



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΔΙΑΝΟΙΞΗΣ ΣΗΡΑΓΓΩΝ

ΜΙΚΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΟΥ ΠΕΤΡΩΜΑΤΟΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΑΝΟΙΓΜΑΤΑ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μιχαήλ Α. Λοτίδης

Μηχανικός Μεταλλείων – Μεταλλουργός Ε.Μ.Π. (ΜEng)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Πάυλος Π. Νομικός

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2019

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Παύλος Π. Νομικός Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός σ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ανδρέας Γ. Μπενάρδος Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Παύλος Π. Νομικός Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π. (επιβλέπων)

Αλέξανδρος Ι. Σοφιανός σ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Ανδρέας Γ. Μπενάρδος Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γεώργιος Ν. Παναγιώτου Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Μιχαήλ Ι. Καββαδάς Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Θεόδωρος Ν. Μιχαλακόπουλος Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κωνσταντίνος Ι. Λουπασάκης Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF MINING AND METALLURGICAL ENGINEERING
DEPARTMENT OF MINING ENGINEERING
LABORATORY OF TUNNELING ENGINEERING

MICROMECHANICAL ROCK BEHAVIOUR AROUND OPENINGS

DOCTOR OF PHILOSOPHY THESIS

Michail A. Lotidis

Mining and Metallurgical Engineer N.T.U.A. (MEng)

SUPERVISOR

Pavlos P. Nomikos

Associate Professor N.T.U.A.

ATHENS, JULY 2019

ADVISORY COMMITTEE

Pavlos P. Nomikos Associate Professor N.T.U.A. (supervisor)

Alexandros I. Sofianos ret. Professor N.T.U.A.

Andreas G. Benardos Associate Professor N.T.U.A.

EXAMINATION COMMITTEE

Pavlos P. Nomikos Associate Professor N.T.U.A. (supervisor)

Alexandros I. Sofianos ret. Professor N.T.U.A.

Andreas G. Benardos Associate Professor N.T.U.A.

Georgios N. Panagiotou Professor N.T.U.A.

Michael J. Kavvadas Professor N.T.U.A.

Theodoros N. Michalakopoulos Associate Professor N.T.U.A.

Constantinos I. Loupasakis Associate Professor N.T.U.A.

Ευχαριστίες

Πριν την παρουσίαση της διδακτορικής διατριβής, οφείλω να αναγνωρίσω τη συνεισφορά ανθρώπων που με τον τρόπο τους είχαν ενεργό ρόλο στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω:

Αρχικά, εκ βάθους καρδίας τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. **Παύλο Νομικό**, επιβλέποντα της διατριβής, για την ανάθεση του θέματος, τη συνεχή βοήθεια και καθοδήγησή του, την εμπύχωση και συμπαράστασή του. Δημιούργησε το κατάλληλο κλίμα για μία δημιουργική συνεργασία και στάθηκε δίπλα μου καθ' όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου ως επιβλέπων, μέντορας, φίλος και οικογένεια.

Τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής, τον σ. Καθηγητή κ. **Αλέξανδρο Σοφιανό** και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. **Ανδρέα Μπενάρδο**, για τη σημαντική τους επιστημονική συμβολή στα ειδικότερα θέματα της διατριβής, καθώς και για την άμεση, αμέριστη και ανεκτίμητη βοήθειά τους όσες φορές τους εξητήθει.

Τα μέλη του Εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της οικίας Σχολής, και κυρίως τον Δρ. **Γεώργιο Παπαντωνόπουλο** Ε.Δι.Π. για την πρόθυμη και αμέριστη βοήθειά του, όπως και για την εμπύχωση που προσέφερε αδιαλείπτως.

Τα μέλη του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας-Υδρογεωλογίας της οικίας Σχολής, και ιδιαίτερος τον Δρ. **Παρασκευά Τσαγγαράτο** Ε.Δι.Π. για τη βοήθεια που προσέφερε όσες φορές του εξητήθει κατά το στάδιο της διαμόρφωσης των δοκιμών, και τον κ. **Δημήτριο Κοτσάνη** Υ.Δ. τόσο για τη χρήσιμη πολύπλευρη βοήθεια και γνώσεις που προσέφερε, όσο και για τον δανεισμό των αλουμινένιων δακτυλίων που ήταν απαραίτητοι στη διεξαγωγή των εργαστηριακών δοκιμών.

Τα μέλη του Εργαστηρίου Εμπλουτισμού των Μεταλλευμάτων και κυρίως τον Καθηγητή κ. **Κωνσταντίνο Τσακαλάκη** και τον Δρ. **Ηλία Σαμμά** Ε.Τ.Ε.Π. της οικίας Σχολής, για τις διευκολύνσεις που παρείχαν κατά το στάδιο της διαμόρφωσης των δοκιμών.

Τις εταιρίες ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε., ΜΑVΙΜΑR Ι.Κ.Ε. και ΠΑΥΛΙΔΗΣ Α.Ε. ΜΑRΜΑΡΑ ΓΡΑΝΙΤΕΣ για τη διάθεση των πετρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή.

Το Εργαστήριο Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας και κυρίως την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κα. **Μαρία Περράκη** για τον δανεισμό του στερεογραφικού μικροσκοπίου.

Τον κ. **Παναγιώτη Παπουτσή** για τη συνεισφορά του στη γλωσσική επιμέλεια του γαλλικού κειμένου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου με κάθε τρόπο σε όλη τη διάρκεια της προσπάθειάς μου.

Η εκπόνηση της διατριβής έτυχε οικονομικής υποστήριξης για 4 έτη από το Ε.Μ.Π. μέσω του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας, ύστερα από πρόταση της Συνέλευσης του Τομέα Μεταλλευτικής και της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Περίληψη

Στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή διερευνάται η μικρορωγμάτωση και η θραύση του πετρώματος γύρω από ανοίγματα που βρίσκονται σε θλιπτικό εντατικό πεδίο. Η εν λόγω διερεύνηση πραγματοποιείται σε δύο κύρια στάδια, ήτοι ένα εργαστηριακό και ένα αριθμητικό.

Φυσικά μοντέλα υπογείων ανοιγμάτων σε πετρώματα, έχουν χρησιμοποιηθεί συχνά στο εργαστήριο για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας της μικρορωγμάτωσης του πετρώματος και των φαινομένων της ρωγμάτωσης γύρω από ανοίγματα. Τέτοιου είδους μελέτες αποσκοπούν στην απόκτηση γνώσης μέσω βασικής έρευνας, και τη μεταφορά της στην κλίμακα του πεδίου για τον ασφαλέστερο σχεδιασμό και κατασκευή βαθιών σηράγγων και μεταλλείων, υπογείων εκσκαφών, βαθιών γεωτρήσεων κ.λπ. Ωστόσο, οι γνώσεις που αποκτώνται μέσω βασικής έρευνας δε δύνανται να μεταφερθούν απευθείας στην κλίμακα του πεδίου, λόγω των πολλών παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη, συμπεριλαμβανομένης της επίδρασης της κλίμακας (scale effect), της μεταβλητότητας των ιδιοτήτων του υλικού, των διαφορετικών συνοριακών και αρχικών συνθηκών κ.λπ. Από την άποψη αυτή, οι αριθμητικές προσομοιώσεις δύνανται να συνδέσουν τα εργαστηριακά αποτελέσματα με τις παρατηρήσεις στην κλίμακα του πεδίου. Προϋπόθεση αποτελεί η ύπαρξη αξιόπιστων εργαστηριακών δεδομένων, όπως φυσικά μοντέλα σαν τα εξεταζόμενα στην παρούσα διδακτορική διατριβή, για την αρχική βαθμονόμηση του αριθμητικού υλικού.

Προηγούμενες εργαστηριακές μελέτες σε υπό θλίψη φυσικά μοντέλα υπογείων ανοιγμάτων σε πετρώματα καταλήγουν στην παρατήρηση τριών κύριων φαινομένων, με ομοιότητες και διαφορές αναλόγως του υλικού, των συνοριακών συνθηκών και της γεωμετρίας του ανοίγματος. Τόσο η εμφάνισή τους όσο και το τελικό μοτίβο της ρωγμάτωσης ποικίλουν από υλικό σε υλικό, με τη σειρά εμφάνισής τους να εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο εντατικό πεδίο. Σε συνθήκες μονοαξονικής θλίψης ή χαμηλού πλευρικού περιορισμού, αρχικά αναμένεται η εμφάνιση εφελκυστικών πρωτογενών ρωγμών, που ξεκινούν από τη στέψη και το δάπεδο της οπής λόγω της υψηλής συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων στις εν λόγω περιοχές, και αναπτύσσονται παράλληλα προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης. Στη συνέχεια, παρατηρείται ο σχηματισμός δευτερογενών ρωγμών στις

εγγύς περιοχές δεξιά και αριστερά των οπών, οι οποίες επεκτείνονται παρακατακόρυφα προς τις βάσεις των πρισμάτων, και αλληλοεπιδρούν μαζί τους, καθώς και με τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων στην αριστερή και δεξιά παρειά του ανοίγματος. Στις εν λόγω περιοχές απαντάται το τρίτο φαινόμενο, γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως «πλευρικές αποφλοιώσεις».

Κατά το εργαστηριακό στάδιο της παρούσας διατριβής εξετάζονται έξι (6) διαφορετικά υλικά, εξορυγμένα από λατομεία της ελληνικής επικράτειας. Φυσικά μοντέλα γύψου, δολομιτικού ασβεστόλιθου, ασβεστιτικών και δολομιτικών μαρμάρων με προϋπάρχουσα μονή κυλινδρική οπή διαφόρων διαμέτρων, υποβάλλονται σε μονοαξονική θλίψη. Μελετάται η επίδραση του υλικού και της διαμέτρου της οπής στη διαδικασία της ρωγμάτωσης, και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με εκείνα της διεθνούς βιβλιογραφίας. Στη συνέχεια εξετάζονται υπό συνθήκες μονοαξονικής θλίψης, τα φαινόμενα της ρωγμάτωσης σε φυσικά μοντέλα δύο διαφορετικών ποικιλιών δολομιτικού μαρμάρου με δύο οριζόντιες παράλληλες προϋπάρχουσες κυλινδρικές οπές διαφόρων διαμέτρων και σχετικής απόστασης, με τους άξονες των κέντρων τους ευθυγραμμισμένους με τις βάσεις του δοκιμίου. Παρουσιάζεται το μοτίβο ρωγμάτωσης κάθε υλικού, καθώς και οι αντίστοιχες διαφορές. Παρόμοια φυσικά μοντέλα μαρμάρου δεν έχουν εξετασθεί και δημοσιευθεί προηγουμένως στη διεθνή βιβλιογραφία.

Για την παρακολούθηση της διαδικασίας της ρωγμάτωσης, της έναρξης των κύριων φαινομένων, της αλληλεπίδρασής τους και του τρόπου αστοχίας των φυσικών μοντέλων, χρησιμοποιείται η μέθοδος της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (digital image correlation, DIC) και η ανάλυση της ακουστικής εκπομπής (acoustic emission, AE). Εφαρμόζονται και παρουσιάζονται νέες τεχνικές ακριβείας για τον προσδιορισμό του πραγματικού χρόνου έναρξης των προαναφερθέντων πρωτογενών ρωγμών στη στέψη και το δάπεδο των οπών, καθώς και των πλευρικών αποφλοιώσεων στις παρειές των ανοιγμάτων. Τα φυσικά μοντέλα λεπτόκοκκων ασβεστιτικών και δολομιτικών υλικών της παρούσας διατριβής παρουσιάζουν δύο διαφορετικές συμπεριφορές ρωγμάτωσης. Τα ασβεστιτικά μάρμαρα παρουσιάζουν ένα ιδιαίτερο μοτίβο και τύπο συμπεριφοράς ρωγμάτωσης που διαφέρουν αισθητά από των δολομιτικών πετρωμάτων και των σχετικών παρατηρήσεων της διεθνούς βιβλιογραφίας. Συγκρίνεται και παρουσιάζεται η απαιτούμενη εφαρμοζόμενη αξονική τάση για την έναρξη των πρωτογενών ρωγμών

και των πλευρικών αποφλοιώσεων στα υλικά που μελετώνται στην παρούσα διατριβή, καθώς και επιπλέον αποτελεσμάτων δημοσιευμένων στη διεθνή βιβλιογραφία, από όπου προκύπτει μια εκθετική συσχέτιση με τη διάμετρο της οπής.

Οι εφαρμοζόμενες τεχνικές που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή για τον προσδιορισμό της έναρξης της ρωγμάτωσης μέσω της μεθόδου συσχέτισης ψηφιακών εικόνων, δύνανται να αξιοποιηθούν και για τον προσδιορισμό της έναρξης της ρωγμάτωσης και σε άλλες εφαρμογές. Η συνδυασμένη εφαρμογή της μεθόδου συσχέτισης ψηφιακών εικόνων και της ανάλυσης της ακουστικής εκπομπής επιτρέπει την αξιόπιστη ποσοτικοποίηση των φαινομένων της ρωγμάτωσης στα εξεταζόμενα λεπτόκοκκα, κρυσταλλικά ή μη, ασβεστιτικά και δολομιτικά υλικά, με παρουσία ταινιώσεων ή χωρίς, που σε διαφορετική περίπτωση η παρατήρησή τους μπορεί να είναι αβέβαιη και ο προσδιορισμός τους αμφισβητήσιμος. Επιπλέον, η κατάλληλη παραμετροποίηση της πειραματικής διαδικασίας και η εξειδικευμένη επεξεργασία των σημάτων ακουστικής εκπομπής μετά την καταγραφή τους, επέτρεψε τον χωρικό προσδιορισμό των πηγών των σημάτων της ακουστικής εκπομπής στις ασβεστιτικές ποικιλίες μαρμάρου. Επίσης, όπου είναι απαραίτητο, χρησιμοποιείται στερεοσκοπικό μικροσκόπιο προκειμένου να αποσαφηνιστεί η κατάσταση της ρωγμάτωσης των φυσικών μοντέλων. Επιβεβαιώνεται ότι η εφαρμογή μιας και μόνο μεθόδου παρακολούθησης δεν αρκεί, τουλάχιστον όχι πάντα, για να περιγράψει ξεκάθαρα μια εξελισσόμενη κατάσταση και ως εκ τούτου θα πρέπει να αξιοποιούνται πάνω από μία προσεγγίσεις για τον πλήρη καθορισμό της. Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα διατριβή, προτείνεται επίσης να εφαρμοστεί για την παρακολούθηση και άλλων πειραματικών μελετών όπου λαμβάνουν χώρα φαινόμενα εξαρτώμενα από το εντατικό πεδίο και από την επίδραση της κλίμακας.

Τα φυσικά μοντέλα της παρούσας διατριβής μπορούν να φανούν χρήσιμα ως σημείο αναφοράς για υλικά με παρόμοιους τύπους συμπεριφοράς, όπως για παράδειγμα τα ασβεστιτικά μάρμαρα. Επιπλέον, παρέχουν μια εικόνα για τη διαδικασία της θραύσης του μαρμάρου γύρω από ανοίγματα, χρήσιμη για την κατανόηση των μηχανισμών που συνδέονται με την υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου, διευκολύνοντας τη μεταφορά της εργαστηριακής γνώσης στο πεδίο.

Στο δεύτερο στάδιο της διατριβής, οι εργαστηριακές δοκιμές στα παραπάνω φυσικά μοντέλα προσομοιώνονται αριθμητικά με το μοντέλο συνδεδεμένων

σωματιδίων (bonded particle model, BPM) αξιοποιώντας τη διδιάστατη και τριδιάστατη έκδοση του λογισμικού Particle Flow Code (PFC) της Itasca. Το γραμμικό μοντέλο παράλληλων δεσμών (linear parallel bond model, PB) χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του γύψου και το μοντέλο επίπεδων δεσμών (flat-joint, FJ) αντίστοιχα για τα μάρμαρα. Επιπλέον, δημοσιευμένα στη διεθνή βιβλιογραφία εργαστηριακά αποτελέσματα από φυσικά μοντέλα σε γρανίτη, προσομοιώνονται επίσης αριθμητικά χρησιμοποιώντας το μοντέλο FJ. Παρουσιάζονται η διαδικασία και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης των υλικών στον κώδικα, καθώς και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των μοντέλων με τα προϋπάρχοντα ανοίγματα. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μεθοδολογία που ακολουθείται για τον προσδιορισμό της εμφάνισης των φαινομένων, και συγκρίνεται τόσο η μέγιστη αντοχή και η απαιτούμενη εφαρμοζόμενη αξονική τάση για την έναρξη των δύο κύριων φαινομένων, των πρωτογενών ρωγμών και των πλευρικών αποφλοιώσεων, των αριθμητικών και φυσικών μοντέλων, όσο και η επίδραση της κλίμακας που τα συνοδεύει. Επιπροσθέτως, πραγματοποιείται αριθμητική διερεύνηση και ποσοτικοποίηση των τάσεων και της κατανομής τους, τόσο κατά μήκος όσο και κάθετα της διαδρομής της εφελκυστικής ρωγμής κατά τη διάρκεια της αριθμητικής δοκιμής θλίψης.

Η μικρορωγμάτωση, η διαδικασία της θραύσης και η αλληλουχία της εμφάνισης των φαινομένων κατά τη διάρκεια των αριθμητικών δοκιμών βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις εργαστηριακές παρατηρήσεις. Επιπλέον, το μοτίβο της ρωγμάτωσης των αριθμητικών δοκιμών ομοιάζει με εκείνο των φυσικών μοντέλων, ενώ οι περιοχές νεφώδους μικρορωγμάτωσης στα αριθμητικά μοντέλα ταυτίζονται με τις περιοχές έντονης παραμόρφωσης που παρατηρούνται κατά την ανάλυση DIC στα αντίστοιχα φυσικά μοντέλα.

Παρόλο που η βαθμονόμηση αξιόπιστου αριθμητικού υλικού που συμπεριφέρεται ρεαλιστικά τόσο μακρο- όσο και μικροσκοπικά για περισσότερες από μία εργαστηριακές δοκιμές είναι ιδιαίτερως απαιτητική, το BPM αποδεικνύεται ικανό να αναπαράγει τα περίπλοκα φαινόμενα που παρατηρούνται γύρω από υπό θλίψη κυλινδρικά ανοίγματα, τουλάχιστον για τα εξεταζόμενα υλικά στην παρούσα διατριβή. Τα εν λόγω βαθμονομημένα αριθμητικά υλικά που συμπεριφέρονται για όλες τις προσομοιούμενες δοκιμές παρόμοια με τις εργαστηριακές, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας των δοκιμών, δύνανται επιπλέον να

αξιοποιηθούν για προσομοιώσεις μεγαλύτερης κλίμακας, τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο, όπως για παράδειγμα για την προσομοίωση ρεαλιστικών δομών στα εξεταζόμενα ή σε παρόμοια υλικά, παρέχοντας ένα ισχυρό εργαλείο στον ερευνητή και στον μηχανικό.

Τέλος, αναπτύσσεται αναλυτική σχέση υπολογισμού της απαιτούμενης εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης για την έναρξη των πρωτογενών εφελκυστικών ρωγμών στη στέψη ή στο δάπεδο ενός κυλινδρικού ανοίγματος που βρίσκεται εντός θλιπτικού εντατικού πεδίου.

Abstract

The presented Doctoral Thesis consists of a laboratory and a numerical investigation of the rock's micro- and macro-fracturing around openings in compression.

Physical modelling of underground openings in rock has been commonly used at the laboratory scale to better understand the micro-fracturing process of rock and the cracking phenomena around the opening. Such studies would bring knowledge acquired from basic research on the field scale for the safer design and construction of deep tunnels and mining drifts, extraction sites, deep drilling etc. However, knowledge acquired from basic research cannot be transferred directly on the field scale, due to the many parameters that need to be taken into account, including the scale effect, the material's variability, the different boundary and initial conditions, etc. To this respect, numerical modelling may be helpful in order to link the laboratory results with the field scale observations, provided that reliable laboratory results (i.e. physical models such as those examined in the current Doctoral Thesis) are available for initial calibration of the numerical material.

Previous studies on physical models of hollow rock plates in compression, conclude on the observation of three main phenomena with similarities and differences depending on the material, the boundary conditions and the geometry of the opening. Their appearance as well as their final pattern may vary from material to material, and their sequence strongly depends on the applied stress field. In uniaxial compression or at low confinement, primary fractures initiate at the upper- and lower-hole's boundary, extending upwards and downwards respectively, due to the high tensile stress concentration at these regions. Then, remote fractures initiate at either sides of the opening, propagating sub-vertically, and interacting with the upper and lower model's surface and with the regions of high compressive stress concentration at the opening's sidewalls. At these areas, the third phenomenon occurs, which is commonly referred to in the literature with the conventional term "spalling".

For the laboratory part of the current Doctoral Thesis, six (6) different materials extracted from greek quarries are examined. Hollow plates of plaster, dolomitic limestone, and calcitic and dolomitic marbles with a single pre-existing cylindrical

hole of various diameters are subjected in uniaxial compression. The influence of the material and the hole's diameter on the fracturing process are studied and compared to the literature. Furthermore, the fracturing phenomena on physical models of two different dolomitic marble's varieties with two horizontal parallel pre-existing cylindrical holes of various diameters and relative distance, with centrelines aligned to the specimen's bases, are examined under uniaxial compression. The fracture pattern of each material and the respective differences are presented. Such physical models of marble have not been examined and published previously in the literature.

Full field digital image correlation and acoustic emission analysis are employed for the monitoring of the fracturing process, the initiation of the main phenomena, their interaction and the failure mode of the physical models. New precise techniques on the determination of the true time of the primary fracture and spalling initiation by digital image correlation are implemented and presented. The physical models of fine grained, crystalline or not, calcitic and dolomitic materials of the current doctoral thesis exhibit two different fracturing behaviours. Calcitic marbles show a newly observed fracture pattern and fracturing behavioural type of the hollow rock plates, compared to the dolomitic varieties and the relevant literature. A comparison between the required applied axial stress for the primary fracture and spalling initiation of the studied materials and the previously published results, is presented, showing an exponential relation to the hole's diameter.

The implemented techniques presented in the current thesis for the determination of the fracturing nucleation by digital image correlation may also be used for the determination of fracture initiation on other applications. The combined application of digital image correlation technique and acoustic emission analysis allows for the reliable quantification of the fracturing phenomena in these fine grained, crystalline or not, calcitic and dolomitic materials, banded or not, that otherwise their observation may be uncertain and their determination questionable. Moreover, by the suitable experimental setup and a specialized post-processing of the acoustic emission signals allowed for the location analysis of the signal's sources on the calcitic marbles. Also, a stereoscopic microscope is used, where necessary, in order to enlighten the fracturing condition of the plate specimens. In addition, it is confirmed that the implementation of a single monitoring system may not describe

clearly a situation, at least not every time, so more than one monitoring approaches should take place to fully define a condition. The followed methodology is also proposed to be implemented for the monitoring in other experimental studies where stress and scale dependent phenomena occur.

Physical models such as those presented herein may be useful as reference for materials with behavioural types different from those previously published in the literature, as for example the calcitic marbles. Furthermore, they provide an insight to the marble fracturing process around openings, which is necessary for the understanding of the implications associated with underground marble exploitation, and facilitate the transferring of the laboratory knowledge to the field.

For the second part of the current Doctoral Thesis, the laboratory experiments on the aforementioned physical models are simulated numerically with a Bonded Particle Model by employing the two- and the three-dimensional versions of Itasca's Particle Flow Code. The Linear Parallel Bond model is employed for the plaster's simulation, and respectively the Flat-Joint model for the marbles. In addition, previously published laboratory physical models on granite are also simulated numerically, employing the Flat-Joint model. The calibration procedure and results are presented, as well as the simulation results of the hollow specimens and the followed methodology for the determination of the phenomena's onset. A comparison between the peak strength and the required applied axial stress for the primary fracture and spalling initiation of the numerical and the physical models is presented along with the accompanied scale effect. Additional numerical investigation is performed quantifying the stress distribution along and normal to the primary fracture's path during the numerical compression test.

The micro-cracking, the fracturing process and the sequence of their appearance during the numerical tests of the hollow plates are in good agreement with the laboratory tested physical models. The fracture pattern of the numerical specimens is similar to the one of the physical models, while the regions of micro-cracking in the numerical models is quite similar to the regions of intense deformation observed from Digital Image Correlation analysis on the respective physical models.

However challenging may be the calibration of a reliable numerical material that behaves realistically both macro- and microscopically for more than a single

laboratory test, the Bonded Particle Model is proved to be capable of capturing the complicated phenomena observed around cylindrical cavities in compression, at least for the materials examined herein. These synthetic materials which behave for all the simulated tests similarly to the physical ones, independently of their geometry's complexity, may now be used also for more advanced simulations and research, both in the laboratory and the field scale, as for example to realistically simulate structures in these or similar materials, providing an innovative insight for the researcher and the engineer.

Finally, an analysis is presented and described, which results in a formula that predicts the required applied axial stress for the primary fracture initiation of a single cylindrical opening in compression.

Résumé

Cette thèse doctorale présente une étude en laboratoire et une étude numérique de la micro- et macro-fracturation de la roche autour d'ouvertures en compression.

La modélisation physique des ouvertures souterraines dans les roches est couramment étudiée au niveau du laboratoire pour mieux comprendre le processus de la micro-fracturation des roches et des phénomènes de fissuration autour d'une ouverture. De telles études apporteraient sur le terrain, une connaissance supplémentaire et fondamentale pour une conception et une construction plus sécurisée des tunnels profonds et des mines souterraines, des sites d'extraction, des forages en profondeur, etc. Cependant, les connaissances acquises grâce à la recherche fondamentale ne peuvent pas être transférées directement au niveau du terrain, à cause de la grande quantité des paramètres à prendre en compte, notamment l'effet d'échelle (scale effect), la variabilité du matériau, les conditions initiales et celles aux limites, etc. À cet égard, la modélisation numérique peut être utile pour lier les résultats du laboratoire aux observations à l'échelle du terrain, à condition que les résultats de laboratoire soient fiables (c.-à-d. des modèles physiques tels que ceux examinés dans cette thèse doctorale) soient disponibles pour la calibration initiale du matériel numérique.

Des études antérieures sur des modèles physiques de plaques de roche percées en compression concluent à l'observation de trois phénomènes principaux présentant des similitudes et des différences en fonction du matériau, des conditions aux limites et de la géométrie de l'ouverture. Leur apparence ainsi que leur motif final peuvent varier d'un matériau à l'autre et leur séquence dépend fortement du champ de contrainte appliqué. En compression uniaxiale ou à faible confinement, des fractures primaires apparaissent aux frontières supérieure et inférieure du trou, s'étendant respectivement vers le haut et vers le bas, en raison de la concentration élevée de contraintes de traction dans ces régions. Ensuite, des fractures distantes s'initient de part et d'autre de l'ouverture, se propageant quasi-verticale et interagissant avec la surface supérieure et inférieure du modèle et avec les zones de forte concentration de contraintes de compression situées sur les flancs de l'ouverture. Le troisième phénomène se produit dans ces zones, auquel

on se réfère couramment dans la littérature avec le terme conventionnel «écaillage».

Pendant l'étude en laboratoire de cette thèse doctorale, six (6) matériaux différents sont examinés, extraits de carrières grecques. Des plaques percées en plâtre, en calcaire dolomitique et en marbres calcitiques et dolomitiques avec un seul trou cylindrique préexistant de différents diamètres sont soumises en compression uniaxiale. L'influence du matériau et du diamètre du trou sur le processus de fracturation sont étudiés et comparés à celle de la littérature. De plus, les phénomènes de fracturation sur des modèles physiques de deux variétés différentes de marbre dolomitique avec deux trous préexistants, cylindriques et parallèles, de différents diamètres et distances relatives, avec des lignes médianes alignées sur les bases du modèle, sont examinés sous compression uniaxiale. Le motif de fracture de chaque matériau et les différences respectives sont présentés. De tels modèles physiques sur le marbre n'ont pas été examinés et publiés auparavant dans la littérature.

La corrélation d'images numériques (digital image correlation, DIC) en plein champ et l'analyse des émissions acoustiques (acoustic emission, AE) sont utilisées pour surveiller le processus de fracture, l'initiation des principaux phénomènes, leur interaction et le mode de défaillance des modèles physiques. De nouvelles techniques de précision sur la détermination du moment de la fracture primaire et du début de l'écaillage sont faites par corrélation d'images numériques et présentées. Les modèles physiques des matériaux calcitiques et dolomitiques, à grain fin, cristallins ou non, de cette thèse doctorale présentent deux comportements de fracturation différents. Les marbres calcitiques présentent un motif de fracture et un type de comportement de fracture qui diffèrent considérablement des roches dolomitiques et des observations faites dans la littérature. Une étude comparative entre la contrainte axiale appliquée requise pour la fracture primaire et le début de l'écaillage des matériaux étudiés est présentée sur les résultats précédemment publiés, montrant une relation exponentielle avec le diamètre du trou.

Les techniques mises en œuvre présentées dans la thèse actuelle pour la détermination de la nucléation de la fracturation par corrélation d'images numériques peuvent également être utilisées pour la détection du démarrage de la

fracture dans d'autres applications. L'application combinée à la technique de corrélation d'images numériques et de l'analyse des émissions acoustiques permet de quantifier de manière fiable les phénomènes de fracturation de ces matériaux à grains fins, cristallins ou non, calcitiques et dolomitiques, en bandes ou non, qui autrement leur observation puisse être incertaine et leur détermination douteuse. De plus, le paramétrage expérimental approprié et un post-traitement spécialisé des signaux d'émission acoustique ont permis l'analyse de localisation des sources de signaux sur les marbres calcitiques. Un microscope stéréoscopique est également utilisé pour éclairer les conditions de fracturation des modèles physiques. En outre, il est confirmé que la mise en place d'un système de surveillance unique ne peut pas décrire totalement une situation, du moins pas à chaque fois. Par conséquent, plusieurs approches de surveillance doivent être appliquées pour définir complètement une condition. Il est également proposé de mettre en œuvre la méthodologie présentée pour la surveillance dans d'autres cas d'études expérimentales où se produisent des phénomènes dépendants du champ de contrainte appliqué et de l'échelle.

Des modèles physiques tels que ceux présentés ici peuvent être utiles comme référence pour des matériaux ayant des types de comportement différents de ceux publiés antérieurement dans la littérature, comme par exemple les marbres calcitiques. En outre, ils permettent de mieux comprendre le processus de fracturation du marbre autour des ouvertures, ce qui est nécessaire pour comprendre les implications liées à l'exploitation souterraine du marbre et facilite le transfert des connaissances de laboratoire vers le terrain.

Pendant la seconde étude de cette thèse doctorale, les expériences en laboratoire sur ces modèles physiques sont simulées numériquement avec un modèle de particules collées (bonded particle model, BPM) en utilisant les versions bidimensionnelle et tridimensionnelle du Particle Flow Code d'Itasca. Le modèle à liaisons linéaires parallèles (linear parallel bond model, PB) est utilisé pour la simulation du plâtre et, respectivement, le modèle à joint plat (flat-joint model, FJ) pour les marbres. En outre, des modèles physiques de laboratoire sur du granit publiés antérieurement sont également simulés numériquement à l'aide du modèle à joint plat. La procédure d'étalonnage et les résultats sont présentés, ainsi que les résultats de la simulation des modèles physiques. La méthodologie suivie pour la

détermination de l'initiation de chaque phénomène est également présentée. Une comparaison entre la force maximale et la contrainte axiale appliquée requise pour l'initiation de la fracture principale et celle de l'écaillage des modèles numérique et physique est présentée, ainsi que l'effet d'échelle associé. Une analyse numérique supplémentaire est effectuée pour quantifier la distribution des contraintes le long du trajet de la fracture primaire et perpendiculaire à elle lors de l'expérience de compression numérique.

La micro-fissuration, le processus de fracturation et la séquence de leur apparition lors des expériences numériques des modèles percées sont en bon accord avec les modèles physiques testés en laboratoire. Le motif de fractures des modèles numériques est similaire à celui des modèles physiques. En outre, les régions de micro-fissuration dans les modèles numériques sont assez similaires aux régions de déformation intense observées à partir de l'analyse de corrélation d'images numériques sur les modèles physiques respectifs.

La calibration fiable d'un matériau numérique qui se comporte de manière réaliste aussi bien au niveau macro- qu'au microscopique pour plusieurs expériences en laboratoire est certes difficile, mais le BPM a prouvé qu'il soit capable de capturer les phénomènes complexes observés autour des cavités cylindriques en compression, au moins pour les matériaux examinés ici. De plus, ces matériaux synthétiques qui se comportent pour toutes les expériences simulées comme aux expériences physiques, indépendamment de la complexité de leur géométrie, peuvent être utilisés dorénavant pour des simulations et des recherches plus avancées, à la fois en laboratoire qu'à l'échelle du terrain, comme par exemple pour simuler de manière réaliste des structures de ces matériaux ou d'autres similaires, fournissant ainsi un outil puissant au chercheur et à l'ingénieur.

Enfin, une analyse est présentée, qui aboutit à une formule qui calcule la contrainte axiale requise pour l'initiation de la fracture primaire d'une seule ouverture cylindrique en compression.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	xi
Abstract.....	xvii
Résumé.....	xxi
Λίστα Σχημάτων.....	xxxii
Λίστα Πινάκων.....	liii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος.....	1
1.2 Χαρακτηριστικά ψαθυρών πετρωμάτων.....	2
1.3 Κίνητρο.....	3
1.4 Αντικείμενο διατριβής.....	3
1.5 Προστιθέμενη αξία.....	4
2 Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	7
2.1 Αναλυτικές επιλύσεις.....	10
2.2 Παρατηρήσεις <i>in situ</i>	13
2.3 Εργαστηριακές μελέτες.....	19
2.4 Αριθμητικές προσομοιώσεις.....	26
3 Ακουστική Εκπομπή του Πετρώματος.....	31
3.1 Ορισμός.....	31
3.2 Τεχνική καταγραφής - εξοπλισμός.....	34
3.3 Ψαθυρή θραύση και ΑΕ.....	35
3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου ΑΕ.....	37
3.5 Χωρικός προσδιορισμός των σημάτων ΑΕ.....	38
3.6 Παραδείγματα εργαστηριακών μελετών.....	40
4 Μέθοδος Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων.....	45
4.1 Προτερήματα και αδυναμίες της μεθόδου.....	46

4.2	Τεχνική συσχέτισμού ψηφιακών εικόνων	47
4.3	Προετοιμασία εφαρμογής της μεθόδου	49
5	Λογισμικό PFC.....	53
5.1	Εισαγωγή	53
5.2	Μέθοδος διακριτών στοιχείων	53
5.3	Λογισμικά PFC2D και PFC3D	54
5.4	Μηχανική στο PFC	60
5.4.1	Μηχανισμός ρωγμάτωσης στο PFC.....	60
5.4.2	Μοντέλο συνδεδεμένων σωματιδίων – BPM.....	61
5.4.3	Δεσμοί μεταξύ των σωματιδίων	62
5.5	Γραμμικό μοντέλο παράλληλων δεσμών	62
5.5.1	Εισαγωγή.....	62
5.5.2	Περίληψη συμπεριφοράς	63
5.5.3	Διάκενο επαφής.....	63
5.5.4	Νόμος δύναμης-μετατόπισης.....	64
5.5.5	Παράμετροι	66
5.5.6	Μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων	68
5.6	Μοντέλο επίπεδων δεσμών.....	70
5.6.1	Υλικό με επίπεδους δεσμούς	70
5.6.2	Κινηματικές μεταβλητές.....	72
5.6.3	Σύνοψη συμπεριφοράς.....	73
5.6.4	Διάκενο επαφής.....	74
5.6.5	Νόμος δύναμης-μετατόπισης.....	74
5.6.6	Παράμετροι	76
5.6.7	Μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων	78
5.7	Ερμηνεία των αποτελεσμάτων	79

6	Εργαστηριακές Δοκιμές Χαρακτηρισμού.....	81
6.1	Πειραματική διαδικασία	81
6.2	Γύψος.....	83
6.3	Μάρμαρο «Βέροια»	86
6.3.1	Παρουσίαση υλικού	86
6.3.2	Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού	88
6.4	Μάρμαρο «Νεφέλη»	93
6.4.1	Παρουσίαση υλικού	93
6.4.2	Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού	94
6.5	Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι».....	99
6.5.1	Παρουσίαση υλικού	99
6.5.2	Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού	100
6.6	Μάρμαρο «Βώλακας ΙΙ»	105
6.6.1	Παρουσίαση υλικού	105
6.6.2	Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού	105
6.7	Ασβεστόλιθος «Απόλλων»	111
6.7.1	Παρουσίαση υλικού	111
6.7.2	Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού	112
7	Εργαστηριακές Δοκιμές Θλίψης σε Φυσικά Μοντέλα με Οπές.....	117
7.1	Προετοιμασία δοκιμών φυσικών μοντέλων.....	117
7.2	Παρακολούθηση ΑΕ φυσικών μοντέλων	121
7.3	Προσδιορισμός έναρξης ΠΡ	121
7.4	Προσδιορισμός έναρξης πλευρικών αποφλοιώσεων	130
7.5	Γύψος.....	134
7.6	Μάρμαρο «Βέροια»	137
7.7	Μάρμαρο «Νεφέλη»	150

7.8	Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»	164
7.9	Μάρμαρο «Βώλακας ΙΙ»	179
7.10	Ασβεστόλιθος «Απόλλων»	193
7.11	Φυσικά μοντέλα με διπλές οπές	199
7.11.1	Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»	201
7.11.2	Μάρμαρο «Βώλακας ΙΙ»	213
7.11.3	Σύγκριση τιμών PFI και SPI μονών και διπλών οπών	225
7.12	Χωρικός προσδιορισμός γεγονότων ΑΕ	226
7.12.1	Πειραματική διάταξη	226
7.12.2	Αποτελέσματα χωρικού εντοπισμού	229
7.13	Υπό μελέτη φυσικά μοντέλα και βιβλιογραφία	233
8	Προσομοιώσεις Εργαστηριακών Δοκιμών Χαρακτηρισμού	241
8.1	Γύψος	242
8.2	Μάρμαρο «Βέροια»	244
8.3	Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»	246
8.4	Μάρμαρο «Βώλακας ΙΙ»	248
9	Προσομοίωση φυσικών μοντέλων	251
9.1	Προσδιορισμός έναρξης των ΠΡ	251
9.2	Προσδιορισμός έναρξης των πλευρικών αποφλοιώσεων	253
9.3	BPM γύψου	255
9.4	BPM μαρμάρων	258
9.4.1	Μάρμαρο «Βέροια»	260
9.4.2	Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»	268
9.4.3	Μάρμαρο «Βώλακας ΙΙ»	286
9.5	BPM γρανίτη Lac du Bonnet	301
9.6	Διερεύνηση του εντατικού πεδίου σε BPM	311

9.6.1	Κατανομή οριζόντιων τάσεων κατά μήκος της ΠΡ	311
9.6.2	Κατανομή τάσεων εγκάρσια στη διεύθυνση της ΠΡ.....	313
10	Ανάπτυξη Σχέσης Υπολογισμού της Τάσης Έναρξης της ΠΡ	317
11	Συμπεράσματα	325
	Βιβλιογραφία	331

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα 2-1. Σκαρίφημα των τριών (3) κύριων φαινομένων που εμφανίζονται κατά τις δοκιμές θλίψης σε φυσικά μοντέλα με μονές διαμπερείς κυλινδρικές οπές στο κέντρο. Με κόκκινο απεικονίζονται οι Πρωτογενείς Ρωγμές, με μπλε οι Δευτερογενείς ρωγμές και με πράσινο οι πλευρικές αποφλοιώσεις.	9
Σχήμα 2-2. Βάθος αποφλοιώσεων R_f σε κυκλικό άνοιγμα ακτίνας R όπως ορίζεται στην Εξίσωση 2-11 από τους Martin et al. (1999).	16
Σχήμα 2-3. Διάγραμμα μέσης συχνότητας-RA value που προκύπτουν από τη μέθοδο AE για το χαρακτηρισμό εφελκυστικών και διατμητικών μικρορωγμών. ..	24
Σχήμα 3-1. Σύγκριση μεταξύ (α) ενεργητικών και (β) παθητικών μη-καταστροφικών μεθόδων παρακολούθησης (T: πηγή, R: δέκτης, P: φορτίο).	33
Σχήμα 3-2. Απλοποιημένο διάγραμμα ροής συστήματος ανίχνευσης ακουστικών σημάτων.	35
Σχήμα 3-3. Συσχέτιση μεταξύ της χαρακτηριστικής τιμής μεγέθους των κόκκων και της χαρακτηριστικής τιμής της κατανομής ενέργειας AE (Příkryl & Lokajíček 1999).	41
Σχήμα 4-1. Σχετική θέση του άξονα της κάμερας CCD και του επιπέδου της παρατηρούμενης επιφάνειας για την εφαρμογή της μεθόδου DIC.	47
Σχήμα 4-2. Subset σε χρόνο t_0 και η μετακίνησή του ds (με πράσινο) στον χώρο λόγω παραμόρφωσης σε χρόνο t_1	48
Σχήμα 4-3. Ενδεικτική επιφάνεια μελέτης, όπου με πράσινο χρώμα υποδεικνύεται επιθυμητό δείγμα μοτίβου, με κίτρινο αποδεκτό και με κόκκινο μη αποδεκτό.	49
Σχήμα 4-4. Ενδεικτικό δείγμα επιφάνειας παρακολούθησης φυσικού μοντέλου μαρμάρου «Βώλακας II» πριν (α) και μετά (β) τη δημιουργία κατάλληλου μοτίβου για την εφαρμογή της μεθόδου DIC.	50
Σχήμα 4-5. Διάταξη DIC όπως εφαρμόστηκε κατά την παρούσα διατριβή σε ΦΜ. Με κόκκινα στοιχεία υποδεικνύονται τα φωτιστικά σώματα LED, με μπλε η κάμερα CCD, με πράσινο η κάμερα CMOS και με κίτρινο το φυσικό μοντέλο μαρμάρου ποικιλίας «Βώλακας Άριστον I».	51
Σχήμα 4-6. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC, όπως προκύπτει από το GOM Correlate, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας II».	51
Σχήμα 5-1. Θετική διατμητική τάση.	58
Σχήμα 5-2. Θετική και αρνητική διατμητική τροπή.	58
Σχήμα 5-3. Μηχανισμός εφελκυστικής ρωγμάτωσης σε συσσωμάτωμα δίσκων στο PFC2D.	61
Σχήμα 5-4. Ροϊκές συνιστώσες (α & β) του γραμμικού μοντέλου παράλληλων δεσμών μεταξύ δύο σωματιδίων (γ) (Itasca Consulting Group Inc. 2014).	63
Σχήμα 5-5. Διάκενο επιφάνειας μεταξύ σωματιδίων (α) και μεταξύ σωματιδίου και τοίχου (β) για γραμμικά μοντέλα.	64
Σχήμα 5-6. Νόμος δύναμης-μετατόπισης για τη δύναμη και τη ροπή δεσμού PB: (a) ορθή δύναμη έναντι επιφάνειας διάκενου παράλληλου δεσμού. (b) διατμητική δύναμη έναντι σχετικής διατμητικής μετατόπισης, (c) στρεπτική ροπή έναντι σχετικής στρεπτικής στροφής και (d) καμπτική ροπή έναντι σχετικής καμπτικής στροφής.	65
Σχήμα 5-7. Περιβάλλουσα αστοχίας δεσμού PB.	66
Σχήμα 5-8. Ο όγκος του υλικού που σχετίζεται με την επαφή μεταξύ σωματιδίων (α) και μεταξύ σωματιδίου και τοίχου.	69
Σχήμα 5-9. Αρχικό συσσωμάτωμα κόκκων με όψεις σε σχήμα ποδιάς (α) και υλικό FJ (β).	71

Σχήμα 5-10. Διακριτοποίηση της διεπιφάνειας διδιάστατου (2D) μοντέλου FJ, όπου φαίνεται η σύμβαση της αρίθμησης των στοιχείων (αριστερά) και της παραμετροποίησης ενός τυπικού στοιχείου (δεξιά).	72
Σχήμα 5-11. Διακριτοποίηση της διεπιφάνειας ενός 3D μοντέλου FJ, όπου φαίνεται η σύμβαση της αρίθμησης των στοιχείων (α) και της παραμετροποίησης ενός τυπικού στοιχείου (β).	73
Σχήμα 5-12. Ροϊκές συνιστώσες (α & β) του μοντέλου επίπεδων δεσμών μεταξύ δύο σωματιδίων (γ) (Itasca Consulting Group Inc. 2014).	74
Σχήμα 5-13. Νόμος δύναμης-μετατόπισης για ασύζευκτο στοιχείο FJ: (α) ορθή τάση έναντι διάκενου στοιχείου, (β) διατμητική τάση έναντι σχετικής διατμητικής μετατόπισης και (γ) περιβάλλουσα ολίσθησης.	75
Σχήμα 5-14. Νόμος δύναμης-μετατόπισης για συζευγμένο στοιχείο FJ: (α) ορθή τάση έναντι διάκενου στοιχείου, (β) διατμητική τάση έναντι σχετικής διατμητικής μετατόπισης και (γ) περιβάλλουσα αστοχίας.	76
Σχήμα 6-1. Παράδειγμα κυματομορφής σήματος AE και των παραμέτρων που παρουσιάζει ο Πίνακας 6-1.	82
Σχήμα 6-2. Διάταξη για τη μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων σε δοκίμιο μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι».	83
Σχήμα 6-3. Χρησιμοποιηθέν εξοπλισμός προετοιμασίας δοκιμών γύψου. α) Ογκομετρικός σωλήνας, δοχεία και μέσα ανάδευσης, βοηθητικά δοχεία, β) φούρνος, γ) ζυγαριά ακριβείας, δ) καλούπι δοκιμών UCS και Brazilian test, ε) έλαιο SEPAROL και στ) καλούπι Acetal Polymer φυσικών μοντέλων.	85
Σχήμα 6-4. Ενδεικτικά δοκίμια χαρακτηρισμού γύψου πριν (α & δ), κατά τη διάρκεια (β & ε) και μετά το πέρας (γ & στ) των εργαστηριακών δοκιμών.	86
Σχήμα 6-5. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Βέροια», όπως προκύπτουν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.	87
Σχήμα 6-6. Φωτογραφίες πρισματικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βέροια» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίους, τα LVDTs και τους αισθητήρες AE.	89
Σχήμα 6-7. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βέροια» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες AE (οι καφέ λεκέδες στις φωτογραφίες (β & δ) είναι σκουριά).	89
Σχήμα 6-8. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a ($\times 10^{-3}$) πρισματικού δοκιμίου μαρμάρου «Βέροια» έπειτα από δοκιμή UCS.	90
Σχήμα 6-9. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Βέροια» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).	91
Σχήμα 6-10. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Βέροια» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).	92
Σχήμα 6-11. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Νεφέλη», όπως προκύπτουν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.	93
Σχήμα 6-12. Φωτογραφίες πρισματικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β)	

παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίους, τα LVDTs και τους αισθητήρες AE.	95
Σχήμα 6-13. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες AE.	95
Σχήμα 6-14. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a ($\times 10^{-3}$) πρισματικού δοκιμίου μαρμάρου «Νεφέλη» έπειτα από δοκιμή UCS.	96
Σχήμα 6-15. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Νεφέλη» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).	97
Σχήμα 6-16. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Νεφέλη» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).	98
Σχήμα 6-17. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Βώλακας Άριστον Ι», όπως προκύπτουν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.	99
Σχήμα 6-18. Φωτογραφίες κυλινδρικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίους, τα LVDTs, το εκτασιόμετρο και τους αισθητήρες AE.	101
Σχήμα 6-19. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες AE.	101
Σχήμα 6-20. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής ε_a (μπλε) / διαμετρικής ε_d (κόκκινο) / ογκομετρικής ε_{vol} (πράσινο) παραμόρφωσης κυλινδρικού δοκιμίου μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» έπειτα από δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.	102
Σχήμα 6-21. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Βώλακας Άριστον Ι» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).	103
Σχήμα 6-22. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Βώλακας Άριστον Ι» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).	104
Σχήμα 6-23. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Βώλακας ΙΙ», όπως προέκυψαν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.	105
Σχήμα 6-24. Φωτογραφίες πρισματικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίους, τα LVDTs και τους αισθητήρες AE.	106
Σχήμα 6-25. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε)	

παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες AE.	107
Σχήμα 6-26. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a ($\times 10^{-3}$) πρισματικού δοκιμίου μαρμάρου «Βώλακας II» έπειτα από δοκιμή UCS.	108
Σχήμα 6-27. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Βώλακας II» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό)..	109
Σχήμα 6-28. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Βώλακας II» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).	110
Σχήμα 6-29. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Απόλλων», όπως προκύπτουν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.	111
Σχήμα 6-30. Φωτογραφίες πρισματικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Απόλλων» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίσκους, τα LVDTs και τους αισθητήρες AE.	113
Σχήμα 6-31. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Απόλλων» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες AE.	113
Σχήμα 6-32. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a ($\times 10^{-3}$) πρισματικού δοκιμίου ασβεστόλιθου «Απόλλων» έπειτα από δοκιμή UCS.	114
Σχήμα 6-33. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Απόλλων» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).	115
Σχήμα 6-34. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Απόλλων» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).	116
Σχήμα 7-1. Τα άρρηκτα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή (α: «Βώλακας Άριστον I», β: «Βώλακας II», γ (από αριστερά προς τα δεξιά): «Απόλλων», «Νεφέλη», «Βέροια»).	120
Σχήμα 7-2. Ενδεικτικά φυσικά μοντέλα έπειτα από τον ψεκάσμό τους με υδαρό διάλυμα μαύρου χρώματος.	120
Σχήμα 7-3. Ενδεικτικό διάγραμμα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση της ΠΡ, όπως προκύπτει από την ανάλυση DIC στο άνω μέρος οπής διαμέτρου 35 mm σε ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια», βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.	123
Σχήμα 7-4. Αντιπροσωπευτικά γραφήματα των διαφορετικών τύπων συμπεριφοράς AE κατά την έναρξη των ΠΡ: (α) ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 10 mm (μεταβολή κλίσης καμπύλης), (β) ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 35 mm (άμεσα διακριτά σκαλοπάτια) και (γ) ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον I» με οπή διαμέτρου 61 mm (προσεχόμενα διακριτά σκαλοπάτια). Οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στην έναρξη των ΠΡ στο άνω και κάτω όριο της αντίστοιχης οπής φυσικού μοντέλου, όπως προκύπτει από την ανάλυση DIC.	125

Σχήμα 7-5. Οριζόντιες μετατοπίσεις (mm) συναρτήσει του χρόνου (sec) διαδοχικών περιοχών ενδιαφέροντος στο DIC, οριοθετημένα κάθετα στη διεύθυνση της ΠΡ στον πρωτεύοντα άξονα, και αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ συναρτήσει του χρόνου (sec) στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα. Η κατακόρυφη γραμμή ορίζει την έναρξη της αντίστοιχης ΠΡ στο όριο οπής διαμέτρου 61 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι».....	126
Σχήμα 7-6. Οριζόντιες μετατοπίσεις (mm) συναρτήσει του χρόνου (sec) διαδοχικών περιοχών ενδιαφέροντος στο DIC, οριοθετημένα κάθετα στη διεύθυνση της ΠΡ στον πρωτεύοντα άξονα, και στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα οι τιμές των παραμορφώσεων ($\times 10^{-4}$) όπως καταγράφονται από τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (Strain) ενεργού μήκους 10 mm, επικολλημένο στο εσωτερικό οπής διαμέτρου 35 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βέροια». Επιπλέον, στον δευτερεύοντα άξονα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα τις γραμμικής παλινδρόμησης (LRSC) στην κλίση της καμπύλης δεδομένων τροπόμετρου - χρόνου (sec). Η κατακόρυφη γραμμή ορίζει την έναρξη της αντίστοιχης ΠΡ.....	127
Σχήμα 7-7. Απεικόνιση των κύριων τροπών όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε φυσικό μοντέλο της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» με οπή διαμέτρου 35 mm σε χρόνο $t = 600$ sec. Οι ΠΡ αναγνωρίζονται από τις υψηλότερες παραμορφώσεις που απεικονίζονται με θερμά χρώματα.....	128
Σχήμα 7-8. Εστιασμένη φωτογραφία γύρω από οπή διαμέτρου 10 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Νεφέλη» έπειτα από δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Το κίτρινο φθορίζον χρώμα κάτω από υπεριώδες φωτισμό διευκολύνει την οπτική επιθεώρηση των ΠΡ.....	129
Σχήμα 7-9. Ανηγμένη σύγκλιση (%) συναρτήσει του χρόνου (sec) δύο προκαθορισμένων σημείων στην αριστερή παρειά οπής διαμέτρου 35 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι».	132
Σχήμα 7-10. Εφαρμοζόμενη αξονική τάση (MPa) συναρτήσει του χρόνου (sec) στον πρωτεύοντα κατακόρυφο άξονα, και αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ συναρτήσει του χρόνου (sec) στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα. Η κατακόρυφες γραμμές ΡU και ΡD ορίζουν την έναρξη των ΠΡ στο άνω και κάτω όριο αντίστοιχα της οπής διαμέτρου 35 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Οι κατακόρυφες γραμμές SL και SR ορίζουν την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων στην αριστερή και δεξιά παρειά της οπής αντίστοιχα.....	133
Σχήμα 7-11. Ενδεικτικά μοντέλα γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ) το πέρας των εργαστηριακών δοκιμών.	134
Σχήμα 7-12. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm. Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.	135
Σχήμα 7-13. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm έπειτα από ανάλυση DIC (α) και με το πέρας της δοκιμής θλίψης (β).	136
Σχήμα 7-14. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου χωρίς οπή ποικιλίας «Βέροια» πριν (α) και μετά (β) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.....	138
Σχήμα 7-15. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 10 mm ποικιλίας «Βέροια» πριν (α) και μετά το πέρας (β & γ) της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	139

Σχήμα 7-16. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Βέροια» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.....	139
Σχήμα 7-17. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 35 mm ποικιλίας «Βέροια» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ, δ & ε) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.....	139
Σχήμα 7-18. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 45 mm ποικιλίας «Βέροια» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.....	140
Σχήμα 7-19. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βέροια» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.	140
Σχήμα 7-20. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βέροια» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.	141
Σχήμα 7-21. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βέροια». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα. .	143
Σχήμα 7-22. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βέροια». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα. .	144
Σχήμα 7-23. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βέροια». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα. .	145
Σχήμα 7-24. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βέροια». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα. .	146
Σχήμα 7-25. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βέροια» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).....	147
Σχήμα 7-26. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βέροια» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).....	147

Σχήμα 7-27. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βέροια» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).....	147
Σχήμα 7-28. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βέροια» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).....	148
Σχήμα 7-29. Συγκριτικό γράφημα εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων - διάμετρος οπής (mm) των ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια» (σκούρο μπλε (σ_p): μέγιστη αντοχή των ΦΜ, ανοιχτό μπλε (1 st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2 nd PFI): έναρξη δεύτερων ΠΡ, γκρι (1 st SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στην πρώτη παρειά, κίτρινο (2 nd SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στη δεύτερη παρειά).	149
Σχήμα 7-30. Άνω (a, b) και κάτω (c, d) όριο οπής 10 mm φυσικού μοντέλου ποικιλίας «Νεφέλη», υπό στερεοσκόπιο από την μπροστά (a & c) και πίσω (b & d) ελεύθερη επιφάνεια. Τα βέλη υποδεικνύουν τη θέση των ΠΡ. Εμφανείς είναι επίσης και οι κατακόρυφες ή παρακατακόρυφες ρωγμές στις παρατηρούμενες περιοχές.	151
Σχήμα 7-31. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 10 mm ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά (β, γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	152
Σχήμα 7-32. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά (β, γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	153
Σχήμα 7-33. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 35 mm ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	153
Σχήμα 7-34. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 45 mm ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά (β, γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	153
Σχήμα 7-35. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.	154
Σχήμα 7-36. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.	155
Σχήμα 7-37. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Νεφέλη». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα. .	157
Σχήμα 7-38. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Νεφέλη». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα. .	158
Σχήμα 7-39. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ	

(Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Νεφέλη». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα. . 159

Σχήμα 7-40. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Νεφέλη». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα. . 160

Σχήμα 7-41. Τελικό αποτέλεσμα (α : πριν την κατάρρευση, β : μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ)..... 161

Σχήμα 7-42. Τελικό αποτέλεσμα (α : πριν την κατάρρευση, β : μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ)..... 161

Σχήμα 7-43. Τελικό αποτέλεσμα (α : πριν την κατάρρευση, β : μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ)..... 161

Σχήμα 7-44. Τελικό αποτέλεσμα (α : πριν την κατάρρευση, β : μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ)..... 162

Σχήμα 7-45. Συγκριτικό γράφημα εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων - διάμετρος οπής (mm) των ΦΜ της ποικιλίας «Νεφέλη» (σκούρο μπλε (σ_p): μέγιστη αντοχή των ΦΜ, ανοιχτό μπλε (1st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2nd PFI): έναρξη δεύτερων ΠΡ, γκρι (1st SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στην πρώτη παρειά, κίτρινο (2nd SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στη δεύτερη παρειά). 163

Σχήμα 7-46. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 10 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης..... 166

Σχήμα 7-47. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β , γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. 166

Σχήμα 7-48. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 35 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β , γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. 166

Σχήμα 7-49. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 45 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α & β), κατά τη διάρκεια (γ) και μετά (δ , ϵ & σ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Επιπλέον, δίνεται το μοντέλο που φορτίστηκε μέχρι αστοχίας μετά το πέρας της δοκιμής (ζ). 167

Σχήμα 7-50. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 61 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β , δ & ϵ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Στο (γ) δίνεται η άνω ΠΡ όπως φαίνεται μακροσκοπικά κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης. 167

Σχήμα 7-51. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο

της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.	168
Σχήμα 7-52. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.	169
Σχήμα 7-53. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.....	171
Σχήμα 7-54. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.....	172
Σχήμα 7-55. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.....	173
Σχήμα 7-56. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.....	174
Σχήμα 7-57. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 61 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.....	175
Σχήμα 7-58. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	176

Σχήμα 7-59. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	176
Σχήμα 7-60. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	176
Σχήμα 7-61. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	177
Σχήμα 7-62. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 61 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	177
Σχήμα 7-63. Συγκριτικό γράφημα εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων - διάμετρος οπής (mm) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» (σκούρο μπλε (σ_p): μέγιστη αντοχή των ΦΜ, ανοιχτό μπλε (1 st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2 nd PFI): έναρξη δεύτερων ΠΡ, γκρι (1 st SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στην πρώτη παρειά, κίτρινο (2 nd SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στη δεύτερη παρειά).	179
Σχήμα 7-64. (α) ΠΡ και (β) ΔΡ, όπως παρατηρούνται μέσω της ανάλυσης DIC σε φυσικό μοντέλο μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ» ($D = 35$ mm).	180
Σχήμα 7-65. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 10 mm ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	182
Σχήμα 7-66. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	182
Σχήμα 7-67. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 35 mm ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	182
Σχήμα 7-68. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 45 mm ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	182
Σχήμα 7-69. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.	183
Σχήμα 7-70. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.	184
Σχήμα 7-71. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.	186
Σχήμα 7-72. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων	

AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.	187
Σχήμα 7-73. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.	188
Σχήμα 7-74. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.	189
Σχήμα 7-75. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β & γ) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	190
Σχήμα 7-76. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	190
Σχήμα 7-77. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	190
Σχήμα 7-78. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	191
Σχήμα 7-79. Συγκριτικό γράφημα εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων - διάμετρος οπής (mm) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» (σκούρο μπλε (σ_p): μέγιστη αντοχή των ΦΜ, ανοιχτό μπλε (1 st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2 nd PFI): έναρξη δεύτερων ΠΡ, γκρι (1 st SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στην πρώτη παρειά, κίτρινο (2 nd SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στη δεύτερη παρειά).	192
Σχήμα 7-80. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Απόλλων» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (δ & ε) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Η προβολή της ΠΡ στη στέψη της οπής μετά το πέρας της δοκιμής υποδεικνύεται με κόκκινο (γ).	194
Σχήμα 7-81. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Απόλλων» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.	195
Σχήμα 7-82. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Απόλλων» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.	196

Σχήμα 7-83. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Απόλλων». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.	198
Σχήμα 7-84. (α) Ανεπτυγμένες ΠΡ και ΔΡ (υποδεικνύονται με κόκκινα και μπλε βέλη αντίστοιχα), και (β) τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Απόλλων» αμέσως πριν την κατάρρευση και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).....	199
Σχήμα 7-85. Σχηματική αποτύπωση του μοτίβου ρωγμάτωσης σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές κατά τη δοκιμή θλίψης. Με κόκκινο υποδεικνύονται οι ΠΡ, με μπλε οι ΔΡ, με πράσινο οι αποφλοιώσεις και με κίτρινο οι συμμετρικές ρωγμές.....	200
Σχήμα 7-86. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	203
Σχήμα 7-87. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R , ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	203
Σχήμα 7-88. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με δύο (2) διαμέτρους D , ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	203
Σχήμα 7-89. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.	206
Σχήμα 7-90. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.	208
Σχήμα 7-91. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4)	

ακτίνες <i>R</i> ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.	210
Σχήμα 7-92. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες <i>R</i> της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.....	211
Σχήμα 7-93. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες <i>R</i> της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.....	211
Σχήμα 7-94. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες <i>R</i> της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.	212
Σχήμα 7-95. Συγκριτικό γράφημα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων συναρτήσει της διαμέτρου των οπών (mm) και του πάχους των στύλων (<i>R</i> : πάχος ίσο με μια ακτίνα οπής, <i>D</i> : πάχος ίσο με μια διάμετρο οπής) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλά κυλινδρικά ανοίγματα (μπλε (1 st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2 nd PFI): έναρξη δεύτερων ΠΡ, γκρι (1 st SPI): έναρξη πρώτων αποφλοιώσεων, κίτρινο (2 nd SPI): έναρξη δεύτερων αποφλοιώσεων).	213
Σχήμα 7-96. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες <i>R</i> ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	215
Σχήμα 7-97. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες <i>R</i> , ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	215
Σχήμα 7-98. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με δύο (2) διαμέτρους <i>D</i> , ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.	215
Σχήμα 7-99. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου <i>t</i> (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου <i>t</i> (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες <i>R</i> ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.....	218
Σχήμα 7-100. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου <i>t</i> (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου <i>t</i> (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες <i>R</i> ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.....	220

Σχήμα 7-101. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες *R* ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα. 222

Σχήμα 7-102. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες *R* της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης. 223

Σχήμα 7-103. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες *R* της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης. 223

Σχήμα 7-104. (α) Ανεπτυγμένες ΠΡ και ΔΡ (υποδεικνύονται με κόκκινα και μπλε βέλη αντίστοιχα), και (β) τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες *R* της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης. 223

Σχήμα 7-105. Συγκριτικό γράφημα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων συναρτήσει της διαμέτρου των οπών (mm) και του πάχους των στύλων (*R*: πάχος ίσο με μια ακτίνα οπής, *D*: πάχος ίσο με μια διάμετρο οπής) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» με διπλά κυλινδρικά ανοίγματα (μπλε (1st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2nd PFI): έναρξη δεύτερων ΠΡ, γκρι (1st SPI): έναρξη πρώτων αποφλοιώσεων, κίτρινο (2nd SPI): έναρξη δεύτερων αποφλοιώσεων). 224

Σχήμα 7-106. Ανηγμένες τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ με μονές οπές ίδιας διαμέτρου. 225

Σχήμα 7-107. Θέσεις αισθητήρων ΑΕ στα φυσικά μοντέλα της παρούσας διατριβής, με σκοπό τον χωρικό προσδιορισμό των σημάτων ΑΕ. 227

Σχήμα 7-108. Ενδεικτικά αποτελέσματα τριδιάστατης (3D) χωρικής ανάλυσης γεγονότων ΑΕ σε ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια». Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι εντοπισμένες θέσεις της πηγής των γεγονότων ΑΕ. Στην αριστερή και δεξιά στήλη παρουσιάζεται η προβολή των γεγονότων ΑΕ στην εμπρόσθια και οπίσθια επιφάνεια των ΦΜ, αντίστοιχα. Οι διάμετροι των οπών των παρουσιαζόμενων ΦΜ είναι 10, 22, 35 και 45 mm, από την 1^η σειρά έως την 4^η αντίστοιχα. 231

Σχήμα 7-109. Ενδεικτικά αποτελέσματα τριδιάστατης (3D) χωρικής ανάλυσης γεγονότων ΑΕ (με κόκκινο) σε ΦΜ της ποικιλίας «Νεφέλη», όπως αυτά προκύπτουν στο NOESIS. Στην αριστερή στήλη παρουσιάζεται η πλευρά των ΦΜ στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος DIC, ενώ στη δεξιά στήλη η πίσω πλευρά. Οι διάμετροι των οπών των παρουσιαζόμενων ΦΜ είναι 10, 22, και 35 mm, από την 1^η σειρά έως την 3^η αντίστοιχα. 232

Σχήμα 7-110. (α) Εφαρμοζόμενη αξονική τάση σ_{PFI} (MPa) για την έναρξη της ΠΡ σε πρισματικά φυσικά μοντέλα με μονή κυλινδρική οπή στο μέσο των πετρωμάτων που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, κατά τη δοκιμή θλίψης, διαιρεμένη με την εφελκυστική αντοχή σ_t (MPa) του αντίστοιχου υλικού, συναρτήσει της διαμέτρου *D*

(mm) των ανοιγμάτων. Στο διάγραμμα (β) συμπεριλαμβάνονται οι αντίστοιχες τιμές άλλων υλικών, δημοσιευμένες στη διεθνή βιβλιογραφία.....	238
Σχήμα 7-111. (α) Εφαρμοζόμενη αξονική τάση σ_{SPI} (MPa) για την έναρξη των ΠΑ σε πρισματικά φυσικά μοντέλα με μονή κυλινδρική οπή στο μέσο των πετρωμάτων που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, κατά τη δοκιμή θλίψης, διαιρεμένη με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci} (MPa) του αντίστοιχου υλικού, συναρτήσει της διαμέτρου D (mm) των ανοιγμάτων. Στο διάγραμμα (β) συμπεριλαμβάνονται οι αντίστοιχες τιμές άλλων υλικών, δημοσιευμένες στη διεθνή βιβλιογραφία.	240
Σχήμα 8-1. BPM γύψου στο PFC3D πριν (α) και μετά τη δοκιμή UCS (b) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή UCS (c). Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Δίσκοι μαύρου και κόκκινου χρώματος αποτελούν εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b).....	243
Σχήμα 8-2. BPM γύψου στο PFC3D πριν (α) και μετά τη δοκιμή BTS (b & c) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή BTS (d). Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Δίσκοι μαύρου και κόκκινου χρώματος αποτελούν εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b & c).....	243
Σχήμα 8-3. BPM μαρμάρου «Βέροια» στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή UCS (b) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή UCS (c). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b).	245
Σχήμα 8-4. BPM μαρμάρου «Βέροια» στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή BTS (b & c) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή BTS (d). Η απόσταση μεταξύ των δίσκων που φαίνεται με διαφορετικά χρώματα (b), αντιπροσωπεύει την εφελκυστική ΜΕΡ. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	245
Σχήμα 8-5. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή UCS (b) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή UCS (c). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b).....	247
Σχήμα 8-6. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή BTS (b & c) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή BTS (d). Η απόσταση μεταξύ των δίσκων που φαίνεται με διαφορετικά χρώματα (b), αντιπροσωπεύει την εφελκυστική ΜΕΡ. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	247
Σχήμα 8-7. BPM μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ» στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή UCS (b) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή UCS (c). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b).	249
Σχήμα 8-8. BPM μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ» στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή BTS (b & c) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή BTS (d). Η απόσταση μεταξύ των δίσκων που φαίνεται με διαφορετικά χρώματα (b), αντιπροσωπεύει την εφελκυστική ΜΕΡ. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	249
Σχήμα 9-1. Προσδιορισμός έναρξης της ΠΡ. Η έναρξη της ΠΡ υποδεικνύεται ως «PFI» (Primary Fracture Initiation) για δύο (2) διαφορετικές περιπτώσεις όπου μία μικρορωγή δύναται (α) & (β) ή όχι (γ) & (δ) να αποτελέσει έναρξη του φαινομένου στο όριο της οπής (BPM μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ», $D = 45$ mm (α) & (β)· BPM μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ», $D = 22$ mm (γ) & (δ)).....	252

Σχήμα 9-2. Διάκριση μεταξύ ενός μεμονωμένου συμβάντος (περίπτωση μονής μικρορωγμής) και έναρξης ΠΡ (PFI) (BPM μαρμάρου «Βώλακας II», $D = 22$ mm).	253
Σχήμα 9-3. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον I», $D = 45$ mm: (α), (β) Η αποκόλληση των δίσκων θεωρείται ως «μεμονωμένο συμβάν». Ο ορισμός έναρξης των πλευρικών αποφλοιώσεων υποδεικνύεται ως «SPI» (Spalling Initiation) στο (γ), όπου η αποκόλληση ενός δίσκου συνοδεύεται από αποκόλληση περισσοτέρων στο (δ).	254
Σχήμα 9-4. BPM γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm στο PFC3D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Δίσκοι μαύρου και κόκκινου χρώματος αποτελούν εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα.	255
Σχήμα 9-5. BPM γύψου χωρίς οπή στο PFC3D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c). Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Δίσκοι μαύρου και κόκκινου χρώματος αποτελούν εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα.	256
Σχήμα 9-6. Προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης ΠΡ και στο BPM γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm στο PFC3D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα. Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .	257
Σχήμα 9-7. (a) Νέφος μικρορωγμών σε BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» και (b) έντονες παραμορφώσεις στο αντίστοιχο ΦΜ κατά την ανάλυση DIC ($D = 35$ mm).	258
Σχήμα 9-8. BPM μαρμάρου «Βέροια» χωρίς οπή στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	261
Σχήμα 9-9. BPM μαρμάρου «Βέροια» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	262
Σχήμα 9-10. BPM μαρμάρου «Βέροια» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	263
Σχήμα 9-11. BPM μαρμάρου «Βέροια» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	264
Σχήμα 9-12. BPM μαρμάρου «Βέροια» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	265

Σχήμα 9-13. Συγκριτικό γράφημα των αντοχών και των τάσεων έναρξης των πρώτων (1^{uv}) φαινομένων συναρτήσεως της διαμέτρου (D) της οπής, που αντιστοιχούν στα φυσικά και αριθμητικά μοντέλα με μονές οπές της ποικιλίας «Βέροια» (1 st PFI PM: ΠΡ ΦΜ, 1 st PFI BPM: ΠΡ BPM, 1 st SPI PM: αποφλοιώσεις ΦΜ, 1 st SPI BPM: αποφλοιώσεις BPM, σ_p PM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ΦΜ και σ_p BPM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη BPM).....	266
Σχήμα 9-14. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_α (Pa) - ϵ_α	267
Σχήμα 9-15. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_α (Pa) - ϵ_α	267
Σχήμα 9-16. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_α (Pa) - ϵ_α	267
Σχήμα 9-17. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_α (Pa) - ϵ_α	268
Σχήμα 9-18. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	269
Σχήμα 9-19. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	270
Σχήμα 9-20. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	271
Σχήμα 9-21. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	272
Σχήμα 9-22. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 61 mm στο PFC2D πριν (α) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα	

συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	273
Σχήμα 9-23. Συγκριτικό γράφημα των αντοχών και των τάσεων έναρξης πρώτων ($1^{ωv}$) (α) και δευτέρων ($2^{ωv}$) (β) φαινομένων συναρτήσεως της διαμέτρου (D) της οπής, που αντιστοιχούν στα φυσικά και αριθμητικά μοντέλα με μονές οπές της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» (1 st PFI PM: ΠΡ ΦΜ, 1 st PFI BPM: ΠΡ BPM, 1 st SPI PM: αποφλοιώσεις ΦΜ, 1 st SPI BPM: αποφλοιώσεις BPM, σ_p PM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ΦΜ και σ_p BPM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη BPM).	274
Σχήμα 9-24. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .	275
Σχήμα 9-25. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .	275
Σχήμα 9-26. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .	276
Σχήμα 9-27. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .	276
Σχήμα 9-28. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 61 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .	276
Σχήμα 9-29. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	278
Σχήμα 9-30. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	279

Σχήμα 9-31. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	280
Σχήμα 9-32. Συγκριτικά γραφήματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των πρώτων (1 st) (α) και δεύτερων (2 nd) (β) φαινομένων συναρτήσεως της διαμέτρου των οπών (mm) και του πάχους της μεταξύ των κολώνας (R : πάχος ίσο με μια ακτίνα προϋπάρχουσας οπής, D : πάχος ίσο με μια διάμετρο προϋπάρχουσας οπής) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και των αντίστοιχων BPM στον κώδικα PFC2D με διπλά κυλινδρικά προϋπάρχοντα ανοίγματα (PFI PM: ΠΡ ΦΜ, PFI BPM: ΠΡ BPM, SPI PM: ΠΑ ΦΜ, SPI BPM: ΠΑ BPM).	281
Σχήμα 9-33. Ανηγμένες 1 ^{εσ} τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ (PM) και των BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των BPM με μονές οπές ίδιας διαμέτρου.....	283
Σχήμα 9-34. Ανηγμένες 2 ^{εσ} τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ (PM) και των BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των BPM με μονές οπές ίδιας διαμέτρου.....	284
Σχήμα 9-35. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	285
Σχήμα 9-36. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	285
Σχήμα 9-37. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	285
Σχήμα 9-38. BPM μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	286
Σχήμα 9-39. BPM μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	287

Σχήμα 9-40. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	288
Σχήμα 9-41. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).....	289
Σχήμα 9-42. Συγκριτικό γράφημα των αντοχών και των τάσεων έναρξης των πρώτων ($1^{ωv}$) (α) και δεύτερων ($2^{ωv}$) (β) φαινομένων συναρτήσεως της διαμέτρου (D) της οπής, που αντιστοιχούν στα φυσικά και αριθμητικά μοντέλα με μονές οπές της ποικιλίας «Βώλακας II» (1 st PFI PM: ΠΡ ΦΜ, 1 st PFI BPM: ΠΡ BPM, 1 st SPI PM: αποφλοιώσεις ΦΜ, 1 st SPI BPM: αποφλοιώσεις BPM, σ_p PM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ΦΜ και σ_p BPM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη BPM).	290
Σχήμα 9-43. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	291
Σχήμα 9-44. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	291
Σχήμα 9-45. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	292
Σχήμα 9-46. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	292
Σχήμα 9-47. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	293
Σχήμα 9-48. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b).	

Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	294
Σχήμα 9-49. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).	295
Σχήμα 9-50. Συγκριτικά γραφήματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των πρώτων (1^{st}) (α) και δεύτερων (2^{nd}) (β) φαινομένων συναρτήσεως της διαμέτρου των οπών (mm) και του πάχους της μεταξύ των κολώνας (R : πάχος ίσο με μια ακτίνα προϋπάρχουσας οπής, D : πάχος ίσο με μια διάμετρο προϋπάρχουσας οπής) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» και των αντίστοιχων BPM στον κώδικα PFC2D με διπλά κυλινδρικά προϋπάρχοντα ανοίγματα (PFI PM: ΠΡ ΦΜ, PFI BPM: ΠΡ BPM, SPI PM: ΠΑ ΦΜ, SPI BPM: ΠΑ BPM).	296
Σχήμα 9-51. Ανηγμένες 1^{es} τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ (PM) και των BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των BPM με μονές οπές ίδιας διαμέτρου.....	298
Σχήμα 9-52. Ανηγμένες 2^{es} τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ (PM) και των BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των BPM με μονές οπές ίδιας διαμέτρου.....	299
Σχήμα 9-53. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	300
Σχήμα 9-54. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	300
Σχήμα 9-55. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a	300
Σχήμα 9-56. BPM για προσομοίωση των φυσικών μοντέλων γρανίτη LdB των (Dzik & Lajtai 1996) στον κώδικα PFC2D.	304
Σχήμα 9-57. Εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις (MPa) εμφάνισης φαινομένων κατά τις δοκιμές θλίψης σε πρισματικά μοντέλα γρανίτη LdB, συναρτήσεως της διαμέτρου (mm) της κυλινδρικής οπής, εργαστηριακά (Dzik & Lajtai 1996) και αριθμητικά στο PFC2D.	305
Σχήμα 9-58. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στα BPM με μονή οπή του γρανίτη LdB στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι	

διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ε_a .	308
Σχήμα 9-59. BPM γρανίτη LdB στο PFC2D μετά τη δοκιμή θλίψης. (α) Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα. (β) Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα.	309
Σχήμα 9-60. BPM με οπές διαμέτρου 20 mm (α) και 100 mm (β) κατά την εφαρμογή των αξονικών τάσεων (Pa) που συγκρίνει ο Πίνακας 9-10 (3 ^η στήλη). Με μαύρο χρώμα αποδίδονται οι εφελκυστικές μικρορωγμές και με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a - ε_a .	310
Σχήμα 9-61. Δίσκοι μέτρησης (ροζ χρώμα) διαμέτρου 1.8 mm έκαστος σε BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι», $D = 61$ mm.	311
Σχήμα 9-62. Μετρήσεις σ_{xx} (MPa) κατά μήκος της ΠΡ σε διάφορες εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις έναντι της κατακόρυφης απόστασης από το κέντρο της οπής (BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι», $D = 61$ mm).	312
Σχήμα 9-63. Μετρήσεις τοπικών κατακόρυφων ΥΥ-τάσεων (MPa) σε κάθετη απόσταση $0.88R$ από τη στέψη της οπής σε διάφορες εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις (BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι», $D = 61$ mm).	314
Σχήμα 9-64. Μετρήσεις τοπικών οριζόντιων ΧΧ-τάσεων (MPa) σε κάθετη απόσταση $0.88R$ από τη στέψη της οπής σε διάφορες εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις (BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι», $D = 61$ mm).	315
Σχήμα 10-1. Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών και εργαστηριακών τιμών σ_{PFI} συναρτήσει της διαμέτρου D της οπής, για τα ΦΜ (α) μαρμάρου «Βέροια», (β) μαρμάρου «Νεφέλη», (γ) μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» και (δ) μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ».	322
Σχήμα 10-2. Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών και εργαστηριακών τιμών σ_{PFI} συναρτήσει της διαμέτρου D της οπής, για τα ΦΜ γρανίτη LdB των Dzik & Lajtai (1996).	323
Σχήμα 10-3. Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών και εργαστηριακών τιμών σ_{PFI} συναρτήσει της διαμέτρου D της οπής, για τα ΦΜ γύψου των Suknev et al. (2003).	323

Λίστα Πινάκων

Πίνακας 5-1. Μονάδες μέτρησης στο PFC που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή.	59
Πίνακας 5-2. Παράμετροι γραμμικού μοντέλου παράλληλων δεσμών.....	67
Πίνακας 5-3. Μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων γραμμικού μοντέλου παράλληλων δεσμών.....	68
Πίνακας 5-4. Παράμετροι μοντέλου επίπεδων δεσμών.	77
Πίνακας 5-5. Μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων μοντέλου επίπεδων δεσμών. ...	78
Πίνακας 6-1. Τιμές παραμέτρων Ακουστικών Εκπομπών κατά το στάδιο της καταγραφής (acquisition) των ασβεσπιτικών και δολομιτικών υλικών.	82
Πίνακας 6-2. Μηχανικές ιδιότητες μείγματος γύψου με κατά βάρος αναλογία νερού : γύψου, 1 : 1.42.	85
Πίνακας 6-3. Ορυκτολογική σύσταση (%) ποικιλίας μαρμάρου «Βέροια».	87
Πίνακας 6-4. Χημική ανάλυση ποικιλίας μαρμάρου «Βέροια», σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία της ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε.....	87
Πίνακας 6-5. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας μαρμάρου «Βέροια».....	88
Πίνακας 6-6. Ορυκτολογική σύσταση (%) ποικιλίας μαρμάρου «Νεφέλη».	93
Πίνακας 6-7. Χημική ανάλυση ποικιλίας μαρμάρου «Νεφέλη», σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία της ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε.....	94
Πίνακας 6-8. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας μαρμάρου «Νεφέλη».....	94
Πίνακας 6-9. Ορυκτολογική σύσταση (%) ποικιλίας μαρμάρου «Βώλακας Άριστον I».	99
Πίνακας 6-10. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας μαρμάρου «Βώλακας Άριστον I».	100
Πίνακας 6-11. Ορυκτολογική σύσταση (%) ποικιλίας μαρμάρου «Βώλακας II».	105
Πίνακας 6-12. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας μαρμάρου «Βώλακας II».	106
Πίνακας 6-13. Ορυκτολογική σύσταση (% κατά βάρος) ποικιλίας ασβεστόλιθου «Απόλλων».	111
Πίνακας 6-14. Χημική ανάλυση ποικιλίας ασβεστόλιθου «Απόλλων», σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία της ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε..	112
Πίνακας 6-15. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας ασβεστόλιθου «Απόλλων».	112
Πίνακας 7-1. Μέγιστη εξεταζόμενη διάμετρος D_{max} ανά υλικό.	118
Πίνακας 7-2. Πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1 st) και δεύτερων (2 nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στην οπή των ΦΜ γύψου.....	136
Πίνακας 7-3. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1 st) και δεύτερων (2 nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια».	149
Πίνακας 7-4. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1 st) και δεύτερων (2 nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Νεφέλη».	163
Πίνακας 7-5. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η έναρξη των πρώτων (1 st) και δεύτερων (2 nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον I», καθώς και η ολοκλήρωση των δοκιμών (σ_{pl}).....	178
Πίνακας 7-6. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1 st) και	

δεύτερων (2 nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II».	192
Πίνακας 7-7. Πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1 st) και δεύτερων (2 nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στην οπή του ΦΜ της ποικιλίας «Απόλλων».	199
Πίνακας 7-8. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η έναρξη των πρώτων (1 st) και δεύτερων (2 nd) ΠΡ (PFI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον I» με διπλά κυλινδρικά ανοίγματα, καθώς και η ολοκλήρωση των δοκιμών (σ_{pt}).	212
Πίνακας 7-9. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η έναρξη των πρώτων (1 st) και δεύτερων (2 nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» με διπλά κυλινδρικά ανοίγματα, καθώς και η ολοκλήρωση των δοκιμών (σ_{pt}).	224
Πίνακας 7-10. Τιμές παραμέτρων ΑΕ κατά το στάδιο της καταγραφής (acquisition) και της μετέπειτα ανάλυσης (post-processing) των ασβεστιτικών ποικιλιών μαρμάρου «Βέροια» και «Νεφέλη».	229
Πίνακας 7-11. Μέση εφαρμοζόμενη αξονική τάση έναρξης ΠΡ (σ_{PFI} (MPa)) στα υπό μελέτη φυσικά μοντέλα. Επιπλέον, ο λόγος της αξονικής τάσης προς την εφελκυστική αντοχή Brazilian σ_{tB} δίνεται στην 4 ^η στήλη.	234
Πίνακας 7-12. Μέση εφαρμοζόμενη αξονική τάση έναρξης πλευρικών αποφλοιώσεων (σ_{SPI} (MPa)) στα υπό μελέτη φυσικά μοντέλα. Επιπλέον, ο λόγος της αξονικής τάσης προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη σ_{ci} του αντίστοιχου υλικού δίνεται στην 4 ^η στήλη.	235
Πίνακας 8-1. Μικροπαράμετροι σχεδιασμού BPM γύψου στο PFC3D.	242
Πίνακας 8-2. Μηχανικές ιδιότητες γύψου εργαστηριακά (Laboratory Specimens, LS) και αριθμητικά (BPM).	242
Πίνακας 8-3. Μικροπαράμετροι σχεδιασμού BPM της ποικιλίας «Βέροια» στο PFC2D.	244
Πίνακας 8-4. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας «Βέροια» εργαστηριακά (Laboratory Specimens, LS) και αριθμητικά (BPM).	244
Πίνακας 8-5. Μικροπαράμετροι σχεδιασμού BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον I» στο PFC2D.	246
Πίνακας 8-6. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας «Βώλακας Άριστον I» εργαστηριακά (Laboratory Specimens, LS) και αριθμητικά (BPM).	246
Πίνακας 8-7. Μικροπαράμετροι σχεδιασμού BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» στο PFC2D.	248
Πίνακας 8-8. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας «Βώλακας II» εργαστηριακά (Laboratory Specimens, LS) και αριθμητικά (BPM).	248
Πίνακας 9-1. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των 1 ^{ωv} (1 st) και 2 ^{ωv} (2 nd) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα του γύψου.	257
Πίνακας 9-2. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα της ποικιλίας «Βέροια».	266
Πίνακας 9-3. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των 1 ^{ωv} (1 st) και 2 ^{ωv} (2 nd) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον I».	274
Πίνακας 9-4. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των 1 ^{ωv} (1 st) και 2 ^{ωv} (2 nd) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM)	

και αριθμητικά (BPM) μοντέλα με διπλές οπές της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι».	281
Πίνακας 9-5. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των 1 ^{ωv} (1 st) και 2 ^{ωv} (2 nd) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ».	290
Πίνακας 9-6. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των 1 ^{ωv} (1 st) και 2 ^{ωv} (2 nd) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα με διπλές οπές της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ».	296
Πίνακας 9-7. Μηχανικές ιδιότητες γρανίτη LdB εργαστηριακά (Dzik & Lajtai 1996) και αριθμητικά (BPM).	301
Πίνακας 9-8. Μικροπαράμετροι σχεδιασμού διδιάστατου BPM γρανίτη Lac du Bonnet στο PFC2D (Lotidis 2014, Lotidis et al. 2015).	303
Πίνακας 9-9. Εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις (MPa) εμφάνισης φαινομένων κατά τις δοκιμές θλίψης σε πρισματικά μοντέλα γρανίτη LdB με μονή κυλινδρική οπή, εργαστηριακά (ΦΜ) (Dzik & Lajtai 1996) και αριθμητικά στο PFC2D (BPM).	305
Πίνακας 9-10. Σύγκριση τιμών των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων, όπου οι ΠΡ των δοκιμίων με οπές διαμέτρου 20 mm και 100 mm φθάνουν σε συγκεκριμένη απόσταση από το όριο των οπών, είτε προς τα άνω είτε προς τα κάτω, όπως παρατηρήθηκαν από τους Dzik & Lajtai (1996) ($L_{\phi M}$) και από τα BPM (L_{BPM}) στο PFC2D.	310

1 Εισαγωγή

1.1 Τοποθέτηση του προβλήματος

Για την καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας της μικρορωγμάτωσης του πετρώματος, των φαινομένων της ρωγμάτωσης και των προπομπών τους, αξιοποιούνται στην κλίμακα του εργαστηρίου φυσικά μοντέλα υπογείων ανοιγμάτων σε πέτρωμα. Τέτοιου είδους μελέτες αποσκοπούν στην απόκτηση γνώσης μέσω βασικής έρευνας, και τη μεταφορά της στην κλίμακα του πεδίου για τον ασφαλέστερο σχεδιασμό και κατασκευή βαθιών σηράγγων και μεταλλείων, εκσκαφών, βαθιών γεωτρήσεων κ.λπ. Σταδιακά, το ενδιαφέρον για τη μελέτη φυσικών μοντέλων εξασθένησε και μετακινήθηκε προς τη μελέτη αριθμητικών μοντέλων και κυρίως υπέρ των προηγμένων αριθμητικών μεθόδων που αναπτύχθηκαν τις τελευταίες δεκαετίες οι οποίες είναι ικανές να προσομοιώνουν τη ρωγμάτωση και θραύση του πετρώματος. Ωστόσο, παρά την ισχύ των εν λόγω αριθμητικών μεθόδων, εξακολουθεί να υπάρχει η ανάγκη για βαθμονόμηση και επικύρωση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με εργαστηριακές ή επί τόπου μετρήσεις.

Η θραύση του άρρηκτου πετρώματος όσο και οι ολισθήσεις στα επίπεδα των ασυνεχειών της βραχομάζας, αποτελούν βασικούς μηχανισμούς που μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχία μια υπόγεια εκσκαφή. Ολίσθηση σε επίπεδα ασυνεχειών παρατηρούνται συχνά σε μικρού βάθους υπόγεια ανοίγματα εντός ισχυρής βραχομάζας, όπου η μηχανική της συμπεριφορά καθορίζεται από τη δομή της. Η θραύση του άρρηκτου πετρώματος ευθύνεται για μερικά από τα κρισιμότερα προβλήματα που αναμένονται στην εξόρυξη σκληρών πετρωμάτων: εκρηκτική αστοχία βραχομάζας, εκτεταμένες αποφλοιώσεις, αστοχίες στύλων, κατάρρευση οροφής σε μεγάλα ανοίγματα κ.ά. Η έναρξη και η ανάπτυξη της ρωγμάτωσης είναι εξαιρετικά σημαντική για πολλές υπόγειες φυσικές και ανθρωπογενείς δομές σε πετρώματα (σήραγγες, υπόγειες εκμεταλλεύσεις, υπόγειοι θάλαμοι κ.λπ.). Η κατανόηση των μηχανισμών της ρωγμάτωσης και της αλληλεπίδρασης των ρωγμών στη διαδικασία κατάρρευσης των θεμελιωδών δομών σε πέτρωμα αποτελεί σημαντικό εργαλείο κατά το στάδιο εκπόνησης και εφαρμογής μια τεχνικής μελέτης. Ο μηχανισμός της ρωγμάτωσης έχει μελετηθεί στο εργαστήριο εδώ και δεκαετίες υπό μονοαξονικές ή πολυαξονικές συνθήκες φόρτισης άρρηκτων δοκιμίων, ωστόσο

δεν έχει τεκμηριωθεί η συσχέτιση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των μηχανισμών αστοχίας στο πεδίο. Το μέσο για να οριστεί μια αμφίδρομη συσχέτιση των εργαστηριακών παρατηρήσεων με το πεδίο, είναι οι αριθμητικές προσομοιώσεις.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εφαρμόζεται μια προσέγγιση πολλαπλής παρακολούθησης όπου «συλλαμβάνονται» μέσω καμερών και της μεθόδου συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (Digital Image Correlation, DIC) και «ακούγονται» μέσω των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων ακουστικής εκπομπής (Acoustic Emission, AE) τα φαινόμενα και η ρωγμάτωση του πετρώματος σε εργαστηριακές δοκιμές άρρηκτων φυσικών μοντέλων θεμελιωδών δομών σε ασβεστιτικά και δολομιτικά μάρμαρα, δολομιτικό ασβεστόλιθο και οικοδομικό γύψο, με προϋπάρχοντα ανοίγματα κυκλικής διατομής.

Τα υπό μελέτη πετρώματα της παρούσας διατριβής δεν έχουν εξεταστεί πρωτίτερα στη βιβλιογραφία. Τόσο τα μεταμορφωσιγενή (ασβεστιτικά και δολομιτικά μάρμαρα) όσο και το ιζηματογενές (ασβεστόλιθος) και ο οικοδομικός γύψος είναι λεπτόκοκκα και μπορούν να θεωρηθούν σχετικά ομοιογενή για τις ανάγκες μιας αριθμητικής προσομοίωσης. Τα συγκεκριμένα πετρώματα παρουσιάζουν κυρίως ψαθυρή συμπεριφορά υπό συνθήκες χαμηλής πλευρικής τάσης και θερμοκρασίας δωματίου.

1.2 Χαρακτηριστικά ψαθυρών πετρωμάτων

Η άσκηση φορτίων σε ορισμένα πετρώματα που χάριν συνεννόησης χαρακτηρίζονται ως *ψαθυρά*, συνοδεύεται από μικρές και περιορισμένες παραμορφώσεις. Κατά τις δοκιμές θλίψης, γνώρισμά τους αποτελεί η εκρηκτικότητα που παρουσιάζουν κατά την αστοχία τους, όπως για παράδειγμα ο δολομίτης. Επιπλέον, κατά τη φόρτιση και πλησιάζοντας τη μέγιστη αντοχή του, σημειώνονται βίαιες φυλλοειδείς αποκολλήσεις πετρώματος, άλλοτε μικρές και άλλοτε μεγάλες, αναλόγως της φύσης του υλικού και των ασυνεχειών του.

Με την εφαρμογή πλευρικής πίεσης στα ψαθυρά πετρώματα, εκτός από ενίσχυση της αντοχής τους παρατηρείται και αλλαγή στη συμπεριφορά του υλικού, η οποία γίνεται πιο όλκιμη. Αναλόγως του υλικού, η μετάβαση της συμπεριφοράς του από ψαθυρή σε όλκιμη απαιτεί χαμηλότερες ή υψηλότερες πλευρικές πιέσεις.

Ως λιγότερο ψαθυρά ή όλκιμα, χαρακτηρίζονται τα πετρώματα που παραμορφώνονται σημαντικά και αστοχούν με ήρεμο τρόπο χωρίς να εκρήγνυνται ή να καταρρέουν βιαίως. Τα εν λόγω υλικά «κάμπτονται» ή «ρέουν» όπως η άργιλος, έχοντας μικρό πλήθος φυλλοειδών αποκολλήσεων.

1.3 Κίνητρο

Η ζήτηση μεγαλύτερης ποσότητας και ποιότητας ορυκτών καθώς και διακοσμητικών λίθων που βρίσκονται σε μεγάλα βάθη, η κατασκευή υπογείων δομών τόσο προς τη συγκοινωνιακή αναβάθμιση (σήραγγες, μετρό) όσο και προς τη βελτίωση της ασφάλειας και της καλύτερης αξιοποίησης του ελάχιστου διαθέσιμου επιφανειακού χώρου, η ευαισθησία της κοινωνίας και η στροφή της στην «πράσινη» ανάπτυξη και η ιδιαίτερη προσοχή που δίνεται στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα κάθε δραστηριότητας, δημιουργεί την ανάγκη κατασκευής βαθύτερων και μεγαλύτερων διαστάσεων υπογείων έργων (π.χ. υδροηλεκτρικοί σταθμοί, κέντρα δεδομένων (data centers), μονάδες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες, υπόγεια μετεγκατάσταση εργοστασίων κ.ά.). Κίνητρο αποτελεί για τον Συγγραφέα η εξασφάλιση της σταθερότητας τέτοιων μεγάλων υπόγειων δομών μεταλλευτικής, βιομηχανικής ή αστικής χρήσης, η δημιουργία συνθηκών για ασφαλή επέκταση των εν λόγω δομών όπου και όταν κριθεί αναγκαία και η ασφαλής αλληλεπίδρασή τους με τις υπερκείμενες επιφανειακές και παρακείμενες υπόγειες κατασκευές. Προκειμένου να επιτευχθούν τα ανωτέρω, θα πρέπει να θεμελιωθεί η συσχέτιση μεταξύ των εργαστηριακών παρατηρήσεων και του πεδίου.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, γίνονται τα πρώτα και βασικότερα βήματα προς αυτήν την κατεύθυνση.

1.4 Αντικείμενο διατριβής

Η παρούσα διατριβή έχει ως αντικείμενο τη θέσπιση στέρεων βάσεων για τον ορισμό συσχέτισης μεταξύ της θεμελιώδους συμπεριφοράς του πετρώματος που παρατηρείται εργαστηριακά και των μηχανισμών θραύσης και αστοχίας των υπόγειων δομών σε πέτρωμα που κατασκευάζονται στο πεδίο. Για τον σκοπό αυτό, η ερευνητική προσπάθεια βασίζεται σε μια πειραματική και μια αριθμητική προσέγγιση, προκειμένου να διερευνηθούν οι μηχανισμοί ρωγμάτωσης στο πέτρωμα και να κατανοηθεί η επίδρασή τους στη μακροσκοπική κατάρρευση. Τα

υλικά που επιλέγονται είναι οικοδομικός γύψος, λεπτόκοκκα ασβεστοπικά και δολομιτικά μάρμαρα, και δολομιτικός ασβεστόλιθος. Η συλλογή τους πραγματοποιήθηκε από ενεργά λατομεία της ελληνικής επικράτειας. Η διατομή των ανοιγμάτων που επιλέγεται για τα υπό κλίμακα φυσικά γεωμετρικά μοντέλα υπογείων δομών, είναι η κυκλική. Η μέθοδος DIC αξιοποιείται για τη μέτρηση παραμορφώσεων, την παρακολούθηση των φαινομένων, τον χρονικό προσδιορισμό της δημιουργίας ρωγμών και την παρακολούθηση της αλληλεπίδρασης και της επέκτασής τους συναρτήσει του χρόνου και των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων. Αντίστοιχα, η μικρορωγμάτωση στο εσωτερικό των μοντέλων κατά τη φόρτισή τους παρακολουθείται μέσω της καταγραφής και της επεξεργασίας των σημάτων ακουστικής εκπομπής, καθώς και του χωρικού προσδιορισμού των πηγών των σημάτων ΑΕ.

Με το πέρας των εργαστηριακών δοκιμών, πραγματοποιούνται αριθμητικές προσομοιώσεις στον κώδικα διακριτών στοιχείων (Discrete Element Method, DEM) Particle Flow Code (PFC) της Itasca C.G. Inc. (2014) σε τρεις (3D) και δύο (2D) διαστάσεις αντίστοιχα. Τα μοντέλα που αξιοποιούνται στο πλαίσιο της αριθμητικής ανάλυσης σε επίπεδο κλίμακας κόκκων, ρυθμίζονται, βαθμονομούνται και επιλύονται για όλα τα εργαστηριακά πειράματα που παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή για τα αντίστοιχα υλικά. Σκοπός των προσομοιώσεων είναι η πιστή αναπαραγωγή των εργαστηριακών παρατηρήσεων μικρο- και μακροσκοπικά, με απώτερο στόχο την αξιοποίηση των βαθμονομημένων αριθμητικών υλικών για περαιτέρω μελέτη που είναι ανέφικτη εργαστηριακά, και τον σχεδιασμό μοντέλων μεγάλης κλίμακας για προσομοιώσεις πεδίου.

Τέλος, προτείνεται τύπος υπολογισμού της εφαρμοζόμενης τάσης έναρξης της πρωτογενούς ρωγμής στη στέψη ή το δάπεδο των οπών, η οποία αποτελεί το πρώτο κύριο φαινόμενο που παρατηρείται στα εν λόγω φυσικά μοντέλα και διερευνάται λεπτομερώς στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

1.5 Προστιθέμενη αξία

Τα πρώτα βήματα που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια των εργαστηριακών φυσικών μοντέλων ήδη από τις αρχές τις δεκαετίας του '70, σκόπευαν στην κατανόηση των βασικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο πέτρωμα γύρω από υπόγεια ανοίγματα. Παράλληλα, έγιναν προσπάθειες θεμελίωσης αναλυτικών

επιλύσεων που να περιγράφουν είτε ποιοτικά είτε ποσοτικά κάποια από τα εν λόγω φαινόμενα σε ελαστικό, ομοιογενές και ισότροπο μέσο. Με το πέρασμα του χρόνου και την αλματώδη ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές όντας πλέον οικονομικά προσιτοί, εισήλθαν σε ένα ή περισσότερα στάδια μιας έρευνας. Οι δυνατότητες που προσφέρουν τα σύγχρονα μέσα σε μια τέτοιου είδους έρευνα δεν έχουν αξιοποιηθεί σε ικανοποιητικό βαθμό, αφού ακόμα και νεότερες δημοσιευμένες μελέτες χρησιμοποιούν τεχνολογικά παρωχημένο εξοπλισμό, με περιορισμένου εύρους και βάθους συμπεράσματα και αποτελέσματα. Επιπλέον, παρά το γεγονός πως βασικό στάδιο μιας τεχνικής μελέτης περιλαμβάνει αριθμητικές προσομοιώσεις, η ανάγκη εκτέλεσης αξιόπιστων εργαστηριακών δοκιμών παραμένει ώστε να τροφοδοτηθούν με αξιόπιστα δεδομένα τα αριθμητικά μοντέλα.

Στην παρούσα διατριβή, αρχικά αξιοποιούνται και αναδεικνύονται οι δυνατότητες σύγχρονων μεθόδων παρακολούθησης και ανάλυσης όπως η DIC και η AE, ο συνδυασμός των οποίων επιτρέπει την εξαγωγή νέων συμπερασμάτων αναφορικά με τα φαινόμενα και τους μηχανισμούς που σημειώνονται στα φυσικά μοντέλα. Επιπλέον, αποσαφηνίζεται η εμφάνιση φαινομένων και η κατάσταση του πετρώματος σε διάφορες περιπτώσεις. Μελετάται το φαινόμενο της επίδρασης της κλίμακας στη συμπεριφορά του πετρώματος. Πραγματοποιείται επιτυχής χωρικός προσδιορισμός των πηγών των σημάτων AE. Εφαρμόζονται νέες τεχνικές για τον αξιόπιστο προσδιορισμό της έναρξης της ρωγμάτωσης, οι οποίες δύνανται να αξιοποιηθούν και σε άλλες εφαρμογές πέραν της παρούσας διατριβής. Επιπροσθέτως, παρέχουν ακριβέστερες μετρήσεις οι οποίες αξιοποιούνται στη βαθμονόμηση και αξιολόγηση των αριθμητικών μοντέλων.

Οι επιτυχείς προσομοιώσεις όλων των εργαστηριακών δοκιμών της παρούσας διατριβής, οι οποίες αναπαράγουν ρεαλιστικά τη μικρο- και μακροσκοπική συμπεριφορά του φυσικού πετρώματος ανεξαρτήτως της γεωμετρίας του δοκιμίου, ανοίγουν νέους ορίζοντες τόσο στις εργαστηριακές μελέτες όσο και στο στάδιο της μελέτης τεχνικών έργων. Το αξιόπιστο βαθμονομημένο αριθμητικό υλικό, δύναται πλέον και αξιοποιείται σε περαιτέρω αριθμητικές εργαστηριακές μελέτες για την εξαγωγή συμπερασμάτων και την κατανόηση φαινομένων που είτε είναι αδύνατη με τα υπάρχοντα μέσα εργαστηριακά, είτε είναι οικονομικώς απαγορευτική. Βεβαίως, το αριθμητικό υλικό λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος μεταξύ του εργαστηρίου και του

πεδίου, καθώς δύναται πλέον να χρησιμοποιηθεί σε προσομοιώσεις που λαμβάνουν χώρα κατά το στάδιο της μελέτης ενός μεταλλευτικού ή τεχνικού έργου, παρουσιάζοντας ρεαλιστικότερα αποτελέσματα αναφορικά με τη συμπεριφορά της εν λόγω δομής, τόσο στα διάφορα στάδια της κατασκευής της, όσο και κατά τη λειτουργία της και την αλληλεπίδρασή της, μελλοντικώς, με φυσικές ή ανθρωπογενείς μεταβολές. Για τις ανάγκες των προσομοιώσεων που κατά κανόνα λαμβάνουν χώρα στο στάδιο της τεχνικής μελέτης, γίνονται παραδοχές στις ιδιότητες των υλικών, στις επί τόπου συνθήκες κ.ο.κ. Με την προτεινόμενη μεθοδολογία της παρούσας διατριβής, παρουσιάζεται μια εναλλακτική προσέγγιση προσομοιώσεων, με λιγότερες παραδοχές κατά τον σχεδιασμό των μοντέλων, αποφέροντας εν τέλει σαφώς ρεαλιστικότερα αποτελέσματα.

Τέλος, προτείνονται τύποι υπολογισμού της απαιτούμενης εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης κατά την οποία σημειώνεται η έναρξη των δύο (2) εκ των τριών (3) κύριων φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε φυσικά μοντέλα με κυλινδρικές οπές, και τα οποία διερευνώνται λεπτομερώς στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Οι τιμές που προκύπτουν από τους εν λόγω τύπους, ακολουθούν ικανοποιητικά τις εργαστηριακές τιμές φυσικών μοντέλων τεσσάρων (4) πετρωμάτων.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

Ο Griffith περιγράφει την έναρξη της αστοχίας ενός ψαθυρού στερεού ως αποτέλεσμα της υψηλής συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων γύρω από τις προϋπάρχουσες σχισμές και ρωγμές εντός του υλικού (Jaeger et al. 2007). Σε κρυσταλλικά πετρώματα υπάρχουν πολυάριθμες σχισμές εντός των ορυκτών κόκκων και των ορίων τους, τόσο λόγω των διαδικασιών σχηματισμού όσο και του ιστορικού φόρτισης του υλικού (Kranz 1983). Οι εν λόγω προϋπάρχουσες μικρορωγμές συμπεριφέρονται ως ανυψωτές τάσης (stress raisers) από όπου εκκινούν νέες ρωγμές. Μόλις σχηματιστούν, με την αύξηση του φορτίου οι νέες μικρορωγμές διαδίδονται και αλληλοεπιδρούν, σχηματίζοντας τελικώς μακρύτερες μακροσκοπικές επιφάνειες ρωγμάτωσης (Brace et al. 1966, Bieniawski 1967, Martin & Chandler 1994, Hoek & Martin 2014). Η διαδικασία της μικρορωγμάτωσης του πετρώματος αποτελεί συνδυασμό περικρυσταλλικής και ενδοκρυσταλλικής αστοχίας (Wong & Einstein 2009a, 2009b), ενώ η αστοχία του γύψου εμφανίζεται περισσότερο ως διάσπαση του αλληλοκλειδώματος των βελονοειδών σωματιδίων που αποτελούν το υλικό.

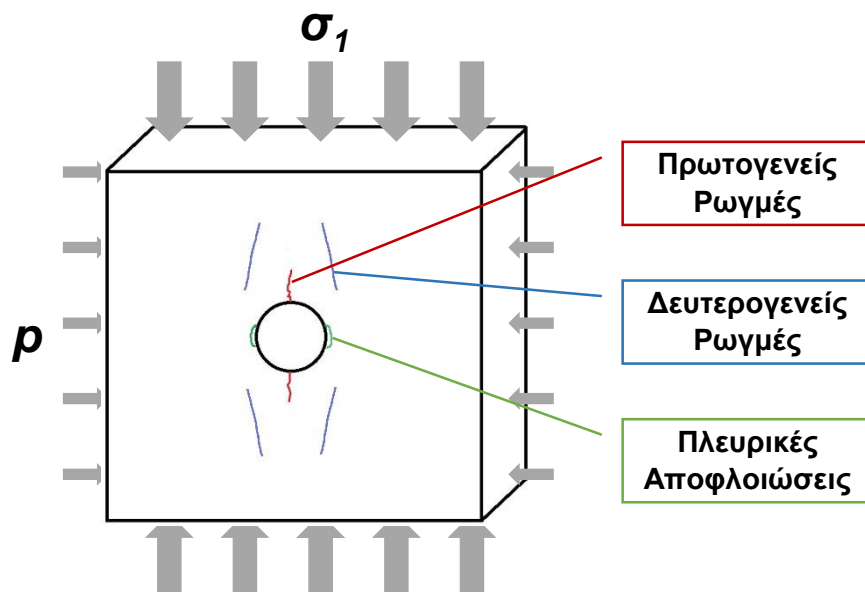
Δραστηριότητες όπως η δημιουργία γεωτρήσεων ή η κατασκευή οδικών και μεταλλευτικών σηράγγων σε πετρώματα που βρίσκονται σε υψηλό εντατικό πεδίο, δημιουργούν ανακατανομή του εντατικού πεδίου και προκαλούν κρίσιμη συγκέντρωση εφαπτομενικών τάσεων στο όριο της εκσκαφής, πολύ υψηλότερες του πρωτογενούς εντατικού πεδίου. Η εν λόγω ανακατανομή και συγκέντρωση τάσεων γύρω από το όριο βαθιάς εκσκαφής, δύνανται να προκαλέσει αστοχία του πετρώματος με διακριτές ρωγματώσεις. Οι εν λόγω ρωγματώσεις είναι ευκρινέστερες όταν το δίκτυο ασυνεχειών της βραχομάζας είναι αραιό ή απουσιάζει. Σε πολλές περιπτώσεις που περιλαμβάνουν βίαιες εκτινάξεις πετρώματος, όπως στα βαθιά μεταλλεία, οι μηχανισμοί ρωγμάτωσης είναι συνήθως πολύπλοκοι και εμφανίζονται τόσο εφελκυστικές όσο και διατμητικές αστοχίες (Shen & Barton 2018).

Η διαδικασία της θραύσης του πετρώματος, δύναται να μελετηθεί είτε μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων, είτε εργαστηριακά μέσω πρισματικών φυσικών μοντέλων υπογείων ανοιγμάτων σε θλίψη, με συνηθέστερη μελετώμενη γεωμετρία ανοίγματος, την κυλινδρική.

Εργαστηριακές μελέτες σε φυσικά μοντέλα υπογείων ανοιγμάτων υπό θλίψη σε πετρώματα και τεχνικά υλικά κατέληξαν σε παρόμοια αποτελέσματα: παρατηρούνται συνήθως τρία (3) κύρια φαινόμενα (Σχήμα 2-1), με ομοιότητες και διαφορές αναλόγως του υλικού, των συντοριακών συνθηκών και της γεωμετρίας του ανοίγματος. Τόσο η εμφάνισή τους όσο και το τελικό μοτίβο του ρωγματομένου μοντέλου ποικίλουν από υλικό σε υλικό, με τη σειρά εμφάνισής τους να εξαρτάται από το εφαρμοζόμενο εντατικό πεδίο. Σε συνθήκες μονοαξονικής θλίψης ή χαμηλού πλευρικού περιορισμού, αρχικά αναμένεται η εμφάνιση εφελκυστικών ρωγμών, που ξεκινούν από τη στέψη και το δάπεδο της οπής λόγω της υψηλής συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων στις εν λόγω περιοχές, και αναπτύσσονται παράλληλα προς τη σ_1 . Οι ρωγμές αυτές, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την έναρξη της μακροσκοπικής ρωγμάτωσης του πετρώματος, αναφέρονται στη διεθνή βιβλιογραφία ως primary fractures (PF), και στην παρούσα διατριβή θα χρησιμοποιείται ο όρος Πρωτογενείς Ρωγμές (ΠΡ). Θεωρητικά, η έναρξη της ρωγμάτωσης σημειώνεται σε μια κρίσιμη τοπική εφασπτομενική τάση στο όριο του ανοίγματος, η οποία δε δύναται να είναι χαμηλότερη από την εφελκυστική αντοχή του υλικού (Murrell 1964, Lajtai 1972). Ο σχηματισμός της εν λόγω εφελκυστικής ρωγμής μεταβάλλει το εντατικό πεδίο γύρω από το άνοιγμα, οδηγώντας στην ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων βαθύτερα στο πέτρωμα. Στη συνέχεια, παρατηρείται ο σχηματισμός ρωγμών στις εγγύς περιοχές δεξιά και αριστερά των οπών, όπως φαίνονται με μπλε χρώμα στο Σχήμα 2-1. Στη διεθνή βιβλιογραφία οι ρωγμές αυτές αναφέρονται ως remote fractures (RF), ενώ στην παρούσα διατριβή θα αναφέρονται ως δευτερογενείς ρωγμές (ΔΡ), λόγω της σειράς τους στην ακολουθία των τριών κύριων φαινομένων στα υπόψη φυσικά μοντέλα. Οι ΔΡ επεκτείνονται παρακατακόρυφα προς τις βάσεις των πρισμάτων, και αλληλοεπιδρούν μαζί τους, καθώς και με τις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων στην αριστερή και δεξιά παρειά του ανοίγματος. Στις εν λόγω περιοχές απαντάται το τρίτο φαινόμενο, γνωστό στη διεθνή βιβλιογραφία ως *πλευρικές αποφλοιώσεις* (sidewall spalling). Σε ψαθυρά υλικά, η εμφάνιση αυτών των αποφλοιώσεων προκαλεί τον σχηματισμό χαρακτηριστικών εγκοπών σχήματος V. Τα προαναφερθέντα φαινόμενα δίνονται σχηματικά στο παρακάτω σκαρίφημα. Με κόκκινο αναπαρίστανται οι Πρωτογενείς Ρωγμές (ΠΡ), με μπλε οι Δευτερογενείς Ρωγμές (ΔΡ) και με πράσινο οι πλευρικές αποφλοιώσεις (ΠΑ). Σημειώνεται ότι η παραπάνω σειρά εμφάνισης των φαινομένων επηρεάζεται από το μέγεθος της πλευρικής ασκούμενης πίεσης σ_3 στα ΦΜ. Συγκεκριμένα, με την αύξηση της σ_3 το

τελικό μήκος των ΠΡ μειώνεται για ένα υλικό και μπορεί να εξαλειφθεί ως φαινόμενο. Αντίθετα, οι αποφλοιώσεις εντείνονται και δύνανται να εμφανιστούν πριν την έναρξη των ΠΡ.

Επιπλέον, ιδιαίτερος λόγος γίνεται για την *επίδραση της κλίμακας* (scale effect), κατά την οποία παρατηρείται πως για ιδίων διαστάσεων πρισματικά μοντέλα, όπου οι συνοριακές συνθήκες δεν επηρεάζουν την εξέλιξη της δοκιμής, ανοίγματα μεγαλύτερης διαμέτρου απαιτούν χαμηλότερη ασκούμενη τάση για την έναρξη των τριών (3) φαινομένων.



Σχήμα 2-1. Σκαρίφημα των τριών (3) κύριων φαινομένων που εμφανίζονται κατά τις δοκιμές θλίψης σε φυσικά μοντέλα με μονές διαμπερείς κυλινδρικές οπές στο κέντρο. Με κόκκινο απεικονίζονται οι Πρωτογενείς Ρωγμές, με μπλε οι Δευτερογενείς ρωγμές και με πράσινο οι πλευρικές αποφλοιώσεις.

Άλλες μελέτες επικεντρώνονται κυρίως στην έναρξη της ρωγμής γύρω από ανοιχτές σχισμές (Adams & Sines 1978, Jiefan et al. 1990, Wong & Einstein 2009a, 2009b, Zou & Wong 2014, Cao et al. 2015, Zhao et al. 2016, Yin et al. 2016), ή γενικότερα σε ελλειψοειδή ανοίγματα (Hoek 1968, Yang et al. 2017), στοχεύοντας κυρίως στην καλύτερη κατανόηση του υλικού από την οπτική γωνία του μηχανικού, παρά στο να παράσχουν αναλυτικές επιλύσεις που να περιγράφουν με ακρίβεια την έναρξη των φαινομένων.

2.1 Αναλυτικές επιλύσεις

Στην παράγραφο που ακολουθεί, παρουσιάζεται η μελέτη του φαινομένου της έναρξης των ΠΡ στο άνω και κάτω όριο οπών κυκλικής διατομής, καθώς και η έναρξη των ΠΑ στις παρειές των οπών, μέσω αναλυτικών επιλύσεων.

Αξιοποιώντας τη θεωρία της ελαστικότητας (Timoshenko & Goodier 1951) και τη θραυστομηχανική, κυρίως μέσω της δυσθραυστότητας (fracture toughness) με τον κρίσιμο συντελεστή συγκέντρωση τάσης K_{IC} του υλικού (π.χ. Carter et al. 1992), αρκετές έρευνες καταλήγουν σε μαθηματικούς τύπους που επιχειρούν να περιγράψουν την έναρξη και τη διάδοση των ΠΡ σε προϋπάρχοντα ανοίγματα εντός θλιπτικού εντατικού πεδίου (Lajtai et al. 1990, Romani et al. 2013). Στη διεθνή βιβλιογραφία επιλέγεται η μελέτη του συγκεκριμένου φαινομένου έναντι των υπολοίπων, θεωρώντας πως τα ψαθυρά υλικά δύνανται να θεωρηθούν πως συμπεριφέρονται ελαστικά έως τη στιγμή της θραύσης, με την ανίχνευση των εφελκυστικών ρωγμών να γίνεται σχετικά εύκολα υπό τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες (Lajtai 1972).

Ο Lajtai (1972) μελετά αναλυτικά την κρίσιμη εφαρμοζόμενη αξονική τάση κατά την οποία σημειώνεται η έναρξη της ΠΡ σε κυλινδρικές και ελλειψοειδείς οπές, αλλά και σε σχισμές. Θεωρεί πως υπάρχει ένα κρίσιμο μήκος r από το όριο της οπής, χαρακτηριστικό για κάθε υλικό, στο οποίο αναπτύσσεται μια κρίσιμη συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων σ_r κατά την οποία σημειώνεται η έναρξη της ΠΡ. Η τιμή r χαρακτηρίζει την ψαθυρότητα του υλικού, και μειώνεται για τα πιο ψαθυρά υλικά. Επιπλέον, υποστηρίζει πως η συγκέντρωση των τάσεων ελαττώνεται εκθετικά κατά μήκος της δυνητικής διαδρομής της ρωγμής. Σε ένα υλικό με αντοχή σ_{ti} σε άμεσο εφελκυσμό, προτείνει πως για κυκλικές διατομές ακτίνας R , το φαινόμενο της έναρξης των ΠΡ σε συνθήκες διαξονικής θλίψης περιγράφεται από την Εξίσωση 2-1.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{ti}}{\frac{5r}{R} - 1} + \frac{\frac{7r}{R} - 3}{\frac{5r}{R} - 1} \sigma_3$$

Εξίσωση 2-1

όπου σ_1 και σ_3 η μέγιστη και ελάχιστη εφαρμοζόμενη κύρια τάση αντίστοιχα.

Μεταξύ των ερευνητών που προσεγγίζουν αναλυτικά το πρόβλημα, ορισμένοι μελετούν μια ομοιογενή πλάκα απείρων διαστάσεων με μονή κυκλική οπή σε εφελκυσμό ή θλίψη (Sammis & Ashby 1986), άλλοι θέτουν δύο (2) αλληλεπικαλυπτόμενες ή ξεχωριστές κυκλικές οπές (Ling 1948), ενώ ορισμένοι χρησιμοποιούν μια ράβδο ή πλάκα με εγκοπή (Leguillon et al. 2007).

Οι ΠΑ δεν έχουν μελετηθεί αναλυτικά όπως οι ΠΡ. Αντ' αυτού, χρησιμοποιούνται οι αναλυτικές επιλύσεις της εφαπτομενικής τάσης, όπου για $\sigma_3 = 0$ η τοπική εφαπτομενική τάση στην παρειά της οπής είναι τριπλάσια της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης στο μοντέλο. Η απαιτούμενη τοπική εφαπτομενική τάση για την έναρξη των ΠΑ θεωρείται ίση με τη θλιπτική αντοχή του υλικού (Carter 1992b).

Ο Rummel (Rummel 1987) μελετώντας το φαινόμενο της ρωγμάτωσης του πετρώματος σε γεωτρήσεις όπου εφαρμόζεται η μέθοδος υδραυλικής θραύσης (hydraulic fracturing), υπολογίζει το συντελεστή συγκέντρωσης τάσης στα άκρα μίας ρωγμής μήκους l_r που εκτείνεται από το όριο κυκλικής οπής σε πλάκα απείρων διαστάσεων που υποβάλλεται σε θλιπτικές τάσεις πεδίου. Η διεύθυνση της ρωγμής θεωρείται παράλληλη προς τη σ_1 . Για τον υπολογισμό του συντελεστή συγκέντρωσης τάσης λόγω σ_1 αξιοποιεί την προσέγγιση των Paris & Sih (1965).

$$K_I = (\pi l_r)^{-1/2} \int_{-l_r}^{l_r} \sigma_{\theta\theta} \left(\frac{l_r + y}{l_r - y} \right)^{1/2} dy \quad \text{Εξίσωση 2-2}$$

Αγνοώντας την παρουσία της ρωγμής υπολογίζει τη $\sigma_{\theta\theta}$ στο επίπεδο της ρωγμής (για $x=0$) από τη λύση του Kirsch:

$$\sigma_{\theta\theta}(r, \theta) = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \left[1 + \left(\frac{R}{y} \right)^2 \right] - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \left[1 + 3 \left(\frac{R}{y} \right)^4 \right] \cos 2\theta \quad \text{Εξίσωση 2-3}$$

Με αντικατάσταση της $\sigma_{\theta\theta}$ στην Εξίσωση 2-2 και για $\sigma_3 = 0$:

$$K_I(p) = \frac{\sigma_1}{2[\pi(R + l_r)]^{1/2}} \int_{-(R+l_r)}^{R+l_r} \left[\frac{R^2}{y^2} - 3 \frac{R^4}{y^4} \right] \left(\frac{R + l_r + y}{R + l_r - y} \right)^{1/2} dy \quad \text{Εξίσωση 2-4}$$

και ολοκληρώνοντάς την στα διαστήματα $[-(R + l_r), -R]$ και $[R, R + l_r]$, αμελώντας το χωρίο που καταλαμβάνει η οπή, προκύπτει

$$K_I(\sigma_1) = 2\sigma_1\sqrt{R}\left(\frac{b^2 - 1}{\pi b^7}\right)^{1/2}$$

**Εξίσωση
2-5**

όπου $b = 1 + l_r/R$, και σ_1 και σ_3 η μέγιστη και η ελάχιστη κύρια τάση αντίστοιχα, και το πρόσημο στην Εξίσωση 2-5 γίνεται θετικό κατά το άνοιγμα της ρωγμής (οι θλιπτικές τάσεις λαμβάνονται ως θετικές). Θέτοντας $K_I = K_{Ic}$, η εξίσωση μπορεί να δώσει την απαιτούμενη τάση σ_1 για την επέκταση της ρωγμής.

Ο Carter (1992b) υποβάλει εργαστηριακά σε δοκιμές θλίψης πρισματικά δοκίμια με κυλινδρικές οπές διαφόρων διαμέτρων από δολομιτικό ασβεστόλιθο Tyndall. Στην ίδια εργασία συμπεριλαμβάνεται ιστορική αναδρομή αναλυτικών επιλύσεων που αφορούν το φαινόμενο της έναρξης των ΠΡ στο άνω και κάτω όριο της οπής, με αξιοποίηση των εξισώσεων από τον συγγραφέα και βελτίωση κάποιων παραμέτρων (π.χ. δυσθραυστότητας) στις εργαστηριακές δοκιμές της εργασίας. Οι σημαντικότερες εξισώσεις που περιλαμβάνονται στην εργασία του είναι εκείνες του Rummel (1987) και των Sammis & Ashby (1986) (Εξίσωση 2-6) η οποία βασίζεται στα αποτελέσματα του Sih (1973). Οι ερευνητές θεωρούν πως οι ΠΡ στα εξεταζόμενα φυσικά μοντέλα επεκτείνονται έως ότου ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσης K_I λάβει την κρίσιμη τιμή K_{Ic} , δηλαδή για $K_I = K_{Ic}$.

$$K_I = -(\sigma_1\sqrt{\pi l_i}) \left[\frac{1.1 \left(1 - 2.1 \frac{\sigma_3}{\sigma_1}\right)}{\left(1 + \frac{l_i}{R}\right)^{3.3}} - \frac{\sigma_3}{\sigma_1} \right]$$

Εξίσωση 2-6

όπου R , σ_1 και σ_3 ορίστηκαν παραπάνω, και l_i το αρχικό μήκος της ΠΡ. Βέβαια, ο Carter αναφέρει πως οι εξισώσεις του Rummel και των Sammis & Ashby δίνουν παρόμοιο K_{Ic} για την έναρξη της ίδιας ΠΡ. Θέτοντας $\sigma_3 = 0$ και αναδιατάσσοντας την Εξίσωση 2-6 προκύπτει η Εξίσωση 2-7 η οποία υπολογίζει την εφαρμοζόμενη αξονική τάση σ_1 κατά την οποία σημειώνεται η έναρξη της ΠΡ συναρτήσει των R και K_{Ic} .

$$\sigma_1 = \left[\frac{K_{Ic} \left(1 + \frac{l_i}{R}\right)^{3.3}}{1.1\sqrt{\pi l_i}} \right]$$

Εξίσωση 2-7

Αναπροσαρμόζοντας την καμπύλη $\sigma_1 - R$ που αφορά τον ασβεστόλιθο Tyndall, επιχειρεί να επιβεβαιώσει τις παραπάνω σχέσεις αξιοποιώντας τα εργαστηριακά δεδομένα του. Συγκεκριμένα, ελαττώνει τη βιβλιογραφική τιμή του K_{Ic} (Kilgour 1984) από $1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ σε $0.38 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Στη συνέχεια της εργασίας συμπεριλαμβάνει εξισώσεις που περιέχουν τον παράγοντα της «κρίσιμης απόστασης r » του Lajtai (1972) και την αντοχή σ_{ci} του πετρώματος σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, διατυπώνοντας εξίσωση υπολογισμού της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_{SPI} κατά την οποία σημειώνονται οι αποφλοιώσεις στις παρειές της οπής. Τα αποτελέσματα της εν λόγω εξίσωσης (Εξίσωση 2-8) επαληθεύονται από τα εργαστηριακά του δεδομένα.

$$\sigma_{SPI} = \frac{r \cdot \sigma_{ci}}{(R + r) \left(1 - \frac{R^2}{2(R + r)^2} - \frac{R^4}{2(R + r)^4} \right)}$$

Εξίσωση 2-8

Τέλος, αξιοποιώντας τις εξισώσεις του Kirsch, έπειτα από τις απαραίτητες τροποποιήσεις και ολοκληρώσεις ως προς το μήκος r , οδηγείται στις εξισώσεις που ακολουθούν και υπολογίζουν την αξονική $\bar{\sigma}_{rr}$ και εφαπτομενική $\bar{\sigma}_{\theta\theta}$ τάση που αναπτύσσονται στην περιοχή υψηλής συγκέντρωσης τάσεων στο όριο της οπής από όπου ξεκινάνε οι ΠΑ.

$$\bar{\sigma}_{rr} = \frac{\sigma_{SPI} \cdot R}{r} \left[1 - \frac{3R}{2(R + r)} + \frac{R^3}{2(R + r)^3} \right]$$

Εξίσωση 2-9

$$\bar{\sigma}_{\theta\theta} = \frac{\sigma_{SPI} \cdot (R + r)}{r} \left[1 - \frac{R^2}{2(R + r)^2} - \frac{R^4}{2(R + r)^4} \right]$$

Εξίσωση 2-10

2.2 Παρατηρήσεις *in situ*

Οι Martin et al. (1997) αναφέρουν πως με τον μηδενισμό του πλευρικού περιορισμού του πετρώματος κατά τη διαδικασία της όρυξης ενός υπογείου ανοίγματος, αυξάνεται η εφαπτομενική τάση στο όριο της εκσκαφής, και μόλις η τιμή της γίνει ίση με την αντοχή της περιβάλλουσας βραχομάζας επιφέρει την αστοχία της. Η εν λόγω αστοχία σε ψαθυρά πετρώματα είναι συνήθως βίαιη και περιγράφεται συχνά ως «αποφλοιώση» (spalling ή slabbing). Η γεωμετρία της περιοχής που αστοχεί παραπέμπει σε μια εγκοπή σχήματος V, και αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα ευστάθειας ενός υπογείου ανοίγματος, μιας και σε

ακραίες συνθήκες εντατικού πεδίου η διαδικασία της αποφλοιώσης δύναται να οδηγήσει σε ολοσχερή κατάρρευση της στοάς. Ο παραπάνω μηχανισμός αστοχίας σπανίζει στις χαμηλού βάθους εξορύξεις, και συνδέεται γενικά με τις μεγάλου βάθους. Για την επί τόπου (*in situ*) μελέτη των συγκεκριμένων φαινομένων, οι Martin et al. (1997) αξιοποιούν στην εργασία τους μια δοκιμαστική σήραγγα μήκους 46 m και διαμέτρου 3.5 m ορυγμένη με μηχανικά μέσα σε ψαθυρό, μη ρωγματωμένο γρανοδιορίτη και γρανίτη Lac du Bonnet στο επίπεδο 420 του Underground Research Laboratory (URL) της Atomic Energy of Canada Limited (AECL). Κατά μήκος της σήραγγας, οι περιοχές κυρίως γύρω από τον γρανίτη δείχνουν εντονότερα διαρροές συγκριτικά με εκείνες του γρανοδιορίτη καθώς το μέτωπο της σήραγγας προχωράει, γεγονός που υποδηλώνει ότι *in situ* ο γρανίτης είναι ελαφρώς ασθενέστερος από τον πιο λεπτόκοκκο γρανοδιορίτη. Επιπλέον, οι συγγραφείς παρατηρούνε πως η νέα γεωμετρία του ανοίγματος διατηρείται σταθερή έπειτα από τη μετάβαση σε συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης, παρά τη βιαιότητα που χαρακτηρίζει την αστοχία ψαθυρών πετρωμάτων λόγω της απότομης απελευθέρωσης ενέργειας. Κατά τη διάνοιξη της σήραγγας, η έναρξη του φαινομένου των αποφλοιώσεων σημειώνεται σε 0.5-1 m από το μέτωπο, ενώ εξελίσσεται όσο το μέτωπο προχωράει. Τα στάδια της εμφάνισης και ανάπτυξης της εγκοπής σχήματος V σύμφωνα με τους Martin et al. είναι τέσσερα (4). Αρχικά παρατηρείται η *έναρξη* όπου μικρορωγμές εμφανίζονται σε μια στενή περιοχή κοντά στο μέτωπο της σήραγγας, και ο χωρικός εντοπισμός τους πραγματοποιείται μέσω γεωφώνων. Ακολούθως, δημιουργείται η *ζώνη διεργασιών* σε απόσταση 0.5-1 m από το μέτωπο, όπου εμφανίζονται θρύμματα σε μια στενή ζώνη πλάτους 5-10 cm στην περιφέρεια του ανοίγματος όπου σημειώνονται οι μέγιστες επαπτομενικές τάσεις στο όριο της εκσκαφής, οι οποίες εξαντλούν το όριο αντοχής της βραχομάζας. Αναφέρουν, πως αρχικά η θραύση συμβαίνει στην περιοχή όπου η συγκέντρωση των μικρορωγμών είναι μεγαλύτερη, δηλαδή εκεί όπου παρατηρείται το μεγαλύτερο πλήθος μικροσεισμικών γεγονότων. Η διασταλτικότητα και η μικρής κλίμακας αποφλοιώση (10-100 mm) στη ζώνη διεργασιών οδηγεί στον σχηματισμό λεπτών όγκων συνήθως στο μέγεθος των κόκκων του γρανίτη (2-5 mm). Έπειτα, αποκολλώνται μεγαλύτερου μεγέθους όγκοι (πάχους από 1 cm έως αρκετών εκατοστών) από τις πλευρές της σχηματισμένης εγκοπής V όσο η σήραγγα επιμηκύνεται. Ο σχηματισμός των εν λόγω αποφλοιώσεων γίνεται ασταθώς. Η *σταθεροποίηση* της κατάστασης και κατά συνέπεια της κατασκευής, έρχεται μόλις η

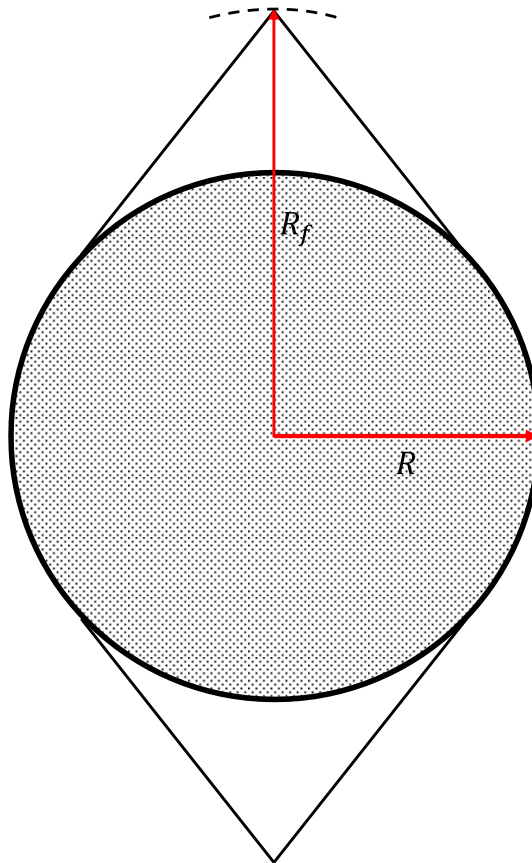
γεωμετρία των εγκοπών V παρέχει επαρκή πλευρικό περιορισμό που να σταθεροποιεί τη ζώνη διεργασιών στο άκρο των εν λόγω εγκοπών. Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο, η αιχμή της εγκοπής θα πρέπει να μετατραπεί από σχήματος V σε U . Κατά συνέπεια θα σημειωθεί αναδιανομή των κύριων τάσεων τοπικά, με παράλληλη αύξηση της σ_1 και του αντίστοιχου πλευρικού περιορισμού. Μια δευτερογενής διαταραχή της εγκοπής U , δίνει το έναυσμα για μια νέα περίοδο αστάθειας και αποφλοιώσεων.

Η σημασία του φαινομένου των αποφλοιώσεων στην ευστάθεια ενός υπογείου ανοίγματος σε ψαθυρό πέτρωμα, σχολιάζεται με αντίστοιχες παρατηρήσεις και από τους Martin et al. (2003). Συγκεκριμένα, και εν προκειμένω για ψαθυρά πετρώματα, αναφέρουν πως σε ενδιάμεσα βάθη, οι εν λόγω περιοχές αστοχίας του πετρώματος εντοπίζονται κοντά στην περίμετρο της σήραγγας, αλλά σε μεγάλα βάθη η αστοχία μπορεί να περιβάλλει ολόκληρο το όριο της εκσκαφής.

Οι Martin et al. (1999) καταγράφοντας από τη βιβλιογραφία την εμφάνιση αποφλοιώσεων σε σήραγγες μετά το 1977, δείχνουν ότι το βάθος των αποφλοιώσεων (R_f) σε ένα πέτρωμα μεταβάλλεται γραμμικά όσο αυξάνεται ο λόγος της μέγιστης εφαπτομενικής τάσης ($\sigma_{\theta\theta max}$) στο όριο του ανοίγματος προς την αντοχή του άρρηκτου πετρώματος (σ_{ci}) όπως εκείνη προκύπτει κατά τις εργαστηριακές δοκιμές:

$$\frac{R_f}{R} = 0.49(\pm 0.1) + 1.25 \frac{\sigma_{\theta\theta max}}{\sigma_{ci}} \quad \text{Εξίσωση 2-11}$$

όπου $\sigma_{\theta\theta max} = 3\sigma_1 - \sigma_3$. Επιπλέον, παρατηρείται πως αναλόγως του πετρώματος, το φαινόμενο των αποφλοιώσεων εμφανίζεται περί το 30% με 50% της αντοχής του άρρηκτου πετρώματος, καθώς επίσης και ότι με την αύξηση της ακτίνας R της σήραγγας, απαιτείται ασθενέστερη εφαπτομενική τάση στο όριο της εκσκαφής για να σημειωθεί η έναρξη του φαινομένου.



Σχήμα 2-2. Βάθος αποφλοιώσεων R_f σε κυκλικό άνοιγμα ακτίνας R όπως ορίζεται στην Εξίσωση 2-11 από τους Martin et al. (1999).

Οι Feng et al. (2018) προκειμένου να μελετήσουν τις αποφλοιώσεις του πετρώματος στις βαθιές σήραγγες στο China Jinping Underground Laboratory Phase II (CJPL-II), χρησιμοποιούν στην εργασία τους τη μέθοδο της φωτογραμμετρίας και της ψηφιακής φωτογράφισης γεωτρήσεων (digital borehole camera method) για την ποσοτικοποίηση των βασικών χαρακτηριστικών του φαινομένου της αποφλοιώσης των πετρωμάτων, συμπεριλαμβανομένων του προσανατολισμού, του πάχους των αποκολλόμενων πλακών και του βάθους στο οποίο εκτείνονται, συναρτήσει της γεωμετρίας του ανοίγματος σε κάθε στάδιο της όρυξης (άνω ημιδιατομή, σήραγγα-πιλότος κ.λπ.) και του εντατικού πεδίου. Οι μηχανισμοί αστοχίας αναλύονται μέσω ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM) και αριθμητικής προσομοίωσης στο FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions). Υποστηρίζουν πως τα αποτελέσματα της έρευνάς τους ανέδειξαν ένα τυπικό μοτίβο αποφλοιώσεων γύρω από σήραγγες σχήματος D κατά την ολοκλήρωση της εκσκαφής της άνω ημιδιατομής (top heading) και της βαθμίδας (bench), όπου οι αποκολλόμενες πλάκες κατά κύριο λόγο είναι παράλληλες με το όριο της εκσκαφής της σήραγγας. Οι πλάκες εμφανίζονται εναλλάξ παχύτερες και

λεπτότερες, με σταδιακά αυξανόμενο πάχος από το πλευρικό τοίχωμα και προς τα μέσα.

Ο Dammyr (2016) μελετά σήραγγες συνολικού μήκους 33 km και διαμέτρου 3.5 m και 6.25 m ορυγμένες κατά το 50% με μηχανή ολομέτωπης κοπής (Tunnel Boring Machine – TBM) σε αδρόκοκκο (σχιστογενή) γρανιτικό γνεύσιο (ορθογνεύσιος), οι οποίες χρησιμοποιούνται ως υδραυλικές σήραγγες υπό πίεση και ως σήραγγες προσαγωγής (headrace tunnel) στον υδροηλεκτρικό σταθμό Kobbeln HPS της βόρειας Νορβηγίας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζει φωτογραφικό υλικό και δεδομένα αποφλοιώσεων βάθους 5 cm έως και 50 cm σε ανυποστήρικτα τμήματα υδραυλικής σήραγγας μεταφοράς (200-300 kPa) διαμέτρου 3.5 m, σημειώνοντας τη σημασία της σχιστότητας του πετρώματος και της διεύθυνσή της ως προς το εντατικό πεδίο και τον άξονα του ανοίγματος.

Οι Everitt & Lajtai (2004) μελετούν την επιρροή της δομής του πετρώματος (rock fabric) σε υπόγεια ανοίγματα ορυγμένα στον γρανιτικό βαθόλιθο της περιοχής Lac du Bonnet στη Μανιτόμπα του Καναδά. Η σειρά των διαδικασιών της όρυξης του ανοίγματος, όπως και η γεωμετρία του και οι παραλλαγές της τοπικής γεωλογίας, επηρεάζουν τον ρυθμό ανάπτυξης των αποφλοιώσεων, τη θέση τους στο όριο της εκσκαφής και του τελικού τους βάθους. Συγκεκριμένα, στις περιοχές συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων, η έναρξη των αποφλοιώσεων είναι εκτενέστερη στις θέσεις όπου το επίπεδο της φύλλωσης είναι παράλληλο με την επιφάνεια της εκσκαφής. Στις περιοχές όπου απουσιάζει ή αναπροσανατολίζεται η φύλλωση λόγω της παρουσίας είτε λεπτόκοκκων φλεβών είτε ορισμένων ξενόλιθων, η ανάπτυξη των αποφλοιώσεων καθυστερεί και περιορίζεται σε έκταση. Επιπλέον, στις περιοχές του μεσόκοκκου και αδρόκοκκου γρανίτη, η έναρξη των αποφλοιώσεων και δημιουργία της εγκοπής σχήματος V πραγματοποιείται και αναπτύσσεται ταχέως σχεδόν αμέσως μετά την εκσκαφή, λαμβάνοντας την τελική της μορφή εντός μιας εβδομάδος. Ο ρυθμός ανάπτυξης των εγκοπών σχήματος V στον λεπτόκοκκο γρανίτη είναι σημαντικά χαμηλότερος, ανεξαρτήτως της μεθόδου όρυξης (μηχανική ή με εκρηκτικά), ενώ σε ορισμένες περιοχές απουσιάζουν εντελώς. Στις περιοχές της σήραγγας που ορύσσονται εντός του λεπτόκοκκου γρανίτη, οι αποφλοιώσεις στην οροφή συνεχίζονται συμβαδίζοντας με τον ρυθμό προχώρησης του μετώπου της εκσκαφής. Βεβαίως, με την εμφάνιση των φλεβών λεπτόκοκκου γρανίτη, η

ανάπτυξη της εγκοπής V καθυστερεί κατά έναν ή και περισσότερους κύκλους εκσκαφής προχώρησης του μετώπου, με σαφώς περιορισμένο βάθος.

Στην εικοσαετή αναδρομή της έρευνας που ξεκίνησε το 1982 στο υπόγειο ερευνητικό εργαστήριο URL της AECL, ο Read (2004) περιγράφει τις πειραματικές μελέτες που έλαβαν χώρα στο εν λόγω εργαστήριο, όπου εκτός των άλλων, κατά τα έτη 1995-1997 μελετήθηκε η επίδραση της γεωμετρίας μιας σήραγγας και ο προσανατολισμός του άξονά της ως προς τους γεωλογικούς σχηματισμούς. Συνολικά ορύχθηκαν δύο (2) κυκλικής και οκτώ (8) ωοειδούς διατομής ανοίγματα με διάφορους λόγους διαστάσεων κύριων προς δευτερευόντων αξόνων και/ή σχετικής γωνίας κλίσης ως προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης. Εννέα (9) από τα παραπάνω ανοίγματα είναι ορυγμένα παράλληλα με τη διεύθυνση της ενδιάμεσης κύριας τάσης σ_2 , ενώ το ένα (1) από τα κυκλικά ανοίγματα είναι παράλληλο προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης σ_1 . Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις που προκύπτουν από τις δέκα (10) διατομές, η αστάθεια που οδηγεί σε αποφλοιώσεις σημειώνεται μόνο σε διατομές ορυγμένες σε γρανίτη, με υπολογιζόμενη μέγιστη τάση στο όριο της εκσκαφής ίση με 120 MPa. Σήραγγες όπου ο κύριος άξονας της διατομής τους βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση της σ_1 , εμφανίζοντας τη μέγιστη συγκέντρωση θλιπτικής τάσης ομοιόμορφα στις δύο παρειές που βρίσκονται κάθετα στη σ_3 , παρουσιάζουν καλύτερη ευστάθεια από εκείνες που ορύσσονται με τον κύριο άξονα της διατομής τους οριζόντια, εμφανίζοντας τη μέγιστη συγκέντρωση θλιπτικής τάσης τοπικά σε δύο σημεία του ορίου. Η σταδιακή αστοχία του ανοίγματος περιλαμβάνει εκτεταμένες σε μέγεθος αποφλοιώσεις στη δεύτερη περίπτωση, εν αντιθέσει με την πρώτη. Η διαφορές που σημειώνονται ως προς την ευστάθεια των εν λόγω δύο (2) ανοιγμάτων σχετίστηκε πρωτίστως με τη διαφορά μεγέθους των τάσεων και της κατανομής τους γύρω από τις δύο (2) σήραγγες. Η παρακολούθηση των μικροσεισμικών διεργασιών επιβεβαιώνει πως η ανάπτυξη περιοχών αστοχίας εντός του πετρώματος είναι περισσότερο διαδεδομένη στα ανοίγματα που σημειώνονται υψηλότερες θλιπτικές τάσεις στο όριο της εκσκαφής, και κυρίως στις σήραγγες όπου η συγκέντρωση των εν λόγω τάσεων εντοπίζεται σε μεμονωμένα σημεία της περιφέρειας, αλλά και στις σήραγγες που ορύσσονται σε γρανίτη έναντι εκείνων σε γρανοδιορίτη. Τέλος, ανοίγματα με μικρότερο λόγο μεγέθους κύριου προς δευτερεύοντα άξονα διατομής, ομοίως

παρουσιάζουν καλύτερη ευστάθεια όντας προσανατολισμένα με τον κύριο άξονα να βρίσκεται παράλληλα με τη διεύθυνση της σ_1 .

Ερευνητικές εργασίες σε υδροηλεκτρικό σταθμό ορυγμένο κατά κύριο λόγο σε ανθρακικά πετρώματα της κινεζικής επαρχίας Σιτσουάν (Sichuan), επιβεβαιώνουν τη σημασία που έχει το φαινόμενο των αποφλοιώσεων σε μια σήραγγα, παρατηρώντας ουσιαστικά πως προηγείται των βίαιων εκτινάξεων πετρώματος (rockburst) στις οποίες οφείλονται τα περισσότερα ατυχήματα και δυστυχήματα (Li et al. 2012, Gong et al. 2012). Συγκεκριμένα, κατά τους Li et al. (2012) τα πρόδρομα χαρακτηριστικά μιας επικείμενης βίαιης εκτίναξης πετρώματος είναι αρχικώς η δημιουργία τεράστιου πλήθους ρωγμών, η διάδοση και η συνένωσή τους, η οποία ακολουθείται από παραμόρφωση της περιβάλλουσας βραχομάζας που περιλαμβάνει ένα στάδιο επιταχυνόμενης παραμόρφωσης, ένα στάδιο ηρεμίας και ένα επαναεπιταχυνόμενης παραμόρφωσης. Παράλληλα, σημειώνεται μείωση της χαρακτηριστικής ταχύτητας των διαμήκων κυμάτων στη βραχομάζα. Η δημιουργία και η εξέλιξη των βίαιων εκτινάξεων πετρώματος αποτελείται από τέσσερα (4) στάδια: α) την προσαρμογή των τάσεων, β) τη συσσώρευση ελαστικής ενέργειας, γ) την έναρξη, διάδοση και συγχώνευση ρωγμών και δ) την κατάρρευση της ρωγματωμένης βραχομάζας.

2.3 Εργαστηριακές μελέτες

Τα τελευταία πενήντα (50) χρόνια, για την εργαστηριακή μελέτη της μικρομηχανικής συμπεριφοράς του πετρώματος γύρω από υπόγεια ανοίγματα, υποβάλλονται σε δοκιμές θλίψης πρισματικά δοκίμια με μία ή περισσότερες οπές, των οποίων το σχήμα και οι διαστάσεις παραπέμπουν στη γεωμετρία των συνηθέστερων υπογείων ανοιγμάτων, ήτοι κυλινδρικές, πρισματικές, ανεστραμμένου τόξου, πεταλοειδείς κ.λπ. Ο αριθμός, η θέση και το βάθος των οπών ποικίλει, με τη συντριπτική πλειοψηφία να αποτελείται από μονές διαμπερείς κυλινδρικές ή πρισματικές οπές στο κέντρο των δοκιμίων. Σε κάθε περίπτωση ο άξονας των ανοιγμάτων είναι παράλληλος κατά τη μικρότερη διάσταση (πάχος) του πρίσματος. Μετά την προετοιμασία τους υποβάλλονται σε δοκιμές είτε μονοαξονικής είτε πολυαξονικής θλίψης, κυρίως διαξονικής εγκάρσια στη διεύθυνση της οπής. Η παρακολούθηση των φαινομένων που εμφανίζονται και αναπτύσσονται στα φυσικά μοντέλα έως ότου επέλθει η αστοχία τους, γίνεται κυρίως με τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης

(strain gauges), καταγραφή και επεξεργασία σημάτων ακουστικής εκπομπής (AE), οπτικές μεθόδους παρακολούθησης, εξέταση λεπτών τομών σε οπτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope – SEM) κ.ά.

Σημειώνεται ότι στη διεθνή βιβλιογραφία αξιοποιούνται κυρίως η μέθοδος της Ακουστικής Εκπομπής και των τροπόμετρων ηλεκτρικής αντίστασης, είτε συνδυασμένα είτε όχι. Πρόκειται για σχετικά ακριβείς μεθόδους, αλλά σημαντικά δαπανηρές στην προμήθεια και κτίση τους. Η ακρίβεια και η επιτυχία της εφαρμογής των δύο (2) μεθόδων εξαρτάται από το είδος της μελέτης, την εμπειρία του ερευνητή, την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού και την κατάσταση του τελευταίου. Όπως είναι φυσικό, κάθε μέθοδος έχει πεπερασμένες δυνατότητες και η συνδυασμένη εφαρμογή τους με πιο σύγχρονες μεθόδους βελτιώνει την παρακολούθηση και ανάλυση της πειραματικής διαδικασίας, μειώνοντας παράλληλα το οικονομικό κόστος.

Οι εν λόγω έρευνες σε φυσικά μοντέλα από πέτρωμα ή τεχνητό υλικό με προϋπάρχοντα ανοίγματα, περιγράφουν τη διαδικασία ρωγμάτωσης ως αποτέλεσμα υψηλής συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων στο άνω και κάτω όριο του ανοίγματος (Lajtai 1971, 1974). Όπως επισημαίνεται από τους Nesetova & Lajtai (1973), σε θεωρίες βασιζόμενες στο Griffith, η έναρξη της ρωγμάτωσης γύρω από το άνοιγμα σημειώνεται μόλις η συγκέντρωση των τοπικών τάσεων ξεπεράσει την αντοχή του υλικού. Επιπροσθέτως, καθώς η επέκταση της ρωγμής είναι αποτέλεσμα συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων, η παρουσία οποιασδήποτε κατανομής τάσεων κατά μήκος της διαδρομής της ΠΡ, επηρεάζει και το τελικό της μήκος. Από την άποψη αυτή, κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, αρχικά θα εμφανιστούν οι ΠΡ μόλις η εφαρμοζόμενη αξονική τάση εξισωθεί με την εφελκυστική αντοχή του υλικού στο όριο του ανοίγματος, υπό την προϋπόθεση πως η κατανομή των τάσεων γύρω από το άνοιγμα είναι ελαστική μέχρι την έναρξη της ΠΡ. Θεωρητικά, υπάρχει μία κρίσιμη διάμετρος οπής από την οποία και έπειτα η εφαρμοζόμενη αξονική τάση κατά την οποία σημειώνεται η έναρξη της ΠΡ είναι ίση ή τουλάχιστον προσεγγίζει την εφελκυστική αντοχή του υλικού (Lajtai 1971). Ορισμένες μελέτες (π.χ. Lajtai 1972) περιγράφουν πως η εν λόγω κατάσταση συμβαίνει πέραν μιας κρίσιμης διαμέτρου οπής, που σημαίνει ότι η απαραίτητη εφαρμοζόμενη αξονική τάση για την έναρξη της ρωγμάτωσης σε φυσικά μοντέλα με στενότερες οπές είναι μεγαλύτερη από την εφελκυστική αντοχή του υλικού και τείνει

σε πολύ υψηλές τιμές για τα στενότερα ανοίγματα. Στην πραγματικότητα το άνω όριο των εν λόγω τιμών αντιστοιχεί στη μονοαξονική αντοχή του δοκιμίου, ενώ στα πολύ στενά ανοίγματα μπορεί και να μην παρατηρηθεί καθόλου ΠΡ. Αντιθέτως, σε οπτικό μικροσκόπιο διακρίνονται πολυάριθμες αξονικές ρωγμές διασκορπισμένες στο μοντέλο, που ομοιάζει με την αστοχία ενός κοινού δοκιμίου έπειτα από δοκιμή UCS (Carter 1992b). Επιπλέον, οι Carter et al. (1992) υποστηρίζουν ότι για υψηλότερες πλευρικές πιέσεις, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις γεωτρήσεων, το μόνο φαινόμενο που λαμβάνει χώρα είναι οι πλευρικές αποφλοιώσεις. Υποστηρίζουν επίσης πως και τα τρία (3) φαινόμενα που φαίνονται στο Σχήμα 2-1 είναι εφελκυστικά, και πως καμία διατμητική μετατόπιση κατά μήκος του επιπέδου της ρωγμής δεν εμφανίζεται, παρά μόνο διόγκωση κάθετα σε αυτό. Αντιθέτως, άλλες μελέτες (Lajtai & Lajtai 1975, Lajtai et al. 1994) υποστηρίζουν πως οι μεν ΔΡ είναι εφελκυστικές, πλην του τμήματός τους που διέρχεται από τις περιοχές συγκέντρωσης υψηλών θλιπτικών τάσεων, αλλά οι δε πλευρικές αποφλοιώσεις είναι καθαρά διατμητικό φαινόμενο.

Εργαστηριακές μελέτες σε γύψο, γρανίτη, ασβεστόλιθο και ποτάσα επιβεβαιώνουν την επίδραση της κλίμακας ως κρίσιμο φαινόμενο στο πέτρωμα (Lajtai 1971, Nesetova & Lajtai 1973, Carter et al. 1991, Carter 1992a, 1992b, Martin 1993, Dzik & Lajtai 1996, Suknev et al. 2003).

Οι Lajtai (1971) και Nesetova & Lajtai (1973) εκτελούν δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε φυσικά μοντέλα γύψου Παρισίων. Ο γύψος των εν λόγω πειραμάτων παρουσιάζει την πιο αξιοσημείωτη επίδραση της κλίμακας μεταξύ υλικών που μελετήθηκαν, τόσο για την έναρξη της ΠΡ όσο και για την έναρξη των ΠΑ. Οι σπές που εξετάζονται έχουν διάμετρο που κυμαίνεται από 6.35 mm μέχρι 50.8 mm. Σε παρόμοια πειράματα, οι Suknev et al. (2003) επιβεβαιώνουν την παρατηρούμενη επίδραση της κλίμακας στην έναρξη της ΠΡ σε δοκίμια γύψου, μελετώντας στενότερα ανοίγματα που κυμαίνονταν από 3 mm μέχρι 25 mm διάμετρο.

Άλλες μελέτες (Carter et al. 1991, Carter 1992a, 1992b, Carter et al. 1992) εξετάζουν τη διαδικασία της θραύσης σε φυσικά μοντέλα από ασβεστόλιθο Tyndall, ποτάσα Saskatchewan και γρανίτη Lac du Bonnet (LdB). Μελετώνται οκτώ (8) μοντέλα ασβεστόλιθου με διαμέτρους από 6.4 mm έως 62 mm. Ο Carter σημειώνει πως τα μηχανικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού διαφοροποιούνται αισθητά από θέση σε θέση. Επιπλέον, το υλικό στερείται αντοχής και ψαθυρότητας

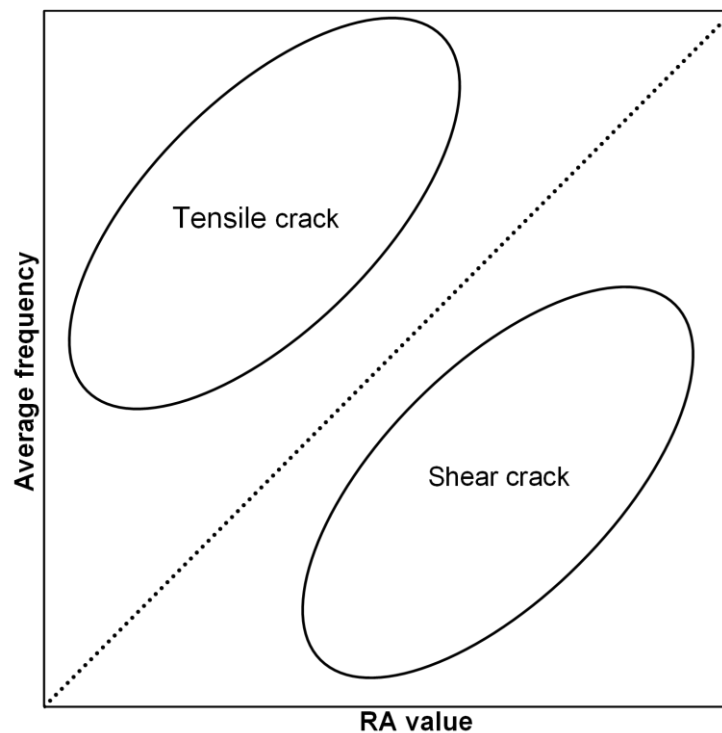
συγκριτικά με τον γρανίτη, αλλά εξακολουθεί να είναι κυρίως ελαστικό. Αντιθέτως, η ποτάσα ως ασθενές και όλκιμο υλικό, συμπεριφέρεται με μη γραμμικό τρόπο, με την αντοχή της και το μέτρο ελαστικότητας να εξαρτάται από τον ρυθμό φόρτισης. Μελετώνται συνολικά έξι (6) διάμετροι από 7 mm έως 65.4 mm. Ο γρανίτης LdB αποτελεί το πιο λεπτομερώς εξετασμένο υλικό από τα παραπάνω, στο οποίο οι Lajtai, Petuhkov, Babulic, Dzik και Martin (Babulic 1985, Carter et al. 1991, Martin 1993, Dzik & Lajtai 1996) μελετούν φυσικά μοντέλα με διάφορες διαμέτρους (από 20 mm έως 103 mm) και διαστάσεις. Οι Dzik & Lajtai (1996) πραγματοποιούν δοκιμές θλίψης με έλεγχο τάσης σε έξι (6) πρισματικά δοκίμια γρανίτη με κυλινδρικές οπές διαμέτρου από 10 mm έως 100 mm. Για τα μοντέλα των παραπάνω υλικών, ο σχηματισμός της πρώτης ΠΡ και των ΠΑ προσδιορίζεται από τις μετρήσεις τροπόμετρων ηλεκτρικής αντίστασης επικολλημένων στις περιοχές έναρξης των φαινομένων. Οι ερευνητές σημειώνουν πως ο γρανίτης LdB παρουσιάζει γραμμική συμπεριφορά, οπότε τα σημεία καμπής στις καμπύλες τάσης-τροπής που λαμβάνονται από τα τροπόμετρα θα μπορούσαν να είναι μόνο αποτέλεσμα της έναρξης ρωγμάτωσης. Με αυτή την παραδοχή, το σημείο απόκλισης από τη γραμμικότητα της καμπύλης τάσης-τροπής αποδίδεται στην άφιξη της άκρης της ρωγμής. Για οπές μεγαλύτερης ακτίνας ($R > 20$ mm), οι ερευνητές επικόλλησαν τροπόμετρα στην εσωτερική κοίλη επιφάνεια του ανοίγματος. Για στενότερες οπές, ο προσδιορισμός της χρονικής στιγμής έναρξης του εκάστου φαινομένου πραγματοποιείται βάσει των τιμών του εγγύτερου τροπόμετρου στο όριο της οπής, που είναι κολλημένο στην έδρα του πρίσματος. Τόσο οι ΠΡ όσο και οι ΠΑ ξεκινούν από την περίμετρο της οπής. Σύμφωνα με τους Dzik & Lajtai (1996), η τάση έναρξης και των τριών φαινομένων εξαρτάται από το μέγεθος του ανοίγματος, με την επίδραση της κλίμακας να είναι πιο έντονη στις μικρές ακτίνες ($R < 10$ mm). Επιπλέον, προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση των οριακών συνθηκών, οι Dzik και Lajtai (1996) εκτελούν ένα σύνολο δοκιμών σε τρία (3) όμοια, σε μέγεθος, πρίσματα γρανίτη LdB: α) με τις χαλύβδινες πλάκες φόρτισης σε άμεση επαφή με το δοκίμιο, β) παρεμβάλλοντας ένα φύλλο Teflon στη διεπιφάνεια μεταξύ των χαλύβδινων πλακών και του δοκιμίου γρανίτη LdB και γ) παρεμβάλλοντας πλάκα γρανίτη LdB στη διεπιφάνεια μεταξύ των χαλύβδινων πλακών και του δοκιμίου. Και οι τρεις (3) δοκιμές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι τα τρία (3) φαινόμενα εμφανίζονται στα μοντέλα σε παρόμοια επίπεδα τάσεων, που σημαίνει ότι η επιρροή των συνοριακών συνθηκών είναι περιορισμένη. Παρεμβολή πλάκας LdB πάχους 30

mm στην προαναφερθείσα διεπιφάνεια δοκιμάζεται επίσης από τους Carter et al. (1991) καταλήγοντας στα ίδια αποτελέσματα. Οι Lotidis (2014) και Lotidis et al. (2015) εξετάζοντας τις επιπτώσεις από την εφαρμογή τέτοιων αριθμητικών πλακών γρανίτη στους κώδικες PFC2D και PFC3D, επίσης δεν παρατηρούν ουσιαστικές διαφορές (Lotidis 2014, Lotidis et al. 2015).

Τα τελευταία χρόνια γίνονται μελέτες όπου χρησιμοποιείται η μέθοδος AE σε εργαστηριακές δοκιμές τέτοιου είδους. Με τη βοήθεια της συγκεκριμένης μεθόδου γίνεται προσπάθεια να προσδιοριστούν χωρικά και χρονικά τα φαινόμενα που εξελίσσονται στα δοκίμια, να κατανοηθεί η φύση τους ως προς το αν αποτελούν εφελκυστικές ή διατμητικές αστοχίες, κάτι που προκύπτει από μεγάλη συγκέντρωση εφελκυστικών ή θλιπτικών τάσεων σε περιοχές των δοκιμίων, και να μελετηθούν οι παράμετροι των AE που λαμβάνονται κατά την εξέλιξη των φαινομένων, π.χ. πλάτος (dB) AE, ενέργεια AE, συχνότητα AE κ.λπ. Τέτοιες δοκιμές βρίσκουν εφαρμογή παραδείγματος χάρη σε δοκίμια σκυροδέματος με κυλινδρικές οπές (Cheon et al. 2008). Ένα σημαντικό πρόβλημα που συναντάται στις εν λόγω μελέτες, αποτελεί η ιδιαίτερη γεωμετρία των συγκριμένων δοκιμίων. Οι οπές που περιέχουν, ανεξαρτήτως γεωμετρίας, αλλοιώνουν τα σήματα AE με αποτέλεσμα τον υπολογισμό εσφαλμένου χωροχρονικού προσδιορισμού των γεγονότων AE και κατ' επέκταση των φαινομένων που εκτυλίσσονται στα δοκίμια. Προκειμένου να ξεπεραστούν οι περιορισμοί που έγκεινται στη γεωμετρία των συγκεκριμένων φυσικών μοντέλων, ακολουθείται η τακτική της παρακολούθησης ορισμένης περιοχής και όχι ολόκληρου του δοκιμίου. Συνήθως μελετάται το μισό (Liu et al. 2015) ή τέταρτο (Cheon et al. 2008) του δοκιμίου, έτσι ώστε να υπάρχει μικρή έκταση της οπής η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ δύο (2) αισθητήρων. Πρόσθετη πρόκληση, αποτελεί ο προσδιορισμός της μεταβολής της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων AE λόγω ρωγμάτωσης κατά τη διάρκεια της εκάστοτε δοκιμής, καθώς επίσης και η σωστή επιλογή των παραμέτρων του εξοπλισμού των AE πριν από κάθε δοκιμή. Για τον υπολογισμό της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων AE, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αισθητήρες υπερήχων, εφαρμοσμένοι πάνω στο φυσικό μοντέλο καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής (Stanchits et al. 2006).

Για τον προσδιορισμό της φύσης των μικρορωγματώσεων (εφελκυστικές, διατμητικές ή μεικτής φύσης) έχουν αξιοποιηθεί διάφορες μέθοδοι, όπως το διάγραμμα μέσης συχνότητας (Average frequency (kHz) = Counts/Duration) – RA

value (RA value (msec/V) = Rise Time/Amplitude) (Σχήμα 2-3), η ανάλυση βάσει της πολικότητας των κυματομορφών των ΑΕ, η αξιοποίηση βάσης δεδομένων όπου έχουν εισαχθεί κυματομορφές εφελκυστικών και διατμητικών μικρορωγμών ως κυματομορφές αναφοράς για τις ΑΕ των δοκιμών, και η μέθοδος του ταυστή της σεισμικής ροπής (Moment Tensor – MT). Ακριβέστερη, αλλά και δυσκολότερη κατά την εφαρμογή, είναι η μέθοδος MT. Στη διεθνή βιβλιογραφία βρίσκει εφαρμογή ακόμα και σε πιο ιδιαίτερες γεωμετρίες δοκιμών πέραν των συνηθισμένων κυλινδρικών των δοκιμών UCS, όπως λ.χ. πρισματικά δοκίμια με οπή ή οπές συμμετρικά ως προς το κέντρο τους, διαμπερείς ή μέχρι το μέσο της μίας διάστασης, συνήθως σχήματος κυλινδρικού (Liu et al. 2015, Zhao et al. 2014), πεταλοειδούς (Liu et al. 2015) ή πρισματικού (Xu et al. 2012, Liu et al. 2014). Τα εν λόγω δοκίμια υποβάλλονται σε δοκιμές μονοαξονικής και διαξονικής θλίψης, προκειμένου να μελετηθούν στο εργαστήριο οι μηχανισμοί αστοχίας γύρω από υπόγεια ανοίγματα.



Σχήμα 2-3. Διάγραμμα μέσης συχνότητας-RA value που προκύπτουν από τη μέθοδο ΑΕ για το χαρακτηρισμό εφελκυστικών και διατμητικών μικρορωγμών.

Εκτός από την αξιοποίηση της μεθόδου ΑΕ, η εισαγωγή εξοπλισμού όπως κάμερα υψηλής ανάλυσης και υψηλής ταχύτητας λήψης στιγμιότυπων, οπτικό μικροσκόπιο, ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) και περιβαλλοντικό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο γνωστό ως ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope), έδωσε νέα ώθηση στη μελέτη των εν λόγω δοκιμών και των μηχανισμών θραύσης

που αναπτύσσονται σε αυτά, και είτε έλυσε απορίες χρόνων, είτε έδωσε τροφή για περαιτέρω έρευνα. Συνηθέστερο υλικό μελέτης αποτελεί ο γύψος λόγω της εύκολης διαμόρφωσής του (Wong & Einstein 2009a, 2009b). Η συνδυασμένη μελέτη με τη χρήση των παραπάνω μεθόδων διευκολύνει τη διάκριση του τρόπου δημιουργίας και ανάπτυξης των φαινομένων, καθώς και των διαφορών τους σε φυσικά μοντέλα γύψου ή κρυσταλλικών υλικών. Για παράδειγμα, παρατηρείται διακριτή διαφορά σε ό,τι αφορά τον τρόπο δημιουργίας των ΠΡ στον γύψο και σε ένα κρυσταλλικό υλικό όπως π.χ. το μάρμαρο, παρά το γεγονός ότι η γένεση των αντίστοιχων ρωγμών οφείλεται σε συγκέντρωση εφελκυστικών τάσεων. Η επιβεβαίωση των εν λόγω παρατηρήσεων θα γινόταν με αρκετή επιφύλαξη αν τα όποια συμπεράσματα πήγαζαν αποκλειστικά από δεδομένα ΑΕ. Συγκεκριμένα, στα δοκίμια γύψου η ΠΡ έχει πολλαπλούς θύλακες από τους οποίους εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα μικρορωγμάτωση η οποία συνενώνεται και έπειτα επεκτείνεται. Αντιθέτως, στα μαρμάρια δοκίμια, οι αντίστοιχες ρωγμές ξεκινάνε από την ελεύθερη επιφάνεια στο άνω και κάτω όριο των σχισμών και σταδιακά επεκτείνεται άνωθεν και κάτωθεν αντίστοιχα, με ενδοκρυσταλλικές και περικρυσταλλικές μικρορωγματώσεις. Μια τέτοιου είδους παρατήρηση, όπου η εξακρίβωσή της δύναται μόνο με τη χρήση μικροσκοπίου, έδωσε νέα δεδομένα για τη μικρομηχανική μελέτη των φυσικών μοντέλων.

Εντούτοις, χρήση τροπόμετρων ηλεκτρικής αντίστασης συναντάται σε δοκιμή διαξονικής θλίψης μοντέλου ρυολίθου της επαρχίας Σιτσουάν (Sichuan) της Κίνας με οπή πεταλοειδούς διατομής (Zhong et al. 2018). Η αξιολόγηση των τροπών που καταγράφηκαν κατά τη δοκιμή θλίψης, δείχνουν πως αστοχεί πρώτα το δάπεδο της οπής εφελκυστικά, και έπειτα ακολουθεί η στέψη. Παράλληλα, στις παρειές της οπής επικρατούν θλιπτικές τροπές. Επίσης, οι ερευνητές σημειώνουν πως οι προϋπάρχουσες φυσικές μικρορωγμές του πετρώματος επηρεάζουν σημαντικά την απορρόφηση ενέργειας παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια της διαξονικής δοκιμής θλίψης.

Τέλος, πρόσφατες μελέτες εξετάζουν τη συμπεριφορά πρισματικών δοκιμίων γύψου με οπές, σε δοκιμές κατά τις οποίες ασκούνταν είτε ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία στις βάσεις του δοκιμίου, είτε ανομοιόμορφα κατανεμημένα, ήτοι εφαρμογή της τάσης στο 57% της ελεύθερης επιφάνειας της μιας βάσης (Suknev 2011).

