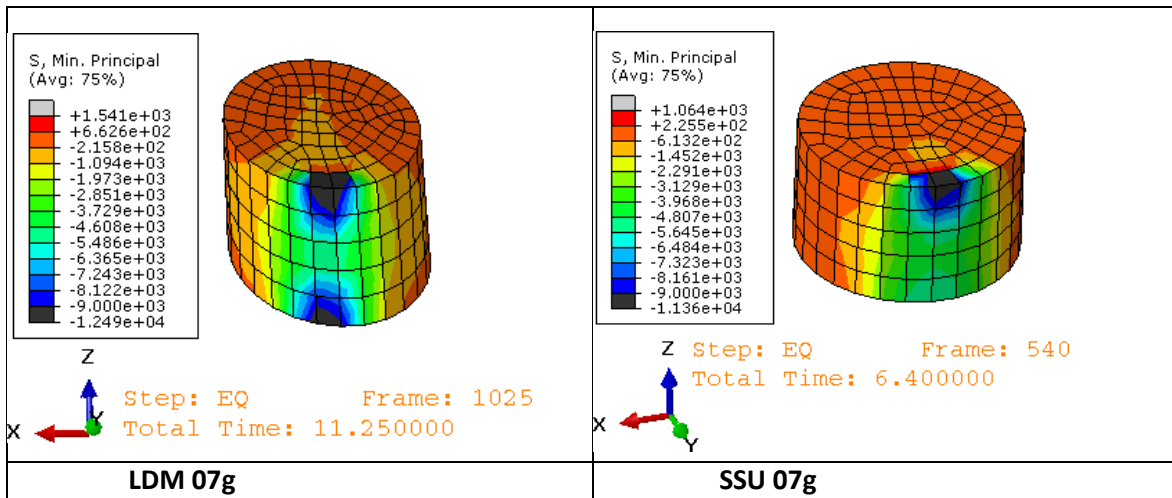




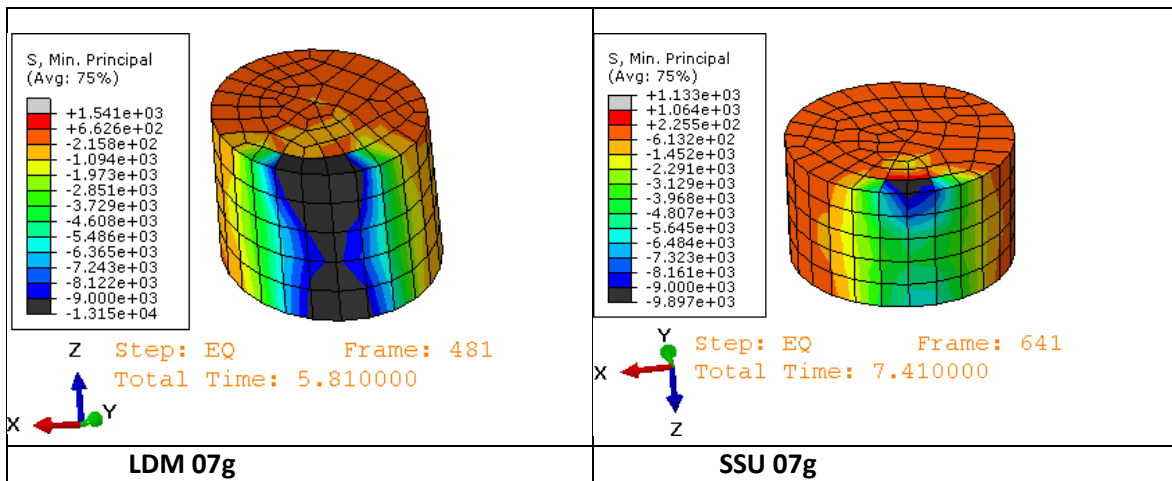
ΜΕΛΟΣ K3_T2.N



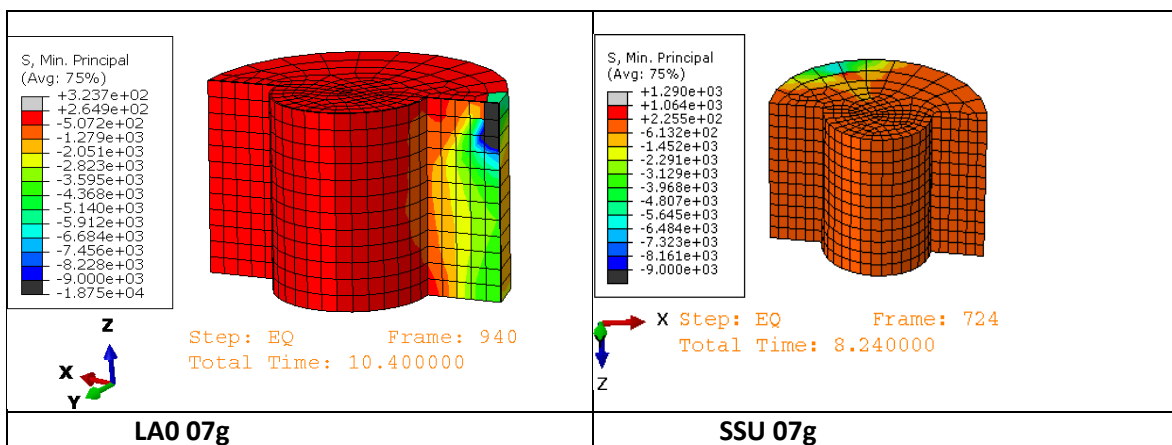
ΜΕΛΟΣ K3_T3.N



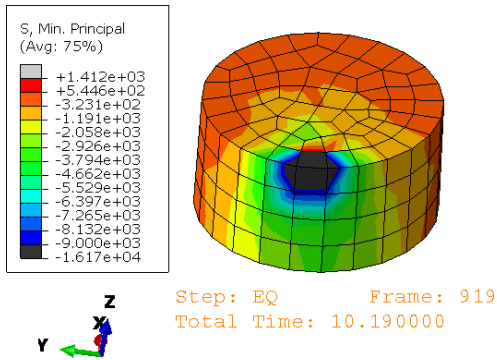
ΜΕΛΟΣ K3_T4.N



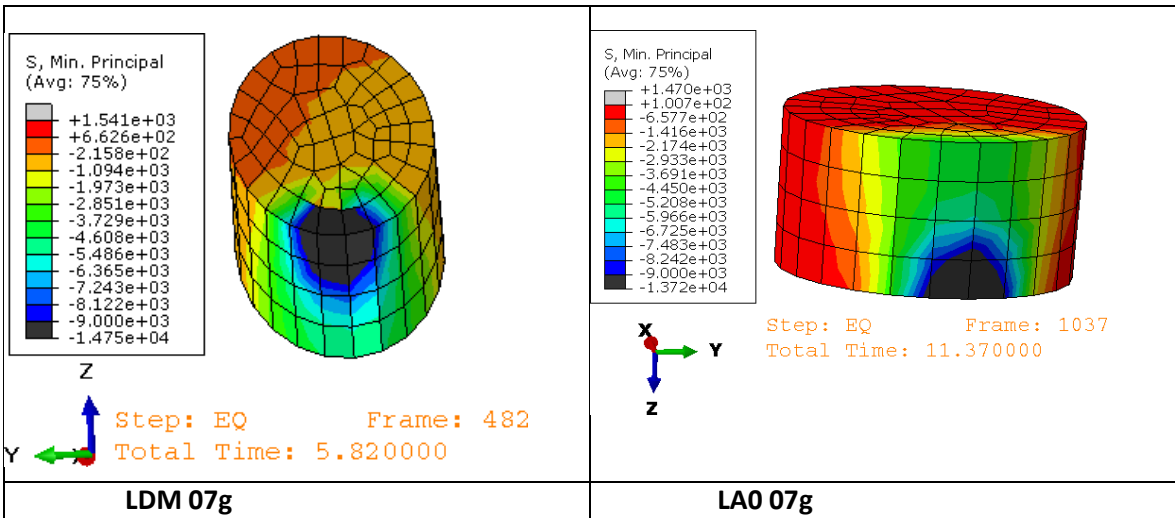
ΜΕΛΟΣ K3_T8.N



ΜΕΛΟΣ K3_T11.N

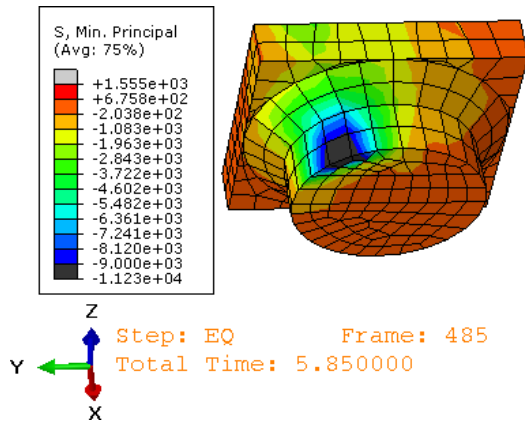


LDM 05g

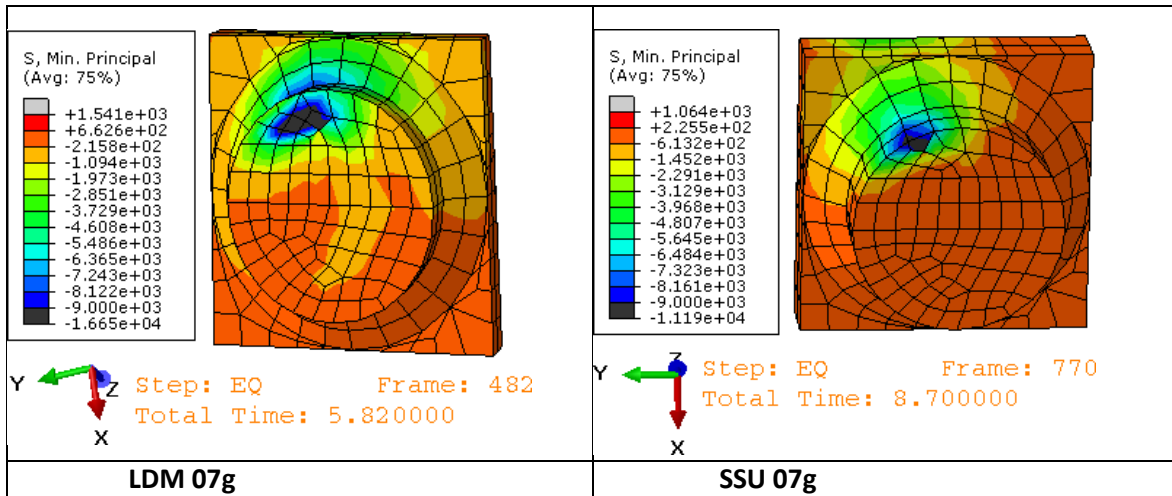


LDM 07g **LA0 07g**

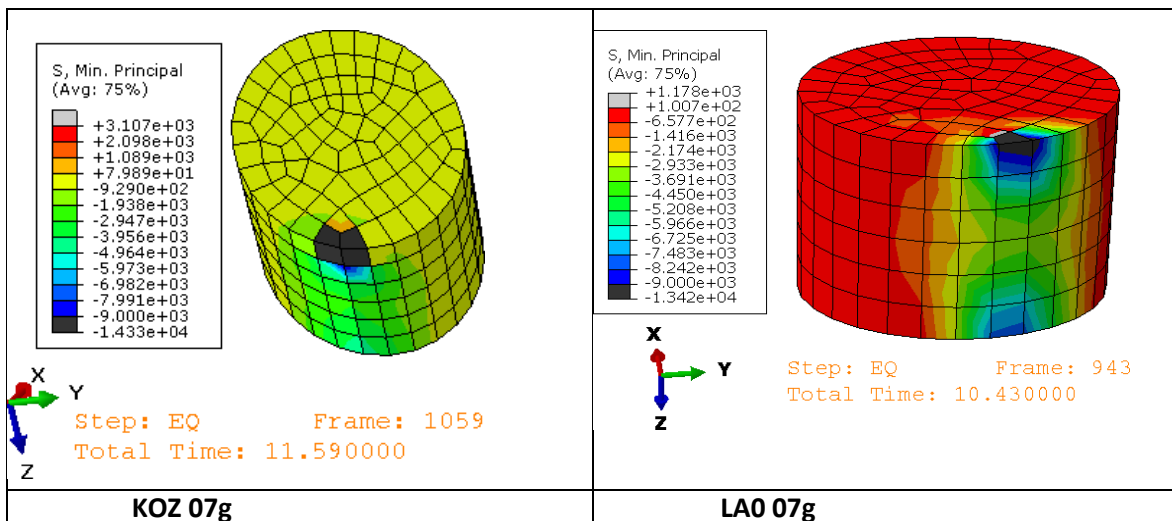
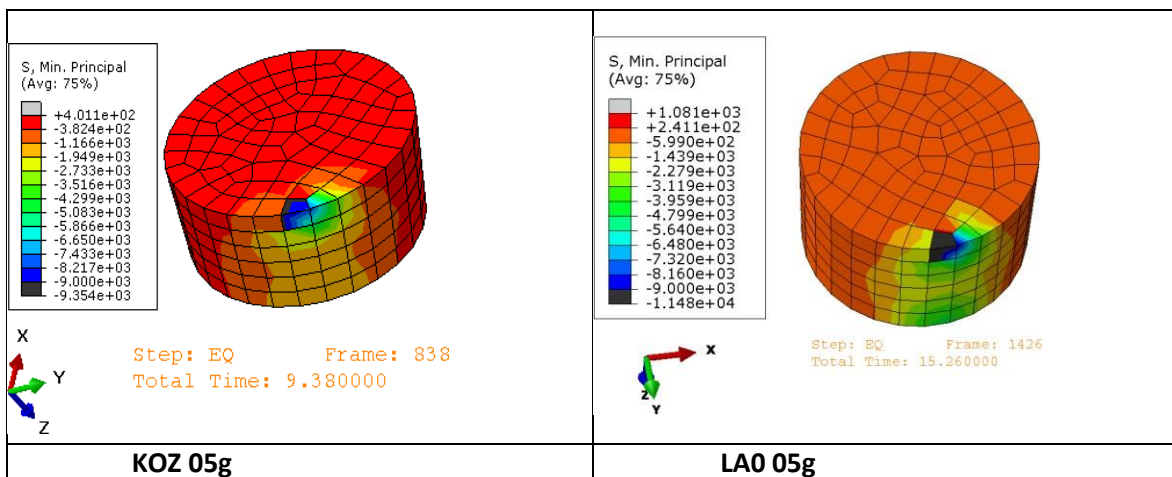
ΜΕΛΟΣ K3_TOP.N

