

Επιστημονική Επετηρίδα, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τιμητική έκδοση στη μνήμη του ομότιμου καθηγητή Κ. Σολδάτου	Ειδικός τόμος 101	103-109	Θεσσαλονίκη 2012
--	----------------------	---------	---------------------

Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΠΕΤΡΟΓΡΑΦΙΑΣ ΣΤΟ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ ΜΙΚΡΟΡΩΓΜΩΝ ΣΕ ΔΟΛΕΡΙΤΕΣ ΑΠΟ ΤΟ ΟΦΙΟΛΙΘΙΚΟ ΣΥΜΠΛΕΓΜΑ ΤΗΣ ΠΙΝΔΟΥ ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΟΝΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Ρηγόπουλος Ι.¹, Τσικούρας Β.¹, Πομώνης Π.², και Χατζηπαναγιώτου Κ.¹

¹ Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Ορυκτών Πρώτων Υλών, 265 00 Πάτρα, rigoroul@upatras.gr, v.tsikouras@upatras.gr, k.hatzipanagioutou@upatras.gr

² Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Ορυκτολογίας-Πετρολογίας, 157 84 Αθήνα, ppomonis@geol.uoa.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Διερευνήθηκε ο τρόπος σχηματισμού και διάδοσης των μικρορωγμών σε δολερίτες από το οφιολιθικό σύμπλεγμα της Πίνδου, στη ΒΔ Ελλάδα, υπό την επίδραση μοναξονικής φόρτισης. Από την εξέταση λεπτιών-στιλπνών τομών σε κυανό προσπίπτον και λευκό διερχόμενο φως, προέκυψε ότι οι νεοσχηματισθείσες μικρορωγμές τείνουν να προσανατολίζονται παράλληλα στον άξονα φόρτισης, με τις ενδοκρυσταλλικές να παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη συχνότητα. Οι μικρορωγμές συνήθως σχηματίζονται κατά μήκος των επιφανειών σχισμού του ακτινόλιθου, υποδεικνύοντας ότι οι κρυσταλλογραφικές αυτές διευθύνσεις δρουν ως επίπεδα αδυναμίας, τα οποία ελέγχουν την εξέλιξη των μικρορωγμών. Οι κόκκοι των μεταλλικών ορυκτών πιθανά αποτελούν κέντρα έναρξης της διάδοσης των μικρορωγμών λόγω της διαφορετικής μηχανικής συμπεριφοράς τους συγκριτικά με τις υπόλοιπες πυριτικές ορυκτές φάσεις. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η γνώση των ιδιαίτερων πετρογραφικών χαρακτηριστικών του εκάστοτε λιθότυπου είναι δυνατό να συνεισφέρει σημαντικά στην πρόβλεψη του πιθανού σχηματισμού επιφανειών αστοχίας ενός πετρώματος κατά τη διάρκεια χρήσης του στα διάφορα τεχνικά έργα.

ABSTRACT

THE ROLE OF PETROGRAPHY IN MICROCRACKING OF DOLERITES FROM THE PINDOS OPHIOLITE DURING UNIAXIAL COMPRESSION

Rigoropoulos I.¹, Tsikouras B.¹, Pomonis P.², and Hatzipanagioutou K.¹

¹ University of Patras, Department of Geology, Section of Earth Materials, GR-265 00 Patras, rigoroul@upatras.gr, v.tsikouras@upatras.gr, k.hatzipanagioutou@upatras.gr

² University of Athens, Department of Geology and Geoenvironment, GR-157 84 Athens, ppomonis@geol.uoa.gr

The formation and propagation of microcracks in dolerites from the Pindos ophiolite, northern Greece, were investigated under uniaxial compressive stress. The study of the polished thin sections, using combined fluorescent and polarized microscopy, indicated that the newly formed microcracks tend to be parallel to the compressive stress direction. The intragranular microcracks are the dominating crack-type. Microcracks are usually formed along the cleavage planes of actinolite crystals, indicating that such crystallographic preferred orientations act as planes of weakness, controlling the direction of the crack paths. Opaque minerals likely comprise locations of initiation of microcracks presumably due to their different mechanical behaviour relative to the surrounding silicate phases. The results indicate that knowledge of the petrographic features of the various lithotypes may assist in the prediction of potential development of failure surfaces of a rock in-service.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα οφιολιθικά πετρώματα αποτελούν υπολείμματα ωκεάνιου φλοιού και ανώτερου μανδύα και αποτελούνται από ένα σημαντικό αριθμό πετρολογικών τύπων, οι οποίοι είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν σε πολυάριθμες κατασκευαστικές-βιομηχανικές εφαρμογές (Τσικούρας et al. 2005, Ρηγόπουλος et al. 2006). Σε γενικές γραμμές είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν ως υψηλής ποιότητας αδρανή υλικά οδοποιίας, σκυροδεμάτων, καθώς και ως σκύρα βάσης σιδηροτροχιών. Οι κύριες χώρες εκμετάλλευσης οφιολίθων είναι η Νορ-

βηγία, η Αυστρία και οι Η.Π.Α., ενώ η εκμετάλλευσή τους στην Ελλάδα αυξάνεται σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

Οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των διαφόρων λιθότυπων εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τα πετρογραφικά τους χαρακτηριστικά (Hartley 1974, Brattli 1992, Åkesson et al. 2001, Räsänen 2004, Tamrakar et al. 2007, Rigoropoulos et al. 2010). Ορυκτολογικές και ιστολογικές μεταβολές είναι δυνατό να τροποποιήσουν τη μηχανική αντοχή των πετρωμάτων, ιδιαίτερα όταν

έχει λάβει χώρα σε αυτά εκτεταμένη εξαλλοίωση και/ή παραμόρφωση. Όσον αφορά στα οφιολιθικά πετρώματα, τα οποία χρησιμοποιούνται εκτενώς σε παγκόσμια κλίμακα ως σκληρά αδρανή υλικά, οι διαδικασίες ωκεάνιας μεταμόρφωσης και τεκτονικής παραμόρφωσης που έχουν επιδράσει σε αυτά είναι δυνατό να μεταβάλλουν ποικιλοτρόπως τα ορυκτοπετρογραφικά τους χαρακτηριστικά και επομένως τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες (Ramana et al. 1986, Pomonis et al. 2007, Ρηγόπουλος et al. 2008).

