

## ΜΕΛΕΤΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΩΝ ΣΕ ΑΛΠΙΝΟΤΥΠΟΥΣ ΧΑΛΑΖΙΕΣ ΑΠΟ ΔΙΑΚΛΑΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΕΝΤΕΛΙΚΟΥ ΟΡΟΥΣ

Κίλιας Σ., Βουδούρης Π., Κατερινόπουλος Α., Καβούρη Σ.

Καποδιστριακό Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστημιούπολη, 15784, Αθήνα

*kilias@geol.uoa.gr, voudouris@geo.uoa.gr, akaterin@geo.uoa.gr, skavouri@yahoo.gr*

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ιδιόμορφοι κρύσταλλοι χαλαζία, μήκους μέχρι 50 cm, αναπτύσσονται επάνω σε συμπαγές γαλακτόχρωμο χαλαζιακό υπόβαθρο, μέσα σε φλέβες, οι οποίες φιλοξενούνται σε ορθογενεσίους του πολυμεταμορφικού συστήματος του Πεντελικού Όρους. Οι φλέβες πληρούν πτεροειδείς διακλάσεις με διευθύνσεις ΒΑ-ΝΔ ή/και ΒΔ-ΝΑ, που συνδέονται με την  $D_p$  παραμορφωτική φάση Αλπικής ηλικίας. Ρευστά εγκλείσματα στο χαλαζιακό υλικό μελετώνται με σκοπό τη διερεύνηση των φυσικοχημικών συνθηκών γένεσής του και τη συσχέτισή του με την γεωτεκτονική εξέλιξη της περιοχής. Οι θερμοκρασίες ομογενοποίησης ( $T_h$ ) στην υγρή φάση κυμαίνονται μεταξύ 175 και 240 °C με μέγιστο συχνότητας στους 180-200 °C. Οι θερμοκρασίες τελικής τήξης πάγου ( $T_{m,ice}$ ) κυμαίνονται μεταξύ -0.1 και -14.5 °C και αντιστοιχούν σε αλατότητες μεταξύ 0.2 και 23 κβ% ισοδ. NaCl, στο σύστημα  $H_2O-NaCl$ . Η συσχέτιση  $T_h$  και αλατότητας, υποδεικνύει κρυστάλλωση του χαλαζία σε συνθήκες βρασμού, σε θερμοκρασίες 150-220 °C και πιέσεις <1.5 Kbar. Τα αποτελέσματα της εργαστηριακής μελέτης υποδεικνύουν ότι το χαλαζιακό υλικό που μελετήθηκε αποτέθηκε από υδροθερμικά διαλύματα στα οποία πιθανόν να συμμετείχε μετεωρικό νερό και συνδέονται με τα τελευταία στάδια ανάδρομων μεταμορφικών φαινομένων και διεργασιών αποσυμπίεσης και ανύψωσης των μεταμορφικών πετρωμάτων του Πεντελικού όρους.

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η μελέτη αλπινότυπων κρυστάλλων χαλαζία που αναπτύχθηκαν σε πτεροειδείς διακλάσεις μεταμορφωμένων πετρωμάτων του Πεντελικού Όρους. Η μελέτη αυτή αποσκοπεί στην εύρεση των συνθηκών γένεσης του χαλαζία και στην ένταξή τους στην γενικότερη γεωτεκτονική εξέλιξη του Πεντελικού όρους και πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο των Ρευστών Εγκλεισμάτων.

Αφορμή για την ενασχόληση με το θέμα ήταν η εύρεση ευμεγεθών κρυστάλλων και η ερώτηση για την πιθανή ή μη σχέση τους με αντίστοιχων των Άλπεων, που επί χρόνια ελκύουν το επιστημονικό ενδιαφέρον.

Ως αλπινότυπες ορυκτογενέσεις σε διακλάσεις ορίζονται σχηματισμοί που συνδέονται με τα τελευταία στάδια της εξέλιξης της Αλπικής ορογενετικής φάσης, ανά τον κόσμο, πέραν της στενής περιοχής των Άλπεων (Niedermayr 1993).

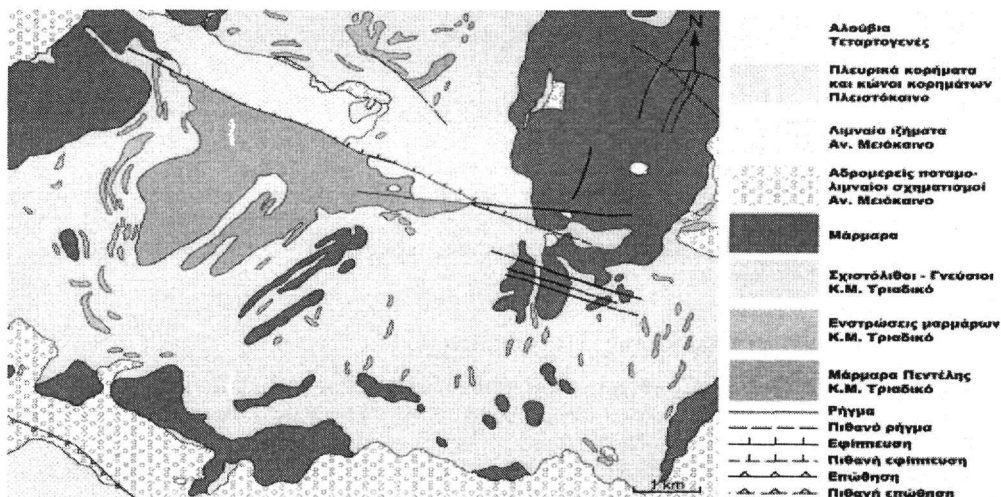
### 2. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΤΟΠΟΘΕΤΗΣΗ

