



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΑΣ-ΠΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ-
ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ



ΗΡΩ ΔΙΑΝΕΛΛΟΥ

Η ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΜΑΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ
ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΙΔΗ
ΝΗΣΙΩΤΙΚΩΝ ΤΟΞΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2020





ΗΡΩ ΔΙΑΝΕΛΛΟΥ
Φοιτήτρια Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5318

Η ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΜΑΓΜΑΤΩΝ
ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΙΔΗ
ΝΗΣΙΩΤΙΚΩΝ ΤΟΞΩΝ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Ορυκτολογίας-Πετρολογίας-
Κοιτασματολογίας

Επιβλέπων

Καθηγητής Αντώνιος Κορωναίος

© Ηρώ Διανέλλου, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Ορυκτολογίας-
Πετρολογίας-Κοιτασματολογίας, 2020

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Η ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΜΑΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ
ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΕΙΔΗ ΝΗΣΙΩΤΙΚΩΝ– Διπλωματική Εργασία

© Iro Dianellou, School of Geology, Dept. of Oryctology-Petrology-Economic
Geology, 2020

All rights reserved.

THE GEOCHEMISTRY OF MAGMAS ORIGINATED IN THE DIFFERENT
KINDS OF ISLAND ARCS – *Bachelor Thesis*



Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

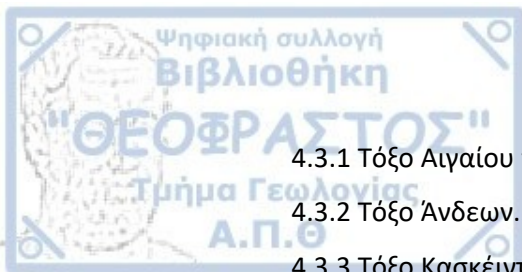
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

Εικόνα Εξωφύλλου:

https://www.google.com/search?q=island+arc&rlz=1C1GGRV_enGR751GR751&sxsrf=ALeKk02IFmO3aaENg2LAfer6DxwTA8I1w:1592861212775&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiU5422rpbqAhVVR3EKHUzqBmEQ_AUoAXoECBUQAw&biw=1366&bih=606#imgrc=DUAkcgFMgV-oIM&imgdii=_7Yq2NCnyG7MpM



Πρόλογος.....	6
1. Εισαγωγή.....	7
2. Καταστρεφόμενα περιθώρια	9
2.1. Νησιωτικά τόξα	10
2.1.1 Ensimatic νησιωτικά τόξα	11
2.1.2 Ensialic νησιωτικά τόξα	11
2.2. Ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια	12
2.3. Διάκριση μεταξύ ensimatic και ensialic νησιωτικών τόξων.....	13
2.4. Διάκριση μεταξύ ensialic και ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου	13
3. Γένεση μάγματος.....	17
3.1 Γένεση μάγματος σε ensimatic νησιώτικο τόξο.....	17
3.1.1 Θερμικό μοντέλο.....	18
3.1.2 Μανδυακή Σφήνα (mantle wedge).....	22
3.1.3 Ανάδυση του μάγματος στην επιφάνεια	25
3.2 Γένεση μάγματος σε ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια	26
3.2.1 Πετρογενετικό μοντέλο.....	27
3.2.2 Θερμικό μοντέλο ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων και διαδικασίες μερικής τήξης	29
4. Γεωχημεία	31
4.1 Ensimatic νησιώτικα τόξα	33
4.1.1 Ίζου-Μπόνιν	33
4.1.2 Τόξο Μαριάνας	34
4.1.3 Τόνγκα-Κέρμαντεκ τόξο	37
4.1.4 Μικρές Αντίλλες	40
4.1.5 Τόξο Σολομών.....	41
4.1.6 Εβρίδες-Βανουάτου	43
4.2 Ensialic νησιώτικα τόξα.....	45
4.2.1 Αλεούτιες	45
4.2.2 Τόξο Μπάντα.....	46
4.2.3 Τόξο Καμτσάτσκι	48
4.2.4 Τόξο Κουρίλ.....	50
4.2.5 Τόξο Ρίου-Κίου	51
4.3 Ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια	53



4.3.1 Τόξο Αιγαίου πέλαγους.....	53
4.3.2 Τόξο Άνδεων.....	54
4.3.3 Τόξο Κασκείντ.....	56
4.3.4 Τόξο Κεντρικής Αμερική.....	57
4.3.5 Τόξο Σούνδα.....	59
4.4 Γεωχημικά διαγράμματα.....	60
4.4.1 Διαγράμματα μεταβολών (bivariate plots).....	60
4.4.1.1 Διαγράμματα Harker κύριων στοιχείων	62
4.4.1.2 Διαγράμματα με MgO στον χ άξονα κύριων στοιχείων	69
4.4.1.3 Διαγράμματα Harker ιχνοστοιχείων	75
4.4.1.4 Διαγράμματα με MgO στον χ άξονα ιχνοστοιχείων	91
4.4.1.5 Διαγράμματα συνδυασμών λόγων ιχνοστοιχείων ως προς λόγους ιχνοστοιχείων ή οξειδίων κύριων στοιχείων.....	109
4.4.2 Διαγράμματα σπανίων γαιών	128
4.4.3 Πετροτεκτονικά διαγράμματα	139
5. Συζήτηση/Αποτελέσματα.....	143
6. Συμπεράσματα	147
Περίληψη	148
Abstract	149
Βιβλιογραφία	150
Ξενόγλωσση βιβλιογραφία.....	150
Ιστολόγιο	158



Πρόλογος

Η παρούσα μελέτη αποτελεί πτυχιακή εργασία που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του προγράμματος προπτυχιακών σπουδών του τμήματος Γεωλογίας, της Σχολής Θετικών επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Ο στόχος της εργασίας αυτής ήταν να μελετήσει εάν με βάση την γεωχημεία υπάρχουν χαρακτηριστικά που μπορούν να διαχωρίσουν ένα ensialic νησιώτικο τόξο από ένα ensimatic νησιώτικο τόξο ή από ένα ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο. Το 1^ο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή, στο 2^ο και 3^ο κεφάλαιο αναλύεται θεωρητικά ο ορισμός και η δομή μαζί με τον τρόπο λειτουργίας των νησιώτικων τόξων και ενεργών περιθωρίων. Στο 4^ο κεφάλαιο επιλέχθηκαν βιβλιογραφικά δείγματα ηφαιστειακών πετρωμάτων από γεωτεκτονικά περιβάλλοντα των τριών ειδών που αναφέρθηκαν από όλο τον κόσμο. Επιπλέον έγινε σύντομη περιγραφή των γεωτεκτονικών περιβαλλόντων από τα οποία επιλέχθηκαν τα δείγματα. Στην συνέχεια με αυτά τα δείγματα έγιναν διάφορα είδη γεωχημικών διαγραμμάτων που με βάση αυτά εξήχθησαν τα συμπεράσματα αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας εργασίας, Αντώνιο Κορωναίο, για την πολύτιμη καθοδήγηση και βοήθειά του κατά την εκπόνηση της πτυχιακής μου εργασίας.



1.Εισαγωγή

Στην Γεωλογία ζώνη υποβύθισης λέγεται το όριο μεταξύ δύο λιθοσφαιρικών πλακών, όπου μία πλάκα βυθίζεται κάτω από μία άλλη. Με βάση το γεγονός αν βυθίζεται ωκεάνια λιθόσφαιρα κάτω από ωκεάνια ή κάτω από ηπειρωτική, το σύστημα ονομάζεται νησιώτικο τόξο ή ενεργό περιθώριο. Σχετικά πρόσφατα η κατηγορία των νησιώτικων τόξων έχει αρχίσει να διαχωρίζεται από μερικούς επιστήμονες σε ensimatic και ensialic. Τα πρώτα αντιστοιχούν στον κλασικό ορισμό του νησιώτικου τόξου, ενώ στα δεύτερα βυθίζεται ωκεάνια κάτω από ηπειρωτική λιθόσφαιρα, όπως στα ενεργά περιθώρια. Τεκτονικά υπάρχουν διαφορές μεταξύ ενός ensialic, ενός ενεργού περιθωρίου και ενός ensimatic τόξου. Όλα τα παραπάνω θα περιγραφούν παρακάτω. Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι, με το να συγκρίνει τα ηφαιστειακά πετρώματα των τριών γεωτεκτονικών περιβαλλόντων ensimatic, ensialic, ενεργών περιθωρίων, να απαντήσει στο ερώτημα εάν γεωχημά υπάρχουν χαρακτηριστικά που να ξεχωρίζουν το ένα σύστημα από το άλλο.

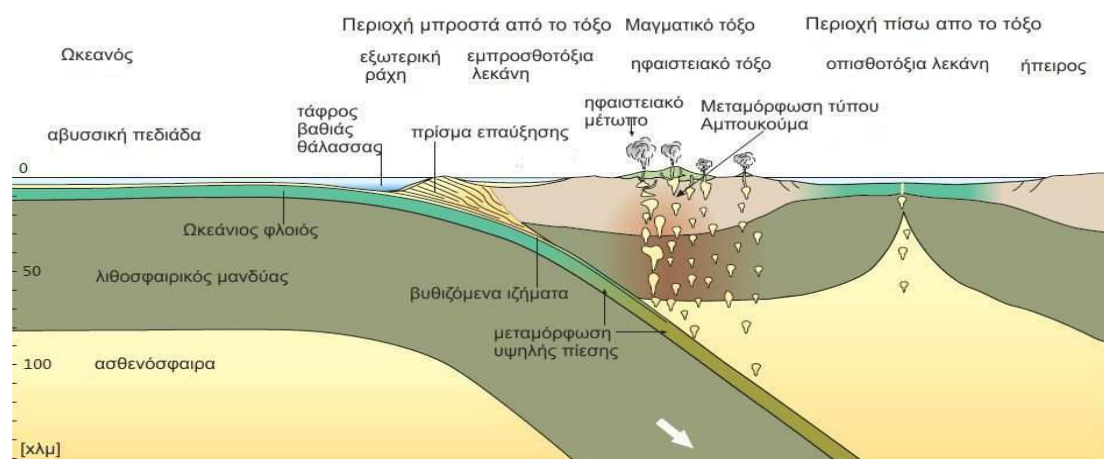


2. Καταστρεφόμενα περιθώρια

Τα καταστρεφόμενα περιθώρια, σύμφωνα με την θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών, είναι ένα γεωτεκτονικό περιβάλλον γένεσης μάγματος όπου δύο πλάκες κινούνται, πλησιάζοντας μετωπικά μεταξύ τους και η μία βυθίζεται κάτω από την άλλη εντός της ασθενόσφαιρας μέσω της διαδικασίας της υποβύθισης. Έτσι στο όριο των λιθοσφαιρικών πλακών γεννιέται η ζώνη υποβύθισης που συμβολίζει το επίπεδο βύθισης. Γενικά σύμφωνα με τον Frisch (2011) η αλληλεπίδραση της ζώνης υποβύθισης με την ασθενόσφαιρα πυροδοτεί την ανάδυση των ρευστών που τροφοδοτούν την τυπική ηφαιστειότητα των καταστρεφόμενων περιθωρίων στην ηφαιστειακή ζώνη ακριβώς από πάνω της. Το όριο των πλακών απεικονίζεται συνήθως σαν μια απλή γραμμή στην επιφάνεια της Γης, συνήθως εντός μιας βαθιάς ωκεάνιας τάφρου, όμως στην πραγματικότητα είναι μια εκατοντάδων χλιομέτρων φαρδιά περιοχή λόγω διαδικασιών της υποβύθισης. Μπορεί να βυθιστεί μόνο ωκεάνια λιθόσφαιρα, που είναι πυκνή και βαριά, και να επανενσωματωθεί στην υγρή ασθενόσφαιρα, καθώς η ηπειρωτική λιθόσφαιρα είναι λιγότερο πυκνή και πολύ ελαφριά για να μπορέσει να βυθιστεί σε μεγάλα βάθη. Η υπερκείμενη πλάκα κάτω από την οποία βυθίζεται η ωκεάνια μπορεί να είναι είτε ηπειρωτική είτε ωκεάνια και η ηφαιστειακή ζώνη λέγεται ηφαιστειακό ή νησιώτικο τόξο, όπως και ολόκληρο το σύστημα ονομάζεται **ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο** ή **νησιώτικο τόξο** αντίστοιχα. Αναλόγως το τι από τα δυο ισχύει θα συμβάλλει στην δημιουργία διαφορετικών γεωμετρικών μορφών επιφανειακής ηφαιστειότητας.

Προκειμένου να κατανοηθούν τα πολύπλοκα συστήματα των καταστρεφόμενων περιθωρίων, αυτά χωρίζονται τοπογραφικά και γεωλογικά σε τρεις παράλληλες περιοχές, με σύστημα αναφοράς το όριο των δύο λιθοσφαιρικών πλακών, δηλαδή τη ζώνη υποβύθισης (Σχ. 2.1):

- Από την ωκεάνια τάφρο ως το τόξο υπάρχει η περιοχή μπροστά από το τόξο (fore arc zone) στην οποία περιλαμβάνεται το πρίσμα επαύξεσης (accretionary wedge), η εξωτερική ράχη (outer ridge) και η λεκάνη μπροστά από το τόξο (fore arc basin)
- Η περιοχή του τόξου είναι η μαγματική ζώνη
- Η περιοχή πίσω από το τόξο, οπισθοτόξια λεκάνη, (back arc zone) που διαφέρει στα διάφορα είδη περιθωρίων, όπως θα αναφερθεί παρακάτω



Σχήμα 1.1 Δομή του συστήματος του ορίου μεταξύ δύο λιθοσφαιρικών πλακών με την ζώνη υποβύθισης και ensialic νησιώτικο τόξο (τροποποιήθηκε από Frisch 2011)

2.1. Νησιωτικά τόξα

Νησιωτικά τόξα σχηματίζονται, όπως προαναφέρθηκε, σε ζώνες σύγκλισης τεκτονικών πλακών όπου ωκεάνια λιθόσφαιρα βυθίζεται κάτω από μια άλλη ωκεάνια υπερκείμενη λιθοσφαιρική πλάκα (Σχ. 2.1.1). Έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά σύμφωνα με την Wilson (1989) και Frisch (2011):

- Στην ζώνη υποβύθισης μια βυθιζόμενη ζώνη σεισμικότητας, ονόματι ζώνη Benioff, που περιλαμβάνει σεισμούς με επιφανειακά, μεσαία και μεγάλα εστιακά βάθη

- Μια βαθιά και στενή ωκεάνια τάφρο (6000 -11000 m βαθιά) σχηματιζόμενη από την υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας μεταξύ της αβυσσικής πεδιάδας και του ορίου της άνω πλάκας

Και στη μαγματική ζώνη:

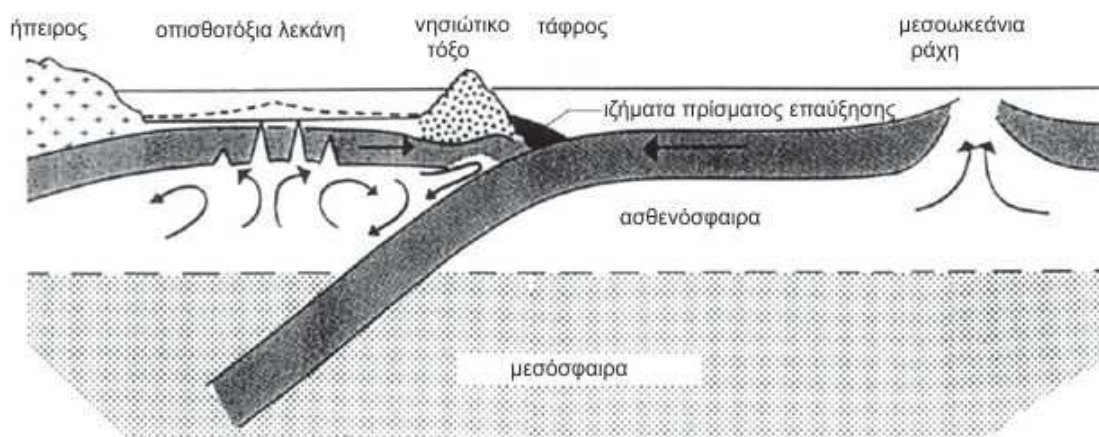
- Τοξωτές αλυσίδες νησιών ή γραμμικές ζώνες ηφαιστειών με έκταση της τάξης των εκατοντάδων ως χιλιάδων χιλιομέτρων και ένα σχετικά στενό φάρδος (200-300 χλμ)

- Ενεργή ηφαιστειότητα εντός της οποίας υπάρχει το μέτωπο του ηφαιστείου, που είναι ένα απότομο όριο της ηφαιστειακής ζώνης προς την πλευρά της θάλασσας, συνήθως παράλληλο στην ωκεάνια τάφρο και σε απόσταση μερικών χιλιομέτρων (100-200 χλμ) από αυτήν

- Χαρακτηριστική ηφαιστειακή ακολουθία που λέγεται «ακολουθία ορογενετικών ανδεσιτών»

- Συχνά σχηματίζεται περιθωριακή λεκάνη (οπισθοτόξια λεκάνη) πίσω από το ηφαιστειακό μέτωπο λόγω διαδικασιών έκτασης του ωκεάνιου πυθμένα

- Τα ιζήματα που συνθέτουν το άνω τμήμα του φλοιού της βυθιζόμενης ωκεάνιας πλάκας (αναφορά λεπτομερούς σύστασης ωκεάνιας πλάκας στην παρ.3.1) αποξύνονται κατά την τριβή της με την υπερκείμενη πλάκα, σχηματίζοντας το πρίσμα επαύξεσης



Σχήμα 2.1.1 Η δημιουργία και βύθιση ωκεάνιας λιθόσφαιρας. Η νέα ωκεάνια λιθόσφαιρα που γεννιέται στις μεσοωκεάνιες ράχες προκαλεί τη μετακίνηση της παλαιότερης ωκεάνιας λιθόσφαιρας προς μια άλλη πλάκα. Σχηματίζεται βαθιά τάφρος όπου η ωκεάνια πλάκα βυθίζεται εντός της ασθενόσφαιρας. Ρεύματα μεταφοράς μέσα στην ασθενόσφαιρα προκαλούν την δημιουργία ενός μικρού κέντρου έκτασης (περιθωριακή λεκάνη) πίσω από το τόξο (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

Τυπικά τέτοια τόξα και ο αντίστοιχος μαγματισμός τους συναντιούνται στον Ειρηνικό ωκεανό, Ατλαντικό ωκεανό και στην Ινδονησία. Παραδείγματα τέτοιων τόξων στον δυτικό Ειρηνικό είναι τα συστήματα Νέας Ζηλανδίας-Τόνγκα, Νέας Βρετανίας-Παπούα-Νέας Γουινέας, Μαριάνες-Ίζου νήσοι, Ιαπωνίας-Κουρίλε-Καμτσάτκας. Στον Ατλαντικό ωκεανό τέτοιου τύπου τόξα αποτελούν οι μικρές Αντίλλες και τα Νότια Σάντουιτς. Παραπάνω για λόγους απλούστευσης αναφέρθηκε πως στα νησιωτικά τόξα η υπερκείμενη πλάκα είναι ωκεάνια. Ωστόσο στην πραγματικότητα τα νησιώτικα τόξα χωρίζονται σε δύο διαφορετικούς τύπους, τα **ensimatic** και τα **ensialic** ανάλογα με το αν η σύσταση της υπερκείμενης πλάκας είναι ωκεάνια ή ηπειρωτική.

2.1.1 Ensimatic νησιωτικά τόξα

Σε αυτόν τον τύπο νησιώτικου τόξου ωκεάνια λιθόσφαιρα βυθίζεται κάτω από άλλη ωκεάνια λιθόσφαιρα και δημιουργείται ένα σύστημα ηφαιστειακού νησιώτικου τόξου πάνω σε ωκεάνιο φλοιό (ensimatic νησιώτικο τόξο από το πυρίτιο και μαγνήσιο) (Σχ. 2.1.2) Στα ensimatic νησιώτικα τόξα κατατάσσονται οι Μαριάνες νήσοι, Τόνγκα-Κέρμαντεκ στον Ειρηνικό και οι μικρές Αντίλλες, τα Νότια Σάντουιτς στον Ατλαντικό.

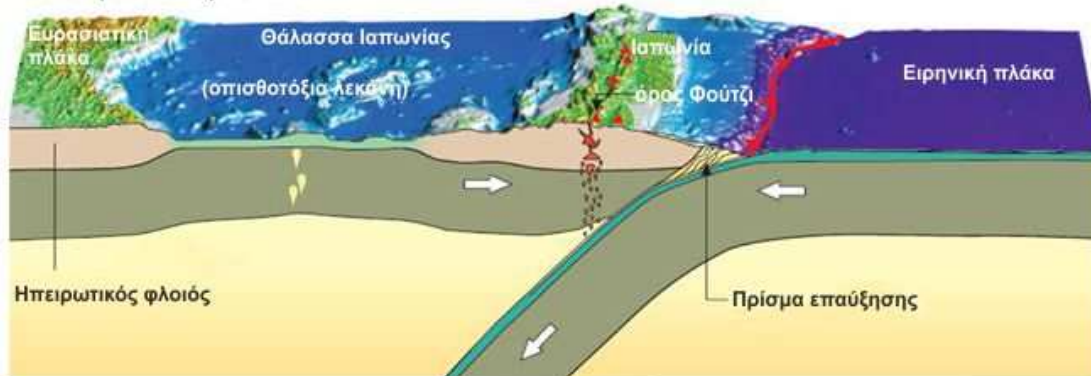
2.1.2 Ensialic νησιωτικά τόξα

Σε αυτόν τον τύπο νησιώτικου τόξου ωκεάνια λιθόσφαιρα βυθίζεται κάτω από ηπειρωτική λιθόσφαιρα και σχηματίζεται νησιώτικο τόξο που από κάτω του υπόκειται ηπειρωτικός φλοιός (ensialic νησιώτικο τόξο από το πυρίτιο και αργίλιο). Το νησιώτικο τόξο χωρίζεται από την ήπειρο με μια θαλάσσια λεκάνη (back arc basin) κάτω από την οποία υπόκειται ωκεάνιος φλοιός (Σχ. 2.1.3). Στα ensialic νησιώτικα τόξα κατατάσσονται τα Ιαπωνικά νησιά, το ανατολικό τόξο της Ινδονησίας και οι Αλεούτιες νήσοι της Αλάσκας (με εξαίρεση τα νησιά Κομαντόρσκι που ανήκουν στην Ρωσία) στον Ειρηνικό ωκεανό.



Σχήμα 2.1.2 Σχηματική απεικόνιση ensimatic νησιώτικου τόξου στις Μαριάνες νήσους (τροποποιήθηκε από Frisch 2011)

Ensialic νησιώτικο τόξο: Ιαπωνία



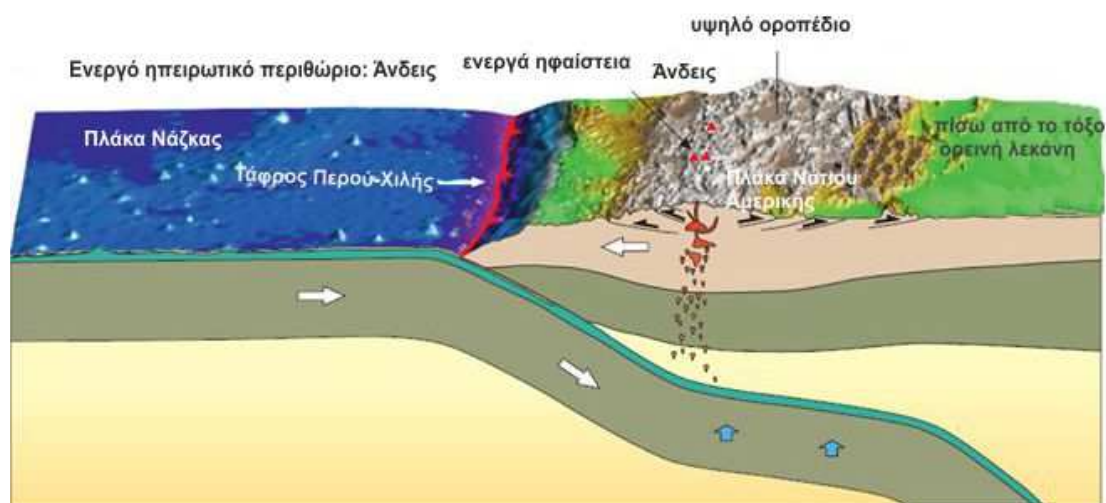
Σχήμα 2.1.3. Σχηματική απεικόνιση ensialic νησιωτικού τόξου στην Ιαπωνία (τροποποιήθηκε από Frisch 2011).

2.2. Ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια

Ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια σχηματίζονται, όπως προαναφέρθηκε, σε ζώνες σύγκλισης τεκτονικών πλακών, όπου ωκεάνια λιθόσφαιρα βυθίζεται κάτω από ηπειρωτική λιθόσφαιρα (Σχ. 2.2.1). Έχουν όλα τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.1 των νησιώτικων τόξων, διαφέρουν ωστόσο στο ότι:

- Δεν υπάρχει οπισθοτόξια λεκάνη (back arc basin), λόγω συμπιεστικού καθεστώτος τεκτονικής πίσω από το τόξο
- Το ηφαιστειακό μέτωπο δημιουργείται απευθείας πάνω στην γειτονική, μεγάλη, ενιαία ήπειρο κάτω από την οποία λαμβάνει χώρα η υποβύθιση
- Το ηπειρωτικό περιθώριο είναι ενωμένο με την ενδοχώρα (hinterland), παρόλο που μια ρηχή θαλάσσια λεκάνη μπορεί να υπάρχει πίσω από το ηφαιστειακό τόξο

Τυπικά τέτοια τόξα και ο αντίστοιχος μαγματισμός τους συναντιούνται στις Άνδεις, στην νοτιοανατολική Αλάσκα και στο δυτικό και κεντρικό τόξο της Σούνδας, όπως στην Σουμάτρα και στην Ιάβα.



Σχήμα 2.2.1 Σχηματική απεικόνιση ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου στις Άνδεις (τροποποιήθηκε από Frisch 2011)

2.3. Διάκριση μεταξύ ensimatic και ensialic νησιωτικών τόξων

Η διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους νησιώτικου τόξου έγκειται στο είδος της υπερκείμενης πλάκας κάτω από την οποία γίνεται η βύθιση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας και επομένως στη σύσταση της λιθόσφαιρας πάνω στην οποία δημιουργείται το ηφαιστειακό τόξο. Εάν η υπερκείμενη πλάκα είναι ωκεάνια πρόκειται για ensimatic τόξο, εάν είναι ηπειρωτική για ensialic. Λόγω αυτού διαφοροποιείται ο τύπος του μαγματισμού και της ηφαιστειότητας.

Ως έναν βαθμό, βέβαια, τα δύο τόξα παρουσιάζουν ομοιότητες, όπως το τεκτονικό καθεστώς έκτασης που κυριαρχεί στην οπισθοτόξια λεκάνη και τον τρόπο βύθισης και τήξης της ωκεάνιας λιθόσφαιρας.

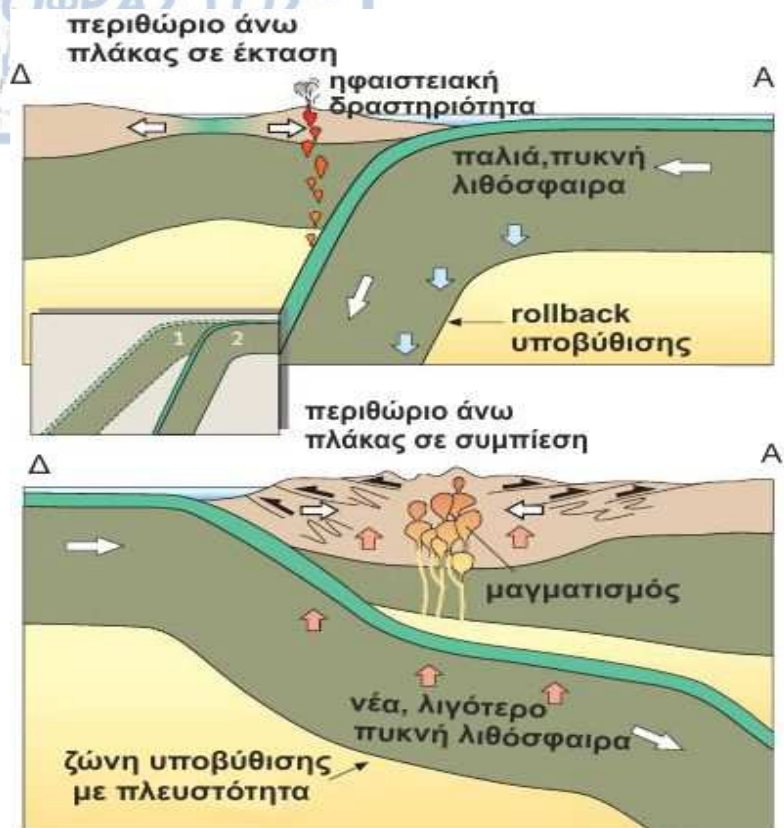
2.4. Διάκριση μεταξύ ensialic και ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου

Η διάκριση μεταξύ ensialic και ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου παρουσιάζει δυσκολίες, καθώς ως έναν βαθμό ο τρόπος γένεσης και ανόδου του μάγματος με συμμετοχή τόσο ωκεάνιου, όσο και ηπειρωτικού φλοιού είναι πανομοιότυπος. Ωστόσο σύμφωνα με τον Frich (2000) η διαφορά έγκειται στο πάχος της υπερκείμενης ηπειρωτικής συστάσεως πλάκας. Στην πρώτη περίπτωση πρόκειται για λεπτή, ενώ στην δεύτερη για παχιά, έως 50 χλμ, ηπειρωτική πλάκα. Ως εκ τούτου παράγεται διαφορετικό είδος μαγματισμού και ηφαιστειότητας. Παρακάτω θα γίνει λεπτομερής επεξήγηση για το θέμα αυτό. Επιπλέον τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια διαφέρουν και με τους δύο τύπους νησιώτικου τόξου στο ότι έχουν διαφορετικό τύπο τεκτονικού καθεστώτος στην περιοχή πίσω από το τόξο. Στα πρώτα επικρατεί συμπιεστικό καθεστώς τεκτονικής, ενώ στα δεύτερα εκτατικό. Γι αυτό τα ενεργά περιθώρια δεν έχουν οπισθοτόξια λεκάνη, αλλά ρηχή θαλάσσια λεκάνη. Επιπλέον τα νησιώτικα τόξα και τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια έχουν διαφορετική τεκτονική δομή. Αυτό οφείλεται στο ότι υπάγονται σε διαφορετικό μηχανισμό υποβύθισης. Τα πρώτα εντάσσονται στην κατηγορία της ελεύθερης υποβύθισης ενώ το τελευταίο στην εξαναγκασμένη υποβύθιση (Σχ. 2.3.1).

- Η ελεύθερη υποβύθιση ή αλλιώς υποβύθιση τύπου Μαριάννα είναι ο πιο απότομος τρόπος καταβύθισης και γίνεται με την βύθιση παλιάς και πυκνής λιθόσφαιρας εντός της ασθενόσφαιρας με κινητήριο δύναμη το ίδιο το βάρος της. Άρα οφείλεται σε εσωτερικό παράγοντα. Αυτό συμβαίνει διότι με την αύξηση της ηλικίας της ωκεάνιας λιθόσφαιρας, αυξάνεται και η πυκνότητά της και μπορεί μετά από κάποιο όριο να ξεπεράσει και την πυκνότητα της υποκείμενης ασθενόσφαιρας και ως εκ τούτου καταβυθίζεται ευκολότερα. Προκειμένου οι κάθετες δυνάμεις να γίνουν ικανές να διασπάρουν την ωκεάνια λιθόσφαιρα ώστε να ξεκινήσει η υποβύθιση, αυτή πρέπει να έχει παραπάνω πυκνότητα του υπολιθοσφαιρικού μανδύα. Αυτό συμβαίνει θεωρητικά μετά την ηλικία των 30 εκατομμυρίων χρόνων. Η ωκεάνια λιθόσφαιρα μπορεί να έχει μέγιστη ηλικία 200 εκατομμυρίων χρόνων. Η παλιότερη ηλικία που έχει βρεθεί είναι 185 εκατομμύρια χρόνια μπροστά στις Μαριάνες νήσους και 175 εκατομμύρια χρόνια και στα δυο περιθώρια του Ατλαντικού ωκεανού. Ένας παλιός ωκεάνιος φλοιός έχει κατά προσέγγιση 2% περισσότερη πυκνότητα από την υποκείμενή του ασθενόσφαιρα. Η δύναμη που τραβάει προς τα κάτω

την βυθιζόμενη πλάκα προκαλεί επίσης μία κίνηση κατά την οποία η ζώνη υποβύθισης κάμπτεται και οπισθοχωρεί ενδοωκεάνια μακριά από την περιοχή του τόξου προς την βυθιζόμενη πλάκα (roll back). Εξαιτίας του roll back επεκτείνεται το όριο της υπερκείμενης πλάκας κάτω από εκτατικό καθεστώς τεκτονικής. Οι συμπιεστικές δομές περιορίζονται ουσιαστικά μόνο στο άκρο της επάνω πλάκας. Ως εκ τούτου το νησιώτικο τόξο μεταναστεύει προς την εξωτερική πλευρά του τοξωτού συστήματος και αυτό έχει ως συνεπακόλουθο το να επικρατεί ισχυρή έκταση στον χώρο της περιοχής πίσω από το τόξο (back arc region). Στα ensialic τόξα, όπου το τόξο σχηματίζεται αρχικά επάνω σε ηπειρωτικό φλοιό, η παραπάνω διαδικασία είναι που προκαλεί τον αποχωρισμό του τόξου από την υπερκείμενη ηπειρωτική λιθόσφαιρα. Παράγεται έτσι οπισθοτόξια λεκάνη από την οποία, σε περίπτωση επαρκούς έκτασης, θα γεννηθεί νέα ωκεάνια λιθόσφαιρα. Σε αυτό τον τύπο υποβύθισης το βάθος των ωκεάνιων τάφρων είναι πολύ μεγάλο καθώς η κλίση με την οποία κάμπτεται η βυθιζόμενη πλάκα είναι εξαιρετικά απότομη. Έτσι η τάφρος γεμίζει μόνο μερικώς με μικρό ποσοστό ιζημάτων, που μεταφέρονται από το νησιώτικο τόξο.

- Η εξαναγκασμένη υποβύθιση ή αλλιώς υποβύθιση τύπου Χιλής μπορεί να γίνει μόνο με συμπιεστικές δυνάμεις, διότι η ωκεάνια λιθόσφαιρα είναι πολύ νέα, θερμή και συνεπώς λιγότερο πυκνή της υποκείμενης της ασθενόσφαιρας. Έτσι λόγω συμπιεστικού καθεστώτος τεκτονικής βυθίζεται με πιο ήπια κλίση από τον τύπο Μαριάνας. Σε αυτή την περίπτωση η βύθιση οφείλεται σε εξωγενή παράγοντα. Οι συμπιεστικές δυνάμεις μεταφέρονται μέσα στην υπερκείμενη πλάκα προκαλώντας δυνατούς και συχνούς σεισμούς. Στην υποβύθιση τύπου Χιλής η περιοχή πίσω από το τόξο συμπιέζεται αντί να εκτείνεται. Διότι τοπικά αναπτύσσονται συμπιεστικές δομές, όπως επωθήσεις, που είναι προσανατολισμένες προς την πλευρά του ωκεανού στην περιοχή μπροστά από το τόξο και προσανατολισμένες προς την ήπειρο στην περιοχή πίσω από το τόξο. Το εγκάρσιο μήκος του φλοιού μειώνεται και συνεπώς το πάχος του αυξάνεται επηρεάζοντας τον μαγματισμό. Ρευστά από την τήξη του ηπειρωτικού φλοιού παγιδεύονται, εντός του ίδιου του φλοιού, ως εγκλείσματα ή λιώνουν γειτονικά πετρώματα, τροφοδοτώντας πολύ εκρηκτικά όξινα ηφαιστεια. Η βυθιζόμενη πλάκα σποραδικά ενώνεται με την υπερκείμενη πλάκα και προκαλείται πάχυνση της τελευταίας. Επομένως δημιουργούνται ψηλές οροσειρές. Η ανύψωση της ηφαιστειακής ζώνης μπορεί να ξεπεράσει, δομικά, και τα 20 χλμ. Δομές του φλοιού που δημιουργούνται σε μεγάλα βάθη ξεθάβονται από την διάβρωση παράγοντας ιζήματα. Οι ωκεάνιες τάφροι είναι ρηχότερες επειδή η ανυψωμένη ενδοχώρα τις τροφοδοτεί με μεγάλο ποσοστό ιζημάτων δίχως να εμποδίζεται από παρεμβαλλόμενα ρήγματα. Το συμπιεστικό καθεστώς, κατά το οποίο οι πλάκες είναι ενωμένες, το διαδέχεται εκτατικό καθεστώς όπου οι πλάκες διαχωρίζονται και η περιοχή της υπερκείμενης πλάκας, που προηγουμένως ανυψώθηκε, καταρρέει από αστάθεια. Αυτή η διαδοχή επαναλαμβάνεται με το όριο της πάνω πλάκας να αποκτά σχήμα θόλου όσο υπάρχει συμπίεση, ώσπου λόγω συσσώρευσης μεγάλης ενέργειας γίνεται ένας ξαφνικός αποχωρισμός (decoupling) των πλακών, η πάνω πλάκα μετακινείται μπροστά προς την βυθιζόμενη πλάκα προκαλώντας την υποχώρηση του ηπειρωτικού περιθωρίου.



Σχήμα 2.3.1 Υποβύθιση τύπου Μαριάννα(πάνω) και τύπου Χιλής(κάτω). Στου τύπου Μαριάννα η υποβύθιση γίνεται εύκολα και η ζώνη υποβύθισης οπισθοχωρεί προς την ανατολή (ένθετη εικόνα). Στου τύπου Χιλής, νέα και ιδιαίτερα ελαφριά λιθόσφαιρα σπρώχνει προς τα πάνω και η υποβύθιση είναι εξαναγκασμένη (τροποποιήθηκε από Frisch 2011).



3.1 Γένεση μάγματος σε ensimatic νησιώτικο τόξο

Θεωρητικά στα νησιώτικα τόξα τύπου ensimatic, όπου ωκεάνια λιθόσφαιρα βυθίζεται κάτω από ωκεάνια, η παραγωγή του μάγματος είναι λιγότερο περίπλοκη, συγκριτικά με τα υπόλοιπα καταστρεφόμενα περιθώρια, διότι κανονικά δεν πρέπει να υπάρχει μόλυνση του αναδυόμενου μάγματος από υλικά του ηπειρωτικού φλοιού. Παρόλα αυτά η διαδικασία γένεσης μάγματος έχει πολλαπλά στάδια και το μάγμα πολλαπλές πηγές (Wilson 1989).

Κατά την υποβύθιση κρύα ωκεάνια λιθόσφαιρα βυθίζεται στον μανδύα. Αυτή αποτελείται από τρία στρώματα ωκεάνιου φλοιού και επιπλέον μανδυακό υλικό με την σύσταση που φαίνεται στον πίνακα 3.1.1.

Πίνακας 3.1.1.

Σ τρώμα	Ομάδα πετρωμάτων (Σύσταση)	Τύπος
1 °	Ωκεάνια ιζήματα όπως πελαγικές άργιλοι, ασβεστολιθικές ροές και κλαστικά ιζήματα χερσαίας προέλευσης	Ωκεάνιος Φλοιός
2 °	Σερπεντινικά σώματα, Pillow βασάλτες και υποκείμενα πλέγματα φλεβών	
3 °	Υδροθερμικά μεταμορφωμένοι, σε άγνωστο βαθμό και βάθος, γάββροι, βασάλτες και δολερίτες μεσσωκεάνιας ράχης	
-	Μανδυακό λερζόλιθος	Μανδύας

Σε κάθε γεωτεκτονικό περιβάλλον μάγμα θα παραχθεί όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει την γραμμή της solidus για τα πετρώματα που υπάρχουν σε εκείνη την περιοχή. Ως πηγές του μάγματος σε ένα ensimatic νησιώτικο τόξο θεωρούνται (Wilson 1989):

1) Η σφήνα του υπερκείμενου μανδύα αποτελούμενη από πάνω προς τα κάτω από:

- Μια πυκνή ωκεάνια λιθόσφαιρα 40-70 χλμ από δύστηκτο λερζόλιθο και χαρτζβουργίτη, ακόμη και υπό παρουσία ρευστής φάσης
- Μια ζώνη με πιο εύηκτο λερζόλιθο προέλευσης ασθenoσφαιρικού άνω μανδύα, του οποίου η πυκνότητα εξαρτάται από την γεωμετρία του τόξου κάθε φορά. Γενικά παρατηρείται πως δεν λαμβάνει χώρα επιφανειακή ηφαιστειότητα όταν δεν υπάρχει πρίσμα ασθenoσφαιρας πάνω από την βυθιζόμενη πλάκα λόγω μικρής κλίσης βύθισης της. Αυτό πρέπει να έχει θεμελιώδεις επιπλοκές σε μοντέλα γένεσης μάγματος στα νησιώτικα τόξα

2) Η ωκεάνια λιθόσφαιρα με την σύσταση που περιγράφηκε παραπάνω, η οποία θα μπορούσε να εμπλακεί στην γένεση μάγματος σε δύο ξεχωριστά περιβάλλοντα:

- Στο πάνω μέρος της βυθιζόμενης πλάκας
- Στην βάση της ηφαιστειακής ακολουθίας του νησιώτικου τόξου, καθώς στα ensimatic νησιώτικα τόξα το τόξο χτίζεται πάνω σε θεμέλια βυθισμένων ωκεάνιων πλακών

3) Θαλάσσιο νερό που παρέχει H_2O και είναι θεμελιώδους σημασίας για την γένεση μάγματος στα νησιώτικα τόξα. Αυτό προέρχεται είτε από απευθείας κυκλοφορία νερού

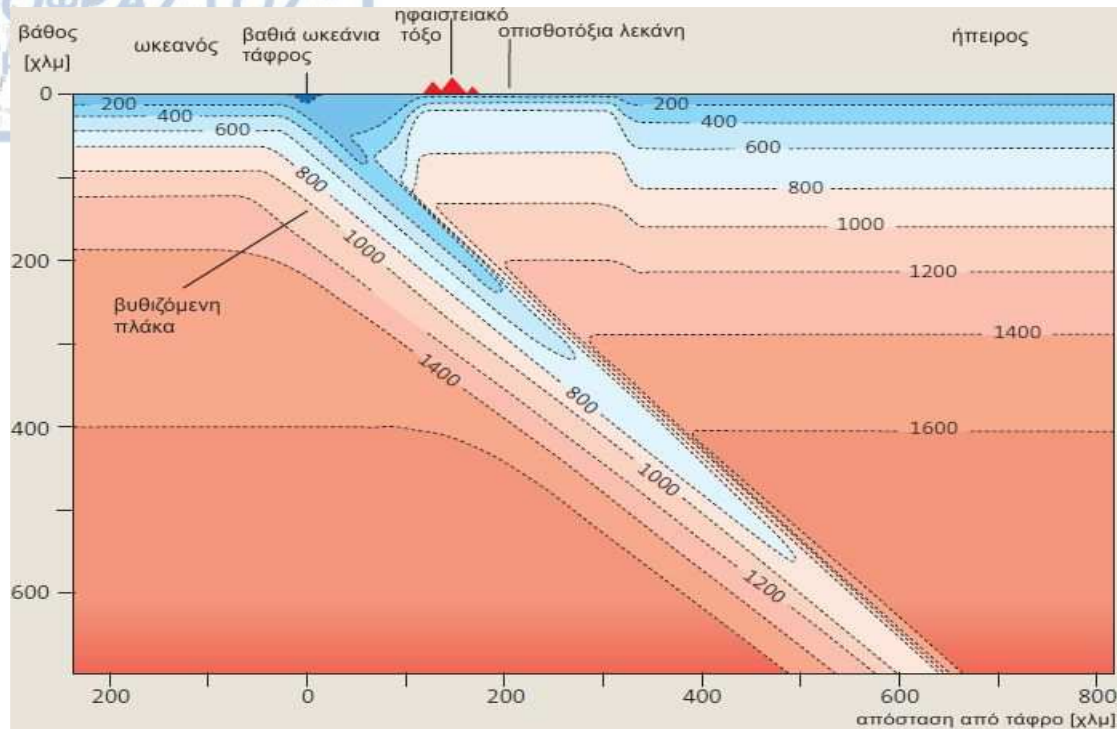
στον φλοιό του τόξου, είτε από την υδροθερμική μεταμόρφωση της βυθιζόμενης πλάκας, που θα αναφερθεί παρακάτω.

Τα είδη των πετρωμάτων που με την μερική τήξη τους δίνουν το μάγμα είναι:

- Αμφιβολίτης με την παρουσία ή μη της υγρής φάσης
- Εκλογίτης με την παρουσία ή μη της υγρής φάσης
- Λερζόλιθος με την παρουσία της υγρής φάσης
- Λερζόλιθος που έχει τροποποιηθεί από αντίδρασή του με ένυδρο πυριτικό μάγμα δημιουργούμενο από την μερική τήξη της βυθιζόμενης πλάκας

3.1.1 Θερμικό μοντέλο

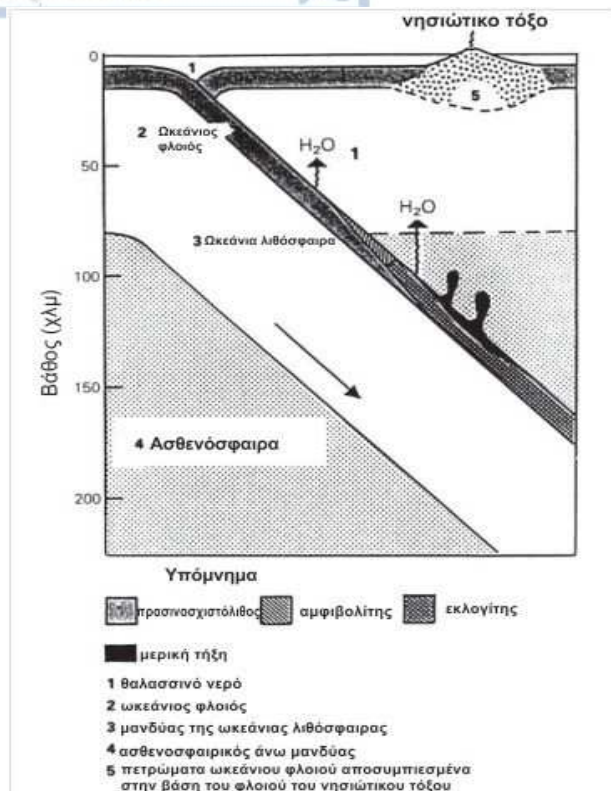
Η κατανόηση των διαδικασιών γένεσης μάγματος που οδηγούν στην ηφαιστειότητα ενός νησιώτικου τόξου, των χαρακτηριστικών και της κατανομής της σεισμικής δραστηριότητας εντός και γύρω από την βυθιζόμενη πλάκα είναι δύσκολη χωρίς πρώτα να μελετηθεί η ταξινόμηση στον χώρο των θερμοκρασιών και πιέσεων σε αυτό το γεωτεκτονικό περιβάλλον (Wilson 1989). Σύμφωνα με τον Frisch (2011) η κατανομή των ισόθερμων, οι οποίες είναι γραμμές ίσων θερμοκρασιών, διαφέρει εντός και εκτός του συστήματος του νησιώτικου τόξου. Υπό κανονικές συνθήκες στο βάθος των 50 χλμ, που αντιστοιχεί σε πίεση 1.5 GPa, οι θερμοκρασίες κυμαίνονται γύρω στους 800-900 °C. Εν αντιθέσει, ωκεάνια λιθόσφαιρα που φτάνει στο ίδιο βάθος σε μια ζώνη υποβύθισης θα φτάσει σε θερμοκρασίες μεταξύ 200 και πάνω από 500 °C. Η χαμηλότερη τιμή αντιστοιχεί σε υποβύθιση παλιάς, ψυχρής και η υψηλότερη σε νέας, θερμής πλάκας. Η αντίθεση στις θερμοκρασίες γίνεται πιο αισθητή βαθύτερα από τα μοτίβα των ισόθερμων. Οι γραμμές των ισόθερμων εντός της ζώνης υποβύθισης κατέρχονται (decline) προς τα βαθύτερα κάτω από την βυθιζόμενη πλάκα, διότι τα πετρώματα είναι κακοί αγωγοί της θερμότητας και χρειάζονται χιλιάδες χρόνια για να προσαρμοστούν στις υψηλές θερμοκρασίες του μανδύα. (Σχ. 3.1.1.1) Πάραυτα η πίεση στην βυθιζόμενη πλάκα αυξάνεται άμεσα αναλογικά με την αύξηση του βάθους λόγω πίεσης από τα υπερκείμενα στρώματα και πετρώματα. Έτσι δημιουργείται μεταμόρφωση χαμηλής θερμοκρασίας, αλλά υψηλής πίεσης που είναι χαρακτηριστική σε περιβάλλοντα υποβύθισης, όπως το νησιώτικο τόξο.



Σχήμα 3.1.1.1. Μοντελοποίηση με υπολογιστή της κατανομής των θερμοκρασιών, σε °C, μιας ζώνης υποβύθισης (τροποποιήθηκε από Frisch 2011)

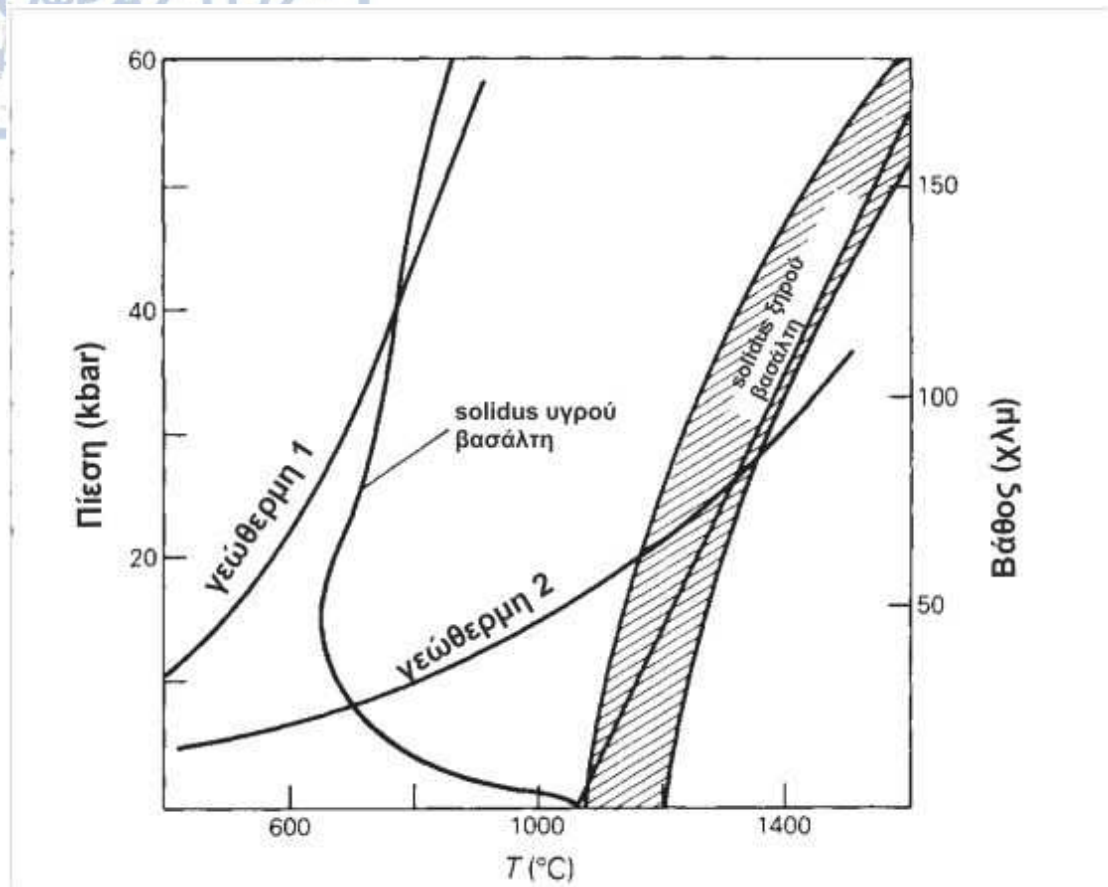
Όσο βαθύτερα βυθίζεται η κρύα πλάκα τόσο θερμαίνεται σταδιακά από την τριβή της με την υπερκείμενη πλάκα και από την περιβάλλουσα θερμότητα του μανδύα. Λόγω αυξανόμενης πίεσης και θερμοκρασίας μεταμορφώνονται υδροθερμικά τα βασαλτικά συστατικά της ωκεάνιας πλάκας, σε βάθη που κυμαίνονται μεταξύ 80 έως 125 χλμ και μετατρέπονται σε πρασινοσχιστόλιθο, αμφιβολίτη, γλαυκοφάνιτη και σε εκλογίτη (Wilson 1989). Σύμφωνα με τον Frisch (2011), στη διάρκεια υδροθερμικής μεταμόρφωσης αφυδατώνονται ένυδρα ορυκτά των βασικών πετρωμάτων της ωκεάνιας πλάκας, όπως ζεόλιθος, χλωρίτης, επίδοτο, αμφιβολίτης και απελευθερώνεται H_2O σαν ξεχωριστή ρευστή φάση. Τα αφυδατωμένα πλέον ορυκτά γίνονται ασταθή και αντικαθίστανται από άλλα. Μόλις παραχθεί η ρευστή φάση, μια ποσότητα της θα δεσμευθεί από άλλα ένυδρα, ανθεκτικά σε υψηλή πίεση, ορυκτά, όπως λοσονίτη, ζοϊσίτη, γλαυκοφάνη. Η υπόλοιπη, εισδύει μαζί με προϊόντα μερικής τήξης στην υπερκείμενη μανδυακή σφήνα ή μεταφέρεται βαθύτερα ως ενδοκρυσταλλικό πορώδες ρευστό (Wilson 1989 και Frisch 2011). Στην μανδυακή σφήνα αντιδρούν και χάνουν την χημική τους ταυτότητα και ως αποτέλεσμα χαμηλώνει η solidus του μανδύα και ενισχύεται η μερική του τήξη. Το ακριβές βάθος στο οποίο θα συμβεί η αλλαγή στην μεταμόρφωση διαφέρει από τόξο σε τόξο καθώς εξαρτάται από το καθεστώς θερμότητας που επικρατεί εντός της βυθιζόμενης πλάκας κάθε φορά. Το καθεστώς θερμότητας εξαρτάται από τον συνδυασμό της ηλικίας της βυθιζόμενης πλάκας, της γωνίας και του ρυθμού βύθισής της (Wilson 1989). Το φαινόμενο της υδροθερμικής μεταμόρφωσης απεικονίζεται στο σχήμα 3.1.1.2. Εξίσου σημαντικά με τα βασαλτικά συστατικά συμβάλλουν στην αφυδάτωση της βυθιζόμενης ωκεάνιας πλάκας και τα ωκεάνια ιζηματογενή πετρώματα και τα θραύσματα ηπειρωτικού φλοιού που βυθίζονται μαζί της. Τα δεύτερα περνούν την ίδια διαδοχή βαθμών μεταμόρφωσης με τα πρώτα, απελευθερώνοντας νερό που προστίθεται στην ρευστή φάση, αν και λόγω επιβολής τους σε

υψηλής πίεσης μεταμόρφωση συνεχίζουν να περιέχουν ένυδρα ορυκτά όπως φεγγίτη, καρφόλιθο, χλωριτοειδή και λοσσονίτη (Frisch 2011).



Σχήμα 3.1.1.2 1)θαλασσινό νερό, 2)ωκεάνια λιθόσφαιρα, 3)μανδύας της ωκεάνιας λιθόσφαιρας, 4) ασθενοσφαιρικός άνω μανδύας, 5) πετρώματα ωκεάνιου φλοιού αποσυμπιέζονται στην βάση του φλοιού του νησιώτικου τόξου (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

Στο σχήμα 3.1.1.3 απεικονίζονται δύο μοντέλα ελάχιστων συνθηκών που πρέπει να επικρατούν προκειμένου να προκληθεί μερική τήξη (solidus) βασικών πετρωμάτων σε βυθιζόμενη ωκεάνια πλάκα. Το ένα είναι υπό άνυδρες και το άλλο υπό κορεσμένες σε νερό συνθήκες.



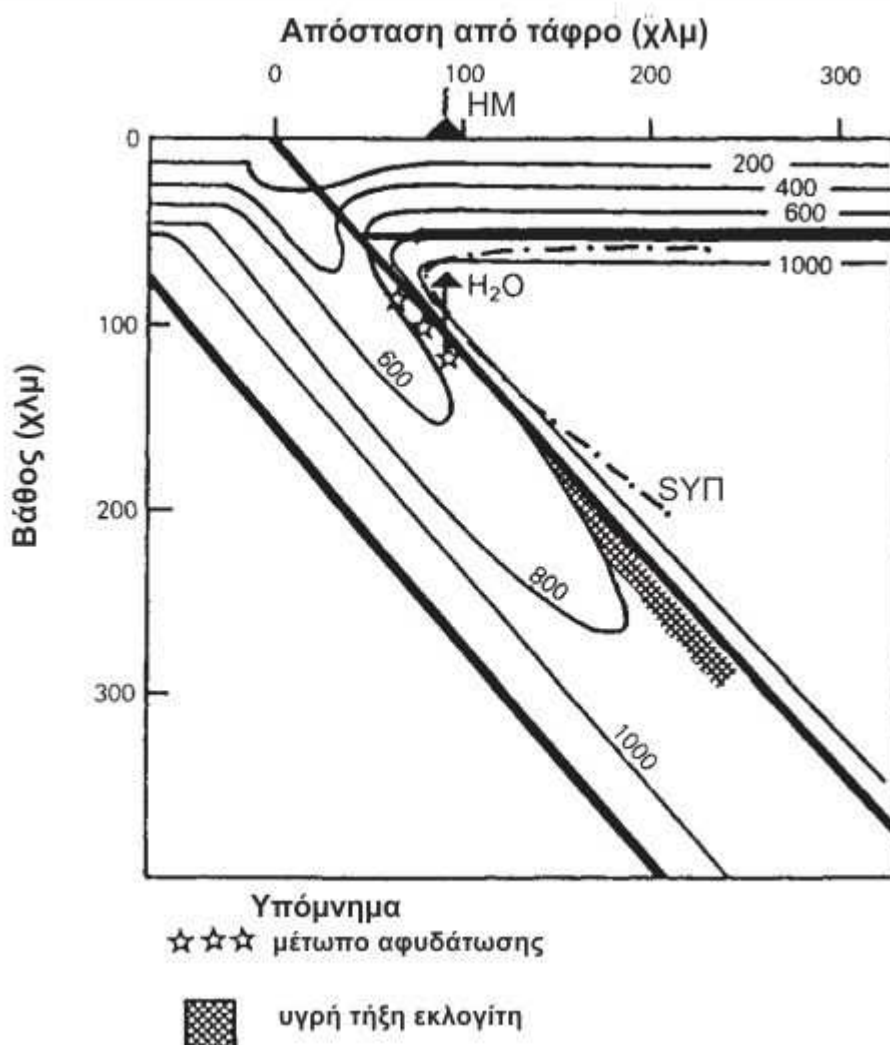
Σχήμα 3.1.1.3 Solidi για βασικά πετρώματα κάτω από άνυδρες και κορεσμένες με νερό συνθήκες. Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει την liquidus (ενδεικτική καμπύλη της θερμοκρασίας πάνω από την οποία το υλικό βρίσκεται πλήρως σε υγρή φάση) ανδεσιτών. Οι γεώθερμες 1 και 2 αποτελούν δύο δυνητικές γεωθερμικές βαθμίδες εντός του άνω μέρους της βυθιζόμενης πλάκας. Γεώθερμη 1: Μοντέλο κρύας πλάκας, όπου το άνω μέρος της πλάκας ψυχραίνεται εξαιτίας ενδοθερμικών αντιδράσεων αφυδάτωσης. Γεώθερμη 2: Μοντέλο θερμής πλάκας, όπου το άνω μέρος της πλάκας θερμαίνεται εξαιτίας επιδράσεων τριβής (κατά Gill 1981, παρ.8.1, σελ.232, τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

Σύμφωνα με τη Wilson (1989) η παρουσία του νερού χαμηλώνει την solidus κατά μερικές εκατοντάδες βαθμούς. Προκειμένου να είναι δυνατή η πρόβλεψη του βάθους στο οποίο ξεκινάει η μερική τήξη της ωκεάνιας πλάκας, πρέπει να είναι γνωστά τα εξής:

- Η γεωθερμική βαθμίδα (ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας με την αύξηση του βάθους κάτω από την επιφάνεια της Γης) στο άνω τμήμα της βυθιζόμενης πλάκας
- Η ποσότητα νερού στο άνω τμήμα της βυθιζόμενης πλάκας

Στο μοντέλο της κρύας πλάκας η μερική τήξη ξεκινάει σε βάθη όπου επικρατούν κορεσμένες σε νερό συνθήκες, ενώ στο μοντέλο θερμής πλάκας μπορεί να ξεκινήσει σε πολύ ρηχά βάθη με ποικιλία στις τιμές περιεχόμενου νερού. Στο σχήμα 3.1.1.3 η σκιασμένη περιοχή του εύρους των liquidus θερμοκρασιών των ανδεσιτών, δίνεται ως μέτρο σύγκρισης. Υποδηλώνεται πως η παραγωγή εκρηκτικών ανδεσιτών γίνεται υπό άνυδρες συνθήκες αν αυτοί είναι το άμεσο αποτέλεσμα της μερικής τήξης της ωκεάνιας πλάκας. Στο θερμικό μοντέλο του σχήματος 3.1.1.4 (παρόμοιο με το μοντέλο ψυχρής πλάκας) φαίνεται πως η μερική τήξη του υγρού εκλογίτη μπορεί να γίνει σε βάθη μεγαλύτερα των 150 χλμ. Όμως η solidus του υγρού εκλογίτη βρίσκεται ουσιαστικά υποπαράλληλα με την επάνω

επιφάνεια της βυθιζόμενης πλάκας . Γιαυτό το αν θα τηχθεί ή όχι η ωκεάνια πλάκα επηρεάζεται πολύ ακόμη και από μικρές μεταβολές στην κατανομή των ισόθερμων.