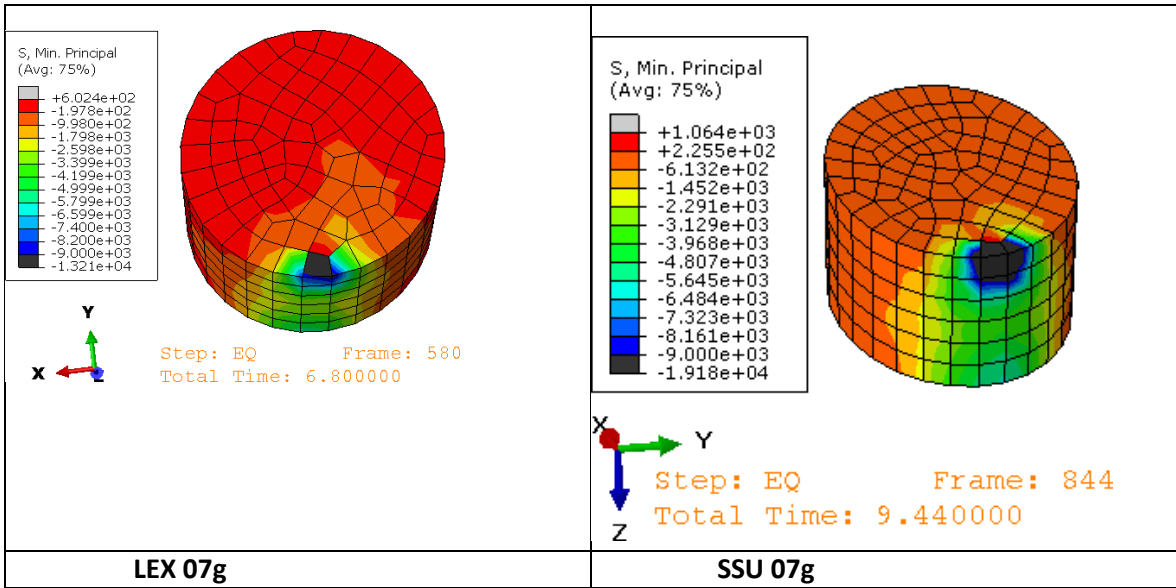


LEX 05g

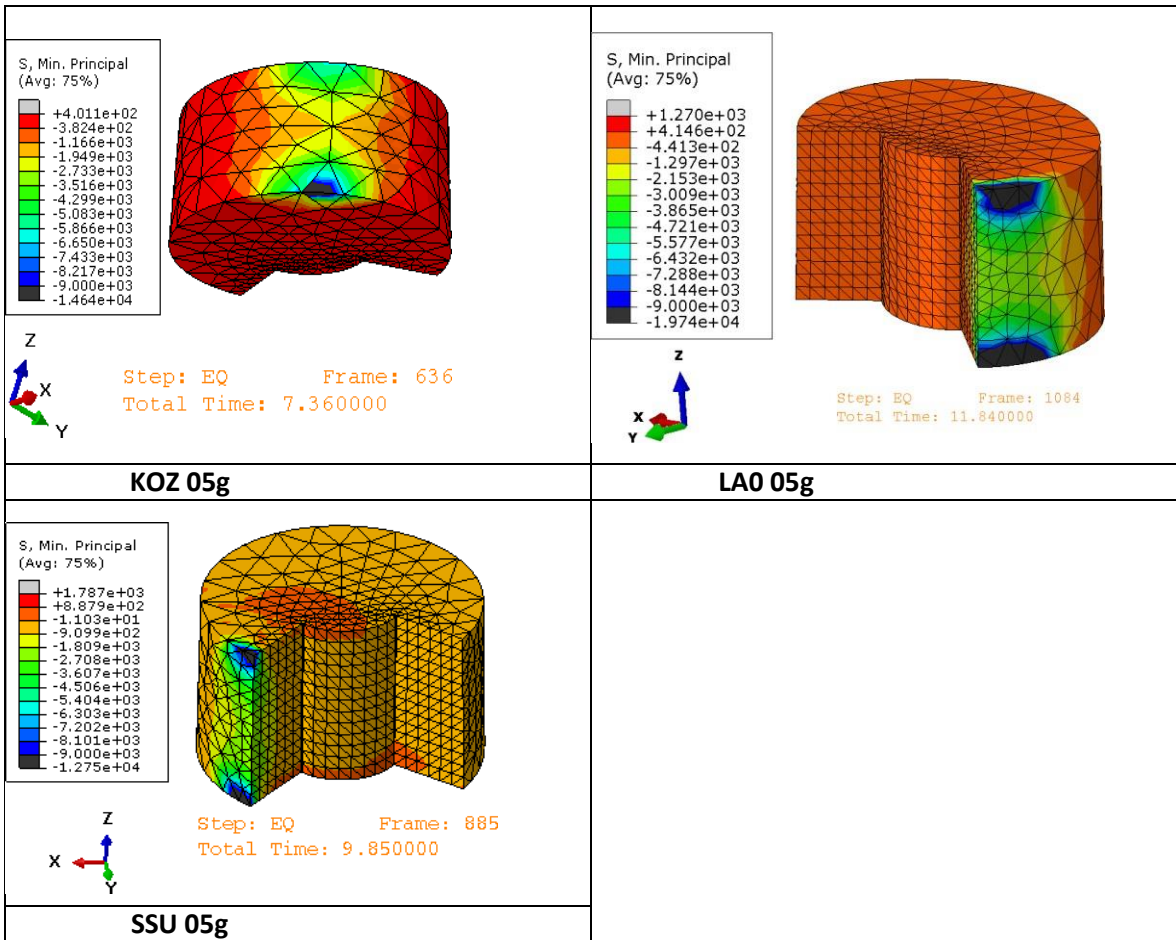


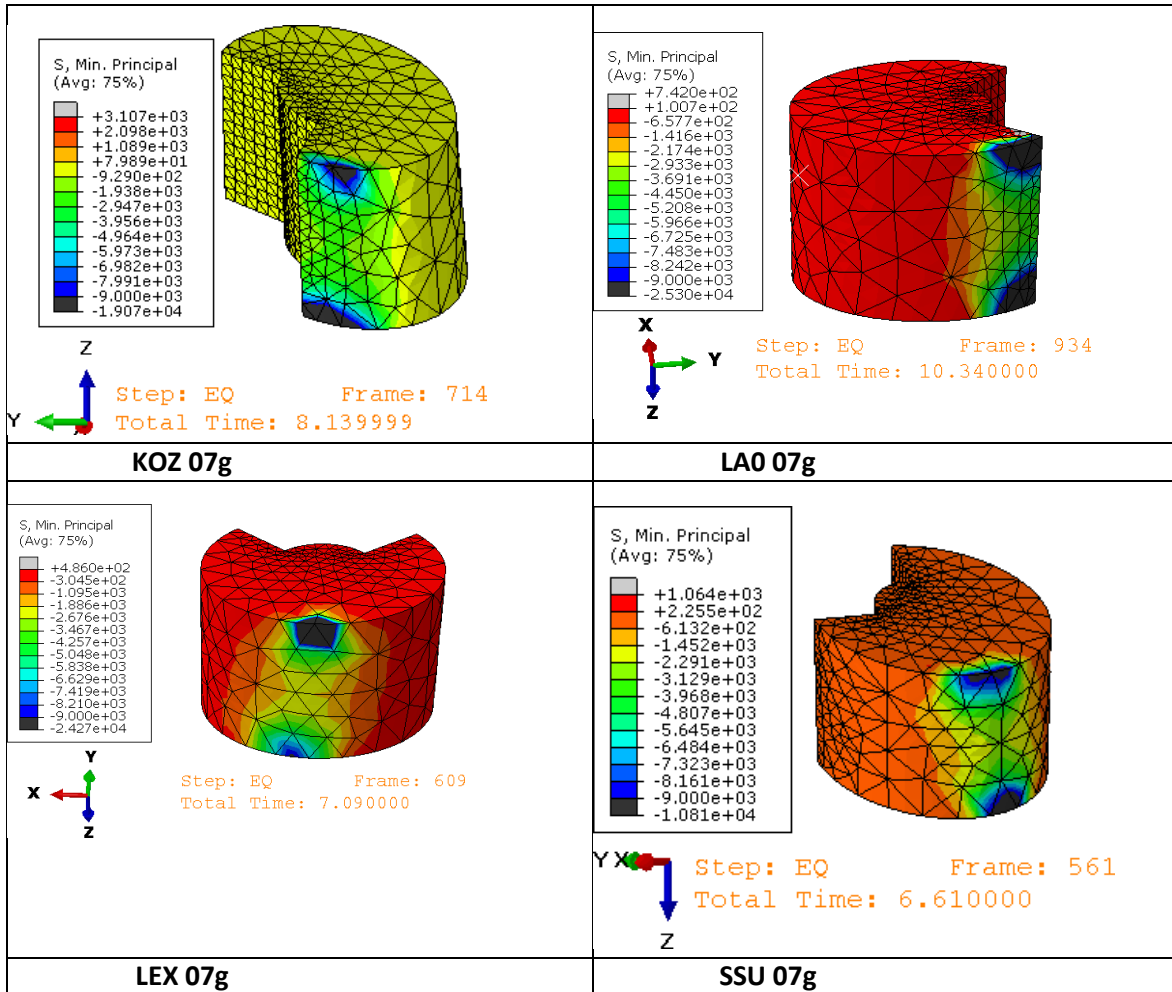
ΜΕΛΟΣ K4_T1.N



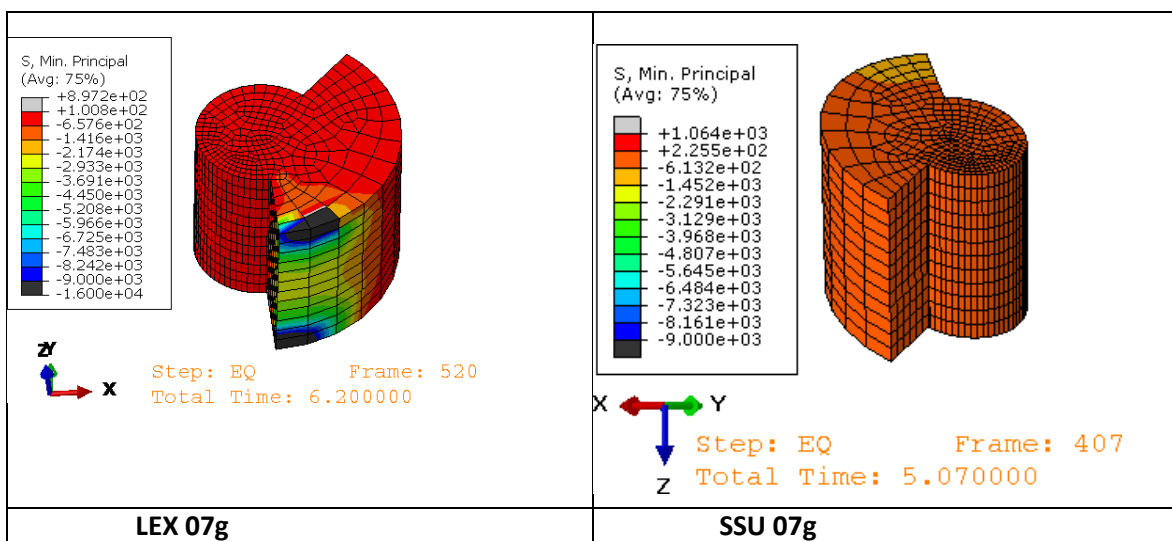


ΜΕΛΟΣ K4_T2.N

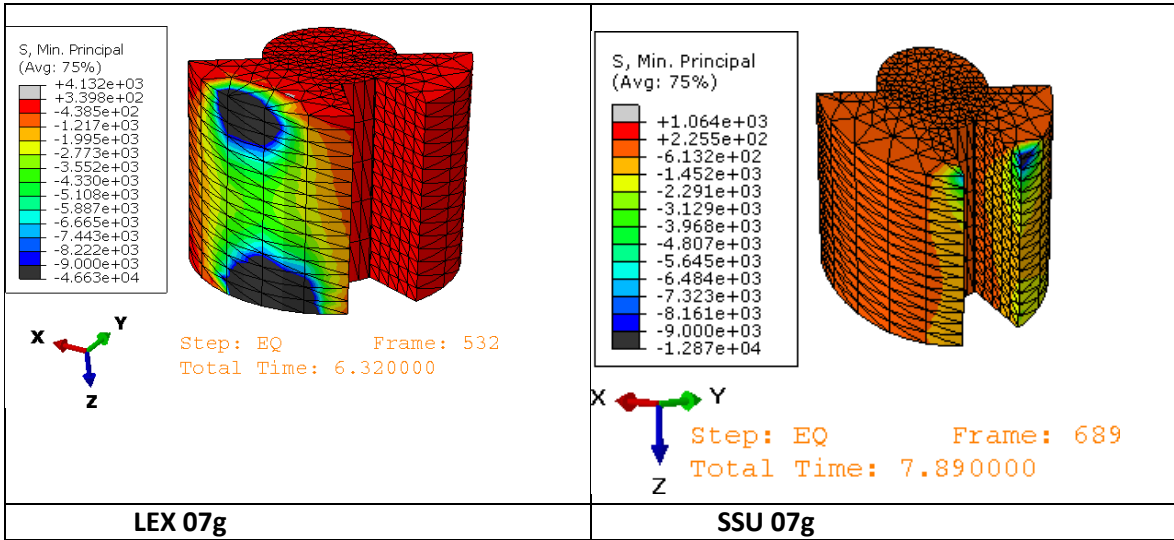




ΜΕΛΟΣ Κ4_T4.N



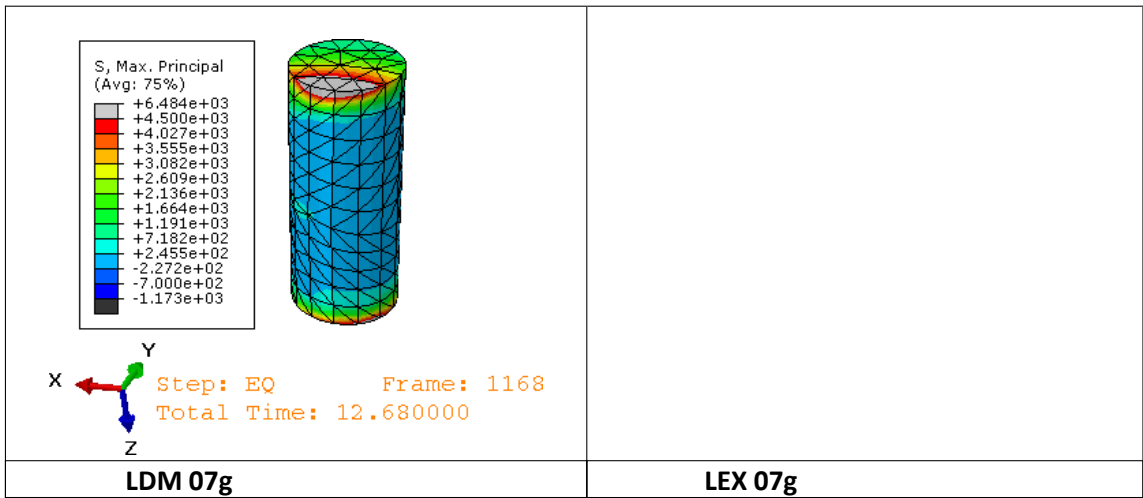
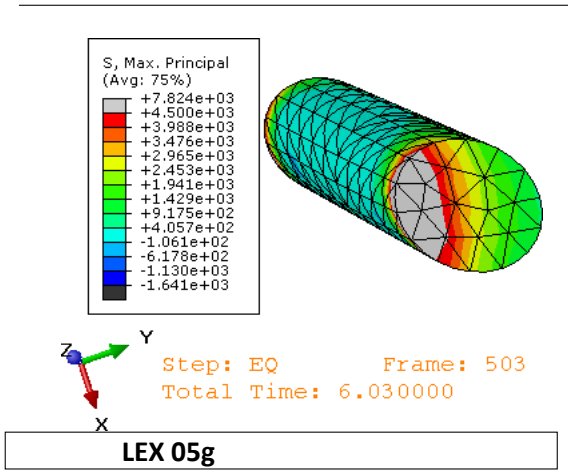
ΜΕΛΟΣ K4_T5.N



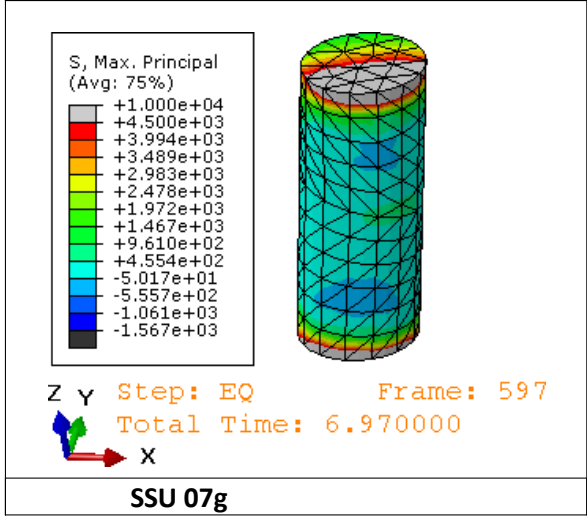
Π.3 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε τεχνητούς λίθους

