



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ
ΝΑΟΥ ΤΟΥ ΠΥΘΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ ΣΤΗ ΡΟΔΟ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**



Διπλωματική Εργασία

Ηρώ-Ειρήνη Μυταρέλη

Αριθμός μητρώου: 01112006

Επιβλέπων: Καθηγητής Ιωάννης Ψυχάρης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2018



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας

**ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ
ΝΑΟΥ ΤΟΥ ΠΥΘΙΟΥ ΑΠΟΛΩΝΑ ΣΤΗ ΡΟΔΟ ΚΑΙ ΤΗΣ
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ**



Διπλωματική Εργασία
Ηρώ-Ειρήνη Μυταρέλη

Αριθμός μητρώου: 01112006

Επιβλέπων: Καθηγητής Ιωάννης Ψυχάρης
Αθήνα, Φεβρουάριος 2018

Copyright © Ηρώ-Ειρήνη Μυταρέλη, 2018
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση σε αρχείο πληροφοριών, διανομή, αναπαραγωγή, μετάφραση ή μετάδοση της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό, υπό οποιαδήποτε μορφή και με οποιοδήποτε μέσο επικοινωνίας, ηλεκτρονικό ή μηχανικό, χωρίς την προηγούμενη έγγραφη άδεια της συγγραφέως. Επιτρέπεται η αναπαραγωγή, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν στη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τη συγγραφέα.

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από τη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων της συγγραφέως (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Copyright © Iro-Eirini Mytareli, 2018
All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organisation (L. 5343/1932, art. 202).

Ηρώ-Ειρήνη Μυταρέλη (2018)

Διπλωματική Εργασία

“ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ ΠΥΘΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ
ΣΤΗ ΡΟΔΟ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ”

Εργαστήριο Αντισεισμικής Τεχνολογίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Iro-Eirini Mytareli (2018)

Diploma Thesis

“NUMERICAL INVESTIGATION OF THE SEISMIC RESPONSE OF THE TEMPLE OF PYTHIOS APOLLO IN
THE GREEK ISLAND OF RHODES AND THE REQUIRED STRENGTH OF RESTORATION MORTARS”

Laboratory of Earthquake Engineering, National Technical University of Athens, Greece

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε το τελευταίο βήμα για την ολοκλήρωση των σπουδών μου στη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π.. Η εκπόνησή της ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2017 και περατώθηκε το Φεβρουάριο του 2018.

Στην προσπάθειά μου αυτή ήταν πολλοί εκείνοι που με βοήθησαν με άμεσο ή έμμεσο τρόπο. Σε όλους αυτούς θα ήθελα να εκφράσω και από εδώ τις πιο θερμές μου ευχαριστίες.

Πρώτα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Ιωάννη Ψυχάρη, για τη συνεργασία του και τις σημαντικές συμβουλές του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής. Τον ευχαριστώ θερμά επίσης για τη συνολική του στήριξη, αλλά και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον και πρωτότυπο θέμα.

Στην ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας συνέβαλε σημαντικά και ο διδακτορικός φοιτητής Ευάγγελος Αυγενάκης, με την καθοδήγησή του κατά την εκμάθηση του προγράμματος Abaqus και τις χρήσιμες υποδείξεις και ιδέες του σε όλα τα στάδια της εργασίας. Τον ευχαριστώ επίσης για την ενθάρρυνσή του σε στιγμές που αντιμετώπισα δυσκολίες καθώς και συσσώρευση κούρασης.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την κα. Μοροπούλου, καθηγήτρια της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. ,για την παροχή βασικού υλικού σχετικά με το Ναό του Πύθιου Απόλλωνα στο οποίο και βασίστηκε η παρούσα μελέτη, καθώς και τον φυσικό Βασίλη Κεραμίδα, για τη διάθεση στοιχείων από τη μεταπτυχιακή του εργασία που είχε ως αντικείμενο μελέτης το ίδιο μνημείο.

Ξεχωριστή εμπειρία ήταν η επίσκεψη στο νησί της Ρόδου το περασμένο καλοκαίρι με σκοπό την παρατήρηση του εξεταζόμενου Ναού από κοντά. Ευχαριστώ τον κ. Ψυχάρη και τον Ε. Αυγενάκη για το όμορφο κι ενδιαφέρον μικρό αυτό ταξίδι, αλλά και την κ. Μοροπούλου και τους συνεργάτες της, τους οποίους συναντήσαμε στο νησί και μάθαμε σημαντικές πληροφορίες για το μνημείο μέσα από τη συζήτησή μας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα και τον κ. Γιώργο και την κα. Σταματία, για τη ζεστή τους υποδοχή και φιλοξενία στη Ρόδο.

Στην πορεία μου όλα αυτά τα χρόνια αλλά και κατά τη φάση της εκπόνησης της εργασίας αυτής ήταν κοντά μου καλοί φίλοι και συμφοιτητές, τους οποίους ευχαριστώ για την υποστήριξη, την κατανόηση και την εμπιστοσύνη. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τη φίλη μου Μαρία για το κουράγιο που μου έδωσε τους τελευταίους μήνες.

Θα ήθελα, τέλος, να εκφράσω τη βαθιά μου ευγνωμοσύνη στην οικογένειά μου, χωρίς τη συμπαράσταση κι αμέριστη αγάπη της οποίας δεν θα είχα φτάσει ως εδώ. Ευχαριστώ τους γονείς μου και την αδερφή μου για την απεριόριστη υπομονή και κατανόηση, την πίστη και την άδιακοπή τους ενθάρρυνση καθ'όλη τη διάρκεια των απαιτητικών σπουδών μου. Ευχαριστώ ακόμη τις πολυαγαπημένες μου γιαγιάδες και τον παππού μου για την καλοσύνη και τη γενναιοδωρία τους. Πολύτιμος ήταν και ο ρόλος των αγαπημένων μου θείων, καθένας από τους οποίους με στήριξε με το δικό του τρόπο. Τους ευχαριστώ όλους για τη δύναμη που μου έδωσαν. Κλείνω το σημείωμα αυτό με ένα ευχαριστώ στις υπέροχες ξαδέρφες μου για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά τους.

Στην οικογένειά μου...



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αριθμητική διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα στη Ρόδο και της απαιτούμενης αντοχής των κονιαμάτων αποκατάστασης

Ηρώ-Ειρήνη Μυταρέλη

Επιβλέπων: Καθηγητής Ιωάννης Ψυχάρης
Φεβρουάριος 2018

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η σεισμική συμπεριφορά των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα που βρίσκεται στην ακρόπολη της Ρόδου. Το εν λόγω μνημείο απαρτίζεται από έναν ελεύθερα ιστάμενο κίονα και από μια συστοιχία κίωνων, αποτελούμενη από τρεις κίονες, οι οποίοι φέρουν ανωδομή (το λεγόμενο θριγκό). Επειδή η δυναμική απόκριση τέτοιων κατασκευών είναι πολύπλοκη και έντονα μη γραμμική, η αναλυτική προσέγγιση καθίσταται πρακτικά αδύνατη και η ανάλυση πραγματοποιείται με αριθμητικές μεθόδους.

Οι κίονες του μνημείου προσομοιώνονται σε τρεις διαστάσεις, εφαρμόζοντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του κώδικα ABAQUS. Στα αριθμητικά μοντέλα που δημιουργούνται, εκτός από τους σπονδύλους προσομοιώνεται και μια βάση πάνω στην οποία εδράζονται οι κίονες. Οι κίονες θεωρούνται αναστηλωμένοι, μετά από την πλήρη αντικατάσταση ορισμένων σπονδύλων από νέους αλλά και τη συμπλήρωση των αρχαίων σπονδύλων με κομμάτια νέου λίθου που προσαρμόζονται ακριβώς στις ακανόνιστες επιφάνειες θραύσης. Η σύνδεση αρχαίων και νέων μελών πραγματοποιείται με χρήση κονιάματος, το οποίο θεωρείται ότι συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά και προσομοιώνεται με τρία ανεξάρτητα γραμμικά ελατήρια κατά μήκος των δύο διευθύνσεων του επιπέδου κάθε επιφάνειας, καθώς και της κάθετης σε αυτό διεύθυνσης. Η βασικότερη, όμως, παράμετρος του αριθμητικού μοντέλου είναι η προσομοίωση των αρμών μεταξύ των σπονδύλων ώστε να αναπαραχθούν τα φαινόμενα αποκόλλησης και ολίσθησης που εκδηλώνονται κατά την απόκριση αυτών των κατασκευών υπό καθεστώς ισχυρής εδαφικής κίνησης. Πράγματι, οι

σπόνδυλοι των κίωνων μπορούν να κινηθούν ανεξάρτητα, να λικνιστούν ή/και να ολισθήσουν μεταξύ τους, δημιουργώντας κατά τη διάρκεια της σεισμικής τους απόκρισης ένα σύστημα απορρόφησης ενέργειας διαφορετικό από αυτό των σύγχρονων κατασκευών. Για το λόγο αυτό, αφενός εισάγεται σαν ιδιότητα επαφής η μηχανική ιδιότητα της τριβής στην εγκάρσια και διαμήκη διεύθυνση. Η τριβή δίνεται βάσει του κλασικού μοντέλου του Coulomb με κοινό στατικό και δυναμικό συντελεστή τριβής. Αφετέρου, στην κάθετη διεύθυνση της διεπιφάνειας δίνεται η προσέγγιση της «σκληρής επαφής», όπου η διείσδυση του ενός σώματος στο άλλο θεωρείται μη φυσική και αποτρέπεται μέσω του αλγορίθμου. Όταν τα σώματα βρίσκονται σε επαφή μεταδίδονται διατμητικές και αξονικές δυνάμεις, καθώς η τριβή εκφράζεται με όρους τάσεων στις διεπιφάνειες. Οι ίδιες ιδιότητες επαφής χρησιμοποιούνται και στις διεπιφάνειες των επιμέρους λίθων της ανωδομής της κιονοστοιχίας.

Οι κίονες υποβάλλονται σε έξι διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις, οι οποίες επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι συμβατές με το σεισμοτεκτονικό περιβάλλον της Ρόδου και τις εδαφικές συνθήκες στη θέση του μνημείου. Επιπλέον, οι επιλεχθείσες καταγραφές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δεσποζουσών περιόδων εδαφικής κίνησης. Οι δύο οριζόντιες συνιστώσες των επιταχυνσιογραφημάτων των εξεταζόμενων σεισμικών κραδασμών επιβάλλονται ταυτόχρονα στο επίπεδο της βάσης των κίωνων και κλιμακώνονται με κατάλληλο συντελεστή ώστε το φάσμα απόκρισης της συνδυασμένης (RMS) χρονοϊστορίας τους να αποκλίνει ελάχιστα από το ελαστικό φάσμα του Ευρωκώδικα 8 που αντιπροσωπεύει τη συγκεκριμένη κατασκευή. Παράλληλα, εξετάζεται η απόκριση των κίωνων για τις αντίστοιχες σεισμικές κινήσεις διπλάσιας έντασης, αλλά και για την περίπτωση που οι καταγραφές των βασικών σεισμικών σεναρίων επιβληθούν σε στραμμένες διευθύνσεις σε σχέση με τις αρχικά εξεταζόμενες.

Στόχος της μελέτης είναι να διερευνηθεί το μέγεθος των προκαλούμενων οριζόντιων μετακινήσεων, και συγκεκριμένα των μέγιστων αναπτυσσόμενων κατά τη διάρκεια της σεισμικής κίνησης και των παραμενουσών ολισθήσεων, στους σπονδύλους των πολυσπόνδυλων κίωνων του μνημείου και στους μονολιθικούς κίονες ισοδύναμης γεωμετρίας. Οι μονολιθικοί κίονες εξετάζονται για να αναδειχθούν οι επιπτώσεις αναστηλωτικών επεμβάσεων του παρελθόντος, οι οποίες είχαν σαν αποτέλεσμα τη σύνδεση των σπονδύλων και τη μετατροπή του δομικού συστήματος σε μονολιθικό πρακτικά. Επιπλέον, βασικός σκοπός της εργασίας είναι να εξετάσει την αναπτυσσόμενη ένταση στις διεπιφάνειες των συνδεόμενων με κονίαμα μελών και να αξιολογήσει την καταλληλότητα ή μη της χρήσης κονιαμάτων σαν μέτρου αποκατάστασης για το υπό μελέτη μνημείο. Οι μέγιστες αναπτυσσόμενες τιμές τάσεων συγκρίνονται με τις αντίστοιχες τιμές αντοχών προτεινόμενων κονιαμάτων αποκατάστασης. Πρέπει να τονιστεί, ωστόσο, ότι η θεωρούμενη κατά την προσομοίωση ελαστική συμπεριφορά του κονιάματος δεν είναι ρεαλιστική, αφού στην πραγματικότητα θα προκληθούν πλαστικές παραμορφώσεις στις διεπιφάνειες των κομματιών καθιστώντας τες έτσι πιο ευάλωτες σε αστοχία κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης και οδηγώντας τες ακόμα και στη θραύση. Επομένως, η θεώρηση αυτή αποσκοπεί απλώς στο να ελεγχθεί το δυσμενέστερο αποτέλεσμα ως προς την εντατική κατάσταση των διεπιφανειών που προκαλείται κατά τη σεισμική απόκριση των κίωνων.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
LABORATORY OF EARTHQUAKE ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Numerical investigation of the seismic response of the Temple of Pythios Apollo in the Greek island of Rhodes and the required strength of restoration mortars

Iro-Eirini Mytareli

Supervisor: Professor Ioannis Psycharis
February 2018

ABSTRACT

This thesis presents a numerical study of the seismic response of multidrum and monolithic columns of the Temple of Pythios Apollo in the Greek island of Rhodes. The examined monument consists of a single free-standing column and a colonnade, which is composed of three columns connected at the top with entablature. Due to the complex and highly non-linear dynamic behaviour of these structures, an analytical approach is almost impossible. The most appropriate way to investigate their seismic behavior is by means of numerical methods.

The structures are modelled using a commercial 3D finite element code (ABAQUS). The models include the columns, whose drums are considered as deformable blocks, as well as a rigid base on which they rest. The columns are supposed to be completely restored since a number of drums are replaced by new stones, but also pieces of new stone are adapted properly to be used as complements to ancient stones that have survived. These pieces of stone are connected with mortar, which is considered to behave like a linear elastic material and is simulated using three independent linear springs along the two shear directions and the normal one to the interfaces. However, the key parameter for the numerical modelling is the simulation of the drum-to-drum joints in order for rocking and sliding phenomena, which take place during strong seismic shaking, to be predicted. Indeed, sliding and/or rocking between consecutive drums of the columns are observed during their seismic response and, in contrast to modern structures, the interfaces between drums dissipate significant amount of energy through inelastic response and differential displacements. The mechanical behavior of these interfaces is defined by introducing a friction model as well as an appropriate interaction property that allows loss of contact. For this purpose, Mohr-Coulomb criterion is adopted for the analysis with zero cohesion and dynamic friction coefficient equal to the static one. When the bodies are in contact, both shear and axial forces can be transmitted since the friction is defined in terms of stress along the interfaces. For the normal contact, a "hard" pressure-overclosure relationship is put into effect. This constraint does not allow any penetration of the one body into another.

The columns are subjected to six different seismic excitations, which are compatible with the seismotectonic environment of Rhodes and the soil conditions in the area of the monument. Furthermore, the selected earthquake records cover a wide range of frequency content. The input motions are applied in two horizontal directions and scaled properly in order for the seismic response spectrum of the combined (RMS) acceleration time histories of each pair to be almost identical to the Eurocode 8 spectrum that represents the specific structure. At a subsequent stage, the examined base excitations are scaled up to double amplitude and the seismic performance of the structures under the increased seismic loading is tested. Finally, the effect of the loading direction on the monument's seismic response is examined imposing the seismic scenarios at a rotated coordinate system.

The aim of this study is to investigate the magnitude of the maximum and residual horizontal displacements developed during the seismic shaking for the multidrum columns and the monolithic ones with an equivalent geometry. The monolithic columns are examined in order to evaluate the efficiency of past restoration procedures, which led to fully bonded drums and therefore to practically monolithic columns. Another basic purpose of this thesis is to study the stresses developed along the interfaces of the connected with mortar pieces of stone and assess the appropriateness of this restoration measure for the examined monument. The maximum stress values developed are compared with the corresponding values for strength of suggested restoration mortars. However, it is worth pointing out that the linear elastic behavior of mortar, which was considered into the simulation, is not realistic, since plastic deformation is expected to be caused along the aforementioned interfaces. This means that these interfaces might be led even to failure during the shaking. Consequently, this assumption intends only to check the seismic demand in terms of stresses along the interfaces during strong seismic motion and evaluate the suggested mortars' adequacy in strength.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1	Περιγραφή του προβλήματος.....	1
1.2	Διάρθρωση εργασίας.....	3
2	ΔΟΜΗ ΑΡΧΑΙΟΥ ΝΑΟΥ-ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ	5
2.1	Τυπική μορφή αρχαίου ναού.....	5
2.2	Σεισμική απόκριση αρχαίων μνημείων.....	8
2.2.1	Γενικά.....	8
2.2.2	Λικνισμός άκαμπτου σώματος επί άκαμπτης βάσης.....	9
3	ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΠΥΘΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ ΣΤΗ ΡΟΔΟ	11
3.1	Περιγραφή του ναού και διαστάσεις	11
3.2	Σύντομο ιστορικό της ιταλικής αναστήλωσης	13
3.3	Δομικό σύστημα.....	18
4	ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ	21
5	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ Κ1,Κ2,Κ3 & Κ4 ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ ΠΥΘΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ	27
5.1	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων.....	27
5.2	Ο αλγόριθμος ανάλυσης του υποπρογράμματος Abaqus/Standard	28
5.3	Περιγραφή μοντέλων αριθμητικής ανάλυσης.....	28
5.4	Σύντομη αναφορά στα βήματα δημιουργίας του μοντέλου στο Abaqus.....	32
5.5	Διαστάσεις κίωνων και ιδιότητες υλικού.....	35
5.6	Μηχανικά προσομοιώματα διεπιφανειών	37
5.6.1	Συμπεριφορά κάθετα στις επιφάνειες (Normal behavior)	38
5.6.2	Ολίσθηση των επιφανειών-Μοντέλα τριβής (Tangential behavior)	38
5.6.3	Συμπεριφορά λόγω συνοχής (Cohesive behavior)	39
6	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΟΥ ΚΙΟΝΑ Κ4- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟ	43
6.1	Σύντομη παρουσίαση των επιλεγόμενων σεισμικών σεναρίων για την περιοχή της Ρόδου	43
6.2	Εξέταση της συμπεριφοράς ως προς τις μετακινήσεις	46
6.3	Εξέταση της συμπεριφοράς ως προς τις τάσεις	60
6.3.1	Εισαγωγή	60
6.3.2	Ανάπτυξη τάσεων στις διεπιφάνειες των σπονδύλων	62
6.3.3	Ανάπτυξη τάσεων στις συνδεόμενες με κονίαμα επιφάνειες	64
6.4	Συμπερασματικά σχόλια	76

7	ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ Κ1, Κ2 ΚΑΙ Κ3- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	79
7.1	Εισαγωγή.....	79
7.2	Εξέταση της συμπεριφοράς ως προς τις μετακινήσεις.....	82
7.3	Εξέταση της συμπεριφοράς ως προς τις τάσεις.....	103
7.3.1	Εισαγωγή.....	103
7.3.2	Ανάπτυξη τάσεων στις διεπιφάνειες με κονίαμα.....	103
7.4	Συμπερασματικά Σχόλια.....	114
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	117
9	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	119

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Η συντήρηση και η προστασία των ιστορικών μνημείων τόσο από τους φυσικούς κινδύνους όσο και από την ανθρώπινη απειλή αποκτούν μεγάλη σημασία για τις τοπικές κοινότητες, τα έθνη αλλά και ολόκληρη την ανθρωπότητα. Η εξισορρόπηση μεταξύ της ασφάλειας και της διατήρησης των ιδιαίτερων αρχιτεκτονικών χαρακτηριστικών των κτισμάτων πολιτιστικής κληρονομιάς αποτελεί πρόκληση για τους αρχαιολόγους και τους μηχανικούς. Ξεχωριστής σημασίας είναι οι αρχαίοι ναοί της κλασικής και ελληνιστικής περιόδου που βρίσκονται στα παράλια της Μεσογείου, όπως η Ελλάδα, η Ιταλία και η Τουρκία, τα οποία αποτελούν μια από τις πιο σεισμογενείς περιοχές σε όλο τον κόσμο. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται έντονο ενδιαφέρον από την πλευρά της επιστημονικής κοινότητας για τη διερεύνηση της σεισμικής επάρκειας αυτού του τύπου αρχαίου μνημείου, καθώς επίσης και για την εφαρμογή αναστηλωτικών εργασιών όπου αυτό κρίνεται αναγκαίο.

Ο χρόνος έχει αφήσει δυστυχώς τα σημάδια του πάνω στους αρχαίους ναούς, αφού οι περισσότεροι από αυτούς επιβιώνουν σήμερα με τη μορφή ενός ή περισσότερων ελεύθερων πολυσπόνδυλων κίωνων. Οι κίονες αποτελούνται τυπικά από λίθινα τεμάχια (σπονδύλους), συνήθως μαρμάρινα, τα οποία εδράζονται το ένα πάνω στο άλλο χωρίς να μεσολαβεί κάποιο συνδετικό υλικό. Το ιδιαίτερο δομικό σύστημα των κίωνων δημιουργεί ένα ειδικό σύστημα απορρόφησης της σεισμικής ενέργειας διαφοροποιώντας έτσι τη σεισμική συμπεριφορά τους από αυτή των σύγχρονων κατασκευών. Όταν οι κίονες υποβάλλονται σε σεισμική φόρτιση, χαρακτηριστική είναι η λικνιστική απόκριση των σπονδύλων, κατά την οποία οι τελευταίοι αποκολλώνται από τη βάση τους, καθώς και οι μεταξύ τους ολισθήσεις. Τέτοια φαινόμενα συνεπάγονται μεγάλες τιμές μετακίνησης των κατασκευών αυτών οδηγώντας έτσι στην κατάργηση της αναλογίας μεταξύ επιβαλλόμενων φορτίων και αναπτυσσόμενης έντασης και παραμόρφωσης (μη γραμμικό πρόβλημα). Επιπλέον, τα σπονδυλωτά συστήματα δε διαθέτουν φυσικούς τρόπους ταλάντωσης, καθώς η απόκρισή τους εξαρτάται και από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης. Για κάθε σχήμα ταλάντωσης μάλιστα οι εξισώσεις κίνησής τους είναι διαφορετικές, με τον αριθμό των τελευταίων να αυξάνεται εκθετικά με τον αριθμό των σπονδύλων. Γίνεται αντιληπτό επομένως ότι η δυναμική απόκριση τέτοιων συστημάτων είναι εξαιρετικά περίπλοκη και για τη μελέτη της είναι πολύ δύσκολο να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές μέθοδοι.

Εξαιτίας των προαναφερθέντων δυσχερειών της αναλυτικής προσέγγισης, ο πλέον κατάλληλος τρόπος για τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης σπονδυλωτών κατασκευών είναι η αριθμητική ανάλυση. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων καθώς και η μέθοδος των διακριτών στοιχείων είναι ικανές να προβλέψουν ικανοποιητικά την απόκριση αυτή. Σε κάθε περίπτωση είναι αναγκαία η επαλήθευση και βαθμονόμηση των παραμέτρων των προσομοιωμάτων για να εξασφαλιστεί σε όσο το δυνατό μεγαλύτερο βαθμό η ορθότητα της προσομοίωσης του προβλήματος. Πιστοποίηση των προσομοιωμάτων μπορεί να γίνει με σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με τα διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα από πειράματα σε ανάλογα δοκίμια. Μέσα από τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης των κίωνων και την κατανόηση του μηχανισμού απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας, στόχος είναι να ελεγχθεί η ευστάθεια των υπάρχοντων κίωνων αλλά και να διαπιστωθούν οι κατάλληλες μέθοδοι αναστήλωσης και να επιλεγθούν κατάλληλα υλικά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις διαδικασίες επέμβασης χωρίς να προκαλέσουν περαιτέρω βλάβες στα μνημεία.

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε αριθμητική ανάλυση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για τη διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης των πολυσπόνδυλων και μονολιθικών κίωνων του αρχαίου ναού του Πύθιου Απόλλωνα που βρίσκεται στο νησί της Ρόδου. Τονίζεται ότι η λεπτομερής προσομοίωση των γεωμετρικών συνθηκών των αρχαίων μνημείων είναι πρακτικά αδύνατη, καθώς για παράδειγμα είναι πολύ δύσκολο να προσομοιωθούν οι υπάρχουσες 'ανωμαλίες' στην περίμετρο των σπονδύλων και να αποδοθεί η ακριβής επιφάνεια επαφής μεταξύ των σπονδύλων. Επομένως, οποιαδήποτε προσπάθεια να μελετηθεί μια τέτοια περίπτωση είτε με αριθμητικές είτε με πειραματικές μεθόδους παραμένει μια προσέγγιση. Ωστόσο, τέτοιες μέθοδοι είναι πάντα χρήσιμες προκειμένου να εκτιμηθεί η απόκριση έστω και ποιοτικά. Στην εξεταζόμενη περίπτωση μνημείου, οι κίονες θεωρούνται αναστηλωμένοι υιοθετώντας το σενάριο για χρήση νέου λίθου από τοπικό πωρόλιθο τον οποίο προμηθεύει το λατομείο Σφουγγαριών Αρχαγγέλου. Ειδικότερα, προσομοιώνεται το κονίαμα που χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση αρχαίων μελών με νέα. Η πρακτική αυτή είναι και στην πραγματικότητα δυνατό να εφαρμοστεί καθώς το συμπλήρωμα του αρχαίου μέλους λαξεύεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται με ακρίβεια στις ακανόνιστες επιφάνειες θραύσεως του αρχαίου μέλους. Η κατεργασία του μέλους γίνεται με την μέθοδο της γλυπτικής αντιγραφής με σημειοθέτη (πονταδόρο) ή χρησιμοποιείται μια αυτόματη ηλεκτρική μηχανή (παντογράφος). Στη συνέχεια το αρχαίο μέλος συγκολλάται με το νέο με τη χρήση συνδετικού κονιάματος. Στο προκύπτον μοντέλο του μνημείου πραγματοποιήθηκαν αριθμητικές αναλύσεις για να εξεταστεί η συμπεριφορά των κίωνων όταν αυτοί υποβάλλονται σε σεισμικές διεγέρσεις διαφορετικής έντασης και συχνотικού περιεχομένου. Τα επιταχυνσιογραφήματα παλαιών σεισμικών δονήσεων που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι συμβατά με το σεισμοτεκτονικό περιβάλλον της Ρόδου και τις εδαφικές συνθήκες στη θέση του μνημείου. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν και για τους αντίστοιχους μονολιθικούς κίονες ισοδύναμης γεωμετρίας με αυτή των πραγματικών πολυσπόνδυλων κίωνων διότι διάφορες πρακτικές σε παλαιότερες επεμβάσεις είχαν ως αποτέλεσμα να μεταβληθεί το δομικό σύστημα των αρχαίων κίωνων καθιστώντας τους σχεδόν μονολιθικούς.

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι να διερευνήσει την απόκριση του επιλεγόμενου μνημείου σε όρους μετακινήσεων και τάσεων που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες των συνδεδόμενων με κονίαμα μελών. Ελέγχεται επίσης η πιθανή κατάρρευση των κίωνων ανάλογα με τη σεισμική διέγερση που εφαρμόζεται στη βάση τους. Η απαίτηση σε όρους τάσεων κάθε σεισμικής διέγερσης αξιοποιείται ώστε να εκτιμηθεί τελικά η απαιτούμενη αντοχή κονιαμάτων αποκατάστασης που πιθανώς θα χρησιμοποιηθούν σε μελλοντική αναστήλωση του μνημείου. Οι σεισμικές δονήσεις που προκαλούν τη δυσμενέστερη απόκριση του μνημείου και οδηγούν στις μέγιστες τιμές τάσεων είναι αυτές που καθορίζουν την επιλογή του κατάλληλου κονιάματος. Τέλος, συγκρίνεται η απόκριση των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων για να αξιολογηθεί η αποδοτικότητα αναστηλωτικών επεμβάσεων του παρελθόντος.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα εργασία διαιρείται σε οκτώ κεφάλαια. Το 1^ο κεφάλαιο είναι εισαγωγικού χαρακτήρα και περιλαμβάνει την περιγραφή του προβλήματος καθώς και την περιγραφή του σκελετού της.

Ακολουθεί το 2^ο κεφάλαιο στο οποίο παρουσιάζονται τα βασικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των μνημείων και γίνεται επίσης σύντομη αναφορά στη σεισμική απόκριση των σπονδυλωτών κατασκευών.

Το 3^ο κεφάλαιο περιέχει ορισμένα ιστορικά στοιχεία για τον εξεταζόμενο Ναό του Πύθιου Απόλλωνα στη Ρόδο. Παρουσιάζεται επίσης συνοπτικά η σημερινή κατάσταση του μνημείου.

Το 4^ο κεφάλαιο αναφέρεται στις σεισμικές διεγέρσεις που επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση της δυναμικής απόκρισης του προς διερεύνηση μνημείου.

Στο 5^ο κεφάλαιο περιγράφεται το αριθμητικό προσομοίωμα του μνημείου, για τη δημιουργία του οποίου το μνημείο θεωρήθηκε αναστηλωμένο. Παρουσιάζεται λοιπόν η συγκεκριμένη πρόταση αποκατάστασης στην οποία βασίστηκε η προσομοίωση του μνημείου.

Στο 6^ο κεφάλαιο παρατίθενται και αναλύονται ενδεικτικά αποτελέσματα των αναλύσεων για το μεμονωμένο πολυσπόνδυλο κίονα K4 του μνημείου. Παράλληλα, εξετάζεται η σεισμική απόκριση του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα και συγκρίνεται με αυτή του σπονδυλωτού κίονα.

Το 7^ο κεφάλαιο περιλαμβάνει το σχολιασμό των αντίστοιχων αποτελεσμάτων για την κιονοστοιχία του μνημείου. Όμοια, πραγματοποιείται σύγκριση της σεισμικής συμπεριφοράς του συμπλέγματος των σπονδυλωτών κίωνων με την αντίστοιχη του συστήματος των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων.

Η εργασία ολοκληρώνεται με το 8^ο κεφάλαιο, στο οποίο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης.

Τέλος, στο κεφάλαιο 9 αναφέρεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της εργασίας.

2 ΔΟΜΗ ΑΡΧΑΙΟΥ ΝΑΟΥ-ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΑΡΧΑΙΩΝ ΜΝΗΜΕΙΩΝ

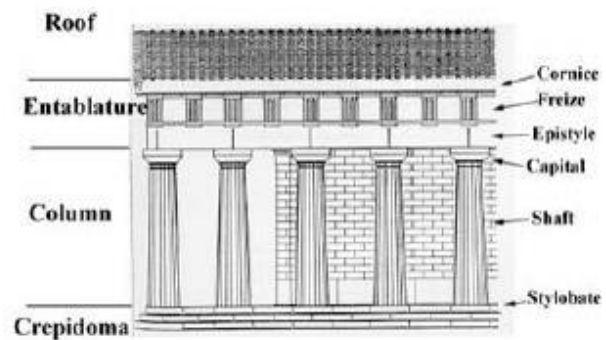
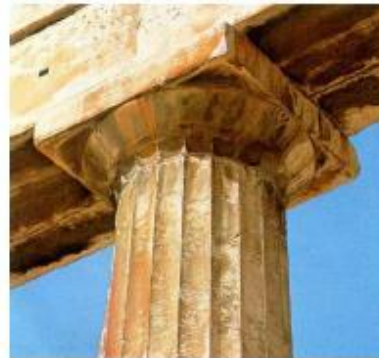
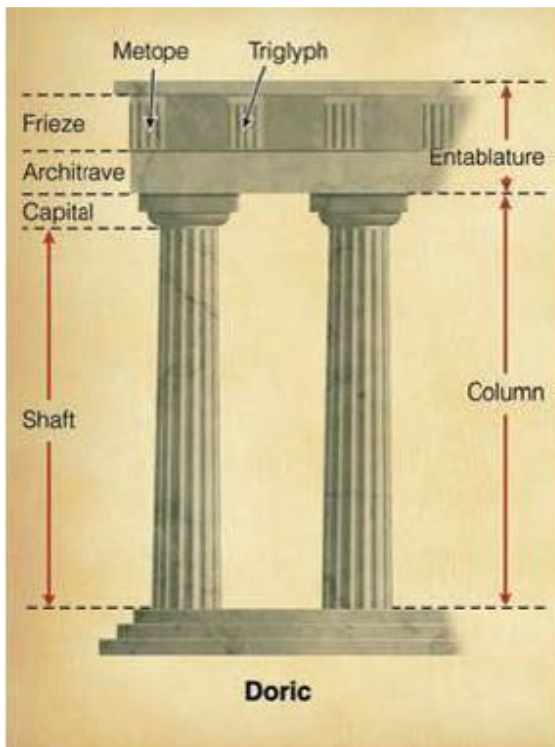
2.1 Τυπική μορφή αρχαίου ναού

Ο πιο συνηθισμένος τύπος αρχαίου μνημείου που απαντάται στις περιοχές γύρω από τη Μεσόγειο Θάλασσα (κυρίως Ελλάδα, Ιταλία και Τουρκία) είναι ο αρχαίος ελληνικός ναός της κλασικής ή ελληνοιστικής περιόδου. Δυστυχώς, μόνο λίγοι από τους ναούς αυτούς διατηρούν σήμερα τη δομική τους ακεραιότητα. Οι περισσότεροι διασώζονται είτε με τη μορφή ελεύθερων (μεμονωμένων) κίωνων είτε με τη μορφή ομάδας κίωνων που συνδέονται μεταξύ τους με επιστύλια, τα οποία είναι ένα είδος δοκού (Εικόνα 2-1). Οι κίονες αποτελούνται από λίθινα τεμάχια, τους λεγόμενους σπονδύλους, κατασκευασμένα συνήθως από μάρμαρο ή πωρόλιθο, τα οποία είχαν τοποθετηθεί το ένα πάνω στο άλλο χωρίς τη χρήση συνδετικού κονιάματος (`εν ξηρώ` δόμηση). Ανάλογα με τη γεωγραφική θέση του μνημείου, ο ναός μπορεί να είναι δωρικού, ιωνικού ή κορινθιακού ρυθμού.



Εικόνα 2-1: Ο ναός του Επικούριου Απόλλωνα στις Βάσσαι όπως διασώζεται σήμερα

Τα μέρη που συνθέτουν την όψη ενός αρχαίου ναού είναι ο κίονας με το κιονόκρανο, το κρηπίδωμα και ο θριγκός (Εικόνα 2-2). Το κρηπίδωμα είναι ένα λιθινό βαθμιδωτό βάθρο που αποτελεί τη βάση του ναού και απαρτίζεται συνήθως από τρεις βαθμίδες. Η ανώτερη βαθμίδα του βάθρου αυτού αποτελεί το στυλοβάτη επί του οποίου στηρίζονται οι κίονες και έχει λίγο μεγαλύτερο ύψος από τις υπόλοιπες βαθμίδες. Οι πολυσπόνδυλοι κίονες αποτελούνται από μεμονωμένους λίθους, τους σπονδύλους, και το κιονόκρανο. Η διάμετρος των σπονδύλων συνήθως μειώνεται ελαφρώς από τη βάση προς την κορυφή.



Εικόνα 2-2: Διαμόρφωση ναού δωρικού ρυθμού- Γεφύρωση της απόστασης μεταξύ των κίωνων μέσω του επιστυλίου

Στην περιμετρική επιφάνεια των κίωνων δημιουργούνται ραβδώσεις κοίλης τομής, σχηματίζοντας μεταξύ τους είτε οξείες είτε επίπεδες ακμές ανάλογα με το ρυθμό που ακολουθήθηκε. Ο αριθμός των ραβδώσεων ποικίλλει από 16 έως 20 και το βάθος τους μπορεί να διαφέρει καθ' ύψος του κίονα. Στην κορυφή του κίονα, στο σημείο όπου ενώνεται με το κιονόκρανο, υπάρχουν τρεις ή τέσσερις δακτύλιοι εγκοπής.

Το κιονόκρανο είναι το μέλος στο οποίο καταλήγει ο κίονας και είναι το στοιχείο που μεταβιβάζει το υπερκείμενο φορτίο βαρύτητας της ανωδομής στον κατακόρυφο κορμό. Στο δωρικό ρυθμό αποτελείται από τον άβακα, μία τετράγωνη πλάκα στο άνω μέρος, και τον εχίνο σε σχήμα στερεού εκ περιστροφής. Αντίστοιχα στον ιωνικό ρυθμό το κιονόκρανο αποτελείται από εχίνο, έλικες και άβακα.

Θριγκός (entablature) είναι ολόκληρη η ανωδομή πάνω από τα κιονόκρανα και αναλύεται σε λεπτομερέστερα μέλη, όπως είναι η ζωφόρος, οι μετόπες, τα τρίγλυφα και τα επιστύλια. Μέσω του

θριγού επιτυγχανόταν ομοιόμορφη κατανομή των φορτίων βαρύτητας της στέγης στους σπονδύλους κι έπειτα στο έδαφος.

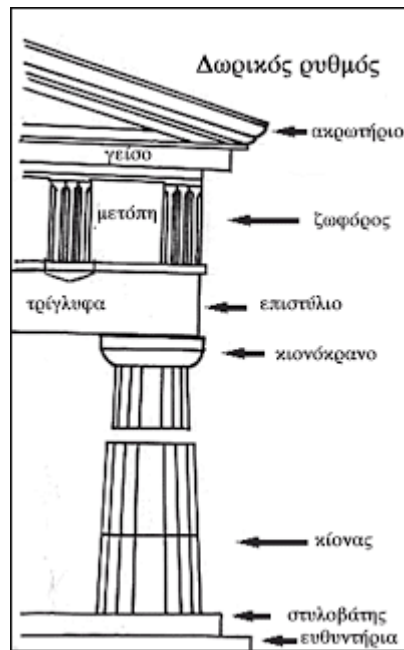
Τα επιστύλια είναι παραλληλόγραμμα κομμάτια λίθου που συνδέουν τους κίονες και ονομάστηκαν έτσι επειδή εδράζονται επί των στύλων. Αυτά μπορεί να είναι είτε ολόσωμα είτε να διαμορφώνονται με την τοποθέτηση παράλληλων δοκών κατά πλάτος για τη μείωση τους βάρους τους. Στις γωνίες οι άκρες των επιστυλίων ενώνονται συχνά με συνδέσμους. Οι κίονες που συνδέονταν με επιστύλια και τοποθετούνταν σε σειρά μέσα και γύρω από τα οικοδομήματα της αρχαιότητας αποτελούσαν την κιονοστοιχία. Αυτές χρησίμευαν στο σχηματισμό στοών ή στην υποστήριξη στεγών και σχηματίζονταν με βάση τον αριθμό των κιώνων, τις μεταξύ τους αποστάσεις και το ρυθμό αυτών. Σε αρκετά πειράματα που διεξήχθησαν διαπιστώθηκε ότι οι κιονοστοιχίες είναι πιο σταθερές από τους ανεξάρτητους κίονες (π.χ. Drosos and Anastasopoulos, Shaking table testing of multidrum columns and portals).

Στο δωρικό ρυθμό πάνω από τα επιστύλια βρίσκεται η ζωφόρος, η οποία αποτελείται από δύο εναλλασσόμενα μεταξύ τους μέλη, τα τρίγλυφα και τις μετόπες. Τα τρίγλυφα αποτελούνται από τρία κάθετα στοιχεία, τους μηρούς, που χωρίζονται από δύο γλυφές, ενώ δύο ημιγλυφές σχηματίζονται στις άκρες δεξιά και αριστερά. Οι μετόπες είναι αυτόνομες πλάκες με ανάγλυφη διακόσμηση. Επάνω από τη ζωφόρο αναπτύσσεται το γείσο, το οποίο έχει ύψος περίπου ίσο με το μισό του ύψους της ζωφόρου και προεξέχει σημαντικά από την τελευταία ώστε να προστατεύει τα υποκείμενα μέλη. Το γείσο αποτελείται από ένα συνεχές κατακόρυφο μέτωπο και στην κάτω επιφάνεια φέρει κεκλιμένες πλάκες, σχήματος ορθογωνίου, ενώ η άνω επιφάνειά του στις μακριές πλευρές παίρνει ενίοτε την κλίση της στέγης.

Πίσω από το εξωτερικό πτερό του ναού διαμορφώνονταν το εσωτερικό του ναού, ο σηκός. Ο σηκός περιβάλλεται από τοίχους, στα άκρα των οποίων δημιουργούνταν οι παραστάδες, δηλαδή μικρές διαπλατύνσεις των τοίχων προς το εσωτερικό. Στις επόμενες εικόνες παρουσιάζονται μια κάτοψη αρχαίου ελληνικού ναού, καθώς και τα βασικά στοιχεία της ανωδομής του (Εικόνες 2-3 και 2-4).



Εικόνα 2-3: Κάτοψη αρχαίου ελληνικού ναού



Εικόνα 2-4: Βασικά στοιχεία της ανωδομής ενός αρχαίου ναού- Ναός δωρικού ρυθμού

2.2 Σεισμική απόκριση αρχαίων μνημείων

2.2.1 Γενικά

Λόγω της σπονδυλωτής δομής των αρχαίων μνημείων, -η οποία είναι τελείως διαφορετική από αυτή των σύγχρονων κατασκευών-, δημιουργείται ένας ειδικός μηχανισμός απόσβεσης της σεισμικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της ισχυρής σεισμικής κίνησης παρατηρείται λικνιστική απόκριση (αποκόλληση μεταξύ των σπονδύλων), ολίσθηση μεταξύ των σπονδύλων, μια κατάσταση συζευγμένης ολίσθησης και λικνισμού, καθώς και φαινόμενα κρούσης μεταξύ των σπονδύλων. Γίνεται αντιληπτό ότι αυτές οι μορφές απόκρισης μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες τιμές μετακινήσεων του συστήματος, γεγονός που καθιστά το πρόβλημα έντονα μη γραμμικό.

Πλήθος ερευνητών έχει ασχοληθεί με τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς των παραπάνω κατασκευών αλλά και γενικότερα των απαραμόρφωτων σωμάτων. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι αναλυτικές, πειραματικές και αριθμητικές εξετάζοντας κυρίως μοντέλα δύο διαστάσεων (π.χ. Allen et al. 1986; Sinopoli 1989; Psycharis 1990; Winkler et al. 1995; Psycharis et al. 2000; Konstantinidis and Makris 2005; Papaliozou and Komodromos 2009) και λιγότερο τριών διαστάσεων (π.χ. Papantonopoulos et al. 2002; Mouzakis et al. 2002; Psycharis et al. 2003, 2013; Dasiou et al. 2009a,b). Αυτές οι μελέτες έχουν αποδείξει ότι, λόγω της επικράτησης της λικνιστικής κίνησης, τα χαρακτηριστικά της δυναμικής απόκρισης των μνημείων είναι παρόμοια με αυτά της απλούστερης περίπτωσης, που είναι ο λικνισμός ενός απόλυτα στερεού σώματος με απλή έδραση σε διεγερόμενη βάση. Επιπλέον, από την έρευνα αυτή προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα αρχαία μνημεία, παρά την φαινομενική τους αστάθεια σε οριζόντια φορτία, επιδεικνύουν γενικά αρκετά ικανοποιητική σεισμική συμπεριφορά (Psycharis et al. 2000). Εξάλλου, η άποψη αυτή ενισχύεται από το γεγονός ότι πολλά αρχαία μνημεία κατασκευασμένα σε περιοχές με έντονη σεισμική δραστηριότητα, επιβιώνουν επί σχεδόν 2500 έτη...

Γενικά, η δυναμική συμπεριφορά των αρχαίων μνημείων είναι ένα πολύπλοκο φαινόμενο. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των κατασκευών αυτών είναι ότι δε διαθέτουν φυσικές ιδιομορφές ταλάντωσης με την

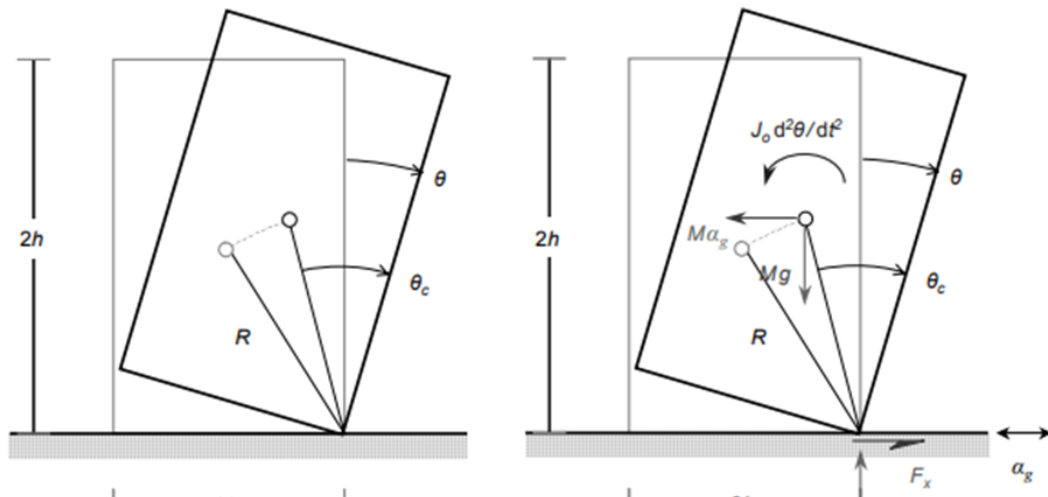
κλασική έννοια του όρου. Αυτό συμβαίνει διότι η απόκριση των κίωνων εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της σεισμικής διέγερσης που επιβάλλεται στη βάση τους. Έτσι, κατά τη διάρκεια ενός ισχυρού σεισμικού κραδασμού διάφορες μορφές ταλάντωσης εναλλάσσονται μεταξύ τους και καθεμιά από τις μορφές αυτές διέπεται από διαφορετικό σύνολο εξισώσεων κίνησης. Οι δε εξισώσεις κίνησης αυξάνονται σημαντικά και διαφοροποιούνται έντονα με την αύξηση του αριθμού των σπονδύλων.

Στο πλαίσιο αυτό της περιπλοκότητας της δυναμικής συμπεριφοράς των μνημείων, διαπιστώθηκε επίσης η ευαισθησία της απόκρισής τους ακόμα και σε πολύ μικρές μεταβολές της διέγερσης ή των γεωμετρικών παραμέτρων του συστήματος. Παράλληλα, πειράματα και αριθμητικές αναλύσεις έδειξαν ότι σημαντικές εκτός επιπέδου μετακινήσεις μπορούν να εκδηλωθούν για καθαρά επίπεδες σεισμικές διεγέρσεις. Σε μερικά πειράματα μάλιστα, η παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση την κάθετη στο επίπεδο της διέγερσης ήταν ίδιας τάξης μεγέθους με τη κύρια (εντός επιπέδου) παραμόρφωση.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα χαρακτηριστικά της εδαφικής κίνησης και η γεωμετρία του συστήματος μπορούν να καθορίσουν τη σεισμική συμπεριφορά των μνημείων. Ειδικότερα, δύο βασικές παράμετροι, που κρίνουν για παράδειγμα το αν ο λικνισμός θα καταλήξει σε ανατροπή του συστήματος, είναι: α) η δεσπόζουσα περίοδος της σεισμικής κίνησης και β) το μέγεθος της κατασκευής. Έχει αποδειχτεί ότι χαμηλής συχνότητας διεγέρσεις είναι πολύ πιο επικίνδυνες από τις υψηλές. Στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται έντονη λικνιστική κίνηση, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η παραμόρφωση οφείλεται κυρίως σε ολισθήσεις των επιμέρους δομικών στοιχείων, ειδικά στο ανώτερο τμήμα της κατασκευής. Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη μελέτη της λικνιστικής απόκρισης ξεχωριστό ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι σεισμικές καταγραφές εγγύς του ρήγματος λόγω των μακροπεριόδων και άρα καταστρεπτικών παλμών που περιέχουν. Οι παλμοί αυτοί παράγονται από την "ενισχυτική συμβολή" των διαδομένων σεισμικών κυμάτων στην κατεύθυνση της διάρρηξης του ρήγματος (Somerville and Graves 1993, Naeim 1995). Η δε καταστρεπτικότητά τους έχει επανειλημμένως αποδειχτεί στην απόκριση μη γραμμικών συστημάτων όπως ο λικνισμός (Housner 1963, Biggs 1964, Anderson and Bertero 1976 and 1986, Gazetas 1996, Makris and Roussos 1998). Σχετικά με το μέγεθος της κατασκευής, έχει βρεθεί ότι οι απόλυτες διαστάσεις της κατασκευής μπορούν να μεταβάλουν την απόκριση, ακόμα και αν διατηρηθεί η αναλογία των διαστάσεων. Κατασκευές μεγαλύτερου μεγέθους θεωρούνται γενικά πιο ευσταθείς σε σχέση με αντίστοιχες μικρότερου μεγέθους και παρόμοιας γεωμετρίας. Εκτός από το μέγεθος του εξεταζόμενου σώματος, η λυγηρότητά του, δηλαδή ο λόγος πλάτους προς ύψος (b/h), παίζει ρόλο στη σεισμική του απόκριση.

2.2.2 Λικνισμός άκαμπτου σώματος επί άκαμπτης βάσης

Για την κατανόηση του φαινομένου του λικνισμού των σωμάτων παρατίθεται σε συντομία το βασικό παράδειγμα του απολύτως στερεού σώματος με απλή έδραση σε διεγερόμενη βάση. Για την μελέτη της λικνιστικής απόκρισης σε σεισμική εξαίτηση, θεωρούμε ένα απολύτως στερεό, ορθογωνικό σώμα διαστάσεων $2b \times 2h$ που εδράζεται μέσω απλής στηρίξεως σε διεγερόμενη βάση με επιτάχυνση a_g (σε g) όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2-1(α). Αρχικώς, για μικρές τιμές της διεγείρουσας επιτάχυνσης, το σώμα βρίσκεται σε σχετική ηρεμία ως προς το επίπεδο της βάσης. Στην περίπτωση αυτή η απόλυτη επιτάχυνση του σώματος είναι $a_i = a_g$ και η αναπτυσσόμενη αδρανειακή δύναμη στο κέντρο βάρους του σώματος $F_i = m a_g$. Όταν η ροπή της αδρανειακής δύναμης περί το γωνιακό σημείο O , $M_i = F_i h$ υπερβεί την ροπή του ίδιου βάρους του σώματος $M_g = mgb$ (Σχήμα 2-1(β)) το σώμα ανασκώνεται από την βάση έδρασης και περιστρέφεται περί το σημείο O . Για να αποτραπεί δε η σχετική ολίσθηση στην διεπιφάνεια μεταξύ του σώματος και της ανένδοτης βάσης η τριβή θεωρείται αρκετά μεγάλη.

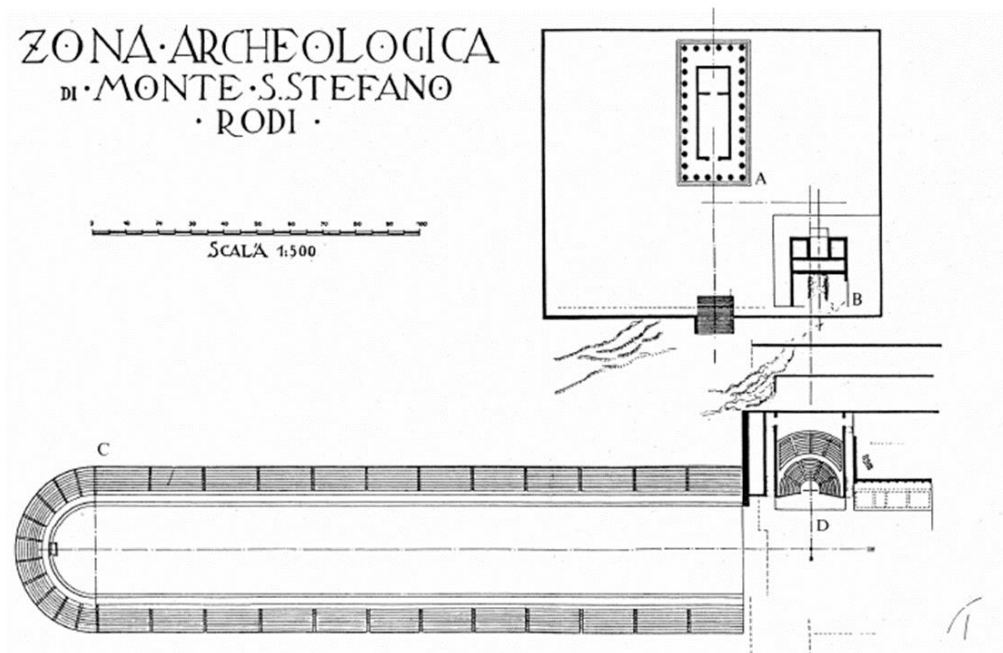


Σχήμα 2-1: Λικνισμός μη-παραμορφωτού σώματος σε σεισμικώς διεγερόμενη βάση: (α) Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και (β) αναπτυσσόμενες δυνάμεις ισορροπίας.

3 ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ-ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΠΥΘΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ ΣΤΗ ΡΟΔΟ

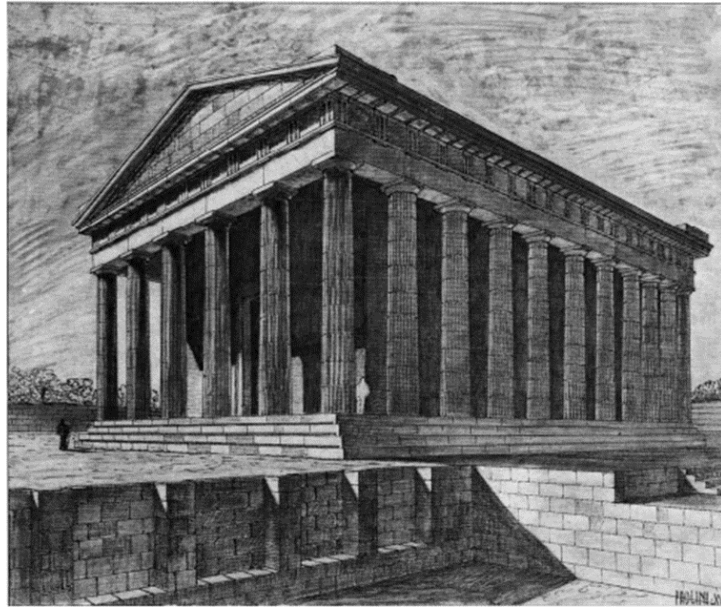
3.1 Περιγραφή του ναού και διαστάσεις

Στο λόφο του Monte Smith Stefano στην ακρόπολη της παλιάς πόλης της Ρόδου, βρίσκεται ο ναός του Πύθιου Απόλλωνα. Ο ναός δεσπόζει ανάμεσα σε ένα συγκρότημα κτισμάτων που περιλαμβάνει και ένα δεύτερο ναό, αφιερωμένο στη θεά Άρτεμη, ένα στάδιο και ένα ωδείο. Τα μνημεία αυτά έφεραν στο φως ανασκαφές κατά τις δεκαετίες του 1920 και αρχών του 1930.



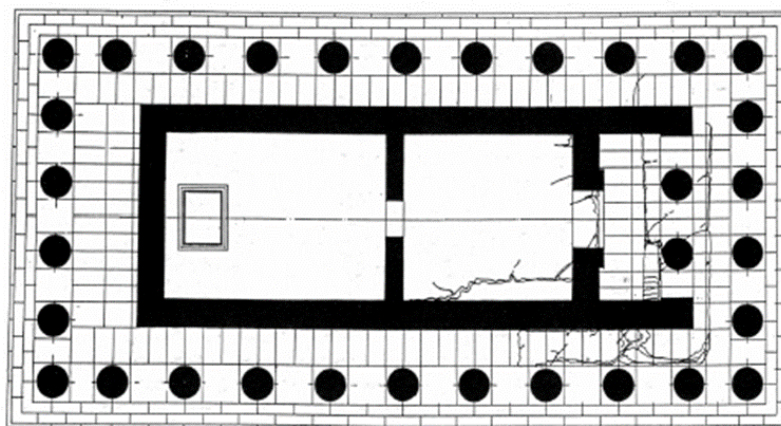
Εικόνα 3-1: Αρχαιολογική ζώνη στο λόφο του Monte Smith

A. Ναός του Πύθιου Απόλλωνα, B. Ναός Αρτέμιδος, C. Στάδιο, D. Ωδείο



Εικόνα 3-2: Προοπτική αναπαράσταση του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα

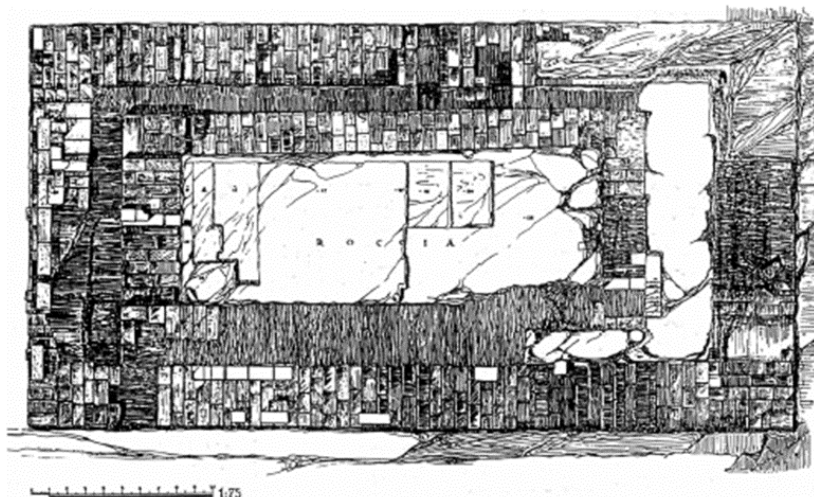
Οι επιγραφές που βρέθηκαν χρονολογούν το Ναό στον 3^ο αι. π.Χ, αλλά οι αρχαιολόγοι, από τα χαρακτηριστικά του σωζόμενου αρχαίου κιονοκράνου, τον αποδίδουν μάλλον στον 1^ο αι. π.Χ. Πρόκειται για έναν περίπτερο ναό, δωρικού ρυθμού, ο οποίος έχει προσανατολισμό ανατολής-δύσης. Ο ναός αποτελούνταν από 6 κίονες στη στενή του πλευρά και από 11 κίονες στην κατά μήκος πλευρά του. Η θεμελίωση της περίπτωσης (δηλ. της σειράς από κίονες) συγκροτείται από μεγάλες τετραγωνισμένες πλάκες και η κρηπίδα, δηλαδή η βάση του ναού, αποτελείται από τρεις αναβαθμούς και το στυλοβάτη. Ο Ναός του Πύθιου Απόλλωνα αποτελεί έναν από τους μεγαλύτερους ναούς της αρχαιότητας, με μήκος 38m και πλάτος μεγαλύτερο από 20m. Οι κίονες είχαν διάμετρο βάσης 1.77m και διάμετρο κορυφής 1.40m, ενώ το ύψος τους έφτανε τα 11.30m.



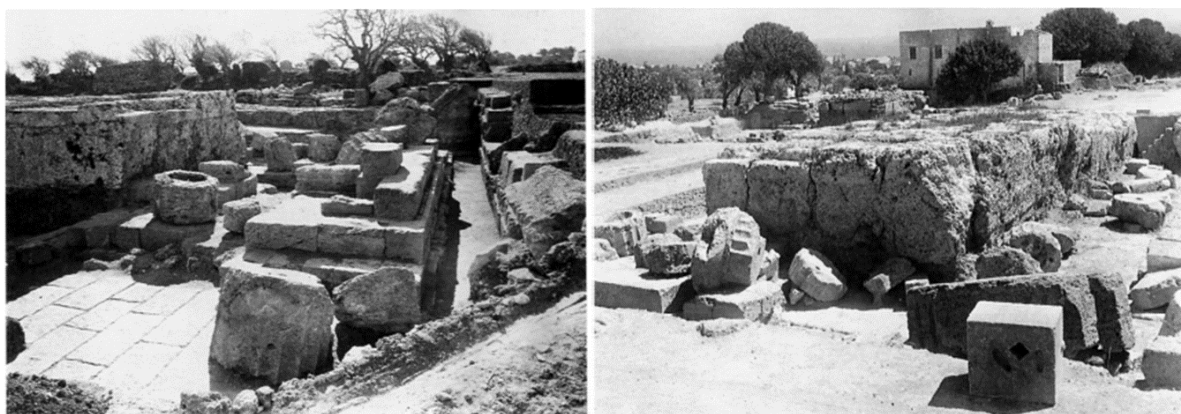
Εικόνα 3-3: Κάτοψη του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα

3.2 Σύντομο ιστορικό της ιταλικής αναστήλωσης

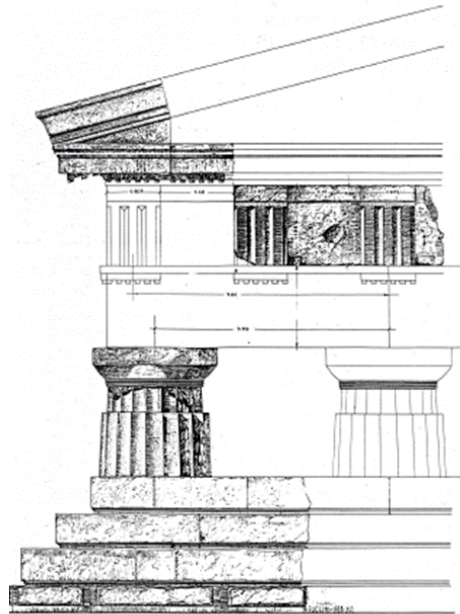
Η αναστήλωση του 1937-1938, κατά την Ιταλοκρατία, από τον αρχιτέκτονα Mario Paolini είναι η ουσιαστική επέμβαση που καθορίζει τη σημερινή υπόσταση του μνημείου. Αρχικά, ανακαλύφθηκε η ισχυρή θεμελίωση ενός Ναού και κατά τις ανασκαφές που ακολούθησαν βρέθηκαν διάφορα αρχιτεκτονικά θραύσματα από πωρόλιθο τοπικής προέλευσης. Τα στοιχεία αυτά επέτρεψαν στο Μ. Paolini να προχωρήσει στη γραφική αναδόμηση του ναού. Αφού εξέτασε το ανάγλυφο της περιοχής, την επιπεδομετρία και αρκετές λεπτομέρειες από τα σωζόμενα μέλη, προχώρησε στην απόδοση της κάτοψης και των προσόψεων του Ναού.



Εικόνα 3-4: Κάτοψη θεμελίωσης του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα μετά την ιταλική ανασκαφή

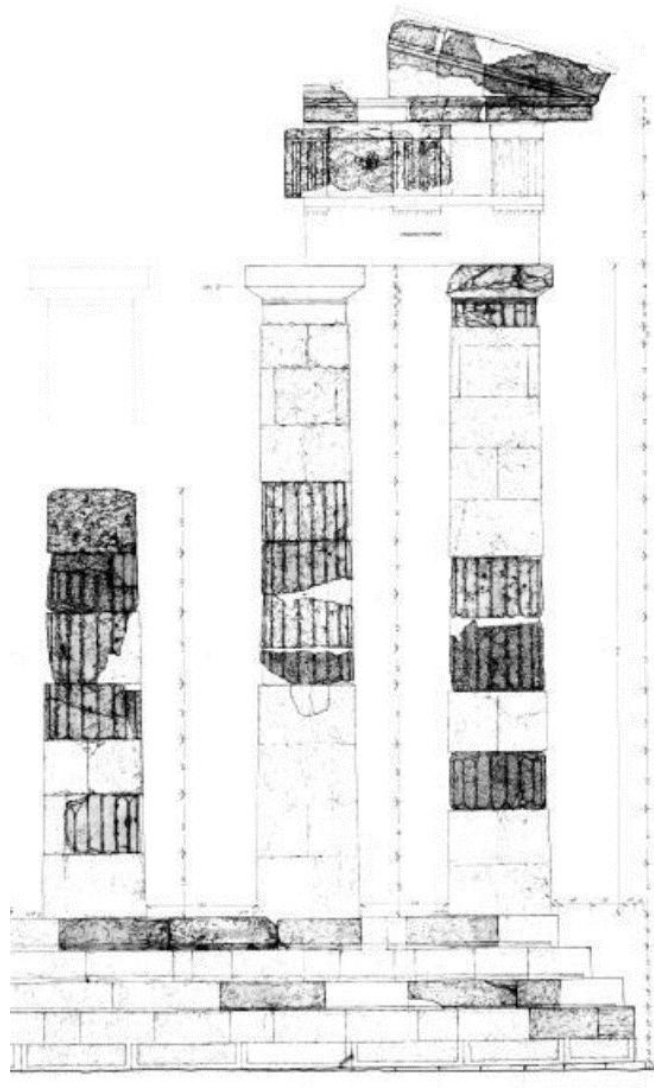


Εικόνα 3-5: Ναός του Πύθιου Απόλλωνα μετά τις ανασκαφές
(Αριστερά: Βορειοδυτική άποψη, Δεξιά: Νοτιοδυτική άποψη)

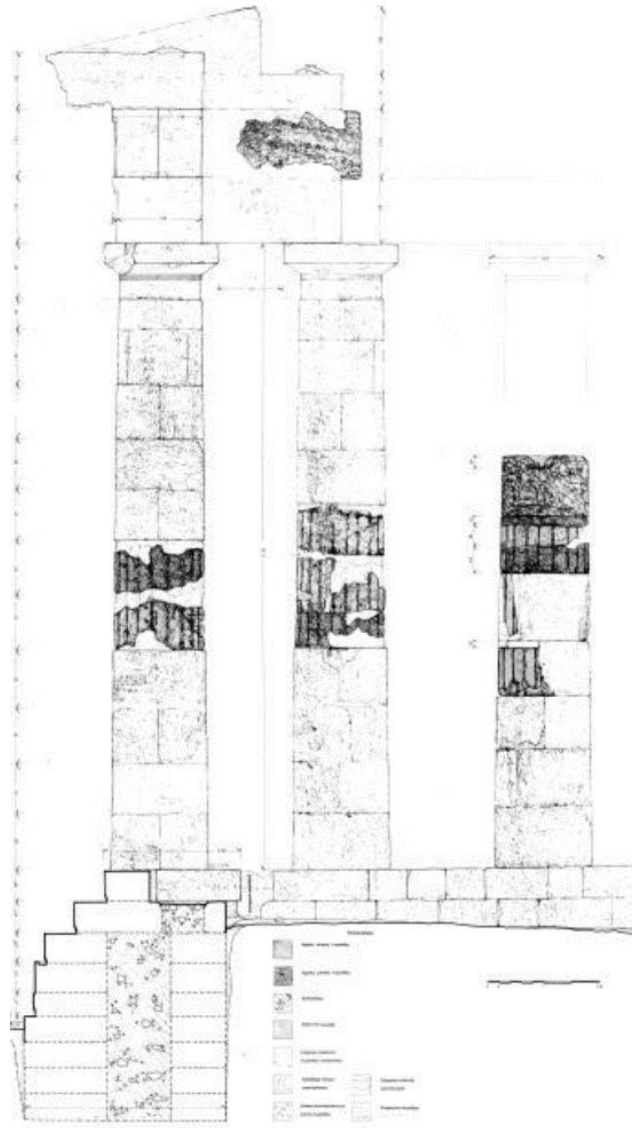


Εικόνα 3-6: Συμπυγμένη όψη γωνίας του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα, αναστήλωση Paolini

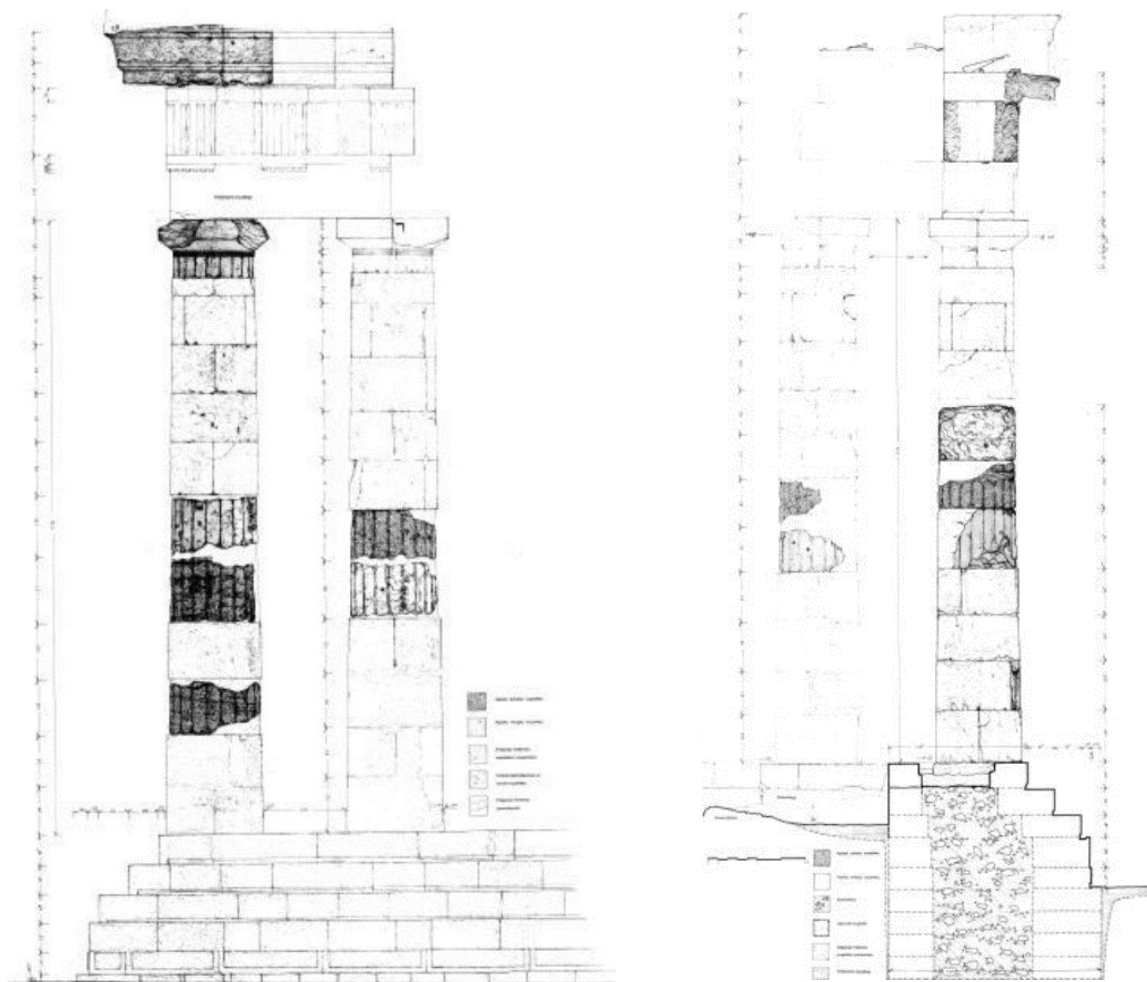
Μετά τις ανασκαφές, ακολούθησε η αναστήλωση της βορειοανατολικής γωνίας του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα. Χαρακτηριστικό στοιχείο της Ιταλικής αναστήλωσης είναι το μικτό σύστημα δόμησης που εφαρμόστηκε, όπου τον κυρίαρχο ρόλο έπαιξε ο πυρήνας κατασκευασμένος από οπλισμένο σκυρόδεμα, και δευτερευόντως ο μανδύας κατασκευασμένος από λίθινα αυθεντικά ή όχι τμήματα. Συγκεκριμένα, διαμορφώθηκε αρχικά η κρηπίδα επί του υποκείμενου βράχου με μανδύα από φέτες πωρόλιθου και γέμισμα με άοπλο σκυρόδεμα, αλλά και με χρήση τεμαχίων λιθοπλίνθων για την αποκατάσταση του στυλοβάτη. Στη συνέχεια, απολαξεύτηκαν οι αρχαίοι σπόνδυλοι εσωτερικά και διαμορφώθηκε πυρήνας από 80cm έως 1m. Παράλληλα, κατασκευάστηκαν λίθινοι ημιδακτύλιοι (2 ανά σπόνδυλο), παρόμοιων διαστάσεων με τους απολαξευμένους σπονδύλους. Τα δύο λίθινα τμήματα συνδέθηκαν μεταξύ τους με 2 χαλύβδινους πιάσχημους συνδέσμους, οι οποίοι τοποθετήθηκαν στην άνω επιφάνεια των ημιδακτυλίων και δε χρησιμοποιήθηκε κονίαμα στη διεπιφάνεια. Για τη μεταφορά και την εναπόθεση των δομικών στοιχείων στο επιθυμητό ύψος κατασκευάστηκε ικρίωμα με ράμπα. Ακολούθησε η χύτευση σκυροδέματος στον εσωτερικό πυρήνα των κιόνων και η τοποθέτηση ράβδων οπλισμού από χάλυβα χωρίς νευρώσεις τμηματικά σε όλο τον κίονα ύψους ~11.30m, συμπεριλαμβανομένου και του κιονοκράνου. Σε επόμενο στάδιο, κατασκευάστηκε το επιστύλιο του μνημείου εξ ολοκλήρου από οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο συνδέθηκε με το υποκείμενο κιονόκρανο μέσω των αναμονών του οπλισμού. Τα υπόλοιπα μέλη του θριγκού κατασκευάστηκαν επίσης από οπλισμένο σκυρόδεμα ή από συνδυασμό πωρόλιθου και οπλισμένου σκυροδέματος στα πλαίσια σύμμικτης κατασκευής. Ακόμα, έγινε εκτενής χρήση τσιμεντοκονιαμάτων με κύριο σκοπό τη συμπλήρωση του όγκου των λίθων του κίονα ή της αρχιτεκτονικής επιφάνειάς του, καθώς και για το κλείσιμο των αρμών.



Εικόνα 3-7: Απεικόνιση του αναστηλωμένου τμήματος του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα (ανατολική όψη)



Εικόνα 3-8: Απεικόνιση του αναστηλωμένου τμήματος του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα (δυτική όψη)



Εικόνα 3-9: Απεικόνιση του αναστηλωμένου τμήματος του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα
(Αριστερά: βόρεια όψη, Δεξιά: νότια όψη)

3.3 Δομικό σύστημα

Αναφορά γίνεται πρώτα στην αρχική δομική λειτουργία του Ναού, στον οποίο λειτουργούσε το δομικό σύστημα “δοκός επί στύλων”. Τα φορτία της ανωδομής, δηλαδή τα ίδια βάρη των μελών, μεταφέρονταν στο έδαφος μέσω των κατακόρυφων στοιχείων, τα οποία είναι οι κίονες και οι τοίχοι.

Η θεμελίωση του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα γινόταν μέσω του θεμελίου απευθείας στο φυσικό βράχο, ο οποίος διαμόρφωνε ένα φυσικό κεκλιμένο επίπεδο από βιοκαλκαρενίτη. Εσωτερικά του μνημείου διατηρείται μέχρι σήμερα τμήμα του βράχου θεμελίωσης του σηκού. Γενικά μπορεί εύλογα να θεωρηθεί ότι στο Ναό τηρείται σε μεγάλο βαθμό η συνθήκη του απαραμόρφωτου της θεμελίωσης δεδομένου του υποκείμενου φυσικού βράχου.

Τα οριζόντια μέλη, όπως είναι τα επιστύλια, ήταν μεγάλης διατομής και μικρού ανοίγματος. Συνεπώς, αυτά λειτουργούσαν σαν αμφιέριστες δοκοί με μικρές τάσεις λειτουργίας, ένα σύστημα που συνεισέφερε θετικά στην απόκριση των κίονων λόγω σημαντικής αύξησης της δυσκαμψίας.

Η στερεότητα του μνημείου αυτού οφείλεται κατά κύριο λόγο στον τρόπο κατασκευής. Η εν ξηρώ δόμηση των κίονων χωρίς την παρεμβολή κονιαμάτων, η ισχυρή πρόσφυση των λίθων λόγω της τέλει λάξευσης και επαφής και η τοποθέτηση αρχιτεκτονικών μελών μεγάλων διαστάσεων και βάρους είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ισχυρού δεσμού τριβής (συντελεστής τριβής διεπιφάνειας: 0.7) που εξασφάλιζε τη συνοχή των αρχιτεκτονικών μελών.

Η συμμετρικότητα στην τοποθέτηση των μελών γύρω από τον κεντροβαρικό άξονα του μνημείου αποτελούσε ένα επιπλέον στοιχείο για την εξασφάλιση της σταθερότητας και της ορθής στατικής λειτουργίας του.

Το δομικό υλικό είναι ο γνωστός Ροδιακός πωρόλιθος από την εγγύς στο μνημείο περιοχή με μικρές αντοχές σε θλίψη και κάμψη. Η κατάσταση των μελών δεν είναι ιδιαίτερα επιμελημένη όσον αφορά στην κοπή του υλικού, γεγονός το οποίο οφείλεται κατά κύριο λόγο στην υφή της πέτρας, στις ασυνέχειες που αυτή παρουσιάζει και στη θρυπτικότητα του ντόπιου λίθου που επιτείνεται με το πέρασμα του χρόνου.

Το δομικό σύστημα του μνημείου μετά τις επεμβάσεις του προηγούμενου αιώνα είναι σήμερα εντελώς διαφορετικό σε σχέση με το αρχαίο. Τα ήδη καταπονημένα αρχαία μέλη απολαξεύτηκαν, όπως έχει προαναφερθεί, σε ποσοστό τουλάχιστον 60% για τη διαμόρφωση εσωτερικού πυρήνα που πληρώθηκε με ισχυρό τσιμεντοκονίαμα και σιδερένιες ράβδους. Παρόμοια απολαξεύτηκαν και τα νέα μέλη με τη διαφοροποίηση ότι αυτά αποτελούνταν από δύο τμήματα. Αυτή η μέθοδος αποκατάστασης, ευρέως διαδεδομένη σε ανάλογα αρχαιολογικά έργα της εποχής, συνέβαλε στη δημιουργία σοβαρών βλαβών στα αρχιτεκτονικά μέλη, όπως διεύρυνση αρμών και πολλές θραύσεις στο κέλυφος των αρχιτεκτονικών μελών.



Εικόνα 3-10: Σημερινή μορφή του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα (τελευταία κατά σειρά φωτογραφία: Ρόδος, 2017, Πηγή: Μεταπτυχιακή εργασία Βασιλείου Κεραμίδα, Αθήνα 2017)

4 ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

Στις αναλύσεις της σεισμικής απόκρισης αρχαίων μνημείων για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με πιθανές επεμβάσεις σε αυτά, είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιηθούν σενάρια σεισμικών διεγέρσεων που να είναι συμβατά με τα σεισμοτεκτονικά δεδομένα της περιοχής και να καλύπτουν όλο το εύρος του αναμενόμενου συχνοτικού περιεχομένου (κυρίως της δεσπόζουσας περιόδου) της εδαφικής κίνησης.

Η επιλογή των σεισμικών διεγέρσεων είναι μία σημαντική απόφαση σε τέτοιες αναλύσεις, αφού, εάν συμπεριλάβει κανείς διεγέρσεις που δεν είναι πιθανόν να συμβούν μπορεί να οδηγηθεί σε λανθασμένα συμπεράσματα, ενώ εάν περιορίσει πολύ τις πιθανές διεγέρσεις μπορεί να οδηγηθεί σε εξαγωγή συμπερασμάτων που είναι εναντίον της ασφάλειας.

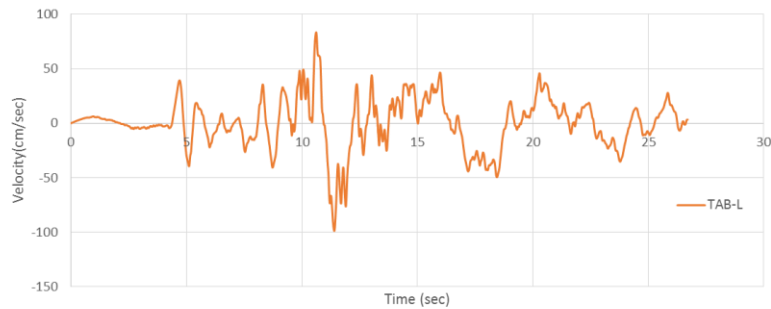
Μεταξύ των παραμέτρων που θα πρέπει κανείς να εξετάσει είναι η μέγιστη εδαφική ταχύτητα και η δεσπόζουσα περίοδος της εδαφικής κίνησης καθώς και φαινόμενα κατευθυντικότητας (directivity) σε περιπτώσεις γειννίασης με ενεργά σεισμικά ρήγματα, παράμετροι που επηρεάζουν σημαντικά την απόκριση αρχαίων μνημείων.

Στην παρούσα εργασία αναλύσεις έγιναν για έξι επιταχυνσιογραφήματα που επιλέχθηκαν από τις βάσεις δεδομένων European Strong Motion Data Base και NGA Strong Motion Data Base, τα οποία έχουν προέλθει από κανονικά ή ανάστροφα ρήγματα και έχουν καταγραφεί σε σκληρό ή βραχώδες έδαφος, είναι επομένως συμβατά με το σεισμοτεκτονικό περιβάλλον της Ρόδου και τις εδαφικές συνθήκες στη θέση του μνημείου. Ταυτόχρονα, καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δεσποζουσών περιόδων.

Τα χαρακτηριστικά των έξι σεισμικών διεγέρσεων που επιλέχθηκαν δίνονται στον Πίνακα 4-1 με χρονολογική σειρά των σεισμικών γεγονότων ενώ στο Σχήμα 4-1 δίνονται οι χρονοϊστορίες των οριζόντιων συνιστωσών των καταγραφών.

Υψηλές τιμές δεσποζουσών περιόδων χαρακτηρίζουν και τις δύο οριζόντιες συνιστώσες της σεισμικής καταγραφής Bisaccia (Campano Lugano, Italy), καθώς επίσης μεγάλες τιμές παρατηρούνται και για μία από τις δύο συνιστώσες των καταγραφών Tabas και Loma Prieta. Επιπλέον, για το σεισμικό γεγονός Tabas διατίθενται καταγραφές εγγύς του ρήγματος, όπου λειτούργησε το φαινόμενο της «κατευθυντικότητας». Ειδικότερα, παρατηρούμε ότι το ταχυσιογράφημα του κραδασμού αυτού (Σχήμα 4-2) περιέχει σημαντικούς μακροπεριόδους παλμούς, τα λεγόμενα πλήγματα. Οι παλμοί αυτοί παράγονται από την “ενισχυτική συμβολή” των διαδιδόμενων σεισμικών κυμάτων στην κατεύθυνση της διάρρηξης του ρήγματος (Somerville and Graves 1993, Naeim 1995). Η δε καταστρεπτικότητα τους έχει επανειλημμένως αποδειχθεί στην απόκριση μη γραμμικών συστημάτων όπως τα λικνιζόμενα

συστήματα (Housner 1963, Biggs 1964, Anderson and Bertero 1976 and 1986, Gazetas 1996, Makris and Roussos 1998).



Σχήμα 4-1: Χρονοϊστορία ταχύτητας για την καταγραφή Tabas (L). Διακρίνεται ένας παλμός κατευθυντικότητας σημαντικής ταχύτητας (100 cm/sec)

Οι αναλύσεις έγιναν μετά την κλιμάκωση των επιταχυνσιογραφημάτων με κατάλληλο συντελεστή, έτσι ώστε, στην περιοχή περιόδων από 0.4 s έως 2.0 s η διαφορά του φάσματος της συνδυασμένης (RMS) χρονοϊστορίας των δύο οριζόντιων καταγραφών από το ελαστικό φάσμα του Ευρωκώδικα 8 για έδαφος κατηγορίας A και εδαφική επιτάχυνση $\gamma I a_g = 1.2 \times 0.24g = 0.288g$ (για συντελεστή σπουδαιότητας $\gamma_I = 1.2$) να είναι ελάχιστη. Η μέθοδος αυτή της κανονικοποίησης επελέγη έναντι της προτεινόμενης στον Ευρωκώδικα για το συγκεκριμένο τύπο κατασκευής, ώστε τα φάσματα των διεγέρσεων να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο φάσμα του Ευρωκώδικα στο κρίσιμο εύρος περιόδων $T = 0.4 \div 2.0s$. Οι συντελεστές κλιμάκωσης που προκύπτουν δίνονται στην τελευταία στήλη του πίνακα 4-1.

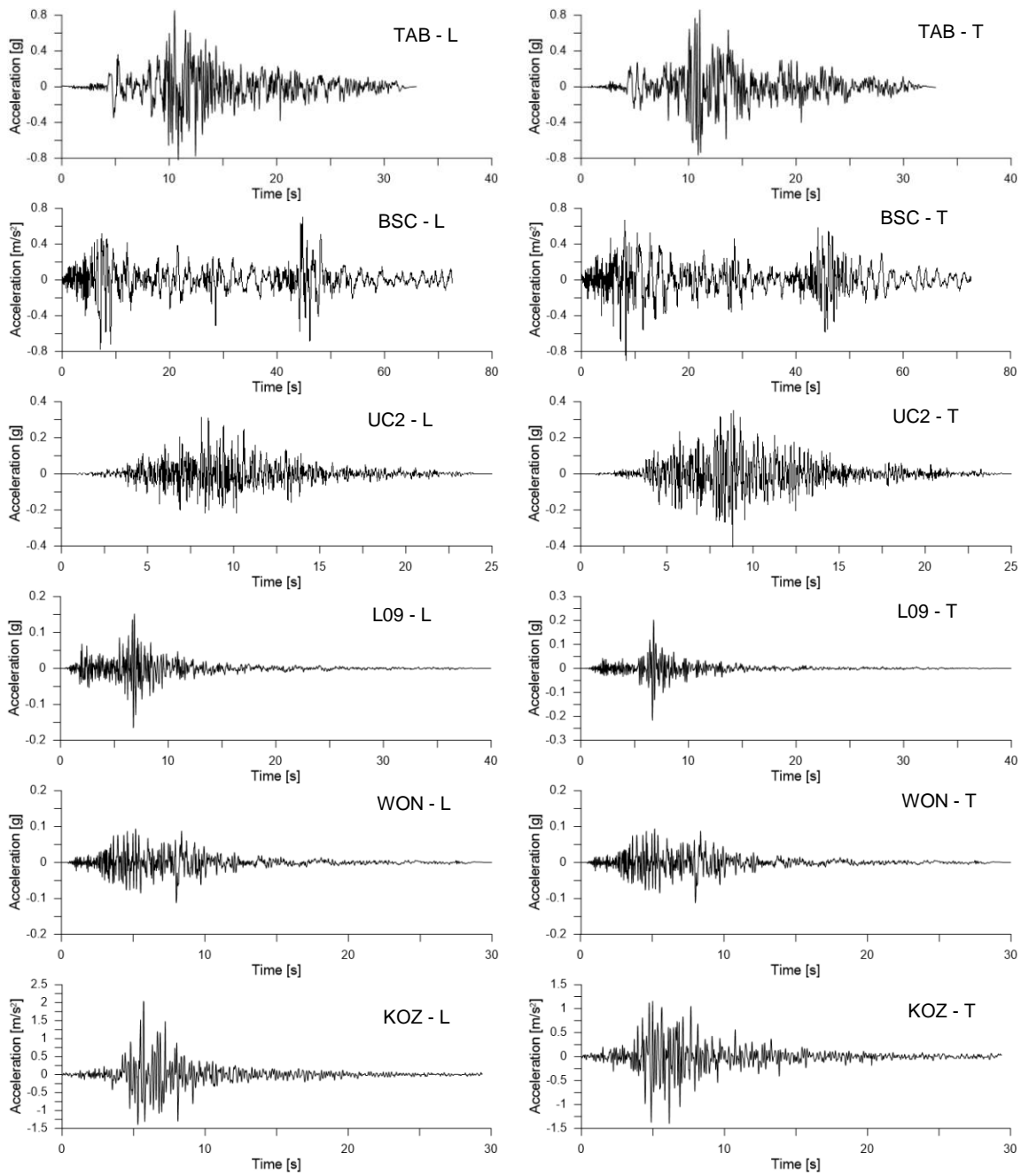
Σημειώνεται ότι αναλύσεις γίνονται τόσο για τους σεισμούς μετά την κλιμάκωσή τους σύμφωνα με την παραπάνω διαδικασία, όσο και για διπλάσιους, οι οποίοι αντιστοιχούν περίπου στο ελαστικό φάσμα του Ευρωκώδικα συν μία τυπική απόκλιση.

Τα κανονικοποιημένα φάσματα των σεισμών (μετά την κλιμάκωση) δίνονται στο Σχήμα 4-3, όπου συγκρίνονται και με το φάσμα του κανονισμού.

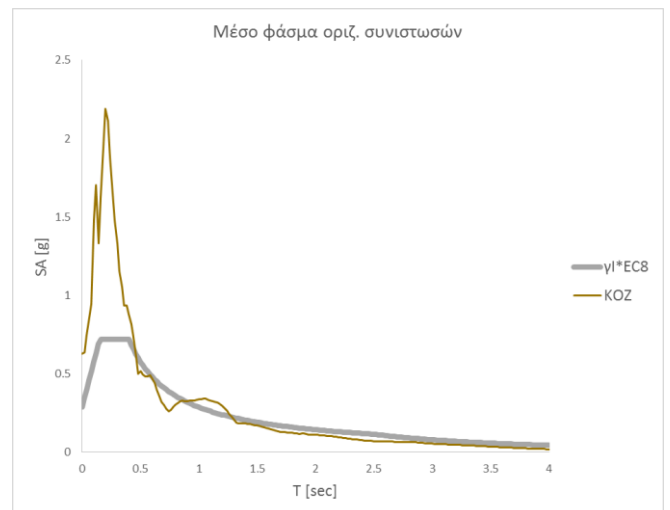
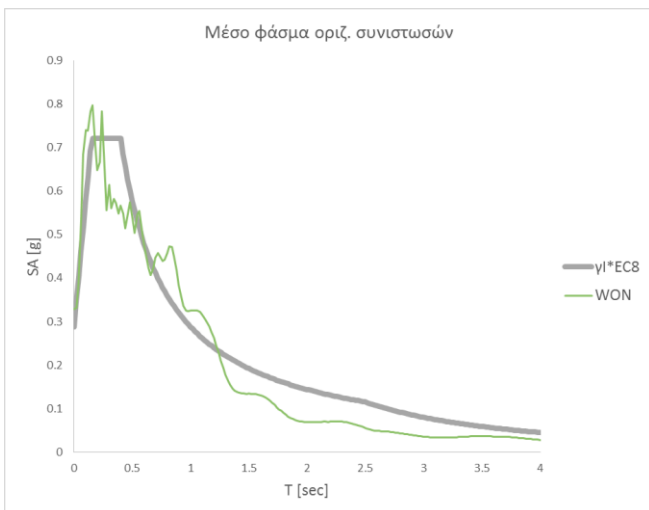
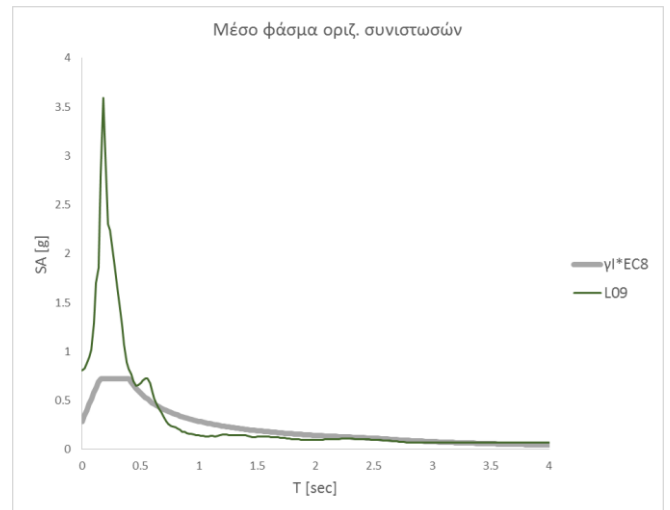
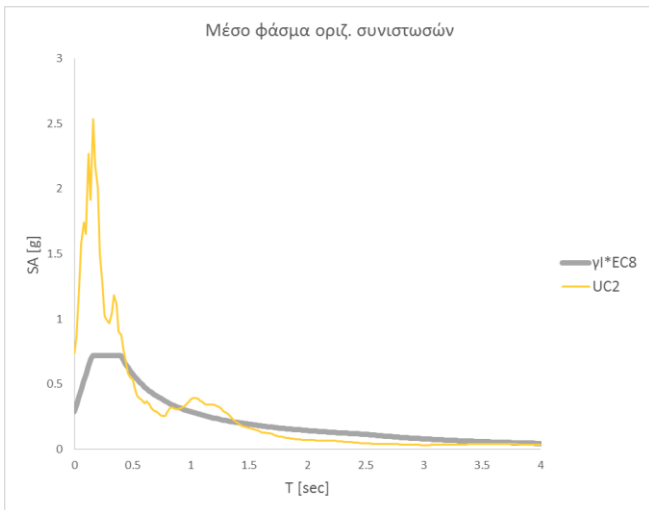
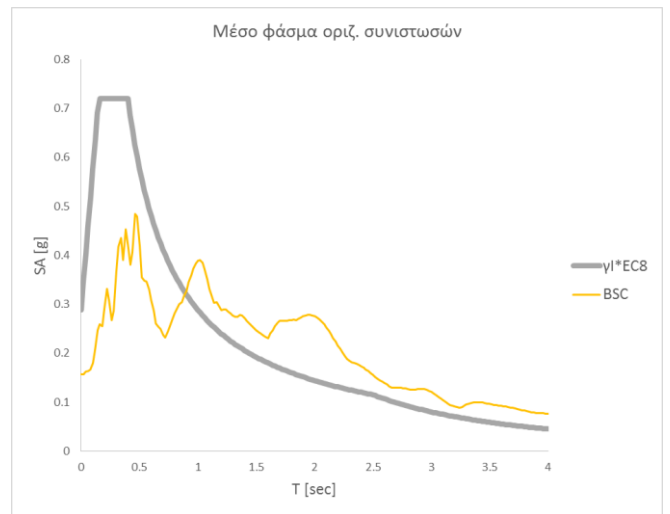
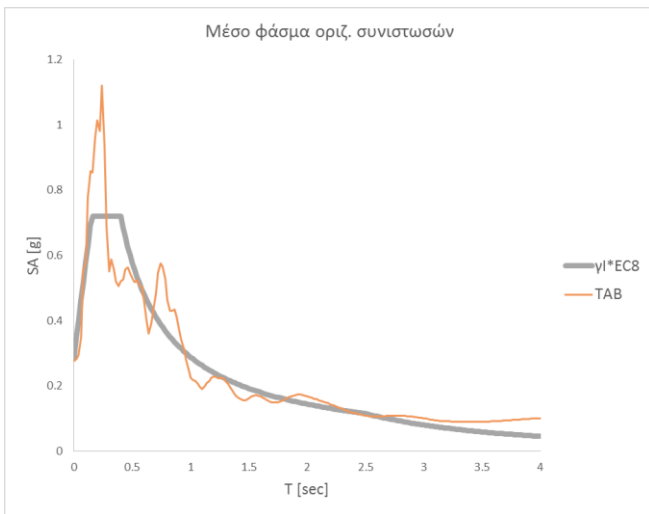
Πίνακας 4-1: Χαρακτηριστικά σεισμικών διεγέρσεων

No	Σεισμός	Ημερ/ via	M_w	Καταγρ.	Συμβολ.	Απόστ. από ρήγμα (km)	Έδαφ- ος	PGA (g)	$T_p^{(1)}$ (sec)	Συντ. κλιμά- κωσης
1	Tabas Iran	16/09 /1978	7.35	Tabas	TAB	2	Rock	L: 0.854 T: 0.862	0.86 4.88	0.322
2	Campano Lugano, Italy	23/11 /1980	6.9	Bisaccia	BSC	19	Rock	L: 0.079 T: 0.092	1.02 2.02	1.817
3	Loma Prieta, California	18/10 /1989	6.9	UCSC	UC2	12	Rock	L: 0.312 T: 0.406	0.38 2.06	2.036
4	Northridge , California, USA	17/01 /1994	6.7	Lake Hughes #9	L09	27	A	L: 0.165 T: 0.217	0.19 0.18	4.209
5	Northridge , California, USA	17/01 /1994	6.7	Los Angeles Wonderland Ave.	WON	23	A	L: 0.112 T: 0.172	1.17 0.84	2.259
6	Kozani, Greece	13/05 /1995	6.5	Kozani Prefecture Blg.	KOZ	14	A	L: 0.208 T: 0.143	0.23 0.39	3.535

(1) Δεσπόζουσα περίοδος. Αντιστοιχεί στην κορυφή του φάσματος ψευδοταχυτήτων για απόσβεση 5%



Σχήμα 4-2: Χρονοϊστορίες επιταχύνσεων των καταγραφών του Πίνακα 1.