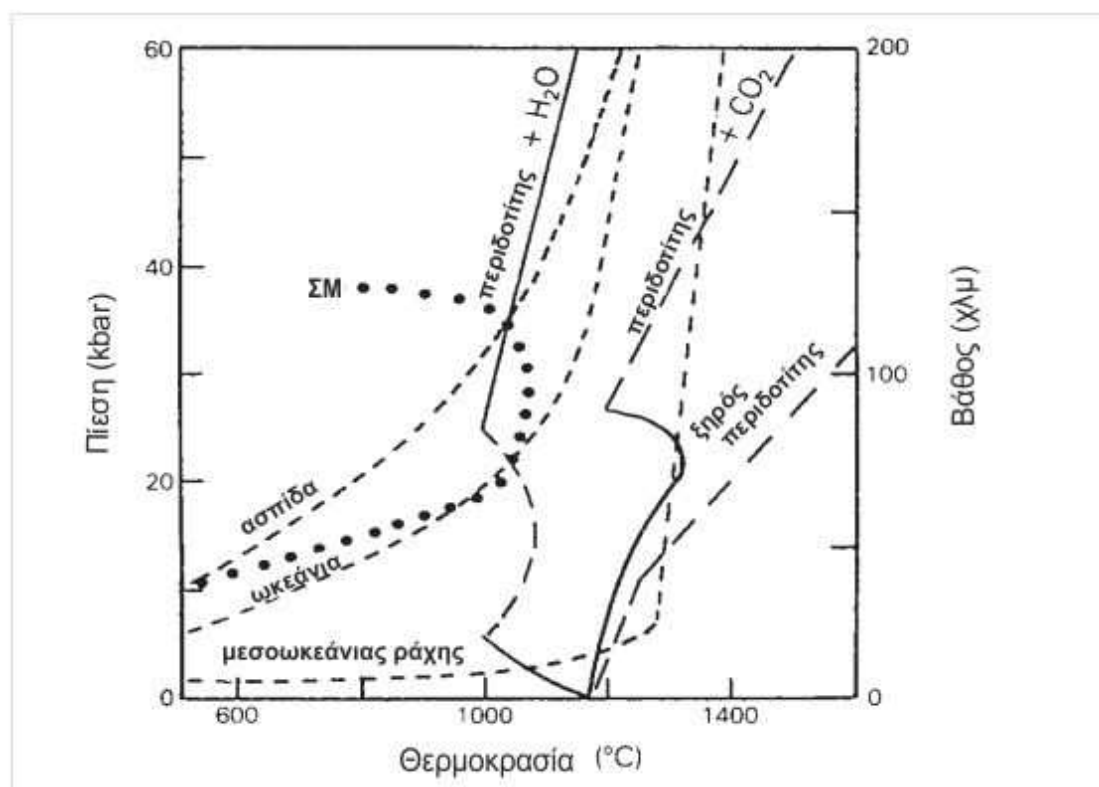
Σχήμα 3.1.1.4 Θερμικό μοντέλο υποβύθισης 100 χλμ παχύ ωκεάνιου φλοιού κάτω από 50 χλμ παχύ ωκεάνιο φλοιό. Η ροή της ασθενόσφαιρας συγκεντρώνει τις ισόθερμες στην γωνία του πρίσματος κοντά στην βάση της λιθόσφαιρας του τόξου. Η solidus του υγρού περιδοτίτη(SYΠ) βρίσκεται απευθείας πάνω από το μέτωπο αφυδάτωσης, σε αυτό το μοντέλο. Επομένως θα λάβει χώρα μερική τήξη του μέρους της υπερκείμενης σφήνας μανδύα που είναι ασθενόσφαιρα. Η σκιασμένη περιοχή αντιπροσωπεύει την ζώνη όπου η θερμοκρασία της solidus του υγρού εκλογίτη υπερβαίνεται, άρα θα γίνει μερική τήξη της ωκεάνιας λιθόσφαιρας. Για το συγκεκριμένο θερμικό μοντέλο αυτό δεν συμβάλλει στην ηφαιστειότητα του τόξου (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

Για την εκτίμηση της συμπεριφοράς σε μερική τήξη των ιζηματογενών πετρωμάτων και θραυσμάτων ηπειρωτικού φλοιού δεν υπάρχουν ακόμη διαθέσιμα μοντέλα για άνυδρες και κορεσμένες σε νερό συνθήκες.

3.1.2 Μανδυακή Σφήνα (mantle wedge)

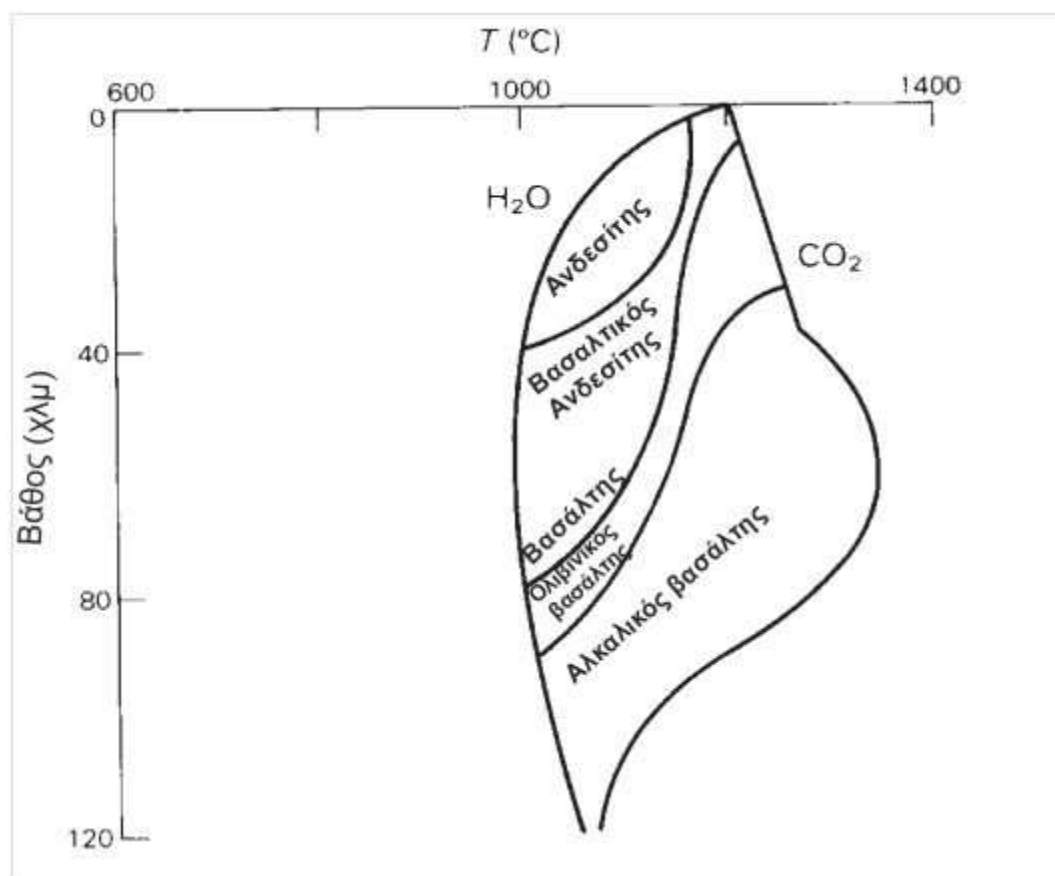
Η μεγαλύτερη ποσότητα των τηγμένων ουσιών που απαρτίζουν το μάγμα σε ένα ensimatic νησιώτικο τόξο, δημιουργείται από την μερική τήξη του ασθενοσφαιρικού υλικού

στην σφήνα του μανδύα επάνω από την βυθιζόμενη ωκεάνια πλάκα (Wilson 1989). Συγκεκριμένα προκαλείται μερική τήξη μανδυακού λερζόλιθου έπειτα από αντίδραση με υδατικά υγρά ή υδάτικα πυριτικά τήγματα από την ωκεάνια πλάκα, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η έναρξη της μερικής τήξης στην σφήνα του μανδύα εξαρτάται από την γεωθερμική του βαθμίδα και την περιεχόμενη ποσότητά του σε πτητικά. Για την σφήνα του μανδύα μπορούν να επικρατούν δυο διαφορετικά συστήματα ελάχιστων συνθηκών για να προκληθεί η μερική του τήξη, το ένα είναι με ύπαρξη H_2O ή CO_2 , άρα "υγρές" συνθήκες και το άλλο δίχως ύπαρξη νερού, άρα άνυδρες ή "ξηρές" συνθήκες. Στην πρώτη περίπτωση οι τιμές ελάχιστης θερμοκρασίας τήξης κατεβαίνουν πολύ, φτάνοντας ως τους $1000\text{ }^{\circ}C$, διότι το νερό ταπεινώνει το όριο τήξης των πετρωμάτων όταν εισέρχεται στο κρυσταλλικό τους πλέγμα. Στο σχήμα 3.1.2.1 απεικονίζονται αρκετές διαφορετικές γεωθερμικές βαθμίδες ως σύγκριση. Η διακεκομμένη γραμμή MW του σχήματος 3.1.2.1 δείχνει ότι η κατανομή των πιθανών γεωθερμικών βαθμίδων της σφήνας του μανδύα είναι ασυνήθιστη. Αυτό οφείλεται στην επίδραση της βυθιζόμενης ψυχρής ωκεάνιας πλάκας. Στο συγκεκριμένο θερμικό μοντέλο η τήξη του λερζόλιθου είναι δυνατή μόνο υπό κορεσμένες σε νερό συνθήκες. Στις άνυδρες συνθήκες οι τιμές ελάχιστης θερμοκρασίας τήξης του λερζόλιθου είναι πιο αυξημένες σε σχέση με πριν, φτάνοντας πάνω από τους $1400^{\circ}C$ και η τήξη μπορεί να προκληθεί σε μικρότερα βάθη.



Σχήμα 3.1.2.1 Σύγκριση της γραμμής των στερεών του περιδοτίτη (λερζόλιθος μανδύα) παρουσία H_2O (0.4%) και CO_2 (5%) με τη γραμμή των στερεών υπό άνυδρες (στεγνές) συνθήκες. Η ποσότητα των πτητικών δεν είναι απαραίτητως πάντα αρκετή για να απελευθερωθεί ελεύθερη αέρια φάση (ατμός). Οι συνεχόμενες γραμμές απεικονίζουν τα σημεία των γραμμών των στερεών με συνύπαρξη αέριας φάσης. Οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν γεωθερμικές βαθμίδες ασπίδων, ωκεανού και μεσσωκεάνιας ράχης. Η διακεκομμένη γραμμή ΣΜ αντιπροσωπεύει την γεωθερμική βαθμίδα στην σφήνα του μανδύα κάτω από το τόξο του σχήματος 3.1.4 (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

Η τήξη στις άνυδρες συνθήκες, είναι ευρέως αποδεκτό, πως παράγει ρευστά βασαλτικής ή πικριτικής σύστασης. Όμως στις υγρές συνθήκες η σύσταση των ρευστών κοντά στις τιμές των γραμμών των στερεών (solidi) αλλάζει. Αυτό συμβαίνει επειδή παρά την συνεχή τροφοδότηση της σφήνας μανδύα σε ρευστά από την βυθιζόμενη πλάκα, η συνολική ποσότητα νερού της παραμένει χαμηλή. Έτσι το νερό των παραγόμενων κορεσμένων σε νερό τηγμάτων, σε συνθήκες θερμοκρασίας κοντά στην γραμμή των στερεών του λερζόλιθου, θα χάνονταν μέσα στο τήγμα εντός μερικών βαθμών θερμοκρασίας της γραμμής των στερεών. Η σύσταση θα άλλαζε σε βασάλη ή πικρίτη μη κορεσμένο σε νερό, όπως στις ξηρές συνθήκες. Εάν δεν συνέβαινε η παραπάνω διαδικασία τα μάγματα δεν θα μπορούσαν να ανέβουν μέχρι την επιφάνεια και να προκαλέσουν ηφαιστειότητα χωρίς να υποστούν εκτενή κλασματική κρυστάλλωση. Η μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό θα προξενούσε την κρυστάλλωσή τους και την απελευθέρωση αέριας φάσης μόλις ξεκινούσαν να ανεβαίνουν προς την επιφάνεια. Είναι πιθανό, βασάλτες υποκορεσμένοι σε νερό τέτοιου τύπου να αποτελούν το μητρικό μάγμα της ηφαιστειακής ακολουθίας των ensimatic νησιώτικων τόξων. Το μάγμα αυτό με την ανάδυσή του υπόκειται σε κλασματική κρυστάλλωση παράγοντας τα πιο όξινα μέρη. Στο σχήμα 3.1.2.2 παρουσιάζονται οι διαφορετικές συστάσεις τηγμάτων που προκύπτουν από την μερική τήξη λερζόλιθου υπό υγρές συνθήκες.



Σχήμα 3.1.2.2 Συστάσεις των τηγμάτων μανδυακού λερζόλιθου σε συνθήκες κοντά στις γραμμές των στερεών στο σύστημα λερζόλιθος- H_2O - CO_2 (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

Όπως αναφέρεται στην Wilson (1989) η σύσταση των μαγμάτων μερικής τήξης του μανδύα μπορεί να παρεκκλίνει από αυτή που φαίνεται στο σχήμα 3.1.2.2. Αυτό γίνεται στην

περίπτωση που η σφήνα του μανδύα θα αντιδράσει με υδροθερμικά ρευστά που αναδύονται από την βυθιζόμενη πλάκα, τα οποία περιέχουν μεγάλες περιεκτικότητες σε SiO_2 . Όπως το νερό, μειώνουν το όριο τήξης του λερζόλιθου. Συγκεκριμένα επεκτείνεται σημαντικά το πεδίο των ανδεσιτών και βασαλτικών ανδεσιτών προς μεγαλύτερα βάθη.

Συμπερασματικά τα τρία πιθανά σενάρια είναι τα εξής:

- Τήξη της βυθιζόμενης πλάκας και της σφήνας του μανδύα
- Αφυδάτωση της βυθιζόμενης πλάκας και τήξη της σφήνας του μανδύα
- Τήξη μόνο της βυθιζόμενης πλάκας

Από τα παραπάνω τρία, το τελευταίο ταιριάζει λιγότερο με τον τρόπο γένεσης της σύστασης των μαγμάτων των ensimatic νησιώτικων τόξων και έτσι είναι το λιγότερο πιθανό να συμβεί.

3.1.3 Ανάδυση του μάγματος στην επιφάνεια

Σύμφωνα με τον Frisch (2011) είναι αξιοσημείωτο το πώς στα νησιώτικα τόξα, που αποτελούν μέρος των πιο ψυχρών τεκτονικών ζωνών (βλέπε Σχ. 3.1.1.1), επιτυγχάνεται η ανάδυση ζεστού μάγματος που τροφοδοτεί τόσο έντονο μαγματισμό και ηφαιστειότητα. Η ηφαιστειότητα ξεκινάει ξαφνικά στο μαγματικό ή ηφαιστειακό μέτωπο. Η δημιουργία του μάγματος περιγράφηκε στις παραγράφους 3.1.1 και 3.1.2. Έχει παρατηρηθεί ότι η πιο βίαιη ηφαιστειότητα λαμβάνει χώρα ακριβώς πίσω από το μαγματικό μέτωπο, όπου η μεγάλη ποσότητα νερού που αντλείται από την ζώνη υποβύθισης εισέρχεται στην σφήνα του μανδύα. Με την αύξηση του βάθους της ζώνης υποβύθισης, που γίνεται με την συνεχή βύθιση της ωκεάνιας πλάκας, αυξάνεται και το βάθος των μαγματικών πηγών. Η ποσότητα νερού που απελευθερώνεται από την ζώνη υποβύθισης μειώνεται, καθώς η απόσταση αυξάνει από το μαγματικό μέτωπο προς την οπισθοτόξια λεκάνη. Γι αυτό στην οπισθοτόξια λεκάνη η ηφαιστειότητα είναι λίγη έως μηδαμινή. Η καθοδική κίνηση της ζώνης υποβύθισης προξενεί ένα καθοδικής κίνησης ρεύμα στην υπερκείμενη ασθενόσφαιρα. Ως εκ τούτου, ποσότητες ζεστής ασθενόσφαιρας μεταφέρονται από πίσω προς τα εμπρός. Με αυτό τον τρόπο η σφήνα του μανδύα συνεχώς τροφοδοτείται με νέο, θερμό μανδυακό υλικό. Σαν αποτέλεσμα κυριαρχεί μια γωνιώδης ροή υλικού μεταξύ βυθιζόμενης, υποκείμενης και υπερκείμενης πλάκας (Σχ. 3.1.3.1). Προτού η κορυφή της ζώνης υποβύθισης φθάσει στην ασθενόσφαιρα, έχει ήδη ξεκινήσει η παραγωγή νερού από αυτήν, έτσι συμπύπτει με την ζώνη όπου η βυθιζόμενη πλάκα ολισθαίνει και τρίβεται με την υπερκείμενη πλάκα.

Προκαλείται μετατροπή εντός του λιθοσφαιρικού μανδύα της υπερκείμενης της ζώνης υποβύθισης πλάκας και παράγονται μεγάλες ποσότητες ένυδρων ορυκτών, όπως αμφιβολίτης και σερπεντίνης. Το όριο μεταξύ των πλακών παραμορφώνεται καθώς τραβιέται προς τα κάτω κατά μήκος της ζώνης υποβύθισης, λόγω αποδυνάμωσης του μανδύα της υπερκείμενης πλάκας από την σερπεντινίωση. Ο αμφιβολίτης και σερπεντίνης γίνονται ασταθή σε μεγαλύτερα βάθη και θερμοκρασίες και μετατρέπονται σε άνυδρο πυρόξενο και ολιβίνη. Από αυτή την αντίδραση απελευθερώνεται περισσότερο νερό που αναδύεται και εμπλουτίζει την περιεκτικότητα νερού εντός της ζώνης υποβύθισης, συμβάλλοντας στην τήξη. Από την συγχώνευση άμορφων μαζών μάγματος σχηματίζονται μεγάλες μάζες ικανές να σχηματίσουν διάπυρα που αναδύονται ενάντια στα καθοδικής κατεύθυνσης ροής μανδυακά ρεύματα. Τα διάπυρα είναι τεράστιου μεγέθους διεισδυτικά σώματα που λέγονται βαθύλιθοι.

Η γένεση μάγματος στα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια είναι περίπου πανομοιότυπη με των ensimatic νησιωτικών τόξων (παρ.3.1) μέχρι το σημείο της μετασώματωσης της μανδυακής σφήνας από πυριτικά και υδατικά ρευστά και την δημιουργία βαθύλιθων που αρχίζουν να αναδύονται προς την επιφάνεια. Η ουσιαστική διαφοροποίηση ξεκινά στην ανάδυση προς την επιφάνεια, διότι στο σύστημα των ενεργών περιθωρίων η υπερκείμενη πλάκα είναι ηπειρωτική αντί ωκεάνιας. Όπως αναφέρεται στον Yanagi (2011) ο ηπειρωτικός φλοιός διαφέρει από τον ωκεάνιο στην προέλευση, την χημική σύσταση και την δομή. Η σύσταση του ωκεάνιου φλοιού περιγράφηκε στην παράγραφο 3.1. Η σύσταση του

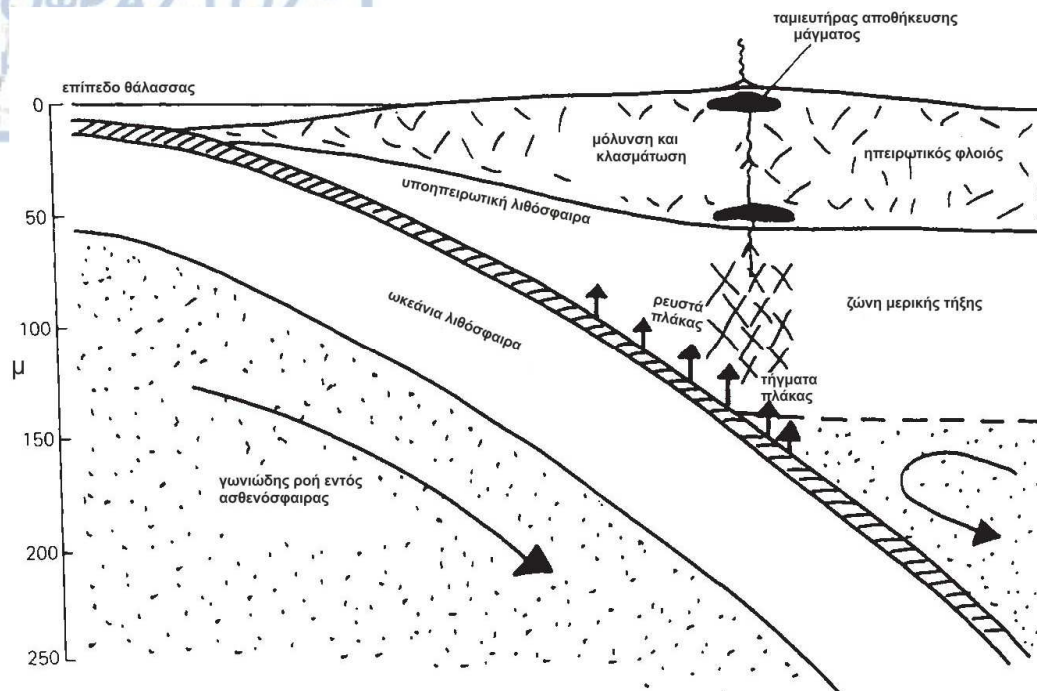
ηπειρωτικού φλοιού περιγράφεται με βάση το μοντέλο των Rudnick&Fountain (1995), που βασίστηκε στην ταχύτητα επιστροφής ανακλώμενων επιμηκών κυμάτων από το κάθε στρώμα. Το σύνολο των στρωμάτων είναι 4 και φαίνονται στον πίνακα 3.2.1.

P-κύματα(χλμ/s)	Στρώμα	Ομάδα πετρωμάτων (Σύσταση)	Τύπος Φλοιού
<5.7	1 ^ο	Ιζηματογενή και ηφαιστειακά πετρώματα	Ανώτερος Γρανιτικός φλοιός , βάθος 20-28χλμ
5.7-6.4	2 ^ο	Γρανιτικά πλουτωνικά και χαμηλής μεταμόρφωσης πετρώματα	
6.4-7.1	3 ^ο	Γαββρικά πετρώματα με ενδιάμεσες μικρές στρώσεις πηλιτικών, γρανουλιτικής φάσης, μεταμορφωμένων πετρωμάτων	Ενδιάμεσος γαββρικός φλοιός, πάχη 9-21χλμ
7.1-7.6	4 ^ο	Βρίσκεται επάνω στον μανδύα	Κατώτερος φλοιός, πολύ λεπτός ή λείπει πολλές φορές

Σε πολλές περιπτώσεις το τέταρτο στρώμα είναι πολύ λεπτό, είτε λείπει παντελώς. Όταν συμβαίνει αυτό, το τρίτο στρώμα είναι αυτό που βρίσκεται επάνω στον μανδύα. Το δεύτερο και τρίτο στρώμα πάντα υπάρχουν σε έναν ηπειρωτικό φλοιό. Το όριο διαχωρισμού των δύο παραπάνω στρωμάτων υπάρχει σε βάθος 20-28 χλμ κάτω από επιφάνεια ασπίδων, πλατφόρμων ή Μεσοζωικών, Καινοζωικών ορογενετικών ζωνών ή ώριμων νησιώτικων τόξων. Ο ηπειρωτικός φλοιός χωρίζεται σε ανώτερο γρανιτικό και κατώτερο γαββρικό φλοιό. Ο ανώτερος φλοιός απαρτίζεται από το πρώτο και δεύτερο στρώμα, τα οποία έχουν κοινή την γρανιτική σύσταση και ο κατώτερος από το τρίτο στρώμα.

3.2.1 Πετρογενετικό μοντέλο

Σύμφωνα με τη Wilson (1989) τα μάγματα στα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια προκύπτουν από μια περίπλοκη αλληλεπίδραση διαδικασιών που συμβαίνουν στον μανδύα και στον ηπειρωτικό φλοιό. Στον μανδύα γίνεται μερική τήξη όπως περιγράφηκε στην παράγραφο 3.1 και κλασματική κρυστάλλωση. Στον ηπειρωτικό φλοιό, λόγω της δραστικά διαφορετικής σύστασής του από την βυθιζόμενη ωκεάνια πλάκα γίνεται μόλυνση του μάγματος και κλασματική κρυστάλλωση (Σχ. 3.2.1.1)



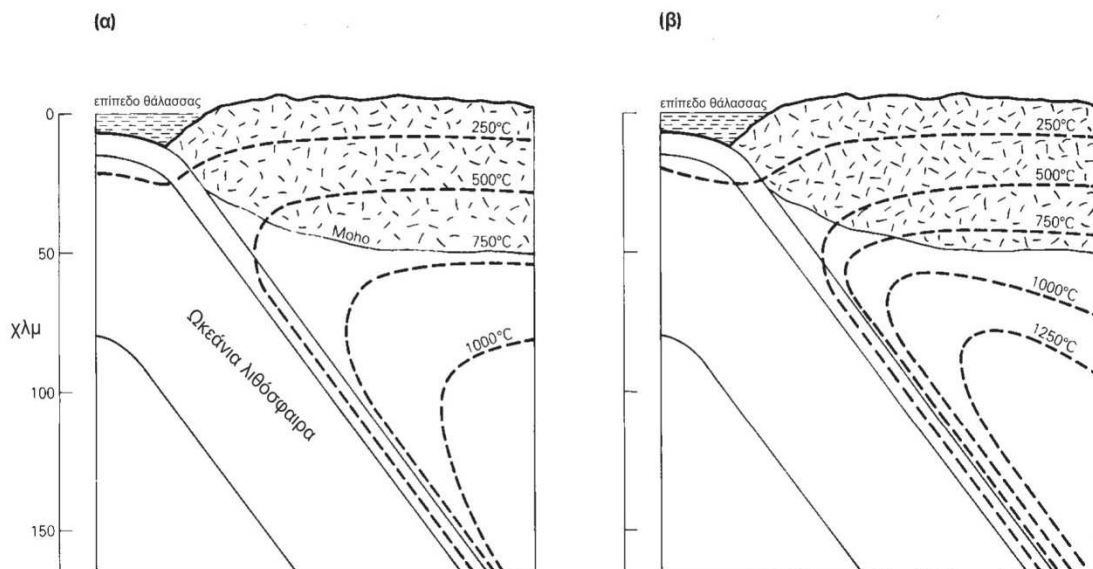
Σχήμα 3.2.1.1 Σχηματική διατομή ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου με υπερκείμενη πλάκα 50 χλμ (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

Εκτός από την συμμετοχή ηπειρωτικού φλοιού, μια ακόμη διαφορά μεταξύ του μοντέλου του σχήματος 3.2.1.1 και του σχήματος 3.1.1.2 είναι και το πάχος της ηπειρωτικής λιθόσφαιρας. Αυτή είναι της τάξης των 140 χλμ κάτω από τις κεντρικές Άνδεις, ενώ μια τυπική ωκεάνια λιθόσφαιρα είναι 70-80 χλμ. Στο μοντέλο του σχήματος 3.3.1.1 ο ηπειρωτικός φλοιός είναι 50 χλμ, ενώ μια τυπική ωκεάνια πλάκα είναι μόλις 10 χλμ. Είναι αναπόφευκτο ένα μάγμα προερχόμενο από μερική τήξη της μανδυακής σφήνας, κατά την διαδρομή του μέσω τόσο παχύ φλοιού διαφορετικής σύστασης να μην αντιδράσει με αυτόν. Έτσι τα μάγματα που έχουν μόλις σχηματιστεί, περιοδικά αναδύονται προς τα πάνω. Κατά την ανάδυσή τους η σύσταση του μάγματος αλλάζει με την διαφοροποίηση. Ορυκτά με υψηλά σημεία τήξης ψύχονται σχηματίζοντας κρυστάλλους και απομακρύνονται από το μάγμα με κλασματική κρυστάλλωση ή λόγω βαρύτητας. Καθώς τα μάγματα διέρχονται μέσω του ηπειρωτικού φλοιού τα πετρώματα του φλοιού μπορούν να αφομοιωθούν από το μάγμα ή να προκληθεί χημική αντίδραση μεταξύ των δύο και το μάγμα να «μολυνθεί». Με αυτόν τον τρόπο η σύσταση του μάγματος αλλάζει συνεχώς από την σύσταση του αρχικού τήγματος της μανδυακής σφήνας. Στις περιπτώσεις που το μάγμα διέρχεται από νέο ηπειρωτικό φλοιό, τα ισοτοπικά δεδομένα Sr, Pb, Nd μπορεί να δίνουν την λανθασμένη εντύπωση ότι το μάγμα δεν μολυνθηκε, διότι τα πετρώματα τέτοιου φλοιού έχουν παρόμοια ισοτοπικά χαρακτηριστικά με τα δημιουργούμενα από την μανδυακή σφήνα μάγματα. Τα μάγματα μπορούν επιπλέον να επηρεαστούν από ηπειρωτικό φλοιό λόγω αντίδρασής τους με χερσαία ιζήματα που βυθίζονται μαζί με την ωκεάνια πλάκα. Τέλος η μανδυακή σφήνα που βρίσκεται πάνω από την βυθιζόμενη ωκεάνια πλάκα έχει λιθοσφαιρικά χαρακτηριστικά. Αυτό συμβαίνει διότι η ηπειρωτική λιθόσφαιρα για το μεγάλο χρονικό διάστημα που υπάρχει, μπορεί να μετασφαιρωθεί σημαντικά και να εμπλουτιστεί ειδικά αν αποτελούσε έναν σταθερό ηπειρωτικό φλοιό. Ο ωκεάνιος φλοιός καταστρέφεται και δημιουργείται ξανά στις μεσοωκεάνιες ράχες. Η ανάδυση ρευστών από την αφυδάτωση της ωκεάνιας πλάκας προξενεί μερική τήξη αυτής της υποηπειρωτικής

λιθόσφαιρας, που λόγω διαφορετικών γεωχημικών χαρακτηριστικών της, το σύστημα είναι πιο περίπλοκο από τα ensimatic τόξα.

3.2.2 Θερμικό μοντέλο ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων και διαδικασίες μερικής τήξης

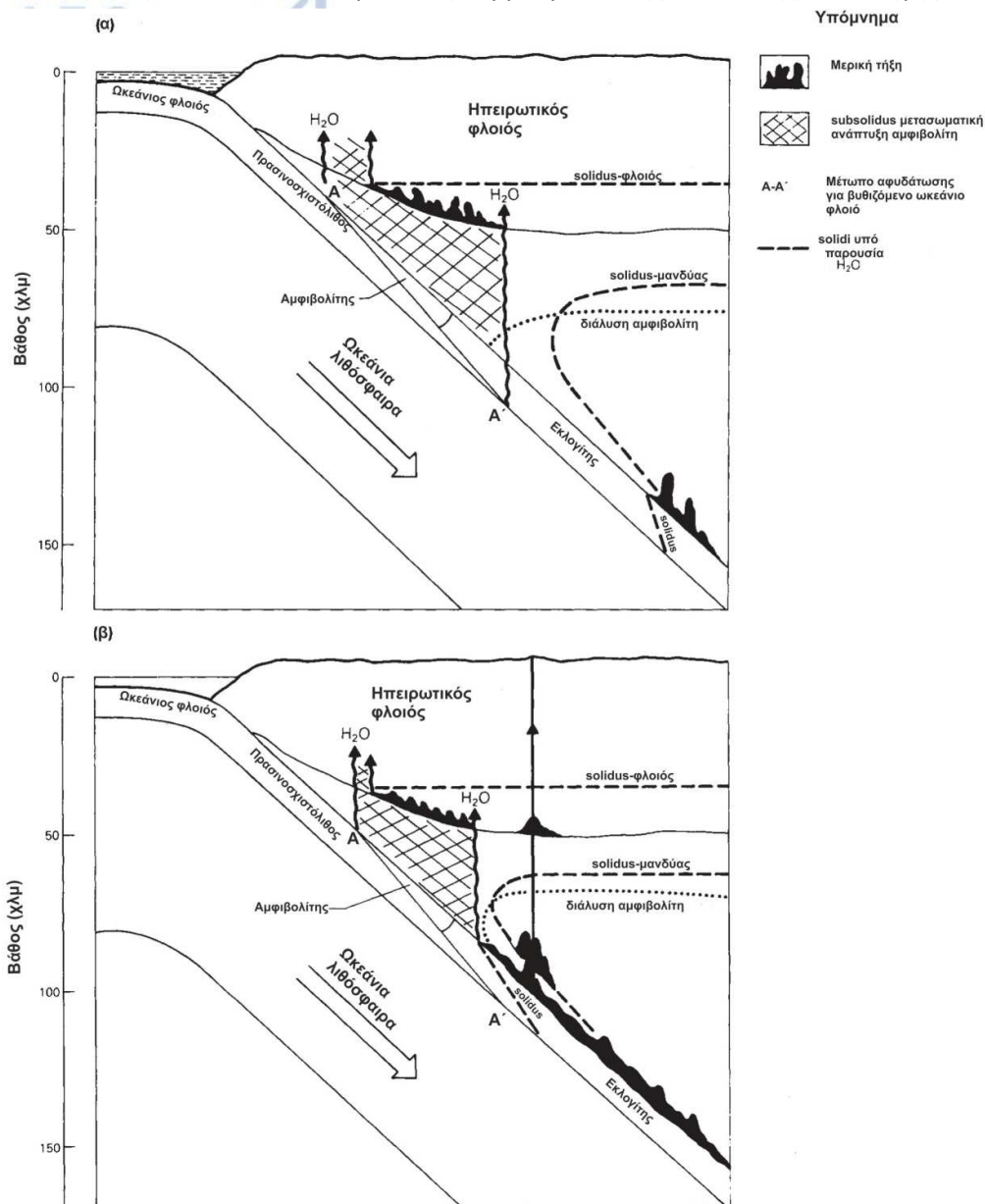
Οι τρεις κύριες πηγές που με την μερική τους τήξη τροφοδοτούν το μάγμα στο περιβάλλον ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων είναι η βυθιζόμενη ωκεάνια πλάκα, η σφήνα του μανδύα και ο ηπειρωτικός φλοιός (Wilson 1989). Υπάρχουν δύο θερμικά μοντέλα για την μερική τήξη της μανδυακής σφήνας (τα θερμικά μοντέλα της τήξης της βυθιζόμενης πλάκας αναφέρονται στην παράγραφο 3.1.1), το ψυχρό και το θερμό μοντέλο (σχήμα 3.2.2.1). Στο ψυχρό μοντέλο η σφήνα του μανδύα ψυχραίνεται από την επίδραση της βύθισης της ψυχρής ωκεάνιας πλάκας, ενώ στο θερμό μοντέλο η σφήνα του μανδύα μπορεί να θερμανθεί από επαγόμενα ρεύματα μεταφοράς.



Σχήμα 3.2.2.1 Σχηματική απεικόνιση των δύο διαφορετικών θερμικών δομών ενός ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου, α)ψυχρό μοντέλο, β)θερμό μοντέλο (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

Παρατηρείται στο σχήμα 3.2.2.1 ότι στο θερμό μοντέλο οι ισόθερμες των 1000°C και 1200°C έχουν υψωθεί προς τα πάνω πιο εσωτερικά στον μανδύα, προκαλώντας περισσότερη μερική τήξη μανδυακού υλικού σε σχέση με το ψυχρό μοντέλο. Επιπροσθέτως η ισόθερμη των 750°C έχει υψωθεί εντός της βάσης του ηπειρωτικού φλοιού, αυξάνοντας την πιθανότητα μερικής τήξης του. Στο σχήμα 3.2.2.2 απεικονίζονται τα ίδια θερμικά μοντέλα με την προσθήκη της τοποθεσίας των solidi των τριών πηγών μερικής τήξης στα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια, υπό την παρουσία H₂O. Η γραμμή A-A' δείχνει το σημείο έναρξης ουσιαστικής αφυδάτωσης της ωκεάνιας πλάκας, που τυγχάνει να συμπίπτει με το όριο πρασινοσχιστολιθικής-αμφιβολιτικής φάσεως. Τα υδάτινα ρευστά εισέρχονται εντός της σφήνας του μανδύα, μέχρι την βάση του ηπειρωτικού φλοιού. Εκεί σε συνθήκες υποστερεάς κατάστασης (subsolidus) προάγουν την δημιουργία εκτεταμένα μετασωματικού αμφιβολίτη (σκιασμένες περιοχές). Οι διακεκομμένες γραμμές δείχνουν το μέγιστο βάθος σταθερότητας του αμφιβολίτη. Η μερική τήξη και στις τρεις πηγές θα γίνει

εκεί όπου θα εισέλθει το H_2O σε περιοχές από την πλευρά υψηλών θερμοκρασιών των solidus, δηλαδή εκεί που θα ξεπεραστεί η θερμοκρασία της solidus της κάθε πηγής.



Σχήμα 3.2.2.2 α) Ψυχρός μανδύας, κρύα βυθιζόμενη πλάκα, β) Θερμός μανδύας, θερμή βυθιζόμενη πλάκα. Απεικονίζεται η τοποθεσία όπου λαμβάνει χώρα μερική τήξη (βυθιζόμενη πλάκα, σφήνα μανδύα, ηπειρωτικός φλοιός) σε ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια για δύο διαφορετικά θερμικά μοντέλα (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

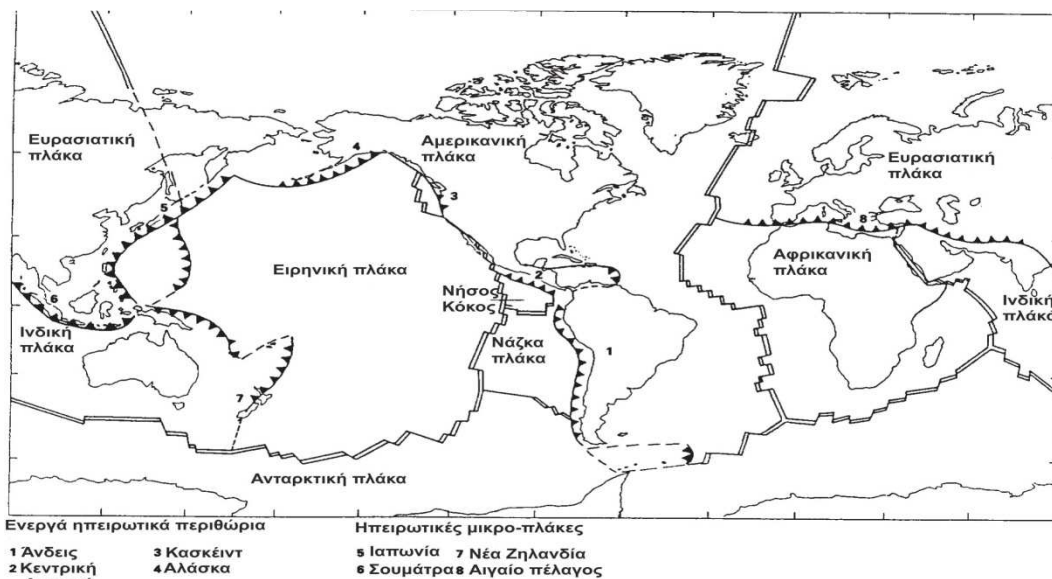
Το κοινό μεταξύ του ψυχρού και του θερμού μοντέλου είναι πως η ανάδυση των υδάτινων ρευστών από τον μετασωματωμένο μανδύα που διαπερνούν τον ηπειρωτικό φλοιό, μπορούν να προκαλέσουν την μερική τήξη του. Ωστόσο μόνο στο θερμό μοντέλο θα συμβεί εκτεταμένη μερική τήξη της σφήνας του μανδύα λόγω της εισόδου σε αυτήν ρευστών από την μερική τήξη της βυθιζόμενης πλάκας. Τα ρευστά μερικής τήξης του μανδύα ανέρχονται μέχρι την βάση του ηπειρωτικού φλοιού και μπορεί να αναμειχθούν με ανατηκτικά φλοιικά τήγματα.

4. Γεωχημεία

Για να εξεταστεί και να συγκριθεί η γεωχημεία των μαγμάτων των ensimatic, ensialic και ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων επιλέχθηκαν χημικές αναλύσεις πετρωμάτων από τις πιο αντιπροσωπευτικές περιοχές του κάθε γεωτεκτονικού περιβάλλοντος από την πηγή <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/> και σύμφωνα με τους χάρτες των σχημάτων 4.1, 4.2.



Σχήμα 4.1 Χάρτης όπου φαίνονται οι πιο χαρακτηριστικές περιοχές ensimatic, ensialic νησιώτικού τόξου και ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου (τροποποιήθηκε από Frisch 2011)



Σχήμα 4.2 Χάρτης με τα κυριότερα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια και συστήματα υποβύθισης που αφορούν ηπειρωτικές μικροπλάκες (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

- Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν χημικές αναλύσεις πετρωμάτων από την ίζου-Μπόνιν, τα τόξα Κέρμαντεκ, Τόνγκα, Σολομών, Μαριάνων, το αρχιπέλαγο Εβρίδων-Βανουάτου και τις μικρές Αντίλλες. Η χημική σύσταση των πετρωμάτων περιελάμβανε: βασάλτες, βασαλτικούς ανδεσίτες, ανδεσίτες, δακίτες, ρυόλιθους, γάββρους, γρανίτες, πικρίτες, σωσονίτες.

- Για τα ensialic νησιώτικα τόξα επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν χημικές αναλύσεις πετρωμάτων από τις Αλεούτιες νήσους, την Μπάντα, την Καμτσάτκι, την Κουρίλ και την Ρίου-Κίου. Η χημική σύσταση των πετρωμάτων περιελάμβανε: διορίτες, βασάλτες, βασαλτικούς ανδεσίτες, δακίτες, ρυοδακίτες, τρονγκεμίτες, γρανίτες, λαμπροφύρες, τραχειανδεσίτες, ρυόλιθους, κεροστιλβικούς ανδεσίτες.

- Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια επιλέχθηκαν να χρησιμοποιηθούν χημικές αναλύσεις πετρωμάτων από το Αιγαίο πέλαγος, τις Άνδεις, το Κασκέντ, την Κεντρική Αμερική και το Σουδάν. Η χημική σύσταση των πετρωμάτων περιελάμβανε: λαμπροφύρες, βασάλτες, ανδεσίτες, σωσονίτες, δακίτες, ρυοδακίτες, ρυόλιθους, βασάλτες, βασαλτικούς ανδεσίτες, τραχείτες και τοναλίτες.

Οι χημικές αναλύσεις από την προαναφερθείσα πηγή ήταν σε μορφή excel ξεχωριστά για την κάθε περιοχή στο οποίο περιλαμβάνονταν το όνομα των δειγμάτων, οι συντεταγμένες, οι ηλικίες, ο τύπος πετρώματος, οι χημικές αναλύσεις τους και οι τίτλοι των δημοσιευμένων εργασιών από τις οποίες προήλθαν. Λόγω του μεγάλου πλήθους των δειγμάτων, αυτά επεξεργάστηκαν ώστε να μειωθεί ο αριθμός τους. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν έπρεπε, οι χημικές αναλύσεις τους, να πληρούν τα εξής κριτήρια:

1. Το SiO_2 να είναι μεγαλύτερο από 45
2. Να έχουν τιμές για όλες ή τις περισσότερες σπάνιες γαίες
3. Να έχουν τιμές λόγων $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, ιδανικά και $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
4. Να έχουν τιμές για τα στοιχεία: Cs, Rb, Ba, Th, U, K, Ta, Nb, Ce, Pb, Sr, Nd, Hf, Zr, Sm, Ti, Tb, Y

Με βάση τα δείγματα που έμειναν αποφασίστηκε για την κάθε περιοχή να επιλεγούν περίπου 10 δείγματα για να χρησιμοποιηθούν στα γεωχημικά διαγράμματα που παρουσιάζονται παρακάτω. Στο excel της κάθε περιοχής η διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης τιμής SiO_2 διαιρέθηκε με το 10. Το αποτέλεσμα ήταν το βήμα επιλογής για τις τιμές SiO_2 των δειγμάτων. Για τιμές SiO_2 για τις οποίες υπήρχαν παραπάνω από ένα δείγματα, ανάλογα με τον αριθμό τους, επιλέχθηκε το μεσαίο. Στα δείγματα που τελικά επιλέχθηκαν, εξετάστηκαν οι τιμές των χημικών αναλύσεων και λόγων τους στο excel για την αξιοπιστία τους από τις δημοσιευμένες εργασίες.

Οι τιμές SiO_2 των τελικών δειγμάτων για τα ensimatic νησιώτικα τόξα κυμαίνονταν από 45.4-77.69, για τα ensialic νησιώτικα τόξα από 45.66-76.15 και για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια από 45.39-75.97. Ο Fe ανάχθηκε για όλα τα δείγματα σε FeO total.

Προτού γίνει η περιγραφή και σύγκριση των διαγραμμάτων θα γίνει μια πολύ σύντομη περιγραφή για το κάθε τόξο από το οποίο χρησιμοποιήθηκαν δείγματα πετρωμάτων για την εξαγωγή των συμπερασμάτων αυτής της εργασίας.

4.1 Ensimatic νησιώτικα τόξα

Λόγος δημιουργίας τόξου: Το Ίζου-Μπόνιν-Μαριάνα είναι ένα νησιωτικό τόξο μήκους 2500 χιλιομέτρων (Sun&Stern 2001). Σύμφωνα με την εργασία των Taylor&Nesbitt (1998) είναι αποτέλεσμα της βύθισης της Ειρηνικής πλάκας κάτω από την θαλάσσια πλάκα των Φιλιππίνων με κατεύθυνση βύθισης δυτικά-βορειοδυτικά και ρυθμό ~7 εκ/χρόνο κατά μήκος της τάφρου Ίζου-Μπόνιν.

Τοποθεσία τόξου: Το τόξο βρίσκεται πάνω στην θαλάσσια πλάκα των Φιλιππίνων και εκτείνεται νότια από την ηφαιστειακή περιοχή της ενδοχώρας της Ιαπωνίας Φούτζι-Χακόνε ως την θάλασσα των Φιλιππίνων.

Ιστορία μαγματισμού: Μαγματισμός στην περιοχή ξεκίνησε μεταξύ 65-28 εκατομμύρια χρόνια πριν. Η μαγματική δραστηριότητα του τόξου μειώθηκε όταν ξεκίνησε η διάνοιξη της οπισθοτόξιας λεκάνης πριν 22-15 εκατομμύρια χρόνια και μετά την πλήρη ανάπτυξη της κορυφώθηκε το Πλειόκαινο και Τεταρτογενές.

Ηφαίστεια τόξου: Το σημερινό μέτωπο του τόξου αποτελείται από 9 ηφαίστεια που από νότια προς βόρεια είναι τα Sofugan, Torishima, Sumisujima, Myojinsho, Aogashima, Hachijojima, Mikurajima, Miwakejima, Oshima και μερικά Πλειοκαινικά ηφαιστειακά θαλάσσια όρη. Όλα τα παραπάνω βρίσκονται 180 χλμ δυτικά από την τάφρο Ίζου-Μπόνιν. Επιπροσθέτως υπάρχουν ηφαίστεια και πίσω από το μέτωπο του τόξου κατά μήκος μιας σειράς αλυσίδων νότια από τα ηφαίστεια του μετώπου. Το ρήγμα Zenitsu είναι η βορειότερη αλυσίδα ηφαιστειών πίσω από ηφαιστειακό μέτωπο και εκτείνεται από το ηφαίστειο Oshima.

Τύπος μαγματισμού: 1) Από τα μετωπικά ηφαίστεια παράγονται χαμηλού καλίου θολεΐτες, όπως βασαλτικές ροές με περιστασιακές εκχύσεις ανδεσιτών και ρυόλιθων.

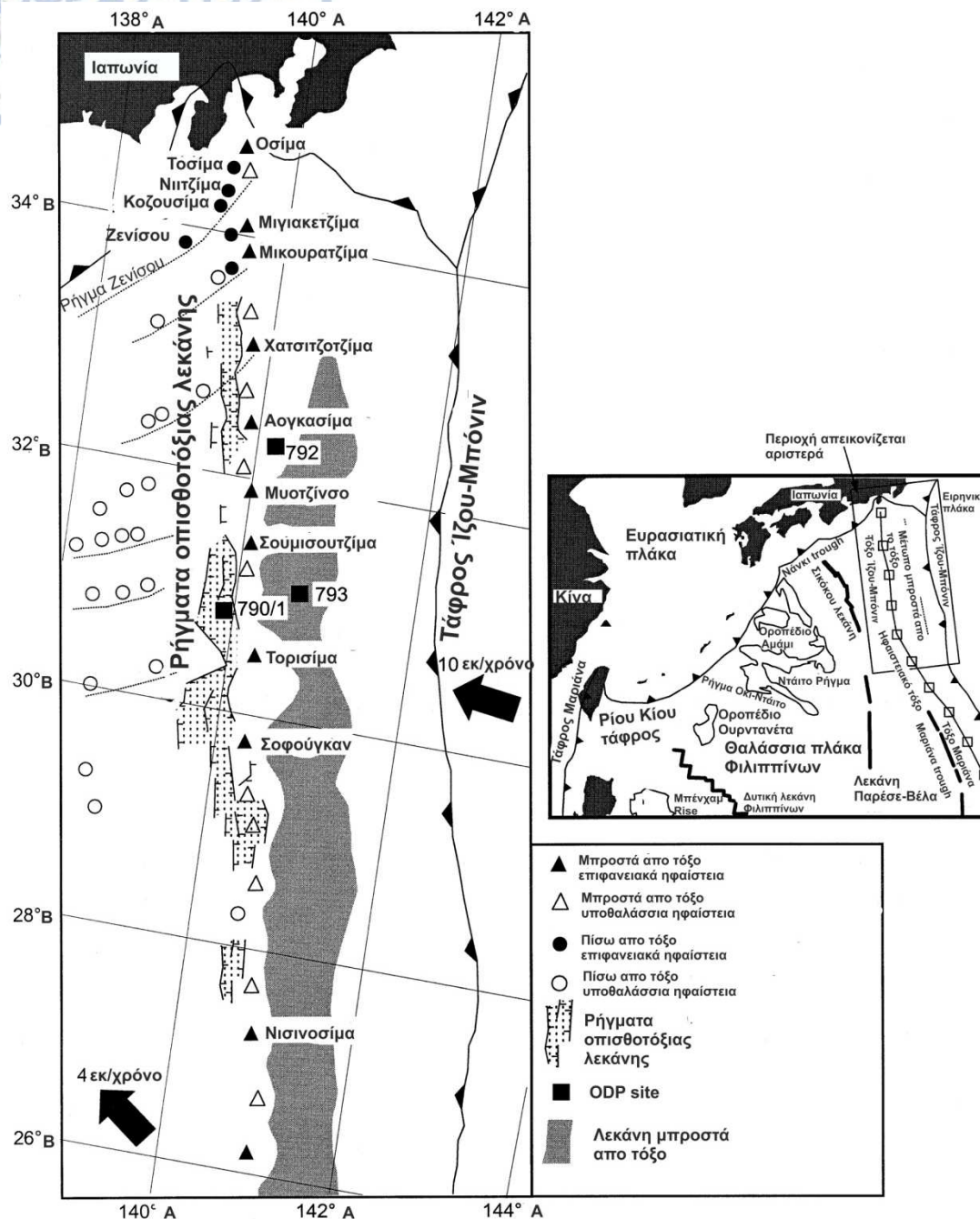
2) Τα ηφαίστεια της βορειότερης αλυσίδας ηφαιστειών παράγουν ρυολιθικό μαγματισμό με εξαίρεση το Niijima στο οποίο βρίσκεται και ορίζοντας με φρέσκο βασάλτη και κλάστες γάββρου.

3) Παραγωγή βασαλτών μικρότερων των 2 εκατομμυρίων ετών γίνεται και σε ρήγματα πίσω από το τόξο. Τα ρήγματα σχηματίζουν ρηξιγενείς λεκάνες 15-40 χλμ πίσω από το μέτωπο μεταξύ του γεωγραφικού πλάτους του Mikurajima στο βορρά και Nishinoshima στο νότο.

4) Το τόξο ήταν ενεργό κατά την περίοδο του ολιγοκαίνου και παρήγαγε ασβεσταλκαλικούς δυο πυροξενικούς βασαλτικούς ανδεσίτες και ανδεσίτες οι οποίοι θάφτηκαν κάτω από μειοκαινικούς ηφαιστειοκλαστικούς τουρβιδίτες της λεκάνης μπροστά από το τόξο.

5) Η λεκάνη μπροστά από το τόξο παρήγαγε μπονινίτες.

Τύπος πηγής του μάγματος: Έχει διεξαχθεί ως συμπέρασμα για την σύσταση του μανδύα κάτω από το Ίζου τόξο και το βορειότερο τμήμα της θαλάσσιας πλάκας των Φιλιππίνων πως μοιάζει με τους Ινδικούς MORB, με ίσως παρόμοιες ισοτοπικές ετερογένειες (Taylor&Nesbitt 1998).



Σχήμα 4.1.1.1 Τοποθεσίες ηφαιστειακών περιοχών στο τόξο Ίζου-Μπόνιν-Μαριάνας (τροποποιήθηκε από Taylor&Nesbitt 1998)

4.1.2 Τόξο Μαριάνας

Τοποθεσία τόξου: Το ενδωκεάνιο τόξο Μαριάνας, σύμφωνα με τους Elliot et al. (1997) αποτελεί μέρος του μεγαλύτερου τόξου Ίζου-Μπόνιν-Μαριάνας (IMM), εκτείνεται από τις 14°B ως τις 24°B, όπου ενώνεται με το ηφαιστειακό τόξο των νησιών Μπόνιν (Bloomer et al. 1989).

Λόγος δημιουργίας τόξου: Οφείλεται στην βύθιση της Ειρηνικής πλάκας κάτω από την θαλάσσια πλάκα των Φιλιππίνων με κατεύθυνση δυτική. Συγκεκριμένα κάτω από το Μαριάνας τόξο βυθίζεται Ιουρασικός φλοιός Ειρηνικής πλάκας με ταχύτητα σύγκλισης ~4

εκ/χρόνο. Το τόξο των Μαριάνων αναπτύχθηκε μετά την ρήξη ενός Μειοκαινικού και παλαιότερης ηλικίας τόξου και την ανάπτυξη οπισθοτόξιας λεκάνης (Bloomer et al. 1989).

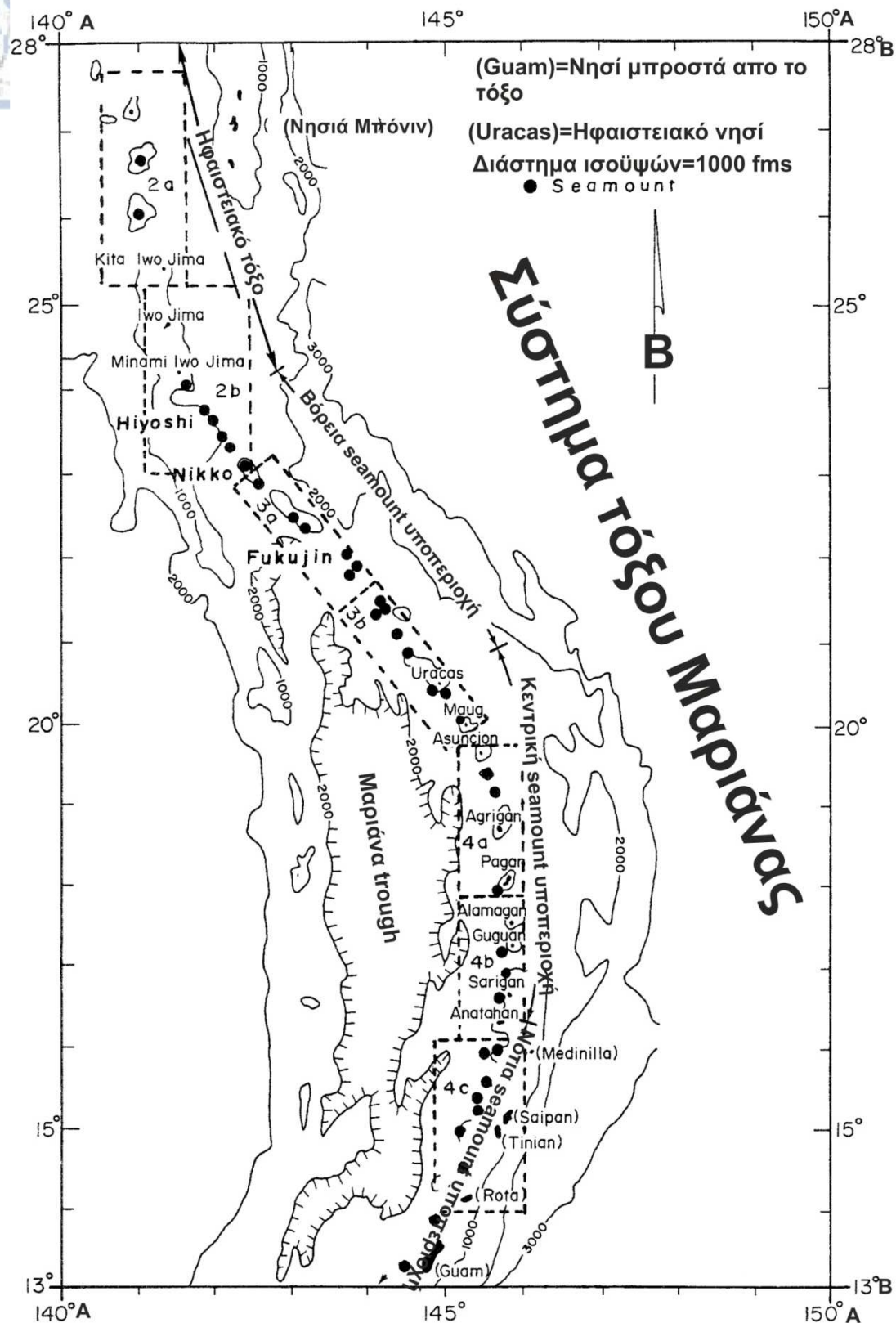
Εξέλιξη τόξου: Είναι ενεργό εδώ και 45 εκατομμύρια χρόνια και έχει συνδεθεί με πολύ έντονη οπισθοτόξια έκταση. Στο παρόν η έκταση αυτή εκδηλώνεται στην Μαριάνα οπισθοτόξια λεκάνη 5-7 εκατομμυρίων χρόνων. Το Μαριάνα τόξο έχει απομονωθεί περεταίρω από την απόθεση χερσαίων ηπειρωτικών ιζημάτων, λόγω της οπισθοτόξιας λεκάνης.

Δομή και μαγματισμός τόξου: Το τόξο ως τμήμα του τόξου IMM έχει διαχωριστεί από τους Bloomer et al. (1989) στις περιοχές: Νότιο υποθαλάσσιο όρος. Κεντρικό νησί και Βόρειο υποθαλάσσιο όρος. Όπως αναφέρεται στους Pearce et al. (2005):

Α) Νότιο υποθαλάσσιο όρος: Βρίσκεται νότια των 16°B και αποτελείται από εννέα οικοδομήματα υποθαλάσσιων ηφαιστείων. Τα τέσσερα έχουν ονομαστεί (Ruby, Diamante, Esmeralda, Tracey) ενώ τα υπόλοιπα δεν έχουν ονόματα. Έχει αναπτυχθεί επάνω σε οπισθοτόξιο φλοιό δυτικά από το εμπροσθοτόξιο μετωπικό ρήγμα και περιλαμβάνει τα νησιά Guam, Rota, Saipan και Tinian. Στα δυτικά η οπισθοτόξια λεκάνη Μαριάνα ενεργά εκτείνεται. Στον νότο το τόξο στρίβει και είναι παράλληλο με την τάφρο και τελικά ενώνεται με το υπολειμματικό τόξο του ρήγματος Μαριάνα. Από τις εκρήξεις των ηφαιστείων έχουν παραχθεί από βασάλτες έως δακίτες.

Β) Κεντρικό νησί: Βρίσκεται από 16° ως 20.7 °B και κυριαρχούν εννέα επιφανειακά ηφαίστεια από το Uracas ως το Anatahan στον νότο, περιλαμβάνει επίσης ηφαιστειακά θαλάσσια όρη. Αναπτύχθηκε πάνω σε οπισθοτόξια λιθόσφαιρα που υπέστη ρήξη και έκταση. Στην δύση η Μαριάνα τάφρος εκτείνεται ενεργά. Από τις εκρήξεις των ηφαιστείων έχουν παραχθεί κυρίως θολείτες και ασβεσταλκαλικούς βασάλτες και βασαλτικούς ανδεσίτες.

Γ) Βόρειο υποθαλάσσιο τόξο: Βρίσκεται από 20.7° ως 24°B. Είναι η συνέχεια του Κεντρικού νησιού, όμως σε αντίθεση με αυτό όλα τα ηφαίστεια του είναι υποθαλάσσια και η οπισθοτόξια λεκάνη Μαριάνα δεν έχει καθαρό άξονα έκτασης. Επιπλέον φαίνεται να έχει αναπτυχθεί επάνω σε προϋπάρχοντα φλοιό τόξου παρά σε ωκεάνιο φλοιό. Το βόρειο υποθαλάσσιο τόξο(NSP) διαχωρίζεται επιπλέον σε νότιο NSP(S-NSP) και βόρειο NSP (W-NSP). Το πρώτο βρίσκεται 20.7 ως 23 B και έχει αλυσίδες μικρών ηφαιστείων που εκτείνονται εντός της Μαριάνας τάφρου με τάση ΔΝΔ ως ΝΝΔ. Το δεύτερο εκτείνεται από 23 ως 24 B και είναι το σημείο όπου η Μαριάνα τάφρος και το τόξο Μαριάνα συναντιούνται στην ζώνη ρήξης με μήκος 150 χιλιόμετρα μακρύ. Το WNSP είναι μια περιοχή όπου το τόξο Μαριάνα και η οπισθοτόξια λεκάνη της Μαριάνας τάφρου συναντιούνται σε περιοχή ρήξης μήκους 150 χλμ. Επιπροσθέτως κάτω από το WNSP η βύθιση της Ειρηνικής κάτω από την θαλάσσια πλάκα των Φιλιππίνων είναι εντελώς πλάγια και αυτό έχει επιπλοκές στην απελευθέρωση ρευστών. Η σύσταση των πετρωμάτων είναι κυρίως σωσονιτική.



Σχήμα 4.1.2.1 Βαθυμετρικός χάρτης του Ηφαιστειακού και Μαριάννα τόξου με διαχωρισμένες περιοχές. Οι μεγάλες βούλες σηματοδοτούν τα κυριότερα υποθαλάσσια ηφαίστεια. Το οροπέδιο Iwo Jima εντός του Ηφαιστειακού τόξου εκτείνεται από το Minami Iwo Jima ως το Kitai Iwo Jima (τροποποιήθηκε από Bloomer et al. 1989)

4.1.3 Τόνγκα-Κέρμαντεκ τόξο

Τοποθεσία τόξου: Το ενδοωκεάνιο σύστημα υποβύθισης Τόνγκα-Κέρμαντεκ σύμφωνα με τους Smith&Price (2006) αποτελείται από τα γειτονικά μεταξύ τους τόξα Τόνγκα και Κέρμαντεκ που διαχωρίζονται από μια αλυσίδα υποθαλάσσιων όρων την Louisville Ridge που διασταυρώνεται με την τάφρο Τόνγκα-Κέρμαντεκ στα 25.6° N.

Λόγος δημιουργίας τόξου: Το σύστημα δημιουργήθηκε λόγω της βύθισης της Ειρηνικής πλάκας κάτω από την Ινδο-Αυστραλιανή πλάκα στην τάφρο Τόνγκα-Κέρμαντεκ. Ως εκ τούτου δημιουργήθηκαν μαγματικά τόξα στην ράχη Τόνγκα-Κέρμαντεκ και έκταση του φλοιού στις οπισθοτόξιες λεκάνες Lau και Havre τάφρους.

Δομή και ρυθμός υποβύθισης τόξου: Η τάφρος Τόνγκα σταματάει στον βορρά λίγο πριν το Samoa, όπου το σύστημα γυρίζει 90° και διασταυρώνεται με την Fiji ζώνη διάρρηξης και την ανενεργή Vitiavz τάφρο. Στον νότο η Κέρμαντεκ τάφρος στενεύει και γίνεται η Hikurangi τάφρος, γειτονικά του ανατολικού ακρωτηρίου του βόρειου νησιού της νέας Ζηλανδίας. Στην τάφρο Hikurangi λαμβάνει χώρα πλάγια υποβύθιση κάτω από τον ηπειρωτικό φλοιό της νέας Ζηλανδίας.