Ιδιαίτερη σημασία για τη μηχανική αντοχή των πετρωμάτων διαδραματίζουν οι μικρορωγμές που διασχίζουν τα ορυκτολογικά συστατικά τους (Shen et al. 1995, Eberhardt et al. 1999). Η παρατήρηση και περιγραφή των διαφόρων τύπων μικρορωγμών είναι ιδιαίτερης σημασίας για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων. Σύμφωνα με τον Kranz (1983), οι μικρορωγμές χωρίζονται: (i) σε ενδοκρυσταλλικές (intragranular), που βρίσκονται στο εσωτερικό των κρυστάλλων, (ii) σε διακρυσταλλικές (transgranular), που διασχίζουν περισσότερους από έναν κρυστάλλους και (iii) σε εκείνες που σχετίζονται με τα όρια των κρυστάλλων (grain-boundary). Η εύθραυστη παραμόρφωση είναι δυνατό να μελετηθεί πειραματικά με ποικίλες τεχνικές. Για παράδειγμα, οι Janssen et al. (2001) πραγματοποίησαν δοκιμές αντοχής σε μοναξονική θλίψη προκειμένου να μελετήσουν πειραματικά το σχηματισμό διαμητικών επιφανειών θραύσης σε γρανιτικά πετρώματα. Επίσης, οι Åkesson et al. (2004) μελέτησαν τον τρόπο διάδοσης των μικρορωγμών σε γρανιτικά πετρώματα της δυτικής Σουηδίας, όταν αυτά υπόκεινται σε μοναξονική κυκλική φόρτιση. Πρόσφατα, οι Rigoroulos et al. (2011) μελέτησαν τον τρόπο διάδοσης μικρορωγμών σε υπερβασικά πετρώματα κατά τη μοναξονική φόρτιση κυλινδρικών δοκιμίων τους.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, διερευνάται ο τρόπος διάδοσης των μικρορωγμών σε δολερίτες από το οφιολιθικό σύμπλεγμα της Πίνδου, κατά τη μοναξονική φόρτιση κυλινδρικών δοκιμίων. Σε γενικές γραμμές, η μελέτη περιελάμβανε τα ακόλουθα στάδια: (i) λεπτομερή πετρογραφική εξέταση και ποσοτικοποίηση των ορυκτολογικών συστατικών με τη μέθοδο σημειακής καταμέτρησης, (ii) προσδιορισμό της αντοχής σε μοναξονική θλίψη, (iii) παρατήρηση των διαφορετικών τύπων μικρορωγμών πριν και μετά τη μοναξονική θλίψη σε κυανό προσπίπτον και λευκό διερχόμενο φως.

2 ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

Οι ορεινοί όγκοι της βόρειας Πίνδου περιλαμβάνουν ένα από τα καλύτερα διατηρημένα οφιολιθικά συμπλέγματα του Ελληνικού χώρου (Σχ. 1). Οι οφιολίθοι της Πίνδου εντάσσονται στη δυτική οφιολιθική ζώνη και περιλαμβάνουν μία σειρά από τεκτονικά τεμάχια, τα οποία στο σύνολό τους είναι επωθημένα προς τα δυτικά, επί του φλύσχη της ζώνης Πίνδου. Η τεκτονοστρωματογραφική διάρθρωση των οφιολιθικών πετρωμάτων της Πίνδου έχει περιγραφεί εκτενώς από τους Jones & Robertson (1991), οι οποίοι διακρίνουν τις παρακάτω τεκτονικές ενότητες: (i) το Σύστημα της Δραμάλας (ή Ντραμάλας), το οποίο αποτελείται από τοπικά σερπεντινωμένους, τεκτονισμένους χαρτσβουργίτες, θυλακοειδείς δουνίτες και σε μικρότερο ποσοστό από πλαγιοκλαστομίγεις λερζόλιθους, (ii) το Σύστημα του Ασπροπόταμου, το οποίο περιλαμβάνει υπερβασικούς και βασικούς σωρείτες, φλεβικά και ηφαιστειακά πετρώματα και (iii) την Ενότητα της Λουμνίτσας που αποτελεί το μεταμορφικό πέλαμα του οφιολιθικού συμπλέγματος της Πίνδου. Οι παραπάνω τεκτονικές ενότητες υπέρκεινται της *mélange* της Αβδέλλας, η οποία αποτελεί έναν τεκτονοϊζηματογενή σχηματισμό, πάχους μεγαλύτερο από 1,5 km. Πρόκειται για χαρακτηριστική *mélange* τύπου “block-in-matrix”, που αποτελείται από τεκτονικά τεμάχια Τριαδικών ασβεστόλιθων, ραδιολαριτών, μαξιλαροειδών λαβών και ποικίλων οφιολιθικών τεμαχίων. Το συνδυαστικό υλικό των παραπάνω τεκτονικών τεμαχίων συνίσταται κυρίως από ιλυόλιθους (Kemp & McCaig 1984).

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, συλλέχθηκαν δολερίτες από το Σύστημα Ασπροπόταμου του οφιολιθικού συμπλέγματος της Πίνδου. Οι δολερίτες αποτελούν χαρακτηριστική εμφάνιση του συστήματος πολλαπλών φλεβών του εν λόγω οφιολιθικού συμπλέγματος. Η περιοχή μελέτης, η οποία τοποθετείται στο κεντρικό τμήμα των οφιολιθικών εμφανίσεων της Πίνδου, περιλαμβάνει επιπλέον μαξιλαροειδείς λάβες και μεσοκρυσταλλικούς ισότροπους γάββρους.

