ΓΕΝΕΣΗ ΓΡΑΝΙΤΙΚΩΝ ΜΑΓΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΞΗ ΑΜΦΙΒΟΛΙΤΩΝ

Διπλωματική εργασία από την φοιτήτρια:
Φραντζανά Αθηνά
Επιβλέπων καθηγητής: Κορωναίος Α.

Τμήμα Γεωλογίας, Σ.Θ.Ε., Α.Π.Θ.
Θεσσαλονίκη, 2004

Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας - Α.Π.Θ.

ΓΕΝΕΣΗ ΓΡΑΝΙΤΙΚΩΝ ΜΑΓΜΑΤΩΝ ΑΠΟ ΤΗΞΗ ΑΜΦΙΒΟΛΙΤΩΝ

Διπλωματική εργασία από την φοιτήτρια:
Φραντζανά Αθηνά
Επιβλέπων καθηγητής: Κορωναίος Α.

Εικόνα του εξώφυλλου: Γρανίτης

Στους γονείς μου, Μαρία και Δημήτρη
και στον αδελφό μου, Σωτήρη

Περιεχόμενα

Πρόλογος
1. Εισαγωγή
1.1. Γενικά
1.2. Αφυδατική τήξη στους αμφιβολίτες
1.3. Περίληψη των πειραματικών αποτελεσμάτων από συσσωμστώματα ορυκτών πλούσιων σε Hb.
1.4. Εξέλιξη του ηπειρωτικού φλοιού από την αφυδατική τήξη αμφιβολιτών και τοναλιτών.
2. Διαγράμματα και σχολιασμός
2.1. Δεδομένα και διαγράμματα
2.2. SiO_2
2.3. TiO_2
2.4. Al_2O_3
2.5. FeO
2.6. MnO
2.7. MgO
2.8. CaO
2.9. Na_2O
2.10. K_2O
2.11. P_2O_5
2.12. A/CNK
3. Συμπεράσματα
Βιβλιογραφία και ευχαριστίες

Πρόλογος

Η εργασία αυτή έγινε στα πλαίσια του υποχρεωτικού μαθήματος «Διπλωματική εργασία» υπό την επίβλεψη του κ. Κορωναίου Α. κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2003 – 2004. Σκοπός της εργασίας είναι να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας, της πίεσης και του αρχικού υλικού στη σύσταση τηγμάτων, που προέκυψαν από πειράματα τήξης αρχικών πετρωμάτων – δειγμάτων, από όπου αντλήσαμε τα δεδομένα της εργασίας και να κάνουμε υποθέσεις για το είδος του πετρώματος που θα προκύψει. Αρχικά αναγράφονται κάποια εισαγωγικά στοιχεία για την τήξη πετρωμάτων, έπειτα τα διαγράμματα και ο σχολιασμός τους που έγιναν στα πλαίσια της εργασίας και τέλος τα συμπεράσματα αυτών.

1. Εισαγωγή

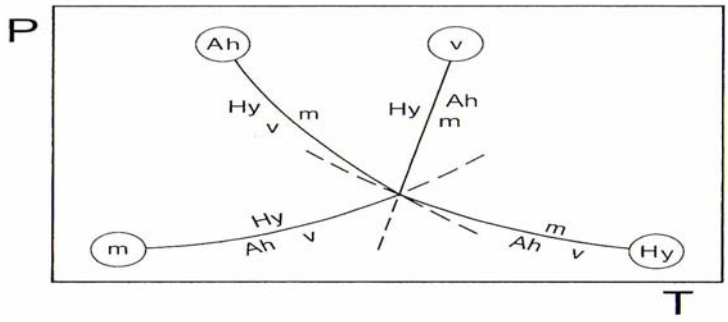
1.1. Γενικά

Η τήξη των ένυδρων ορυκτών έχει από καιρό αναγνωριστεί ως μια πηγή σχηματισμού των πλούσιων σε νερό γρανιτικών μαγμάτων (Brown & Fyfe 1970, Robertson & Wyllie 1971a, b, Wyllie 1971, Kerrick 1972, Grant 1973, Huang & Wyllie 1973, Huang et al. 1973a, b). Οι Lambert et al. (1969), Brown & Fyfe (1970), Lambert & Wyllie (1970, 1972), Huang & Wyllie (1973, 1981) και οι Millhollen & Wyllie (1974) ήταν μερικοί από τους πρώτους που ερεύνησαν τις συνθήκες P-T για την τήξη πετρωμάτων που περιέχουν τουλάχιστον ένα ένυδρο ορυκτό. Όμως, αυτές οι έρευνες περιορίστηκαν κυρίως στο να εξαχθούν συμπεράσματα για τις συνθήκες αφυδατικής τήξης από πειράματα τήξης κορεσμένης σε νερό. Ο Burnham (1979b) παρουσίασε solidus για την αφυδατική τήξη συσσωματωμάτων ορυκτών που περιείχαν μοσχοβίτη (Mu), βιοτίτη (Bi) και κεροστίλβη (Hb), βασισμένος σε υδροθερμικές αντιδράσεις.

Η τήξη των -πλούσιων σε Mu, Bi και Hb- πετρωμάτων δίχως προσθήκη νερού έχει ονομαστεί τήξη με απουσία υγρού ή αφυδατική τήξη. Και οι δύο προηγούμενοι όροι αναφέρονται στην ίδια διαδικασία: ένα ένυδρο ορυκτό (π.χ. Mu, Bi ή Hb) καταστρέφεται καθώς αντιδρά με άλλα άνυδρα ορυκτά. Τα προϊόντα της αντίδρασης είναι ένα τήγμα (υποκορεσμένο σε νερό) και ένα υπόλειμμα αποτελούμενο από άνυδρα ή κυρίως άνυδρα ορυκτά που σχηματίζει όξινους έως βασικούς γρανουλίτες.

Μια τέτοια διαδικασία που οδηγεί σε αφυδάτωση των αντιδρώντων μπορεί να μην έχει απουσία υγρού, όμως ο όρος «αφυδατική τήξη» χρησιμοποιείται εδώ για την διαδικασία τήξης χωρίς την προσθήκη νερού. Επίσης, αυτός ο όρος χρησιμοποιείται στην βιβλιογραφία πιο συχνά από τον άλλο. Όμως, δεν πρέπει να γίνεται σύγχυση της αφυδατικής τήξης με την αντίδραση αφυδάτωσης subsolidus.

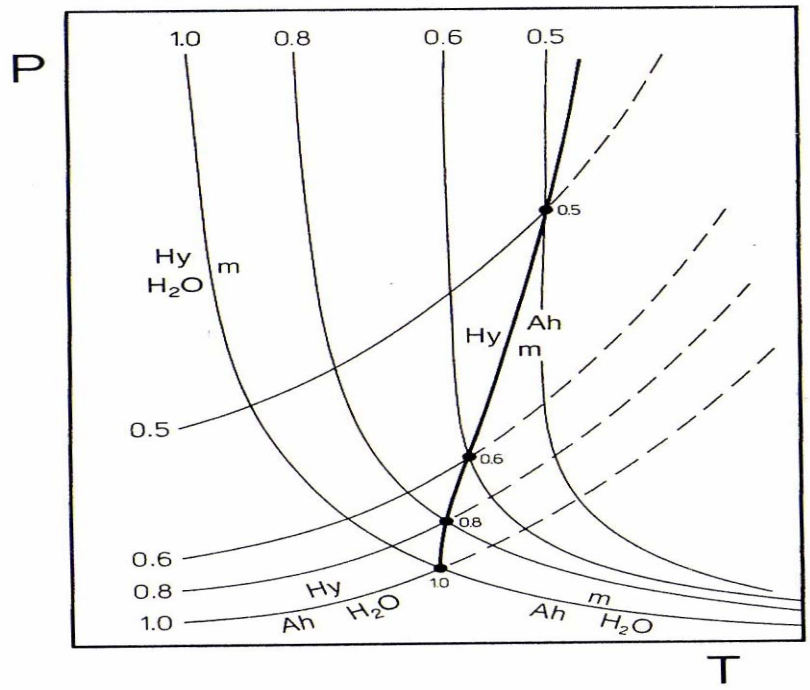
Η αντίδραση αφυδατικής τήξης είναι μια ανεξάρτητη αντίδραση που γεννιέται στο ενδιάμεσο των αντιδράσεων αφυδάτωσης subsolidus και με παρουσία υγρού (βλ. Σχ. 1.1.1, 1.1.2). Αυτό δείχνει την αρχή μιας υποκορεσμένης σε νερό τήξης που οφείλεται σε μια αντίδραση που περιλαμβάνει την καταστροφή ενός ένυδρου ορυκτού. Μια ελεύθερη –πλούσια σε νερό- υγρή φάση δεν σχηματίζεται κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας επειδή το νερό που ελευθερώνεται από το ένυδρο ορυκτό πηγαίνει κατευθείαν σ' ένα τήγμα υποκορεσμένο σε νερό.



Σχ. 1.1.1. Σκίτσο που δείχνει τις σχέσεις μεταξύ των καμπυλών Hy+V=m και Ah+V=m (καμπύλες Ah & Hy) των κορεσμένων σε H_2O solidus, της αντίδρασης αφυδάτωσης subsolidus Hy=Ah+V (καμπύλη m) και της αντίδρασης αφυδατικής τήξης Hy=Ah+m (καμπύλη V). Hy=ένυδρη κρυσταλλική φάση, Ah=άνυδρη κρυσταλλική φάση, m=τήγμα, V=φάση H_2O. Τα γράμματα στους κυκλούς δείχνουν την φάση που δεν παίρνει μέρος στην αντίδραση. Η δράση ελαττώνεται με την αύξηση της P στην καμπύλη V. (JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.)

Η διαδικασία της αφυδατικής τήξης, οι σχέσεις των καμπυλών solidus, η αντίδραση αφυδάτωσης subsolidus και η αντίδραση αφυδατικής τήξης φαίνονται στα Σχ. 1.1.1 και 1.1.2. Το Σχ. 1.1.1 δείχνει τη θέση της αντίδρασης της αφυδατικής τήξης σε σχέση με την καμπύλη solidus του συστήματος και την αντίδραση αφυδάτωσης subsolidus. Η δράση του νερού της καμπύλης αφυδατικής τήξης είναι 1,0 μόνο μεταξύ των καμπυλών solidus και της αντίδρασης της αφυδάτωσης subsolidus και ελαττώνεται με την αύξηση της T και της P.

Η καμπύλη αφυδατικής τήξης ως μια λειτουργία του a_{H2O} φαίνεται στο Σχ. 1.1.2. Κατασκευάστηκε από τα ενδιάμεσα τμήματα των καμπυλών τήξης με παρουσία νερού με την αντίδραση αφυδάτωσης subsolidus στις δράσεις του νερού στο 1,0, 0,8, 0,6 και 0,5. Η έντονη καμπύλη που συνδέει τα ενδιάμεσα τμήματα μπορεί να θεωρηθεί ως η καμπύλη για την αφυδατική τήξη. Αυτή η καμπύλη δείχνει τις χαμηλότερες δυνατές T (σε δεδομένες P) όπου μπορεί να σχηματιστεί τήγμα χωρίς την προσθήκη νερού στο σύστημα. Επίσης, δείχνει τις τιμές T-P όπου η αντίδραση αφυδάτωσης γίνεται μετασταθής.



Σχ.1.1.2. Διάγραμμα T-P που δείχνουν τις σχέσεις φάσης στο σύστημα Ah-Hy- H_2O. Καμπύλες solidus και subsolidus αφυδάτωσης έχουν χαραχτεί για δράση aH_2O=1.0, 0.8, 0.6 και 0.5. Στα ενδιάμεσα τμήματα γεννιέται η αντίδραση αφυδάτωσης τήξης. (JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.)

1.2. Αφυδατική τήξη στους αμφιβολίτες

Η αφυδατική τήξη των πλούσιων σε κεροστίλβη (Hb) συσσωματωμάτων ορυκτών που αποτελούν τους αμφιβολίτες είναι ένα σημαντικό βήμα στην ανάπτυξη του ηπειρωτικού φλοιού. Το υλικό που προστέθηκε στον ηπειρωτικό φλοιό από τα Αρχαϊκά χρόνια είναι γενικά βασαλτικής ή ανδεσιτικής σύστασης. Αυτό το υλικό μπορεί να ενυδατωθεί και να μετατραπεί σε αμφιβολίτες. Η αφυδατική τήξη αμφιβολίτη αναμένεται να καταλήξει σε τοναλιτικά μάγματα. Η διαίρεση των τοναλιτικών μαγμάτων και η κρυστάλλωση των τοναλιτών στον ανώτερο ηπειρωτικό φλοιό είναι το πιο σημαντικό βήμα της φλοιικής διαφοροποίησης. Αυτοί οι τοναλίτες

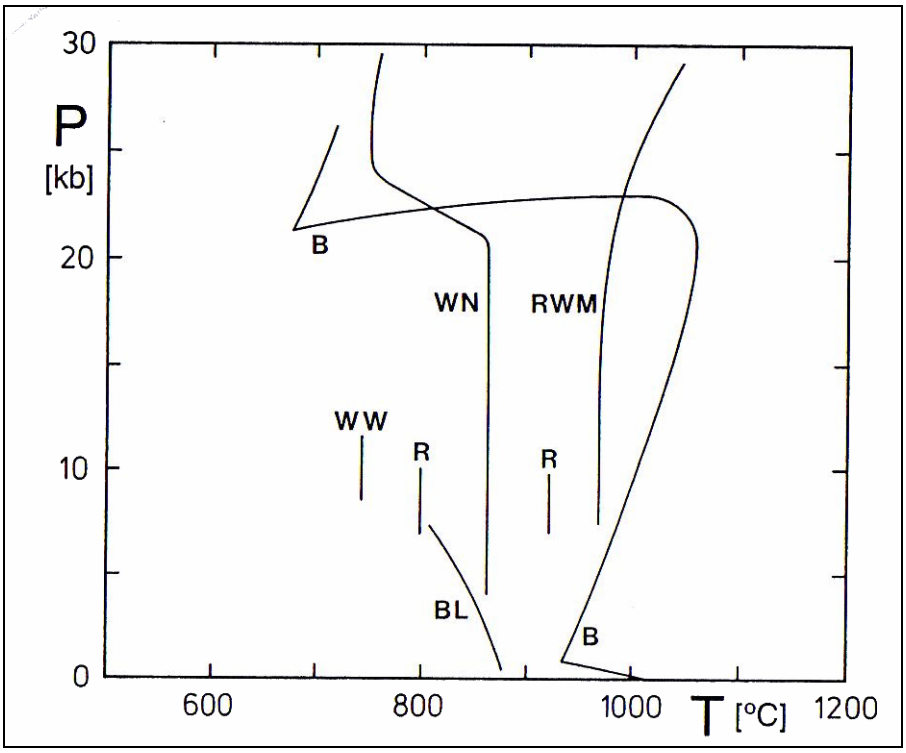
μπορεί να είναι το πέτρωμα-πηγή των γρανιτικών μαγμάτων που θα σχηματιστούν σ' ένα επόμενο βήμα της αφυδατικής τήξης. Αυτές οι διαδικασίες μπορεί να οδηγήσουν σ' έναν γρανιτικό ανώτερο φλοιό και έναν αφυδατωμένο γρανουλιτικό κατώτερο φλοιό φτωχό σε γρανιτικά συστατικά (Wedepohl 1991).

Παρά τη σημασία της αφυδατικής τήξης της Hb των αμφιβολιτών, υπάρχουν μόνο λίγες πειραματικές και θεωρητικές μελέτες που έχουν εκδοθεί πριν το 1991. Οι Brown & Fyfe (1970) κάνουν πειράματα αφυδατικής τήξης με μίγματα ξεχωριστών ορυκτών (χαλαζίας, άστριοι, μοσχοβίτης, βιοτίτης, κεροστίλβη) σε πίεση (P) 2,5-10,5 kbar και θερμοκρασία (T) πάνω από 900°C. Οι συστάσεις των μερικών τηγμάτων που σχηματίστηκαν σ' αυτά τα πειράματα συζητήθηκαν με λεπτομέρεια (Brown & Fyfe 1970). Όμως, η solidus που δίνεται από πλούσια σε Hb συσσωματώματα ορυκτών είναι πολύ σχηματική και διαφέρει σημαντικά από πρόσφατα αποτελέσματα (Σχ. 1.2.2). Οι Lambert & Wyllie (1972) χρησιμοποίησαν τα αποτελέσματα πειραμάτων κορεσμένων σε νερό (H_2O) για να μειώσουν τις συνθήκες για αφυδατική τήξη σε αμφιβολίτη. Οι Ellis & Thompson (1986) εκτιμούν τις συνθήκες για αφυδατική τήξη αμφιβολίτη στη μελέτη τους σχετικά με τη sobsolidus και τις αντιδράσεις μερικής τήξης στο σύστημα $CaO+MgO+Al_2O_3+SiO_2+H_2O$ με περίσσεια χαλαζία κάτω από συνθήκες με περίσσεια H_2O και με ανεπάρκεια H_2O.

Ο Burnham (1976b) παρουσίασε μια εκτεταμένη θερμοδυναμική μελέτη αφυδατικής τήξης σε βιοτιτικούς γνευσίους και πλούσιους σε Hb. Όμως, λεπτομερείς πειραματικές μελέτες της αφυδατικής τήξης των πλούσιων σε Hb αμφιβολιτών εκδόθηκαν πολλά χρόνια μετά από τους Beard & Lofgren (1989, 1991), Hacker (1990), Rapp et al. (1991), Rushmer (1991), Winther & Newton (1991), Wolf & Wyllie (1991, 1994), Wyllie & Wolf (1993) και Sen & Dynn (1994). Οι Beard & Lofgren (1989, 1991) ερεύνησαν τις αντιδράσεις αφυδατικής τήξης και τήξης κορεσμένης σε H_2O πέντε βασαλτών και ανδεσιτών μεταμορφωμένων τόξων (πρασινόλιθοι και αμφιβολίτες) στους 800-1000°C σε P=1-7 kbar. Τα τήγματα που σχηματίστηκαν από την αφυδατική τήξη βρέθηκαν να είναι γενικά υποκορεσμένα σε H_2O και να έχουν συστάσεις σαν τους τοναλίτες νησιωτικών τόξων. Αντίθετα, η τήξη κορεσμένη σε H_2O (στα 3 kbar) έδωσε ισχυρά υπεραργιλλικά τήγματα πλούσια σε Ca και φτωχά σε Fe, Mg, Ti και K. Αυτές οι συστάσεις θεωρήθηκαν απίθανο να είναι αυτές των πιο φυσικών πυριτικών πετρωμάτων. Στην περίπτωση των πειραμάτων των κορεσμένων σε H_2O, κυριαρχούσε η Hb, ενώ στα πειράματα αφυδατικής τήξης κυριαρχούσαν τα πλαγιόκλαστα (Pl) και οι πυρόξενοι (Px). Οι Beard & Lofgren (1991) θα μπορούσαν να δείξουν ότι τα αποτελέσματα των υψηλών T τους είναι κοντά στη σύσταση ισορροπίας. Συμπεραίνεται από τους συγγραφείς ότι οι άνυδροι πλούσιοι σε Px και Pl γρανουλίτες έπρεπε να εξελιχθούν ως αποτέλεσμα της αφυδατικής τήξης σε περιοχές τόξων. Η έναρξη της τήξης παρατηρήθηκε ότι συμβαίνει στην ερευνούμενη P μεταξύ των 800-900°C (Σχ. 1.2.1).

Οι Rapp et al. (1991) έκαναν πειράματα αφυδατικής τήξης σε τέσσερις ολιβινικούς αμφιβολίτες στα 8, 16, 22 και 32 kbar με σκοπό να εκτιμήσουν την εγκυρότητα των μοντέλων για την προέλευση των Αρχαϊκών γρανιτοειδών που θεωρούνται ότι έχουν μια βασική φλοιική πηγή. Οι συστάσεις των τηγμάτων που παράχθηκαν από 10-40% τήξη βρέθηκαν να είναι τοναλιτική - τροντγκεμιτική σε όλες τις ερευνούμενες P. Τα υπολειμματικά σώματα ήταν αμφίβολος+πλαγιόκλαστο±ορθοπυρόξενος, Fe-Ti οξείδια στα 8 kbar, γρανάτης+ορθοπυρόξενος±αμφίβολος, πλαγιόκλαστο, Fe-Ti οξείδια στα 16 kbar και γρανάτης+κλινοπυρόξενος±ρουτίλιο σε υψηλότερες P.

Οι υπολογιζόμενες REE στα πειραματικά τήγματα βρέθηκαν να είναι όμοιες με αυτές των τοναλιτικών και τροντγκεμιτικών γνευσίων από αρχαϊκές περιοχές τεφρών γνευσίων και γρανιτο-πρασινοσχιστόλιθων. Σύμφωνα με τους Rapp et al. (1991) και



Σχ. 1.2.1. Διάγραμμα P-T που δείχνει τις τιμές της solidus για αφυδατική τήξη αμφιβολιτών που ορίστηκε πειραματικά πρίν το 1993. (JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.)

Rapp (1995), τα πειραματικά αποτελέσματα υποστηρίζουν το μοντέλο ότι τα βασικά πετρώματα είναι η πιο πιθανή πηγή για την γένεση τροντγεμιτών και τοναλιτών συμβάλλοντας στην ανάπτυξη του νέου ηπειρωτικού φλοιού. Η solidus της αφυδατικής τήξης των αμφιβολιτών βρέθηκε μετά τους 950° και 1050°C (Σχ. 1.2.1).

Ο Rushmer (1991) ερεύνησε την αφυδατική τήξη 2 φυσικών αμφιβολιτών με διαφορετική σύσταση, έναν μεταλκαλικό βασάλτη (54 wt% Hb, 36 wt% Pl, 8 wt% Q, 2 wt% άλλα) και έναν μεταθολεϊίτη νησιωτικού τόξου (44 wt% Hb, 32 wt% Pl, 17 wt% Q, 1 wt% Bi, 6 wt% άλλα). Ο CPx βρέθηκε να κυριαρχεί στα πειράματα με τους μεταλκαλικούς βασάλτες και ο Opx σ' αυτά με τους μεταθολεϊίτες. Η Hb εξαφανίστηκε σ' αυτές τις περιπτώσεις στους 1000° και τους 950°C. Η solidus για την αφυδατική τήξη αποφασίστηκε ότι θα είναι σχεδόν στους 925°C για τον πλούσιο σε Q αμφιβολίτη (μεταβασάλτη) και στους 800°C για τον πλούσιο σε Q και Bi αμφιβολίτη (μεταθολεϊίτη) (Σχ. 1.2.1).

Οι Winther & Newton (1991) μελέτησαν τις σχέσεις τήξης ενός φυσικού βασάλτη με υψηλό Al και ενός συνθετικού συσσωματώματος που έχει τη σύσταση ενός μέσου αρχαϊκού θολεϊίτη σε T των 750-1100°C στα 5-30 kbar, με διαφορετικά ποσά νερού που προστίθεται στα στερεά (1, 2, 5 και 15 wt%). Οι T των 850-1000°C και οι P των 15 kbar φαίνεται να είναι οι κατάλληλες συνθήκες τήξης. Ο σχηματισμός των τοναλιτικών τηγμάτων ευνοείται από υψηλότερες T, χαμηλότερες P και χαμηλότερες περιεκτικότητες σε νερό στην πηγή. Τα τροντγκεμιτικά τήγματα ευνοούνται από χαμηλότερες T, υψηλότερες P και χαμηλότερες περιεκτικότητες σε νερό. Η solidus ορίστηκε από τους Winther & Newton (1991) να είναι σχεδόν κάθετη γραμμή μεταξύ 3 και 20 kbar σε σχεδόν 850°C (Σχ. 1.2.1).

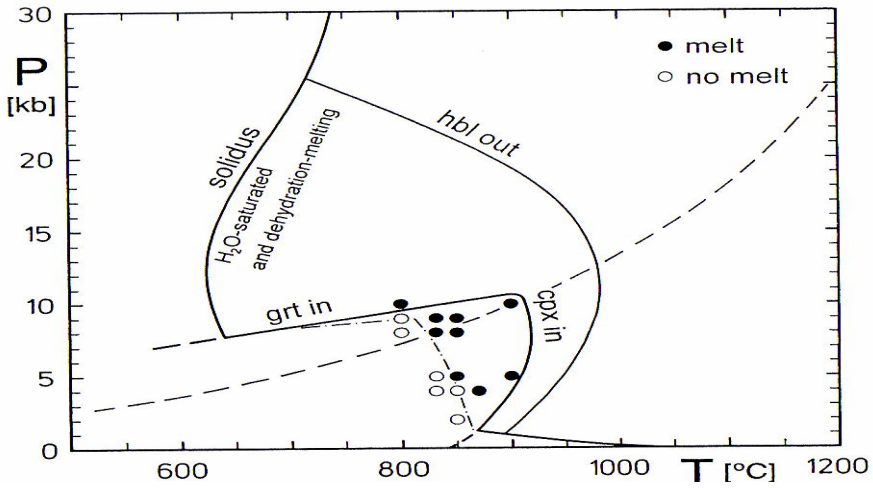
Οι Wolf &Wyllie (1991) έτηξαν ένα στερεό κύλινδρο από γραμμωτό αμφιβολίτη για να εξερευνήσουν τις επιδράσεις της υφής και του χρόνου στις σχέσεις της αφυδατικής τήξης. Τα πειράματα έγιναν σε 10 kbar και 850-1000°C. Παρατηρήθηκε ότι τα σχήματα των τηγμάτων ελέγχονται από την κρυσταλλική μορφολογία. Σύμφωνα με τους Wolf & Wyllie (1991), οι επιφάνειες μεταξύ των επιμηκυνσμένων κόκκων των γραμμωτών πετρωμάτων μπορούν να γίνουν «μονοπάτια» για τη μετανάστευση των τηγμάτων ή την διάδοση των συστατικών του τήγματος. Τα τήγματα που σχηματίζονται σε σχετικά χαμηλές T (800-900°C) μεταξύ των κρυστάλλων Hb και Pl είναι πλούσια σε νερό και έχουν χαμηλά ιξώδη. Αυτά τα τήγματα θεωρούνται ως πιθανά ικανά διαχωρισμού. Σε υψηλότερες T, η αναλογία τήγματος αυξάνεται και το ιξώδες θεωρείται ότι πρέπει να είναι πολύ υψηλό για να επιτρέψει διαχωρισμό. Τα αποτελέσματα των Wolf & Wyllie (1991) δείχνουν ότι ο διαχωρισμός τήγματος των πρώτων ένυδρων τηγμάτων θα μπορούσε να συμβάλλει στην αφυδάτωση των αμφιβολιτών χαμηλού K και μπορεί συνεπώς να μετακινήσει τα ασυμβίβαστα ιχνοστοιχεία όπως τα μεγάλα λιθόφιλα στοιχεία κατά την διάρκεια της μετάβασης από αμφιβολιτικές φάσεις σε γρανουλιτικές. Τα πειράματα και οι υπολογισμοί των Wolf & Wyllie (1991) δείχνουν επίσης ότι ο διαχωρισμός μικρών ποσοτήτων ένυδρων τηγμάτων είναι πιθανός, σε συμφωνία με προηγούμενα αποτελέσματα από συνθετικά συσσωματώματα χαλαζία (Q) και αστρίων (F) ή Q και Pl (Dell Angelo & Tullis 1988, Laporte & Provost 1993). Σε επιπρόσθετα πειράματα, χρησιμοποιώντας ένα δείγμα σε σκόνη του ίδιου πετρώματος, η solidus καθορίστηκε κάτω από τους 750°C (Σχ. 1.2.1). Αργότερα, οι Wolf & Wyllie (1994) μιμήθηκαν την αφυδατική τήξη ενός φυσικού ασβεστιτικού αμφιβολίτη χαμηλού K σε 10 kbar και 750-1000°C. Η αναλογία τήγματος αυξήθηκε σε T=800-875°C πάνω από το 15 vol%, μειώθηκε στους 875°C και 900°C και αυξήθηκε ξανά σχεδόν στο 50 vol% σε T=900-1000°C. Ο CPx είναι ένα προϊόν αντίδρασης σε όλες τις ερευνούμενες T, ο Gr και ο Opx εμφανίζονται στους 850°C και πάνω, ενώ δύο νέοι αμφίβολοι παρατηρούνται στις περισσότερες σειρές. Στους 1000°C ένα τοναλιτικό τήγμα συνυπάρχει μ' ένα συσσωμάτωμα γρανουλιτικής φάσης, που αποτελείται από Gr, Opx και Pl. Εξαιτίας της υψηλής περιεκτικότητας του σε ανορθίτη στο αρχικό υλικό, τα τήγματα είναι περισσότερο ασβεστιτικά και αργιλικά από τους φυσικούς τοναλίτες (πίνακας 1 και Σχ. 1.2.4, 1.2.5).

Οι Wolf &Wyllie (1994) υποστηρίζουν ότι τα αποτελέσματά τους είναι σύμφωνα μ' ένα διάγραμμα αμφιβολιτικής φάσης που δείχνει υψηλές T solidus σε χαμηλές P (P<10 kbar) και σχετικά χαμηλές T σε υψηλότερες P (Σχ. 1.2.2). Συμπεραίνεται ότι η αποσύνθεση της Hb που προκύπτει κατά τον σχηματισμό του γρανάτη πρέπει να κάνει διαθέσιμο το νερό για τήξη με υποκορεσμό σε νερό ως τήξη με την solidus κορεσμένη σε νερό. Στα 10 kbar η T solidus για την αφυδατική τήξη βρέθηκε μόλις κάτω από τους 750°C.

Οι Wyllie & Wolf (1993) έκαναν περίληψη προηγούμενων εργασιών για την αφυδατική τήξη αμφιβολιτών και έδωσαν ειδική προσοχή στην solidus της αφυδατικής τήξης αυτού του τύπου πετρώματος. Επίσης, κατασκεύασαν ένα διάγραμμα φάσης κλειστού συστήματος για ένα απλό, πλήρως ενυδατωμένο αμφιβολίτη (Hb+Pl) δείχνοντας την solidus και την ενδιάμεση τήξη για την Hb. Η solidus για την αφυδατική τήξη του αμφιβολίτη ορίζεται σε χαμηλή P (P<9 kbar) από μία σχεδόν κάθετη καμπύλη όπου ο CPx είναι το κυρίαρχο στερεό προϊόν αντίδρασης και σχεδόν στα 9 kbar από μια σχεδόν οριζόντια καμπύλη όπου κυριαρχεί ο σχηματισμός του Gr. Σε υψηλές P (P≥9 kbar) και σε συνθήκες κλειστού συστήματος η solidus για την αφυδατική τήξη συμπίπτει με την solidus κορεσμένη σε νερό για τους αμφιβολίτες. Το νέο διάγραμμα φάσης που κατασκευάστηκε από τους Wyllie &

Wolf (1993) επεκτείνει τον χώρο για την γένεση της τήξης σε πολύ χαμηλότερες T και P από ότι οι προηγούμενες πειραματικές έρευνες. Αυτό το νέο διάγραμμα φαίνεται στο Σχ. 1.2.2 (για καμπύλες που δημοσιεύθηκαν πριν το 1993, βλ. Σχ. 1.2.1).

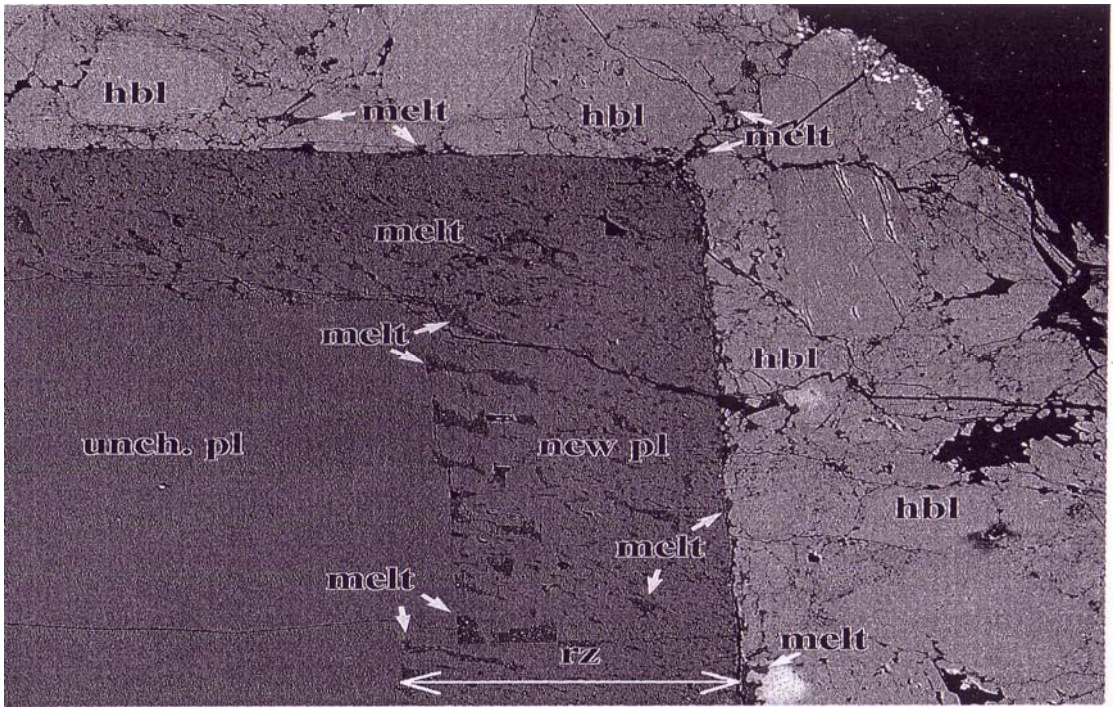
Οι Johannes & Wolke (1994) ερεύνησαν τις σχέσεις της φάσης της τήξης για συγκεντρώσεις Hb-Pl σε P πάνω από 15 kbar. Η τροποποιημένη μονοκρυσταλλική μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την έρευνα των πρώτων τηγμάτων. Ένα πειραματικό προϊόν που προέκυψε στους 850°C και τα 5 kbar , π.χ. παρουσιάζεται στο Σχ. 1.2.3. Τα πρώτα τήγματα παρατηρούνται σχεδόν 70°C κάτω από την solidus των CPx και σχεδόν 1 kbar κάτω από την solidus των Gr των Wyllie & Wolf (1993) (Σχ. 1.2.2).



Σχ. 1.2.2. Διάγραμμα P-T που δείχνει τις καμπύλες solidus για αφυδατική τήξη αμφιβολιτών (σκούρες γραμμές) και καμπύλες Hb (λεπτή γραμμή) σύμφωνα με τους Wyllie & Wolf (1993). Η διακεκομμένη γραμμή με τις τελείες, οι τελείες και οι κύκλοι είναι πρόσφατα αποτέλεσματα των Johannes & Wolke (1994). Η διακεκομμένη καμπύλη αναπαριστά την γεωθερμική βαθμίδα της ΝΑ Αυστραλίας, ένα τεκτονικά ενεργό περιβάλλον (O' Reilly & Griffin 1985)(JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.).

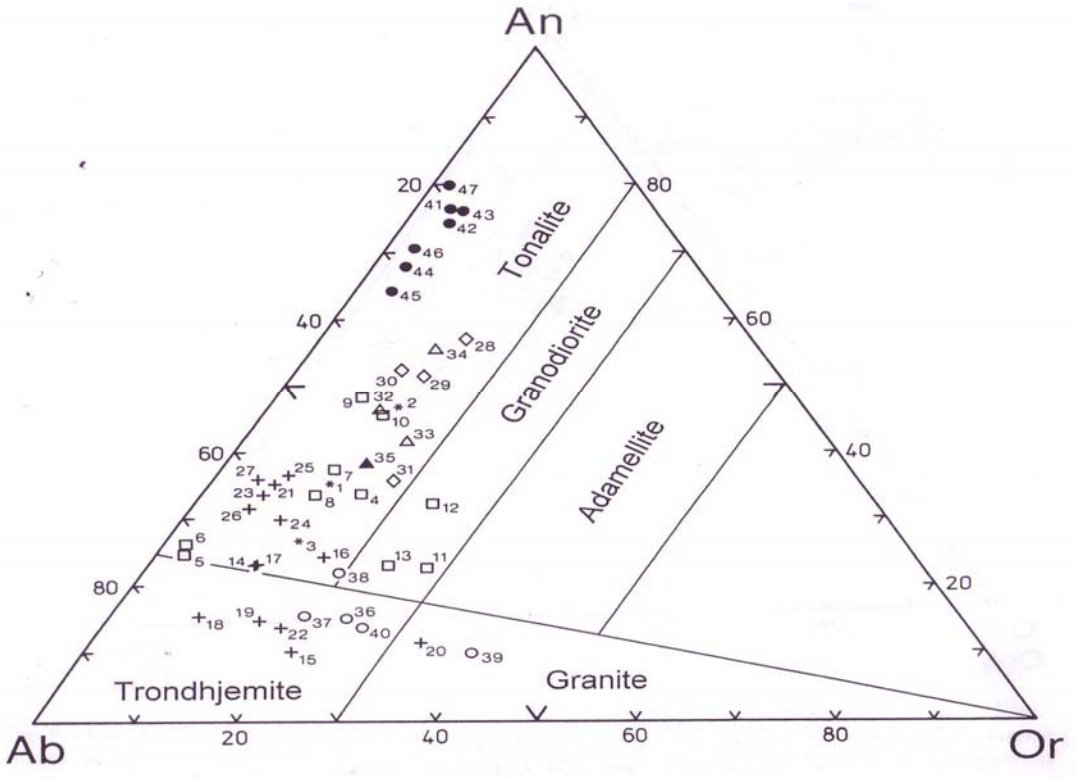
Οι Sen & Dunn (1994) μελέτησαν την αφυδατική τήξη ενός αμφιβολίτη στα 15 και 20 kbar σε T 850-1150°C για να ορίσουν τα μερικά τήγματα και τις σχέσεις φάσης σε βασικά πετρώματα κάτω από συνθήκες κατάλληλες σε μία θερμή γεωθερμική πλάκα. Το αρχικό υλικό ήταν ένας αμφιβολίτης από την British Columbia του Καναδά, που αποτελούταν από παργασιτική Hb (76,3 wt%), ανορθιτικό Pl (20,5 wt%) και μικρές ποσότητες Q και Gr. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η υψηλής P αφυδατική τήξη ενός αμφιβολίτη παράγει ένα υπόλειμμα πλούσιο σε ομφακιτικό CPx και Gr που συνυπάρχει με τήγματα ρυολιθικά ως ανδεσιτικά. Η σύσταση των τηγμάτων μετατοπίζεται από γρανιτική σε τροντγεμιτική με αυξανόμενη T. Συγκρινόμενα με τήγματα πρότυπης πλάκας, τα πειραματικά τήγματα είναι πολύ φτωχά σε MgO και CaO. Οι συστάσεις των τηγμάτων που γεννήθηκαν από αφυδατική τήξη αμφιβολιτών ή πρασινοσχιστολίθων ή μίγματα πλούσια σε Hb κατάλληλων συστάσεων αναφέρθηκαν από τους Hacker (1990), Beard & Lofgren (1991), Rapp et al. (1991), Rushmer (1991), Wolf & Wyllie (1994), Johannes & Wolke (1994) και Sen & Dynn (1994). Αντιπροσωπευτικά δείγματα από αυτούς τους συγγραφείς σε P 5-20 kbar και σε Τα πάνω από 850°C φαίνονται στον πίνακα 1. Ο πίνακας 1 περιλαμβάνει αποτελέσματα από πειράματα με ξηρά αρχικά υλικά, με δύο

εξαιρέσεις: στις σειρές 14 και 19 προστέθηκε 1-2 wt% νερό. Οι ομαλές τιμές Ab-An-Or και Q-Ab-An των αναλύσεων που δίνονται στον πίνακα φαίνονται στα Σχ. 1.2.4 και 1.2.5. Οι συστάσεις των αρχικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν από τους Beard & Lofgren (1991), Rapp et al. (1991), Rushmer (1991), Wolf & Wyllie(1994), Johannes & Wolke (1994) και Sen & Dynn (1994) δίνονται στον πίνακα 2.



Σχ. 1.2.3. Ηλεκτρονική μικροσκοπική εικόνα ενός πειραματικού προϊόντος στους 850^{o} C και τα 5 kbar (t=6 d). Αρχικά υλικά: ένας αδρόκοκκος κρύσταλλος Pl (An $_{58}$) που περιβάλλεται από αδρόκοκκη Hb. (JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.)

Τα αρχικά υλικά του Hacker (1990) ήταν ένα φυσικό πέτρωμα που αποτελείται από σχεδόν 53% Hb, 43% Pl (An_{30}), 2% Il, 2% Q και ίχνη Rt και Ap. Ο κύριος σκοπός των πετρωμάτων του ήταν η έρευνα της εξέλιξης των υφών κατά τη μεταμόρφωση των αμφιβολιτών. Καμία προσπάθεια δεν έγινε ώστε να επιτευχθεί η χημική ισορροπία. Το αρχικό υλικό των Johannes & Wolke (1994) ήταν ένας μονοκρύσταλλος Pl (An_{58}) που περιβάλλεται από αμφίβολο (αναλογία Pl:Hb=1:2). Η αμφίβολος ήταν μια ομαλή Hb στις περιπτώσεις No32-34 και μία πλούσια σε Al (14,1 wt% Al_2O_3) και πλούσια σε K_2O (0,89 wt%) στην περίπτωση No35. Το αρχικό υλικό του No31 (Rushmer, 1991) ήταν ένα μίγμα από 54 wt% Hb, 36 wt% Pl και 10 wt% Q. Τα δεδομένα των ομαλών Ab, An και Or από όλες τις αναλύσεις δίνονται στον πίνακα 1 και φαίνονται σ' ένα τριγωνικό διάγραμμα του Σχ. 1.2.4.

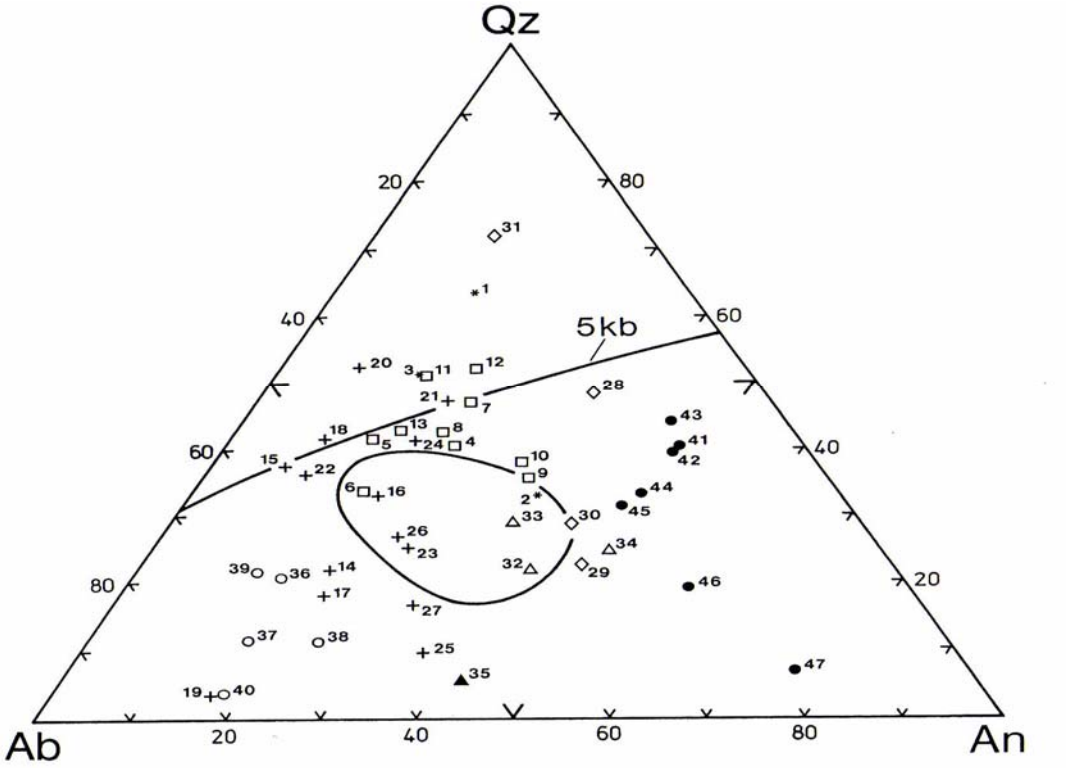


Σχ. 1.2.4. Τριαδικό διάγραμμα που δείχνει τα ομαλοποιημένα δεδομένα Ab, An και Or των προϊόντων που φαίνονται στον πίνακα 1. Οι περιοχές που φαίνονται για τα ασβεσταλκαλικά πετρώματα είναι σύμφωνα με τον O' Connor (1965). (JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.)

Το διάγραμμα Ab-An-Or (που εισήγαγε ο O' Conor, 1965) χρησιμοποιείται συχνά για την διάκριση μεταξύ των μελών της ασβεσταλκαλικής ακολουθίας τροντγεμίτη, τοναλίτη, γρανοδιορίτη, αδαμελίτη και γρανίτη. Όλα τα πειραματικά τήγματα, εκτός των 11-13, 20 και 39, φαίνονται στον χώρο για τους τροντγκεμίτες και τους τοναλίτες. Μια πολύ καλή ματιά στα αρχικά υλικά και τις συνθήκες αυτών των σειρών δεν προσφέρει μια εξήγηση για την σχετικά υψηλή περιεκτικότητα Or στα μερικά τήγματά τους. Όμως, υπάρχει μία περισσότερο ή λιγότερο εσωτερική συνοχή στα αποτελέσματα που καθορίσθηκαν από τους Beard & Lofgren (1991). Τα τήγματα 11-13 προέκυψαν με την αρχική σύσταση έχοντας σχεδόν την υψηλότερη περιεκτικότητα σε K_2O. Μόνο το αρχικό υλικό No4 είναι πλουσιότερο σε K_2O και παράγει τήγματα χαμηλού K. Τα δεδομένα που φαίνονται στο Σχ. 1.2.4 δεν δείχνουν συστηματικές διαφορές της σύστασης του τήγματος με τις ποικίλες τρέχουσες συνθήκες. Όμως, υπάρχει μια σχέση μεταξύ της αναλογίας Ab/An των τηγμάτων και της σύστασης του Pl των κατάλληλων αρχικών υλικών. Ένα Pl πλούσιο σε An αυξάνει τα πλούσια τήγματα σε Ca, όπως φαίνεται από όλα τα προϊόντα των Wolf & Wyllie (1994) (σύγκριση τελειών στο Σχ. 1.2.4 με όλα τα άλλα δεδομένα). Μερικά τήγματα δείχνουν υψηλότερες αναλογίες σε Ab/An από την αρχική τους σύσταση (βλ. No28-30 και 34). Αυτό μπορεί να οφείλεται στις δυσκολίες στην ανάλυση Na_2O σε τήγματα πλούσια σε νερό. Ένα περισσότερο κατάλληλο διάγραμμα να παρουσιαστεί και να συγκριθεί η σύσταση του τοναλίτη μπορεί να είναι ένα τριγωνικό διάγραμμα Q-Ab-An, καθώς και ο Q και το Pl είναι τα κύρια και συχνά τα μόνα λευκά ορυκτά σε τοναλίτες και τροντγεμίτες. Γι' αυτό οι τιμές Q-, Ab- και An

όλων των προϊόντων φαίνονται στον πίνακα 1 και επίσης σ' ένα διάγραμμα (Σχ. 1.2.5 α). Η καμπύλη του ελλειψοειδούς σχήματος στο Σχ. 1.2.5 περιβάλλει τον χώρο που περιέχει 14 από τους 15 φυσικούς τοναλίτες.

Το Σχ. 1.2.5 δείχνει ένα σημαντικό διάγραμμα των συστάσεων των πειραματικών τηγμάτων. Μόνο λίγα αποτελέσματα φαίνονται στον χώρο που αναπαριστά τη σύσταση των φυσικών τοναλιτών. Το διάγραμμα των δεδομένων μπορεί να μην οφείλεται μόνο στις διαφορές στην αρχική σύσταση και τις τρέχουσες συνθήκες, άλλα επίσης και στην ισορροπία και τα αναλυτικά προβλήματα. Γι' αυτό υπάρχουν συστηματικά σύμβολα. Τα δεδομένα των Wolf & Wyllie (1994) προκαλούν μείωση



Σχ. 1.2.5.α Τριαδικό διάγραμμα που δείχνει τις ομαλοποιημένες τιμές Qz, Ab και An των προϊόντων του πίνακα 1. Η οβάλ περιοχή αναπαριστά συστάσεις φυσικών τοναλιτών. Η καμπύλη 5 kbar είναι η καμπύλη των 5 kbar του τοναλιτικού συστήματος Qz-Ab-An. (JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.)

των τιμών του Q με αύξηση της T. αυτό οφείλεται σε μια προσέγγιση της σύστασης του τήγματος στη σύσταση του αμφιβολιτικού αρχικού υλικού με την αύξηση της τήξης.

No.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
T (°C)	1000	1000	1030	1000	1050	1025	1050	950	1000	950	975	900	1000	850	850	950	975	1025	950	1025
P (kbar)	8	16	16	8	8	16	16	8	8	8	8	10	8	8	8	15	15	15	20	20
t (h)	144 – 672							72	24	72	72	144	144	144	144	216	96	120	192	96
Ref.[a]	RWM	RWM	RWM	RWM	RWM	RWM	RWM	R	R	R	R	JW	JW	JW	JW	SD	SD	SD	SD	SD
SiO_2	75.06	72.77	65.44	73.86	57.95	67.20	61.60	54.62	53.47	54.76	71.80	61.00	64.40	60.70	58.50	67.56	65.29	62.81	67.66	62.00
TiO_2	0.09	0.65	0.25	0.12	1.45	0.99	1.25	0.85	1.33	1.11	1.02	0.70	0.30	0.70	0.20	0.63	0.76	1.06	0.61	1.46
Al_2O_3	14.37	14.50	17.57	14.04	17.42	16.32	17.57	16.57	17.73	15.86	12.78	19.20	17.60	18.20	21.90	17.64	18.53	18.36	17.45	18.34
FeO	2.26	2.81	6.43	2.63	9.51	4.05	6.18	6.63	7.30	7.01	2.58	5.50	5.00	5.50	4.10	2.37	2.85	4.81	1.89	4.39
MnO	0.06	0.04	n.d.	0.08	0.24	0.13	0.11	0.09	0.17	0.14	0.06	0.10	0.10	0.20	0.10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
MgO	0.52	0.47	0.60	0.48	2.17	0.95	1.48	1.20	3.27	3.98	0.58	1.50	1.10	2.80	1.00	0.74	0.72	1.29	0.62	1.18
CaO	3.57	1.73	4.39	3.43	5.97	4.81	6.26	4.11	5.64	5.08	1.86	6.30	5.40	7.20	6.50	2.35	2.63	3.52	1.61	2.81
Na_2O	3.50	5.15	4.65	4.10	4.52	4.88	4.86	1.20	2.27	2.11	1.41	3.40	3.20	2.40	4.80	5.63	6.49	5.53	4.89	6.08
K_2O	0.55	1.88	0.67	0.94	0.78	0.61	0.47	0.88	1.21	0.89	0.79	1.30	1.80	1.30	2.00	3.09	2.73	2.61	5.29	3.74
Total[b]	89.63	96.74	88.90	91.59	92.73	94.35	91.40	86.14	92.39	90.94	92.88	91.30	90.30	90.10	90.50	91.68	92.17	93.09	92.08	90.89
CIPW norms																				
Q	42.34	29.37	20.40	36.33	6.65	22.73	13.04	33.30	14.53	18.82	58.45	16.60	21.90	18.30	4.20	15.39	8.63	8.01	13.51	2.51
Or	3.25	11.12	3.96	5.58	4.61	3.61	2.79	6.04	7.74	5.58	5.03	7.80	10.80	7.80	11.90	18.28	16.15	15.44	31.28	22.12
Ab	29.59	43.53	39.30	34.76	38.20	41.27	41.16	11.79	20.79	19.63	12.85	29.00	27.40	20.50	40.90	47.58	54.85	46.74	41.32	51.39
An	17.73	8.59	21.79	17.08	24.90	20.81	24.76	23.67	30.28	27.71	9.93	31.60	27.10	35.40	32.50	11.66	13.06	17.48	7.99	11.66
C	1.51	0.84	1.20	0.03	–	–	–	7.16	2.63	2.41	6.70	0.70	0.60	–	–	0.74	0.10	0.02	0.73	–
wo	–	–	–	–	1.97	1.29	2.66	–	–	–	–	–	–	0.30	0.00	–	–	–	–	0.95
Di en	–	–	–	–	0.54	0.38	0.78	–	–	–	–	–	–	0.10	0.00	–	–	–	–	0.34
fs	–	–	–	–	1.54	0.96	2.00	–	–	–	–	–	–	0.20	0.00	–	–	–	–	0.64
Hy en	1.30	1.17	1.50	1.20	4.89	2.00	2.93	3.37	8.82	10.90	1.56	3.80	2.80	6.90	2.50	1.85	1.80	3.23	1.55	2.61
fs	4.11	4.15	11.38	4.79	13.95	5.07	7.49	12.70	12.47	12.42	3.41	9.20	9.00	9.20	7.40	3.31	3.97	7.07	2.46	5.00
Il	0.17	1.23	0.47	0.23	2.75	1.88	2.38	1.87	2.73	2.32	2.09	1.30	0.60	1.30	0.40	1.20	1.44	2.01	1.16	2.77
Residual phases	hbl	hbl	hbl	hbl	hbl	–	–	hbl	–	hbl	hbl	hbl	hbl	hbl	hbl	hbl	hbl	hbl	–	–
	pl	pl	pl	pl	pl	–	–	pl	pl	pl	pl	pl	pl	pl	pl	pl	pl	–	–	–
	–	cpx	cpx	–	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx	cpx
	opx	opx	–	opx	opx	–	–	opx	opx	opx	opx	–	–	–	opx	–	–	–	–	–
	–	grt	grt	–	–	grt	grt	–	–	–	–	grt	–	–	–	grt	grt	grt	grt	grt
	mag	–	–	mag	mag	–	–	ilm	ilm	ilm	ilm	–	–	–						
	qtz	qtz	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–						

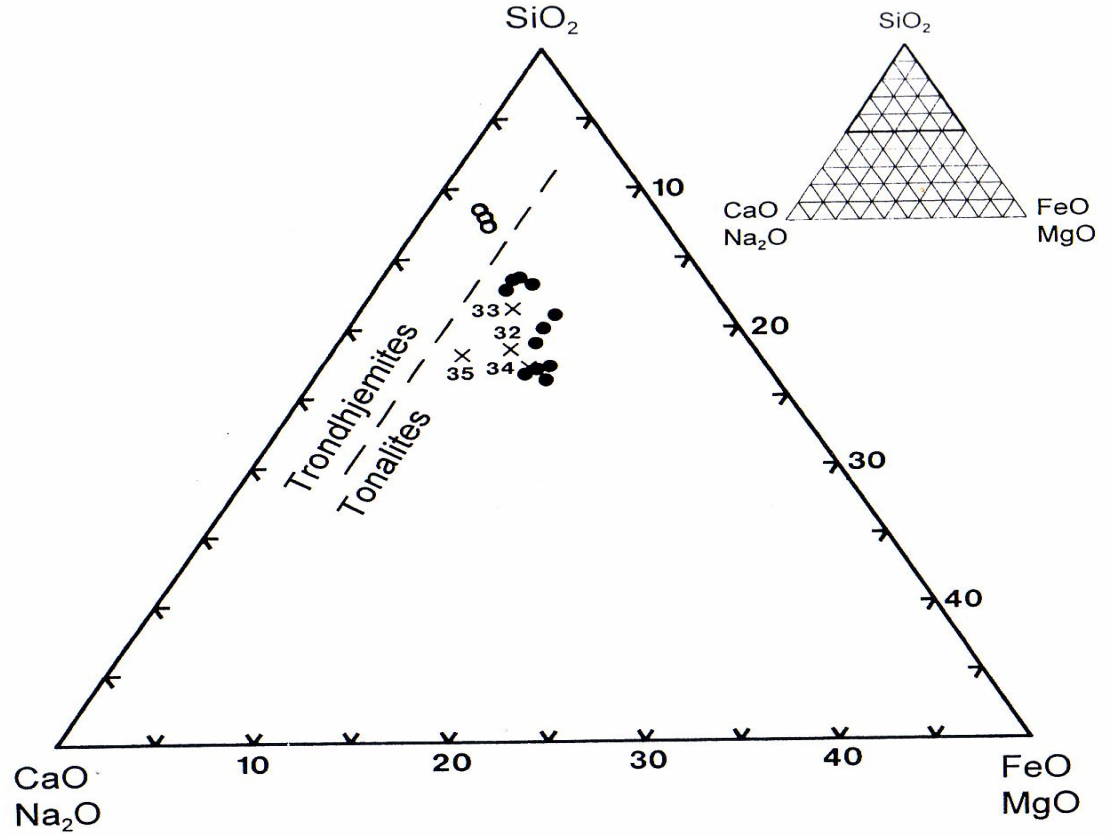
Πίνακας 1. Σύνθεση επιλεγμένων μερικών τηγμάτων που γεννήθηκαν από αφυδατική τήξη αμφιβολιτών.

Ref.[a] No. in Table 9.1 Figs. 9.13 and 9.14	BL 4	BL 5 – 6	BL 7 – 9	BL 10	BL 11 – 13	RWM 14 – 17	RWM 18 – 20	RWM 21 – 23	RWM 24 – 27	R 28 – 29	R 30	JW 32 – 34	JW 35	SD 36 – 40	WW 41 – 47
SiO_2	57.02	55.11	52.47	49.48	51.39	51.19	48.60	48.30	47.60	49.04	51.69	47.54	43.44	46.88	48.40
TiO_2	0.60	1.66	1.74	1.18	1.55	1.18	2.06	0.72	1.19	1.27	1.00	1.11	1.08	1.22	0.40
Al_2O_3	15.39	14.94	15.29	17.76	15.82	16.62	17.03	15.30	14.18	16.37	16.31	16.40	19.00	15.00	14.60
Fe_2O_3	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.92	1.20	1.94	4.08	4.88	–
FeO	8.01	11.28	11.79	12.49	12.23	11.32	10.69	10.70	13.77	7.45	7.62	9.39	9.61	8.70	8.40
MnO	0.17	0.21	0.22	0.26	0.26	0.23	0.21	0.19	0.19	0.18	0.11	0.18	0.17	0.26	0.20
MgO	5.52	4.01	5.29	4.74	4.42	6.59	6.07	8.40	6.86	7.45	7.51	7.33	5.45	8.25	10.70
CaO	9.20	6.07	9.21	10.90	8.95	5.49	9.66	12.60	10.99	10.81	8.90	11.79	10.71	11.28	14.30
Na_2O	2.54	4.29	2.55	1.96	3.30	4.33	3.30	2.27	2.56	3.42	3.09	2.47	3.30	2.51	1.00
K_2O	0.44	0.03	0.16	0.15	0.37	0.82	0.21	0.08	0.19	0.44	0.26	0.42	0.71	0.80	0.10
LOI	1.56	0.47	0.49	0.21	0.61	1.53	0.70	0.98	1.65	0.77	1.36	–	–	1.50	–
Total	100.45	98.07	99.21	99.13	98.98	99.30	98.53	99.54	99.18	99.12	99.05	98.57	97.55	99.78	98.10
CIPW norms															
Q	9.88	4.73	4.17	0.54	–	–	–	–	–	–	0.03	–	–	–	–
Or	2.63	0.18	0.96	0.90	2.23	4.96	1.27	0.48	1.15	2.64	1.57	2.52	4.30	4.74	0.60
Ab	21.71	37.15	21.83	16.75	28.37	37.43	28.51	19.46	22.18	26.98	26.72	21.18	14.24	20.43	8.62
An	29.58	21.92	30.15	39.60	27.70	23.99	31.68	31.74	27.28	28.43	30.53	32.85	35.76	27.32	35.69
Ne	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.29	–	–	7.78	0.45	–
Di wo	6.93	3.74	6.74	6.30	7.30	1.62	7.23	13.24	11.96	10.41	5.82	11.07	7.82	12.02	15.30
Di en	3.38	1.35	2.77	2.29	2.63	0.74	3.41	6.80	5.04	5.89	3.34	6.03	3.94	7.50	9.24
Di fs	3.43	2.47	4.01	4.15	4.84	0.87	3.73	6.08	6.95	4.08	2.22	4.64	3.70	3.78	5.22
Hy en	10.58	8.92	10.62	9.69	7.86	4.05	2.69	1.25	1.60	–	15.78	0.94	–	–	9.50
Hy fs	10.74	16.31	15.39	17.52	14.47	4.73	2.94	1.11	2.21	–	10.48	0.73	–	–	5.36
Ol fo	–	–	–	–	0.53	8.44	6.59	9.28	7.66	9.07	–	8.14	7.02	9.22	5.97
Ol fa	–	–	–	–	1.07	10.88	7.95	9.16	11.65	6.93	–	6.92	7.27	5.13	3.73
Mt	–	–	–	–	–	–	–	–	–	1.23	1.17	2.85	6.06	7.09	–
Il	1.15	3.23	3.35	2.27	3.00	2.29	4.00	1.39	2.32	2.45	1.94	2.14	2.10	2.32	0.77
	Green-shist	Green-shist	Green-shist	Hbl-hornfels	Green-shist	Amphi-bolite	Amphi-bolite	Amphi-bolite	Amphi-bolite	Amphi-bolite	Amphi-bolite	hbl + pl	hbl (Al-r) + pl	Amphi-bolite	Amphi-bolite
Plag-compos.	An_{58}[b]	An_{37}[b]	An_{58}[b]	An_{70}[b]	An_{49}[b]	An_{39}[b]	An_{52}[b]	An_{62}[b]	An_{55}[b]	An_{40-42}	An_{40-45}	An_{58}	An_{58}	An_{55}	An_{90}

Πίνακας 2. Αρχικές συστάσεις

Η υψηλή τήξη είναι επίσης ο λόγος για τις χαμηλές τιμές Q των No19 και 40 (1-2 wt% νερό προστέθηκε στην περίπτωση του No19). Τα Σχ. 1.2.4 και 1.2.5 μπορεί να μην είναι τα κατάλληλα για την διάκριση μεταξύ τοναλιτών και τροντγκεμιτών, καθώς αυτά δεν περιλαμβάνουν τα φεμικά συστατικά. Ένα τριγωνικό διάγραμμα SiO_2-CaO+Na_2O-FeO+MgO (Σχ. 1.2.5 β) κατασκευάστηκε για την διάκριση των συστάσεων τοναλιτών και τροντγεμιτών. Αυτό δείχνει ότι το 4 wt% (FeO+MgO) ομαλοποιείται σε 5 wt% [ως SiO_2+(CaO+Na_2O)+(FeO+MgO)] και αναπαριστά το όριο μεταξύ των περιοχών για τους τοναλίτες και τους τροντγεμίτες (διακεκομμένη γραμμή). Το Σχ. 1.2.5 β δείχνει του σύσταση τριών φυσικών τροντγκεμιτών, 12 φυσικών τοναλιτών (δύο είναι συμπτωματικοί) και τεσσάρων τρεχόντων προϊόντων αφυδατικής τήξης συσσωματωμάτων Hb-Pl (Johannes & Wolke 1994). Μια σύγκριση των πειραματικών και φυσικών δεδομένων δείχνει καθαρά ότι τα προϊόντα που προκύπτουν στις T των 850-1000°C έχουν «πραγματική» τοναλιτική σύσταση.

Η περιεκτικότητα σε SiO_2 των μερικών τηγμάτων σε όλες τις περιπτώσεις είναι υψηλότερη από αυτήν του υλικού της πηγής τους. Οι περιεκτικότητες των FeO, MgO και CaO είναι χαμηλότερες και των Na_2O και K_2O είναι (με λίγες εξαιρέσεις) υψηλότερες στα τήγματα όταν συγκρίνονται με τα μητρικά τους πετρώματα. Η μέση περιεκτικότητα K_2O των συνθετικών τηγμάτων είναι χαμηλότερη σε σύγκριση μ' ένα φυσικό τοναλίτη. Αυτή η διαφορά μπορεί να εξηγηθεί με ενεργή μετασωμάτωση κατά την διάρκεια της γένεσης φυσικών τοναλιτικών τηγμάτων ή τον σχηματισμό αμφιβολιτών.



Σχ. 1.2.5.β Τριαδικό διάγραμμα που δείχνει τις ομαλοποιημένες τιμές SiO_2, CaO+Na_2O και FeO+MgO των φυσικών τοναλιτών (τελείες) και τροντγεμιτών (κύκλοι). Οι σταυροί αναπαριστούν πειραματικά αποτελέσματα T 850°, 900° και 1000°C (βλ. πίνακα 1). Η διακεκομένη γραμμή χωρίζει τις περιοχές για τους τοναλίτες και τους τροντγεμίτες. (JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.)