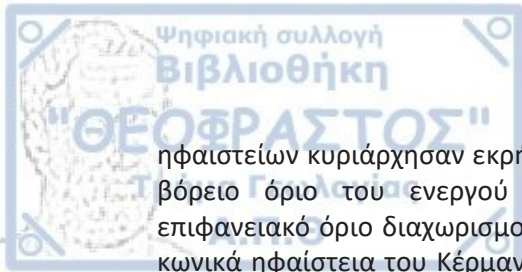
Ο παραγόμενος μαγματισμός χαρακτηρίζεται ως Ταυρο ηφαιστειακή ζώνη στο βόρειο νησί. Προς βόρεια αυξάνεται ο ρυθμός υποβύθισης και ο ρυθμός έκτασης κατά μήκος του ρήματος Lau-Havre-Ταυρο. Αυτό προκαλεί το κομμάτι του φλοιού μεταξύ της τάφρου και των συστημάτων των ρηγμάτων να κινείται ανεξάρτητα και από τις δύο κύριες πλάκες. Γιαυτό υπάρχουν θεωρίες για μια πλάκα Τόνγκα-Κέρμαντεκ που έσπασε σε μικροπλάκες Niuafo'ou, Τόνγκα και Κέρμαντεκ. Οι ρυθμοί υποβύθισης μειώνονται προς νότο κατά μήκος της τάφρου Τόνγκα-Κέρμαντεκ από 24 εκ/χρόνο σε 6 εκ/χρόνο. Στο τμήμα της Τόνγκα αυτό συμβαίνει γιατί μειώνεται ο ρυθμός έκτασης στην οπισθοτόξια λεκάνη Lau, ενώ στο τμήμα Κέρμαντεκ η μείωση είναι συνάρτηση της απόστασης από τον πόλο περιστροφής των κύριων πλακών του συστήματος.

Γενικά παρατηρούνται διαφορετικοί ρυθμοί υποβύθισης στο κεντρικό και βόρειο Τόνγκα τόξο, στην νότια Κέρμαντεκ και Τόνγκα τάφρο και στην κεντρική Τόνγκα τάφρο. Το ίδιο κάνει και ο ρυθμός έκτασης που έχει διαφορετικές τιμές στην κεντρική, βόρεια, νότια Lau λεκάνη, στην ηφαιστειακή ζώνη Ταυρο και στην νότια και βόρεια λεκάνη της τάφρου Havre. Επειδή αλλάζει σε πολλά σημεία του τόξου η κλίση βύθισης της υποκείμενης πλάκας έχει προταθεί ότι η οπισθοχώρηση στο τόξο είναι ταχύτερη στο βόρειο και βραδύτερη στο νότιο τμήμα του τόξου.

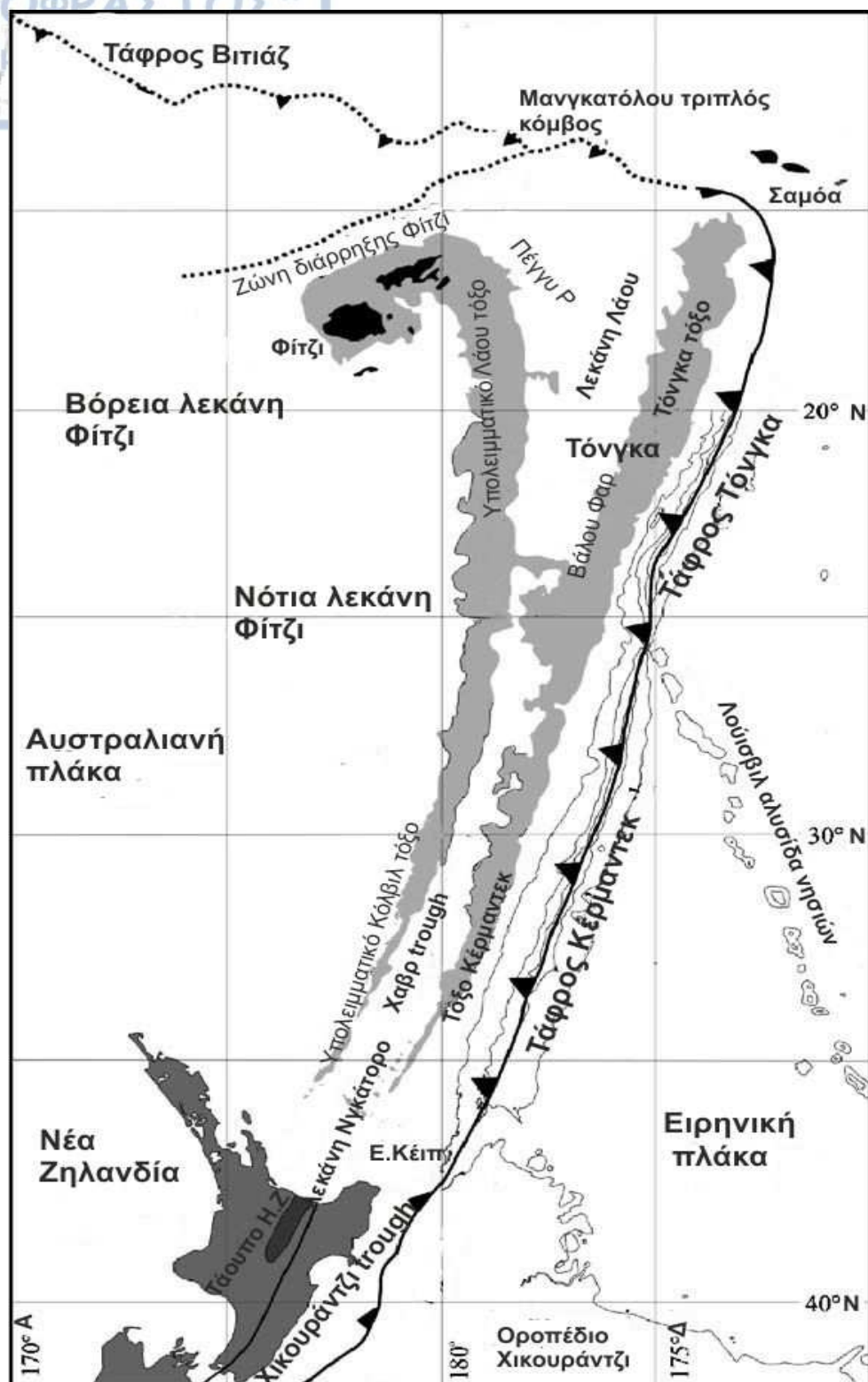
Ηφαίστεια τόξου: Επιφανειακά τα ηφαίστεια των Τόνγκα Κέρμαντεκ φαίνονται να διαχωρίζονται σε δύο ξεχωριστές ομάδες. Όμως η χαρτογράφηση του ωκεάνιου πυθμένα αποκάλυψε ότι πρόκειται για συνεχόμενη σειρά ηφαιστειών που κάποια είναι υποθαλάσσια. Τα ηφαίστεια Τόνγκα-Κέρμαντεκ περιορίζονται σε μία ζώνη 40 χιλιομέτρων, είναι ακανόνιστα διατεταγμένα εντός της ζώνης και συχνά υπάρχουν ως δυτικά και ανατολικά ζευγάρια συμπλεγμάτων. Παρατηρούνται και παλαιότερα ηφαίστεια δυτικά της 40 χιλιομέτρων ζώνης εντός της τάφρου Havre τα οποία είναι σημάδια ότι το ηφαιστειακό μέτωπο του τόξου μετανάστευσε ανατολικά με το άνοιγμα της λεκάνης.

Τα ηφαίστεια του Τόνγκα είναι πολυάριθμα, κάποια είναι μεγάλα και σχηματίζουν νησιώτικα συμπλέγματα, κάποια είναι υποθαλάσσια, σχηματίστηκαν κατά μήκος ρηγμάτων και ενώνουν τα νησιά. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι στο βόρειο τμήμα του Τόνγκα τα ηφαίστεια Curacao, Tafahi και Niuatorutapu προς τον βορρά και Fonualei and Toku προς τον νότο σχηματίζουν νησιώτικο σύμπλεγμα. Τα Curacao και Fonualei είναι ενεργά από το 1770, το Toku πιστεύεται να έχει ηλικία 3.6 εκατομμύρια χρόνια.

Ενεργή ηφαιστειότητα τόξου και προϊόντα της: Τα ενεργά ηφαιστειακά νησιά αποτελούν την δυτική νησιώτικη αλυσίδα και είναι κοντά στο δυτικό περιθώριο του ρήματος Τόνγκα. Παράγουν κυρίως πυροξενικούς-πλαγιοκλαστικούς-βασαλτικούς-ανδεσίτες και πιο σπάνια ανδεσίτες, δακίτες. Κατά την ολοκαινική δραστηριότητα των



ηφαιστειών κυριάρχησαν εκρήξεις καλιούχων δακτιών και χαμηλού πυριτίου ρυόλιθων. Το βόρειο όριο του ενεργού υποθαλάσσιου ηφαιστείου Monowai συμπίπτει με το επιφανειακό όριο διαχωρισμού των ηφαιστειών Τόνγκα και Κέρμαντεκ. Αυτό μαζί με άλλα κωνικά ηφαίστεια του Κέρμαντεκ απέχουν 10-30 χλμ δυτικά του ρήγματος Κέρμαντεκ. Στα ηφαίστεια Κέρμαντεκ ανήκουν τα T-Q, P-O και τα ηφαιστειακά νησιά Raoul, Macauley και L'Esperance. Το κάθε ένα αποτελείται από πολλά στρωματοηφαίστεια που δεν είναι για όλα γνωστή η ηλικία. Για το Raoul η κεντρική Denham Bay καλδέρα είναι ενεργή σίγουρα από πριν 2.2 δισεκατομύρια χρόνια και έχει δώσει 3 εκρήξεις από το 1814. Στο Macauley κυριαρχεί μια κεντρική υποθαλάσσια καλδέρα που δημιουργήθηκε πριν 6.3 δισεκατομμύρια χρόνια σε μια ισχυρή έκρηξη. Προς τον νότο συνεχίζεται η ύπαρξη ηφαιστειών που από μερικά εξάχθηκαν βασάλτες ηλικίας 1.2-2 εκατομμυρίων ετών. Τα νησιά Κέρμαντεκ γενικά παράγουν ολιβινικό και πλαγιοκλαστικό βασάλτη, δυο-πυροξενικό-βασαλτικό-ανδεσίτη, ανδεσίτη και δακίτη, όπως και χαμηλού καλίου ρυόλιθους. Το ολόκαινο οι εκρήξεις όπως και στο Τόνγκα παρήγαγαν δακίτη και χαμηλού πυριτίου ρυόλιθο.



Σχήμα 4.1.3.1 Νοτιοδυτική περιοχή του Ειρηνικού όπου απεικονίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του συστήματος τόξου Τόνγκα-Κέρμαντεκ και των οπισθοτόξινων λεκανών (τροποποιήθηκε από Smith&Price 2006)

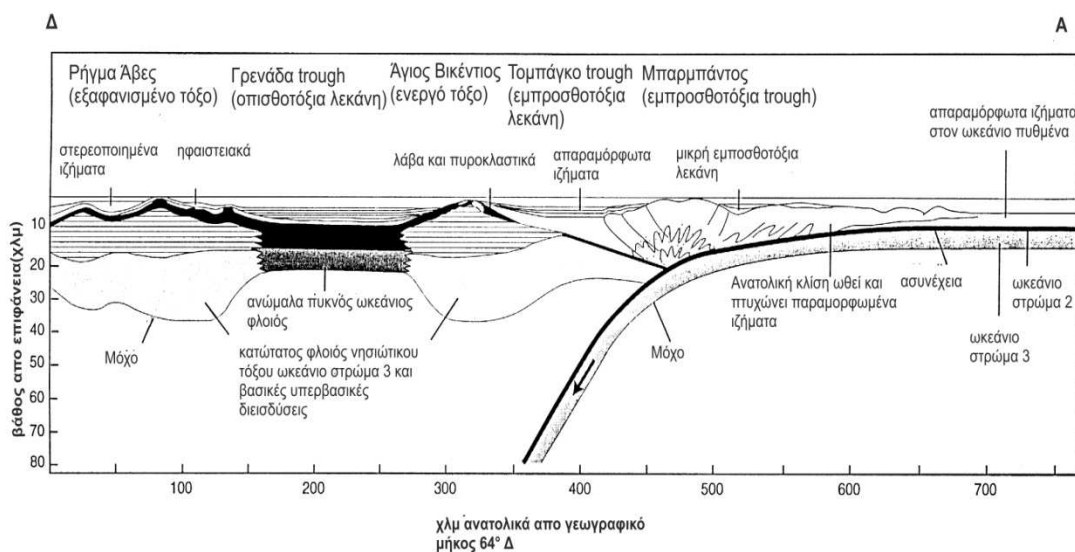
4.1.4 Μικρές Αντίλλες

Λόγος δημιουργίας τόξου: Το τόξο των μικρών Αντίλλων, σύμφωνα με τους Macdonald et al. (2000) δημιουργήθηκε λόγω της δυτικής κατευθύνσεως βύθισης της Ατλαντικής πλάκας κάτω από την Καραϊβική πλάκα. Ο ρυθμός βύθισης είναι $2-4 \text{ εκ}/\alpha^{-1}$.

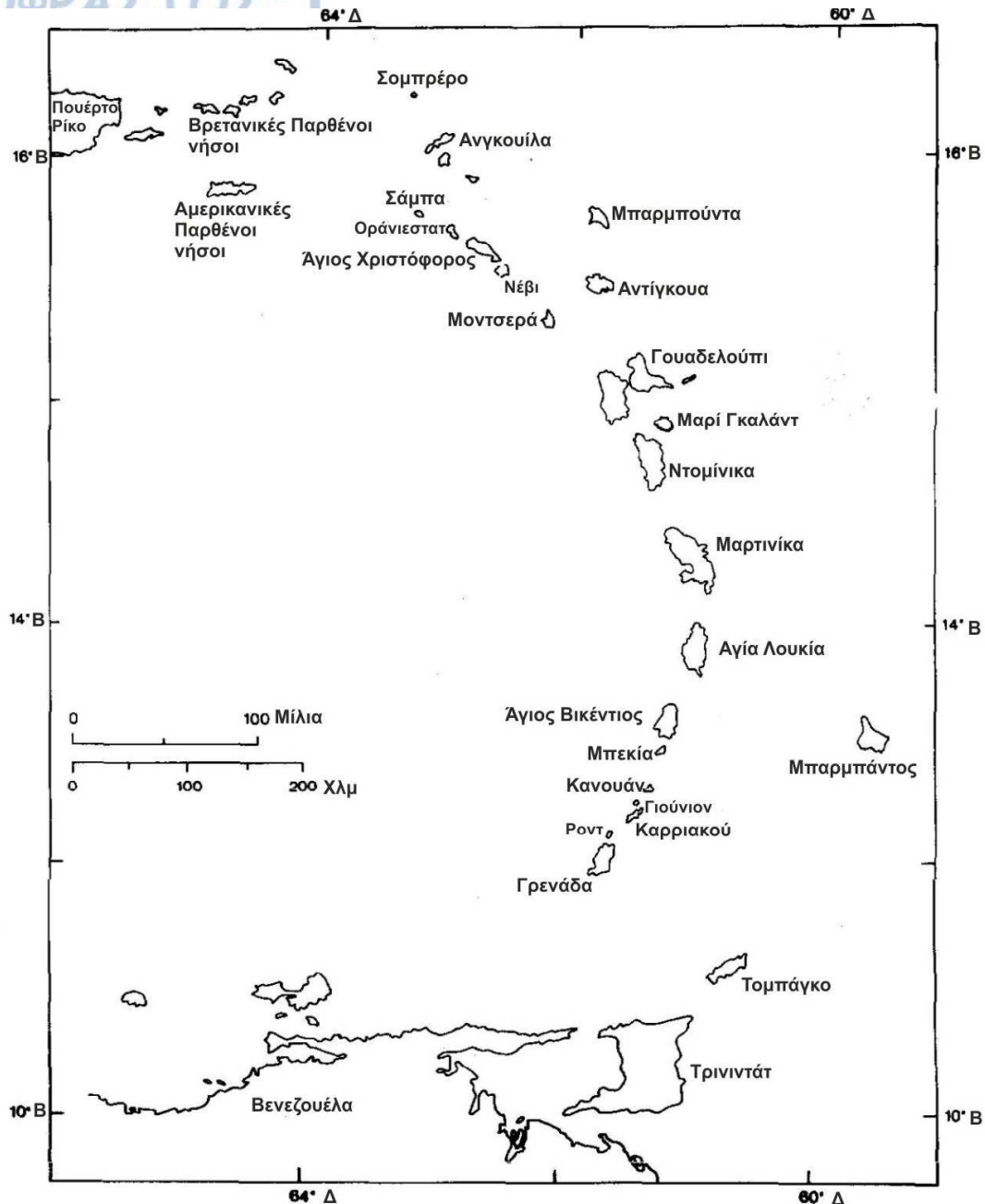
Τοποθεσία τόξου: Έχει 800 χιλιόμετρα μήκος και εκτείνεται από την Σάμπα στον βορρά ως την Γρενάδα στον νότο. Ο μαγματισμός στο βόρειο μέρος του νησιού είναι θολειτικός, κεντρικά ασβεσταλκαλικός και δυτικά ακόρεστος σε πυρίτιο.

Ηλικία μαγματισμού τόξου: Το τόξο των μικρών Αντίλλων έχει κυρίως Κρητιδικό μαγματισμό, όμως υπάρχουν αποδείξεις και για ακόμη παλαιότερο μαγματισμό βόρεια του Δομίνικου. Δυτικά υπάρχουν οι ενεργές ηφαιστειακά Caribbees και ανατολικά οι ανενεργές πλέον ασβεστιτικές Caribbees. Οι πρώτες είναι ενεργές από το κάτω Μειόκαινο ως σήμερα και οι τελευταίες υπήρξαν ενεργές από το Ηώκαινο ως το μέσο Ολιγόκαινο.

Πετρώματα τόξου: Πετρολογικά ξεχωρίζονται τρεις ομάδες: **α)** Η βόρεια ομάδα νησιών (Σάμπα ως Montser-Rat) με κύριο πέτρωμα τον ανδεσίτη και μετά δακίτη, αν και έχει καταγραφεί και βασάλτης ως μεγάλα τμήματα σε πυροκλαστικές αποθέσεις. **β)** Η κεντρική ομάδα νησιών (Γουαδελούπιως Αγία Λουκία). Εδώ περιλαμβάνονται τα μεγαλύτερα νησιά του τόξου και το κύριο πέτρωμα είναι πάλι ο ανδεσίτης, ύστερα βασάλτες και δακίτες και σπάνια ρυόλιθοι. **γ)** Η νότια ομάδα νησιών (απο Άγιος Βικέντιος ως Γρενάδα). Στον Άγιο Βικέντιο κυριαρχεί κυρίως βασάλτης και βασαλτικός ανδεσίτης. Ο ανδεσίτης συναντάται πάντα ως συστατικό σε μικτά μαγματικά πετρώματα. Για τις Γρεναδίνες νήσους δεν έχει γίνει αρκετή έρευνα όμως όπως η Γρενάδα είναι πιο περίπλοκα πετρολογικά από τον Άγιο Βικέντιο με πετρώματα από πικρίτες, βασάλτες και ανδεσίτες ή δακίτες.



4.1.4.1 Διατομή κατά μήκος των Μικρών Αντίλλων στο γεωγραφικό πλάτος του Άγιου Βικέντιου που απεικονίζει την υποβύθιση της Ατλαντικής πλάκας κάτω από την Καραϊβική (τροποποιήθηκε από Macdonald et al. 2000)



Σχήμα 4.1.4.2 Το τόξο των Μικρών Αντίλλων. Το νέο νησιώτικο τόξο εκτείνεται από τη Γρενάδα ως την Σάμπα. Οι ασβεστολιθικές Καραϊβικές (Μαρί Γκαλάντ ως Σομπρέρο) και οι Γρεναδίνες νήσοι (Μπεκία ως Ροντ) απεικονίζονται στον χάρτη (τροποποιήθηκε από Brown&Holland 1977)

4.1.5 Τόξο Σολομών

Τοποθεσία τόξου: Το τόξο Σολομών σύμφωνα με την εργασία των Schuth et al. (2009) αποτελείται από δύο παράλληλες αλυσίδες νησιών με φορά ΒΔ-ΝΑ που σηματοδοτούν την ζώνη βύθισης μεταξύ της Ινδικής-Αυστραλιανής και της Ειρηνικής πλάκας.

Ηλικία τόξου και τρόπος δημιουργίας του: Η ζώνη βύθισης πιθανότατα είναι ενεργή από το Ηώκαινο και την χαρακτηρίζει η αντιστροφή της πολικότητάς της κατά το Νεογενές. Πριν την αντιστροφή η βύθιση της Ειρηνικής κάτω από την Ινδική-Αυστραλιανή πλάκα λάμβανε χώρα κάτω από την τάφρο Βιτιάζ, τότε αναπτύχθηκε η βορειότερη και παλαιότερη

αλυσίδα νησιών του Σολομών. Αυτή η αλυσίδα νησιών συγκρούστηκε με το 30 χιλιομέτρων πυκνό Κρητιδικής ηλικίας οροπέδιο Οντογκ Τζάβα και τότε η υποβύθιση της Ειρηνικής πλάκας σταμάτησε. Η Ινδική-Αυστραλιανή πλάκα άρχισε να βυθίζεται κάτω από την Ειρηνική, λόγω των συνεχόμενων κινήσεων σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών, πριν περίπου 6 εκατομμύρια χρόνια. Αυτή η υποβύθιση οδήγησε σε μαγματισμό τύπου νησιώτικου τόξου και την ανάπτυξη της νοτιότερης αλυσίδας νησιών του Σολομών. Γεωφυσικά μοντέλα δείχνουν ότι συνεχίζεται η υποβύθιση των κατώτατων μερών του ocean flood βασάλτες οροπεδίου Οντογκ Τζάβα κάτω από το τόξο Σολομών κατά μήκος ενός ρήγματος αποκόλλησης μικρής γωνίας. Το τόξο Σόλομων συνεχίζεται προς τα ανατολικά (Βανουάτο τόξο) και το όλο τεκτονικό καθεστώς του είναι αποτέλεσμα της αντιστροφής της πολικότητας της υποβύθισης των πλακών κάτω από αυτό.

Ηφαιστειακά νησιά: Το τόξο Σόλομων για μήκος 1000 χιλιομέτρων χωρίζεται στις εξής περιοχές:

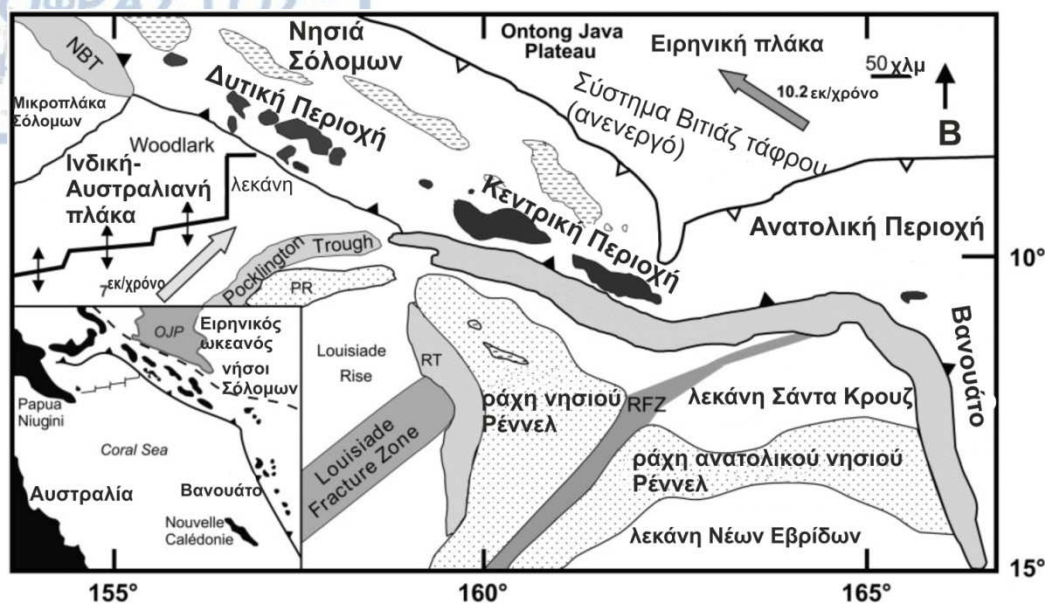
Α) Η δυτική περιοχή περιλαμβάνει τα νησιά Σόρτλαντ(Φάουρο, Σόρτλαντ) και την ομάδα νησιών Νέας γεωργίας(Vella Lavella, Ghizo, Kolombangara, Kohinggo, New Georgia, Rendova, Vangunu, Ngatoka)

Β) Η κεντρική περιοχή περιλαμβάνει τα νησιά Ρούσελ(Mborokua, Puvunu, Mbanika), Σάβο, Γουαταλκανάλ(ανατολικό Γκαλέγκο ηφαιστειακό πεδίο μόνο), και Μακίρα

Γ) Η ανατολική περιοχή αντιπροσωπεύεται από το αρχιπέλαγο Σάντα Κρουζ(Tinakula, Santa Cruz, Uturua, Vanikoro)

Πετρώματα τόξου: Το πιο συχνό πέτρωμα στο Σόλομων τόξο είναι ο βασάλτης και ο ανδεσίτης. Συναντώνται πικρίτες και ανκαραμίτες στα νησιά Νέας Γεωργίας όπου εξεράγησαν πάνω από το κέντρο έκτασης Γουντλάρκ και επίσης στο αρχιπέλαγο Σάντα Κρουζ βόρεια του Βανουάτου, όπου βυθίζεται η ζώνη διάρρηξης Ρένελ. Έχουν αναγνωριστεί επιπλέον αδακίτες και υψηλού μαγνησίου ανδεσίτες. Οι υψηλού μαγνησίου ανδεσίτες συνδέονται με τους αδακίτες, όμως κάποιοι έχουν ομοιότητες με σύσταση μπονινίτη.

Προέλευση ηφαιστειότητας τόξου: Από τις μετρήσεις εHf-εNd δειγμάτων λάβας του νησιού Σόλομων της προαναφερθείσας εργασίας φαίνεται οι περισσότερες να έχουν προέλευση Ινδικού τύπου μανδύα, ενώ ορισμένα πιθανόν έχουν προέλευση από τον βυθιζόμενη φλοιό της Ειρηνικής πλάκας, όπως οι αδακίτες ή από παλαιότερο υπόβαθρο της Ειρηνικής πλάκας, όπως οι βασάλτες.



Σχήμα 4.1.5.1 Απλουστευμένος τεκτονικός χάρτης και απλουστευμένη μικρογραφία με την γενική εικόνα της νοτιοδυτικής περιοχής του Ειρηνικού. Εντός της Ινδικής-Αυστραλιανής πλάκας υποβυθίζονται τεκτονικά κομμάτια πλάκας, το καθένα διαφορετικής ηλικίας, κάτω από το Σόλομων τόξο. Η διακεκομμένη γραμμή στην μικρογραφία συμβολίζει την ανενεργή τάφρο Βίτιαζ. NBT, Νέα Βρετανική Τάφρος, PR, Ρήγμα Pocklington, RT, Τάφρος Rennell, RFZ, Rennell Ζώνη Διάρρηξης (τροποποιήθηκε από Schuth et al. 2009)

4.1.6 Εβρίδες-Βανουάτου

Τοποθεσία τόξου: Σύμφωνα με τις εργασίες Peate et al. (1997) και Beaumais et al. (2016) το Βανουάτου (Εβρίδες) τόξο εκτείνεται κατά μήκος 1200 χιλιομέτρων στον νοτιοδυτικό Ειρηνικό από το Ureparapara στον βορρά ως το Hunter στον νότο και είναι τοποθετημένο σε ένα σύνθετο περιθώριο σύγκλισης μεταξύ της Αυστραλιανής και Ειρηνικής πλάκας.

Το περιθώριο σηματοδοτείται από δυο αντίθετες σε φορά υποβυθίσεις που οριοθετούνται από την τάφρο Βανουάτου στην δύση και την τάφρο Τόνγκα στην ανατολή. Ως εκ τούτου υπάρχει ~12 εκατομμύρια χρόνια ασυμμετρία στο άνοιγμα της βόρειας οπισθοτόξιας λεκάνης των Φίτζι.

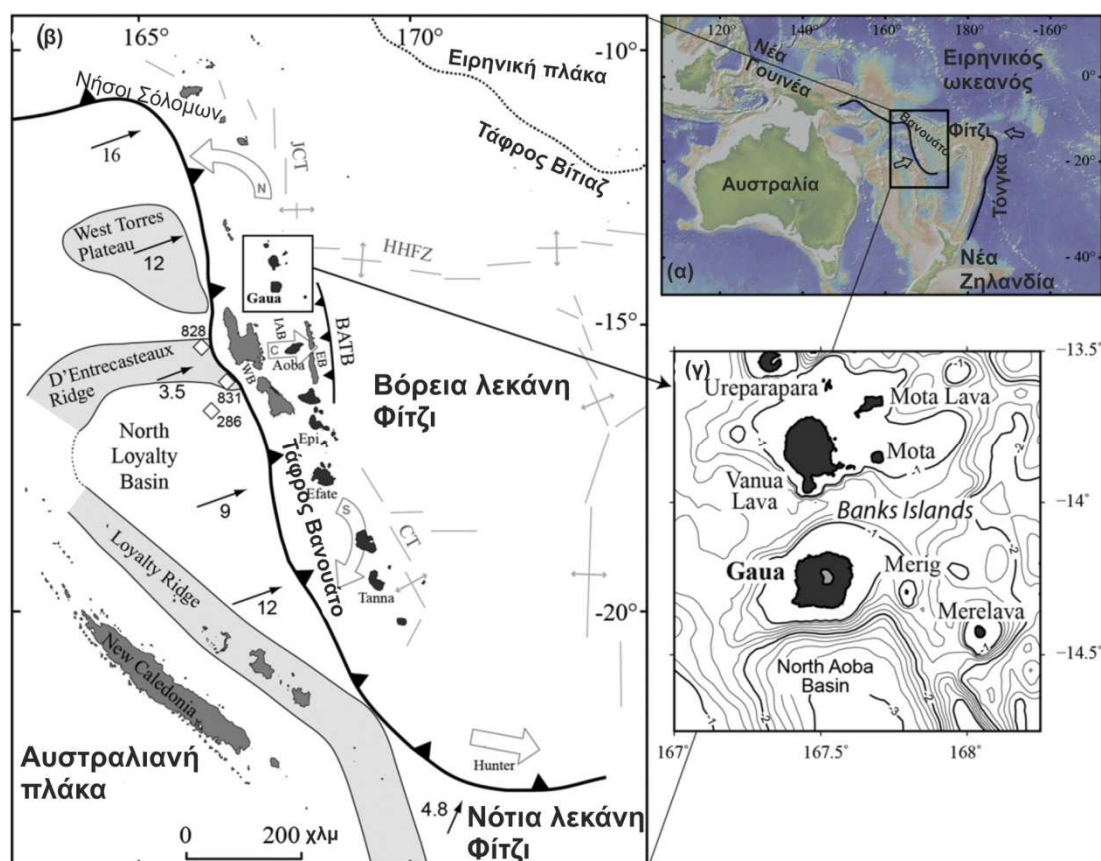
Ιστορία δημιουργίας τόξου: Η τεκτονική ιστορία του Βανουάτου νησιώτικου τόξου είναι περίπλοκη. Η τάφρος Vitiaz αποτελεί το υπόλειμμα της ζώνης υποβύθισης της Ειρηνικής πλάκας κάτω από την Ινδική-Αυστραλιανή από την οποία είχε σχηματιστεί το Vitiaz νησιώτικο τόξο. Πριν 12 εκατομμύρια χρόνια το Βανουάτου αποτελούσε μέρος του Vitiaz τόξου. Ο μαγματισμός της Δυτικής ζώνης του Βανουάτου ηλικίας 25-14 εκατομμύρια χρόνια σχετίζεται με την τότε δυτικής φοράς βύθιση. Πριν 12 εκατομμύρια χρόνια ξεκίνησε η διάνοιξη της οπισθοτόξιας λεκάνης Βόρειων Φίτζι ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης του οροπεδίου Οντόνγκ Τζάβα με τα νησιά Σολομών(παρ.4.1.5). Οι παραπάνω τεκτονικές διαδικασίες οδήγησαν στον διαχωρισμό του Vitiaz τόξου. Πριν 7-4 εκατομμύρια χρόνια η Αυστραλιανή πλάκα άρχισε να βυθίζεται με ανατολική διεύθυνση κάτω από την βόρεια λεκάνη Φίτζι της Ειρηνικής πλάκας. Η μαγματική δραστηριότητα από την βύθιση δημιούργησε το σημερινό Βανουάτου νησιώτικο τόξο και παράχθηκε ο μαγματισμός της Ανατολικής ζώνης. Ο μαγματισμός στο ενεργό ηφαιστειακό τόξο (Κεντρική αλυσίδα) ξεκίνησε πριν 6 εκατομμύρια χρόνια και αρχικά συγκεντρώθηκε στα ηφαίστεια Erromango,

Tanna και Anatom στον νότο και στα Vot Tande και Futuna στην ανατολή. Η ηφαιστειακή δραστηριότητα σταδιακά μετανάστευσε πιο κοντά στην Βανουάτου τάφρο λόγω της αύξησης κλίσης της ζώνης υποβύθισης έως τις τωρινές 70°.

Τωρινό τόξο: Η τωρινή τεκτονική εξέλιξη του Βανουάτου τόξου κυριαρχείται από την σύγκρουση του κεντρικού τμήματος του τόξου με την ζώνη D'Entrecasteaux. Η ζώνη D'Entrecasteaux είναι ένα σύστημα νησιώτικου τόξου Ηωκαινικής- Ολιγοκαινικής ηλικίας και βρίσκεται επάνω στην βυθιζόμενη πλάκα. Η σύγκρουση ξεκίνησε πριν περίπου 1,5 ως 3 εκατομμύρια χρόνια κοντά στην περιοχή Epi κι έχει μεταναστεύσει βόρεια λόγω της πλάγιας θέσης της ζώνης D'Entrecasteaux σε σχέση με την παράταξη της τάφρου.

Στην σημερινή εποχή ο ρυθμός σύγκλισης φτάνει τα 12 εκ/χρόνο στο βόρειο μέρος του οροπεδίου West Torres, όμως είναι μόλις 3,5 εκ/χρόνο κοντά στην ζώνη σύγκλισης του ρήγματος d'Entrecasteaux.

Τύπος μαγματισμού τόξου: Συγκεκριμένες μεταβολές στην σύσταση των ηφαιστειακών της Κεντρικής αλυσίδας συσχετίζονται με την τοποθεσία της υποβύθισης. Συναντάται αλκαλικός μαγματισμός μόνο στα Gaua, Aoba και Ambrym τα οποία βρίσκονται αμέσως ανατολικά από την ζώνη υποβύθισης. Οι λάβες από τα κεντρικά νησιά μπροστά από την ζώνη υποβύθισης έχουν υψηλότερο λόγο $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ και χαμηλότερο $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ σε σύγκριση με νησιά μακρύτερα προς νότο. Τα πρωταρχικά μάγματα του τόξου έχουν ποικίλες συστάσεις που κυμαίνονται από χαμηλού K θολεΐτες σε υψηλού K αλκαλικά.



Σχήμα 4.1.6.1 (τροποποιήθηκε από Beaumais et al. 2016)

4.2 Ensialic νησιώτικα τόξα

4.2.1 Αλεούτιες

Λόγος δημιουργίας τόξου: Το τόξο των Αλεούτιων είναι αποτέλεσμα της βορειοδυτικής κατευθύνσεως υποβύθισης της Ειρηνικής πλάκας κάτω από την Βορειοαμερικανική πλάκα (Stevenhollbrook et al. 1999).

Τοποθεσία τόξου: Στο δυτικό μέρος του τόξου η υποβύθιση λαμβάνει χώρα κάτω από το ωκεάνιο μέρος της βορειοαμερικανικής πλάκας, ενώ στο ανατολικό μέρος λαμβάνει χώρα κάτω από το Μεσοζωϊκό ηπειρωτικό υπόβαθρο της χερσόνησου της Αλάσκας (Kay et al. 1982). Το συνολικό σύστημα του τόξου βρίσκεται επάνω σε μία στενή που εκτείνεται 2000 χλμ δυτικά από την χερσόνησο Αλάσκα, όπου το τόξο ενώνεται με την Alaska Range, έως την χερσόνησο Καμπσάτσκι με την οποία συνορεύει (Jisha et al. 2004 και Coats 2013). Νότια της Αλεούτιας τάφρου η βυθιζόμενη Ειρηνική πλάκα περιλαμβάνει τρεις βόρειας-νότιας παράταξης ζώνες διάρρηξης, με την κυριότερη να είναι η 25 χλμ πλάτους Άμπλια (AFZ) (Jisha et al. 2004).

Ηφαίστεια τόξου: Το ηφαιστειακό τόξο των Αλεούτιων περιλαμβάνει περίπου 40 ενεργά ηφαίστεια και εκτείνεται περίπου 1580 μίλια από το βουνό Spurr ως το νησί Buldir (Coats 2013).

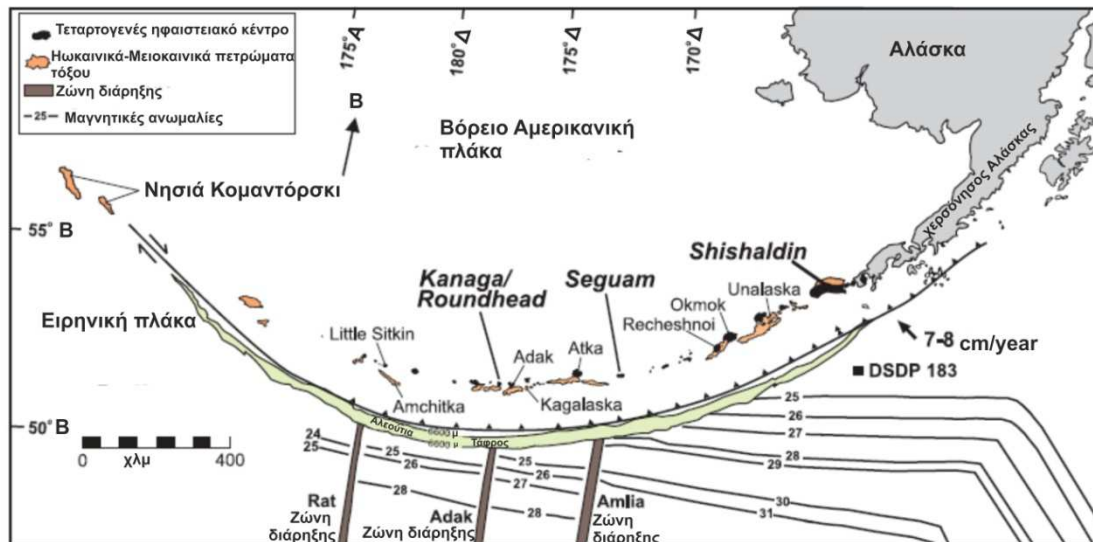
Ιστορία εξέλιξης τόξου: Σύμφωνα με έρευνες το τόξο υποθέτεται πως σχηματίστηκε στο κάτω Ηώκαινο (55-50 εκατομμύρια χρόνια πριν) (Stevenhollbrook et al. 1999), λόγω της νότιας κατεύθυνσης μετανάστευσης της ζώνης σύγκλισης της πλάκας Kula. Αυτή η μετανάστευση οδήγησε σε παγίδευση ωκεάνιου φλοιού στην Βερίγγειο θάλασσα και σε απομόνωση του Βερίγγειου ηπειρωτικού περιθώριου πίσω από την τωρινή ζώνη υποβύθισης (Jisha et al. 2004).

Σύσταση υπόβαθρου τόξου: Το τόξο των Αλεούτιων διαφέρει από τα υπόλοιπα ενδοωκεάνια τόξα στο ότι δεν έχει σχηματιστεί σε αυτό οπισθοτόξια λεκάνη. Σύμφωνα με τους Stevenhollbrook et al. (1999) δεδομένα σεισμικών ανακλώμενων κυμάτων και χαρτογραφήσεων φαίνεται να δείχνουν ότι τα **πετρώματα υποβάθρου** της Αλεούτιας μορφολογικής ράχης (Aleutian morphologic ridge) χωρίζονται σε **τρεις στρωματογραφικές ενότητες: α)** Μία Ηωκαινική κατώτερη ακολουθία ηφαιστειακών πετρωμάτων, **β)** Μια Ολιγοκαινική-Μειοκαινική ενδιάμεση ακολουθία θαλάσσιων ιζηματογενών πετρωμάτων, **γ)** Μία Πλειοκαινική και Τεταρτογενή ανώτερη ακολουθία ιζηματογενών και πυριγενών πετρωμάτων. Γεωφυσική μελέτη έδειξε πως ο φλοιός του τόξου έχει μέγιστη πυκνότητα 25 χλμ και όγκο περίπου 2300 χλμ³ για κάθε χλμ τόξου.

Συνολική σύσταση τόξου: Όπως αναφέρεται στους Jisha et al. (2004), δεδομένα ταχυτήτων επιμήκων κυμάτων έδειξαν μία **συνολική σύσταση κυρίως μανδυακή για το τόξο**. Πιο συγκεκριμένα: **α)** ο ανώτερος φλοιός αποτελείται από μεταβάσालτες, διορίτες και διαβάτες, **β)** ο ενδιάμεσος φλοιός από πρασινοσχιστολιθικές φάσεις, MORB, γάββρους και ανορθοσίτες, **γ)** ο κατώτερος φλοιός από γρανάτες, γρανουλίτες, αμφιβολίτες, κερροστολβίτες, ασβεσταλκαλικούς ως θολεϊτικούς βασάλτες ή από μανδυακό υπόλειμα κλασματικής κρυστάλλωσης ασβεσταλκαλικών ως θολεϊτικών βασαλτών. Επιπλέον εμφανίζεται ένας μικρός όγκος γρανιτικών πλουτονιτών στα νησιά Adak, Amchitka, Kagalaska και Unalaska το οποίο επιβεβαιώνουν τρισδιάστατα μοντέλα ταχύτητας κυμάτων που προτείνουν ότι το 40% του άνω φλοιού έχει ενδιάμεση ως όξινη σύσταση. Όμως δεν υπάρχουν σεισμικά δεδομένα που να δείχνουν όξινο ενδιάμεσο φλοιό.

Μαγματισμός τόξου: Όσον αφορά τον μαγματισμό του τόξου, σύμφωνα με τους Stevenhollbrook et al. (1999), υπήρχαν περίοδοι αύξησης και μείωσης αυτού, με ένα κύριο επεισόδιο σχηματισμού του τόξου στο Ηώκαινο και την συγκέντρωση της μαγματικής δραστηριότητας ώστε να δημιουργηθούν ηφαίστεια πριν 40 εκατομμύρια χρόνια. Οι

σύσταση των λαβών του τόξου κυμαίνονται από βασάλτη ως δακίτη και σπάνια ρυόλιθο με τον βασάλτη να επικρατεί.



Σχήμα 4.2.1.1 Τεκτονικό πλαίσιο στο τόξο Αλεούτιων. (τροποποιήθηκε από Jisha et al. 2004)

4.2.2 Τόξο Μπάντα

Τόξο Μπάντα, μια ιδιαίτερη περίπτωση: Το τόξο Μπάντα ανήκει στην σπάνια περίπτωση της σύγκρουσης ηπειρωτικής πλάκας με νησιώτικο τόξο (Vonderbroch 1979). Πάντα αυτά τα συστήματα είναι νέα στην γεωλογική ηλικία (Τεταρτογενής ή νεότερα) και πιθανόν αποτελούν ενδιάμεσο στάδιο στην εξελικτική πορεία δύο συγκλινόμενων λιθοσφαιρικών πλακών. Η κατάληξη τέτοιων συστημάτων ίσως είναι η μετατροπή τους σε ενδοηπειρωτικές ζώνες συρραφής πλακών (suture zones) λόγω σύγκρουσής τους με δεύτερη ηπειρωτική μάζα. Αυτό συμβαίνει λόγω μεταβολής της πολικότητας της υποβύθισης ή λόγω ανάπτυξης νέας θέσης υποβύθισης.

Διαχωρισμός τόξου: Σύμφωνα με τους Herrington et al. (2011) το τόξο Μπάντα χωρίζεται σε εσωτερικά και εξωτερικά τόξα Μπάντα και σε αυτά συμβαίνουν οι περίπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ της βόρεια κινούμενης Αυστραλιανής πλάκας, της Ευρασιατικής πλάκας και μίας ομάδας νοτιοδυτικά κινούμενων Ειρηνικών πλακών, όπως οι θαλάσσιες πλάκες των Φιλιππίνων και Καρολίνας.

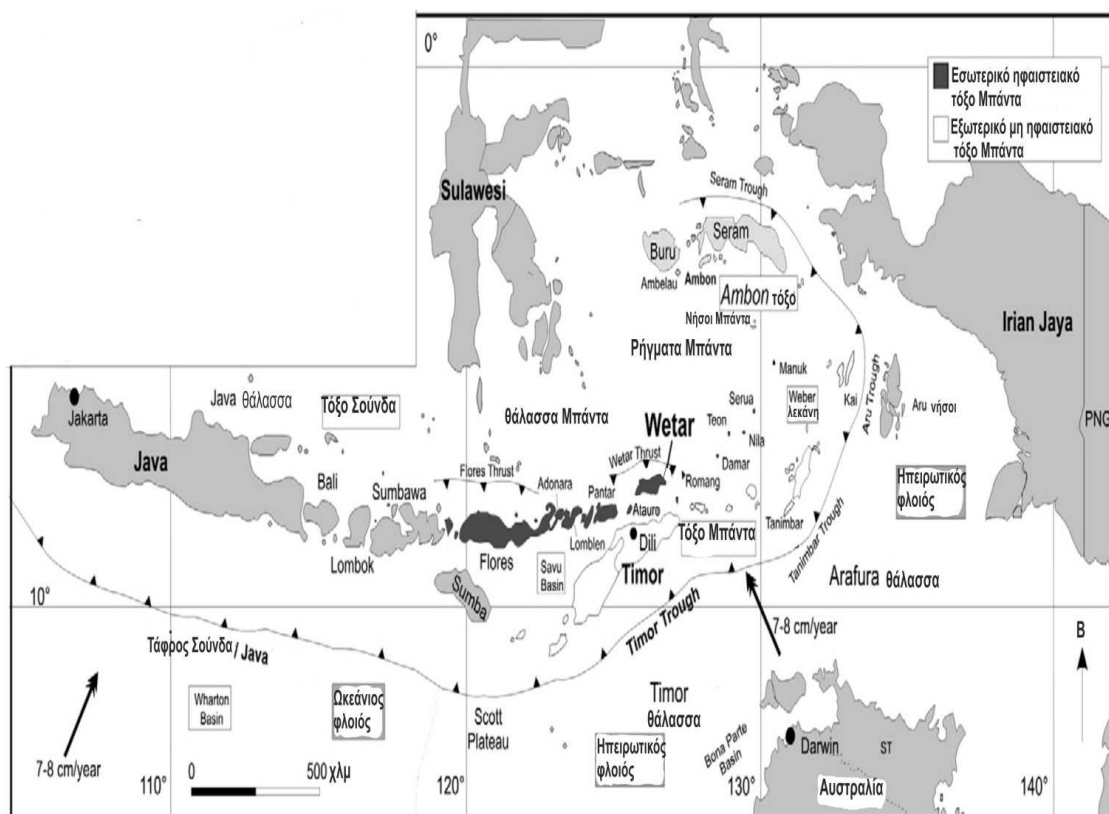
Μία από τις πολλές απόψεις για προέλευση τόξου: Είναι κοινώς αποδεκτό ότι το τόξο Μπάντα αποτελεί ζώνη σύγκρουσης μεταξύ ηπειρωτικής πλάκας και τόξου, όμως υπάρχουν απόψεις που υποστηρίζουν πως μπορούν να εφαρμοστούν διαφορετικά μοντέλα προέλευσης διαφορετικών περιοχών του αναπτυσσόμενου ορογενούς σε διαφορετικά στάδια κατά την διαδικασία της σύγκρουσης. Μία τέτοια άποψη είναι του Harris (2006), σύμφωνα με τον οποίο υπάρχει η Banda Terrane, μια σειρά πετρωμάτων που αποτελούν μέρος του τόξου Μπάντα και είναι υπόλειμμα του Ιουρασικού-Ηωκαινικού μεγάλου τόξου της Ινδονησίας.

Σχηματισμός εξωτερικού μέρους τόξου: Η πετρολογική σύσταση του εξωτερικού τόξου Μπάντα στο μεγαλύτερο μέρος της δεν έχει ηφαιστειακή προέλευση. Ανατολικά του Timor, στην Timor τάφρο της ηπειρωτικής Αυστραλιανής πλάκας βυθίζεται, αποτελώντας την υποκείμενη πλάκα. Η υπερκείμενη πλάκα είναι μία ένωση της Banda Terrane(

συνδυασμός ωκεάνιου φλοιού, μεταμορφωμένων πετρωμάτων) και του ηπειρωτικού τεμάχου Buntan, το οποίο είναι κομμάτι του βόρειου περιθωρίου της Αυστραλιανής πλάκας που είχε μετατοπιστεί βόρεια και συγκρούσεται με το μεγάλο τόξο της Ινδονησίας στο κάτω Ηώκαινο-κάτω Ολιγόκαινο (Harris 2006 και Herrington et al. 2011). Αρκετές μελέτες, οι πηγές των οποίων αναφέρονται στους Herrington et al. (2011), υποστηρίζουν ότι συμμετείχαν αρκετά μικρο-ηπειρωτικά τεμάχη στα αρχικά στάδια του τωρινού συστήματος της Μπάντα.

Σχηματισμός εσωτερικού μέρους τόξου: Το εσωτερικό ηφαιστειακό τόξο Μπάντα, συμπεριλαμβανομένου του νησιού Wetar, αναπτύχθηκε λόγω της υποβύθισης της BBA κινούμενης Αυστραλιανής πλάκας με 75 χλυστά/ χρόνο⁻¹ κάτω από την Ευρασιατική πλάκα εντός της τάφρου Μπάντα. Κάτω από την τάφρο υπόκειται ηπειρωτική λιθόσφαιρα της οποίας η πυκνότητα κυμαίνεται μεταξύ 31-40 χλμ από δυτικά προς ανατολικά και είναι σεισμικά ενεργή στα μεγαλύτερα βάθη. Υπάρχουν ενδείξεις από σεισμικά δεδομένα για την ύπαρξη Αυστραλιανής λιθοσφαιρικής πλάκας βόρειας κλίσης σε βάθη μεγαλύτερα των 300 χλμ.

Απόψεις για τον μαγματισμό και ρυθμό σύγκλισης τόξου: Τυχόν διακριτές παρατηρήσεις διαφορών στον μαγματισμό του τόξου αποδίδονται στην σύγκρουση του Αυστραλιανού ηπειρωτικού περιθωρίου με το εξωτερικό τόξο Μπάντα πριν 3,5-2 εκατομμύρια χρόνια, το οποίο οδήγησε στην δημιουργία του ρήγματος Wetar. Ωστόσο σύγχρονες εργασίες υποστηρίζουν πως ο ρυθμός σύγκλισης κατά μήκος της θάλασσας Timor δεν άλλαξε σημαντικά από την στιγμή της σύγκρουσης.



Σχήμα 4.2.2.1 Κύρια γεωγραφικά χαρακτηριστικά του Ινδονησιακού τόξου κατά Hamilton 1979, Whitford et al., 1977, van Bergen et al. 1989, Masson et al., 1991, Snyder et al., 1996, Honthaas et al., 1999 και Hinschberger et al., 2001. (τροποποιήθηκε από Herrington et al. 2011)

4.2.3 Τόξο Καμτσάτσκι

Τοποθεσία τόξου: Σύμφωνα με τους Kepezhinskas et al. (1997) και Churikova et al. (2001), το τόξο Καμτσάτσκι αποτελεί μέρος του 1700 χιλιομέτρων ορίου σύγκλισης Καμτσάτσκι-Κουρίλ. Το τόξο Καμτσάτσκι βρίσκεται στο Βορειοανατολικό όριο σύγκλισης της Ευρασιατικής και Ειρηνικής πλάκας, κάτω από το οποίο η Μεσοζωϊκή Ειρηνική πλάκα βυθίζεται με ρυθμό 9 εκ/χρόνο. Ταυτόχρονα μαζί με την Ειρηνική πλάκα βυθίζεται και η αλυσίδα υποθαλάσσιων όρων Emperor.

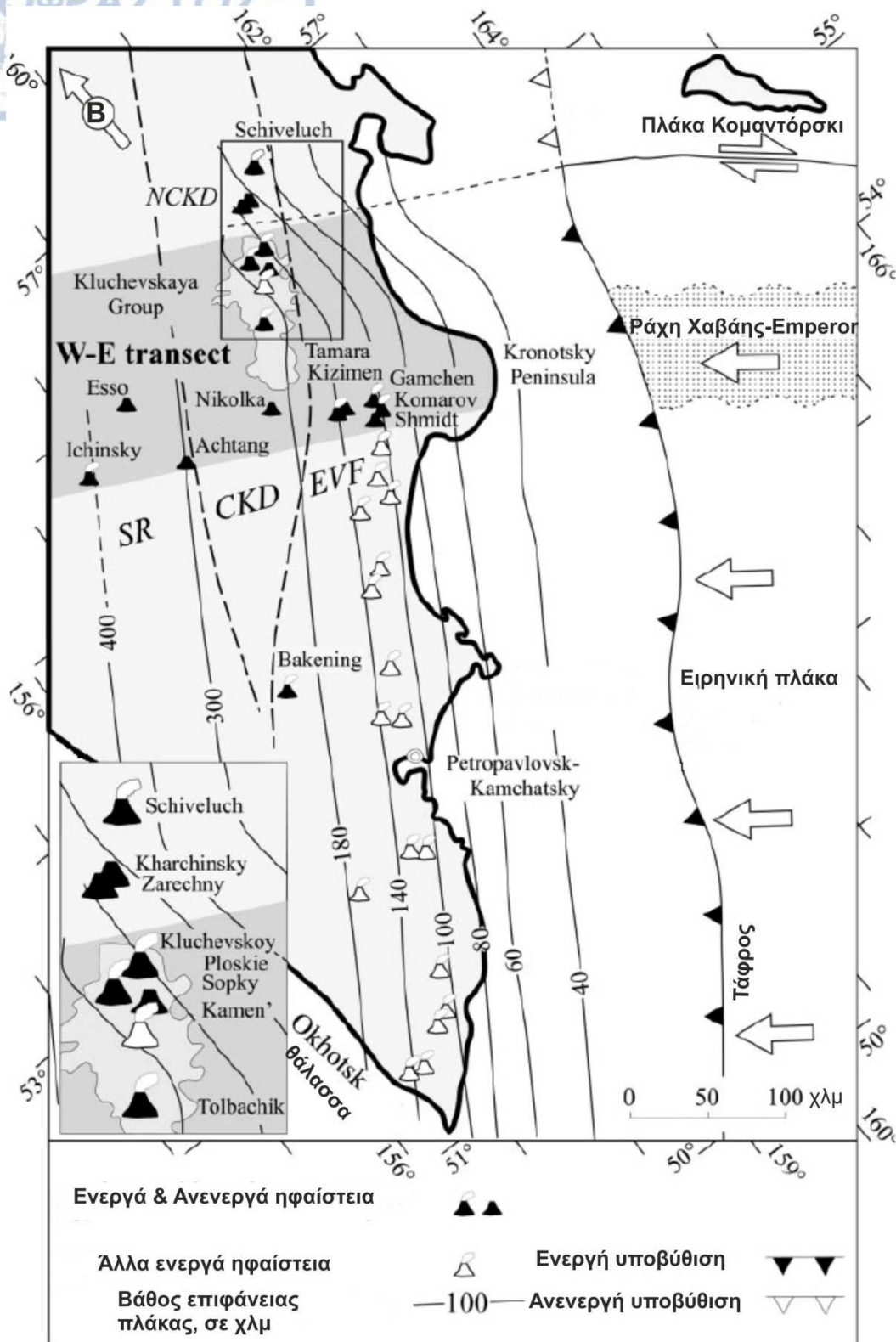
Ιστορία ηφαιστειότητας τόξου: Στο τόξο υπάρχουν πάνω από 240 Τεταρτογενή ηφαιστειακά κέντρα, με 34 τωρινά ενεργά. Η παλαιότερη ηλικία ηφαιστειακής δραστηριότητας στο τόξο είναι Κρητιδική. Ωστόσο η ηφαιστειακή δραστηριότητα που προέκυψε από την τωρινή τεκτονική διαμόρφωση του τόξου είναι άνω Μειοκαινικής-κάτω Πλειοκαινικής ηλικίας. Επιπλέον το Πλειόκαινο με κάτω Πλειστόκαινο από εκρήξεις προέκυψαν βασάλτες με μερικώς ενδοπλακικά χαρακτηριστικά. Το άνω Πλειστόκαινο με Ολόκαινο η ηφαιστειακή δραστηριότητα ενισχύθηκε.

Σημερινή ηφαιστειότητα τόξου: Η ενεργή ηφαιστειότητα συνεχίζεται νότια στο Κουρίλ νησιώτικο τόξο. Η ενεργή ηφαιστειακή δραστηριότητα παύει βόρεια στο ηφαίστειο Shiveluch. Αυτό οφείλεται στον τριπλό κόμβο Καμτσάτσκι-Αλεούτιες, όπου το όριο των λιθοσφαιρικών πλακών από όριο σύγκλισης στον νότο (μεταξύ Ευρασιατικής-Ειρηνικής πλάκας) μετατρέπεται σε όριο strike slip στον βορρά (μεταξύ Ειρηνικής-Βόρειοαμερικανικής πλάκας). Προς τα βόρεια υπάρχουν ίχνη εξαφανισμένων ηφαιστειών 2-15 εκατομμυρίων χρόνων που σχετίζονται με ένα μικρής διάρκειας ζωής κέντρο έκτασης στην λεκάνη Κομαντόρσκι.

Τμήματα τόξου: Το τόξο **διαχωρίζεται σε τρία τμήματα** που οριοθετούνται από κύριες ζώνες διάρρηξης. **α)** Το νότιο τμήμα (SS) που εκτείνεται νότια της Petropavlosk ζώνης διάρρηξης (PFZ) και χωρίζει το ηφαιστειακό υπόβαθρο τύπου Κουρίλ στο νότο από το επωθημένο υπόβαθρο τύπου Καμτσάτσκι στον βορρά. **β)** Το κεντρικό τμήμα εκτείνεται από την χερσαία ακολουθία της ζώνης διάρρηξης Alpha στον βορρά ως την PFZ στον νότο. Αυτό το τμήμα σχετίζεται με την βορειοδυτική υποβύθιση της Μεσοζωϊκής Ειρηνικής πλάκας. Έλαβε χώρα ενδοπειρωτική διάρρηξη, που ονομάζεται Κεντρική βύθιση Καμτσάτσκι (CKD from central Kamchatka Depression) παράλληλα στην τάφρο Καμτσάτσκι. Το CKD είναι πολύ ηφαιστειακά ενεργό και οριοθετείται από ρήγματα. Η ενδοπειρωτική ρήξη διαχωρίζει το ενεργό ηφαιστειακό μέτωπο (Ανατολική ηφαιστειακή ζώνη ή EVF) από το οπισθοτόξια ηφαιστειακή ζώνη του Sredinny Range (SR). Η SR περιλαμβάνει μόνο ένα ενεργό ηφαίστειο (Ichinsky ηφαιστειακό κέντρο). **γ)** Το βόρειο τμήμα (NS) σχηματίστηκε λόγω της δυτικής κατευθύνσεως υποβύθισης νέου (<15 Ma), θερμού ωκεάνιου φλοιού της λεκάνης Κομαντόρσκι. Το τμήμα αυτό είναι ηφαιστειακά ανενεργό και σχετίζεται περισσότερο με μία κορεσμένη σε ιζήματα τάφρο. Όμως πριν 2-15 Ma υπήρξε στο τμήμα ηφαιστειακή δραστηριότητα και σχηματίστηκαν ασβεσταλκαλικές ως σωσονιτικές ηφαιστειακές ακολουθίες. Κάτω από το NS υπόκεινται πυκνός ωκεάνιος φλοιός (>18 χλμ) και νοτιότερα αλλάζει σε μεταβατικό φλοιό (transitional crust).

Ομοιότητα τόξου με ηπειρωτικό φλοιό: Με εξαίρεση ένα σχετικά λεπτό φλοιό κάτω από το CKD, κάτω από τα CS και SS υπόκεινται φλοιός πυκνότητας 30-40 χλμ, παρουσιάζοντας μεγάλη αύξηση πυκνότητας σε σχέση με το NS και την ανάπτυξη γρανουλιτικής φάσης στον κατώτερο φλοιό, όπως σε έναν ηπειρωτικό φλοιό.

Πετρώματα τόξου: Τα ηφαιστειακά πετρώματα των ηφαιστειών του τόξου Καμτσάτσκι είναι από βασάλτες ως ανδεσίτες και δακίτες.



Σχήμα 4.2.3.1 Γενική τεκτονική θέση του τόξου Καμτσάτσκι και η τοποθεσία της διατομής στο βόρειο Καμτσάτσκι (σκιαγραφημένη περιοχή). Ηφαίστεια δειγματοληψίας απεικονίζονται με σκιαγραφημένα σύμβολα. Τα όρια του CKD είναι από τον Masurenkov 1991. SR: Srediny Range, CKD: Κεντρική βύθιση Καμτσάτσκι, EVF:Ανατολικό ηφαιστειακό μέτωπο, NCKD:Βόρεια Κεντρική βύθιση Καμτσάτσκι (τροποποιήθηκε από Churikova et al. 2001)

Λόγος δημιουργίας τόξου: Το τόξο Κουρίλ αποτελεί μέρος του γεωδυναμικού συστήματος της βύθισης της Ειρηνικής πλάκας (90-118 Ma) κάτω από την Βόρειοαμερικανική πλάκα ή την Okhotsk πλάκα (η οποία θεωρείται από κάποιους επιστήμονες ως ξεχωριστή λιθοσφαιρική πλάκα μεταξύ της Βορειοαμερικανικής, Ευρασιατικής, Ειρηνικής, Armunian πλάκας και είναι κυρίως καλυμμένη από την Okhotsk θάλασσα) (Ishikawara & Tera 1997 και Martynov et al. 2010 και De Grave et al. 2016) .

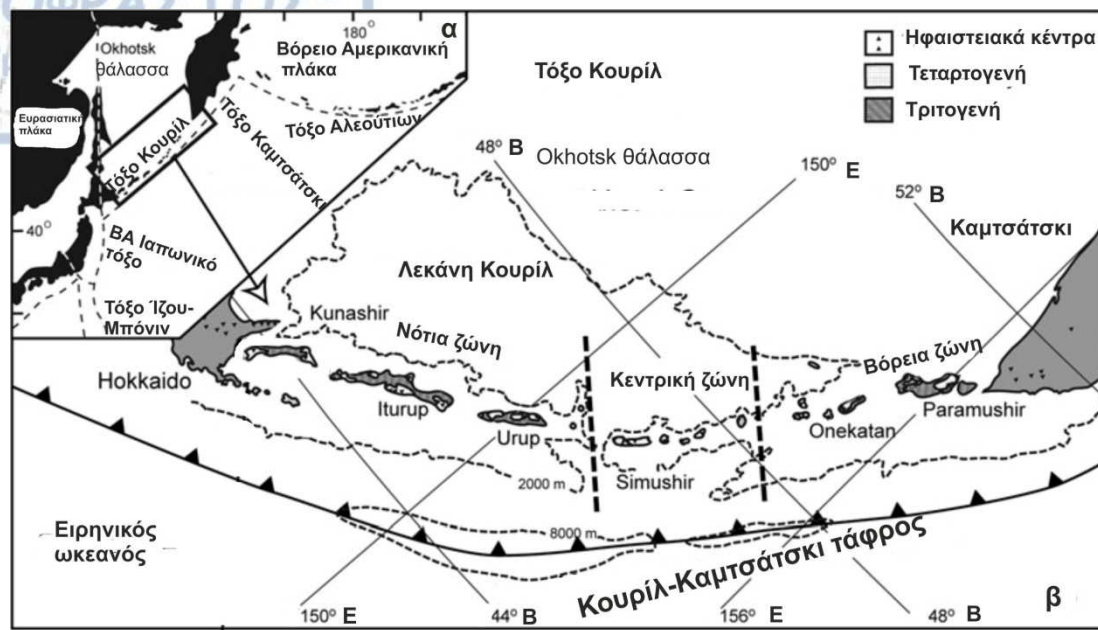
Τοποθεσία τόξου: Το τόξο απαρτίζεται από την τάφρο Κουρίλ-Καμτσάτσκι, την μεγάλη ηφαιστειακή αλυσίδα Κουρίλ και την οπισθοτόξια λεκάνη Κουρίλ(Martynov et al. 2010). Το τόξο εκτείνεται 1150 χλμ, έχει πλάτος 100-200 χλμ και βρίσκεται μεταξύ του τόξου Καμτσάτσκι και του τόξου Χοκάιντο-Ιαπωνίας. Το ανατολικό Χοκάιντο ανήκει στο τόξο Κουρίλ και το κεντρικό, δυτικό Χοκάιντο στο τόξο Ιαπωνίας (Ishikawara & Tera 1997, Martynov et al 2010 και De Grave et al 2016). Η παρουσία πολυάριθμων μεταμορφωμένων πετρωμάτων ως ξενόλιθους στους τεταρτογενείς βασάλτες υποδεικνύουν ότι το τόξο σχηματίζεται επάνω σε ηπειρωτικό φλοιό.