Π.3.1 Εφελκυσμός

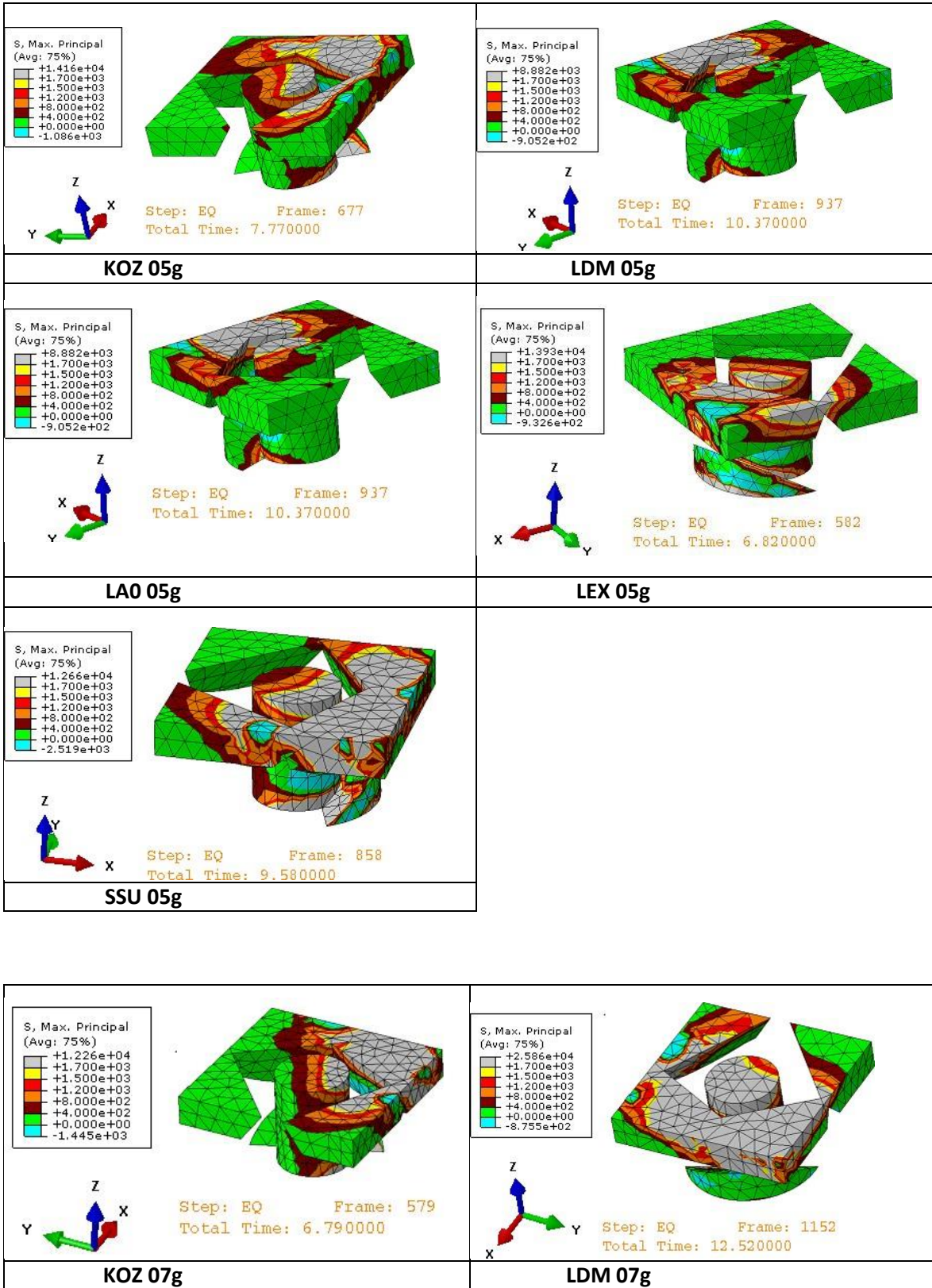
ΜΕΛΟΣ Κ1_T5.M

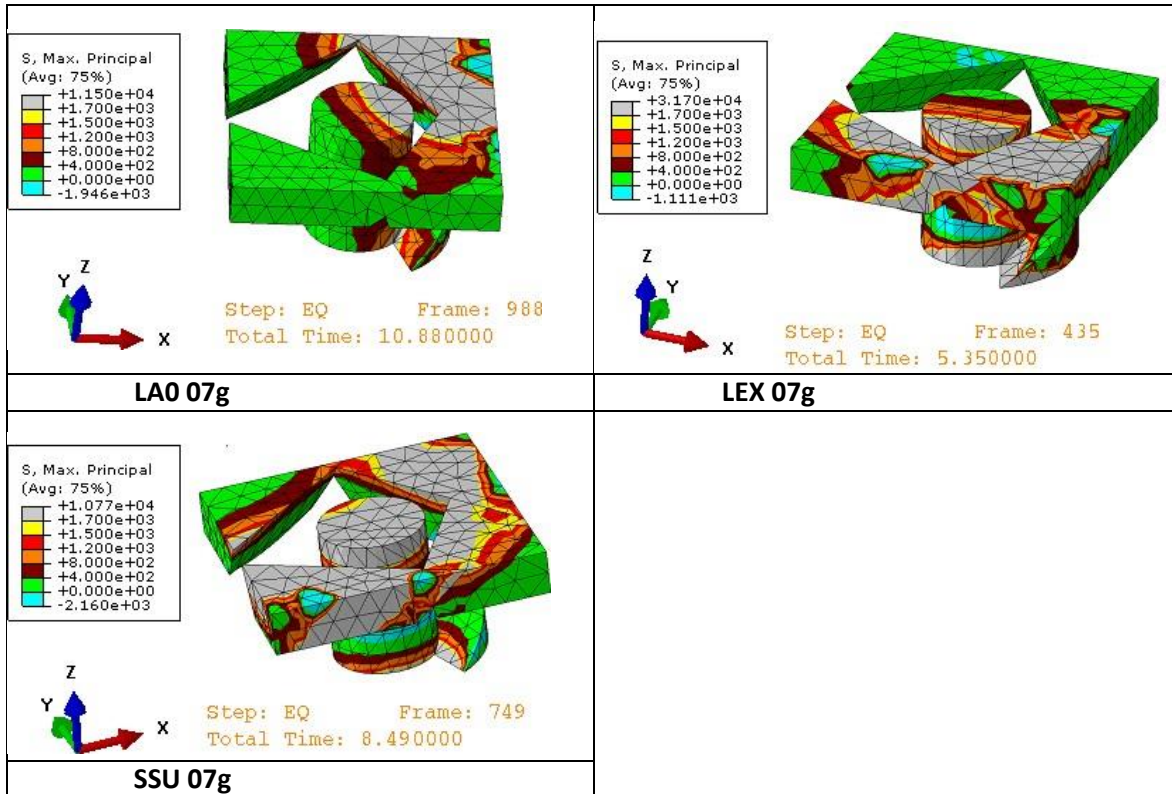


LEX 07g

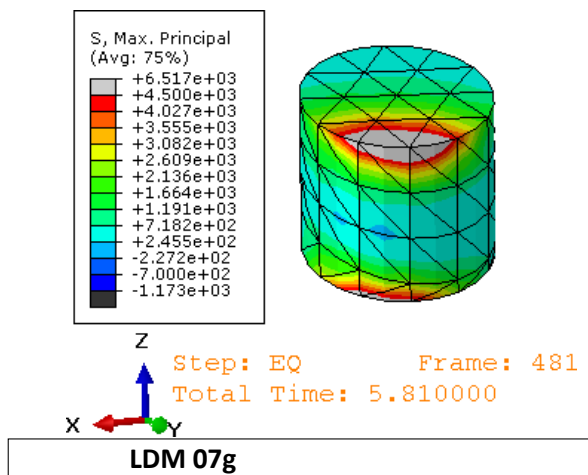


ΜΕΛΟΣ K2_TOP.M

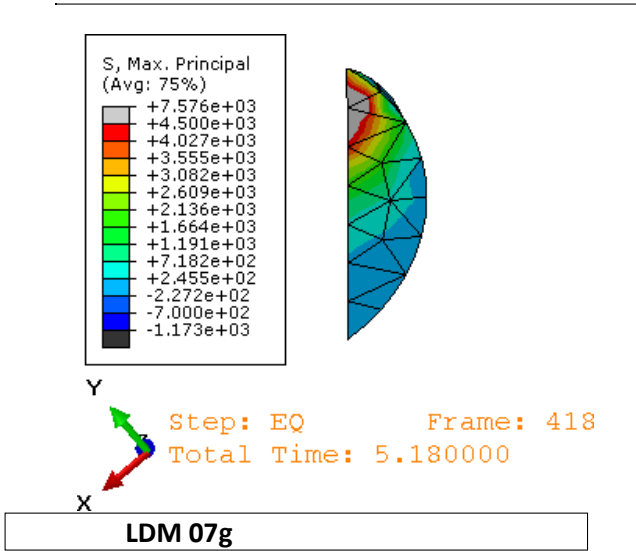




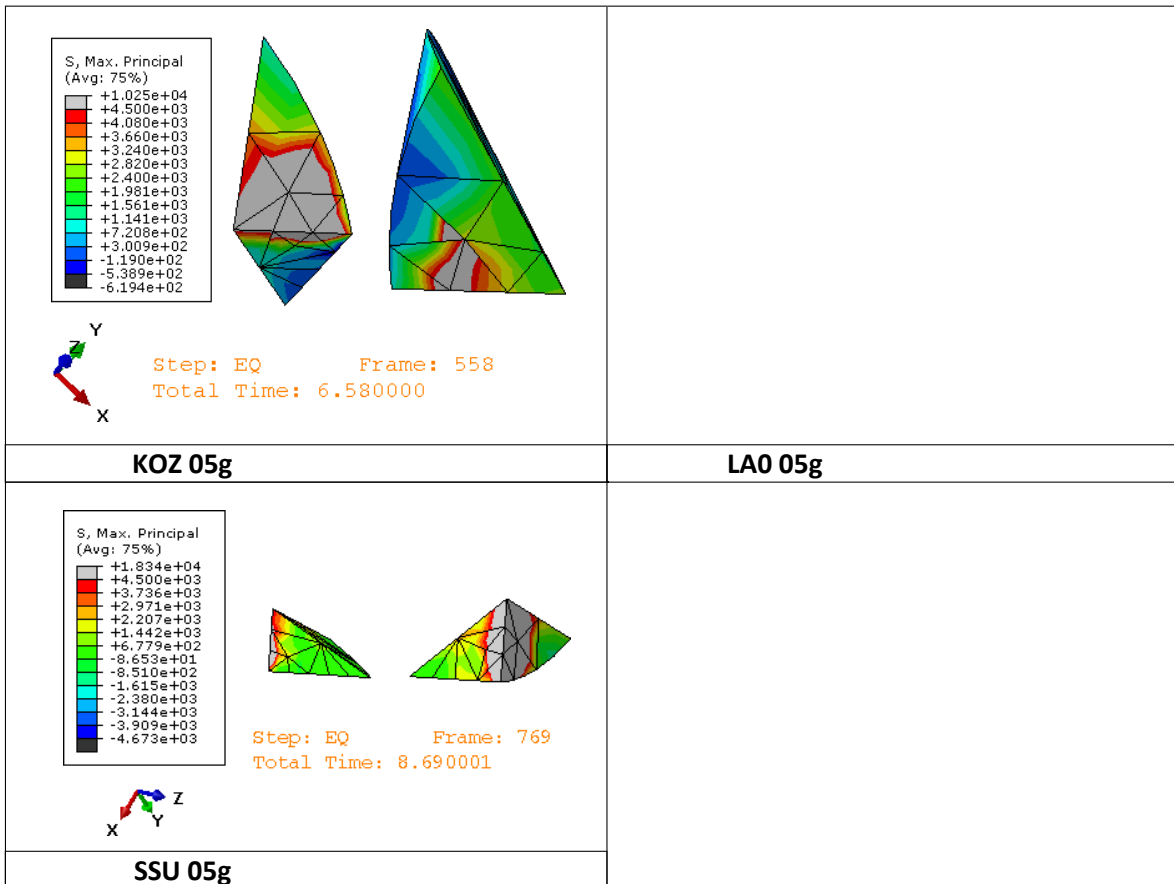
ΜΕΛΟΣ Κ3_T5.M

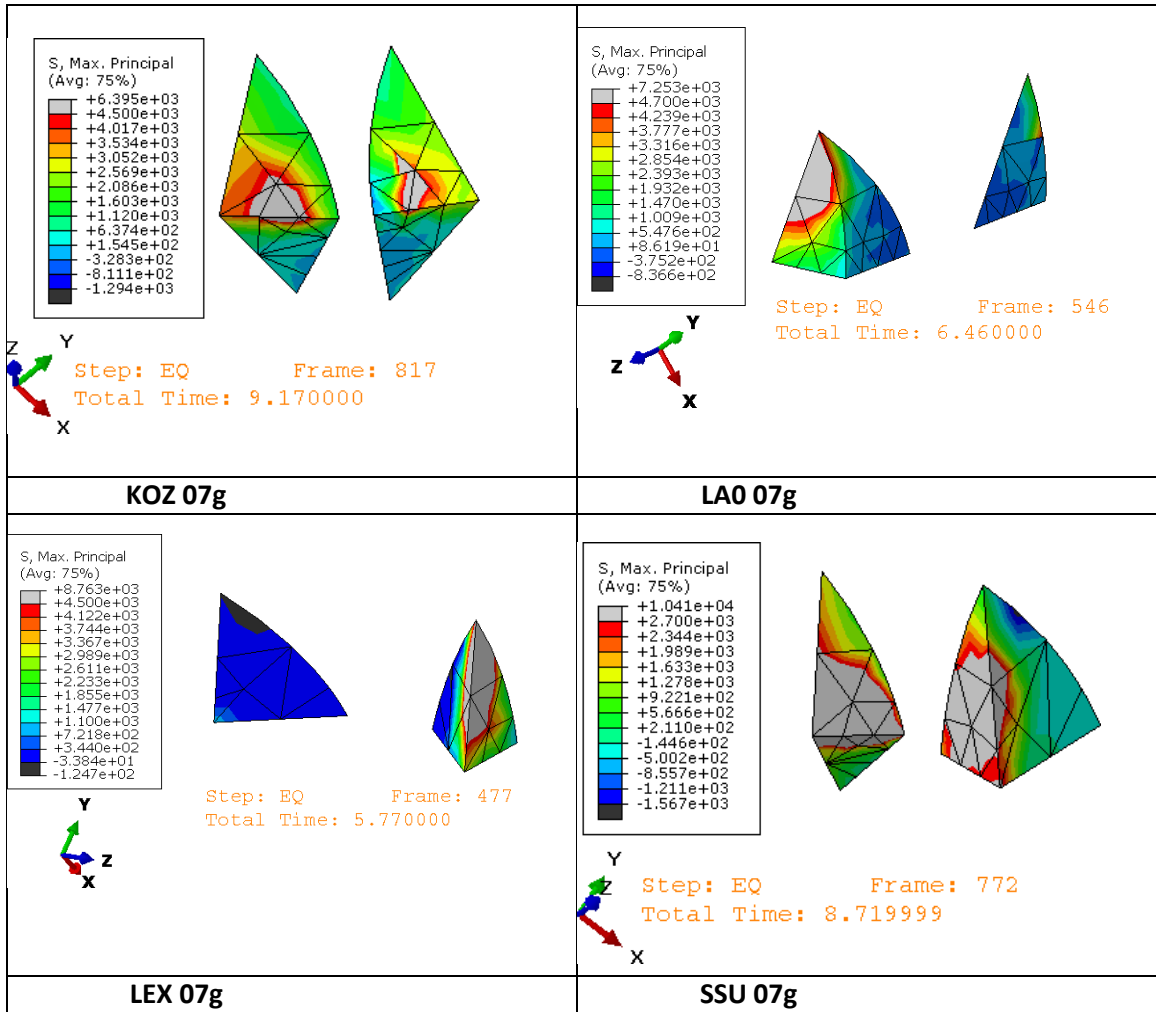


ΜΕΛΟΣ Κ3_T5.M

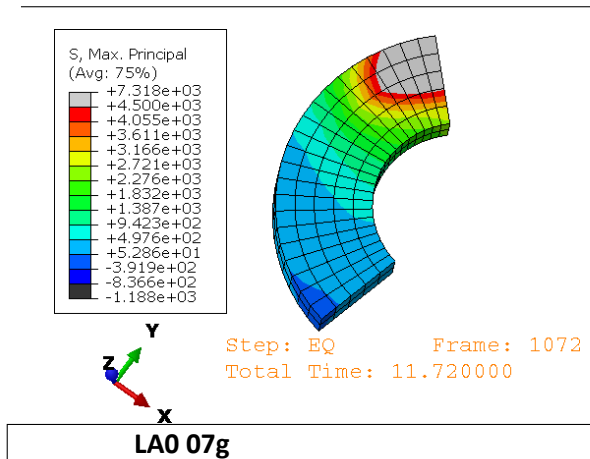


ΜΕΛΟΣ Κ4_T2.M

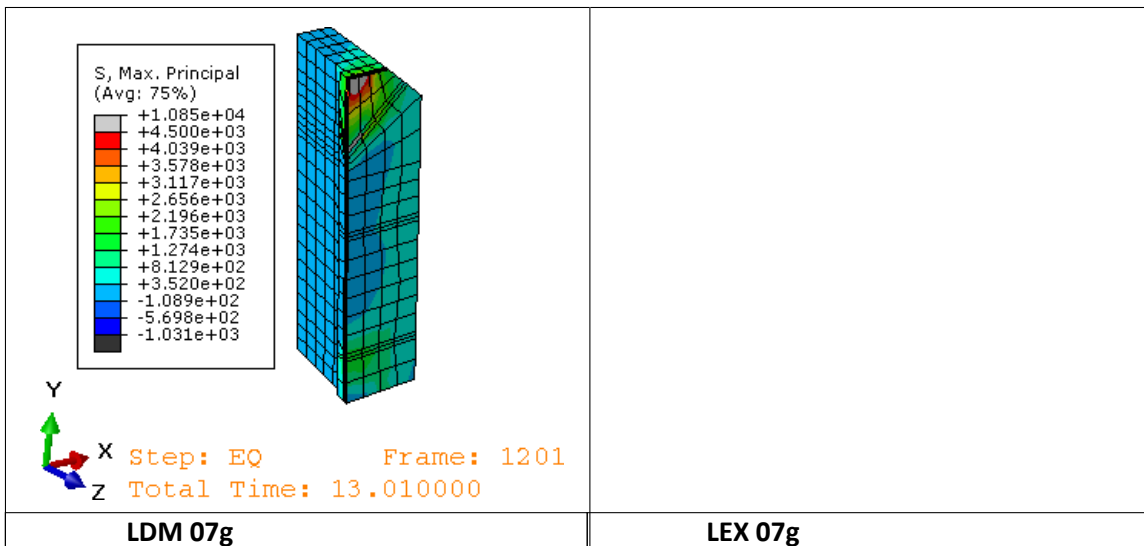
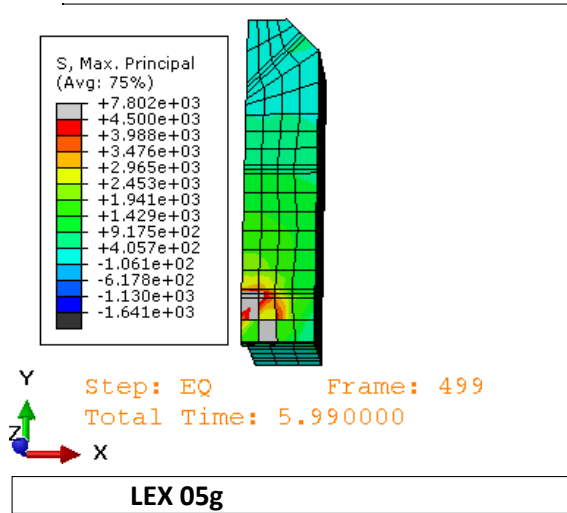




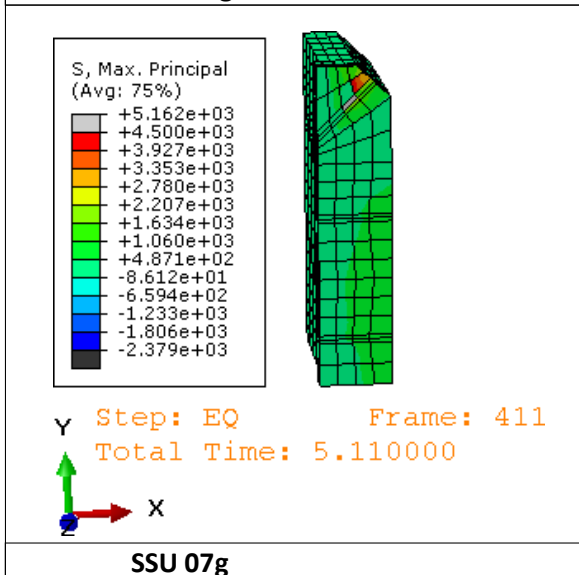
ΜΕΛΟΣ K4_T4.M



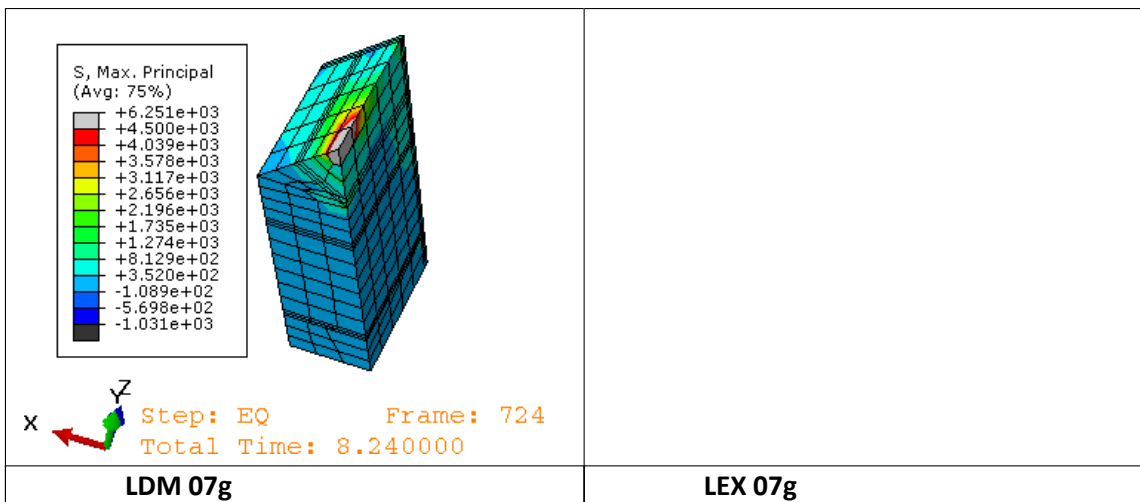
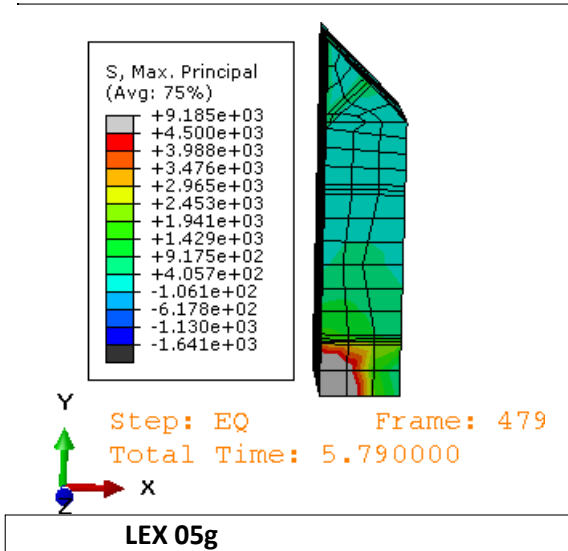
ΜΕΛΟΣ ΕΡΑ1.Μ