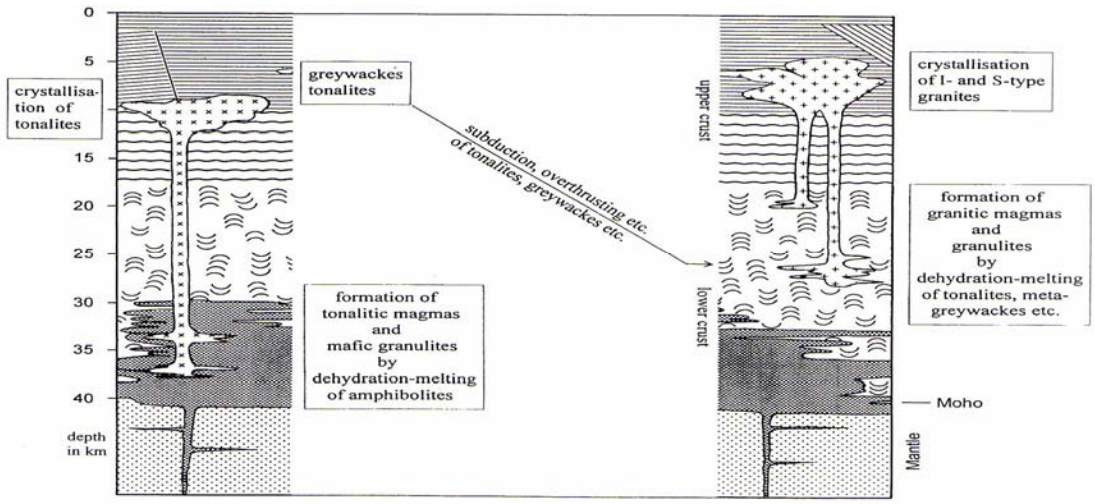
Τα πειραματικά τήγματα είναι (με λίγες εξαιρέσεις) ισχυρά ή ελαφρώς υπεραλκαλικά καθώς όλα τα μητρικά πετρώματα είναι διοψιδικά (σύμφωνα με τη norm). Ως εδώ τα πειράματα για την αφυδατική τήξη φτάνουν μόνο σε γενικά συμπεράσματα και πολλά αποτελέσματα πρέπει να ερμηνευθούν με προσοχή. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για όλα τα δεδομένα που. . βρίσκονται πάνω από την καμπύλη για τα 5 kbar στην περιοχή του Q στο Σχ. 1.2.5 α. Καλύτερης ποιότητας δεδομένα χρειάζονται για μια πιο λεπτομερή συστηματική ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

1.3. Περίληψη των πειραματικών αποτελεσμάτων από συσσωματώματα ορυκτών πλούσιων σε Hb

1. Η αφυδατική τήξη των αμφιβολιτών ξεκινάει σε χαμηλές P (<10 kbar) και σε σχετικά υψηλές T (850°C). Σε υψηλές P (>10 kbar) μπορεί να ξεκινήσει σε T τόσο χαμηλές ως 650°C. Όμως, το ποσό των τηγμάτων χαμηλών T είναι πολύ μικρό και η σύσταση των πρώτων τηγμάτων μπορεί να είναι τόσο χαμηλή σε FeO, MgO και CaO που να ταιριάζει με τη σύσταση των «αληθινών» τοναλιτών, μέχρι οι T να φτάσουν ή να ξεπεράσουν τους 900°C.
2. Το υπόλειμμα είναι ένας πλούσιος σε Gr γρανουλίτης ή ένας γρανουλιτικός αμφιβολίτης σε υψηλές P (≥ 10 kbar) και ένας πλούσιος σε Px γρανουλίτης ή γρανουλιτικός αμφιβολίτης σε χαμηλότερες P.
3. Οι περιεκτικότητες των SiO_2, Na_2O και K_2O των πειραματικών τηγμάτων είναι υψηλότερες από αυτές των πρωτολίθων. Τα περισσότερα από τα πειραματικά τήγματα είναι ισχυρά ή ελαφρώς υπεραργιλλικά, καθώς όλα τα αρχικά υλικά είναι διοψιδικά (norm).
4. Η σύσταση των πειραματικών τηγμάτων είναι τροντγεμιτική ως τοναλιτική και τα πειραματικά δεδομένα υποστηρίζουν την ιδέα ότι τα τοναλιτικά μάγματα μπορεί να γεννηθούν από αφυδατική τήξη αμφιβολιτών.

1.4. Εξέλιξη του ηπειρωτικού φλοιού από την αφυδατική τήξη αμφιβολιτών και τοναλιτών

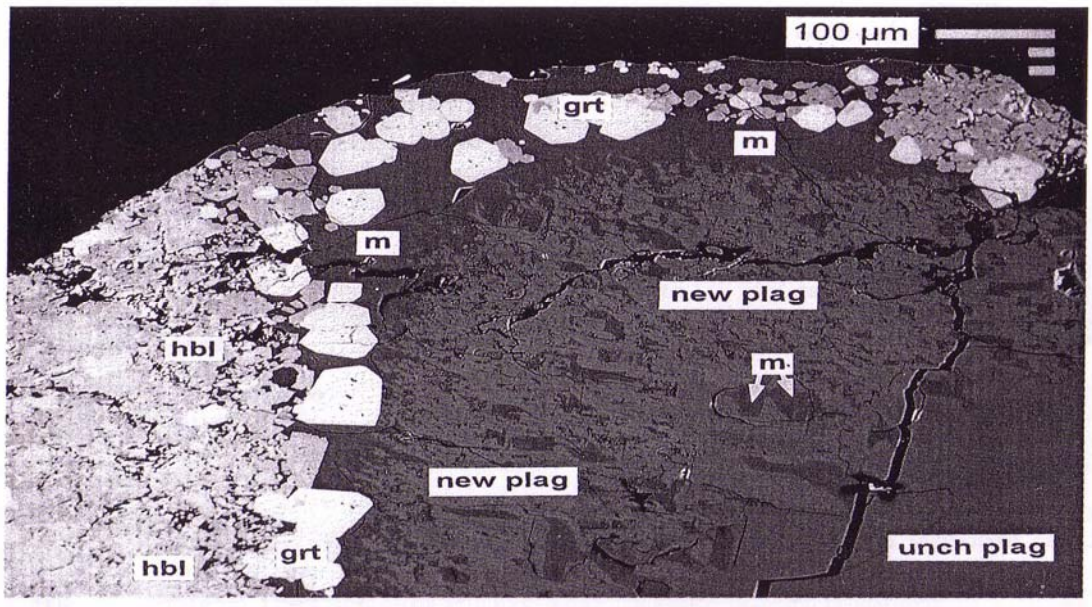
Ο σχηματισμός του γρανίτη και η εξέλιξη του ηπειρωτικού φλοιού σχετίζονται πολύ μεταξύ τους. Ο αρχαϊκός φλοιός αποτελείται από μια διττή (bimodal) ακολουθία δύο διαφορετικών πετρωμάτων. Αυτά είναι θολεϊτικοί βασάλτες και τοναλιτικά ή τροντγεμιτικά γρανιτικά πετρώματα (Barker & Peterman 1974, Arth & Hanson 1975, Barker & Arth 1976). Τα βασικά μάγματα προέρχονται από τον μανδύα και γεννιούνται από μερική τήξη περιδοτιτών. Μεγάλες ηφαιστειακές δομές μπορεί να έχουν συσσωρευτεί και βυθιστεί σε πυκνό βασαλτικό υλικό που οδήγησε στο σχηματισμό βασικών αμφιβολιτών, γρανατούχων γρανουλιτών, ή εκλογιτών (Taylor & McLeman 1985). Αυτό το πρώτο σημαντικό φλοιικό δομικό επεισόδιο έχει σχέση με τον μανδύα. Ακολουθείται από δύο μεγάλες ενδοφλοιικές μαγματικές διαδικασίες τροποποιώντας τον ηπειρωτικό φλοιό σ' έναν ανώτερο μανδύα με γρανοδιοριτική σύσταση κι έναν περισσότερο βασικό γρανουλιτικό κατώτερο φλοιό.



Σχ.1.4.1. Σχήμα που δείχνει τα σημαντικά ενδοφλοιικά επεισόδια τροποποιώντας τον ηπειρωτικό φλοιό. 1) Γένεση τοναλιτικών μαγμάτων από μερική τήξη αμφιβολιτών,εκλογιτών κ.λ.π. 2) Υποβύθιση, επώθηση κ.λ.π. τοναλιτών και των σχετικών ιζηματογενών και μεταμορφωμένων. 3) Σχηματισμός I- και S-τύπου γρανιτικών μαγμάτων από αφυδατική τήξη τοναλιτών, μεταγραουβάκων κ.λ.π. (Wedepohl 1991). (JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.)

Αυτές οι ενδοφλοιικές διαδικασίες περιγράφονται με την βοήθεια ενός μοντέλου που πρότεινε ο Wedepohl (1991) στο Σχ. 1.4.1. Το πρώτο ενδοφλοιικό μαγματικό επεισόδιο είναι η γένεση τοναλιτικών τηγμάτων από μερική τήξη βασικών πρωτολίθων. Αυτή η διαδικασία απαιτεί ενέργεια (η οποία μπορεί να προστεθεί από μαγματική επικάλυψη) και νερό. Οι αμφιβολίτες είναι τα πιο κατάλληλα βασικά μητρικά πετρώματα που έχουν την κατάλληλη σύσταση, καθώς και νερό. Τα πειραματικά ευρήματα που συζητήθηκαν ήδη παραπάνω δείχνουν ότι η αφυδατική τήξη των αμφιβολιτών μπορεί να παράγει τοναλιτικά μερικά τήγματα σε σχετικά χαμηλές T (βλ. Σχ. 1.2.2, βασισμένο κυρίως στα δεδομένα των Wolf & Wyllie 1994 και μερικά επιπρόσθετα αποτελέσματα των Johannes & Wolke 1994). Τα νέα δεδομένα υποστηρίζουν έναν ενδοφλοιικό σχηματισμό των τοναλιτικών μαγμάτων κατά την διάρκεια υψηλού βαθμού μεταμόρφωσης και διαφέρουν από τα παλαιότερα ευρήματα του Wyllie (1977a), ο οποίος πρότεινε ότι «τα τήγματα τοναλιτικής σύστασης δεν μπορούν να γεννηθούν από φλοιική ανάτηξη κάτω από συνθήκες ομαλής περιοχικής μεταμόρφωσης». Οι αρχαϊκοί τοναλίτες, τροντγεμίτες και οι γνεύσιοι της σύστασης TTG (tonalite-trondhjemite-granodiorite) τυπικά δείχνουν πολύ διαφοροποιημένα μοντέλα REE και σοβαρή πτώχευση σε HREE (Jahn & Sun 1979, Jahn et al 1984, Wedepohl et al. 1991). Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η πτώχευση σε HREE δεν μπορεί να προέρχεται από κλασματική κρυστάλλωση βασαλτικών μαγμάτων, αλλά δείχνει μια προέλευση από μερική τήξη βασαλτικών πετρωμάτων σε βάθη όπου ο Gr είναι μια σταθερή υπολειμματική φάση (Jahn & Sun 1979, Taylor & McLeman 1985) που συγκεντρώνει HREE (Schnetzler & Philpotts 1970, Gromet & Silver 1983). Η κρυστάλλωση του Gr θεωρείται ότι συμβαίνει σε βάθος του μανδύα (Jahn & Sun 1979). Όμως, τέτοια βάθη δεν απαιτούνται για την γένεση του Gr σε ανατηκτικούς αμφιβολίτες. Ο Gr μπορεί να έχει ήδη σχηματιστεί σε βάθος του φλοιού. Η καμπύλη του Gr που δόθηκε από τους Wyllie & Wolf (1993) και φαίνεται στο Σχ. 1.2.2, δείχνει ότι ο Gr είναι μια σταθερή φάση σε ένα ευρύ φάσμα T και P=10 kbar που ανταποκρίνονται σε ένα βάθος σχεδόν 35 km. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώθηκε από τους Johannes & Wolke (1994) σε πειράματα αφυδατικής τήξης

με σώματα Hb-Pl. Ένα πειραματικό αποτέλεσμα στην P των 10 kbar (T=900°C) δίνεται στο Σχ. 1.4.2. Δείχνει κρυστάλλωση Gr, CPx, νέας -πλούσιας σε Al- Hb, νέου –πλούσιου σε An- Pl και το σχηματισμό του τήγματος. Το τήγμα έχει μια σύσταση (No32 στον πίνακα 1 και Σχ. 1.2.4 και 1.2.5 α και β) σχεδόν ίδια με αυτήν των φυσικών τοναλιτών. Έτσι, το πρώτο ενδοφλοιικό επεισόδιο μερικής τήξης οδηγεί σε μια αύξηση των SiO_2, Na_2O και K_2O στο μερικό τήγμα και των FeO, MgO και CaO στο υπόλειμμα. Οι τύποι των πετρωμάτων που γεννιούνται από τον διαχωρισμό των τηγμάτων και των στερεών είναι τοναλίτες (ή τροντγεμίτες) και βασικοί γρανουλίτες. Οι τοναλίτες που σχηματίστηκαν έτσι είναι κατάλληλα μητρικά πετρώματα για την γένεση γρανιτικών μερικών τηγμάτων. Αυτό το δεύτερο ενδοφλοιικό μαγματικό επεισόδιο μπορεί να συμβεί σε σχετικά χαμηλές T στους 800°C. Αυτό σημαίνει μία παραπάνω αύξηση των Na_2O και K_2O στο μερικό τήγμα και των FeO, MgO και CaO στο υπόλειμμα. Η αύξηση του SiO_2 στο τήγμα μπορεί να είναι λιγότερο φανερή. Τα πετρώματα που προκύπτουν είναι όξινοι γρανουλίτες και I-τύπου γρανοδιορίτες ή γρανίτες. Οι ανατηκτικοί γρανίτες και γρανοδιορίτες μπορούν επίσης να σχηματιστούν από μερική τήξη (μετα)γραουβάκων. Οι περισσότεροι γραουβάκες είναι τοναλιτικής σύστασης (Wedepohl, 1995) και τα προϊόντα της μερικής τήξης των γραουβάκων μπορεί να είναι σχεδόν ίδια με αυτών που γεννιούνται στους τοναλίτες. Όμως, τα ιχνοστοιχεία καθώς και κάποια κύρια στοιχεία μπορεί να παρουσιάζουν χαρακτηριστικά ενός S- ή I-τύπου γρανίτη. Η σύσταση του ολικού φλοιού είναι κυρίως το αποτέλεσμα της μερικής τήξης μανδυακού υλικού. Μπορεί να τροποποιηθεί με απώλεια βασικού υπολείμματος στον ανώτερο μανδύα (Wedepohl, 1991). Όμως, η εξέλιξη του ηπειρωτικού φλοιού σε γρανοδιοριτικό ανώτερο φλοιό και σε κατώτερο φλοιό να κυριαρχείται από όξινους και βασικούς γρανουλίτες οφείλεται σε ενδοφλοιικά επεισόδια. Ο μαγματισμός του γρανίτη παίζει τον πιο σημαντικό ρόλο σ' αυτές τις ενδοφλοιικές διαδικασίες.



Σχ. 1.4.2. Ηλεκτρονική μικροσκοπική εικόνα ενός πειραματικού προϊόντος με ένα κρύσταλλο Pl που περιβάλλεται από Hb. Τρέχουσες συνθήκες:10 kbar, 900^o C, NNO buffer,6 μέρες. Το τήγμα και ο γρανάτης σχηματίζονται στο όριο Hb-Pl. Η σύσταση του αρχικού Pl είναι An $_{58}$. Η σύσταση του τήγματος που περιβάλλει τον Gr δίνεται στον πίνακα 1. (JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.)

2. Διαγράμματα και Σχολιασμός

2.1. Δεδομένα και διαγράμματα

Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τα πειράματα τήξης σε διάφορες θερμοκρασίες (T) και πιέσεις (P) των Hacker (1990), Beard & Lofgren (1991), Rapp et al. (1991), Rushmer (1991), Johannes & Wolke (1994), Senn & Dun (1994), Wolf & Wyllie (1994), Rapp (1995) και Rapp & Watson (1995). Αυτά προβλήθηκαν σε διαγράμματα, με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της T και της P στη σύσταση του τήγματος που προκύπτει έπειτα από την τήξη των αρχικών πετρωμάτων. Τα αρχικά πετρώματα είναι κυρίως αμφιβολίτες (με σύσταση αλκαλι-βασάλτη, μετα-θολεϊίτη, ανδεσίτη). Τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι το τριγωνικό AFM διάγραμμα με συντεταγμένες A=Al_2O_3-(Na_2O+K_2O+CaO), F=Na_2O+K_2O και M=CaO+FeO+MgO και διαγράμματα XY, στα οποία η σύσταση των τηγμάτων προβάλλεται σαν εξαρτημένη μεταβλητή της P ή της T και στα οποία αρχικά τοποθετήσαμε όλα τα τήγματα και έπειτα τα τήγματα ανά πείραμα (από διαφορετικά αρχικά υλικά). Ανά πείραμα φτιάξαμε επίσης και διαγράμματα T-A/CNK και P-A/CNK, για να παρατηρήσουμε αν τα τήγματα είναι μεταργιλλικά ή υπεραργιλλικά και αν υπάρχει μετάβαση από τον ένα τύπο στον άλλο. Στα AFM διαγράμματα τοποθετήσαμε όλα τα τήγματα ταξινομημένα κάθε φορά ως προς ένα στοιχείο (SiO_2, TiO_2, κ.λ.π.) ή μια μεταβλητή (T ή P).

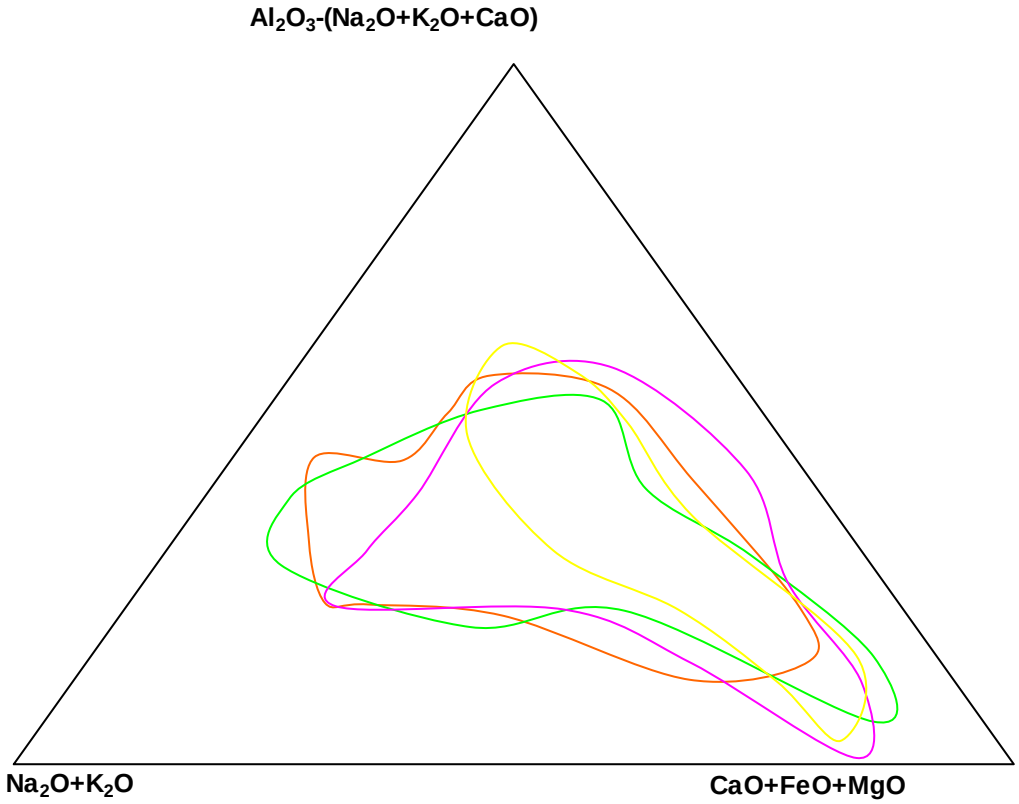
Παρακάτω περιγράφονται οι παρατηρήσεις και ο σχολιασμός όλων των διαγραμμάτων που προαναφέρθηκαν.

2.2. SiO_2

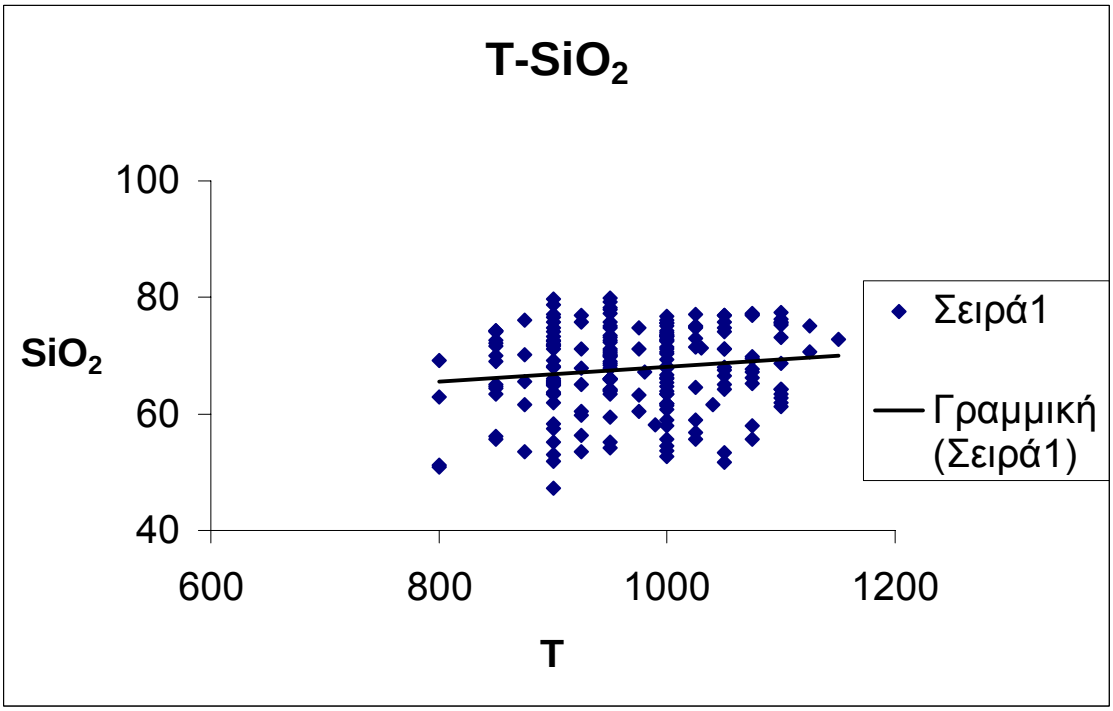
Το SiO_2 φαίνεται να παρουσιάζει αλλιλεπικάλυψη και μια γενική τάση προς μεγαλύτερη περιεκτικότητα του τήγματος σε CaO+FeO+MgO, στο τριγωνικό διάγραμμα AFM. Παρ' όλα αυτά κανένα από τα τήγματα, με μεγάλη ή μικρή περιεκτικότητα σε SiO_2, δεν εμφανίζει κάποια ιδιαίτερη τάση προς τις κορυφές του τριγώνου AFM (Σχ. 2.2.1).

Ως προς την θερμοκρασία (T), βλέπουμε ότι δεν παρουσιάζεται κάποια ιδιαίτερη τάση του SiO_2 των τηγμάτων ή παρουσιάζεται μια μικρή θετική συσχέτιση της περιεκτικότητάς του με την αύξηση της T. Σε γενικές γραμμές, ωστόσο, βλέπουμε ότι σε δεδομένη T μπορούμε να πάρουμε τήγματα με διαφορετική περιεκτικότητα σε SiO_2. π.χ. σε T=800° C, έχουμε 3 τήγματα με διαφορετικές περιεκτικότητες σε SiO_2 (51,28, 62,84 και 69,12) (Σχ. 2.2.2).

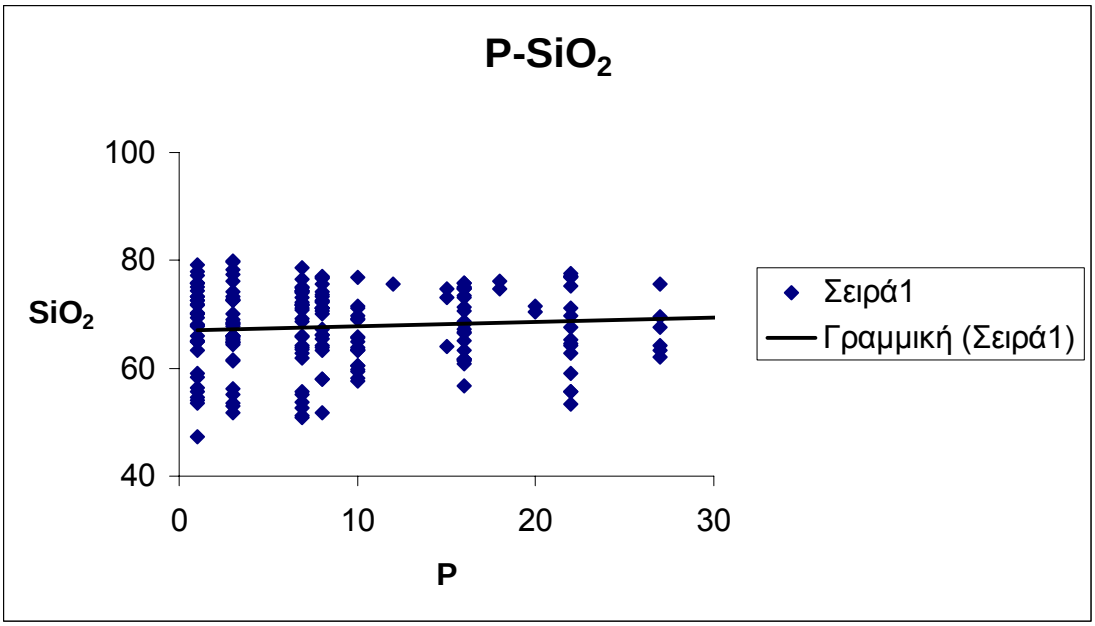
Ως προς την πίεση (P), το SiO_2 από όλα τα τήγματα μπορεί να εμφανιστεί με διαφορετικό ποσοστό για την ίδια P. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Σχ. 2.2.3), π.χ. σε P=15 kbar, συναντάμε τήγμα με SiO_2 =63,99, τήγμα με SiO_2=73,04 και τήγμα με SiO_2=74,71. Επομένως, βλέπουμε ότι γενικά σε μεγάλες P μπορούμε να πάρουμε τήγματα με μεγάλη αλλά και με μικρή περιεκτικότητα σε SiO_2. Το ίδιο ισχύει και για τις μικρές και μέσες P.



Σχ. 2.2.1.Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το SiO_2



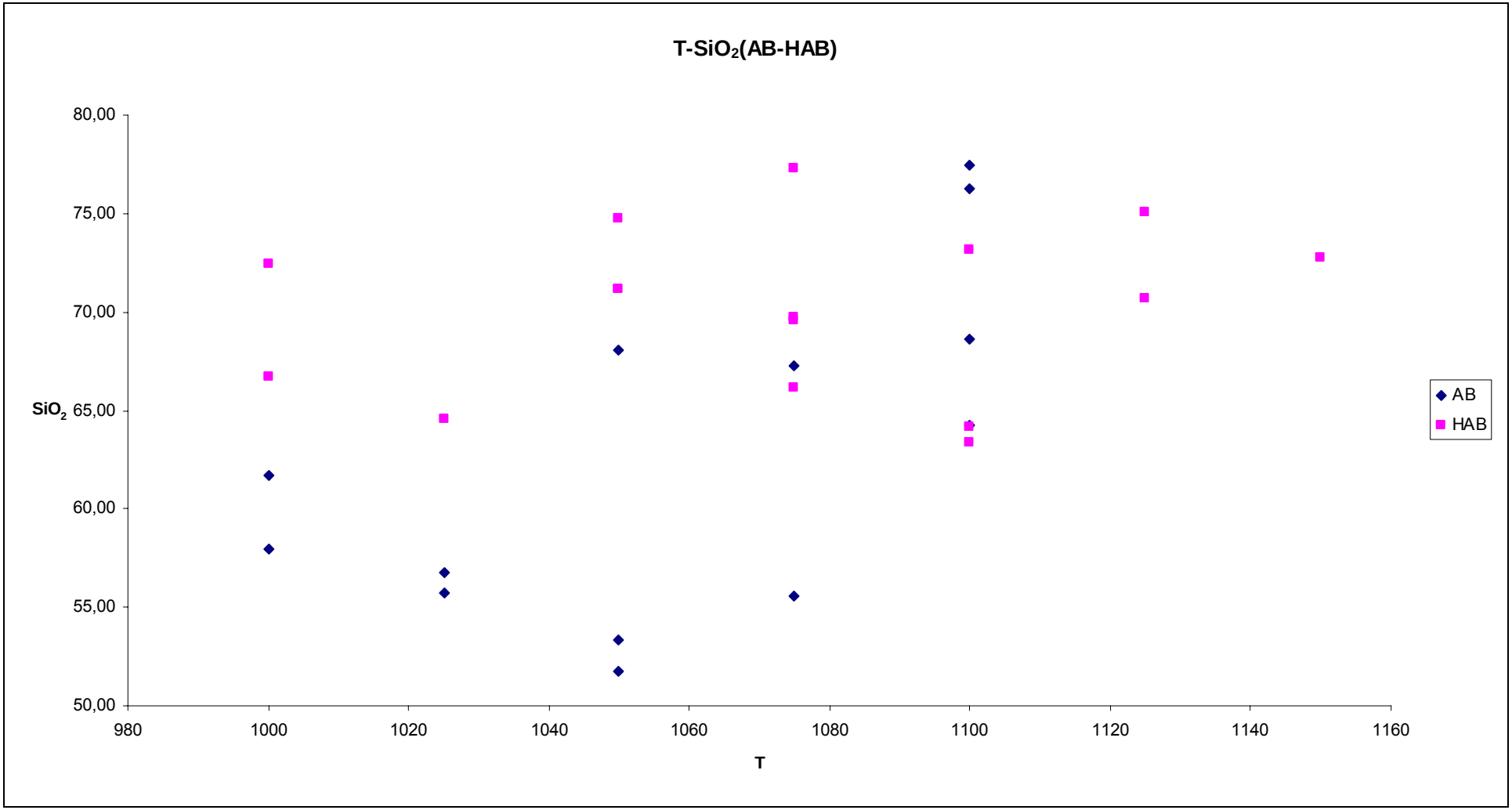
Σχ. 2.2.2. Διάγραμμα $T\text{-}SiO_2$



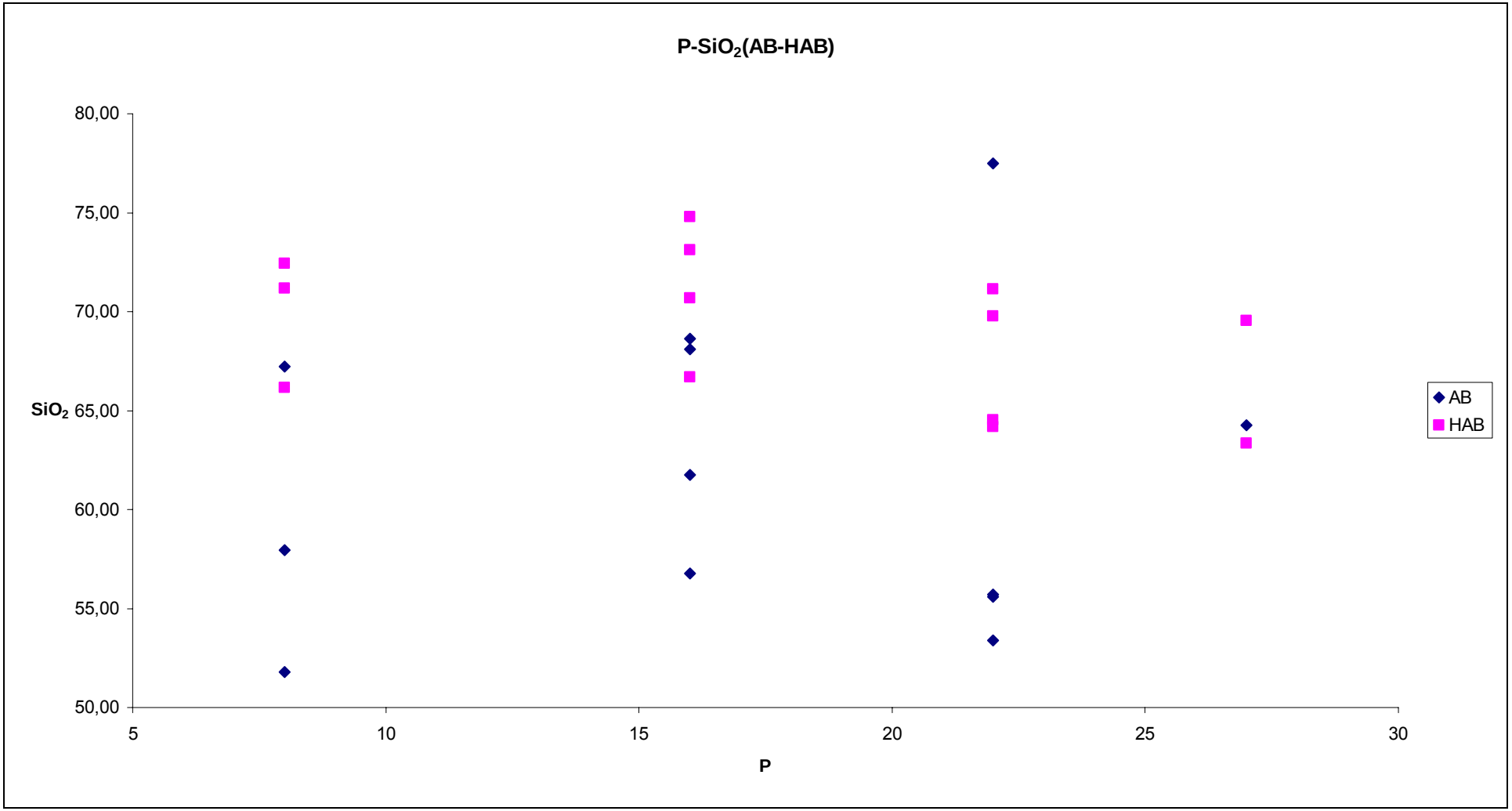
Σχ. 2.2.3. Διάγραμμα P-SiO_2

Στα διαγράμματα T- SiO_2 ανά πείραμα, παρατηρούμε ότι από το πείραμα με αρχικό υλικό το δείγμα AB, τα τήγματα που προκύπτουν παρουσιάζουν αύξηση της περιεκτικότητάς τους σε SiO_2 καθώς αυξάνεται η T, ενώ το SiO_2 των τηγμάτων που προκύπτουν από το δείγμα HAB παρουσιάζει μια σταθερότητα με την αύξηση της T, όπως περίπου και από το δείγμα MAT. Τα τήγματα από το αρχικό υλικό LKT παρουσιάζουν μικρή ελάττωση της περιεκτικότητάς τους σε SiO_2, όπως και από το δείγμα SC478. Από το δείγμα SC466 προκύπτουν τήγματα με σχεδόν σταθερό SiO_2, ενώ εκείνα των δειγμάτων SC555, SC557 και SC571 παρουσιάζουν αύξηση του SiO_2 με την αύξηση της T (Σχ. 2.2.4 α, 2.2.5 α, 2.2.6 α και 2.2.7 α).

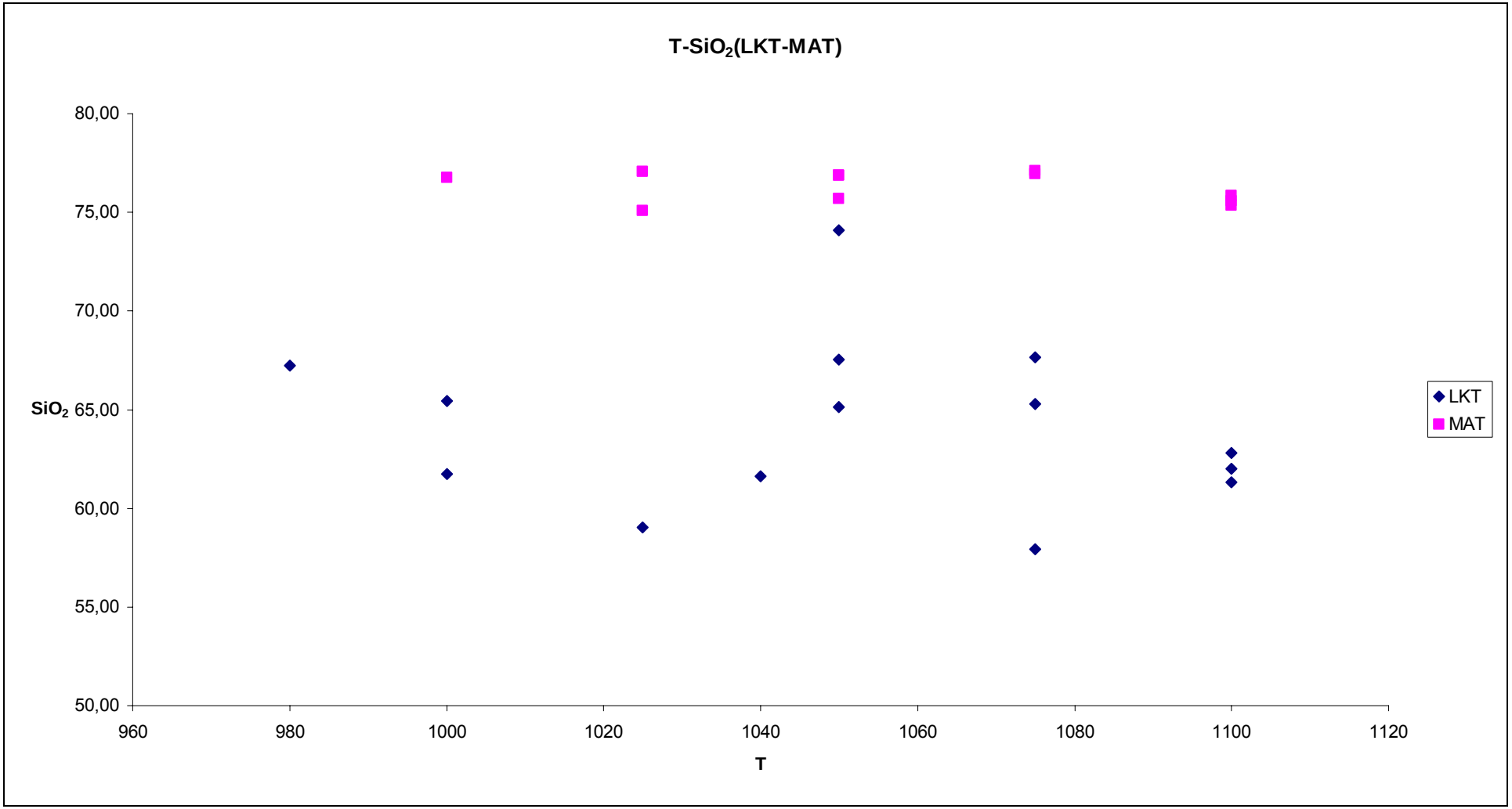
Από τα διαγράμματα P- SiO_2 ανά πείραμα, παρατηρούμε ότι στο πείραμα με αρχικό υλικό το δείγμα AB, έχουμε αύξηση του SiO_2 στο τήγμα με την αύξηση της P. Το ίδιο συμβαίνει και με το τήγμα από το δείγμα HAB. Στο διάγραμμα όπου προβάλλονται τα τήγματα από τα δείγματα LKT και MAT, φαίνεται ότι το SiO_2 παραμένει σχεδόν σταθερό με μια μικρή ελάττωση με την αύξηση της P. Ενώ ελάττωση παρουσιάζει το SiO_2 των τηγμάτων από τα αρχικά υλικά SC466, SC478 και SC555, καθώς και από τα SC557 και SC571 (Σχ. 2.2.4 β, 2.2.5 β, 2.2.6 β και 2.2.7 β).



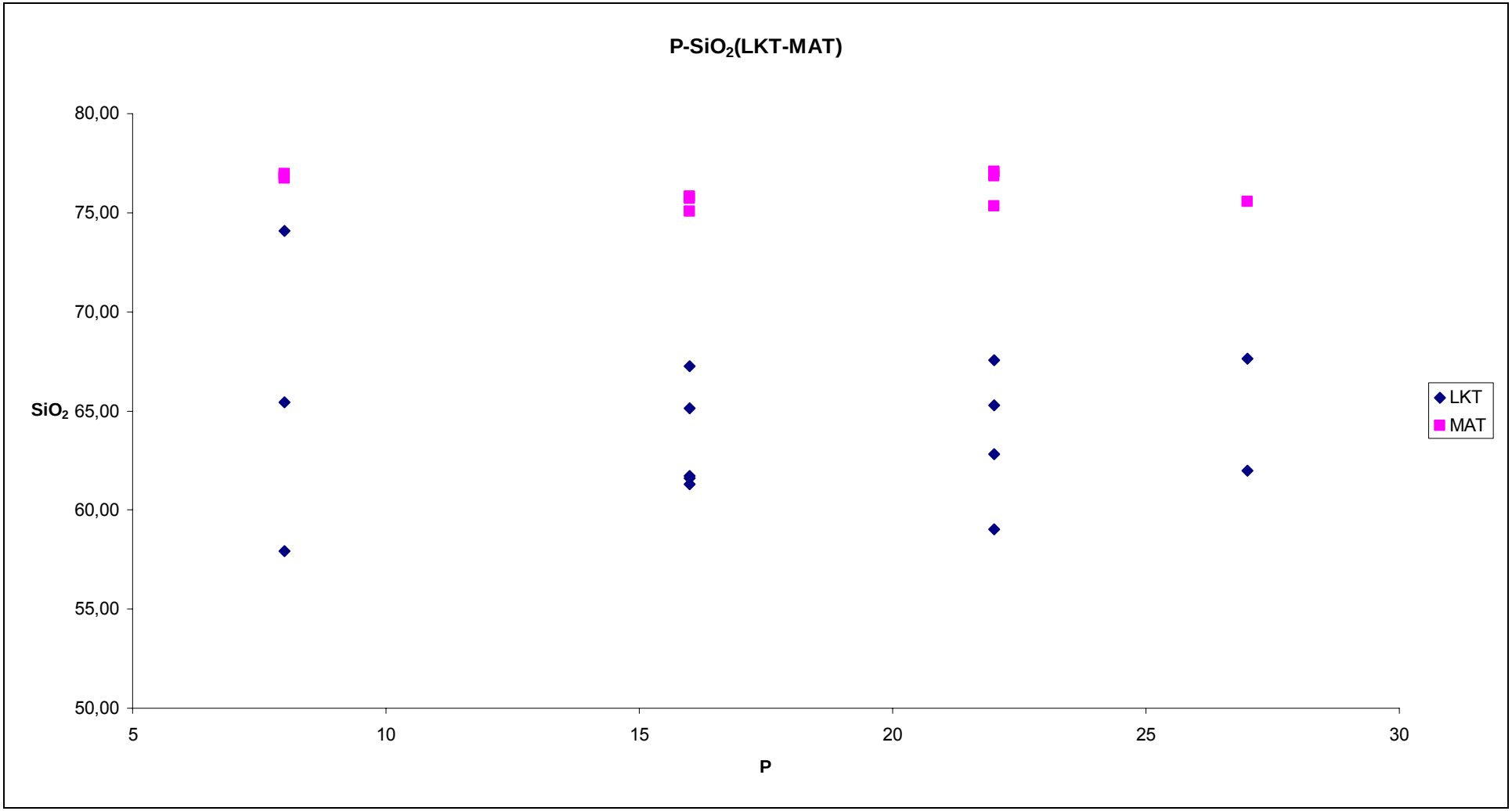
Σχ. 2.2.4α Διάγραμμα T-SiO_2 για τα δείγματα AB και HAB.



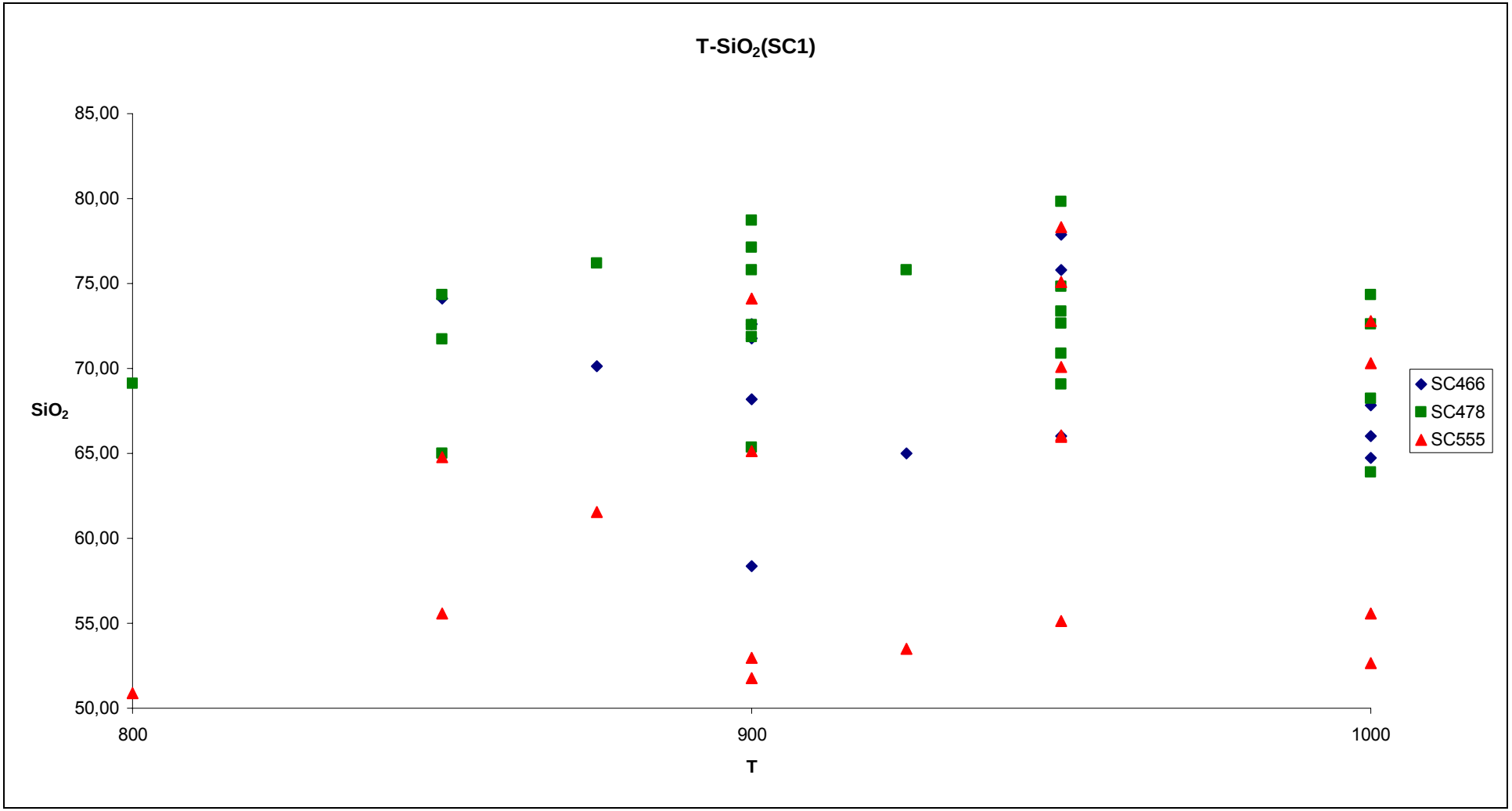
Σχ. 2.2.4β Διάγραμμα P-SiO_2 για τα δείγματα AB και HAB.



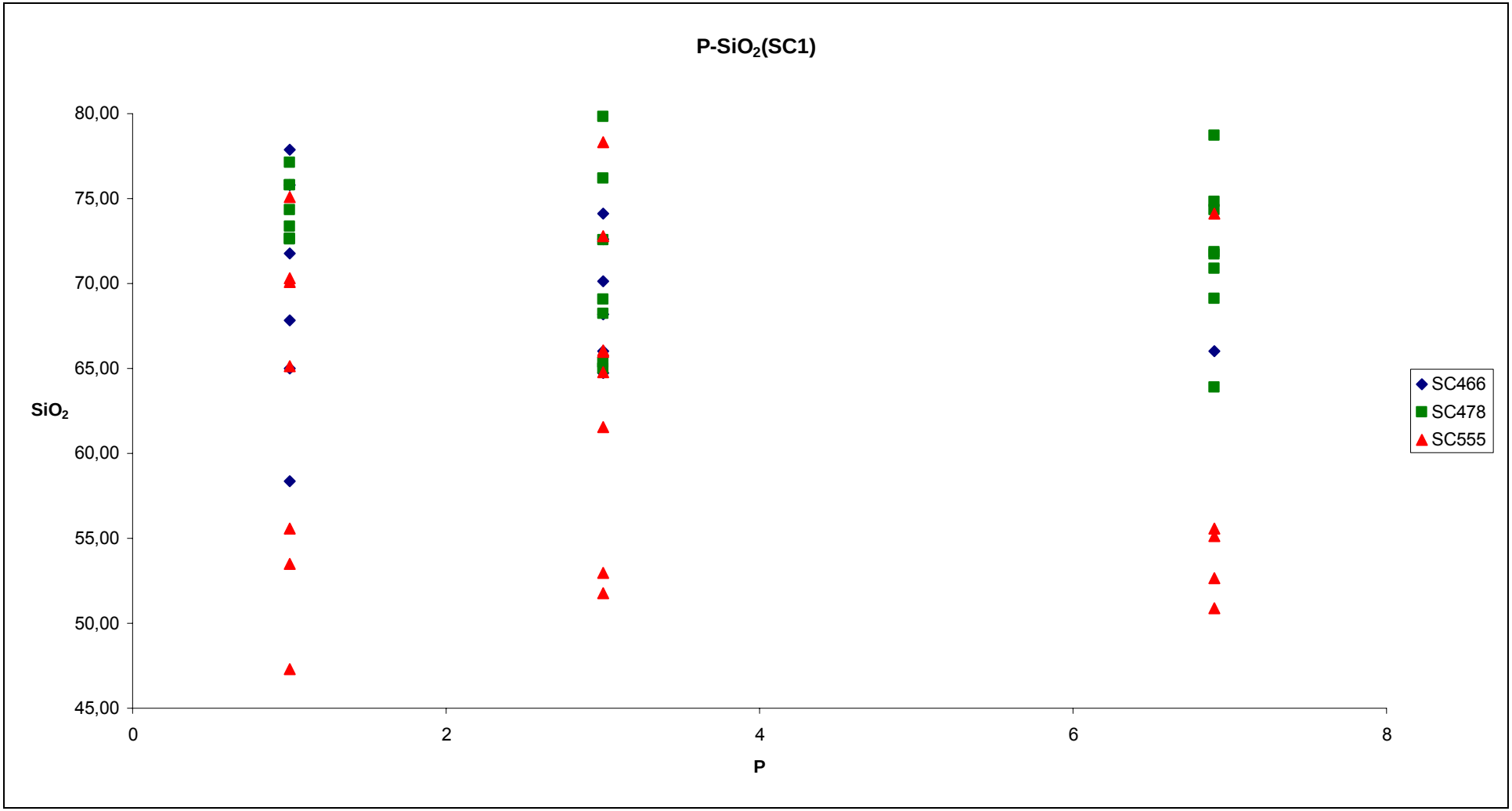
Σχ. 2.2.5α Διάγραμμα *T-SiO_2 για τα δείγματα LKT και MAT.*



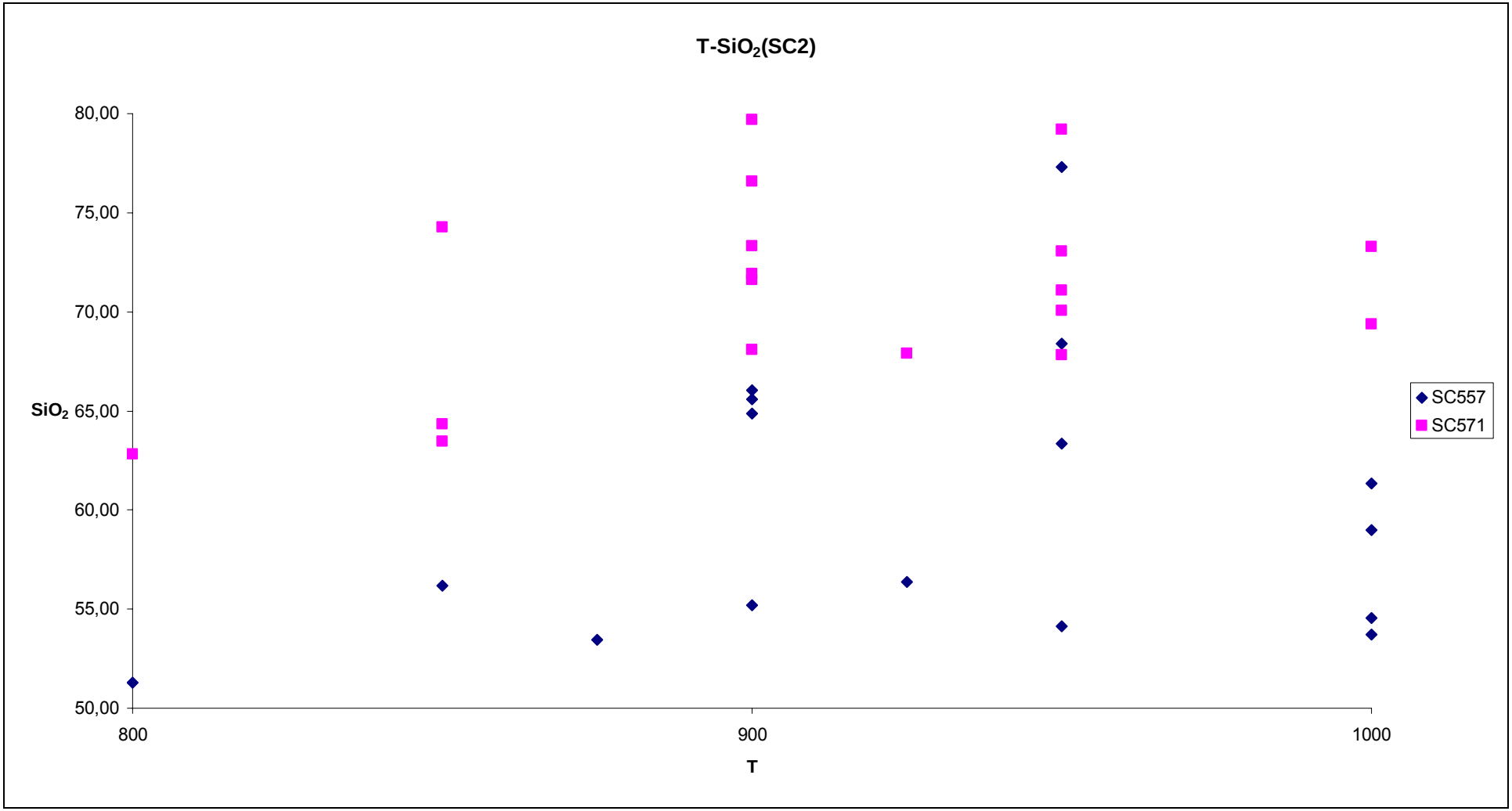
Σχ. 2.2.5β Διάγραμμα P-SiO_2 για τα δείγματα LKT και MAT.



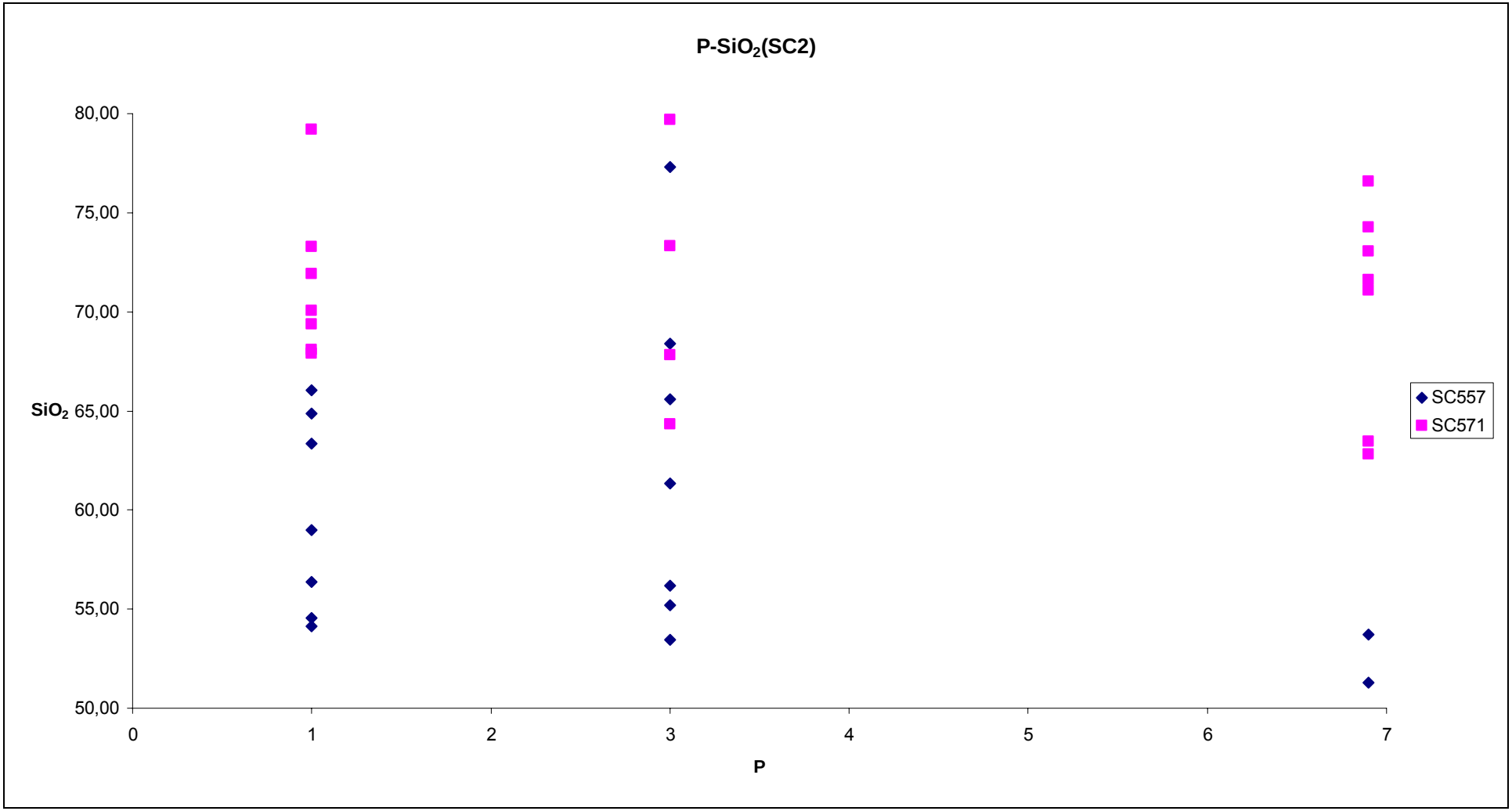
Σχ. 2.2.6α Διάγραμμα *T-SiO_2 για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.*



Σχ. 2.2.6β Διάγραμμα *P-SiO₂ για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.*



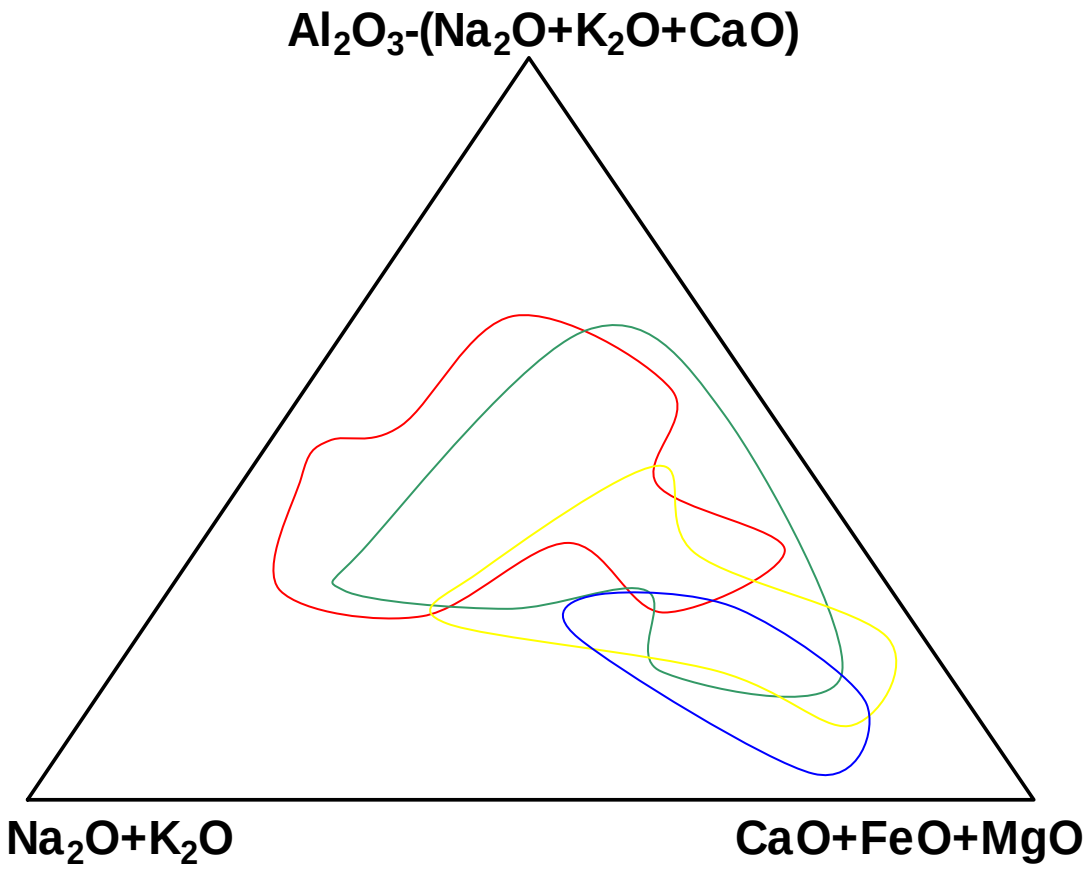
Σχ. 2.2.7α Διάγραμμα T-SiO_2 για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ. 2.2.7β Διάγραμμα P-SiO_2 για τα δείγματα SC557 και SC571.

2.3. TiO_2

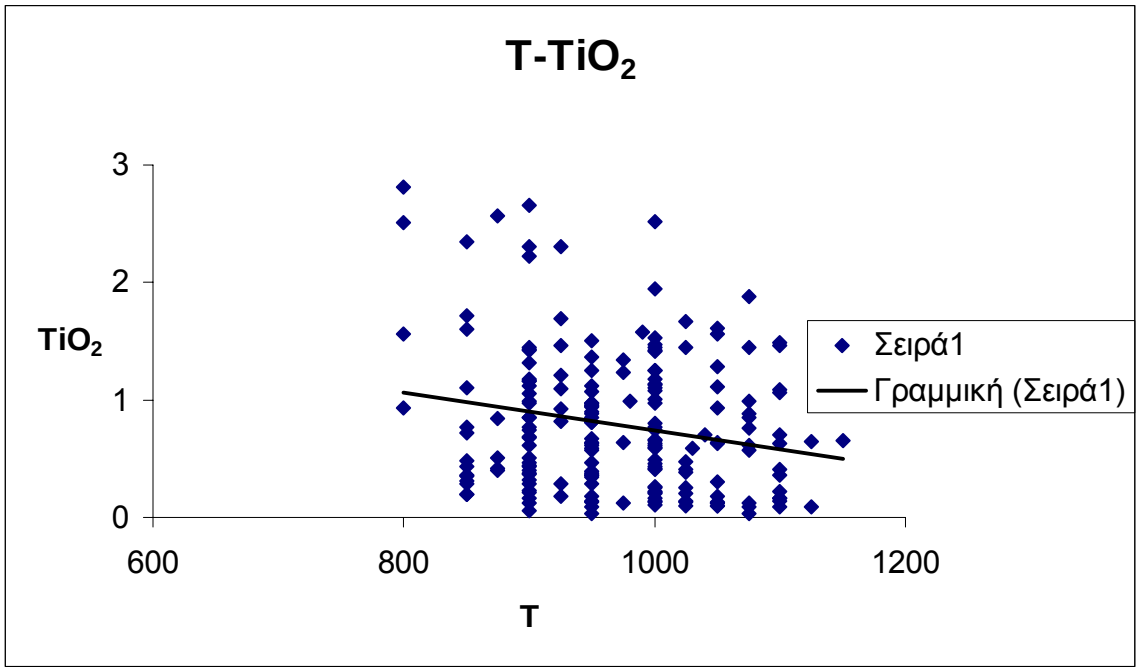
Το TiO_2 παρουσιάζει αλληλεπικάλυψη και μία γενική τάση και μια γενική τάση προς μεγαλύτερη περιεκτικότητα του τήγματος σε CaO+FeO+MgO, στο τριγωνικό διάγραμμα AFM. Ιδιαίτερα τα τήγματα με τη μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε TiO_2 (2,13-2,83, μπλε γραμμή) τείνουν έντονα προς την κορυφή CaO+FeO+MgO, που σημαίνει ότι εμφανίζουν και μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε CaO+FeO+MgO (Σχ. 2.3.1).