Βάθος βύθισης, πάχος φλοιού: Το βάθος της βυθιζόμενης ωκεάνιας Ειρηνικής πλάκας κυμαίνεται μεταξύ 94.2 χλμ, κάτω από το βόρειο Κουρίλ, 92 χλμ κάτω από το νότιο Κουρίλ. Το πάχος του φλοιού μεταβάλλεται ελάχιστα κατά μήκος του τόξου και είναι 28-33 χλμ στο νότιο, 25-30 χλμ στο κεντρικό και 32-36 χλμ στο βόρειο Κουρίλ.

Ηλικία ηφαιστειότητας τόξου και οπισθοτόξιας λεκάνης του: Σύμφωνα με τους Martynov et al. (2010), ο σχηματισμός της ηφαιστειακής αλυσίδας Κουρίλ ξεκίνησε το άνω Μειόκαινο με κάτω Ολιγόκαινο, την ίδια περίοδο που συγκρούστηκαν τα τόξα Κουρίλ και Ιαπωνίας . Η οπισθοτόξια λεκάνη Κουρίλ θεωρείται ότι σχηματίστηκε στο μέσο Μειόκαινο ως κάτω Ολιγόκαινο (32-15 Ma) λόγω οπισθοτόξιας έκτασης. Από το κάτω Πλειόκαινο την έκταση την διαδέχθηκε συμπίεση, όμως η μαγματική δραστηριότητα παραμένει ενεργή (Martynov et al. 2010) .

Ηφαιστειακά νησιά τόξου: Η ηφαιστειακή αλυσίδα περιλαμβάνει μια σειρά ηφαιστειακών νησιών με ενεργά στρωματοηφαίστεια. Βορειοανατολικά μεγάλα (πχ Iturup, Urup, Simushir, Onkotan, Paramushir, Shumshukai) και μικρά νησιά (πχ Rasshua, Matua, Shishkotan, Kharimkotan) σκιαγραφούν την ηφαιστειακή αλυσίδα Κουρίλ (De Grave et al 2016). Υπάρχει δεύτερο τόξο ηφαιστειακών νησιών, τα μικρά νησιά Κουρίλ (ή Nemuro-Shikotan τόξο) Το Nemuro-Shikotan βρίσκεται στην πλευρά του Ειρηνικού, νότια του Kunashir, του δυτικότερου νησιού του τόξου Κουρίλ και περιλαμβάνει την χερσόνησο Nemuro του Χοκάιντο. Θεωρείται ότι αυτό το παλαιότερο αποτελεί το υπόβαθρο σχηματισμού του σημερινού τόξου Κουρίλ (De Grave et al. 2016) .

Πετρώματα τόξου: Τα ηφαιστειακά πετρώματα των νησιών Κουρίλ μπορούν να διαχωριστούν σε δύο ομάδες: **α)** Την κατώτερη ομάδα που αποτελούνται κυρίως από παραμορφωμένα Νεογενή πετρώματα **β)** Την ανώτερη ομάδα που αποτελείται από Πλειστοκαινικά ως τωρινά πετρώματα των οποίων η σύσταση κυμαίνεται από βασάλτη ως ρυόλιθο, με τους βασαλτικούς ανδεσίτες να κυριαρχούν (De Grave et al. 2016).



Σχήμα 4.2.4.1 α)Χάρτης του Κουρίλ νησιώτικου τόξου, β)τοποθεσίες Τεταρτογενών ηφαιστειών (τροποποιήθηκε από Martynov et al. 2010)

4.2.5 Τόξο Ρίου-Κίου

Τοποθεσία τόξου: Σύμφωνα με τους Shinjo (1999), Shinjo & Kato (2000) και Shinjo et al. (2000), το τόξο Ρίου Κίου εκτείνεται 1200 χλμ μεταξύ του Kyushu, της νοτιοδυτικής Ιαπωνίας και της Ταϊλάνδης.

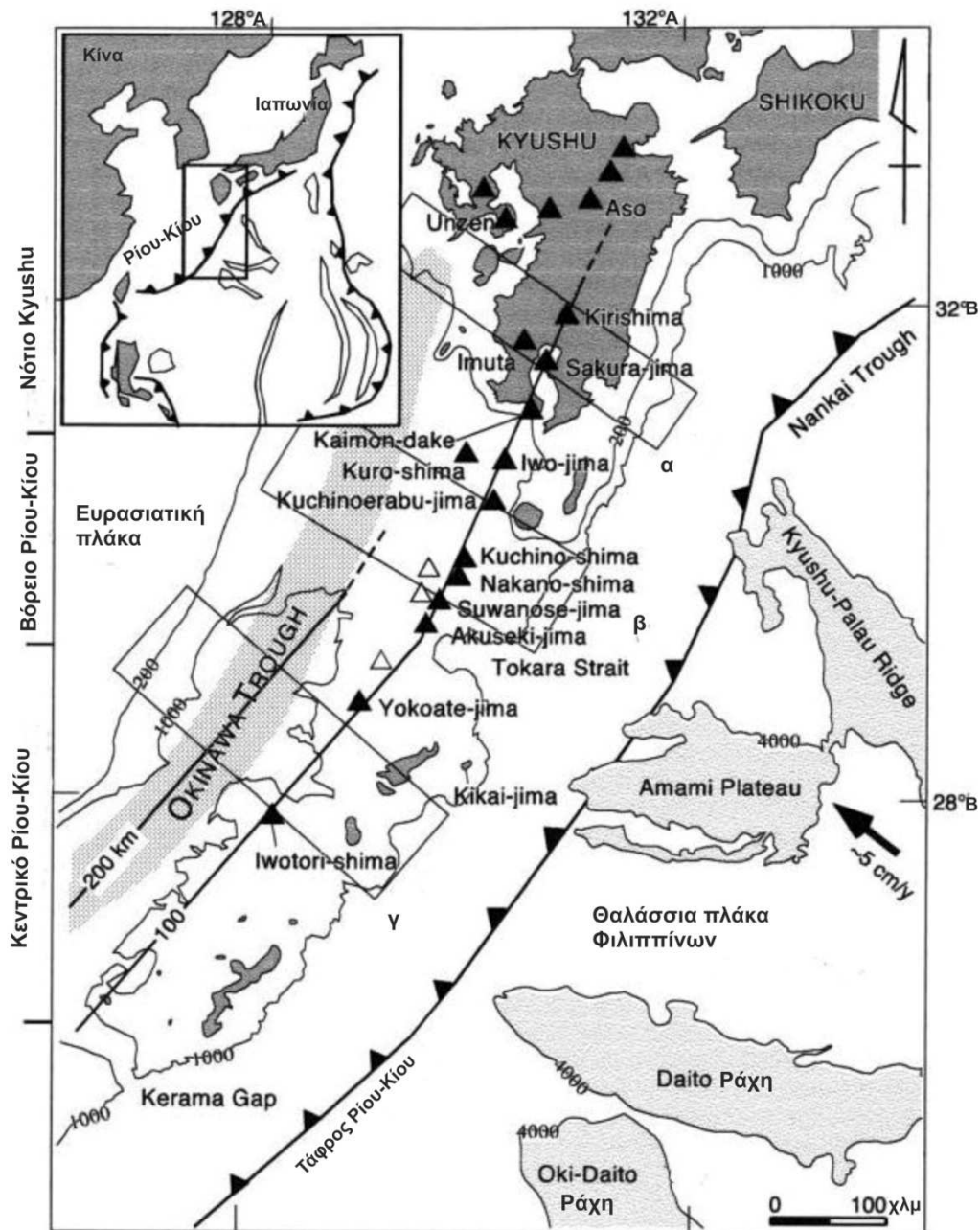
Λόγος δημιουργίας τόξου: Το τόξο Ρίου Κίου σχετίζεται με την δυτική κατευθύνσεως βύθιση της θαλάσσιας πλάκας των Φιλιππίνων κάτω από την Ευρασιατική πλάκα, με ταχύτητα 6-7 cm/a.

Συνολικό σύστημα τόξου: Το σύστημα του τόξου αποτελείται από την τάφρο Ρίου Κίου, μια σειρά από νησιά, μια ενεργή ηφαιστειακή ζώνη και την οπισθοτόξια λεκάνη Okinawa Trough τα οποία είναι υποπαράλληλα μεταξύ τους στην περιοχή από την μεριά του Ειρηνικού έως το περιθώριο της Ασιατικής ηπείρου.

Περιοχές τόξου και η ηφαιστειότητά τους: Το τόξο Ρίου Κίου έχει διαχωριστεί σε τρεις περιοχές: Το Βόρειο, Κεντρικό και Νότιο Ρίου Κίου. **α) Στο Βόρειο Ρίου Κίου** το ηφαιστειακό μέτωπο χαρακτηρίζεται από Τεταρτογενή, ενεργά ηφαίστεια με κυρίως ανδεδιτικά ηφαιστειακά προϊόντα. Προς το νότο, στην μέση της τάφρου Okinawa και του κεντρικού Ρίου Κίου το ηφαιστειακό μέτωπο γίνεται ασαφές. **β) Στο κεντρικό Ρίου Κίου** στα νησιά O-Jima και Kume-jima τα ηφαιστειακά προϊόντα είναι υψηλού Mg ανδεδίτες και βασάλτες αντίστοιχα. Τα πρώτα χρονολογούνται με K-Ar στα 6.08 ± 46 Ma, ενώ τα δεύτερα δεν έχουν χρονολογηθεί ισοτοπικά αν και πιστεύεται ότι στρωματογραφικά είναι ισόχρονα με τους ανδεδίτες καθώς υπόκεινται του σχηματισμού Uegusukudake ηλικίας 4.6-5.5 Ma. Τα υψηλού Mg πετρώματα συσχετίζονται με άλλους μεγάλους όγκους λαβών, όπως την ομάδα Aguni 6.4 Ma ηλικίας και τον σχηματισμό Uegusukudake που έχουν χαρακτηριστικά ασβεσταλκαλικών πετρωμάτων. Η ομάδα Aguni συναντιέται στο νησί Akuni-Jima, ο σχηματισμός Uegusukudake στο νησί Kume-Jima, στο οποίο συναντιέται επίσης ο μεσο-Μειοκαινικής ηλικίας ασβεσταλκαλικός σχηματισμός Aradake ηλικίας 17.7-12.6 Ma. **γ) Στο νότιο Ρίου Κίου** στο νησί Iriomote-Jima συναντιούνται υψηλού Mg βασάλτικοι ανδεδίτες. Χρονολόγηση με K-Ar δείχνουν ηλικία πετρώματος 13.1±1.1 Ma.

Οπισθοτόξια λεκάνη τόξου: Η Okinawa Trough είναι μια νέα οπισθοτόξια λεκάνη που σχηματίστηκε λόγω έκτασης της Ευρασιατικής ηπειρωτικής λιθόσφαιρας πίσω από το τόξο

και τάφρο Ρίου Κίου. Δεδομένα ανακλώμενων κυμάτων δείχνουν ότι ο φλοιός της οπισθοτόξιας λεκάνης είναι ηπειρωτικός και ότι η πυκνότητά του αυξάνεται από 18 χλμ σε 30 χλμ στην νότια και βόρεια τάφρο Okinawa αντίστοιχα.



Σχήμα 4.2.5.1 Χάρτης του βόρειου τόξου Ρίου Κίου που απεικονίζει τα κύρια δομικά στοιχεία καταστρεφόμενων περιθωρίων. Σκιαγραφούνται οι βαθύμετρες των 200,1000 χλμ. Μαύρα τρίγωνα: Τεταρτογενή ηφαίστεια, άσπρα τρίγωνα: μέσου Μειοκαίνου-Πλειοκαίνου ηφαίστεια, πυκνές γραμμές: ισοϋψείς 100,200 χλμ στην ζώνη Bennioff, το μαύρο βέλος δείχνει την ταχύτητα κίνησης της θαλάσσιας πλάκας των Φιλιππίνων ως προς την Ευρασιατική πλάκα. Το νησί Kikai-Jima στα 28,3°B, 130°Α αναδύεται ταχέα με ρυθμό 1-2 mm/year λόγω σύγκρουσης του Amani Plateu με την τάφρο Ρίου Κίου. Τοπογραφικά υψώματα (πχ Amani Plateu και Daito ράχη) στην θαλάσσια πλάκα Φιλιππίνων σκιαγραφούνται από την 4000 μέτρα βαθύμετρη (τροποποιήθηκε από Shinjo et al. 2000)

4.3.1 Τόξο Αιγαίου πέλαγους

Λόγος δημιουργίας τόξου: Το τόξο του Αιγαίου σχηματίστηκε εξαιτίας της βορειοανατολικής κατευθύνσεως υποβύθισης του Μεσογειακού θαλάσσιου πυθμένα, που αποτελεί μέρος της Αφρικανικής πλάκας, κάτω από την Κρήτη και το νότιο Αιγαίο (Mitropoulos & Tarney 1992).

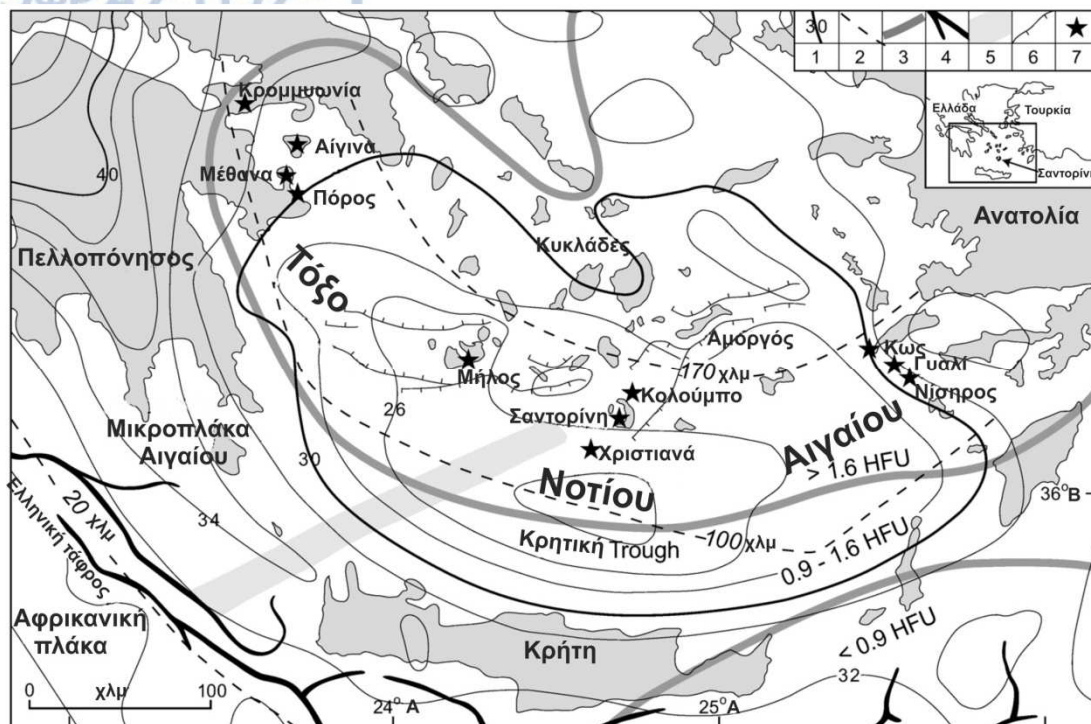
Τοποθεσία τόξου και ηφαιστειακά κέντρα: Η υποβύθιση αυτή λαμβάνει χώρα εδώ και 26 Ma. Τα ηφαιστειακά κέντρα της Αίγινας στον Σαρωνικό κόλπο, στα Μέθανα, τον Πόρο, την Μήλο, Σαντορίνη, Κω και Νίσηρο σχηματίζουν ένα τόξο ΒΔ-ΝΑ παράταξης που εκτείνεται από κοντά στην Αθήνα ανατολικά ως την Τουρκική ηπειρωτική χώρα στον Μπόντρουμ (ή αρχαία Αλικαρνασσός). Από τα ηφαίστεια ενεργά είναι της Σαντορίνης, Νίσηρου και Μέθανα.

Κύρια ηφαιστειότητα: Σύμφωνα με τους Fytikas et al. (1984) η ηφαιστειακή δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου χωρίζεται σε **δύο φάσεις**. **α)** Μία που αναπτύχθηκε κυρίως το Ολιγόκαινο- μέσο Μειόκαινο στο Βόρειο Αιγαίο, **β)** Μία που αναπτύσσεται από το μέσο Πλειόκαινο έως σήμερα στο Νότιο Αιγαίο.

Δευτερεύουσες ηφαιστειότητες: Μεταξύ των δύο κύριων φάσεων παρατηρούνται διάσπαρτα, στα περιθώρια της μικροπλάκας του Αιγαίου, δευτερεύουσες ηφαιστειότητες ηλικίας άνω Μειόκαινου- Τεταρτογενούς με ποικίλα πετρογενετικά χαρακτηριστικά.

Μετανάστευση ηφαιστειότητας: Η ηφαιστειότητα ξεκίνησε στο βορειότερο τμήμα του βόρειου Αιγαίου με μεσαία ως όξινη ασβεσταλκαλική σύσταση. Σταδιακά η ηφαιστειότητα μετανάστευσε νότια και ταυτόχρονα εμπλουτίστηκε σε Κ. Αυτή η εξέλιξη θεωρείται ότι οφείλεται στην αύξηση της κλίσης της ζώνης σεισμικότητας Benioff κάτω από την Ευρασιατική πλάκα. Με την σειρά του το γεγονός αυτό ήταν αποτέλεσμα μείωσης του ρυθμού σύγκλισης Ευρασιατικής-Αφρικανικής πλάκας μετά από ηπειρωτική τους σύγκρουση.

Ηφαιστειακά προϊόντα: **1)** Τα ηφαιστειακά προϊόντα της Ολιγοκαινικής-μέσο Μειοκαινικής φάσης είναι ασβεσταλκαλικές ως σωσονιτικές λάβες και πυροκλαστικά με μέτριας οξύτητας ως βασικά πετρώματα. **2)** Τα ηφαιστειακά προϊόντα της φάσης του μέσου Πλειοκαίνου ως σήμερα είναι κυρίως ανδεσίτες, με μικρό ποσοστό βασαλτών ή ρυόλιθων με τυπικά χαρακτηριστικά ασβεσταλκαλικότητας σε λεπτά ηπειρωτικά περιθώρια.



Σχήμα 4.3.1.1 Τόξο νότιου Αιγαίου. Η εικόνα επικεντρώνεται στο γεωδυναμικό περιβάλλον της Σαντορίνης. 1) Βάθος της Moho (σε χλμ), 2) Βάθος της ζώνης Benioff, 3) Ροή θερμότητας, 4) Ελληνική τάφρος, 5) ζώνη Σαντορίνης μεσαίου βάθους σεισμών, 6) Πλειοκαινικές-Τεταρτογενείς δομές ρηγμάτων στο κεντρικό τμήμα του τόξου, 7) Ηφαίστεια (τροποποιήθηκε από Bailey et al. 2009)

4.3.2 Τόξο Άνδεων

Τοποθεσία τόξου: Η κορδilierά των Άνδεων είναι μια συνεχόμενη αλυσίδα από όρη που εκτείνεται 10.000 χλμ κατά μήκος του δυτικού άκρου της Νότιας Αμερικής, από την Καραϊβική θάλασσα ως την Scotia θάλασσα. Είναι η μεγαλύτερη επιφανειακή οροσειρά στην Γη.

Λόγος δημιουργίας τόξου: Οφείλει τον σχηματισμό της στην υποβύθιση της ωκεάνιας πλάκας Νάζκα (12-20 Ma) κάτω από την ηπειρωτική πλάκα της Νότιας Αμερικής με ρυθμό σύγκλισης 58 mm/yr με κατεύθυνση Α-Δ (Wilson 1989 και Tassara et al. 2006 και Hidalgo et al. 2012).

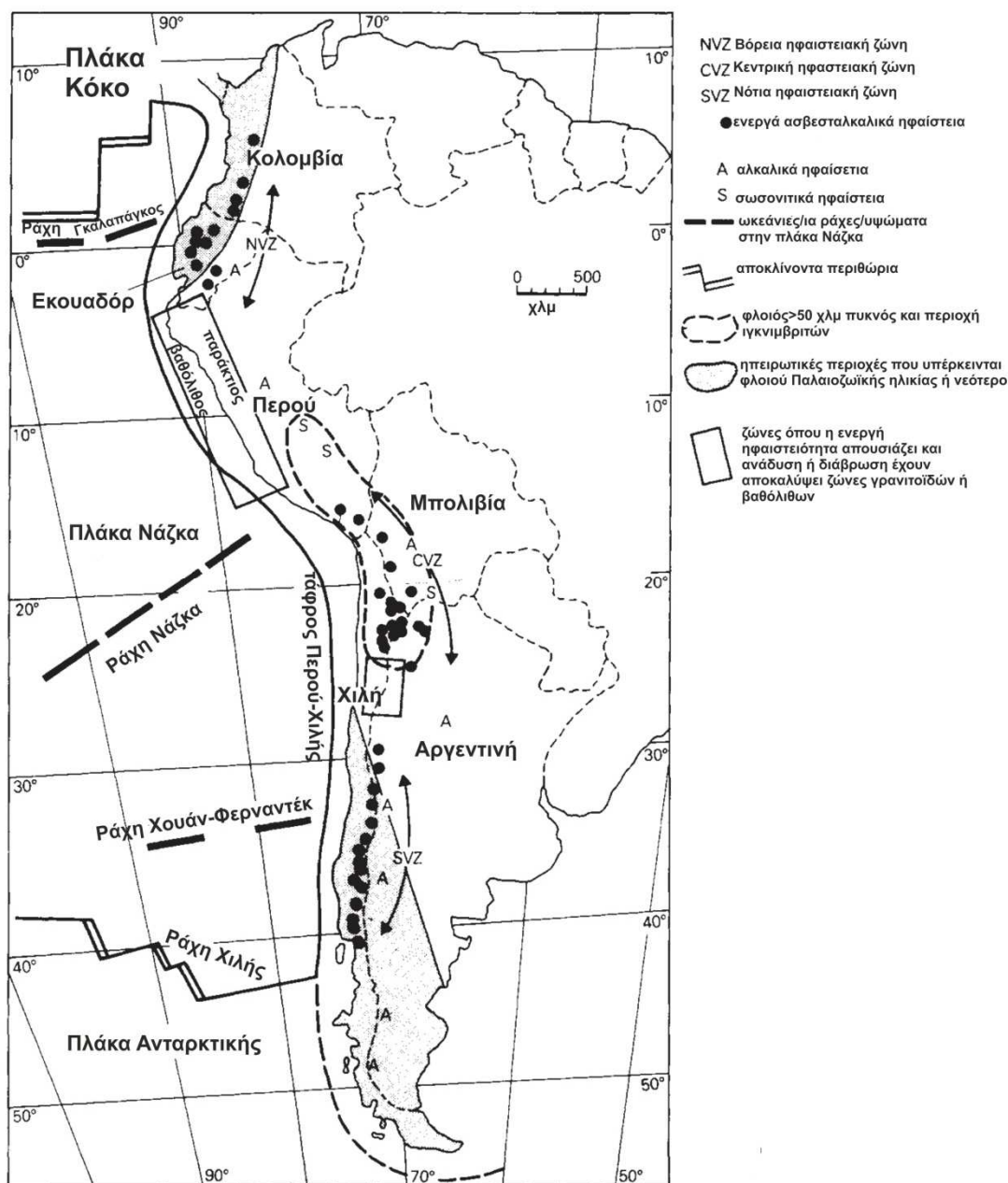
Ανωμαλία κλίσης υποβύθισης: Σύμφωνα με την Wilson (1989), σημαντικό χαρακτηριστικό του τωρινού συστήματος υποβύθισης είναι ότι χωρίζεται σε ζώνες μικρής κλίσης ($< 10^\circ$) και πιο απότομης κλίσης ($\sim 30^\circ$) βύθισης. Η ενεργή ηφαιστειότητα σχετίζεται μόνο με τις ζώνες πιο απότομης κλίσης βύθισης. Η ύπαρξη της ανωμαλίας των ζωνών μικρής κλίσης πιθανολογείται ότι οφείλεται στην υποβύθιση ασεισμικών ράχων των Νάζκα και Χουαν ντε Φούκα εντός της πλάκας Νάζκα.

Γεωγραφικός διαχωρισμός τόξου: Οι Άνδεις στην περιοχή της δυτικής Κολομβίας διαχωρίζονται σε δυτική, κεντρική και ανατολική Κορδilierά, η κάθε μια έχοντας διαφορετικής σύστασης υπόβαθρο προερχόμενο από ξεχωριστές γεωλογικές διαδικασίες, όπως αναφέρεται με περισσότερες λεπτομέρειες στους Quandt et al. (2018).

Ηλικία ηφαιστειότητας: Σύμφωνα με την Wilson (1989) το ηφαιστειακό τόξο των Άνδεων σχηματίστηκε επάνω σε επιφάνεια Προκάμβριων και Παλαιοζωϊκών πετρωμάτων που ανυψώθηκε κατά μήκος του Ειρηνικού περιθώριου της Αμερικής το άνω Τριαδικό με κάτω Ιουραϊκό.

Ζώνες ηφαιστειότητας: Η ενεργός ηφαιστειότητα στις Άνδεις διακρίνεται σε **τρεις ζώνες:** **α)** η βόρεια ηφαιστειακή ζώνη (NVZ) που εκτείνεται από την Κολομβία μέχρι τον Εκουαδόρ ($5^{\circ}\text{B}-2^{\circ}\text{N}$), **β)** η κεντρική ηφαιστειακή ζώνη (CVZ) που εκτείνεται από το νότιο Περού μέχρι την βόρεια Χιλή, Αυστραλία, Μπολιβία ($16^{\circ}\text{N}-28^{\circ}\text{N}$), **γ)** νότια ηφαιστειακή ζώνη (SVZ) που εκτείνεται στην νότια Χιλή και Αργεντινή.

Τύπος ηφαιστειότητας τόξου: **1)** Οι λάβες της NVZ απαρτίζονται από βασαλτικούς ανδεσίτες και ανδεσίτες. **2)** Οι λάβες της SVZ είναι παρόμοιες με της NVZ, αλλά λίγο πιο βασικές με υψηλού Al βασάλτες και βασαλτικούς ανδεσίτες να επικρατούν. **3)** Οι λάβες της CVZ είναι ενδιάμεσες ως όξινες, με αύξηση του περιεχόμενου K_2O ως προς $\text{SiO}_2\%$ και με την αύξηση του βάθους στην ζώνη σεισμικότητας Βεννιόφ ασβεσταλκαλικά ηφαιστειακά μεταβαίνουν σε σωσονιτικά.



Σχήμα 4.3.2.1 Κατανομή των ενεργών ηφαιστειών στην κορδιλιέρα των Άνδεων στην νότιο Αμερική (τροποποιήθηκε από Wilson 1989)

Τοποθεσία τόξου: Το Τεταρτογενές τόξο Κασκέντ εκτείνεται 1250 χλμ από το όρος Lassen της βόρεια Καλιφόρνιας μέχρι το όρος Meager της Βρετανικής Κολομβίας (Mitchell & Asmerom 2011) .

Λόγος δημιουργίας, παλιότερες απόψεις: Παλιότερη εργασία, όπως του Schmidt et al. (2008), αναφέρουν ότι το τόξο οφείλεται σε υποβύθιση νέου φλοιού που απαρτίζεται από τις μικροπλάκες Explorer(2-6 Ma), Juan De Fuca(4-28 Ma), Gorda(10-26 Ma στην τάφρο) κάτω από την πλάκα της Βόρειου Αμερικής με ρυθμό σύγκλισης 40-45 mm/yr με κάθετη κλίση στην Βρετανική Κολομβία και Ουάσινγκτον και πλάγια προς βορρά στο νότιο τόξο . Οι μικροπλάκες οριοθετούνται η μία από την άλλη με τις ζώνες διάρρηξης Nootka και Blanco. Σεισμικότητα στο τόξο υπάρχει κυρίως βόρεια και νότια μέρη του τόξου όπου το βάθος της υποκείμενης πλάκας είναι ~100 χλμ. Δεν υπάρχει σεισμικότητα κάτω από το κεντρικό και νότιο Όρεγκον.

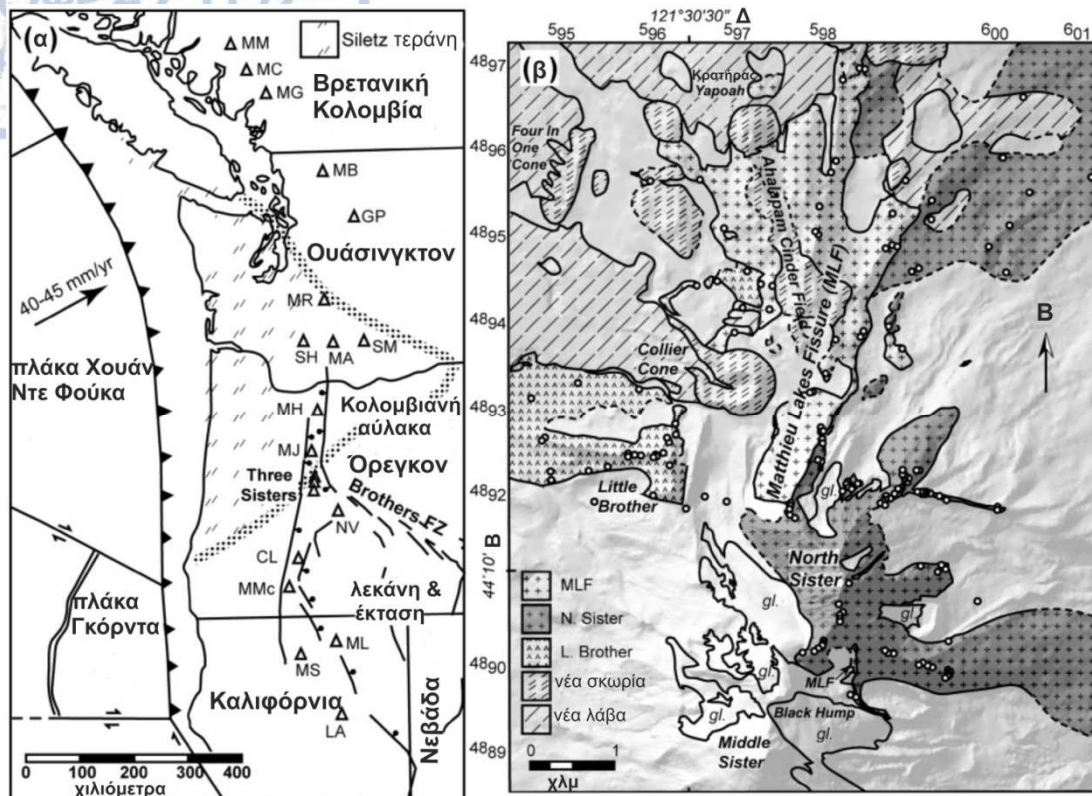
Λόγος δημιουργίας, νεότερες απόψεις: Σε νεότερη εργασία, όπως την Mitchell & Asmerom (2011), αναφέρεται ότι υποβυθίζεται μόνο η Juan de Fuca(<10 Ma στην τάφρο) με ρυθμό υποβύθισης ~3.5 cm/a. Ότι από τα δύο κι αν ισχύει παραμένει το γεγονός ότι υποβυθίζεται νέα, θερμή πλάκα και γιαυτό στο Κασκέντ τόξο ισχύει το θερμό μοντέλο υποβύθισης (σχήμα 3.3.2.1) (Schmidt et al. 2008 και Mitchell & Asmerom 2011) .

Τρόπος ανάπτυξης τόξου: Το τόξο Κασκέντ έχει αναπτυχθεί πάνω σε φλοιό που απαρτίζεται από επωημένες τερράνες ηλικίας Παλαιοκένου μέχρι Ηωκαίνου (Schmidt et al. 2008). Τοπογραφικά δεν υπάρχει τάφος κατά μήκος του ηπειρωτικού περιθωρίου διότι έχει καλυφθεί από ιζήματα λόγω υψηλών ρυθμών ιζηματογένεσης στο βόρειο Ειρηνικό περιθώριο (Leeman et al. 1990).

Γεωγραφικός διαχωρισμός τόξου: Στην περιοχή του Όρεγκον του τόξου Κασκέντ διακρίνονται δύο γεωγραφικές περιοχές: το Western Cascades (40-10 Ma) και High Cascades (10-0 Ma) (Rowe et al. 2009). Ο μεγάλος όγκος βασικής ηφαιστειότητας στο κεντρικό Όρεγκον στο Κασκέντ τόξο έχει προκύψει από μια διάνοιξη που έλαβε χώρα πριν 5 Ma στο κεντρικό Όρεγκον High Cascades.

Πετρώματα τόξου: Όπως αναφέρεται στους Schmidt et al. (2008), στο τόξο υπάρχει μεγάλη ποικιλία σύστασης ανάμεσα στα πρωταρχικά βασαλτικά ηφαιστειακά πετρώματα. Οι κύριοι χημικοί τύποι είναι ασβεσταλκαλικοί βασάλτες (~3 Ma) (Rowe et al. 2009), χαμηλού Καλίου θολείτες, βασάλτες εμπλουτισμένους σε ελαφριές σπάνιες γαίες και στοιχεία HFS (στοιχεία υψηλού δυναμικού πεδίου), υψηλού μαγνησίου βασαλτικοί ανδεσίτες και τέλος έντονα αλκαλικά αμψαροκίτικα πετρώματα .

Ηφαιστειακές ζώνες: Με βάση ισοτοπικά δεδομένα ηφαιστειακών πετρωμάτων του τόξου και από το κεντρικό Όρεγκον χωρίστηκαν οι εξής ηφαιστειακές περιοχές: **1)** η Βόρεια περιοχή από το βουνό Meager ως την κορυφή Glacier, **2)** η περιοχή Κολομβίας από το βουνό Rainier ως το βουνό Jefferson, **3)** η Κεντρική περιοχή από το Three Sisters ως την λίμνη Medicine, **4)** η Νότια περιοχή που περιλαμβάνει το βουνό Shasta ως την κορυφή Lassen. Η ηφαιστειότητα της οπισθοτόξιας λεκάνης του τόξο είναι νεότερη από ~1 Ma (Rowe et al. 2009).



Σχήμα 4.3.3.1 α) Τεκτονικός χάρτης της ζώνης υποβύθισης Κασκέιντ. Το North Sister από το ηφαιστειακό πεδίο Three Sisters βρίσκεται στην διασταύρωση βόρειας-νότιας κατεύθυνσης High Cascade Graben, που υποδεικνύεται από κανονικά ρήγματα και την ζώνη διάρρηξης Brother (Brother fault zone). MM, Mt. Meager; MC, Mt. Cayley; MG, Mt. Garibaldi; MB, Mt. Baker; GP, Glacier Peak; MR, Mt. Rainier; SH, Mt. St. Helens; MA, Mt. Adams; SM, Simcoe Mountain; MH, Mt. Hood; MJ, Mt. Jefferson; NV, Newberry Volcano; CL, Crater Lake; MMc, Mt. McLaughlin; ML, Medicine Lake; MS, Mt. Shasta; LA, Lassen Peak. β) Απλουστευμένος γεωλογικός χάρτης των North Sister, Little Brother, Matthieu Lakes Fissure (MLF), και Ολοκαινικών κόνων σκωρίας. Περιοχές χωρίς μοτίβο είναι μοραίνες, παγετώνες αλλούβια και αποθέσεις στάχτης. Λευκή κύκλοι είναι περιοχές δειγματοληψίας (τροποποιήθηκε από Schmidt & Grunder 2011)

4.3.4 Τόξο Κεντρικής Αμερικής

Λόγος δημιουργίας τόξου: Σύμφωνα με τους Heydolph et al. (2012), το τόξο της Κεντρικής Αμερικής αναπτύχθηκε λόγω της υποβύθισης της πλάκας Cocos κάτω από την Καραϊβική πλάκα.

Τοποθεσία τόξου: Εκτείνεται 1400 χλμ από το ηφαίστειο Takana, κοντά στα σύνορα Γουατεμάλας-Μεξικού, έως τον δυτικό Παναμά.

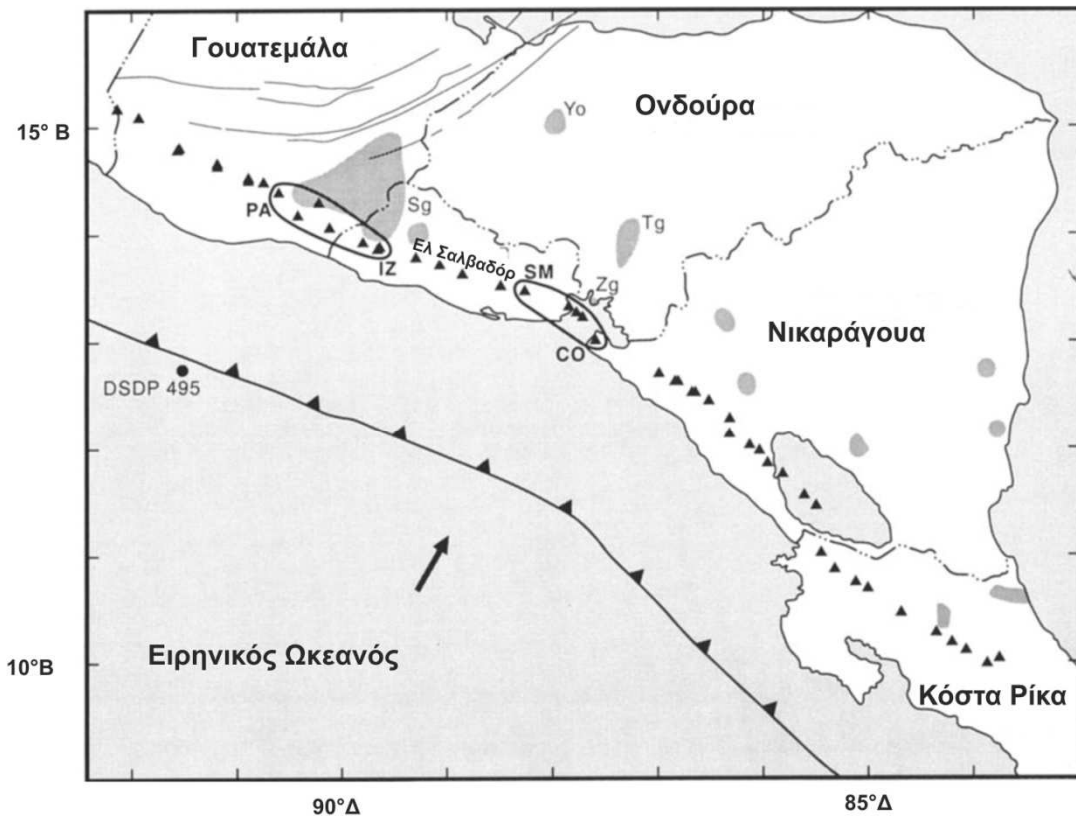
Ηφαιστειακά κέντρα τόξου: Τα ηφαιστειακά κέντρα που προκύπτουν από την υποβύθιση χωρίζονται, ανάλογα με την σχετική θέση τους στο τόξο, σε: **1)** ηφαιστειακό μέτωπο (VF), αποτελώντας την κύρια αλυσίδα ηφαιστειών. Το ηφαιστειακό μέτωπο είναι παράλληλο στην Μεσαία Αμερικανική τάφρο, που σηματοδοτεί την υποβύθιση της πλάκας Cocos κάτω από την πλάκα της Καραϊβικής και την μικροπλάκα του Παναμά (Diriazza et al. 2015). **2)** μικρότερα ηφαιστειακά κέντρα πίσω από το VF (BVF) σε απόσταση έως 350 χλμ από την τάφρο, **3)** αρκετά πίσω από το τόξο ηφαιστειακά κέντρα (BA) υπάρχουν στην Honduras, όπως τα νησιά Yojoa και Utila, σε απόσταση 350-520 χλμ από την τάφρο.

Οπισθοτόξια ηφαιστειότητα τόξου: Σύμφωνα με τους Walker et al. (2000), το βορειότερο κομμάτι της ζώνης υποβύθισης της Κεντρικής Αμερικής περιλαμβάνει τις περιοχές οπισθοτόξιας ηφαιστειότητας της νοτιοανατολικής Γουατεμάλας και της

Ονδούρας. Επιπρόσθετα περιλαμβάνεται και το περιθώριο μετασχηματισμού της Καραϊβικής και Βορειοαμερικανικής πλάκας.

Παράγοντες επιρροής μάγματος τόξου: Το τόξο έχει δύο χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την μαγματογένεση: 1) Μεταβολή της κλίσης της βυθιζόμενης πλάκας κατά μήκος του τόξου, αντιστρόφως ανάλογη μεταβολή στην πυκνότητα του φλοιού, 2) Η ιζηματογένεση.

Ηφαιστειότητα τόξου: Οι λάβες που εκρήγνυνται από όλα τα ηφαίστεια VF ποικίλουν από πορφυριτικούς βασάλτες έως ρυόλιθους, με πιο κοινά τους βασάλτες και βασαλτικούς ανδεσίτες. Οι λάβες των ηφαιστειών BVF επηρεάζονται από τις αλληλεπιδράσεις των πλακών της Καραϊβικής και Βόρειας Αμερικής. Η σύστασή τους είναι αυτή αφυρικών και σπάνια πορφυριτικών βασαλτών με περισσότερο wt% MgO από τις λάβες VF και μεγαλύτερες συγκεντρώσεις σε ασυμβίβαστα στοιχεία ή λόγους ασυμβίβαστων στοιχείων.



Σχήμα 4.3.4.1 Ζώνη υποβύθισης Κεντρικής Αμερικής. Το τόξο δείχνει κατά προσέγγιση την κατεύθυνση σύγκλησης των πλακών Cocos και Καραϊβικής. Τα τρίγωνα συμβολίζουν τα ηφαίστεια του ηφαιστειακού μετώπου. Σχετικά ηφαιστειακά μέτωπα για δύο διατομές είναι κυκλωμένα. Οι διατομές εκτείνονται πίσω από αυτά τα τμήματα του ηφαιστειακού μετώπου στην κατεύθυνση σύγκλησης των πλακών. Τα ηφαίστεια που είναι σημειωμένα είναι τα: PA, Pacaya, IZ: Izalco, SM: San Miguel και CO: Cosigüina. Οι σκιασμένες περιοχές είναι τμήματα της ηφαιστειακής δραστηριότητας πίσω από το τόξο (BVF). Επιπλέον έχουν σημειωθεί τα: Sg: southeastern Guatemala, Yo: Lago Yojoa, Tg: Tegucigalpa και Zg: Zacate Grande. Οι συνεχόμενες γραμμές στην κεντρική Γουατεμάλα είναι ρήγματα που σηματοδοτούν το όριο μεταξύ της Καραϊβικής και νότιας Αμερικανικής πλάκας. Η τάφρος της Κεντρικής Αμερικής σηματοδοτεί το όριο μεταξύ της πλάκας Cocos και Καραϊβικής. (τροποποιήθηκε από Walker et al. 2000)

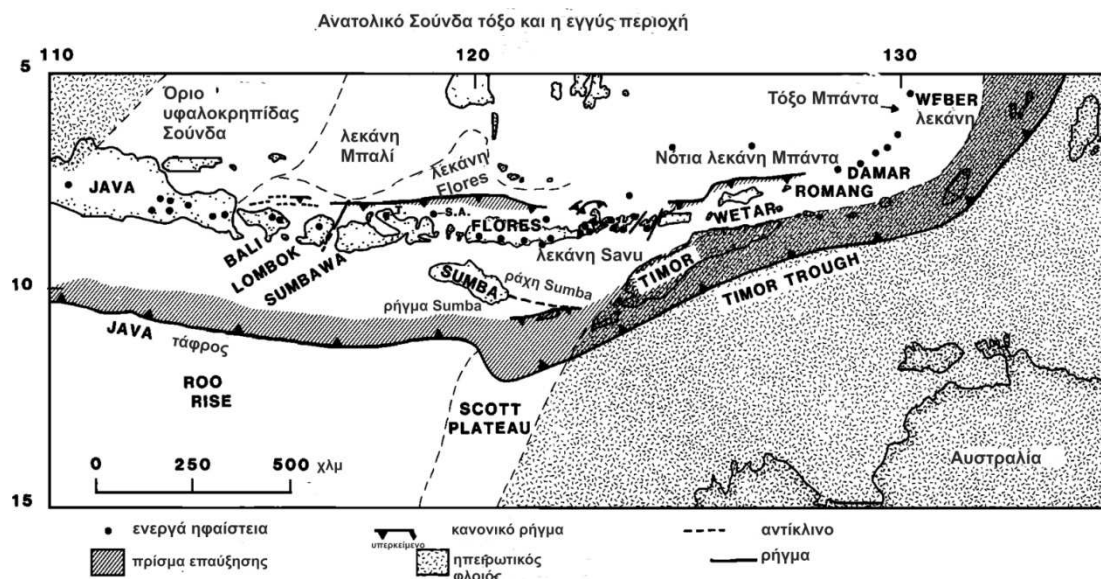
Τοποθεσία τόξου: Σύμφωνα με τους Hadley et al. (2011), το τόξο Σούνδα εκτείνεται από τα νησιά Adaman βόρεια της Σουμάτρας έως το Flores στην θάλασσα Μπάντα.

Λόγος δημιουργίας τόξου: Έχει αναπτυχθεί λόγω της βόρειας κατευθύνσεως μετανάστευσης κατά $6-7 \text{ cm}^{-1}$ και βύθισης της Ινδοαυστραλιανής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική.

Ιστορία εξέλιξης τόξου: Σύμφωνα με τους Wheller et al. (1987) η περιοχή χαρακτηρίζεται από περίπλοκες τεκτονικές σχέσεις μεταξύ ωκεάνιων και ηπειρωτικών τεράνων. Η εξέλιξη του Ινδονησιακού αρχιπέλου από το Μεσοζωϊκό έχει οδηγήσει στην ανατολική κατευθύνσεως μετανάστευση μιας σειράς ζωνών υποβύθισης. Αυτές ξεκινούν με ένα Κρητιδικό-κάτω Τετατογενές τόξο που εκτείνονταν μέσω της Σουμάτρας, Java και το νοτιοανατολικό Kalimantan. Αυτό το διαδέχθηκε το σημερινό κάτω-μέσου Τετατογενούς τόξο που περιλαμβάνει τις περιοχές Java, Sumbawa, Flores, Wetar και το νοτιοανατολικό Sulawesi.

Στοιχεία μετάβασης από ηπειρωτικό σε ωκεάνιο φλοιό: Σεισμικά δεδομένα στην εμπροσθοτόξια περιοχή της Σουμάτρα, δηλαδή στο ανατολικό τόξο Σούνδα και την θάλασσα Java, έδειξαν πυκνότητες του φλοιού 20-30 χλμ κάτω από την Σουμάτρα και Java και 18 χλμ κοντά στο Μπαλί. Αυτές οι τιμές θεωρήθηκαν πως είναι μετάβαση από τυπικό ηπειρωτικό σε ωκεάνιου φλοιού.

Ηφαιστειότητα τόξου και γειτονικού τόξου Μπάντα: Όσον αφορά την ηφαιστειότητα του τόξου Σούνδα και του γειτονικού του τόξου Μπάντα (παρ.4.2.2) τα πετρώματα ποικίλουν από θολεϊτικά μέχρι ασβεσταλκαλικά και από σωσονιτικά ως λευκιτικά. Από δυτικά προς ανατολικά, στις περιοχές του δυτικού Java, Μπαλί και Flores, τα ηφαίστεια εμπλουτίζονται σταδιακά σε κάλιο ανατολικά καταλήγοντας στα λευκιτικά ηφαίστεια Muriah, Soromundi, Sangenges. Από τα παραπάνω εξαιρούνται οι περιοχές της Σουμάτρα και του Wetar, στα οποία περιλαμβάνονται κυρίως δακίες ως ρυόλιθοι.



Σχήμα 4.3.5.1 Κύρια τεκτονικά χαρακτηριστικά στο ανατολικό τόξο Σούνδα. Τοποθεσίες των ενεργών ηφαιστειών, των κύριων ρηγμάτων, πρισμάτων επαύξεσης και έκταση του ηπειρωτικού φλοιού. Η λεκάνη μπροστά από το τόξο βρίσκεται μεταξύ του τόξου και του πρίσματος επαύξεσης. (τροποποιήθηκε από Silver & McCaffrey 1983)

4.4 Γεωχημικά διαγράμματα

4.4.1 Διαγράμματα μεταβολών (bivariate plots)

Σύμφωνα με τον Rollinson (1993) ο λόγος χρήσης των διαγραμμάτων μεταβολών είναι να παρατηρηθούν μεταβολές μεταξύ των δειγμάτων και να αναγνωριστούν τάσεις. Επομένως το χημικό στοιχείο που πλοτάρεται στον x άξονα ενός τέτοιου διαγράμματος πρέπει να επιλέγεται είτε για να δείξει την μέγιστη μεταβολή μεταξύ των δειγμάτων, είτε για να απεικονίσει κάποια συγκεκριμένη γεωχημική διαδικασία. Πλοτάρεται πολύ συχνά το SiO_2 στον x άξονα για τα περισσότερα είδη πυριγενών πετρωμάτων ή ιζηματογενών με μεγάλη περιεκτικότητα σε χαλαζία. Διότι το SiO_2 είναι το κύριο συστατικό των πετρωμάτων και δείχνει την μεγαλύτερη μεταβλητότητα από οποιοδήποτε άλλο οξείδιο.

Για την κατασκευή των διαγραμμάτων μεταβολών μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε κύρια στοιχεία, είτε ιχνοστοιχεία. Ως κλασσικά **κύρια στοιχεία** θεωρούνται τα Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, K, P τα οποία αναγράφονται ως οξείδια σε μια χημική ανάλυση κύριων στοιχείων. Ως **ιχνοστοιχεία** θεωρούνται τα στοιχεία των οποίων η περιεκτικότητα σε ένα πέτρωμα είναι μικρότερη από 0.1 wt% ή αλλιώς είναι λιγότερη από 1000 μέρη στο εκατομμύριο (ppm). Συνήθως αντικαθιστούν κύρια στοιχεία στα δομικά ορυκτά των πετρωμάτων, πιο σπάνια σχηματίζουν από μόνα τους είδη ορυκτών. Τα ιχνοστοιχεία διαχωρίζονται με δύο τρόπους: α) με βάση την συμπεριφορά τους εντός ενός μαγματικού συστήματος, β) με βάση τον λόγο του φορτίου τους ως προς το μέγεθός τους, μια ιδιότητα που λέγεται δύναμη πεδίου και ουσιαστικά είναι το ηλεκτροστατικό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας του κατιόντος. Χαρακτηρίζεται και ως ιοντικό δυναμικό του στοιχείου και είναι ο λόγος του σθένους προς την ιοντική ακτίνα του στοιχείου.

Στον α τρόπο διαχωρισμού τα ιχνοστοιχεία χωρίζονται σε ασυμβίβαστα και συμβίβαστά. Κατά την τήξη του μανδύα της Γης τα ασυμβίβαστα ιχνοστοιχεία εμπλουτίζουν την ρευστή φάση και δεν εισέρχονται στην δομή των σχηματιζόμενων ορυκτών ή αν εισέλθουν θα φύγουν με την πρώτη ευκαιρία. Τα συμβίβαστα εμπλουτίζουν την στερεή φάση ή αλλιώς τα ορυκτά που σχηματίζονται κατά την ψύξη του τήγματος του μανδύα. Υπάρχουν βαθμοί συμβατότητας ή ασυμβατότητας και έτσι το ίδιο ιχνοστοιχείο μπορεί να ανήκει στην μια ή στην άλλη κατηγορία σε τήγματα διαφορετικής σύστασης.

Στον β τρόπο διαχωρισμού τα ιχνοστοιχεία χωρίζονται στα υψηλής δύναμης πεδίου κατιόντα (high field strength elements ή HFS) και τα χαμηλής δύναμης πεδίου κατιόντα (low field strength elements ή LFS) γνωστά και ως μεγάλα ιοντικά λιθόφιλα στοιχεία (large ion lithophile elements ή LILE). Τα πρώτα είναι μικρά κατιόντα με υψηλό φορτίο και ιοντικό δυναμικό >2 . Θεωρούνται ασυμβίβαστα επειδή λόγω του υψηλού φορτίου τους είναι δύσκολη η επίτευξη ισορροπίας του φορτίου τους. Τα δεύτερα είναι μεγάλα κατιόντα, μικρού φορτίου και έχουν ιοντικό δυναμικό <2 . Θεωρούνται επίσης ασυμβίβαστα λόγω της μεγάλης ιοντικής ακτίνας τους. Συμβίβαστα τείνουν να είναι τα στοιχεία με μικρή ιοντική ακτίνα και σχετικά μικρό φορτίο. HFS είναι οι λανθανίδες και τα Sc, Y, Th, U, Pb, Zr, Hf, Ti, Nb, Ta. Τα ζεύγη Hf, Zr και Nb, Ta είναι παρόμοια σε μέγεθος και φορτίο και επιδεικνύουν

παρόμοια γεωχημική συμπεριφορά. LILE είναι τα Cs, Rb, K, Ba. Μπορούν να θεωρηθούν ως LILE και τα Sr, δισθενές Eu και δισθενές Pb. Τα τρία αυτά στοιχεία έχουν σχεδόν ίδια ιοντική ακτίνα και φορτίο.

Τα είδη των διαγραμμάτων μεταβολών που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εργασία είναι τα εξής:

- α) Διαγράμματα Harker όπου προβάλλονται οξειδία ως προς SiO_2 .
- β) Προβολή MgO στον χ άξονα. Είναι μια αρκετά συχνή εναλλακτική των διαγραμμάτων Harker. Θεωρείται πιο κατάλληλο για σειρές πετρωμάτων που περιέχουν ποικίλα βασικά μέλη. Αυτό συμβαίνει διότι σε αυτή την περίπτωση μπορεί το εύρος σε περιεκτικότητες SiO_2 να είναι μικρό, ενώ το MgO είναι βασικό συστατικό των στερεών φάσεων που προέρχονται από βασικά τήγματα. Δείχνει μεγάλη μεταβλητότητα είτε λόγω της κατάρρευσης των φάσεων μαγνησίου κατά την μερική τήξη, είτε κατά την αφαίρεσή τους κατά την κλασματική κρυστάλλωση.
- γ) Διαγράμματα συνδυασμών λόγων ή μη ιχνοστοιχείων ως προς λόγους ή μη ιχνοστοιχείων ή οξειδίων κύριων στοιχείων. Στην γεωχημεία βοηθάνε πολλές φορές αυτού του είδους διαγράμματα στο να αναγνωριστούν τάσεις που είναι δύσκολο να αναγνωριστούν με πιο κλασσικά διαγράμματα. Αυτό συμβαίνει γιατί τα δεύτερα μπορεί να είναι επιδεκτικά σε τυχόν μεταμόρφωση ή αποσάθρωση που έχουν δεχτεί τα πετρώματα στην διάρκεια του χρόνου και να επηρεάζονται τα αποτελέσματα. Ανάλογα με τον συνδυασμό αυτή η πιθανότητα ελαχιστοποιείται και τα αποτελέσματα των δειγμάτων είναι πιο ακριβή και αξιόπιστα (Hastie et al. 2007).

Υπόμνημα

Ensismatic τόξα

- Τόξο Ίζου Μπόνιν
- Τόξο Κέρμαντεκ
- ◆ Τόξο Μικρών Αντίλλων
- ▼ Τόξο Μαριάνας
- ★ Τόξο Εβρίδες-Βανουάτου
- ▲ Τόξο Τόνγκα
- ⊕ Τόξο Σολομών

Ensialic τόξα

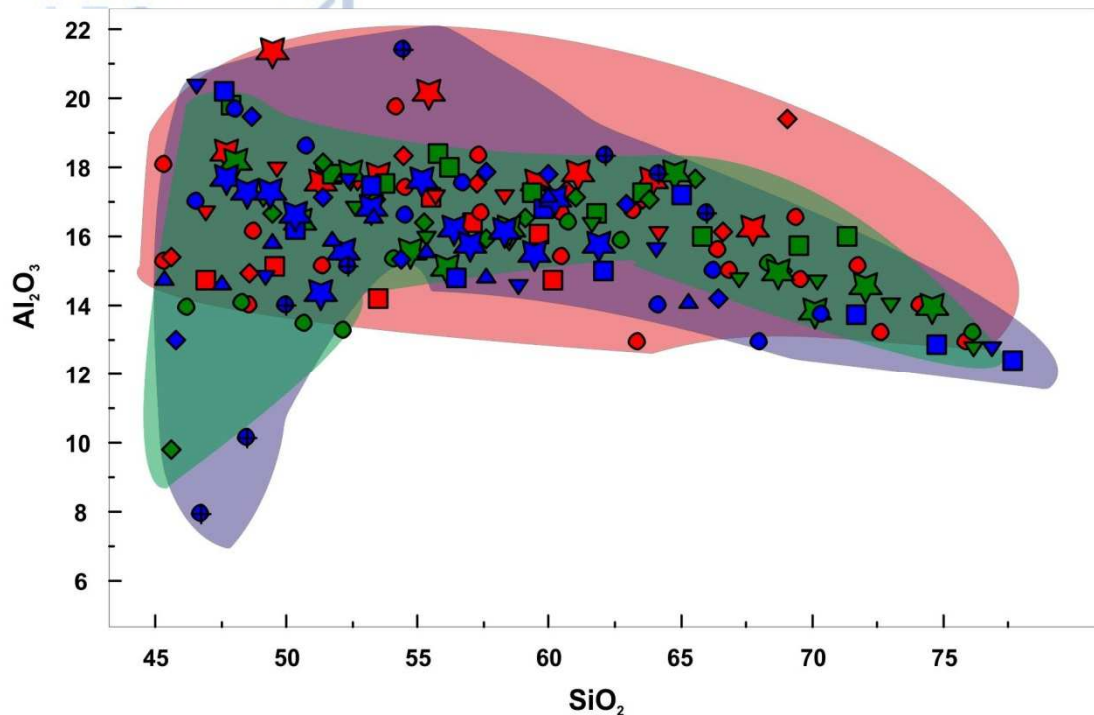
- Τόξο Αλεούτιες
- Τόξο Μπάντα
- ◆ Τόξο Καμτσάτσκι
- ▼ Τόξο Κουρίλ
- ★ Τόξο Ρίου Κίου

Ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια

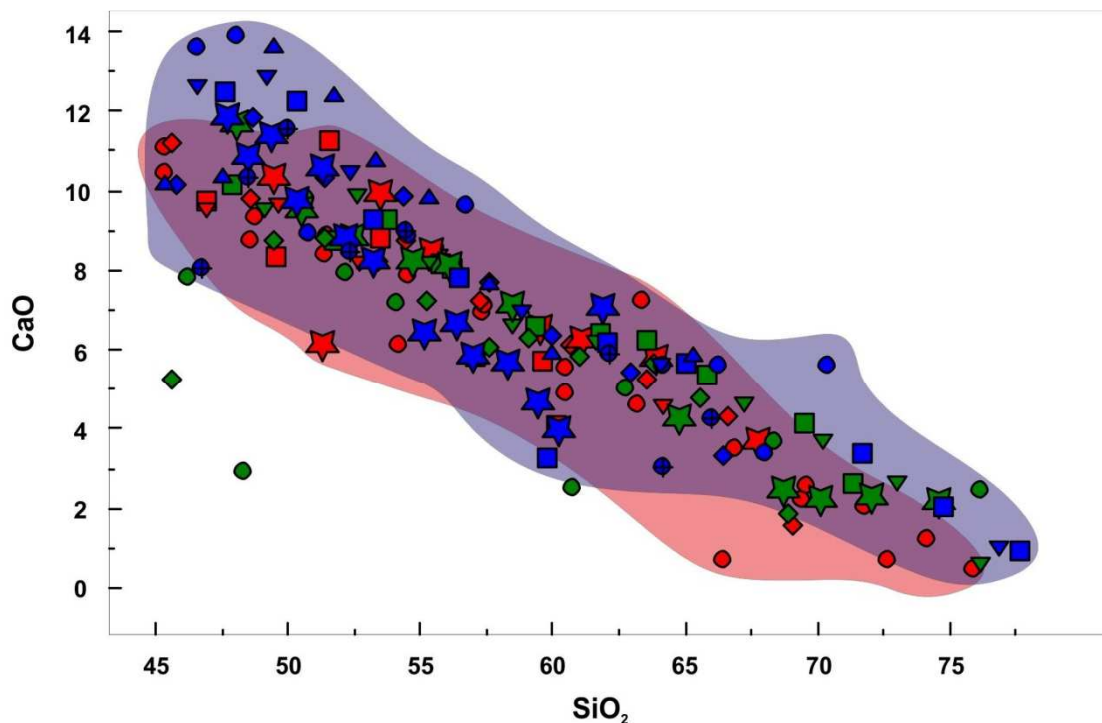
- Τόξο Αιγαίου πελάγους
- Τόξο Άνδεων
- ◆ Τόξο Κασκέντ
- ▼ Τόξο Κεντρικής Αμερικής
- ★ Τόξο Σούνδα

Σχήμα 4.4.1.1 Σε όλα τα διαγράμματα η μπλε περιοχή και τα μπλε σχήματα αντιπροσωπεύουν τα δείγματα των ensimatic νησιώτικων τόξων, η πράσινη περιοχή και τα πράσινα σχήματα των ensialic νησιώτικων τόξων ενώ η κόκκινη περιοχή και τα κόκκινα σχήματα των ενεργά ηπειρωτικών περιθωρίων.