Σχήμα 4-3 :Φάσματα επιταχύνσεων ($\zeta=5\%$) των καταγραφών του Πίνακα 4-1 μετά την κλιμάκωσή τους

5 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ Κ1,Κ2,Κ3 & Κ4 ΤΟΥ ΝΑΟΥ ΤΟΥ ΠΥΘΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ

5.1 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μελέτη φαινομένων στη φύση, όπως η ανάλυση φορέων στη Στατική, με σύγχρονα υπολογιστικά μέσα ακολουθεί δύο βασικά στάδια: (i) τη μαθηματική διατύπωση του φαινομένου και (ii) την αριθμητική ανάλυση του μαθηματικού προσομοιώματος. Η μαθηματική διατύπωση βασίζεται σε ορισμένες παραδοχές γύρω από τις διαδικασίες που χαρακτηρίζουν το φαινόμενο, ενώ η αριθμητική ανάλυση χρησιμοποιεί αριθμητικές μεθόδους και δυνατότητες του Η/Υ προκειμένου να δώσει λύση στη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος. Η αριθμητική μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων βασίζεται στην αντικατάσταση του γεωμετρικά σύνθετου πεδίου του προβλήματος από ένα σύνολο απλών υποπεδίων, τα οποία ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι ο φορέας του προβλήματος αποτελείται από ένα σύνολο διακριτών πεπερασμένων στοιχείων, τα οποία εφάπτονται μεταξύ τους χωρίς να αφήνουν κανένα κενό και συνδέονται με τους κόμβους που βρίσκονται στα σύνορα των στοιχείων. Το σύνολο αυτό των στοιχείων ονομάζεται δίκτυο ή πλέγμα και η προσομοίωση του φορέα με το δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων ονομάζεται διακριτοποίηση του φορέα. Το πλέγμα προγραμματίζεται ώστε να περιέχει τις δομικές ιδιότητες και τις ιδιότητες υλικού που καθορίζουν με ποιο τρόπο θα συμπεριφερθεί μια κατασκευή υπό ορισμένες συνθήκες φόρτισης. Σκοπός της μεθόδου είναι ο υπολογισμός προσεγγιστικών λύσεων μερικών διαφορικών εξισώσεων που διέπουν τα φαινόμενα στη φύση. Το πλήθος των αλγεβρικών εξισώσεων στο οποίο καταλήγουμε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ταυτίζεται με το πλήθος των βαθμών ελευθερίας του προβλήματος. Για το λόγο αυτό, το σύστημα των εξισώσεων αυτών μπορεί να επιλυθεί μόνο με τη βοήθεια Η/Υ.

5.2 Ο αλγόριθμος ανάλυσης του υποπρογράμματος Abaqus/Standard

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων Abaqus 6.14-1. Συγκεκριμένα, η προσομοίωση του φορέα του εξεταζόμενου προβλήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του γραφικού περιβάλλοντος Abaqus/CAE και του υποπρογράμματος ανάλυσης Abaqus/Standard.

Το Abaqus προσφέρει επιλογές ανάλυσης τόσο για γραμμικά όσο και για μη γραμμικά προβλήματα. Για την επίλυση των πρώτων χρησιμοποιούνται συνήθως μέθοδοι που βασίζονται στις ιδιομορφές του συστήματος, ενώ για τα μη γραμμικά συστήματα εφαρμόζονται μέθοδοι άμεσης ολοκλήρωσης. Στο Abaqus/Standard η δυναμική απόκριση έντονα μη γραμμικών συστημάτων προσδιορίζεται από την επίλυση των εξισώσεων κίνησης με την άμεση μέθοδο ολοκλήρωσης στο χρόνο για όλους τους βαθμούς ελευθερίας του μοντέλου των πεπερασμένων στοιχείων. Το υποπρόγραμμα αυτό είναι σχεδιασμένο για την ανάλυση δομικών στοιχείων, με τελικό σκοπό τον προσδιορισμό της συνολικής δυναμικής απόκρισης της κατασκευής. Οι μέθοδοι ολοκλήρωσης χωρίζονται σε "implicit" και "explicit". Με τις "implicit" (έμμεσες) μεθόδους γίνεται αντιστροφή των χρησιμοποιούμενων μητρών και επιλύεται ταυτόχρονα ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών εξισώσεων σε κάθε χρονικό βήμα. Η λύση προκύπτει μετά από επαναλήψεις χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Newton-Raphson. Ωστόσο, εφόσον πρέπει να λυθεί ένα καθολικό σύστημα εξισώσεων (για ολόκληρο το φορέα) σε λάθε χρονικό βήμα, αναμένεται ότι το υπολογιστικό κόστος θα είναι αρκετά μεγάλο.

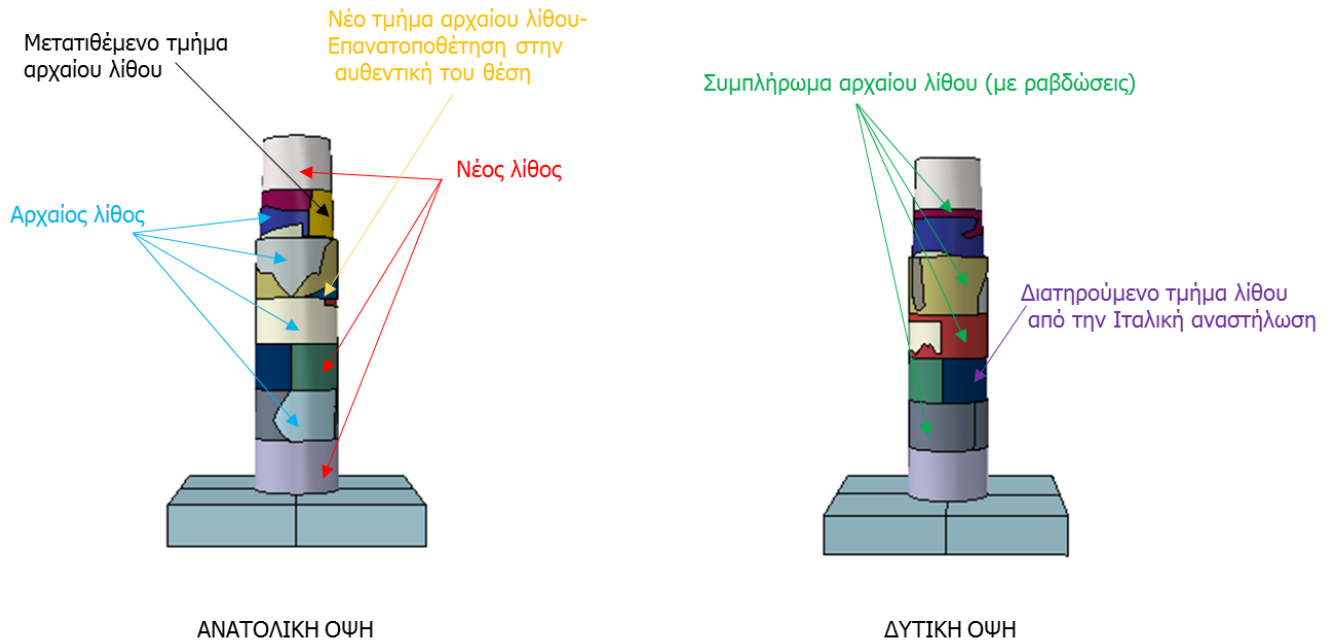
Η δυναμική ανάλυση άμεσης ολοκλήρωσης με το Abaqus/Standard μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη διάφορων προβλημάτων όπως είναι η δυναμική απόκριση συστημάτων που περιλαμβάνει μη γραμμικότητα, επαφή (contact) και απώλεια μέτριας ποσότητας ενέργειας. Τυπική εφαρμογή μπορεί να γίνει σε προβλήματα που περιλαμβάνουν κρούση σωμάτων (όπως είναι η εξεταζόμενη περίπτωση της σεισμικής απόκρισης αρχαίων κίωνων).

5.3 Περιγραφή μοντέλων αριθμητικής ανάλυσης

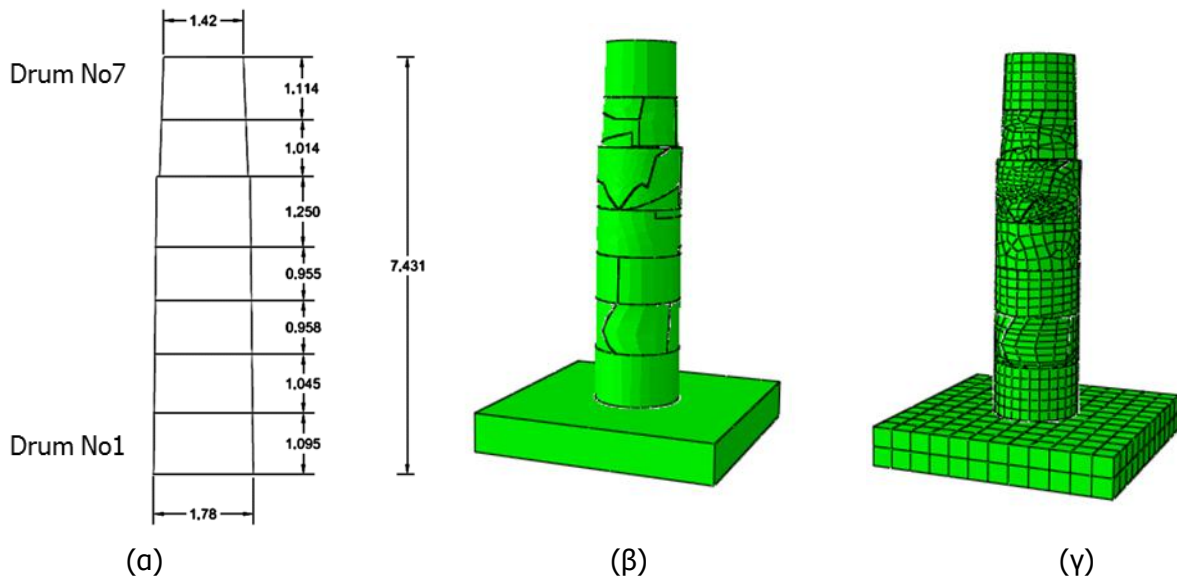
Ο μεμονωμένος πολυσπόνδυλος κίονας K4, καθώς και οι πολυσπόνδυλοι κίονες K1, K2 και K3 που συνδέονται μεταξύ τους με ανωδομή (entablature), θεωρούνται αναστηλωμένοι και συνεπώς αποτελούνται από αρχαία και νέα μέλη. Η πρόταση αποκατάστασης των κίωνων παρουσιάζεται στις Εικόνες 5-1,5-3 και 5-4, όπου δείχνεται το είδος των τμημάτων λίθου που απαρτίζουν τους σπονδύλους. Τα αρχαία μέλη που φέρουν βλάβες συμπληρώνονται με νέο υλικό, που είναι τοπικός πωρόλιθος, ανάλογων φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών. Η εσωτερική στήλη από σκυρόδεμα που προέρχεται από την Ιταλική αναστήλωση αφαιρείται και έτσι καταργείται η μονολιθικότητα των κίωνων. Σύμφωνα με την προτεινόμενη επέμβαση, ορισμένοι σπόνδυλοι αντικαθίστανται πλήρως από νέους, συμπαγείς αράβδωτους σπονδύλους, ενώ όπου υπάρχει αρχαίος λίθος προστίθεται συμπλήρωμα από νέο λίθο ίδιο με αυτόν των νέων σπονδύλων. Τα συμπληρώματα αυτά προτείνονται ραβδωμένα. Για τη σύνδεση αρχαίων και νέων μελών χρησιμοποιείται κονίαμα. Οι σπόνδυλοι εδράζονται ο ένας πάνω στον άλλο έχοντας απλή επαφή. Κατά την προσομοίωση δε λήφθηκαν υπόψη τυχόν ρηγματώσεις που υπήρχαν στους σπονδύλους και θεωρήθηκε πλήρης επαφή μεταξύ όλων των επιφανειών.

Οι κίονες K1, K2, K3 και K4 προσομοιώνονται με τις πραγματικές του διαστάσεις ως τρισδιάστατες σπονδυλωτές κατασκευές στον κώδικα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS (ABAQUS, 2014). Κάθε σπόνδυλος προσομοιώνεται ως παραμορφώσιμο σώμα κάνοντας χρήση χωρικών τρισδιάστατων στοιχείων συνεχούς μέσου (brick elements). Δεδομένου ότι το κρηπίδωμα του ναού έχει πάχος 2.5m περίπου και ο ναός είναι χτισμένος επί βραχώδους υποβάθρου, μπορούμε εύλογα να θεωρήσουμε ότι ο κίονας εδράζεται πάνω σε άκαμπτη βάση. Έτσι, η βάση του κίονα προσομοιώνεται ως ένα πρακτικά

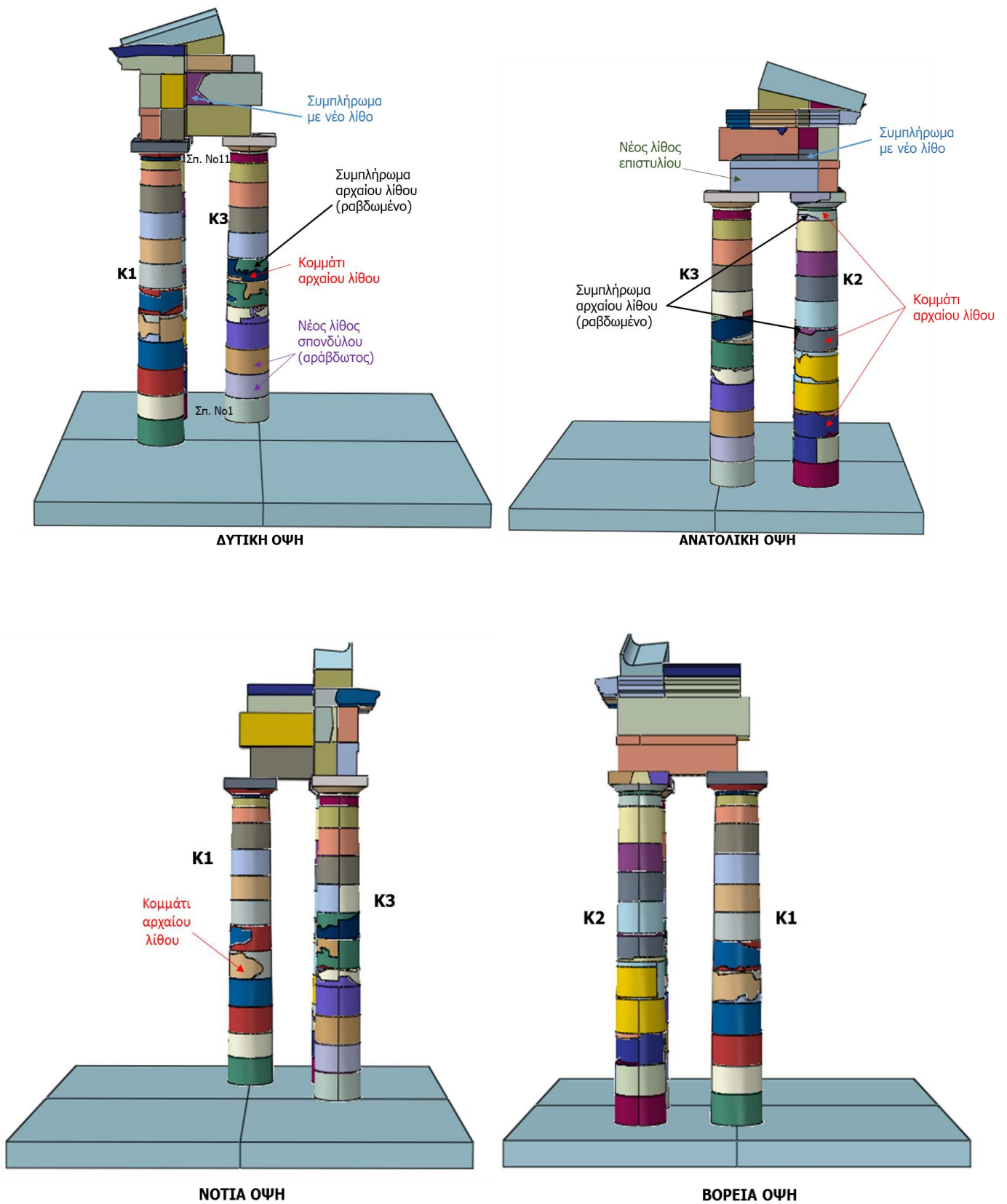
απαραμόρφωτο σώμα (χρήση πολύ μεγάλης, πρακτικά άπειρης, τιμής για το μέτρο ελαστικότητας). Οι διεπιφάνειες των σωμάτων προσομοιώνονται με κατάλληλο τρόπο στο ABAQUS, ώστε να επιτρέπονται φαινόμενα αποκόλλησης (λίκνισμού) και ολίσθησης. Στην επόμενη εικόνα απεικονίζονται και τα αριθμητικά προσομοιώματα, τα οποία προκύπτουν μετά από τη διακριτοποίηση των φορέων (mesh).



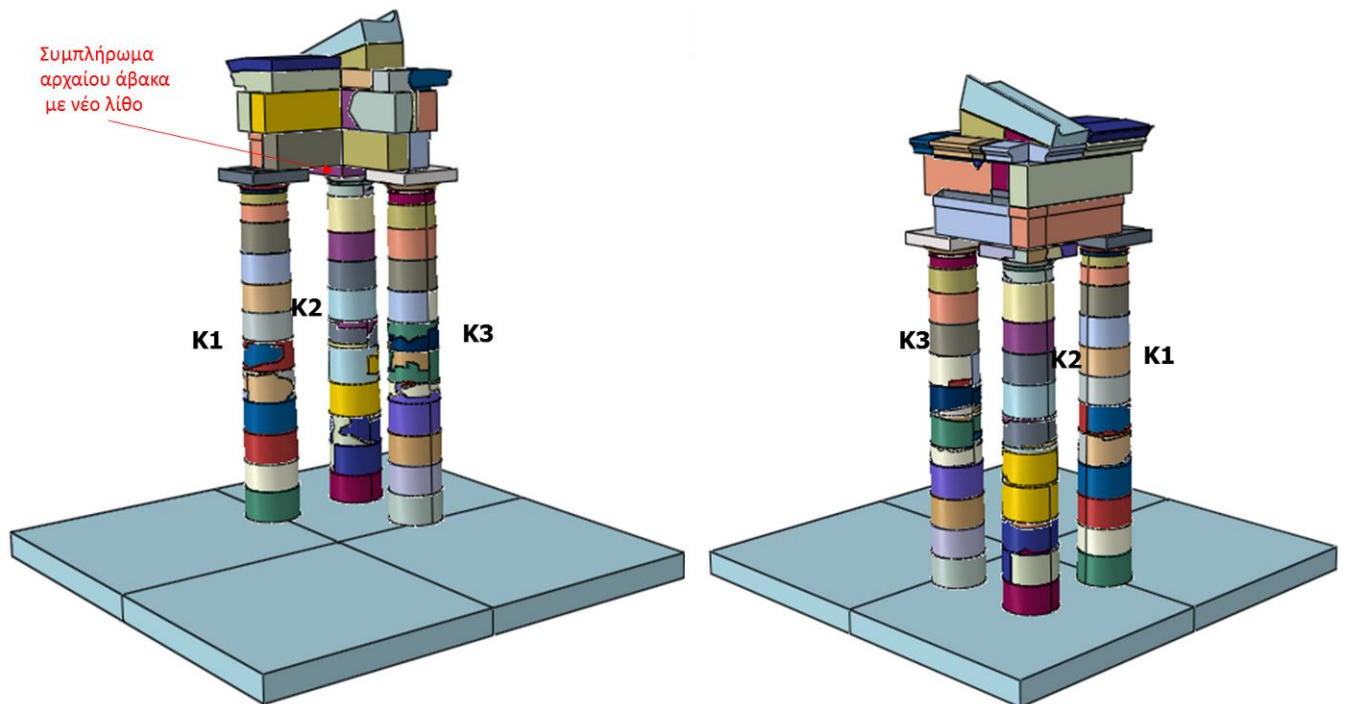
Εικόνα 5-1: Όψεις αναστηλωμένου κίονα- Πρόταση αποκατάστασης



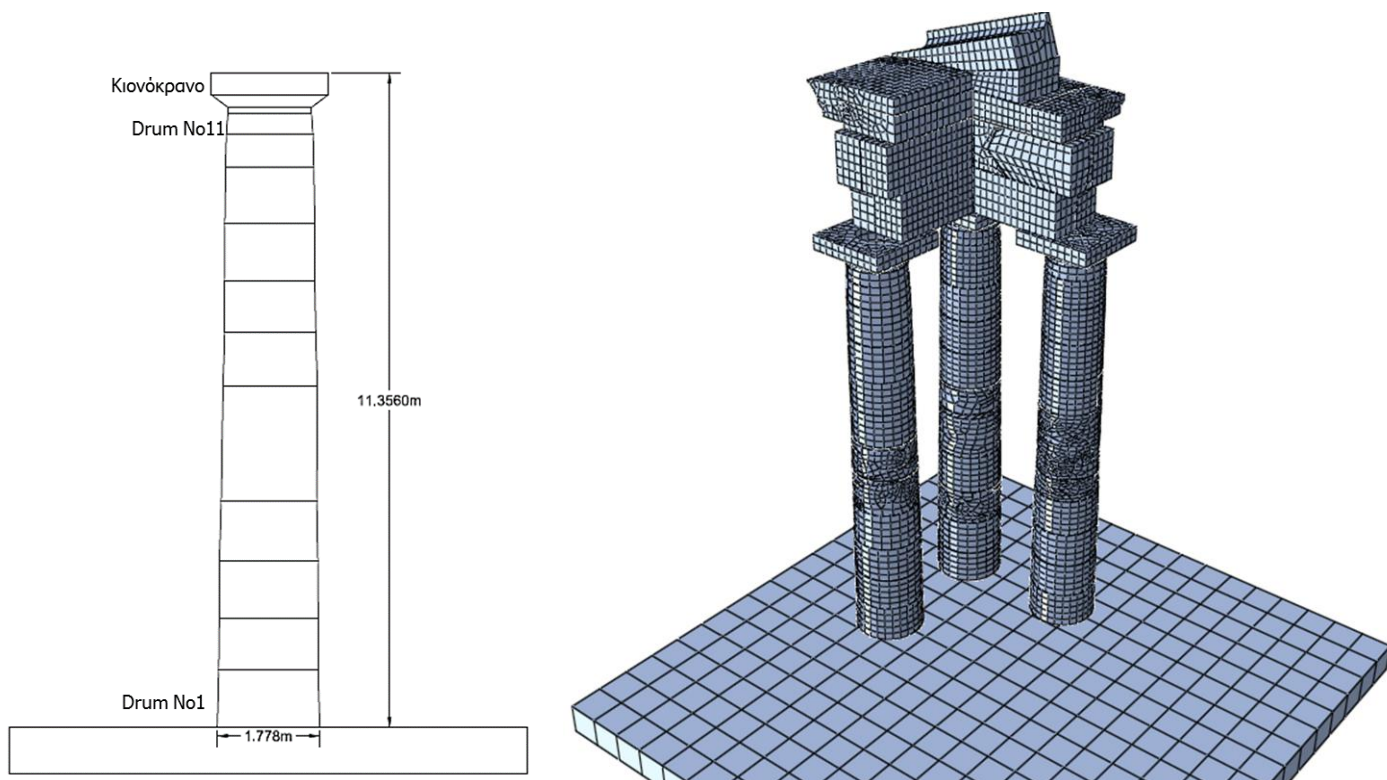
Εικόνα 5-2: (α) Διαστάσεις κίονα σε m, (β) Μαθηματικό προσομοίωμα κατασκευής (φορέας), (γ) Αριθμητικό προσομοίωμα



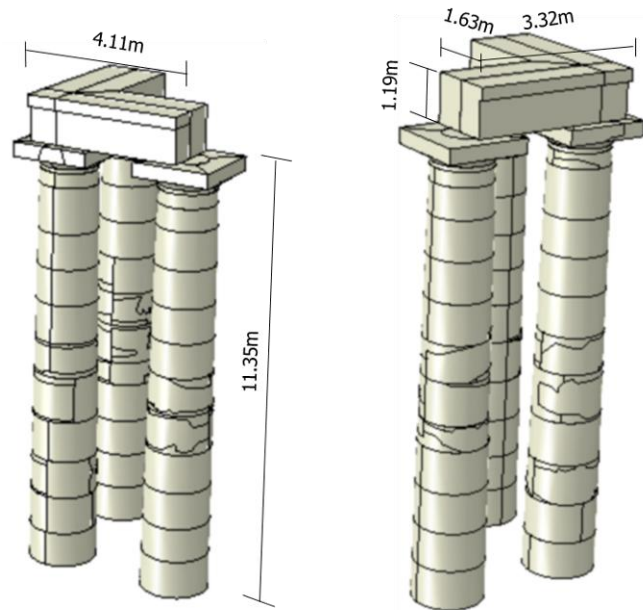
Εικόνα 5-3: Όψεις κιονοστοιχίας, Ναός του Πύθιου Απόλλωνα- Πρόταση αναστήλωσης



Εικόνα 5-4: Κιονοστοιχία Κ1-Κ2-Κ3, Ναός του Πύθιου Απόλλωνα- Πρόταση αναστήλωσης



Εικόνα 5-5: Διαστάσεις κίονα Κ1 και Αριθμητικό προσομοίωμα κιονοστοιχίας

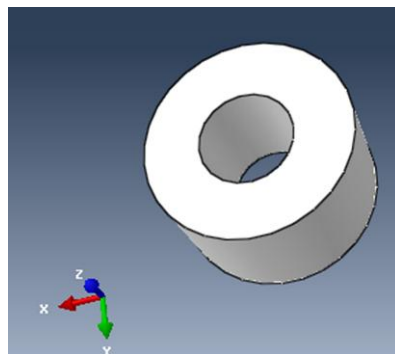


Εικόνα 5-6: Διαστάσεις επιστυλίου

5.4 Σύντομη αναφορά στα βήματα δημιουργίας του μοντέλου στο Abaqus

➤ Δημιουργία γεωμετρίας μοντέλου

Σε πρώτο στάδιο σχεδιάστηκαν ξεχωριστά οι σπόνδυλοι των κιόνων ως τρισδιάστατα παραμορφώσιμα σώματα (3D deformable bodies) χρησιμοποιώντας την εντολή Create Part. Δημιουργήθηκαν κοίλοι κόλικοι κύλινδροι, με μειούμενη διάμετρο προς την κορυφή των σπονδύλων, για να ανταποκρίνονται στην κατάσταση των σπονδύλων, οι οποίοι είχαν απολαξευτεί εσωτερικά στο παρελθόν προκειμένου να εγχυθεί πυρήνας σκυροδέματος με διάμετρο της τάξης των 80cm. Οι διαστάσεις των κιόνων δίνονται αναλυτικά παρακάτω.



Εικόνα 5-7: Μοντελοποίηση τυπικού σπονδύλου κίονα στο Abaqus

➤ Ορισμός υλικού

Στη συνέχεια, ορίστηκαν οι ιδιότητες του υλικού των σπονδύλων με τη βοήθεια της ομάδας εντολών Property, θεωρώντας ότι αυτό παρουσιάζει γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα, ορίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας, ο λόγος Poisson και η πυκνότητα του τοπικού πωρόλιθου που θεωρείται ότι θα χρησιμοποιηθεί στην αναστήλωση του μνημείου, και επιπλέον έγινε η παραδοχή ότι αρχαία και νέα μέλη χαρακτηρίζονται από ίδιες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων. Οι τιμές αυτές αναφέρονται παρακάτω στο κείμενο. Σημειώνεται ότι η πυκνότητα του υλικού ορίστηκε σε Mg/m^3 και το μέτρο ελαστικότητας σε kPa .

➤ Συνδεσμολογία

Ακολούθησε η συναρμολόγηση των μερών (parts) χρησιμοποιώντας τις εντολές της ενότητας Assembly ώστε το μοντέλο να αποκτήσει την τελική του μορφή.

➤ Ορισμός βημάτων ανάλυσης (steps)

Στην επόμενη φάση δημιουργήθηκαν τα βήματα ανάλυσης (steps). Πιο συγκεκριμένα η εντολή Step αφορά την ακολουθία των χρησιμοποιούμενων βημάτων ανάλυσης. Το Abaqus δημιουργεί από μόνο του ένα ειδικό αρχικό βήμα (initial step), το οποίο επιτρέπει να οριστούν συνοριακές συνθήκες και ιδιότητες αλληλεπίδρασης (π.χ. τριβή), οι οποίες επιβάλλονται με το που ξεκινά η ανάλυση. Το 2^ο βήμα που ορίστηκε είναι βήμα στατικής ανάλυσης ("Apply gravity") κατά το οποίο επιβλήθηκαν τα φορτία βαρύτητας του μοντέλου. Στο 3^ο βήμα επιβλήθηκε η επιτάχυνση ("Apply acceleration") και ορίστηκε να εκτελεστεί δυναμική ανάλυση. Σημειώνεται ότι στα δύο τελευταία βήματα ανάλυσης ενεργοποιήθηκε η επιλογή Nlgeom, καθώς αυτή λαμβάνει υπόψη της τη γεωμετρική μη γραμμικότητα κατά τη διάρκεια των βημάτων ανάλυσης.

➤ Ιδιότητες αλληλεπίδρασης των διεπιφανειών των σωμάτων (Interaction)

Στο επόμενο στάδιο προσδιορίστηκαν οι αλληλεπιδράσεις των σωμάτων που βρίσκονται σε επαφή με την εντολή Interaction→Create. Ορίστηκαν οι επιφάνειες που αλληλεπιδρούν και δημιουργήθηκε αλληλεπίδραση επιφάνειας προς επιφάνεια (Surface-to-surface contact). Τα ζεύγη επιφανειών που ορίστηκαν (master surface & slave surface) είναι οι βάσεις και οι κορυφές των σπονδύλων, η κατώτερη οριζόντια επιφάνεια των επιστυλίων, η ανώτερη επιφάνεια του στυλοβάτη, οι επιφάνειες των μελών της ανωδομής ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσής τους, καθώς και οι επιφάνειες των κομματιών λίθου στις οποίες χρησιμοποιείται κονίαμα. Οι ιδιότητες αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιήθηκαν είναι δύο: (α) η απλή επαφή που περιλαμβάνει τον ορισμό της τριβής και της μηχανικής συμπεριφοράς κάθετα στις επιφάνειες και (β) η συνοχή που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του κονιάματος. Στην ενότητα 4.4 περιγράφονται αναλυτικά οι παραπάνω ιδιότητες.

Για τη δημιουργία των μονολιθικών κίωνων χρησιμοποιήθηκαν τα λεγόμενα "tie constraints". Αυτά αποτελούν έναν επιβαλλόμενο περιορισμό που υποχρεώνει δύο επιφάνειες να έχουν κοινή μεταφορική και περιστροφική κίνηση. Επομένως, οι επιφάνειες συνδέονται ισχυρά μεταξύ τους και δεν επιτρέπεται καμία σχετική κίνηση. Τα "tie constraints" εφαρμόστηκαν στις διεπιφάνειες των σπονδύλων ορίζοντας μια "master surface" και μια "slave surface".

➤ **Επιβολή φορτίων (Load)**

Τα μόνα φορτία που ορίστηκαν με την εντολή Load ήταν τα ίδια βάρη των μελών του φορέα, τα οποία ασκούνται στο βήμα ανάλυσης "Apply gravity". Με την επιλογή Create Load→Gravity ορίστηκε η επιτάχυνση της βαρύτητας ίση με 9.81m/s^2 και υπολογίστηκε έτσι το ίδιο βάρος των μελών (έχοντας ορίσει προηγουμένως την πυκνότητα του υλικού τους). Ως μονάδα μέτρησης για την επιτάχυνση χρησιμοποιείται το m/s^2 ώστε, σε συνδυασμό με τις υπόλοιπες ιδιότητες που ορίστηκαν, να υπολογίζονται οι δυνάμεις σε kN και οι τάσεις σε kPa.

➤ **Επιβολή συνοριακών συνθηκών (boundary conditions)**

Στο βήμα αυτό ορίζονται οι συνθήκες στήριξης του φορέα. Όπως έχει προαναφερθεί, στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι εύλογη η θεώρηση πακτωμένης βάσης του φορέα λόγω της έδρασης επί βραχώδους υποβάθρου. Με την εντολή BCs→Create→Type:Displacement/Rotation δεσμεύονται λοιπόν όλοι οι βαθμοί ελευθερίας στην κάτω οριζόντια επιφάνεια της βάσης των κιόνων. Ωστόσο αυτή η συνθήκη της πλήρους πάκτωσης επιβάλλεται μόνο κατά το βήμα ανάλυσης "Apply Gravity". Για το βήμα ανάλυσης στο οποίο επιβάλλεται η επιτάχυνση, ελευθερώνεται η διεύθυνση στην οποία ασκείται η επιτάχυνση κι έτσι η συνοριακή συνθήκη αλλάζει. Δημιουργήθηκαν, επομένως, άλλες δύο συνοριακές συνθήκες ("Acceleration 1" και "Acceleration 2") που εφαρμόζονται στο βήμα ανάλυσης "Apply acceleration" και σε αυτές ελευθερώθηκαν οι βαθμοί ελευθερίας U1 και U2 αντίστοιχα για να επιβληθούν οι δύο οριζόντιες συνιστώσες επιτάχυνσης των καταγραφών.

➤ **Διακριτοποίηση του φορέα (mesh)**

Στην επόμενη φάση δημιουργήθηκε το πλέγμα των πεπερασμένων στοιχείων για τους φορείς του προβλήματος. Χρησιμοποιήθηκαν εξαεδρικά ορθογωνικά στοιχεία 8 κόμβων (C3D8R) (1^{ης} τάξης παρεμβολή-γραμμικά), τα οποία αποτελούν τη γενίκευση σε τρεις διαστάσεις του ορθογωνικού στοιχείου επίπεδης έντασης-παραμόρφωσης 4 κόμβων. Σε αυτά εφαρμόζεται η μέθοδος μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration) και περιορίζονται ανεπιθύμητες μορφές παραμόρφωσης (hourglass control). Το είδος της μεθόδου ολοκλήρωσης αναφέρεται στον αριθμό των Gauss points (σημείων ολοκλήρωσης) που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ολοκληρώματος των πολυωνυμικών όρων του μητρώου στιβαρότητας των πεπερασμένων στοιχείων. Στη μειωμένη ολοκλήρωση τα πεπερασμένα στοιχεία θεωρούνται ότι έχουν ένα μοναδικό σημείο ολοκλήρωσης που βρίσκεται στο γεωμετρικό κέντρο τους και υπολογίζονται μέσες τιμές παραμόρφωσης για τα στοιχεία. Στους φορείς του εξεταζόμενου προβλήματος κάθε μέλος διακριτοποιήθηκε ξεχωριστά και χρησιμοποιήθηκαν πεπερασμένα στοιχεία με μέσο μέγεθος της τάξης του 0.2 και άνω, το οποίο καθόρισε την πυκνότητα του δικτύου στα διάφορα μέλη.

➤ **Υποβολή του μοντέλου για ανάλυση (Job)**

Τα μοντέλα είναι έτοιμα προς ανάλυση και με την εντολές Job→ Create και Job→ Submit αρχίζει η διαδικασία της ανάλυσης από το Abaqus.

5.5 Διαστάσεις κίωνων και ιδιότητες υλικού

Ο ελεύθερα ιστάμενος κίονας Κ4 έχει ύψος 7.43m και αποτελείται από επτά σπονδύλους με ύψος της τάξης του 1m. Η διάμετρος της βάσης είναι 1.78m και της κορυφής 1.42m. Οι κίονες Κ1, Κ2 και Κ3 της κιονοστοιχίας είναι ψηλότεροι και ιδιαίτερα λυγηροί, με ύψος 11.36m και λόγο ύψους προς διάμετρο βάσης (λυγηρότητα/ραδινότητα) $H/d=19:3$ ($H/d=6.39$). Οι διαστάσεις των κίωνων δίνονται αναλυτικά στους παρακάτω πίνακες.

Πίνακας 5-1 : Διαστάσεις σπονδυλωτού κίονα Κ4, Ναός Πύθιου Απόλλωνα

Στοιχείο	Διάμετρος βάσης (m)	Διάμετρος κορυφής (m)	Ύψος στοιχείου (m)
Σπόνδυλος 1 ^{ος}	1.78	1.772	1.095
Σπόνδυλος 2 ^{ος}	1.772	1.764	1.045
Σπόνδυλος 3 ^{ος}	1.764	1.757	0.958
Σπόνδυλος 4 ^{ος}	1.757	1.749	0.955
Σπόνδυλος 5 ^{ος}	1.749	1.74	1.250
Σπόνδυλος 6 ^{ος}	1.58	1.504	1.014
Σπόνδυλος 7 ^{ος}	1.504	1.42	1.114

Πίνακας 5-2: Διαστάσεις σπονδυλωτού κίονα Κ1, Ναός Πύθιου Απόλλωνα

Στοιχείο	Διάμετρος βάσης (m)	Διάμετρος κορυφής (m)	Ύψος στοιχείου (m)
Σπόνδυλος 1 ^{ος}	1.778	1.725	0.9932
Σπόνδυλος 2 ^{ος}	1.725	1.718	0.906
Σπόνδυλος 3 ^{ος}	1.718	1.71	0.989
Σπόνδυλος 4 ^{ος}	1.71	1.658	1.034
Σπόνδυλος 5 ^{ος}	1.658	1.638	2.015
Σπόνδυλος 6 ^{ος}	1.638	1.582	0.913
Σπόνδυλος 7 ^{ος}	1.582	1.566	0.906
Σπόνδυλος 8 ^{ος}	1.566	1.5594	0.985
Σπόνδυλος 9 ^{ος}	1.5594	1.536	0.981
Σπόνδυλος 10 ^{ος}	1.536	1.506	0.57
Σπόνδυλος 11 ^{ος}	1.506	1.454	0.3589
Δακτύλιος	1.454	1.454	0.112
Εχίνος	1.454	2.045	0.223
	Μήκος τετραγωνικής κάτοψης (m)		Ύψος στοιχείου (m)
Άβακας	2.045		0.37

Πίνακας 5-3: Διαστάσεις σπονδυλωτού κίονα Κ2, Ναός Πύθιου Απόλλωνα

Στοιχείο	Διάμετρος βάσης (m)	Διάμετρος κορυφής (m)	Ύψος στοιχείου (m)
Σπόνδυλος 1 ^{ος}	1.7688	1.7512	0.9309
Σπόνδυλος 2 ^{ος}	1.7512	1.7334	1.0095
Σπόνδυλος 3 ^{ος}	1.7334	1.7066	1.013
Σπόνδυλος 4 ^{ος}	1.7066	1.68	1.090
Σπόνδυλος 5 ^{ος}	1.68	1.64	1.217
Σπόνδυλος 6 ^{ος}	1.64	1.6	0.9165
Σπόνδυλος 7 ^ο	1.6	1.5912	1.0229
Σπόνδυλος 8 ^{ος}	1.5912	1.573	0.9479
Σπόνδυλος 9 ^{ος}	1.573	1.5378	0.9309
Σπόνδυλος 10 ^{ος}	1.5378	1.5112	1.1982
Σπόνδυλος 11 ^{ος}	1.5112	1.4756	0.3733
Δακτύλιος	1.4756	1.4756	0.112
Εχίνος	1.4756	2.045	0.223
	Μήκος τετραγωνικής κάτοψης (m)		Ύψος στοιχείου (m)
Άβακας	2.045		0.37

Πίνακας 5-4: Διαστάσεις σπονδυλωτού κίονα Κ3, Ναός Πύθιου Απόλλωνα

Στοιχείο	Διάμετρος βάσης (m)	Διάμετρος κορυφής (m)	Ύψος στοιχείου (m)
Σπόνδυλος 1 ^{ος}	1.7688	1.7422	0.9845
Σπόνδυλος 2 ^{ος}	1.7422	1.7156	0.9601
Σπόνδυλος 3 ^{ος}	1.7156	1.6978	0.9956
Σπόνδυλος 4 ^{ος}	1.6978	1.6712	1.049
Σπόνδυλος 5 ^{ος}	1.6712	1.6178	1.6801
Σπόνδυλος 6 ^{ος}	1.6178	1.5912	0.9105
Σπόνδυλος 7 ^ο	1.5912	1.5556	0.9867
Σπόνδυλος 8 ^{ος}	1.5556	1.5378	0.9956
Σπόνδυλος 9 ^{ος}	1.5378	1.52	0.9778
Σπόνδυλος 10 ^{ος}	1.52	1.4844	0.7556
Σπόνδυλος 11 ^{ος}	1.4844	1.44	0.3556
Δακτύλιος	1.44	1.44	0.112
Εχίνος	1.44	2.045	0.223
	Μήκος τετραγωνικής κάτοψης (m)		Ύψος στοιχείου (m)
Άβακας	2.045		0.37

Η συμπεριφορά των σπονδύλων θεωρείται γραμμική ελαστική. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες του τοπικού πωρόλιθου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5-5: Ιδιότητες υλικού

	Μέτρο ελαστικότητας, E(MPa)	Λόγος Poisson, ν	Πυκνότητα, ρ(ton/m³)
Αρχαίο μέλος	1044	0.25	2
Νέο μέλος	1044	0.25	2

Η σεισμική διέγερση επιβάλλεται στη βάση του κίονα με τη μορφή καταναγκασμού επιτάχυνσης. Η ανάλυση γίνεται σε δύο βήματα. Στο πρώτο εισάγεται η βαρύτητα και ενεργοποιούνται οι διεπιφάνειες των σπονδύλων, ενώ στο επόμενο βήμα εισάγεται η σεισμική κίνηση. Κατά την ανάλυση λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα 2^{ης} τάξης.

5.6 Μηχανικά προσομοιώματα διεπιφανειών

Μεταξύ δύο επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή αναπτύσσονται ορθές τάσεις (κάθετες στην επιφάνεια) και ,αν υπάρχει και τριβή μεταξύ αυτών, έχουμε και την εμφάνιση διατμητικών τάσεων. Οι τελευταίες αντιστέκονται στην ολίσθηση των σωμάτων.

Σε μια ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων οι συνθήκες της επαφής είναι μια κατηγορία μη γραμμικού περιορισμού, που επιτρέπει δυνάμεις να μεταφέρονται από το ένα κομμάτι του μοντέλου στο άλλο. Ο περιορισμός είναι μη γραμμικός γιατί εφαρμόζεται μόνο όταν οι δύο επιφάνειες βρίσκονται σε επαφή. Όταν αυτές απομακρύνονται, τότε οι περιορισμοί που έχουν οριστεί αφαιρούνται.

Η προσομοίωση της επαφής στο Abaqus/Standard βασίστηκε στη μέθοδο των επιφανειών επαφής (surface-based behavior). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος ζεύγους επαφής (surface-to-surface contact).

Ένα πρόβλημα επαφής περιγράφεται από:

Τον τρόπο επιβολής των δεσμεύσεων μεταξύ των κόμβων των στοιχείων των προς επαφή επιφανειών (αλγόριθμοι εύρεσης σχετικών θέσεων των κόμβων και επιβολής δεσμεύσεων)

Τη μηχανική συμπεριφορά των διεπιφανειών όταν αυτές είναι <<κλειστές>> (closed) , η οποία εκφράζεται από τις αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις στις διεπιφάνειες

Ο κώδικας Abaqus διαθέτει δύο επιλογές σχετικά με τους αλγορίθμους εύρεσης σχετικής θέσης των προς επαφή κόμβων των στοιχείων και επιβολής δέσμευσης:

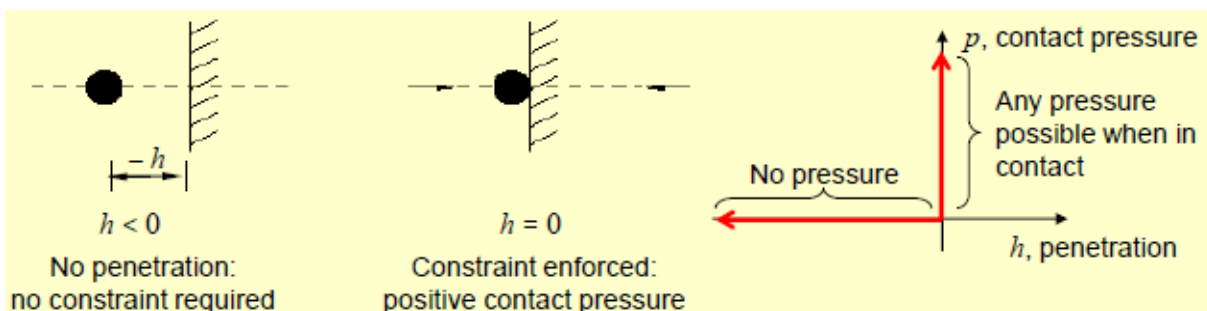
- Τον αλγόριθμο «πεπερασμένης» ολίσθησης (finite sliding)
- Τον αλγόριθμο «μικρής» ολίσθησης (small sliding)

Ο αλγόριθμος πεπερασμένης ολίσθησης επιτρέπει τη γενικευμένη κίνηση μεταξύ των επιφανειών (αποκόλληση, ολίσθηση). Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε βήμα ανάλυσης θα πρέπει να προσδιορίζεται η σχετική θέση των επιφανειών και να επιβάλλονται εκ νέου οι δεσμεύσεις, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο.

Ο αλγόριθμος μικρής σχετικής ολίσθησης θεωρεί μικρή σχετική κίνηση μεταξύ των επιφανειών. Επομένως, τα προς επαφή ζεύγη κόμβων παραμένουν ίδια καθ'όλη τη διάρκεια της ανάλυσης. Το γεγονός αυτό επιταχύνει τη διαδικασία της ανάλυσης.

5.6.1 Συμπεριφορά κάθετα στις επιφάνειες (Normal behavior)

Ο περιορισμός της επαφής εφαρμόζεται στο Abaqus όταν η απόσταση (clearance) μεταξύ δύο επιφανειών γίνει μηδενική. Κατά την επαφή των σωμάτων ασκείται πίεση (contact pressure) μεταξύ των επιφανειών χωρίς όμως να επιτρέπεται η διείσδυση της μιας μέσα στην άλλη. Αντίθετα, όταν τα σώματα αποκολλώνται, οι ορθές τάσεις μηδενίζονται άμεσα. Με άλλα λόγια δεν επιτρέπεται εφελκυσμός. Αυτή η συμπεριφορά αναφέρεται ως «σκληρή» επαφή (hard contact), επιτρέπει την αποκόλληση των επιφανειών και συνοψίζεται στη σχέση πίεση επαφής (contact pressure,) p -διείσδυση (penetration, h) που απεικονίζεται στο σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1: Σχέση πίεσης επαφής-διείσδυσης για σκληρή επαφή (hard contact) (ABAQUS 2014)

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει το φαινόμενο του λικνισμού των σπονδύλων, κατά το οποίο οι τελευταίοι αποκολλώνται μεταξύ τους.

5.6.2 Ολίσθηση των επιφανειών-Μοντέλα τριβής (Tangential behavior)

Στο εξεταζόμενο πρόβλημα του πολυσπόνδου κίονα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος «πεπερασμένης» ολίσθησης (finite sliding) για την περιγραφή πιθανών φαινομένων αποκόλλησης και ολίσθησης μεταξύ των σπονδύλων. Αντίθετα, για την περιγραφή του αρμού μεταξύ αρχαίου και νέου λίθου αξιοποιήθηκε ο αλγόριθμος «μικρής» ολίσθησης (small sliding), καθώς το κόνιαμα θεωρείται ότι λειτουργεί σαν κόλλα και έτσι δεν επιτρέπει μεγάλες σχετικές κινήσεις μεταξύ των μελών.

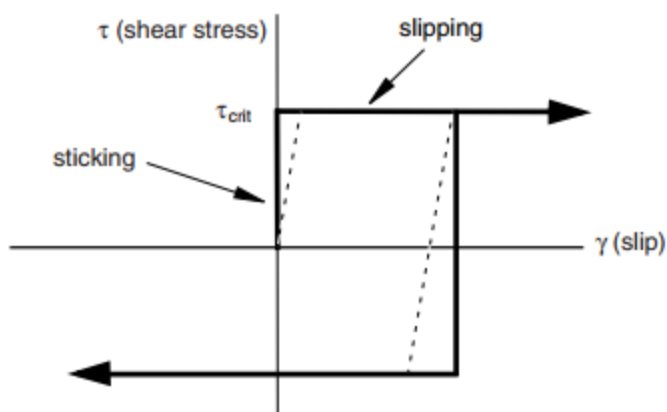
Όταν δυο σώματα βρίσκονται σε επαφή, είναι δυνατό να μεταφέρουν και διατμητικές δυνάμεις κατά μήκος της διεπιφάνειάς τους. Έτσι, κατά την ανάλυση μπορεί να χρειαστεί να ληφθούν υπόψη δυνάμεις τριβής, που εμποδίζουν τη σχετική κίνηση των επιφανειών. Το μοντέλο τριβής κατά Coulomb

είναι ένα κοινό προσομοίωμα που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συμπεριφορά τριβής μεταξύ δύο επιφανειών και χαρακτηρίζεται από το συντελεστή τριβής, μ .

Η εφαπτομενική κίνηση είναι μηδενική μέχρι η διατμητική τάση στην επιφάνεια να φτάσει μια κρίσιμη τιμή, η οποία είναι συνάρτηση της ορθής τάσης:

$$\tau_{crit} = \mu p$$

, όπου μ ο συντελεστής τριβής και p η πίεση επαφής μεταξύ των δύο επιφανειών. Στο Σχήμα 5-2 συνοψίζεται η συμπεριφορά του μοντέλου τριβής Coulomb: υπάρχει μηδενική σχετική κίνηση ("sticking") όταν οι επιφάνειες είναι συνδεδεμένες και ολίσθηση ("slipping") όταν $\tau > \tau_{crit} = \mu p$.



Σχήμα 5-2: Μοντέλο τριβής Coulomb- Συσχέτιση ορθών και διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια (ABAQUS 2014)

Στην εργασία αυτή, για την προσομοίωση της τριβής στις διεπιφάνειες των σπονδύλων, λήφθηκε συντελεστής τριβής (μ) ίσος με 0.7, μια τιμή που θεωρείται ευρέως αποδεκτή για τις κατασκευές αυτές.

5.6.3 Συμπεριφορά λόγω συνοχής (Cohesive behavior)

Η συμπεριφορά της συνοχής περιγράφεται σαν ένας ελαστικός νόμος έλξης-αποκόλλησης (traction-separation law) μεταξύ των επιφανειών. Για να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του κονιάματος που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση αρχαίου με νέο λίθο, η συνοχή περιορίζεται στις περιοχές των επιφανειών που βρίσκονται αρχικά σε επαφή (only slave nodes initially in contact).

Στο ABAQUS χρησιμοποιήθηκε η συμπεριφορά συνοχής βασισμένη σε επιφάνειες (surface-based cohesive behavior), η οποία είναι κατάλληλη για την προσομοίωση συνδέσεων συνοχής με αμελητέο πάχος υλικού διεπιφάνειας. Η συμπεριφορά αυτή ορίζεται σαν ιδιότητα αλληλεπίδρασης (Interaction property, Surface-to-surface contact).

Το μοντέλο αυτό υποθέτει γραμμική ελαστική συμπεριφορά και ορίζει συντελεστές δυσκαμψίας που αναφέρονται στην κάθετη στη διεπιφάνεια (διάνυσμα n) διεύθυνση και στις εφαπτομενικές

διευθύνσεις (διανύσματα s και t). Με άλλα λόγια, θεωρείται ότι υπάρχουν γραμμικά ελατήρια σταθεράς K (kPa/m ή kN/m³) κατά μήκος των διευθύνσεων αυτών. Η ελαστική συμπεριφορά εκφράζεται συναρτήσει ενός μητρώου δυσκαμψίας (Σχήμα 5-3) που συνδέει τις ορθές και διατμητικές τάσεις (tractions) με τις αντίστοιχες αποκολλήσεις (separations) που λαμβάνουν χώρα κατά μήκος της διεπιφάνειας.

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\delta.$$

Σχήμα 5-3: Ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας- Συμπεριφορά λόγω συνοχής (Cohesive behaviour) (ABAQUS DOCUMENTATION 2014)

,όπου t είναι το διάνυσμα των τάσεων έλξης (εφελκυστικές) και δ το διάνυσμα των αποκολλήσεων. Θεωρήθηκε ότι η συμπεριφορά σε κάθε διεύθυνση είναι ανεξάρτητη από τις υπόλοιπες (uncoupled traction-separation) και έτσι υπολογίζονται μόνο οι συντελεστές δυσκαμψίας K_{nn} , K_{ss} και K_{tt} . Οι τιμές του συντελεστή δυσκαμψίας κατά την κάθετη διεύθυνση (K_{nn}) και των διατμητικών δυσκαμψιών (K_{ss}, K_{tt}) δίνονται από τις σχέσεις 5-1 και 5-2 του Lourenço (1996):

$$K_{nn} = \frac{E_u E_m}{h_m (E_u - E_m)} \quad (5-1)$$

$$K_{ss} = K_{tt} = \frac{G_u G_m}{h_m (G_u - G_m)} \quad (5-2)$$

,όπου:

- E_u το μέτρο ελαστικότητας του λιθοσώματος
- E_m το μέτρο ελαστικότητας του κονιάματος
- G_u το μέτρο διάτμησης του λιθοσώματος
- G_m το μέτρο διάτμησης του κονιάματος
- h_m το πάχος του αρμού

Για $h_m=2\text{mm}$, $E_u=1044\text{MPa}$, $E_m=11,5\text{GPa}$, $G_u=E_u/(2(1+\nu))=1044/(2(1+0.25))=417.6\text{MPa}$ και $G_m=E_m/(2(1+\nu))=11.5/(2(1+0.25))=4.6\text{GPa}$ έχουμε:

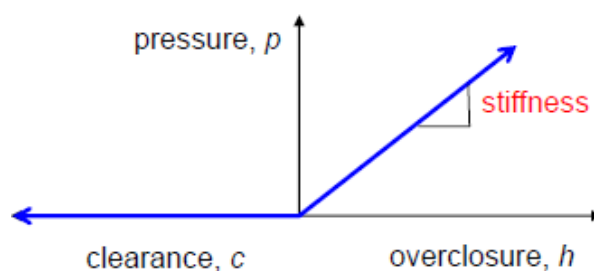
$$K_{nn} = -\frac{1044 \cdot 10^3 \cdot 11.5 \cdot 10^6}{0.002(1044 \cdot 10^3 - 11.5 \cdot 10^6)} = 574,120,122.4 \text{ kPa/m} \approx 5.74 \cdot 10^8 \text{ kPa/m}$$

$$K_{ss} = K_{tt} = -\frac{4.176 \cdot 10^5 \text{ kPa} \cdot 4.6 \cdot 10^6 \text{ kPa}}{0.002 \text{ m} (4.176 \cdot 10^5 - 4.6 \cdot 10^6) \text{ kPa}} = 229,648,049 \text{ kPa/m} \approx 2.29 \cdot 10^8 \text{ kPa/m}$$

Η ενδεικτική τιμή για το μέτρο ελαστικότητας του κονιάματος λήφθηκε από τα χαρακτηριστικά κονιαμάτων αποκατάστασης που προτείνονται στην εργασία του Βασιλείου Κεραμίδα (Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2017, σελ. 109, Πίνακας 16). Συγκεκριμένα, η τιμή αυτή αναφέρεται στο δυναμικό μέτρο ελαστικότητας κονιάματος φυσικής υδραυλικής ασβέστου M10 το οποίο θεωρείται συμβατό για την προσαρμογή νέων τμημάτων λίθου.

Στην κάθετη διεύθυνση των επιφανειών που βρίσκονται σε επαφή, η σχέση Pressure-Overclosure ορίζει τη θλιπτική συμπεριφορά και δεν αλληλεπιδρά με τη συμπεριφορά λόγω συνοχής. Αυτό συμβαίνει διότι η πρώτη ενεργοποιείται όταν οι επιφάνειες είναι «κλειστές», ενώ η δεύτερη συμβάλλει όταν οι επιφάνειες αποχωρίζονται.

Σε συνδυασμό λοιπόν με τη συμπεριφορά λόγω συνοχής (cohesive behavior) ορίστηκε και ένας νόμος που περιγράφει τη θλιπτική συμπεριφορά στην κάθετη διεύθυνση (normal behavior). Αντί για τη «σκληρή» επαφή που αναφέραμε, χρησιμοποιήθηκε ένας νόμος γραμμικής σχέσης πίεσης επαφής-διείσδυσης ("linear default method" for pressure-overclosure relationship) και ορίστηκε μια τιμή για τη δυσκαμψία επαφής (contact stiffness) ίση με τη δυσκαμψία K_{nn} που ορίστηκε στο μοντέλο συνοχής.



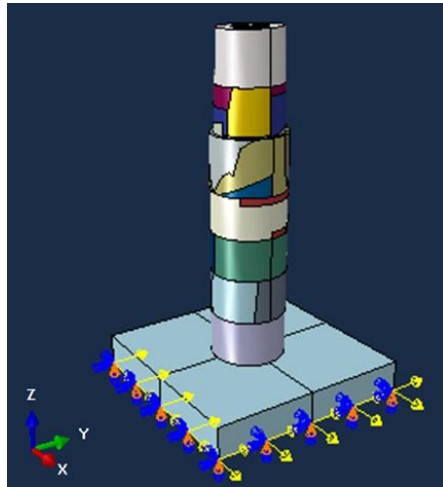
Σχήμα 5-4: Γραμμική σχέση πίεσης επαφής- διείσδυσης για μαλακή επαφή (softened contact) (ABAQUS DOCUMENTATION 2014)

6 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΟΥ ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΟΥ ΚΙΟΝΑ Κ4- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟ

6.1 Σύντομη παρουσίαση των επιλεγόμενων σεισμικών σεναρίων για την περιοχή της Ρόδου

Ο ελεύθερα ιστάμενος πολυσπόνδυλος κίονας Κ4 υποβάλλεται σε έξι σεισμικές διεγέρσεις οι οποίες κρίνονται συμβατές με το σεισμοτεκτονικό περιβάλλον της Ρόδου και τις εδαφικές συνθήκες στη θέση του μνημείου. Συγκεκριμένα, στην Ακρόπολη της Ρόδου, όπου βρίσκεται το εξεταζόμενο μνημείο, αναμένονται υψίσυχνοι γενικά κραδασμοί επειδή υπάρχει εμφάνιση βράχου κοντά στην επιφάνεια. Στα επιταχυνσιογραφήματα των διεγέρσεων αυτών εφαρμόστηκε κατάλληλος συντελεστής κλιμάκωσης ώστε τα φάσματα απόκρισης που αντιστοιχούν σε αυτές να είναι όσο το δυνατό πλησιέστερα στο φάσμα του Ευρωκώδικα, στο κρίσιμο εύρος περιόδων $T=0.4-2\text{sec}$. Περισσότερες πληροφορίες για τα επιλεχθέντα σεισμικά σενάρια και την τροποποίηση αυτών δίνονται στο Κεφάλαιο 4.

Στον Πίνακα 6-1 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι περιπτώσεις σεισμικών διεγέρσεων που εξετάστηκαν. Σε όλες τις δοκιμές θεωρήθηκε διαξονική οριζόντια επιπόνηση (διευθύνσεις Χ και Υ) στη βάση του κίονα (Εικόνα 6-1). Σημειώνεται ότι στη διεύθυνση Χ εφαρμόστηκαν οι καταγραφές που αντιστοιχούν στη διαμήκη διεύθυνση (Longitudinal-L) και στη διεύθυνση Υ οι καταγραφές που αντιστοιχούν στην εγκάρσια διεύθυνση (Transverse-T).



Εικόνα 6-1: Εισαγωγή καταναγκασμού επιτάχυνσης στη βάση του κίονα στις διευθύνσεις X και Y

Εκτός από τις κανονικοποιημένες (μετά την κλιμάκωση) σεισμικές δονήσεις, δοκιμάστηκαν τόσο οι αντίστοιχες διπλάσιες έντασης όσο και οι κανονικοποιημένες δονήσεις μετά από στροφή των διευθύνσεων X και Y κατά 45° και 90°. Με τον τρόπο αυτό διερευνήθηκε αφενός η επιρροή της έντασης της εδαφικής κίνησης και αφετέρου η επιρροή της διεύθυνσης της τελευταίας στην απόκριση της κατασκευής. Ειδικά για την περίπτωση του πολυσπόνδουλου κίονα, τα μέλη του οποίου μπορούν να λικνίζονται είτε ανεξάρτητα το ένα από το άλλο είτε κατά ομάδες, κρίθηκε σκόπιμη η εξέταση διαφόρων διευθύνσεων της σεισμικής κίνησης. Η σεισμική κίνηση, ανάλογα με τη διεύθυνσή της, είναι πιθανό να καταπονήσει έντονα τα συνδεδεμένα με κονίαμα τμήματα λίθου εξαναγκάζοντάς τα να αποκολληθούν ή/και να ολισθήσουν μεταξύ τους προκαλώντας έτσι αυξημένη συγκέντρωση έντασης στις σχετικές διεπιφάνειες.

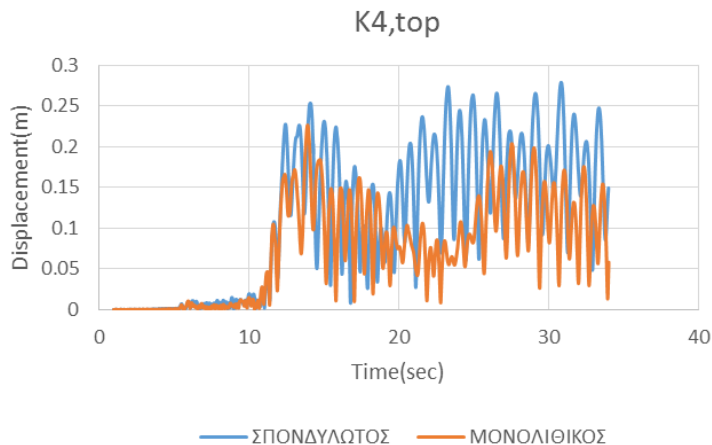
Μελετάται παράλληλα η σεισμική συμπεριφορά του μονολιθικού κίονα ανάλογης γεωμετρίας με αυτή του σπονδυλωτού, προκειμένου να αναδειχθούν οι επιπτώσεις σχετικών επεμβάσεων που έχουν γίνει σε μνημεία κατά το παρελθόν. Για παράδειγμα, συχνή πρακτική σε παλαιές αναστηλώσεις ήταν η διάτρηση των σπονδύλων και η έγχυση σκυροδέματος στο εσωτερικό τους σχηματίζοντας μια ενιαία κατακόρυφη στήλη, με αποτέλεσμα την αλλαγή του δομικού συστήματος και τη λειτουργία των κίωνων σχεδόν σαν μονολιθικών. Όπως προαναφέρθηκε, αυτού του είδους η επέμβαση πραγματοποιήθηκε και στον εξεταζόμενο ναό του Πύθιου Απόλλωνα στη Ρόδο κατά την Ιταλική αναστήλωση του 1938-40.

Πίνακας 6-1: Περιπτώσεις εξεταζόμενων σεισμικών διεγέρσεων

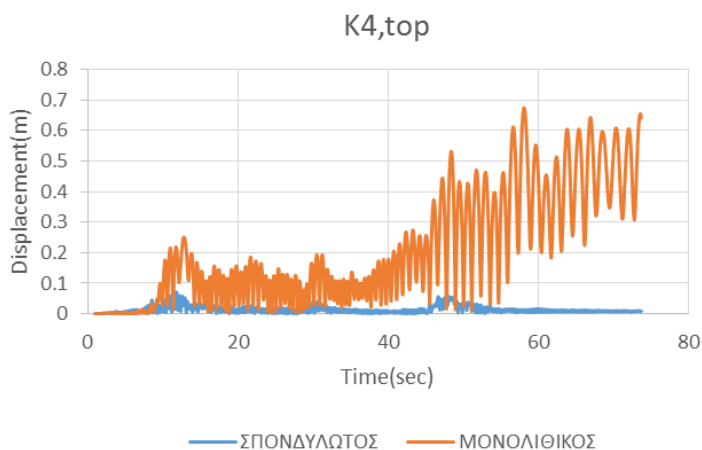
α/α	Σεισμική διεγερση	Διεύθυνση φόρτισης	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, PGA-L(g)	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, PGA-T(g)	Κατάρρευση κίονα
1	Tabas (1978)	X+Y	0.275	0.277	Όχι
2	Tabas (1978)	X'(+45°) +Y'(+45°)	0.275	0.277	Όχι
3	Tabas (1978)	X'(+90°) +Y'(+90°)	0.275	0.277	Όχι
4	Tabas (1978)	X+Y	0.550	0.555	Ναι
5	Campano Lugano (1980)	X+Y	0.144	0.167	Όχι
6	Campano Lugano (1980)	X'(+45°) +Y'(+45°)	0.144	0.167	Όχι
7	Campano Lugano (1980)	X'(+90°) +Y'(+90°)	0.144	0.167	Ναι ο μονολιθικός
8	Campano Lugano (1980)	X+Y	0.288	0.335	Ναι
9	Loma Prieta (1989)	X+Y	0.636	0.827	Όχι
10	Loma Prieta (1989)	X'(+45°) +Y'(+45°)	0.636	0.827	Όχι
11	Loma Prieta (1989)	X'(+90°) +Y'(+90°)	0.636	0.827	Όχι
12	Loma Prieta (1989)	X+Y	1.273	1.654	Όχι
13	Northridge (1994) LakeHughes #9	X+Y	0.695	0.911	Όχι
14	Northridge (1994) LakeHughes #9	X'(+45°) +Y'(+45°)	0.695	0.911	Όχι
15	Northridge (1994) LakeHughes #9	X'(+90°) +Y'(+90°)	0.695	0.911	Όχι
16	Northridge (1994) LakeHughes #9	X+Y	1.390	1.823	Όχι
17	Northridge (1994) LosAngeles WonderlandAve.	X+Y	0.254	0.389	Όχι
18	Northridge (1994) LosAngeles WonderlandAve.	X'(+45°) +Y'(+45°)	0.254	0.389	Όχι
19	Northridge (1994) LosAngeles WonderlandAve.	X'(+90°) +Y'(+90°)	0.254	0.389	Όχι
20	Northridge (1994) LosAngeles WonderlandAve.	X+Y	0.507	0.778	Όχι
21	Kozani,Greece (1995)	X+Y	0.735	0.503	Όχι
22	Kozani,Greece (1995)	X'(+45°) +Y'(+45°)	0.735	0.503	Όχι
23	Kozani,Greece (1995)	X'(+90°) +Y'(+90°)	0.735	0.503	Όχι
24	Kozani,Greece (1995)	X+Y	1.469	1.006	Όχι

6.2 Εξέταση της συμπεριφοράς ως προς τις μετακινήσεις

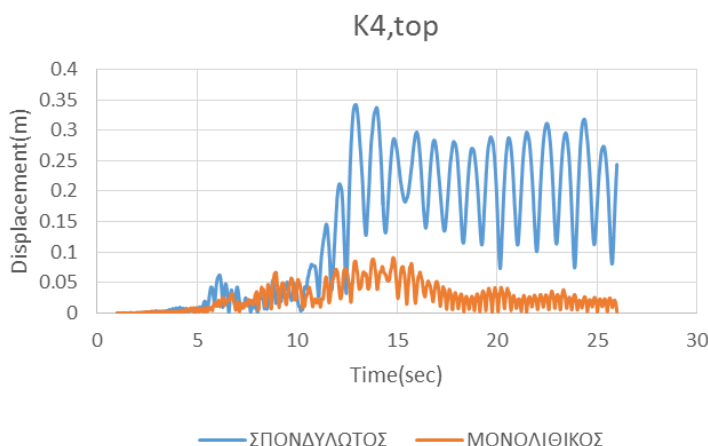
Στα Σχήματα 6-1 έως 6-6 απεικονίζονται οι χρονοϊστορίες της συνισταμένης μετακίνησης ($d=(d_x^2+d_y^2)^{0.5}$) στις διευθύνσεις Χ (1) και Υ (2) του κορυφαίου σπονδύλου (drum No7) του σπονδυλωτού κίονα (multidrum) K4 για τις προαναφερθείσες *κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις*. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα τα αντίστοιχα αποτελέσματα για το μονολιθικό κίονα (monolithic) ισοδύναμης γεωμετρίας. Το σημείο ελέγχου για τη μετακίνηση είναι ο κόμβος στο κέντρο της ανώτερης επιφάνειας (κορυφή) του 7^{ου} σπονδύλου.



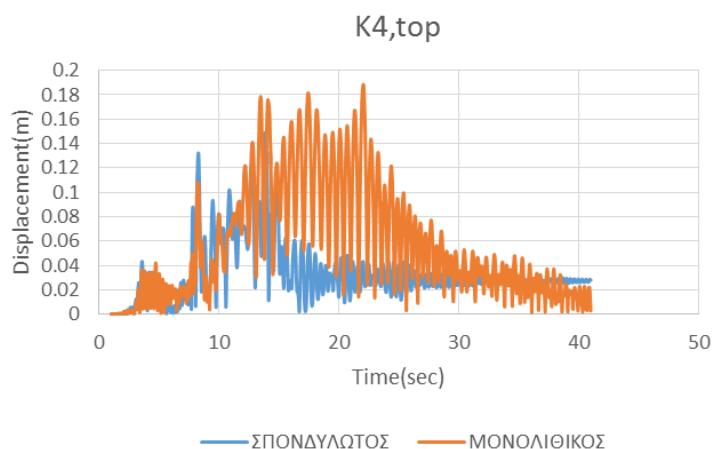
Σχήμα 6-1: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4: **Tabas, Iran** (1978), κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.275g$, $PGA(T)=0.277g$



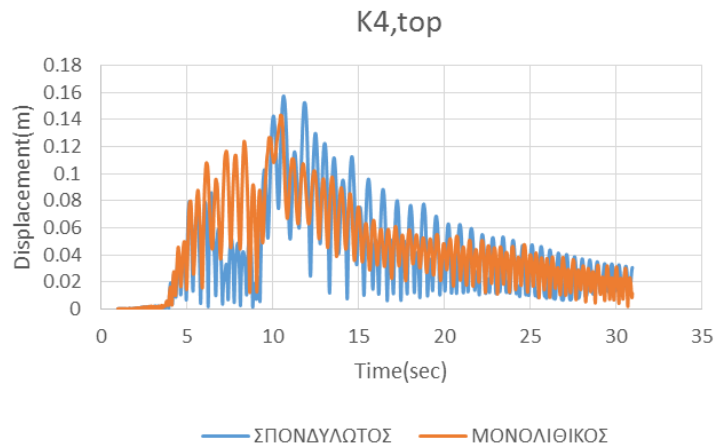
Σχήμα 6-2: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4: **Campano Lugano, Italy** (1980), κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.144g$, $PGA(T)=0.167g$



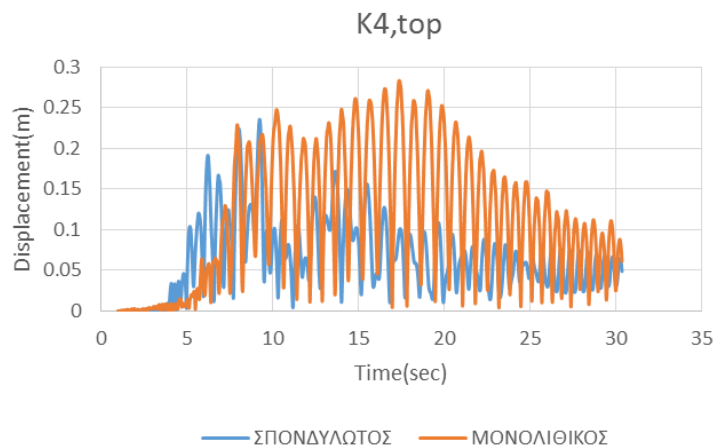
Σχήμα 6-3: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα Κ4: **Loma Prieta, California, USA (1989)**, κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.636g$, $PGA(T)=0.827g$



Σχήμα 6-4: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα Κ4: **Northridge, California, USA (1994)**, καταγραφή **Lake Hughes #9**, κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.695g$, $PGA(T)=0.911g$



Σχήμα 6-5: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4: **Northridge, California, USA (1994)**, καταγραφή **Los Angeles Wonderland Ave.**, κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.254g$, $PGA(T)=0.389g$



Σχήμα 6-6: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4: **Kozani, Greece (1995)**, κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.735g$, $PGA(T)=0.503g$

Τα αποτελέσματα των εξεταζόμενων περιπτώσεων καταδεικνύουν σημαντική διαφοροποίηση των τιμών των μετακινήσεων για τις διάφορες σεισμικές διεγέρσεις ανεξαρτήτως του αν οι τελευταίες ανάγονται στο ίδιο επίπεδο έντασης (μέγιστη επιτάχυνση-PGA), γεγονός που αναδεικνύει τη μεγάλη εξάρτηση που υπάρχει ανάμεσα στο συχνοτικό περιεχόμενο της διέγερσης και την απόκριση της κατασκευής.

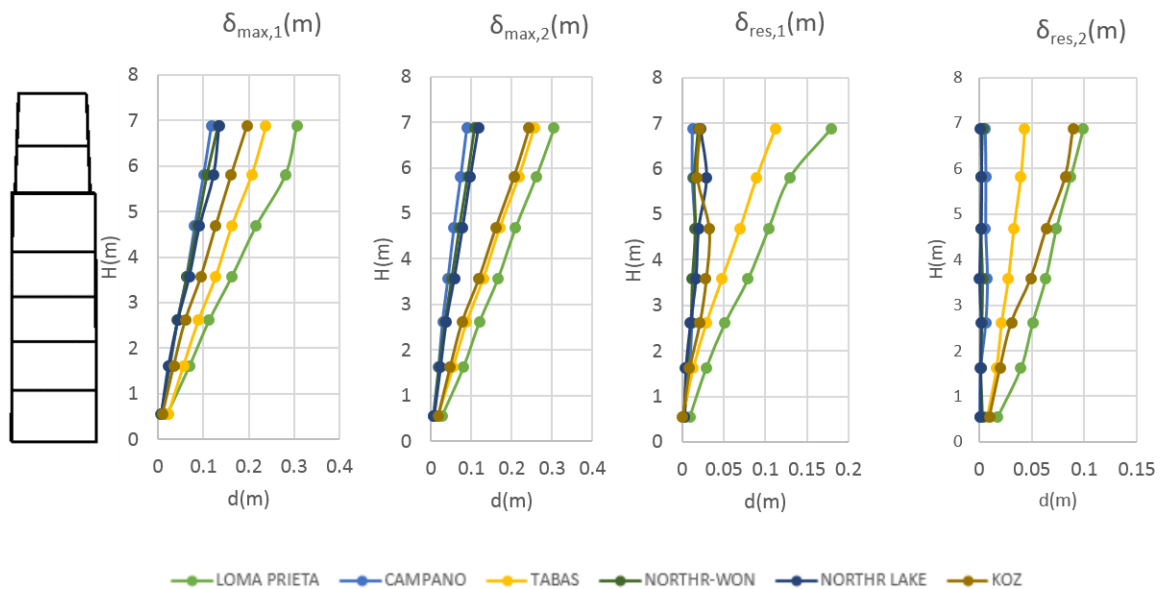
Επιπλέον, οι αριθμητικές αναλύσεις δείχνουν ότι η συμπεριφορά του κίονα είναι γενικά χαστική. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζεται πιο ευσταθής ο σπονδυλωτός κίονας, ενώ σε άλλες ο μονολιθικός. Ακόμη, μπορεί η συμπεριφορά τους να είναι παρόμοια για κάποιες συγκεκριμένες διεγέρσεις στη βάση τους.

Για το σπονδυλωτό κίονα η μέγιστη μετακίνηση του ανώτερου σπονδύλου σημειώνεται κατά τη σεισμική διέγερση Loma Prieta και είναι ίση με 35cm. Εξίσου υψηλή είναι η τιμή της μετακίνησης για τους σεισμικούς κραδασμούς Tabas και Κοζάνης, καθώς φτάνει τα 25cm. Επιπλέον, και για τις δύο δόνησεις καταγράφεται σημαντική μόνιμη παραμόρφωση του κορυφαιού σπονδύλου: 15cm για τη σεισμική δόνηση Tabas και φτάνει τα 25cm για τη δόνηση Loma Prieta. Ωστόσο, σε καμία περίπτωση δεν έχουμε κατάρρευση του κίονα. Η συμπεριφορά του μονολιθικού κίονα στις αντίστοιχες σεισμικές διεγέρσεις είναι αρκετά διαφορετική για τη σεισμική διέγερση Loma Prieta, όπου εμφανίζει σημαντικά μικρότερες μετακινήσεις (μέγιστη τιμή:10cm) και η παραμένουσα σχεδόν μηδενίζεται. Για την περίπτωση της σεισμικής διέγερσης Tabas, η συμπεριφορά του μονολιθικού προσεγγίζει αυτή του σπονδυλωτού, αλλά καταγράφονται μικρότερες τιμές μετακίνησης με τη μόνιμη να ξεπερνά ελαφρώς τα 5cm. Παρατηρείται επίσης ότι ο κίονας βρίσκει νέα θέση ισορροπίας και εκτελεί ελεύθερες ταλαντώσεις γύρω όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην περίπτωση της σεισμικής διέγερσης Loma Prieta για $t > 15\text{sec}$. Στη σεισμική διέγερση της Κοζάνης ο πολυσπόνδυλος κίονας εμφανίζεται να είναι πιο ευσταθής ιδίως από το 10^ο περίπου λεπτό της εδαφικής κίνησης κι έπειτα. Ωστόσο, οι δύο κίονες καταλήγουν με παραπλήσια μόνιμη μετακίνηση της τάξης των 5cm.

Η πιο έντονη διαφορά μεταξύ των αποκρίσεων σπονδυλωτού και μονολιθικού κίονα παρατηρείται για τη σεισμική διέγερση Camrano. Η κίνηση του μονολιθικού κίονα είναι ισχυρότερη καθ'όλη τη διάρκεια της διέγερσης. Σημειώνονται πολύ μεγαλύτερες τιμές μέγιστης αλλά και παραμένουσας μετακίνησης. Συγκεκριμένα, η μετακίνηση φτάνει το μέγιστο των 70cm και στο τέλος της διέγερσης ο μονολιθικός κίονας έχει μετακινηθεί κατά 67cm περίπου στο οριζόντιο επίπεδο σε σχέση με την αρχική του θέση. Οι αντίστοιχες τιμές για το σπονδυλωτό κίονα είναι 7cm και 1cm. Πολύ χαρακτηριστικές είναι και οι ελεύθερες ταλαντώσεις που παρατηρούνται κατά την απόκριση του μονολιθικού κίονα υπό τη σεισμική διέγερση Camrano. Αυτές, ωστόσο, δεν είναι ρεαλιστικές καθώς στην πραγματικότητα αποσβέννυνται με την πάροδο του χρόνου. Η περίπτωση αυτή καταδεικνύει τη χρησιμότητα της εισαγωγής μιας τιμής απόσβεσης στο μοντέλο ώστε να αποδοθεί η πραγματική κίνηση του κίονα προς το τέλος της σεισμικής διέγερσης. Κατά τις προσομοιώσεις στην εργασία δε λήφθηκε υπόψη τιμή για την απόσβεση.

Για το σπονδυλωτό κίονα η μέγιστη μετακίνηση είναι της τάξης των 15cm και η μόνιμη λίγο μεγαλύτερη από 2cm για τις σεισμικές καταγραφές Northridge, Lake Hughes και Northridge, Wonderland. Ο μονολιθικός κίονας επιδεικνύει γενικώς παρόμοια συμπεριφορά για αυτές τις δύο σεισμικές διεγέρσεις, καθώς και για τη σεισμική δόνηση της Κοζάνης.

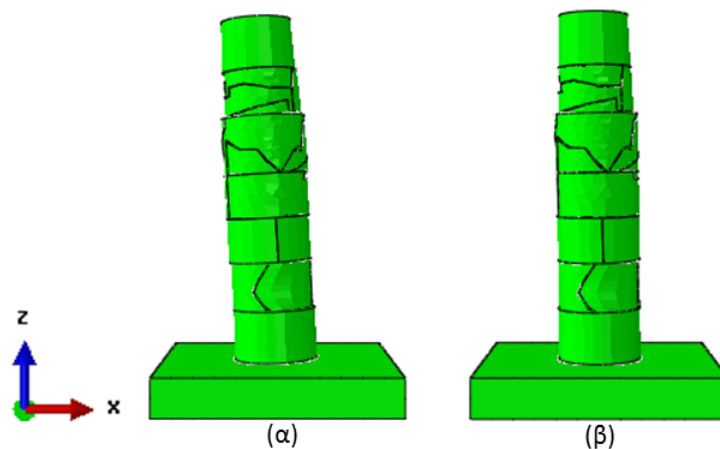
Το Σχήμα 6-7 συγκρίνει την απόκριση του πολυσπόνδουλου κίονα για τις έξι εξεταζόμενες σεισμικές διεγέρσεις με βάση την κατανομή της μέγιστης μετακίνησης σε κάθε διεύθυνση (X (1) και Y (2)) καθ' ύψος του πολυσπόνδουλου κίονα. Τα σημεία ελέγχου είναι τα μέσα του ύψους των σπονδύλων.



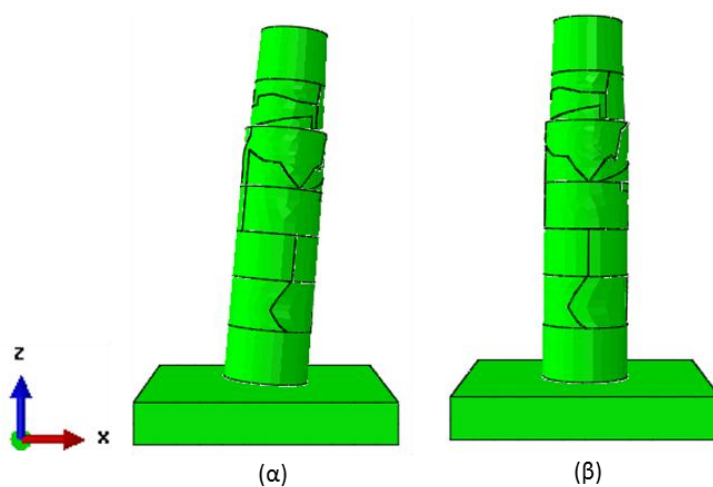
Σχήμα 6-7: Κατανομή της μέγιστης μετακίνησης δ_{\max} και της παραμένουσας μετακίνησης δ_{res} καθ' ύψους του κίονα στις δύο οριζόντιες διευθύνσεις

Παρατηρούμε ότι οι τιμές της μετακίνησης δ_{\max} αυξάνονται σχεδόν γραμμικά με το ύψος και είναι πολύ μεγαλύτερες στους ανώτερους σπονδύλους. Η συμπεριφορά αυτή είναι γενικά αναμενόμενη καθώς οι ανώτεροι σπόνδυλοι έχουν μικρότερο υπερκείμενο βάρος κι έτσι μπορούν να κινηθούν πιο ελεύθερα. Ως προς τις μόνιμες μετακινήσεις δ_{res} σημειώνονται συγκριτικά μικρότερες τιμές κατά την εγκάρσια διεύθυνση (Y ή 2).

Στις εικόνες 6-2 και 6-3 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα στιγμιότυπα της παραμορφωμένης εικόνας του σπονδυλωτού και του μονολιθικού κίονα αντίστοιχα κατά το τέλος της ανάλυσης για τις δύο δυσμενέστερες σεισμικές διεγέρσεις (ως προς τις μόνιμες μετακινήσεις). Αυτές είναι οι Loma Prieta και Tabas για το σπονδυλωτό και οι Campano και Tabas για το μονολιθικό.



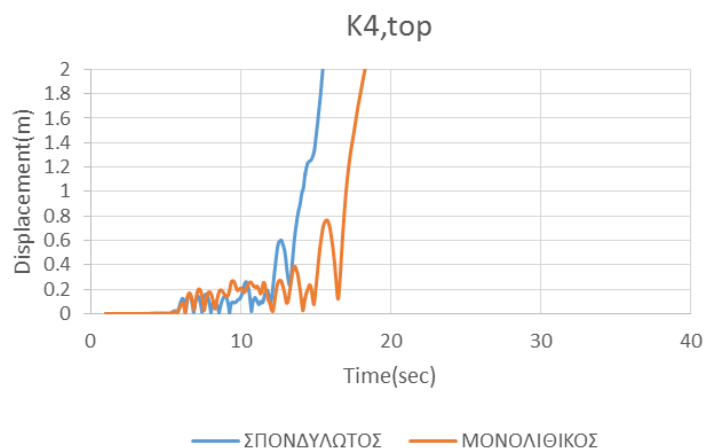
Εικόνα 6-2: Παραμορφωμένη εικόνα του *σπονδυλωτού* κίονα Κ4 στο τέλος των σεισμικών διεγέρσεων Loma Prieta (α) και Tabas (β) (παραμορφωμένη κλίμακα:2.0)



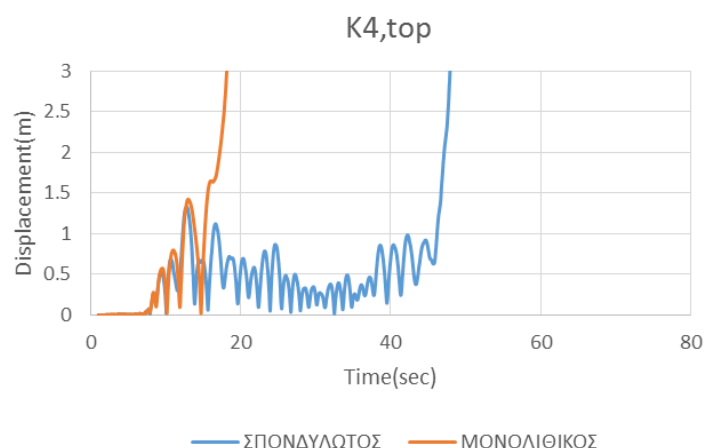
Εικόνα 6-3: Παραμορφωμένη εικόνα του *μονολιθικού* κίονα Κ4 στο τέλος των σεισμικών διεγέρσεων Cambrano (α) και Tabas (β) (παραμορφωμένη κλίμακα:1.0)

Για το σπονδυλωτό κίονα παρατηρείται η στροφή των σπονδύλων λόγω της λικνιστικής τους κίνησης, όπως φαίνεται πιο καθαρά για τους σπονδύλους Νο4 έως 7 στην τελική παραμορφωμένη εικόνα του κίονα (Εικόνα 6.2(α)) υπό τη σεισμική διέγερση Loma Prieta, αλλά και την ολίσθηση μεταξύ των σπονδύλων (σχετική μετακίνηση 6^{ου} και 7^{ου} σπονδύλου στην ίδια εικόνα). Για το μονολιθικό κίονα παρατηρείται το ανασήκωμα από τη βάση του για την περίπτωση της σεισμικής διέγερσης Campano και ομοίως η στροφή του λόγω κάμψης.

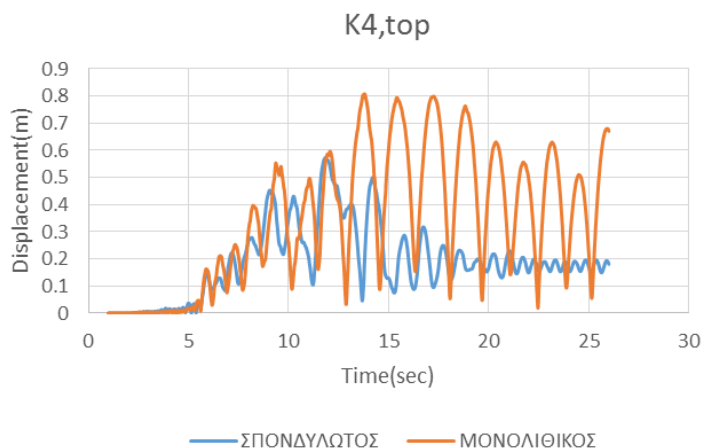
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής των κίωνων για τις ίδιες σεισμικές διεγέρσεις οι οποίες όμως έχουν αναχθεί στο διπλάσιο επίπεδο έντασης.