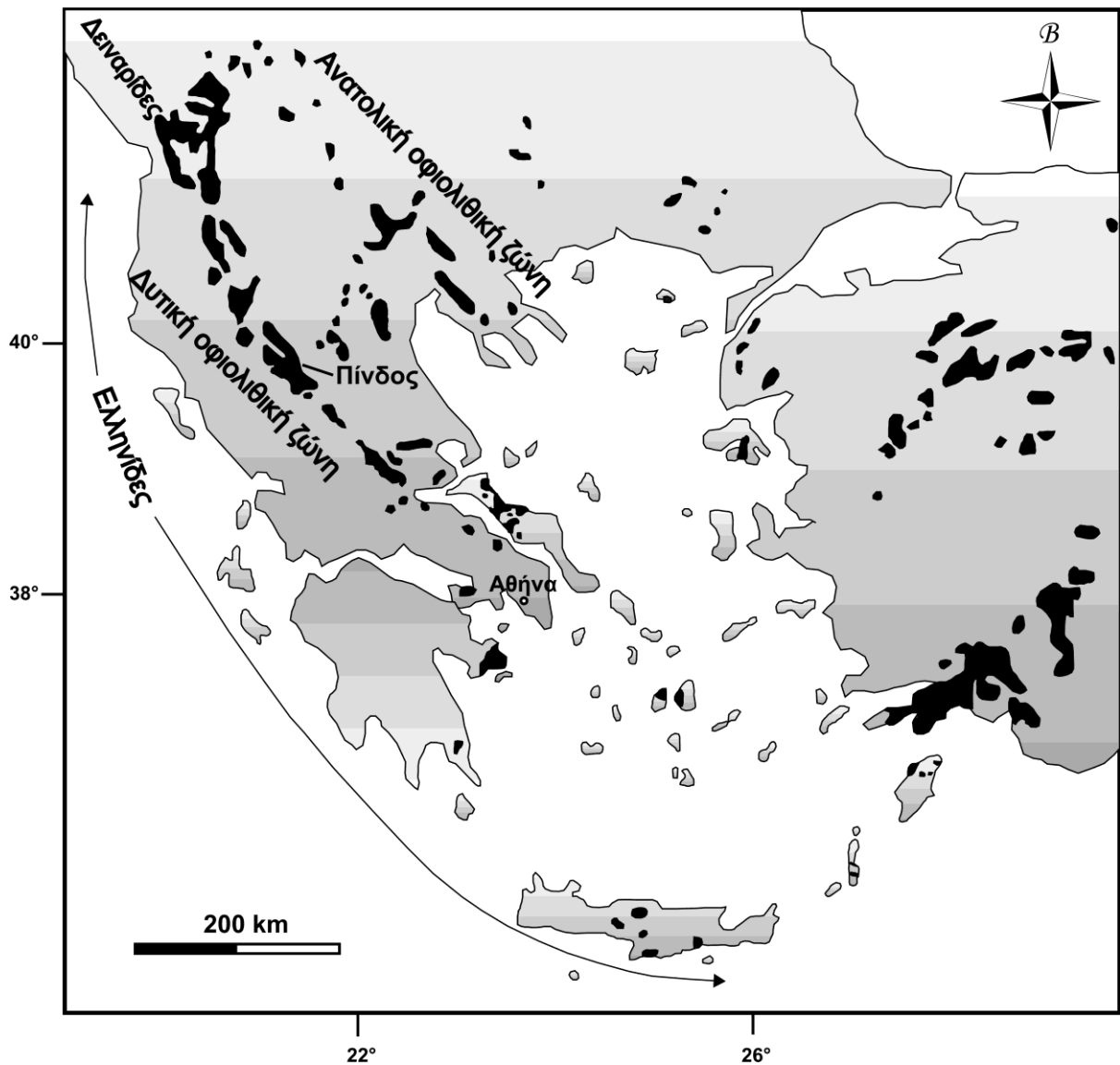
3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΡΕΥΝΑΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Προετοιμασία δειγμάτων

Αρχικά, από τους υπό μελέτη δολερίτες παρασκευάστηκαν λεπτές-στιλπνές τομές, ούτως ώστε να εξετασθούν διεξοδικά τα ιδιαίτερα ορυκτολογικά και ιστολογικά χαρακτηριστικά τους. Οι συμμετέχουσες ορυκτές φάσεις ποσοτικοποιήθηκαν σε πολωτικό μικροσκόπιο, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο σημειακής καταμέτρησης. Καταμετρήθηκαν περίπου 500 ισομερώς κατανομημένα σημεία σε δύο αντιπροσωπευτικές λεπτές-στιλπνές τομές δολερίτη. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (εξοπλισμένο με EDS και WDS), με σκοπό τον προσδιορισμό της χημικής σύστασης συγκεκριμένων ορυκτών φάσεων.

Επιπρόσθετα, λήφθηκαν δείγματα μεγάλων διαστάσεων, από όπου διαμορφώθηκαν δοκίμια κυλινδρικού σχήματος με διάμετρο 54 mm (NX) και με λόγο ύψους προς διάμετρο μεταξύ 2 και 2,5. Πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές δοκιμές μοναξονικής θλίψης και λήφθηκε ο μέσος όρος των τιμών που προέκυψαν.

Σε επόμενο στάδιο παρασκευάστηκαν λεπτές-στιλπνές τομές, προσανατολισμένες παράλληλα στον άξονα των κυλινδρών. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί σύγκριση των μικρορωγμών πριν και μετά τη μοναξονική φόρτιση, παρασκευάστηκε μία λεπτή-στιλπνή τομή από τον κύλινδρο που έχει υποστεί μοναξονική θλίψη (προσανατολισμένη κάθετα στην κύρια επιφάνεια θραύσης) και μία από εκείνον που δεν έχει υποστεί καμία φόρτιση. Για την παρατήρησή τους σε μικροσκόπιο φθορισμού, πραγματοποιήθηκε εμπλοτισμός του υπό εξέταση δείγματος με φθορίζουσα εποξική ρητίνη. Οι υπό εξέταση λεπτές-στιλπνές τομές παρασκευάστηκαν στα εργαστήρια του Danish Technological Institute, Concrete Centre, σύμφωνα με το Σκανδιναβικό πρότυπο NT Build 361.



Σχήμα 1. Απλοποιημένος χάρτης όπου σημειώνεται η περιοχή μελέτης, καθώς και η κατανομή των οφιολιθικών εμφανίσεων στην Ελλάδα και στις γειτονικές χώρες.

3.2 Πετρογραφία

Οι υπό μελέτη δολερίτες αποτελούν λεπτόκοκκα ισότροπα πετρώματα και παρουσιάζουν χαρακτηριστικό υποφειτικό ιστό (Σχ. 2α). Ωστόσο, κατά τόπους ο ιστός τους μπορεί να χαρακτηριστεί ως πορφυροειδής, με πορφυροκρυστάλλους πλαγιόκλαστων και κλινοπυρόξενων μέσα σε μία πιο λεπτοκρυσταλλική κύρια μάζα με υποφειτικό ιστό. Η κύρια ορυκτολογική τους σύσταση περιλαμβάνει πλαγιόκλαστο (λαβραδορίτης-βυτοβνίτης) και κλινοπυρόξενο (αυγίτης) (Πίν. 1). Σε μικρότερα ποσοστά συμμετέχει τιτανίτης, καθώς επίσης και μεταλλικά ορυκτά (αιματίτης, μαγνητίτης, σιδηροπυρίτης, χαλκοπυρίτης).