4.4.1.1 Διαγράμματα Harker κύριων στοιχείων



Σχήμα 4.4.1.1.1 Διαγράμματα Harker Al_2O_3 , CaO , FeOT , K_2O , MgO , MnO , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 ως προς SiO_2 . Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

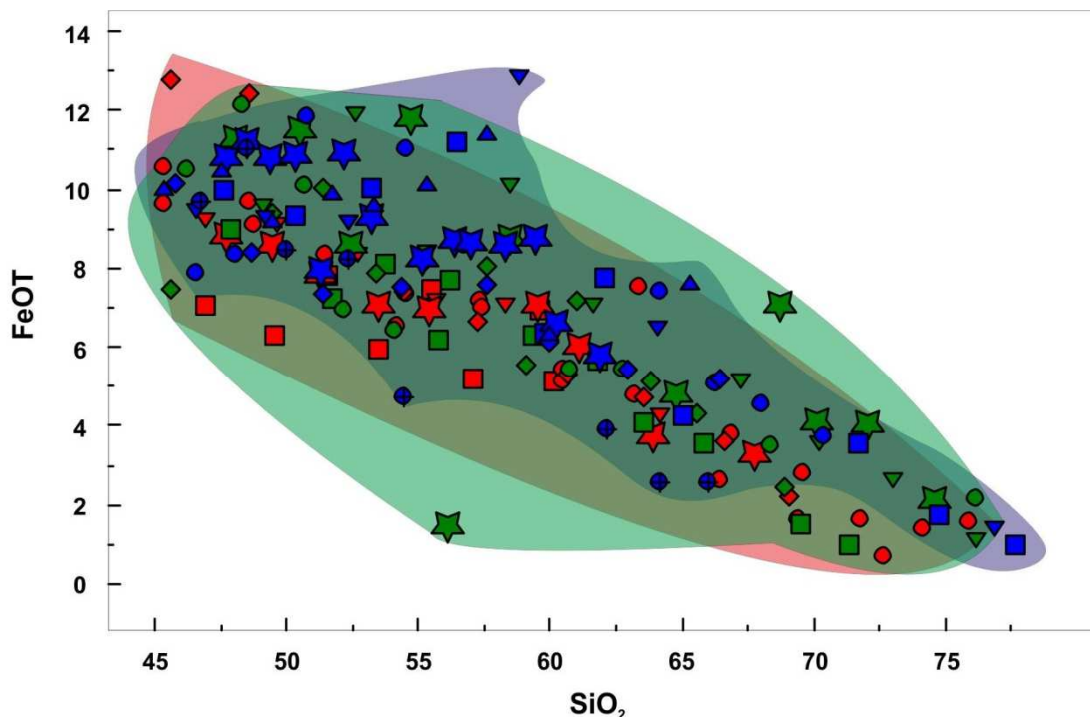


Σχήμα 4.4.1.1.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Al_2O_3 ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.1.1): 1) Παρατηρήσεις: Για τα **ensimatic** ησιώτικα τόξα οι τιμές Al_2O_3 κυμαίνονται σταθερά περίπου μεταξύ 14-18 με εξαίρεση για

$\text{SiO}_2=47$, όπου εμφανίζονται τιμές 8-21, για $\text{SiO}_2=55$, όπου εμφανίζεται τιμή 22 και για $\text{SiO}_2>65$, όπου οι τιμές πέφτουν λίγο κάτω του 14. **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές Al_2O_3 στην πλειοψηφία τους κυμαίνονται μεταξύ 15-18, με εξαίρεση για $\text{SiO}_2=45-52$, όπου εμφανίζονται τιμές 10-20 και για $\text{SiO}_2>65$, όπου οι τιμές πέφτουν από 15-13. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** η πλειοψηφία των τιμών κυμαίνεται μεταξύ 13-18, αλλά εμφανίζονται και υψηλότερες τιμές από 18-21. 2) Συμπεράσματα: Γενικά με τοπικές διαφοροποιήσεις και οι 3 ομάδες δεν διαχωρίζονται.

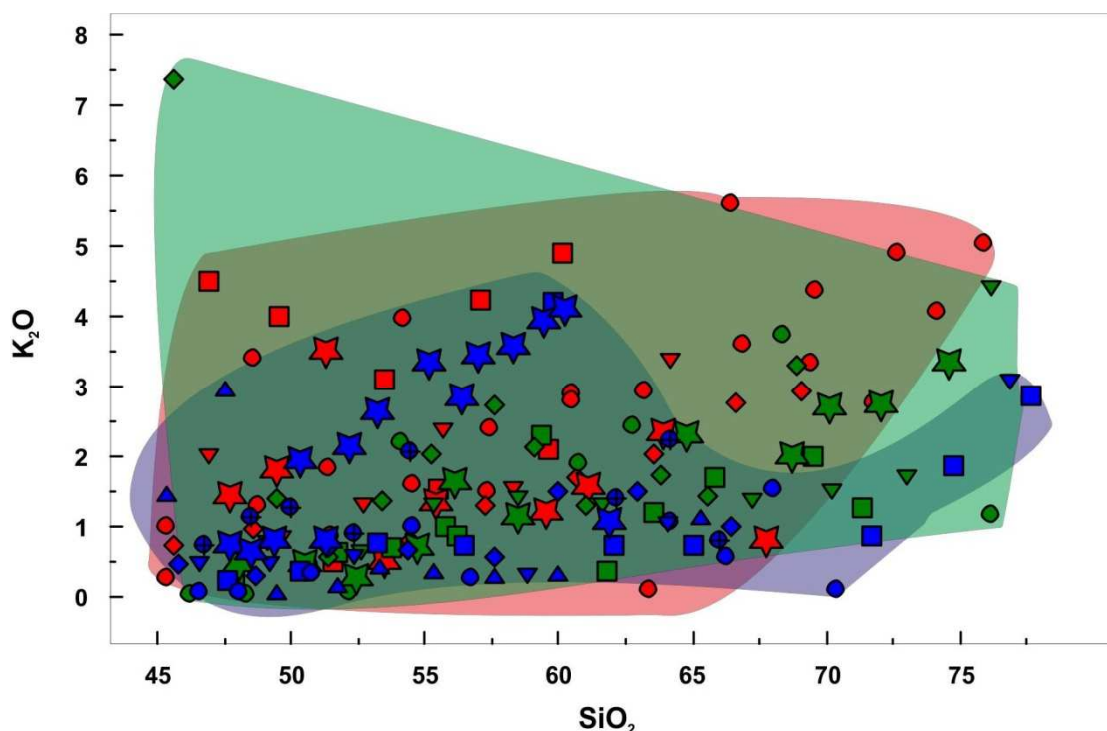
Στο διάγραμμα CaO ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.1.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα** οι τιμές CaO κυμαίνονται μεταξύ 14-1 και μειώνονται με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 12-1. Οι τιμές μειώνονται με την αύξηση του πυριτίου αν και εμφανίζονται κάποιες χαμηλές τιμές και για $\text{SiO}_2=45-47$, σε αντίθεση με τα ensimatic τόξα. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 11-1 και μειώνονται με την αύξηση του πυριτίου. 2) Συμπεράσματα: Γενικά οι τρεις ομάδες δεν διαφοροποιούνται.



Σχήμα 4.4.1.1.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα FeOT ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.1.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα** οι τιμές FeOT κυμαίνονται στην πλειοψηφία των δειγμάτων μεταξύ 12-2, εκτός από μια εξαίρεση για $\text{SiO}_2=58$ όπου το FeOT είναι 13, και οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στις χαμηλότερες τιμές SiO_2 και μειώνονται με την αύξηση του πυριτίου. **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές FeOT κυμαίνονται μεταξύ 12-1 και, όπως στα ensimatic, οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στις χαμηλότερες τιμές πυριτίου και αυξάνονται με την μείωση του πυριτίου. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** οι τιμές

FeOT κυμαίνονται μεταξύ 13-1 και ,όπως στα προηγούμενα δύο γεωτεκτονικά περιβάλλοντα, οι μέγιστες τιμές παρουσιάζονται στις χαμηλότερες τιμές πυριτίου και μειώνονται με την αύξηση του πυριτίου. 2) Συμπεράσματα: Γενικά οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται.

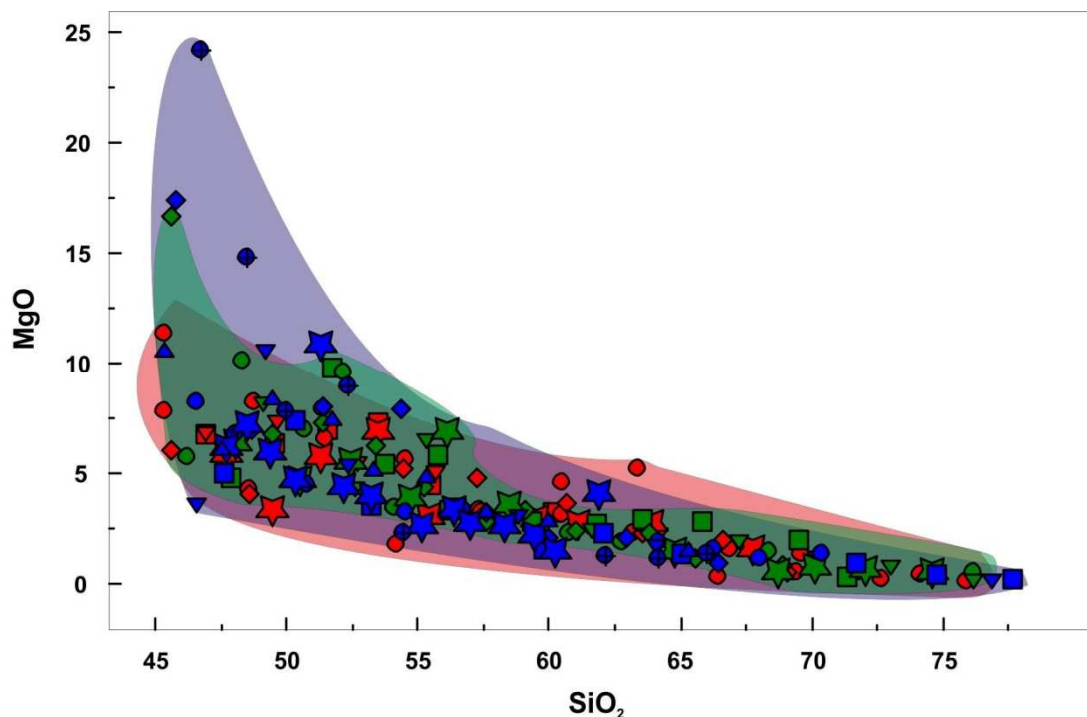


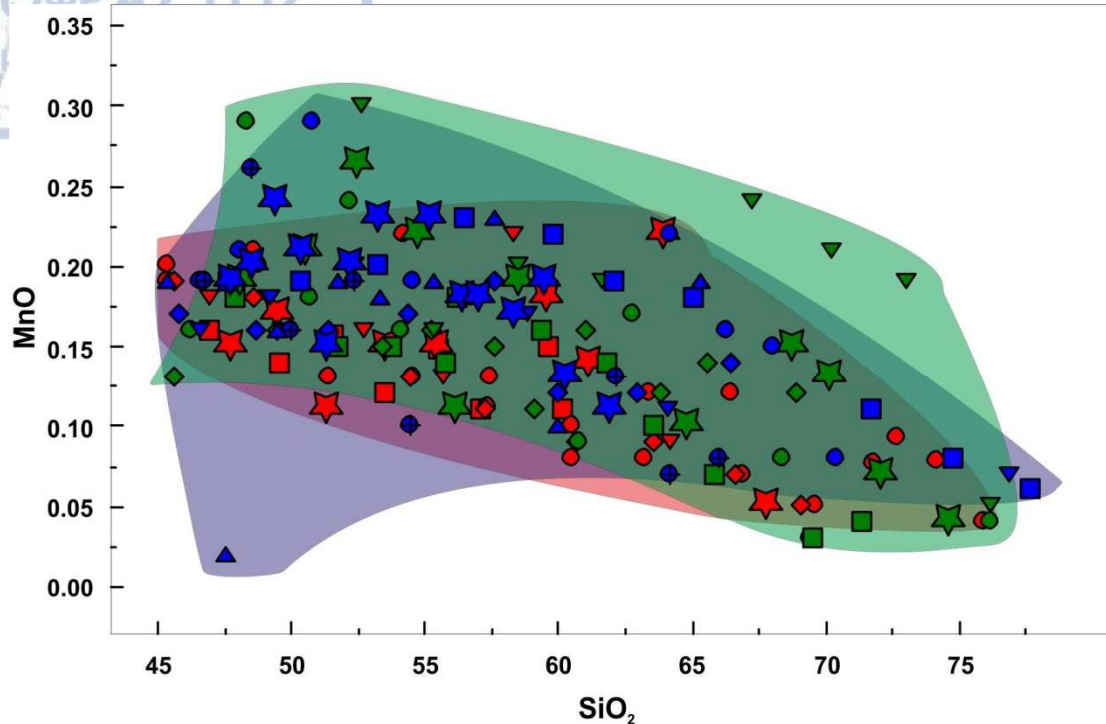
Σχήμα 4.4.1.1.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα K_2O ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.1.1) : 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα** οι τιμές K_2O κυμαίνονται μεταξύ 4-0. Οι τιμές αυξάνονται για $SiO_2 = 45-60$. Στο διάστημα $SiO_2 = 60-70$ οι τιμές είναι σταθερές μεταξύ 0-2 και για $SiO_2 > 70$ αυξάνονται πάλι από 0-3. **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές K_2O κυμαίνονται μεταξύ 0-4.5 , με εξαίρεση ένα δείγμα που παρουσιάζει τιμή $K_2O=7.5$, και τείνουν να αυξάνονται με την αύξηση του πυριτίου. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** οι τιμές K_2O κυμαίνονται μεταξύ 0-5.5 και παρουσιάζουν και αυξημένες τιμές σε όλο το διάστημα τιμών SiO_2 . 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους καθαρά, αν και για τιμές $SiO_2 > 68$ τα ensialic έχουν γενικά υψηλότερες τιμές από τα ensimatic. Τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή με τα 2 είδη νησιώτικων τόξων, αλλά παρουσιάζουν και πολύ υψηλότερες τιμές K_2O από αυτά σε όλο το εύρος τιμών SiO_2 . Γενικά δεν υπάρχει ξεκάθαρη διαφοροποίηση ανάμεσα στις 3 ομάδες.

Στο διάγραμμα MgO ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.1.1) : 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα** οι τιμές MgO κυμαίνονται περίπου μεταξύ 25-0. Οι τιμές είναι μέγιστες στα χαμηλότερα επίπεδα SiO_2 και μειώνονται με την αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου. **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές MgO κυμαίνονται περίπου μεταξύ 16-0. Οι τιμές είναι μέγιστες στα χαμηλότερα επίπεδα SiO_2 και μειώνονται με την αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου, όπως στα ensimatic. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** οι τιμές MgO

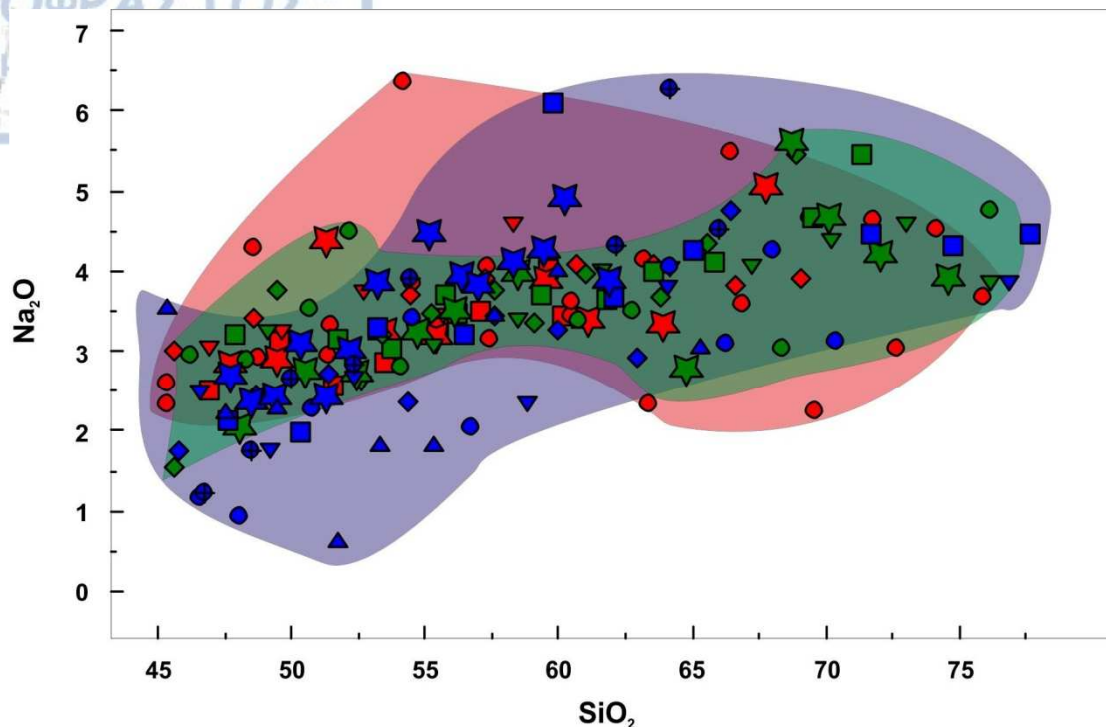
κυμαίνονται περίπου μεταξύ 11-0. Η τάση μείωσης των τιμών με την αύξηση του πυριτίου είναι ίδια με τα άλλα δύο είδη γεωτεκτονικών περιβαλλόντων. 2) Συμπεράσματα: Γενικά, εκτός από το γεγονός ότι οι τρεις ομάδες έχουν διαφορετική μέγιστη τιμή, με φθίνουσα σειρά από τα ensimatic ως τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια, στην χαμηλότερη περιεκτικότητα πυριτίου, δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.





Σχήμα 4.4.1.1.1 συνέχεια

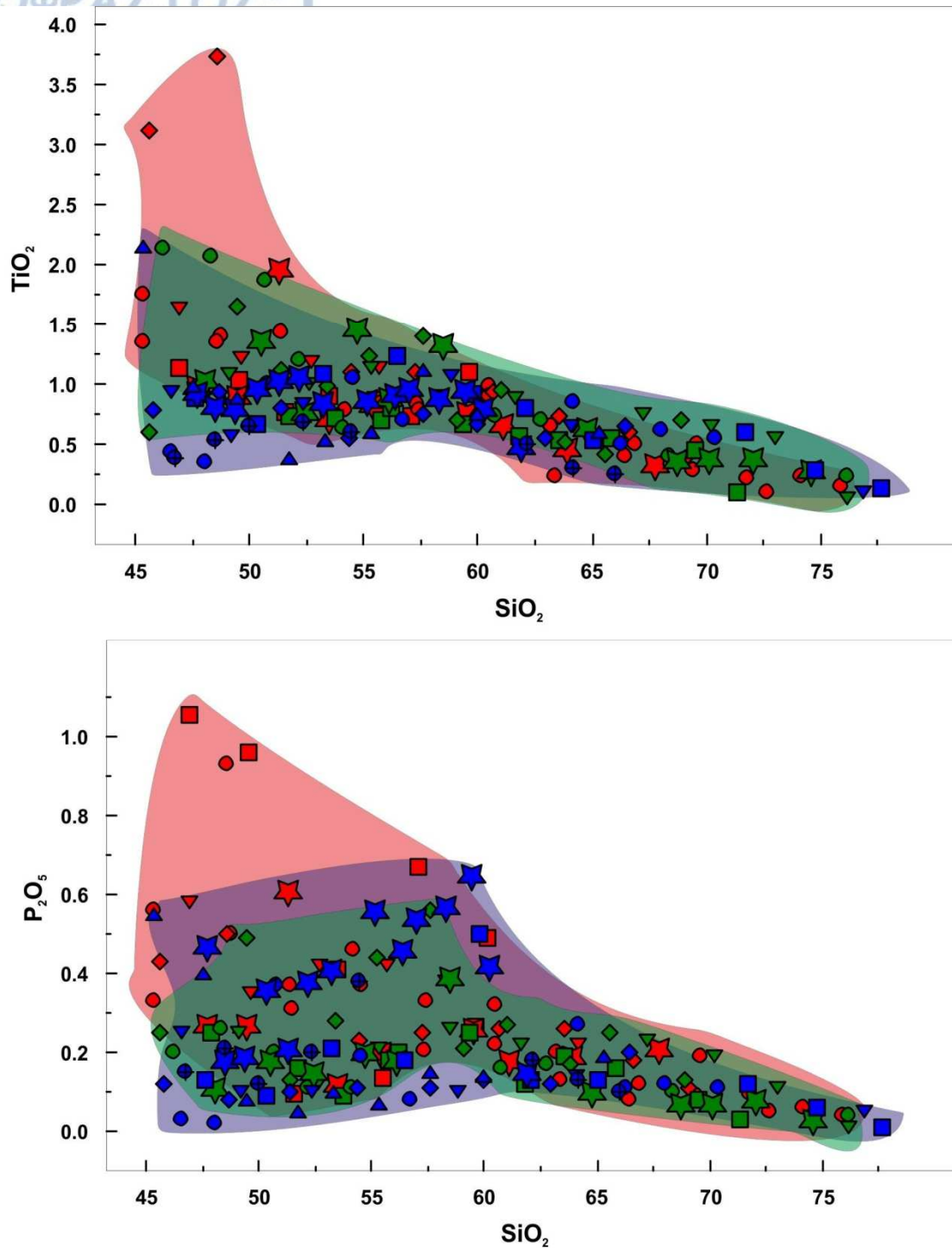
Στο διάγραμμα MnO ως προς SiO₂ (Σχ. 4.4.1.1.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα** οι τιμές MnO ως προς SiO₂ κυμαίνονται από 0.28-0.07 περίπου, με μια εξαίρεση όπου εμφανίζεται η τιμή 0.02 για SiO₂=47. Οι τιμές έχουν μειωτική τάση με την αύξηση της περιεκτικότητας πυριτίου. **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές MnO κυμαίνονται μεταξύ 0.3-0.03 περίπου. Με ελάχιστες εξαιρέσεις δειγμάτων φαίνεται το MnO να έχει μειωτική τάση με την αύξηση περιεκτικότητας πυριτίου, όπως στα ensimatic. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** οι τιμές MnO κυμαίνονται μεταξύ 0.22-0.05 περίπου. Οι τιμές έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του πυριτίου. 2) Συμπεράσματα: Γενικά δεν υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των 3 ομάδων.



Σχήμα 4.4.1.1.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Na_2O ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.1.1) : 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα** οι τιμές Na_2O κυμαίνονται μεταξύ 0.5-6 και έχουν αυξητική τάση με την αύξηση της περιεκτικότητας SiO_2 . **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές Na_2O κυμαίνονται μεταξύ 1.5-5.5. Οι τιμές Na_2O αυξάνονται στο διάστημα $\text{SiO}_2=45-55$, μένουν σταθερές μεταξύ 3.5-4 για $\text{SiO}_2=55-65$ και για $\text{SiO}_2>65$ έχουν πάλι αυξητική τάση. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** οι τιμές Na_2O κυμαίνονται μεταξύ 2-6, έχουν κυρίως αυξητική τάση με την αύξηση των περιεκτικότητων SiO_2 με την εξαίρεση τριών δειγμάτων για $\text{SiO}_2=62.5-72.5$. 2) Συμπεράσματα: Γενικά εκτός από το ότι τα ensimatic στο διάστημα $\text{SiO}_2=45-60$ παρουσιάζουν ταυτόχρονα και χαμηλότερες τιμές Na_2O από τις άλλες ομάδες, δεν υπάρχει διαφοροποίηση.

Στο διάγραμμα TiO_2 ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.1.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα** οι τιμές TiO_2 κυμαίνονται στην πλειοψηφία τους μεταξύ 0.02-1.2. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση στο διάστημα $\text{SiO}_2=45-52$ περίπου και για $\text{SiO}_2>52$ έχουν μειωτική τάση. **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές TiO_2 κυμαίνονται μεταξύ 0.02-2.1 περίπου. Για $\text{SiO}_2=45-60$ οι τιμές TiO_2 είναι περίπου σταθερές εντός των ορίων 0.5-1.7 περίπου, ενώ για $\text{SiO}_2>60$ μειώνονται. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** οι τιμές TiO_2 κυμαίνονται μεταξύ 3.7-0.5 και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση της περιεκτικότητας του SiO_2 . 2) Συμπεράσματα: Εκτός από την εμφάνιση υψηλότερων τιμών TiO_2 των ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων στις χαμηλότερες περιεκτικότητες SiO_2 , οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται.

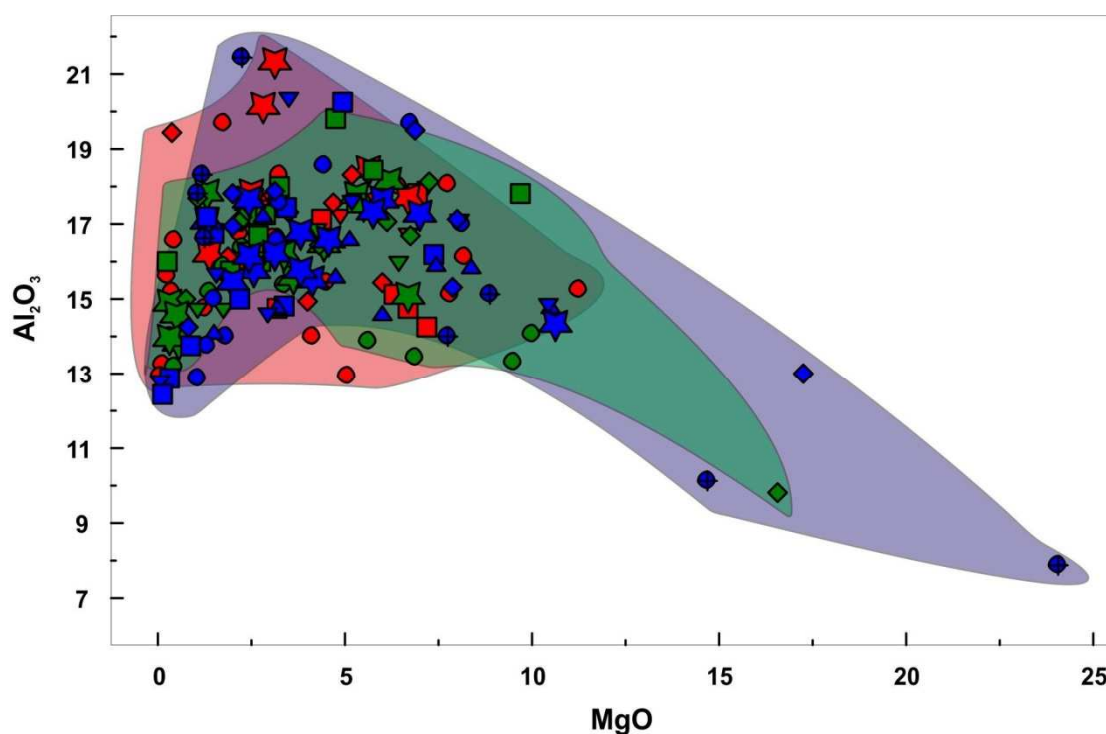


Σχήμα 4.4.1.1.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα P_2O_5 ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.1.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-0.6 περίπου. Τα δείγματα φαίνεται να χωρίζονται σε δυο ομάδες με διαφορετική συμπεριφορά διακύμανσης του P_2O_5 . Η μια ομάδα έχει σταθερές τιμές P_2O_5 σε όλο το εύρος SiO_2 και κυμαίνονται από 0-0.3 περίπου, ενώ η άλλη ομάδα ξεκινάει με $\text{P}_2\text{O}_5=0.2$ και με αυξητική τάση φτάνει στην τιμή 0.6 για $\text{SiO}_2=45-57$, μετά μειώνονται οι τιμές. **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές P_2O_5 κυμαίνονται μεταξύ 0.1-0.5. Όπως και στα ensimatic, τα δείγματα χωρίζονται σε δυο ομάδες με διαφορετική συμπεριφορά διακύμανσης του P_2O_5 . Η μια ομάδα έχει σταθερά

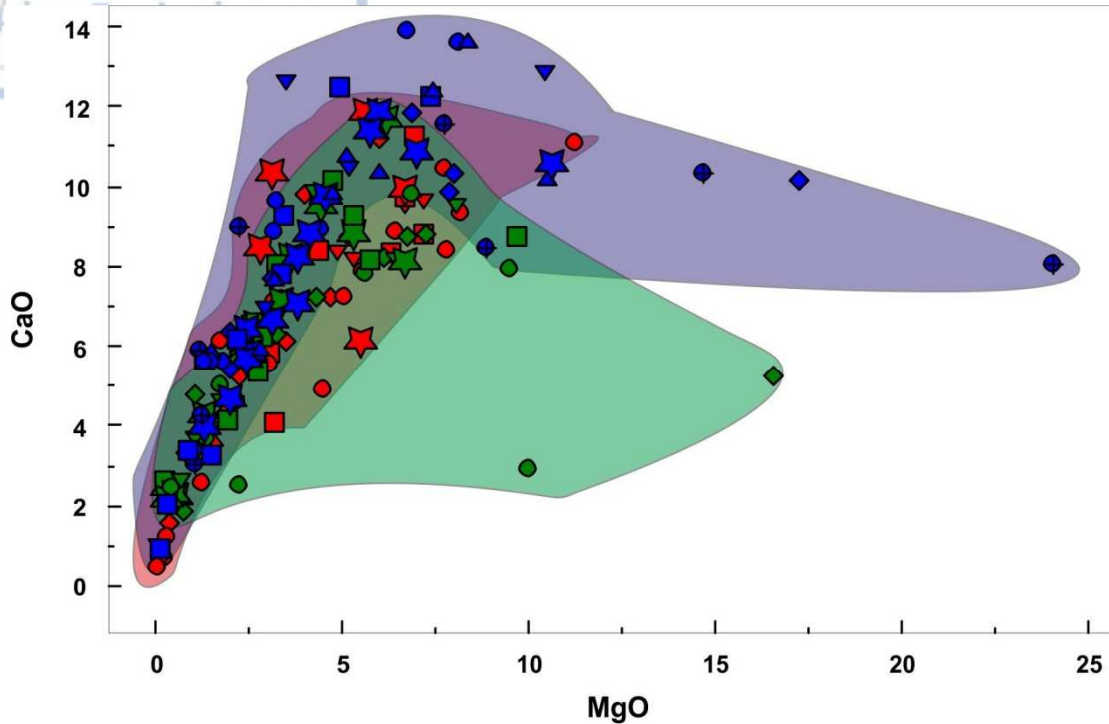
τιμές P_2O_5 σε όλο το εύρος SiO_2 και κυμαίνονται από 0-0.2 περίπου. Η άλλη ομάδα ξεκινάει με $P_2O_5=0.2$ και με αυξητική τάση φτάνει στην τιμή 0.5 για τιμές $SiO_2=45-57$, μετά μειώνονται οι τιμές. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** οι τιμές P_2O_5 κυμαίνονται μεταξύ 0-1 περίπου και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση της περιεκτικότητας SiO_2 . 2) Συμπεράσματα: Γενικά εκτός από την παρουσία πολύ υψηλότερων τιμών P_2O_5 των ενεργών περιθωρίων για εύρος $SiO_2=45-50$, δεν υπάρχει διαφοροποίηση των 3 ομάδων.

4.4.1.2 Διαγράμματα με MgO στον χ άξονα κύριων στοιχείων



Σχήμα 4.4.1.2.1 Διαγράμματα Harker Al_2O_3 , CaO , $FeOT$, K_2O , MnO , Na_2O , P_2O_5 , SiO_2 , TiO_2 ως προς MgO . Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

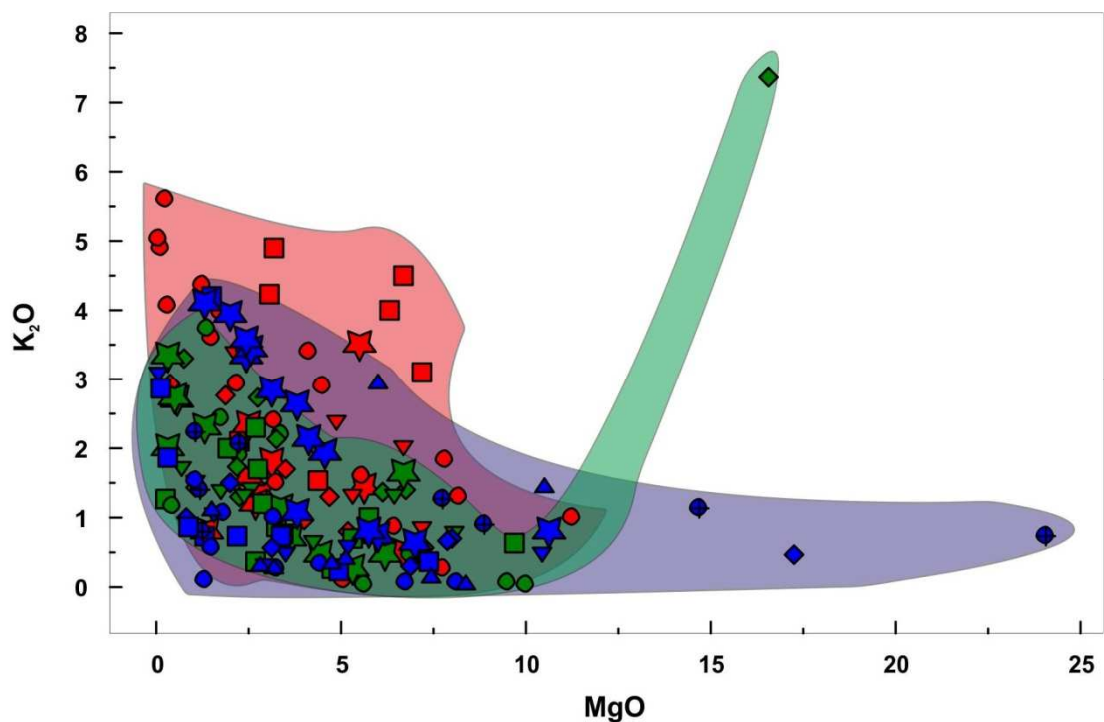
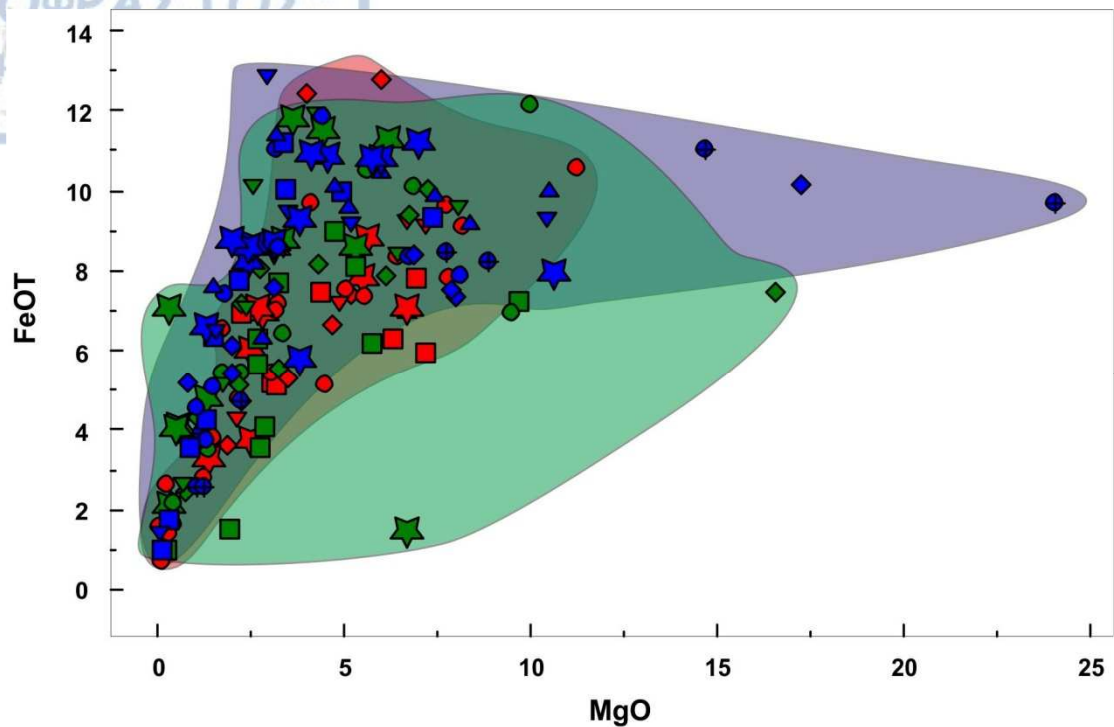
Στο διάγραμμα Al_2O_3 ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.2.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic νησιώτικα τόξα** οι τιμές Al_2O_3 κυμαίνονται στην πλειοψηφία τους μεταξύ 12-21 περίπου. Οι τιμές έχουν μια ελαφριά αύξηση μέχρι το $MgO=5$ που από κει και πέρα μειώνονται. **Για τα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές Al_2O_3 στην πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνονται μεταξύ 13-19 περίπου. Οι τιμές ακολουθούν την ίδια τάση με τα ensimatic τόξα πριν και μετά το $MgO=5$. **Για τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** οι τιμές Al_2O_3 κυμαίνονται μεταξύ 13-21, υπάρχει μια ελαφριά αυξητική τάση των τιμών μέχρι το $MgO=2.5$ περίπου. 2) Συμπεράσματα: Γενικά δεν διαφοροποιούνται οι 3 ομάδες.



Σχήμα 4.4.1.2.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα CaO ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.2.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1-14 περίπου και έχουν αυξητική τάση με την αύξηση της περιεκτικότητας MgO μέχρι το $MgO \sim 6$, όπου μειώνονται ελαφρά. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 2-12 περίπου, έχουν για την πλειοψηφία των δειγμάτων αυξητική τάση μέχρι το $MgO \sim 5$, μετά υπάρχει μια μικρή μείωση. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-12 περίπου και έχουν αυξητική τάση με την αύξηση της περιεκτικότητας MgO. 2) Συμπεράσματα: Γενικά οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

Στο διάγραμμα FeOT ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.2.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1-13 περίπου. Έχουν αυξητική τάση μέχρι το $MgO = 5$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1-12. Για την πλειοψηφία των δειγμάτων υπάρχει αυξητική τάση του FeOT με την αύξηση της περιεκτικότητας MgO. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές FeOT κυμαίνονται μεταξύ 1-13 και για την πλειοψηφία των δειγμάτων υπάρχει αυξητική τάση με την αύξηση του MgO. 2) Συμπεράσματα: Γενικά δεν υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των 3 ομάδων.

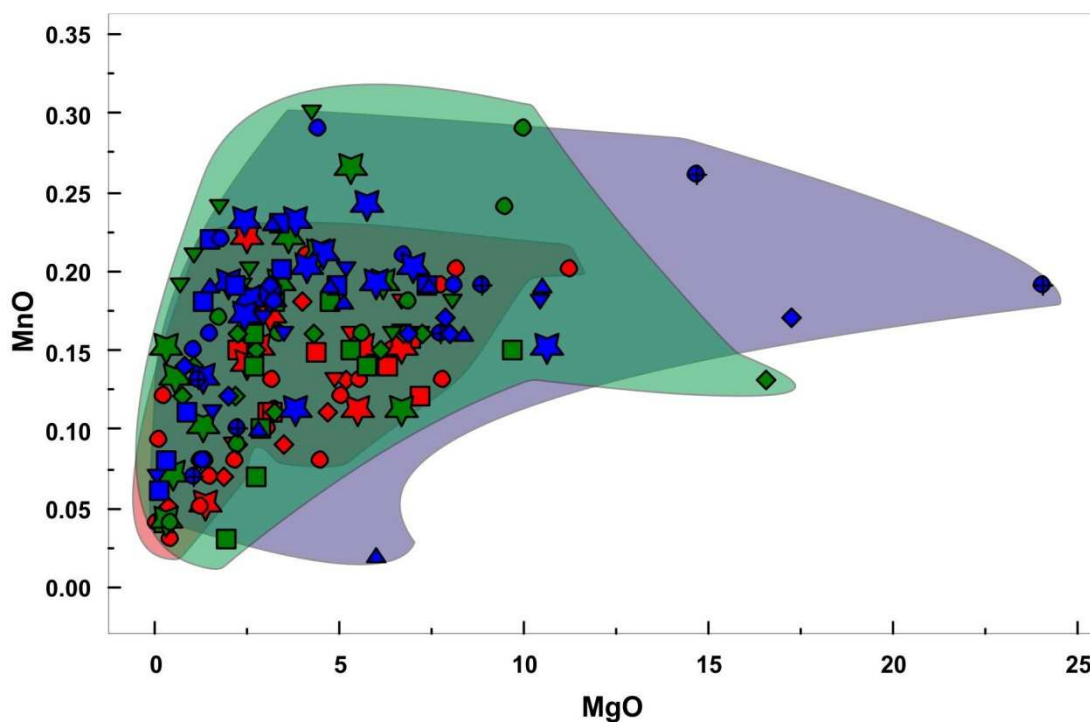


Σχήμα 4.4.1.2.1 συνέχεια

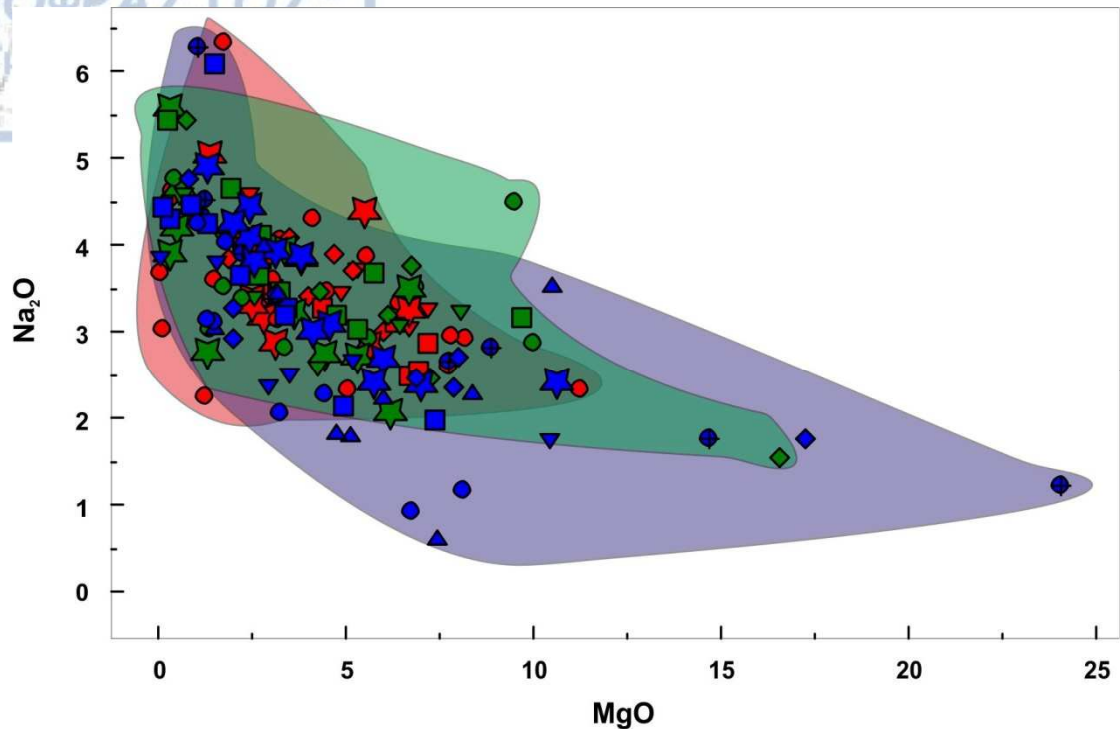
Στο διάγραμμα K_2O ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.2.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-4 και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση της περιεκτικότητας MgO . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται στην πλειοψηφία των δειγμάτων μεταξύ 0-3.5 περίπου και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση της περιεκτικότητας MgO . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-5.5 περίπου και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του MgO . 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες έχουν

κοινή περιοχή τιμών K_2O , τα ensimatic διαφοροποιούνται από τα υπόλοιπα μετά το $MgO=10$, ενώ τα ενεργά περιθώρια έχουν ταυτόχρονα και υψηλότερες τιμές από τις άλλες 2 ομάδες. Τα ensialic δεν ξεχωρίζουν από τις άλλες 2 ομάδες.

Στο διάγραμμα MnO ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.2.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές MnO για την πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνονται μεταξύ 0.05-0.29 περίπου και έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές MnO κυμαίνονται μεταξύ 0.02-0.3 περίπου και η πλειοψηφία των δειγμάτων έχει αυξητική τάση τιμών MnO με την αύξηση του MgO . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές MnO κυμαίνονται μεταξύ 0.02-0.22 και έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO . 2) Συμπεράσματα: Γενικά οι 3 ομάδες δεν ξεχωρίζουν μεταξύ τους.

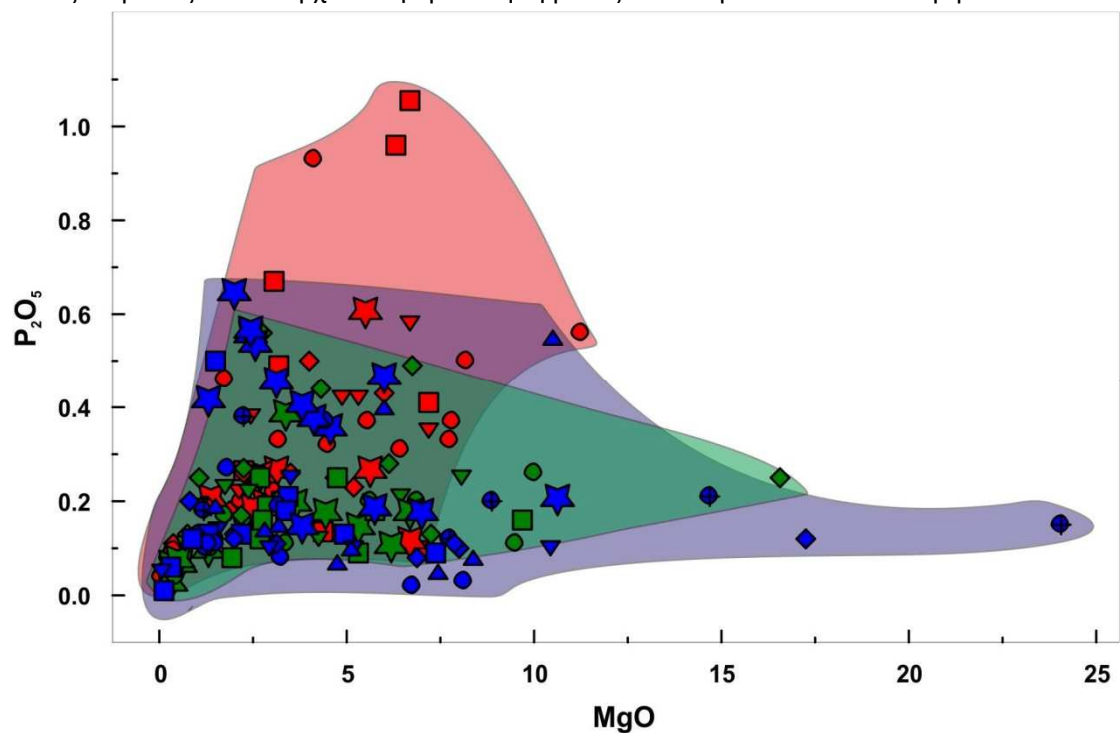


Σχήμα 4.4.1.2.1 συνέχεια

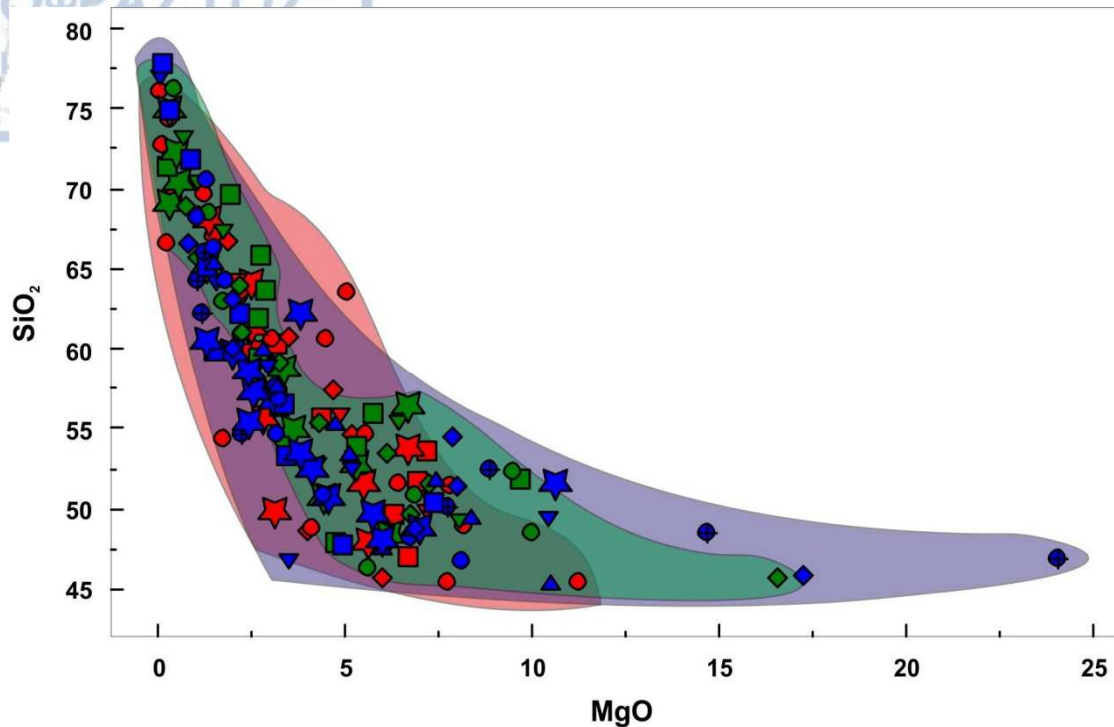


Σχήμα 4.4.1.2.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Na_2O ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.2.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 6.2-0.5 περίπου και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του MgO . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 5.5-1.5 περίπου και έχουν επίσης μειωτική τάση με την αύξηση του MgO . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 6.2-2.2 περίπου και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του MgO . 2) Συμπεράσματα: Πέρα από το ότι τα ensimatic τόξα εμφανίζουν και πολύ χαμηλότερες τιμές Na_2O από τις άλλες 2 ομάδες δεν υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ των 3 γεωτεκτονικών περιβαλλόντων.



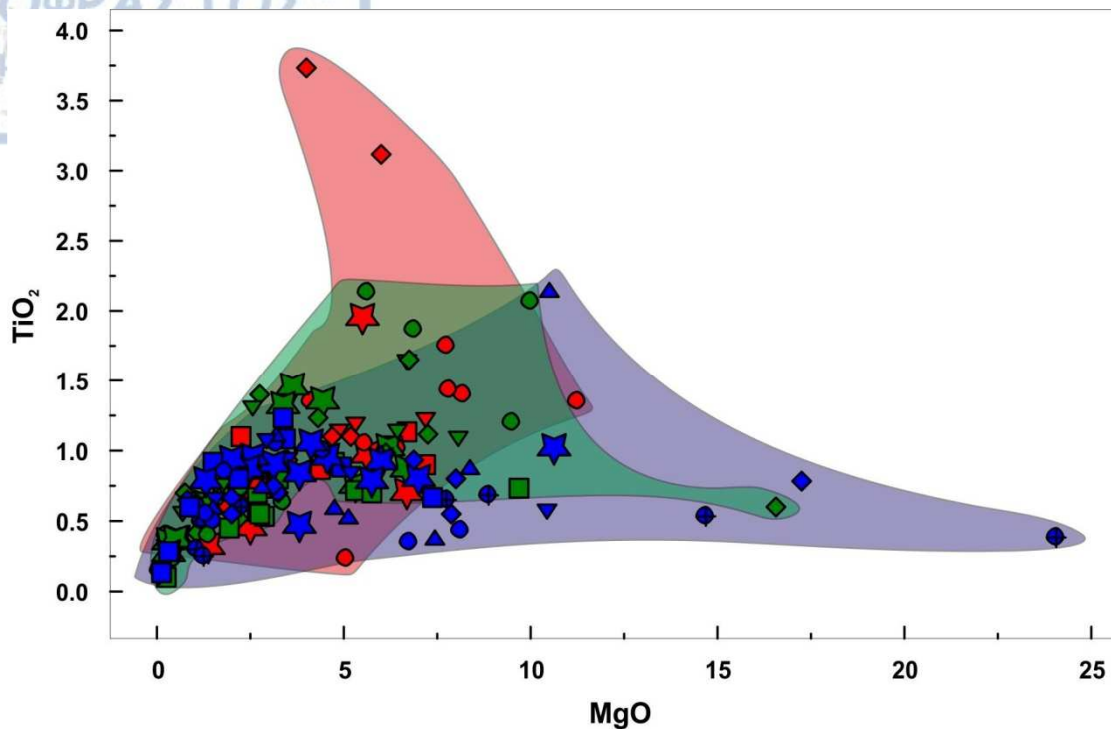
Σχήμα 4.4.1.2.1 συνέχεια



Σχήμα 4.4.1.2.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα P_2O_5 ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.2.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-0.65 περίπου, οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στα χαμηλότερα επίπεδα MgO . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-0.55 περίπου, οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται για $MgO \approx 2-7$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.05-1.2, οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται για $MgO \approx 3-5$. 2) Συμπεράσματα: Πέρα από την ύπαρξη των υψηλότερων τιμών P_2O_5 των ενεργών περιθωρίων και των χαμηλότερων τιμών P_2O_5 των ensimatic για $MgO > 5$ από τα υπόλοιπα γεωτεκτονικά περιβάλλοντα αντίστοιχα δεν παρατηρείται διαφοροποίηση μεταξύ των 3 ομάδων.

Στο διάγραμμα SiO_2 ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.2.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές SiO_2 κυμαίνονται μεταξύ 77-46 περίπου και έχει μειωτική τάση με την αύξηση του MgO . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές SiO_2 κυμαίνονται μεταξύ 76-46 περίπου και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του MgO . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές SiO_2 κυμαίνονται μεταξύ 76-46 περίπου και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του MgO . 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.



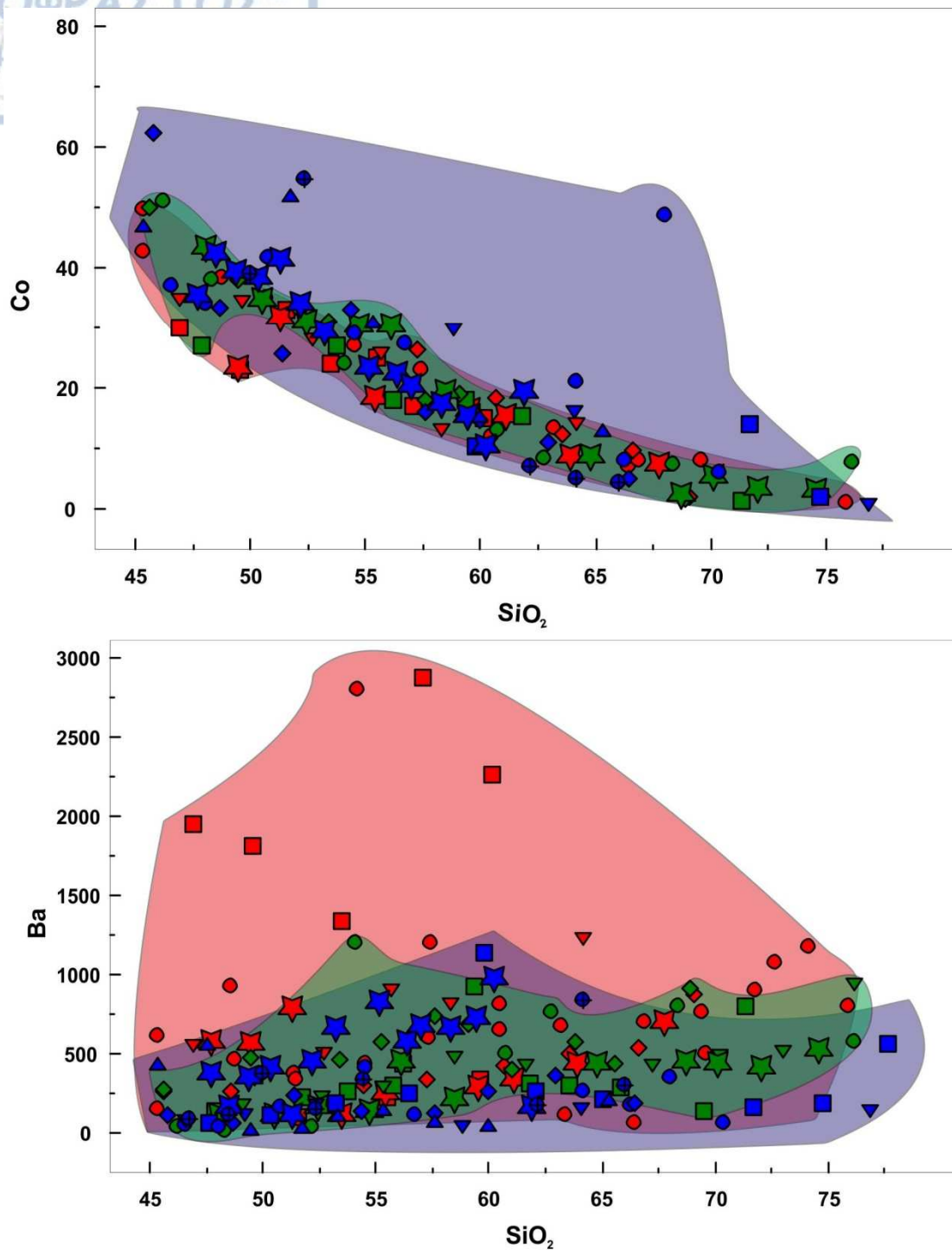
Σχήμα 4.4.1.2.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα TiO_2 ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.2.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές TiO_2 κυμαίνονται μεταξύ 0-1.2 για την πλειοψηφία των δειγμάτων. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-2. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.2-3.7. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός του ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα με $\text{TiO}_2 > 2$ και τα ενεργά περιθώρια έχουν τιμές TiO_2 για $\text{MgO} > 16$.

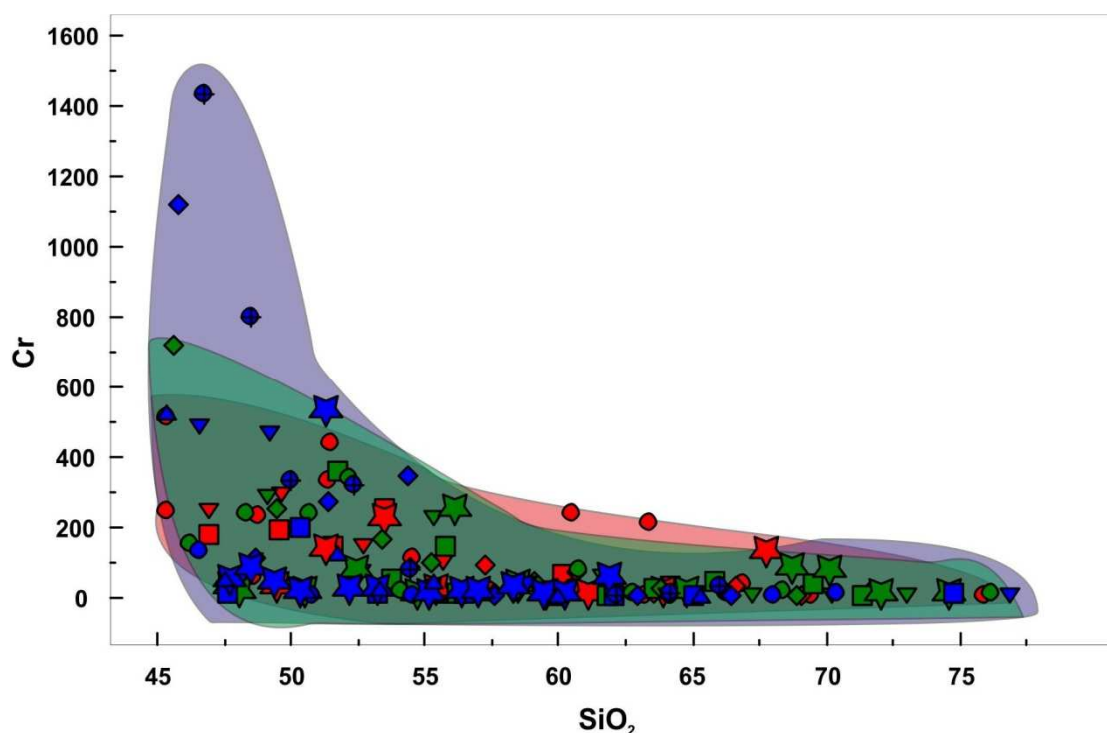
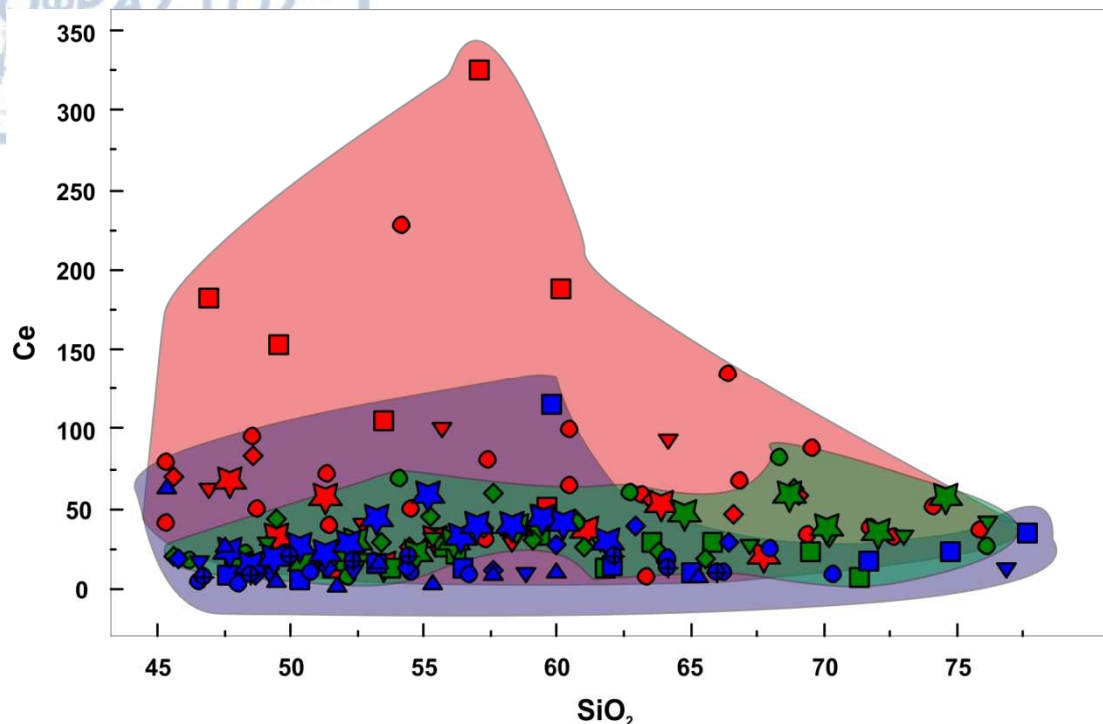
4.4.1.3 Διαγράμματα Harker ιχνοστοιχείων

Στο διάγραμμα Co ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Co κυμαίνονται μεταξύ 62-0 περίπου και υπάρχει μειωτική τάση των τιμών με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Co κυμαίνονται μεταξύ 50-0 περίπου και υπάρχει μειωτική τάση των τιμών με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Co κυμαίνονται μεταξύ 50-0 περίπου και οι τιμές έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 . 2) Συμπεράσματα: Γενικά οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται.

Στο διάγραμμα Ba ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ba κυμαίνονται μεταξύ 0-1000. Υπάρχουν τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές Ba για όλο το εύρος SiO_2 . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ba κυμαίνονται μεταξύ 0-1250. Υπάρχουν τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές Ba για όλο το εύρος SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ba κυμαίνονται μεταξύ 0-2750. Υπάρχουν τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές Ba για όλο το εύρος SiO_2 . 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic και ensialic δεν διαφοροποιούνται μέχρι το $\text{SiO}_2 = 60$. Για $\text{SiO}_2 > 60$ τα ensialic τόξα τείνουν να έχουν υψηλότερες τιμές Ba από τα ensimatic. Τα ενεργά περιθώρια είναι τα μοναδικά που εμφανίζουν τιμές $\text{Ba} > 1250$.