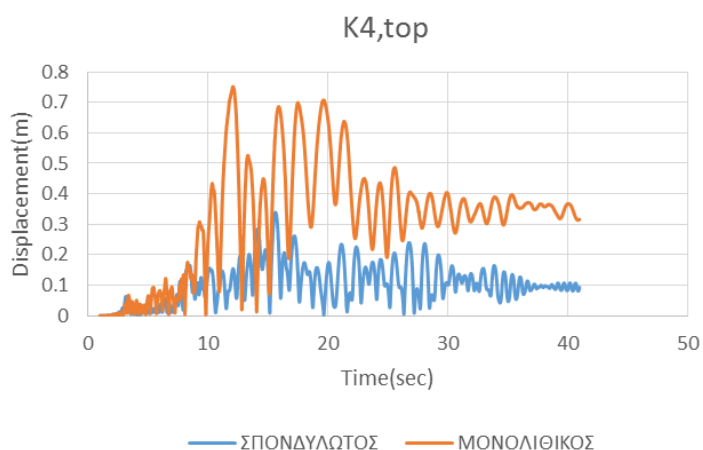
Σχήμα 6-8: Σύγκριση χρονιστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4: **Tabas, Iran** (1978), διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.55g$, $PGA(T)=0.554g$



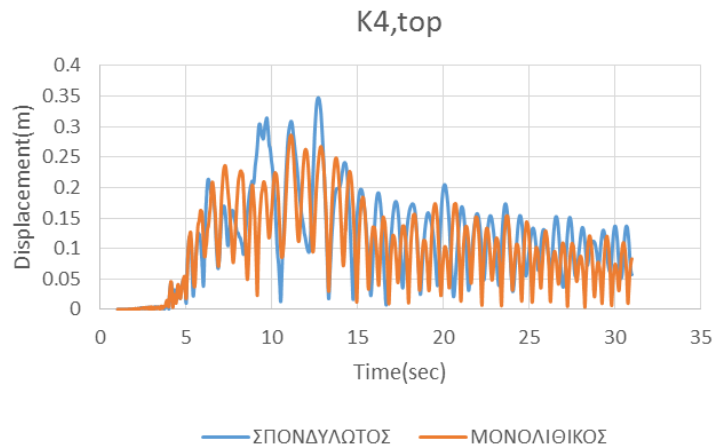
Σχήμα 6-9: Σύγκριση χρονιστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4: **Campano** Lugano, Italy (1980), διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.288g$, $PGA(T)=0.334g$



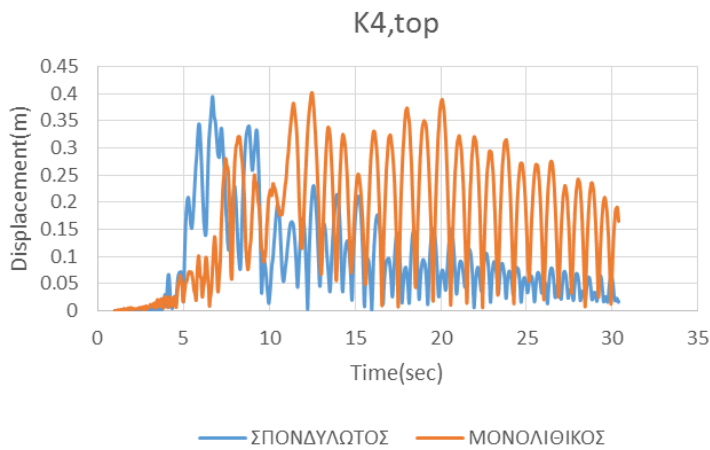
Σχήμα 6-10: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα Κ4: **Loma Prieta, California,USA (1989)**, διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=1.272g$, $PGA(T)=1.654g$



Σχήμα 6-11: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα Κ4: **Northridge, California,USA (1994)**, καταγραφή **Lake Hughes #9**, διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=1.39g$, $PGA(T)=1.822g$



Σχήμα 6-12: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4: **Northridge, California, USA (1994)**, καταγραφή **Los Angeles Wonderland Ave.**, διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L) = 0.508g$, $PGA(T) = 0.778g$



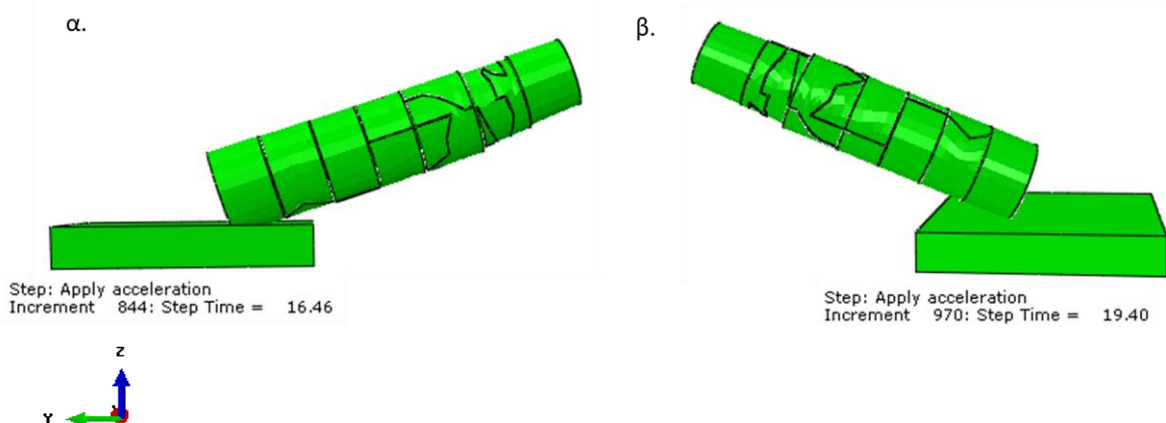
Σχήμα 6-13: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4: **Kozani, Greece (1995)**, διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L) = 1.47g$, $PGA(T) = 1.00g$

Τόσο ο πολυσπόνδυλος όσο και ο μονολιθικός κίονας καταρρέουν υπό τη διέγερση της βάσης τους με τις σεισμικές καταγραφές Tabas και Cambrano, όπως υποδηλώνεται από τη ραγδαία αύξηση των μετακινήσεων στα αντίστοιχα διαγράμματα. Οι διεγέρσεις αυτές χαρακτηρίζονται από μέγιστη επιτάχυνση βάσης (PGA) ίση με 0.55g και 0.30g αντίστοιχα. Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές της PGA, οι οποίες ξεπερνούν το 1.0g και φτάνουν μέχρι και 1.83g στην περίπτωση της διέγερσης Northridge, Lake Hughes, δεν σημειώνεται κατάρρευση. Επομένως, οι υψηλές τιμές PGA δεν είναι απαραίτητο ότι θα οδηγήσουν σε δυσμενέστερη απόκριση. Το συχνотικό περιεχόμενο των σεισμικών διεγέρσεων, καθώς και η έντονη παρουσία φαινομένων 2^{ης} τάξης στις κατασκευές αυτές φαίνεται να έχουν μεγάλη επιρροή στην απόκριση των κίωνων. Συγκεκριμένα, η σεισμική διέγερση Cambrano είναι χαμηλής συχνότητας, αφού η δεσπόουζα ιδιοπερίοδος στις δύο καταγραφές της παίρνει μεγάλες τιμές ίσες με 1.02sec και 2.02sec, και άρα δείχνεται και εδώ η μεγαλύτερη επικινδυνότητα αυτού του είδους σεισμικής διέγερσης. Επιπλέον, στην καταγραφή Tabas συναντώνται παλμοί κατευθυντικότητας σημαντικής ταχύτητας (100cm/sec), με αποτέλεσμα να εισάγονται μεγάλα ποσά ενέργειας στην κατασκευή και να προκαλούνται σημαντικές μετακινήσεις σε αυτή.

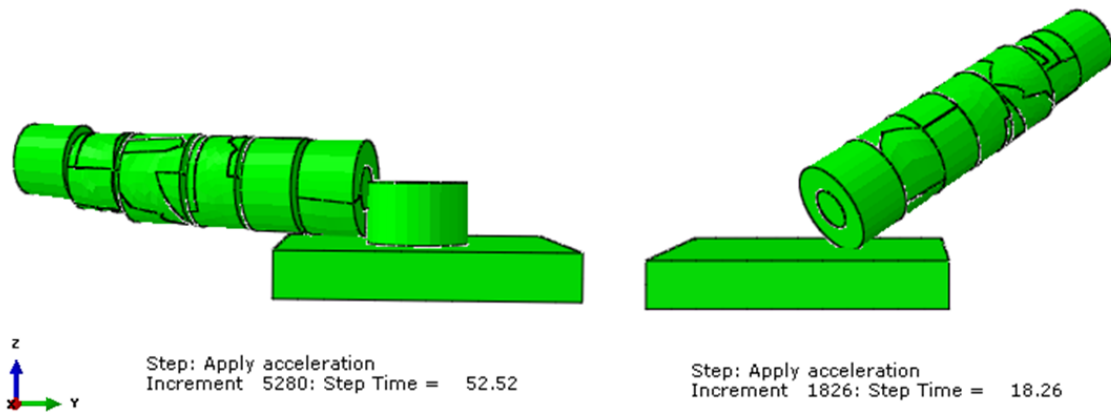
Επιπλέον, όπως είναι λογικό, το μέγεθος των μετακινήσεων των κίωνων αυξάνεται με την αύξηση του πλάτους της διέγερσης. Οι τιμές της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής των κίωνων διπλασιάζεται ή και υπερδιπλασιάζεται για τις διπλάσιες κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις. Μάλιστα, για το μονολιθικό κίονα που υποβάλλεται στη σεισμική κίνηση Northridge, Lake Hughes, η μέγιστη μετακίνηση σχεδόν τετραπλασιάζεται. Εξαιρουμένων των σεισμικών διεγέρσεων που προκάλεσαν την ανατροπή του κίονα, η εντονότερη απόκριση παρατηρήθηκε για τη σεισμική διέγερση Loma Prieta όπου σημειώθηκε μέγιστη μετακίνηση 80cm και παραμένουσα 70cm.

Στις επόμενες εικόνες απεικονίζονται οι κίονες κατά την κατάρρευσή τους. Επίσης, παρατίθενται για λόγους σύγκρισης ενδεικτικά στιγμιότυπα της συνισταμένης μετακίνησης του πολυσπόνδυλου κίονα για τη σεισμική διέγερση Loma Prieta και την αντίστοιχη διπλάσια.

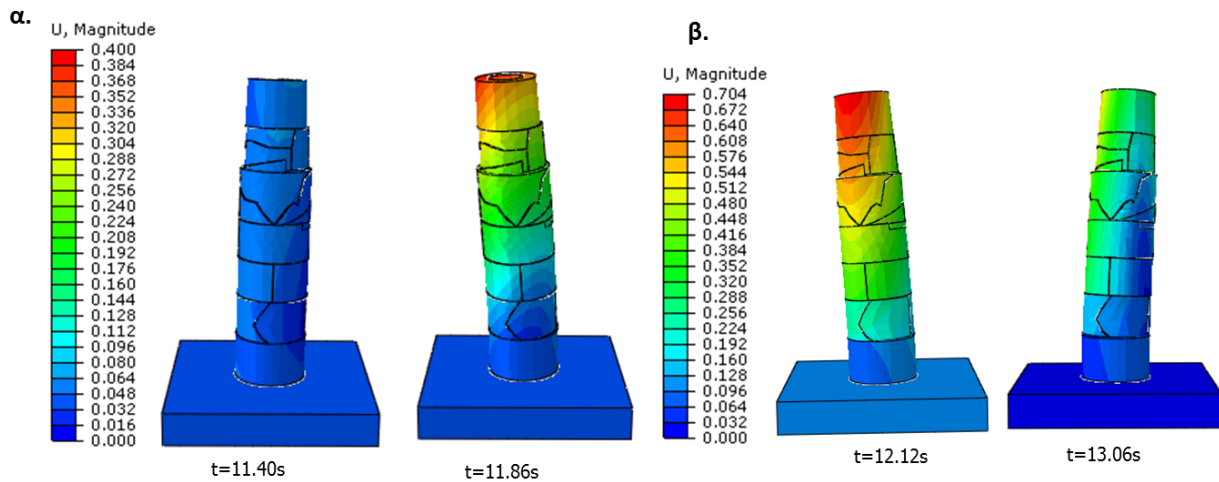
Για να εξεταστεί περισσότερο η έντονη απόκριση του μονολιθικού κίονα κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης Cambrano παρουσιάζονται ενδεικτικά στιγμιότυπα της συνισταμένης μετακίνησης του κίονα. Παρατηρούμε ότι η απόκριση του κίονα ελέγχεται κυρίως από το λικνισμό (ανασήκωμα του χαμηλότερου σπονδύλου από τη βάση).



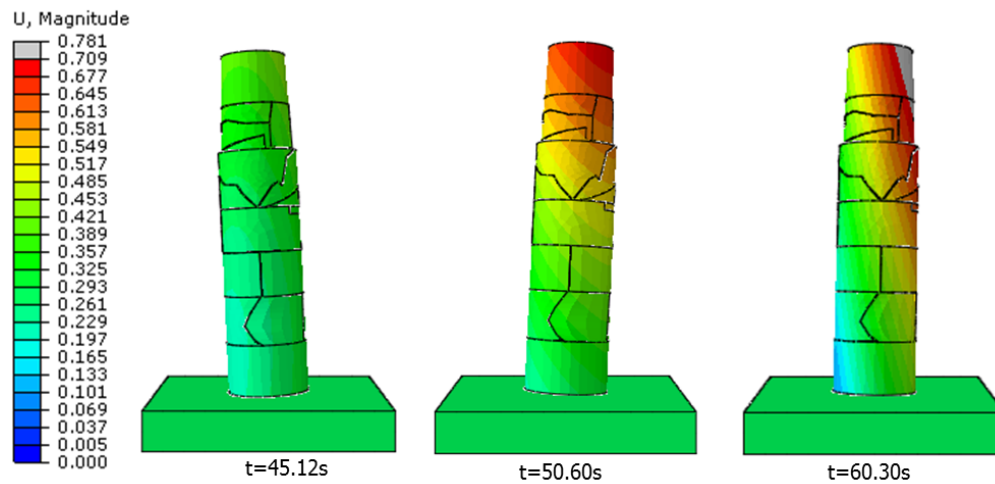
Εικόνα 6-4: Κατάρρευση του πολυσπόνδυλου (α) και του μονολιθικού (β) κίονα υπό τη διπλάσια σεισμική διέγερση Tabas



Εικόνα 6-5: Κατάρρευση του πολυσπόνδου (αριστερά) και του μονολιθικού (δεξιά) κίονα υπό τη διπλάσια σεισμική διέγερση Campano

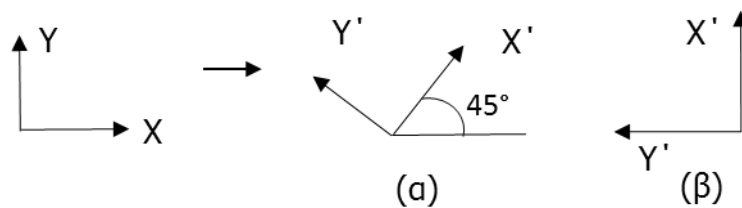


Εικόνα 6-6: Μετακίνηση του πολυσπόνδου κίονα K4 σε διάφορες χρονικές στιγμές για διαξονική επιπόνηση με τη σεισμική διέγερση Loma Prieta ανηγμένη σε (α) $PGA(L)=0.636g$, $PGA(T)=0.827g$ και (β) $PGA(L)=1.272g$, $PGA(T)=1.654g$

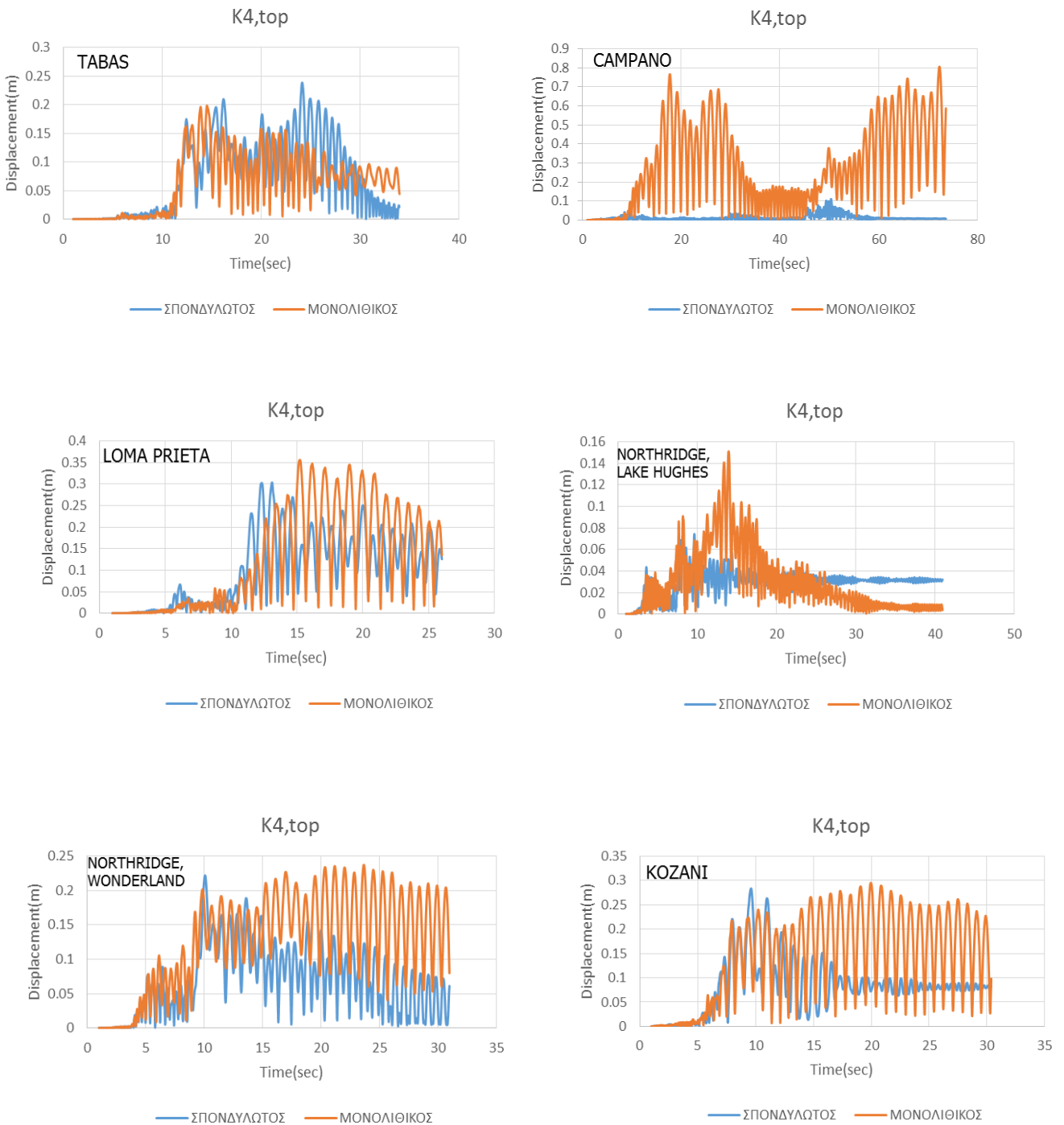


Εικόνα 6-7: Μετακίνηση του μονολιθικού κίονα Κ4 σε διάφορες χρονικές στιγμές για διαξονική επιπόνηση με τη σεισμική διέγερση Cambrano

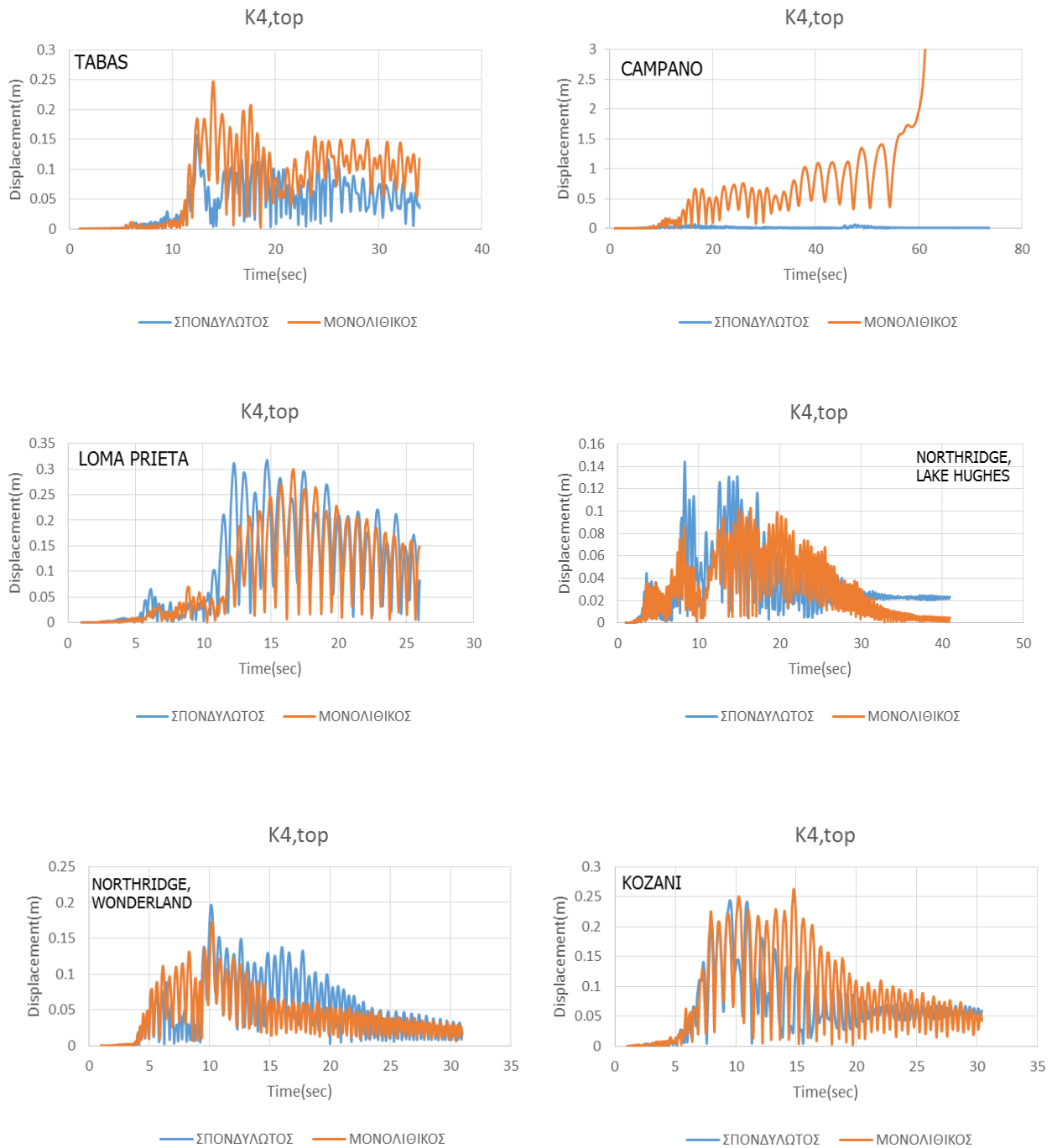
Τέλος, παρουσιάζονται εν συντομία τα διαγράμματα της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής των δύο εξεταζόμενων κίωνων για τις προαναφερθείσες σεισμικές διεγέρσεις μετά από στροφή των διευθύνσεών τους κατά 45° και 90° . Στο παρακάτω σχήμα δείχνονται οι άξονες της φόρτισης που επιβάλλεται στο επίπεδο της βάσης των κίωνων.



Σχήμα 6-14: Στροφή του συστήματος αξόνων X-Y κατά (α) 45° και (β) 90°



Σχήμα 6-15: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4 για τις έξι εξεταζόμενες κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις με στροφή των διευθύνσεών τους κατά 45°



Σχήμα 6-16: Σύγκριση χρονιοιστοριών της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής του σπονδυλωτού και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα Κ4 για τις έξι εξεταζόμενες κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις με στροφή των διευθύνσεών τους κατά 90°

Τα παραπάνω διαγράμματα δείχνουν ότι η στροφή των δύο διευθύνσεων της φόρτισης δεν προκάλεσε γενικά ουσιαστική μεταβολή στο μέγεθος της μετακίνησης των κίωνων κατά την απόκρισή τους σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν για το αρχικό σύστημα αξόνων. Ωστόσο, για εναλλαγή των διευθύνσεων X και Y (στροφή κατά 90°) ο μονολιθικός κίονας καταρρέει. Συνεπώς, για την ίδια τιμή σεισμικής έντασης (PGA), είναι δυνατόν να σημειωθεί κατάρρευση για μια συγκεκριμένη σεισμική διέγερση ενώ για μία άλλη να μη συμβεί. Αποδεικνύεται λοιπόν και πάλι η μεγάλη ευαισθησία της σεισμικής συμπεριφοράς τέτοιων κατασκευών στη μεταβολή των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης, αλλά και ο καθοριστικός ρόλος των μη γραμμικοτήτων (παρουσία φαινομένων P-δ) ,που χαρακτηρίζουν το συγκεκριμένο πρόβλημα, στην απόκριση των κίωνων.

6.3 Εξέταση της συμπεριφοράς ως προς τις τάσεις

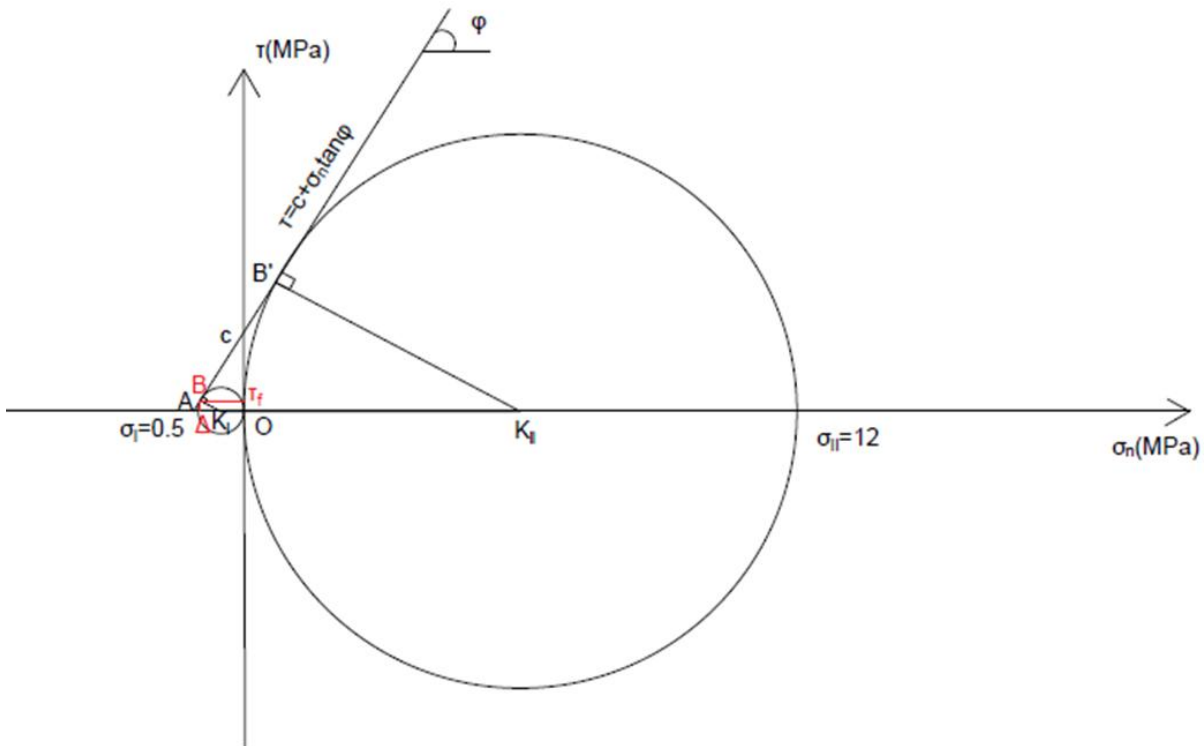
6.3.1 Εισαγωγή

Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται στο μέγεθος των αναπτυσσόμενων τάσεων, ορθών και διατμητικών, στις επιφάνειες των κομματιών λίθου που συνδέονται μεταξύ τους με κονίαμα. Παράλληλα, εξετάζονται οι τάσεις που αναπτύσσονται στις διεπιφάνειες των σπονδύλων. Μέσα από τα στιγμιότυπα των τάσεων στις επιφάνειες αυτές μπορεί να παρατηρηθεί χαρακτηριστικά το φαινόμενο του λικνισμού, κατά το οποίο έχουμε χαρακτηριστική εναλλαγή της συγκέντρωσης των τάσεων κατά τη σημειακή επαφή των σπονδύλων όταν ανασηκώνεται μέρος της διατομής τους.

Για την εξαγωγή των τάσεων μεταξύ των συνδεδεμένων τμημάτων λίθου ήταν αναγκαία η προσομοίωση του κονιάματος. Αρχικά, έγινε η υπόθεση ότι αυτό αποτελεί ένα υλικό με μηδενικό πρακτικά πάχος σε σύγκριση με τις διαστάσεις των λίθων. Επιπλέον, ρωγμές αναμένεται να εκδηλωθούν και να εξελιχθούν κατά μήκος της διεπιφάνειας κονιάματος-λίθου. Συγκεκριμένα, μπορούν να συμβούν δύο μορφές αστοχίας: είτε εφελκυστική αστοχία, η οποία οδηγεί στο άνοιγμα των αρμών, είτε διατμητικές αστοχίες εντός και εκτός επιπέδου, οι οποίες προκαλούν ολίσθηση των αρμών. Στο μοντέλο της παρούσας εργασίας, η αντίσταση σε εφελκυσμό και διάτμηση του κονιάματος αποδίδεται χρησιμοποιώντας ένα νόμο συνοχής (cohesive behavior). Θεωρείται πλήρως ελαστική συμπεριφορά που ορίζεται μέσα από τις σταθερές δυσκαμψίας K_{nn}, K_{ss} και K_{tt} (χρησιμοποιούνται αρκετά μεγάλες τιμές για τις σταθερές αυτές ώστε οι παραμορφώσεις λόγω συνοχής να μην συγχέονται με τις παραμορφώσεις της κατασκευής γενικά).

Οι τιμές που προκύπτουν για τις αναπτυσσόμενες ορθές εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις συγκρίνονται με την εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας κονιάματος-λίθου, τη λεγόμενη πρόσφυση στο υπόστρωμα, και με τη θλιπτική αντοχή του χρησιμοποιούμενου κονιάματος αντίστοιχα. Για τις αντοχές χρησιμοποιούνται οι αντίστοιχες τιμές που προτείνονται στην εργασία του Βασίλη Κεραμίδα ((Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ, Μεταπτυχιακή εργασία, Αθήνα 2017, σελ. 109, Πίνακας 16). Η πρόσφυση στο υπόστρωμα θεωρείται ίση με 0.5MPa και η θλιπτική αντοχή του κονιάματος λαμβάνεται ίση με 12MPa (τιμή που αντιστοιχεί στο κονίαμα αποκατάστασης της φυσικής υδραυλικής ασβέστου M10). Η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας κονιάματος-λίθου, λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων, θεωρείται ίση με την οριακή διατμητική τάση, τ_f , που αναπτύσσεται στην επιφάνεια διάρρηξης, όταν επικρατεί μονοαξονικός εφελκυσμός (μικρός κύκλος του Mohr στο Σχήμα 6.17). Αυτή είναι η πιο δυσμενής παραδοχή που μπορεί να γίνει για την τιμή της διατμητικής αντοχής, όπως προκύπτει από το Σχήμα 6.17. Στο Σχήμα αυτό φαίνονται οι κύκλοι του Mohr που αντιστοιχούν στα καθεστώτα μονοαξονικού εφελκυσμού (μικρός κύκλος) και μονοαξονικής θλίψης (μεγάλος κύκλος), καθώς και η περιβάλλουσα αστοχίας που περιγράφεται από την εξίσωση ευθείας $\tau=c+\sigma_n \tan\phi$. Με τ συμβολίζεται η διατμητική τάση στη διάρρηξη την ώρα της θραύσης, με σ_n η ορθή τάση στη διάρρηξη, με c η συνοχή του υλικού, δηλαδή η διατμητική αντοχή της επιφάνειας όταν $\sigma_n=0$, και με ϕ η γωνία

εσωτερικής τριβής του υλικού. Η $\tan\phi$ ονομάζεται συντελεστής εσωτερικής τριβής και συμβολίζεται με το γράμμα μ . Η περιβάλλουσα αστοχίας είναι η κοινή εφαπτομένη των δύο κύκλων και τα σημεία τομής της με τους κύκλους Mohr αποτελούν τα κρίσιμα ζεύγη τάσεων (σ_n , τ) για τα οποία συμβαίνει διατμητική διάρρηξη ή ανοιχτή (εφελκυστική) διάρρηξη. Στην πραγματικότητα, το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb δίνει μεγάλες αποκλίσεις στην περίπτωση του εφελκυστικού πεδίου τάσεων και γι'αυτό το λόγο προτιμάται το κριτήριο Griffith. Στο τελευταίο η περιβάλλουσα αστοχίας γίνεται καμπύλη στο πεδίο των εφελκυστικών τάσεων. Στην περίπτωσή μας όμως δεχόμαστε απλοποιητικά την τιμή που προκύπτει από το κριτήριο Mohr-Coulomb, καθώς πρόκειται για μια πολύ μικρή τιμή.



Σχήμα 6-17: Κύκλοι του Mohr για μονοαξονικό εφελκυσμό (αριστερά) και μονοαξονική θλίψη (δεξιά) και περιβάλλουσα αστοχίας Mohr-Coulomb

Από τα τρίγωνα AK_1B και $AK_{II}B'$ έχουμε: $K_1A = \frac{\sigma_I/2}{\sin \phi}$ (4-3) και $K_{II}A = \frac{\sigma_{II}/2}{\sin \phi}$ (4-4).

Αφαιρώντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$K_{II}A - K_1A = \frac{\sigma_{II} + \sigma_I}{2} = \frac{\sigma_{II} - \sigma_I}{2 \sin \phi}$$

$$\text{Άρα, } \sin \phi = \frac{\sigma_{II} - \sigma_I}{\sigma_{II} + \sigma_I} = \frac{12 - 0.5}{12 + 0.5} = 0.92 \Rightarrow \phi = 67^\circ$$

Από το τρίγωνο $BK_1\Delta$ έχουμε:

$$\tau_f = \frac{\sigma_I}{2} * \cos \phi = \frac{0.5}{2} * \cos(67^\circ) = 0.10 \text{MPa} = 100 \text{kPa}$$

Η συνοχή c της διεπιφάνειας κονιάματος-λίθου υπολογίζεται ως εξής:

$$c = OA * \tan \phi = (K_1A + \frac{\sigma_I}{2}) * \tan \phi = (\frac{\sigma_I}{2} (1 + \frac{1}{\sin \phi})) * \tan \phi \Rightarrow$$

$$c = (\frac{0.5}{2} * (1 + \frac{1}{\sin 67^\circ})) * \tan 67^\circ = 1.23 \text{MPa} = 1230 \text{kPa}$$

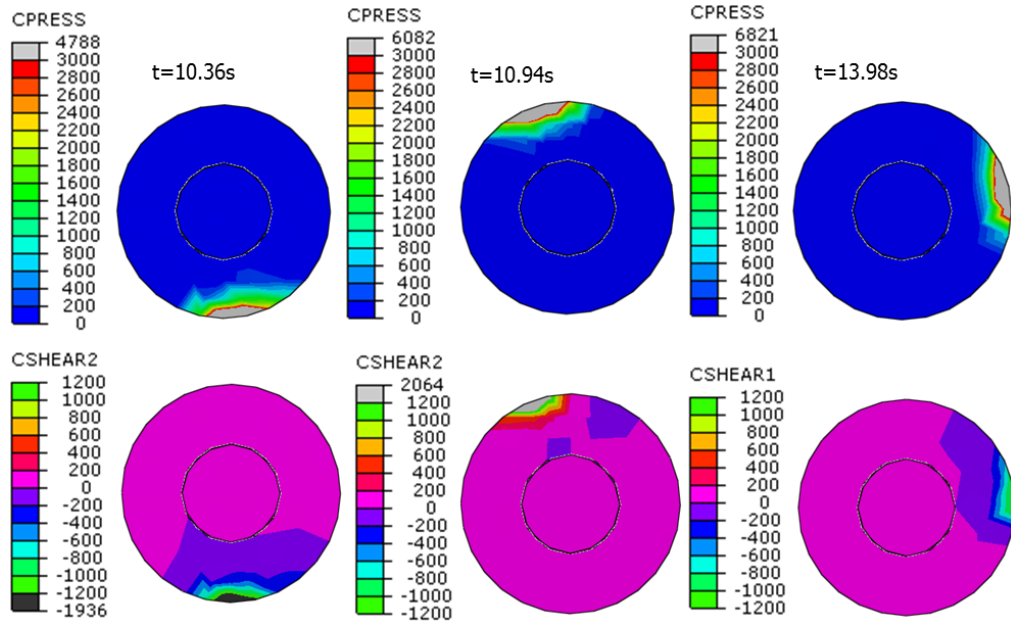
Σχετικά με τις διεπιφάνειες των σπονδύλων, ο έλεγχος που γίνεται αφορά τις ορθές θλιπτικές τάσεις. Ειδικότερα, εξετάζεται αν υπερβαίνεται η τιμή των 7.08MPa που αντιστοιχεί στη θλιπτική αντοχή του λίθου αποκατάστασης, με προέλευση από το λατομείο Σφουγγαριών στο χωριό Αρχάγγελος της Ρόδου, που πρόκειται πιθανώς να χρησιμοποιηθεί στο μνημείο. Η τιμή της θλιπτικής αντοχής του αυθεντικού λίθου, καθώς και του ήδη υπάρχοντος λίθου αποκατάστασης από την εποχή της ιταλικής αναστήλωσης, είναι 12.5MPa και 7.98MPa αντίστοιχα (οι δύο αυτές τιμές προέκυψαν από πειράματα κρουσιμέτρησης που διενεργήθηκαν στο Εργαστήριο Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ). Ειδικότερα, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις σημαντικές τάσεις που αναπτύσσονται στις άκρες των επιφανειών επαφής των σπονδύλων κατά τη διάρκεια του λικνισμού των τελευταίων. Μέσα σε δέκατα του δευτερολέπτου, κατά τη διάρκεια της σεισμικής κίνησης, μέρος της διατομής ενός σπονδύλου "ακουμπά" διαδοχικά σε κάθε θέση της περιφέρειας του υπερκείμενου σπονδύλου. Έτσι εκδηλώνεται συγκέντρωση τάσεων στα άκρα, η οποία μπορεί ενδεχομένως να ερμηνεύσει την τοπική θραύση των σπονδύλων που συχνά παρατηρείται.

6.3.2 Ανάπτυξη τάσεων στις διεπιφάνειες των σπονδύλων

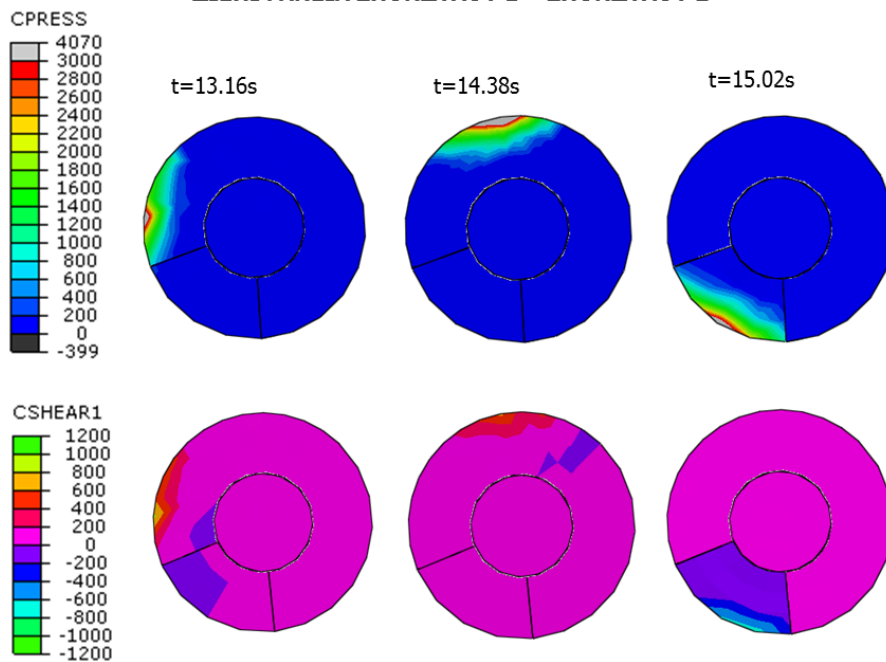
Στην επόμενη εικόνα (Εικόνα 6-8) παρουσιάζονται ενδεικτικά στιγμιότυπα των αναπτυσσόμενων ορθών και διατμητικών τάσεων στη διεπιφάνεια βάσης 1^{ου} σπονδύλου και άνω επιφάνειας του στυλοβάτη, καθώς και στη διεπιφάνεια 1^{ου} και 2^{ου} σπονδύλου, για τη σεισμική διέγερση Loma Prieta. Επιπλέον, παρουσιάζονται αντίστοιχες εικόνες για τη διεπιφάνεια βάσης 1^{ου} σπονδύλου και άνω επιφάνειας του στυλοβάτη του μονολιθικού κίονα για τη σεισμική διέγερση Campano. Προκειμένου να διαμορφώσουμε εικόνα σχετικά με την "απαίτηση" κάθε σεισμικής διέγερσης, επιλέγονται εκείνες οι χρονικές στιγμές στις οποίες η απόκριση είναι έντονη. Ο όρος CPRESS αναφέρεται στις ορθές τάσεις. Με αρνητικό πρόσημο δηλώνονται οι εφελκυστικές τάσεις και με θετικό οι θλιπτικές. Οι διατμητικές

τάσεις στις διευθύνσεις 1 και 2 του επιπέδου της επιφάνειας δηλώνονται με τον όρο CSHEAR1 και CSHEAR2 αντίστοιχα.

ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ 1^{ου}-ΣΤΥΛΟΒΑΤΗ



ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ 1^{ου}-ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ 2^{ου}



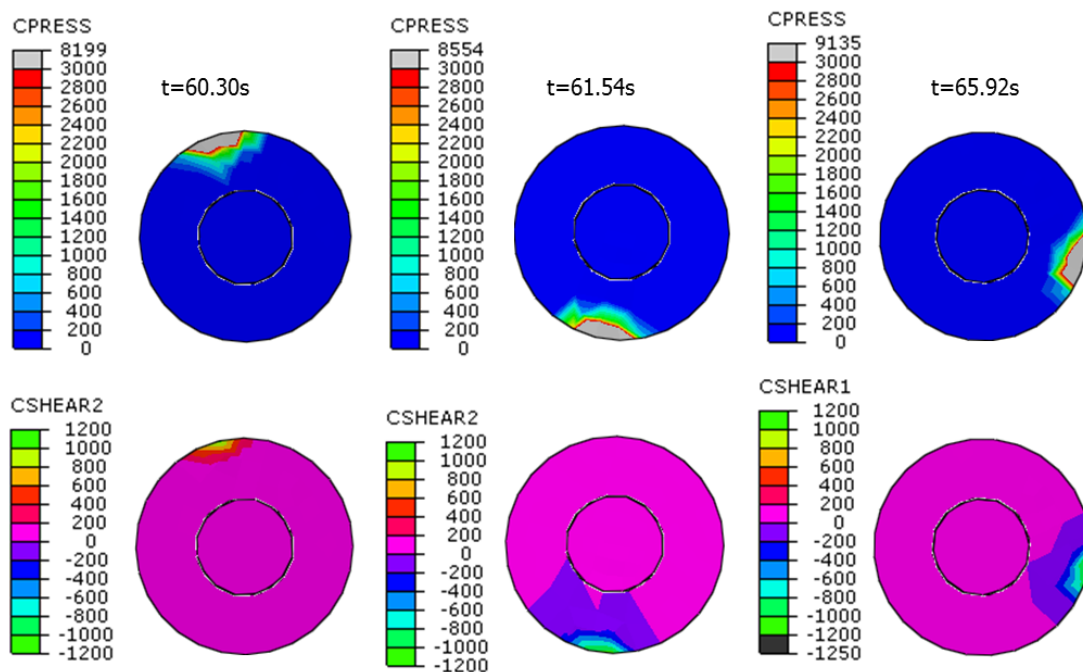
Εικόνα 6-8: Στιγμιότυπα των αναπτυσσόμενων ορθών (cpress) και διατμητικών τάσεων (cshear1/cshear2) σε kPa στην κάτω επιφάνεια του 1^{ου} σπονδύλου και του 2^{ου} σπονδύλου του πολυσπόνδου κίονα για τη σεισμική διέγερση Loma Prieta

Αρχικά, παρατηρείται διαφορά στο μέγεθος των τάσεων μεταξύ των δύο διεπιφανιών, η οποία είναι όμως αναμενόμενη δεδομένου του μεγαλύτερου βάρους που ασκείται στον 1^ο σπόνδυλο. Επιπλέον, φαίνεται ότι οι κατακόρυφες τάσεις υπερβαίνουν τις διατμητικές κατά το μεγαλύτερο μέρος της κίνησης των σπονδύλων. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει ότι δεν πραγματοποιείται σχετική ολίσθηση μεταξύ των σπονδύλων, καθώς δεν ισχύει το μοντέλο τριβής Coulomb κατά το οποίο οι διατμητικές τάσεις αποτελούν ένα ποσοστό των ορθών.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι το όριο των 7MPa για τη θλιπτική αντοχή του πωρόλιθου δεν υπερβαίνεται κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης, με την τιμή αυτή να προσεγγίζεται αρκετά ωστόσο (μέγιστη αναπτυσσόμενη τάση τα 6.821MPa).

Ενδεικτικά στιγμιότυπα των τάσεων που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια 1^{ου} σπονδύλου και στυλοβάτη του μονολιθικού κίονα παρουσιάζονται για τη σεισμική διέγερση Cambrano. Παρατηρήθηκε ότι καθ'όλη τη διάρκεια της σεισμικής κίνησης κυριάρχησε ο λικνισμός του κίονα.

ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΣΠΟΝΔΥΛΟΥ 1^{ου}-ΣΤΥΛΟΒΑΤΗ

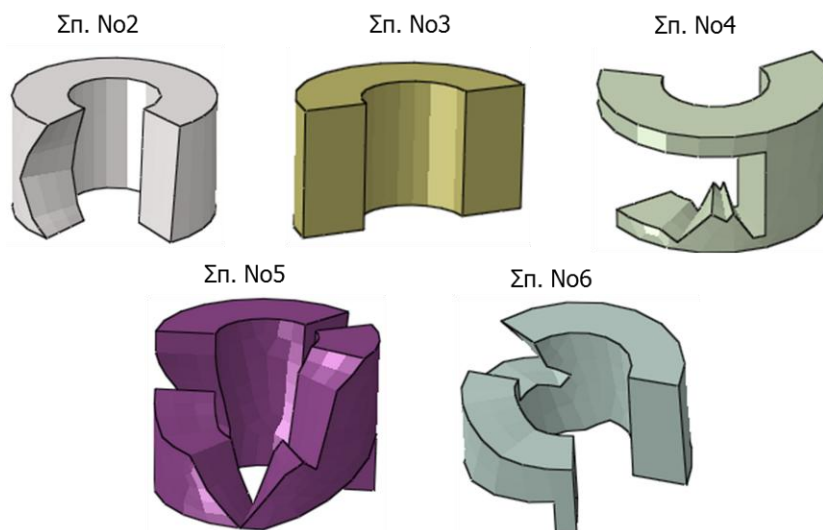


Εικόνα 6-9: Στιγμιότυπα των αναπτυσσόμενων ορθών (cpress) και διατμητικών τάσεων (cshear1/cshear2) σε kPa στην κάτω επιφάνεια του 1^{ου} σπονδύλου του μονολιθικού κίονα για τη σεισμική διέγερση Cambrano

6.3.3 Ανάπτυξη τάσεων στις συνδεόμενες με κονίαμα επιφάνειες

Στους σπονδύλους Νο2, Νο4, Νο5 και Νο6 του κίονα Κ4 χρησιμοποιούνται τόσο τμήματα αρχαίου λίθου όσο και συμπληρώματα αυτού με νέο λίθο τα οποία συγκολλώνται μεταξύ τους με κονίαμα. Στο σπόνδυλο Νο3 συγκολλώνται δύο ημικυκλικοί λίθοι: ο ένας προέρχεται από την εποχή της Ιταλικής αναστήλωσης και κρίνεται ότι μπορεί να διατηρηθεί η ύπαρξή του στο μνημείο και ο άλλος αποτελείται από νέο λίθο. Στην κάτω έδρα του 5^{ου} σπονδύλου χρησιμοποιείται ένα νεοταυτισμένο τμήμα αρχαίου

σπονδύλου και συνδέεται με τα όμορα κομμάτια του σπονδύλου αυτού. Παρακάτω παρουσιάζονται τα κομμάτια των σπονδύλων στις επιφάνειες των οποίων ελέγχθηκαν οι αναπτυσσόμενες τάσεις. Τονίζεται ότι λόγω ατελειών στην προσομοίωση της γεωμετρίας των σπονδύλων δημιουργήθηκαν επιφάνειες πολύ μικρού εμβαδού με αποτέλεσμα την εμφάνιση πολύ υψηλών τάσεων στις περιοχές αυτές, οι οποίες όμως δεν είναι ρεαλιστικές. Για παράδειγμα, το φαινόμενο αυτό παρατηρείται σε επιφάνειες του 3^{ου} και 6^{ου} σπονδύλου. Για το λόγο αυτό, οι τιμές αυτές αγνοούνται.



Εικόνα 6-10: Εξεταζόμενα τμήματα των σπονδύλων του κίονα Κ4 ως προς τις αναπτυσσόμενες ορθές και διατμητικές τάσεις στις επιφάνειες με κόνιαμα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα αποτελέσματα ως προς το μέγεθος των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών (διατμητικές και εφελκυστικές τάσεις) όπως προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για το σπονδυλωτό και το μονολιθικό κίονα υπό τη διέγερση της βάσης τους με τις έξι εξεταζόμενες σεισμικές διεγέρσεις. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται και τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τις διπλάσιες κανονικοποιημένες διεγέρσεις. Επιπλέον, καθώς πρόκειται για ένα μη συμμετρικό σύστημα λόγω των επιμέρους συνδεόμενων τμημάτων διαφορετικής γεωμετρίας που απαρτίζουν τον κίονα, εξετάζεται η αύξηση της έντασης που ενδεχομένως προκαλείται από την επιβολή της φόρτισης σε διάφορες διευθύνσεις, για παράδειγμα στραμμένες κατά 45° ή 90° σε σχέση με το αρχικό σύστημα αξόνων.

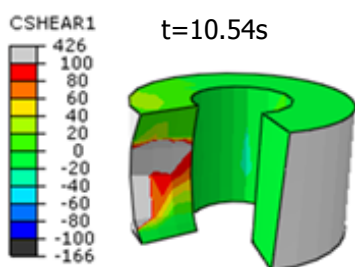
ΔΙΑΤΜΗΣΗ

Για το σπονδυλωτό κίονα Κ4 τα μέγιστα εντατικά μεγέθη προέκυψαν για τη σεισμική διέγερση Loma Prieta, για την οποία διαπιστώθηκαν και οι μέγιστες τιμές μετακίνησης της κορυφής του κίονα. Στην εικόνα 6-11 παρουσιάζονται οι μέγιστες διατμητικές τάσεις που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της σεισμικής δόνησης στους σπονδύλους καθ' ύψος του πολυσπόνδου κίονα Κ4. Δίνεται μια γενική εικόνα των αστοχιών, δηλαδή της υπέρβασης του ορίου των 100kPa που θεωρείται ως η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας λίθου-κονιάματος, που προκλήθηκαν κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης στις διάφορες επιφάνειες όπου χρησιμοποιείται κόνιαμα καθ' ύψος του κίονα. Για όλες γενικά τις εξεταζόμενες σεισμικές διεγέρσεις παρατηρήθηκαν λιγότερο ή περισσότερο εκτεταμένες

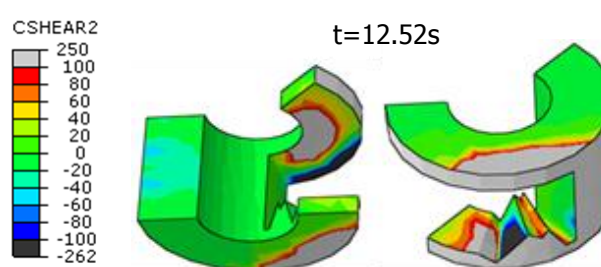
αστοχίες στις οποίες σημειώνεται και διαφορετικός βαθμός υπέρβασης της διατμητικής αντοχής της διεπιφάνειας. Πρέπει να τονιστεί ότι κατά την προσομοίωση η συμπεριφορά του κονιάματος θεωρήθηκε ελαστική, που σημαίνει ότι η παραμόρφωση και η αναπτυσσόμενη ένταση που αυτή συνεπάγεται αναιρούνται με την αποφόρτιση. Στην πραγματικότητα όμως έχουμε πλαστική αστοχία στις επιφάνειες που ελέγχουμε και οι προκαλούμενες βλάβες επεκτείνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Δηλαδή, θα παρατηρούσαμε εξέλιξη των αστοχιών και υπέρβαση του ορίου των 100kPa σε όλο και μεγαλύτερο τμήμα των επιφανειών. Αυτό συμβαίνει γιατί η εξωτερική δύναμη που ασκείται στο σύστημα παραλαμβάνεται αξιοποιώντας το συνολικό διαθέσιμο εμβαδόν των εσωτερικών επιφανειών. Συνεπώς, κατά την αντίσταση του φορέα στα επιβαλλόμενα εξωτερικά φορτία αστοχούν αρχικά ορισμένες περιοχές και στη συνέχεια επιστρατεύονται εκείνες που δεν έχουν εξαντλήσει την αντοχή τους. Άρα, θα μπορούσε να συμβεί σταδιακά αποκόλληση των συνδεόμενων τμημάτων και πτώση κομματιών λίθου. Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό ότι οι τιμές των τάσεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια δεν είναι ρεαλιστικές και δεν θα αναπτύσσονταν κανονικά, καθώς συμβαίνει αστοχία για τάση μεγαλύτερη των 100kPa. Βασικός στόχος είναι να εξεταστεί το εύρος της περιοχής που αστοχεί, ώστε να αξιολογηθεί η επάρκεια της χρήσης κονιάματος με διατμητική αντοχή διεπιφάνειας κονιάματος και λίθου της τάξης των 100kPa για την αναστήλωση του μνημείου.

ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

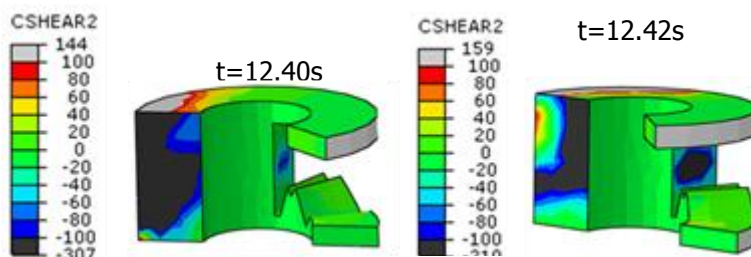
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 2^{ος}



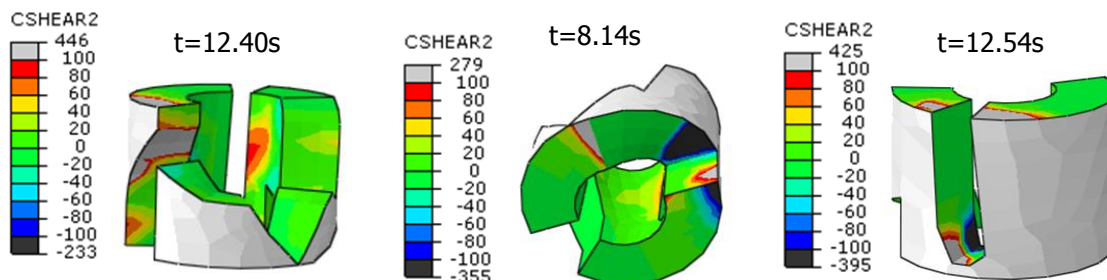
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}

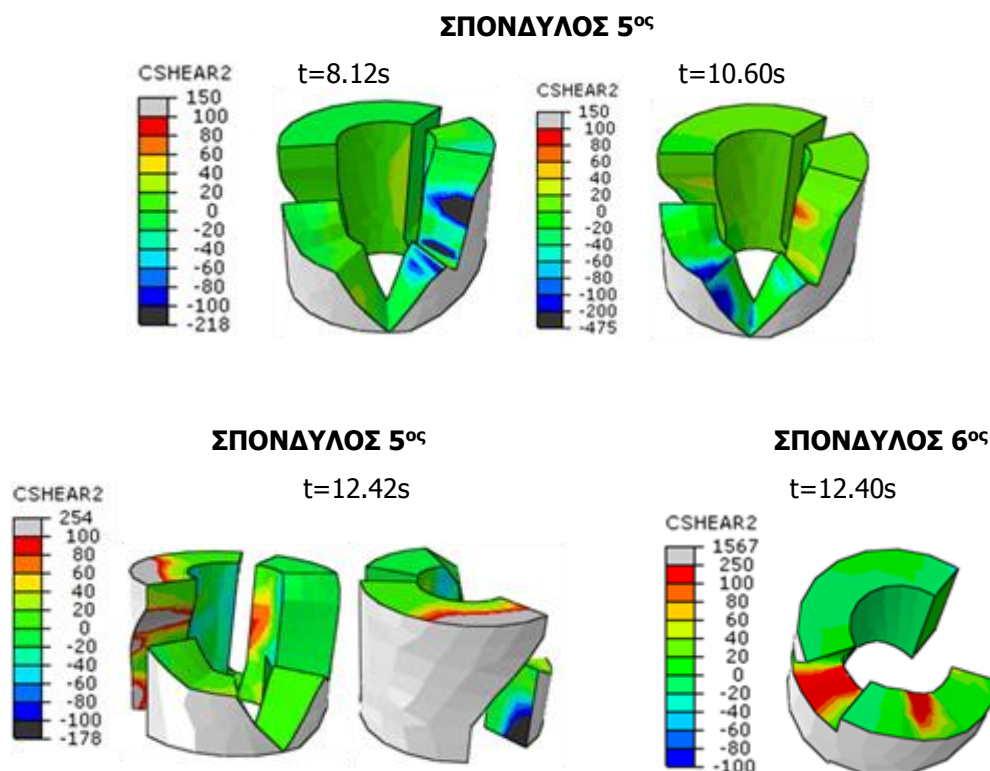


ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}



ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}





Εικόνα 6-11:Αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις σε kPa στους σπονδύλους καθ'ύψος του πολυσπόνδυλου κίονα Κ4 κατά τη διάρκεια της κανονικοποιημένης διέγερσης Loma Prieta

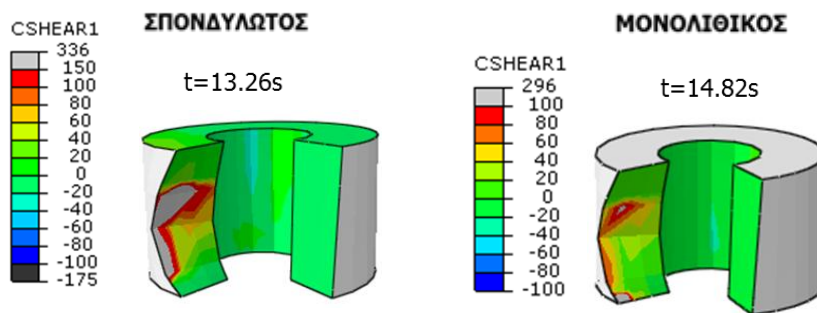
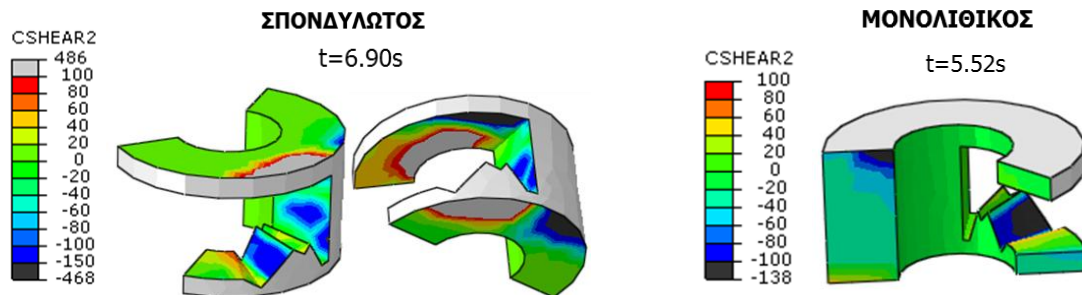
Όπως είναι λογικό, παρατηρούμε ότι η μέγιστη ένταση εμφανίζεται κατά το λικνισμό των σπονδύλων (π.χ. για $t=12.42s$, σπόνδυλος 5^{ος}). Όταν η σημειακή επαφή των σπονδύλων συμβαίνει κοντά στην περιοχή των συνδεόμενων με κονίαμα κομματιών, τότε επιβαρύνεται τοπικά η συγκεκριμένη περιοχή λόγω της άσκησης του υπερκείμενου βάρους και αντιδρά αναπτύσσοντας διατμητικές τάσεις.

Συνολικά οι αναπτυσσόμενες τάσεις ξεπερνούν τα 100kPa και στο 2^ο και 5^ο σπόνδυλο φτάνουν τα 425 kPa και 445kPa αντίστοιχα. Αυτές οι τιμές, ωστόσο, δεν είναι αντιπροσωπευτικές για τη σεισμική απαίτηση γιατί μπορεί να αναφέρονται σε ένα σημείο και εξαρτώνται από τον τρόπο υπολογισμού των τάσεων στα πεπερασμένα στοιχεία του μοντέλου από το ABAQUS. Η πολύ υψηλή τιμή 1567kPa (σπόνδυλος 6^{ος}) δεν πρέπει να ληφθεί υπόψη, καθώς εμφανίζεται σε μια επιφάνεια πολύ μικρού εμβαδού που σχηματίστηκε κατά τη δημιουργία της γεωμετρίας του μοντέλου.

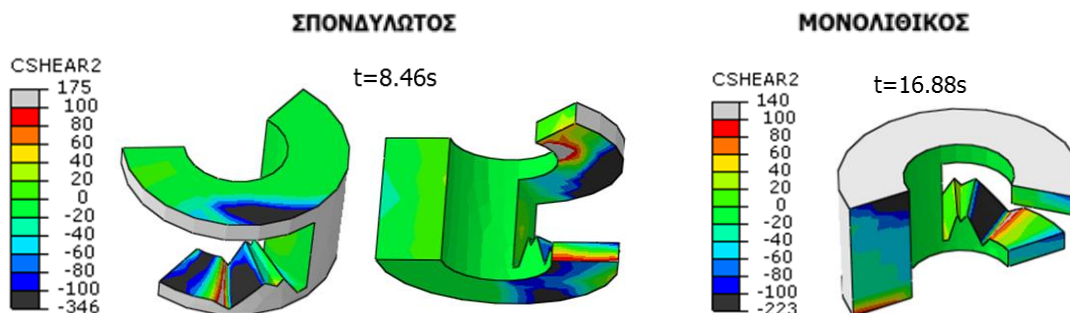
Στον 5^ο σπόνδυλο παρατηρούνται αστοχίες σε τμήματα όλων των επιφανειών στις οποίες εφαρμόστηκε στρώση κονιάματος. Το γεγονός ότι ο σπόνδυλος αυτός βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα του κίονα ευνοεί τη λικνιστική του κίνηση. Στο τμήμα αυτό οι σπόνδυλοι έχουν τη δυνατότητα να κινούνται πιο ελεύθερα λόγω του μικρότερου υπερκείμενου βάρους και έτσι μπορούν να στρέφονται και να αποκτούν σημειακή επαφή σε οποιαδήποτε περιοχή της κυκλικής τους περιφέρειας.

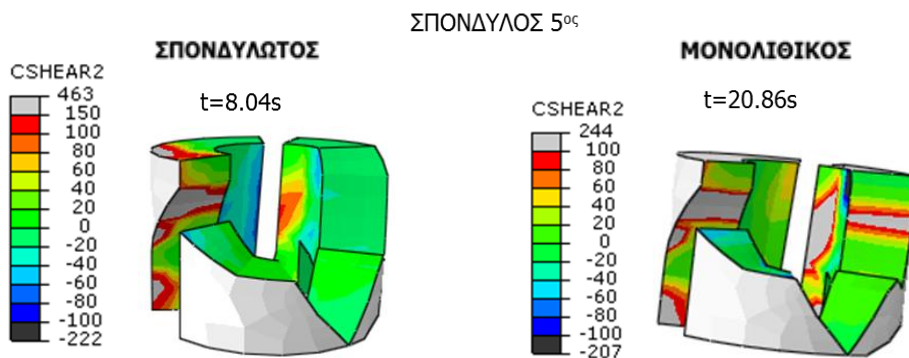
Υψηλές τιμές τάσεων εμφανίζονται και για τη σεισμική διέγερση Northridge, Lake Hughes #9, στην οποία έχει εφαρμοστεί ο μεγαλύτερος συντελεστής κλιμάκωσης (4.209) και επομένως χαρακτηρίζεται

από ιδιαίτερες υψηλές τιμές PGA στις δύο διευθύνσεις ($PGA(L)=1.39g$, $PGA(T)=1.82g$), αλλά και για τη σεισμική διέγερση της Κοζάνης ($PGA(L)=0.735g$, $PGA(T)=0.503g$). Σημειώνεται ότι η απόκριση του μονολιθικού κίονα για αυτές τις δύο σεισμικές διεγέρσεις παρουσιάζει σημαντικές ομοιότητες με την αντίστοιχη του σπονδυλωτού μέχρι το 10^ο περίπου δευτερόλεπτο της εδαφικής κίνησης, οπότε και ο μονολιθικός κίονας γίνεται πιο ασταθής και εμφανίζει μεγαλύτερες μετακινήσεις. Κρίνεται λοιπόν σκόπιμο να συγκριθούν οι αναπτυσσόμενες τάσεις στις συνδεόμενες επιφάνειες των δύο κίονων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα αποτελέσματα ως προς το μέγεθος των διατμητικών τάσεων που προέκυψαν για τις δύο προαναφερθείσες σεισμικές δονήσεις, αυξάνοντας το όριο των 100kPa στα 150kPa σε ορισμένες περιπτώσεις ώστε να ελεγχθεί εάν περιορίζεται σημαντικά ή όχι η έκταση της αστοχίας.

ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 2^{ος}ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}

Εικόνα 6-12: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων σε kPa στις συνδεόμενες με κονίαμα επιφάνειες του 2^{ου} και 4^{ου} σπονδύλου του πολυσπονδύλου και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4 για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Northridge, Lake Hughes #9

ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}

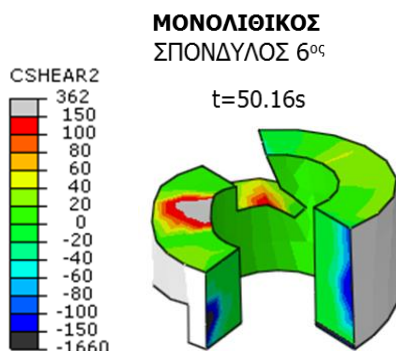


Εικόνα 6-13: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων σε kPa στις συνδεόμενες με κονίαμα επιφάνειες του 4^{ου} και 5^{ου} σπονδύλου του πολυσπόνδουλου και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα Κ4 για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση της Κοζάνης

Γενικά, παρατηρούνται πιο εκτεταμένες αστοχίες στους σπονδύλους του πολυσπόνδουλου κίονα σε σχέση με τους αντίστοιχους του μονολιθικού και για τον πρώτο, ακόμα και με διατμητική αντοχή διεπιφανείας λίθου-κονιάματος ίση με 150kPa, παρατηρείται ότι αστοχεί σημαντικό τμήμα των επιφανειών του (π.χ Εικόνα 6-12, Σπ. Νο2, Εικόνα 6-13, Σπ. Νο5). Επιπλέον, οι τιμές των αναπτυσσόμενων τάσεων είναι μικρότερες στην περίπτωση του μονολιθικού κίονα. Αυτό είναι λογικό καθώς, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, οι υψηλές αναπτυσσόμενες τάσεις στον πολυσπόνδυλο κίονα οφείλονται στις συγκρούσεις των σπονδύλων κατά το λικνισμό των τελευταίων, ενώ στο μονολιθικό κίονα δε συμβαίνει αυτό.

Αστοχίες σημειώνονται σε όλους τους σπονδύλους, με μεγαλύτερες τιμές τάσεων να εμφανίζονται στον 4^ο και 5^ο σπόνδυλο του πολυσπόνδουλου κίονα. Και για το μονολιθικό κίονα παρατηρούνται αστοχίες στους ίδιους σπονδύλους. Ωστόσο, το μέγεθος των διατμητικών τάσεων είναι μικρότερο, και στην περίπτωση του 5^{ου} σπονδύλου για τη σεισμική δόνηση της Κοζάνης είναι περίπου το μισό των αντίστοιχων αναπτυσσόμενων τάσεων στο σπονδυλωτό κίονα. Επιπλέον, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στον 5^ο σπόνδυλο του μονολιθικού κίονα για την ίδια σεισμική κίνηση για παράδειγμα, είναι δυνατό να αστοχήσει και η εσωτερική επιφάνεια του κελύφους των σπονδύλων. Αυτή η αστοχία όμως δεν είναι τόσο σημαντική, καθώς δεν οδηγεί σε κατάρρευση τμημάτων του κίονα.

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται η δυσμενέστερη εικόνα τάσεων για το μονολιθικό κίονα όταν αυτός υπόκειται στη σεισμική διέγερση Cambrano, η οποία τον οδήγησε και στις υψηλότερες τιμές μετακίνησης.

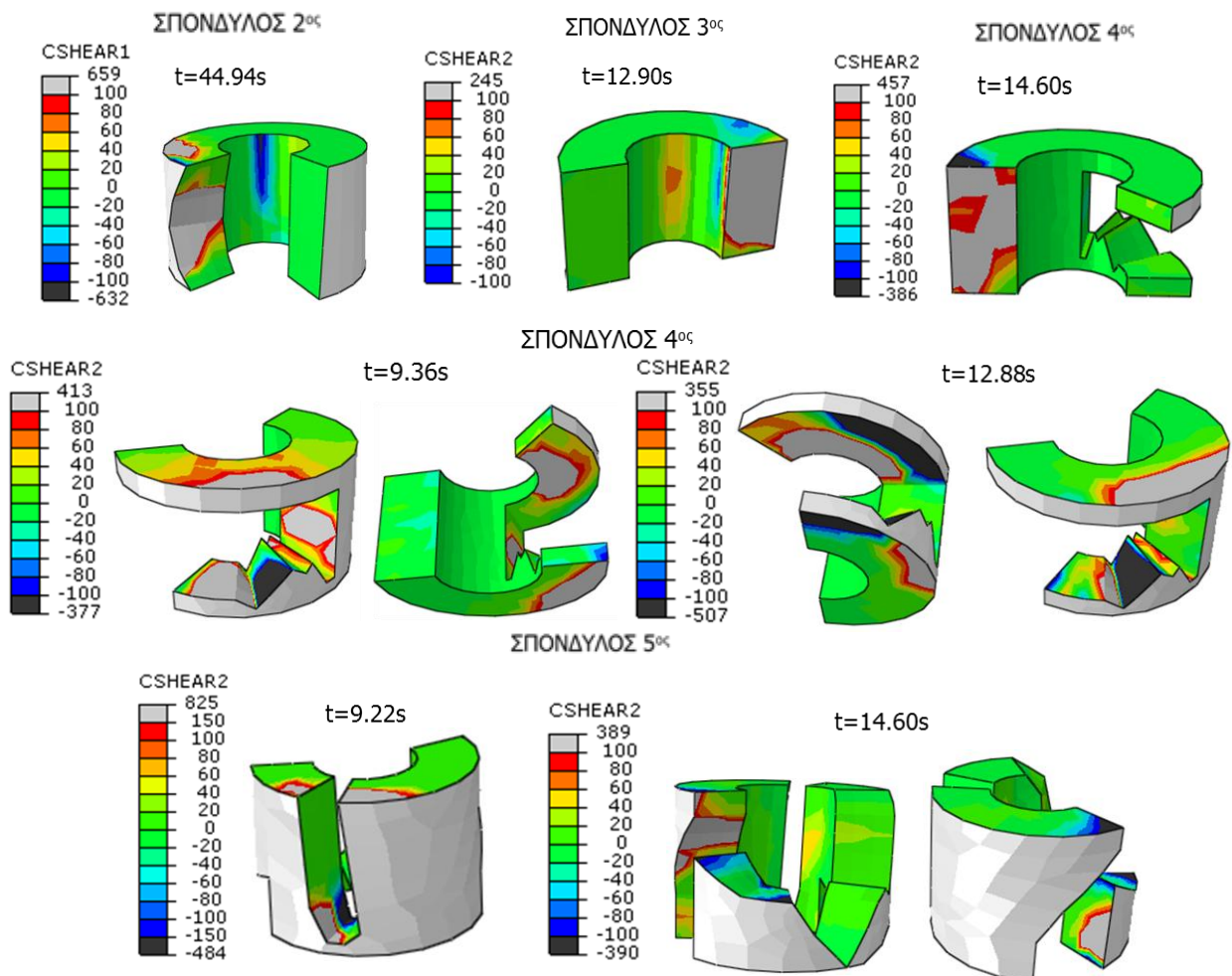


Εικόνα 6-14: Αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις σε kPa στις συνδεόμενες με κονίαμα επιφάνειες του 6^{ου} σπονδύλου του μονολιθικού κίονα Κ4 για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Cambrano

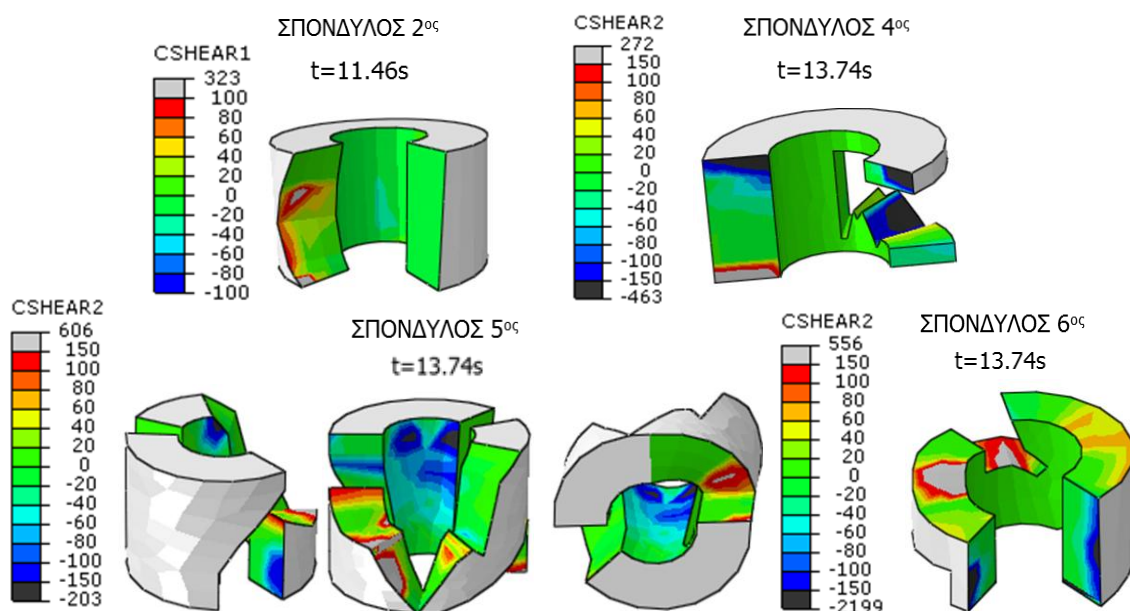
Το γεγονός ότι οι υψηλότερες τιμές τάσεων εμφανίζονται στους ανώτερους σπονδύλους (5^{ος} και 6^{ος}) του μονολιθικού κίονα ερμηνεύεται από το ότι αναπτύσσονται αντίστοιχα μεγαλύτερες τιμές επιταχύνσεων στο τμήμα αυτό του κίονα, άρα και μεγαλύτερες σεισμικές δυνάμεις. Οι μεγαλύτερες επιταχύνσεις οφείλονται στις μεγαλύτερες μετακινήσεις που είναι δυνατό να εκδηλωθούν στο ανώτερο τμήμα του κίονα. Σ'αυτές τις επιταχύνσεις μπορούν να αποδοθούν και οι ολισθήσεις που παρατηρούνται μεταξύ των ανώτερων σπονδύλων, καθώς οι πρώτες είναι ικανές να υπερνικήσουν τις δυνάμεις τριβής.

Ακολουθεί η εξέταση των αναπτυσσόμενων τάσεων για τις αντίστοιχες διπλάσιες κανονικοποιημένες διεγέρσεις. Ενδιαφέρον παρουσιάζει η εξέταση των μεγεθών αυτών κατά τις διπλάσιες σεισμικές διεγέρσεις Tabas και Cambrano, στις οποίες είχαμε ανατροπή των δύο κίωνων και πριν από αυτή σημειώθηκαν πολύ σημαντικές μετακινήσεις της κορυφής τους που έφτασαν έως και το 1.5m στη σεισμική διεγέρση Cambrano. Στις παρακάτω εικόνες δείχνονται στιγμιότυπα των διατμητικών τάσεων κατά τις δυσμενέστερες χρονικές στιγμές της διπλάσιας σεισμικής δόνησης Cambrano για το σπονδυλωτό και το μονολιθικό κίονα.

ΔΙΠΛΑΣΙΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ



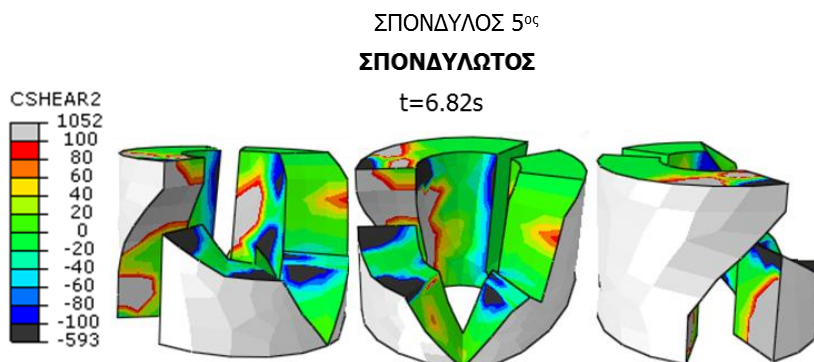
Εικόνα 6-15: Αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις σε kPa στις συνδεόμενες με κονίαμα επιφάνειες καθ'ύψος του πολυσπόνδουλου κίονα K4 για τη διπλάσια κανονικοποιημένη σεισμική διεγέρση Cambrano

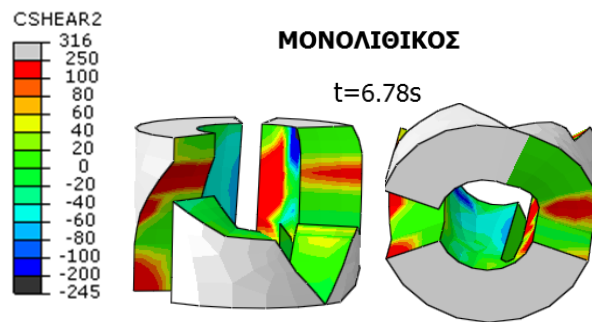


Εικόνα 6-16: Αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις σε kPa στις συνδεόμενες με κονίαμα επιφάνειες καθ' ύψος του μονολιθικού κίονα Κ4 για τη *διπλάσια* κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Cambrano

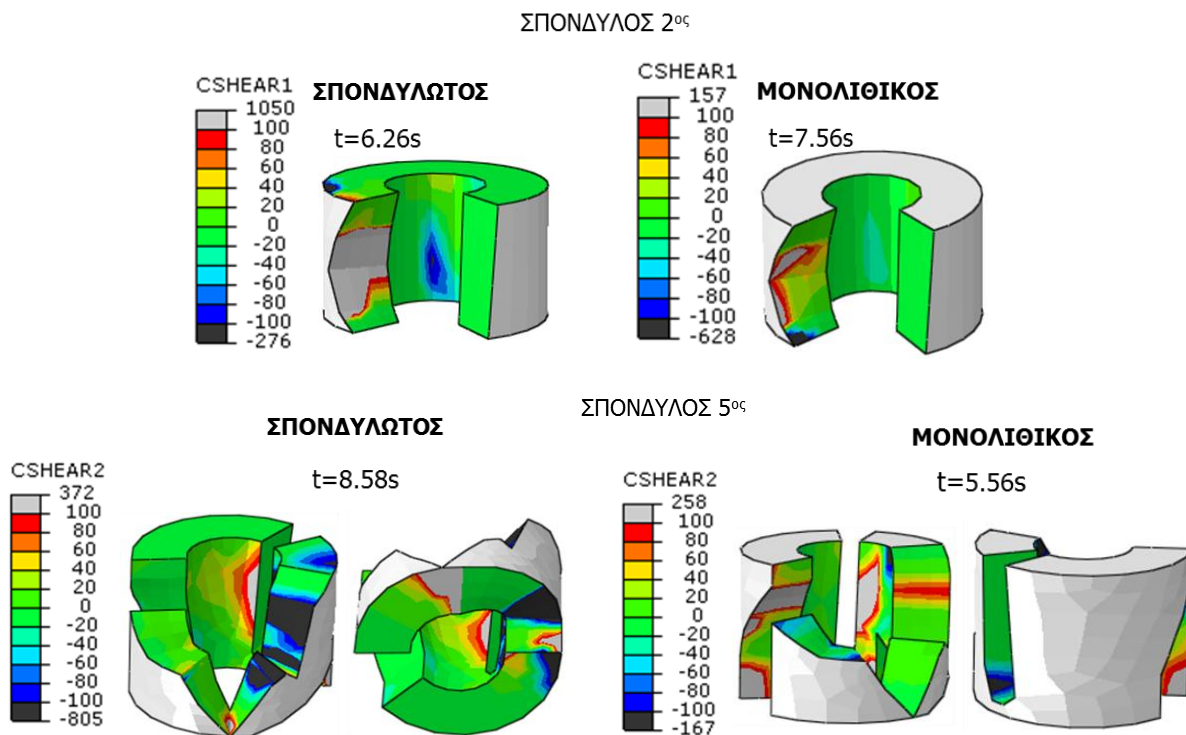
Παρατηρούμε ότι έχουμε αυξημένη επιφάνεια αστοχίας αλλά και αυξημένο μέγεθος τάσεων στην περίπτωση των διπλάσιων διεγέρσεων. Στον πολυσπόνδυλο κίονα οι αστοχίες είναι πιο εκτεταμένες επίσης και αστοχεί σημαντικό τμήμα των επιφανειών σε όλους τους σπονδύλους. Για το μονολιθικό κίονα παρατηρείται ότι γύρω στη χρονική στιγμή $t=13.74s$ αυτός καταπονείται έντονα και παρατηρείται υπέρβαση του ορίου της διατμητικής αντοχής σε όλους τους σπονδύλους, από τον 4^ο μέχρι και τον 6^ο.

Οι υψηλότερες τιμές τάσεων εμφανίζονται ωστόσο κατά τις διπλάσιες σεισμικές διεγέρσεις Northridge, Lake Hughes #9 και Κοζάνης, όπου αγγίζουν το 1MPa περίπου. Παρακάτω δίνονται ενδεικτικές εικόνες με τα δυσμενέστερα μεγέθη και γίνεται σύγκριση με το μονολιθικό κίονα ο οποίος επέδειξε παρόμοια ή εντονότερη συμπεριφορά κατά τις δύο αυτές σεισμικές δονήσεις.





Εικόνα 6-17: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων σε kPa στον 5^ο σπόνδυλο του πολυσπόνδουλου και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4 για τη διπλάσια κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Northridge, Lake Hughes #9



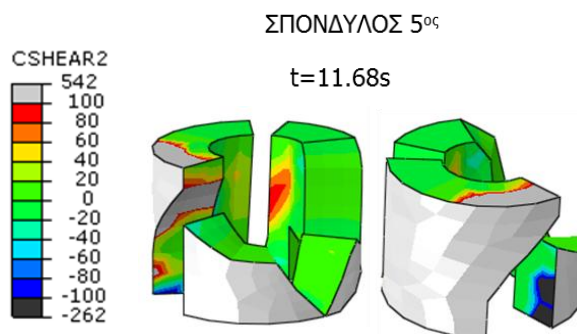
Εικόνα 6-18: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων σε kPa στο 2^ο και 5^ο σπόνδυλο του πολυσπόνδουλου και του ισοδύναμου μονολιθικού κίονα K4 για τη διπλάσια κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση της Κοζάνης

Συνολικά, μπορούμε να πούμε ότι οι αστοχίες που σημειώνονται στις επιφάνειες των σπονδύλων που συνδέονται με κονίαμα είναι πιο θεαματικές για τις διπλάσιες σεισμικές διεγέρσεις. Αυτό δικαιολογείται από τις σημαντικά μεγαλύτερες επιταχύνσεις που πιθανώς αναπτύχθηκαν στην κατασκευή λόγω της επιβολής διπλάσιων εδαφικών επιταχύνσεων, και οδήγησαν αντίστοιχα στην επιβολή αυξημένων σεισμικών δράσεων.

Η διπλάσια σεισμική διέγερση της Κοζάνης προκάλεσε τη μεγαλύτερη ένταση, η οποία έφτασε τα 1050kPa, ενώ για την αντίστοιχη απλώς κανονικοποιημένη σεισμική καταγραφή, οι μέγιστες διατμητικές τάσεις ήταν σχεδόν οι μισές (465kPa).

Τέλος, εξετάζονται τα αποτελέσματα ως προς τις διατμητικές τάσεις για τις στραμμένες σεισμικές διεγέρσεις κατά 45° ή 90° . Επιλέγεται ενδεικτικό στιγμιότυπο των τάσεων που αναπτύσσονται στον 5^ο σπόνδυλο του πολυσπόνδυλου κίονα Κ4 για τη σεισμική διέγερση Loma Prieta μετά από στροφή 90° , η οποία και έδωσε μεγαλύτερες τιμές σε σχέση με την αντίστοιχη αρχική διέγερση.

ΣΤΡΑΜΜΕΝΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ



Εικόνα 6-19: Αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις σε kPa στον 5^ο σπόνδυλο του πολυσπόνδυλου κίονα Κ4 για τη *στραμμένη* κατά 90° κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Loma Prieta

Γενικώς, δεν παρατηρούνται μεγαλύτερες διαφορές στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη στις επιφάνειες του πολυσπόνδυλου και του μονολιθικού κίονα στις υπόλοιπες στραμμένες σεισμικές διεγέρσεις που εξετάζονται. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση του μονολιθικού κίονα ο οποίος ανατρέπεται κατά την απόκρισή του υπό τη στραμμένη κατά 90° σεισμική διέγερση Campano. Στο παράρτημα των εικόνων βρίσκονται ενδεικτικές εικόνες για όλες τις σεισμικές κινήσεις με τις στραμμένες διευθύνσεις.

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ-ΘΛΙΨΗ

Οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές και θλιπτικές τάσεις ελέγχονται με βάση το όριο 500kPa και 12000kPa αντίστοιχα που ορίζονται από τις ιδιότητες προτεινόμενου κονιάματος αποκατάστασης. Το πρώτο όριο αντιπροσωπεύει την πρόσφυση του κονιάματος στο υπόστρωμα και θεωρείται ως η εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας λίθου-κονιάματος, ενώ το δεύτερο αποτελεί τη θλιπτική αντοχή του κονιάματος.

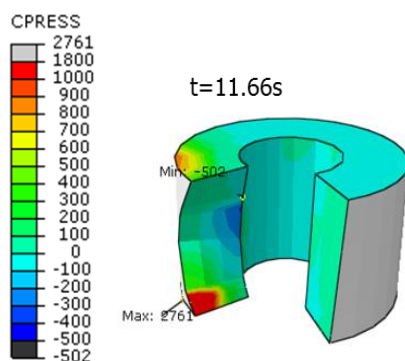
Στη συνέχεια, όμοια με τις διατμητικές τάσεις, παρουσιάζονται, με κοινή κλίμακα-υπόμνημα για τον εφελκυσμό και τη θλίψη, τα δυσμενέστερα αποτελέσματα για τις αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις (CPRESS) στις επιφάνειες με κονίαμα των σπονδύλων του πολυσπόνδυλου και μονολιθικού κίονα όπως προέκυψαν από τις αριθμητικές αναλύσεις για τις εξεταζόμενες κανονικοποιημένες διεγέρσεις, τις αντίστοιχες αυτών μετά από στροφή των διευθύνσεών τους κατά 45° ή 90° , καθώς και για εκείνες διπλάσιας έντασης σε σχέση με τις αρχικά εξεταζόμενες κανονικοποιημένες σεισμικές κινήσεις.

Όπως δείχνεται στις παρακάτω εικόνες, στην περίπτωση του σπονδυλωτού κίονα, μικρή υπέρβαση του εφελκυστικού ορίου σημειώθηκε για τις σεισμικές διεγέρσεις Loma Prieta και της Κοζάνης, για τις οποίες είχε παρατηρηθεί και αυξημένη διατμητική ένταση. Για το μονολιθικό κίονα παρατηρήθηκε αντίστοιχη υπέρβαση, αλλά σε πιο σημαντικό βαθμό, κατά την απόκρισή του υπό τη σεισμική διέγερση Cambrano, η οποία τον οδήγησε και στις μεγαλύτερες τιμές μετακινήσεων.

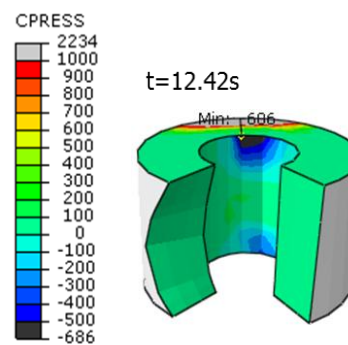
Για τη σεισμική διέγερση της Κοζάνης παρατίθενται στιγμιότυπα των ορθών τάσεων και για τους δύο εξεταζόμενους κίονες, καθώς έφτασαν στο ίδιο επίπεδο μέγιστης μετακίνησης (σε διαφορετικές ωστόσο χρονικές στιγμές).

ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ

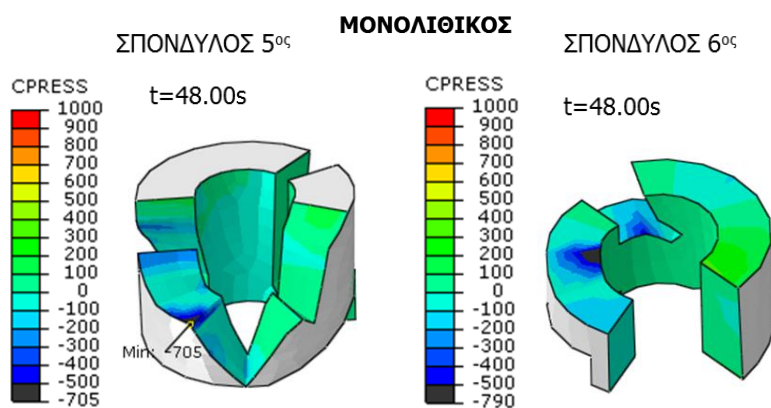
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 2^{ος}



Εικόνα 6-20: Αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις σε kPa στο 2^ο σπόνδυλο του πολυσπόνδυλου κίονα K4 για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Loma Prieta



Εικόνα 6-21: Αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις σε kPa στους ανώτερους σπονδύλους του μονολιθικού κίονα K4 για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Cambrano

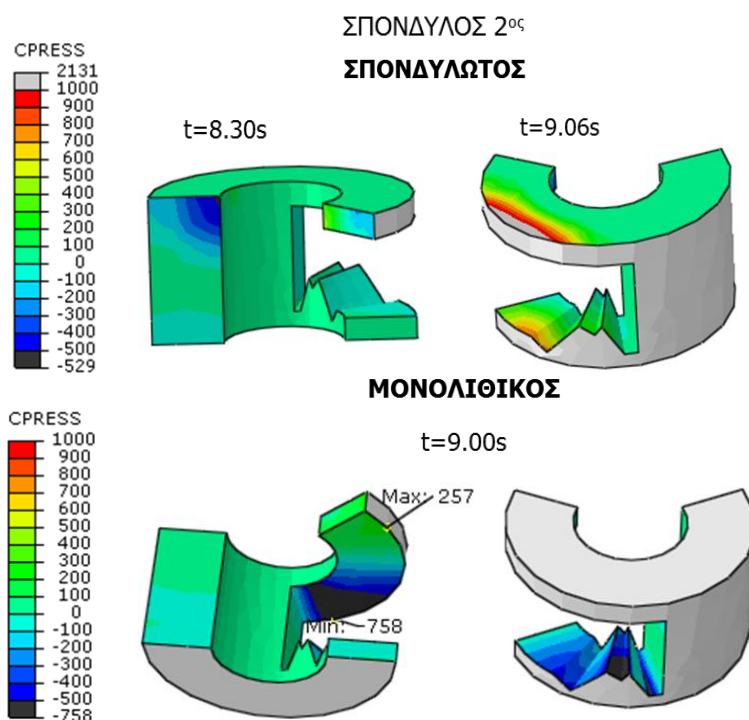
Παρατηρούμε ότι γενικά δε σημειώνεται αστοχία σε εφελκυσμό. Οι εφελκυστικές τιμές κυμαίνονται χονδρικά μεταξύ 0 και 100kPa. Εφελκυστικές τάσεις μεγαλύτερες από 500kPa αναπτύχθηκαν τοπικά στο εσωτερικό μέρος των σπονδύλων (στη διεπιφάνεια του εσωτερικού των σπονδύλων (κελυφών) και της εσωτερικής στήλης λίθου που συμπληρώνει τα κελύφη) κατά το λικνισμό των τελευταίων (Εικόνα 6-20). Η αστοχία στις εσωτερικές επιφάνειες πιθανώς να οδηγήσει στην αποκόλληση των αντίστοιχων συνδεόμενων μερών, ωστόσο ακόμα και αν αυτή συμβεί, δεν είναι καθοριστικής σημασίας για την ευστάθεια του κίονα.

Στο μονολιθικό κίονα παρατηρείται υπέρβαση του εφελκυστικού ορίου (700kPa περίπου) σε επίσης περιορισμένο τμήμα επιφάνειας κατά την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Cambrano. Η μέγιστη ένταση αναπτύσσεται και εδώ στο ανώτερο μέρος του κίονα.

Σχετικά με τη θλίψη, το όριο των 12000kPa δεν υπερβαίνεται σε καμία περίπτωση. Αντίθετα, οι θλιπτικές τάσεις διατηρούνται σε πολύ χαμηλότερο επίπεδο, αγγίζοντας τα 1800kPa στο κάτω μέρος του 2^{ου} σπονδύλου του σπονδυλωτού κίονα (Εικόνα 6-20). Γενικά, όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από τις εικόνες του παραρτήματος, με εξαίρεση την ακραία περιοχή του 2^{ου} σπονδύλου η θλίψη στις επιφάνειες με κονίαμα δεν είναι σημαντική (π.χ. δεν ξεπερνά τα 670kPa σε επιφάνεια του 6^{ου} σπονδύλου του σπονδυλωτού κίονα κατά τη σεισμική διέγερση Loma Prieta).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τους δύο κίονες όταν αυτοί υποβάλλονται στις διπλάσιες κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις. Επιλέγονται στιγμιότυπα των ορθών τάσεων στους σπονδύλους των κίωνων για τη διπλάσια σεισμική διέγερση Loma Prieta, για την οποία προέκυψε η μεγαλύτερη ένταση.

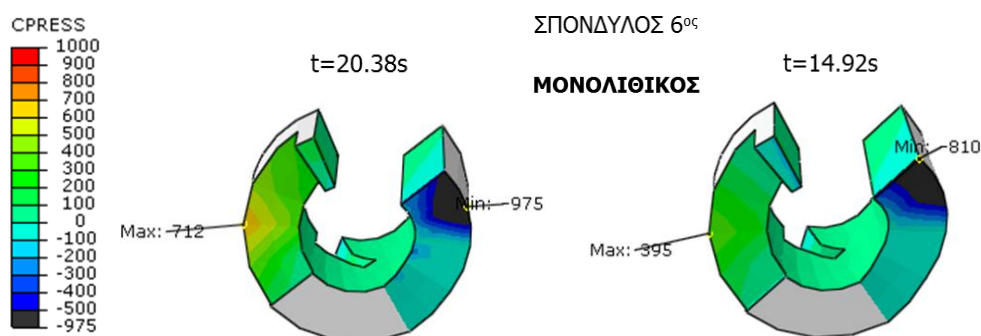
ΔΙΠΛΑΣΙΕΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΕΣ ΔΙΕΓΕΡΣΕΙΣ



Εικόνα 6-22: Αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις σε kPa στον 4ο σπόνδυλο του σπονδυλωτού και μονολιθικού κίονα Κ4 για τη διπλάσια κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Loma Prieta

Στο μονολιθικό κίονα παρατηρείται υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής, ενώ αντίθετα στον πολυσπόνδυλο δεν έχουμε αντίστοιχη αστοχία. Η ίδια τάση παρατηρήθηκε και στην περίπτωση των απλών κανονικοποιημένων σεισμικών κινήσεων. Στην περίπτωση του πολυσπόνδυλου συστήματος ήταν αναμενόμενη η παραλαβή του εξωτερικού φορτίου μέσω της διάτμησης κατά βάση. Πράγματι, κατά το λικνισμό των σπονδύλων, τα συνδεόμενα με κονίαμα τμήματα λίθου τείνουν να ολισθήσουν μεταξύ τους παρά να αποκολληθούν.