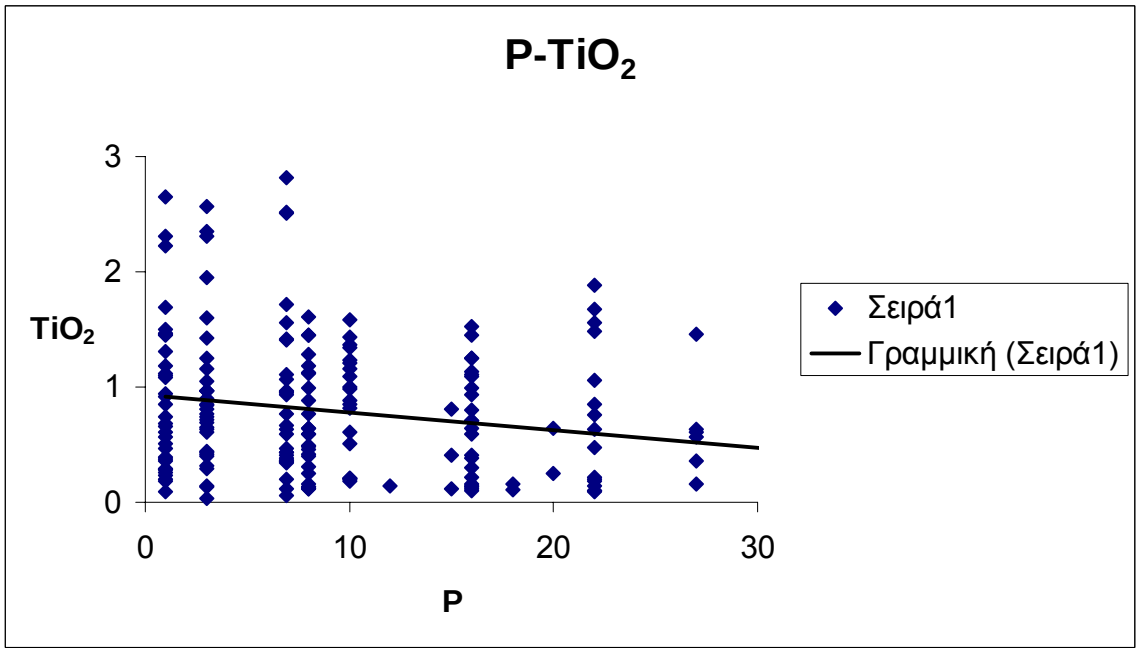
Σχ.2.3.1 Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το TiO_2.

Με την αύξηση της T, το TiO_2 γενικά παρουσιάζει ελάττωση. Π.χ. στους 800° C , που είναι η χαμηλότερη T, παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες σε TiO_2 που ξεκινούν από 0,93 και φτάνουν ως και 2,82. Ενώ στους 1150° C , που είναι η υψηλότερη T, παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητα σε TiO_2 =0,65 (Σχ. 2.3.2).

Ως προς την P, το TiO_2 εμφανίζει ελάττωση με την αύξησή της. Π.χ. σε P=1 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες από 0,09 που φτάνουν ως 2,63, ενώ σε P=27 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες από 0,16 ως 1,46. Άρα σε μικρότερη P μπορούμε να πάρουμε τήγματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε TiO_2 απ' ότι σε μια μεγαλύτερη P (Σχ. 2.3.3).



Σχ.2.3.2. Διάγραμμα T-TiO_2.

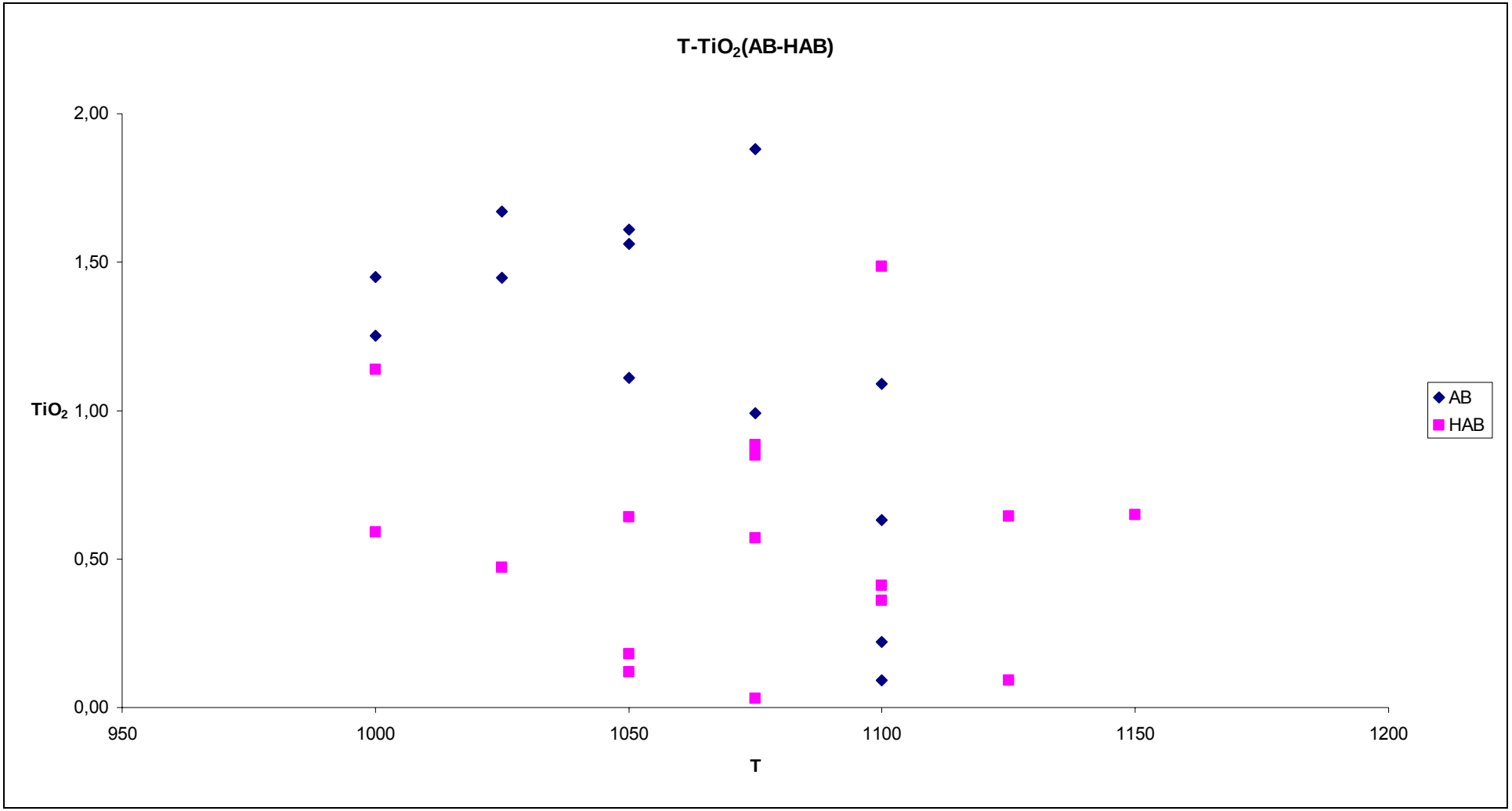


Σχ.2.3.3. Διάγραμμα P-TiO_2.

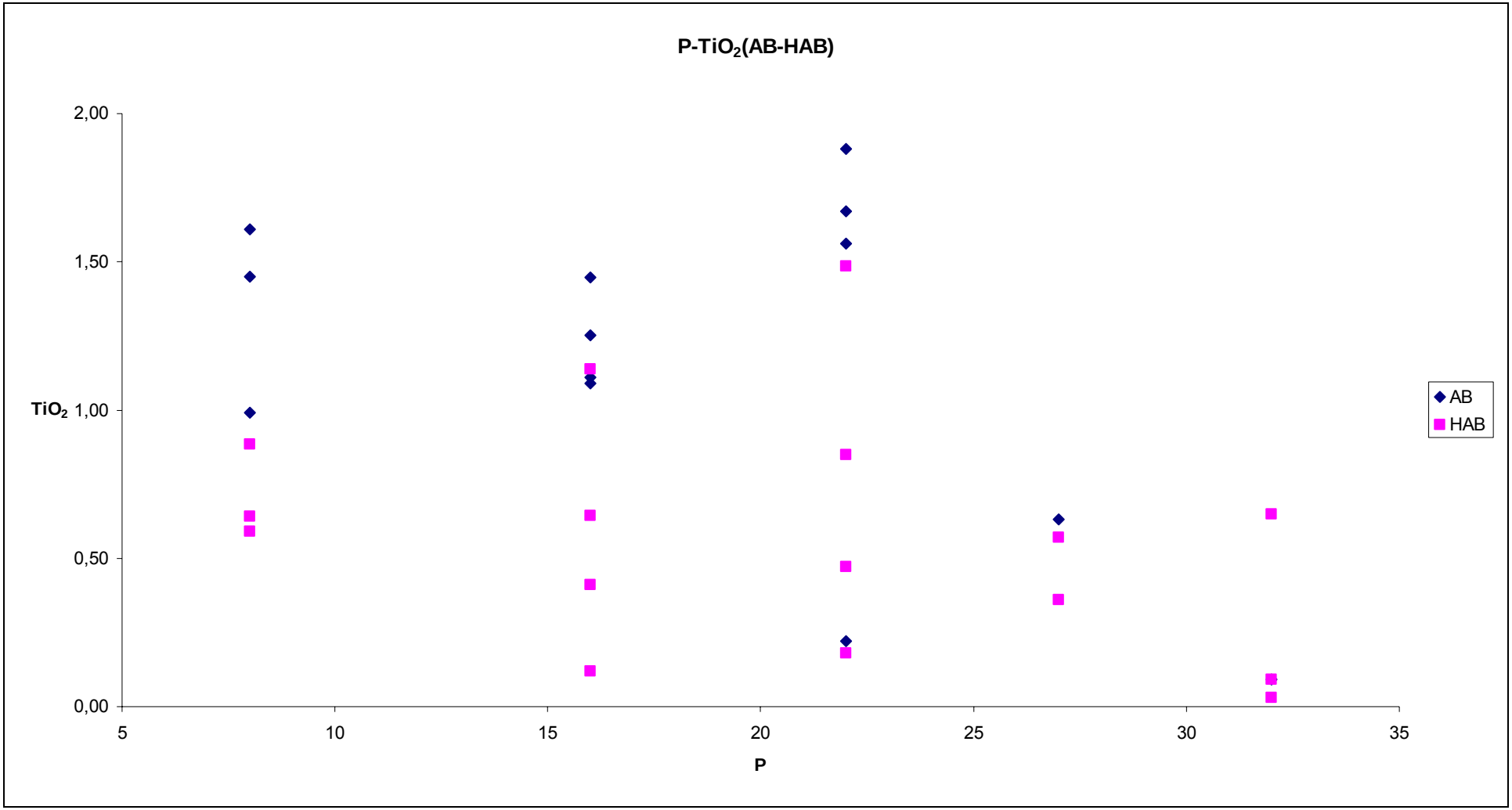
Στα διαγράμματα T-TiO_2 ανά πείραμα παρατηρούμε ότι από το πείραμα με αρχικό υλικό το δείγμα ΑΒ παίρνουμε τήγματα που παρουσιάζουν ελάττωση της περιεκτικότητας τους σε TiO_2 με την αύξηση της Τ, ενώ από το δείγμα ΗΑΒ τα τήγματα που προκύπτουν έχουν σχεδόν σταθερή περιεκτικότητα σε TiO_2 με μία πολύ μικρή ελάττωση. Σταθερότητα εμφανίζουν και τα τήγματα από το αρχικό υλικό ΜΑΤ. Αύξηση της περιεκτικότητας σε TiO_2 με την αύξηση της Τ παρουσιάζουν τα

τήγματα που προκύπτουν από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα LKT και SC466. Ενώ ελάττωση παρουσιάζουν τα τήγματα από τα δείγματα SC478, SC555, SC557 και SC571 (Σχ. 2.3.4 α, 2.3.5 α, 2.3.6 α και 2.3.7 α).

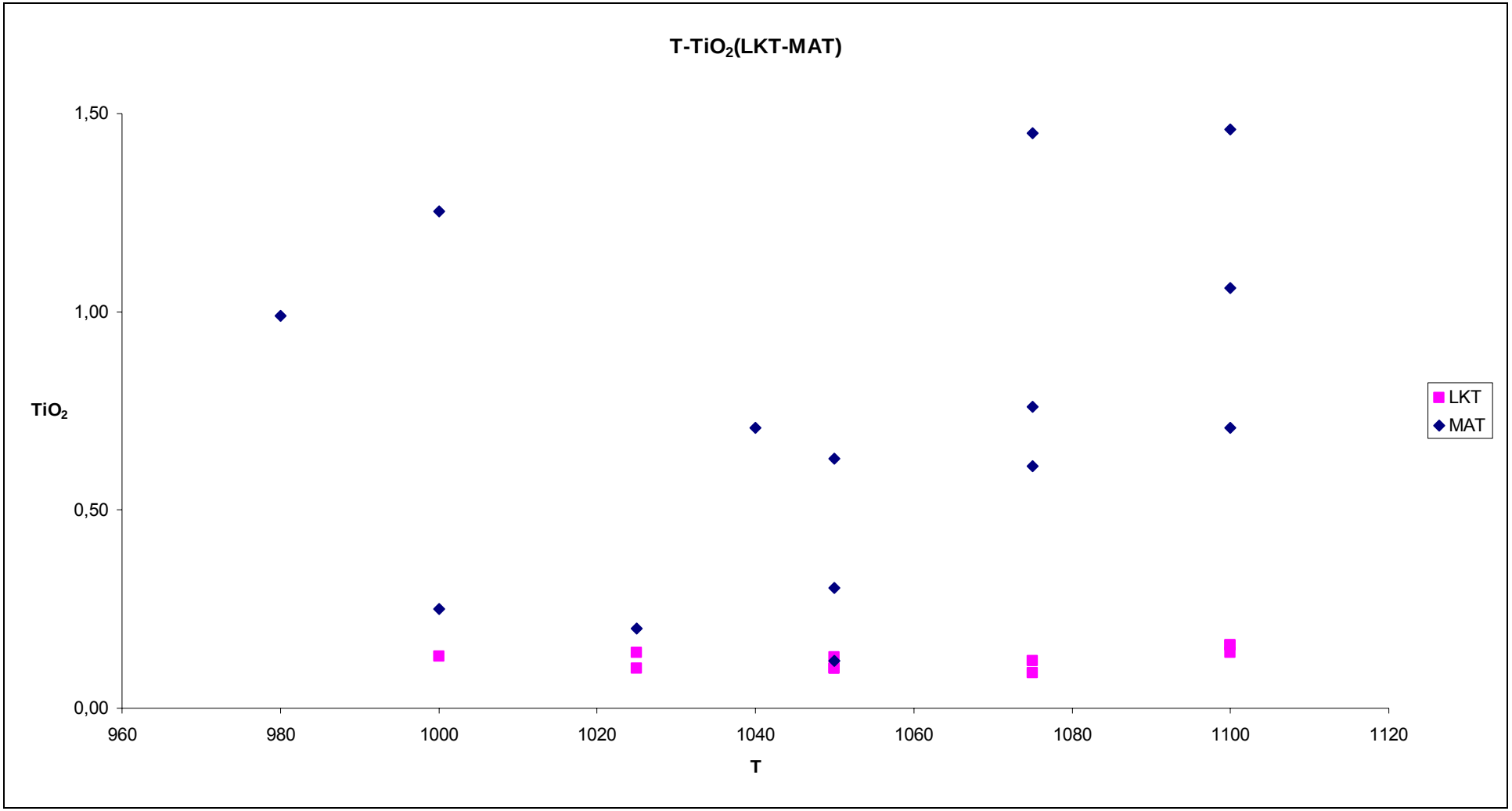
Από τα διαγράμματα P-TiO_2 ανά πείραμα προκύπτει ότι τα τήγματα που προκύπτουν από τα αρχικά υλικά AB και HAB εμφανίζουν ελάττωση της περιεκτικότητάς τους σε TiO_2 με την αύξηση της P. Αύξηση της περιεκτικότητας με την αύξηση της P παρουσιάζουν τα τήγματα από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα LKT, SC557 και SC571, ενώ από τα δείγματα MAT, SC466, SC478 και SC555 τα τήγματα που προκύπτουν παρουσιάζουν σταθερότητα στην περιεκτικότητά τους σε TiO_2 (Σχ. 2.3.4 β, 2.3.5 β, 2.3.6 β και 2.3.7 β).



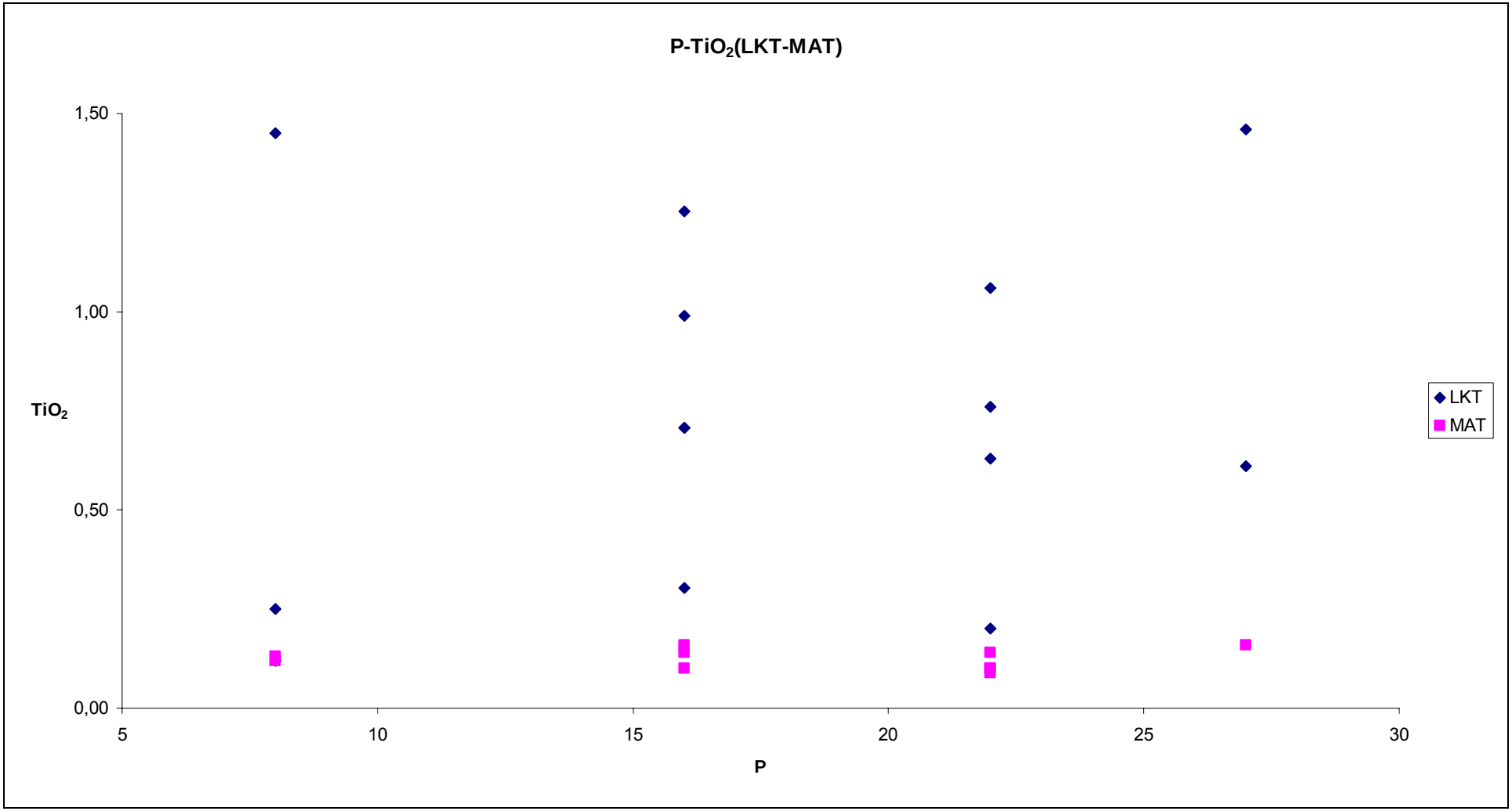
Σχ.2.3.4α Διάγραμμα T-TiO_2 για τα δείγματα AB και HAB.



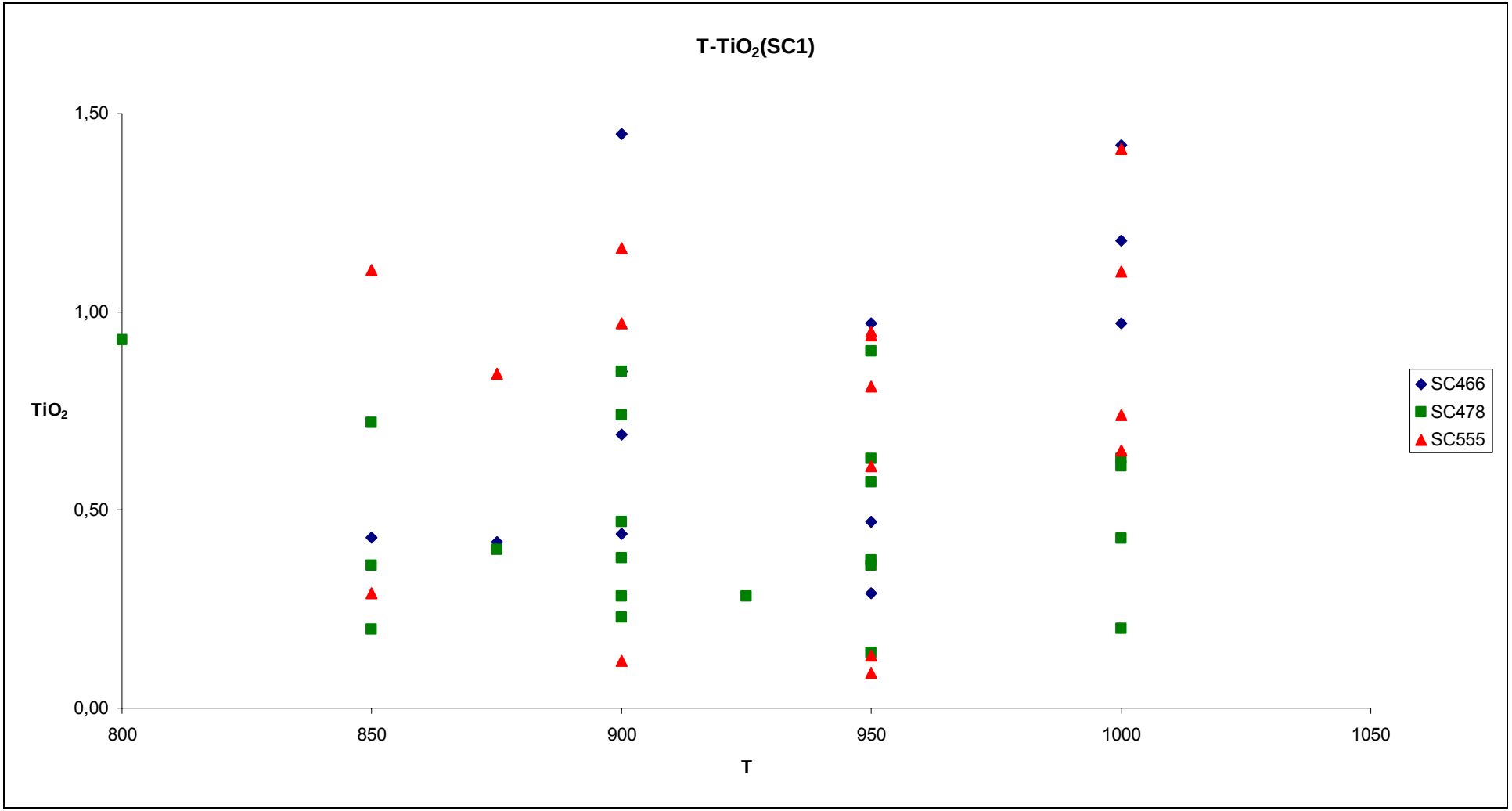
Σχ.2.3.4β Διάγραμμα P-TiO_2 για τα δείγματα AB και HAB.



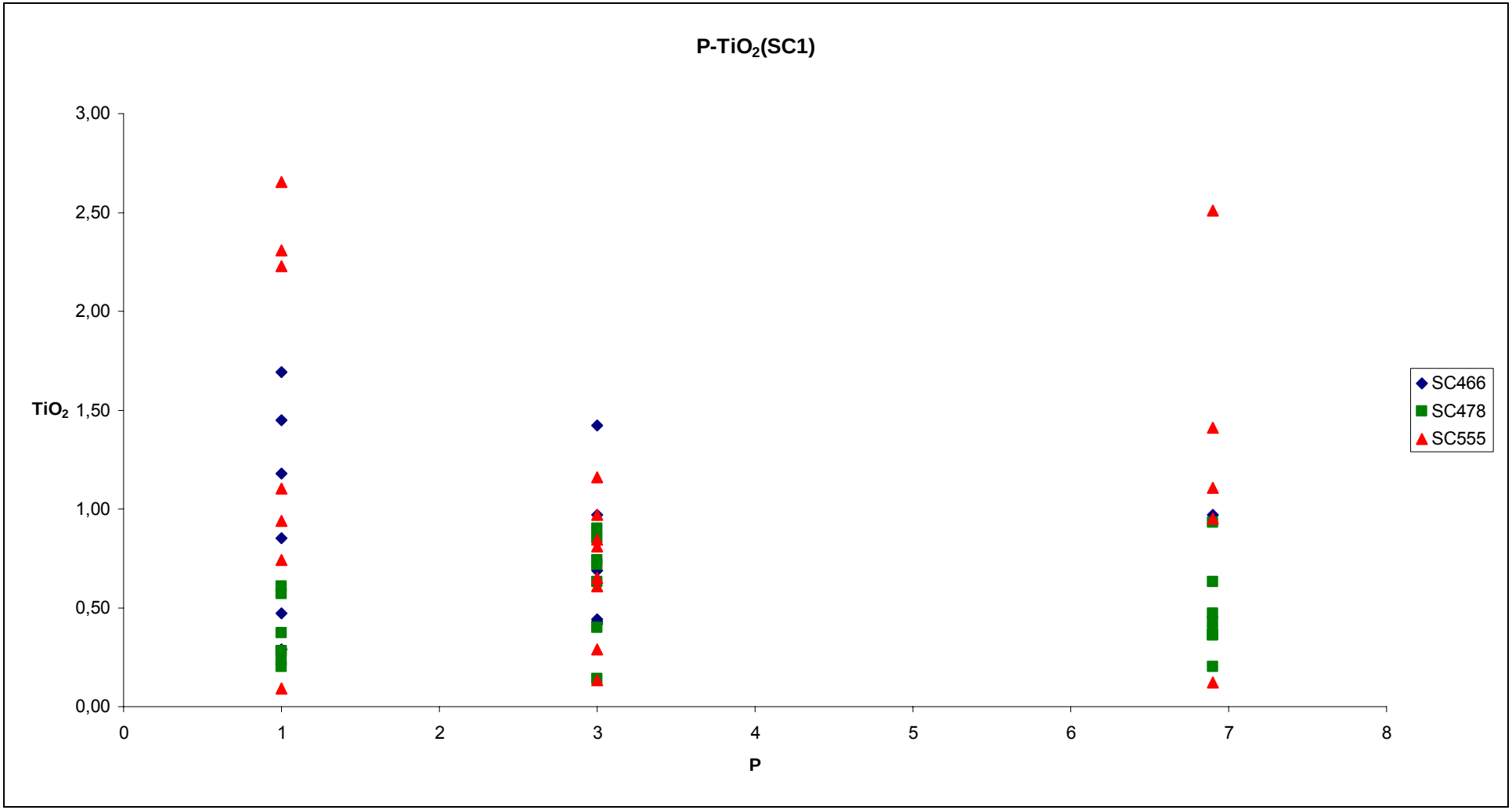
Σχ.2.3.5α Διάγραμμα T-TiO_2 για τα δείγματα LKT και MAT.



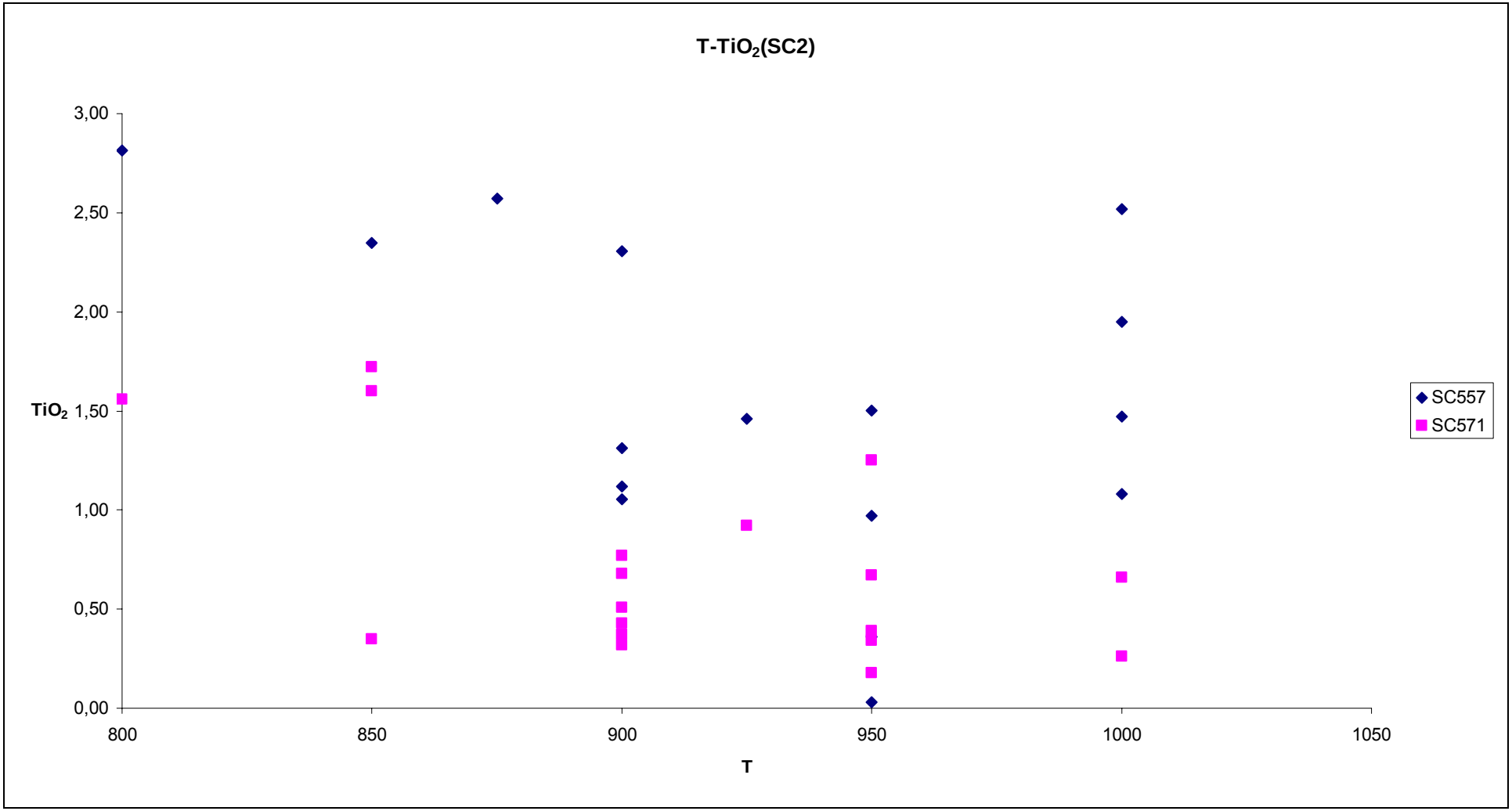
Σχ.2.3.5β Διάγραμμα P-TiO_2 για τα δείγματα LKT και MAT.



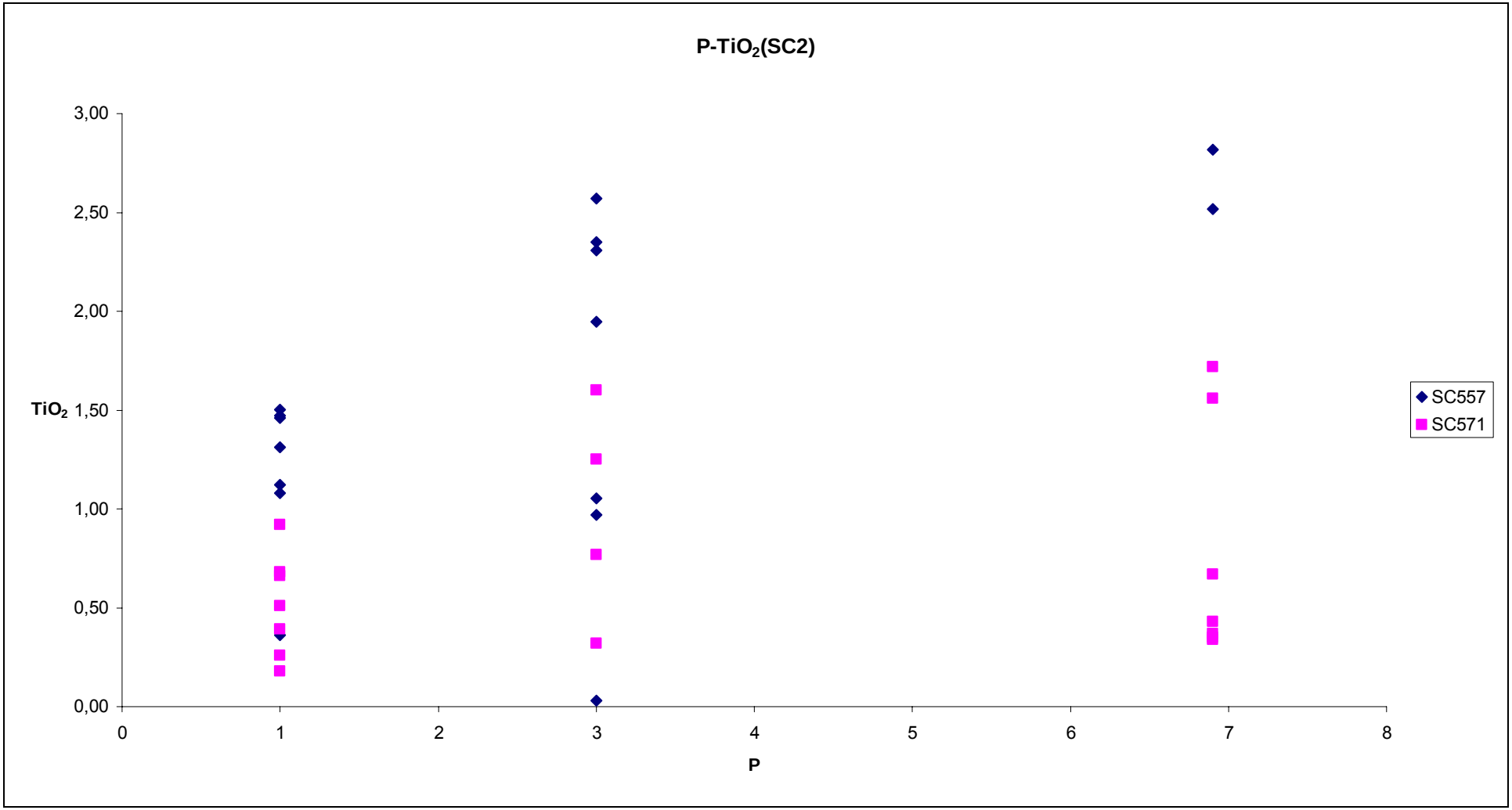
Σχ.2.3.6α Διάγραμμα T-TiO_2 για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ.2.3.6β Διάγραμμα P-TiO_2 για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



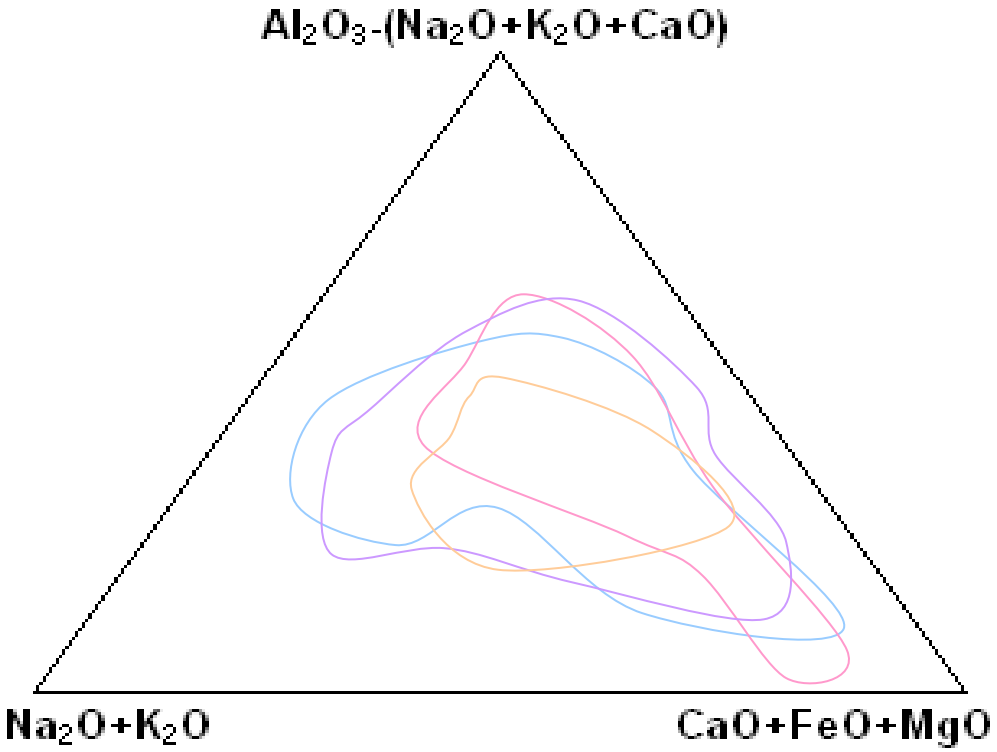
Σχ.2.3.7α Διάγραμμα T-TiO_2 για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ.2.3.7β Διάγραμμα P-TiO_2 για τα δείγματα SC557 και SC571

2.4. Al_2O_3

Στο τριγωνικό διάγραμμα AFM παρατηρούμε ότι τα τήγματα που ταξινομήθηκαν με βάση το Al_2O_3 παρουσιάζουν αλληλεπικάλυψη και μια γενική μικρή τάση προς την κορυφή CaO+FeO+MgO. Ιδιαίτερα αυτή η τάση εμφανίζεται στα τήγματα με τη χαμηλότερη περιεκτικότητα σε Al_2O_3 (11-14, ροζ γραμμή) (Σχ. 2.4.1).



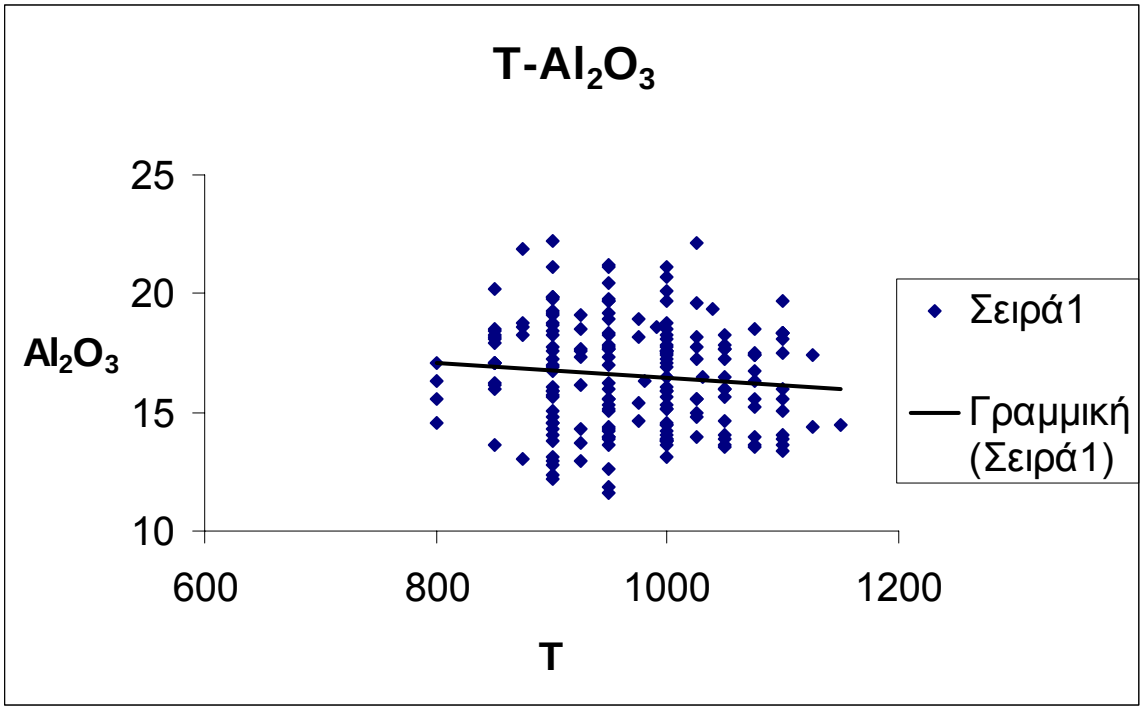
Σχ.2.4.1. Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το Al_2O_3.

Ως προς την αύξηση της T, το Al_2O_3 παραμένει σχεδόν σταθερό στα τήγματα με μια μικρή τάση ελάττωσης. Γενικά, παίρνουμε και χαμηλές και υψηλές περιεκτικότητες σε όλες τις δεδομένες T. π.χ. στους 800° C παίρνουμε τήγματα με Al_2O_3=13,03, αλλά και με Al_2O_3=21,91 (Σχ. 2.4.2).

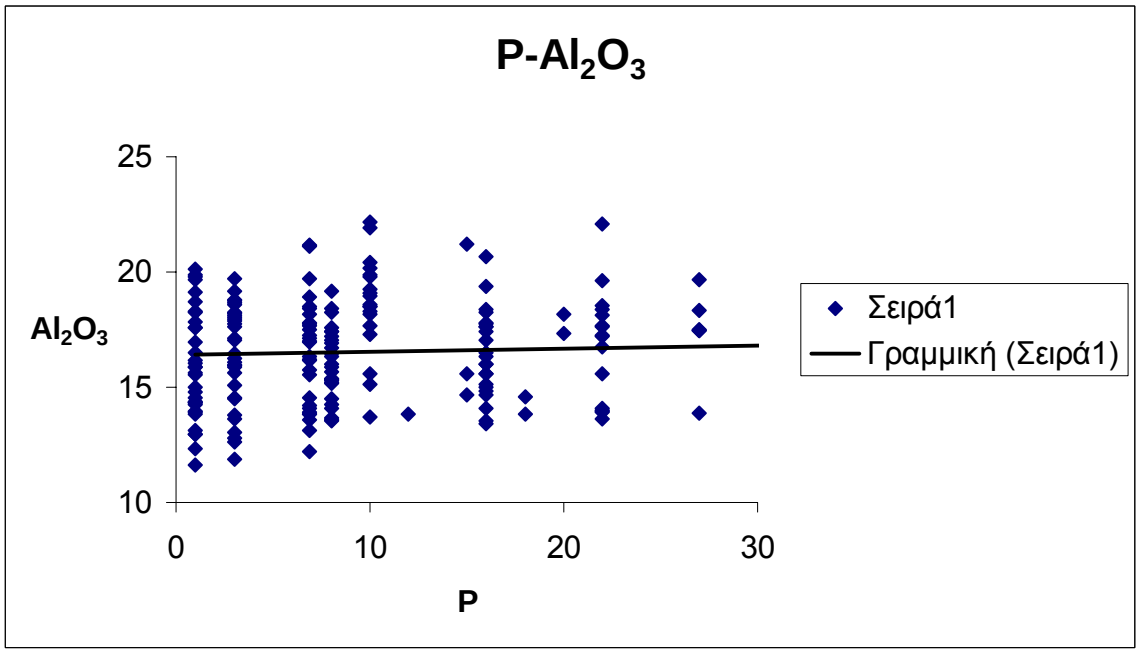
Με την αύξηση της P, όπως φαίνεται στο διάγραμμα (Σχ. 2.4.3), το Al_2O_3 παραμένει σταθερό. Κυμαίνεται σχεδόν από 13 ως 21 για όλες τις P.

Από τα διαγράμματα T-Al_2O_3 ανά πείραμα παρατηρούμε ότι τα τήγματα που προκύπτουν από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα AB και HAB παρουσιάζουν ελάττωση της περιεκτικότητάς τους σε Al_2O_3 με την αύξηση της T. Από τα δείγματα MAT και LKT τα τήγματα εμφανίζουν σχεδόν σταθερή περιεκτικότητα σε Al_2O_3, ενώ σταθερή είναι και η περιεκτικότητα των τηγμάτων από τα δείγματα SC466, SC478, SC555, SC557 και SC571 (Σχ. 2.4.4 α, 2.4.5 α, 2.4.6 α και 2.4.7 α).

Από τα διαγράμματα P-Al_2O_3 ανά πείραμα προκύπτει ότι στο πείραμα με αρχικό υλικό το δείγμα AB, έχουμε μικρή ελάττωση του Al_2O_3στο τήγμα με την αύξηση της

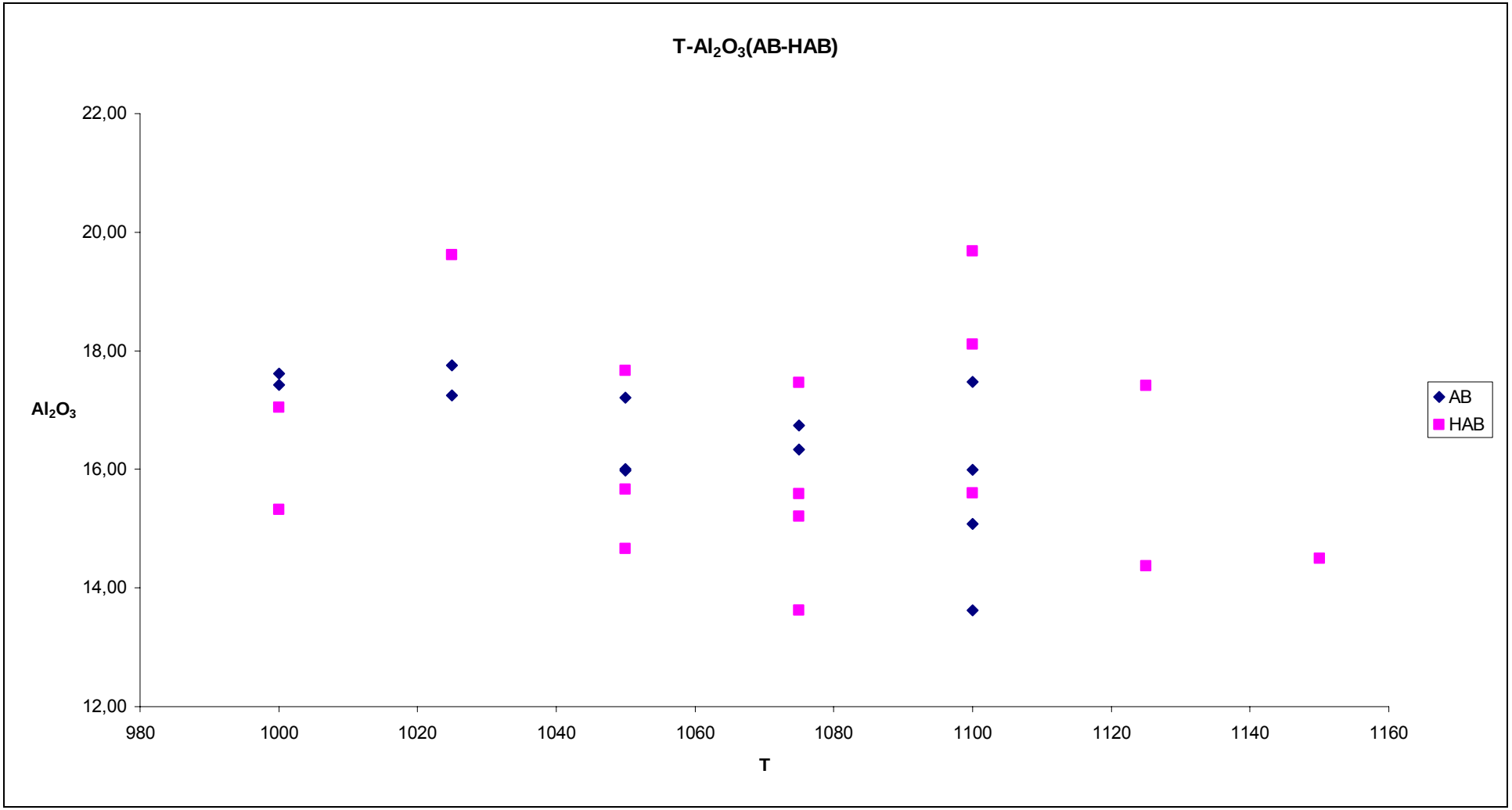


Σχ.2.4.2. Διάγραμμα T-Al_2O_3.

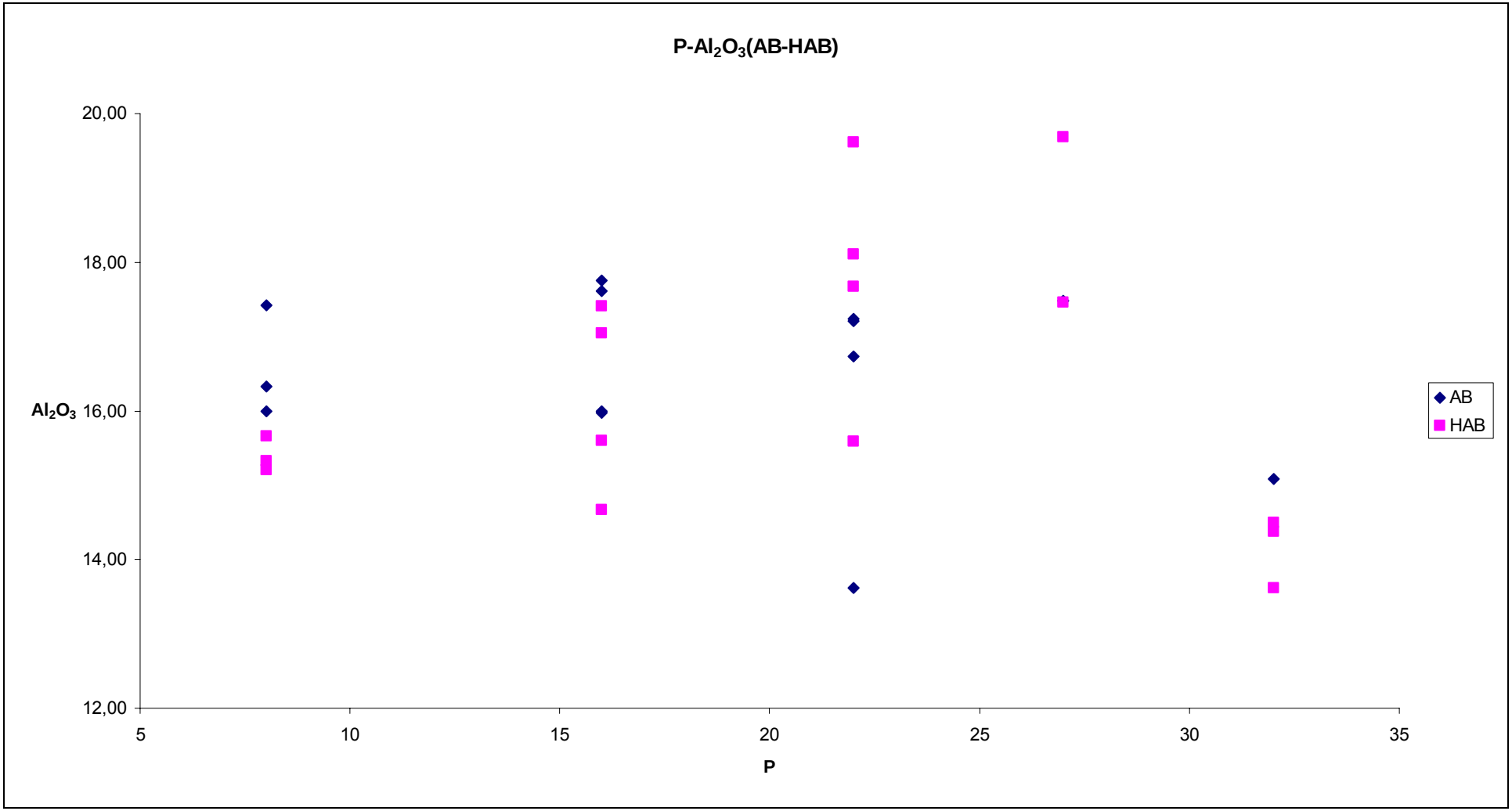


Σχ.2.4.3. Διάγραμμα P-Al_2O_3.

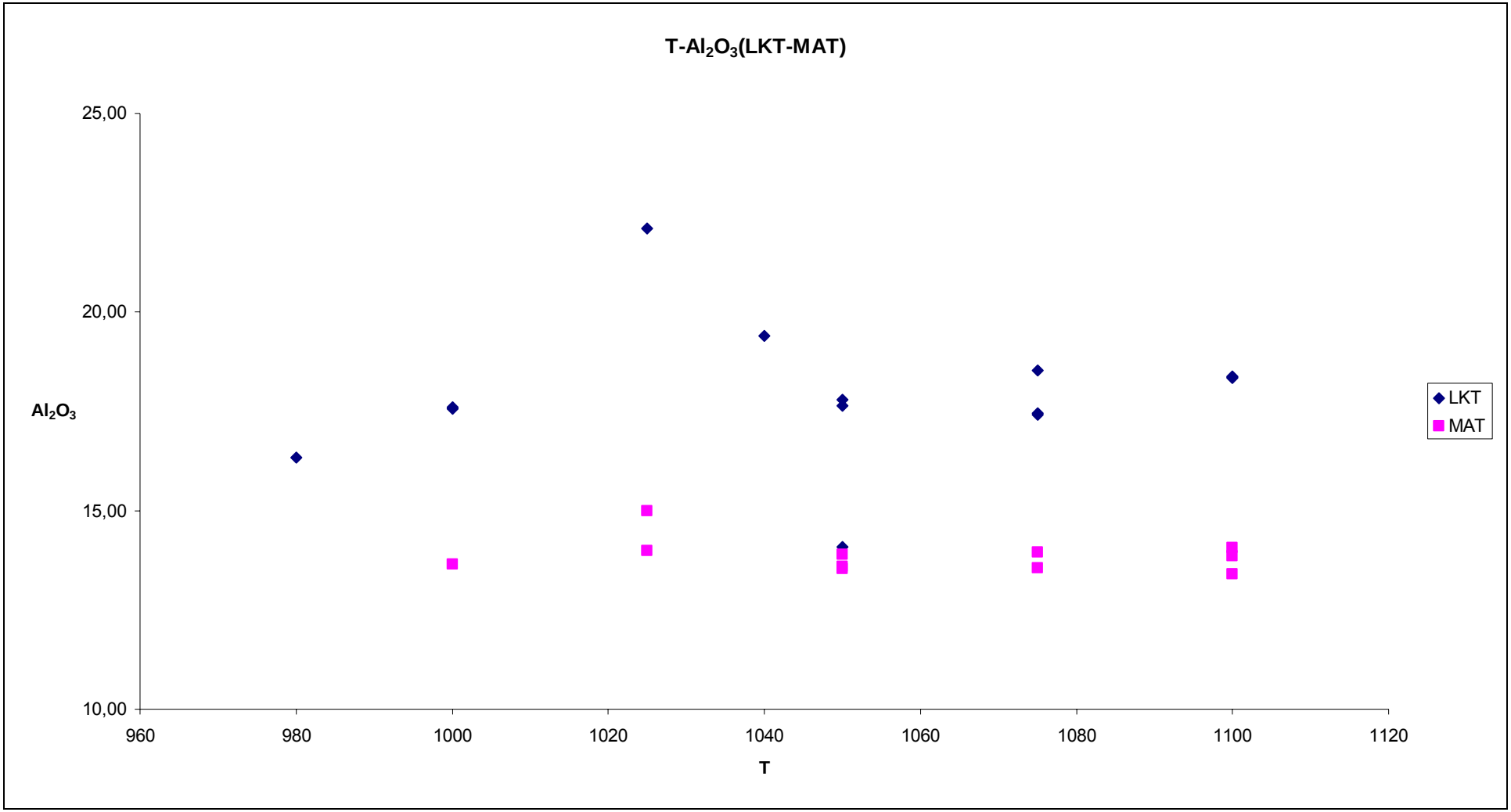
P. Το τήγμα από το δείγμα HAB παρουσιάζει σταθερότητα, όπως σχεδόν και τα τήγματα από τα δείγματα MAT και SC555. Στο διάγραμμα όπου προβάλλονται τα ρήγματα από το δείγμα LKT, φαίνεται ότι το Al_2O_3 παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση της P, καθώς και από τα SC466 και SC478. Ενώ ελάττωση παρουσιάζει το Al_2O_3 των τηγμάτων από τα αρχικά υλικά SC557 και SC571 (Σχ. 2.4.4 β, 2.4.5 β, 2.4.6 β και 2.4.7 β).



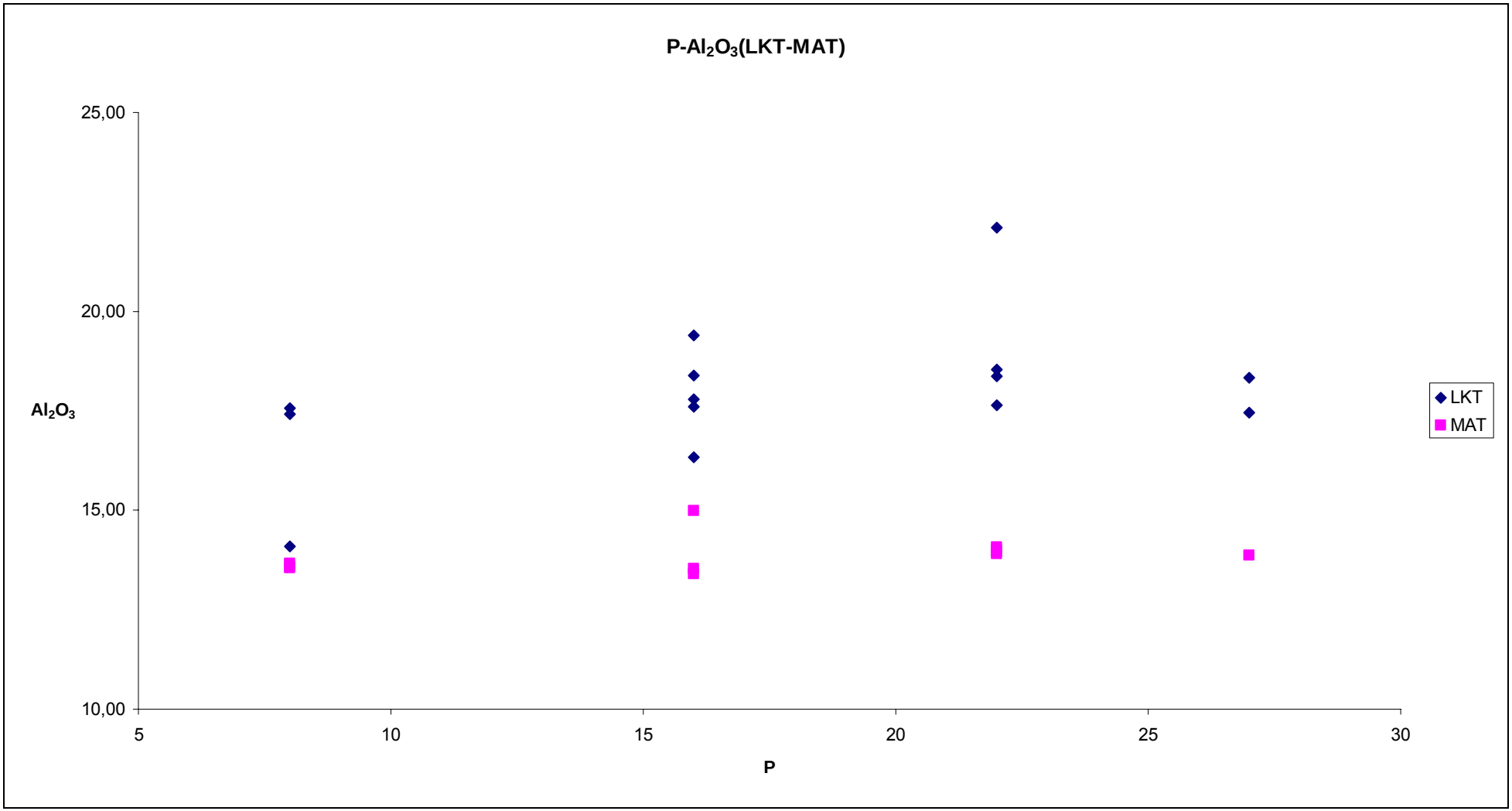
Σχ.2.4.4α Διάγραμμα T-Al_2O_3 για τα δείγματα AB και HAB.



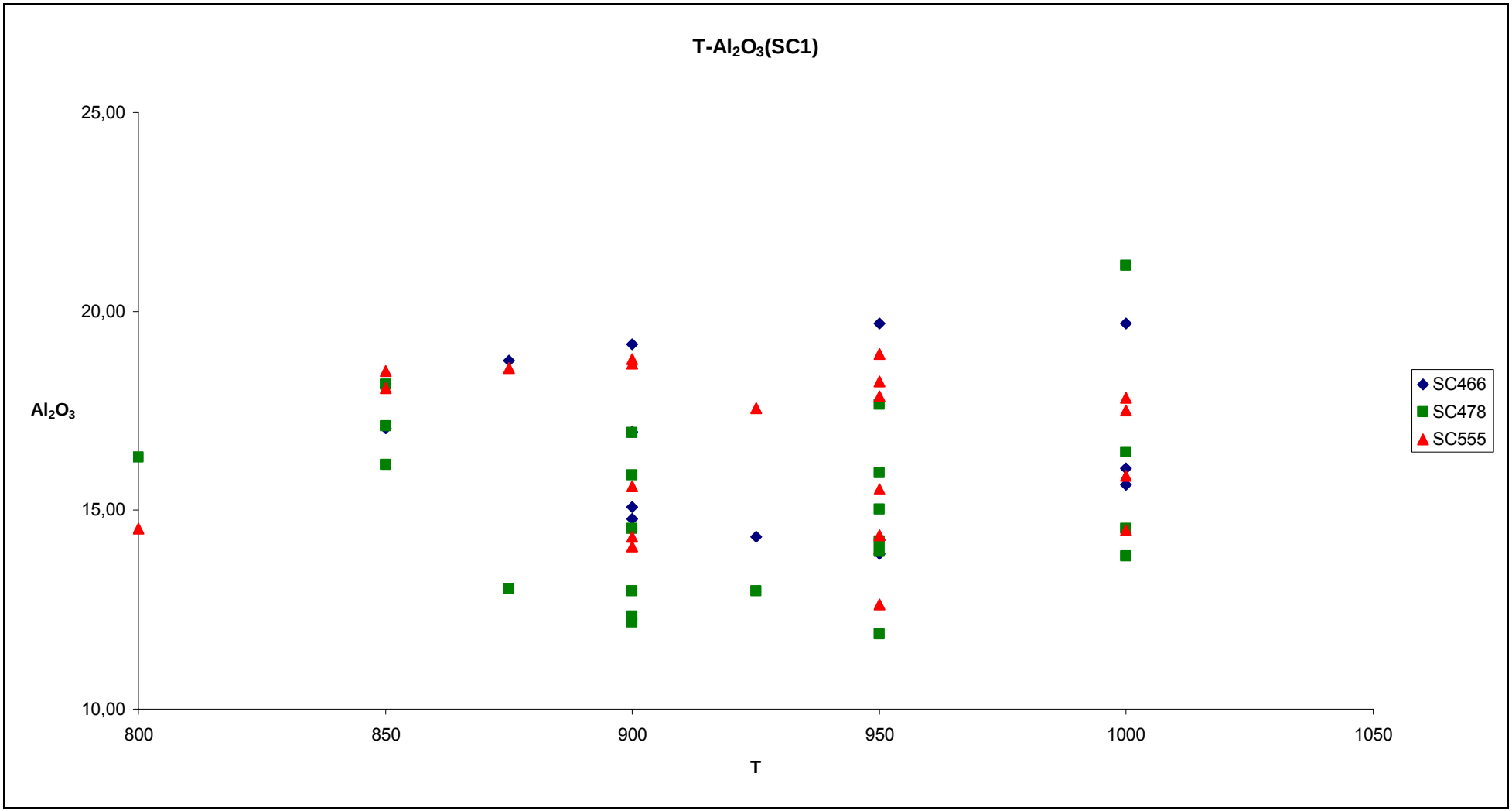
Σχ.2.4.4β Διάγραμμα P-Al_2O_3 για τα δείγματα AB και HAB.