Σχήμα 4.4.1.3.1 Διαγράμματα ιχνοστοιχείων Co, Ba, Ce, Cr, Cs, Cu, Ga, Ge, Hf, La, Nb, Ni, Pb, Rb, Sc, Sr, Ta, Th, U, V, Y, Zn, Zr ως προς SiO₂. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1



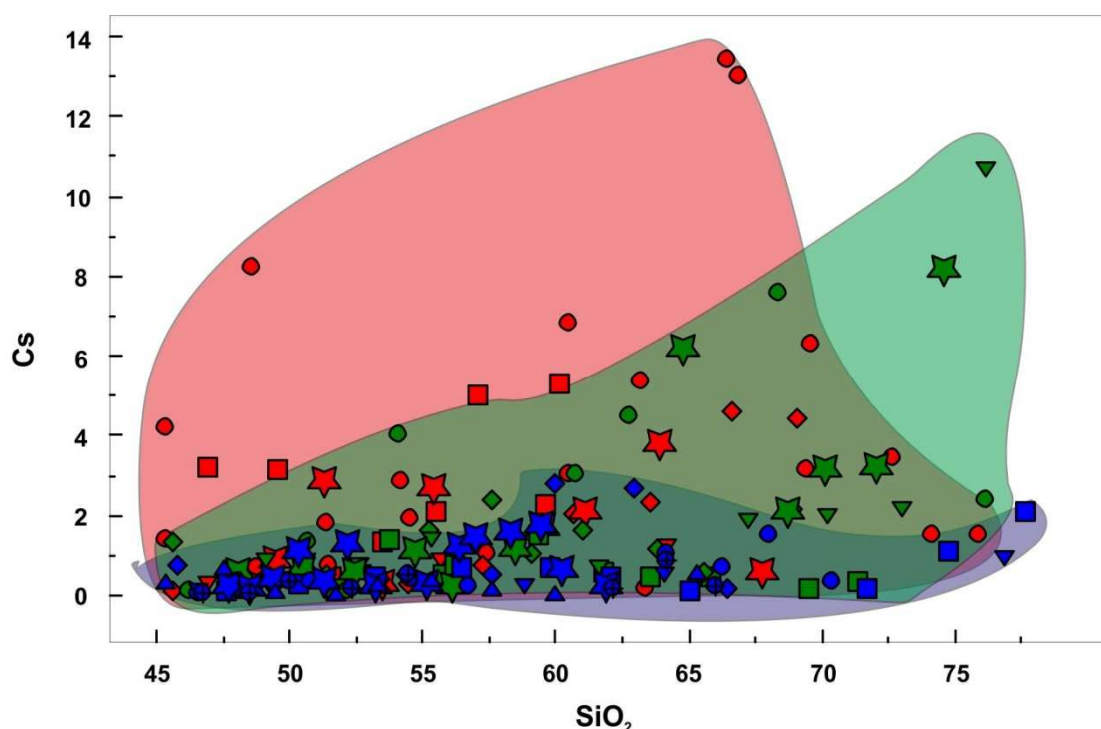
Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Ce ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ce κυμαίνονται μεταξύ 0-50 περίπου για την πλειοψηφία των δειγμάτων. Οι πιο αυξημένες τιμές εμφανίζονται μέχρι το $\text{SiO}_2=60$ και από κει και ύστερα οι τιμές είναι χαμηλές. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-75. Για όλο το εύρος SiO_2 εμφανίζονται τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές Ce. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ce κυμαίνονται μεταξύ 0-325 περίπου. Μέχρι το $\text{SiO}_2=60$ εμφανίζονται τόσο πολύ χαμηλές, όσο και πολύ υψηλές τιμές Ce. Μετά το $\text{SiO}_2>60$ εμφανίζονται χαμηλές έως μέτριες τιμές

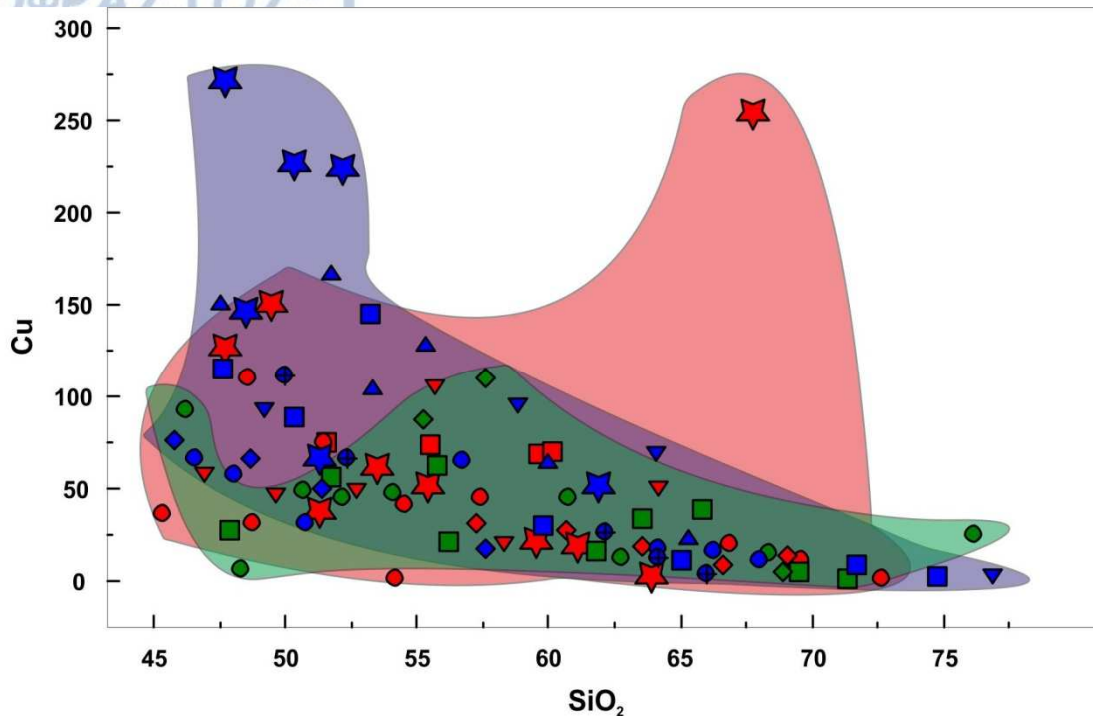
Ce. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic από τα ensialic τόξα μέχρι το $\text{SiO}_2=65$ δεν διαφοροποιούνται, αλλά για $\text{SiO}_2>65$ τα ensialic τείνουν να έχουν υψηλότερες τιμές Ce από τα ensimatic. Τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που εμφανίζουν τιμές $\text{Ce}>100$.

Στο διάγραμμα Cr ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Cr κυμαίνονται μεταξύ 1400-0. Έχουν μειωτική τάση μέχρι το $\text{SiO}_2=55$ που από εκεί και ύστερα οι τιμές είναι σταθερές κοντά στο 0. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 700-0. Μέχρι το $\text{SiO}_2=55$ οι τιμές Cr έχουν μειωτική τάση και από εκεί και ύστερα οι τιμές είναι σταθερές κοντά στο 0. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 500-0. Οι τιμές μειώνονται μέχρι το $\text{SiO}_2=55$ που από εκεί και μετά επικρατούν τιμές κοντά στο 0 με εξαίρεση δύο δειγμάτων. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

Στο διάγραμμα Cs ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Cs κυμαίνονται μεταξύ 0-3. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-10 περίπου. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Cs κυμαίνονται μεταξύ 0-13. Για όλο το εύρος SiO_2 υπάρχουν τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το ότι τα ensialic παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές Cs από τα ensimatic για $\text{SiO}_2>67$ και τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που παρουσιάζουν $\text{Cs}>10$.



Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια



Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

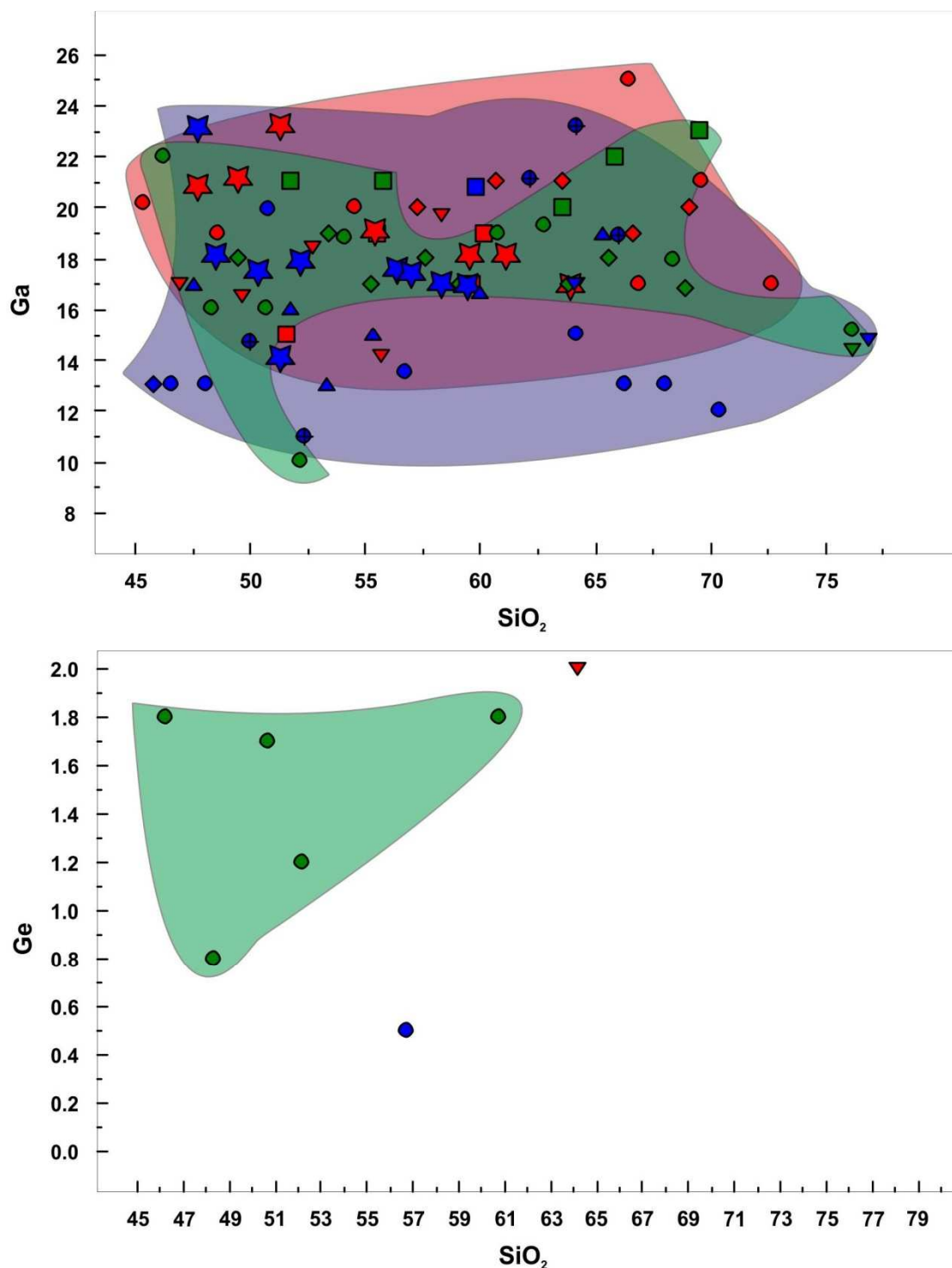
Στο διάγραμμα Cu ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Cu κυμαίνονται από 0-270. Οι τιμές έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Cu κυμαίνονται από 0-100 περίπου. Οι τιμές μειώνονται ως το $\text{SiO}_2=47$, ενώ μετά από αυτό αυξάνονται πάλι ως το $\text{SiO}_2=57$ και μειώνονται ξανά ύστερα από αυτό. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-250. Οι τιμές έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 , με εξαίρεση ένα δείγμα. 2) Συμπεράσματα: Οι τρεις ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

Στο διάγραμμα Ga ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ga κυμαίνονται μεταξύ 13-23. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ga κυμαίνονται μεταξύ 10-23. **Για τα ενεργά** οι τιμές Ga κυμαίνονται μεταξύ 14-25. 2) Συμπεράσματα: Οι τρεις ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

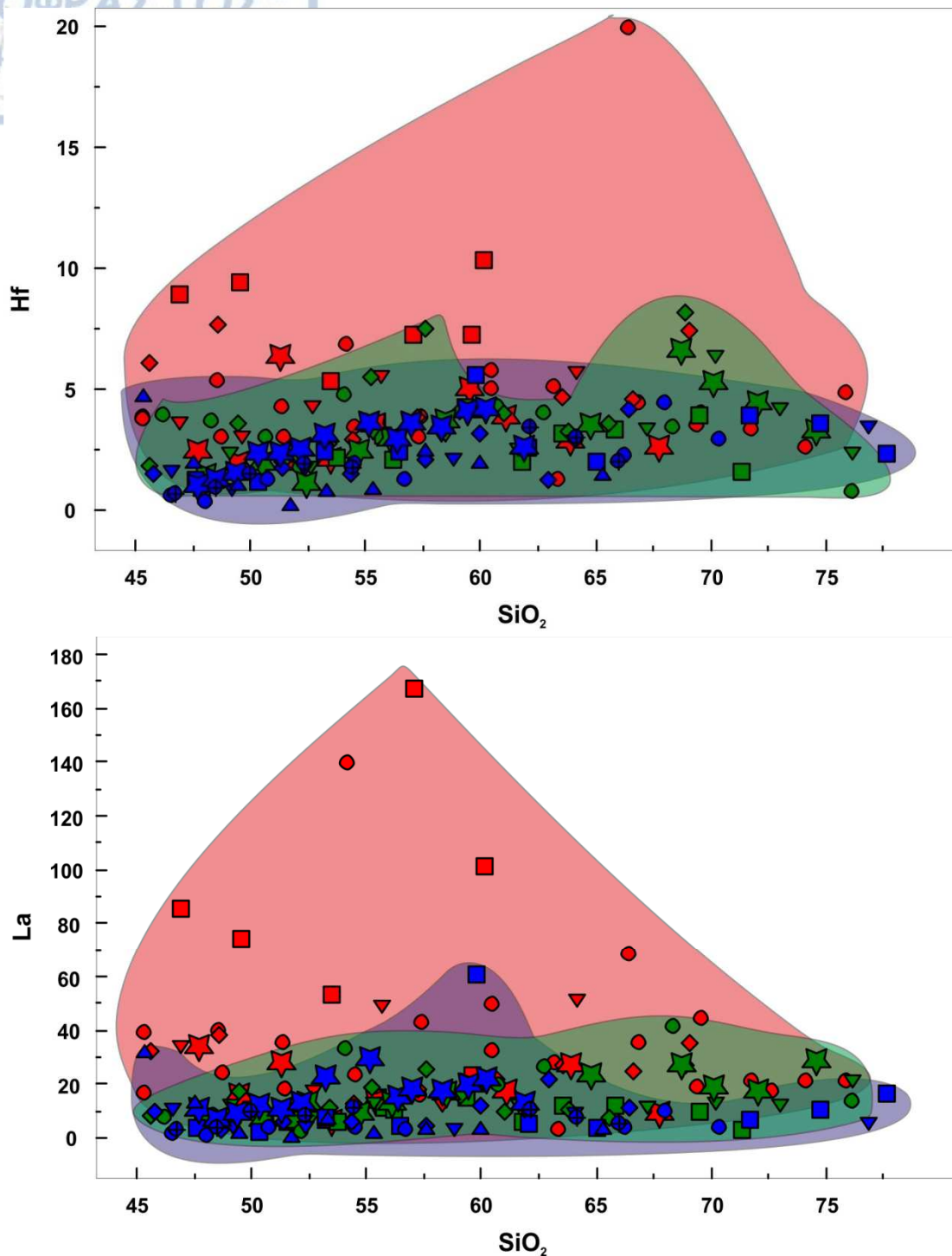
Στο διάγραμμα Ge ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: Από όλα τα δείγματα που επιλέχθηκαν έτυχε να έχει τιμή Ge μόνο ένα δείγμα **για τα ensimatic και τα ενεργά περιθώρια** με τιμές Ge 0.5 στο $\text{SiO}_2=57$ και 2 στο $\text{SiO}_2=63$ αντίστοιχα. **Για τα ensialic** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0.8-1.8 μέχρι το $\text{SiO}_2=59$. 2) Συμπεράσματα: Λόγω ανεπαρκών δειγμάτων για τα ensimatic, ενεργά περιθώρια δεν μπορεί να διεξαχθεί συμπέρασμα.

Στο διάγραμμα Hf ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Hf κυμαίνονται από 0-5. Έχουν αυξητική τάση μέχρι το $\text{SiO}_2=60$ που από εκεί και ύστερα οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-2.5 περίπου. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Hf κυμαίνονται μεταξύ 0-7.5. Έχουν αυξητική τάση μέχρι το $\text{SiO}_2=60$. Από $\text{SiO}_2=60-70$ οι τιμές είναι σταθερές κοντά στην τιμή $\text{Hf}=2.5$. Στο $\text{SiO}_2=70$ εμφανίζονται και υψηλότερες τιμές του 2.5. Μετά το $\text{SiO}_2=70$ εμφανίζονται τιμές $\text{Hf} \leq 2.5$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Hf

κυμαίνονται μεταξύ 0-20 περίπου. Για όλο το εύρος SiO_2 εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές Hf. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν παρουσιάζουν διαφοροποίηση πέρα από το ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που έχουν τιμή Hf > 7.5.

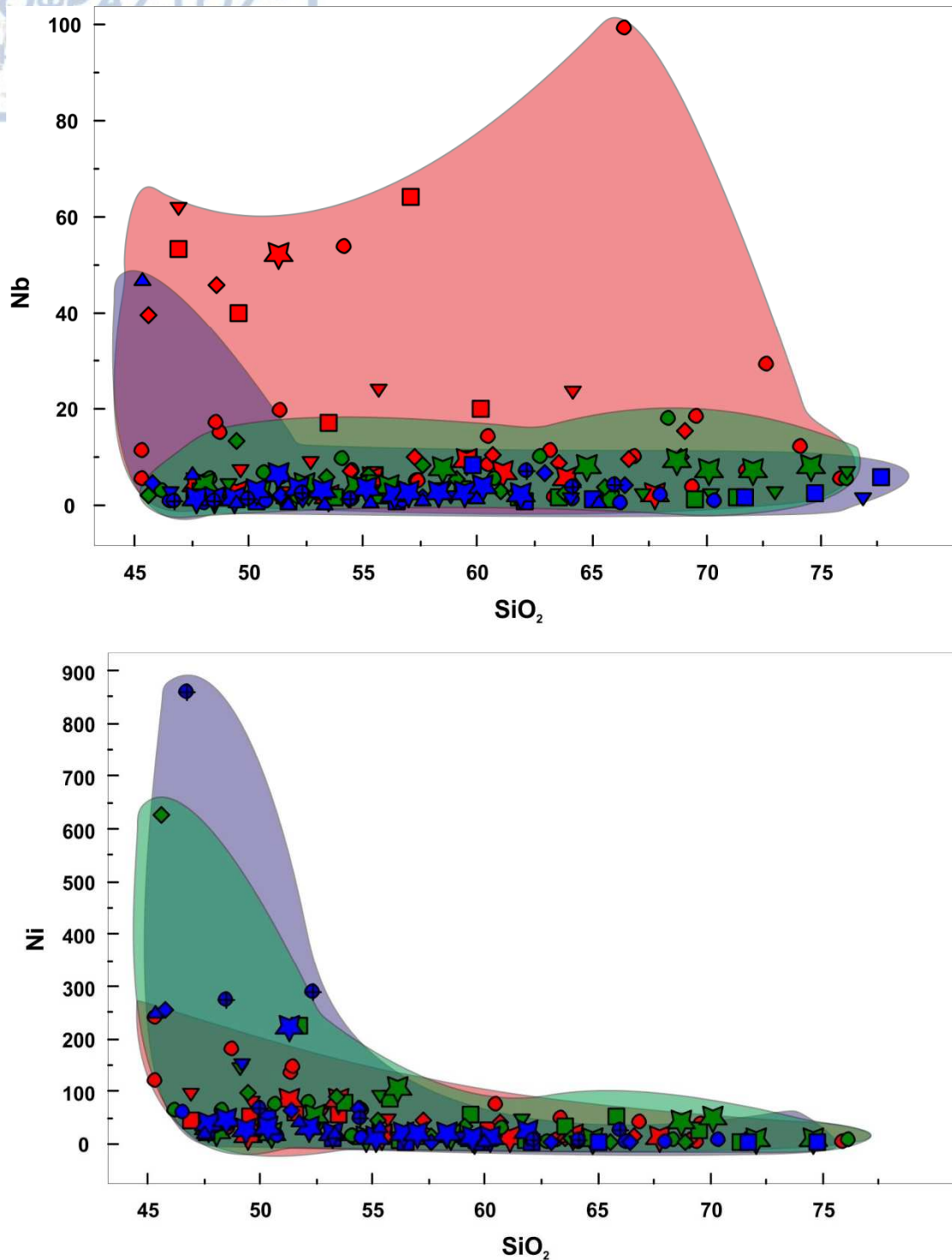


Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια



Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα La ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές La κυμαίνονται μεταξύ 0-60, αν και η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνονται σταθερά μεταξύ 0-30 σε όλο το εύρος SiO_2 . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές La κυμαίνονται μεταξύ 0-30 σε όλο το εύρος SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές La κυμαίνονται μεταξύ 0-170. 2) Συμπεράσματα: Οι κλίση των ensimatic είναι οριζόντια. Των ensialic είναι οριζόντια και για $\text{SiO}_2 > 65$ η κλίση μεγαλώνει. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινό εύρος τιμών La με τις άλλες 2 ομάδες, αλλά είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $\text{La} > 60$.

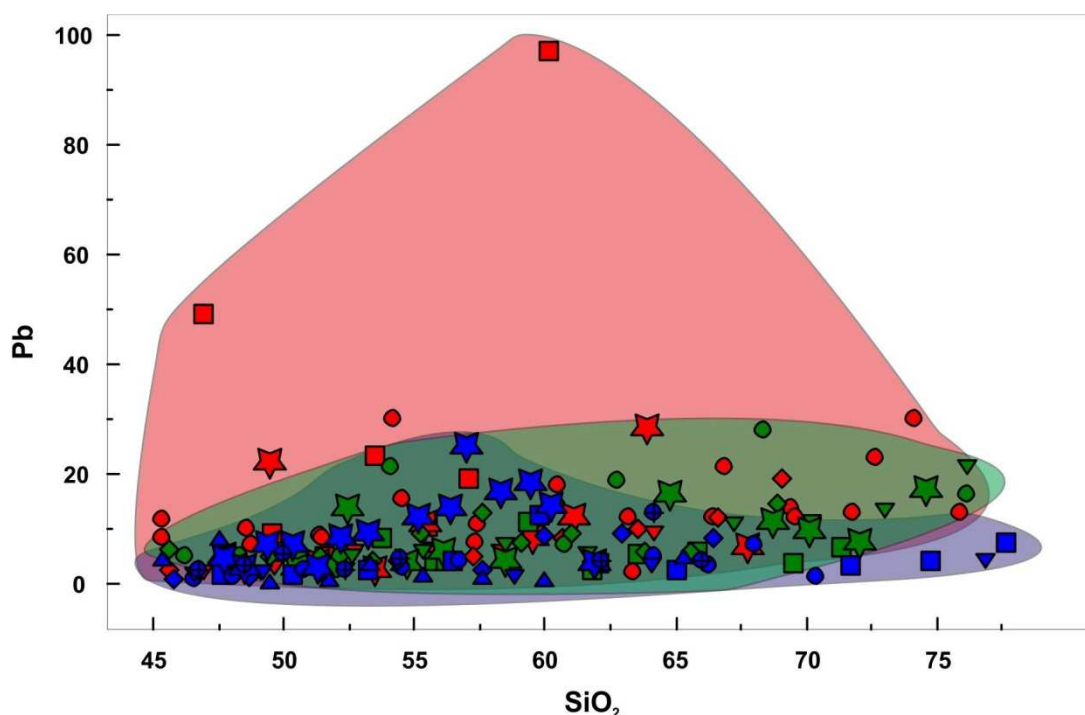


Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Nb ως προς SiO₂ (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Nb κυμαίνονται μεταξύ 0-5 σταθερά για όλο το εύρος SiO₂ για την πλειοψηφία των δειγμάτων με εξαίρεση ένα δείγμα με Nb=49 στο SiO₂=45. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Nb κυμαίνονται μεταξύ 0-15 περίπου για όλο το εύρος SiO₂. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Nb κυμαίνονται μεταξύ 0-60 μέχρι SiO₂=56 και μεταξύ 0-20 για SiO₂>56. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα έχουν οριζόντια κλίση, με τα ensialic να τείνουν να έχουν λίγο υψηλότερες τιμές από τα ensimatic. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινό εύρος τιμών Nb με

τις άλλες 2 ομάδες, αλλά ταυτόχρονα παρουσιάζουν και πολύ υψηλότερες τιμές Nb από αυτές σε όλο το εύρος SiO_2 .

Στο διάγραμμα Ni ως προς SiO_2 : 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ni κυμαίνονται για την πλειοψηφία των δειγμάτων μεταξύ 0-50 σε όλο το εύρος SiO_2 , με εξαίρεση την παρουσία δειγμάτων με $\text{Ni}=150-250$ για $\text{SiO}_2=45-52.5$ και ένα δείγμα με $\text{Ni}=750$ στο $\text{SiO}_2=46$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ni κυμαίνονται για την πλειοψηφία των δειγμάτων μεταξύ 0-50, με εξαίρεση δύο δείγματα με τιμές $\text{Ni}=620$ στο $\text{SiO}_2=45$ και $\text{Ni}=200$ στο $\text{SiO}_2=52$. Επίσης 4 δείγματα με $\text{Ni}=100$ το ένα στο $\text{SiO}_2=49$ και τα τρία στο $\text{SiO}_2=55$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ni κυμαίνονται μεταξύ 0-250 μέχρι $\text{SiO}_2=52$ και για $\text{SiO}_2>52$ κυμαίνονται μεταξύ 0-50. 2) Συμπεράσματα: Γενικά οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

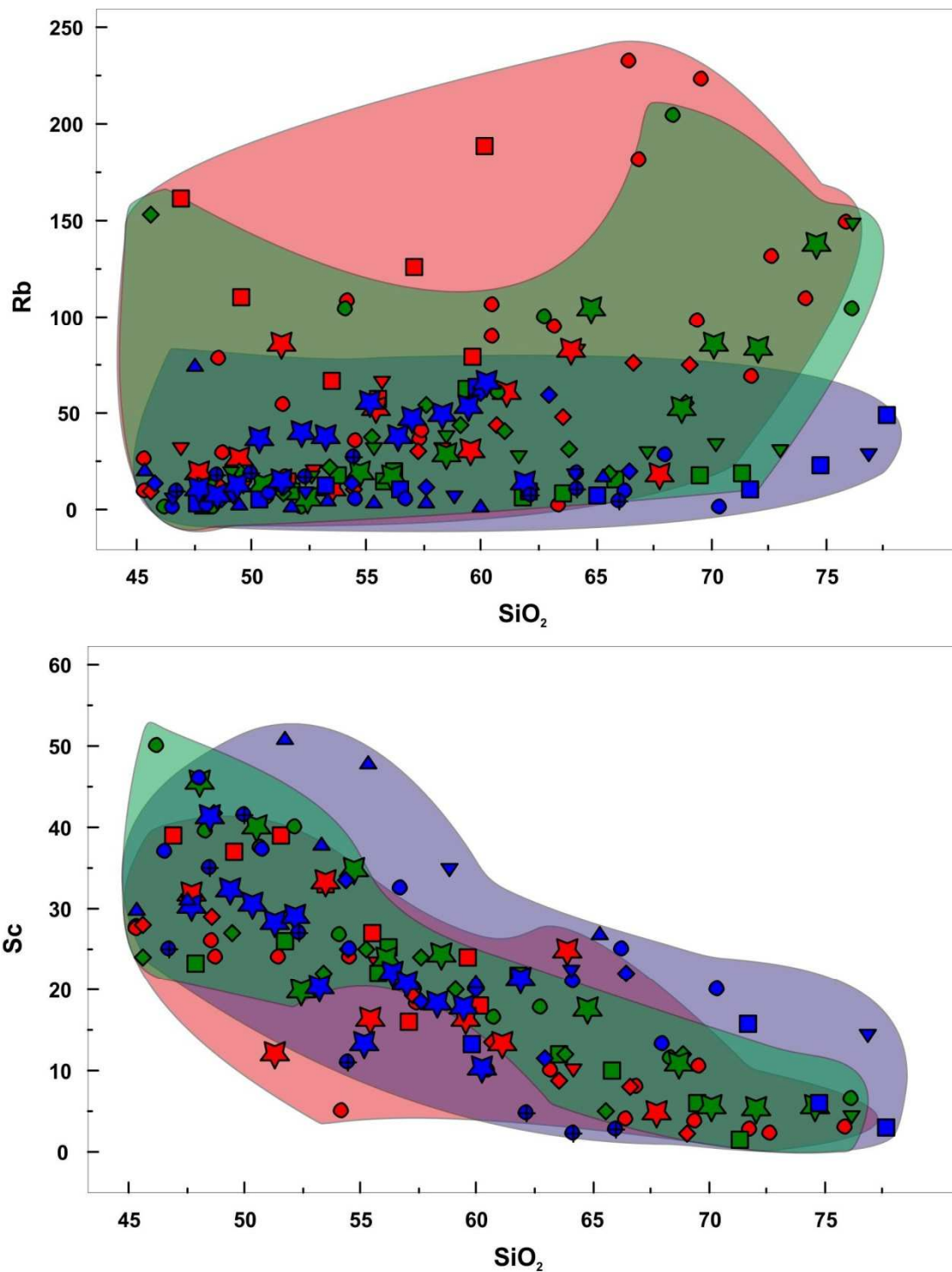


Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Pb ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-20. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-20. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-98 περίπου. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται για $\text{SiO}_2<67$, ενώ για $\text{SiO}_2>67$ τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές Pb από τα ensimatic. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινό εύρος τιμών Pb με τις άλλες 2 ομάδες, αλλά είναι τα μόνα με τιμές $\text{Pb}>20$.

Στο διάγραμμα Rb ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Rb κυμαίνονται μεταξύ 0-75. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στο $\text{SiO}_2=47$ και στο $\text{SiO}_2=50-60$ περίπου. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-200. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται στο $\text{SiO}_2=45$, $\text{SiO}_2=53$ και $\text{SiO}_2=62-75$ περίπου. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-220 περίπου. Σε όλο το εύρος SiO_2 εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές Rb. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα δεν

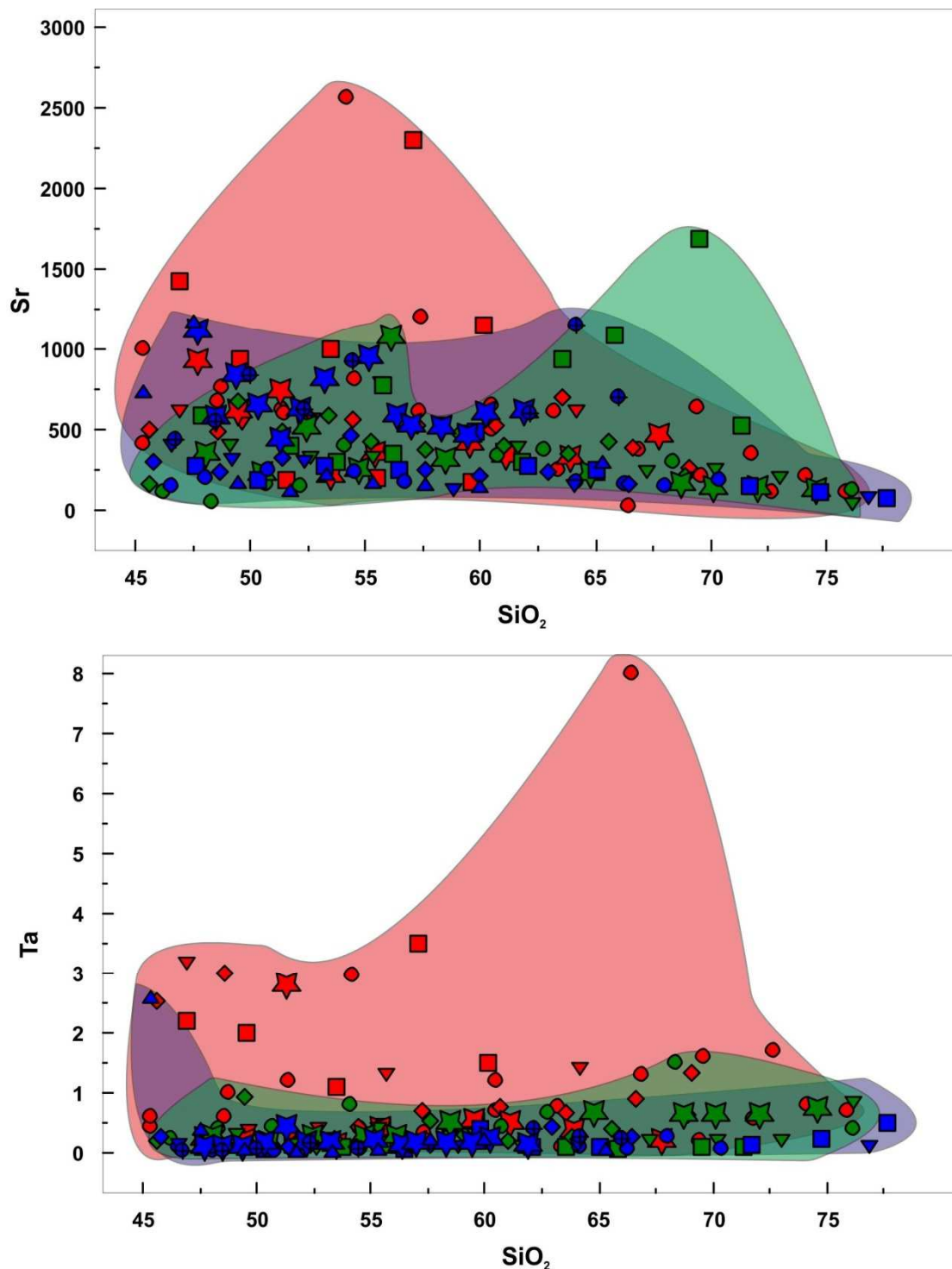
διαφοροποιούνται για $\text{SiO}_2 < 67$. Για $\text{SiO}_2 > 67$ τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές Rb από τα ensimatic. Τα ενεργά περιθώρια δεν διαφοροποιούνται από τις άλλες δύο ομάδες, εκτός από το ότι είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $\text{Rb} > 120$.



Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Sc ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: Για τα ensimatic τόξα οι τιμές Sc κυμαίνονται μεταξύ 50-0 και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 . Για τα

ensialic τόξα οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 50-0 και οι τιμές έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 40-0. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

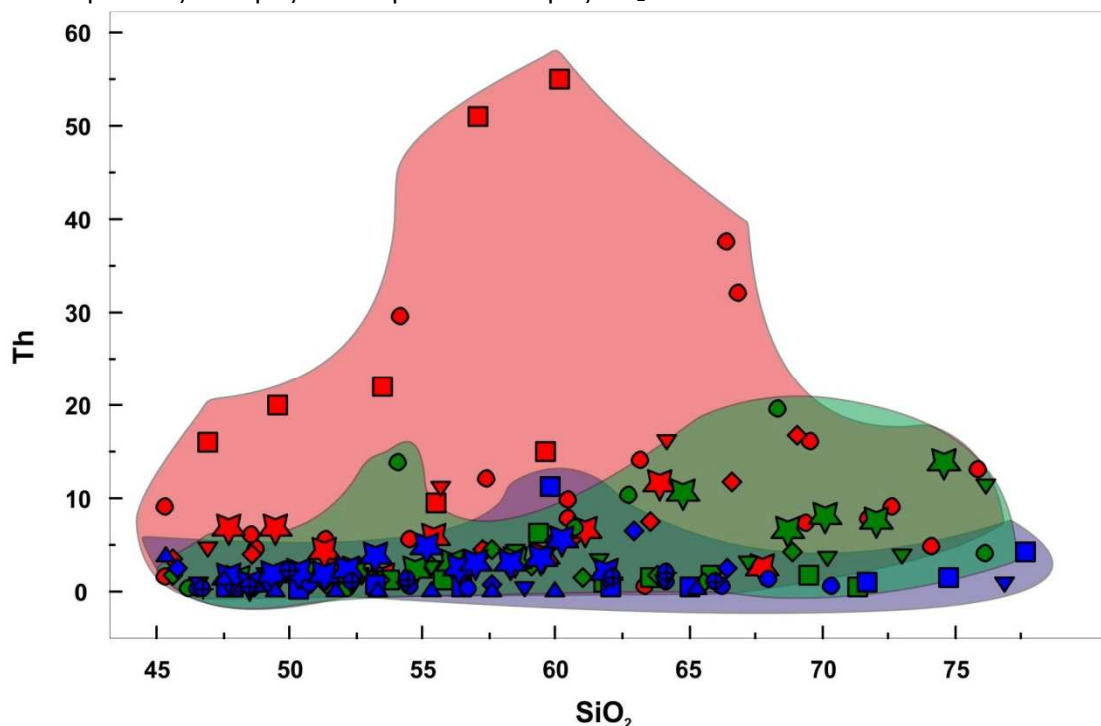


Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Sr ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: Για τα ensimatic τόξα οι τιμές Sr κυμαίνονται μεταξύ 1100-0. Για τα ensialic οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-1000. Για

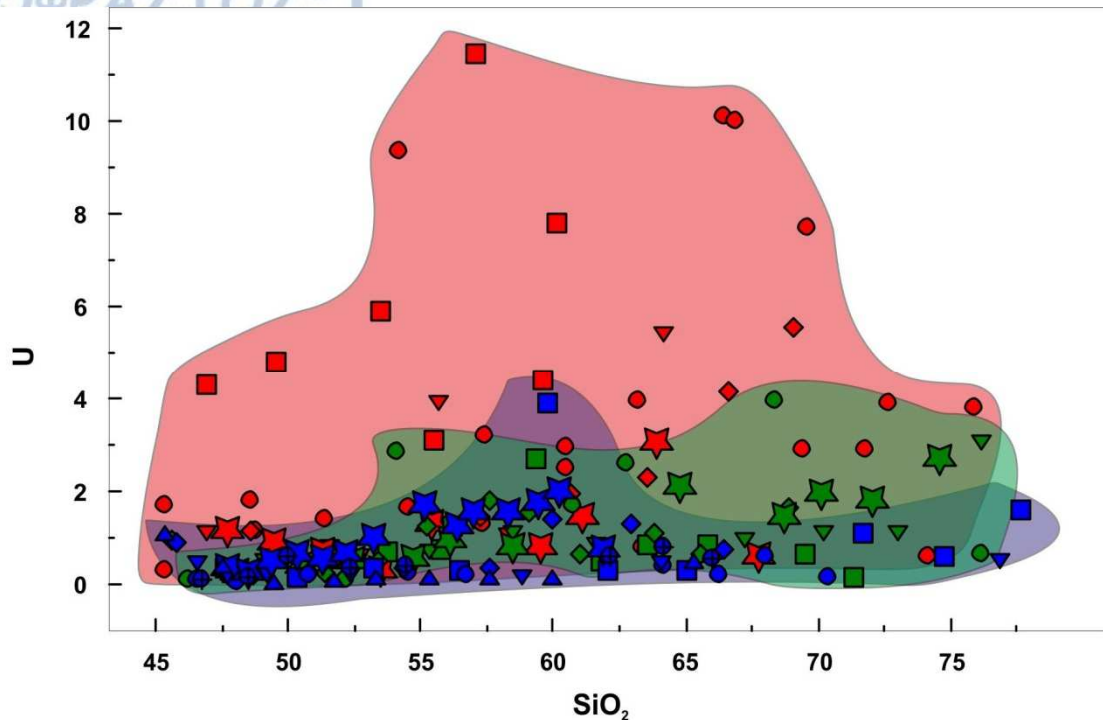
τα ενεργά περιθώρια οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-2500. 2)Συμπεράσματα: Οι τρεις ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που εμφανίζουν τιμές $Sr > 1500$.

Στο διάγραμμα Ta ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1)Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ta κυμαίνονται σταθερά σε όλο το εύρος SiO_2 μεταξύ 0-0.5 περίπου με εξαίρεση ένα δείγμα με τιμή $Ta=2.5$ στο $SiO_2=45$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ta κυμαίνονται μεταξύ 0-0.5 σε όλο το εύρος SiO_2 με εξαίρεση τρία δείγματα με τιμές Ta κοντά στο 1 στο $SiO_2=49$, $SiO_2=54$, $SiO_2=68$ περίπου. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ta κυμαίνονται μεταξύ 0-8. Υπάρχουν χαμηλές και υψηλές τιμές Ta σε όλο το εύρος SiO_2 . 2)Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $Ta > 2.5$ για όλο το εύρος SiO_2 .



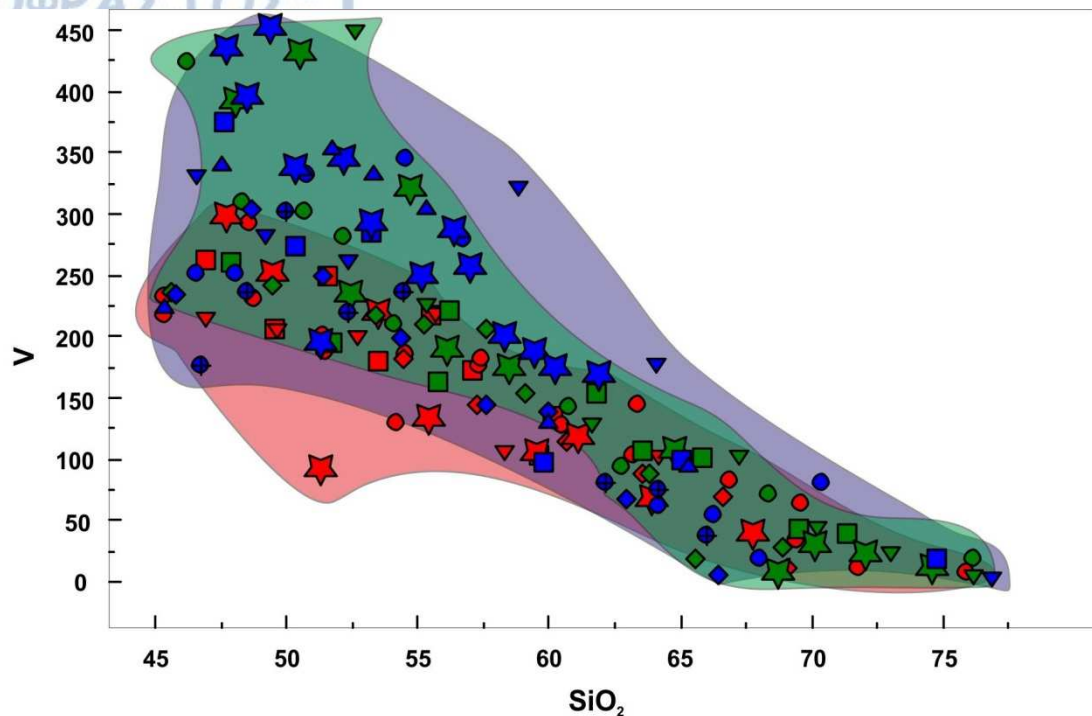
Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Th ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1)Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Th κυμαίνονται μεταξύ 0-5 με εξαίρεση ένα δείγμα με μέγιστη τιμή $Th=10$ στο $SiO_2=60$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Th κυμαίνονται μεταξύ 0-20 με ελαφριά αυξητική τάση για την πλειοψηφία των τιμών με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** για $SiO_2=45-55$ $Th=0-30$. Για $SiO_2=55-67$, $Th=5-55$. Για $SiO_2=67-80$, $Th=4-15$. 2)Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic διαφοροποιούνται για $SiO_2 > 65$ όπου η πλειοψηφία των δειγμάτων των ensialic έχουν υψηλότερη τιμή Th από τα ensimatic. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών με τις άλλες 2 ομάδες, αλλά πολλά δείγματα τείνουν να έχουν υψηλότερες τιμές Th από τις άλλες 2 ομάδες. Επίσης είναι τα μόνα που παρουσιάζουν $Th > 20$.



Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

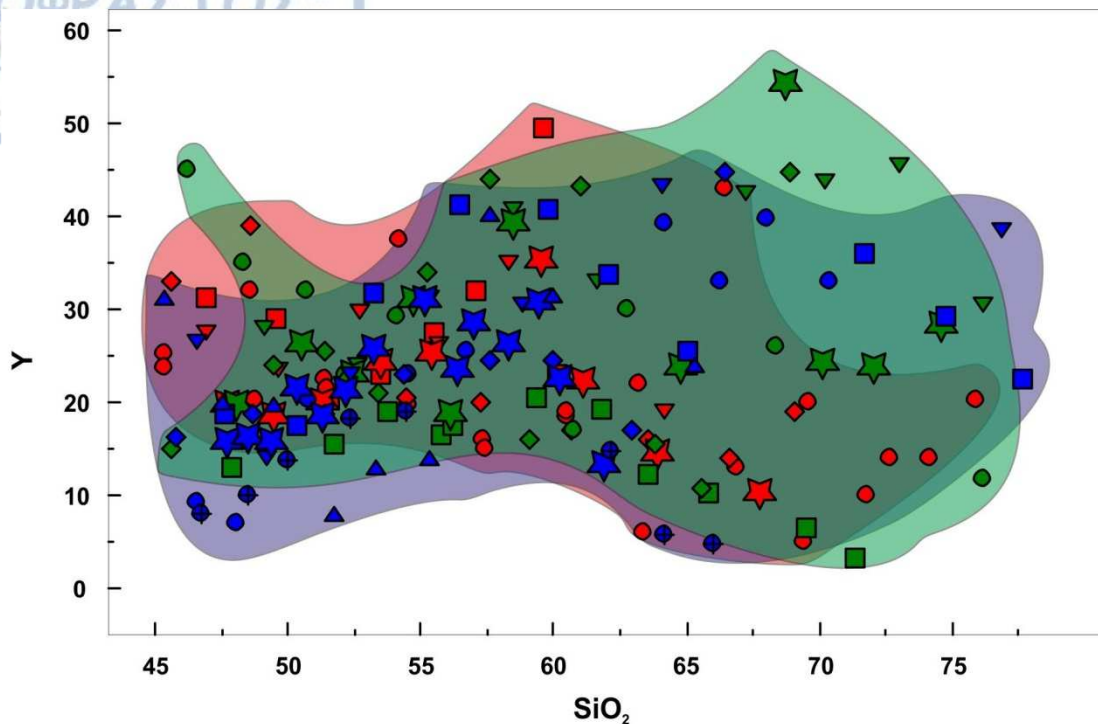
Στο διάγραμμα U ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** η πλειοψηφία των δειγμάτων για το U κυμαίνεται μεταξύ 0-1, αλλά για $\text{SiO}_2=55-60$ εμφανίζονται και τιμές $U=1-4$ περίπου. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-4 και έχουν μια ελαφριά αυξητική τάση με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** για $\text{SiO}_2=45-53$ ισχύει $U=0-6$, για $\text{SiO}_2=53-70$ ισχύει $U=0.5-11.5$ και για $\text{SiO}_2=70-80$ ισχύει $U=0-3$. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic διαφοροποιούνται για $\text{SiO}_2>65$ όπου η πλειοψηφία των δειγμάτων των ensialic έχουν υψηλότερη τιμή U από τα ensimatic. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών με τις άλλες 2 ομάδες, αλλά πολλά δείγματα τείνουν να έχουν υψηλότερες τιμές U από τις άλλες 2 ομάδες. Επίσης είναι τα μόνα που παρουσιάζουν $U>4$.



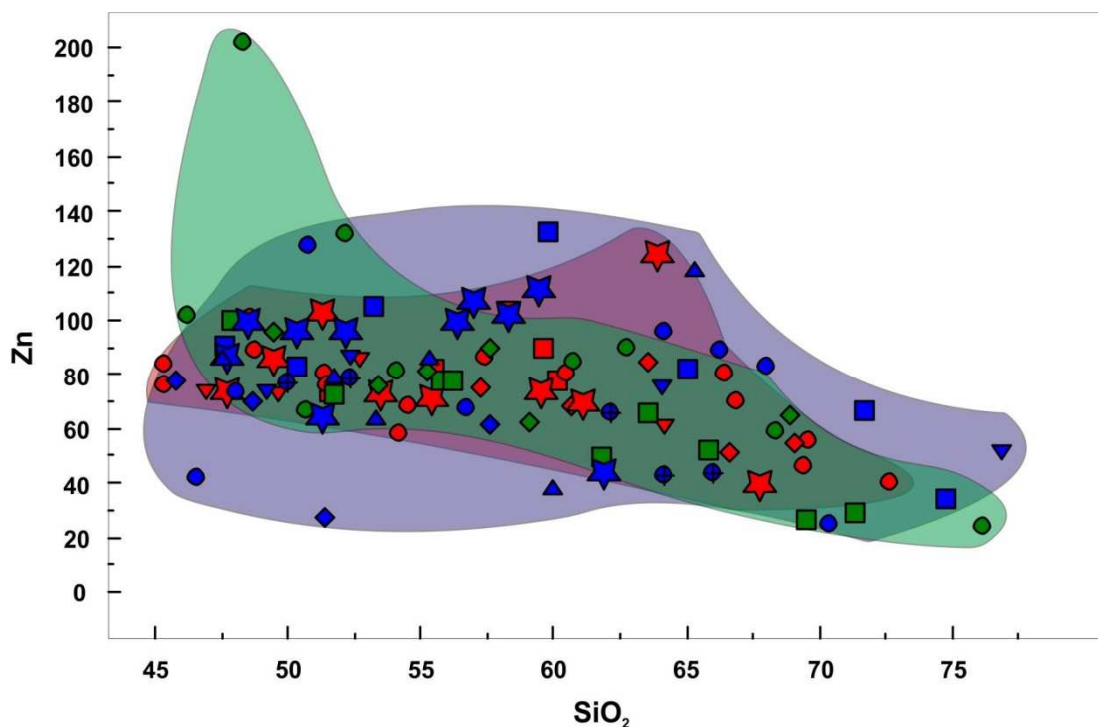
Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα V ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές V κυμαίνονται μεταξύ 450-0 με μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές V κυμαίνονται μεταξύ 425-0 περίπου με μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές V κυμαίνονται μεταξύ 300-0 περίπου με μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 για την πλειοψηφία των δειγμάτων. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

Στο διάγραμμα Y ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Y κυμαίνονται μεταξύ 5-45. Εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές σε όλο το εύρος SiO_2 . **Για τα ensialic τόξα** για $\text{SiO}_2=45-60$ ισχύει $Y=15-45$, ενώ για $\text{SiO}_2=60-80$ ισχύει $Y=5-55$. **Για τα ενεργά περιθώρια** για $\text{SiO}_2=45-60$ ισχύει $Y=15-50$, ενώ για $\text{SiO}_2=60-80$ ισχύει $Y=5-45$. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.



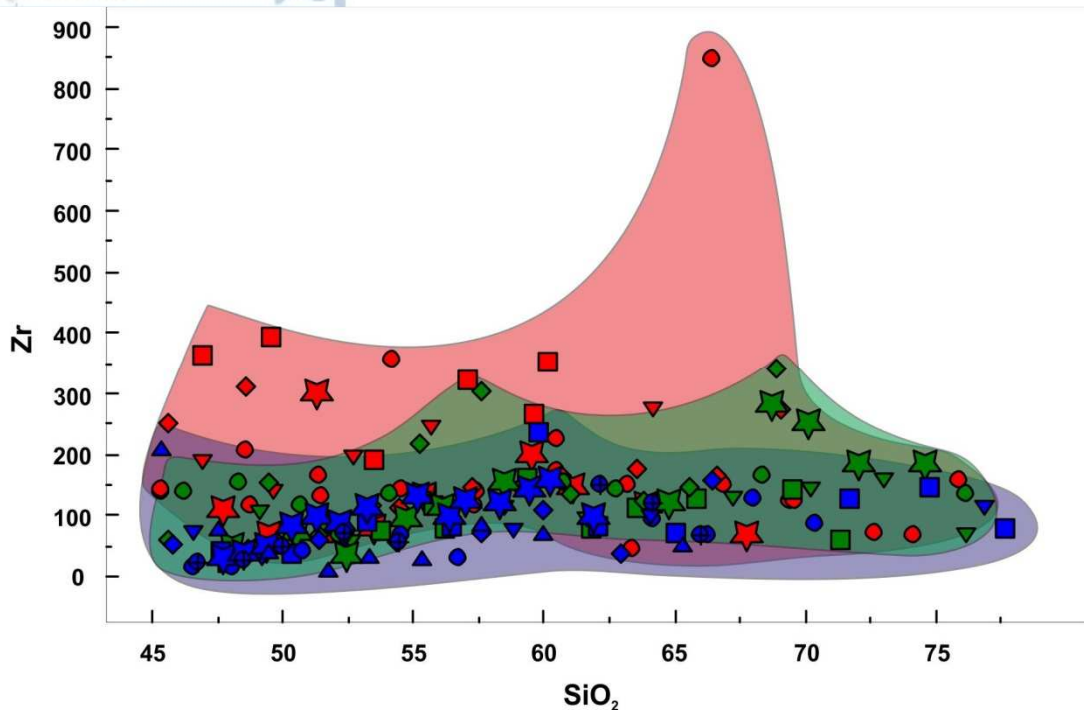
Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια



Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Zn ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Zn κυμαίνονται μεταξύ 30-130. Εμφανίζονται ταυτόχρονα τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές και προς τις υψηλότερες τιμές SiO_2 διακρίνεται μια ελαφριά μειωτική τάση. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Zn κυμαίνονται μεταξύ 200-30 και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 100-40, με μια μέγιστη τιμή $\text{Zn}=130$ για $\text{SiO}_2=64$ περίπου. Οι τιμές φαίνεται να

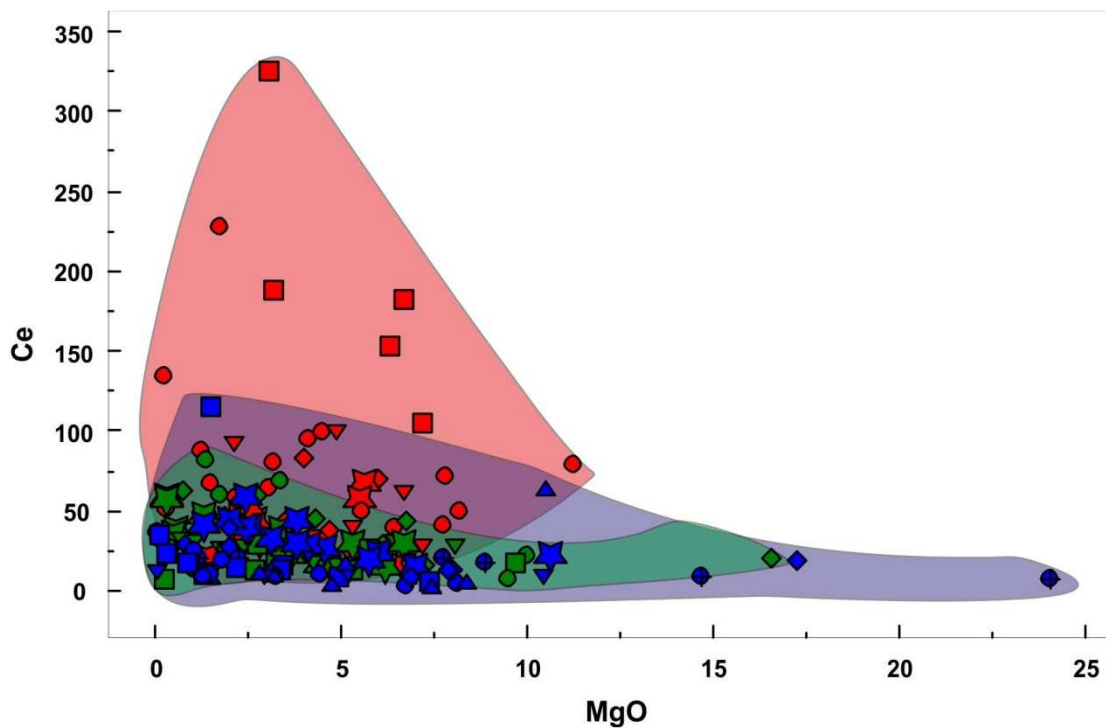
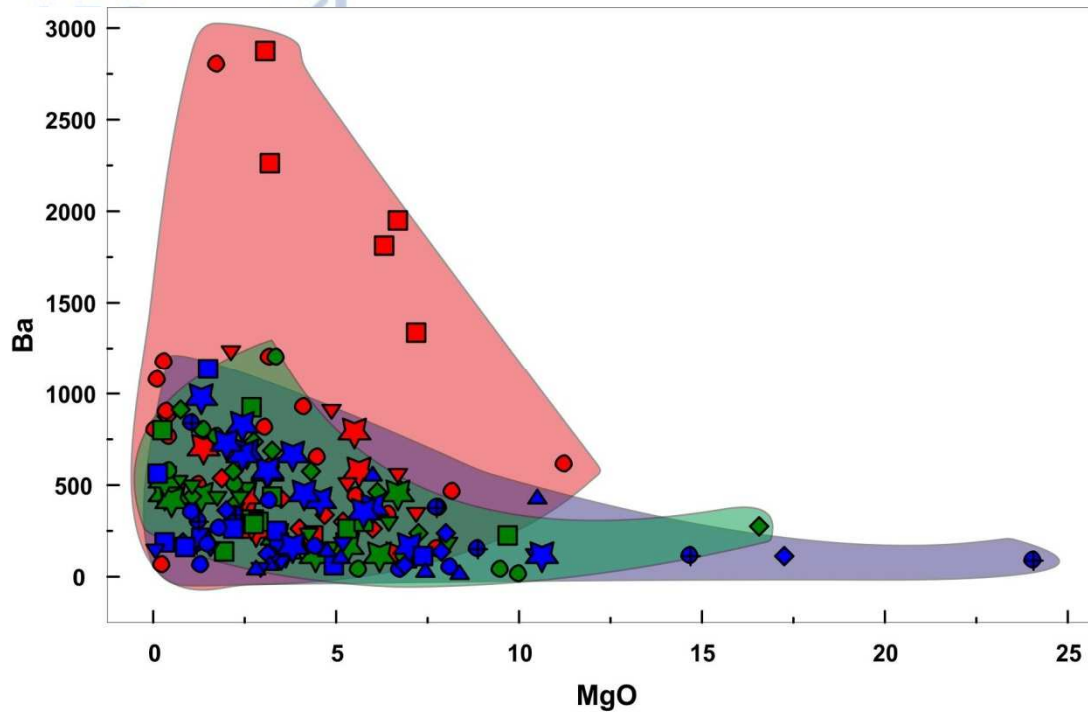
ακολουθούν κυρίως μια μειωτική τάση με την αύξηση του SiO_2 . 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται.



Σχήμα 4.4.1.3.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Zr ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.3.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνονται μεταξύ 0-150 σε όλο το εύρος SiO_2 , με εξαίρεση μια μέγιστη τιμή $\text{Zr}=200$ στο $\text{SiO}_2=60$. **Για τα ensialic τόξα** η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνονται μεταξύ 0-150, άλλα εμφανίζονται τιμές $\text{Zr}=250-350$ για $\text{SiO}_2=55-57$ και για $\text{SiO}_2=68-70$ περίπου. **Για τα ενεργά περιθώρια** για $\text{SiO}_2=45-60$ ισχύει $\text{Zr}=50-400$, ενώ για $\text{SiO}_2=60-80$ ισχύει $\text{Zr}=50-300$, με εξαίρεση μια μέγιστη τιμή $\text{Zr}=850$ στο $\text{SiO}_2=65$. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται εκτός από το ότι τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν τιμές $\text{Zr}>350$.

4.4.1.4 Διαγράμματα με MgO στον χ άξονα ιχνοστοιχείων



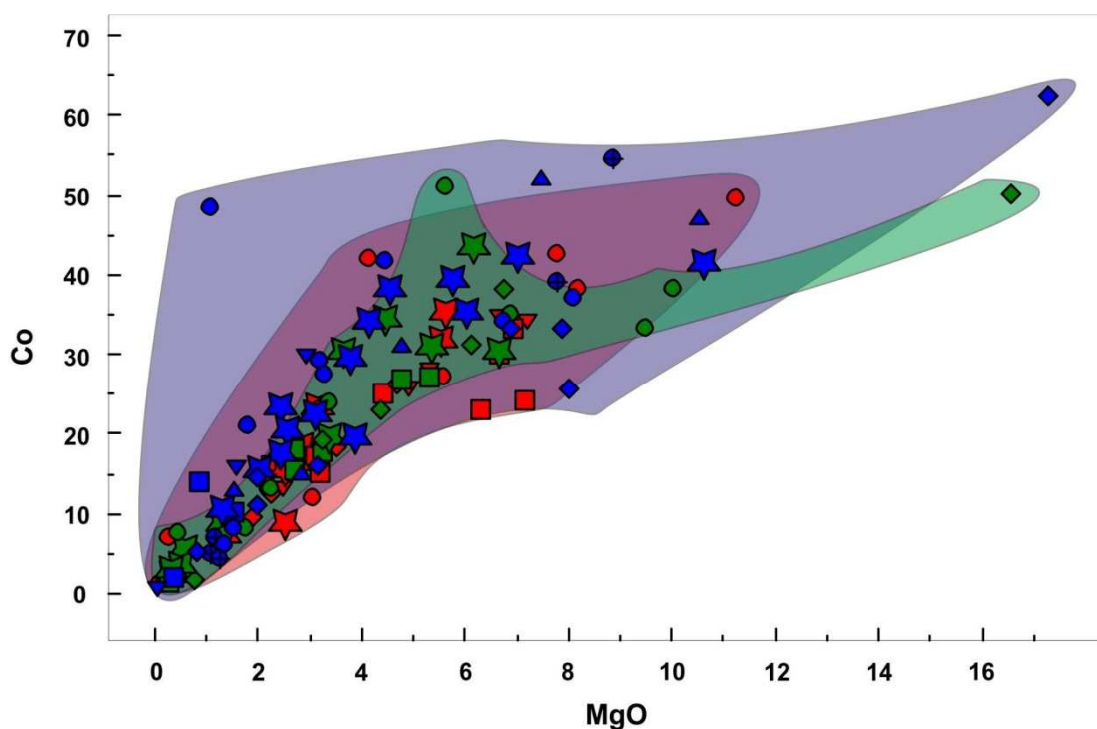
Σχήμα 4.4.1.4.1 Διαγράμματα Ba, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Ga, Ge, Hf, K, La, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Sc, Sr, Ta, Th, Ti, U, V, Y, Zn, Zr ως προς MgO. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

Στο διάγραμμα Ba ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ba κυμαίνονται μεταξύ 0-1000 περίπου και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του MgO. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ba κυμαίνονται μεταξύ 0-1100 περίπου και σταματούν να υπάρχουν στο MgO~16. Η πλειοψηφία των δειγμάτων φαίνεται να έχει μειωτική τάση τιμών Ba με την αύξηση του MgO. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ba κυμαίνονται μεταξύ

0-2800. Οι τιμές σταματούν να υπάρχουν στο $MgO \sim 11$ και ως αυτή την τιμή σε όλο το εύρος MgO εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές Ba. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic και ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, πέρα από το ότι τα ensimatic συνεχίζουν να έχουν τιμές Ba μετά το $MgO=16$ σε αντίθεση με τα ensialic. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών Ba με τις άλλες 2 ομάδες, άλλα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $Ba > 1100$.