Η Αττικοκυκλαδική αποτελεί ένα σύμπλεγμα μεταμορφωμένων πετρωμάτων, αποτέλεσμα των ορογενετικών διαδικασιών που είναι υπεύθυνες για την ανύψωση των Ελληνίδων.

Έχουν διαπιστωθεί τρία μεταμορφικά γεγονότα. Η πρώτη μεταμορφική φάση M1 είναι κυανοσχιστολιθικού τύπου (HP/LT), ηλικίας 40-50 M.a. Ακολουθεί η M2, πρασινοσχιστολιθικού χαρακτήρα (LP/HT) με ηλικία 20-25 M.a. Τέλος, η άνοδος γρανιτικών μαγμάτων προκάλεσε, κατά το Ανώτερο Μειόκαινο, την τοπικού χαρακτήρα θερμική μεταμόρφωση M3.

Αυτά τα φαινόμενα μεταμόρφωσης οφείλονται στην σύγκρουση της Αφρικανικής πλάκας με το Ευρασιατικό περιθώριο, μετά την υποβύθιση και το κλείσιμο του ωκεανού Πίνδου - Κυκλάδων. Στην συνέχεια, στην ευρύτερη περιοχή έδρασαν εφελκυστικές τάσεις που προκάλεσαν την απολέπνωση του φλοιού του Αιγαίου και την άνοδο των μεταμορφωμένων συμπλεγμάτων στην επιφάνεια.

Μέρος της Αττικοκυκλαδικής είναι και οι μεταμορφωμένοι σχηματισμοί του Πεντελικού όρους. Παρά το μεγάλο αριθμό δημοσιεύσεων, η γεωλογία της περιοχής παραμένει υπό συζήτηση.



Σχήμα 1. Γεωλογικός χάρτης του κεντρικού Πεντελικού (τροποποιημένος από Κατσικάτσος 2002)

Οι έρευνες των τελευταίων ετών (Λόζιος 1993, Kessel 1996, Κατσικάτσος 2002) συγκλίνουν στην θεώρηση δύο γεω-εκτονικών ενότητων στην περιοχή. Η σχετικά αυτόχθονη ενότητα με κύρια φάση μεταμόρφωσης την πρασινοσχιστολιθική, και η σχετικά αλλόχθονη, υπερκείμενη τεκτονικά, με κύρια φάση την κυανοσχιστολιθική. Οι πετρολογικοί σχηματισμοί που απαντούν στην πρώτη είναι μεγάλοι όγκοι μαρμάρων καθώς και ένα σχιστολιθικό σύμπλεγμα, που εκτός από σχιστόλιθους περιέχει ορθογνήσιους, μεταφαισειακά πετρώματα, σερπεντινίτες, αμφιβολίτες, και ενστρούσεις μαρμάρων. Στην αλλόχθονη ενότητα επικρατούν σχιστόλιθοι και φυλλίτες, με χαρακτηριστική παρουσία γλαυκοφανούς στις σχετικές παραγενέσεις. Η συμμετοχή των μαρμάρων είναι μικρή.

Η δομή του Πεντελικού όρους σε μακρο-κλίμακα είναι μια θολοειδής πτυχή με διεύθυνση άξονα ΒΔ-ΝΑ και βύθιση άλλοτε προς ΒΔ και άλλοτε προς ΝΑ (Μαριολάκος & Παπανικολάου 1973). Φαίνεται πως και οι δύο ενότητες, η αυτόχθονη και η αλλόχθονη, έχουν κοινή παραμορφωτική πορεία (Λόζιος 1993, Kessel 1990).

Αναγνωρίστηκαν τρεις κύριες παραμορφωτικές φάσεις: η Ds, η Dp και η Df (Λόζιος 1993). Η παλαιότερη, Ds, συνδέεται με την πρόδρομη μεταμόρφωση HP/LT που στη συνέχεια εξελίσσεται στην κύρια φάση LP/HT. Η ηλικία της είναι Av. Ηώκαινο – Κ. Μ. Μειόκαινο. Η Dp παραμορφωτική φάση, Μειοκαινικής ηλικίας, ξεκινά με πλαστικό χαρακτήρα παραμόρφωσης και μεταβαίνει σε πλαστικο-θραυσιγενή. Η εμφάνισή της δεν συνδέεται με φαινόμενα μεταμόρφωσης, αλλά με ανακρυστάλλωση τοπικού χαρακτήρα σε συγκεκριμένες ζώνες. Η Df είναι θραυσιγενούς χαρακτήρα, με ρήγματα και διακλάσεις και αρχίζει το Av. Μειόκαινο.