Μια εκ των σύγχρονων μεθόδων που εφαρμόστηκε στην παρούσα διατριβή, ανήκει στην κατηγορία των οπτικών μεθόδων παρακολούθησης και ονομάζεται Συσχέτιση Ψηφιακών Εικόνων (Digital Image Correlation, DIC). Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο λαμβάνονται φωτογραφίες στην περιοχή ενδιαφέροντος του φυσικού μοντέλου, εν προκειμένω γύρω από την οπή, καθ' όλη τη διάρκεια μιας δοκιμής, και στη συνέχεια με τη βοήθεια εξειδικευμένου κώδικα στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (H/Y) πραγματοποιείται ανάλυση των τροπών έχοντας ως σημείο αναφοράς την αρχική φωτογραφία που ελήφθη κατά την έναρξη της δοκιμής πριν την παραμόρφωση του δοκιμίου. Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται με σκοπό να αντικαταστήσει ή να περιορίσει-εξαλείψει τη χρήση τροπόμετρων ηλεκτρικής αντίστασης, η οποία εκτός του ότι επιβαρύνει τον προϋπολογισμό και περιορίζει την παρακολούθηση και ανάλυση σε συγκεκριμένες μικρές περιοχές του δοκιμίου, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον ανθρώπινο παράγοντα (π.χ. ορθή κόλλησή τους στο δοκίμιο) και μειώνει την αξιοπιστία της ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου τροπόμετρου (μήκος κ.λπ.) και του υπό μελέτη υλικού (μέγεθος κόκκων κ.λπ.). Επιπλέον, η DIC αξιοποιείται για την επιβεβαίωση των παρατηρήσεων που προκύπτουν από άλλες μεθόδους.

2.4 Αριθμητικές προσομοιώσεις

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών επέτρεψε το σχεδιασμό και χρήση αριθμητικών υπολογιστικών προγραμμάτων, όπου υπό την προϋπόθεση εισαγωγής των κατάλληλων παραμέτρων, είναι ικανά να επιλύουν, σε λειτουργικό χρόνο, πολύπλοκα προβλήματα που αφορούν την ευστάθεια κατασκευών, όπως για παράδειγμα υπογείων μεταλλείων και τεχνικών έργων όπως οδικές σήραγγες και μετρό. Οι διαθέσιμοι κώδικες θεωρούν το μέσο είτε συνεχές (FLAC3D, Abaqus, LS-DYNA, Sofistik, RS2 κ.ά.) είτε ασυνεχές (PFC, UDEC, 3DEC, YADE κ.ά.). Στην πρώτη κατηγορία το αριθμητικό μοντέλο διαιρείται από πλέγμα στοιχείων των οποίων η γεωμετρία εξαρτάται από τις δυνατότητες του λογισμικού, ενώ στη δεύτερη αποτελείται από διακριτά σωματίδια που συνδέονται στα σημεία επαφής τους. Αναφορικά με το PFC (Particle Flow Code), τα διακριτά σωματίδια συνδέονται και αλληλοεπιδρούν με μοντέλα δεσμών (Bonded Particle Model, BPM) που επιλέγονται από τον χρήστη (Potyondy & Cundall 2004), και είναι δίσκοι (διδιάστατη προσομοίωση, 2D) και σφαίρες (τριδιάστατη προσομοίωση, 3D) ή συσσωματώματα αυτών (Yoon et al. 2015). Εναλλακτικά μπορούν να

χρησιμοποιηθούν κόκκοι (Grained Particle Model, GPM), των οποίων οι έδρες περιβάλλουν τους προαναφερθέντες δίσκους προκειμένου να προσομοιωθεί ρεαλιστικότερα ένα κοκκώδες πέτρωμα (Potyondy 2010). Για την ορθή προσομοίωση των φυσικών μοντέλων, απαιτείται προεργασία προκειμένου να πραγματοποιηθεί βαθμονόμηση των υλικών στους κώδικες ώστε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων να είναι ρεαλιστικά. Τη διαδικασία της βαθμονόμησης καθώς και περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις προσομοιώσεις, δίνονται στο Κεφάλαιο 8.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν έρευνες με προσομοιώσεις διαφόρων εργαστηριακών δοκιμών και δοκιμών πεδίου. Για παράδειγμα, με τον κώδικα RFPA^{2D} πραγματοποιούνται προσομοιώσεις φυσικών πειραμάτων σε πρισματικά δοκίμια γρανίτη που περιέχουν προϋπάρχουσα οπή στο κέντρο τους και υποβάλλονται σε θλίψη (Liu et al. 2014, Liu et al. 2015). Με τον ίδιο κώδικα, μελετάται η ευστάθεια σήραγγας που κατασκευάζεται σε κατακερματισμένη βραχομάζα, και το κατά πόσο αυτή μεταβάλλεται για ασυνέχειες με διαφορετικές κλίσεις και για διαφορετικούς συντελεστές K (Jia & Tang 2008). Διαξονικές δοκιμές θλίψης σε πρισματικά δοκίμια ψαμμίτη Berea με προϋπάρχουσα κυλινδρική οπή στο κέντρο, προσομοιώνονται επίσης με το PFC2D (Fakhimi et al. 2002) και το RFPA^{2D} (Wang et al. 2012), και τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης συγκρίνονται με εκείνα των ΑΕ των φυσικών δοκιμών (Fakhimi et al. 2002). Μικρομηχανική μελέτη βάσει του κώδικα RFPA^{2D} (Wang et al. 2013) προσομοιώνει εργαστηριακές δοκιμές θλίψης σε φυσικά πρισματικά μοντέλα γύψου με μία ή περισσότερες κυλινδρικές οπές (Lajtai 1972, Lajtai & Lajtai 1975), ασκώντας είτε στατικά είτε δυναμικά φορτία.

Με τον κώδικα UDEC μελετάται για παράδειγμα η συνένωση ρωγμών που δημιουργούνται σε άρρηκτα δοκίμια κατά τις εργαστηριακές δοκιμές, καθώς επίσης και η υψηλή διάτμηση που συναντάται σε δοκίμια που υπόκεινται σε μεγάλες πλευρικές πιέσεις. Τα αριθμητικά μοντέλα αντιπροσωπεύουν γρανίτη LdB και διορίτη Äspö (Hoek & Martin 2014). Εκτός των εργαστηριακών δοκιμών, ο κώδικας UDEC χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του πειράματος APSE στο επίπεδο 450-m του εργαστηρίου Äspö Hard Rock της νότιας Σουηδίας (Lan et al. 2013). Το εν λόγω πείραμα αποσκοπεί στην παρακολούθηση της εξέλιξης της ρωγμάτωσης της βραχομάζας που βρίσκεται μεταξύ δύο κυλινδρικών φρεάτων, διαμέτρου 1.75

m έκαστο. Η φόρτιση του πετρώματος ανάμεσα στα δύο φρέατα ελέγχεται χρησιμοποιώντας την επί τόπου εντατική κατάσταση, τη γεωμετρία της εκσκαφής και την τοπική αύξηση της θερμοκρασίας του πετρώματος λόγω της γεωθερμικής βαθμίδας. Η εν λόγω φόρτιση προκαλεί περίπλοκες ασυνεχείς διαδικασίες που εμπλέκονται στην έναρξη της ρωγμάτωσης, στην εξέλιξή και την αλληλεπίδρασή της, με κοινό χαρακτηριστικό στα εν λόγω φαινόμενα την παρουσία κυρίως εφελκυστικών μηχανισμών. Τελικώς, το UDEC δίνει αποτελέσματα που αφορούν τις απαντώμενες θερμοκρασίες και μετακινήσεις, των οποίων οι τιμές συμφωνούν με τις προεκτιμηθείσες πριν την προσομοίωση.

Διδιάστατη αριθμητική προσομοίωση φυσικών πρισματικών μοντέλων γύψου (Wong 2008) με ζευγάρι τεχνητών σχισμών, πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το γραμμικό μοντέλο παράλληλων δεσμών (Linear Parallel Bond Model) του PFC2D (Zhang & Wong 2012, 2013). Με το ίδιο μοντέλο δεσμών, πραγματοποιούνται διδιάστατες αριθμητικές προσομοιώσεις δοκιμών μονοαξονικής θλίψης φυσικών πρισματικών δοκιμών γρανίτη Hwangdeung, τα οποία έχουν δύο (2) τεχνητές σχισμές, μια οριζόντια και μια κεκλιμένη (Lee & Jeon 2011). Σκοπός είναι η μελέτη των μηχανισμών θραύσης και η δυνατότητα του κώδικα PFC2D να αναπαράγει ρεαλιστικά τις εργαστηριακές παρατηρήσεις και αποτελέσματα. Προσομοίωση με το PFC2D και το Phase2 αποσκοπεί στη μελέτη της επίδρασης των πλευρικών πιέσεων σε σήραγγες (Diederichs et al. 2004). Με τον κώδικα PFC2D και την τεχνική των συσσωματωμάτων, προσομοιώνονται φυσικές εργαστηριακές δοκιμές σε γρανίτη Aue, κατά τις οποίες κυλινδρικά δοκίμια υποβάλλονται σε πλευρικά περιορισμένες ασύμμετρες δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Yoon et al. 2015). Κατά τις εργαστηριακές δοκιμές εφαρμόζεται η μέθοδος ΑΕ, της οποίας τα αποτελέσματα και συμπεράσματα συγκρίνονται με των αριθμητικών μοντέλων.

Εκτός από δοκιμές σε πετρώματα, το PFC2D χρησιμοποιείται και για την προσομοίωση επένδυσης από πολυμερή υλικά για την υποστήριξη σήραγγας, και της αλληλεπίδρασή της με το προσομοιωμένο πέτρωμα (Tannant & Wang 2004). Σκοπός της μελέτης είναι να εξετασθεί το κατά πόσο δύναται το συγκεκριμένο μέτρο υποστήριξης να συνεισφέρει στην αντιμετώπιση της εκτεταμένης ρωγμάτωσης που δημιουργείται στη στέψη σήραγγας λόγω του υψηλού εντατικού πεδίου. Πρόκειται για αριθμητικό υλικό που η απόδοση και η συμπεριφορά του παραπέμπει σε οπλισμένο με πλέγμα εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Τελικώς, διαπιστώνεται πως έχει

μικρή συνεισφορά λόγω της υψηλής παραμορφωσιμότητάς του. Συν τοις άλλοις, κατά τη διάρκεια της μελέτης πραγματοποιούνται αριθμητικές δοκιμές UCS και άμεσου εφελκυσμού (DTS) προκειμένου να προσδιοριστούν οι αντίστοιχες μηχανικές παράμετροι.

Στο πλαίσιο τριδιάστατων προσομοιώσεων με τον κώδικα PFC3D, δύναται να μελετηθεί η επίδραση του δικτύου των ασυνεχειών (Discrete Fracture Network, DFN) σε συνθετική βραχομάζα. Χαρακτηριστικά, προσομοιώνονται δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε στύλους πετρώματος με ασυνέχειες (Zhang et al. 2015) και σε κυλινδρικά δοκίμια πετρώματος (Tawadrous et al. 2009). Επίσης, προσομοιώνονται φυσικές δοκιμές σε δοκίμια που αποτελούνται από μείγμα γύψου και άμμου, στα οποία έχουν δημιουργηθεί τεχνητές ασυνέχειες με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της γεωμετρίας των ασυνεχειών στην αντοχή του υλικού σε μονοαξονική θλίψη (Kulatilake et al. 2001).

Το μείζον πρόβλημα που προκύπτει κατά την προσομοίωση με τον κώδικα PFC και γενικότερα λογισμικών που παραπέμπουν στην κατηγορία του συγκεκριμένου κώδικα (DEM), είναι το γεγονός ότι χρειάζονται πολλούς υπολογιστικούς πόρους προκειμένου να επιλύσουν δοκιμές πεδίου μεγάλης κλίμακας (π.χ. σήραγγας) σε λειτουργικό χρόνο, κάτι που κατά κανόνα σπάνια συναντάται σε εργαστηριακές υποδομές. Ως συμβιβαστική λύση αντιπροτείνεται η συνδυασμένη χρήση λογισμικών συνεχούς μέσου και DEM. Με την εν λόγω μέθοδο, το μεγαλύτερο τμήμα του μοντέλου προσομοιώνεται με πλέγμα από το λογισμικό συνεχούς μέσου, απαιτώντας σχετικά λίγους υπολογιστικούς πόρους συστήματος, ενώ οι περιοχές που χαρακτηρίζονται κρίσιμες για τη μελέτη ενδιαφέροντος αντιπροσωπεύονται από τα στοιχεία του κώδικα DEM. Τέτοιες υβριδικές μέθοδοι βρίσκουν εφαρμογή σε μεγάλης κλίμακας έργα/δοκιμές, όπως μεγάλες υπόγειες εκσκαφές. Οι Cai et al. (2007) αξιοποιώντας με διαφορετικό τρόπο το συνδυασμό των δύο μεθόδων, προσομοιώνουν στην εργασία τους τον υδροηλεκτρικό σταθμό ενέργειας Kannagawa της TEPCO (Tokyo Electric Power Company) στην Ιαπωνία (Cai et al. 2007). Εν προκειμένω, το περιβάλλον πέτρωμα προσομοιώνεται με ζώνες πεπερασμένων διαφορών με χρήση του κώδικα FLAC και τα σημεία στα οποία έχουν τοποθετηθεί τα γεώφωνα προσομοιώνονται με το PFC. Κάθε μικρορωγή στο PFC παραλληλίζεται με τις ΑΕ που καταγράφηκαν στην κατασκευή. Αρτιότερη αξιοποίηση της εφαρμογής της συνδυασμένης μεθόδου, θα αποτελούσε η

αντικατάσταση των ζωνών που αντιπροσωπεύουν τα τοιχώματα του σταθμού, από στοιχεία του PFC. Τέλος, εκτός από το συνδυασμό των δύο προγραμμάτων, υπάρχουν εν γένει υβριδικοί κώδικες, όπως ο Irazu FEMDEM, κατά τον οποίο η δομή αντιπροσωπεύεται από τριγωνικά στοιχεία τα οποία έχουν τη δυνατότητα να αποκολλώνται το ένα από το άλλο, και να δέχονται παραμορφώσεις, προσφέροντας ουσιαστικά στο μοντέλο μια ενδιάμεση συμπεριφορά μεταξύ FEM (Finite Element Method) και DEM (Lisjak & Grasselli 2014).

3 Ακουστική Εκπομπή του Πετρώματος

3.1 Ορισμός

Η ακουστική εκπομπή (ΑΕ) του πετρώματος αποτελεί ένα φυσικό φαινόμενο. Πρόκειται για τα μεταβατικά ελαστικά κύματα υψηλής συχνότητας που εκπέμπονται κατά την παραμόρφωσή του υπό συνθήκες φόρτισης, και οφείλεται σε διεργασίες στο εσωτερικό του, όπως π.χ. στον σχηματισμό μικρορωγμών που συνοδεύεται από ακαριαία απελευθέρωση ενέργειας, στη διάδοση εκτοπίσεων (dislocations) του κρυσταλλικού πλέγματος, στην ανάπτυξη διδυμιών (twinning), κ.ά. Τα κύματα αυτά διαδίδονται ως κύματα σώματος (διαμήκη P και εγκάρσια S), ενώ τελικώς ανιχνεύονται στην επιφάνεια του υλικού με διάφορες μορφές που μπορεί να περιλαμβάνουν συν τοις άλλοις και επιφανειακά (κύματα Rayleigh και Love), ανακλώμενα, περιθλώμενα ή κατευθυνόμενα (κύμα Lamb) κύματα.

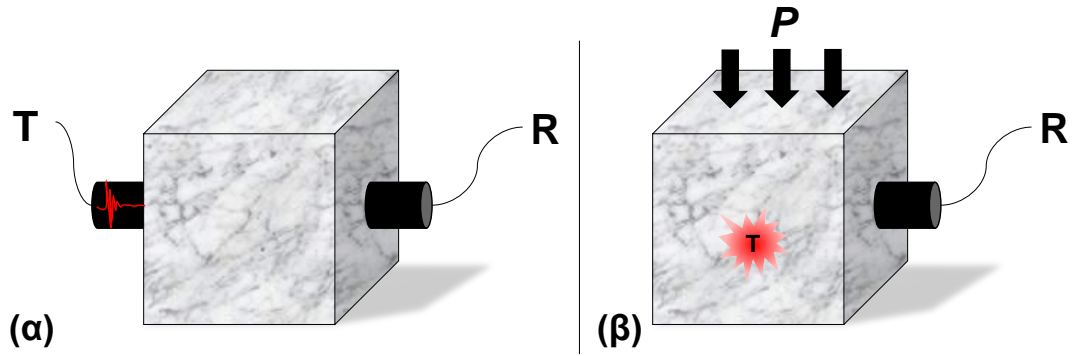
Η αξιοποίηση του συγκεκριμένου φαινομένου πραγματοποιείται κυρίως σε εργαστηριακές εφαρμογές, και παρομοιάζει με τη μικροσεισμική δραστηριότητα (microseismic activity, MS) που προκαλείται από τη θραύση του πετρώματος στο πεδίο ή από τις καταπτώσεις και κατακρημνίσεις σε ορυχεία και μεταλλεία. Τόσο κατά τη μελέτη της ΑΕ όσο και της MS ερευνάται η δημιουργία και εξέλιξη ελαστικών κυμάτων, παρόλο που αναφέρονται σε διαφορετικά μεγέθη πηγών και εύρους συχνοτήτων. Στην κλασική σεισμολογία οι διαστάσεις της πηγής των σημάτων είναι από μερικά μέτρα έως δεκάδες χιλιόμετρα, και οι συχνότητές τους μικρότερες από μερικές δεκάδες Hertz. Στο εργαστήριο, οι διαστάσεις των δοκιμών είναι συνήθως μικρότερες του 1 m περιορίζοντας το μέγιστο δυνατό μέγεθος της θραύσης. Οι συνηθέστερες πηγές σημάτων ΑΕ σε μια εργαστηριακή μελέτη βραχομηχανικής, εντοπίζονται σε σχισμές στην κλίμακα των κόκκων του πετρώματος και ως εκ τούτου οι περισσότερες έχουν διαστάσεις της τάξης του 1 mm. Ως αποτέλεσμα, οι εργαστηριακές μελέτες άγονται σε ένα εύρος συχνοτήτων από μερικά kHz έως 1-2 MHz (Lockner 1993)).

Το εύρος των συχνοτήτων των κυμάτων ΑΕ μπορεί είτε να καλύπτει είτε όχι εκείνο το οποίο δύναται ο άνθρωπος να αφουγκραστεί. Τα ηχητικά κύματα που βρίσκονται υψηλότερα από το φάσμα που ο άνθρωπος δύναται να αφουγκραστεί, ορίζονται ως κύματα υπερήχων. Αυστηρώς ορίζοντάς τα, τα κύματα ΑΕ δεν είναι ούτε υπέρηχοι ούτε ακουστικά. Ο θόρυβος που προκύπτει κατά τη θραύση (ηχητικά κύματα στον

αέρα) αποτελεί μεν φαινόμενο ΑΕ, όμως τα κύματα ΑΕ δεν είναι ηχητικά αλλά ελαστικά και διαδίδονται σε ένα στερεό. Η παρακολούθηση της μικροσεισμικής δραστηριότητας του πετρώματος βρίσκει εφαρμογή στο πεδίο, και κατά συνέπεια η ΑΕ δύναται να αξιοποιηθεί ως μέθοδος ανίχνευσης και διερεύνησης της διαδικασίας της ρωγμάτωσης του πετρώματος πριν τη μακροσκοπική αστοχία του (Ishida et al. 2017).

Θεωρείται τύποις μη-καταστροφική μέθοδος παρακολούθησης, προκαλώντας ενστάσεις για το αν και κατά πόσο εμπίπτει στην εν λόγω κατηγορία μεθόδων μιας και η ρωγμάτωση του υπό εξέταση υλικού αποτελεί προϋπόθεση για την εφαρμογή της. Σε αντίθεση με άλλες μη-καταστροφικές μεθόδους, οι ΑΕ εφαρμόζονται συνήθως κατά τη διάρκεια της φόρτισης του δοκιμίου/κατασκευής, ενώ οι περισσότερες από τις υπόλοιπες μη-καταστροφικές μεθόδους εφαρμόζονται είτε πριν είτε κατόπιν της φόρτισης.

Πιο ξεκάθαρος τρόπος κατηγοριοποίησης των μη-καταστροφικών τεχνικών, είναι η ταξινόμησή τους αναλόγως του τρόπου που εφαρμόζονται. Ενδεχομένως είναι ορθότερος ο χαρακτηρισμός της μεθόδου ΑΕ ως «παθητική» μη-καταστροφική μέθοδος, μιας και ανιχνεύει ρωγμές μόνο κατά τη διάρκεια της ανάπτυξής τους κατά την εξέλιξη της δοκιμής. Επιπλέον, δύναται να χρησιμοποιείται για την ανίχνευση της ρωγμάτωσης σε πρώιμο στάδιο και πριν αυτή προλάβει να επεκταθεί επιφέροντας την πλήρη αστοχία του δοκιμίου. Στο Σχήμα 3-1 δίνεται ο διαχωρισμός μεταξύ μιας ενεργητικής και μιας παθητικής μη-καταστροφικής μεθόδου. Στην ενεργητική μέθοδο, όπως π.χ. η μέθοδος μέτρησης της ταχύτητας των υπερήχων, η πηγή του ελαστικού κύματος είναι τεχνητή και προκύπτει από πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα σε επαφή με την εξωτερική επιφάνεια της εξεταζόμενης δομής (Σχήμα 3-1α), ενώ αντιθέτως στις παθητικές μεθόδους η πηγή βρίσκεται στο εσωτερικό της (Σχήμα 3-1β).



Σχήμα 3-1. Σύγκριση μεταξύ (α) ενεργητικών και (β) παθητικών μη-καταστροφικών μεθόδων παρακολούθησης (T: πηγή, R: δέκτης, P: φορτίο).

Η συστηματική παρακολούθηση του φαινομένου στο πεδίο (*in situ*) ξεκινάει περί το 1930. Η ανάγκη πρόβλεψης των επερχόμενων κατακρημνίσεων και των βίαιων εκτινάξεων, καθώς και της αστοχίας του πετρώματος σε ορυχεία και μεταλλεία των Η.Π.Α., οδήγησαν σε πρώιμες μελέτες AE (Obert 1941, Obert & Duvall 1942). Στα επόμενα χρόνια, παρακολουθείται η μικροσεισμική δραστηριότητα με στόχο τη διερεύνηση της ευστάθειας υπογείων ανοιγμάτων (Obert & Duvall 1957).

Η εργαστηριακή καταγραφή και παρακολούθηση της AE ξεκινάει το 1950 από τον Kaiser, ο οποίος υποβάλλοντας μεταλλικά δοκίμια σε εφελκυσμό κατέγραψε ακουστικά σήματα (Kaiser 1950). Επιπλέον, παρατήρησε ότι αν σε ένα δοκίμιο εφαρμοστεί μια τάση P η οποία στη συνέχεια ελαττώνεται, τότε κατά την εκ νέου άσκηση τάσης δεν παρατηρούνται σήματα AE έως ότου η νέα τάση να ισούται με P . Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «φαινόμενο Kaiser» και δεν παρατηρείται σε όλα τα υλικά που υποβάλλονται σε φόρτιση. Έπειτα, ο Schofield επανεξετάζοντας τη δουλειά του Kaiser, δημοσιεύει την εργασία του το 1961 όπου χρησιμοποιείται ο όρος «Ακουστικές Εκπομπές» (Schofield 1961). Ακολουθώντας την εργασία του Schofield, οι Green και Dunegan ανέπτυξαν τυποποιημένες διαδικασίες και συσκευές καταγραφής και παρακολούθησης των AE (Grosse & Ohtsu 2008).

Κατά τις δεκαετίες του '50 και του '60, εμβαθύνοντας στις βασικές αρχές των ακουστικών εκπομπών με απώτερο στόχο την απόκτηση γνώσης και τη μεταφορά της στο πεδίο (Scholz 1968a), αναπτύσσεται εξειδικευμένος εξοπλισμός και χαρακτηρίζεται η συμπεριφορά των AE για διάφορα πετρώματα (Knill et al. 1968). Επιπλέον, μελετάται η διαδικασία της ρωγμάτωσης του πετρώματος (Evans 1978, Lockner 1993) και η συσχέτιση της μικρορωγμάτωσης με την ανελαστική παραμόρφωση (Scholz 1968b).

3.2 Τεχνική καταγραφής - εξοπλισμός

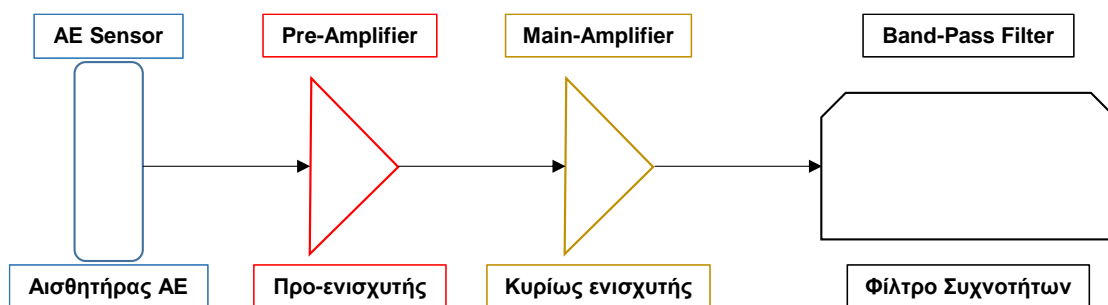
Κατά την επικρατούσα σήμερα επιστημονική αντίληψη, η μακροσκοπική θραύση ενός ψαθυρού υλικού προκαλείται από την ανάπτυξη, διάδοση και αλληλεπίδραση μικρορωγμών στο εσωτερικό του (π.χ. (Paterson & Wong 2005)) με αποτέλεσμα τον σχηματισμό μακροσκοπικών επιπέδων θραύσης. Όλες αυτές οι διεργασίες συνοδεύονται από την απελευθέρωση της αποθηκευμένης ενέργειας παραμόρφωσης, παράγοντας ελαστικά κύματα που διαδίδονται εντός του υλικού και ανιχνεύονται από έναν πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα ΑΕ προσαρμοσμένο στην υπό μελέτη δομή. Παρά το γεγονός ότι οι σύγχρονες συσκευές ΑΕ είναι πλήρως ψηφιακές, τα συστήματα ανίχνευσης είναι κατά βάσει αναλογικού τύπου.

Με την καταγραφή του μέγιστου πλάτους και της διάρκειας της κυματομορφής ενός σήματος ΑΕ λαμβάνεται μια χονδρική εκτίμηση της απελευθερούμενης ενέργειας στην πηγή του σήματος. Παρ' όλα αυτά, με χρήση ενός και μόνο αισθητήρα δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν εκ των υστέρων διορθώσεις όπως για παράδειγμα λόγω της απόσβεσης κατά τη διάδοση του κύματος, με αποτέλεσμα οι σχετικοί υπολογισμοί να μην είναι ακριβείς. Επιπλέον, το τελευταίο τμήμα της κυματομορφής του σήματος ΑΕ συχνά σχετίζεται με παραμένουσα δόνηση του αισθητήρα ΑΕ, ο οποίος μετατρέπει τις κυματικές ταλαντώσεις σε ηλεκτρικά σήματα. Κατά συνέπεια, οι κυματομορφές των σημάτων ΑΕ και οι παράμετροί τους δε συνδέονται πλήρως με τους μηχανισμούς δημιουργίας (generating mechanisms) των κυμάτων, αλλά κυρίως αντικατοπτρίζουν τις διάφορες επιδράσεις κατά την όδευση του κύματος στο υλικό καθώς και τα χαρακτηριστικά των συστημάτων ανίχνευσης. Με τη λήψη δεδομένων από περισσότερους τους ενός αισθητήρες ορισμένα από τα παραπάνω προβλήματα μπορεί να αντιμετωπίζονται, και ως εκ τούτου προτιμάται η χρήση περισσότερων αισθητήρων στις εφαρμογές ΑΕ.

Η ανίχνευση των σημάτων ΑΕ επηρεάζεται από την καταγραφή θορύβου που προέρχεται από τόσο από διάφορους παράγοντες που προκαλούν δονήσεις όσο και από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Ο ανιχνευόμενος θόρυβος περιορίζεται με τη χρήση ειδικών οργάνων και συστημάτων που φιλτράρουν τα καταγραφόμενα σήματα. Παραδείγματος χάρη, ορίζεται το εύρος της συχνότητας της εκάστοτε μέτρησης εκτός του εύρους συχνοτήτων που αντιστοιχεί στους ήχους και το θόρυβο του περιβάλλοντος. Τα χαρακτηριστικά των σημάτων ΑΕ διαφέρουν μεταξύ τους λόγω των ιδιαιτεροτήτων του μέσου στο οποίο αναπτύσσονται και των πηγών ΑΕ

από όπου προκύπτουν. Οι εν λόγω διαφορές εντοπίζονται και καταγράφονται χρησιμοποιώντας αισθητήρες ευρέως φάσματος συχνοτήτων (wideband). Έπειτα διαχωρίζεται το σήμα από τον θόρυβο, ο οποίος προκύπτει από φυσικές ή τεχνητές πηγές, από το εσωτερικό ή το εξωτερικό της υπό μελέτη δομής. Σε κάθε περίπτωση, ο αυτοματοποιημένος διαχωρισμός μεταξύ του θορύβου και των επιθυμητών σημάτων παραμένει συχνά δύσκολος.

Στο Σχήμα 3-2 δίνεται ένα τυπικό σύστημα ανίχνευσης ΑΕ. Τα ελαστικά κύματα ΑΕ ανιχνεύονται από έναν πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα ΑΕ, ο οποίος μετατρέπει τις δυναμικές κινήσεις στην επιφάνεια του υλικού σε ηλεκτρικά σήματα. Στη συνέχεια τα σήματα ΑΕ ενισχύονται από έναν προενισχυτή και έπειτα από έναν κύριο ενισχυτή. Όπως αναφέρθηκε, για την εξάλειψη του θορύβου εφαρμόζεται φίλτρο συχνοτήτων για τον διαχωρισμό των καταγραφόμενων σημάτων, όπου σε πετρώματα και σε σκυρόδεμα ορίζεται συνήθως από μερικά kHz έως 1-2 MHz. Το επιλέξιμο εύρος συχνοτήτων καθορίζεται και από τα χαρακτηριστικά των αισθητήρων ΑΕ και του υπό μελέτη υλικού.



Σχήμα 3-2. Απλοποιημένο διάγραμμα ροής συστήματος ανίχνευσης ακουστικών σημάτων.

3.3 Ψαθυρή θραύση και ΑΕ

Έχει παρατηρηθεί ότι η μικρορωγμάτωση ενός πετρώματος που υποβάλλεται σε θλιπτικά φορτία αποτελείται κυρίως από εφελκυστικές μικρορωγμές που επεκτείνονται παράλληλα ως προς τον άξονα διεύθυνσης της κύριας θλιπτικής τάσης (Peng & Johnson 1972, Tarronnier & Brace 1976, Kranz 1983, Moore & Lockner 1995). Η ανάπτυξη συστήματος μακροσκοπικών επιφανειών ρωγμάτωσης σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών και πιέσεων και για μια πληθώρα ειδών πετρωμάτων περιλαμβάνει την ανάπτυξη και αλληλεπίδραση μικρορωγματώσεων. Η ακουστική εκπομπή που παράγεται από τη γρήγορη ανάπτυξη μικρορωγματώσεων, αποτελεί φαινόμενο που σχετίζεται με την ψαθυρή θραύση,

πληροφορώντας για την πορεία της αστοχίας του πετρώματος. Η αύξηση του ρυθμού παραμόρφωσης και του ρυθμού των εκλυόμενων σημάτων ΑΕ αποτελούν δείκτες πρόβλεψης της επερχόμενης αστοχίας. Ως δείκτης επερχόμενης αστοχίας του πετρώματος στο εργαστήριο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η διακύμανση της κλίσης της γραφικής παράστασης πλάτους-συχνοτήτων γεγονότων ΑΕ (*b*-value).

Οι εργαστηριακές μελέτες ΑΕ μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- 1) απλή καταμέτρηση του συνόλου των σημάτων ΑΕ κατά τη διάρκεια της φόρτισης και μέχρι την κατάρρευση του δοκιμίου, από όπου προκύπτει συσχέτιση μεταξύ του ρυθμού έκλυσης των σημάτων ΑΕ και του ρυθμού της ανελαστικής παραμόρφωσης.
- 2) Χωροχρονικός προσδιορισμός των υποκέντρων των πηγών των σημάτων ΑΕ. Η συγκεκριμένη ανάλυση απαιτεί τον ακριβή προσδιορισμό της χρονικής άφιξης των σημάτων ΑΕ που καταγράφονται από ένα σύνολο αισθητήρων ΑΕ. Η ανάλυση των χωρικών και χρονικών διακυμάνσεων των υποκέντρων των σημάτων ΑΕ βελτιώνει την κατανόηση της ανάπτυξης των μικρορωγματώσεων και της τοπικά συνδυασμένης δράσης τους που οδηγεί στην αστοχία του πετρώματος. Η δημιουργία των ρωγμών και η ανάπτυξή τους μπορεί να μελετηθεί σε οιονεί-στατικές συνθήκες φόρτισης μέχρι την αστοχία, ελέγχοντας την εφαρμοζόμενη τάση και διατηρώντας σταθερό τον ρυθμό λήψης σημάτων ΑΕ.
- 3) Ανάλυση όλων των δεδομένων της κυματομορφής ΑΕ όπως εκείνη λαμβάνεται από κάθε αισθητήρα.

Με αφορμή τις ομοιότητες μεταξύ των σεισμών και των εργαστηριακών σημάτων ΑΕ, ο κύριος στόχος των εργαστηριακών μελετών είναι η έρευνα και μελέτη της διαδικασίας ρωγμάτωσης με πρόθεση να αναγνωριστούν καταστάσεις που προηγούνται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προπομποί, ήτοι εργαλεία πρόβλεψης σεισμών. Παρά την πρόοδο που έχει σημειωθεί στην ανάλυση των σημάτων ΑΕ όπου εφαρμόζονται όλο και πιο εξεζητημένες τεχνικές, ο παραπάνω στόχος δεν έχει επιτευχθεί (Scholz 1968c), με την πλειονότητα των συστηματικών ερευνών ΑΕ να αφορούν αδιατάρακτα εργαστηριακά δοκίμια. Η εν λόγω προσέγγιση δικαιολογείται από το γεγονός ότι: 1) η μελέτη της επέκτασης και αλληλεπίδρασης των φυσικών ρωγμών του πετρώματος δύναται να μελετηθεί εργαστηριακά, 2) τα στατιστικά στοιχεία που προκύπτουν κατά τη διάρκεια σεισμών και κατακρημνίσεων είναι παρόμοια ποικιλοτρόπως με εκείνα των ΑΕ στο εργαστήριο, και 3) υπάρχει συσχέτιση μεταξύ της εσωτερικής γωνίας τριβής του

άρρηκτου πετρώματος και της τριβής ολίσθησης σε προϋπάρχουσες ασυνέχειες (Lockner & Byerlee 1993).

3.4 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της μεθόδου ΑΕ

Οι ΑΕ εξαρτώνται κυρίως από τις μόνιμες (ανελαστικές) παραμορφώσεις του υλικού. Για τον λόγο αυτό, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να ανιχνεύσει μόνο τον σχηματισμό νέων ρωγμών και την εξέλιξη των προϋπαρχόντων ρωγμών ή των διεργασιών που έχουν να κάνουν με τριβή ή ολίσθηση. Τα φαινόμενα αυτά συνήθως σχετίζονται είτε με εσωτερικά μηχανικά ή θερμικά φορτία, είτε με πιέσεις που εφαρμόζονται εξωτερικά στο σώμα της υπό μελέτη δομής. Οι δοκιμές ΑΕ μπορούν να διεξαχθούν υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας ή και κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Ως εκ τούτου, σε δοκιμές κατασκευών υπό πραγματικές συνθήκες φόρτισης, είναι εξαιρετικά χρήσιμες και ικανές να καταγράψουν μια ενδεχόμενη διαδικασία αστοχίας.

Πλεονέκτημα της συγκεκριμένης τεχνικής συγκριτικά με άλλες μη-καταστροφικές μεθόδους, αποτελεί το γεγονός ότι η διαδικασία της θραύσης των υλικών δύναται να παρατηρηθεί καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας φόρτισης του δοκιμίου. Αρκεί η τοποθέτηση μερικών αισθητήρων για την παρακολούθηση της δραστηριότητας των σημάτων ΑΕ στο δοκίμιο. Τα σήματα προκειμένου να καταγραφούν πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια που τίθενται πριν την έναρξη της δοκιμής στο καταγραφικό σύστημα με σκοπό τον περιορισμό του θορύβου και τη λήψη σημάτων που προέρχονται αποκλειστικά από τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην υπό μελέτη δομή. Οι αισθητήρες ΑΕ τοποθετούνται σταθερά πάνω στις ελεύθερες επιφάνειες του δοκιμίου καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής και δε χρειάζεται να μετακινούνται σε όλη την έκταση του δοκιμίου προκειμένου να ανιχνεύσουν τη δραστηριότητα ΑΕ, αυτοματοποιώντας τη όλη διαδικασία. Επιπλέον, δεν είναι απαραίτητη η πρόσβαση σε όλες τις πλευρές του δοκιμίου.

Μειονέκτημα της δοκιμής ΑΕ αποτελεί η αδυναμία της να επαναλαμβάνει τα ίδια αποτελέσματα σε παρόμοια δοκίμια ενός υλικού που υποβάλλονται σε όμοιες συνθήκες φόρτισης, λόγω της φύσης των πηγών των σημάτων, π.χ. τυχαίος σχηματισμός ρωγμής. Επιπλέον, σε περιπτώσεις αποκόλλησης ή μη σωστής εφαρμογής του αισθητήρα ΑΕ στην επιφάνεια του δοκιμίου/κατασκευής, σταματάει η καταγραφή σημάτων ΑΕ και συνάμα η παρακολούθησή της. Τέτοιου είδους

προβλήματα προκύπτουν είτε ως αποτέλεσμα κακής τοποθέτησης των αισθητήρων, είτε λόγω δημιουργίας ρωγμάτων η οποία διέρχεται κάτω από την επιφάνεια του αισθητήρα δημιουργώντας ένα στρώμα αέρα στη διεπιφάνεια αισθητήρα-δοκιμίου/κατασκευής.

Επίσης, μετρήσεις ΑΕ σε διαφορετικά δοκίμια από υλικό με διάσπαρτη ανομοιογένεια σε μια συγκεκριμένη διάσταση, όπως για παράδειγμα ιζηματογενή πετρώματα, δε δίνουν παρόμοια αποτελέσματα ΑΕ αν το μήκος κύματος των σημάτων έχει παρόμοιο μέγεθος με τις διαστάσεις των στρώσεων. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που είναι χρήσιμη η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δοκιμών ΑΕ με άλλες μεθόδους, παραδείγματος χάρη με τη χρήση οπτικών μεθόδων παρακολούθησης της επιφάνειας, ή μεθόδων υπερήχων, X-Ray κ.ο.κ.

Η ψαθυρή θραύση συνήθως συνοδεύεται από ξαφνική απώλεια αντοχής, η οποία σε περίπτωση εύκαμπτου πλαισίου φόρτισης επιφέρει ασταθή και βίαιη κατάρρευση του δοκιμίου. Ακόμα και σε δύσκαμπτα πλαίσια φόρτισης, πολλά ψαθυρά κρυσταλλικά πετρώματα αστοχούν με την απότομη ανάπτυξη και διάδοση μακροσκοπικών ρωγμών. Η έναρξη και διάδοση της τελικής μακροσκοπικής ρωγμάτωσης περιλαμβάνει υψηλούς ρυθμούς έκλυσης ΑΕ που δυσχεραίνουν τη διαχωρισμένη καταγραφή των σημάτων. Το εν λόγω πρόβλημα δύναται να επιλυθεί είτε με ρύθμιση των παραμέτρων του καταγραφικού συστήματος, είτε με τη χρήση συστήματος ελέγχου όπου η αξονική τάση προσαρμόζεται συνεχώς προκειμένου να διατηρείται σταθερός ο ρυθμός λήψης των σημάτων ΑΕ (Lockner et al. 1991, 1992). Με την τεχνική αυτή, το σύνολο της διαδικασίας της δημιουργίας και ανάπτυξης των ρωγμών δύναται να παρατηρηθεί μέσω του χωροχρονικού εντοπισμού των υποκέντρων των πηγών ΑΕ που τους αντιστοιχούν.

3.5 Χωρικός προσδιορισμός των σημάτων ΑΕ

Ο χωρικός προσδιορισμός των υποκέντρων των πηγών ΑΕ αποτελεί ίσως τη σημαντικότερη ανάλυση σημάτων ΑΕ.

Αξιοποιώντας περισσότερους του ενός αισθητήρες ΑΕ σε μια δοκιμή, δύναται να πραγματοποιηθεί χωρικός προσδιορισμός των υποκέντρων των πηγών των σημάτων ΑΕ. Απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις (4) αισθητήρες για τριδιάστατο (3D) χωρικό προσδιορισμό, και κατ' ελάχιστον έξι (6) για ανάλυση του τανυστή της σεισμικής ροπής (Moment Tensor - MT) για τον προσδιορισμό της φύσης των

ρωγμών ως εφελκυστικές, διατμητικές ή της ενδιάμεσης κατάστασης που χαρακτηρίζεται ως μεικτού τύπου. Η θέση των αισθητήρων στον χώρο διαφέρει ανάλογα με τη δοκιμή, το υπό μελέτη φαινόμενο και τη γεωμετρία του δοκιμίου. Ο προσδιορισμός των υποκέντρων στον χώρο προκύπτει από τους σχετικούς χρόνους άφιξης των ακουστικών κυμάτων στους αισθητήρες. Με τη βοήθεια του κριτηρίου Akaike (Akaike Information Criterion - AIC) (Akaike 1974) πραγματοποιείται ακριβέστερος προσδιορισμός του χρόνου άφιξης των σημάτων ΑΕ στους αισθητήρες, βελτιώνοντας την ακρίβεια των αναλύσεων.

Εκτός από τα φαινόμενα που παρατηρούνται λόγω του μεγέθους του δοκιμίου, των διαστάσεων της πηγής και των συχνοτήτων των κυμάτων, ο χωρικός προσδιορισμός των πηγών ΑΕ γίνεται με ανάλογο, της σεισμολογίας, τρόπο. Σε πολλές εφαρμογές, τα δοκίμια φορτίζονται έως ότου αστοχήσουν, με τη μικρορωγμάτωση που τα συνοδεύει να αναπτύσσεται ανισότροπα έχοντας ως συνέπεια τη δημιουργία ανισότροπου πεδίου ταχυτήτων διάδοσης κυμάτων. Κατά την άσκηση φορτίων σε ένα δοκίμιο, είναι σύνηθες να εμφανίζεται ανισοτροπία στην ταχύτητα των Ρ κυμάτων από 30% έως 50% (Yanagidani et al. 1985), καθώς και ελάττωσή της έως και 30% (Lockner et al. 1977) που οφείλεται στη διασταλτικότητα (dilatancy) και στην επέκτασης της ρωγμάτωσης. Λόγω των πιθανών σφαλμάτων που προκύπτουν κατά την πειραματική διαδικασία και κατά την επεξεργασία των δεδομένων για τον 3D χωρικό προσδιορισμό, είναι επιθυμητό να χρησιμοποιούνται περισσότεροι χρόνοι άφιξης, δηλαδή περισσότεροι των τεσσάρων (4) αισθητήρων.

Μια τυπική εργαστηριακή διάταξη για την εφαρμογή του χωρικού προσδιορισμού των πηγών ΑΕ περιλαμβάνει έξι (6) ή παραπάνω αισθητήρες, συνδεδεμένους σε προενισχυτές που βρίσκονται κοντά στο δοκίμιο ούτως ώστε να περιορίζονται τα επίπεδα θορύβου. Με το στήσιμο της διάταξης και πριν την έναρξη της δοκιμής, ορίζονται φίλτρα και παράμετροι που επιτρέπουν την καταγραφή μόνο εκείνων των σημάτων που διαθέτουν τα επιθυμητά χαρακτηριστικά. Σημειώνεται ότι οι αισθητήρες ΑΕ καταγράφουν οποιοδήποτε σήμα προσπίπτει κάθετα στην επιφάνειά τους (διαμήκη Ρ, εγκάρσια S, επιφανειακά κ.ο.κ.) με αποτέλεσμα να καταγράφονται κύματα διαφορετικών ταχυτήτων (Mistras Group Hellas 2015).

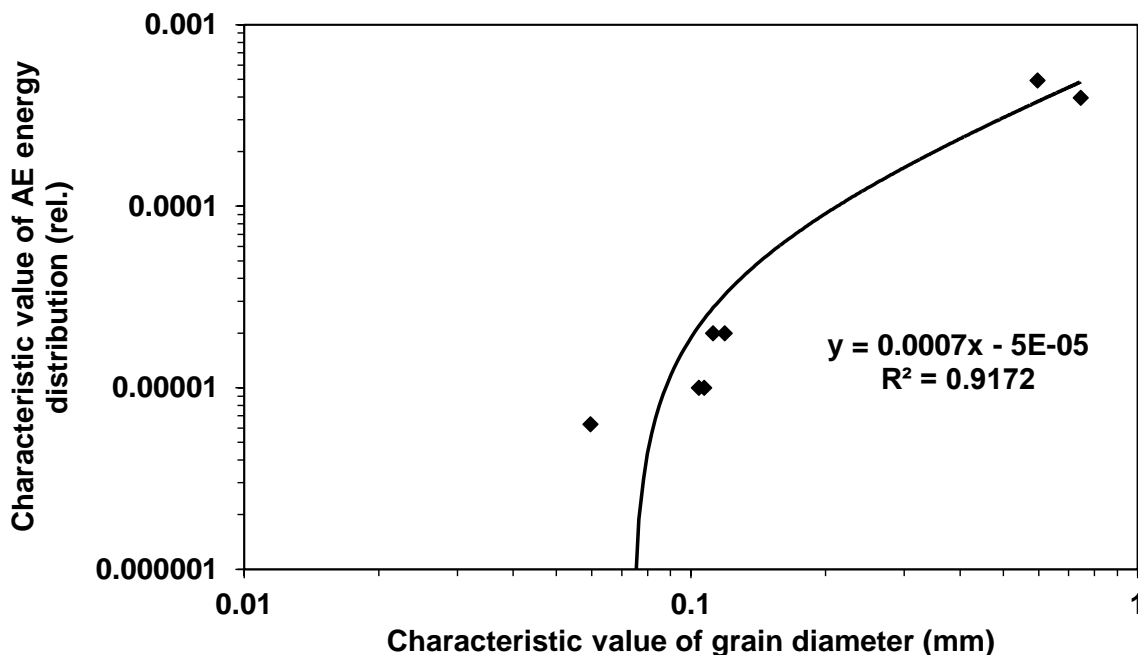
3.6 Παραδείγματα εργαστηριακών μελετών

Η λήψη και η επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων κατά τις δοκιμές ΑΕ, κατέστη δυνατή με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Εντούτοις, η επιβεβαίωση ή μη των αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων εξακολουθεί να πραγματοποιείται με τη χρήση επιπλέον μεθόδων, όπως με την παρακολούθηση των παραμορφώσεων με οπτικές μεθόδους ή με τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges), με την οπτική ή ηλεκτρονική μικροσκοπία κ.λπ.

Παραδείγματος χάρη, οι Přikryl et al. (2003) εξετάζουν αρχικώς δοκίμια γρανίτη στο εργαστήριο χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ΑΕ, και έπειτα πραγματοποιούν πετρογραφικές αναλύσεις λεπτών τομών προκειμένου να εξεταστούν εις βάθος τα δοκίμια σε επίπεδο μικροδομής. Με την παραπάνω μεθοδολογία συμπεραίνεται ότι η κατανομή της ενέργειας και της συχνότητας των παρατηρούμενων ΑΕ, αντικατοπτρίζει τη μικροδομή των δοκιμίων. Η χαρακτηριστική τιμή της ενέργειας των παρατηρούμενων ΑΕ αντανakλά τις συνηθέστερες διαστάσεις κόκκου του εξεταζόμενου δοκιμίου (Přikryl et al. 2003). Εν ολίγοις, αφενός η ενέργεια των ΑΕ εξαρτάται από την κατανομή του μεγέθους των κόκκων, αφετέρου ο ρυθμός εκπομπής και η αθροιστική ενέργεια των ΑΕ εξαρτώνται από την κατάσταση ανισοτροπίας της μικροδομής του πετρώματος, ενώ παράλληλα οι ΑΕ εξαρτώνται από το τελικό μοτίβο της ψαθυρής θραύσης. Η ενέργεια των ΑΕ εξαρτάται σημαντικά από το μέγεθος της διεπιφάνειας μεταξύ των κόκκων, από όπου και απελευθερώνεται, και είναι ανάλογη του τετραγώνου της μετατόπισης (Lokajíček & Vlk 1994).

Σε δοκίμια που υποβάλλονται σε ανεμπόδιση μονοαξονική θλίψη (Unconfined Compressive Strength, UCS), παρατηρούνται κυρίως ρωγματώσεις αξονικά κατά τη διεύθυνση της φόρτισης (Gramberg 1989). Μέσω της ανάλυσης των μικρορωγμών προκύπτει ότι η αξονική ρωγμάτωση (splitting) των πετρωμάτων προκαλεί πιο απότομη αστοχία από ό,τι η διατμητική ρωγμάτωση (Li 1993, Li & Nordlund 1993). Παρ' όλα αυτά, κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης του δοκιμίου δύναται να αναπτυχθεί δευτερεύουσα διάτμηση με τη μορφή συζυγών διαγωνίως αναπτυσσόμενων ζωνών διάτμησης ή σειράς κλιμακοειδών ρωγμών (Olson & Pollard 1991). Αποδεχόμενοι ότι το πέτρωμα παραμορφώνεται κυρίως λόγω εφελκυστικής μικρορωγμάτωσης, αξονικής ρωγμάτωσης (cleavage) και παρόμοιων μηχανισμών, τότε μια αύξηση στο μέσο μέγεθος κόκκου, οδηγεί σε αύξηση της

επιφάνειας της μικρορωγμής που με τη σειρά της αυξάνει τη χαρακτηριστική ενέργεια (Σχήμα 3-3) (Přikryl et al. 2003). Η εξέταση δύο (2) διαφορετικής κοκκομετρίας γρανοδιοριστών, δείχνει πως υπάρχει επίδραση της κατανομής του μεγέθους των κόκκων στη χαρακτηριστική τιμή της κατανομής ενέργειας AE (Kusunose et al. 1991).



Σχήμα 3-3. Συσχέτιση μεταξύ της χαρακτηριστικής τιμής μεγέθους των κόκκων και της χαρακτηριστικής τιμής της κατανομής ενέργειας AE (Přikryl & Lokajíček 1999).

Βάσει της αλληλοσυσχέτισης μεταξύ του μεγέθους των κόκκων και της κατανομής της ενέργειας των AE, μπορεί κανείς να υποθέσει ότι οι πηγές της ακουστικής εκπομπής (δηλαδή τα σημεία όπου σημειώνονται ρωγμές στο δοκίμιο) βρίσκονται είτε στα όρια των κόκκων (περικρυσταλλική ρωγμάτωση), είτε σε ρωγμές που σχηματίζονται στο εσωτερικό των κόκκων θραύοντάς τους (ενδοκρυσταλλική ρωγμάτωση).

Εργαστηριακές δοκιμές ανεμπόδιστης μονοαξονικής θλίψης σε πρισματικά δοκίμια μαρμάρου Διονύσου, με παράλληλη εφαρμογή της τεχνικής AE (Nomikos et al. 2012), δείχνουν ότι η έναρξη της δραστηριότητας AE παρατηρείται χαμηλότερα του 30% του μέγιστου φορτίου. Το επίπεδο τάσης μπορεί να συσχετιστεί με τις τιμές ASL (Average Signal Level) των καταγεγραμμένων σημάτων AE. Μία απότομη αύξηση των διαγραμμάτων ASL-φορτίου παρατηρείται μετά το 97% του ανηγμένου φορτίου. Επίσης, στην ίδια τάση παρατηρείται ένα σημαντικό ποσοστό της δραστηριότητας των AE και μια φαινομενική πρόδρομη πτώση της τιμής b (b -value).

Με την εφαρμογή εξωτερικών πιέσεων ή με μεταβολές των περιβαλλοντικών συνθηκών, τόσο τα πετρώματα όσο και το σκυρόδεμα αρχίζουν να φθείρονται με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η αντοχή και η αποδοτικότητα των κατασκευών. Τα φαινόμενα αυτά συνοδεύονται από έκλυση σημάτων ΑΕ, οπότε αξιοποιείται η μέθοδος ΑΕ για τη μελέτη της διαδικασίας της ρωγμάτωσης και της έναρξης της επερχόμενης αστοχίας των υλικών (Dai & Labuz 1997). Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την πυκνότητα των υλικών και χρησιμοποιώντας μια εξίσωση πιθανοτήτων για την πορεία των σημάτων ΑΕ, οι Dai & Labuz παρατηρούν ότι τα πιο πορώδη ή κατακεραματισμένα υλικά δίνουν υψηλότερους ρυθμούς ΑΕ σε κάθε επίπεδο ασκούμενης τάσης. Ως εκ τούτου, καταλήγουν πως η μέθοδος ΑΕ δύναται να εφαρμοστεί για τη διάγνωση του επιπέδου ρωγμάτωσης ενός φαθουρού υλικού, καθώς και να φανεί χρήσιμη για τη σωστή επιλογή μεταξύ των διαθέσιμων υλικών που προορίζονται για χρήση σε μια κατασκευή. Τέλος, τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο μέσος όρος των τιμών RMS (Root Mean Square) ενός συνόλου σημάτων ΑΕ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο πρόβλεψης της έναρξης της αστοχίας σε πραγματικό χρόνο.

Βάσει της μεθόδου ΑΕ σε γρανίτη από το ινστιτούτο KURT (Korea atomic energy research institute's Underground Research Tunnel) στη Νότια Κορέα (Kim et al. 2015) μελετάται η ανίχνευση της έναρξης της μικρο-ρωγμάτωσης και του επιπέδου της τάσης όπου πραγματοποιείται μακροσκοπική θραύση των δοκιμών γρανίτη. Από την εν λόγω μελέτη, συνάγεται με διάφορες μεθόδους συμπεριλαμβανομένων της ογκομετρικής τροπής των ρωγμών, της τιμής b (b -value), της τεχνικής του τανυστή της σεισμικής ροπής (Moment Tensor - MT) και της ενέργειας των σημάτων ΑΕ, η εξέλιξη της μακροσκοπικής θραύσης ποσοτικά. Από την καταγραφή των τιμών των τάσεων-τροπών και της δραστηριότητας ΑΕ κατά τη διάρκεια των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, σημειώνεται η έναρξη της ρωγμάτωσης σε επίπεδο τάσης $0.42 - 0.53\sigma_{ci}$, και η έναρξη της μακροσκοπικής ρωγμάτωσης σε $0.62 - 0.84\sigma_{ci}$. Η μέγιστη διακύμανση μεταξύ της ογκομετρικής παραμόρφωσης των ρωγμών και της μεθόδου ΑΕ είναι 16%, η οποία σημειώνεται σε επίπεδο τάσης που ισοδυναμεί με $0.84\sigma_{ci}$. Τέλος, κατά τους ερευνητές συμπεραίνεται ότι η εκτίμηση της θραύσης αξιοποιώντας την προσέγγιση της ενέργειας ΑΕ είναι προτιμητέα, έχοντας τόσο καλύτερες προοπτικές πρακτικής εφαρμογής πεδίου, όσο και αξιοπιστίας των τιμών που λαμβάνονται κατά τη θραύση.

Παρόμοια προσέγγιση προτιμάται και από άλλους ερευνητές (Ganne et al. 2007) οι οποίοι μελετάνε την ενέργεια των ΑΕ σε συνδυασμό με πετρογραφικές αναλύσεις σε μικρού πάχους πρισματικά δοκίμια ασβεστόλιθου Βελγίου. Τα εν λόγω δοκίμια περιέχουν στο κέντρο κυλινδρική οπή και έπειτα κόβονται συμμετρικά ως προς το κέντρο βάρους τους, παράλληλα προς τις βάσεις τους. Αντικείμενο μελέτης με τις παραπάνω μεθόδους, είναι η σύγκριση των αποτελεσμάτων και των δεδομένων που προκύπτουν κατά την πειραματική διαδικασία, όταν στην πρώτη περίπτωση δημιουργούνται ρωγμές από καθαρά θλιπτικά φορτία και αντιστοίχως στη δεύτερη περίπτωση από καθαρά εφελκυστικά φορτία. Τα αποτελέσματα του επιπέδου τάσης όπου παρατηρείται το κάθε στάδιο ρωγμάτωσης (Kim et al. 2015), επιβεβαιώνουν τα προαναφερθέντα αποτελέσματα στη Νότια Κορέα.

Σημαντικό εργαλείο για τη βέλτιστη ανάλυση των δεδομένων που προκύπτουν από δοκιμές ΑΕ, είναι η απλοποιημένη ανάλυση του τανυστή της σεισμικής ροπής (Simplified Moment Tensor Analysis - MT) που βασίζεται στο πλάτος των σημάτων ΑΕ (Ohtsu 1989, 1991). Η συγκεκριμένη ανάλυση επιτρέπει την κατηγοριοποίηση των ρωγμών που δημιουργούνται στο δοκίμιο, ξεχωρίζοντας εκείνες που δημιουργήθηκαν λόγω εφελκυσμού από εκείνες που δημιουργήθηκαν λόγω διάτμησης. Εντούτοις, υπάρχει ένα εύρος ρωγμών που εμφανίζεται ως ενδιάμεση κατάσταση και χαρακτηρίζεται ως μεικτού τύπου (mixed-mode) ρωγμάτωση. Η χρήση της συγκεκριμένης ανάλυσης βελτιώνει ποιοτικά τις μελέτες ΑΕ που εξετάζουν χωρικά τη δημιουργία ρωγμών σε δοκίμια, δίνοντας ευκρινέστερη εικόνα ως προς τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Παραδείγματος χάρη, τριαξονικές δοκιμές σε συνδυασμό με τη μέθοδο MT σε δοκίμια γρανίτη Hwangdeung και μάρμαρο Yeosan (Chang & Lee 2004), διαπιστώνουν πως κατά τη δημιουργία της ρωγμάτωσης δημιουργούνται κυρίως εφελκυστικές μικρορωγμές, οι οποίες στη συνέχεια συνενώνονται και επεκτείνονται χάρη στη δημιουργία διατμητικών ή μεικτού τύπου ρωγμών. Σημαντική παρατήρηση επίσης, αποτελεί το γεγονός ότι περί το 60% των ρωγμών που δημιουργήθηκαν κατά τις τριαξονικές δοκιμές, ανεξαρτήτως επιπέδου πλευρικής πίεσης, χαρακτηρίζονται βάσει της τεχνικής MT ως διατμητικές ρωγμές. Σε τριαξονικές δοκιμές θλίψης κυλινδρικών δοκιμίων γρανίτη Aue (Graham et al. 2010), συγκρίνεται η απόδοση ως προς τον χαρακτηρισμό των ρωγμών, της μεθόδου MT και της τεχνικής που αξιοποιεί την πολικότητα των κυματομορφών. Τα αποτελέσματα των δύο τεχνικών δίνουν

παρόμοια εικόνα των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα μέχρι την αστοχία του δοκιμίου, όπου αρχικά σημειώνονται κυρίως εφελκυστικές ρωγμές οι οποίες αντικαθίστανται λίγο πριν την αστοχία του δοκιμίου από διατμητικές. Οι ερευνητές τονίζουν ότι η εν λόγω συμπεριφορά αναμένεται μόνο σε άρρηκτα πετρώματα μικρού πορώδους.

Βεβαίως, η μέθοδος MT βρίσκει εφαρμογή και στον χαρακτηρισμό των πηγών των σημάτων ΑΕ που προσδιορίζονται χωρικά σε πιο ιδιαίτερες γεωμετρικές δοκιμίων, όπως λ.χ. πρισματικά δοκίμια με οπή ή οπές συμμετρικά ως προς το κέντρο τους, διαμπερείς ή μέχρι το μέσο της μίας διάστασης, συνήθως σχήματος κυλινδρικού (Zhao et al. 2014, Liu et al. 2015), πεταλοειδούς (Liu et al. 2015) ή πρισματικού (Xu et al. 2012, Liu et al. 2014). Τα εν λόγω δοκίμια υποβάλλονται σε δοκιμές μονοαξονικής και διαξονικής θλίψης, προκειμένου να μελετηθούν εργαστηριακά οι μηχανισμοί αστοχίας γύρω από υπόγεια ανοίγματα. Στη διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται εργαστηριακές δοκιμές σε φυσικά μοντέλα υπογείων δομών, συνδυασμένες με μεθόδους ΑΕ για τον χωροχρονικό προσδιορισμό των μικρορωγμών και την ταυτοποίησή τους μέσω ΜΤ. Εντούτοις, λόγω της ιδιαιτερότητας που παρουσιάζουν τα συγκεκριμένα δοκίμια με την παρουσία προϋπαρχόντων ανοιγμάτων, τα κύματα αλλοιώνονται. Προκειμένου να λυθεί το εν λόγω πρόβλημα στις δοκιμές της παρούσας διδακτορική διατριβής, οι αισθητήρες ΑΕ τοποθετούνται στο μισό του δοκιμίου, περιορίζοντας τις αλλοιώσεις που επιφέρουν τα ανοίγματα στην ανάπτυξη και διάδοση των ελαστικών κυμάτων, και επίσης μεριμνώντας ώστε να μην εκτεθούν σε περιοχές που αναμένεται η εμφάνιση των υπό μελέτη μηχανισμών ρωγμάτωσης.

4 Μέθοδος Συσχέτισης Ψηφιακών Εικόνων

Η μέθοδος της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (Digital Image Correlation – DIC) μετρά μισό αιώνα ζωής μιας και πρωτοεμφανίστηκε κατά τη δεκαετία του 1970 (Anuta 1970, Keating et al. 1975). Αναπτύχθηκε για τη διδιάστατη (2D) μέτρηση μετατοπίσεων και παραμορφώσεων των σωμάτων στους τομείς της μηχανικής και της επιστήμης των υλικών. Η έμπνευση για την αρχική σύλληψη της ιδέας προέκυψε από μια αντίστοιχη μεθοδολογία που ακολουθείται στον τομέα της ρευστομηχανικής, όπου υπολογίζεται η στιγμιαία ταχύτητα των ρευστών (Particle Image Velocimetry – PIV) (Adrian 2005).

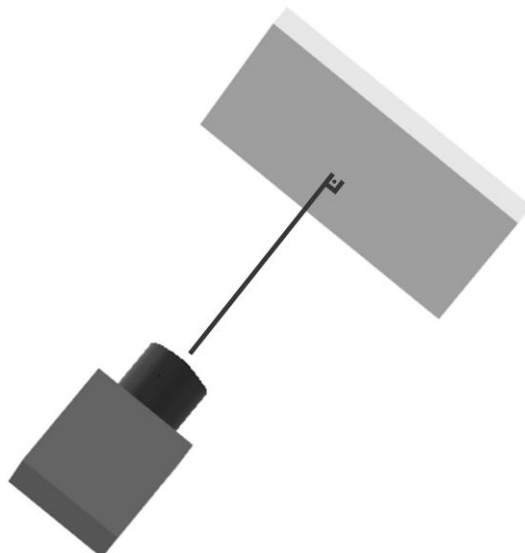
Στην πράξη, η μέθοδος εξελίχθηκε με την ανάπτυξη και την προσιτή εμπορική διάθεση των καμερών με CCD (Charge-Coupled Device), καθώς επίσης και με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος των προσωπικών υπολογιστών. Η τελευταία, επέτρεψε τη συνδυασμένη εφαρμογή δύο (2) ή περισσότερων καμερών CCD προκειμένου να μετρηθούν παραμορφώσεις σε τρεις (3) διαστάσεις (3D). Τα πλεονεκτήματα των καμερών CCD έναντι των υπολοίπων, έγκεινται στη μεγαλύτερη ευαισθησία τους σε ό,τι αφορά την καταγραφή των φωτονίων, στη δυνατότητα λήψης περισσότερων καρέ στη μονάδα του χρόνου και στην απαίτηση λιγότερου χρονικού διαστήματος έκθεσης για τη λήψη της κάθε φωτογραφίας. Επιπλέον, παρέχουν αρκετά υψηλότερο δυναμικό εύρος χρώματος (High Dynamic Range, HDR) συγκριτικά με τους αισθητήρες CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor), κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα σε εφαρμογές όπως η ανάλυση DIC όπου υπάρχουν μεγάλες αντιθέσεις άσπρου με μαύρου χρώματος στην επιφάνεια παρακολούθησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αποφυγή καταστάσεων όπου η κάμερα είτε εστιάζει σε πολύ φωτεινά σημεία του φωτογραφούμενου κάδρου, είτε σε πολύ σκοτεινά, με αποτέλεσμα να συλλαμβάνει είτε μια πολύ σκοτεινή φωτογραφία είτε μια πολύ φωτεινή, προκειμένου να εξισοροτηθεί ο φωτισμός. Τέλος, το σημαντικότερο πλεονέκτημα των CCD είναι πως κατά την καταγραφή ενός καρέ, τα εικονοστοιχεία εκτίθενται στο φως όλα μαζί παράλληλα και ακολούθως διαβάζονται ένα-ένα και μετατρέπονται σε αναλογικό σήμα, όπου ενισχύονται όλα μαζί και μετατρέπονται εν συνεχεία σε ψηφιακό σήμα παρουσιάζοντας εν τέλει ένα ομοιόμορφο αποτέλεσμα για κάθε καρέ. Αντιθέτως, στους αισθητήρες CMOS τα εικονοστοιχεία διαβάζονται ανά γραμμή-γραμμή, κάτι που σε στατικές λήψεις δεν αποτελεί τόσο μεγάλο ελάττωμα, αλλά επιπροσθέτως

κάθε εικονοστοιχείο ενισχύεται και μετατρέπεται σε αναλογικό σήμα αυτόνομα και ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα, έχοντας ως αποτέλεσμα ένα ανομοιόμορφο αποτέλεσμα για κάθε καρέ.

4.1 Προτερήματα και αδυναμίες της μεθόδου

Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η δυνατότητα υπολογισμού μετατοπίσεων και παραμορφώσεων σε όλη την παρακολουθούμενη επιφάνεια, και όχι μόνο τοπικά όπως για παράδειγμα με τα τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges). Επιπλέον, πρόκειται για μη-παρεμβατική μέθοδο, μιας και η παρακολούθηση της επιφάνειας γίνεται εξ αποστάσεως, χωρίς την τοποθέτηση επιπλέον εξοπλισμού πάνω στην επιφάνεια του εξεταζόμενου σώματος.

Αξίζει να σημειωθεί πως για διδιάστατες (2D) αναλύσεις, η αξιοποίηση της μεθόδου DIC περιορίζεται αποκλειστικά σε επίπεδες επιφάνειες, κάτι που αποκλείει τη μέτρηση μετατοπίσεων σε διαφορετικό επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή, το επίπεδο της παρατηρούμενης περιοχής και ο άξονας του φακού της κάμερας θα πρέπει να είναι τοποθετημένα κάθετα μεταξύ τους (Σχήμα 4-1). Επιπλέον, κατά την εφαρμογή της μεθόδου, η απόσταση μεταξύ της παρακολουθούμενης επιφάνειας και του φακού της κάμερας θα πρέπει να παραμένει σταθερή, μιας και η παραμικρή μεταβολή αλλοιώνει τις μετρούμενες παραμορφώσεις. Εν τούτοις, ο εξοπλισμός κατά τη λειτουργία του θερμαίνεται, κάτι που προκαλεί ελαφρά διαστολή των επί μέρους στοιχείων του, με παράλληλη αλλοίωση της αρχικής απόστασης μεταξύ του αισθητήρα CCD και της επιφάνειας παρατήρησης. Αποτέλεσμα της διαστολής είναι ο υπολογισμός αυξημένων παραμορφώσεων κατά τη συσχέτιση των ψηφιακών εικόνων, που ομοιάζουν με παραμορφώσεις λόγω εφελκυσμού (Ma et al. 2012). Επιπλέον, όταν η μέθοδος χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση παραμορφώσεων σε φορτιζόμενα υλικά, λόγω του φαινομένου Poisson η εν λόγω απόσταση επίσης μεταβάλλεται. Αιτία αυτής της αδυναμίας είναι η «μονόφθαλμη» παρακολούθηση του υπό μελέτη σώματος.



Σχήμα 4-1. Σχετική θέση του άξονα της κάμερας CCD και του επιπέδου της παρατηρούμενης επιφάνειας για την εφαρμογή της μεθόδου DIC.

4.2 Τεχνική συσχέτισμού ψηφιακών εικόνων

Κατά τη συγκεκριμένη μέθοδο καταγράφονται συστηματικά ασπρόμαυρες φωτογραφίες της παρατηρούμενης επιφάνειας. Η πρώτη φωτογραφία που κατά κανόνα λαμβάνεται πριν την εφαρμογή φορτίων στο μέσο, χρησιμοποιείται ως σημείο αναφοράς βάσει της οποίας μετρούνται οι μετέπειτα παραμορφώσεις.

Η βασική αρχή της μεθόδου στηρίζεται στο γεγονός ότι κάθε εικονοστοιχείο (pixel) των φωτογραφιών λαμβάνει μια συγκριμένη ταυτότητα βάσει του βάθους χρώματός του, η οποία το συνοδεύει καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Με τον τρόπο αυτό, η επιφάνεια της φωτογραφίας που καλύπτεται από το εκάστοτε εικονοστοιχείο λαμβάνει μια χαρακτηριστική τιμή λειτουργώντας πλέον ως τμήμα ενός καννάβου που δύναται πλέον να αξιοποιηθεί σε περαιτέρω αναλύσεις. Οι μετακινήσεις και οι παραμορφώσεις της παρατηρούμενης περιοχής προκύπτουν από την καταγραφή των τοπικών μετακινήσεων βάσει της νέας θέσης των εν λόγω ταυτοτήτων. Βαθμονομώντας τις διαστάσεις της παρατηρούμενης επιφάνειας στον κώδικα που επεξεργάζεται τις καταγεγραμμένες φωτογραφίες, γίνεται δυνατός ο υπολογισμός των πραγματικών παραμορφώσεων που λαμβάνουν χώρα.

Στην πορεία των εργαστηριακών δοκιμών, κάποια εικονοστοιχεία δύνανται να αλλάζουν ταυτότητα είτε λόγω μεταβολών του φωτισμού, είτε λόγω παραμορφώσεων ή και ρωγμών της παρατηρούμενης επιφάνειας που προκαλούν τοπικούς μεταχρωματισμούς. Το φαινόμενο αυτό επιφέρει θόρυβο κατά τη

συσχέτιση των ψηφιακών εικόνων. Για τον λόγο αυτό, η παρακολούθηση των εικονοστοιχείων πραγματοποιείται κατά ομάδες υποσυνόλων που ονομάζονται *subsets*. Τα εικονοστοιχεία σχηματίζουν τετράγωνες μικρές επιφάνειες, λαμβάνοντας εκτός από την ατομική, και μια ομαδική ταυτότητα, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα οι όποιες μεταβολές παρατηρούνται ατομικά στα εικονοστοιχεία, να απορροφούνται από την ομάδα. Ως εκ τούτου, κατά τον υπολογισμό των μετακινήσεων, κάθε subset χαρακτηρίζεται από ένα μικρό περιθώριο σφάλματος μιας και στην πράξη είναι αδύνατο να υπάρχει απόλυτη ταύτιση των επιμέρους ατομικών ταυτοτήτων.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί πως κάθε λογισμικό και κώδικας που συσχετίζει ψηφιακές εικόνες, διαθέτει επιπλέον εργαλεία περιορισμού του θορύβου.

0	0	0	100	100	100	0	0	0
0	0	0	100	100	100	0	0	0
0	0	0	100	100	100	0	0	0
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
100	100	100	100	100	100	100	100	100
0	0	0	100	100	100	0	0	0
0	0	0	100	100	100	0	0	0
0	0	0	100	100	100	0	0	0

***t*₀**

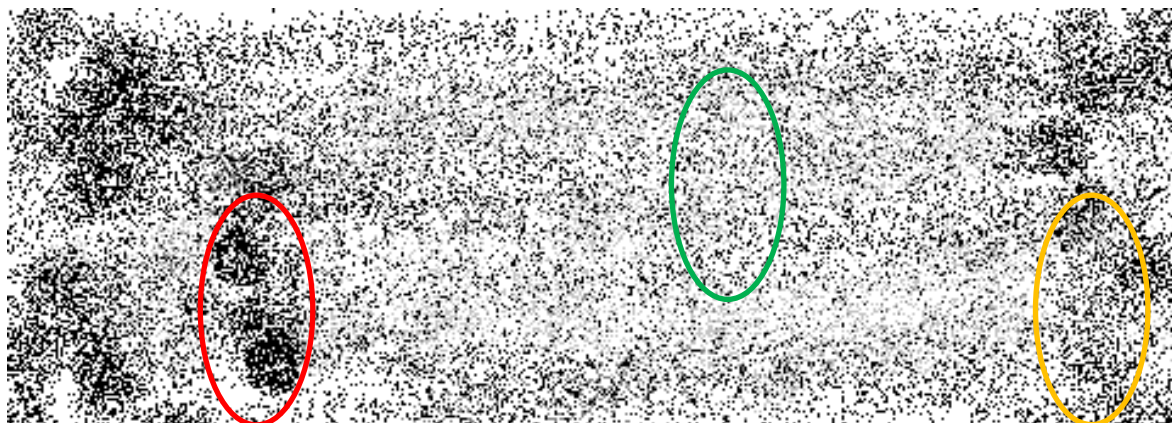
40	40	0	0	0	100	100	100	0
40	40	100	100	100	100	100	100	100
40	40	100	100	100	100	100	100	100
40	40	100	100	100	100	100	100	100
40	40	0	0	0	100	100	100	0
60	60	0	0	0	100	100	100	0
60	60	0	0	0	100	100	100	0
60	60	0	0	0	0	0	0	0
60	60	10	10	10	10	10	10	10

***t*₁**

Σχήμα 4-2. Subset σε χρόνο t_0 και η μετακίνησή του ds (με πράσινο) στον χώρο λόγω παραμόρφωσης σε χρόνο t_1 .

4.3 Προετοιμασία εφαρμογής της μεθόδου

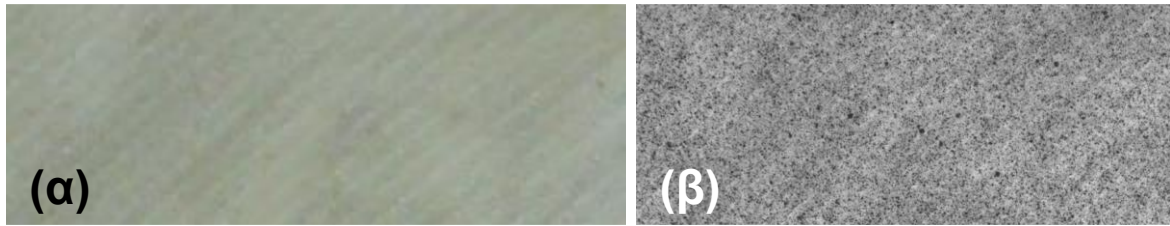
Βασική παράμετρος εφαρμοσιμότητας και επιτυχίας της μεθόδου DIC αποτελεί η ποιότητα της παρατηρούμενης επιφάνειας. Για να είναι δυνατός ο υπολογισμός των μετακινήσεων και των παραμορφώσεων, θα πρέπει στην εν λόγω επιφάνεια να σχηματιστεί κατάλληλο μοτίβο, μη επαναλαμβανόμενο, το οποίο συνήθως επιτυγχάνεται με εκτοξευθέν υδαρό χρωματικό διάλυμα δημιουργώντας έντονες αντιθέσεις και αποχρώσεις, κατά προτίμηση άσπρου και μαύρου. Ενδεικτική επιφάνεια μελέτης δίνεται στο Σχήμα 4-3, όπου με πράσινο χρώμα υποδεικνύεται επιθυμητό δείγμα μοτίβου, με κίτρινο αποδεκτό και με κόκκινο μη αποδεκτό. Η ποιότητα του μοτίβου είναι μείζονος σημασίας, αφού στις περιοχές που χαρακτηρίζονται από μη αποδεκτό μοτίβο, δεν είναι δυνατή η κανναβοποίησή τους σε subsets από το λογισμικό επεξεργασίας.



Σχήμα 4-3. Ενδεικτική επιφάνεια μελέτης, όπου με πράσινο χρώμα υποδεικνύεται επιθυμητό δείγμα μοτίβου, με κίτρινο αποδεκτό και με κόκκινο μη αποδεκτό.

Κατά την προετοιμασία της πειραματικής διάταξης για την εφαρμογή της μεθόδου DIC, είναι εξαιρετικά σημαντικό ο φωτισμός της παρατηρούμενης επιφάνειας να είναι έντονος, χωρίς σκιές και να παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Επιπλέον, οι ρυθμίσεις του διαφράγματος της κάμερας θα πρέπει επίσης να παραμένουν σταθερές για όλες τις φωτογραφίες προκειμένου ο χρόνος έκθεσης να διατηρείται ίδιος ώστε τα εικονοστοιχεία να μην αλλάζουν τελικώς αποχρώσεις-ταυτότητες που οδηγούν σε θόρυβο και εσφαλμένες μετρήσεις μετακινήσεων. Για τέτοιου είδους εφαρμογές ενδείκνυνται τα φωτιστικά σώματα LED (Light-Emitting Diode).

Ενδεικτικό δείγμα επιφάνειας παρακολούθησης πριν και μετά τον ψεκασμό της για τη δημιουργία κατάλληλου μοτίβου, δίνονται στο Σχήμα 4-4.



Σχήμα 4-4. Ενδεικτικό δείγμα επιφάνειας παρακολούθησης φυσικού μοντέλου μαρμάρου «Βώλακας II» πριν (α) και μετά (β) τη δημιουργία κατάλληλου μοτίβου για την εφαρμογή της μεθόδου DIC.

Η ακρίβεια της ανάλυσης DIC εξαρτάται τόσο από το εύρος των αποχρώσεων όσο και από τον αριθμό και το μέγεθος των εικονοστοιχείων (pixels) των φωτογραφιών. Περισσότερες αποχρώσεις, μεγαλύτερος αριθμός και μικρότερο μέγεθος εικονοστοιχείων και subset αποφέρουν ακριβέστερες αναλύσεις. Βέβαια, υπάρχει ένα κατώτατο όριο μεγέθους subset, το οποίο βρίσκεται σε άμεση συνάρτηση με το μέγεθος του μοτίβου που έχει σχηματιστεί για την εφαρμογή της μεθόδου DIC. Το συνολικό μέγεθος κάθε subset και άρα ο συνολικός αριθμός των εικονοστοιχείων που το απαρτίζουν, θα πρέπει να είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος των στοιχείων του μοτίβου κοκκίωσης (speckle pattern) που έχει σχηματιστεί.

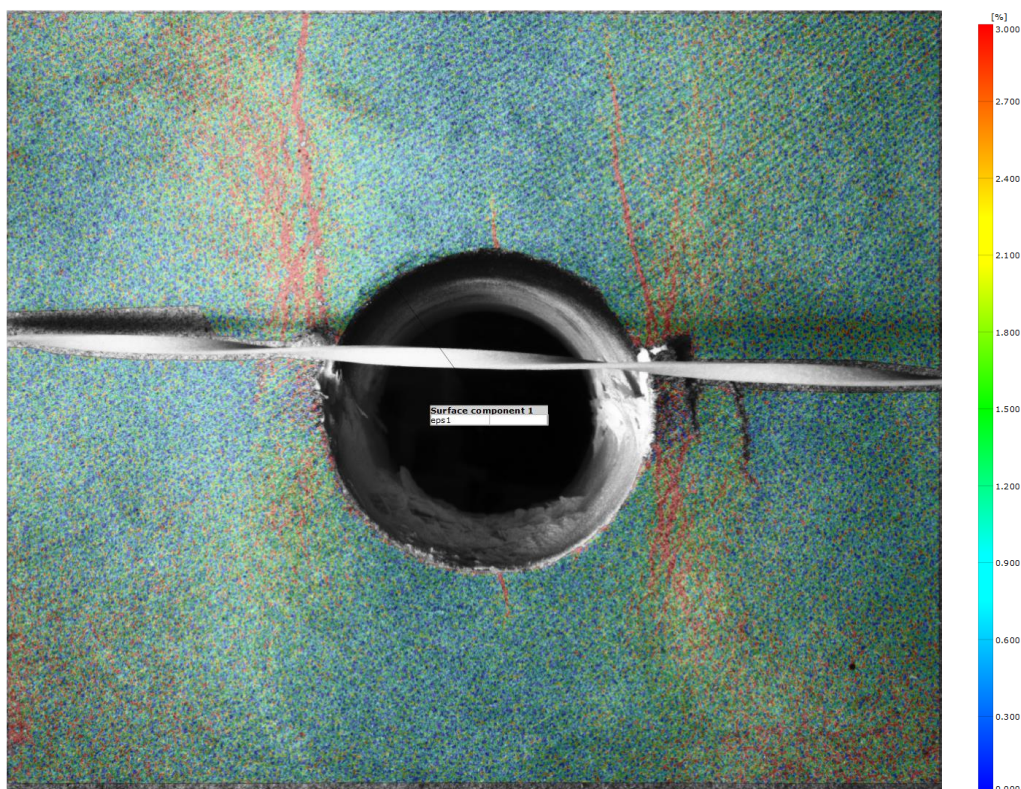
Στην παρούσα διδακτορική διατριβή χρησιμοποιείται κάμερα CCD της FLIR Integrated Imaging Solutions, Inc., και συγκεκριμένα η Point Grey Grasshopper3 GS3-U3-50S5M-C με αισθητήρα Sony ICX625. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, λαμβάνονται ασπρόμαυρες φωτογραφίες βάθους 24 bit, με ανάλυση 5 MP (2448 px x 2048 px) και μέγεθος εικονοστοιχείου 3.45 μm . Ο φωτισμός των επιφανειών παρατήρησης πραγματοποιήθηκε με την αξιοποίηση δύο (2) φωτιστικών σωμάτων LED, υπό γωνία στα αριστερά και δεξιά τους. Η εκ των υστέρων ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Correlate της GOM.

Διάταξη DIC, όπως εκείνη εφαρμόστηκε κατά την παρούσα διατριβή σε φυσικά μοντέλα, δίνεται στην παρακάτω φωτογραφία. Με κόκκινα στοιχεία υποδεικνύονται τα φωτιστικά σώματα LED, με μπλε η κάμερα CCD, με πράσινο η κάμερα CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) και με κίτρινο το φυσικό μοντέλο μαρμάρου ποικιλίας Βώλακας Άριστον I.



Σχήμα 4-5. Διάταξη DIC όπως εφαρμόστηκε κατά την παρούσα διατριβή σε ΦΜ. Με κόκκινα στοιχεία υποδεικνύονται τα φωτιστικά σώματα LED, με μπλε η κάμερα CCD, με πράσινο η κάμερα CMOS και με κίτρινο το φυσικό μοντέλο μαρμάρου ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι».

Ενδεικτικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC, όπως αυτό προκύπτει από το λογισμικό GOM Correlate σε φυσικό μοντέλο μαρμάρου ποικιλίας Βώλακας ΙΙ, δίνεται ακολούθως. Με θερμότερα χρώματα αντιπροσωπεύονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Με κόκκινο χρώμα εν προκειμένω, τονίζονται μακροσκοπικές ρωγμές.



Σχήμα 4-6. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC, όπως προκύπτει από το GOM Correlate, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ».

5 Λογισμικό PFC

5.1 Εισαγωγή

Τα κρυσταλλικά πετρώματα είναι ψαθυρά ετερογενή υλικά τα οποία κατά τη φόρτισή τους επιδεικνύουν ανελαστική παραμόρφωση, που οφείλεται κυρίως στον σχηματισμό, στην ανάπτυξη, στη διεύρυνση και στην αλληλεπίδραση ενός πλήθους μικρορωγμών στο εσωτερικό του πετρώματος. Η προσέγγιση που συνήθως ακολουθείται για την προσομοίωση της ανελαστικής παραμόρφωσης και θραύσης του πετρώματος μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες: την έμμεση και την άμεση.

Η προσομοίωση με το PFC (Particle Flow Code) (Itasca Consulting Group Inc. 2014) ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων άμεσης προσέγγισης. Το εν λόγω λογισμικό αποτελεί έναν αριθμητικό κώδικα προσομοίωσης της κίνησης και της αλληλεπίδρασης σωματιδίων με βάση τη μέθοδο διακριτών στοιχείων (Distinct Element Method, DEM) σε διδιάστατο (PFC2D) και σε τριδιάστατο περιβάλλον (PFC3D). Η DEM είναι αριθμητική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων μηχανικής σε υλικά με ασυνεχή δομή (Cundall & Hart 1992)· ως τέτοια μπορούν να θεωρηθούν και τα πετρώματα, καθώς αποτελούνται από διακριτούς κόκκους ή κρυστάλλους.

5.2 Μέθοδος διακριτών στοιχείων

Ως μέθοδος διακριτών στοιχείων (DEM) χαρακτηρίζεται η κατηγορία των μεθόδων αριθμητικής προσομοίωσης, όπου το υπό εξέταση υλικό αναπαρίσταται σαν ένα σύστημα αλληλεπιδρώντων διακριτών στοιχείων, που υπόκεινται σε μακροσκοπική κίνηση. Η DEM παρουσιάστηκε από τον Cundall (1971) αρχικά για την ανάλυση των προβλημάτων βραχομηχανικής και στη συνέχεια για κοκκώδη εδάφη (Cundall & Strack 1979). Η DEM θεωρεί το μέσο ασυνεχές, δίνοντας έμφαση στις επαφές και στην αλληλεπίδραση των στοιχείων του μέσου, κάτι που αποτελεί πλεονέκτημα της μεθόδου έναντι των συμβατικών μεθόδων που βασίζονται στη συμπεριφορά του συνεχούς μέσου.

Στην DEM οι υπολογισμοί κατά την αριθμητική επίλυση εναλλάσσονται μεταξύ του δεύτερου (2^{ου}) νόμου του Νεύτωνα, που εφαρμόζεται στα διακριτά σωματίδια και μιας καταστατικής σχέσης δύναμης-μετατόπισης, που εφαρμόζεται στις επαφές των σωματιδίων. Κάθε σωματίδιο εκτελεί μεταθετική ή και περιστροφική κίνηση, που

οφείλεται στις δυνάμεις που ασκούνται στα σημεία επαφής του από τα γειτονικά σωματίδια, στις εφαρμοζόμενες εξωτερικές δυνάμεις, καθώς και στις ασκούμενες βαρυτικές δυνάμεις. Για τον προσδιορισμό των κινήσεων αυτών χρησιμοποιείται ο δεύτερος (2^{ος}) νόμος του Νεύτωνα. Αντίστοιχα, η καταστατική σχέση δύναμης-μετατόπισης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των δυνάμεων που ασκούνται στις επαφές των σωματιδίων, οι οποίες είναι αποτέλεσμα της σχετικής κίνησής τους.

Η αλληλεπίδραση των στοιχείων αποτελεί μια δυναμική διαδικασία που αντιμετωπίζεται αριθμητικά με υπολογισμούς σε διακριτά χρονικά βήματα. Σε κάθε βήμα οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις των σωματιδίων θεωρούνται σταθερές, υποθέτοντας ότι αυτά βρίσκονται σε συνθήκες ισορροπίας. Επιπλέον, σε κάθε βήμα υπολογίζονται οι δυνάμεις στις επαφές και οι σχετικές μετατοπίσεις των σωματιδίων, οι οποίες προκύπτουν από τη διάδοση διαταραχών μέσω του συστήματος έπειτα από επιβολή εξωτερικών φορτίσεων. Το χρονικό βήμα θα πρέπει να είναι αρκούντως μικρό, ώστε κατά τη διάρκειά του να δύναται να θεωρηθεί πως οποιαδήποτε διαταραχή στο αριθμητικό μοντέλο δε θα διαδοθεί πέρα από την άμεση γειτονία της.

5.3 Λογισμικά PFC2D και PFC3D

Στο PFC2D το πέτρωμα προσομοιώνεται σε δύο διαστάσεις (2D) ως σύνολο άκαμπτων κυκλικών δίσκων μοναδιαίου μήκους ή και συσσωματωμάτων τους, ενώ αντίστοιχα στο PFC3D η προσομοίωση γίνεται σε τρεις διαστάσεις (3D) θεωρώντας το πέτρωμα ως σύνολο άκαμπτων σφαιρών. Το σύνολο των σωματιδίων (δίσκοι σε 2D και σφαίρες σε 3D) βρίσκεται εντός προκαθορισμένου χώρου πεπερασμένων διαστάσεων, στο όριο του οποίου ορίζονται συνθήκες βάσει των οποίων αλληλεπιδρούν τα σωματίδια με τα οποία έρχεται σε επαφή. Τα σωματίδια μπορούν να κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους και να αλληλεπιδρούν στις επαφές τους. Το προσομοίωμα αυτό του πετρώματος καλείται συχνά στη βιβλιογραφία ως «*Μοντέλο Συνδεδεμένων Σωματιδίων*» (Bonded Particle Model, BPM) ή «*συνθετικό πέτρωμα*».

Στόχο της μοντελοποίησης αποτελεί η δημιουργία ενός συνόλου σωματιδίων, η μηχανική συμπεριφορά του οποίου να αντιπροσωπεύει όσο το δυνατόν καλύτερα εκείνη ενός φυσικού πετρώματος τόσο στις εργαστηριακές δοκιμές όσο και στο πεδίο. Η φόρτιση του αριθμητικού μοντέλου πραγματοποιείται δίνοντας τιμές είτε για

την ταχύτητα μετακίνησης των τοίχων ή των σωματιδίων, είτε εφαρμόζοντας βαρυτικές και εξωτερικές δυνάμεις, είτε συνδυασμό των ανωτέρω.

Στο περιβάλλον του PFC, η ενσωματωμένη γλώσσα προγραμματισμού FISH επιτρέπει τον καθορισμό νέων μεταβλητών και διαδικασιών. Η αξιοποίησή τους προσανατολίζεται είτε στην επέκταση της λειτουργίας του κώδικα είτε στην προσθήκη ιδιοτήτων του πετρώματος καθορισμένων από τον χρήστη. Η FISHTANK του PFC αποτελεί σύνολο συναρτήσεων της FISH, που διευκολύνει τον καθορισμό της εντατικής κατάστασης του συνθετικού πετρώματος ή των ορίων του, καθώς και την προσομοίωση εργαστηριακών δοκιμών.

Για την επιτυχημένη προσομοίωση, θα πρέπει να ακολουθούνται ορισμένα βασικά στάδια, που αφορούν στην αλληλουχία των εργασιών από το στάδιο της δημιουργίας των σωματιδίων έως και το στάδιο της ολοκλήρωσης της προσομοίωσης:

1. Δημιουργία σωματιδίων

Αρχικά οριοθετείται η περιοχή εργασίας. Έπειτα, ορίζονται στον Πίνακα Ανάθεσης Μοντέλου Επαφών (Contact Model Assignment Table, CMAT) το αρχικό μοντέλο επαφών με παραμέτρους όπως το μέτρο ελαστικότητας στην επαφή των σωματιδίων, ο λόγος ορθής προς τη διατμητική δυστροπία (k_n/k_s) κ.ά. Στη συνέχεια, δίνονται οι συντεταγμένες κατά τις οποίες θα σχηματισθούν οι τοίχοι-όρια του μοντέλου. Εντός αυτών των ορίων τοποθετούνται τα σωματίδια των οποίων καθορίζεται η πυκνότητα, και το πορώδες του μοντέλου. Σημειώνεται ότι λόγω της γεωμετρίας των σωματιδίων το πραγματικό πορώδες του μοντέλου διαφέρει τελικώς από το πορώδες που καθορίζεται στο συγκεκριμένο στάδιο. Ωστόσο, με εντολές FISH καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός του πραγματικού πορώδους. Έπειτα από την ολοκλήρωση των παραπάνω, πραγματοποιείται ένα πλήθος υπολογιστικών κύκλων με σκοπό την απόσβεση των ανεπτυγμένων δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων. Αφού ολοκληρωθούν οι προαναφερθέντες κύκλοι επίλυσης, διαγράφονται ορισμένα σωματίδια προκειμένου το BPM να λάβει την τελική του γεωμετρία.

2. Επιλογή τύπου επαφής

Με τον όρο *επαφή* εννοείται η περιοχή (ή σημείο) αλληλεπίδρασης των σωματιδίων που αλληλοεφάπτονται. Ο τύπος της επαφής μπορεί να αφορά στην ελαστική σχέση μεταξύ της δύναμης και της παραμόρφωσης στην επαφή, συσχετίζοντάς τες μέσω της δυστροπίας της επαφής (contact-stiffness models). Επίσης, μπορεί να αφορά στην ολίσθηση ή και απομάκρυνση των σωματιδίων αναλόγως της διεύθυνσης και του μεγέθους της ορθής δύναμης (εφελκυστικής ή θλιπτικής) που εφαρμόζεται ανάμεσα στα σωματίδια που εφάπτονται (slip & separation model). Τέλος, μπορεί να αφορά σε σωματίδια που όχι μόνο βρίσκονται σε επαφή αλλά είναι και συνδεδεμένα μεταξύ τους· εν προκειμένω, στην παρούσα διατριβή με επίπεδους (flat-joint) ή παράλληλους (parallel bond) δεσμούς (bonding models). Στο συγκεκριμένο στάδιο μεταβάλλεται το αρχικό μοντέλο δεσμών και ορίζεται το τελικό που θα εφαρμοστεί μεταξύ των σωματιδίων.

3. Επιλογή ιδιοτήτων του υλικού

Ο καθορισμός ιδιοτήτων του αριθμητικού υλικού αφορά τόσο τις ιδιότητες των σωματιδίων όσο και των δεσμών ανάμεσά τους. Με το PFC προσομοιώνεται η συμπεριφορά ενός υλικού βάσει της συμπεριφοράς των σωματιδίων που συνθέτουν το BPM. Πραγματοποιώντας δοκιμές διαφόρων συνδυασμών μικροπαραμέτρων κατά τη μοντελοποίηση, όπως είναι το μέτρο ελαστικότητας των δεσμών ή ο συντελεστής τριβής μεταξύ των σωματιδίων, δύναται να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός ώστε το συνθετικό υλικό να συμπεριφέρεται παρόμοια με το πραγματικό. Τέλος, μετά το συγκεκριμένο στάδιο μπορεί να ορισθεί δίκτυο ασυνεχειών στο συνθετικό υλικό, εφόσον αυτό απαιτείται.

4. Φόρτιση – Επίλυση – Προσομοίωση σε στάδια

Η φόρτιση μπορεί να είναι είτε παθητική είτε ενεργητική. Στην παθητική, οποιαδήποτε μεταβολή στο μοντέλο προκαλεί ανακατανομή του φορτίου σε αυτό. Αντίστοιχα, η ενεργητική φόρτιση επιβάλλεται εξωτερικά. Επειδή η DEM είναι πλήρως δυναμική μέθοδος, κάποια μορφή απόσβεσης είναι απαραίτητη για την απορρόφηση τμήματος της κινητικής ενέργειας. Στα πραγματικά υλικά, οι διάφορες μικροσκοπικές διαδικασίες, όπως η εσωτερική τριβή και η διασπορά κυμάτων, καταναλώνουν την κινητική ενέργεια. Στο BPM εφαρμόζεται τοπική, μη ιξώδης απόσβεση, οριζόμενη με έναν συντελεστή απόσβεσης (damping). Με τον όρο

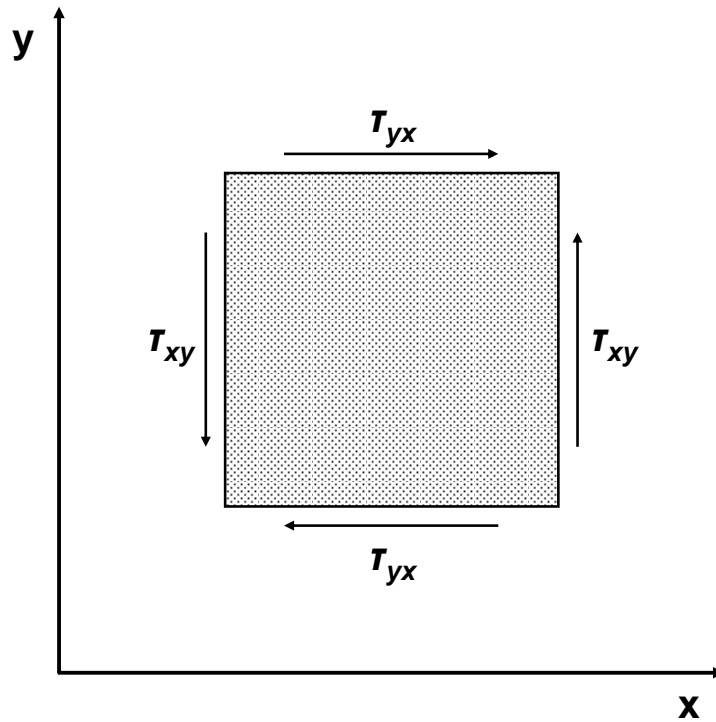
επίλυση αναφερόμαστε στους υπολογιστικούς κύκλους και στα βήματα που εκτελεί το λογισμικό έως ότου φτάσει το μοντέλο σε κατάσταση ισορροπίας. Η επίλυση πραγματοποιείται είτε ντετερμινιστικά είτε όχι. Η κύρια διαφορά μεταξύ τους έγκειται στην *επαναληψιμότητα* των υπολογισμών. Κατά την επίλυση σε υπολογιστικά συστήματα με παραπάνω του ενός (1) πυρήνα, η πορεία των υπολογισμών μπορεί να διαφέρει. Ως εκ τούτου, τα τελικά αποτελέσματα του μοντέλου θα διαφέρουν κάθε φορά που πραγματοποιούνται από την αρχή οι υπολογισμοί, τόσο στο ίδιο όσο και σε διαφορετικό υπολογιστικό σύστημα. Στην ντετερμινιστική επίλυση κάτι τέτοιο δεν ισχύει με αποτέλεσμα το ίδιο μοντέλο να εξάγει πάντα τα ίδια αποτελέσματα ανεξαρτήτως υπολογιστικού συστήματος. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής επιλέγεται ντετερμινιστική επίλυση των μοντέλων. Η προσομοίωση σε στάδια αξιοποιείται για τυχόν αλλαγές στη γεωμετρία του BPM ή/και στις παραμέτρους που ορίζονται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

5. Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι σχετικά δύσκολη, επειδή το PFC προσομοιώνει ένα μη γραμμικό σύστημα διακριτών στοιχείων και μάλιστα σε σημαντική χρονική διάρκεια. Συνεπώς, η αξιολόγηση των μοντέλων πραγματοποιείται μέσω της ανάλυσης δεικτών και μεγεθών (π.χ. της ισορροπίας δυνάμεων) ή διαγραμμάτων, την επισκόπηση των αρχείων καταγραφής του ιστορικού της επίλυσης ή την παρακολούθηση στιγμιότυπων της προσομοίωσης.

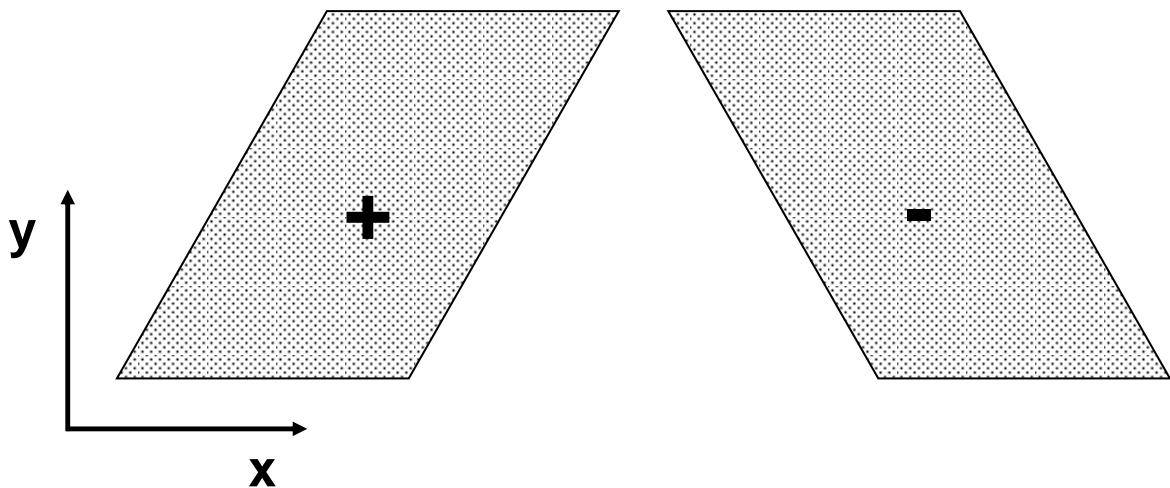
Η σύμβαση που υιοθετεί ο κώδικας PFC για τα πρόσημα και τις μονάδες, σημειώνεται πως δε συμπίπτει πάντα με τη σύμβαση της μηχανικής των πετρωμάτων. Συγκεκριμένα:

- Ορθή τάση: Με αρνητικό (-) πρόσημο ορίζονται οι θλιπτικές τάσεις και με θετικό (+) οι εφελκυστικές.
- Διατμητική τάση: Θετική φορά της διατμητικής τάσης ορίζεται η όμοια με τη φορά του θετικού ημιάξονα με τον οποίο είναι παράλληλη, εφόσον το ίδιο ισχύει και για τη θετική ορθή τάση που ασκείται στο ίδιο επίπεδο.



Σχήμα 5-1. Θετική διατμητική τάση.

➤ Τροπή: Για την ορθή τροπή ισχύουν ανάλογοι κανόνες με την ορθή τάση (η βράχυνση θεωρείται αρνητική (-)). Για τη διατμητική τροπή, θεωρείται θετική (+) η παραμόρφωση με διεύθυνση που συνάδει με τη φορά του θετικού (+) ημιάξονα των x .



Σχήμα 5-2. Θετική και αρνητική διατμητική τροπή.

➤ Δυνάμεις επαφής: Τα διανύσματα των δυνάμεων επαφής αναλύονται στο επίπεδο της σε μια ορθή και μια διατμητική συνιστώσα. Θετικές (+) θεωρούνται οι ορθές δυνάμεις επαφής που προκαλούν θλίψη.

➤ Διανυσματικά μεγέθη: Οι συνιστώσες των διανυσμάτων λαμβάνουν θετικές ή αρνητικές τιμές ανάλογα με τη φορά των θετικών ημιαξόνων x και y σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων xOy .

➤ Στροφές: Θετική (+) φορά στροφής είναι η αντιωρολογιακή. Το ίδιο ισχύει και για τις ροπές.

Όλες οι μονάδες βρίσκονται είτε στο SI είτε στο αγγλοσαξωνικό σύστημα και θα πρέπει να είναι συμβατές μεταξύ τους καθώς δε γίνεται καμία μετατροπή μέσω του λογισμικού.

Πίνακας 5-1. Μονάδες μέτρησης στο PFC που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή.

Σύστημα μονάδων	SI
Μήκος	m
Πυκνότητα	kg/m ³
Δύναμη	N
Τάση	Pa
Επιτάχυνση της βαρύτητας	m/sec ²

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθούν ορισμένες παραδοχές του κώδικα PFC2D μιας και λειτουργεί σε διδιάστατο (2D) περιβάλλον. Σε ένα σύνολο δίσκων υπάρχουν μόνο δύο συνιστώσες για την ανάλυση των δυνάμεων και μια για τη ροπή και μόνο αυτές λαμβάνονται υπόψη στις εξισώσεις κίνησης και στις σχέσεις δυνάμεων-μετατοπίσεων. Επιπλέον, τα κέντρα βάρους όλων των σωματιδίων βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Η τάση και η τροπή, ως συνεχείς μεταβλητές, δεν ορίζονται σε κάθε σημείο στο μοντέλο, επειδή το μέσο είναι ασυνεχές. Για την τάση υπάρχουν διάφοροι τρόποι υπολογισμού τόσο για τα 2D όσο και για τα 3D BPM:

i. Με εντολές FISH.

ii. Με υπολογισμό της μέσης τάσης σε προκαθορισμένη περιοχή κυκλικού (2D) ή σφαιρικού (3D) σχήματος, η οποία προκύπτει από τη συσχέτιση των δύο συνιστωσών της δύναμης σε κάθε σωματίδιο ανά μήκος περιφέρειας του σωματιδίου. Διαιρώντας την τελευταία με το πάχος του σωματιδίου προκύπτει μια τιμή τάσης. Η μέση τάση στην περιοχή μέτρησης προκύπτει ως ο μέσος όρος της τάσης κάθε σωματιδίου.

iii. Εμμέσως, από τη μέτρηση των φορτίων που αναπτύσσονται στους τοίχους.

Στο PFC2D η τροπή υπολογίζεται μόνο κατά τη διεύθυνση των αξόνων x και y . Η ογκομετρική τροπή υπολογίζεται ως το άθροισμα των ορθών τροπών κατά x και κατά y . Το πορώδες υπολογίζεται με βάση την επιφάνεια που καλύπτουν τα κενά προς την επιφάνεια που καλύπτουν τα σωματίδια, ενώ στην τριδιάστατη προσέγγιση του PFC3D προκύπτει ως ο λόγος των όγκων και όχι των επιφανειών. Ο Deresiewicz (1958) υπολογίζει ότι το ελάχιστο πορώδες σε ομοιόμορφο μέγεθος δίσκων (2D) μπορεί να φτάσει την τιμή 0.0931, ενώ σε σφαίρες (3D) φτάνει έως 0.2595 (Deresiewicz 1958). Τέλος, η μάζα υπολογίζεται βάσει του ειδικού βάρους, της ακτίνας και του πάχους της κάθε σφαίρας (μοναδιαίο για τους δίσκους του PFC2D).

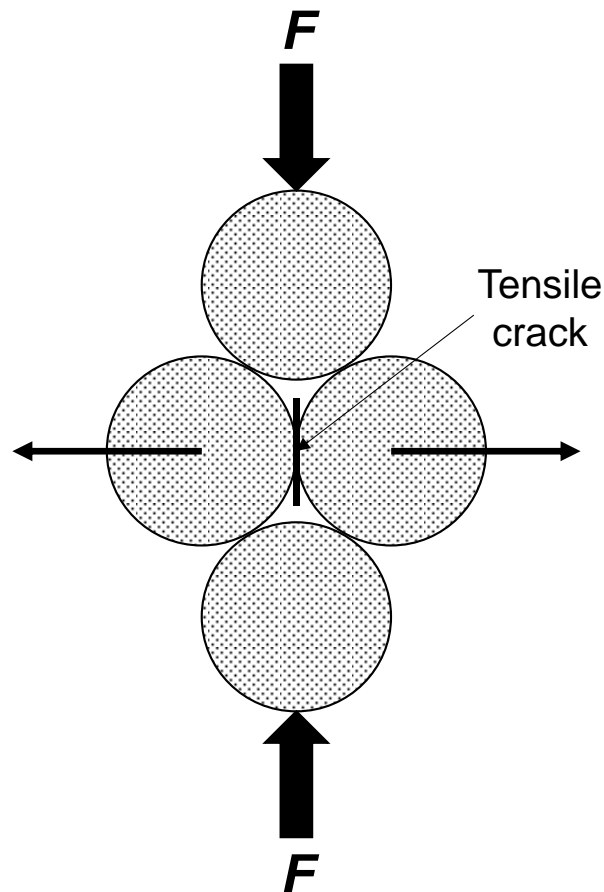
5.4 Μηχανική στο PFC

Η αναπαράσταση του πετρώματος ως σύνολο σωματιδίων συζευγμένων στις επαφές τους επιχειρεί να προσεγγίσει όσο το δυνατόν ικανοποιητικότερα τη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος. Η τεχνική αυτή αναφέρεται από τους Potyondy & Cundall (Potyondy & Cundall 2004) ως μοντέλο συνδεδεμένων σωματιδίων (Bonded Particle Model – BPM). Το BPM μπορεί να λάβει διάφορες παραλλαγές (π.χ. Cho et al. 2007), ανάλογα με το σχήμα των σωματιδίων και την αρχική αλληλοεπικάλυψή τους. Επιπλέον, επιλέγοντας κατάλληλες καταστατικές σχέσεις για τις επαφές, μπορούν να προσομοιωθούν φαινόμενα όπως η διασταλτικότητα λόγω εκτενούς μικρορωγμάτωσης ή η χρονικά εξαρτώμενη τροπή.

5.4.1 Μηχανισμός ρωγμάτωσης στο PFC

Στο PFC τα σωματίδια θεωρούνται ως άκαμπτα στοιχεία που παραμορφώνονται τοπικά στα σημεία επαφής τους. Οι επαφές θεωρείται πως έχουν πεπερασμένη ορθή και διατμητική δυστροπία, αναλόγως της οποίας μεταβάλλονται οι τροπές. Τα σωματίδια δύνανται να βρίσκονται απλώς σε επαφή ή να είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους αναπαριστώντας ένα στερεό υλικό. Σε μια τέτοια περίπτωση, η θραύση του υλικού εμφανίζεται μέσω της προοδευτικής θραύσης των δεσμών των σωματιδίων, μόλις η φόρτιση ξεπεράσει την αντοχή των δεσμών.

Στο Σχήμα 5-3 φαίνεται ο σχηματισμός εφελκυστικών ρωγμών που προκαλούνται από θλιπτικές δυνάμεις. Συγκεκριμένα, το ζεύγος των αξονικών δυνάμεων F τείνει να διαχωρίσει τα σωματίδια από το συσσωμάτωμα, με συνέπεια την υποβολή του δεσμού σε εφελκυσμό και την επακόλουθη θραύση του.



Σχήμα 5-3. Μηχανισμός εφελκυστικής ρωγμάτωσης σε συσσωμάτωμα δίσκων στο PFC2D.

5.4.2 Μοντέλο συνδεδεμένων σωματιδίων – BPM

Για τη δημιουργία ενός BPM, απαραίτητη είναι η επιλογή κατάλληλων μικροπαραμέτρων των επαφών μεταξύ των σωματιδίων και των δεσμών, ώστε το συνθετικό υλικό να παρουσιάζει παρόμοια μακροσκοπική συμπεριφορά με το φυσικό. Η επιλογή γίνεται συνήθως βάσει αποτελεσμάτων τυπικών εργαστηριακών δοκιμών που στη συνέχεια προσομοιώνονται αριθμητικά, όπου το BPM βαθμονομείται ώστε να προσεγγίσει τη συμπεριφορά του πετρώματος. Οι παραδοχές που υιοθετούνται σχετικά με τα σωματίδια για τη δημιουργία του BPM είναι οι εξής:

1. Είναι άκαμπτα και έχουν μορφή σφαιρών (PFC3D) ή δίσκων (PFC2D) πεπερασμένης διαμέτρου και μάζας.
2. Κινούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους, μεταθετικά ή και περιστροφικά.
3. Αλληλεπιδρούν μόνο στις επαφές τους. Λόγω της γεωμετρίας τους, μεταξύ δύο σφαιριδίων ή δίσκων δύναται να υπάρχει μόνο μια (1) επαφή.

4. Πιθανές αλληλεπικαλύψεις μεταξύ των σωματιδίων θα πρέπει να είναι τόσο μικρές, ώστε οι επαφές μεταξύ τους να θεωρούνται σημειακές.

5. Στις επαφές μπορούν να αντιστοιχισθούν δεσμοί. Οι δεσμοί θεωρούνται πως έχουν πεπερασμένη ορθή και διατμητική δυστροπία και αντοχή. Επίσης, δύνανται να φέρουν φορτία, και μόλις η φόρτιση υπερβεί την αντοχή τους θραύονται. Σε περίπτωση που ξεπεραστεί πρώτα η διατμητική αντοχή του δεσμού, τότε ο δεσμός *αστοχεί σε διάτμηση*. Αντίστοιχα, σε περίπτωση που ξεπεραστεί η εφελκυστική αντοχή του, τότε ο δεσμός *αστοχεί σε εφλκυσμό*. Στην περίπτωση του μοντέλου flat-joint η επαφή διαιρείται σε προκαθορισμένο πεπερασμένο αριθμό *στοιχείων* (π.χ. τέσσερα (4) στοιχεία ανά δεσμό-επαφή).

6. Για την επίλυση εφαρμόζονται οι νόμοι κίνησης του Νεύτωνα, οι οποίοι συσχετίζουν τη σχετική κίνηση των σωματιδίων με τη δύναμη και τη ροπή που αναπτύσσονται στις επαφές τους. Επιπλέον, στις επαφές εφαρμόζονται οι σχέσεις δύναμης-μετατόπισης.

5.4.3 Δεσμοί μεταξύ των σωματιδίων

Οι Potyondy & Cundall παρομοιάζουν τους δεσμούς των σωματιδίων στο PFC2D με το συγκολλητικό υλικό των κόκκων των κλαστικών ιζηματογενών πετρωμάτων ή με τη νοητή συγκόλληση των κρυστάλλων των κρυσταλλικών πετρωμάτων (Potyondy & Cundall 2004). Στο PFC μπορούν να οριστούν διάφοροι τύποι δεσμών. Στην παρούσα διατριβή επιλέγεται το γραμμικό μοντέλο παράλληλων δεσμών (linear parallel bond model) για τα BPM του γύψου και το μοντέλο επίπεδων δεσμών (flat-joint model) για τα BPM των κρυσταλλικών υλικών.

5.5 Γραμμικό μοντέλο παράλληλων δεσμών

Το γραμμικό μοντέλο παράλληλων δεσμών (Linear Parallel Bond Model, PB) με ανενεργούς αποσβεστήρες δυνάμεων και μηδενικό διάκενο αναφοράς αντιστοιχεί στο μοντέλο παράλληλων δεσμών (parallel-bond model) των Potyondy & Cundall (Potyondy & Cundall 2004). Αποτελεί κατά βάση ένα γραμμικό μοντέλο που δύναται να εφαρμοστεί τόσο μεταξύ των σωματιδίων, όσο και μεταξύ σωματιδίων και τοίχων.

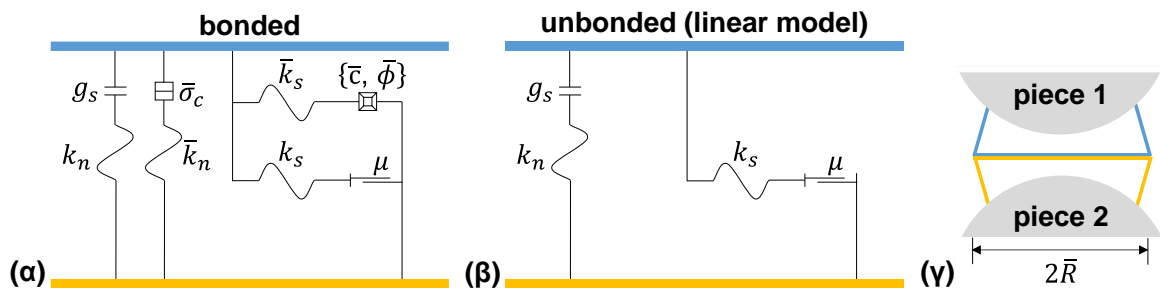
5.5.1 Εισαγωγή

Ένας δεσμός PB προσομοιώνει τη μηχανική συμπεριφορά ενός πεπερασμένου μεγέθους «τσιμεντοειδούς» όγκου τοποθετημένου ανάμεσα σε δύο σωματίδια που

εφάπτονται. Οι ελαστικές συνιστώσες του παράλληλου δεσμού ενεργούν παράλληλα με τις γραμμικές συνιστώσες της επαφής, επιβάλλοντας ελαστική αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων. Οι εν λόγω δεσμοί μπορούν να μεταφέρουν μεταξύ των σωματιδίων τόσο δυνάμεις όσο και ροπές.

5.5.2 Περίληψη συμπεριφοράς

Ένας δεσμός PB εμφανίζεται ως ένα σετ ελατηρίων με σταθερή ορθή και διατμητική δυστροπία, ομοιόμορφα κατανεμημένες στη διατομή του δεσμού (ορθογώνιο στο PFC2D BPM, κυκλικός δίσκος στο PFC3D), που βρίσκονται στο επίπεδο επαφής και επικεντρώνονται στο σημείο επαφής. Τα εν λόγω ελατήρια αντιδρούν παράλληλα με τα γραμμικά ελατήρια της επαφής τα οποία παραμένουν ενεργά και μετά την αστοχία του δεσμού. Η σχετική κίνηση σε επαφή δεσμού PB, προκαλεί ανάπτυξη δυνάμεων και ροπών εντός του συνδετικού υλικού, οι οποίες ενεργούν επί των δύο εφαπτόμενων σωματιδίων (ή επί της επαφής τοίχου-σωματιδίου) και μπορούν να σχετίζονται με τις μέγιστες ορθές και διατμητικές τάσεις που ενεργούν εντός του συνδετικού υλικού στην περιφέρεια του δεσμού. Εάν οποιαδήποτε από αυτές τις μέγιστες τάσεις υπερβεί την αντίστοιχη αντοχή του δεσμού, τότε εκείνος σπάει και το συνδετικό υλικό απομακρύνεται από το μοντέλο μαζί με τις δυνάμεις, τις ροπές και τη δυσκαμψία που το συνοδεύουν.

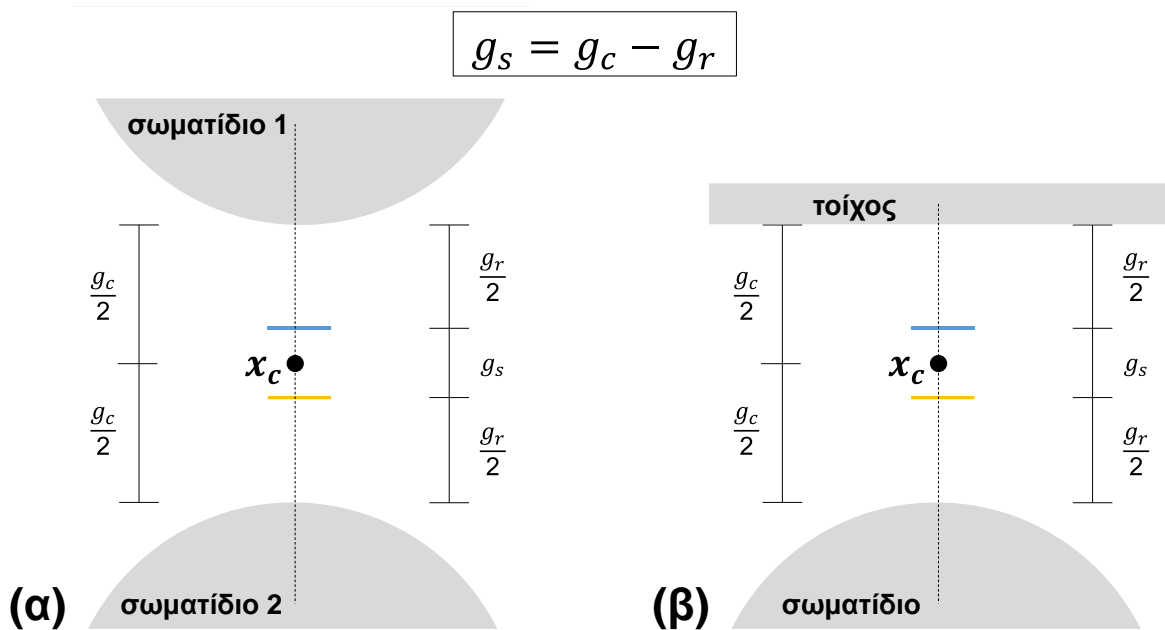


Σχήμα 5-4. Ροϊκές συνιστώσες (α & β) του γραμμικού μοντέλου παράλληλων δεσμών μεταξύ δύο σωματιδίων (γ) (Itasca Consulting Group Inc. 2014).

5.5.3 Διάκενο επαφής

Το διάκενο της επαφής φαίνεται στο Σχήμα 5-5. Μια επαφή με το συγκεκριμένο μοντέλο ενεργοποιείται εφόσον είναι συζευγμένη (bonded) ή εάν το διάκενο μεταξύ των σωματιδίων είναι μικρότερο ή ίσο με το μηδέν. Η καταστατική σχέση δύναμης-μετατόπισης δεν εφαρμόζεται στις ανενεργές επαφές. Σημειώνεται ότι υπολογιστικά, η ασύνδετη επαφή και ο δεσμός PB λειτουργούν ως δύο διακριτές διεπιφάνειες μεταξύ των σωματιδίων (Σχήμα 5-4). Όταν το διάκενο αναφοράς είναι μηδέν, οι

νοητές επιφάνειες της πρώτης διεπιφάνειας συμπίπτουν με τις επιφάνειες των σωματιδίων.



Σχήμα 5-5. Διάκενο επιφάνειας μεταξύ σωματιδίων (α) και μεταξύ σωματιδίου και τοίχου (β) για γραμμικά μοντέλα.

Όταν δημιουργείται ένας δεσμός PB, ορίζεται μια διεπιφάνεια μεταξύ δύο νοητών επιφανειών, ενώ ταυτόχρονα η δύναμη και η ροπή του μηδενίζονται. Ο εν λόγω δεσμός προσδίδει ελαστική αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο (2) νοητών επιφανειών, η οποία εξαφανίζεται μόλις ο δεσμός σπάσει. Κάθε νοητή επιφάνεια ενώνεται άκαμπτα σε ένα τμήμα κάποιου σώματος. Η επιφάνεια του διάκενου του δεσμού PB ορίζεται ως η αθροιστική σχετική ορθή μετατόπιση των δύο νοητών επιφανειών:

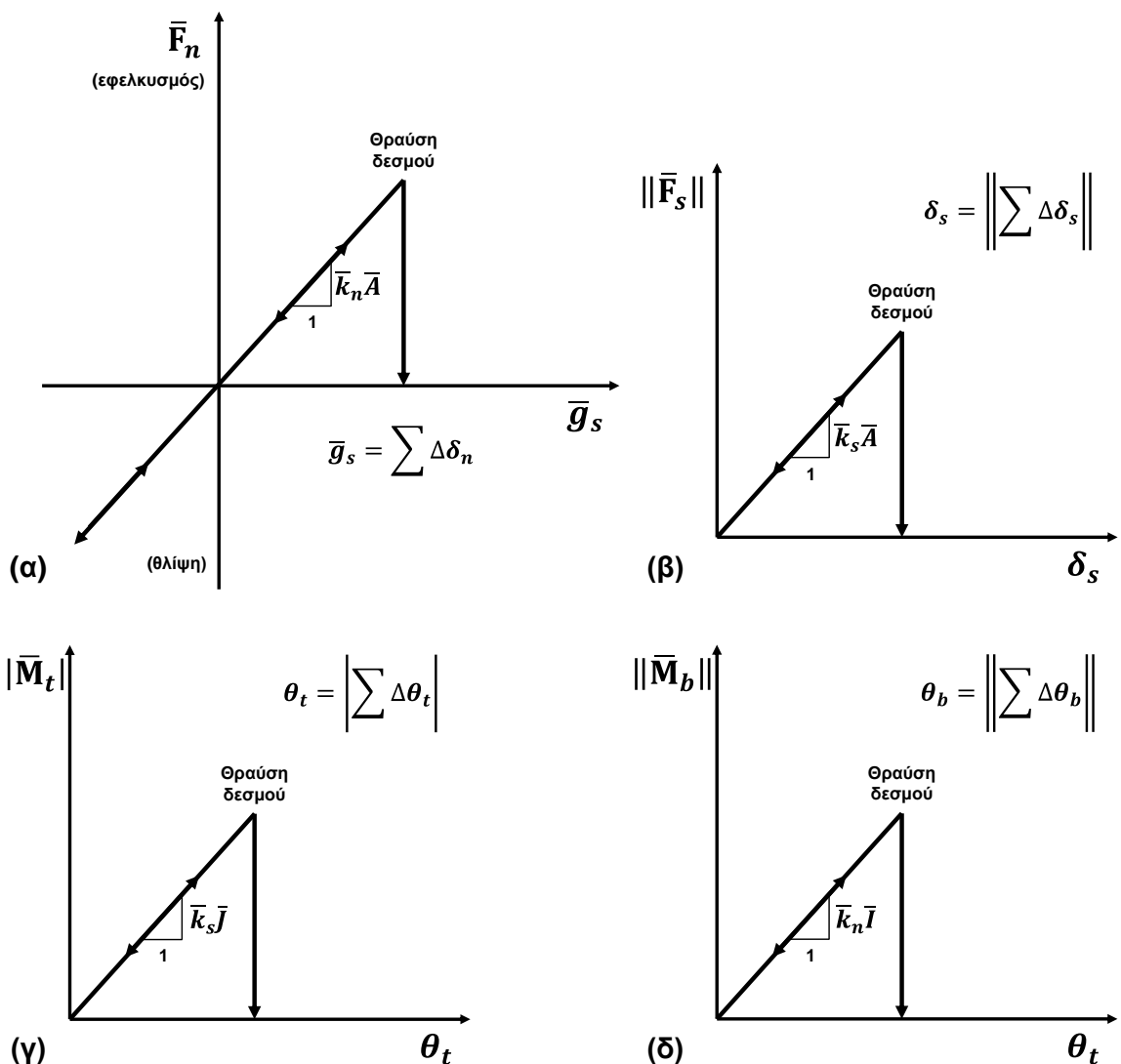
$$\bar{g}_s = \sum \Delta\delta_n \quad \text{Εξίσωση 5-1}$$

όπου $\Delta\delta_n$ η αύξηση της σχετικής ορθής μετατόπισης.

5.5.4 Νόμος δύναμης-μετατόπισης

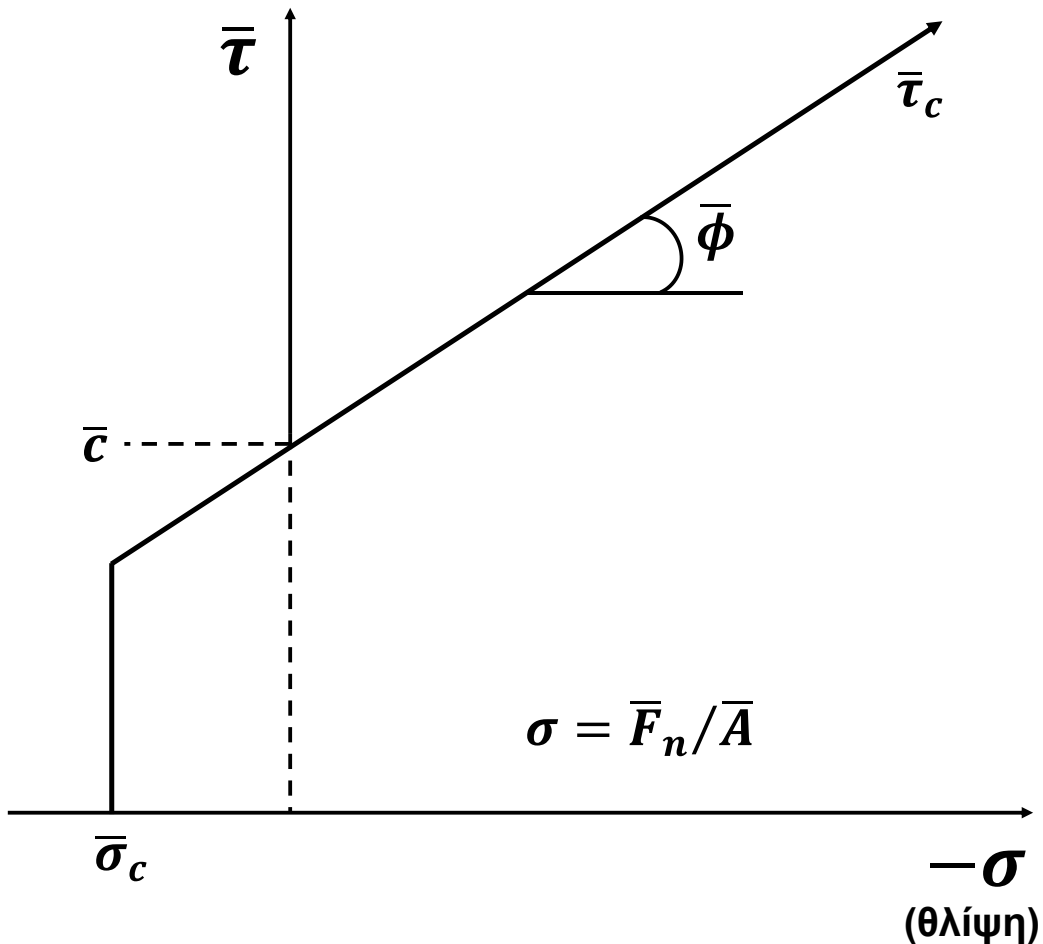
Όπως προαναφέρθηκε, οι ορθές και διαμητικές δυνάμεις των δεσμών που ασκούνται στις επαφές των σωματιδίων υπολογίζονται από την καταστατική σχέση δύναμης-μετατόπισης. Σύμφωνα με την εν λόγω σχέση, η εφελκυστική δύναμη \bar{F}_n είναι γραμμικώς ανάλογη του διακένου της επαφής \bar{g}_s , και εξαρτάται από το γινόμενο της ορθής δυστροπίας \bar{k}_n με τη διατομή του δεσμού \bar{A} (Σχήμα 5-6α). Η διαμητική δύναμη \bar{F}_s είναι γραμμικώς ανάλογη της σχετικής διαμητικής

μετατόπισης δ_s , και εξαρτάται από το γινόμενο της διατμητικής δυστροπίας \bar{k}_s με τη διατομή του δεσμού \bar{A} (Σχήμα 5-6b). Αντίστοιχα, η στρεπτική ροπή \bar{M}_t είναι μηδενική για τα 2D BPM, και γραμμικώς ανάλογη της σχετικής στρεπτικής στροφής θ_t για τα 3D BPM, όπου εξαρτάται από τη στρεπτική δυστροπία η οποία τίθεται ίση με το γινόμενο της διατμητικής δυστροπίας \bar{k}_s με την πολική ροπή αδρανείας \bar{J} της διατομής του δεσμού (Σχήμα 5-6c). Η καμπτική ροπή \bar{M}_b είναι γραμμικώς ανάλογη της σχετικής καμπτικής στροφής θ_b , και εξαρτάται από το γινόμενο της ορθής δυστροπίας \bar{k}_n με τη ροπή αδρανείας \bar{I} της διατομής του δεσμού (Σχήμα 5-6d).



Σχήμα 5-6. Νόμος δύναμης-μετατόπισης για τη δύναμη και τη ροπή δεσμού PB: (a) ορθή δύναμη έναντι επιφάνειας διάκενου παράλληλου δεσμού, (b) διατμητική δύναμη έναντι σχετικής διατμητικής μετατόπισης, (c) στρεπτική ροπή έναντι σχετικής στρεπτικής στροφής και (d) καμπτική ροπή έναντι σχετικής καμπτικής στροφής.

Στο Σχήμα 5-7 δίνεται η περιβάλλουσα αστοχίας του δεσμού PB, όπου $\bar{\tau}_c$ η διατμητική αντοχή, \bar{c} η συνοχή, $\bar{\sigma}_c$ η εφελκυστική αντοχή και $\bar{\phi}$ η γωνία τριβής του δεσμού. Η μέση ορθή τάση σ υπολογίζεται από το πηλίκο της ορθής δύναμης \bar{F}_n στον δεσμό προς τη διατομή του \bar{A} . Υπενθυμίζεται πως βάσει της σύμβασης προσήμων που υιοθετεί το PFC, οι θλιπτικές τάσεις ορίζονται αρνητικές.



Σχήμα 5-7. Περιβάλλουσα αστοχίας δεσμού PB.

5.5.5 Παράμετροι

Για να οριστεί ένας δεσμός PB αρκεί να δοθούν τιμές για το μέτρο ελαστικότητάς του (Young's modulus, \bar{E}_c) και εκείνο των επαφών (E_c), τη συνοχή (c) και τη γωνία τριβής ($\bar{\phi}$) του, την εφελκυστική αντοχή του ($\bar{\sigma}_c$), τον λόγο ($\bar{\kappa}^*$) της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία του (\bar{k}_n / \bar{k}_s) και αντιστοίχως εκείνον της επαφής ($\kappa^* = k_n / k_s$), τον συντελεστή τριβής (μ) μεταξύ των σωματιδίων, τον συντελεστή απόσβεσης, την ακτίνα \bar{R} της διατομής του δεσμού μεταξύ των σωματιδίων και τη μεταξύ τους απόσταση για την οποία αυτά ενώνονται με δεσμό.

Οι παράμετροι που ορίζονται από το γραμμικό μοντέλο παράλληλων δεσμών καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5-2. Παράμετροι γραμμικού μοντέλου παράλληλων δεσμών.

Σύμβολο	Όνομα	Εύρος
	linearpbond	Όνομα μοντέλου
Γραμμικές παράμετροι		
k_n	Ορθή δυστροπία [δύναμη/μετατόπιση]	$[0, +\infty)$
k_s	Διατμητική δυστροπία [δύναμη/μετατόπιση]	$[0, +\infty)$
μ	Συντελεστής τριβής	$[0, +\infty)$
g_r	Διάκενο αναφοράς [μήκος]	R
E^*	Ενεργό μέτρο ελαστικότητας [δύναμη/επιφάνεια]	$[0, +\infty)$
κ^*	Λόγος ορθής προς τη διατμητική δυστροπία $\kappa^* \equiv \frac{k_n}{k_s}$	$[0, +\infty)^*$
s	Κατάσταση ολίσθησης $\left\{ \begin{array}{l} \text{true: ολισθαίνει} \\ \text{false: δεν ολισθαίνει} \end{array} \right\}$	{false, true}
Παράμετροι δεσμών PB		
\bar{k}_n	Ορθή δυστροπία [τάση/μετατόπιση]	$[0, +\infty)$
\bar{k}_s	Διατμητική δυστροπία [τάση/μετατόπιση]	$[0, +\infty)$
$\bar{\sigma}_c$	Εφελκυστική αντοχή	$[0, +\infty)$
\bar{c}	Συνοχή	$[0, +\infty)$
$\bar{\phi}$	Γωνία τριβής	$[0, +\infty)$
\bar{B}	Κατάσταση δεσμού: $\left\{ \begin{array}{l} 0: \text{χωρίς δεσμό} \\ 1: \text{χωρίς δεσμό (αστοχία σε εφελκυσμό) \& } \\ 2: \text{χωρίς δεσμό (αστοχία σε διάτμηση)} \\ 3: \text{σε δεσμό} \end{array} \right\}$	{0,1,2,3}
\bar{R}	Ακτίνα δεσμού	$[0, +\infty)$
\bar{E}^*	Ενεργό μέτρο ελαστικότητας δεσμού	$[0, +\infty)$
$\bar{\kappa}^*$	Λόγος ορθής προς τη διατμητική δυστροπία δεσμού $\bar{\kappa}^* \equiv \frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s}$	$[0, +\infty)^*$
* Κατά σύμβαση, κ^* και $\bar{\kappa}^*$ ισούνται με 0 εάν είτε η ορθή είτε η διατμητική δυστροπία είναι 0.		

5.5.6 Μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται συνοπτικά οι μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων του γραμμικού μοντέλου παράλληλων δεσμών.

Πίνακας 5-3. Μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων γραμμικού μοντέλου παράλληλων δεσμών.

Σύμβολο	Εύρος	Περιγραφή
Για την επαφή χωρίς τον δεσμό		
deformability		Καθορισμός παραμορφωσιμότητας
E^*	$[0, +\infty)$	Ενεργό μέτρο ελαστικότητας
κ^*	$[0, +\infty)^*$	Λόγος ορθής προς τη διατμητική δυστροπία
Για τον παράλληλο δεσμό		
pb deformability		Καθορισμός παραμορφωσιμότητας δεσμού
\bar{E}^*	$[0, +\infty)$	Ενεργό μέτρο ελαστικότητας δεσμού
$\bar{\kappa}^*$	$[0, +\infty)^*$	Λόγος ορθής προς τη διατμητική δυστροπία δεσμού $\bar{\kappa}^* \equiv \frac{\bar{k}_n}{\bar{k}_s}$
bond		Εγκατάσταση δεσμού εάν $g_c \in G$
G	$(-\infty, +\infty)$	Διάστημα διάκενου
* Κατά σύμβαση, θέτοντας $\kappa^* = 0$ τίθεται k_s αλλά δε μεταβάλλει το k_n .		

➤ Παραμορφωσιμότητα επαφής (deformability)

Η παραμόρφωση ενός ομοιογενούς, ισότροπου, καλοσυνδεμένου κοκκώδους υλικού δύναται να αναπαρίσταται από ένα ισότροπο μοντέλο, το οποίο περιγράφεται με τις ελαστικές σταθερές του μέτρου ελαστικότητας Young (E) και του λόγου Poisson (ν). Τα E και ν συσχετίζονται με το ενεργό μέτρο ελαστικότητας (E^*) και τον λόγο ορθής προς διατμητικής δυστροπίας ($\kappa^* \equiv k_n/k_s$) στις επαφές ως εξής: το E σχετίζεται με το E^* , όπου το E αυξάνεται όσο αυξάνεται το E^* . Το ν σχετίζεται με το κ^* , με το ν να αυξάνεται μέχρι μια οριακή θετική τιμή όσο αυξάνεται το κ^* . Καθορίζοντας τα E^* και κ^* , προσδιορίζονται τα k_n και k_s ως εξής:

$$k_n := A E^* / L, \quad k_s := k_n / \kappa^*$$

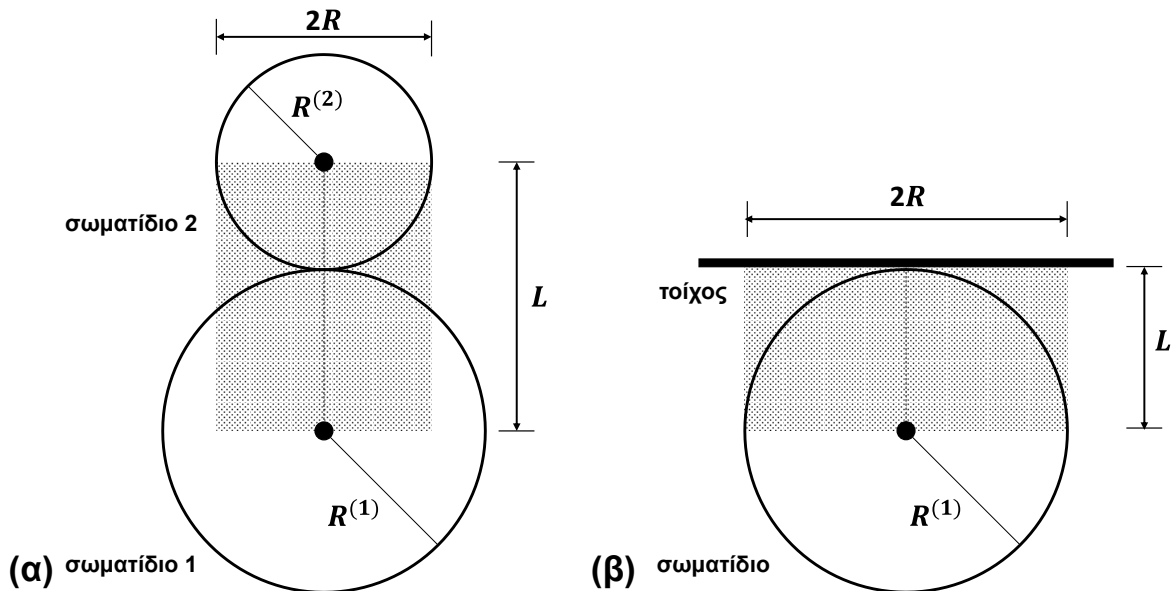
Εξίσωση 5-2

με

$$A = \begin{cases} 2Rt & , \quad 2D \ (t = 1) \\ \pi R^2 & , \quad 3D \end{cases}, \quad R = \begin{cases} \min(R^{(1)}, R^{(2)}) & , \quad \text{επαφή σωματιδίων} \\ R^{(1)} & , \quad \text{επαφή σωματιδίου με τοίχο} \end{cases}$$

$$L = \begin{cases} R^{(1)} + R^{(2)} & , \quad \text{επαφή σωματιδίων} \\ R^{(1)} & , \quad \text{επαφή σωματιδίου με τοίχο} \end{cases}$$

όπου $R^{(i)}$ η ακτίνα του σωματιδίου i . Ο πρώτος όρος στην Εξίσωση 5-2 προκύπτει εξισώνοντας την ορθή δυστροπία με την ατένεια (axial stiffness) του όγκου του υλικού, όπως στο Σχήμα 5-8.



Σχήμα 5-8. Ο όγκος του υλικού που σχετίζεται με την επαφή μεταξύ σωματιδίων (α) και μεταξύ σωματιδίου και τοίχου.

➤ **Παραμορφωσιμότητα δεσμού PB (pb deformability)**

Η παραμορφωσιμότητα του παράλληλου δεσμού ορίζεται ως εξής:

$$\bar{k}_n := \bar{E}^* / L \quad , \quad \bar{k}_s := \bar{k}_n / \bar{\kappa}^*$$

Εξίσωση 5-3

$$\text{με } L = \begin{cases} R^{(1)} + R^{(2)} & , \quad \text{επαφή σωματιδίων} \\ R^{(1)} & , \quad \text{επαφή σωματιδίου με τοίχο} \end{cases}$$

➤ **Εγκατάσταση δεσμού (bond)**

Ένας παράλληλος δεσμός δημιουργείται στη δεύτερη ($2^{\text{η}}$) διεπιφάνεια αν το διάκενο της επαφής μεταξύ των σωματιδίων βρίσκεται εντός της διατομής του διάκενου του δεσμού. Εάν δεν οριστεί κάποιο διάκενο δεσμού, τότε ο δεσμός εγκαθίσταται μόνο μεταξύ των αλληλεπικαλυπτόμενων σωματιδίων.

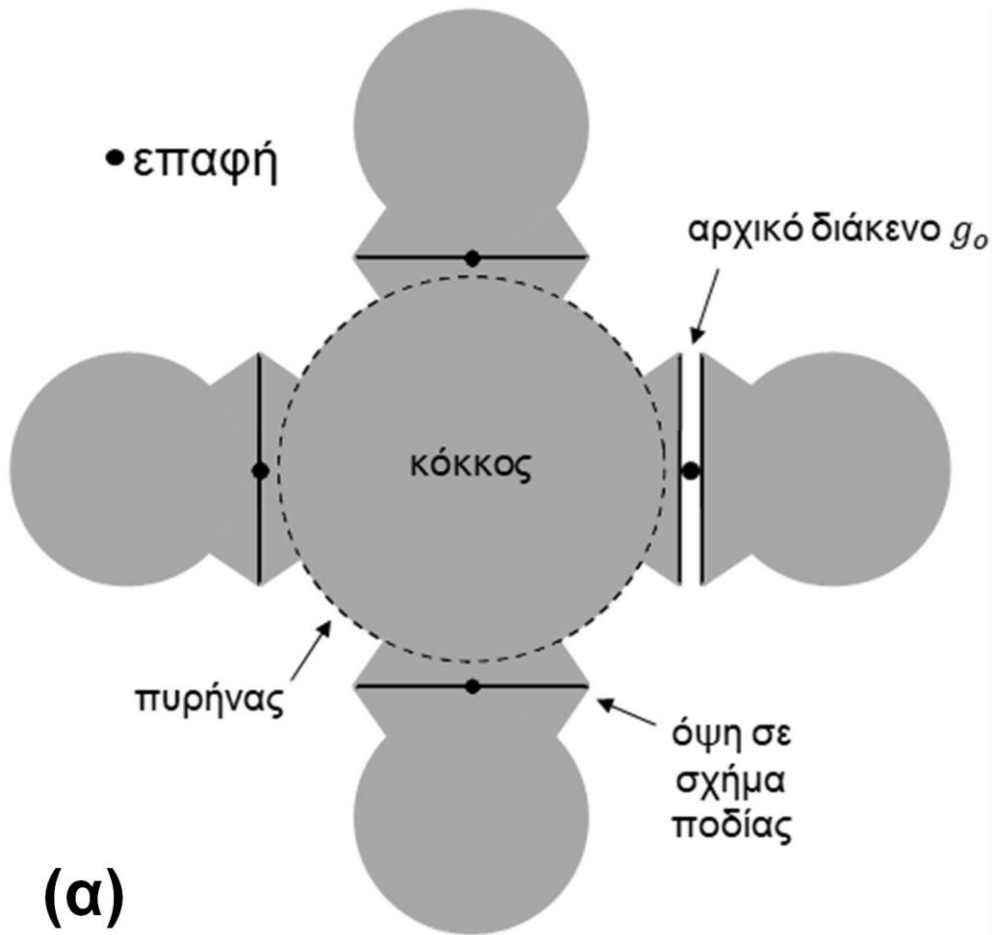
5.6 Μοντέλο επίπεδων δεσμών

Το μοντέλο επίπεδων δεσμών (Flat-Joint, FJ) δύναται να εφαρμοστεί τόσο στις επαφές μεταξύ των σωματιδίων, όσο και μεταξύ σωματιδίων και τοίχων.

5.6.1 Υλικό με επίπεδους δεσμούς

Μια επαφή δεσμού FJ προσομοιώνει τη συμπεριφορά μιας διεπαφής μεταξύ δύο νοητών επιφανειών, όπου η κάθε μία συνδέεται άκαμπτα σε κάποιο τμήμα ενός σώματος (σφαίρας, τοίχου, κόκκου). Η ενεργή επιφάνεια κάθε σωματιδίου διαιρείται σε προκαθορισμένο πλήθος τμημάτων που ονομάζονται *στοιχεία*, όπου κάθε ένα ανεξάρτητα αλληλοεπιδρά με την αντίστοιχη νοητή επιφάνεια του εφαπτόμενου τμήματος του εταίρου σωματιδίου. Οι νοητές επιφάνειες ονομάζονται «όψεις» και για τα μεν διδιάστατα (2D) μοντέλα είναι γραμμές, για τα δε τριδιάστατα μοντέλα (3D) έχουν σχήμα κυκλικού δίσκου.

Τα σωματίδια ενός αριθμητικού μοντέλου με δεσμούς FJ εμφανίζονται ως κόκκοι, καθένας από τους οποίους απεικονίζεται ως πυρήνας (κυκλικός για 2D, σφαιρικός για 3D) περιβαλλόμενος από μια σειρά όψεων σε σχήμα ποδιάς. Οι εν λόγω κόκκοι δημιουργούνται μόλις εφαρμοστεί το μοντέλο Flat-Joint στις επαφές μεταξύ των σωματιδίων ενός συσσωματώματος (Σχήμα 5-9). Διεπαφή υφίσταται μεταξύ κάθε συνόλου παρακείμενων όψεων και διακρίνεται σε στοιχεία. Η κατάσταση του κάθε στοιχείου είναι είτε σε δεσμό είτε όχι. Η αστοχία στη διεπιφάνεια κάθε ζεύγους στοιχείων συμβάλλει σταδιακά στη θραύση του δεσμού και αναφέρεται ως *ρωγμή* (Σχήμα 5-10). Εάν σε επαφή FJ η σχετική μετατόπιση της νοητής διεπιφάνειας γίνει μεγαλύτερη από τη διάμετρο της εν λόγω επαφής, τότε οι παρακείμενες όψεις αφαιρούνται διαγράφοντας τον δεσμό και απελευθερώνοντας τα σωματίδια. Εάν τα συγκεκριμένα σωματίδια έρθουν σε επαφή, τότε χωρίς να βρίσκονται σε δεσμό συμπεριφέρονται σύμφωνα με το γραμμικό μοντέλο επαφής.

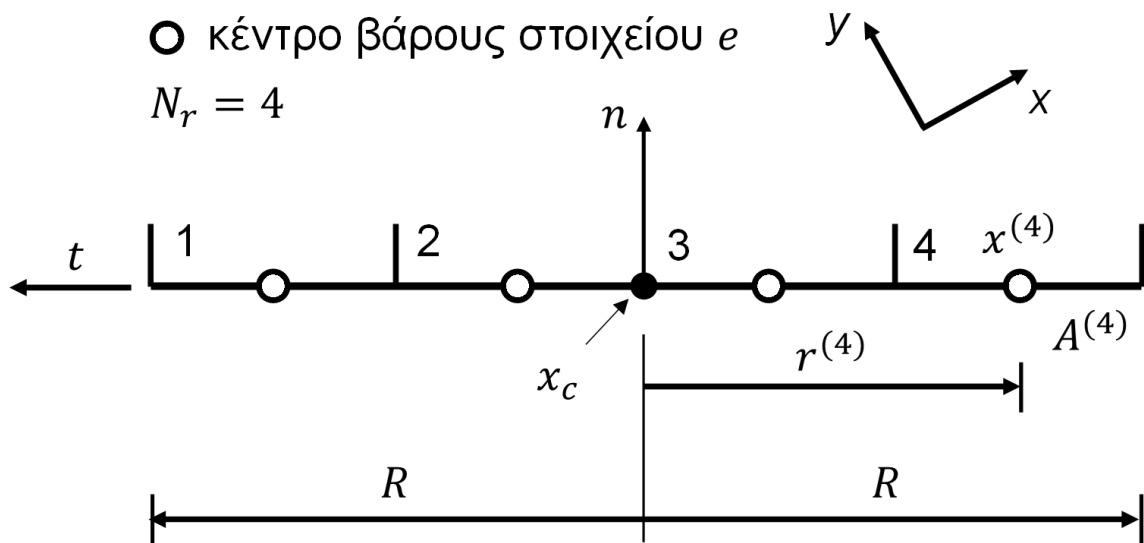


Σχήμα 5-9. Αρχικό συσσωμάτωμα κόκκων με όψεις σε σχήμα ποδιάς (α) και υλικό FJ (β).

5.6.2 Κινηματικές μεταβλητές

Η διεπιφάνεια του μοντέλου Flat-Joint παραμένει κεντραρισμένη ως προς το επίπεδο επαφής και περιστρέφεται με αυτό, έτσι ώστε το σύστημα συντεταγμένων της διεπιφάνειας του δεσμού να συμπίπτει με τις συντεταγμένες του επιπέδου της επαφής μεταξύ των σωματιδίων. Το διάκενο της διεπιφάνειας του δεσμού εκφράζεται ακολουθώντας συναρτήσει της επιφάνειας του διάκενου της επαφής και του αντίστοιχου διανύσματος κάμψης-στροφής¹. Η σχετική κίνηση των νοητών επιφανειών ποικίλει κατά μήκος της διεπιφάνειας του δεσμού.

Η διεπιφάνεια των 2D μοντέλων FJ εμφανίζεται ως ορθογώνιο πλάτους $2R$ και μοναδιαίου πάχους. Η θέση ενός σημείου x που βρίσκεται στη διεπαφή εκφράζεται από τη σχετική του θέση $r = x - x_c$. Η διακριτοποίηση της διεπιφάνειας (Σχήμα 5-10) εξαρτάται από τον αριθμό των στοιχείων ίσου μήκους κατά την ακτινική διεύθυνση (N_r).



Σχήμα 5-10. Διακριτοποίηση της διεπιφάνειας διδιάστατου (2D) μοντέλου FJ, όπου φαίνεται η σύμβαση της αρίθμησης των στοιχείων (αριστερά) και της παραμετροποίησης ενός τυπικού στοιχείου (δεξιά).

¹ Η κινηματική προσεγγίζει την κίνηση των δύο νοητών επιφανειών, όπου η κάθε μία συνδέεται άκαμπτα σε ένα τμήμα ενός σωματιδίου. Περιορισμό στην τρέχουσα κινηματική προσέγγιση αποτελεί το γεγονός πως όταν τα δύο συζευγμένα σώματα με μία κοινή επαφή FJ μετακινούνται εφαιπτομενικά το ένα προς το άλλο, το διάκενο της διεπαφής αυξάνεται (διότι αυξάνεται το g_s). Ο εν λόγω περιορισμός δύναται να ξεπεραστεί με την εισαγωγή μιας εναλλακτικής διεπαφής στο σύστημα συντεταγμένων που δε θα περιστρέφεται υπό τις ανωτέρω συνθήκες.

Η διεπιφάνεια ενός 3D μοντέλου FJ είναι ένας κυκλικός δίσκος διαμέτρου $2R$. Η θέση ενός σημείου x που βρίσκεται στη διεπιφάνεια εκφράζεται από τη σχετική του θέση $r = x - x_c$. Η διακριτοποίηση της διεπιφάνειας (Σχήμα 5-11) ελέγχεται από τον αριθμό των στοιχείων κατά την ακτινική (N_r) και περιμετρική (N_α) διεύθυνση.

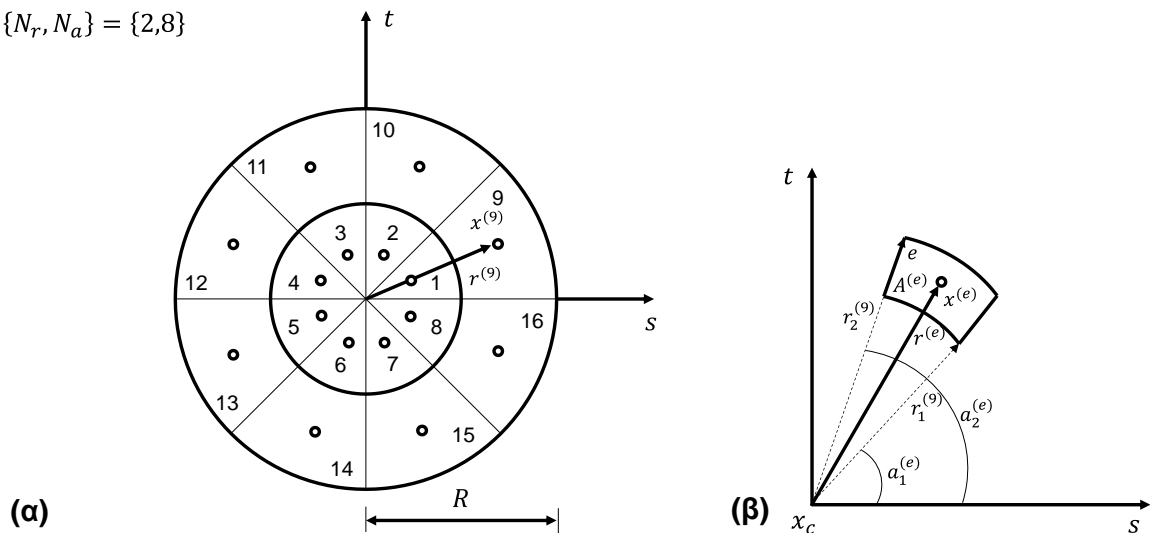
$$s^{(e)} = \frac{\int t dA}{\int dA} = \frac{2}{3} \left(\frac{\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right) \left(\frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$

$$t^{(e)} = \frac{\int t dA}{\int dA} = \frac{2}{3} \left(\frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1} \right) \left(\frac{r_2^3 - r_1^3}{r_2^2 - r_1^2} \right)$$

Εξίσωση 5-4

○ κέντρο βάρους στοιχείου e

$\{N_r, N_\alpha\} = \{2, 8\}$



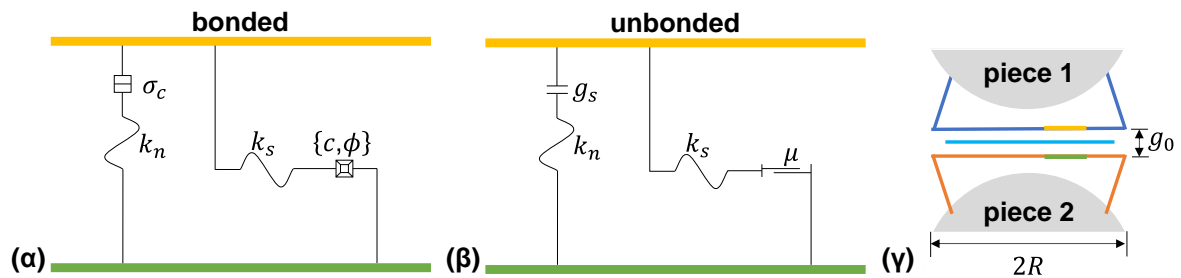
Σχήμα 5-11. Διακριτοποίηση της διεπιφάνειας ενός 3D μοντέλου FJ, όπου φαίνεται η σύμβαση της αρίθμησης των στοιχείων (α) και της παραμετροποίησης ενός τυπικού στοιχείου (β).

5.6.3 Σύνοψη συμπεριφοράς

Το μοντέλο Flat-Joint προσομοιώνει τη μακροσκοπική συμπεριφορά μιας διεπιφάνειας πεπερασμένου μεγέθους, γραμμικά ελαστικής, που είναι μερικώς ή καθολικώς συνδεδεμένη με δεσμό και μπορεί να υποστεί μερική ή πλήρη θραύση. Στο ασύζευκτο τμήμα της διεπιφάνειας η διατμητική αντίσταση είναι μόνο λόγω τριβής (Σχήμα 5-12).

Η διεπιφάνεια διακρίνεται σε στοιχεία. Κάθε στοιχείο είναι είτε συζευγμένο είτε όχι και η θραύση κάθε συζευγμένου στοιχείου συνεισφέρει εν μέρει στη θραύση της διεπιφάνειας. Κάθε συζευγμένο στοιχείο φέρει δύναμη και ροπή σύμφωνα με την καταστατική σχέση δύναμης-μετατόπισης ή ροπής-στροφής. Η συμπεριφορά του

είναι γραμμικά ελαστική μέχρι να ξεπεραστεί η εφελκυστική ή διατμητική αντοχή και ο δεσμός να σπάσει μετατρέποντας το στοιχείο σε ασύζευκτο. Η συμπεριφορά ενός ασύζευκτου στοιχείου είναι γραμμικά ελαστική με παρουσία τριβής, με την εφαρμογή ενός ορίου Coulomb στη διατμητική αντοχή. Με τον τρόπο αυτό η διεπιφάνεια του δεσμού FJ μεταβαίνει από μία πλήρως συνδεδεμένη σε μια πλήρως ασύνδετη κατάσταση με παρουσία τριβής.



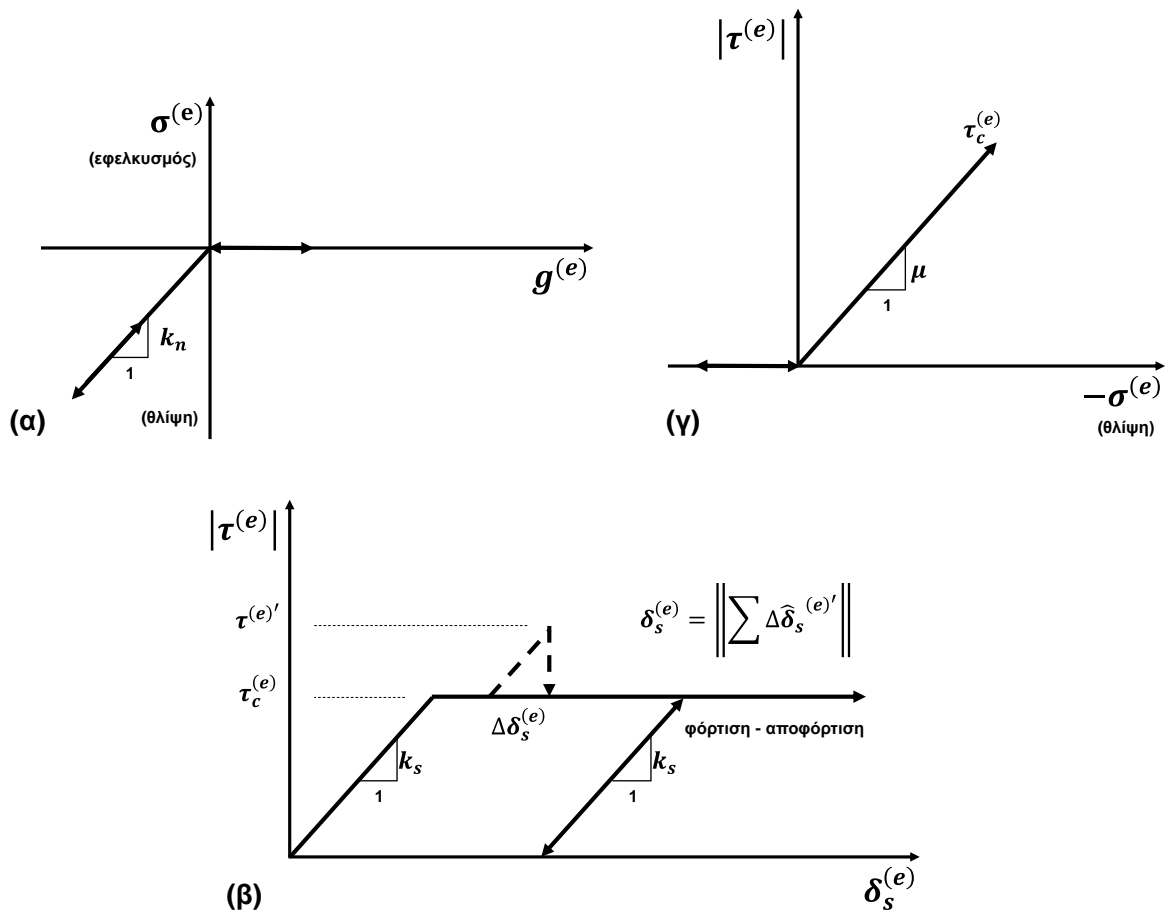
Σχήμα 5-12. Ροϊκές συνιστώσες (α & β) του μοντέλου επίπεδων δεσμών μεταξύ δύο σωματιδίων (γ) (Itasca Consulting Group Inc. 2014).

5.6.4 Διάκενο επαφής

Μια επαφή του μοντέλου Flat-Joint ενεργοποιείται εφόσον κάποιο στοιχείο της είναι είτε συζευγμένο είτε έχει αρνητική τιμή του διάκενου (αλληλοεπικάλυψη δύο σωμάτων). Η καταστατική σχέση δύναμης-μετατόπισης δεν εφαρμόζεται στις ανενεργές επαφές. Η επαφή μπορεί να διαγραφεί μέσω του μηχανισμού ανίχνευσης επαφής, εάν η απόσταση μεταξύ των κέντρων των νοητών επιφανειών γίνεται μεγαλύτερη από τη διάμετρο του δεσμού.

5.6.5 Νόμος δύναμης-μετατόπισης

Οι ορθές και διατμητικές τάσεις που ασκούνται στις επαφές των ασύζευκτων σωματιδίων υπολογίζονται στο κέντρο βάρους για κάθε στοιχείο e της επαφής από την καταστατική σχέση δύναμης-μετατόπισης. Σύμφωνα με την εν λόγω σχέση, η ορθή εφελκυστική τάση $\sigma^{(e)}$ στο στοιχείο e είναι μηδενική (Σχήμα 5-13a). Η διατμητική τάση $\tau^{(e)}$ είναι γραμμικώς ανάλογη της θλιπτικής ορθής τάσης $\sigma^{(e)}$, και εξαρτάται από τη γωνία τριβής μ μεταξύ των σωματιδίων (Σχήμα 5-13c).

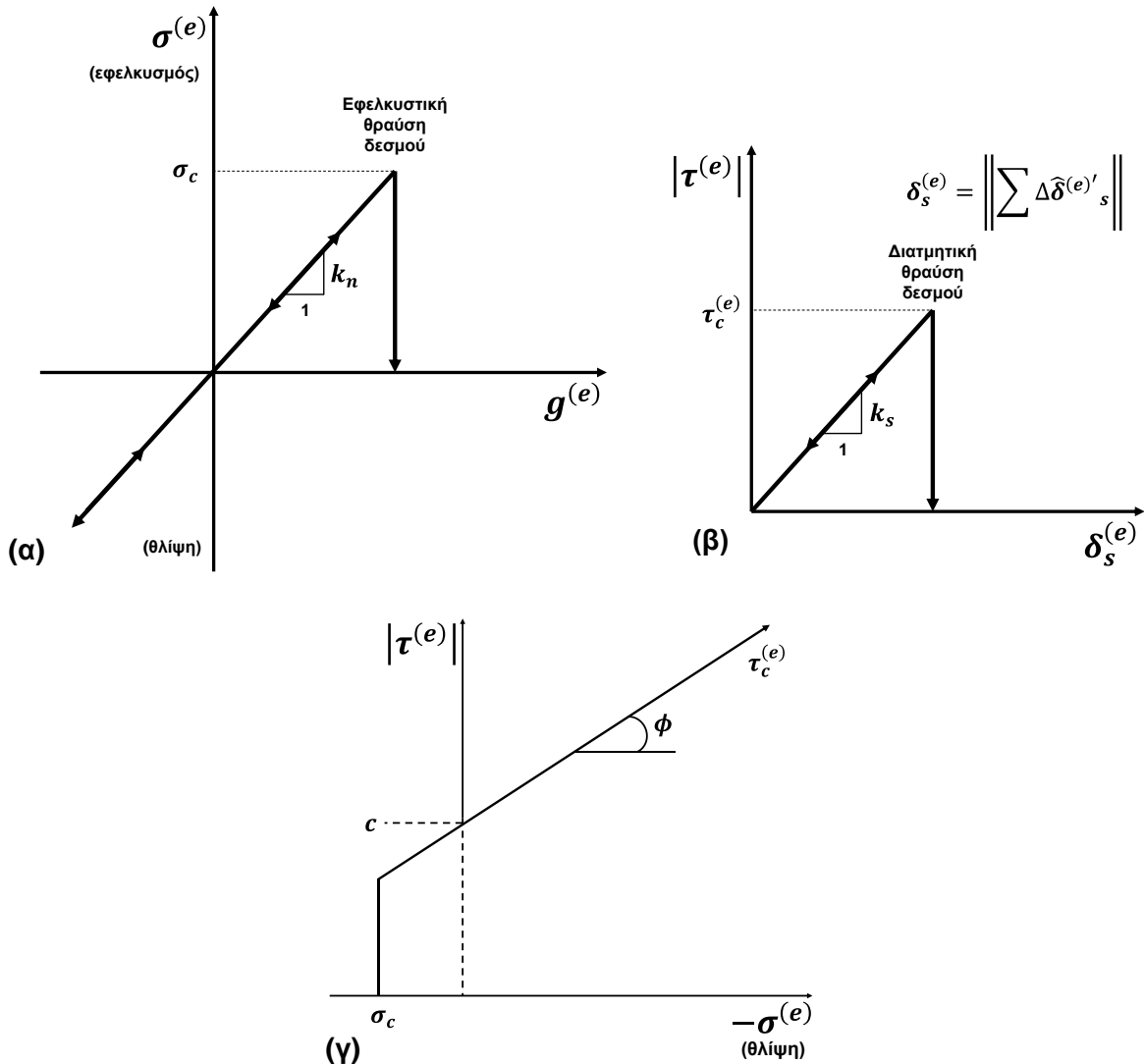


Σχήμα 5-13. Νόμος δύναμης-μετατόπισης για ασύζευκτο στοιχείο FJ: (α) ορθή τάση έναντι διάκενου στοιχείου, (β) διατμητική τάση έναντι σχετικής διατμητικής μετατόπισης και (γ) περιβάλλουσα ολίσθησης.

Οι ορθές και διατμητικές τάσεις που ασκούνται στις επαφές των συζευγμένων σωματιδίων υπολογίζονται στο κέντρο βάρους για κάθε στοιχείο e της επαφής από την καταστατική σχέση δύναμης-μετατόπισης. Σύμφωνα με την εν λόγω σχέση, η ορθή εφελκυστική τάση $\sigma^{(e)}$ του στοιχείου e είναι γραμμικώς ανάλογη του διακένου του, και εξαρτάται από την ορθή δυστροπία k_n του δεσμού (Σχήμα 5-14a). Η διατμητική τάση $\tau^{(e)}$ του στοιχείου e είναι γραμμικώς ανάλογη της διατμητικής μετατόπισης $\delta_s^{(e)}$ του κέντρου βάρους του, και εξαρτάται από τη διατμητική δυστροπία k_s του δεσμού (Σχήμα 5-14b).