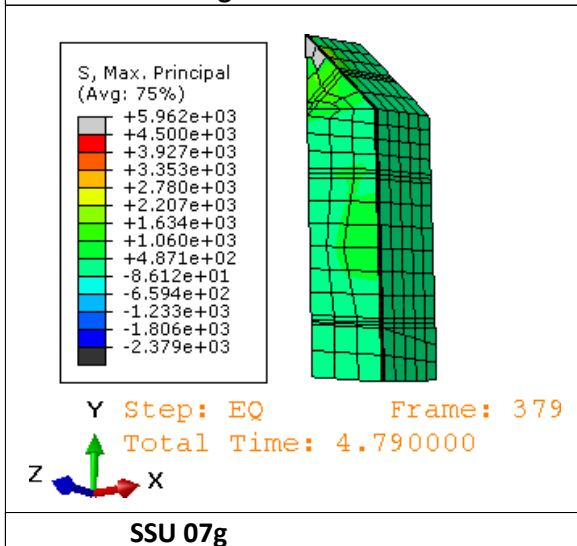
LEX 07g



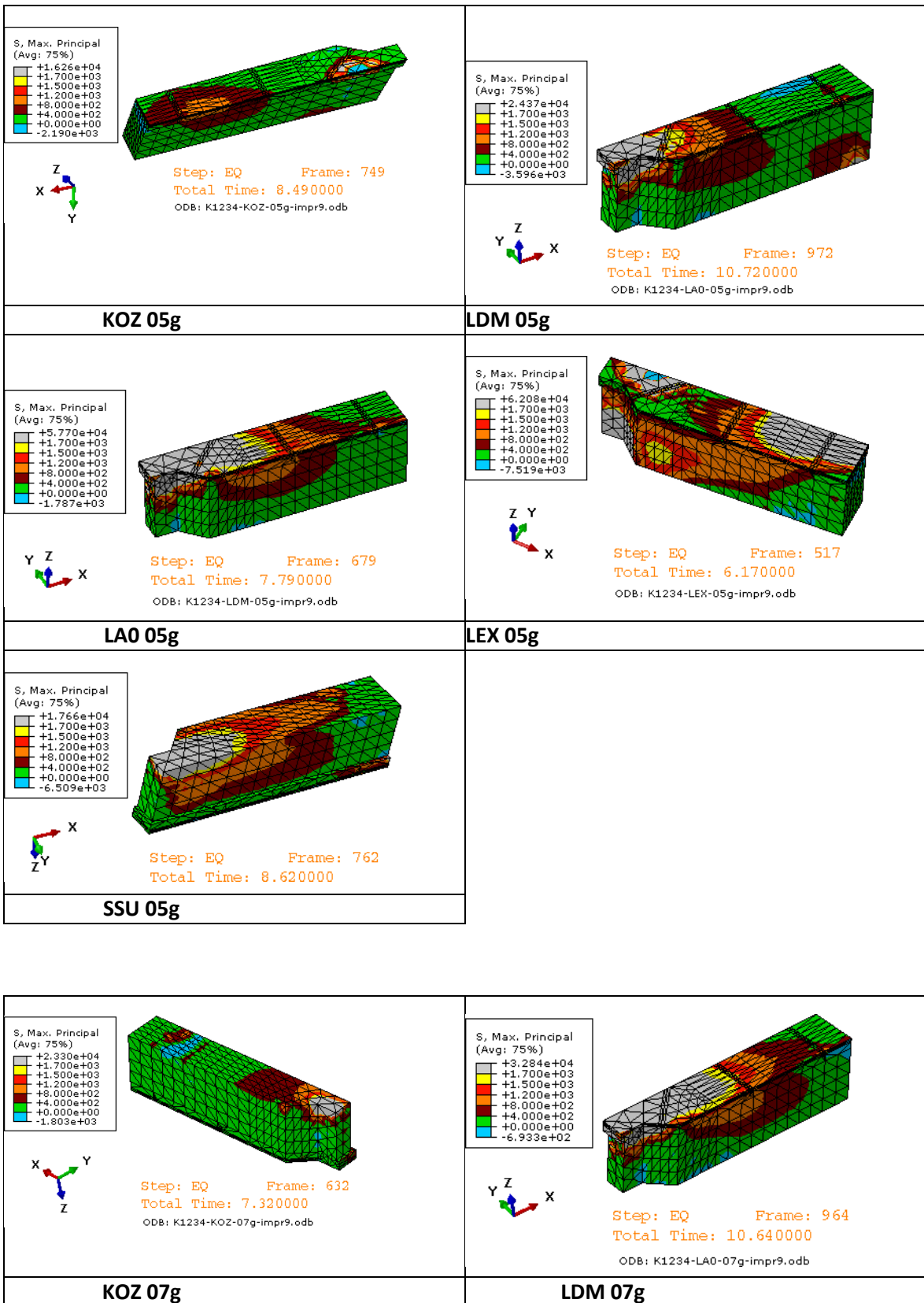
ΜΕΛΟΣ ΕΡΑ2.Μ

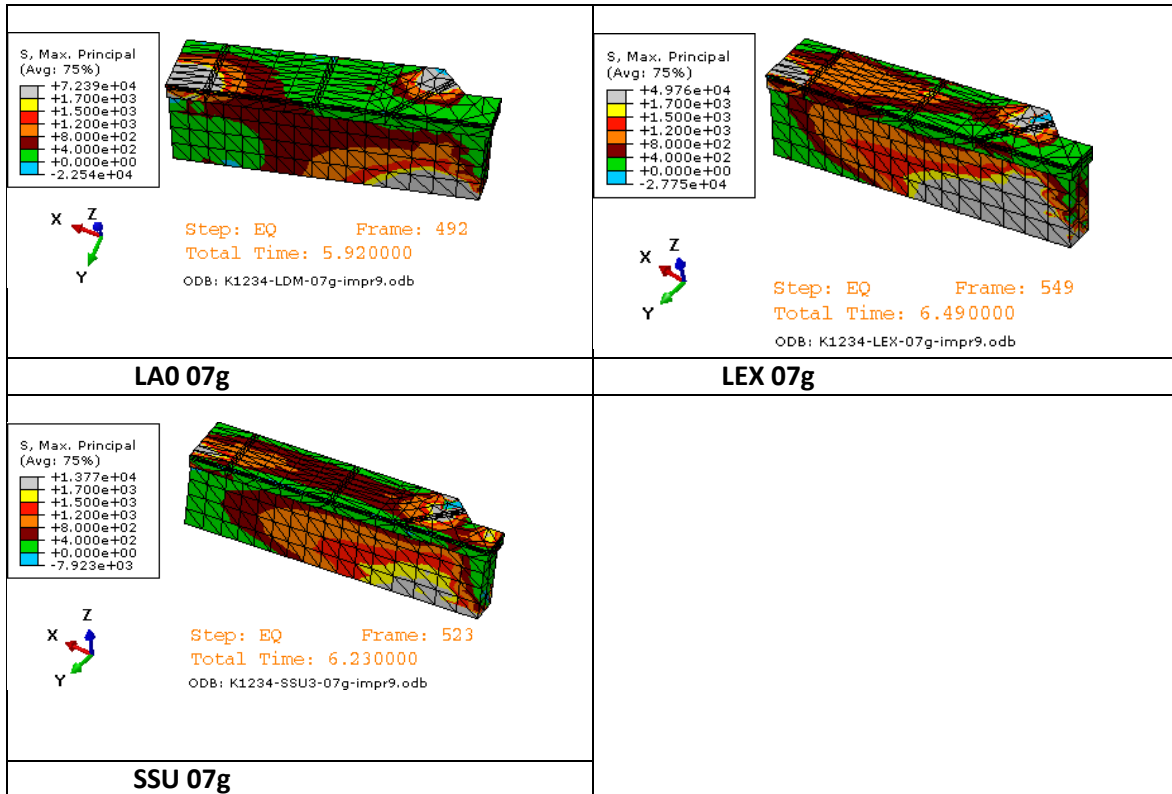


LEX 07g

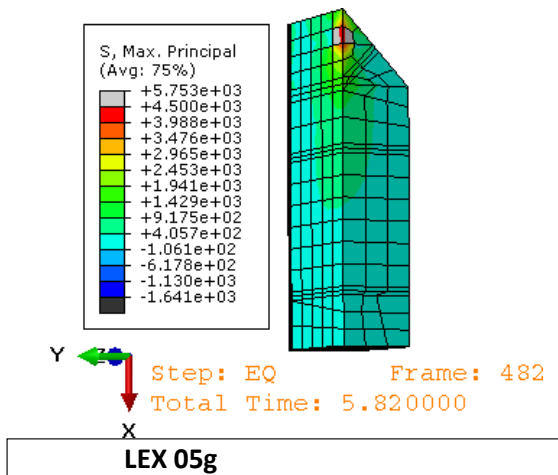


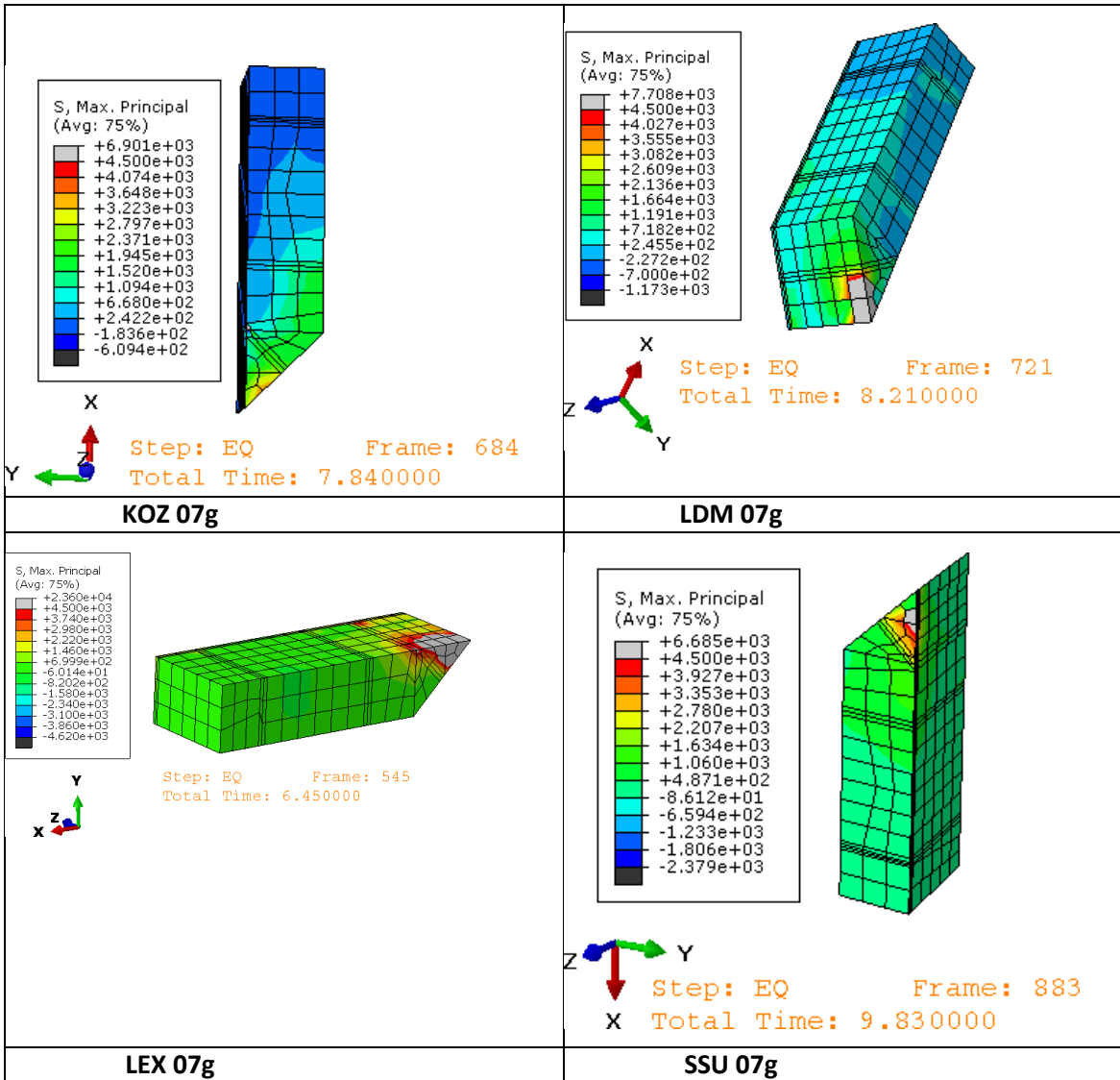
ΜΕΛΟΣ ΕΡΑΣ.Μ



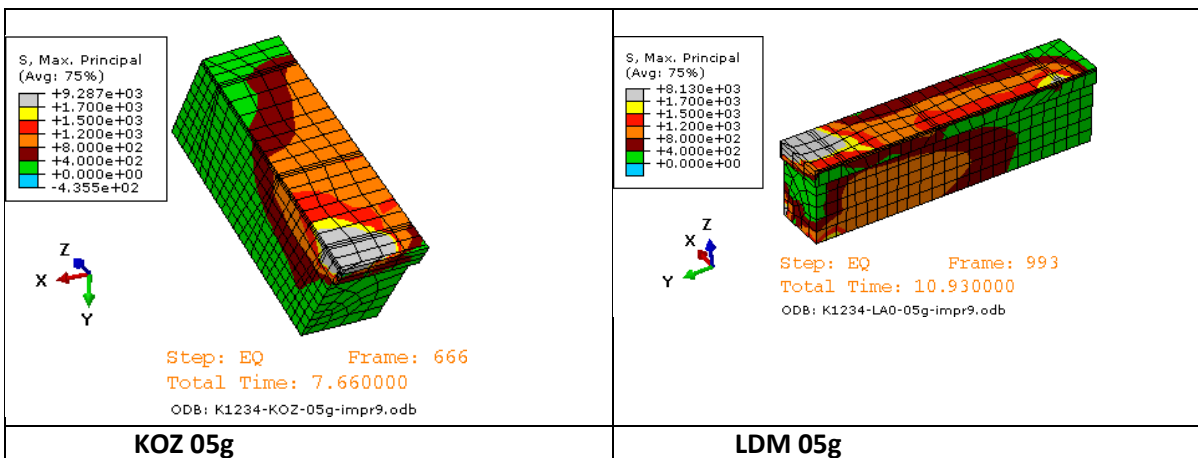


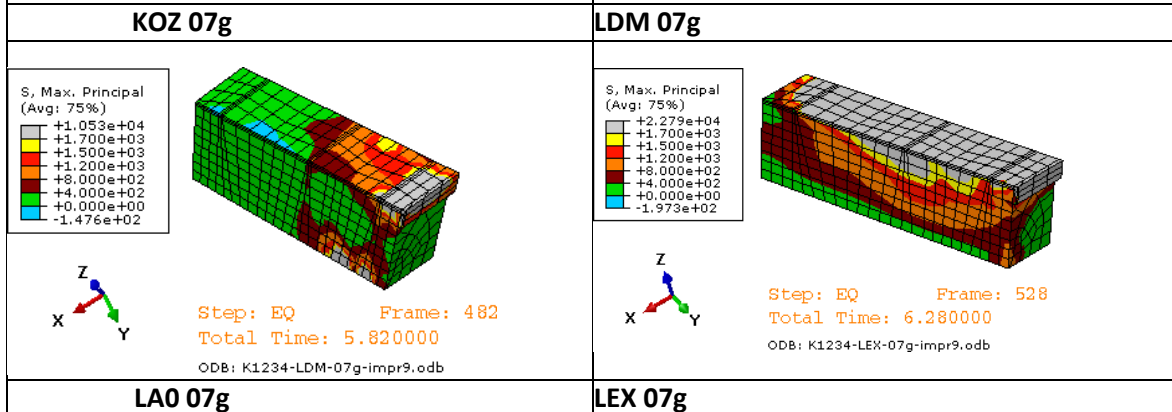
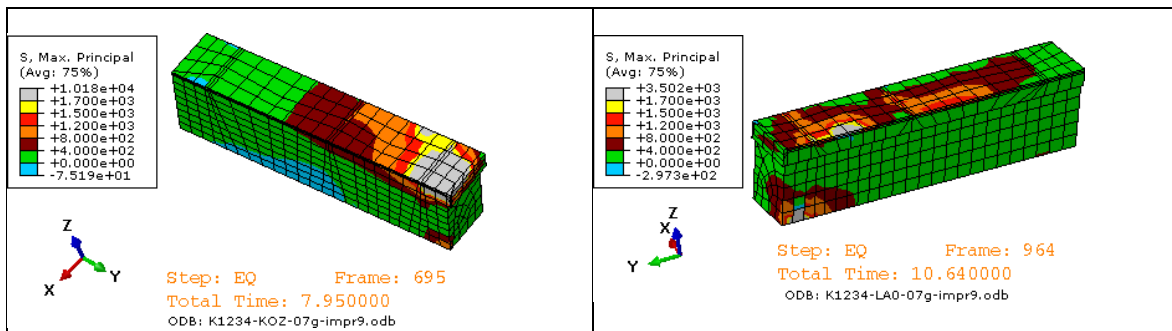
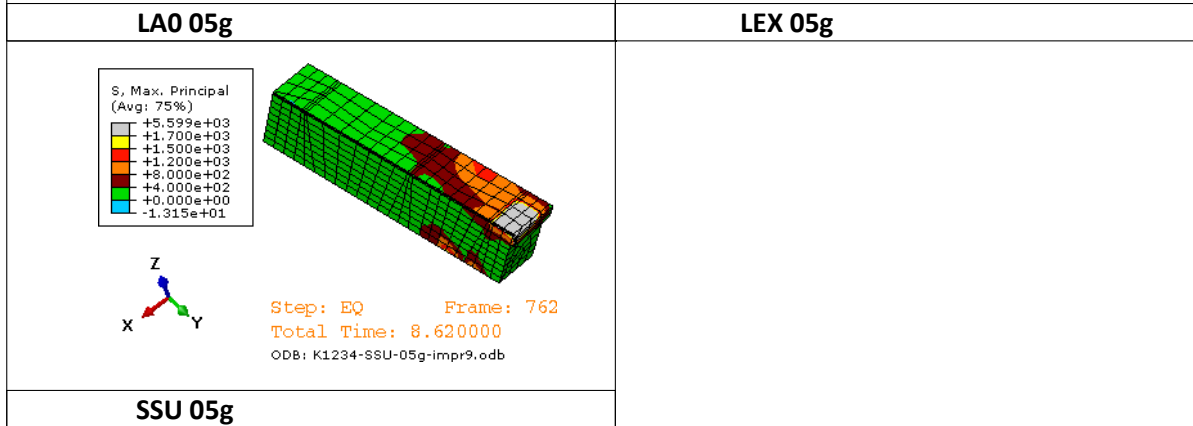
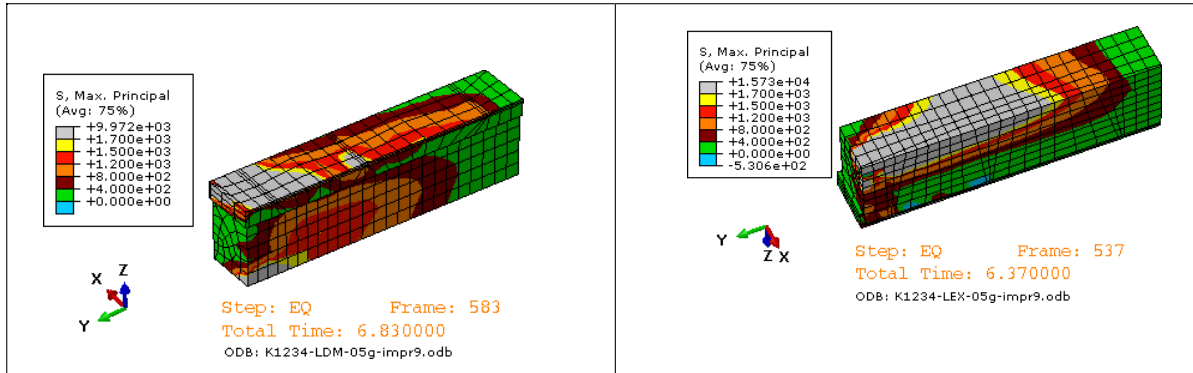
ΜΕΛΟΣ ΕΡΑ4.Μ