Οι Μαριολάκος & Πυπανικολάου (1973) υποστηρίζουν ότι η δημιουργία των διακλάσεων είναι αποτέλεσμα της παραμορφωτικής φάσης που συνδέεται με τις εφιπτεύσεις, δηλαδή με ηλικία αρχαιότερη από το Νεογένης. Ακολουθούν τις πτυχογόνες φάσεις και προηγούνται των ρηματογόνων.

Οι περοειδείς διακλάσεις της Dp παραμορφωτικής φάσης είναι στοιχεία του τεκτονικού ιστού που υποδεικνύουν τη μετάβαση από τον πλαστικό στο θραυσιγενή χαρακτήρα παραμόρφωσης,

δηλαδή την ανύψωση από τον ενδιάμεσο στον ανώτερο τεκτονικό όροφο. Εμφανίζονται συχνότερα στους σχιστολιθικούς πετρολογικούς σχηματισμούς, σε σχέση με τα μάρμαρα.

### 3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η δειγματοληψία έγινε σε 5 διαφορετικές εμφανίσεις. Από τα 46 δείγματα που συλλέχθηκαν, επιλέχθηκαν 10 για την παρασκευή λεπτών διπλοστιλβωμένων τομών. Κριτήριο για την επιλογή, αποτέλεσε η κάλυψη όλων των μορφολογικών τύπων του χαλαζία. Πραγματοποιήθηκαν περισσότερες από 300 μικροθερμομετρικές μετρήσεις ρευστών εγκλεισμάτων τόσο σε συμπαγή γαλακτώδη χαλαζία, όσο και σε διαφανείς κρυστάλλους, με σκοπό να διερευνηθούν οι φυσικοχημικές συνθήκες (P-V-T-X) σχηματισμού τους.

Για τη μελέτη των ρευστών εγκλεισμάτων χρησιμοποιήθηκε ο αναλυτικός εξοπλισμός του Τομέα Οικονομικής Γεωλογίας-Γεωχημείας του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

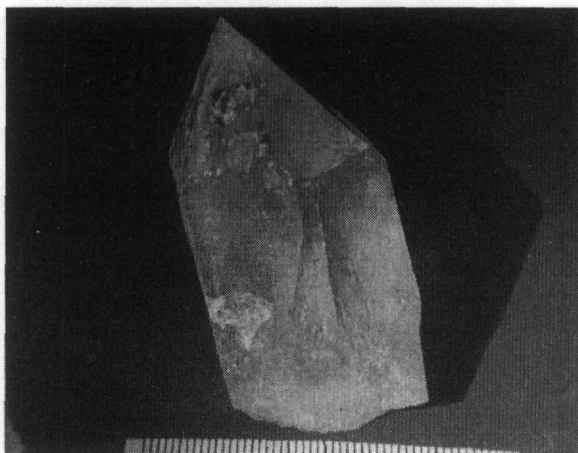
Οι μικροθερμομετρικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με σύστημα θέρμανσης – ψύξης LINKAM THMS600/TP92 τοποθετημένο σε μικροσκόπιο Leitz Orthoplan. Ως standar χρησιμοποιήθηκαν φυσικά εγκλείσματα CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O και διάφοροι οργανικοί διαλύτες. Η ακρίβεια των μετρήσεων προσδιορίστηκε στους ± 0.5 °C για το θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ -70 έως +30 °C, και ± 2-3 °C για μεγαλύτερες θερμοκρασίες.

### 4. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΧΑΛΑΖΙΑΚΩΝ ΦΛΕΒΩΝ

Οι περισσότερες χαλαζιακές φλέβες αναπτύσσονται σαν φακοειδή σώματα κάθετα στην επικρατούσα σχιστότητα και είναι επιμηκείς ή σιγμοειδούς μορφής. Συνήθως αντιστοιχούν σε συστήματα εφελκυστικών διακλάσεων με επ εcheilon διάταξη. Το πάχος τους κυμαίνεται μεταξύ μερικών cm και 1m, ενώ το μήκος τους φθάνει τα 5m. Χαρακτηριστικό της εξέλιξης των χαλαζιακών φλεβών είναι μία πρώτη απόθεση συμπαγούς, γαλακτώδους χαλαζία και μία μετέπειτα ανάπτυξη ιδιόμορφων κρυστάλλων.

Μακροσκοπικά ο χαλαζίας εμφανίζεται με τη μορφή ιδιόμορφων πρισματικών κρυστάλλων διαφανών, ημιδιαφανών (Σχ. 2) ή γαλακτόχρωμων, οι οποίοι βρίσκονται στο εσωτερικό εγκοίλων και αναπτύσσονται πάνω σε μία συμπαγή, γαλακτόχρωμη χαλαζιακή μάζα. Κάποιοι από αυτούς έχουν αποκοπεί και βρίσκονται στο εσωτερικό του εγκοίλου, μέσα σε πολύ λεπτόκοκκο αργιλικό υλικό (κολυμβητές κρύσταλλοι). Συχνά έχουν το σχήμα σκήπτρου ή είναι διπλαπόληκτοι, με ύψος από 0.5 έως και 50 cm. Παρατηρήθηκαν επίσης οι ποικιλίες ορεία κρύσταλλος και καπνίας.