Στο Σχήμα 5-14c δίνεται η περιβάλλουσα αστοχίας του στοιχείου e του δεσμού FJ, όπου $\tau_c^{(e)}$ η διατμητική του αντοχή και c η συνοχή, σ_c η εφελκυστική αντοχή και φ η εσωτερική γωνία τριβής του δεσμού. Η διατμητική τάση $\tau^{(e)}$ του στοιχείου e υπολογίζεται από το πηλίκο της διατμητικής δύναμης $F_s^{(e)}$ που του ασκείται προς τη διατομή του $A^{(e)}$. Η ορθή τάση σ^e του στοιχείου e υπολογίζεται από το πηλίκο της

ορθής δύναμης $F_n^{(e)}$ που του ασκείται προς τη διατομή του $A^{(e)}$. Υπενθυμίζεται πως βάσει της σύμβασης των πρόσχημων που υιοθετεί το PFC, οι θλιπτικές τάσεις ορίζονται αρνητικές.



Σχήμα 5-14. Νόμος δύναμης-μετατόπισης για συζευγμένο στοιχείο FJ: (α) ορθή τάση έναντι διάκενου στοιχείου, (β) διατμητική τάση έναντι σχετικής διατμητικής μετατόπισης και (γ) περιβάλλουσα αστοχίας.

5.6.6 Παράμετροι

Για να οριστεί ένας δεσμός FJ αρκεί να δοθούν τιμές για το μέτρο ελαστικότητάς του (Young's modulus, E^*), τη συνοχή (c) και τη γωνία τριβής (ϕ) του, την εφελκυστική αντοχή του (σ_c) τον λόγο (κ^*) της ορθής προς τη διατμητική δυστροπία του (k_n/k_s), τον συντελεστή τριβής (μ) μεταξύ των σωματιδίων, το πλήθος των στοιχείων του, τον συντελεστή απόσβεσης και τη μεταξύ τους απόσταση για την οποία αυτά ενώνονται με δεσμό.

Οι παράμετροι που ορίζονται από το μοντέλο επίπεδων δεσμών καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5-4. Παράμετροι μοντέλου επίπεδων δεσμών.

Σύμβολο	Περιγραφή	Εύρος
N_r	Αριθμός στοιχείων κατά την ακτινική διεύθυνση (συνολικός αριθμός στοιχείων στο 2D)	$[1, +\infty)$
N_α	Αριθμός στοιχείων κατά την περιμετρική διεύθυνση	$[3, +\infty)$
g_0	Αρχικό διάκενο επιφάνειας	$[0.0, +\infty)$
k_n	Ορθή δυστροπία [τάση/μετατόπιση]	$[0.0, +\infty)$
k_s	Διατμητική δυστροπία [τάση/μετατόπιση]	$[0.0, +\infty)$
μ	Συντελεστής τριβής	$[0.0, +\infty)$
σ_c	Εφελκυστική αντοχή	$[0.0, +\infty)$
c	Συνοχή	$[0.0, +\infty)$
ϕ	Γωνία τριβής [μοίρες]	$[0.0, 90.0)$
E^*	Ενεργό μέτρο ελαστικότητας	$[0.0, +\infty)$
κ^*	Λόγος ορθής προς τη διατμητική δυστροπία $\kappa^* \equiv k_n/k_s$	$[0.0, +\infty)$
$s^{(e)}$	Κατάσταση ολίσθησης του στοιχείου (e): $\left\{ \begin{array}{ll} \text{true} & , \text{ ολισθαίνει} \\ \text{false} & , \text{ δεν ολισθαίνει} \end{array} \right\}$	$\{true, false\}$
$B^{(e)}$	Κατάσταση του δεσμού του στοιχείου $(e): \left\{ \begin{array}{l} 0, \text{ χωρίς δεσμό} \\ 1, \text{ χωρίς δεσμό (αστοχία σε εφλεκυσμό)} \\ 2, \text{ χωρίς δεσμό (αστοχία σε διάτμηση)} \\ 3, \text{ σε δεσμό} \end{array} \right\}$	$\{0,1,2,3\}$
g_s	Επιφάνεια διάκενου	

5.6.7 Μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται συνοπτικά οι μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων του μοντέλου επίπεδων δεσμών.

Πίνακας 5-5. Μέθοδοι καθορισμού παραμέτρων μοντέλου επίπεδων δεσμών.

Σύμβολο	Εύρος	Περιγραφή
deformability		Καθορισμός παραμορφωσιμότητας
E^*	$[0.0, +\infty)$	Ενεργό μέτρο ελαστικότητας
$\kappa^* \equiv \frac{k_n}{k_s}$	$[0.0, +\infty)$	Λόγος ορθής προς τη διατμητική δυστροπία
bond		Σύζευξη στοιχείου e ή όλων των στοιχείων
G	R^2	Διάστημα διάκενου
* Εάν είτε η k_n είτε η k_s είναι μηδενικές, τότε μηδενίζεται και ο κ^* .		

➤ Παραμορφωσιμότητα δεσμού (deformability)

Η παραμόρφωση ενός ομοιογενούς, ισότροπου, καλοσυνδεμένου κοκκώδους υλικού δύναται να αναπαρίσταται από ένα ισότροπο μοντέλο, το οποίο περιγράφεται με τις ελαστικές σταθερές του μέτρου ελαστικότητας Young (E) και του λόγου Poisson (ν). Τα E και ν συσχετίζονται με το ενεργό μέτρο ελαστικότητας (E^*) και τον λόγο ορθής προς διατμητικής δυστροπίας ($\kappa^* \equiv k_n/k_s$) στις επαφές ως εξής: το E σχετίζεται με το E^* , όπου το E αυξάνεται όσο αυξάνεται το E^* . Το ν σχετίζεται με το κ^* , με το ν να αυξάνεται μέχρι μια οριακή θετική τιμή όσο αυξάνεται το κ^* . Καθορίζοντας τα E^* και κ^* , προσδιορίζονται τα k_n και k_s ως εξής:

$$k_n := E^*/L \quad , \quad k_s := k_n/\kappa^*$$

Εξίσωση 5-5

$$\text{με } L = \begin{cases} R^{(1)} + R^{(2)} & , \quad \text{επαφή σωματιδίων} \\ R^{(1)} & , \quad \text{επαφή σωματιδίου με τοίχο} \end{cases}$$

όπου $R^{(i)}$ η ακτίνα του σωματιδίου i . Ο πρώτος όρος στην Εξίσωση 5-5 προκύπτει εξισώνοντας την ορθή δυστροπία με την ατένεια (=axial stiffness) του όγκου του υλικού, όπως στο Σχήμα 5-8.

➤ **Εγκατάσταση δεσμού (bond)**

Η σύζευξη του στοιχείου e πραγματοποιείται εάν το διάκενο της επαφής μεταξύ των σωματιδίων βρίσκεται εντός της διατομής του διάκενου του δεσμού. Εάν δεν οριστεί κάποιο διάκενο δεσμού, τότε ο δεσμός εγκαθίσταται μόνο μεταξύ των αλληλεπικαλυπτόμενων σωματιδίων. Εάν δεν προσδιοριστεί ο αύξων αριθμός του στοιχείου e , τότε πραγματοποιείται σύζευξη σε όλα τα στοιχεία.

5.7 Ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων στο PFC πραγματοποιείται είτε αξιοποιώντας απευθείας τα εργαλεία στο γραφικό περιβάλλον του λογισμικού, είτε εξάγοντας τις επιλεγμένες χρονοϊστορίες των δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία σε υπολογιστικά φύλλα ή άλλα λογισμικά. Στις περισσότερες περιπτώσεις, κρίνεται απαραίτητη η συστηματική καταγραφή στιγμιότυπων του μοντέλου κατά τη διάρκεια των κύκλων επίλυσης με παράλληλη αξιοποίηση των αυτοματοποιημένων εργαλείων ή εκείνων που έχουν οριστεί έπειτα από εντολές FISH. Επιπλέον, ενδείκνυται η προσομοίωση σε στάδια, και η αποθήκευση των αποτελεσμάτων τους σε ξεχωριστά αρχεία για την εκ των υστέρων αξιολόγησή τους.

Για τις ανάγκες της παρούσας διδακτορικής διατριβής αξιοποιούνται όλα τα ανωτέρω. Συγκεκριμένα, πραγματοποιείται εκ των υστέρων επεξεργασία επιλεγμένων χρονοϊστοριών από ποσότητες ορισμένες είτε απευθείας στο PFC είτε μέσω εντολών FISH. Επιπλέον, τα αποθηκευμένα στιγμιότυπα αποτυπώνουν την κατάσταση και τη θέση των μικρορωγμών, το διάστημα του διακένου μεταξύ των σωματιδίων και τα ομαδοποιημένα μέσω εντολών FISH συσσωματώματα των σωματιδίων που αποκολλώνται από το BPM κατά τη φόρτισή τους.

6 Εργαστηριακές Δοκιμές Χαρακτηρισμού

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές χαρακτηρισμού των υλικών που χρησιμοποιούνται για τα πειράματα της παρούσας διδακτορικής διατριβής, δηλ. σε γύψο, ασβεστόλιθο και τέσσερις (4) ποικιλίες μαρμάρου:

- Λευκό μάρμαρο από την περιοχή της Βέροιας («Βέροια»).
- Γκρίζο μάρμαρο από την περιοχή του Πάρνωνα («Νεφέλη»).
- Δύο (2) ποικιλίες από τον Βώλακα Δράμας («Βώλακας Άριστον I» & «Βώλακας II»).
- Μπεζ ασβεστόλιθος από τα Καρναζέικα του Ναυπλίου («Απόλλων»).

Σημειώνεται ότι, με τον όρο *αξονική τάση* (σ_a) στην παρούσα διατριβή, νοείται το πηλίκο της εφαρμοζόμενης αξονικής δύναμης από τη σερβο-υδραυλική μηχανή προς το εμβαδό των βάσεων των δοκιμίων.

6.1 Πειραματική διαδικασία

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων γύψου και μαρμάρου εκτελούνται δοκιμές μονοαξονικής (UCS) και αντιδιαμετρικής θλίψης (δοκιμές Brazilian-BTS). Οι δοκιμές UCS στα δοκίμια μαρμάρου πραγματοποιούνται σε πλαίσιο θλίψης δυναμικότητας 5000 kN ενώ οι δοκιμές Brazilian σε πλαίσιο δυναμικότητας 250 kN. Για τις αντίστοιχες δοκιμές UCS των δοκιμίων του γύψου επιλέγεται το πλαίσιο δυναμικότητας 250 kN, ενώ για τις δοκιμές Brazilian πλαίσιο δυναμικότητας 15 kN. Οι δοκιμές Brazilian εκτελούνται με χρήση σιαγόνων κατά ISRM (International Society for Rock Mechanics) (ISRM 1978).

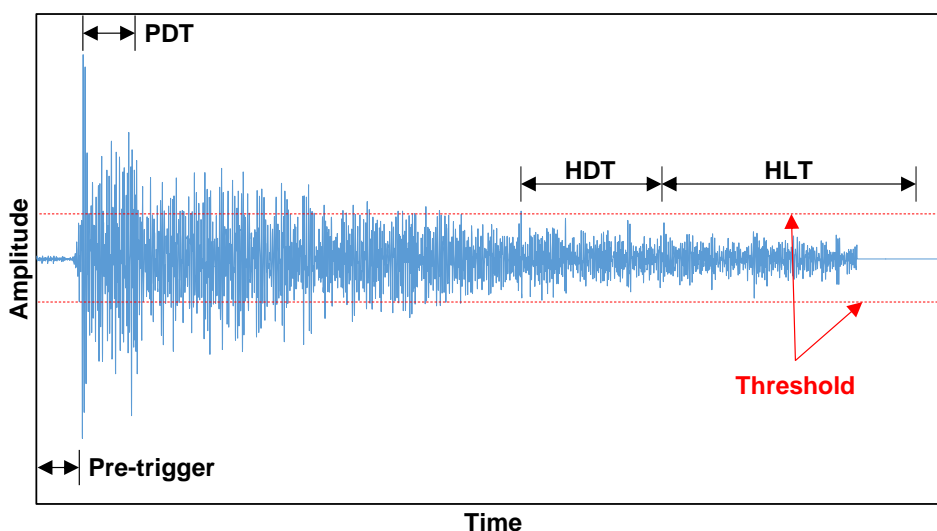
Για την ανίχνευση και καταγραφή των φαινομένων Ακουστικής Εκπομπής (AE) κατά τη διάρκεια των δοκιμών στα δοκίμια μαρμάρου χρησιμοποιείται οκτακάναλη (8-κάναλη) συσκευή καταγραφής και αισθητήρες AE R15 και R15a (resonant frequency: 150 kHz) της PAC (Physical Acoustics Corporation) τοποθετημένους σε προκαθορισμένες θέσεις στην επιφάνεια των δοκιμίων. Οι αισθητήρες συνδέονται μέσω προενισχυτών, ρυθμισμένων στα 40 dB. Το κατώφλι (threshold) για τον διαχωρισμό των λαμβανόμενων σημάτων από τον θόρυβο του περιβάλλοντος ορίζεται στα 45 dB για τις ασβεστιτικές ποικιλίες μαρμάρου και τον ασβεστόλιθο, και στα 30-35 dB για τα δολομιτικά μάρμαρα. Λεπτομερής παρουσίαση των

παραμέτρων που επιλέγονται κατά το στάδιο της καταγραφής (acquisition) των ΑΕ με το λογισμικό ΑΕ WIN της MISTRAS GROUP στις δοκιμές των υλικών, δίνεται στον παρακάτω πίνακα, ενώ στο Σχήμα 6-1 ακολουθεί παράδειγμα σε μια ενδεικτική κυματομορφή σήματος ΑΕ.

Πίνακας 6-1. Τιμές παραμέτρων Ακουστικών Εκπομπών κατά το στάδιο της καταγραφής (acquisition) των ασβεστιτικών και δολομιτικών υλικών.

	Ασβεστιτικά μάρμαρα & ασβεστόλιθος	Δολομιτικά μάρμαρα
SF	100 kHz – 1 MHz	
PDT (μsec)	20	
HDT (μsec)	100	
HLT (μsec)	300	
MD (msec)	100	
Threshold (dB)	45	30 - 35
Pre-Amplification (dB)	40	
Pre-Trigger (μsec)	125	

Σημείωση: σημείο αναφοράς αποτελεί η χρονική στιγμή t_0 όπου το πλάτος ενός σήματος ξεπερνάει για πρώτη φορά το προκαθορισμένο κατώφλι (threshold). SF (sensor frequency): το εύρος συχνοτήτων των αισθητήρων, PDT (Peak Definition Time): το χρονικό διάστημα για τον ορισμό του μεγίστου ενός σήματος έπειτα από t_0 , HDT (Hit Definition Time): το χρονικό διάστημα που ο εξοπλισμός αναμένει για την καταγραφή δύο διαδοχικών πλάτων σήματος μεγαλύτερων του κατωφλιού, HLT (Hit Lockout Time): το χρονικό διάστημα που έπεται του HDT όπου ό,τι καταγράφεται από τον αισθητήρα αντιστοιχίζεται στο τελευταίο σήμα, MD (Max Duration): ο μέγιστος χρόνος που μπορεί να αποδοθεί σε ένα σήμα, Pre-amplification: η προενίσχυση του σήματος από τον εξοπλισμό, Pre-trigger: το καταγραφόμενο διάστημα που προηγείται του t_0 .



Σχήμα 6-1. Παράδειγμα κυματομορφής σήματος ΑΕ και των παραμέτρων που παρουσιάζει ο Πίνακας 6-1.

Ο προσδιορισμός της αξονικής παραμόρφωσης των δοκιμίων κατά τις δοκιμές UCS πραγματοποιείται με τη χρήση τριών LVDTs σε γωνία 120° για την καταγραφή της βράχυνσης του δοκιμίου μεταξύ των δύο αλουμινένιων δακτυλίων στους οποίους είναι προσαρμοσμένα. Η διαμετρική τροπή υπολογίζεται από τη μέτρηση της μεταβολής της περιμέτρου των κυλινδρικών δοκιμίων με εκτασιόμετρο τύπου αλυσίδας. Σε μέρος των δοκιμών πραγματοποιείται οπτική παρακολούθηση με λήψη βίντεο στα 1200 fps (καρέ/δευτερόλεπτο).

Τέλος, κατά τις δοκιμές υπερήχων χρησιμοποιείται η συσκευή PUNDIT7 (Portable Ultrasonic Non-Destructive Indicating Tester) και ο παλμογράφος Tektronix TDS 1012B με μορφοτροπείς (transducers) συχνότητας 54 kHz για τη μέτρηση της ταχύτητας των διαμηκών *P*-κυμάτων, και με συχνότητας 1 MHz για τη μέτρηση της ταχύτητας των εγκάρσιων *S*-κυμάτων. Στη διεπιφάνεια μορφοτροπέων και δοκιμίου εφαρμόζεται γέλη υπερήχων ως υλικό σύζευξης για την ορθότερη μέτρηση των χρόνων μετάδοσης των παλμών (Σχήμα 6-2).



Σχήμα 6-2. Διάταξη για τη μέτρηση της ταχύτητας των υπερήχων σε δοκίμιο μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι».

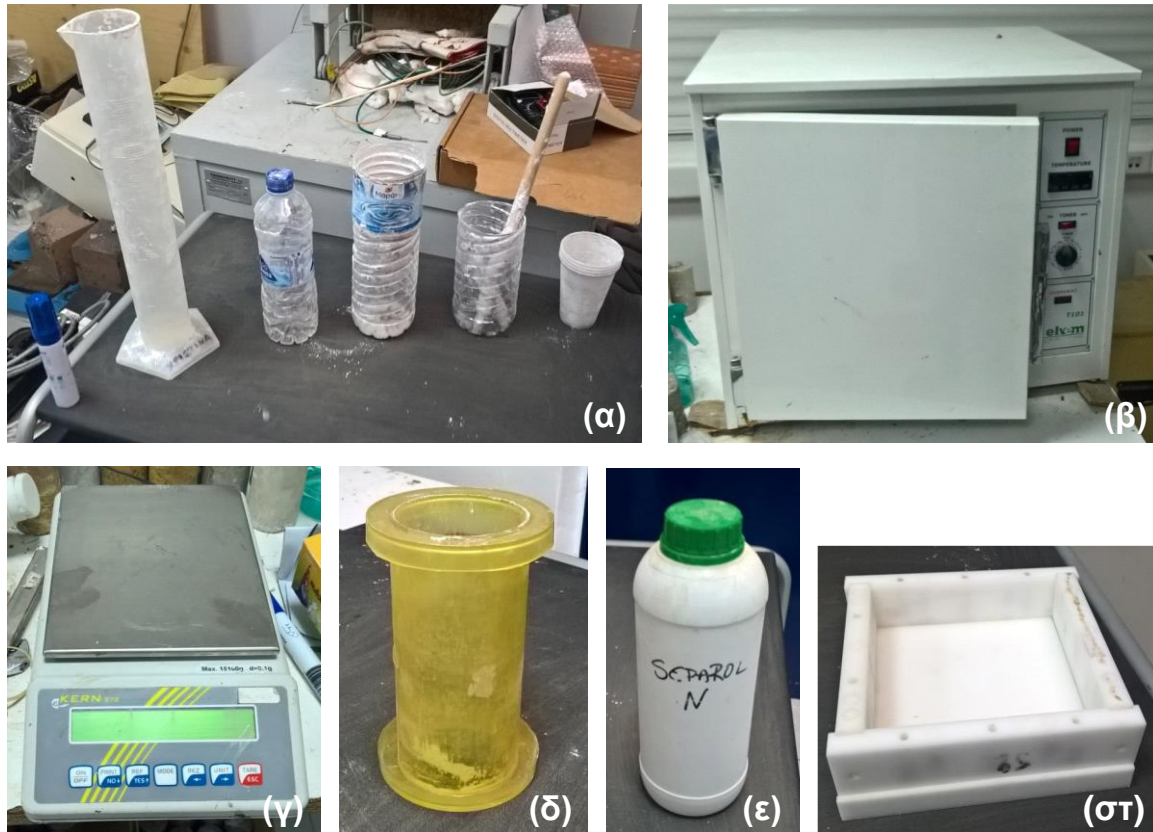
6.2 Γύψος

Για την παρασκευή των δοκιμίων γύψου χρησιμοποιείται κοινός οικοδομικός γύψος αναμεμιγμένος με νερό. Κατά τη διάρκεια της εργαστηριακής μελέτης με το εν λόγω υλικό, παρασκευάζεται μεγάλη ποσότητα δοκιμίων με σκοπό την επιλογή της βέλτιστης αναλογίας γύψου/νερού, με γνώμονα τη μέγιστη δυνατή αντοχή σε θλίψη του στερεοποιημένου δείγματος. Τελικώς, τα δοκίμια παρασκευάζονται με κατά

βάρος αναλογία νερού : γύψου, 1 : 1.42. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει (Σχήμα 6-3):

- Δοχεία ανάμιξης μείγματος.
- Μέσο ανάδευσης.
- Εργαστηριακό φούρνο.
- Ζυγαριά ακριβείας.
- Καλούπια κυλινδρικών δοκιμίων.
- Καλούπια πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 15 cm x 15 cm x 4 cm από πλάκες Acetal Polymer.
- Λιπαντικό έλαιο SEPAROL ώστε να απομακρυνθούν τα καλούπια έπειτα από την παραμονή των δοκιμίων στον φούρνο.

Αρχικά τοποθετείται το νερό στο δοχείο ανάμιξης και προστίθεται σταδιακά ο γύψος εξασφαλίζοντας τη συνεχή ανάδευση του μίγματος. Μετά την πλήρη προσθήκη του γύψου το μίγμα αναδεύεται για 2 min και στη συνέχεια τοποθετείται στο επιθυμητό καλούπι. Στη συνέχεια το μίγμα τοποθετείται στο φούρνο σε θερμοκρασία 40 °C και αφήνεται να στερεοποιηθεί για 6 ώρες οπότε και απομακρύνεται το καλούπι. Το δοκίμιο στη συνέχεια παραμένει στον φούρνο για τέσσερις (4) ημέρες, και κατόπιν αφήνεται για 1 ημέρα σε θερμοκρασία δωματίου πριν από την εκτέλεση της προκαθορισμένης δοκιμής.



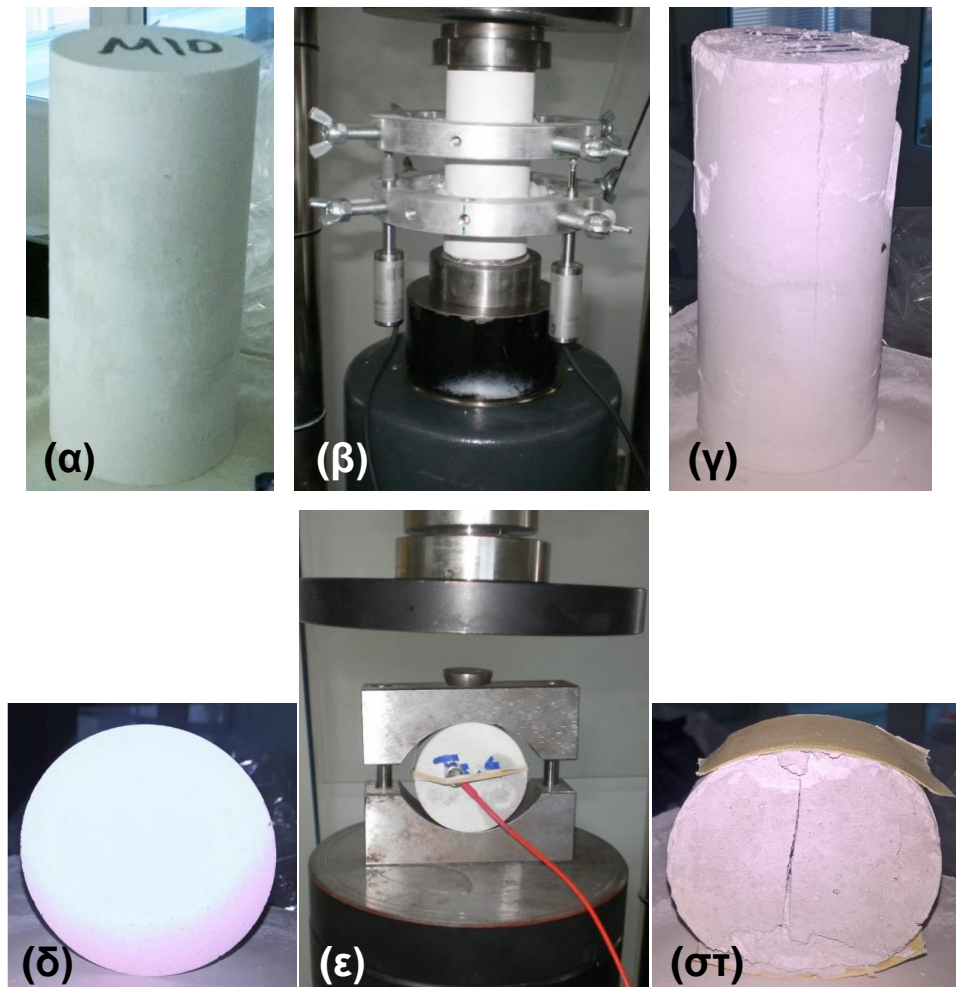
Σχήμα 6-3. Χρησιμοποιηθέν εξοπλισμός προετοιμασίας δοκιμών γύψου. α) Ογκομετρικός σωλήνας, δοχεία και μέσα ανάδευσης, βοηθητικά δοχεία, β) φούρνος, γ) ζυγαριά ακριβείας, δ) καλούπι δοκιμών UCS και Brazilian test, ε) έλαιο SEPAROL και στ) καλούπι Acetal Polymer φυσικών μοντέλων.

Για τον χαρακτηρισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, αξιοποιούνται δεδομένα από δώδεκα (12) δοκιμές UCS και τέσσερις (4) δοκιμές Brazilian. Τα κυλινδρικά δοκίμια για τη δοκιμή UCS έχουν μέση διάμετρο 55.75 mm και λόγο ύψους/διαμέτρου ίσο με 2.1. Οι δίσκοι για τη δοκιμή Brazilian έχουν μέση διάμετρο 55.66 mm και λόγο διαμέτρου/πάχους ίσο με 2.2. Το τελικό μείγμα έπειτα από παραμονή τεσσάρων (4) ημερών στον φούρνο σε θερμοκρασία 40°C αποκτά πυκνότητα d ίση με 1070.67 kg/m³, μέσο μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus) E ίσο με 3.57 GPa, αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci} ίση με 6.95 MPa, και αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (Brazilian) σ_{tB} ίση με 1.67 MPa (Πίνακας 6-2).

Πίνακας 6-2. Μηχανικές ιδιότητες μείγματος γύψου με κατά βάρος αναλογία νερού : γύψου, 1 : 1.42.

Μέγεθος	Τιμή
σ_{ci} (MPa)	6.95 ± 1.4
E (GPa)	3.57 ± 0.5
σ_{tB} (MPa)	1.67 ± 0.15
d (kg/m ³)	1070.67 ± 13

Όπως φαίνεται και στις εικόνες που δίνονται στο Σχήμα 6-4, τα κυλινδρικά δοκίμια με το πέρασ της δοκιμής UCS αστοχούν με αξονική θραύση παράλληλα στη διεύθυνση φόρτισης, ενώ στα δοκίμια αντιδιαμετρικής θλίψης σχηματίζεται εφελκυστική ρωγμή κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης.

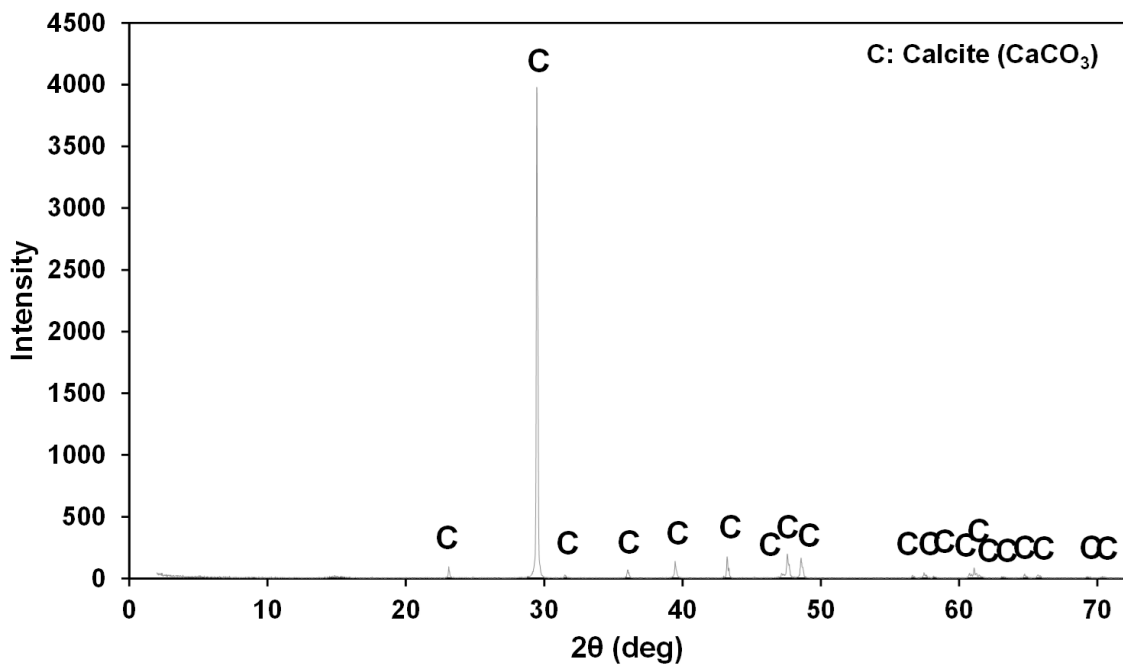


Σχήμα 6-4. Ενδεικτικά δοκίμια χαρακτηρισμού γύψου πριν (α & δ), κατά τη διάρκεια (β & ε) και μετά το πέρας (γ & στ) των εργαστηριακών δοκιμών.

6.3 Μάρμαρο «Βέροια»

6.3.1 Παρουσίαση υλικού

Πρόκειται για λευκό λεπτόκοκκο δολομιτικό μάρμαρο αποτελούμενο κυρίως από ασβεστίτη, με σαφή διεύθυνση γκριζων ταινιώσεων (παράλληλα στον άξονα X), εξορυσσόμενο από την περιοχή της Βέροιας. Ο Πίνακας 6-3 παρουσιάζει την ορυκτολογική σύνθεση (%) όπως προκύπτει από την ανάλυση XRD (X-Ray Diffraction) (Σχήμα 6-5) με το περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus. Ο Πίνακας 6-4 περιλαμβάνει τη χημική ανάλυση (%) του υλικού όπως είναι διαθέσιμη από την εταιρία που παραχώρησε το υλικό (ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε.).



Σχήμα 6-5. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Βέροια», όπως προκύπτουν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.

Πίνακας 6-3. Ορυκτολογική σύσταση (%) ποικιλίας μαρμάρου «Βέροια».

Ορυκτό	%
Ασβεστίτης	>97
Άλλα ορυκτά	<3

Πίνακας 6-4. Χημική ανάλυση ποικιλίας μαρμάρου «Βέροια», σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία της ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε.

Χημική ένωση	Ποσοστό συμμετοχής (%)	Χημική ένωση	Ποσοστό συμμετοχής (%)
CaO	54.90	K ₂ O	0.04
MgO	0.25	Al ₂ O ₃	0.40
SiO ₂	0.06	MnO	0.02
Fe ₂ O ₃	0.14	CO ₂	43.20
Na ₂ O	0.07		

6.3.2 Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού

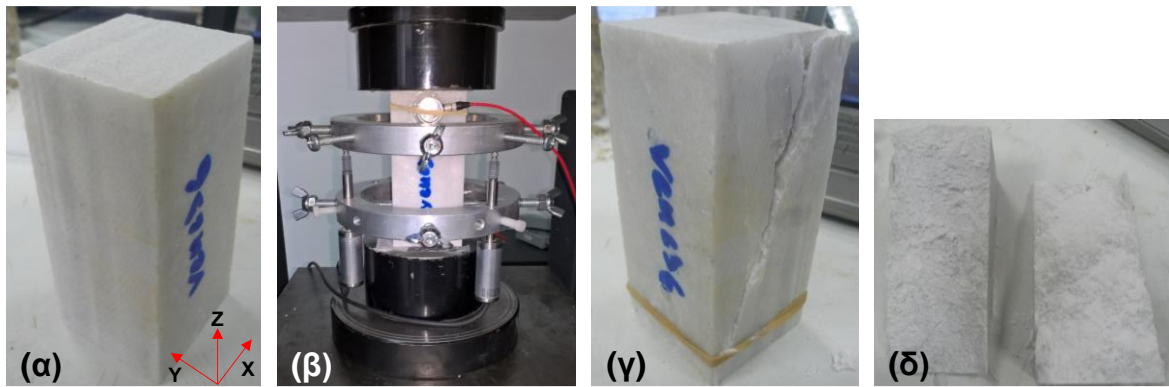
Ακολούθως, ο Πίνακας 6-5 περιέχει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκεκριμένης ποικιλίας μαρμάρου. Σημειώνεται ότι κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) τα δοκίμια φορτίζονται κατά τον άξονα Z σε καρτεσιανό σύστημα αξόνων XYZ, με τις ταινιώσεις του μαρμάρου να παρουσιάζονται παράλληλα στο επίπεδο XZ όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-6α. Το επίπεδο φόρτισης διατηρείται ίδιο τόσο για τις δοκιμές BTS όσο και για τις δοκιμές θλίψης των φυσικών μοντέλων. Η ταχύτητα των P-κυμάτων καταγράφεται κατά μήκος και των τριών (3) διευθύνσεων XYZ, ενώ η ταχύτητα των S-κυμάτων καταγράφεται μόνο κατά μήκος της διεύθυνσης Z. Τα δοκίμια για τις δοκιμές θλίψης είναι πρισματικά με ύψος 120.2 mm, ισοδύναμη διάμετρο διατομής 59.88 mm και λόγο ύψους/ισοδύναμης διαμέτρου 2. Οι δίσκοι των δοκιμών αντιδιαμετρικής θλίψης έχουν διάμετρο 55.8 mm και πάχος 24.2 mm.

Πίνακας 6-5. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας μαρμάρου «Βέροια».

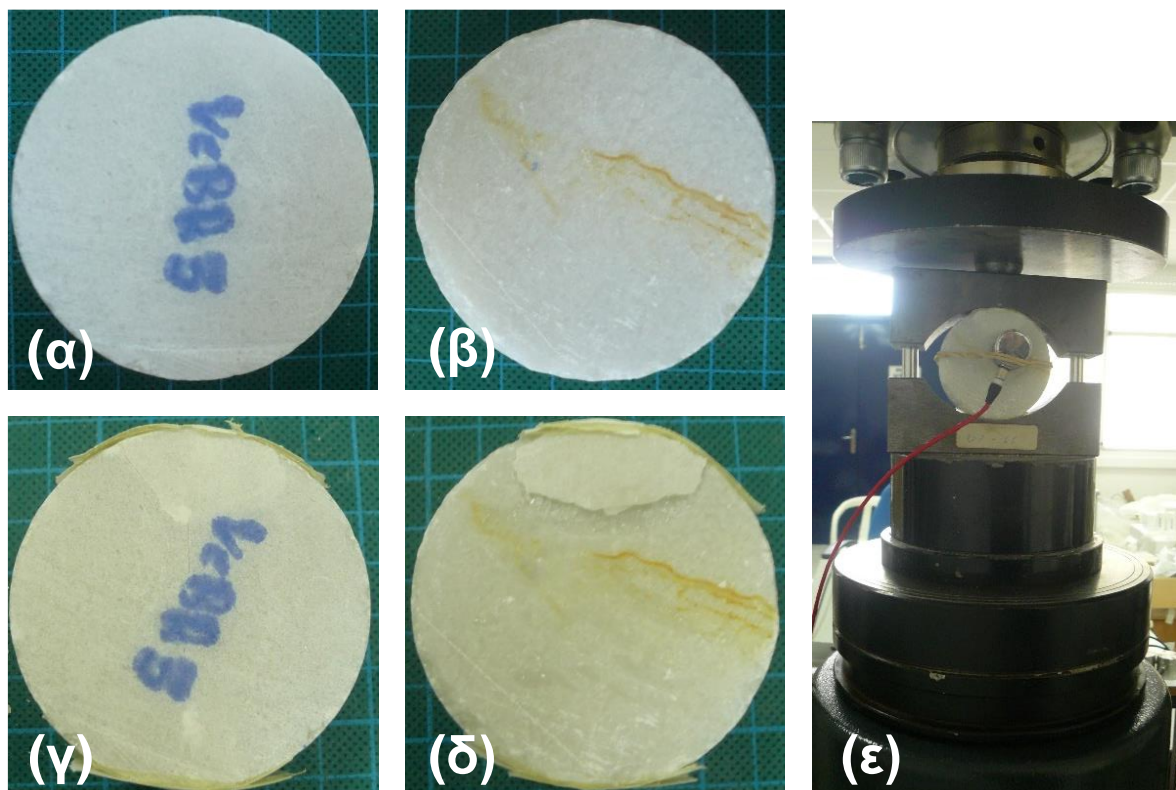
Μηχανική ιδιότητα	Τιμή	Αριθμός δοκιμών
σ_{ci} (MPa) (ρυθμός 750 N/sec)	120.6 ± 16	7
σ_{tB} (MPa) (ρυθμός 200 N/sec)	8.98 ± 1.65	8
E (GPa)	97.5 ± 18	6
d (kg/m ³)	2693.5	9
V_{pX} (m/sec)	6416.6	9
V_{pY} (m/sec)	6247.9	9
V_{pZ} (m/sec)	6754.7	9
V_{sX} (m/sec)	2876.3	9

Σημείωση: σ_{ci} : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{tB} : αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό Brazilian, E : μέτρο ελαστικότητας Young, d : πυκνότητα, V_p : ταχύτητα διαμηκών κυμάτων, V_s : ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων.

Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των δοκιμών χαρακτηρισμού δίνονται ακολούθως. Συγκεκριμένα, παρατίθενται φωτογραφίες δοκιμών πρίσματος και δίσκου για δοκιμές μονοαξονικής και αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian) αντίστοιχα, πριν (άρρηκτη κατάσταση), κατά τη διάρκεια (διάταξη δοκιμών στην πρέσα) και μετά το πέρας των δοκιμών.



Σχήμα 6-6. Φωτογραφίες πρισματικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βέροια» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίους, τα LVDTs και τους αισθητήρες AE.



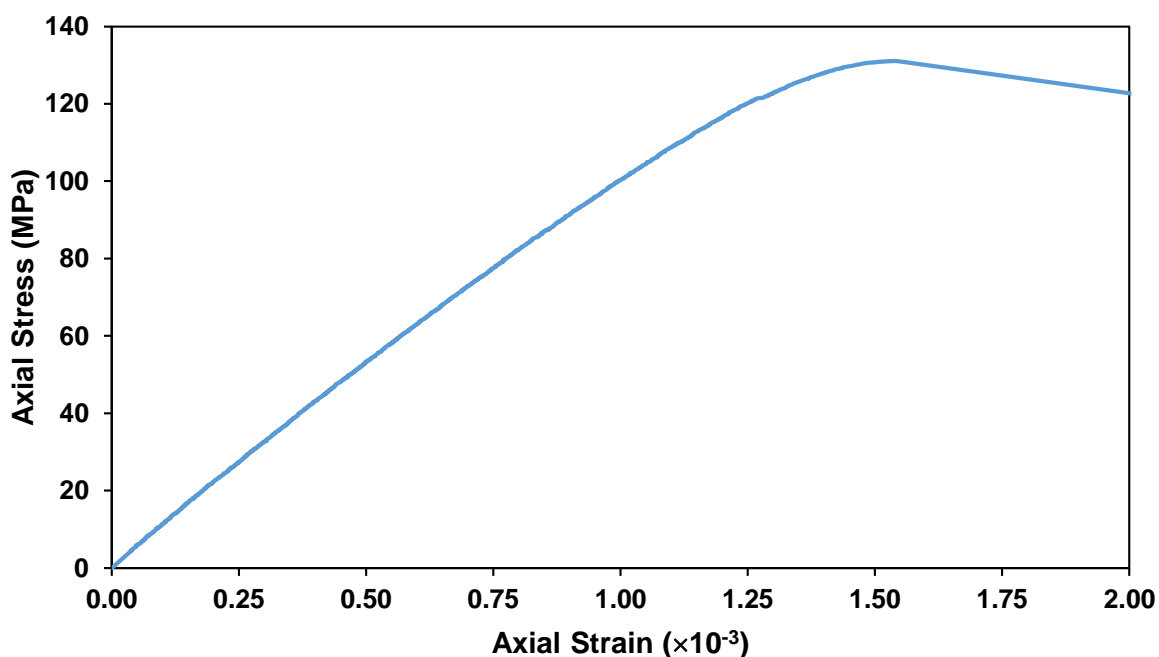
Σχήμα 6-7. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βέροια» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες AE (οι καφέ λεκέδες στις φωτογραφίες (β & δ) είναι σκουριά).

Όπως φαίνεται και στις παραπάνω φωτογραφίες, το υλικό αστοχεί σε μονοαξονική θλίψη με τον σχηματισμό διαγώνιας διαμητικής θραύσης. Επιπλέον, παρατηρείται επιφανειακή αποκόλληση φύλλων (τσιπ) λόγω εφελκυστικών θραύσεων παράλληλα με τις ταινιώσεις του μαρμάρου. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, για φόρτιση πέραν του 70% της κορυφαίας αντοχής και ειδικότερα κατά τη θραύση του δοκιμίου, απελευθερώνονται βυτουμενιούχα αέρια που μέχρι πρότινος ήταν εγκλεισμένα στο

πορώδες του υλικού. Τέλος, η κατάρρευση των δοκιμίων συνοδεύεται από δυνατό κρότο.

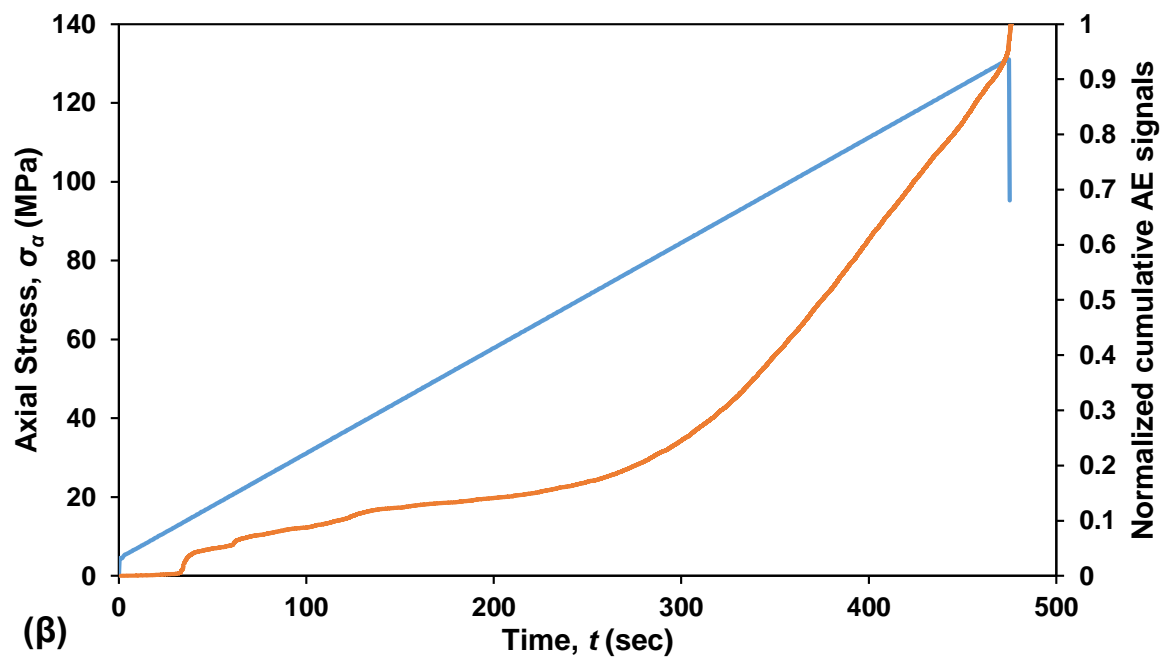
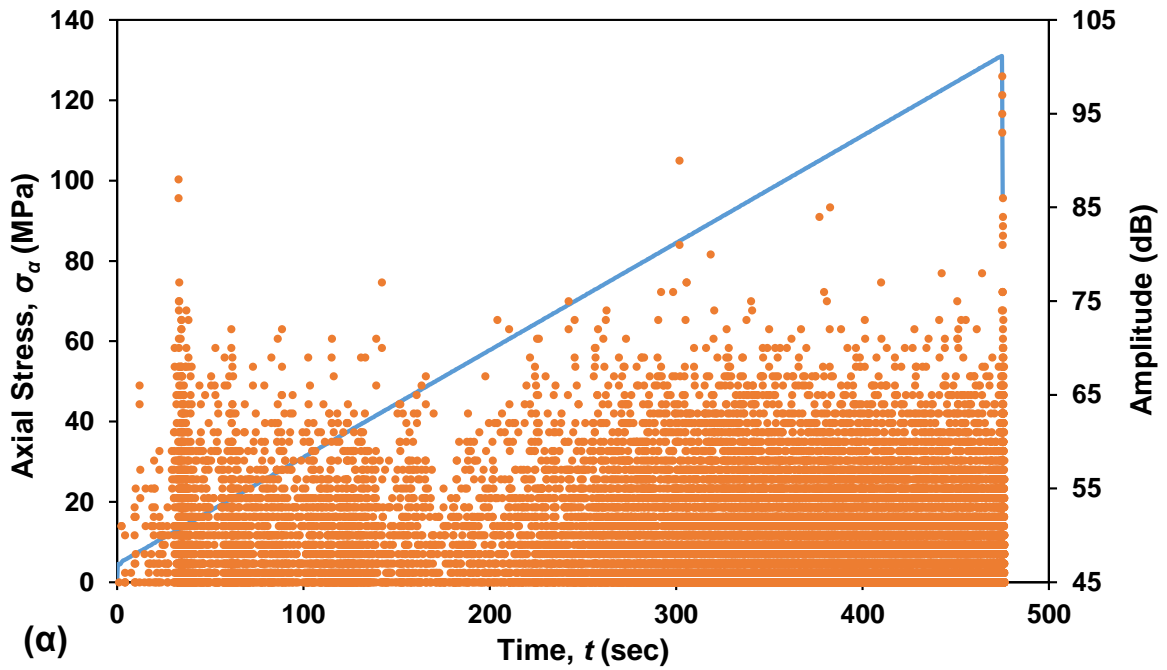
Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης, τα δοκίμια αστοχούν με την εμφάνιση εφελκυστικής ρωγμής κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης (Σχήμα 6-7).

Ενδεικτική καμπύλη της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής τροπής ε_a δίνεται στο Σχήμα 6-8. Από τη συγκεκριμένη γραφική παράσταση παρατηρείται απουσία της περιοχής κλεισίματος πόρων και μικρορωγμών.

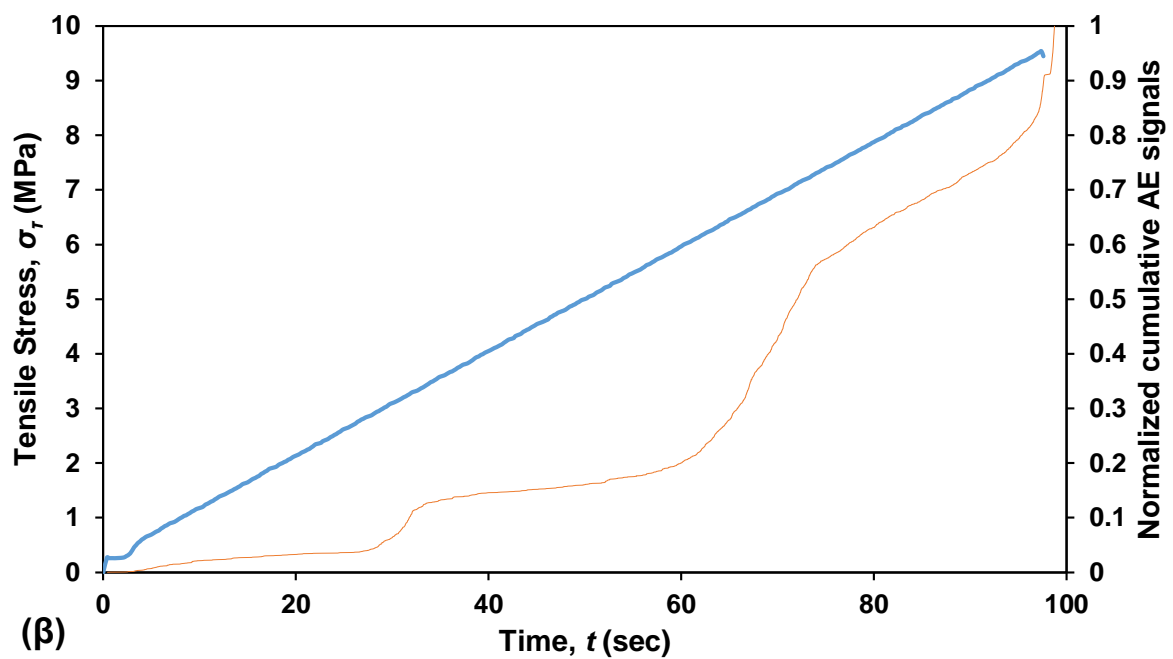
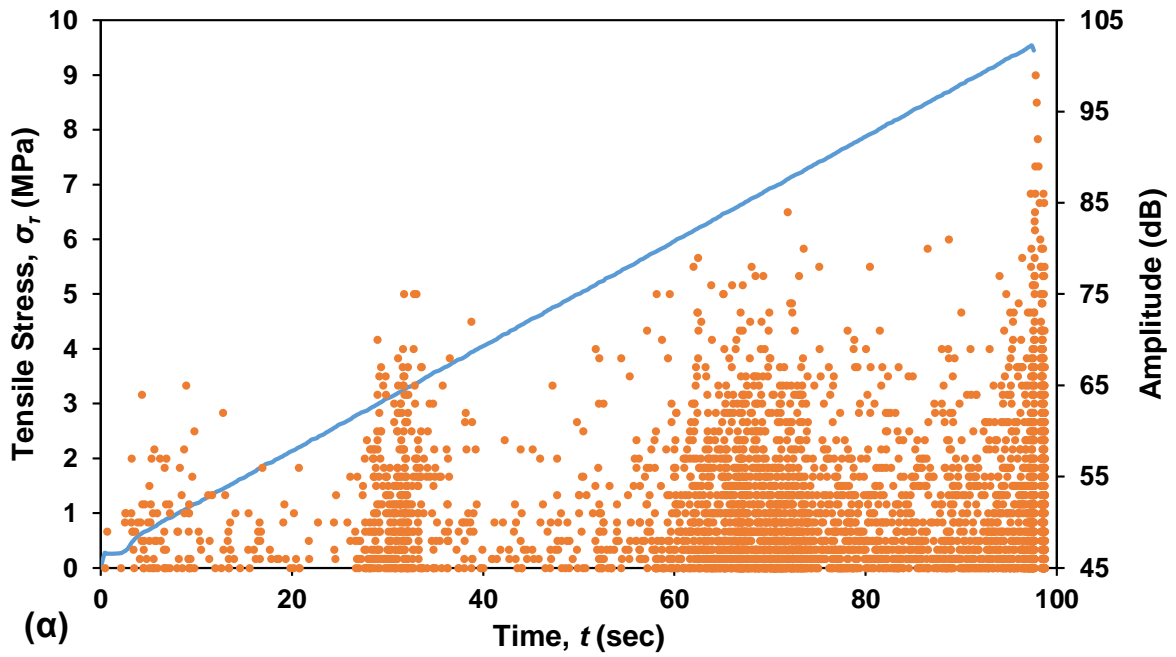


Σχήμα 6-8. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a ($\times 10^{-3}$) πρισματικού δοκιμίου μαρμάρου «Βέροια» έπειτα από δοκιμή UCS.

Επιπλέον, ενδεικτικά γραφήματα με τις καμπύλες εφαρμοζόμενης τάσης (σ_a ή σ_{tB} (MPa) για τις δοκιμές UCS και BTS αντίστοιχα) – χρόνου t (sec) (μπλε χρώμα) στον πρωτεύοντα κατακόρυφο άξονα και πλάτους σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή ανηγμένου αθροιστικού πλήθους σημάτων AE – χρόνου t (sec) στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα δίνονται στο Σχήμα 6-9 και στο Σχήμα 6-10.



Σχήμα 6-9. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Βέροια» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).

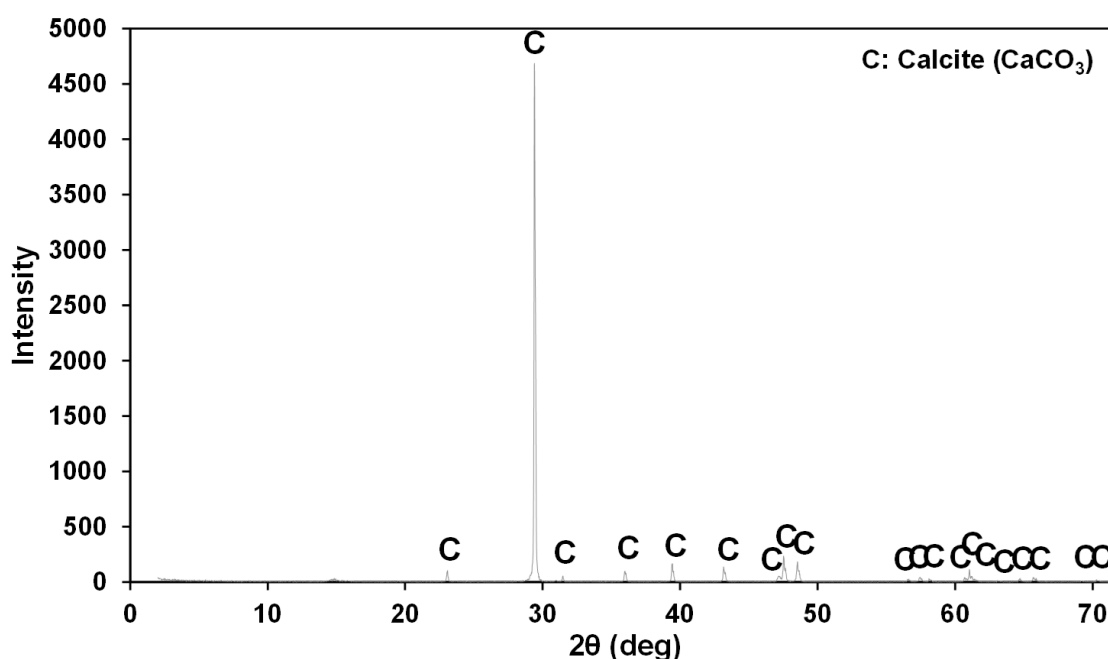


Σχήμα 6-10. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Βέροια» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).

6.4 Μάρμαρο «Νεφέλη»

6.4.1 Παρουσίαση υλικού

Πρόκειται για γκρίζο λεπτόκοκκο ασβεστίτικο νεφελώδες μάρμαρο αποτελούμενο κυρίως από ασβεστίτη, εξορυσσόμενο από την περιοχή του Πάρνωνα. Ο Πίνακας 6-6 παρουσιάζει την ορυκτολογική σύσταση (%) όπως προκύπτει από την ανάλυση XRD (Σχήμα 6-11) με το περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus. Ο Πίνακας 6-7 περιλαμβάνει τη χημική ανάλυση (%) του υλικού όπως είναι διαθέσιμη από την εταιρία που παραχώρησε το υλικό (ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε.).



Σχήμα 6-11. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Νεφέλη», όπως προκύπτουν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.

Πίνακας 6-6. Ορυκτολογική σύσταση (%) ποικιλίας μαρμάρου «Νεφέλη».

Ορυκτό	%
Ασβεστίτης	>97
Άλλα ορυκτά	<3

Πίνακας 6-7. Χημική ανάλυση ποικιλίας μαρμάρου «Νεφέλη», σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία της ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε.

Χημική ένωση	Ποσοστό συμμετοχής (%)	Χημική ένωση	Ποσοστό συμμετοχής (%)
CaO	54.90	K ₂ O	0.13
MgO	1.55	Al ₂ O ₃	0.40
SiO ₂	0.05	MnO	0.02
Fe ₂ O ₃	0.28	CO ₂	43.15
Na ₂ O	0.04		

6.4.2 Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού

Ακολούθως, ο Πίνακας 6-8 περιέχει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκεκριμένης ποικιλίας μαρμάρου. Σημειώνεται ότι κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) τα δοκίμια φορτίζονται κατά τον άξονα Z, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-12α. Το επίπεδο φόρτισης διατηρείται ίδιο τόσο για τις δοκιμές BTS όσο και για τις δοκιμές θλίψης των φυσικών μοντέλων. Τα πρισματικά δοκίμια UCS έχουν ύψος 119.3 mm, ισοδύναμη διάμετρο διατομής 59.46 mm και λόγο ύψους/ισοδύναμης διαμέτρου 2. Οι δίσκοι των δοκιμών BTS έχουν διάμετρο 55.70 mm και πάχος 23.3 mm.

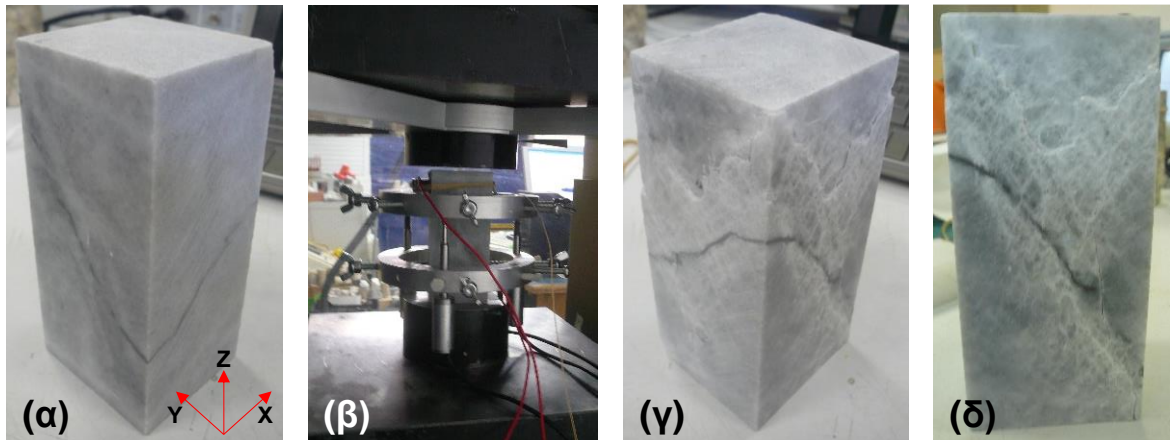
Πίνακας 6-8. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας μαρμάρου «Νεφέλη».

Μηχανική ιδιότητα	Τιμή	Αριθμός δοκιμών
σ_{ci} (MPa) (ρυθμός 700 N/sec)	88.3 ± 8	6
σ_{tB} (MPa) (ρυθμός 200 N/sec)	7.35 ± 1.35	8
E (GPa)	67.2 ± 2.7	4
d (kg/m ³)	2692.3	9
V_{px} (m/sec)	6066.4	9
V_{py} (m/sec)	5920.7	9
V_{pz} (m/sec)	6097.5	9
V_{sx} (m/sec)	2739.8	9

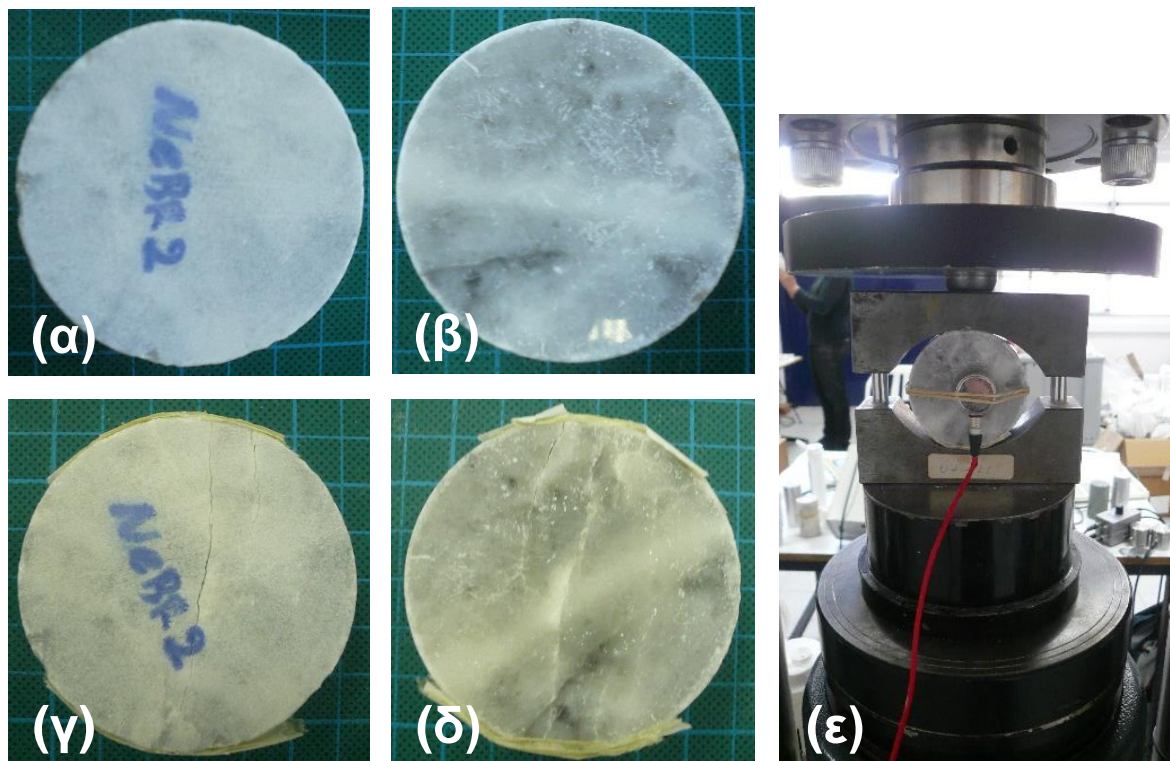
Σημείωση: σ_{ci} : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{tB} : αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό Brazilian, E : μέτρο ελαστικότητας Young, d : πυκνότητα, V_p : ταχύτητα διαμηκών κυμάτων, V_s : ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων.

Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των δοκιμών χαρακτηρισμού δίνονται ακολούθως. Συγκεκριμένα, παρατίθενται φωτογραφίες δοκιμών πρίσματος και δίσκου για δοκιμές μονοαξονικής και αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian) αντίστοιχα,

πριν (άρρηκτη κατάσταση), κατά τη διάρκεια (διάταξη δοκιμών στην πρέσα) και μετά το πέρας των δοκιμών.



Σχήμα 6-12. Φωτογραφίες πρισματικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίους, τα LVDTs και τους αισθητήρες AE.



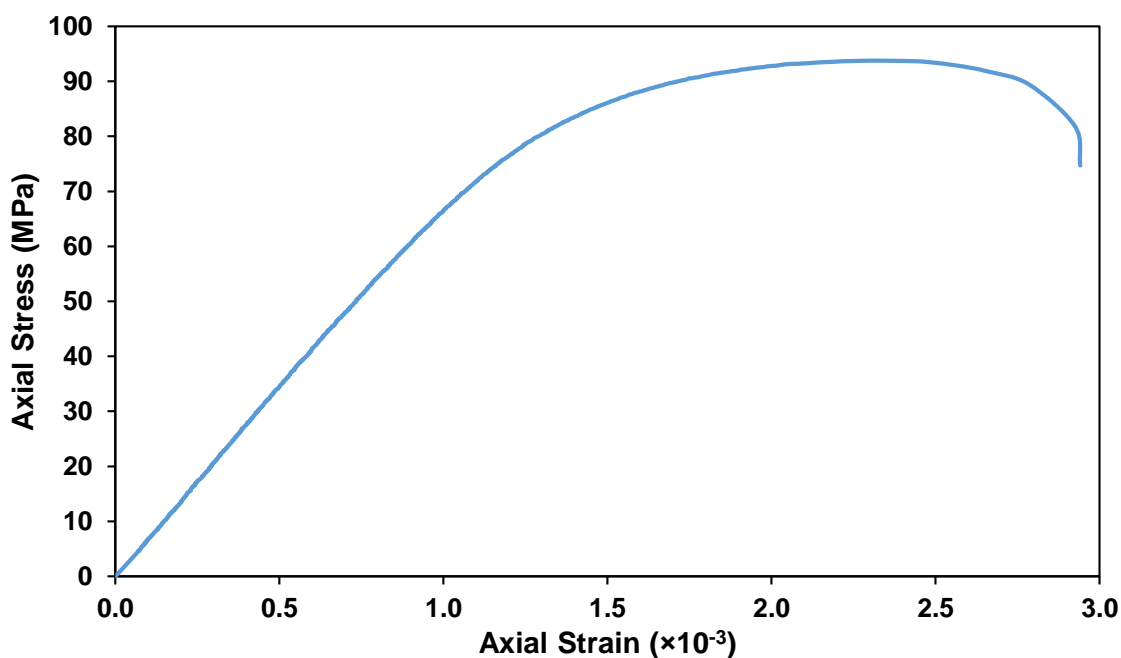
Σχήμα 6-13. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες AE.

Όπως φαίνεται και στις παραπάνω φωτογραφίες, το υλικό αστοχεί με το σχηματισμό διαγώνιων διατμητικών MEP, σχηματίζοντας συζυγείς διαγωνίως αναπτυσσόμενες ζώνες διάτμησης (Gramberg 1989) κατά μήκος της επιφάνειας αστοχίας (Σχήμα 6-12γ & δ). Επιπλέον, σε ορισμένα δοκίμια παρατηρείται περιορισμένη επιφανειακή

αποκόλληση φύλλων (τσιπ) λόγω εφελκυστικών θραύσεων. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, για φόρτιση πέραν του 70% της κορυφαίας αντοχής και ειδικότερα κατά τη θραύση του δοκιμίου, απελευθερώνονται βυτουμενιούχα αέρια που μέχρι πρότινος ήταν εγκλεισμένα στο πορώδες του υλικού. Τέλος, η κατάρρευση των δοκιμίων ολοκληρώνεται αθόρυβα, χωρίς εκρηκτική συμπεριφορά.

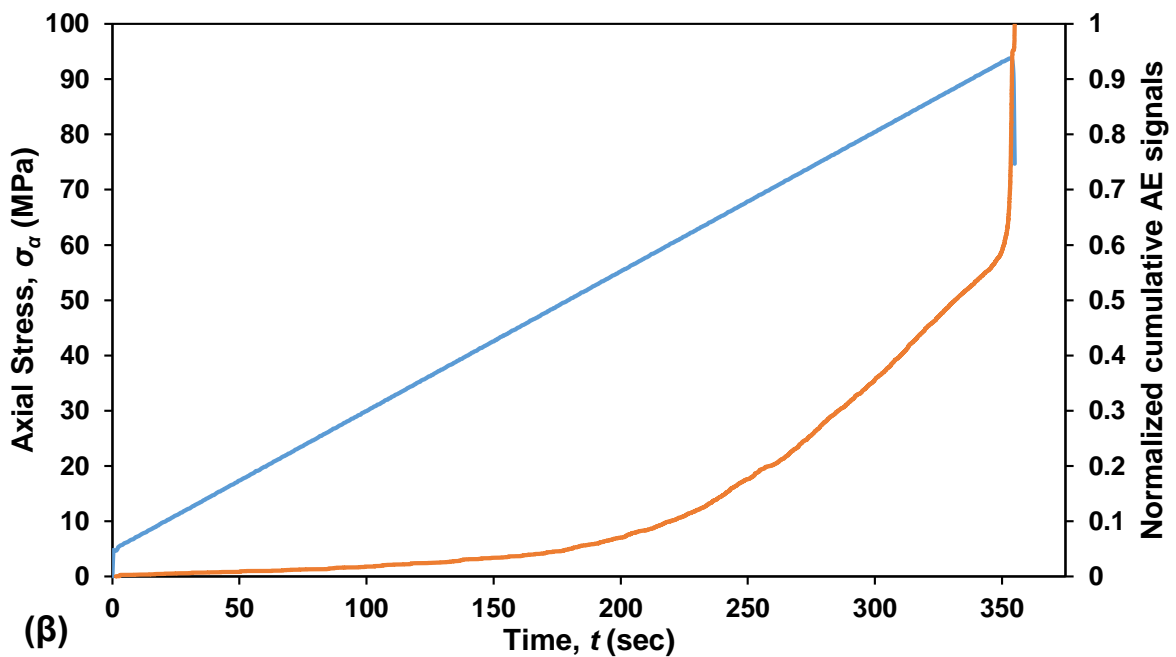
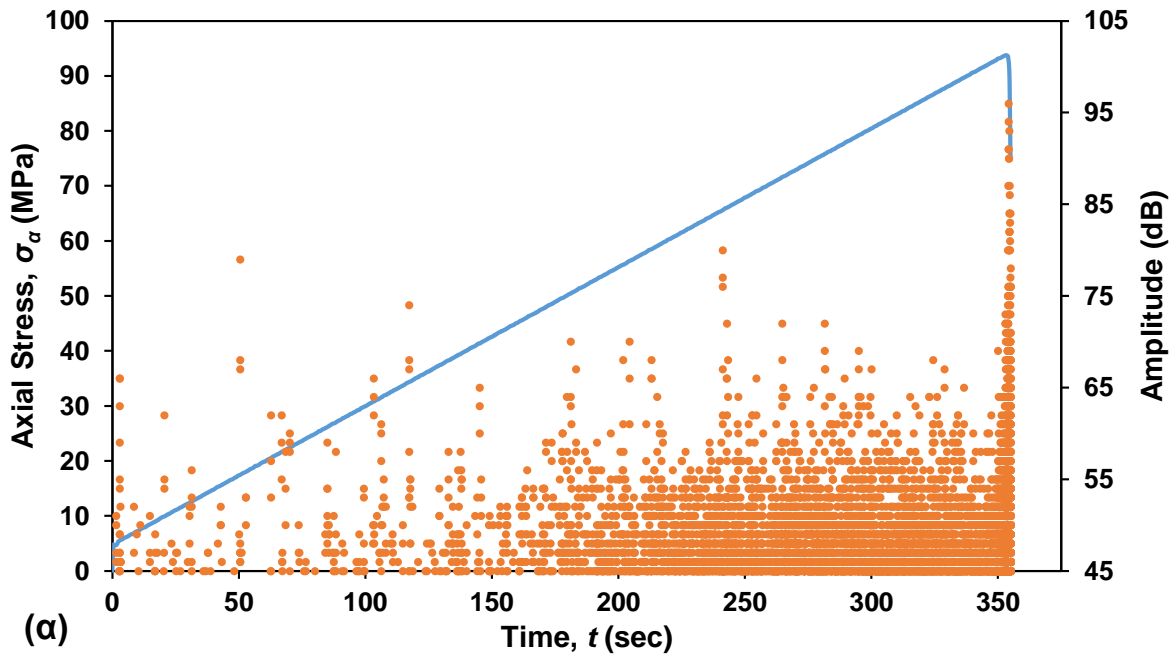
Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης, τα δοκίμια αστοχούν με την εμφάνιση εφελκυστικής ρωγμής κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης (Σχήμα 6-13).

Ενδεικτική καμπύλη της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a δίνεται στο Σχήμα 6-14. Όπως και στην αντίστοιχη γραφική παράσταση της ποικιλίας «Βέροια», δεν απαντάται περιοχή κλεισίματος μικρορωγμών και πόρων. Εμφανίζεται δε, μεγάλη περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης πέραν των 80 MPa.

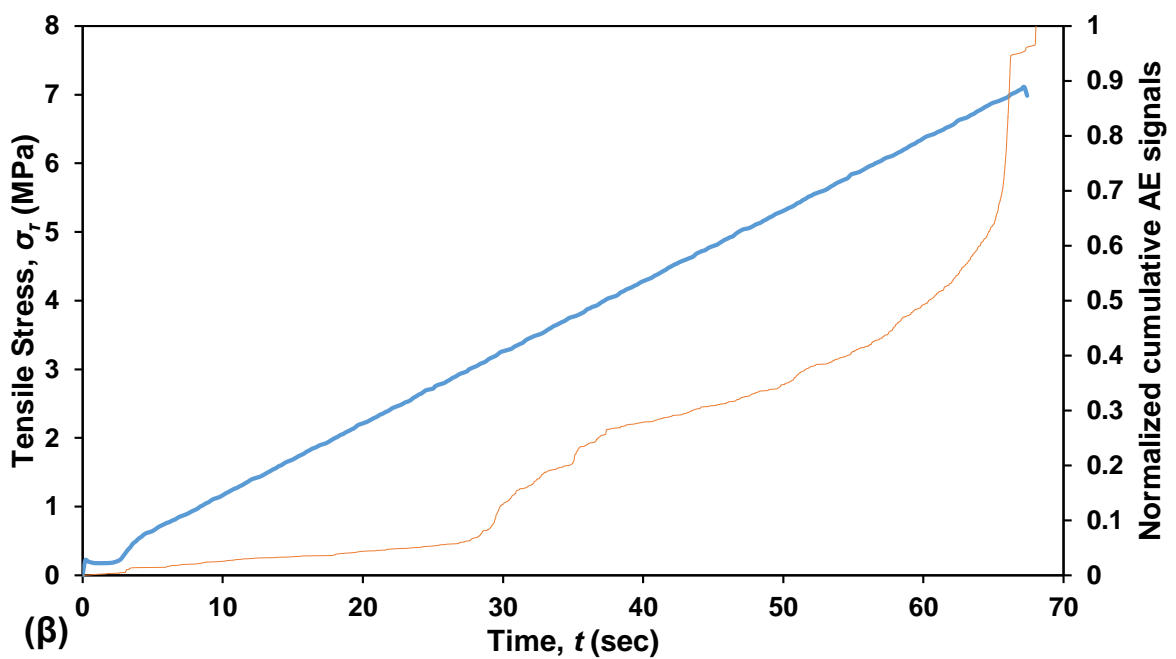
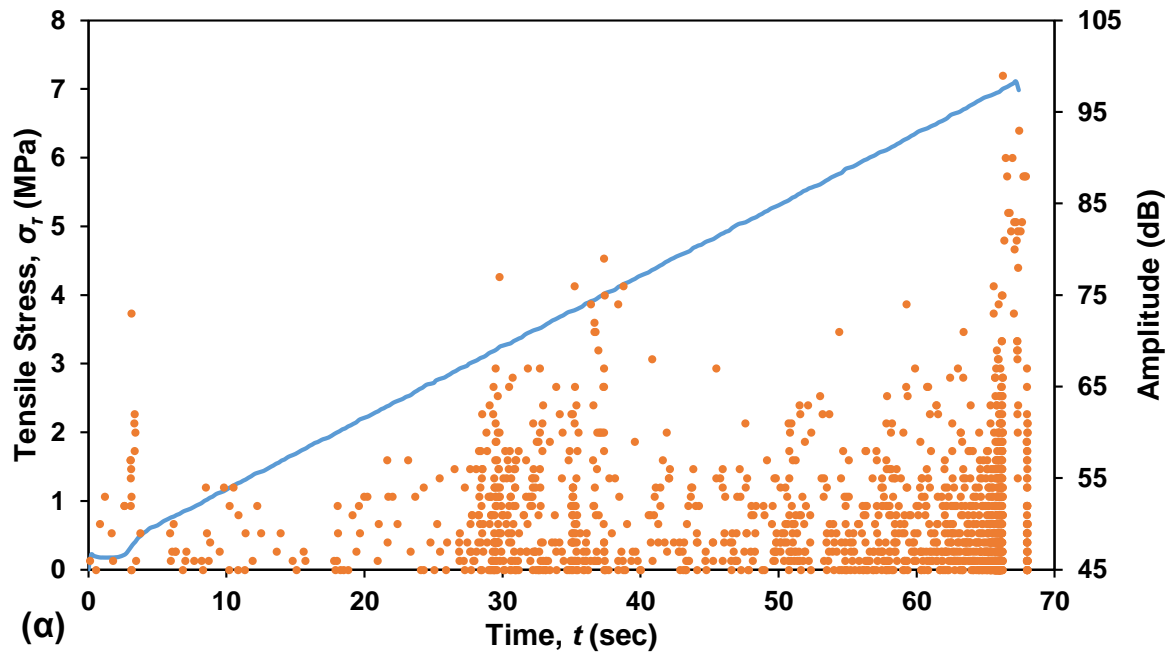


Σχήμα 6-14. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a ($\times 10^{-3}$) πρισματικού δοκιμίου μαρμάρου «Νεφέλη» έπειτα από δοκιμή UCS.

Επιπλέον, ενδεικτικά γραφήματα με τις καμπύλες εφαρμοζόμενης τάσης (σ_a ή σ_{tB} (MPa) για τις δοκιμές UCS και BTS αντίστοιχα) – χρόνου t (sec) (μπλε χρώμα) στον πρωτεύοντα κατακόρυφο άξονα και πλάτους σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή ανηγμένου αθροιστικού πλήθους σημάτων AE – χρόνου t (sec) στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα δίνονται στο Σχήμα 6-15 και στο Σχήμα 6-16.



Σχήμα 6-15. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Νεφέλη» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).

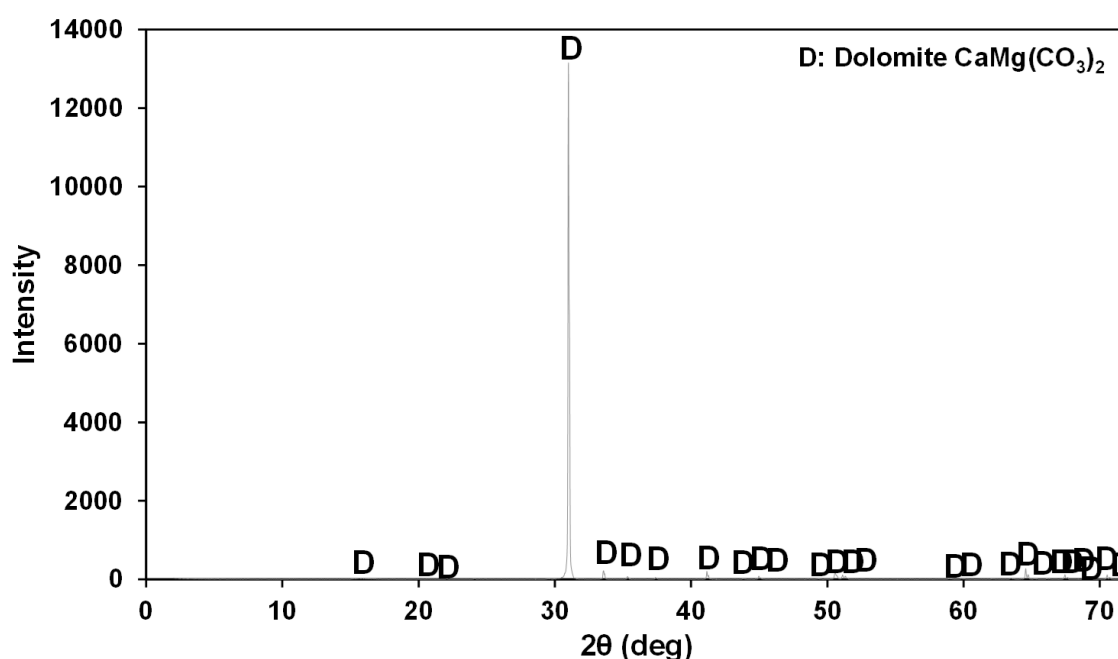


Σχήμα 6-16. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Νεφέλη» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).

6.5 Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»

6.5.1 Παρουσίαση υλικού

Πρόκειται για λευκό λεπτόκοκκο δολομιτικό μάρμαρο με λεπτές γραμμικές ή κυματοειδείς διαγώνιες γκρι/μπεζ ταινιώσεις και περιστασιακά με λεπτά γκρι/κόκκινα κρυσταλλικά νεύρα ή και στρόγγυλα ασβεστιτικά κρύσταλλα, από την περιοχή του Βώλακα Δράμας. Ο τύπος «Άριστον» αποτελεί τη σημαντικότερη, ποιοτικώς και οικονομικώς, ποικιλία δολομιτικών μαρμάρων εξορυσσόμενη από την περιοχή του Φαλακρού Όρους (Chatzipanagis & Vougioukas 2004). Ο Πίνακας 6-9 παρουσιάζει την ορυκτολογική σύσταση (%) όπως προκύπτει από την ανάλυση XRD (Σχήμα 6-17) με το περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.



Σχήμα 6-17. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Βώλακας Άριστον Ι», όπως προκύπτουν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.

Πίνακας 6-9. Ορυκτολογική σύσταση (%) ποικιλίας μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι».

Ορυκτό	%
Δολομίτης	>97
Άλλα ορυκτά	<3

6.5.2 Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού

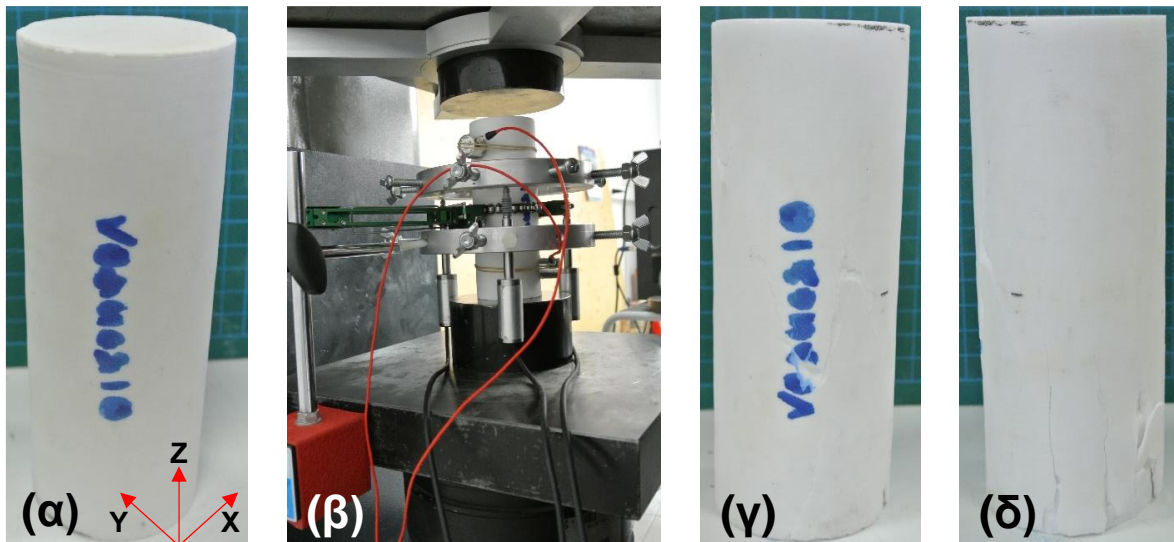
Ακολούθως, ο Πίνακας 6-10 περιέχει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκεκριμένης ποικιλίας μαρμάρου. Σημειώνεται ότι κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) τα δοκίμια φορτίζονται κατά τον άξονα Z, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-18α. Το επίπεδο φόρτισης διατηρείται ίδιο τόσο για τις δοκιμές BTS όσο και για τις δοκιμές θλίψης των φυσικών μοντέλων. Τα κυλινδρικά δοκίμια UCS έχουν ύψος 148.6 mm, διάμετρο διατομής 55.59 mm και λόγο ύψους/διαμέτρου 2.7. Οι δίσκοι των δοκιμών BTS έχουν διάμετρο 55.67 mm και πάχος 28.9 mm,.

Πίνακας 6-10. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι».

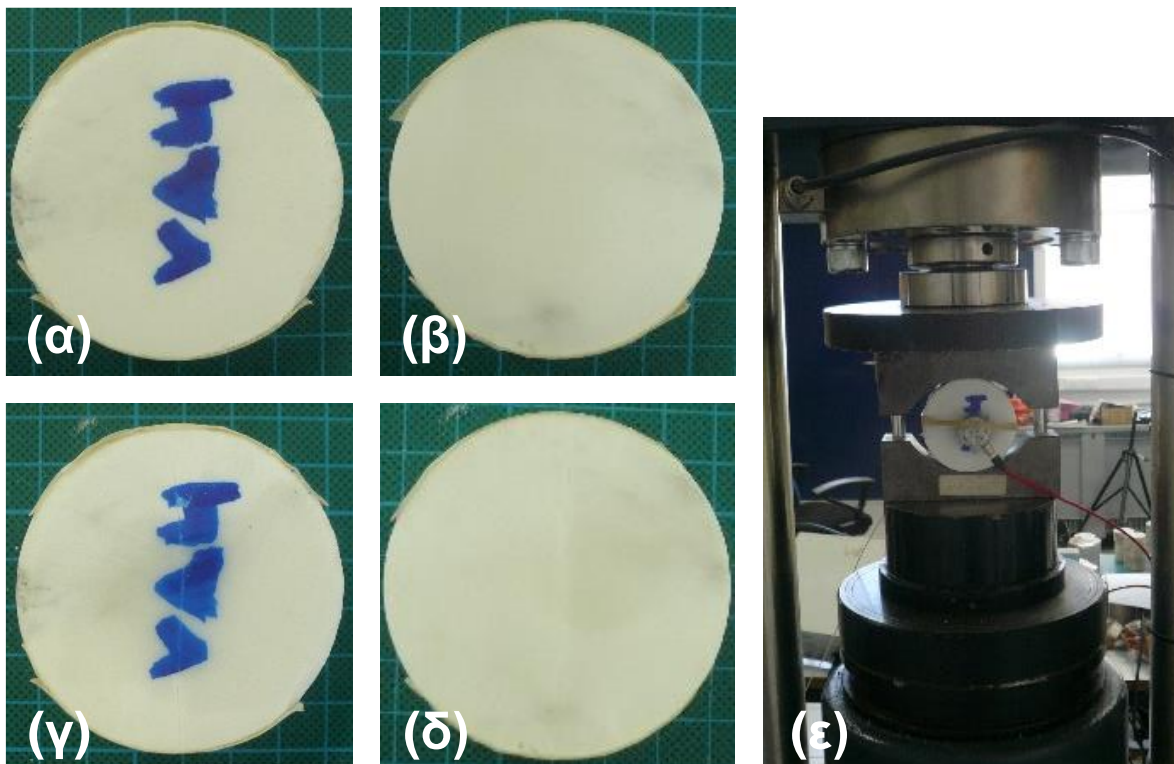
Μηχανική ιδιότητα	Τιμή	Αριθμός δοκιμών
σ_{ci} (MPa) (ρυθμός 1000 N/sec)	118.1 ± 14	10
σ_{tB} (MPa) (ρυθμός 200 N/sec)	4.59 ± 1.1	12
E (GPa)	56.1 ± 6	9
ν	0.28	9
d (kg/m ³)	2831.9	15
V_{px} (m/sec)	2393.7	15
V_{py} (m/sec)	1915.7	15
V_{pz} (m/sec)	2545.6	15
V_{sx} (m/sec)	1536.7	15

Σημείωση: σ_{ci} : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{tB} : αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό Brazilian, E : μέτρο ελαστικότητας Young, ν : λόγος Poisson, d : πυκνότητα, V_p : ταχύτητα διαμηκών κυμάτων, V_s : ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων.

Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των δοκιμών χαρακτηρισμού δίνονται ακολούθως. Συγκεκριμένα, παρατίθενται φωτογραφίες δοκιμών πρίσματος και δίσκου για δοκιμές μονοαξονικής και αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian) αντίστοιχα, πριν (άρρηκτη κατάσταση), κατά τη διάρκεια (διάταξη δοκιμών στην πρέσα) και μετά το πέρας των δοκιμών.



Σχήμα 6-18. Φωτογραφίες κυλινδρικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίους, τα LVDTs, το εκτασιόμετρο και τους αισθητήρες AE.



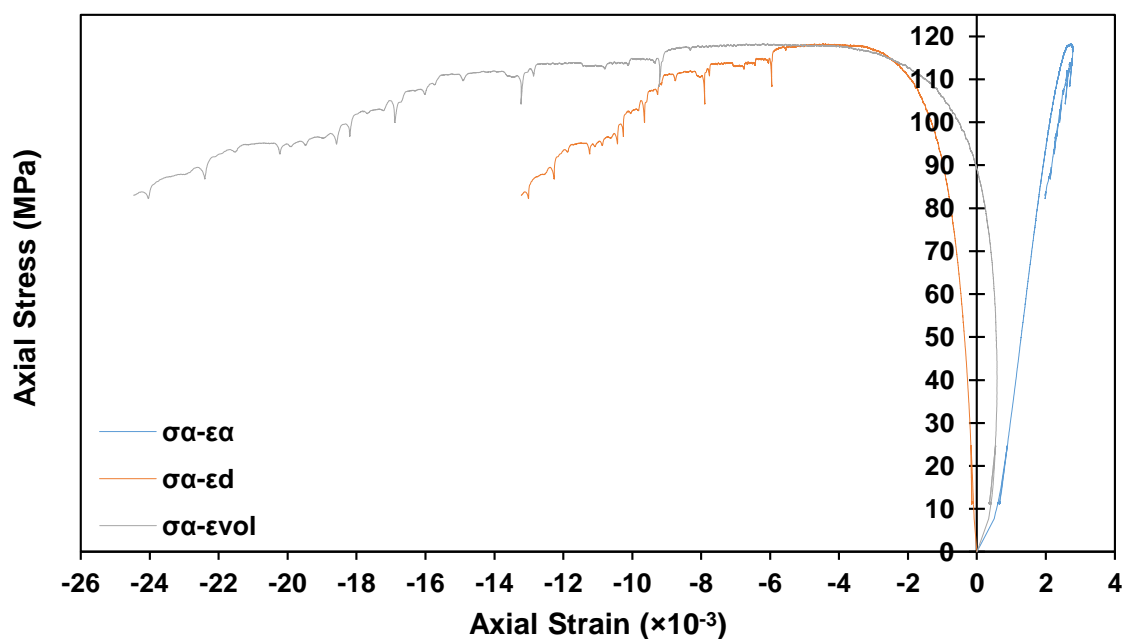
Σχήμα 6-19. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες AE.

Όπως φαίνεται στις παραπάνω φωτογραφίες, το υλικό αστοχεί αξονικά, εκλύοντας μεγάλη ποσότητα πούδρας από τις διαμητικές MEP. Επιπλέον, παρατηρείται επιφανειακή αποκόλληση φύλλων (τσιπ) κυρίως λόγω διατμήσεων. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής και ειδικότερα κατά τη θραύση του δοκιμίου,

απελευθερώνονται βυτουμενιούχα αέρια που μέχρι πρότινος ήταν εγκλεισμένα στο πορώδες του υλικού, σε σαφώς μεγαλύτερη ποσότητα από ό,τι στις ασβεστιτικές ποικιλίες μαρμάρου της παρούσας διατριβής. Τέλος, η κατάρρευση των δοκιμίων ολοκληρώνεται με κρότο και ακόμα περισσότερη έκλυση πούδρας.

Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης, τα δοκίμια αστοχούν με την εμφάνιση εφελκυστικής ρωγμής κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης (Σχήμα 6-19).

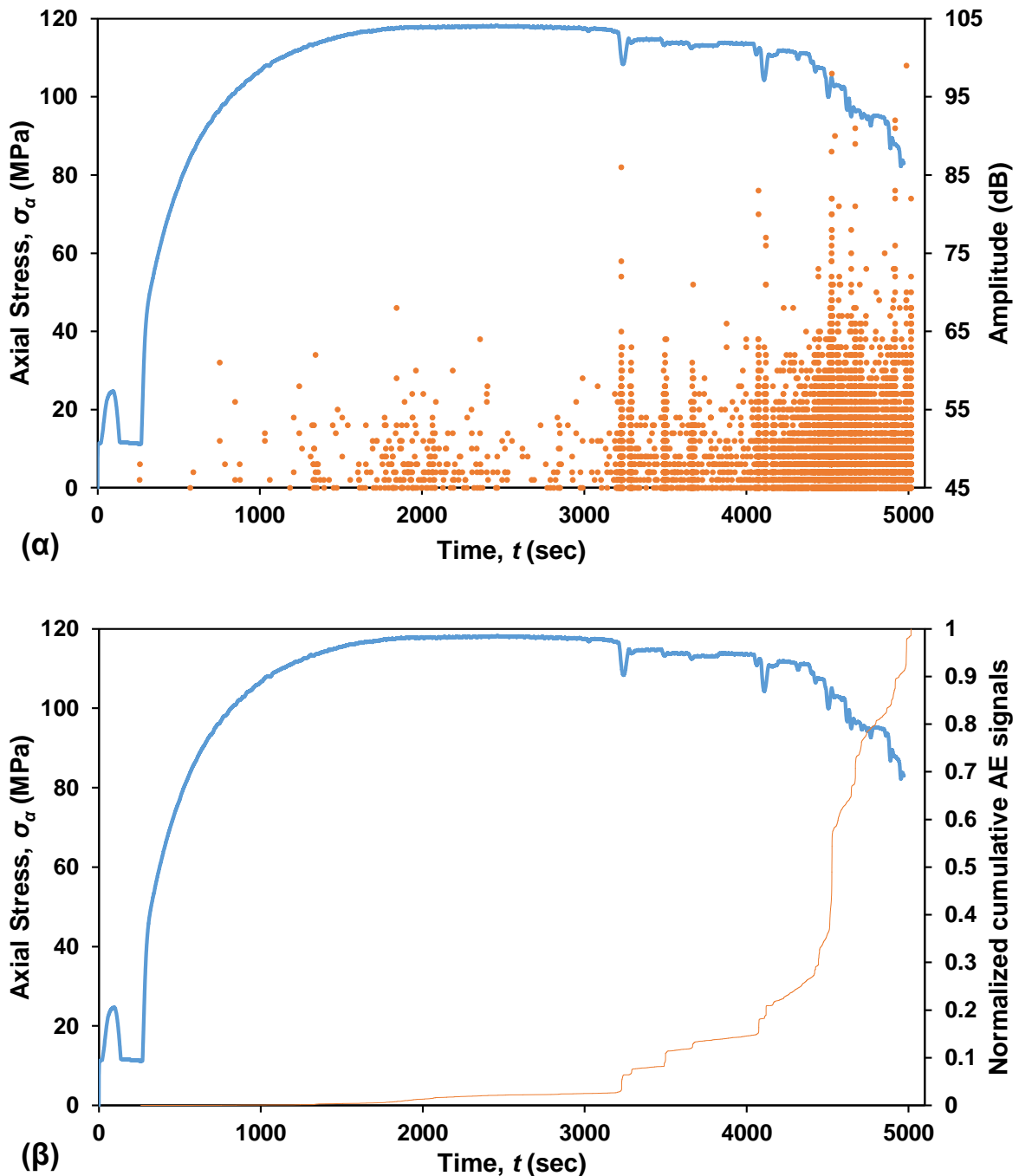
Ενδεικτικές καμπύλες της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής ε_a / διαμετρικής ε_d / ογκομετρικής ε_{vol} παραμόρφωσης δίνονται στο Σχήμα 6-20. Σημειώνεται ότι τα δοκίμια φορτίζονται με ρυθμό φορτίου μέχρι την άσκηση αξονικής τάσης 45 MPa που βρίσκεται εντός της ελαστικής περιοχής του υλικού, και έπειτα η δοκιμή συνεχίζεται με έλεγχο διαμετρικής παραμόρφωσης και ρυθμό 20 $\mu\text{m}/\text{min}$ έως την ολοκλήρωσή της. Στην καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a εμφανίζονται ανεστραμμένα κοίλα για τάσεις μικρότερες των 13 MPa, που εκφράζουν την περιοχή κλεισίματος των μικρορωγμών και πόρων του δοκιμίου.



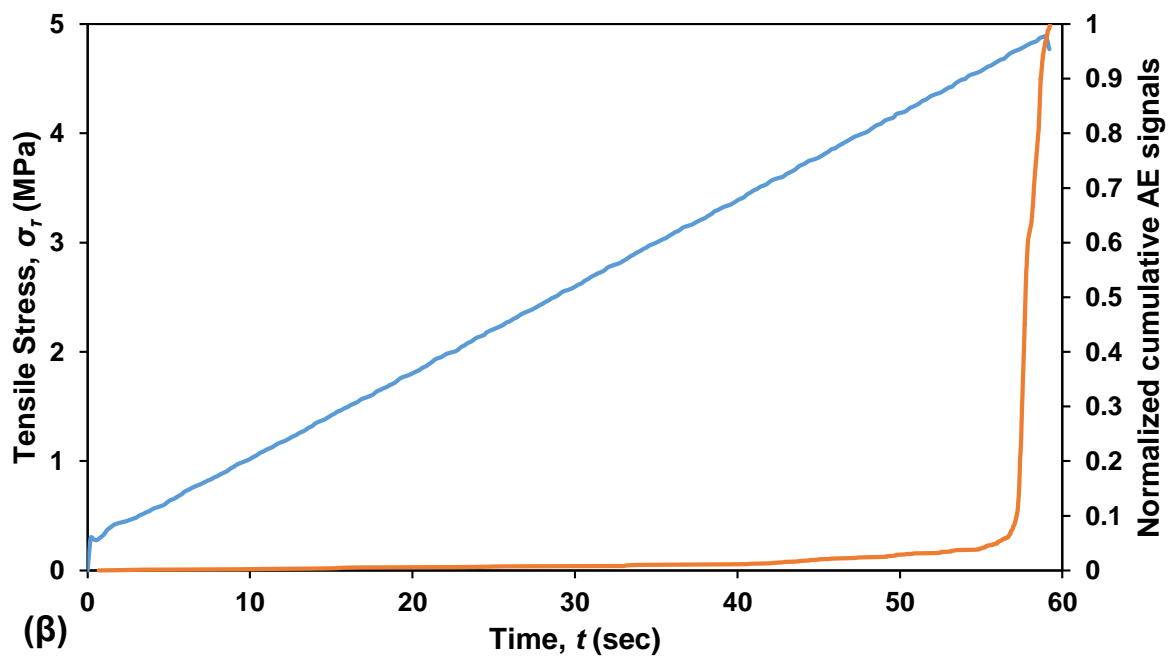
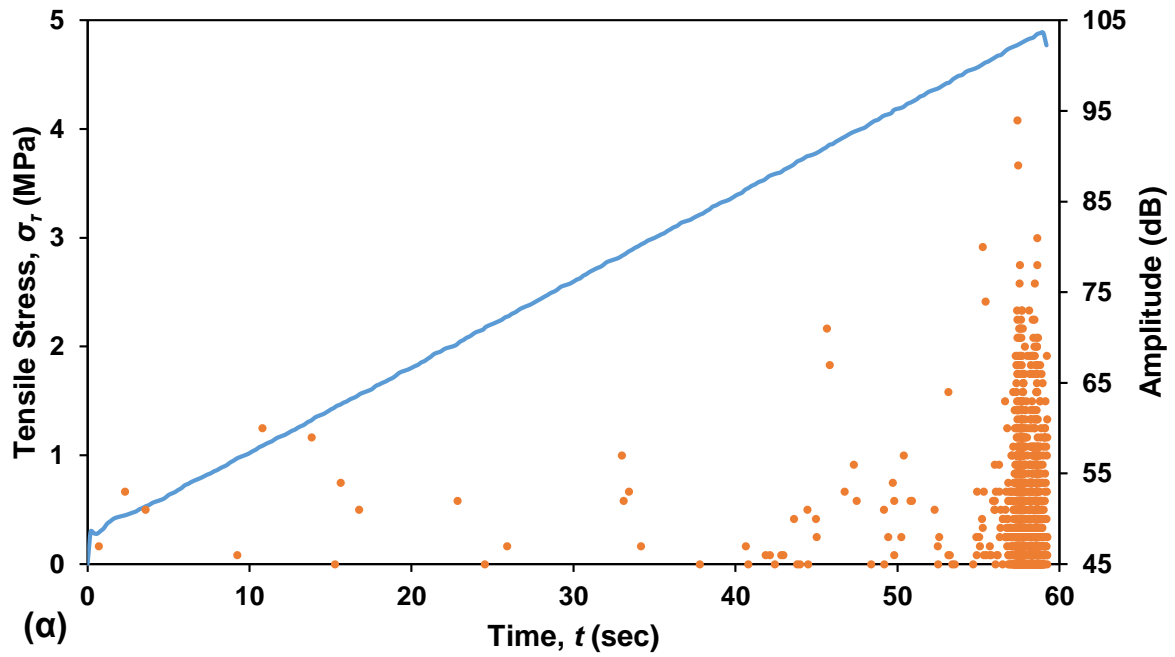
Σχήμα 6-20. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής ε_a (μπλε) / διαμετρικής ε_d (κόκκινο) / ογκομετρικής ε_{vol} (πράσινο) παραμόρφωσης κυλινδρικού δοκιμίου μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» έπειτα από δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.

Επιπλέον, ενδεικτικά γραφήματα με τις καμπύλες εφαρμοζόμενης τάσης (σ_a ή σ_{tB} (MPa) για τις δοκιμές UCS και BTS αντίστοιχα) – χρόνου t (sec) (μπλε χρώμα) στον πρωτεύοντα κατακόρυφο άξονα και πλάτους σημάτων AE (Amplitude (dB)) –

χρόνου t (sec) ή ανηγμένου αθροιστικού πλήθους σημάτων AE – χρόνου t (sec) στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα δίνονται στο Σχήμα 6-21 και στο Σχήμα 6-22. Στα εν λόγω γραφήματα, είναι έκδηλος ο σημαντικά μικρότερος αριθμός σημάτων AE κατά τις δοκιμές UCS συγκριτικά με τα προηγούμενα υλικά.



Σχήμα 6-21. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Βώλακας Άριστον Ι» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).

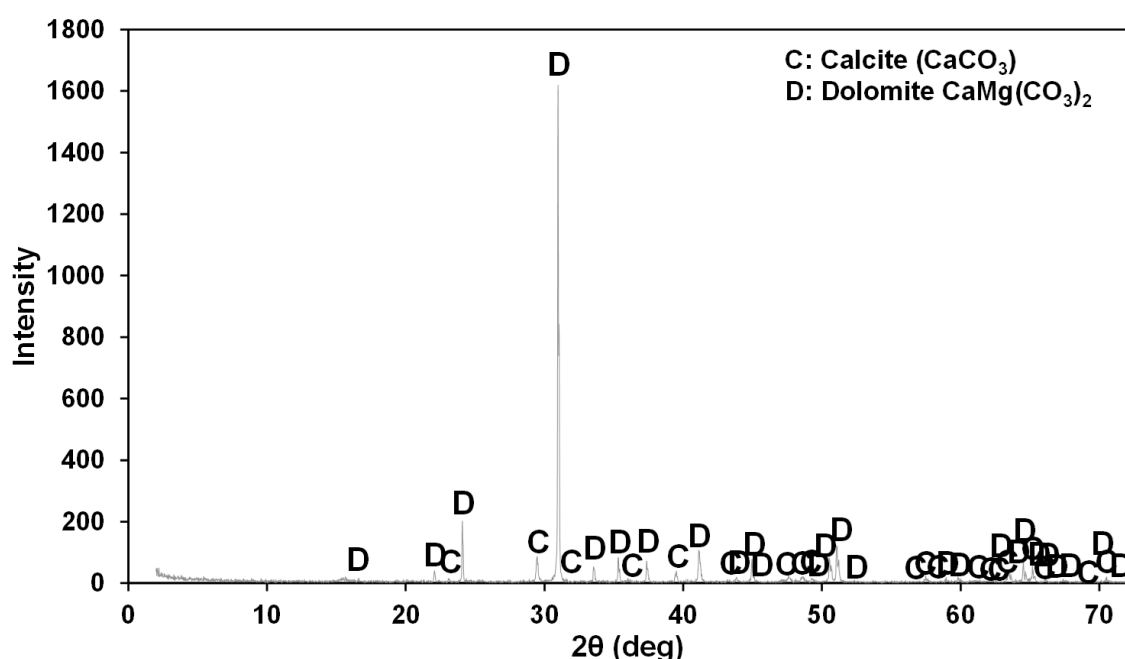


Σχήμα 6-22. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Βώλακας Άριστον Ι» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).

6.6 Μάρμαρο «Βώλακας II»

6.6.1 Παρουσίαση υλικού

Πρόκειται για λευκό λεπτόκοκκο δολομιτικό μάρμαρο με μικρή ποσότητα ασβεστίτη, με λεπτές γραμμικές ή κυματοειδείς διαγώνιες γκρι ταινιώσεις και περιστασιακά με λεπτά γκρι/κόκκινα κρυσταλλικά νεύρα ή και στρόγγυλα ασβεστιτικά κρύσταλλα, από την περιοχή του Βώλακα Δράμας. Ανήκει στον εμπορικό τύπο «Ταινιωτό Βώλακα». Ο Πίνακας 6-11 παρουσιάζει την ορυκτολογική σύσταση (%) όπως προκύπτει από την ανάλυση XRD (Σχήμα 6-23) με το περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.



Σχήμα 6-23. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Βώλακας II», όπως προέκυψαν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.

Πίνακας 6-11. Ορυκτολογική σύσταση (%) ποικιλίας μαρμάρου «Βώλακας II».

Ορυκτό	%
Δολομίτης	91-97
Ασβεστίτης	3-9

6.6.2 Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού

Ακολουθώς, ο Πίνακας 6-12 περιέχει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκεκριμένης ποικιλίας μαρμάρου. Σημειώνεται ότι κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) τα δοκίμια φορτίζονται κατά τον άξονα Z, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-24α. Το επίπεδο φόρτισης διατηρείται ίδιο τόσο για τις δοκιμές BTS όσο και για τις δοκιμές

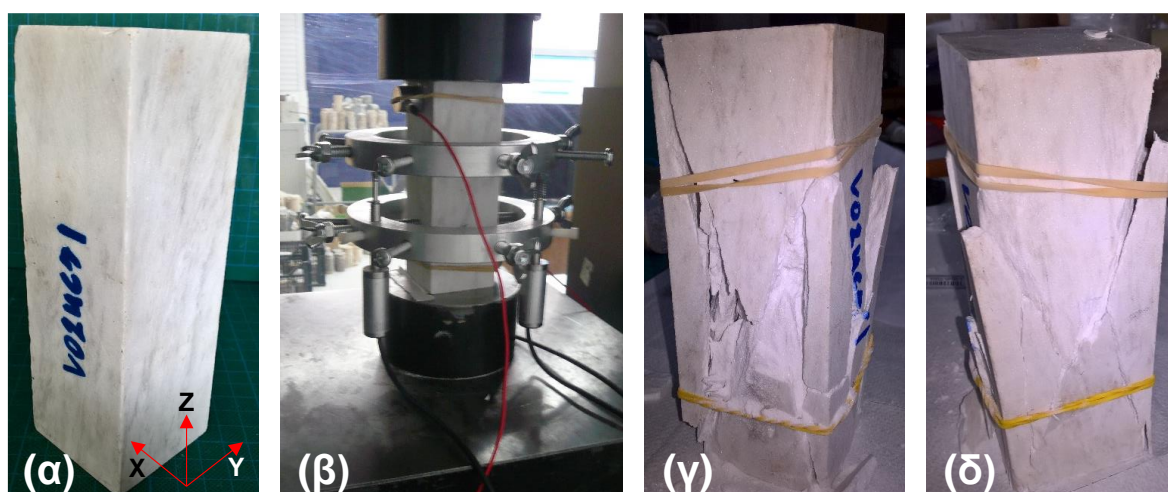
θλίψης των φυσικών μοντέλων. Τα πρισματικά δοκίμια UCS έχουν ύψος 148.2 mm, ισοδύναμη διάμετρο διατομής 57.42 mm και λόγο ύψους/ ισοδύναμης διαμέτρου 2.6. Οι δίσκοι των δοκιμών BTS έχουν διάμετρο 55.67 mm και πάχος 24.4 mm.

Πίνακας 6-12. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας μαρμάρου «Βώλακας II».

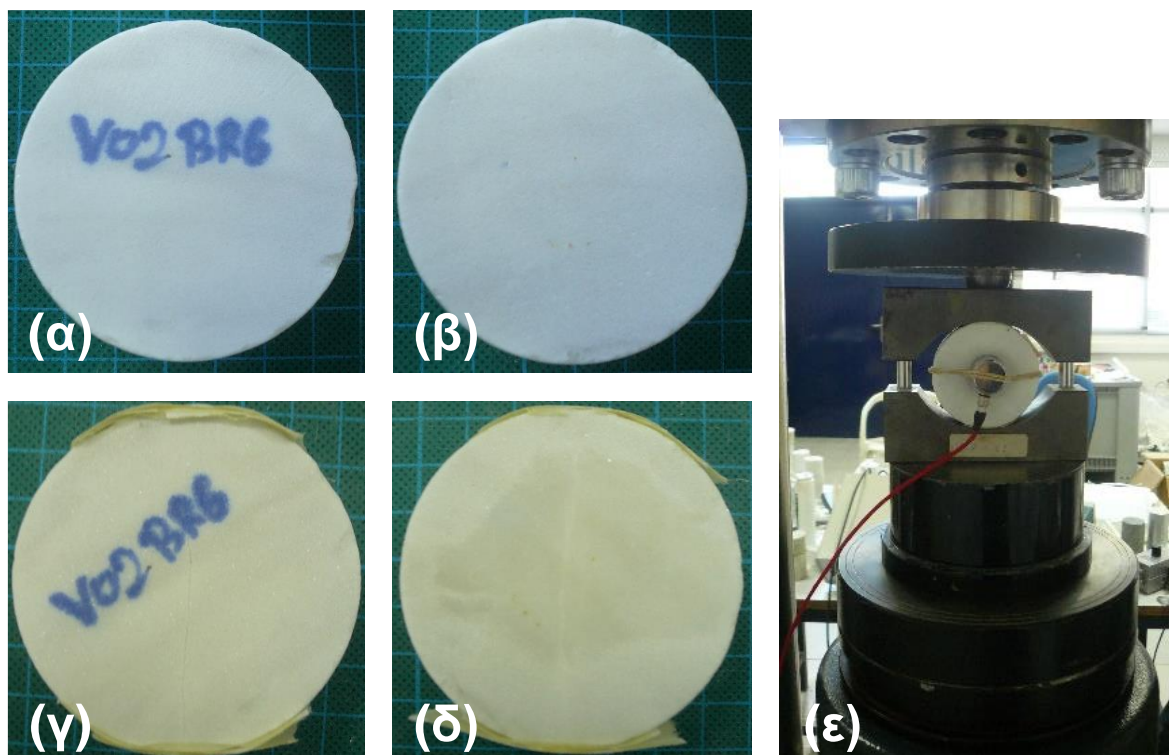
Μηχανική ιδιότητα	Τιμή	Αριθμός δοκιμών
σ_{ci} (MPa) (ρυθμός 750 N/sec)	125 ± 9	7
σ_{tB} (MPa) (ρυθμός 200 N/sec)	5.65 ± 1.98	25
E (GPa)	54.8 ± 13	6
d (kg/m ³)	2804.9	15
V_{pX} (m/sec)	3632.9	15
V_{pY} (m/sec)	3842.7	15
V_{pZ} (m/sec)	4034.3	15
V_{sX} (m/sec)	1568.3	15

Σημείωση: σ_{ci} : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{tB} : αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό Brazilian, E : μέτρο ελαστικότητας Young, d : πυκνότητα, V_p : ταχύτητα διαμηκών κυμάτων, V_s : ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων.

Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των δοκιμών χαρακτηρισμού δίνονται ακολούθως. Συγκεκριμένα, παρατίθενται φωτογραφίες δοκιμών πρίσματος και δίσκου για δοκιμές μονοαξονικής και αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian) αντίστοιχα, πριν (άρρηκτη κατάσταση), κατά τη διάρκεια (διάταξη δοκιμών στην πρέσα) και μετά το πέρας των δοκιμών.



Σχήμα 6-24. Φωτογραφίες πρισματικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βώλακας II» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίους, τα LVDTs και τους αισθητήρες AE.



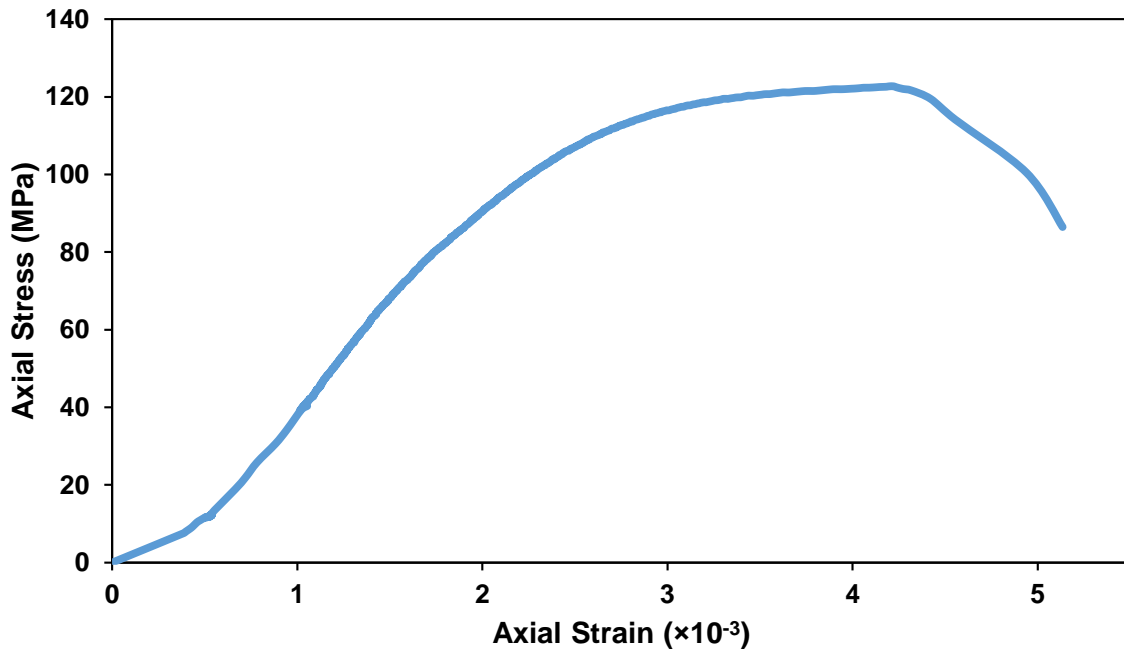
Σχήμα 6-25. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Βώλακας II» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες ΑΕ.

Όπως φαίνεται και στις παραπάνω φωτογραφίες, το υλικό αστοχεί με το σχηματισμό αξονικών και κεκλιμένων διατμητικών MEP που χωρίζουν το δοκίμιο στα δύο (2) σχηματίζοντας δύο (2) αντικριστά πυραμοειδή τεμάχια. Επιπλέον, παρατηρείται εκτεταμένη επιφανειακή αποκόλληση φύλλων (τσιπ) κυρίως λόγω διατμήσεων, και παράλληλα εκλύεται μεγάλη ποσότητα πούδρας από τις διατμητικές MEP. Όπως παρατηρείται και στην έτερη δολομιτική ποικιλία μαρμάρου της παρούσας διατριβής, κατά τη διάρκεια της δοκιμής και ειδικότερα κατά τη θραύση του δοκιμίου, απελευθερώνονται βυτουμενιούχα αέρια που μέχρι πρότινος ήταν εγκλεισμένα στο πορώδες του υλικού, σε σαφώς μεγαλύτερη ποσότητα από ό,τι στις ασβεστιτικές ποικιλίες μαρμάρου της παρούσας διατριβής. Τέλος, η κατάρρευση των δοκιμίων ολοκληρώνεται με έντονο κρότο.

Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης, τα δοκίμια αστοχούν με την εμφάνιση εφελκυστικής ρωγμής κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης (Σχήμα 6-25).

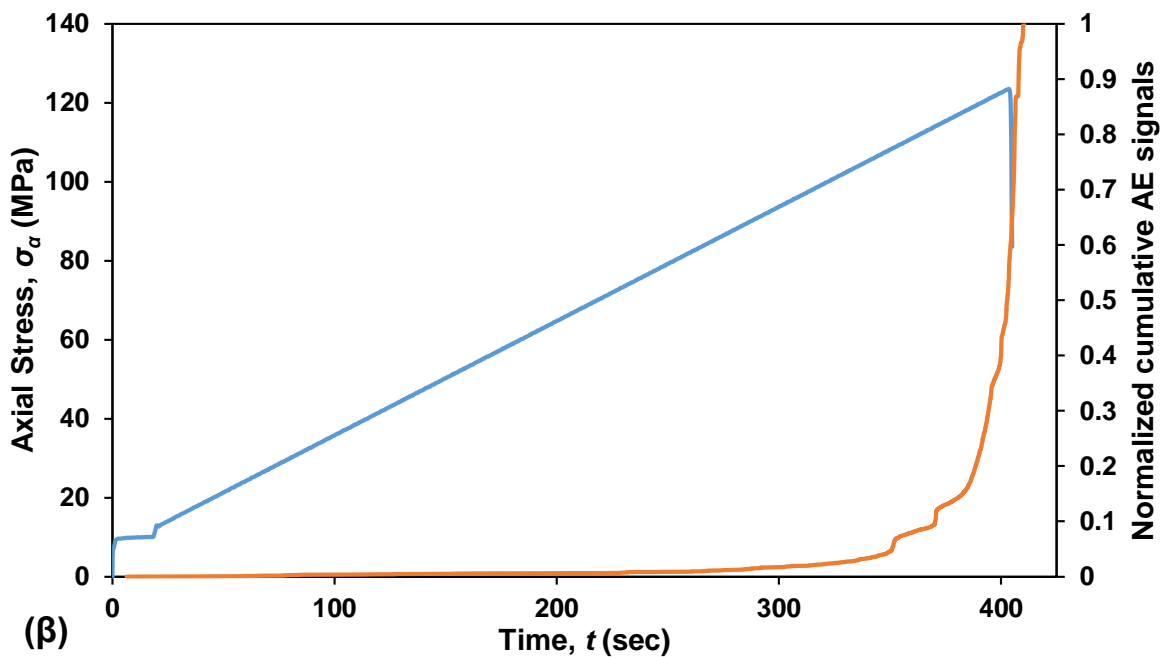
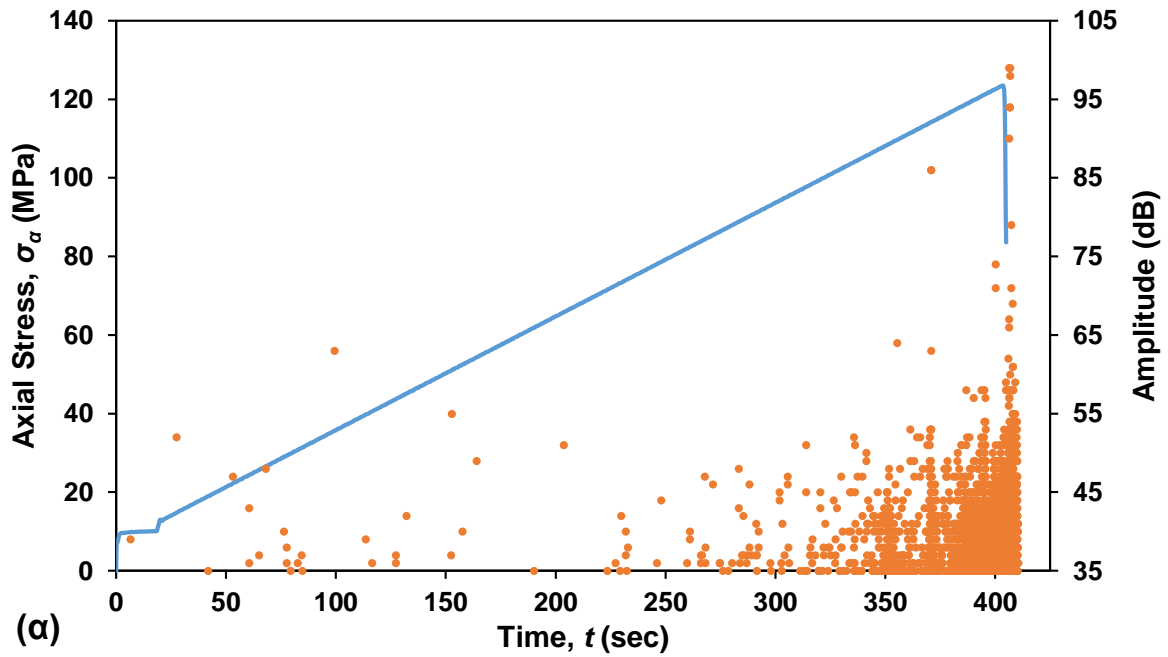
Ενδεικτική καμπύλη της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a δίνεται στο Σχήμα 6-26, όπου παρατηρείται αναστροφή των κοίλων για τάσεις μικρότερες των 17 MPa, που εκφράζουν την περιοχή κλεισίματος

των μικρορωγμών και πόρων του δοκιμίου, και στη συνέχεια εμφανίζεται η ελαστική περιοχή. Εμφανίζεται δε, μεγάλη περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης πέραν των 70 MPa.

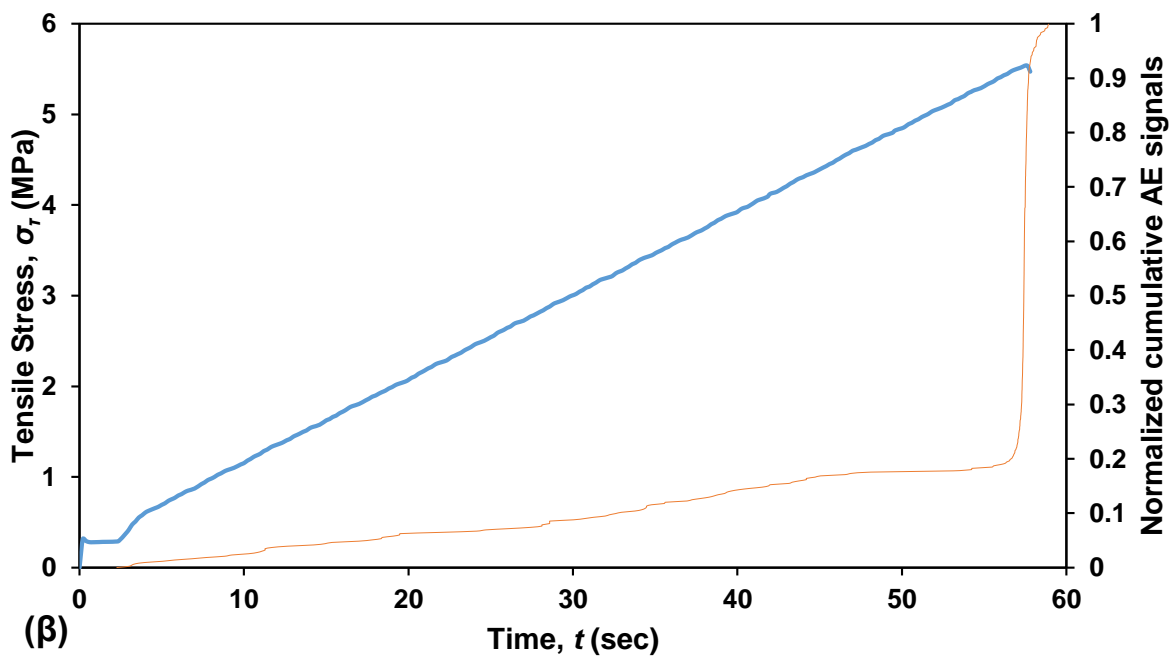
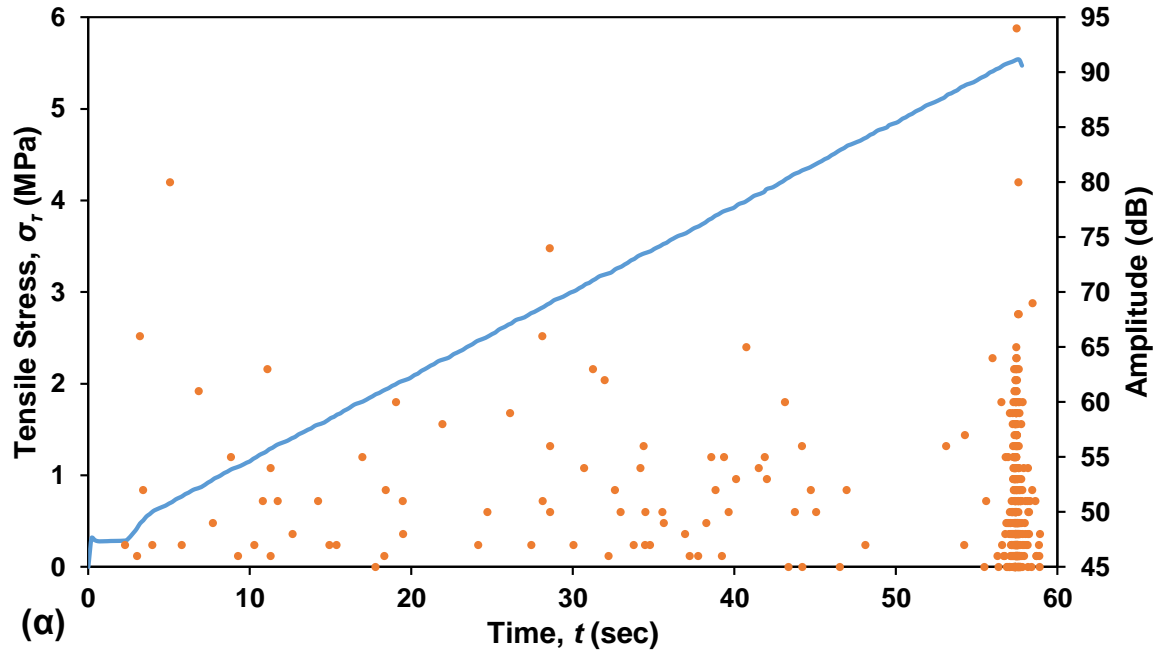


Σχήμα 6-26. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης $\varepsilon_a (\times 10^{-3})$ πρισματικού δοκιμίου μαρμάρου «Βώλακας II» έπειτα από δοκιμή UCS.

Επιπλέον, ενδεικτικά γραφήματα με τις καμπύλες εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – χρόνου t (sec) (μπλε χρώμα) στον πρωτεύοντα κατακόρυφο άξονα και πλάτους σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή ανηγμένου αθροιστικού πλήθους σημάτων AE – χρόνου t (sec) στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα δίνονται στο Σχήμα 6-27 και στο Σχήμα 6-28. Στα εν λόγω γραφήματα, παρομοίως με τα αντίστοιχα γραφήματα της επίσης δολομιτικής ποικιλίας «Βώλακας Άριστον I», είναι έκδηλος ο σημαντικά μικρότερος αριθμός σημάτων AE κατά τις δοκιμές UCS συγκριτικά με τα προηγούμενα υλικά. Ειδικότερα, το μεγαλύτερο ποσοστό των σημάτων AE σημειώνονται μετά το 96% της μέγιστης αντοχής.



Σχήμα 6-27. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Βώλακας II» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).

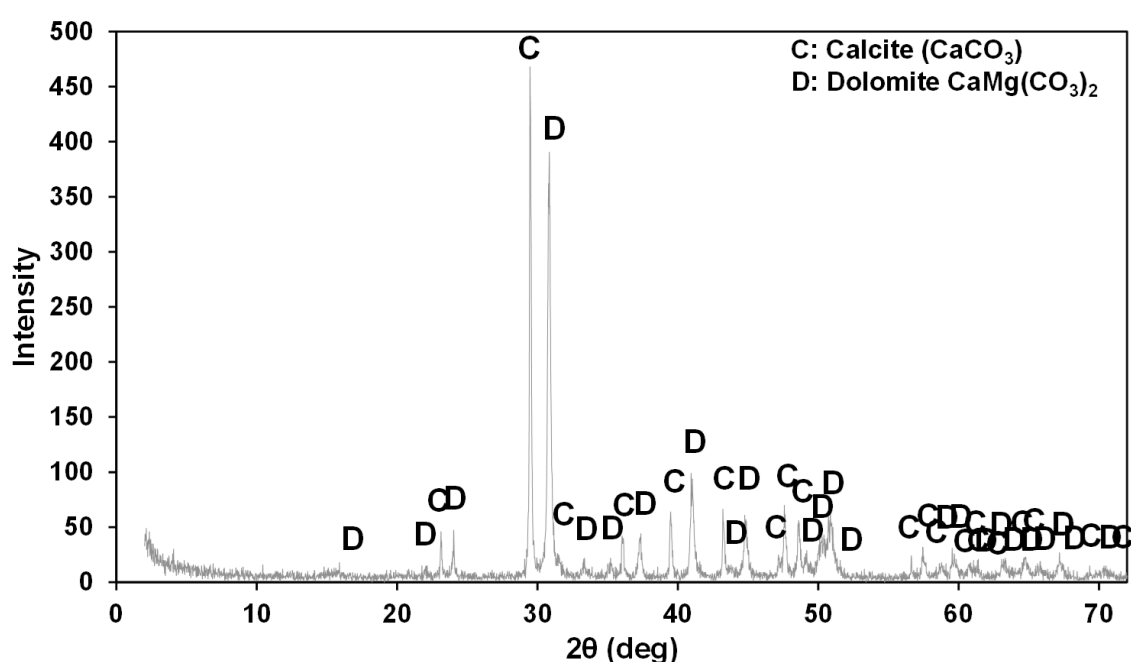


Σχήμα 6-28. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Βώλακας II» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).

6.7 Ασβεστόλιθος «Απόλλων»

6.7.1 Παρουσίαση υλικού

Πρόκειται για μπεζ λατυποπαγές καρναζέικο δολομιτικό ασβεστόλιθο, από την ομώνυμη περιοχή των Καρναζέικων Ναυπλίου. Ο Πίνακας 6-13 παρουσιάζει την ορυκτολογική σύσταση (%) όπως προκύπτει από την ανάλυση XRD (Σχήμα 6-29) με το περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus. Ο Πίνακας 6-14 περιλαμβάνει τη χημική ανάλυση (%) του υλικού όπως είναι διαθέσιμη από την εταιρία που παραχώρησε το υλικό (ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε.).



Σχήμα 6-29. Αποτελέσματα ανάλυσης XRD στη ποικιλία «Απόλλων», όπως προκύπτουν στο περιθλασίμετρο Bruker D8 Focus.

Πίνακας 6-13. Ορυκτολογική σύσταση (% κατά βάρος) ποικιλίας ασβεστόλιθου «Απόλλων».

Ορυκτό	%
Ασβεστίτης	53
Δολομίτης	44
Άλλα ορυκτά	<3

Πίνακας 6-14. Χημική ανάλυση ποικιλίας ασβεστόλιθου «Απόλλων», σύμφωνα με τα δημοσιευμένα στοιχεία της ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ ΜΠΑΡΜΠΑΡΗΣ Α.Ε..

Χημική ένωση	Ποσοστό συμμετοχής (%)	Χημική ένωση	Ποσοστό συμμετοχής (%)
CaO	52.90	Na ₂ O	0.56
MgO	0.97	K ₂ O	0.04
SiO ₂	1.71	Al ₂ O ₃	0.03
Fe ₂ O ₃	0.34	CO ₂	42.70

6.7.2 Αποτελέσματα δοκιμών χαρακτηρισμού

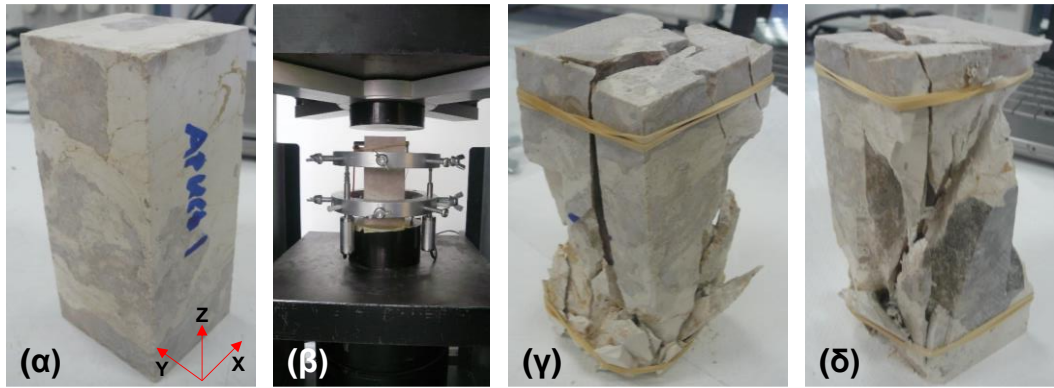
Ακολούθως, ο Πίνακας 6-15 περιέχει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκεκριμένης ποικιλίας ασβεστόλιθου. Σημειώνεται ότι κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (UCS) τα δοκίμια φορτίζονται κατά τον άξονα Z, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6-30α. Το επίπεδο φόρτισης διατηρείται ίδιο τόσο για τις δοκιμές BTS όσο και για τις δοκιμές θλίψης των φυσικών μοντέλων. Τα πρισματικά δοκίμια UCS έχουν ύψος 120.8 mm, ισοδύναμη διάμετρο διατομής 59.05 mm και λόγο ύψους/ισοδύναμης διαμέτρου 2. Οι δίσκοι των δοκιμών BTS έχουν διάμετρο 55.82 mm και πάχος 23.0 mm.

Πίνακας 6-15. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας ασβεστόλιθου «Απόλλων».

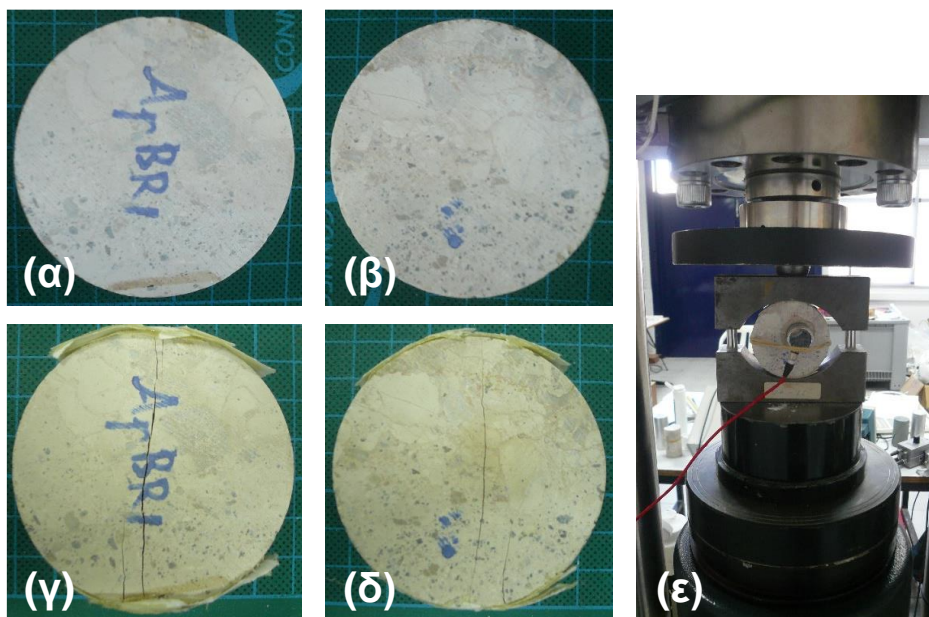
Μηχανική ιδιότητα	Τιμή	Αριθμός δοκιμών
σ_{ci} (MPa) (ρυθμός 750 N/sec)	169.7	5
σ_{tB} (MPa) (ρυθμός 200 N/sec)	10.9 ± 3.5	8
E (GPa)	57.9 ± 5.2	4
d (kg/m ³)	2621.02	9
V_{pX} (m/sec)	6028.80	9
V_{pY} (m/sec)	6329.41	9
V_{pZ} (m/sec)	6282.50	9
V_{sX} (m/sec)	2125.00	9

Σημείωση: σ_{ci} : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, σ_{tB} : αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό Brazilian, E : μέτρο ελαστικότητας Young, d : πυκνότητα, V_p : ταχύτητα διαμηκών κυμάτων, V_s : ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων.

Αντιπροσωπευτικές φωτογραφίες των δοκιμών χαρακτηρισμού δίνονται ακολούθως. Συγκεκριμένα, παρατίθενται φωτογραφίες δοκιμών πρίσματος και δίσκου για δοκιμές μονοαξονικής και αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian) αντίστοιχα, πριν (άρρηκτη κατάσταση), κατά τη διάρκεια (διάταξη δοκιμών στην πρέσα) και μετά το πέρας των δοκιμών.



Σχήμα 6-30. Φωτογραφίες πρισματικού δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Απόλλων» πριν (α) και μετά το πέρας της δοκιμής UCS (γ & δ). Στη φωτογραφία (β) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής με τους δακτυλίους, τα LVDTs και τους αισθητήρες AE.



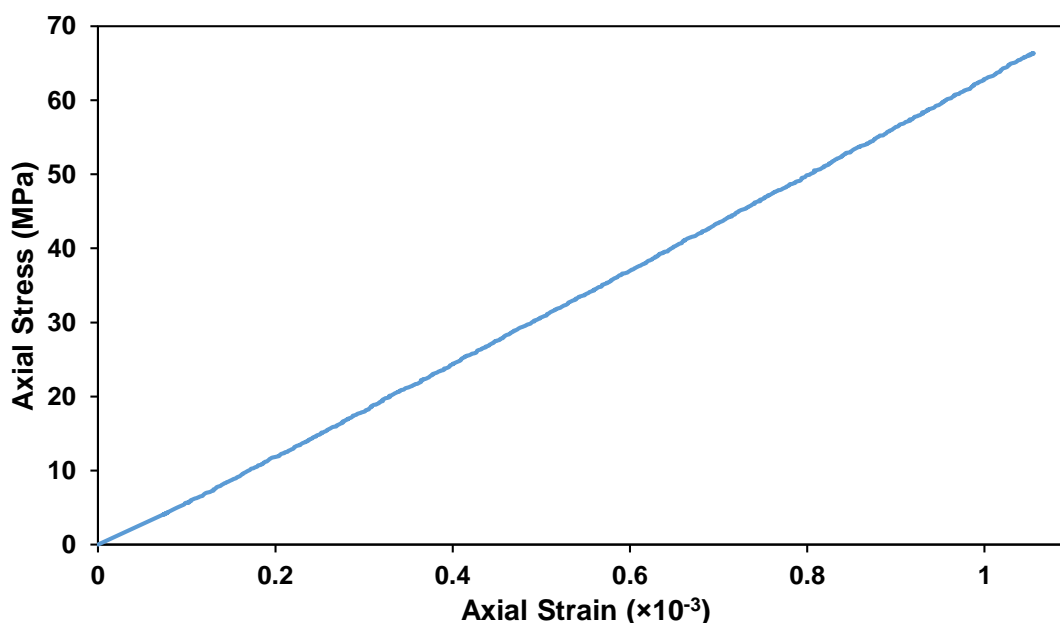
Σχήμα 6-31. Φωτογραφίες δοκιμίου χαρακτηρισμού της ποικιλίας «Απόλλων» πριν (α & β) και μετά το πέρας της δοκιμής BTS (γ & δ). Στη φωτογραφία (ε) παρουσιάζεται η εργαστηριακή διάταξη κατά τη διάρκεια της δοκιμής BTS με τις σιαγώνες (ISRM 1978) και τους αισθητήρες AE.

Όπως φαίνεται και στις παραπάνω φωτογραφίες, το υλικό αστοχεί με τον σχηματισμό κυρίως αξονικών και λιγότερο κεκλιμένων εφελκυστικών ΜΕΡ, κατακερματίζοντας το δοκίμιο σε πάρα πολλά μικρά τμήματα και αποκολλήσεις φύλλων (τσιπ) λόγω εφελκυσμού. Αρκετά από τα εξεταζόμενα δοκίμια μετά το πέρας των δοκιμών και την κατάρρευσή τους είναι μη αναγνωρίσιμα, μιας και η αστοχία του υπό εξέταση υλικού είναι εξαιρετικά εκρηκτική, αφήνοντας στη μεταλλική πλάκα του πλαισίου της πρέσας μόνο τρίμματα και χαλίκια. Χαρακτηριστικά, σε συνθήκες μεγάλων ασκούμενων τάσεων, αποκολλούνται τσιπάκια από τις μεγάλες ακμές των πρισμάτων παράγοντας θόρυβο και προκαλώντας απομείωση της διατομής τους, κάτι που θυμίζει έντονα τα φαινόμενα

και τη γενική εικόνα που απαντώνται σε υπόγεια μεταλλεία και λατομεία όπου η εκμετάλλευση πραγματοποιείται με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων. Επιπλέον, το συγκεκριμένο υλικό σε αντίθεση με τις παραπάνω ποικιλίες μαρμάρου, δεν περιέχει βυτουμενιούχα αέρια. Τέλος, η κατάρρευση των δοκιμών ολοκληρώνεται με έντονο κρότο, που οφείλεται στην εξαιρετικά εκρηκτική τους συμπεριφορά.

Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης, τα δοκίμια αστοχούν με την εμφάνιση εφελκυστικής ρωγμής κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης (Σχήμα 6-31).

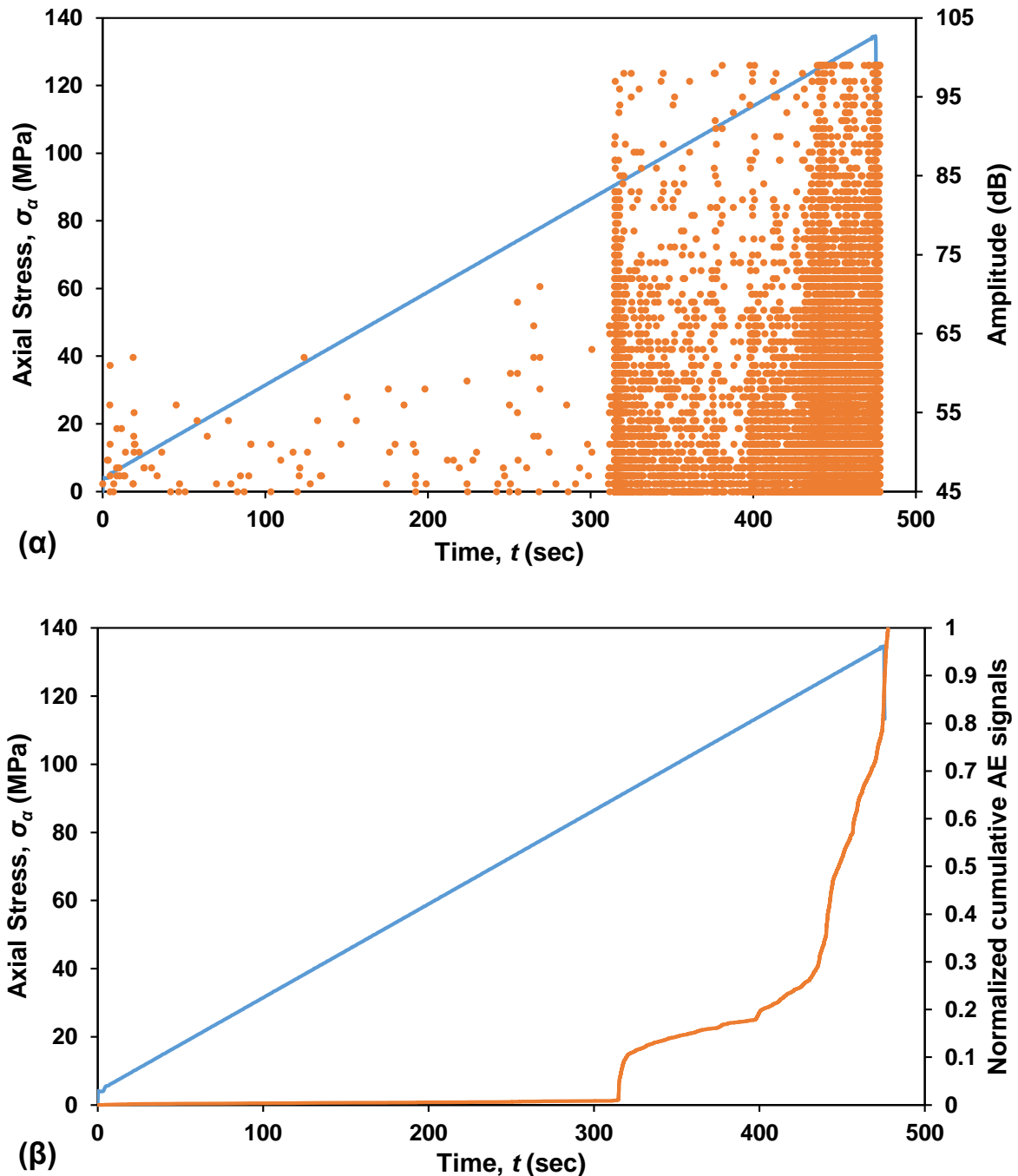
Ενδεικτική καμπύλη της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a έως την άσκηση αξονικής τάσης ίσης με 66 MPa δίνεται στο Σχήμα 6-32, όπου παρατηρείται μεγάλη ελαστική περιοχή και απουσία της περιοχής κλεισίματος των μικρορωγμών και πόρων. Τα δοκίμια στη συνέχεια αποφορτίζονται, απομακρύνονται οι δακτύλιοι και τα LVDTs προκειμένου να προστατευτούν από την εκρηκτικότητα του εξεταζόμενου υλικού, και με τοποθετημένους πλέον μόνο τους αισθητήρες AE σε επαφή με τα δοκίμια, πραγματοποιείται η φόρτισή τους έως ότου επέλθει η κατάρρευση.



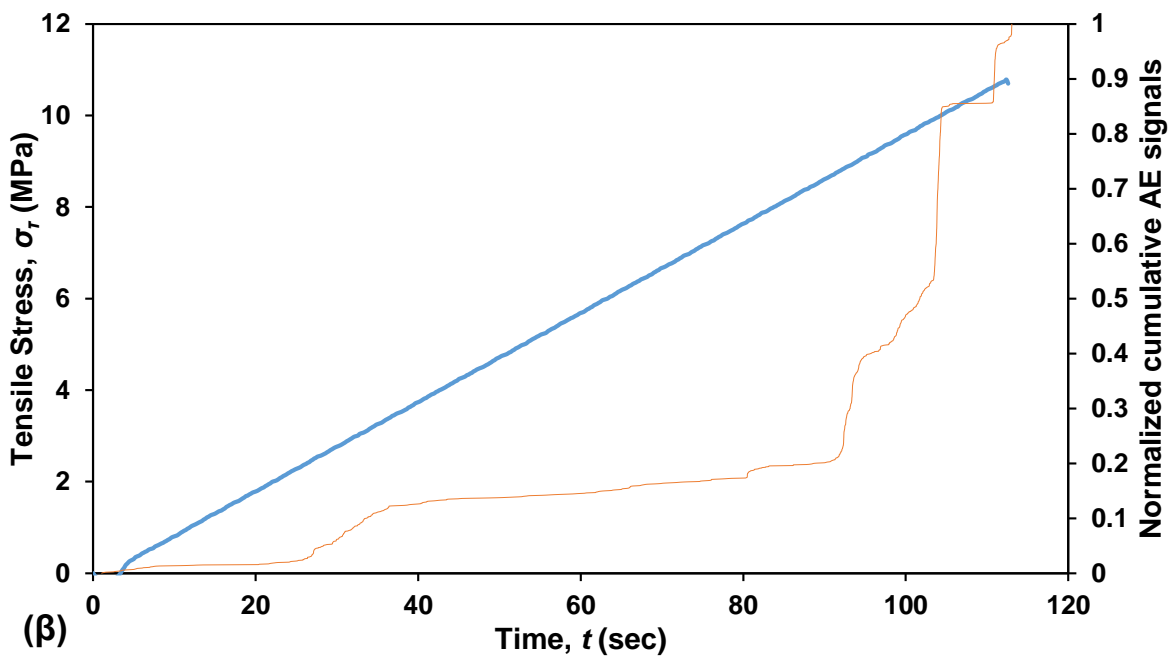
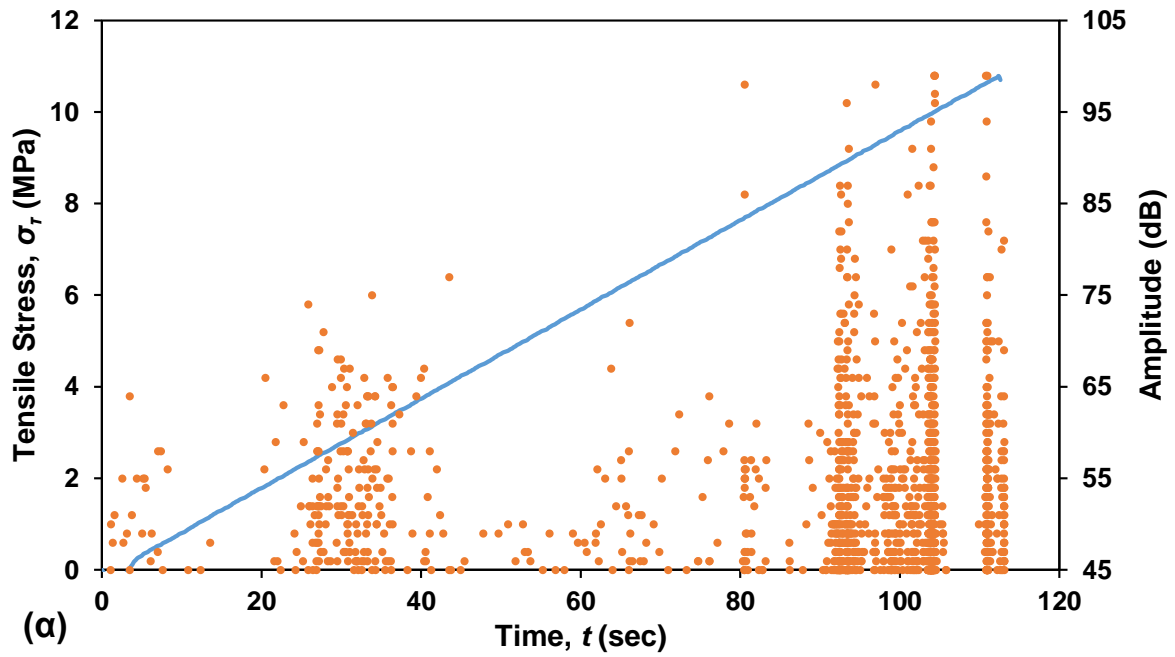
Σχήμα 6-32. Καμπύλη εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – αξονικής παραμόρφωσης ε_a ($\times 10^{-3}$) πρισματικού δοκιμίου ασβεστόλιθου «Απόλλων» έπειτα από δοκιμή UCS.

Επιπλέον, ενδεικτικά γραφήματα με τις καμπύλες εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a (MPa) – χρόνου t (sec) (μπλε χρώμα) στον πρωτεύοντα κατακόρυφο άξονα και πλάτους σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή ανηγμένου αθροιστικού πλήθους σημάτων AE – χρόνου t (sec) στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα

δίνονται στο Σχήμα 6-33 και στο Σχήμα 6-34. Σημειώνεται δε ότι, η απουσία σημάτων AE έως περί τα 90 MPa ασκούμενης αξονικής τάσης, δε σχετίζεται με το φαινόμενο Kaiser (Kaiser 1950), καθώς το πλήθος των λαμβανόμενων σημάτων είναι αντίστοιχο των παρακάτω γραφημάτων κατά τη διάρκεια της πρώτης φόρτισης του δοκιμίου έως τα 66 MPa.



Σχήμα 6-33. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής UCS στην ποικιλία «Απόλλων» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).



Σχήμα 6-34. Ενδεικτικά διαγράμματα δοκιμής BTS στην ποικιλία «Απόλλων» όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό).

7 Εργαστηριακές Δοκιμές Θλίψης σε Φυσικά Μοντέλα με Οπές

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται αρχικά η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη διαμόρφωση και τη μελέτη των φυσικών μοντέλων (ΦΜ) της παρούσας διδακτορικής διατριβής, και στη συνέχεια δίνονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν με το πέρας όλης της διαδικασίας.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, βασικό στόχο του πειραματικού μέρους της παρούσας διατριβής αποτελεί η εργαστηριακή μελέτη των μηχανισμών ρωγμάτωσης και θραύσης του πετρώματος γύρω από τα κυλινδρικά ανοίγματα των ΦΜ. Επιπλέον, εξετάζεται η επίδραση των πρωτογεννών και δευτερογεννών φαινομένων ρωγμάτωσης και θραύσης στον τρόπο αστοχίας των ΦΜ. Η προκύπτουσα γνώση συντελεί στην πληρέστερη κατανόηση των μηχανισμών αστοχίας του πετρώματος στο πεδίο και ειδικότερα κατά τη μελέτη θεμελιωδών δομών υπογείων κατασκευών, όπως π.χ. σηράγγων σε μεγάλο βάθος.

Στο πλαίσιο αυτό, πρωτίστως αναγνωρίζονται τα φαινόμενα που λαμβάνουν μέρος κατά τη διάρρηξη και εν τέλει την κατάρρευση των ΦΜ, προσδιορίζονται χρονικά συναρτήσει της ασκούμενης αξονικής τάσης αξιοποιώντας τόσο τις αναλύσεις DIC όσο και κατά το δυνατό τη μελέτη των ΑΕ του πετρώματος. Στη συνέχεια, τα φαινόμενα που ταυτοποιούνται με τις παραπάνω μεθόδους, συγκρίνονται αρχικά ως προς τον τρόπο και τον χρόνο εμφάνισής τους, συναρτήσει της διαμέτρου της οπής των ΦΜ κάθε υλικού, και έπειτα αντιπαραβάλλονται με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων υλικών (πετρωμάτων και γύψου) από τη διεθνή βιβλιογραφία.

7.1 Προετοιμασία δοκιμίων φυσικών μοντέλων

Τα δοκίμια των ΦΜ που προετοιμάζονται από γύψο, ασβεστόλιθο και τέσσερις (4) ποικιλίες μαρμάρου φαίνονται στο Σχήμα 7-1.

Πριν από την έναρξη της προετοιμασίας, μετρούνται οι διαστάσεις των δοκιμίων και προσδιορίζονται οι ταχύτητες των διαμήκων και διατμητικών κυμάτων (V_pX , V_pY , V_pZ , V_sZ) και η πυκνότητα (ρ) των πλακών που προορίζονται για φυσικά μοντέλα (ΦΜ) με οπές, όπως στα δοκίμια χαρακτηρισμού. Με τον τρόπο αυτό

επιβεβαιώνεται η διεύθυνση φόρτισης των ΦΜ και επιλέγονται οι έδρες που θα αποτελέσουν τις βάσεις των δοκιμίων κατά τις δοκιμές θλίψης.

Η προετοιμασία των δοκιμίων ξεκινάει με τη λείανση της επιφάνειας των βάσεων τους, με συσκευή λείανσης του οίκου Controls s.r.l. (τύπος 55-C0201/C), για την εξάλειψη των ανωμαλιών που προκαλούνται κατά την κοπή του δοκιμίου. Με τη λείανση επιχειρείται τόσο η δημιουργία απόλυτα επίπεδων βάσεων όσο και η επίτευξη μιας ομαλής επιφάνειας κατάλληλης για την εκτέλεση της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Οι τελικές διαστάσεις των δοκιμίων μετά τη λείανσή τους μετρούνται με παχύμετρο.

Η πρώτη σειρά δοκιμών περιλαμβάνει δύο (2) σετ δοκιμίων με διαφορετικές διαμέτρους οπών (τρεις (3) πλάκες ανά σετ) για κάθε υλικό προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα που θα προκύψουν και να οργανωθεί η δεύτερη σειρά δοκιμών. Εξετάζονται από τρία (3) ΦΜ με τις ίδιες διαστάσεις και διάμετρο οπής για κάθε σειρά, προκειμένου τα αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις να έχουν στατιστική αξιοπιστία. Η μέγιστη διάμετρος οπής D_{max} που μελετάται σε κάθε υλικό επιλέγεται έτσι ώστε να μην επηρεάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής από το μέγεθος της πλάκας και τις συνοριακές συνθήκες. Τηρείται γενικά λόγος πλάτους (ή ύψους) προς διάμετρο οπής τουλάχιστον ίσος με τέσσερα (4). Οι διαστάσεις των δοκιμίων και οι αντίστοιχες μέγιστες διαμέτροι οπής δίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 7-1. Μέγιστη εξεταζόμενη διάμετρος D_{max} ανά υλικό.

Υλικό	Διαστάσεις ΦΜ (cm)	D_{max} (mm)
Γύψος	15 x 15 x 4	28
Μάρμαρο «Βέροια»	15 x 15 x 5	35
Μάρμαρο «Νεφέλη»	15 x 15 x 5	35
Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»	30 x 30 x 8.5	61
Μάρμαρο «Βώλακας ΙΙ»	20 x 20 x 8	45
Ασβεστόλιθος «Απόλλων»	15 x 15 x 5	22

Η διάτρηση των οπών στις πλάκες των ΦΜ πραγματοποιείται με διατρητικό μηχάνημα υγρής διάτρησης (καροτιέρα) DMS160A του οίκου Husqvarna, που φέρει αδαμαντοφόρα κοπτικά της σειράς D810 του ίδιου οίκου. Τοποθετείται η πλάκα στο διατρητικό φορείο και φέρεται το αδαμαντοφόρο κοπτικό σε μικρή (1-2 mm)

απόσταση από την πλάκα. Η έναρξη της διάτρησης γίνεται με προσοχή και με την εφαρμογή μικρής πίεσης έτσι ώστε να περιοριστεί στο ελάχιστο δυνατό η ζημία στο πέτρωμα πέριξ της οπής. Στη συνέχεια διατηρείται σταθερή πίεση μέχρι και την ολοκλήρωση της διάτρησης. Καθαρίζεται το δοκίμιο, και απομακρύνεται η υγρασία λόγω της διάτρησης. Στη συνέχεια το δοκίμιο αποθηκεύεται σε θερμοκρασία δωματίου μέχρι την περαιτέρω προετοιμασία του.

Έπειτα από τη διαμόρφωσή τους, τα φυσικά μοντέλα τοποθετούνται σε παράταξη σε εξωτερικό χώρο (Σχήμα 7-2) και η επιφάνειά τους ψεκάζεται με υδαρό διάλυμα μαύρου χρώματος για τη διαμόρφωση επιφάνειας παρατήρησης με κατάλληλο μοτίβο για την εφαρμογή της μεθόδου DIC. Συγκεκριμένα, το μοτίβο της επιφάνειας μελέτης θα πρέπει να επιτρέπει την παρακολούθηση των μικροπαραμορφώσεων της κατά τη φόρτιση. Για τον λόγο αυτό, οι επιφάνειες μελέτης ψεκάζονται με χρώματα που δημιουργούν έντονες αντιθέσεις και αποχρώσεις. Στην προκειμένη περίπτωση, τα λευκά/γκρίζα ΦΜ μαρμάρου και τα μπεζ του ασβεστόλιθου ψεκάζονται με μαύρο χρώμα. Η ακρίβεια της ανάλυσης DIC εξαρτάται τόσο από το εύρος των αποχρώσεων όσο και από τον αριθμό και το μέγεθος των εικονοστοιχείων (pixels) των φωτογραφιών. Περισσότερες αποχρώσεις, μεγαλύτερος αριθμός και μικρότερο μέγεθος εικονοστοιχείων αποφέρουν ακριβέστερες αναλύσεις. Στην παρούσα διατριβή λαμβάνονται ασπρόμαυρες φωτογραφίες βάθους 24 bit, με ανάλυση 5 MP (2448 px x 2048 px) και μέγεθος εικονοστοιχείου 3.45 μm . Η ανάλυση πραγματοποιείται με τη βοήθεια του λογισμικού Correlate της GOM (GOM 2018).



Σχήμα 7-1. Τα άρρηκτα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διατριβή (α: «Βώλακας Άριστον Ι», β: «Βώλακας ΙΙ», γ (από αριστερά προς τα δεξιά): «Απόλλων», «Νεφέλη», «Βέροια»).



Σχήμα 7-2. Ενδεικτικά φυσικά μοντέλα έπειτα από τον ψεκασμό τους με υδαρό διάλυμα μαύρου χρώματος.

7.2 Παρακολούθηση ΑΕ φυσικών μοντέλων

Όπως έγινε λόγος σε προηγούμενο κεφάλαιο, σε κάθε ΦΜ εφαρμόζεται η μέθοδος ΑΕ με την αξιοποίηση οκτώ (8) αισθητήρων της PAC micro-100S ευρέως φάσματος (wideband) για τον γύψο, ενώ R15 και R15α (resonant frequency: 150 kHz) για τα μάρμαρα και τον ασβεστόλιθο, συνδεδεμένους σε προενισχυτές (pre-amplifiers) ρυθμισμένους στα 40 dB. Κατά την τοποθέτηση των αισθητήρων ΑΕ στο φυσικό μοντέλο, λαμβάνονται υπόψη οι περιοχές όπου αναμένεται εμφάνιση ΜΕΡ προς αποφυγή τους, μιας και σε περίπτωση που κατά τη διάρκεια των δοκιμών αυτές φθάσουν στην επιφάνεια κάτω από τους αισθητήρες, θα αποτυγχάνει η ορθή παρακολούθηση των ΑΕ από το συγκεκριμένο χρονικό σημείο και έπειτα.

Με την ολοκλήρωση των δοκιμών, τα δεδομένα των ΑΕ εισάγονται στο λογισμικό NOESIS V8.0 της MISTRASGROUP όπου γίνεται ο συγχρονισμός των δεδομένων της πρέσας με τα δεδομένα ΑΕ, και αξιοποιούνται οι πληροφορίες που αφορούν το πλάτος των κυμάτων (Amplitude (dB)) και το αθροιστικό πλήθος των σημάτων ΑΕ (Vector (Hit) #). Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά προβάλλονται σε κοινά διαγράμματα με την ασκούμενη αξονική τάση (MPa) συναρτήσει του χρόνου (sec). Στα ίδια διαγράμματα δίνονται οι στιγμές έναρξης των πρωτογενών εφελκυστικών ρωγμών στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων αριστερά (Sl) και δεξιά (Sr) της οπής αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι, ο προσδιορισμός της τάσης έναρξης των αποφλοιώσεων πραγματοποιείται αποκλειστικά με τη μέθοδο DIC, έχοντας ως επιφάνεια ανάλυσης την μπροστά έδρα του φυσικού μοντέλου.

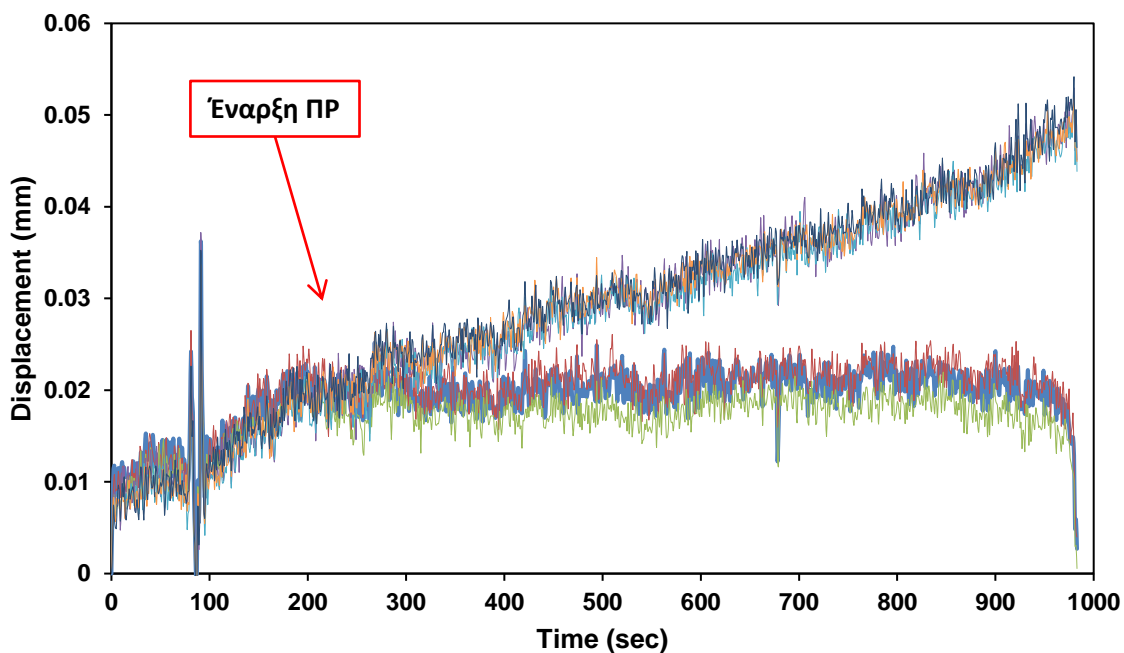
Αναλυτικά τα αποτελέσματα και οι παρατηρήσεις που προέκυψαν κατά τη μελέτη των φυσικών μοντέλων του εκάστοτε υλικού δίνονται στις επόμενες παραγράφους.

7.3 Προσδιορισμός έναρξης ΠΡ

Διαφορές μεταξύ των υπό μελέτη υλικών είναι εμφανείς ήδη από το στάδιο των δοκιμών χαρακτηρισμού. Παραδείγματος χάρη, ο γύψος είναι εξαιρετικά ευαίσθητος σε διαφοροποιήσεις ως προς το μείγμα και τη μέθοδο παρασκευής, κάτι που αναφέρεται και στη διεθνή βιβλιογραφία (Wong & Einstein 2009a, 2009b). Κατά τις δοκιμές με έλεγχο φορτίου, τα δολομικά μάρμαρα αστοχούν με εκκωφαντικό κρότο και απότομη απελευθέρωση ενέργειας, καταρρέοντας σε μικρά και πολλά τεμάχια. Αντιθέτως, τα ασβεστιτικά μάρμαρα αστοχούν σαφώς πιο ήρεμα.

Η ορυκτολογική σύσταση και οι προσμίξεις κάθε ποικιλίας διαδραματίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην έναρξη και ανάπτυξη των ΠΡ. Για παράδειγμα, οι ταινιώσεις της ποικιλίας «Βέροια» κυριαρχούν στη διαδικασία ρωγμάτωσης των αντίστοιχων ΦΜ. Συγκεκριμένα, σε ορισμένα ΦΜ, δευτερογενείς μακροσκοπικές ρωγμές ακολουθούν τα επίπεδα των ταινιώσεων, παραμορφώνοντας εν τέλει το σύνθετο μοτίβο που φαίνεται στο Σχήμα 2-1. Η ανάλυση DIC αποδεικνύεται ικανή να ξεπεράσει την όχληση του παραπάνω θορύβου και να συλλάβει τα υπό μελέτη φαινόμενα. Σημειώνεται ότι ανάλογα προβλήματα δεν παρουσιάζονται στα υπόλοιπα υλικά.