Οι δολερίτες έχουν επηρεαστεί από διεργασίες χαμηλού έως μέσου βαθμού μεταμόρφωσης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό δευτερογενών προϊόντων σε βάρος των μαγματικών ορυκτών. Τα πλαγιόκλαστα παρουσιάζονται άλλοτε καολινιτωμένα και άλλοτε σωσσυριτωμένα, έχοντας αντικατασταθεί από αλβίτη, επίδοτο και κλινοζωϊσίτη, ενώ συχνά το μεγαλύτερο ποσοστό των κλινοπυρόξενων έχει αντικατασταθεί

από ακτινόλιθο και/ή χλωρίτη. Κατά την εξαλλοίωσή τους, οι κλινοπυρόξενοι συχνά διατηρούν το αρχικό κρυσταλλικό σχήμα τους, δημιουργώντας φαινόμενα ψευδομόρφωσης. Επίσης, συμμετέχει δευτερογενής χαλαζίας, ο οποίος συνήθως πληρώνει κενούς χώρους μεταξύ των υπολοίπων κρυστάλλων. Επιπρόσθετα, ο χαλαζίας και το επίδοτο συχνά καταλαμβάνουν διακρυσταλλικές μικρορωγμές, υποδεικνύοντας

Πίνακας 1. Ορυκτολογική σύσταση (% κ.ο.) των υπό μελέτη δολεριτών από το οφιολιθικό σύμπλεγμα της Πίνδου (τα ποσοστά των ορυκτών βασίζονται στην καταμέτρηση 500 ισομερώς κατανεμημένων σημείων ανά λεπτή-σιλιπνή τομή).

Αριθμός Δείγματος	Pl	Cpx	Act	Chl	Qz	Ep	Op
PVN1a_1	46,0	12,8	25,2	5,0	9,0	1,0	1,0
PVN1a_2	49,4	14,6	21,4	3,6	6,4	1,6	3,0
PVN1a (Μέσος Όρος)	47,7	13,7	23,3	4,3	7,7	1,3	2,0

Pl: πλαγιόκλαστο, Cpx: κλινοπυρόξενος, Act: ακτινόλιθος, Chl: χλωρίτης, Qz: χαλαζίας, Ep: επίδοτο, Op: μεταλλικά ορυκτά.

την εκτεταμένη κυκλοφορία υδροθερμικών διαλυμάτων στα πετρώματα αυτά.

Τα περισσότερα από τα ορυκτολογικά συστατικά των δολεριτών παρουσιάζουν σημάδια τεκτονικής παραμόρφωσης (κυματοειδής κατάσβεση χαλαζία και πλαγιόκλαστων, διακρυσταλλικές μικρορωγμές που διαπερνούν ολόκληρη τη μάζα του πετρώματος). Όσον αφορά στις μικρορωγμές που διασχίζουν το πέτρωμα, οι περισσότερες από αυτές είναι ενδοκρυσταλλικές, ενώ μικρότερο είναι το ποσοστό των διακρυσταλλικών. Χαρακτηριστικό είναι ότι στον ακτινόλιθο, που όπως αναφέρθηκε παραπάνω αποτελεί προϊόν εξαλλοίωσης των κρυστάλλων του κλινοπυρόξενου, παρατηρείται συχνά κάμψη και θραύση κατά μήκος των επιπέδων του σχισμού του (Σχ. 2β).

3.3 Αντοχή σε μοναξονική θλίψη

Η αντοχή σε μοναξονική θλίψη (Uniaxial Compressive Strength) είναι μία από τις σημαντικότερες ιδιότητες που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της μηχανικής αντοχής των πετρωμάτων και αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση που επιβάλλεται σε δοκίμιο πετρώματος μέχρι τη θραύση του. Η δοκιμή αυτή πραγματοποιήθηκε σε κυλινδρικά δοκίμια, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM (1986). Μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής, ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στην προσεκτική απομάκρυνση των δοκιμίων από την υδραυλική πρέσα, ούτως ώστε να μη διαταραχθούν οι νεοσχηματισθείσες μικρορωγμές. Η τιμή αντοχής σε μοναξονική θλίψη, η οποία προέκυψε από το μέσο όρο 6 δειγμάτων, είναι 181,6 MPa, υποδεικνύοντας πετρώματα πολύ υψηλής μηχανικής αντοχής (IAEG 1979).

3.4 Ανάλυση μικρορωγμών

3.4.1 Μεθοδολογία

Για την παρατήρηση των μικρορωγμών χρησιμοποιήθηκαν δύο εικόνες (προσανατολισμένες παράλληλα στον άξονα των κυλινδρικών δοκιμίων) από κάθε περιοχή των λεπτών-στιλπνών τομών, μία που έχει ληφθεί σε λευκό διερχόμενο φως και μία από την ίδια ακριβώς περιοχή που έχει ληφθεί σε κυανό προσπίπτον φως. Η μεγέθυνση λήψης τους ήταν τέτοια ούτως ώστε να είναι ευδιάκριτες οι μικρορωγμές στους μεμο-

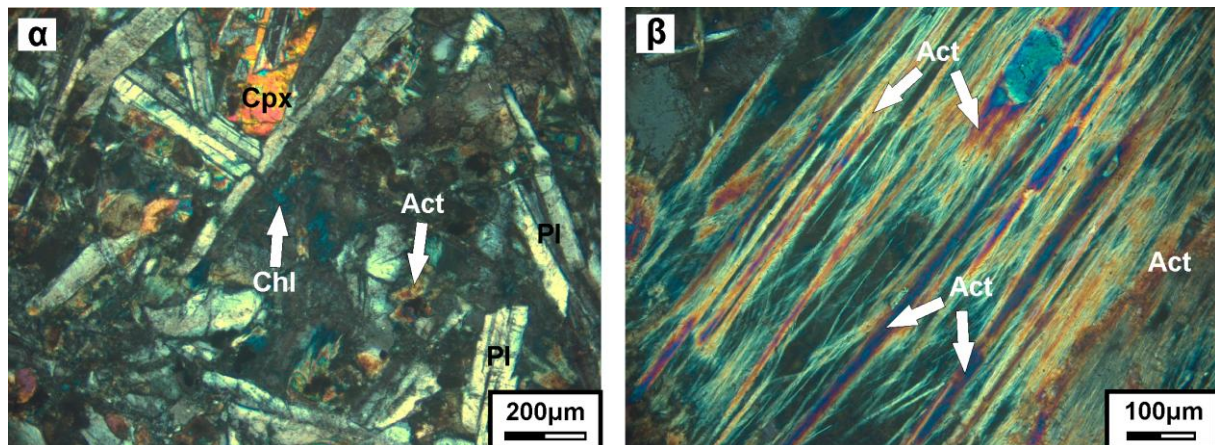
νωμένους κρυστάλλους των υπό μελέτη δολεριτών. Οι εικόνες έχουν ληφθεί από διάφορες περιοχές των λεπτών-στιλπνών τομών, έτσι ώστε τα αποτελέσματα της μελέτης να είναι κατά το δυνατό αντιπροσωπευτικά.