Σύνδρομα ορυκτά του χαλαζία είναι ο σερικίτης, ο σιδηροπυρίτης και το ρουτίλιο, σε συνολική αναλογία <0,5 % του όγκου των εγκοίλων. Οι φλέβες συνοδεύονται από υδροθερμική εξαλλοίωση (σερικιτίωση) του πλευρικού πετρώματος (ορθογενέσιος).



Σχήμα 2. Ιδιόμορφος πρισματικός κρύσταλλος χαλαζία

Σε μακροσκοπική κλίμακα δεν διακρίνονται ρωγμές ή σπασίματα και γενικότερα δεν παρατηρείται τεκτονική καταπόνηση στους ιδιόμορφους κρυστάλλους. Ακόμα και σε μικροσκοπική κλίμακα τα σπασίματα στο εσωτερικό των κρυστάλλων είναι σπάνια και σε τυχαίο προσανατολισμό. Αντίθετη εικόνα εμφανίζει στο μικροσκόπιο η συμπαγής γαλακτόχρωμη μάζα, η οποία παρουσιάζει μέσο- έως μικροκρυσταλλική μορφή, ως αποτέλεσμα τοπικών κατακλάσεων και ανακρυστάλλωσης (Σχ. 3α). Τα όρια μεταξύ των κρυστάλλων είναι ευθύγραμμα. Διακρίνονται τουλάχιστον δύο συστήματα μικρορωγμών, με μεγάλη πυκνότητα, τα οποία διαπερνούν τα όρια των κρυστάλλων (Σχ. 3β).

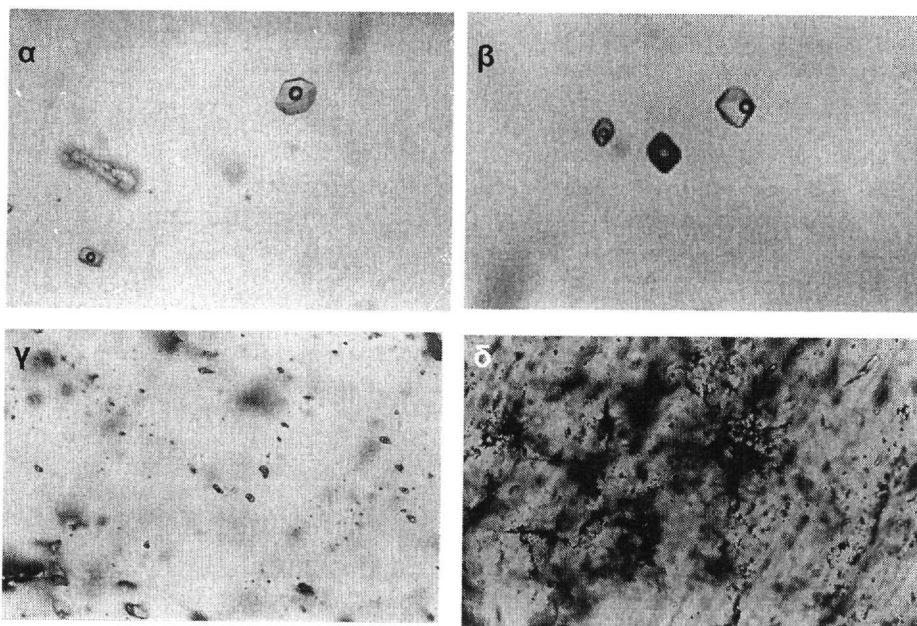
## 5. ΡΕΥΣΤΑ ΕΓΚΛΕΙΣΜΑΤΑ

### 5.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Στη πλειοψηφία τους τα εγκλείσματα, είναι υδάτινα, διφασικά υγρού-αερίου (L-V), πλούσια σε υγρή φάση ( $L > V < 25\%$  κ.ο.) με διαμέτρους από 10 έως 60  $\mu\text{m}$ . Λιγότερο συχνά συναντούνται μονοφασικά αέρια εγκλείσματα, καθώς και εγκλείσματα με κυμαινόμενη αναλογία υγρής/αέριας φάσης (Σχ. 4β).

Τα ρευστά εγκλείσματα στο γαλακτώδη χαλαζία έχουν ακανόνιστο ή ωοειδές σχήμα και εμφανίζονται κατά προτίμηση κατά μήκος μικρορωγμών (δευτερογενή), σε αντίθεση με εκείνα στους ιδιόμορφους χαλαζίες, τα οποία αναπτύσσονται κυρίως κατά μήκος των ζωνών ανάπτυξης του κρυστάλλου (Σχ. 4γ), αλλά και σε τυχαία τρισδιάστατη κατανομή καθώς και σε επουλωμένες ενδοκρυσταλλικές μικρορωγμές. Έχουν κυρίως ωοειδές σχήμα και συχνά έχουν σχήμα αρνητικού κρυστάλλου (Σχ. 4α) (πρωτογενή κατά Roedder 1984).