Ο χρονικός προσδιορισμός της έναρξης των ΠΡ στο άνω και κάτω όριο των ανοιγμάτων των ΦΜ, πραγματοποιείται με την ίδια μεθοδολογία για όλα τα εξεταζόμενα υλικά, ανεξάρτητα από τις διαστάσεις του μοντέλου, τη διάμετρο της οπής, την ορυκτολογία του υλικού, τις προσμίξεις κ.λπ. Εν προκειμένω, αξιολογούνται οι τοπικές οριζόντιες μετατοπίσεις μικρών περιοχών ενδιαφέροντος (Region of Interest, ROI), που η κάθε μία περιέχει ένα ομαδοποιημένο υποσύνολο εικονοστοιχείων. Αρχικά, ορίζεται ένα πλήθος περιοχών ενδιαφέροντος εκατέρωθεν του σημείου έναρξης της σχηματιζόμενης πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής στο όριο της οπής, κάθετα στη διεύθυνσή της. Έπειτα, τα δεδομένα που προκύπτουν αποτυπώνονται σε διάγραμμα μετατόπισης dx - χρόνου t , όπως φαίνεται στο Σχήμα 7-3. Οι καμπύλες που προκύπτουν από μια τέτοια ανάλυση συμπορεύονται με κοινές τιμές στην αρχή της δοκιμής, ακολουθώντας την τοπική παραμόρφωση του υλικού στις περιοχές συγκέντρωσης υψηλών εφελκυστικών τάσεων, μέχρι την έναρξη της πρωτογενούς εφελκυστικής ρωγμής σε κάποια θέση ανάμεσά τους. Εν συνεχεία, ορισμένες καμπύλες ακολουθούν αύξουσα πορεία, ενώ άλλες ακολουθούν φθίνουσα. Τη χρονική στιγμή (sec) όπου σημειώνεται η συγκεκριμένη απόκλιση των καμπύλων, ορίζεται η έναρξη της ΠΡ (Σχήμα 7-3).

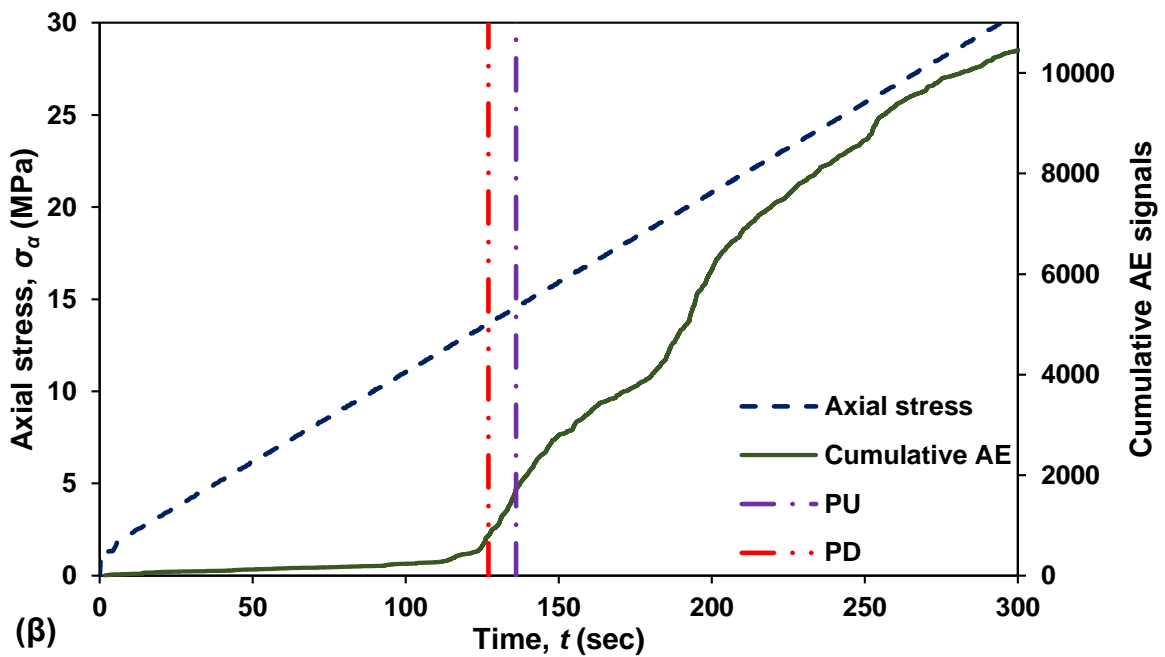
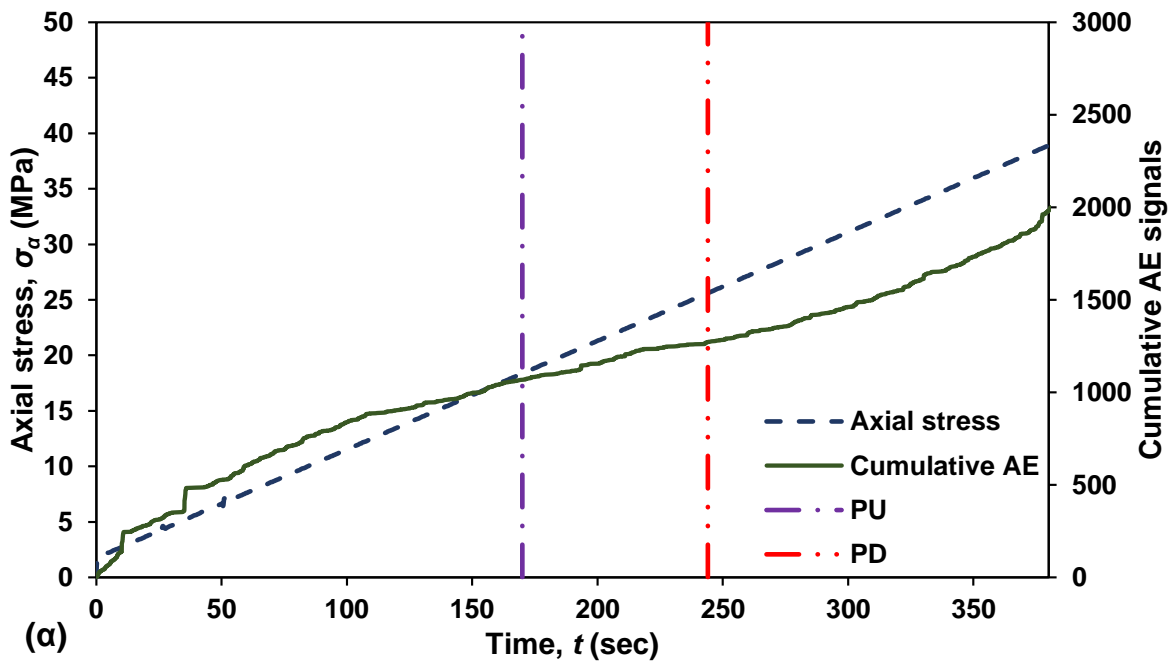


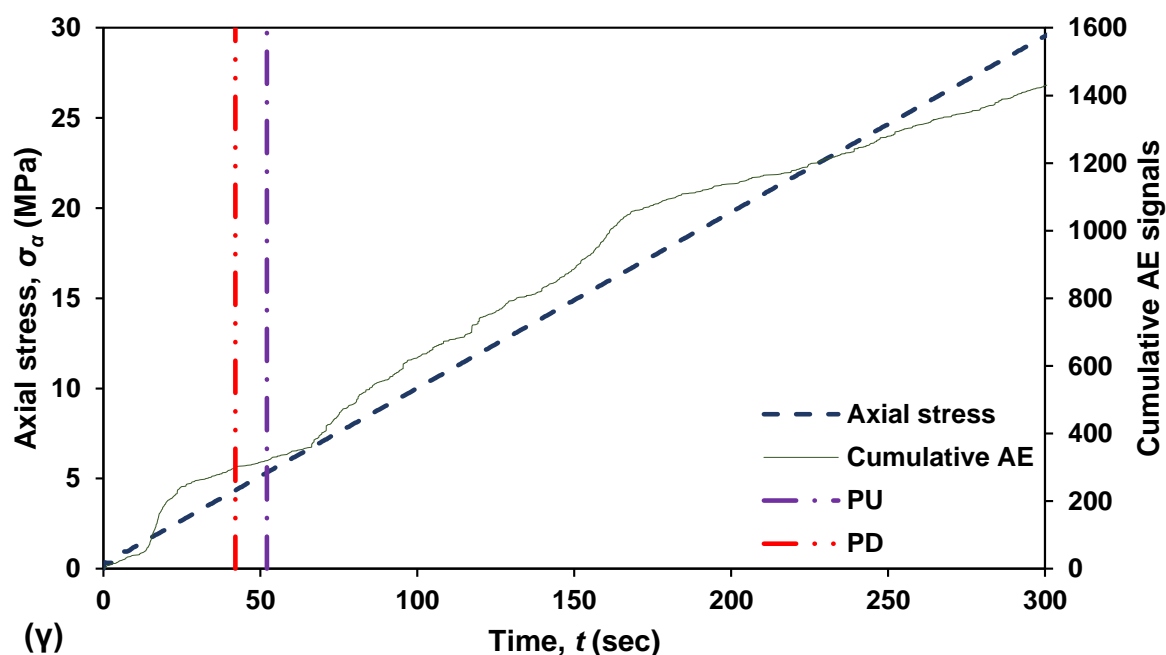
Σχήμα 7-3. Ενδεικτικό διάγραμμα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση της ΠΡ, όπως προκύπτει από την ανάλυση DIC στο άνω μέρος οπής διαμέτρου 35 mm σε ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια», βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης DIC συγκρίνονται με εκείνα των ακουστικών εκπομπών, όπου εντοπίζονται δύο (2) διαφορετικοί τύποι συμπεριφοράς ΑΕ, ανεξαρτήτως υλικού. Κατά τον πρώτο (1^ο) τύπο, τη χρονική στιγμή (sec) έναρξης της ΠΡ σύμφωνα με το DIC, ο ρυθμός λήψης των σημάτων ΑΕ αυξάνεται, κάτι που παρατηρείται από την τοπική αύξηση της κλίσης της καμπύλης αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ ως προς τον χρόνο (sec), που δίνεται στο Σχήμα 7-4α. Στο εν λόγω σχήμα, η έναρξη της ΠΡ στο άνω όριο της οπής (κάθετη κόκκινη γραμμή) δε συνοδεύεται από αξιοσημείωτη αλλαγή του ρυθμού λήψης των σημάτων ΑΕ. Παρόλα αυτά, με την έναρξη της ΠΡ στο κάτω όριο της οπής, παρατηρείται τοπική αύξηση του ρυθμού καταγραφής των σημάτων ΑΕ. Η αρχική αύξηση του πλήθους των σημάτων ΑΕ στο Σχήμα 7-4α πριν την έναρξη των ΠΡ, αντιστοιχεί περί το 1% του συνολικού πλήθους σημάτων ΑΕ που καταγράφηκαν κατά τη δοκιμή θλίψης, και αποδίδεται στην αρχική προσαρμογή της διεπαφής ΦΜ – μεταλλικής πλάκας σερβουδραυλικής μηχανής.

Κατά τον δεύτερο τύπο ΑΕ, παρατηρούνται διακριτά σκαλοπάτια ή απότομη αύξηση του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ τη χρονική στιγμή (sec) έναρξης της ΠΡ (Σχήμα 7-4β), ή συνηθέστερα, ελάχιστα δευτερόλεπτα κατόπιν (Σχήμα 7-4γ).

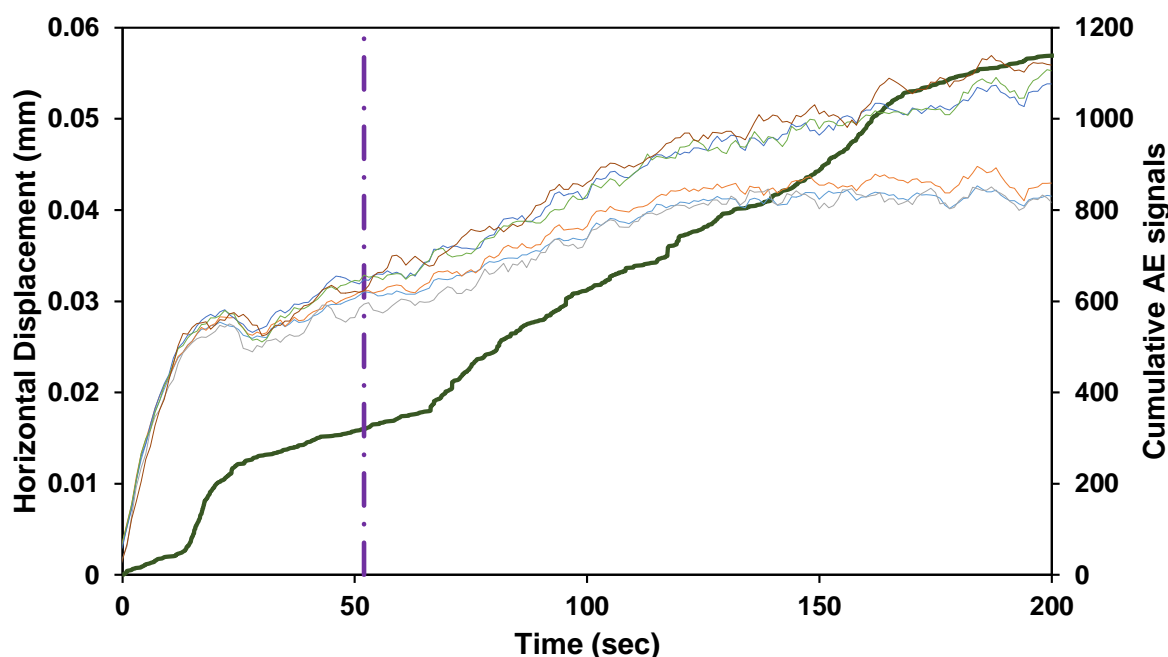
Από την καμπύλη του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ και για τους δύο (2) τύπους συμπεριφοράς ΑΕ που εντοπίζονται, συμπεραίνεται πως το υπό μελέτη εφελκυστικό φαινόμενο συνοδεύεται από ασθενή δραστηριότητα ΑΕ, μιας και η συνολική αύξηση του πλήθους των σημάτων ΑΕ που του αντιστοιχούν, αντιπροσωπεύει ένα μικρό ποσοστό των συνολικών καταγεγραμμένων σημάτων ΑΕ κατά τη δοκιμή θλίψης.





Σχήμα 7-4. Αντιπροσωπευτικά γραφήματα των διαφορετικών τύπων συμπεριφοράς AE κατά την έναρξη των ΠΡ: (α) ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 10 mm (μεταβολή κλίσης καμπύλης), (β) ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 35 mm (άμεσα διακριτά σκαλοπάτια) και (γ) ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 61 mm (προσεχόμενα διακριτά σκαλοπάτια). Οι κατακόρυφες γραμμές αντιστοιχούν στην έναρξη των ΠΡ στο άνω και κάτω όριο της αντίστοιχης οπής φυσικού μοντέλου, όπως προκύπτει από την ανάλυση DIC.

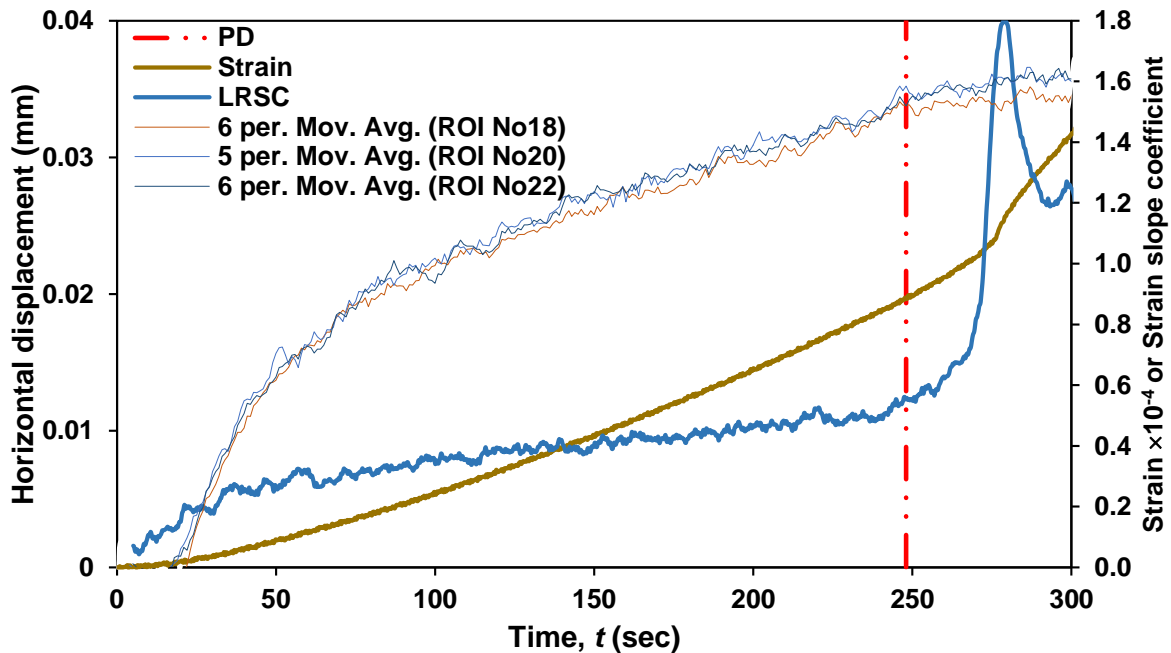
Αντιπροσωπευτικό συνδυασμένο γράφημα DIC – AE δίνεται στο Σχήμα 7-5, όπου ο πρωτεύοντας κατακόρυφος άξονας απεικονίζει τις οριζόντιες μετατοπίσεις συναρτήσει του χρόνου (sec) των διαδοχικών περιοχών ενδιαφέροντος στο DIC, ενώ ο δευτερεύοντας αποτυπώνει το αθροιστικό πλήθος των σημάτων AE συναρτήσει του χρόνου (sec) για ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 61 mm. Η κατακόρυφη γραμμή αντιπροσωπεύει την έναρξη της ΠΡ στο άνω όριο της οπής. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων DIC και AE επιβεβαιώνει το γεγονός πως η εφαρμογή μιας και μόνο μεθόδου παρακολούθησης δεν αρκεί για να περιγράψει ξεκάθαρα μια κατάσταση που λαμβάνει χώρα, όχι πάντα τουλάχιστον, και ως εκ τούτου πάνω από μία προσεγγίσεις θα πρέπει να αξιοποιούνται προκειμένου να καθοριστεί πλήρως μια κατάσταση.



Σχήμα 7-5. Οριζόντιες μετατοπίσεις (mm) συναρτήσει του χρόνου (sec) διαδοχικών περιοχών ενδιαφέροντος στο DIC, οριοθετημένα κάθετα στη διεύθυνση της ΠΡ στον πρωτεύοντα άξονα, και αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ συναρτήσει του χρόνου (sec) στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα. Η κατακόρυφη γραμμή ορίζει την έναρξη της αντίστοιχης ΠΡ στο όριο οπής διαμέτρου 61 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι».

Ο εντοπισμός της έναρξης των ΠΡ με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία από τις μετρήσεις DIC επαληθεύεται από τα αποτελέσματα μετρήσεων της παραμόρφωσης με τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges), ενεργού μήκους 10 mm, επικολλημένα στο εσωτερικό οπών κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης της πρωτογενούς ρωγμής σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 35 mm των ποικιλιών «Βέροια» και «Νεφέλη», καθώς και σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Στο Σχήμα 7-6 αποτυπώνονται σε κοινό γράφημα συναρτήσει του χρόνου, οι μετατοπίσεις που υπολογίζονται στο DIC και οι παραμορφώσεις που καταγράφονται από τροπόμετρο στο κάτω όριο οπής διαμέτρου 35 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βέροια». Προκειμένου να οριστεί η έναρξη της ΠΡ από τα δεδομένα του τροπόμετρου, υπολογίζεται ο ρυθμός μεταβολής της κλίσης της καμπύλης τροπής-χρόνου, μέσω γραμμικής παλινδρόμησης για διάστημα 10 sec. Η γραφική παράσταση της παραπάνω ανάλυσης αποτυπώνεται επίσης στο Σχήμα 7-6. Η έναρξη της ΠΡ από το DIC ($t=248$ sec) βρίσκεται χρονικά ανάμεσα από την εμφανή αύξηση ($t = 243$ sec) και την απότομη αύξηση ($t = 257$ sec) του μέσου ρυθμού μεταβολής της τροπής, οι οποίες δύνανται να θεωρηθούν ως το κατώτατο και ανώτατο όριο αντίστοιχα της πραγματικής χρονικής στιγμής έναρξης της

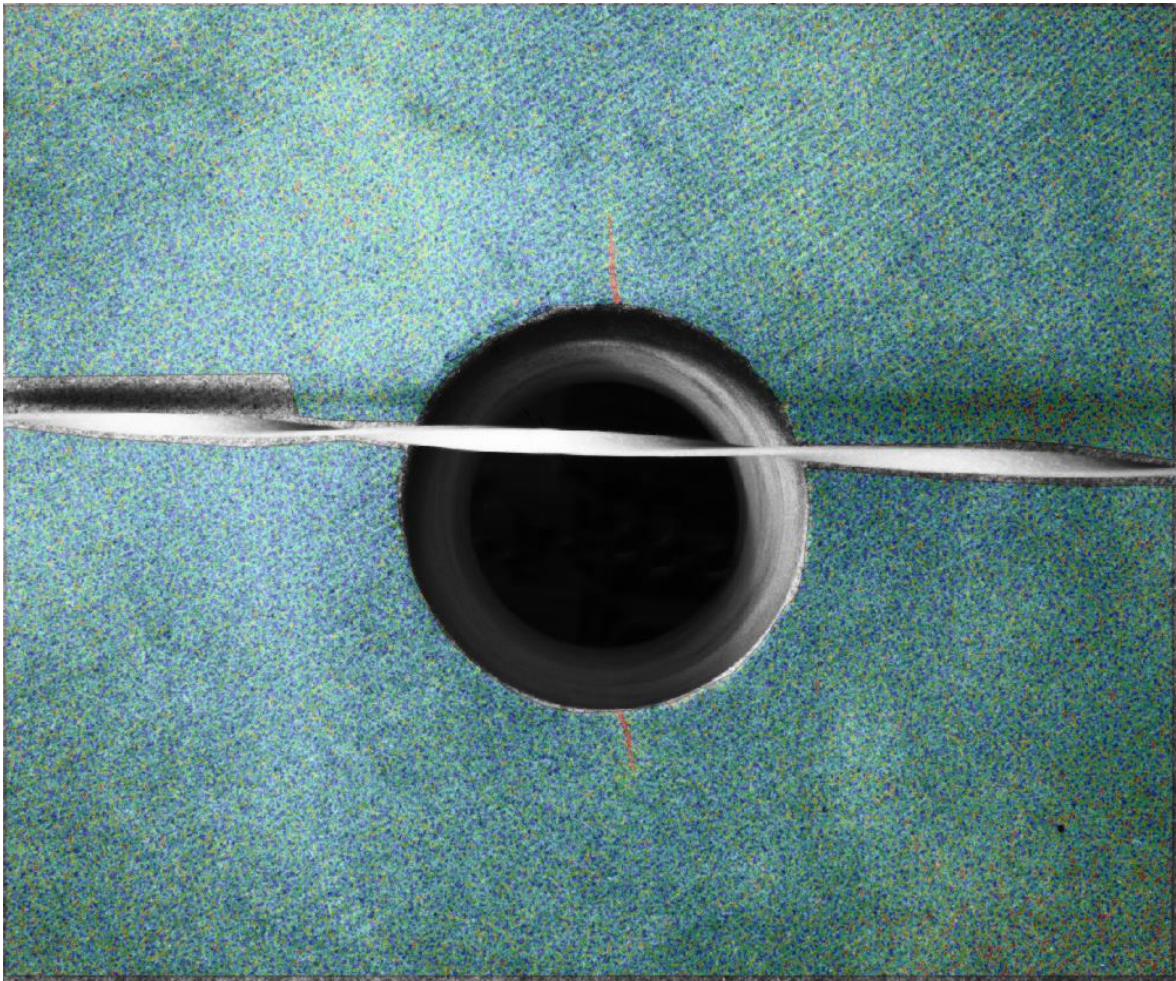
ρωγμής. Η παραπάνω ανάλυση στα δεδομένα του τροπόμετρου ξεκαθαρίζει την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, η οποία συμβαδίζει με εκείνα του DIC. Παρόλα αυτά, σημειώνεται ότι η ανάλυση DIC εφαρμόζεται στην μπροστινή ελεύθερη επιφάνεια του ΦΜ, ενώ το τροπόμετρο επικολλείται στο μέσο της καμπύλης επιφάνειας του εσωτερικού της οπής.



Σχήμα 7-6. Οριζόντιες μετατοπίσεις (mm) συναρτήσει του χρόνου (sec) διαδοχικών περιοχών ενδιαφέροντος στο DIC, οριοθετημένα κάθετα στη διεύθυνση της ΠΡ στον πρωτεύοντα άξονα, και στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα οι τιμές των παραμορφώσεων ($\times 10^{-4}$) όπως καταγράφονται από τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (Strain) ενεργού μήκους 10 mm, επικολλημένο στο εσωτερικό οπής διαμέτρου 35 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βέροια». Επιπλέον, στον δευτερεύοντα άξονα παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα τις γραμμικής παλινδρόμησης (LRSC) στην κλίση της καμπύλης δεδομένων τροπόμετρου - χρόνου (sec). Η κατακόρυφη γραμμή ορίζει την έναρξη της αντίστοιχης ΠΡ.

Στο Σχήμα 7-7 απεικονίζεται το μέγεθος της κύριας τροπής γύρω από το κυλινδρικό άνοιγμα στην πρόσθια επιφάνεια του δοκιμίου, όπως προκύπτει από την ανάλυση DIC με το λογισμικό GOM Correlate, σε φυσικό μοντέλο της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 35 mm σε χρόνο $t = 600$ sec. Οι ΠΡ στο άνω και κάτω όριο της οπής διακρίνονται από τις υψηλές τιμές της τροπής κατά μήκος τους συγκριτικά με εκείνες στην υπόλοιπη περιοχή της επιφάνειας παρατήρησης. Μακροσκοπικά δύναται να γίνει διάκριση μιας ρωγμής, όπως εκείνες που φαίνονται στο Σχήμα 7-7, μετά από εύλογο χρονικό διάστημα, αρκετά αργότερα από τον πραγματικό χρόνο έναρξης της ρωγμής. Η χρονική διαφορά οφείλεται στο μέγεθος των υπολογιζόμενων παραμορφώσεων της περιοχής ενδιαφέροντος, οι οποίες κατά την

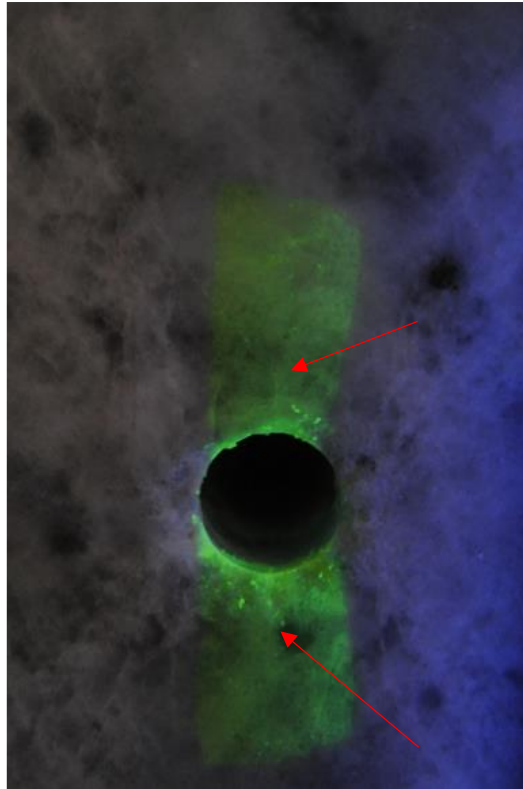
έναρξη της ρωγμάτωσης δεν έχουν κλιμακωθεί επαρκώς ώστε να διακρίνεται μια συγκεκριμένη ρωγμή σε πρώιμο στάδιο, μιας και η απόχρωση της επιφάνειας είναι ομοιόμορφη λόγω των παρόμοιων τιμών τροπής.



Σχήμα 7-7. Απεικόνιση των κύριων τροπών όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε φυσικό μοντέλο της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 35 mm σε χρόνο $t = 600$ sec. Οι ΠΡ αναγνωρίζονται από τις υψηλότερες παραμορφώσεις που απεικονίζονται με θερμά χρώματα.

Κάτι αντίστοιχο παρατηρείται και οπτικά κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Στα περισσότερα εξεταζόμενα υλικά, οι ΠΡ είναι δυσδιάκριτες με γυμνό οφθαλμό έως ότου αναπτυχθούν σημαντικά. Με το πέρας των δοκιμών, η παρατήρηση των ΠΡ είναι μεν δυνατή, αλλά όχι καθ' όλο το μήκος τους εξαιτίας του μερικού κλεισίματος του άκρου τους, όπως αναπτύσσεται λεπτομερώς σε επόμενη παράγραφο. Η παρατήρησή τους μπορεί να διευκολυνθεί με τη σήμανση της διαδρομής των ρωγμών με κίτρινο φθορίζον χρώμα και φωτισμό με υπεριώδες φως (ultraviolet – UV). Κοντινή λήψη φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Νεφέλη» με οπή διαμέτρου 10 mm μετά τη δοκιμή UCS δίνεται στο Σχήμα 7-8, όπου το κίτρινο φθορίζον χρώμα και το υπεριώδες φως διευκολύνουν της οπτική επιθεώρηση των ΠΡ. Στο σημείο

αυτό σημειώνεται ότι η χρήση διεισδυτικών υγρών (penetrants) σε πορώδη υλικά όπως για παράδειγμα τα δολομιτικά μάρμαρα είναι μάλλον ακατάλληλη, κάτι που επιβεβαιώνεται κατά τη διάρκεια της παρούσας διατριβής όπου οι ρωγμές και οι πόροι του υλικού απορροφούν πλήρως το υγρό.



Σχήμα 7-8. Εστιασμένη φωτογραφία γύρω από οπή διαμέτρου 10 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Νεφέλη» έπειτα από δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Το κίτρινο φθορίζον χρώμα κάτω από υπεριώδες φωτισμό διευκολύνει την οπτική επιθεώρηση των ΠΡ.

Μετά την έναρξη των ΠΡ στα δολομιτικά μάρμαρα, οι καμπύλες των οριζόντιων μετατοπίσεων αποκλίνουν ξεκάθαρα η μία από την άλλη. Στα ασβεστιτικά μάρμαρα, η συγκεκριμένη απόκλιση διευρύνεται έπειτα από λίγο. Η εν λόγω καθυστέρηση δεν επηρεάζει τα συμπεράσματα που προκύπτουν στην ποικιλία «Βέροια», καθώς μπορεί κανείς να διακρίνει μια σαφή απόκλιση μεταξύ των καμπύλων με την έναρξη του φαινομένου, αλλά επηρεάζει τα συμπεράσματα για την ποικιλία «Νεφέλη». Σε αντίθεση με τις υπόλοιπες ποικιλίες, το μάρμαρο «Νεφέλη» φαίνεται πιο παραμορφωμένο στις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης, κάτι που δυσκολεύει τη σαφή διάκριση της απόκλισης των καμπύλων, με συνέπεια τον προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ σε σημαντικά υψηλότερες εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις συγκριτικά με την εφελκυστική αντοχή σ_{IB} του υλικού. Παρόμοια συμπεριφορά έχει σημειωθεί σε άλλη

διάσημη καθαρά ασβεστιτική ποικιλία, το μάρμαρο της Carrara από την Τοσκάνη της Ιταλίας (Wong & Einstein 2009a, 2009b), όπου σύμφωνα με τους συγγραφείς οι πτεροειδείς ρωγμές (wing cracks) στα άκρα των εξεταζόμενων προϋπάρχουσων σχισμών σημειώνονται σε επίσης αξιοσημείωτα υψηλότερη εφαρμοζόμενη αξονική τάση συγκριτικά με την αντοχή του υλικού.

7.4 Προσδιορισμός έναρξης πλευρικών αποφλοιώσεων

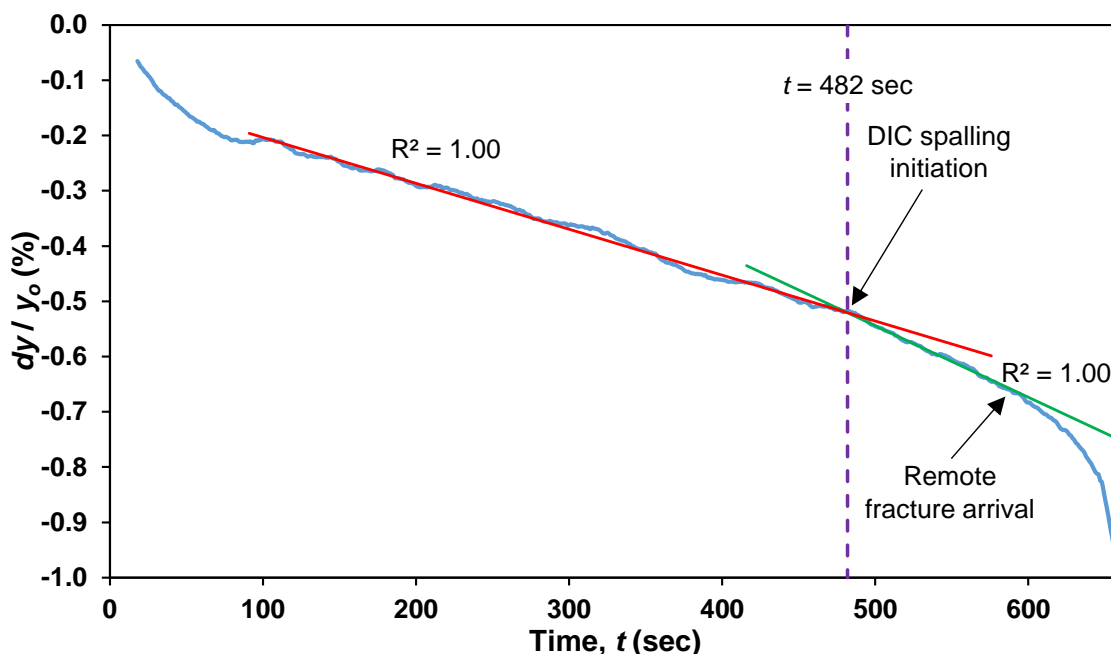
Η έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων αποτελεί το τελευταίο κύριο φαινόμενο που εμφανίζεται πριν τα δευτερεύοντα φαινόμενα της συνένωσης και αλληλεπίδρασης ρωγμών που τελικά οδηγούν στην επερχόμενη κατάρρευση των ΦΜ. Η μακροσκοπική εμφάνισή τους εξαρτάται από τη φύση του υλικού. Όσο ψαθυρότερο είναι το υλικό, τόσο πιο εμφανείς γίνονται οι σχηματιζόμενες εγκοπές μορφής V στα πλευρικά τοιχώματα του ανοίγματος στις περιοχές υψηλής συγκέντρωσης θλιπτικών τάσεων (θλιπτικές ΠΥΣΤ). Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι η φύση της μικρορωγμάτωσης που οδηγεί στην έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων δεν είναι εμφανής κατά την πειραματική διαδικασία. Παρόλα αυτά, με το πέρας των δοκιμών UCS στα εν λόγω ΦΜ, μακροσκοπικά κυριαρχεί διατμητική ρωγμάτωση στις ΠΥΣΤ για όλα τα εξεταζόμενα υλικά. Επιπλέον, λόγω του όγκιμου χαρακτήρα της ποικιλίας «Νεφέλη», οι φυλλοειδείς σχηματισμού που εμφανίζονται στις επιφάνειες των ΦΜ δεν αποκολλώνται, κάτι που επέτρεψε τη μακροσκοπική τους μελέτη με το πέρας της δοκιμής. Ιδιαίτερα, εκείνοι που εμφανίστηκαν στις παρειές της οπής είναι σαφώς διατμητικής φύσεως. Παρόμοιες παρατηρήσεις σημειώνονται και στη δεύτερη ασβεστιτική ποικιλία, τη «Βέροια», παρόλο που σε ορισμένες περιπτώσεις ένας αξιοσημείωτος αριθμός φυλλοειδών αποκολλήσεων δε είναι ανακτήσιμος. Τέλος, το μάρμαρο «Βέροια» ήταν το μόνο με ταινιώσεις σαφούς διεύθυνσεως, με αποτέλεσμα οι περιοχές των αποφλοιώσεων να επηρεαστούν από την παρουσία τους. Καθώς η διάμετρος της οπής διευρύνεται, η επιρροή των ταινιώσεων αυξάνεται, δημιουργώντας τεθλασμένες οδοντωτές (zig-zag) επιφάνειες κατά μήκος του άξονα του ανοίγματος, ακολουθώντας όσο το δυνατόν περισσότερο τη διαδρομή κάθε ταινίωσης.

Ο προσδιορισμός της έναρξης των πλευρικών αποφλοιώσεων στις παρειές κάθε οπής, ακολουθεί μια κοινή μεθοδολογία για κάθε ΦΜ, ανεξάρτητα από τις διαστάσεις του ΦΜ, τη διάμετρο της οπής, την ορυκτολογία του υλικού, τις προσμίξεις κ.λπ. Η

παρατήρηση των αποφλοιώσεων μέσω του DIC είναι πολυπλοκότερη συγκριτικά με των ΠΡ, καθώς οι αυξημένες τροπές στα πλευρικά τοιχώματα των οπών μπορούν να αποδοθούν είτε σε μια λεπτή ρωγμή (όπως στην περίπτωση της ΠΡ), είτε σε μια έντονα παραμορφωμένη περιοχή.

Ως εκ τούτου, η παραπάνω περιγραφείσα μεθοδολογία για τον προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ κρίνεται μη εφαρμόσιμη στη συγκεκριμένη περίπτωση. Για αυτόν τον λόγο, ο προσδιορισμός της έναρξης των πλευρικών αποφλοιώσεων πραγματοποιείται μέσω της ανηγμένης βράχυνσης dy/y_0 της κατακόρυφης απόστασης y_0 μεταξύ δύο (2) προκαθορισμένων σημείων στο όριο των οπών για κάθε μια θλιπτική ΠΥΣΤ. Η έναρξη της αποφλοίωσης στην αντίστοιχη παρειά λαμβάνει χώρα ανάμεσα στα δύο (2) αυτά σημεία.

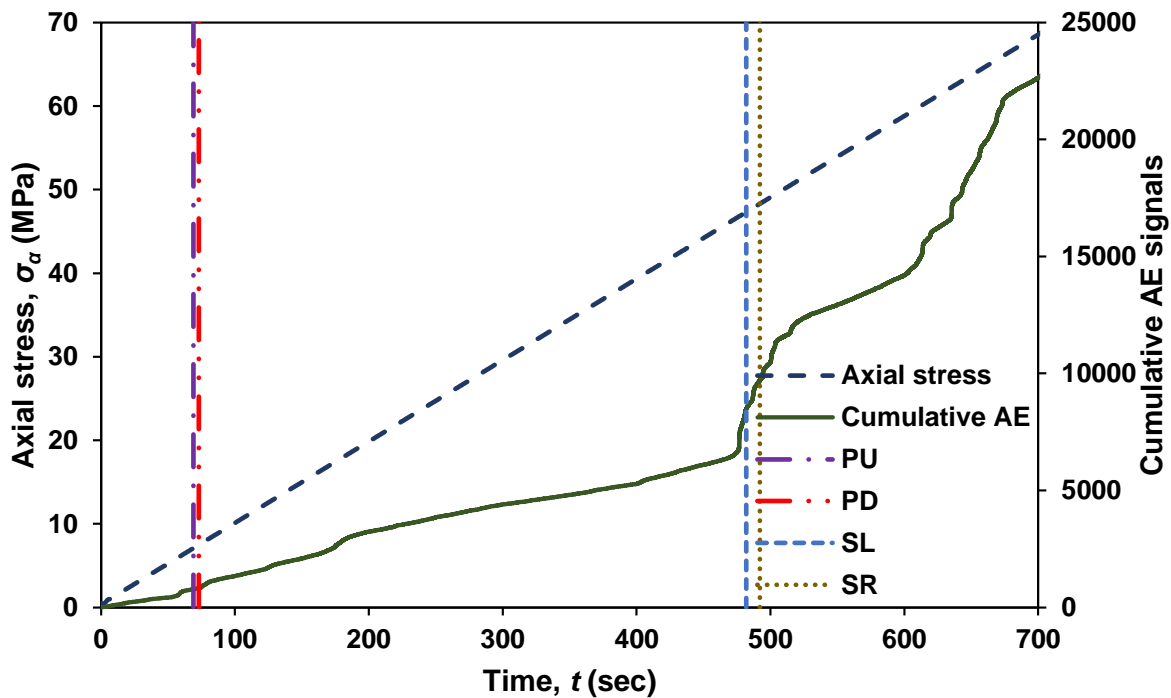
Αντιπροσωπευτικό διάγραμμα (dy/y_0 συναρτήσεως του χρόνου) της παραπάνω ανάλυσης στην αριστερή παρειά οπής διαμέτρου 35 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι», δίνεται στο Σχήμα 7-9. Το σημείο αλλαγής της κλίσης της καμπύλης σε χρόνο 482 sec ερμηνεύεται ως η χρονική στιγμή έναρξης της αποφλοίωσης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση ορίζει ένα κατώτερο χρονικό όριο έναρξης της αποφλοίωσης. Το εν λόγω φαινόμενο είναι προοδευτικό, μιας και αρχικά σχηματίζονται συζυγείς διαγωνίως αναπτυσσόμενες ζώνες άσπρης απόχρωσης στις παρειές των οπών (white patches), οι οποίες με την άφιξη των ΔΡ σε χρόνο 585 sec (Σχήμα 7-9) μετατρέπονται σε αποκολλώμενα φυλλάρια και πούδρα, καταστρέφοντας μακροσκοπικά την επιφάνεια της παρειάς της οπής. Η συγκεκριμένη χρονική στιγμή μπορεί να θεωρηθεί ως προχωρημένο στάδιο αποφλοιώσεων, μεταγενέστερη του ανώτατου χρονικού ορίου έναρξης του φαινομένου.



Σχήμα 7-9. Ανηγγμένη σύγκλιση (%) συναρτήσεως του χρόνου (sec) δύο προκαθορισμένων σημείων στην αριστερή παρειά οπής διαμέτρου 35 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι».

Η έναρξη των αποφλοιώσεων συνοδεύεται συνήθως από σημαντική αύξηση καταγραφής σημάτων ΑΕ. Σε ορισμένες περιπτώσεις, κυρίως στην ποικιλία «Βώλακας Άριστον Ι», η καμπύλη αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ συναρτήσεως του χρόνου εμφανίζει διακριτά σκαλοπάτια περί το χρόνο έναρξης των αποφλοιώσεων βάσει του DIC. Στο Σχήμα 7-10 δίνεται αντιπροσωπευτικό γράφημα της καμπύλης αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ για φυσικό μοντέλο της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 35 mm. Στον πρωτεύοντα κατακόρυφο άξονα δίνεται η εφαρμοζόμενη αξονική τάση (MPa) συναρτήσεως του χρόνου (sec) (διακεκομμένη καμπύλη), ενώ στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα η συνεχής καμπύλη αντιπροσωπεύει το αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ συναρτήσεως του χρόνου (sec). Οι κατακόρυφες γραμμές υποδεικνύουν τη χρονική στιγμή έναρξης των ΠΡ στο άνω (PU) και κάτω (PD) όριο της οπής, και των πλευρικών αποφλοιώσεων στην αριστερή (SL) και δεξιά (SR) παρειά της οπής. Ένα διακριτό σκαλοπάτι της καμπύλης του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ παρατηρείται σε χρόνο 476 sec, δηλαδή λίγο νωρίτερα από την καθοριζόμενη από το DIC έναρξη της αποφλοιώσεως στο αριστερό τοίχωμα σε χρόνο 482 sec, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέθοδο DIC. Βεβαίως, σημειώνεται ότι σε αρκετές περιπτώσεις φυσικών μοντέλων, αντί για διακριτά σκαλοπάτια στην εν λόγω καμπύλη, παρατηρείται σταδιακή αύξηση του πλήθους των σημάτων ΑΕ σε πρώιμα

στάδια, και μάλιστα αρκετά νωρίτερα από την έναρξη των αποφλοιώσεων σύμφωνα με το DIC. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων DIC και AE επιβεβαιώνει το γεγονός πως η εφαρμογή μιας και μόνο μεθόδου παρακολούθησης δεν αρκεί για να περιγράψει ξεκάθαρα μια κατάσταση που λαμβάνει χώρα, τουλάχιστον όχι πάντα, και ως εκ τούτου πάνω από μία προσεγγίσεις θα πρέπει να αξιοποιούνται προκειμένου να καθοριστεί πλήρως μια κατάσταση.

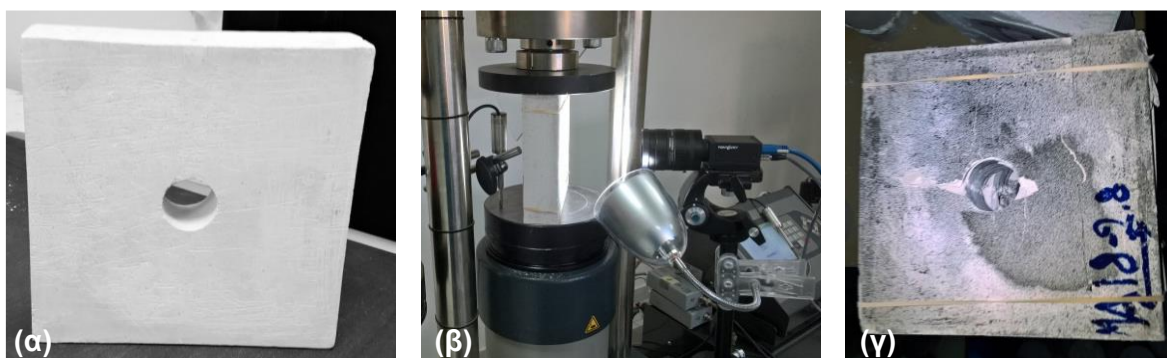


Σχήμα 7-10. Εφαρμοζόμενη αξονική τάση (MPa) συναρτήσει του χρόνου (sec) στον πρωτεύοντα κατακόρυφο άξονα, και αθροιστικό πλήθος σημάτων AE συναρτήσει του χρόνου (sec) στον δευτερεύοντα κατακόρυφο άξονα. Η κατακόρυφες γραμμές PU και PD ορίζουν την έναρξη των ΠΡ στο άνω και κάτω όριο αντίστοιχα της οπής διαμέτρου 35 mm φυσικού μοντέλου της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Οι κατακόρυφες γραμμές SL και SR ορίζουν την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων στην αριστερή και δεξιά παρειά της οπής αντίστοιχα.

Τέλος, σε αντίθεση με τον προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ στην ποικιλία «Νεφέλη» μέσω του DIC, ο προσδιορισμός των πλευρικών αποφλοιώσεων δεν αντιμετωπίζει αντίστοιχες δυσκολίες.

7.5 Γύψος

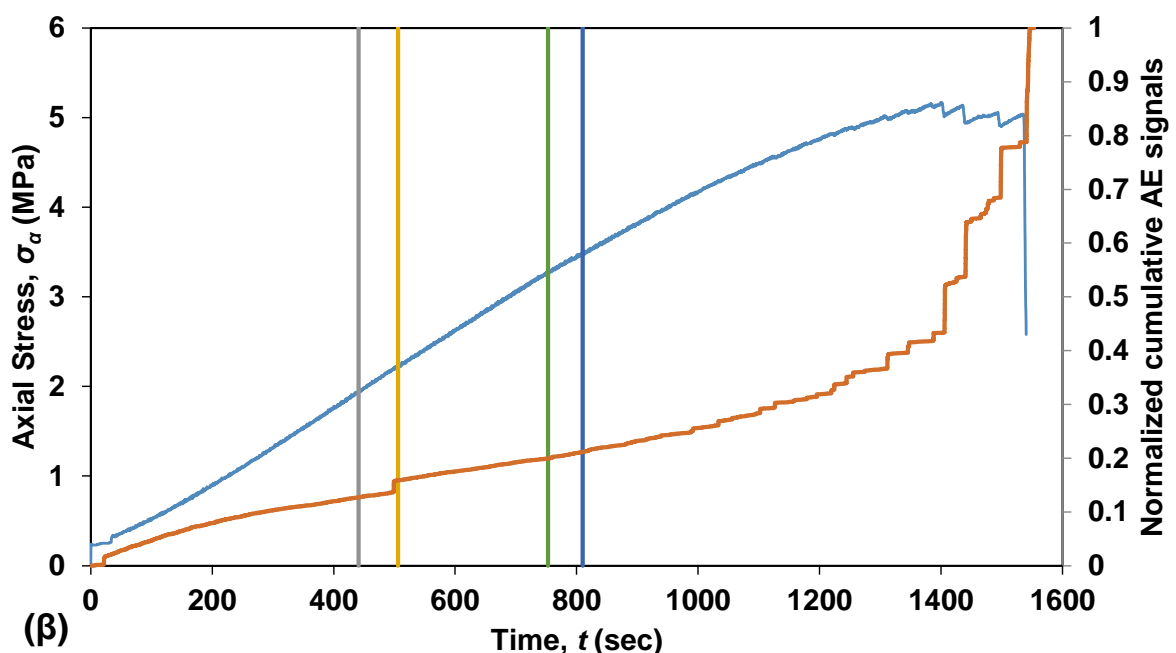
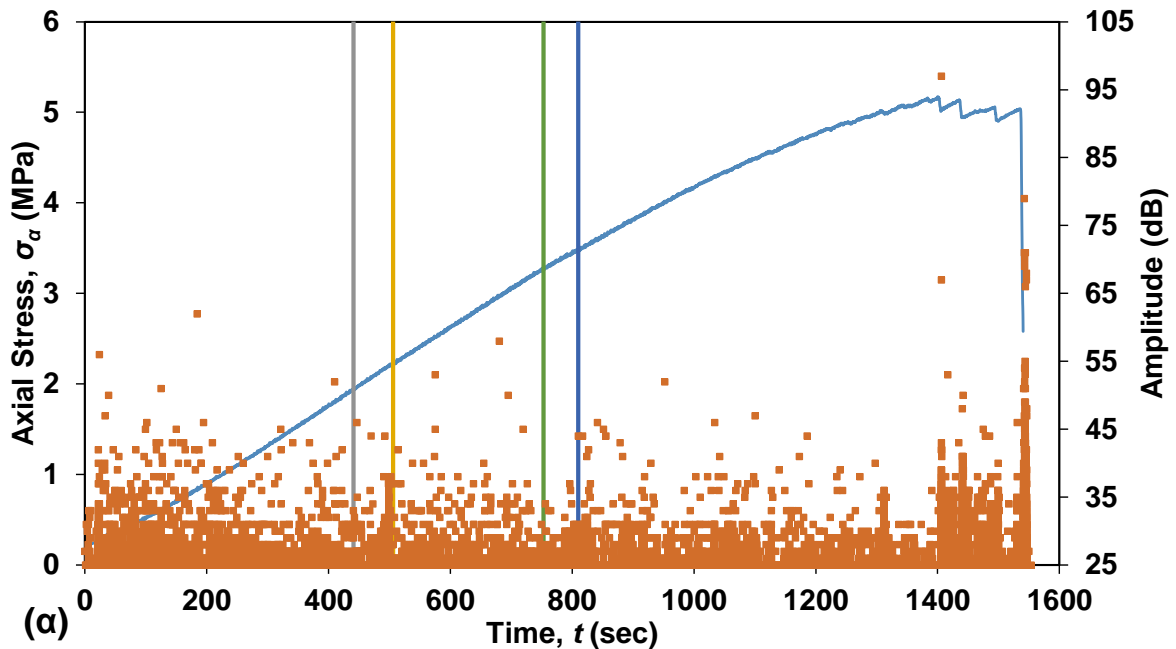
Με το πέρας των δοκιμών χαρακτηρισμού, παρασκευάζονται οι πλάκες των ΦΜ οι οποίες έπειτα από παραμονή τεσσάρων (4) ημερών στον φούρνο σε θερμοκρασία 40 °C υποβάλλονται σε δοκιμές UCS. Τα καλούπια που χρησιμοποιούνται για τη διαμόρφωση των πλακών είναι φτιαγμένα από το υλικό Acetol Polymer που αντέχει σε θερμοκρασίες 200 °C χωρίς να αλλοιώνεται. Η μελέτη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στις εν λόγω πλάκες πραγματοποιείται με τη χρήση αισθητήρων ΑΕ και κάμερας υψηλής ανάλυσης για αξιοποίηση της μεθόδου DIC. Στο Σχήμα 7-11 φαίνονται ενδεικτικά δοκίμια πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας των εργαστηριακών δοκιμών.



Σχήμα 7-11. Ενδεικτικά μοντέλα γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ) το πέρας των εργαστηριακών δοκιμών.

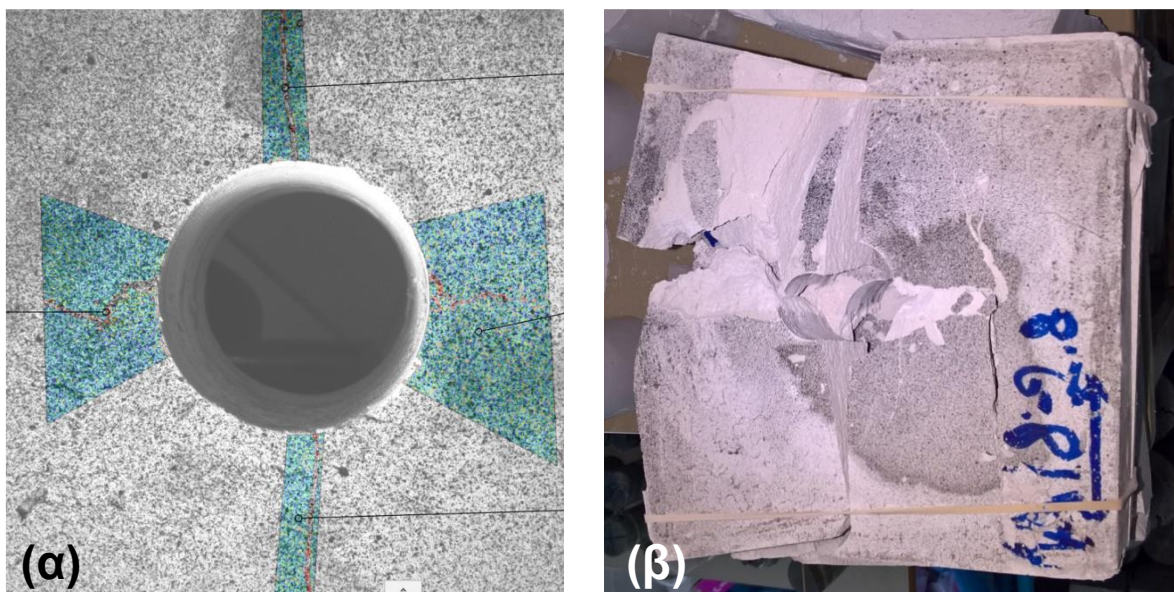
Στο Σχήμα 7-12 δίνεται διάγραμμα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a και του πλάτους (Amplitude (dB)) ή του αθροιστικού πλήθους (Vector (Hit)) ως προς τον χρόνο για ΦΜ γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm. Στο ίδιο διάγραμμα δίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC, όπου με τις κατακόρυφες ευθείες σημειώνονται οι χρόνοι έναρξης των ΠΡ στο πάνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής καθώς και των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής. Παρατηρείται πλήρης αντιστοιχία των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα ΦΜ, όπως έχουν προσδιοριστεί χρονικά με τη μέθοδο DIC, με τα καταγραφόμενα σήματα ΑΕ. Συγκεκριμένα, κατά την έναρξη των ΠΡ παρατηρείται απότομη αύξηση του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ που λαμβάνονται από το σύστημα καταγραφής. Επιπλέον, η κλίση της καμπύλης αθροιστικής δραστηριότητας ΑΕ ως προς το χρόνο αυξάνεται κατά τις χρονικές στιγμές έναρξης των αποφλοιώσεων στις παρειές της οπής. Ομοίως, κατά την έναρξη των αποφλοιώσεων παρατηρείται μείωση της κλίσης της καμπύλης αξονικής τάσης ως προς το χρόνο. Βεβαίως, καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής δεν παρατηρείται αύξηση του πλάτους των σημάτων πλην της

κορυφαίας αντοχής και της κατάρρευσης του ΦΜ. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC επιβεβαιώνονται από τις παρατηρήσεις που προκύπτουν μέσω της ανάλυσης των σημάτων ΑΕ, και αντιστρόφως.



Σχήμα 7-12. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων ΑΕ (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων ΑΕ – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm. Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.

Κατά την πορεία της δοκιμής UCS στο ΦΜ αρχικά σχηματίζονται οι ΠΡ στο άνω και κάτω μέρος της οπής, οι οποίες ξεκινάνε από την περιφέρεια του ανοίγματος και επεκτείνονται απότομα, με μεγάλη ταχύτητα προς την άνω και κάτω έδρα του δοκιμίου αντίστοιχα. Μετά την έναρξη των ΠΡ, παρατηρείται εσωτερική αποφλοίωση στις παρειές της οπής, όπου βρίσκονται οι περιοχές συγκέντρωσης υψηλών θλιπτικών τάσεων. Έπειτα, από τις ίδιες περιοχές αναπτύσσονται ΜΕΡ που εμφανίζονται στις επιφάνειες του μοντέλου και επεκτείνονται προς τις πλαϊνές έδρες του. Με το πέρας της δοκιμής και την κατάρρευση του δοκιμίου, γίνονται εμφανείς οι ΜΕΡ στο εσωτερικό του. Εικόνα από φυσικό μοντέλο γύψου μετά το πέρας της δοκιμής δίνεται στο Σχήμα 7-13β. Σημειώνεται ότι η φωτογραφία προέρχεται από φυσικό μοντέλο που έχει καταρρεύσει, προκειμένου να γίνουν εμφανείς οι εσωτερικές ΜΕΡ που δημιουργήθηκαν κατά τη φόρτισή του. Σε μοντέλα που δε φορτίζονται έως ότου επέλθει κατάρρευση, οι ΠΡ επεκτείνονται σημαντικά προς τις βάσεις τους, χωρίς να όμως φτάσουν έως αυτές.



Σχήμα 7-13. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm έπειτα από ανάλυση DIC (α) και με το πέρας της δοκιμής θλίψης (β).

Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ γύψου που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή.

Πίνακας 7-2. Πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1st) και δεύτερων (2nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στην οπή των ΦΜ γύψου.

D (mm)	1 st PFI (MPa)	2 nd PFI (MPa)	1 st SPI (MPa)	2 nd SPI (MPa)	σ_p (MPa)
28	2.3	2.6	4.6	4.7	6.1

7.6 Μάρμαρο «Βέροια»

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου υλικού εξετάζονται τα εξής ΦΜ:

- Ένα (1) ΦΜ χωρίς οπή.
- Τρία (3) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 10 mm.
- Τρία (3) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 22 mm.
- Τέσσερα (4) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 35 mm.
- Ένα (1) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 45 mm.

Όλες οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης των ΦΜ μαρμάρου «Βέροια» πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (750 N/sec) μέχρι την κατάρρευση των δοκιμίων.

Τα φυσικά μοντέλα με κυλινδρικές οπές διαμέτρου 10 mm, 22 mm και 35 mm παρουσιάζουν παρόμοιους μηχανισμούς αστοχίας, η εμφάνιση των οποίων είναι ευκρινέστερη στα μοντέλα με μεγαλύτερες διαμέτρους οπής. Παρατηρώντας τη διαδικασία αστοχίας του ΦΜ με την οπή διαμέτρου 45 mm, επιβεβαιώνεται πως η συγκεκριμένη οπή είναι ακατάλληλη για τα ΦΜ αυτών των διαστάσεων, καθώς η ανάπτυξη των φαινομένων και η θραύση του δοκιμίου επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες.

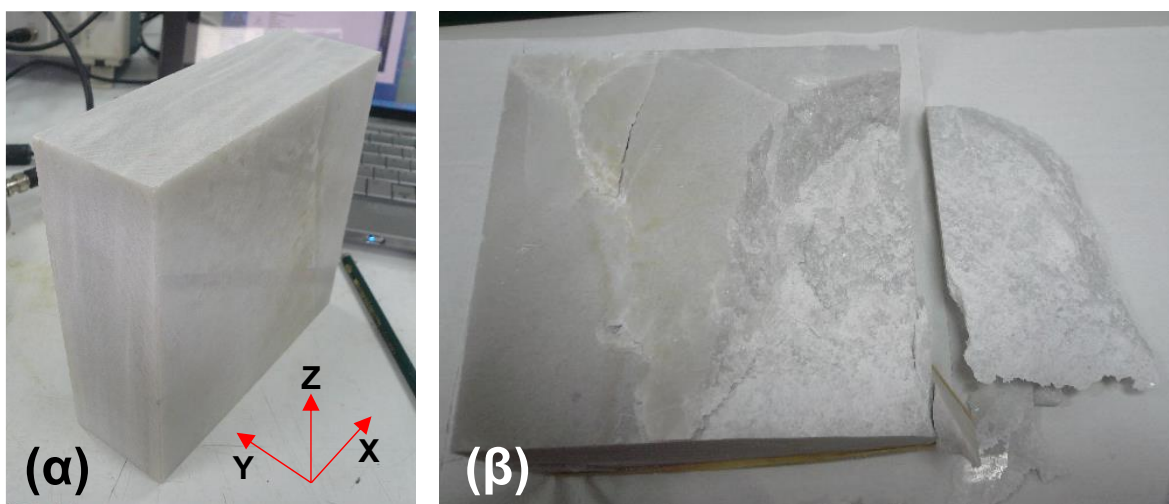
Κατά την πορεία της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ, αρχικά σχηματίζονται οι εφελκυστικές ΠΡ στο άνω και κάτω μέρος της οπής, οι οποίες ξεκινάνε από την περιφέρεια της οπής και επεκτείνονται σταδιακά προς τις βάσεις των δοκιμίων. Οι ΠΡ είναι αποτέλεσμα των εφελκυστικών ΠΥΣΤ στο άνω και κάτω μέρος των οπών. Για σημαντικό χρονικό διάστημα, οι εν λόγω ρωγμές είναι το μόνο παρατηρούμενο φαινόμενο μακροσκοπικά, τόσο οπτικά όσο και με την ανάλυση DIC.

Μετά την έναρξη των ΠΡ, παρατηρείται ο σχηματισμός των ΔΡ στις εγγύς περιοχές δεξιά και αριστερά των οπών, οι οποίες επεκτείνονται με μεγάλη κλίση προς τις βάσεις των πρισμάτων, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη μετέπειτα κατάρρευση των ΦΜ. Κατά την εξέλιξη των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, οι ΔΡ ενώνονται με τις θλιπτικές ΠΥΣΤ στα δεξιά και αριστερά των οπών, περιοχές όπου εμφανίζονται οι εσωτερικές αποφλοιώσεις κατά την άσκηση μεγαλύτερων αξονικών τάσεων στα πρίσματα. Σημειώνεται ότι κατά την έναρξη του φαινομένου των πλευρικών αποφλοιώσεων (ΠΑ) στο εσωτερικό των οπών, αριστερά και δεξιά σχηματίζονται επιφανειακά οι χαρακτηριστικές ρομβοειδείς περιοχές λόγω

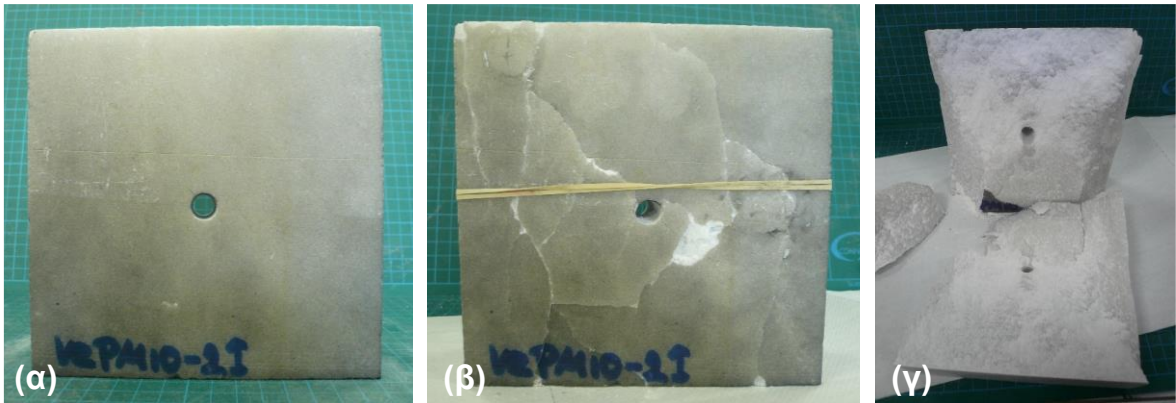
διάτμησης. Επίσης, σε δοκίμια όπου μετά την κατάρρευσή τους αποκολλώνται μεγάλα φυλλοειδή τεμάχια από τις ΠΥΣΤ γύρω από την οπή, είναι ευδιάκριτο με γυμνό οφθαλμό πως στις μεν άνω και κάτω ΠΥΣΤ κυριαρχούν εφελκυστικές μικρορωγματώσεις, στις δε αριστερές και δεξιές κυριαρχούν οι διατμητικές.

Με το πέρας της δοκιμής και την κατάρρευση των δοκιμίων που συνοδεύεται από κρότο, γίνονται εμφανείς οι ΜΕΡ στο εσωτερικό των ΦΜ, οι οποίες είναι κατά κύριο λόγο μεικτού τύπου (mixed-mode) με μεγαλύτερη εφελκυστική παρουσία. Σημειώνεται ότι δημιουργούνται ορισμένες μεικτού τύπου, κυρίως εφελκυστικές, ΜΕΡ παράλληλες στις ταινιώσεις των πρισμάτων και κατά μήκος αυτών, οι οποίες σε αρκετές περιπτώσεις εμποδίζουν την ομαλή εφαρμογή της μεθόδου DIC μιας και καταστρέφουν τμήμα των επιφανειών παρακολούθησης αλλοιώνοντας τα αποτελέσματα του χρονικού προσδιορισμού εμφάνισης των φαινομένων. Επιπλέον, στην πορεία της δοκιμής αποκολλώνται αρκετά εφελκυστικά φυλλάκια, ενώ παρουσιάζεται απελευθέρωση βυτουμενιούχων αερίων από τους πόρους του υλικού.

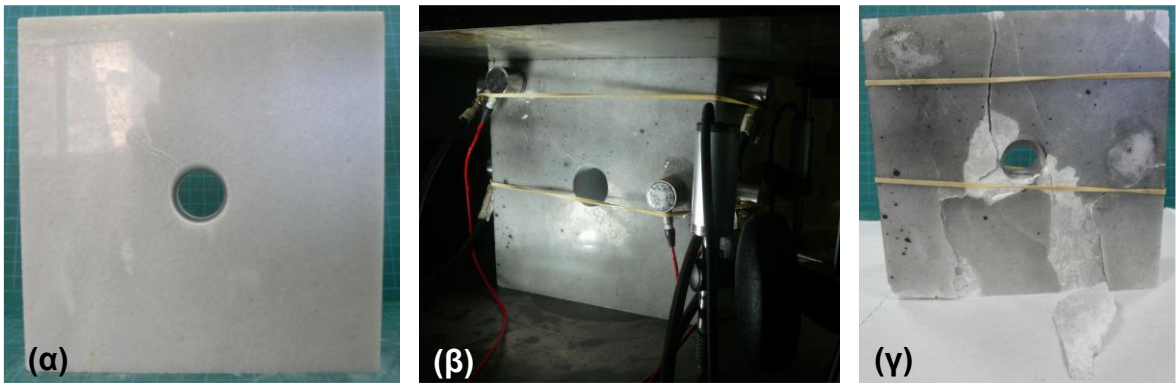
Εικόνες από τα ΦΜ πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης δίνονται στα παρακάτω σχήματα. Σημειώνεται ότι οι εικόνες των ΦΜ μετά το πέρας των δοκιμών προέρχονται από μοντέλα που έχουν καταρρεύσει.



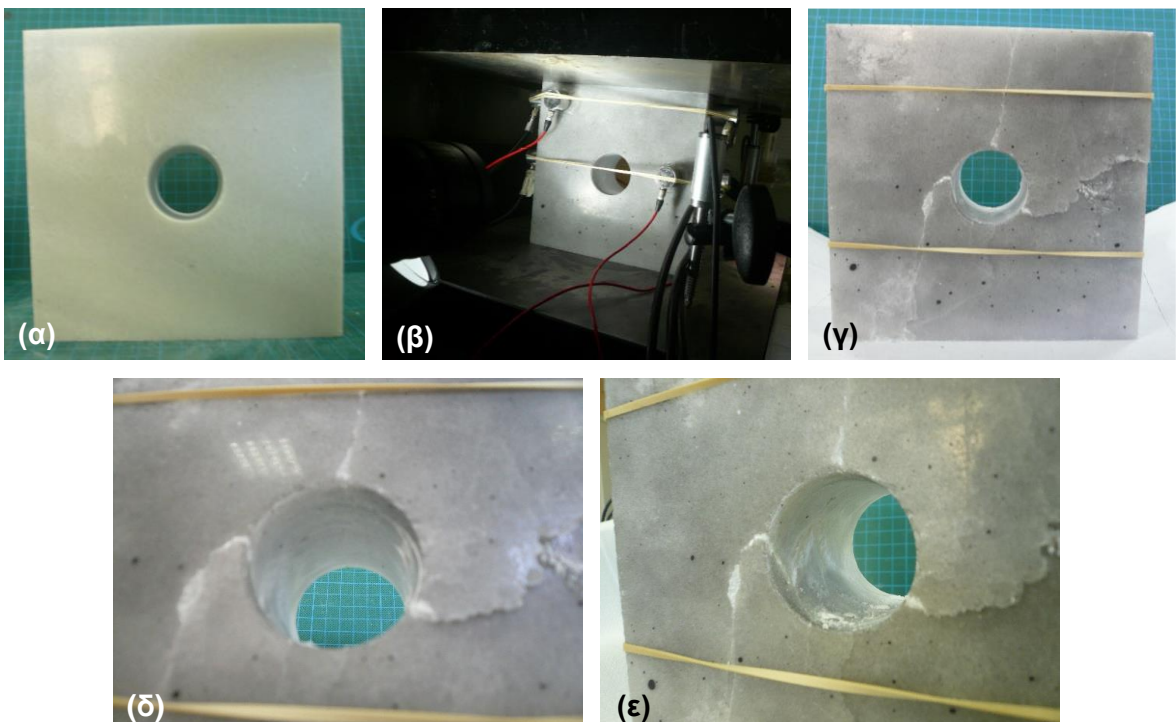
Σχήμα 7-14. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου χωρίς οπή ποικιλίας «Βέροια» πριν (α) και μετά (β) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



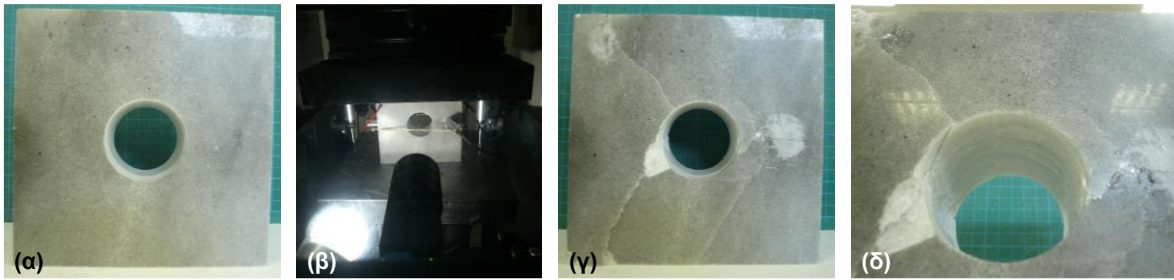
Σχήμα 7-15. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 10 mm ποικιλίας «Βέροια» πριν (α) και μετά το πέρας (β & γ) της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 7-16. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Βέροια» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

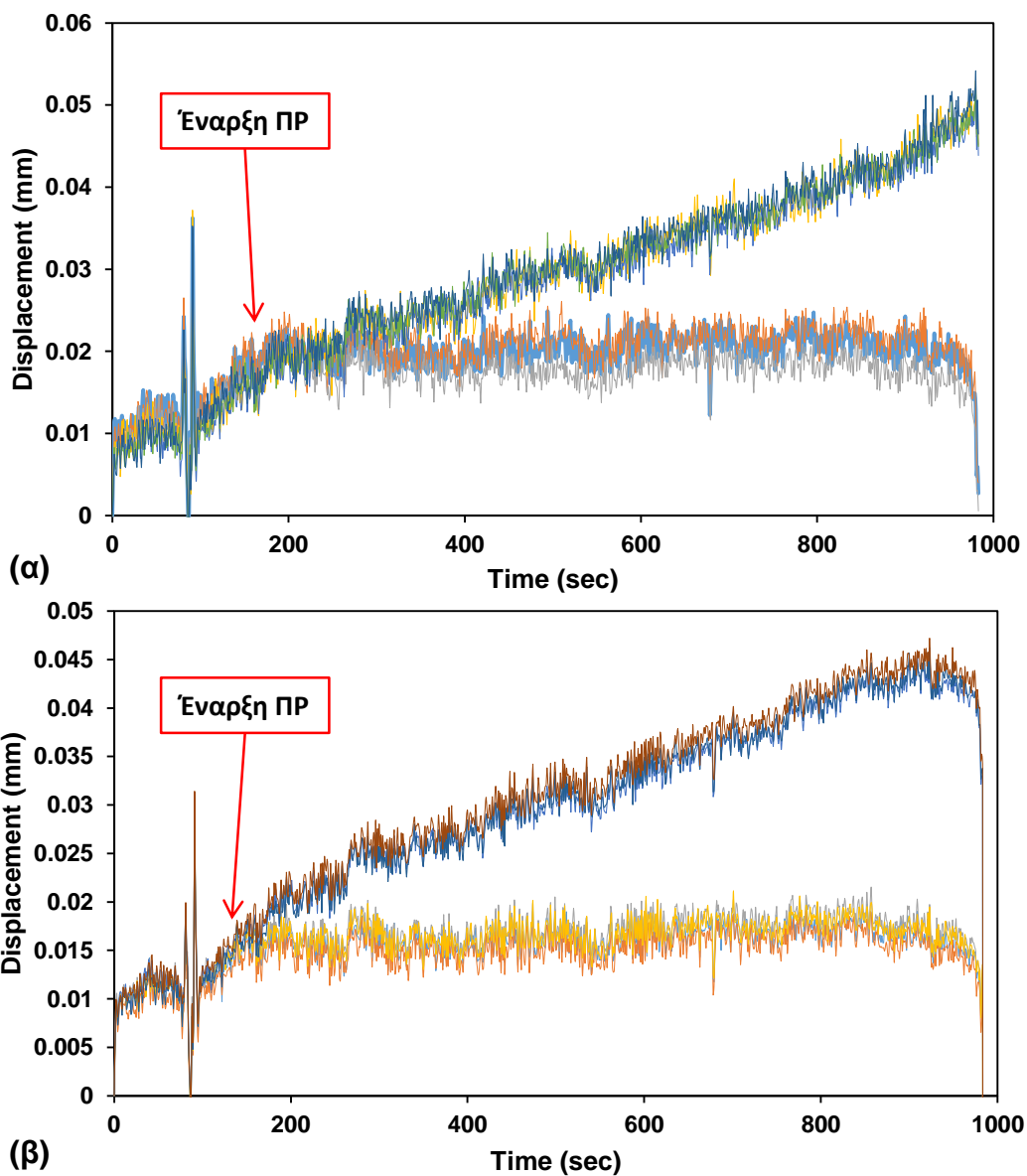


Σχήμα 7-17. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 35 mm ποικιλίας «Βέροια» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ, δ & ε) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



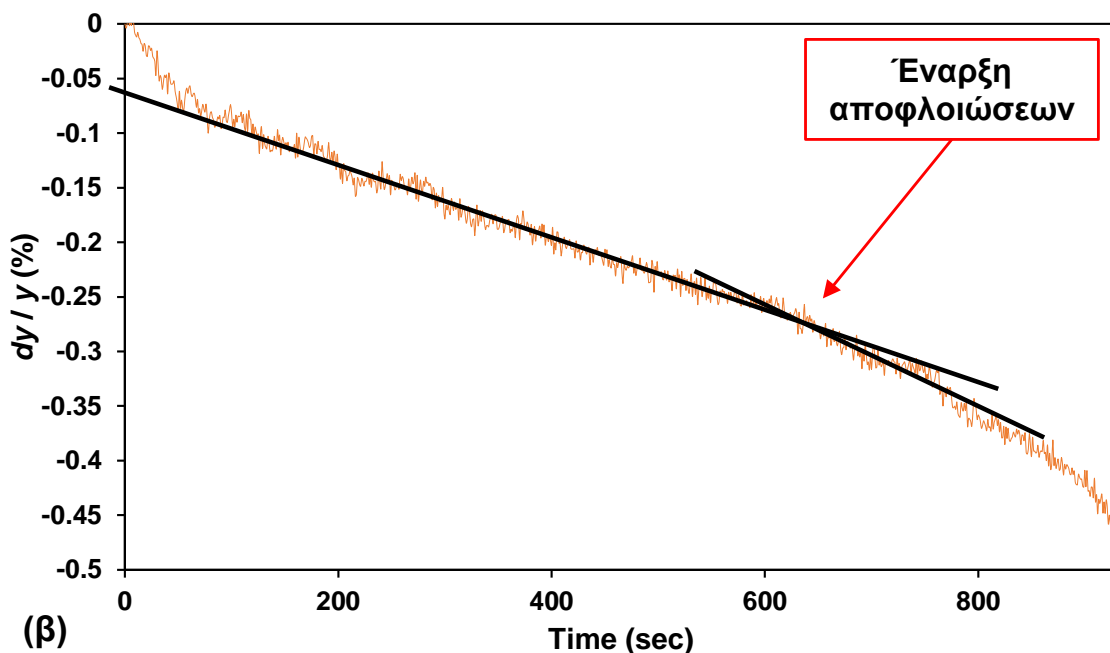
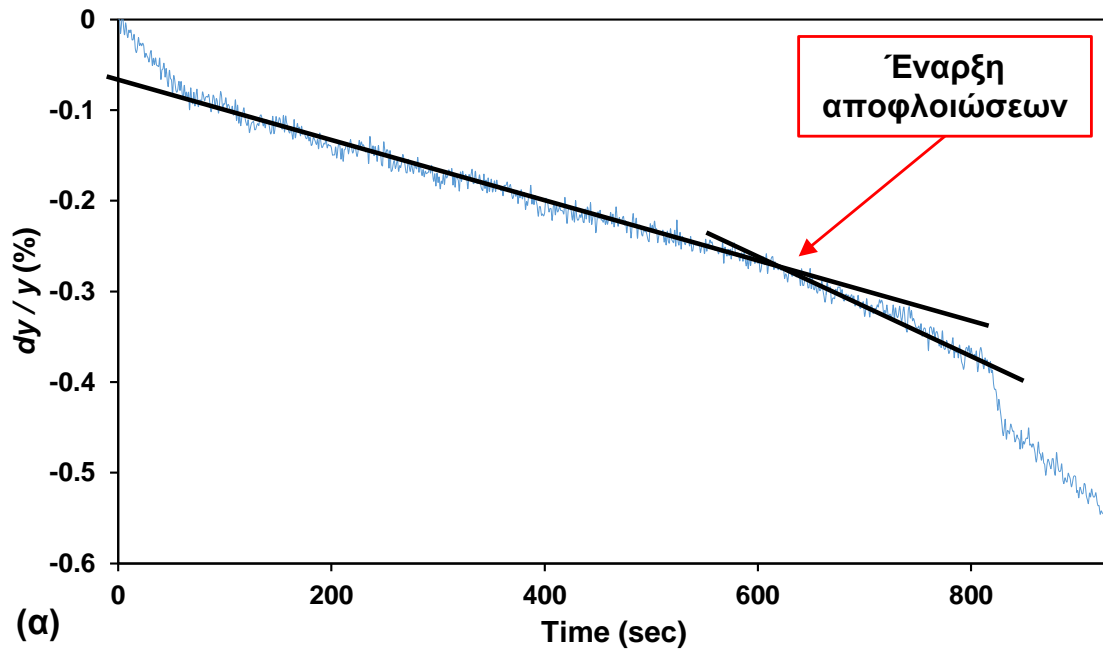
Σχήμα 7-18. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 45 mm ποικιλίας «Βέροια» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ενδεικτικά γραφήματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.3 δίνονται στο Σχήμα 7-19.



Σχήμα 7-19. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βέροια» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.

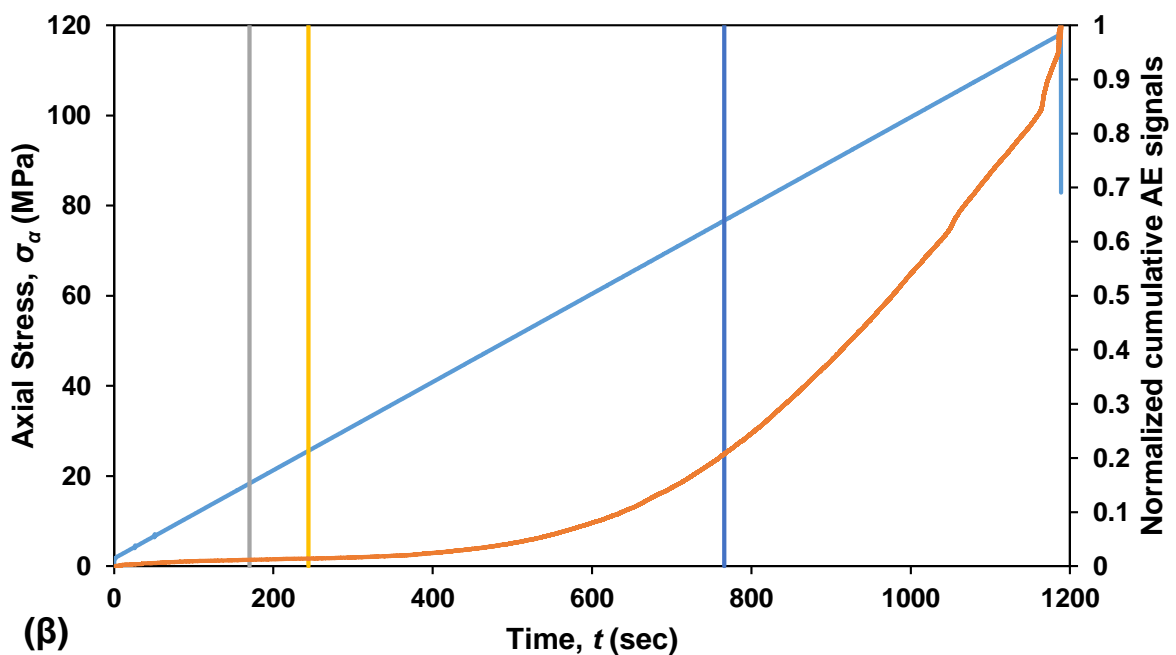
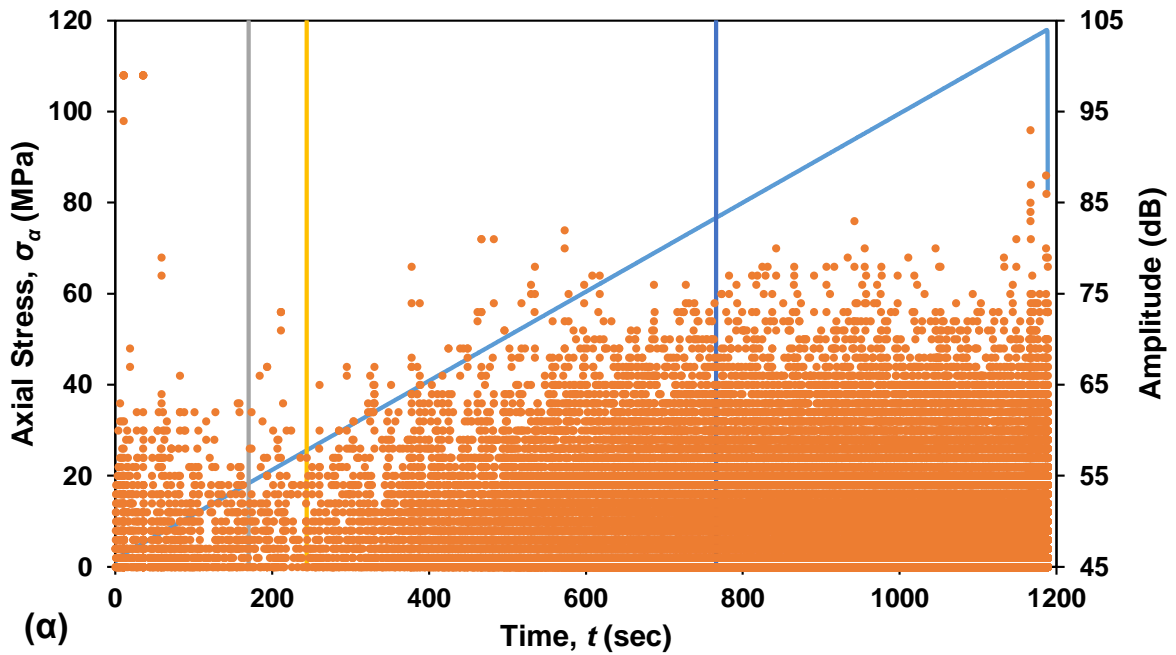
Ενδεικτικά γραφήματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των αποφλοιώσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.4 δίνονται στο Σχήμα 7-20.



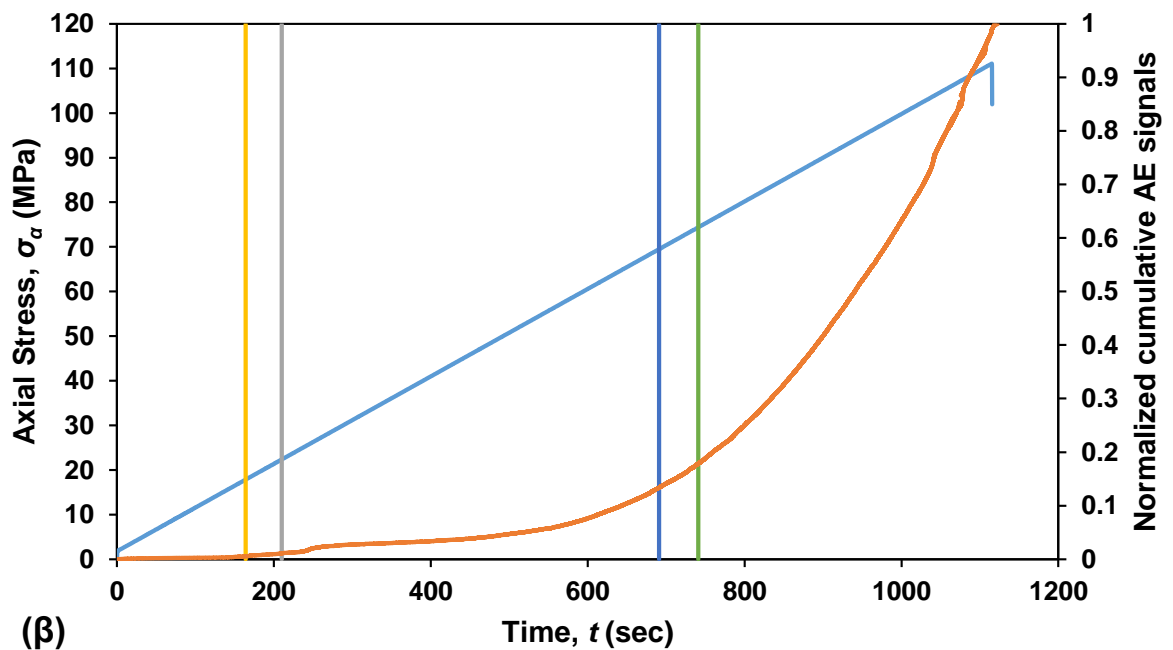
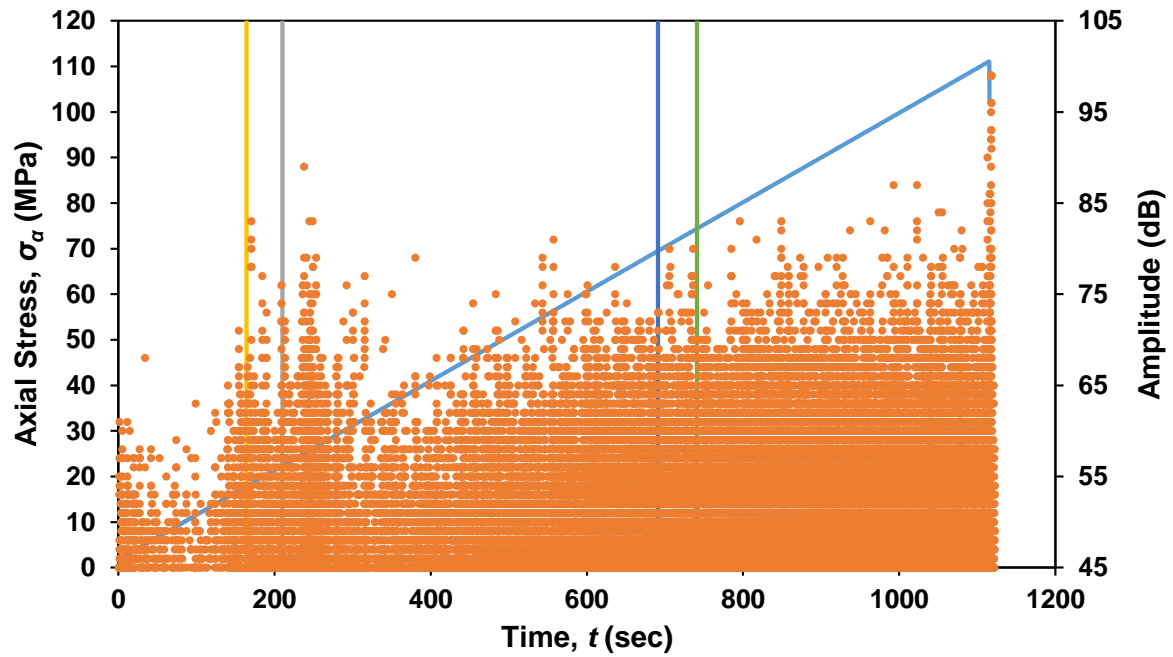
Σχήμα 7-20. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βέροια» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται διαγράμματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a και του πλάτους (Amplitude (dB)) ή του ανηγμένου αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ ως προς τον χρόνο για κάθε μία εξεταζόμενη οπή των ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια». Στα ίδια διαγράμματα δίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC, όπου με τις κατακόρυφες ευθείες σημειώνονται οι χρόνοι έναρξης των ΠΡ στο πάνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής καθώς και των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής. Παρατηρείται πλήρης αντιστοιχία των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα ΦΜ, όπως έχουν προσδιοριστεί χρονικά με τη μέθοδο DIC, με τα καταγεγραμμένα σήματα ΑΕ.

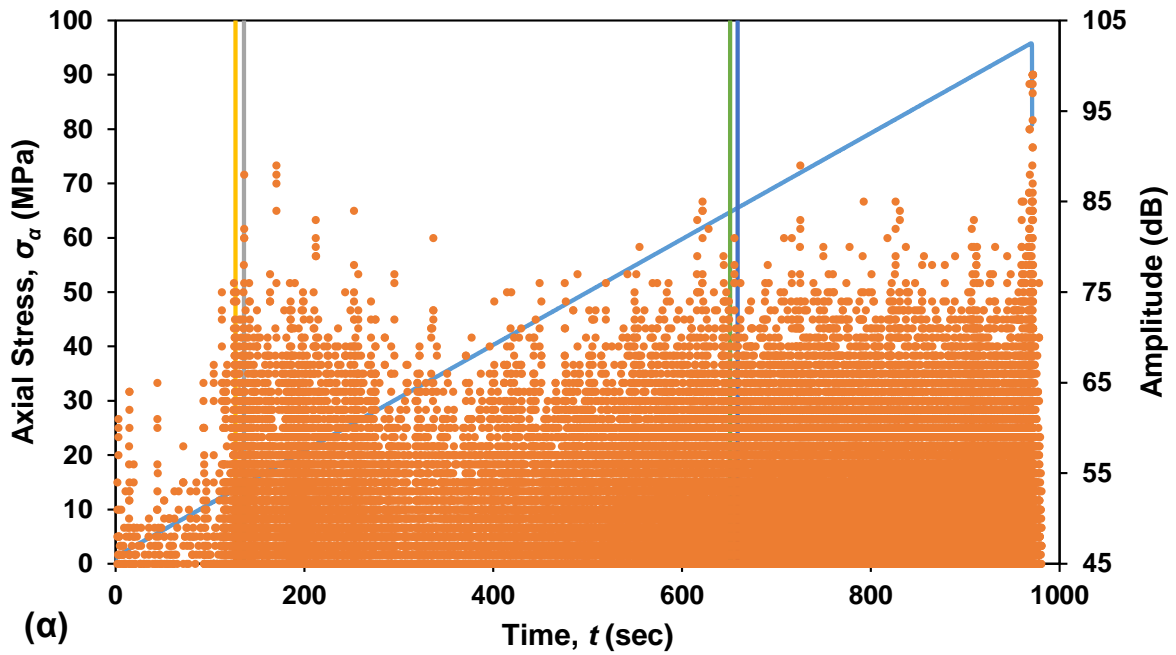
Συγκεκριμένα, κατά την έναρξη των ΠΡ παρατηρούνται στις περισσότερες περιπτώσεις μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ ή/και αύξηση του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ που λαμβάνονται από το σύστημα καταγραφής. Κατά τις αποφλοιώσεις, παρατηρούνται μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ, ενώ καταγράφονται μέχρι εκείνη τη στιγμή περί το 30% του συνολικού αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ της δοκιμής. Δεν παρατηρούνται μεν διακριτά σκαλοπάτια, αλλά κατά την έναρξη του φαινομένου παρατηρείται σημαντική αύξηση του ρυθμού καταγραφής σημάτων ΑΕ. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC γενικά επιβεβαιώνονται από τις παρατηρήσεις που προκύπτουν μέσω της ανάλυσης των σημάτων ΑΕ, και αντιστρόφως.



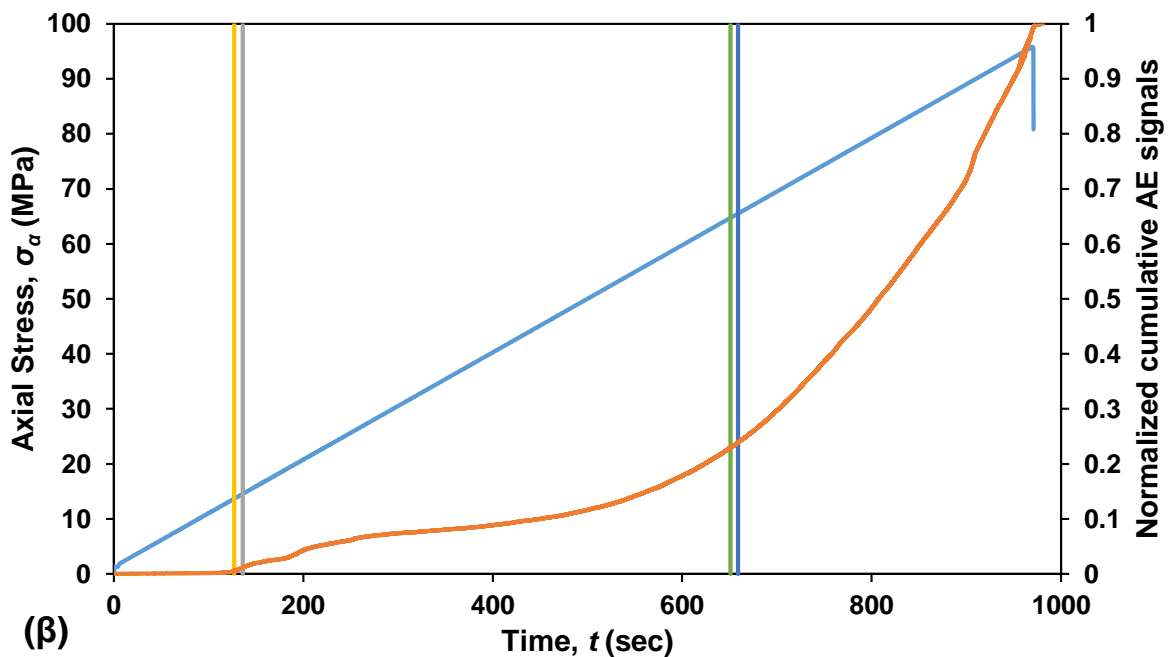
Σχήμα 7-21. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βέροια». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



Σχήμα 7-22. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βέροια». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.

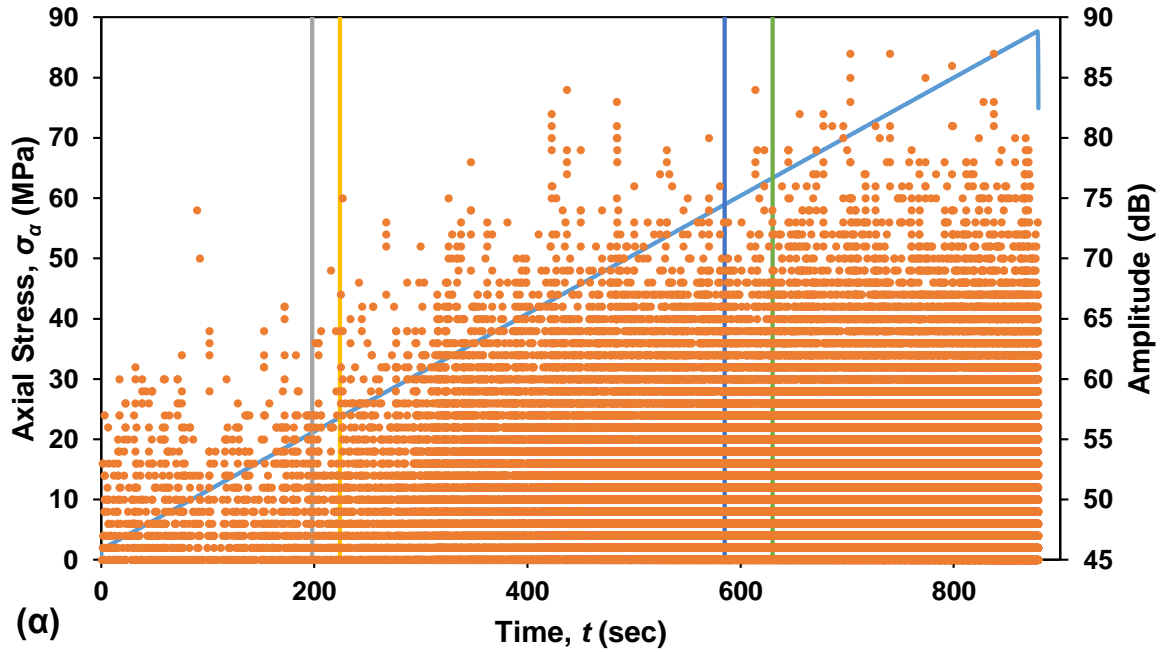


(α)

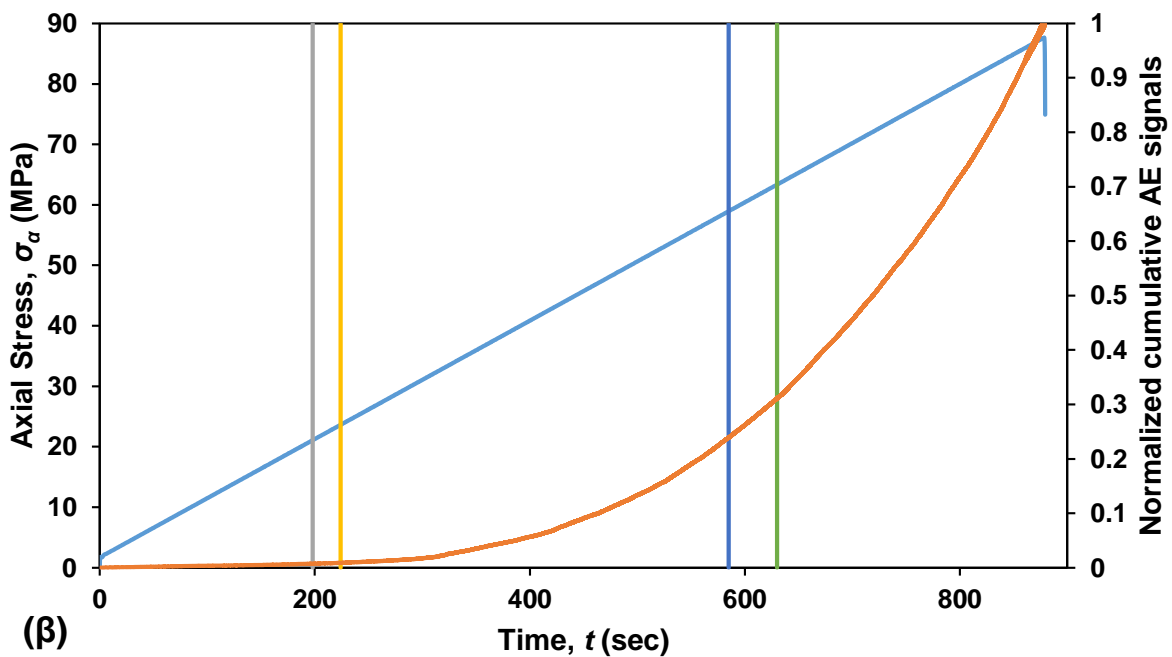


(β)

Σχήμα 7-23. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βέροια». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



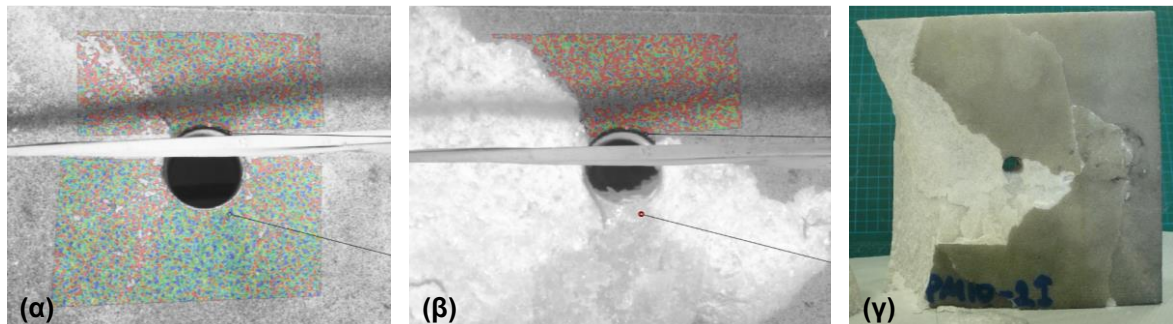
(α)



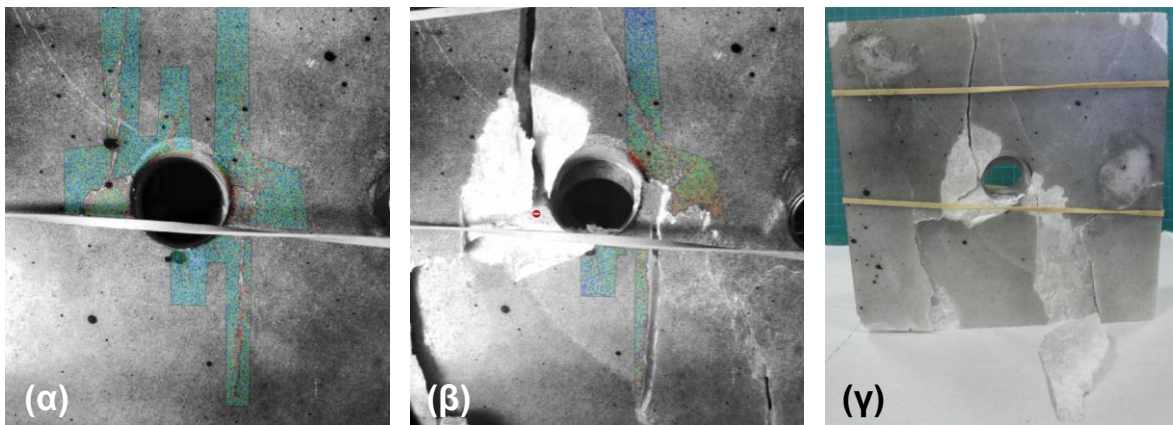
(β)

Σχήμα 7-24. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βέροια». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.

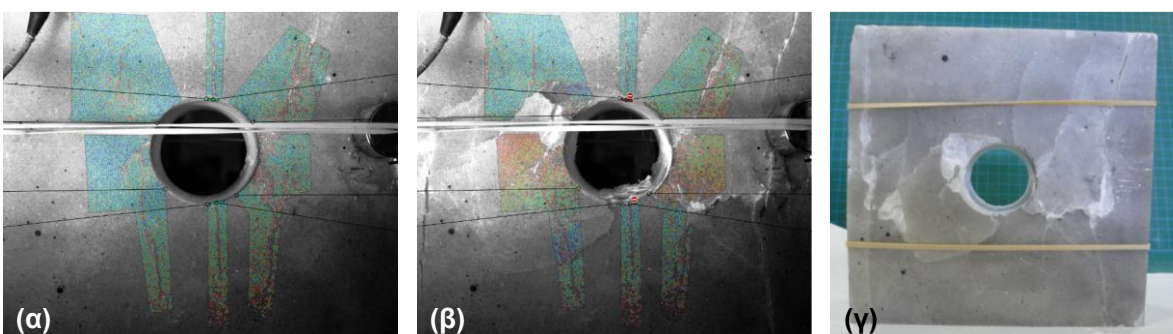
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται ενδεικτικά φωτογραφίες από ΦΜ με οπή μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, με τα αποτελέσματα της ανάλυσης DIC, αμέσως πριν και μετά την κατάρρευση των ΦΜ.



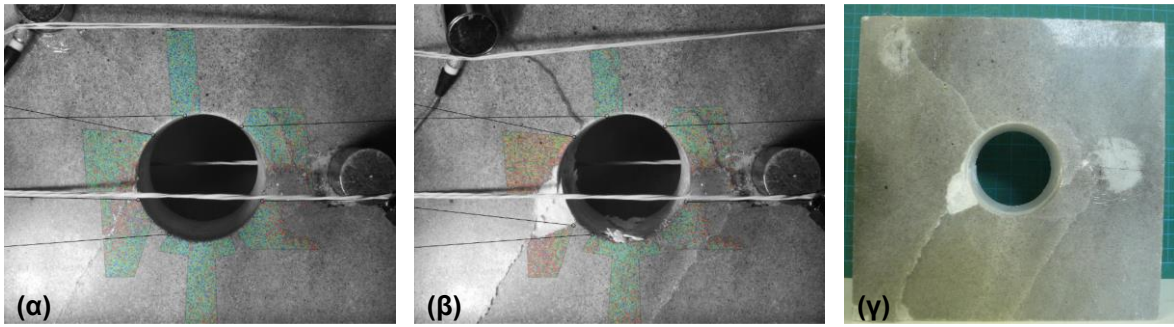
Σχήμα 7-25. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βέροια» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).



Σχήμα 7-26. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βέροια» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).



Σχήμα 7-27. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βέροια» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).



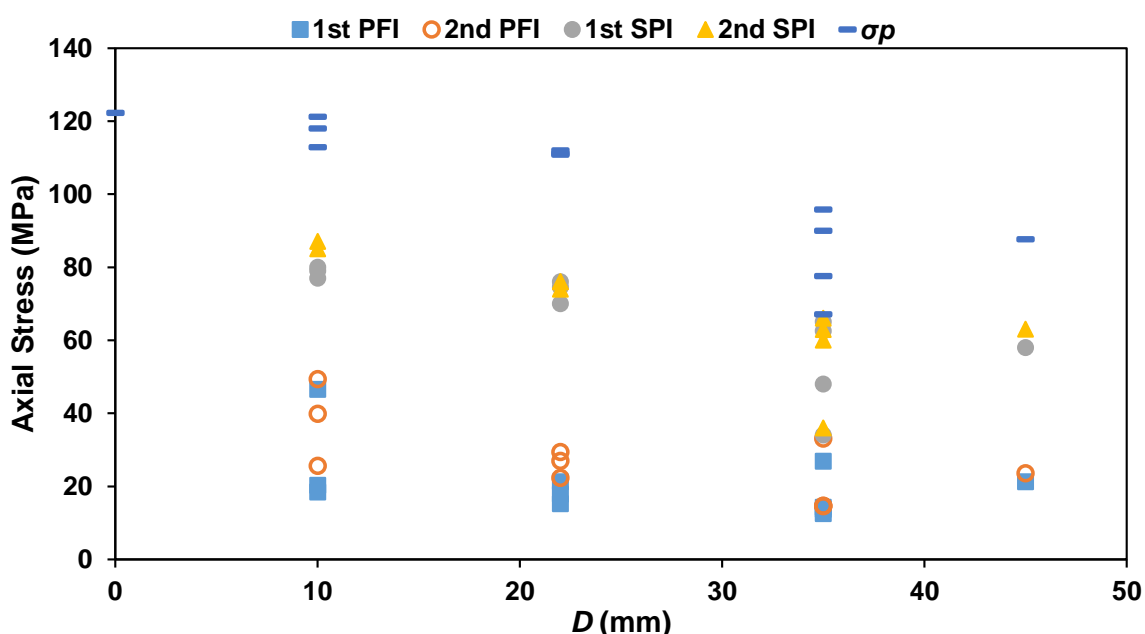
Σχήμα 7-28. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βέροια» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).

Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια» που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή. Επιπλέον, δίνεται γράφημα της μεταβολής της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης κατά την οποία λαμβάνει χώρα το εκάστοτε φαινόμενο συναρτήσει της διαμέτρου της οπής των ΦΜ. Με σκούρο μπλε χρώμα (σ_p) αντιπροσωπεύεται η μέγιστη αντοχή των ΦΜ, με ανοιχτό μπλε (1st PFI) και πορτοκαλί (2nd PFI) δίνεται η έναρξη των πρώτων και δεύτερων ΠΡ αντίστοιχα, ενώ με γκρι (1st SPI) και κίτρινο (2nd SPI) οι πρώτες και οι δεύτερες αποφλοιώσεις για τις δύο παρειές του ανοίγματος αντίστοιχα.

Εξετάζοντας το γράφημα στο Σχήμα 7-29, παρατηρείται μείωση της αντοχής των ΦΜ συναρτήσει της αύξησης της διαμέτρου της οπής. Επιπλέον, η έναρξη των πρώτων ΠΡ, καθώς και η έναρξη των αποφλοιώσεων στο εσωτερικό των ανοιγμάτων, συμβαίνουν σε χαμηλότερες αξονικές τάσεις με την αύξηση της διαμέτρου της οπής. Η παραπάνω παρατήρηση έρχεται να επιβεβαιώσει παλαιότερες παρατηρήσεις άλλων ερευνητών (π.χ. Lajtai 1971, Dzik & Lajtai 1996), και επαληθεύει τις αριθμητικές παρατηρήσεις των Lotidis (2014) και Lotidis et al. (2015).

Πίνακας 7-3. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1st) και δεύτερων (2nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια».

D (mm)	1 st PFI (MPa)	2 nd PFI (MPa)	1 st SPI (MPa)	2 nd SPI (MPa)	σ_p (MPa)
0					122.2
10	20.3	39.8	80.0	85.0	112.8
10	18.4	25.6	77.0	-	117.9
10	46.5	49.3	79.0	87.0	121.2
22	17.8	22.3	70.0	74.0	111.1
22	15.2	29.4	74.5	76.0	110.8
22	21.2	27.0	76.0	76.0	112.0
35	14.3	14.6	34.0	36.0	67.1
35	12.5	14.5	48.0	60.0	77.5
35	13.7	14.6	65.0	66.0	95.8
35	26.9	33.1	62.5	62.9	89.9
45	21.2	23.6	58.0	63.0	87.7



Σχήμα 7-29. Συγκριτικό γράφημα εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων - διάμετρος οπής (mm) των ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια» (σκούρο μπλε (σ_p): μέγιστη αντοχή των ΦΜ, ανοιχτό μπλε (1st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2nd PFI): έναρξη δεύτερων ΠΡ, γκρι (1st SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στην πρώτη παρειά, κίτρινο (2nd SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στη δεύτερη παρειά).

7.7 Μάρμαρο «Νεφέλη»

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου υλικού εξετάζονται τα εξής ΦΜ:

- Τρία (3) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 10 mm.
- Τρία (3) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 22 mm.
- Τέσσερα (4) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 35 mm.
- Ένα (1) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 45 mm.

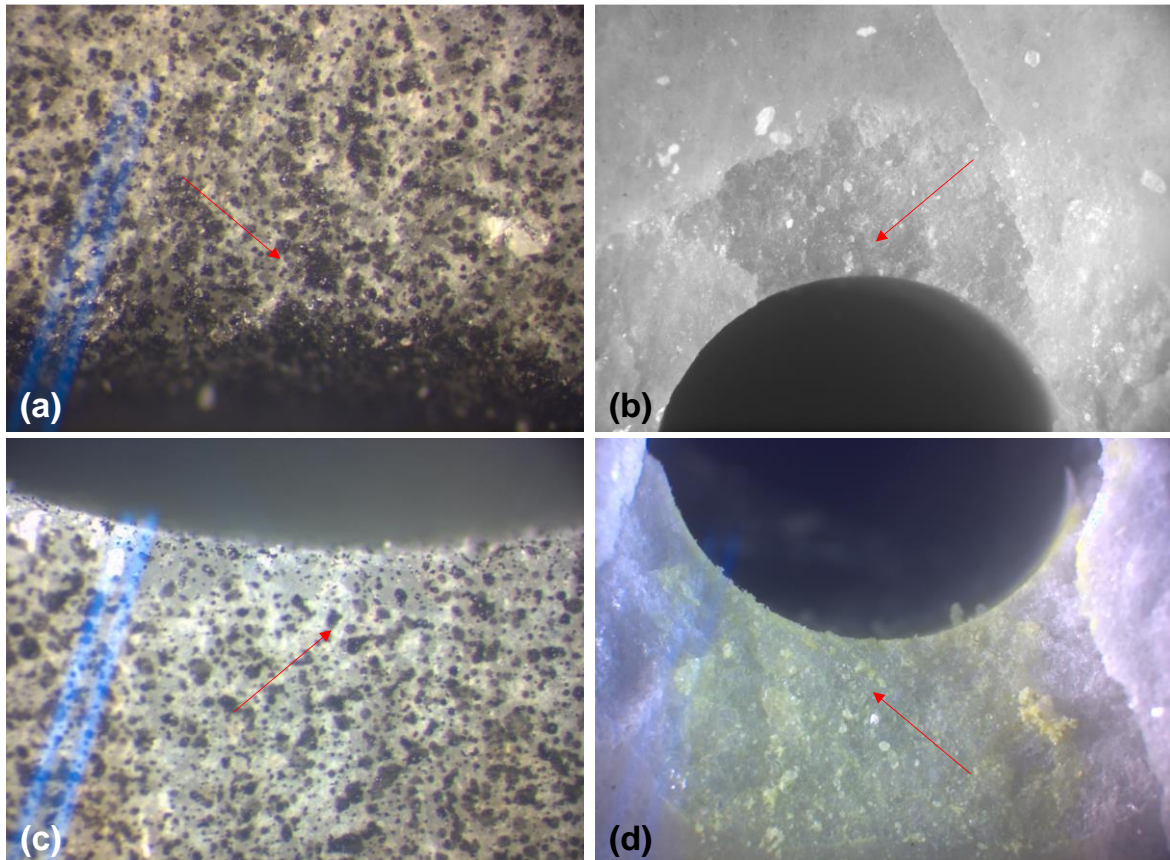
Όλες οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης των ΦΜ μαρμάρου «Νεφέλη» πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (750 N/sec) μέχρι την κατάρρευση των δοκιμίων.

Τα φυσικά μοντέλα με κυλινδρικές οπές διαμέτρου 10 mm, 22 mm και 35 mm παρουσιάζουν παρόμοιους μηχανισμούς αστοχίας, η εμφάνιση των οποίων είναι ευκρινέστερη στα μοντέλα με μεγαλύτερες διαμέτρους οπής. Παρατηρώντας τη διαδικασία αστοχίας του ΦΜ με την οπή διαμέτρου 45 mm, επιβεβαιώνεται πως η συγκεκριμένη οπή είναι ακατάλληλη για τα ΦΜ αυτών των διαστάσεων, καθώς η ανάπτυξη των φαινομένων και η θραύση του δοκιμίου επηρεάζονται από τις συνοριακές συνθήκες.

Κατά την πορεία της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ, αρχικά σχηματίζονται οι εφελκυστικές ΠΡ στο άνω και κάτω μέρος της οπής, οι οποίες ξεκινάνε από την περιφέρεια της οπής και επεκτείνονται σταδιακά προς τις βάσεις των δοκιμίων. Οι ΠΡ είναι αποτέλεσμα των εφελκυστικών ΠΥΣΤ στο άνω και κάτω μέρος των οπών. Για σημαντικό χρονικό διάστημα, οι εν λόγω ρωγμές είναι το μόνο παρατηρούμενο φαινόμενο μακροσκοπικά, τόσο οπτικά όσο και με την ανάλυση DIC.

Αναφορικά για τα μοντέλα με οπή διαμέτρου 10 mm, η μακροσκοπική παρατήρηση των ΠΡ στην μπροστά ή πίσω ελεύθερη επιφάνεια των πρισμάτων είναι εξαιρετικά δυσχερής. Η επιβεβαίωση του σχηματισμού των ΠΡ στα εν λόγω ΦΜ πραγματοποιείται με τη χρήση στερεοσκοπικού μικροσκοπίου LEICA MZ8 με προσαρμοσμένη CCD κάμερα JENOPTIK ProgRes C10 plus. Υπό τον φακό του στερεοσκοπίου παρατηρούνται πολλές κατακόρυφες ή παρακατακόρυφες κοντές ρωγμές, οι οποίες ξεκινούν από το πάνω και κάτω όριο της οπής και επεκτείνονται άνωθεν και κάτωθεν της αντιστοίχως, ενώ στο εσωτερικό της οπής παρατηρείται μόνο μία προβολή ρωγμής. Ορισμένες από τις παραπάνω κοντές ρωγμές

βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, δυσχεραίνοντας περαιτέρω την αναγνώριση της πραγματικής ΠΡ, αν και εφόσον υπάρχει (Σχήμα 7-30).



Σχήμα 7-30. Άνω (a, b) και κάτω (c, d) όριο οπής 10 mm φυσικού μοντέλου ποικιλίας «Νεφέλη», υπό στερεοσκόπιο από την μπροστά (a & c) και πίσω (b & d) ελεύθερη επιφάνεια. Τα βέλη υποδεικνύουν τη θέση των ΠΡ. Εμφανείς είναι επίσης και οι κατακόρυφες ή παρακατακόρυφες ρωγμές στις παρατηρούμενες περιοχές.

Μετά την έναρξη των ΠΡ, παρατηρούνται μέσω της ανάλυσης DIC περιοχές έντονης παραμόρφωσης, οι οποίες αντιστοιχούν στις συζυγείς διαγωνίως αναπτυσσόμενες ζώνες διάτμησης που παρατηρούνται μακροσκοπικά μετά την κατάρρευση του μοντέλου. Οι εν λόγω ζώνες επεκτείνονται διαγώνια με κλίση 45° - 55° προς τις βάσεις των πρισμάτων. Κατά την προχωρημένη ανάπτυξή τους σχηματίζονται μικρά φυλλοειδή θραύσματα πετρώματος στην επιφάνεια του πρίσματος, τα οποία όμως δεν αποκολλώνται από το δοκίμιο. Οι συγκεκριμένες ζώνες ενώνονται με τις θλιπτικές ΠΥΣΤ στα δεξιά και αριστερά των οπών, όπου εμφανίζονται οι εσωτερικές αποφλοιώσεις κατά την άσκηση μεγαλύτερων αξονικών τάσεων στα πρίσματα. Στα ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm ενώνονται στο άλλο άκρο με τις γωνίες των πρισμάτων, ενώ στα ΦΜ με τις οπές των 35 mm ενώνονται με τις βάσεις των πρισμάτων, πλησίον των γωνιών. Η εμφάνιση των συγκεκριμένων ζωνών δεν απαντάται στις δολομιτικές ποικιλίες μαρμάρου που εξετάζονται στην παρούσα

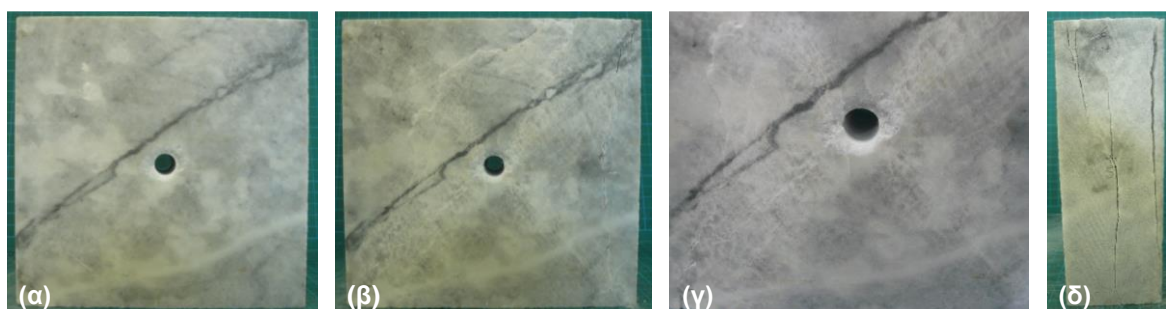
διατριβή, και δεν αναφέρονται ως φαινόμενο στην υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία. Με το πέρας της δοκιμής και την κατάρρευση των δοκιμίων, που σε αντίθεση με άλλες ποικιλίες μαρμάρου δε συνοδεύεται από κρότο, γίνονται εμφανείς οι εν λόγω ζώνες στο εσωτερικό των ΦΜ, επιβεβαιώνοντας ότι είναι κατά κύριο λόγο διατμητικές.

Κατά την έναρξη του φαινομένου των αποφλοιώσεων στις παρειές των οπών σχηματίζονται συζυγείς διαγωνίως αναπτυσσόμενες ζώνες άσπρης απόχρωσης. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται αντί του σχηματισμού εφελκυστικών ή διατμητικών ρωγμών σε διαφορετικές διατάξεις φόρτισης άλλων ασβεστοπικών μαρμάρων και χαρακτηρίζεται στη διεθνή βιβλιογραφία ως *white patches* (Wong & Einstein 2009a, 2009b).

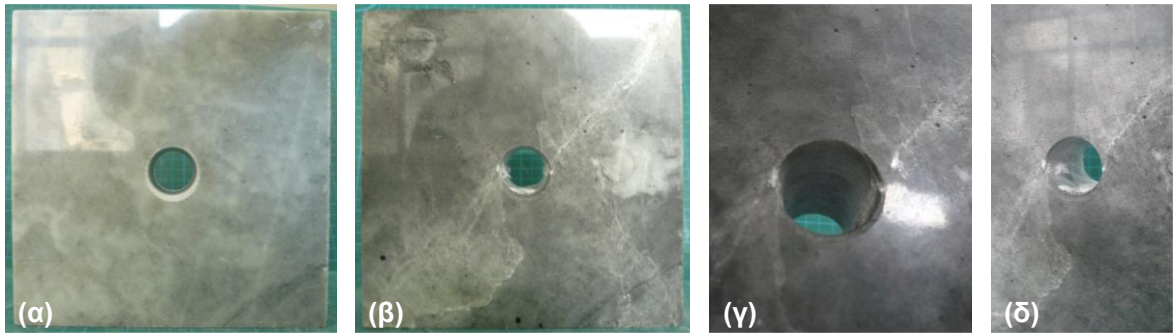
Λίγο πριν την επίτευξη της κορυφαίας αντοχής, εμφανίζονται στα δοκίμια δευτερογενείς κατακόρυφες ΜΕΡ, παράλληλες στη διεύθυνση της εφαρμοζόμενης τάσης, οι οποίες επεκτείνονται μέχρι τις βάσεις των δοκιμίων.

Σημειώνεται ότι λόγω πάχους των ΦΜ δημιουργούνται ΜΕΡ παράλληλα στο επίπεδο ΧΖ, διχοτομώντας τα μοντέλα. Επιπλέον, στην πορεία της δοκιμής σχηματίζονται αρκετά φυλλοειδή θραύσματα που δεν αποκολλώνται από τα πρίσματα, ενώ έντονη είναι η παρουσία βυτουμενιούχων αερίων που απελευθερώνονται από τους πόρους του υλικού ήδη από χαμηλές ασκούμενες αξονικές τάσεις.

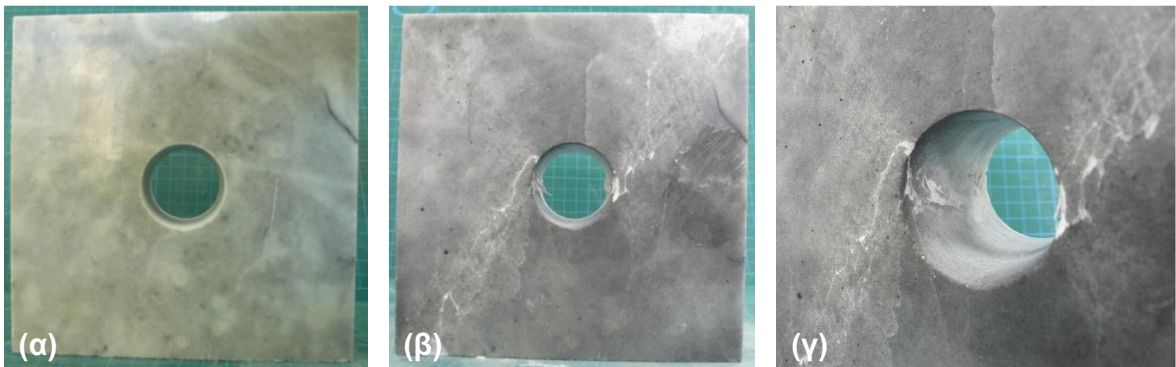
Εικόνες από τα ΦΜ πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης δίνονται στα παρακάτω σχήματα. Σημειώνεται ότι οι εικόνες των ΦΜ μετά το πέρας των δοκιμών προέρχονται από μοντέλα που έχουν καταρρεύσει.



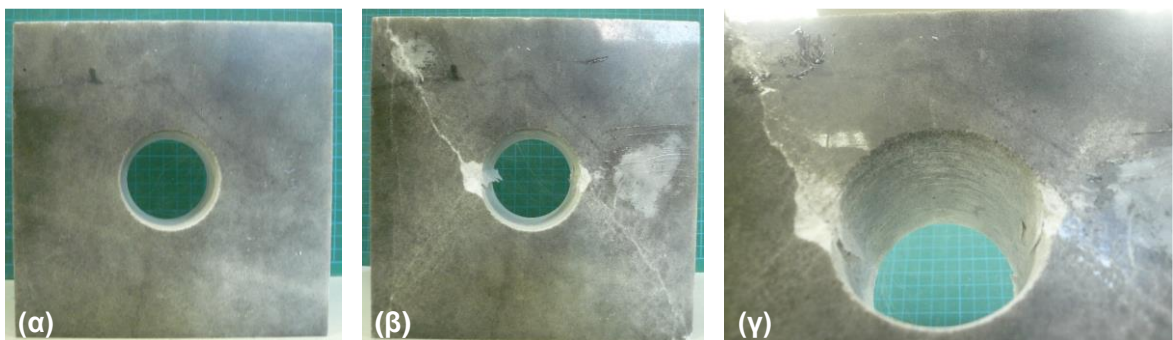
Σχήμα 7-31. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 10 mm ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά (β, γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 7-32. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά (β, γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

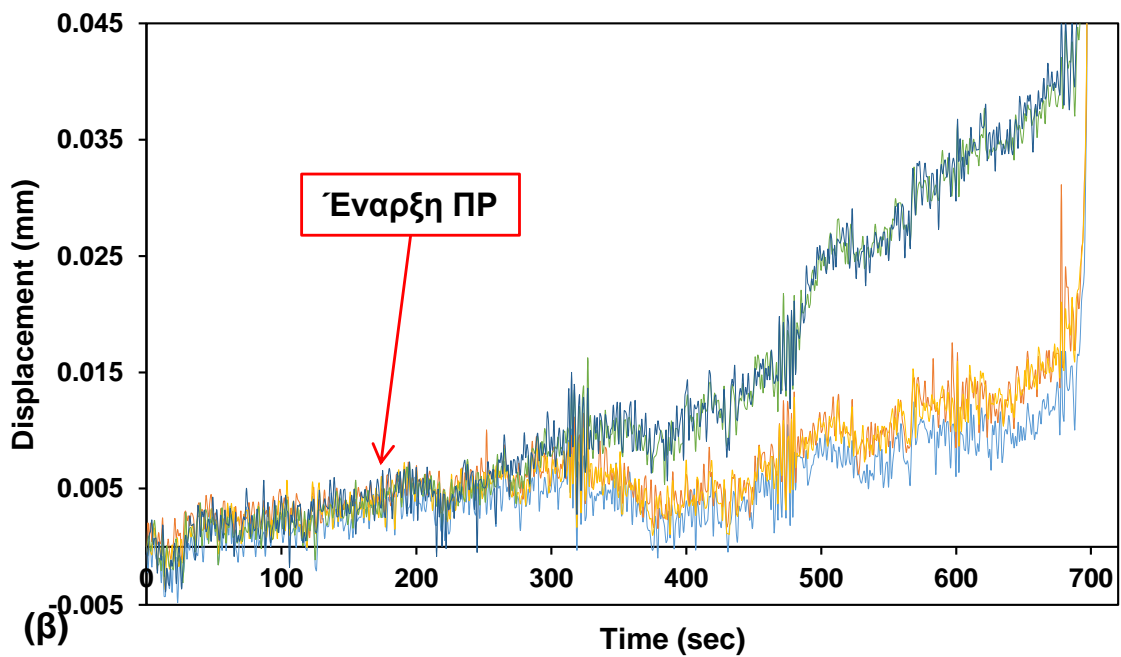
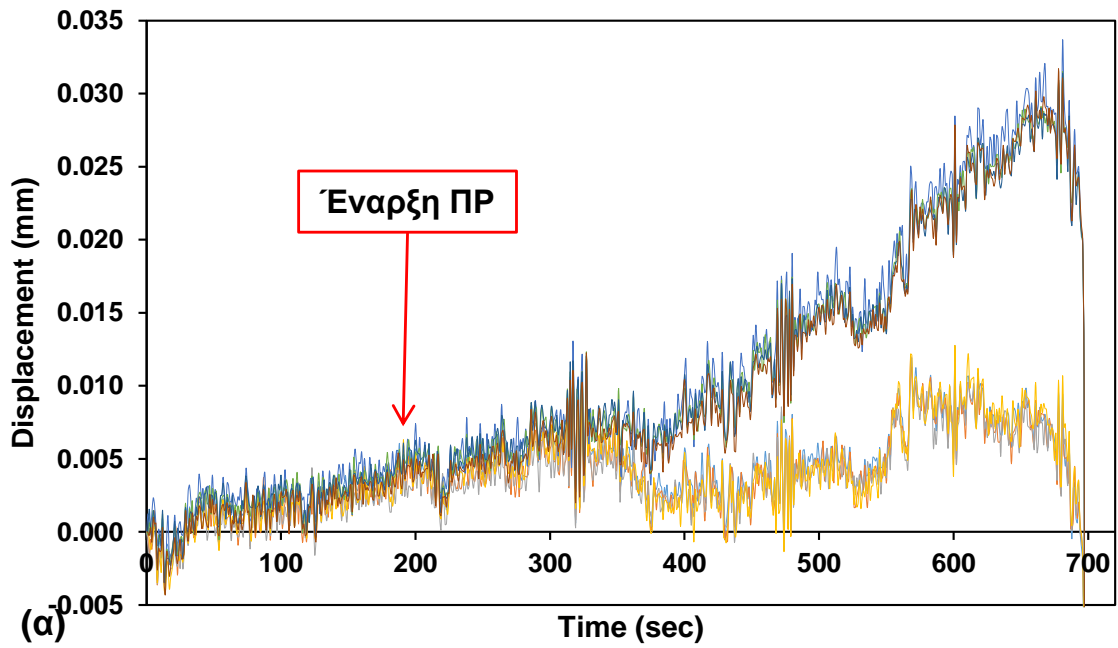


Σχήμα 7-33. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 35 mm ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



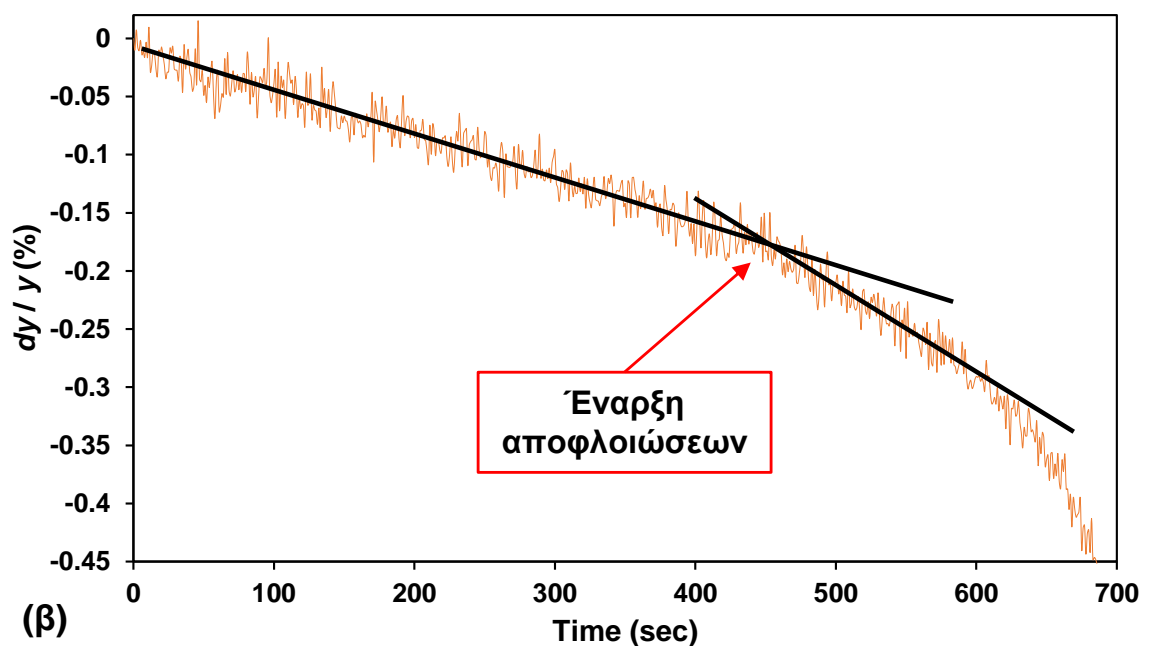
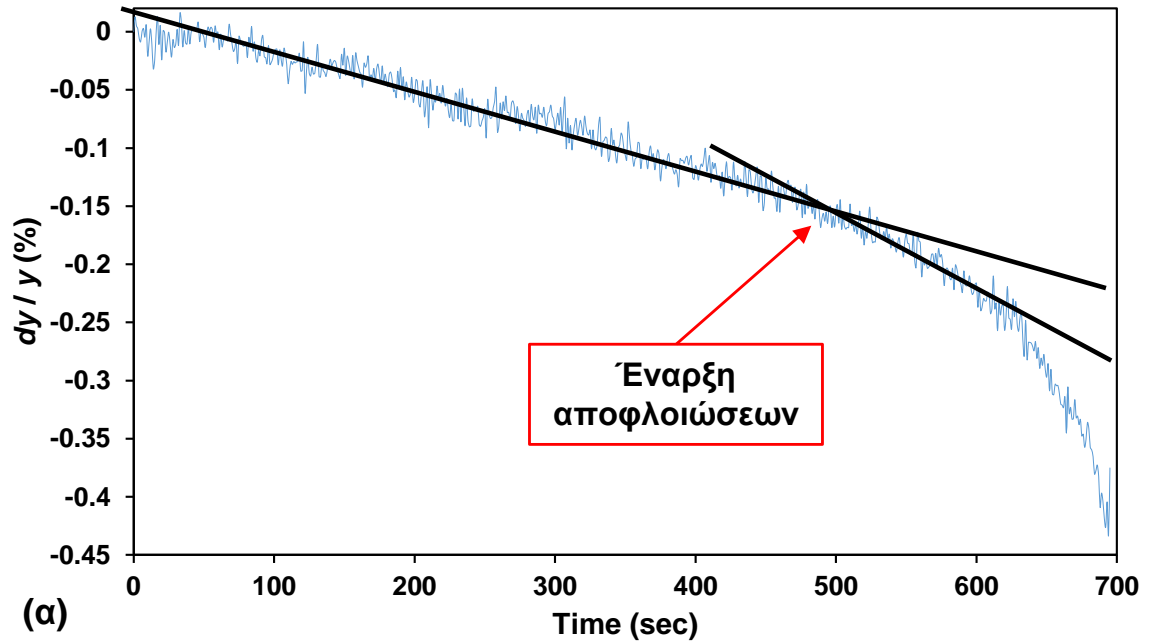
Σχήμα 7-34. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 45 mm ποικιλίας «Νεφέλη» πριν (α) και μετά (β, γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ενδεικτικά γραφήματα για τον προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ με την τεχνική DIC σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.3 δίνονται στο Σχήμα 7-35.



Σχήμα 7-35. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.

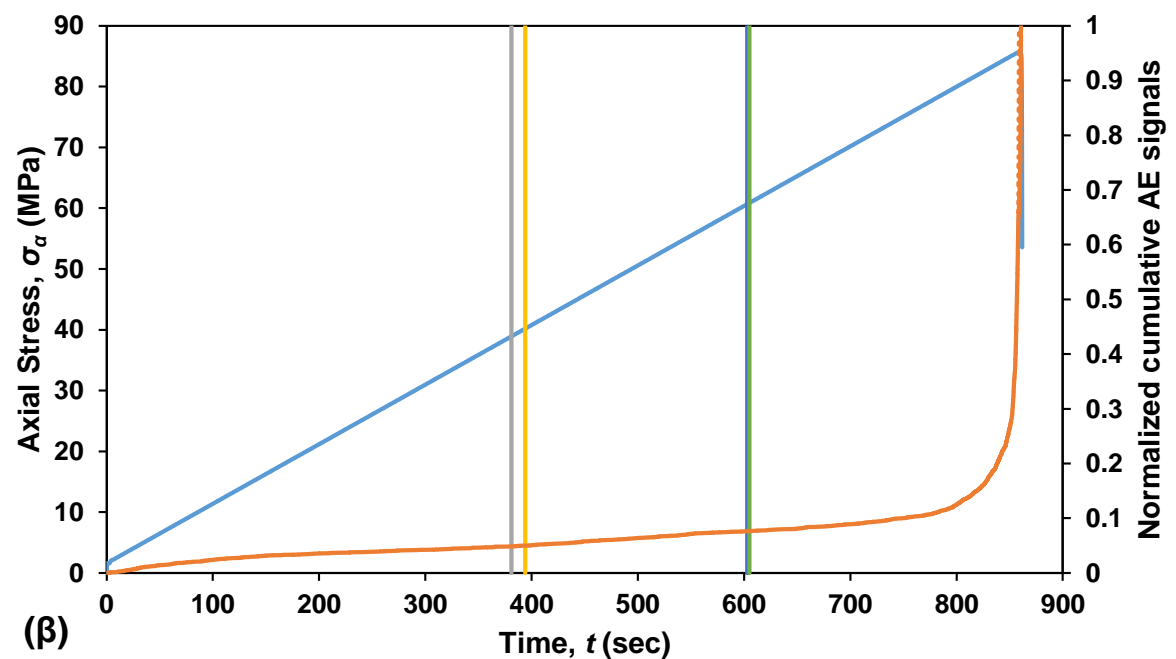
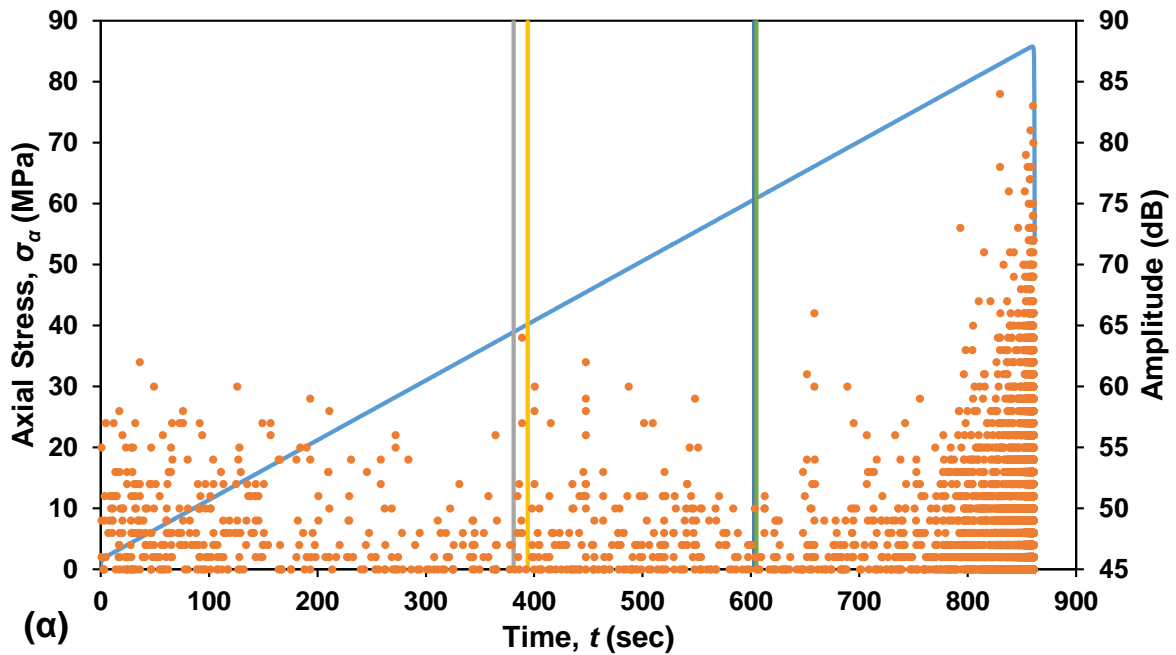
Ενδεικτικά γραφήματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των αποφλοιώσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.4 δίνονται στο Σχήμα 7-36.



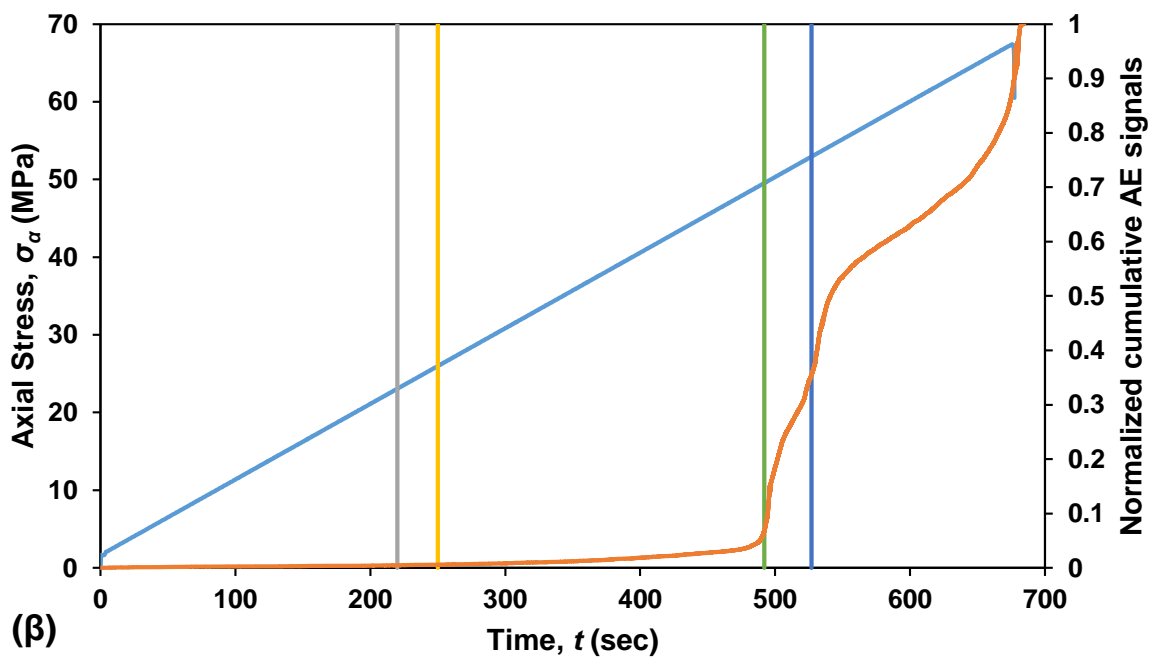
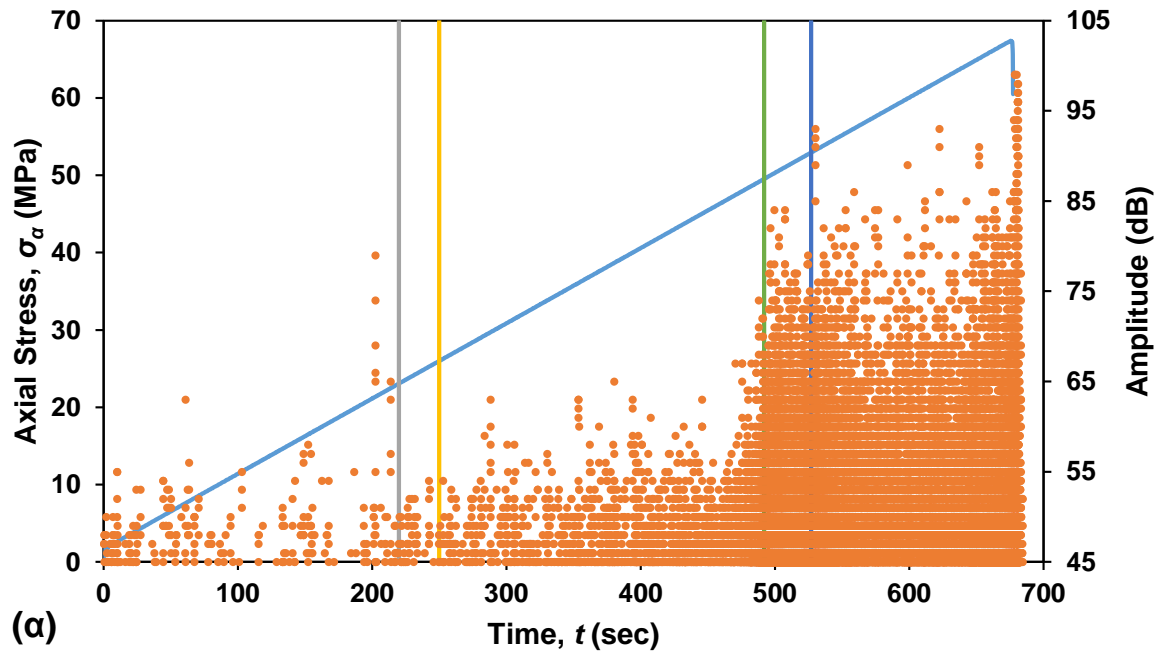
Σχήμα 7-36. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται διαγράμματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a και του πλάτους (Amplitude (dB)) ή του ανηγμένου αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ ως προς τον χρόνο για κάθε μία εξεταζόμενη οπή των ΦΜ της ποικιλίας «Νεφέλη». Στα ίδια διαγράμματα δίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC, όπου με τις κατακόρυφες ευθείες σημειώνονται οι χρόνοι έναρξης των ΠΡ στο πάνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής καθώς και των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής. Παρατηρείται πλήρης αντιστοιχία των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα ΦΜ, όπως έχουν προσδιοριστεί χρονικά με τη μέθοδο DIC, με τα καταγεγραμμένα σήματα ΑΕ.

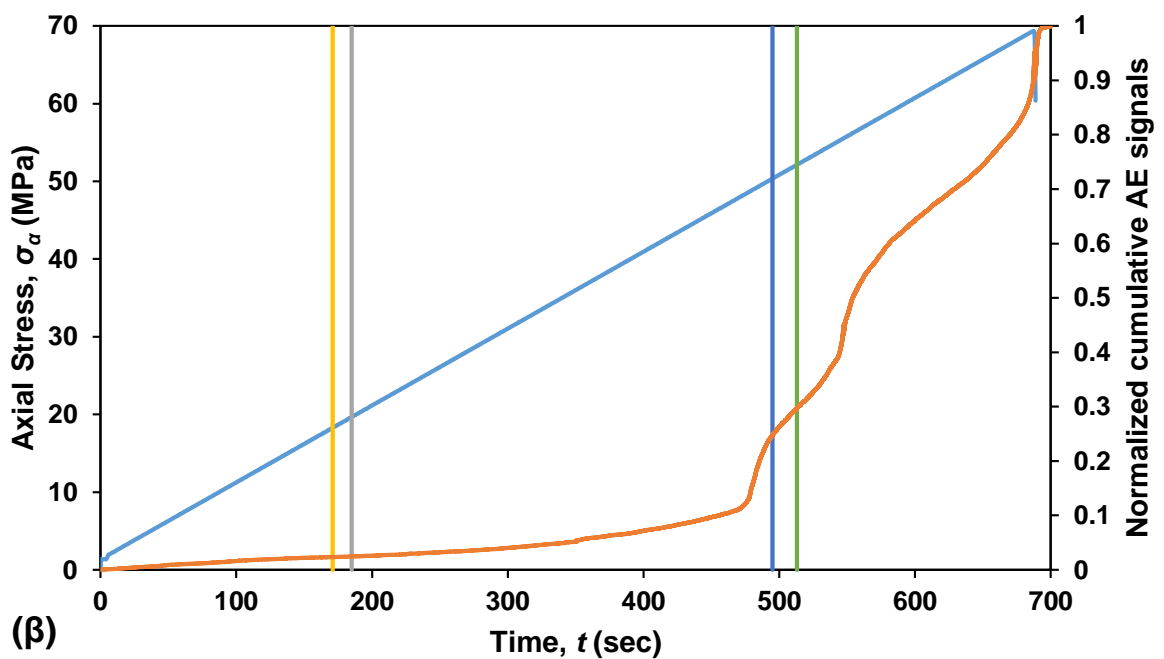
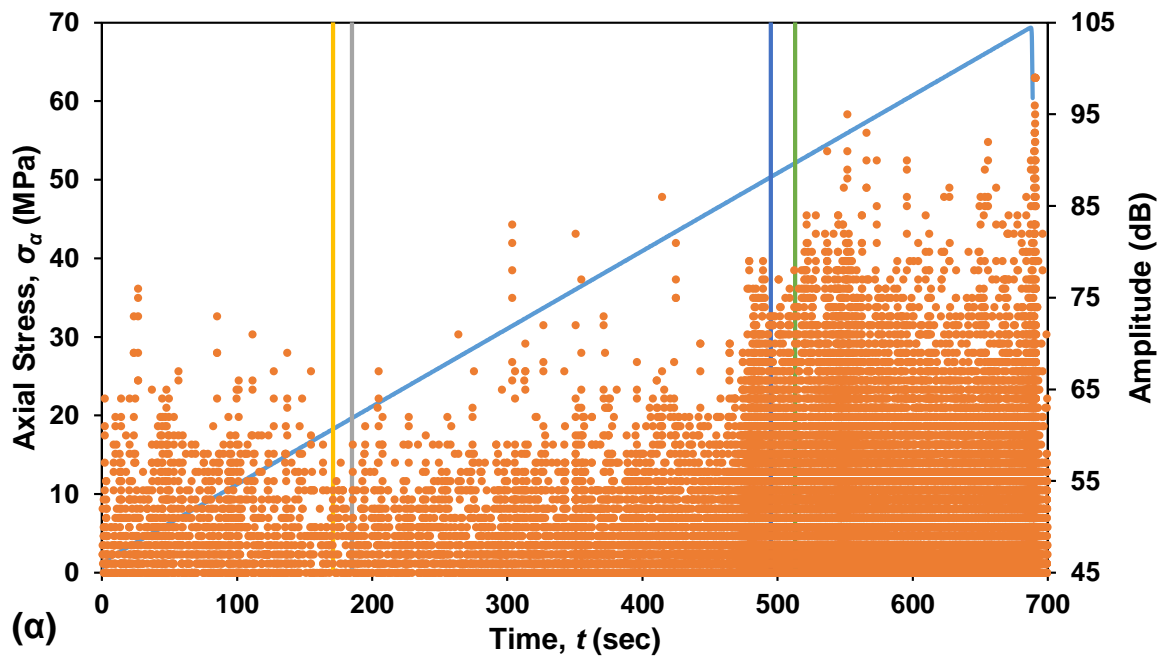
Συγκεκριμένα, κατά την έναρξη των ΠΡ παρατηρούνται στις περισσότερες περιπτώσεις μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ ή/και αύξηση του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ που λαμβάνονται από το σύστημα καταγραφής. Κατά τις αποφλοιώσεις, παρατηρούνται μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ, εκτός από το ΦΜ με οπή διαμέτρου 10 mm, ενώ καταγράφονται μέχρι εκείνη τη στιγμή περί το 10% του συνολικού αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ της δοκιμής για τα ΦΜ με οπές διαμέτρου 10 mm και 22 mm, ενώ το ποσοστό ανεβαίνει περί το 25-30% για τις μεγαλύτερες οπές. Δεν παρατηρούνται μεν διακριτά σκαλοπάτια πλην ελαχίστων εξαιρέσεων, αλλά κατά την έναρξη του φαινομένου παρατηρείται σημαντική αύξηση του ρυθμού καταγραφής σημάτων ΑΕ. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC γενικά επιβεβαιώνονται από τις παρατηρήσεις που προκύπτουν μέσω της ανάλυσης των σημάτων ΑΕ, και αντιστρόφως.



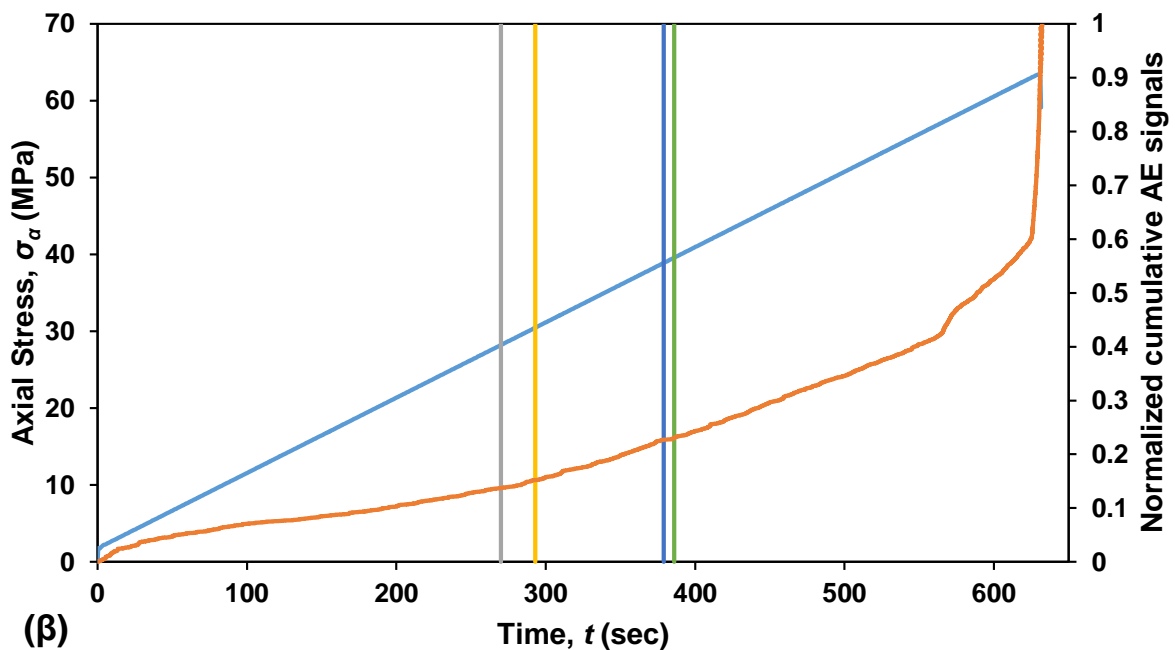
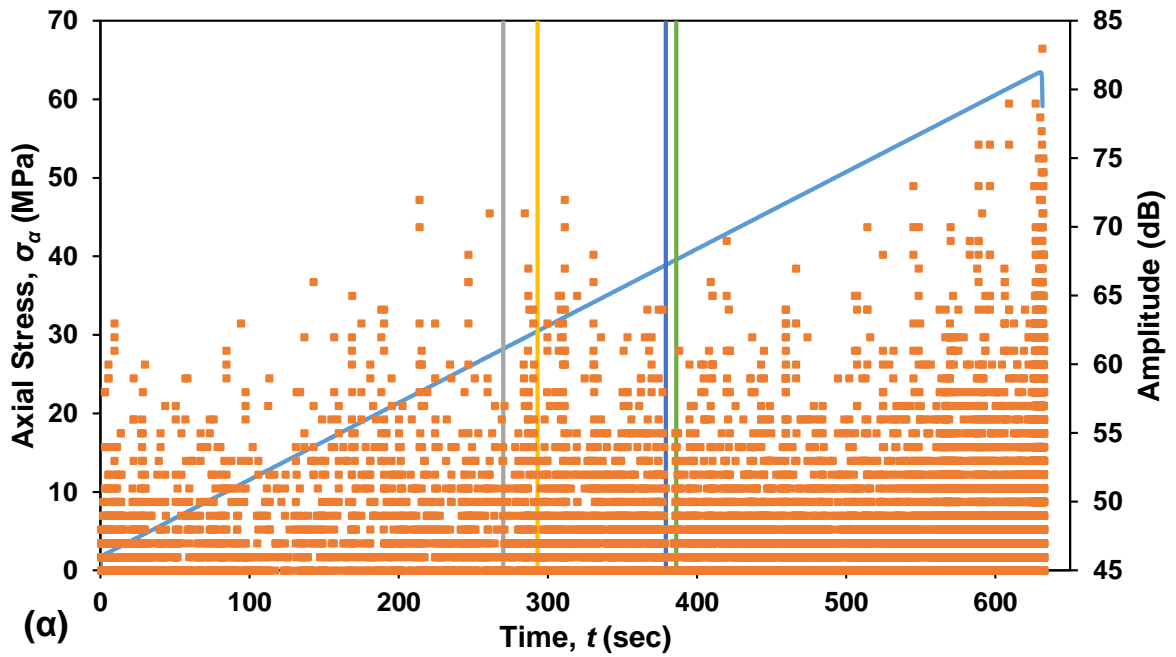
Σχήμα 7-37. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Νεφέλη». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



Σχήμα 7-38. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Νεφέλη». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.

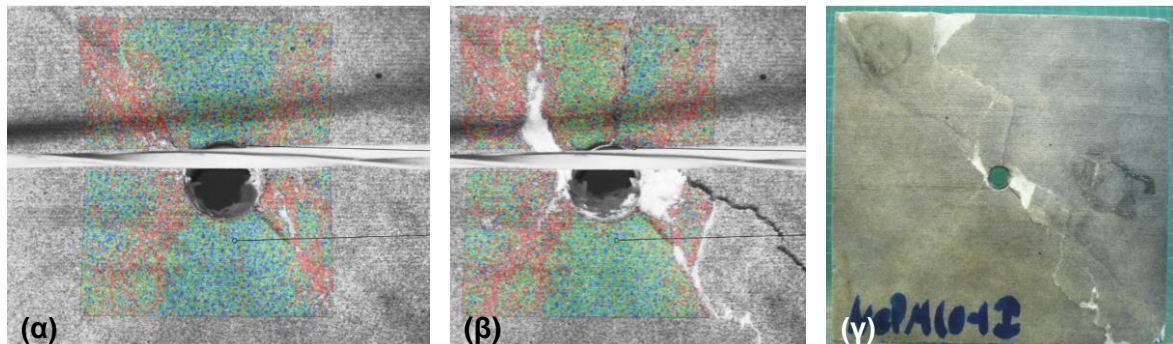


Σχήμα 7-39. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Νεφέλη». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.

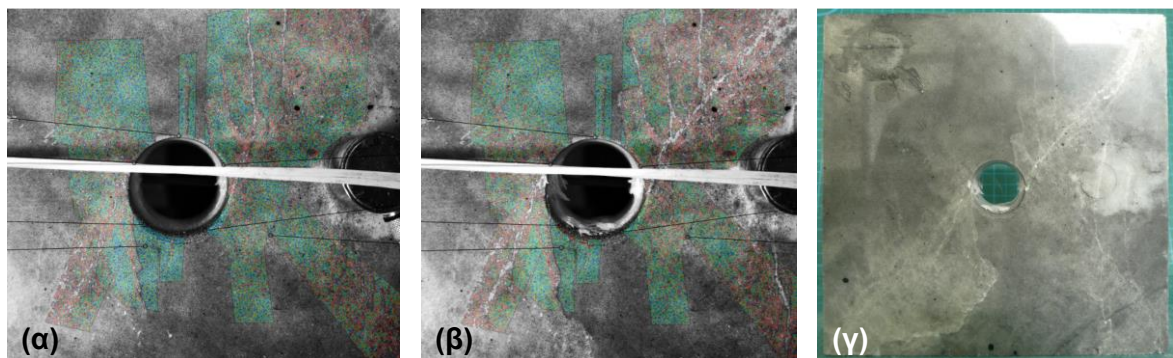


Σχήμα 7-40. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Νεφέλη». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.

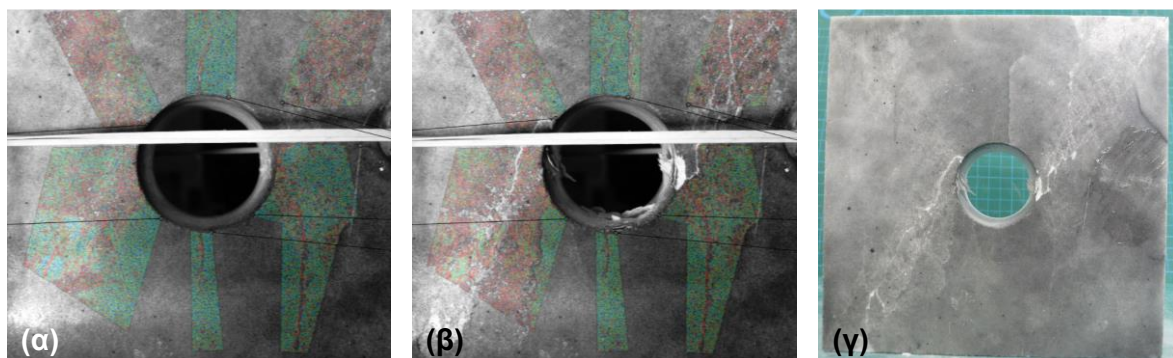
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται ενδεικτικά φωτογραφίες από ΦΜ με οπή μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, με τα αποτελέσματα της ανάλυσης DIC, αμέσως πριν και μετά την κατάρρευση των ΦΜ.



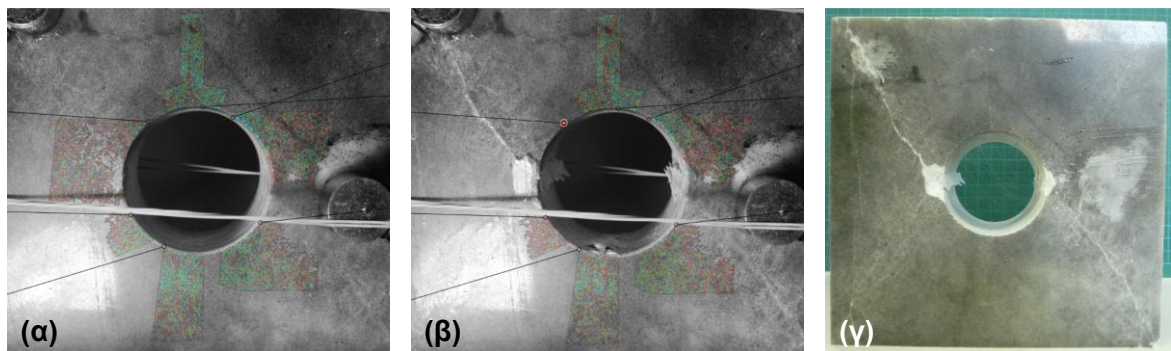
Σχήμα 7-41. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).



Σχήμα 7-42. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).



Σχήμα 7-43. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).



Σχήμα 7-44. Τελικό αποτέλεσμα (α: πριν την κατάρρευση, β: μετά την κατάρρευση) της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Νεφέλη» και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).

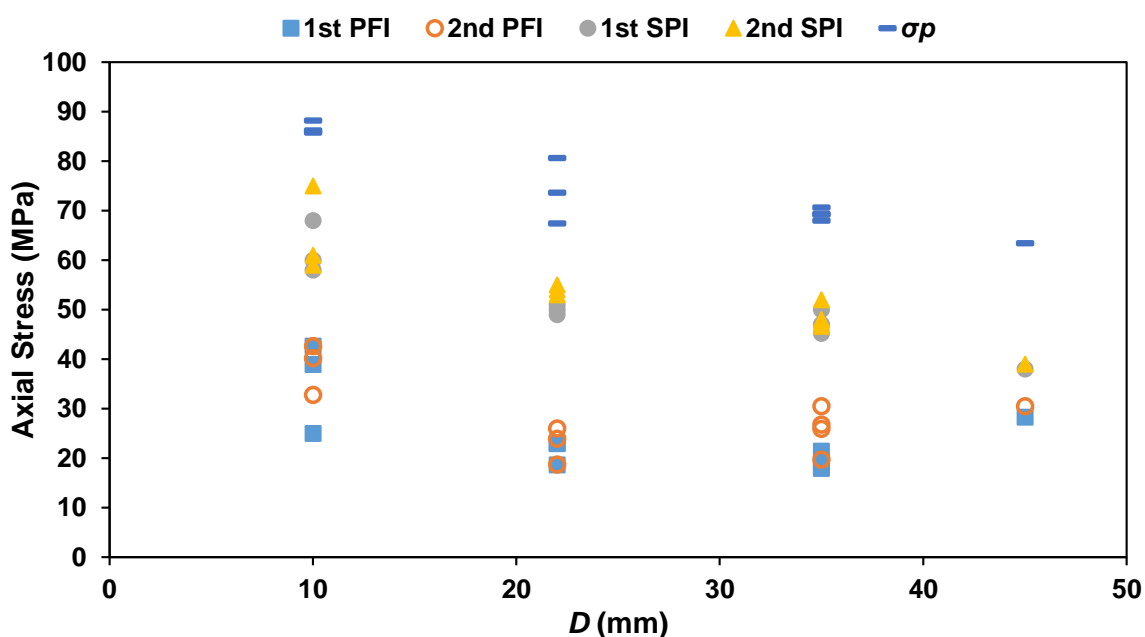
Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ της ποικιλίας «Νεφέλη» που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή. Επιπλέον, δίνεται γράφημα της μεταβολής της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης κατά την οποία λαμβάνει χώρα το εκάστοτε φαινόμενο συναρτήσει της διαμέτρου της οπής των ΦΜ. Με σκούρο μπλε χρώμα (σ_p) αντιπροσωπεύεται η μέγιστη αντοχή των ΦΜ, με ανοιχτό μπλε (1st PFI) και πορτοκαλί (2nd PFI) δίνεται η έναρξη των πρώτων και δεύτερων ΠΡ αντίστοιχα, ενώ με γκρι (1st SPI) και κίτρινο (2nd SPI) οι πρώτες και οι δεύτερες αποφλοιώσεις για τις δύο παρειές του ανοίγματος αντίστοιχα.