3.4.2 Αποτελέσματα

Στους υπό μελέτη δολερίτες του οφιολιθικού συμπλέγματος της Πίνδου παρατηρήθηκε τοπικά διάχυτος φθορισμός κατά τη διέγερση με κυανό φως. Το φαινόμενο αυτό, πιθανά οφείλεται τόσο στο λεπτοκρυσταλλικό χαρακτήρα των υπό μελέτη δειγμάτων, όσο και στη συμμετοχή σημαντικού ποσοστού δευτερογενών ορυκτών φάσεων σε αυτά, οι οποίες τείνουν να εμποτίζονται διάχυτα με τη φθορίζουσα εποξική ρητίνη. Λαμβάνοντας υπόψη την παρατήρηση αυτή, γίνεται αντιληπτό ότι στο συγκεκριμένο λιθότυπο, οι διάφοροι τύποι μικρορωγμών είναι δυνατό να παρατηρηθούν και όχι να ποσοτικοποιηθούν κατά τη μικροσκοπική εξέταση, δεδομένου ότι στις περισσότερες περιπτώσεις τα όριά τους δεν είναι επακριβώς ορατά. Ωστόσο, οι παρατηρήσεις που έγιναν είναι ιδιαίτερα σημαντικές, καθότι αφορούν στο ρόλο των συμμετεχόντων ορυκτών φάσεων κατά τη δημιουργία και εξάπλωση των μικρορωγμών.

Οι μικρορωγμές που επικρατούν τόσο στα ανέπαφα δείγματα όσο και σε εκείνα που έχουν υποστεί θραύση είναι οι ενδοκρυσταλλικές. Όσον αφορά στις νεοσχηματισθείσες μικρορωγμές, παρατηρήθηκε ότι τείνουν να προσανατολίζονται παράλληλα στον άξονα φόρτισης των δοκιμίων. Επιπρόσθετα, ιδιαίτερα εμφανής είναι η αύξηση της συχνότητας των διακρυσταλλικών κυρίως μικρορωγμών στα δείγματα που έχουν υποστεί θραύση συγκριτικά με τα ανέπαφα δείγματα.

Όπως αναφέρεται και στην κλασική πετρογραφική εξέταση των δολεριτών, παρατηρούνται διάφοροι βαθμοί αντικατάστασης των κρυστάλλων κλινοπυρόξενου από ακτινόλιθο. Στο δείγμα που έχει υποστεί θραύση, ο ακτινόλιθος που έχει σχηματιστεί σε βάρος του κλινοπυρόξενου διασχίζεται από ενδοκρυσταλλικές μικρορωγμές, οι οποίες διευθύνονται κατά μήκος των επιπέδων του σχισμού του. Το χαρακτηριστικό αυτό συμφωνεί με τη θραύση κατά μήκος των επιπέδων (110) του σχισμού του ακτινόλιθου που παρατη-



Σχήμα 2. Εικόνες πολωτικού μικροσκοπίου των υπό μελέτη δολεριτών (διασταυρωμένα nicols), όπου διακρίνεται: (α) ο υποφειτικός ιστός (δείγμα PVN1a_2), (β) η θραύση κατά μήκος των επιπέδων σχισμού του ακτινόλιθου (δείγμα PVN1a_1). (Act: ακτινόλιθος, Chl: χλωρίτης, Cpx: κλινοπυρόξενος, Pl: πλαγιόκλαστο).

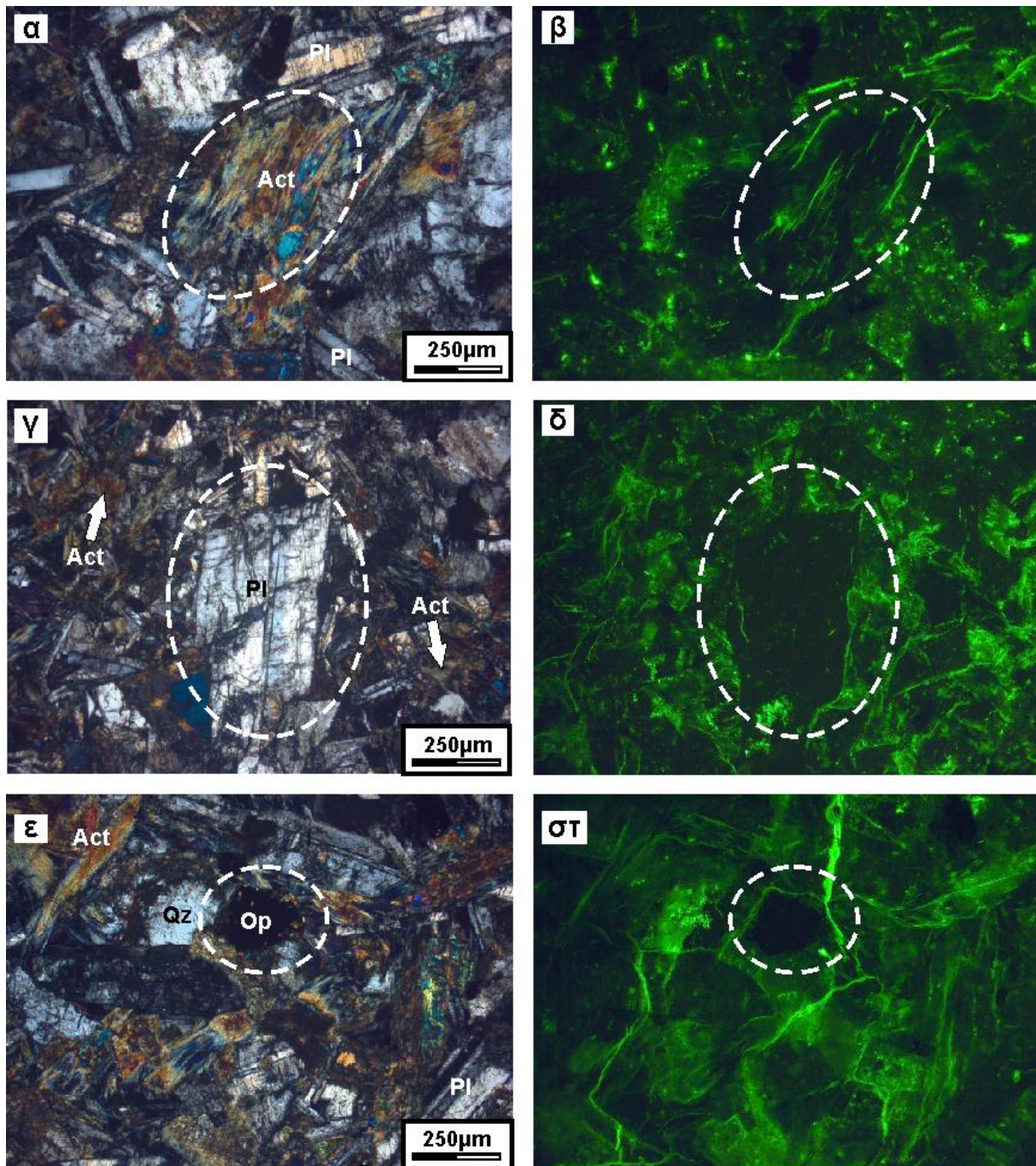
ρήθηκε κατά την κλασική πετρογραφική εξέταση και είναι ιδιαίτερα εμφανές όταν τα επίπεδα σχισμού του ακτινόλιθου είναι υποπαράλληλα στον άξονα φόρτισης των κυλινδρικών δοκιμίων (Σχ. 3α,β). Από την άλλη πλευρά, χαρακτηριστική είναι η απουσία διάχυτου φθορισμού στους υγιείς κρυστάλλους του πλαγιόκλαστου (Σχ. 3γ,δ), ως ένδειξη του μικρού αριθμού μικρορωγμών σε αυτά.