Στο διάγραμμα Ce ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ce κυμαίνονται μεταξύ 0-110 αν και η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται από 0-50 σε όλο το εύρος τιμών MgO . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ce κυμαίνονται μεταξύ 0-75, αν και η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0-50 μέχρι το $MgO=16$ όπου σταματούν οι τιμές Ce. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ce κυμαίνονται μεταξύ 25-325 και εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές Ce μέχρι το $MgO=11$, όπου σταματούν οι τιμές Ce.

2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic και ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, πέρα από το ότι τα ensimatic συνεχίζουν να έχουν τιμές Ce μετά το $MgO=16$ σε αντίθεση με τα ensialic. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών Ce με τις άλλες 2 ομάδες, άλλα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $Ce > 110$.

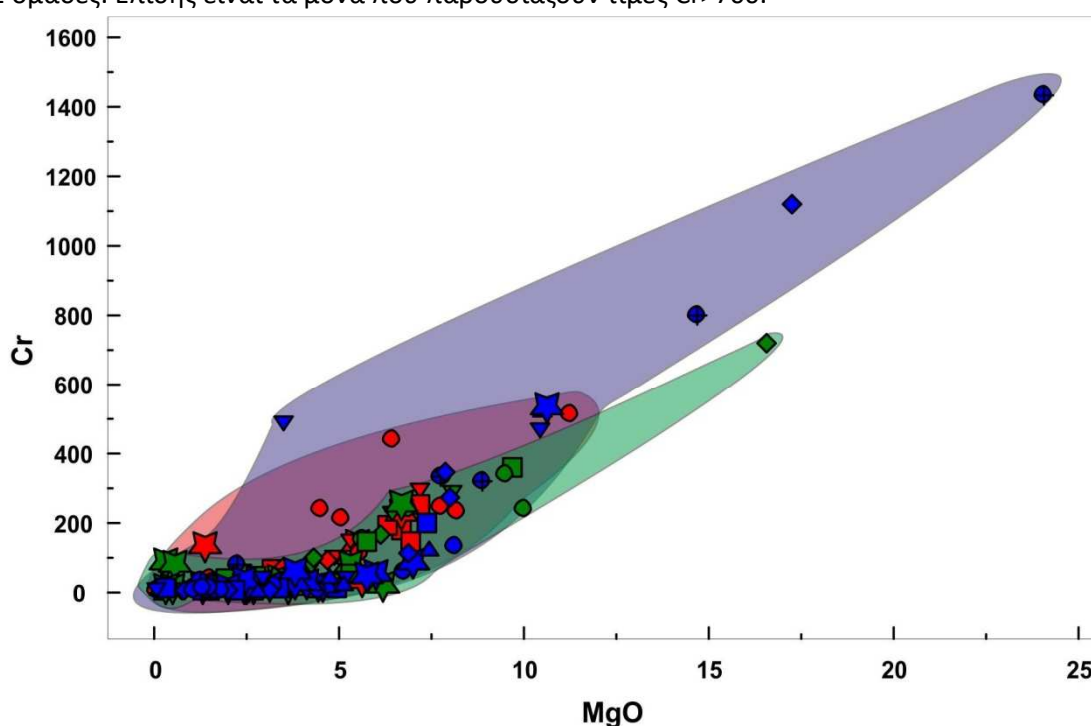


Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Co ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Co κυμαίνονται μεταξύ 0-60. Η πλειοψηφία των δειγμάτων παρουσιάζει μια αυξητική τάση τιμών Co με την αύξηση του MgO . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Co κυμαίνονται μεταξύ 0-50. Η πλειοψηφία των δειγμάτων παρουσιάζει μια αυξητική τάση τιμών Co με την αύξηση του MgO . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Co κυμαίνονται μεταξύ 0-49. Η πλειοψηφία των δειγμάτων παρουσιάζει μια αυξητική τάση τιμών Co με την αύξηση του MgO .

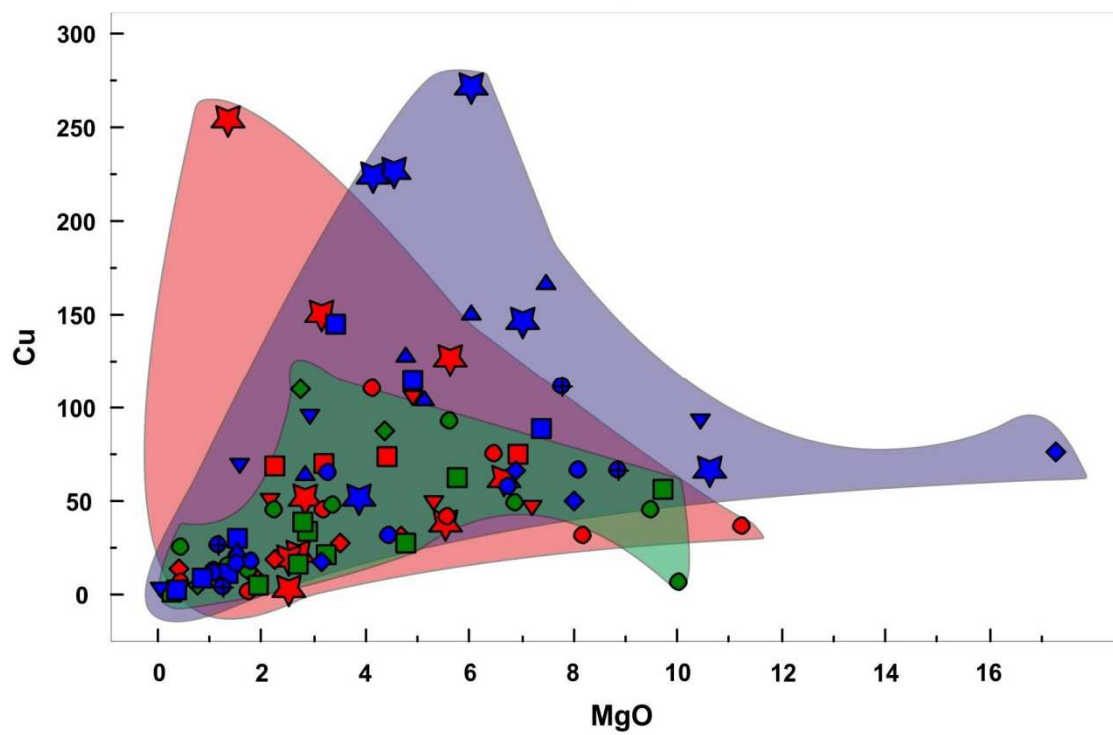
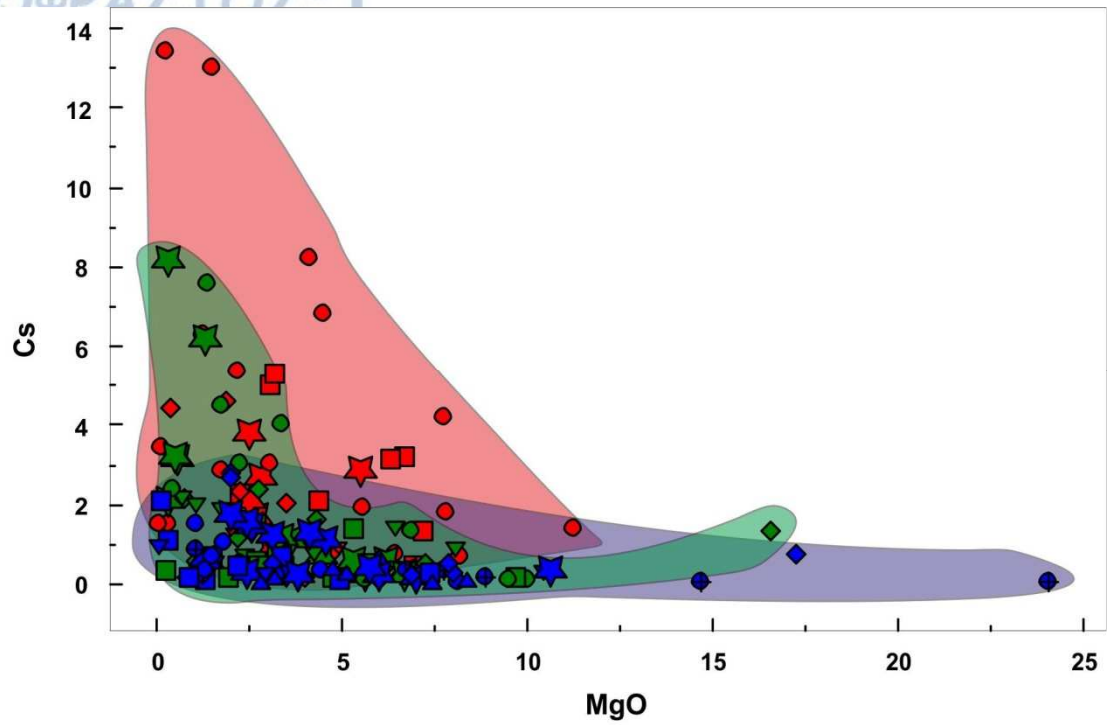
2)Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται πέρα από το ότι τα ensimatic είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $Co > 50$.

Στο διάγραμμα Cr ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1)Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Cr κυμαίνονται μεταξύ 0-1400. Για $MgO=0-5$ οι τιμές Cr κυμαίνονται σταθερά από 0-50. Για $MgO > 5$ τα δείγματα παρουσιάζουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Cr κυμαίνονται μεταξύ 0-700. Για $MgO=0-5$ οι τιμές Cr κυμαίνονται σταθερά από 0-100. Για $MgO > 5$ τα δείγματα παρουσιάζουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-400. Για $MgO=0-5$ οι τιμές Cr κυμαίνονται σταθερά από 0-50. Για $MgO > 5$ τα δείγματα παρουσιάζουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO. 2)Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες μέχρι το $MgO=11$ δεν διαφοροποιούνται. Για $MgO > 10$ τα ensimatic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές Cr από τις άλλες 2 ομάδες. Επίσης είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $Cr > 700$.

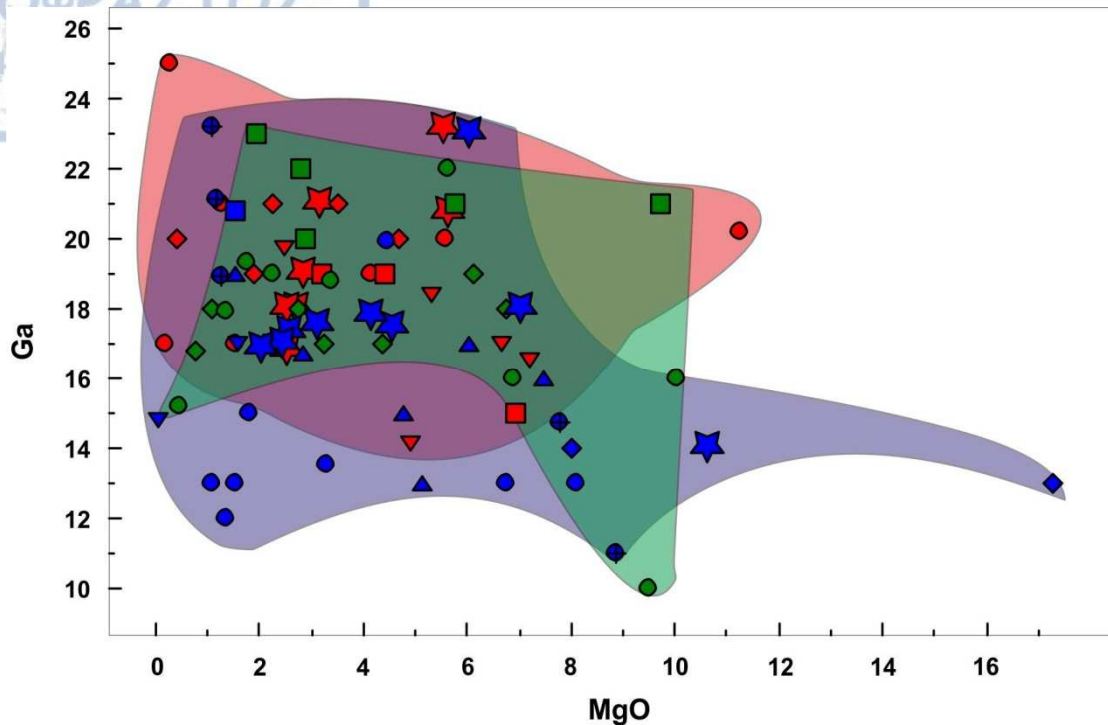


Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Cs ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1)Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Cs κυμαίνονται μεταξύ 0-2.5. Τιμές $Cs > 0.5$ εμφανίζονται για $MgO < 5$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Cs κυμαίνονται μεταξύ 0-8. Τιμές $Cs > 1$ εμφανίζονται για $MgO < 5$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Cs κυμαίνονται μεταξύ 0-13.5. Εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές μέχρι το $MgO=11$ όπου σταματά η ύπαρξη τιμών Cs. 2)Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ensialic έχουν και τιμές $Cs > 2.5$ για $MgO=0-3$ σε αντίθεση με τα ensimatic και τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $Cs > 8$.



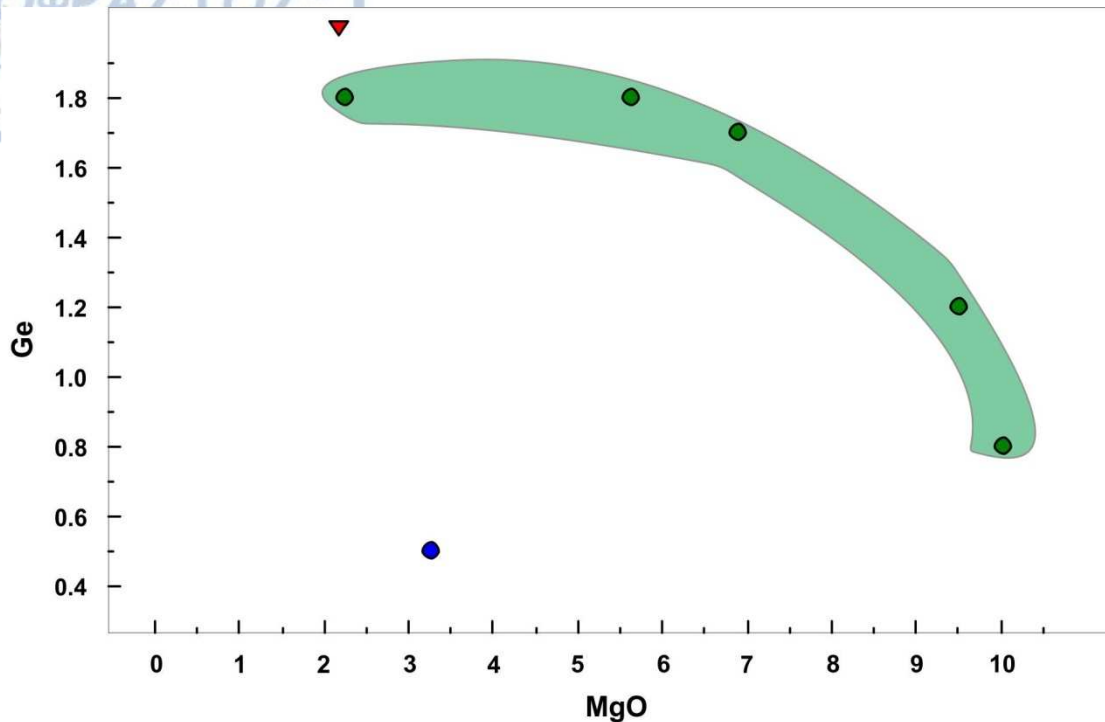
Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Cu ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Cu κυμαίνονται μεταξύ 0-260. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση μέχρι το MgO=7.5. Για MgO>7.5 οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 50-75. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-100. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση μέχρι το MgO=6. Για MgO>6 ισχύει Cu=0-25. Επίσης οι τιμές Cu σταματούν στο MgO=9.5. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Cu κυμαίνονται μεταξύ 0-250. Υπάρχει μια ελαφριά αυξητική τάση των τιμών Cu μέχρι το MgO=7 που από εκεί και μετά ισχύει Cu=25-30 μέχρι MgO=11.5 όπου σταματούν οι τιμές. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται εκτός από το ότι τα ensimatic συνεχίζουν να έχουν τιμές Cu για MgO>11.5.

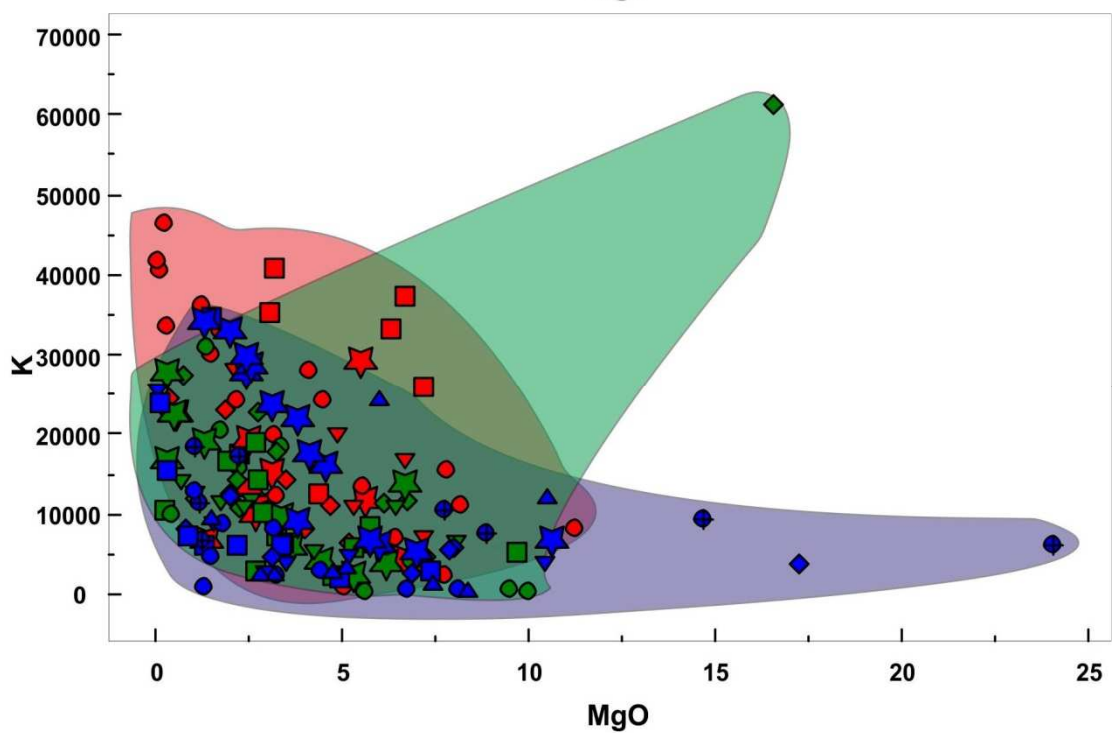
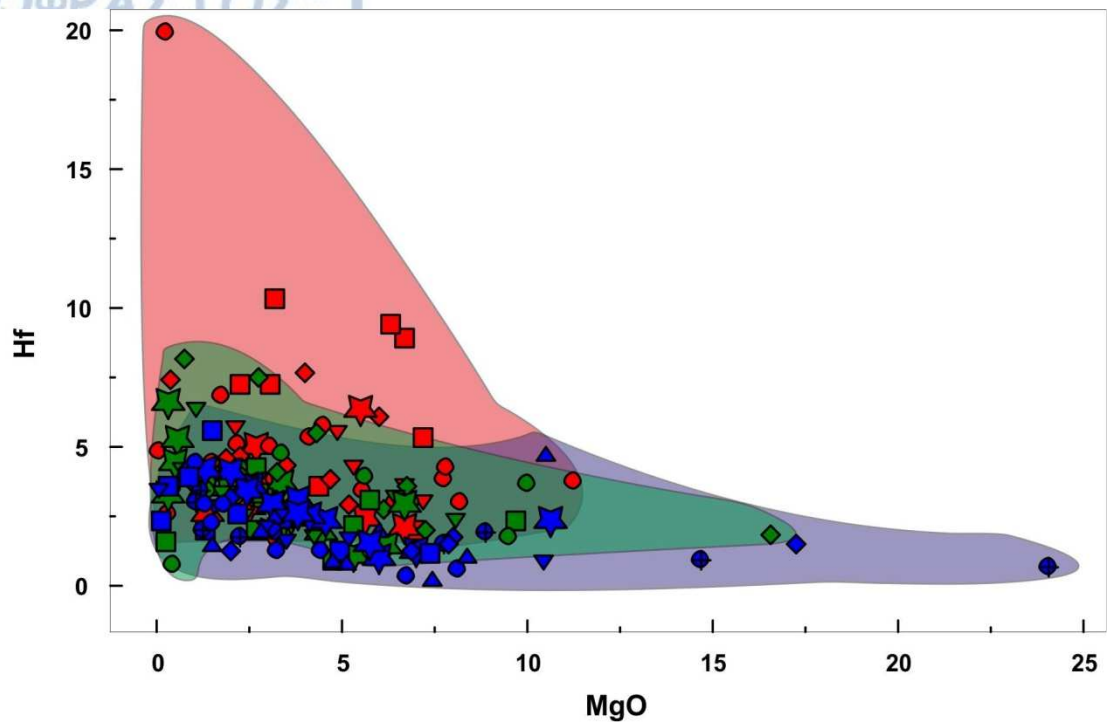
Στο διάγραμμα Ga ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ga κυμαίνονται μεταξύ 12-23. Μέχρι το MgO=6.5 υπάρχουν τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές Ga. Για MgO>6.5 οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 12.5-13. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ga κυμαίνονται μεταξύ 10-23. Οι τιμές είναι κυρίως Ga>15, με εξαίρεση ένα δείγμα με Ga=10 στο MgO=9.5. Στο MgO=10 σταματάει η ύπαρξη τιμών Ga. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ga κυμαίνονται μεταξύ 14-25. Μέχρι το MgO=11, όπου σταματάει η ύπαρξη τιμών Ga, υπάρχουν τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές Ga σε όλο το εύρος MgO. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

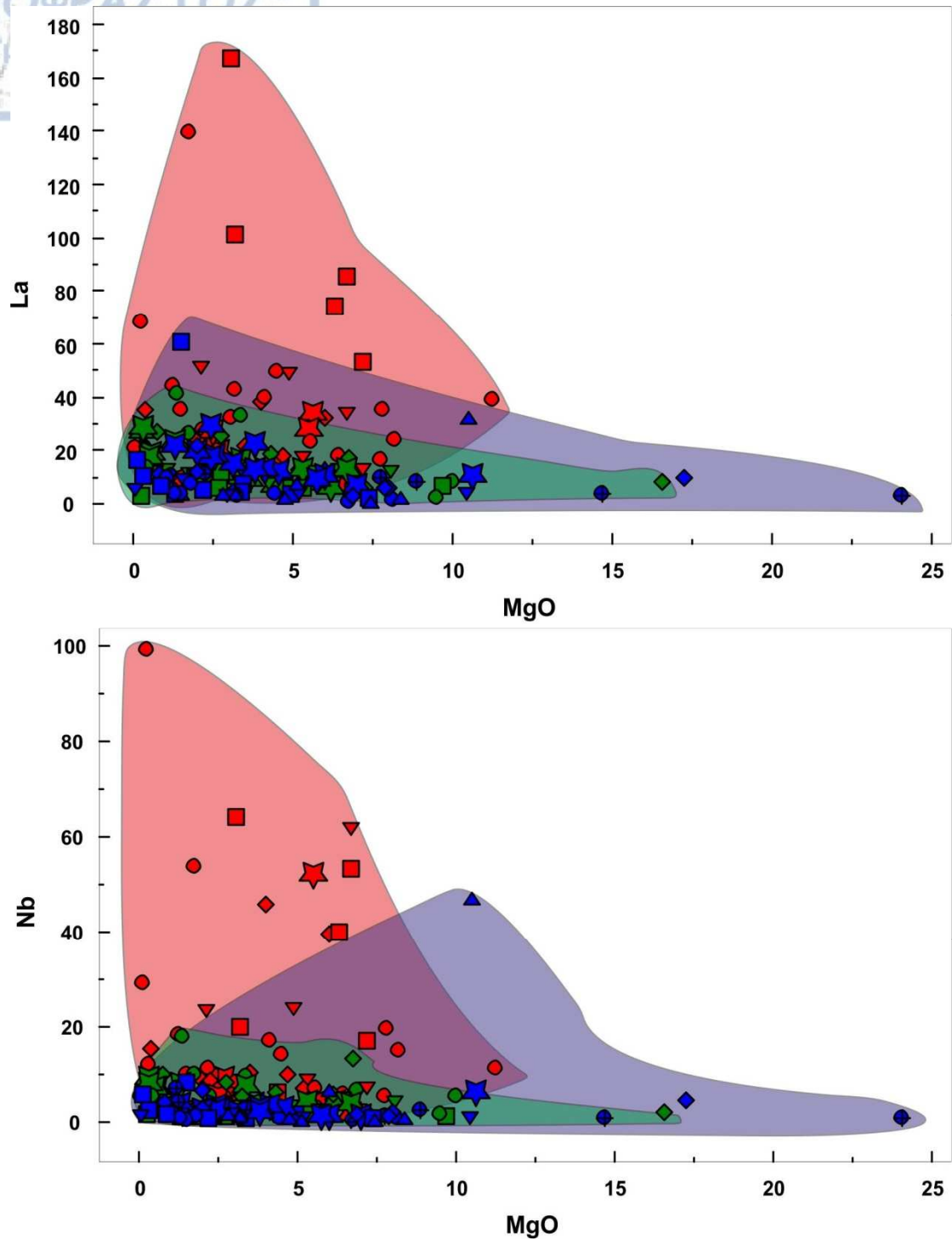
Στο διάγραμμα Ge ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: Από όλα τα δείγματα που επιλέχθηκαν έτυχε να έχει τιμή Ge μόνο ένα δείγμα **για τα ensimatic και τα ενεργά περιθώρια** με τιμές Ge 0.5 στο MgO=~3.2 και 2 στο MgO=~2 αντίστοιχα. **Για τα ensialic** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1.8-0.8 για MgO=2-10. 2) Συμπεράσματα: Λόγω ανεπαρκών δειγμάτων για τα ensimatic, ενεργά περιθώρια δεν μπορεί να διεξαχθεί συμπέρασμα.

Στο διάγραμμα Hf ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Hf κυμαίνονται μεταξύ 0-5 περίπου για MgO≤10 και για MgO=10-24 Hf=0-1. **Για τα ensialic τόξα** Hf=0-7.5. **Για τα ενεργά περιθώρια** Hf=1.5-20. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται εκτός από το ότι τα ensimatic είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Hf για MgO>17 και ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Hf>7.5.



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα K ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** K=0-35000. **Για τα ensialic τόξα** K=0-60000 μέχρι MgO=15. **Για τα ενεργά περιθώρια** K=0-45000 μέχρι MgO=10. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές K για MgO>15.

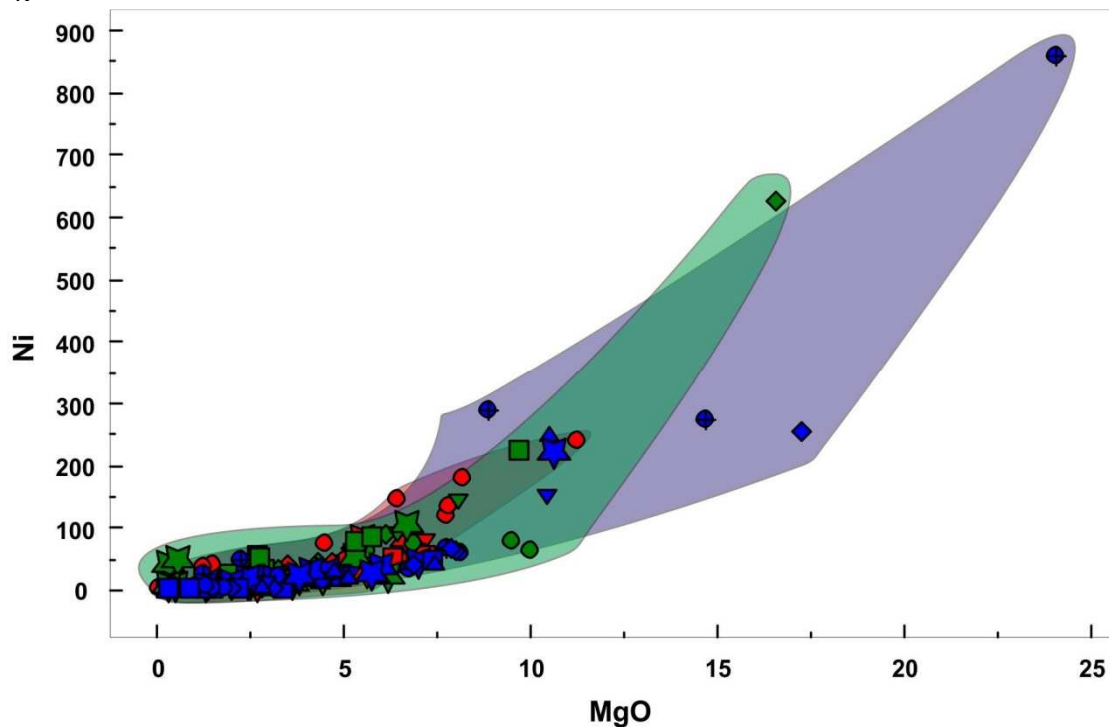


Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα La ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές La κυμαίνονται μεταξύ 0-60, η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0-30 για $MgO=0-10$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές La κυμαίνονται μεταξύ 0-40 και σταματούν στο $MgO \sim 16$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές La κυμαίνονται μεταξύ 0-170 και σταματούν στο $MgO \sim 11$. Σε όλο το εύρος MgO τα ενεργά περιθώρια εμφανίζουν τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές La. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι

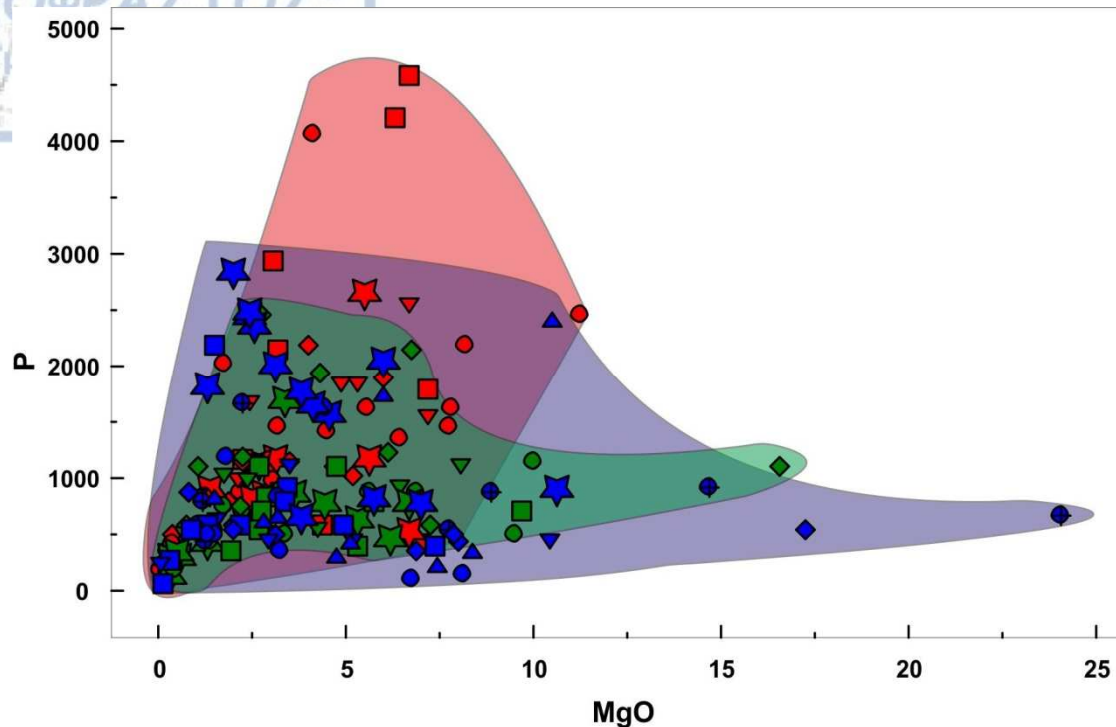
τα ensimatic είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές La για $MgO > 16$ και ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές La > 40.

Στο διάγραμμα Nb ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Nb κυμαίνονται μεταξύ 0-45 περίπου, αν και η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0-9 για $MgO = 0-10$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Nb κυμαίνονται μεταξύ 0-19, αν και η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0-10. Οι τιμές σταματούν στο $MgO \sim 16$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-100. Μέχρι το $MgO = 11$, όπου σταματούν οι τιμές Nb, εμφανίζονται τόσο υψηλές, όσο και υψηλές τιμές. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός του ότι τα ensimatic τόξα συνεχίζουν να έχουν τιμές Nb για $MgO > 16$ και ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που έχουν Nb > 40.



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

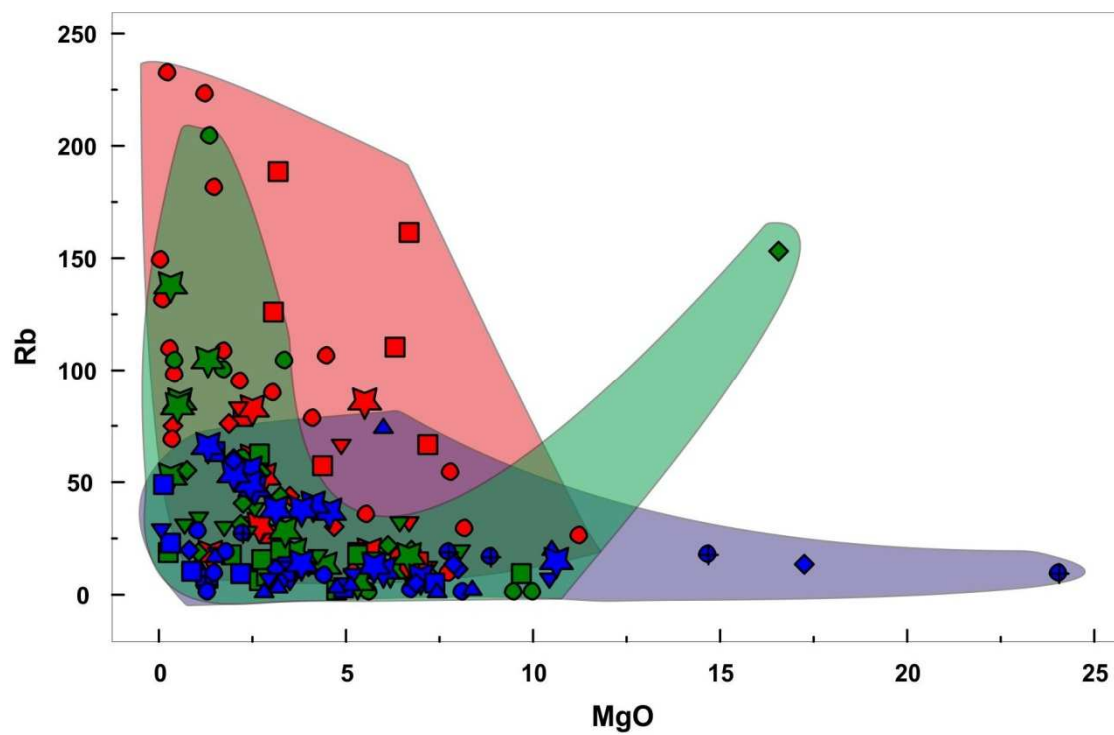
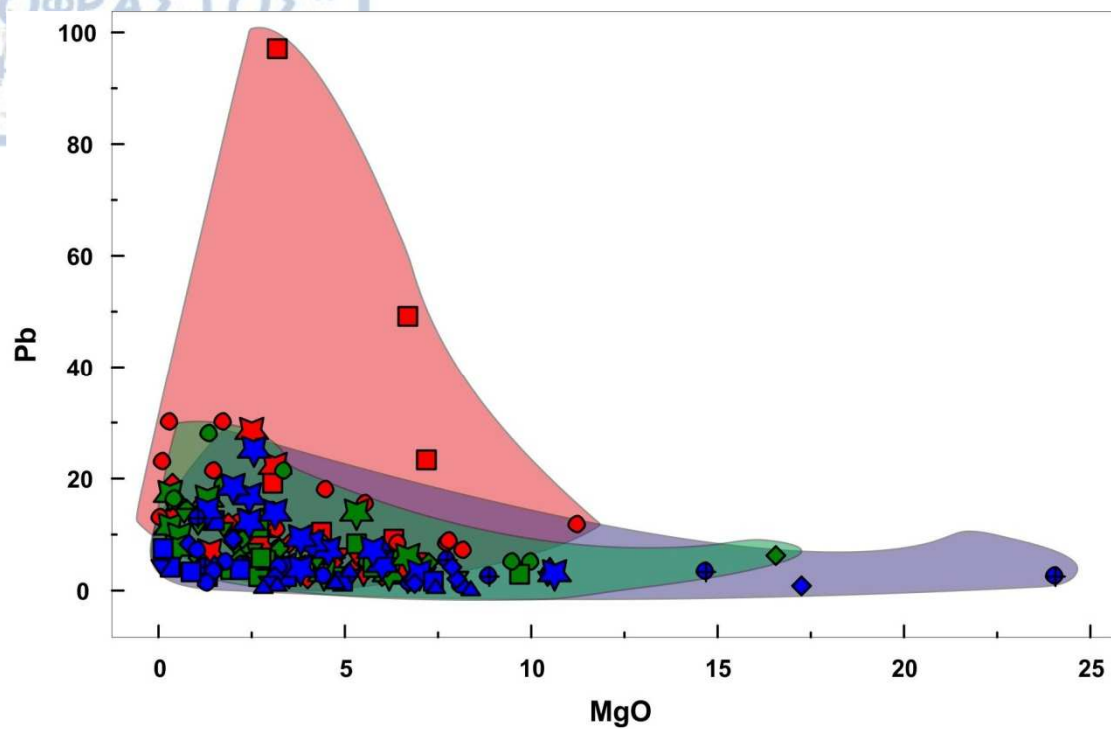
Στο διάγραμμα Ni ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-900, αλλά η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0-50 για $MgO = 0-7.5$. Για $MgO > 7.5$ οι τιμές Ni αποκτούν αυξητική τάση. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ni κυμαίνονται μεταξύ 0-600, αλλά η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0-100 για $MgO = 0-6$. Για $MgO > 6$ οι τιμές αποκτούν αυξητική τάση και σταματούν στο $MgO = 16$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ni κυμαίνονται μεταξύ 0-200, αλλά η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται μεταξύ 0-100 για $MgO = 0-7.5$. Για $MgO > 7.5$ οι τιμές Ni αποκτούν αυξητική τάση και σταματούν στο $MgO = 11$. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ensimatic είναι τα μόνα που συνεχίζουν να έχουν τιμές Ni για $MgO > 16$ και εμφανίζουν Ni > 600.



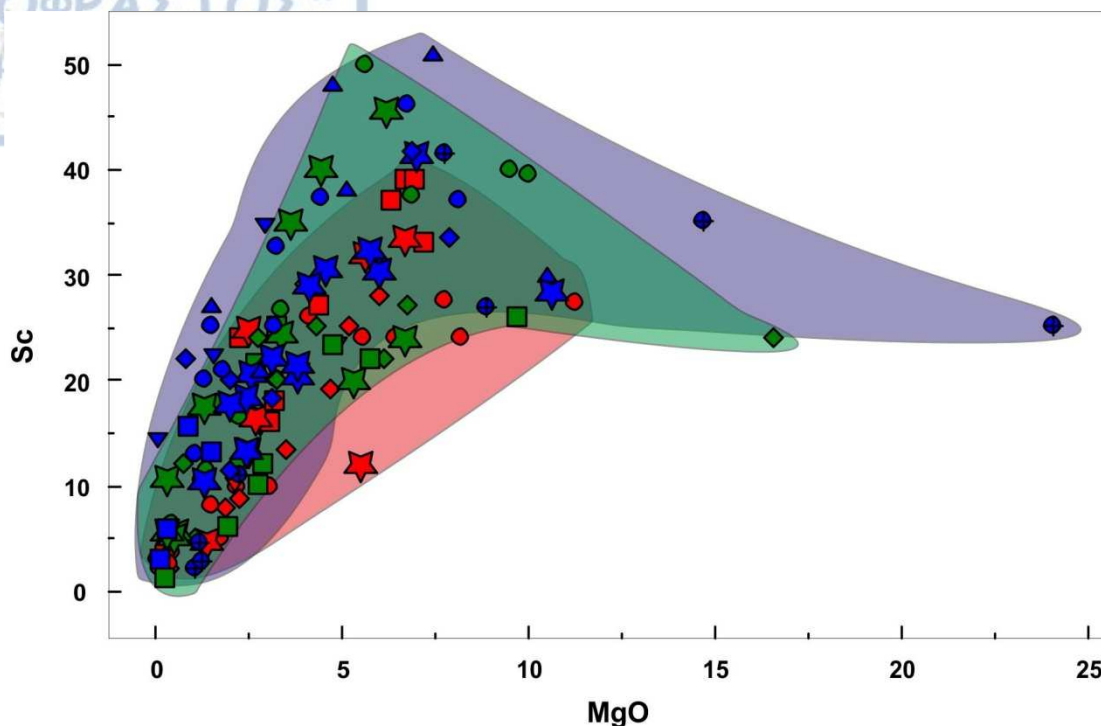
Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα P ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές P κυμαίνονται μεταξύ 0-2800 περίπου. Για MgO=0-10 εμφανίζονται τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές ταυτόχρονα. Για MgO>10, P=500-1000. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές P κυμαίνονται μεταξύ 0-2500. Για MgO=0-7.5 εμφανίζονται τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές ταυτόχρονα. Για MgO>7.5, P=500-1000. Οι τιμές P σταματούν στο MgO=16. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές P κυμαίνονται μεταξύ 0-4500. Μέχρι το MgO=10, όπου σταματούν οι τιμές P, εμφανίζονται τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές ταυτόχρονα. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ensimatic είναι τα μόνα που συνεχίζουν να έχουν τιμές P για MgO> 16 και ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που εμφανίζουν P>3000.

Στο διάγραμμα Pb ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Pb κυμαίνονται μεταξύ 0-25 περίπου. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Pb κυμαίνονται μεταξύ 0-28 περίπου και σταματά η εμφάνιση τιμών Pb στο MgO=16. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 0-100 περίπου. Μέχρι το MgO=11, όπου σταματούν οι τιμές Pb, εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές Pb. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ensimatic είναι τα μόνα που συνεχίζουν να έχουν τιμές Pb για MgO> 16 και ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που εμφανίζουν Pb>28.



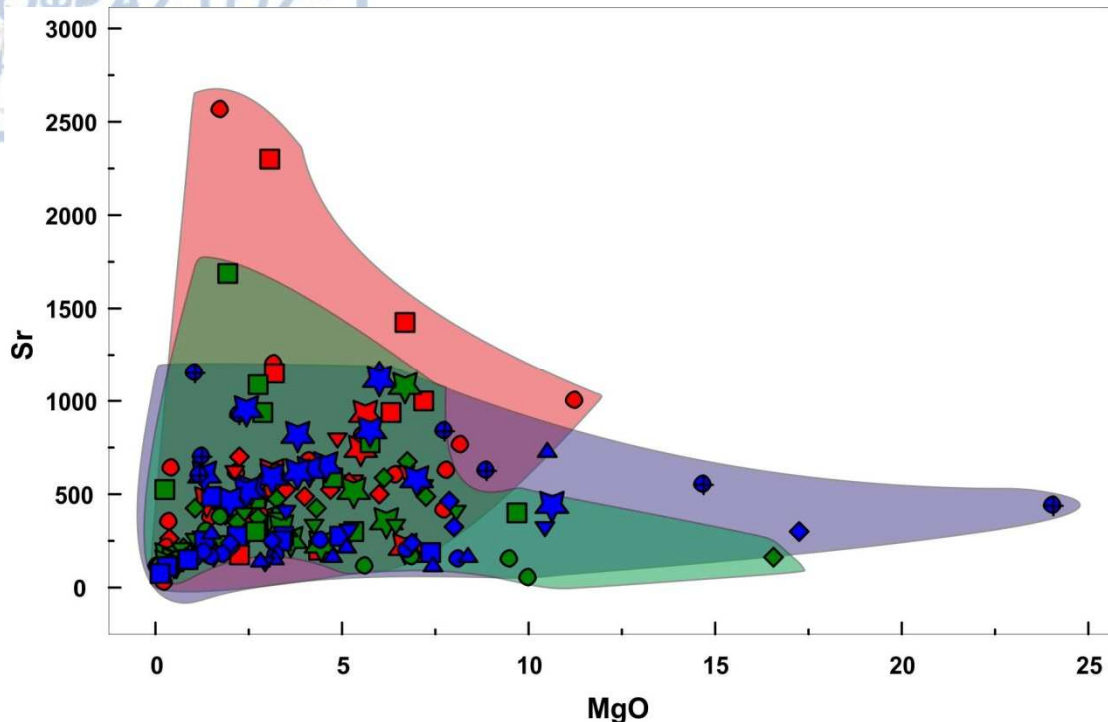
Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Rb ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Rb κυμαίνονται μεταξύ 0-75. Οι υψηλότερες τιμές Rb εμφανίζονται μέχρι $MgO \approx 6$. Για $MgO > 6$ $Rb = 0-12.5$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Rb κυμαίνονται μεταξύ 0-200. Οι υψηλότερες τιμές εμφανίζονται μέχρι $MgO = 3$. Για $MgO > 3$, $Rb = 0-12.5$ με εξαίρεση ένα δείγμα με $Rb = 150$ στο $MgO = 16$, όπου και σταματούν οι τιμές Rb. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Rb κυμαίνονται μεταξύ περίπου 10-230. Οι τιμές Rb σταματούν στο $MgO = 11$ και ως αυτό το σημείο εμφανίζονται ταυτόχρονα τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές Rb. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ensimatic είναι τα μόνα που συνεχίζουν να έχουν τιμές Rb για $MgO > 16$ και ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που εμφανίζουν $Rb > 200$.

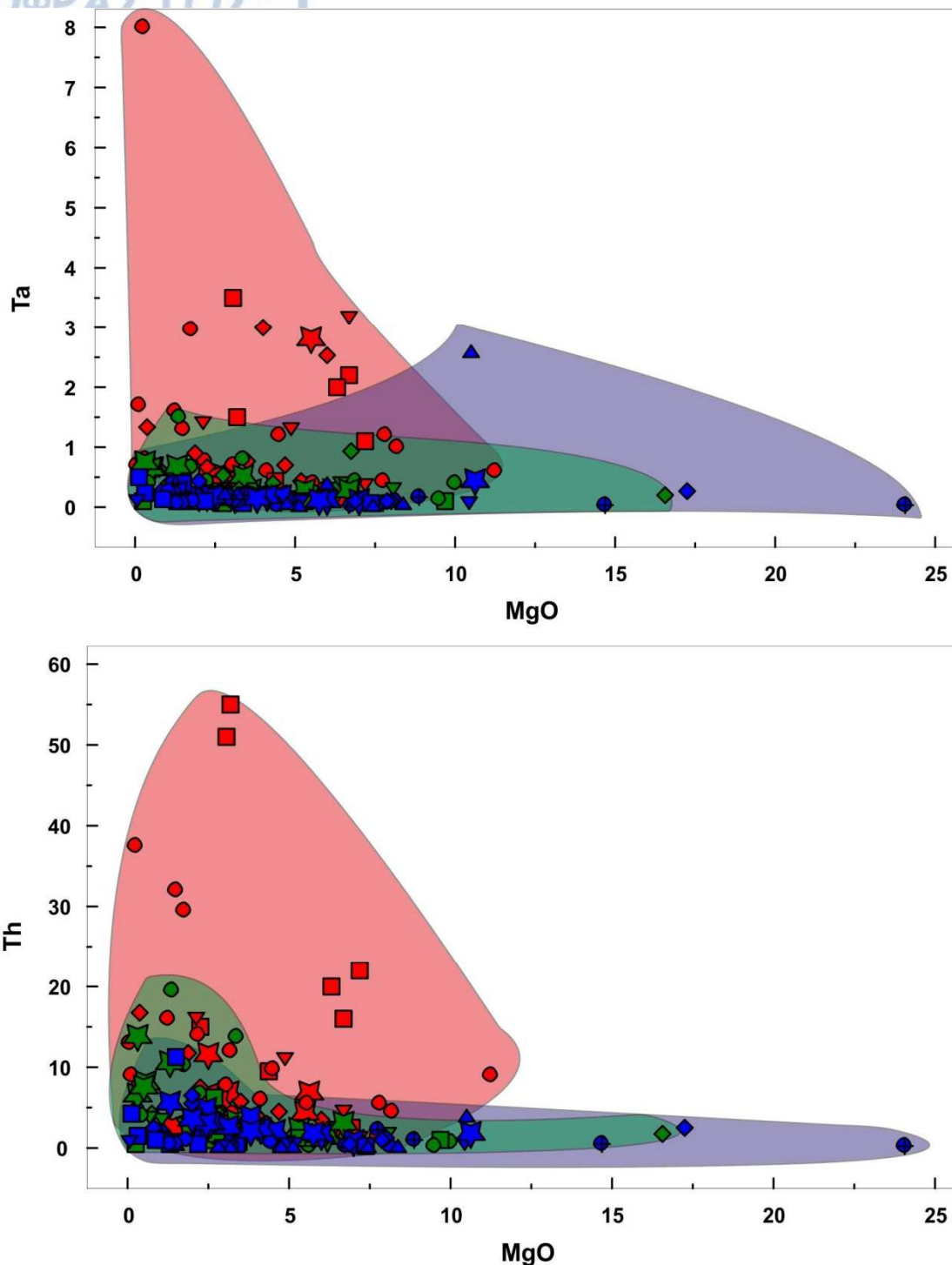
Στο διάγραμμα Sc ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Sc κυμαίνονται μεταξύ 0-50. Έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO, μέχρι το $MgO = 8$. Για $MgO > 8$ οι τιμές Rb μειώνονται και κυμαίνονται μεταξύ 25-30. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Rb κυμαίνονται μεταξύ 0-50. Έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO, μέχρι το $MgO = 5$. Για $MgO = 5-16$ οι τιμές Rb μειώνονται και κυμαίνονται μεταξύ 25-40. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Rb κυμαίνονται μεταξύ 0-40. Για την πλειοψηφία των δειγμάτων φαίνεται να υπάρχει αυξητική τάση με την αύξηση του MgO, μέχρι το $MgO = 5$. Για $MgO = 5-10$ οι τιμές Rb μειώνονται και κυμαίνονται μεταξύ 25-26. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Sr ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Sr κυμαίνονται μεταξύ 0-1100 περίπου. Για $MgO=0-7.5$ εμφανίζονται ταυτόχρονα τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές Sr. Για $MgO>7.5$, $Sr=250-750$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Sr κυμαίνονται μεταξύ 0-1750 περίπου. Για $MgO=0-7$ εμφανίζονται ταυτόχρονα τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές Sr. Για $MgO=7-16$, $Sr=0-250$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Sr κυμαίνονται μεταξύ 0-2500. Μέχρι το $MgO=16$, όπου σταματούν οι τιμές Sr, εμφανίζονται ταυτόχρονα τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ensimatic είναι τα μόνα που συνεχίζουν να έχουν τιμές Sr για $MgO>16$ και ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που εμφανίζουν $Sr>1750$.

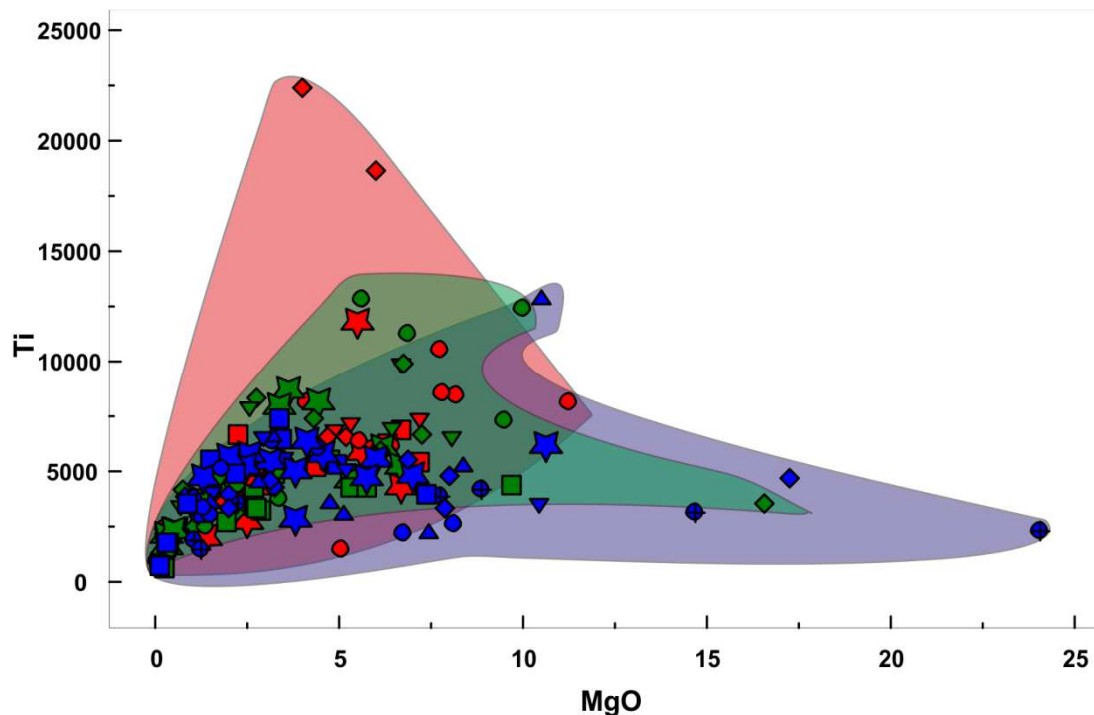
Στο διάγραμμα Ta ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ta κυμαίνονται σταθερά μεταξύ 0-0.5, με εξαίρεση 1 δείγμα με $Ta=2.5$, στο $MgO=10$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ta κυμαίνονται σταθερά μεταξύ 0-0.5 για $MgO=0-16$, με εξαίρεση 2 δειγμάτων με $Ta=1.5$ στο $MgO=1.5$ και $Ta=1$ στο $MgO=7$. **Για τα ενεργά περιθώρια** ισχύει $Ta=0-8$ για $MgO=0-11$. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Ta για $MgO>16$. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών Ta με τις άλλες 2 ομάδες, άλλα τείνουν να έχουν ταυτόχρονα και αρκετά υψηλότερες τιμές Ta και είναι τα μόνα που παρουσιάζουν $Ta>2.5$.



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Th ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Th κυμαίνονται σταθερά μεταξύ 0-5 σε όλο το εύρος MgO, εκτός από ένα δείγμα με Th=10, στο MgO=1.5. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Th κυμαίνονται μεταξύ 0-20 για MgO=0-3 περίπου, ενώ για MgO=3-16, Th=0-3 περίπου. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Th κυμαίνονται μεταξύ 0-55 για MgO=0-11. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Th για MgO>16. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών Th με

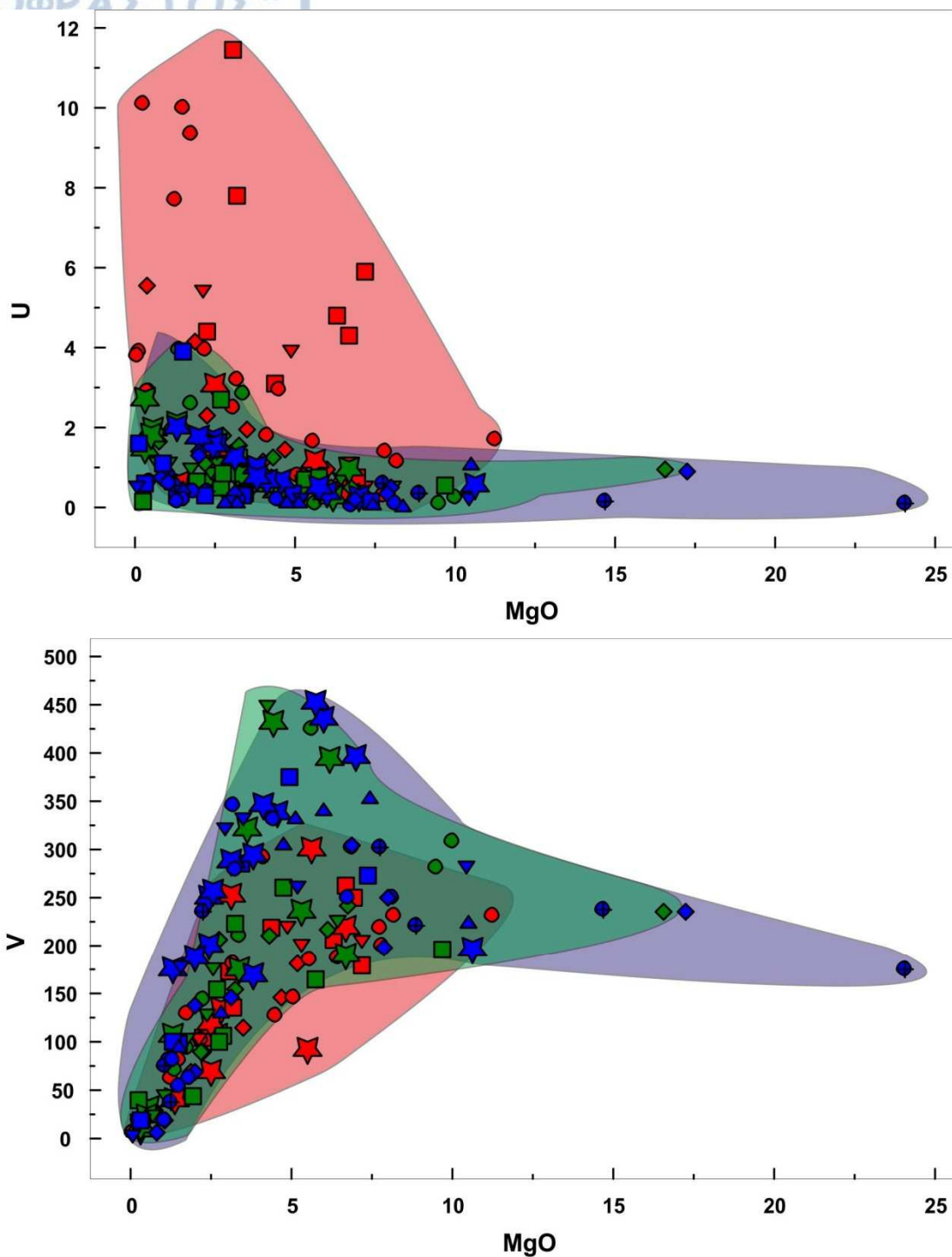
τις άλλες 2 ομάδες, αλλά τείνουν να έχουν ταυτόχρονα και αρκετά υψηλότερες τιμές Ti και είναι τα μόνα που παρουσιάζουν $Ti > 20$.



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Ti ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ti κυμαίνονται μεταξύ 0-12500. Βέβαια η πλειοψηφία των δειγμάτων έχουν τιμές $Ti = 0-7500$ και αυξητική τάση με την αύξηση του MgO μέχρι το $MgO = 10$, όπου από εκεί και μετά ισχύει $Ti = 2500-5000$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ti κυμαίνονται μεταξύ 0-12500. Έχουν αυξητική τάση μέχρι το $MgO = 10$ και για $MgO = 10-16$, $Ti = 2500$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ti κυμαίνονται μεταξύ 0-22500 για $MgO = 0-11$ και εμφανίζονται ταυτόχρονα τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές Ti. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Ti για $MgO > 16$. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών Ti με τις άλλες 2 ομάδες, αλλά είναι τα μόνα που παρουσιάζουν $Ti > 12500$.

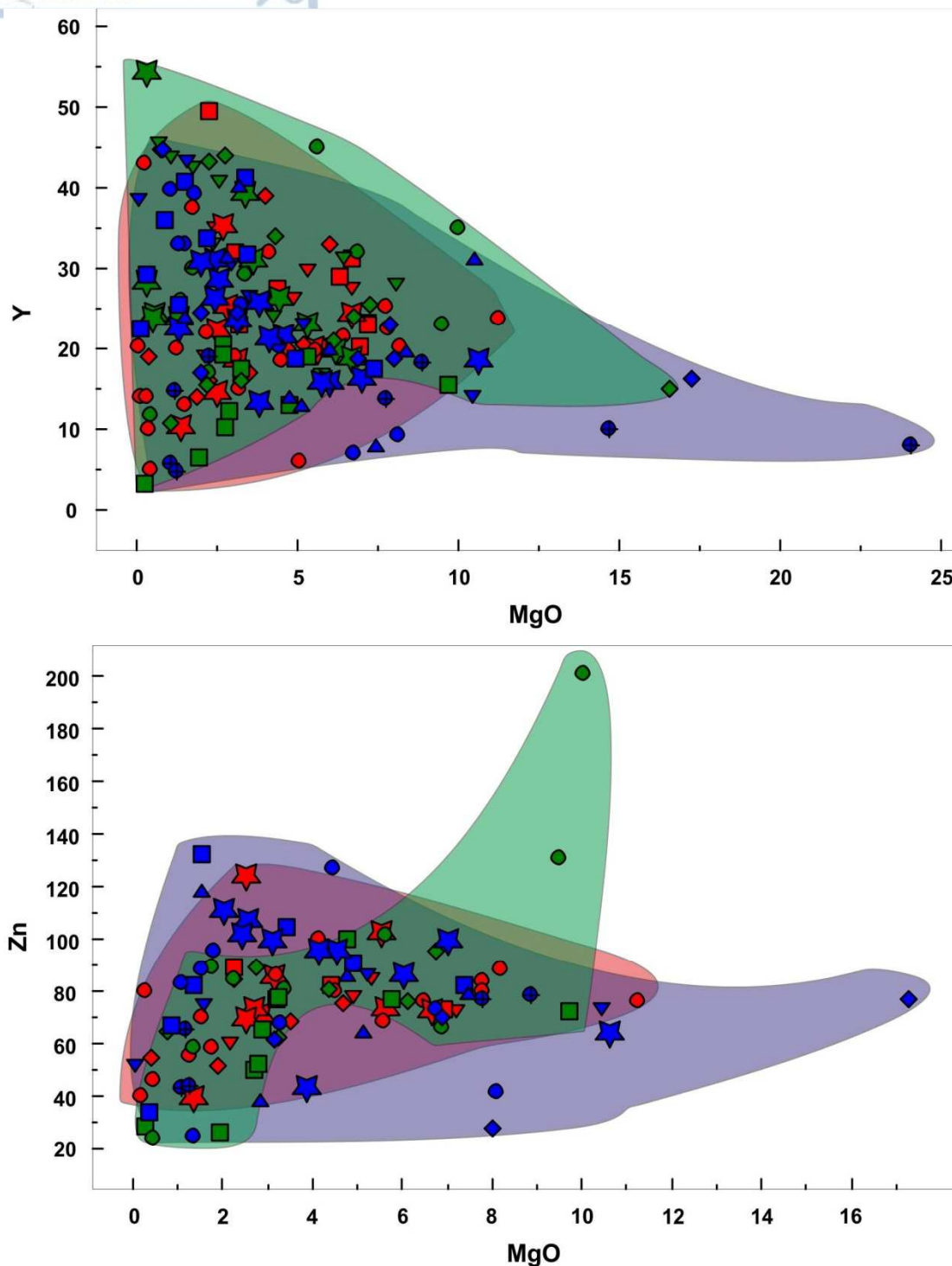
Στο διάγραμμα U ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές U κυμαίνονται μεταξύ 0-4 και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του MgO. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές U κυμαίνονται μεταξύ 0-4. Οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται για $MgO = 0-3.5$ περίπου και για $MgO = 3.5-16$ οι τιμές U είναι 0-1. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές U κυμαίνονται μεταξύ 0.5-11.5 για $MgO = 0-11$. Για όλο το εύρος MgO εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές U ταυτόχρονα. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές U για $MgO > 16$. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών U με τις άλλες 2 ομάδες, αλλά είναι τα μόνα που παρουσιάζουν $U > 4$.