Εξετάζοντας το γράφημα στο Σχήμα 7-45, παρατηρείται μείωση της αντοχής των ΦΜ συναρτήσει της αύξησης της διαμέτρου της οπής. Επιπλέον, η έναρξη των πρώτων ΠΡ, καθώς και η έναρξη των αποφλοιώσεων στο εσωτερικό των ανοιγμάτων, συμβαίνουν σε χαμηλότερες αξονικές τάσεις με την αύξηση της διαμέτρου της οπής. Η παραπάνω παρατήρηση έρχεται να επιβεβαιώσει παλαιότερες παρατηρήσεις άλλων ερευνητών (π.χ. Lajtai 1971, Dzik & Lajtai 1996), και επαληθεύει τις αριθμητικές παρατηρήσεις των των Lotidis (2014) και Lotidis et al. (2015).

Οι παραπάνω παρατηρήσεις είναι παρόμοιες με τις αντίστοιχες που προκύπτουν από το Σχήμα 7-29 που αφορά την ποικιλία «Βέροια».

Πίνακας 7-4. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1st) και δεύτερων (2nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Νεφέλη».

D (mm)	1 st PFI (MPa)	2 nd PFI (MPa)	1 st SPI (MPa)	2 nd SPI (MPa)	σ_p (MPa)
10	38.9	40.2	60.0	61.0	85.8
10	25.0	32.8	58.0	59.0	86.2
10	42.6	42.6	68.0	75.0	88.2
22	22.9	23.9	50.0	54.0	73.6
22	23.0	26.0	49.0	53.0	67.4
22	18.6	18.7	51.0	55.0	80.6
35	21.4	26.8	47.0	47.5	69.2
35	19.2	30.5	47.0	48.0	68.0
35	18.3	19.7	50.0	52.0	69.4
35	17.9	25.9	45.2	46.6	70.6
45	28.3	30.5	38.0	39.0	63.4



Σχήμα 7-45. Συγκριτικό γράφημα εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων - διάμετρος οπής (mm) των ΦΜ της ποικιλίας «Νεφέλη» (σκούρο μπλε (σ_p): μέγιστη αντοχή των ΦΜ, ανοιχτό μπλε (1st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2nd PFI): έναρξη δεύτερων ΠΡ, γκρι (1st SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στην πρώτη παρειά, κίτρινο (2nd SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στη δεύτερη παρειά).

7.8 Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου υλικού εξετάζονται τα εξής ΦΜ:

- Δύο (2) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 10 mm.
- Δύο (2) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 22 mm.
- Δύο (2) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 35 mm.
- Δύο (2) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 45 mm.
- Δύο (2) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 61 mm.

Όλες οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης των ΦΜ μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με μονές οπές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (2462 N/sec) έως την προχωρημένη ανάπτυξη των φαινομένων, και έπειτα συνεχίστηκαν με ρυθμό παραμόρφωσης (8 $\mu\text{m}/\text{min}$) έως την ολοκλήρωση της δοκιμής. Οι δοκιμές ολοκληρώθηκαν σε τάσεις ελαφρώς χαμηλότερες της μέγιστης αντοχής των ΦΜ, εκτός από ένα με οπή διαμέτρου 45 mm που φορτίστηκε μέχρι να καταρρεύσει.

Τα φυσικά μοντέλα παρουσιάζουν παρόμοιους μηχανισμούς αστοχίας, η εμφάνιση των οποίων είναι ευκρινέστερη στα μοντέλα με μεγαλύτερες διαμέτρους οπής.

Κατά την πορεία της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ, αρχικά σχηματίζονται οι εφελκυστικές ΠΡ στο άνω και κάτω μέρος της οπής, οι οποίες ξεκινάνε από την περιφέρεια της οπής και επεκτείνονται σταδιακά προς τις βάσεις των δοκιμίων. Οι ΠΡ είναι αποτέλεσμα των εφελκυστικών ΠΥΣΤ στο άνω και κάτω μέρος των οπών. Για σημαντικό χρονικό διάστημα, οι εν λόγω ρωγμές είναι το μόνο παρατηρούμενο φαινόμενο μακροσκοπικά, τόσο οπτικά όσο και με την ανάλυση DIC.

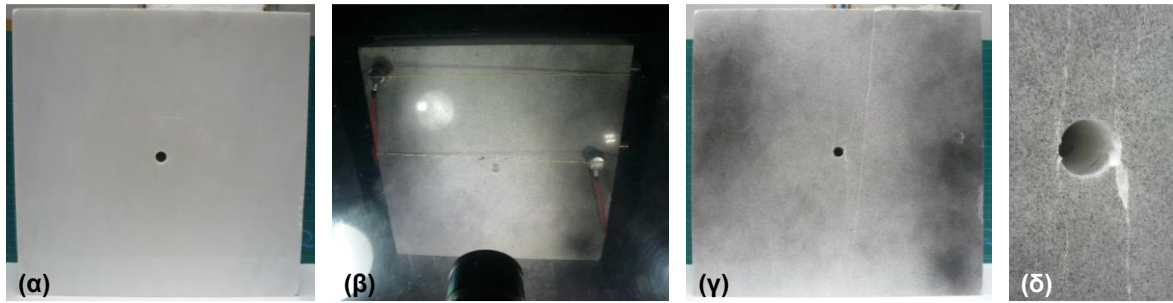
Μετά την έναρξη των ΠΡ, παρατηρείται ο σχηματισμός των ΔΡ στις εγγύς περιοχές δεξιά και αριστερά των οπών, οι οποίες επεκτείνονται παρακατακόρυφα προς τις βάσεις των πρισμάτων, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη μετέπειτα κατάρρευση των ΦΜ. Χάρη τις λειασμένες επιφάνειες παρακολούθησης των ΦΜ, τόσο οι ΠΡ όσο και οι ΔΡ είναι ευδιάκριτες σε προχωρημένα στάδια με γυμνό οφθαλμό. Συνολικά, έως τέσσερις (4) ΔΡ δύνανται να εμφανιστούν, αλλά μόνο δύο (2), αντιδιαμετρικές μεταξύ τους, καθορίζουν τελικώς τη συμπεριφορά του ΦΜ. Κατά την εξέλιξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, οι ΔΡ ενώνονται με τις θλιπτικές ΠΥΣΤ στα δεξιά και αριστερά των οπών, περιοχές όπου εμφανίζονται οι εσωτερικές αποφλοιώσεις κατά την άσκηση μεγαλύτερων αξονικών τάσεων στα πρίσματα.

Παράλληλα, επεκτείνονται και φτάνουν ως τις βάσεις των προισμάτων, ενώ δημιουργούνται μικρότερες ΜΕΡ που προκύπτουν από μεταγενέστερες διακλαδώσεις των αρχικών ΔΡ.

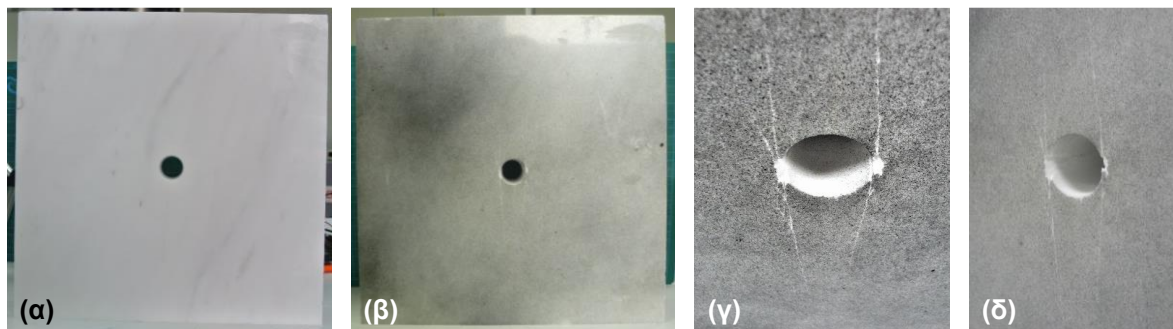
Με την άφιξή τους στις θλιπτικές ΠΥΣΤ αλληλοεπιδρούν με το διαταραγμένο υλικό μέχρι που προβάλλονται στις παρειές των οπών, θέσεις όπου σημειώνονται αποφλοιώσεις (spalling). Επιπλέον, με την έναρξη των αποφλοιώσεων στο εσωτερικό των οπών, παρατηρείται κλείσιμο των εφελκυστικών ΠΡ που οφείλεται στην εκτεταμένη ρωγμάτωση του μοντέλου κατά την οποία οι ΔΡ διευρύνονται περαιτέρω με παράλληλη εντατικοποίηση των αποφλοιώσεων.

Με το πέρας της δοκιμής και την κατάρρευση του δοκιμίου με οπή διαμέτρου 45 mm που φορτίσθηκε μέχρι αστοχίας, η οποία συνοδεύεται από εκκωφαντικό κρότο, γίνονται εμφανείς οι ΜΕΡ στο εσωτερικό του, οι οποίες λόγω ολίσθησης είναι κατά κύριο λόγο διατμητικές και μερικές μεικτού τύπου (mixed-mode). Επιπλέον, η κατάρρευση του ΦΜ συνοδεύεται από έντονη παρουσία πούδρας που προέρχεται από τις διατμητικές ΜΕΡ και τις αποφλοιώσεις. Παραμένει άγνωστο εάν η φύση της έναρξης του φαινομένου των αποφλοιώσεων είναι καθαρά εφελκυστικό ή διατμητικό φαινόμενο, ωστόσο η κατάσταση των θλιπτικών ΠΥΣΤ έπειτα από τις δοκιμές θλίψης εμφανίζουν ξεκάθαρα διατμητική αστοχία. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως με την κατάρρευση του ΦΜ παρατηρούνται, όπως και στα προηγούμενα υλικά (εμφανέστερα στα ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια»), εφελκυστικές ΠΥΣΤ στο άνω και κάτω μέρος της οπής και διατμητικές ΠΥΣΤ στα δεξιά και αριστερά αυτής. Επιπροσθέτως, στην πορεία της δοκιμής δεν εμφανίζονται ιδιαίτερος φυλλοειδείς αποκολλήσεις πετρώματος, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα υλικά που μελετώνται στην παρούσα διατριβή, ενώ έντονη είναι η παρουσία βυτουμενιούχων αερίων που απελευθερώνονται από τους πόρους του υλικού.

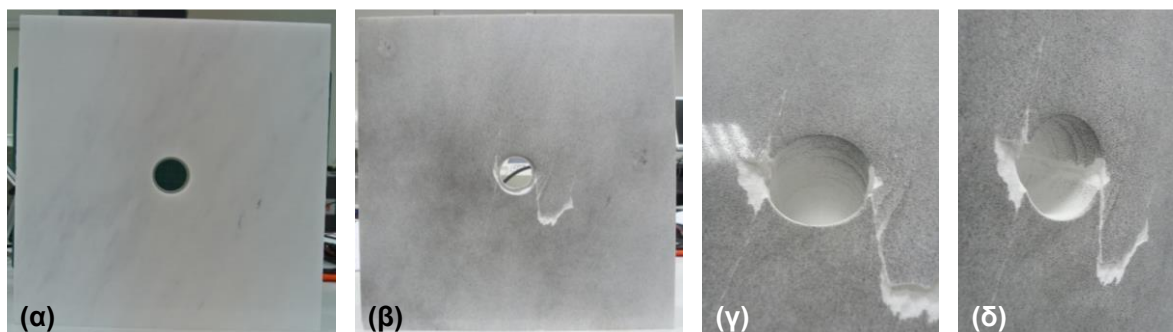
Σημειώνεται ότι τα δοκίμια δεν υποβάλλονται σε θλίψη μέχρι την κορυφαία αντοχή τους προκειμένου να μην καταρρεύσουν ώστε να μπορέσουν να μελετηθούν περαιτέρω. Εικόνες από τα ΦΜ πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης δίνονται ακολούθως.



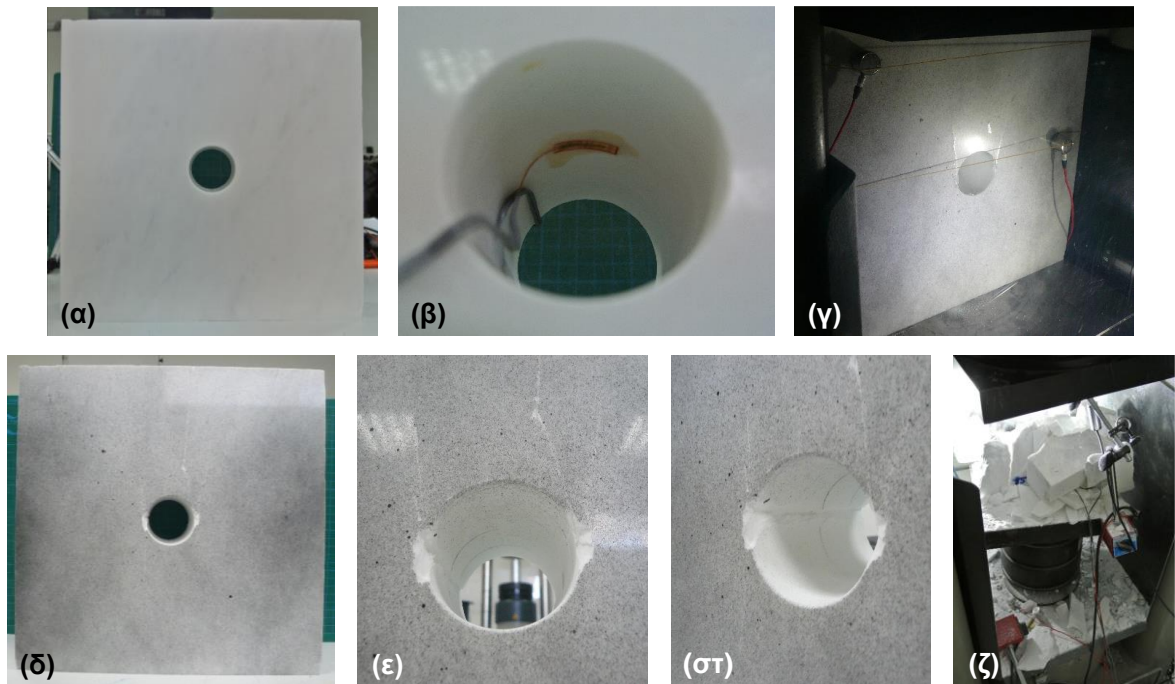
Σχήμα 7-46. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 10 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



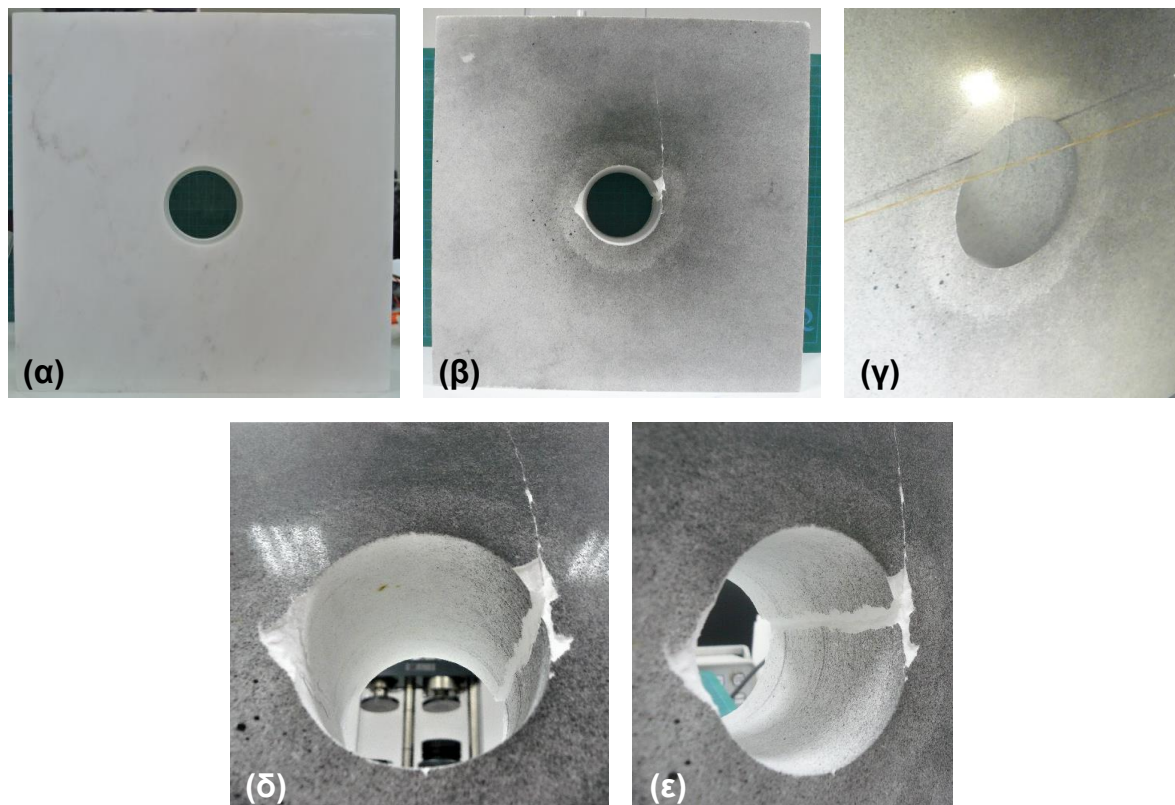
Σχήμα 7-47. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β, γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 7-48. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 35 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β, γ & δ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

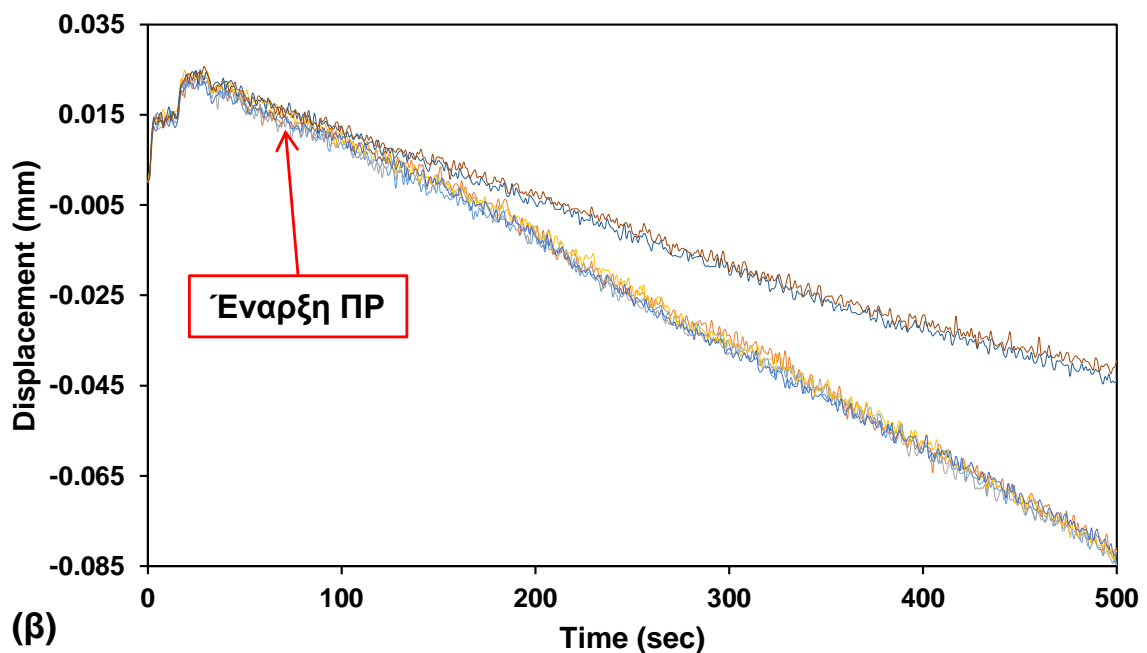
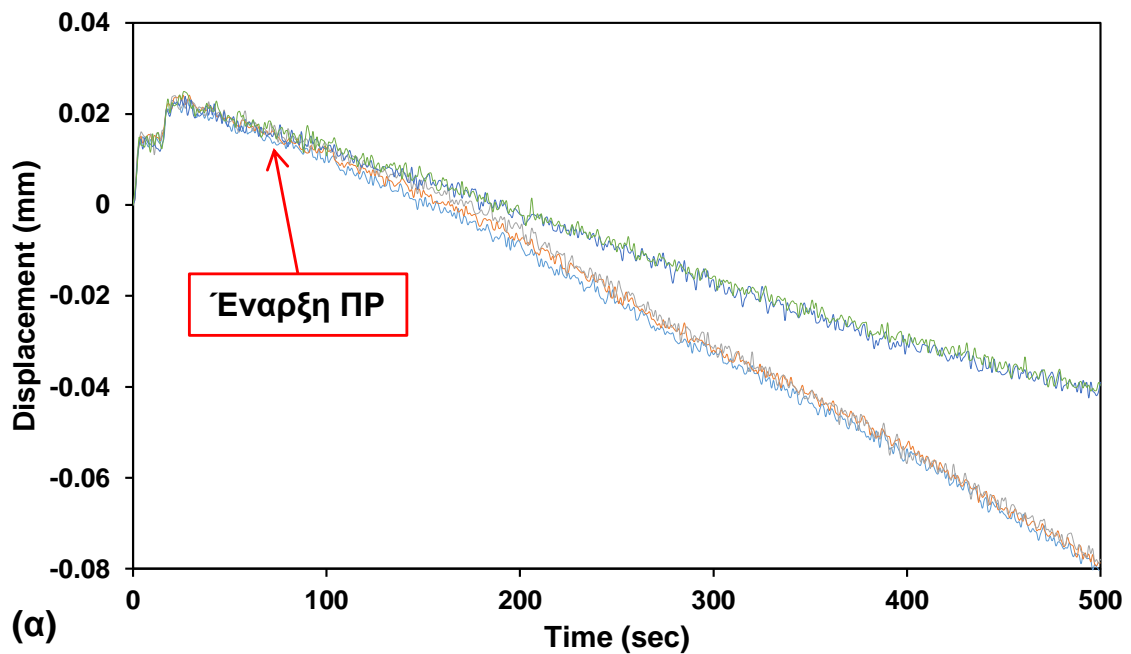


Σχήμα 7-49. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 45 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α & β), κατά τη διάρκεια (γ) και μετά (δ, ε & στ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Επιπλέον, δίνεται το μοντέλο που φορτίστηκε μέχρι αστοχίας μετά το πέρας της δοκιμής (ζ).



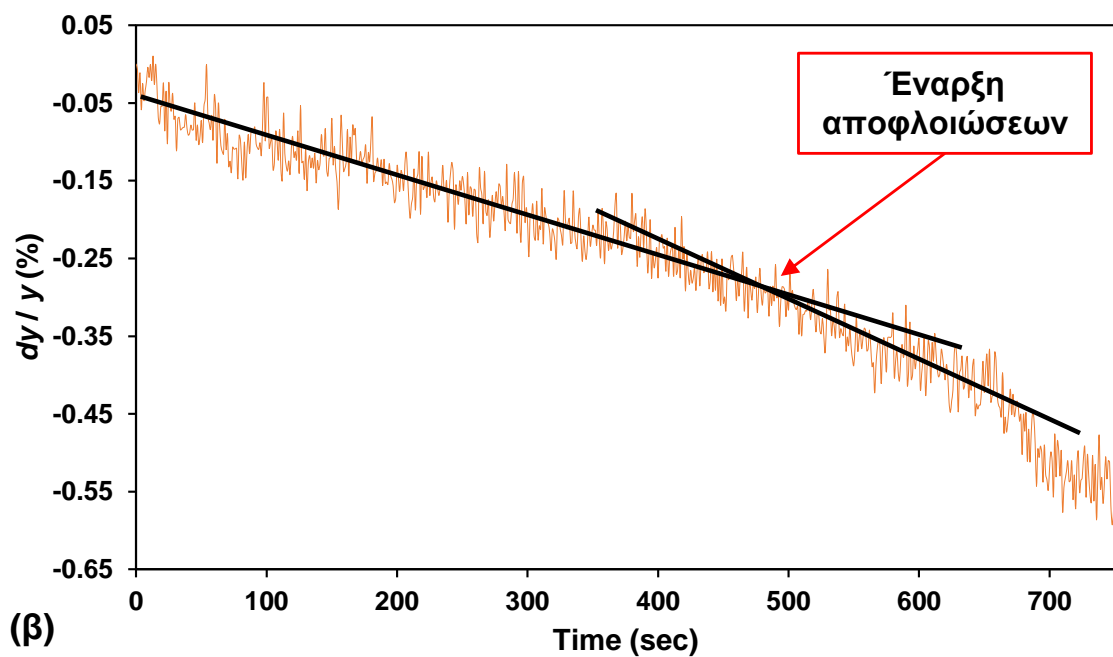
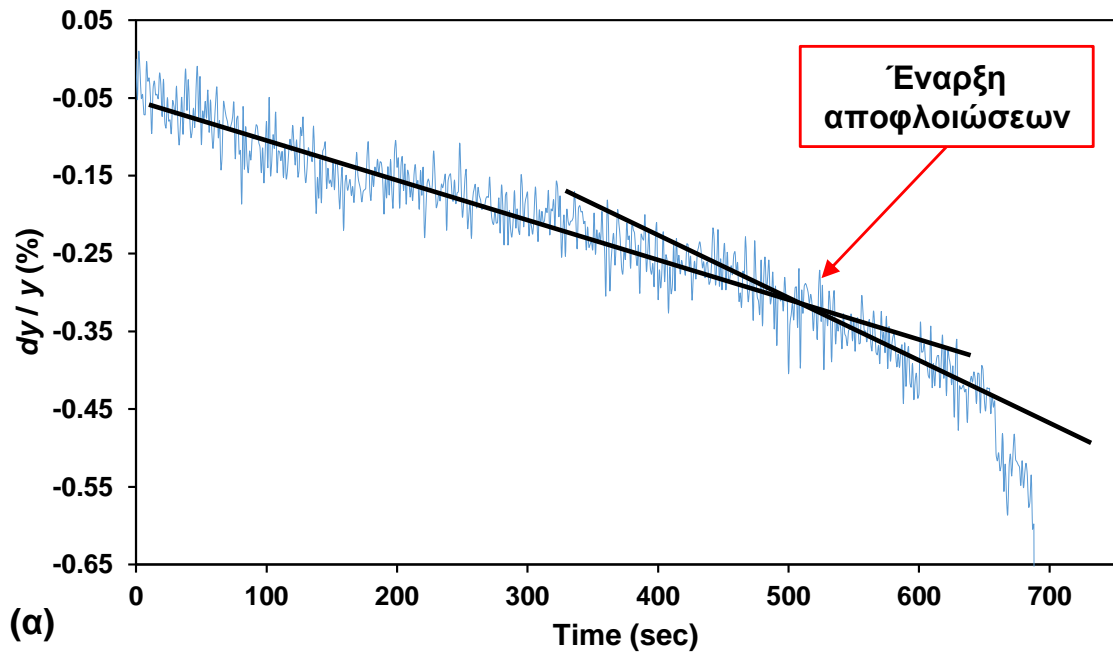
Σχήμα 7-50. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 61 mm ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β, δ & ε) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Στο (γ) δίνεται η άνω ΠΡ όπως φαίνεται μακροσκοπικά κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης.

Ενδεικτικά γραφήματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.3 δίνονται στο Σχήμα 7-51.



Σχήμα 7-51. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.

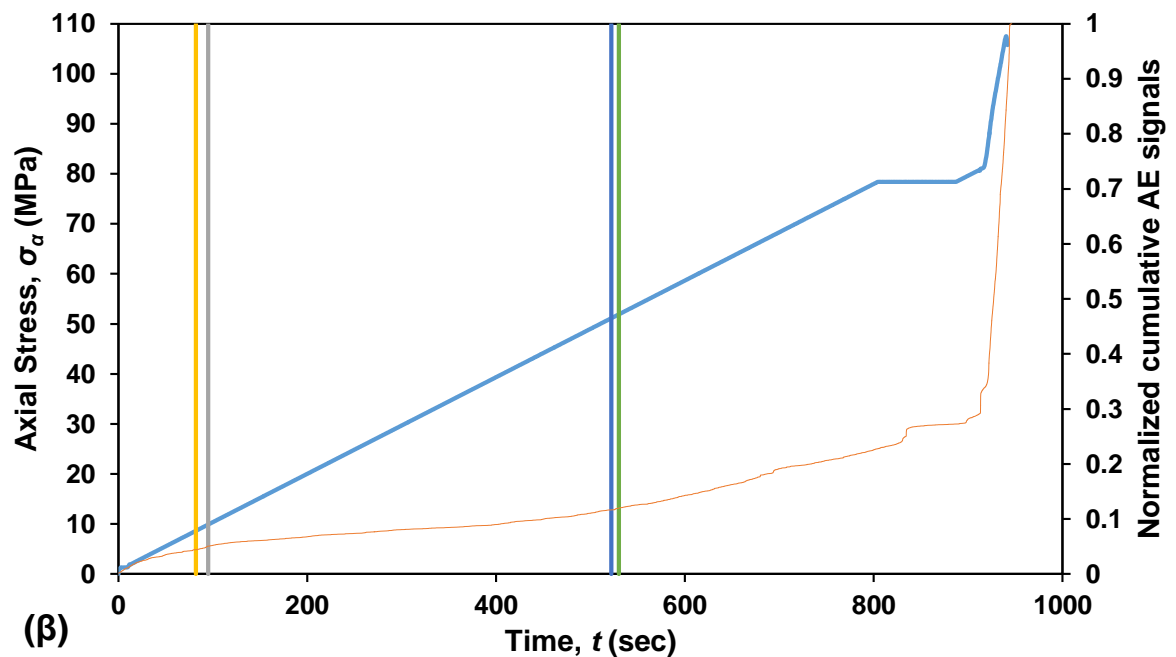
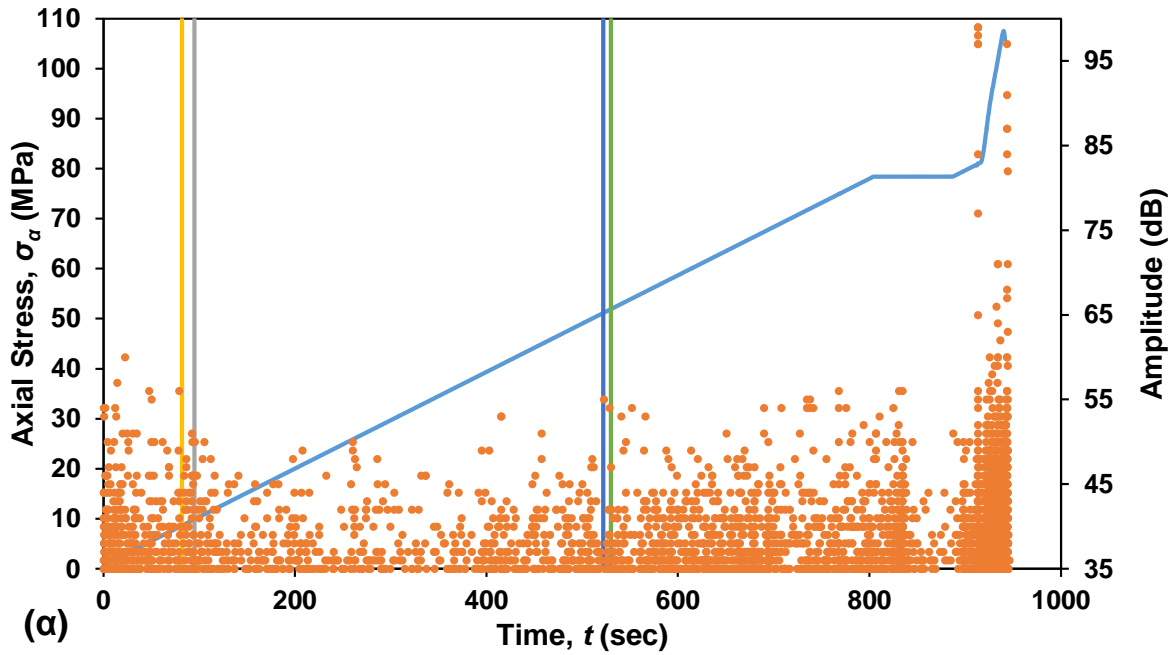
Ενδεικτικά γραφήματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των αποφλοιώσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.4 δίνονται στο Σχήμα 7-52.



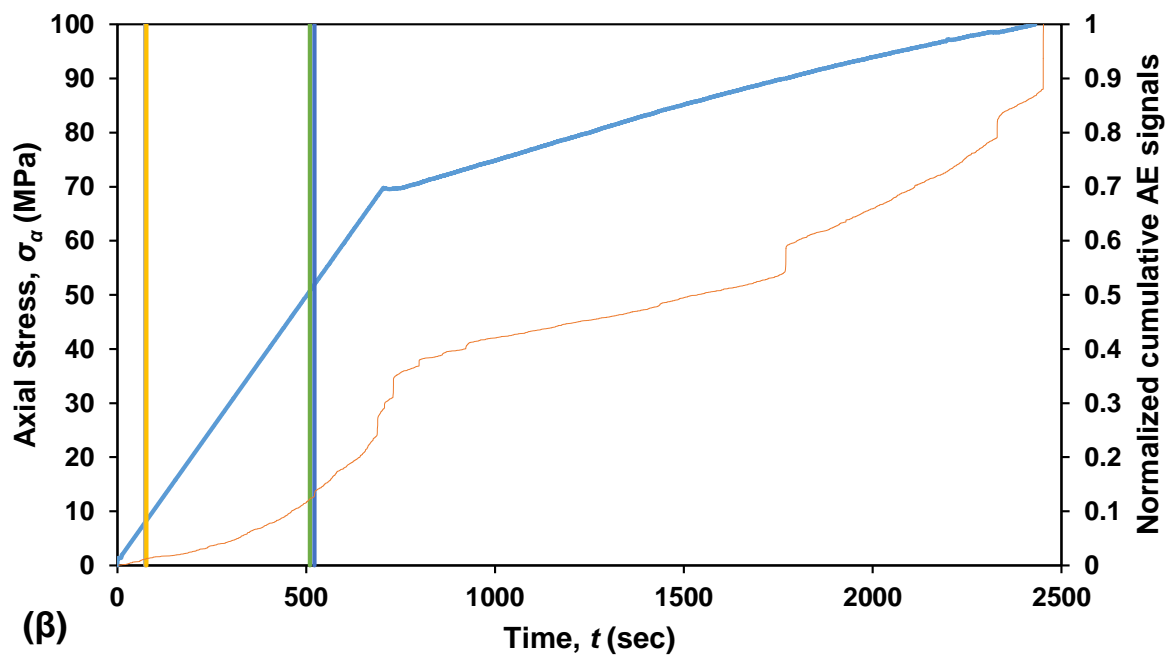
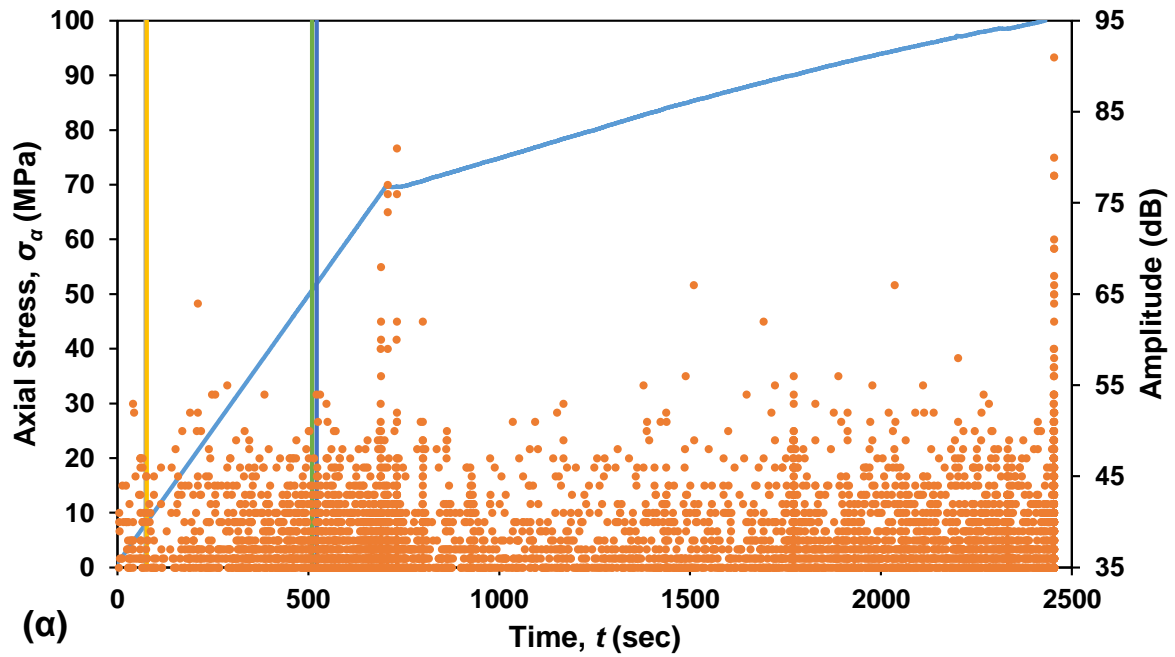
Σχήμα 7-52. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται διαγράμματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a και του πλάτους (Amplitude (dB)) ή του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ (Vector (Hit)) ως προς τον χρόνο για κάθε μία εξεταζόμενη οπή των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Στα ίδια διαγράμματα δίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC, όπου με τις κατακόρυφες ευθείες σημειώνονται οι χρόνοι έναρξης των ΠΡ στο πάνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής καθώς και των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής. Παρατηρείται πλήρης αντιστοιχία των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα ΦΜ, όπως έχουν προσδιοριστεί χρονικά με τη μέθοδο DIC, με τα καταγεγραμμένα σήματα ΑΕ.

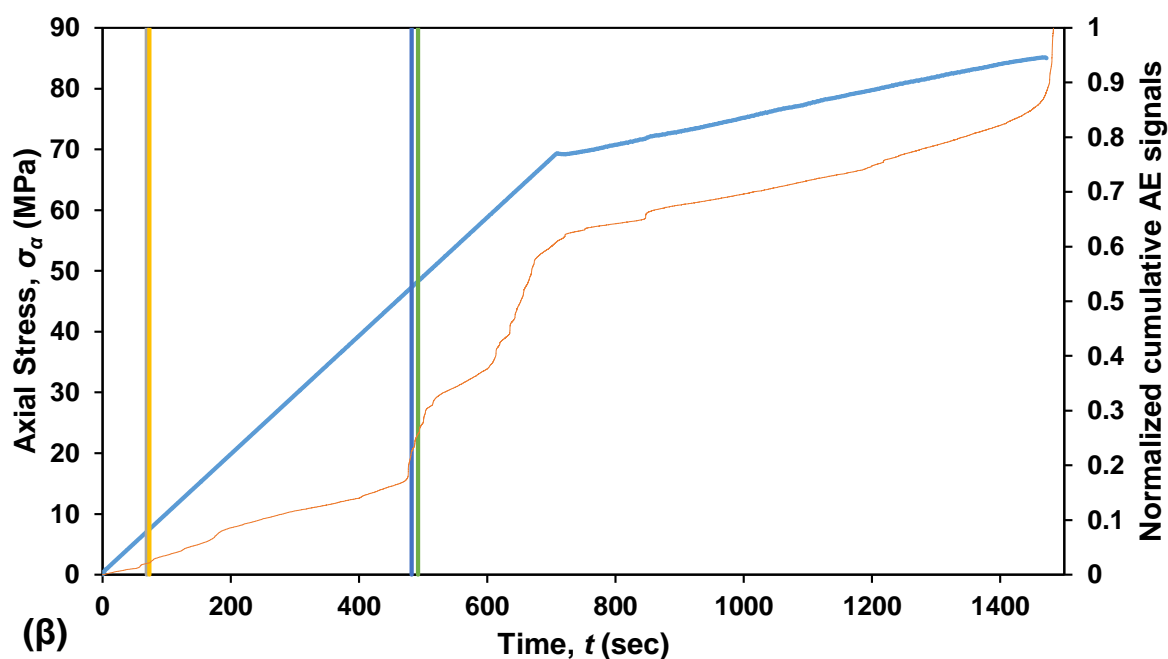
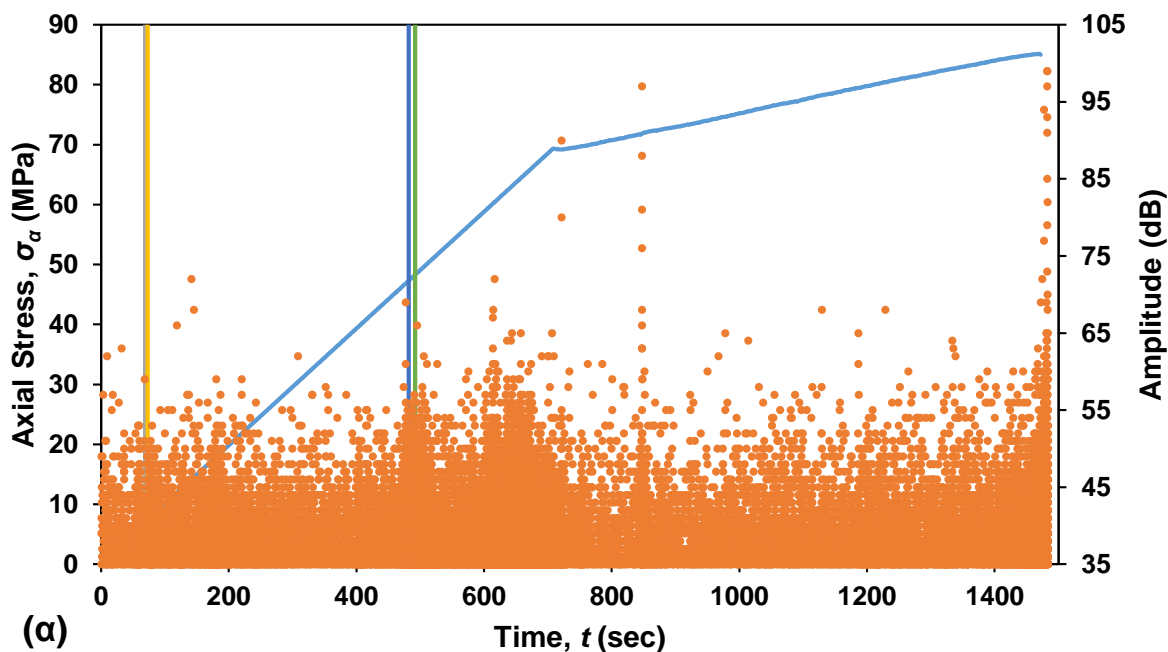
Συγκεκριμένα, κατά την έναρξη των ΠΡ παρατηρούνται στις περισσότερες περιπτώσεις μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ ή/και αύξηση του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ που λαμβάνονται από το σύστημα καταγραφής. Κατά τις αποφλοιώσεις, παρατηρούνται μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ, ενώ εμφανίζονται είτε διακριτά σκαλοπάτια, είτε σημαντική αύξηση στις τιμές της καμπύλης του αθροιστικού πλήθους σημάτων. Επιπλέον, μέχρι εκείνη τη στιγμή καταγράφονται περί το 12% του συνολικού αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ της δοκιμής για τα ΦΜ με οπές διαμέτρου έως και 35 mm, ενώ το ποσοστό ανεβαίνει περί το 25% για τις μεγαλύτερες οπές. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC γενικά επιβεβαιώνονται από τις παρατηρήσεις που προκύπτουν μέσω της ανάλυσης των σημάτων ΑΕ, και αντιστρόφως.



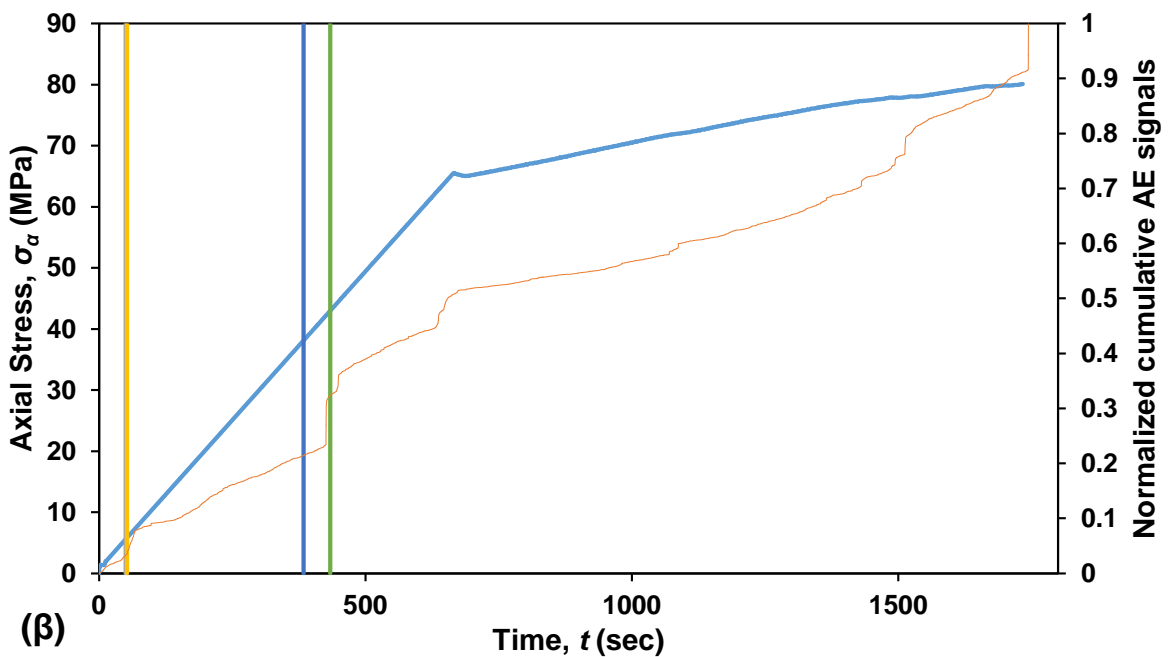
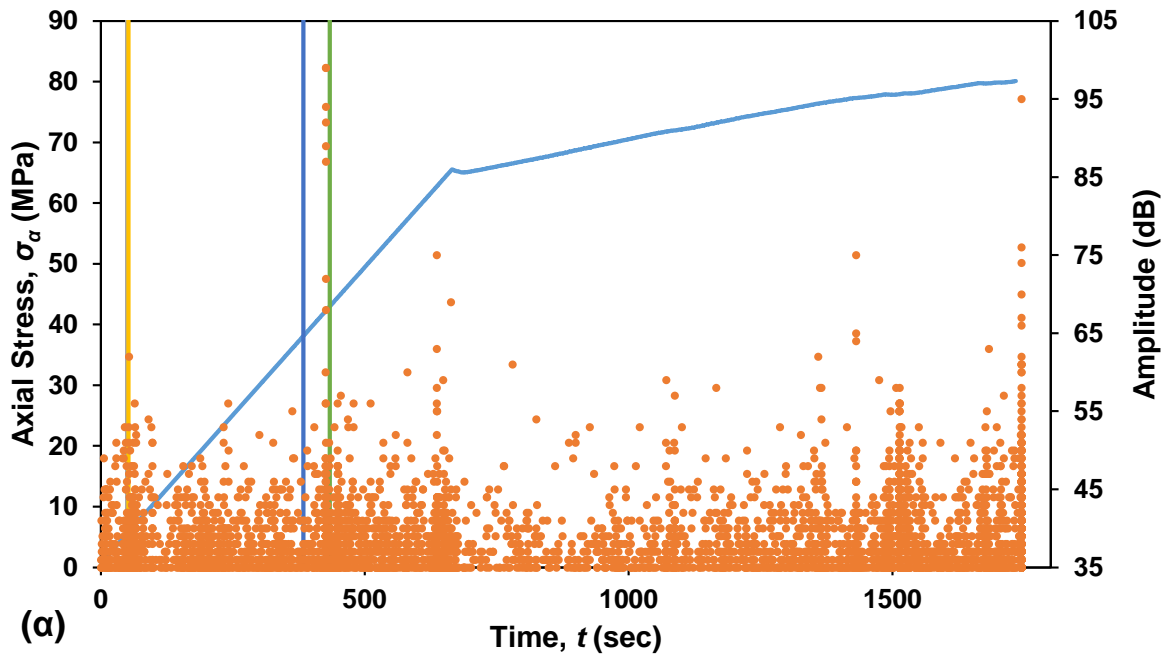
Σχήμα 7-53. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



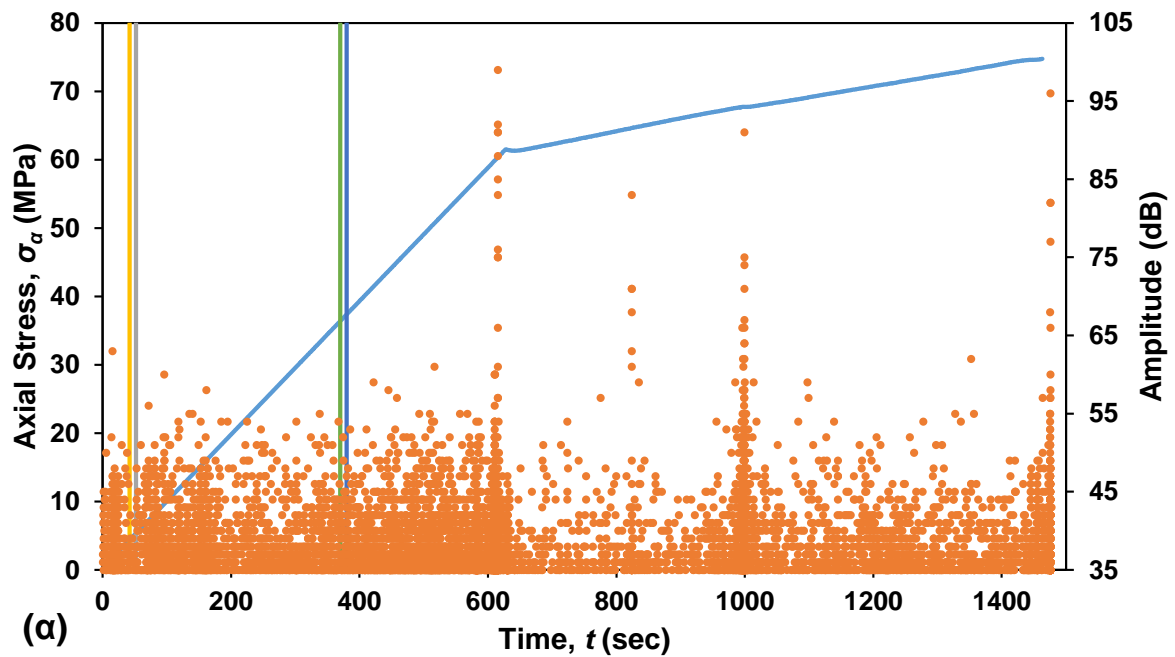
Σχήμα 7-54. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



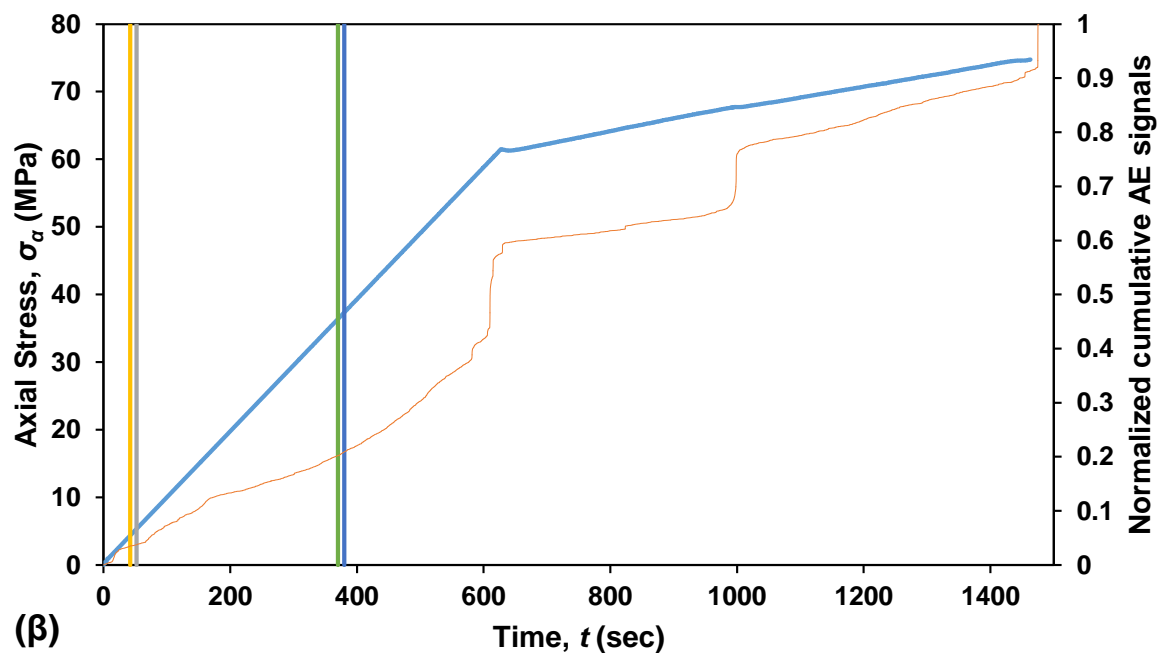
Σχήμα 7-55. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



Σχήμα 7-56. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



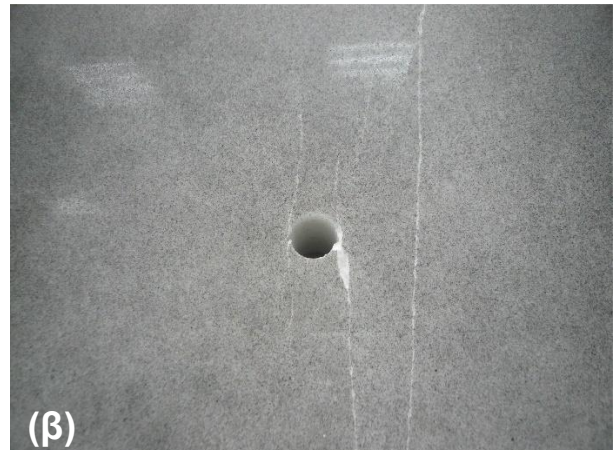
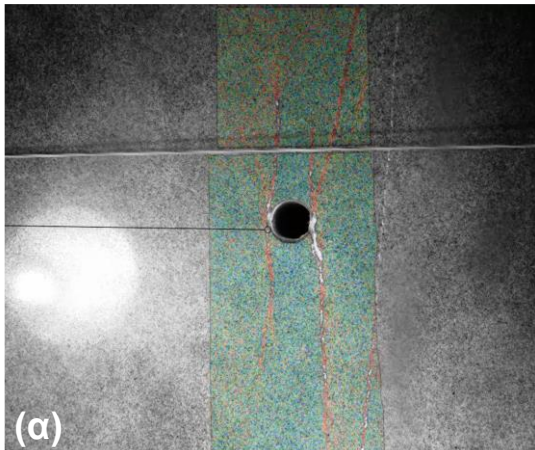
(α)



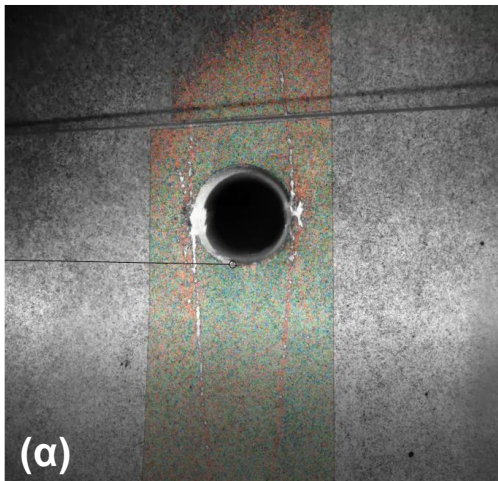
(β)

Σχήμα 7-57. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 61 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.

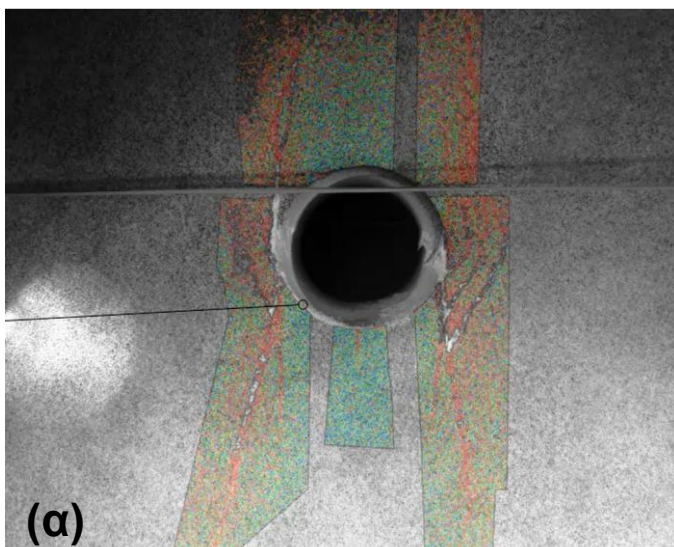
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται φωτογραφίες από ΦΜ με οπή και τα αποτελέσματα της ανάλυσης DIC μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης. Σημειώνεται ότι η ΠΡ στο δάπεδο της οπής στο Σχήμα 7-61 έχει σχεδόν κλείσει, με τη ρωγμή που φαίνεται στην αντίστοιχη θέση να αποτελεί δευτερογενές φαινόμενο.



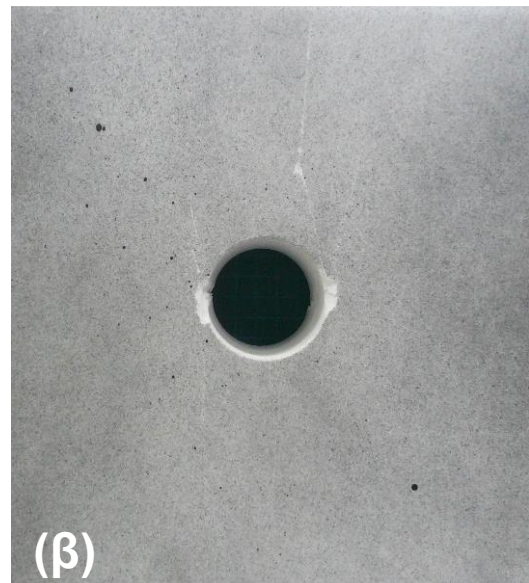
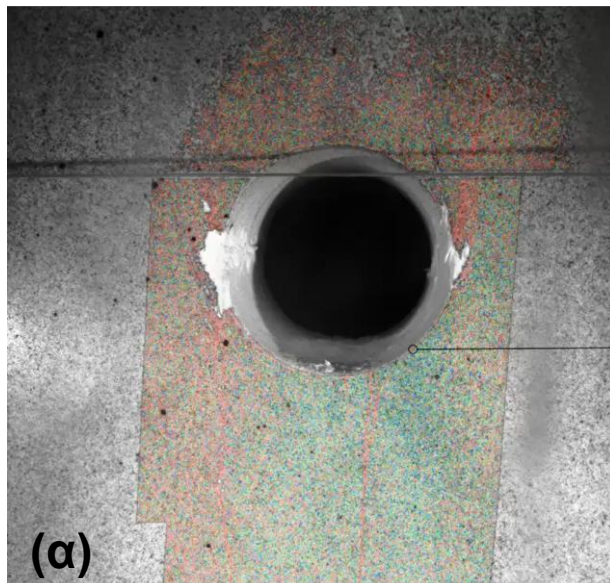
Σχήμα 7-58. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.



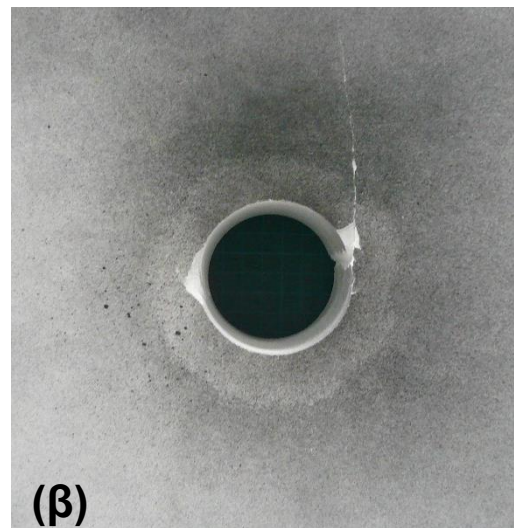
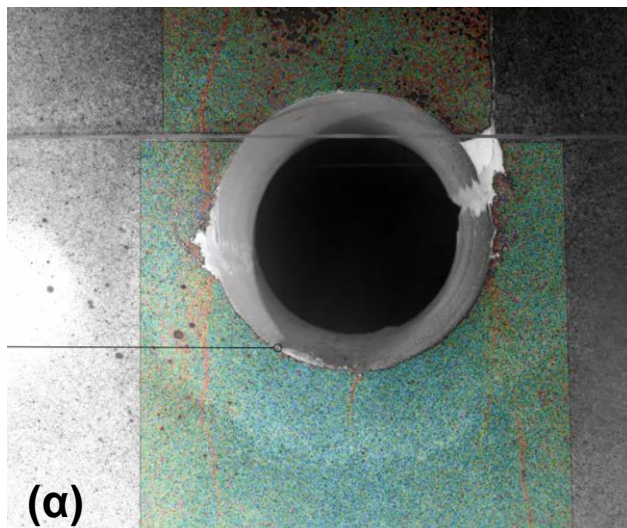
Σχήμα 7-59. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.



Σχήμα 7-60. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.



Σχήμα 7-61. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.



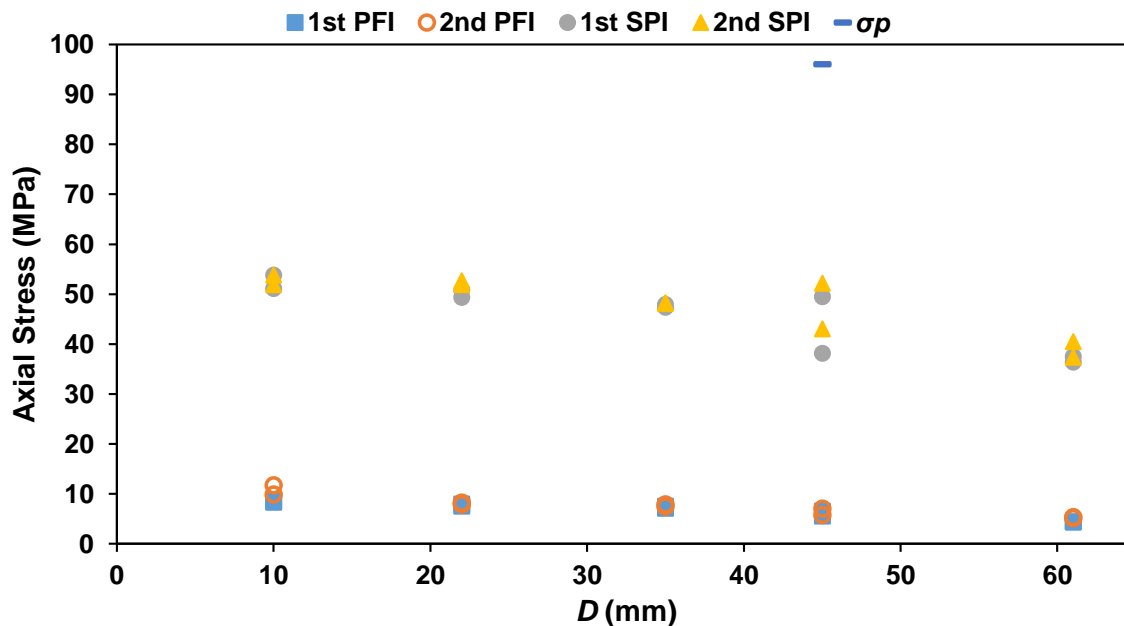
Σχήμα 7-62. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 61 mm της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.

Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή. Επιπλέον, δίνεται γράφημα της μεταβολής της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης κατά την οποία λαμβάνει χώρα το εκάστοτε φαινόμενο συναρτήσει της διαμέτρου της οπής των ΦΜ. Με σκούρο μπλε χρώμα (σ_p) αντιπροσωπεύεται η μέγιστη αντοχή των ΦΜ, με ανοιχτό μπλε (1st PFI) και πορτοκαλί (2nd PFI) δίνεται η έναρξη των πρώτων και δεύτερων ΠΡ αντίστοιχα, ενώ με γκρι (1st SPI) και κίτρινο (2nd SPI) οι πρώτες και οι δεύτερες αποφλοιώσεις για τις δύο παρείς του ανοίγματος αντίστοιχα.

Εξετάζοντας το γράφημα στο Σχήμα 7-63, παρατηρείται πως η έναρξη των πρώτων ΠΡ, καθώς και η έναρξη των αποφλοιώσεων στο εσωτερικό των ανοιγμάτων, απαντώνται κατά τη διάρκεια εφαρμογής χαμηλότερων αξονικών τάσεων στα ΦΜ συναρτήσει της αύξησης της διαμέτρου της οπής. Η παραπάνω παρατήρηση έρχεται να επιβεβαιώσει παλαιότερες παρατηρήσεις άλλων ερευνητών (π.χ. Lajtai 1971, Dzik & Lajtai 1996), και επαληθεύει τις αριθμητικές παρατηρήσεις των των Lotidis (2014) και Lotidis et al. (2015). Τα παραπάνω συμπεράσματα ομοιάζουν με τα αντίστοιχα των μαρμάρων «Βέροια» και «Νεφέλη».

Πίνακας 7-5. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η έναρξη των πρώτων (1st) και δεύτερων (2nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι», καθώς και η ολοκλήρωση των δοκιμών (σ_{pt}).

<i>D</i> (mm)	1 st PFI (MPa)	2 nd PFI (MPa)	1 st SPI (MPa)	2 nd SPI (MPa)	σ_{pt} (MPa)
10	8.6	9.9	51.1	51.9	107.5
10	8.3	11.7	53.8	53.8	90.0
22	7.5	7.9	49.3	52.7	92.0
22	8.0	8.3	50.7	51.9	100.0
35	7.5	7.9	47.9	48.1	93.1
35	7.1	7.5	47.3	48.3	85.1
45	6.5	7.0	49.5	52.2	($\sigma_p =$) 96.0
45	5.6	5.8	38.1	43.0	80.1
61	4.4	5.1	37.5	40.5	77.8
61	4.4	5.3	36.4	37.8	74.8



Σχήμα 7-63. Συγκριτικό γράφημα εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων - διάμετρος οπής (mm) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» (σκούρο μπλε (σ_p): μέγιστη αντοχή των ΦΜ, ανοιχτό μπλε (1st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2nd PFI): έναρξη δευτέρων ΠΡ, γκρι (1st SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στην πρώτη παρειά, κίτρινο (2nd SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στη δεύτερη παρειά).

7.9 Μάρμαρο «Βώλακας ΙΙ»

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου υλικού εξετάζονται τα εξής ΦΜ:

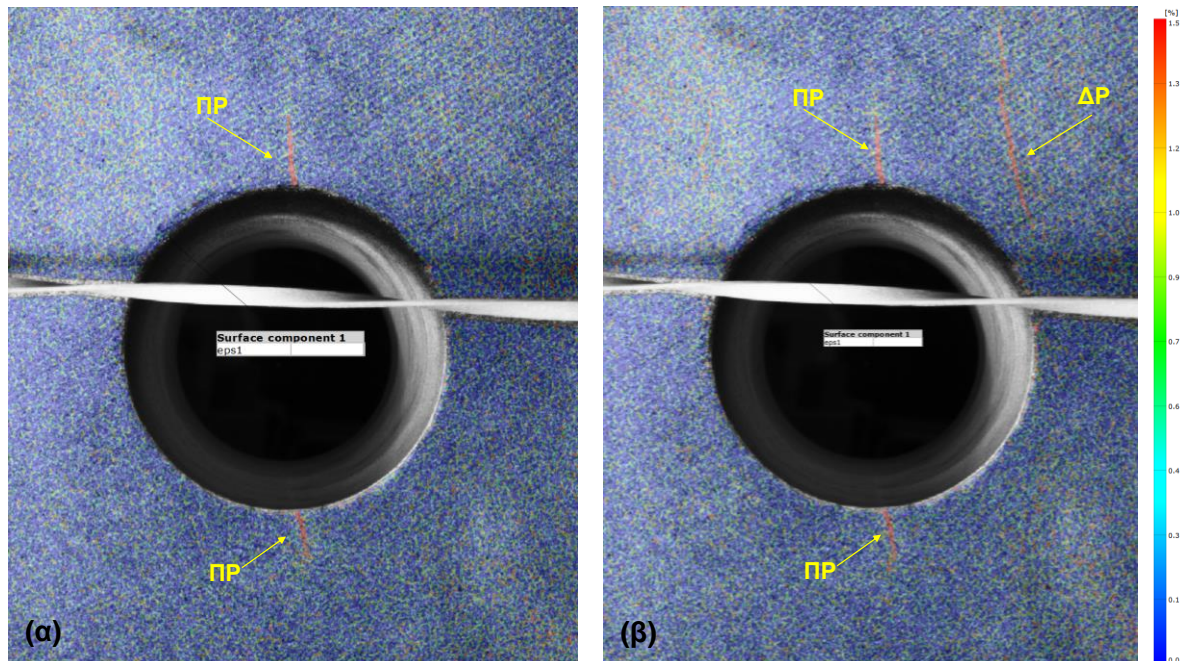
- Ένα (1) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 10 mm.
- Τρία (3) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 22 mm.
- Τέσσερα (4) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 35 mm.
- Τρία (3) ΦΜ με οπή διαμέτρου (D) 45 mm.

Όλες οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης των ΦΜ μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ» με μονές οπές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (1570 N/sec) μέχρι την κατάρρευση των δοκιμών.

Τα φυσικά μοντέλα παρουσιάζουν παρόμοιους μηχανισμούς αστοχίας, η εμφάνιση των οποίων είναι ευκρινέστερη στα μοντέλα με μεγαλύτερες διαμέτρους οπής.

Κατά την πορεία της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ, αρχικά σχηματίζονται οι εφελκυστικές ΠΡ στο άνω και κάτω μέρος της οπής, οι οποίες ξεκινάνε από την περιφέρεια της οπής και επεκτείνονται σταδιακά προς τις βάσεις των δοκιμών. Οι ΠΡ είναι αποτέλεσμα των εφελκυστικών ΠΥΣΤ στο άνω και κάτω μέρος των οπών.

Για σημαντικό χρονικό διάστημα, οι εν λόγω ρωγμές είναι το μόνο παρατηρούμενο φαινόμενο μακροσκοπικά, τόσο οπτικά όσο και με την ανάλυση DIC (Σχήμα 7-64a).



Σχήμα 7-64. (α) ΠΡ και (β) ΔΡ, όπως παρατηρούνται μέσω της ανάλυσης DIC σε φυσικό μοντέλο μαρμάρου «Βώλακας II» ($D = 35$ mm).

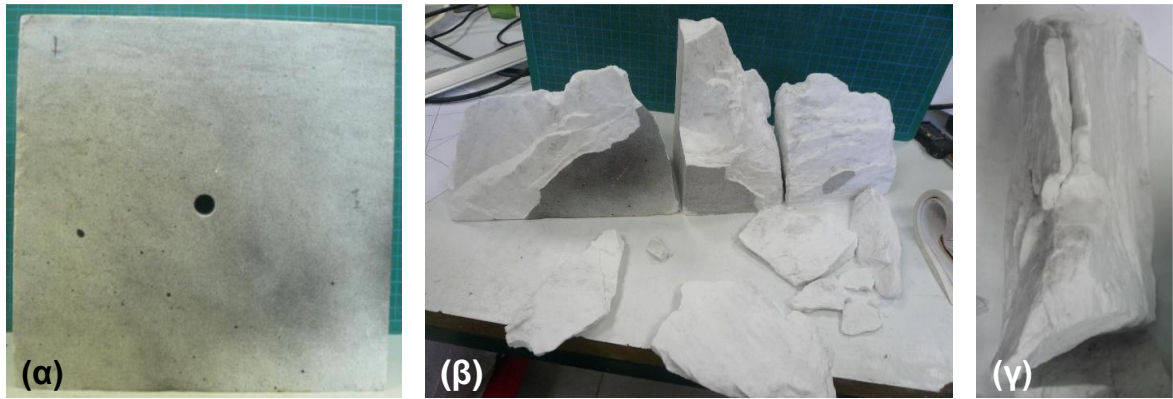
Μετά την έναρξη των ΠΡ, παρατηρείται ο σχηματισμός των ΔΡ στις εγγύς περιοχές δεξιά και αριστερά των οπών, οι οποίες επεκτείνονται παρακατακόρυφα προς τις βάσεις των πρισμάτων, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη μετέπειτα κατάρρευση των ΦΜ. Λόγω της απουσίας λειασμένων επιφανειών παρακολούθησης των ΦΜ, τόσο οι ΠΡ όσο και οι ΔΡ είναι δυσδιάκριτες ακόμα και σε προχωρημένα στάδια με γυμνό οφθαλμό. Ως εκ τούτου η εμφάνιση και η εξέλιξή τους παρακολουθείται αποκλειστικά μέσω της ανάλυσης DIC (Σχήμα 7-64b). Συνολικά, έως τέσσερις (4) ΔΡ δύνανται να εμφανιστούν, αλλά μόνο δύο (2), αντιδιαμετρικές μεταξύ τους, καθορίζουν τελικώς τη συμπεριφορά του ΦΜ. Κατά την εξέλιξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, οι ΔΡ ενώνονται με τις θλιπτικές ΠΥΣΤ στα δεξιά και αριστερά των οπών, περιοχές όπου εμφανίζονται οι εσωτερικές αποφλοιώσεις κατά την άσκηση μεγαλύτερων αξονικών τάσεων στα πρίσματα. Παράλληλα, επεκτείνονται και φτάνουν ως τις βάσεις των προισμάτων, ενώ δημιουργούνται μικρότερες ΜΕΡ που προκύπτουν από μεταγενέστερες διακλαδώσεις των αρχικών ΔΡ.

Με την άφιξή τους στις θλιπτικές ΠΥΣΤ αλληλοεπιδρούν με το διαταραγμένο υλικό μέχρι που προβάλλονται στις παρειές των οπών, θέσεις όπου σημειώνονται αποφλοιώσεις (spalling). Επιπλέον, με την έναρξη των αποφλοιώσεων στο

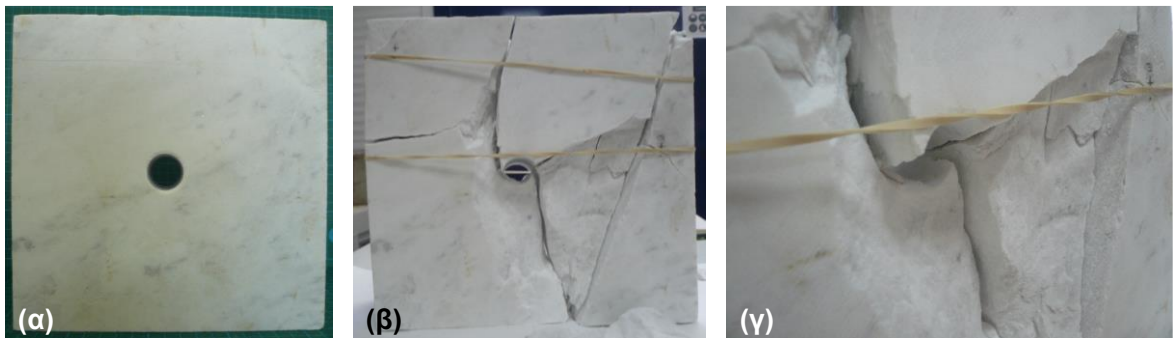
εσωτερικό των οπών, παρατηρείται κλείσιμο των εφελκυστικών ΠΡ που οφείλεται στην εκτεταμένη ρωγμάτωση του μοντέλου κατά την οποία οι ΔΡ διευρύνονται περαιτέρω με παράλληλη εντατικοποίηση των αποφλοιώσεων.

Με το πέρας της δοκιμής και την κατάρρευση των δοκιμών η οποία συνοδεύεται από εκκωφαντικό κρότο, γίνονται εμφανείς οι ΜΕΡ στο εσωτερικό των ΦΜ, οι οποίες λόγω ολίσθησης είναι κατά κύριο λόγο διατμητικές και μερικές μεικτού τύπου (mixed-mode). Επιπλέον, η κατάρρευση των ΦΜ συνοδεύεται από έντονη παρουσία πούδρας που προέρχεται από τις διατμητικές ΜΕΡ και τις αποφλοιώσεις. Παραμένει άγνωστο εάν η φύση της έναρξης του φαινομένου των αποφλοιώσεων είναι καθαρά εφελκυστικό ή διατμητικό φαινόμενο, ωστόσο η κατάσταση των θλιπτικών ΠΥΣΤ έπειτα από τις δοκιμές θλίψης εμφανίζουν ξεκάθαρα διατμητική αστοχία. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως με την κατάρρευση του ΦΜ παρατηρούνται, όπως και στα προηγούμενα υλικά (εμφανέστερα στα ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια»), εφελκυστικές ΠΥΣΤ στο άνω και κάτω μέρος της οπής και διατμητικές ΠΥΣΤ στα δεξιά και αριστερά αυτής. Σημειώνεται ότι δημιουργούνται διαγώνιες ΜΕΡ στο επίπεδο ΧΥ των ΦΜ, παράλληλες στις ταινιώσεις των πρισμάτων, εφόσον υπάρχουν. Είναι σύνηθες φαινόμενο μετά την κατάρρευση των μοντέλων, να αποκαλύπτονται αρκετές διατμητικές ΜΕΡ στα ΦΜ κατά μήκος των ταινιώσεων (π.χ. Σχήμα 7-65β, γ). Επιπροσθέτως, στην πορεία της δοκιμής σχηματίζονται αρκετές διατμητικές και μεικτού τύπου (mixed-mode) φυλλοειδείς αποκολλήσεις πετρώματος, κυρίως μεγάλου μεγέθους, ενώ έντονη είναι η παρουσία βουτουμενιούχων αερίων που απελευθερώνονται από τους πόρους του υλικού σε συνθήκες ασκούμενων αξονικών τάσεων χαμηλότερων των 40 ΜΡα. Γενικότερα, πολλές από τις μεγάλες φυλλοειδείς αποκολλήσεις πετρώματος των ΦΜ, όσες είναι μεικτού τύπου αλλά κυρίως εφελκυστικές, αλληλοεπιδρούν με τις ταινιώσεις του υλικού.

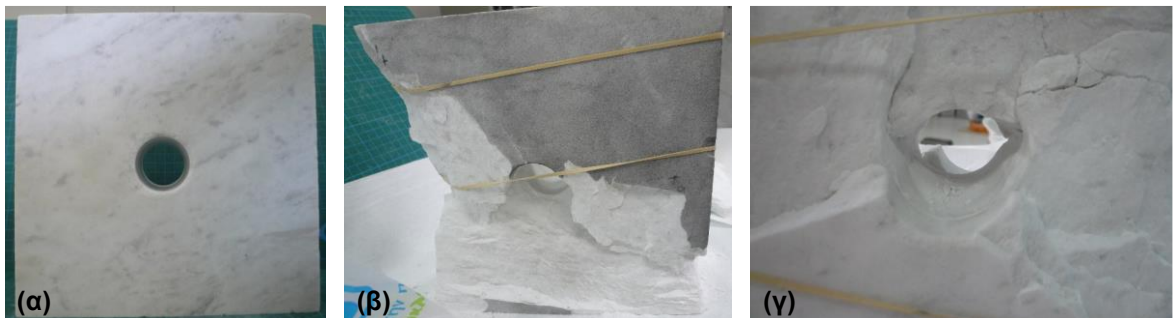
Εικόνες από φυσικά μοντέλα μετά το πέρας των δοκιμών δίνονται στα παρακάτω σχήματα. Σημειώνεται ότι οι φωτογραφίες προέρχονται από φυσικά μοντέλα που έχουν καταρρεύσει.



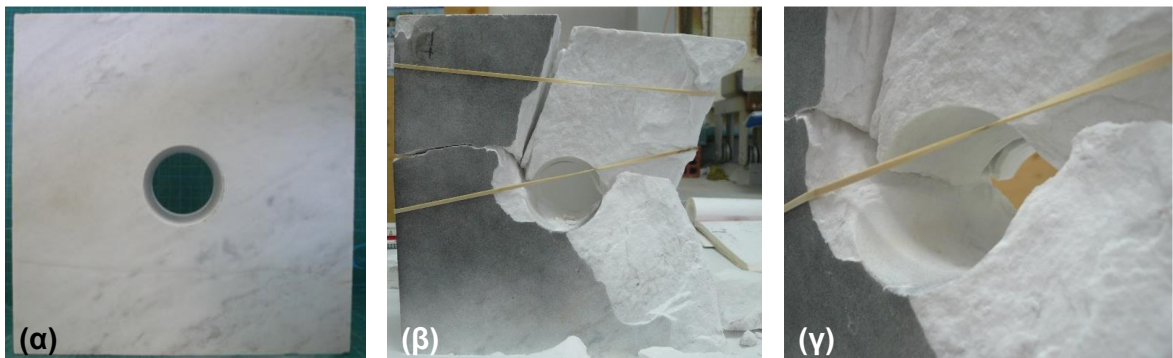
Σχήμα 7-65. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 10 mm ποικιλίας «Βώλακας II» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 7-66. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Βώλακας II» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

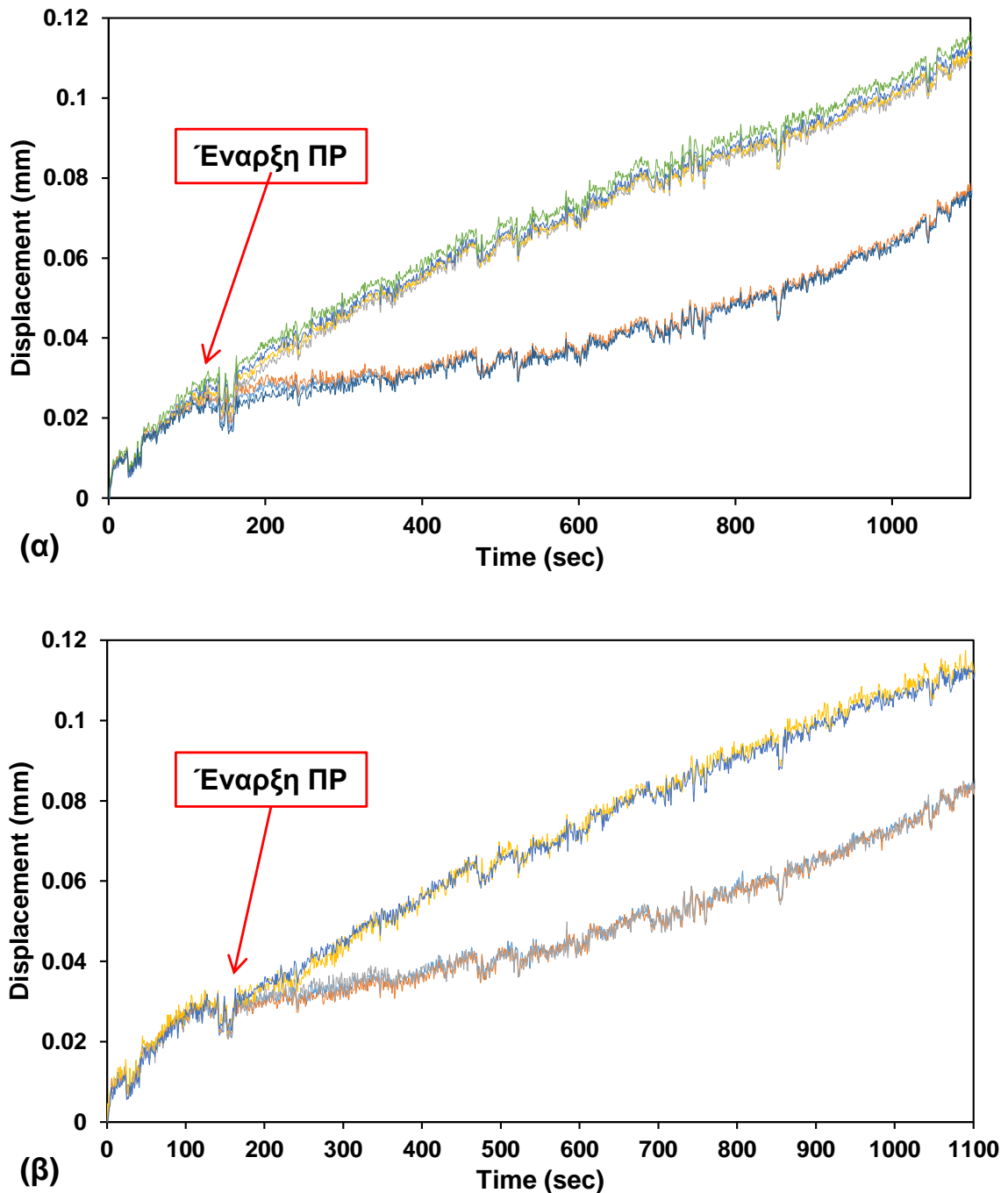


Σχήμα 7-67. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 35 mm ποικιλίας «Βώλακας II» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



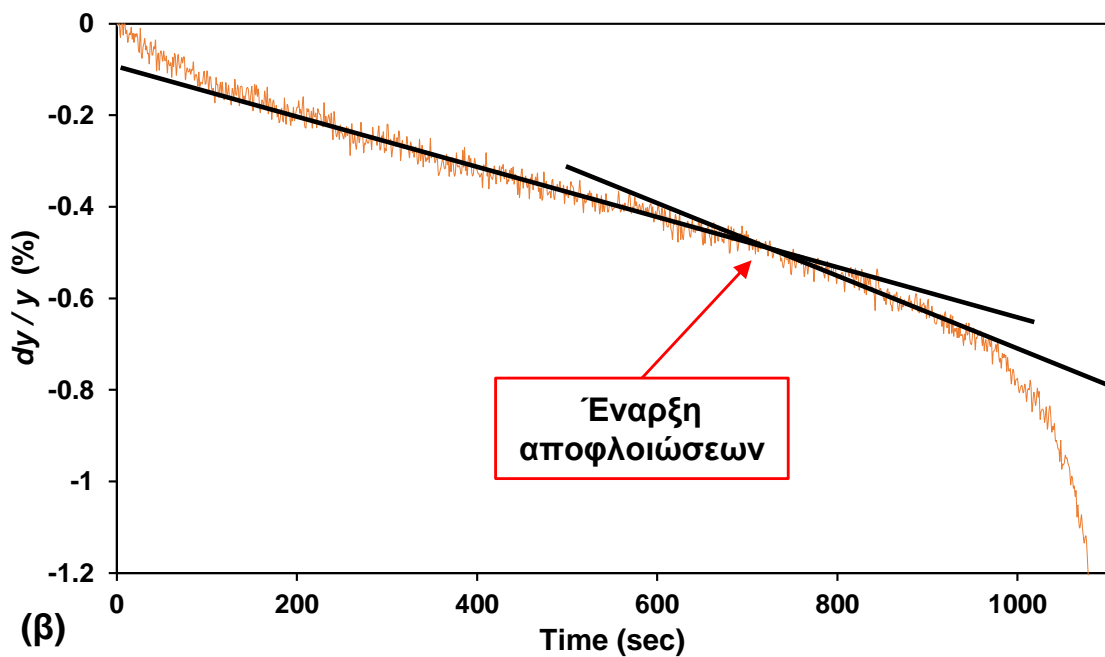
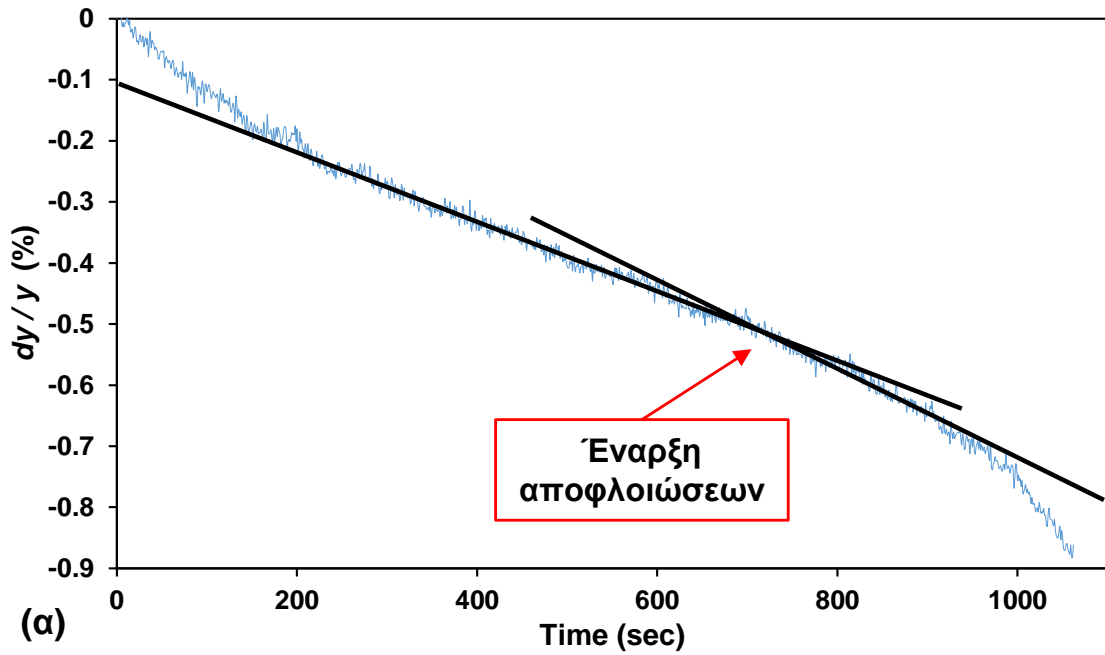
Σχήμα 7-68. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 45 mm ποικιλίας «Βώλακας II» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Ενδεικτικά γραφήματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.3 δίνονται στο Σχήμα 7-69.



Σχήμα 7-69. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βύλακας II» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.

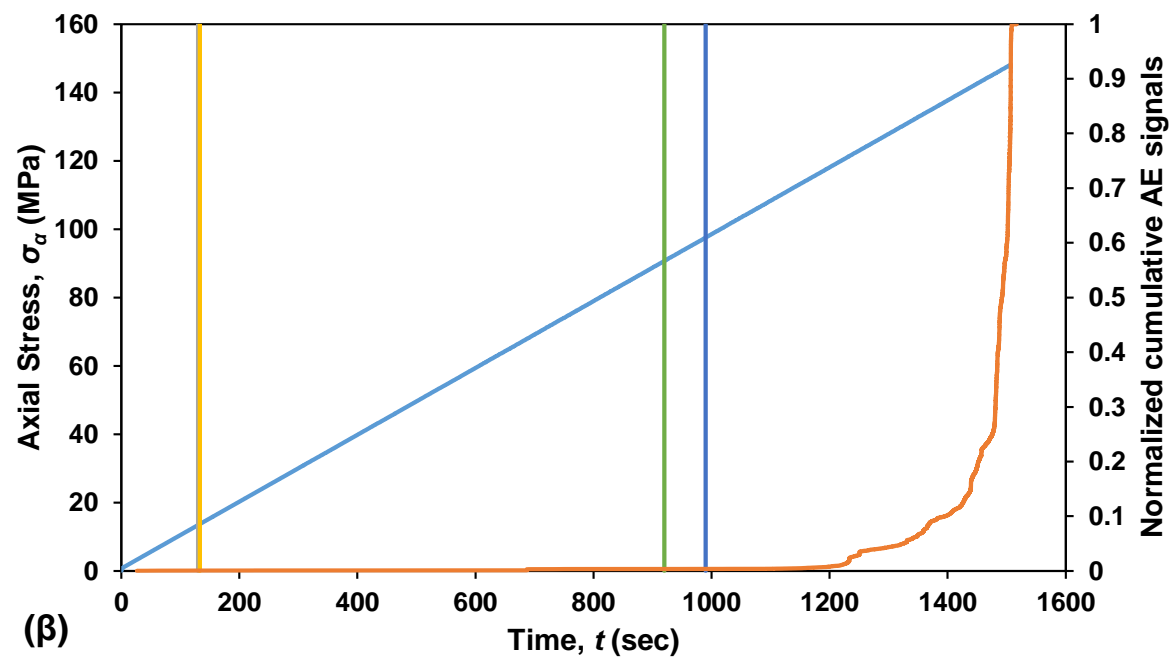
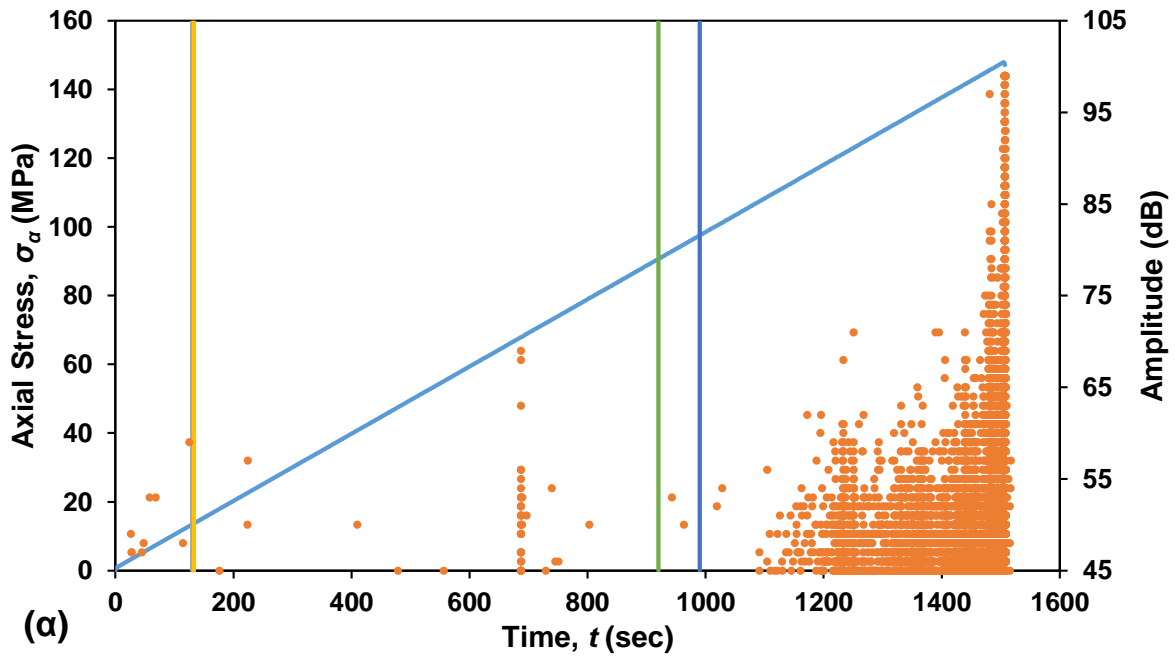
Ενδεικτικά γραφήματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των αποφλοιώσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.4 δίνονται στο Σχήμα 7-70.



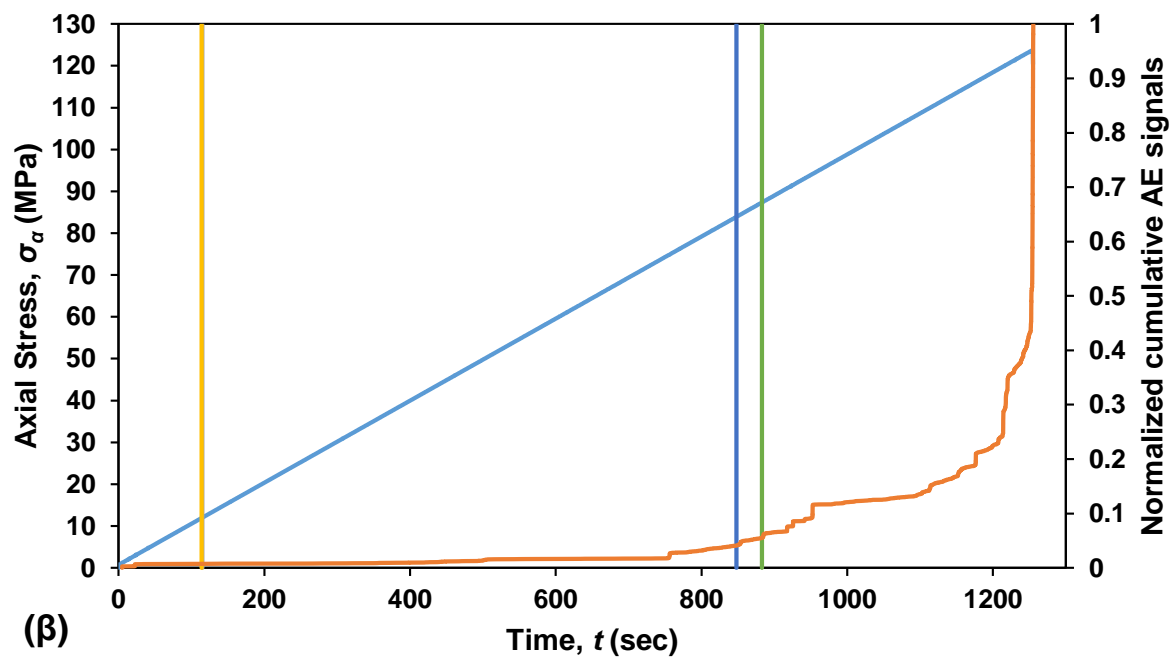
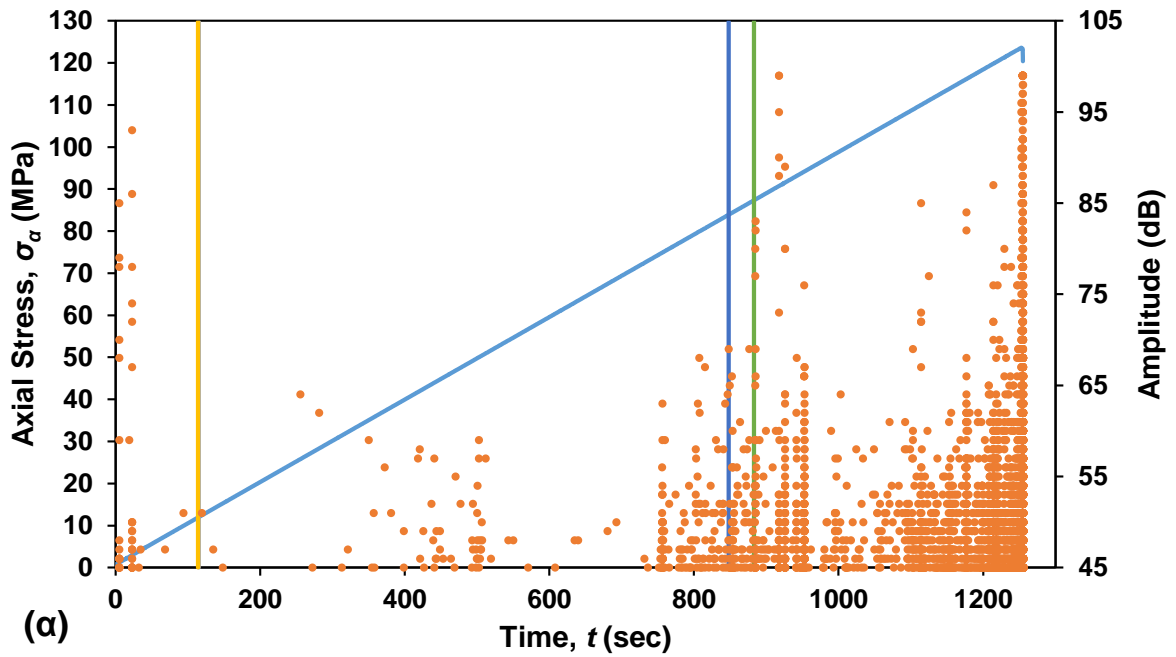
Σχήμα 7-70. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας II» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται διαγράμματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a και του πλάτους (Amplitude (dB)) ή του αθροιστικού πλήθους σημάτων AE (Vector (Hit)) ως προς τον χρόνο για κάθε μία εξεταζόμενη οπή των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II». Στα ίδια διαγράμματα δίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC, όπου με τις κατακόρυφες ευθείες σημειώνονται οι χρόνοι έναρξης των ΠΡ στο πάνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής καθώς και των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής. Συγκριτικά με τα υπόλοιπα εξεταζόμενα υλικά της παρούσας διατριβής, παρατηρείται μικρότερη αντιστοιχία των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα ΦΜ, όπως έχουν προσδιοριστεί χρονικά με τη μέθοδο DIC, με τα καταγεγραμμένα σήματα AE.

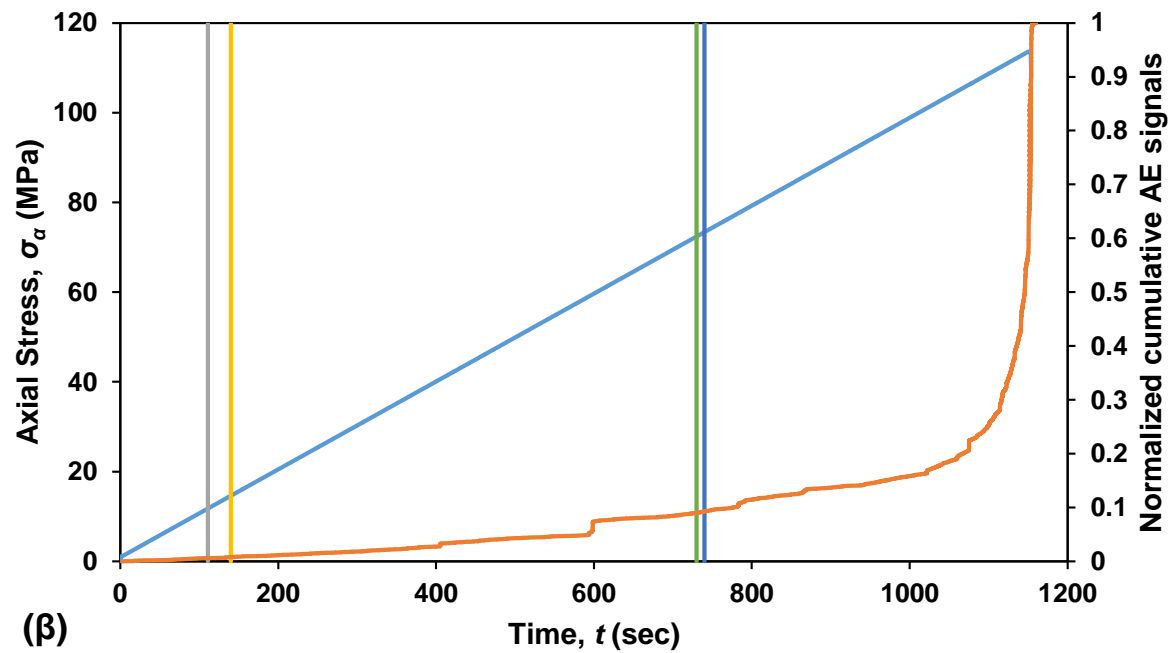
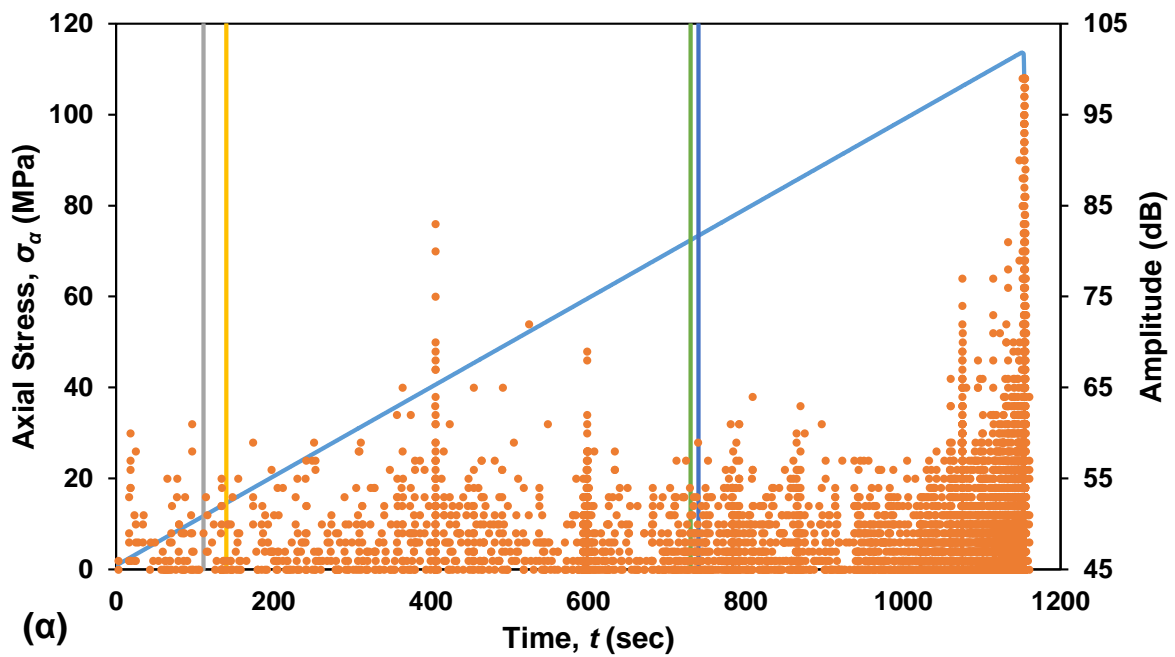
Παραδείγματος χάρη, κατά την έναρξη των ΠΡ δεν παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγαλύτερου πλάτους σήματα AE, αλλά ούτε και σημαντική αύξηση του αθροιστικού πλήθους σημάτων AE. Επιπλέον, η καταγραφή των σημάτων AE κατά την έναρξη των αποφλοιώσεων, είτε παραπέμπει στην επικρατούσα κατάσταση που συναντάται κατά την έναρξη των ΠΡ, είτε διαφοροποιείται και παραπέμπει στην κατάσταση που συναντάται κατά την έναρξη των αποφλοιώσεων των ΦΜ των υπολοίπων εξεταζόμενων υλικών. Στη δεύτερη περίπτωση, παρατηρούνται μεν μεγαλύτερου πλάτους σήματα AE, ενώ εμφανίζονται είτε διακριτά σκαλοπάτια, είτε σημαντική αύξηση στις τιμές της καμπύλης του αθροιστικού πλήθους σημάτων. Επιπλέον, μέχρι εκείνη τη στιγμή καταγράφονται περί το 7-13% του συνολικού αθροιστικού πλήθους σημάτων AE της δοκιμής. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC για την έναρξη των αποφλοιώσεων γενικά επιβεβαιώνονται μερικώς από τις παρατηρήσεις που προκύπτουν μέσω της ανάλυσης των σημάτων AE, και αντιστρόφως.



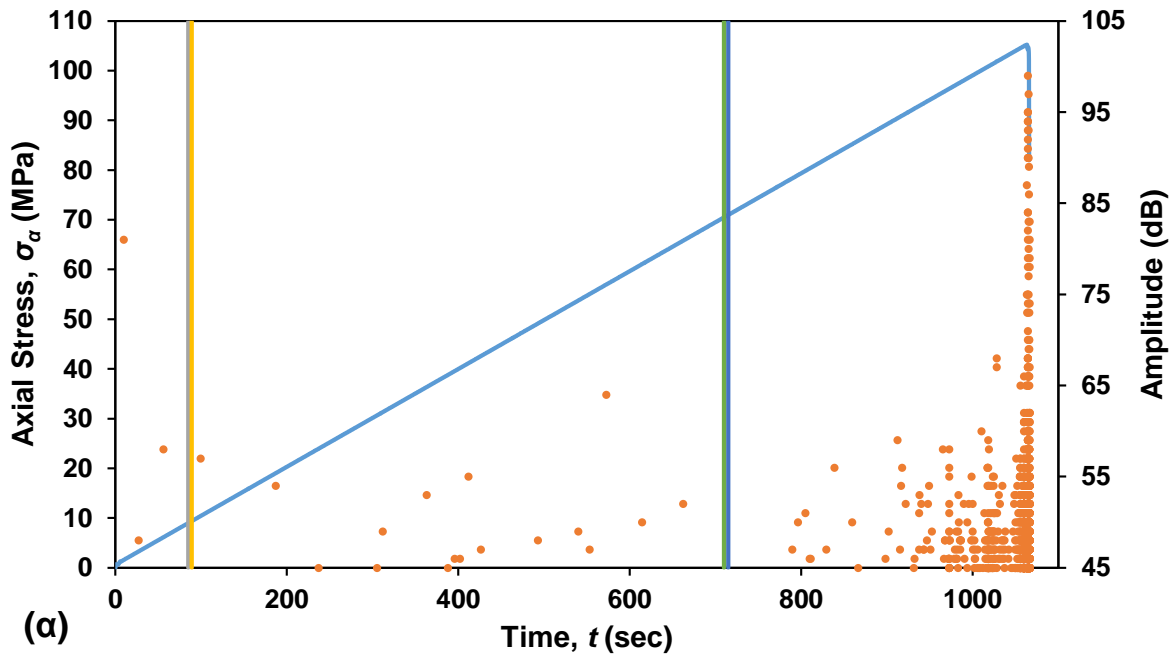
Σχήμα 7-71. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



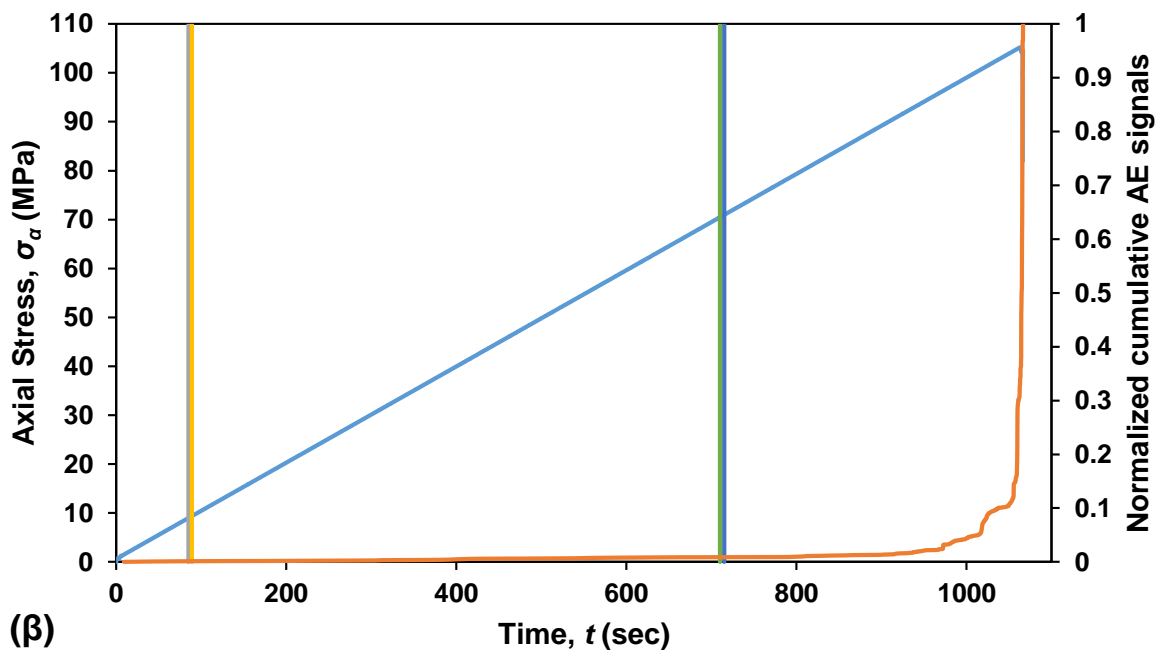
Σχήμα 7-72. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



Σχήμα 7-73. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.



(α)



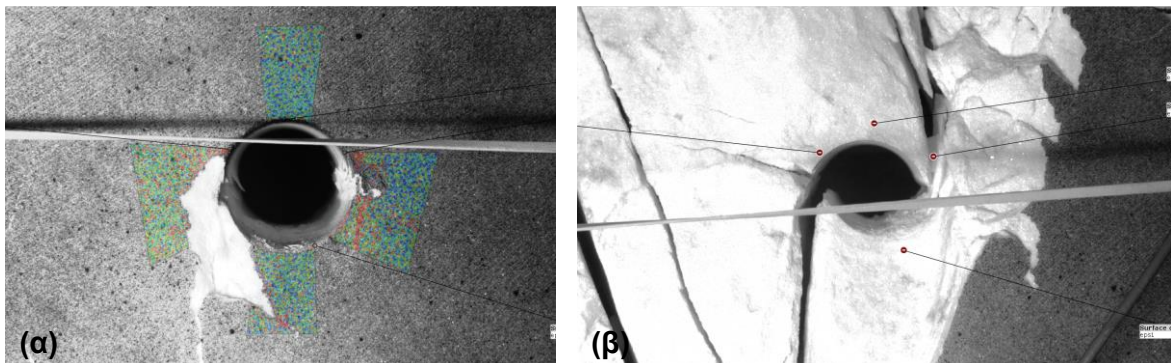
(β)

Σχήμα 7-74. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.

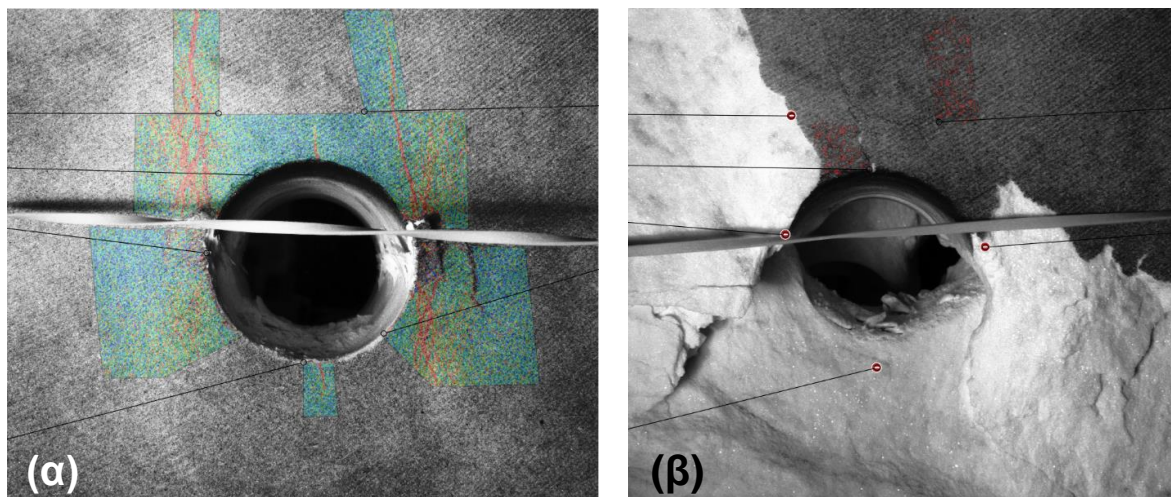
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται ενδεικτικά φωτογραφίες από ΦΜ με οπή μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης, με τα αποτελέσματα της ανάλυσης DIC, αμέσως πριν και μετά την κατάρρευση των ΦΜ.



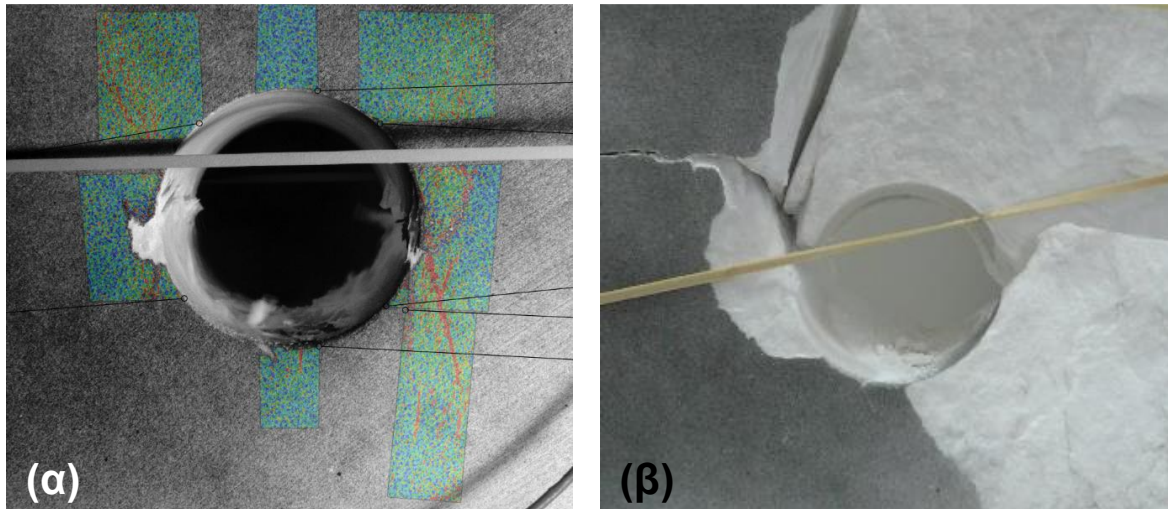
Σχήμα 7-75. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 10 mm της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β & γ) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.



Σχήμα 7-76. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.



Σχήμα 7-77. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 35 mm της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.



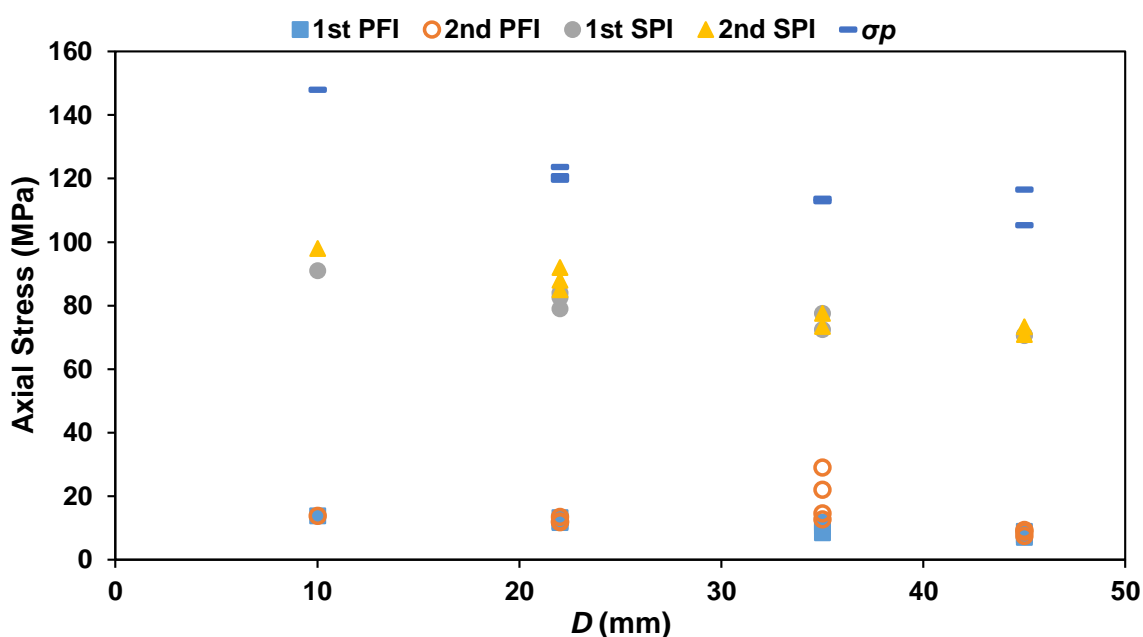
Σχήμα 7-78. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.

Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή. Επιπλέον, δίνεται γράφημα της μεταβολής της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης κατά την οποία λαμβάνει χώρα το εκάστοτε φαινόμενο συναρτήσει της διαμέτρου της οπής των ΦΜ. Με σκούρο μπλε χρώμα (σ_p) αντιπροσωπεύεται η μέγιστη αντοχή των ΦΜ, με ανοιχτό μπλε (1st PFI) και πορτοκαλί (2nd PFI) δίνεται η έναρξη των πρώτων και δεύτερων ΠΡ αντίστοιχα, ενώ με γκρι (1st SPI) και κίτρινο (2nd SPI) οι πρώτες και οι δεύτερες αποφλοιώσεις για τις δύο παρείς του ανοίγματος αντίστοιχα.

Εξετάζοντας το γράφημα στο Σχήμα 7-79, παρατηρείται μείωση της αντοχής των ΦΜ συναρτήσει της αύξησης της διαμέτρου της οπής. Επιπλέον, η έναρξη των πρώτων ΠΡ, καθώς και η έναρξη των αποφλοιώσεων στο εσωτερικό των ανοιγμάτων, απαντώνται κατά τη διάρκεια εφαρμογής χαμηλότερων αξονικών τάσεων στα ΦΜ συναρτήσει της αύξησης της διαμέτρου της οπής. Η παραπάνω παρατήρηση έρχεται να επιβεβαιώσει παλαιότερες παρατηρήσεις άλλων ερευνητών (π.χ. Lajtai 1971, Dzik & Lajtai 1996), και επαληθεύει τις αριθμητικές παρατηρήσεις των (Lotidis 2014, Lotidis et al. 2015). Τα παραπάνω συμπεράσματα έρχονται να θυμίσουν με την ομοιότητά τους τα αντίστοιχα που αφορούν τις ποικιλίες «Βέροια» και «Νεφέλη».

Πίνακας 7-6. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1st) και δευτέρων (2nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II».

D (mm)	1 st PFI (MPa)	2 nd PFI (MPa)	1 st SPI (MPa)	2 nd SPI (MPa)	σ_p (MPa)
10	13.8	13.8	91.0	98.0	147.90
22	13.2	13.5	79.0	85.0	119.58
22	12.0	12.0	84.0	88.0	123.60
22	11.7	11.8	82.5	92.0	120.68
35	11.8	14.6	72.4	73.4	113.63
35	11.5	29.0			
35	8.4	22.0			
35	10.4	12.7	77.5	77.5	112.79
45	7.0	7.5			
45	7.7	8.8	70.8	73.3	116.51
45	8.9	9.3	70.5	70.9	105.23



Σχήμα 7-79. Συγκριτικό γράφημα εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων - διάμετρος οπής (mm) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» (σκούρο μπλε (σ_p): μέγιστη αντοχή των ΦΜ, ανοιχτό μπλε (1st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2nd PFI): έναρξη δευτέρων ΠΡ, γκρι (1st SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στην πρώτη παρειά, κίτρινο (2nd SPI): έναρξη αποφλοιώσεων στη δεύτερη παρειά).

7.10 Ασβεστόλιθος «Απόλλων»

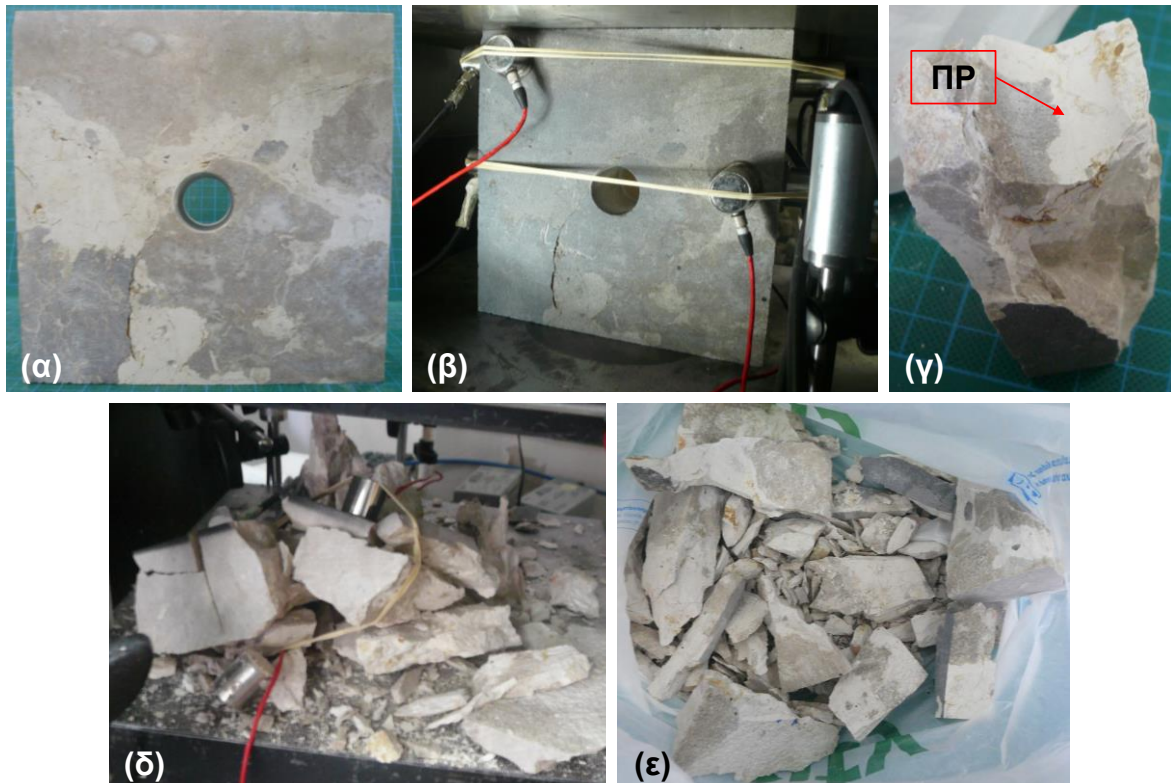
Για τη μελέτη του συγκεκριμένου υλικού εξετάζεται ένα ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm. Η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης στο ΦΜ ασβεστόλιθου «Απόλλων» πραγματοποιήθηκε με έλεγχο φορτίου (750 N/sec) μέχρι την κατάρρευση του δοκιμίου.

Κατά την πορεία της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης στο ΦΜ, αρχικά σχηματίζονται οι εφελκυστικές ΠΡ στο άνω και κάτω μέρος της οπής, οι οποίες ξεκινάνε από την περιφέρεια της οπής και επεκτείνονται σταδιακά προς τις βάσεις των δοκιμίων. Οι ΠΡ είναι αποτέλεσμα των εφελκυστικών ΠΥΣΤ στο άνω και κάτω μέρος των οπών. Για σημαντικό χρονικό διάστημα, οι εν λόγω ρωγμές είναι το μόνο παρατηρούμενο φαινόμενο μακροσκοπικά, τόσο οπτικά όσο και με την ανάλυση DIC. Το μέγιστο μήκος των ΠΡ του συγκεκριμένου υλικού είναι σημαντικά μικρότερο συγκριτικά με το αντίστοιχο μήκος των ΠΡ στα ΦΜ των υπόλοιπων εξεταζόμενων υλικών της παρούσας διατριβής.

Μετά την έναρξη των ΠΡ, παρατηρείται ο σχηματισμός των ΔΡ δεξιά και αριστερά των οπών, οι οποίες επεκτείνονται παρακατακόρυφα προς τις βάσεις του πρίσματος, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη μετέπειτα κατάρρευση του ΦΜ. Κατά την εξέλιξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, οι ΔΡ ενώνονται με τις θλιπτικές ΠΥΣΤ στα δεξιά και αριστερά της οπής, περιοχές όπου εμφανίζονται οι εσωτερικές αποφλοιώσεις κατά την άσκηση μεγαλύτερων αξονικών τάσεων στα πρίσματα. Σημειώνεται ότι τόσο η έναρξη, όσο και η επέκταση του φαινομένου των αποφλοιώσεων στο εσωτερικό της οπής, συνοδεύονται από απότομη απελευθέρωση ελαστικής ενέργειας μέσω της βίαιης αποφλοίωσης των παρειών της οπής με τη μορφή φυλλοειδών αποκολλήσεων πετρώματος.

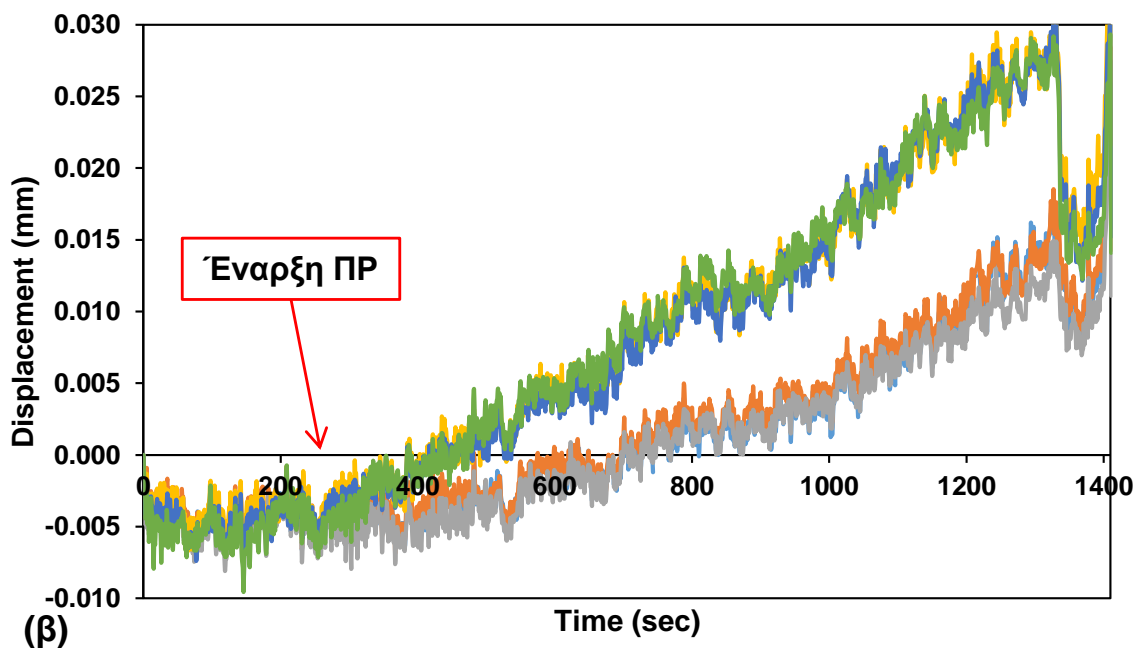
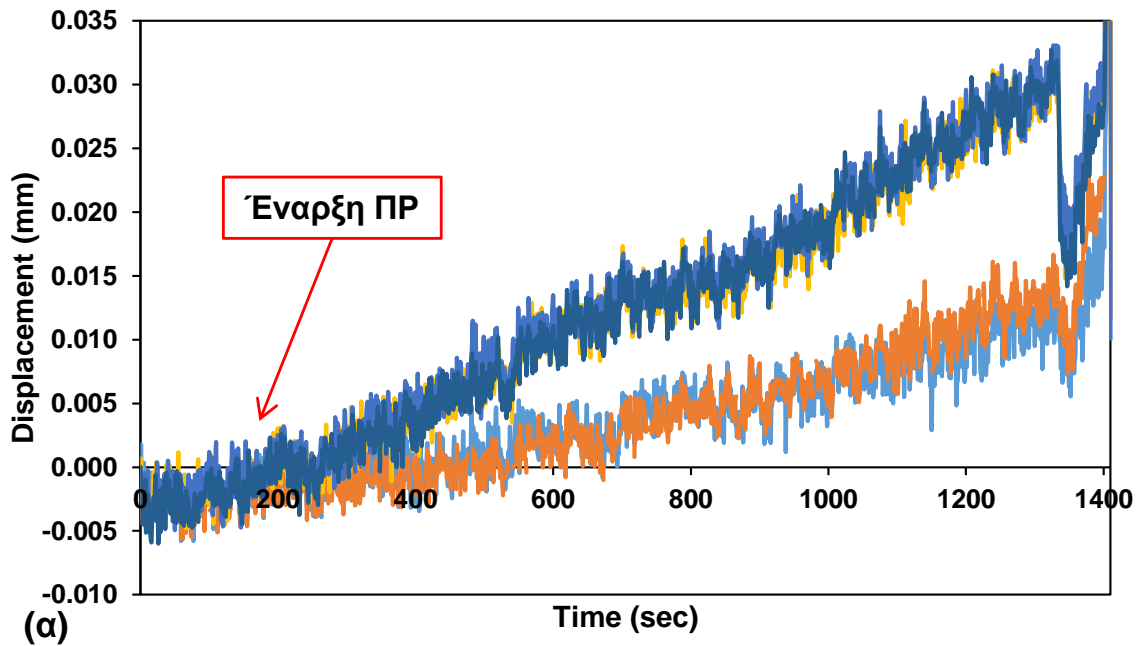
Με το πέρας της δοκιμής και την κατάρρευση του δοκιμίου που συνοδεύεται από εκκωφαντικό κρότο, το ΦΜ γίνεται δύσκολα αναγνωρίσιμο καθώς διαλύεται σε πολλά τεμάχια μικρού και μεσαίου μεγέθους. Οι επιφάνειες των εν λόγω τεμαχίων υποδυκνείουν κατά κύριο λόγο εφελκυστική αστοχία. Επιπλέον, στην πορεία της δοκιμής αποκολλώνται ορισμένα εφελκυστικά φυλλάκια κατά την απότομη απελευθέρωση ελαστικής ενέργειας.

Εικόνες από το ΦΜ πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης δίνονται στο Σχήμα 7-80. Σημειώνεται ότι οι εικόνες του ΦΜ μετά το πέρας της δοκιμής προέρχονται από μοντέλο που έχει καταρρεύσει.



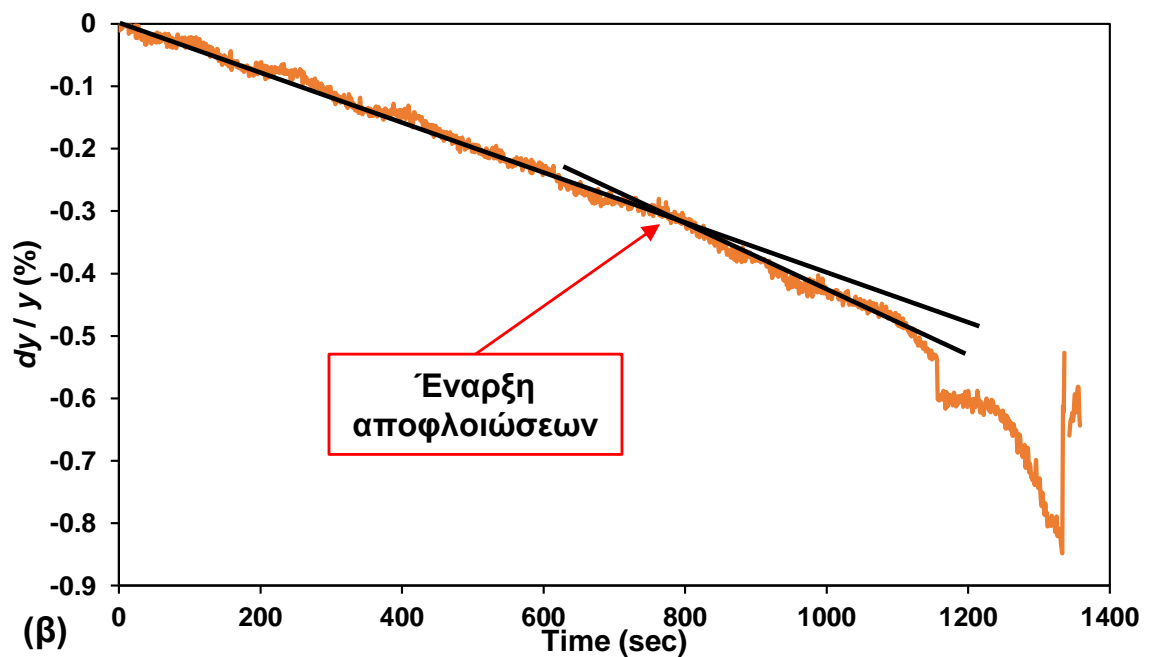
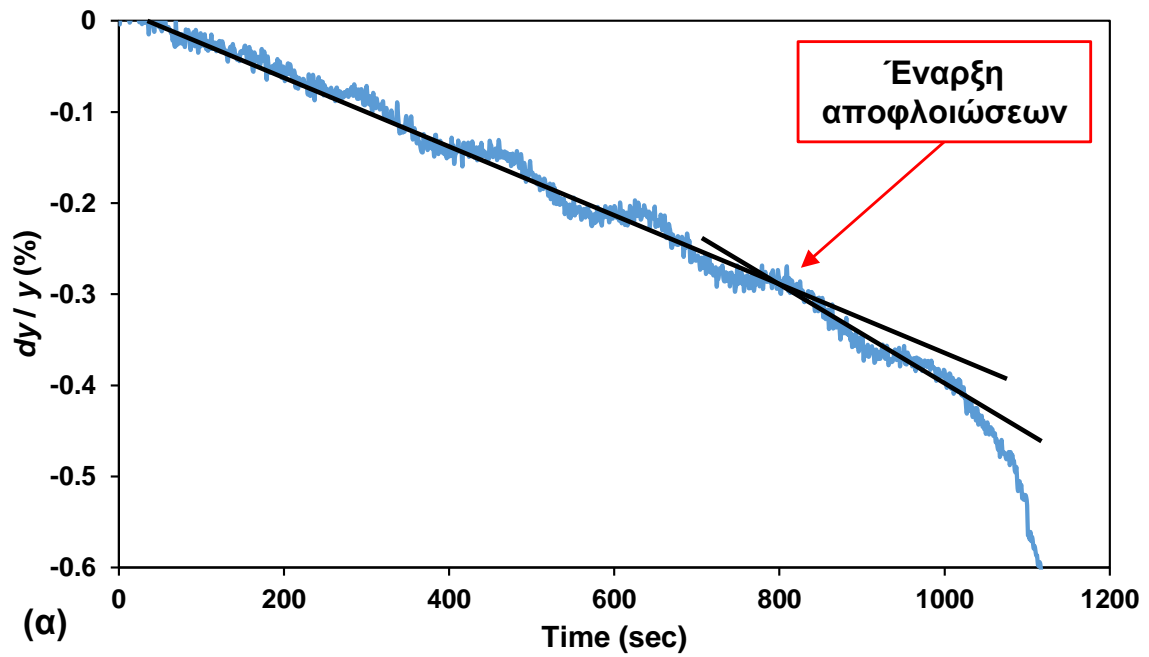
Σχήμα 7-80. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με οπή διαμέτρου 22 mm ποικιλίας «Απόλλων» πριν (α), κατά τη διάρκεια (β) και μετά (δ & ε) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης. Η προβολή της ΠΡ στη στέψη της οπής μετά το πέρας της δοκιμής υποδεικνύεται με κόκκινο (γ).

Ενδεικτικά γραφήματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.3 δίνονται στο Σχήμα 7-81.



Σχήμα 7-81. Διαγράμματα μετατοπίσεων (mm) – χρόνου (sec) εγκάρσια στη διεύθυνση των ΠΡ, όπως προκύπτουν από την ανάλυση DIC σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Απόλλων» στο άνω (α) και κάτω (β) όριο της οπής αντίστοιχα, βάσει των οποίων υπολογίζεται η χρονική έναρξη των ΠΡ.

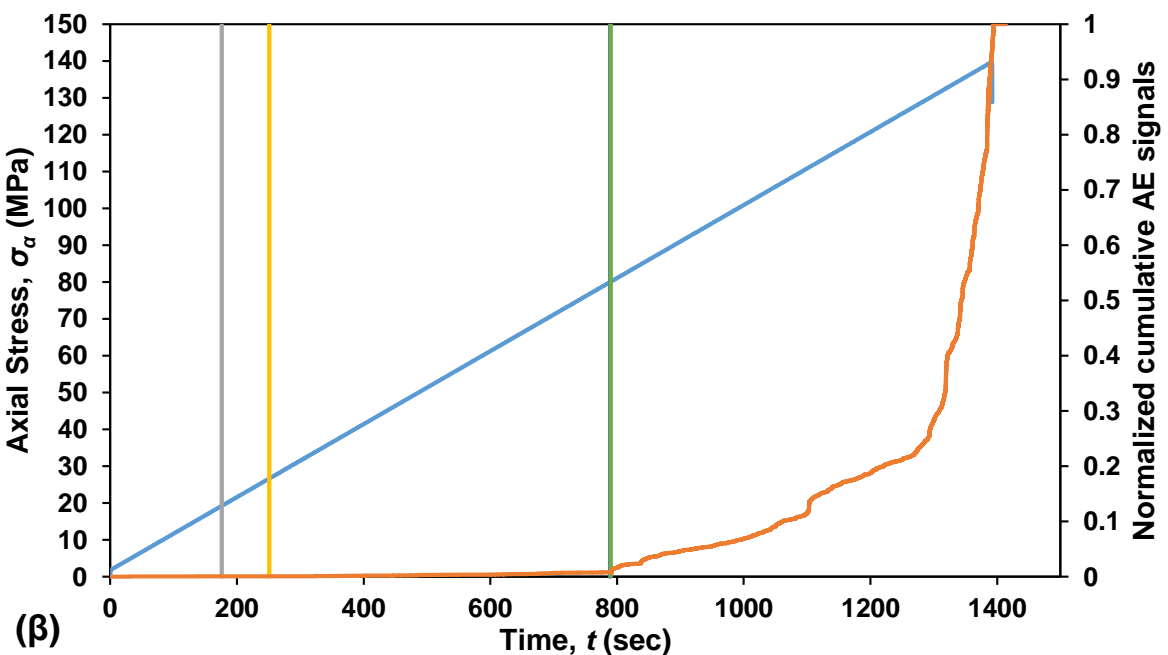
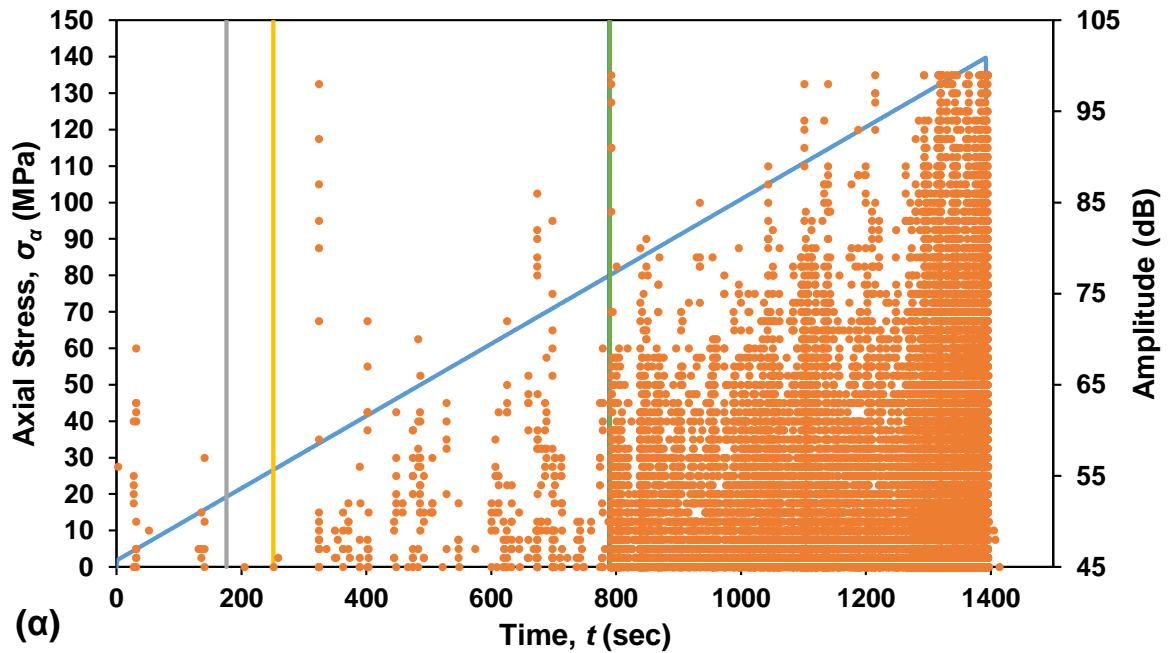
Ενδεικτικά γραφήματα που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των αποφλοιώσεων σύμφωνα με τη μεθοδολογία της Παραγράφου 7.4 δίνονται στο Σχήμα 7-82.



Σχήμα 7-82. Προσδιορισμός έναρξης αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, σε ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Απόλλων» στην αριστερή (α) και δεξιά (β) παρειά της οπής αντίστοιχα.

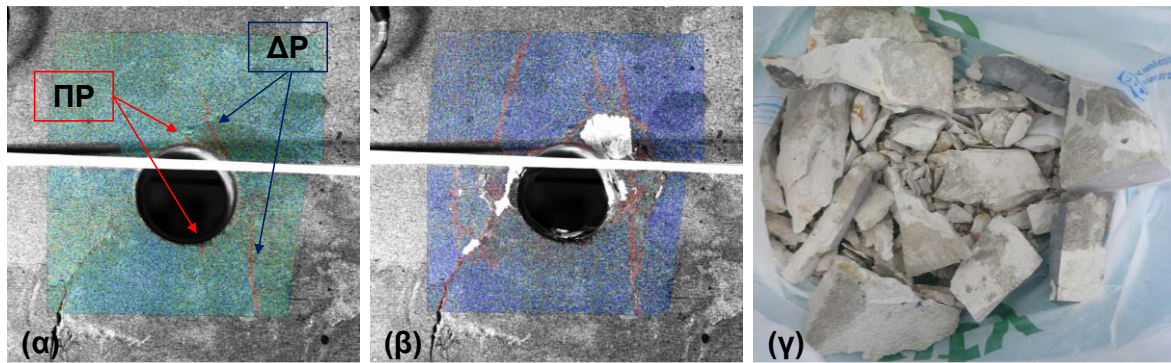
Στο Σχήμα 7-83 δίνονται διαγράμματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a και του πλάτους (Amplitude (dB)) ή του ανηγμένου αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ ως προς τον χρόνο για το εξεταζόμενο ΦΜ της ποικιλίας «Απόλλων». Στα ίδια διαγράμματα δίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC, όπου με τις κατακόρυφες ευθείες σημειώνονται οι χρόνοι έναρξης των ΠΡ στο πάνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής καθώς και των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής. Παρατηρείται μεγάλη αντιστοιχία κατά τον χρονικό προσδιορισμό της έναρξης των πλευρικών αποφλοιώσεων με τη μέθοδο DIC, ενώ αντιθέτως, η έναρξη των ΠΡ στο άνω και κάτω όριο της οπής δε συνοδεύεται από αξιόλογη δραστηριότητα ΑΕ.

Συγκεκριμένα, κατά τη χρονική στιγμή έναρξης των πλευρικών αποφλοιώσεων, παρατηρούνται μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ, ενώ καταγράφονται μέχρι εκείνη τη στιγμή περί το 8% του συνολικού αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ της δοκιμής. Παρατηρείται απότομη αύξηση του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ με σημαντική αύξηση του ρυθμού καταγραφής σημάτων ΑΕ. Αντιθέτως, η έναρξη των ΠΡ συνοδεύεται από ασθενή δραστηριότητα ΑΕ, τόσο ως προς το πλάτος όσο και ως προς το πλήθος των καταγεγραμμένων σημάτων ΑΕ. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC για την έναρξη των αποφλοιώσεων γενικά επιβεβαιώνονται από τις παρατηρήσεις που προκύπτουν μέσω της ανάλυσης των σημάτων ΑΕ, και αντιστρόφως.



Σχήμα 7-83. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για φυσικό μοντέλο με οπή διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Απόλλων». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο της οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά της οπής αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 7-84 δίνονται ενδεικτικά φωτογραφίες από το ΦΜ με οπή διαμέτρου 22 mm μετά το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, με τα αποτελέσματα της ανάλυσης DIC, αμέσως πριν και μετά την κατάρρευση του ΦΜ.



Σχήμα 7-84. (α) Αναπτυσσόμενες ΠΡ και ΔΡ (υποδεικνύονται με κόκκινα και μπλε βέλη αντίστοιχα), και (β) τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με οπές διαμέτρου 22 mm της ποικιλίας «Απόλλων» αμέσως πριν την κατάρρευση και φωτογραφία του αντίστοιχου ΦΜ μετά την κατάρρευση (γ).

Τέλος, στον πίνακα που ακολουθεί συνοψίζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης στο ΦΜ της ποικιλίας «Απόλλων» που εξετάζεται στην παρούσα διατριβή.

Πίνακας 7-7. Πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η μέγιστη αντοχή (σ_p) καθώς και η έναρξη των πρώτων (1st) και δεύτερων (2nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στην οπή του ΦΜ της ποικιλίας «Απόλλων».

D (mm)	1 st PFI (MPa)	2 nd PFI (MPa)	1 st SPI (MPa)	2 nd SPI (MPa)	σ_p (MPa)
22	19.2	26.5	80.0	80.0	139.7

7.11 Φυσικά μοντέλα με διπλές οπές

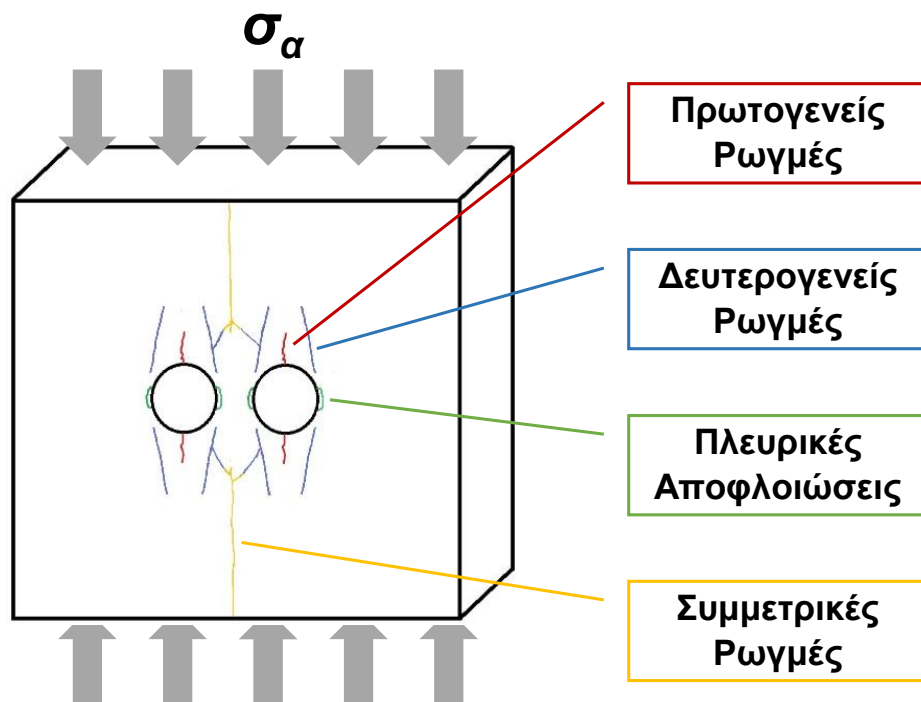
Με το πέρας των εργαστηριακών δοκιμών σε ΦΜ με μονές κυλινδρικές οπές, διαμορφώνονται μοντέλα με διπλές ομοεπίπεδες κυλινδρικές οπές ούτως ώστε να μελετηθεί η αλληλεπίδραση των δύο ανοιγμάτων και να παρατηρηθούν τυχόν διαφορές στην εμφάνιση των φαινομένων και στο τελικό μοτίβο της θραύσης των μοντέλων συγκριτικά με τα ΦΜ μονής οπής. Τα υλικά που επιλέγονται προς εξέταση, είναι οι δολομιτικές ποικιλίες μαρμάρου της παρούσας διατριβής.

Για την παρακολούθηση των φαινομένων που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης στα εν λόγω ΦΜ, χρησιμοποιείται ακριβώς η ίδια διάταξη που αξιοποιείται για τα ΦΜ μονής οπής των δύο υλικών. Για την αναγνώριση και τον προσδιορισμό των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα παρακάτω φυσικά μοντέλα, εφαρμόζεται η ίδια μεθοδολογία και εξοπλισμός που αξιοποιείται για τα ΦΜ μονής οπής των δύο υλικών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται τα οχτώ (8) κανάλια ΑΕ, με τους αισθητήρες ΑΕ να τοποθετούνται στις ίδιες θέσεις και να ρυθμίζονται στο λογισμικό AEWIn με τις ίδιες παραμέτρους των δοκιμών στα ΦΜ

μονής οπής. Η κάμερα CCD για την εφαρμογή της μεθόδου DIC ρυθμίζεται με τις παραμέτρους των δοκιμών στις μονές οπές και στη συνέχεια τοποθετείται έτσι ώστε να συλλαμβάνονται όλα τα φαινόμενα γύρω από τα δύο (2) ανοίγματα.

Τα ΦΜ των δύο υλικών αστοχούν με παρόμοιο τρόπο κατά τη δοκιμή θλίψης, παρουσιάζοντας παρόμοιους μηχανισμούς αστοχίας, η εμφάνιση των οποίων είναι ευκρινέστερη στα μοντέλα με τις οπές διαμέτρου 35 mm. Τα συγκεκριμένα μοντέλα εκτός από μεγαλύτερες οπές, έχουν και μεγαλύτερου πάχους στύλο ανάμεσα στα δύο ανοίγματα, κάτι που επιτρέπει την ευκρινέστερη μακροσκοπική παρακολούθηση των φαινομένων που αναπτύσσονται σε αυτόν.

Η μακροσκοπική παρακολούθηση της ανάπτυξης και διάδοσης των ρωγμών και των φαινομένων στα δοκίμια, είναι δυνατή με γυμνό οφθαλμό στις λειασμένες επιφάνειες των ΦΜ του μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι». Η ανάλυση DIC πραγματοποιείται με επιτυχία και στα δύο υλικά, και αποτελεί το μοναδικό μέσο παρακολούθησης των μη λειασμένων επιφανειών της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ». Σχηματική αποτύπωση του μοτίβου ρωγμάτωσης σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές κατά τη δοκιμή θλίψης δίνεται στο Σχήμα 7-85. Με κόκκινο υποδεικνύονται οι ΠΡ, με μπλε οι ΔΡ, με πράσινο οι αποφλοιώσεις και με κίτρινο οι συμμετρικές ρωγμές που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.



Σχήμα 7-85. Σχηματική αποτύπωση του μοτίβου ρωγμάτωσης σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές κατά τη δοκιμή θλίψης. Με κόκκινο υποδεικνύονται οι ΠΡ, με μπλε οι ΔΡ, με πράσινο οι αποφλοιώσεις και με κίτρινο οι συμμετρικές ρωγμές.

7.11.1 Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου υλικού εξετάζονται τα εξής ΦΜ:

- Ένα (1) ΦΜ με διπλές οπές διαμέτρου (D) 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R).
- Ένα (1) ΦΜ με διπλές οπές διαμέτρου (D) 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R).
- Ένα (1) ΦΜ με διπλές οπές διαμέτρου (D) 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R).

Όλες οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης των ΦΜ μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (2462 N/sec) έως την προχωρημένη ανάπτυξη των φαινομένων και στις δύο οπές, και έπειτα συνεχίστηκαν με ρυθμό παραμόρφωσης (8 $\mu\text{m}/\text{min}$) έως την ολοκλήρωση της δοκιμής. Οι δοκιμές ολοκληρώθηκαν σε τάσεις ελαφρώς χαμηλότερες της μέγιστης αντοχής των ΦΜ.

Κατά την πορεία της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές, αρχικά σχηματίζονται οι ΠΡ στο άνω και κάτω μέρος των οπών, οι οποίες ξεκινάνε από την περιφέρεια της κάθε οπής και επεκτείνονται σταδιακά προς τις βάσεις των πρισμάτων. Οι ΠΡ είναι αποτέλεσμα των εφελκυστικών ΠΥΣΤ στο άνω και κάτω μέρος των οπών. Σημειώνεται ότι η έναρξη των πρώτων ΠΡ γίνεται αντιδιαμετρικά για τις δύο οπές, π.χ. αν η έναρξη της πρώτης ΠΡ στην αριστερή οπή παρατηρηθεί στο άνω μέρος, τότε η πρώτη ΠΡ στη δεξιά οπή παρατηρείται στο κάτω μέρος αντίστοιχα κ.ο.κ.

Μετά την έναρξη όλων των ΠΡ, παρατηρείται ο σχηματισμός των ΔΡ δεξιά και αριστερά από τις οπές, οι οποίες επεκτείνονται με μεγάλη κλίση προς τις βάσεις των πρισμάτων, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη μετέπειτα ρωγμάτωση των ΦΜ. Κατά την εξέλιξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, οι ΔΡ ενώνονται με τις θλιπτικές ΠΥΣΤ στα δεξιά και αριστερά των οπών, περιοχές όπου εμφανίζονται οι εσωτερικές αποφλοιώσεις κατά την άσκηση μεγαλύτερων αξονικών τάσεων στα πρίσματα. Παράλληλα, επεκτείνονται και φτάνουν ως τις βάσεις των μοντέλων, ενώ δημιουργούνται μικρότερες ΜΕΡ που προκύπτουν από μεταγενέστερες διακλαδώσεις των αρχικών ΔΡ.

Και στα τρία (3) ΦΜ, αναπτύσσονται δύο (2) κατακόρυφες ΜΕΡ, συμμετρικά ως προς τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας του δοκιμίου, περί τον άξονα του στύλου μεταξύ των δύο ανοιγμάτων, οι οποίες επεκτείνονται και φτάνουν ως τις βάσεις του ΦΜ. Οι εν λόγω ΜΕΡ συγχωνεύονται με τις διακλαδώσεις των ΔΡ δεξιά της αριστερής οπής και αριστερά της δεξιάς αντίστοιχα.

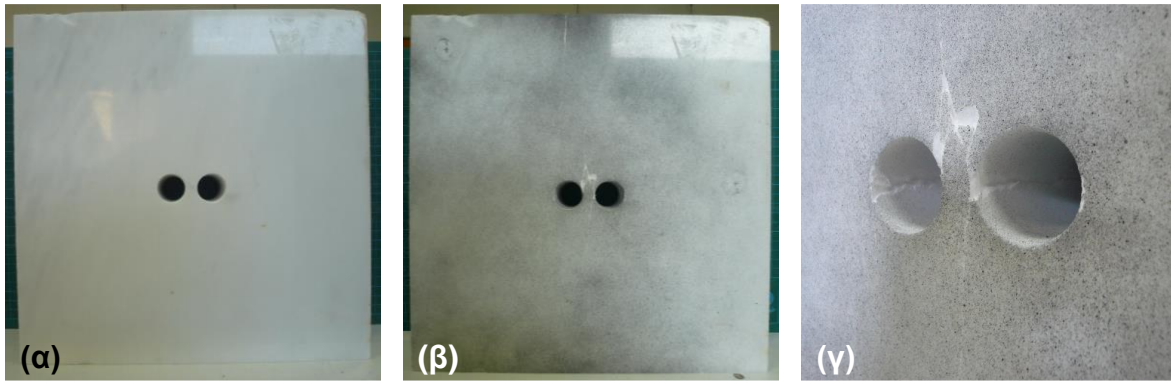
Η έναρξη των πρώτων αποφλοιώσεων και στις δύο (2) οπές παρατηρείται από την ίδια πλευρά, δηλαδή αν για παράδειγμα οι πρώτες αποφλοιώσεις στην αριστερή οπή σημειωθούν στην αριστερή παρειά, τότε και οι πρώτες αποφλοιώσεις της δεξιάς οπής θα εμφανιστούν επίσης στην αριστερή παρειά κ.ο.κ. Επιπλέον, με την έναρξη των αποφλοιώσεων στο εσωτερικό των οπών παρατηρείται κλείσιμο των εφελκυστικών ΠΡ πλησίον του άκρου τους.

Επίσης, το εσωτερικό των στύλων δείχνει να μη κυριαρχείται από ΜΕΡ.

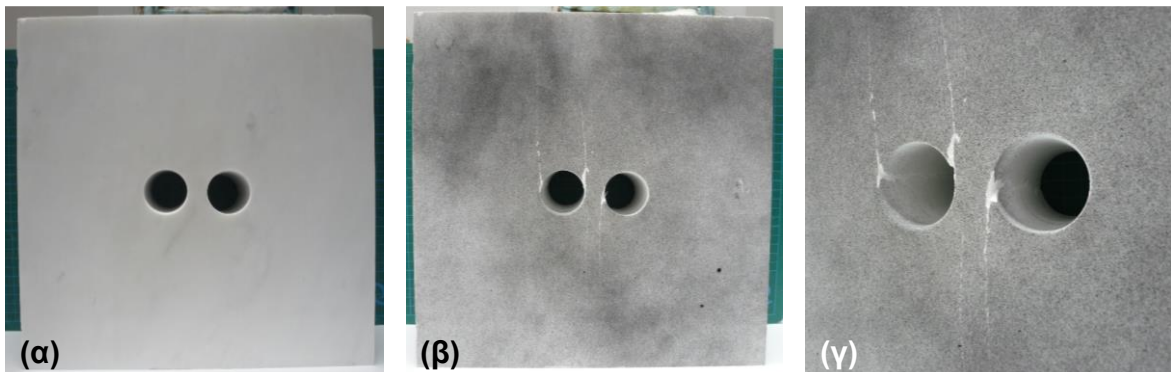
Κοντά στην κορυφαία αντοχή του ΦΜ, οι διακλαδώσεις των ΔΡ που ενώνονται με τις δύο (2) αξονικές ΜΕΡ, σχηματίζουν τελικώς έναν ρόμβο ανάμεσα από τα δύο ανοίγματα, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες, η παρουσία του οποίου επιβεβαιώνεται από την αποκάλυψη του εσωτερικού των μοντέλων λόγω φυλλοειδούς επιφανειακής αποκόλλησης υλικού.

Επιπροσθέτως, στην πορεία της δοκιμής έντονη είναι η παρουσία βυτουμενιούχων αερίων που απελευθερώνονται από τους πόρους του υλικού, κάτι που συμβαίνει και στις δοκιμές της 1^{ης} Σειράς.

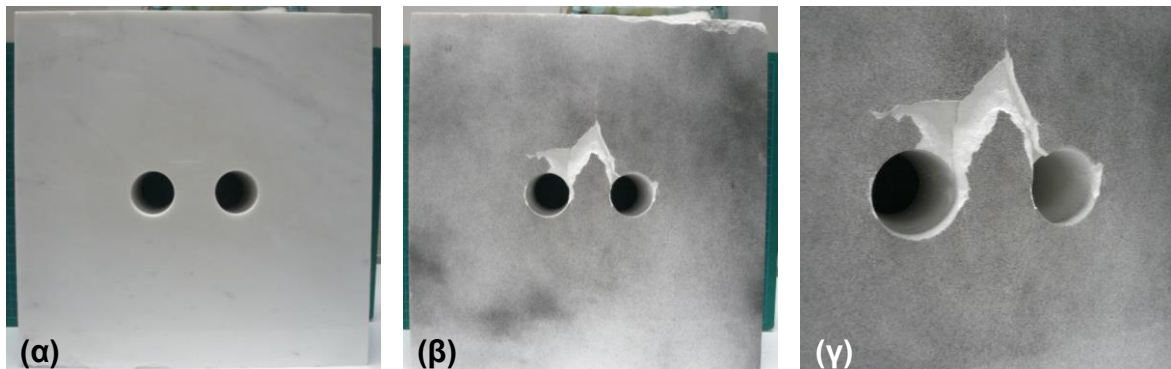
Σημειώνεται ότι τα δοκίμια δεν υποβάλλονται σε θλίψη μέχρι την κορυφαία αντοχή τους προκειμένου να μην καταρρεύσουν ώστε να μπορέσουν να μελετηθούν περαιτέρω. Εικόνες από τα ΦΜ πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης δίνονται ακολούθως.