Κατά τη μοναξονική φόρτιση των κυλινδρικών δοκιμίων των δολεριτών, τα μεταλλικά ορυκτά παρουσιάζουν εμφανώς διαφορετική μηχανική συμπεριφορά

από τις πυριτικές ορυκτές φάσεις. Από την εξέταση των λεπτών-στιλπνών τομών σε κυανό προσπίπτον και λευκό διερχόμενο φως, εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι μικρορωγμές σχεδόν πάντοτε απουσιάζουν από τους κόκκους των μεταλλικών ορυκτών, ωστόσο συχνά παρατηρείται ο σχηματισμός τους γύρω από αυτούς (Σχ. 3ε,στ).

4 ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η διερεύνηση του τρόπου σχηματισμού και διάδο-



Σχήμα 3. (α,β) Παρουσία ενδοκρυσταλλικών μικρορωγμών που διευθύνονται παράλληλα στο σχισμό του ακτινόλιθου, (γ,δ): πορφυροκρύσταλλος πλαγιόκλαστου, ο οποίος σε αντίθεση με τις περιβάλλουσες ορυκτές φάσεις δεν παρουσιάζει διάχυτο φθορισμό, (ε,στ): κόκκος μεταλλικού ορυκτού, από τον οποίο απουσιάζουν πλήρως οι μικρορωγμές, ωστόσο παρατηρείται ο σχηματισμός τους γύρω από αυτόν. Όλες οι εικόνες λήφθηκαν από τη λεπτή-στιλπνή τομή του δείγματος που έχει υποστεί θραύση (PVN1a_1) - (α,γ,ε: εικόνες σε λευκό διερχόμενο φως, β,δ,στ: εικόνες σε κυανό προσπίπτον φως – Act: ακτινόλιθος, Op: μεταλλικά ορυκτά, Pl: πλαγιόκλαστο, Qz: χαλαζίας).

σης των μικρορωγμών θεωρείται παράμετρος «κλειδί» για την κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων (Hoek & Bieniawski 1966, Ahrens & Rubin 1993, Miskovsky et al. 2004). Από τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης προκύπτουν νέα στοιχεία όσον αφορά στο ρόλο της πετρογραφίας στην εξέλιξη των μικρορωγμών σε δολερίτες, υπό την επίδραση μοναξονικής φόρτισης.

Οι υπό μελέτη δολερίτες αποτελούν χαμηλού έως μετρίου βαθμού μεταμόρφωσης πετρώματα, στα οποία κυριαρχούν οι ενδοκρυσταλλικές μικρορωγμές, όπως προέκυψε από τη μικροσκοπική παρατήρηση των δειγμάτων πριν και μετά τη μοναξονική θλίψη. Το στοιχείο αυτό συμφωνεί με τις μελέτες των Moore & Lockner (1995), Janssen et al. (2001), Åkesson et al. (2004) και Rigoroulos et al. (2011). Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι οι νεοσχηματισθείσες μικρορωγμές στα δείγματα που μελετήθηκαν τείνουν να προσανατολίζονται παράλληλα στον άξονα φόρτισης. Σε ανάλογα συμπεράσματα έχουν καταλήξει οι Rao & Ramana (1992) και Åkesson et al. (2004). Όπως αναφέρουν οι Kranz (1983) και Rigoroulos et al. (2011), υπό την επίδραση συμπίεστικών τάσεων, η συνένωση των ήδη υπαρχόντων και των νεοσχηματισθέντων ενδοκρυσταλλικών μικρορωγμών οδηγεί σταδιακά στο σχηματισμό των κύριων επιφανειών θραύσης των δοκιμίων των πετρωμάτων. Συνεπώς, είναι εμφανές ότι κατά τη μηχανική καταπόνηση των μεμονωμένων κόκκων του αδρανούς υλικού, οι μικρορωγμές θα αυξάνονται και θα επεκτείνονται, συνιστώντας κύριες επιφάνειες θραύσης, που θα διαχωρίσουν τους κόκκους σε δύο ή περισσότερα τεμάχια.