Τοπικά παρατηρήθηκαν «παρηκμασμένα - σπασμένα» με φυσικό τρόπο εγκλείσματα (naturally decrepitated) που έχουν υποστεί επανεξισορρόπηση (re-equilibration) (Σχ. 4δ). Ο όρος αυτός εκφράζει οποιαδήποτε προφανή αλλαγή στην πυκνότητα και/ή την υφή των εγκλεισμάτων (Vityk et al. 1995).



Σχήμα 4. Τύποι ρευστών εγκλεισμάτων: α. Υδάτινα, διφασικά εγκλείσματα υγρού-αερίου πλούσια σε υγρή φάση σχήματος αρνητικού κρυστάλλου. β. Συνύπαρξη εγκλεισμάτων πλούσιων σε υγρή και αέρια φάση. γ. Ρευστά εγκλείσματα που οριοθετούν ζώνες ανάπτυξης σε ιδιόμορφο χαλαζία. δ. Παρηκμασμένα – σπασμένα εγκλείσματα σε γαλακτόχρωμο συμπαγή χαλαζία.

### 5.2 ΜΙΚΡΟΘΕΡΜΟΜΕΤΡΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

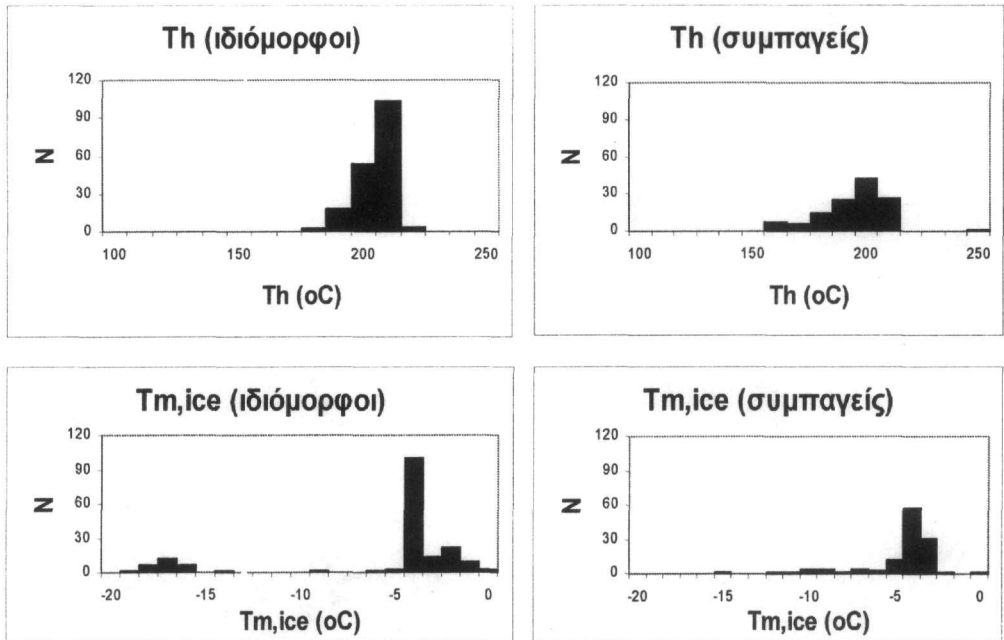
Έγιναν συνολικά περισσότερες από 300 μικροθερμικές μετρήσεις σε ρευστά εγκλείσματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τα υδροθερμικά διαλύματα που απέθεσαν τους ιδιόμορφους κρυστάλλους ή επούλωσαν τις μικρορωγμές στη συμπαγή χαλαζιακή μάζα.

Ιδιόμορφοι κρύσταλλοι: Οι ευτηκτικές θερμοκρασίες τήξης ( $T_{e,ice}$ ) κυμαίνονται μεταξύ  $-25,5$  και  $-20,0$   $^{\circ}\text{C}$ , υποδεικνύοντας NaCl και KCl ως τα κυρίαρχα άλατα σε διάλυση. Οι θερμοκρασίες τελικής τήξης πάγου ( $T_{m,ice}$ ) κυμαίνονται μεταξύ  $-19$  και  $0,3$   $^{\circ}\text{C}$ , με διάμεσο  $-4,2$   $^{\circ}\text{C}$ . και αντιστοιχούν σε αλατότητες μεταξύ 0 και 21,7 wt% NaCl, με διάμεσο 6,7 κ.β.% ισοδ. NaCl στο σύστημα  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$

(Bodnar 1993). Οι θερμοκρασίες ομογενοποίησης (Th) πάντοτε στην υγρή φάση, κυμαίνονται μεταξύ 155.3 και 218.6 °C με μέγιστη συγκέντρωση στο διάστημα 180-200 °C (Σχ. 5).