Σχήμα 7-86. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



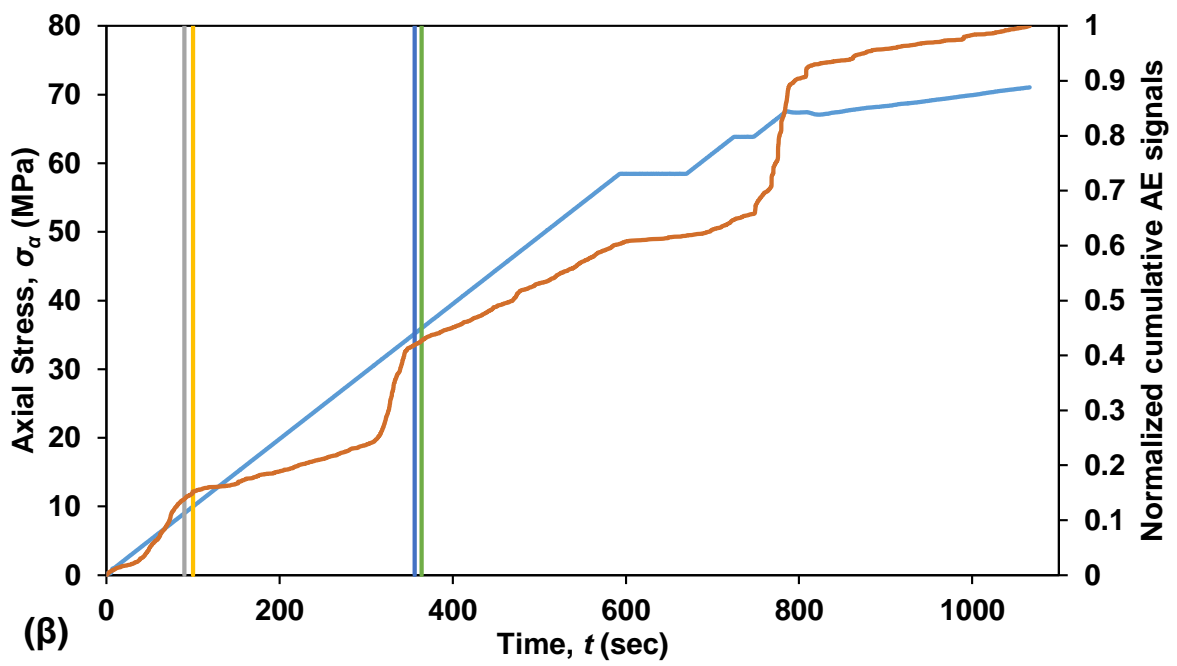
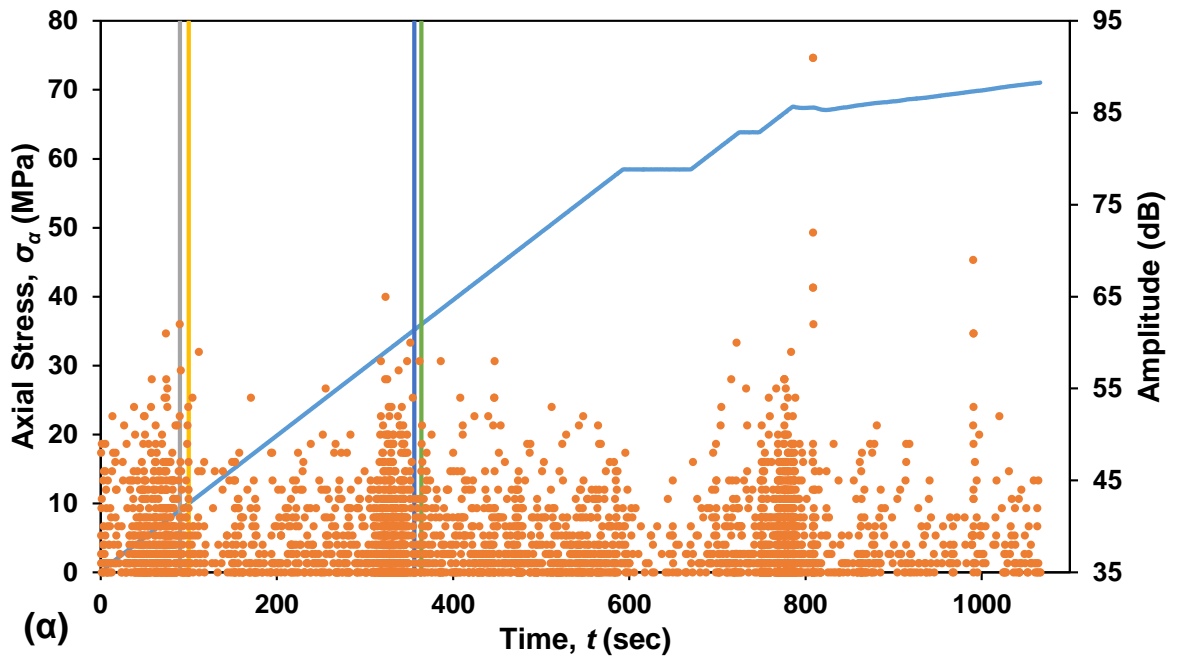
Σχήμα 7-87. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R , ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

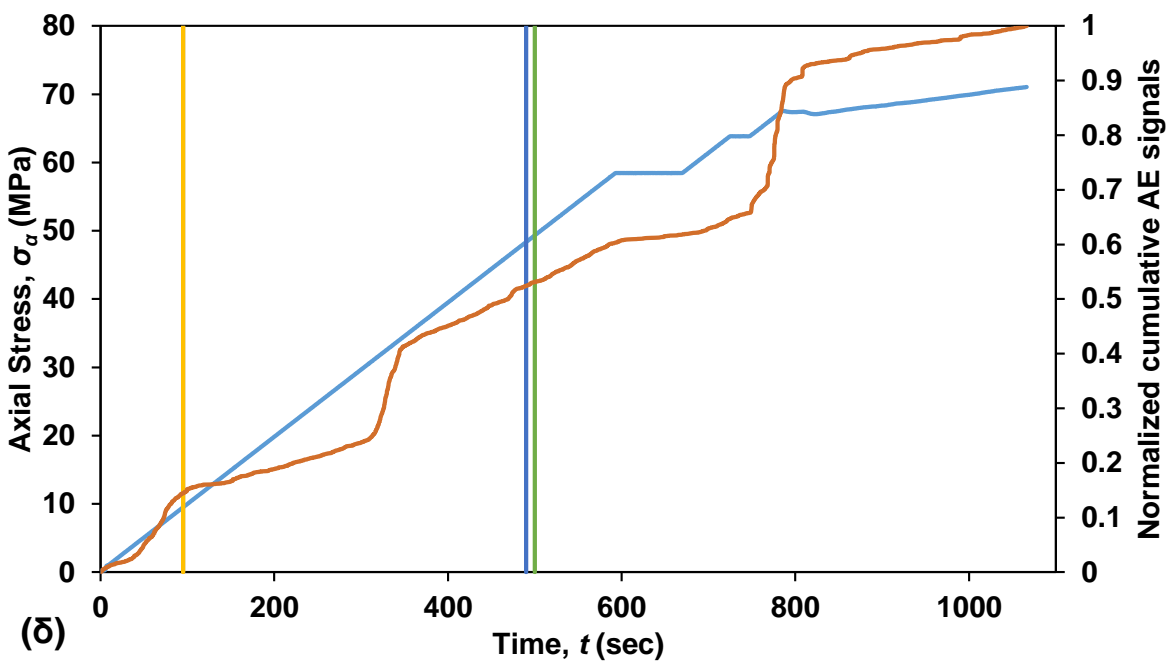
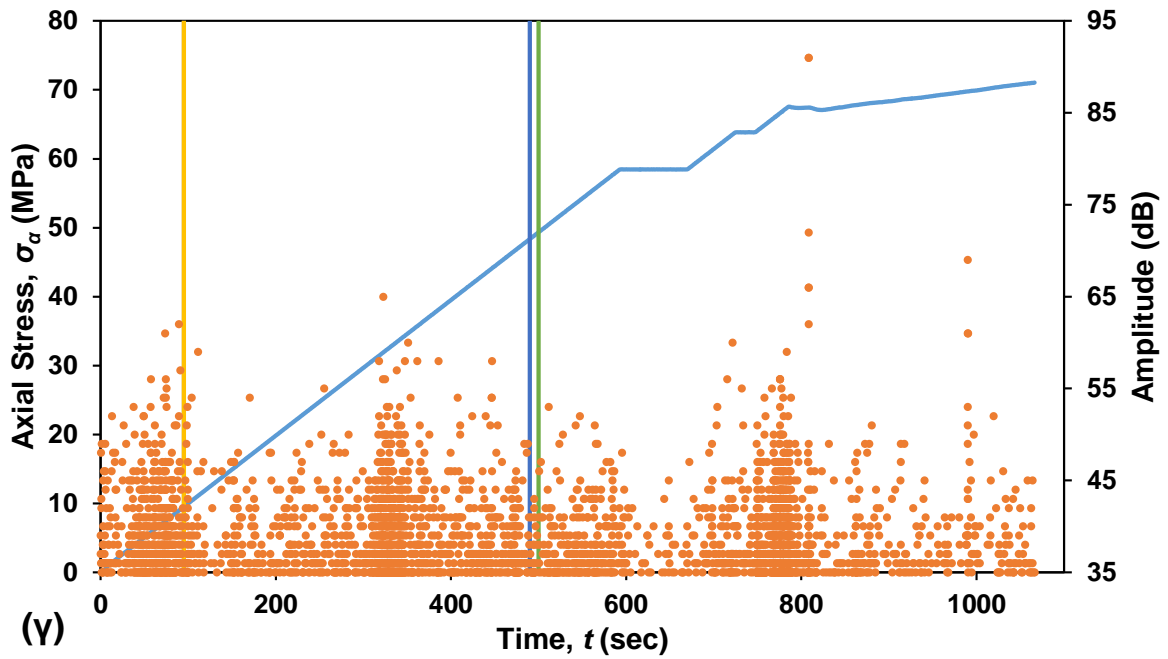


Σχήμα 7-88. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με δύο (2) διαμέτρους D , ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

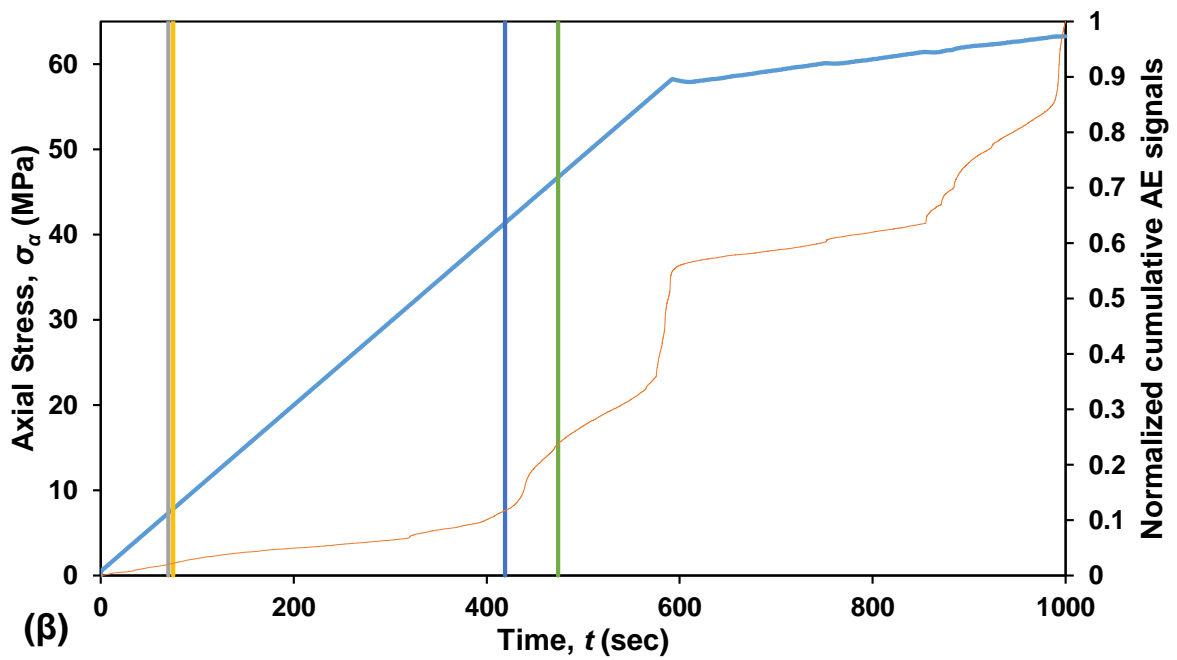
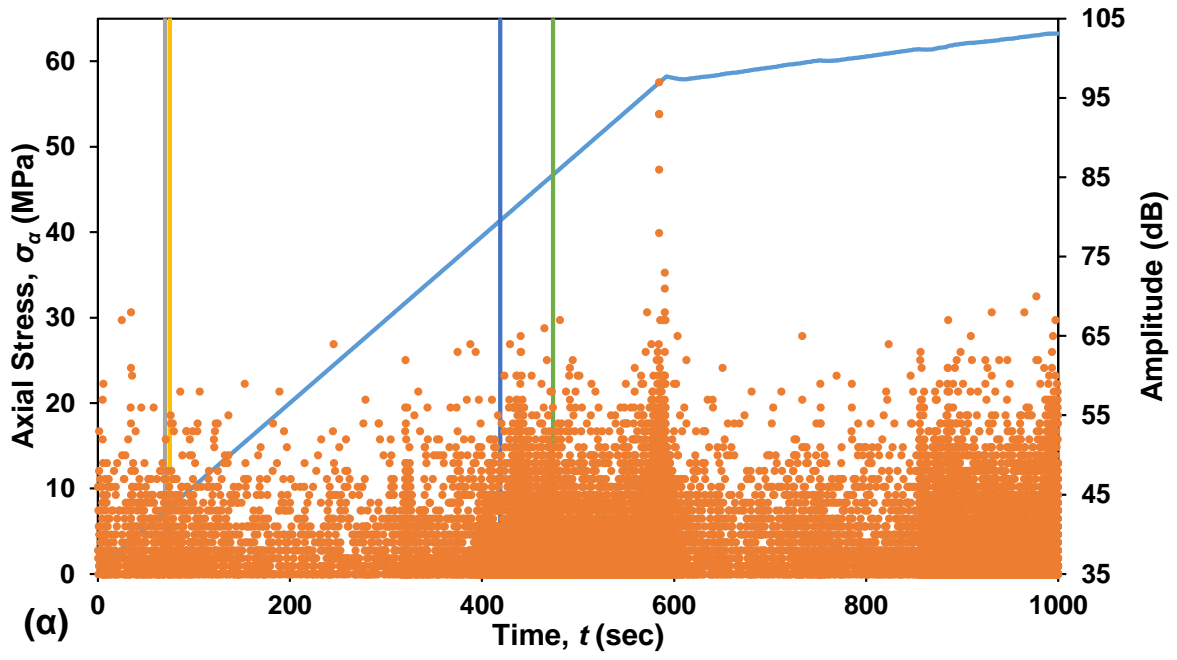
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται διαγράμματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a και του πλάτους (Amplitude (dB)) ή του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ (Vector (Hit)) ως προς τον χρόνο για κάθε ένα ΦΜ με διπλή οπή της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Στα ίδια διαγράμματα δίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC, όπου με τις κατακόρυφες ευθείες σημειώνονται οι χρόνοι έναρξης των ΠΡ στο πάνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής (οπή Α (A) – οπή Β (B)) καθώς και των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής. Παρατηρείται μεγάλη αντιστοιχία κατά τον χρονικό προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ με τη μέθοδο DIC, καθώς και κατά την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων.

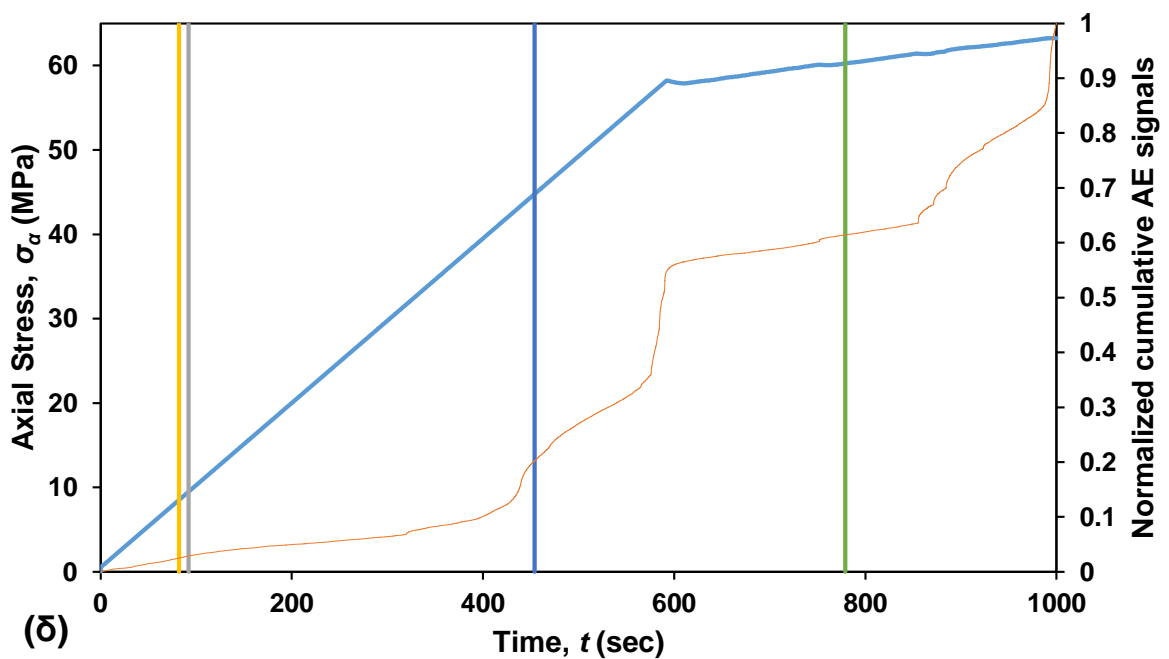
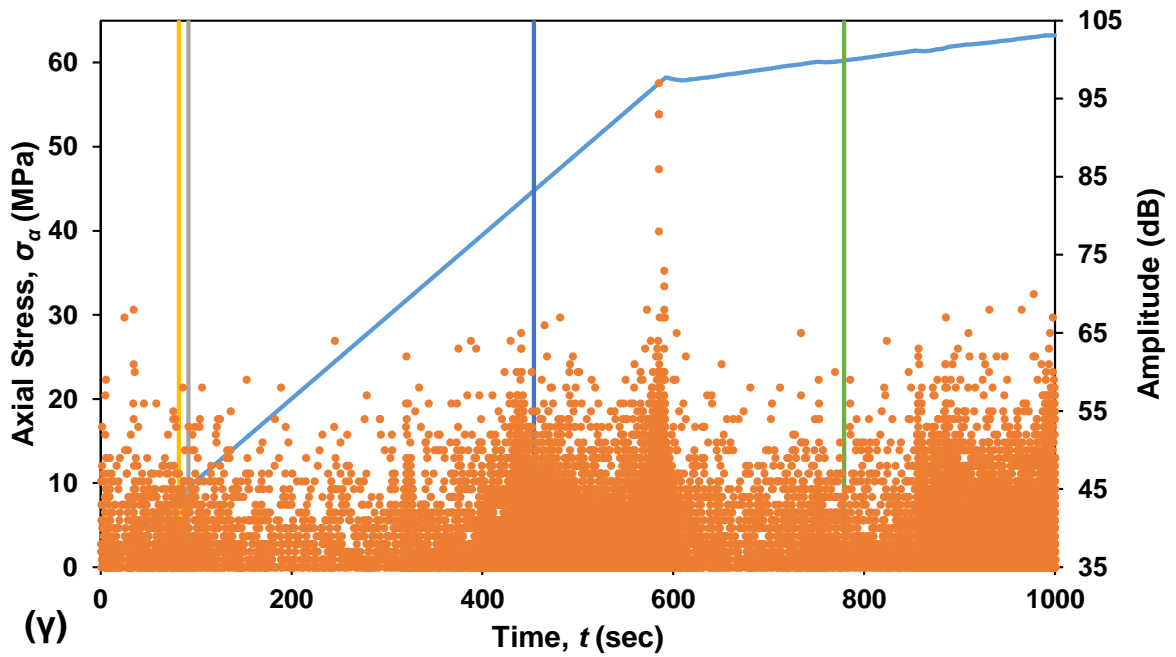
Συγκεκριμένα, κατά την έναρξη των ΠΡ παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ και σημαντική αύξηση του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ, που σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει έως το 20% του συνολικού αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ της δοκιμής. Επιπλέον, η καταγραφή των σημάτων ΑΕ κατά την έναρξη των αποφλοιώσεων αυξάνεται σημαντικά, και παράλληλα παρατηρούνται μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC για την έναρξη των ΠΡ και των πλευρικών αποφλοιώσεων γενικά επιβεβαιώνονται από τις παρατηρήσεις που προκύπτουν μέσω της ανάλυσης των σημάτων ΑΕ, και αντιστρόφως.



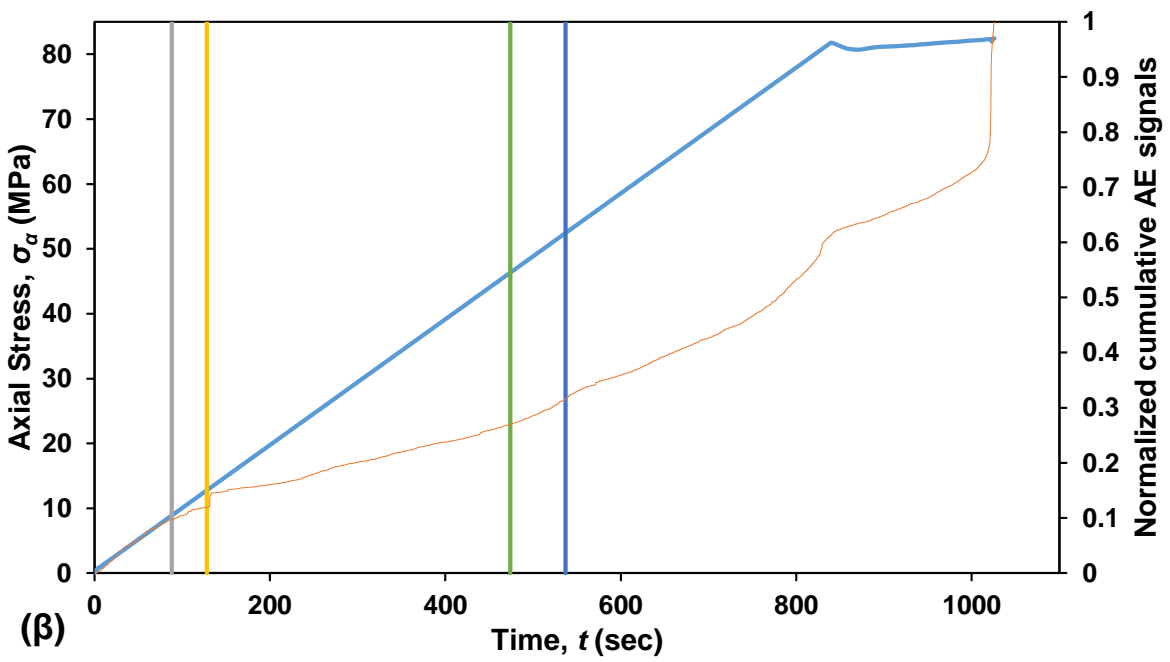
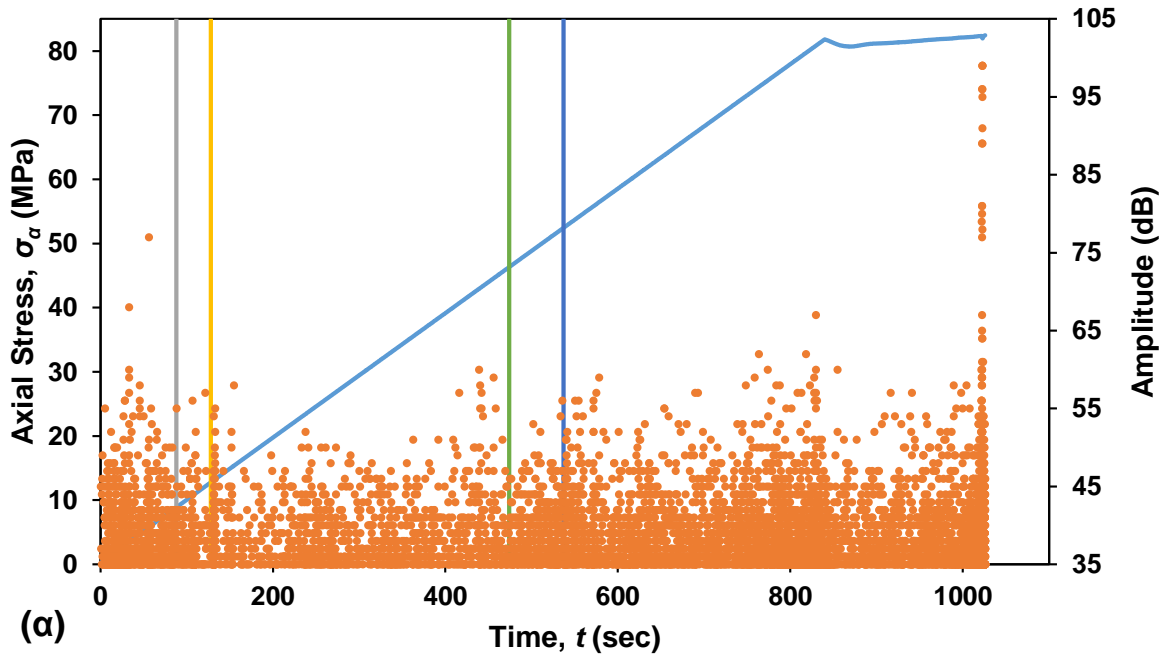


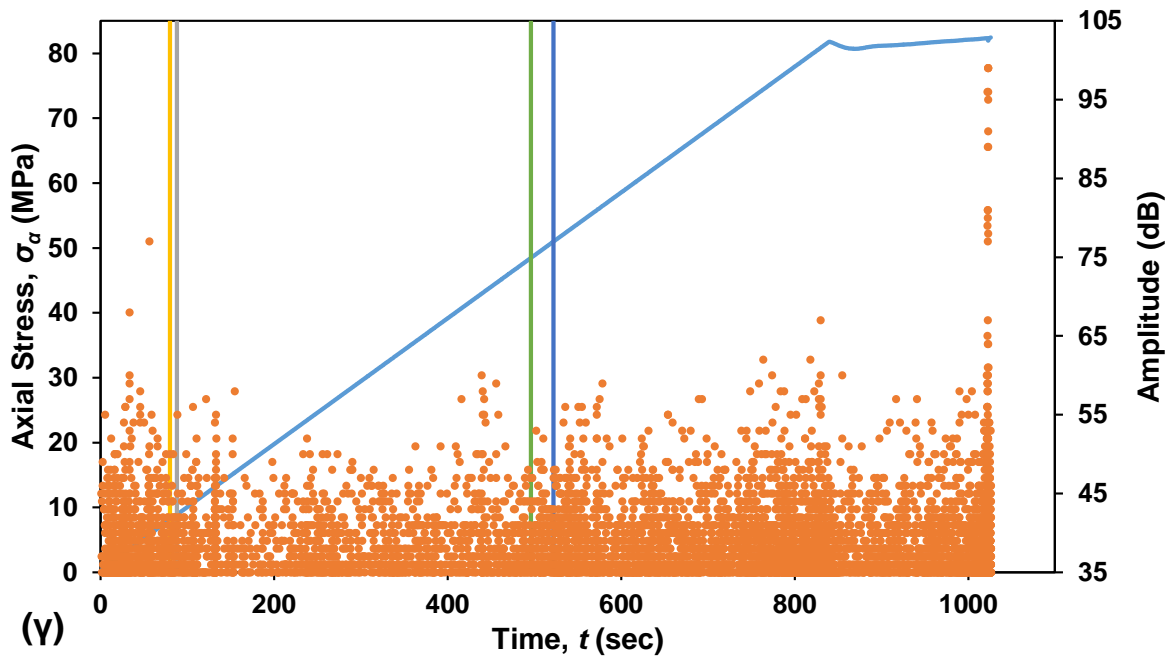
Σχήμα 7-89. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.



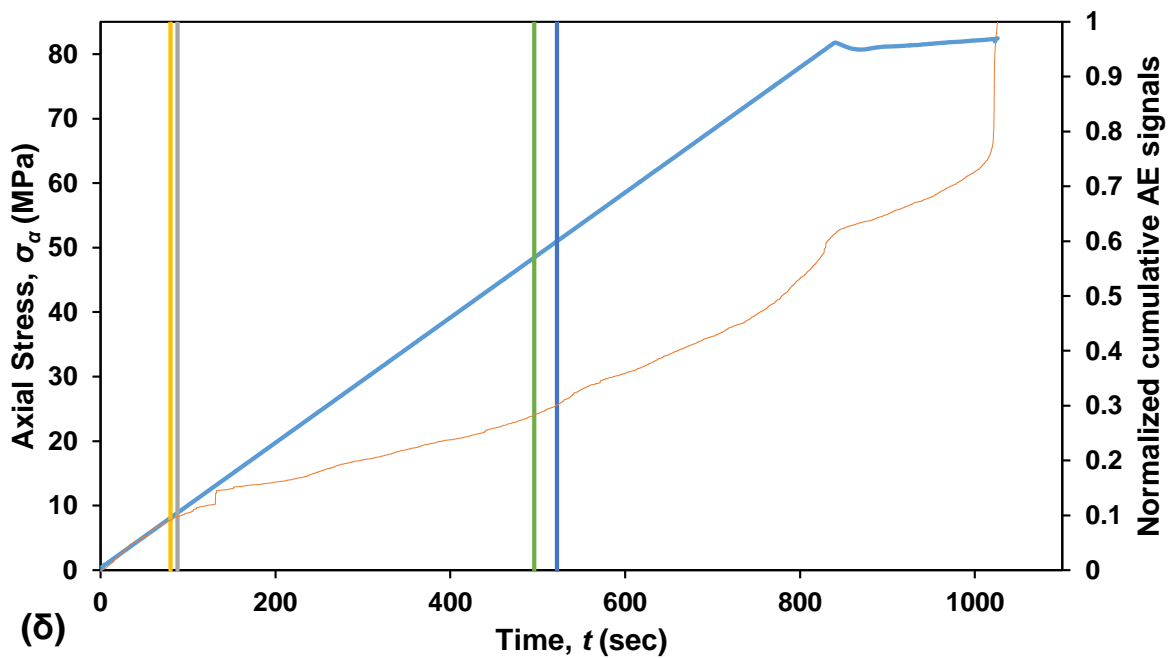


Σχήμα 7-90. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.





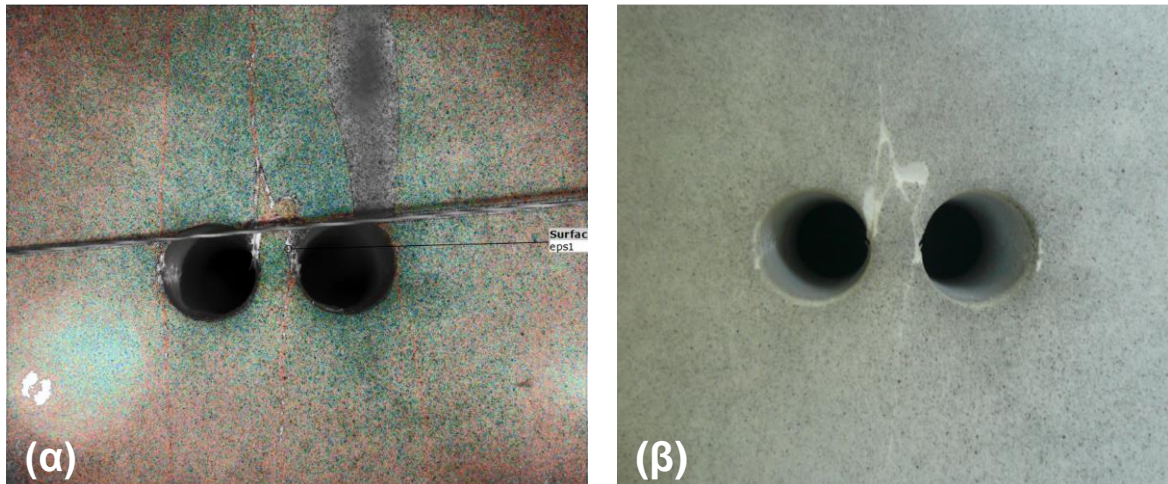
(γ)



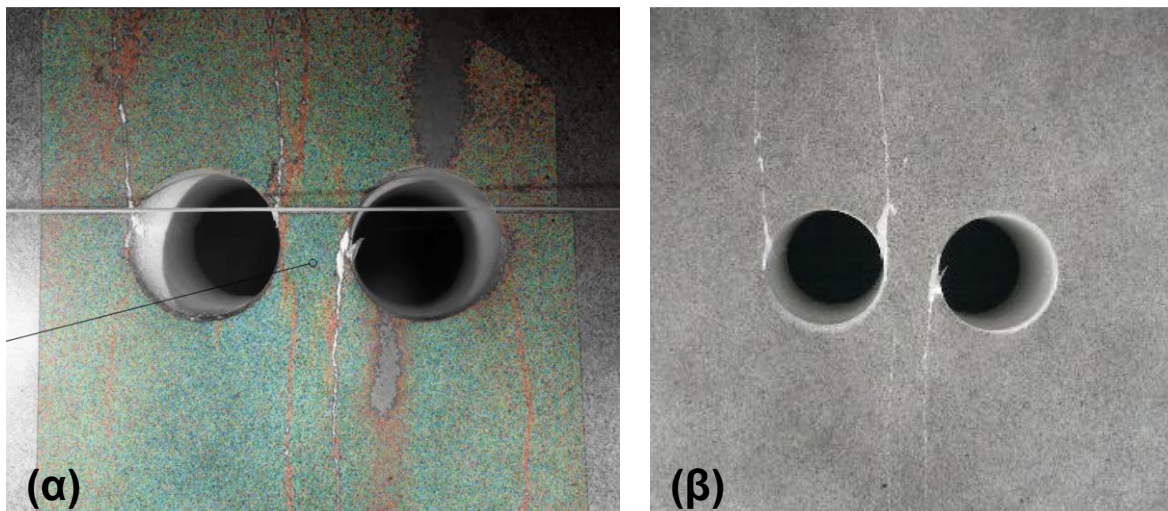
(δ)

Σχήμα 7-91. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.

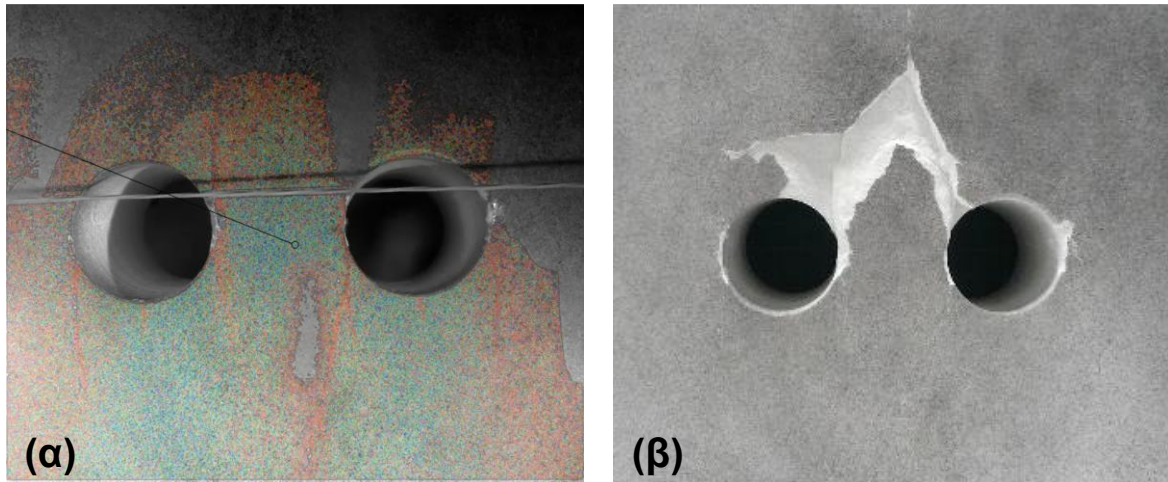
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται φωτογραφίες από ΦΜ με διπλή οπή και τα αποτελέσματα της ανάλυσης DIC μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 7-92. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.



Σχήμα 7-93. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.

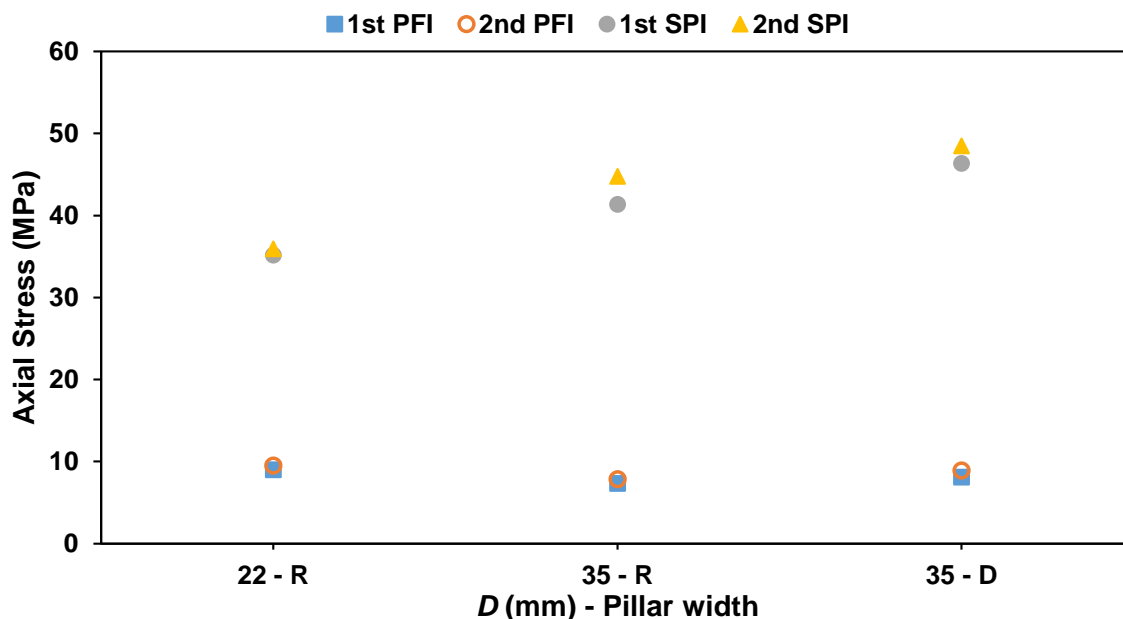


Σχήμα 7-94. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες R της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.

Συγκριτικός πίνακας όπου παρατίθενται οι τιμές των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων κατά την έναρξη των φαινομένων στα ΦΜ με διπλή κυλινδρική οπή δίνεται ακολούθως. Γράφημα όπου απεικονίζονται οι εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις κατά την έναρξη των πρώτων ($1^{ωv}$) και δεύτερων ($2^{ωv}$) ΠΡ και αποφλοιώσεων στα ΦΜ, έπεται του προαναφερθέντος πίνακα. Σημειώνεται ότι η δεύτερη εμφάνιση των φαινομένων που δίνεται στο γράφημα δεν αναφέρεται απαραίτητα στη δεύτερη οπή.

Πίνακας 7-8. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η έναρξη των πρώτων (1^{st}) και δεύτερων (2^{nd}) ΠΡ (PFI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλά κυλινδρικά ανοίγματα, καθώς και η ολοκλήρωση των δοκιμών (σ_{pt}).

D (mm) – πλάτος στύλου		1 st PFI (MPa)	2 nd PFI (MPa)	1 st SPI (MPa)	2 nd SPI (MPa)	σ_{pt} (MPa)
22 mm – R	Οπή A	9.0	10.0	35.2	36.0	71.1
	Οπή B	9.5	9.5	48.4	49.3	
35 mm – R	Οπή A	7.3	7.8	41.4	46.7	63.3
	Οπή B	8.5	9.5	44.8	60.3	
35 mm – D	Οπή A	8.9	12.8	46.3	52.4	82.5
	Οπή B	8.1	8.9	48.5	51.0	



Σχήμα 7-95. Συγκριτικό γράφημα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των φαινομένων συναρτήσει της διαμέτρου των οπών (mm) και του πάχους των στύλων (*R*: πάχος ίσο με μια ακτίνα οπής, *D*: πάχος ίσο με μια διάμετρο οπής) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλά κυλινδρικά ανοίγματα (μπλε (1st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2nd PFI): έναρξη δευτέρων ΠΡ, γκρι (1st SPI): έναρξη πρώτων αποφλοιώσεων, κίτρινο (2nd SPI): έναρξη δευτέρων αποφλοιώσεων).

7.11.2 Μάρμαρο «Βώλακας ΙΙ»

Για τη μελέτη του συγκεκριμένου υλικού εξετάζονται τα εξής ΦΜ:

- Ένα (1) ΦΜ με διπλές οπές διαμέτρου (*D*) 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (*R*).
- Ένα (1) ΦΜ με διπλές οπές διαμέτρου (*D*) 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (*R*).
- Ένα (1) ΦΜ με διπλές οπές διαμέτρου (*D*) 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (*R*).

Όλες οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης των ΦΜ μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ» με διπλές οπές πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου (1570 N/sec) έως την προχωρημένη ανάπτυξη των φαινομένων και στις δύο οπές, και έπειτα συνεχίστηκαν με ρυθμό παραμόρφωσης (8 μm/min) έως την ολοκλήρωση της δοκιμής. Οι δοκιμές ολοκληρώθηκαν σε τάσεις ελαφρώς χαμηλότερες της μέγιστης αντοχής των ΦΜ.

Κατά την πορεία της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης στα ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές, αρχικά σχηματίζονται οι ΠΡ στο άνω και κάτω μέρος των οπών, οι οποίες ξεκινάνε από την περιφέρεια της κάθε οπής και επεκτείνονται σταδιακά προς τις

βάσεις των πρισμάτων αντίστοιχα. Οι ΠΡ είναι αποτέλεσμα των εφελκυστικών ΠΥΣΤ στο άνω και κάτω μέρος των οπών.

Μετά την έναρξη όλων των ΠΡ, παρατηρείται ο σχηματισμός των ΔΡ δεξιά και αριστερά από τις οπές, οι οποίες επεκτείνονται με μεγάλη κλίση προς τις βάσεις των πρισμάτων, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη μετέπειτα ρωγμάτωση των ΦΜ.

Και στα τρία (3) μοντέλα, όπως συμβαίνει και με τα αντίστοιχα της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι», αναπτύσσονται δύο (2) κατακόρυφες ΜΕΡ, συμμετρικά ως προς τον οριζόντιο άξονα συμμετρίας του δοκιμίου, περί τον άξονα του στύλου μεταξύ των δύο ανοιγμάτων, οι οποίες επεκτείνονται και φτάνουν ως τις βάσεις του ΦΜ. Οι εν λόγω ΜΕΡ συγχωνεύονται με τις διακλαδώσεις των ΔΡ δεξιά της αριστερής οπής και αριστερά της δεξιάς αντίστοιχα.

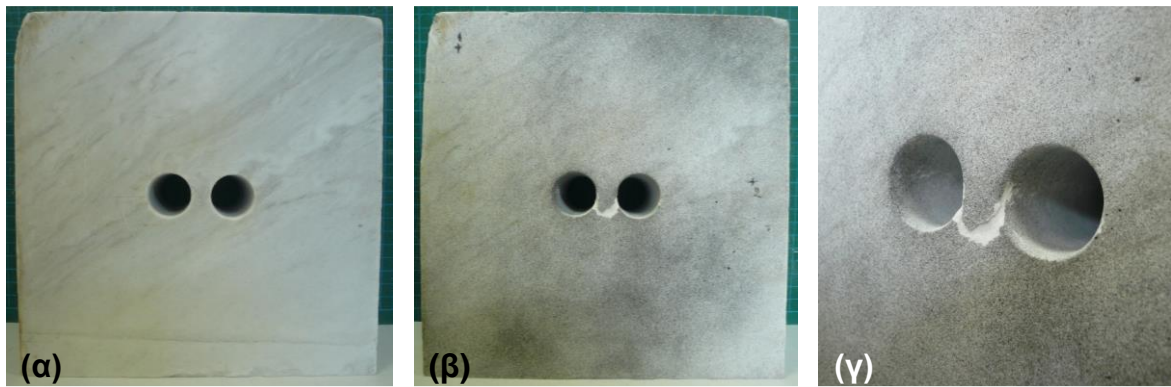
Κατά την εξέλιξη της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης, οι ΔΡ ενώνονται με τις θλιπτικές ΠΥΣΤ στα δεξιά και αριστερά των οπών, περιοχές όπου εμφανίζονται οι εσωτερικές αποφλοιώσεις κατά την άσκηση μεγαλύτερων αξονικών τάσεων στα πρίσματα. Παράλληλα, επεκτείνονται και φτάνουν ως τις βάσεις των μοντέλων, ενώ δημιουργούνται μικρότερες ΜΕΡ που προκύπτουν από μεταγενέστερες διακλαδώσεις των αρχικών ΔΡ. Επιπλέον, με την έναρξη των αποφλοιώσεων στο εσωτερικό των οπών παρατηρείται κλείσιμο των εφελκυστικών ΠΡ πλησίον του άκρου τους.

Επίσης, το εσωτερικό των στύλων δείχνει να μη κυριαρχείται από ΜΕΡ.

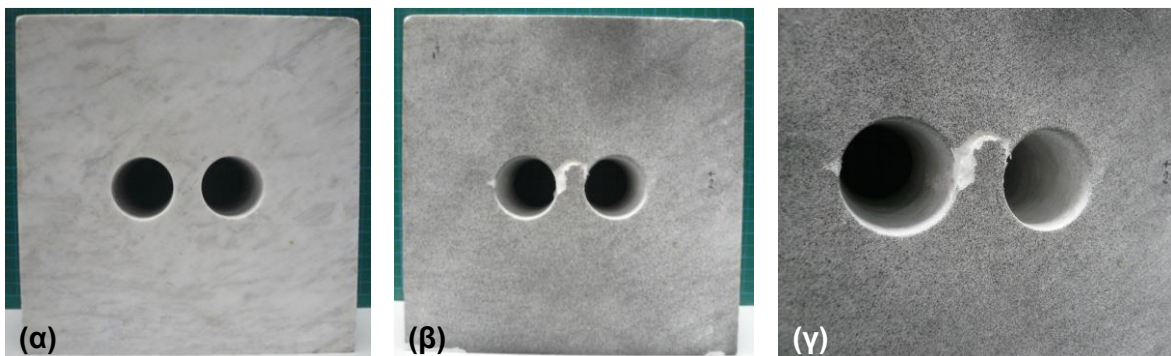
Κοντά στην κορυφαία αντοχή του ΦΜ, οι διακλαδώσεις των ΔΡ που ενώνονται με τις δύο (2) αξονικές ΜΕΡ, σχηματίζουν τελικώς έναν ρόμβο ανάμεσα από τα δύο ανοίγματα, όπως φαίνεται και στις παρακάτω εικόνες, η παρουσία του οποίου επιβεβαιώνεται από την αποκάλυψη του εσωτερικού των μοντέλων λόγω φυλλοειδούς επιφανειακής αποκόλλησης υλικού.

Επιπροσθέτως, στην πορεία της δοκιμής έντονη είναι η παρουσία βυτουμενιούχων αερίων που απελευθερώνονται από τους πόρους του υλικού, κάτι που συμβαίνει και στις δοκιμές της 1^{ης} Σειράς.

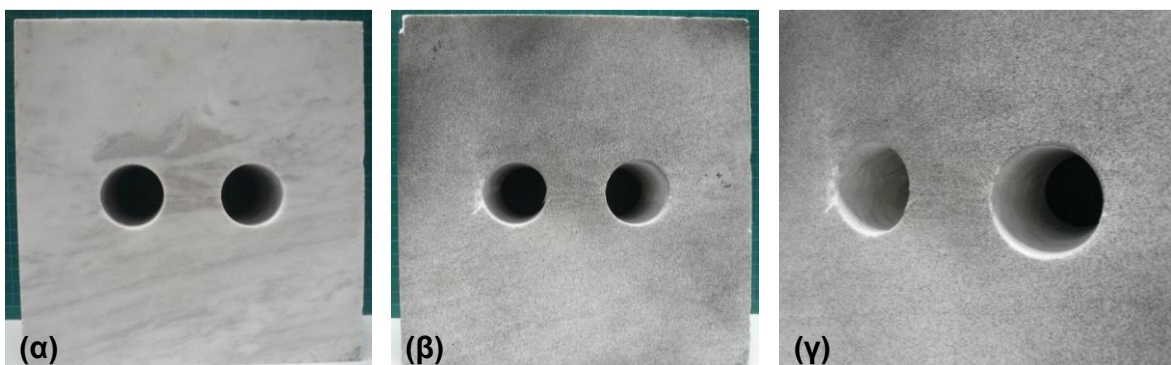
Σημειώνεται ότι τα δοκίμια δεν υποβάλλονται σε θλίψη μέχρι την κορυφαία αντοχή τους προκειμένου να μην καταρρεύσουν ώστε να μπορέσουν να μελετηθούν περαιτέρω. Εικόνες από τα ΦΜ πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης δίνονται ακολούθως.



Σχήμα 7-96. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας II» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 7-97. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R , ποικιλίας «Βώλακας II» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

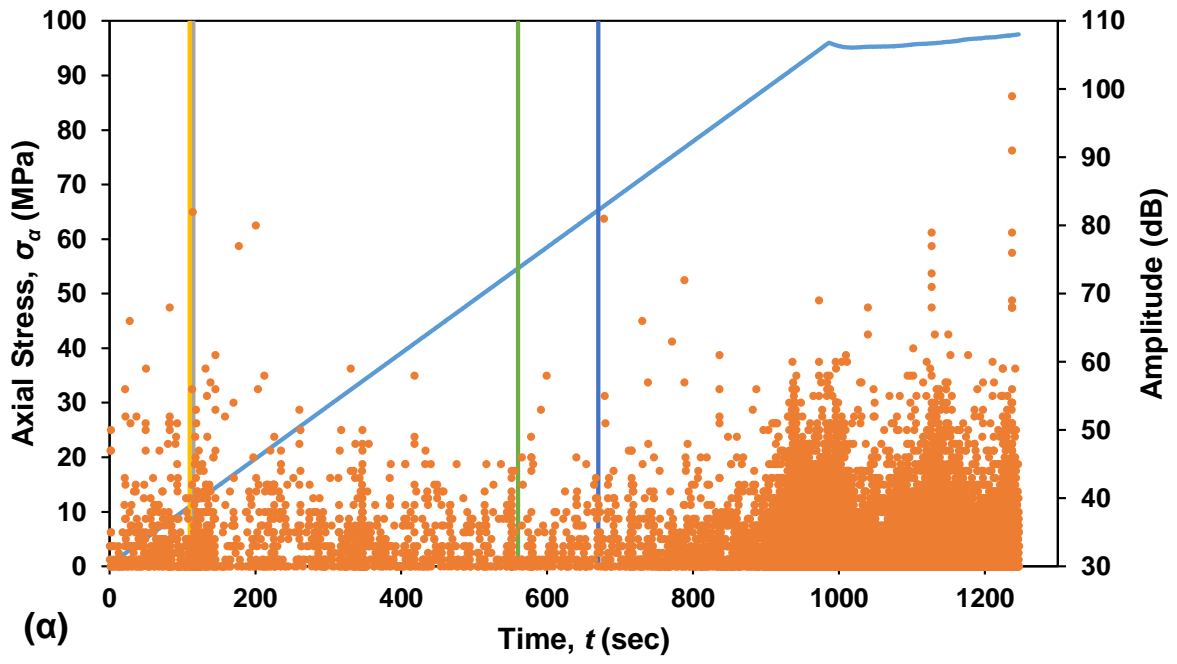


Σχήμα 7-98. Φωτογραφίες φυσικού μοντέλου με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με δύο (2) διαμέτρους D , ποικιλίας «Βώλακας II» πριν (α) και μετά (β & γ) το πέρας της δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

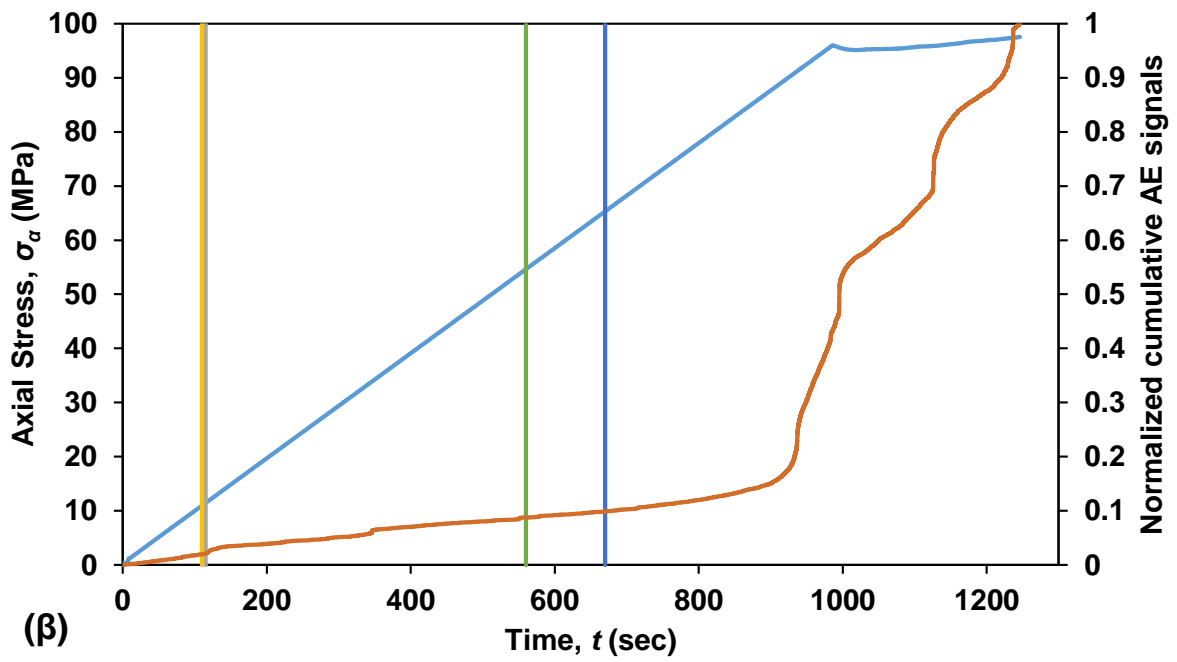
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται διαγράμματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_a και του πλάτους (Amplitude (dB)) ή του αθροιστικού πλήθους σημάτων AE (Vector (Hit)) ως προς τον χρόνο για κάθε ένα ΦΜ με διπλή οπή της ποικιλίας «Βώλακας II». Στα ίδια διαγράμματα δίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC, όπου με τις κατακόρυφες ευθείες σημειώνονται οι χρόνοι έναρξης των ΠΡ στο πάνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής (οπή A (A) – οπή B (B)) καθώς και των

αποφλοιώσεων στην αριστερή (SI) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής. Παρατηρείται μεγάλη αντιστοιχία κατά τον χρονικό προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ με τη μέθοδο DIC, και μικρότερη κατά την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων.

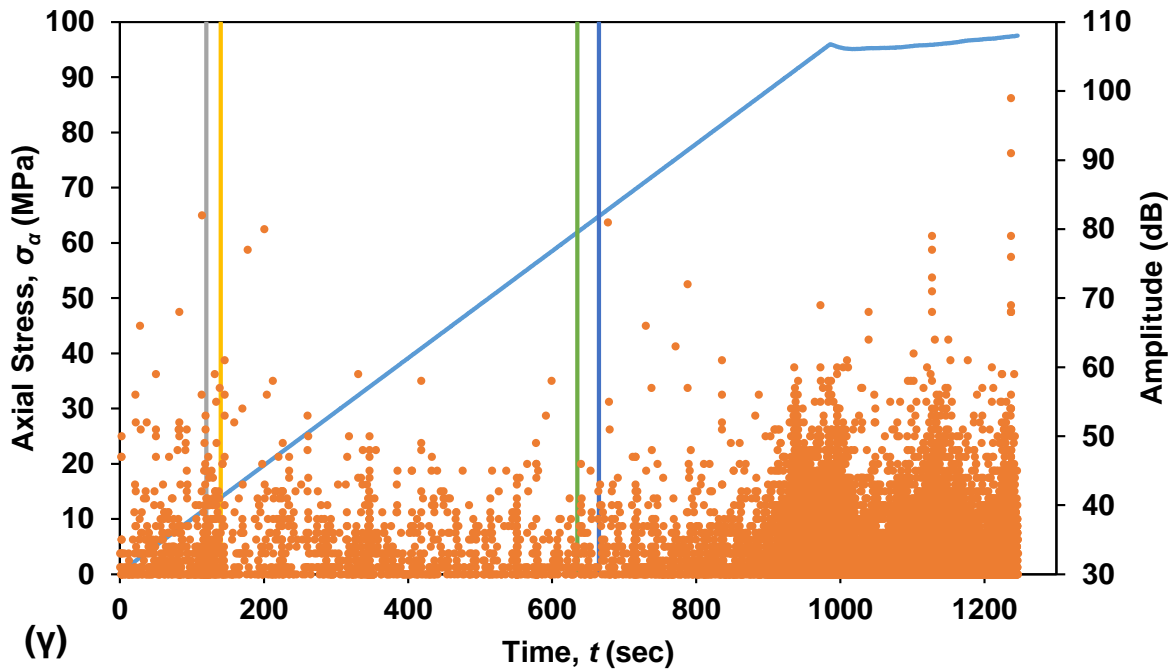
Συγκεκριμένα, κατά την έναρξη των ΠΡ παρατηρούνται ιδιαίτερα μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ και σημαντική αύξηση του αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ, που αντιστοιχεί περί το 5% του συνολικού αθροιστικού πλήθους σημάτων ΑΕ της δοκιμής. Επιπλέον, η καταγραφή των σημάτων ΑΕ κατά την έναρξη των αποφλοιώσεων αυξάνεται ελαφρώς, αλλά δεν παρατηρούνται μεγαλύτερου πλάτους σήματα ΑΕ. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της μεθόδου DIC για την έναρξη των ΠΡ και των πλευρικών αποφλοιώσεων γενικά επιβεβαιώνονται από τις παρατηρήσεις που προκύπτουν μέσω της ανάλυσης των σημάτων ΑΕ, και αντιστρόφως.



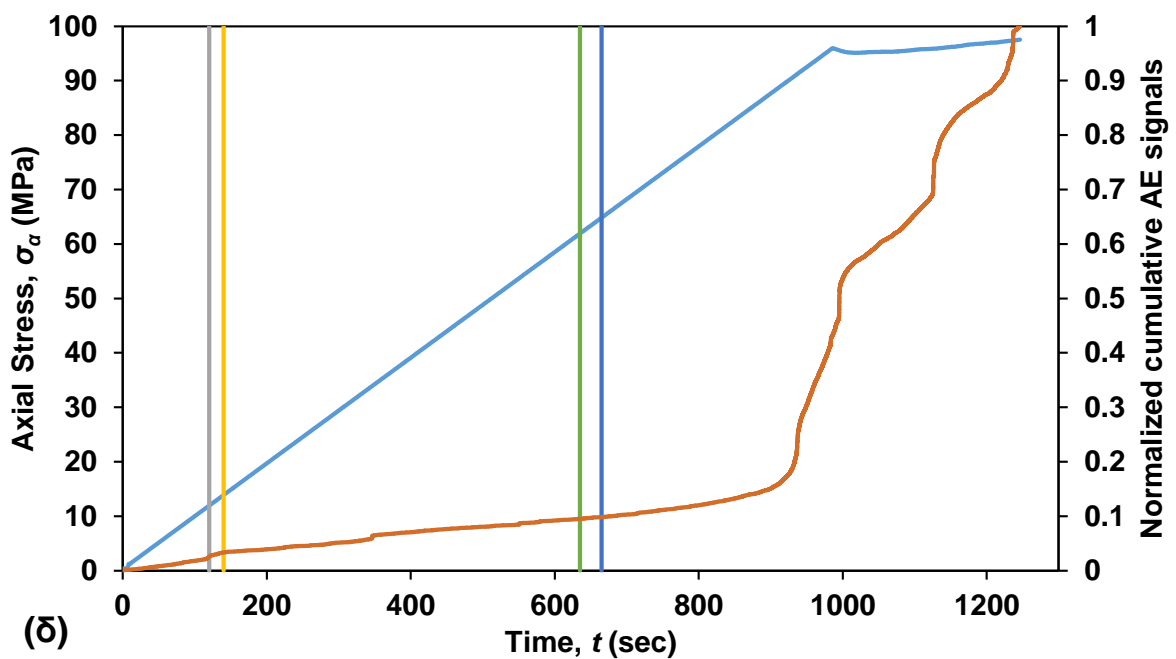
(α)



(β)

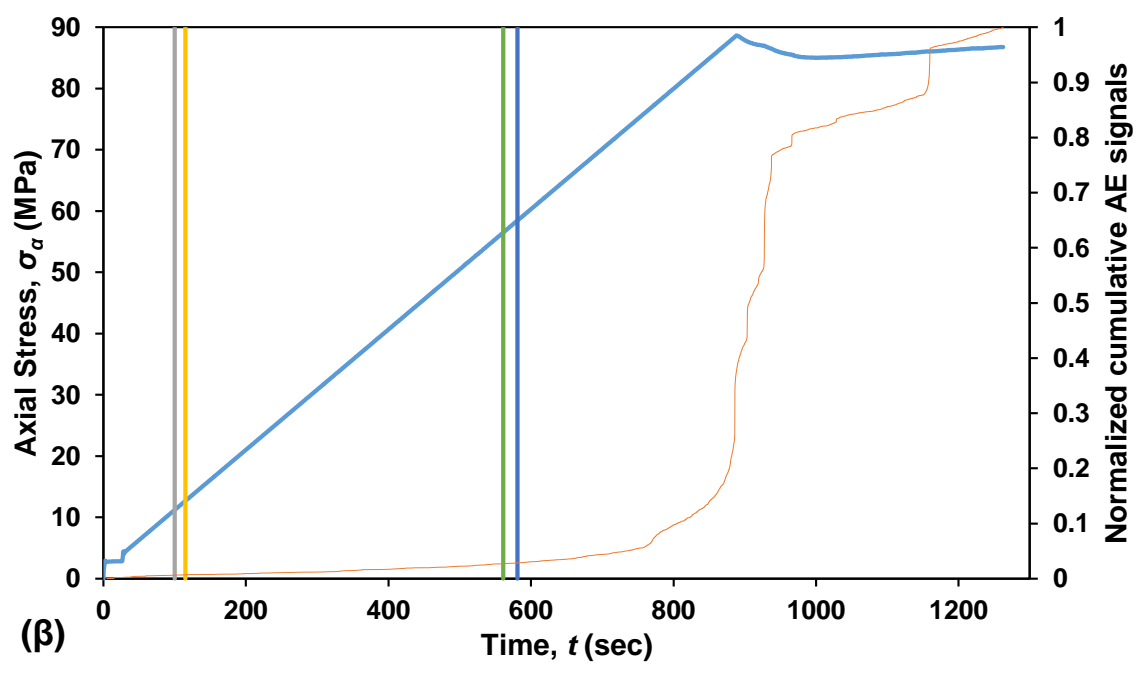
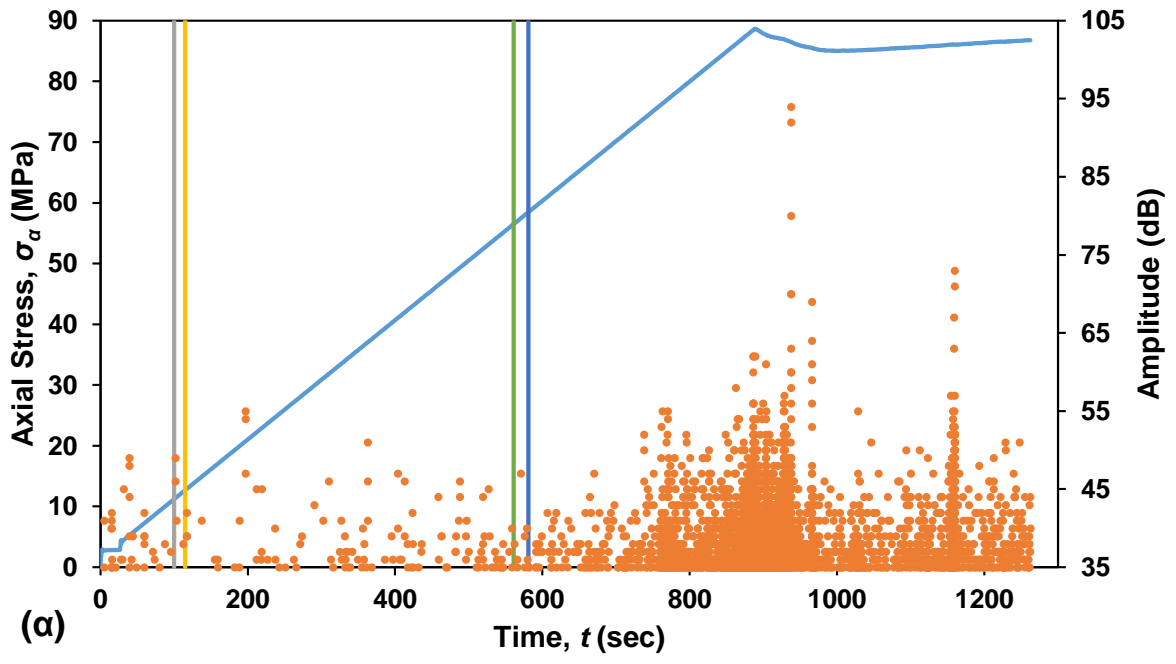


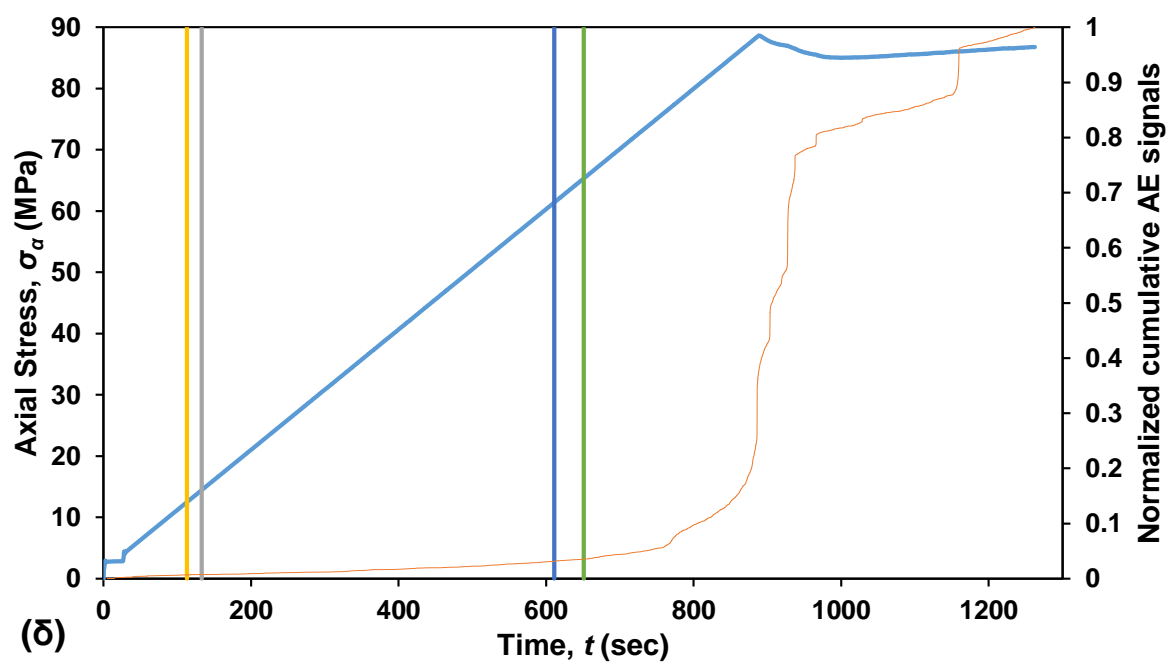
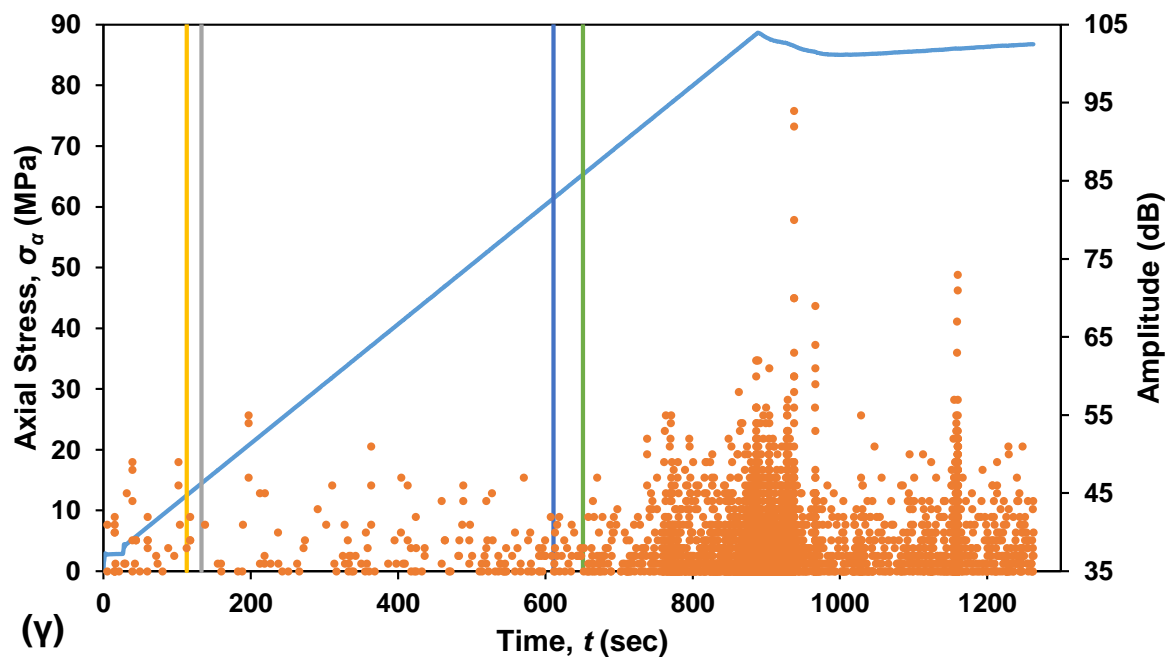
(γ)



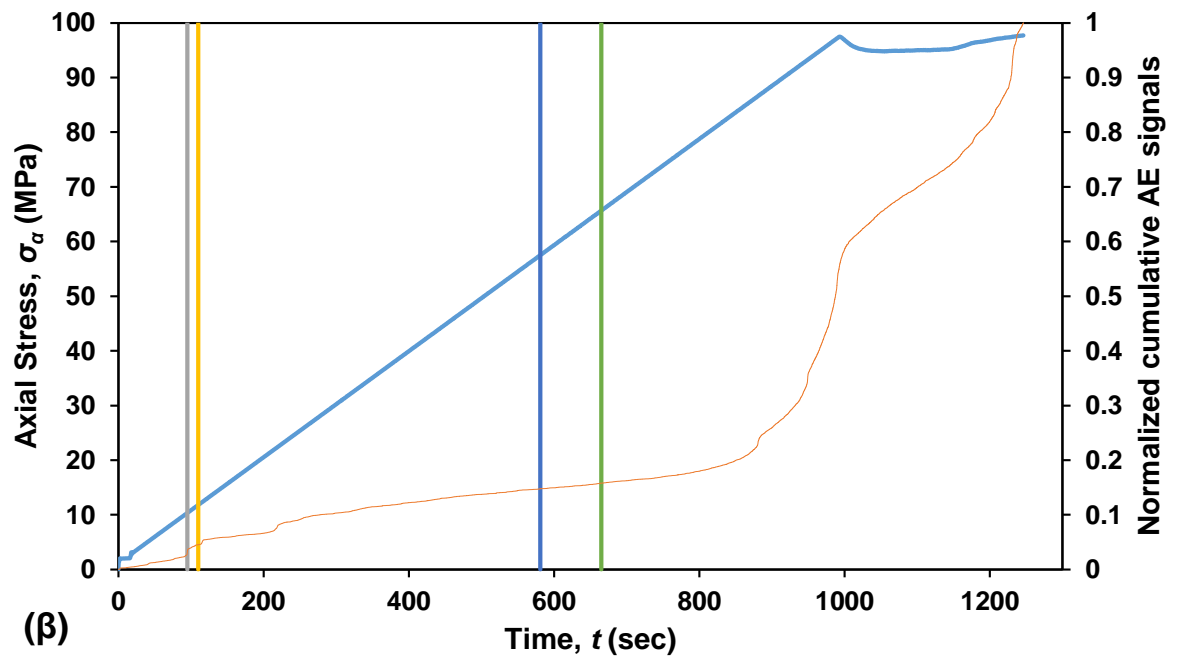
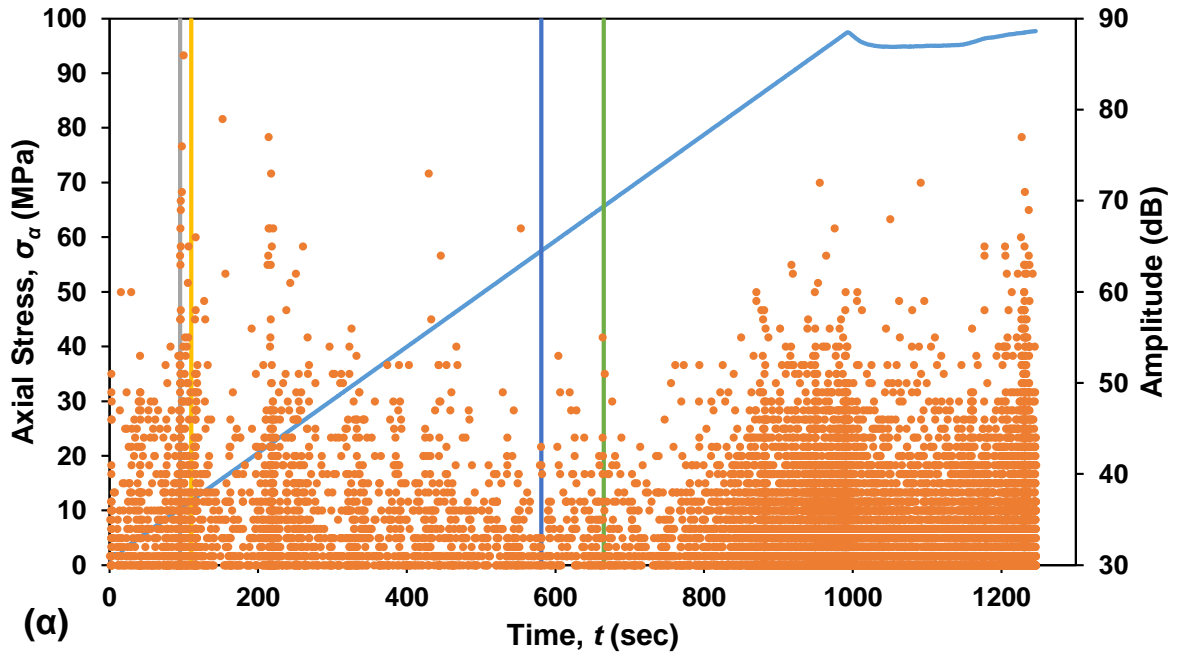
(δ)

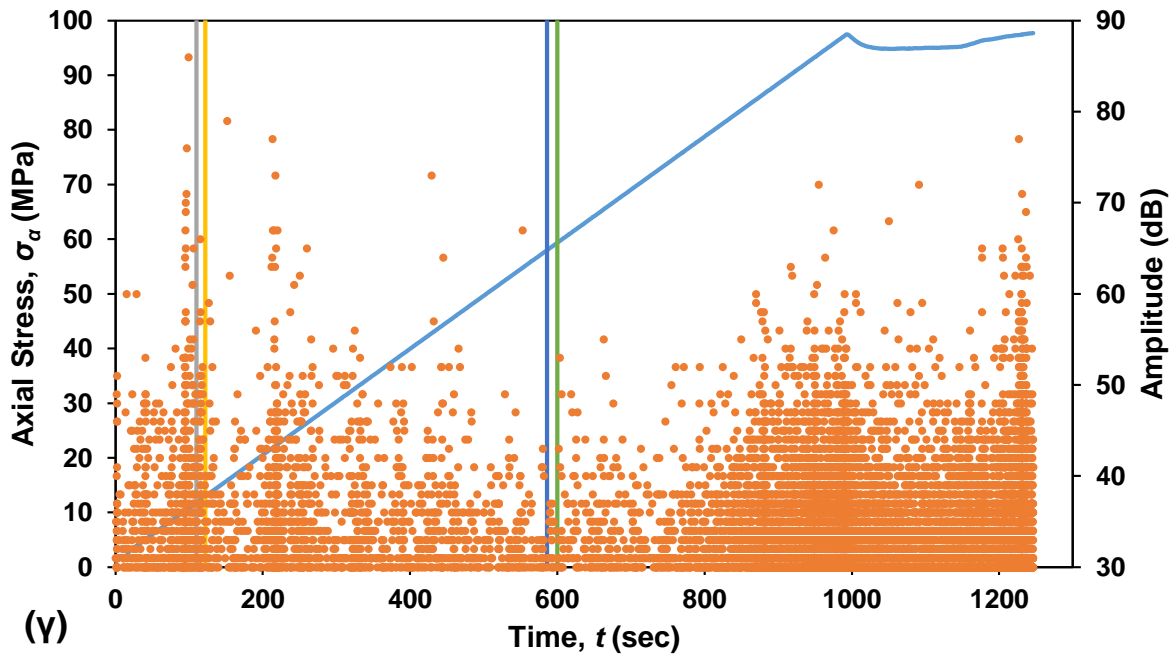
Σχήμα 7-99. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.



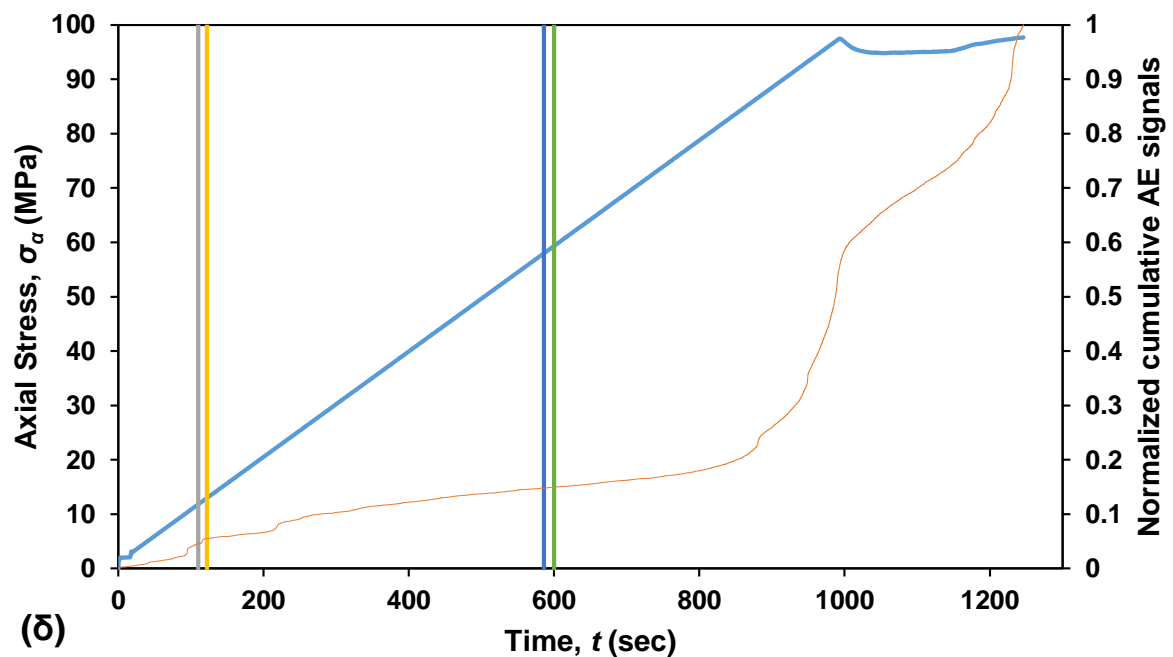


Σχήμα 7-100. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.





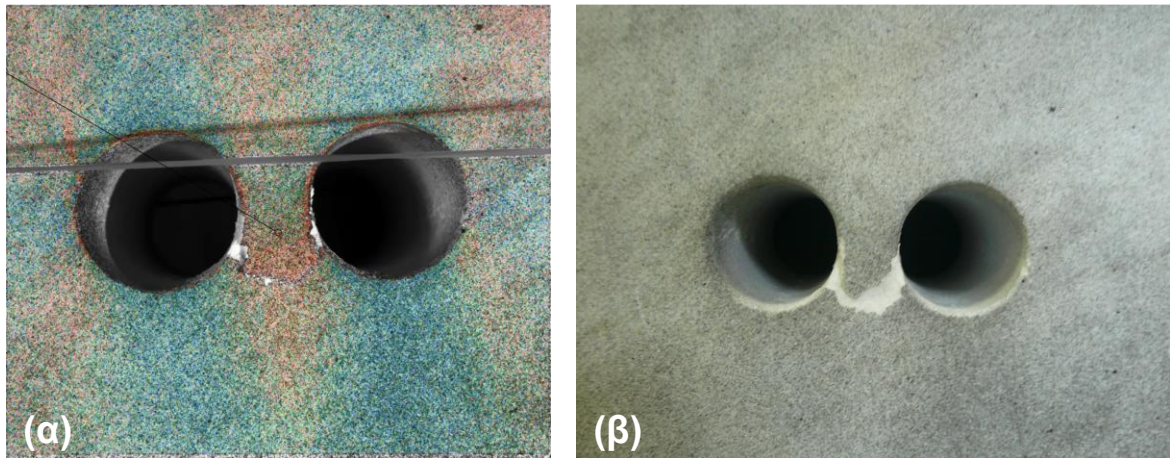
(γ)



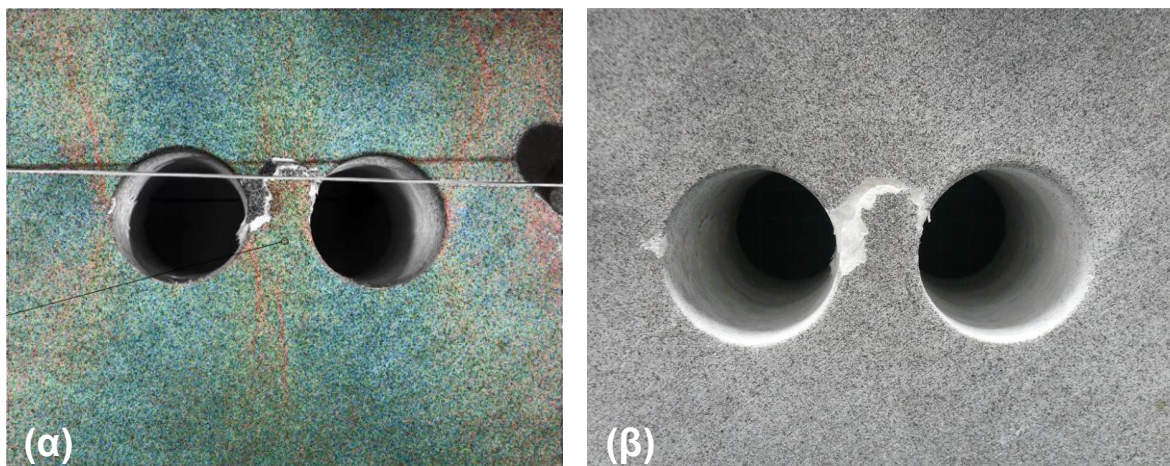
(δ)

Σχήμα 7-101. Διαγράμματα όπου στον πρωτεύοντα άξονα δίνεται η καμπύλη τάσης (MPa)-χρόνου (sec) (μπλε) και στον δευτερεύοντα (α) το πλάτος σημάτων AE (Amplitude (dB)) – χρόνου t (sec) ή (β) το ανηγμένο αθροιστικό πλήθος σημάτων AE – χρόνου t (sec) (ερυθρό) για ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές (οπή Α (α & β) – οπή Β (β & γ)) διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες R ποικιλίας «Βώλακας II». Με γκρι, κίτρινο, σκούρο μπλε και πράσινο φαίνονται οι στιγμές έναρξης των ΠΡ στο άνω (Pu) και κάτω (Pd) όριο κάθε οπής, και η έναρξη των αποφλοιώσεων στην αριστερή (Sl) και δεξιά (Sr) παρειά κάθε οπής αντίστοιχα.

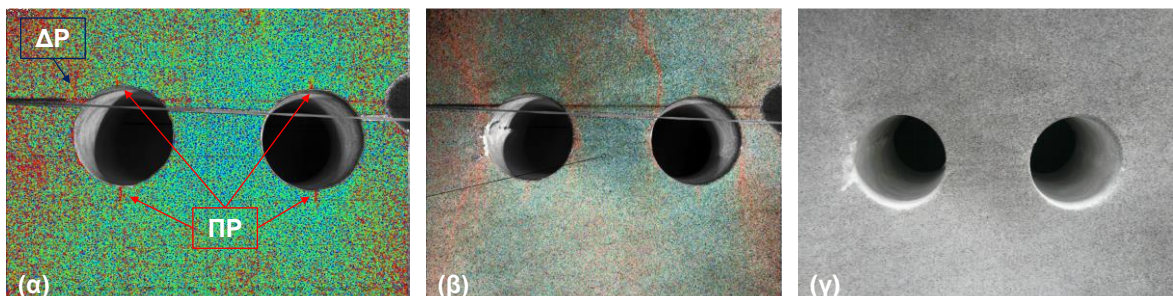
Στα παρακάτω σχήματα δίνονται φωτογραφίες από ΦΜ με διπλή οπή και τα αποτελέσματα της ανάλυσης DIC μετά το πέρας των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης.



Σχήμα 7-102. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.



Σχήμα 7-103. Τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC (α) σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες R της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.

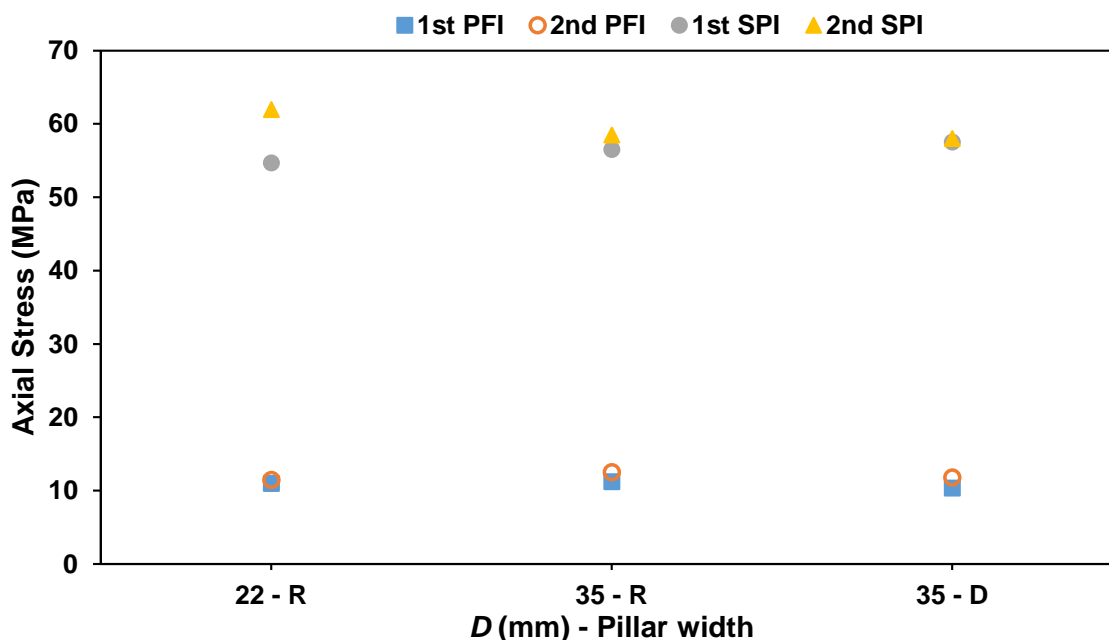


Σχήμα 7-104. (α) Ανεπτυγμένες ΠΡ και ΔΡ (υποδεικνύονται με κόκκινα και μπλε βέλη αντίστοιχα), και (β) τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης DIC σε ΦΜ με διπλές κυλινδρικές οπές διαμέτρου 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες R της ποικιλίας «Βώλακας II» και φωτογραφία (β) του αντίστοιχου ΦΜ μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής θλίψης.

Συγκριτικός πίνακας όπου παρατίθενται οι τιμές των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων κατά την έναρξη των φαινομένων στα ΦΜ με διπλή κυλινδρική οπή δίνεται ακολούθως. Γράφημα όπου απεικονίζονται οι εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις κατά την έναρξη των πρώτων (1^{ωv}) και δεύτερων (2^{ωv}) ΠΡ και αποφλοιώσεων στα ΦΜ, έπεται του προαναφερθέντος πίνακα. Σημειώνεται ότι η δεύτερη εμφάνιση των φαινομένων που δίνεται στο γράφημα δεν αναφέρεται απαραίτητα στη δεύτερη οπή.

Πίνακας 7-9. Συγκριτικός πίνακας εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) όπου σημειώνεται η έναρξη των πρώτων (1st) και δεύτερων (2nd) ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) στις οπές των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» με διπλά κυλινδρικά ανοίγματα, καθώς και η ολοκλήρωση των δοκιμών (σ_{pt}).

<i>D</i> (mm) – πλάτος στύλου		1 st PFI (MPa)	2 nd PFI (MPa)	1 st SPI (MPa)	2 nd SPI (MPa)	σ_{pt} (MPa)
22 mm – <i>R</i>	Οπή Α	11.0	11.5	54.7	65.3	97.5
	Οπή Β	12.0	13.9	61.9	64.8	
35 mm – <i>R</i>	Οπή Α	11.2	12.7	56.5	58.5	88.7
	Οπή Β	12.5	14.4	61.4	65.3	
35 mm – <i>D</i>	Οπή Α	10.3	12.8	57.5	65.7	97.7
	Οπή Β	11.8	13.0	58.0	59.3	

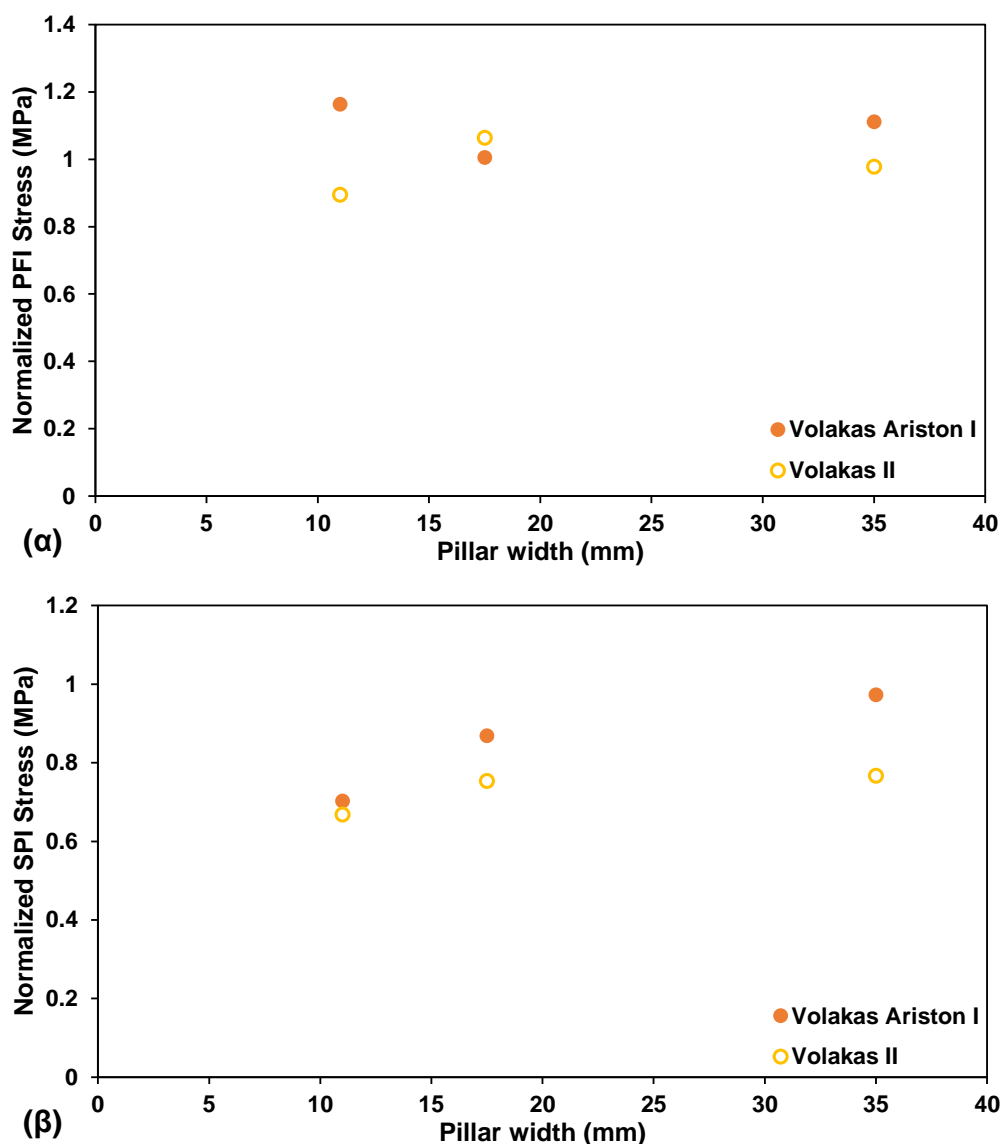


Σχήμα 7-105. Συγκριτικό γράφημα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνιση των φαινομένων συναρτήσει της διαμέτρου των οπών (mm) και του πάχους των στύλων (*R*: πάχος ίσο με μια ακτίνα οπής, *D*: πάχος ίσο με μια διάμετρο οπής) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» με διπλά κυλινδρικά ανοίγματα (μπλε (1st PFI): έναρξη πρώτων ΠΡ, πορτοκαλί (2nd PFI): έναρξη δεύτερων ΠΡ, γκρι (1st SPI): έναρξη πρώτων αποφλοιώσεων, κίτρινο (2nd SPI): έναρξη δεύτερων αποφλοιώσεων).

7.11.3 Σύγκριση τιμών PFI και SPI μονών και διπλών οπών

Στο Σχήμα 7-106 δίνονται διαγράμματα των ανηγμένων τιμών PFI και SPI των ΦΜ με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ με τις μονές οπές ίδιας διαμέτρου.

Στο διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 7-106α το οποίο αναφέρεται στις ανηγμένες τιμές PFI, δεν παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στις τιμές έναρξης του φαινομένου με την παρουσία της δεύτερης οπής, ανεξαρτήτως διαμέτρου ανοίγματος και πάχους στύλου. Αντιθέτως, με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο ανοιγμάτων, φαίνεται στο Σχήμα 7-106β πως οι τιμές SPI που αναφέρονται στις διπλές οπές προσεγγίζουν τις αντίστοιχες των μονών οπών.



Σχήμα 7-106. Ανηγμένες τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ με μονές οπές ίδιας διαμέτρου.

7.12 Χωρικός προσδιορισμός γεγονότων ΑΕ

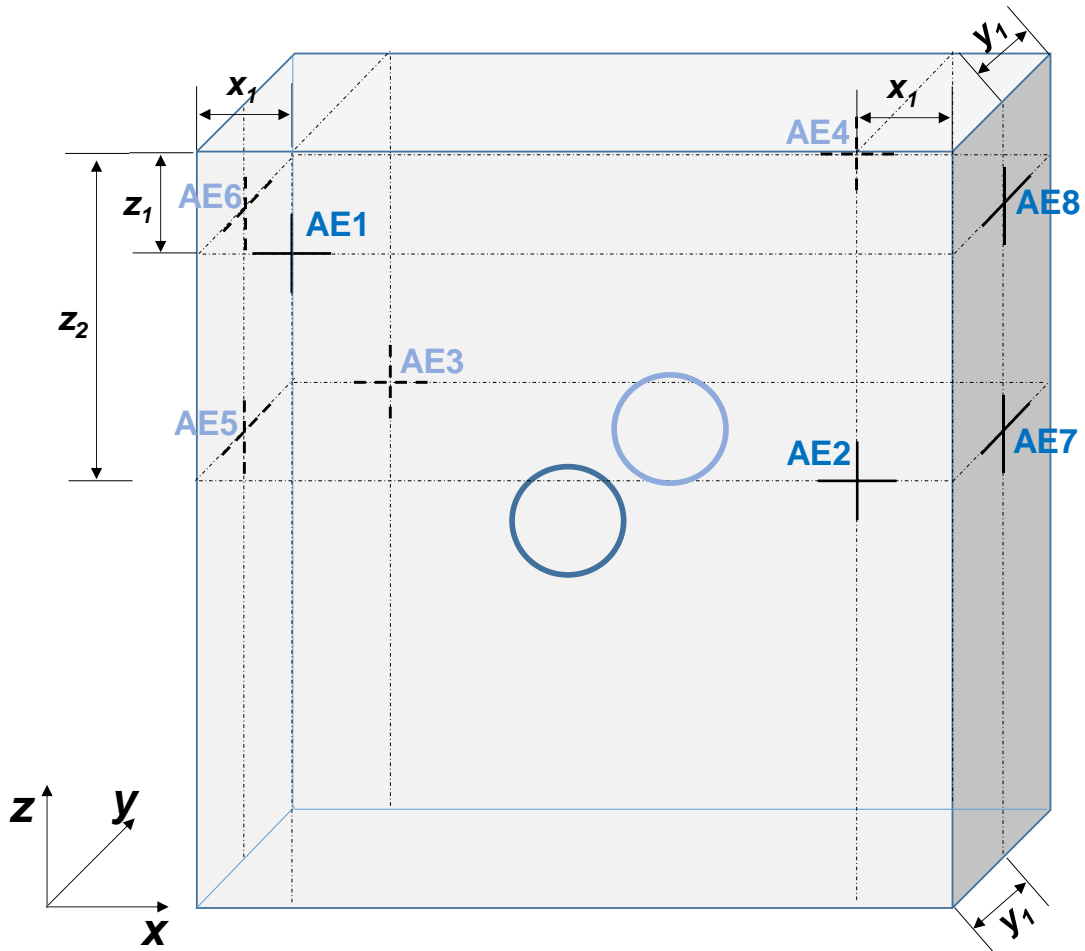
7.12.1 Πειραματική διάταξη

Τα σήματα Ακουστικής Εκπομπής που καταγράφονται κατά τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης στα φυσικά μοντέλα με οπές, δύνανται να αξιοποιηθούν για τον χωρικό προσδιορισμό των μικρορωγμών που δημιουργούνται κατά την πορεία των δοκιμών. Η επεξεργασία των σημάτων ΑΕ πραγματοποιείται στο λογισμικό NOESIS V8.0 της MISTRAS GROUP (Mistras Group Hellas 2017).

Για την επιτυχή αξιοποίηση των σημάτων ΑΕ, εξετάζονται εναλλακτικές θέσεις τοποθέτησης των αισθητήρων ΑΕ στα πρισματικά φυσικά μοντέλα. Είναι σημαντικό οι θέσεις των αισθητήρων να επιτρέπουν την ομαλή ανάπτυξη των σημάτων στο υλικό, ούτως ώστε να περιοριστεί το σφάλμα του χρονικού προσδιορισμού της άφιξής τους. Επιπλέον, συστήνεται να αποφευχθεί η τοποθέτηση αισθητήρων αντικριστά, και δη σε μικρή απόσταση (εν προκειμένω κατά τη διάσταση του πάχους του δοκιμίου), προκειμένου να διευρυνθεί η διαφορά του χρόνου άφιξης του εκάστοτε σήματος ΑΕ από τον κάθε αισθητήρα και να εφαρμοστεί αρτιότερα ο εντοπισμός της θέσης της πηγής.

Η διάταξη που διαπιστώθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή ότι επιτυγχάνει τον ρεαλιστικότερο χωρικό προσδιορισμό των σημάτων ΑΕ που προκύπτουν από μικρορωγματώσεις, παρουσιάζεται στο Σχήμα 7-107. Η διάταξη αυτή συμφωνεί γενικά με την αντίστοιχη που χρησιμοποιούν οι Lin et al. (2015). Η εν λόγω διάταξη προσανατολίζεται στον εντοπισμό της πηγής σημάτων κυρίως στο άνω μισό του φυσικού μοντέλου. Η επιλογή μιας διάταξης που δεν αποδίδει χωρικά τα σήματα ΑΕ σε ολόκληρη τη δομή του ΦΜ κρίνεται ως «αναγκαίος συμβιβασμός», διότι η ύπαρξη ανοίγματος στο κέντρο του μοντέλου αλλοιώνει σημαντικά τα λεμβανόμενα σήματα. Εξάλλου, όσο μειώνεται η αναλογία του πάχους προς τις υπόλοιπες δύο διαστάσεις του δοκιμίου, ο χωρικός προσδιορισμός των σημάτων θα πρέπει να θεωρηθεί ως διδιάστατος (2D). Ως εκ τούτου, επικεντρωνόμενοι στο άνωθεν ήμισυ των ΦΜ, η διάσταση του πάχους αποκτά υπόσταση και διευκολύνει τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται στο NOESIS σε τρεις διαστάσεις (3D). Ουσιαστικά, προκειμένου για τριδιάστατες (3D) χωρικές αναλύσεις, η επιθυμητή μορφή της παρακολουθούμενης δομής καλό είναι να παραπέμπει σε τυπικό γεωμετρικό σχήμα (πρίσμα, κύβος, κύλινδρος κ.λπ.).

Στο παρακάτω σκαρίφημα, η θέση των αισθητήρων ΑΕ στις εμφανείς και μη εμφανείς έδρες του πρίσματος υποδεικνύονται από τα σταυρονήματα συνεχούς και διακεκομμένης γραμμής, αντίστοιχα, που συνοδεύονται από τις ονομασίες «ΑΕ#», όπου # ο αύξων αριθμός έκαστου αισθητήρα ΑΕ.



Σχήμα 7-107. Θέσεις αισθητήρων ΑΕ στα φυσικά μοντέλα της παρούσας διατριβής, με σκοπό τον χωρικό προσδιορισμό των σημάτων ΑΕ.

Για τον χωρικό προσδιορισμό των σημάτων ΑΕ στα ΦΜ, ορίζονται οι διαστάσεις του δοκιμίου και οι θέσεις των αισθητήρων σε καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Εν συνεχεία επιλέγεται το είδος της ανάλυσης που πρόκειται να πραγματοποιηθεί, η οποία είναι εν προκειμένω τριδιάστατη ανάλυση (3D). Ακολούθως, για τον καθορισμό του χρονικού διαστήματος κατά το οποίο τα σήματα που λαμβάνουν οι αισθητήρες ΑΕ αντιστοιχίζονται στο αμέσως προηγούμενο γεγονός ΑΕ, ορίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

- το χρονικό διάστημα EDT (event definition time) κατά το οποίο τα λελαμβανόμενα σήματα ΑΕ από τους αισθητήρες αποδίδονται σε ένα γεγονός ΑΕ,

- το χρονικό διάστημα LT (lockout time) που έπεται του προαναφερθέντος και εντός του οποίου απομονώνονται λελαμβανόμενα σήματα θορύβου και ανακλάσεων στις έδρες του δοκιμίου, τα οποία κατά κανόνα ακολουθούν χρονικά τα σήματα των γεγονότων ΑΕ.

Επιπλέον, στο ίδιο στάδιο ορίζονται:

- ο ελάχιστος και μέγιστος αριθμός σημάτων ΑΕ που απαιτούνται για τον ορισμό ενός γεγονότος ΑΕ. Λόγω της φύσης του τριδιάστατου χωρικού προσδιορισμού ο ελάχιστος αριθμός δε δύναται να είναι μικρότερος των τεσσάρων (4) σημάτων
- ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων που θα πραγματοποιήσει το λογισμικό κατά τους υπολογισμούς του προκειμένου να περιοριστούν τα σφάλματα (maximum number of iterations)
- ο συντελεστής (fail event correlations) βάσει του οποίου ορίζεται το κατώτερο αποδεκτό ποσοστό συσχέτισης των σημάτων, δηλαδή το κατά πόσο τα σήματα θεωρούνται, σύμφωνα με το λογισμικό, πως αντιστοιχούν όντως στο ίδιο γεγονός, ώστε να μη συνυπολογίζονται απλώς και μόνο λόγω του χρόνου άφιξης τους που τυγχάνει να βρίσκεται εντός του event definition time.

Έπειτα από τον ορισμό των παραπάνω κρίσιμων παραμέτρων, ορίζεται μια ταχύτητα διάδοσης των σημάτων για το υλικό, κοινή στους τρεις (3) άξονες, βάσει της οποίας προσδιορίζονται χωρικά τα σήματα. Σημειώνεται ότι η εν λόγω ταχύτητα δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με την ταχύτητα των διαμηκών κυμάτων V_p , καθώς οι αισθητήρες ΑΕ συλλαμβάνουν οποιοδήποτε σήμα προσπίπτει κάθετα στην επιφάνειά τους (Mistras Group Hellas 2015). Εν ολίγοις, συλλαμβάνονται τόσο τα διαμήκη P και εγκάρσια S κύματα, όσο και τα επιφανειακά κ.ο.κ. καθώς και ανακλάσεις αυτών, όπως προαναφέρθηκε. Είναι συνεπώς πιθανό, λόγω της γωνίας πρόσπτωσης των σημάτων στην επιφάνεια του αισθητήρα ΑΕ να μην καταγράφονται ορισμένα P και S κύματα. Αιτία για το φαινόμενο αυτό αποτελεί η σχετική θέση του αισθητήρα ΑΕ και της πηγής του εκπεμπόμενου σήματος.

Ως χρόνος άφιξης των σημάτων ΑΕ στην παρούσα διατριβή ορίζεται η χρονική στιγμή κατά την οποία το πλάτος της κυματομορφής του σήματος υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι (First Threshold Crossing - FTC).

Τέλος, σημειώνεται πως η ποιότητα της τελικής ανάλυσης είναι αλληλένδετη με εκείνη των καταγραφόμενων σημάτων ΑΕ. Ως εκ τούτου, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά τη ρύθμιση των παραμέτρων του καταγραφικού (acquisition) συστήματος ΑΕ (PDT, HDT, HLT, threshold, waveform length κ.λπ.).

7.12.2 Αποτελέσματα χωρικού εντοπισμού

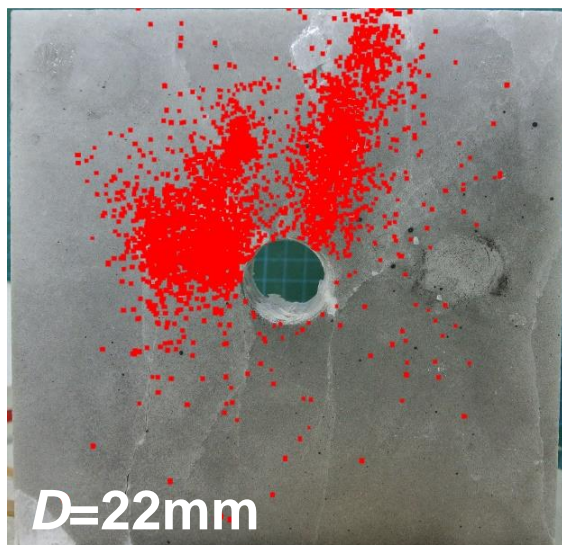
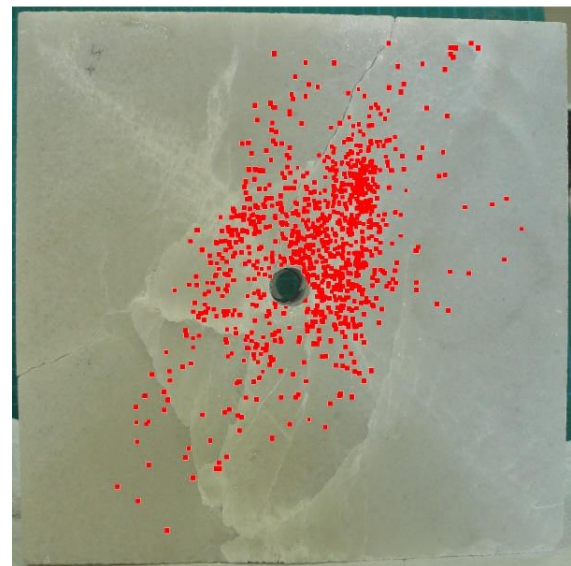
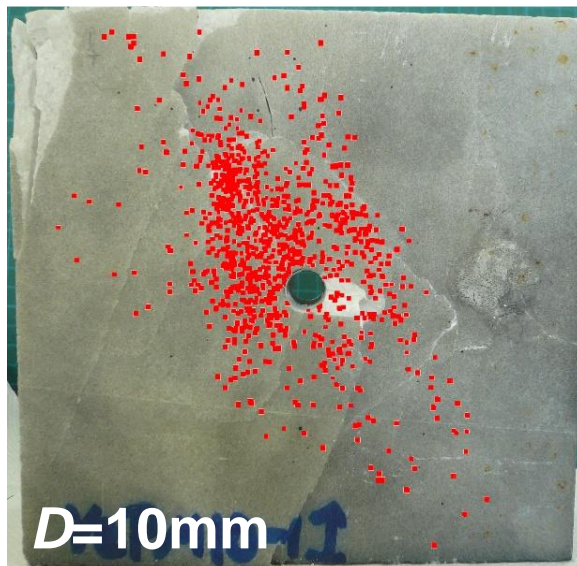
Ο Πίνακας 7-10 παραθέτει τις τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τα δύο (2) υλικά κατά το στάδιο της καταγραφής (acquisition) και της μετέπειτα ανάλυσης (post-processing). Για την επιλογή των συγκεκριμένων παραμέτρων αξιολογείται η φύση των, υπό μελέτη, υλικών, τα χαρακτηριστικά του διαθέσιμου εξοπλισμού καταγραφής ακουστικών εκπομπών, όπως επίσης και οι ιδιαιτερότητες της επερχόμενης ανάλυσης. Προτεραιότητα δίνεται στη σωστή καταγραφή της κυματομορφής κάθε σήματος ΑΕ, ούτως ώστε προσεγγίζοντας τη μέγιστη αντοχή του ΦΜ κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης, να διαχωρίζονται τα καταγραφόμενα κατά ριπάς σήματα ΑΕ, ούτως ώστε να μη χρεώνονται σε ένα (1) γεγονός περισσότερα του ενός σήματα ΑΕ σε κάθε αισθητήρα.

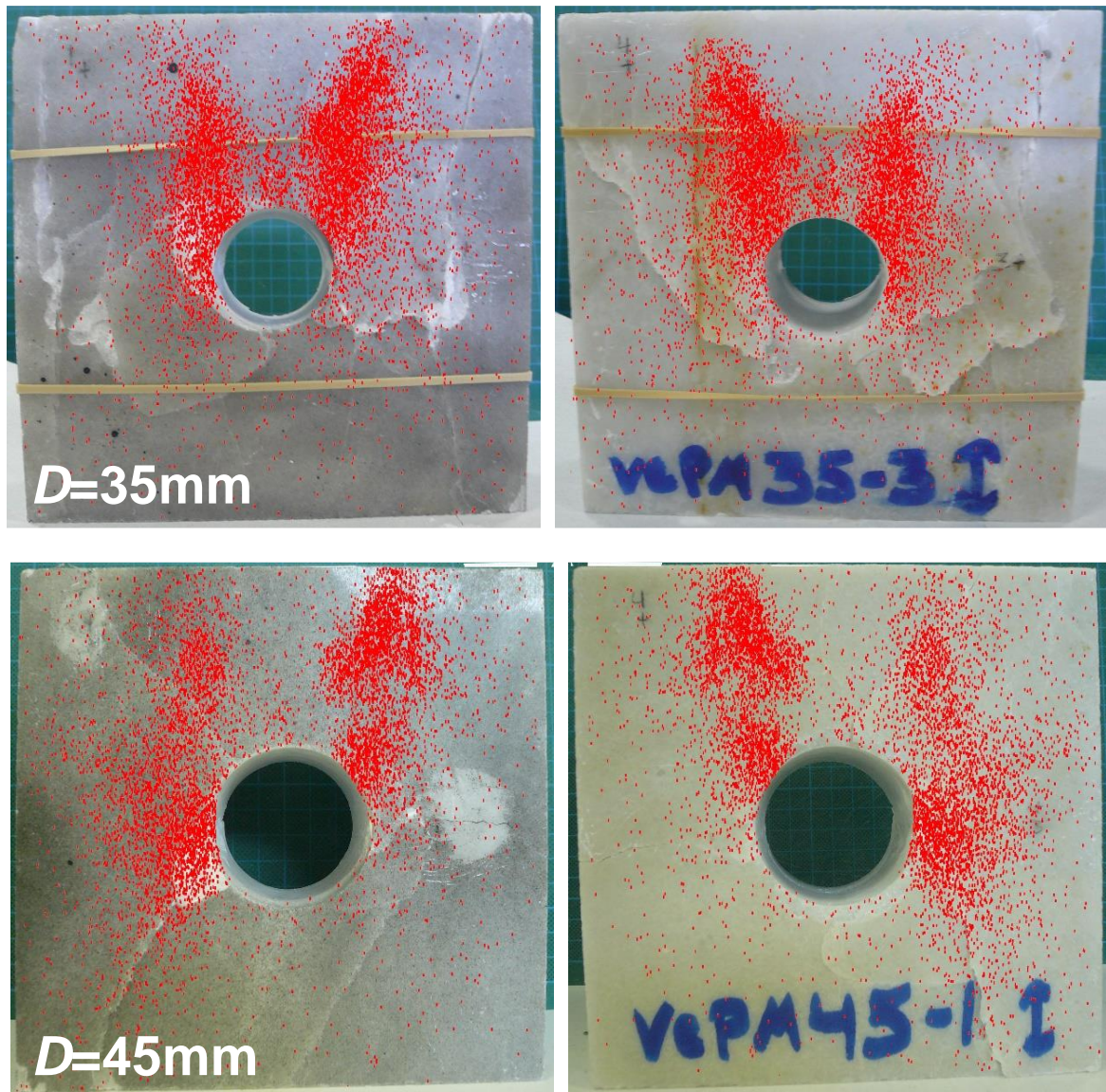
Πίνακας 7-10. Τιμές παραμέτρων ΑΕ κατά το στάδιο της καταγραφής (acquisition) και της μετέπειτα ανάλυσης (post-processing) των ασβεστιτικών ποικιλιών μαρμάρου «Βέροια» και «Νεφέλη».

		Μάρμαρο «Βέροια»	Μάρμαρο «Νεφέλη»
Acquisition	Sensor Frequency	100 kHz – 1 MHz	
	PDT (μsec)	20	
	HDT (μsec)	100	
	HLT (μsec)	300	
	Max Duration (msec)	100	
	Threshold (dB)	45	
	Pre-Amplifier (dB)	40	
	Sample rate (MS/sec)	1	
	Pre-Trigger	125	
	Waveform length (msec)	5	
Post-processing	Event Definition Time (μsec)	200	130
	Lockout Time (μsec)	0	
	Wave velocity (m/sec)	600-900	700-1300

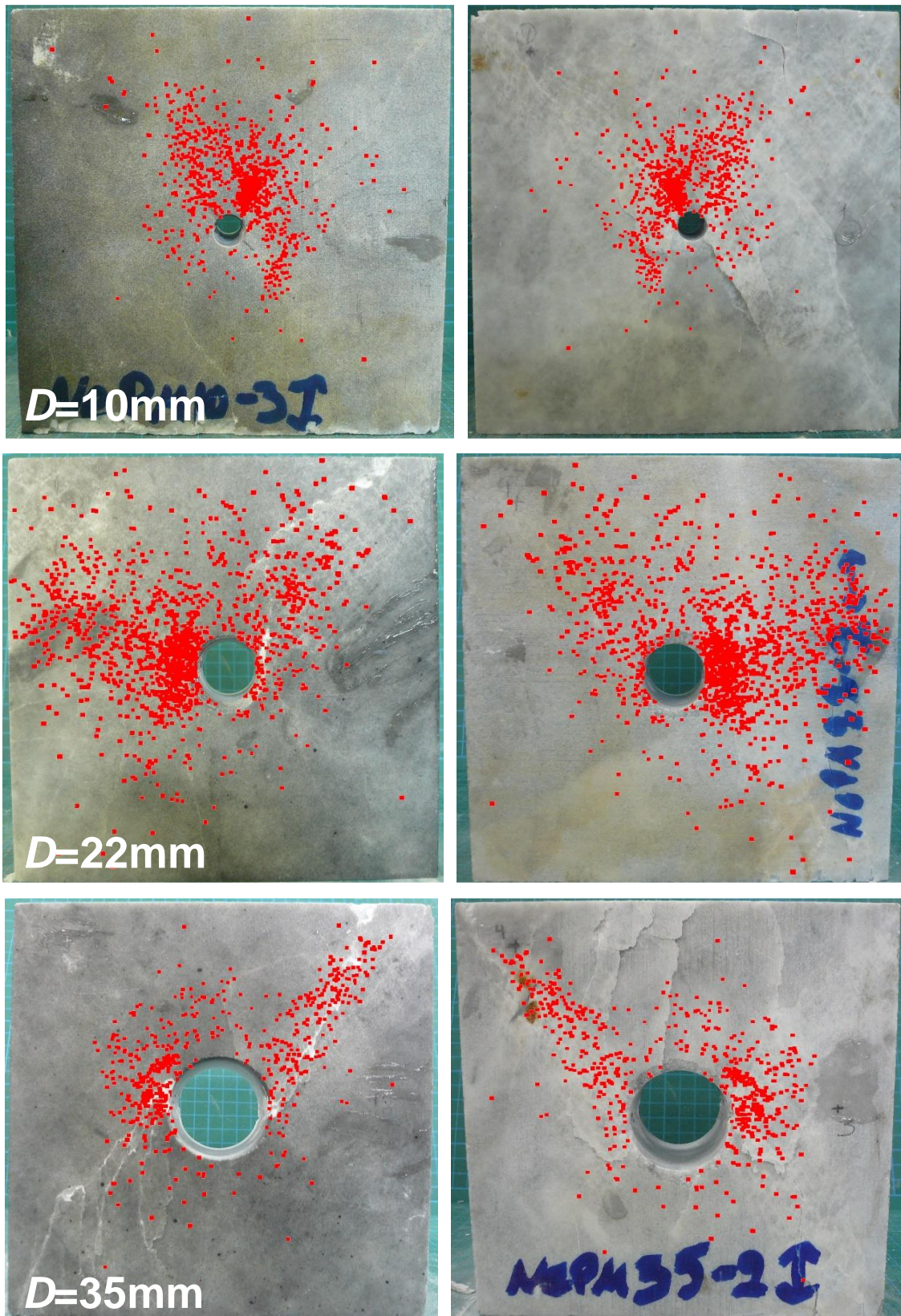
	Minimum number of AE events	4
	Maximum number of AE events	8
	Fail event correlations below	0.7
	Maximum number of iterations	256
	Arrival timing	FTC

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται ενδεικτικά αποτελέσματα του χωρικού προσδιορισμού των σημάτων AE στα ΦΜ των δύο (2) ασβεστιτικών μαρμάρων που μελετώνται στην παρούσα διατριβή, ήτοι τις ποικιλίες «Βέροια» και «Νεφέλη». Με κόκκινο απεικονίζονται στον χώρο τα σήματα AE όπως προκύπτουν από 3D χωρική ανάλυση προβεβλημένα στο επίπεδο XZ, όπου X το μήκος, Y το πλάτος και Z το ύψος των ΦΜ (βλ. Σχήμα 7-14).





Σχήμα 7-108. Ενδεικτικά αποτελέσματα τριδιάστατης (3D) χωρικής ανάλυσης γεγονότων ΑΕ σε ΦΜ της ποικιλίας «Βέροια». Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται οι εντοπισμένες θέσεις της πηγής των γεγονότων ΑΕ. Στην αριστερή και δεξιά στήλη παρουσιάζεται η προβολή των γεγονότων ΑΕ στην εμπρόσθια και οπίσθια επιφάνεια των ΦΜ, αντίστοιχα. Οι διάμετροι των οπών των παρουσιαζόμενων ΦΜ είναι 10, 22, 35 και 45 mm, από την 1^η σειρά έως την 4^η αντίστοιχα.



Σχήμα 7-109. Ενδεικτικά αποτελέσματα τριδιάστατης (3D) χωρικής ανάλυσης γεγονότων ΑΕ (με κόκκινο) σε ΦΜ της ποικιλίας «Νεφέλη», όπως αυτά προκύπτουν στο NOESIS. Στην αριστερή στήλη παρουσιάζεται η πλευρά των ΦΜ στην οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος DIC, ενώ στη δεξιά στήλη η πίσω πλευρά. Οι διαμέτροι των οπών των παρουσιαζόμενων ΦΜ είναι 10, 22, και 35 mm, από την 1^η σειρά έως την 3^η αντίστοιχα.

Από τα ανωτέρω σχήματα προκύπτει ικανοποιητικός χωρικός εντοπισμός των γεγονότων ΑΕ στα ΦΜ των δύο (2) ασβεστιτικών ποικιλιών μαρμάρου. Σημειώνεται πως στις παραπάνω εικόνες δίνονται οι προβολές των εντοπισμένων πηγών ΑΕ στο επίπεδο ΧΖ, κάτι που σημαίνει πως η συντριπτική πλειονότητά τους αντιστοιχεί στο εσωτερικό των ΦΜ, που ήταν και ο στόχος της ανάλυσης. Εξάλλου, όπως παρουσιάζεται στις παραγράφους 7.6 και 7.7, στα ΦΜ των ασβεστιτικών ποικιλιών σχηματίζονται εσωτερικές ΜΕΡ στο επίπεδο ΧΖ, όπως φαίνεται και από τις εικόνες στο Σχήμα 7-15 και στο Σχήμα 7-31 όπου παρατηρείται η ρωγμάτωση πλευρικά των αντίστοιχων ΦΜ στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Τα παραπάνω αιτιολογούν και τις όποιες παρατηρούμενες αποκλίσεις και αναντιστοιχίες μεταξύ του μακροσκοπικά παρατηρούμενου τελικού μοτίβου ρωγμάτωσης της εμπρόσθιας και οπίσθιας επιφάνειας παρατήρησης των ΦΜ και των σημειωμένων γεγονότων ΑΕ στον χώρο.

Τέλος, από τις εικόνες στο Σχήμα 7-108, συμπεραίνεται πως ο κύριος όγκος των γεγονότων ΑΕ που προκύπτουν από την ανάλυση στα ΦΜ του μαρμάρου «Βέροια», αναφέρεται στις ΔΡ και στις πλευρικές αποφλοιώσεις. Αντιστοίχως, στο Σχήμα 7-109, ο κύριος όγκος των γεγονότων ΑΕ που προσδιορίζονται χωρικά στα ΦΜ του μαρμάρου «Νεφέλη», αναφέρονται στις συζυγείς διαγωνίως αναπτυσσόμενες ζώνες διάτμησης και στις πλευρικές αποφλοιώσεις. Το πλήθος των γεγονότων ΑΕ που αναφέρονται στον σχηματισμό της ΠΡ είναι σαφώς μικρότερο για τα δύο πετρώματα, και κυρίως για το μάρμαρο «Νεφέλη».

7.13 Υπό μελέτη φυσικά μοντέλα και βιβλιογραφία

Ο Πίνακας 7-11 παραθέτει τις μέσες εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις σ_{PFI} (MPa) κατά τις οποίες σημειώνεται η έναρξη των ΠΡ για καθένα από τα έξι (6) εξεταζόμενα υλικά. Σημειώνεται ότι για κάθε υλικό (κυρίως στις ασβεστιτικές ποικιλίες μαρμάρου), εξαιρούνται ορισμένες μετρήσεις που δε βρίσκονται σε συνέχεια με εκείνες των υπολοίπων ΦΜ με την ίδια διάμετρο οπής. Επιπλέον στον ίδιο πίνακα, παρατίθεται ο λόγος της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_{PFI} (MPa) για την έναρξη των ΠΡ προς την έμμεση αντοχή σε εφελκυσμό (Brazilian) σ_{tB} (MPa) του αντίστοιχου υλικού.

Πίνακας 7-11. Μέση εφαρμοζόμενη αξονική τάση έναρξης ΠΡ (σ_{PFI} (MPa)) στα υπό μελέτη φυσικά μοντέλα. Επιπλέον, ο λόγος της αξονικής τάσης προς την εφελκυστική αντοχή Brazilian σ_{tB} δίνεται στην 4^η στήλη.

Υλικό	Διάμετρος οπής (mm)	σ_{PFI} (MPa)	$\sigma_{PFI} / \sigma_{tB}$
Γύψος	28	2.3	1.37
Μάρμαρο «Βέροια»	10	19.4	2.16
	22	16.5	1.84
	35	13.5	1.50
Μάρμαρο «Νεφέλη»	10	25.0	3.40
	22	21.5	2.93
	35	18.5	2.52
Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»	10	8.6	1.88
	22	7.8	1.69
	35	7.3	1.59
	45	6.1	1.32
	61	4.4	0.95
Μάρμαρο «Βώλακας II»	10	13.8	2.44
	22	12.3	2.18
	35	10.5	1.86
	45	7.6	1.34
Ασβεστόλιθος «Απόλλων»	22	19.2	1.77

Ο Πίνακας 7-12 παραθέτει τις μέσες εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις σ_{SPI} (MPa) κατά τις οποίες σημειώνεται η έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων για καθένα από τα έξι (6) εξεταζόμενα υλικά. Σημειώνεται ότι για κάθε υλικό (κυρίως στις ασβεστιτικές ποικιλίες μαρμάρου), εξαιρούνται ορισμένες μετρήσεις που δε βρίσκονται σε συνέχεια με εκείνες των υπολοίπων ΦΜ με την ίδια διάμετρο οπής. Επιπλέον στον ίδιο πίνακα, παρατίθεται ο λόγος της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης σ_{SPI} (MPa) για την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη σ_{ci} (MPa) του αντίστοιχου υλικού.

Πίνακας 7-12. Μέση εφαρμοζόμενη αξονική τάση έναρξης πλευρικών αποφλοιώσεων (σ_{SPI} (MPa)) στα υπό μελέτη φυσικά μοντέλα. Επιπλέον, ο λόγος της αξονικής τάσης προς την αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική θλίψη σ_{ci} του αντίστοιχου υλικού δίνεται στην 4^η στήλη.

Υλικό	Διάμετρος οπής (mm)	σ_{SPI} (MPa)	$\sigma_{SPI} / \sigma_{ci}$
Γύψος	28	4.6	0.67
Μάρμαρο «Βέροια»	10	78.7	0.65
	22	73.5	0.61
	35	63.0	0.53
Μάρμαρο «Νεφέλη»	10	62.0	0.70
	22	50.0	0.57
	35	47.3	0.55
Μάρμαρο «Βώλακας Αριστον Ι»	10	52.5	0.44
	22	50.0	0.42
	35	47.6	0.40
	45	43.8	0.37
	61	37.0	0.31
Μάρμαρο «Βώλακας ΙΙ»	10	91.0	0.73
	22	81.8	0.65
	35	75.0	0.60
	45	70.7	0.57
Ασβεστόλιθος «Απόλλων»	22	80.0	0.47

Στο Σχήμα 7-110, δίνεται σε γράφημα συναρτήσεως της διαμέτρου της οπής (mm) του ΦΜ η εφαρμοζόμενη αξονική τάση σ_{PFI} (MPa) έναρξης της ΠΡ για κάθε ΦΜ της παρούσας διατριβής, ανηγμένη ως προς την αντοχή σε έμμεσο εφελκυσμό (Brazilian - BTS) του αντίστοιχου υλικού. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα, αποτυπώνονται αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα από παρόμοια φυσικά μοντέλα σε άλλα είδη πετρώματος που έχουν δημοσιευτεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Γύψος (παρούσα μελέτη, (Lajtai 1971, Suknev et al. 2003), λεπτόκοκκα ασβεστοπικά και δολομιτικά μάρμαρα (παρούσα μελέτη), ασβεστόλιθος (παρούσα μελέτη, (Carter 1992a, 1992b), μεσόκοκκος γρανίτης (Carter et al. 1991, Carter 1992a, Martin 1993, Dzik & Lajtai 1996) και ποτάσα (Carter 1992a) συνθέτουν τα υλικά του γραφήματος. Αναφορικά με τις τιμές των ΦΜ γύψου των Suknev et al. (2003), η ανηγμένη προς την αντοχή του υλικού σε άμεσο εφελκυσμό σ_{ti} (direct tensile strength – DTS) τάση

PFI προέκυψε έπειτα από υπολογισμό της μέσω του λόγου τάσης σ_{PFI} προς τη θλιπτική αντοχή του υλικού σ_{ci} που δημοσίευσαν οι συγγραφείς στην εργασία τους. Για τον υπολογισμό των υπόλοιπων ανηγμένων τιμών σ_{PFI} χρησιμοποιείται η αντοχή BTS του εκάστοτε υλικού που δημοσιεύτηκε στην αντίστοιχη εργασία.

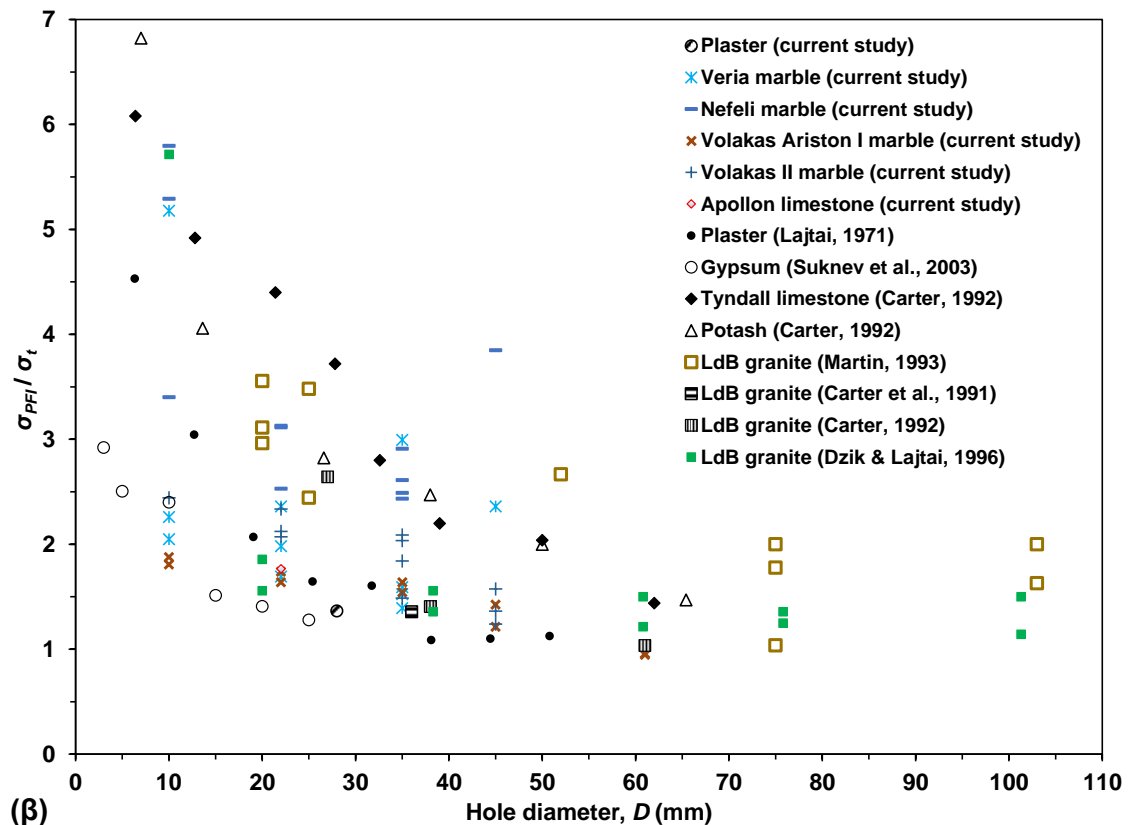
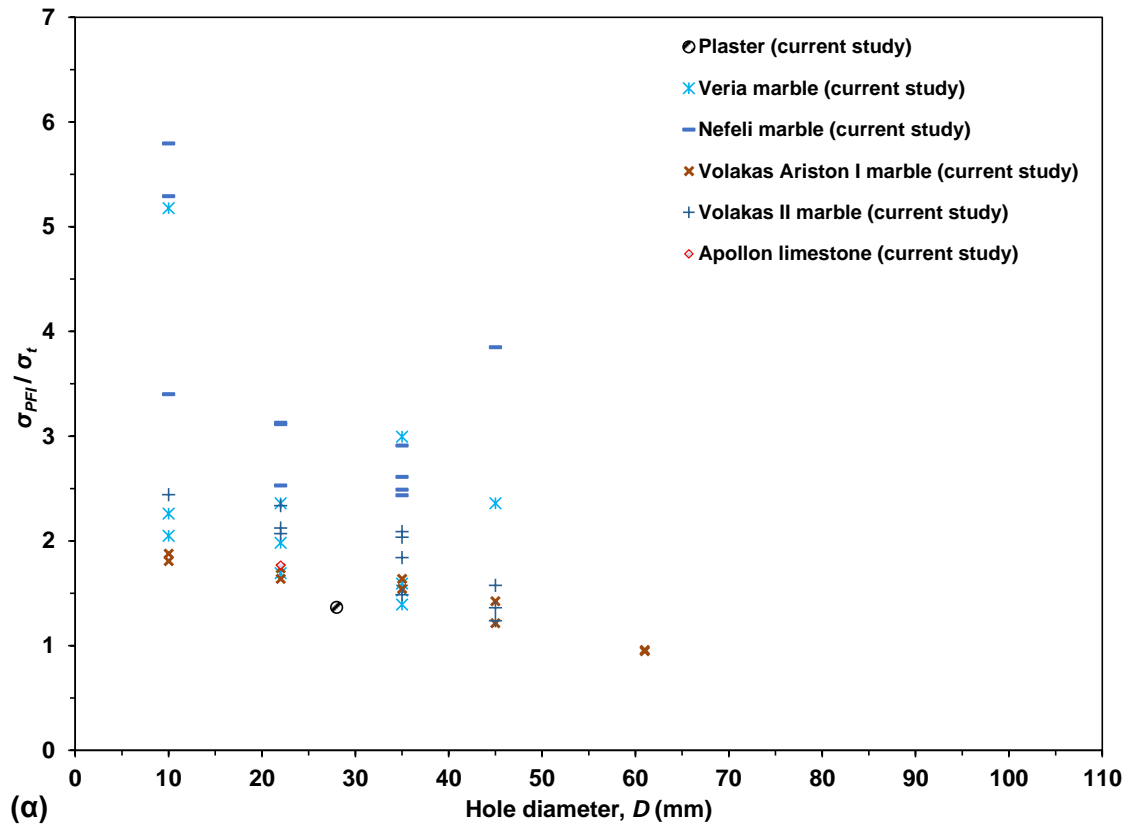
Οι ανηγμένες τιμές αξονικής τάσης σ_{PFI} φαίνεται να ακολουθούν μια εκθετικά μειούμενη τάση με την αύξηση της διαμέτρου των οπών. Οι τιμές περιβάλλονται από ένα ανώτερο και ένα κατώτερο όριο ανεξαρτήτως των χαρακτηριστικών και της ορυκτολογίας του υλικού, χωρίς να παρατηρείται σαφής διαχωρισμός των τιμών συναρτήσει της ψαθυρότητας των υλικών.

Στο παρακάτω γράφημα, ανεξαρτήτως υλικού, ο λόγος έναρξης της ΠΡ προς την εφελκυστική αντοχή του υλικού παραμένει σταθερή μεταξύ του εύρους 1-2 καθώς η διάμετρος της οπής ξεπερνά τη διάμετρο NX (54 mm) που συνήθως χρησιμοποιείται στις δοκιμές Brazilian. Επιπλέον, όσο μεγαλώνει η διάμετρος της οπής, η απαιτούμενη εφαρμοζόμενη αξονική τάση που οδηγεί σε έναρξη ΠΡ τείνει προς την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Τα ψαθυρά υλικά διατηρούν χαμηλό λόγο στην τεταγμένη συγκριτικά με τα πιο όλκιμα. Συγκεκριμένα, ο λόγος $\sigma_{PFI} / \sigma_{tB}$ των ψαθυρών υλικών κυμαίνεται μεταξύ 1-3. Σε λιγότερο ψαθυρά ΦΜ, οι εν λόγω τιμές είναι υψηλότερες, κάτι που γίνεται πιο αισθητό σε στενότερα ανοίγματα, με διάμετρο οπών μικρότερη των 20 mm. Η εν προκειμένω διαφοροποίηση μπορεί να είναι φαινομενική, καθώς οι συνολικές παραμορφώσεις στις ΠΥΣΤ των όλκιμων υλικών είναι υψηλότερες από των αντίστοιχων ψαθυρών. Οι εν λόγω εκτεταμένες παραμορφώσεις ενδεχομένως καλύπτουν την πραγματική χρονική στιγμή έναρξης της ρωγμής κατά την εκ των υστέρων ανάλυση των πειραματικών δεδομένων παρακολούθησης των ΦΜ, οδηγώντας σε καταγραφή υψηλότερων εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων έναρξης του φαινομένου. Η διάμετρος των 20 mm εμφανίζεται στο γράφημα ως το πρώτο (1^ο) ορόσημο πριν από τη διάμετρο NX που αποτελεί το δεύτερο (2^ο), καθώς οι τιμές της τεταγμένης για τα ανοίγματα με διάμετρο μικρότερη των 20 mm φτάνουν έως και τέσσερις (4) φορές υψηλότερα από τις αντίστοιχες των μεγαλύτερων σε διάμετρο.

Όπως γίνεται λόγος στην παρούσα διδακτορική διατριβή, η απαιτούμενη εφαρμοζόμενη αξονική τάση για την έναρξη της ΠΡ στις στενότερες οπές τείνει σε πολύ υψηλές τιμές, κάτι που πρακτικά ερμηνεύεται ως η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του δοκιμίου. Στην πραγματικότητα θα υπάρχει ένα κατώτατο όριο

διαμέτρου οπής από το οποίο και έπειτα οι ΠΡ θα δημιουργούνται και θα διαδίδονται ξεκάθαρα. Σε στενότερα ανοίγματα ενδέχεται να μη δημιουργούνται καθόλου. Μελέτες σε αντίστοιχα ΦΜ με πολύ στενές οπές, λιγότερο των 5 mm διάμετρο, έχουν δημοσιευτεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Ουσιαστικά, όσο η οπή στενεύει, η διάμετρος της γίνεται συγκρίσιμη με το μέγεθος των κόκκων του υλικού. Τέτοια συσχέτιση επηρεάζει την έναρξη και τη διάδοση των φαινομένων, όπως η έναρξη της ΠΡ. Με άλλα λόγια, σε πολύ στενά ανοίγματα με διάμετρο συγκρίσιμη του μεγέθους των κόκκων του υλικού, μπορούν είτε να δημιουργηθούν είτε όχι, ΠΡ, αναλόγως των κρυστάλλων ή των κόκκων του υλικού στο όριο του ανοίγματος. Το τελικό μοτίβο ρωγμάτωσης σε φυσικό μοντέλο γρανίτη Χονγκ Κονγκ με πολλαπλές οπές διαμέτρου 1.5 mm, ανέδειξε τη σημασία του μεγέθους των κόκκων στην ανάπτυξη των ρωγμών (Lin et al. 2015). Ορισμένες από τις οπές εμφάνισαν ΠΡ, ενώ κάποιες άλλες όχι, καθώς η διαδικασία της ρωγμάτωσης αποτελεί συνδυασμό ενδοκρυσταλλικής και περικρυσταλλικής μικρορωγμάτωσης. Στις οπές χωρίς εμφάνιση ΠΡ, παρουσιάστηκαν ρωγμές στα αριστερά και δεξιά των ανοιγμάτων, ξεκινώντας από τα όρια των οπών.

Αξιοσημείωτο για το παρακάτω γράφημα αποτελεί το γεγονός ότι οι απεικονιζόμενες τιμές προέρχονται από φυσικά μοντέλα διαφορετικών διαστάσεων και υλικών με διαφορετική ορυκτολογική σύσταση και δομή. Ως εκ τούτου, σε μοντέλα όπου οι διαστάσεις τους δεν επηρεάζουν τις συνθηκικές του πειράματος, όπως για παράδειγμα σε φυσικά μοντέλα «Βέροια» και «Νεφέλη» με οπές διαμέτρου μικρότερη των 45 mm, η διαδικασία ρωγμάτωσης εξελίσσεται ομαλά και εξαρτάται από τη διάμετρο του ανοίγματος.



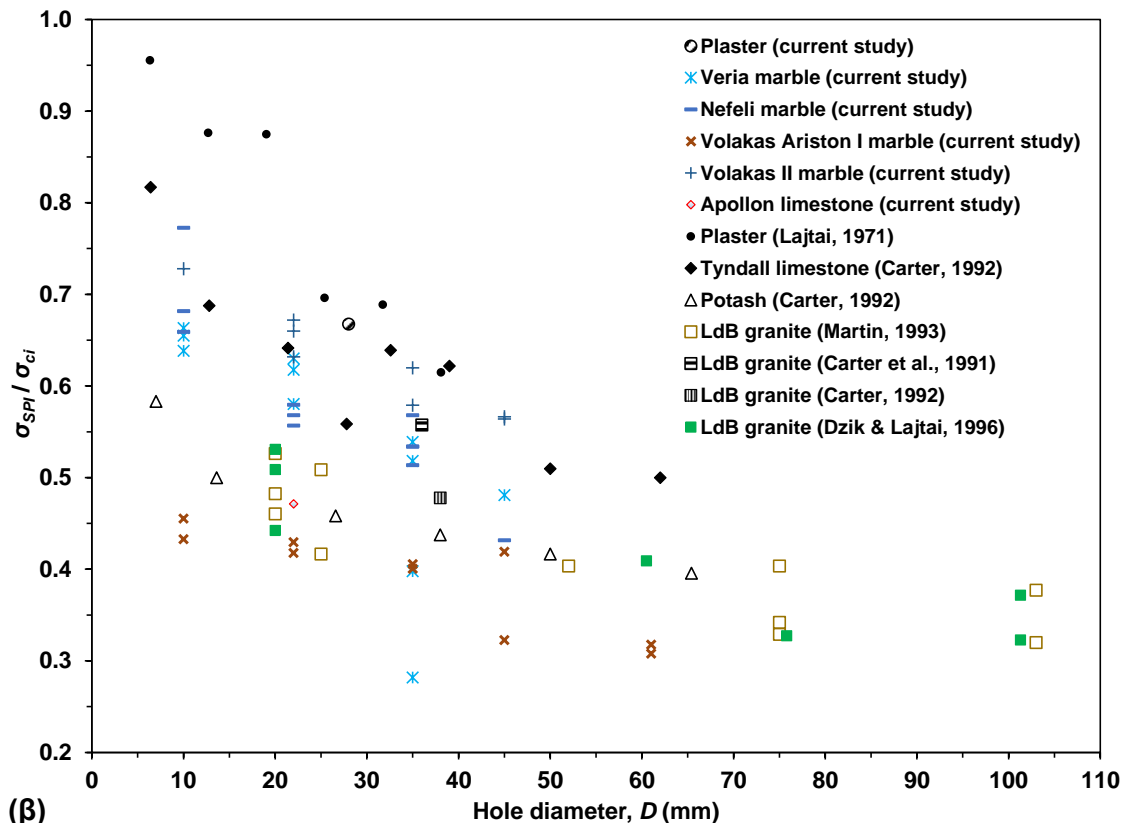
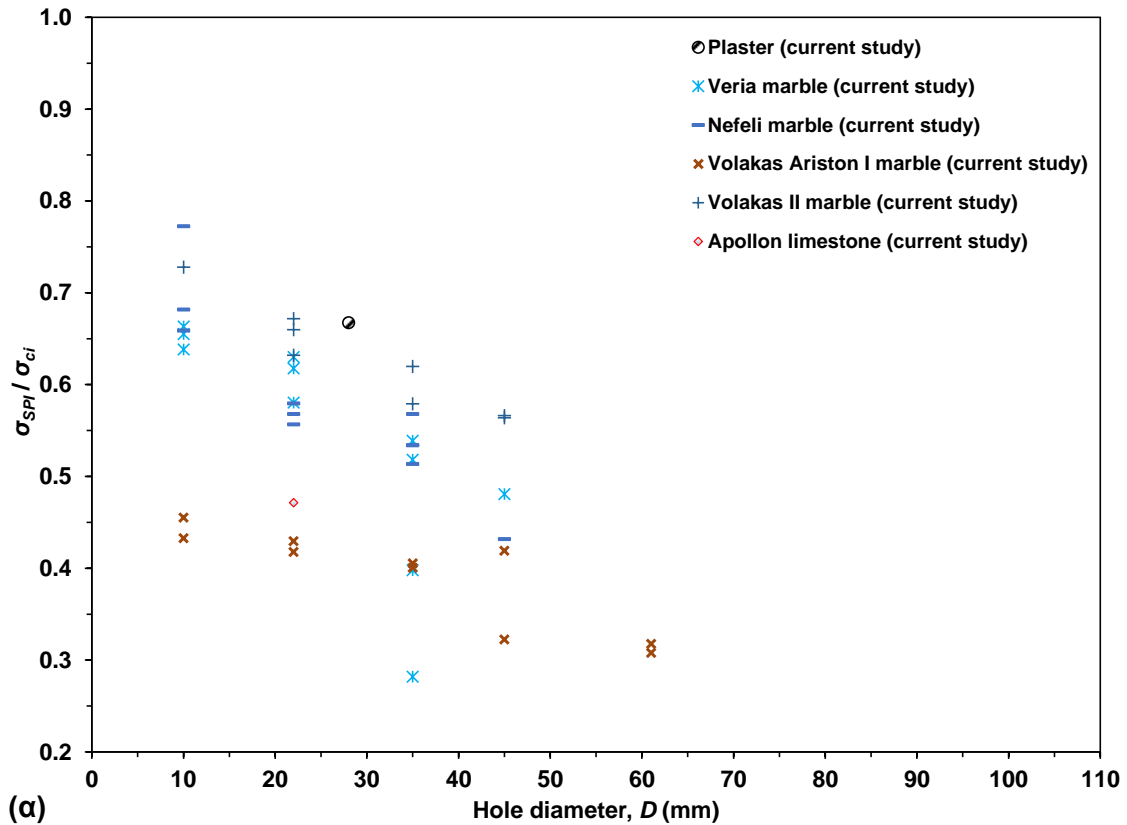
Σχήμα 7-110. (α) Εφαρμοζόμενη αξονική τάση σ_{PFI} (MPa) για την έναρξη της ΠΡ σε πρισματικά φυσικά μοντέλα με μονή κυλινδρική οπή στο μέσο των πετρωμάτων που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, κατά τη δοκιμή θλίψης, διαιρεμένη με την εφελκυστική αντοχή σ_t (MPa) του αντίστοιχου υλικού, συναρτήσεως της διαμέτρου D (mm) των ανοιγμάτων. Στο διάγραμμα (β) συμπεριλαμβάνονται οι αντίστοιχες τιμές άλλων υλικών, δημοσιευμένες στη διεθνή βιβλιογραφία.

Αντίστοιχα με την παραπάνω ανάλυση σχετικά με την έναρξη της ΠΡ, στο Σχήμα 7-111 δίνεται σε γράφημα συναρτήσει της διαμέτρου της οπής D (mm) του ΦΜ η εφαρμοζόμενη αξονική τάση σ_{SPI} (MPa) για την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων για κάθε ΦΜ της παρούσας διατριβής, ανηγμένη ως προς την αντοχή UCS του αντίστοιχου υλικού. Επιπλέον στο ίδιο σχήμα, αποτυπώνονται αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα από παρόμοια φυσικά μοντέλα σε άλλα είδη πετρώματος που έχουν δημοσιευτεί στη διεθνή βιβλιογραφία. Γύψος (παρούσα μελέτη, (Lajtai 1971)), λεπτόκοκκα ασβεστίτικα και δολομιτικά μάρμαρα (παρούσα μελέτη), ασβεστόλιθος (παρούσα μελέτη, Carter 1992a, 1992b)), μεσόκοκκος γρανίτης (Carter et al. 1991, Carter 1992a, Martin 1993, Dzik & Lajtai 1996) και ποτάσα (Carter 1992a) συνθέτουν τα υλικά του γραφήματος. Οι ανηγμένες τιμές σ_{SPI} υπολογίζονται από την αντοχή UCS του εκάστοτε υλικού που δημοσιεύτηκε στην αντίστοιχη εργασία.

Οι ανηγμένες τιμές αξονικής τάσης σ_{SPI} φαίνεται να ακολουθούν μια εκθετικά μειούμενη τάση με την αύξηση της διαμέτρου των οπών. Οι τιμές περιβάλλονται από ένα ανώτερο και ένα κατώτερο όριο ανεξαρτήτως των χαρακτηριστικών και της ορυκτολογίας του υλικού.

Στο παρακάτω γράφημα, για μεγαλύτερες διαμέτρους οπής, η εφαρμοζόμενη αξονική τάση για την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων τείνει να περιορίζεται μεταξύ του 30% με 40% της θλιπτικής αντοχής του υλικού. Σε ανοίγματα διαμέτρου μικρότερης των 12.8 mm, οι πλευρικές αποφλοιώσεις ξεκινάνε μεταξύ του 42% με 82% της αντοχής UCS του υλικού, πλην του γύψου του Lajtai (1971) όπου οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ του 87% με 95%.

Από το γράφημα που ακολουθεί, μπορεί να υποτεθεί ότι σε πολύ στενά ανοίγματα η απαιτούμενη αξονική τάση για την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων θα είναι ίση με την αντοχή UCS του υλικού, όπως παρατηρείται π.χ. στα δοκίμια γύψου του Lajtai (1971). Στην πραγματικότητα θα υπάρχει ένα κατώτατο όριο διαμέτρου οπής από το οποίο και έπειτα οι πλευρικές αποφλοιώσεις θα δημιουργούνται και θα επεκτείνονται ξεκάθαρα. Σε στενότερα ανοίγματα μπορεί να μην εμφανιστούν καθόλου πλευρικές αποφλοιώσεις μέχρι πριν την κατάρρευση του δοκιμίου.



Σχήμα 7-111. (α) Εφαρμοζόμενη αξονική τάση σ_{SPI} (MPa) για την έναρξη των ΠΑ σε πρισματικά φυσικά μοντέλα με μονή κυλινδρική οπή στο μέσο των πετρωμάτων που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, κατά τη δοκιμή θλίψης, διαιρεμένη με την αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_{ci} (MPa) του αντίστοιχου υλικού, συναρτήσε της διαμέτρου D (mm) των ανοιγμάτων. Στο διάγραμμα (β) συμπεριλαμβάνονται οι αντίστοιχες τιμές άλλων υλικών, δημοσιευμένες στη διεθνή βιβλιογραφία.

8 Προσομοιώσεις Εργαστηριακών Δοκιμών Χαρακτηρισμού

Προκειμένου να προσομοιωθεί και να μελετηθεί αριθμητικά ένα υλικό στο PFC, πρέπει πρώτα να βαθμονομηθεί ο κώδικας ως προς το μοντέλο δεσμών και τις βέλτιστες αντίστοιχες μικρο-παραμέτρους για το εκάστοτε υλικό. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει μια προεπιλογή μικρο-παραμέτρων του BPM και προσομοίωση των εργαστηριακών δοκιμών χαρακτηρισμού, ήτοι των δοκιμών μονοαξονικής (UCS) και αντιδιαμετρικής (BTS) θλίψης. Εάν τα BPM των εν λόγω δοκιμών έχουν τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες και μακροσκοπική συμπεριφορά ρωγμάτωσης με τα αντίστοιχα εργαστηριακά δοκίμια, τότε σχεδιάζονται τα BPM των φυσικών μοντέλων. Σε περίπτωση αποκλίσεων μεταξύ των εργαστηριακών και αριθμητικών παρατηρήσεων, επιλέγεται και ορίζεται στο BPM ένα νέο σύνολο μικρο-παραμέτρων, και όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή. Σημειώνεται ότι οι επιθυμητές μηχανικές ιδιότητες του BPM δύνανται να επιτευχθούν με μια πληθώρα συνδυασμών μικρο-παραμέτρων· παρόλα αυτά, δεν είναι όλοι αποδεκτοί βάσει της μακροσκοπικής σύγκρισης του τρόπου ρωγμάτωσης. Προφανώς, όσες περισσότερες εργαστηριακές δοκιμές προσομοιώνονται αριθμητικά, τόσο πιο αξιόπιστο είναι τελικό σύνολο μικρο-παραμέτρων. Επιπλέον, οι συνοριακές συνθήκες των αριθμητικών δοκιμών επηρεάζουν σημαντικά το τελικό αριθμητικό αποτέλεσμα και τη συμπεριφορά του BPM.

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η βαθμονόμηση των υλικών στο PFC, μέσω αριθμητικών προσομοιώσεων των εργαστηριακών δοκιμών χαρακτηρισμού της παρούσας διατριβής. Όλα τα BPM σχεδιάζονται με τις διαστάσεις των αντίστοιχων εργαστηριακών δοκιμών που παρουσιάζονται στην Παράγραφο 6. Για τη ρεαλιστική προσομοίωση των υλικών στον κώδικα, απαιτείται η πραγματοποίηση και η αξιολόγηση για κάθε υλικό ενός σημαντικού αριθμού BPM με διαφορετικές μικροπαραμέτρους, εφαρμόζοντας το Γραμμικό Μοντέλο Παράλληλων Δεσμών (Linear Parallel Bond Model) στις επαφές των σφαιρών των BPM γύψου, και το Μοντέλο Επίπεδων Δεσμών (Flat-Joint Model) σε εκείνες των δίσκων των BPM πετρωμάτων. Επιπλέον, η πυκνότητα d των σφαιρών (γύψος, 3D) / δίσκων (πετρώματα, 2D) του BPM ορίζεται ίση με την πυκνότητα του φυσικού υλικού, χωρίς αυτό να σημαίνει πως ταυτίζεται με του BPM. Βάσει της τιμής της d που καθορίζεται

κατά τη δημιουργία του μοντέλου, πραγματοποιείται η επίλυση των εξισώσεων που διέπουν την κίνηση. Τέλος, η γωνία τριβής της διεπιφάνειας BPM-τοιχών τίθεται μηδενική.

8.1 Γύψος

Ο Πίνακας 8-1 παρουσιάζει τις μικροπαραμέτρους που τελικώς επιλέγονται ως βέλτιστες για την τριδιάστατη (3D) αριθμητική προσομοίωση του γύψου στο PFC3D, εφαρμόζοντας το μοντέλο γραμμικά παράλληλων δεσμών (linear-parallel bond model).

Πίνακας 8-1. Μικροπαραμέτροι σχεδιασμού BPM γύψου στο PFC3D.

Μικροπαραμέτρος	Τιμή
Ελάχιστη ακτίνα σφαιρών (mm)	0.7
Λόγος μέγιστης / ελάχιστης ακτίνας σφαιρών	1.66
Μέγιστη απόσταση δεσμού (mm)	0.05
$\kappa^* (= k_n/k_s)$	1.8
$\bar{\kappa}^* = \bar{k}_n/\bar{k}_s$	1.8
E_c (μέτρο ελαστικότητας επαφής, GPa)	1.4
\bar{E}_c (μέτρο ελαστικότητας δεσμού, GPa)	1.4
$\bar{\sigma}_c$ (εφελκυστική αντοχή δεσμού,	1.2
\bar{c} (συνοχή δεσμού, MPa)	1.6
μ (συντελεστής τριβής μεταξύ δίσκων)	0.25

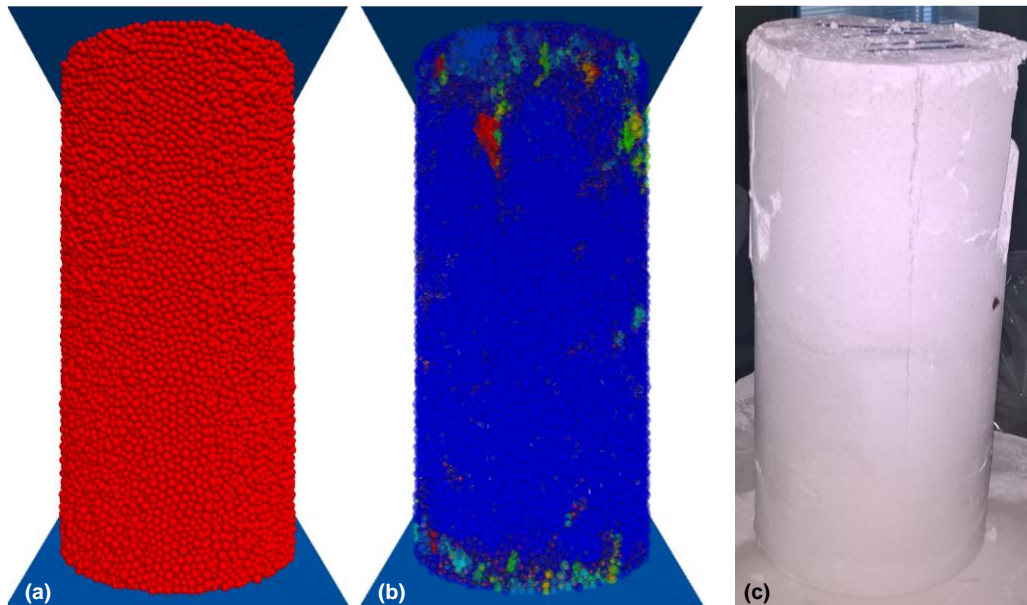
Ο Πίνακας 8-2 παραθέτει τις μηχανικές ιδιότητες του φυσικού και του αριθμητικού υλικού που προκύπτουν από δοκιμές UCS και BTS.

Πίνακας 8-2. Μηχανικές ιδιότητες γύψου εργαστηριακά (Laboratory Specimens, LS) και αριθμητικά (BPM).

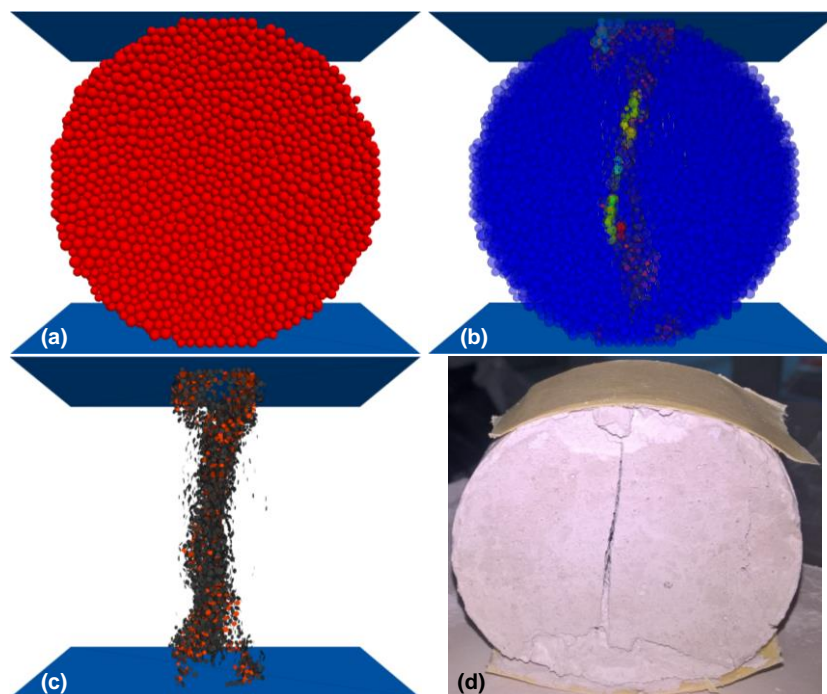
Μηχανική ιδιότητα	LS	BPM
σ_{ci} (MPa)	6.95 ± 1.4	8.07
E (GPa)	3.57 ± 0.5	3.63
σ_{tB} (MPa)	1.67 ± 0.15	1.64

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται τα βαθμονομημένα BPM του υλικού στο PFC3D και τα αντίστοιχα φυσικά δοκίμια για κάθε εργαστηριακή δοκιμή του υλικού στην παρούσα διατριβή. Με το πέρας της δοκιμής UCS, το κυλινδρικό αριθμητικό

δοκίμιο αστοχεί κυρίως αξονικά στο άνω τμήμα του. Στον αριθμητικό δίσκο Brazilian, σχηματίζονται μικρορωγμές στο κέντρο του, κυρίως εφελκυστικές, με επέκτασή τους κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης, σχηματίζοντας ΜΕΡ.



Σχήμα 8-1. BPM γύψου στο PFC3D πριν (a) και μετά τη δοκιμή UCS (b) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή UCS (c). Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Δίσκοι μαύρου και κόκκινου χρώματος αποτελούν εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b).



Σχήμα 8-2. BPM γύψου στο PFC3D πριν (a) και μετά τη δοκιμή BTS (b & c) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή BTS (d). Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Δίσκοι μαύρου και κόκκινου χρώματος αποτελούν εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b & c).

8.2 Μάρμαρο «Βέροια»

Ο Πίνακας 8-3 παρουσιάζει τις μικροπαραμέτρους που τελικώς επιλέγονται ως βέλτιστες για τη διδιάστατη (2D) αριθμητική προσομοίωση του μαρμάρου «Βέροια» στο PFC2D, εφαρμόζοντας το μοντέλο επίπεδων δεσμών (flat-joint model).

Πίνακας 8-3. Μικροπαραμέτροι σχεδιασμού BPM της ποικιλίας «Βέροια» στο PFC2D.

Μικροπαραμέτρος	Τιμή
Ελάχιστη ακτίνα δίσκων (mm)	0.3
Λόγος μέγιστης / ελάχιστης ακτίνας δίσκων	1.66
Μέγιστη απόσταση δεσμού (mm)	0.05
κ^* ($= k_n/k_s$)	4
E^* (μέτρο ελαστικότητας δεσμού, GPa)	81.9
σ_c (εφελκυστική αντοχή δεσμού, MPa)	17
c (συνοχή δεσμού, MPa)	36.5
ϕ (γωνία τριβής δεσμού, deg)	41°
μ (συντελεστής τριβής μεταξύ δίσκων)	0.5

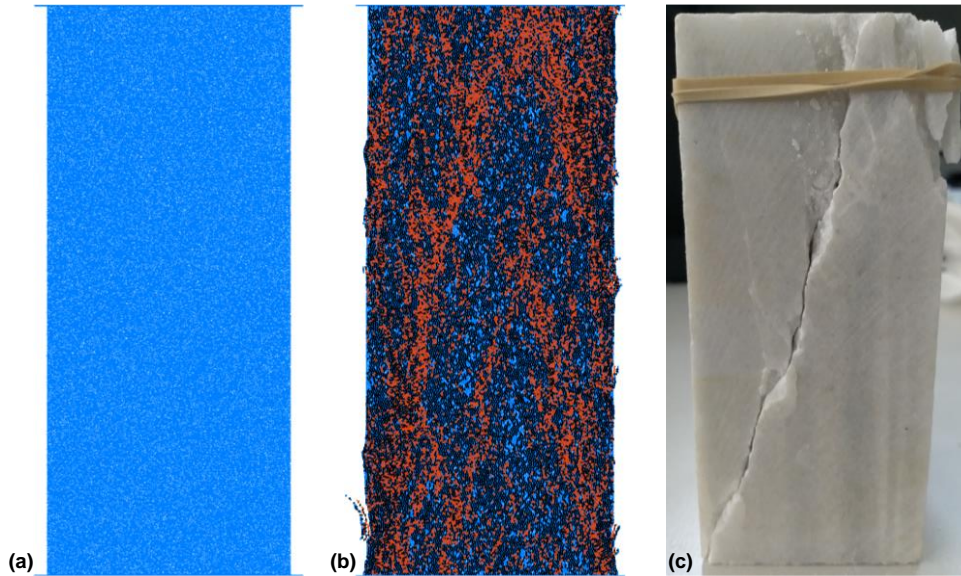
Ο Πίνακας 8-4 παραθέτει τις μηχανικές ιδιότητες του φυσικού και του αριθμητικού υλικού που προκύπτουν από δοκιμές UCS και BTS.

Πίνακας 8-4. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας «Βέροια» εργαστηριακά (Laboratory Specimens, LS) και αριθμητικά (BPM).

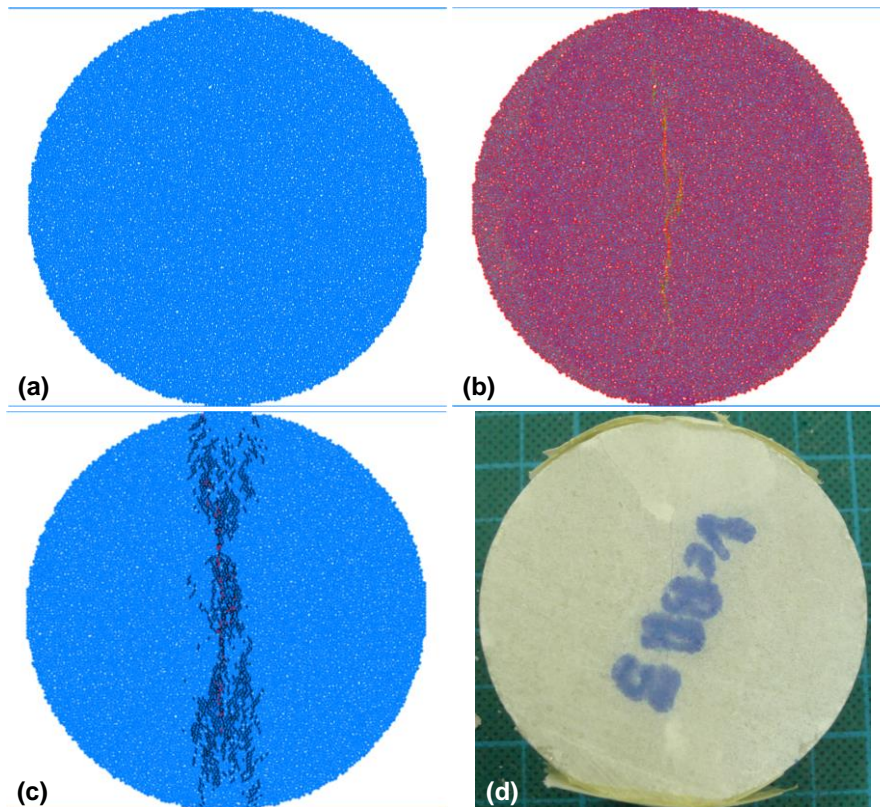
Μηχανική ιδιότητα	LS	BPM
σ_{ci} (MPa)	120.6 ± 16	118.5
E (GPa)	97.5 ± 18	96.8
σ_{tB} (MPa)	8.98 ± 1.65	8.8

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται τα βαθμονομημένα BPM του υλικού στο PFC2D και τα αντίστοιχα φυσικά δοκίμια για κάθε εργαστηριακή δοκιμή του υλικού στην παρούσα διατριβή. Σημειώνεται ότι ενώ το μάρμαρο «Βέροια» παρουσιάζει σαφή διεύθυνση νερών τα οποία επηρεάζουν την ανάπτυξη των ρωγμών έπειτα από τις δοκιμές θλίψης, για τις ανάγκες της αριθμητικής προσομοίωσης αντιμετωπίζεται ως ομοιογενές υλικό. Με το πέρας της δοκιμής UCS, το αριθμητικό δοκίμιο αστοχεί κυρίως με διακριτές διαγώνιες MEP και ένα σύνολο αξονικών ρωγμών. Στον αριθμητικό δίσκο Brazilian, σχηματίζονται μικρορωγμές στο κέντρο

του, κυρίως εφελκυστικές, με επέκτασή τους κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης, σχηματίζοντας ΜΕΡ.



Σχήμα 8-3. BPM μαρμάρου «Βέροια» στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή UCS (b) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή UCS (c). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b).



Σχήμα 8-4. BPM μαρμάρου «Βέροια» στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή BTS (b & c) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή BTS (d). Η απόσταση μεταξύ των δίσκων που φαίνεται με διαφορετικά χρώματα (b), αντιπροσωπεύει την εφελκυστική ΜΕΡ. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

8.3 Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»

Ο Πίνακας 8-5 παρουσιάζει τις μικροπαραμέτρους που τελικώς επιλέγονται ως βέλτιστες για τη διδιάστατη (2D) αριθμητική προσομοίωση του μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» στο PFC2D, εφαρμόζοντας το μοντέλο επίπεδων δεσμών (flat-joint model).

Πίνακας 8-5. Μικροπαραμέτροι σχεδιασμού BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» στο PFC2D.

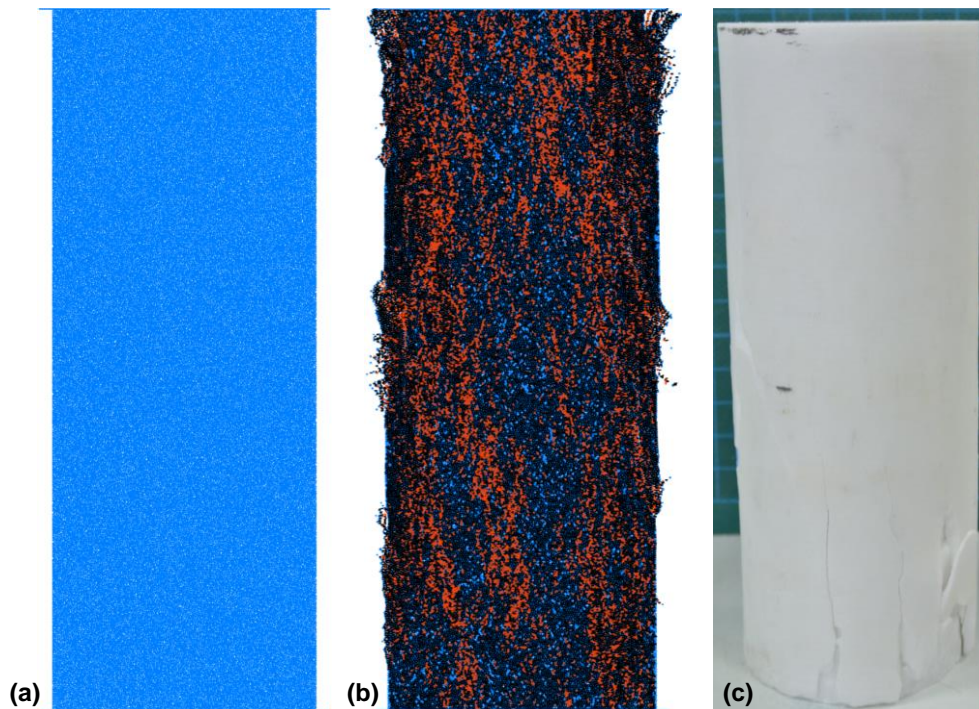
Μικροπαραμέτρος	Τιμή
Ελάχιστη ακτίνα δίσκων (mm)	0.3
Λόγος μέγιστης / ελάχιστης ακτίνας δίσκων	1.66
Μέγιστη απόσταση δεσμού (mm)	0.05
$\kappa^* (= k_n/k_s)$	2.6
E^* (μέτρο ελαστικότητας δεσμού, GPa)	47.5
σ_c (εφελκυστική αντοχή δεσμού, MPa)	6.6
c (συνοχή δεσμού, MPa)	36
ϕ (γωνία τριβής δεσμού, deg)	43°
μ (συντελεστής τριβής μεταξύ δίσκων)	0.67

Ο Πίνακας 8-6 παραθέτει τις μηχανικές ιδιότητες του φυσικού και του αριθμητικού υλικού που προκύπτουν από δοκιμές UCS και BTS.