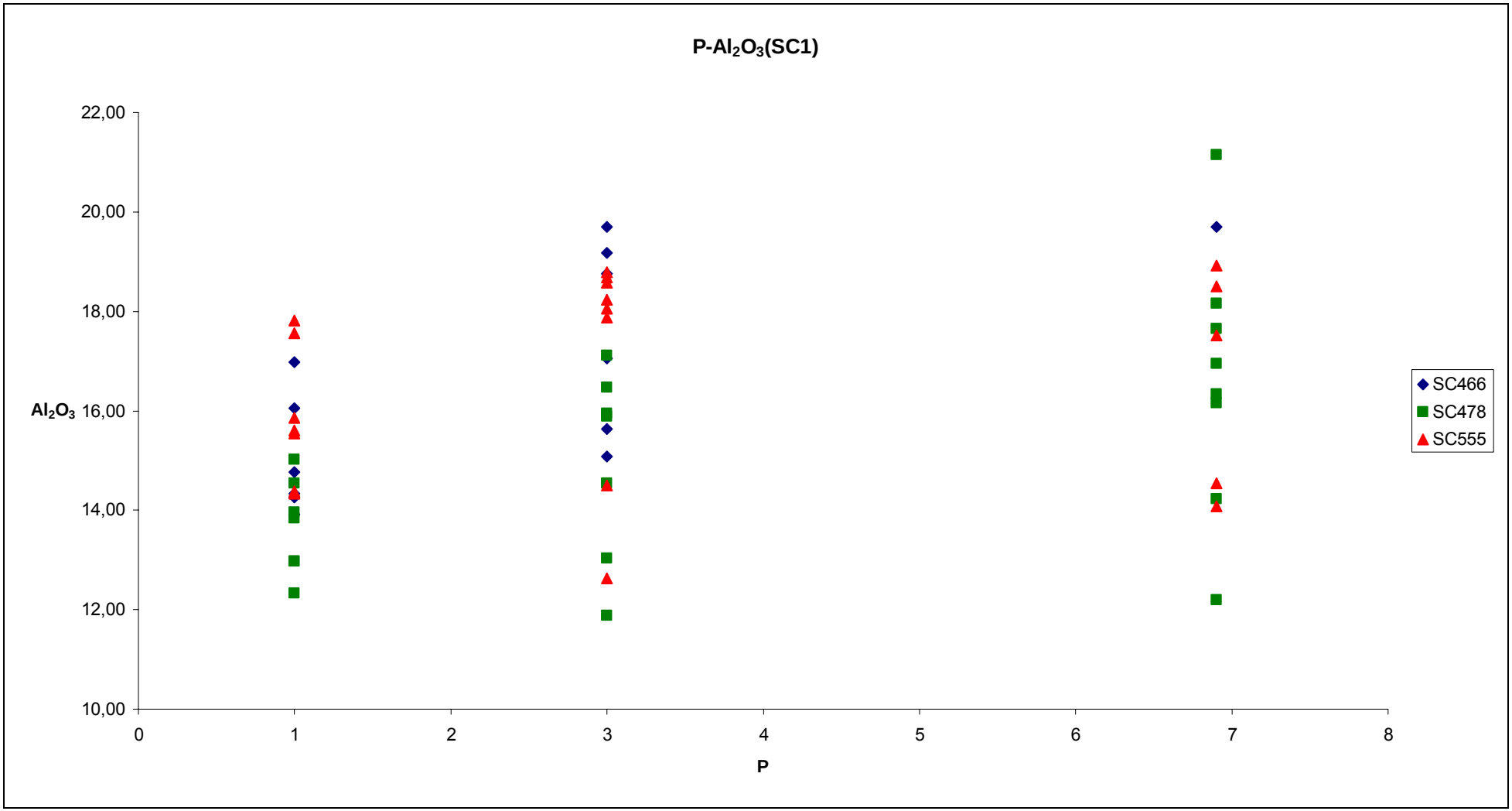
Σχ.2.4.5α Διάγραμμα T-Al_2O_3 για τα δείγματα LKT και MAT.



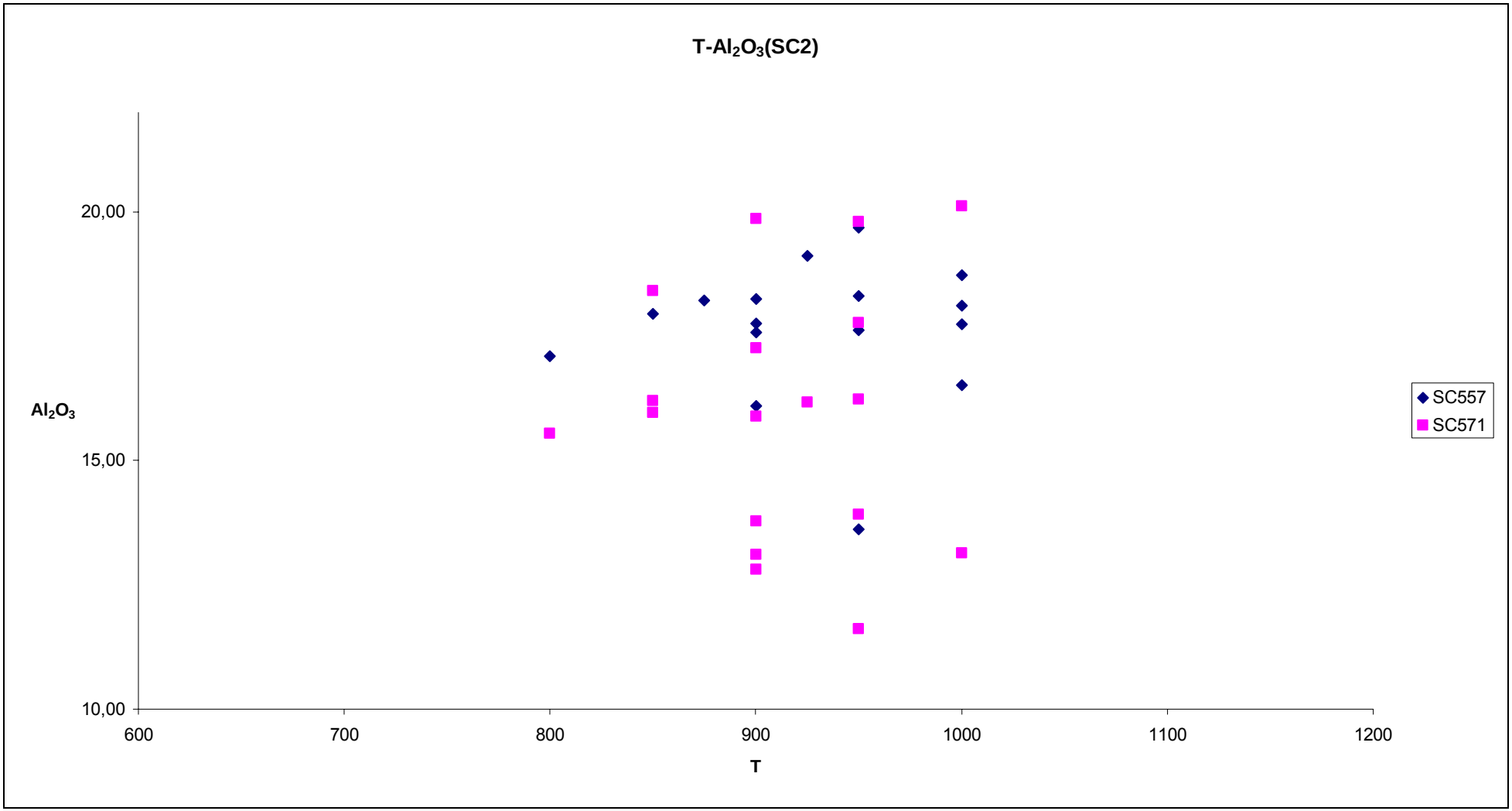
Σχ.2.4.5β Διάγραμμα P-Al_2O_3 για τα δείγματα LKT και MAT.



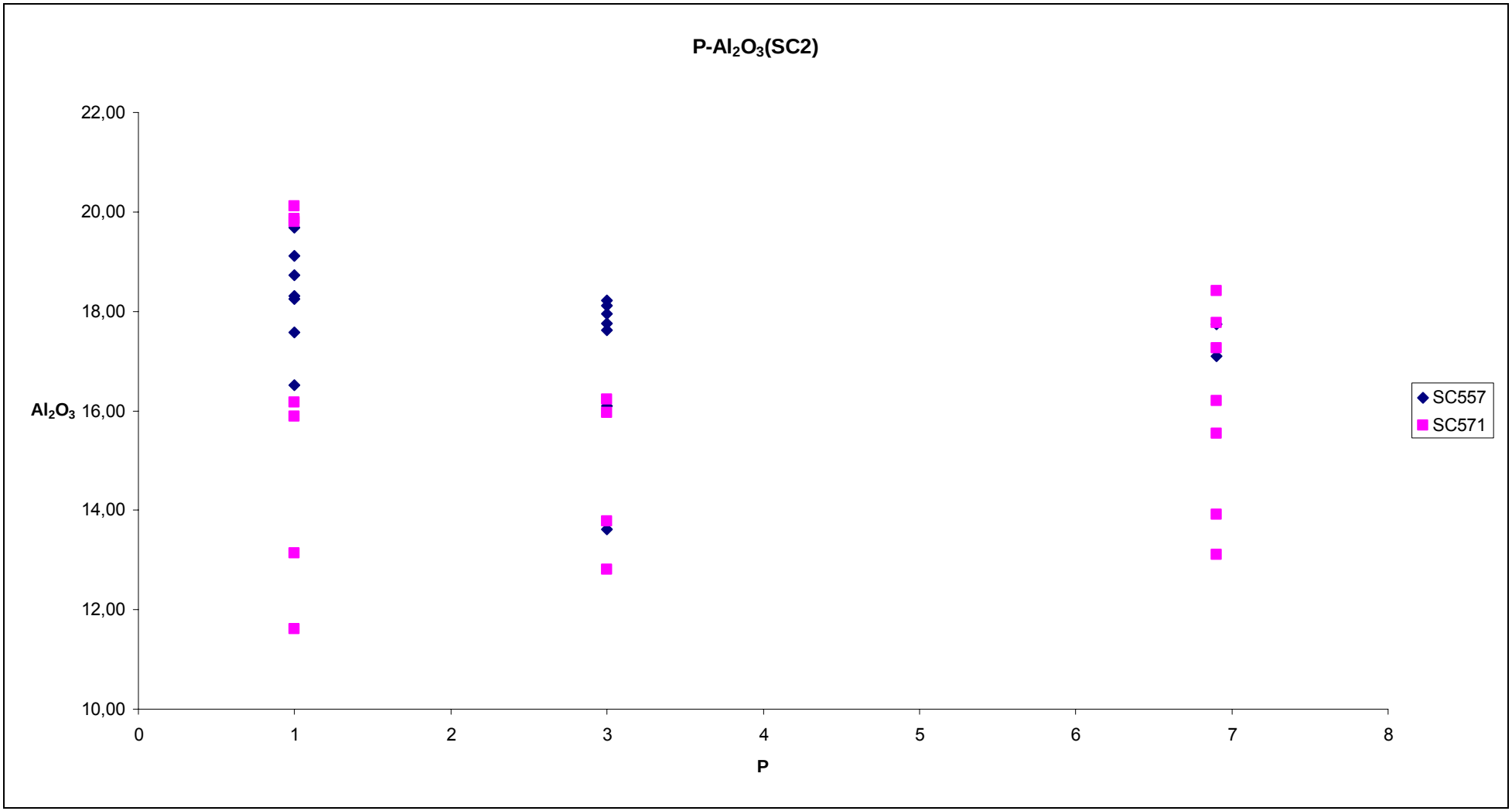
Σχ.2.4.6α Διάγραμμα T-Al_2O_3 για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ.2.4.6β Διάγραμμα P-Al_2O_3 για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



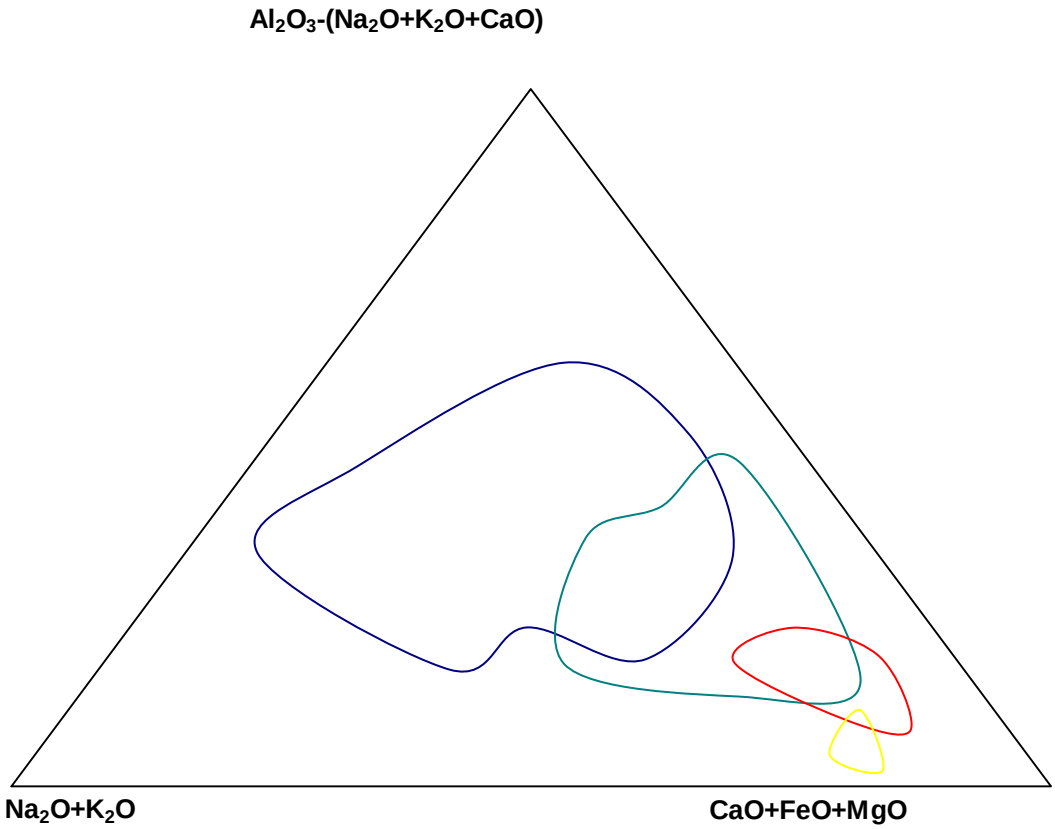
Σχ.2.4.7α Διάγραμμα T-Al_2O_3 για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ.2.4.7β Διάγραμμα P-Al_2O_3 για τα δείγματα SC557 και SC571.

2.5. FeO

Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα AFM (Σχ. 2.5.1), όσο το FeO αυξάνεται στα τήγματα, τόσο αυτά τείνουν να αυξάνουν και την περιεκτικότητα τους σε CaO+FeO+MgO. Δηλαδή, τα τήγματα με το λιγότερο FeO (0,60-5,30, μπλε γραμμή) βρίσκονται σχεδόν στη μέση του τριγώνου ενώ αυτά με το περισσότερο FeO (14,70-19,40, κίτρινη γραμμή) βρίσκονται σχεδόν στην κορυφή CaO+FeO+MgO.

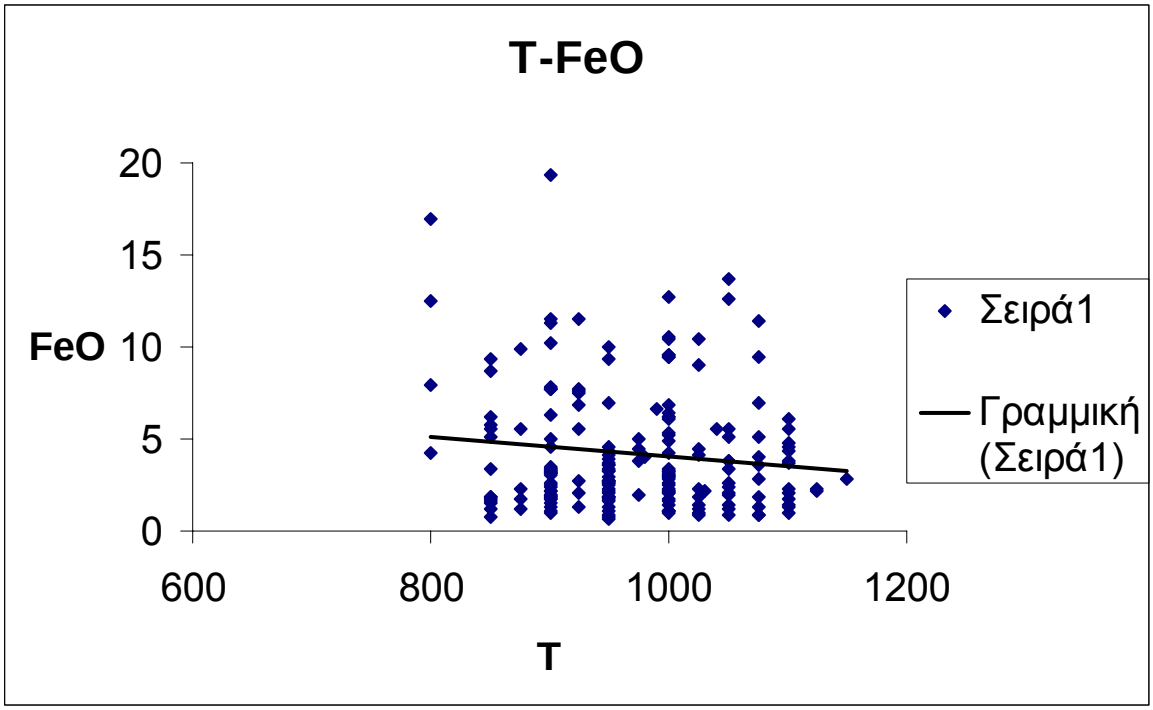


Σχ.2.5.1. Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το FeO.

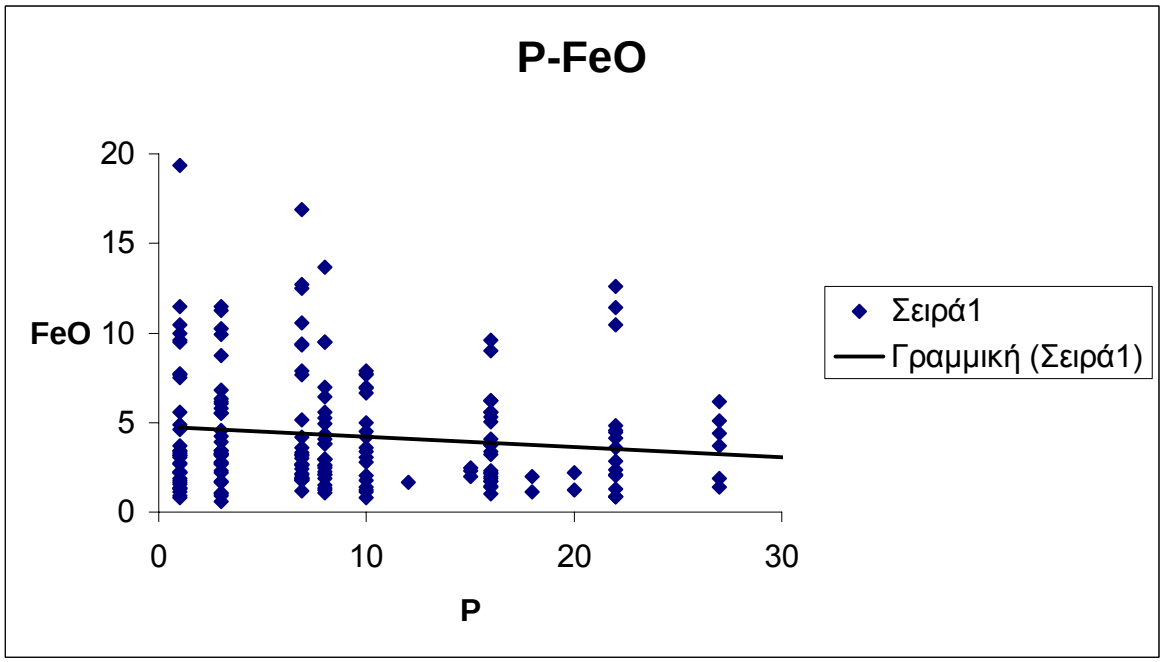
Με την αύξηση της T, το FeO γενικά παρουσιάζει μικρή ελάττωση. Π.χ. στους 800° C , που είναι η χαμηλότερη T, παίρνουμε τήγματα και με υψηλές περιεκτικότητες σε FeO (16,91). Ενώ στους 1150° C , που είναι η υψηλότερη T, παίρνουμε τήγματα κυρίως με χαμηλές περιεκτικότητες σε FeO (2,8) (Σχ. 2.5.2).

Ως προς την P, το FeO εμφανίζει μικρή ελάττωση με την αύξησή της. Π.χ. σε P=1 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες που φτάνουν ως και 19,36, ενώ σε P=27 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες ως 6,14. Άρα σε μικρότερη P μπορούμε να πάρουμε τήγματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε FeO απ' ότι σε μια μεγαλύτερη P (Σχ. 2.5.3).

Στα διαγράμματα T-FeO ανά πείραμα παρατηρούμε ότι από το πείραμα με αρχικό υλικό το δείγμα AB παίρνουμε τήγματα που παρουσιάζουν μεγάλη ελάττωση της περιεκτικότητας τους σε FeO με την αύξηση της T, ενώ από το δείγμα HAB τα τήγματα που προκύπτουν έχουν σχεδόν σταθερή περιεκτικότητα σε FeO με μία πολύ μικρή ελάττωση. Σχεδόν σταθερά εμφανίζονται και τα τήγματα από το αρχικό υλικό



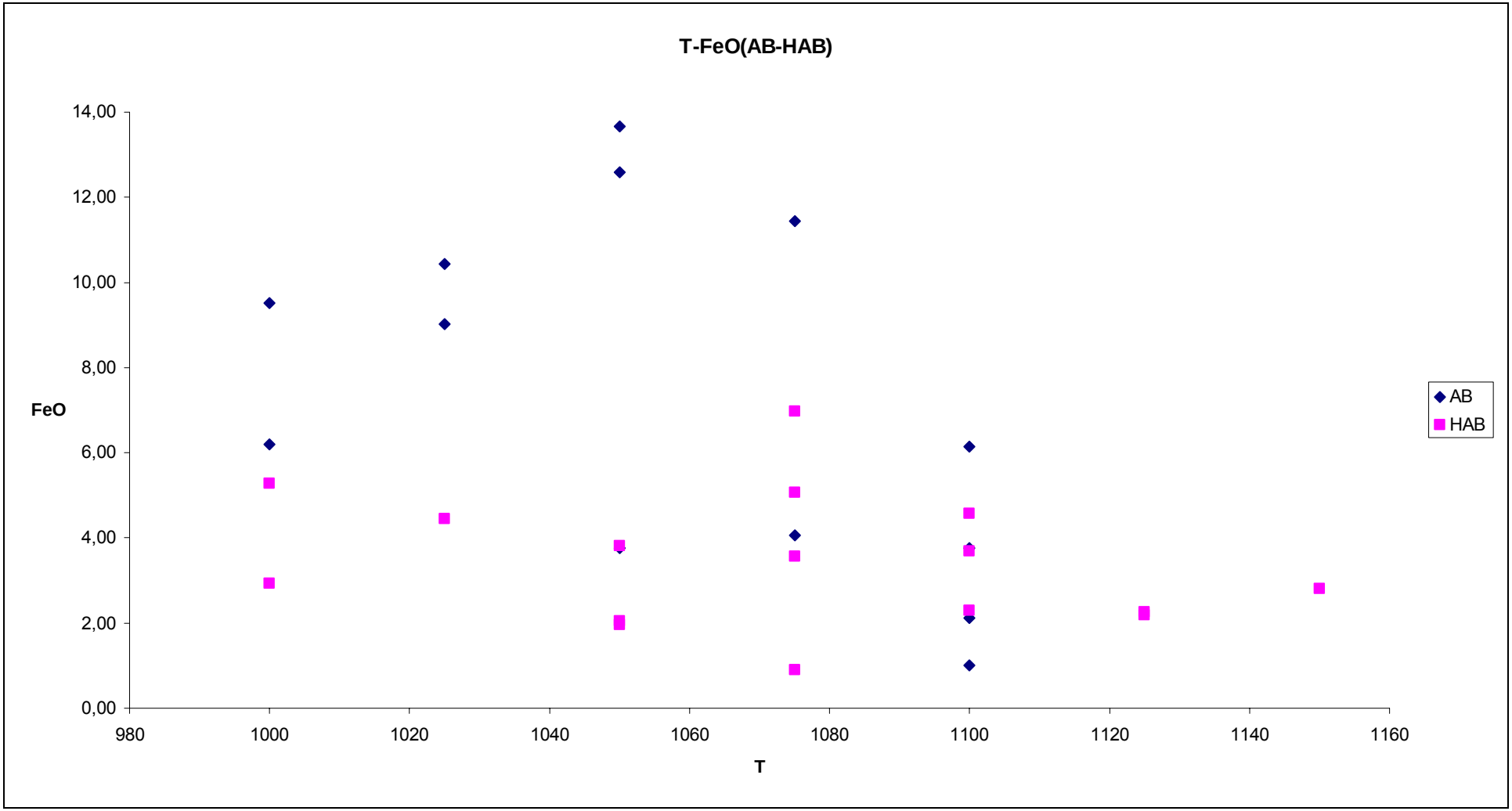
Σχ.2.5.2. Διάγραμμα T-FeO.



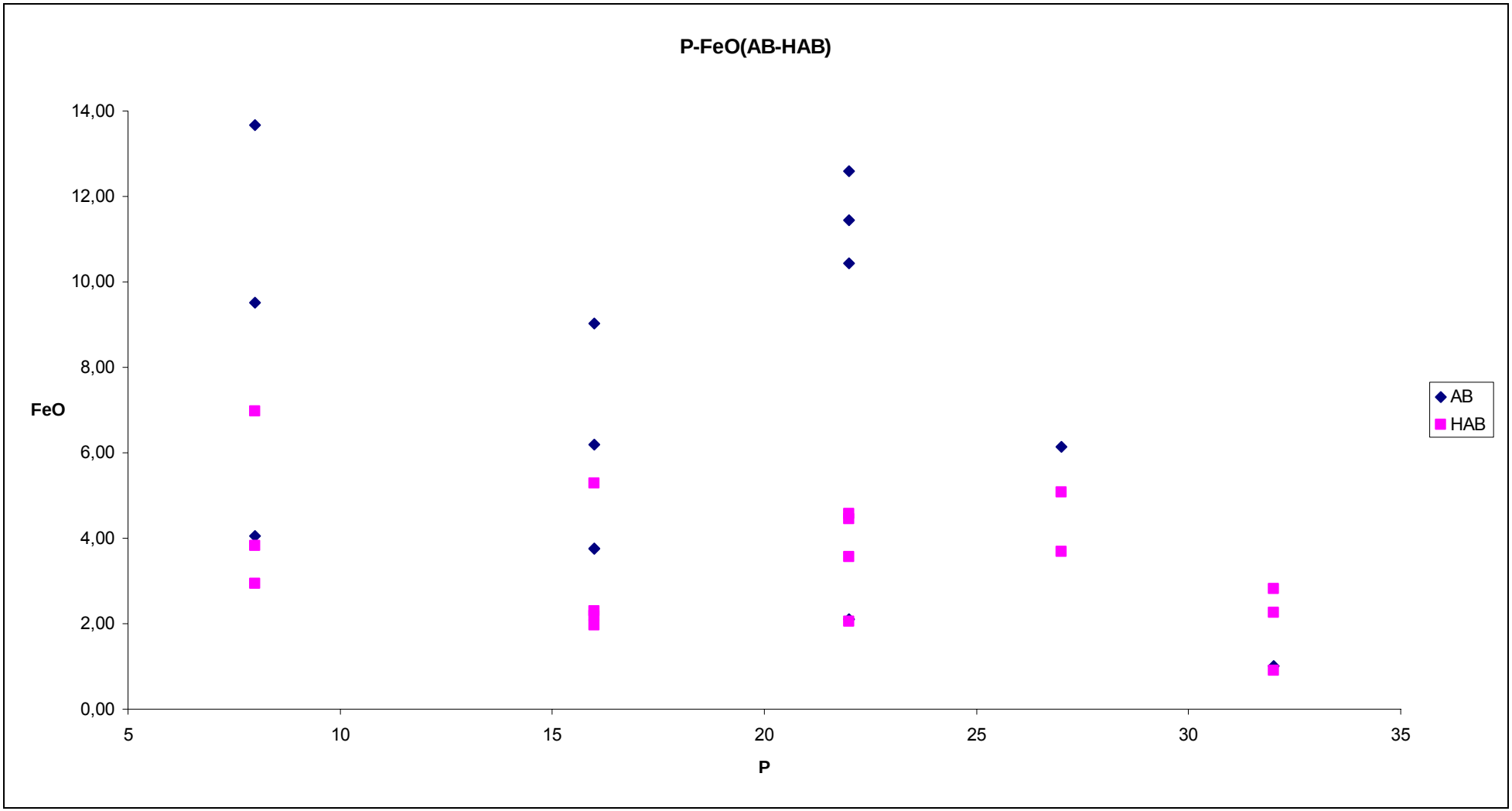
Σχ.2.5.3. Διάγραμμα P-FeO.

ΜΑΤ και LKT. Αύξηση της περιεκτικότητας σε FeO με την αύξηση της T παρουσιάζουν τα τήγματα που προκύπτουν από τα πειράματα με αρχικό υλικό το δείγμα SC466. Ενώ ελάττωση παρουσιάζουν τα τήγματα από τα δείγματα SC478, SC555, SC557 και SC571 (Σχ. 2.5.4 α, 2.5.5 α, 2.5.6 α και 2.5.7 α).

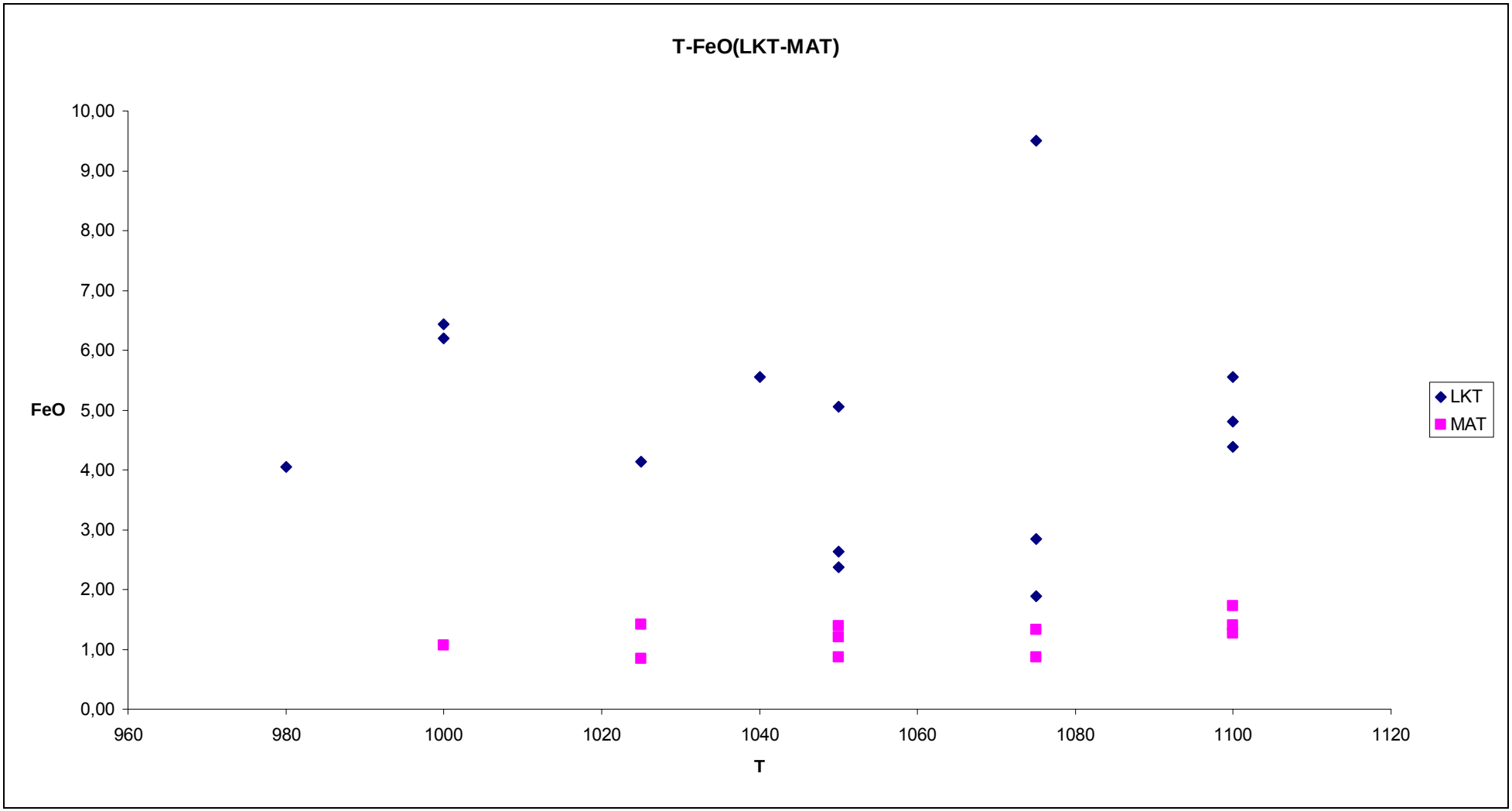
Από τα διαγράμματα P-FeO ανά πείραμα προκύπτει ότι τα τήγματα που προκύπτουν από τα αρχικά υλικά AB, HAB, LKT και SC466 εμφανίζουν ελάττωση της περιεκτικότητάς τους σε FeO με την αύξηση της P. Αύξηση της περιεκτικότητας με την αύξηση της P παρουσιάζουν τα τήγματα από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα SC555, SC557 και SC571, ενώ από τα δείγματα MAT και SC478 τα τήγματα που προκύπτουν παρουσιάζουν σταθερότητα στην περιεκτικότητά τους σε FeO (Σχ. 2.5.4 β, 2.5.5 β, 2.5.6 β και 2.5.7 β).



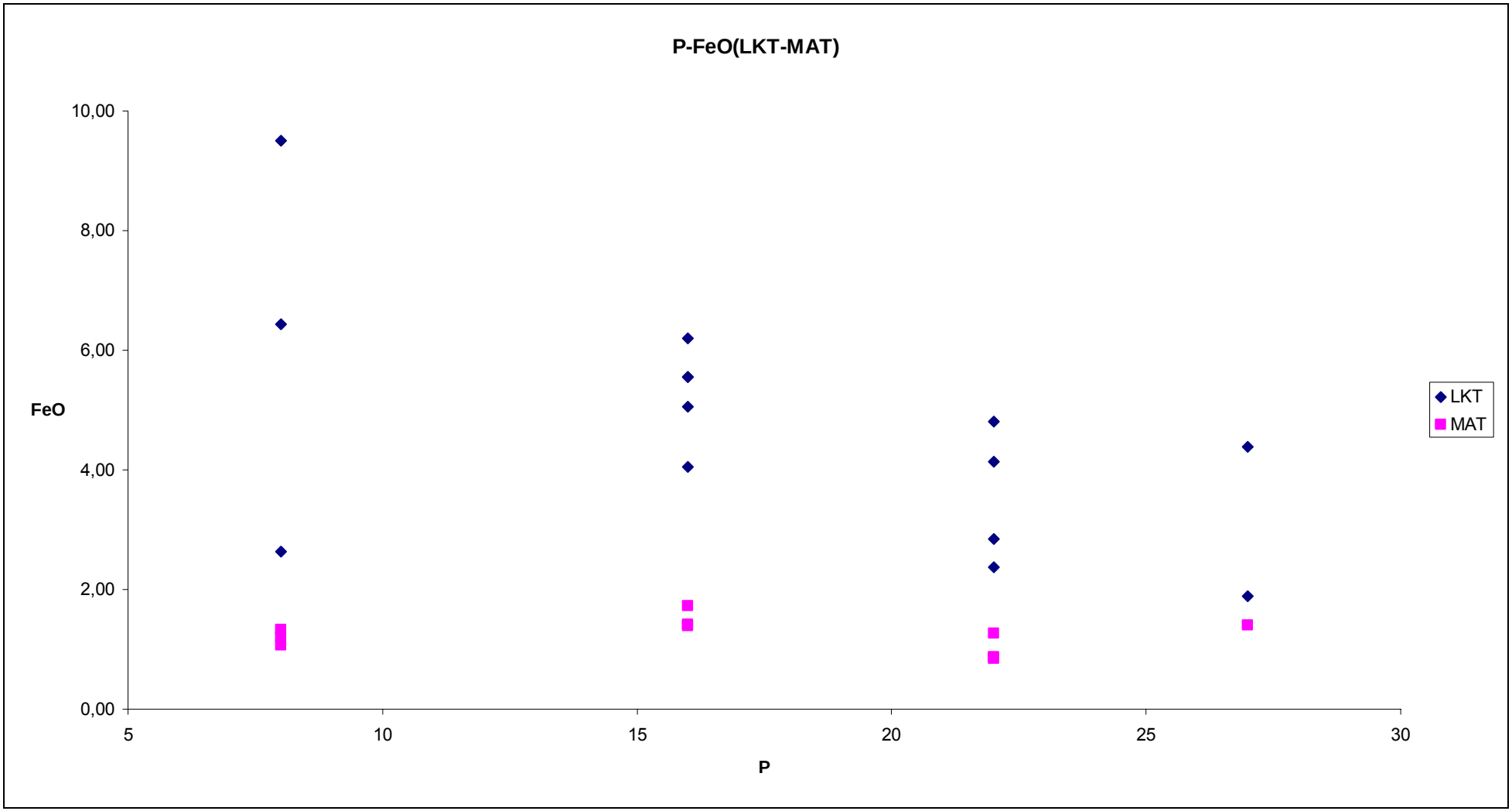
Σχ.2.5.4α Διάγραμμα T-FeO για τα δείγματα AB και HAB.



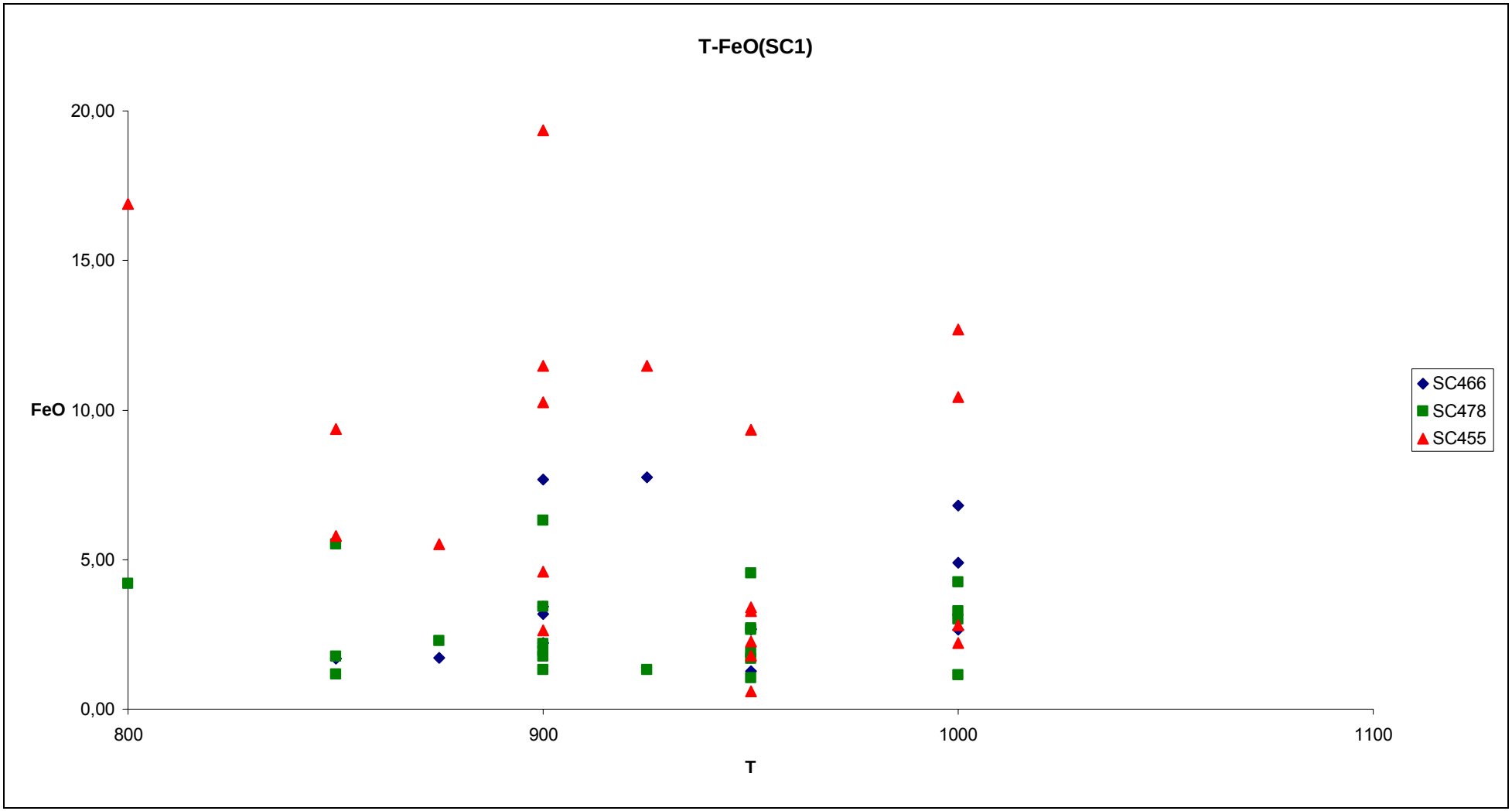
Σχ.2.5.4β Διάγραμμα P-FeO για τα δείγματα AB και HAB.



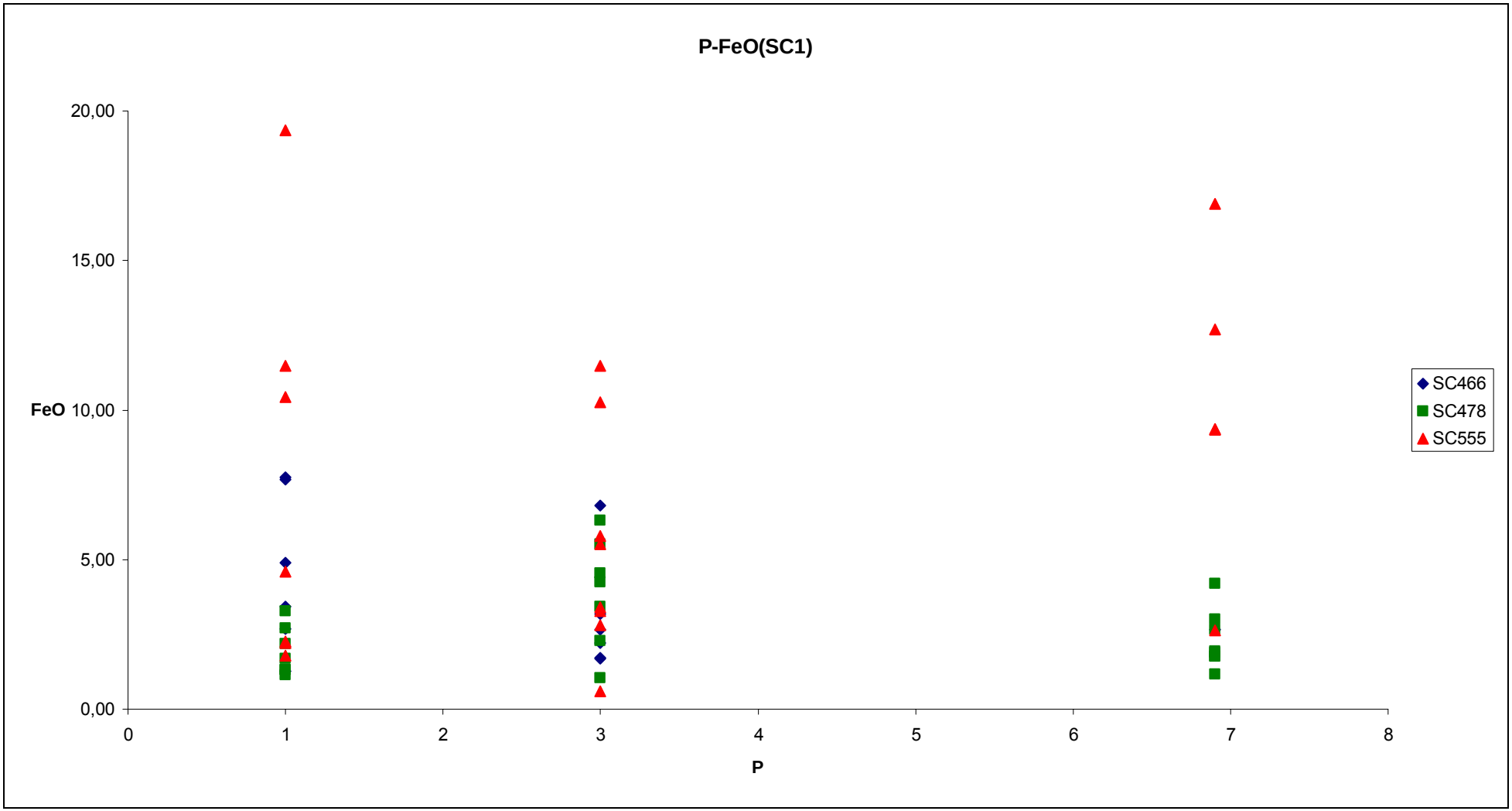
Σχ.2.5.5α Διάγραμμα T-FeO για τα δείγματα LKT και MAT.



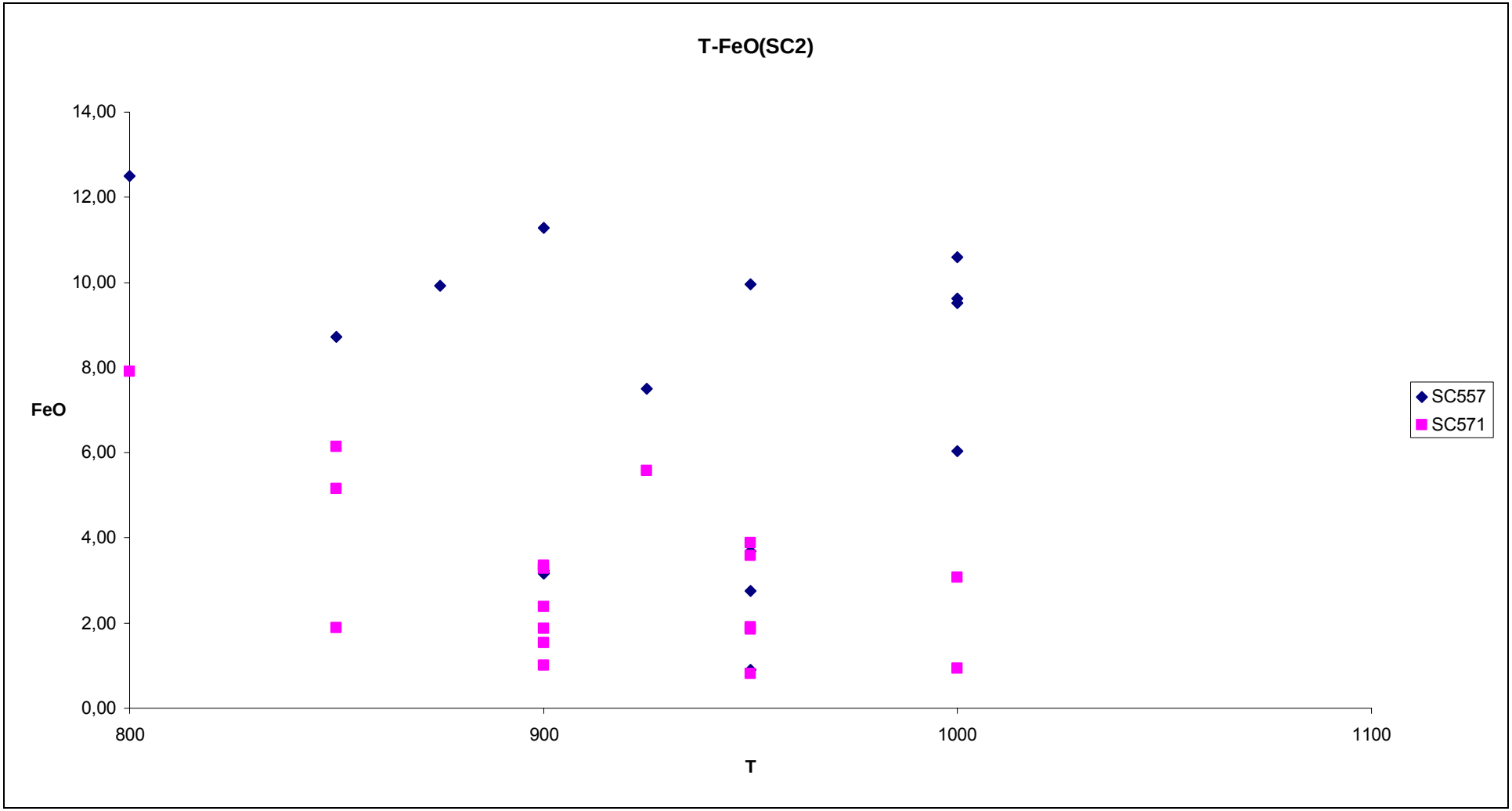
Σχ.2.5.5β Διάγραμμα P-FeO για τα δείγματα LKT και MAT.



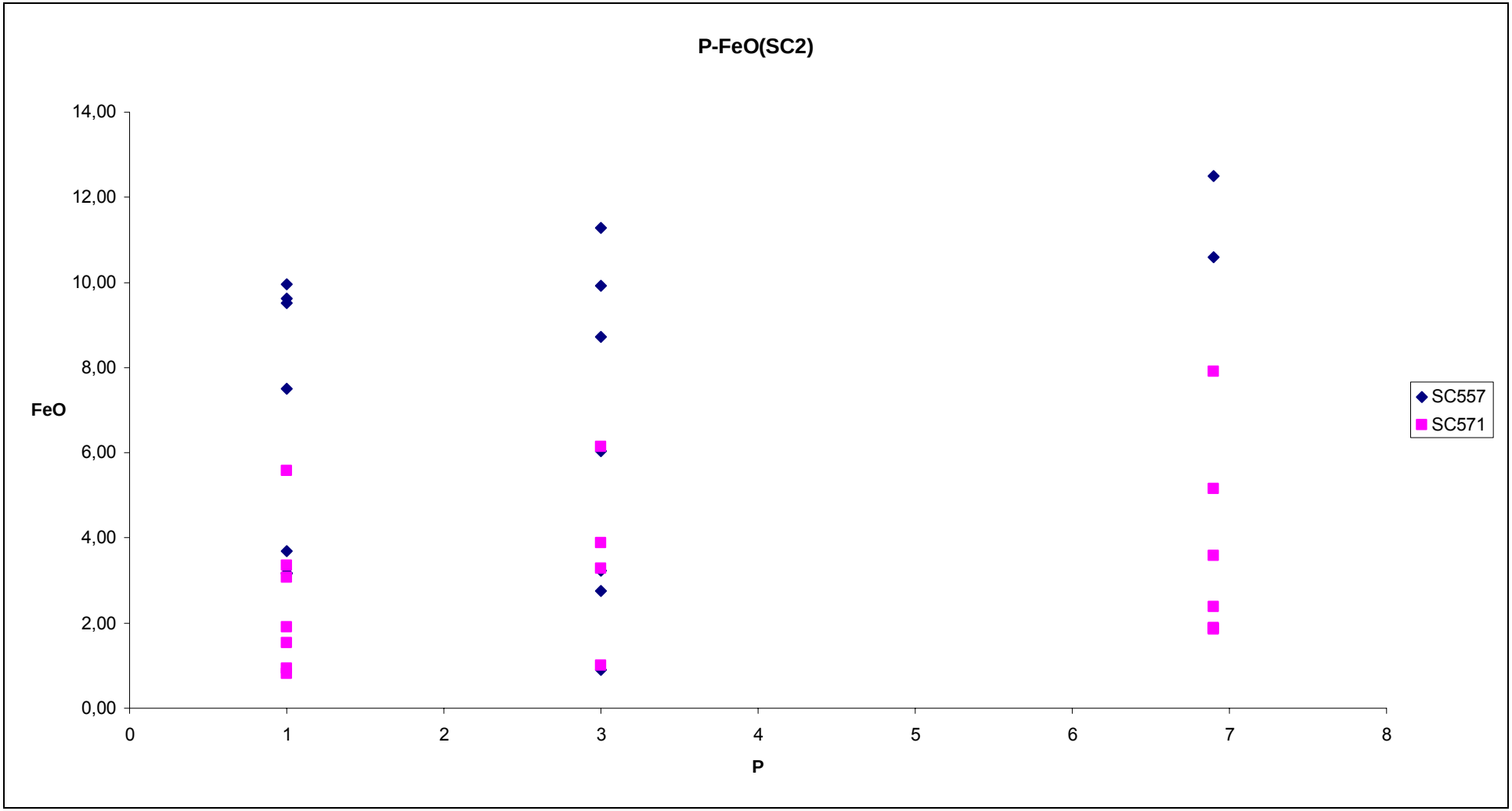
Σχ.2.5.6α Διάγραμμα T-FeO για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ.2.5.6β Διάγραμμα P-FeO για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



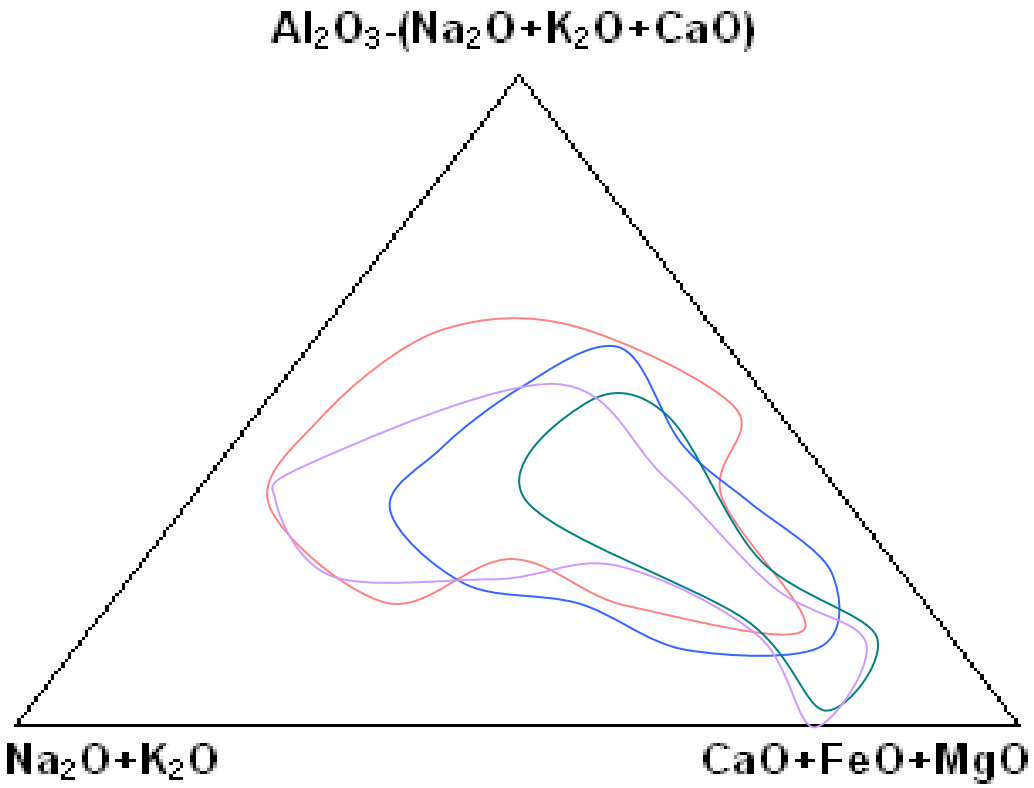
Σχ.2.5.7α Διάγραμμα T-FeO για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ.2.5.7β Διάγραμμα P-FeO για τα δείγματα SC557 και SC571.

2.6. MnO

Το MnO φαίνεται να παρουσιάζει αλλιλεπικάλυψη και μια γενική τάση προς μεγαλύτερη περιεκτικότητα του τήγματος σε CaO+FeO+MgO, στο τριγωνικό διάγραμμα AFM, ιδιαίτερα τα τήγματα με μεγάλη περιεκτικότητα σε MnO (0,23-0,34, πράσινη γραμμή και 0,34-0,45, μοβ γραμμή) (Σχ. 2.6.1).

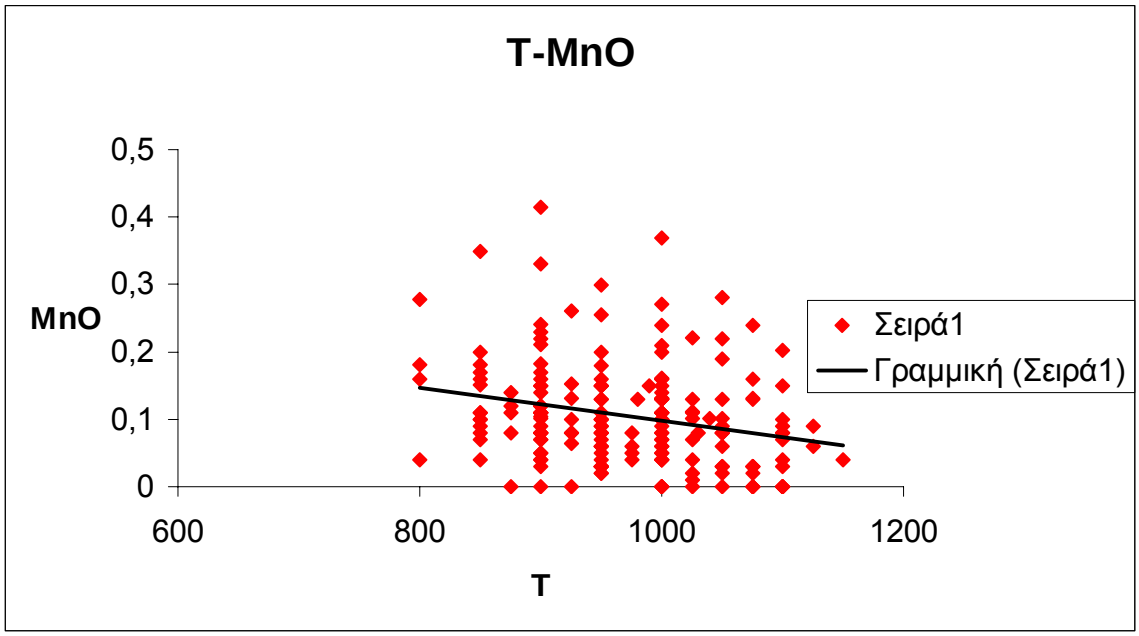


Σχ.2.6.1. Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το MnO.

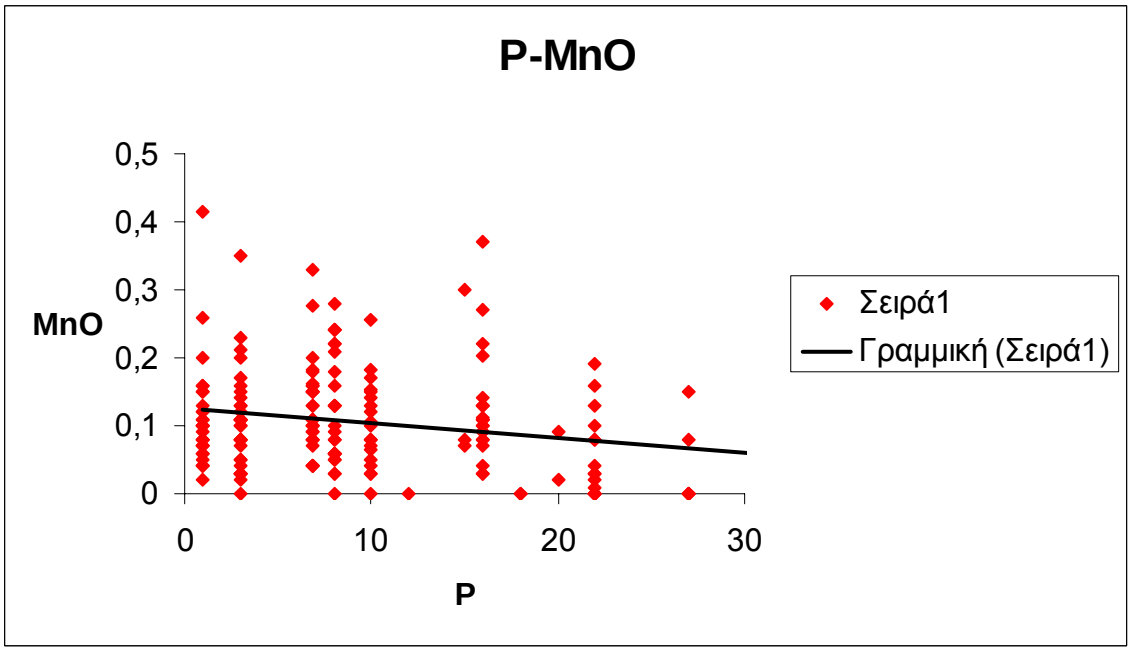
Ως προς την T, βλέπουμε ότι παρουσιάζεται τάση ελάττωσης του MnO των τηγμάτων με την αύξησή της. π.χ. σε T=800° C, έχουμε τήγμα με περιεκτικότητα σε MnO=0,28, ενώ στους 1150° C έχουμε τήγμα με MnO=0,04 (Σχ. 2.6.2).

Ως προς την πίεση (P), το MnO εμφανίζει επίσης μικρή ελάττωση με την αύξησή της. Π.χ. σε P=1 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες που φτάνουν ως 0,42, ενώ σε P=27 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες ως 0,15 (Σχ. 2.6.3).

Στα διαγράμματα T- MnO ανά πείραμα, παρατηρούμε ότι από το πείραμα με αρχικό υλικό το δείγμα AB, τα τήγματα που προκύπτουν παρουσιάζουν ελάττωση της περιεκτικότητάς τους σε MnO καθώς αυξάνεται η T, ενώ το MnO των τηγμάτων που προκύπτουν από το δείγμα HAB παρουσιάζει μια σταθερότητα με την αύξηση της T, όπως περίπου και από τα δείγματα SC466, SC478 και SC557. Τα τήγματα από τα αρχικά υλικά LKT και MAT παρουσιάζουν μικρή ελάττωση της περιεκτικότητάς τους σε MnO, όπως και από τα δείγματα SC555, όπου η ελάττωση είναι μεγάλη, και SC571 (Σχ. 2.6.4 α, 2.6.5 α, 2.6.6 α και 2.6.7 α).