Συμπαγής χαλαζίας: Οι ευτηκτικές θερμοκρασίες τήξης (T<sub>e,ice</sub>) είναι παρόμοιες με εκείνες των ιδιόμορφων κρυστάλλων και κυμαίνονται μεταξύ -25,0 και -20,0 °C. Οι θερμοκρασίες τελικής τήξης πάγου (T<sub>m,ice</sub>) κυμαίνονται από -15,6 έως -0,4 °C, με διάμεσο -4,4 °C, και αντιστοιχούν σε αλατότητες μεταξύ 0,7 και 19,1 wt% NaCl, με διάμεσο 7 wt% NaCl. Οι θερμοκρασίες ομογενοποίησης (Th) στην υγρή φάση βρίσκονται μεταξύ 164 και 240,2 °C, με μέγιστη συγκέντρωση στο ίδιο διάστημα με τα εγκλείσματα στους ιδιόμορφους χαλαζίες (180 – 200 °C) (Σχ.5).

Φαινόμενα τήξης ενώσεων clathrates δεν παρατηρήθηκαν, γεγονός που σημαίνει ότι τα εγκλείσματα που μελετήθηκαν μπορεί να περιέχουν έως 2.2 molal CO<sub>2</sub> (Hedenquist & Henley 1985).



Σχήμα 5. Ιστογράμματα θερμοκρασιών τήξης πάγου (T<sub>m,ice</sub>) και θερμοκρασιών ομογενοποίησης (Th) για τους ιδιόμορφους κρυστάλλους και τον συμπαγή χαλαζία

## 6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα διαγράμματα συσχέτισης θερμοκρασίας ομογενοποίησης (Th) και αλατότητας (Σχ. 6), προκύπτουν τρεις πιθανές πορείες εξέλιξης των υδροθερμικών διαλυμάτων, που συνδέονται με τη γένεση του χαλαζία και οι οποίες μπορεί να έδρασαν μεμονωμένα ή διαδοχικά: ανάμειξης, απλής ψύξης, και βρασμού. Δεν παρατηρήθηκε καμία διαφοροποίηση στις μικροθερμομετρικές ιδιότητες μεταξύ των ρευστών εγκλεισμάτων του συμπαγούς και του ιδιόμορφου χαλαζία, καθώς και από βάση προς την κορυφή των ιδιόμορφων κρυστάλλων.

Η πορεία ανάμειξης που διαπιστώθηκε, ερμηνεύεται ως αντίδραση μεταξύ ενός ανερχόμενου μητρικού υδροθερμικού διαλύματος, θερμοκρασίας >200 °C και αλατότητας 4-5 wt% ισοδ. NaCl, με νερό πολύ χαμηλής αλατότητας και χαμηλής θερμοκρασίας, πιθανόν μετεωρικό νερό.

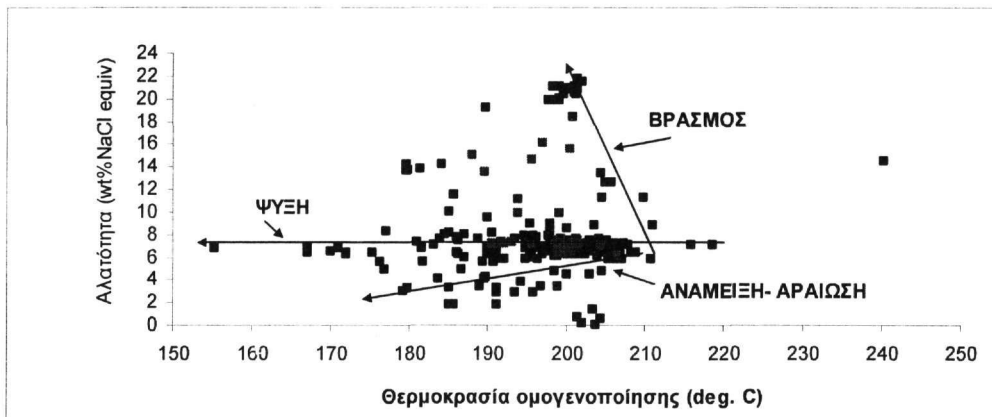
Η πορεία απλής ψύξης εκφράζει την κρυστάλλωση του χαλαζία στα τελευταία στάδια της υδροθερμικής δραστηριότητας.

Η πορεία αύξησης της αλατότητας από 4-5 έως 19-20 wt% ισοδ. NaCl με παράλληλη ψύξη από >220 έως τους 150 °C, σε συνδυασμό με τη συνύπαρξη εγκλεισμάτων πλουσιών σε υγρή και αέρια φάση (Σχ. 4β) ερμηνεύεται ως αποτέλεσμα βρασμού. Η διαπίστωση του φαινομένου του βρασμού

υποδεικνύει ότι οι θερμοκρασίες ομογενοποίησης 150-220 °C αντιπροσωπεύουν τις πραγματικές θερμοκρασίες απόθεσης των κρυστάλλων. Με βάση τον υπολογισμό των ισόχρων ευθειών των εγκλεισμάτων που μελετήθηκαν (Zhang & Frantz 1987), οι πιέσεις που αντιστοιχούν στις θερμοκρασίες ομογενοποίησης, άρα και οι πιέσεις κρυστάλλωσης του χαλαζία είναι μικρότερες του 1.5 Kbar.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι πορείες εξέλιξης των υδροθερμικών διαλυμάτων που προαναφέρθηκαν, δεν συνυπάρχουν σε όλες τις εμφανίσεις που μελετήθηκαν, φαινόμενο που έχει διαπιστωθεί και σε αντίστοιχες εμφανίσεις των κεντρικών Ελβετικών Άλπεων (Mullis et al. 1994).