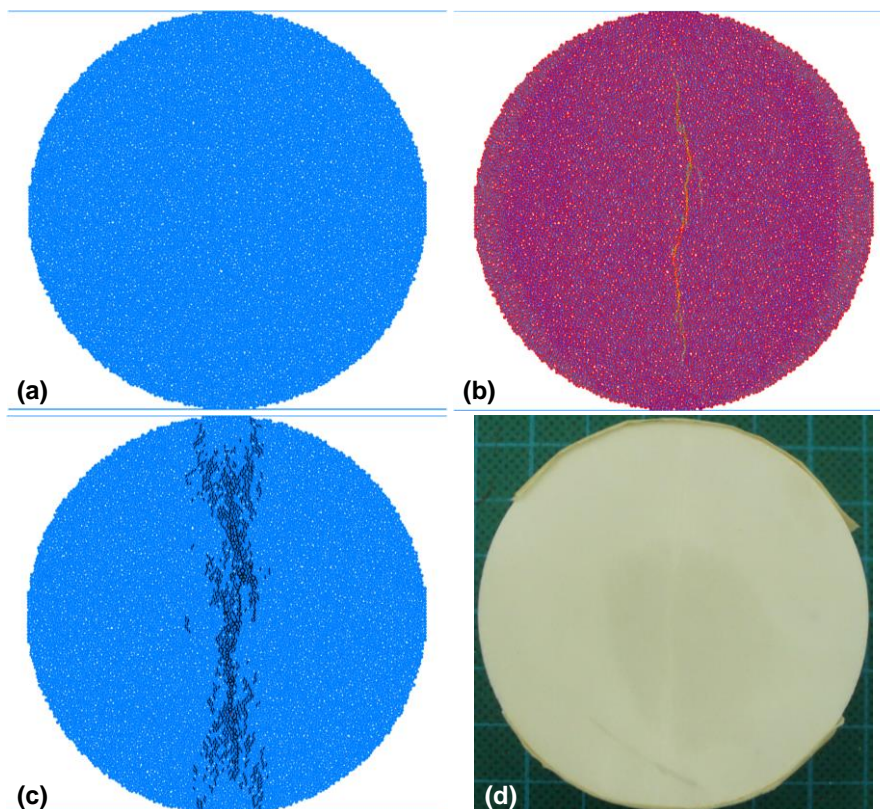
Πίνακας 8-6. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» εργαστηριακά (Laboratory Specimens, LS) και αριθμητικά (BPM).

Μηχανική ιδιότητα	LS	BPM
σ_{ci} (MPa)	118.1 ± 14	110.5
E (GPa)	56.1 ± 6	58.0
σ_{tB} (MPa)	4.59 ± 1.1	4.5

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται τα βαθμονομημένα BPM του υλικού στο PFC2D και τα αντίστοιχα φυσικά δοκίμια για κάθε εργαστηριακή δοκιμή του υλικού στην παρούσα διατριβή. Με το πέρας της δοκιμής UCS, το αριθμητικό δοκίμιο αστοχεί με αξονικές MEP και ένα σύνολο αξονικών ρωγμών. Στον αριθμητικό δίσκο Brazilian, σχηματίζονται μικρορωγμές στο κέντρο του, κυρίως εφελκυστικές, με επέκτασή τους κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης, σχηματίζοντας MEP.



Σχήμα 8-5. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή UCS (b) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή UCS (c). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b).



Σχήμα 8-6. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή BTS (b & c) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή BTS (d). Η απόσταση μεταξύ των δίσκων που φαίνεται με διαφορετικά χρώματα (b), αντιπροσωπεύει την εφελκυστική MEP. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

8.4 Μάρμαρο «Βώλακας II»

Ο Πίνακας 8-7 παρουσιάζει τις μικροπαραμέτρους που τελικώς επιλέγονται ως βέλτιστες για τη διδιάστατη (2D) αριθμητική προσομοίωση του μαρμάρου «Βώλακας II» στο PFC2D, εφαρμόζοντας το μοντέλο επίπεδων δεσμών (flat-joint model).

Πίνακας 8-7. Μικροπαραμέτροι σχεδιασμού BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» στο PFC2D.

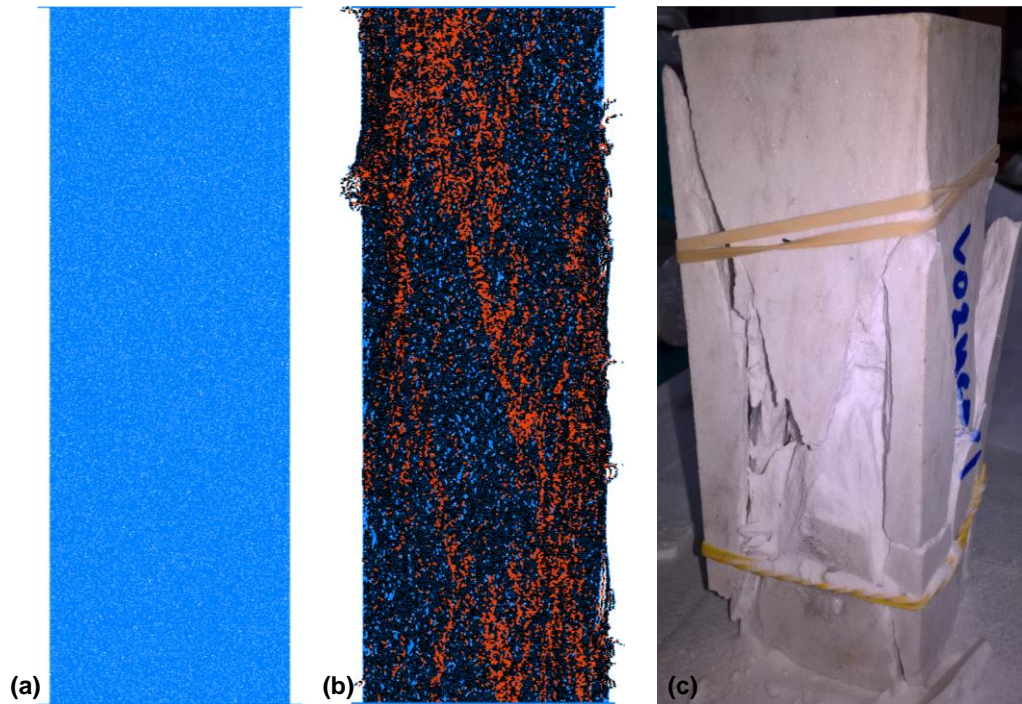
Μικροπαραμέτρος	Τιμή
Ελάχιστη ακτίνα δίσκων (mm)	0.3
Λόγος μέγιστης / ελάχιστης ακτίνας δίσκων	1.66
Μέγιστη απόσταση δεσμού (mm)	0.05
$\kappa^* (= k_n/k_s)$	3.2
E^* (μέτρο ελαστικότητας δεσμού, GPa)	54.5
σ_c (εφελκυστική αντοχή δεσμού, MPa)	11.8
c (συνοχή δεσμού, MPa)	43
ϕ (γωνία τριβής δεσμού, deg)	40°
μ (συντελεστής τριβής μεταξύ δίσκων)	0.67

Ο Πίνακας 8-8 παραθέτει τις μηχανικές ιδιότητες του φυσικού και του αριθμητικού υλικού που προκύπτουν από δοκιμές UCS και BTS.

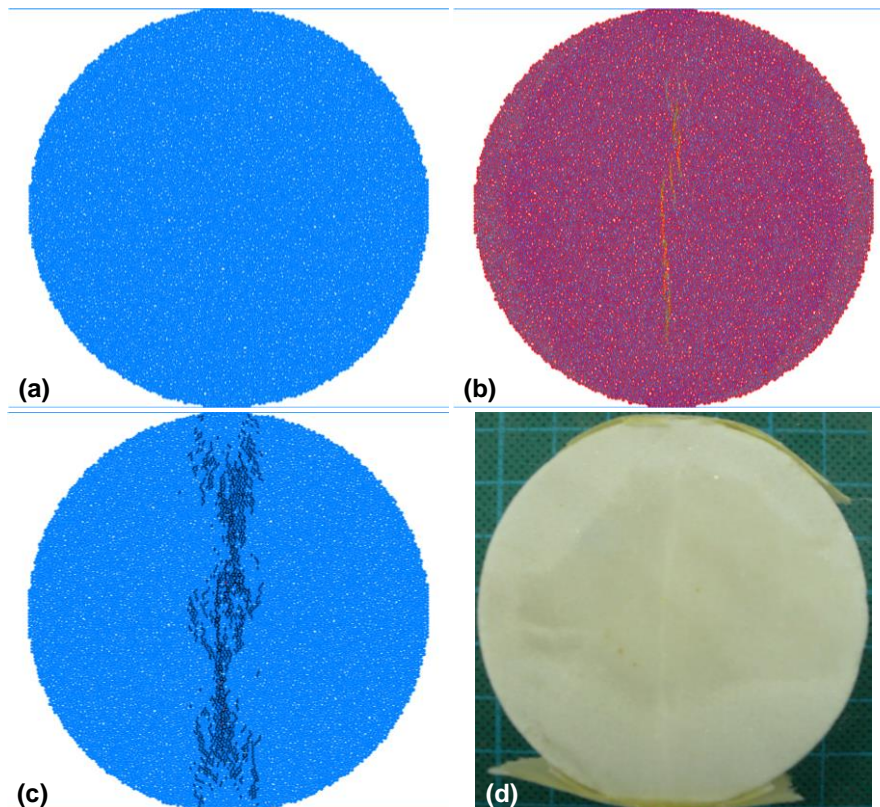
Πίνακας 8-8. Μηχανικές ιδιότητες ποικιλίας «Βώλακας II» εργαστηριακά (Laboratory Specimens, LS) και αριθμητικά (BPM).

Μηχανική ιδιότητα	LS	BPM
σ_{ci} (MPa)	125.0 ± 9.0	127.53
E (GPa)	54.8 ± 13	53.6
σ_{tB} (MPa)	5.65 ± 1.98	6.5

Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται τα βαθμονομημένα BPM του υλικού στο PFC2D και τα αντίστοιχα φυσικά δοκίμια για κάθε εργαστηριακή δοκιμή του υλικού στην παρούσα διατριβή. Με το πέρας της δοκιμής UCS, το αριθμητικό δοκίμιο αστοχεί κυρίως με διακριτές διαγώνιες MEP και ένα σύνολο αξονικών ρωγμών. Στον αριθμητικό δίσκο Brazilian, σχηματίζονται μικρορωγμές στο κέντρο του, κυρίως εφελκυστικές, με επέκτασή τους κατά μήκος της διαμέτρου φόρτισης, σχηματίζοντας MEP



Σχήμα 8-7. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή UCS (b) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή UCS (c). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (b).



Σχήμα 8-8. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή BTS (b & c) και αντίστοιχο δοκίμιο χαρακτηρισμού μετά τη δοκιμή BTS (d). Η απόσταση μεταξύ των δίσκων που φαίνεται με διαφορετικά χρώματα (b), αντιπροσωπεύει την εφελκυστική ΜΕΡ. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

9 Προσομοίωση φυσικών μοντέλων

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι προσομοιώσεις των εργαστηριακών δοκιμών στα φυσικά μοντέλα υλικών που εξετάζονται στην παρούσα διδακτορική διατριβή. Συγκεκριμένα δημιουργούνται αριθμητικά μοντέλα συνδεδεμένων σωματιδίων (BPM δίσκων σε 2D και σφαιρών σε 3D) για τα μάρμαρα «Βέροια», «Βώλακας Άριστον Ι» και «Βώλακας ΙΙ». Το μάρμαρο «Νεφέλη» δεν προσομοιώθηκε εξαιτίας του όγκιμου χαρακτήρα του, που δε δύναται να προσεγγισθεί με τα διαθέσιμα μοντέλα δεσμών του PFC. Επίσης, δεν προσομοιώθηκε ο ασβεστόλιθος «Απόλλων», εξαιτίας της εξαιρετικά μεγάλης ανομοιογένειας του πετρώματος, η οποία αποτυπώνεται και στα εργαστηριακά αποτελέσματα των δοκιμών χαρακτηρισμού. Τέλος, προσομοιώθηκαν εργαστηριακές δοκιμές σε φυσικά μοντέλα γρανίτη Lac du Bonnet, δημοσιευμένες στη διεθνή βιβλιογραφία.

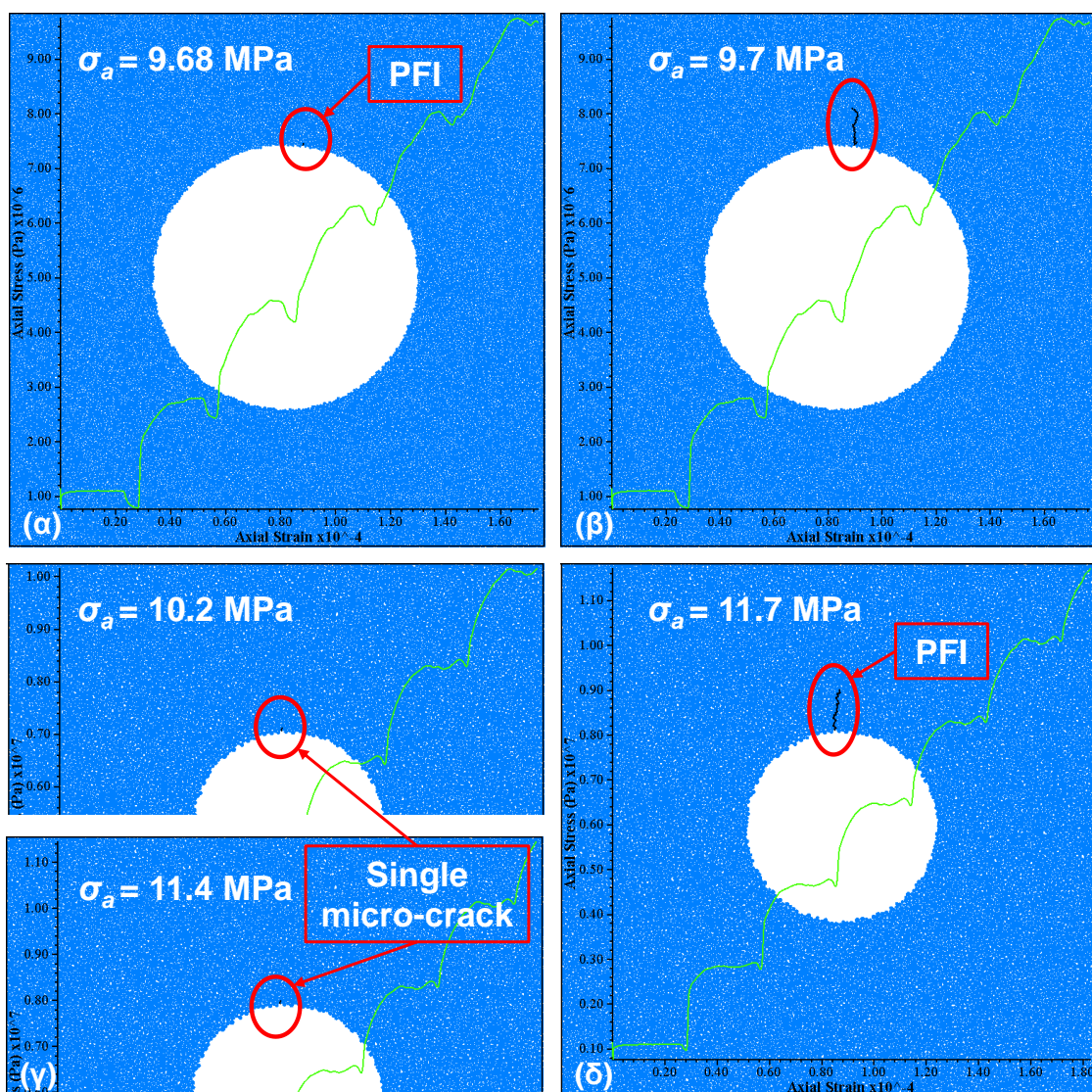
Σκοπός των προσομοιώσεων είναι η δημιουργία BPM που να προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τόσο τον τρόπο αστοχίας και την εξέλιξη της ρωγμάτωσης των φυσικών μοντέλων, όσο και τις εντατικές καταστάσεις στις οποίες παρατηρούνται τα χαρακτηριστικά φαινόμενα της ανάπτυξης των πρώτων εφελκυστικών ρωγμών στο άνω και κάτω όριο των οπών και των πλευρικών αποφλοιώσεων στις παρειές των οπών.

Αρχικά, περιγράφονται οι μεθοδολογίες που ακολουθούνται για τον προσδιορισμό της έναρξης των ΠΡ και ΠΑ στα BPM. Στη συνέχεια, περιγράφονται τα BPM για κάθε εξεταζόμενο υλικό και δίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε σύγκριση με τα αντίστοιχα εργαστηριακά. Τέλος, εξετάζεται η εντατική κατάσταση εντός του BPM στις περιοχές ενδιαφέροντος και στα χαρακτηριστικά στάδια της αριθμητικής δοκιμής ώστε να διερευνηθούν περαιτέρω τα φαινόμενα που παρατηρούνται και εργαστηριακά.

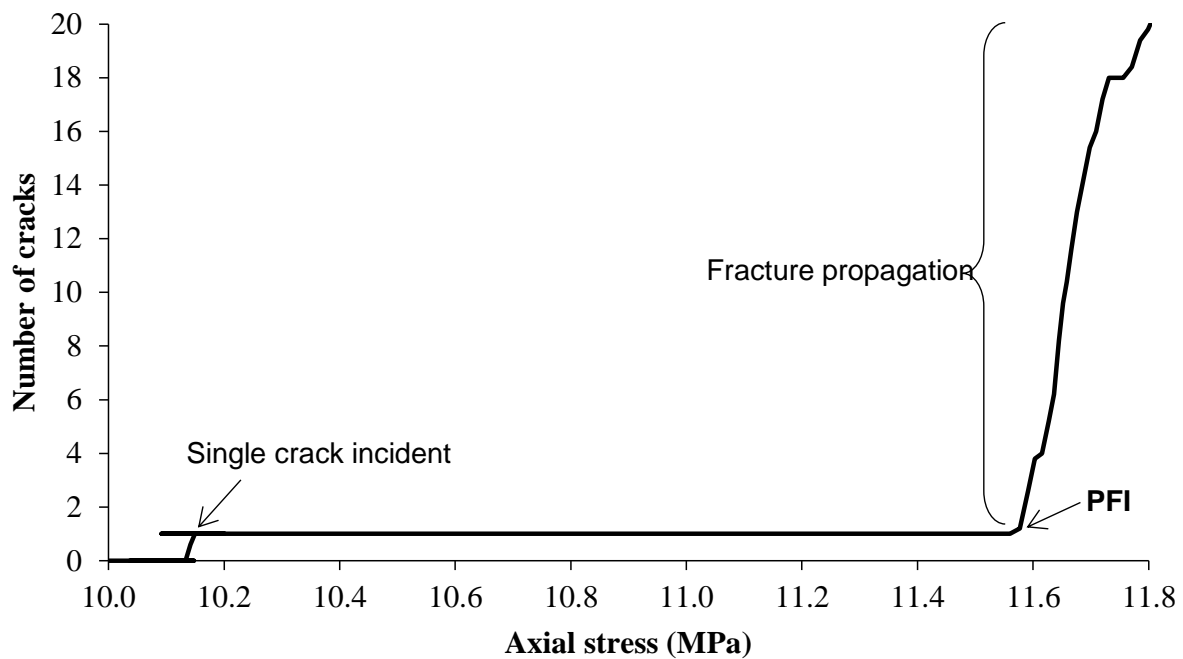
9.1 Προσδιορισμός έναρξης των ΠΡ

Ο εύστοχος και ακριβής προσδιορισμός έναρξης των φαινομένων αριθμητικά, εξαρτάται από τη συμπεριφορά του μοντέλου και την κρίση του μηχανικού. Συγκεκριμένα, είναι κρίσιμη η διάκριση μεταξύ της πραγματικής έναρξης των φαινομένων από ένα μεμονωμένο συμβάν. Ουσιαστικά, η εμφάνιση μίας και μόνο μικρορωγμής (ήτοι θραύση δεσμού στο PFC) στη στέψη ή το δάπεδο της οπής

(Σχήμα 9-1α) αποδίδεται σε «έναρξη ΠΡ» αν και εφόσον ακολουθείται αμέσως (εντός των επόμενων υπολογιστικών κύκλων) από την ανάπτυξη περισσότερων μικρορωγμών κατά μήκος της διαδρομής της ΠΡ (Σχήμα 9-1β), που υποδεικνύει διάδοση ρωγμής. Αντιθέτως, η εμφάνιση μιας μικρορωγμής στο όριο της οπής αποτελεί μεμονωμένο συμβάν (Σχήμα 9-1γ) αν δεν ακολουθείται από διάδοση της ΠΡ για σημαντική αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης (Σχήμα 9-1δ). Στο διάγραμμα του αριθμού ρωγμών έναντι της αξονικής τάσης που δίνεται στο Σχήμα 9-2, η εμφάνιση μιας και μόνο μικρορωγμής στη στέψη της οπής στο Σχήμα 9-1γ πραγματοποιείται σε τάση 10.2 MPa χωρίς να ακολουθείται από άλλες μικρορωγμές έως την τάση 11.58 MPa, η οποία και ορίζεται ως τάση έναρξης της ΠΡ.



Σχήμα 9-1. Προσδιορισμός έναρξης της ΠΡ. Η έναρξη της ΠΡ υποδεικνύεται ως «PFI» (Primary Fracture Initiation) για δύο (2) διαφορετικές περιπτώσεις όπου μία μικρορωγμή δύναται (α) & (β) ή όχι (γ) & (δ) να αποτελέσει έναρξη του φαινομένου στο όριο της οπής (BPM μαρμάρου «Βώλακας II», $D = 45$ mm (α) & (β)· BPM μαρμάρου «Βώλακας II», $D = 22$ mm (γ) & (δ)).



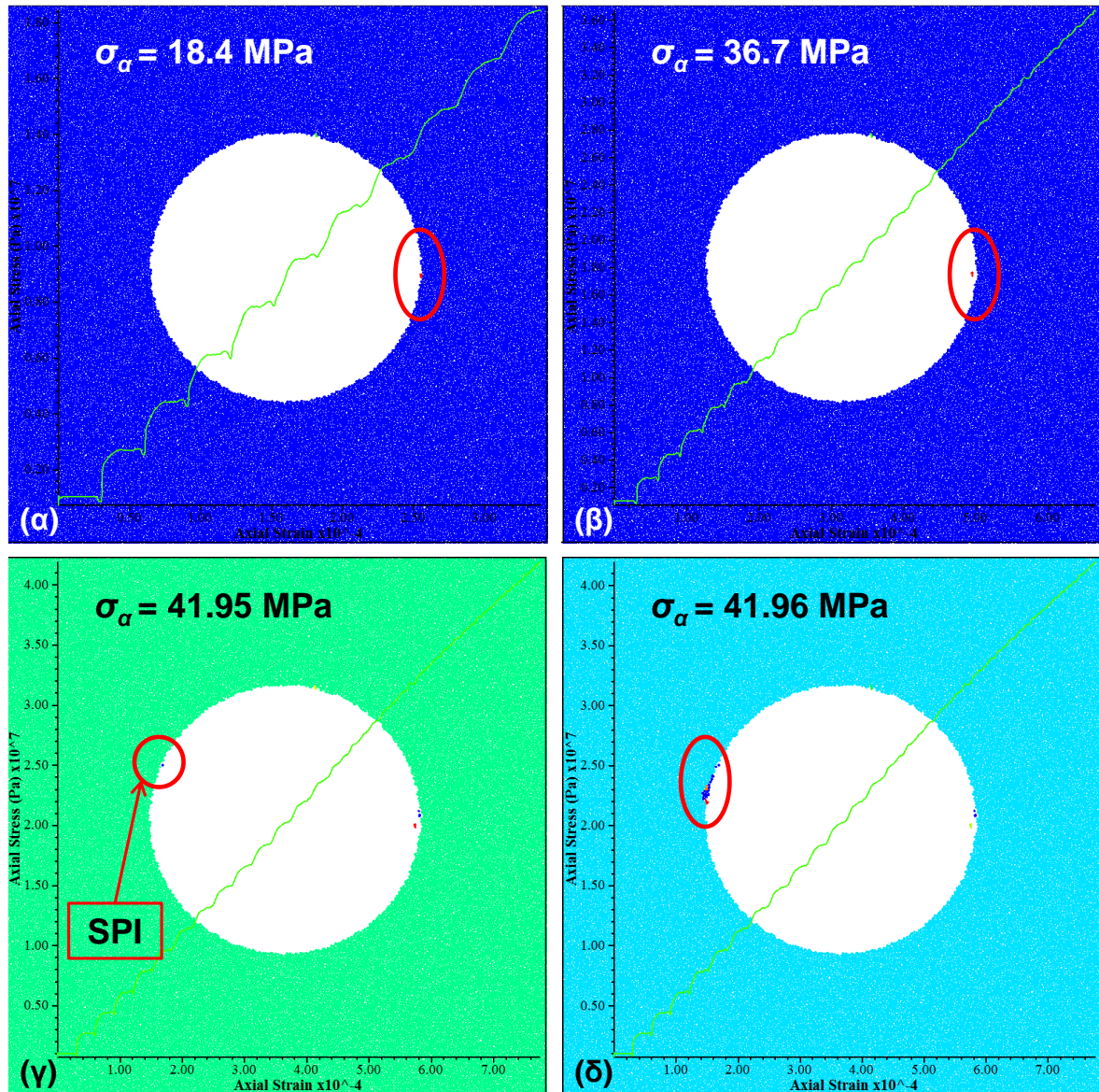
Σχήμα 9-2. Διάκριση μεταξύ ενός μεμονωμένου συμβάντος (περίπτωση μόνης μικρορωγμής) και έναρξη ΠΡ (PFI) (BPM μαρμάρου «Βώλακας II», $D = 22$ mm).

9.2 Προσδιορισμός έναρξης των πλευρικών αποφλοιώσεων

Η τάση έναρξης των πλευρικών αποφλοιώσεων σε ορισμένα BPM, δύναται να οριστεί ως η τάση κατά την οποία αποκολλώνται οι πρώτοι δίσκοι (ή σφαίρες προκειμένου για 3D BPM) από τις παρειές της οπής, αν και εφόσον ακολουθούνται άμεσα (εντός των επόμενων υπολογιστικών κύκλων) από αποκόλληση περισσότερων δίσκων από την ίδια παρειά της οπής. Σε αντίθετη περίπτωση, θεωρείται ως μεμονωμένο συμβάν. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ο λόγος της περιμέτρου της οπής προς τη διάμετρο των δίσκων. Για δεδομένη διάμετρο δίσκων, η αποκόλληση δύο (2) δίσκων από οπή διαμέτρου 10 mm αποτελεί πιο βαρυσήμαντο γεγονός από ό,τι η αποκόλληση του ίδιου αριθμού δίσκων από τις παρειές οπής μεγαλύτερης διαμέτρου (π.χ. οπή διαμέτρου 45 mm). Σημειώνεται ότι η πλευρική αποκόλληση δίσκων από δεδομένες θέσεις στις παρειές της οπής, εκκινεί έπειτα από την εμφάνιση διατμητικής μικρορωγμάτωσης στις εν λόγω θέσεις.

Η αποκόλληση μεμονωμένων δίσκων στη δεξιά παρειά της οπής στο Σχήμα 9-3α σε τάση 18.4 MPa, η οποία δε συνοδεύεται από συστηματική αποκόλληση περισσότερων δίσκων για σημαντική αύξηση της αξονικής τάσης στα 36.7 MPa (Σχήμα 9-3β), δε θεωρείται ως «έναρξη πλευρικών αποφλοιώσεων». Αντιθέτως, η αποκόλληση ενός δίσκου στην αριστερή παρειά της οπής για τάση 42 MPa στο

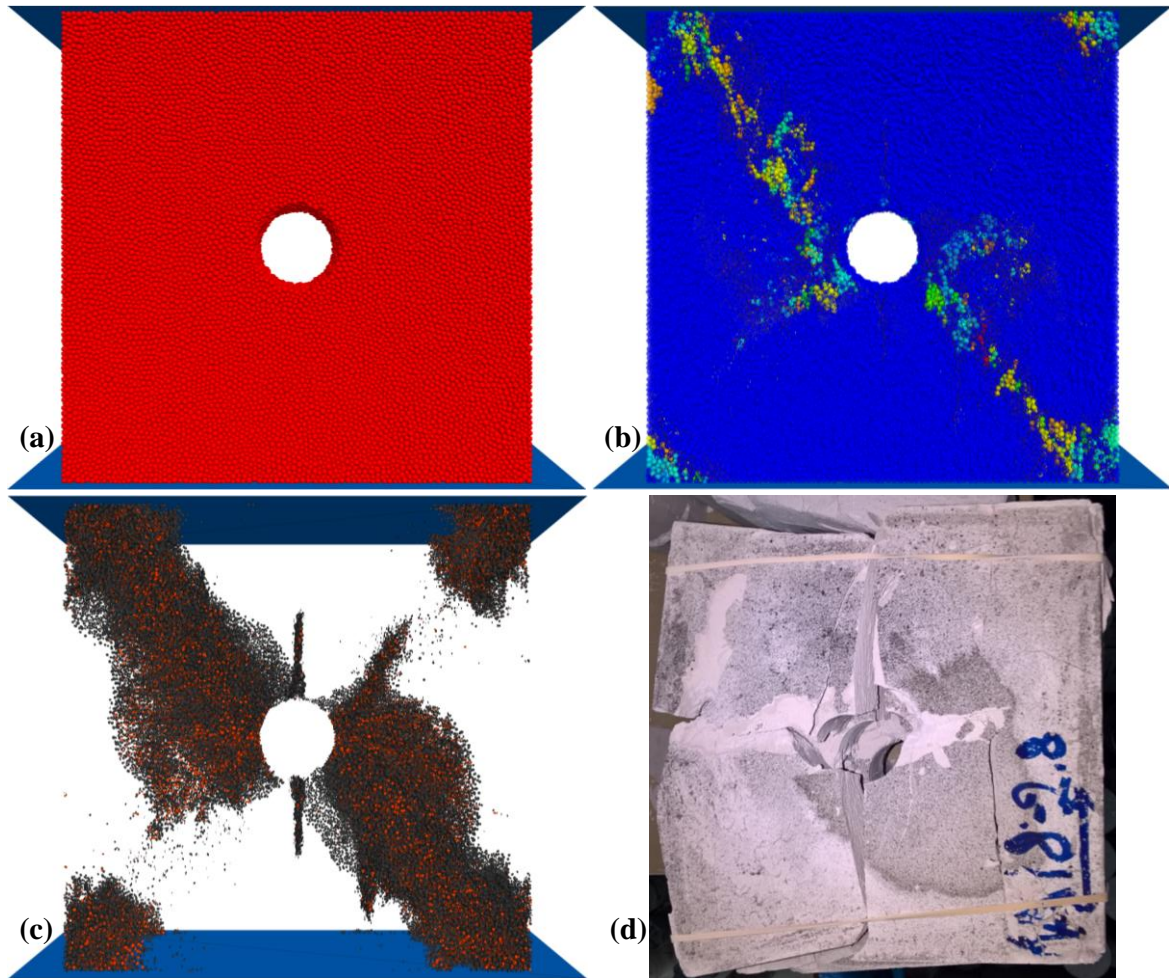
Σχήμα 9-3γ λαμβάνεται ως έναρξη του φαινομένου μιας και συνοδεύεται από σημαντικό αριθμό αποκολλημένων δίσκων για μικρή αύξηση της αξονικής τάσης στους επόμενους υπολογιστικούς κύκλους (Σχήμα 9-3δ).



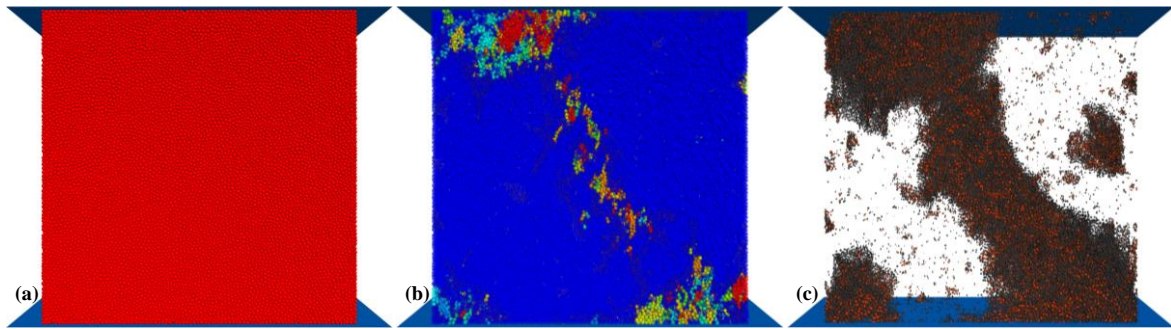
Σχήμα 9-3. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι», $D = 45 \text{ mm}$: (α), (β) Η αποκόλληση των δίσκων θεωρείται ως «μεμονωμένο συμβάν». Ο ορισμός έναρξης των πλευρικών αποφλοιώσεων υποδεικνύεται ως «SPI» (Spalling Initiation) στο (γ), όπου η αποκόλληση ενός δίσκου συνοδεύεται από αποκόλληση περισσοτέρων στο (δ).

9.3 BPM γύψου

Το BPM στο PFC3D προσομοιώνει τις εργαστηριακές δοκιμές θλίψης των φυσικών μοντέλων γύψου με προϋπάρχουσα κυλινδρική οπή διαμέτρου 28 mm. Το αριθμητικό μοντέλο σχεδιάζεται με τις διαστάσεις των ΦΜ, ήτοι 15 cm x 15 cm x 4 cm. Στο Σχήμα 9-4 δίνονται εικόνες του BPM γύψου στο PFC3D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d).



Σχήμα 9-4. BPM γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm στο PFC3D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Δίσκοι μαύρου και κόκκινου χρώματος αποτελούν εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα.



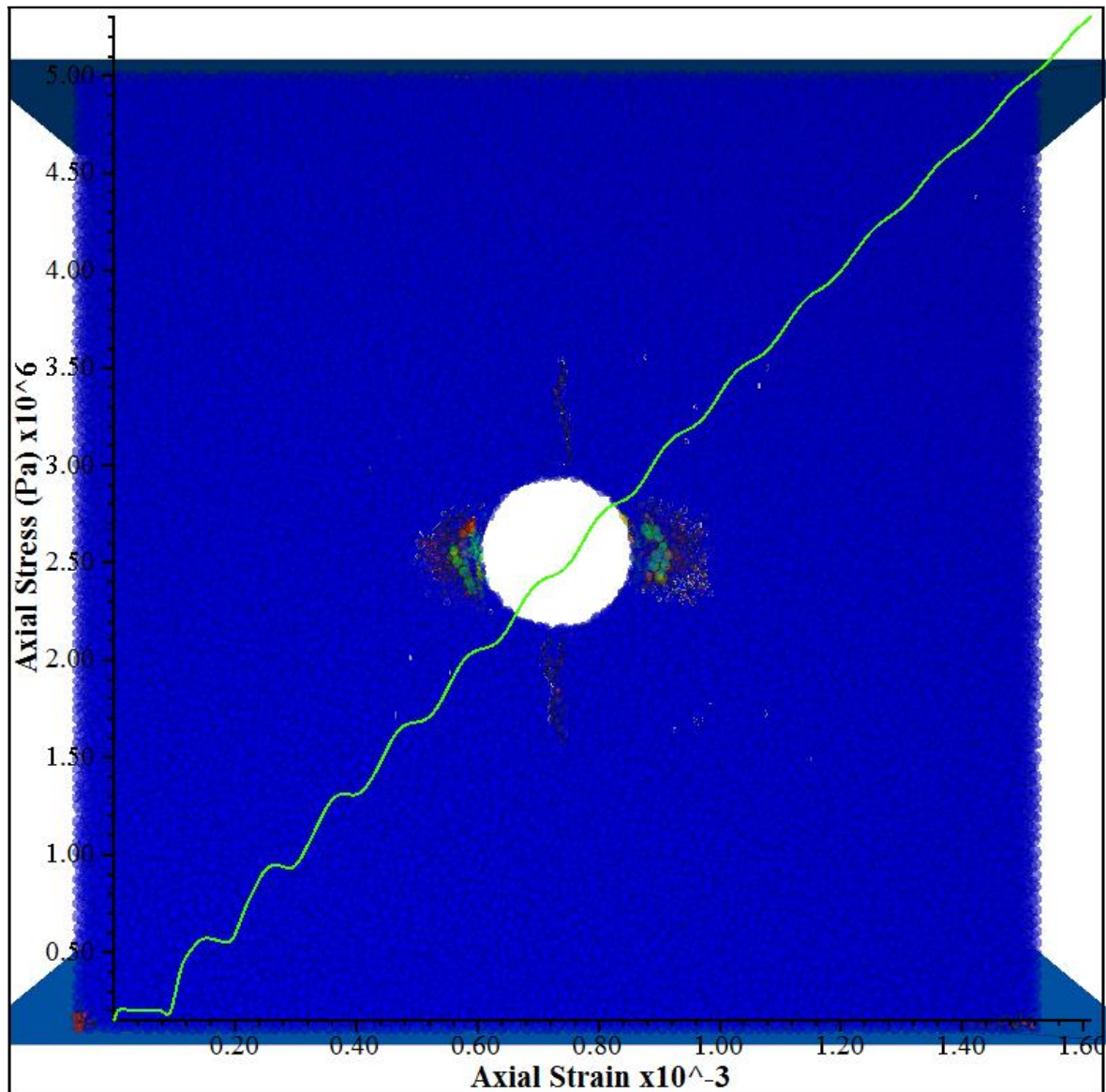
Σχήμα 9-5. BPM γύψου χωρίς οπή στο PFC3D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c). Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Δίσκοι μαύρου και κόκκινου χρώματος αποτελούν εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα.

Κατά τη διάρκεια της αριθμητικής δοκιμής, αρχικά εμφανίζονται οι ΠΡ στη στέψη και το δάπεδο του ανοίγματος, κυρίως με εφελκυστικές μικρορωγματώσεις, οι οποίες ξεκινώντας από το όριο της οπής επεκτείνονται προς τις βάσεις του μοντέλου. Ακολούθως, μεικτού τύπου μικρορωγματώση (εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές) παρατηρείται στις θλιπτικές ΠΥΣΤ των παρειών της οπής. Έπειτα, εμφανίζεται μεικτού τύπου μικρορωγματώση μακριά από την οπή, η επέκταση της οποίας συνδέει την αριστερή θλιπτική ΠΥΣΤ με την άνω αριστερή γωνία του μοντέλου, και τη δεξιά θλιπτική ΠΥΣΤ με την κάτω δεξιά γωνία του μοντέλου αντίστοιχα, σχηματίζοντας ΜΕΡ που τείνουν να διχοτομήσουν το BPM. Η αποφλοιώση των παρειών της οπής συνοδεύεται από τοπικές διατμητικές μικρορωγματώσεις.

Ο Πίνακας 9-1 παρουσιάζει τη μέγιστη αντοχή (σ_p) των φυσικών (ΦΜ) και αριθμητικών (BPM) μοντέλων. Στον ίδιο πίνακα, δίνονται οι τιμές των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των ΠΡ (PFI) στη στέψη ή το δάπεδο της οπής, καθώς και η αντίστοιχη εφαρμοζόμενη τάση κατά την έναρξη των αποφλοιώσεων (SPI) στις παρειές του ανοίγματος. Όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 7.4, ο προσδιορισμός της τάσης έναρξης των αποφλοιώσεων μέσω της μεθόδου DIC, χρησιμοποιεί ως επιφάνεια ανάλυσης την έμπροσθεν έδρα του φυσικού μοντέλου και όχι το εσωτερικό της οπής. Για τον προσδιορισμό της έναρξης του εκάστοτε φαινομένου στο PFC3D χρησιμοποιείται επίσης η έμπροσθεν έδρα του BPM, έχοντας ως στόχο τη σύγκριση των αντίστοιχων τιμών των φυσικών και αριθμητικών μοντέλων.

Πίνακας 9-1. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των 1^{ων} (1st) και 2^{ων} (2nd) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα του γύψου.

D (mm)	1 st PFI (MPa)		2 nd PFI (MPa)		1 st SPI (MPa)		2 nd SPI (MPa)		σ_p (MPa)	
	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM
0									7.2 ± 0.35	8.2
28	2.28	2.3	2.57	2.52	4.64	4.38	4.67	4.62	6.10	6.32

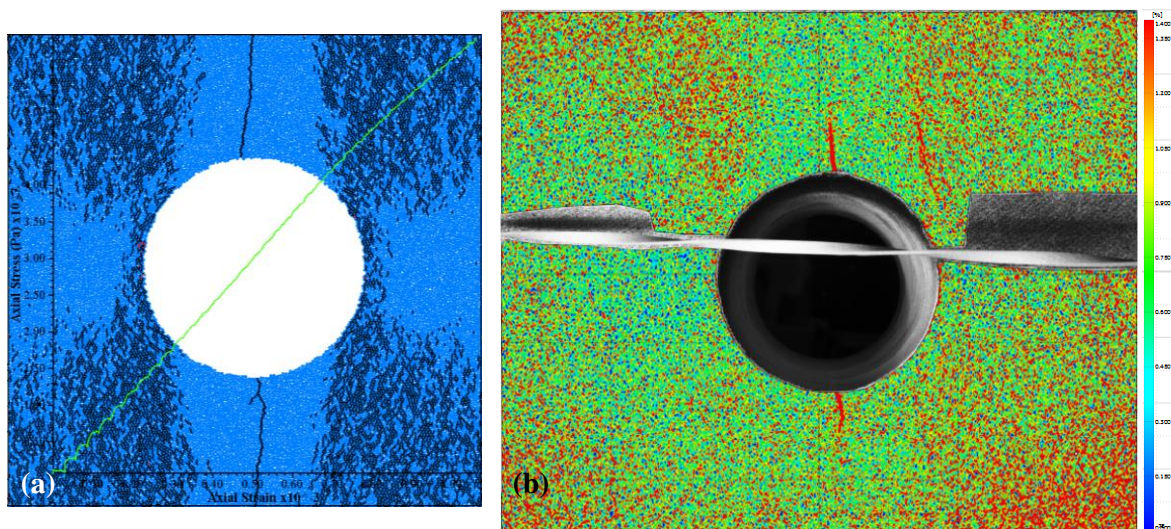


Σχήμα 9-6. Προχωρημένο στάδιο ανάπτυξης ΠΡ και στο BPM γύψου με οπή διαμέτρου 28 mm στο PFC3D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα. Σφαίρες διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .

9.4 BPM μαρμάρων

Η μικρορωγμάτωση, η διαδικασία της θραύσης και η σειρά εμφάνισης των φαινομένων κατά την προσομοίωση των εργαστηριακών δοκιμών στα ΦΜ των μαρμάρων «Βέροια», «Βώλακας Άριστον Ι» και «Βώλακας ΙΙ» είναι κατά κύριο λόγο παρόμοια, με ορισμένες διαφορές όπως περιγράφονται ακολούθως.

Αρχικά, οι ΠΡ σχηματίζονται από εφελκυστικές μικρορωγματώσεις στη στέψη και το δάπεδο του ανοίγματος, οι οποίες ξεκινώντας από το όριο της οπής επεκτείνονται προς τις βάσεις του μοντέλου, κατά αντιστοιχία με εκείνες που αναπτύσσονται στα ΦΜ. Ακολούθως, εμφανίζονται εφελκυστικές μικρορωγματώσεις στις παρειές της οπής και στις παρακείμενες περιοχές αριστερά και δεξιά της, κυρίως αξονικής διεύθυνσης, σχηματίζοντας ένα νέφος μικρορωγμών στις περιοχές που βρίσκονται εντός των πολικών γωνιών $\pi/4$ και $\pi/3$ και εντός της πολικής απόστασης $1.5D$ από το κέντρο της οπής. Με την αύξηση της αξονικής τάσης, το εν λόγω νέφος μικρορωγμών επεκτείνεται προς τις γωνίες του BPM, ενώ παράλληλα σχηματίζονται συνεχώς νέες μικρορωγμές στην αριστερή και δεξιά ακμή του BPM. Ο μηχανισμός αυτός βρίσκεται σε συμφωνία με τις παρατηρήσεις της μεθόδου DIC, όπου παρατηρούνται έντονες παραμορφώσεις στις ίδιες περιοχές των ΦΜ (Σχήμα 9-7).



Σχήμα 9-7. (a) Νέφος μικρορωγμών σε BPM της ποικιλίας «Βώλακας ΙΙ» και (b) έντονες παραμορφώσεις στο αντίστοιχο ΦΜ κατά την ανάλυση DIC ($D = 35$ mm).

Σε αντίθεση με τις προαναφερθείσες περιοχές, και πλην των εφελκυστικών ΠΡ, δεν εμφανίζονται άλλες μικρορωγμές στις περιοχές που βρίσκονται εντός των πολικών γωνιών $-\pi/4$ και $\pi/4$ και πολικής απόστασης $2D$, καθώς και στις περιοχές άνω από τη στέψη και κάτω από το δάπεδο της οπής. Όσο μεγαλύτερη είναι διάμετρος της

οπής, τόσο μεγαλύτερες είναι εν λόγω περιοχές, κυρίως άνωθεν και κάτωθεν της οπής, λόγω της επίδρασης του ανοίγματος στην ανακατανομή του εντατικού πεδίου.

Σε επόμενα στάδια και εντός των περιοχών του νέφους εφελκυστικών ρωγμών, αναπτύσσεται νέφος διατμητικών ρωγμών κατά μήκος της διαδρομής των εργαστηριακά παρατηρούμενων ΔΡ, με ελαφρά κλίση προς την οπή όπως δίνεται στο Σχήμα 2-1. Παρόλα αυτά, δεν κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός μιας ελάχιστης τάσης έναρξης των ΔΡ στα αριθμητικά μοντέλα, λόγω της έντονης και νεφώδους μικρορωγμάτωσης.

Στις θλιπτικές ΠΥΣΤ πλευρικά της οπής, συναντάται ελαφρά παρουσία διατμητικών μικρορωγμών έπειτα από τον σχηματισμό της νεφώδους μικρορωγμάτωσης και πριν από την εμφάνιση της προαναφερθείσας διατμητικής μικρορωγμάτωσης κατά μήκος της διαδρομής των ΔΡ. Η παρουσία διατμητικών μικρορωγμών στις εν λόγω περιοχές προηγείται πάντα της έναρξης του τρίτου (3^{ου}) κύριου φαινομένου, ήτοι των πλευρικών αποφλοιώσεων. Οι διατμητικές μικρορωγμές στις θλιπτικές ΠΥΣΤ έχουν ως αποτέλεσμα την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων.

Με την αύξηση της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης, οι ΔΡ διευρύνονται και επιμηκύνονται προς τις περιοχές εκκίνησης των αποφλοιώσεων, καθώς και προς τις βάσεις του BPM. Εντός της νεφώδους μικρορωγμάτωσης και γύρω από τη ΔΡ, σχηματίζονται δευτερεύουσες μεικτού τύπου ΜΕΡ (δΜΕΡ), πλατύτερες, μακρύτερες και με μεγαλύτερη επιρροή στη συμπεριφορά του μοντέλου από ό,τι οι ΔΡ, οι οποίες αλληλοεπιδρούν με τις ΔΡ και φτάνουν ως τις βάσεις του BPM. Η κλίση των δΜΕΡ εξαρτάται από τη γωνία τριβής ολίσθησης μεταξύ των δίσκων του BPM.

Κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών στα αντίστοιχα ΦΜ των δολομικών μαρμάρων «Βώλακας Άριστον Ι» και «Βώλακας ΙΙ», παρατηρείται «κλείσιμο» της ΠΡ έπειτα από την έναρξη και των τριών (3) κύριων φαινομένων. Όπως εξηγείται στην παράγραφο 9.5, οι αριθμητικές προσομοιώσεις στο PFC2D δείχνουν ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλίψης και έπειτα από τον σχηματισμό των ΔΡ, αναπτύσσεται εφελκυστικό εντατικό πεδίο στις περιοχές ανάμεσα από τις ΔΡ και τις πλευρικές ακμές του BPM. Αντιθέτως, αναπτύσσεται αρχικά ασθενές και εν συνεχεία εντονότερο θλιπτικό εντατικό πεδίο στις περιοχές μεταξύ των ΠΡ και

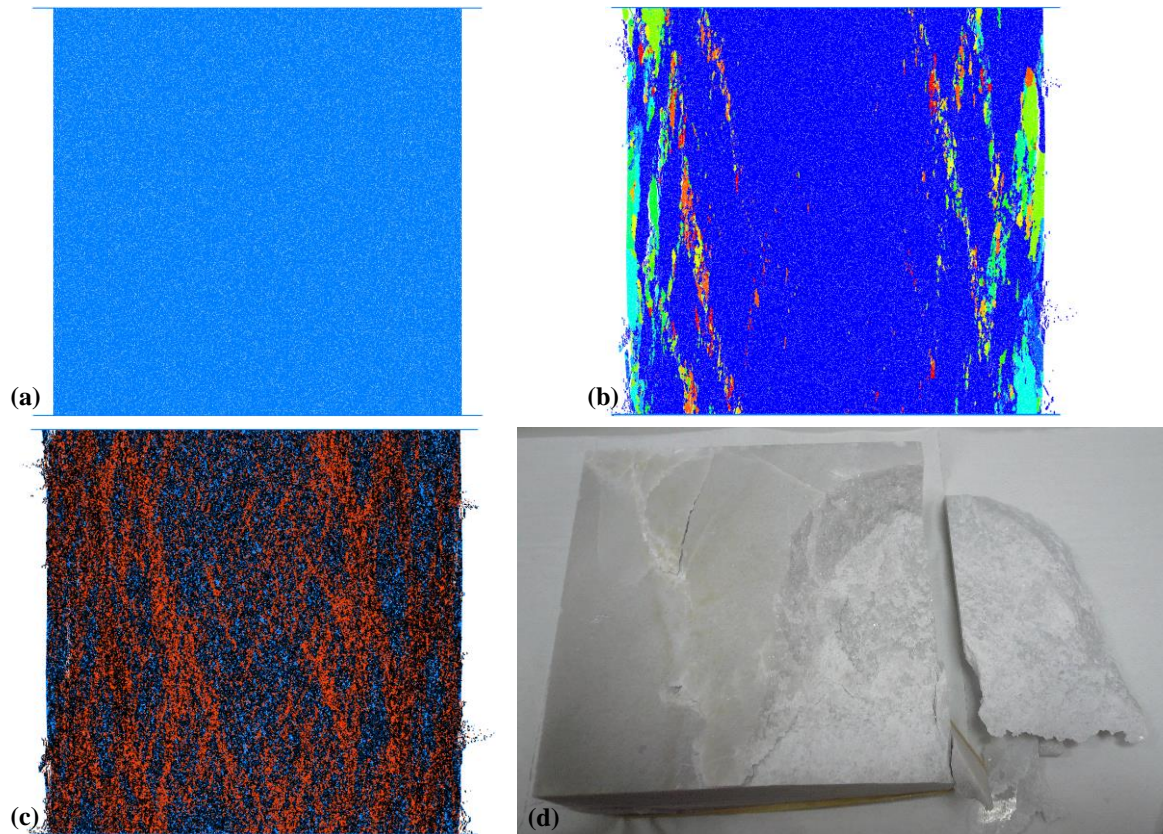
των ΔΡ. Η ανάπτυξη του εν λόγω θλιπτικού εντατικού πεδίου περιορίζει την επέκταση της ΠΡ.

Έπειτα από την επίτευξη της μέγιστης αντοχής του BPM, μεικτού τύπου μικρορωγμάτωση σχηματίζει κεκλιμένες ΜΕΡ (κΜΕΡ) οι οποίες συνδέουν τα σημεία όπου οι δΜΕΡ συναντούν τις βάσεις του BPM, είτε με τις πλευρικές ακμές του μοντέλου, είτε με την απέναντι βάση του (δηλ. την άνω ή την κάτω). Η κλίση των εν λόγω κΜΕΡ αντιστοιχεί σε εκείνη με την οποία οι δΜΕΡ συνδέουν τις θλιπτικές ΠΥΣΤ πλευρικά της οπής με τις βάσεις του μοντέλου. Η θέση των συγκεκριμένων σημείων στις βάσεις του BPM εξαρτάται από τη διάμετρο της οπής. Τέλος, δεδομένου ότι όλα τα μοντέλα ενός εξεταζόμενου υλικού έχουν τις ίδιες διαστάσεις, οι εν λόγω κΜΕΡ φτάνουν είτε στις απέναντι βάσεις του μοντέλου στην περίπτωση των στενότερων οπών, είτε στις πλευρικές ακμές στην περίπτωση των πλατύτερων οπών.

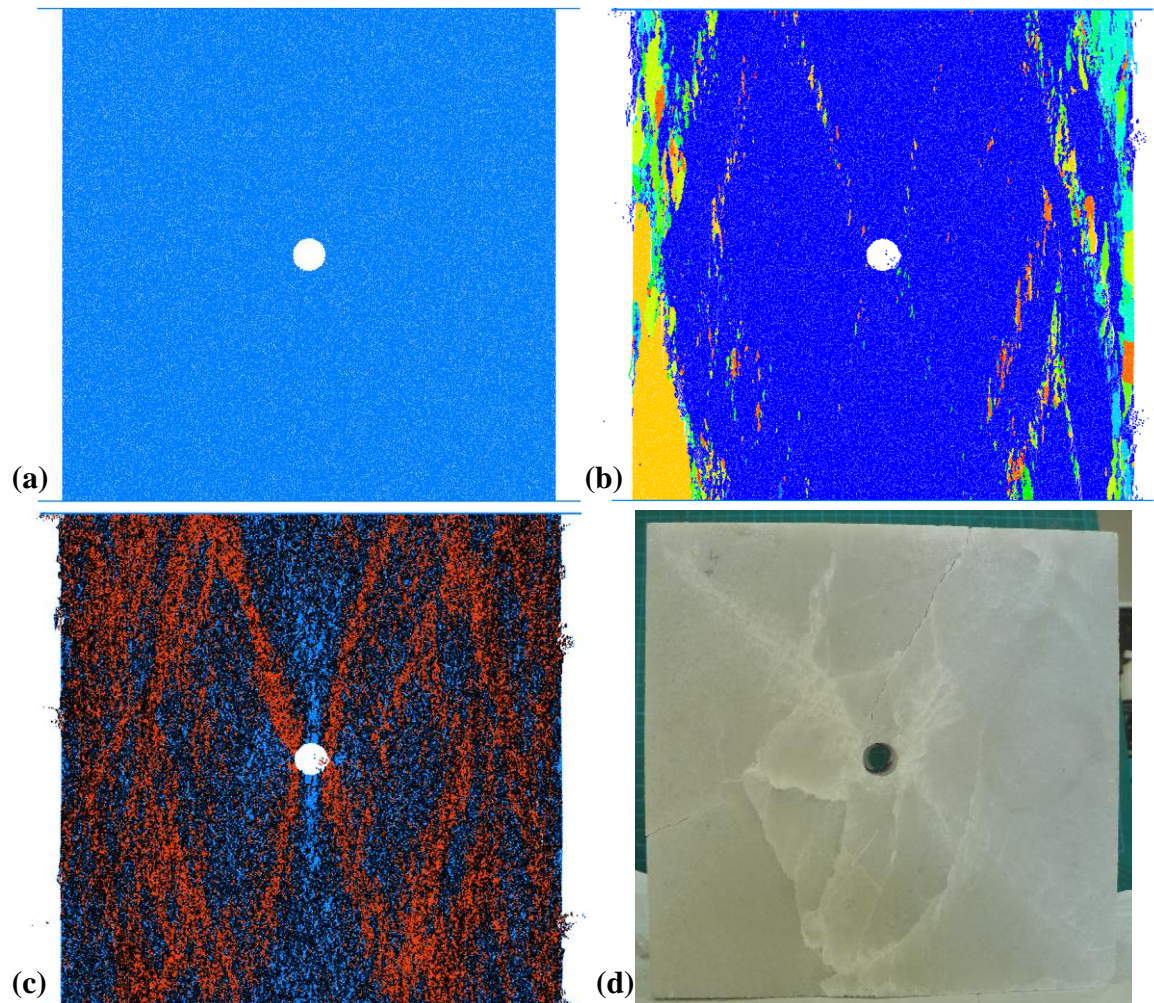
Κλείνοντας, αξίζει να σημειωθεί πως παρά το γεγονός πως η δοκιμή θλίψης του ΦΜ με οπή διαμέτρου 45 mm της ποικιλίας «Βέροια» θεωρείται απορριπτέα λόγω συνοριακών συνθηκών, όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 7.6, εντούτοις προσομοιώνεται στην Παράγραφο 9.4.1 δίνοντας αξιοσημείωτα αποτελέσματα και τελικό μοτίβο ρωγμάτωσης, σε αντιστοιχία με του ΦΜ. Σημειώνεται επίσης ότι η τιμή PFI βρίσκεται υψηλότερα συγκριτικά με του BPM με οπή διαμέτρου 35 mm, όπως αντίστοιχα παρατηρείται και εργαστηριακά από τα ΦΜ.

9.4.1 Μάρμαρο «Βέροια»

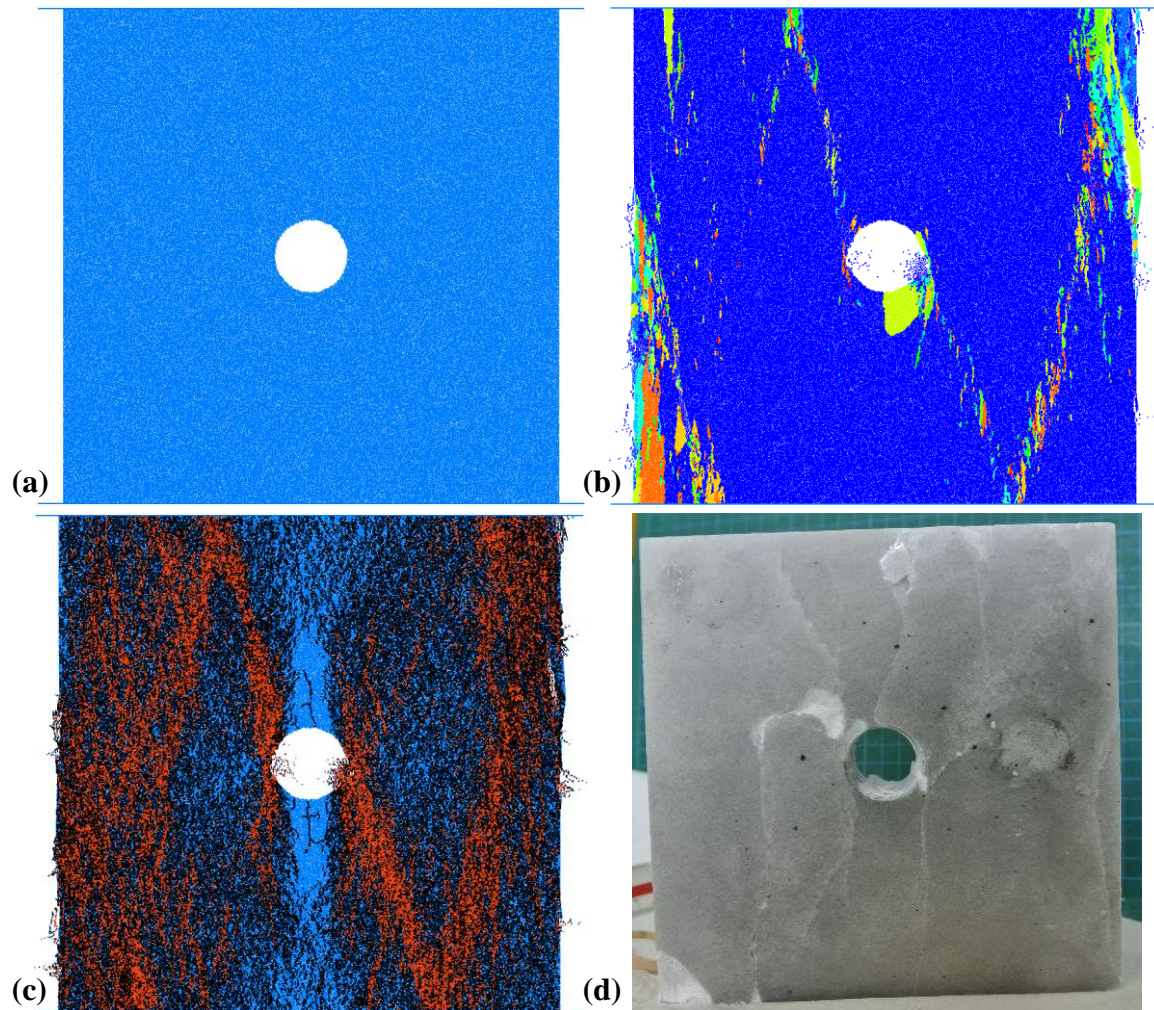
Τα αριθμητικά μοντέλα μαρμάρου «Βέροια» σχεδιάζονται με τις διαστάσεις των αντίστοιχων ΦΜ. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται εικόνες από τα BPM που αντιστοιχούν στα φυσικά μοντέλα της ποικιλίας «Βέροια» με τις οπές διαμέτρου 10, 22, 35 και 45 mm, καθώς και του μοντέλου χωρίς οπή, πριν (a) και μετά (b & c) τις δοκιμές θλίψης στο PFC2D, καθώς των αντίστοιχων ΦΜ (d) μετά το πέρας των δοκιμών θλίψης.



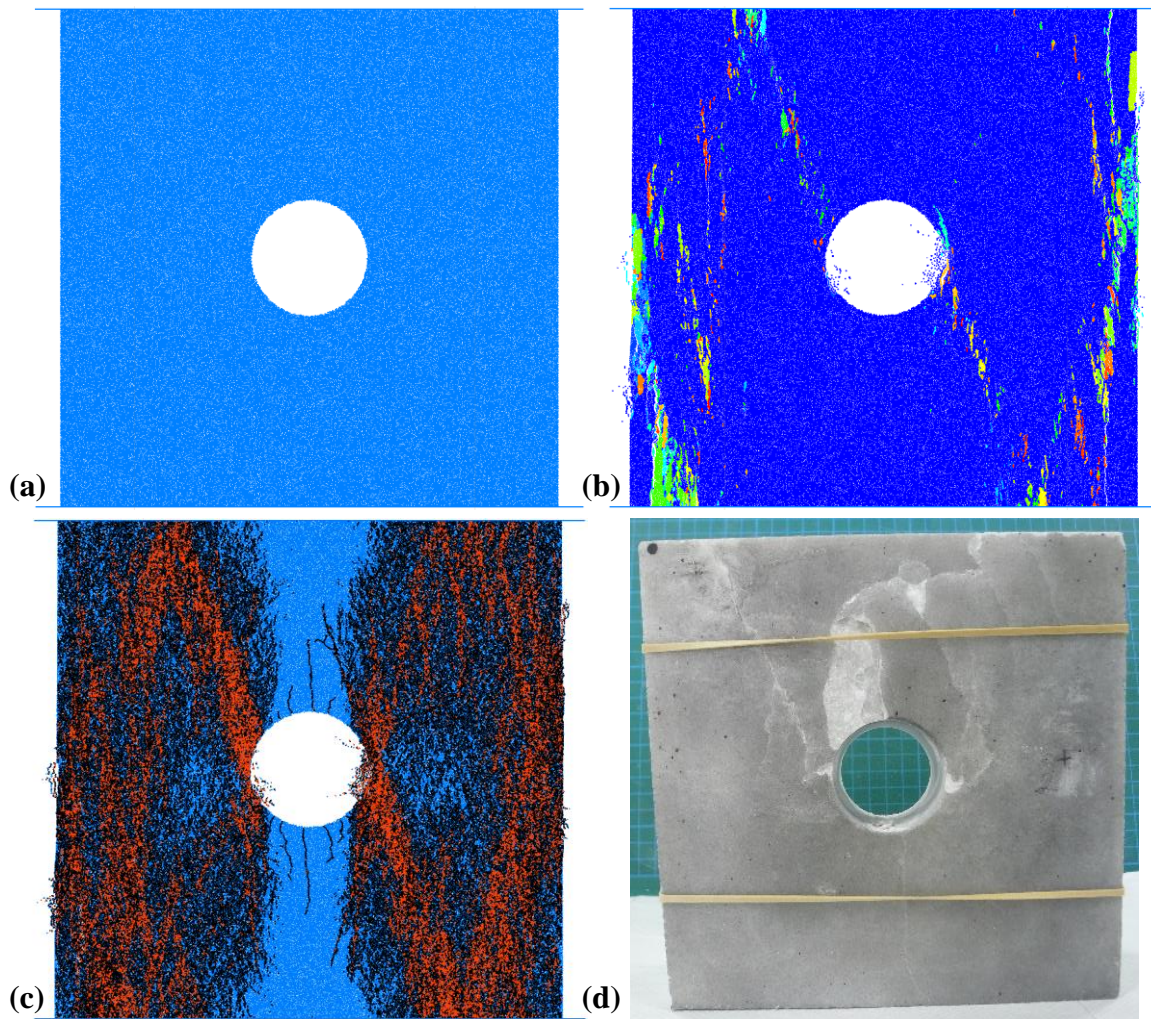
Σχήμα 9-8. BPM μαρμάρου «Βέροια» χωρίς οπή στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b &c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



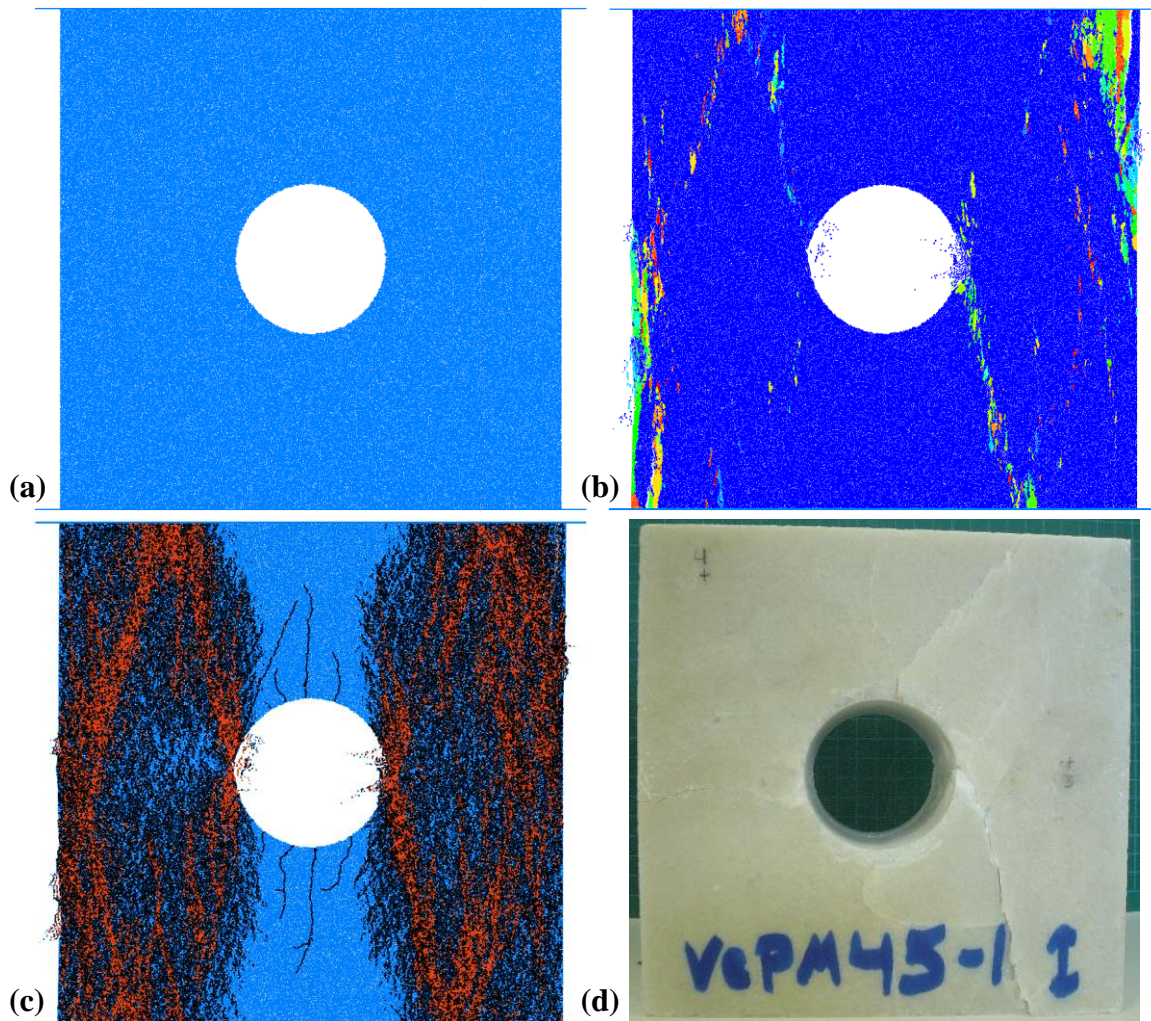
Σχήμα 9-9. BPM μαρμάρου «Βέροια» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b &c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



Σχήμα 9-10. BPM μαρμάρου «Βέροια» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



Σχήμα 9-11. BPM μαρμάρου «Βέροια» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

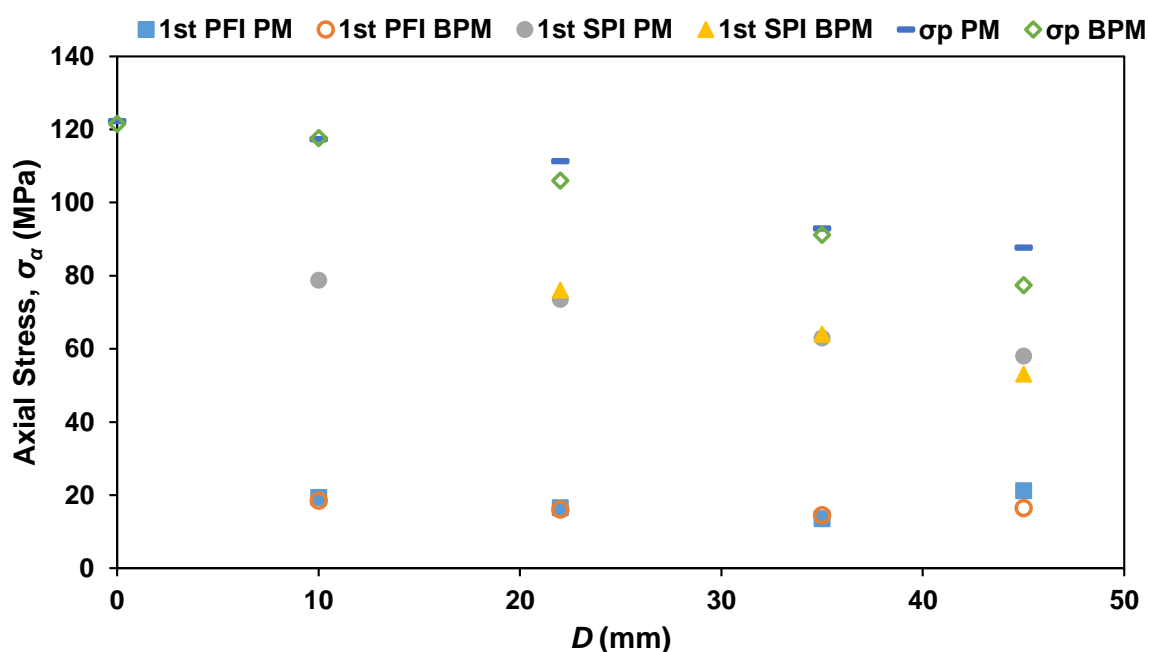


Σχήμα 9-12. BPM μαρμάρου «Βέροια» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

Ακολούθως, δίνεται συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) των φυσικών (PM) και αριθμητικών (BPM) μοντέλων. Στον ίδιο πίνακα δίνονται επίσης οι τιμές των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των ΠΡ (PFI) στη στέψη ή το δάπεδο της οπής, καθώς και η αντίστοιχη κατά την οποία παρατηρείται η έναρξη των αποφλοιώσεων (SPI) στις παρειές του ανοίγματος, στα αριστερά ή τα δεξιά.

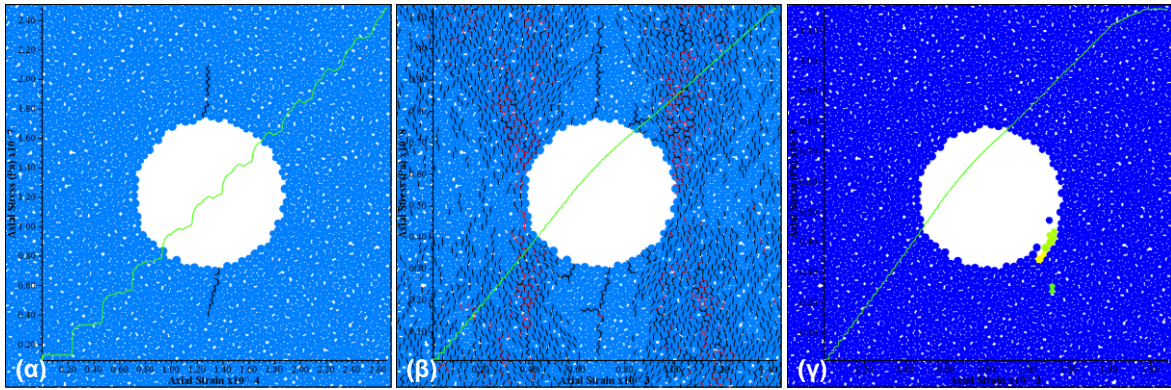
Πίνακας 9-2. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα της ποικιλίας «Βέροια».

D (mm)	1 st PFI (MPa)		1 st SPI (MPa)		σ_p (MPa)	
	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM
0					122.2	121.4
10	19.4	18.4	78.7	-	117.3	117.6
22	16.5	16.0	73.5	76.0	111.3	106.0
35	13.5	14.5	63.8	64.0	92.9	91.1
45	21.2	16.4	58.0	53.0	87.7	77.4

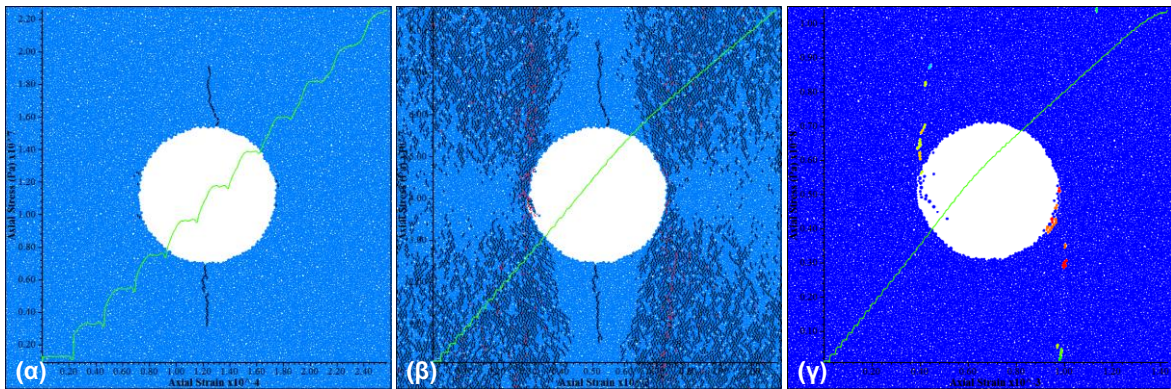


Σχήμα 9-13. Συγκριτικό γράφημα των αντοχών και των τάσεων έναρξης των πρώτων (1^{ω}) φαινομένων συναρτήσει της διαμέτρου (D) της οπής, που αντιστοιχούν στα φυσικά και αριθμητικά μοντέλα με μονές οπές της ποικιλίας «Βέροια» (1st PFI PM: ΠΡ ΦΜ, 1st PFI BPM: ΠΡ BPM, 1st SPI PM: αποφλοιώσεις ΦΜ, 1st SPI BPM: αποφλοιώσεις BPM, σ_p PM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ΦΜ και σ_p BPM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη BPM).

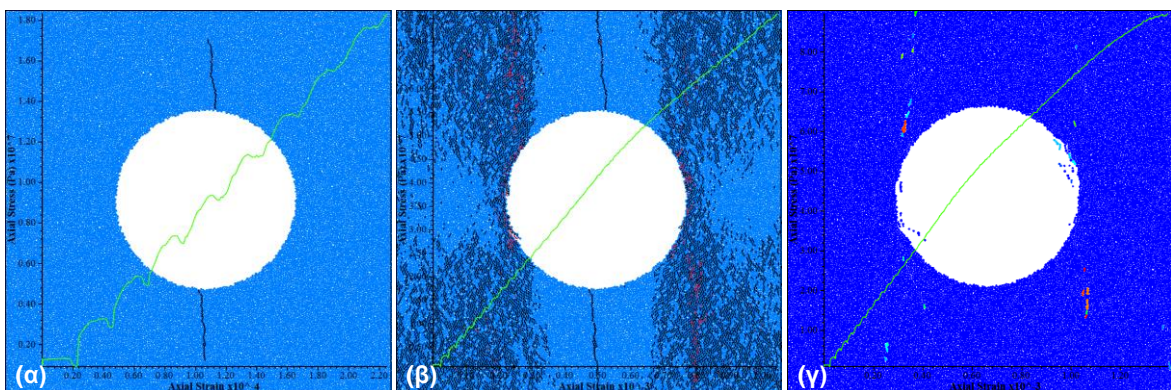
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται στιγμιότυπα των BPM γύρω από τα ανοίγματα κατά τη διάρκεια των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στον κώδικα PFC2D, και συγκριμένα παρατίθενται εικόνες όπου τα υπό μελέτη φαινόμενα βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο.



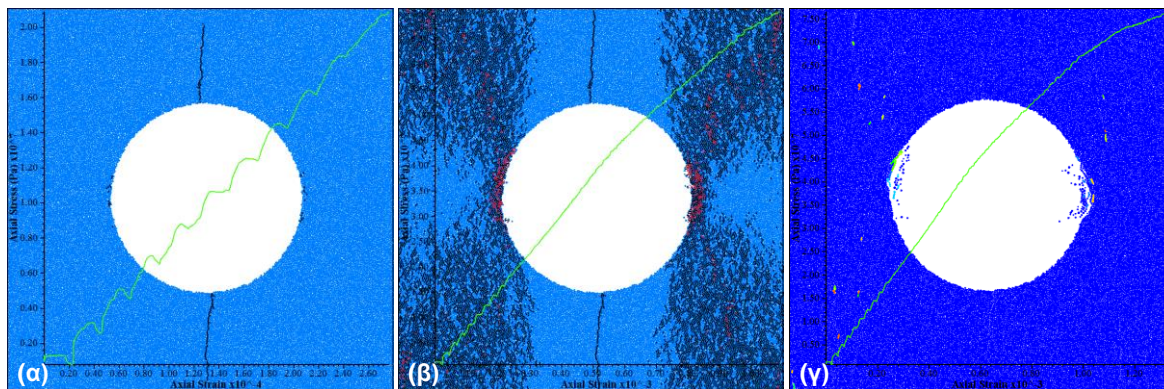
Σχήμα 9-14. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .



Σχήμα 9-15. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .



Σχήμα 9-16. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .



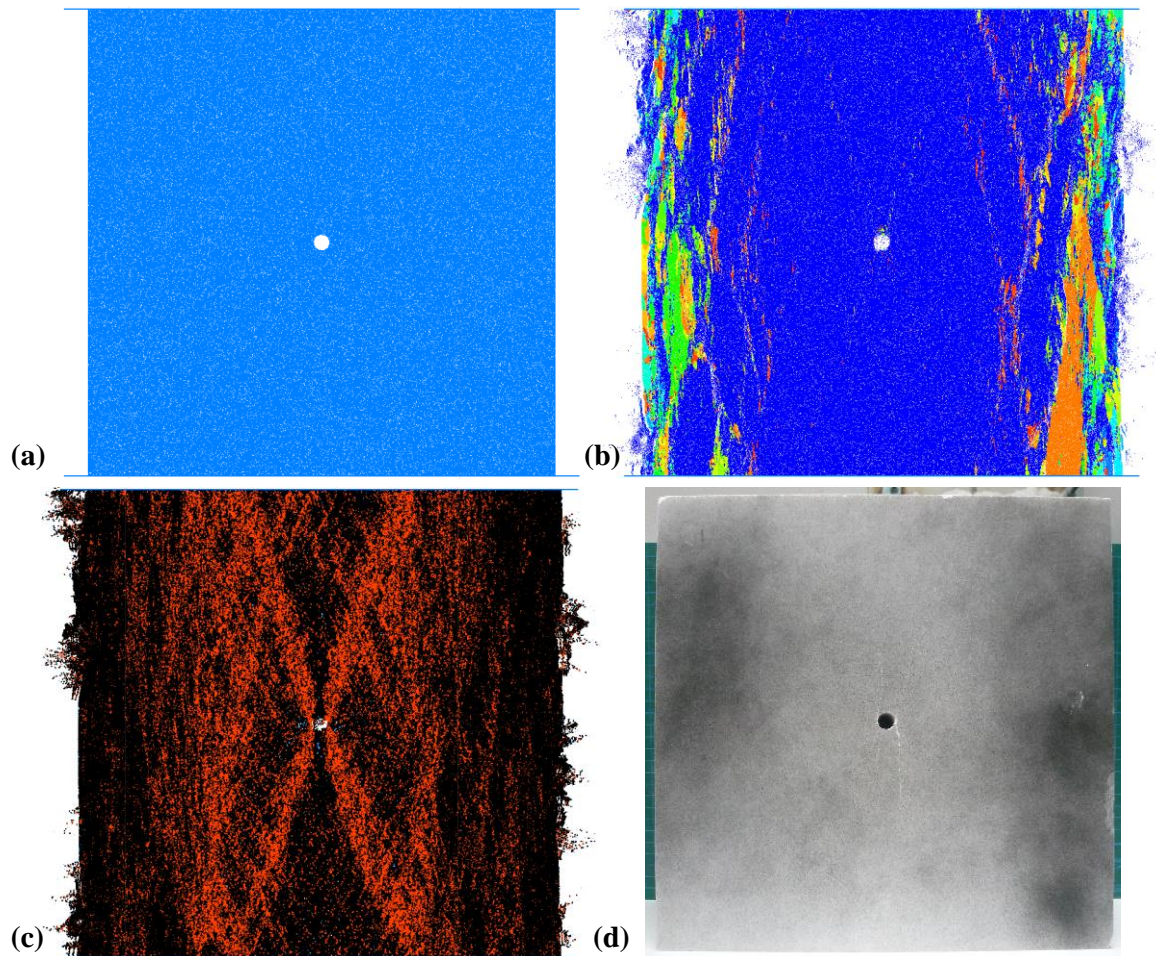
Σχήμα 9-17. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βέροια» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .

9.4.2 Μάρμαρο «Βώλακας Άριστον Ι»

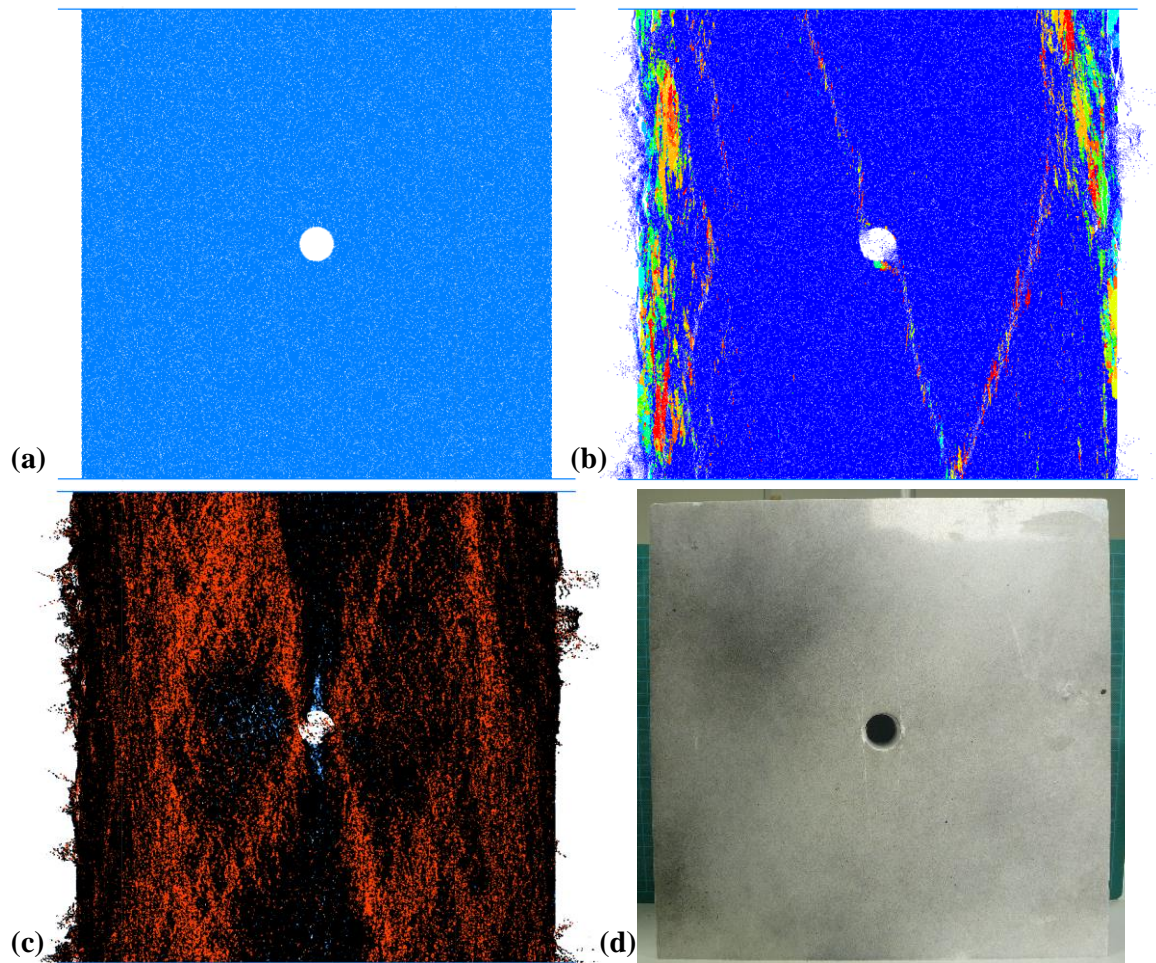
Τα αριθμητικά μοντέλα μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» σχεδιάζονται με τις διαστάσεις των αντίστοιχων ΦΜ.

9.4.2.1 Αριθμητικές προσομοιώσεις 1^{ης} σειράς δοκιμών

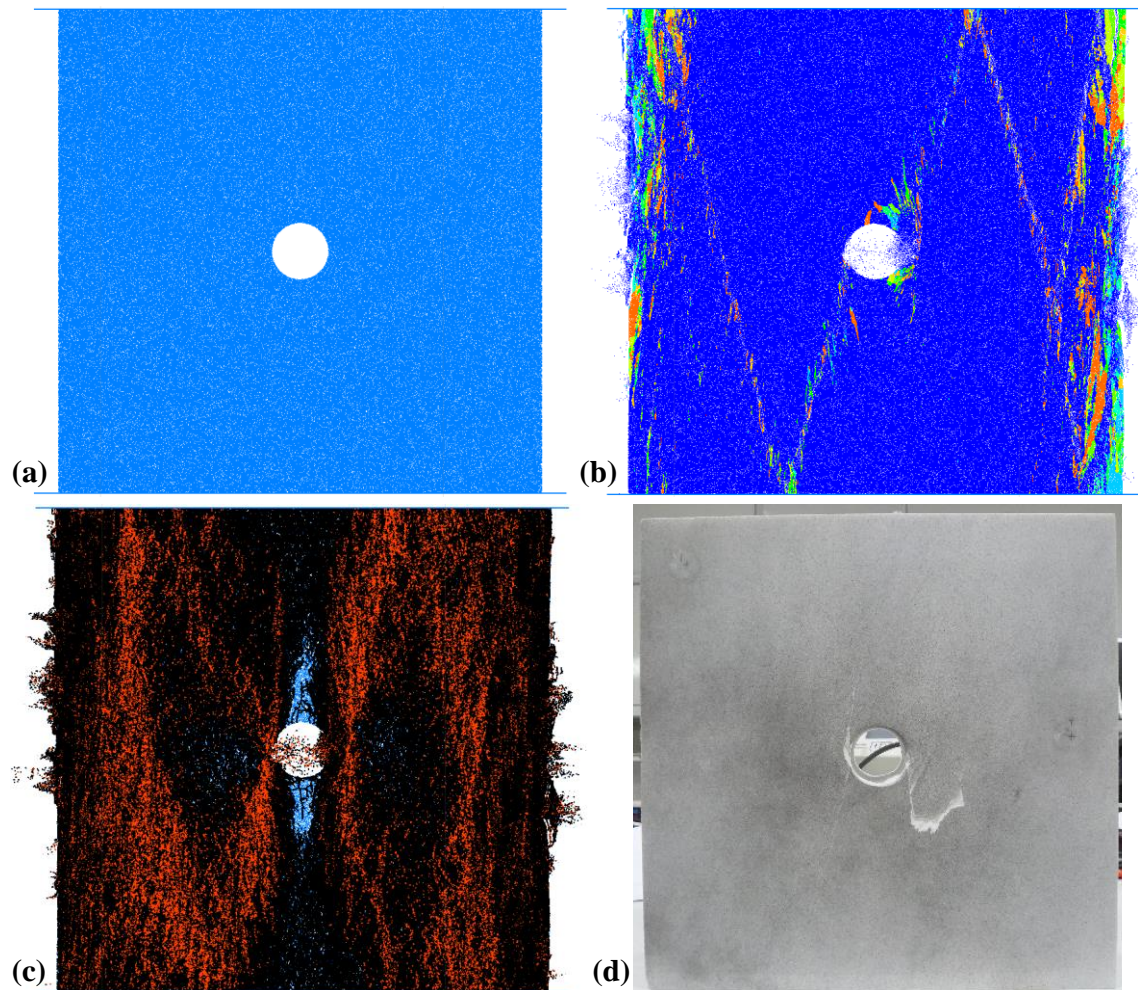
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται εικόνες από τα BPM που αντιστοιχούν στα φυσικά μοντέλα της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με τις οπές διαμέτρου 10, 22, 35, 45 και 61 mm πριν (a) και μετά (b & c) τις δοκιμές θλίψης στο PFC2D, καθώς των αντίστοιχων ΦΜ (d) μετά το πέρας των δοκιμών θλίψης.



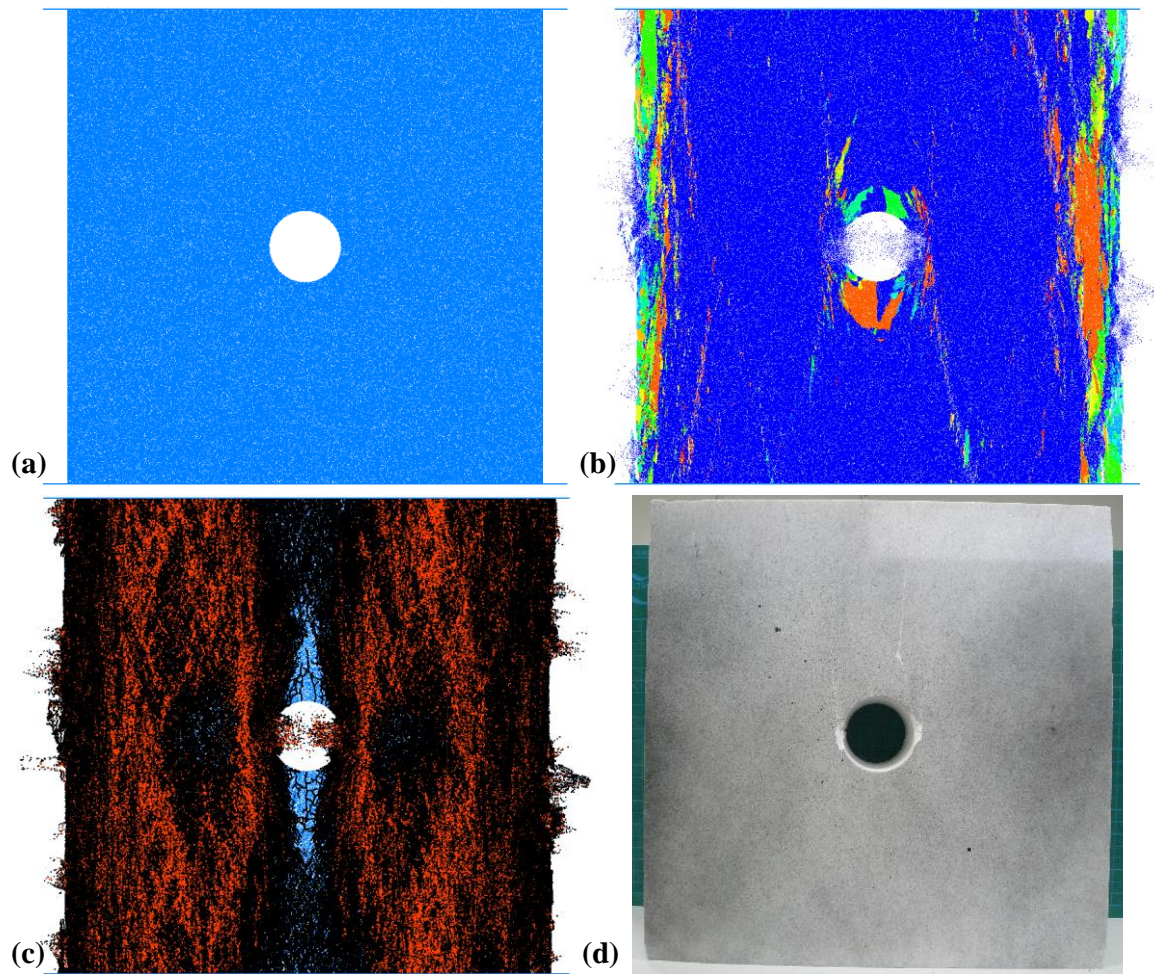
Σχήμα 9-18. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b &c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



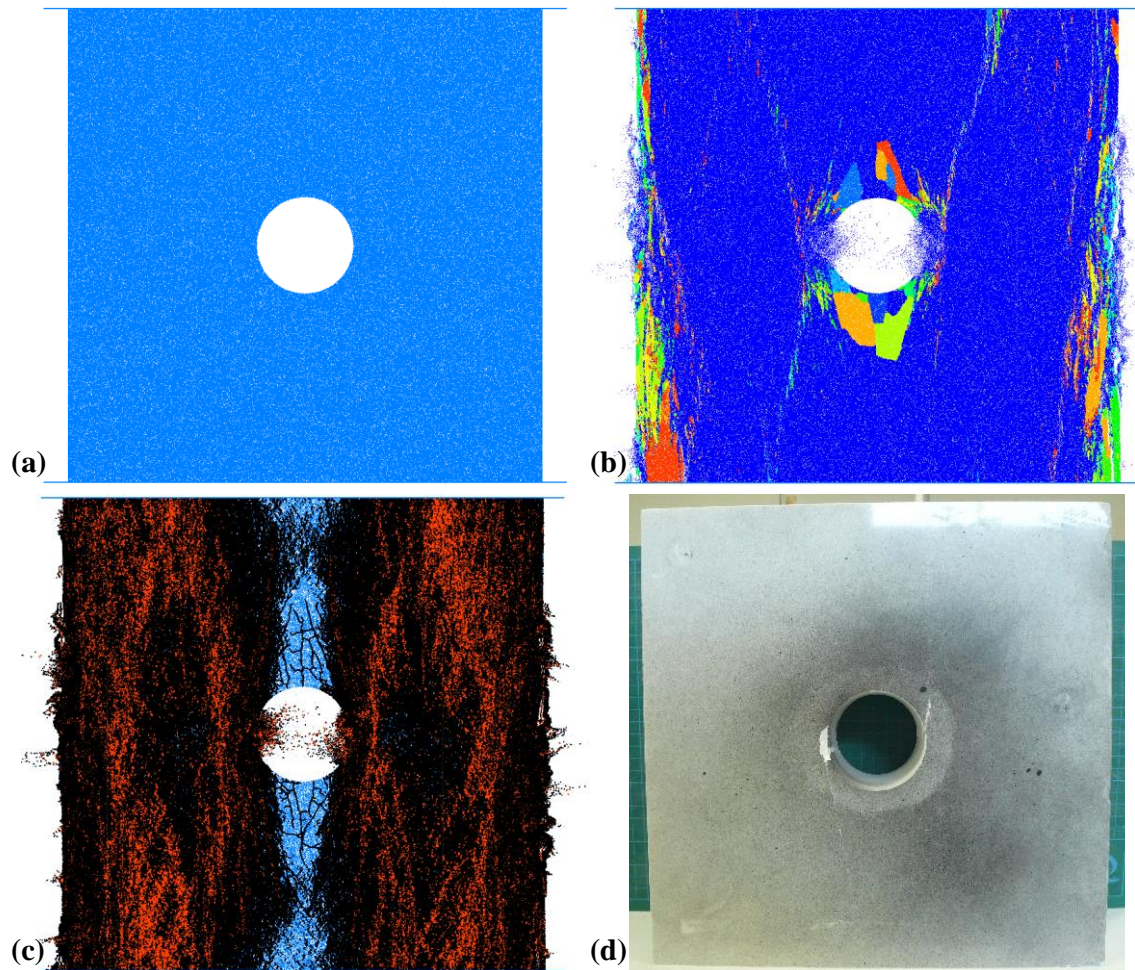
Σχήμα 9-19. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



Σχήμα 9-20. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b &c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



Σχήμα 9-21. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b &c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

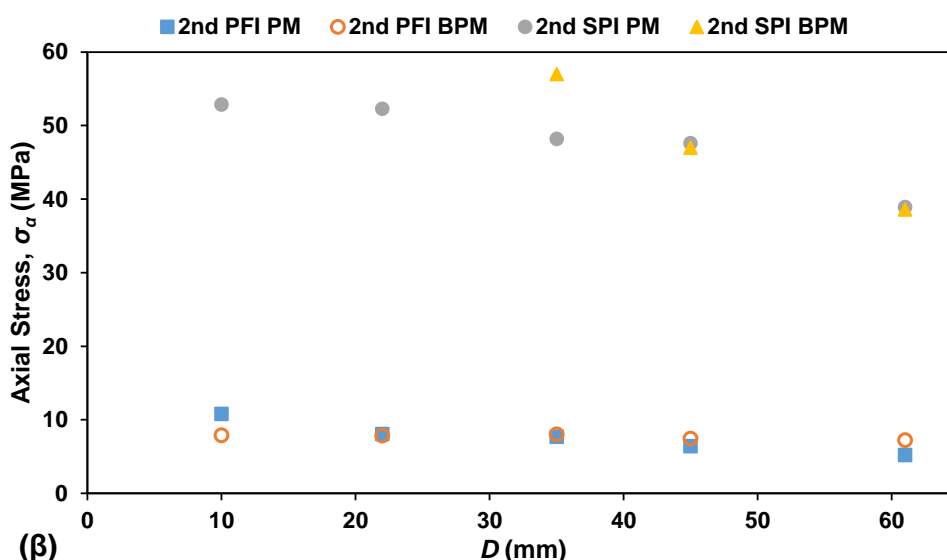
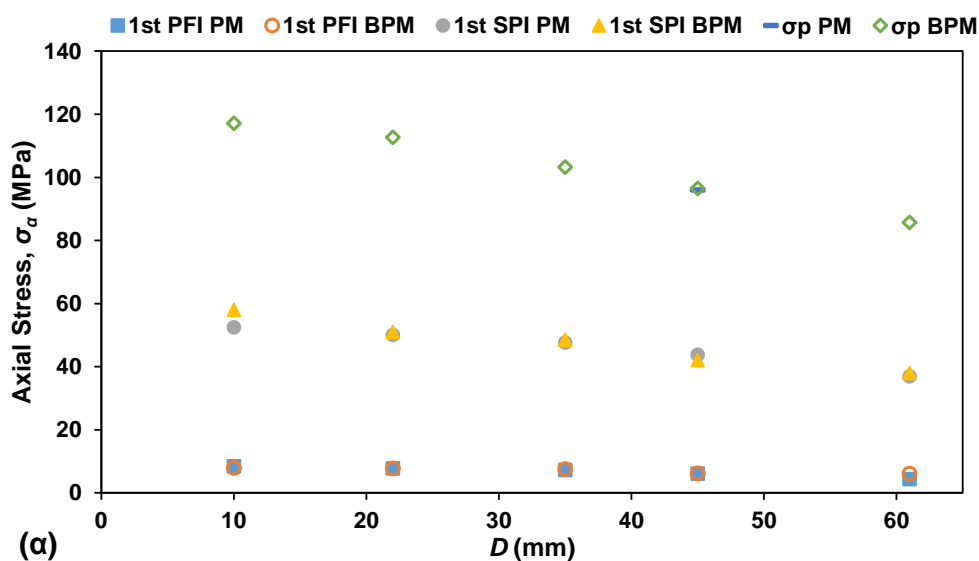


Σχήμα 9-22. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 61 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

Ακολούθως, δίνεται συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) των φυσικών (PM) και αριθμητικών (BPM) μοντέλων. Στον ίδιο πίνακα δίνονται επίσης οι τιμές των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των $1^{\omega v}$ (1^{st}) και $2^{\omega v}$ (2^{nd}) ΠΡ (PFI) στη στέψη ή το δάπεδο της οπής, καθώς και οι αντίστοιχες κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των αποφλοιώσεων (SPI) στις παρειές του ανοίγματος, στα αριστερά ή τα δεξιά.

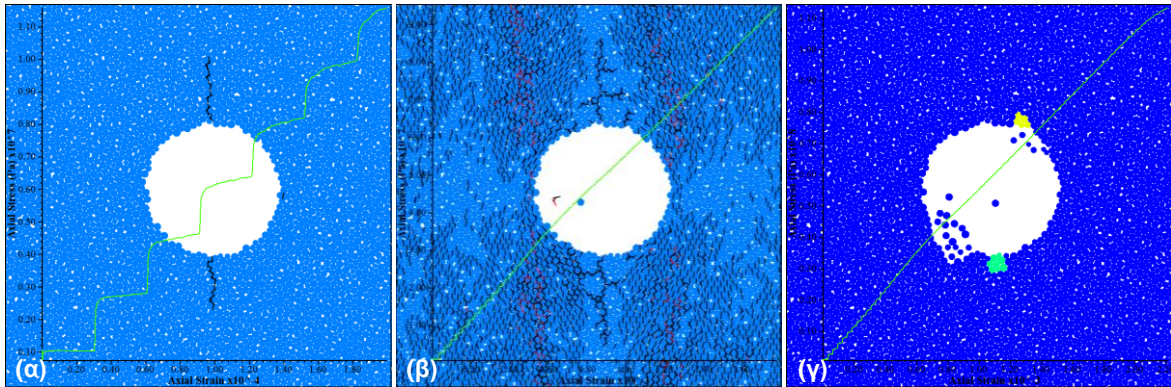
Πίνακας 9-3. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των $1^{\omega v}$ (1^{st}) και $2^{\omega v}$ (2^{nd}) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι».

D (mm)	1 st PFI (MPa)		2 nd PFI (MPa)		1 st SPI (MPa)		2 nd SPI (MPa)		σ_p (MPa)	
	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM
10	8.5	7.9	10.8	7.9	52.5	58.0	52.9	-	>107.5	117.1
22	7.8	7.8	8.1	7.9	50.0	51.0	52.3	-	>100.0	112.7
35	7.3	7.5	7.7	8.1	47.6	48.5	48.2	57.0	>93.1	103.2
45	6.1	6.2	6.4	7.5	43.8	42.0	47.6	47.0	96.0	96.5
61	4.4	6.1	5.2	7.5	37.0	38.0	38.9	38.6	>77.8	85.7

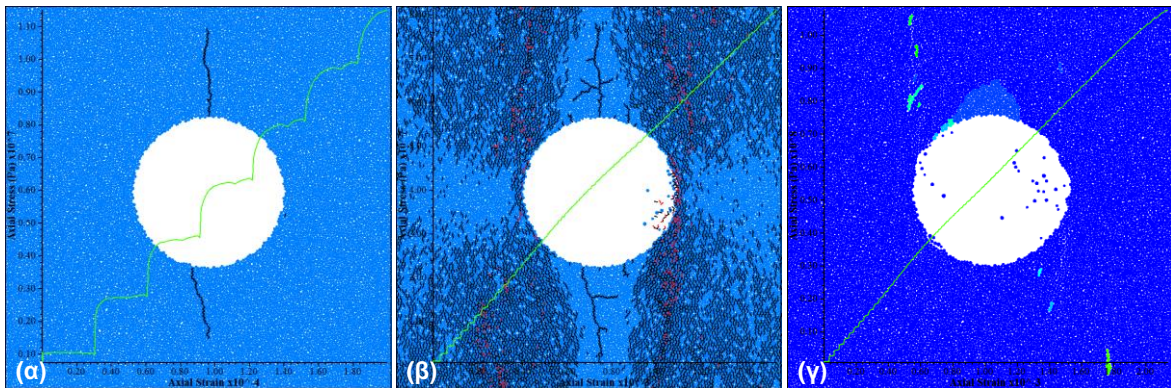


Σχήμα 9-23. Συγκριτικό γράφημα των αντοχών και των τάσεων έναρξης πρώτων ($1^{\omega v}$) (α) και δευτέρων ($2^{\omega v}$) (β) φαινομένων συναρτήσει της διαμέτρου (D) της οπής, που αντιστοιχούν στα φυσικά και αριθμητικά μοντέλα με μονές οπές της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» (1^{st} PFI PM: ΠΡ ΦΜ, 1^{st} PFI BPM: ΠΡ BPM, 1^{st} SPI PM: αποφλοιώσεις ΦΜ, 1^{st} SPI BPM: αποφλοιώσεις BPM, σ_p PM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ΦΜ και σ_p BPM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη BPM).

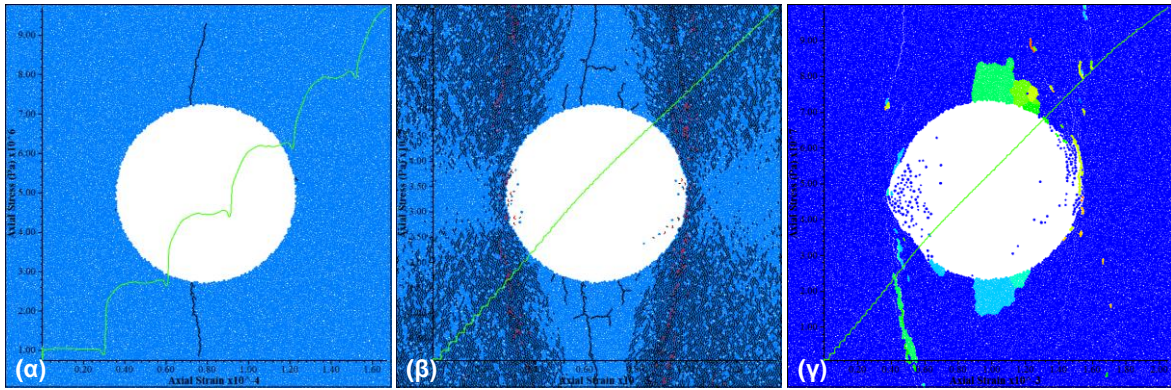
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται στιγμιότυπα των BPM γύρω από τα ανοίγματα κατά τη διάρκεια των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στον κώδικα PFC2D, και συγκριμένα παρατίθενται εικόνες όπου τα υπό μελέτη φαινόμενα βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο.



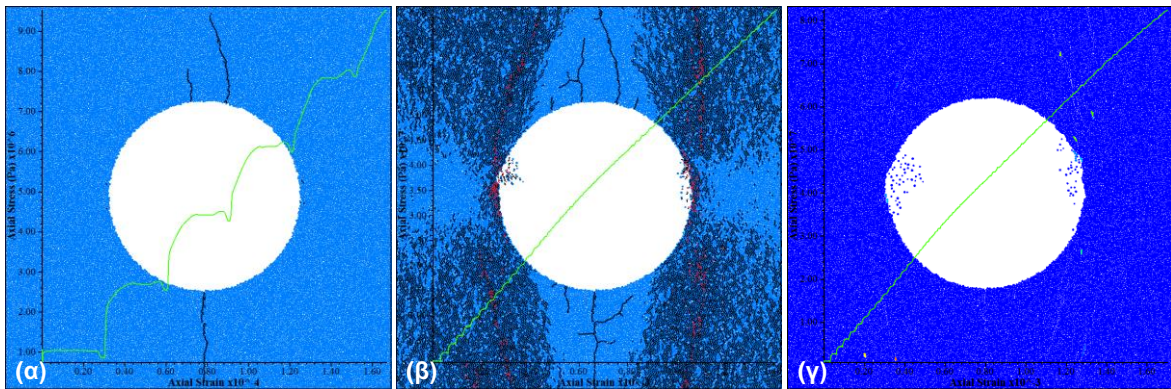
Σχήμα 9-24. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_{α} (Pa) - ϵ_{α} .



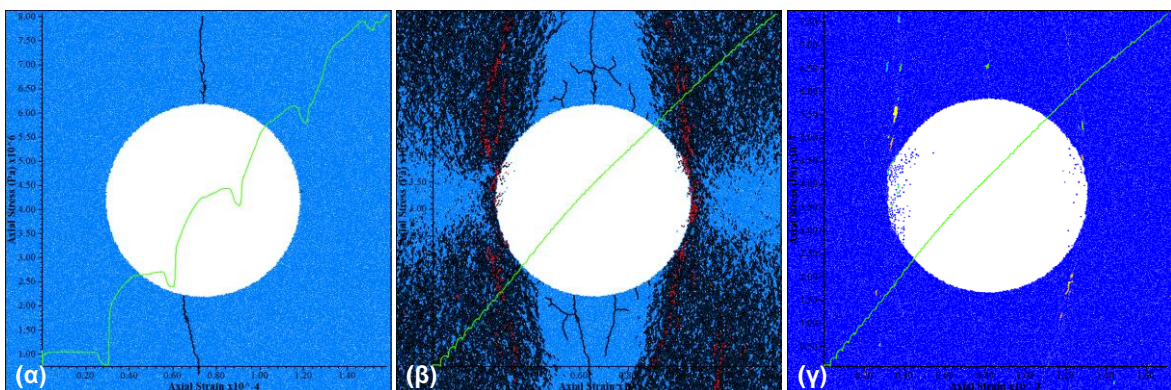
Σχήμα 9-25. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_{α} (Pa) - ϵ_{α} .



Σχήμα 9-26. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_{α} (Pa) - ϵ_{α} .



Σχήμα 9-27. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_{α} (Pa) - ϵ_{α} .



Σχήμα 9-28. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 61 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_{α} (Pa) - ϵ_{α} .

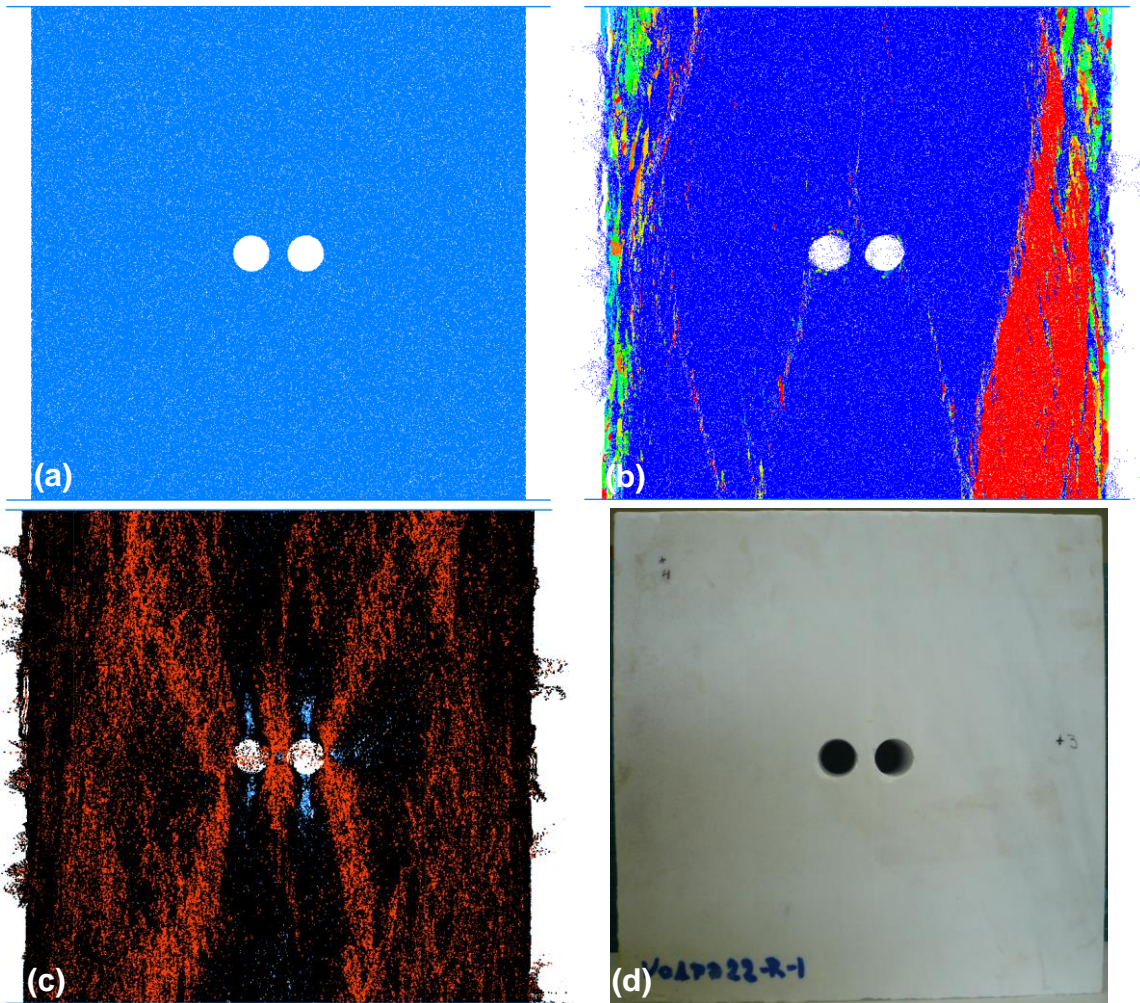
9.4.2.2 Αριθμητικές προσομοιώσεις 2^{ης} σειράς δοκιμών

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων της δεύτερης (2^{ης}) σειράς εργαστηριακών δοκιμών σε φυσικά μοντέλα με διπλές κυλινδρικές οπές της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι». Όπως και στις εργαστηριακές δοκιμές, έτσι και στις προσομοιώσεις εξετάστηκαν τα εξής BPM:

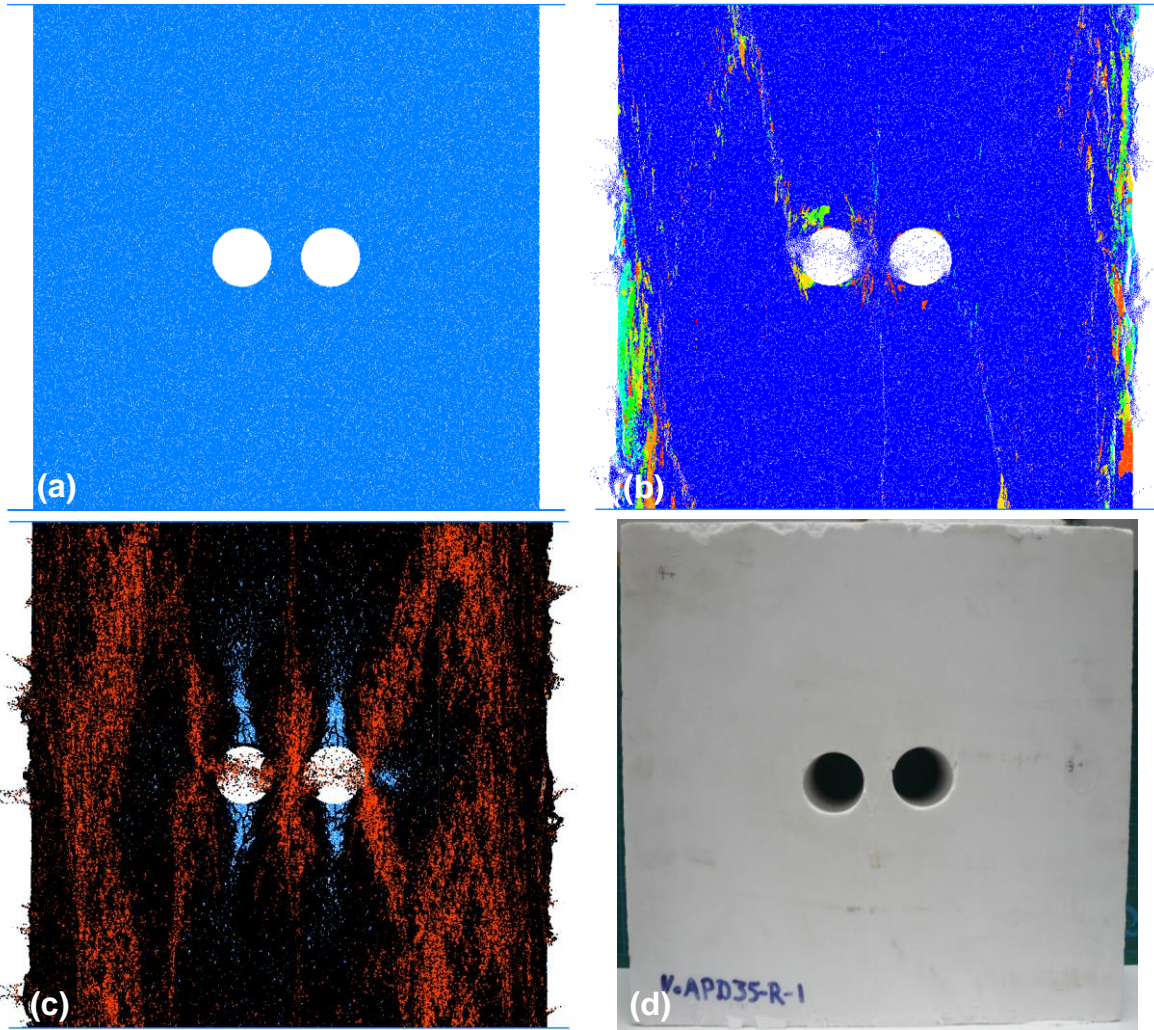
- BPM με διπλές οπές διαμέτρου (D) 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R).
- BPM με διπλές οπές διαμέτρου (D) 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R).
- BPM με διπλές οπές διαμέτρου (D) 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R).

Ο τρόπος ρωγμάτωσης των συγκεκριμένων μοντέλων ομοιάζει με εκείνον που περιγράφεται στην παράγραφο 9.4.2.1. Λόγω της ύπαρξης του δεύτερου ανοίγματος, έπειτα από τη νεφώδη εφελκυστική μικρορωγμάτωση στις αντίστοιχες θέσεις, παρατηρούνται οι πρώτες διατμητικές μικρορωγμές κατά μήκος των συμμετρικών ΜΕΡ, οι οποίες επεκτείνονται προς τις βάσεις των μοντέλων. Οι επόμενες διατμητικές μικρορωγματώσεις εμφανίζονται στις διακλαδώσεις των ΔΡ, έπειτα στις παρειές των οπών και λίγο αργότερα ακολουθούν στις ίδιες τις ΔΡ. Σημειώνεται ότι, όπως και στις αντίστοιχες εργαστηριακές δοκιμές, δεν παρατηρούνται ΜΕΡ στους στύλους μετά το πέρας των δοκιμών, και αντιστοίχως σχηματίζεται τελικώς ο ρόμβος ανάμεσα στα δύο ανοίγματα.

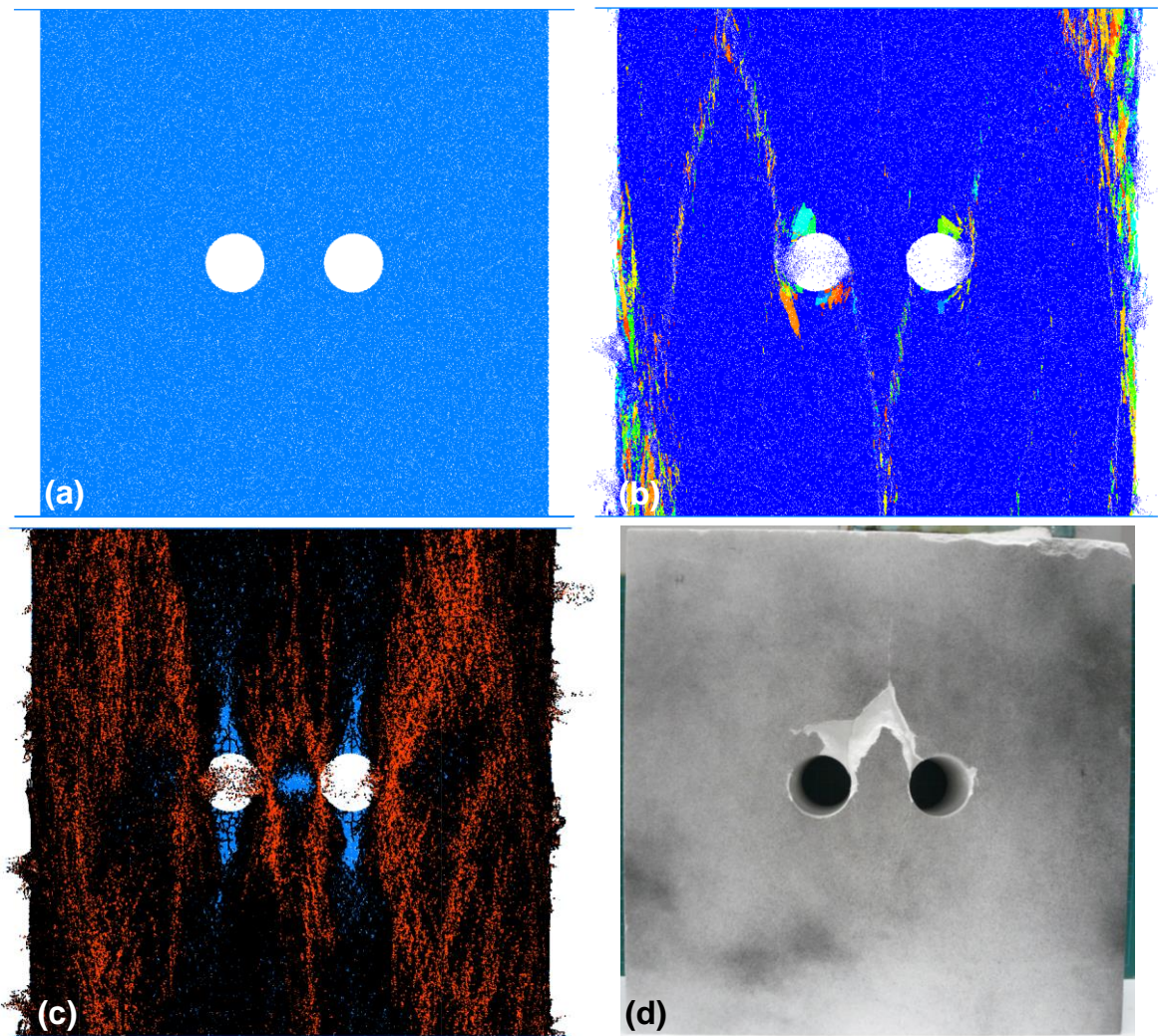
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται εικόνες από τα BPM πριν (a) και μετά (b & c) τις δοκιμές θλίψης στο PFC2D, καθώς και φωτογραφία των αντίστοιχων ΦΜ (d) μετά το πέρας των δοκιμών θλίψης.



Σχήμα 9-29. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



Σχήμα 9-30. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

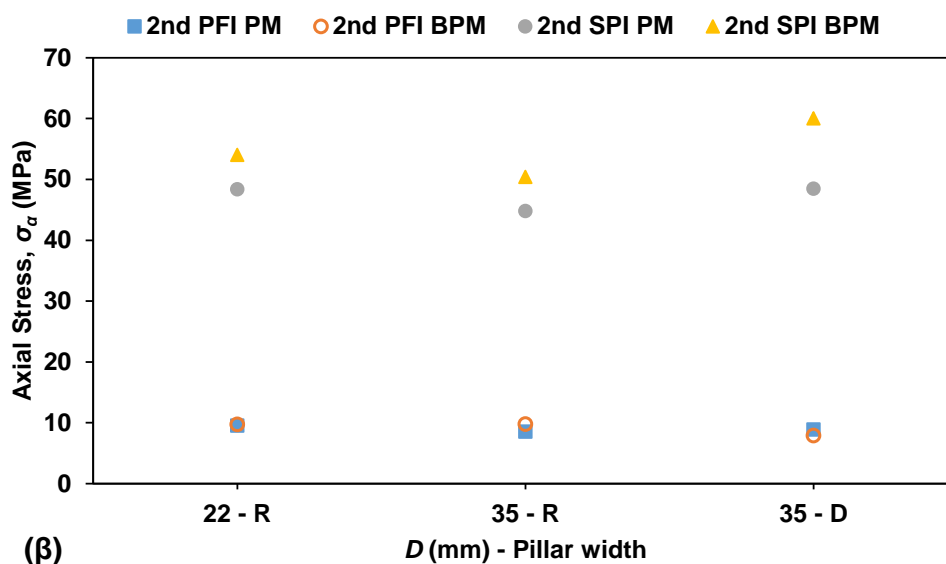
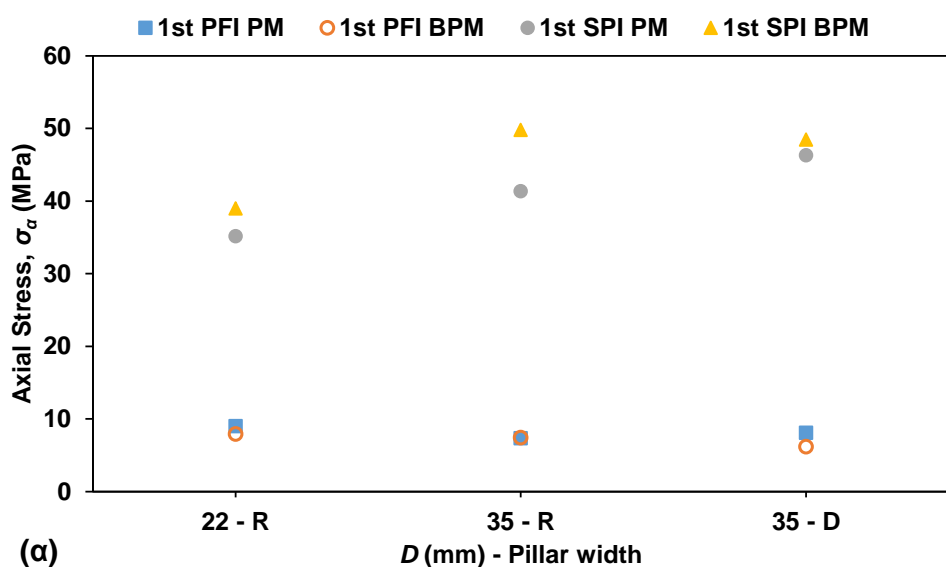


Σχήμα 9-31. BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

Ακολούθως, δίνεται συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) των φυσικών (PM) και αριθμητικών (BPM) μοντέλων. Στον ίδιο πίνακα δίνονται επίσης οι τιμές των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των $1^{\omega\upsilon}$ (1^{st}) και $2^{\omega\upsilon}$ (2^{nd}) ΠΡ (PFI) στη στέψη ή το δάπεδο των οπών, καθώς και οι αντίστοιχες κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των αποφλοιώσεων (SPI) στις παρειές των οπών.

Πίνακας 9-4. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των 1^{ων} (1st) και 2^{ων} (2nd) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα με διπλές οπές της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι».

D (mm) – πλάτος στύλου	1 st PFI (MPa)		2 nd PFI (MPa)		1 st SPI (MPa)		2 nd SPI (MPa)		σ_p (MPa)	
	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM
22 mm - R	9.0	8.0	9.5	9.7	35.2	39.0	48.4	54.0	>71.1	107.0
35 mm - R	7.3	7.5	8.5	9.8	41.4	49.8	44.8	50.4	>63.3	91.3
35 mm - D	8.1	6.2	8.9	7.9	46.3	48.5	48.5	60.0	>82.5	92.0

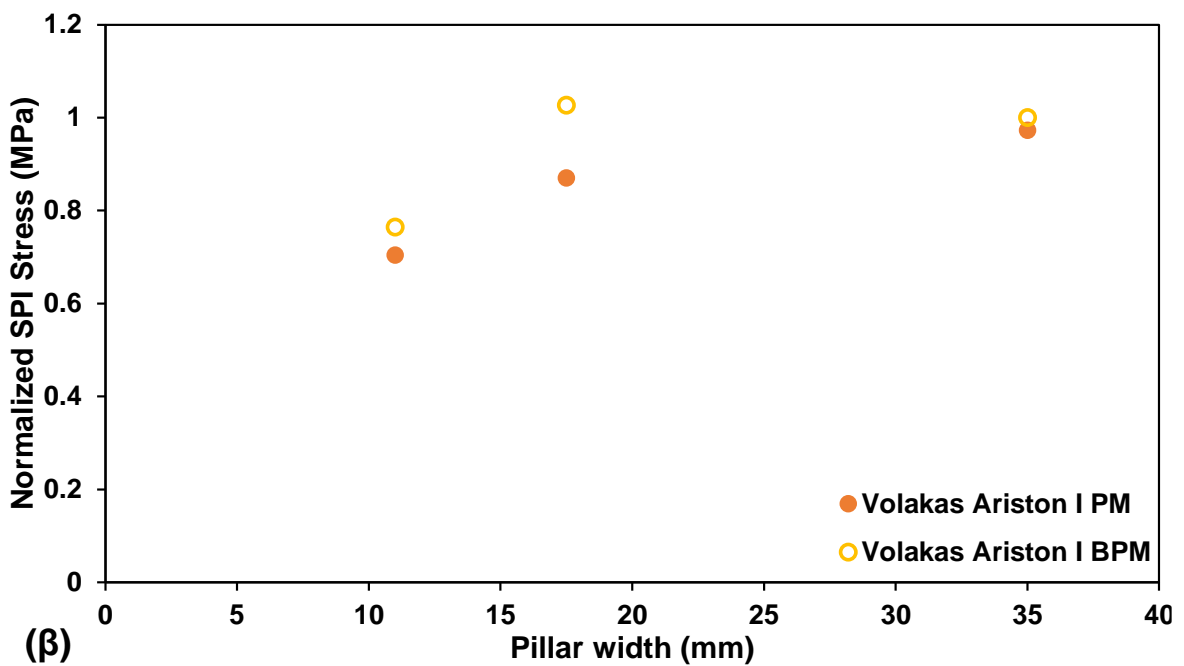
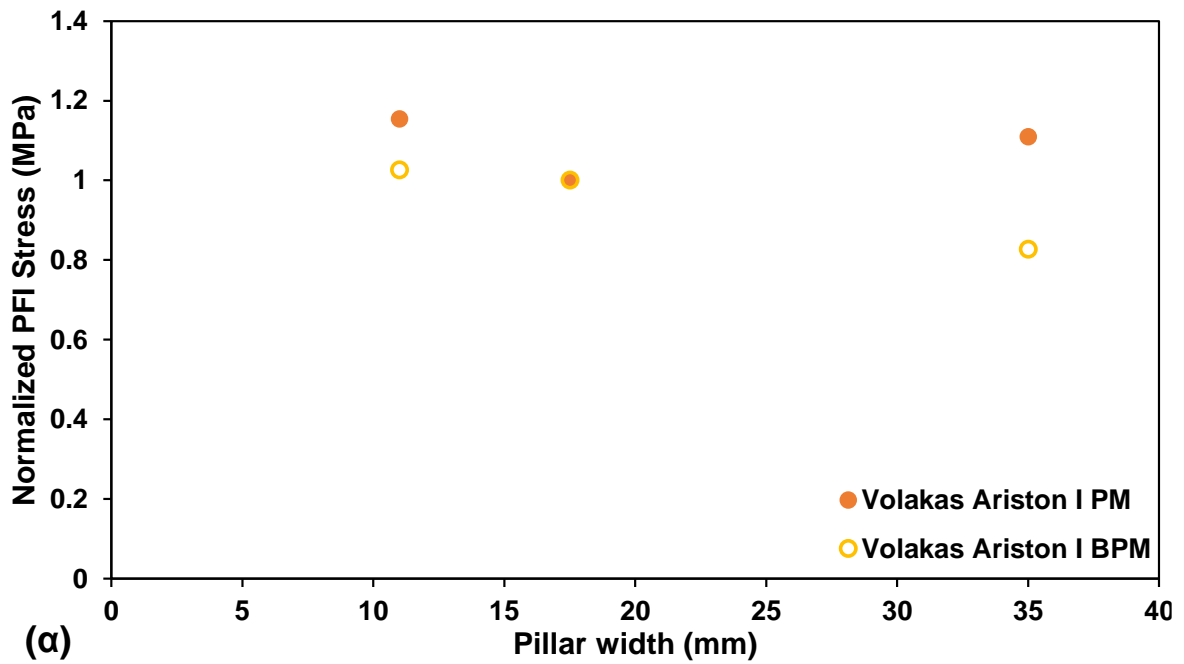


Σχήμα 9-32. Συγκριτικά γραφήματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των πρώτων (1st) (α) και δεύτερων (2nd) (β) φαινομένων συναρτήσεως της διαμέτρου των οπών (mm) και του πάχους της μεταξύ των κολώνας (R : πάχος ίσο με μια ακτίνα προϋπάρχουσας οπής, D : πάχος ίσο με μια διάμετρο προϋπάρχουσας οπής) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» και των αντίστοιχων BPM στον κώδικα PFC2D με διπλά κυλινδρικά προϋπάρχοντα ανοίγματα (PFI PM: ΠΡ ΦΜ, PFI BPM: ΠΡ BPM, SPI PM: ΠΑ ΦΜ, SPI BPM: ΠΑ BPM).

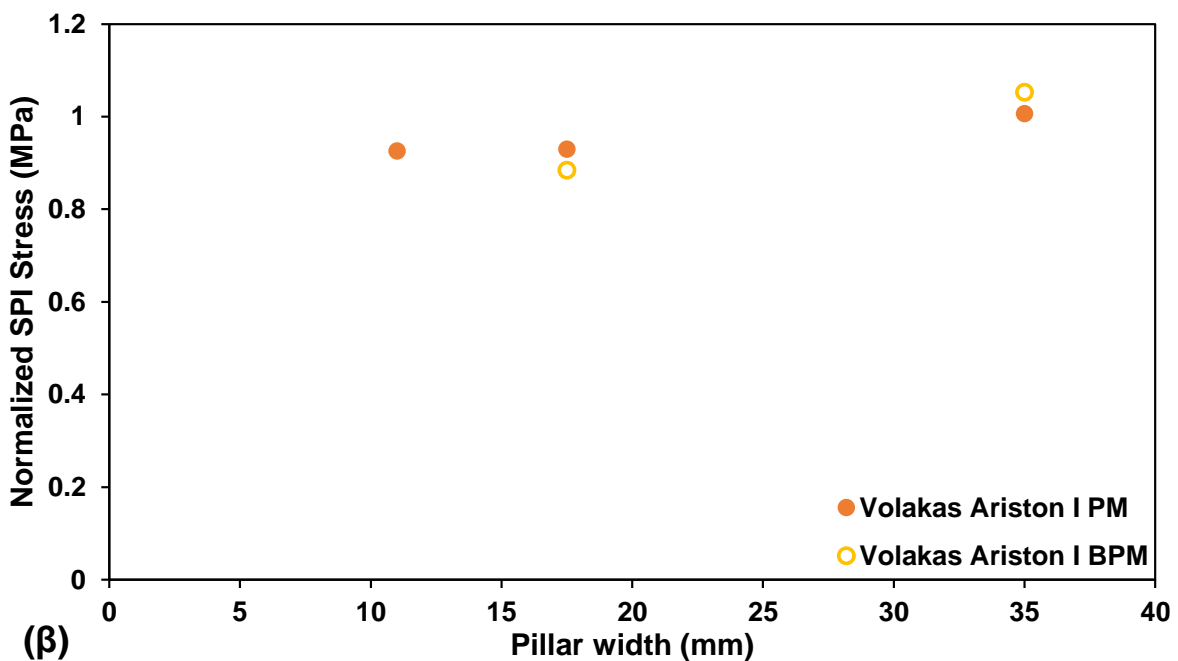
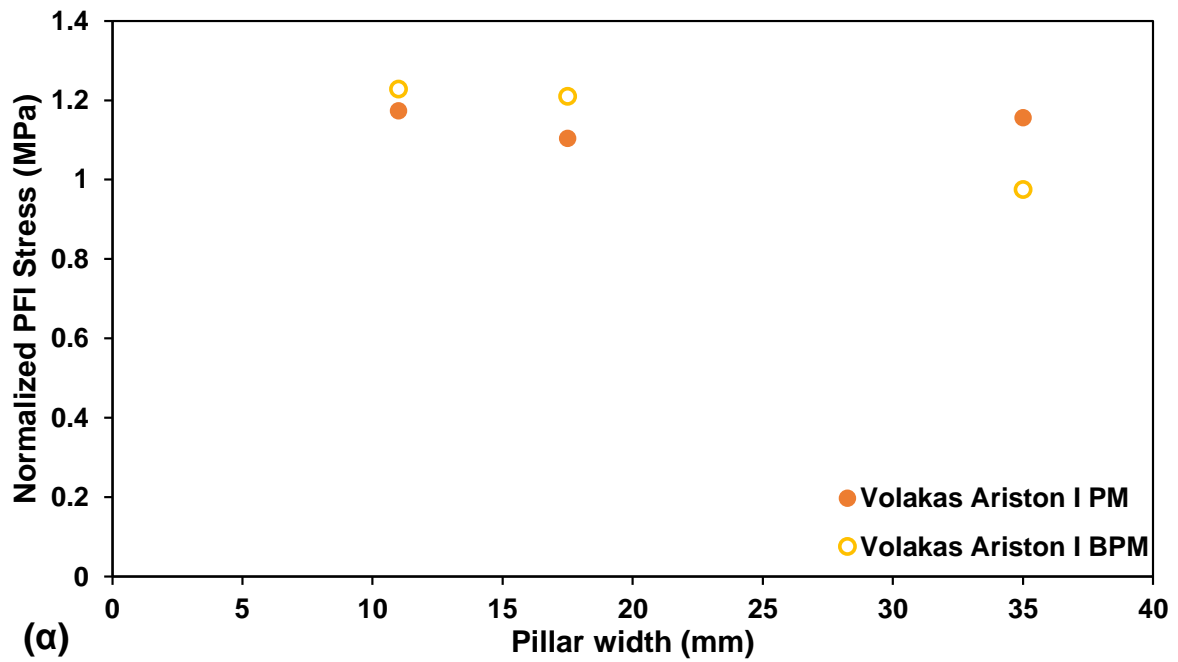
Στο Σχήμα 9-33 και στο Σχήμα 9-34 δίνονται διαγράμματα των ανηγμένων τιμών PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των αντίστοιχων BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των μοντέλων με τις μονές οπές ίδιας διαμέτρου.

Στο διάγραμμα που αναφέρεται στις 1^{ες} ανηγμένες τιμές PFI που δίνεται στο Σχήμα 9-33α, καθώς και στο αντίστοιχο που αναφέρεται στις 2^{ες} ανηγμένες τιμές PFI στο Σχήμα 9-34α, επί της ουσίας δεν παρατηρείται μεταβολή στις τιμές έναρξης του φαινομένου με την παρουσία της δεύτερης οπής, ανεξαρτήτως διαμέτρου ανοίγματος και πάχους σύλου, τόσο στα φυσικά όσο και στα αριθμητικά μοντέλα. Αντιθέτως, με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο ανοιγμάτων, φαίνεται στο Σχήμα 9-33β και στο Σχήμα 9-34β πως οι 1^{ες} αλλά και οι 2^{ες} τιμές SPI που αναφέρονται στις διπλές οπές προσεγγίζουν τις αντίστοιχες των μονών οπών, τόσο στα φυσικά όσο και στα αριθμητικά μοντέλα.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως υπάρχει καλή αντιστοιχία τόσο για τις 1^{ες} όσο και για τις 2^{ες} ανηγμένες τιμές PFI και SPI που αναφέρονται στις εργαστηριακές δοκιμές και στις προσομοιώσεις στο PFC2D.

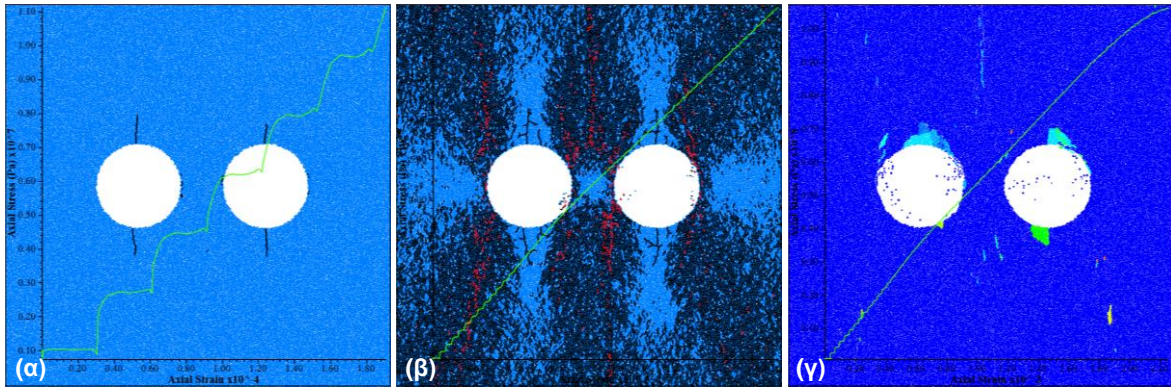


Σχήμα 9-33. Ανηγμένες 1^{ες} τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ (PM) και των BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των BPM με μονές οπές ίδιας διαμέτρου.

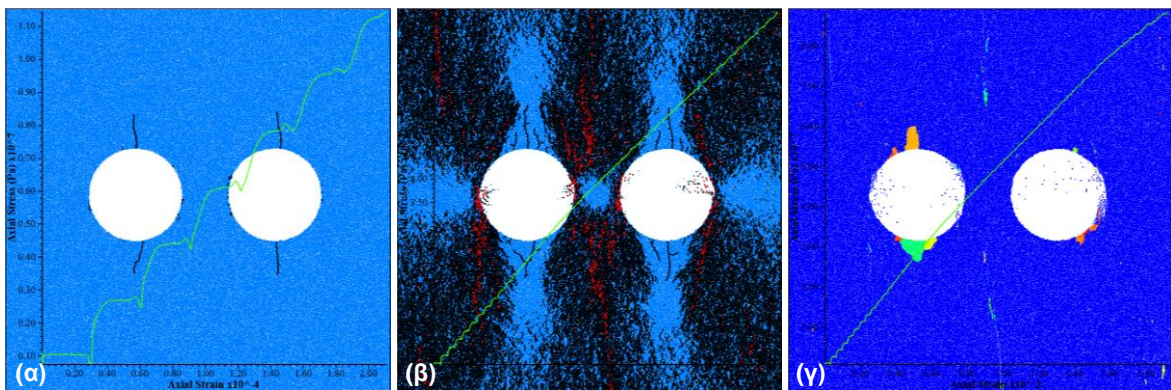


Σχήμα 9-34. Ανηγγμένες 2^{ES} τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ (PM) και των BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των BPM με μονές οπές ίδιας διαμέτρου.

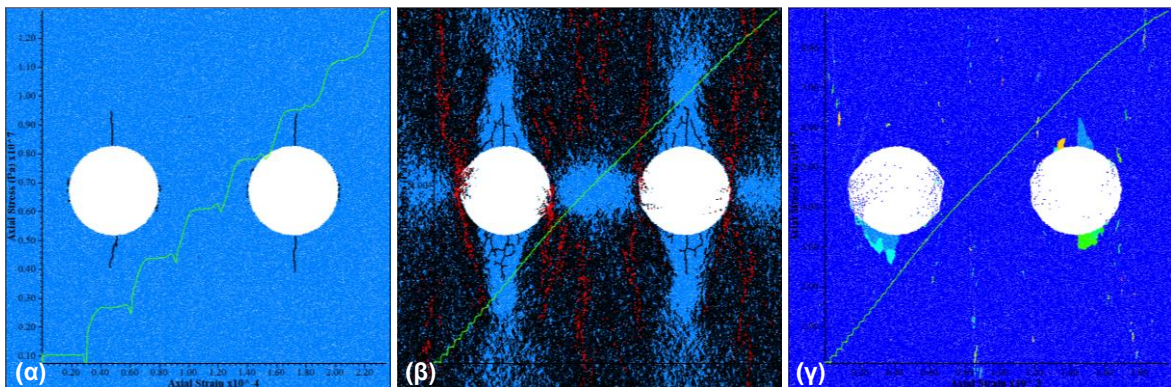
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται στιγμιότυπα των BPM γύρω από τα ανοίγματα κατά τη διάρκεια των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στον κώδικα PFC2D, και συγκριμένα παρατίθενται εικόνες όπου τα υπό μελέτη φαινόμενα βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο.



Σχήμα 9-35. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο ΒΡΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .



Σχήμα 9-36. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο ΒΡΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .



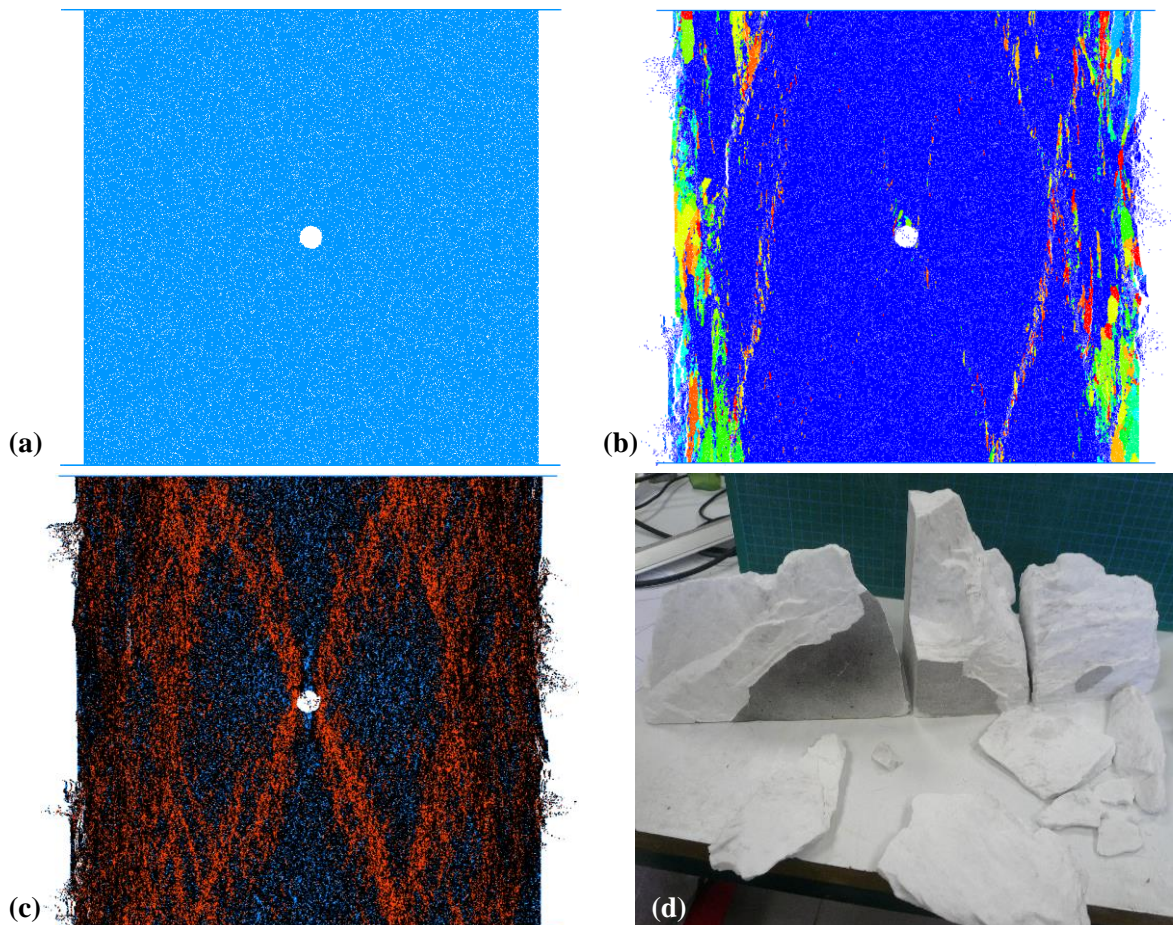
Σχήμα 9-37. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο ΒΡΜ της ποικιλίας «Βώλακας Άριστον Ι» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .

9.4.3 Μάρμαρο «Βώλακας II»

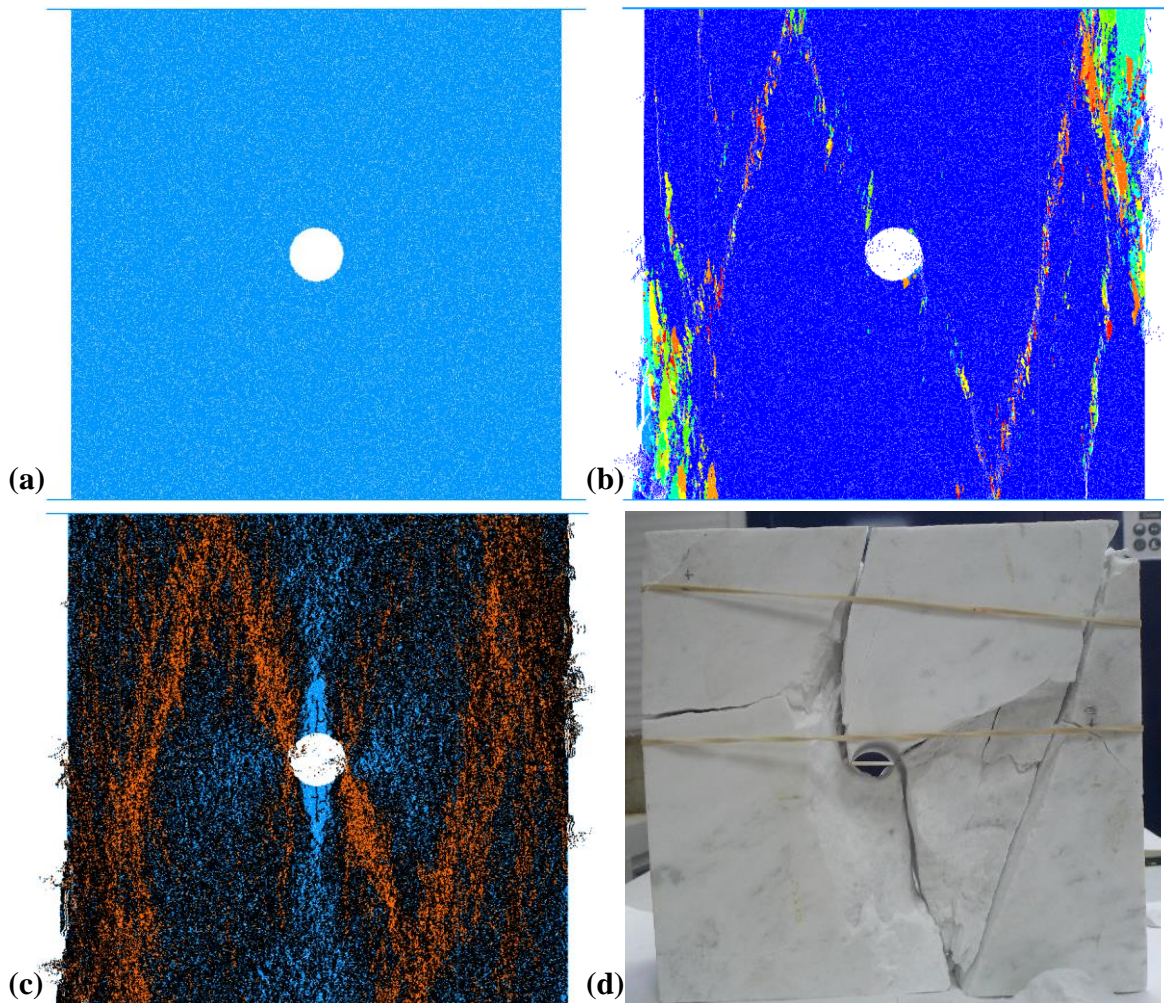
Τα αριθμητικά μοντέλα μαρμάρου «Βώλακας II» σχεδιάζονται με τις διαστάσεις των αντίστοιχων ΦΜ.

9.4.3.1 Αριθμητικές προσομοιώσεις 1^{ης} σειράς δοκιμών

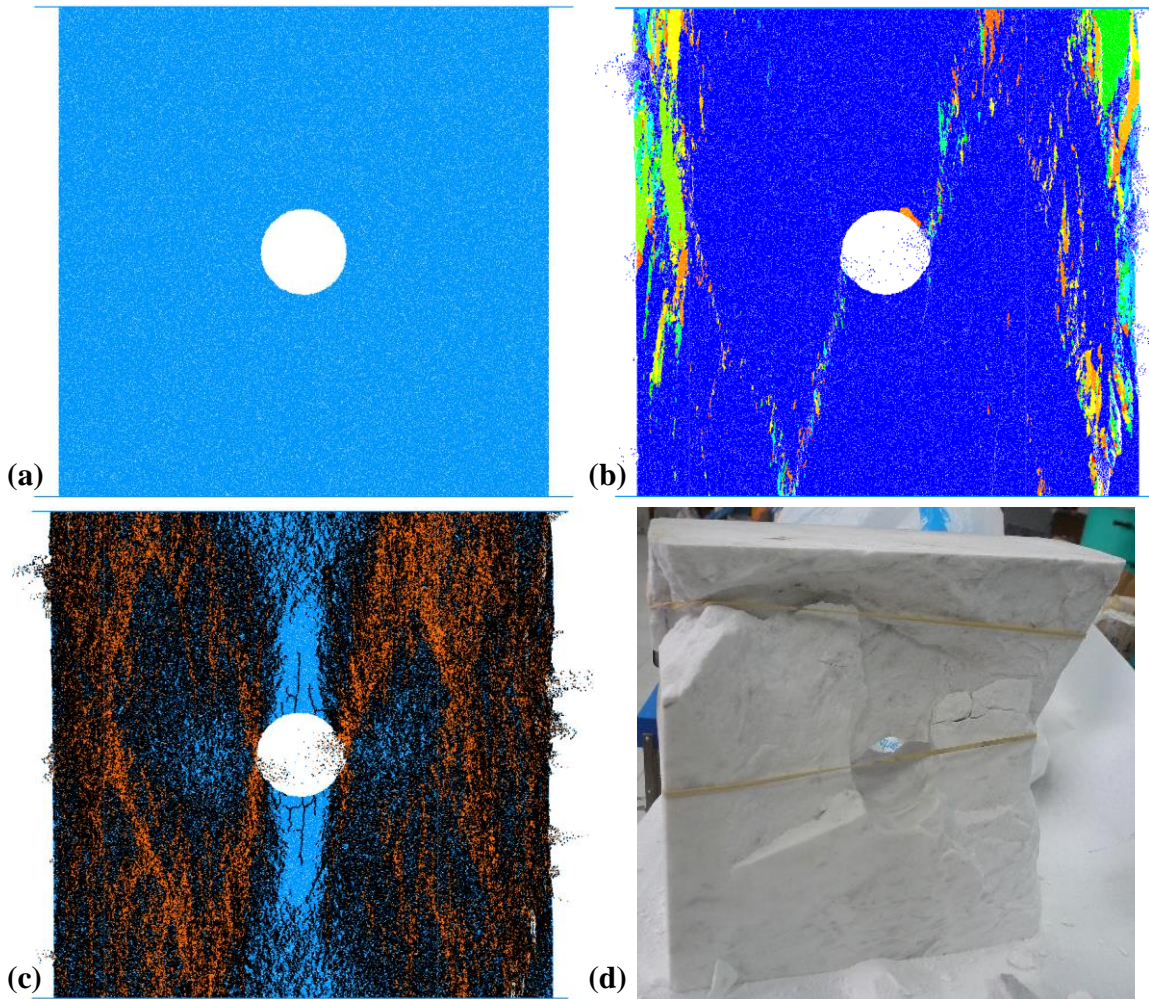
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται εικόνες από τα BPM που αντιστοιχούν στα φυσικά μοντέλα της ποικιλίας «Βώλακας II» με τις οπές διαμέτρου 10, 22, 35 και 45 mm πριν (a) και μετά (b & c) τις δοκιμές θλίψης στο PFC2D, καθώς των αντίστοιχων ΦΜ (d) μετά το πέρας των δοκιμών θλίψης.



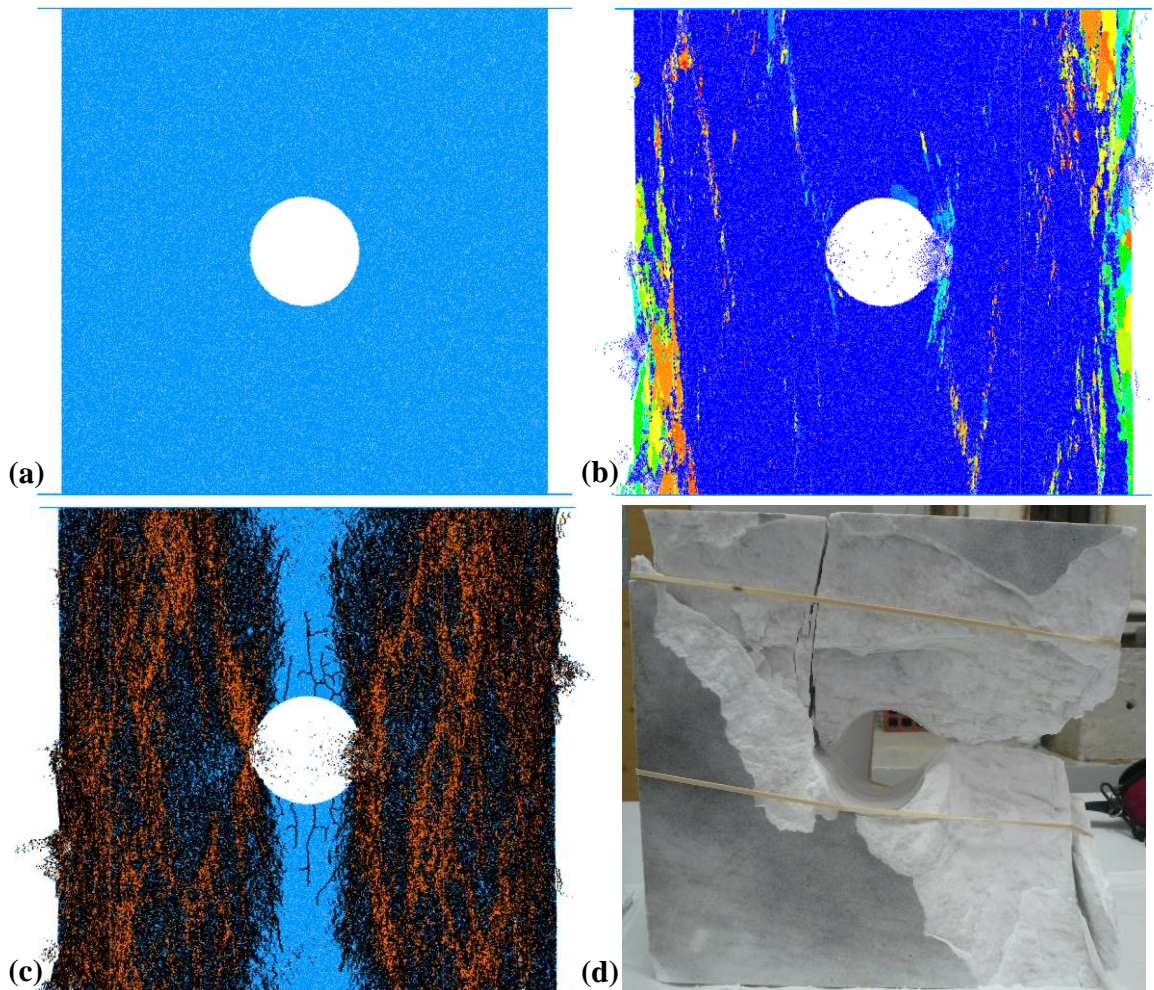
Σχήμα 9-38. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



Σχήμα 9-39. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



Σχήμα 9-40. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

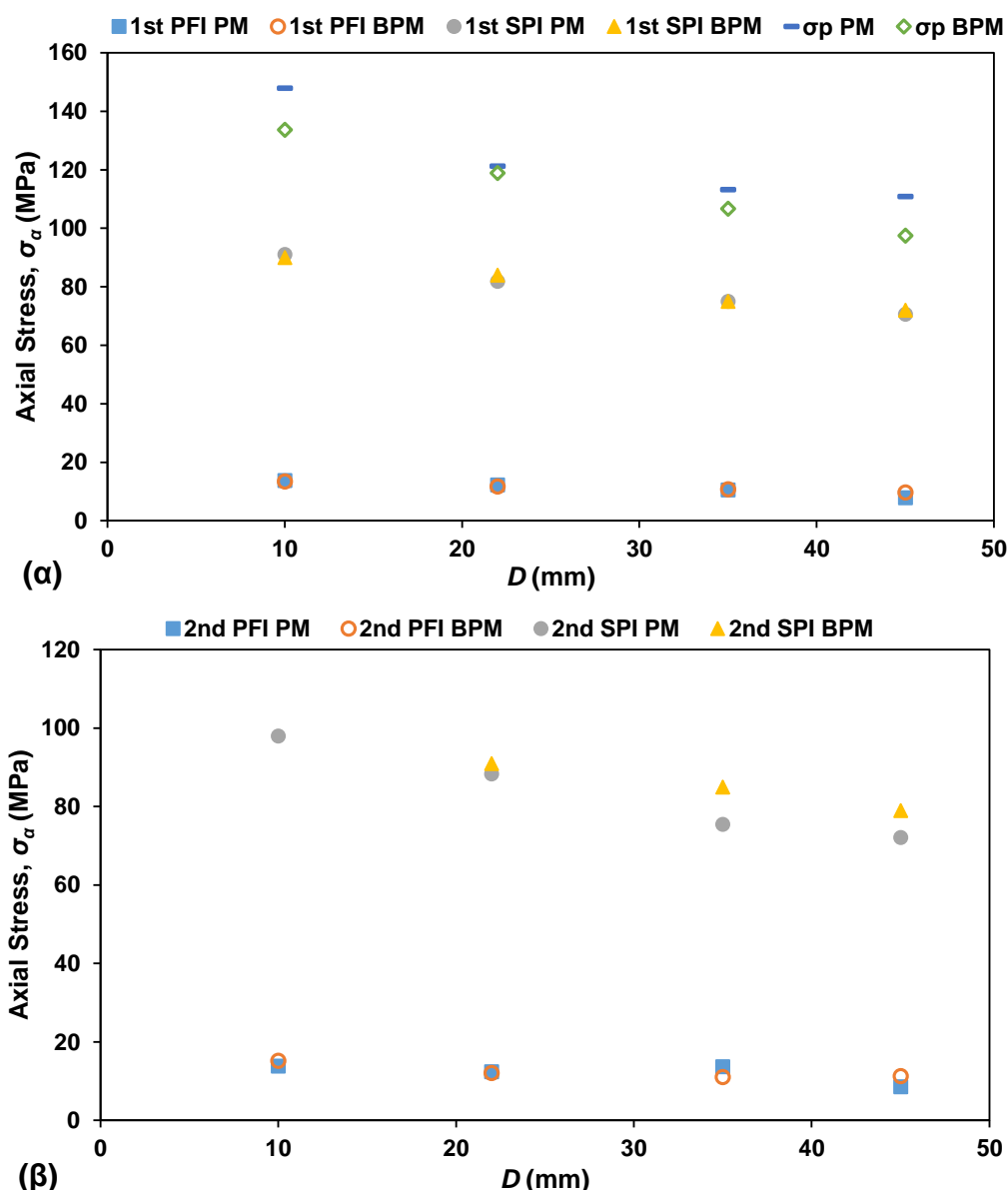


Σχήμα 9-41. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

Ακολουθώς, δίνεται συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) των φυσικών (PM) και αριθμητικών (BPM) μοντέλων. Στον ίδιο πίνακα δίνονται επίσης οι τιμές των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των $1^{\omega\upsilon}$ (1^{st}) και $2^{\omega\upsilon}$ (2^{nd}) ΠΡ (PFI) στη στέψη ή το δάπεδο της οπής, καθώς και οι αντίστοιχες κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των αποφλοιώσεων (SPI) στις παρειές του ανοίγματος, στα αριστερά ή τα δεξιά.

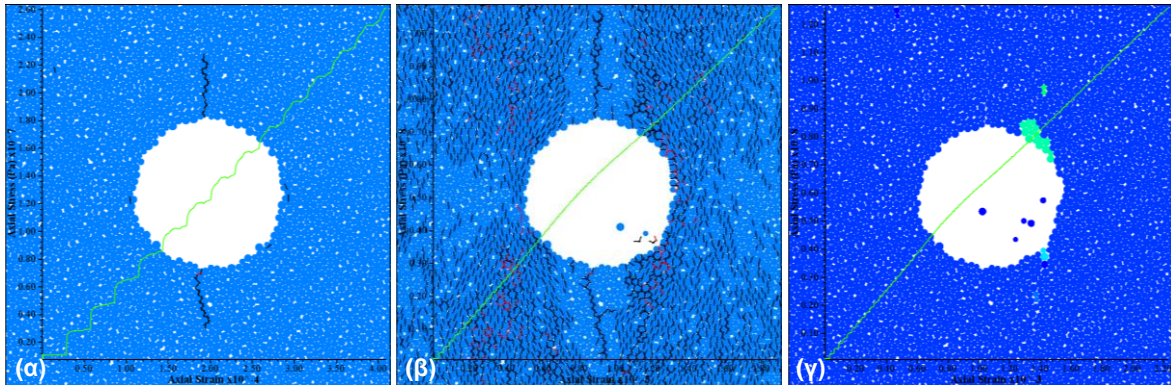
Πίνακας 9-5. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των $1^{\omega v}$ (1^{st}) και $2^{\omega v}$ (2^{nd}) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα της ποικιλίας «Βώλακας II».

D (mm)	1 st PFI (MPa)		2 nd PFI (MPa)		1 st SPI (MPa)		2 nd SPI (MPa)		σ_p (MPa)	
	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM
10	13.8	13.4	13.8	15.2	91.0	90.0	98.0	-	147.9	133.6
22	12.3	11.7	12.4	12.1	81.8	84.0	88.3	91.0	121.3	118.9
35	10.5	10.8	13.7	11.0	75.0	75.0	75.5	85.0	113.2	106.7
45	7.9	9.7	8.5	11.3	70.7	72.0	72.1	79.0	110.9	97.4

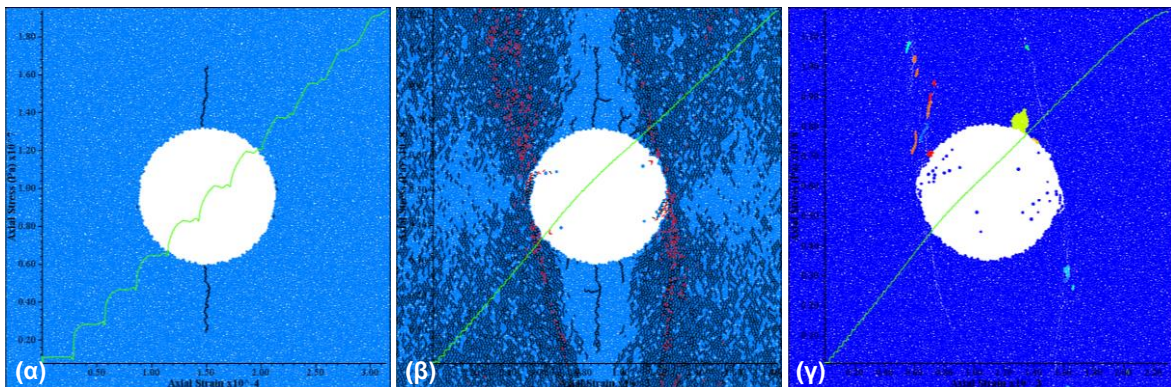


Σχήμα 9-42. Συγκριτικό γράφημα των αντοχών και των τάσεων έναρξης των πρώτων ($1^{\omega v}$) (α) και δευτέρων ($2^{\omega v}$) (β) φαινομένων συναρτήσει της διαμέτρου (D) της σπής, που αντιστοιχούν στα φυσικά και αριθμητικά μοντέλα με μονές σπές της ποικιλίας «Βώλακας II» (1^{st} PFI PM: ΠΡ ΦΜ, 1^{st} PFI BPM: ΠΡ BPM, 1^{st} SPI PM: αποφλοιώσεις ΦΜ, 1^{st} SPI BPM: αποφλοιώσεις BPM, σ_p PM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη ΦΜ και σ_p BPM: αντοχή σε μονοαξονική θλίψη BPM).