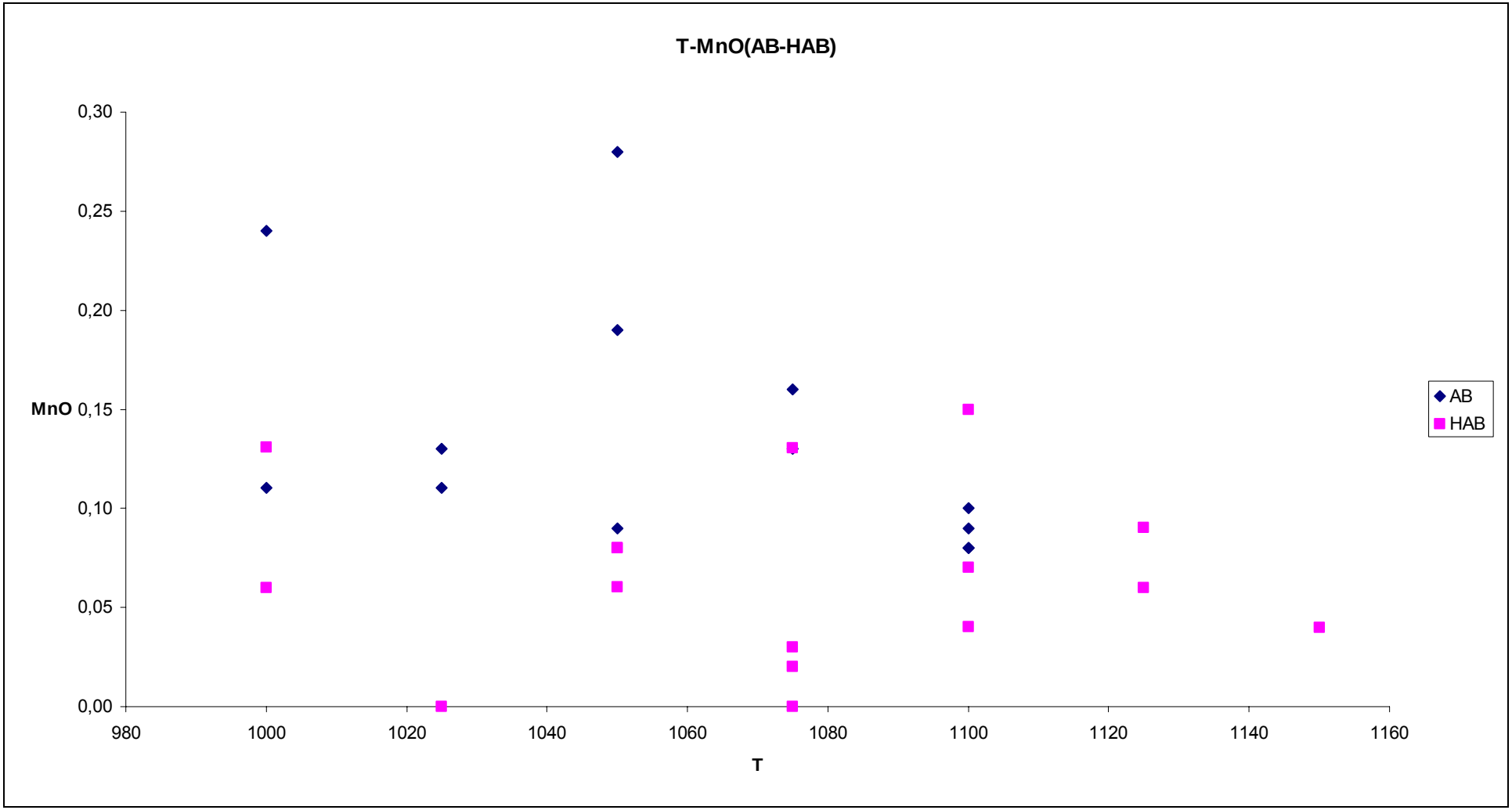


Σχ.2.6.2. Διάγραμμα T-MnO.

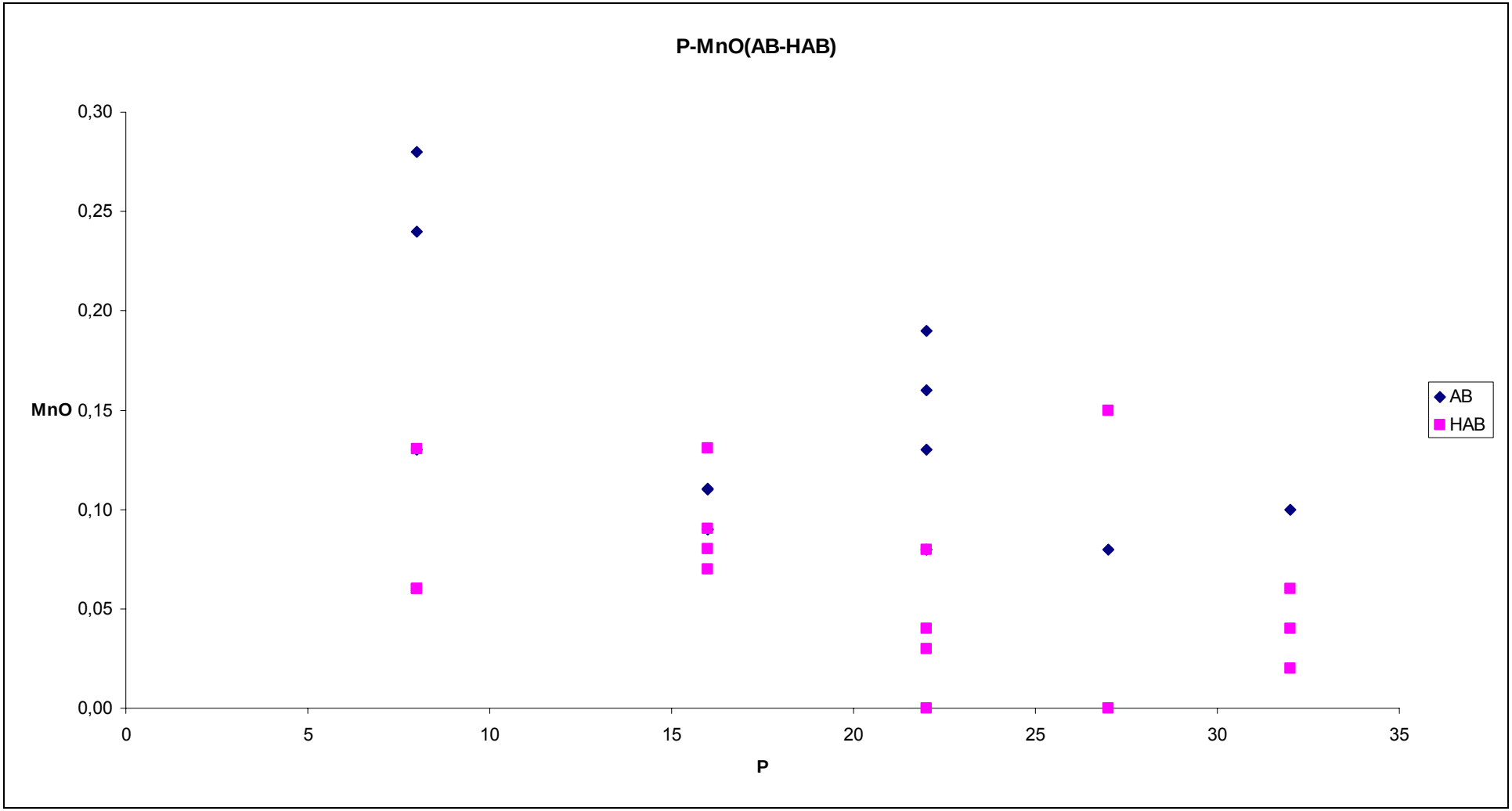


Σχ.2.6.3. Διάγραμμα P-MnO.

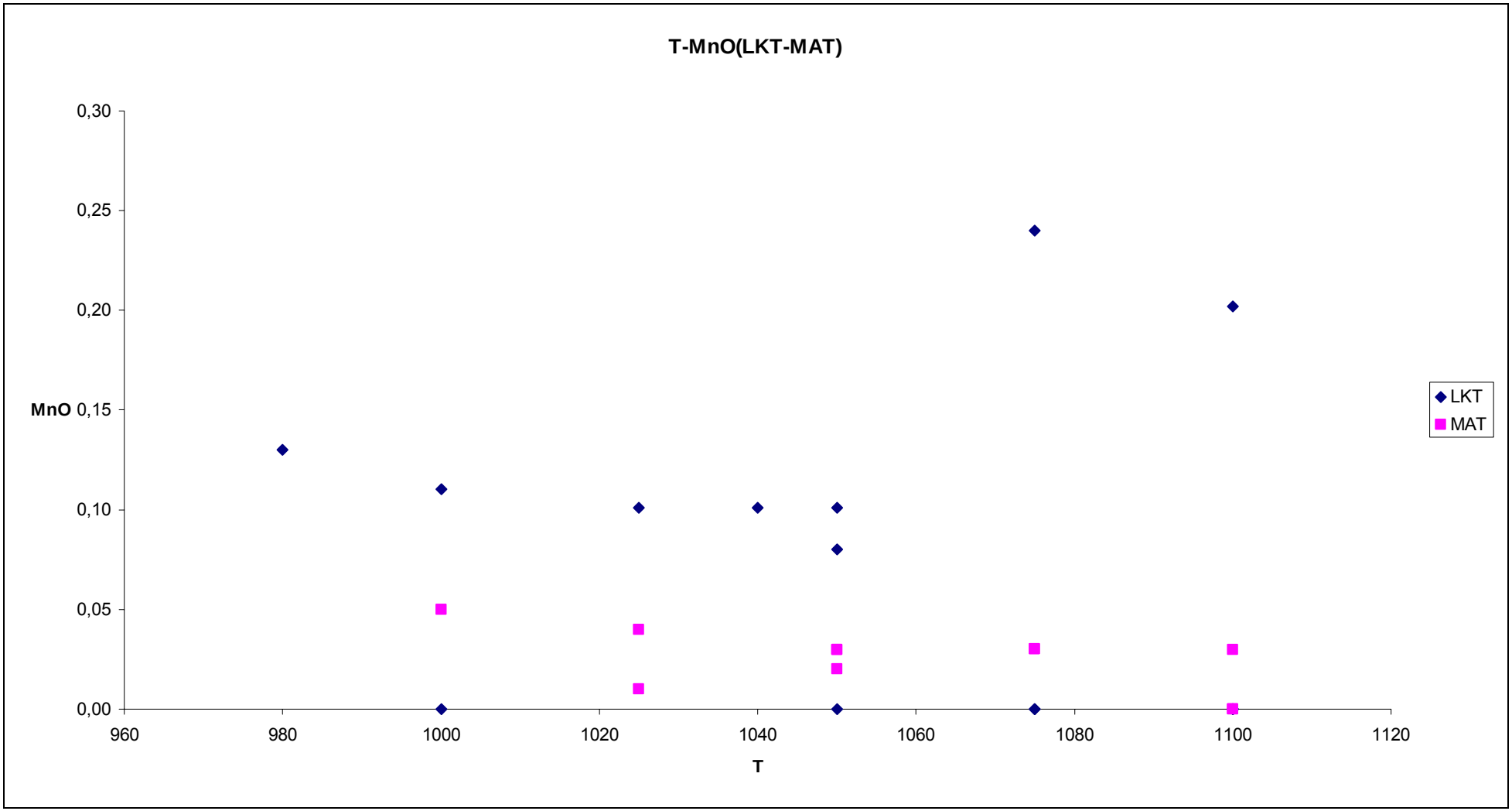
Από τα διαγράμματα P-MnO ανά πείραμα, παρατηρούμε ότι στα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα AB, HAB, LKT και MAT έχουμε ελάττωση του MnO στο τήγμα με την αύξηση της P. Στο διάγραμμα όπου προβάλλονται τα τήγματα από τα δείγματα SC478 και SC555, καθώς και από τα SC557 και SC571 φαίνεται ότι το MnO παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση της P. Ενώ σταθερό παραμένει το MnO των τηγμάτων από το αρχικό υλικό SC466 (Σχ. 2.6.4 β, 2.6.5 β, 2.6.6 β και 2.6.7 β).



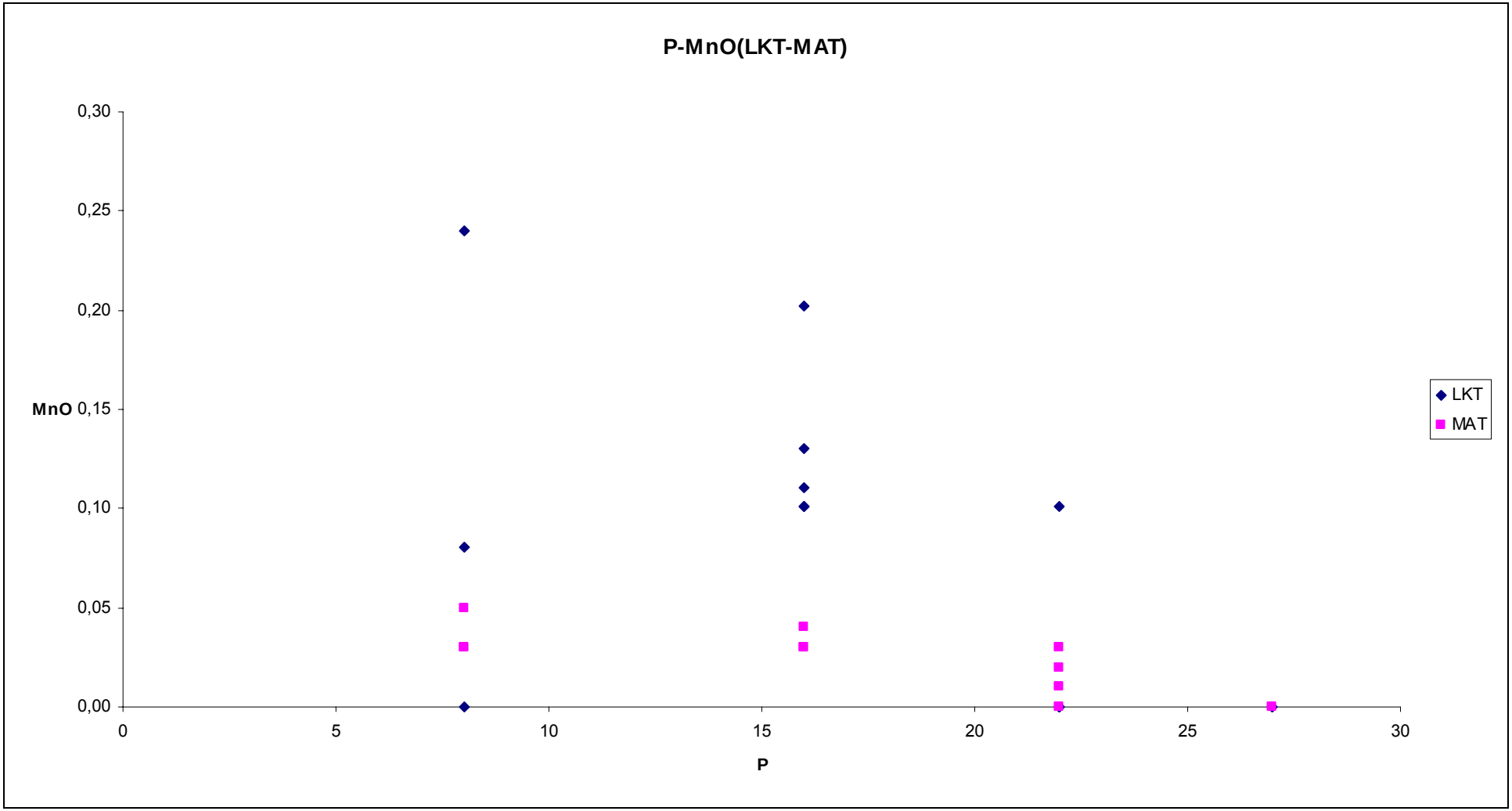
Σχ.2.6.4α Διάγραμμα T-MnO για τα δείγματα AB και HAB.



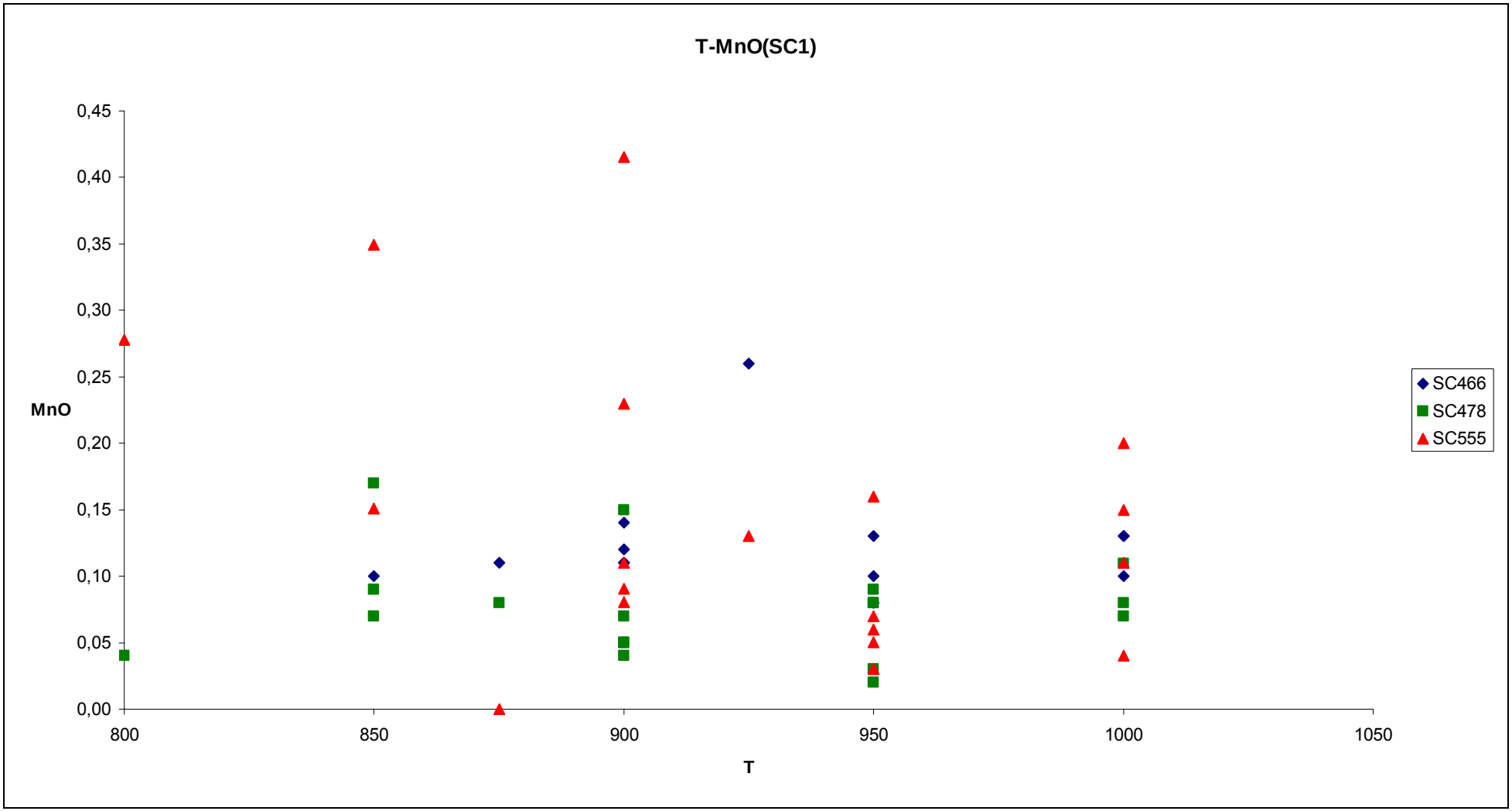
Σχ.2.6.4β Διάγραμμα P-MnO για τα δείγματα AB και HAB.



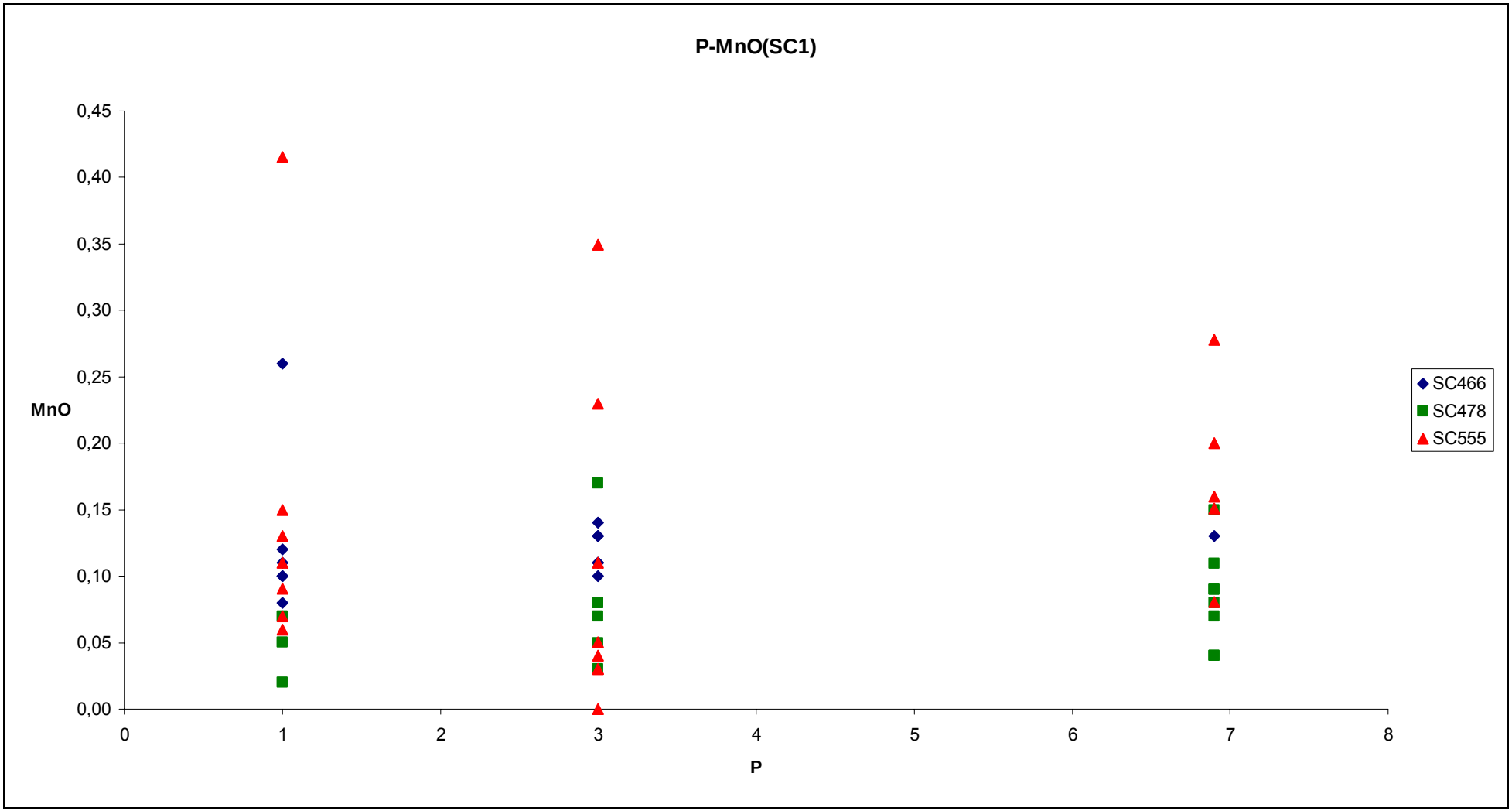
Σχ.2.6.5α Διάγραμμα T-MnO για τα δείγματα LKT και MAT.



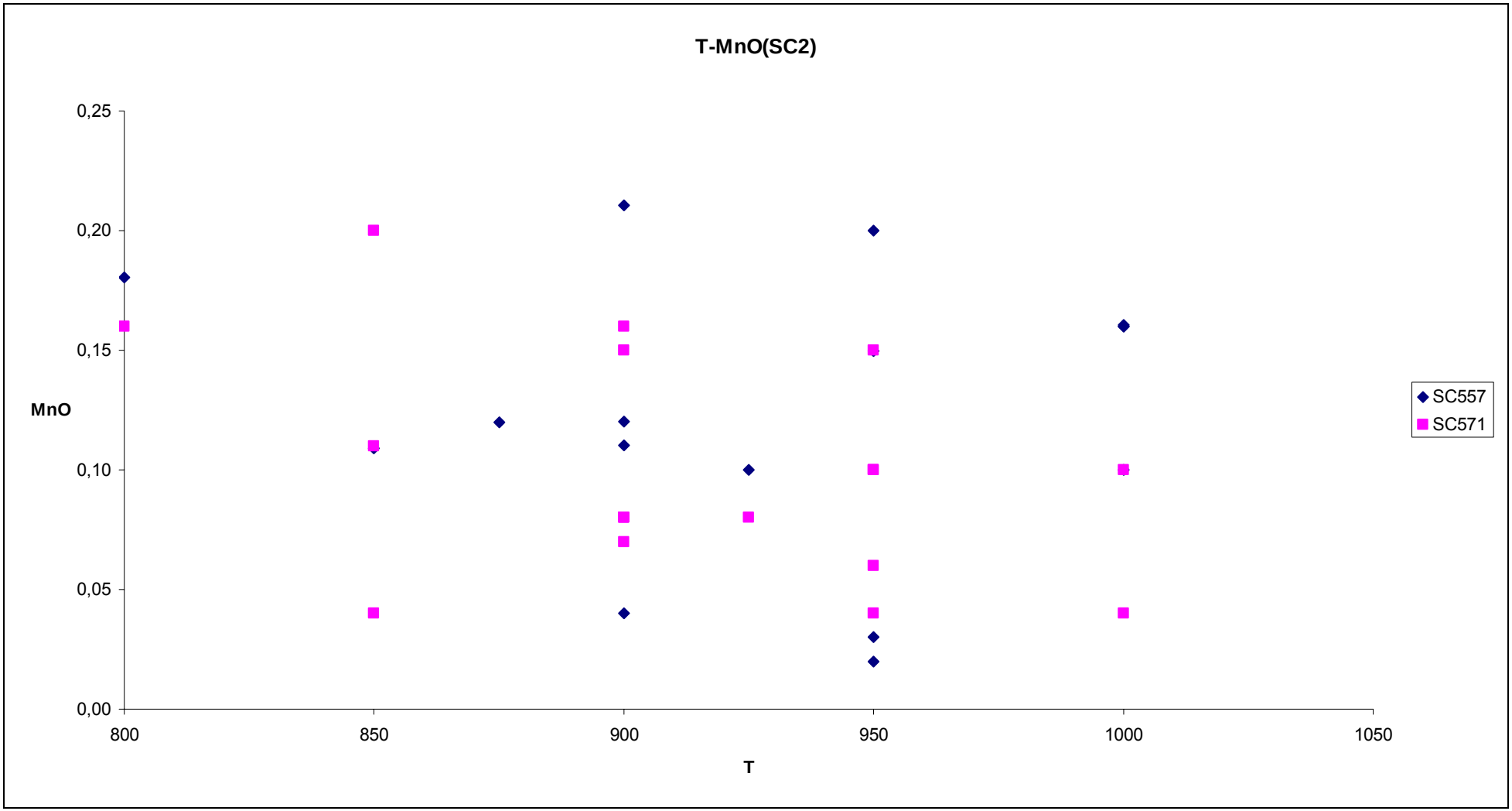
Σχ.2.6.5β Διάγραμμα P-MnO για τα δείγματα LKT και MAT.



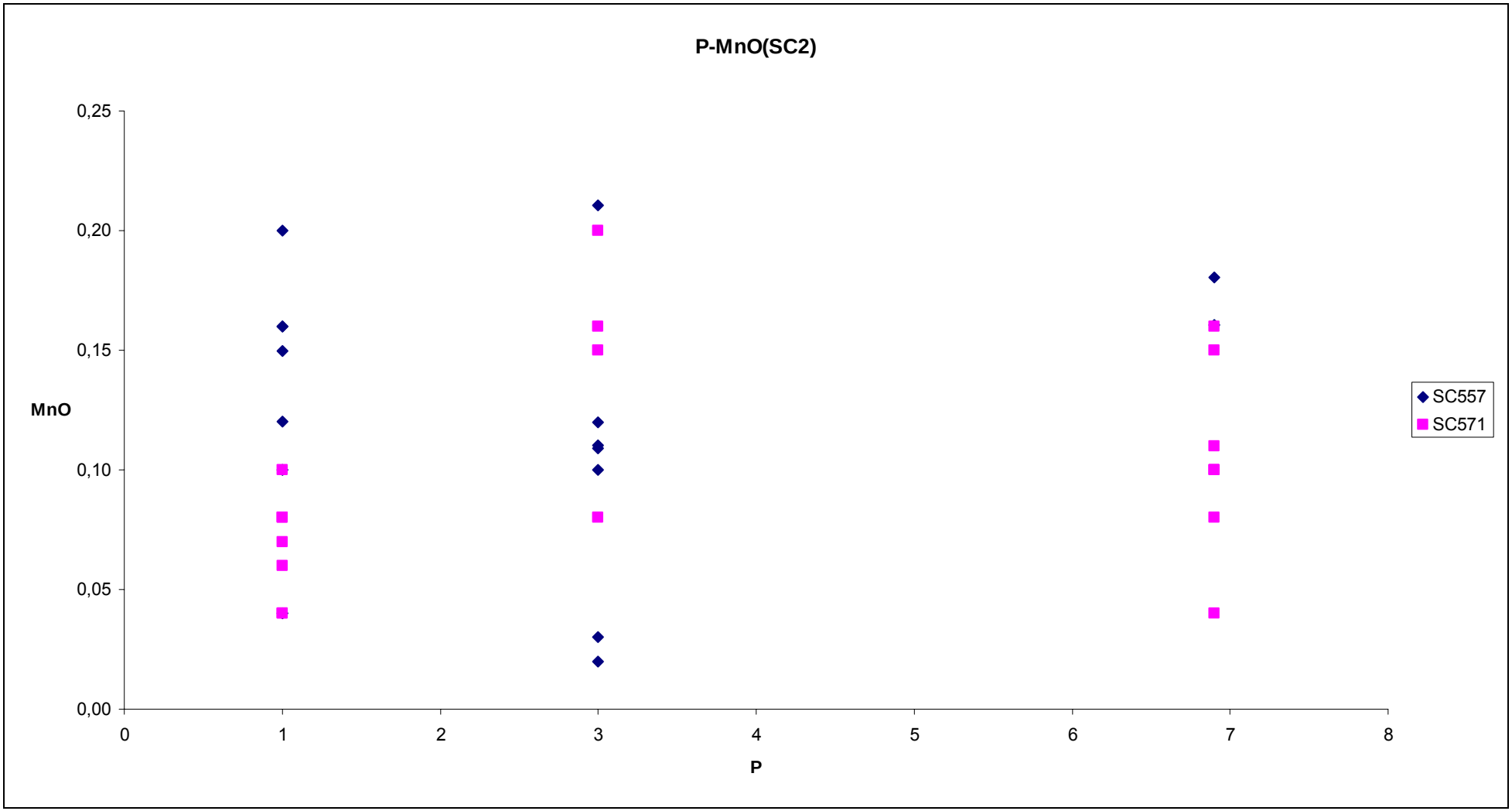
Σχ.2.6.6α Διάγραμμα T-MnO για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ.2.6.6β Διάγραμμα P-MnO για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



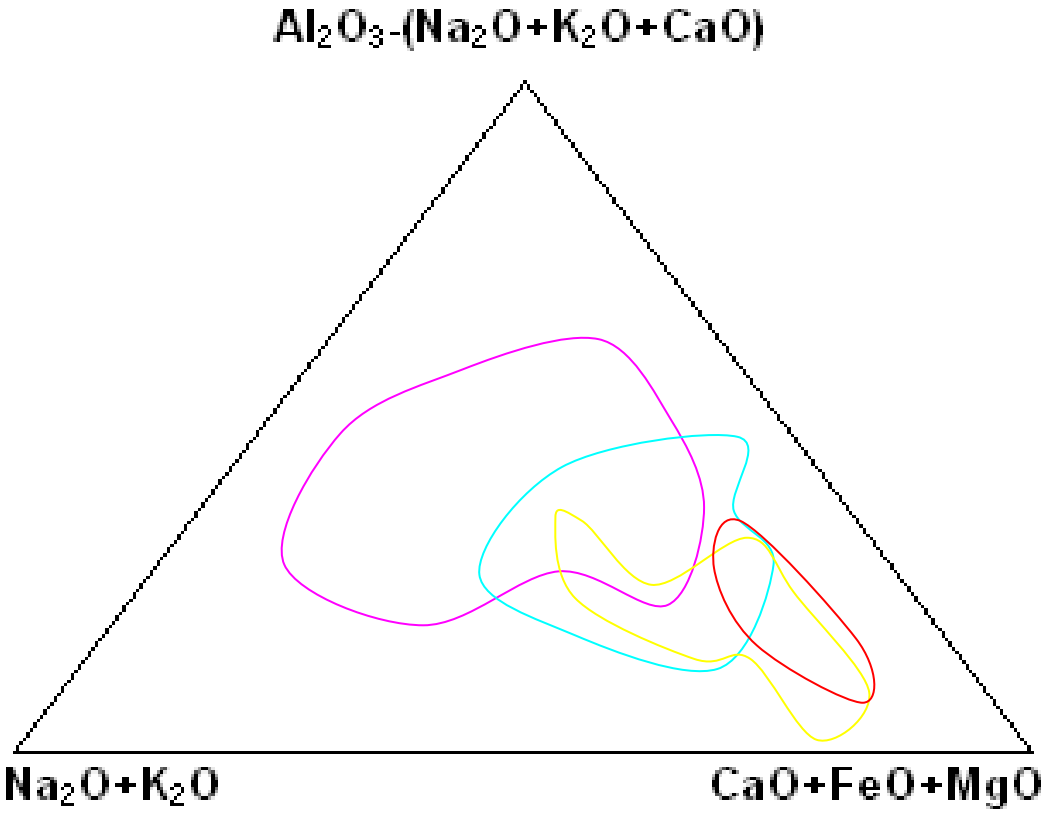
Σχ.2.6.7α Διάγραμμα T-MnO για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ.2.6.7β Διάγραμμα P-MnO για τα δείγματα SC557 και SC571.

2.7. MgO

Όπως βλέπουμε στο διάγραμμα AFM (Σχ. 2.7.1), γενικά όσο το MgO αυξάνεται στα τήγματα, τόσο αυτά τείνουν να αυξάνουν και την περιεκτικότητα τους σε CaO+FeO+MgO. Δηλαδή, τα τήγματα με το λιγότερο MgO (0,01-1,16, ροζ γραμμή) βρίσκονται σχεδόν στη μέση του τριγώνου ενώ αυτά με το περισσότερο MgO (2,31-3,46, κίτρινη γραμμή και 3,46-4,61 κόκκινη γραμμή) βρίσκονται σχεδόν στην κορυφή CaO+FeO+MgO.

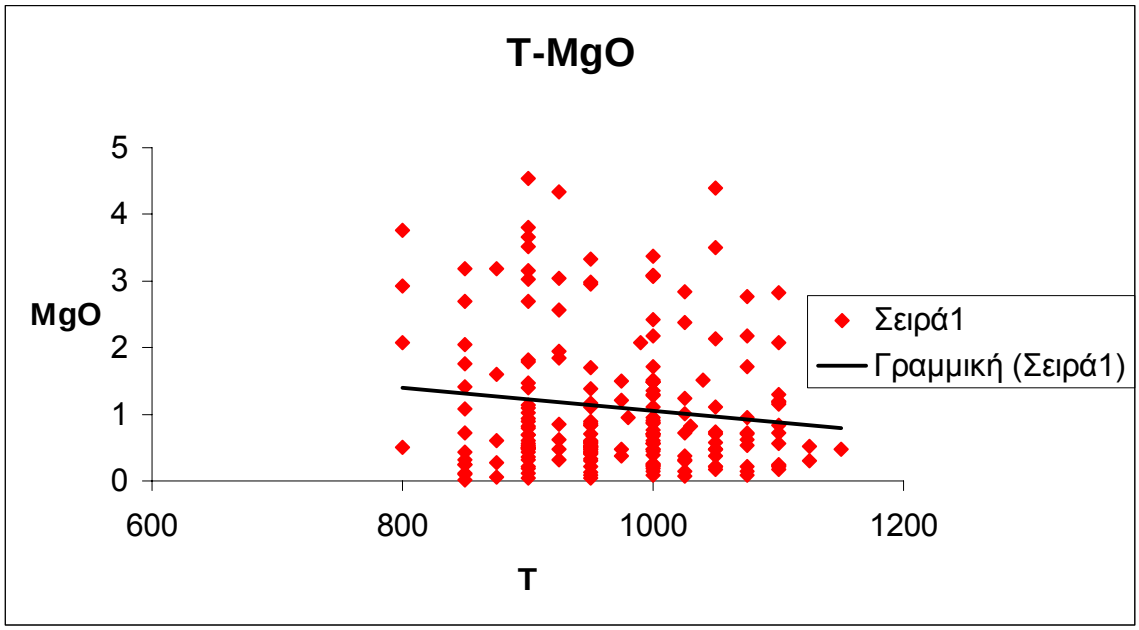


Σχ.2.7.1. Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το MgO.

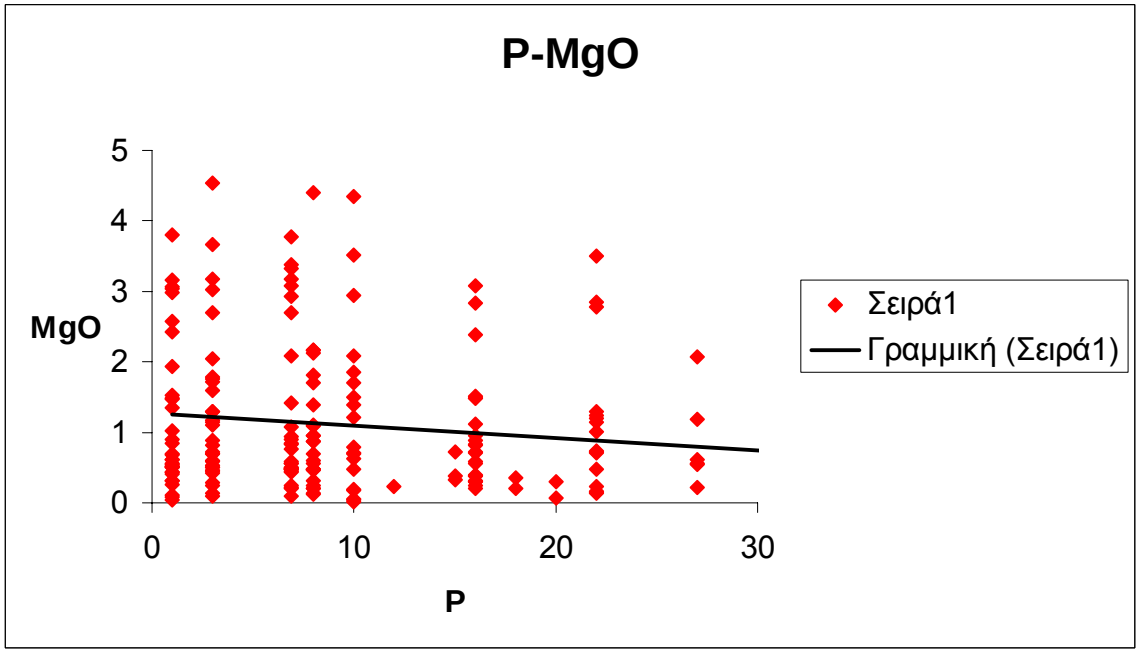
Με την αύξηση της T, το MgO γενικά παρουσιάζει μικρή ελάττωση. Π.χ. στους 1150° C , που είναι η υψηλότερη T, παίρνουμε τήγματα κυρίως με χαμηλές περιεκτικότητες σε MgO (0,47) (Σχ. 2.7.2).

Ως προς την P, το MgO εμφανίζει μικρή ελάττωση με την αύξησή της. Π.χ. σε P=1 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες που φτάνουν ως και 3,80, στα 16 kbar φτάνουν ως και 1,52, ενώ σε P=27 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες ως 2,07. Άρα σε μικρότερη P μπορούμε να πάρουμε τήγματα με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε MgO απ' ότι σε μια μεγαλύτερη P (Σχ. 2.7.3).

Στα διαγράμματα T-MgO ανά πείραμα παρατηρούμε ότι από το πείραμα με αρχικό υλικό το δείγμα AB παίρνουμε τήγματα που παρουσιάζουν ελάττωση της περιεκτικότητας τους σε MgO με την αύξηση της T, ενώ από το δείγμα HAB τα τήγματα που προκύπτουν έχουν σχεδόν σταθερή περιεκτικότητα σε MgO. Σχεδόν σταθερά εμφανίζονται και τα τήγματα από το αρχικό υλικό MAT, ενώ σταθερά είναι



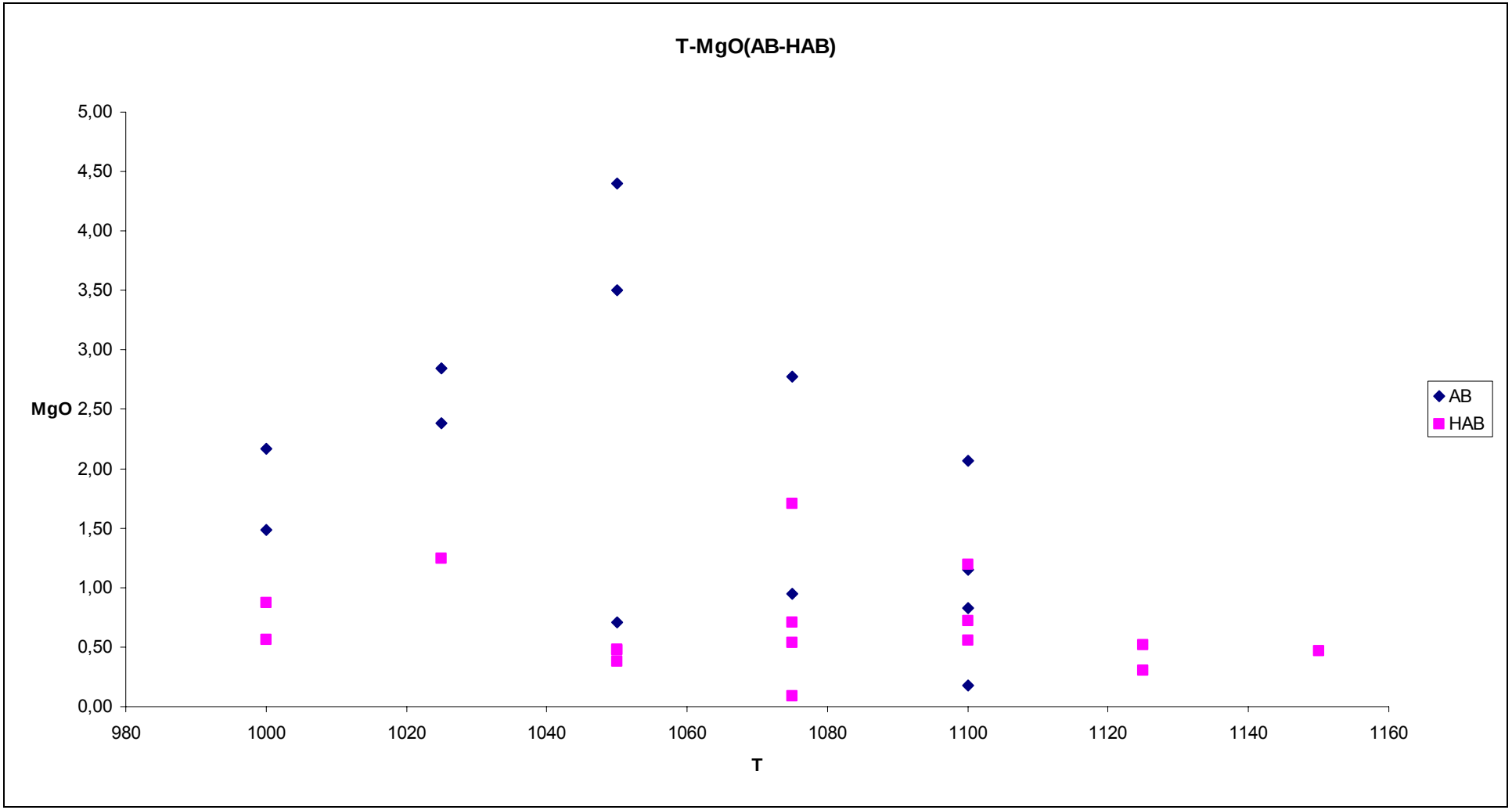
Σχ.2.7.2. Διάγραμμα T-MgO.



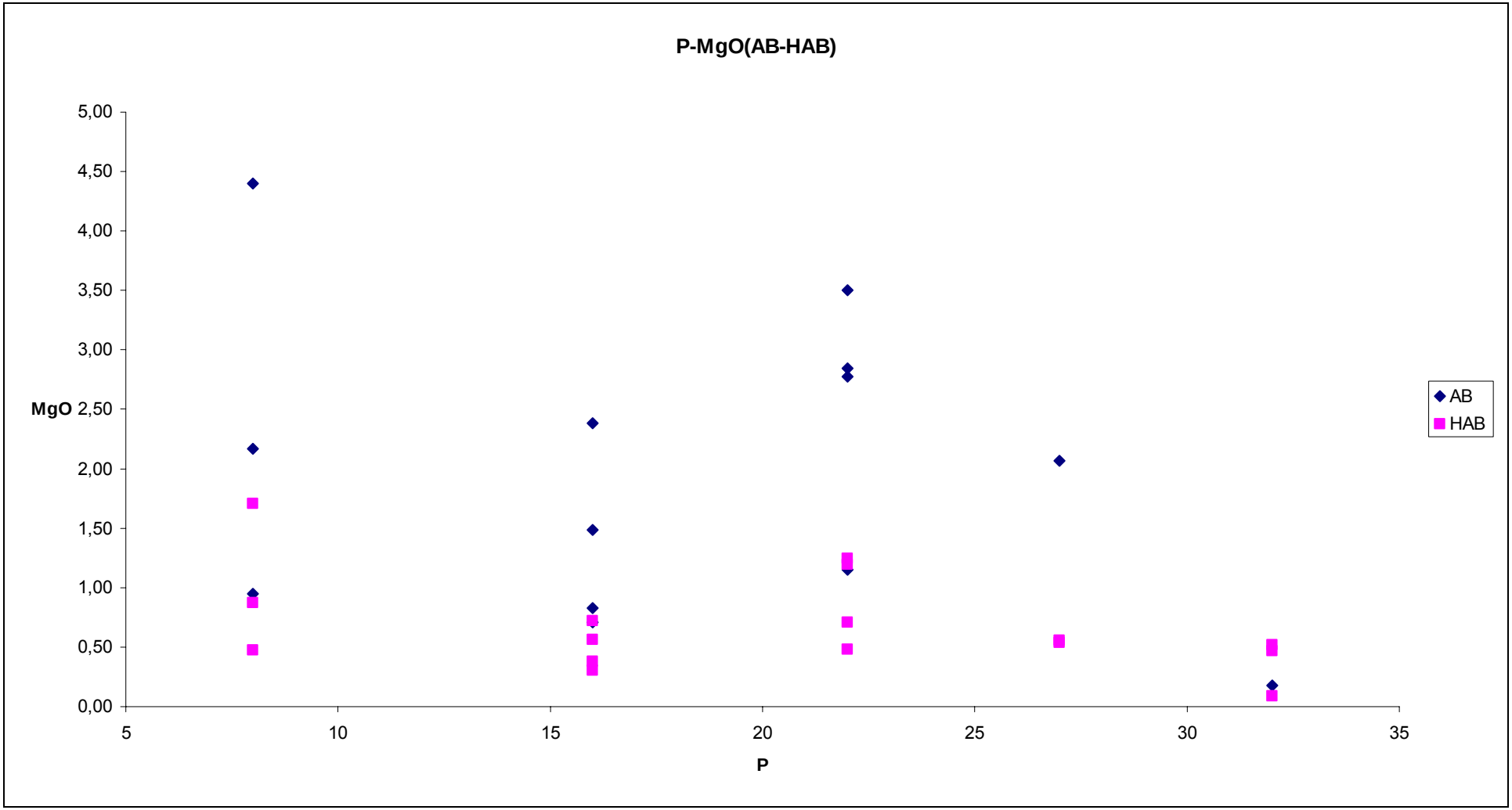
Σχ.2.7.3. Διάγραμμα P-MgO.

και αυτά που προκύπτουν από το δείγμα SC478. Αύξηση της περιεκτικότητας σε MgO με την αύξηση της T παρουσιάζουν τα τήγματα που προκύπτουν από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα LKT και SC466. Ενώ ελάττωση παρουσιάζουν τα τήγματα από τα δείγματα SC555, SC557 και SC571 (Σχ. 2.7.4 α, 2.7.5 α, 2.7.6 α και 2.7.7 α).

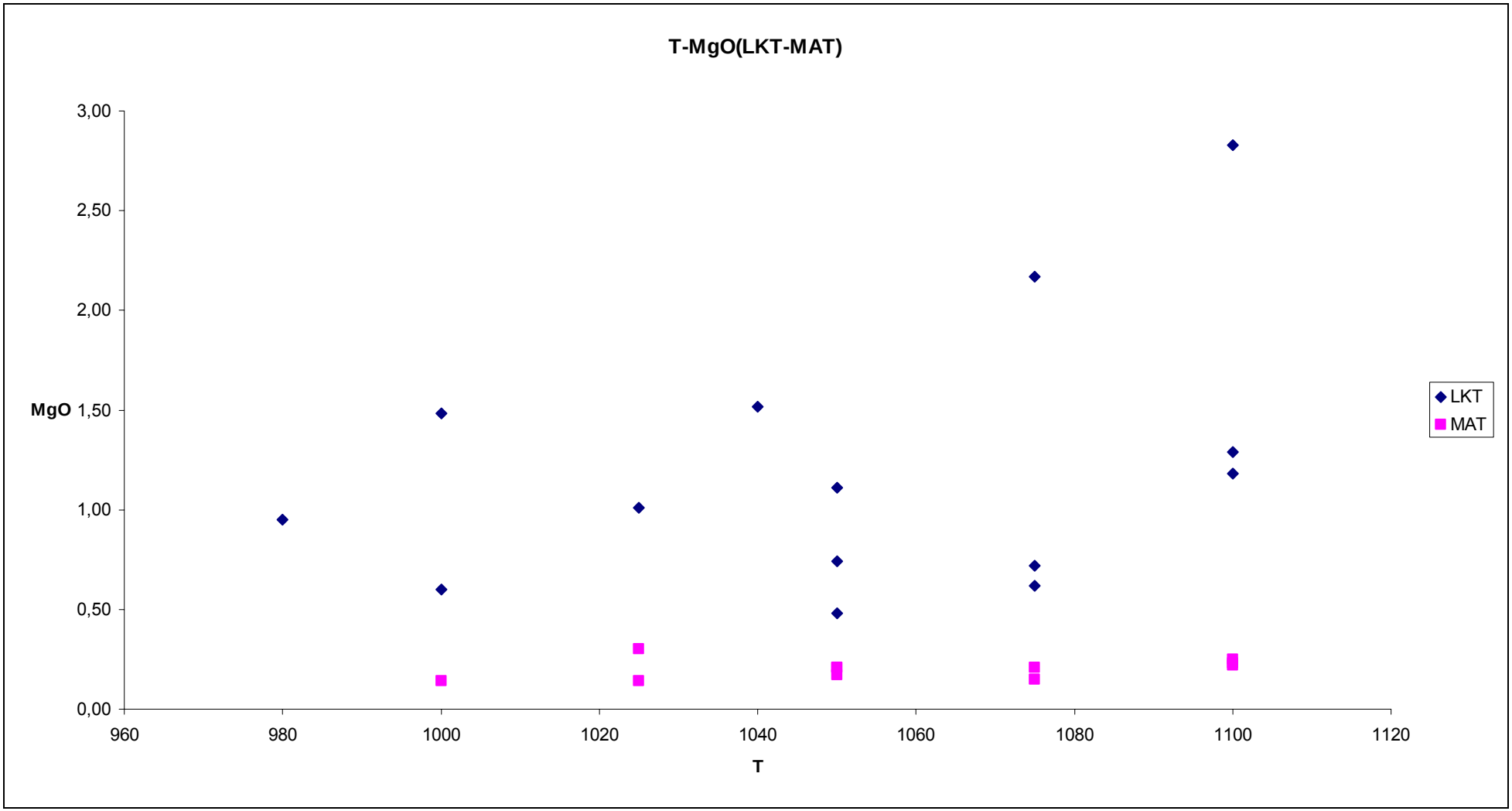
Από τα διαγράμματα P-MgO ανά πείραμα προκύπτει ότι τα τήγματα που προκύπτουν από τα αρχικά υλικά AB, HAB, LKT και SC466 εμφανίζουν ελάττωση της περιεκτικότητάς τους σε MgO με την αύξηση της P. Αύξηση της περιεκτικότητας με την αύξηση της P παρουσιάζουν τα τήγματα από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα SC555, SC557 και SC571, όπου η ελάττωση είναι μικρή, ενώ από τα δείγματα MAT και SC478 τα τήγματα που προκύπτουν παρουσιάζουν σταθερότητα στην περιεκτικότητά τους σε MgO (Σχ. 2.7.4 β, 2.7.5 β, 2.7.6 β και 2.7.7 β).



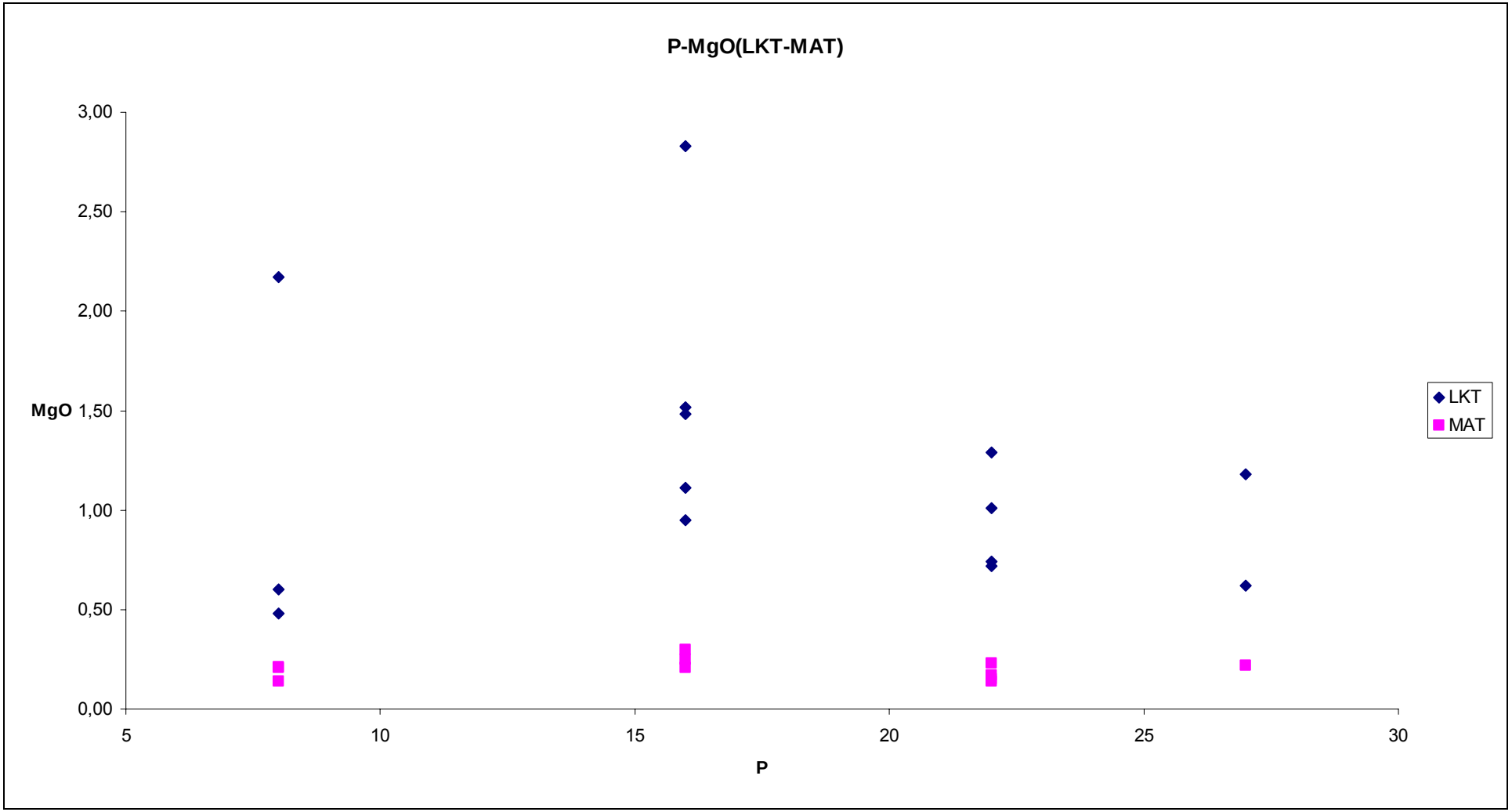
Σχ.2.7.4α Διάγραμμα T-MgO για τα δείγματα AB και HAB.



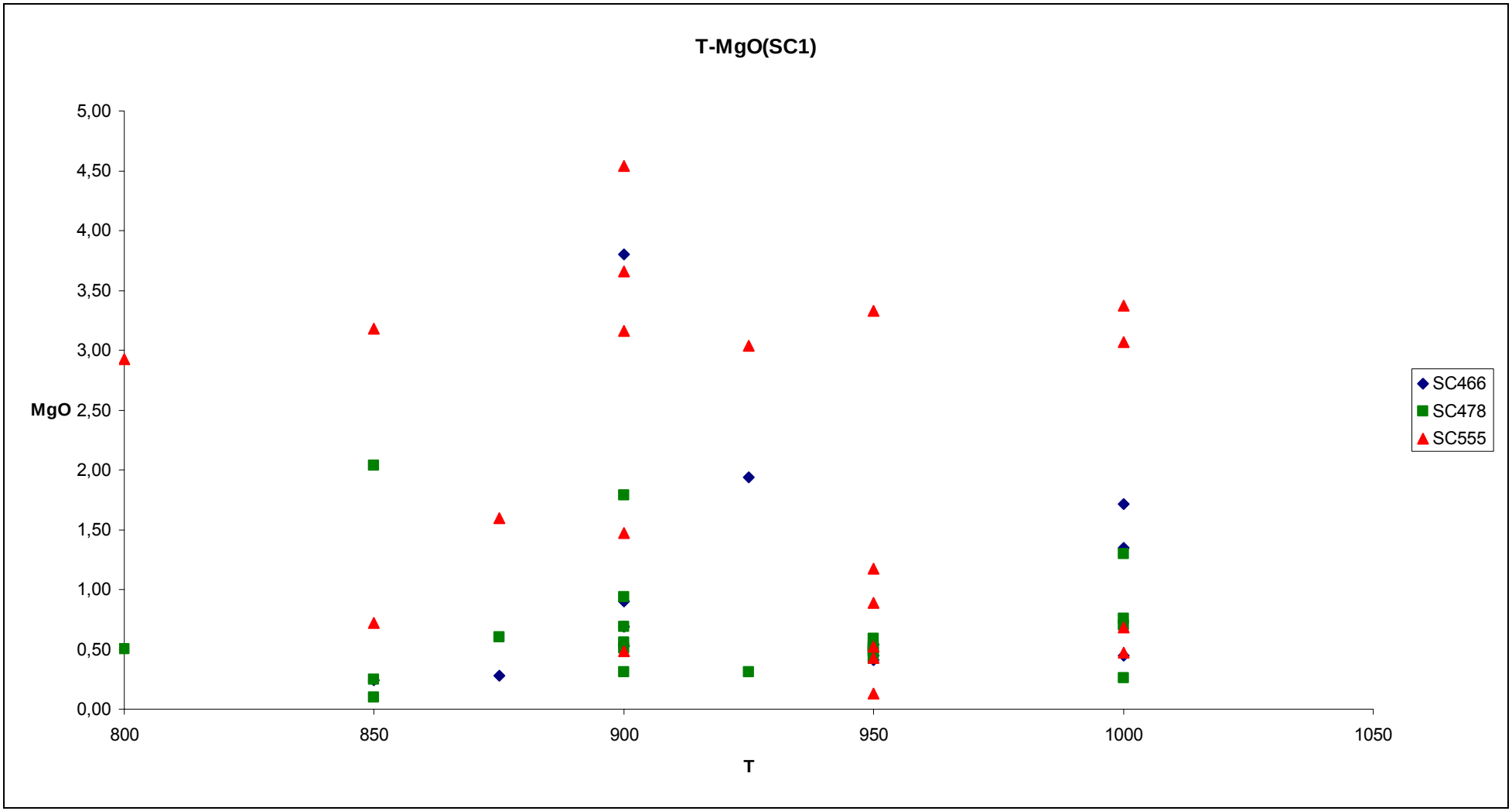
Σχ.2.7.4β Διάγραμμα P-MgO για τα δείγματα AB και HAB.



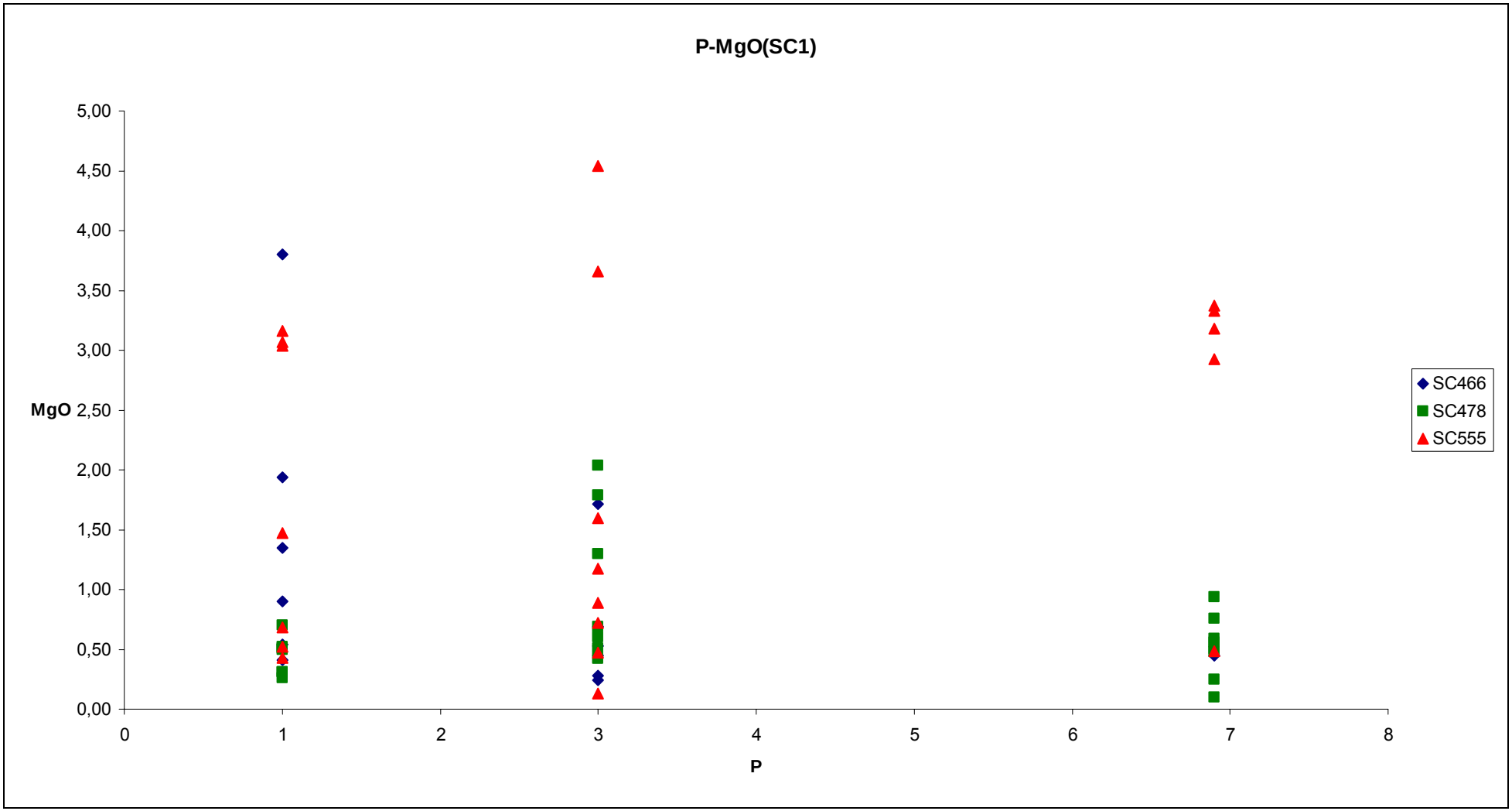
Σχ.2.7.5α Διάγραμμα T-MgO για τα δείγματα LKT και MAT.