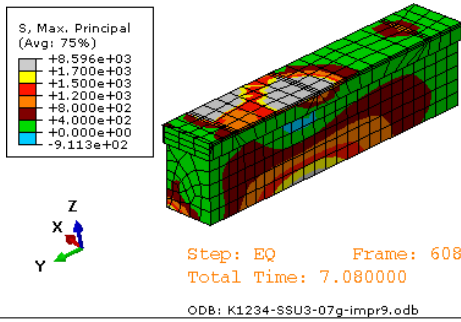




ΜΕΛΟΣ ΕΡΒ1.Μ

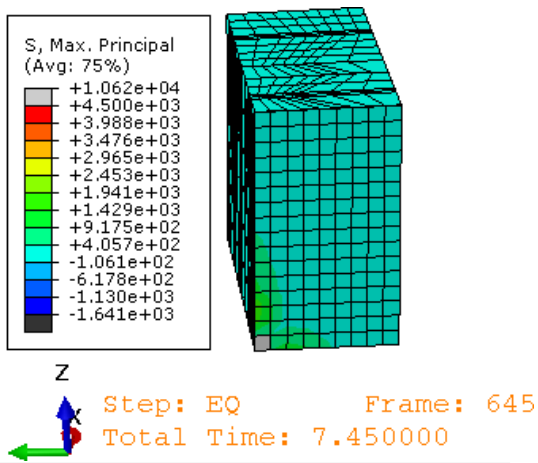




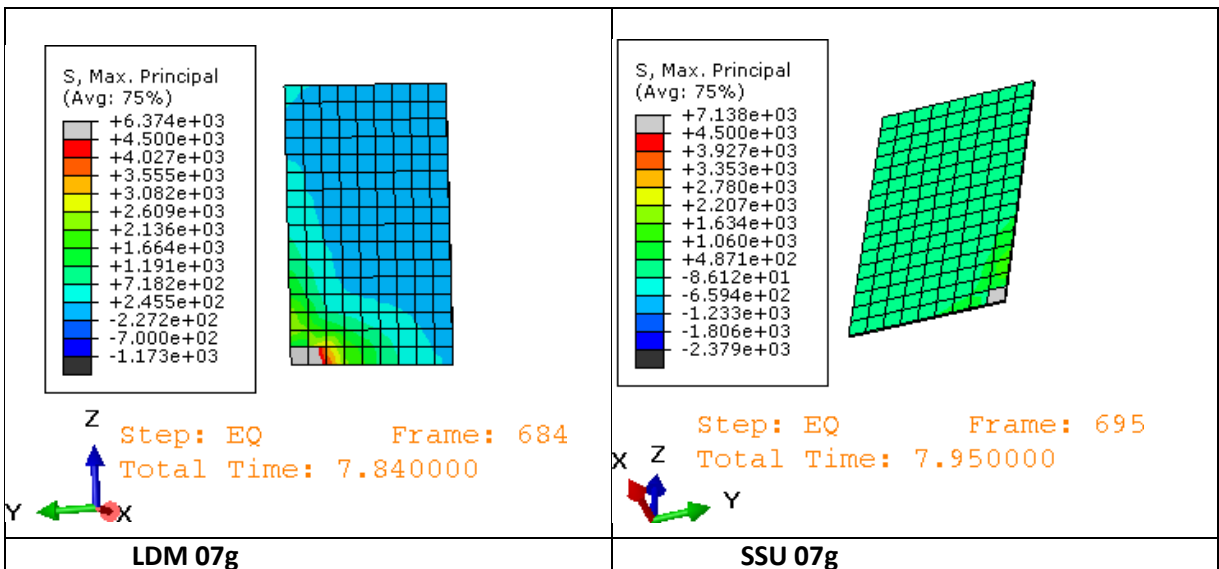


SSU 07g

ΜΕΛΟΣ ΕΡΒ4.Μ

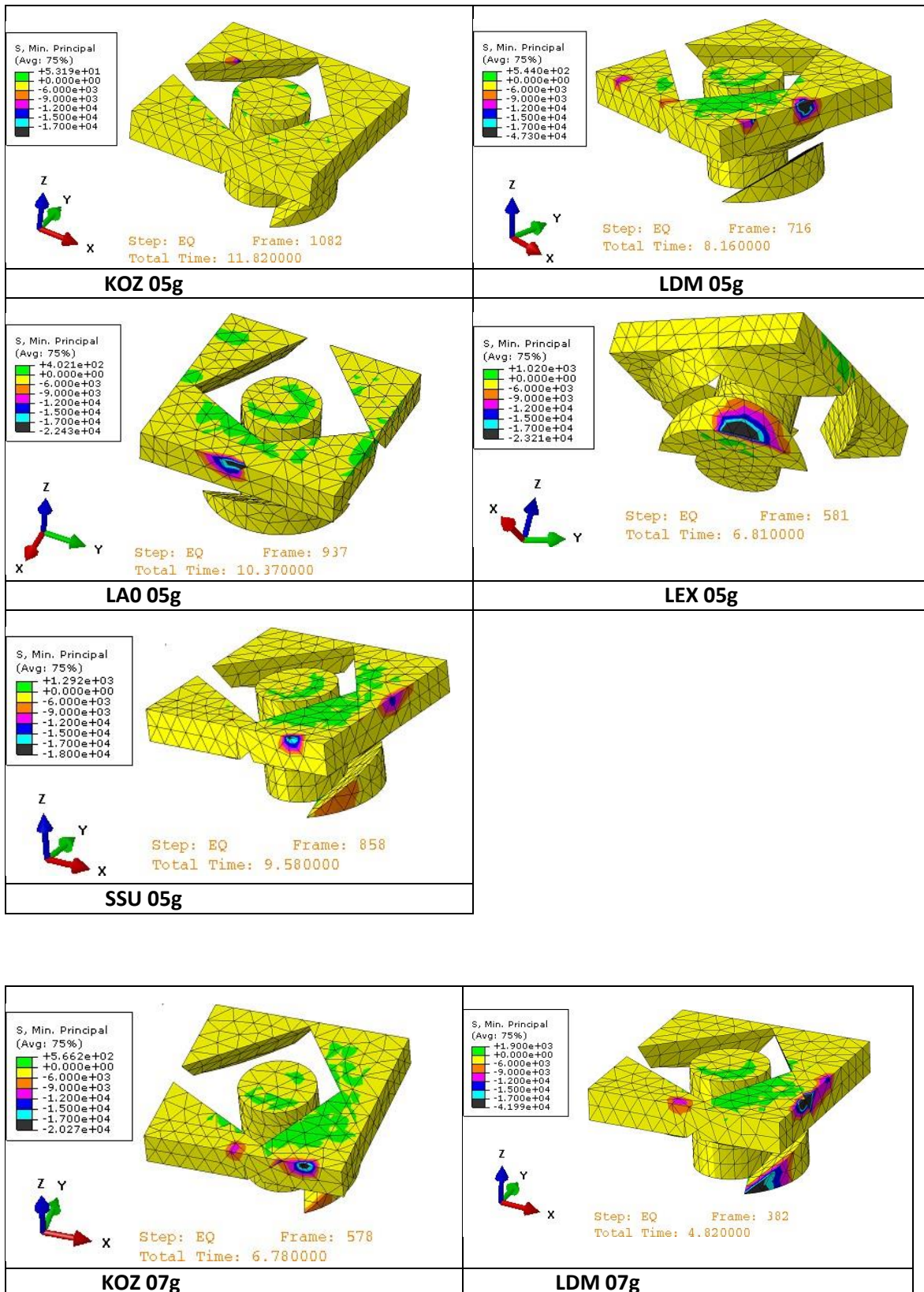


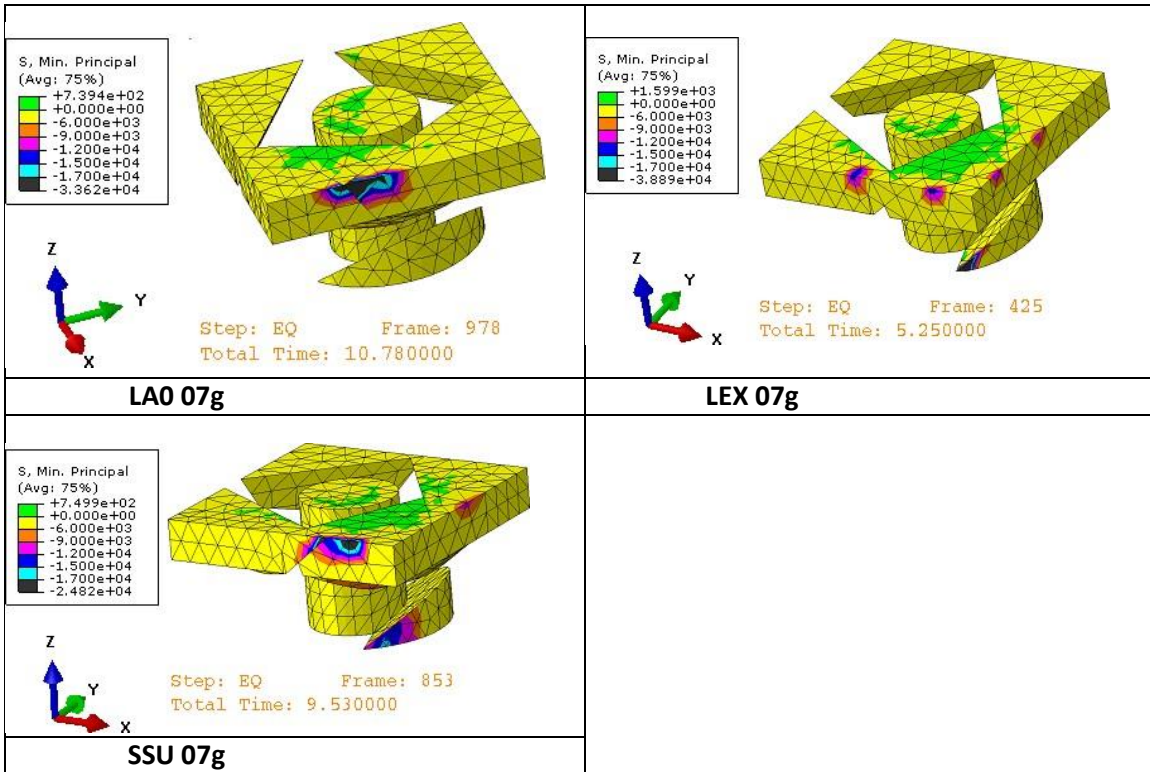
LEX 05g



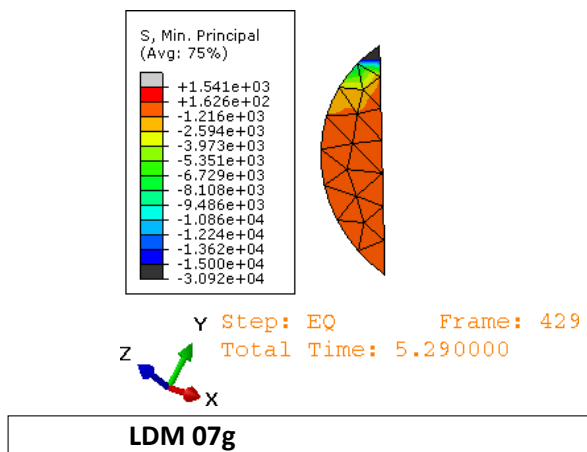
Π.3.2 Θλίψη

ΜΕΛΟΣ Κ2_TOP.M

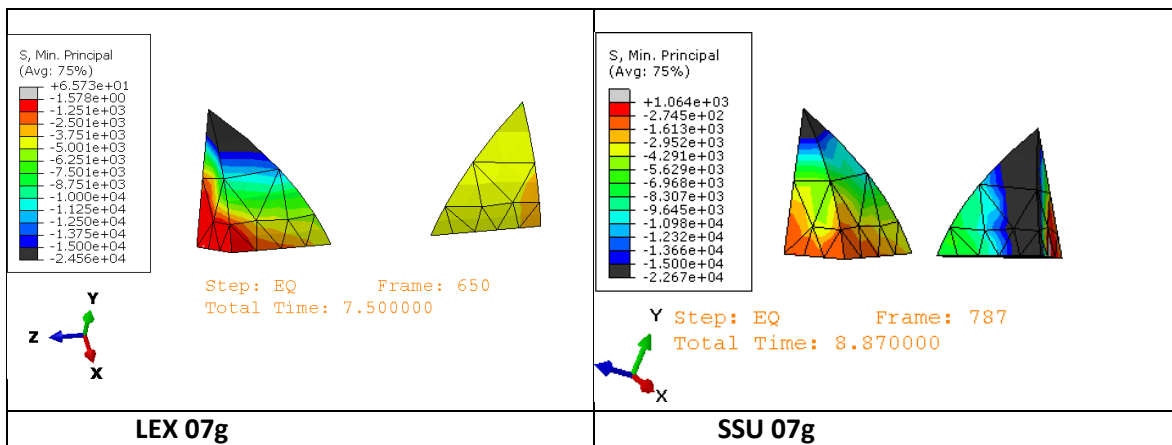
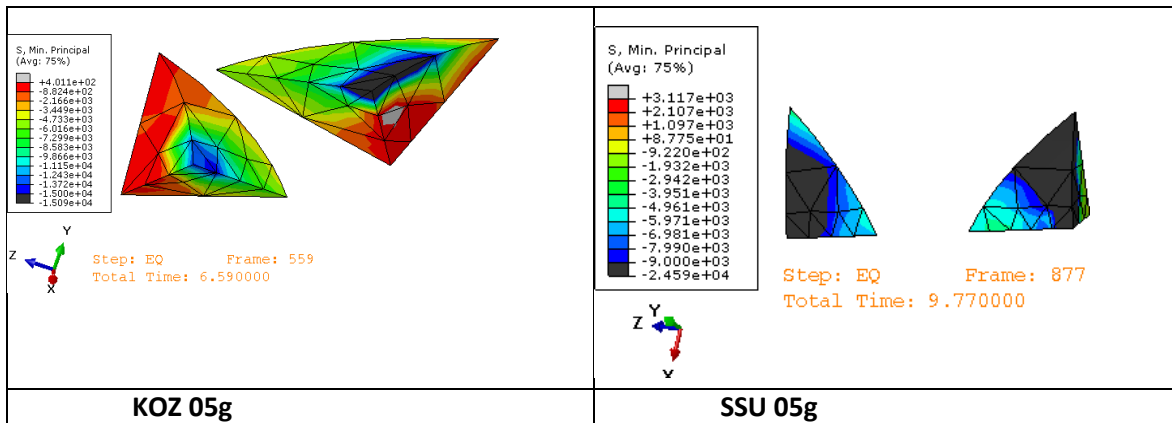




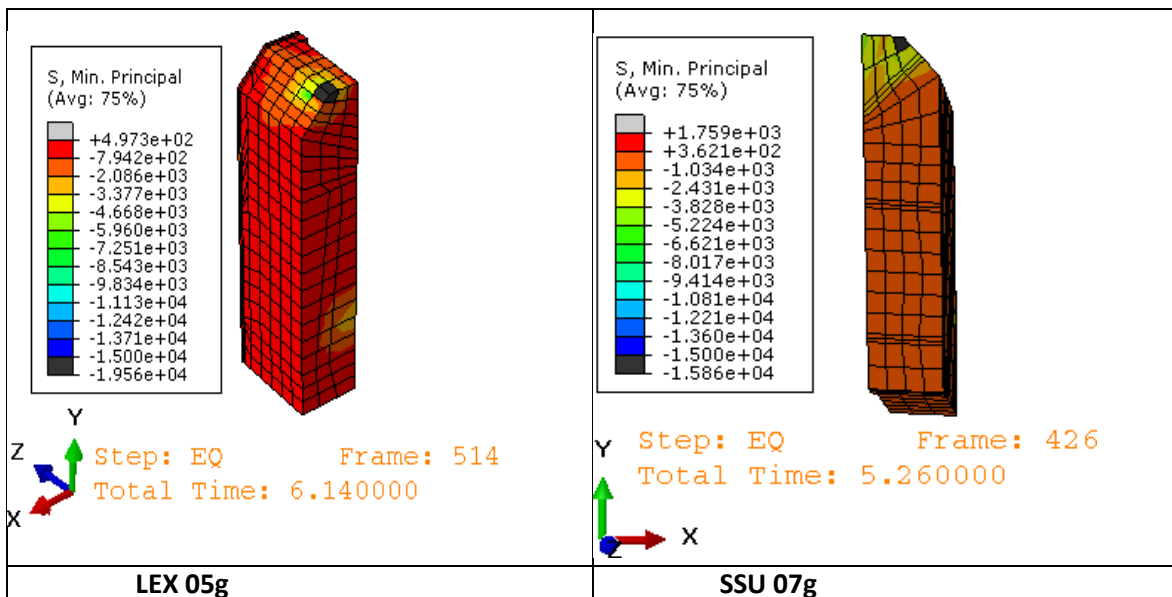
ΜΕΛΟΣ Κ3_T5.M



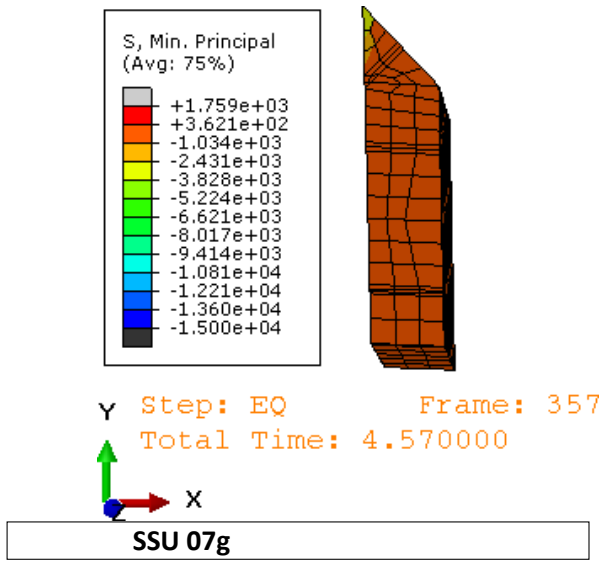
ΜΕΛΟΣ K4_T2.M



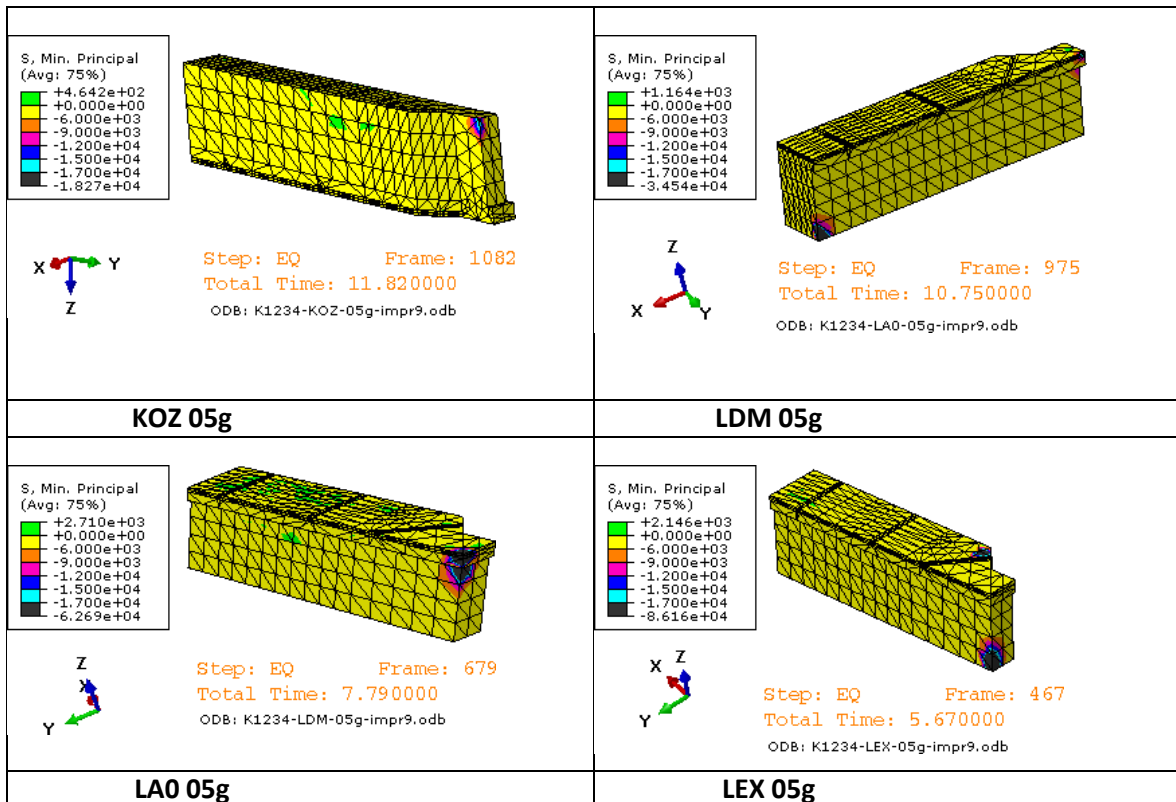
ΜΕΛΟΣ ΕΡΑ1.M

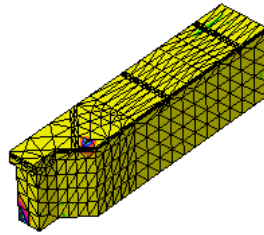
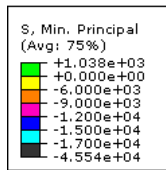


ΜΕΛΟΣ ΕΡΑ2.Μ



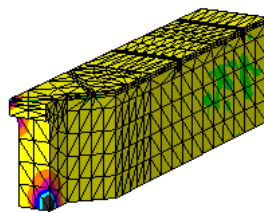
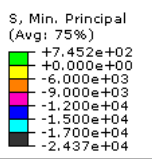
ΜΕΛΟΣ ΕΡΑ3.Μ





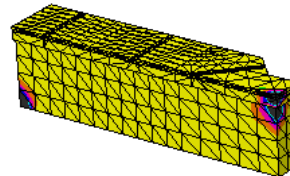
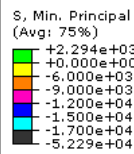
Step: EQ Frame: 762
 Total Time: 8.620000
 ODB: K1234-SSU-05g-impr9.odb

SSU 05g



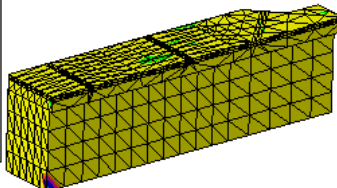
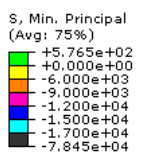
Step: EQ Frame: 651
 Total Time: 7.510000
 ODB: K1234-KOZ-07g-impr9.odb

KOZ 07g



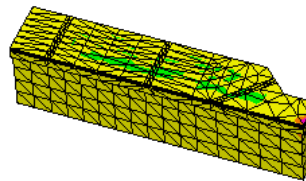
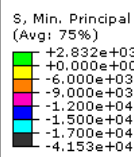
Step: EQ Frame: 976
 Total Time: 10.760000
 ODB: K1234-LA0-07g-impr9.odb

LDM 07g



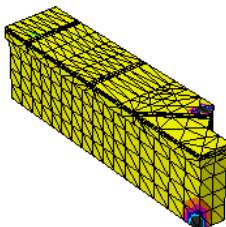
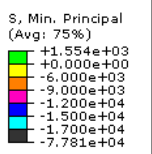
Step: EQ Frame: 651
 Total Time: 7.510000
 ODB: K1234-LDM-07g-impr9.odb

LA0 07g



Step: EQ Frame: 609
 Total Time: 7.090000
 ODB: K1234-LEX-07g-impr9.odb

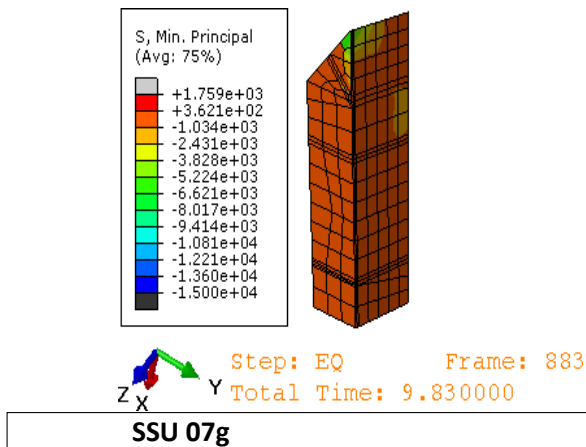
LEX 07g



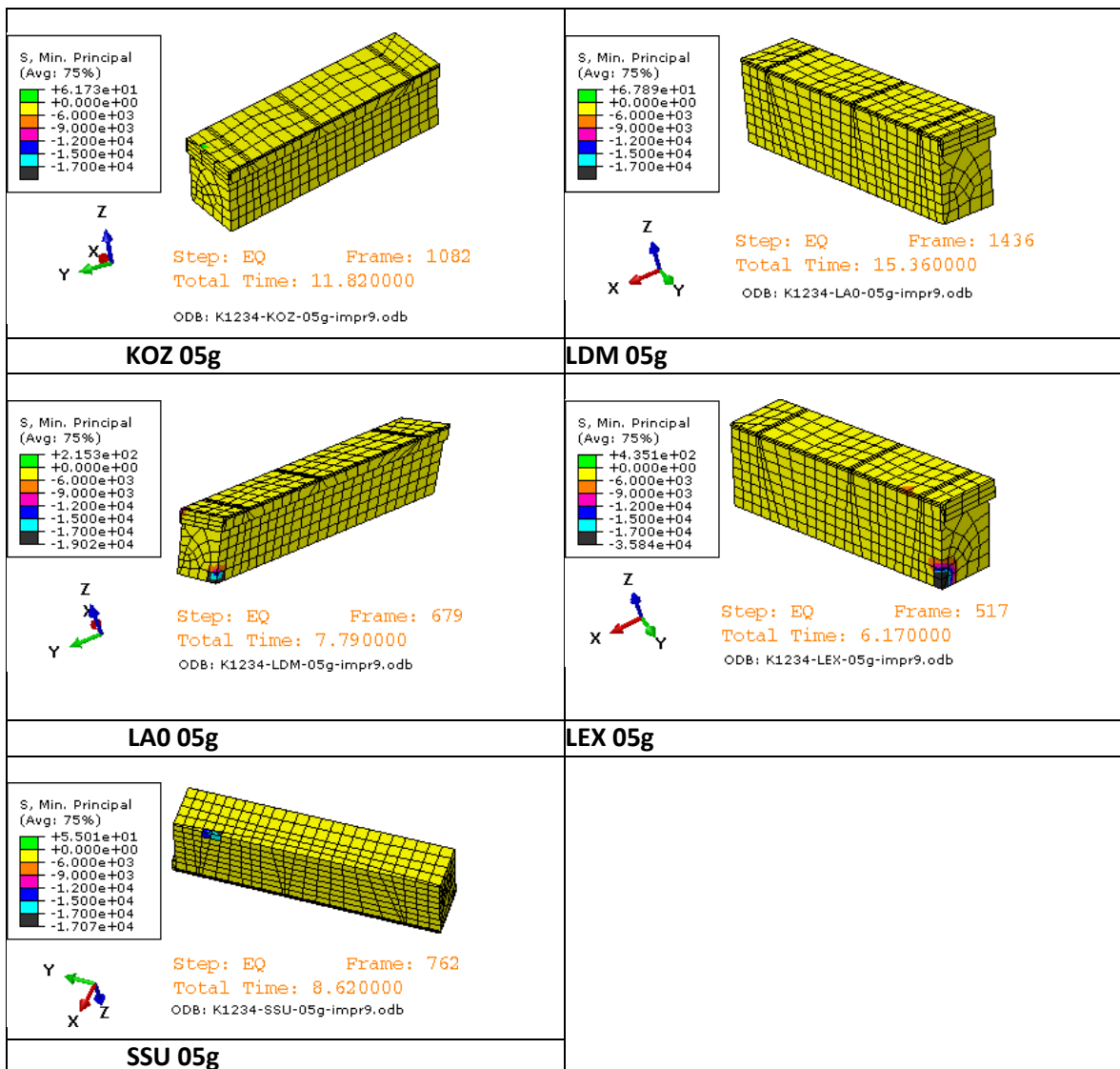
Step: EQ Frame: 552
 Total Time: 6.520000
 ODB: K1234-SSU3-07g-impr9.odb