Τέλος, εξετάζεται και εδώ η προκαλούμενη ένταση από τις ίδιες σεισμικές διεγέρσεις υπό στραμμένες διευθύνσεις. Παρουσιάζονται στιγμιότυπα ορθών τάσεων για το μονολιθικό κίονα, όπου και σημειώνεται αστοχία.



Εικόνα 6-23: Αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις σε kPa στον 6ο σπόνδυλο του μονολιθικού κίονα K4 για τις στραμμένες κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις Loma Prieta (αριστερά) και Camrano (δεξιά) κατά 45° και 90° αντίστοιχα

Η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο ανώτερο μέρος του μονολιθικού κίονα (4^{ος}, 5^{ος} και 6^{ος} σπόνδυλος) ερμηνεύεται από το γεγονός ότι στο κάτω μέρος του οι αναπτυσσόμενες θλιπτικές τάσεις είναι υψηλότερες λόγω του μεγαλύτερου υπερκείμενου βάρους, με αποτέλεσμα να εξουδετερώνουν τις αναπτυσσόμενες εφελκυστικές.

6.4 Συμπερασματικά σχόλια

Για την πλειοψηφία των εξεταζόμενων σεισμικών σεναρίων ο σπονδυλωτός και ο ισοδύναμος μονολιθικός μεμονωμένος κίονας επέδειξαν παρόμοια εν γένει συμπεριφορά ως προς την ευστάθεια. Εξαιρεση αποτελούν οι σεισμικές διεγέρσεις Loma Prieta και Camrano για τις οποίες οι δύο τύποι κίονων αποκρίθηκαν με εντελώς διαφορετικό τρόπο. Για την πρώτη ο σπονδυλωτός κίονας αποδείχτηκε εμφανώς πιο ασταθής, με την προβλεπόμενη παραμένουσα ολίσθηση του ανώτατου σπονδύλου να είναι της τάξης των 25cm. Αντίθετα, για τη σεισμική διέγερση Camrano, παρά τη σχετικά χαμηλή τιμή της καρυφαίας τιμής εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) στις δύο διευθύνσεις, ο μονολιθικός κίονας αναπτύσσει πολύ μεγαλύτερες μετακινήσεις, με τις μόνιμες να είναι ίδιες περίπου με τις μέγιστες αναπτυσσόμενες κατά τη διάρκεια του σεισμικού κραδασμού και να φτάνουν τα 30cm περίπου. Ο κίονας κάμπτεται όπως ένας πρόβολος στην περίπτωση αυτή κι αυτή η μορφή απόκρισης αποτελεί το δυσμενέστερο σενάριο. Για τις υπόλοιπες σεισμικές διεγέρσεις προβλέπονται μικρότερες τιμές μόνιμων μετακινήσεων οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ των 5cm-15cm.

Ως προς την αναπτυσσόμενη ένταση στις επιφάνειες των τμημάτων των σπονδύλων όπου χρησιμοποιείται κονίαμα, προκύπτει ότι στον πολυσπόνδυλο κίονα είναι πιθανότερο να συμβεί αστοχία εξαιτίας της λικνιστικής κίνησης των σπονδύλων, η οποία ενισχύει την ανάπτυξη τάσεων στις διεπιφάνειες των συνδεόμενων κομματιών λίθου. Ωστόσο, φάνηκε ότι και στο μονολιθικό κίονα, ιδιαίτερα στα ανώτερα τμήματά του, μπορούν να αναπτυχθούν σημαντικές τάσεις. Επομένως, η λύση της χρήσης κονιάματος σαν μέτρου αναστήλωσης του κίονα δεν φαίνεται να είναι αποτελεσματική και μάλλον πρέπει να προτιμηθεί η χρήση ράβδων οπλισμού για τη σύνδεση των επιμέρους μελών των σπονδύλων.

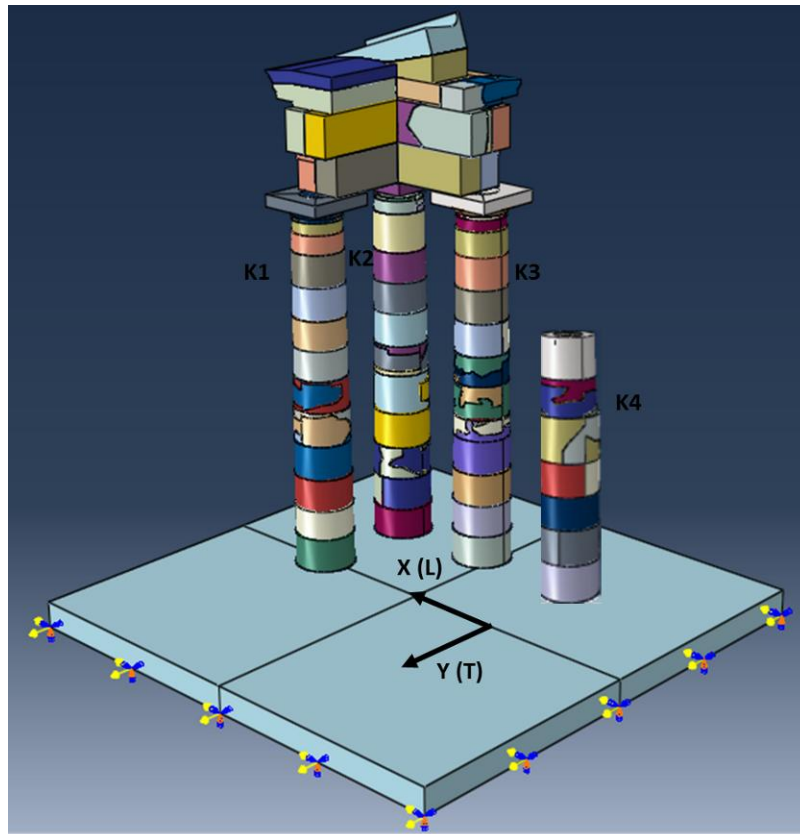
Επιπλέον, ο κίονας παραλαμβάνει την επιβαλλόμενη σεισμική φόρτιση αναπτύσσοντας κατά βάση διατμητική ένταση και συνεπώς είναι πιθανότερο ότι θραύση ή ρηγματώση στις διεπιφάνειες των συνδεόμενων κομματιών θα προέλθει από την ολίσθηση των αρμών (κι όχι από το άνοιγμα των αρμών, δηλ. από υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής της διεπιφάνειας).

7 ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΑΣ ΤΩΝ ΚΙΟΝΩΝ Κ1, Κ2 ΚΑΙ Κ3- ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

7.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αποτελεί συνέχεια του κεφαλαίου 6 και παρουσιάζει τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς της συστοιχίας των κίωνων Κ1, Κ2 και Κ3, οι οποίοι διατάσσονται υπό ορθή γωνία και αποτελούν το υπόλοιπο τμήμα του ναού του Πύθιου Απόλλωνα. Οι αριθμητικές αναλύσεις για την κionoστοιχία πραγματοποιήθηκαν σε δεύτερη φάση, τηρώντας κοινό σύστημα αξόνων για την επιβολή της σεισμικής φόρτισης με αυτό που χρησιμοποιήθηκε κατά τις αναλύσεις του μεμονωμένου κίονα Κ4. Η σεισμική κίνηση εφαρμόστηκε και στην προκειμένη περίπτωση με τη μορφή χρονοϊστορίας επιτάχυνσης που ασκήθηκε στη βάση των τριών κίωνων. Στην εικόνα 7-1 δείχνονται οι άξονες Χ και Υ του ABAQUS στους οποίους εφαρμόστηκαν οι οριζόντιες συνιστώσες L και T των καταγραφών αντίστοιχα.

Η απόκριση της εν λόγω κionoστοιχίας μελετήθηκε τόσο ως προς τις μετακινήσεις όσο και ως προς τις ορθές και διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στις επιφάνειες των κομματιών λίθου που συνδέονται μεταξύ τους με κονίαμα, όπως προβλέπεται στην πρόταση αποκατάστασης του μνημείου. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η αναστηλωμένη κionoστοιχία και αναφέρονται τα τμήματα αρχαίου και νέου λίθου για τα οποία εξετάστηκε η αναπτυσσόμενη ένταση. Για λόγους σύγκρισης μελετήθηκε και η απόκριση του ισοδύναμου μονολιθικού συστήματος.



Εικόνα 7-1: Επιβολή χρονοϊστοριών επιτάχυνσης κατά τις διευθύνσεις X και Y

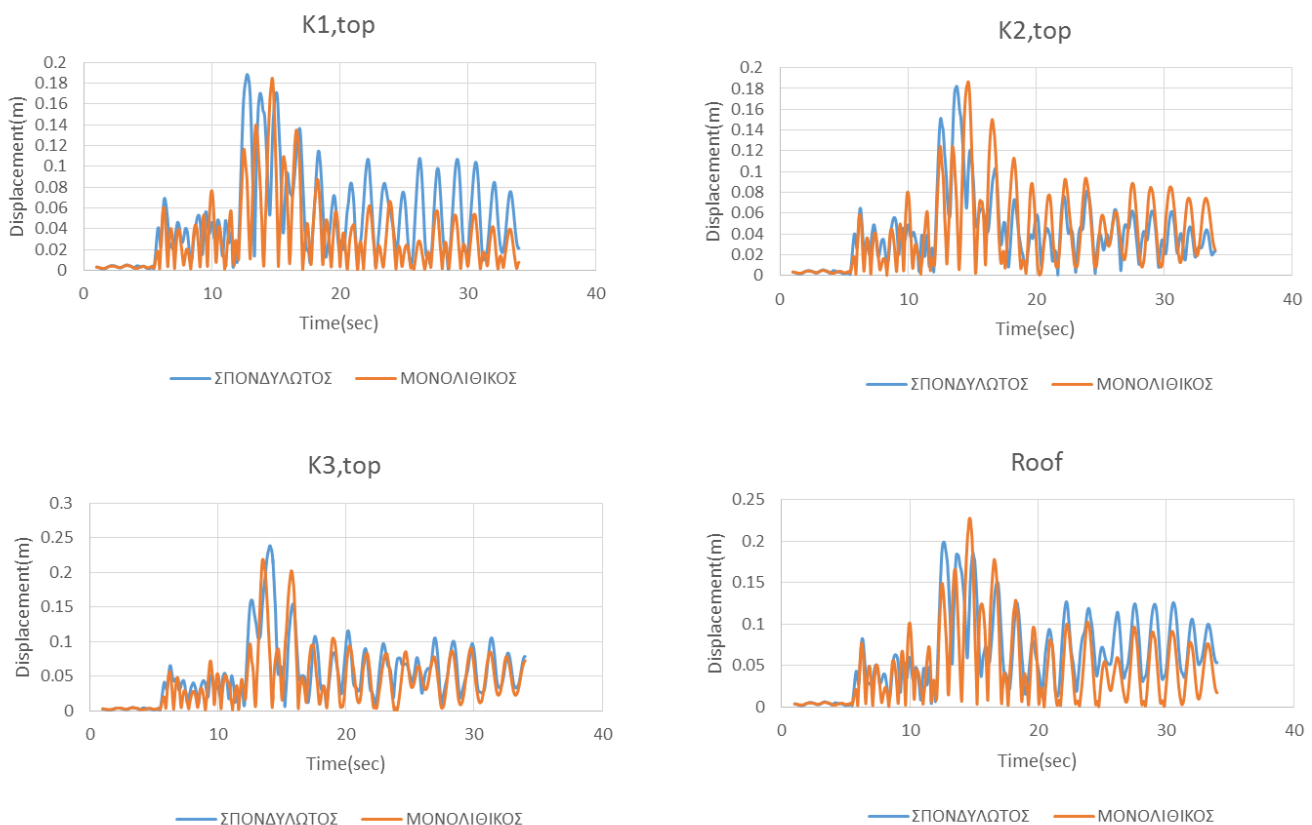
Στον Πίνακα 7-1 συνοψίζονται οι σεισμικές διεγέρσεις στις οποίες υποβλήθηκε η κιονοστοιχία και σημειώνεται ποιες από αυτές οδήγησαν είτε στην κατάρρευση τμήματος ή ολόκληρης της κιονοστοιχίας είτε στην κατάρρευση μέρους ή του συνόλου της ανωδομής είτε στην κατάρρευση ολόκληρης της κατασκευής.

Πίνακας 7-1: Εξεταζόμενες σεισμικές διεγέρσεις

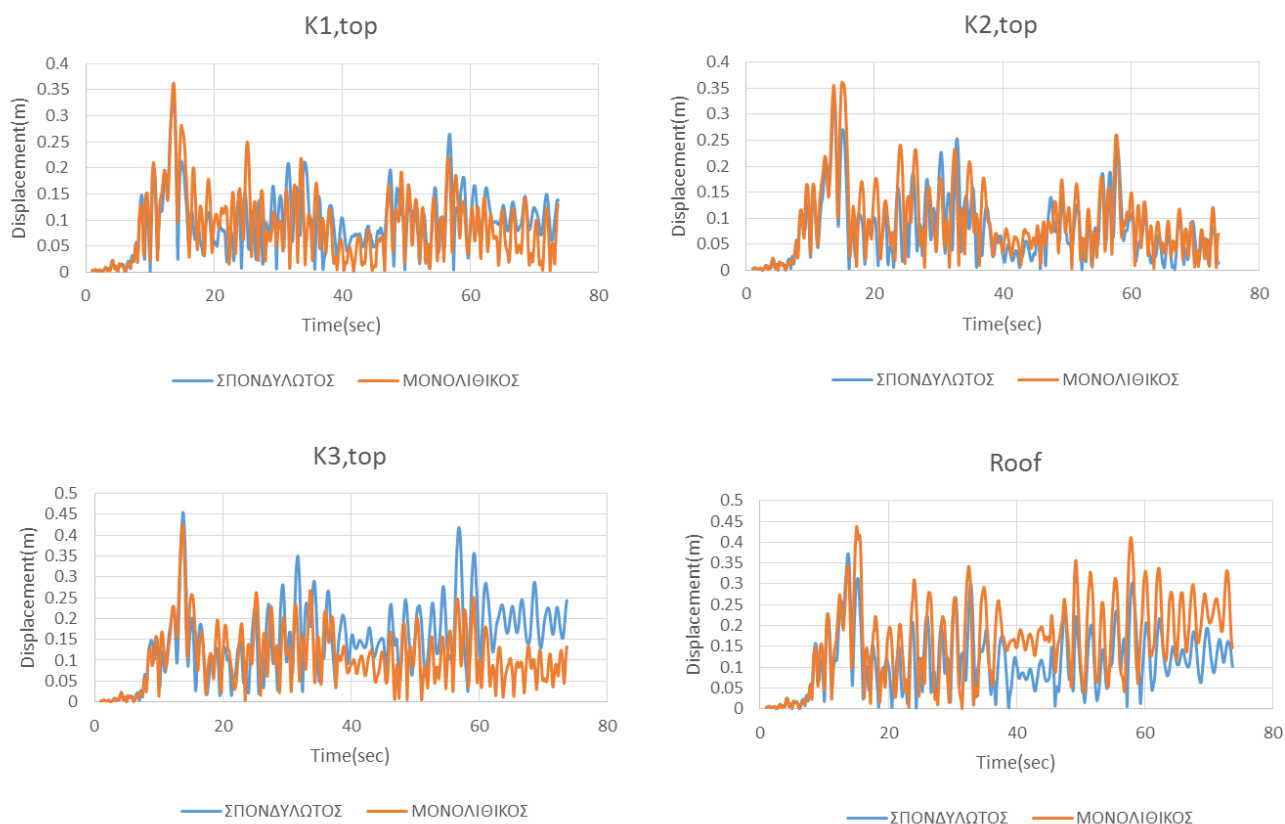
	Σεισμική διεγέρση	Διεύθυνση φόρτισης	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, PGA-L(g)	Μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, PGA-T(g)	Κατάρρευση
1	Tabas (1978)	X+Y	0.275	0.277	Όχι
2	Tabas (1978)	X'(+45°) + Y'(+45°)	0.275	0.277	Όχι
3	Tabas (1978)	X'(+90°) + Y'(+90°)	0.275	0.277	Όχι
4	Tabas (1978)	X+Y	0.550	0.555	ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΟΙ: Κατάρρευση τμήματος της ανωδομής ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΙ: Κατάρρευση όλων των κίωνων και ανωδομής
5	Campano Lugano (1980)	X+Y	0.144	0.167	Όχι
6	Campano Lugano (1980)	X'(+45°) + Y'(+45°)	0.144	0.167	Όχι
7	Campano Lugano (1980)	X'(+90°) + Y'(+90°)	0.144	0.167	Όχι
8	Campano Lugano (1980)	X+Y	0.288	0.335	ΠΟΛΥΣΠΟΝΔΥΛΟΙ: Κατάρρευση τμήματος της ανωδομής και του κίονα Κ1 ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΙ: Κατάρρευση τμήματος της ανωδομής
9	Loma Prieta (1989)	X+Y	0.636	0.827	Όχι
10	Loma Prieta (1989)	X'(+45°) + Y'(+45°)	0.636	0.827	Όχι
11	Loma Prieta (1989)	X'(+90°) + Y'(+90°)	0.636	0.827	Όχι
12	Loma Prieta (1989)	X+Y	1.273	1.654	Όχι
13	Northridge (1994) LakeHughes #9	X+Y	0.695	0.911	Όχι
14	Northridge (1994) LakeHughes #9	X'(+45°) + Y'(+45°)	0.695	0.911	Όχι
15	Northridge (1994) LakeHughes #9	X'(+90°) + Y'(+90°)	0.695	0.911	Όχι
16	Northridge (1994) LakeHughes #9	X+Y	1.390	1.823	Όχι
17	Northridge (1994) Los Angeles WonderlandAve.	X+Y	0.254	0.389	Όχι
18	Northridge (1994) Los Angeles WonderlandAve.	X'(+45°) + Y'(+45°)	0.254	0.389	Όχι
19	Northridge (1994) Los Angeles WonderlandAve.	X'(+90°) + Y'(+90°)	0.254	0.389	Όχι
20	Northridge (1994) Los Angeles WonderlandAve.	X+Y	0.507	0.778	Όχι
21	Kozani,Greece (1995)	X+Y	0.735	0.503	Όχι
22	Kozani,Greece (1995)	X'(+45°) + Y'(+45°)	0.735	0.503	Όχι
23	Kozani,Greece (1995)	X'(+90°) + Y'(+90°)	0.735	0.503	Όχι
24	Kozani,Greece (1995)	X+Y	1.469	1.006	Όχι

7.2 Εξέταση της συμπεριφοράς ως προς τις μετακινήσεις

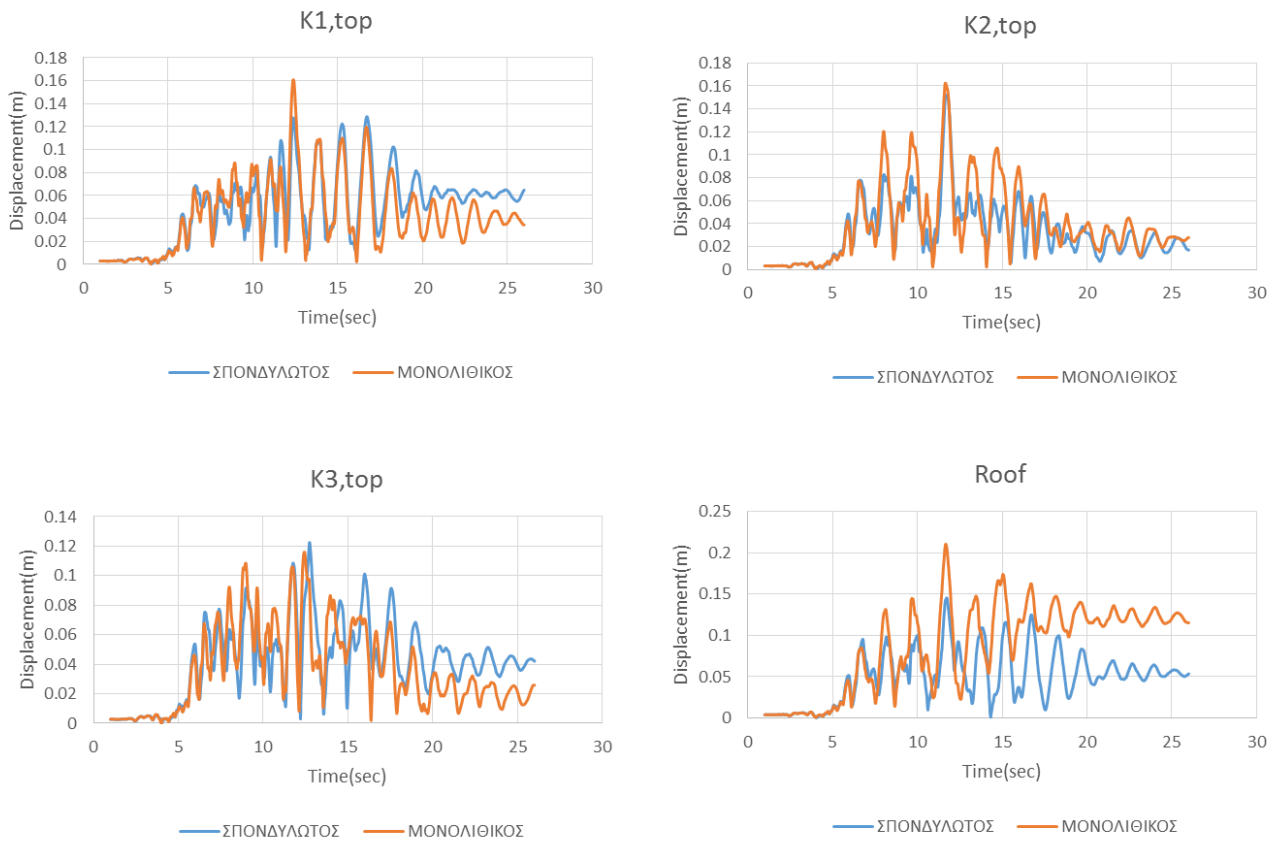
Στα Σχήματα 7-1 έως 7-6 απεικονίζονται οι ιστορίες της συνισταμένης μετακίνησης ($d=(d_x^2+d_y^2)^{0.5}$) στις διευθύνσεις Χ (1) και Υ (2) του κιοκράνου των σπονδυλωτών κίωνων και της ανωδομής τα κιοστοιχίας για τις προαναφερθείσες *κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις*. Για λόγους σύγκρισης παρουσιάζονται στο ίδιο διάγραμμα τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τους μονολιθικούς κίονες ισοδύναμης γεωμετρίας. Το σημείο ελέγχου για τη μετακίνηση του κιοκράνου είναι ο κόμβος στο κέντρο της ανώτερης επιφάνειάς (κορυφή) του, ενώ για την ανωδομή καταγράφεται η μετακίνηση του κέντρου βάρους της.



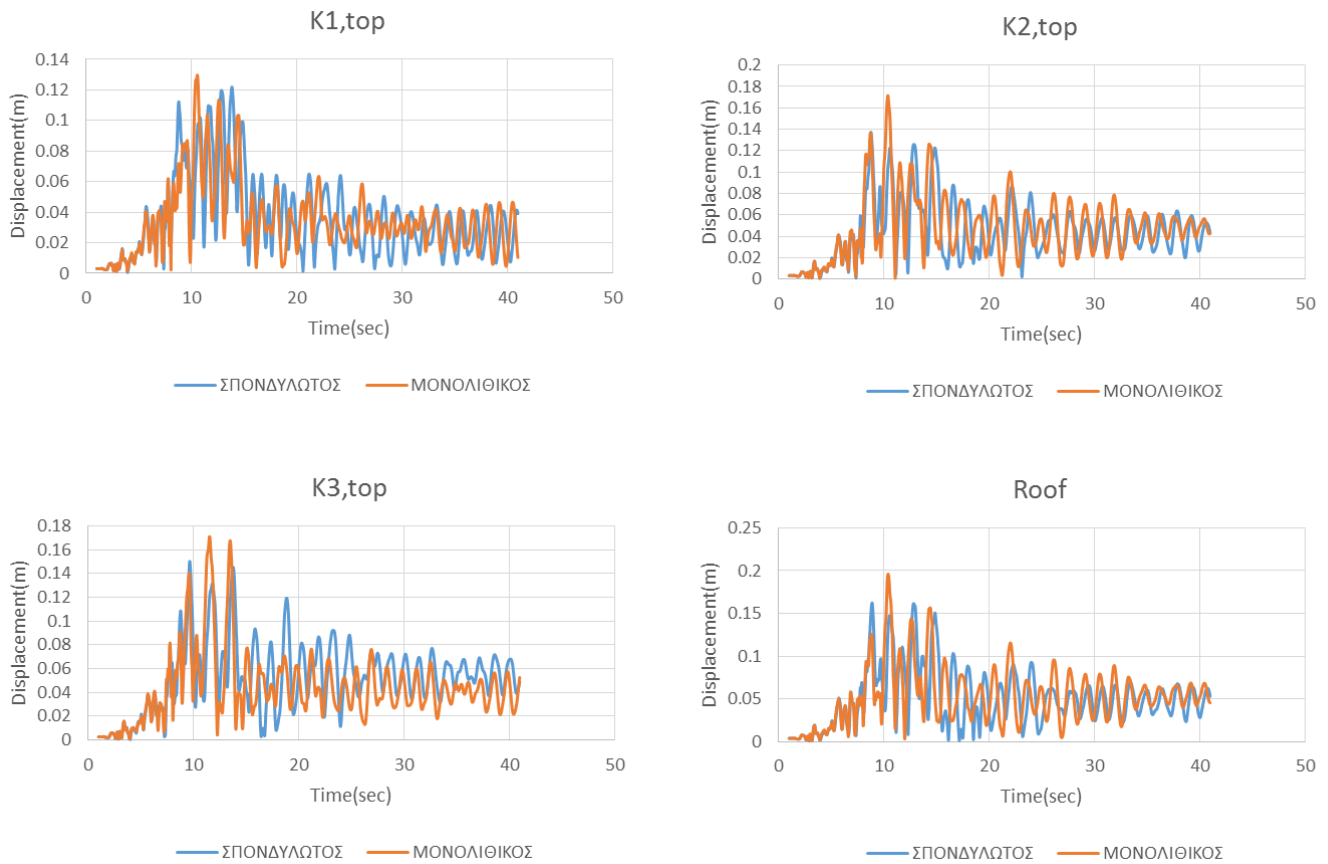
Σχήμα 7-1: Σύγκριση ιστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Tabas, Iran (1978)**, κανονικοποιημένη διεγέρση, διαξονική (Χ+Υ) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.275g$, $PGA(T)=0.277g$



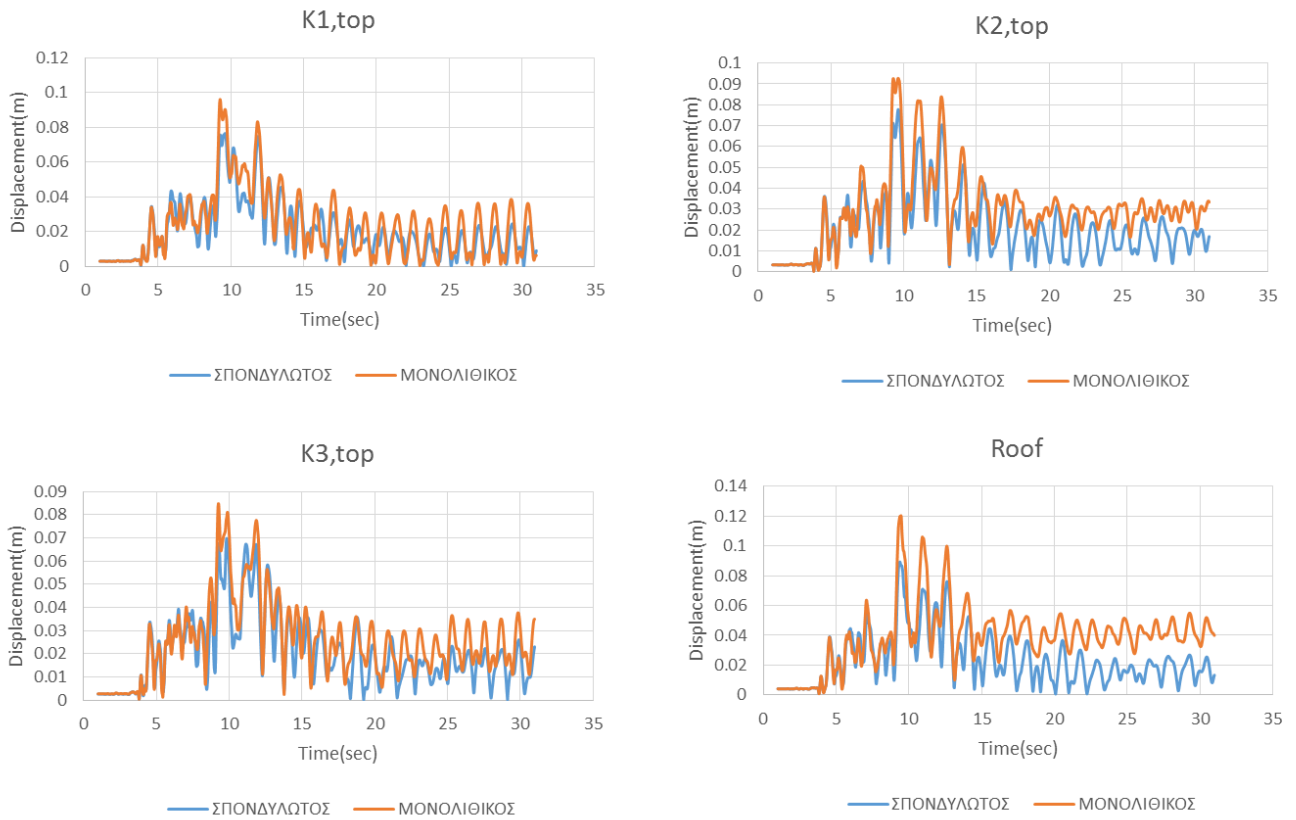
Σχήμα 7-2: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Campano Lugano, Italy (1980)**, κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.144g$, $PGA(T)=0.167g$



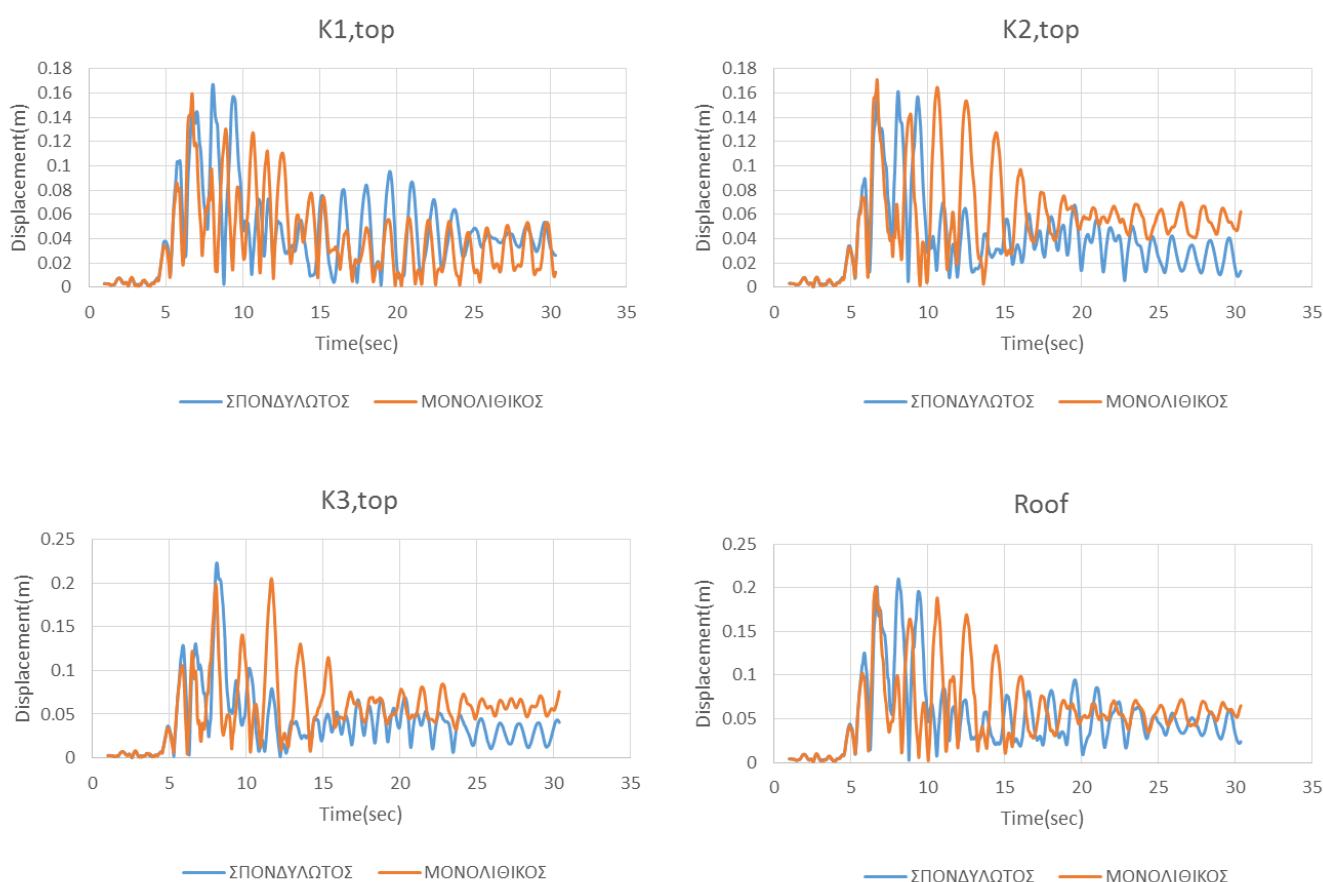
Σχήμα 7-3: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίονων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Loma Prieta, California, USA** (1989), κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.636g$, $PGA(T)=0.827g$



Σχήμα 7-4: Σύγκριση χρονιοιστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Northridge, California, USA (1994)**, καταγραφή **Lake Hughes #9**, κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.695g$, $PGA(T)=0.911g$



Σχήμα 7-5: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίονων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Northridge, California, USA (1994)**, καταγραφή **Los Angeles Wonderland Ave.**, κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L) = 0.254g$, $PGA(T) = 0.389g$



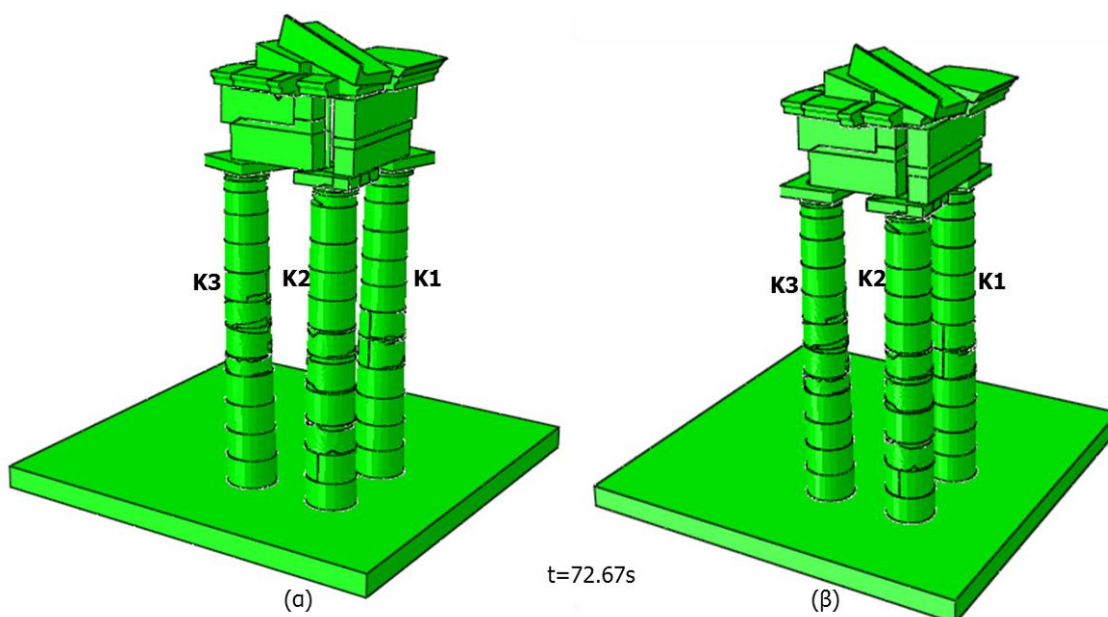
Σχήμα 7-6: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίονων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Kozani, Greece (1995)**, κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (Χ+Υ) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.735g$, $PGA(T)=0.503g$

Αρχικά, παρατηρώντας τις χρονοϊστορίες της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής των κίονων και της ανωδομής, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι αριθμητικές αναλύσεις προβλέπουν γενικώς παρόμοια συμπεριφορά για το πολυσπόνδυλο και το μονολιθικό σύμπλεγμα κίονων. Αυτή η ομοιομορφία στην απόκριση των δύο συστημάτων οφείλεται πιθανώς στην ύπαρξη της ανωδομής, η οποία είναι ογκώδης και υποχρεώνει τους σπονδυλωτούς κίονες να συμπεριφερθούν όπως οι αντίστοιχοι μονολιθικοί. Θεωρείται δηλαδή ότι το βάρος της ανωδομής που φέρουν οι πολυσπόνδυλοι κίονες περιορίζει τη δυνατότητα των σπονδύλων να αποκολληθούν μεταξύ τους και να λικνιστούν κατά τη διάρκεια της σεισμικής κίνησης.

Η δυσμενέστερη απόκριση των δύο κίονων σημειώνεται για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Campano, η οποία οδηγεί στις υψηλότερες τιμές μέγιστων μετακινήσεων αλλά και παραμενουσών παραμορφώσεων. Συγκεκριμένα, για τον κίονα K3 καταγράφεται μέγιστη οριζόντια μετακίνηση 45cm κατά τη διάρκεια αυτής της σεισμικής δόνησης, ενώ για τους κίονες K1 και K2 η αντίστοιχη τιμή φτάνει τα 35cm περίπου. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν και τους μονολιθικούς κίονες.

Οι μόνιμες μετακινήσεις κατά το τέλος του σεισμικού κραδασμού είναι μικρότερες αλλά σημαντικές αφού φτάνουν τα 15cm και 25cm στην περίπτωση του πολυσπόνδουλου κίονα K1 και K3 αντίστοιχα. Οι αντίστοιχοι μονολιθικοί κίονες εμφανίζουν ίδια ή μικρότερη τιμή παραμένουσας μετακίνησης (γύρω στα 13cm για το μονολιθικό κίονα K3).

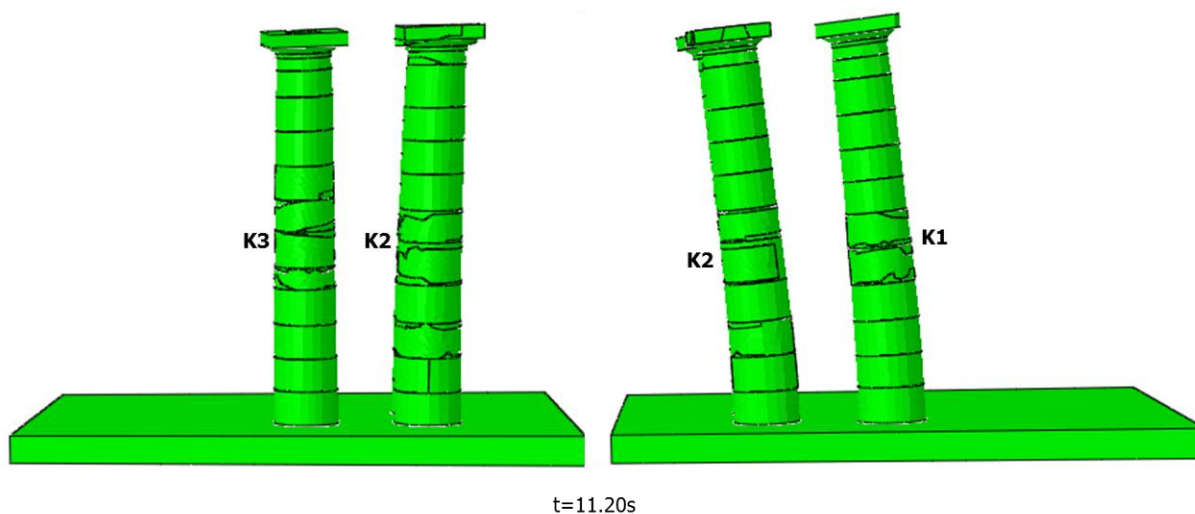
Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα, δε διαφοροποιούνται ουσιαστικά ως προς το μέγεθός τους οι μέγιστες μετακινήσεις κατά τη διάρκεια των σεισμικών δονήσεων για τους σπονδυλωτούς και τους μονολιθικούς κίονες. Ως προς τις μόνιμες μετακινήσεις, άλλοτε παρατηρούνται μεγαλύτερες μόνιμες μετακινήσεις στους πολυσπόνδουλους κίονες και άλλοτε στους μονολιθικούς. Στις περισσότερες περιπτώσεις η διαφορά μεταξύ των δύο κίωνων δεν είναι σημαντική. Στην περίπτωση των πολυσπόνδουλων κίωνων, η μεγαλύτερη τιμή είναι αναμενόμενη λόγω των ολισθήσεων που συμβαίνουν μεταξύ των σπονδύλων. Γενικά, η κιονοστοιχία δεν καταρρέει σε κανένα σεισμικό κραδασμό από αυτούς που εξετάστηκαν. Μάλιστα, στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή επιβιώνει με μέγιστη παραμένουσα μετακίνηση των κιονοκράνων της τάξης των 5cm. Παρακάτω παρουσιάζεται η τελική παραμορφωμένη εικόνα του συμπλέγματος των πολυσπόνδουλων και μονολιθικών κίωνων K1, K2 και K3 όταν η βάση τους υπόκειται στην κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Camrano.



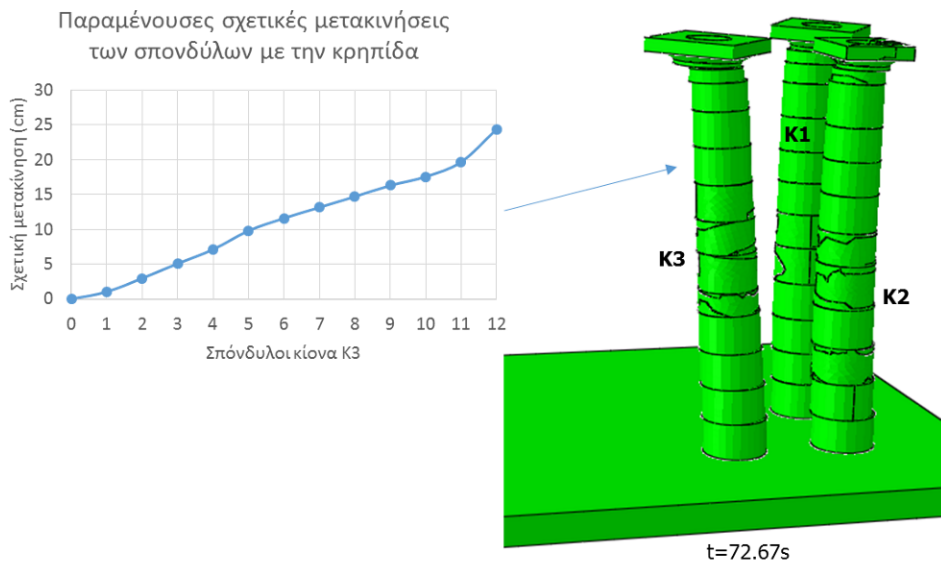
Εικόνα 7-2: Παραμορφωμένη εικόνα του συμπλέγματος των (α) πολυσπόνδουλων και (β) μονολιθικών κίωνων στο τέλος της σεισμικής διέγερσης Camrano (παραμορφωμένη κλίμακα:2.0)

Για τους πολυσπόνδουλους κίονες παρατηρούνται έντονη στρόφη των κιονοκράνων (κίονες Κ1 και Κ3) , καθώς και ολισθήσεις μεταξύ των σπονδύλων (κίονας Κ2). Σημαντικότερες ολισθήσεις στα ψηλότερα τμήματα του κίονα είναι αναμενόμενες διότι ο λόγος των οριζόντιων προς κατακόρυφων δράσεων σε αυτά τα στρώματα είναι μεγαλύτερος). Επομένως, η σεισμική καταγραφή Camrano, η οποία είναι μια από τις πιο μακροπερίοδες σεισμικές διεγέρσεις από αυτές που εξετάστηκαν, ενεργοποίησε τις διεπιφάνειες στο ανώτερο κυρίως τμήμα των κίωνων. Στους μονολιθικούς κίονες τα μεγέθη αυτά είναι μικρότερα. Και στα δύο συστήματα προκαλείται αποδιοργάνωση της ανωδομής με σημαντικές ολισθήσεις των ασύνδετων λίθων του επιστυλίου και της ζωφόρου.

Παρατίθενται τέλος, σε παραμορφωμένη κλίμακα για εποπτικούς λόγους, δύο στιγμιότυπα της κιονοστοιχίας. Το ένα κατά τη διάρκεια της έντονης απόκρισής της, περί τα 11s, όπου διακρίνεται ο λικνισμός των σπονδύλων, που ξεκινά από το 2^ο σπόνδυλο, καθώς και ολισθήσεις των ανώτερων μελών. Το 2^ο στιγμιότυπο απεικονίζει την τελική παραμορφωμένη εικόνα της κιονοστοιχίας και συνοδεύεται από ένα διάγραμμα που δείχνει σε ποσοτικό επίπεδο τις μόνιμες σχετικές ολισθήσεις των σπονδύλων του κίονα Κ3 που διακρίνονται. Ο άξονας των τετμημένων του διαγράμματος αυτού περιλαμβάνει τους αριθμούς των σπονδύλων του κίονα ξεκινώντας από τη βάση (Σπ. Νο1) και καταλήγωντας στο κιονόκρανο (No12 στο διάγραμμα).

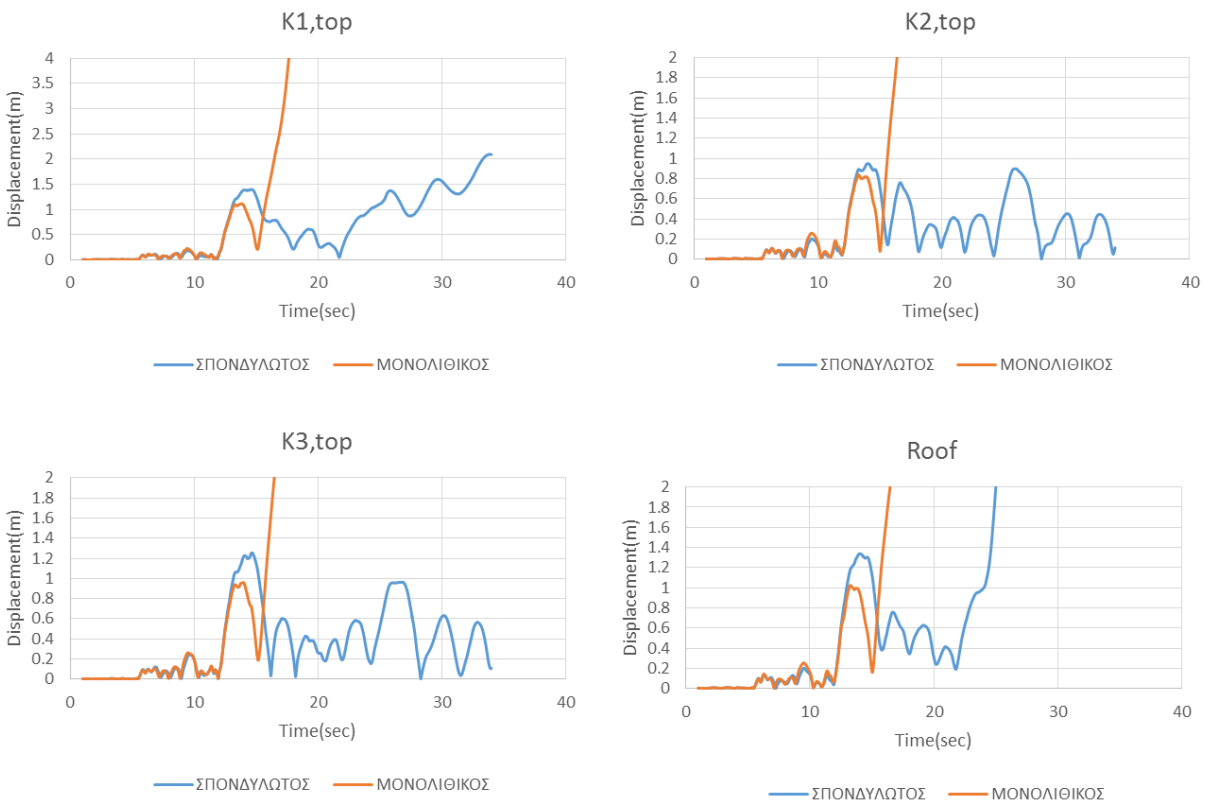


Εικόνα 7-3: Παραμορφωμένη εικόνα της πολυσπόνδυλης κιονοστοιχίας κατά την ισχυρή της κίνηση υπό τη διέγερση της βάσης της με την κανονικοποιημένη σεισμική δόνηση Camrano (συντελεστής παραμορφωμένης κλίμακας: 5.0)

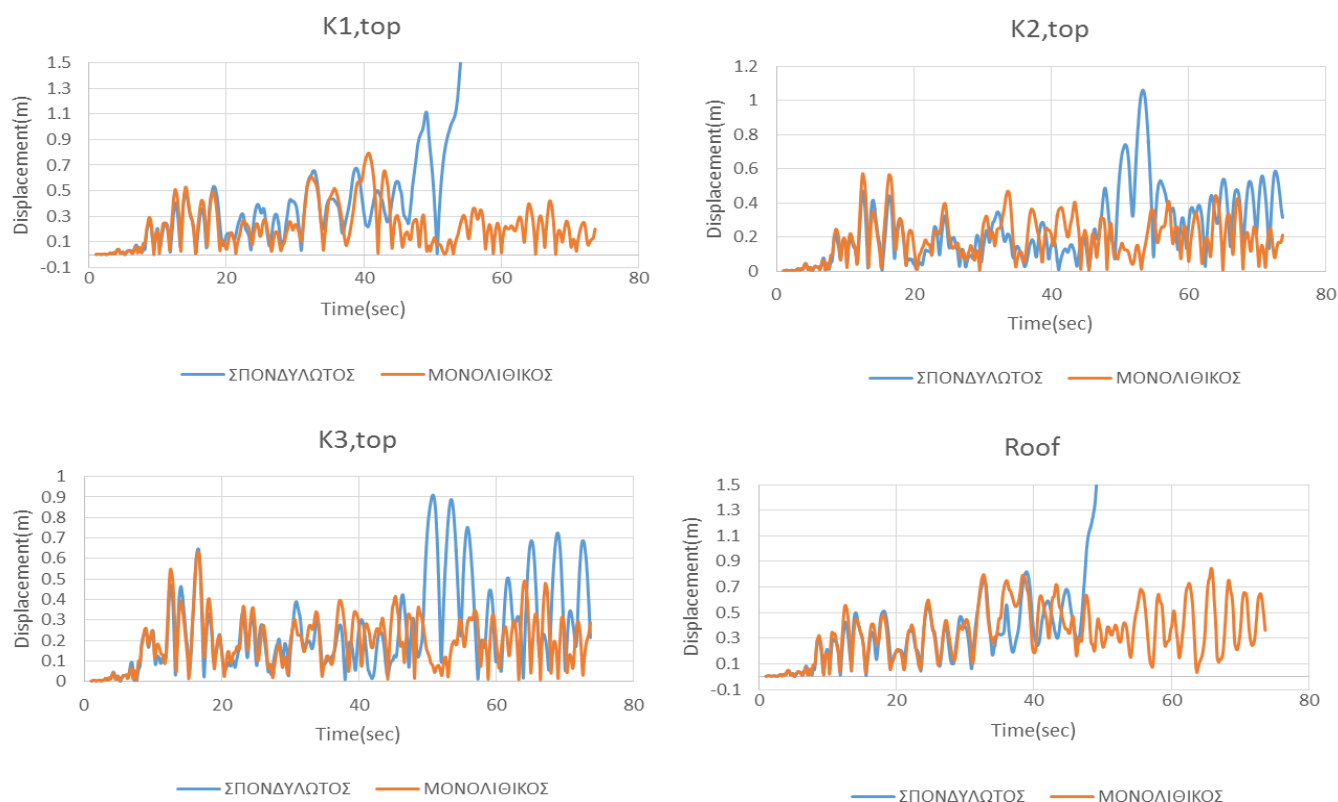


Σχήμα 7-7: Παραμένουσες σχετικές μετακινήσεις των σπονδύλων των κίωνων για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Camrano (συντελεστής παραμορφωμένης κλίμακας: 5.0)

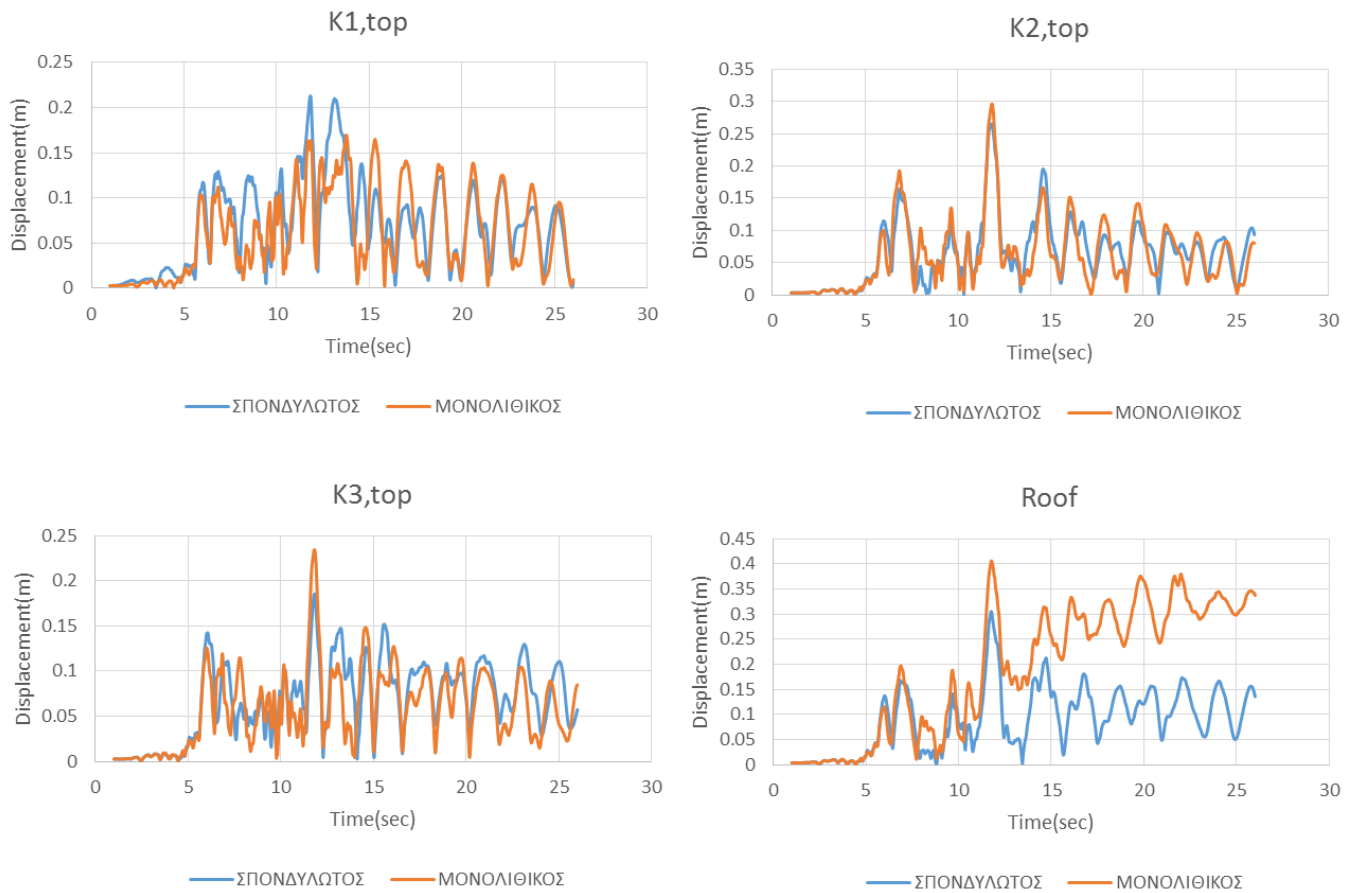
Ακολούθως, εξετάζεται η συμπεριφορά των κίωνων για τις αντίστοιχες διπλάσιες σεισμικές διεγέρσεις.



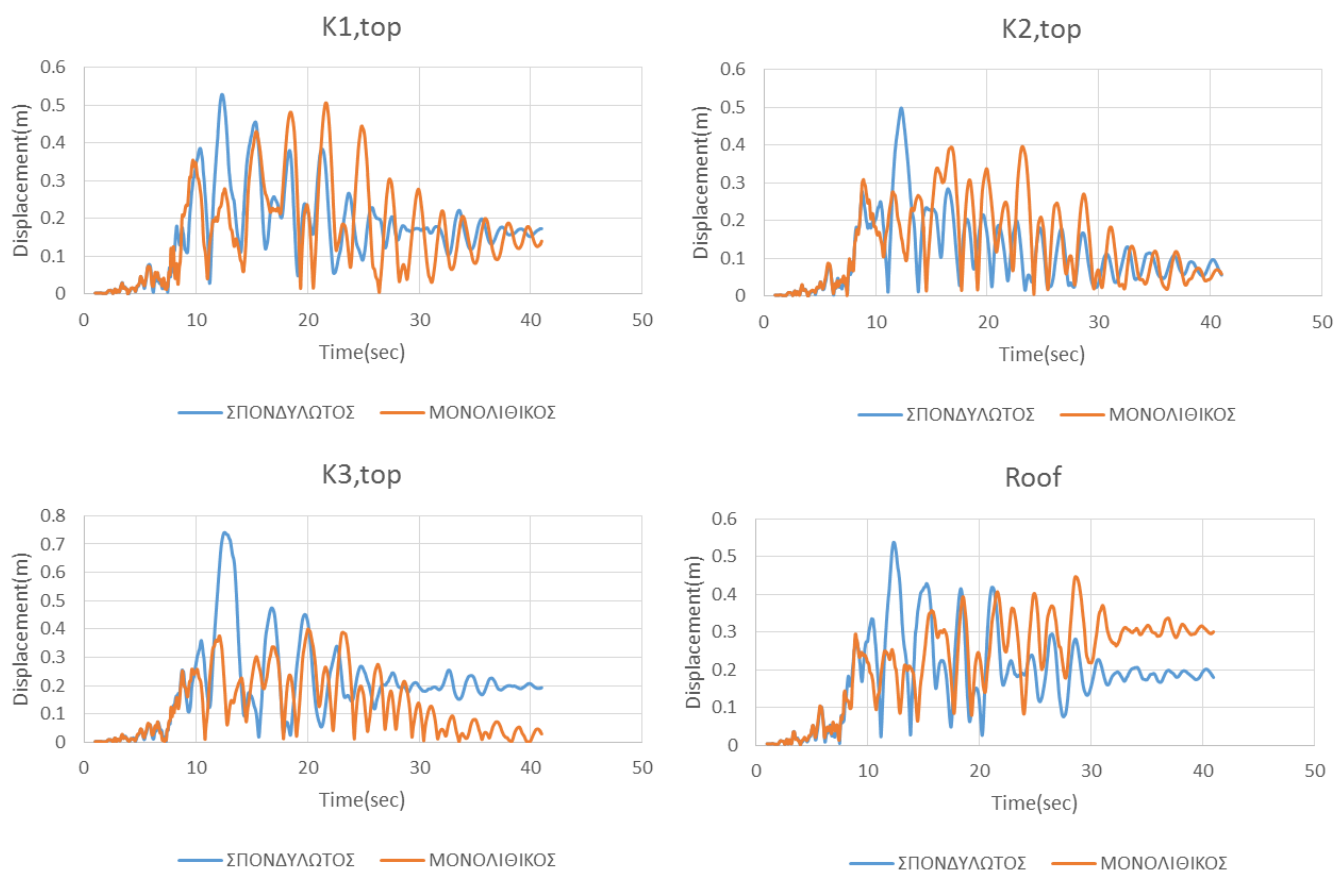
Σχήμα 7-8: Σύγκριση χρονιοιστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Tabas, Iran (1978)**, διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.55g$, $PGA(T)=0.554g$



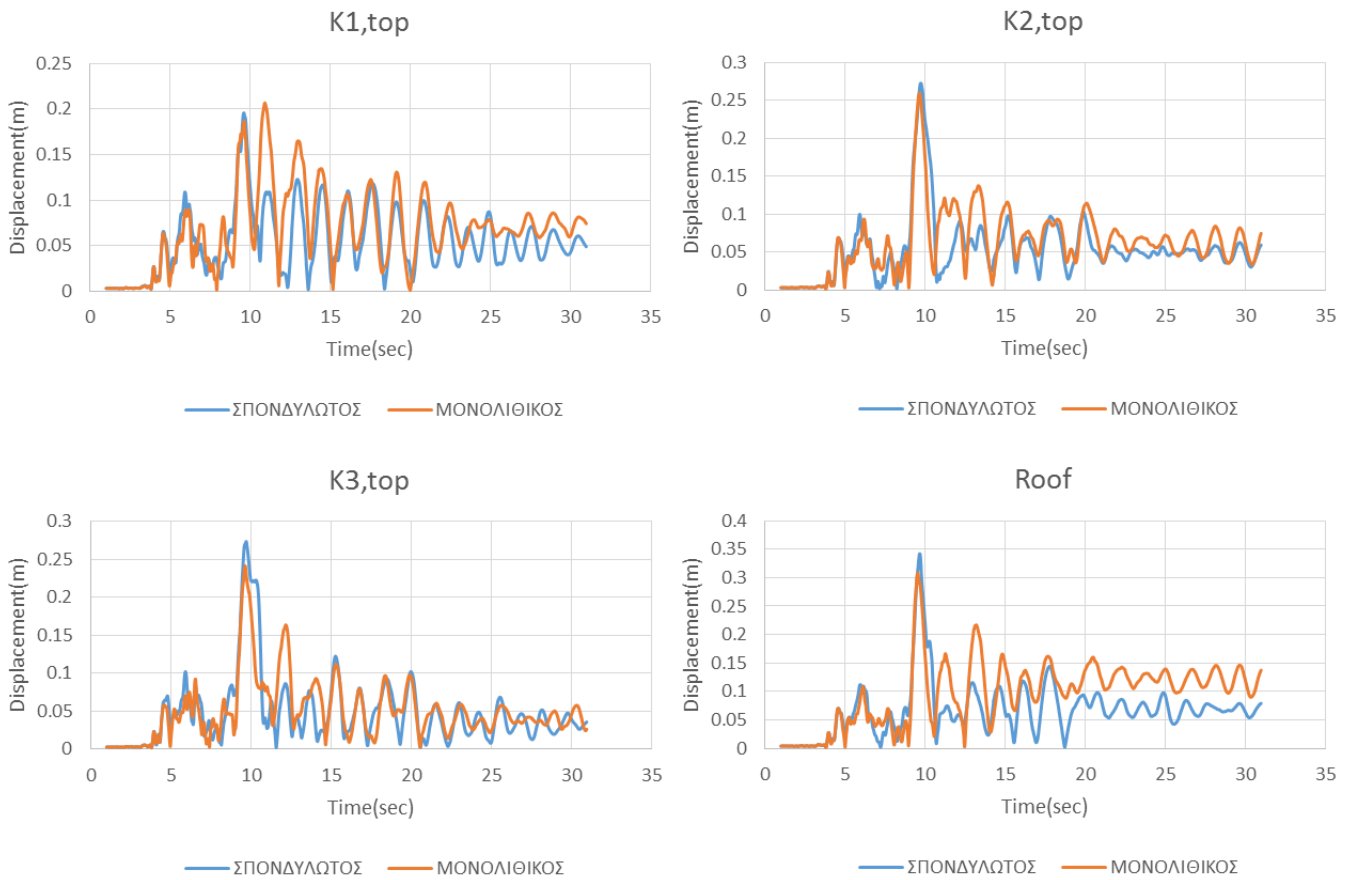
Σχήμα 7-9: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κionoκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Campano** Lugano, Italy (1980), διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=0.288g$, $PGA(T)=0.334g$



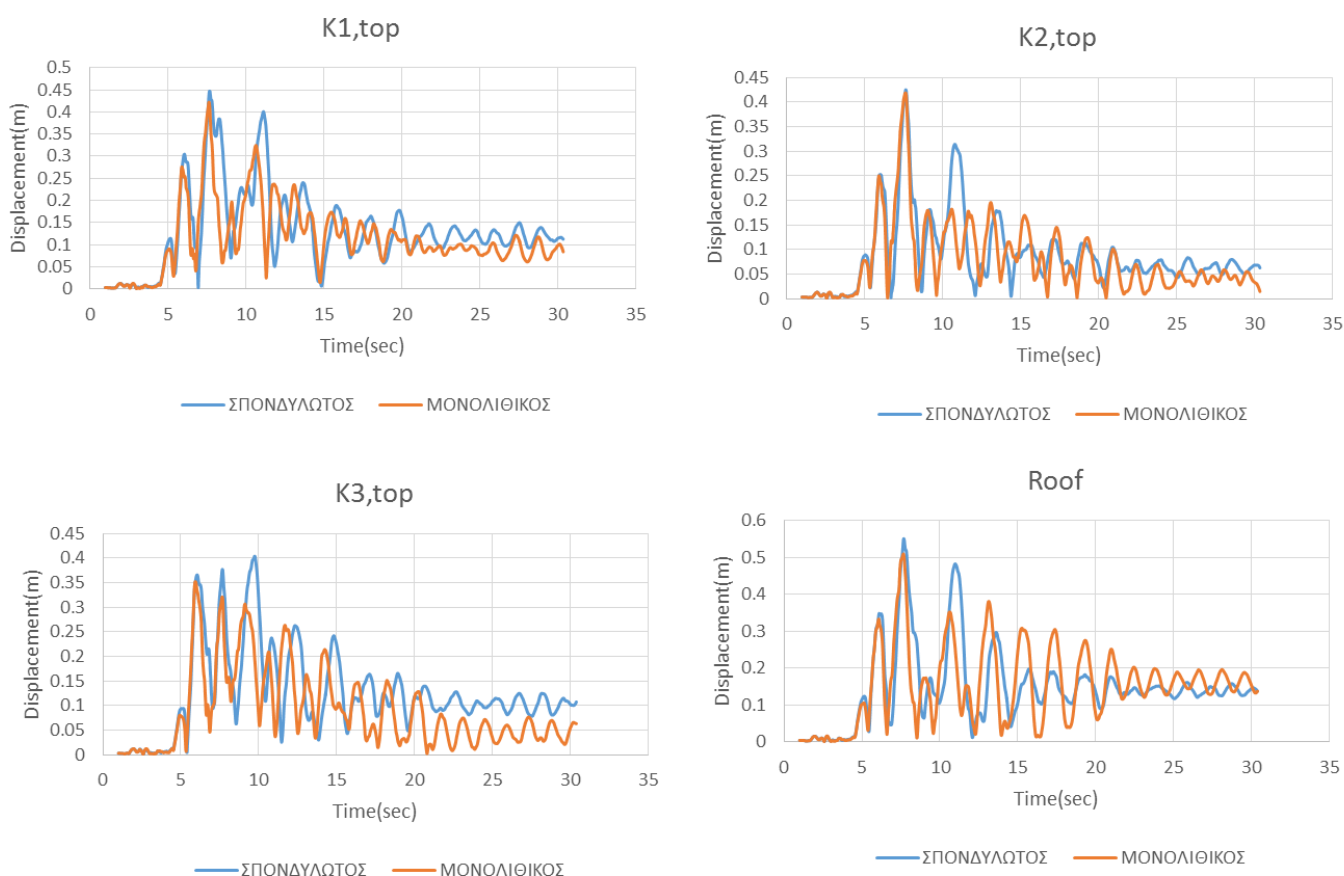
Σχήμα 7-10: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίονων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Loma Prieta, California, USA (1989)**, διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (Χ+Υ) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=1.272g$, $PGA(T)=1.654g$



Σχήμα 7-11: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κionoκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Northridge, California, USA (1994)**, καταγραφή **Lake Hughes #9**, διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=1.39g$, $PGA(T)=1.822g$



Σχήμα 7-12: Σύγκριση χρονιοιστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίονων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Northridge, California, USA (1994)**, καταγραφή **Los Angeles Wonderland Ave.**, διπλάσια κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (X+Y) οριζόντια επιπόνηση, $PGA (L) = 0.508g$, $PGA (T) = 0.778g$

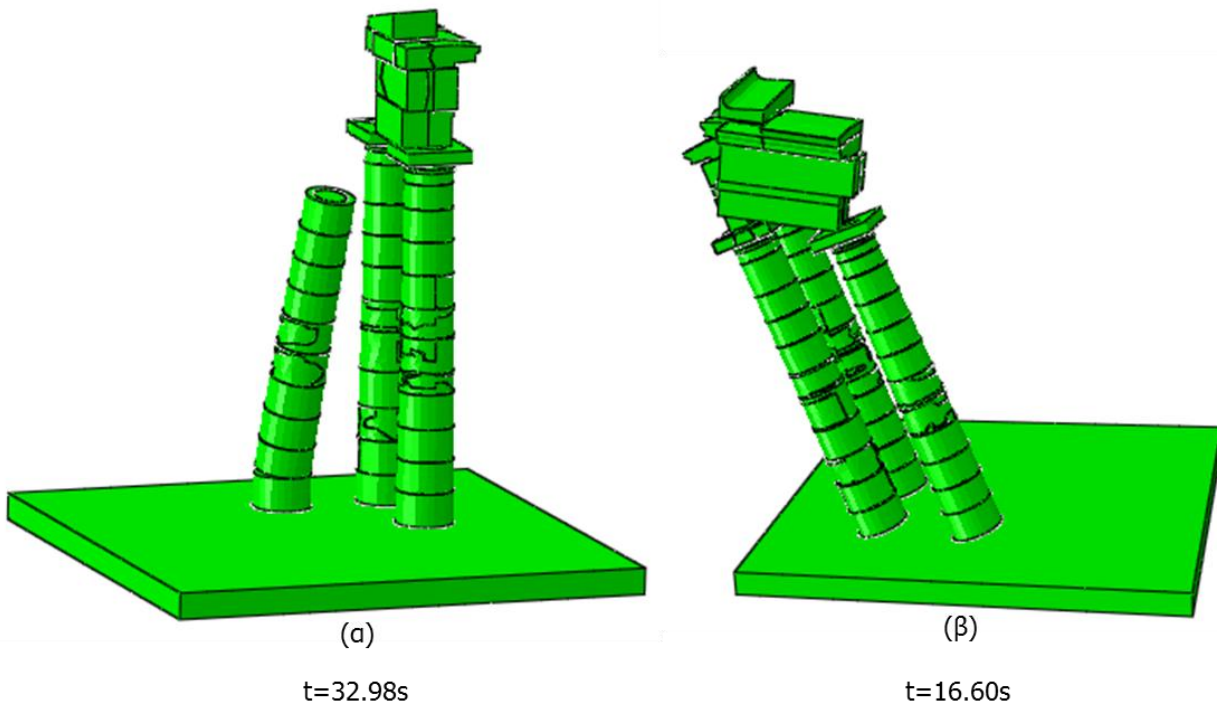


Σχήμα 7-13: Σύγκριση χρονιοιστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων και της ανωδομής αυτών (Roof): **Kozani, Greece (1995)**, διπλάσιο κανονικοποιημένη διέγερση, διαξονική (Χ+Υ) οριζόντια επιπόνηση, $PGA(L)=1.47g$, $PGA(T)=1.00g$

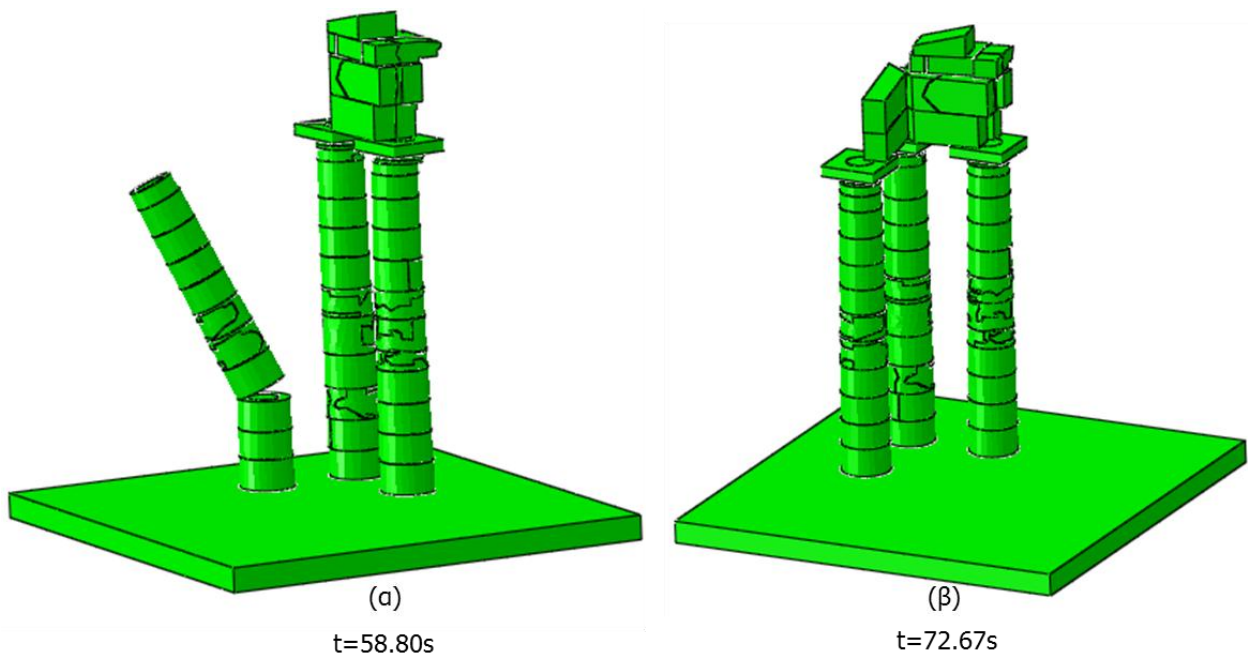
Όπως προκύπτει από τις αριθμητικές επιλύσεις, μέρος ή το σύνολο της κιονοστοιχίας καταρρέει για το διπλάσιο επίπεδο έντασης σε ορισμένες περιπτώσεις σεισμικών διεγέρσεων. Επιπλέον, όπως ήταν αναμενόμενο, η επιβολή διπλάσιας φόρτισης οδήγησε σε πολλαπλάσιες προκαλούμενες μετακινήσεις της κιονοστοιχίας. Οι παρατηρήσεις αυτές αφορούν τόσο τους πολυσπόνδουλους όσο και τους ισοδύναμους μονολιθικούς κίονες.

Στις εικόνες 7-4 και 7-5 δείχνονται στιγμιότυπα της κιονοστοιχίας κατά τη διάρκεια των διπλάσιων σεισμικών διεγέρσεων Tabas και Cambrano, για τις οποίες σημειώθηκε ανατροπή μελών της. Η μακροπεριοδή σεισμική καταγραφή Cambrano και η καταγραφή Tabas που περιέχει παλμούς κατευθυντικότητας, σε συνδυασμό με το αυξημένο επίπεδο έντασης, οδήγησαν σε κατάρρευση.

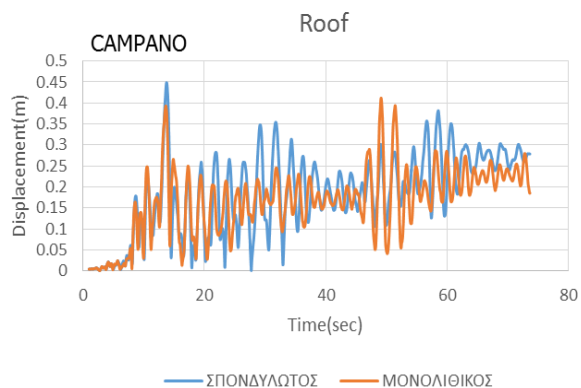
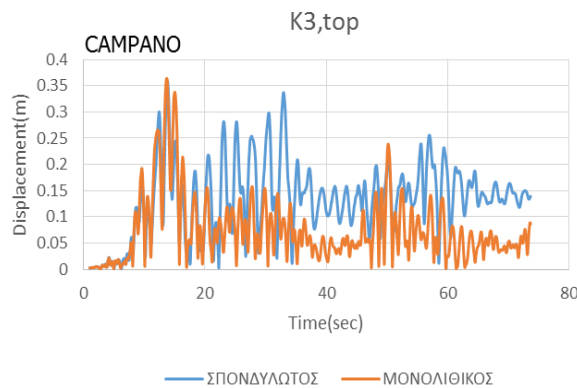
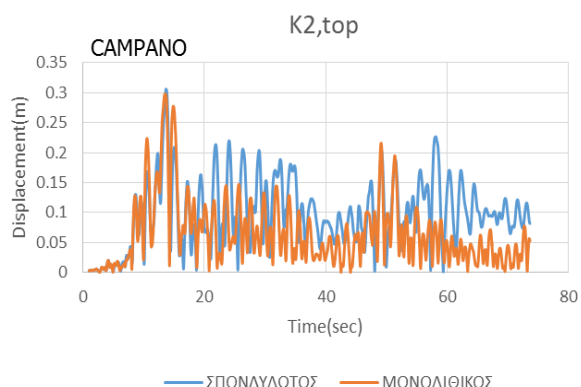
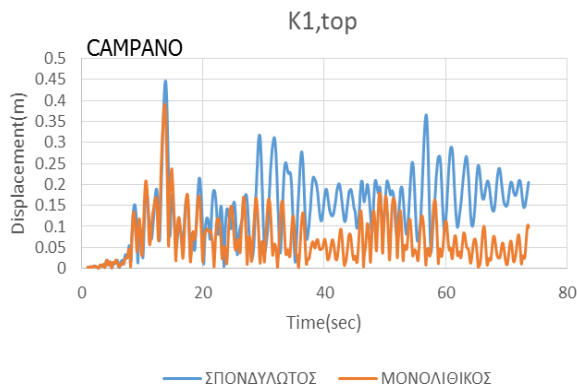
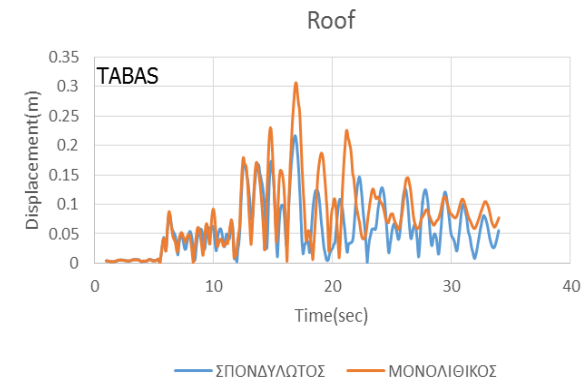
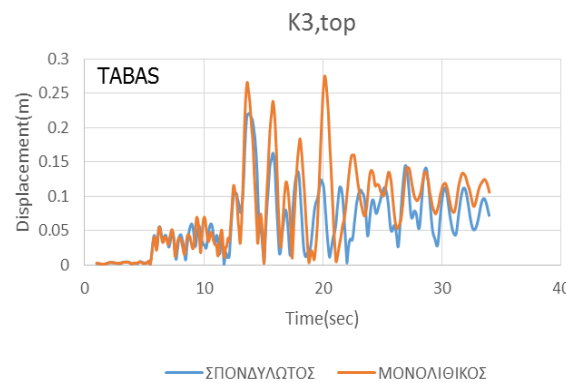
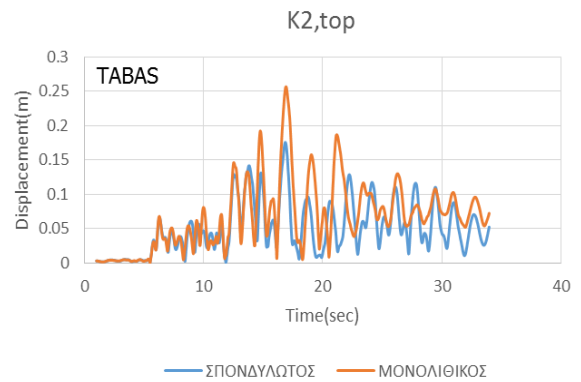
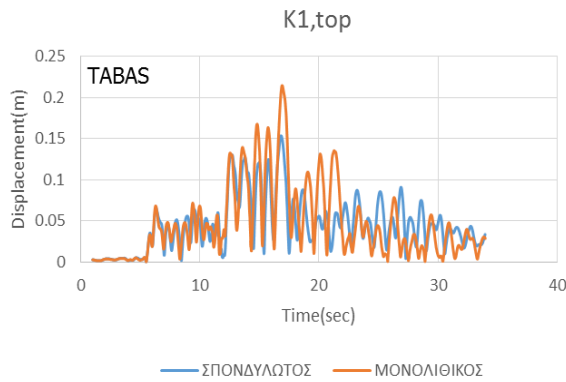
Σαν τελικό στάδιο εργασίας, επιβλήθηκαν στο οριζόντιο επίπεδο της βάσης της κιονοστοιχίας οι επιλεχθείσες κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις σε διευθύνσεις στραμμένες κατά 45° και 90° σε σχέση με τους αρχικούς άξονες Χ και Υ. Τα προκύπτοντα διαγράμματα της συνισταμένης μετακίνησης της κορυφής των κίωνων και της ανωδομής τους παρουσιάζονται συνοπτικά στα ακόλουθα σχήματα.