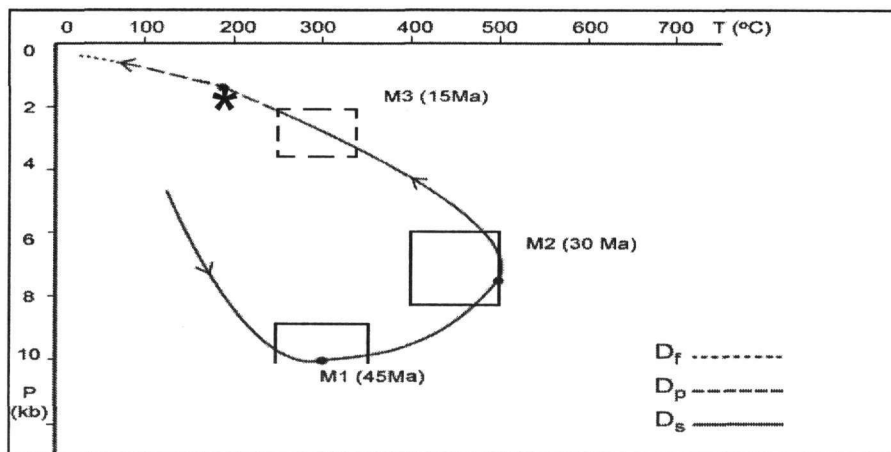
Τα δευτερογενή «παρηκμασμένα – σπασμένα» εγκλείσματα (decrepitated) υποδεικνύουν συνθήκες αποσυμπίεσης των εγκλεισμάτων, που πιθανά συνδέονται με την γενική ανύψωση μετα-



Σχήμα 6. Συγκεντρωτικό διάγραμμα θερμοκρασίας ομογενοποίησης- αλατότητας για το σύνολο των ρευστών εγκλεισμάτων

μορφικών συμπλεγμάτων (Kiliias 2001).

Με βάση τις συνθήκες κρυστάλλωσης P-T που υπολογίστηκαν και την παρουσία των δευτερογενών «παρηκμασμένων / – σπασμένων» εγκλεισμάτων, συμπεραίνεται ότι η κρυστάλλωση του αλπινότυπου χαλαζία συνδέεται με τα τελευταία στάδια ανάδρομων μεταμορφικών φαινομένων και τις διεργασίες ανύψωσης των μεταμορφικών πετρωμάτων του Πεντελικού όρους (Σχ. 7).



Σχήμα 7. Προβολή των συνθηκών P-T παγίδευσης ρευστών εγκλεισμάτων (\*) και κρυστάλλωσης χαλαζία, στο διάγραμμα εξελικτικής μεταβολής συνθηκών P-T-t στην περιοχή μελέτης των KESSEL (1990) και ΛΟΖΙΟΣ (1993).



Τα εγκλείσματα αυτά ερμηνεύονται ως αποτύπωση της εισχώρησης μετεωρικών διαλυμάτων κατά τα τελευταία στάδια ενός εφελκυστικού, θραυσιγενούς τεκτονικού καθεστώτος, που συνδέεται με ανύψωση μεταμορφικών συμπλεγμάτων (Nesbit & Muelenbachs 1995, Kilias 2001). Τα τεκτονικό αυτό περιβάλλον ευνοεί αφενός την εκτόνωση ανερχομένων διαλυμάτων με συνέπεια το βρασμό και αφετέρου επιτρέπει την εισχώρηση μετεωρικού νερού σε σημαντικό βάθος στο φλοιό και την ανάμιξή του με τα ανερχόμενα διαλύματα.

Το συζυγές σύστημα πτεροειδών διακλάσεων, που φιλοξενεί το χαλαζιακό υλικό που μελετήθηκε, συνδέεται με την παραμορφωτική φάση Dp, Μειοκαινικής ηλικίας, η οποία ξεκινά με πλαστικό χαρακτήρα παραμόρφωσης και μεταβαίνει σε πλαστικο-θραυσιγενή κατά τη διάρκεια της ανύψωσης των μεταμορφικών συμπλεγμάτων (Σχ. 7).

Τα χαρακτηριστικά P-V-T-X των ρευστών εγκλεισμάτων που μελετήθηκαν, είναι απολύτως αντίστοιχα με εκείνα που χαρακτηρίζουν υδροθερμικά διαλύματα, τα οποία απέθεσαν χαλαζία σε Αλπικές διακλάσεις, και συνδέονται με φαινόμενα ανάδρομης μεταμόρφωσης και τεκτονικής ανύψωσης στις Ελβετικές Άλπεις (Mullis et al. 1994).