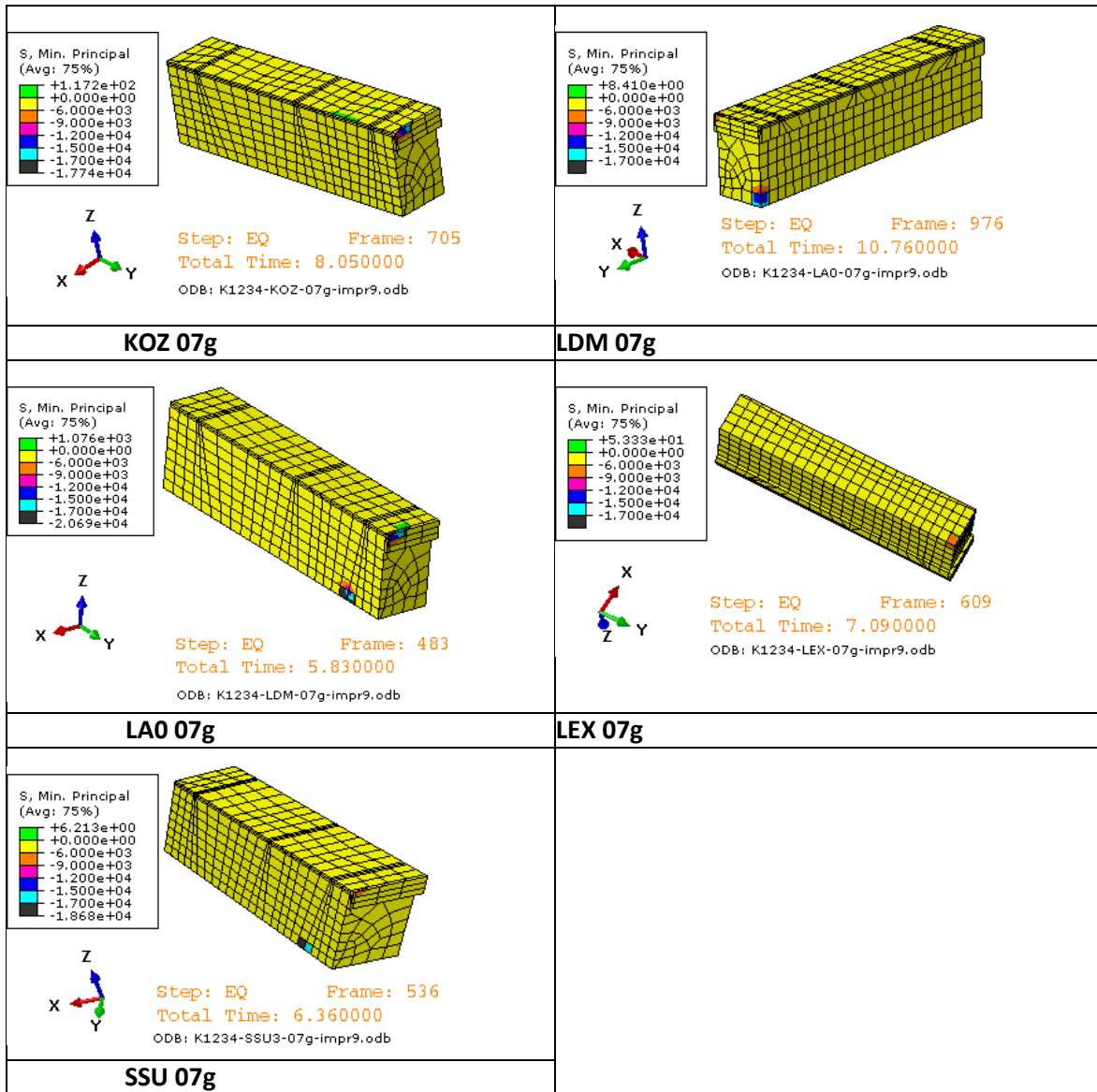
SSU 07g

ΜΕΛΟΣ ΕΡΑ4.M

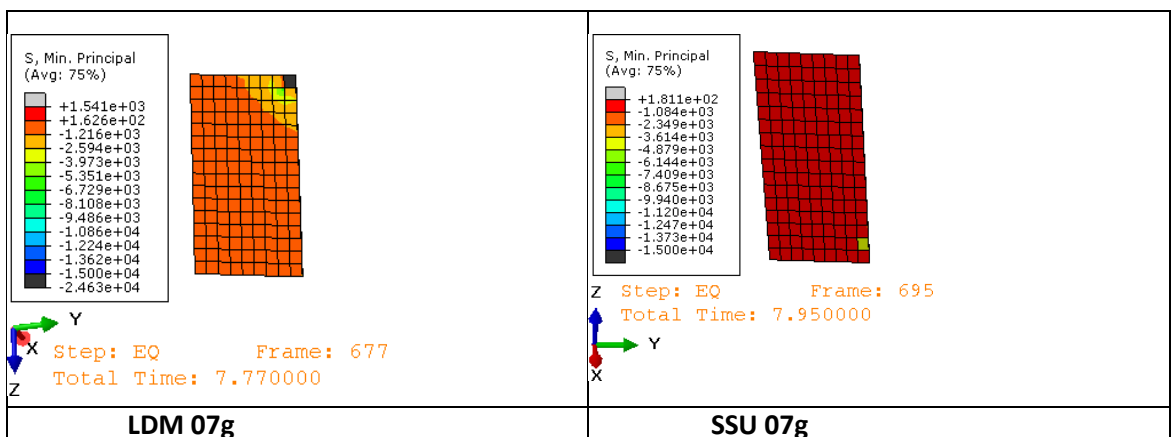


ΜΕΛΟΣ ΕΡΒ1.M





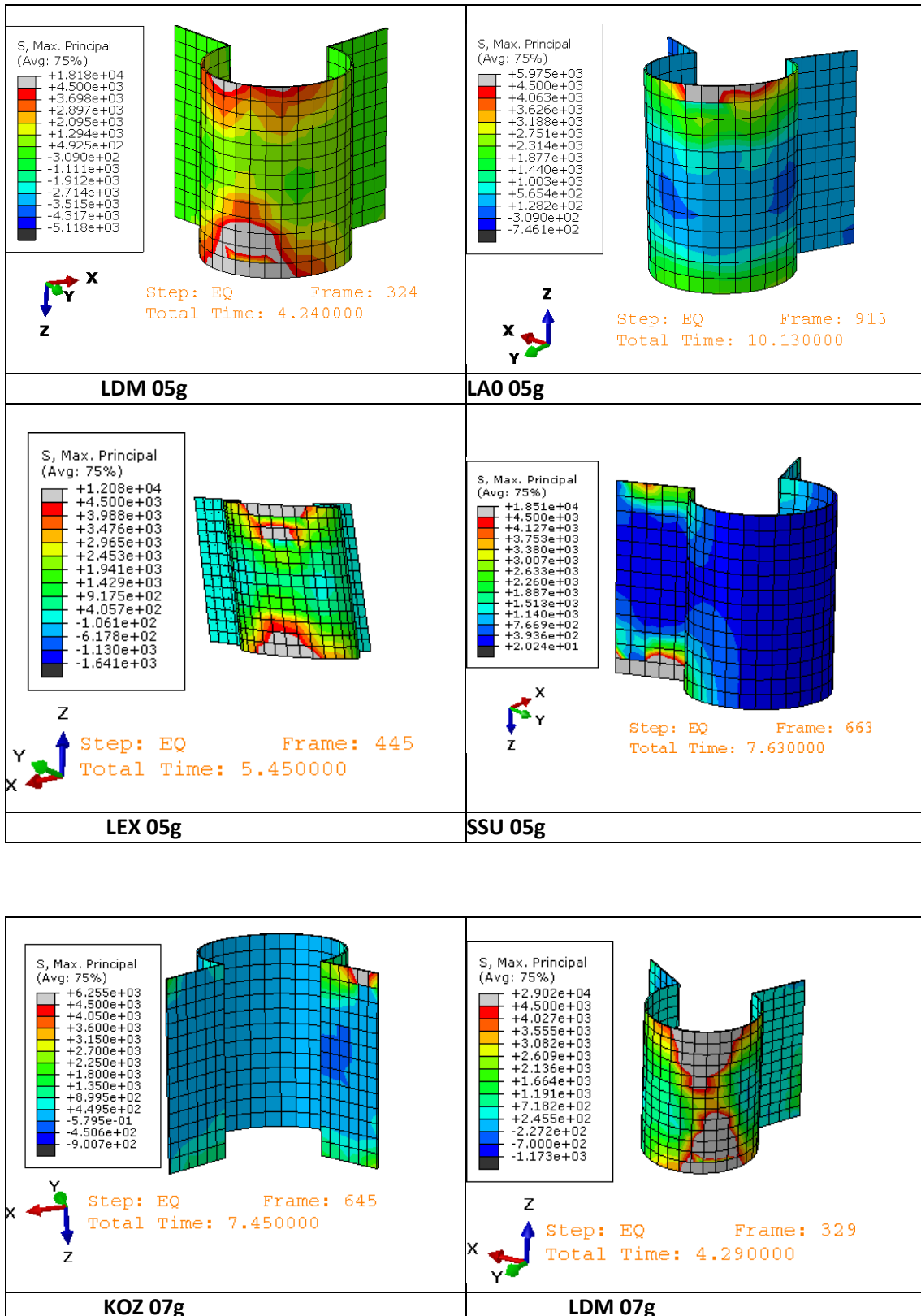
ΜΕΛΟΣ EPB4.M

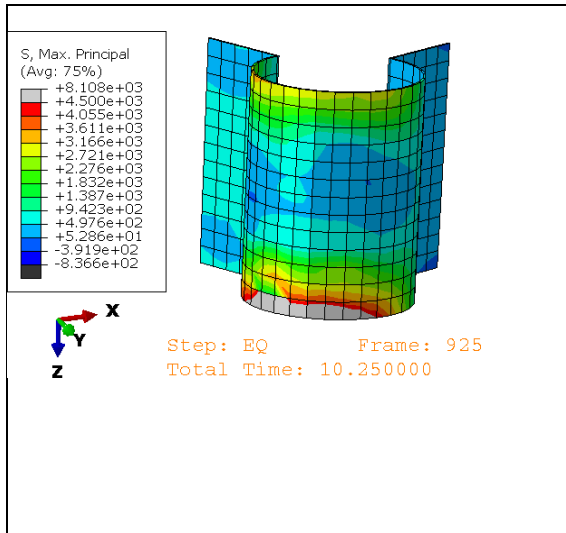


Π.4 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε κονιάματα σύνδεσης

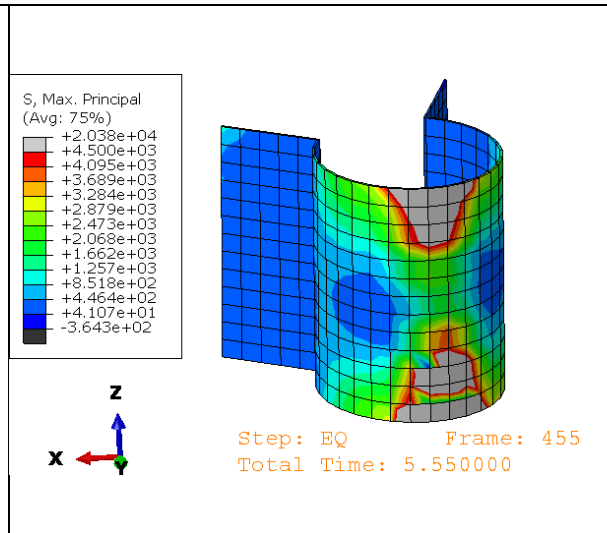
Π.4.1 Εφελκυσμός

ΜΕΛΟΣ Κ2_T3.M

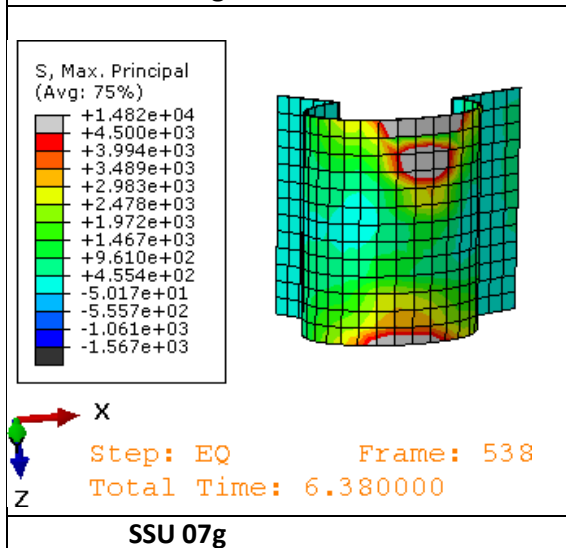




LAO 07g

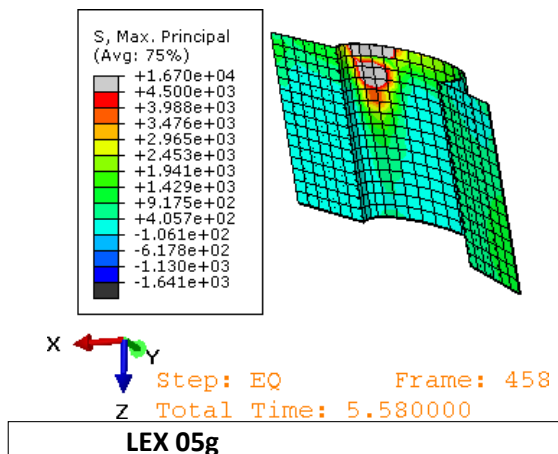


LEX 07g

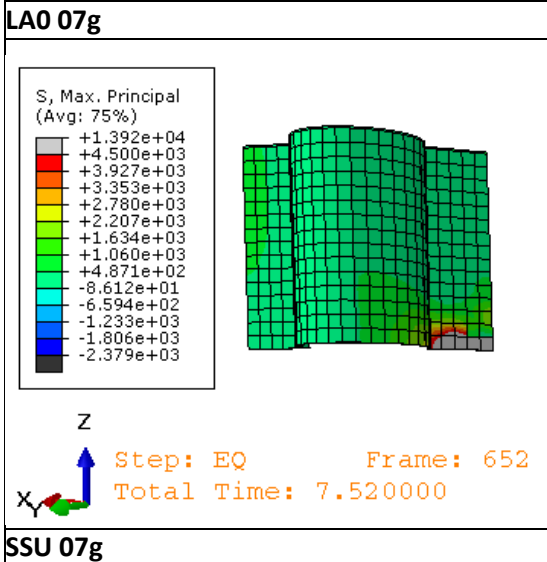
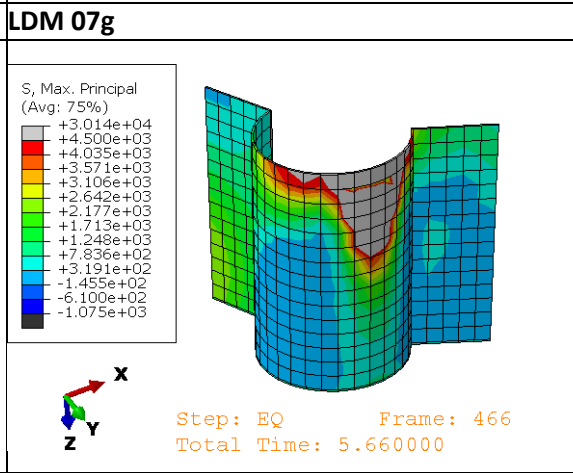
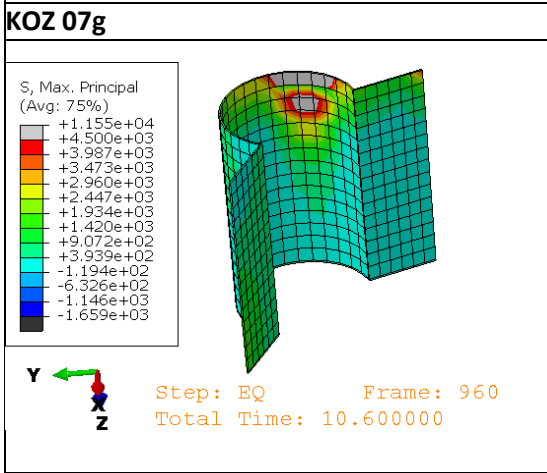
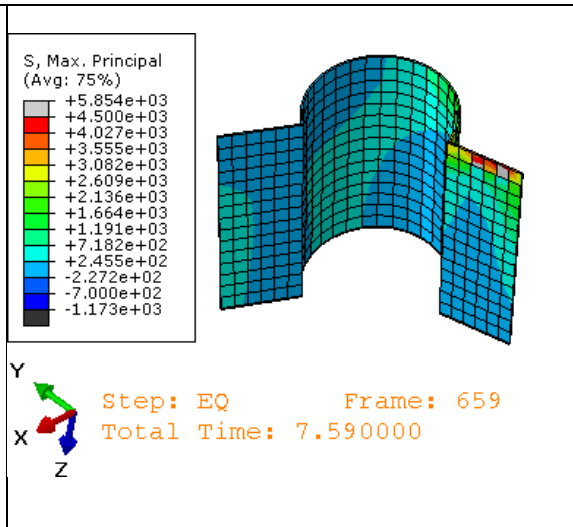
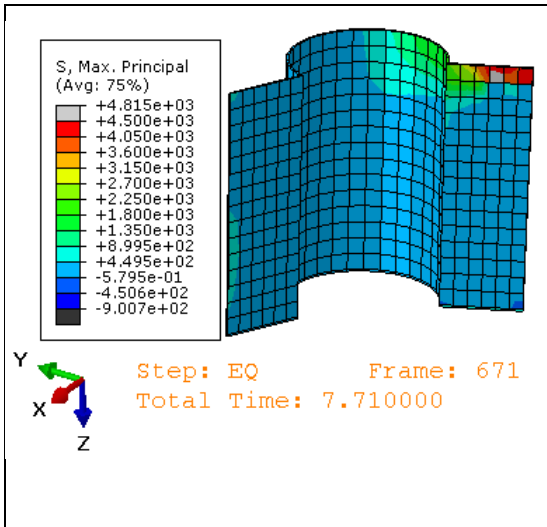


SSU 07g

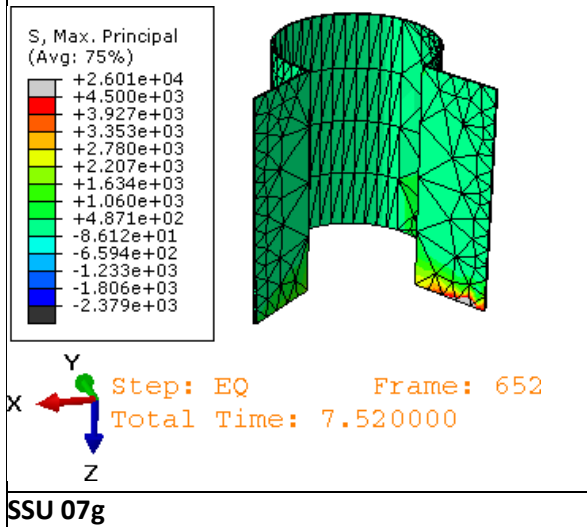
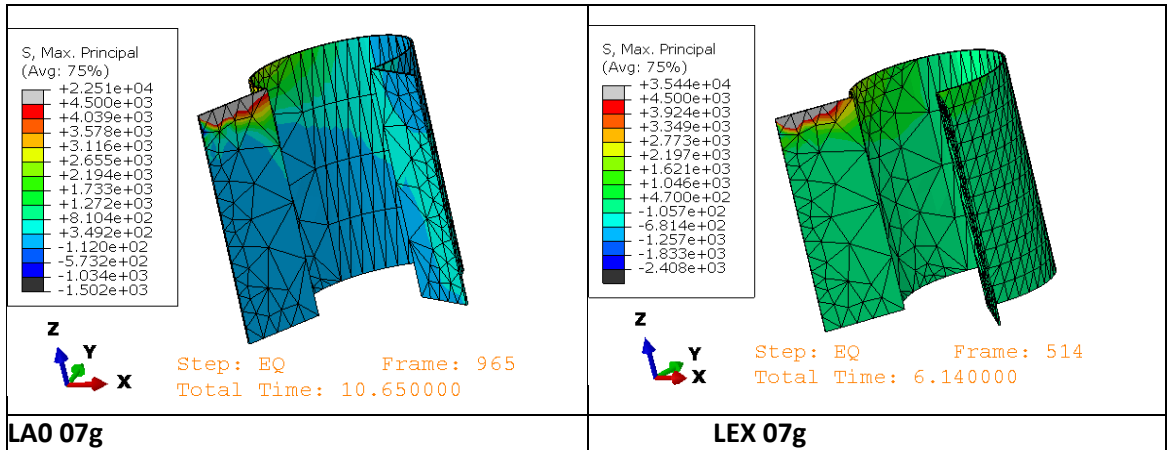
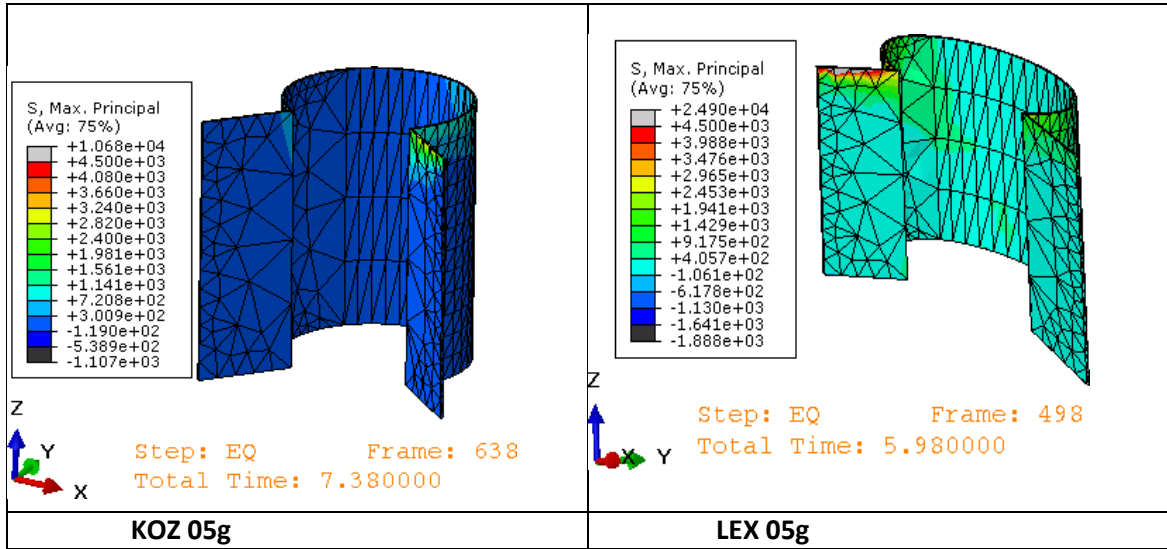
ΜΕΛΟΣ K2_T5.M