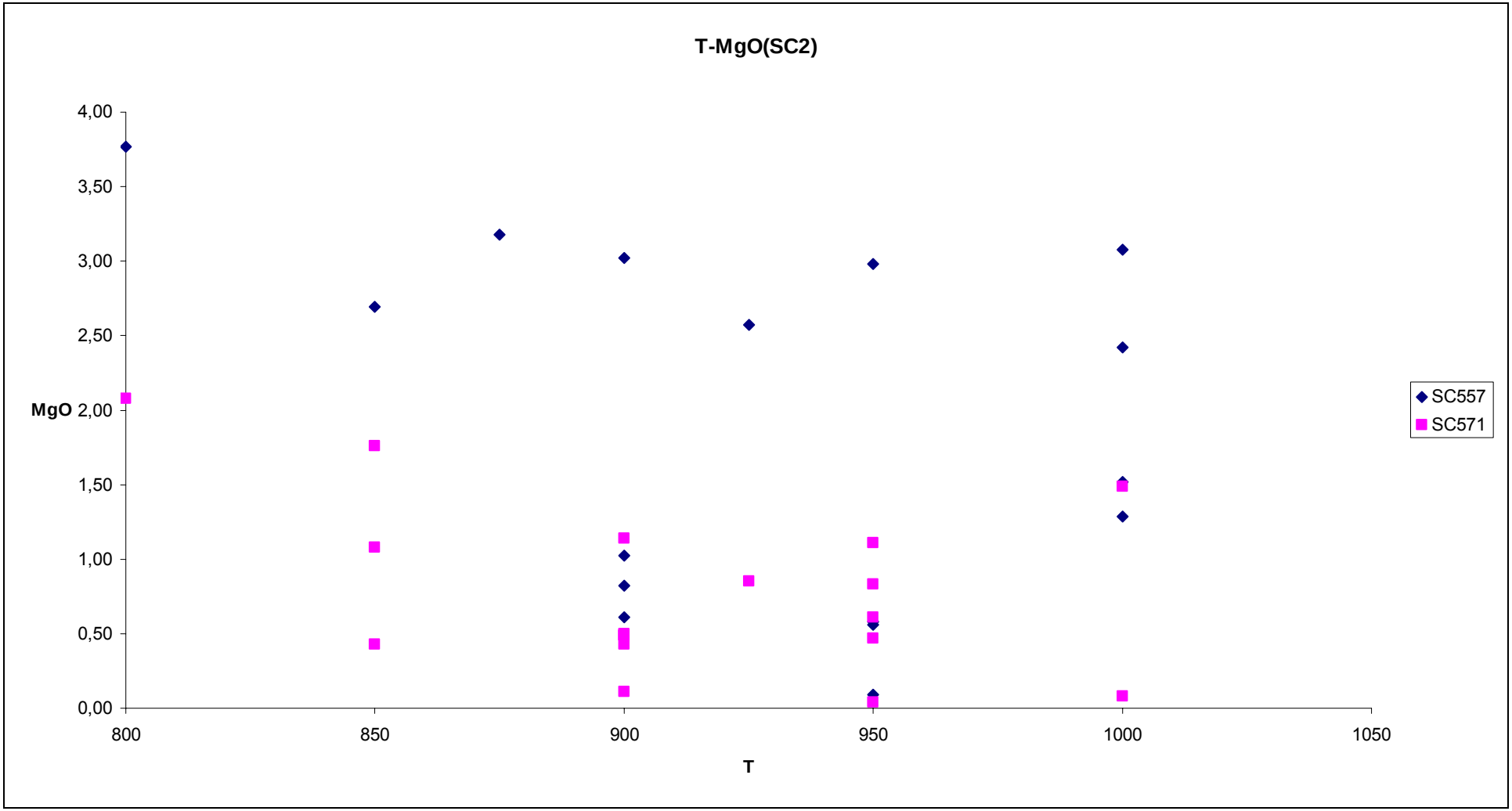
Σχ.2.7.5β Διάγραμμα P-MgO για τα δείγματα LKT και MAT.



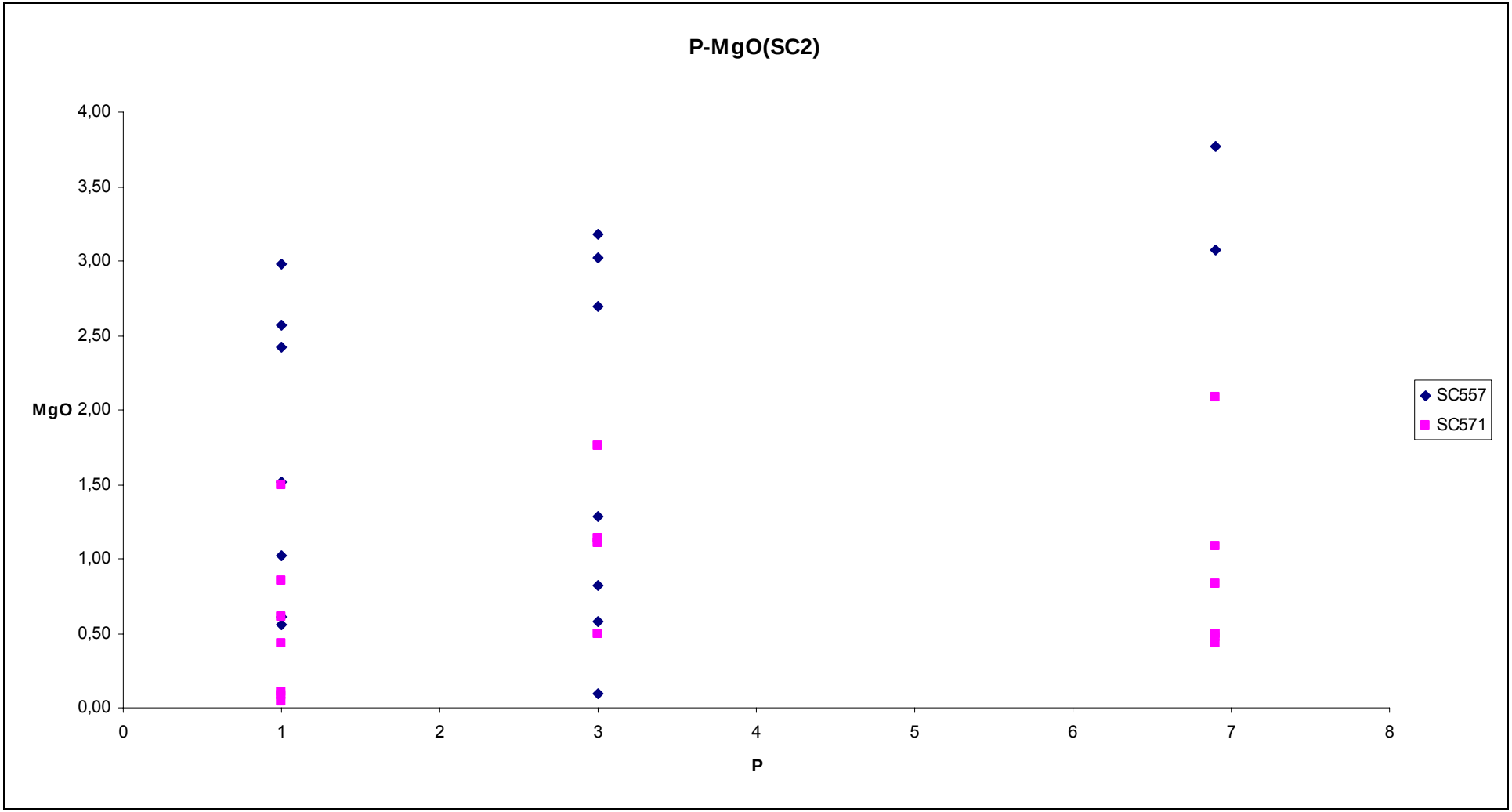
Σχ.2.7.6α Διάγραμμα T-MgO για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ.2.7.6β Διάγραμμα P-MgO για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



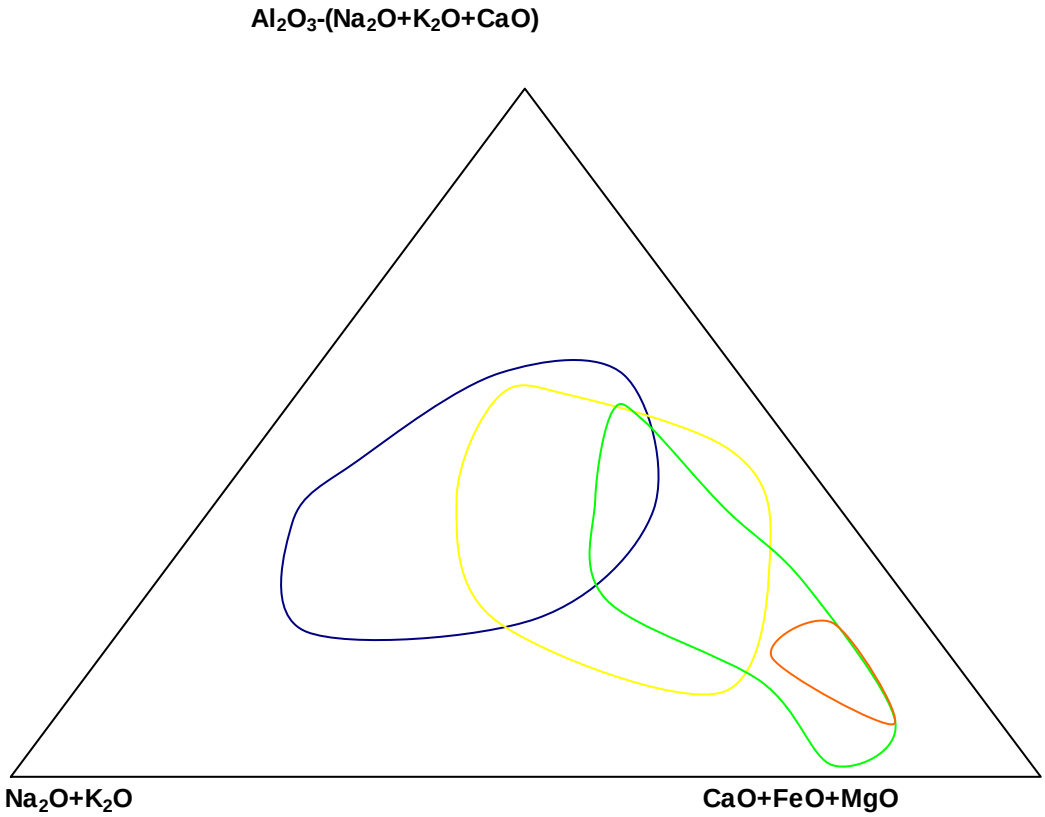
Σχ.2.7.7α Διάγραμμα T-MgO για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ.2.7.7β Διάγραμμα P-MgO για τα δείγματα SC557 και SC571.

2.8. CaO

Στο διάγραμμα AFM (Σχ. 2.8.1) παρατηρούμε ότι γενικά όσο το CaO αυξάνεται στα τήγματα, τόσο αυτά τείνουν να αυξάνουν και την περικτικότητα τους σε CaO+FeO+MgO. Δηλαδή, τα τήγματα με το περισσότερο CaO (5,5-8, πράσινη γραμμή και 8-10,5 πορτοκαλί γραμμή) βρίσκονται σχεδόν στην κορυφή CaO+FeO+MgO, σε αντίθεση με τα τήγματα με το λιγότερο CaO (0,5-3, μπλε γραμμή).

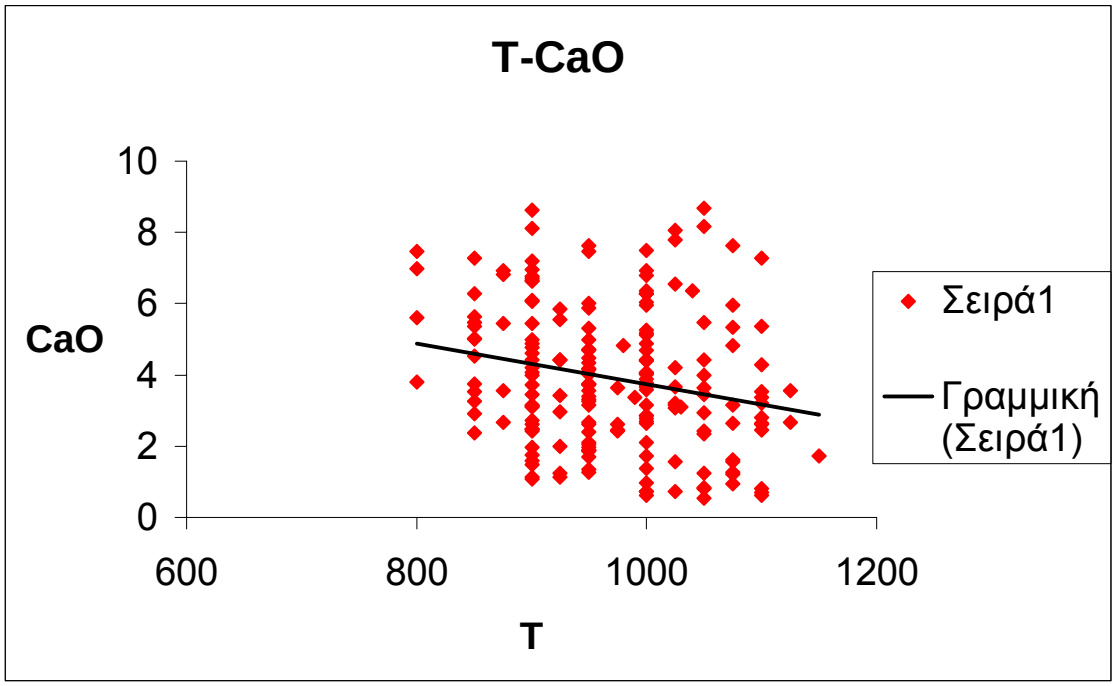


Σχ.2.8.1. Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το CaO.

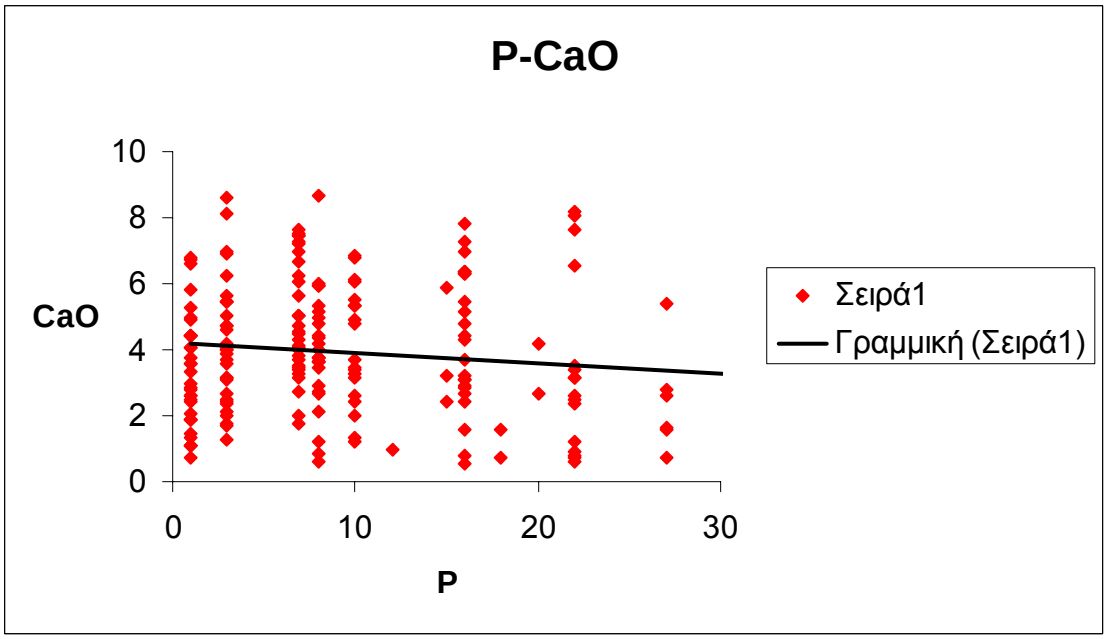
Ως προς την T, βλέπουμε ότι παρουσιάζεται τάση ελάττωσης του CaO των τηγμάτων με την αύξησή της. π.χ. σε T=800° C, έχουμε τήγμα με περιεκτικότητα σε CaO=3,80 αλλά και τήγμα με CaO=7,48, στους 1000° C έχουμε τήγματα με περιεκτικότητες από 0,72 ως 7,49, ενώ στους 1150° C έχουμε τήγμα με CaO=1,73 (Σχ. 2.8.2).

Ως προς την P, το CaO εμφανίζει μικρή ελάττωση με την αύξησή της. Π.χ. σε P=1 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες που φτάνουν ως και 6,76, ενώ σε P=27 kbar παίρνουμε τήγματα με περιεκτικότητες ως 5,37 (Σχ. 2.8.3).

Από τα διαγράμματα T-CaO ανά πείραμα παρατηρούμε ότι τα τήγματα που προκύπτουν από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα AB, HAB, LKT, SC555, SC557 και SC571 παρουσιάζουν ελάττωση της περιεκτικότητάς τους σε CaO με την αύξηση της T. Από τα δείγματα MAT, SC466 και SC478 τα τήγματα εμφανίζουν σχεδόν σταθερή περιεκτικότητα σε CaO (Σχ. 2.8.4 α, 2.8.5 α, 2.8.6 α και 2.8.7 α).

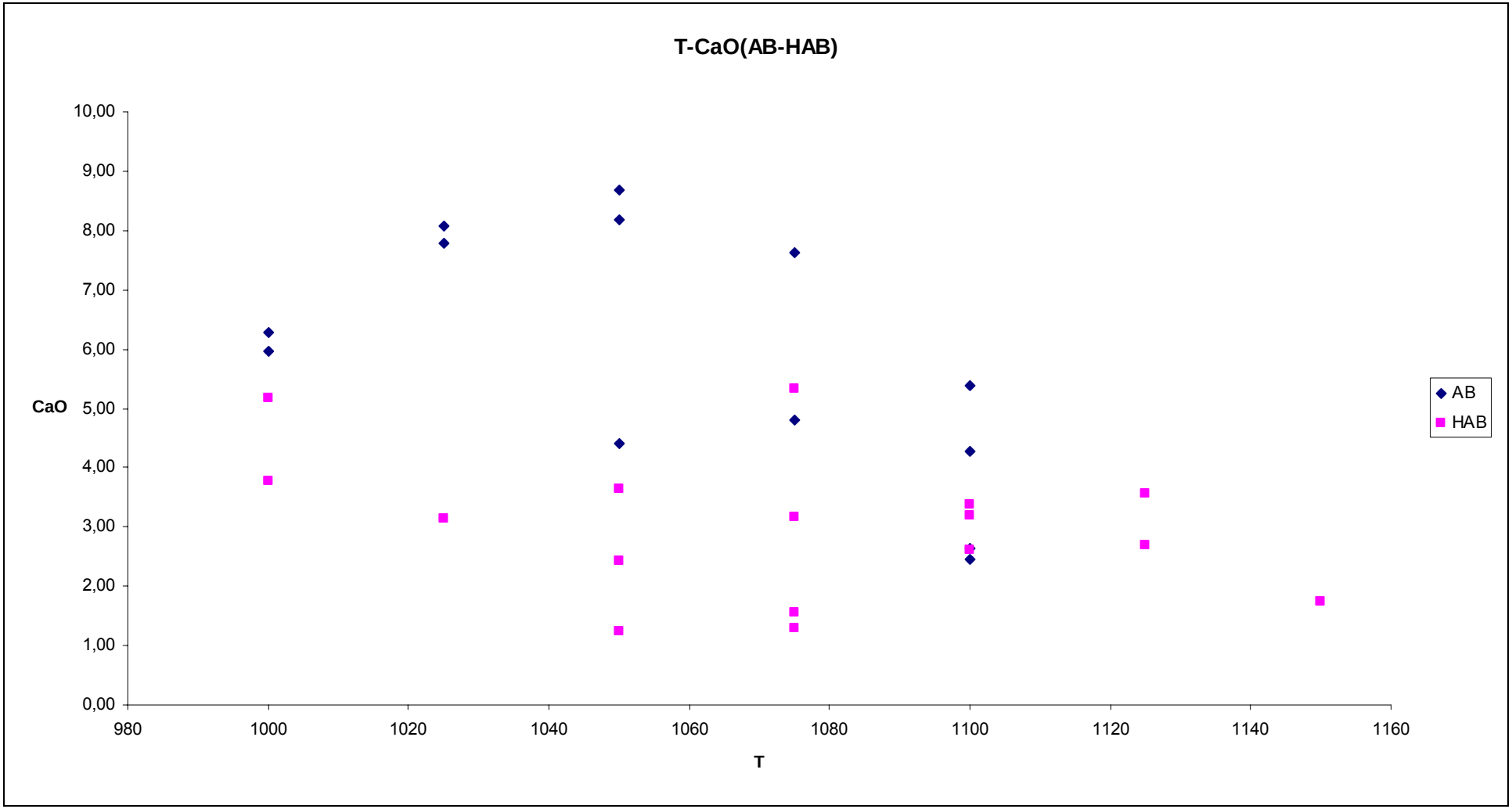


Σχ.2.8.2. Διάγραμμα T-CaO.

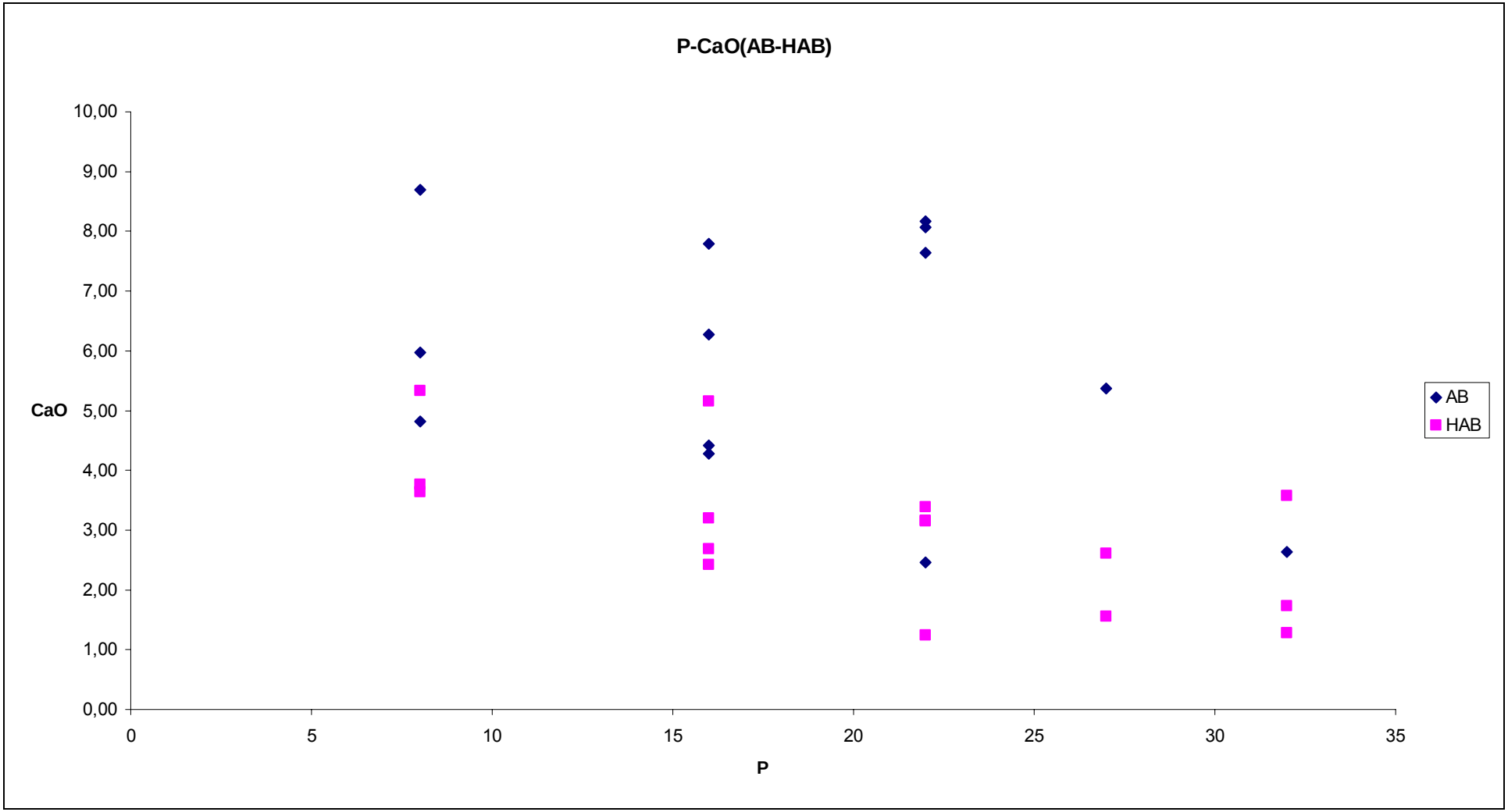


Σχ.2.8.3. Διάγραμμα P-CaO.

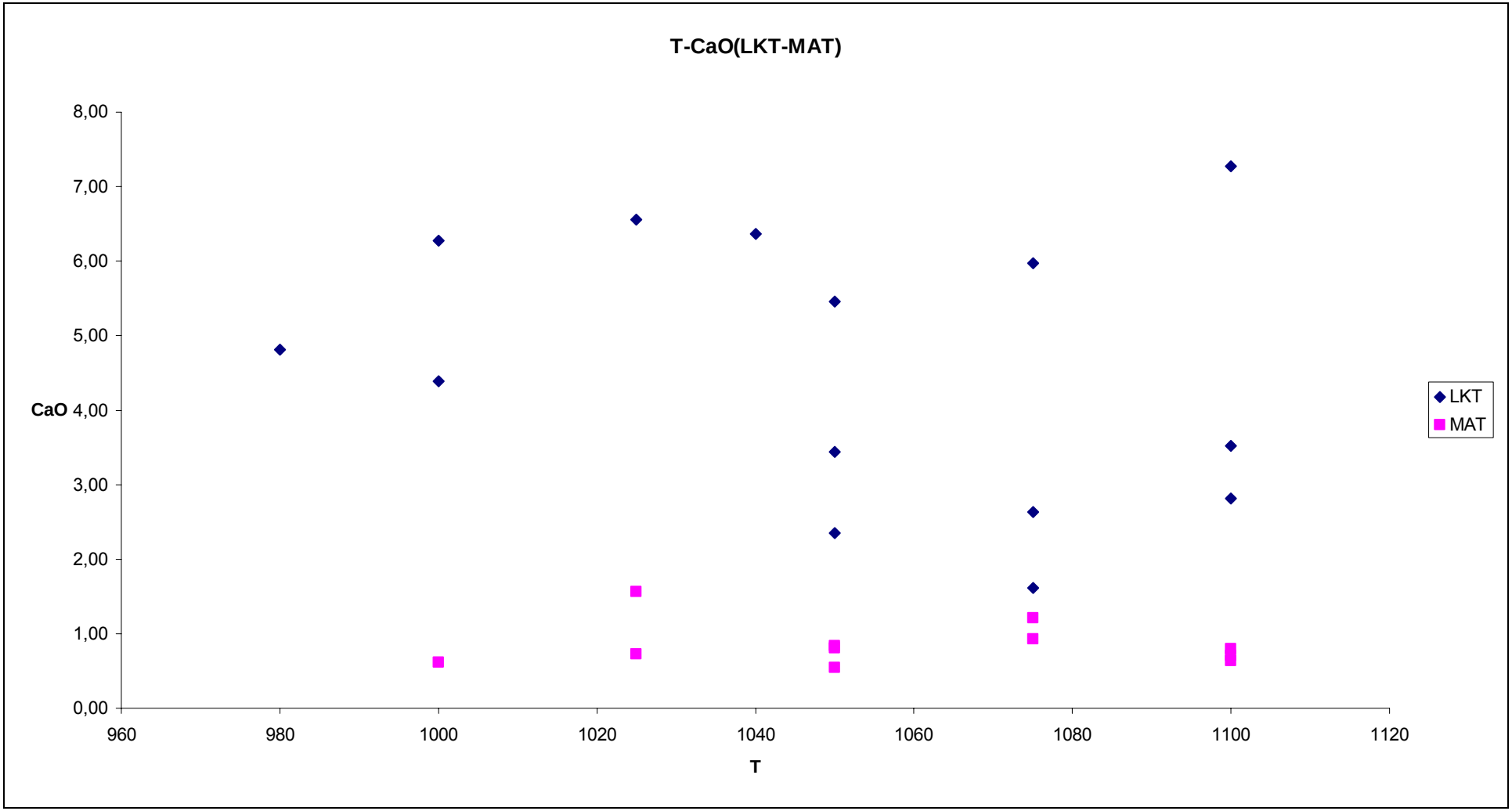
Από τα διαγράμματα P-CaO ανά πείραμα, παρατηρούμε ότι στα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα AB, HAB και LKT έχουμε ελάττωση του CaO στο τήγμα με την αύξηση της P. Στα διαγράμματα όπου προβάλλονται τα τήγματα από τα δείγματα SC466, SC478 και SC555, καθώς και από τα SC557 και SC571 φαίνεται ότι το παρουσιάζει αύξηση με την αύξηση της P. Ενώ σταθερό παραμένει το CaO των τηγμάτων από το αρχικό υλικό MAT (Σχ. 2.8.4 β, 2.8.5 β, 2.8.6 β και 2.8.7 β).



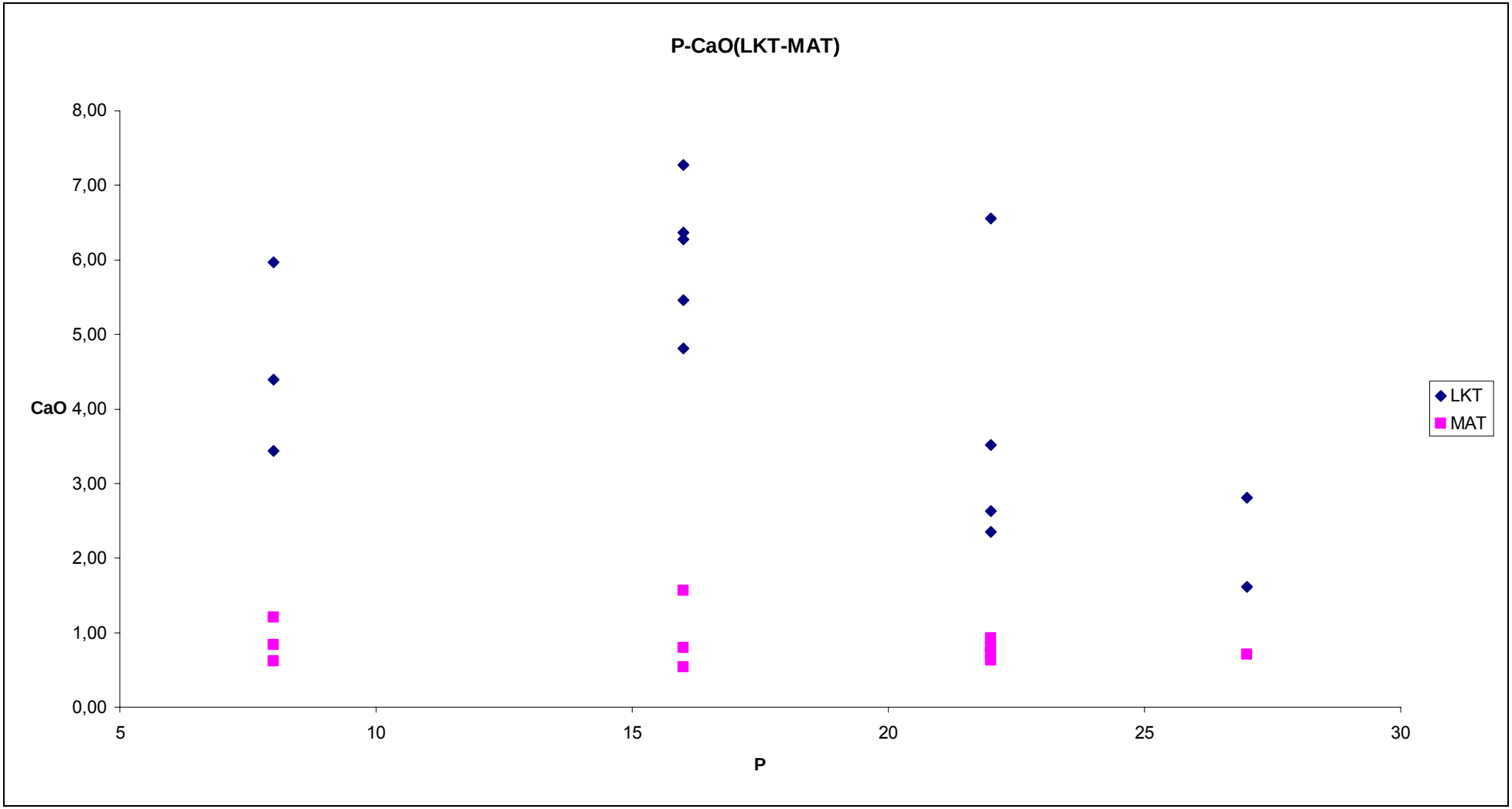
Σχ. 2.8.4α Διάγραμμα T-CaO για τα δείγματα AB και HAB.



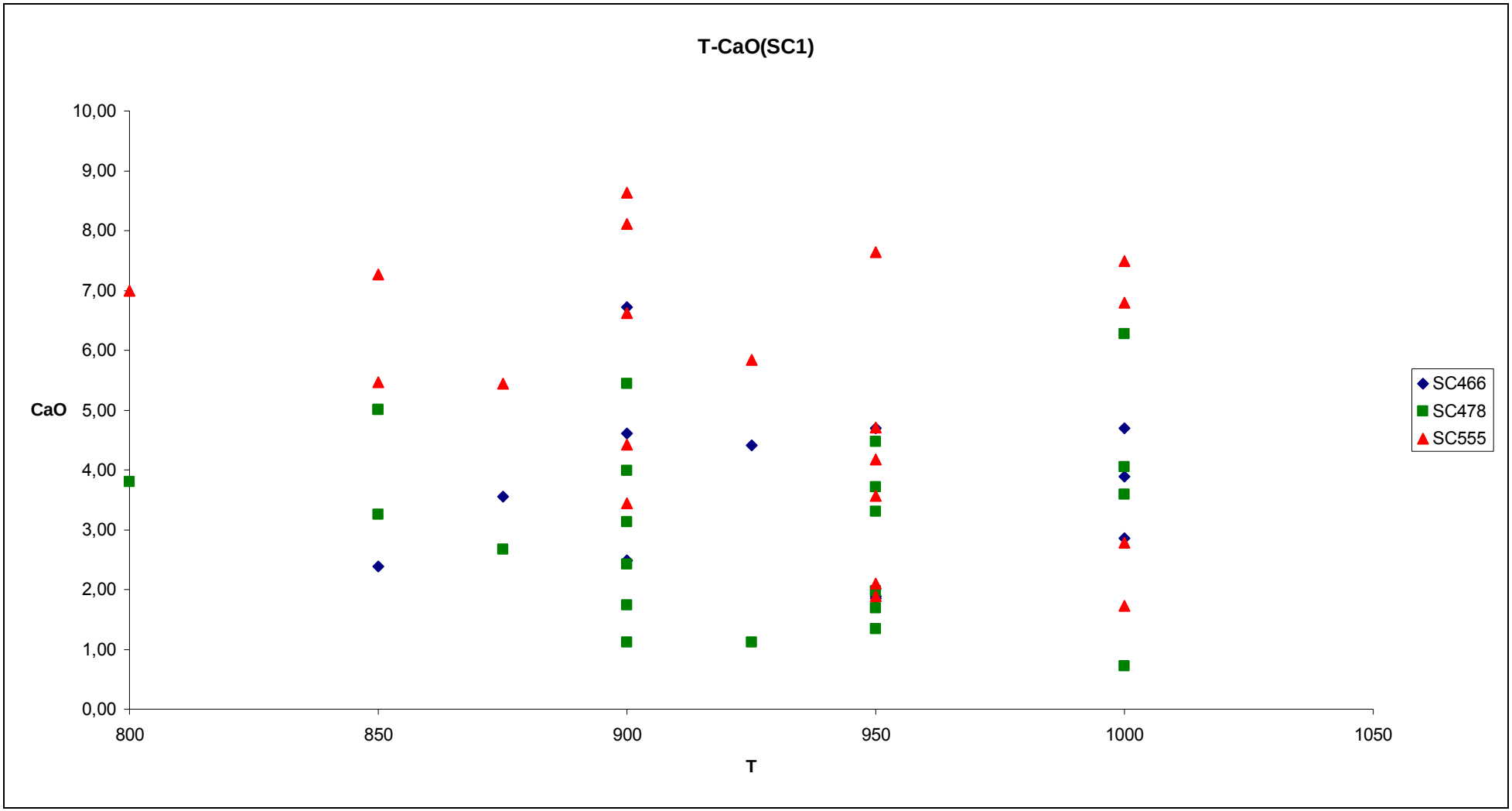
Σχ. 2.8.4β Διάγραμμα P-CaO για τα δείγματα ΑΒ και ΗΑΒ.



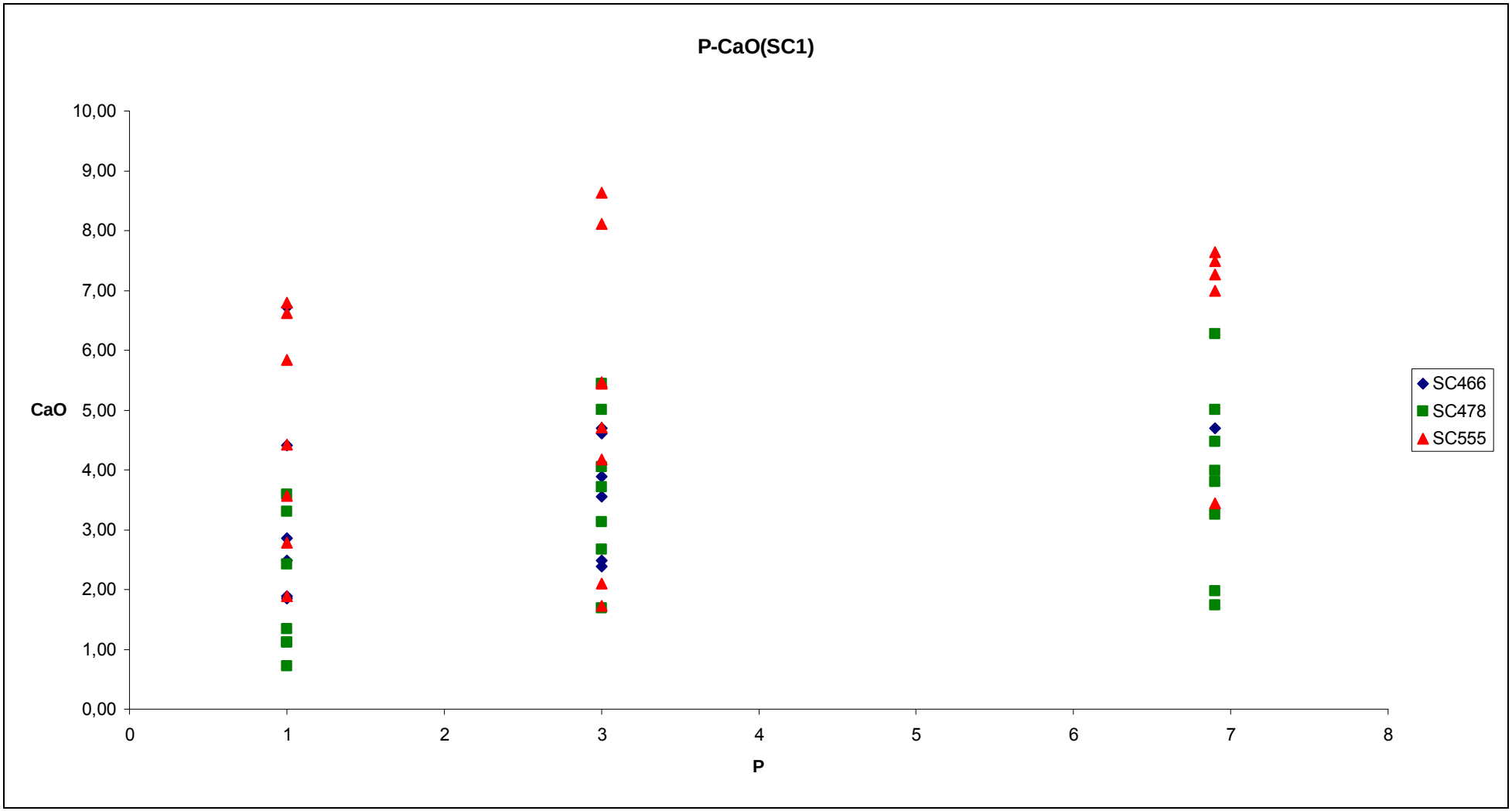
Σχ. 2.8.5α Διάγραμμα T-CaO για τα δείγματα LKT και MAT.



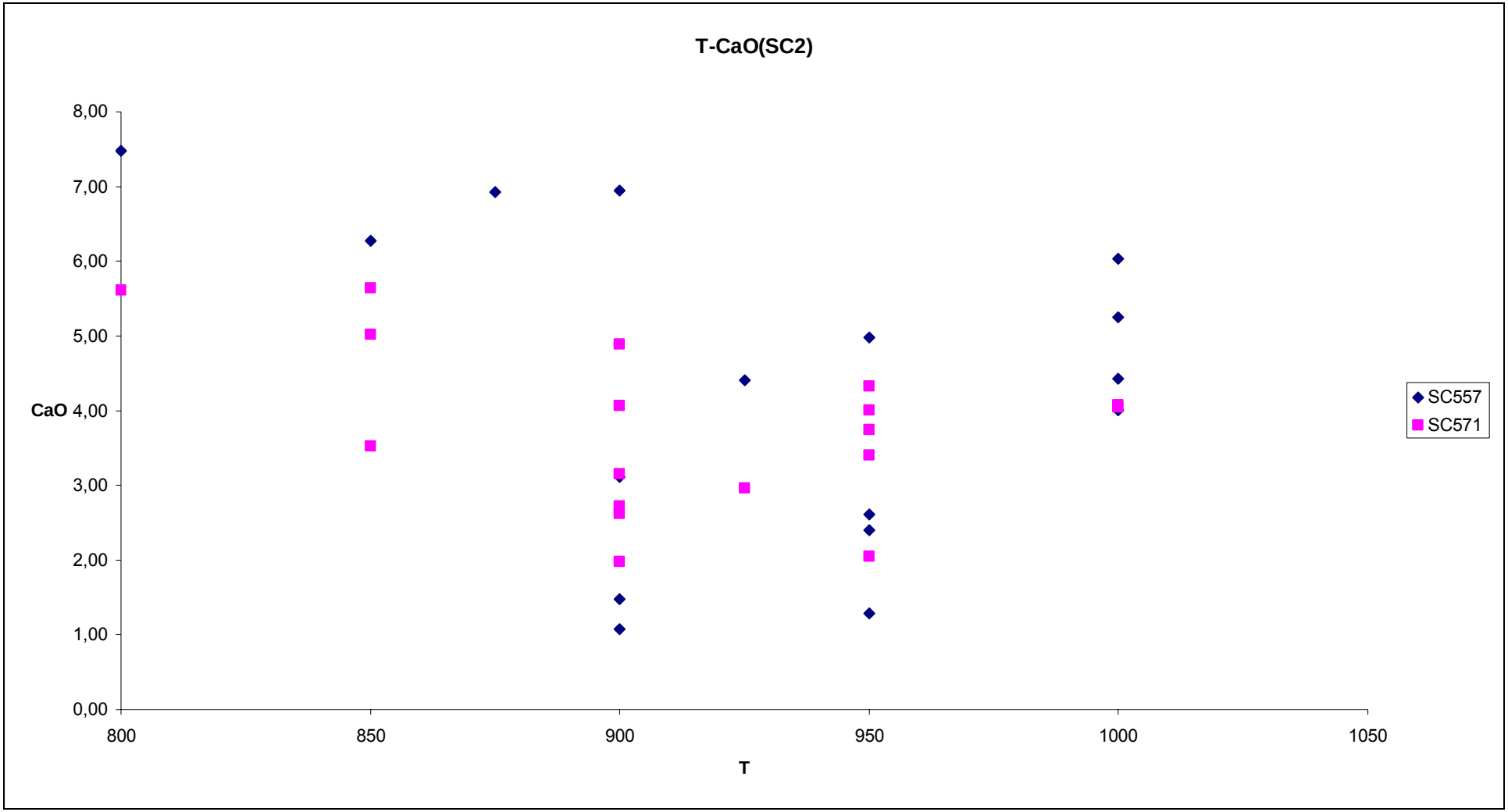
Σχ. 2.8.5β Διάγραμμα P-CaO για τα δείγματα LKT και MAT.



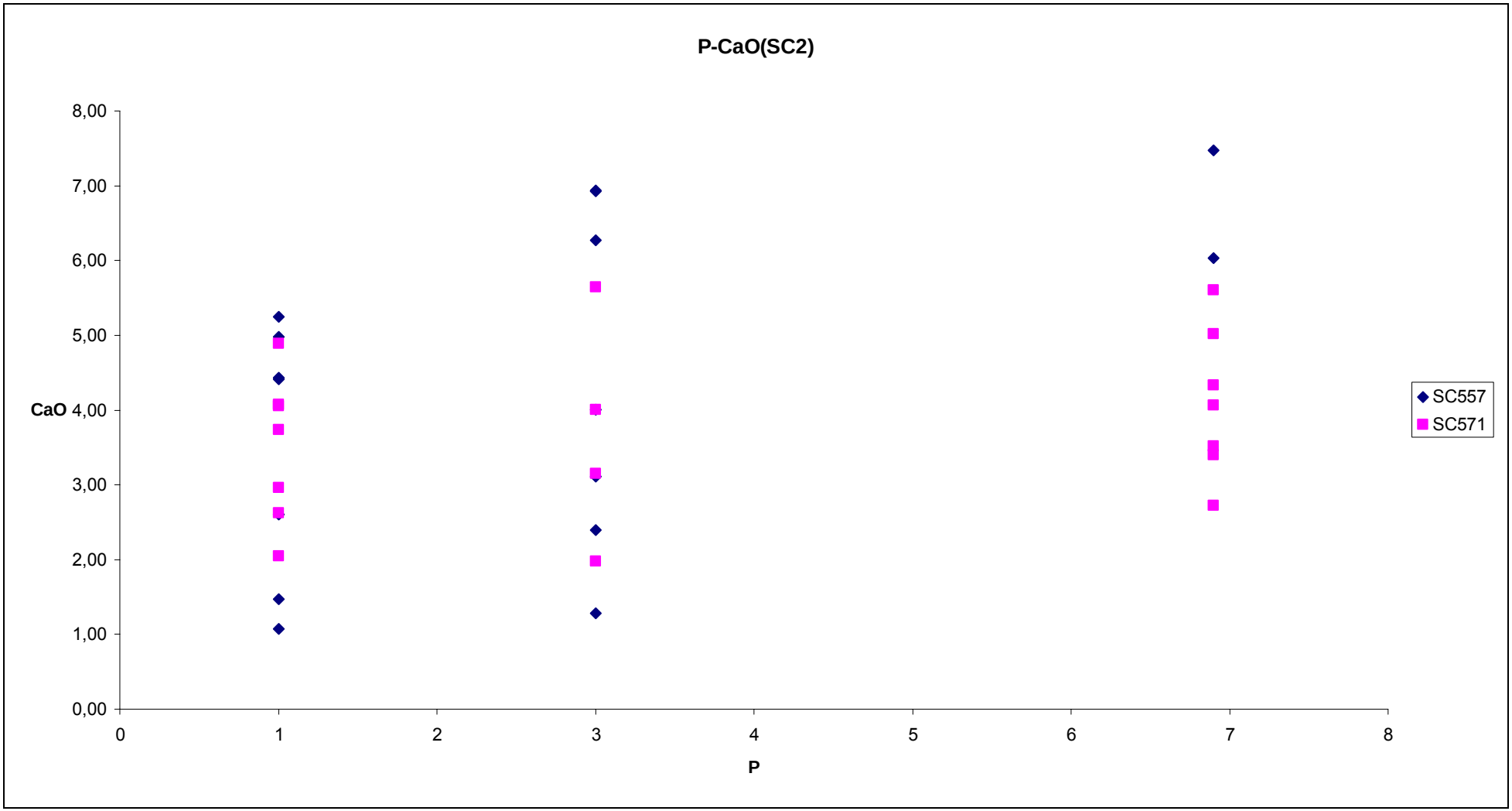
Σχ. 2.8.6α Διάγραμμα T-CaO για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ. 2.8.6β Διάγραμμα P-CaO για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



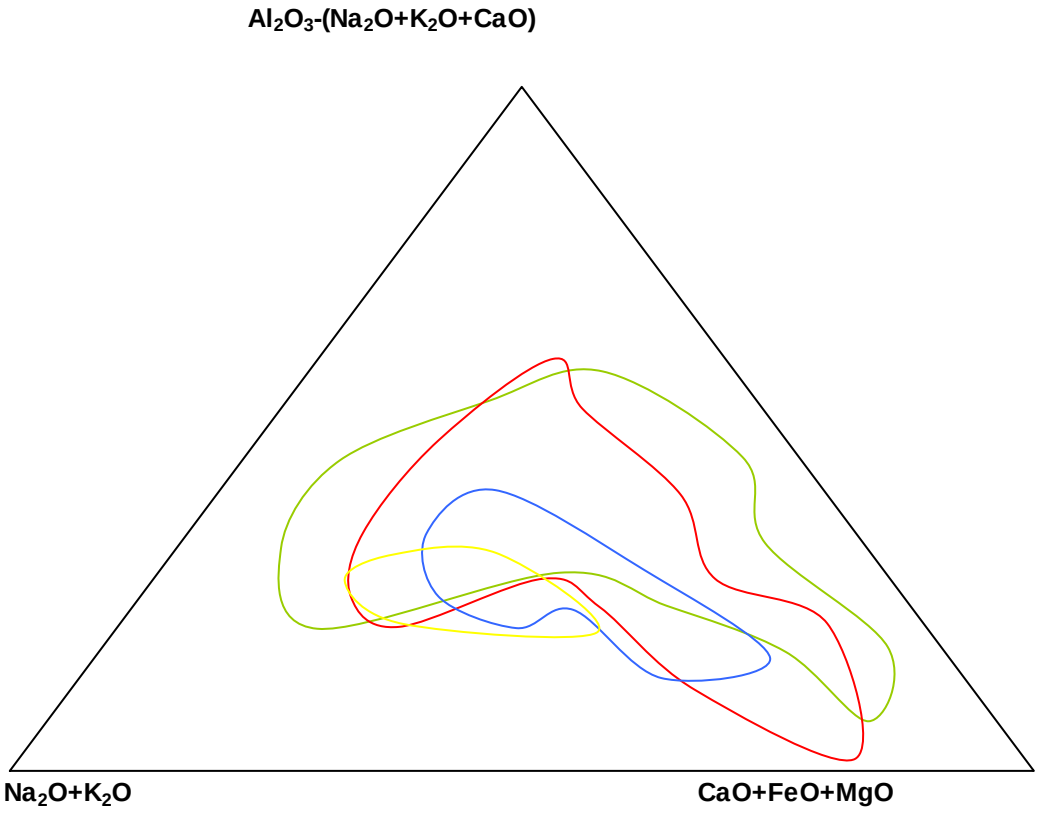
Σχ. 2.8.7α Διάγραμμα T-CaO για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ. 2.8.7β Διάγραμμα P-CaO για τα δείγματα SC557 και SC571.

2.9. Na_2O

Στο τριγωνικό διάγραμμα AFM παρατηρούμε ότι τα τήγματα που ταξινομήθηκαν με βάση το Na_2O παρουσιάζουν σχεδόν αλληλεπικάλυψη και μια γενική μικρή τάση από την κορυφή CaO+FeO+MgO προς την κορυφή Na_2O+K_2O. Δηλαδή, τα τήγματα με το περισσότερο Na_2O (7,3-9,1, κίτρινη γραμμή) τείνουν προς την Na_2O+K_2O, ενώ τα άλλα προς την CaO+FeO+MgO (1,9-3,7, πράσινη γραμμή και 3,7-5,5, κόκκινη γραμμή) (Σχ. 2.9.1).

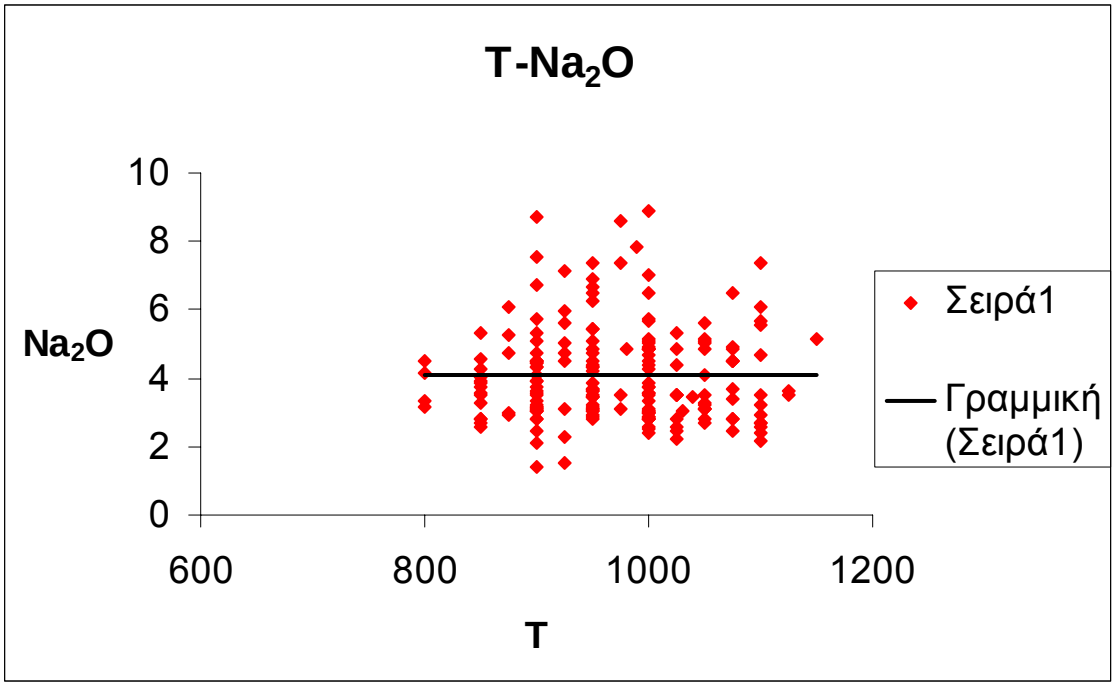


Σχ.2.9.1. Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το Na_2O.

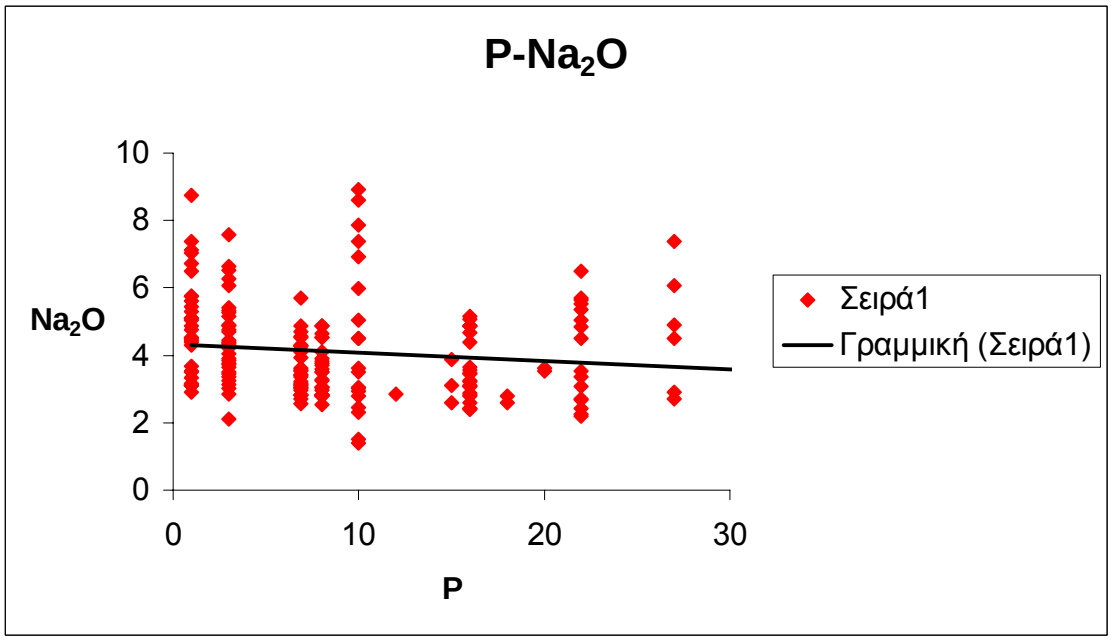
Το Na_2O παραμένει σταθερό με την αύξηση της T. Συναντάμε υψηλές και χαμηλές περιεκτικότητες του ίδιου επιπέδου σε οποιαδήποτε από τις δεδομένες T (Σχ. 2.9.2).

Σταθερότητα παρουσιάζει το Na_2O και ως προς την αύξηση της P, με μία πολύ μικρή ελάττωση. Κυμαίνεται σχεδόν σταθερά από 2,9 ως 7,8 για όλες τις δεδομένες P (Σχ. 2.9.3).

Στα διαγράμματα T-Na_2O ανά πείραμα παρατηρούμε ότι από το πείραμα με αρχικό υλικό το δείγμα AB παίρνουμε τήγματα που παρουσιάζουν ελάττωση της περιεκτικότητας τους σε Na_2O με την αύξηση της T, ενώ από το δείγμα HAB τα τήγματα που προκύπτουν εμφανίζουν αύξηση σε Na_2O. Σχεδόν σταθερά, με μικρή αύξηση εμφανίζονται τα τήγματα από τα αρχικά υλικά MAT και LKT. Ενώ αύξηση της περιεκτικότητας σε Na_2O με την αύξηση της T παρουσιάζουν τα τήγματα που προκύπτουν από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα SC466, SC478, SC555, SC557 και SC571 (Σχ. 2.9.4 α, 2.9.5 α, 2.9.6 α και 2.9.7 α).

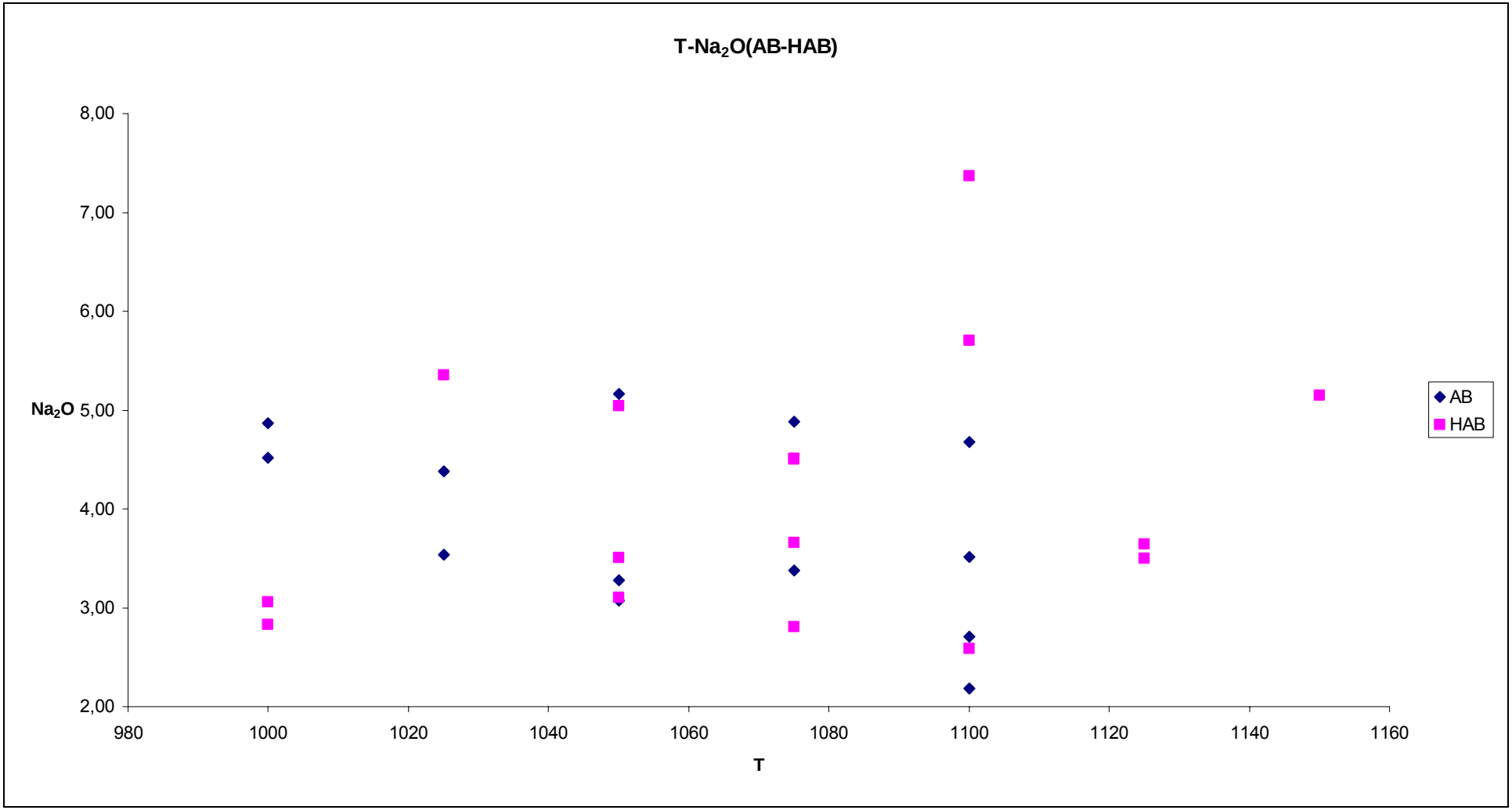


Σχ.2.9.2. Διάγραμμα T-Na_2O.

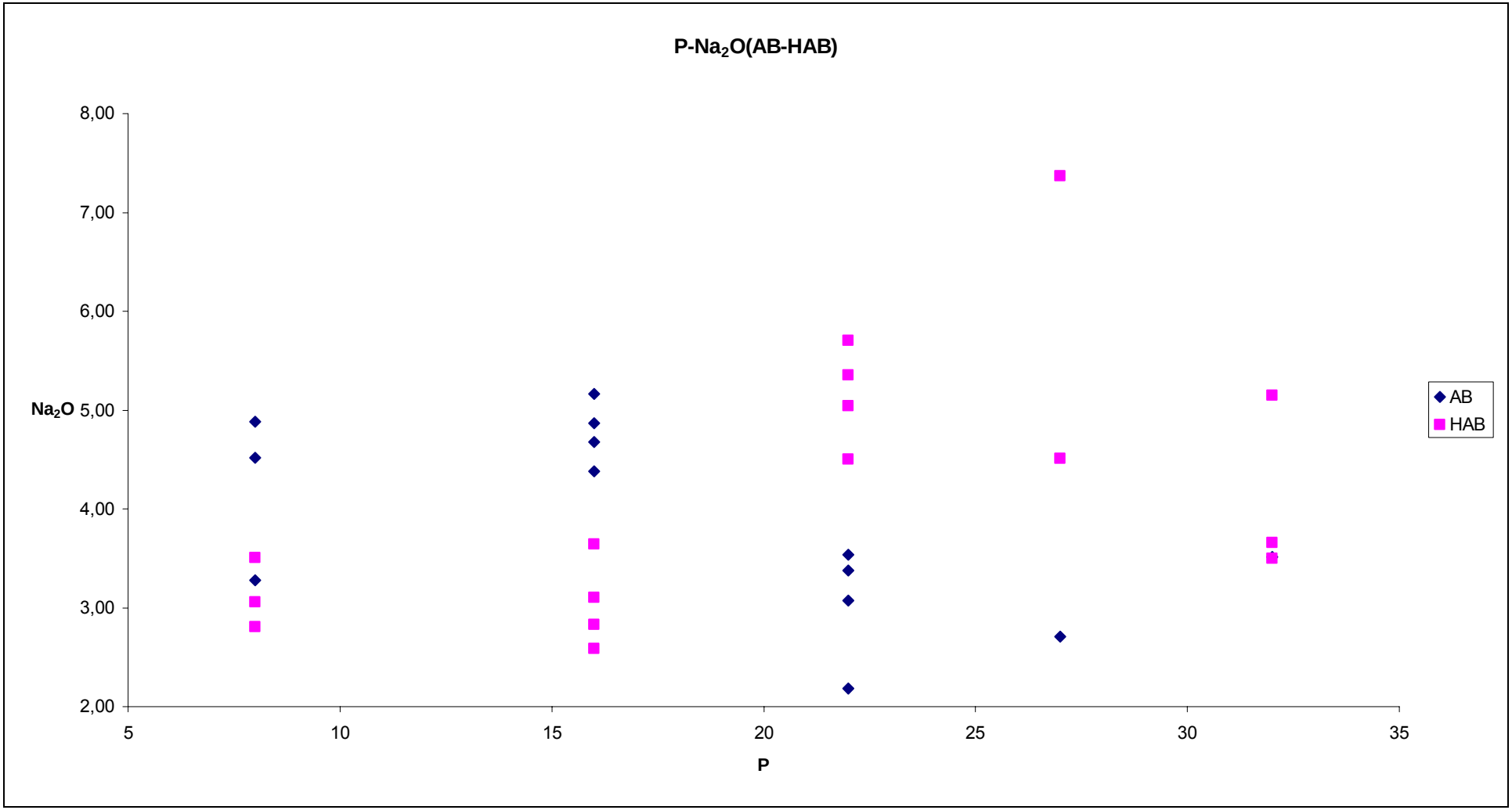


Σχ.2.9.3. Διάγραμμα P-Na_2O.