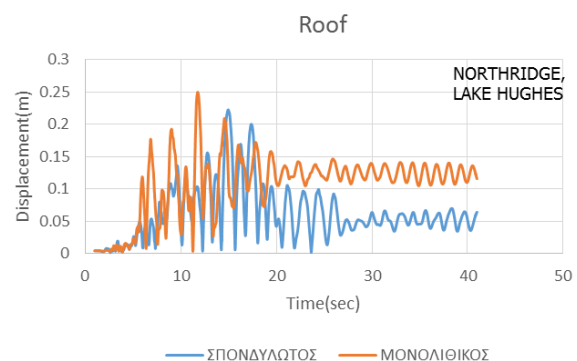
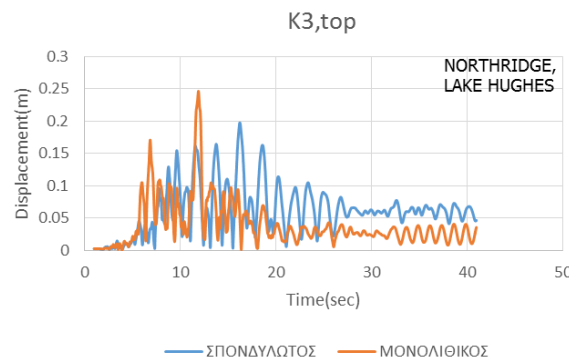
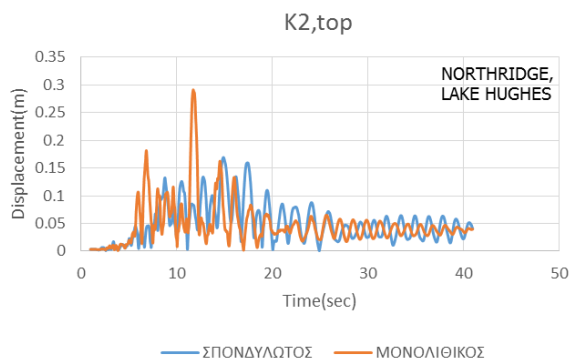
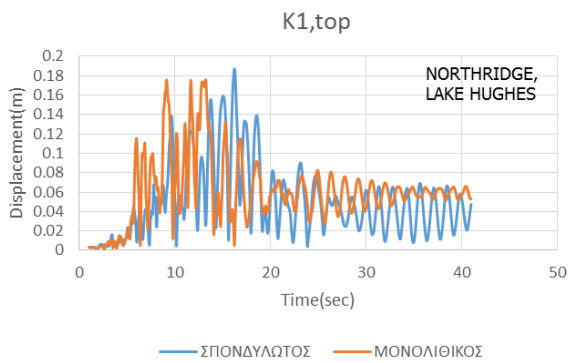
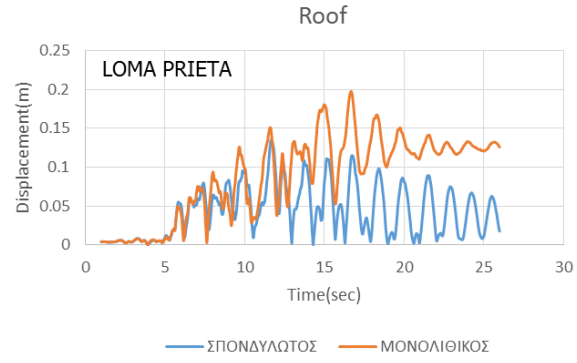
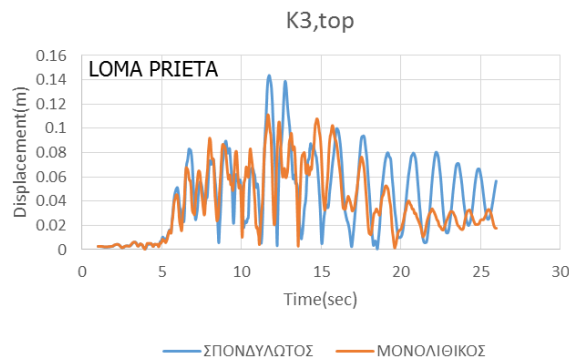
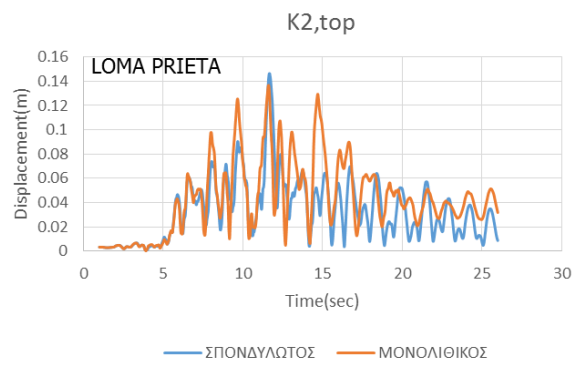
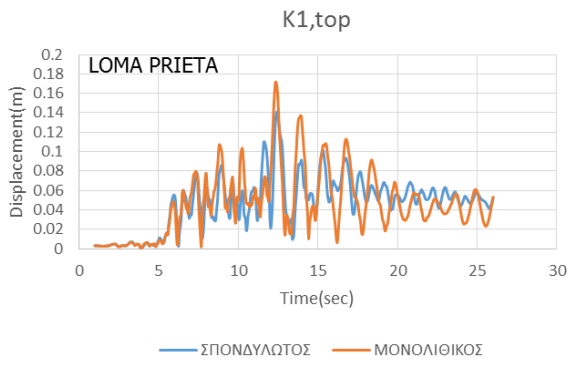


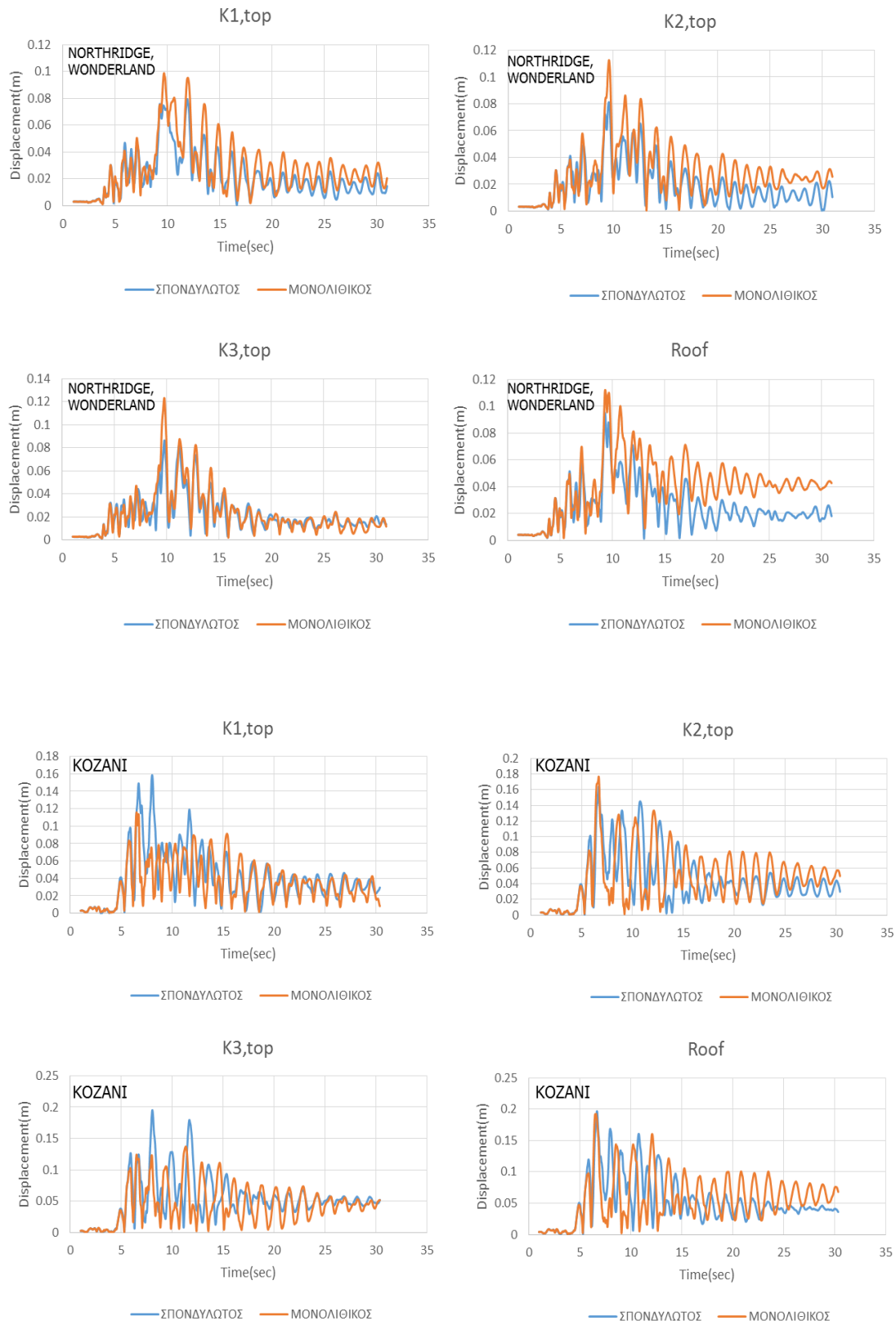
Εικόνα 7-4: (α) Τελική παραμορφωμένη εικόνα του συμπλέγματος των πολυσπόνδυλων κίονων και (β) Κατάρρευση του συμπλέγματος των μονολιθικών κίονων για τη διπλάσια κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Tabas



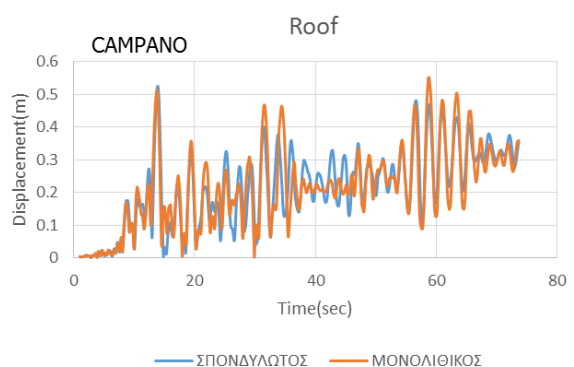
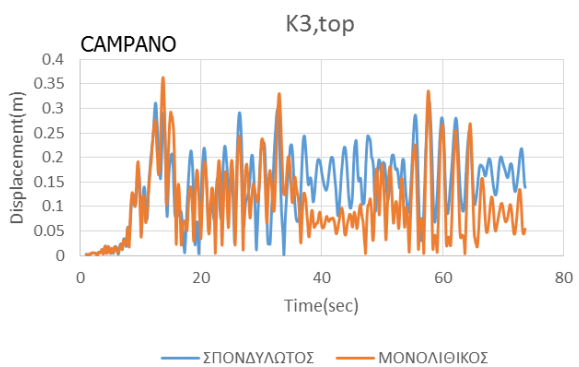
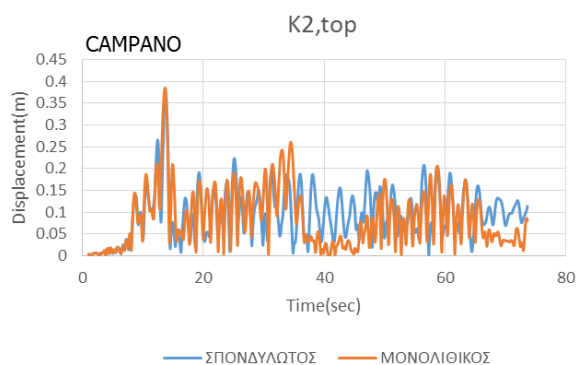
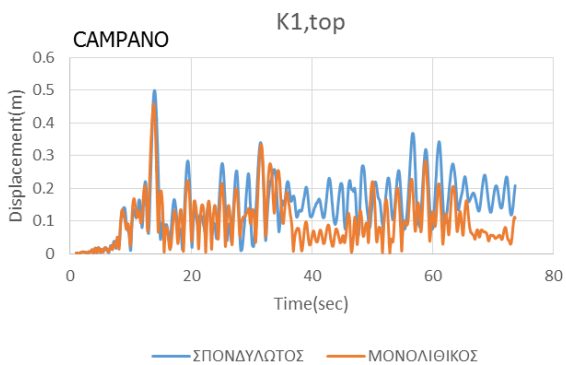
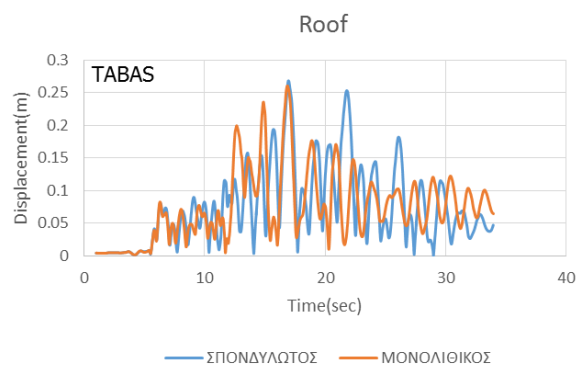
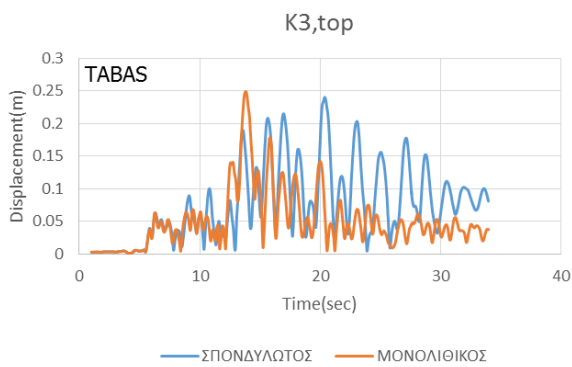
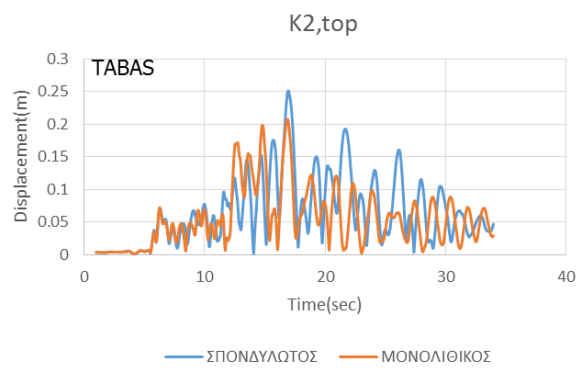
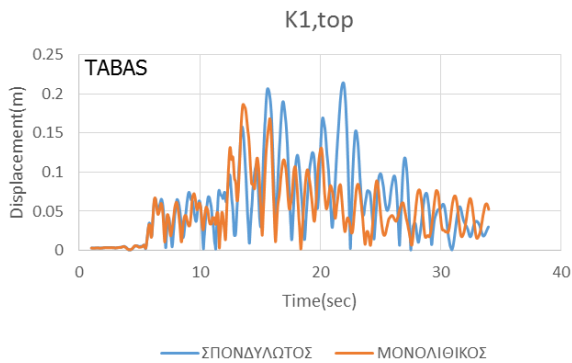
Εικόνα 7-5: (α) Κατάρρευση τμήματος του συμπλέγματος των πολυσπόνδυλων κίονων και (β) Τελική παραμορφωμένη εικόνα του συμπλέγματος των μονολιθικών κίονων για τη διπλάσια κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Campano

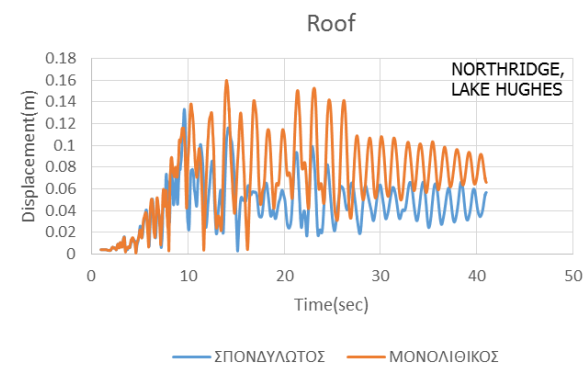
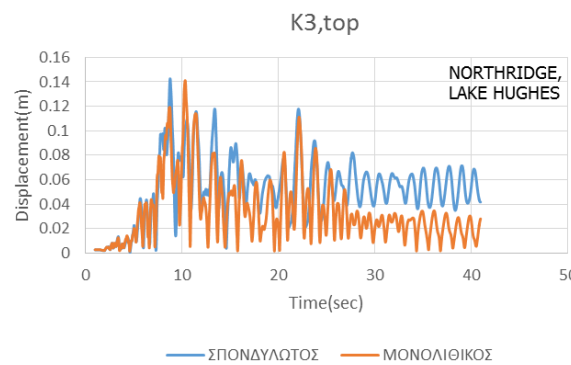
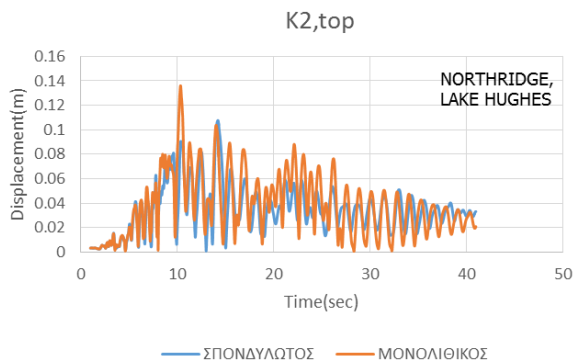
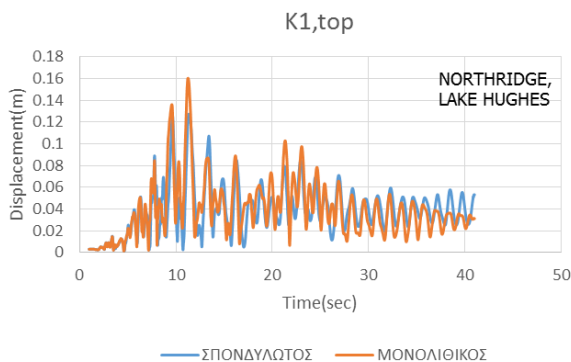
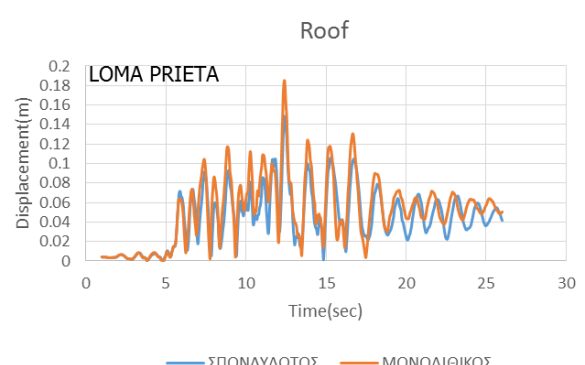
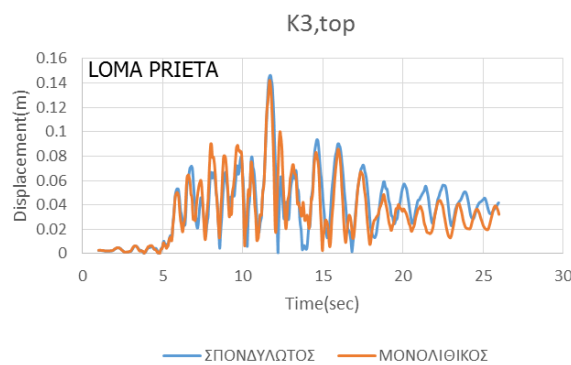
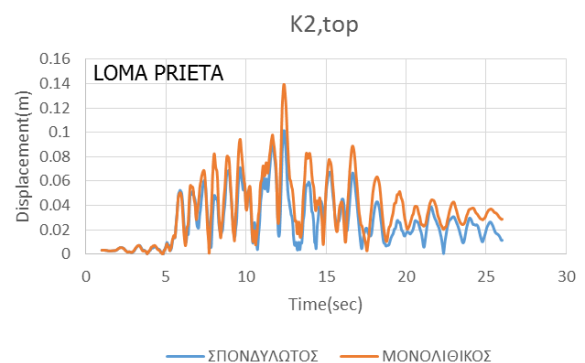
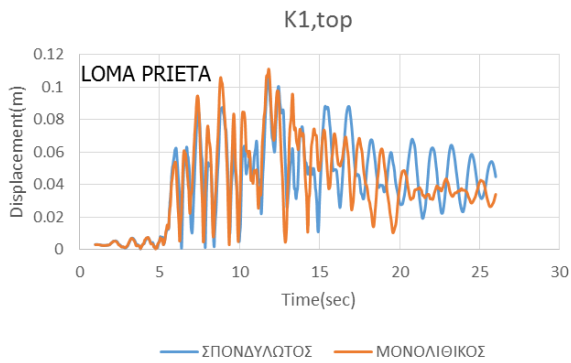


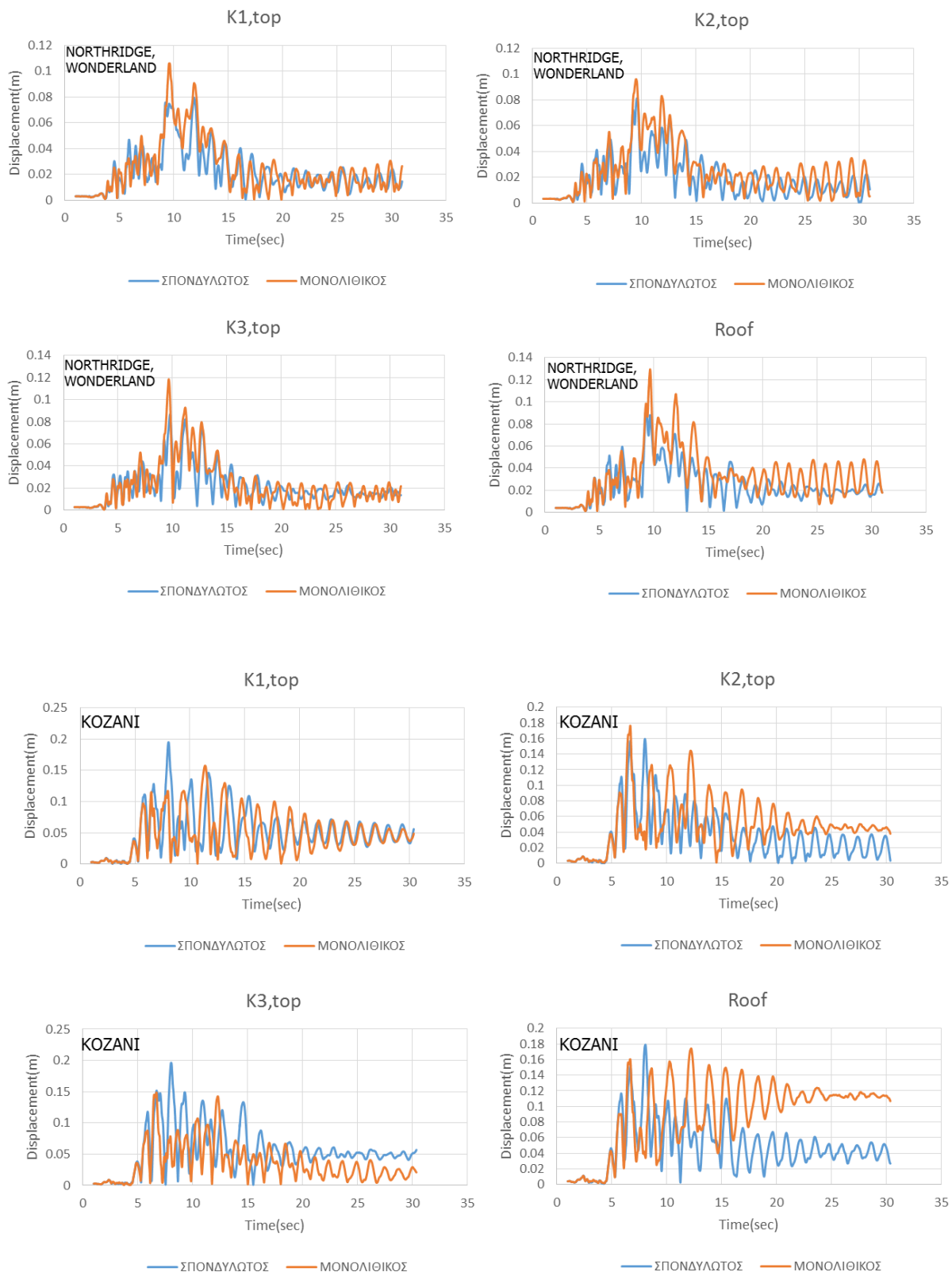




Σχήμα 7-14: Σύγκριση χρονοϊστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων και της ανωδομής αυτών (Roof) για τις έξι εξεταζόμενες κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις με στροφή των διευθύνσεών τους κατά 45°







Σχήμα 7-16: Σύγκριση χρονοιστοριών της συνισταμένης μετακίνησης του κιονοκράνου των σπονδυλωτών και των ισοδύναμων μονολιθικών κίωνων και της ανωδομής αυτών (Roof) για τις έξι εξεταζόμενες κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις με στροφή των διευθύνσεών τους κατά 90°

Συγκρίνοντας τα αντίστοιχα διαγράμματα των μετακινήσεων για διευθύνσεις σεισμικής φόρτισης σύμφωνα με το αρχικά ορισμένο σύστημα αξόνων (βλ. Εικόνα 7-1) και για διευθύνσεις στραμμένες σε σχέση με το σύστημα αυτό, προκύπτει ότι η τάξη μεγέθους των μεγεθών δε μεταβάλλεται λόγω της στροφής των αξόνων της σεισμικής φόρτισης. Οι τιμές τόσο των μέγιστων όσο και των μόνιμων μετακινήσεων δε διαφοροποιούνται ουσιαστικά. Επιπλέον, για κανέναν από αυτούς τους σεισμικούς κραδασμούς δεν σημειώνεται κατάρρευση τμήματος ή του συνόλου της κιονοστοιχίας.

7.3 Εξέταση της συμπεριφοράς ως προς τις τάσεις

7.3.1 Εισαγωγή

Οι κίονες Κ1, Κ2 και Κ3 του ναού του Πύθιου Απόλλωνα απαρτίζονται τόσο από αρχαία μέλη όσο και από συμπληρώματα των αρχαίων κομματιών με νέο λίθο. Όπως και στην περίπτωση του μεμονωμένου κίονα Κ4, αρχαία και νέα μέλη συγκολλώνται μεταξύ τους με κονίαμα. Επιπλέον, χρησιμοποιείται κονίαμα και για τη σύνδεση ορισμένων τμημάτων της ανωδομής. Στο υποκεφάλαιο αυτό εξετάζεται η αναπτυσσόμενη ένταση στις διεπιφάνειες των συνδεόμενων τμημάτων λίθου, λαμβάνοντας ως διατμητική αντοχή την τιμή 100kPa και ως εφελυστική αντοχή τα 500kPa. Ως όριο για τη θλιπτική ένταση θεωρείται η τιμή 12000kPa, που αντιστοιχεί στη θλιπτική αντοχή συγκεκριμένης ποιότητας κονιάματος. Επιλέχθηκε να μελετηθεί ένα τουλάχιστον κομμάτι λίθου από κάθε κίονα καθώς και δύο τμήματα της ανωδομής. Συγκεκριμένα, εξετάζεται ένα κομμάτι που ανήκει στον 5^ο σπόνδυλο του κίονα Κ1, ένα κομμάτι από τον 6^ο σπόνδυλο του κίονα Κ3 και τέσσερα κομμάτια λίθου από τον κίονα Κ2, καθένα από τα οποία ανήκει στους σπονδύλους Νο3, Νο6 και Νο11 καθώς και στον άβακα του κιονοκράνου του κίονα. Στον κίονα Κ2 χρησιμοποιείται κονίαμα σε διάφορες στάθμες καθ' ύψος, ενώ στους υπόλοιπους δύο κίονες της συστοιχίας τα συνδεόμενα τμήματα λίθου συγκεντρώνονται περίπου στο μέσον του ύψους των κίωνων.

7.3.2 Ανάπτυξη τάσεων στις διεπιφάνειες με κονίαμα

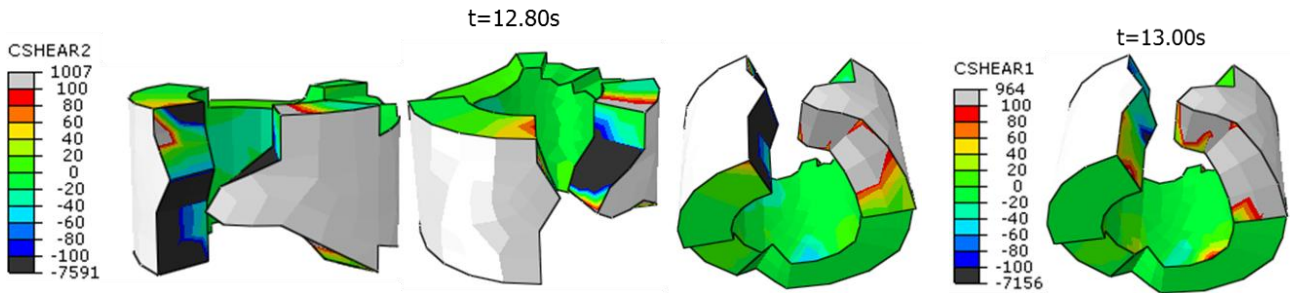
Παρακάτω παρουσιάζονται στιγμιότυπα των προαναφερόμενων κομματιών σπονδύλων τόσο των πολυσπόνδυλων όσο και των μονολιθικών κίωνων κατά τις δυσμενέστερες χρονικές στιγμές της απόκρισης, για τις οποίες αναπτύχθηκε η μέγιστη ένταση και παρατηρήθηκε υπέρβαση των ορίων αντοχής σε σημαντική έκταση σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών επιλύσεων. Αρχικά, ελέγχονται οι εικόνες των αναπτυσσόμενων τάσεων στις επιφάνειες των σπονδύλων που προκύπτουν από τις αριθμητικές επιλύσεις για τις έξι εξεταζόμενες κανονικοποιημένες σεισμικές καταγραφές, οι οποίες αποτελούν και τα βασικά σεισμικά σενάρια για την τοποθεσία του μνημείου. Επιπλέον, παρουσιάζονται διαδοχικά και τα σχετικά αποτελέσματα για τις αντίστοιχες διπλάσιες κανονικοποιημένες σεισμικές διεγέρσεις. Για την κατά το δυνατό πληρέστερη εκτίμηση της σεισμικής απαίτησης σε όρους διατμητικών και ορθών τάσεων, εξετάζεται τέλος η αναπτυσσόμενη ένταση που προκαλείται από τη φόρτιση της βάσης με τους έξι κανονικοποιημένους σεισμικούς κραδασμούς υπό στραμμένες διευθύνσεις.

ΔΙΑΤΜΗΣΗ

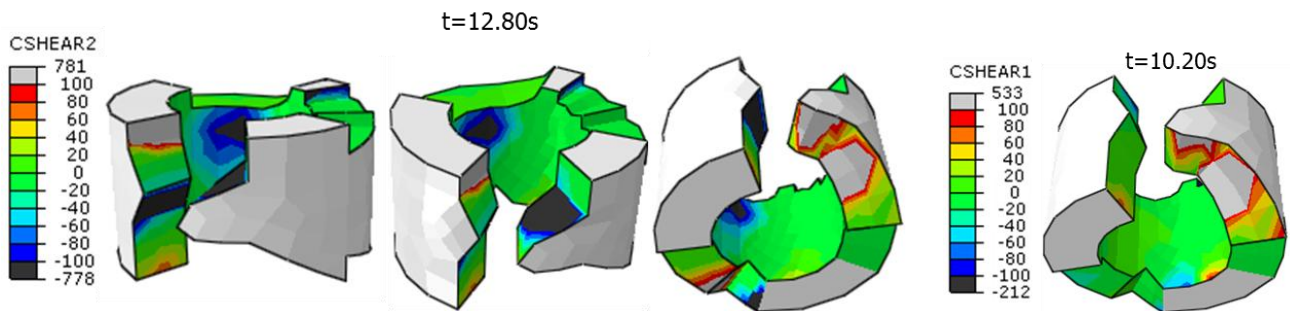
Η παρουσίαση ενδεικτικών αποτελεσμάτων ξεκινά με τις εικόνες διατμητικών τάσεων που αναπτύχθηκαν σε κομμάτια σπονδύλων και των τριών κίωνων κατά τη διέγερση της βάσης των τελευταίων με την κανονικοποιημένη σεισμική καταγραφή Campano, η οποία τους οδήγησε και στις μεγαλύτερες μετακινήσεις (σε σχέση με τις υπόλοιπες καταγραφές που ελέγχθηκαν).

ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 3^{ος}

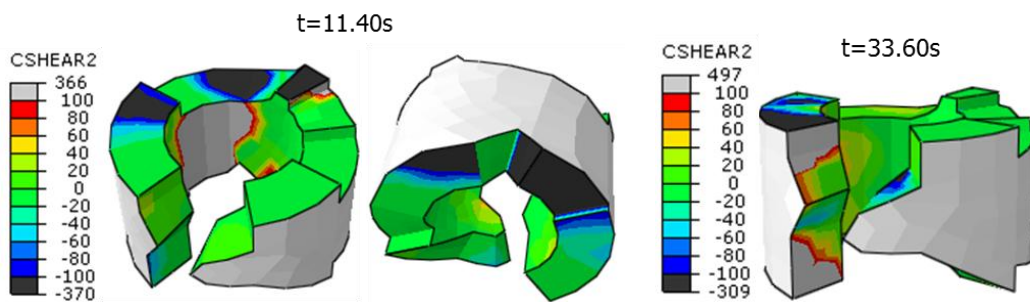
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ



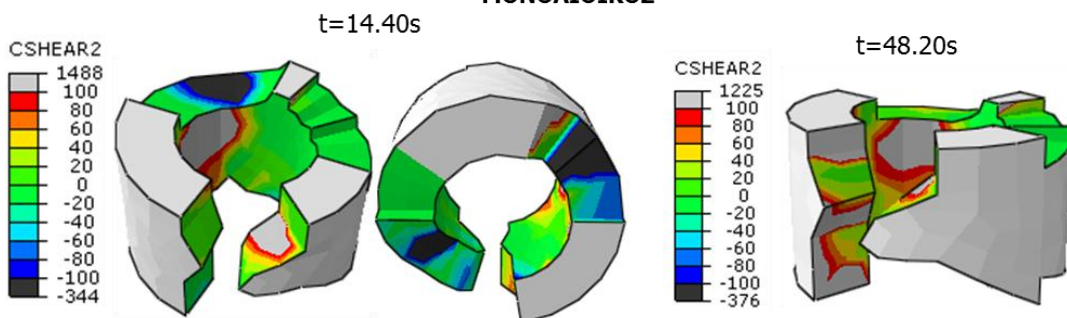
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

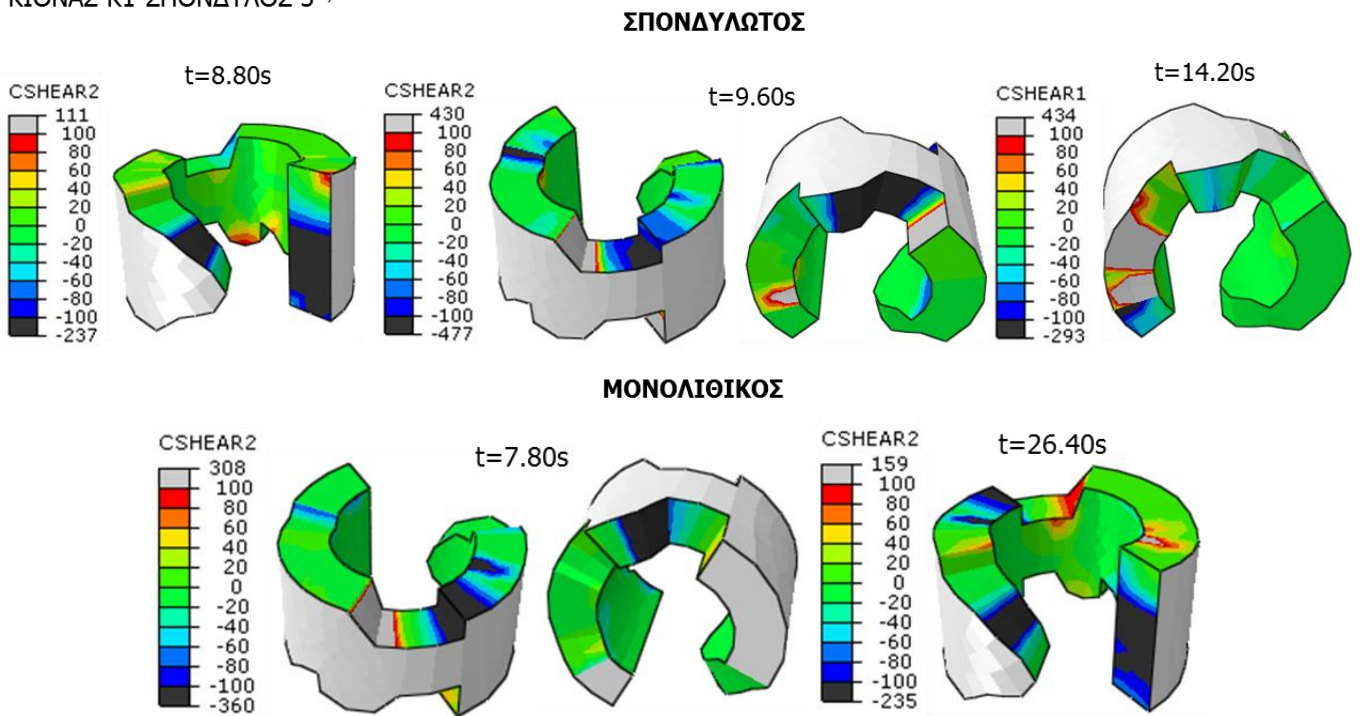


ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

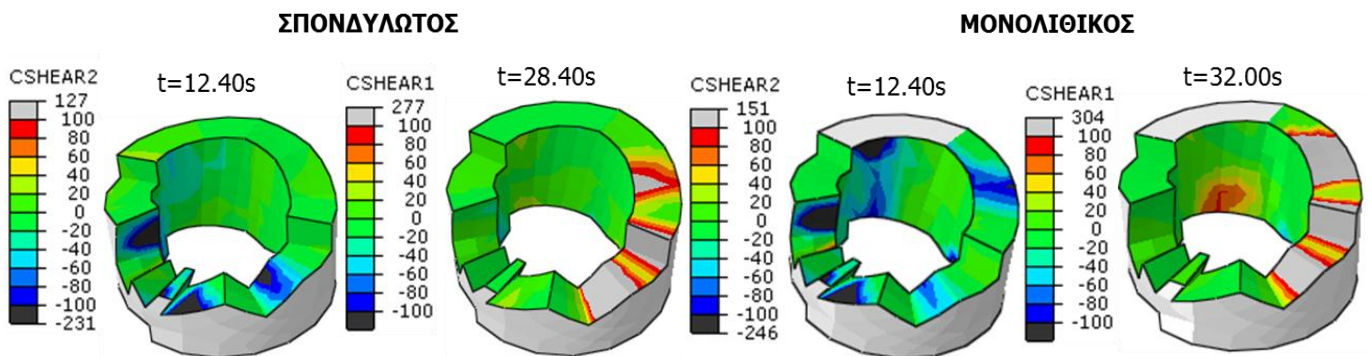


Εικόνα 7-6: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων στις επιφάνειες του σπονδύλου Νο3 του σπονδυλωτού και μονολιθικού κίονα Κ2 για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Camrano

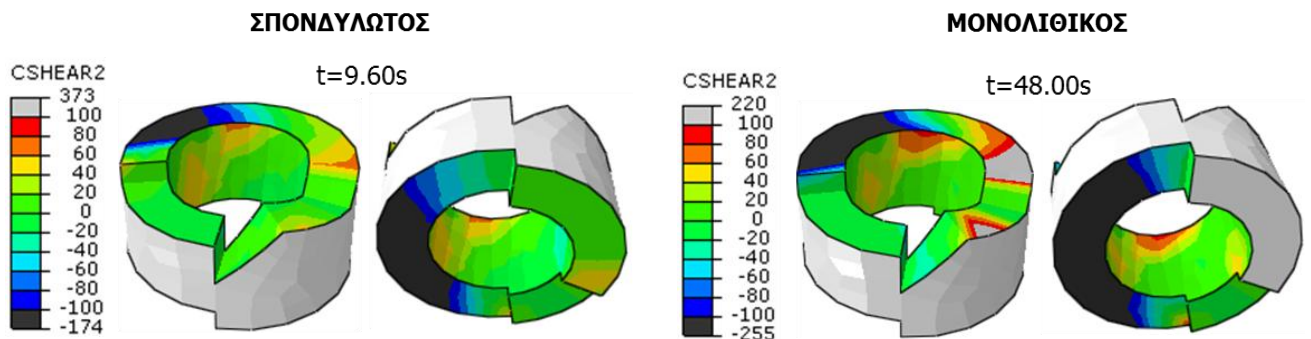
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



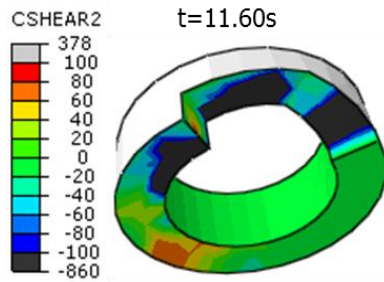
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



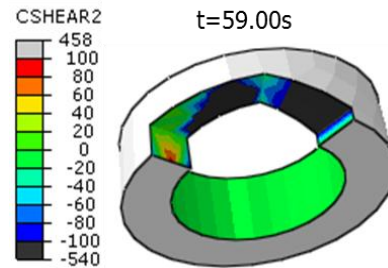
Εικόνα 7-7: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διαμηθικών τάσεων στις επιφάνειες των σπονδύλων Νο5 και Νο6 του σπονδυλωτών και μονολιθικών κίωνων Κ1, Κ2 και Κ3 για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Cambrano

ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 11^{ος}

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

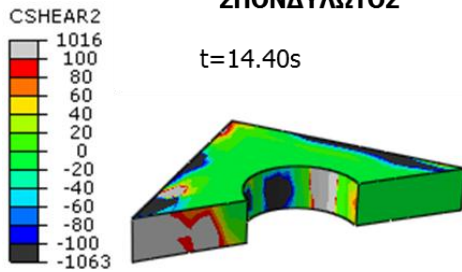


ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

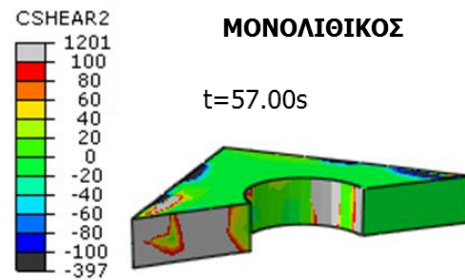


ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΑΒΑΚΑΣ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

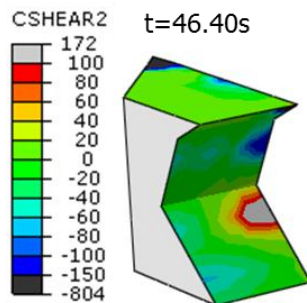


ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

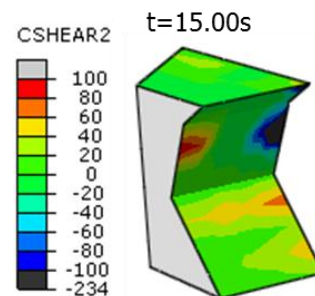


ΤΜΗΜΑ ΑΝΩΔΟΜΗΣ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

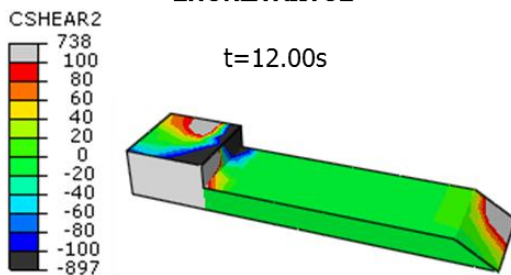


ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

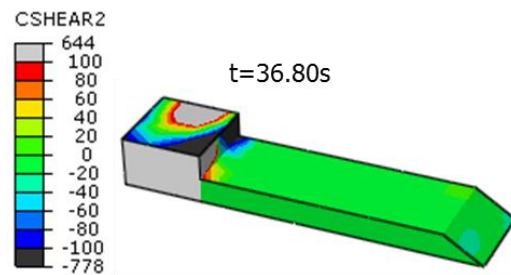


ΤΜΗΜΑ ΑΝΩΔΟΜΗΣ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ



ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



Εικόνα 7-8: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διαμηθικών τάσεων στις επιφάνειες του σπονδύλου Νο11 και του άβακα του σπονδύλωτου και μονολιθικού κίονα Κ2 και σε τμήματα της ανώδομής των δύο εξεταζόμενων κίονοστοιχίων για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Campano

Παρατηρώντας τις παραπάνω εικόνες, προκύπτει το συμπέρασμα ότι το όριο των 100kPa υπερβαίνεται σε σημαντικό τμήμα των επιφανειών των σπονδύλων τόσο των πολυσπόνδυλων όσο και των μονολιθικών κίωνων. Ιδιαίτερα στον σπόνδυλο Νο3 του σπονδυλωτού κίονα Κ2 προκαλείται εκτεταμένη αστοχία στις διάφορες επιφάνειές του (Εικόνα 7-7), ενώ η αντίστοιχη εικόνα για το μονολιθικό κίονα προβλέπει μικρότερο εύρος περιοχής που αστοχεί. Και για τις υπόλοιπες εξεταζόμενες σεισμικές δονήσεις παρατηρείται μια τάση να αναπτύσσεται μεγάλη ένταση στο σπόνδυλο Νο3 του κίονα Κ2 (με αστοχία σε διάτμηση και κατά τις δύο διευθύνσεις του επιπέδου της επιφάνειας), η οποία υπερέχει έναντι της επικρατούσας εντατικής κατάστασης στους άλλους σπονδύλους των κίωνων και έτσι καθιστά το σπόνδυλο αυτό κρίσιμο μέλος (Βλ. Παράρτημα Εικόνων). Επιπλέον, οι δυσμενέστερες χρονικές στιγμές ως προς την αναπτυσσόμενη ένταση συμπίπτουν σε ορισμένες περιπτώσεις για τους δύο τύπους κίωνων, σε αναλογία με την εν πολλοίς όμοια απόκριση των κίωνων αυτών ως προς την οριζόντια μετακίνηση. Μάλιστα, για τη σεισμική διέγερση Northridge, WonderLand, η ταύτιση αυτών των χρονικών στιγμών για τους αντίστοιχους σπονδύλους των πολυσπόνδυλων και των μονολιθικών κίωνων είναι χαρακτηριστική.

Μια ακόμα αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι ότι στο σπόνδυλο Νο11 του κίονα Κ2 η αστοχία της διεπιφάνειας είναι σχεδόν ολοκληρωτική και στην περίπτωση του πολυσπόνδυλου κίονα αυτή σημειώνεται κατά την ολίσθηση του εν λόγω σπονδύλου (όπως μαρτυρά στην Εικόνα 7-9 η συγκέντρωση τάσεων στη βάση του σπονδύλου Νο11). Η παραμόρφωση του κίονα Κ2 γύρω στα 11s φαίνεται και στην Εικόνα 7-5 του προηγούμενου υποκεφαλαίου, όπου διαπιστώνεται ότι είναι ιδιαίτερα έντονη. Εξετάζοντας τις αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις στις επιφάνειες των σπονδύλων και για τις υπόλοιπες σεισμικές καταγραφές, ο σπόνδυλος Νο11 φαίνεται να καταπονείται σημαντικά και να αστοχεί πρακτικά η διεπιφάνεια των συνδεδόμενων κομματιών λίθου στις περισσότερες περιπτώσεις (Βλ. Παράρτημα Εικόνων). Η συμπεριφορά αυτή αποδίδεται στις ολισθήσεις των σπονδύλων που συμβαίνουν στο ανώτερο τμήμα των κίωνων. Εξίσου δυσμενής είναι η αναπτυσσόμενη ένταση για το συμπλήρωμα του άβακα του κιονοκράνου του κίονα Κ2, αφού αστοχεί γενικά η μία εκ των δύο επιφανειών του όπου χρησιμοποιείται κονίαμα κατά τη διέγερση της βάσης της κιονοστοιχίας με καθεμιά από τις έξι σεισμικές δονήσεις που επιλέχθηκε να δοκιμαστούν.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί κατά τη μελέτη της απόκρισης του μεμονωμένου κίονα Κ4, η μεγιστοποίηση της έντασης στις διεπιφάνειες με κονίαμα των σπονδύλων των πολυσπόνδυλων κίωνων μπορεί να συμβαίνει και κατά το λικνισμό των σπονδύλων (κατά τον οποίο αποκτούν σημειακή, «μονόπλευρη» επαφή).

Σχετικά με την αναπτυσσόμενη ένταση στην ανωδομή, διαπιστώνεται με βάση τις αριθμητικές αναλύσεις ότι στο κατακόρυφο τμήμα λίθου που λειτουργεί σαν συμπλήρωμα (βλ. Εικόνα 7-10, το 1^ο κατά σειρά τμήμα της ανωδομής) δεν αναπτύσσονται σημαντικές διατμητικές τάσεις.

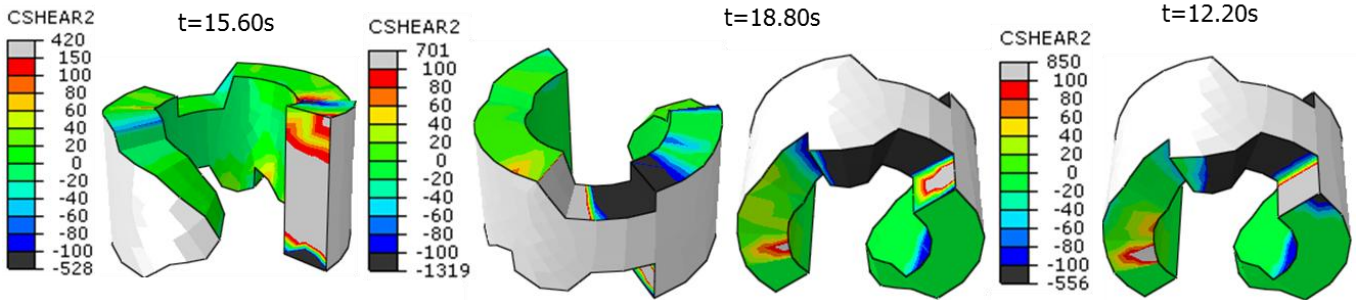
Λόγω της ομοιότητας των εικόνων, δεν παρουσιάζονται στο κυρίως κείμενο της εργασίας αντίστοιχα αποτελέσματα από τις υπόλοιπες εξεταζόμενες σεισμικές κινήσεις. Σημειώνεται μόνο ότι και οι σεισμικές καταγραφές Northridge, Lake Hughes #9 και της Κοζάνης, 1995 οδήγησαν σε αυξημένη ένταση των διεπιφανειών. Ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Παράρτημα Εικόνων, όπου βρίσκονται συγκεντρωμένα τα σχετικά στιγμιότυπα για το σύνολο των εξεταζόμενων σεισμικών διεγέρσεων.

Στη συνέχεια, απεικονίζεται η αναπτυσσόμενη εντατική κατάσταση των επιφανειών των σπονδύλων για διέγερση της βάσης της κιονοστοιχίας με τις αντίστοιχες διπλάσιες σεισμικές κινήσεις. Επιλέχθηκε να παρουσιαστούν τα δυσμενέστερα αποτελέσματα για κάθε εξεταζόμενο σπόνδυλο, τα οποία μπορεί να προκαλούνται από διαφορετική διέγερση για κάθε κίονα.

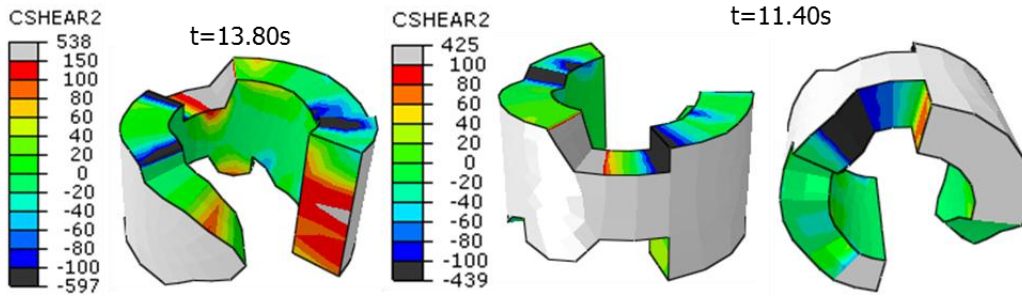
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}

(α)

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ



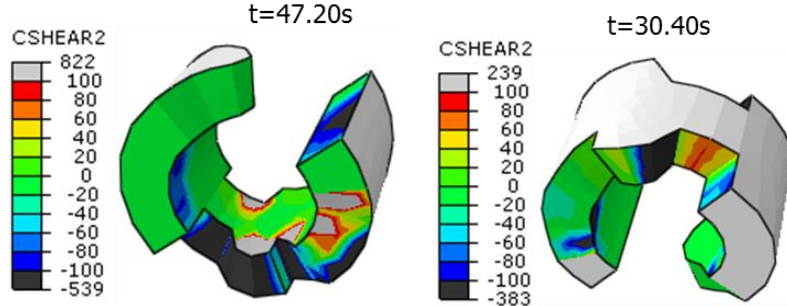
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



(β)

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

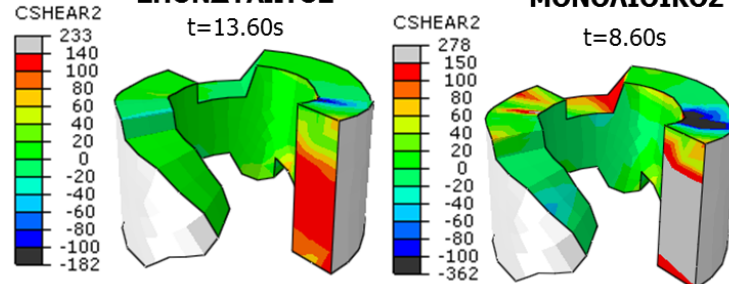
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



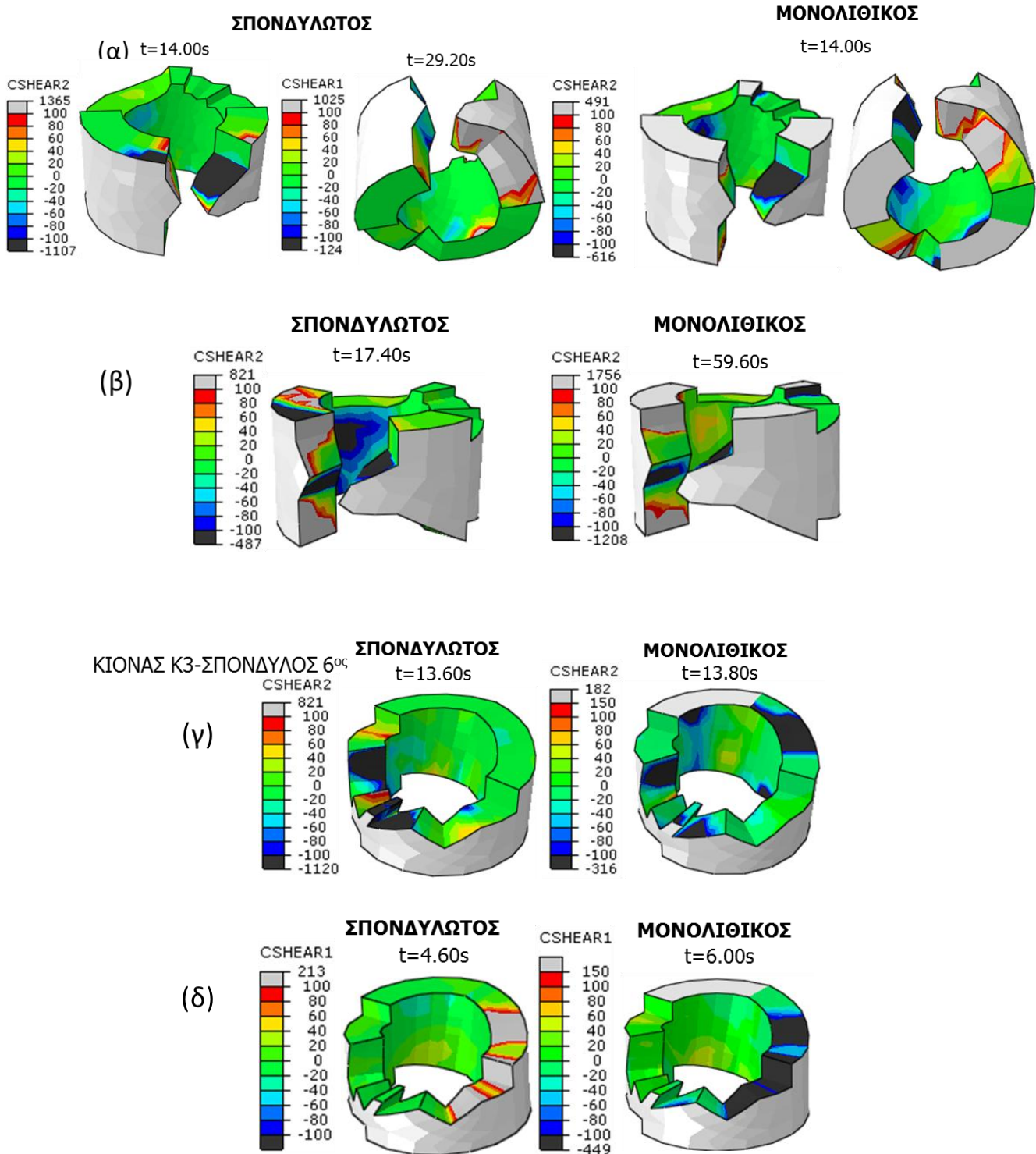
(γ)

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

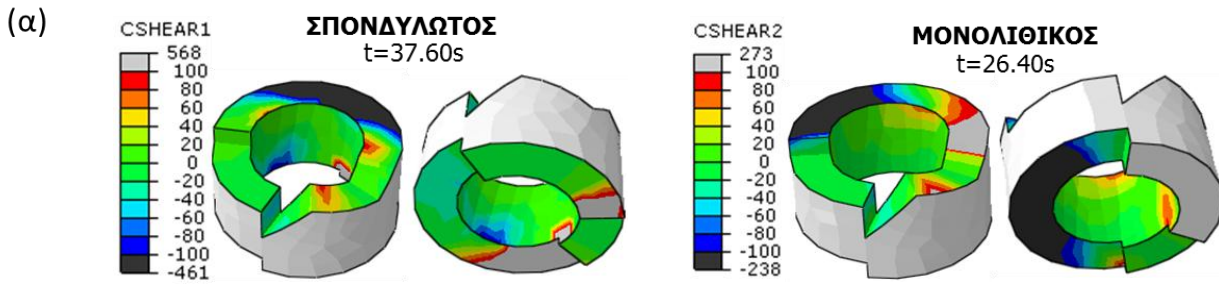


Εικόνα 7-9: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων στις επιφάνειες του σπονδύλου Νο5 του σπονδυλωτού και μονολιθικού κίονα Κ1 για τις διπλάσιες κανονικοποιημένες σεισμικές διέγερσεις (α) Tabas, (β) Cambrano και (γ) Loma Prieta

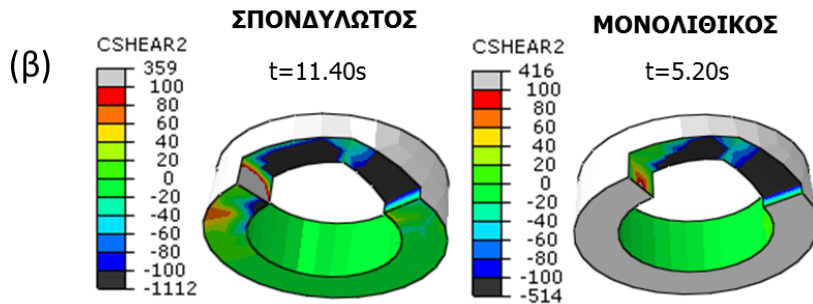
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 3^{ος}

Εικόνα 7-10: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διαμητρικών τάσεων στις επιφάνειες των σπονδύλων Νο3 και Νο6 των σπονδυλωτών και μονολιθικών κίονων Κ2 και Κ3 αντίστοιχα για τις διπλάσιες κανονικοποιημένες σεισμικές διέγερσεις (α) Tabas, (β) Cambrano, (γ) Tabas και (δ) Κοζάνη, 1995

ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



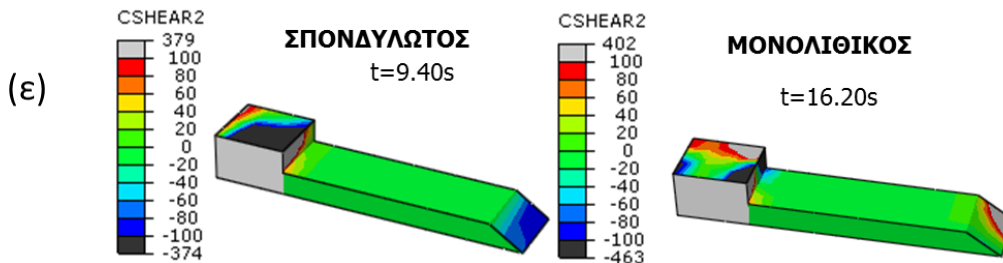
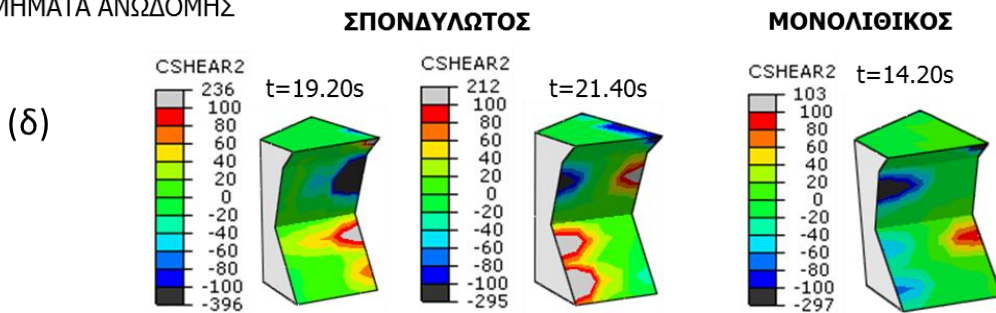
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 11^{ος}



ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΑΒΑΚΑΣ



ΤΜΗΜΑΤΑ ΑΝΩΔΟΜΗΣ

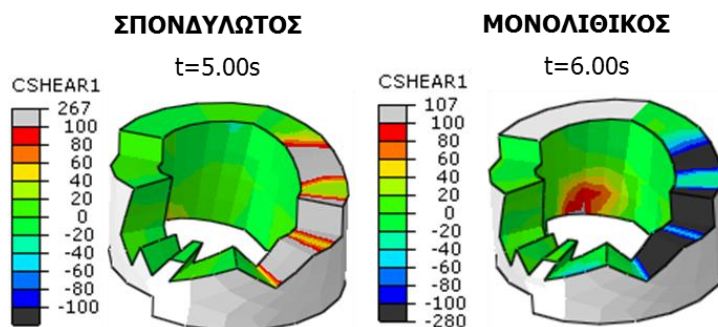


Εικόνα 7-11: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων στις επιφάνειες των σπονδύλων Νο6 και Νο11 και του άβακα του πολυσπονδύλου και μονολιθικού κίονα Κ2 καθώς και σε τμήματα της ανώδομης για τις *διπλάσιες* κανονικοποιημένες σεισμικές διέγερσεις Campano((α), (γ), (ε)) και Tabas ((β) ,(δ))

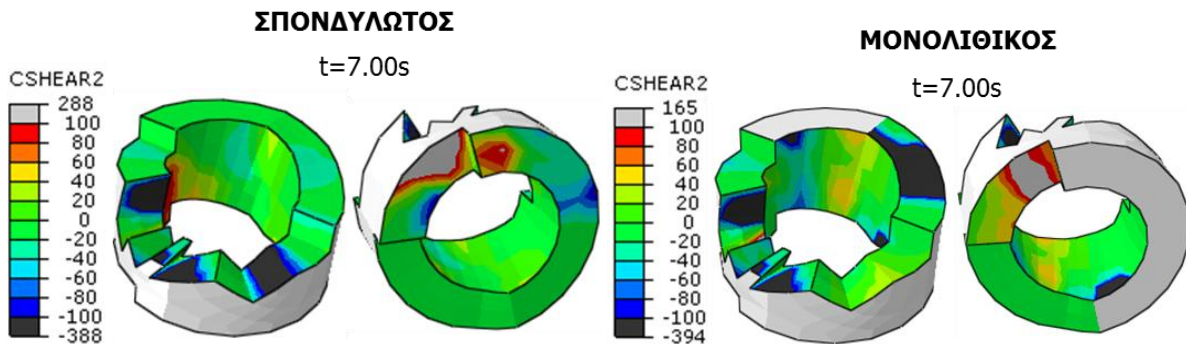
Οι παραπάνω εικόνες δείχνουν ότι οι διπλάσιες έντασης σεισμικές δονήσεις μπορούν να αποβούν καταστροφικές για την ακεραιότητα της σύνδεσης κομματιών λίθου με κονίαμα, αφού η αναπτυσσόμενη ένταση προβλέπεται να υπερκεράσει τη διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας, αν αυτή θεωρηθεί της τάξης των 100kPa, για το σύνολο σχεδόν των εξεταζόμενων σεισμικών διεγέρσεων. Ακόμα και το όριο των 150kPa φαίνεται ότι δεν επαρκεί σε πολλές περιπτώσεις. Επιπλέον, σε όλους τους υπό μελέτη σπονδύλους σημειώθηκαν σημαντικές αστοχίες, με χαρακτηριστικά παραδείγματα τα στιγμιότυπα που αναφέρονται στη δράση των διπλάσιων σεισμικών κραδασμών Tabas και Cambrano. Ωστόσο, τόσο η διπλάσια σεισμική διέγερση της Κοζάνης όσο και οι διπλάσιες καταγραφές Loma Prieta και Northridge, Lake Hughes #9 οδήγησαν σε εκτεταμένες αστοχίες των επιφανειών των σπονδύλων. Οι σχεικές εικόνες βρίσκονται στο Παράρτημα εικόνων.

Τέλος, η εικόνα των βλαβών που προκαλούν στους κίονες του μνημείου οι βασικές σεισμικές διεγέρσεις που θεωρείται ότι είναι πιθανό να εκδηλωθούν στην περιοχή του μνημείου, συμπληρώνεται με την εξέταση των καταγραφών αυτών αν οι τελευταίες επιβληθούν σε διαφορετικές διευθύνσεις. Διερευνάται, λοιπόν, η απόκριση της κιονοστοιχίας για άσκηση της σεισμικής φόρτισης στους άξονες Χ' και Υ' που είναι στραμμένοι κατά 45° και 90° σε σχέση με τους αρχικούς άξονες Χ και Υ.

Από την εξέταση των αποτελεσμάτων για το σύνολο των στραμμένων σεισμικών διεγέρσεων προέκυψε ότι δε διαφοροποιείται σημαντικά η αναπτυσσόμενη ένταση στους σπονδύλους των κίωνων σε σύγκριση με αυτή που προκαλείται αν οι διεγέρσεις αυτές ασκηθούν στο αρχικώς χρησιμοποιούμενο σύστημα αξόνων Χ-Υ. Για το λόγο αυτό επιλέγεται να παρουσιαστούν μερικές ενδεικτικές εικόνες για εκείνους τους σεισμικούς κραδασμούς που αποδείχτηκαν ελαφρώς δυσμενέστεροι για την κιονοστοιχία ασκούμενοι σε διαφορετική διεύθυνση και θα προκαλούσαν «διάχυτη» αστοχία (δηλ. υπέρβαση του ορίου διατμητικής αντοχής σε πλήθος επιφανειών ή σε μεγάλη έκταση μιας επιφάνειας).



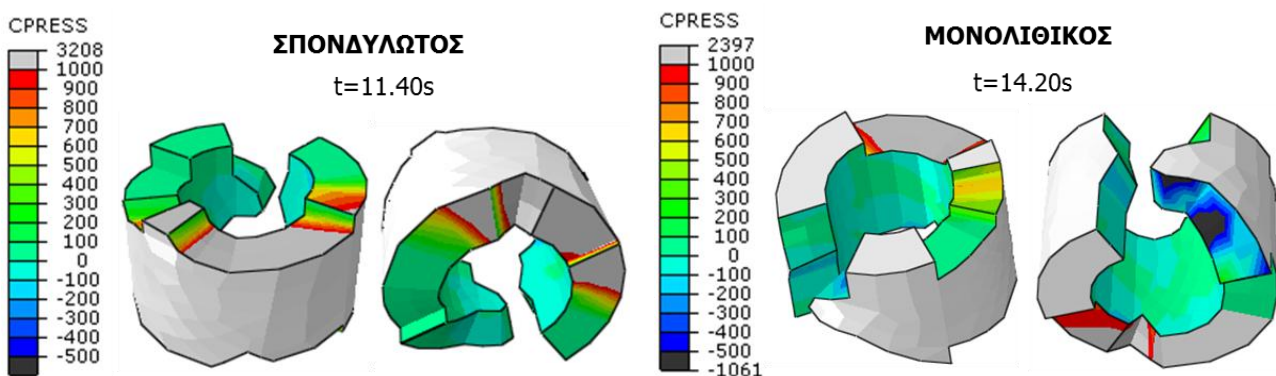
Εικόνα 7-12: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων στις επιφάνειες του σπονδύλου Νο6 του πολυσπόνδουλου και μονολιθικού κίονα Κ3 για την *στραμμένη κατά 45°* κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση της Κοζάνης, 1995



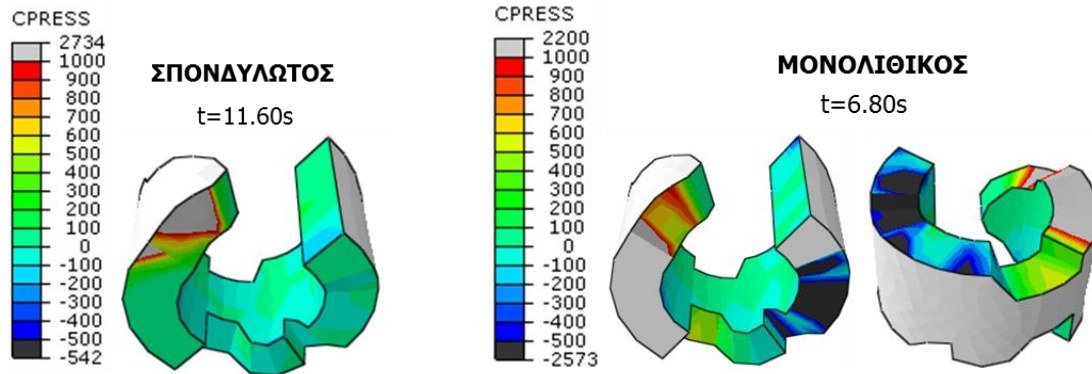
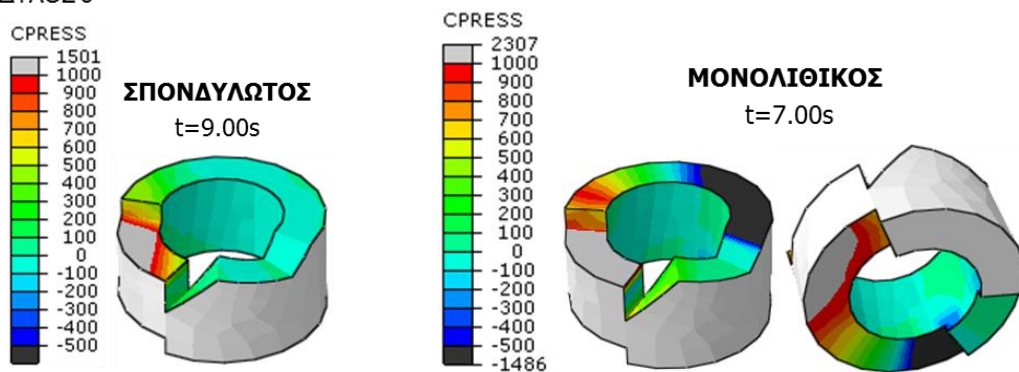
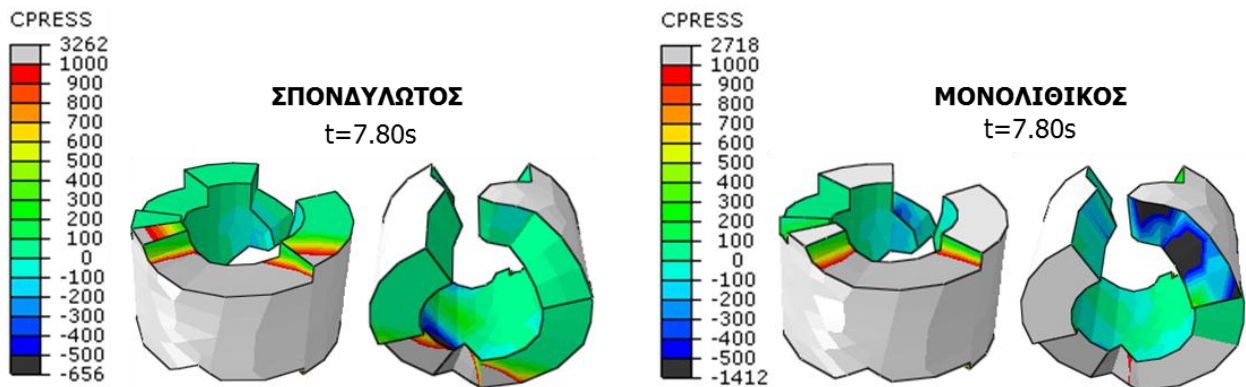
Εικόνα 7-13: Σύγκριση αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων στις επιφάνειες του σπονδύλου Νο6 του πολυσπόνδουλου και μονολιθικού κίονα K3 για την *στραμμένη κατά 90°* κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Northridge, Lake Hughes #9

ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ-ΘΛΙΨΗ

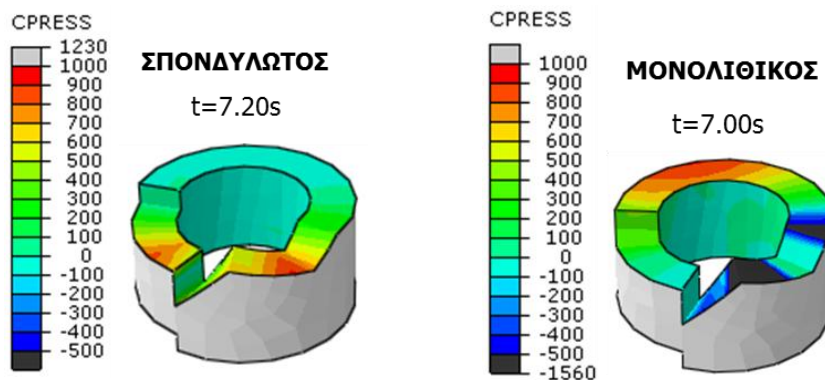
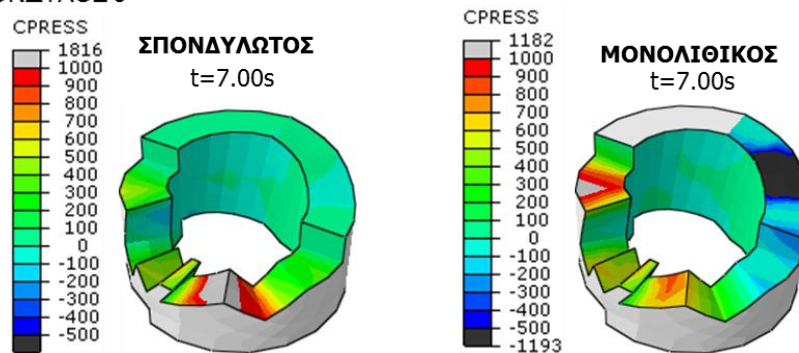
Οι κίονες του μνημείου εξετάστηκαν και ως προς τις αναπτυσσόμενες ορθές τάσεις στις διεπιφάνειες των συνδεόμενων μελών τους. Τόσο η εφελκυστική όσο και η θλιπτική ένταση μελετήθηκαν ταυτόχρονα. Η κλίμακα των τάσεων επιλέχθηκε να έχει ως κατώτατο όριο την εκτιμώμενη εφελκυστική αντοχή της διεπιφάνειας λίθου-κονιάματος (500kPa) και το διπλάσιο όριο για τη θλίψη (1000kPa). Το όριο για τη θλίψη δεν είναι αντιπροσωπευτικό, καθώς είναι πολύ μεγαλύτερο (της τάξης των 10MPa), αλλά τέθηκε για λόγους ευκρίνειας των αποτελεσμάτων. Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται τα δυσμενέστερα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον έλεγχο όλων των σεισμικών σεναρίων (βασικών, διπλάσιων και βασικών σε στραμμένες διευθύνσεις) για τους δύο εξεταζόμενους τύπους κίονων.



Εικόνα 7-14: Σύγκριση αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων στις επιφάνειες του σπονδύλου Νο3 του πολυσπόνδουλου και μονολιθικού κίονα K2 για την *κανονικοποιημένη* σεισμική διέγερση Campano

ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 3^{ος}

Εικόνα 7-15: Σύγκριση αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων στις επιφάνειες σπονδύλων των πολυσπόνδυλων και μονολιθικών κίωνων Κ1 και Κ2 για τη *διπλάσια κανονικοποιημένη* σεισμική διέγερση Northridge, Lake Hughes #9

ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}

Εικόνα 7-16: Σύγκριση αναπτυσσόμενων ορθών τάσεων στις επιφάνειες σπονδύλων των πολυσπόνδουλων και μονολιθικών κίωνων Κ2 και Κ3 για τη *στραμμένη κατά 90°* κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Northridge, Lake Hughes #9

Παρατηρούμε ότι στους σπονδύλους του σπονδυλωτού κίονα αναπτύσσεται θλιπτική ένταση κατά κύριο λόγο, ενώ αντίθετα στους σπονδύλους του μονολιθικού έχουμε ακόμα και υπέρβαση της θεωρούμενης εφελκυστικής αντοχής της διεπιφάνειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, φαίνεται η αναπτυσσόμενη ένταση σε σπονδύλους των δύο κίωνων την ίδια χρονική στιγμή ώστε να είναι άμεση η σύγκριση. Η εφελκυστική ένταση των μονολιθικών κίωνων οφείλεται στην κάμψη τους κατά το λικνισμό του σώματός τους που ξεκινά από τη βάση τους. Οι σπόνδυλοι των πολυσπόνδουλων κίωνων εμφανίζουν με τη σειρά τους αυξημένη θλιπτική ένταση (π.χ. Εικόνα 7-14) κατά το λικνισμό τους, οπότε και η επιφάνεια επαφής τους είναι πολύ μικρή (θεωρητικά σημειακή επαφή).

7.4 Συμπερασματικά Σχόλια

Για τα βασικά σεισμικά σενάρια που εξετάστηκαν οι μέγιστες μετατοπίσεις του κιονοκράνου και των δύο τύπων κίωνων της κιονοστοιχίας κυμαίνονται μεταξύ 10-20cm, ενώ οι μόνιμες είναι μικρότερες και είναι της τάξης των 5cm. Εξαιρέση αποτελεί η σεισμική διέγερση Campano, η οποία προκάλεσε μέγιστες και μόνιμες μετακινήσεις της τάξης των 40cm και 20cm αντίστοιχα. Για τη διέγερση αυτή, παρατηρείται λικνισμός των πολυσπόνδουλων κίωνων που ξεκινά από τους χαμηλούς σπονδύλους κατά τη διάρκεια της έντονης κίνησής τους, καθώς και ολισθήσεις των ανώτερων σπονδύλων και στροφή των κιονοκράνων στο τέλος της σεισμικής δόνησης.

Ως προς την αναπτυσσόμενη ένταση, αναμένονται υψηλές τιμές διατμητικών τάσεων οι οποίες υπερβαίνουν το όριο των 100kPa που θεωρήθηκε ως η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας λίθου-κονιάματος. Ακόμη και η τιμή των 150kPa υπερβαίνεται σε ορισμένες περιπτώσεις. Αστοχία από εφελκυσμό των διεπιφανειών δεν προβλέπεται για τους πολυσπόνδυλους κίονες. Ωστόσο, στους μονολιθικούς παρατηρείται ανάπτυξη σημαντικών εφελκυστικών τάσεων σε ορισμένες περιπτώσεις.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των κιόνων του Ναού του Πύθιου Απόλλωνα στη Ρόδο. Το μνημείο θεωρείται αναστηλωμένο, με βασικές μεθόδους αποκατάστασης τη συμπλήρωση μελών με νέους λίθους αλλά και την αντικατάσταση μελών από νέα. Η συμπλήρωση των υπαρχόντων μελών εφαρμόζεται κάνοντας χρήση κονιάματος. Ένας δεύτερος στόχος της εργασίας αυτής είναι να διερευνήσει την αποτελεσματικότητα αυτού του τρόπου επέμβασης. Για το λόγο αυτό, στα αριθμητικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν έγινε προσομοίωση του κονιάματος και συγκρίθηκαν οι αναπτυσσόμενες τάσεις στις διεπιφάνειες των συνδεδεμένων μελών κατά τη διάρκεια σεισμικής δόνησης με τις αντίστοιχες αντοχές προτεινόμενων κονιαμάτων αποκατάστασης.

Η σεισμική συμπεριφορά μιας τέτοιας κατασκευής δε σχετίζεται με αυτή των σύγχρονων κατασκευών και χαρακτηρίζεται από έντονη μη γραμμικότητα, λόγω της μη γραμμικότητας που εισάγεται κατά το λικνισμό και την ολίσθηση στις διεπιφάνειες μεταξύ των σπονδύλων των πολυσπόνδουλων κιόνων. Εκτός από τους πολυσπόνδουλους κίονες εξετάζονται όμως και οι μονολιθικοί ισοδύναμης γεωμετρίας για να διερευνηθούν οι επιπτώσεις παλιών αναστηλωτικών επεμβάσεων που είχαν ως αποτέλεσμα τη μετατροπή των κιόνων σε μονολιθικούς πρακτικά. Η διερεύνηση έγινε αριθμητικά εφαρμόζοντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων με τη βοήθεια του κώδικα ABAQUS.

Οι σεισμικές καταγραφές που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι συμβατές με το σεισμοτεκτονικό περιβάλλον της Ρόδου και τις εδαφικές συνθήκες στη θέση του μνημείου (βράχος). Επιπλέον, οι επιλεγθείσες καταγραφές καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα δεσποζουσών περιόδων εδαφικής κίνησης, καθώς, μεταξύ άλλων, το συχνотικό περιεχόμενο της σεισμικής διέγερσης αποτελεί βασική παράμετρο επιρροής της απόκρισης.

Από το σύνολο των εξεταζόμενων περιπτώσεων, παρατηρείται διαφοροποίηση των τιμών οριζόντιας μετακίνησης της κορυφής των κιόνων για τις διαφορετικές σεισμικές διεγέρσεις ανεξαρτήτως του αν αυτές ανάγονται σε παρόμοιο επίπεδο έντασης. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει τη μεγάλη εξάρτηση των χαρακτηριστικών της διέγερσης (π.χ. συχνотικό περιεχόμενο) και της απόκρισης της κατασκευής.

Σημειώνεται ότι οι πολυσπόνδυλοι και μονολιθικοί κίονες του μνημείου δεν κατέρρευσαν για κανένα από τα εξεταζόμενα βασικά σεισμικά σενάρια. Για τον μεμονωμένο, ελεύθερα ιστάμενο πολυσπόνδυλο κίονα του μνημείου προβλέφθηκε μέγιστη μετακίνηση της τάξης των 35cm και μόνιμη παραμόρφωση

του ανώτερου σπονδύλου ίση με 25cm (για την κανονικοποιημένη σεισμική διέγερση Loma Prieta). Η δυσμενέστερη σεισμική απόκριση για τον αντίστοιχο μονολιθικό κίονα τον οδήγησε σε μέγιστη αλλά και μόνιμη μετακίνηση περίπου 70cm (κατά την κανονικοποιημένη διέγερση Campano). Σχετικά με τη δυσμενέστερη απόκριση της κιονοστοιχίας, οι κίονες που την αποτελούν εμφάνισαν μέγιστη οριζόντια μετατόπιση του κιονοκράνου τους της τάξης των 40cm και παραμένουσα ολίσθηση της τάξης των 20cm (επίσης για τη σεισμική διέγερση Campano). Σπονδυλωτοί και μονολιθικοί κίονες επέδειξαν παρόμοια ή όμοια σεισμική συμπεριφορά για το σύνολο των σεισμικών σεναρίων. Συνεπώς, το μνημείο συμπεριφέρεται αρκετά ικανοποιητικά έναντι σημαντικής σεισμικής φόρτισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για ένα μνημείο με σημαντικές διαστάσεις και ήταν αναμενόμενο να παρουσιάσει σταθερότητα κατά την απόκρισή του, καθώς έχει αποδειχθεί ότι το μεγάλο μέγεθος μιας κατασκευής συντελεί στην ευστάθειά της και ότι εξασθενεί η επιρροή της ραδινότητας για αύξηση των απόλυτων διαστάσεων από ένα σημείο και μετά (φαινόμενο "size effect" -πράγματι στην περίπτωση μας οι κίονες είναι ιδιαίτερα υψίκορμοι).

Η αύξηση του επιπέδου της έντασης οδηγεί σε αύξηση των μετακινήσεων των κίωνων, όπως και θεωρητικά αναμένεται. Όταν το πλάτος της σεισμικής ταλάντωσης ανάχθηκε στο διπλάσιο, τότε οι κίονες κατέρρευσαν για κάποιες από τις εξεταζόμενες σεισμικές διεγέρσεις (Tabas και Campano). Ανατροπή σημειώθηκε τόσο για το μεμονωμένο κίονα όσο και για την κιονοστοιχία (ή τμήμα αυτής) για τις ίδιες διπλάσιες σεισμικές δονήσεις. Οι δύο σεισμικές καταγραφές που οδήγησαν σε κατάρρευση, Tabas και Campano, περιέχουν παλμό κατευθυντικότητας υψηλής ταχύτητας και μεγάλες δεσπόζουσες περιόδους εδαφικής κίνησης αντίστοιχα.

Σχετικά με την αναπτυσσόμενη ένταση στις διεπιφάνειες των συνδεδεμένων με κονίαμα κομματιών λίθου, προέκυψε ότι το όριο των 100kPa, που θεωρήθηκε ως η διατμητική αντοχή της διεπιφάνειας λίθου-κονιάματος, υπερβαίνεται σε σημαντικό πλήθος επιφανειών και των πολυσπόνδυλων και των μονολιθικών κίωνων για το σύνολο σχεδόν των εξεταζόμενων σεισμικών καταγραφών. Στους σπονδύλους της κιονοστοιχίας μάλιστα, ο κίνδυνος φαίνεται να είναι σοβαρότερος, καθώς αστοχεί σημαντικό τμήμα των επιφανειών και η απαίτηση ξεπερνά ακόμα και τα 150kPa σε ορισμένες περιπτώσεις. Για τις σεισμικές διεγέρσεις διπλάσιας έντασης οι «αστοχίες» είναι πιο θεαματικές, καθώς το όριο υπερβαίνεται σε μεγαλύτερο τμήμα των επιφανειών. Επιπλέον, η κατασκευή φαίνεται να παραλαμβάνει την επιβαλλόμενη σεισμική φόρτιση αναπτύσσοντας κατά βάση διατμητική ένταση, αφού ο εφελκυσμός διατηρείται σε χαμηλότερα επίπεδα και δεν σημειώνεται αστοχία (υπέρβαση του εφελκυστικού ορίου ίσου με 500kPa) στους σπονδύλους των πολυσπόνδυλων κίωνων. Στους μονολιθικούς κίονες το όριο αυτό υπερβαίνεται, γεγονός που οφείλεται στην καμπτική λειτουργία τους σε ορισμένες περιπτώσεις. Επομένως, η χρήση κονιάματος δεν κρίνεται ως ασφαλής λύση για την αναστήλωση του εξεταζόμενου μνημείου και προτείνεται η υιοθέτηση εναλλακτικών μέτρων, όπως είναι η χρήση οπλισμού τιτανίου για τη σύνδεση των λίθων και την αποκατάσταση της μονολιθικότητας των αρχιτεκτονικών μελών.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] ABAQUS (2014) Analysis User's Manual - version 6.14-1. Dassault Systèmes, SIMULIA Inc, USA

[2] Psycharis I. et al. (1998), "Harmonic and earthquake response of a classical column", 11th European Conference of Earthquake Engineering, A.A. Balkema, Rotterdam

[3] Psycharis IN., Papastamatiou DY., Alexandris AP. (2000), "Parametric investigation of the stability of classical columns under harmonic and earthquake excitations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 29(8):1093–1109

[4] Psycharis I., Fragiadakis M. and Stefanou I. (2013), "Seismic reliability assessment of classical columns subjected to near-fault ground motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, DOI: 10.1002/eqe.2312

[5] Konstantinidis D. and Makris N. (2005) "Seismic response analysis of multidrum classical columns", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, DOI:10.1002/eqe.478

[6] Μελέτη δομικής αποκατάστασης, Τεύχος 1, Πίκουλα Μαρία, Ρόδος 2016, ΥΠ.ΠΟ.Α-Εφορεία Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου

[7] Τεχνική έκθεση Αποκατάστασης, Γεώργιος Αντωνίου, Ιούνιος 2016, ΥΠ.ΠΟ.Α-Εφορεία Αρχαιοτήτων Δωδεκανήσου

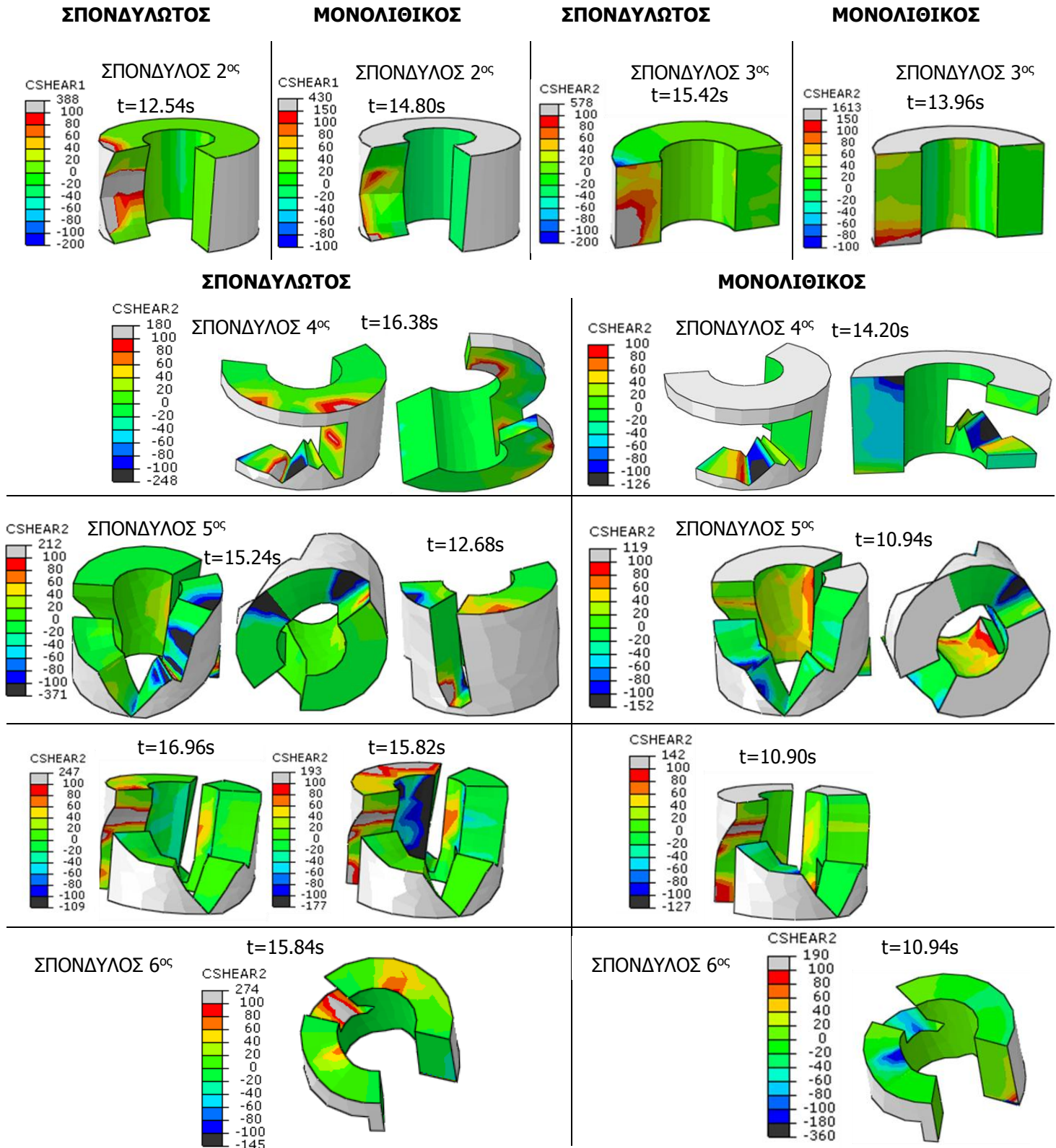
[8] Ταβουκτσή Ελένη (2009), «Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς σφονδυλωτών και μονολικών κίονων στο Ναό του Απόλλωνα της Ρόδου και στην Ελληνιστική Στοά στη Λίνδο», Διπλωματική εργασία μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

[9] Καραφαγκά Στέλλα (2013), «Διερεύνηση της Σεισμικής Συμπεριφοράς Κίονων – Η Περίπτωση Κίονα της Στοάς του Ψιθύρου στην Ακρόπολη της Λίνδου», Διπλωματική εργασία μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Τεχνικών Έργων», Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

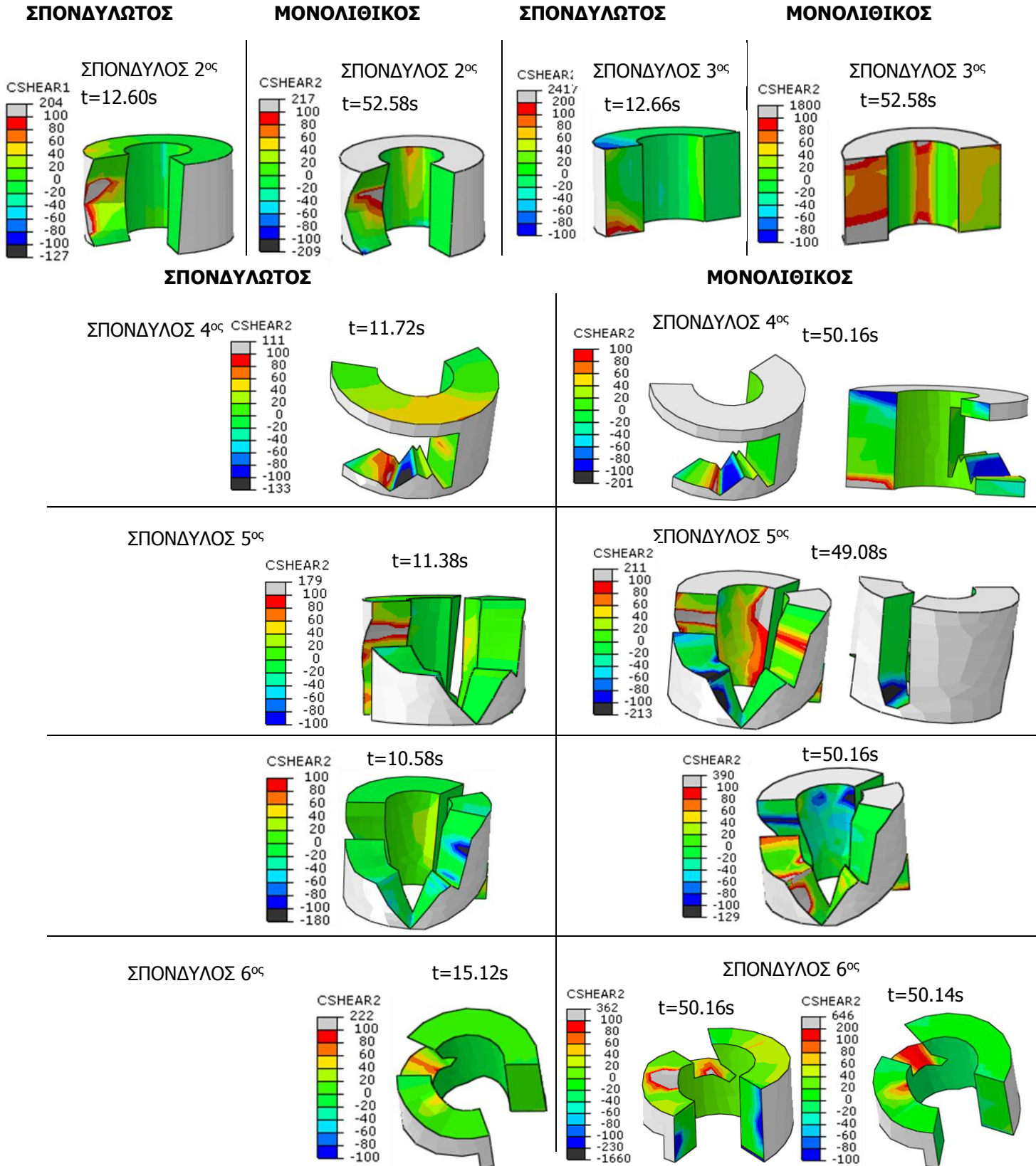
- [10] Καραφαγάκ Σ.Β., Γ.Κ. Τσινίδης, Μ.Κ. Πίκουλα, και Κ.Δ. Πιπιλάκης. 2015 Ακρόπολη Λίνδου, Απόκριση και ευστάθεια πολυσπόνδου ιωνικού κίονα, υπό σεισμική φόρτιση και ανεμοποίηση. Πρακτικά 4ου Πανελληνίου Συνέδριου Αναστηλώσεων. ΕΤΕΠΑΜ, Θεσσαλονίκη, σελ. 791-804
- [11] Kyriazis Pitilakis, Grigorios Tsinidis, Stella Karafagka, 2017. Analysis of the seismic behavior of classical multi-drum and monolithic columns, Springer, Bull. Earthquake Eng.
- [12] Simplified micro modeling of partially grouted masonry assemblages
Mohammad Bolhassani, Ahmad A. Hamid, Alan C.W. Lau, Franklin Moon
Department of Civil, Architectural and Environmental Engineering, Drexel University, Philadelphia, PA, United States
Mechanical Engineering and Mechanics, Drexel University, Philadelphia, PA, United States
- [13] Papaloizou L., P. Polycarpou, and P. Komodromos, 2008. Numerical analysis of ancient multi-drum columns with epistyles under dynamic loadings. In Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing
- [14] Παπαδρακάκης Μ. 1996. Ανάλυση φορέων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. ΕΜΠ, Αθήνα
- [15] Mouzakis H.P., I.N. Psycharis, D.Y. Papastamatiou, P.G. Carydis, C. Papantonopoulos, and C. Zambas. 2002. Experimental investigation of the earthquake response of a model of a marble classical column, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 31, pp. 1681-1698.
- [16] Drosos, V., and I. Anastasopoulos. 2014. Shaking table testing of multidrum columns and portals. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol. 43, Iss. 11, pp. 1703–1723
- [17] Apostolou M., G. Gazetas, and E. Garini. 2007. Seismic response of slender rigid structures with foundation uplifting. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 27, pp. 642–654
- [18] Λικνισμός και Ανατροπή Στερεού Σώματος υπό Σεισμική Διέγερση: Ιστορικά Περιστατικά, 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας 5–7 Νοεμβρίου, 2008 Άρθρο 1777
- [19] Παπαδόπουλος Κωνσταντίνος, 2018. Συμβολή στη μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς αρχαίων μνημείων, Διδακτορική Διατριβή. Σχολή Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Αθήνα.

A. ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΙΣΤΑΜΕΝΟΣ ΚΙΟΝΑΣ Κ4, ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΠΥΘΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ

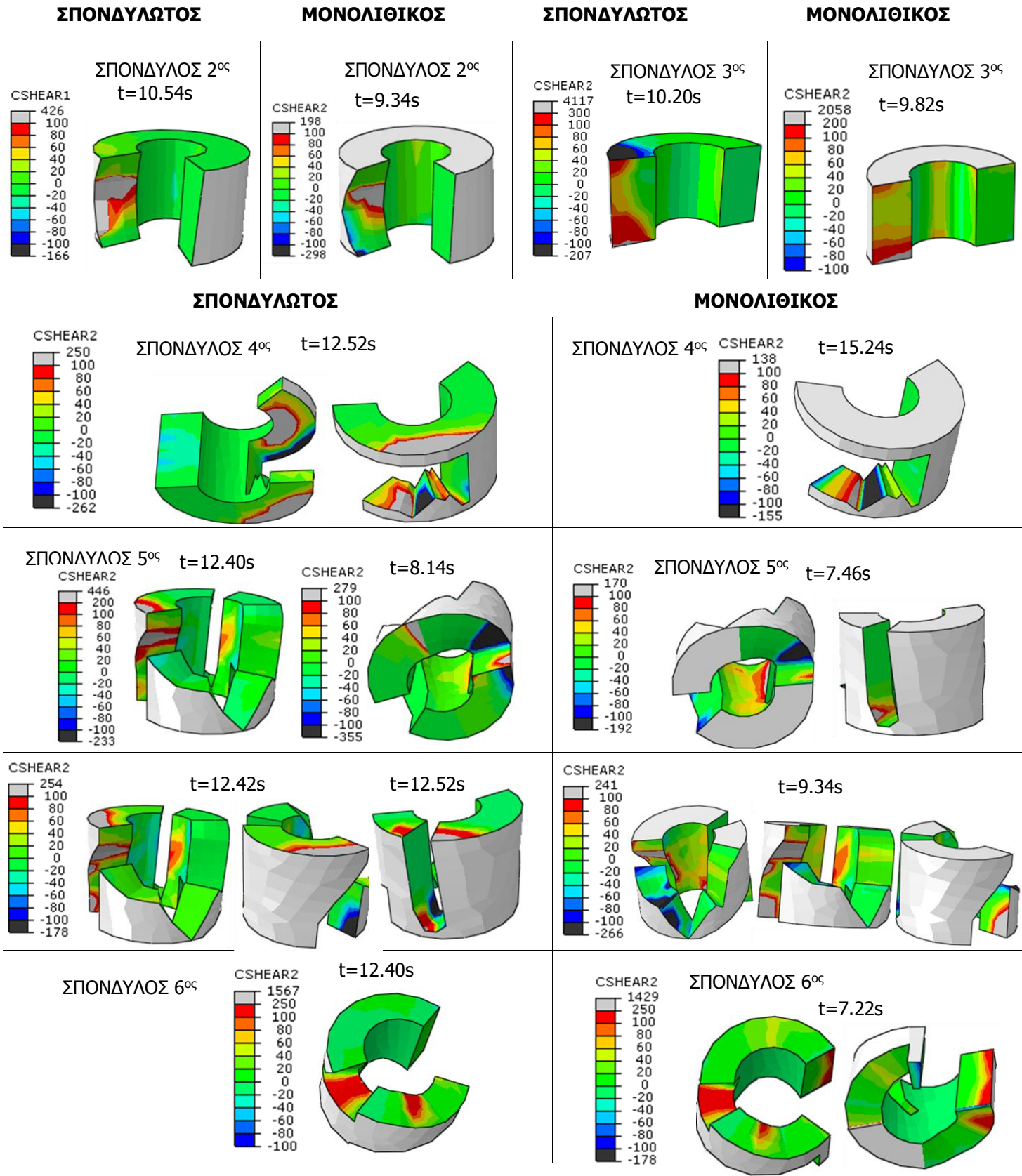
Ομάδα εικόνων 1.1: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΑΒΑΣ



Ομάδα εικόνων 1.2: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΑΜΡΑΝΟ



Ομάδα εικόνων 1.3: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΛΟΜΑ ΠΡΙΕΤΑ

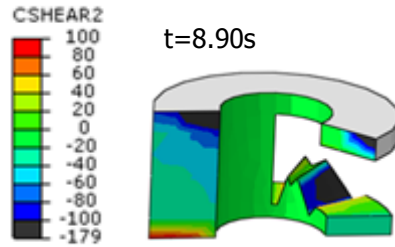
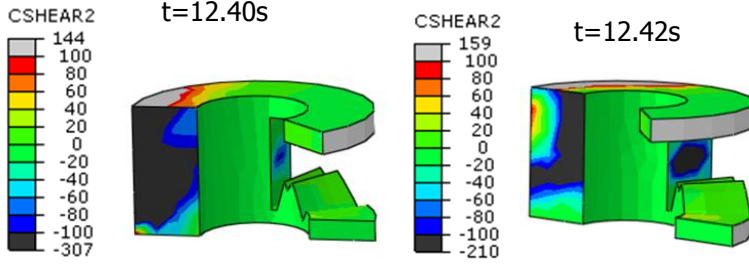


ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

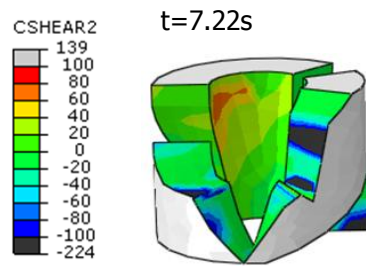
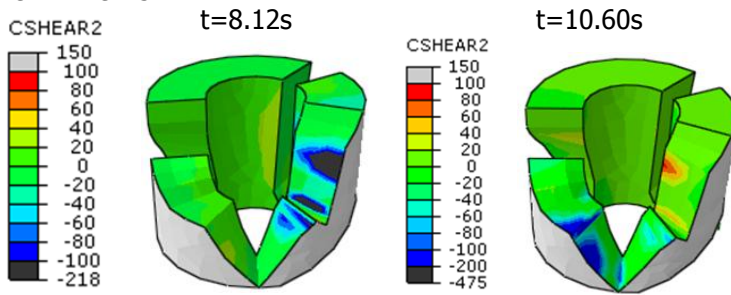
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}

ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}



ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}

ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



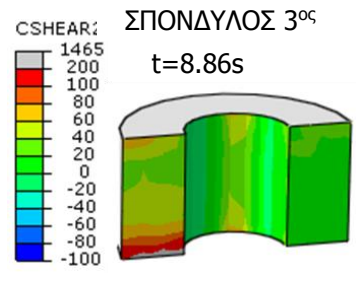
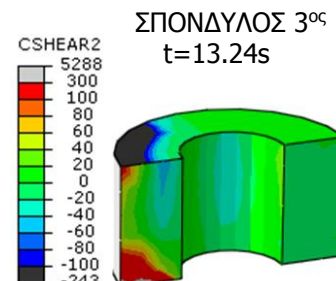
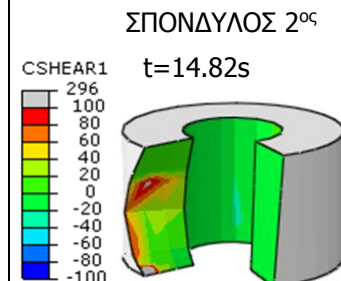
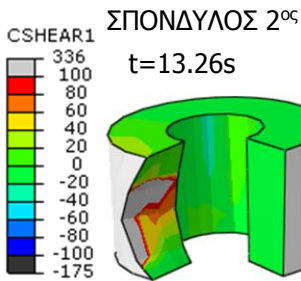
Ομάδα εικόνων 1.4: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, LAKE HUGHES

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

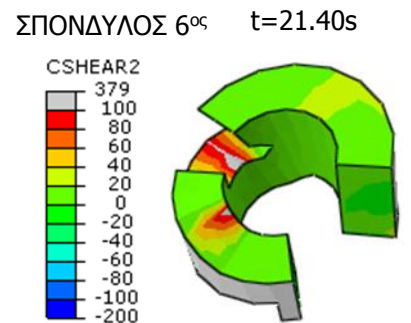
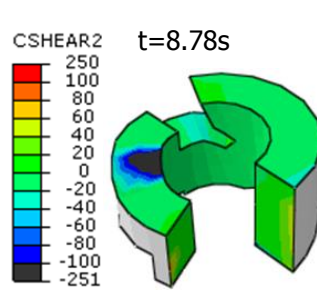
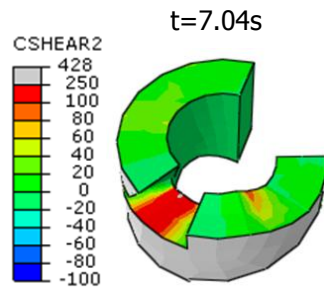
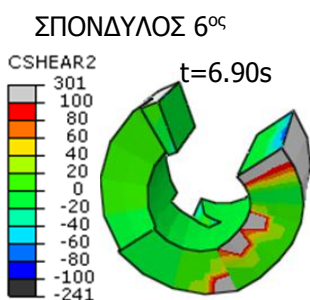
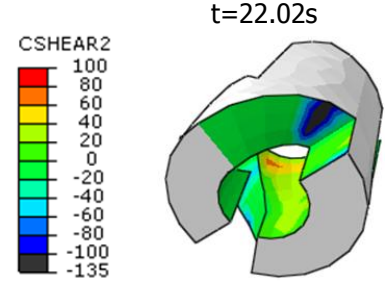
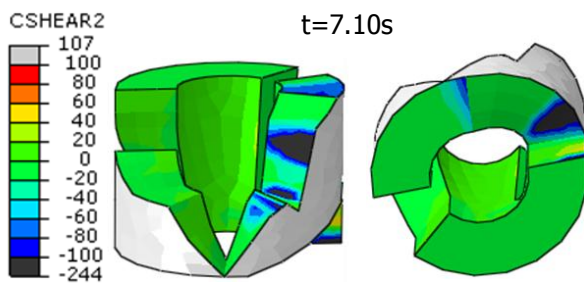
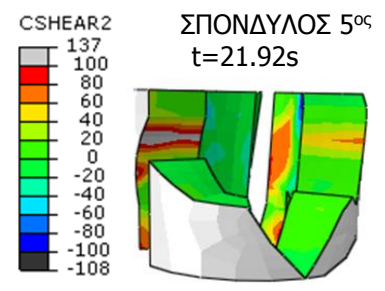
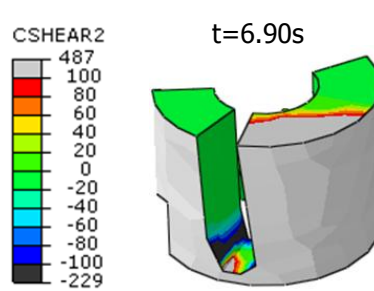
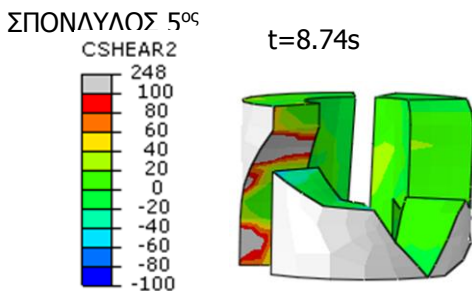
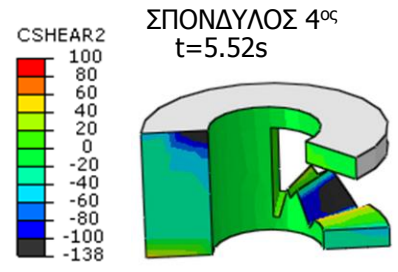
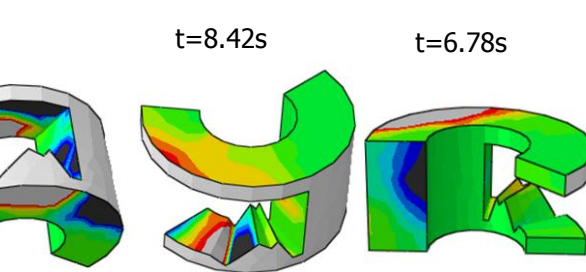
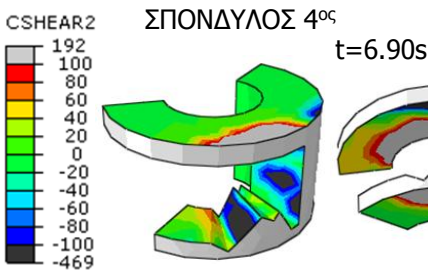
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



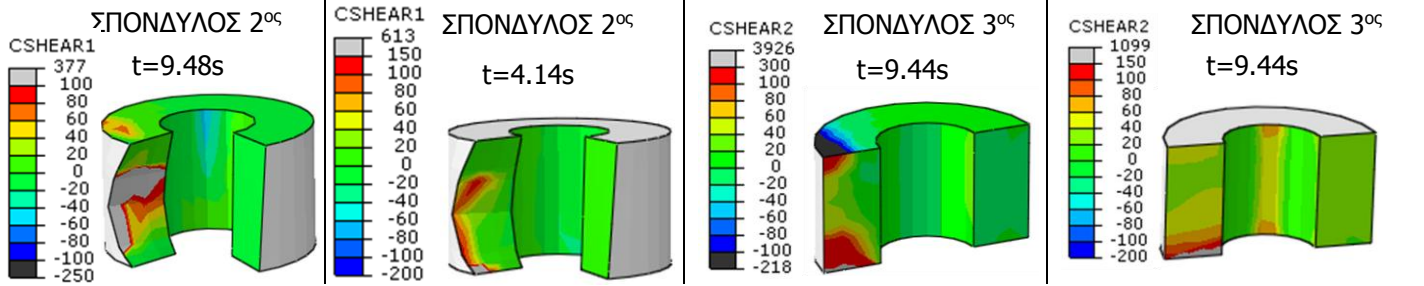
Ομάδα εικόνων 1.5: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTH RIDGE, WONDERLAND

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

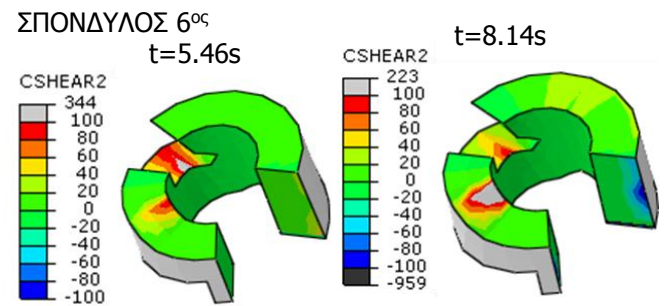
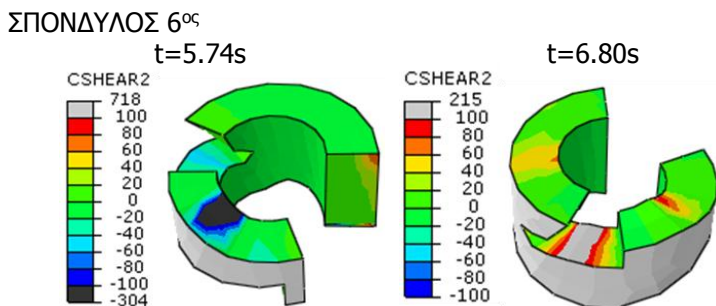
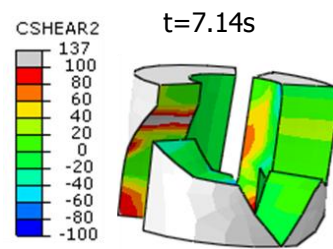
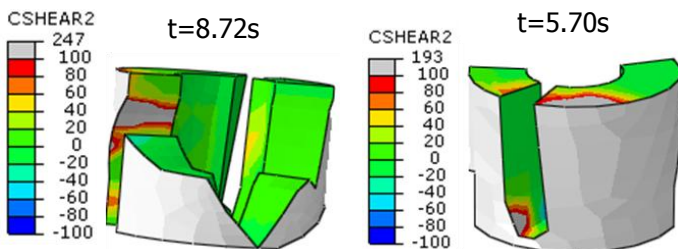
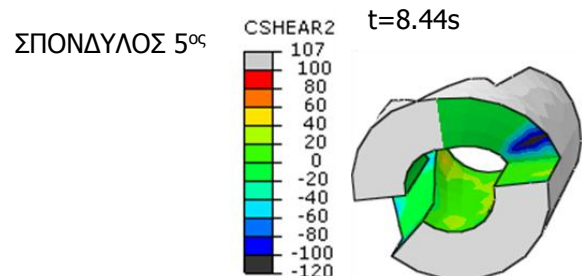
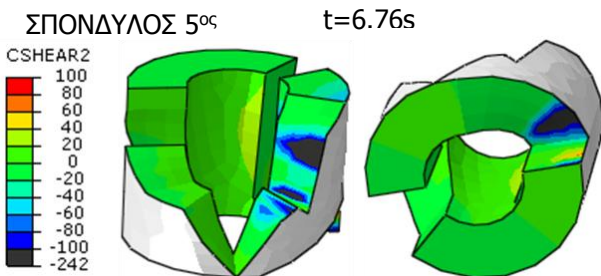
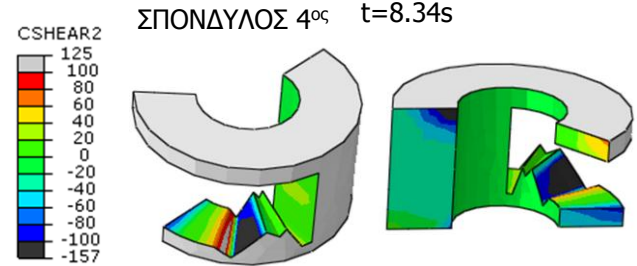
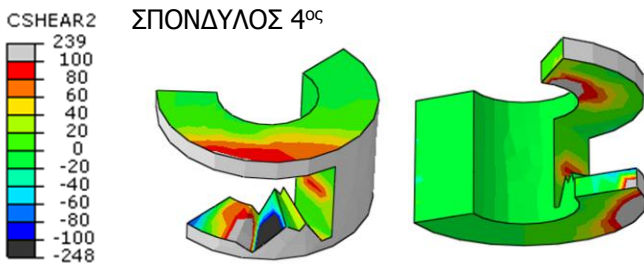
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



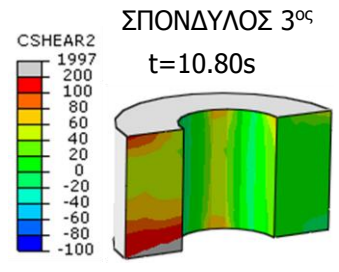
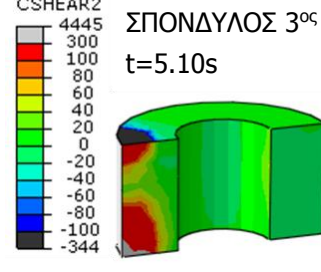
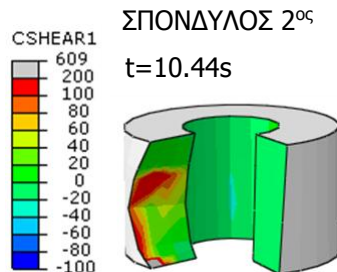
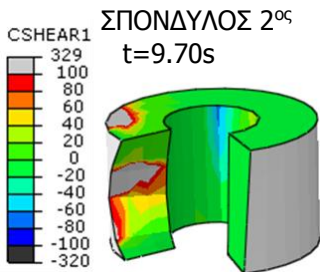
Ομάδα εικόνων 1.6: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΟΖΑΝΗ,1995

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

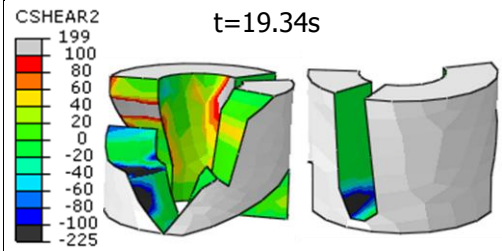
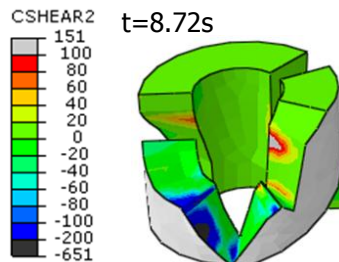
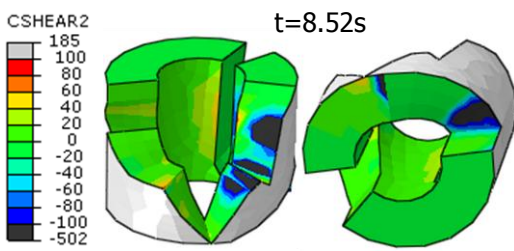
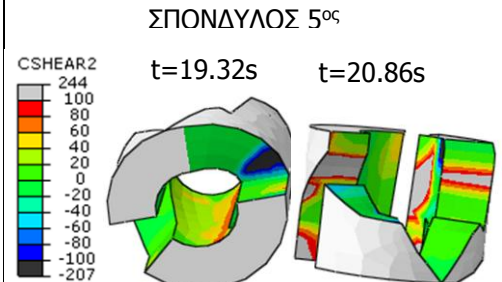
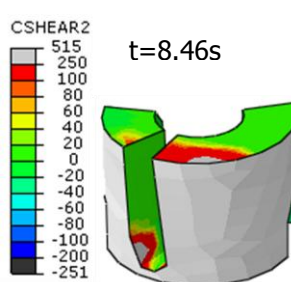
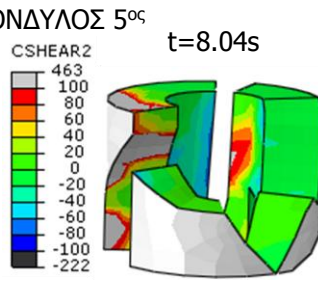
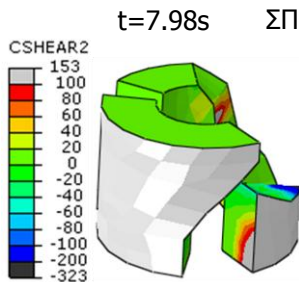
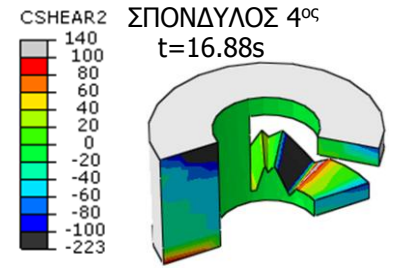
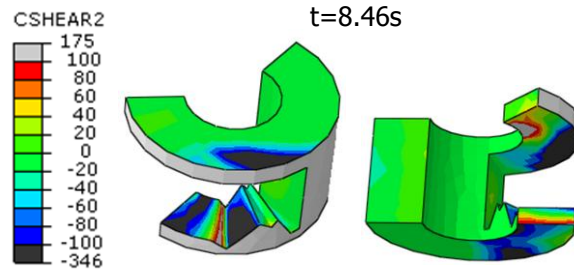
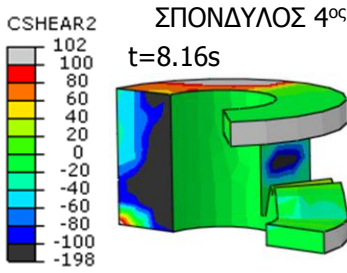
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

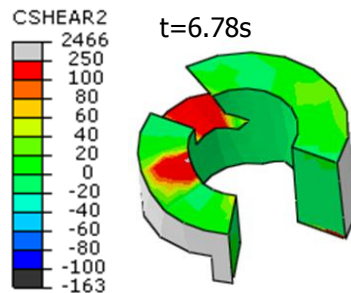


ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

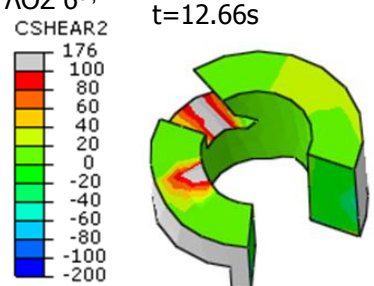
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



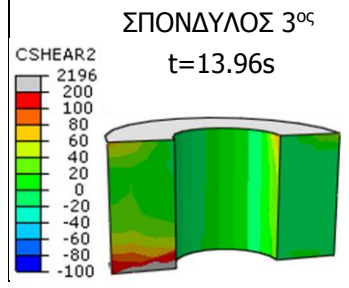
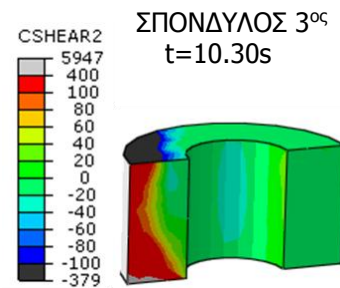
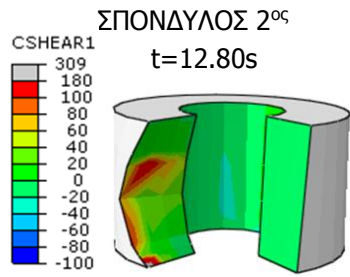
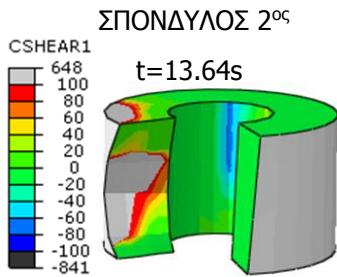
Ομάδα εικόνων 2.1: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΑΒΑΣ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

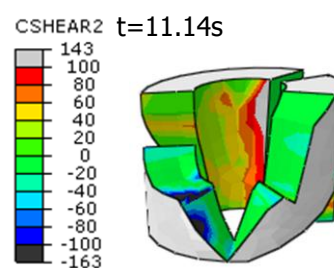
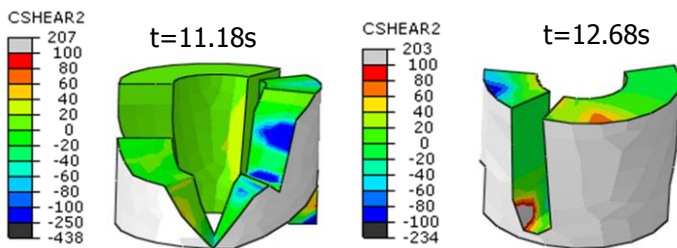
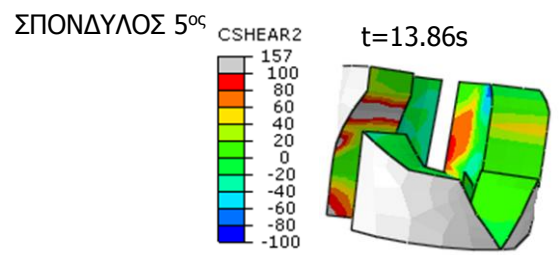
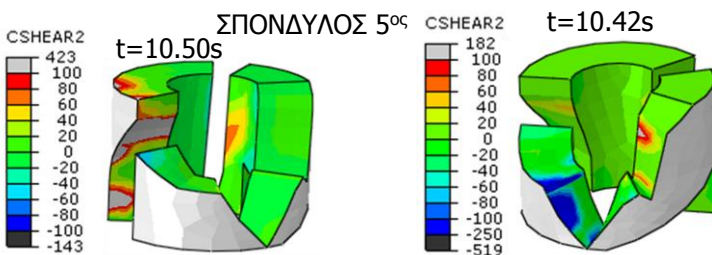
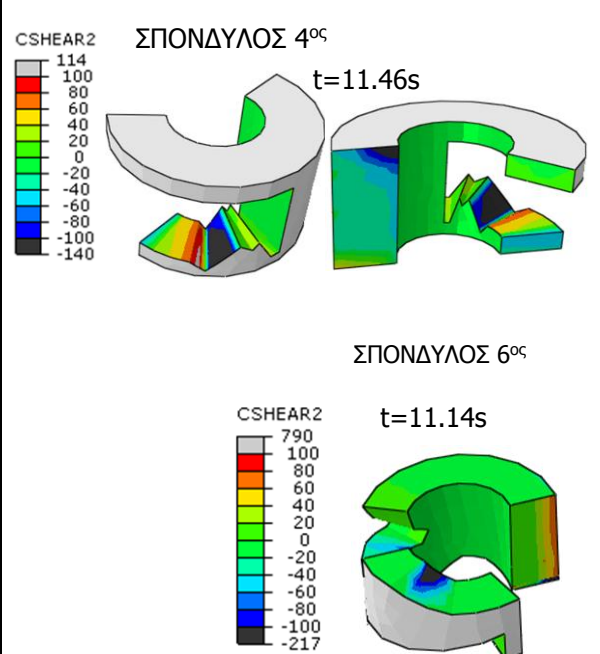
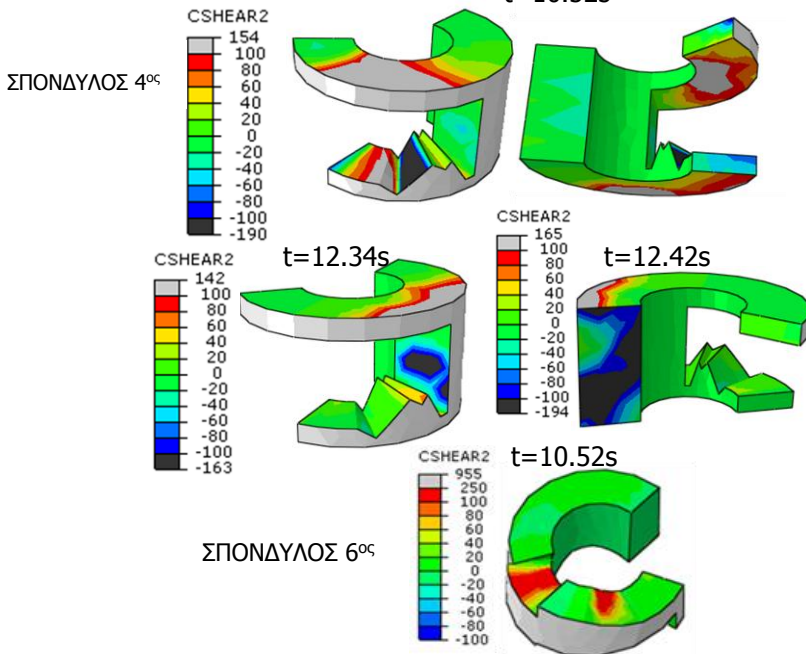
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



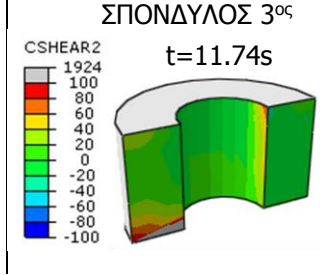
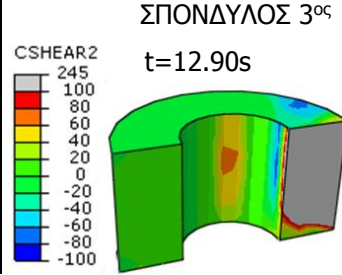
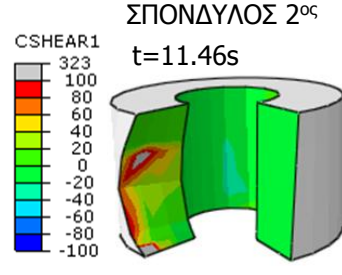
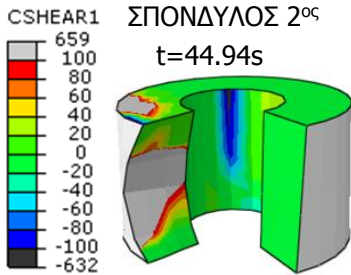
Ομάδα εικόνων 2.2: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ CAMRANO

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

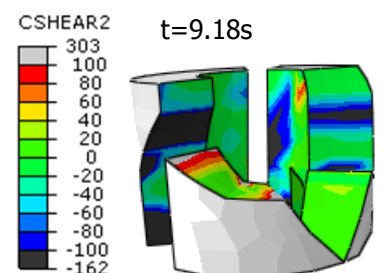
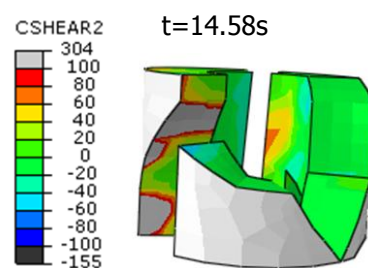
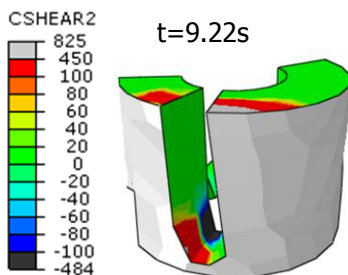
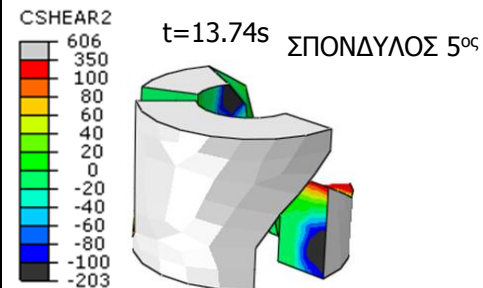
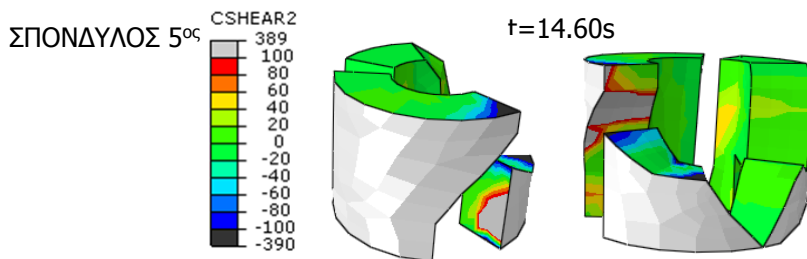
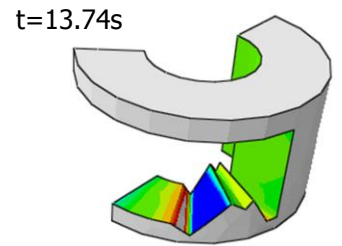
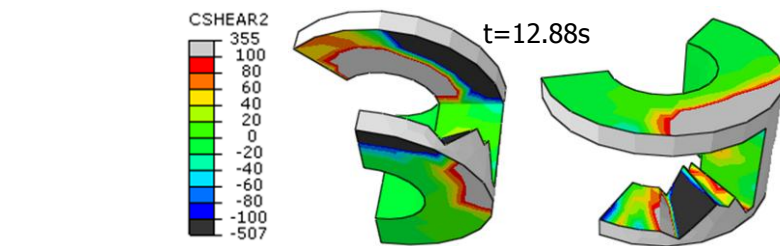
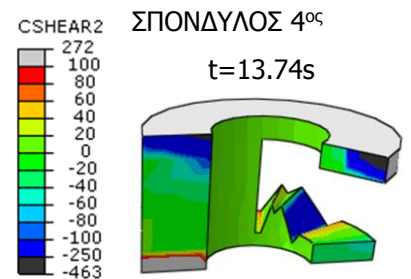
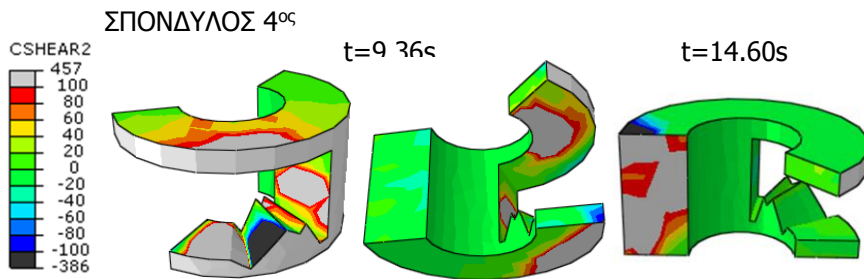
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

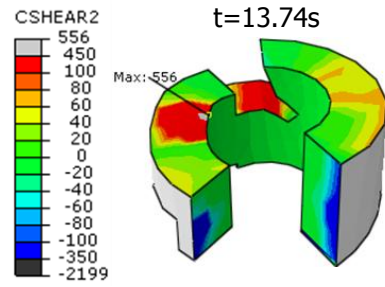
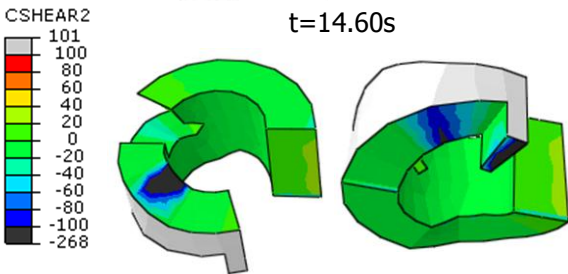
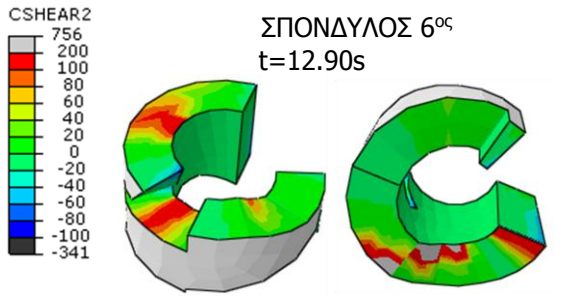
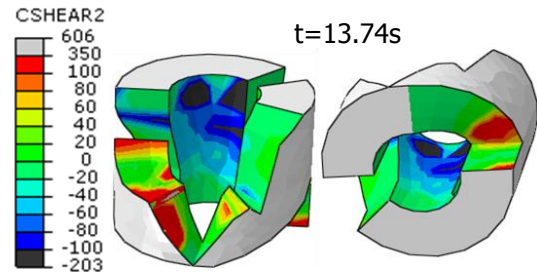
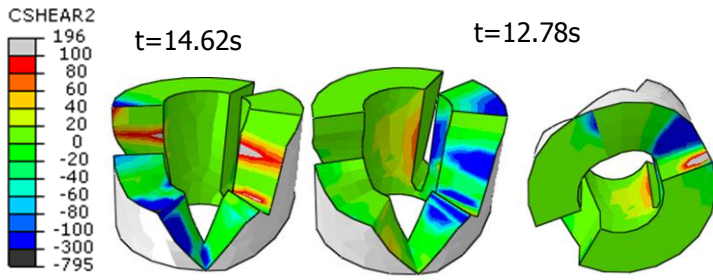
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ





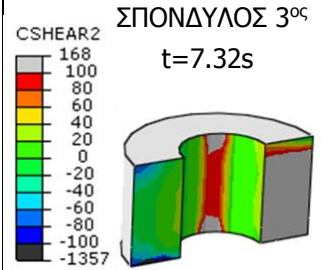
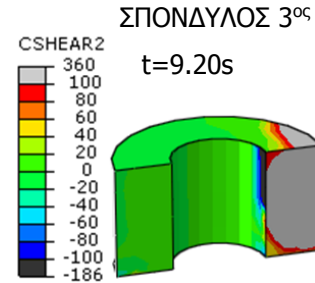
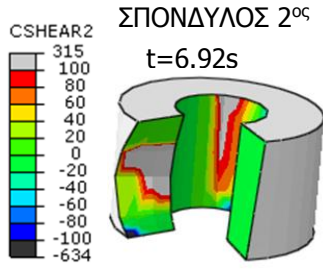
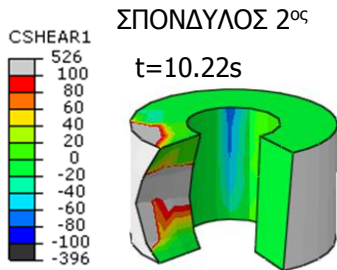
Ομάδα εικόνων 2.3: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΛΟΜΑ ΠΡΙΕΤΑ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

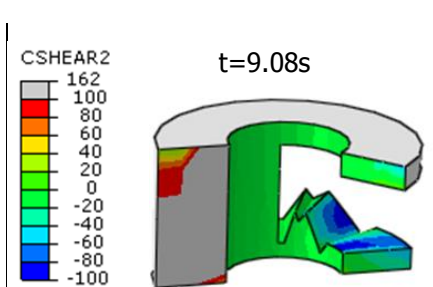
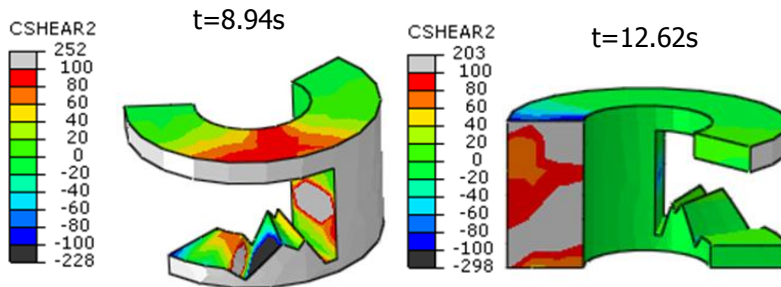
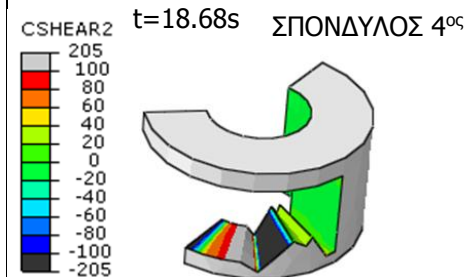
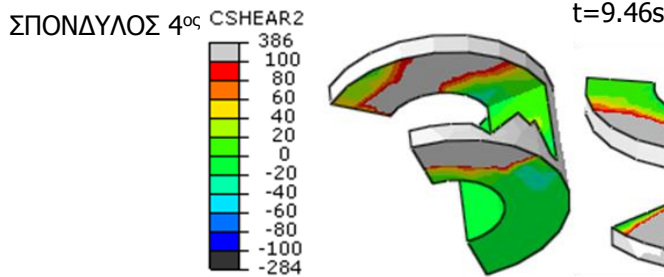
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



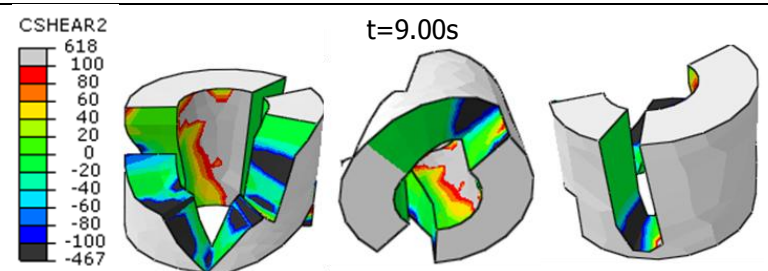
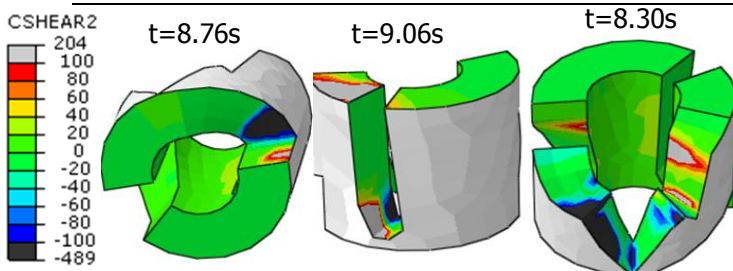
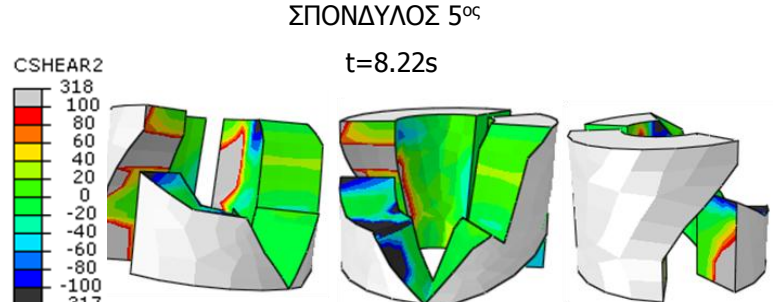
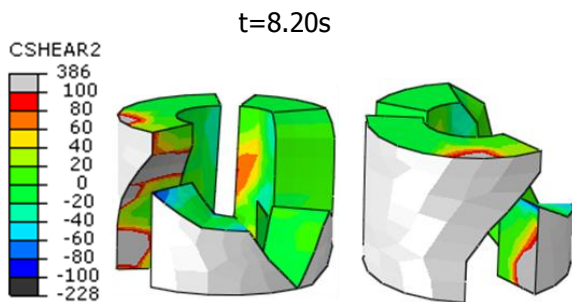
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

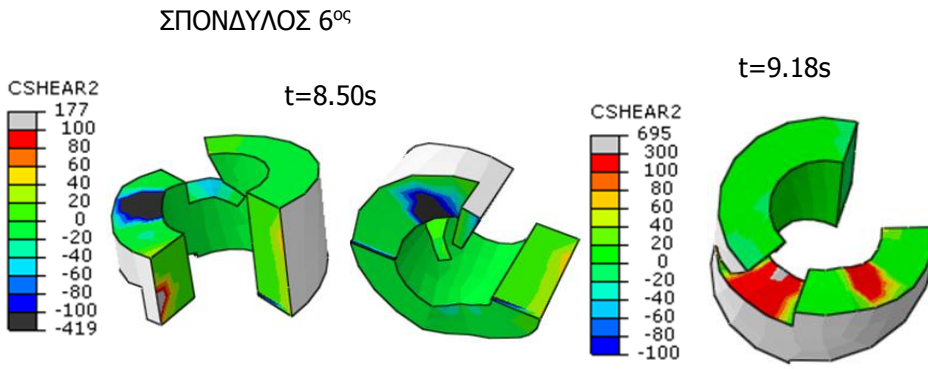
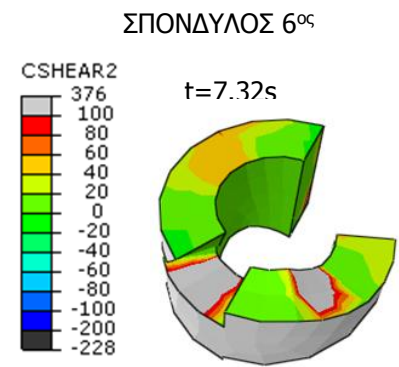
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}

ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ**ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ**

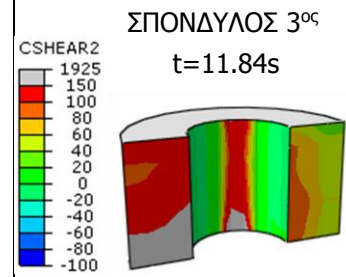
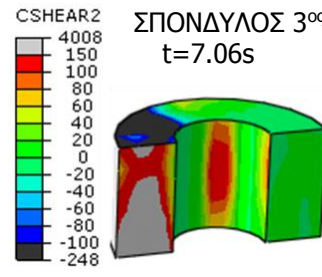
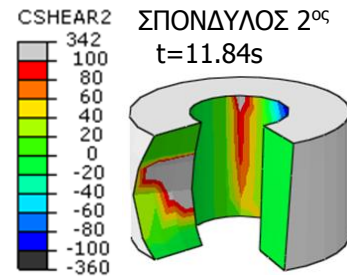
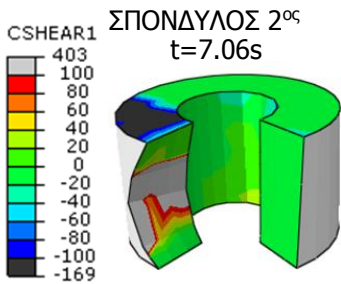
Ομάδα εικόνων 2.4: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, LAKE HUGHES #9

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

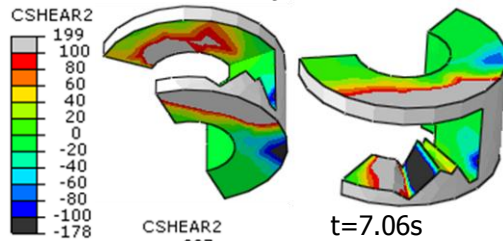


ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

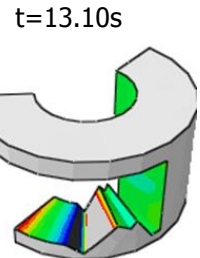
t=7.52s

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

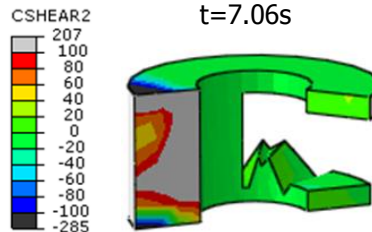
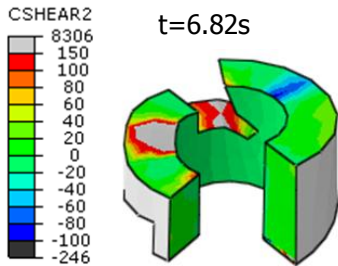
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}



ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}

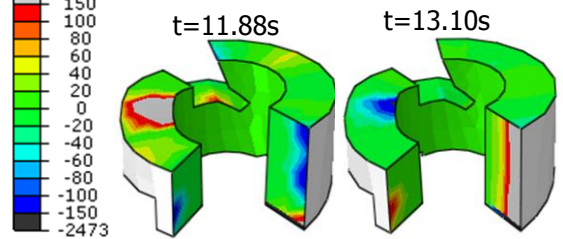


ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



CSHEAR2

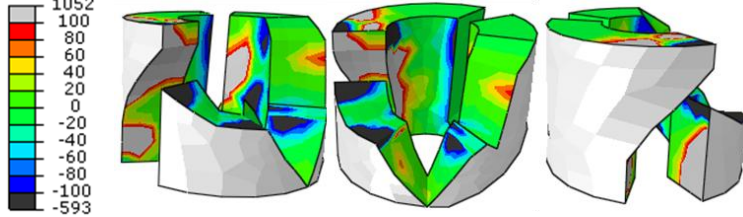
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



CSHEAR2

ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}

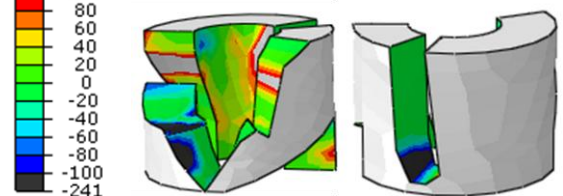
t=6.82s



CSHEAR2

ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}

t=13.10s

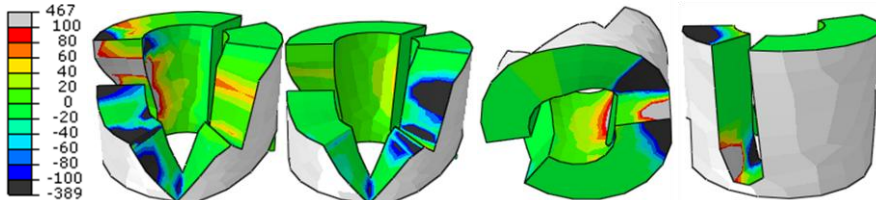


CSHEAR2

t=7.04s

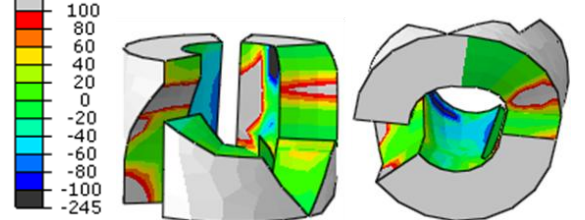
t=7.88s

t=7.16s



CSHEAR2

t=6.78s



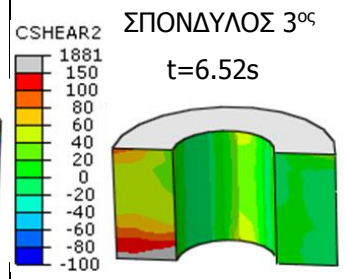
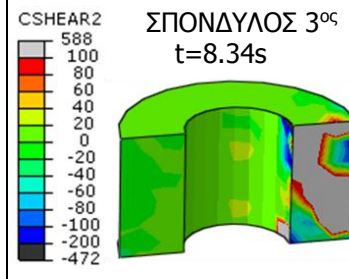
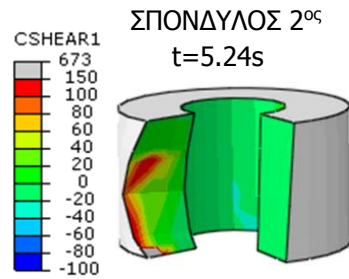
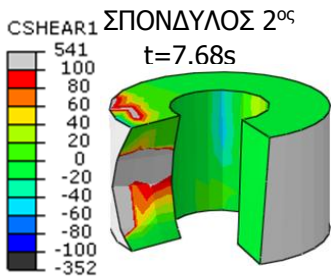
Ομάδα εικόνων 2.5: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, WONDERLAND

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

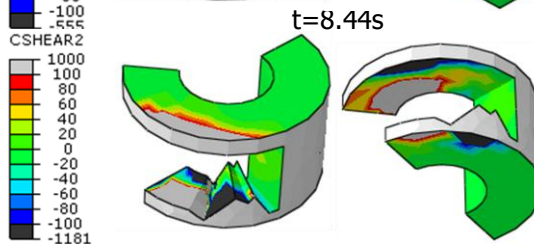
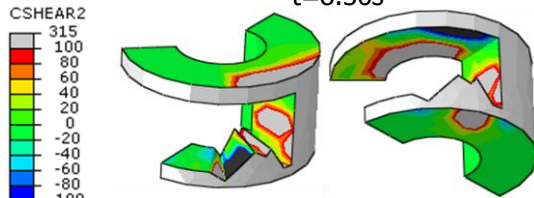
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



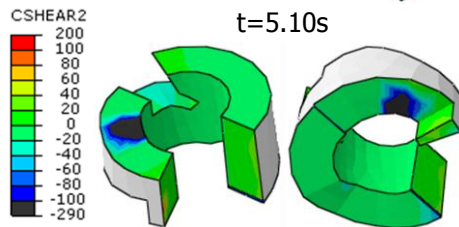
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

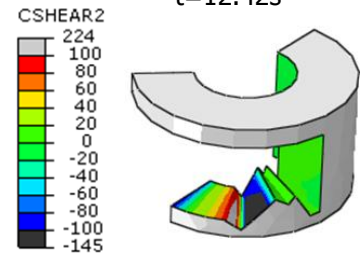
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}



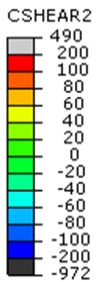
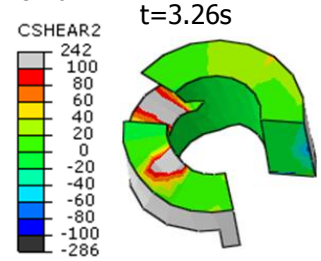
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 4^{ος}

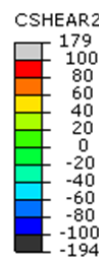
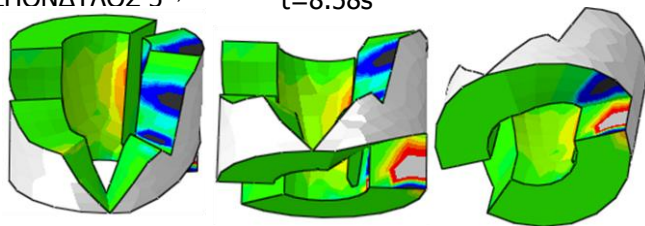


ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



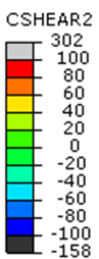
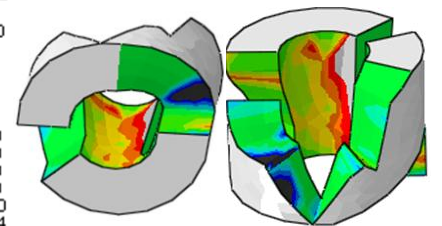
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}

t=8.58s

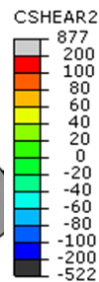
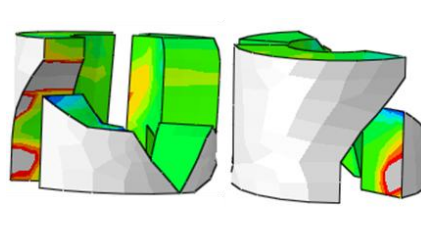


t=5.14s

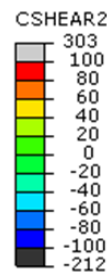
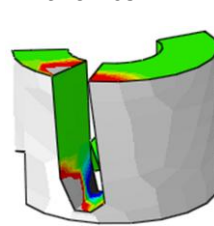
t=5.24s



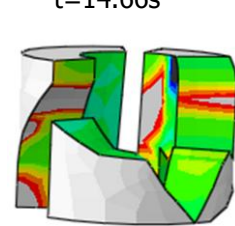
t=6.44s



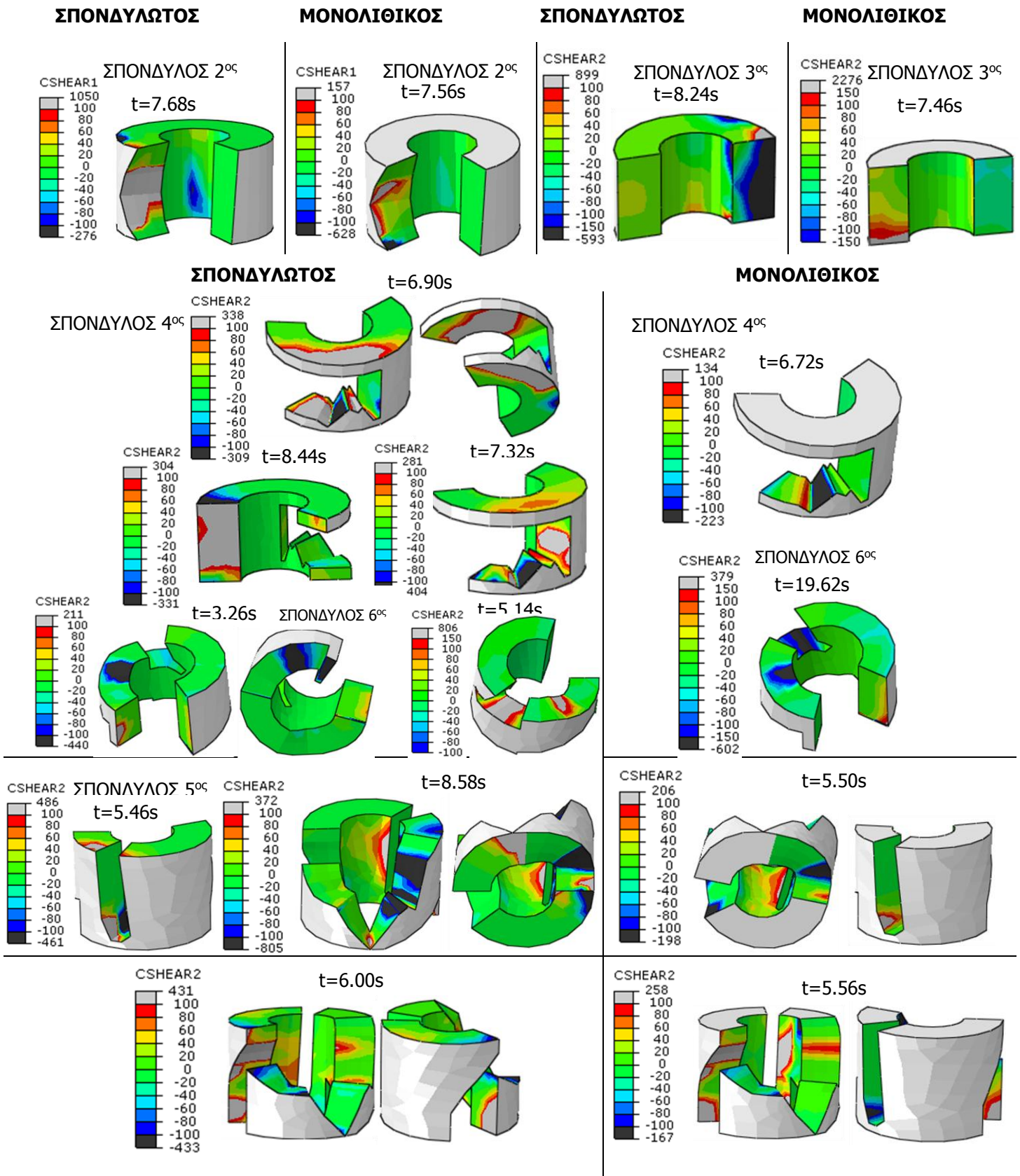
t=8.46s



t=14.66s



Ομάδα εικόνων 2.6: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΟΖΑΝΗ, 1995



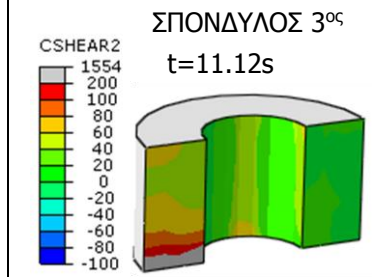
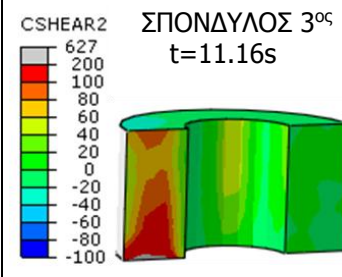
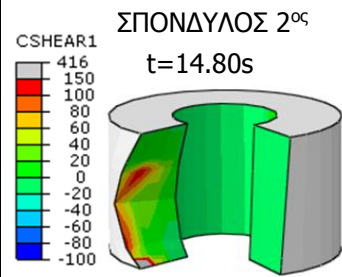
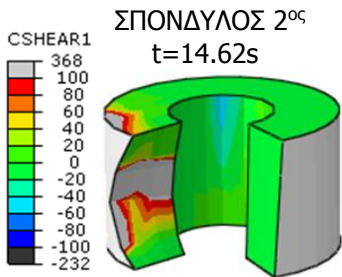
Ομάδα εικόνων 3.1: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΑΒΑΣ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

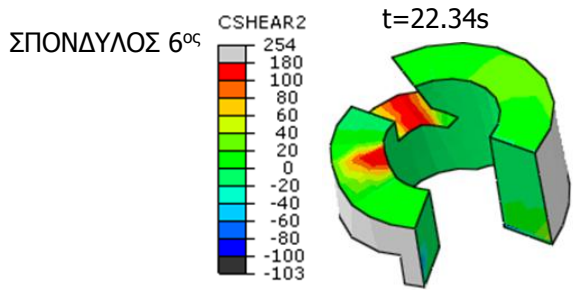
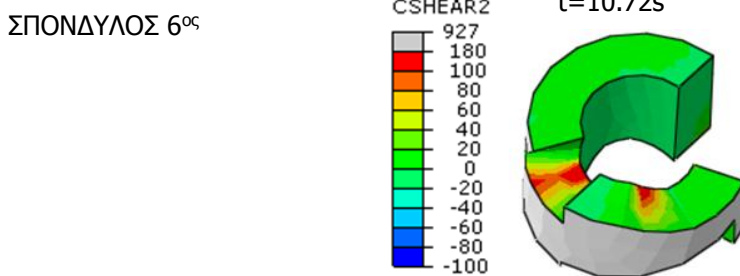
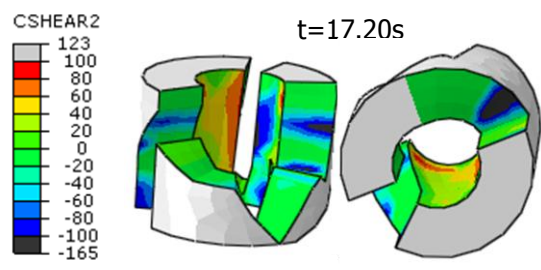
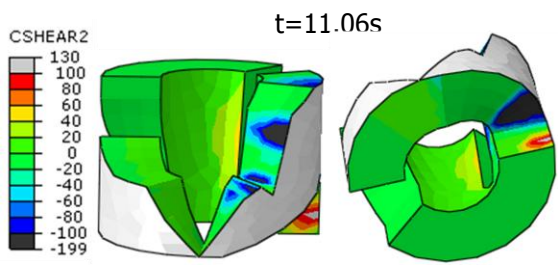
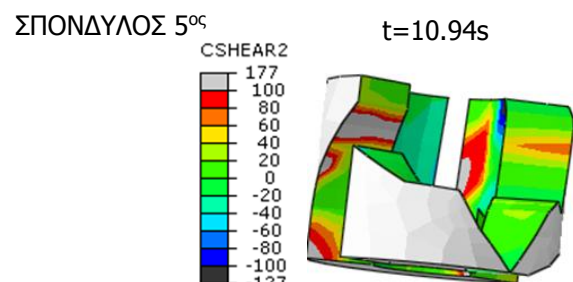
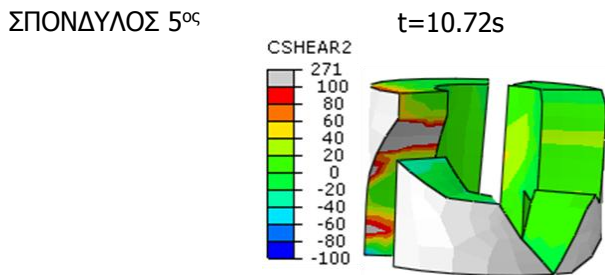
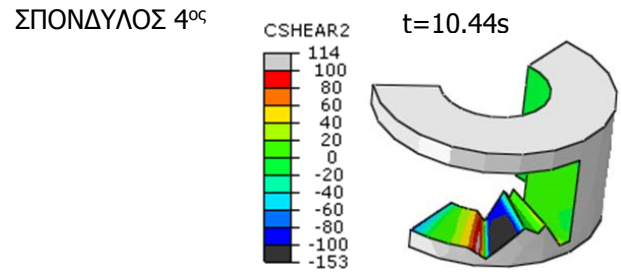
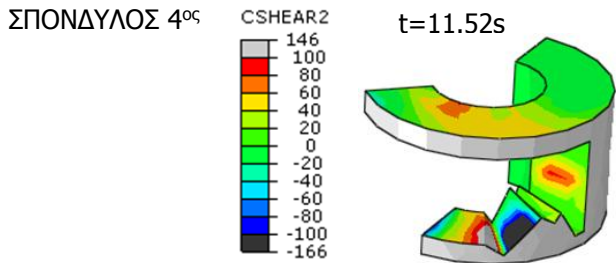
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



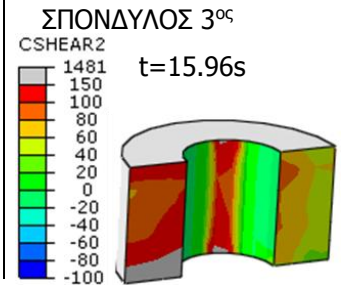
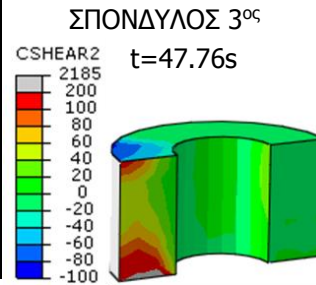
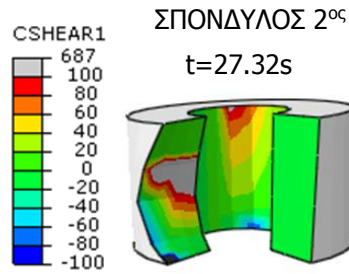
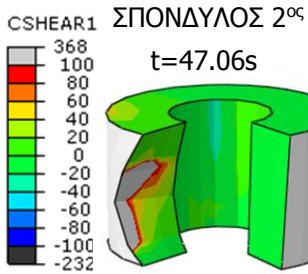
Ομάδα εικόνων 3.2: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΑΜΡΑΝΟ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

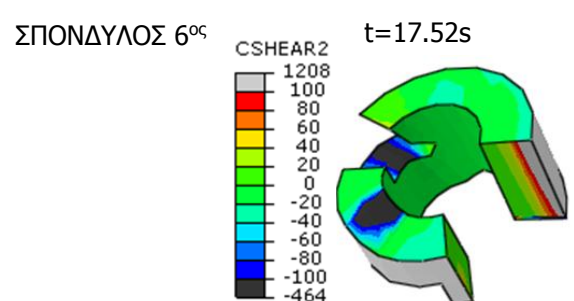
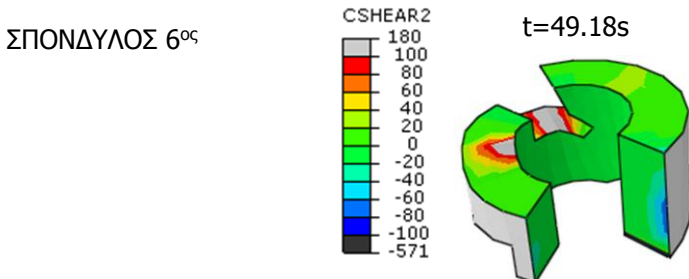
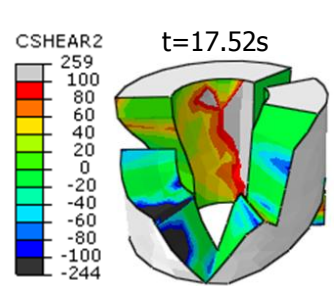
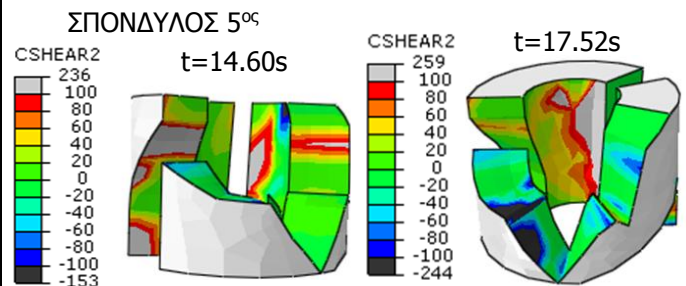
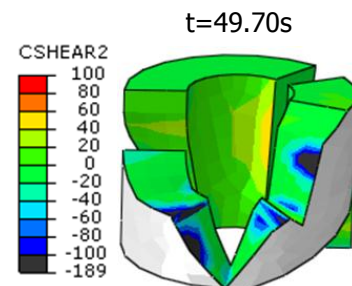
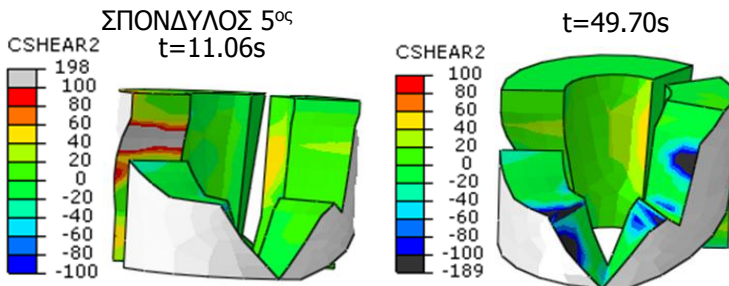
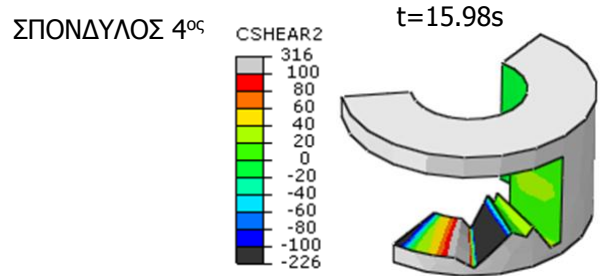
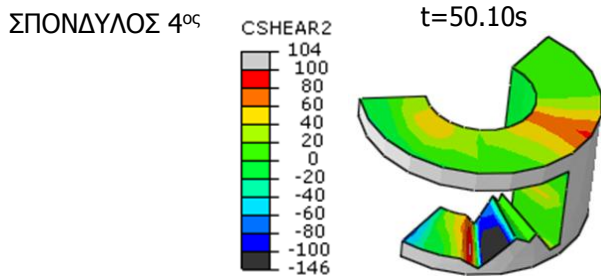
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



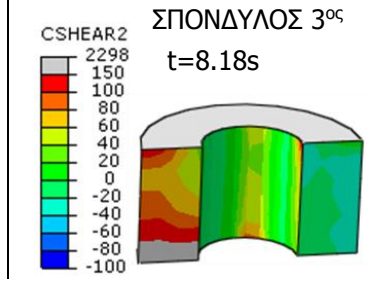
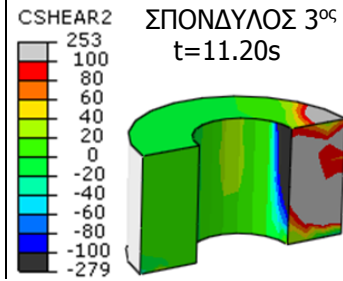
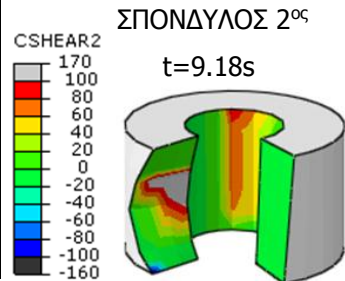
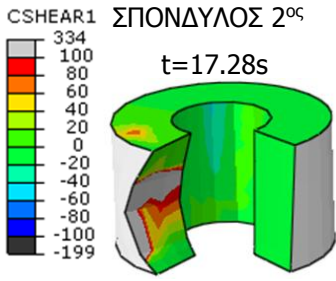
Ομάδα εικόνων 3.3: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΛΟΜΑ ΠΡΙΕΤΑ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

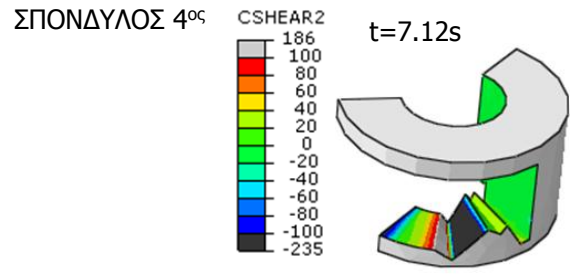
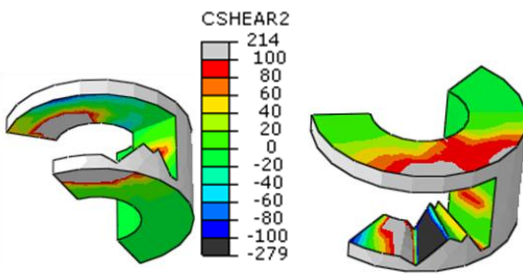
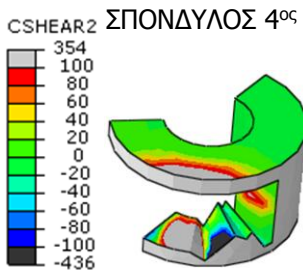
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

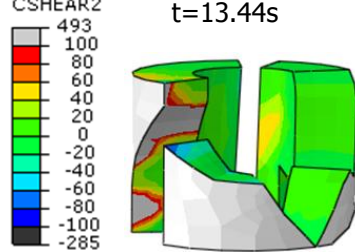
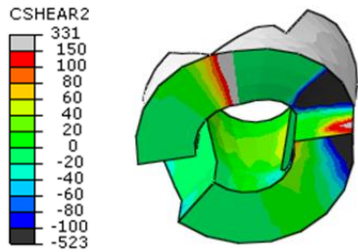


ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

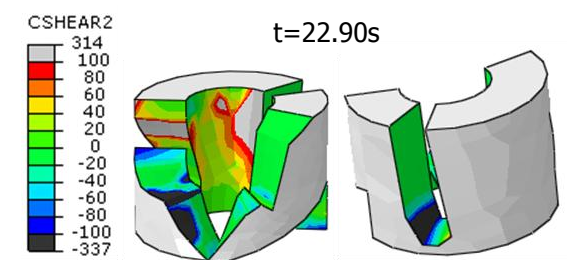
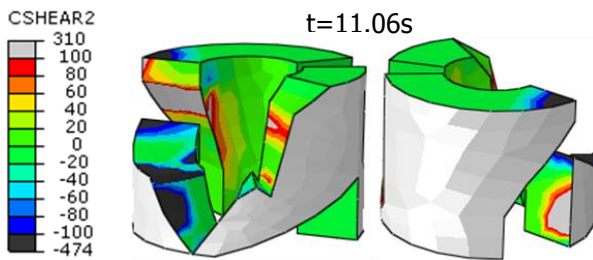
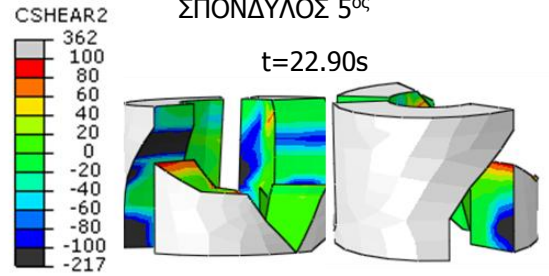
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



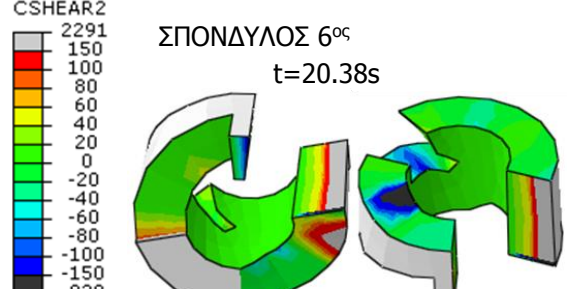
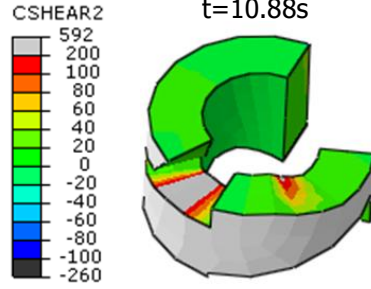
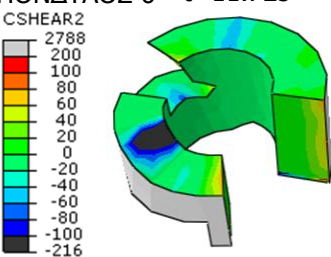
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος} t=8.14s



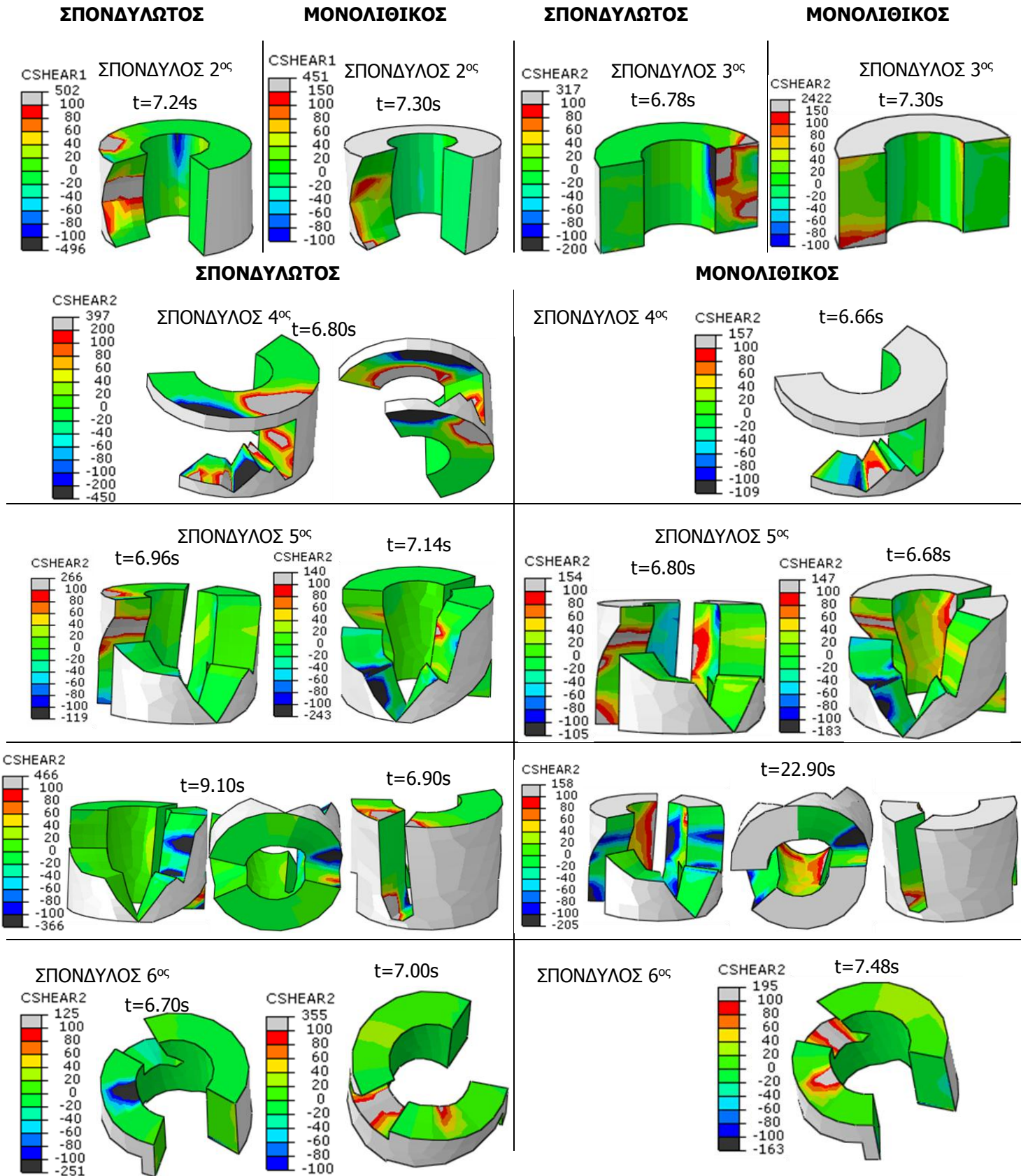
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος} t=11.72s



Ομάδα εικόνων 3.4: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, LAKE HUGHES #9



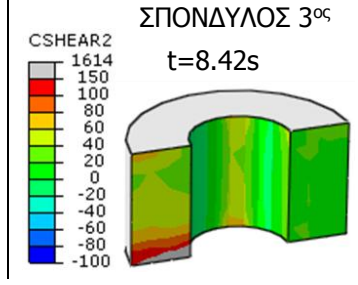
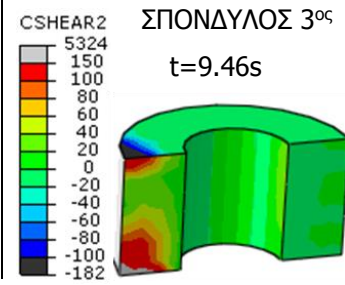
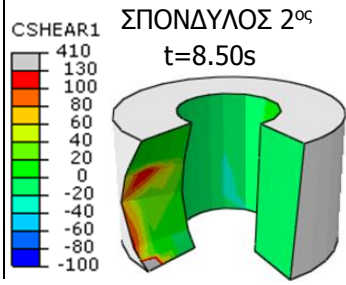
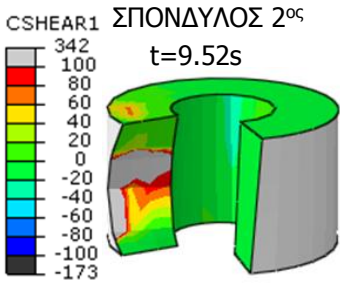
Ομάδα εικόνων 3.5: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTH RIDGE, WONDERLAND

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

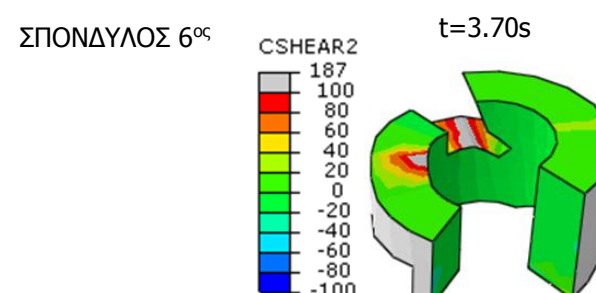
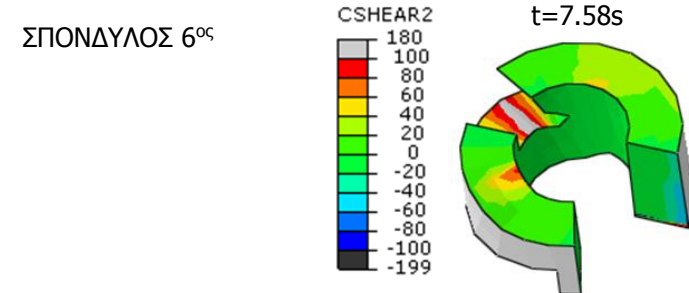
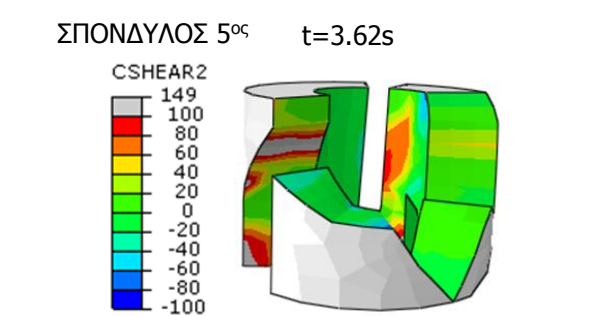
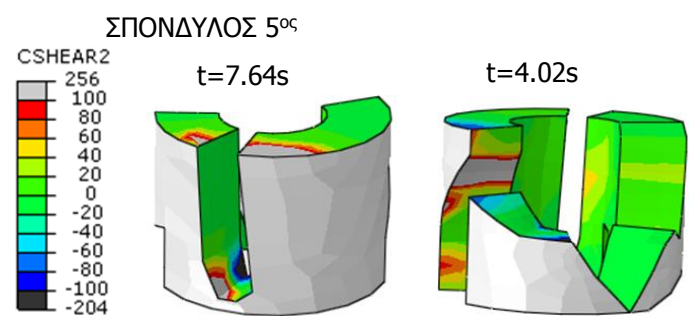
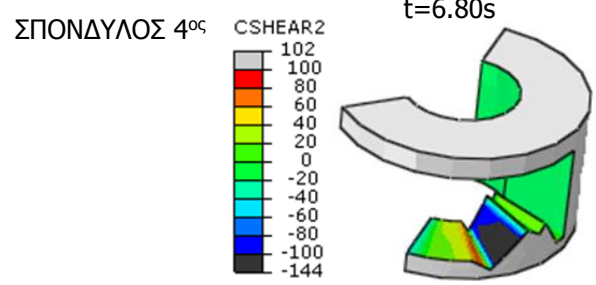
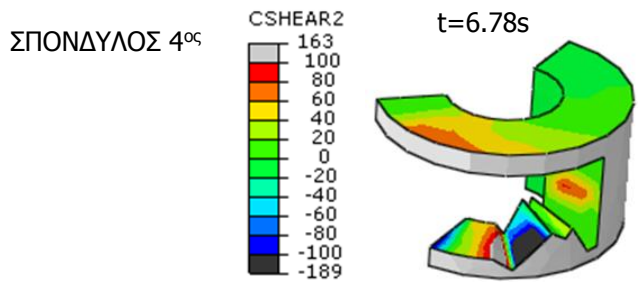
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

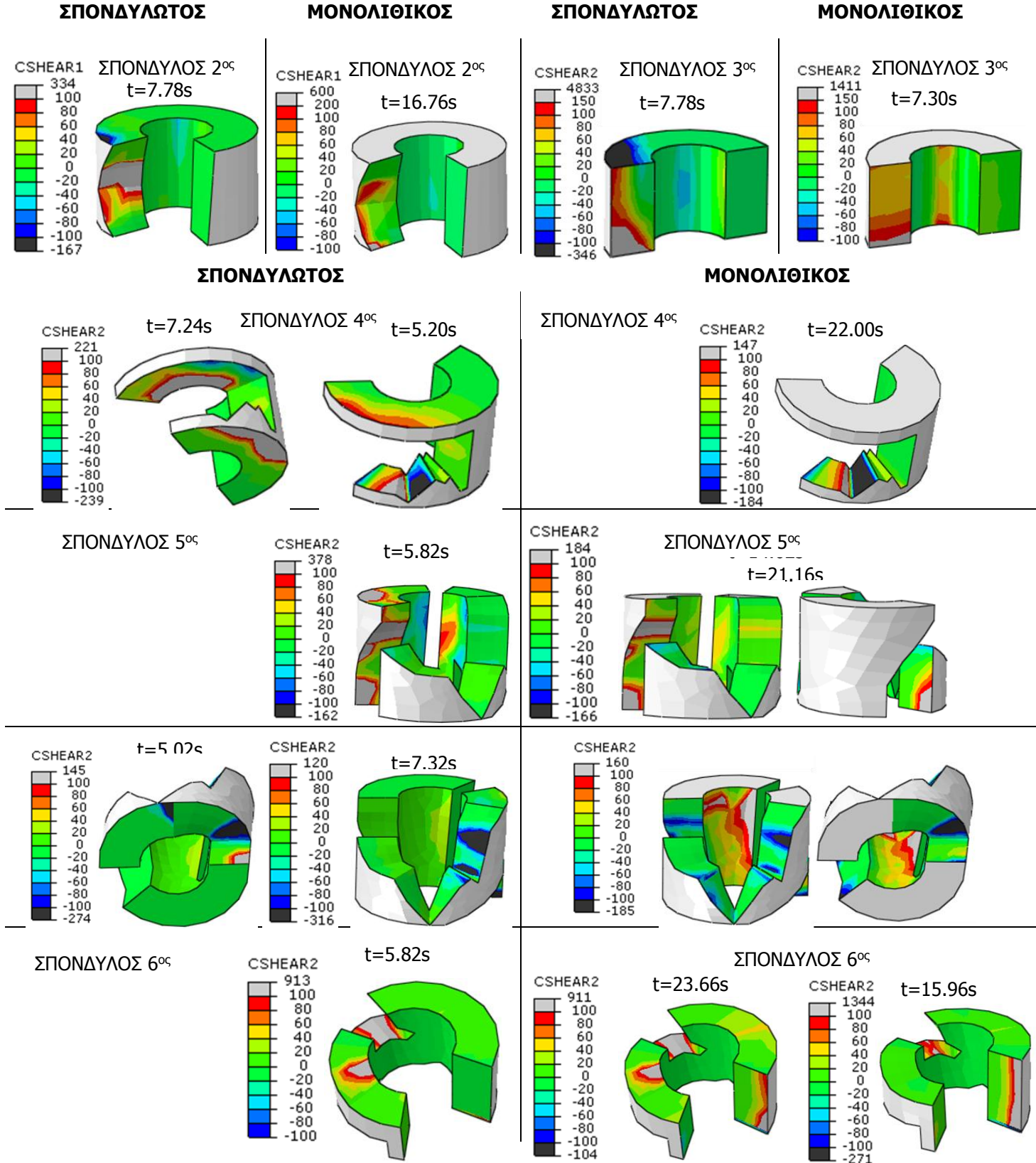


ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



Ομάδα εικόνων 3.6: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΟΖΑΝΗ,1995



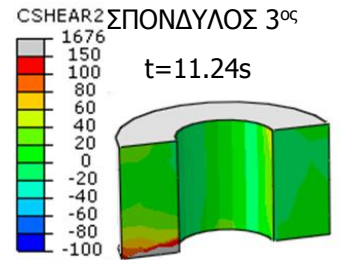
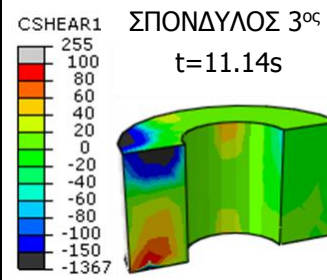
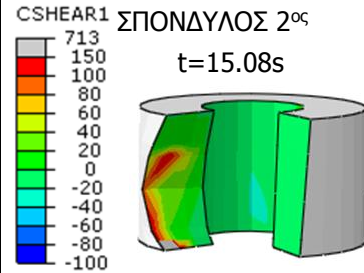
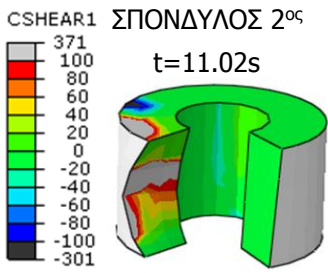
Ομάδα εικόνων 4.1: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΑΒΑΣ

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

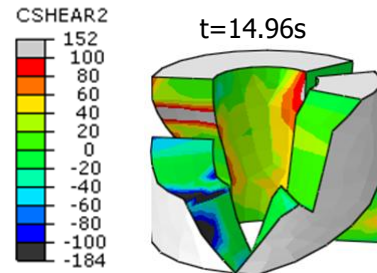
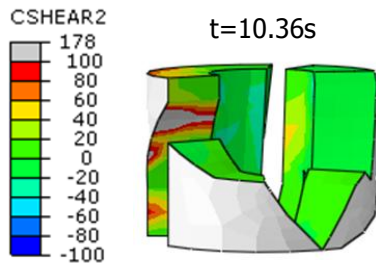
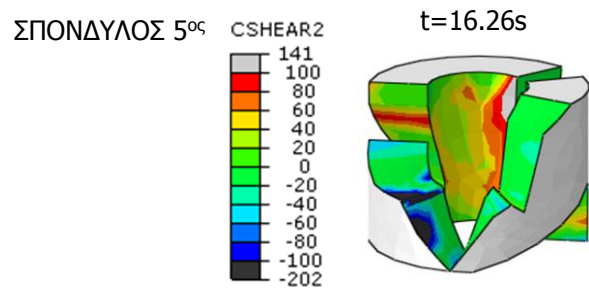
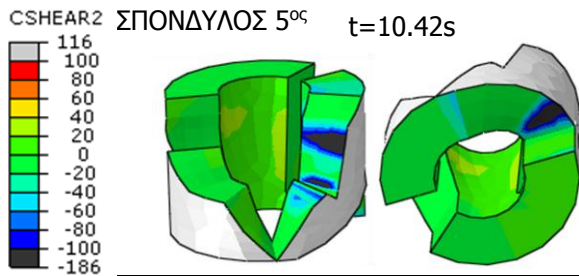
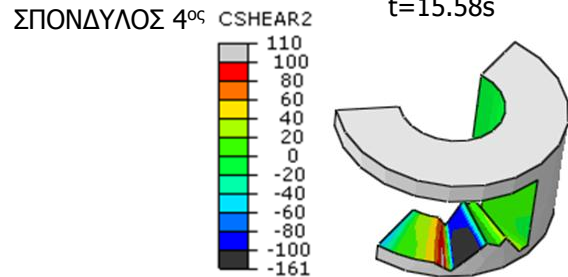
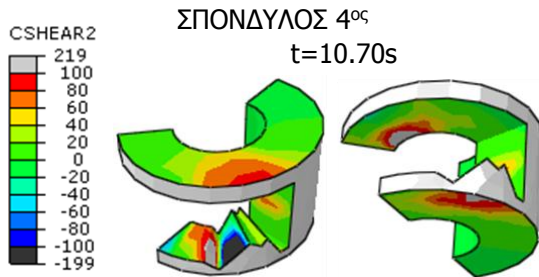
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

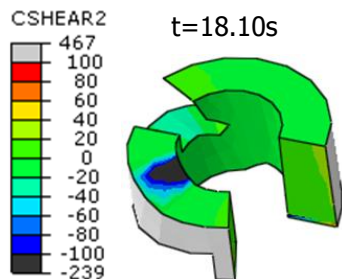


ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

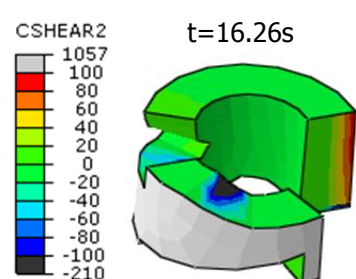
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ



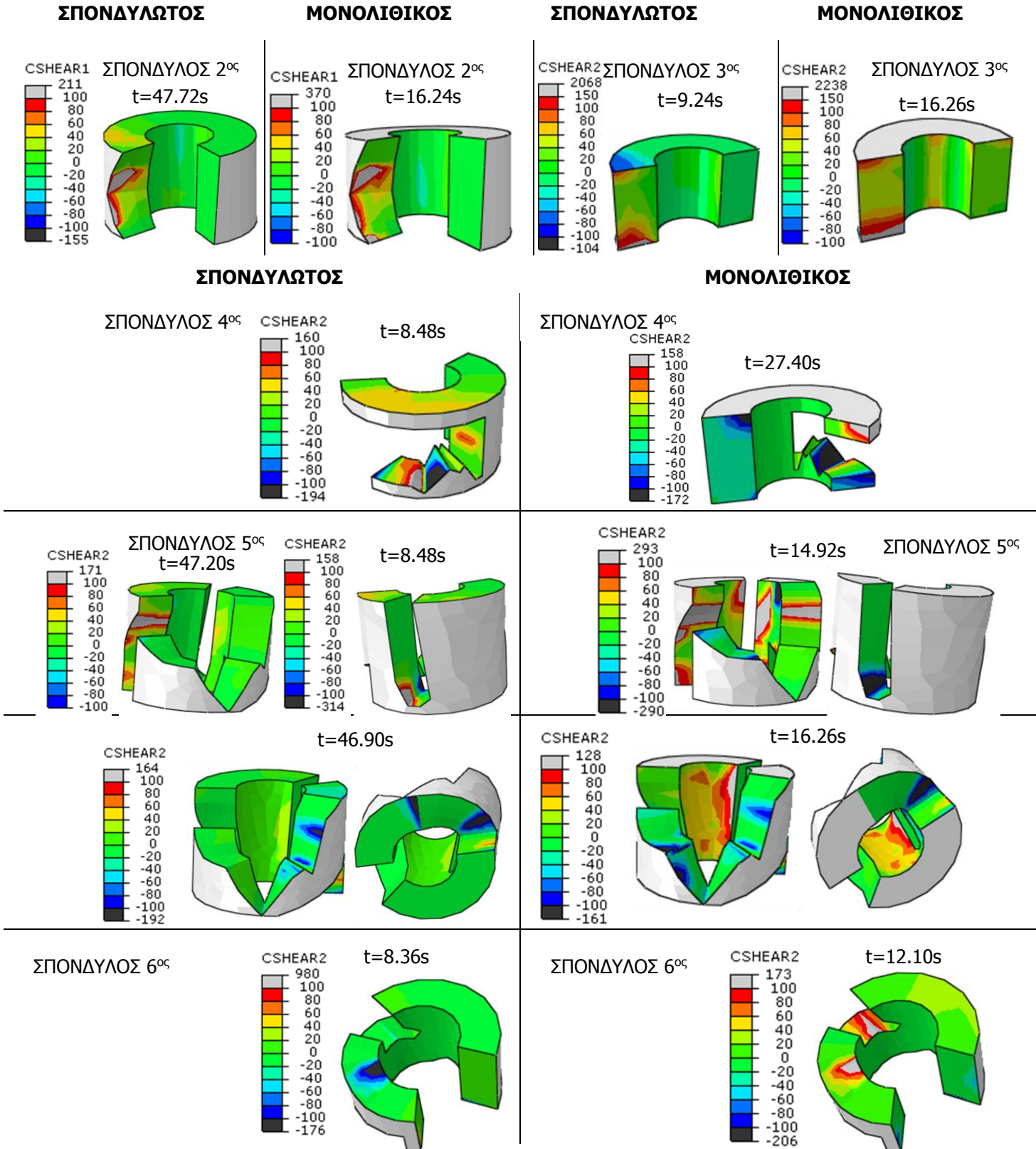
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