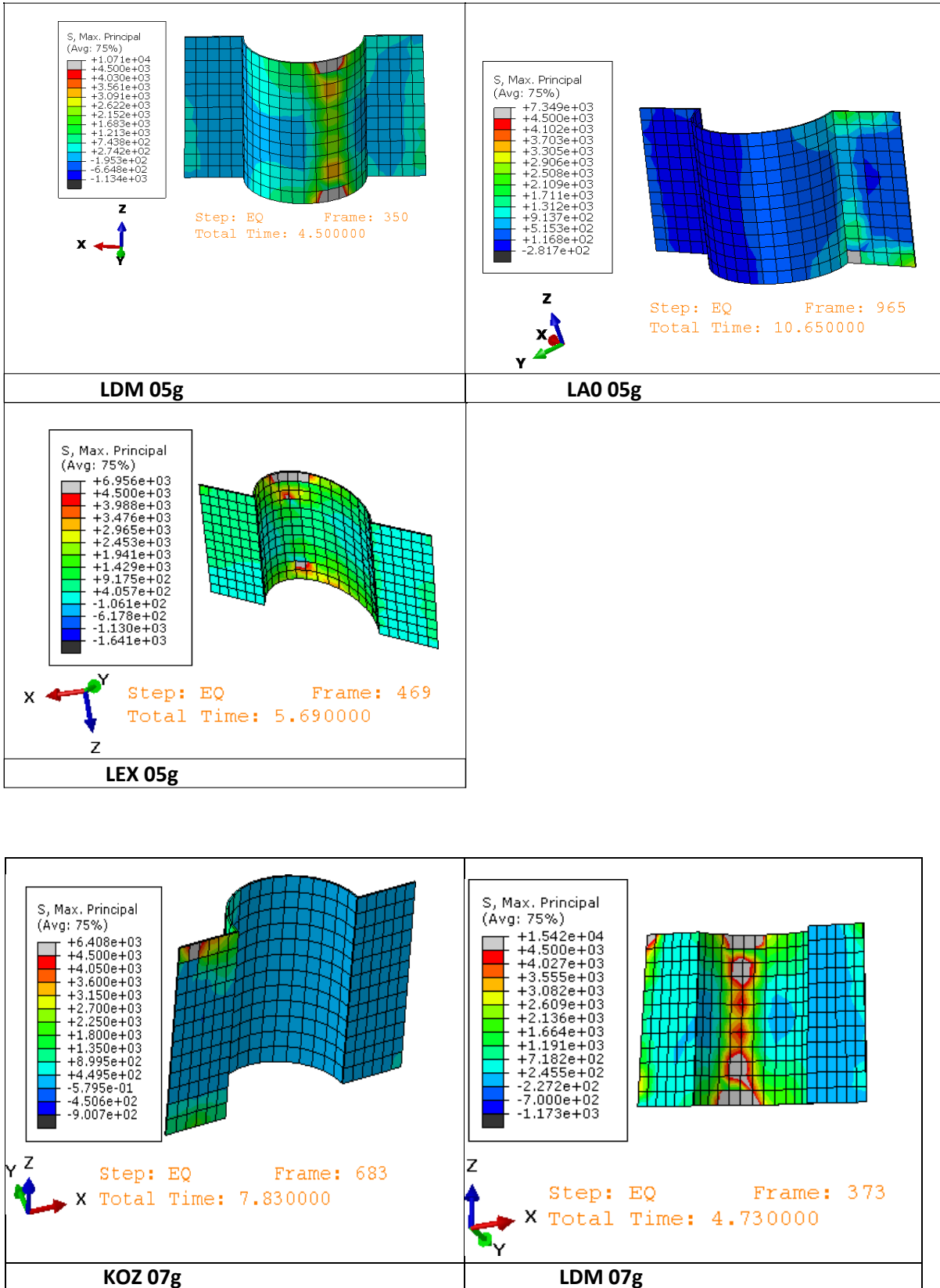
LEX 05g

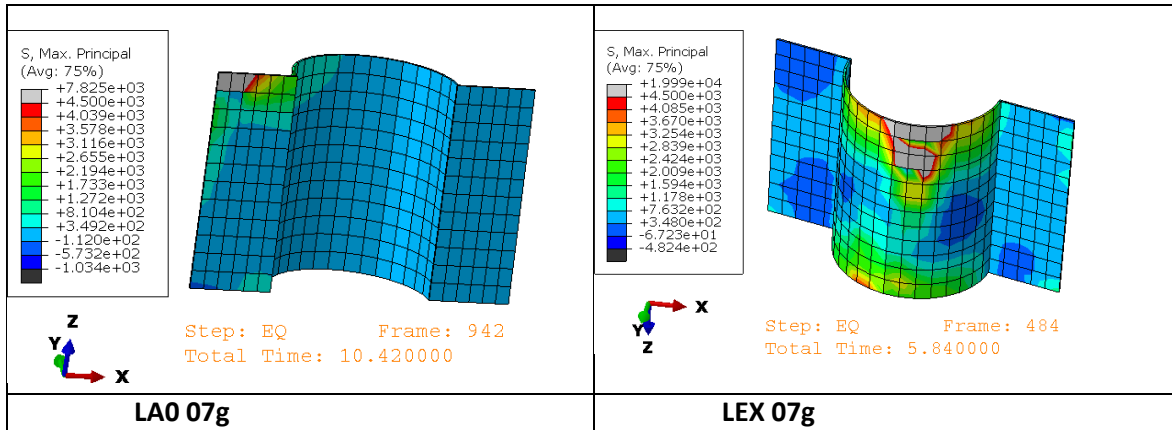


ΜΕΛΟΣ K2_T6.M

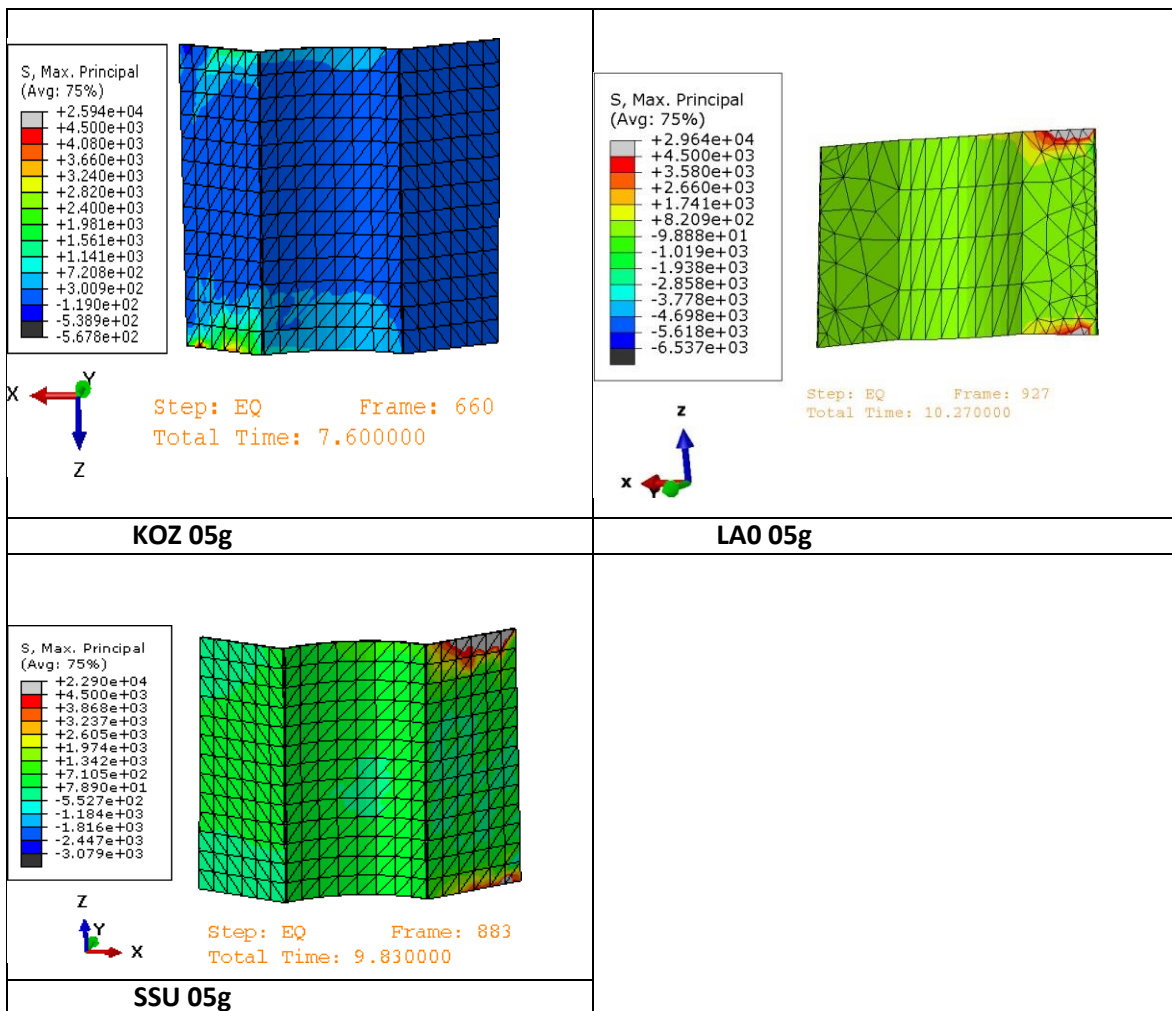


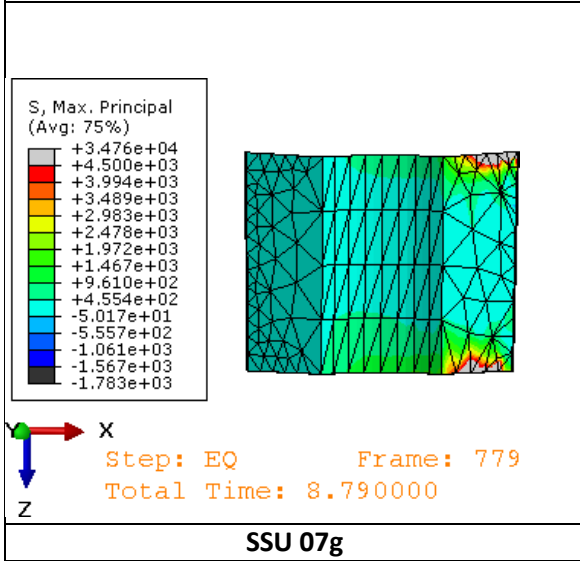
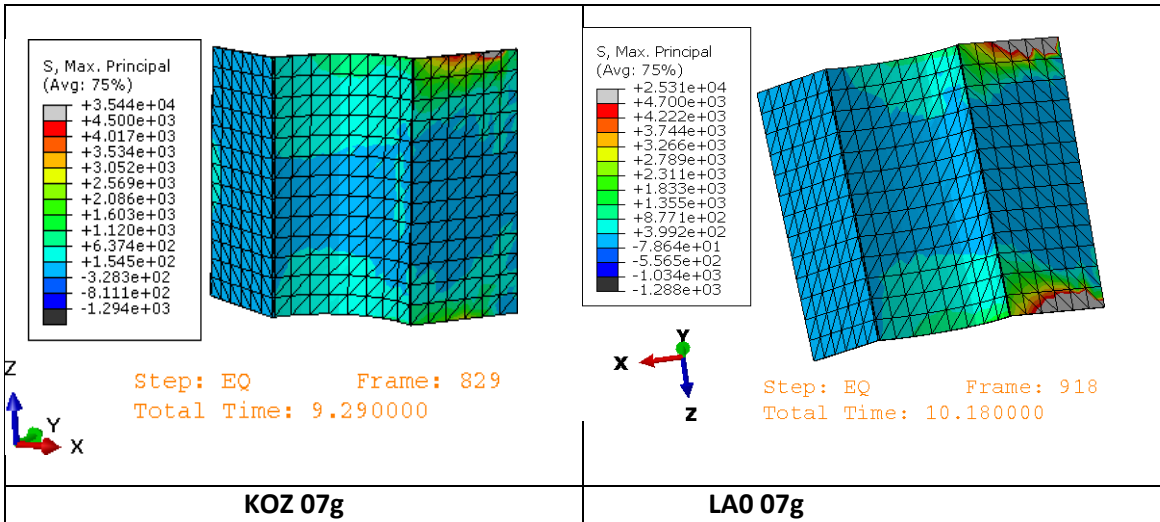
ΜΕΛΟΣ Κ3_T8.M