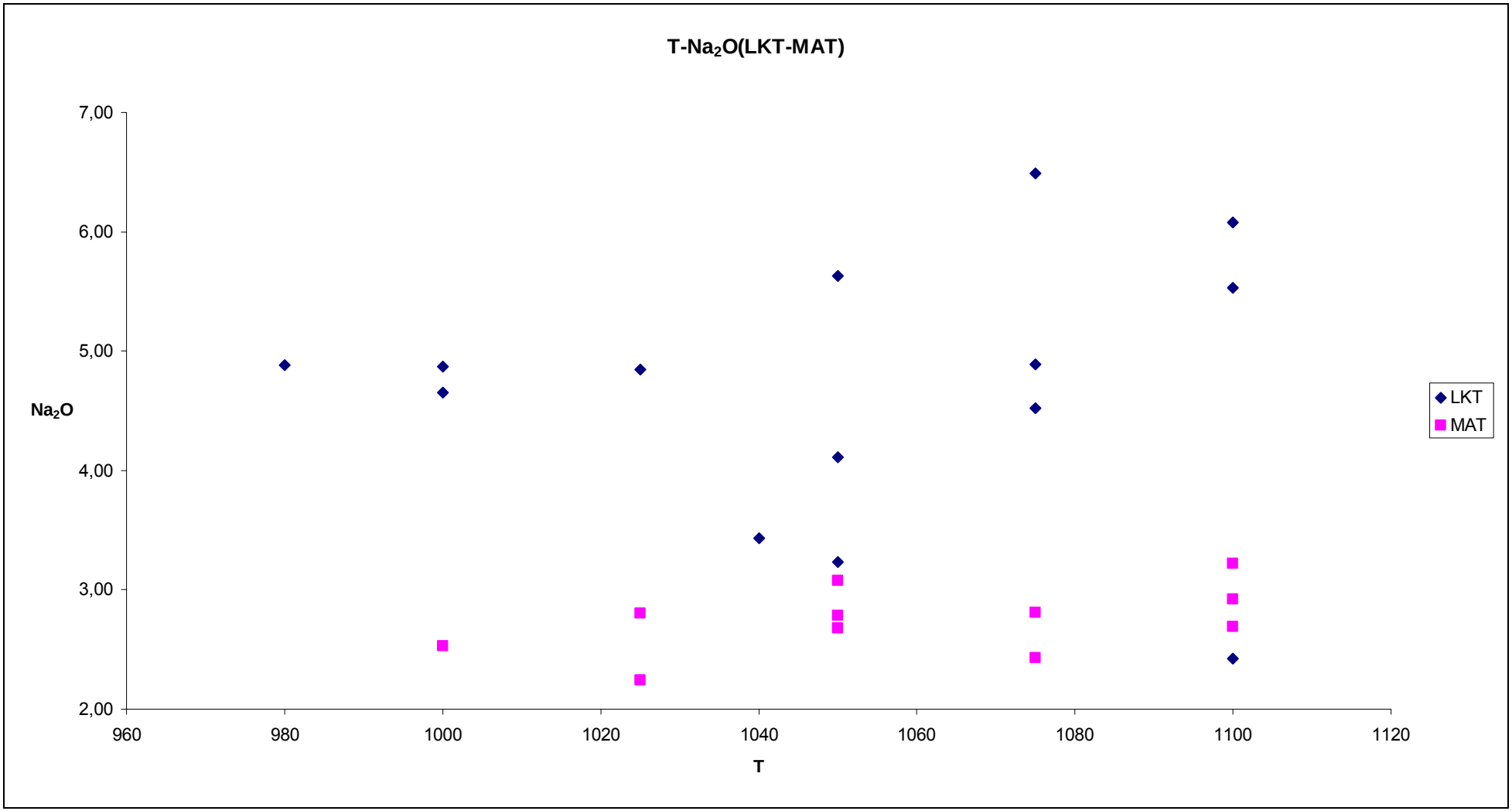
Από τα διαγράμματα P-Na_2O ανά πείραμα προκύπτει ότι στο πείραμα με αρχικό υλικό το δείγμα AB, έχουμε μικρή ελάττωση του Na_2O στο τήγμα με την αύξηση της P. Το τήγμα από το δείγμα HAB παρουσιάζει αύξηση, όπως και τα τήγματα από τα δείγματα LKT, SC466 και SC478. Στο διάγραμμα όπου προβάλλονται τα τήγματα από το δείγμα MAT φαίνεται ότι το Na_2O παρουσιάζει σχεδόν σταθερότητα με την αύξηση της P. Ενώ ελάττωση παρουσιάζει το Na_2O των τηγμάτων από τα αρχικά υλικά SC555, SC557 και SC571 (Σχ. 2.9.4 β, 2.9.5 β, 2.9.6 β και 2.9.7 β).



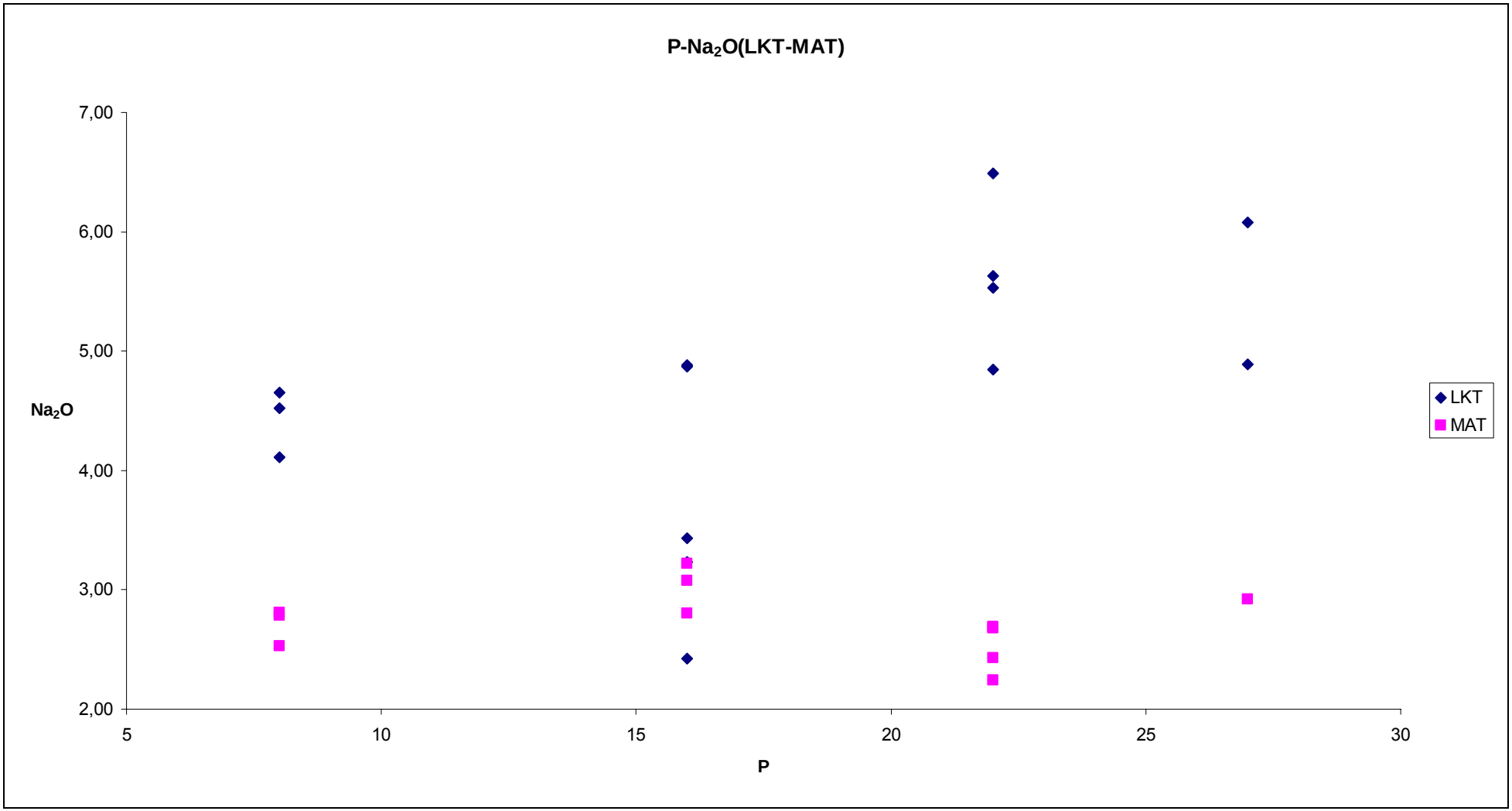
Σχ.2.9.4α Διάγραμμα T-Na_2O για τα δείγματα AB και HAB.



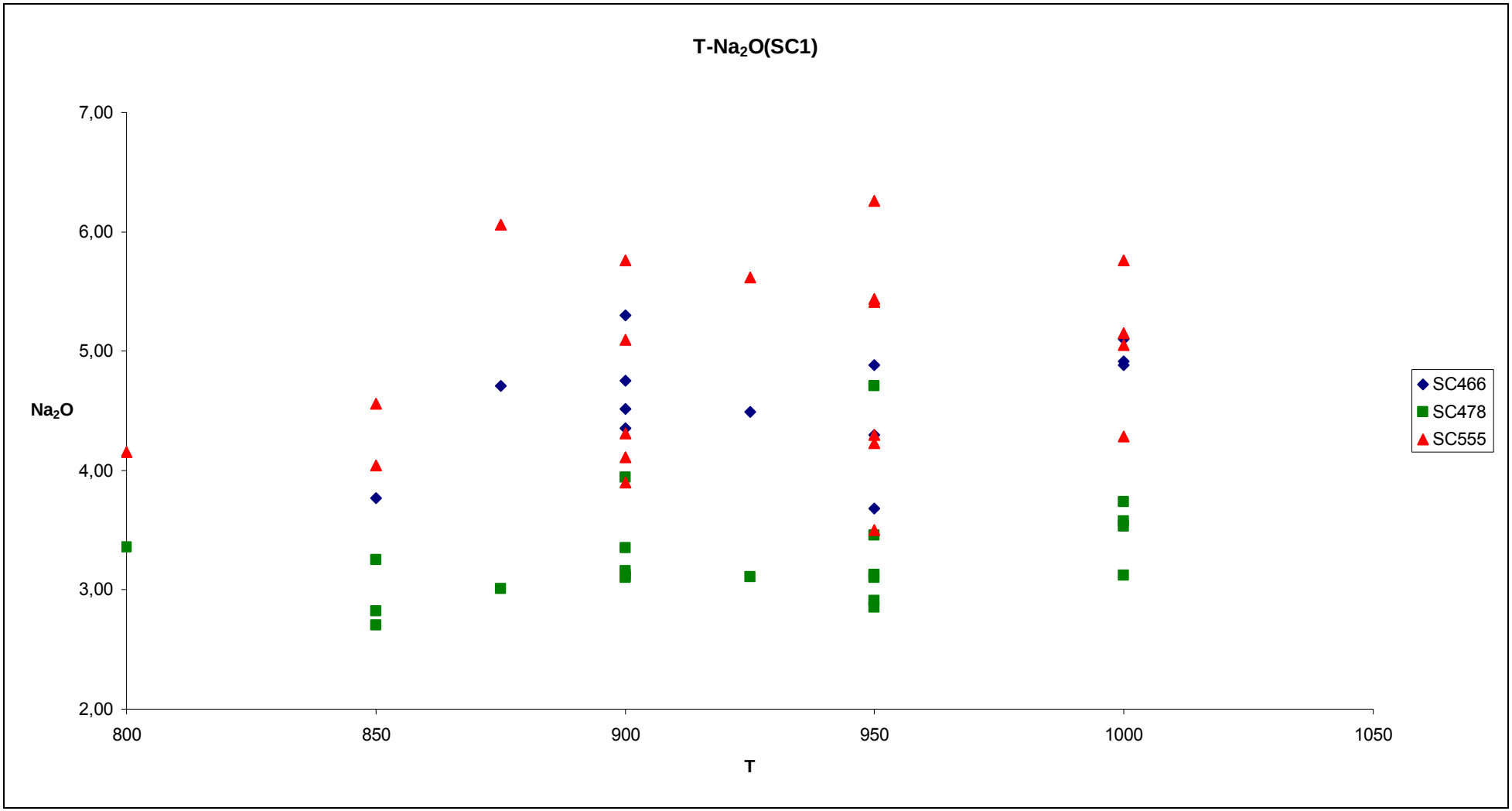
Σχ.2.9.4β Διάγραμμα P-Na_2O για τα δείγματα AB και HAB.



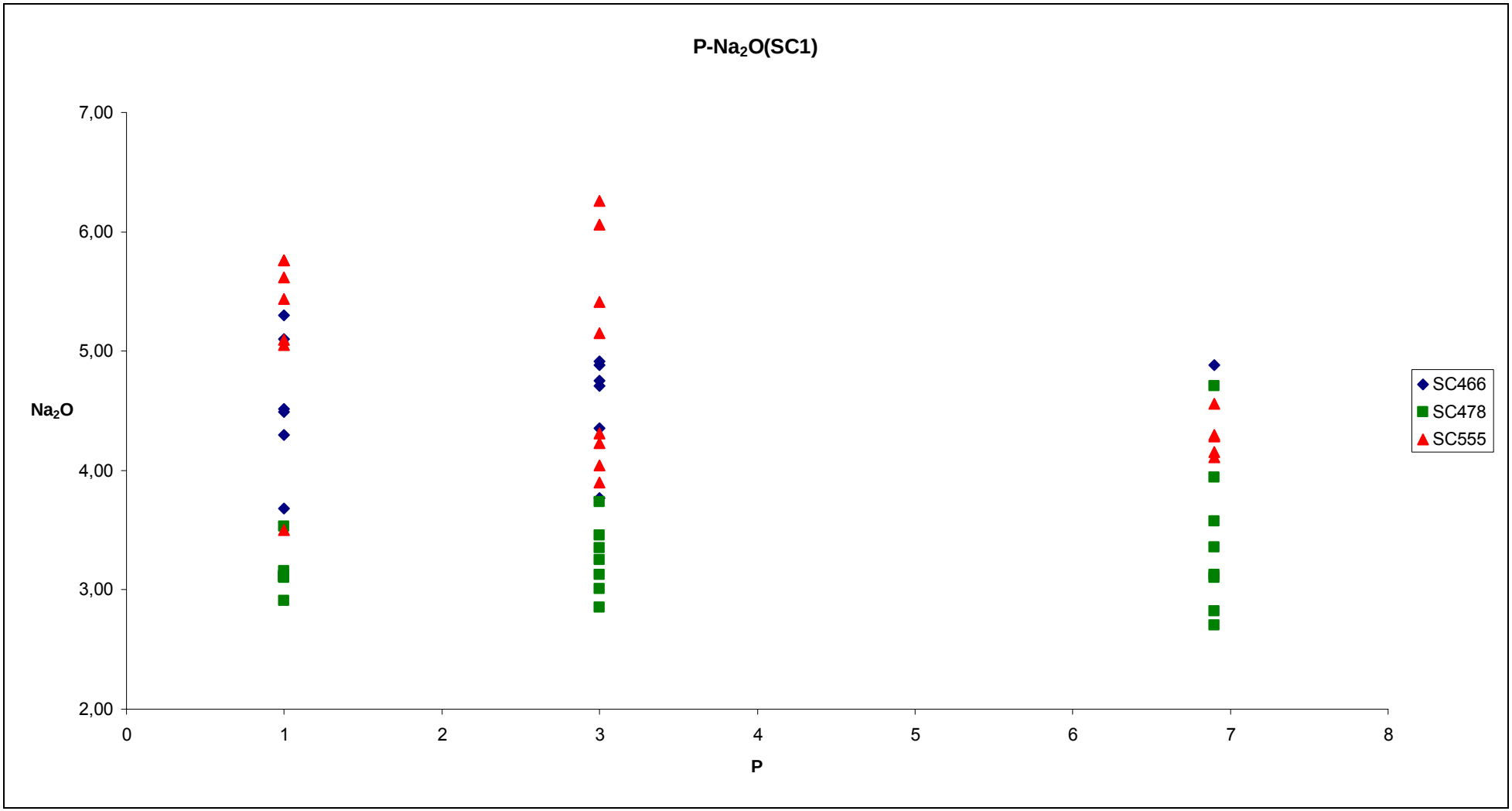
Σχ.2.9.5α Διάγραμμα T-Na_2O για τα δείγματα LKT και MAT.



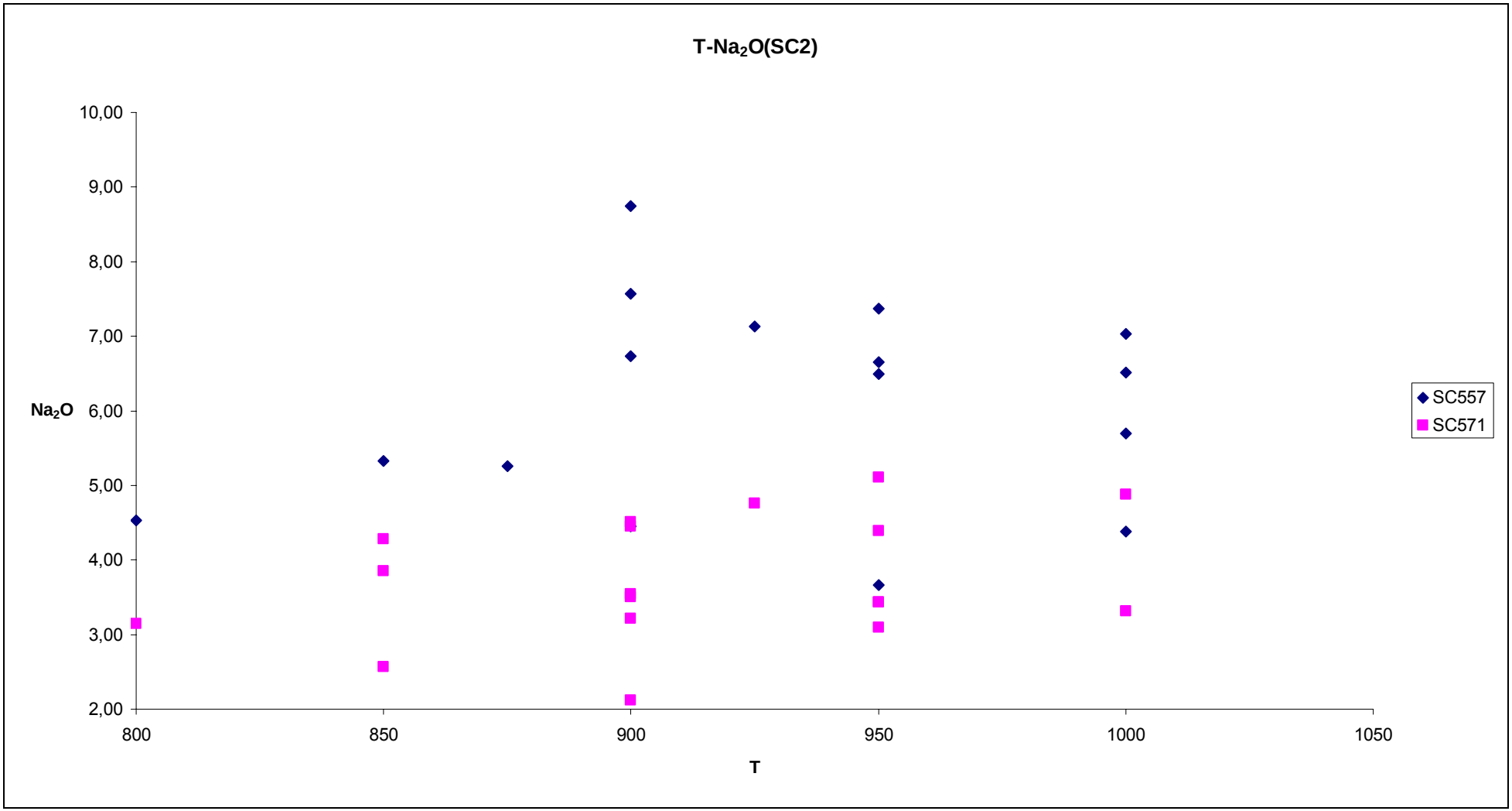
Σχ.2.9.5β Διάγραμμα P-Na_2O για τα δείγματα LKT και MAT.



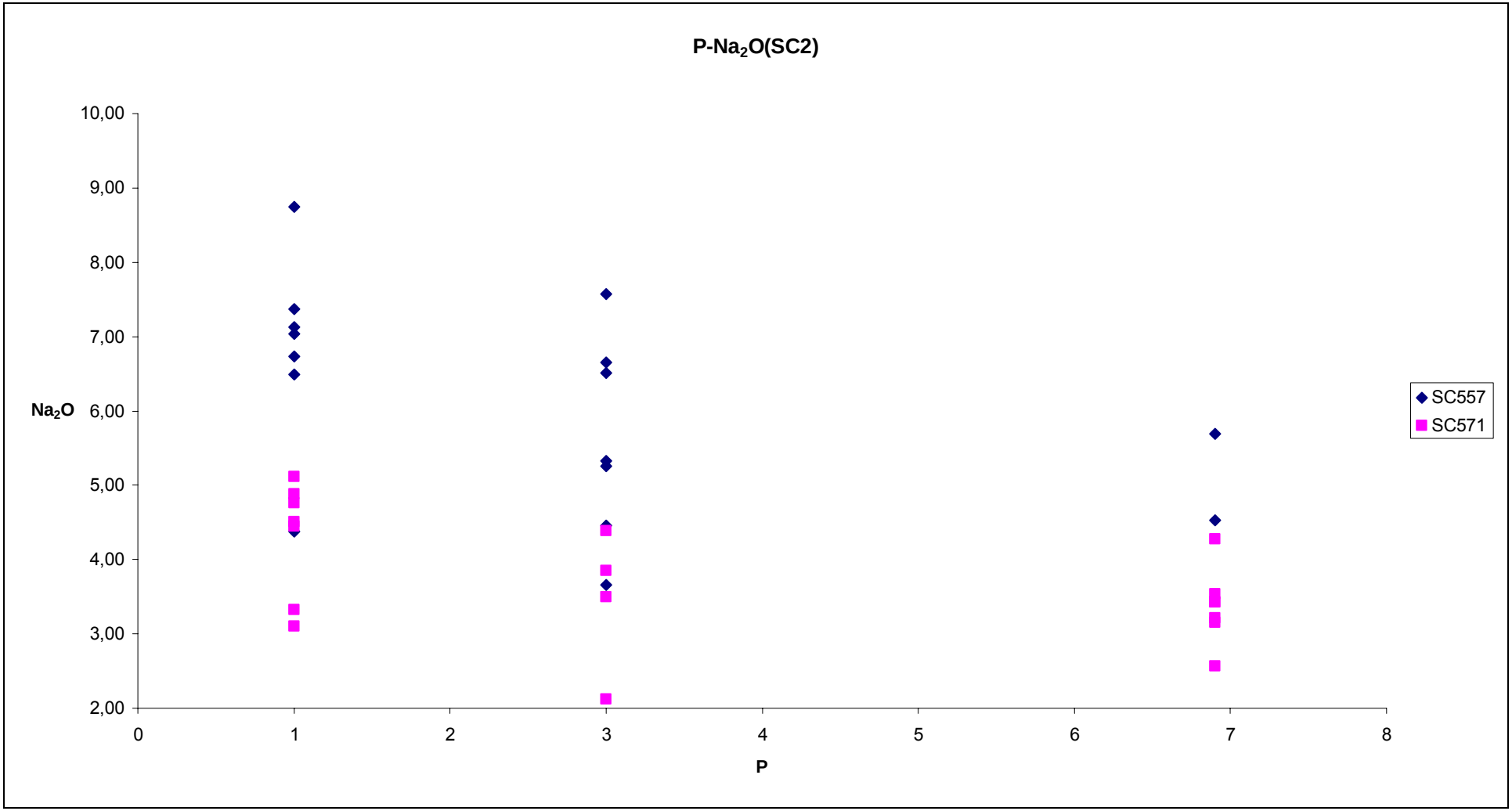
Σχ.2.9.6α Διάγραμμα T-Na_2O για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ.2.9.6β Διάγραμμα P-Na_2O για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



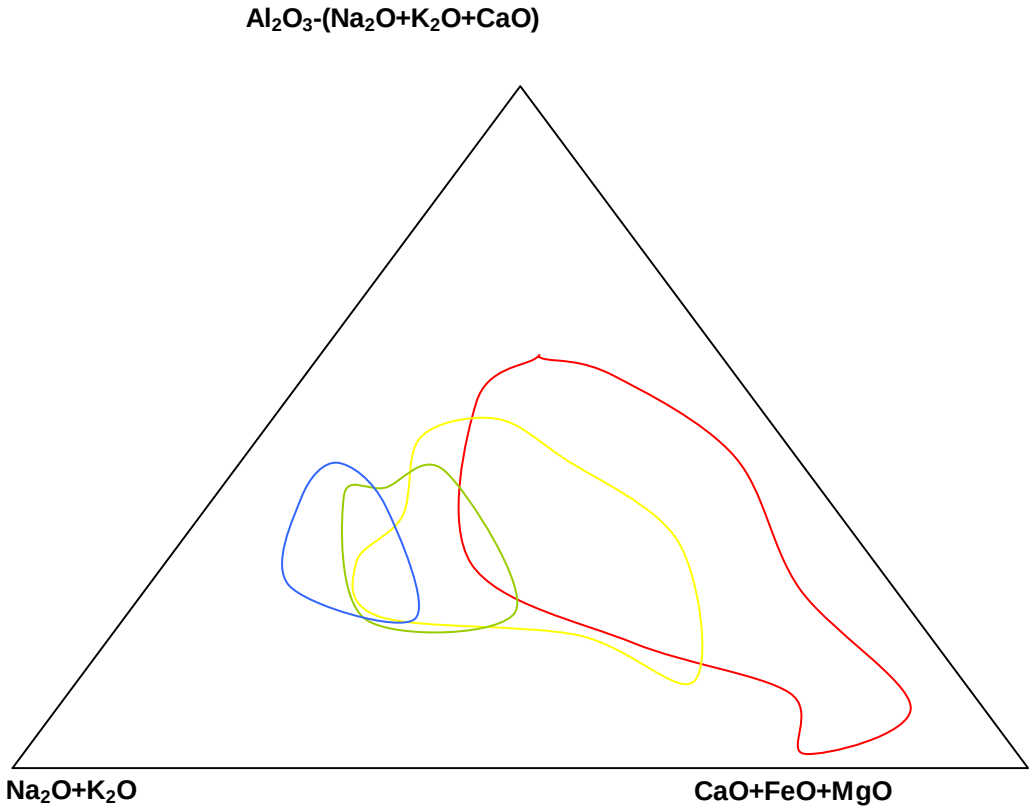
Σχ.2.9.7α Διάγραμμα T-Na_2O για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ.2.9.7β Διάγραμμα P-Na_2O για τα δείγματα SC557 και SC571.

2.10. K_2O

Στο διάγραμμα AFM (Σχ. 2.10.1) παρατηρούμε ότι γενικά όσο το K_2O αυξάνεται στα τήγματα, τόσο αυτά τείνουν από την κορυφή CaO+FeO+MgO προς την κορυφή Na_2O+K_2O. Δηλαδή, τα τήγματα με το περισσότερο K_2O (4,25-5,65, μπλε γραμμή) τείνουν προς την Na_2O+K_2O, ενώ τα άλλα προς την CaO+FeO+MgO (0,05-1,45, κόκκινη γραμμή).

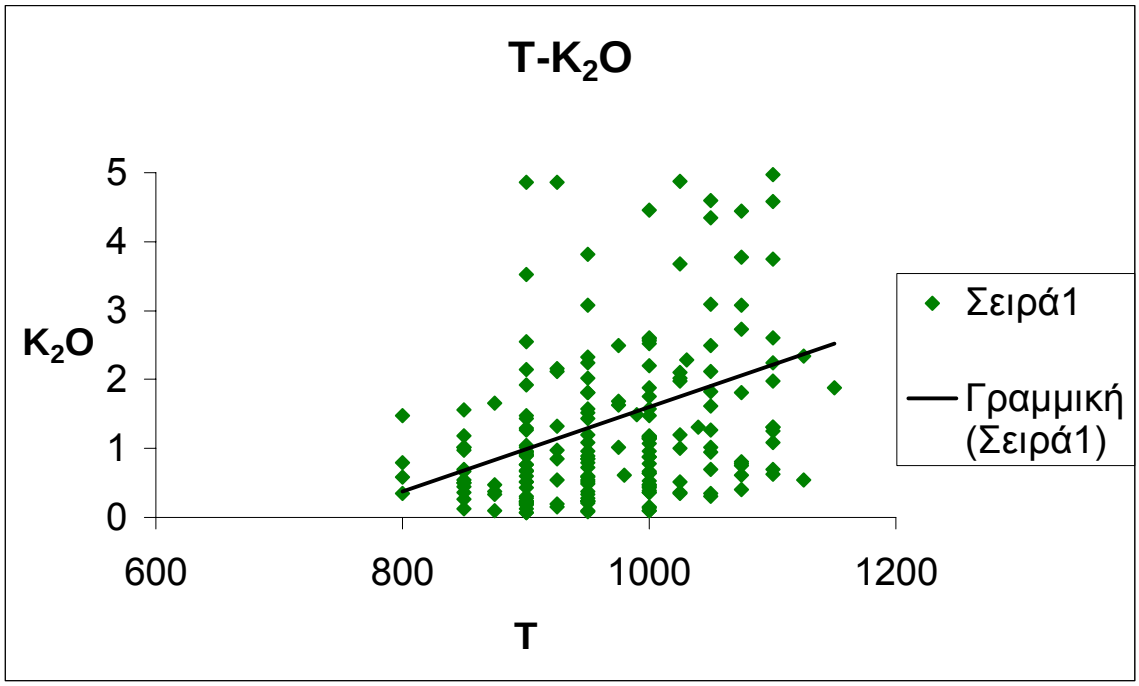


Σχ.2.10.1. Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το K_2O.

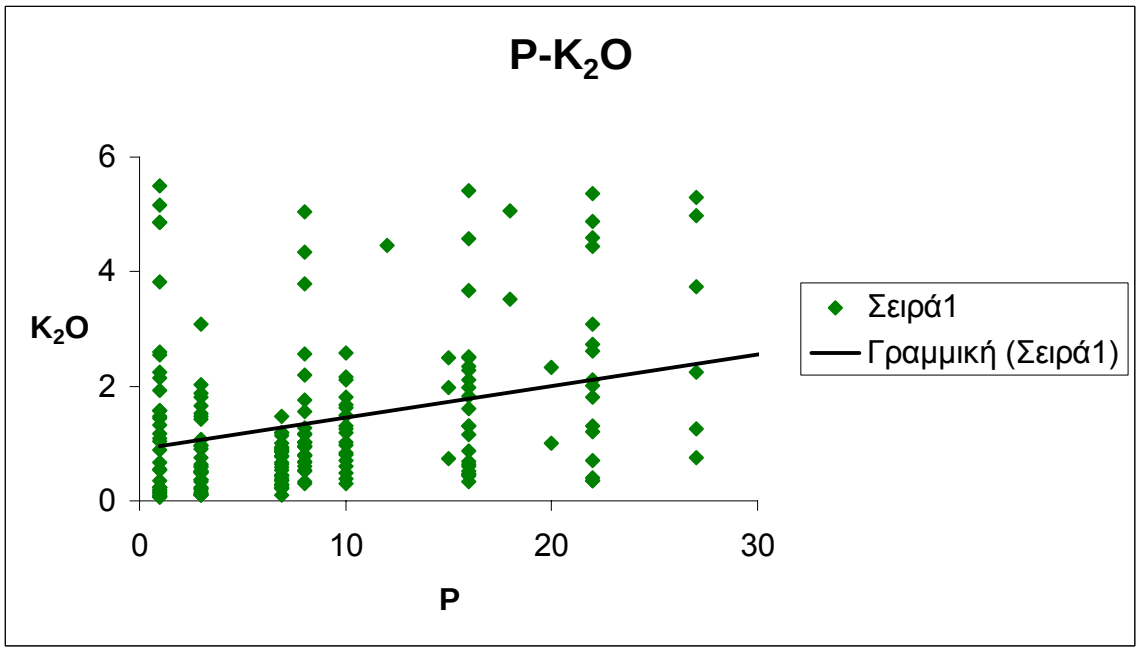
Με την αύξηση της T τα τήγματα αυξάνουν σε K_2O. π.χ. σε T=800° C, έχουμε τήγμα με περιεκτικότητα σε K_2O=0,35 αλλά και τήγμα με K_2O=1,48, ενώ στους 1000° C έχουμε τήγματα με περιεκτικότητες από 0,10 ως 4,45 (Σχ. 2.10.2).

Επίσης, με την αύξηση της P, αυξάνεται και η περιεκτικότητα των τηγμάτων σε K_2O. Π.χ. σε P=1 kbar παίρνουμε τα περισσότερα τήγματα μεταξύ 0,10 και 2,60, ενώ σε P=27 kbar παίρνουμε τήγματα με τη μικρότερη περιεκτικότητα να είναι ίση με 0,75 και τη μεγαλύτερη ίση με 5,29 (Σχ. 2.10.3).

Στα διαγράμματα T-K_2O ανά πείραμα παρατηρούμε ότι από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα AB, HAB, LKT, SC478, SC555 και SC557 προκύπτουν τήγματα που αυξάνουν την περιεκτικότητά τους σε K_2O με την αύξηση της T. Ενώ τα τήγματα από τα δείγματα MAT, SC466 και SC571 διατηρούν σταθερό το K_2O με την αύξηση της T (Σχ. 2.10.4 α, 2.10.5 α, 2.10.6 α και 2.10.7 α).

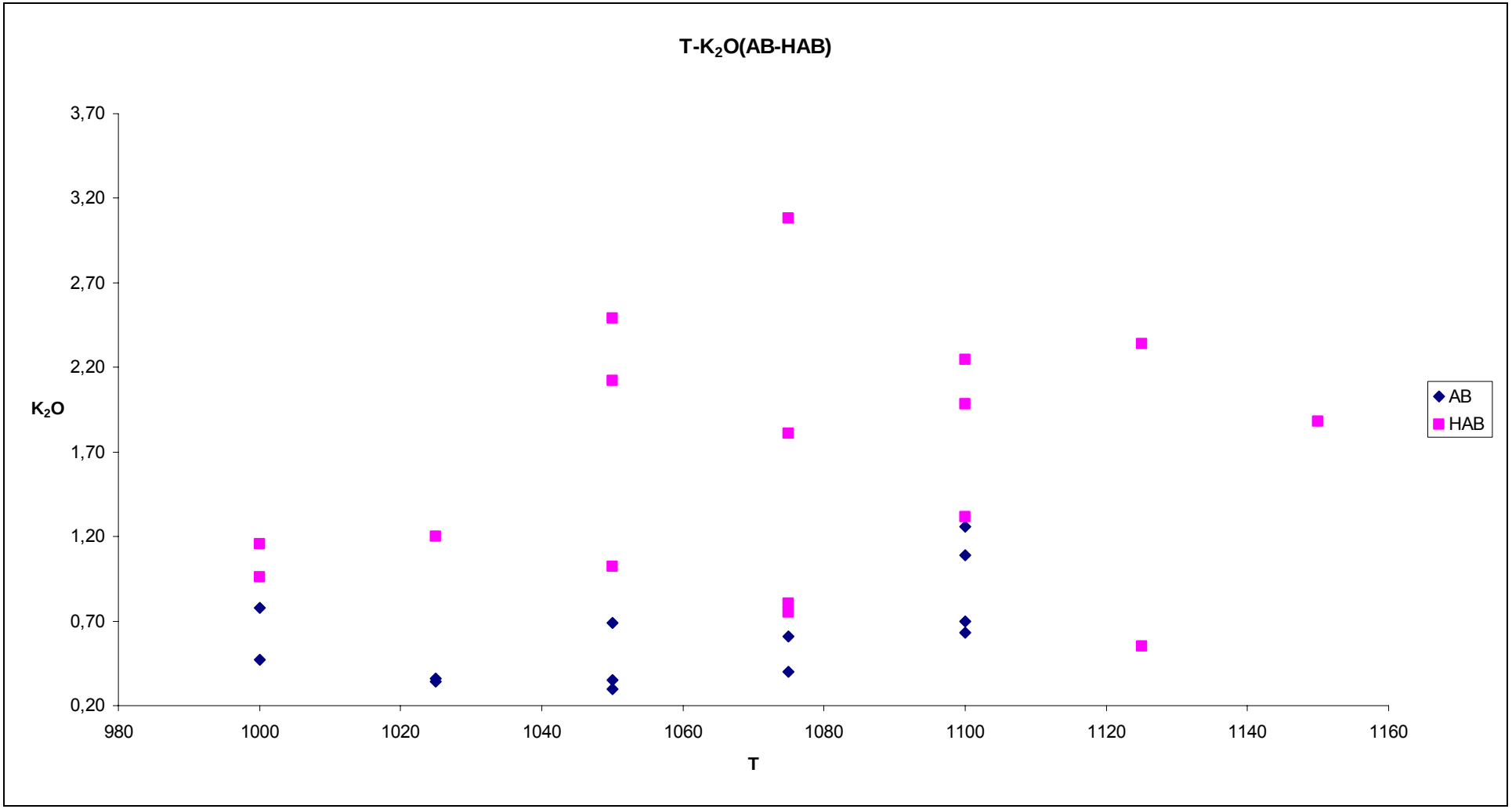


Σχ.2.10.2. Διάγραμμα T-K_2O.

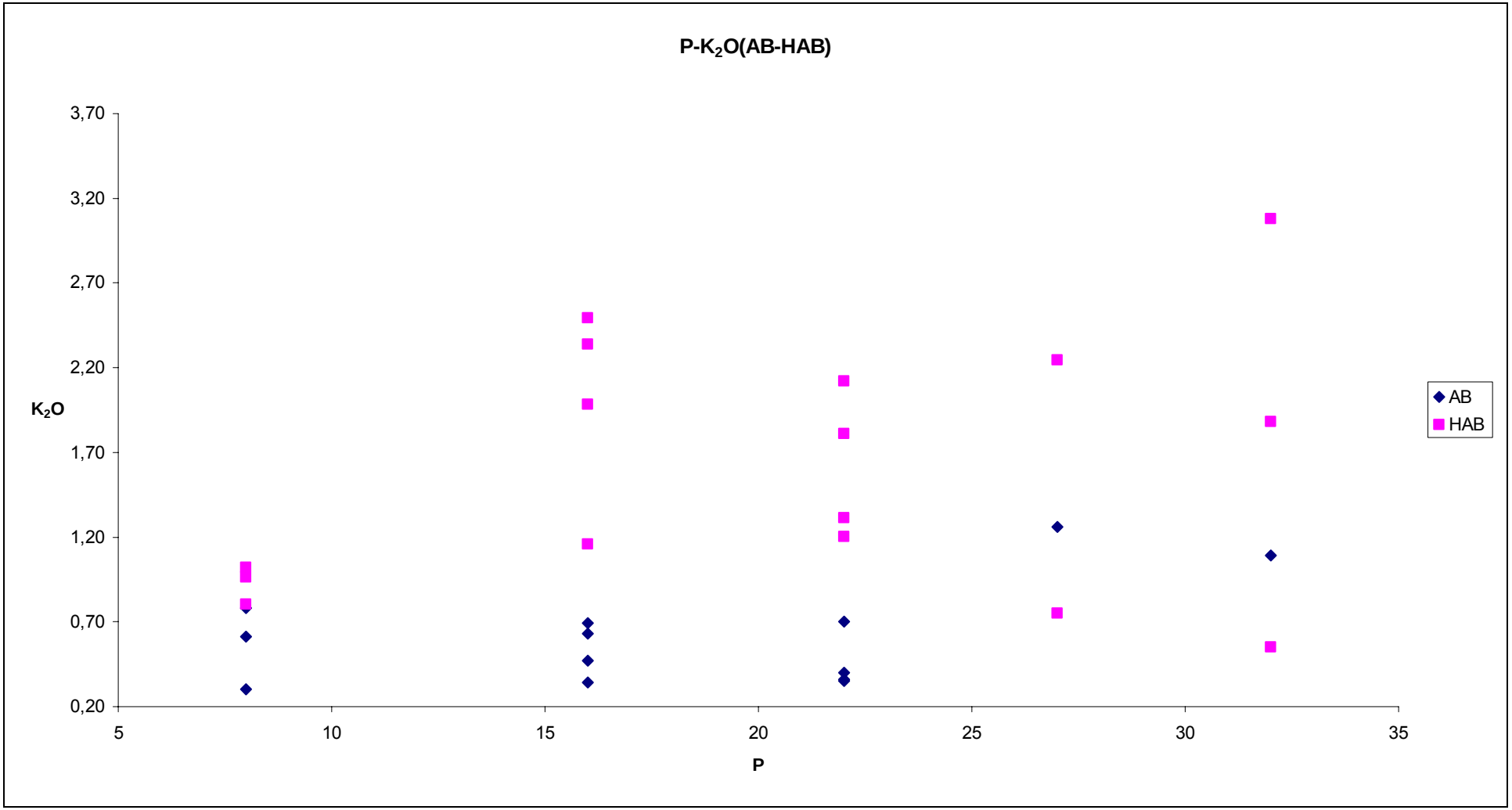


Σχ.2.10.3. Διάγραμμα P-K_2O.

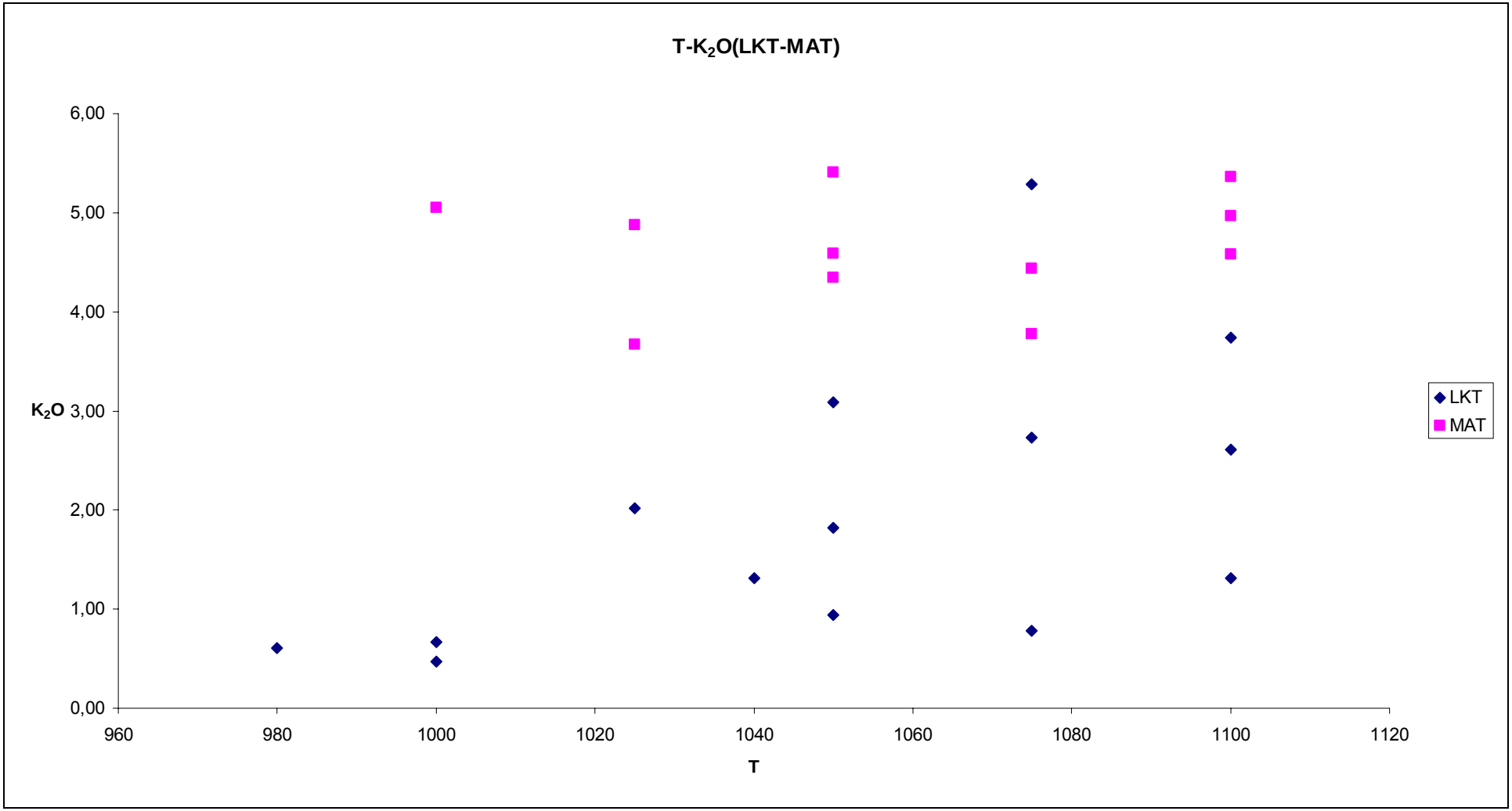
Από τα διαγράμματα P-K_2O ανά πείραμα, παρατηρούμε ότι στα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα AB, HAB, LKT , MAT και SC571 έχουμε αύξηση του K_2O στο τήγμα με την αύξηση της P. Στα διαγράμματα όπου προβάλλονται τα τήγματα από τα δείγματα SC478 και SC555, καθώς και από το SC557 φαίνεται ότι το K_2O παρουσιάζει ελάττωση με την αύξηση της P. Ενώ σταθερό παραμένει το K_2O των τηγμάτων από το αρχικό υλικό SC466 (Σχ. 2.10.4 β, 2.10.5 β, 2.10.6 β και 2.10.7 β).



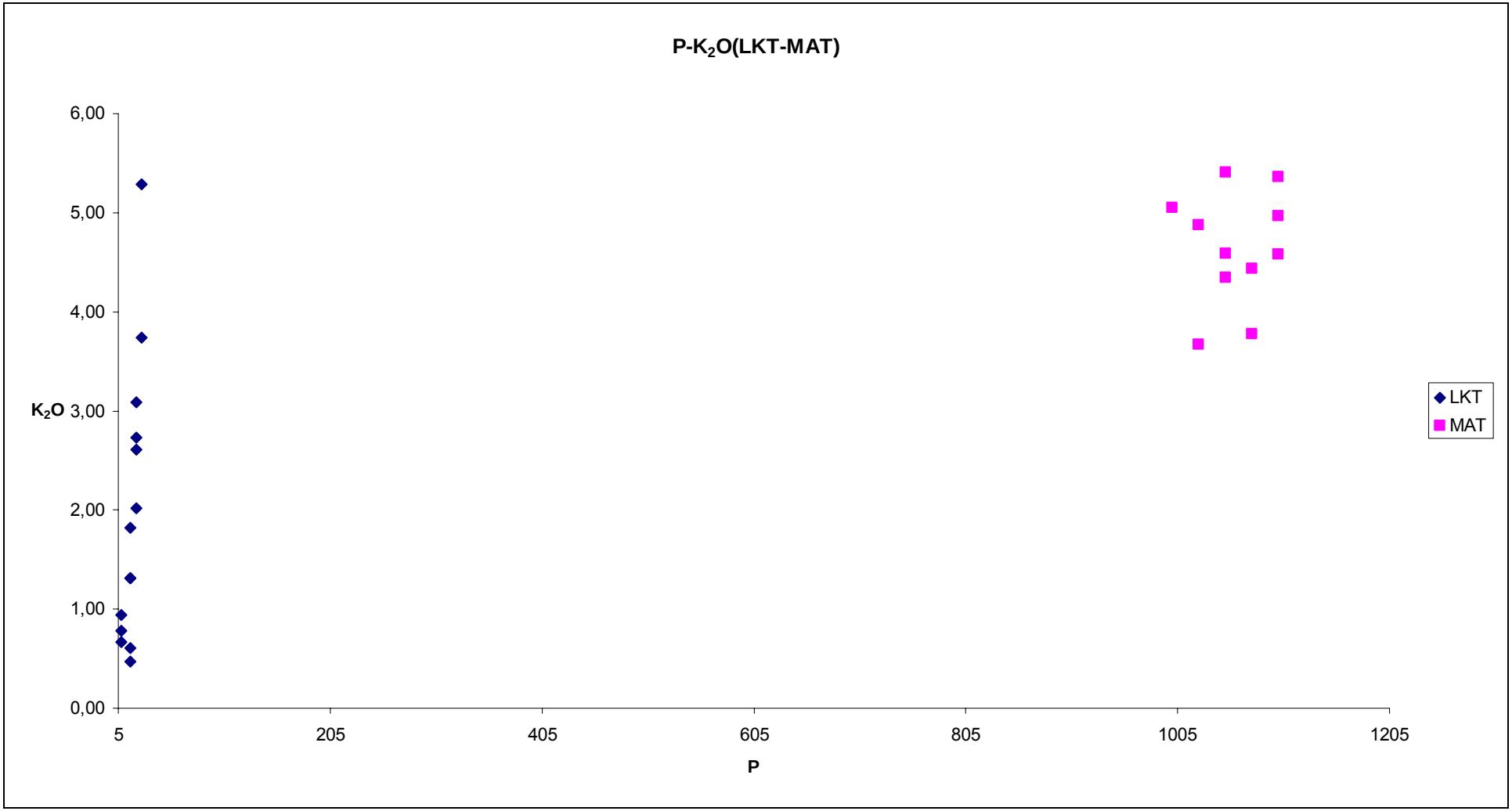
Σχ.2.10.4α Διάγραμμα T-K_2O για τα δείγματα AB και HAB.



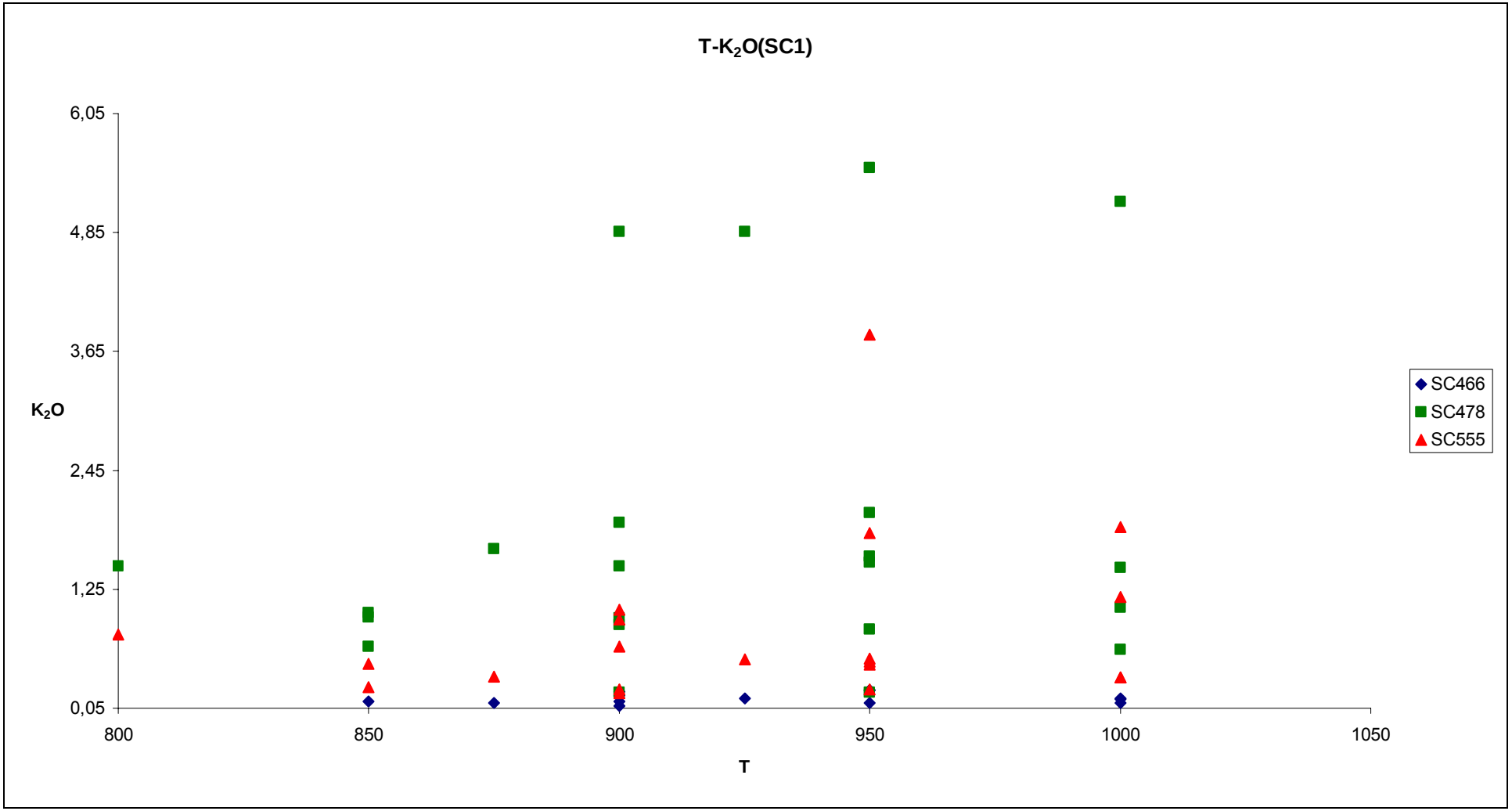
Σχ.2.10.4β Διάγραμμα P-K_2O για τα δείγματα AB και HAB.



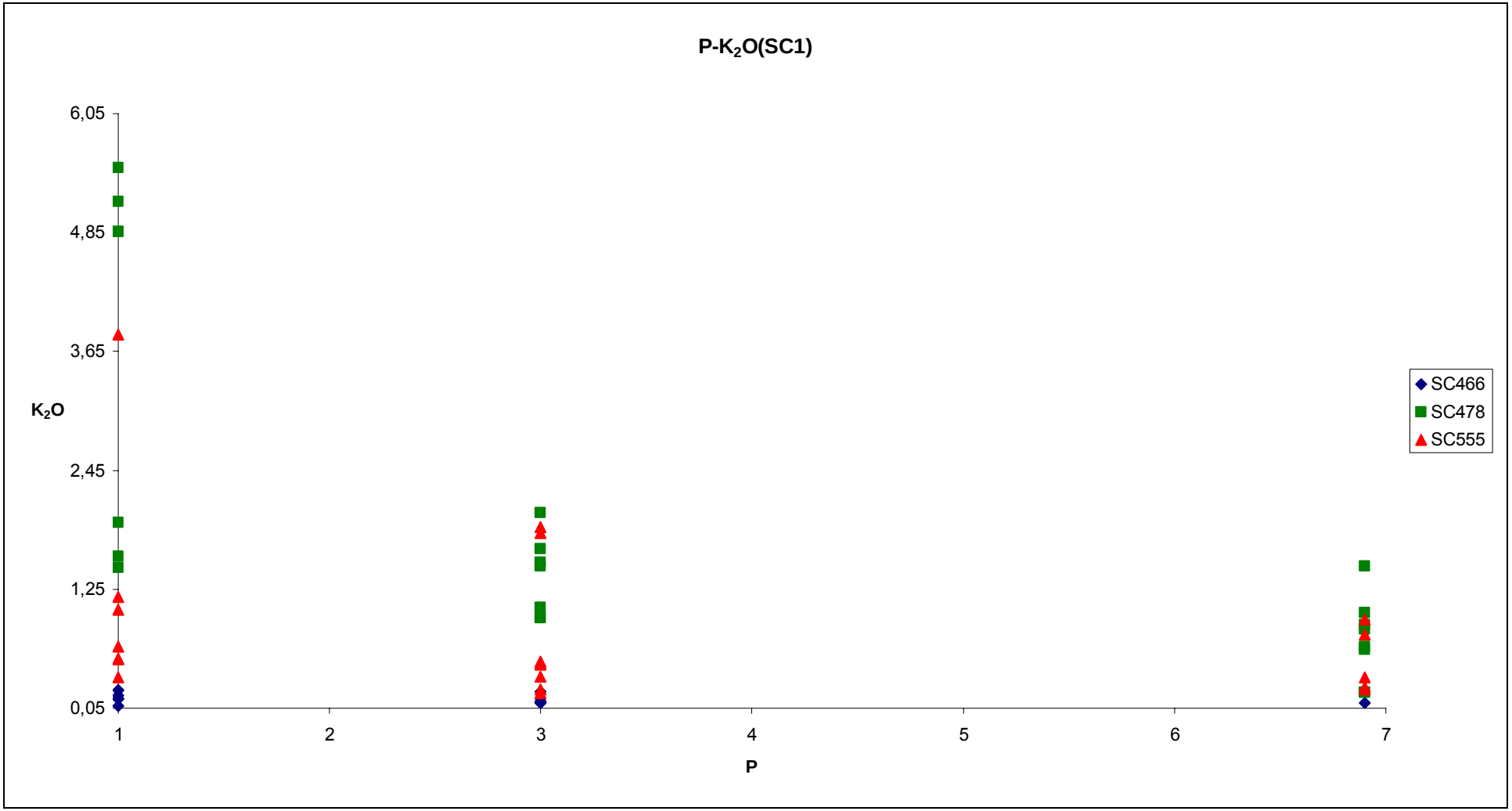
Σχ.2.10.5α Διάγραμμα T-K_2O για τα δείγματα LKT και MAT.



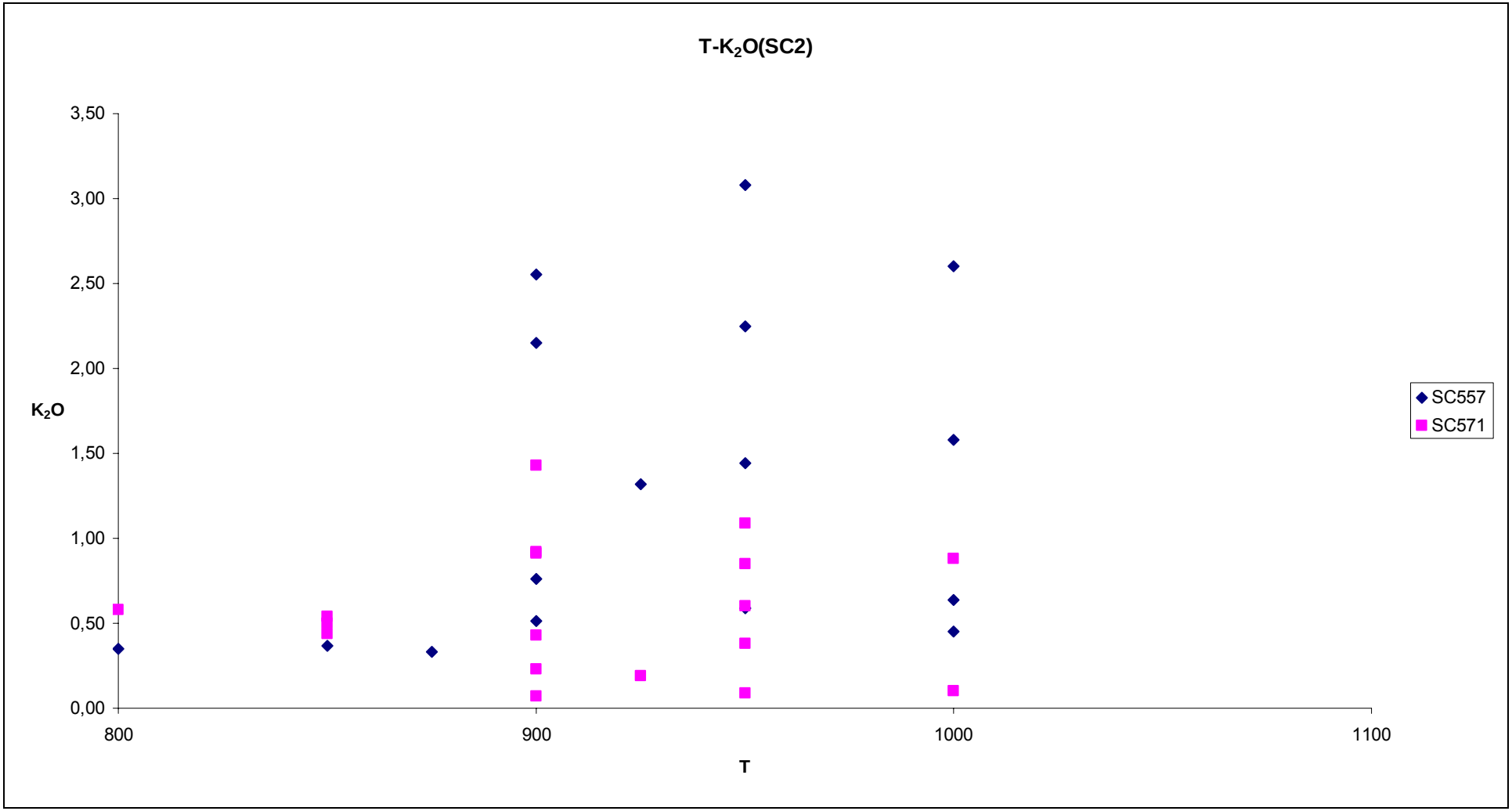
Σχ.2.10.5β Διάγραμμα P-K_2O για τα δείγματα LKT και MAT.