Η παρατήρηση ότι κατά τη μοναξονική φόρτιση αναπτύσσονται μικρορωγμές που διέρχονται από τα επίπεδα σχισμού του ακτινολίθου συμφωνεί με τα αποτελέσματα της έρευνας των Rigoroulos et al. (2010), οι οποίοι αναφέρουν ότι ο κύριος λόγος της εύθραυστης συμπεριφοράς του ακτινολίθου φαίνεται να είναι ο τέλειος σχισμός του κατά μήκος των επιπέδων (110), σε συνδυασμό με το ότι αναπτύσσεται υπό μορφή ινωδών κρυστάλλων σε βάρος των βραχυπρισματικών κρυστάλλων του κλινοπυρόξενου. Το χαρακτηριστικό αυτό αναμένεται να μειώσει σε κάποιο βαθμό τη μηχανική αντοχή των υπό μελέτη δολεριτικών αδρανών υλικών, δεδομένου ότι οι επιφάνειες σχισμού του ακτινολίθου είναι πιθανό να λειτουργήσουν ως επίπεδα έναρξης σχηματισμού των κύριων επιφανειών θραύσης, οι οποίες θα οδηγήσουν σε θραύση των κόκκων του αδρανούς. Ωστόσο, η συμμετοχή του ακτινολίθου είναι δυνατό να οδηγήσει σε αύξηση της αντίστασης των αδρανών σε στίλβωση, λαμβάνοντας υπόψη ότι η εύθραυστη συμπεριφορά του εν λόγω ορυκτού θα έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή ανανέωση της μικροτραχύτητας των κόκκων του αδρανούς (Rigoroulos et al. 2010). Η επίδραση των επιφανειών σχισμού των ορυκτών στη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων και ο ρόλος τους στη διάδοση των μικρορωγμών έχει διερευνηθεί κατά καιρούς από διάφορους ερευνητές (π.χ. Atkinson et al. 1979, Kronenberg & Shelton 1980, Kudo et al. 1992, Schild et al. 2001). Όσον αφορά στους υγιείς κρυστάλλους πλαγιόκλαστου, η παρουσία μικρού αριθμού μικρορωγμών σε αυτούς υποδεικνύει την αυξημένη μηχανική αντοχή τους.

Ελάχιστες μικρορωγμές παρατηρήθηκαν εντός των μεταλλικών ορυκτών, ωστόσο αρκετά συχνά παρατηρήθηκαν αρκετές μικρορωγμές να διευθύνονται ακτινωτά γύρω από τους κόκκους αυτών, υποδεικνύοντας ότι αποτελούν πιθανά κέντρα έναρξης της διάδοσης των μικρορωγμών (Rigoroulos et al. 2011). Το χαρακτηριστικό αυτό συμφωνεί με τους Åkesson et al. (2004), οι οποίοι σημείωσαν ότι ο αριθμός των μικρορωγμών σε γρανιτικά δείγματα που υπόκεινται σε μοναξονική κυκλική φόρτιση είναι μεγαλύτερος γύρω από μεταλλικά ορυκτά, λόγω του διαφορετικού μέτρου ελαστικότητάς τους σε σχέση με τις περιβάλλουσες ορυκτές φάσεις. Συνεπώς, το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό στους υπό μελέτη δολερίτες είναι δυνατό να αποδοθεί στη διαφορετική μηχανική συμπεριφορά των μεταλλικών ορυκτών συγκριτικά με τα υπόλοιπα πυριτικά ορυκτά.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία διερευνά την επίδραση των πετρογραφικών παραμέτρων στο σχηματισμό και τη διάδοση των μικρορωγμών κατά τη διάρκεια της μοναξονικής φόρτισης σε δολερίτες από το οφιολιθικό σύμπλεγμα της Πίνδου. Η παρατήρηση προσανατολισμένων λεπτών-στιλπνών τομών που έχουν εμποτιστεί με φθορίζουσα εποξική ρητίνη, σε λευκό διερχόμενο και κυανό προσπίπτον φως, καθιστά δυνατή την άμεση παρατήρηση των μικρορωγμών σε σχέση με τις συμμετέχουσες ορυκτές φάσεις. Από τη μικροσκοπική παρατήρηση των υπό μελέτη δειγμάτων προέκυψε ότι η εξέλιξη των διαφόρων τύπων μικρορωγμών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ιδιαίτερα ορυκτολογικά και ιστολογικά τους χαρακτηριστικά.