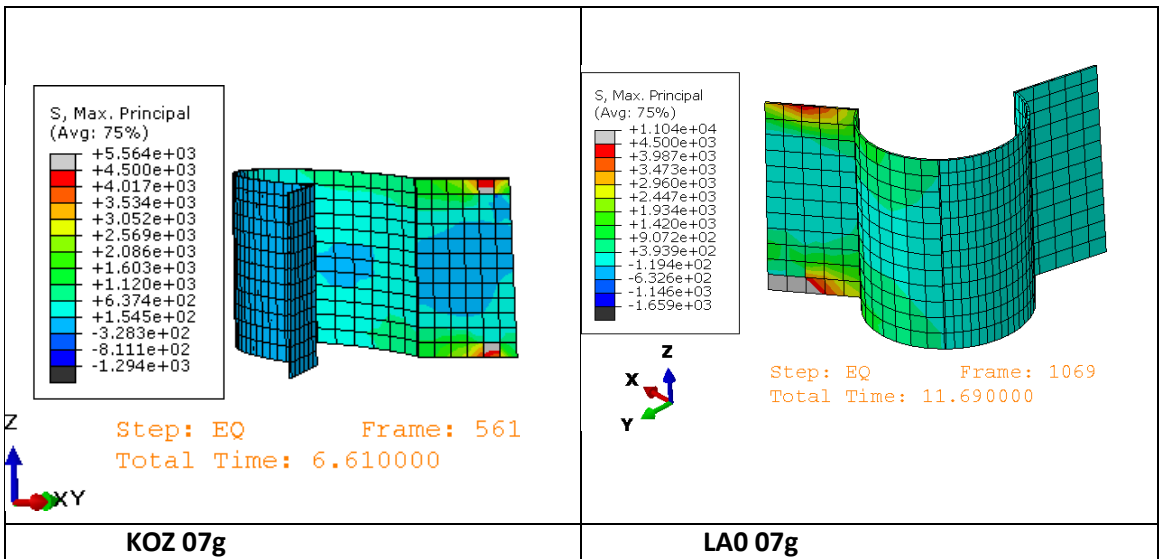


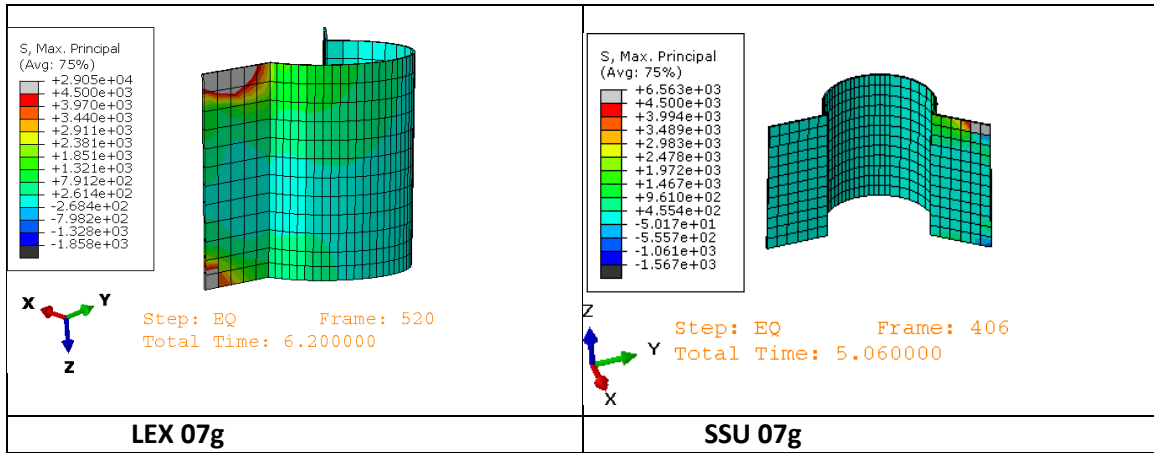
ΜΕΛΟΣ K4_T2.M



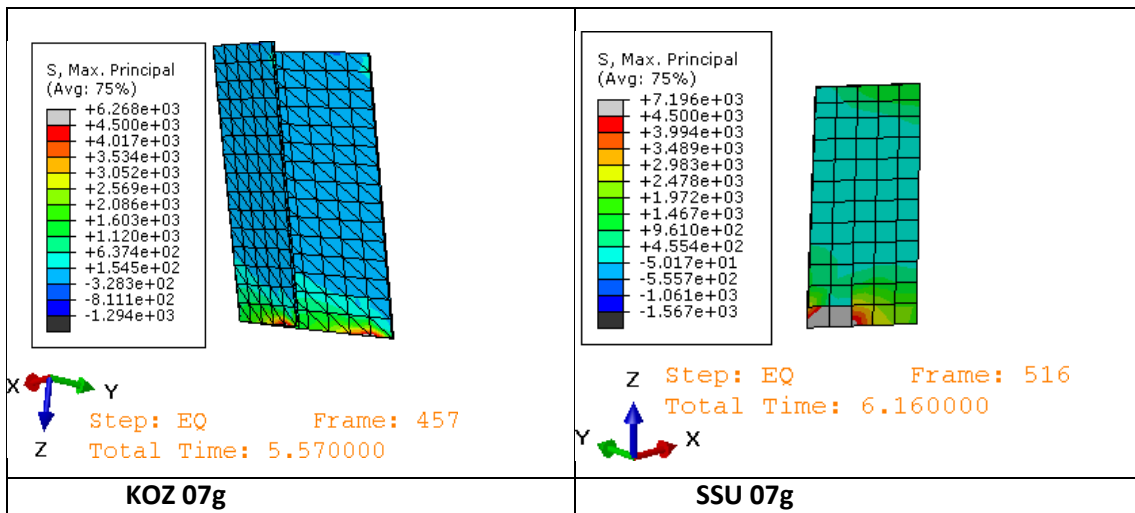


ΜΕΛΟΣ K4_T4.M

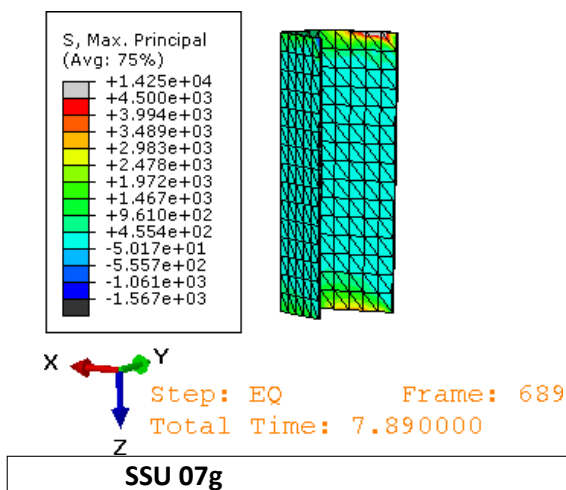




ΜΕΛΟΣ Κ4_T4.M

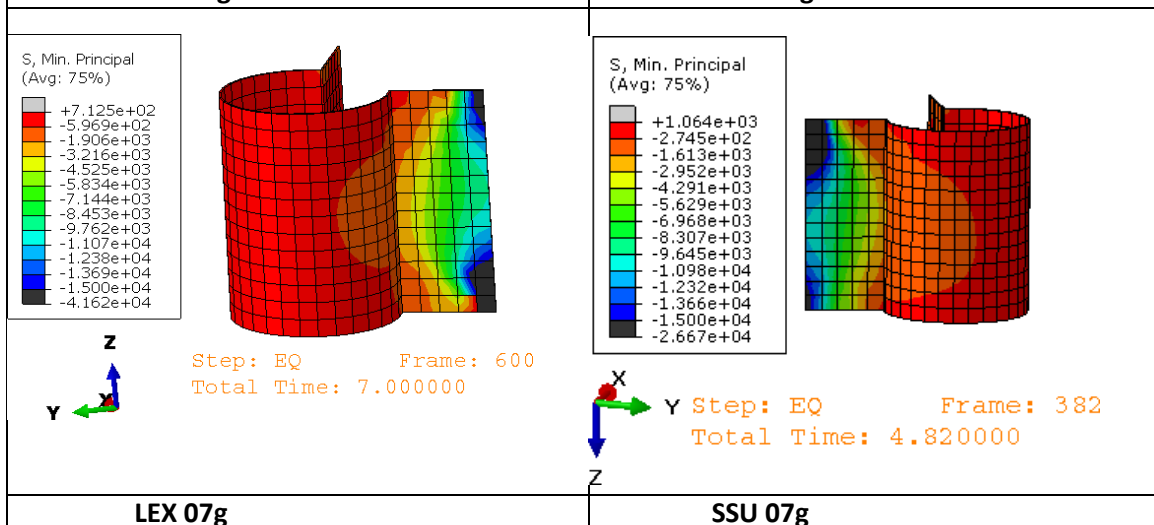
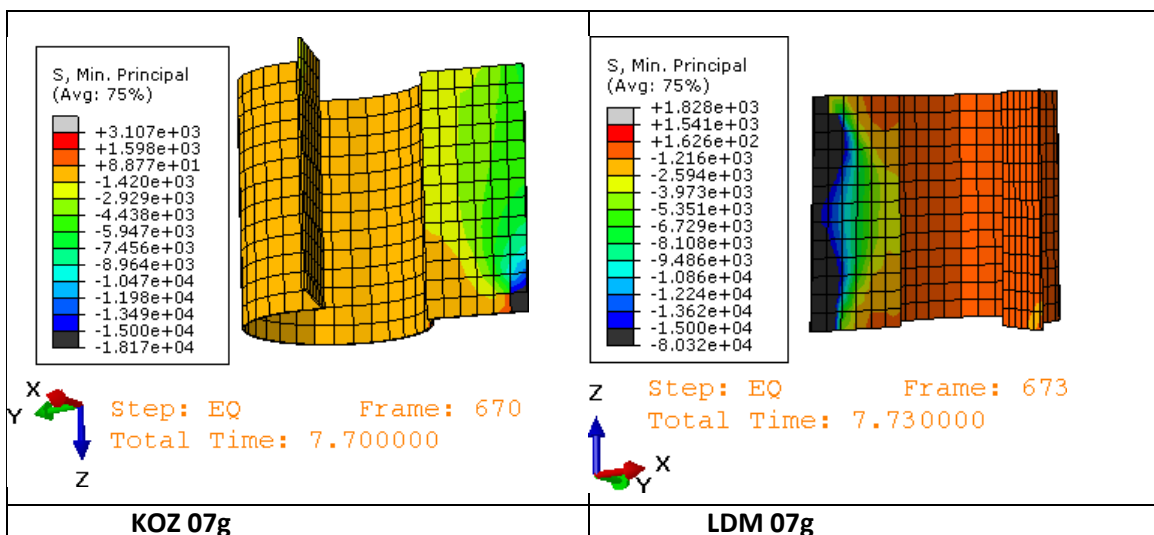
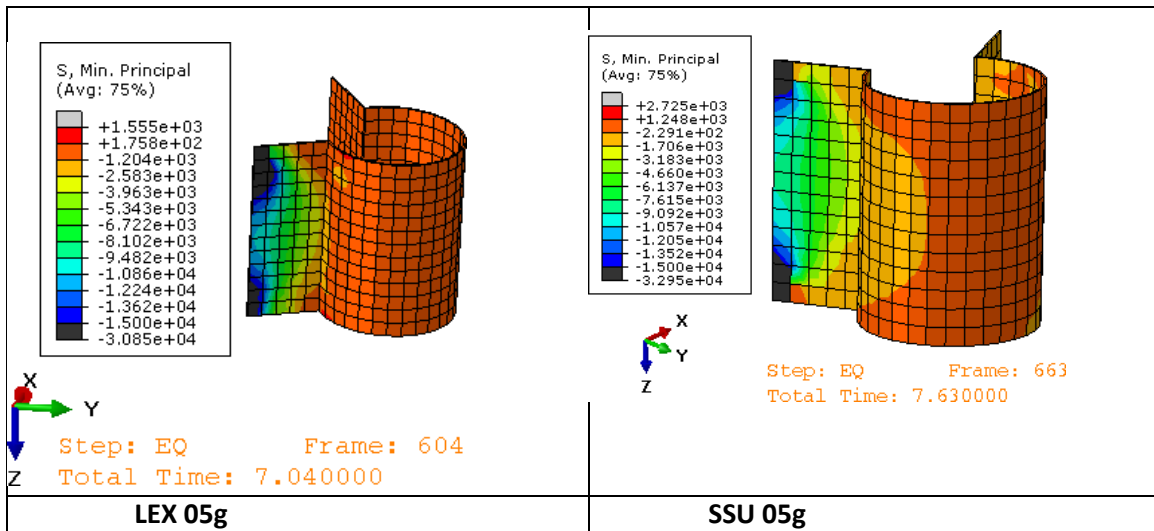


ΜΕΛΟΣ Κ4_T5.M

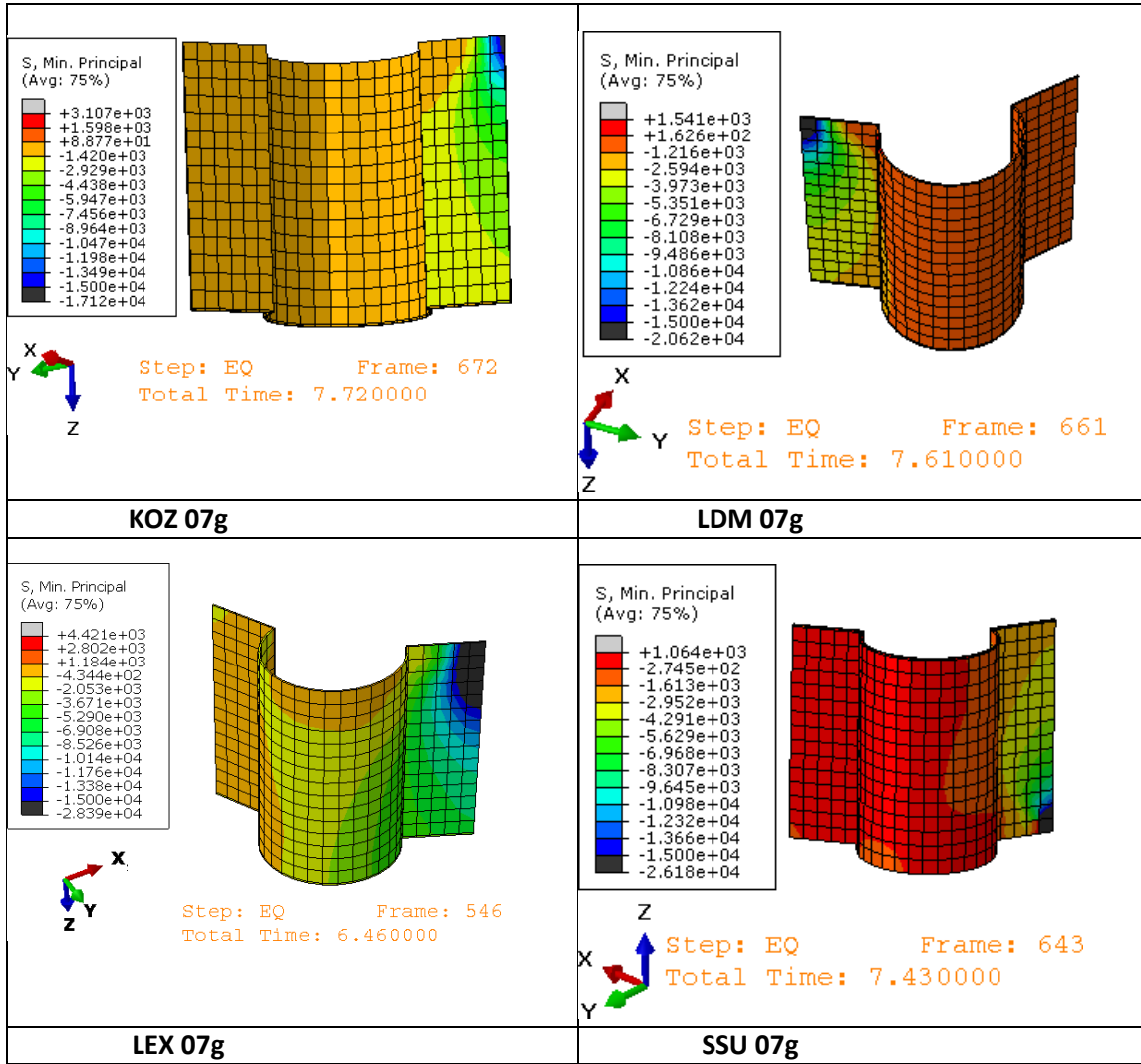


Π.4.2 Θλίψη

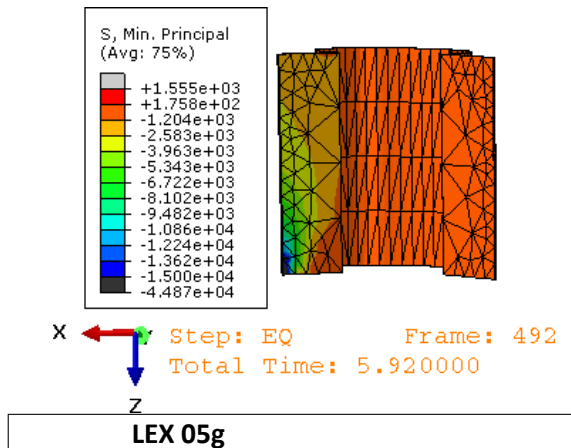
ΜΕΛΟΣ Κ2_T3.M

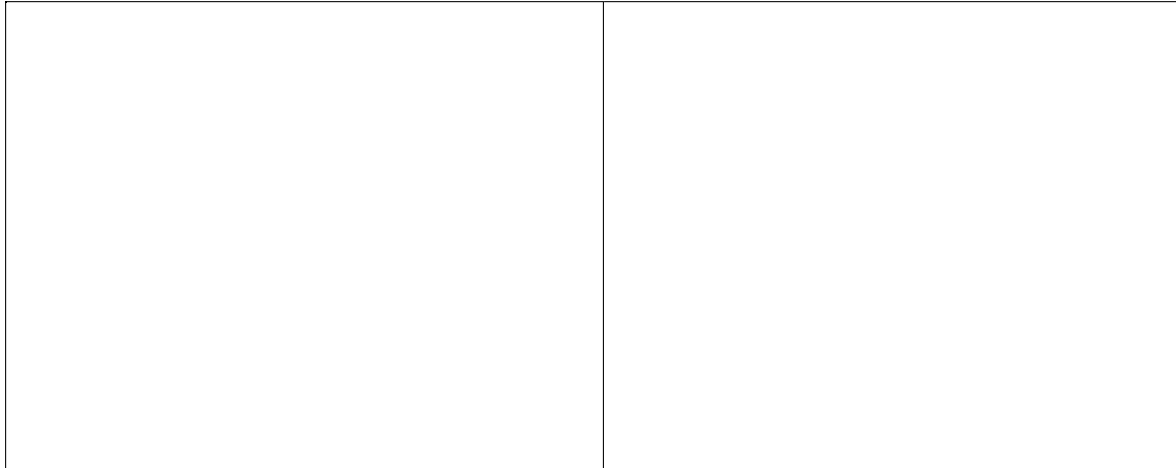


ΜΕΛΟΣ Κ2_T5.M



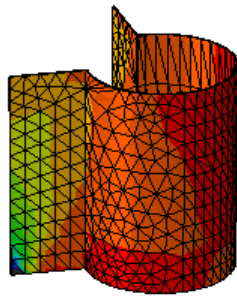
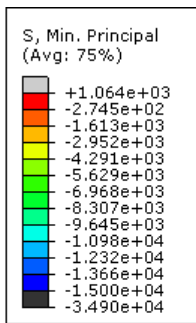
ΜΕΛΟΣ Κ2_T6.M





LAO 07g

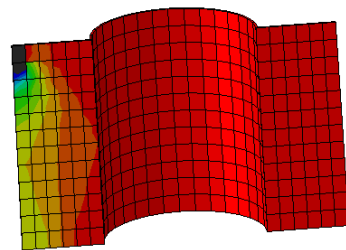
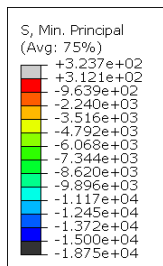
LEX 07g



Step: EQ Frame: 654
Total Time: 7.540000

SSU 07g

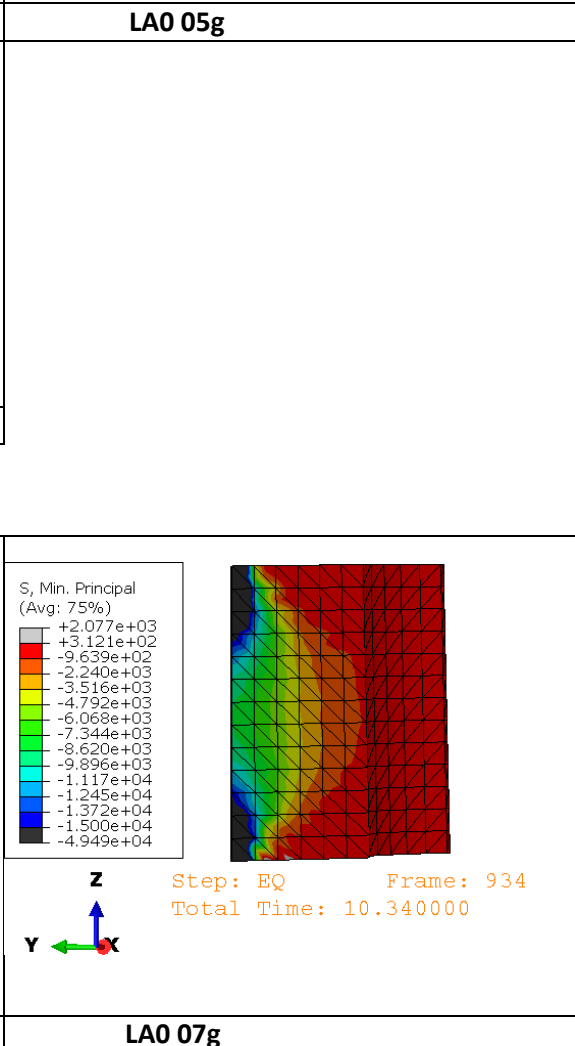
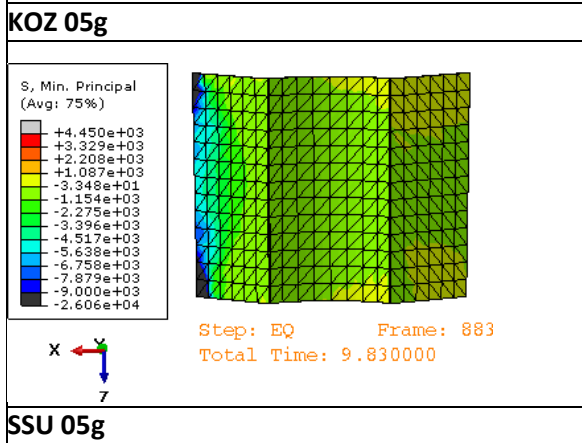
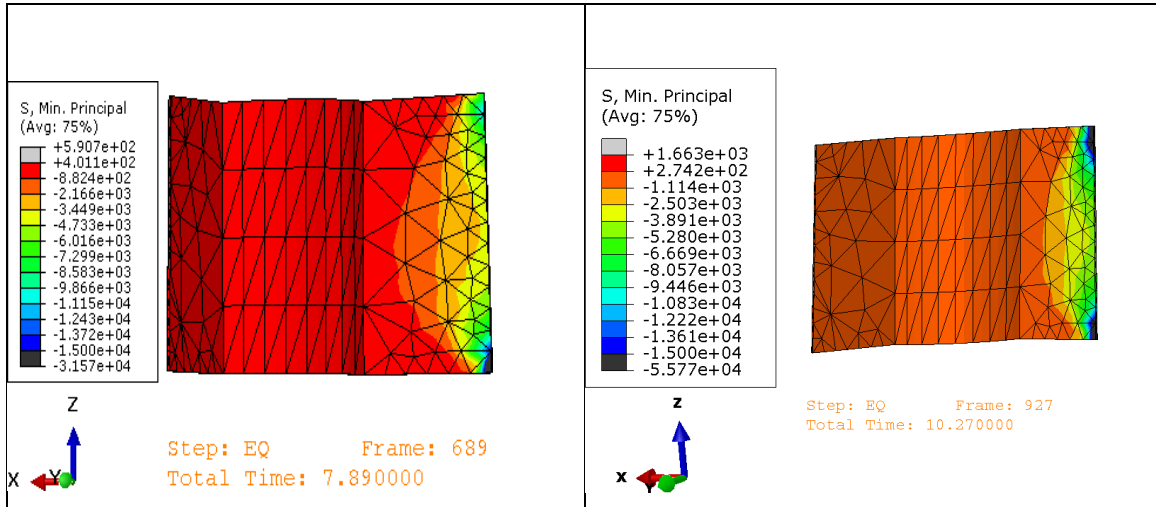
ΜΕΛΟΣ Κ3_T8.M

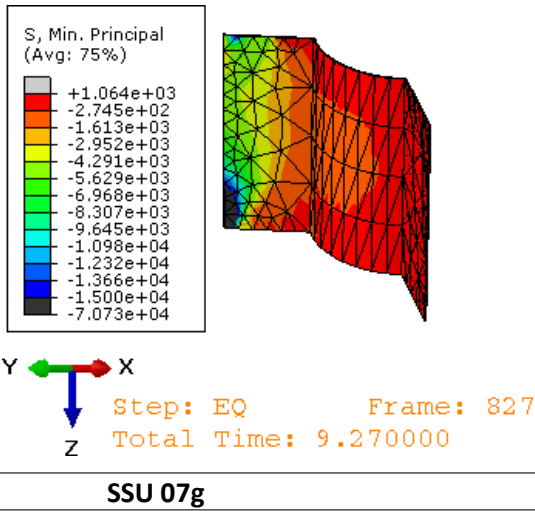


Step: EQ Frame: 940
Total Time: 10.400000

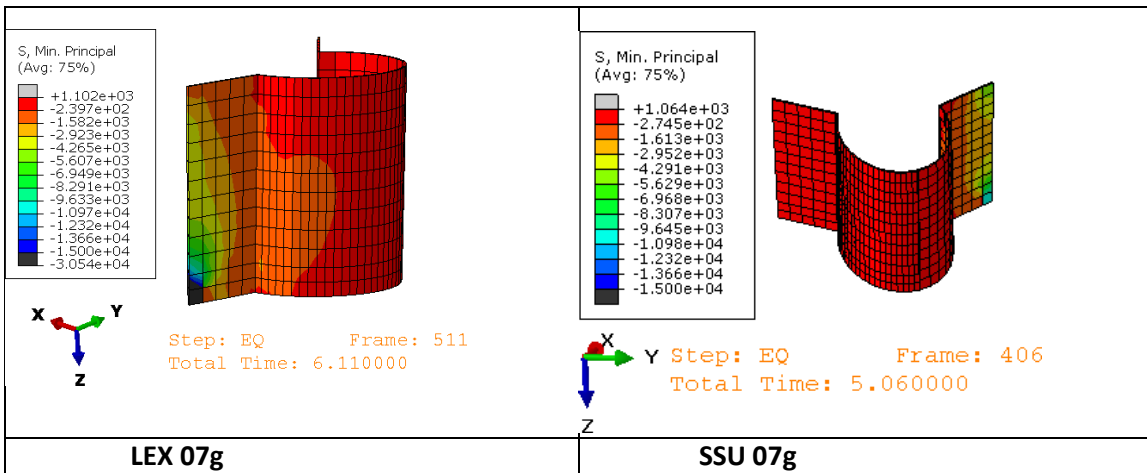
LAO 07g

ΜΕΛΟΣ K4_T2.M

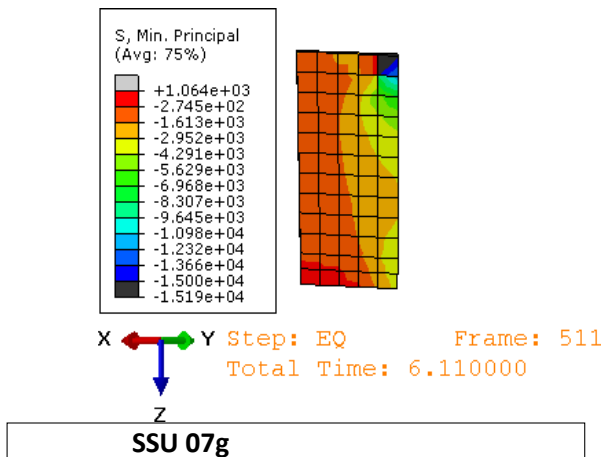




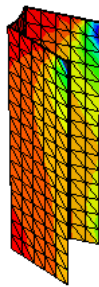
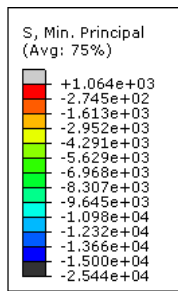
ΜΕΛΟΣ K4_T4.M



ΜΕΛΟΣ K4_T4.M



ΜΕΛΟΣ Κ4_T5.M



X ← Step: EQ Frame: 689
↓ Total Time: 7.890000
Z