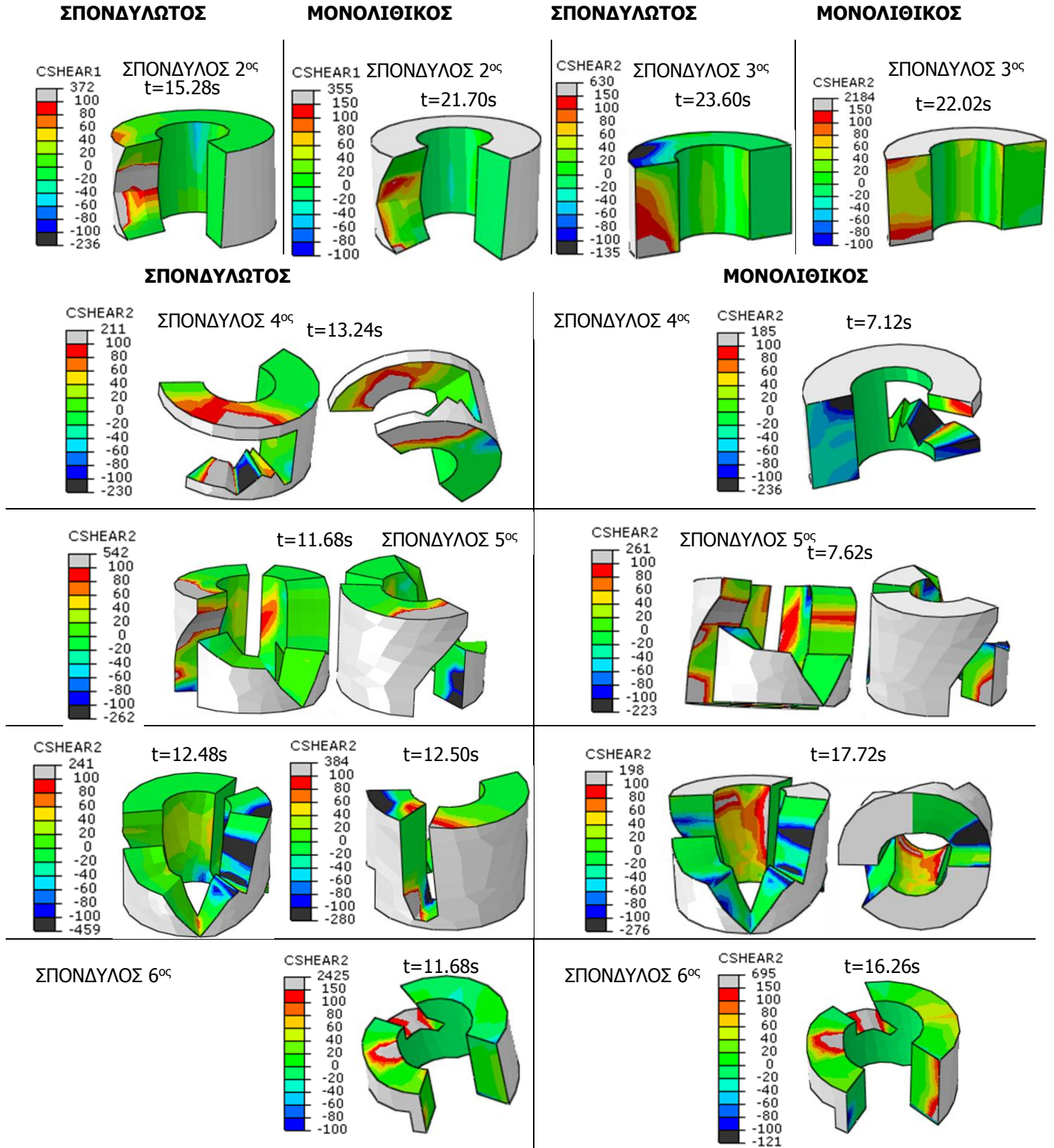
ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



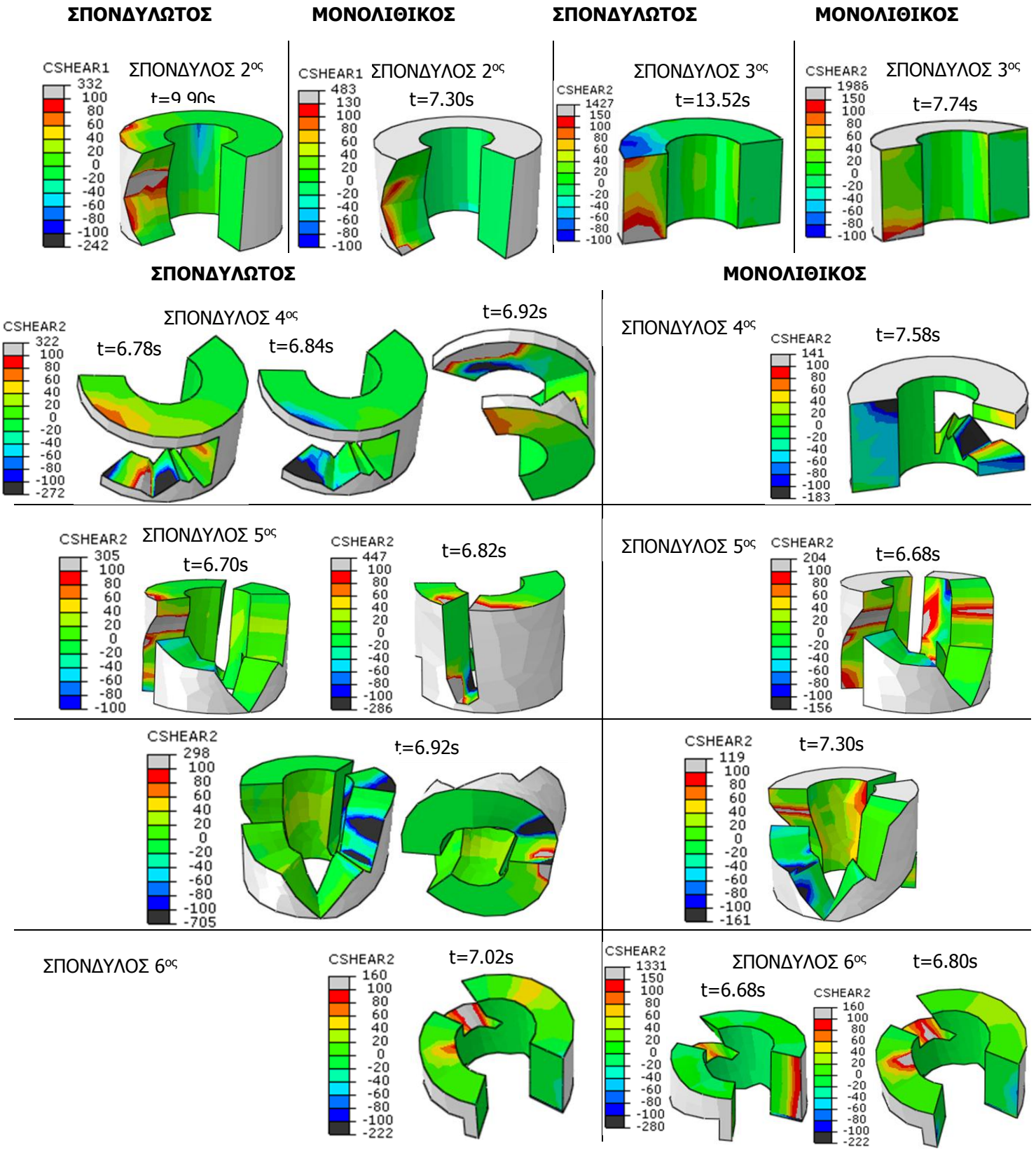
Ομάδα εικόνων 4.2: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ CAMPANO



Ομάδα εικόνων 4.3: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΛΟΜΑ ΠΡΙΕΤΑ



Ομάδα εικόνων 4.4: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, LAKE HUGHES #9



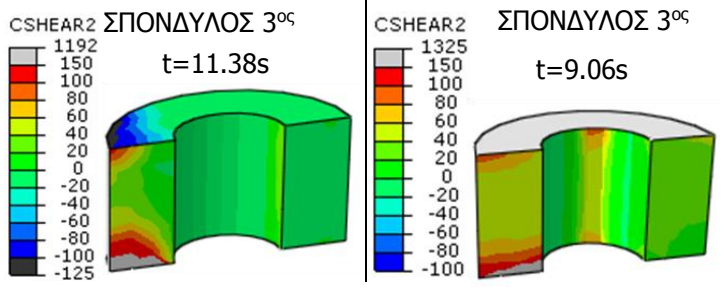
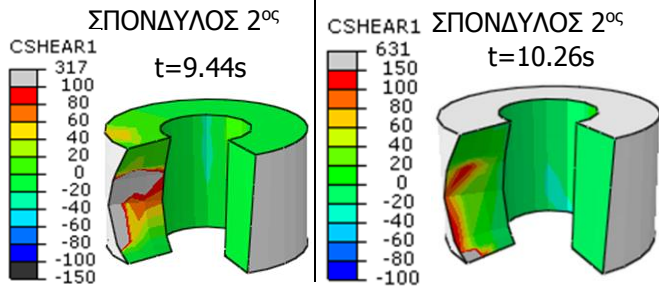
Ομάδα εικόνων 4.5: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, WONDERLAND

ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

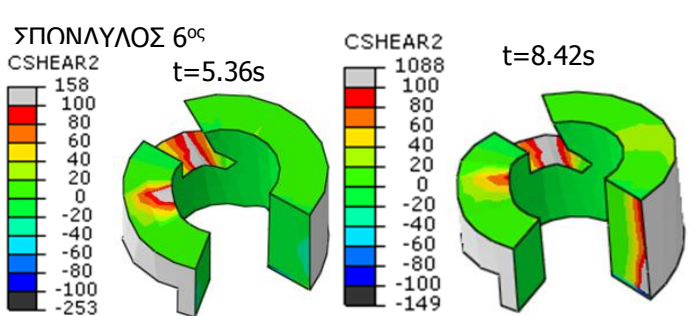
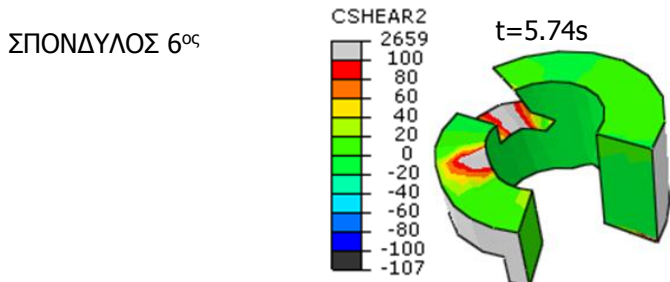
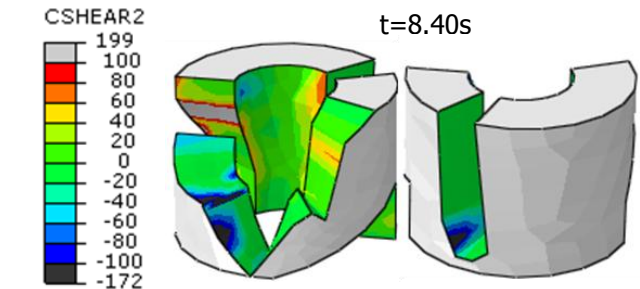
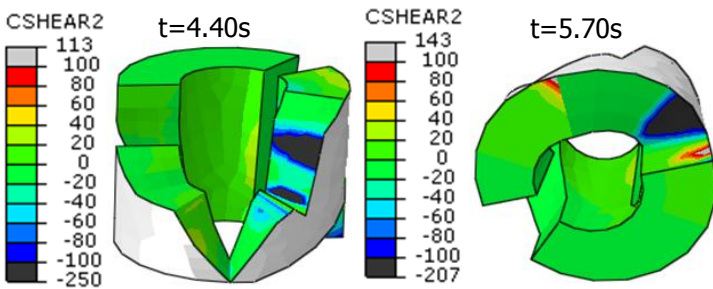
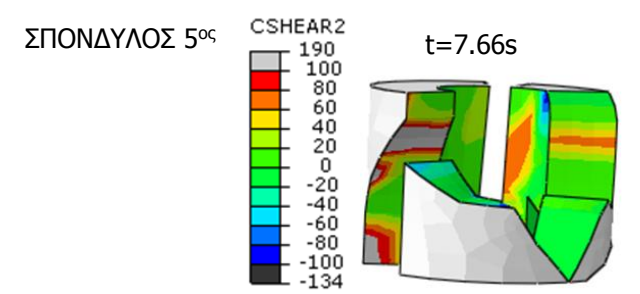
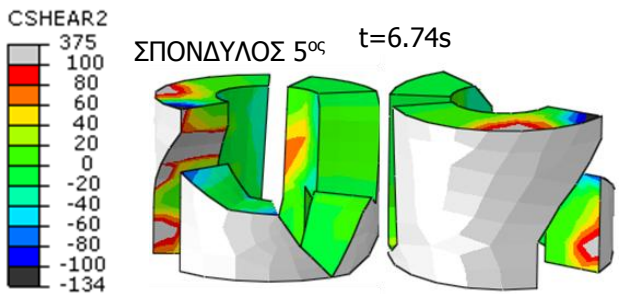
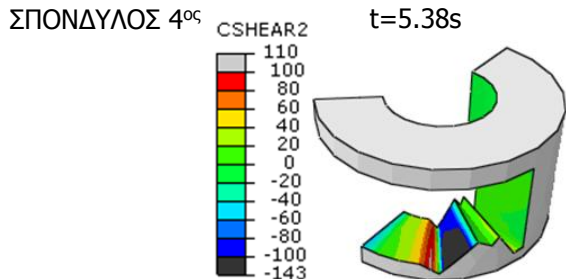
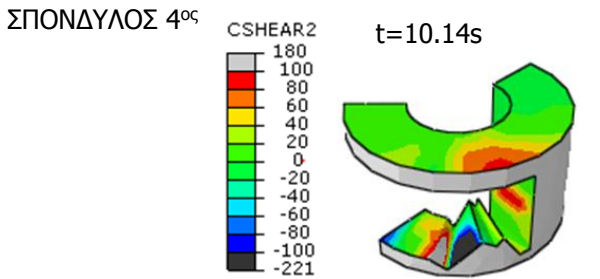
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

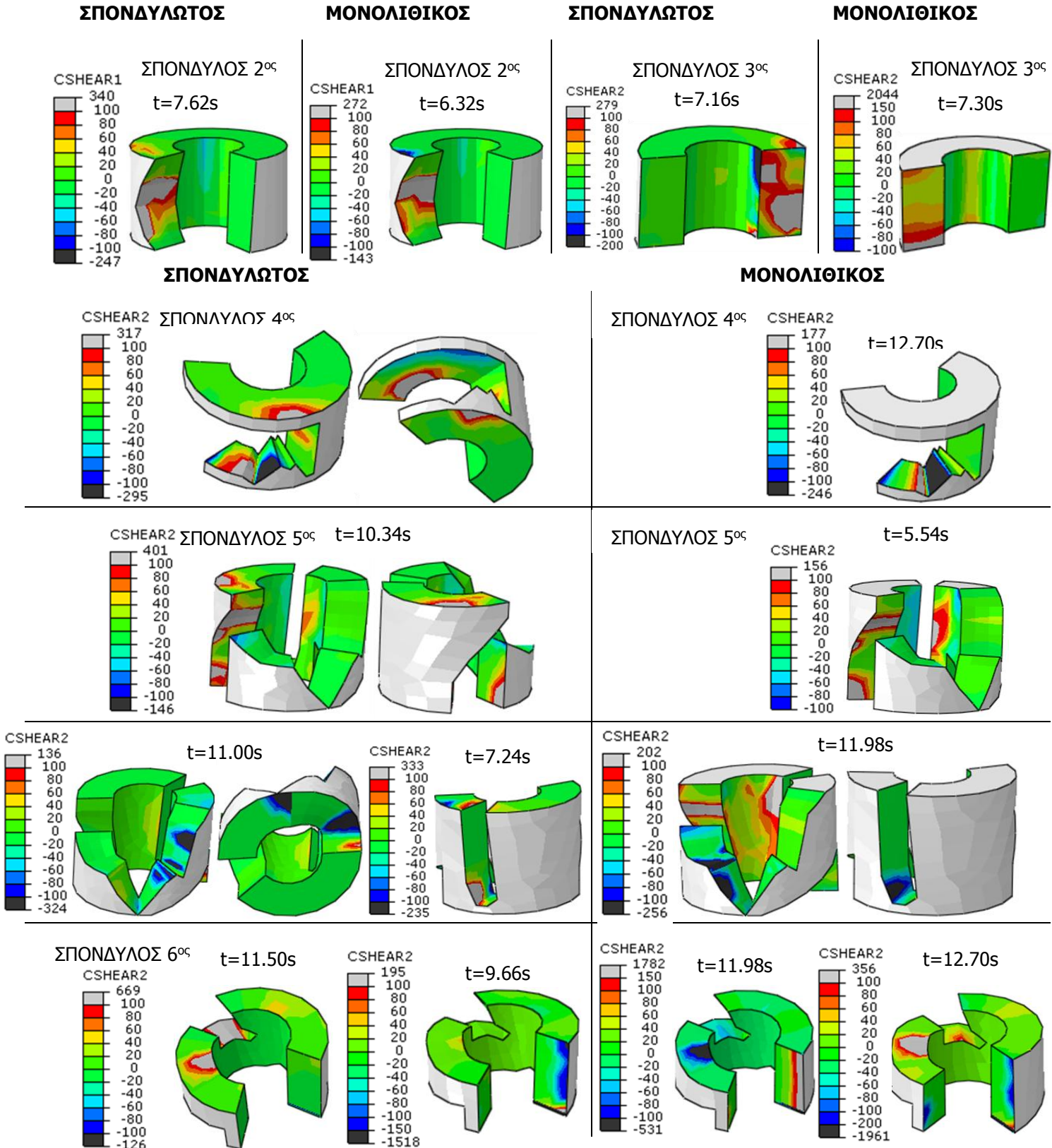


ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

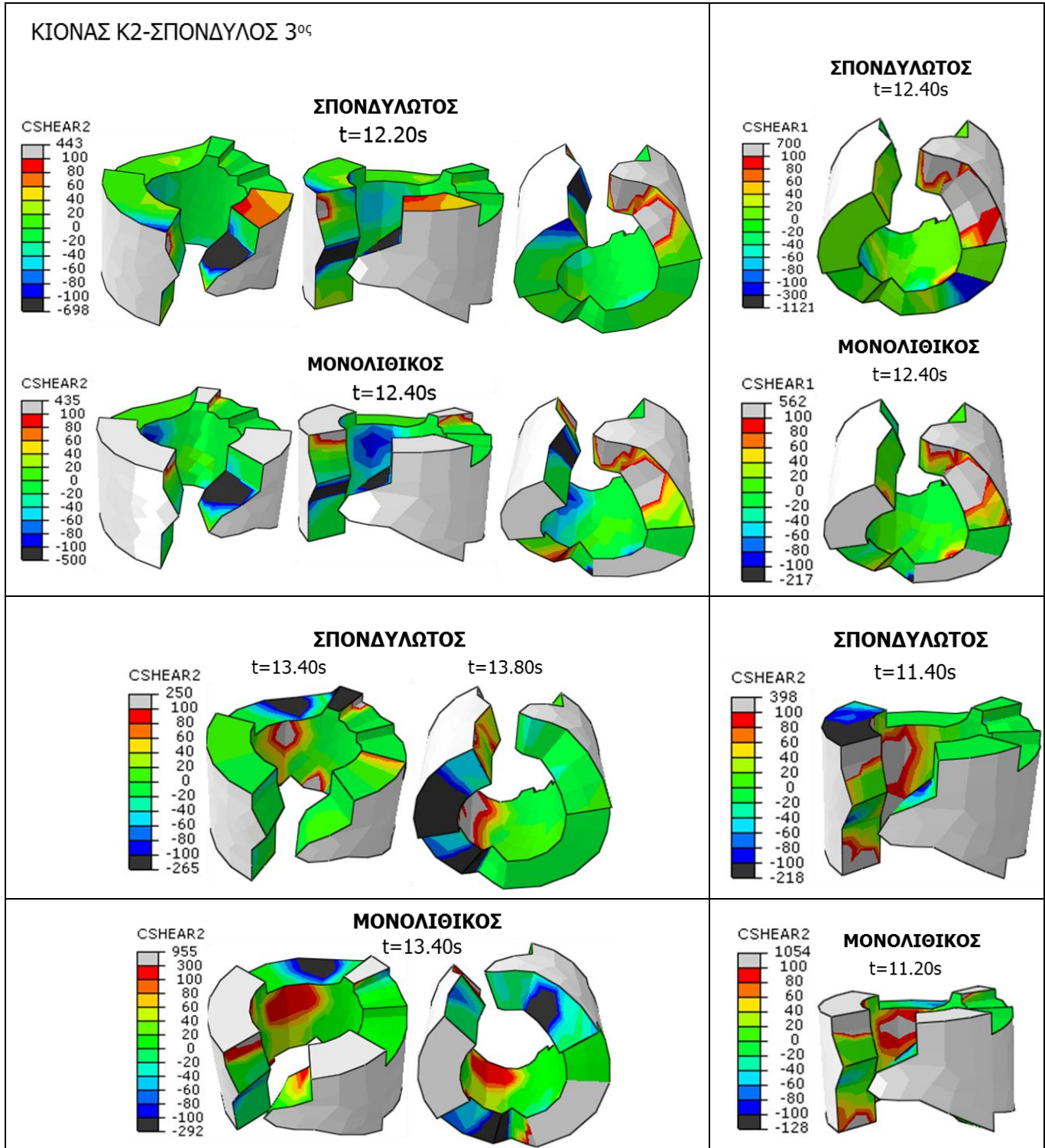


Ομάδα εικόνων 4.6: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΟΖΑΝΗ, 1995

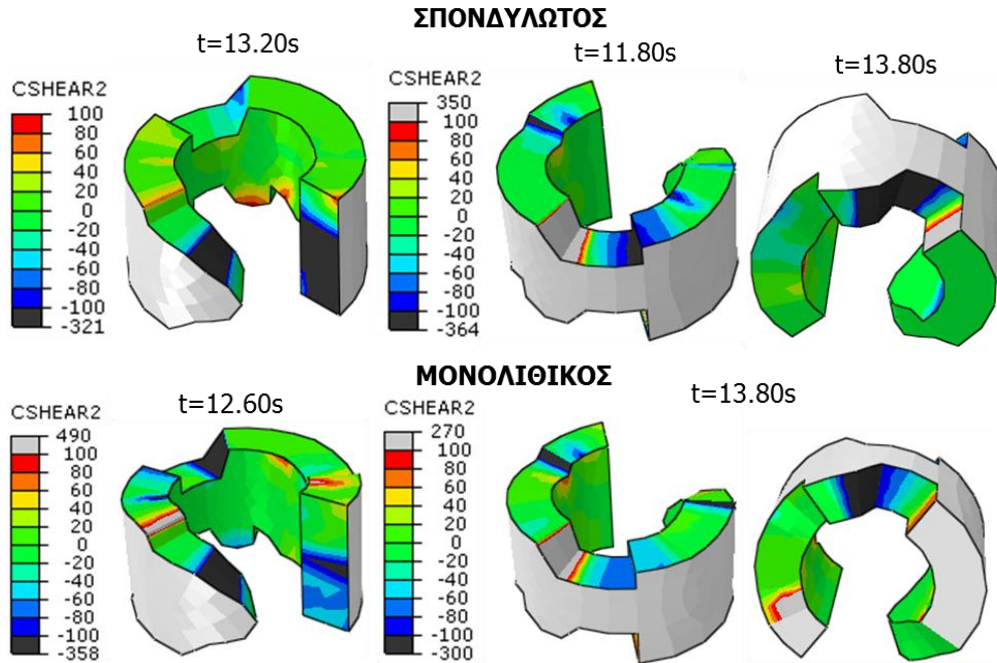


B. ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΙΟΝΩΝ Κ1, Κ2 ΚΑΙ Κ3, ΝΑΟΣ ΤΟΥ ΠΥΘΙΟΥ ΑΠΟΛΛΩΝΑ

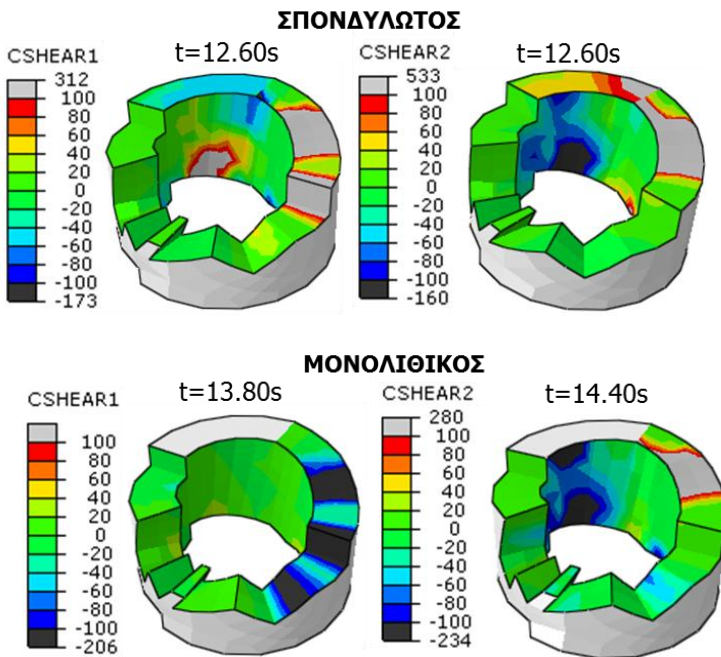
Ομάδα εικόνων 1.1: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΑΒΑΣ



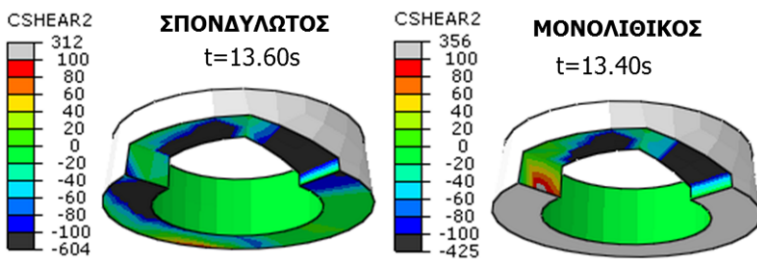
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



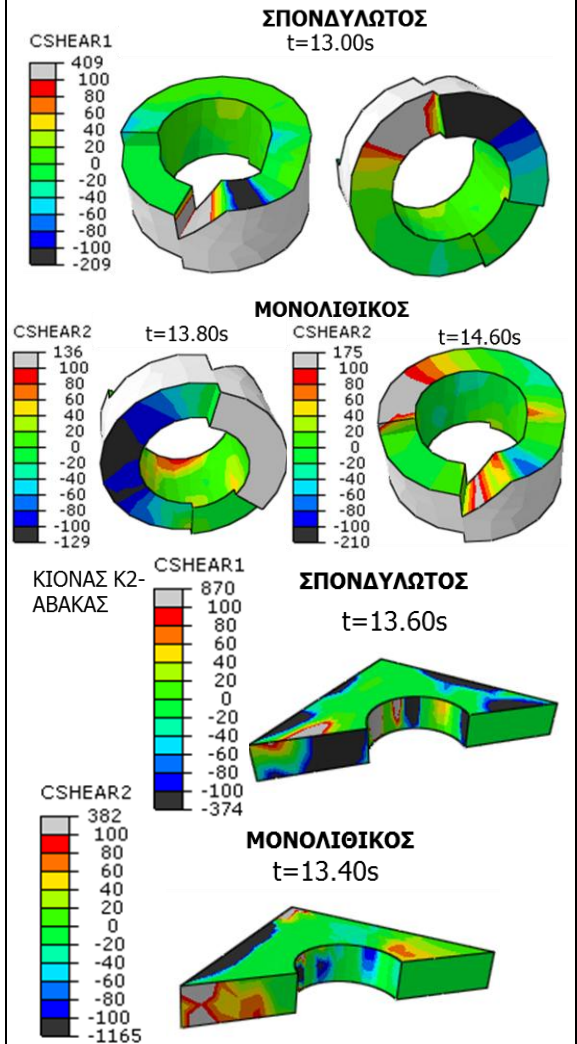
ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



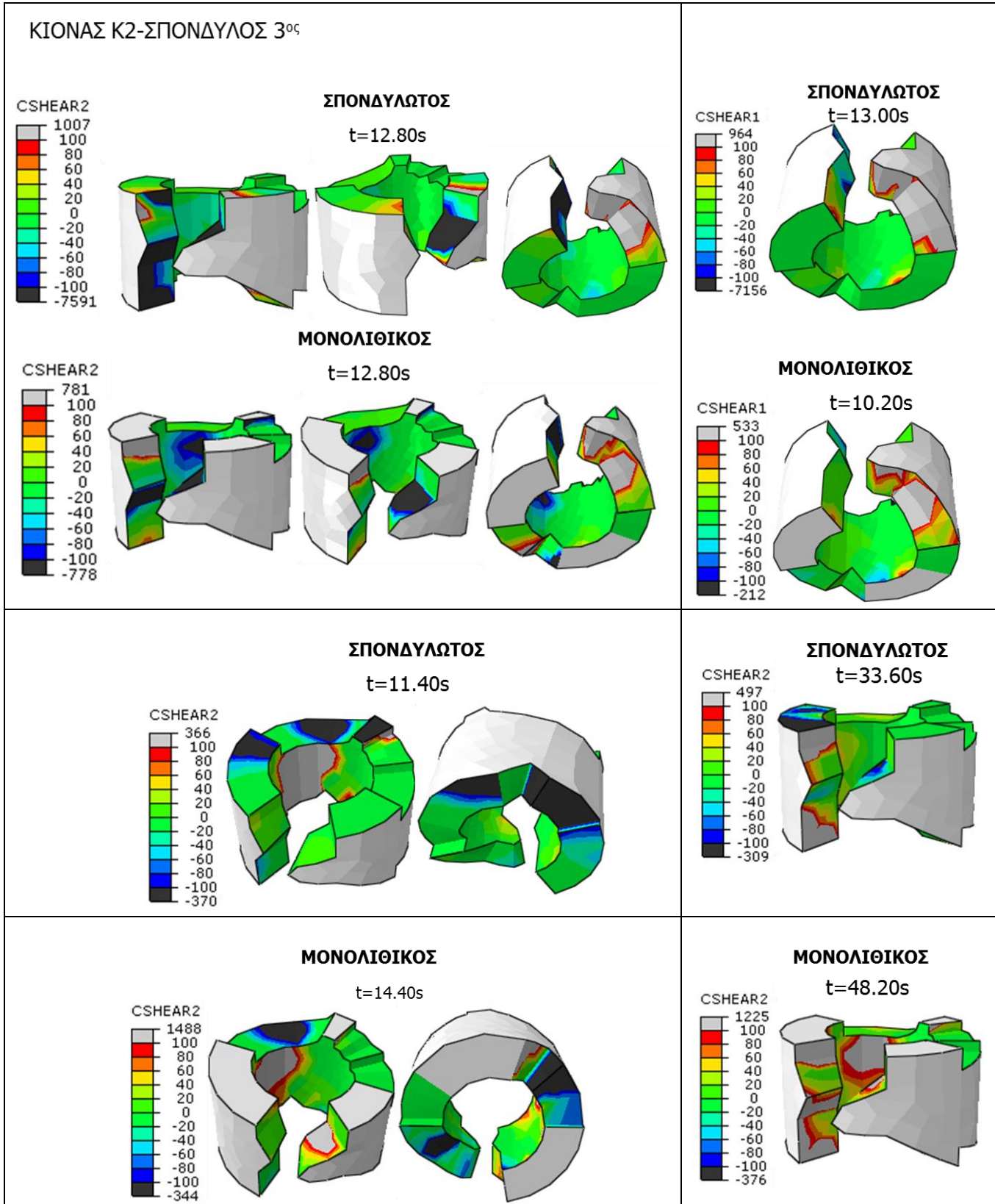
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 11^{ος}



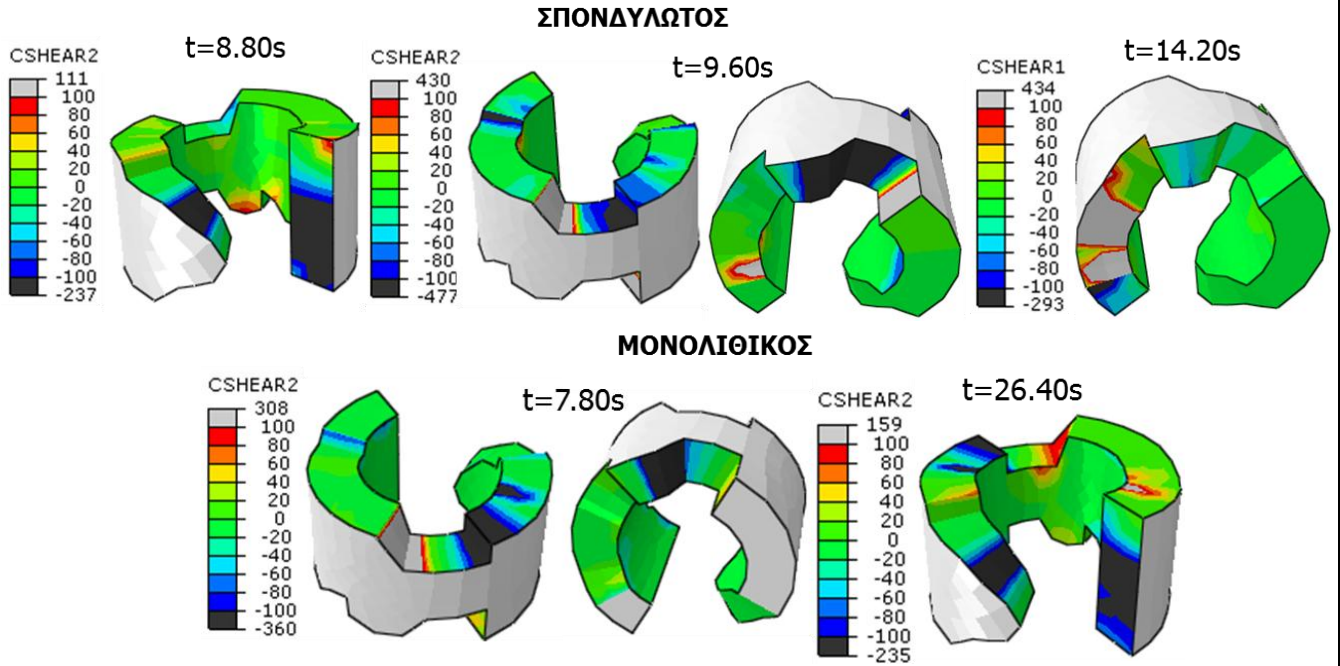
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



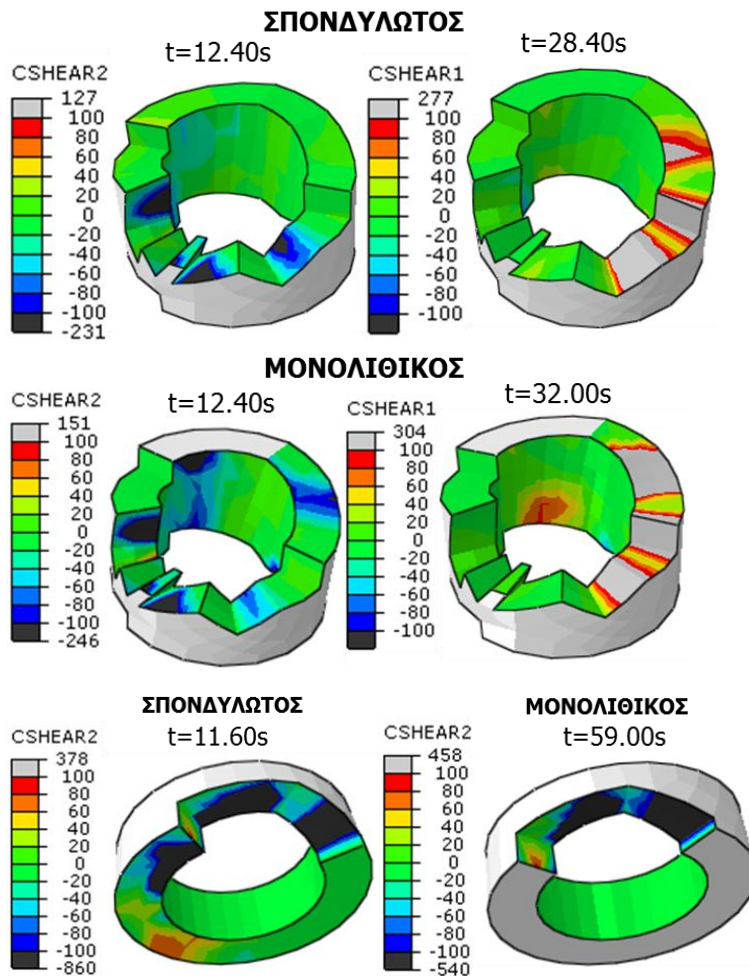
Ομάδα εικόνων 1.2: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ CAMPANO



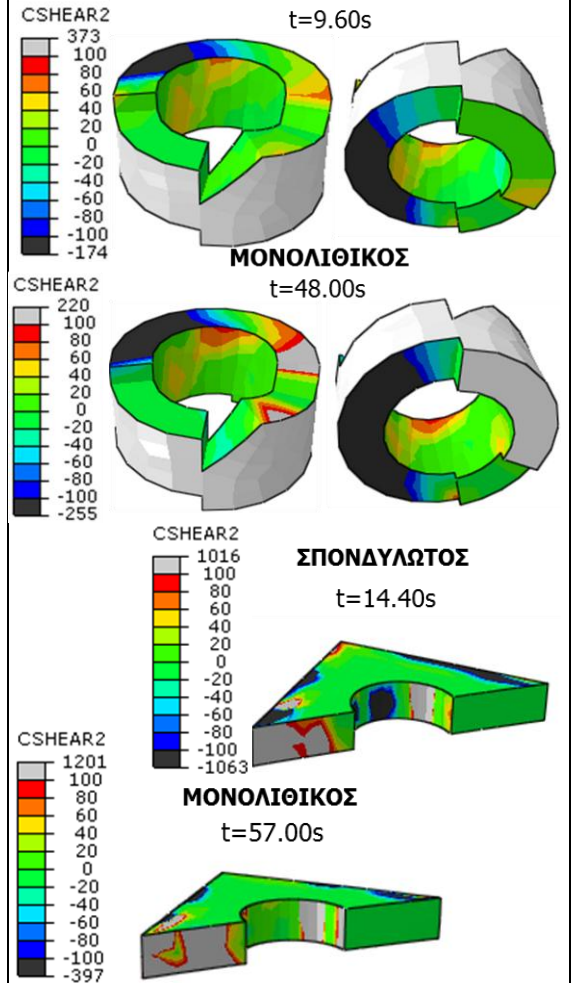
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



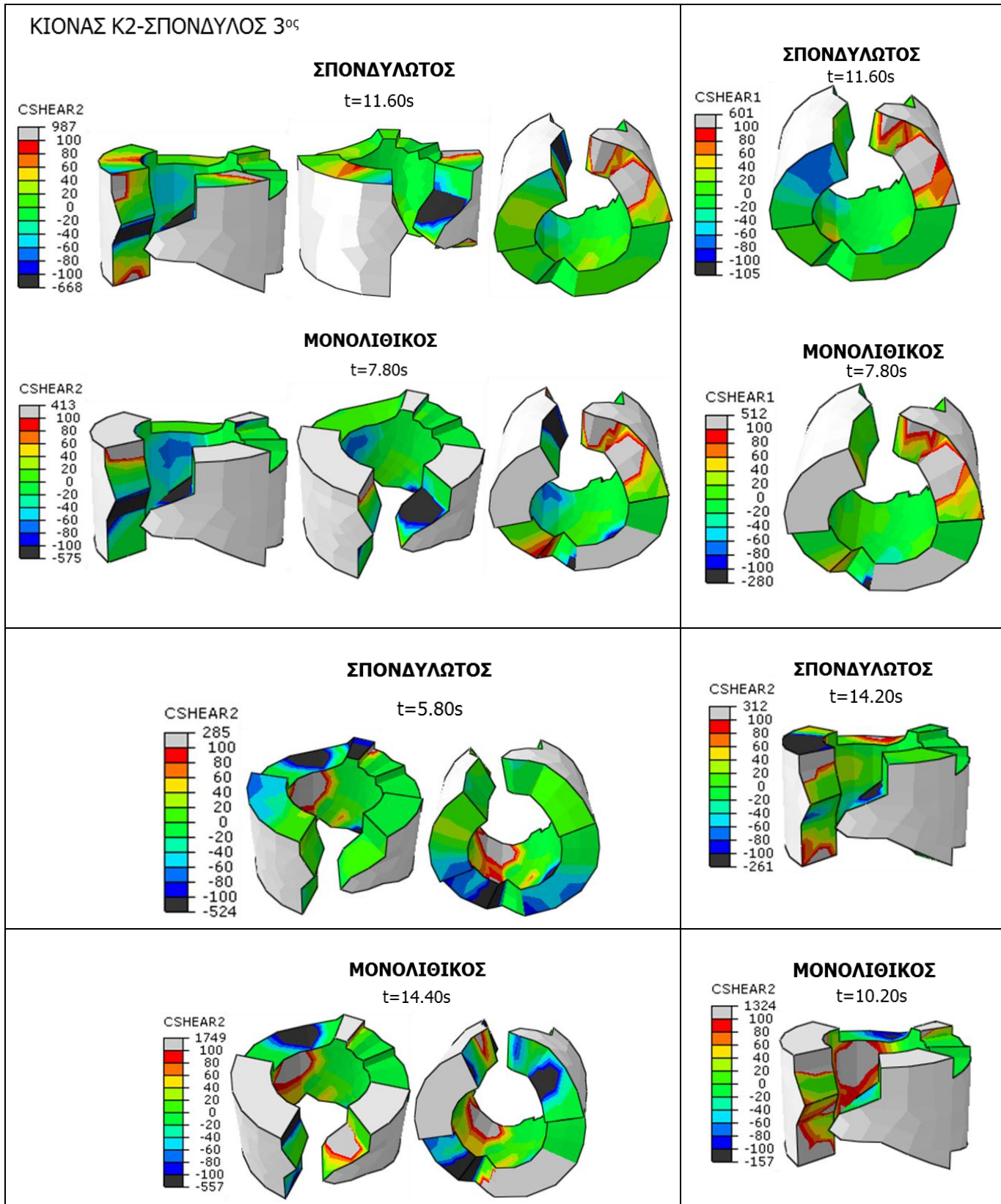
ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}

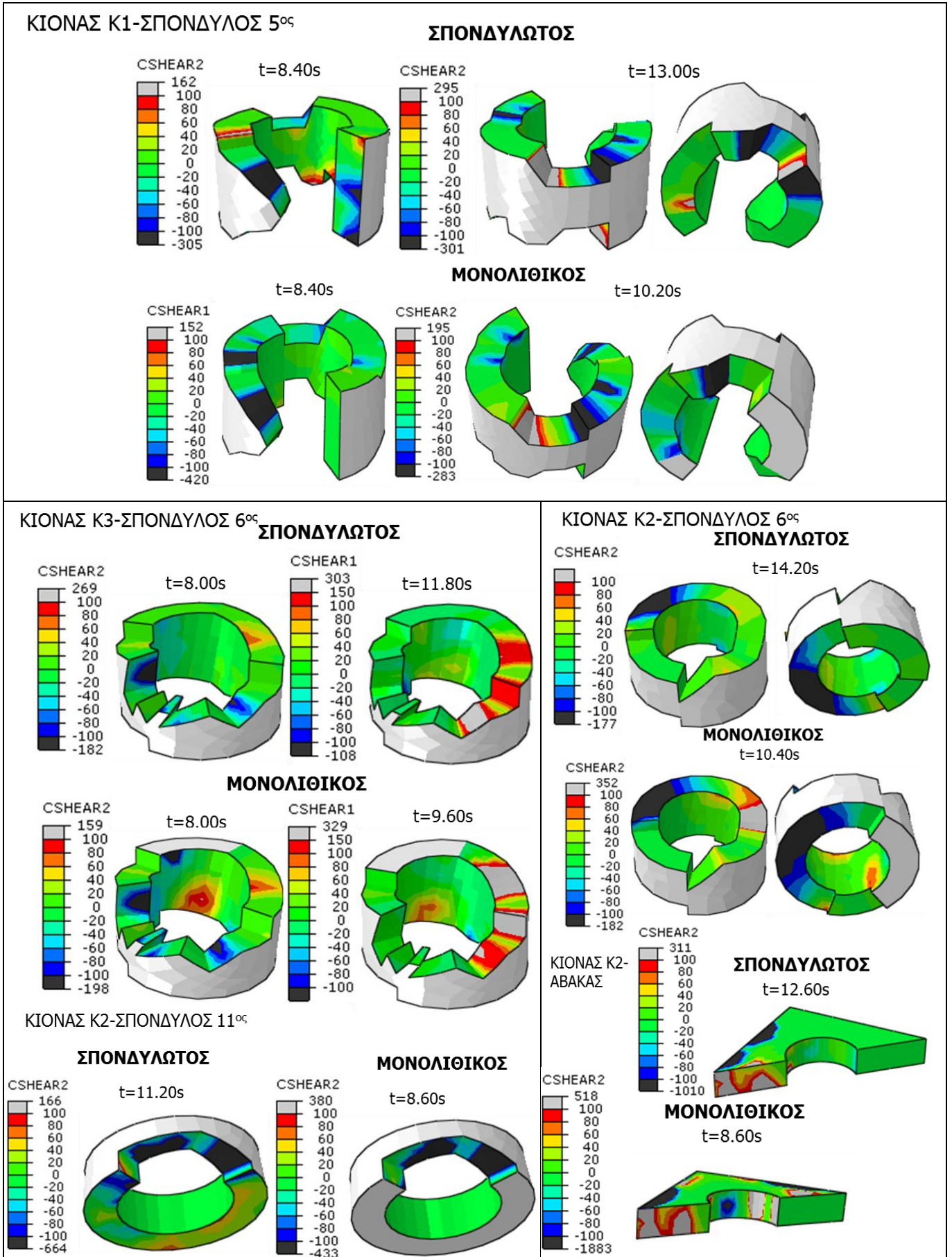


ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}

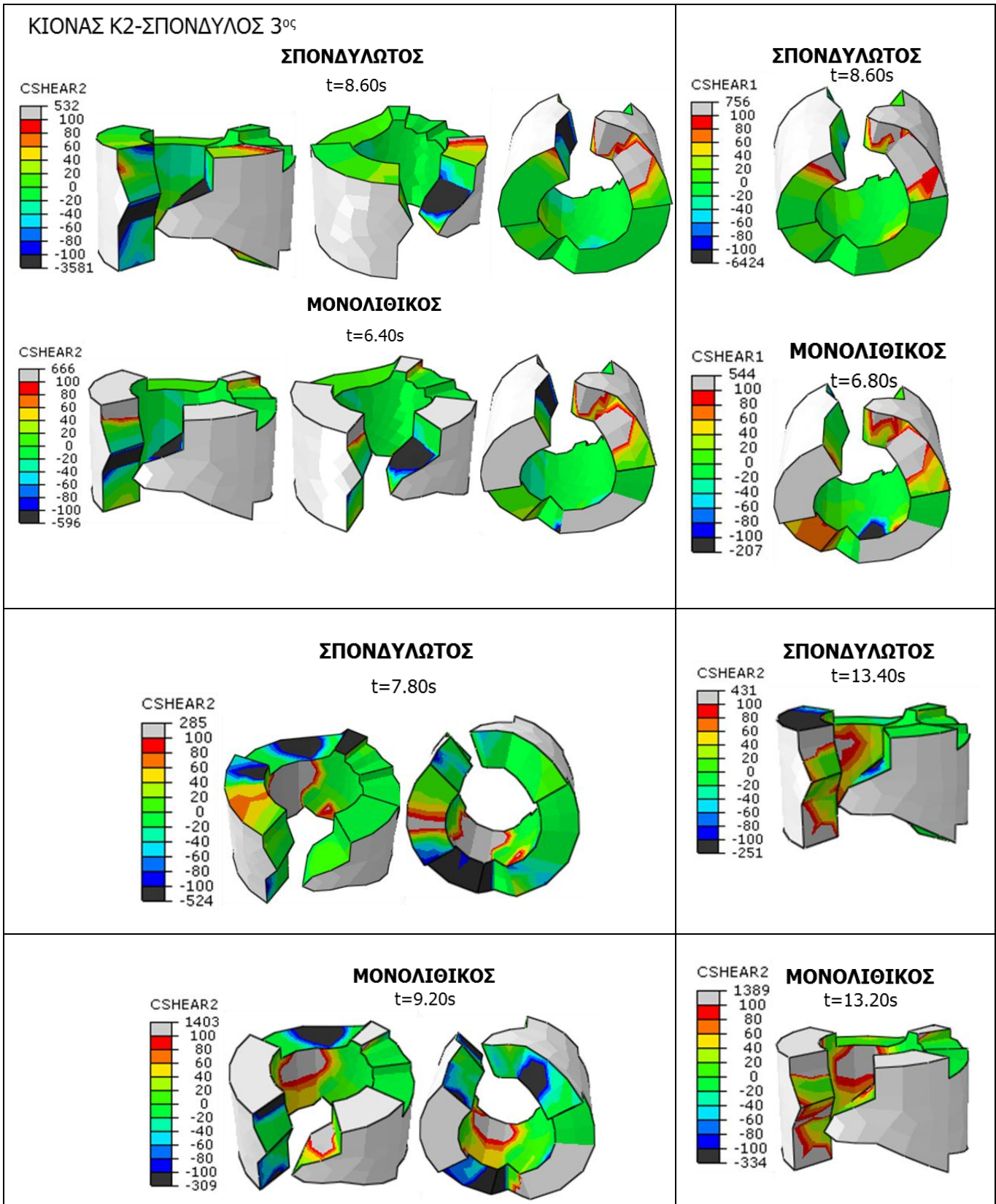


Ομάδα εικόνων 1.3: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΛΟΜΑ ΠΡΙΕΤΑ

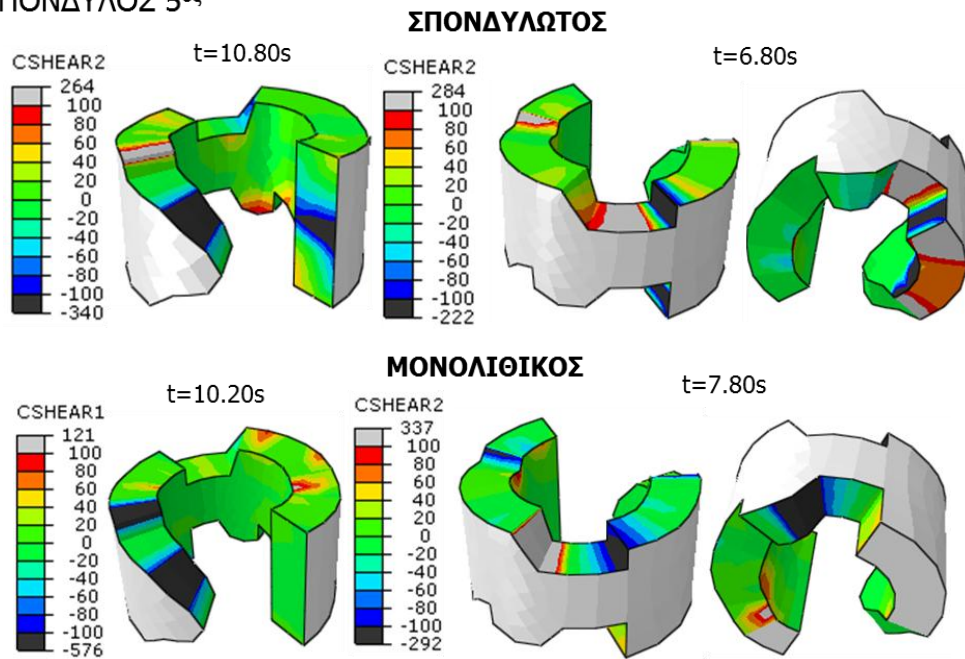




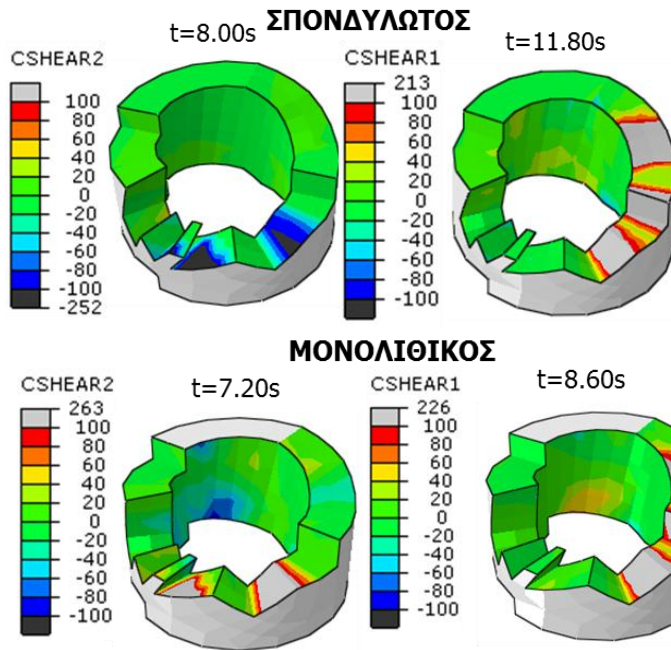
Ομάδα εικόνων 1.4: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHRIDGE, LAKE HUGHES #9



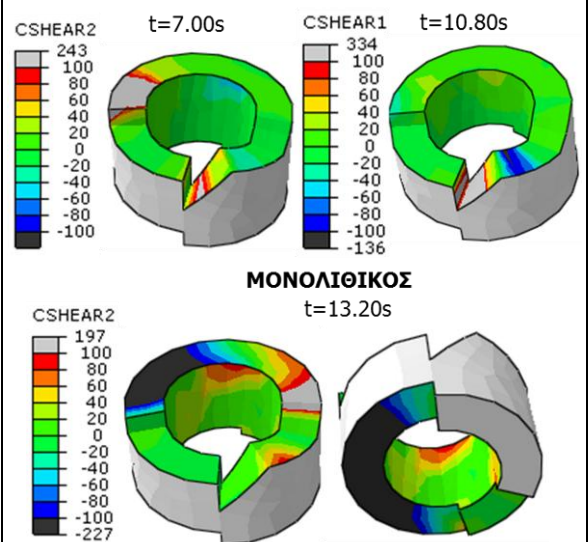
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



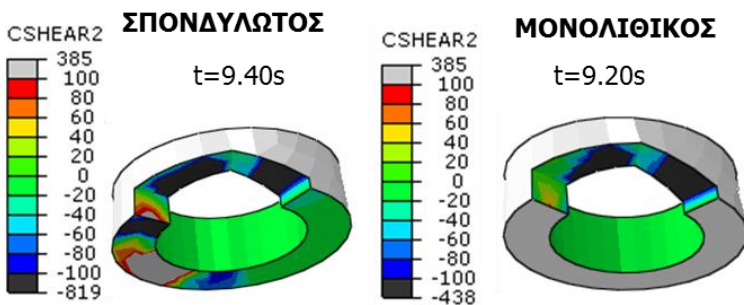
ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



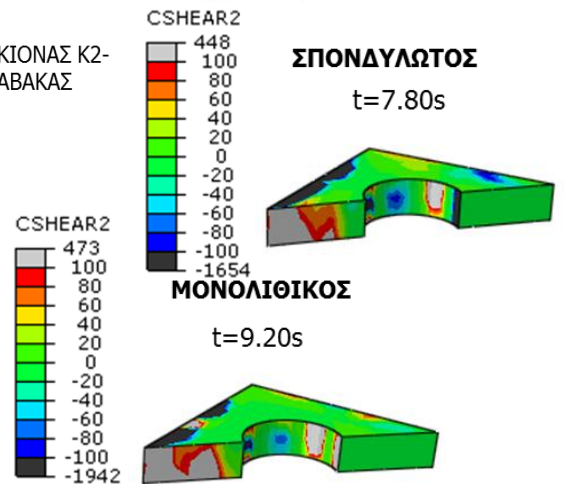
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



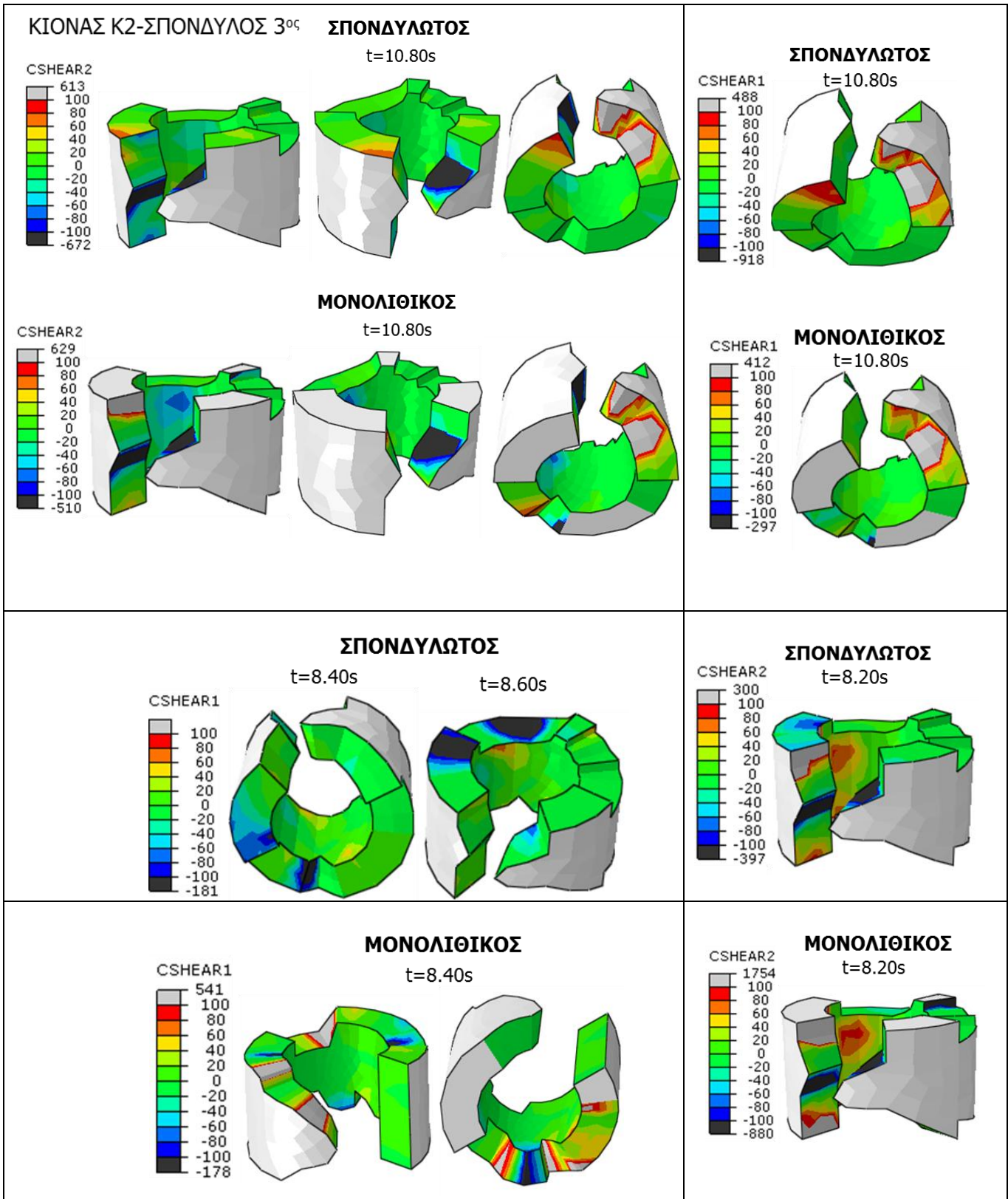
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 11^{ος}



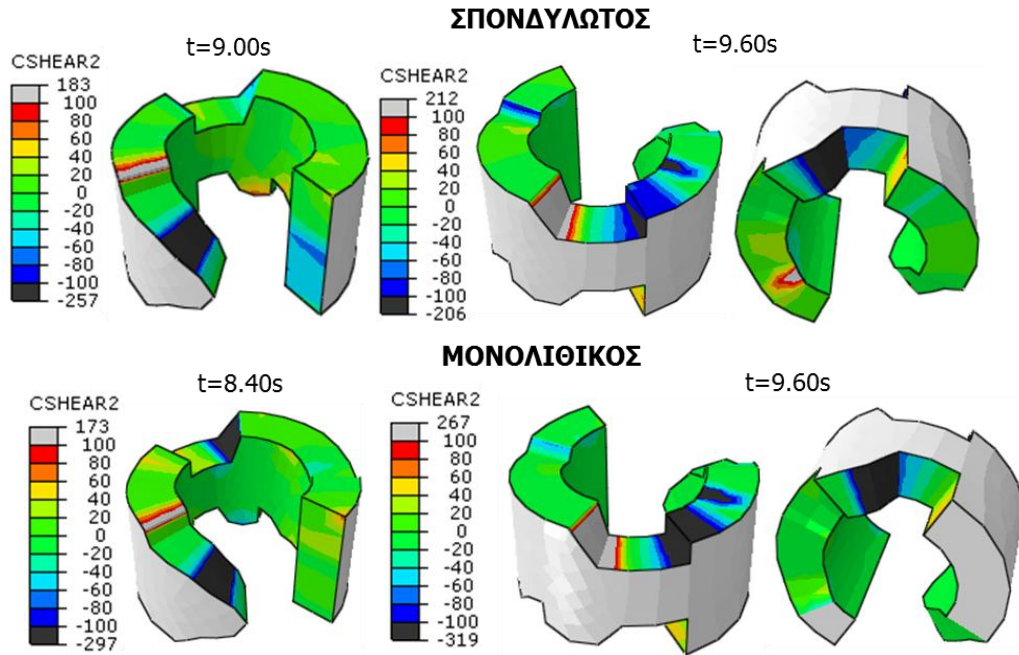
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΑΒΑΚΑΣ



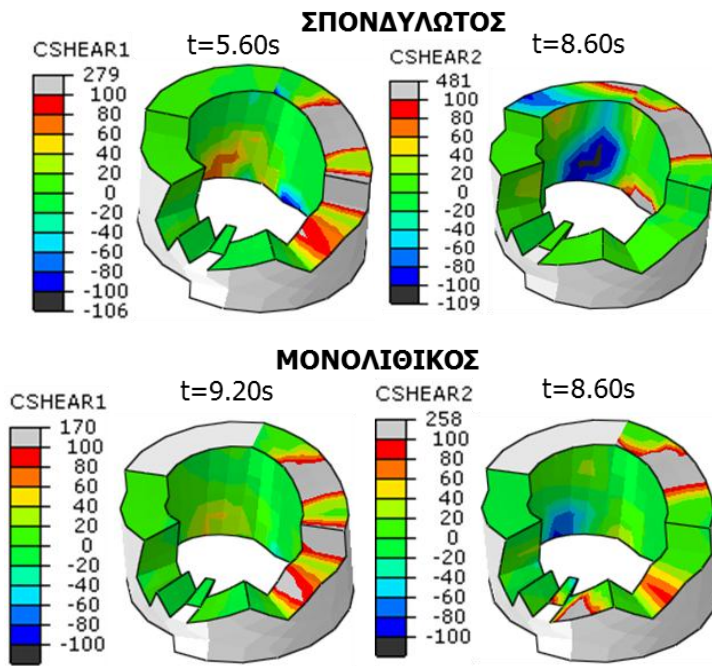
Ομάδα εικόνων 1.5: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, WONDERLAND



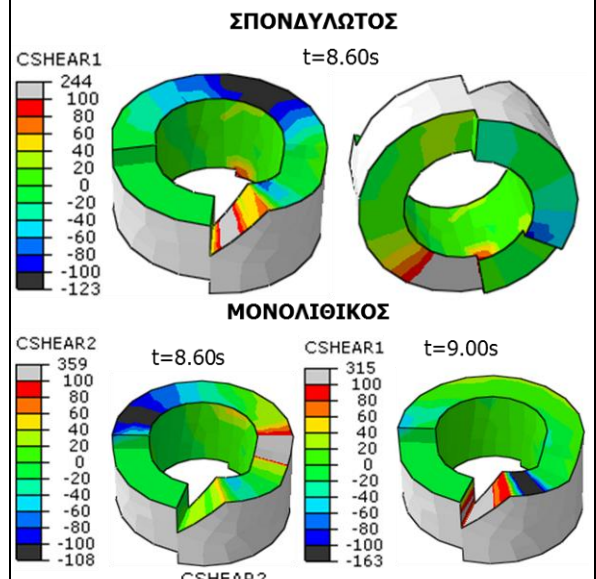
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



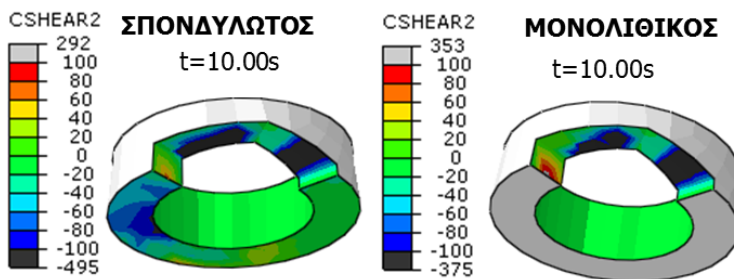
ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



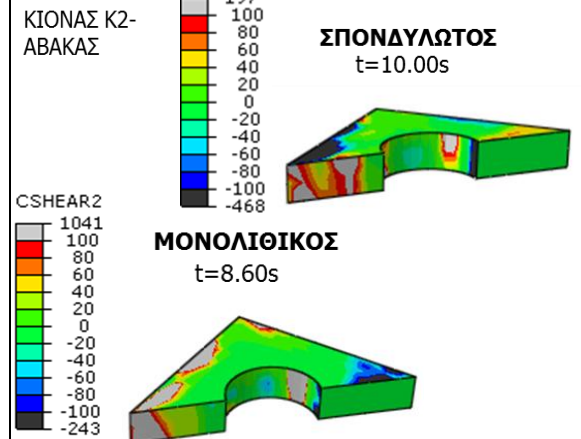
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



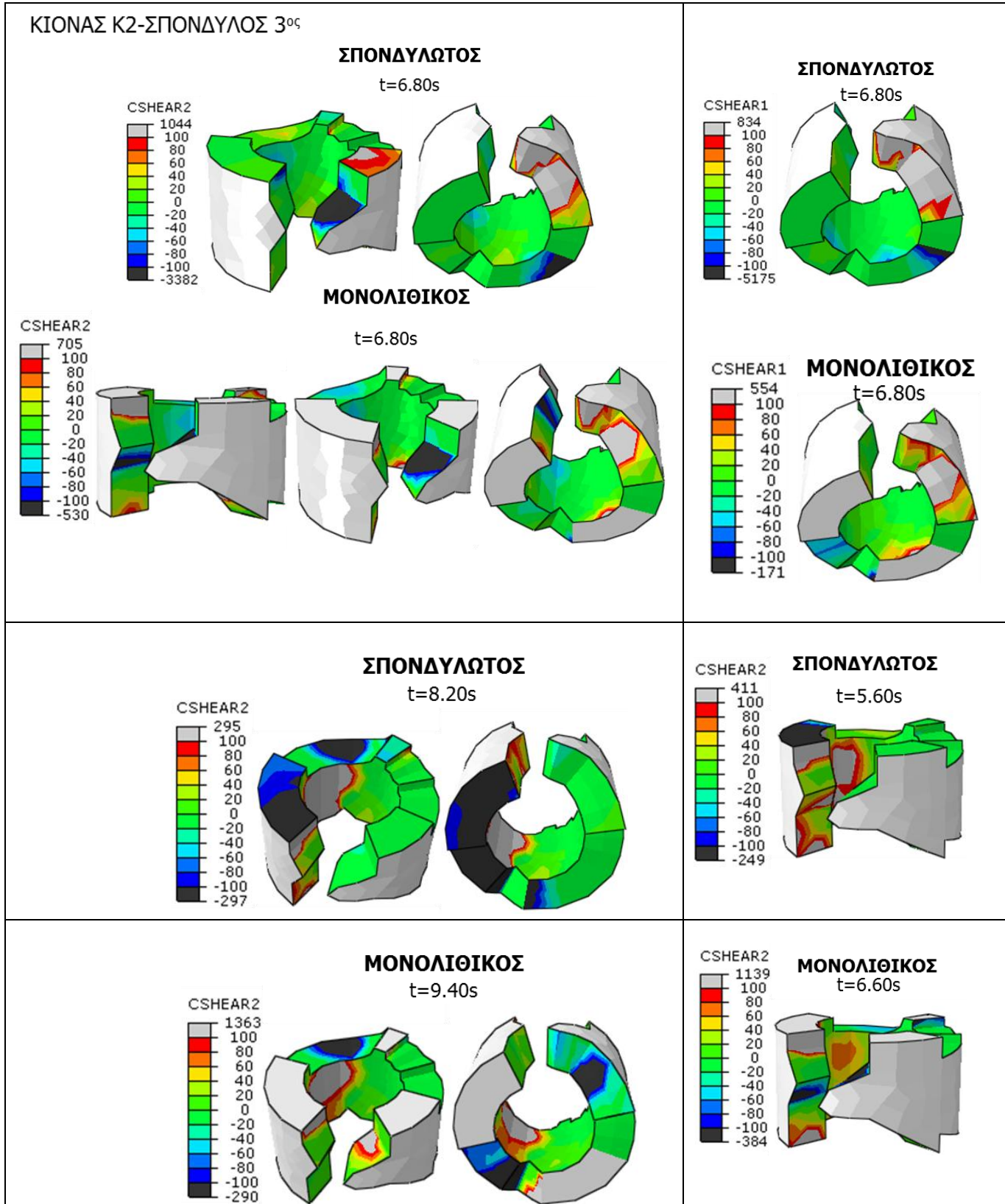
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 11^{ος}

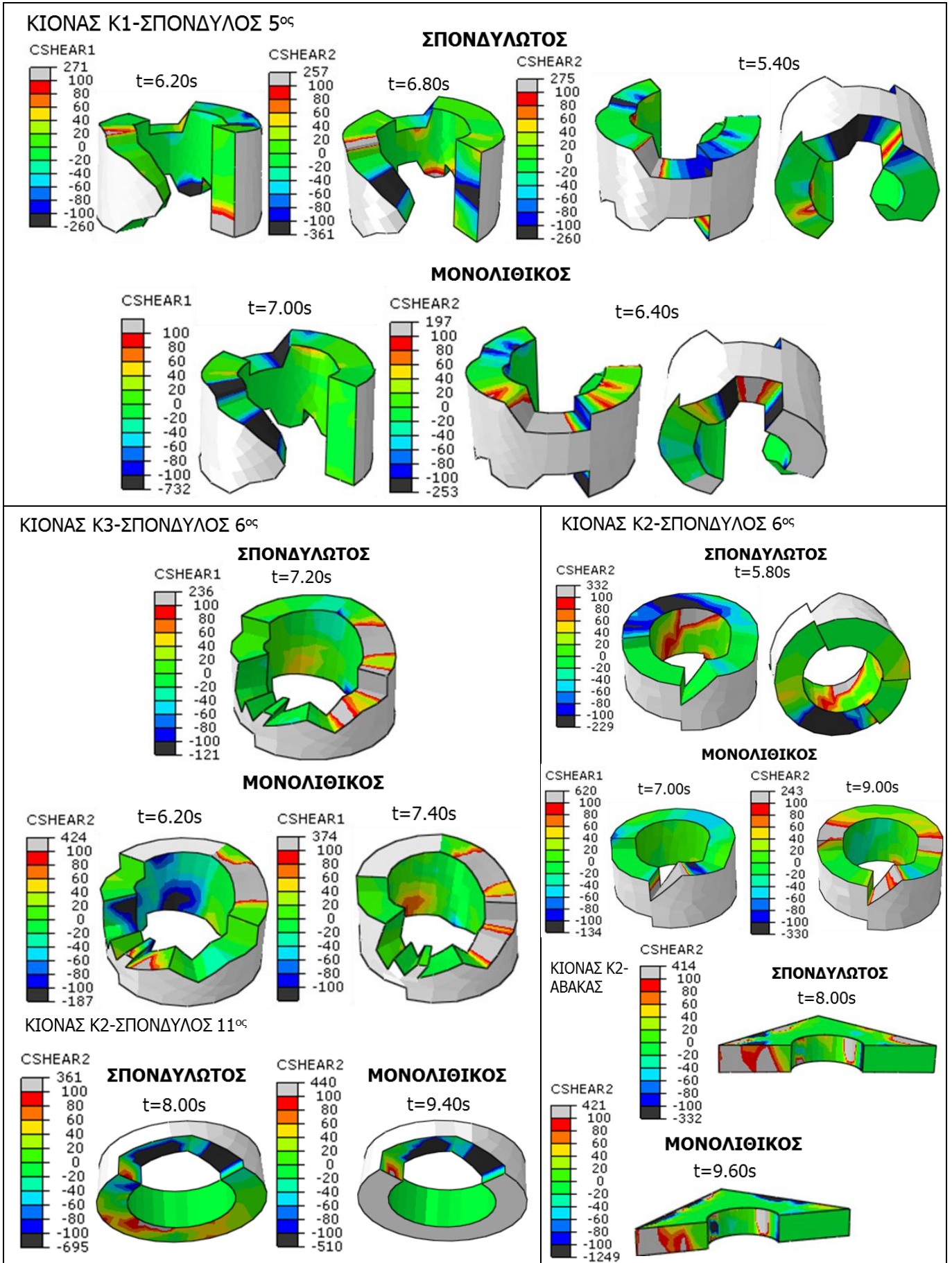


ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΑΒΑΚΑΣ

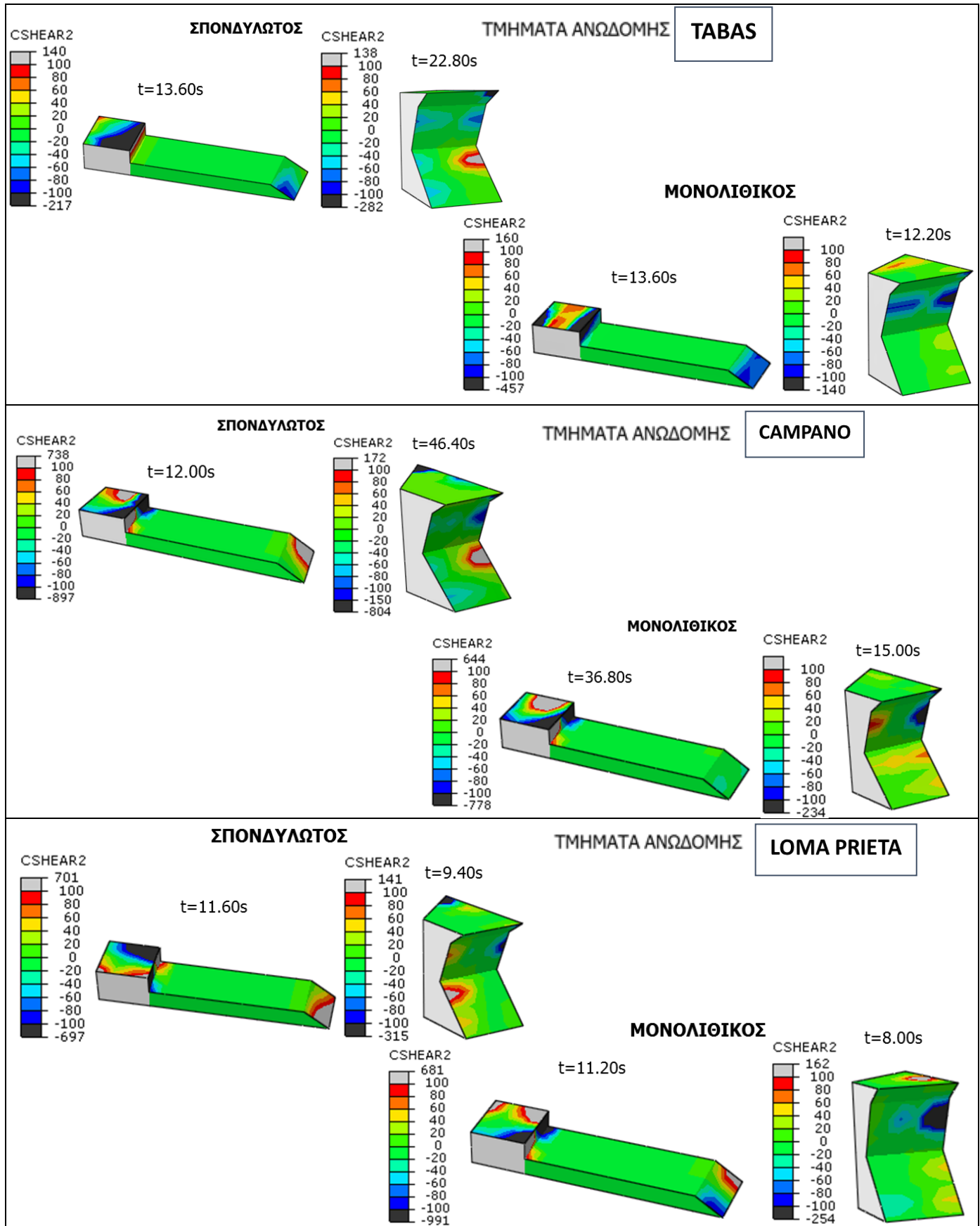


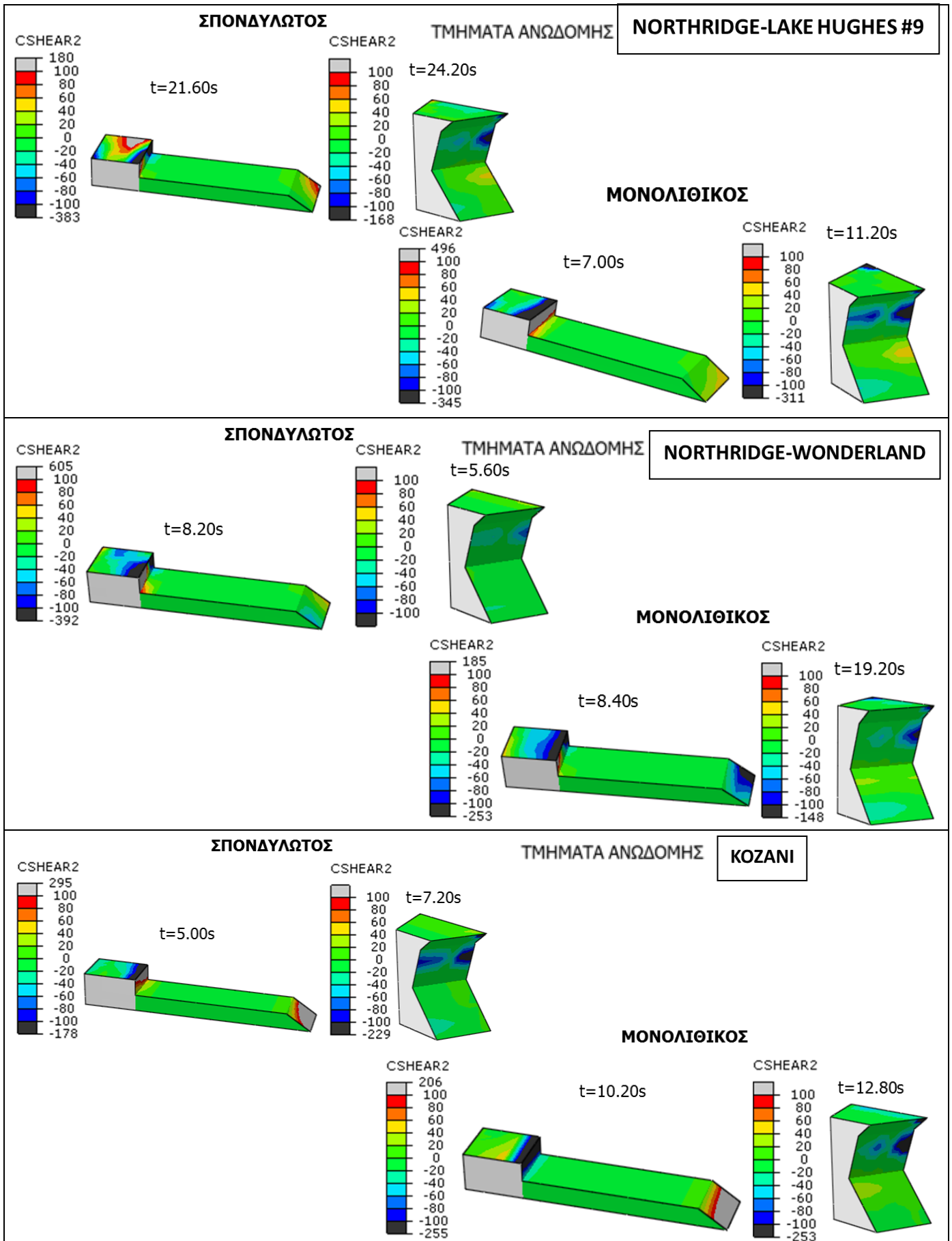
Ομάδα εικόνων 1.6: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΟΖΑΝΗ 1995



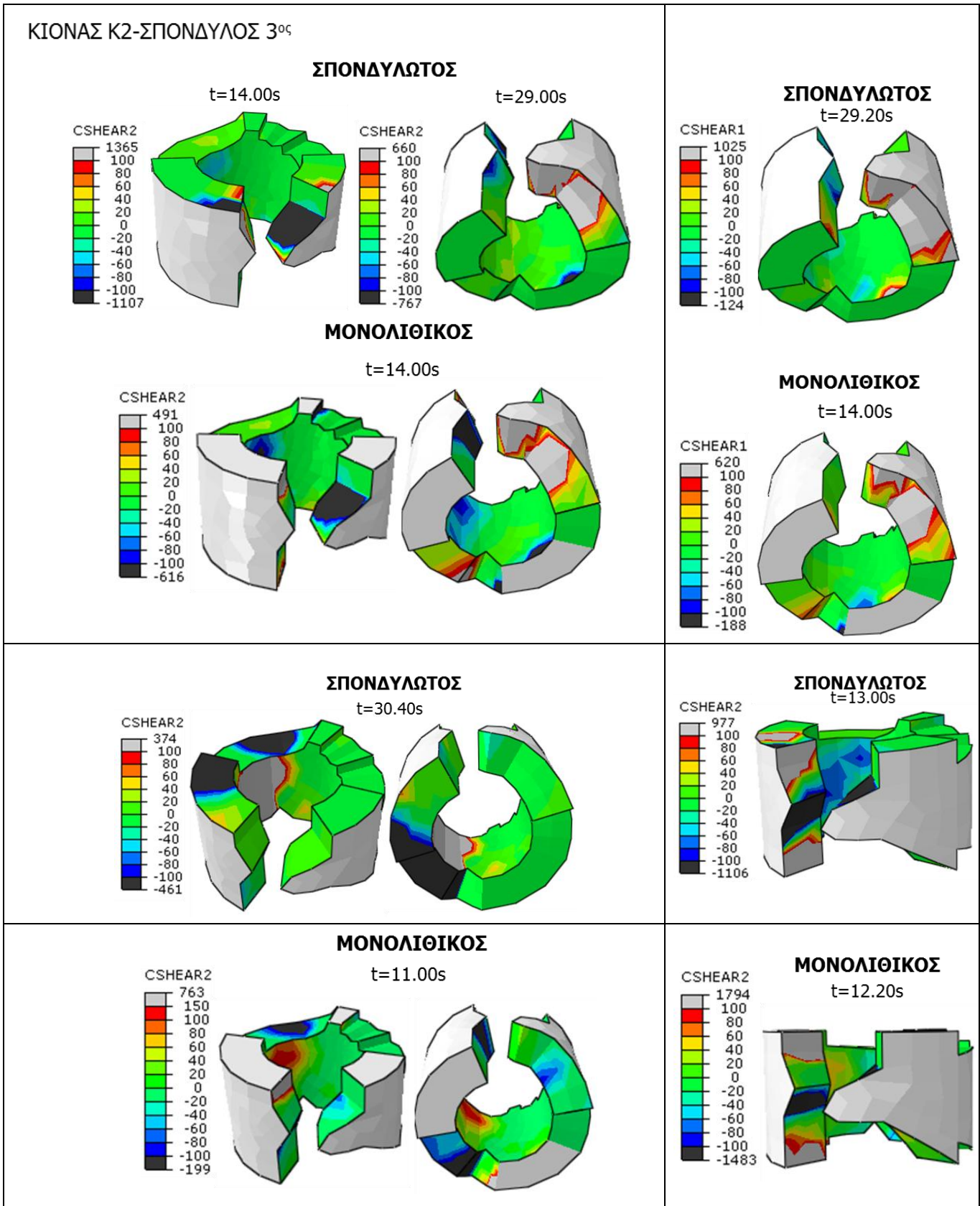


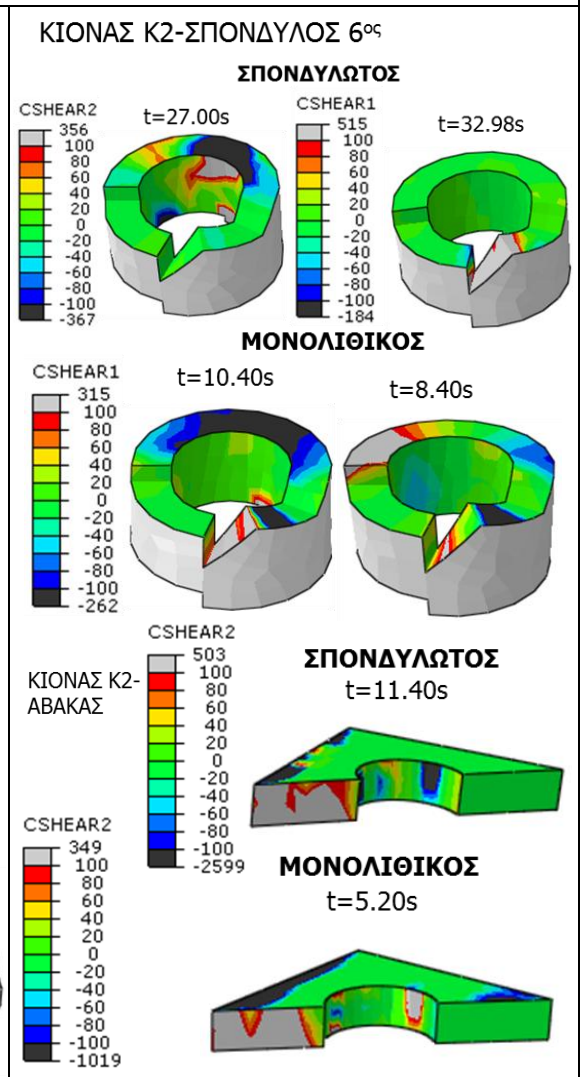
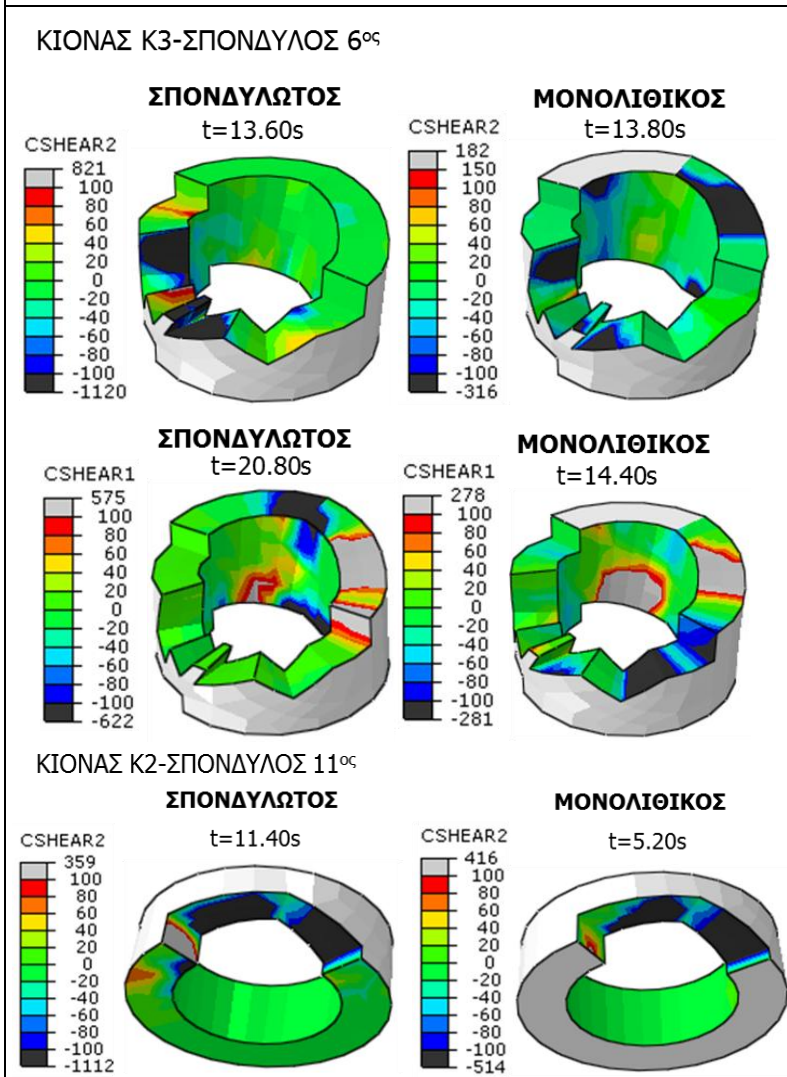
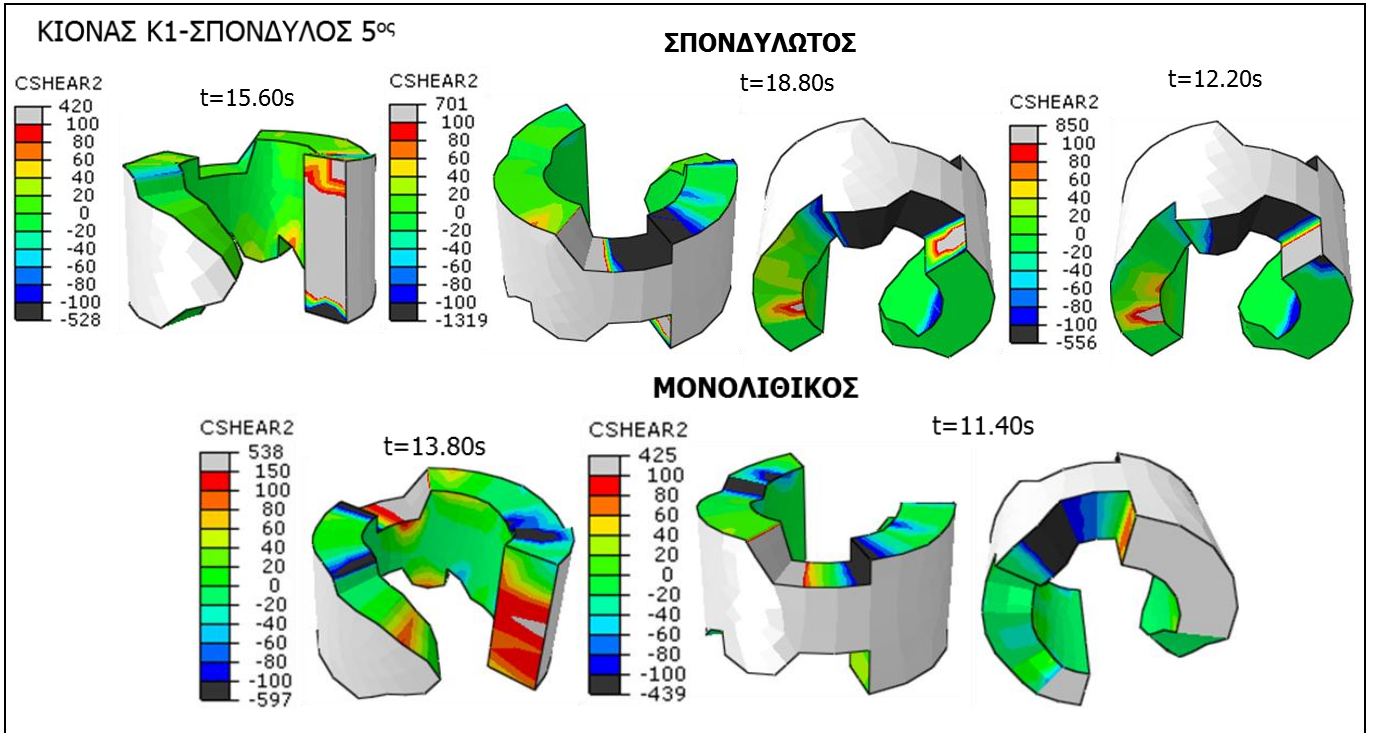
Ομάδα εικόνων 1.7: Διαμητικές τάσεις CSHEAR1/CSHEAR2 σε τμήματα της ανωδομής για το σύνολο των εξεταζόμενων κανονικοποιημένων σεισμικών διεγέρσεων