Οι νεοσχηματισθείσες μικρορωγμές στα δείγματα που μελετήθηκαν τείνουν να προσανατολίζονται παράλληλα στον άξονα φόρτισης. Οι κύριες επιφάνειες θραύσης των δοκιμίων των πετρωμάτων θεωρείται ότι σχηματίζονται από τη συνένωση των ήδη υπαρχόντων και των νεοσχηματισθέντων ενδοκρυσταλλικών μικρορωγμών. Κατά τη μοναξονική φόρτιση αναπτύσσονται μικρορωγμές που διέρχονται από τα επίπεδα σχισμού του ακτινολίθου, υποδεικνύοντας ότι τα κρυσταλλογραφικά αυτά επίπεδα λειτουργούν συχνά ως επιφάνειες αδυναμίας, καθορίζοντας τον τρόπο διάδοσης των μικρορωγμών. Από την άλλη πλευρά, μικρός αριθμός μικρορωγμών εντοπίζονται στους υγιείς κρυστάλλους πλαγιόκλαστου, υποδεικνύοντας την αυξημένη μηχανική αντοχή τους. Οι μικρορωγμές απουσιάζουν από τους κόκκους των μεταλλικών ορυκτών, ωστόσο αρκετά συχνά διευθύνονται ακτινωτά γύρω από αυτούς, λόγω της διαφορετικής μηχανικής συμπεριφοράς των μεταλλικών ορυκτών συγκριτικά με τα υπόλοιπα πυριτικά ορυκτά. Συνεπώς, θεωρείται ότι τα μεταλλικά ορυκτά αποτελούν πιθανά κέντρα έναρξης του σχηματισμού και της διάδοσης των μικρορωγμών.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστούμε το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (ΕΚΤ), Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Εκπαίδευση και Αρχική Επαγγελματική Κατάρτιση (ΕΠΕΑΕΚ II) και ειδικότερα το Πρόγραμμα ΠΥΘΑΓΟΡΑΣ I, για τη χρηματοδότηση αυτού του έργου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ρηγόπουλος Ι., Πομώνης Π., Τσικούρας Β. & Χατζηπαναγιώτου Κ. 2006. Συγκριτική αξιολόγηση δολεριτών από τα οφιολιθικά πετρώματα της Πίνδου και του Βούρινου για χρήση τους ως αδρανών υλικών. Τεχν. Χρον., Επιστ. Εκδ. ΤΕΕ, 1, 3, 49-61.
- Ρηγόπουλος Ι., Πομώνης Π., Τσικούρας Β., Χατζηπαναγιώτου Κ. & Στουρνάρας Κ. 2008. Συγκριτική μελέτη των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων ως αδρανών υλικών από το οφιολιθικό σύμπλεγμα της Πίνδου (ΒΔ Ελλάδα). Πρακ. 1^{ου} Παν. Συνεδρίου Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ, Αθήνα, 1-13.
- Τσικούρας Β., Πομώνης Π., Ρηγόπουλος Ι. & Χατζηπαναγιώτου Κ. 2005. Διερεύνηση καταλληλότητας βασικών οφιολιθικών πετρωμάτων της περιοχής Μικροκλεισούρας Γρεβενών για χρήση τους ως αντιολισθηρών αδρανών και σκύρων βάσης σιδηροτροχιών. Πρακ. 2^{ου} Συνεδρίου της Επιτροπής Οικονομικής Γεωλογίας, Ορυκτολογίας και Γεωχημείας, Θεσσαλονίκη, 347-356.
- Ahrens T.J. & Rubin A.M. 1993. Impact-induced tensional failure in rock. *J Geophys Res*, 98, 1185-203.
- Åkesson U., Hansson J. & Stigh J. 2004. Characterisation of microcracks in the Bohus granite, western Sweden, caused by uniaxial cyclic loading. *Eng. Geol.*, 72, 131-142.
- Åkesson U., Lindqvist J.E., Göransson M. & Stigh J. 2001. Relationship between texture and mechanical properties of granites, central Sweden, by use of image-analysing technique. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 60, 277-284.
- ASTM D-2938 1986. Standard test method of unconfined compressive strength of intact rock core specimens. Annual Book of Standards, 4.08, Philadelphia.
- Atkinson B.K., Rutter E.H., Sibson R.H. & White S.H. 1979. Some specific experimental and field studies pertaining directly to the mechanisms of seismic and aseismic faulting. Final Technical Report from Geology Department, Imperial College of Science and Technology to the U.S. National Earthquake Hazards Reduction Program.
- Brattli B. 1992. The influence of geological factors on the mechanical properties of basic igneous rocks used as road surface aggregates. *Eng. Geol.*, 33, 31-44.
- Eberhardt E., Stead D. & Stimpson B. 1999. Quantifying pre-peak progressive brittle fracture damage in rock during uniaxial compression. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 36, 361-380.
- Hartley A. 1974. A review of the geological factors influencing the mechanical properties of road surface aggregates. *Q. J. Eng. Geol.*, 7, 69-100.
- Hoek E. & Bieniawski Z.T. 1966. Fracture propagation mechanism in hard rock. Proceedings of the First Congress of the International Society of Rock Mechanics, Bertrand, Lisboa, Portugal, 1, 243-249.
- IAEG 1979. Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. Part 1, rock and soil materials. *IAEG Bulletin*, 19, 364-371.
- Janssen C., Wagner F.C., Zang A. & Dresen G. 2001. Fracture process zone in granite: a microstructural analysis. *Int. J. Earth Sciences (Geol. Rundsch.)*, 90, 46-59.
- Jones G. & Robertson A.H.F. 1991. Tectono-stratigraphy and evolution of the Mesozoic Pindos ophiolite and related units, northwestern Greece. *J. Geol. Soc.*, 148, 267-288.
- Kemp A.E.S. & McCaig A.M. 1984. Origins and significance of rocks in an imbricate thrust zone beneath the Pindos ophiolite, northwestern Greece. In: Dixon, J.E., Robertson, A.H.F. (Eds), *The Geological Evolution of the Eastern Mediterranean*, Geol. Soc., London, Spec. Publ. 17, pp. 569-580.
- Kranz R.L. 1983. Microcracks in rocks: a review. *Tectonophysics*, 100, 449-480.
- Kronenberg A.K. & Shelton G.L. 1980. Deformation microstructures in experimentally deformed Maryland diabase. *J. Struct. Geol.*, 2, 341-353.
- Kudo Y., Sano O., Murashige N. & Mizuta Y. 1992. Stress-induced crack path in Aji granite under tensile stress. *Pure and Applied Geophysics*, 138, 641-656.
- Miskovsky K., Tabora Duarte M., Kou S.Q. & Lindqvist P-A. 2004. Influence of the mineralogical composition and textural properties on the quality of coarse aggregates. *J. Mater. Eng. Perform.*, 13, 144-50.
- Moore D.E. & Lockner D.A. 1995. The role of microcracking in shear-fracture propagation in granite. *J. Struct. Geol.*, 17, 95-114.
- Nordtest Standard NT Build 361, 1991.
- Pomonis P., Rigopoulos I., Tsikouras B. & Hatzipanagiotou K. 2007. Relationships between petrographic and physico-mechanical properties of basic igneous rocks from the Pindos ophiolitic complex, NW Greece. *Proc. 11th Congress Geol. Soc. Greece, XXXVII, Athens*, 947-958.
- Räisänen M. 2004. Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaal-litti complex, southeastern Finland. *Eng. Geol.*, 74, 197-211.
- Ramana Y.V., Gogte B.S. & Sarma K.V.L.N.S. 1986. Physical properties of Indus ophiolites from Kashmir Himalaya. *Phys. Earth Planet. Int.*, 43, 104-122.
- Rao M.V.M.S. & Ramana Y.V. 1992. A study of progressive failure of rock under cyclic loading by ultrasonic and AE monitoring techniques. *Rock Mech. Rock Eng.*, 237-251.
- Rigopoulos I., Tsikouras B., Pomonis P. & Hatzipanagiotou K. 2010. The influence of alteration on the engineering properties of dolerites: The examples from the Pindos and Vourinos ophiolites (northern Greece). *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 47, 69-80.
- Rigopoulos I., Tsikouras B., Pomonis P. & Hatzipanagiotou K. 2011. Microcracks in ultrabasic rocks under uniaxial compressive stress. *Eng. Geol.*, 117 (1-2), 104-113.
- Schild M., Siegesmund S., Vollbrecht A. & Mazurek M. 2001. Characterization of granite matrix porosity and pore-space geometry by in situ and laboratory methods. *Geophys. J. Int.*, 146, 111-125.
- Shen B., Stephansson O., Einsteien H. & Ghahreman B. 1995. Coalescence of fractures under shear stresses in experiments. *J. Geophys. Res.*, 100 (B4), 5975-5990.
- Tamrakar N.K., Yokota S. & Shrestha S.D. 2007. Relationships among mechanical, physical and petrographic properties of Siwalik sandstones, Central Nepal Sub-Himalayas. *Eng. Geol.*, 90, 105-123.