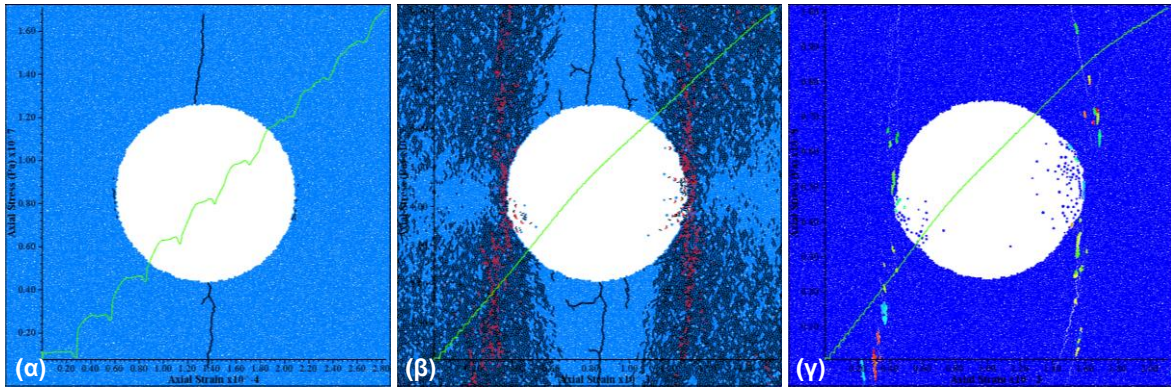
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται στιγμιότυπα των BPM γύρω από τα ανοίγματα κατά τη διάρκεια των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στον κώδικα PFC2D, και συγκριμένα παρατίθενται εικόνες όπου τα υπό μελέτη φαινόμενα βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο.



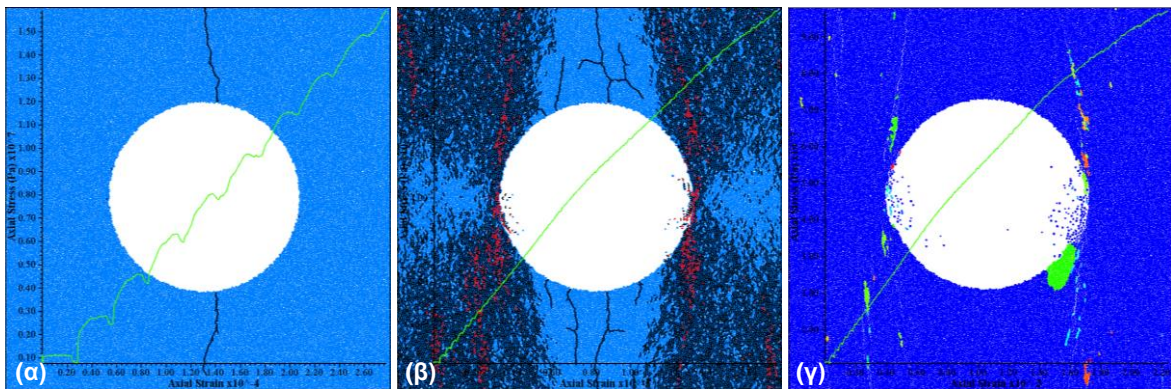
Σχήμα 9-43. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 10 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_α (Pa) - ϵ_α .



Σχήμα 9-44. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 22 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_α (Pa) - ϵ_α .



Σχήμα 9-45. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 35 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .



Σχήμα 9-46. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στο BPM της ποικιλίας «Βώλακας II» με οπή διαμέτρου 45 mm στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .

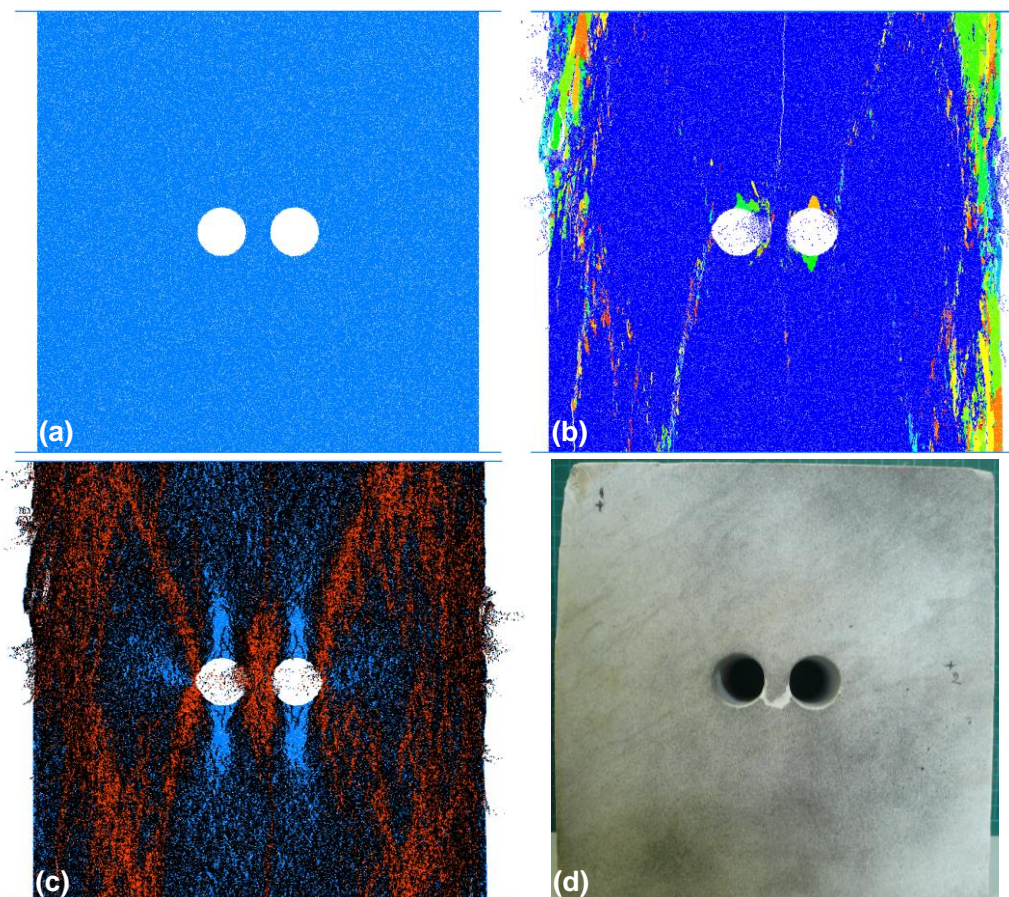
9.4.3.2 Αριθμητικές προσομοιώσεις 2^{ης} σειράς δοκιμών

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων της δεύτερης (2^{ης}) σειράς εργαστηριακών δοκιμών σε φυσικά μοντέλα με διπλές κυλινδρικές οπές της ποικιλίας «Βώλακας II». Όπως και στις εργαστηριακές δοκιμές, έτσι και στις προσομοιώσεις εξετάστηκαν τα εξής BPM:

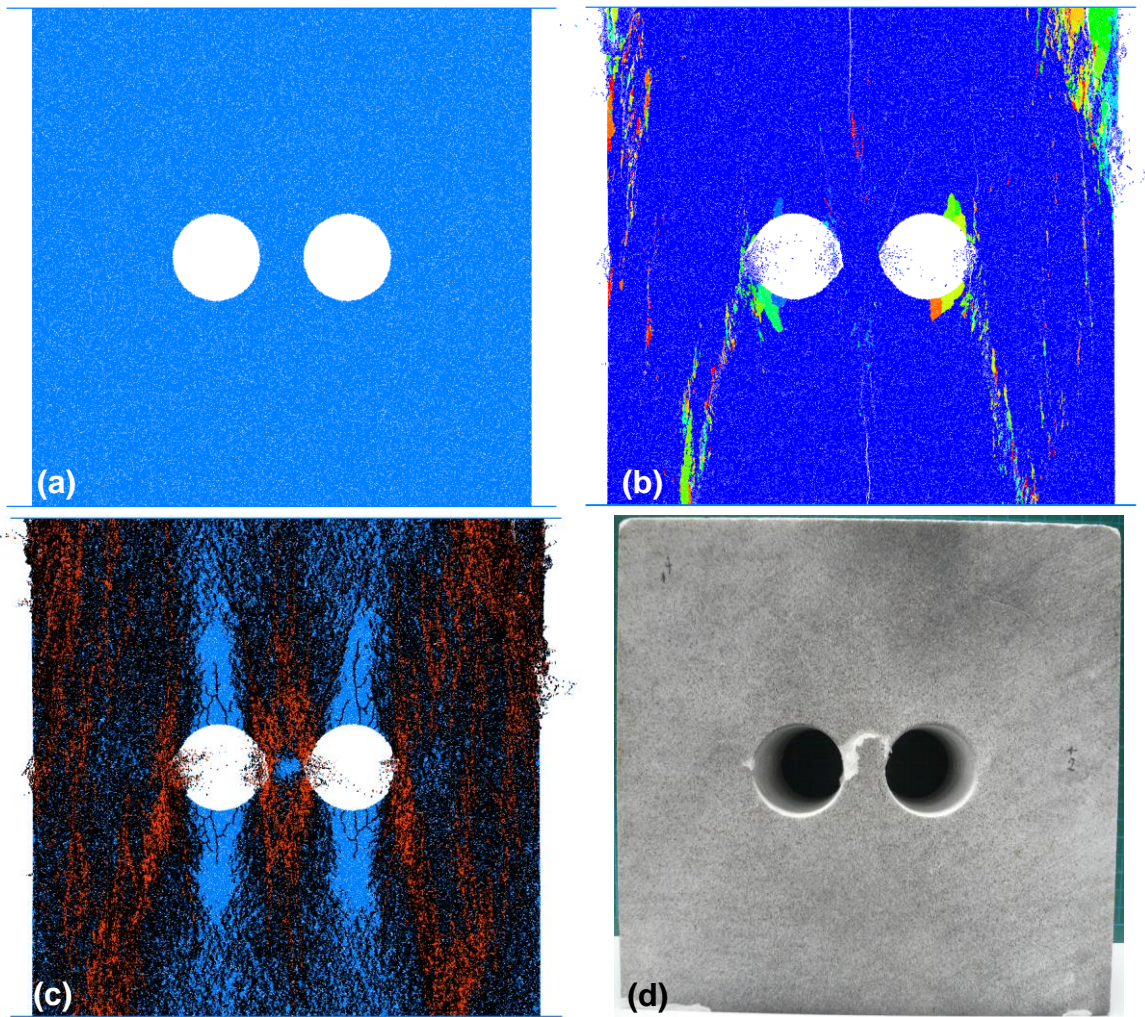
- BPM με διπλές οπές διαμέτρου (D) 22 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R).
- BPM με διπλές οπές διαμέτρου (D) 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R).
- BPM με διπλές οπές διαμέτρου (D) 35 mm εκάστη και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R).

Ο τρόπος ρωγμάτωσης των συγκεκριμένων μοντέλων ομοιάζει με εκείνον που περιγράφεται στην παράγραφο 9.4.3.2. Λόγω της ύπαρξης του δεύτερου ανοίγματος, έπειτα από τη νεφώδη εφελκυστική μικρορωγμάτωση στις αντίστοιχες θέσεις, παρατηρούνται οι πρώτες διατμητικές μικρορωγμές κατά μήκος των συμμετρικών ΜΕΡ, οι οποίες επεκτείνονται προς τις βάσεις των μοντέλων. Οι επόμενες διατμητικές μικρορωγματώσεις εμφανίζονται στις διακλαδώσεις των ΔΡ, έπειτα στις παρειές των οπών και λίγο αργότερα ακολουθούν στις ίδιες τις ΔΡ. Σημειώνεται ότι, όπως και στις αντίστοιχες εργαστηριακές δοκιμές, δεν παρατηρούνται ΜΕΡ στους στύλους μετά το πέρας των δοκιμών, και αντιστοίχως σχηματίζεται τελικώς ο ρόμβος ανάμεσα στα δύο ανοίγματα.

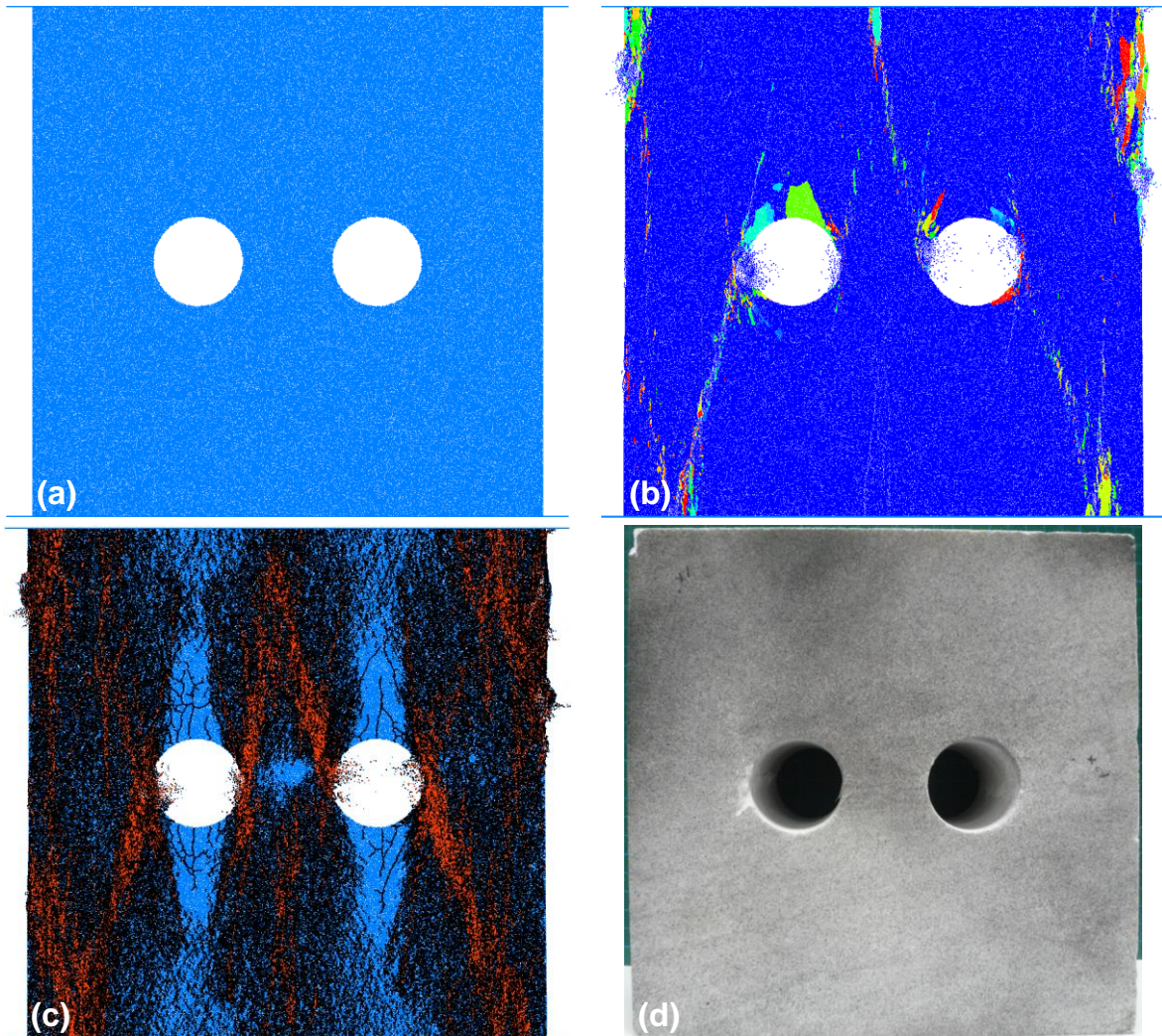
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται εικόνες από τα BPM πριν (a) και μετά (b & c) τις δοκιμές θλίψης στο PFC2D, καθώς και φωτογραφία των αντίστοιχων ΦΜ (d) μετά το πέρας των δοκιμών θλίψης.



Σχήμα 9-47. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).



Σχήμα 9-48. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

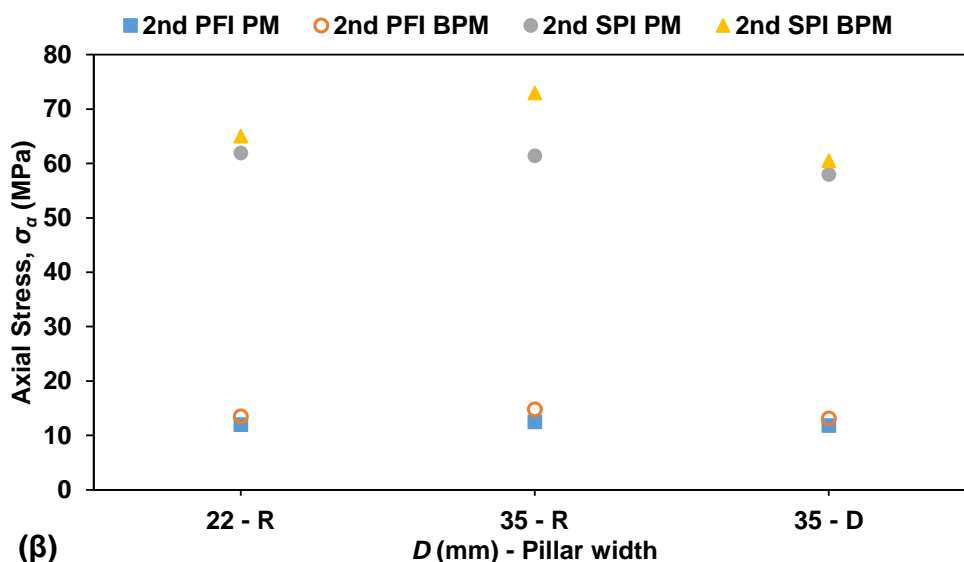
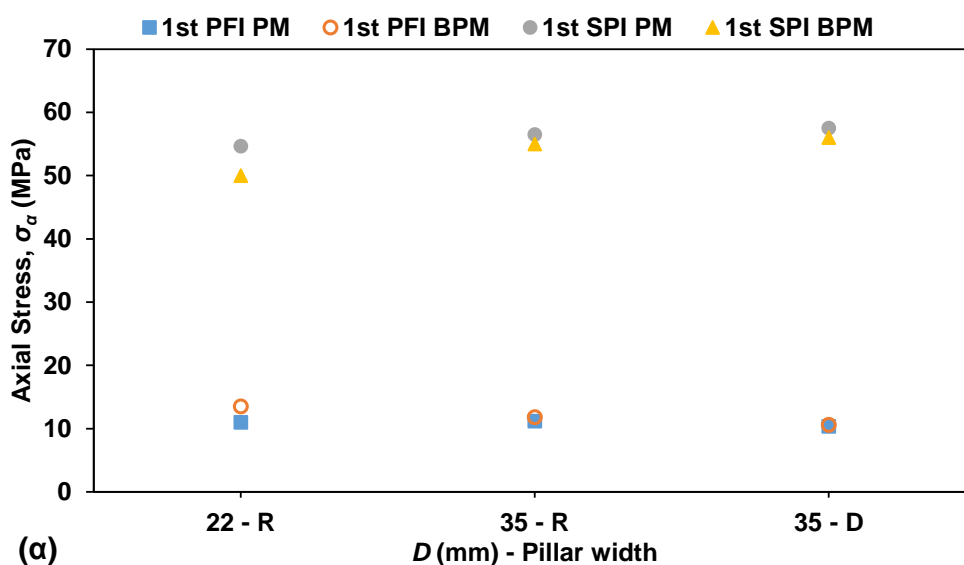


Σχήμα 9-49. BPM μαρμάρου «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R) στο PFC2D πριν (a) και μετά τη δοκιμή θλίψης (b & c), και αντίστοιχο ΦΜ μετά τη δοκιμή θλίψης (d). Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (b). Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (c).

Ακολούθως, δίνεται συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) των φυσικών (PM) και αριθμητικών (BPM) μοντέλων. Στον ίδιο πίνακα δίνονται επίσης οι τιμές των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των $1^{\omega v}$ (1^{st}) και $2^{\omega v}$ (2^{nd}) ΠΡ (PFI) στη στέψη ή το δάπεδο των οπών, καθώς και οι αντίστοιχες κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των αποφλοιώσεων (SPI) στις παρειές των οπών.

Πίνακας 9-6. Συγκριτικός πίνακας της μέγιστης αντοχής (σ_p) και των 1^{ων} (1st) και 2^{ων} (2nd) τάσεων έναρξης των ΠΡ (PFI) και ΠΑ (SPI) που αντιστοιχούν στα φυσικά (PM) και αριθμητικά (BPM) μοντέλα με διπλές οπές της ποικιλίας «Βώλακας II».

D (mm) – πλάτος στύλου	1 st PFI (MPa)		2 nd PFI (MPa)		1 st SPI (MPa)		2 nd SPI (MPa)		σ_p (MPa)	
	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM	PM	BPM
22 mm - R	11.0	13.5	12.0	13.5	54.7	50.0	61.9	65.0	>97.5	112.5
35 mm - R	11.2	11.8	12.5	14.8	56.5	55.0	61.4	73.0	>88.7	88.4
35 mm - D	10.3	10.6	11.8	13.1	57.5	56.0	58.0	60.5	>97.7	83.9

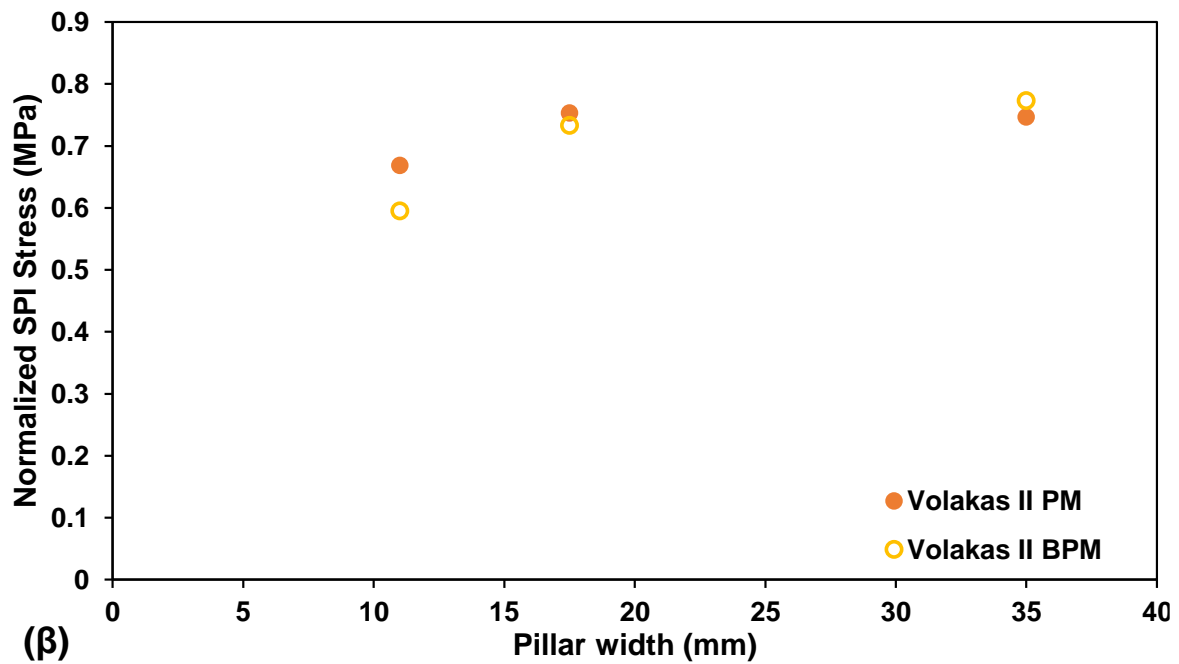
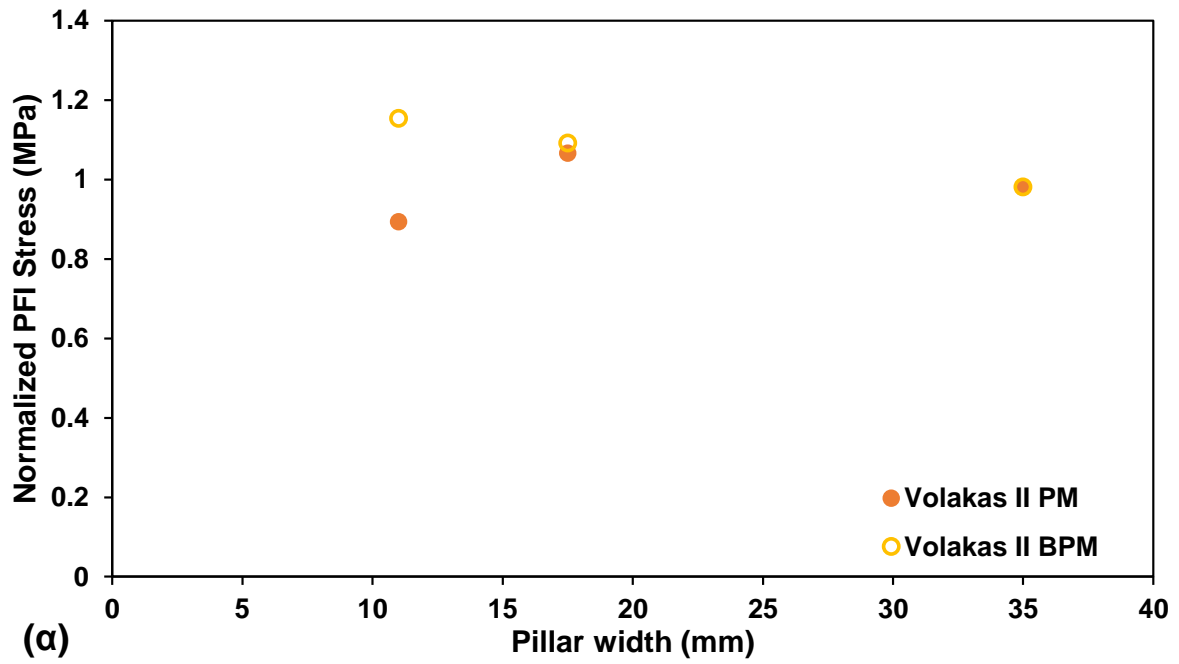


Σχήμα 9-50. Συγκριτικά γραφήματα της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης (MPa) εμφάνισης των πρώτων (1st) (α) και δεύτερων (2nd) (β) φαινομένων συναρτήσεως της διαμέτρου των οπών (mm) και του πάχους της μεταξύ των κολώνας (R : πάχος ίσο με μια ακτίνα προϋπάρχουσας οπής, D : πάχος ίσο με μια διάμετρο προϋπάρχουσας οπής) των ΦΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» και των αντίστοιχων BPM στον κώδικα PFC2D με διπλά κυλινδρικά προϋπάρχοντα ανοίγματα (PFI PM: ΠΡ ΦΜ, PFI BPM: ΠΡ BPM, SPI PM: ΠΑ ΦΜ, SPI BPM: ΠΑ BPM).

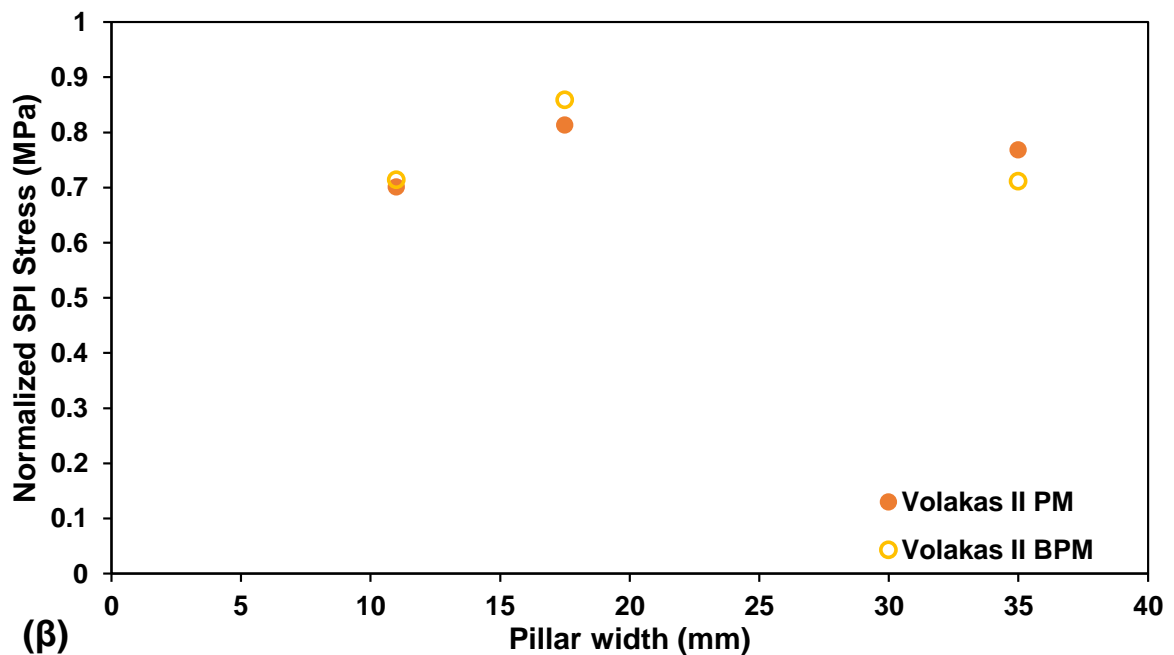
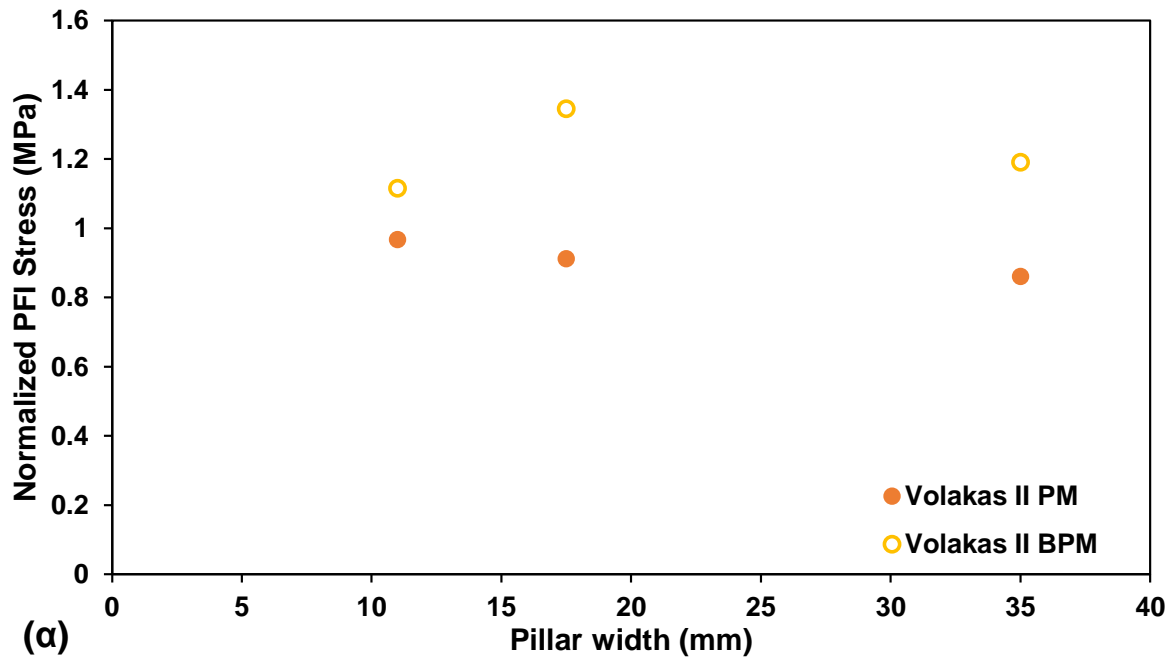
Στο Σχήμα 9-51 και στο Σχήμα 9-52 δίνονται διαγράμματα των ανηγμένων τιμών PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των αντίστοιχων BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των μοντέλων με τις μονές οπές ίδιας διαμέτρου.

Στο διάγραμμα που αναφέρεται στις 1^{ες} ανηγμένες τιμές PFI που δίνεται στο Σχήμα 9-51α, επί της ουσίας δεν παρατηρείται μεταβολή στις τιμές έναρξης του φαινομένου με την παρουσία της δεύτερης οπής, ανεξαρτήτως διαμέτρου ανοίγματος και πάχους στύλου, τόσο στα φυσικά όσο και στα αριθμητικά μοντέλα. Στο αντίστοιχο διάγραμμα που αναφέρεται στις 2^{ες} ανηγμένες τιμές PFI στο Σχήμα 9-52α, παρά το γεγονός πως το τελικό συμπέρασμα παραμένει το ίδιο ως προς την τάση έναρξης του φαινομένου, εντούτοις παρατηρείται μικρότερη αντιστοιχία των εργαστηριακών και αριθμητικών τιμών στο PFC2D. Αντιθέτως, με την αύξηση της απόστασης μεταξύ των δύο ανοιγμάτων, φαίνεται στο Σχήμα 9-51β και στο Σχήμα 9-52β πως οι 1^{ες} αλλά και οι 2^{ες} τιμές SPI που αναφέρονται στις διπλές οπές προσεγγίζουν τις αντίστοιχες των μονών οπών, τόσο στα φυσικά όσο και στα αριθμητικά μοντέλα.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως υπάρχει καλή αντιστοιχία τόσο για τις 1^{ες} όσο και για τις 2^{ες} ανηγμένες τιμές PFI και SPI που αναφέρονται στις εργαστηριακές δοκιμές και στις προσομοιώσεις στο PFC2D.

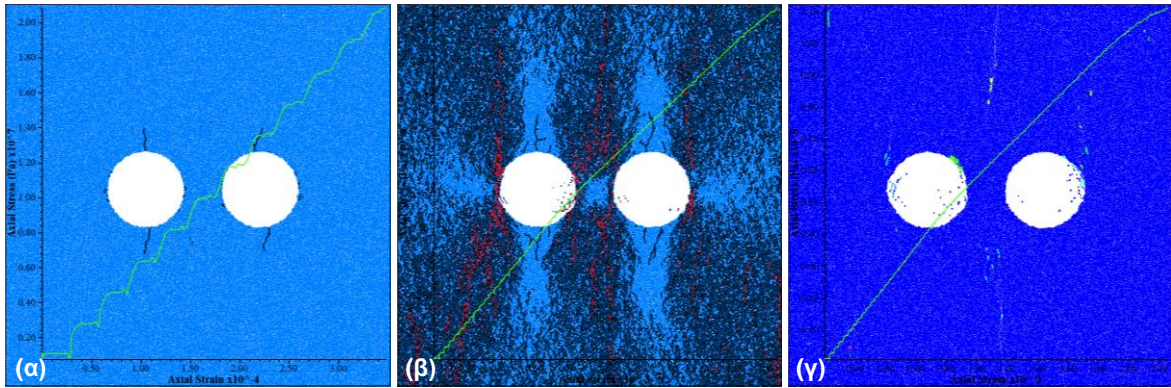


Σχήμα 9-51. Ανηγγμένες 1^{ες} τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ (PM) και των BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των BPM με μονές οπές ίδιας διαμέτρου.

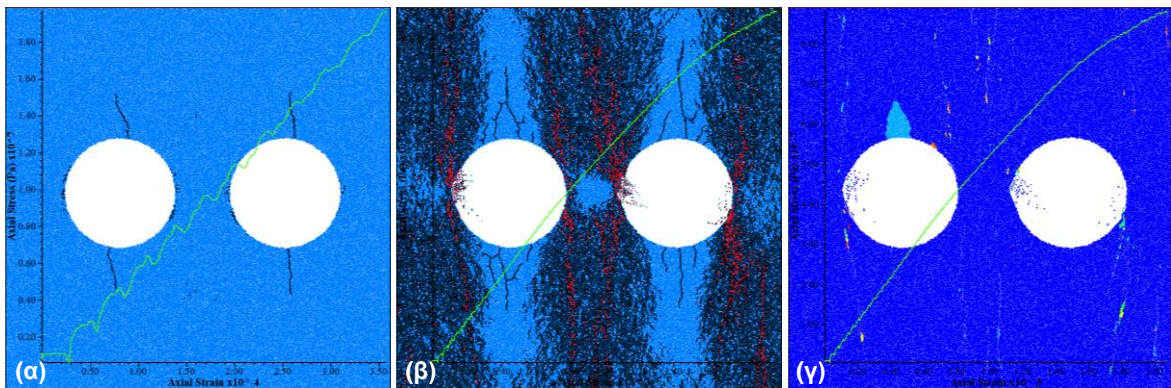


Σχήμα 9-52. Ανηγγμένες $2^{εs}$ τιμές PFI (α) και SPI (β) των ΦΜ (PM) και των BPM με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και 35 mm, με τις αντίστοιχες μέσες τιμές PFI και SPI των ΦΜ (PM) και των BPM με μονές οπές ίδιας διαμέτρου.

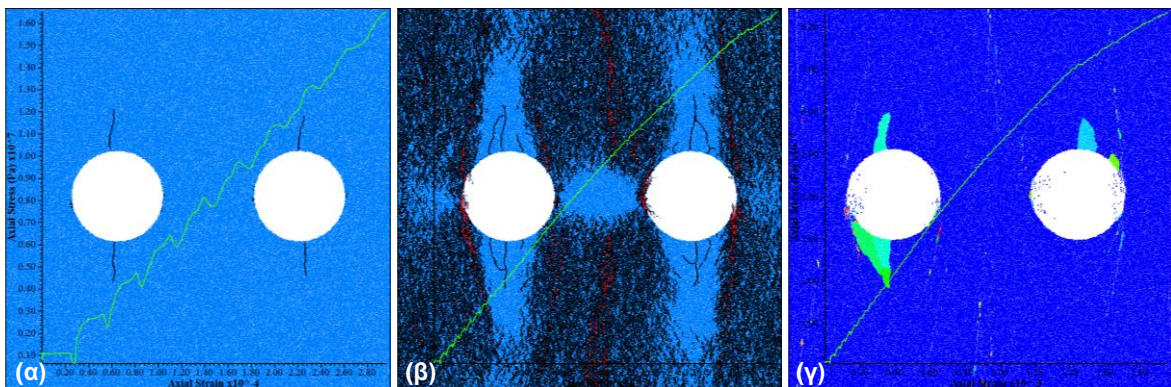
Στα σχήματα που ακολουθούν δίνονται στιγμιότυπα των BPM γύρω από τα ανοίγματα κατά τη διάρκεια των δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στον κώδικα PFC2D, και συγκριμένα παρατίθενται εικόνες όπου τα υπό μελέτη φαινόμενα βρίσκονται σε προχωρημένο στάδιο.



Σχήμα 9-53. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο ΒΡΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 22 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .



Σχήμα 9-54. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο ΒΡΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τρεις (3) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .



Σχήμα 9-55. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ, (γ) ΠΑ και (β & γ) συμμετρικών ρωγμών στο ΒΡΜ της ποικιλίας «Βώλακας II» με διπλές οπές διαμέτρου 35 mm και απόσταση κέντρων ίση με τέσσερις (4) ακτίνες (R) στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_a (Pa) - ϵ_a .

9.5 BPM γρανίτη Lac du Bonnet

Στη συγκεκριμένη παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της αριθμητικής προσομοίωσης εργαστηριακών δοκιμών θλίψης σε πρισματικά μοντέλα γρανίτη Lac du Bonnet (LdB) με μονή κυλινδρική οπή (Dzik & Lajtai 1996). Τα δοκίμια των εν λόγω ΦΜ προέρχονται από την περιοχή της πόλης Lac du Bonnet στη Μανιτόμπα του Καναδά. Πρόκειται για μεσόκοκκο ελαστικό ψαθυρό πέτρωμα, μεγάλης θλιπτικής αντοχής. Για την προσομοίωση της εν λόγω εργαστηριακής μελέτης, χρησιμοποιούνται τα διδιάστατα BPM του κώδικα PFC2D και εφαρμόζεται το μοντέλο επίπεδων δεσμών Flat-Joint (FJ) στις επαφές των δίσκων.

Οι μηχανικές ιδιότητες του γρανίτη LdB, σύμφωνα με τους Dzik & Lajtai (1996), δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Γρανίτης LdB). Στην τρίτη (3^η) στήλη του ίδιου πίνακα δίνονται οι αντίστοιχες τιμές του BPM έπειτα από τη βαθμονόμηση του υλικού στον κώδικα PFC2D.

Πίνακας 9-7. Μηχανικές ιδιότητες γρανίτη LdB εργαστηριακά (Dzik & Lajtai 1996) και αριθμητικά (BPM).

Μηχανική ιδιότητα	Γρανίτης LdB	BPM
σ_{ci} (MPa)	226 ± 15	226
E (GPa)	70 ± 4.7	70
σ_{tB} (MPa)	14 ± 1.2	14.3

Στην εργασία των Dzik & Lajtai εξετάζονται πρισματικά μοντέλα γρανίτη LdB με κυλινδρική οπή σε δοκιμές θλίψης, όπου καταγράφεται η τιμή της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης κατά την οποία παρουσιάζονται οι ΠΡ στο άνω ή κάτω όριο των οπών, καθώς και οι πλευρικές αποφλοιώσεις των παρειών. Για τον προσδιορισμό των εν λόγω τιμών, αξιοποιούνται οι τιμές που προκύπτουν από επικολλημένα τροπόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges) στο όριο κάθε ανοίγματος και σε σημεία όπου αναμένεται η έναρξη του εκάστοτε φαινομένου. Για μοντέλα με διάμετρο οπής μεγαλύτερης των 40 mm, τα τροπόμετρα επικολλήθηκαν στο εσωτερικό των οπών, ενώ για μικρότερης διαμέτρου οπές, ο προσδιορισμός της έναρξης των φαινομένων πραγματοποιήθηκε από τα τροπόμετρα που ήταν επικολλημένα ακριβώς δίπλα από το όριο της οπής.

Σύμφωνα με τους Dzik & Lajtai, η έναρξη των φαινομένων εξαρτάται από το μέγεθος των ανοιγμάτων και ιδίως στις οπές με διάμετρο μικρότερη των 20 mm.

Σημειώνουν επίσης πως ο υπό μελέτη γρανίτης είναι γραμμικά ελαστικό πέτρωμα, και ως εκ τούτου η παρέκκλιση από τη γραμμικότητα της καμπύλης τάσης-τροπής που προκύπτει από τις μετρήσεις των τροπόμετρων, δεν μπορεί παρά να αντικατοπτρίζει την έναρξη κάποιας ρωγμάτωσης.

Προκειμένου να εξετάσουν την επίδραση των συνοριακών συνθηκών, οι Dzik & Lajtai στην εργασία τους πραγματοποιούν σει δοκιμών σε τρία παρόμοια πρισματικά μοντέλα γρανίτη LdB: (α) στην πρώτη (1^η) περίπτωση οι βάσεις του δοκιμίου έρχονται σε απευθείας επαφή με τις μεταλλικές πλάκες των εμβόλων της πρέσας, (β) στη δεύτερη (2^η) περίπτωση παρεμβάλλεται ένα φύλλο τεφλόν στις διεπιφάνειες των βάσεων του δοκιμίου με τις μεταλλικές πλάκες της πρέσας και τέλος (γ) στην τρίτη (3^η) δοκιμή παρεμβάλλεται πλάκα ιδίου γρανίτη στις εν λόγω διεπιφάνειες. Με την ολοκλήρωση και των τριών (3) δοκιμών, οι ερευνητές σημειώνουν πως η έναρξη των ΠΡ στο άνω και κάτω όριο των οπών παρατηρείται κατά την εφαρμογή παρόμοιων αξονικών τάσεων, συμπεραίνοντας πως η επιρροή των συνοριακών συνθηκών είναι εξαιρετικά περιορισμένη. Κατά τη διάρκεια των προσομοιώσεων όλων των αριθμητικών μοντέλων της παρούσας διατριβής στο PFC, η γωνία τριβής στη διεπιφάνεια τοίχων-βάσεων BPM τίθεται ίση με 0° (Πίνακας 9-8). Η τρίτη (3^η) παραλλαγή της δοκιμής που περιλαμβάνει τις πλάκες ιδίου γρανίτη, εξετάζεται και από τον Carter, καταλήγοντας σε όμοια συμπεράσματα (Carter et al. 1991). Σημειώνεται ότι η παρεμβολή πλακών ιδίου αριθμητικού πετρώματος στη διεπιφάνεια τοίχου-BPM στον κώδικα PFC, τόσο σε 2D όσο και σε 3D BPM, δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα (Lotidis 2014, Lotidis et al. 2015), επιβεβαιώνοντας τις παρατηρήσεις των Dzik & Lajtai.

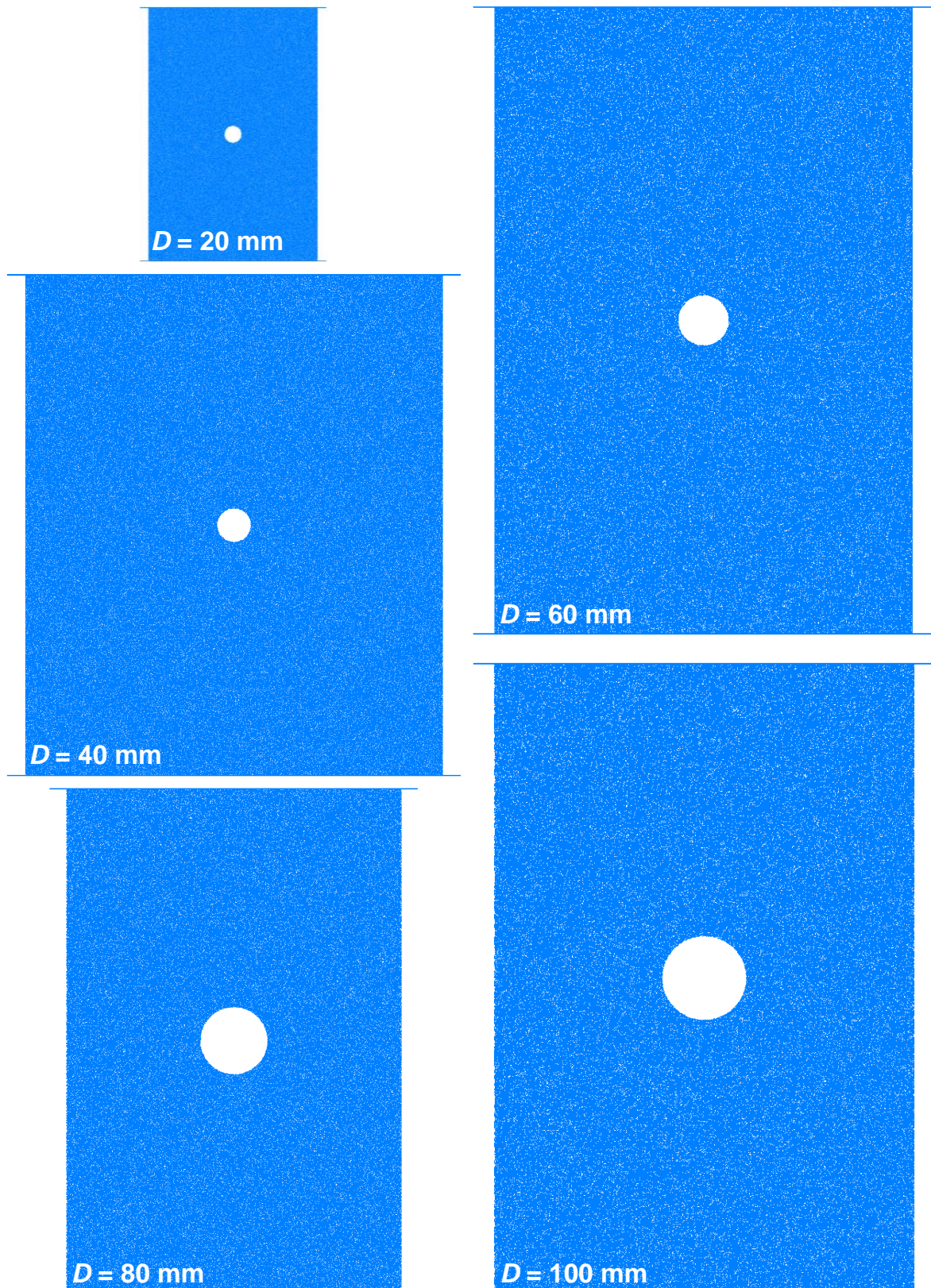
Ο Πίνακας 9-8 παρουσιάζει τις παραμέτρους σχεδιασμού των BPM γρανίτη LdB στον κώδικα PFC2D (Lotidis 2014, Lotidis et al. 2015).

Πίνακας 9-8. Μικροπαράμετροι σχεδιασμού διδιάστατου BPM γρανίτη Lac du Bonnet στο PFC2D (Lotidis 2014, Lotidis et al. 2015).

Μικροπαράμετρος	Τιμή
Ελάχιστη ακτίνα σφαιρών (mm)	0.36
Λόγος μέγιστης / ελάχιστης ακτίνας σφαιρών	1.66
Μέγιστη απόσταση δεσμού (mm)	0.05
$\kappa^* (= k_n/k_s)$	2.5
E^* (μέτρο ελαστικότητας δεσμού, GPa)	65
σ_c (εφελκυστική αντοχή δεσμού, MPa)	14.2
c (συνοχή δεσμού, MPa)	98
μ (συντελεστής τριβής μεταξύ δίσκων)	0.685

Συνολικά εξετάζονται πέντε (5) αριθμητικά μοντέλα (Σχήμα 9-56) χρησιμοποιώντας τις μικροπαραμέτρους που δίνει ο Πίνακας 9-8 ως εξής:

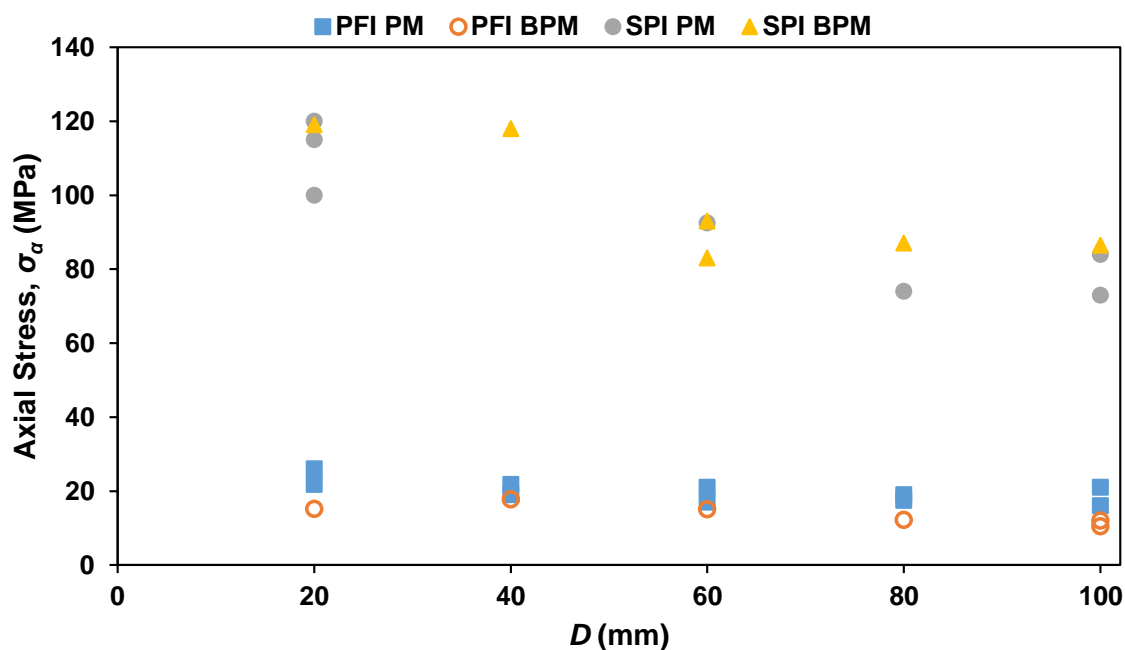
- BPM διαστάσεων 200 mm x 300 mm με μονή κυκλική οπή διαμέτρου 20 mm,
- BPM διαστάσεων 500 mm x 600 mm με μονή κυκλική οπή διαμέτρου 40 mm,
- BPM διαστάσεων 500 mm x 750 mm με μονή κυκλική οπή διαμέτρου 60 mm,
- BPM διαστάσεων 400 mm x 600 mm με μονή κυκλική οπή διαμέτρου 80 mm,
- BPM διαστάσεων 500 mm x 750 mm με μονή κυκλική οπή διαμέτρου 100 mm.



Σχήμα 9-56. BPM για προσομοίωση των φυσικών μοντέλων γρανίτη LdB των (Dzik & Lajtai 1996) στον κώδικα PFC2D.

Στη συνέχεια, τα εν λόγω BPM υποβάλλονται σε δοκιμές θλίψης, όπου καταγράφονται οι αξονικές τάσεις κατά την εφαρμογή των οποίων παρουσιάζεται η

έναρξη των ΠΡ στο άνω ή κάτω όριο της εκάστοτε οπής, καθώς επίσης και οι πλευρικές αποφλοιώσεις των παρειών της. Τα εν λόγω αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 9-57. Οι τιμές PFI και SPI αντιστοιχούν στις τιμές έναρξης των ΠΡ και ΠΑ αντίστοιχα, ενώ ο χαρακτηρισμοί PM και BPM αναφέρονται στα ΦΜ και BPM αντίστοιχα.



Σχήμα 9-57. Εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις (MPa) εμφάνισης φαινομένων κατά τις δοκιμές θλίψης σε πρισματικά μοντέλα γρανίτη LdB, συναρτήσεως της διαμέτρου (mm) της κυλινδρικής οπής, εργαστηριακά (Dzik & Lajtai 1996) και αριθμητικά στο PFC2D.

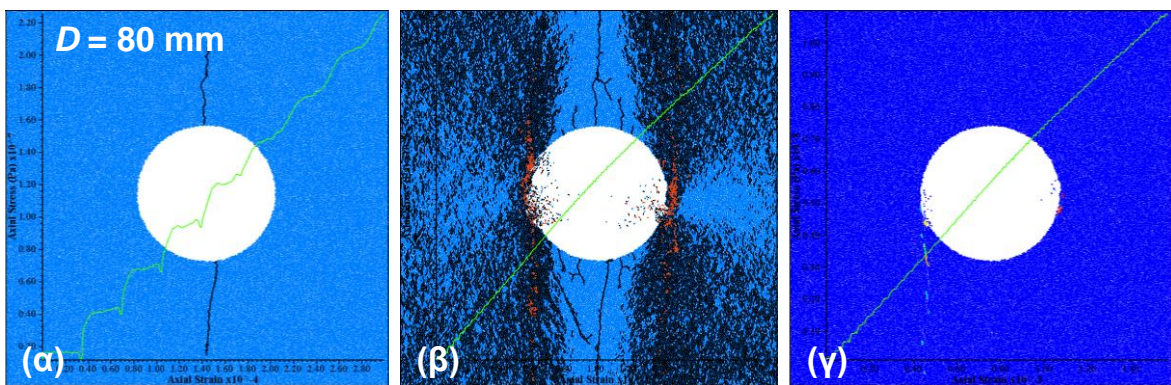
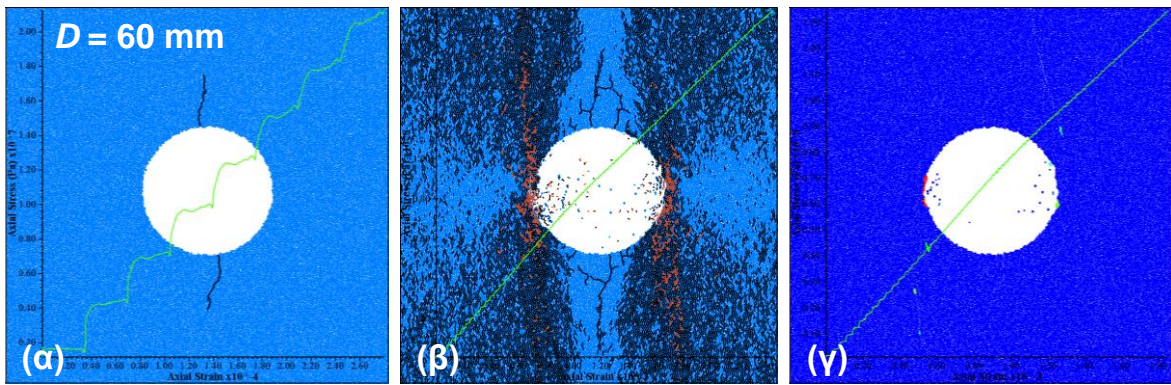
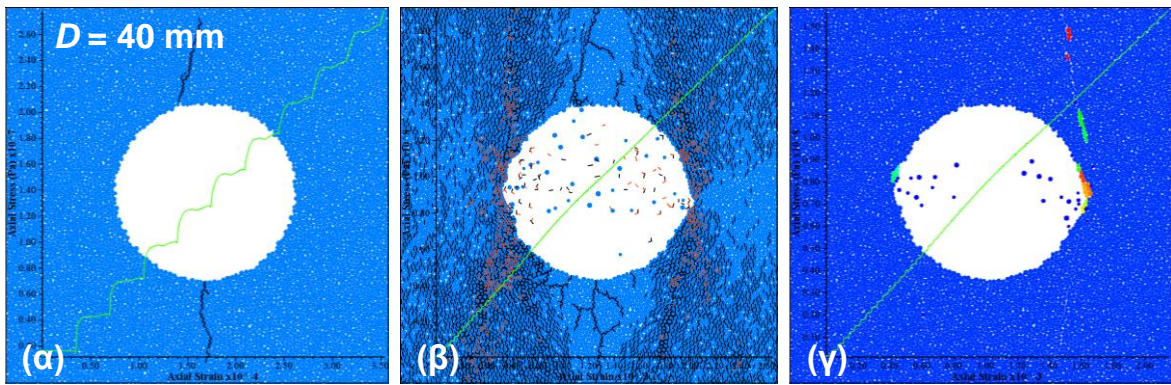
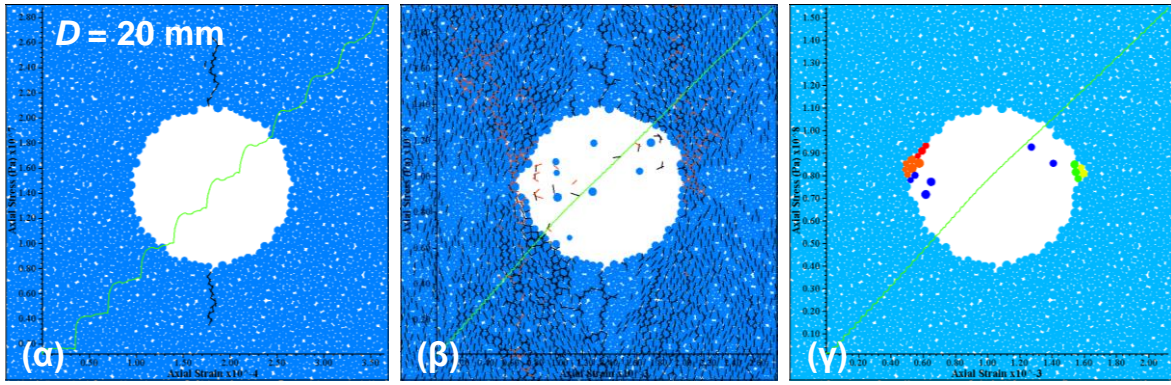
Πίνακας 9-9. Εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις (MPa) εμφάνισης φαινομένων κατά τις δοκιμές θλίψης σε πρισματικά μοντέλα γρανίτη LdB με μονή κυλινδρική οπή, εργαστηριακά (ΦΜ) (Dzik & Lajtai 1996) και αριθμητικά στο PFC2D (BPM).

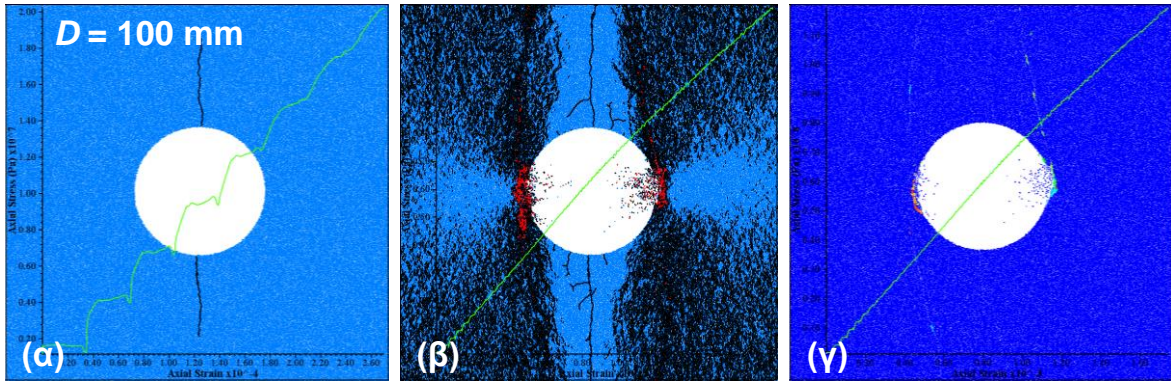
Διαστάσεις (mm)	D (mm)	PFI (MPa)		SPI (MPa)	
		ΦΜ	BPM	ΦΜ	BPM
200 x 300	20	15 (έναρξη) / 22-26	15.2 (κάτω) / 18 (πάνω)	100 / 115 / 120	119
500 x 600	40	20-21	17.8	-	118
500 x 750	60	17-20	15.1	92.5	83 / 93
400 x 600	80	17-18	12.2	74	87
500 x 750	100	14 (έναρξη) / 17-20	10.5 (πάνω) / 12 (κάτω)	73 / 84	86.5

Κατά την πορεία των δοκιμών θλίψης στα αριθμητικά μοντέλα με οπή, αρχικά σχηματίζονται οι εφελκυστικές ΠΡ στο άνω και κάτω όριο του ανοίγματος, οι οποίες ξεκινάνε από την περιφέρεια της οπής και επεκτείνονται προς τις βάσεις του μοντέλου. Μετά την έναρξη των δύο ρωγμών, παρατηρείται εφελκυστική νεφώδης

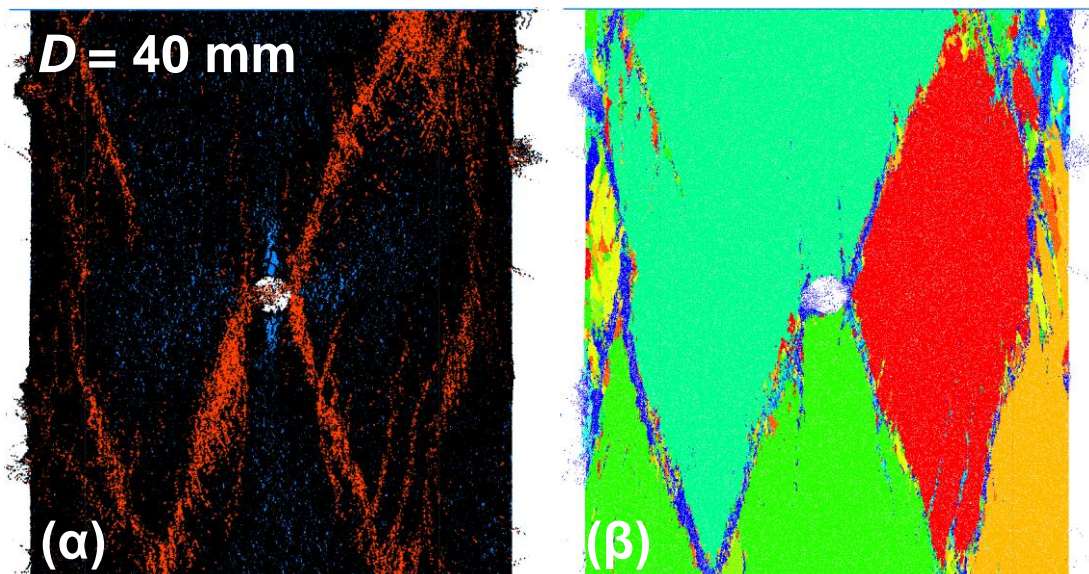
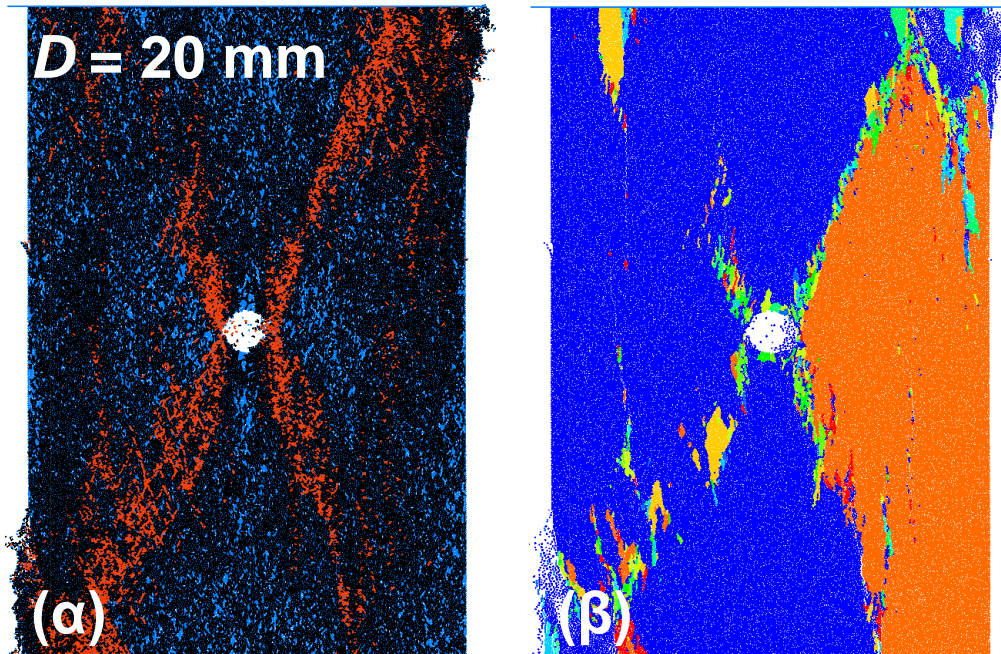
μικρορωγμάτωση μακριά από το άνοιγμα, η οποία στην πορεία της δοκιμής γίνεται διάσπαρτη στο μοντέλο. Έπειτα, πραγματοποιείται συνένωση των εφελκυστικών μικρορωγμών και καμπυλότητα του διαγράμματος $\sigma-\epsilon$. Αφότου εμφανιστούν διατμητικές μικρορωγμές στις θλιπτικές ΠΥΣΤ των τοιχωμάτων, εμφανίζονται αποφλοιώσεις στο εσωτερικό της οπής. Σημειώνεται ότι η έναρξη των αποφλοιώσεων σε όλα τα αριθμητικά μοντέλα σημειώνεται έπειτα από την εμφάνιση διατμητικών μικρορωγμών στην αριστερή ή δεξιά παρειά των οπών. Τέλος, παρουσιάζονται έντονα διατμητικές μικρορωγμές σε ΜΕΡ που ενώνουν τις ΠΥΣΤ με τις βάσεις του μοντέλου. Σημειώνεται ότι οι πρώτες διατμητικές μικρορωγμές των BPM εμφανίζονται στις παρειές των οπών. Στο διάγραμμα που δίνεται στο Σχήμα 9-57, φαίνεται πως οι εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις κατά τις οποίες παρατηρείται η έναρξη των αποφλοιώσεων μειώνονται συναρτήσει της αύξησης της διαμέτρου της οπής, ενώ η έναρξη των ΠΡ επηρεάζεται λιγότερο.

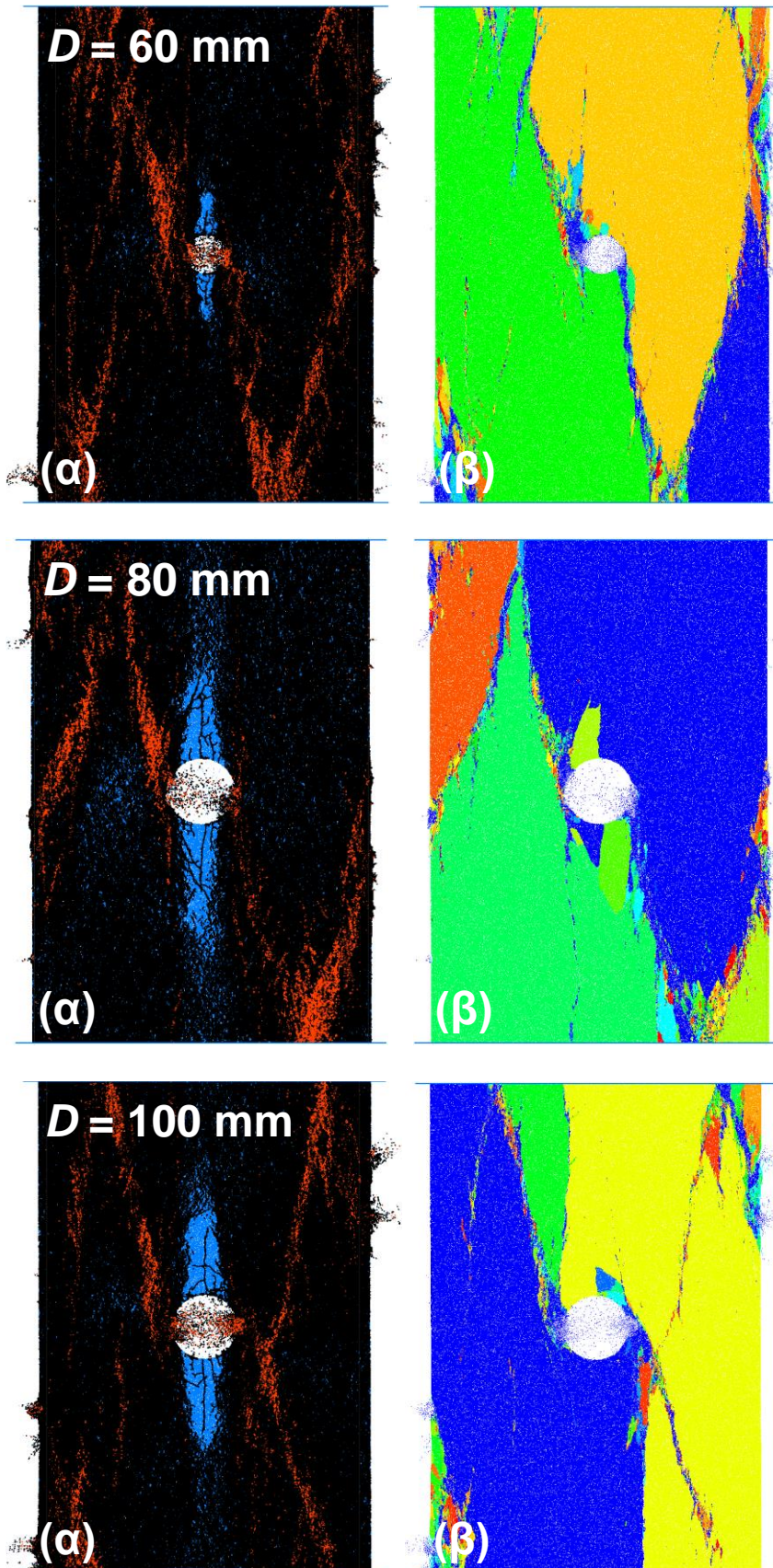
Τόσο ο Πίνακας 9-7, όσο και ο Πίνακας 9-9 δείχνουν ομοιότητες στην αντοχή σε ανεμπόδιστη μονοαξονική (UCS) και αντιδιαμετρική (BTS) θλίψη, στο μέτρο ελαστικότητας καθώς και στις τάσεις για τις οποίες πραγματοποιούνται οι ΠΡ (primary fractures) στο άνω ή κάτω όριο των ανοιγμάτων όπως και οι αποφλοιώσεις (spalling) των παρειών των οπών των φυσικών μοντέλων και των BPM. Τυχόν αποκλίσεις των τιμών που προκύπτουν από τα BPM με τις αντίστοιχες των ΦΜ εμπίπτουν στην εκάστοτε τυπική απόκλιση που αναφέρεται στα φυσικά δοκίμια. Επιπλέον, ορισμένες διαφορές μεταξύ των παρατηρήσεων των φυσικών και των αριθμητικών μοντέλων, έγκεινται στο γεγονός πως οι δοκιμές θλίψης των φυσικών μοντέλων πραγματοποιήθηκαν με έλεγχο φορτίου, εν αντιθέσει με τον έλεγχο παραμόρφωσης των BPM. Επίσης, οι δίσκοι των BPM είναι άκαμπτοι, εν αντιθέσει με τους κόκκους του φυσικού πετρώματος. Τέλος, οι ακριβείς διαστάσεις των φυσικών μοντέλων δε γίνονται γνωστές στην εργασία των Dzik & Lajtai, παρά μόνο αναφέρεται πως το ελάχιστο πλάτος και ύψος κάθε μοντέλου ήταν δέκα (10) και δεκαπέντε (15) φορές μεγαλύτερα από την ακτίνα της οπής αντίστοιχα.





Σχήμα 9-58. (α) Προχωρημένη ανάπτυξη ΠΡ, (β) ΔΡ και (γ) ΠΑ στα ΒΡΜ με μονή οπή του γρανίτη LdB στο PFC2D. Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα (α & β), ενώ δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα (γ). Με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ_α (Pa) - ϵ_α .



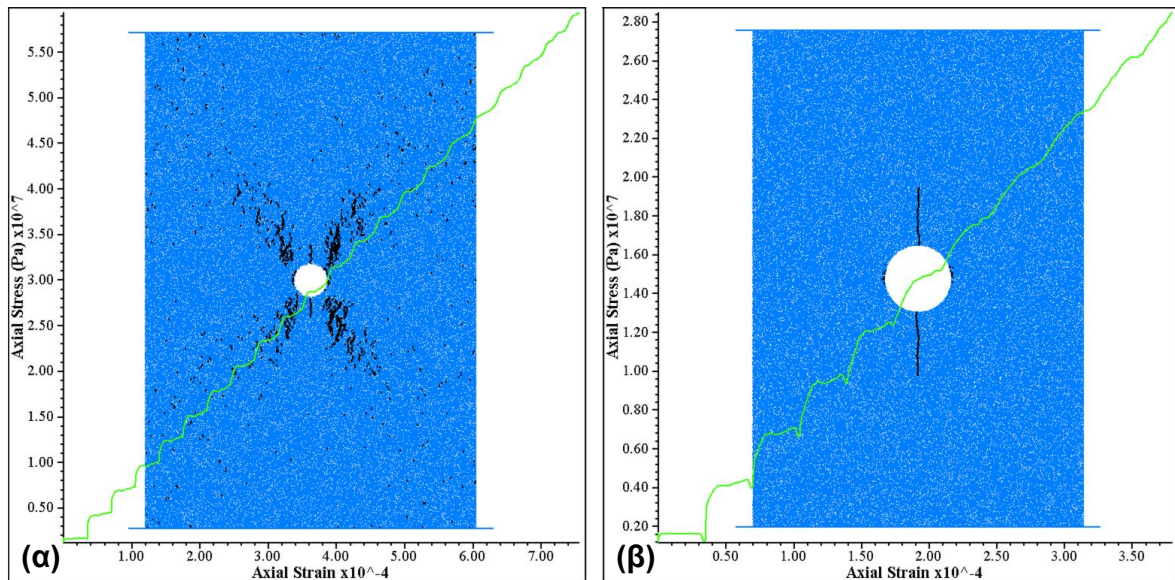


Σχήμα 9-59. BPM γρανίτη LdB στο PFC2D μετά τη δοκιμή θλίψης. (α) Με μαύρο και με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι εφελκυστικές και διατμητικές μικρορωγμές αντίστοιχα. (β) Δίσκοι διαφορετικού, του μπλε, χρώματος αποτελούν αποκολλημένα συσσωματώματα.

Τέλος, οι Dzik & Lajtai μέτρησαν με τη βοήθεια τροπόμετρων επικολλημένων κάθετα προς τη διεύθυνση της αξονικής φόρτισης, την πορεία των ΠΡ συναρτήσει της ασκούμενης αξονικής τάσης στα ΦΜ με οπές διαμέτρου 20 mm και 100 mm. Για δεδομένη αξονική τάση, το μήκος της ΠΡ στο BPM με οπή διαμέτρου 20 mm είναι 14 mm έναντι των 20 mm του αντίστοιχου ΦΜ. Αντιστοίχως, για δεδομένη αξονική τάση τόσο στο BPM όσο και στο ΦΜ με οπή διαμέτρου 100 mm, το μήκος της ΠΡ είναι 100 mm. Παρόλα αυτά, το τελικό μήκος των ΠΡ των δύο (2) BPM είναι κοντότερο από των ΦΜ. Ο Πίνακας 9-10 δίνει τις τιμές όπως προκύπτουν κατά τις εργαστηριακές και αριθμητικές δοκιμές. Οι αντίστοιχες εικόνες των BPM δίνονται στο Σχήμα 9-60.

Πίνακας 9-10. Σύγκριση τιμών των εφαρμοζόμενων αξονικών τάσεων, όπου οι ΠΡ των δοκιμών με οπές διαμέτρου 20 mm και 100 mm φθάνουν σε συγκεκριμένη απόσταση από το όριο των οπών, είτε προς τα άνω είτε προς τα κάτω, όπως παρατηρήθηκαν από τους Dzik & Lajtai (1996) ($L_{\Phi M}$) και από τα BPM (L_{BPM}) στο PFC2D.

D (mm) / $L_{\Phi M}$ (mm) – L_{BPM} (mm)	ΠΡ (MPa)	
	ΦΜ	BPM
20 / 18 – ~14	54	59
100 / 100 – 100	29	28.6



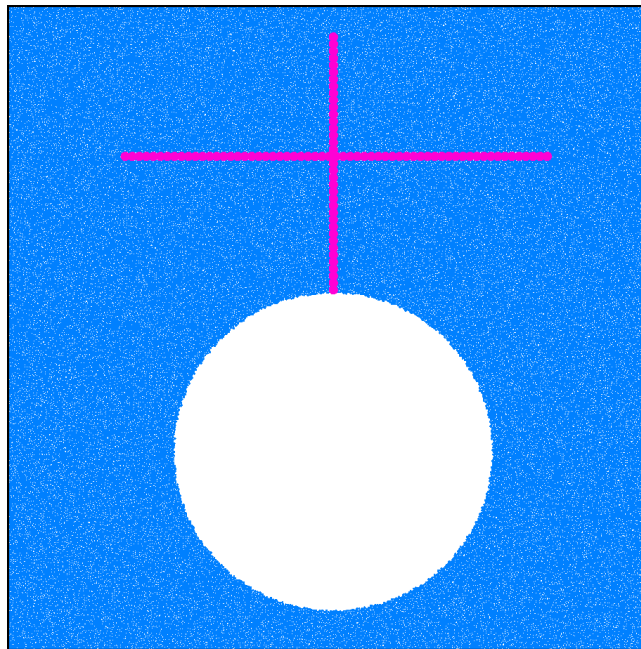
Σχήμα 9-60. BPM με οπές διαμέτρου 20 mm (α) και 100 mm (β) κατά την εφαρμογή των αξονικών τάσεων (Pa) που συγκρίνει ο Πίνακας 9-10 (3^η στήλη). Με μαύρο χρώμα αποδίδονται οι εφελκυστικές μικρορωγμές και με πράσινο δίνεται η καμπύλη σ - ϵ .

9.6 Διερεύνηση του εντατικού πεδίου σε BPM

Η τάση είναι μία συνεχής ποσότητα και ως εκ τούτου δεν ορίζεται σε κάθε σημείο ενός συσσωματώματος διακριτών σωματιδίων, όπως είναι το BPM. Στο PFC σε κάθε χρονικό βήμα υπολογίζονται οι δυνάμεις στις επαφές και οι μετατοπίσεις των δίσκων, με τις οποίες πραγματοποιείται η μελέτη της συμπεριφοράς του υλικού στη μικροκλίμακα. Για τη συσχέτιση με τη συμπεριφορά ενός συνεχούς μέσου απαιτείται ο υπολογισμός μέσων τιμών, οι οποίες όμως δε δίνονται απ' ευθείας από τον κώδικα. Ως εκ τούτου, προκειμένου να υπολογισθεί η κατανομή των τάσεων στο PFC χρησιμοποιούνται περιοχές μέτρησης (κύκλοι σε 2D και σφαίρες σε 3D), οι οποίες καλύπτουν μια προεπιλεγμένη επιφάνεια του BPM, κάτω από την οποία βρίσκεται ένας ικανός αριθμός σωματιδίων. Ο υπολογισμός του τοπικού εντατικού πεδίου στις περιοχές μέτρησης εκτελείται σε κάθε υπολογιστικό κύκλο (step) σύμφωνα με τους Christoffersen et al. (1981).

9.6.1 Κατανομή οριζόντιων τάσεων κατά μήκος της ΠΡ

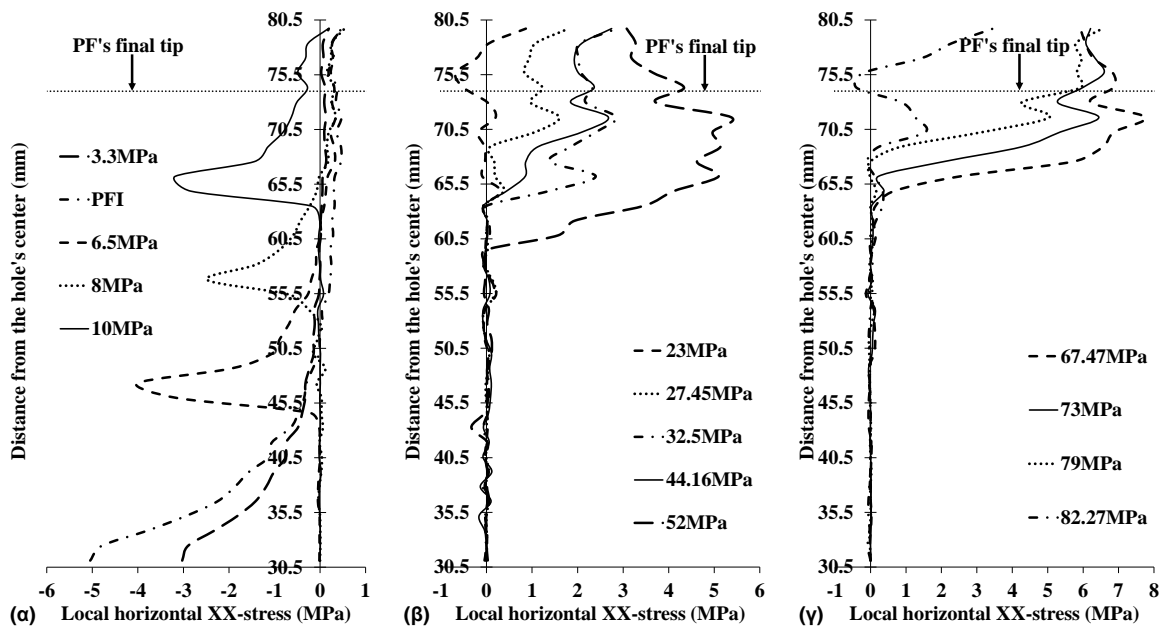
Για τον υπολογισμό της κατανομής των οριζόντιων τάσεων κατά μήκος της ΠΡ αξιοποιούνται μετρήσεις της τοπικής οριζόντιας τάσης (σ_{xx}) από 37 κύκλους μέτρησης διαμέτρου 1.8 mm έκαστος, κατά μήκος της ΠΡ σε BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» με οπή διαμέτρου 61 mm. Σημειώνεται ότι η διάδοση της ΠΡ ολοκληρώνεται σε απόσταση 74 mm από το κέντρο της οπής.



Σχήμα 9-61. Δίσκοι μέτρησης (ροζ χρώμα) διαμέτρου 1.8 mm έκαστος σε BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι», $D = 61$ mm.

Η τοπική σ_{xx} κατά μήκος της ΠΡ είναι είτε εφελκυστική είτε θλιπτική, αναλόγως της απόστασης από το όριο της οπής και το στάδιο διάδοσης της ΠΡ. Πριν την έναρξη της ΠΡ (PFI) και σε αξονική τάση 3.3 MPa, η σ_{xx} είναι εφελκυστική κοντά στο όριο της οπής, και μετατρέπεται σε ασθενή θλιπτική σε απόσταση $2R$. Τη στιγμή έναρξης της ΠΡ (υποδεικνύεται ως «PFI» στο διάγραμμα που δίνεται στο Σχήμα 9-62α), η τοπική σ_{xx} αυξάνεται τόσο στις εφελκυστικές όσο και στις θλιπτικές περιοχές. Επιπλέον, η εμφάνιση της θλιπτικής περιοχής βρίσκεται πλέον εγγύτερα στο όριο της οπής ($1.67R$). Η μέγιστη εφελκυστική σ_{xx} δρα κατά τη στιγμή έναρξης της ΠΡ (PFI) στο όριο της οπής και είναι ελαφρώς υψηλότερη από την αριθμητική αντοχή Brazilian σ_{tB} του υλικού στο PFC2D.

Η επέκταση της ΠΡ γίνεται προοδευτικά και απαιτεί χαμηλότερη τοπική εφελκυστική σ_{xx} από ό,τι η στιγμή PFI, αλλά περί την αντοχή σ_{tB} . Κατά μήκος της ήδη αναπτυχθείσας ΠΡ, καταγράφονται σχεδόν μηδενικές τοπικές εφελκυστικές σ_{xx} , πλην των τελευταίων 4-5 mm της ρωγμής όπου η τοπική εφελκυστική σ_{xx} αυξάνεται στην τρέχουσα μέγιστη εφελκυστική τάση στην άκρη της ρωγμής.



Σχήμα 9-62. Μετρήσεις σ_{xx} (MPa) κατά μήκος της ΠΡ σε διάφορες εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις έναντι της κατακόρυφης απόστασης από το κέντρο της οπής (BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι», $D=61$ mm).

Σε απόσταση μεγαλύτερη από $1.56R$ από το όριο της οπής, η σ_{xx} μετατρέπεται από εφελκυστική σε θλιπτική για αξονική τάση (σ_a) 23 MPa. Κατά την εν λόγω αξονική τάση, εντείνεται η προπεριγραφείσα νεφώδης εφελκυστική μικρορωγμάτωση στις περιοχές ανάπτυξης των ΔΡ. Από τη συγκεκριμένη αξονική τάση και έπειτα, οι

οριζόντιες θλιπτικές σ_{xx} επεκτείνονται προς το όριο της οπής και εμφανίζονται σε απόσταση $1.0R$ από το όριο της οπής για $\sigma_a = 52$ MPa. Η εν λόγω σ_a είναι αρκετά μεγαλύτερη από την τάση SPI. Όπως αναφέρεται και στην Παράγραφο 7, έπειτα από την εμφάνιση των τριών (3) κύριων φαινομένων στα φυσικά μοντέλα των δολομιτικών μαρμάρων, οι ΠΡ φαίνεται να «κλείνουν». Η συγκεκριμένη παρατήρηση μπορεί να σχετίζεται με την ανάπτυξη θλιπτικών σ_{xx} στην άνω περιοχή διάδοσης της ΠΡ όπως υπολογίζεται από τους κύκλους μέτρησης στο παρόν BPM (Σχήμα 9-62β).

Η επέκταση της θλιπτικής περιοχής προς το όριο της οπής συνοδεύεται από προοδευτική αύξηση της σ_{xx} με την αύξηση της αξονικής τάσης, ενώ κοντές εφελκυστικές ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στην ΠΡ και διαμητικές μικρορωγμές εμφανίζονται στις ΔΡ ($\sigma_a = 44.2$ MPa). Κατόπιν, μετράται σταθερή αύξηση της θλιπτικής σ_{xx} σε απόσταση μεγαλύτερη από $1.0R$ έως την αλλαγή κλίσης της καμπύλης $\sigma_a - \text{step}$ στα 67.5 MPa, η οποία συνοδεύεται από το σχηματισμό νέων κοντών εφελκυστικών ρωγμών κάθετα στην ΠΡ και την επέκταση των προηγούμενων. Στην εν λόγω αξονική τάση σημειώνεται η μέγιστη τοπική θλιπτική σ_{xx} . Έπειτα, μετράται μια ήπια μείωση της θλιπτικής σ_{xx} μέχρι την απότομη πτώση της λίγο πριν την επίτευξη της μέγιστης αντοχής του BPM ($\sigma_a = 82.3$ MPa) (Σχήμα 9-62γ). Σημειώνεται ότι κατά τη συγκεκριμένη αξονική τάση, η μετρούμενες τοπικές σ_{xx} κατά μήκος της υπόλοιπης ΠΡ είναι μηδενικές, δηλαδή για απόσταση έως $1.18R$ από το όριο της οπής.

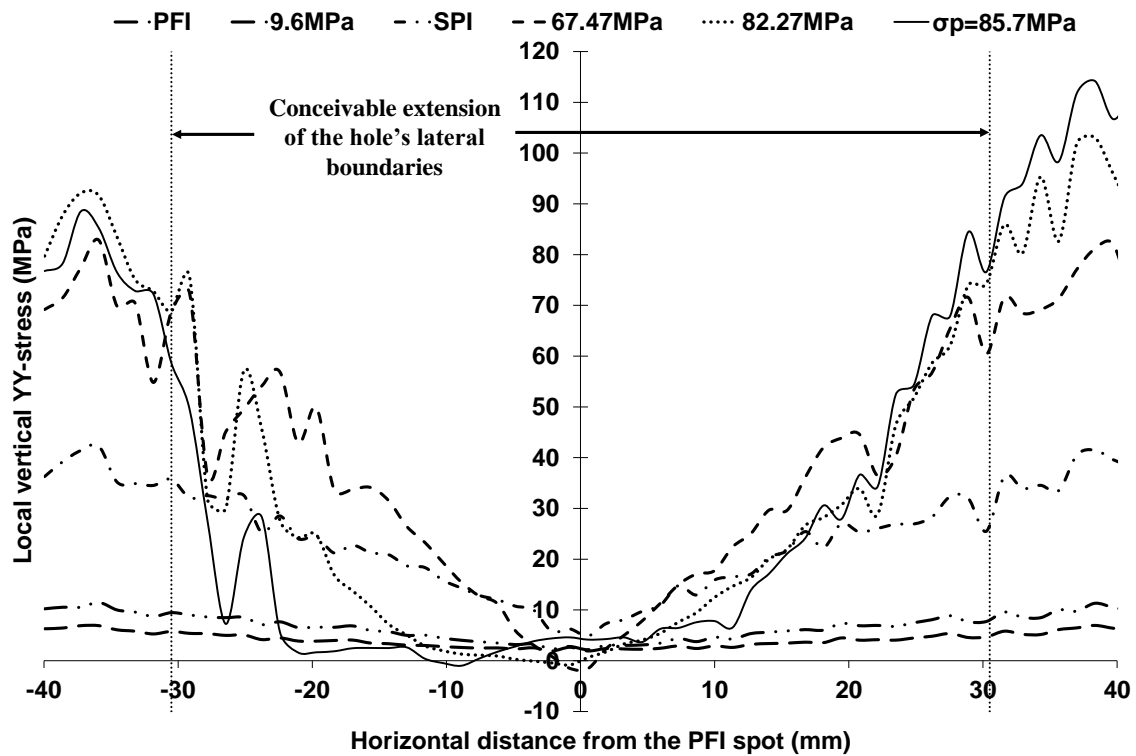
9.6.2 Κατανομή τάσεων εγκάρσια στη διεύθυνση της ΠΡ

Για τη μελέτη της επιρροής του κυκλικού ανοίγματος και της μικρορωγμάτωσης στην κατανομή των τάσεων, αξιοποιούνται δεδομένα από 61 κύκλους μέτρησης (διαμέτρου 1.8 mm έκαστος) συμμετρικά ευθυγραμμισμένων κάθετα στη διεύθυνση της ΠΡ (Σχήμα 9-61), φτάνοντας σε οριζόντια απόσταση $1.31R$ αριστερά και δεξιά από την ΠΡ. Η γραμμή μέτρησης βρίσκεται σε κατακόρυφη απόσταση $0.88R$ από τη στέψη της οπής.

Κατά τη διάρκεια των αριθμητικών προσομοιώσεων, οι κύκλοι μέτρησης που βρίσκονται εγγύτερα στην ΠΡ καταγράφουν αξιοσημείωτα χαμηλότερες τοπικές κατακόρυφες σ_{yy} συγκριτικά με τους υπόλοιπους (Σχήμα 9-63). Πλησιάζοντας τις νοητές προεκτάσεις των πλευρικών ορίων της οπής, και κυρίως εξωτερικά αυτών, οι σ_{yy} αυξάνονται σημαντικά. Επιπλέον, οι πιο απομακρυσμένοι, από την ΠΡ, κύκλοι

μέτρησης καταγράφουν σ_{yy} που πλησιάζουν το επίπεδο της αντίστοιχης αξονικής τάσης στο BPM.

Για αξονική τάση 82.3 MPa, δηλαδή λίγο πριν την κορυφαία αντοχή του BPM (ήτοι $\sigma_p = 85.7$ MPa), καταγράφεται πτώση της θλιπτικής σ_{yy} , η οποία ξεχωρίζει κυρίως στους δίσκους μέτρησης που βρίσκονται από τα αριστερά της ΠΡ.



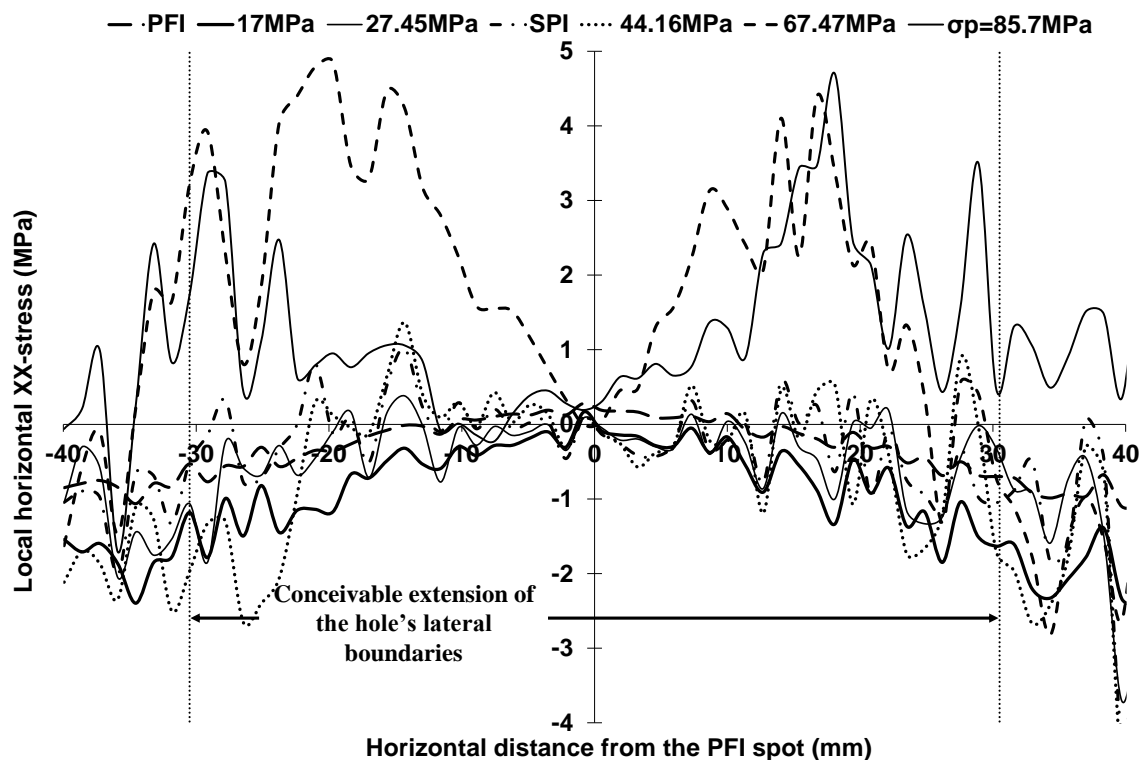
Σχήμα 9-63. Μετρήσεις τοπικών κατακόρυφων YY-τάσεων (MPa) σε κάθετη απόσταση $0.88R$ από τη στέψη της οπής σε διάφορες εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις (BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι», $D = 61$ mm).

Η αξιολόγηση των μετρήσεων της οριζόντιας σ_{xx} από τους προαναφερθέντες 61 κύκλους μέτρησης είναι πολυπλοκότερη. Οι εν λόγω μετρήσεις διαταράσσονται είτε από την επέκταση της ΠΡ, είτε από τη ρωγμάτωση του BPM. Στα πρώτα στάδια της δοκιμής θλίψης, και κυρίως έπειτα από την έναρξη της ΠΡ, οι σ_{xx} είναι εφελκυστικές και κατανεμημένες οιονεί-γραμμικά κατά μήκος των 61 κύκλων μέτρησης. Οι μετρήσεις των σ_{xx} στον άξονα της ΠΡ είναι μηδενικές και αυξάνονται συναρτήσει της απόστασης από την ΠΡ. Οι πιο απομακρυσμένοι κύκλοι μέτρησης καταγράφουν τις υψηλότερες εφελκυστικές τάσεις. Οι συγκεκριμένοι κύκλοι βρίσκονται εντός της περιοχής με τη νεφώδη εφελκυστική μικρορωγμάτωση (όπου αργότερα σχηματίζονται οι ΔΡ), η οποία παρατηρείται αρχικά σε αξονική τάση 17 MPa.

Με την αύξηση της εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης, οι εν λόγω περιοχές διευρύνονται και συνοδεύονται από μείωση των εφελκυστικών σ_{xx} , ενώ στα επόμενα

στάδια της δοκιμής παρατηρούνται θλιπτικές τάσεις κατά μήκος της γραμμής μέτρησης των 61 δίσκων. Κατά τη στιγμή SPI, παρατηρείται μια αύξηση των σ_{xx} , παραμένοντας εντούτοις χαμηλότερες από 1 MPa. Οι μετρούμενες σ_{xx} παραμένουν σχεδόν σταθερές έως τον σχηματισμό των εγκάρσιων κοντών εφελκυστικών ρωγμών στην ΠΡ, και την εμφάνιση των διατμητικών μικρορωγμών στις ΔΡ ($\sigma_a = 44.2$ MPa). Σημειώνεται ότι το στάδιο αυτό έπεται για λίγο της στιγμής SPI στο συγκεκριμένο BPM (ήτοι $\sigma_a = 38$ MPa).

Οι μετρούμενες τοπικές θλιπτικές σ_{xx} αυξάνονται σταθερά, κυρίως στις περιοχές εγγύτερα στην ΠΡ, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή τους σε $\sigma_a = 67.5$ MPa και παραμένοντας σχεδόν σταθερές έως την κορυφαία αντοχή του BPM (ήτοι $\sigma_p = 85.7$ MPa). Επιπλέον, οι τοπικές μετρήσεις των σ_{xx} στους πιο απομακρυσμένους κύκλους μέτρησης, κοντά στις νοητές προεκτάσεις των πλευρικών ορίων της οπής και κυρίως εξωτερικά αυτών, είναι ή τείνουν να γίνουν εφελκυστικές. Τέλος, σημειώνεται ότι οι μετρήσεις των σ_{xx} από τους κύκλους που βρίσκονται εγγύτερα στην ΠΡ παραμένουν μηδενικές από τη στιγμή άφιξης της ΠΡ έως και την κορυφαία αντοχή του BPM.



Σχήμα 9-64. Μετρήσεις τοπικών οριζόντιων XX-τάσεων (MPa) σε κάθετη απόσταση $0.88R$ από τη στέψη της οπής σε διάφορες εφαρμοζόμενες αξονικές τάσεις (BPM μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι», $D = 61$ mm).

10 Ανάπτυξη Σχέσης Υπολογισμού της Τάσης Έναρξης της ΠΡ

Σε προηγούμενο κεφάλαιο, παρουσιάζονται εργασίες δημοσιευμένες στη διεθνή βιβλιογραφία όπου επιχειρούν να προσδιορίσουν αναλυτικά την απαιτούμενη τάση έναρξης της ΠΡ στη στέψη ή το δάπεδο οπής κυκλικής διατομής. Οι περισσότερες εκκινούν από τη θεωρία της ελαστικότητας (Timoshenko & Goodier 1951), ενώ άλλες περιορίζονται στην ποιοτική περιγραφή του φαινομένου (Lajtai 1972). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, προτείνεται τύπος προσδιορισμού της εφαρμοζόμενης τάσης έναρξης του εν λόγω φαινομένου, που προκύπτει έπειτα από ανάλυση.

Η έναρξη της ΠΡ σε υπό θλίψη μοντέλα πετρώματος πραγματοποιείται στη στέψη και στο δάπεδο του ανοίγματος, λόγω της συγκέντρωσης εφελκυστικών τάσεων, και επεκτείνεται προς τις βάσεις του μοντέλου. Όπως παρουσιάζεται στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής, η τάση έναρξης του φαινομένου σε μοντέλα ιδίων διαστάσεων και υλικού εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά τους, τον πλευρικό περιορισμό, τον βαθμό επιρροής των συνοριακών συνθηκών, και τη διάμετρο του ανοίγματος κάθε μοντέλου. Σημειώνεται ότι πρόκειται για καθαρά εφελκυστική αστοχία.

Στις δοκιμές θλίψης των φυσικών μοντέλων μαρμάρου της παρούσας διατριβής, η επιλογή των διαστάσεων των οπείων έγινε μεριμνώντας ώστε να μην υπάρχει επιρροή των συνοριακών συνθηκών στα φαινόμενα που εμφανίζονται και αναπτύσσονται στα μοντέλα, παρατηρείται πως για ίδιας διαμέτρου ανοίγματα σε διαφορετικά υλικά η τάση έναρξης των ΠΡ διαφέρει αναλόγως της εφελκυστικής αντοχής Brazilian του υλικού. Όπως παρουσιάζεται στην Παράγραφο 7.13, με την αύξηση της διαμέτρου της οπής σε μοντέλα ανεπηρέαστα των συνοριακών συνθηκών, η απαιτούμενη αξονική τάση PFI σ_{PFI} προσεγγίζει την εφελκυστική αντοχή του υλικού σ_t . Κατά συνέπεια, συμπεραίνεται πως η εφελκυστική αντοχή του υλικού κατέχει πρωτεύοντα ρόλο στην έναρξη της ΠΡ.

$$\sigma_{PFI} \propto (\sigma_t)^{\alpha_i}$$

Εξίσωση 10-1

όπου η αδιάστατη σταθερά $\alpha_i \in (0, +\infty)$.

Η αντίσταση του υλικού στο να ρωγματώνεται περιγράφεται από το μέγεθος της δυσθραυστότητας. Η δυσθραυστότητα δύναται να μετρηθεί πειραματικά με διάφορες διατάξεις, η τιμή όμως που λαμβάνεται από αυτές εξαρτάται από την ακολουθούμενη μεθοδολογία, τη γεωμετρία και το μέγεθος των δοκιμίων, καθώς και τον ρυθμό φόρτισής τους (Bažant et al. 1993). Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκάρια με ή χωρίς προϋπάρχουσες εγκοπές διαφορετικού βάθους, σε ιταλικό ασβεστιτικό μάρμαρο Carrara και σε σκυρόδεμα, δείχνουν πως η κρίσιμη τιμή του συντελεστή συγκέντρωσης τάσης (K_{IC}) αρχικά αυξάνεται με την αύξηση του βάθους της προϋπάρχουσας εγκοπής, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή για βάθος εγκοπής περί το 20%-35% του ύψους του δοκαριού (Carpinteri 1981). Σε εγκοπές μεγαλύτερου βάθους παρατηρείται μείωση της τιμής K_{IC} . Το μέγιστο βάθος εγκοπής που εξετάζεται για τα εν λόγω δοκάρια μαρμάρου ισούται με το 50% του ύψους των δοκαριών. Λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της πειραματικής διαδικασίας στον προσδιορισμό των τιμών K_{IC} , γίνεται σαφές πως πρέπει να τηρείται κοινή μεθοδολογία προσδιορισμού της, η αναφορά στην οποία να συνοδεύεται από τα χαρακτηριστικά της μεθόδου και των δοκιμίων. Βιβλιογραφικά, τα μάρμαρα λαμβάνουν τιμές της δυσθραυστότητας K_{IC} περί το $0.6-1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (Atkinson 1987), ενώ ο γρανίτης περί το $0.59-2.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (Atkinson 1987). Αντιστοίχως, ο γρανίτης εμφανίζει υψηλότερες τιμές σ_{PFI} συγκριτικά με τα μάρμαρα που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, πλην της ποικιλίας «Νεφέλη», η οποία έχει χαμηλότερη αντοχή κατά τη δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (Brazilian) από τον γρανίτη των Carter et al. (1992). Συμπεραίνεται επομένως πως η σ_{PFI} είναι ανάλογη της K_{IC} .

$$\sigma_{PFI} \propto (K_{IC})^{\alpha_{ii}}$$

Εξίσωση 10-2

όπου η αδιάστατη σταθερά $\alpha_{ii} \in (0, +\infty)$. Σημειώνεται ότι ενώ υπάρχει συσχέτιση των K_{IC} και σ_t μέσω εμπειρικών τύπων (π.χ. Zhang 2002), εντούτοις δεν είναι κοινοί για όλα τα υλικά και δεν έχουν προκύψει ακολουθώντας κοινή μεθοδολογία προσδιορισμού των εν λόγω μεγεθών. Κατά συνέπεια, στον προτεινόμενο τύπο της παρούσας διατριβής αξιοποιούνται και τα δύο μεγέθη.

Στο διάγραμμα που δίνεται στο Σχήμα 7-110, παρατηρείται πως η απαιτούμενη σ_{PFI} ελαττώνεται με την αύξηση της διαμέτρου D της οπής, και τείνει στην εφελκυστική αντοχή του υλικού. Ως εκ τούτου, για έναν συντελεστή m_l , ισχύει πως η σ_{PFI} είναι αντιστρόφως ανάλογη της ακτίνας R του ανοίγματος.

$$\sigma_{PFI} \propto m_l \times (R)^{-u}$$

Εξίσωση 10-3

όπου οι αδιάστατες σταθερές $m_l, u \in (0, +\infty)$. Λαμβάνοντας υπόψη πως η διαμόρφωση της γεωμετρίας των μοντέλων έγινε μεριμνώντας ώστε να μην υπάρξει επιρροή των συννοριακών στην εμφάνιση και ανάπτυξη των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στα μοντέλα, δεν επιλέγεται η αξιοποίηση κάποιου επιπλέον μεγέθους με μονάδα μέτρησης το μήκος, πέραν της ακτίνας R των οπών. Επιπλέον, λόγω της φύσης του φαινομένου, η οποία είναι καθαρά εφελκυστική, δεν επιλέγεται η αξιοποίηση κάποιου επιπλέον μεγέθους αντοχής.

Στο Σχήμα 7-110, παρατηρείται πως οι τιμές για όλα τα πετρώματα του διαγράμματος ακολουθούν μια εξίσωση δύναμης της μορφής $y = ax^\beta$. Ως εκ τούτου, ο αριθμητικός τύπος που διερευνάται έχει τη μορφή:

$$\sigma_{PFI} = ax^\beta$$

$$= \alpha \times \left(\frac{m_l \times (K_{IC} \times \sigma_t)^{a_f}}{(R)^u} \right)^\beta \left(\left(\frac{(MPa \times \sqrt{m} \times MPa)^{a_f}}{(m)^u} \right)^\beta \right)$$

Εξίσωση 10-4

όπου $\alpha = 1$, οι αδιάστατες σταθερές $a_f = a_i = a_{ii}$ και $\beta \in (0, +\infty)$.

Δεδομένου ότι η μονάδα μέτρησης της ποσότητας σ_{PFI} είναι MPa, θα πρέπει κατά την επίλυση του δεύτερου μέλους στην Εξίσωση 10-4 να απαλειφθούν όλα τα υπόλοιπα μεγέθη. Προκειμένου για τον παρονομαστή, ο αμεσότερος τρόπος να απαλειφθεί είναι είτε θέτοντας $a_f = 1$ και $u = 1/2$, είτε θέτοντας $a_f = 2$ και $u = 1$. Στην πρώτη περίπτωση, η εξίσωση απλοποιείται, ενώ στη δεύτερη περιπλέκεται. Ως εκ τούτου, στην Εξίσωση 10-4 ορίζονται $a_f = 1$ και $u = 1/2$, και προκύπτει η Εξίσωση 10-5.

$$\sigma_{PFI} = \left(\frac{m_l \times K_{IC} \times \sigma_t}{\sqrt{R}} \right)^\beta ((MPa \times MPa)^\beta)$$

Εξίσωση 10-5

Σημειώνεται ότι αύξηση των ποσοτήτων a_f και u , με αντίστοιχη προσαρμογή της ποσότητας β , οδηγεί σε μείωση της υπολογιζόμενης σ_{PFI} . Αντιστοίχως, μείωση των εν λόγω τιμών, αποφέρει υψηλότερες τιμές σ_{PFI} .

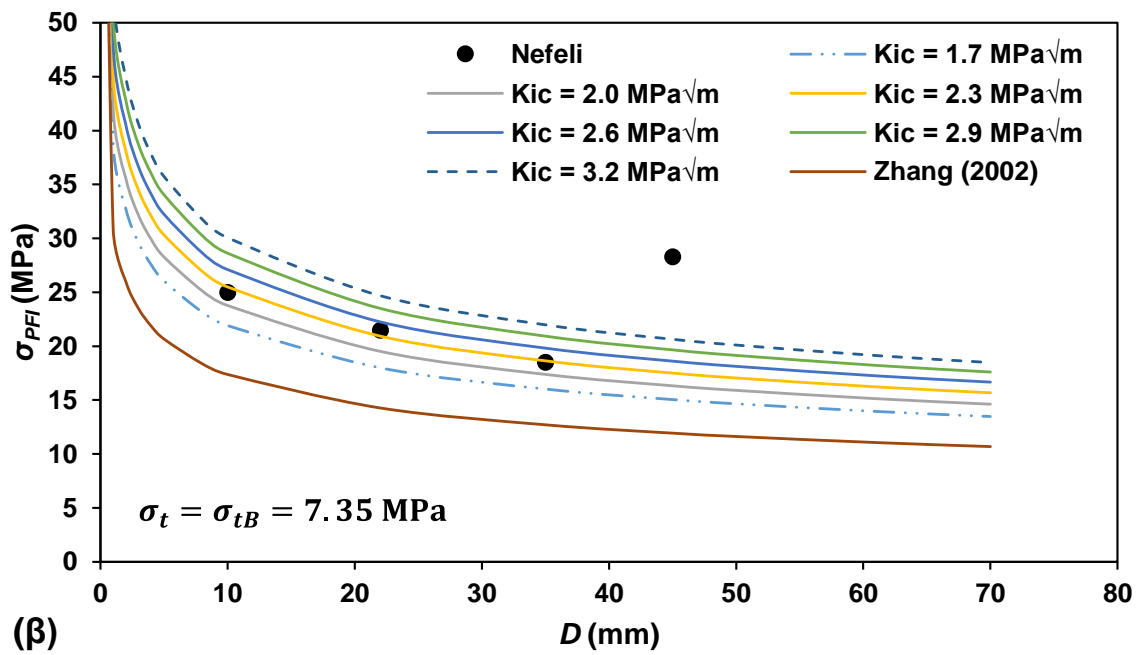
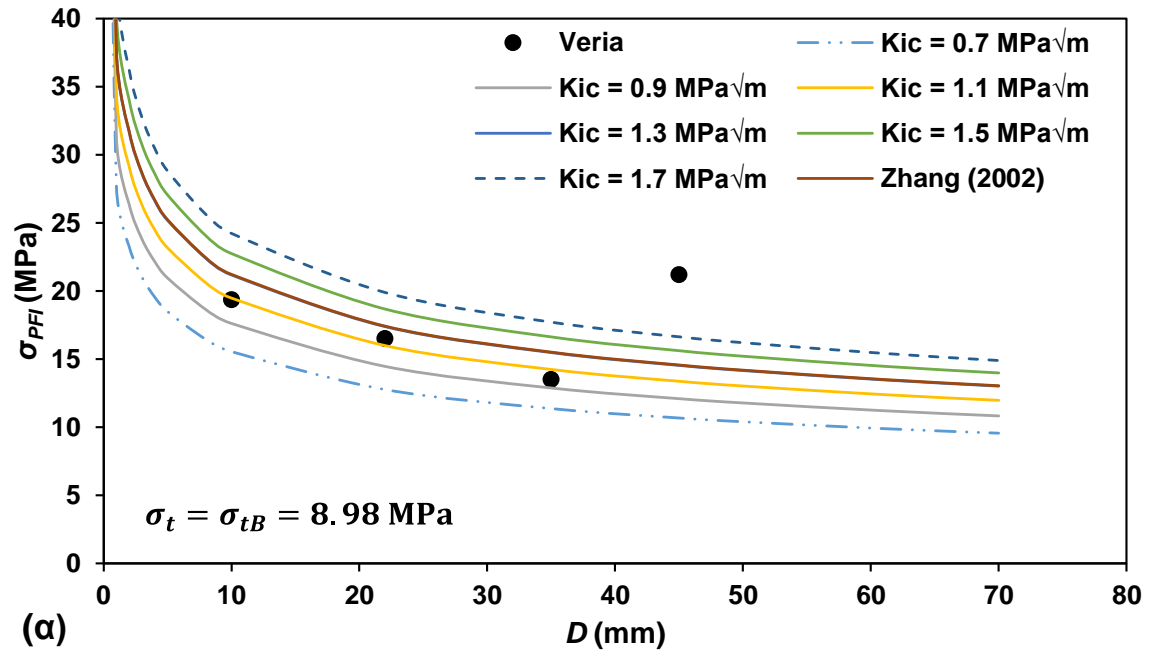
Συνεχίζοντας την επίλυση έως ότου στο δεύτερο μέλος της εν λόγω εξίσωσης να προκύπτει αποκλειστικά ένα μέγεθος οριζόμενο σε MPa, τίθεται $\beta = 1/2$. Λαμβάνοντας υπόψη πως όλα τα μεγέθη της εξίσωσης είναι διαθέσιμα έπειτα από τυπικές εργαστηριακές δοκιμές χαρακτηρισμού, μένει να οριστεί η τιμή του συντελεστή m_l .

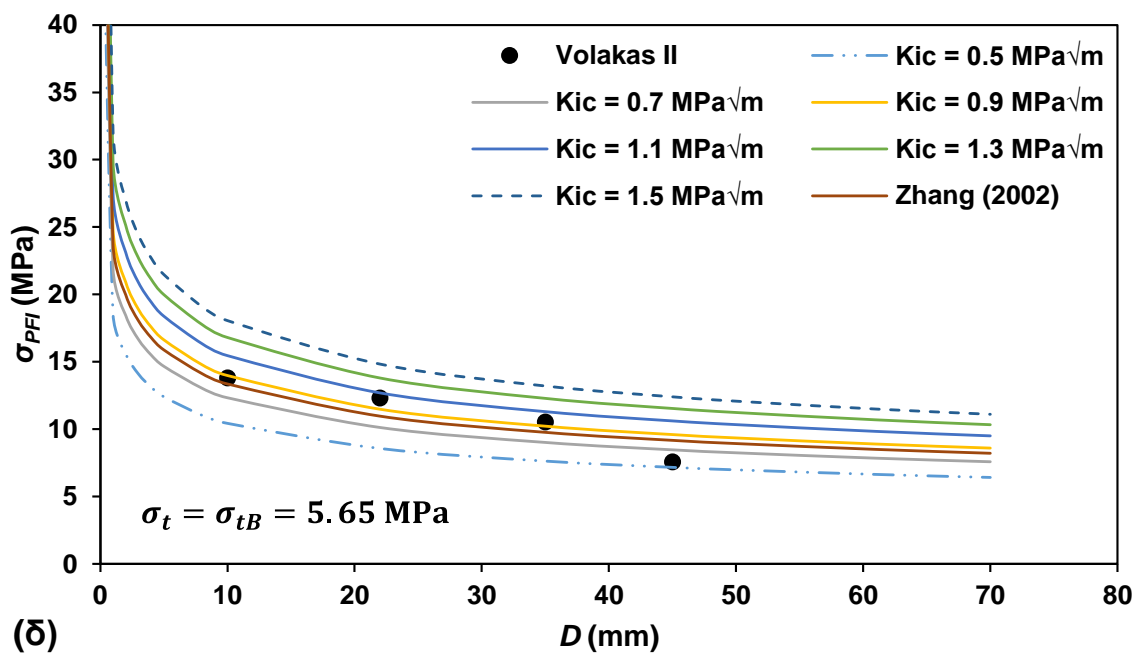
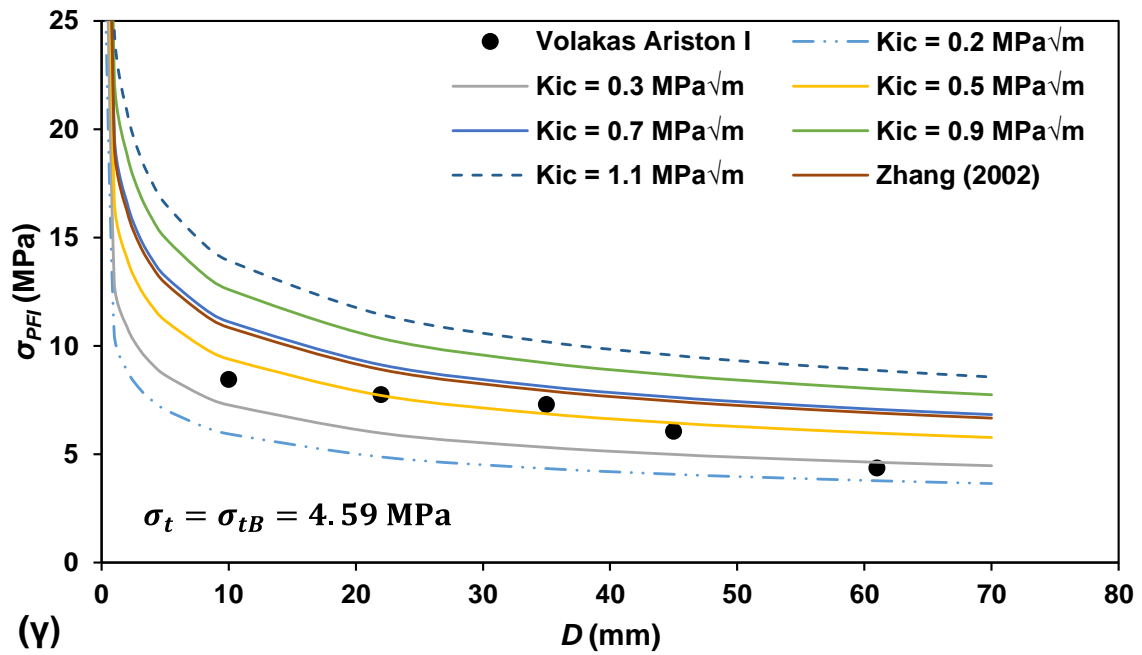
Εν κατακλείδι, ο προτεινόμενος στην παρούσα διδακτορική διατριβή, αριθμητικός τύπος υπολογισμού της απαιτούμενης εφαρμοζόμενης τάσης σ_{PFI} για την έναρξη της ΠΡ στη στέψη ή το δάπεδο κυκλικής οπής, είναι ο εξής:

$$\sigma_{PFI} = \sqrt{\frac{m_l \times K_{IC} \times \sigma_t}{\sqrt{R}}} \text{ (MPa)}$$

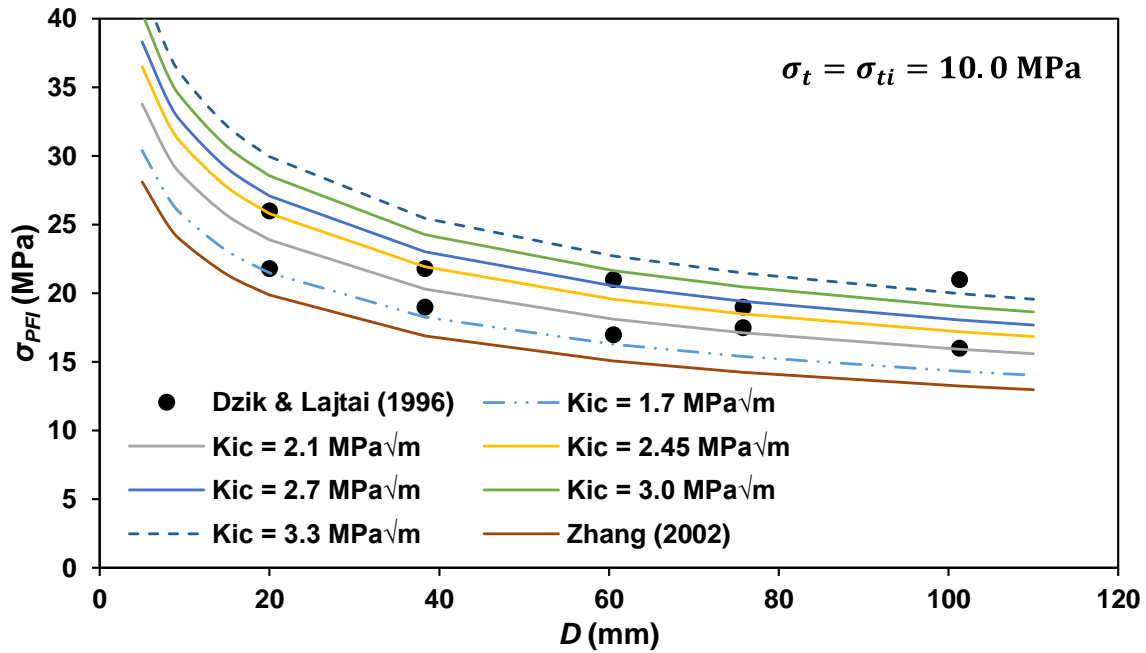
Εξίσωση 10-6

Η εφαρμογή του προτεινόμενου τύπου στις δολομικές ποικιλίες μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» και «Βώλακας ΙΙ», καθώς και στις ασβεστιτικές ποικιλίες «Βέροια» και «Νεφέλη» της παρούσας διατριβής, δίνεται για διάφορες τιμές K_{IC} στο Σχήμα 10-1 θέτοντας τον συντελεστή m_l ίσο με τον αριθμό e του Euler. Επιπλέον, στο Σχήμα 10-2 δίνεται η εφαρμογή του τύπου για τον ίδιο συντελεστή m_l σε δημοσιευμένες εργαστηριακές δοκιμές θλίψης αντίστοιχων μοντέλων γρανίτη Lac du Bonnet (Dzik & Lajtai 1996), καθώς και σε μοντέλα γύψου στο Σχήμα 10-3 (Suknev et al. 2003). Τέλος, σε κάθε γράφημα περιλαμβάνεται μια επιπλέον καμπύλη η οποία παρουσιάζει τις τιμές του προτεινόμενου τύπου (Εξίσωση 10-6) στην οποία πραγματοποιείται αντικατάσταση της ποσότητας K_{IC} αξιοποιώντας τη σχέση $\sigma_t = 6.88 \times K_{IC}$ που προτείνεται από τον Zhang (2002). Στην εν λόγω σχέση, θεωρείται πως η μονάδα μέτρησης της ποσότητας 6.88 είναι \sqrt{m}^{-1} .

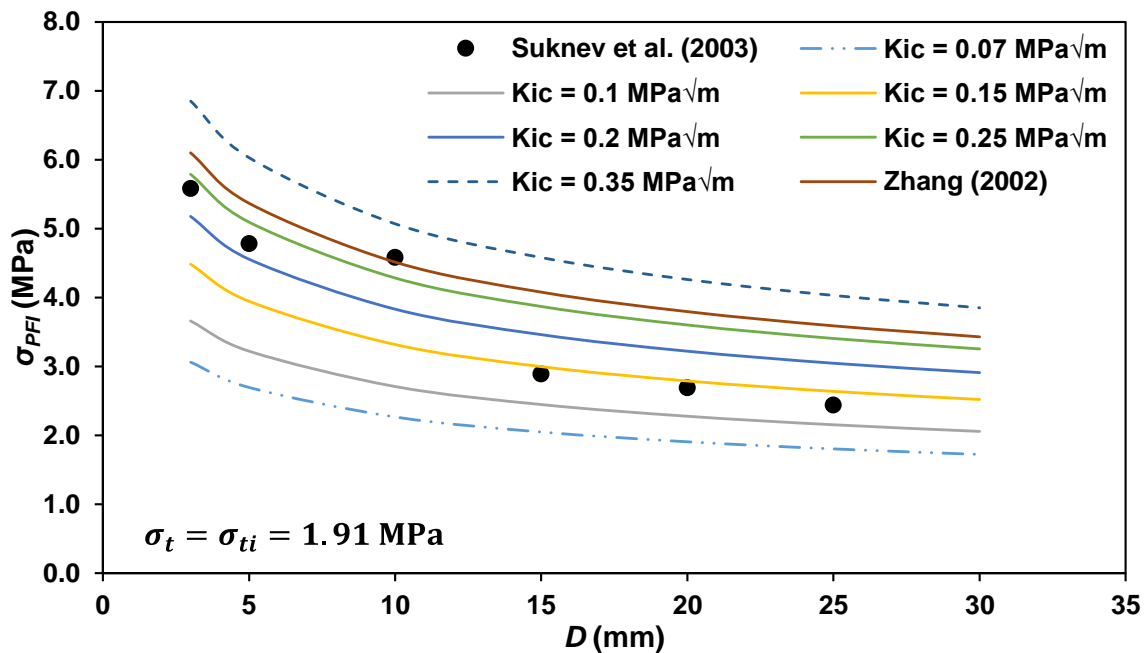




Σχήμα 10-1. Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών και εργαστηριακών τιμών σ_{PFI} συναρτήσει της διαμέτρου D της οπής, για τα ΦΜ (α) μαρμάρου «Βέροια», (β) μαρμάρου «Νεφέλη», (γ) μαρμάρου «Βώλακας Άριστον Ι» και (δ) μαρμάρου «Βώλακας ΙΙ».



Σχήμα 10-2. Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών και εργαστηριακών τιμών σ_{PFI} συναρτήσει της διαμέτρου D της οπής, για τα ΦΜ γρανίτη LdB των Dzik & Lajtai (1996).



Σχήμα 10-3. Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών και εργαστηριακών τιμών σ_{PFI} συναρτήσει της διαμέτρου D της οπής, για τα ΦΜ γύψου των Suknev et al. (2003).

Ενδεικτικά, σημειώνεται ότι η τιμή K_{IC} που προκύπτει κατά τις δοκιμές DT (double torsion) στον γρανίτη LdB από όπου διαμορφώθηκαν τα φυσικά μοντέλα των Dzik & Lajtai (1996), κυμαίνεται περί το 2.45 - 2.5 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (Carter et al. 1992, Martin 1993, Dzik & Lajtai 1996). Αντίστοιχα, έπειτα από δοκιμές CSTBD (cracked straight-through Brazilian disc) σε γύψο, η τιμή K_{IC} υπολογίζεται ίση με 0.13 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (Lotidis

et al. 2019). Τέλος, όπως προαναφέρθηκε, τυπικές τιμές K_{IC} μαρμάρων κυμαίνονται περί το 0.6-1.6 MPa \sqrt{m} (Atkinson 1987). Σημειώνεται ότι, έπειτα από δοκιμές SENB (single edge notch bend) σε μάρμαρο «Saint Pons» στο οποίο εμφανίζεται σαφής διεύθυνση ζωνών, η μέση τιμή K_{IC} δοκιμών των οποίων η εγκοπή βρίσκεται κάθετα στο επίπεδο των ζωνών και παράλληλα στον άξονά τους, κατά αντιστοιχία με τη διεύθυνση φόρτισης των δοκιμών της ποικιλίας «Βέροια» που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, ισούται με 1.39 MPa \sqrt{m} (Atkinson 1987).

Τέλος, σημειώνεται ότι παρά το γεγονός πως κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου τύπου (Εξίσωση 10-6) στα παραπάνω γραφήματα επιλέγεται $m_l = e$, εντούτοις απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της ποσότητας m_l μέσω εργαστηριακών δοκιμών.

11 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, φυσικά μοντέλα υπογείων δομών με προϋπάρχοντα ανοίγματα κυκλικής διατομής, διαμορφωμένα σε πλάκες δύο (2) ποικιλιών ασβεστιτικών και δύο (2) ποικιλιών δολομιτικών μαρμάρων, δολομιτικού ασβεστόλιθου και οικοδομικού γύψου, υποβάλλονται σε θλίψη προκειμένου να μελετηθεί η διαδικασία της ρωγμάτωσης και της αλληλεπίδρασης των ρωγμών στη διαδικασία της κατάρρευσής τους, καθώς επίσης και η επίδραση της κλίμακας. Επιπλέον, υποβάλλονται σε θλίψη φυσικά μοντέλα των δύο δολομιτικών μαρμάρων με διπλές κυλινδρικές οπές παραλλάσσοντας τη μεταξύ τους απόσταση, προκειμένου να μελετηθεί η αλληλεπίδραση των δύο οπών και οι επιρροή τους στη διαδικασία της ρωγμάτωσης και στη μηχανική συμπεριφορά του πετρώματος.

Για την παρακολούθηση της μηχανικής συμπεριφοράς των φυσικών μοντέλων και για τη διάκριση της έναρξης της ρωγμάτωσης κατά τη διάρκεια της φόρτισής τους, αξιοποιούνται οι μέθοδοι της ακουστικής εκπομπής (AE) και της συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (DIC). Εφαρμόζονται και παρουσιάζονται νέες τεχνικές ακριβείας, οι οποίες αποφέρουν αξιόπιστα αποτελέσματα για τον προσδιορισμό του χρόνου έναρξης της ρωγμάτωσης μέσω της μεθόδου DIC. Επίσης, όπου κρίνεται απαραίτητο, χρησιμοποιούνται επιπλέον τεχνικές όπως η παρατήρηση μέσω στερεογραφικού μικροσκοπίου, ούτως ώστε να διαφωτίσουν την κατάσταση της ρωγμάτωσης των μοντέλων. Το μοτίβο ρωγμάτωσης και η έναρξη των πρωτογενών ρωγμών και των πλευρικών αποφλοιώσεων σε κάθε μοντέλο συγκρίνεται με τη βιβλιογραφία, καταλήγοντας σε ομοιότητες και διαφορές που υπεισέρχονται και στην επίδραση της κλίμακας.

Τα φυσικά μοντέλα των λεπτόκοκκων ασβεστιτικών και δολομιτικών μαρμάρων, και του δολομιτικού ασβεστόλιθου της παρούσας διατριβής, τα οποία μελετώνται για πρώτη φορά στην παρούσα διατριβή, παρουσιάζουν δύο (2) διαφορετικές συμπεριφορές ρωγμάτωσης. Τα φυσικά μοντέλα των ασβεστιτικών μαρμάρων επιδεικνύουν ένα νέο μοτίβο ρωγμάτωσης και μηχανικής συμπεριφοράς, συγκριτικά με τις δολομιτικές ποικιλίες και τη βιβλιογραφία. Επιπλέον, η χρήση στερεοσκοπικού μικροσκοπίου κατέχει βασικό ρόλο στην αποσαφήνιση της κατάστασης της ρωγμάτωσης του πετρώματος στη στέψη και το δάπεδο της οπής διαμέτρου 10 mm των φυσικών μοντέλων των ασβεστιτικών μαρμάρων.

Επιπροσθέτως, δίνονται και παρουσιάζονται λεπτομερώς, διαγράμματα των τιμών της απαιτούμενης εφαρμοζόμενης αξονικής τάσης για την έναρξη της πρωτογενούς ρωγμής και των πλευρικών αποφλοιώσεων, ανηγμένες αντίστοιχα προς την εφελκυστική και θλιπτική αντοχή του αντίστοιχου υλικού, της παρούσας διατριβής και άλλων δημοσιευμένων στη διεθνή βιβλιογραφία (Lajtai 1971, Carter et al. 1991, Carter et al. 1992, Carter 1992a, 1992b, Martin 1993, Dzik & Lajtai 1996, Suknev et al. 2003). Σε ό,τι αφορά την επίδραση της κλίμακας στη συμπεριφορά των μοντέλων, η αύξηση της διαμέτρου της οπής έχει ως αποτέλεσμα την εκθετική μείωση της απαιτούμενης ανηγμένης αξονικής τάσης έναρξης των πρωτογενών ρωγμών, η οποία τείνει σε ένα λόγο 1.0 για τις μεγαλύτερες διαμέτρους οπής. Παρόμοια εκθετική μείωση παρατηρείται με την αύξηση της διαμέτρου της οπής και στην έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων, η οποία τείνει περίπου σε ένα λόγο 1/3 για τις μεγαλύτερες διαμέτρους οπής.

Οι νέες τεχνικές που εφαρμόζονται και παρουσιάζονται στην παρούσα διατριβή για τον προσδιορισμό της έναρξης της ρωγμάτωσης μέσω DIC δύνανται να αξιοποιηθούν και σε άλλες εφαρμογές που είναι επιθυμητός ο προσδιορισμός της έναρξης αντίστοιχων φαινομένων. Η συνδυασμένη εφαρμογή των τεχνικών DIC και ΑΕ επιτρέπει την αξιόπιστη ποσοτικοποίηση των φαινομένων της ρωγμάτωσης σε τέτοιου είδους λεπτόκοκκα, κρυσταλλικά ή μη, ασβεστιτικά και δολομιτικά υλικά, ζωνώδη ή μη, που σε διαφορετική περίπτωση η παρατήρησή τους θα ήταν αβέβαιη και ο προσδιορισμός τους αμφισβητήσιμος. Επιπλέον, επιβεβαιώνεται πως η εφαρμογή μιας και μόνο μεθόδου παρακολούθησης δεν περιγράφει πάντα μια κατάσταση με σαφή τρόπο, και ως εκ τούτου περισσότερες από μία προσεγγίσεις παρακολούθησης θα πρέπει να εφαρμόζονται ώστε να περιγραφεί πλήρως μια κατάσταση. Επίσης, προτείνεται εφαρμογή της ακολουθούμενης μεθοδολογίας παρακολούθησης και σε άλλου είδους πειραματικές έρευνες όπου τα φαινόμενα που εμφανίζονται εξαρτώνται από την εντατική κατάσταση και την επίδραση της κλίμακας.

Σημειώνεται ότι, στην παρούσα διατριβή αναγνωρίζεται η αξία της μεθόδου ΑΕ, καθώς αξιοποιείται στον επιτυχή χωρικό προσδιορισμό των πηγών των σημάτων ΑΕ στα φυσικά μοντέλα των ασβεστιτικών μαρμάρων, προβάλλοντας τελικώς την εσωτερική κατάσταση των φυσικών μοντέλων.

Η παρούσα διατριβή αποσαφηνίζει τα φαινόμενα της ρωγμάτωσης και της συμπεριφοράς ανοιγμάτων σε μονοαξονική θλίψη. Τα φυσικά μοντέλα που εξετάζονται, δύνανται να αποτελέσουν χρήσιμα σημεία αναφοράς για υλικά με διαφορετικούς τύπους συμπεριφοράς από εκείνους που παρουσιάζονται στη διεθνή βιβλιογραφία, όπως για παράδειγμα παρατηρείται στα ασβεστίτικα μάρμαρα. Επιπλέον, παρέχουν μια εικόνα της διαδικασίας της θραύσης του μαρμάρου γύρω από ανοίγματα, η οποία κρίνεται απαραίτητη για την κατανόηση των συνεπειών που συνδέονται με μια υπόγεια εκμετάλλευση μαρμάρου, διευκολύνοντας τη μεταφορά της εργαστηριακής γνώσης στο πεδίο.

Τελικό στόχο αποτελεί η τεκμηρίωση συσχέτισης μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των μηχανισμών αστοχίας των θεμελιωδών δομών σε πέτρωμα. Το μέσο για να οριστεί μια αμφίδρομη συσχέτιση των εργαστηριακών παρατηρήσεων με τις *in situ* είναι οι αριθμητικές προσομοιώσεις. Συνεπώς, τα εργαστηριακά αποτελέσματα και συμπεράσματα που προκύπτουν από τα παρουσιαζόμενα φυσικά μοντέλα μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν για τη βαθμονόμηση αξιόπιστων αριθμητικών μοντέλων, προκειμένου να προσομοιωθούν ρεαλιστικά κατασκευές στα συγκεκριμένα ή σε παρόμοια πετρώματα.

Με το πέρας των εργαστηριακών δοκιμών, χρησιμοποιούνται μοντέλα συνδεδεμένων σωματιδίων (BPM) για την προσομοίωση της διαδικασίας της ρωγμάτωσης των φυσικών μοντέλων σε συνθήκες μονοαξονικής θλίψης. Τα υλικά της παρούσας διατριβής που προσομοιώνονται είναι ο οικοδομικός γύψος και τα μάρμαρα «Βέροια», «Βώλακας Άριστον Ι» και «Βώλακας ΙΙ». Επιπλέον, προσομοιώνονται αντίστοιχα εργαστηριακά πειράματα σε φυσικά μοντέλα γρανίτη Lac du Bonnet (Dzik & Lajtai 1996). Χρησιμοποιείται η διδιάστατη (2D) και τριδιάστατη (3D) έκδοση του Particle Flow Code (PFC2D και PFC3D, αντίστοιχα). Το BPM κάθε υλικού βαθμονομείται βάσει των μακροσκοπικών μηχανικών χαρακτηριστικών και της ρωγμάτωσης του φυσικού υλικού, αποσκοπώντας σε ρεαλιστική αναπαράσταση της μικρο- και μακροσκοπικής μηχανικής συμπεριφοράς των φυσικών μοντέλων, επιτυγχάνοντας τελικά και στις δύο.

Η μικρορωγμάτωση, η διαδικασία της θραύσης και η σειρά εμφάνισης των φαινομένων κατά τη διάρκεια των αριθμητικών δοκιμών στα μοντέλα με μονές ή διπλές οπές βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες εργαστηριακές δοκιμές των φυσικών μοντέλων. Επιπλέον, οι περιοχές της νεφώδους μικρορωγμάτωσης

των BPM στο PFC βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις ζώνες των έντονων παραμορφώσεων που ανιχνεύονται στις εργαστηριακές δοκιμές μέσω της μεθόδου DIC. Επίσης, η απαιτούμενη εφαρμοζόμενη αξονική τάση για την έναρξη των πρωτογενών ρωγμών και των πλευρικών αποφλοιώσεων στα BPM βρίσκεται επίσης σε καλή συμφωνία με των αντίστοιχων φυσικών μοντέλων. Η επίδραση της κλίμακας που παρατηρείται στα φυσικά μοντέλα, εμφανίζεται και στα BPM παρά το γεγονός πως η μείωση των αριθμητικών τιμών για την έναρξη των πρωτογενών ρωγμών είναι λιγότερο ευαίσθητη στην αύξηση της διαμέτρου της οπής συγκριτικά με τα εργαστηριακά πειράματα. Οι αριθμητικές τιμές για την έναρξη των πλευρικών αποφλοιώσεων των μοντέλων εμφανίζουν ακόμη πιο ρεαλιστική επίδραση της κλίμακας. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως οι αριθμητικές τιμές της τάσης έναρξης των δεύτερων πρωτογενών ρωγμών και πλευρικών αποφλοιώσεων, καθώς και η μέγιστη αντοχή των μοντέλων βρίσκονται επίσης σε καλή συμφωνία με τις αντίστοιχες εργαστηριακές τιμές.

Διαφορές ανάμεσα στα εργαστηριακά και αριθμητικά αποτελέσματα είναι συνήθως αναμενόμενες, και ορισμένες από αυτές προκύπτουν από το γεγονός πως τα BPM που αξιοποιούνται στην παρούσα διατριβή είναι ομοιογενή, χωρίς να περιλαμβάνουν φλέβες ή ζώνες, όπως τα πραγματικά υλικά. Επιπλέον, τα αριθμητικά σωματίδια είναι άκαμπτα και άθραυστα, εν αντιθέσει με τους κόκκους του πετρώματος. Παρόλα αυτά, τα BPM της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποδεικνύεται πως είναι κατάλληλα για τη ρεαλιστική προσομοίωση της μικρο- και μακροσκοπικής μηχανικής συμπεριφοράς τέτοιων υλικών, ακόμη και με διδιάστατα μοντέλα.

Το συσσωμάτωμα του PFC χαρακτηρίζεται κανονικά από τοπικές δυνάμεις και ροπές ανάμεσα σε γειτνιάζοντα αλληλοεπιδρώντα σωματίδια. Εντούτοις, μια τεχνική υπολογισμού του μέσου όρου ποσοτήτων εντός προκαθορισμένων περιοχών μέτρησης δύναται να προσφέρει τις συνιστώσες της τοπικής τάσης και κατά συνέπεια την κατανομή των τάσεων τόσο κατά μήκος όσο και εγκάρσια της διαδρομής της πρωτογενούς ρωγμής κατά τη διάρκεια των αριθμητικών δοκιμών. Με την εφαρμογή της εν λόγω προσέγγισης, διαφωτίζονται ορισμένα φαινόμενα και γεγονότα που παρατηρούνται στα εργαστηριακά πειράματα, όπως είναι εκείνο του «κλεισίματος» των πρωτογενών ρωγμών στις δολομικές ποικιλίες, καθώς τα εφελκυστικά πεδία γίνονται θλιπτικά και αντιστρόφως.

Η βαθμονόμηση ενός αξιόπιστου αριθμητικού υλικού που να συμπεριφέρεται ρεαλιστικά τόσο μικρο- όσο και μακροσκοπικά για περισσότερες από μια εργαστηριακές δοκιμές, αποτελεί μια δύσκολη και απαιτητική πρόκληση. Εντούτοις, το BPM αποδεικνύεται ικανό να συλλάβει τα περίπλοκα φαινόμενα που παρατηρούνται γύρω από κυλινδρικά ανοίγματα υπό θλίψη, τουλάχιστον για τα πέντε (5) υλικά που προσομοιώνονται αριθμητικά στην παρούσα διατριβή. Τα εν λόγω βαθμονομημένα αριθμητικά υλικά που συμπεριφέρονται για όλες τις προσομοιούμενες δοκιμές παρόμοια με τις εργαστηριακές, ανεξάρτητα από την πολυπλοκότητα της γεωμετρίας των δοκιμών, δύνανται επιπλέον να αξιοποιηθούν για προσομοιώσεις μεγαλύτερης κλίμακας, τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο, όπως παραδείγματος χάρη για τη ρεαλιστική προσομοίωση δομών στα εν λόγω ή σε παρόμοια υλικά, προσφέροντας μια καινοτόμα προσέγγιση στον ερευνητή και στον μηχανικό. Προσομοιώσεις με κώδικες DEM όπως το PFC που αξιοποιείται στην παρούσα διατριβή, χρησιμοποιούν το αξιόπιστο βαθμονομημένο υλικό για την προσομοίωση της υπό μελέτη δομής, χωρίς παραδοχές της καταστατικής συμπεριφοράς ή των μηχανικών χαρακτηριστικών. Τέτοιες προσομοιώσεις δύνανται να αξιοποιηθούν για το βραχυ- και μακροπρόθεσμο σχεδιασμό σε μια τεχνική μελέτη, είτε αυτόνομα είτε συνδυάζοντας το BPM με έναν κώδικα FDM (Finite Difference Method), κερδίζοντας υπολογιστική ταχύτητα.

Τέλος, στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνεται αριθμητικός τύπος προσδιορισμού της απαιτούμενης αξονικής τάσης για την έναρξη της πρωτογενούς ρωγμής σε κυλινδρικά ανοίγματα. Ο εν λόγω τύπος που προκύπτει έπειτα από ανάλυση, παρουσιάζεται εκτενώς και εφαρμόζεται προσεγγίζοντας με καλή ακρίβεια τις εργαστηριακές τιμές έναρξης του φαινομένου στα φυσικά μοντέλα των μαρμάρων που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή, σε μοντέλα γρανίτη Lac du Bonnet (Dzik & Lajtai 1996) και σε πλάκες γύψου (Suknev et al. 2003). Σημειώνεται ότι, παρά το γεγονός πως κατά την εφαρμογή του προτεινόμενου τύπου (Εξίσωση 10-6) στην παρούσα διατριβή επιλέγεται $m_l = e$, εντούτοις απαιτείται περαιτέρω διερεύνηση της ποσότητας m_l μέσω εργαστηριακών δοκιμών.

Βιβλιογραφία

- Adams M., Sines G. (1978) Crack extension from flaws in a brittle material subjected to compression. *Tectonophysics*, 15 August, 49(1-2), pp. 97-118.
- Adrian R.J. (2005) Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, August, 39(2), pp. 159-169.
- Akaike H. (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, December, 19(6), pp. 716-723.
- Anuta, P.E. (1970) Spatial registration of multispectral and multitemporal digital imagery using fast Fourier transform techniques. *IEEE Transactions on Geoscience Electronics*, October, 8(4), pp. 353-368.
- Atkinson B.K. (1987) *Fracture mechanics of rock*. s.l.:Elsevier Ltd..
- Babulic P.J. (1985) Fracture propagation around a circular opening in granite. *BSc Thesis*.
- Bažant Z.P., Bai S.-P., Gettu R. (1993) Fracture of rock: effect of loading rate. *Engineering Fracture Mechanics*, June, 45(3), pp. 393-398.
- Bieniawski Z.T. (1967) Mechanism of brittle fracture of rock: Part I—theory of the fracture process. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, October, 4(4), pp. 395-404.
- Brace W.F., Paulding Jr. B.W., Scholz C. (1966) Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *Journal of Geophysical Research*, 15 August, 71(16), pp. 3939-3953.
- Cai M. et al. (2007) FLAC/PFC coupled numerical simulation of AE in large-scale underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, June, 44(4), pp. 550-564.
- Cao R.-h., Lin H., Pu C.-z., Ou K. (2015) Mechanical Behavior of Brittle Rock-Like Specimens with Pre-existing Fissures Under Uniaxial Loading: Experimental Studies and Particle Mechanics Approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, March, 49(3), p. 763–783.
- Carpinteri A. (1981) Static and energetic fracture parameters for rocks and concretes. *Matériaux et Construction*, 14(81), pp. 151-162.

- Carter B.J. (1992a) Physical and numerical modeling of fracture in rock: With special emphasis on the potash mines of Saskatchewan. *PhD Thesis, Civil Engineering Department, University of Manitoba*, 1 April.
- Carter B.J. (1992b) Size and stress gradient effects on fracture around cavities. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, July, 25(3), pp. 167-186.
- Carter B.J., Lajtai E.Z., Petukhov A. (1991) Primary and remote fracture around underground cavities. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, January, 15(1), pp. 21-40.
- Carter B.J., Lajtai E.Z., Yuan Y. (1992) Tensile fracture from circular cavities loaded in compression. *International Journal of Fracture*, October, 57(3), pp. 221-236.
- Chang S.-H., Lee C.-I. (2004) Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, October, 41(7), pp. 1069-1086.
- Chatzipanagis I., Vougioukas D. (2004) The significance of the lithostratigraphic position and the tectonic deformation for the location and the exploitation of the dolomitic marbles of Falacron Mountain. *Proceedings of the 10th International Congress*, April, pp. 63-71.
- Cheon D.-S. et al. (2008) Determination of failure initiation stress and failure grade using acoustic emission. *Geosystem Engineering*, March, 11(1), pp. 1-6.
- Cho N., Martin D.C., Segol D.C. (2007) A clumped particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, October, 44(7), pp. 997-1010.
- Christoffersen J., Mehrabadi M.M., Nemat-Nasser S. (1981) A micromechanical description of granular material behavior. *Journal of Applied Mechanics*, 48(2), pp. 339-344.
- Cundall P.A. (1971) A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics*, Nancy, France, pp. 129-136.
- Cundall P.A., Hart R.D. (1992) Numerical modelling of discontinua. *Engineering Computations*, February, 9(2), pp. 101-113.

Cundall P.A., Strack O.D. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, March, 29(1), pp. 47-65.

Dai S.T., Labuz J.F. (1997) Damage and failure analysis of brittle materials by acoustic emission. *Journal of Materials in Civil Engineering*, November, 9(4), pp. 200-205.

Dammyr Ø. (2016) Prediction of brittle failure for TBM tunnels in anisotropic rock: a case study from northern Norway. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, June, 49(6), pp. 2131-2153.

Deresiewicz H. (1958) Mechanics of granular matter. Στο: *Advances in Applied Mechanics*. s.l.:Elsevier B.V., pp. 233-306.

Diederichs M.S., Kaiser P.K., Eberhardt E. (2004) Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, July, 41(5), pp. 785-812.

Dzik E.J., Lajtai E.Z. (1996) Primary fracture propagation from circular cavities loaded in compression. *International Journal of Fracture*, January, 79(1), pp. 49-64.

Evans A.G. (1978) Acoustic emission sources in brittle solids. *Fundamentals of Acoustic Emission*, pp. 209-227.

Everitt R.A., Lajtai E.Z. (2004) The influence of rock fabric on excavation damage in the Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, December, 41(8), pp. 1277-1303.

Fakhimi A., Carvalho F., Ishida T., Labuz J.F. (2002) Simulation of failure around a circular opening in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, June, 39(4), pp. 507-515.

Feng X.T. et al. (2018) In Situ Observation of Rock Spalling in the Deep Tunnels of the China Jinping Underground Laboratory (2400 m Depth). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, April, 51(4), pp. 1193-1213.

Ganne P., Vervoort A., Wevers M. (2007) Quantification of pre-peak brittle damage: Correlation between acoustic emission and observed micro-fracturing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, July, 44(5), pp. 720-729.

GOM (2018) GOM Correlate 2018 - User Manual.

Gong Q.M. et al. (2012) Rock burst and slabbing failure and its influence on TBM excavation at headrace tunnels in Jinping II hydropower station. *Engineering Geology*, 4 January, Vol. 124, pp. 98-108.

Graham C.C., Stanchits S., Main I.G., Dresen G. (2010) Comparison of polarity and moment tensor inversion methods for source analysis of acoustic emission data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, January, 47(1), pp. 161-169.

Gramberg J. (1989) *A non-conventional view on rock mechanics and fracture mechanism*. Rotterdam: A.A. Balkema.

Grosse C.U., Ohtsu M. (2008) Acoustic emission testing. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Hoek E. (1968) Brittle fracture of rock. *Rock Mechanics in Engineering Practice*, pp. 99-124.

Hoek E., Martin D.C. (2014) Fracture initiation and propagation in intact rock – A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, August, 6(4), pp. 287-300.

Ishida T. et al. (2017) ISRM Suggested method for laboratory acoustic emission monitoring. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, March, 50(3), pp. 665-674.

ISRM (1978) Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, June, 15(3), pp. 99-103.

Itasca Consulting Group Inc. (2014) *PFC 5.0 Documentation*. s.l.:s.n.

Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R. (2007) *Fundamentals of rock mechanics*. 4th ed.. s.l.:Blackwell Publishing.

Jia P., Tang C.A. (2008) Numerical study on failure mechanism of tunnel in jointed rock mass. *Tunnelling and Underground Space Technology*, September, 23(5), pp. 500-507.

- Jiefan H., Ganglin C., Yonghong Z., Ren W. (1990) An experimental study of the strain field development prior to failure of a marble plate under compression. *Tectonophysics*, 20 March, 175(1-3), pp. 269-284.
- Kaiser J. (1950) A study of acoustic phenomena in tensile tests. *PhD Thesis, Technical University of Munich*.
- Keating T.J., Wolf P.R., Scarpace F.L. (1975) An improved method of Digital Image Correlation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 41(8), pp. 993-1002.
- Kilgour J. (1984) *Fracture toughness of Tyndall limestone*. Winnipeg: BSc Thesis, Civil Engineering Department, University of Manitoba.
- Kim J.-S. et al. (2015) A comparative evaluation of stress-strain and acoustic emission methods for quantitative damage assessments of brittle rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 12 July, 48(2), pp. 495-508.
- Knill J.L., Franklin J.A., Malone A.W. (1968) A study of acoustic emission from stressed rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, January, 5(1), pp. 87-121.
- Kranz R.L. (1983) Microcracks in rocks: A review. *Tectonophysics*, December, 100(1-3), pp. 449-480.
- Kulatilake P.H.S.W., Malama B., Wang J. (2001) Physical and particle flow modeling of jointed rock block behavior under uniaxial loading. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, July, 38(5), pp. 641-657.
- Kusunose K., Lei X., Nishizawa O., Satoh T. (1991) Effect of grain size on fractal structure of acoustic emission hypocenter distribution in granitic rock. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, May, 67(1-2), pp. 194-199.
- Lajtai E.Z. (1971) A theoretical and experimental evaluation of the Griffith theory of brittle fracture. *Tectonophysics*, February, 11(2), pp. 129-156.
- Lajtai E.Z. (1972) Effect of tensile stress gradient on brittle fracture initiation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, September, 9(5), pp. 569-578.

- Lajtai E.Z. (1974) Brittle fracture in compression. *International Journal of Fracture*, December, 10(4), pp. 525-536.
- Lajtai E.Z., Carter B.J., Ayari M.L. (1990) Criteria for brittle fracture in compression. *Engineering Fracture Mechanics*, 37(1), pp. 59-74.
- Lajtai E.Z., Carter B.J., Scott Duncan E.J. (1994) En echelon crack-arrays in potash salt rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 27(2), pp. 89-111.
- Lajtai E.Z., Lajtai V.N. (1975) The collapse of cavities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, April, 12(4), pp. 81-86.
- Lan H., Martin C.D., Andersson J.C. (2013) Evolution of in situ rock mass damage induced by mechanical-thermal loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, January, 46(1), pp. 153-168.
- Lee H., Jeon S. (2011) An experimental and numerical study of fracture coalescence in pre-cracked specimens under uniaxial compression. *International Journal of Solids and Structures*, 15 March, 48(6), pp. 979-999.
- Leguillon D., Quesada D., Putot C., Martin E. (2007) Prediction of crack initiation at blunt notches and cavities – size effects. *Engineering Fracture Mechanics*, October, 74(15), pp. 2420-2436.
- Li C. (1993) Deformation and failure of brittle rocks under compression. *Doctoral thesis, Luleå University of Technology*.
- Li C., Nordlund E. (1993) Deformation of brittle rocks under compression - with particular reference to microcracks. *Mechanics of Materials*, May, 15(3), pp. 223-239.
- Ling C.-B. (1948) The Stresses in a Plate Containing an Overlapped Circular Hole. *Journal of Applied Physics*, Vol. 19, pp. 405-411.
- Lin J.-p. et al. (2015) Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in rock with a pre-cut circular hole under uniaxial compression. *Engineering Fracture Mechanics*, February, Vol. 135, pp. 206-218.
- Lin P., Wong R.H.C., Tang C. (2015) Experimental study of coalescence mechanisms and failure under uniaxial compression of granite containing multiple

holes. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, Vol. 77, pp. 313-327.

Li S. et al. (2012) In situ monitoring of rockburst nucleation and evolution in the deeply buried tunnels of Jinping II hydropower station. *Engineering Geology*, 1 June, Vol. 137-138, pp. 85-96.

Lisjak A., Grasselli G. (2014) A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, August, 6(4), pp. 301-314.

Liu J.-P., Li Y.-H., Xu S.-D. (2014) Estimation of cracking and damage mechanisms of rock specimens with pre-cut holes by moment tensor analysis of acoustic emission. *International Journal of Fracture*, July, 188(1), pp. 1-8.

Liu J.-P. et al. (2015) Cracking mechanisms in granite rocks subjected to uniaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, February, Vol. 75, pp. 151-159.

Liu J.-P. et al. (2015) Moment tensor analysis of acoustic emission for cracking mechanisms in rock with a pre-cut circular hole under uniaxial compression. *Engineering Fracture Mechanics*, February, Vol. 135, pp. 206-218.

Lockner D. (1993) The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, December, 30(7), pp. 883-899.

Lockner D.A., Byerlee J.D. (1993) How geometrical constraints contribute to the weakness of mature faults. *Nature*, Vol. 363, pp. 250-252.

Lockner D.A. et al. (1991) Quasi-static fault growth and shear fracture energy in granite. *Nature*, 7 March, Vol. 350, pp. 39-42.

Lockner D.A. et al. (1992) Chapter 1 Observations of quasistatic fault growth from acoustic emissions. *Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks*, Vol. 51, pp. 3-31.

Lockner D.A., Walsh J.B., Byerlee J.D. (1977) Changes in seismic velocity and attenuation during deformation of granite. *Journal of Geophysical Research*, 10 November, 82(33), pp. 5374-5378.

- Lokajíček T., Vlk J. (1994) Interface card for multichannel processing of acoustic emission signals, Progress in Acoustic Emission VII. *Proceedings of 12th International Acoustic Emission Symposium*, Sapporo 17-20 October. pp. 577-582.
- Lotidis M.A. (2014) The approach of synthetic rock mass for the numerical simulation of the brittle rocks' failure around underground openings. *MEng Thesis, School of Mining and Metallurgical Engineering, National Technical University of Athens, Athens, Greece.*
- Lotidis M.A., Mytilinaiou D.E., Nomikos P.P., Sofianos A.I. (2019) A laboratory and numerical investigation of flawed rock-like plates in compression. Paper ARMA 19-1762. In: *Proceedings of 53rd US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium, New York, NY, 23-26 June 2019, USA.*
- Lotidis M.A., Nomikos P.P., Sofianos A.I. (2015) A numerical investigation of rock fracture around cavities in compression. *Eurock 2015: Future Development of Rock Mechanics*, 7-10 October, pp. 719-724.
- Martin C.D. (1993) The strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings. *PhD Thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada, June.*
- Martin D.C., Chandler N.A. (1994) The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, December, 31(6), pp. 643-659.
- Martin D.C., Kaiser P.K., Christiansson R.C. (2003) Stress, instability and design of underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, October-December, 40(7-8), pp. 1027-1047.
- Martin D.C., Kaiser P.K., McCreath D.R. (1999) Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(1), pp. 136-151.
- Martin D.C., Read R.S., Martino J.B. (1997) Observations of brittle failure around a circular test tunnel. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, October, 34(7), pp. 1065-1073.

- Ma S., Pang J., Ma Q. (2012) The systematic error in digital image correlation induced by self-heating of a digital camera. *Measurement Science and Technology*, 5 January. Vol. 23.
- Mistras Group Hellas (2015) Προσωπική επικοινωνία.
- Mistras Group Hellas (2017) Noesis v8.1 - Manual.
- Moore D.E., Lockner D.A. (1995) The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. *Journal of Structural Geology*, January, 17(1), pp. 95-111,113-114.
- Murrell S.A.F. (1964) The theory of the propagation of elliptical Griffith cracks under various conditions of plane strain or plane stress: Part I. *British Journal of Applied Physics*, 15(10), pp. 1195-1210.
- Nesetova V., Lajtai E.Z. (1973) Fracture from compressive stress concentrations around elastic flaws. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, July, 10(4), pp. 265-284.
- Nomikos P.P., Sakkas K.M., Sofianos A.I. (2012) Acoustic emission of Dionysos marble specimens in uniaxial compression. *Harmonising Rock Engineering and the Environment - Proceedings of the 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics*, 16-21 October, Beijing, China .pp. 771-775.
- Obert L. (1941) *Use of subaudible noises for prediction of rock bursts*, s.l.: U.S. Bureau of Mines, Rept. Invest. RI-3555.
- Obert L., Duvall W.I. (1942) *Use of subaudible noises for prediction of rock bursts, part II*, s.l.: U.S. Bureau of Mines, Rept. Invest. RI-3654.
- Obert L., Duvall W.I. (1957) *Micro-seismic method of determining the stability of underground openings*, s.l.: U.S. Bureau of Mines, Rept. Bulletin 573.
- Ohtsu M. (1989) Source kinematics of acoustic emission based on a moment tensor. *NDT International*, February, 22(1), pp. 14-20.
- Ohtsu M. (1991) Simplified moment tensor analysis and unified decomposition of acoustic emission source: Application to in situ hydrofracturing test. *Journal of Geophysical Research*, 10 April, 96(B4), pp. 6211-6221.

Olson J.E., Pollard D.D. (1991) The initiation and growth of en échelon veins. *Journal of Structural Geology*, 13(5), pp. 595-608.

Paris P.C., Sih G.C.M. (1965) Stress analysis of cracks. *Fracture Toughness Testing and its Applications*, pp. 30-83.

Paterson M.S., Wong T.-f. (2005) *Experimental rock deformation - the brittle field*. 2 επιμ. s.l.:Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Peng S., Johnson A.M. (1972) Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chelmsford granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, January, 9(1), pp. 37-86.

Potyondy D.O. (2010) A grain-based model for rock: Approaching the true microstructure. *Proceedings of Rock Mechanics in the Nordic Countries 2010*, 9-12 June.

Potyondy D.O., Cundall P.A. (2004) A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, December, 41(8), pp. 1329-1364.

Přikryl R., Lokajčiček T. (1999) The effect of grain size and other fabric parameters on the acoustic emission characteristics of stressed granitic rocks. *Proceedings, 35th International Conference on Ultrasonics and Acoustic Emission*, Třešť, Czech Republic. pp. 74-77.

Přikryl R., Lokajčiček T., Li C., Rudajev V. (2003) Acoustic emission characteristics and failure of uniaxially stressed granitic rocks: the effect of rock fabric. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, September, 36(4), pp. 255-270.

Read R.S. (2004) 20 years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, December, 41(8), pp. 1251-1275.

Romani R. et al. (2013) Identification and validation of crack onset criterion by digital image correlation in quasi-brittle materials under compression. *21ème Congrès Français de Mécanique*, 26-30 August.

Rummel F. (1987) Fracture mechanics approach to hydraulic fracturing stress measurements. *Fracture mechanics of rock*, pp. 217-240.

- Sammis C.G., Ashby M.F. (1986) The failure of brittle porous solids under compressive stress states. *Acta Metallurgica*, March, 34(3), pp. 511-526.
- Schofield B.H. (1961) *Acoustic emission under applied stress*, Boston: Report ARL-150, Lessels and Associates.
- Scholz C.H. (1968a) Experimental study of the fracturing process in brittle rock. *Journal of Geophysical Research*, 15 February, 73(4), pp. 1447-1454.
- Scholz C.H. (1968b) Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. *Journal of Geophysical Research*, 15 February, 73(4), pp. 1417-1432.
- Scholz C.H. (1968c) The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 58(1), pp. 399-415.
- Shen B., Barton N.R. (2018) Rock fracturing mechanisms around underground openings. *Geomechanics and Engineering*, September, 16(1), pp. 35-47.
- Sih G.C. (1973) *Handbook of stress intensity factors: for researchers and engineers*. Lehigh University, Bethlehem: Institute of fracture and solids mechanics.
- Stanchits S., Vinciguerra S., Dresen G. (2006) Ultrasonic Velocities, Acoustic Emission Characteristics and Crack Damage of Basalt and Granite. *Pure and Applied Geophysics*, June, 163(5-6), pp. 974-993.
- Suknev S.V. (2011) Tensile fracturing in gypsum under uniform and nonuniform distributed compression. *Journal of Mining Science*, September, 47(5), pp. 573-579.
- Suknev S.V., Elshin V.K., Novopashin M.D. (2003) Experimental investigation into processes of crack formation in rock samples with hole. *Journal of Mining Science*, 39(5), pp. 460-466.
- Tannant D.D., Wang C. (2004) Thin tunnel liners modelled with particle flow code. *Engineering Computations*, 21(2-4), pp. 318-342.
- Tapponnier P., Brace W.F. (1976) Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, April, 13(4), pp. 103-112.
- Tawadrous A.S., DeGagné D., Pierce M., Mas Ivars D. (2009) Prediction of uniaxial compression PFC3D model micro-properties using artificial neural networks.

International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 25 December, 33(18), pp. 1953-1962.

Timoshenko S., Goodier J.N. (1951) *Theory of elasticity*. s.l.:McGraw-Hill Book Company Inc..

Wang S.Y., Sloan S.W., Sheng D.C., Tang C.A. (2012) Numerical analysis of the failure process around a circular opening in rock. *Computers and Geotechnics*, January, Vol. 39, pp. 8-16.

Wang S.Y. et al. (2013) Numerical study on static and dynamic fracture evolution around rock cavities. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, August, 5(4), pp. 262-276.

Wong L.N.Y., Einstein H.H. (2009a) Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part 1. Macroscopic observations and interpretation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 42, pp. 475-511.

Wong L.N.Y., Einstein H.H. (2009b) Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part 2-Microscopic observations and interpretation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 42, pp. 513-545.

Wong L.N.Y. (2008) Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble. *PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology*.

Xu S. et al. (2012) Experimental studies on pillar failure characteristics based on acoustic emission location technique. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, November, 22(11), pp. 2792-2798.

Yanagidani T. et al. (1985) Localization of dilatancy in Ohshima granite under constant uniaxial stress. *Journal of Geophysical Research*, 10 July, 90(B8), pp. 6840-6858.

Yang S.-Q., Huang Y.-H., Tian W.-L., Zhu J.-B. (2017) An experimental investigation on strength, deformation and crack evolution behavior of sandstone containing two oval flaws under uniaxial compression. *Engineering Geology*, 30 January, Vol. 217, pp. 35-48.

Yin Q., Jing H., Zhu T. (2016) Mechanical behavior and failure analysis of granite specimens containing two orthogonal fissures under uniaxial compression. *Arabian Journal of Geosciences*, January, 9(31).

- Yoon J.S., Zang A., Stephansson O. (2015) Simulating fracture and friction of Aue granite under confined asymmetric compressive test using clumped particle model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, January, Vol. 49, pp. 68-83.
- Zhang X.-P., Wong L.N.Y. (2012) Cracking processes in rock-like material containing a single flaw under uniaxial compression: A numerical study based on parallel bonded-particle model approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, September, 45(5), pp. 711-737.
- Zhang X.-P., Wong L.N.Y. (2013) Crack Initiation, propagation and coalescence in rock-like material containing two flaws: A numerical study based on bonded-particle model approach. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, September, 46(5), pp. 1001-1021.
- Zhang Y., Stead D., Elmo D. (2015) Characterization of strength and damage of hard rock pillars using and damage of hard rock pillars using. *Computers and Geotechnics*, April, Vol. 65, pp. 56-72.
- Zhang Z.X. (2002) An empirical relation between mode I fracture toughness and the tensile strength of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, April, 39(3), pp. 401-406.
- Zhao X.-D., Zhang H.-X., Zhu W.-C. (2014) Fracture evolution around pre-existing cylindrical cavities in brittle rocks under uniaxial compression. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, March, 24(3), pp. 806-815.
- Zhao Y. et al. (2016) Cracking and stress–strain behavior of rock-like material containing two flaws under uniaxial compression. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, July, 49(7), p. 2665–2687.
- Zhong Z. et al. (2018) Fracture mechanism of naturally cracked rock around an inverted U-shaped opening in a biaxial compression test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, March, Vol. 103, pp. 242-253.
- Zou C., Wong L.N.Y. (2014) Experimental studies on cracking processes and failure in marble under dynamic loading. *Engineering Geology*, 1 May, Vol. 173, pp. 19-31.