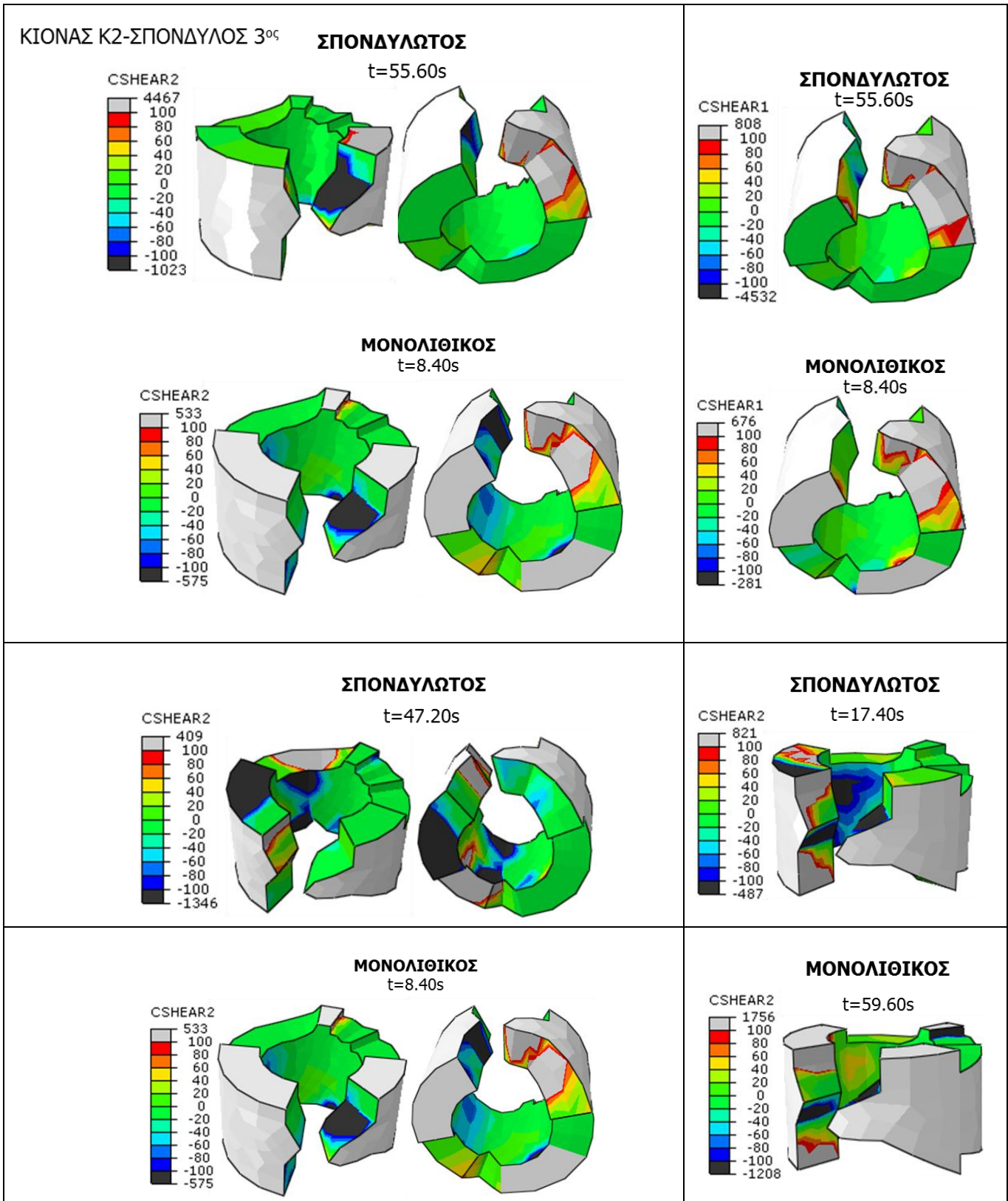


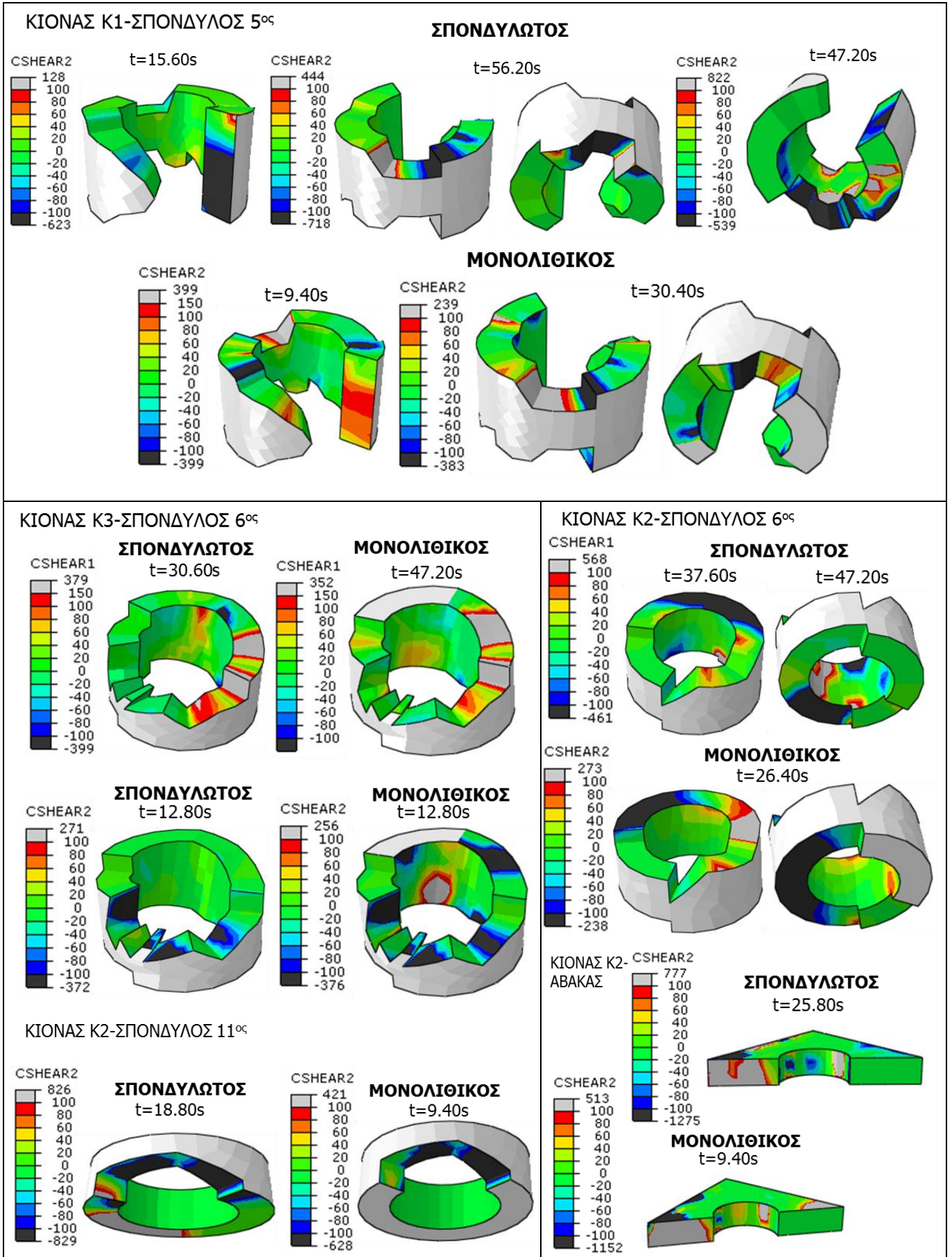
Ομάδα εικόνων 2.1: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΑΒΑΣ





Ομάδα εικόνων 2.2: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΑΡΦΑΝΟ



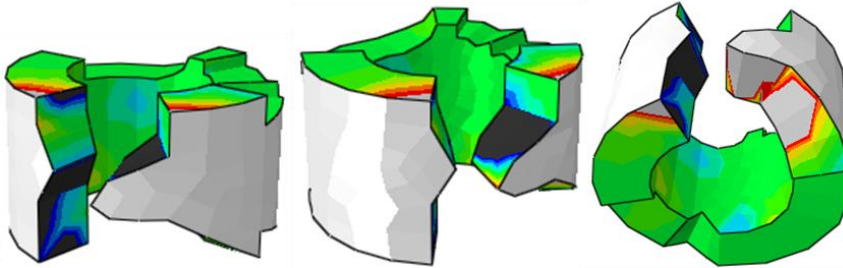
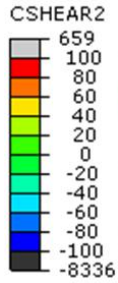


Ομάδα εικόνων 2.3: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΛΟΜΑ ΠΡΙΕΤΑ

ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 3^{ος}

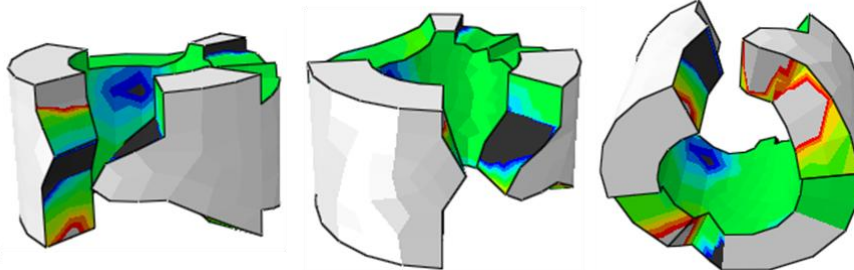
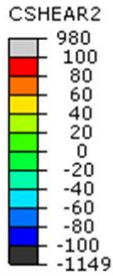
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=5.00s



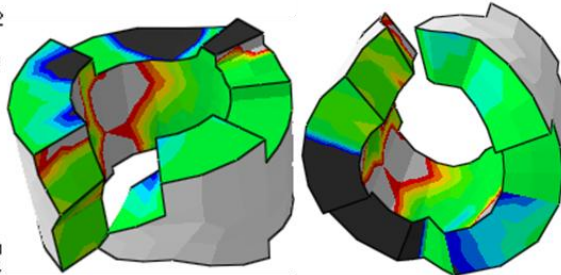
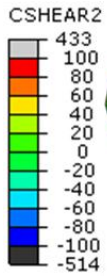
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

t=4.80s



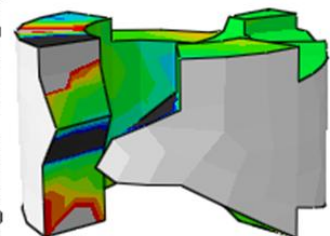
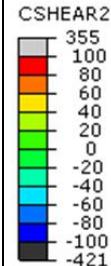
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=9.40s



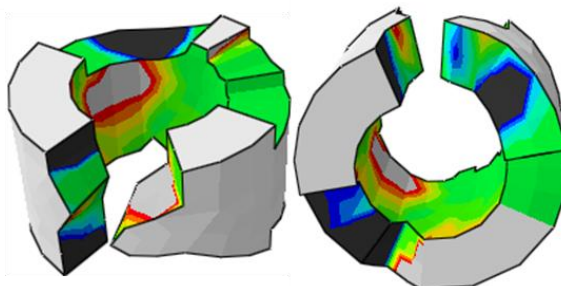
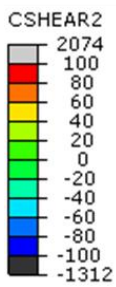
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=14.40s



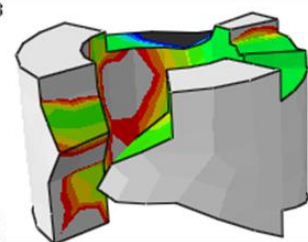
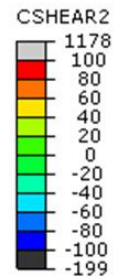
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

t=11.00s

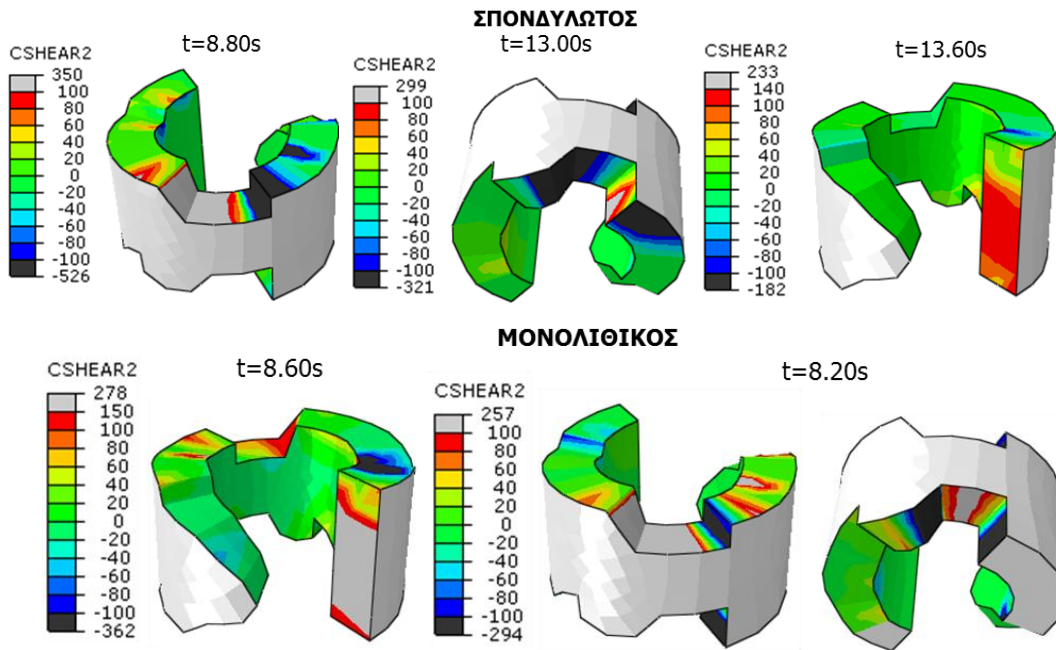


ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

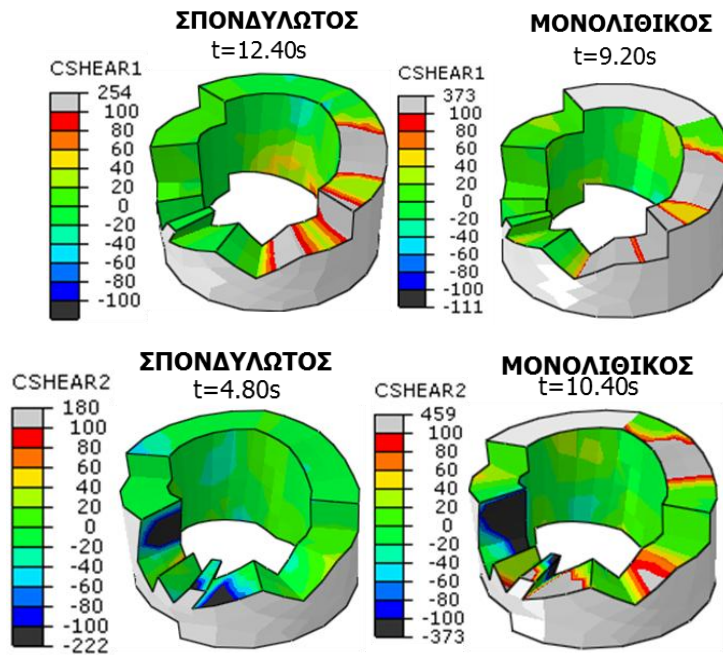
t=9.40s



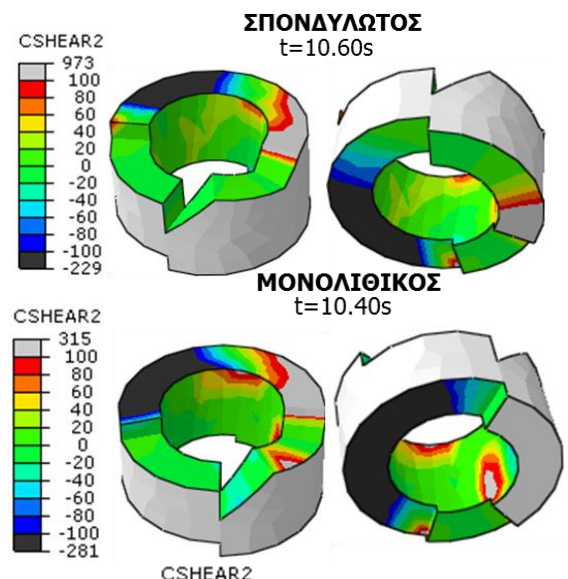
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



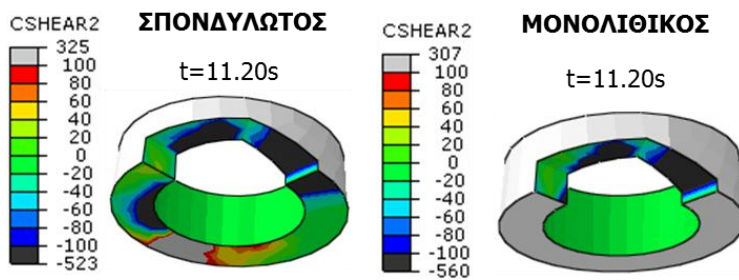
ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



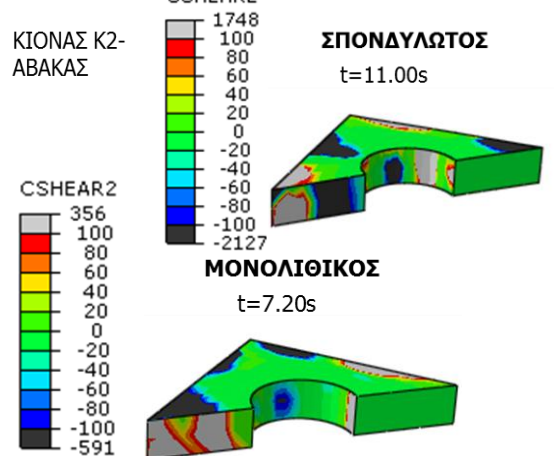
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 11^{ος}



ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΑΒΑΚΑΣ

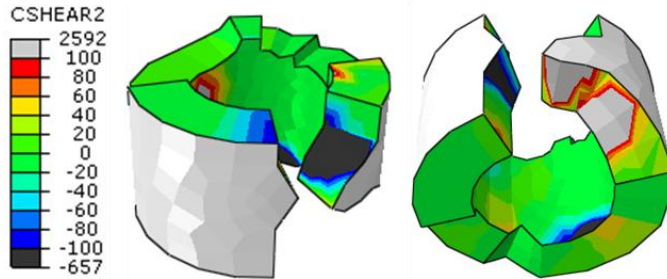


Ομάδα εικόνων 2.4: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, LAKE HUGHES #9

ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 3^{ος}

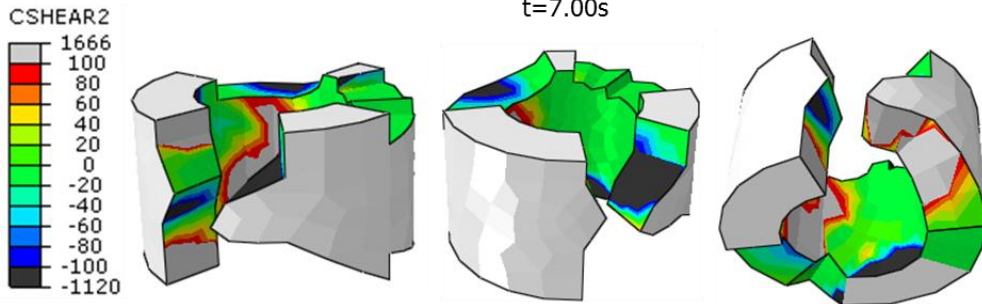
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=5.60s



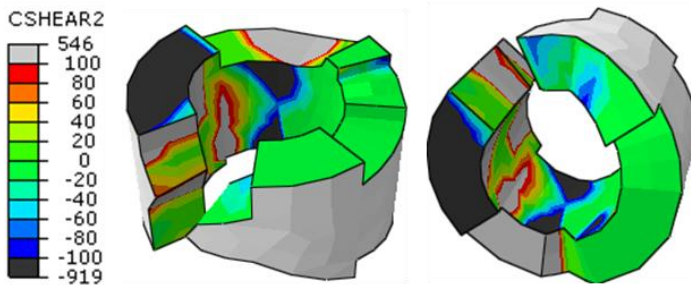
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

t=7.00s



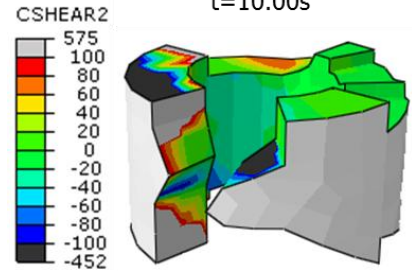
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=17.40s



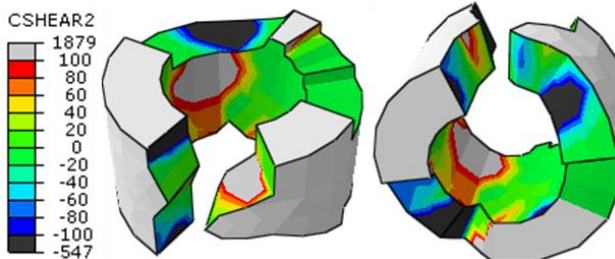
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=10.00s



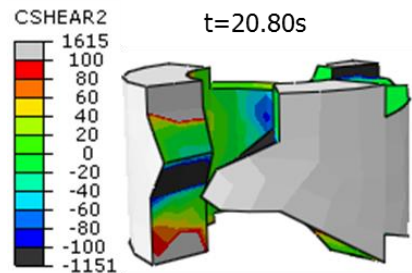
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

t=7.60s

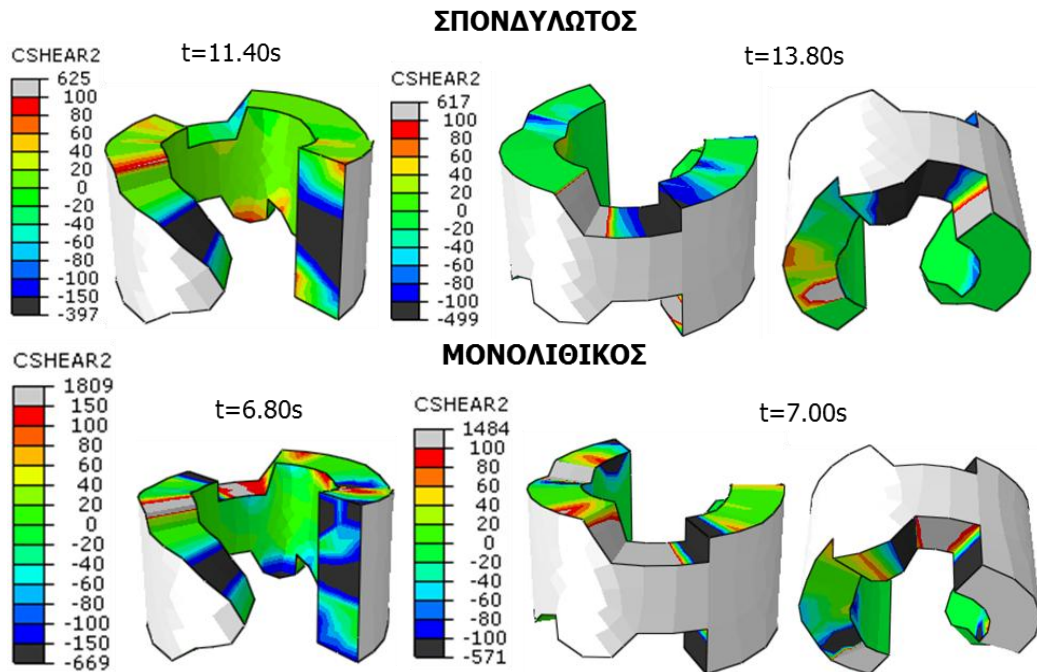


ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

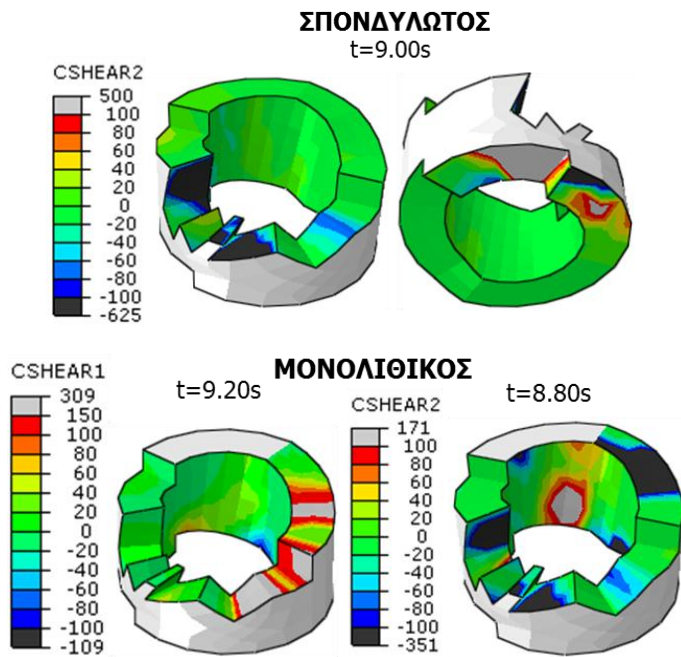
t=20.80s



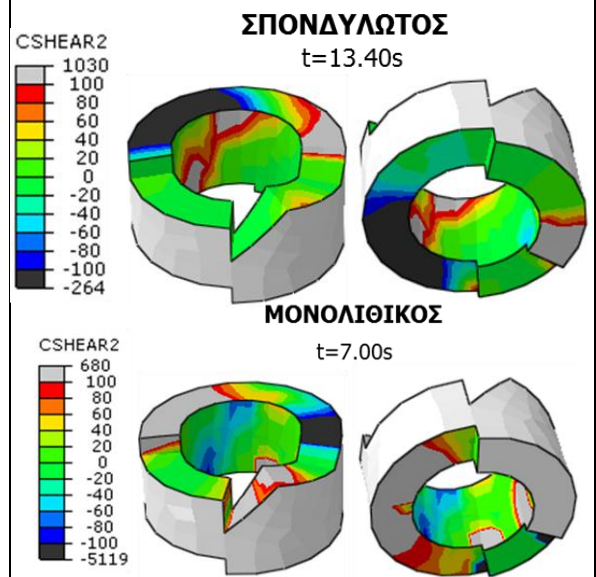
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



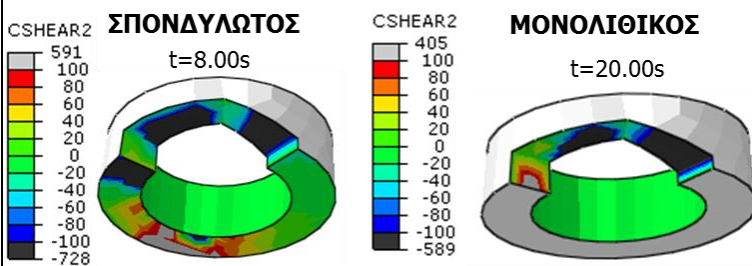
ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



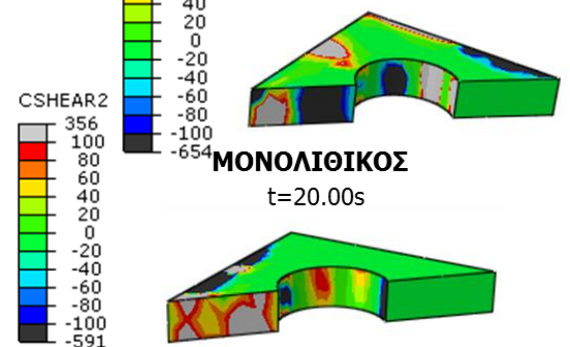
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 11^{ος}



ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΑΒΑΚΑΣ

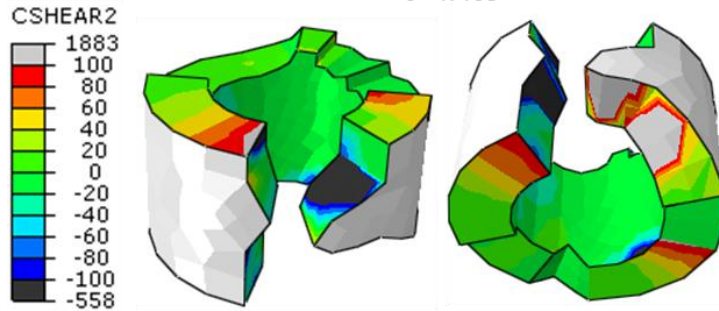


Ομάδα εικόνων 2.5: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, WONDERLAND

ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 3^{ος}

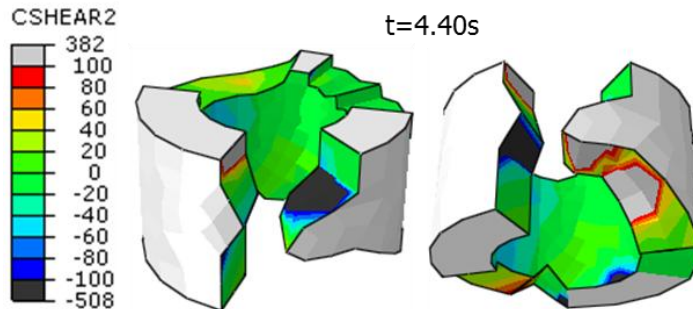
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=4.40s



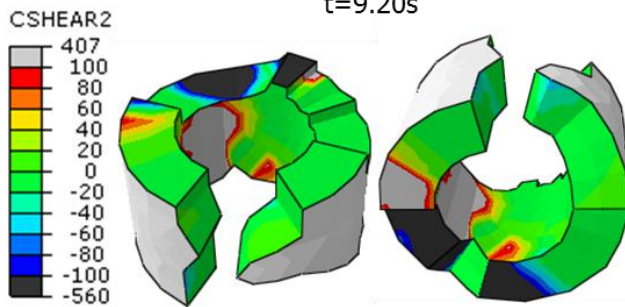
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

t=4.40s



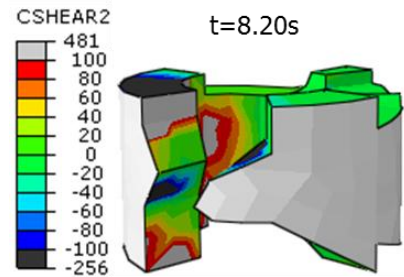
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=9.20s



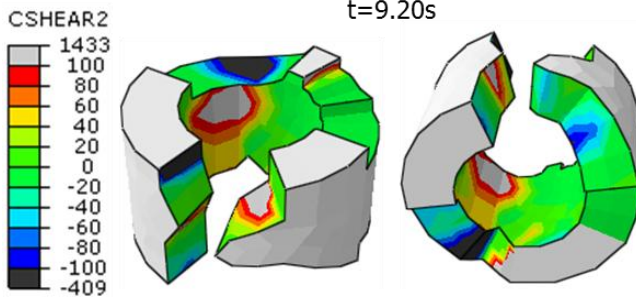
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=8.20s



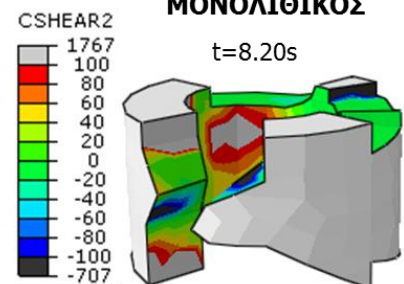
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

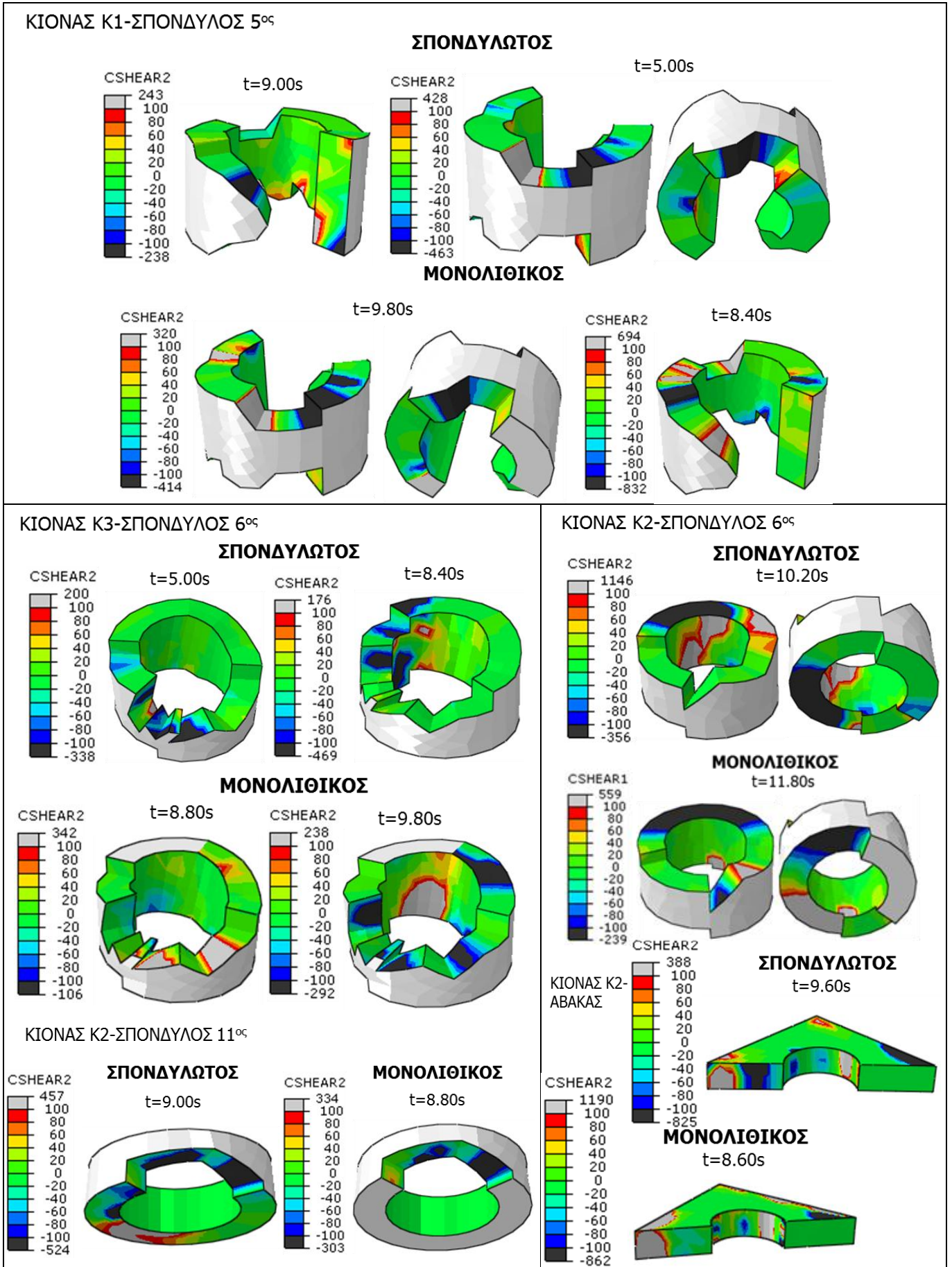
t=9.20s



ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

t=8.20s



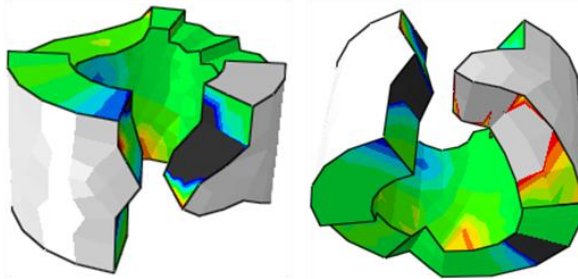
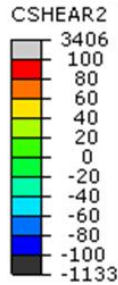


Ομάδα εικόνων 2.6: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΔΙΠΛΑΣΙΑ ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΟΖΑΝΗΣ, 1995

ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 3^{ος}

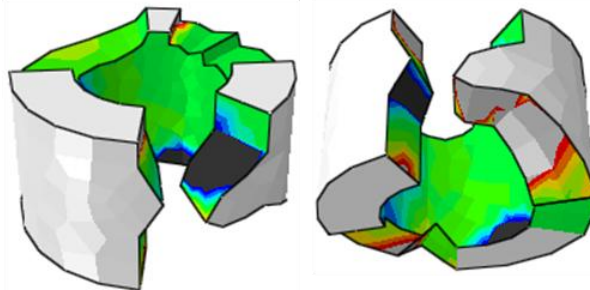
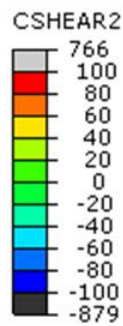
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=5.60s



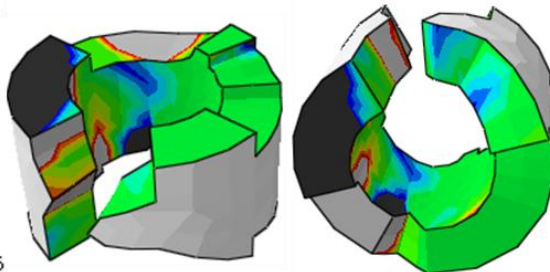
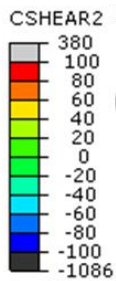
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

t=5.00s



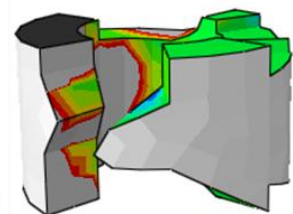
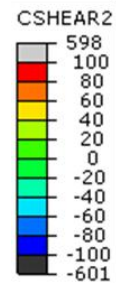
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=9.80s



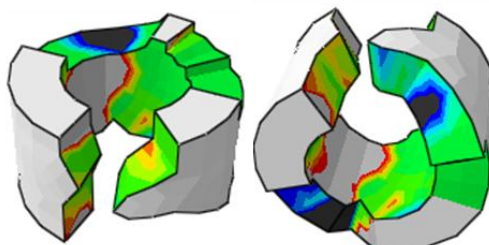
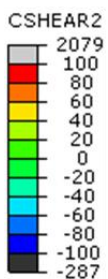
ΣΠΟΝΔΥΛΩΤΟΣ

t=9.40s



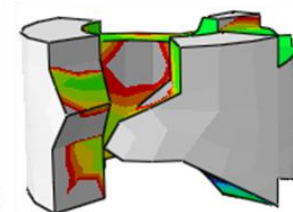
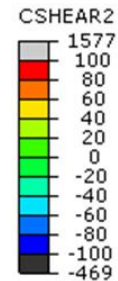
ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

t=5.80s

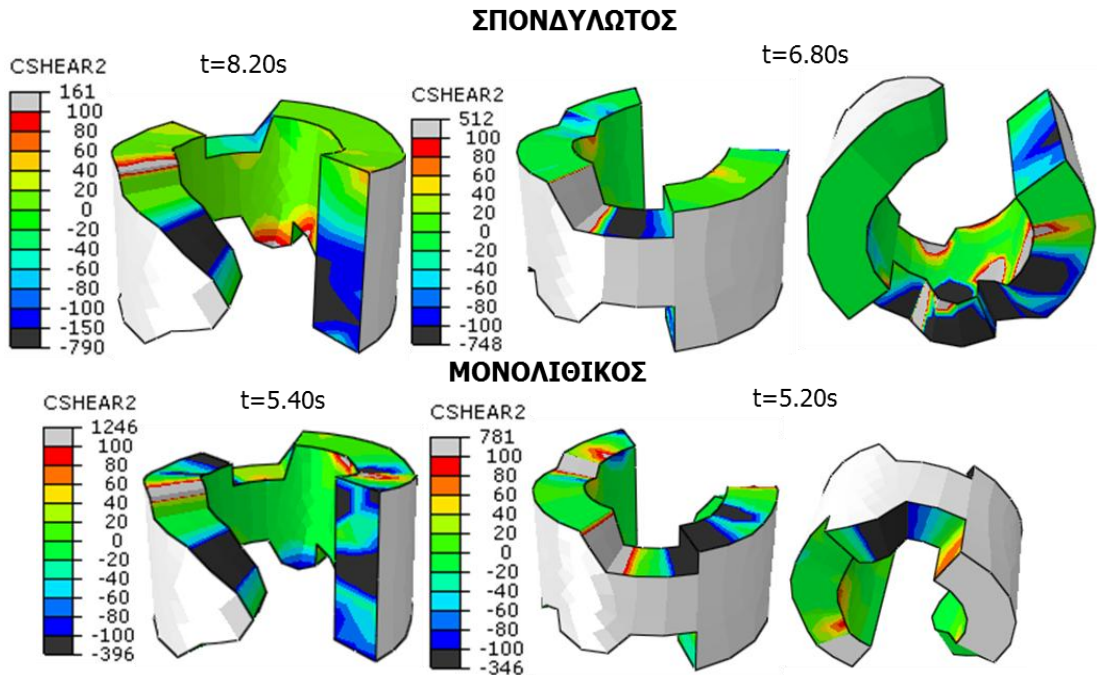


ΜΟΝΟΛΙΘΙΚΟΣ

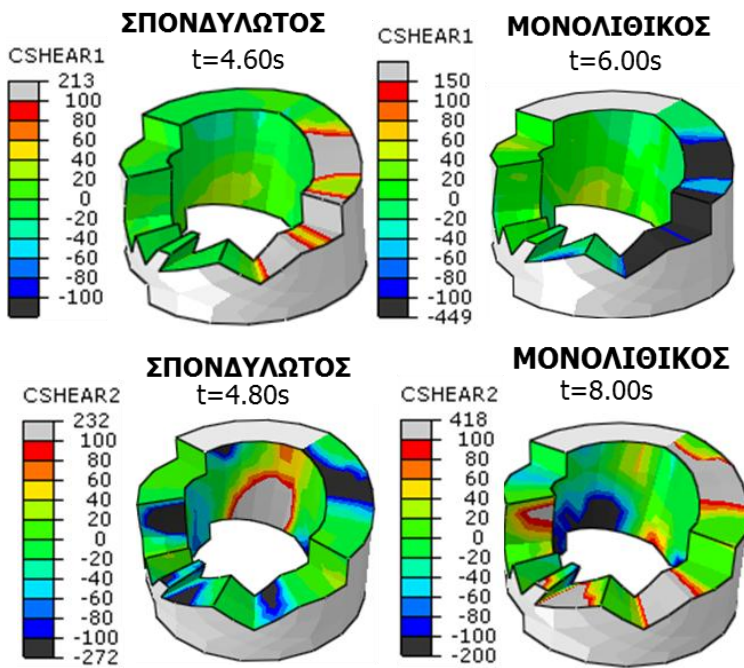
t=11.80s



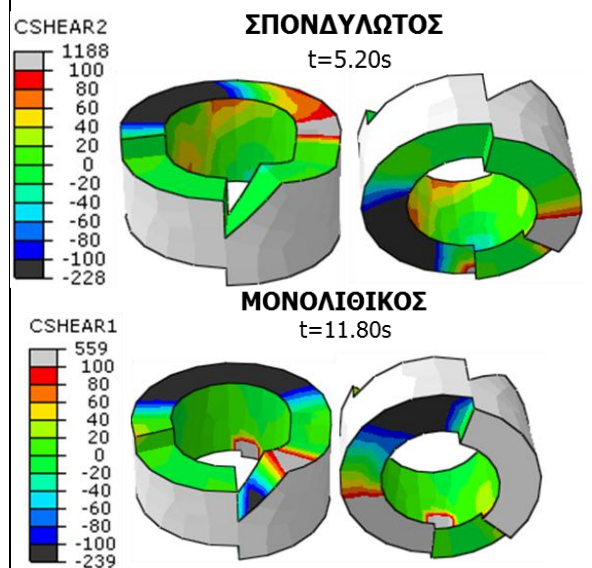
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



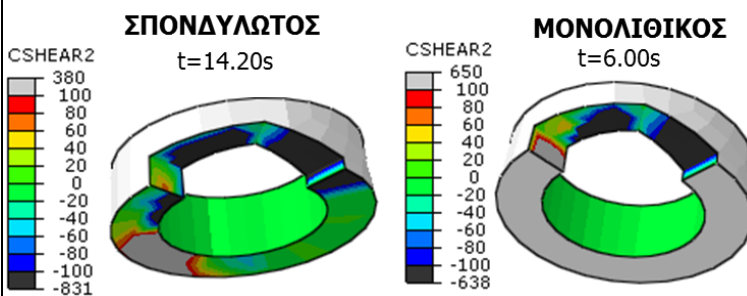
ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



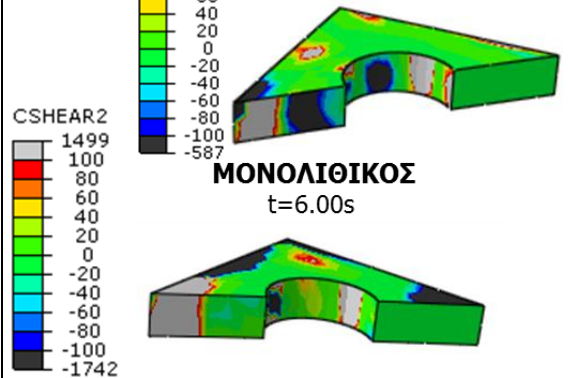
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



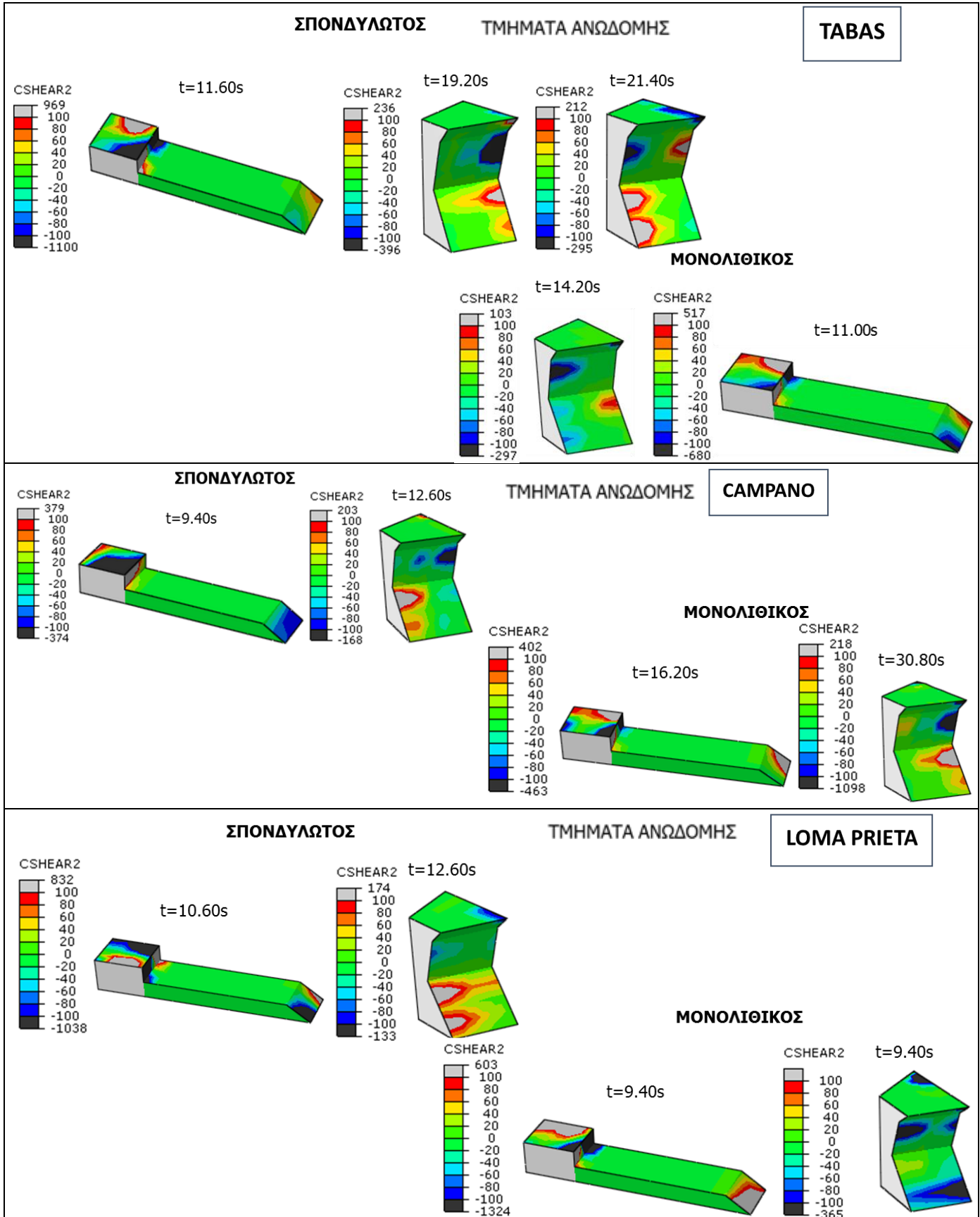
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 11^{ος}

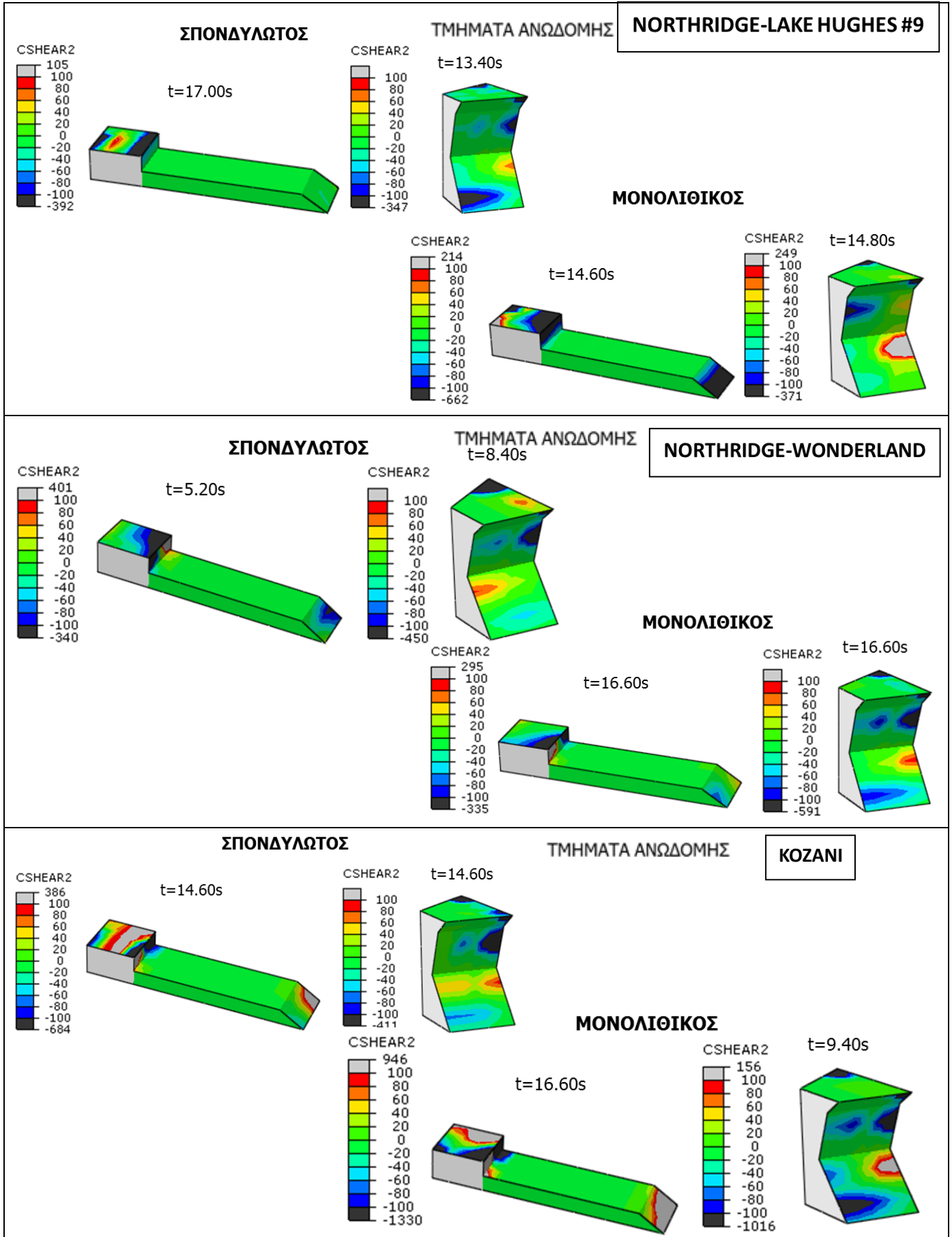


ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΑΒΑΚΑΣ

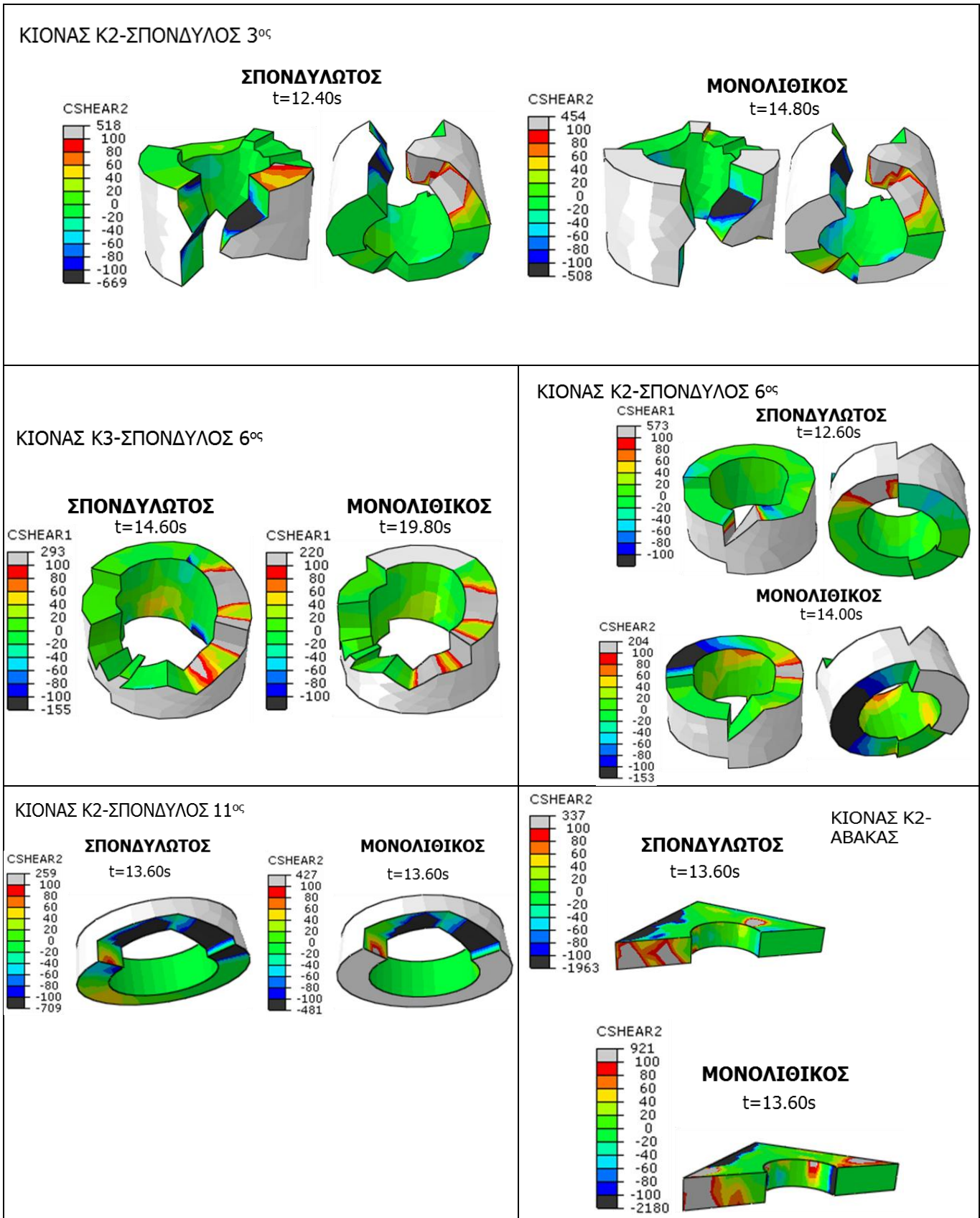


Ομάδα εικόνων 2.7: Διατμητικές τάσεις CSHEAR1/CSHEAR2 σε τμήματα της ανωδομής για το σύνολο των εξεταζόμενων **διπλάσιων** κανονικοποιημένων σεισμικών διεγέρσεων

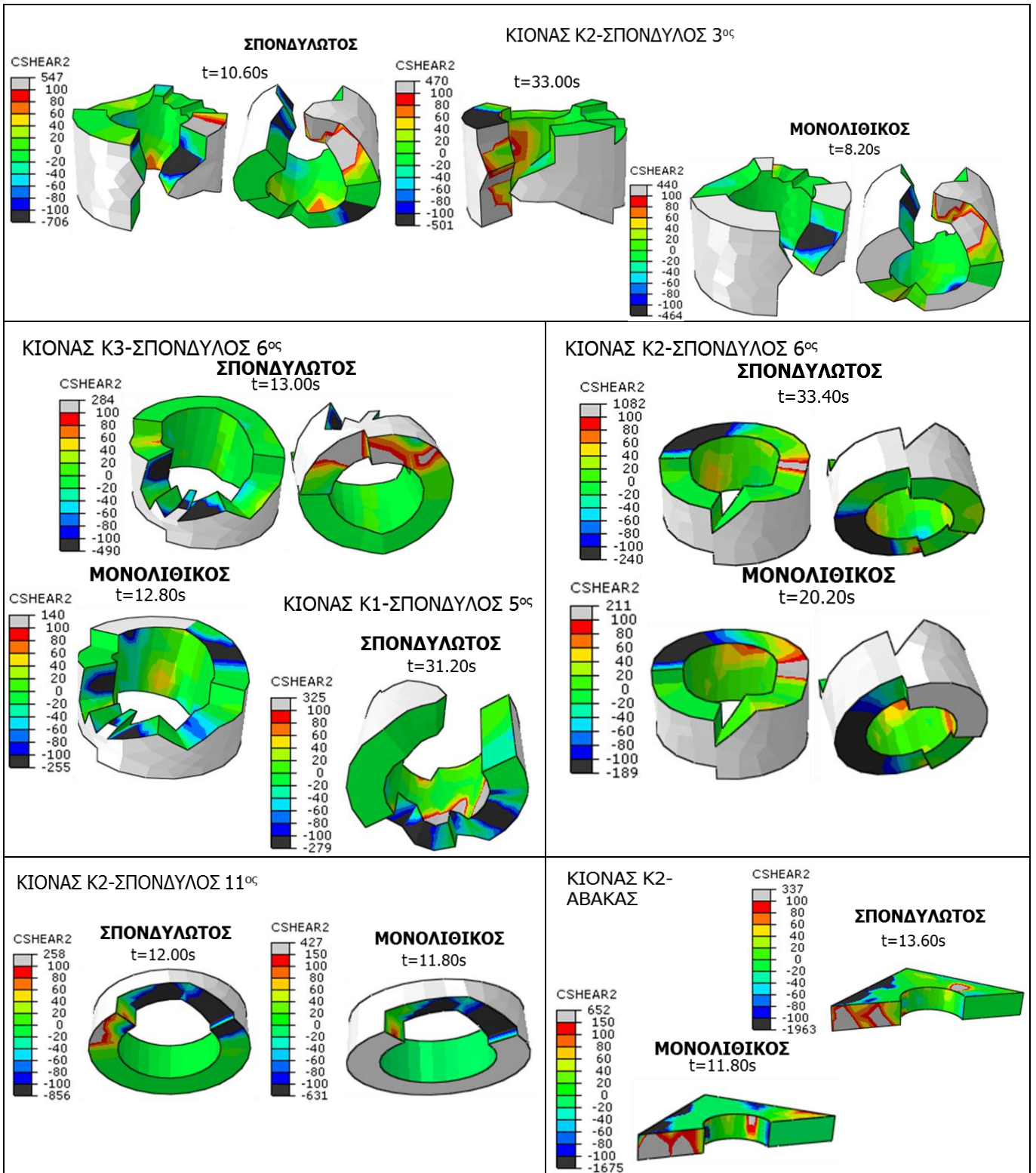




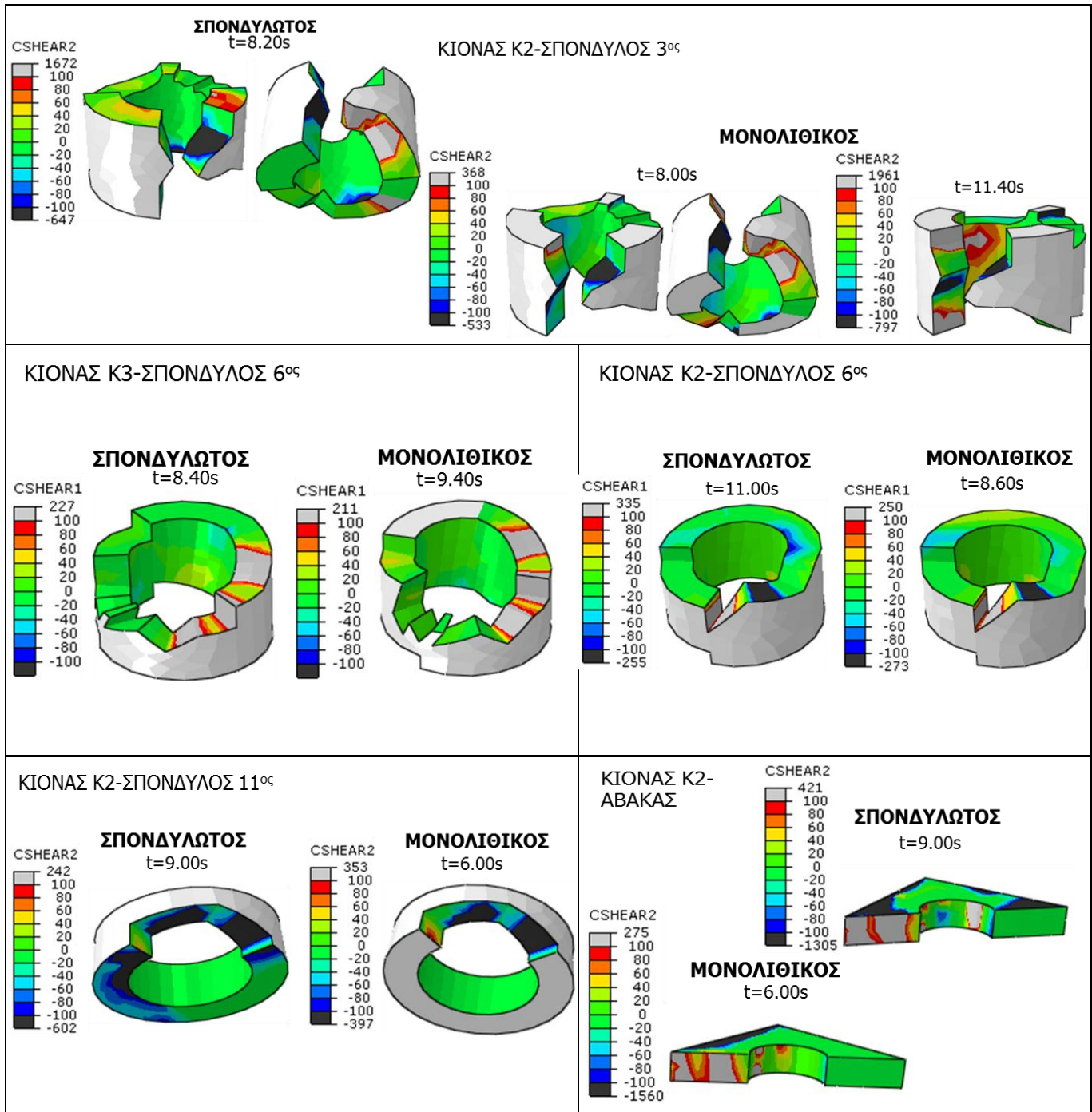
Ομάδα εικόνων 3.1: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΑΒΑΣ



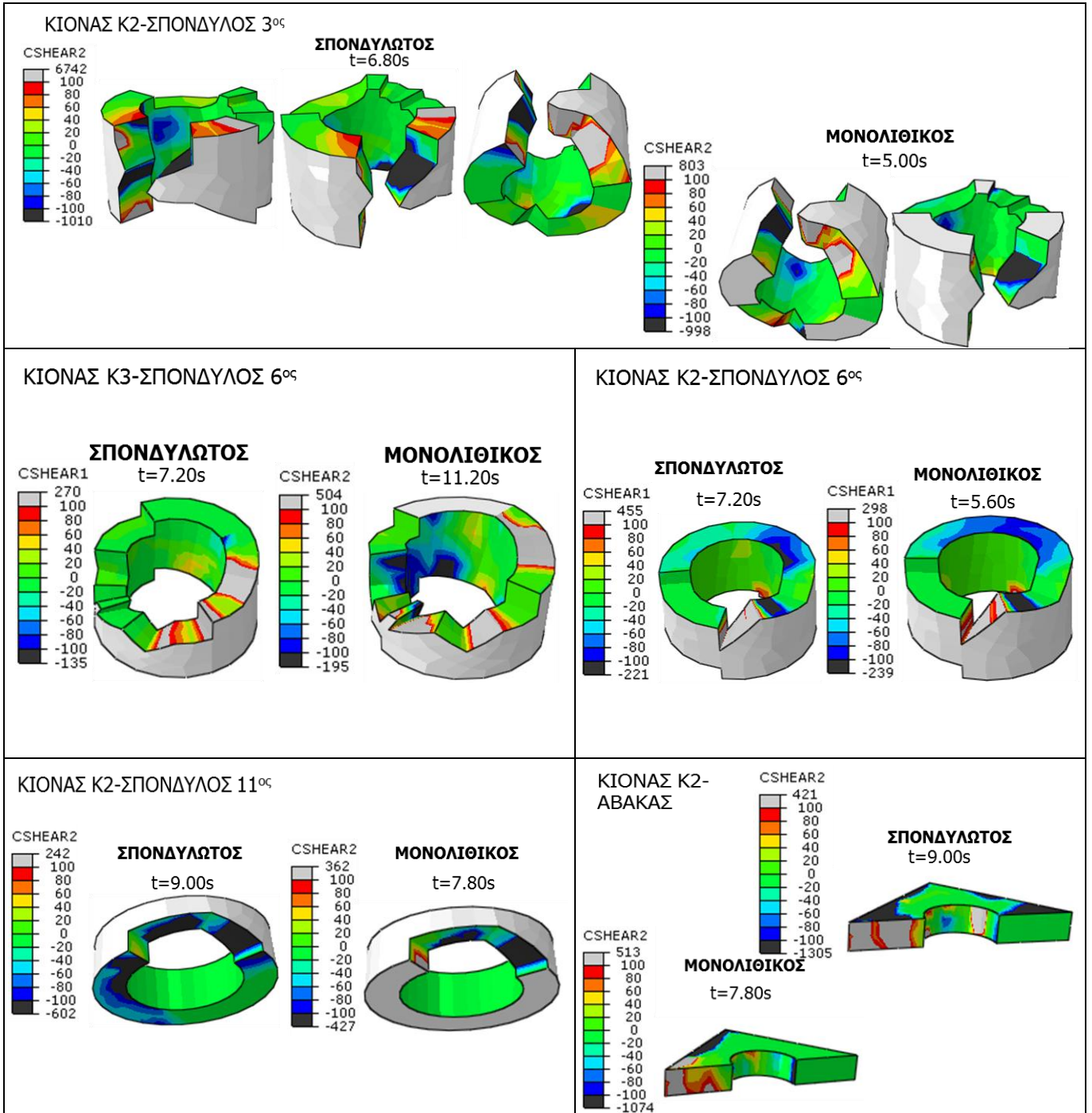
Ομάδα εικόνων 3.2: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΣΑΡΑΝΟ



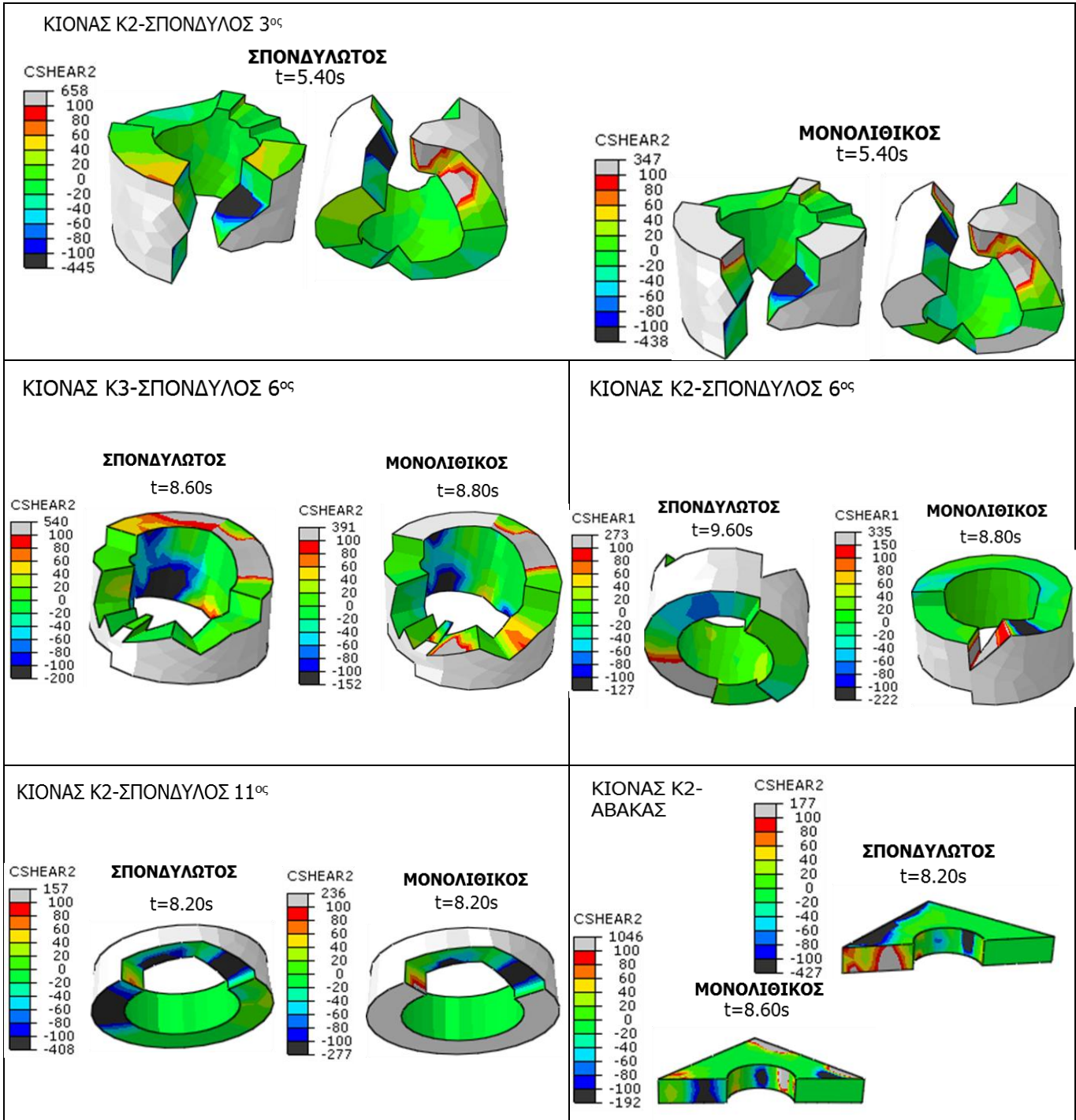
Ομάδα εικόνων 3.3: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΛΟΜΑ ΠΡΙΕΤΑ



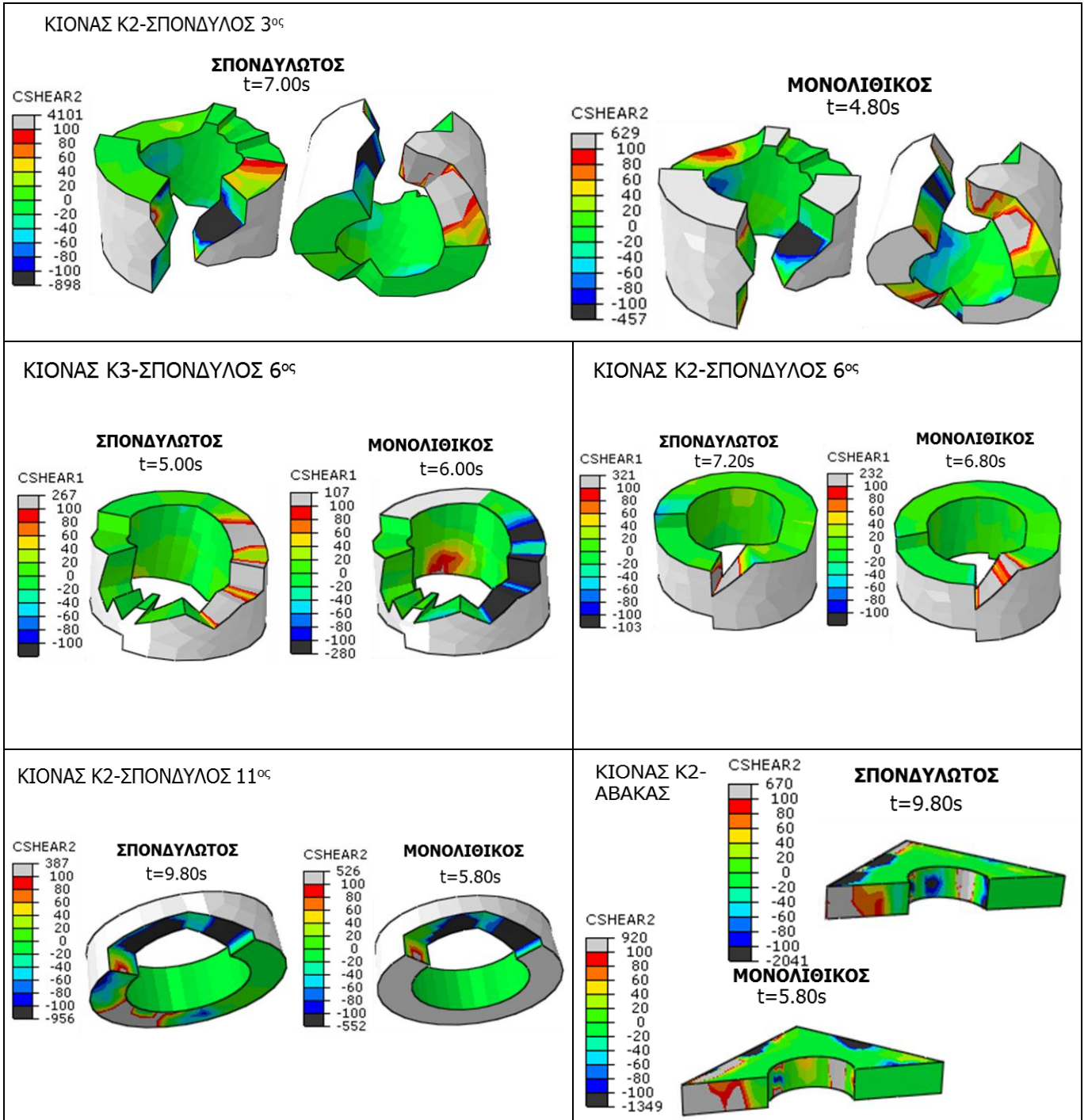
Ομάδα εικόνων 3.4: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, LAKE HUGHES #9



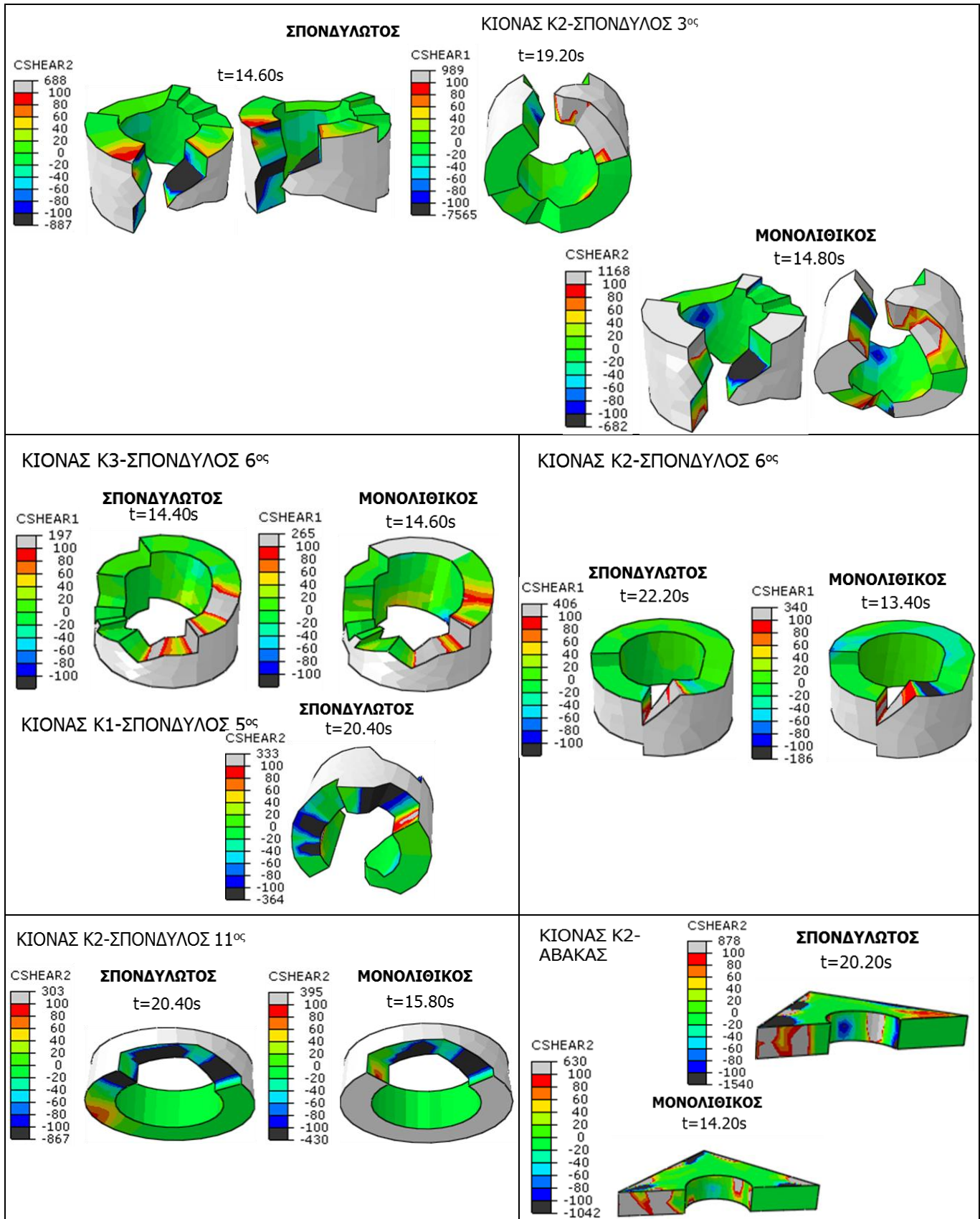
Ομάδα εικόνων 3.5: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, WONDERLAND



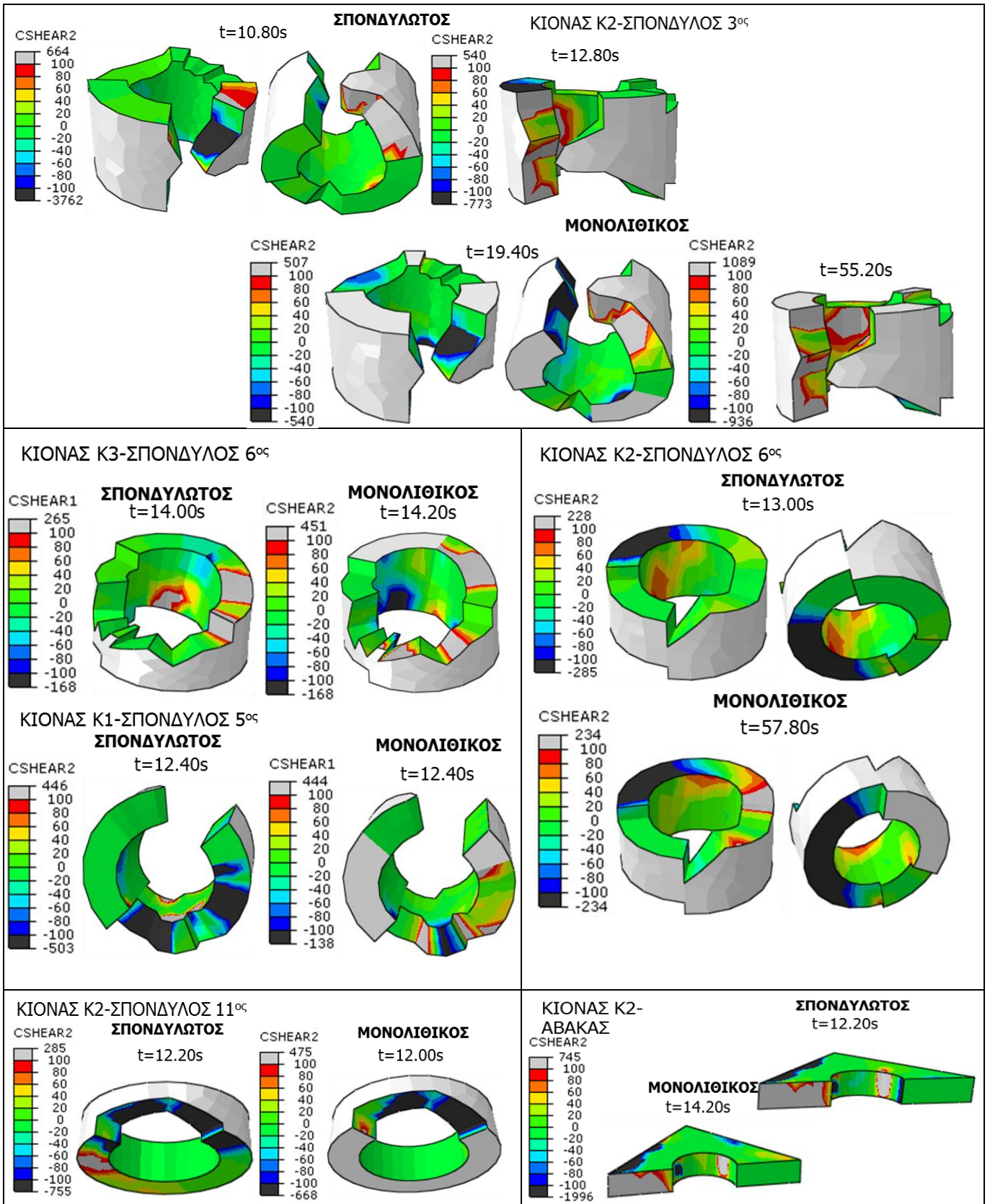
Ομάδα εικόνων 3.6: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 45° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΟΖΑΝΗΣ, 1995



Ομάδα εικόνων 4.1: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΤΑΒΑΣ

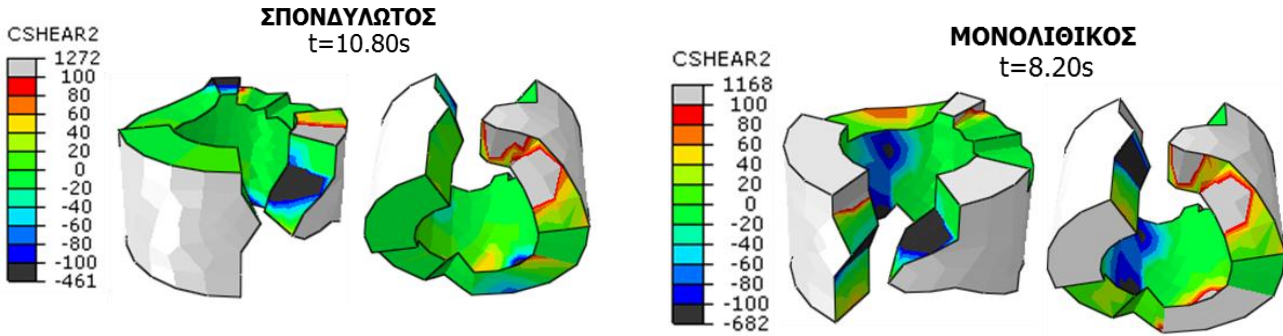


Ομάδα εικόνων 4.2: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ CAMPANO

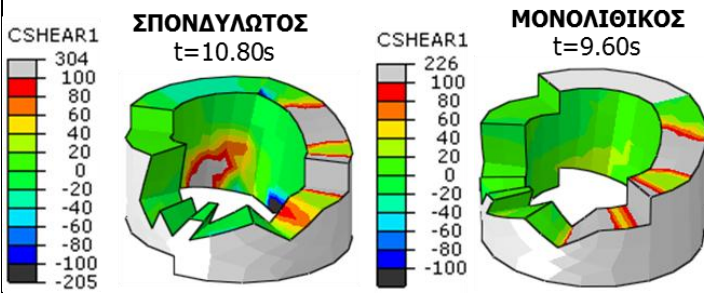


Ομάδα εικόνων 4.3: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΛΟΜΑ ΠΡΙΕΤΑ

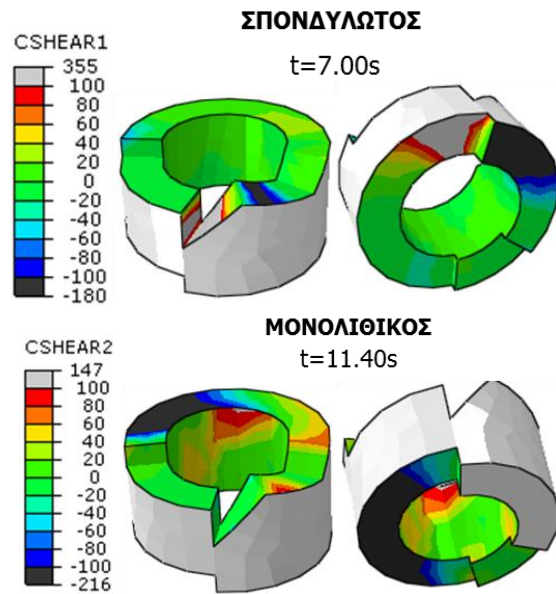
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 3^{ος}



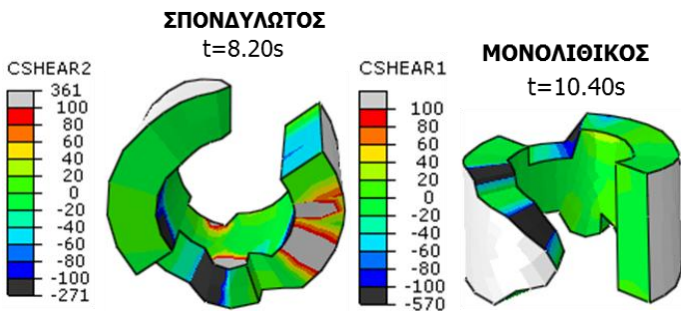
ΚΙΟΝΑΣ Κ3-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



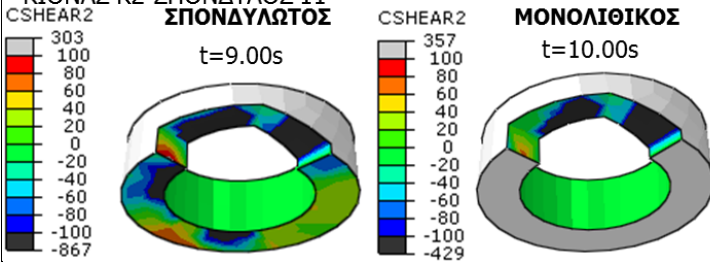
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 6^{ος}



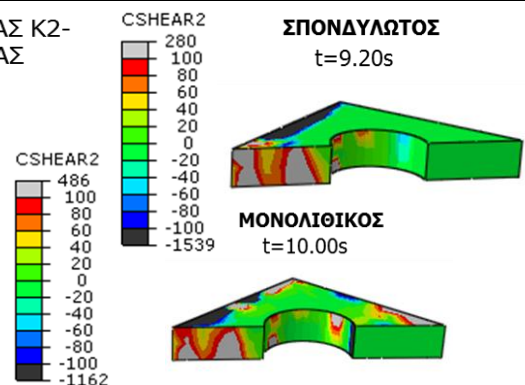
ΚΙΟΝΑΣ Κ1-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 5^{ος}



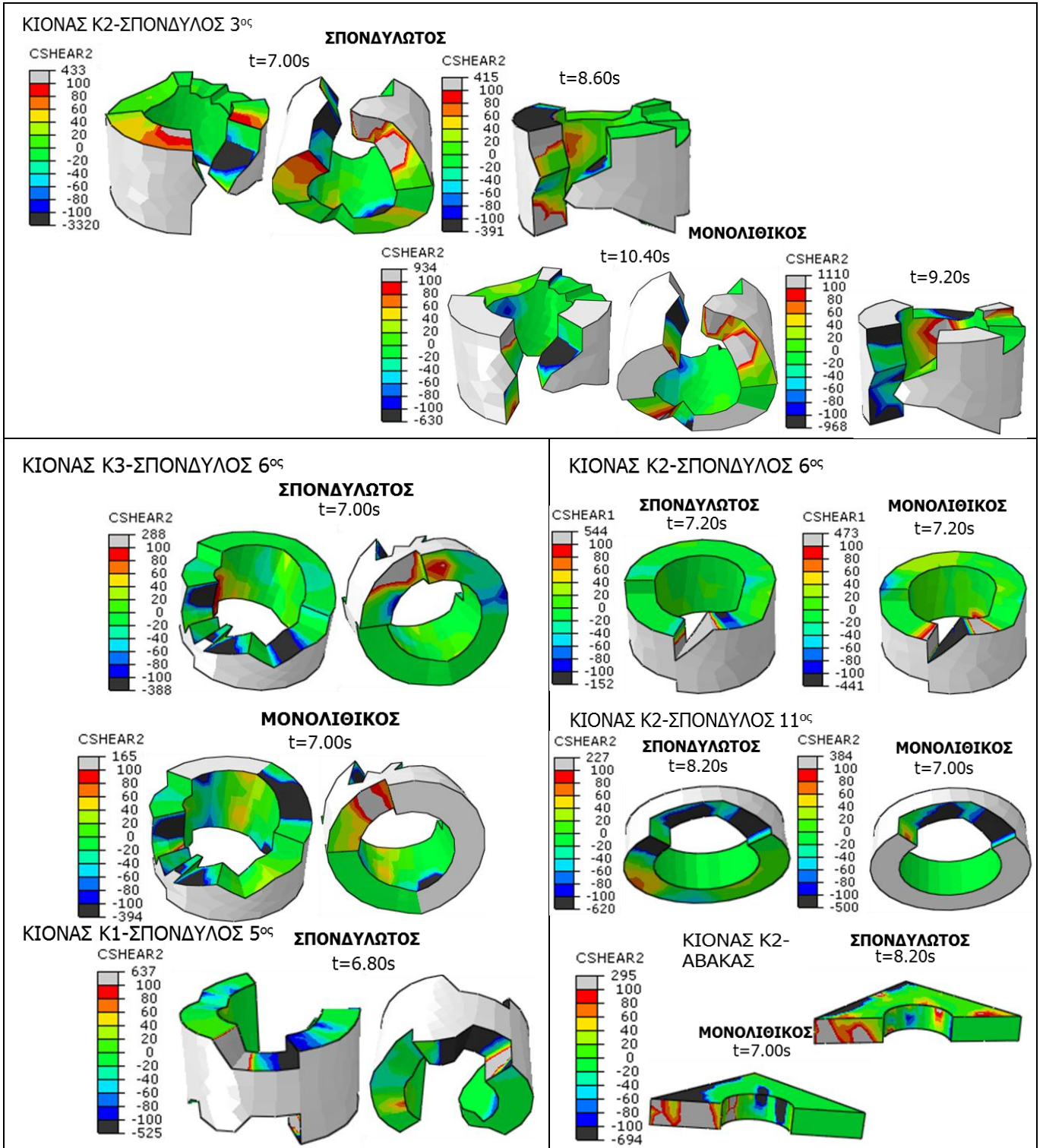
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΣΠΟΝΔΥΛΟΣ 11^{ος}



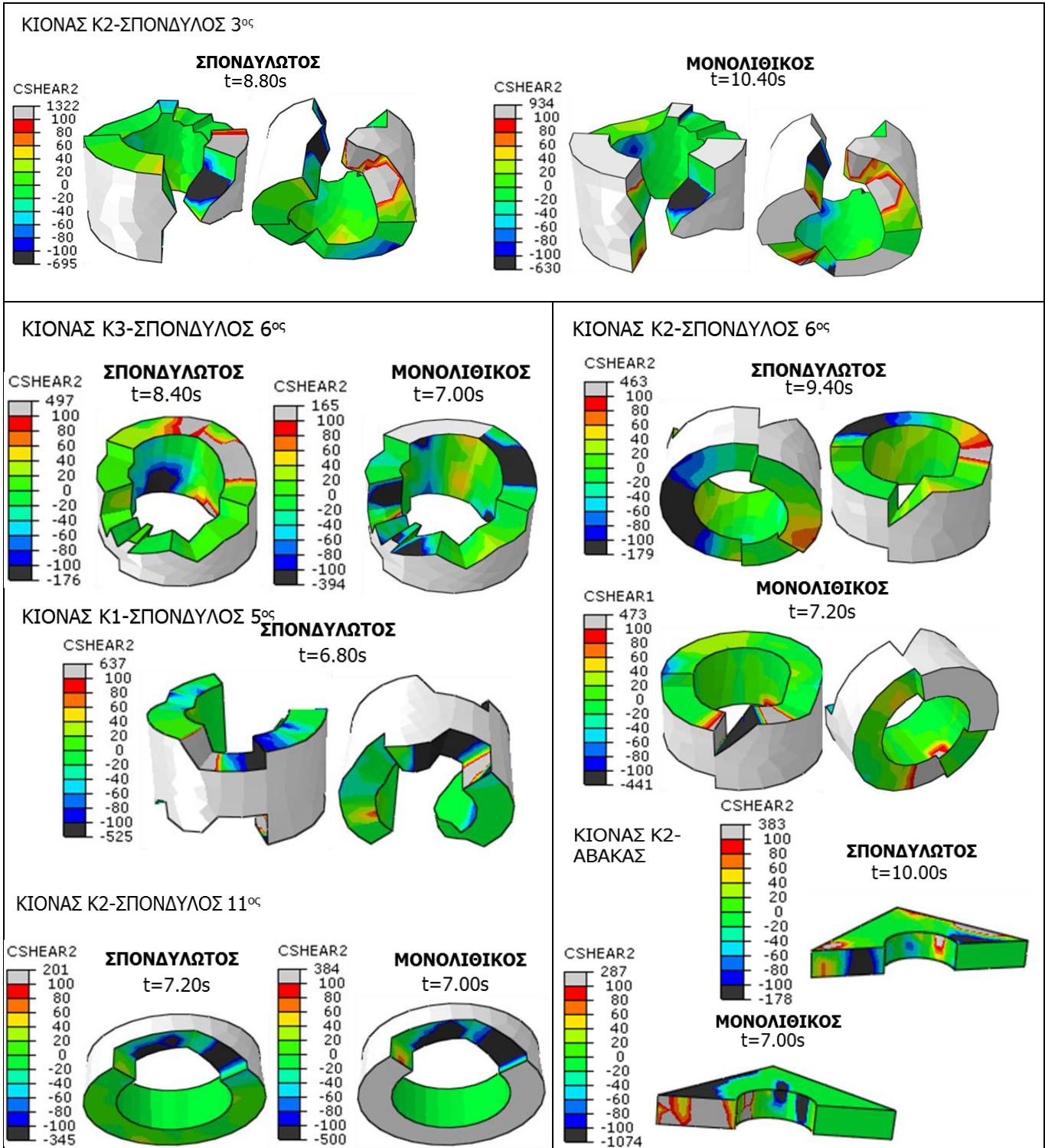
ΚΙΟΝΑΣ Κ2-ΑΒΑΚΑΣ



Ομάδα εικόνων 4.3: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, LAKE HUGHES #9



Ομάδα εικόνων 4.5: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ NORTHBRIDGE, WONDERLAND



Ομάδα εικόνων 4.6: ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΤΑΣΕΙΣ CSHEAR1/CSHEAR2-ΣΤΡΑΜΜΕΝΗ ΚΑΤΑ 90° ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΕΓΕΡΣΗ ΚΟΖΑΝΗΣ, 1995