Επί πλέον, τα γενικότερα γεωτεκτονικά και υδροθερμικά χαρακτηριστικά P-V-T-X του χαλαζιακού υλικού είναι αντίστοιχα με εκείνα που έχουν αναφερθεί πρόσφατα σε σχέση με μεταλλοφορίες ορογενετικού χρυσού (Boiron et al. 2003).

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Κατσικάτσος Γ. 2002. Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας σε κλίμακα 1:50000. Φύλλο «Κηφισιά». Εκδ. Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα 2002.
- Λόζιος Σ.Γ. 1993. Τεκτονική ανάλυση μεταμορφωμένων σχηματισμών Β.Α. Αττικής. Διδακτορική Διατριβή, Αθήνα, 301σ.
- Μαριολάκος Η. & Παπανικολάου Δ. 1973. Παρατηρήσεις επί την τεκτονική του δυτικού Πεντελικού – Αττική. Δελτ.Ελλ.Γεωλ.Εταιρ., X/2, 134-197
- Bodnar R.J. 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions. *Geoch. Cosm. Acta*, 57, p 683-684
- Boiron M.C., Cathelineau, M., Banks, D.A., Fourcade, S. & Vallance, J. 2003. Mixing of metamorphic and surficial fluids during the uplift of the Hercynian upper crust: consequences for gold deposition. *Chem. Geol.* 194 p 119-141
- Hedenquist J.W. & Henley R.W. 1985. The importance of CO<sub>2</sub> freezing point measurements of fluid inclusions: evidence for geothermal systems and implications for epithermal ore depositions. *Econ. Geol.* 80, p1379-1406
- Kessel 1990. Untersuchungen zu Deformation und Metamorphose im Attischen Kristallin, Griechenland, Diss. Univ. Berlin, 120p.
- Kilias S. 2001. Genesis of vein-quartz deposits in relation to uplift of the Serbo-macedonian Zone, N. Greece. Evidence from fluid inclusions studies. *Chemie der Erde*, 61, p117-139
- Mullis, J., Dubessy, J., Poty, B. & O'Neil J. 1994. Fluids regimes during late stages of a continental collision. Physical, chemical and stable isotope measurements of fluid inclusions in fissure quartz from a geotraverse through the Central Alps. Switzerland. *Geoch. Cosm. Acta*, 58 (10), pp 2239-2267.
- Nesbitt B.E. & Muelenbachs K. 1995. Geochemical studies of the origins and effects of synorogenic fluids in the southern Omineca crystalline belt of British Columbia, Canada. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 107, p1033-1050
- Niedermayr G., 1993. Alpine kluefte. *Miner. Welt*, 4/6, p57-69
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. *Rev. Min.* 12, 644p.
- Vityk M. O., Bodnar R.J. & Dudok I.V. 1995. Natural and synthetic re-equilibration textures of fluid inclusions in quartz (Marmarosh Diamonds): Evidence for refilling under condition of compressive loading. *Eur. J. Mineral.* 7, p1071-1087.
- Zhang Y.G. & Frantz J.D. 1987. Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-CaCl<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O using synthetic fluids inclusions. *Chem. Geol.*, 64, p 335-350.

## ABSTRACT

### **FLUID INCLUSION STUDY IN ALPINOTYPE QUARTZ CRYSTALS FROM FISSURES IN PENTELICON MOUNTAIN**

Kilias, S., Voudouris, P., Katerinopoulos, A., Kavouri, S.

*National and Kapodistrian University of Athens, Faculty of Geology, Panepistimioupolis, 15784 Athens, kilias@geol.uoa.gr, voudouris@geo.uoa.gr, akaterin@geo.uoa.gr, skavouri@yahoo.gr*

Idiomorphic quartz crystals, up to 50 cm long, have been developed on massive, milky quartz substrate, within veins hosted by orthogneisses of the polymetamorphic system of the Pentelikon Mt. The veins fill NE-SW or/and NW-SE trending en-echelon fissures associated with the  $D_{ip}$  deformation phase of Alpine age. Quartz-hosted fluid inclusions have been studied in order to decipher the physicochemical conditions of deposition and the relationship to the geotectonic evolution of the area. Homogenization temperatures ( $T_h$ ) to the liquid phase range between 175 and 240 °C clustering at 180-200 °C. Final ice melting temperatures ( $T_{m,ice}$ ) range between -0.1 and -14.5 °C corresponding to salinities between 0.2 and 23 wt% NaCl equiv. in the system  $H_2O-NaCl$ . Th-salinity relationships indicate quartz crystallization under boiling conditions at temperatures 150-220 °C and pressures <1.5 Kbar. The results of this study indicate that quartz was deposited from hydrothermal fluids with a meteoric water component in the latest stages of retrograde metamorphism and regional decompressive uplift of the Pentelikon Mt metamorphic complex.