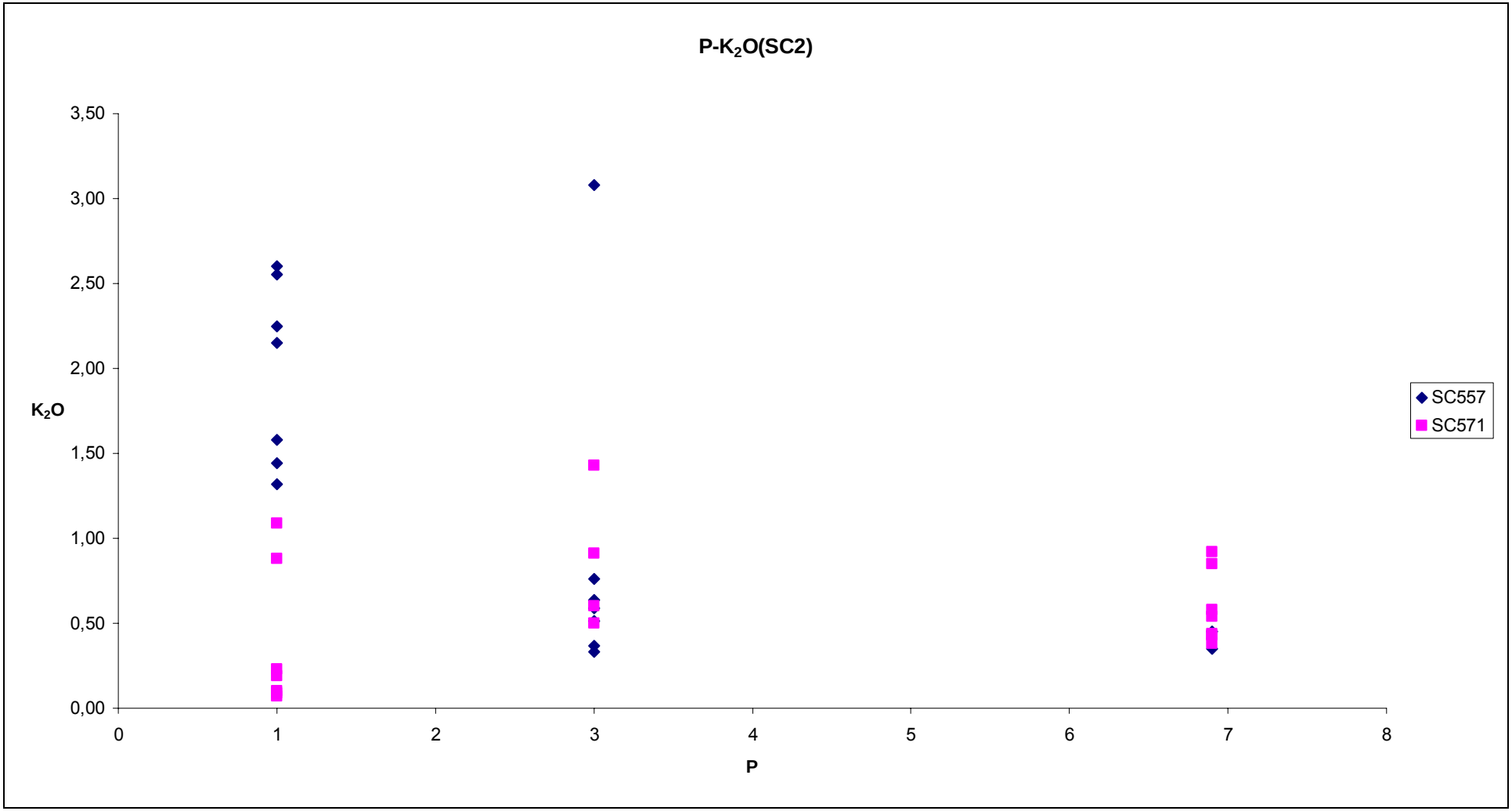
Σχ.2.10.6α Διάγραμμα T-K_2O για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ.2.10.6β Διάγραμμα P-K_2O για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



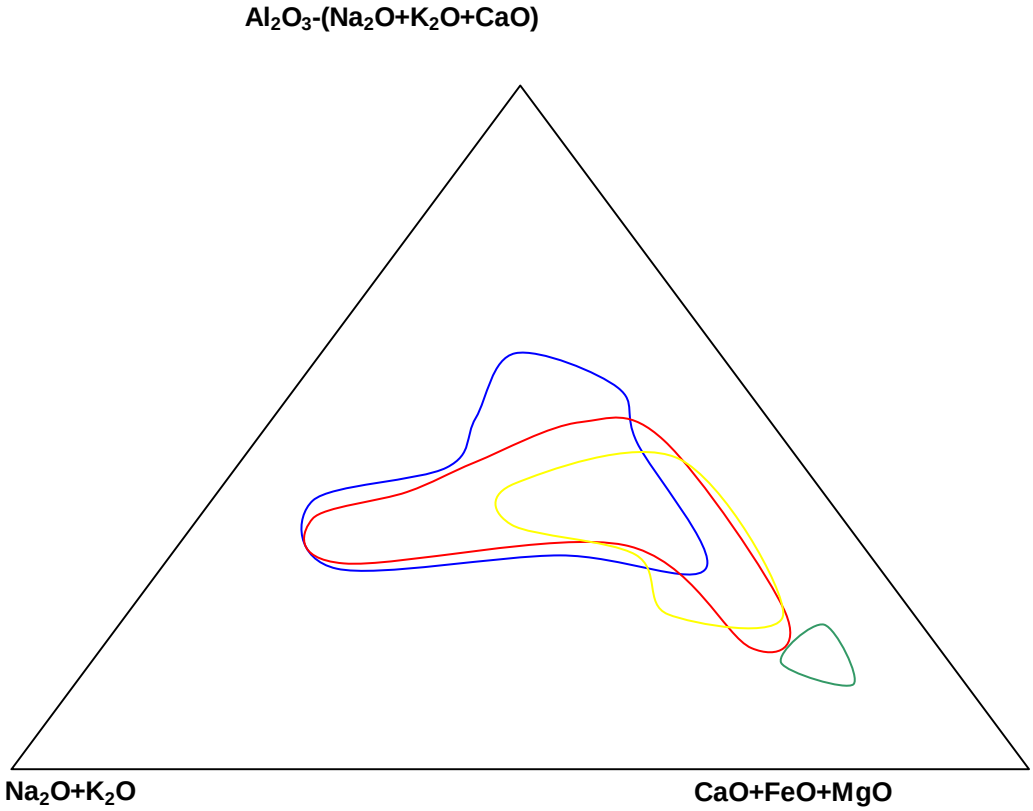
Σχ.2.10.7α Διάγραμμα T-K_2O για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ.2.10.7β Διάγραμμα P-K_2O για τα δείγματα SC557 και SC571.

2.11. P_2O_5

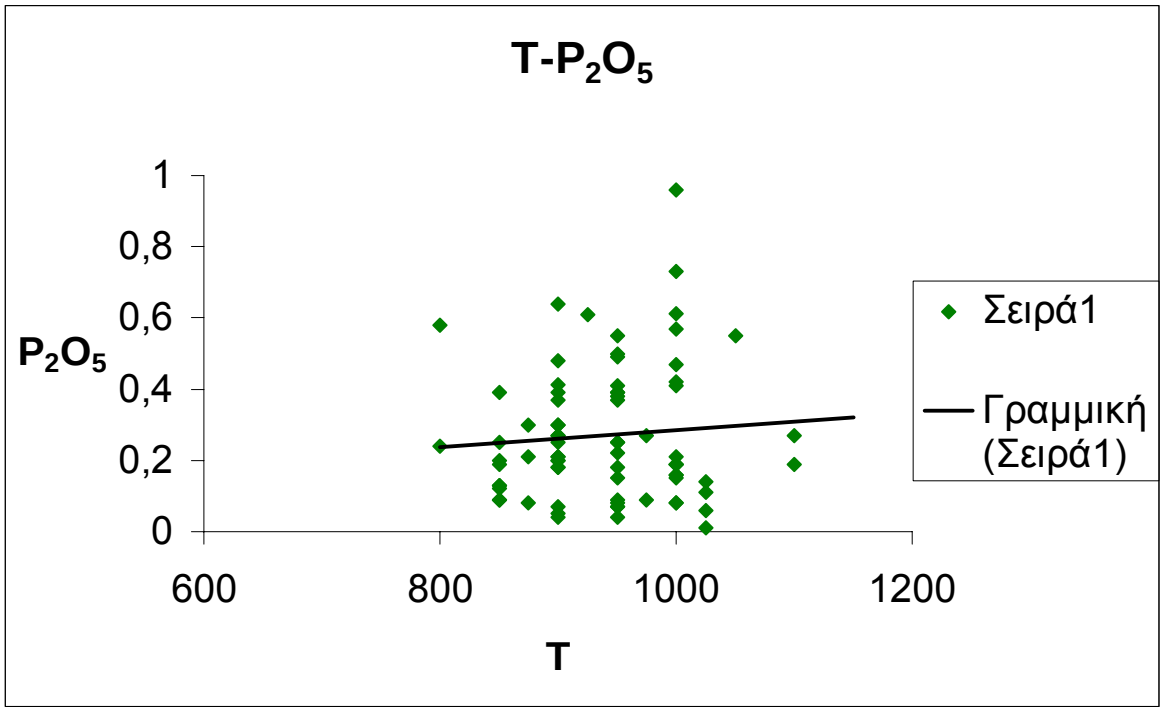
Στο τριγωνικό διάγραμμα AFM παρατηρούμε ότι τα τήγματα που ταξινομήθηκαν με βάση το P_2O_5 παρουσιάζουν αλληλεπικάλυψη, εκτός από εκείνα με το περισσότερο P_2O_5 (0,76-1,01, πράσινη γραμμή) που τείνουν προς την κορυφή CaO+FeO+MgO (Σχ. 2.11.1)



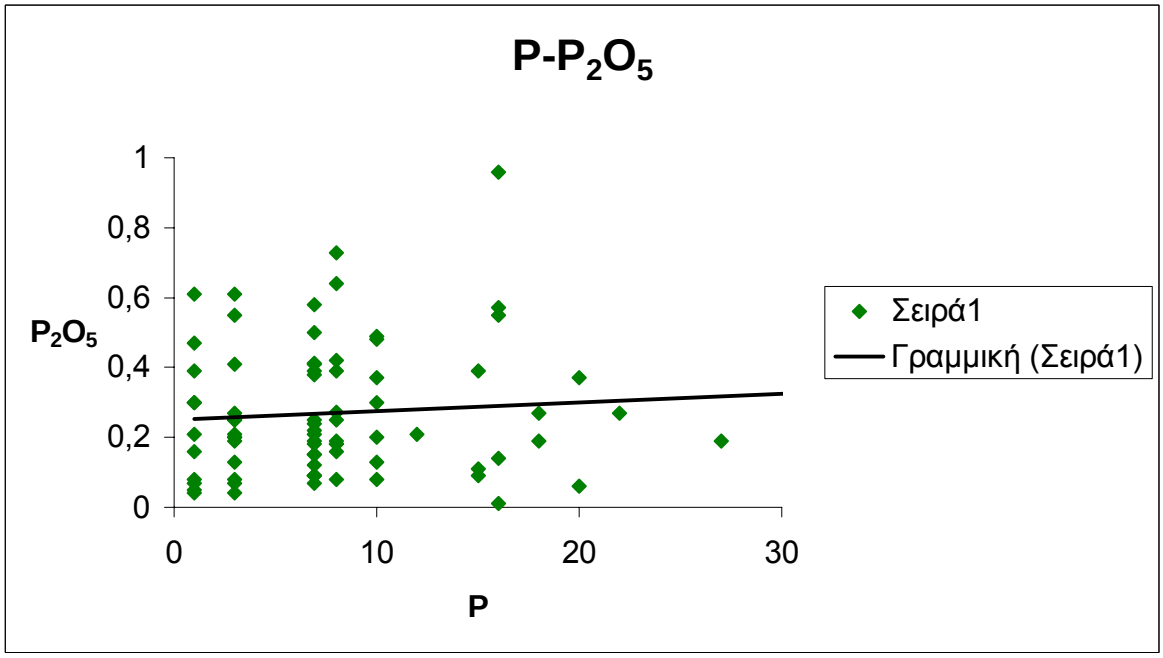
Σχ.2.11.1. Τριγωνικό διάγραμμα AFM για το P_2O_5.

Με την αύξηση της T τα τήγματα παρουσιάζουν μικρή αύξηση σε P_2O_5. π.χ. σε T=800° C, έχουμε τήγμα με περιεκτικότητα σε P_2O_5=0,24 αλλά και τήγμα με P_2O_5=0,58, ενώ στους 1000° C έχουμε τήγματα με περιεκτικότητες από 0,08 ως 0,96 (Σχ. 2.11.2).

Επίσης, με την αύξηση της P, αυξάνεται λίγο και η περιεκτικότητα των τηγμάτων σε P_2O_5. Σχεδόν για όλες τις δεδομένες P η περιεκτικότητα σε P_2O_5 κυμαίνεται μεταξύ 0,05 και 0,55 για τα περισσότερα τήγματα (Σχ. 2.11.3).



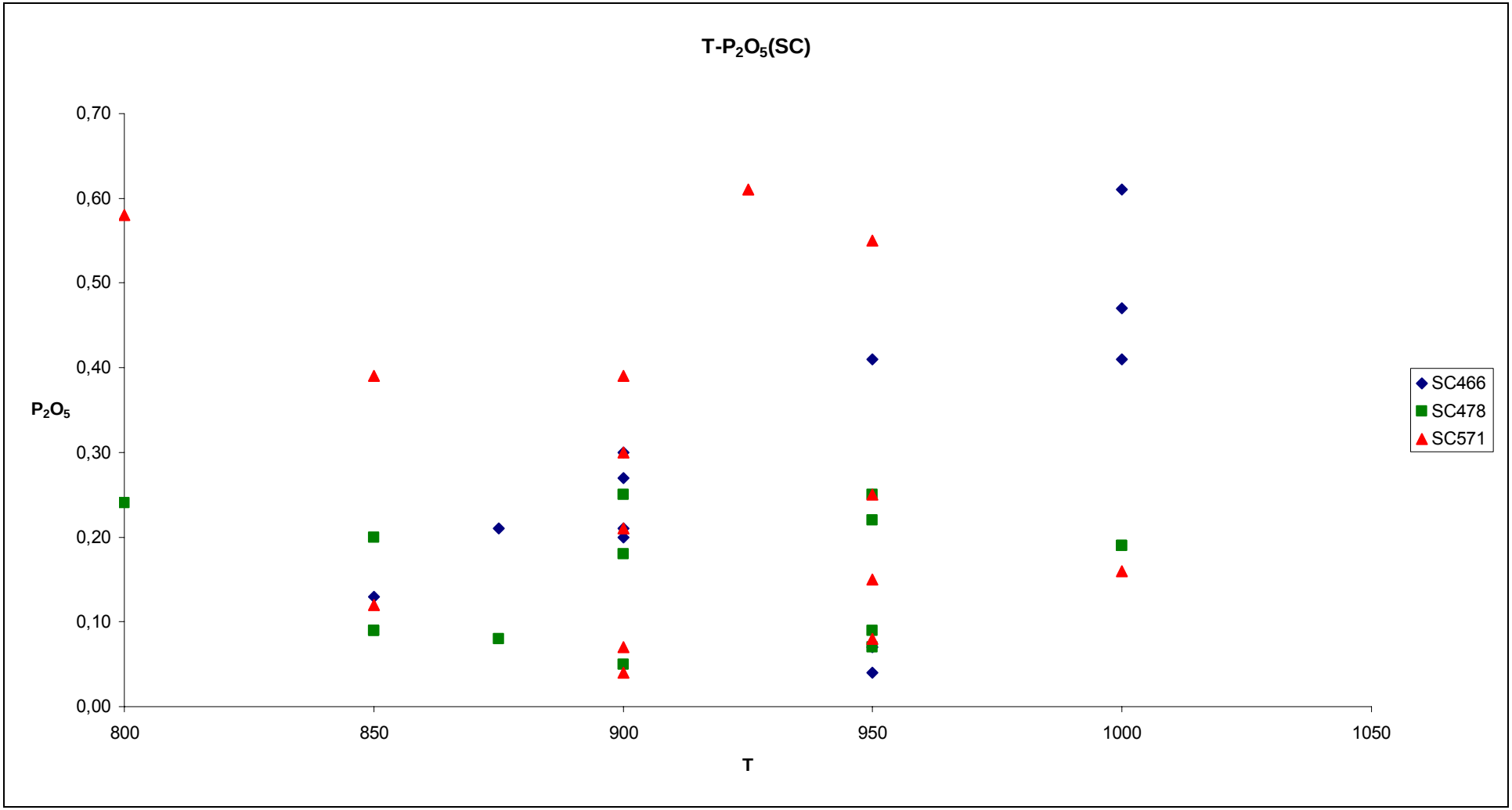
Σχ.2.11.2. Διάγραμμα T-P_2O_5.



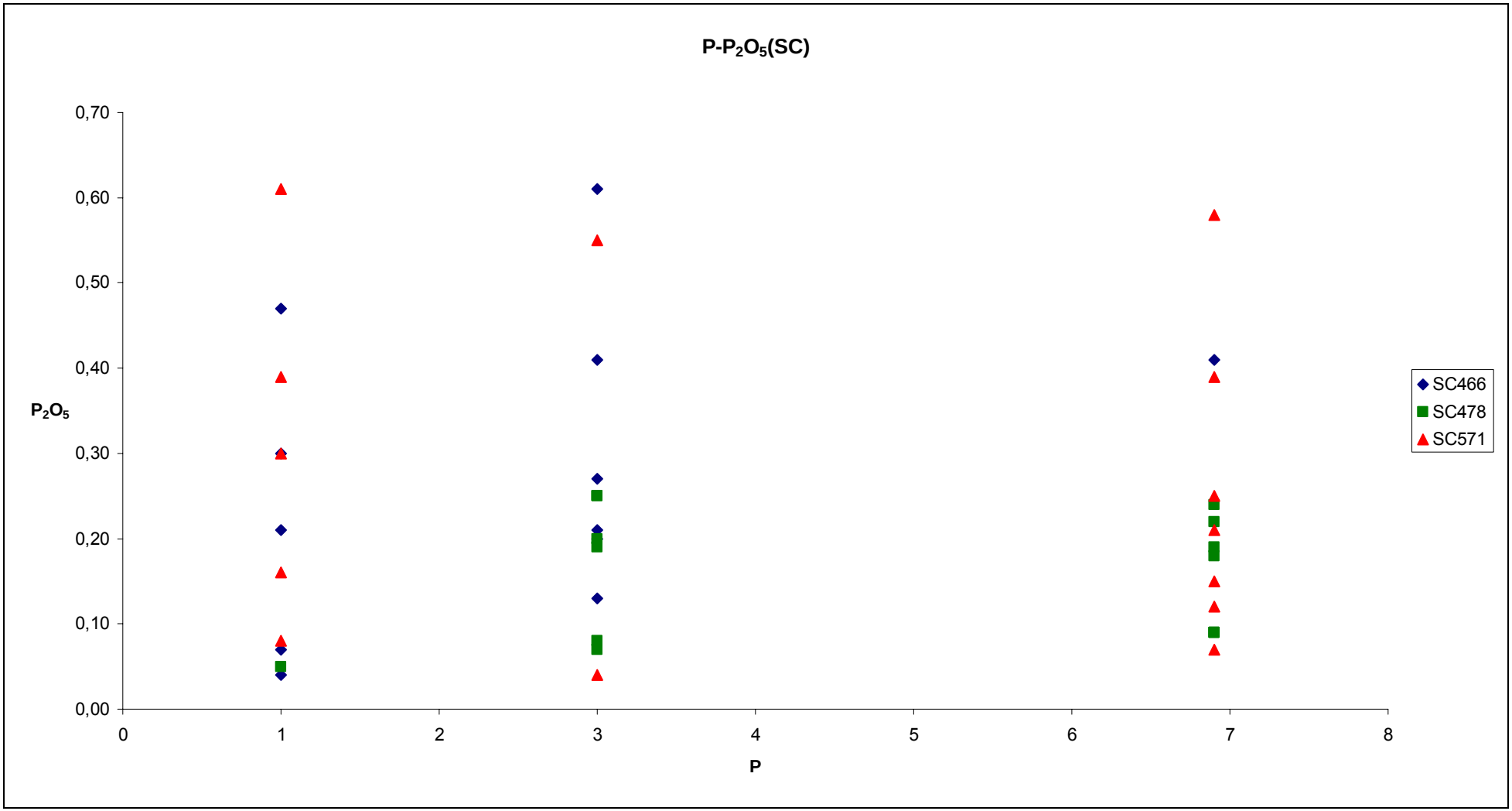
Σχ.2.11.3. Διάγραμμα P-P_2O_5.

Στο διάγραμμα T-P_2O_5 ανά πείραμα παρατηρούμε ότι από τα πειράματα με αρχικό υλικό το δείγμα SC466 παίρνουμε τήγματα που παρουσιάζουν αύξηση της περιεκτικότητάς τους σε P_2O_5 με τη αύξηση της T. Από το δείγμα SC478 παίρνουμε τήγματα με σχεδόν σταθερό P_2O_5, ενώ από το SC571 τήγματα με ελάττωση του P_2O_5 με την αύξηση της T (Σχ. 2.11.4 α).

Ακριβώς το ίδιο συμβαίνει και σε σχέση με την αύξηση της P, όπως φαίνεται στο διάγραμμα P-P_2O_5 (Σχ. 2.11.4 β).



Σχ.2.11.4α Διάγραμμα T-P_2O_5 για τα δείγματα SC466, SC478 και SC571.



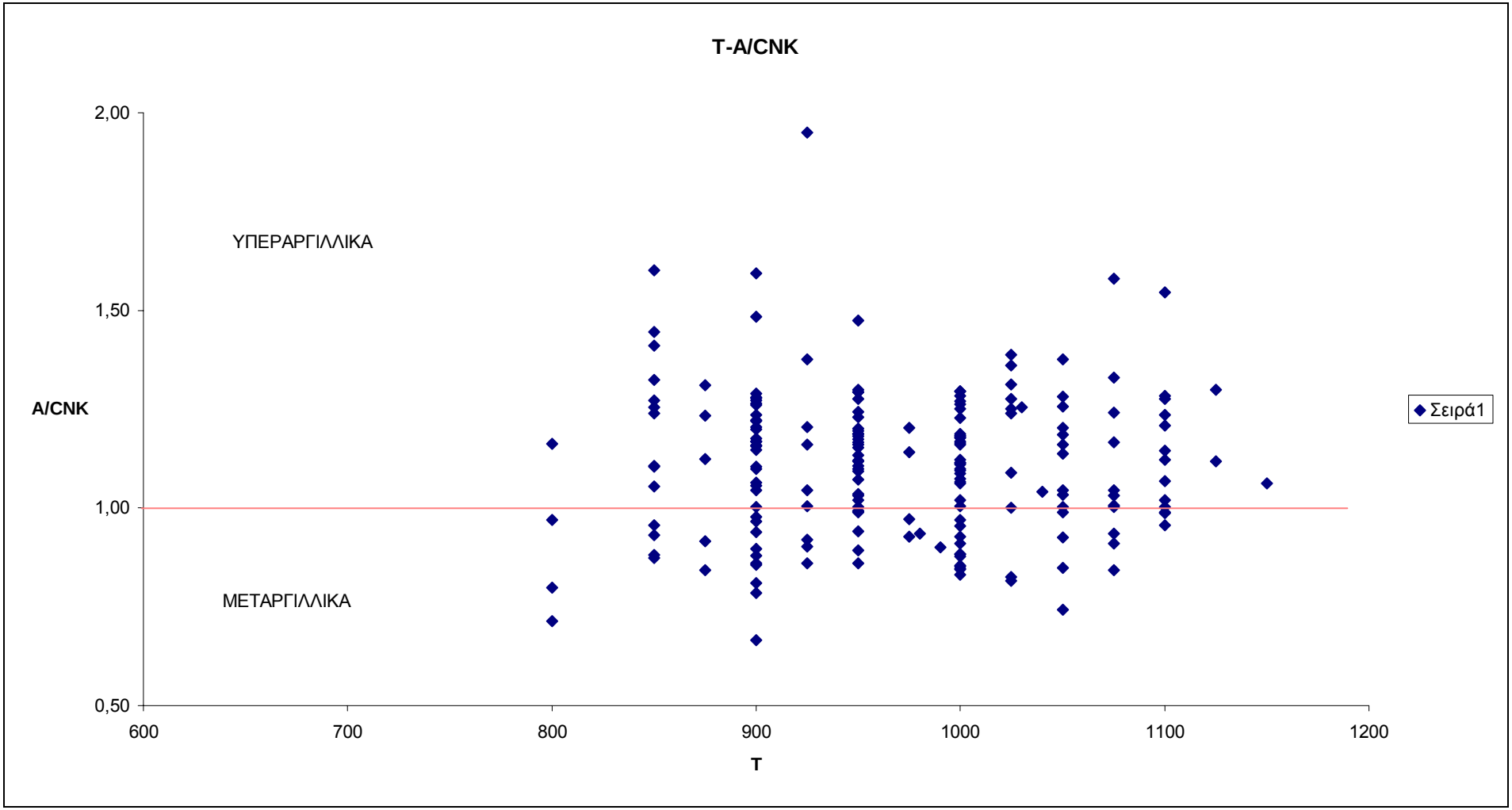
Σχ.2.11.4β Διάγραμμα P-P_2O_5 για τα δείγματα SC466, SC478 και SC571.

2.12. Δείκτης κορεσμού σε αλκάλεα A/CNK

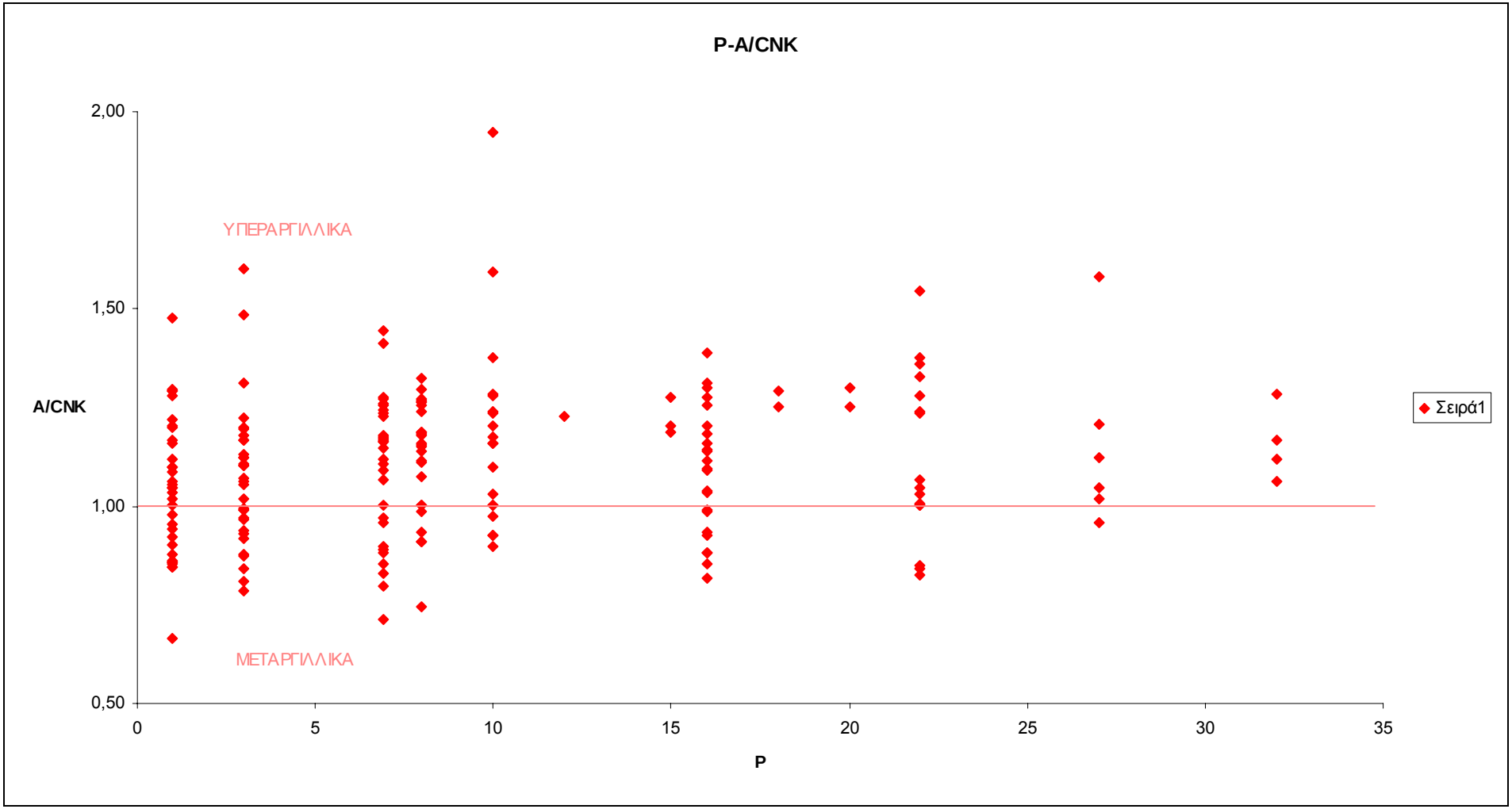
Στο διάγραμμα T-A/CNK (Σχ. 2.12.1), που έγινε για όλα τα τήγματα, παρατηρούμε ότι με την αύξηση της T, τα τήγματα που προκύπτουν είναι περισσότερο υπεραργιλλικά. Παρομοίως, με την αύξηση της P, έχουμε και πιο υπεραργιλλικά τήγματα, όπως φαίνεται στο διάγραμμα P-A/CNK (Σχ. 2.12.2).

Από τα διαγράμματα T-A/CNK, που έγιναν ανά πείραμα, δηλαδή για διαφορετικά δείγματα ως αρχικά υλικά κάθε φορά, συμπεραίνουμε ότι από τα δείγματα HAB, MAT, SC466, SC478 και SC571 προκύπτουν τήγματα υπεραργιλλικά. Ενώ από το δείγμα SC557 παίρνουμε τήγματα μεταργιλλικά. Από τα δείγματα AB, LKT και SC555 προκύπτουν τήγματα μεταργιλλικά, που με την αύξηση της T γίνονται κυρίως υπεραργιλλικά (Σχ. 2.12.3 α, 2.12.4 α, 2.12.5 α και 2.12.6 α).

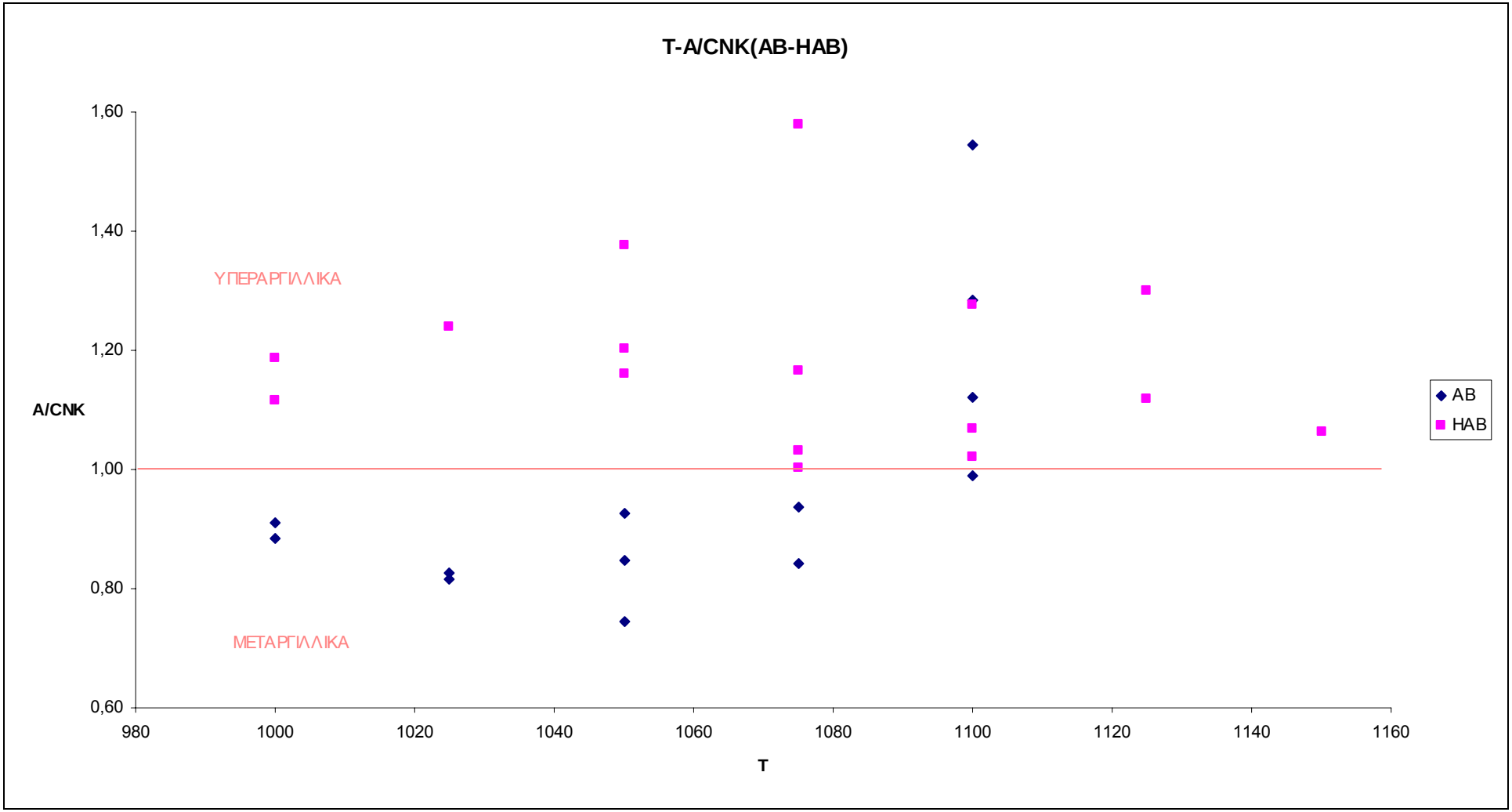
Ομοίως, από τα διαγράμματα P-A/CNK ανά πείραμα προκύπτει ότι από τα δείγματα HAB, MAT, SC466, SC478 και SC571 παίρνουμε τήγματα υπεραργιλλικά. Ενώ από τα δείγματα SC555 και SC557 παίρνουμε κυρίως μεταργιλλικά τήγματα. Τέλος, από τα πειράματα με αρχικά υλικά τα δείγματα AB και LKT προκύπτουν μεταργιλλικά τήγματα, τα οποία με την αύξηση της P γίνονται περισσότερο υπεραργιλλικά (Σχ. 2.12.3 β, 2.12.4 β, 2.12.5 β και 2.12.6 β).



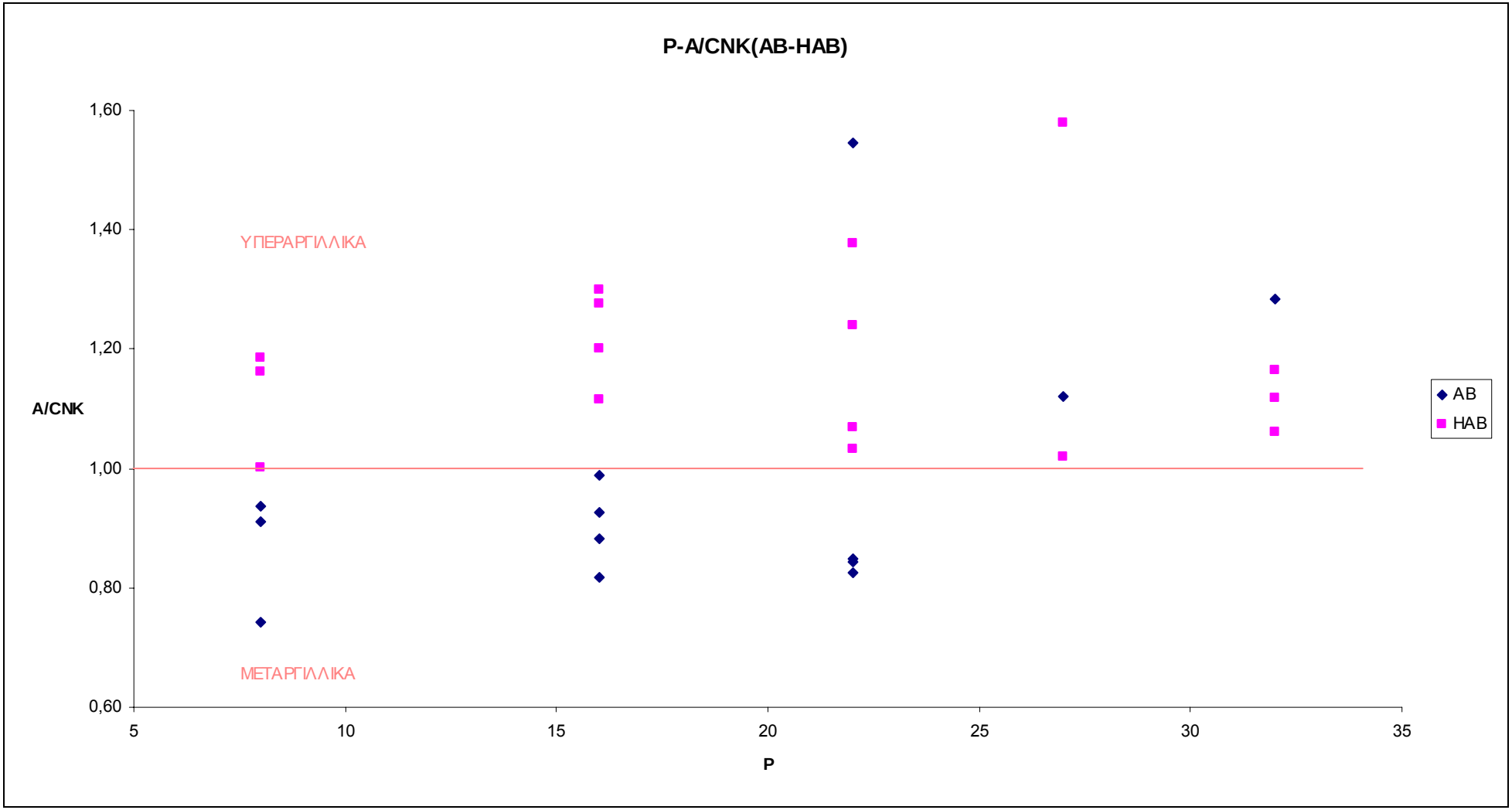
Σχ.2.12.1. Διάγραμμα T-A/CNK.



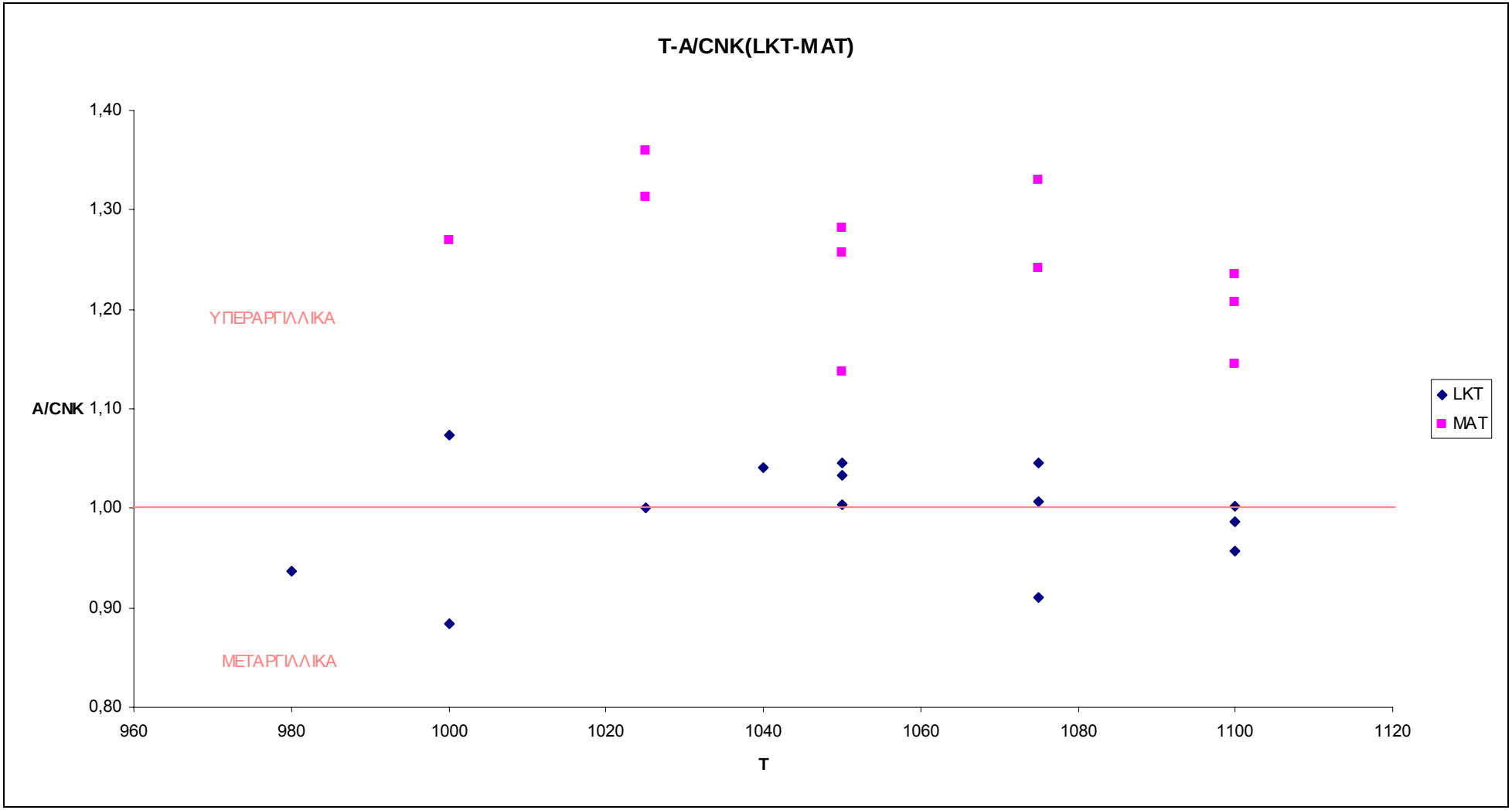
Σχ.2.12.2. Διάγραμμα P-A/CNK.



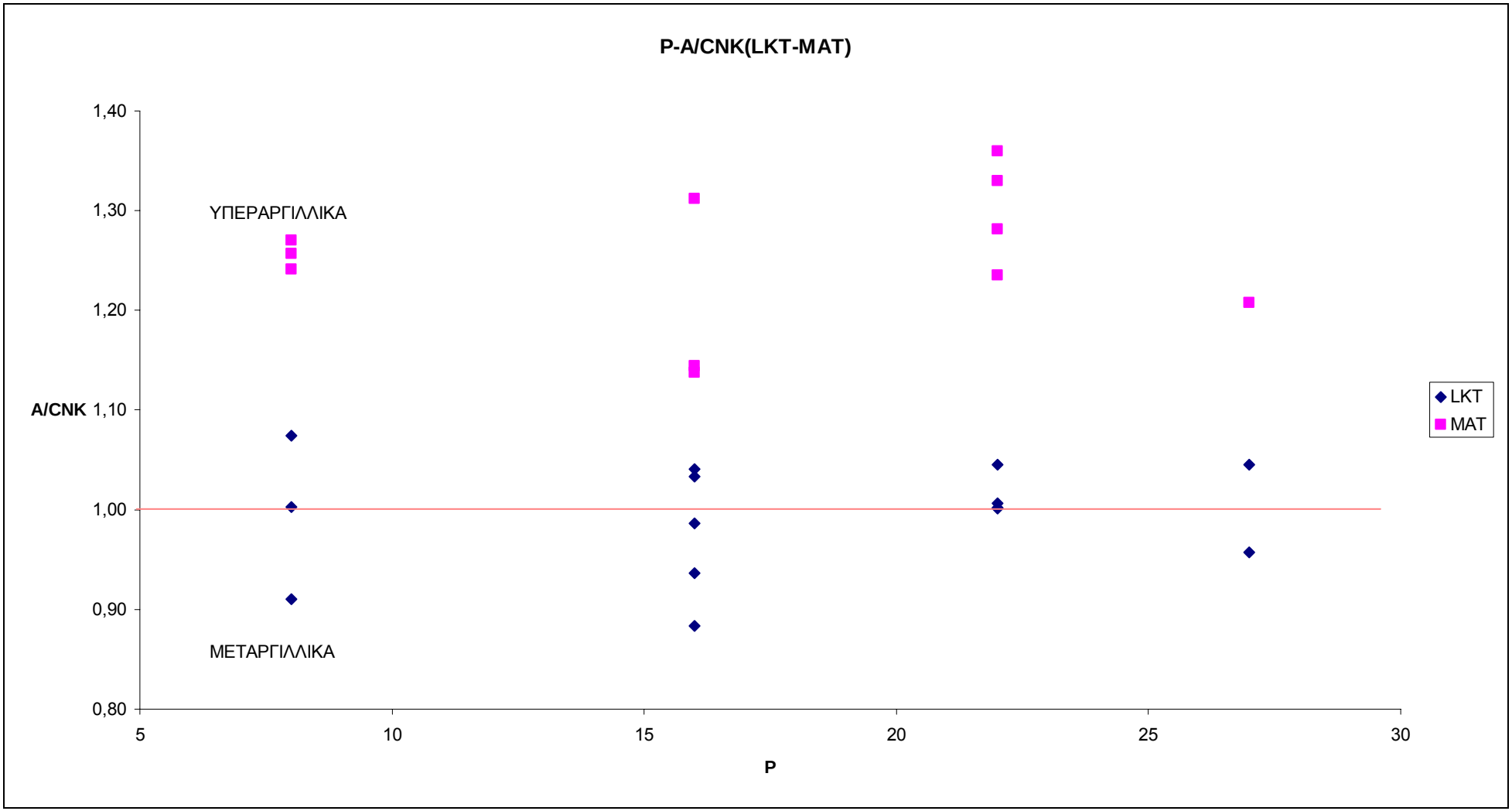
Σχ.2.12.3α Διάγραμμα T-A/CNK για τα δείγματα ΑΒ και ΗΑΒ.



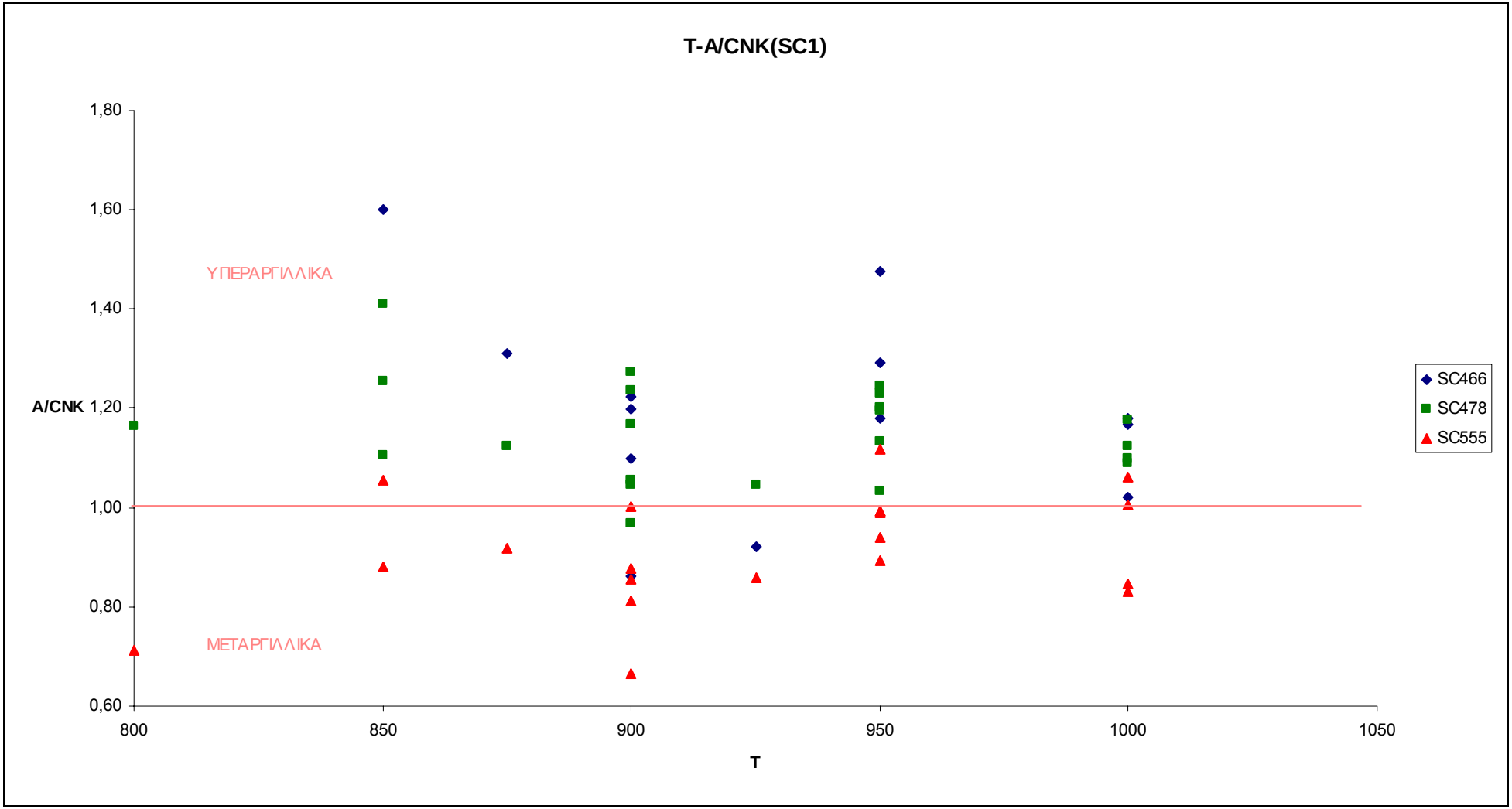
Σχ.2.12.3β Διάγραμμα P-A/CNK για τα δείγματα AB και HAB.



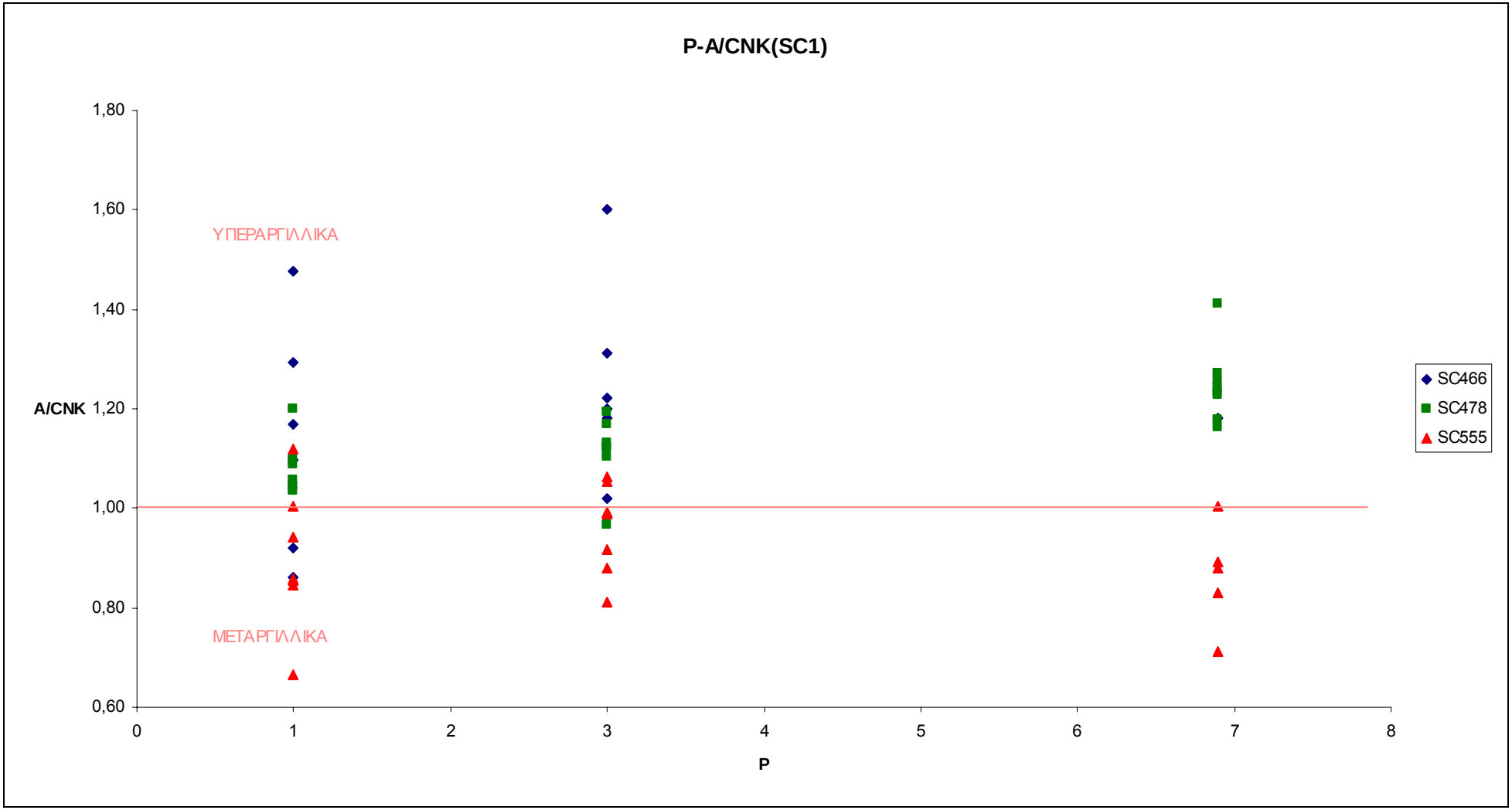
Σχ.2.12.4α Διάγραμμα T-A/CNK για τα δείγματα LKT και MAT.



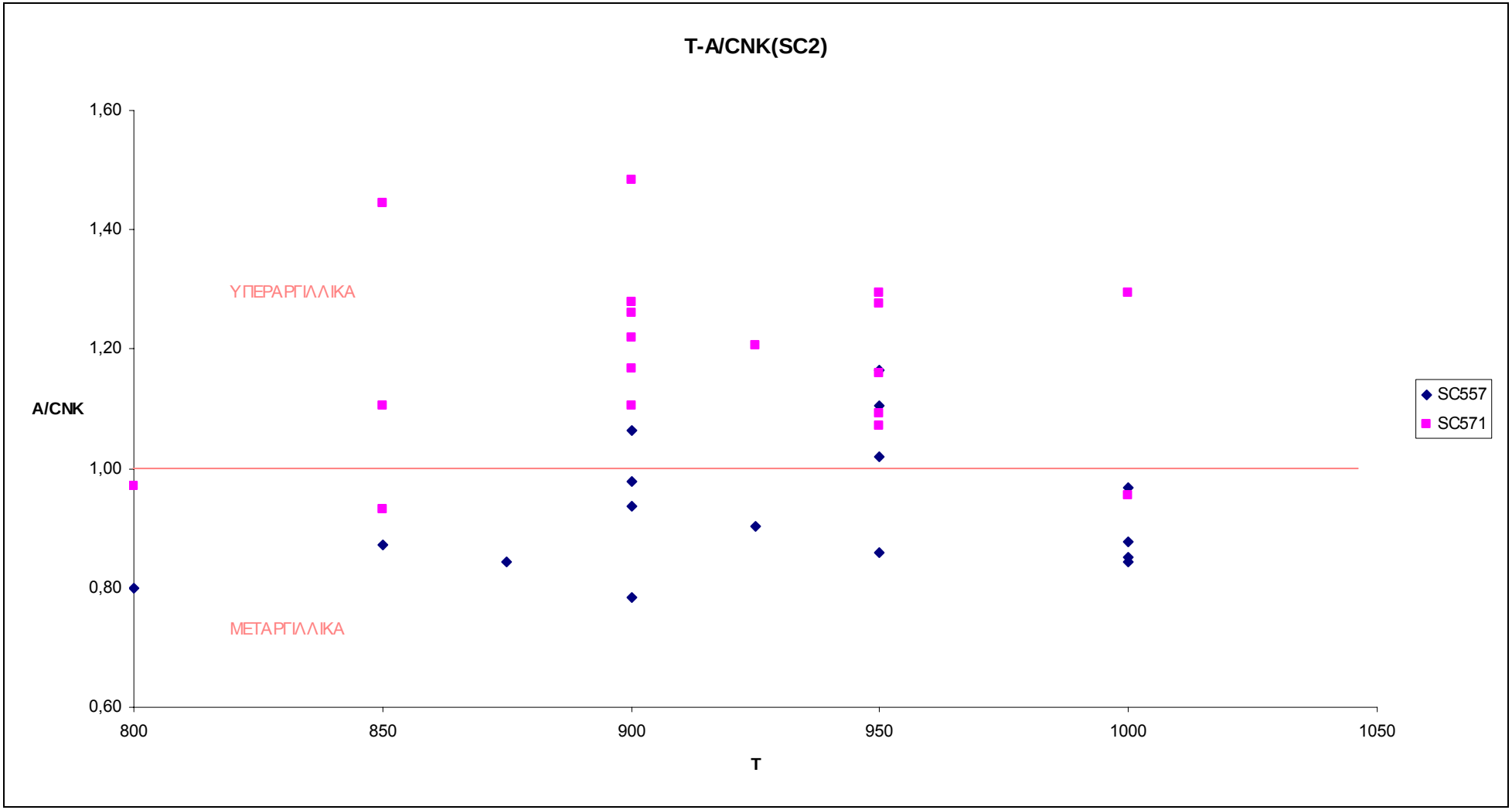
Σχ.2.12.4β Διάγραμμα P-A/CNK για τα δείγματα LKT και MAT.



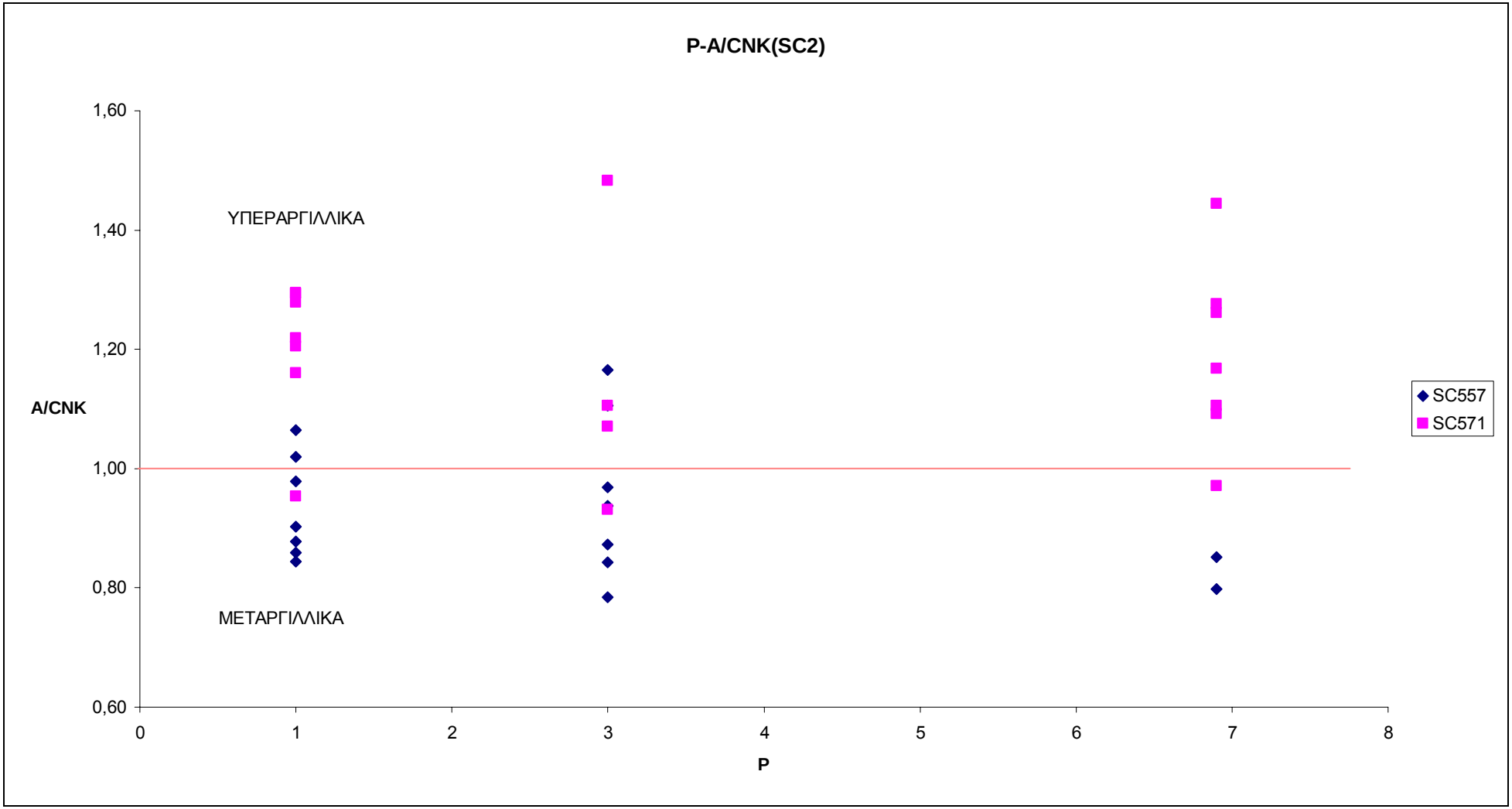
Σχ.2.12.5α Διάγραμμα T-A/CNK για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ.2.12.5β Διάγραμμα P-A/CNK για τα δείγματα SC466, SC478 και SC555.



Σχ.2.12.6α Διάγραμμα T-A/CNK για τα δείγματα SC557 και SC571.



Σχ.2.12.6β Διάγραμμα P-A/CNK για τα δείγματα SC557 και SC571.

3. Συμπεράσματα

Από τα διαγράμματα που παρατέθηκαν στο Κεφ. 2, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα, σχετικά με την επίδραση της T, της P και του αρχικού υλικού στη σύσταση του τήγματος που προκύπτει έπειτα απο τήξη:

1. Με την αύξηση της T, παρατηρούμε ότι αυξάνονται το K_2O και το P_2O_5, ελαττώνονται τα TiO_2, FeO, MnO, MgO και το CaO, ενώ παραμένουν σταθερά το SiO_2, το Al_2O_3 και το Na_2O.
2. Με την αύξηση της P, παρομοίως, παρατηρούμε ότι αυξάνονται K_2O και το P_2O_5, ελαττώνονται τα TiO_2, FeO, MnO, MgO και το CaO, ενώ παραμένουν σταθερά το SiO_2, το Al_2O_3 και το Na_2O.
3. Τα τήγματα με περισσότερο TiO_2, FeO, MnO, MgO, CaO και P_2O_5 τείνουν προς την κορυφή CaO+FeO+MgO του τριγωνικού διαγράμματος AFM, δηλαδή τείνουν να εχούν περισσότερο CaO+FeO+MgO. Ενώ τα τήγματα με περισσότερο Na_2O και K_2O τείνουν προς την κορυφή Na_2O+K_2O.
4. Από τα διαγράμματα ανά πείραμα, η σχέση των αρχικών υλικών-σύστασης του τήγματος που προκύπτει με την αύξηση της T και της P φαίνεται στους πίνακες A και B.

Δείγμα/στοιχείο	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5
AB	+	-	-	-	-	-	-	-	+	
HAB	=	-	-	-	=	=	-	+	+	
LKT	-	+	+ =	- =	-	+	-	+ =	+	
MAT	=	=	=	+ =	-	=	=	+ =	=	
SC466	=	+	=	+	=	+	=	+	=	+
SV478	-	-	=	-	=	=	=	+	+	=
SC555	+	-	=	-	-	-	-	+	+	
SC557	+	-	=	-	=	-	-	+	+	
SC571	+	-	=	-	-	-	-	+	=	-

Πίνακας A: Σχέση αρχικού υλικού-σύστασης τήγματος με την αύξηση της T, όπου το – σημαίνει ελάττωση, το + σημαίνει αύξηση και το = σημαίνει σταθερότητα.

Δείγμα/στοιχείο	SiO2	TiO2	Al2O3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	P2O5
AB	+	-	-	-	-	-	-	-	+	
HAB	+	-	=	-	-	-	-	+	+	
LKT	=	+	+	-	-	-	-	+	+	
MAT	-	=	+ =	=	-	=	=	=	+	
SC466	-	-	+	-	=	-	+	+	=	+
SV478	-	=	+	=	+	=	+	-	-	=
SC555	-	=	=	+	+	+	+	-	-	
SC557	-	+	-	+	+	+	+	-	-	
SC571	-	+	-	+	+	+	+	-	+	-

Πίνακας B: Σχέση αρχικού υλικού-σύστασης τήγματος με την αύξηση της P, όπου το – σημαίνει ελάττωση, το + σημαίνει αύξηση και το = σημαίνει σταθερότητα.

5. Τέλος, από τα διαγράμματα T- και P-A/CNK προκύπτει ότι γενικά με την αύξηση της T και της P τα τήγματα τείνουν να είναι υπεραργιλλικά, όπως επίσης και τα τήγματα που προκύπτουν από αρχικά πετρώματα που είναι αμφιβολίτες, αλκαλι-βασάλτες και θολεϊίτες (AB, HAB, LKT, MAT, SC466, SC478 και SC571), ενώ από αρχικά πετρώματα –ανδεσίτες (SC555 και SC557) παίρνουμε μεταργιλλικά τήγματα.
6. Άρα, σε γενικές γραμμές, μπορούμε να συνοψίσουμε λέγοντας ότι τα τήγματα που προκύπτουν έπειτα από τήξη αμφιβολιτικών πετρωμάτων τείνουν να αυξάνουν την περιεκτικότητά τους σε K_2O και P_2O_5, να έχουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε CaO+FeO+MgO και να είναι κυρίως υπεραργιλλικά.

Βιβλιογραφία

BEARD J.S. & Lofgren G.E.,. "Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstonew and amphibolites at 1,3, and 6.9 kb". Journal of petrology (1991), 32, part 2,365-401.

JOHANNES W. & Holtz F., "Petrogenesis and experimental petrology of granitic rocks", Chapter 9, 265-301.

PATIÑO DOUCE A.E., "Melt generation in the continental crust: answered and unanswered questions". Mineral magazine (1994), 58A, 692-693.

RUSHMER T., "Partial melting of two amphibolites: contrasting experimental results under fluid-absent conditions". Contrib. Mineral. Petrol. (1991), 107: 41-59.

Πρόσθετη βιβλιογραφία:

DEBON F. & LeFort P., "A cationic classification of common plutonic rocks and their magmatic associations: principles, method, applications". Bull. Mineral (1988), 111, 493-510.

RAPP R.P. & Watson E.B., "Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar. Implications for continental growth and crust – mantle recycling". Journal of petrology (1993), vol. 36, 891-931.

TEPPER J.H., Nelson B.K., Bergantz G.W. & Irving A.J., "Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: generation of calc – alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity". Contrib. Mineral. Petrol. (1993), 113: 333-351.

WAREHAM C.D, Millar I.L. & Vaughan A.P.M., "The generation of sodic granite magma, Western Palmer Land, Antarctic Peninsula". Contrib. Mineral. Petrol. (1997), 128: 81-96.

WOLF M.B. & Wyllie P.J., "Dehydration melting of amfibolite at 10 kbar: the effects of temperature and time". Contrib. Mineral. Petrol. (1994), 115: 369-383.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον κύριο Κορωναίο Α. για την πολύτιμη βοήθειά του, το χρόνο, το υλικό και την πρόθυμη συνεργασία του.

Επίσης, ευχαριστώ το συμφοιτητή μου Πετράκη Σ. για τη βοήθειά του.