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα V ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές V κυμαίνονται μεταξύ 0-450. Για MgO=0-6 περίπου οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO. Για MgO>6 οι τιμές μειώνονται και κυμαίνονται μεταξύ 200-275. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές V κυμαίνονται μεταξύ 0-450. Για MgO=0-6 περίπου οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO. Για MgO=6-16 οι τιμές μειώνονται και κυμαίνονται μεταξύ 200-300. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές U κυμαίνονται μεταξύ 0-300. Για την πλειοψηφία των δειγμάτων φαίνεται να υπάρχει μια αυξητική τάση με την αύξηση του MgO για MgO=0-5. Για MgO=5-11 οι τιμές μειώνονται και κυμαίνονται μεταξύ 175-250.

2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Y για $MgO > 16$.

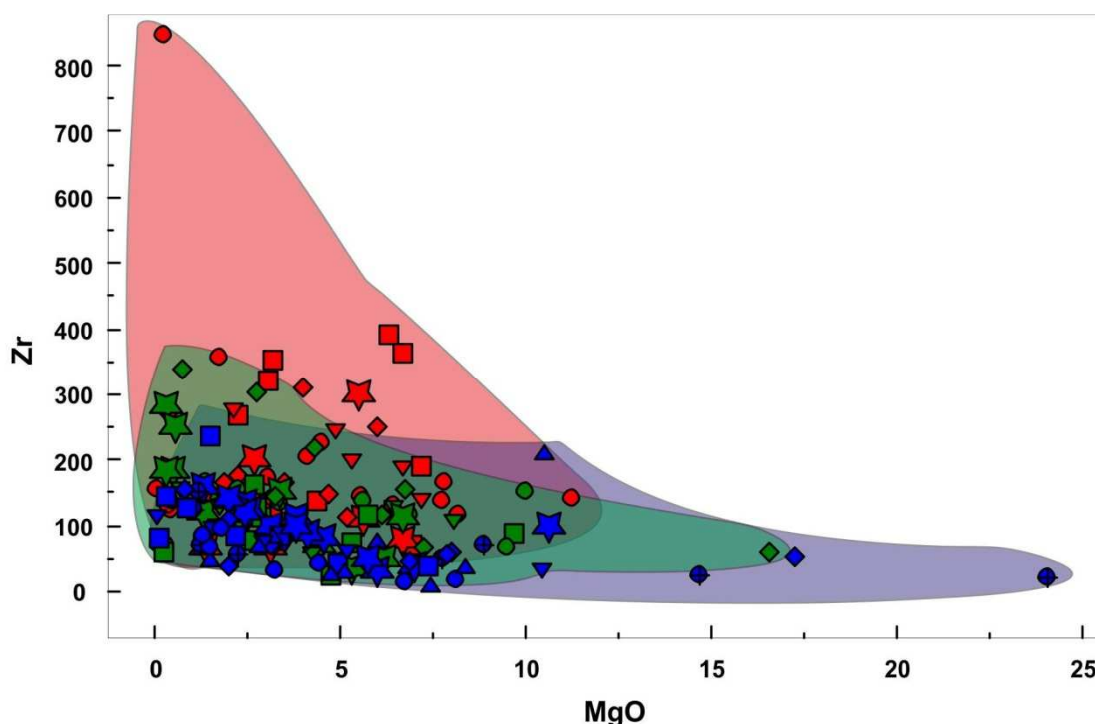


Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Y ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: Για τα ensimatic τόξα οι τιμές Y κυμαίνονται μεταξύ 5-45. Για $MgO > 3$, $Y = 5-30$. Για τα ensialic τόξα οι τιμές Y κυμαίνονται μεταξύ 4.5-55 περίπου. Για $MgO = 5-16$, $Y = 15-35$. Για τα ενεργά περιθώρια οι τιμές Y κυμαίνονται μεταξύ 4.5-50. Για $MgO = 3-11$, $Y = 5-30$. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες

δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Y για $MgO > 16$.

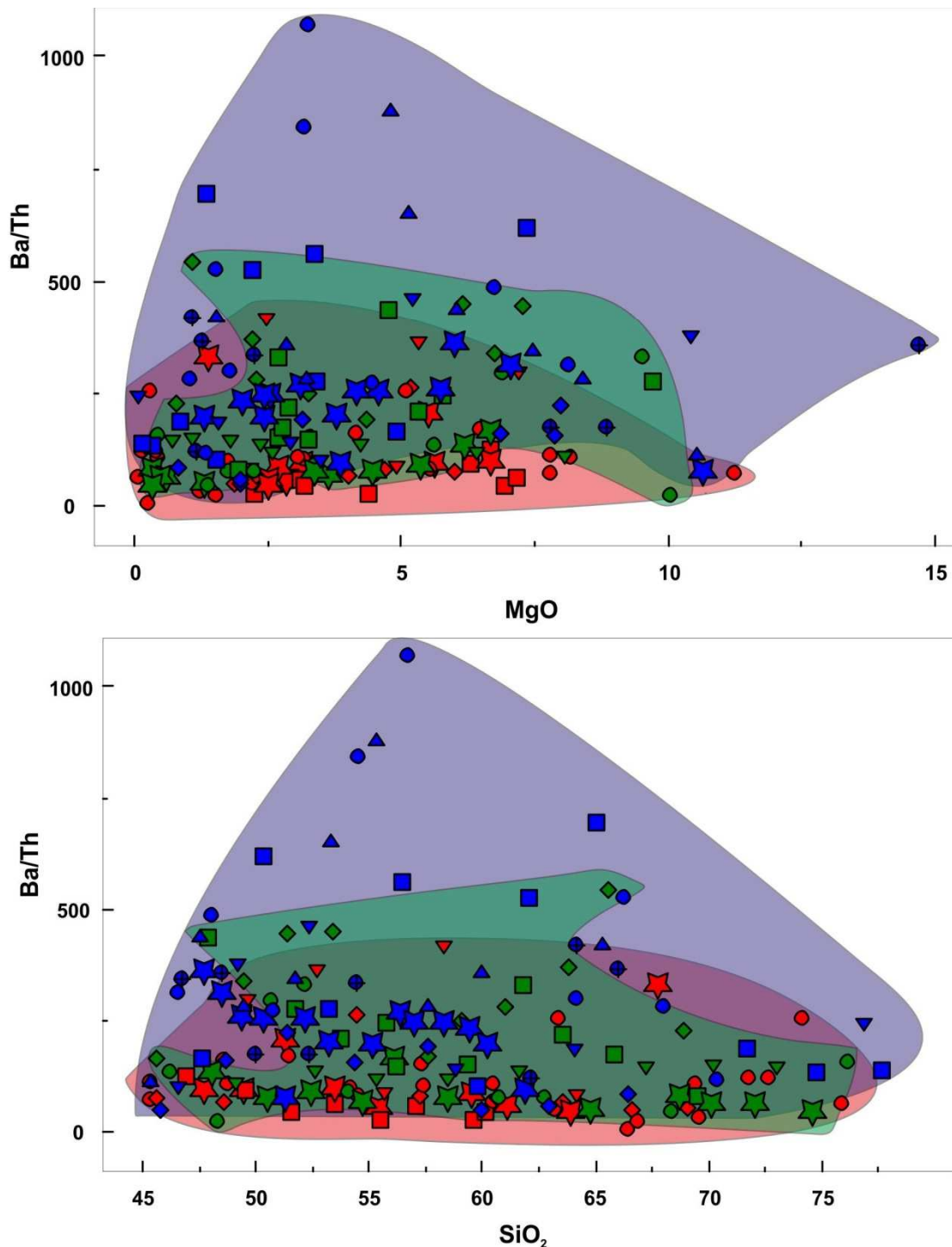
Στο διάγραμμα Zn ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Zn ως προς MgO κυμαίνονται μεταξύ 20-130 για $MgO=0-4$ και 30-100 για $MgO > 4$. **Για τα ensialic τόξα** για $MgO=0-3$ οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 20-90 και έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO. Για $MgO=3-6.5$ ισχύει $Zn=78-100$ σταθερά και για $MgO=6.5-9.5$ ισχύει $Zn=70-200$ με αυξητική τάση. **Για τα ενεργά περιθώρια** για $MgO=0-2.5$ οι τιμές Zn κυμαίνονται μεταξύ 40-120 με αυξητική τάση. Για $MgO=2.5-11$ οι τιμές μειώνονται και κυμαίνονται μεταξύ 70-100. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται εκτός από το ότι εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Zn για $MgO > 11$. Επίσης τα ensialic είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $Zn > 130$.



Σχήμα 4.4.1.4.1 συνέχεια

Στο διάγραμμα Zr ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.4.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Zr κυμαίνονται μεταξύ 250-50 και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του MgO. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Zr κυμαίνονται μεταξύ 350-50 και έχουν κυρίως μειωτική τάση για $MgO=0-7.5$. Για $MgO=7.5-16$, ισχύει $Zr=70-150$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Zr κυμαίνονται μεταξύ 900-70 περίπου και έχουν μειωτική τάση για $MgO=0-11$. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Zr για $MgO > 16$. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών Zr με τις άλλες 2 ομάδες, άλλα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν ταυτόχρονα και $Zr > 350$.

4.4.1.5 Διαγράμματα συνδυασμών λόγων ιχνοστοιχείων ως προς λόγους
ιχνοστοιχείων ή οξειδίων κύριων στοιχείων

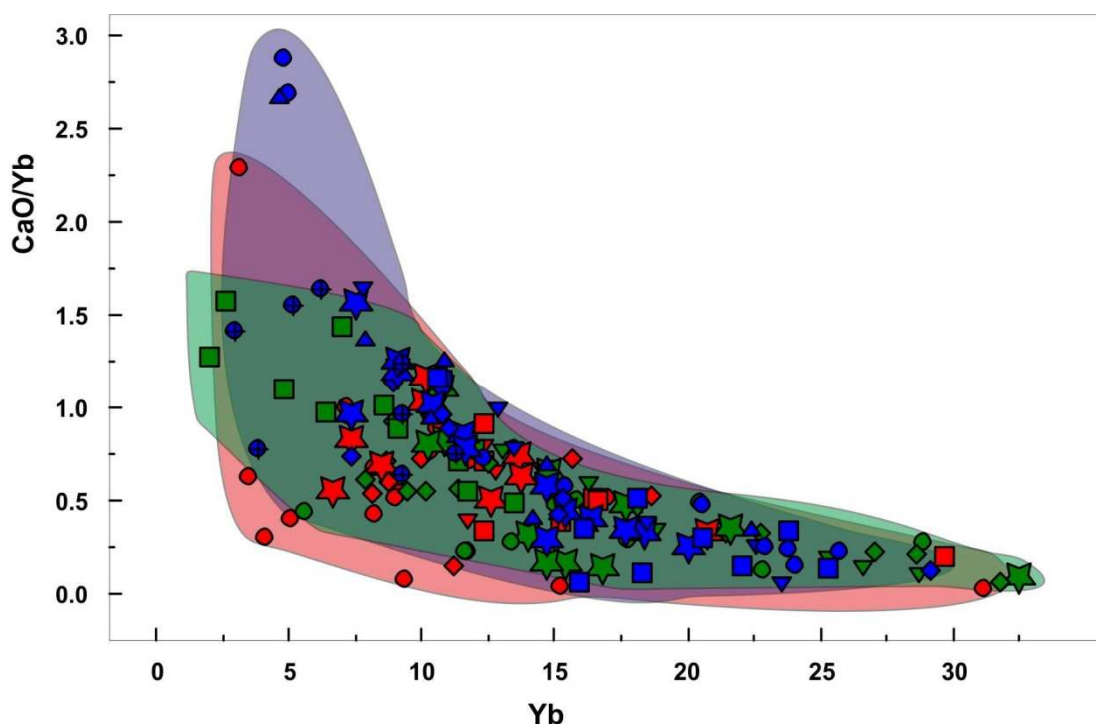


Σχήμα 4.4.1.5.1 Διαγράμματα Ba/Th-MgO, Ba/Th-SiO₂. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

Στο διάγραμμα Ba/Th ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.5.1): 1) Παρατηρήσεις: Για τα **ensimatic** τόξα οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 48-1068. Οι τιμές Ba/Th>500 εμφανίζονται για MgO=0-

7.5 και για $MgO > 7.5$, $Ba/Th = 70-372$ περίπου. Σε κάθε διάστημα εμφανίζονται τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 18-540 για $MgO = 0-10$ αν και η πλειοψηφία των δειγμάτων έχει τιμές 38-340. Τιμές $Ba/Th > 340$ εμφανίζονται για $MgO = 0-7.5$. Σε όλο το εύρος MgO εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 1.4-410 περίπου για $MgO = 0-11.28$. Τιμές $Ba/Th > 290$ εμφανίζονται για $MgO = 0-7.5$. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα με $Ba/Th > 540$ και τα ενεργά περιθώρια τα μόνα με $Ba/Th < 38$, με εξαίρεση ένα δείγμα των ensialic με $Ba/Th = 18$. **(Να σημειωθεί ότι υπάρχει 1 δείγμα ensialic με $(Ba/Th, MgO) = (2624.585, 0.31)$ και 1 με $(164, 16.58)$ και 3 δείγματα ensialic με $Ba/Th = 45-354$ και $MgO = 14-24$ τα οποία λόγω κλίμακας του διαγράμματος δεν φαίνονται.)**

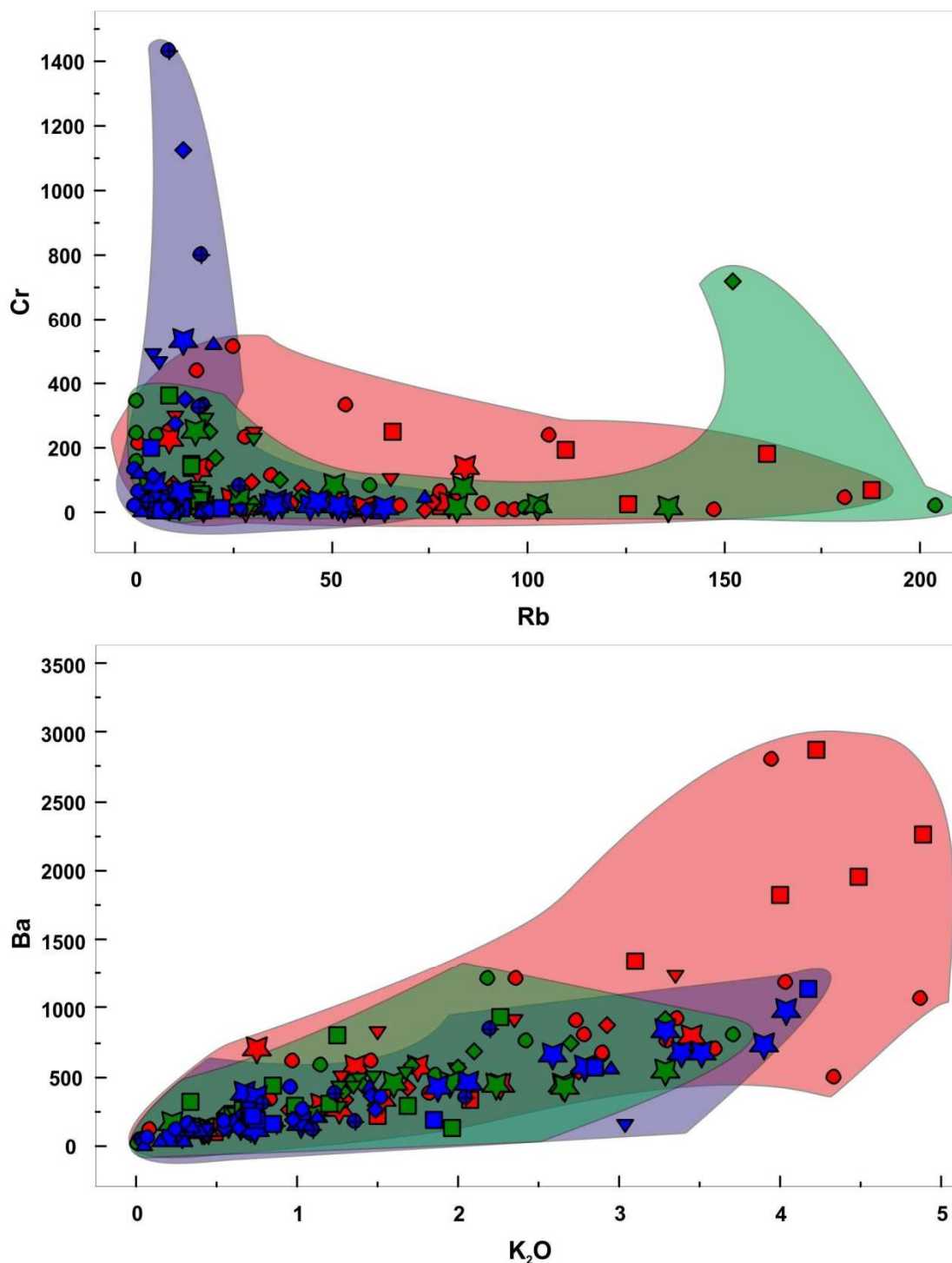
Στο διάγραμμα Ba/Th ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.5.1): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται από 45-1068. Οι τιμές $Ba/Th > 270$ εμφανίζονται για $SiO_2 = 45-67.5$. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 18-540. Τιμές $Ba/Th > 250$ εμφανίζονται για $SiO_2 = 47-65$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 1.4-410. Σε όλο το εύρος SiO_2 εμφανίζονται τόσο υψηλές, όσο και χαμηλές τιμές του λόγου. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται εκτός από το ότι τα ensimatic τόξα είναι τα μόνα με $Ba/Th > 540$. **(Να σημειωθεί ότι υπάρχει ένα δείγμα ensialic τόξου με $(Ba/Th, SiO_2) = (2624.585, 71.38)$ το οποίο λόγω κλίμακας του διαγράμματος δεν φαίνεται.)**



Σχήμα 4.4.1.5.2 Διάγραμμα CaO/Yb - Yb κανονικοποιημένο κατά Sun & Macdonough (1989). Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

Στο διάγραμμα CaO/Yb ως προς Yb (Σχ. 4.4.1.5.2) : 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 3-0.2 περίπου και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του Yb , δηλαδή οι μέγιστες τιμές εμφανίζονται για $Yb = 5$ και με την αύξηση του Yb οι τιμές

του λόγου μειώνονται. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές CaO/Yb κυμαίνονται μεταξύ 1.5-0.3 και έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του Yb. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 2.25-0.3 και για την πλειοψηφία των δειγμάτων διακρίνεται μειωτική τάση με την αύξηση του Yb. Ωστόσο παρατηρούνται και χαμηλές τιμές του λόγου στις αρχικές τιμές Yb, κάτι που δεν συμβαίνει στα νησιώτικα τόξα. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.

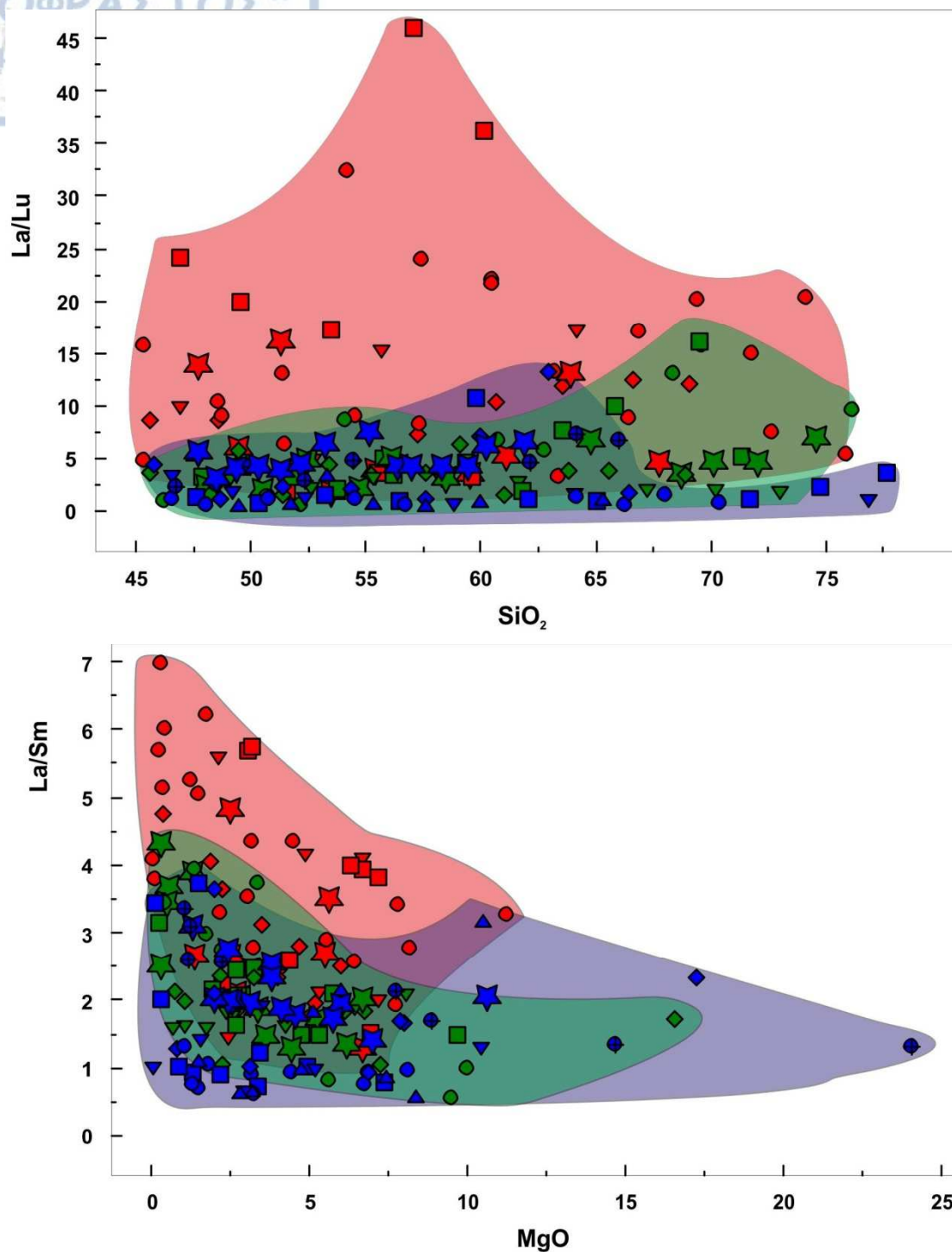


Σχήμα 4.4.1.5.3 Διαγράμματα Cr-Rb, Ba- K_2O . Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

Στο διάγραμμα Cr ως προς Rb (Σχ. 4.4.1.5.3) : 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 1400-0. Οι μέγιστες τιμές Cr εμφανίζονται για Rb=0-24 περίπου και η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται σταθερά μεταξύ 0-100 για Rb<25 και μεταξύ 0-50 για Rb=25-75. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Cr κυμαίνονται μεταξύ 400-0 περίπου, αν και ένα δείγμα έχει τιμές (Cr,Rb)= (700, 150), και για την πλειοψηφία των δειγμάτων έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του Rb με τις μέγιστες τιμές Cr να εμφανίζονται για Rb=0-47 και για Rb>47 οι τιμές Cr κυμαίνονται μεταξύ 0-100. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Cr κυμαίνονται μεταξύ 0-500. Η πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνεται σταθερά μεταξύ 0-100, αλλά οι μέγιστες τιμές Cr έχουν μειωτική τάση με την αύξηση του Rb. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic τόξα διαφοροποιούνται από τις άλλες δυο ομάδες στο ότι για Rb=0-24 είναι τα μόνα παρουσιάζουν ταυτόχρονα και τιμές Cr>500. Τα ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται από τις άλλες 2 ομάδες. Τα ενεργά περιθώρια για Rb=50-110 είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Cr>100, κατά τα άλλα δεν διαφοροποιούνται από τις άλλες 2 ομάδες.

Στο διάγραμμα Ba ως προς K₂O (Σχ. 4.4.1.5.3): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Ba κυμαίνονται μεταξύ 0-1000 και έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του K₂O για K₂O=0-4.25. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Ba κυμαίνονται μεταξύ 0-1250 για K₂O=0-3.75 και έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του K₂O. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Ba κυμαίνονται μεταξύ 0-3000 για K₂O=0-5 και οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του K₂O. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic και ensialic τόξα δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το ότι τα πρώτα παρουσιάζουν τιμές Ba για K₂O>3.75. Τα ενεργά περιθώρια δεν διαφοροποιούνται από τις άλλες 2 ομάδες, εκτός από το ότι είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Ba>1250 και παρουσιάζουν τιμές για K₂O>4.

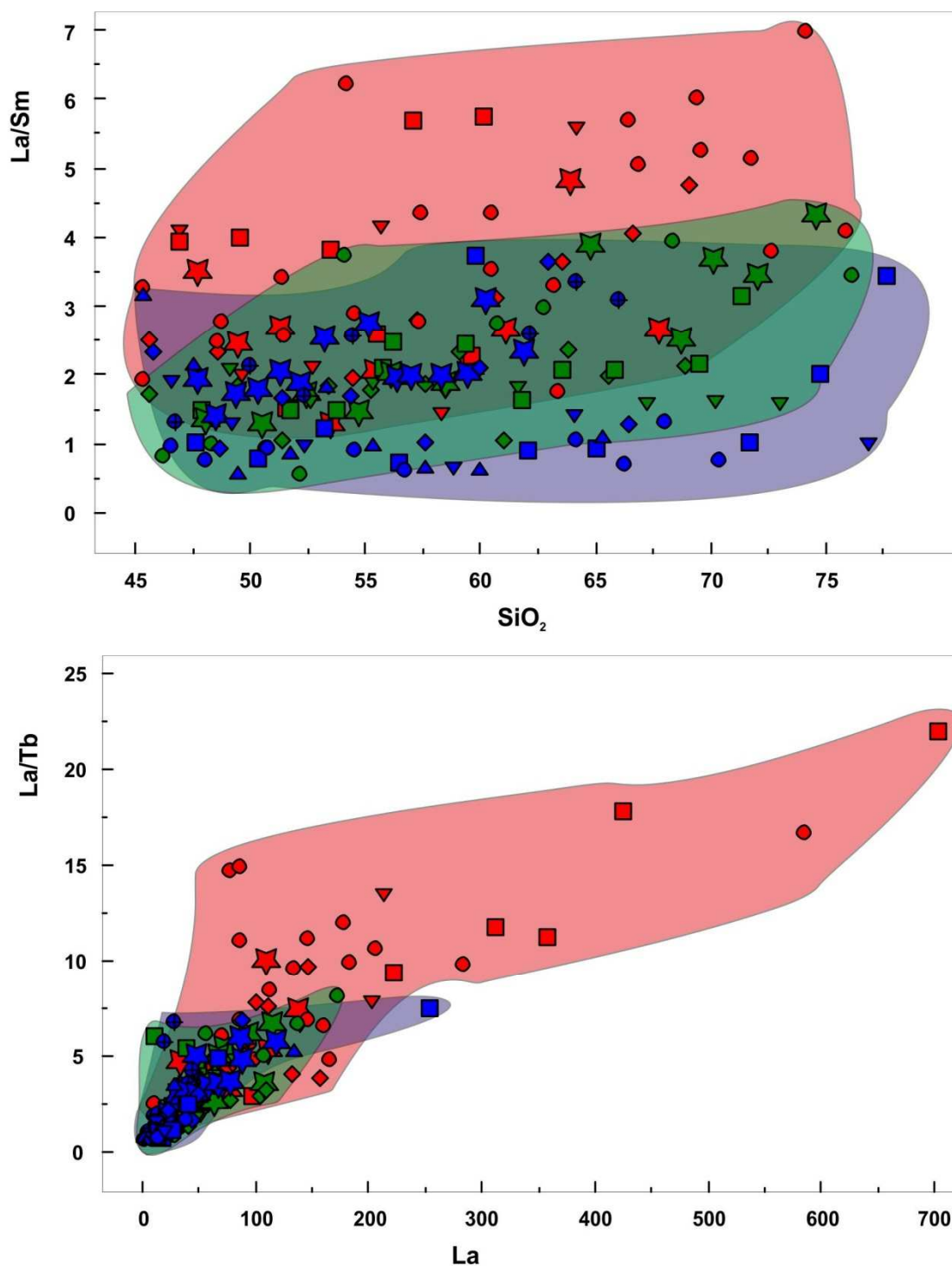
Στο διάγραμμα La/Lu-SiO₂ (Σχ. 4.4.1.5.4): 1) Παρατηρήσεις: **Στα ensimatic νησιώτικα τόξα** ο λόγος La/Lu κυμαίνεται σταθερά από 0-7 σε όλες τις τιμές SiO₂ >45, εκτός από όταν SiO₂= ~60-64 όπου ο λόγος La/Lu παρουσιάζει μέγιστο στις τιμές 10-12.5. Η κλίση των σπανίων γαιών, είναι σχεδόν οριζόντια. **Στα ensialic νησιώτικα τόξα** οι τιμές του λόγου La/Lu έχουν εύρος περίπου από 0-7 για τιμές SiO₂ από 45-65 και για τιμές >70. Ο λόγος La/Lu παρουσιάζει και πιο αυξημένες τιμές για SiO₂=65-70, με μέγιστη τιμή La/Lu=15, όταν SiO₂=70. Η κλίση των σπάνιων γαιών είναι οριζόντια μέχρι SiO₂=65, άλλα για SiO₂>65 η κλίση μεγαλώνει. **Στα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια** ο λόγος La/Lu παρουσιάζει εύρος τιμών ~2.5-24 για τιμές SiO₂>45, εκτός από όταν SiO₂=55-60 όπου οι τιμές του λόγου La/Lu αυξάνονται ακόμη παραπάνω και παρουσιάζουν μέγιστο στην τιμή 45 για SiO₂=57.5. 2) Συμπεράσματα: Τα τρία γεωτεκτονικά περιβάλλοντα έχουν διαφορετική κλίση σπανίων γαιών. Επιπλέον παρουσιάζουν διαφορετικό μέγιστο τιμής λόγου La/Lu, με αύξουσα σειρά από τα ensimatic ως τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια και μάλιστα σε διαφορετικό εύρος τιμών SiO₂.



Σχήμα 4.4.1.5.4 Διαγράμματα ανηγμένων τιμών λόγων La/Lu-SiO_2 , La/Sm-MgO . Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)

Στο διάγραμμα La/Sm ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.5.4): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0.5-4 περίπου. Οι μέγιστες τιμές που μπορεί να πάρει ο λόγος μειώνονται με την αύξηση του MgO . **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0.5-4.5. Οι μέγιστες τιμές του λόγου ακολουθούν την ίδια τάση με τα ensimatic τόξα. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 1-7. Οι μέγιστες τιμές του λόγου ακολουθούν την ίδια τάση με τα νησιώτικα τόξα, όμως είναι πολύ υψηλότερες από αυτά. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic και ensialic τόξα δεν

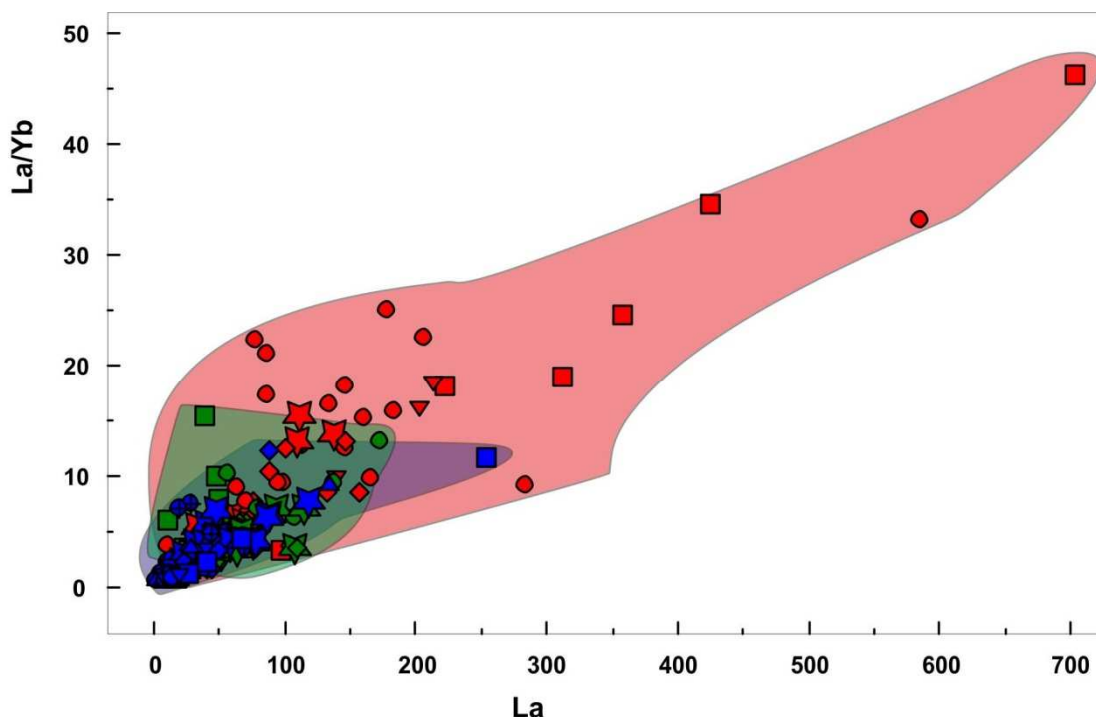
διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το ότι για $MgO=0-3$ τα ensimatic μόνο εμφανίζουν και τιμές λόγου <1 και ότι τα ensimatic έχουν τιμές λόγου για $MgO>17.5$, ενώ τα ensialic όχι. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών του λόγου με τα νησιώτικα τόξα, όμως είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $La/Sm>4.5$. Επίσης είναι τα μόνα που σταματούν να παρουσιάζουν τιμές λόγου για $MgO>11$.



Σχήμα 4.4.1.5.5 Διαγράμματα ανηγμένων τιμών λόγων $La/Sm-SiO_2$, $La/Tb-La$. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)

Στο διάγραμμα La/Sm ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.5.5): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** ο λόγος κυμαίνεται μεταξύ 0.5-3.5. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0.5-4.25. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 1-7. Η κλίση 2) Συμπεράσματα: Η κλίση των σπανίων γαιών για τα ensimatic τόξα είναι περίπου οριζόντια. Η κλίση των σπανίων γαιών των ensialic είναι υψηλότερη από των ensimatic, ενώ των ενεργών περιθωρίων είναι ενδιάμεση των δύο νησιώτικων τόξων, όμως είναι τα μόνα με τιμές $\text{La/Sm} > 4.25$.

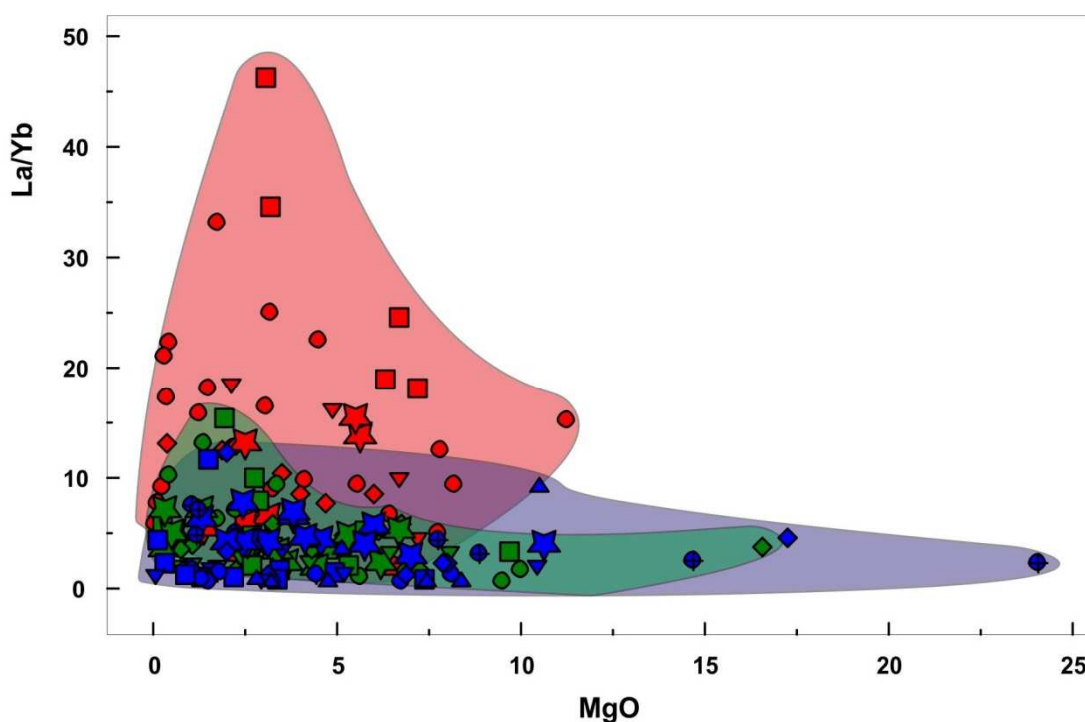
Στο διάγραμμα La/Tb ως προς La (Σχ. 4.4.1.5.5): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 0-5.5. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του La και η κλίση είναι απότομη για $\text{La} = 0-100$, όπου μετά γίνεται ομαλότερη. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0-6. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του La και η κλίση είναι ίδια απότομη με των ensimatic του διαστήματος $\text{La} = 0-100$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0-22.5. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του La και η κλίση είναι το ίδιο απότομη με των ensialic για $\text{La} = 0-200$, ενώ για $\text{La} > 200$ η κλίση γίνεται πιο ομαλή. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic και ensialic δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το διάστημα $\text{La} = 150-250$, όπου τα ensimatic αποκτούν ομαλότερη κλίση και σταματούν οι τιμές La/Tb των ensialic. Τα ενεργά περιθώρια, αν και έχουν κοινή περιοχή τιμών του λόγου με τα νησιώτικα τόξα, διαφοροποιούνται από αυτά καθώς έχουν πολλά δείγματα με τιμές $\text{La/Tb} > 6$. Επίσης για $\text{La} > 200$ αποκτούν και διαφορετική κλίση από τα νησιώτικα τόξα.



Σχήμα 4.4.1.5.6 Διάγραμμα ανηγμένων τιμών λόγου La/Yb-La . Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun & Macdonough 1989)

Στο διάγραμμα La/Yb ως προς La (Σχ. 4.4.1.5.6): **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0-11. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του La και η κλίση

είναι απότομη για $La=0-120$, όπου μετά γίνεται ομαλότερη. **Για τα ensialic** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 3-15, για την πλειοψηφία των δειγμάτων οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του La. η κλίση είναι ίδια απότομη με των ensimatic του διαστήματος $La=0-120$. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές La/Yb κυμαίνονται μεταξύ 0-45. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του La και η κλίση είναι το ίδιο απότομη με των ensialic τόξων. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic και ensialic δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους, εκτός από το διάστημα $La=120-250$, όπου τα ensimatic αποκτούν ομαλότερη κλίση και σταματούν οι τιμές La/Tb των ensialic. Τα ενεργά περιθώρια, αν και έχουν κοινή περιοχή τιμών του λόγου με τα νησιώτικα τόξα, διαφοροποιούνται από αυτά καθώς έχουν πολλά δείγματα με τιμές $La/Yb > 15$.



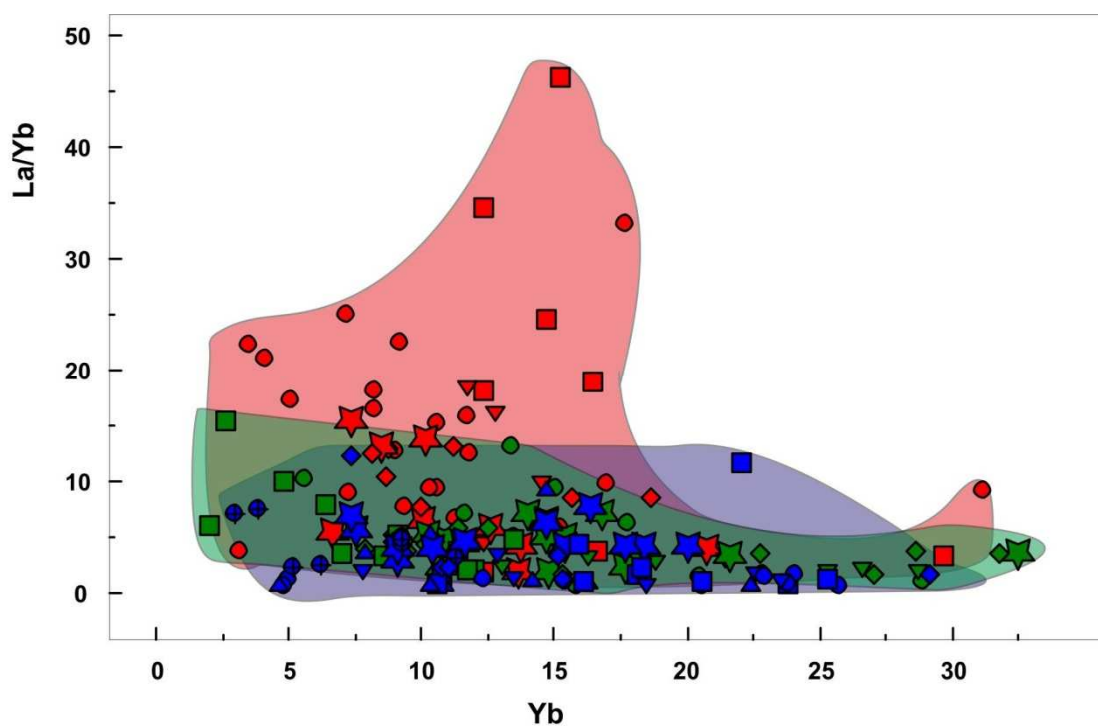
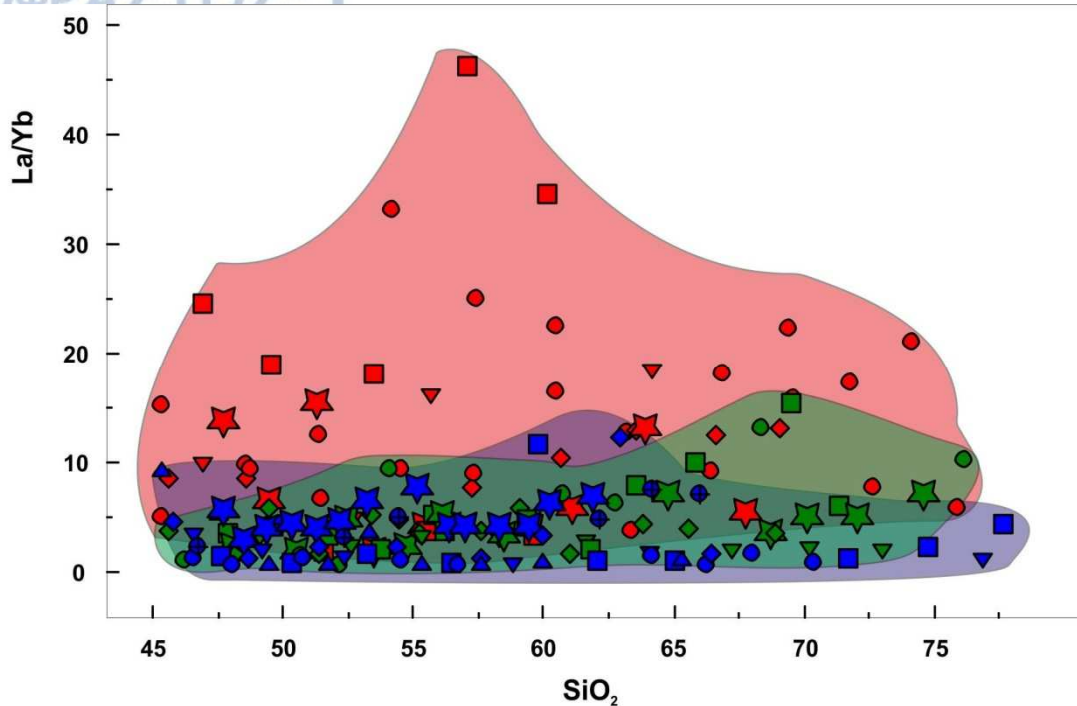
Σχήμα 4.4.1.5.7 Διάγραμμα ανηγμένων τιμών λόγου $La/Yb-MgO$. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)

Στο διάγραμμα La/Yb ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.5.7): **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0-12 περίπου. Με την αύξηση του MgO υπάρχει μείωση της μέγιστης τιμής που μπορεί να πάρει ο λόγος. Η κλίση αρχικά είναι λίγο απότομη, ενώ για $MgO > 5$ είναι σχεδόν οριζόντια. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 15-0. Με την αύξηση του MgO υπάρχει μείωση της μέγιστης τιμής που μπορεί να πάρει ο λόγος. Αρχικά η κλίση είναι πιο απότομη, αλλά για $MgO > 3$ γίνεται οριζόντια, όπως στα ensimatic. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 50-0.5. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο λόγος La/Yb μειώνεται με την αύξηση του MgO . Η κλίση είναι κατακόρυφη. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic και ensialic δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους. Τα ενεργά περιθώρια, αν και έχουν κοινή περιοχή τιμών του λόγου με τα νησιώτικα τόξα, διαφοροποιούνται από αυτά καθώς έχουν πολλά δείγματα με τιμές $La/Yb > 15$. Επιπλέον έχουν διαφορετική κλίση των σπανίων γαιών από τα νησιώτικα τόξα.

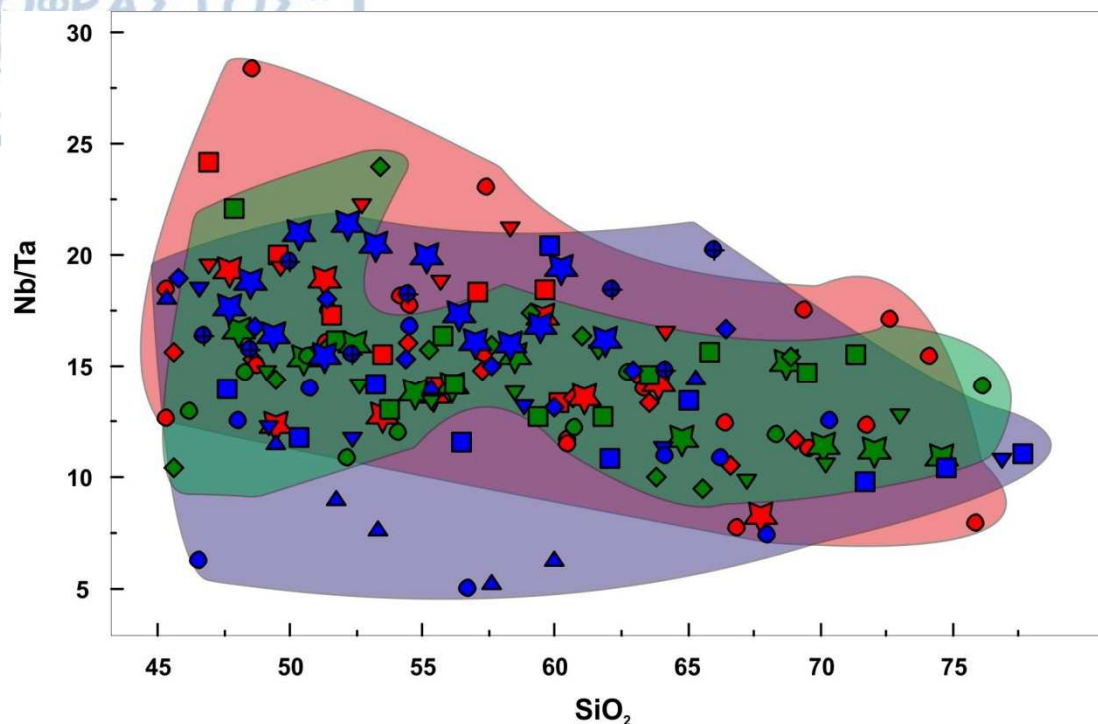
Στο διάγραμμα La/Yb ως προς SiO₂ (Σχ. 4.4.1.5.8): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0-10. Η κλίση είναι οριζόντια πέρα από την εμφάνιση μέγιστης τιμής La/Yb=10 για SiO₂=60-63. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0-15. Η κλίση μέχρι το SiO₂=65 είναι οριζόντια, όμως για SiO₂>65 η κλίση μεγαλώνει και γίνεται πιο απότομη. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 2-45. Για το διάστημα SiO₂=45-56 η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο λόγος αυξάνεται από La/Yb=25 μέχρι που καταλήγει στην τιμή La/Yb=45. Για SiO₂>56 η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει ο λόγος μειώνεται ως την τιμή La/Yb=23. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα διαφοροποιούνται για SiO₂>65, όπου αλλάζει η κλίση των ensialic. Τα ενεργά περιθώρια, αν και έχουν κοινή περιοχή τιμών του λόγου με τα νησιώτικα τόξα, διαφοροποιούνται από αυτά καθώς έχουν πολλά δείγματα με τιμές La/Yb>15. Επιπλέον έχουν διαφορετική κλίση των σπανίων γαιών από τα νησιώτικα τόξα.

Στο διάγραμμα La/Yb ως προς Yb (Σχ. 4.4.1.5.8): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0-11. Για την πλειοψηφία των δειγμάτων υπάρχει φθίνουσα τάση της μέγιστης τιμής του λόγου με την αύξηση του Yb, ενώ υπάρχουν τιμές κοντά στο 0 για όλο το εύρος Yb. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 15-0.2. Υπάρχει φθίνουσα τάση των τιμών του λόγου με την αύξηση του Yb. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0.3-45. Για Yb=0-15 υπάρχει αύξουσα τάση της μέγιστης τιμής του λόγου La/Yb από την τιμή 23-45. Για Yb>15 υπάρχει απότομη μείωση των τιμών και ο λόγος κυμαίνεται μεταξύ 0.2-9. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών La/Yb, άλλα είναι τα μόνα που παρουσιάζουν La/Yb>15.

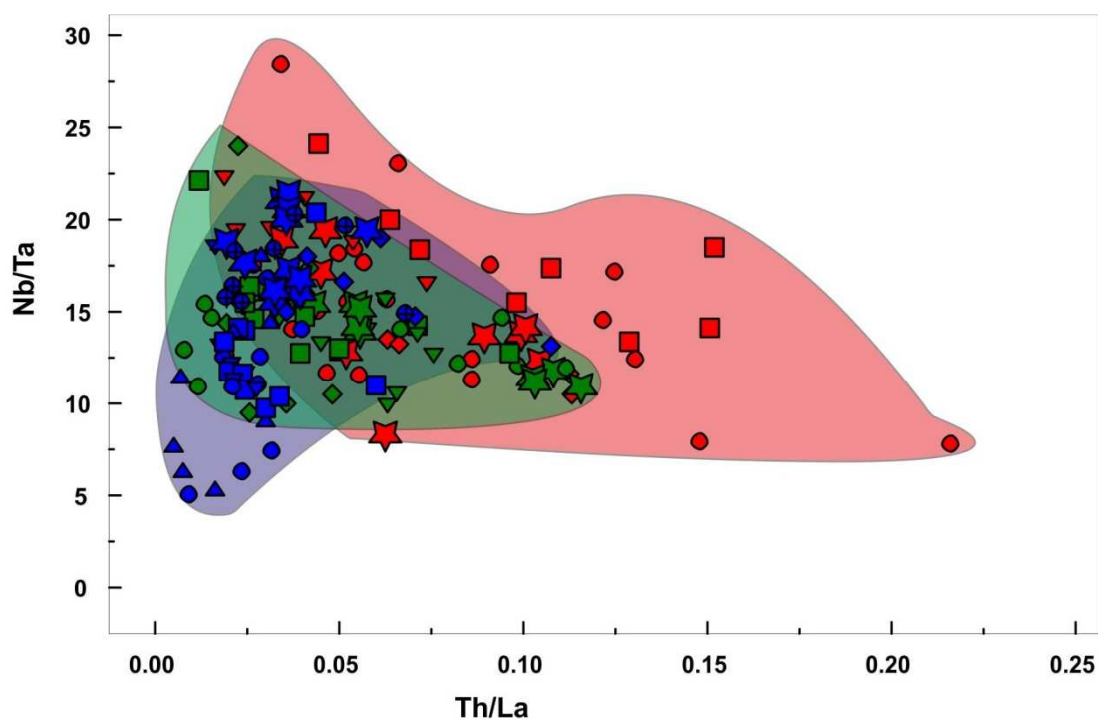
Στο διάγραμμα Nb/Ta ως προς SiO₂ (Σχ. 4.4.1.5.9): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 5-22. Σε όλο το εύρος SiO₂ εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές του λόγου, εκτός από SiO₂≥67.5, όπου Nb/Ta=7.5-12.5. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται για SiO₂=45-55, Nb/Ta= 10-23, για SiO₂= 55-59, Nb/Ta=13-17.5, SiO₂>59, Nb/Ta=10-15. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 28-8 και οι τιμές έχουν φθίνουσα τάση με την αύξηση του SiO₂. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ensimatic εμφανίζουν και Nb/Ta<8 και τα ενεργά περιθώρια Nb/Ta>23.



Σχήμα 4.4.1.5.8 Διαγράμματα ανηγμένων τιμών λόγων La/Yb-SiO_2 , La/Yb-Yb . Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)



Σχήμα 4.4.1.5.9 Διάγραμμα ανηγμένων τιμών λόγου Nb/Ta-SiO₂. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)

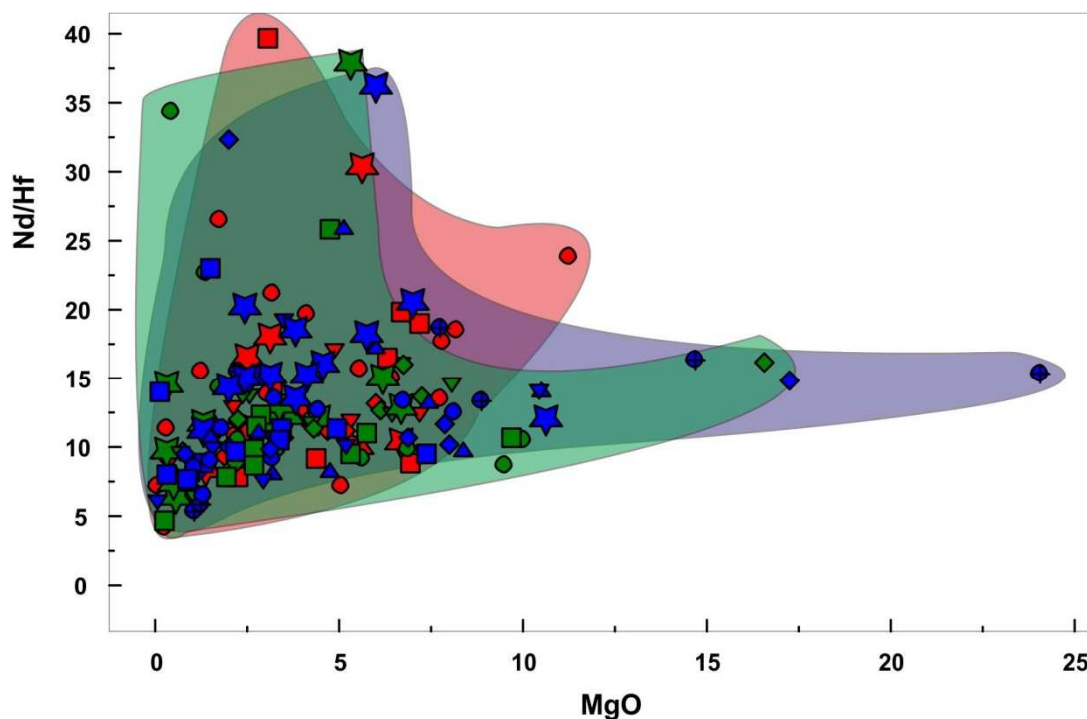


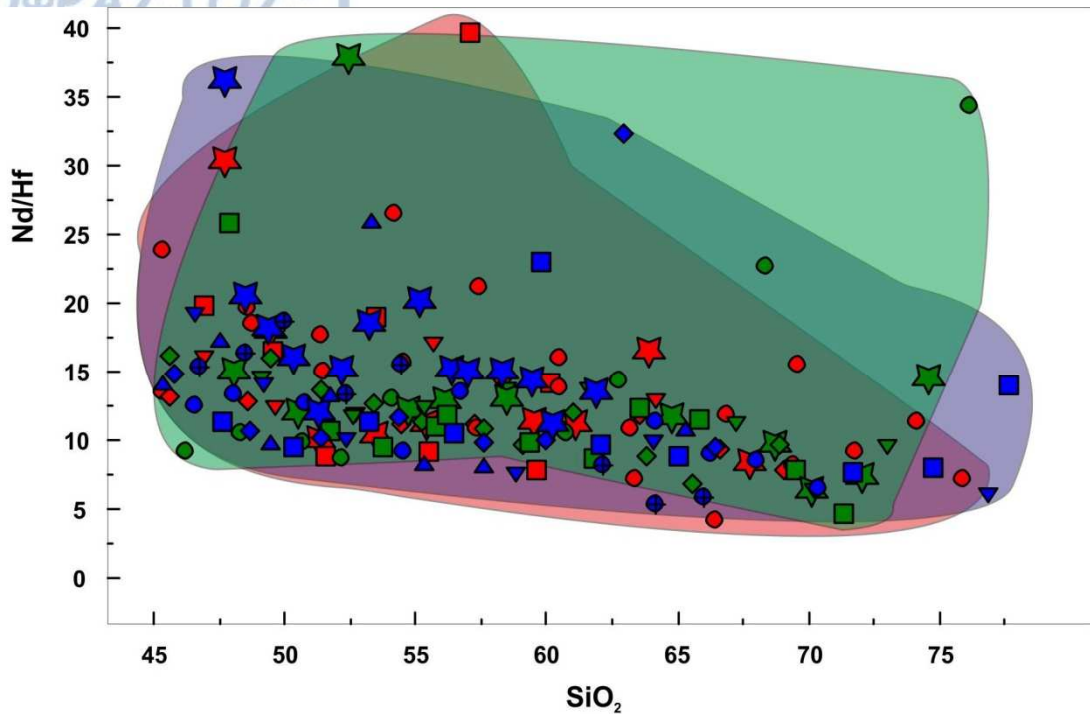
Σχήμα 4.4.1.5.10 Διάγραμμα ανηγμένων τιμών λόγων Nb/Ta-Th/La. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)

Στο διάγραμμα Nb/Ta ως προς Th/La (Σχ. 4.4.1.5.10): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του Nb/Ta κυμαίνονται μεταξύ 5-20. Για Th/La=0-0.06 η κλίση της νοητής

ευθείας που ακολουθούν τα δείγματα είναι μεγάλη και οι τιμές Nb/Ta έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του Th/La. Για Th/La=0.06-0.10 οι τιμές Nb/Ta μειώνονται. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές Nb/Ta κυμαίνονται από 24-9. Οι τιμές του λόγου μειώνονται με την αύξηση του Th/La για Th/La=0-0.11. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές Nb/Ta κυμαίνονται μεταξύ 29-8. Οι τιμές του λόγου έχουν φθίνουσα τάση με την αύξηση του Th/La για Th/La=0-0.22. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic δεν διαφοροποιούνται ως προς το εύρος τιμών του Nb/Ta, εκτός από το ότι τα ensimatic εμφανίζουν Nb/Ta<9, αλλά έχουν διαφορετική τάση της αύξησης ή μείωσης του λόγου σε σχέση με το Th/La. Τα ενεργά περιθώρια αν και έχουν κοινή περιοχή τιμών Nb/Ta με τα νησιώτικα τόξα είναι τα μόνα που έχουν Nb/Ta>24 και τιμές Nb/Ta για Th/La>0.11.

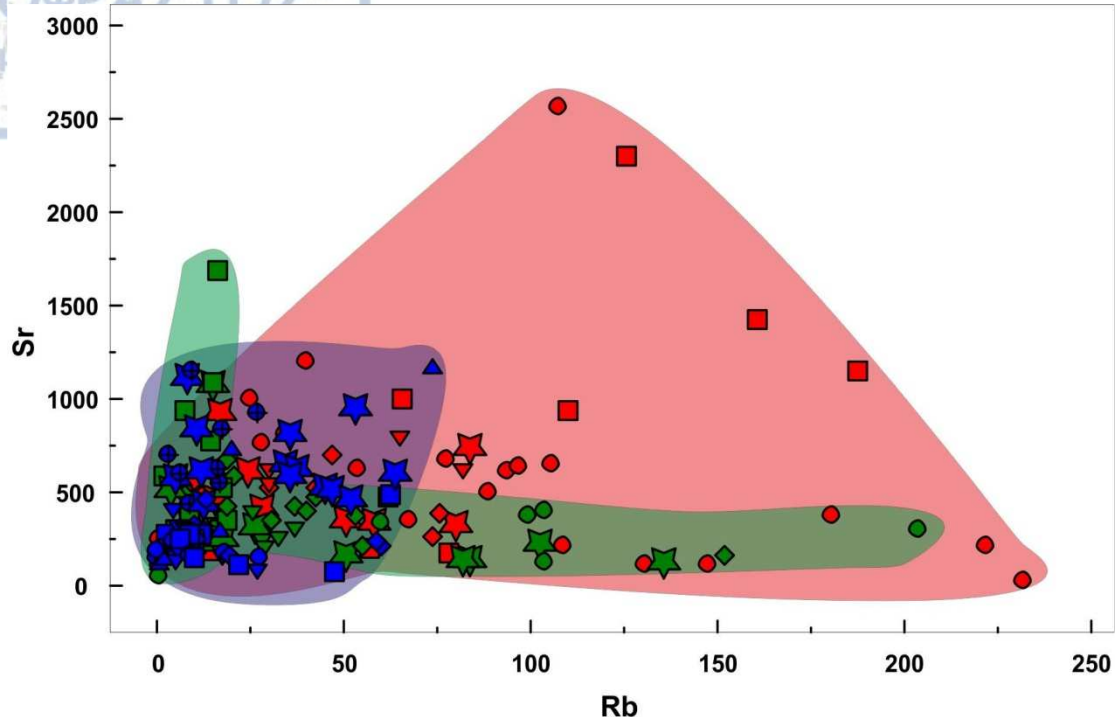
Στο διάγραμμα Nd/Hf ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.5.11): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** τα δείγματα ξεκινούν από το ίδιο σημείο, όμως στην συνέχεια χωρίζονται σε 2 διαφορετικές κλίσεις η μία μεγαλύτερη από την άλλη. Στην μεγαλύτερη κλίση τα δείγματα έχουν τιμές από 5-20 και έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO για MgO=0-6. Στην μικρότερη κλίση τα δείγματα κυμαίνονται μεταξύ 5-15 και έχουν επίσης αυξητική τάση με την αύξηση του MgO για MgO=0-25. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ 5-37.5 για MgO=0-5, ενώ για MgO=5-16, Nd/Hf=5-15. Η πλειοψηφία των δειγμάτων δείχνει αυξητική τάση των τιμών του λόγου με την αύξηση του MgO. **Για τα ενεργά περιθώρια** για την πλειοψηφία των δειγμάτων οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 5-22.5. Για MgO=0-5.5 εμφανίζονται και τιμές Nd/Hf=25,30,40. Οι τιμές του λόγου έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του MgO. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.





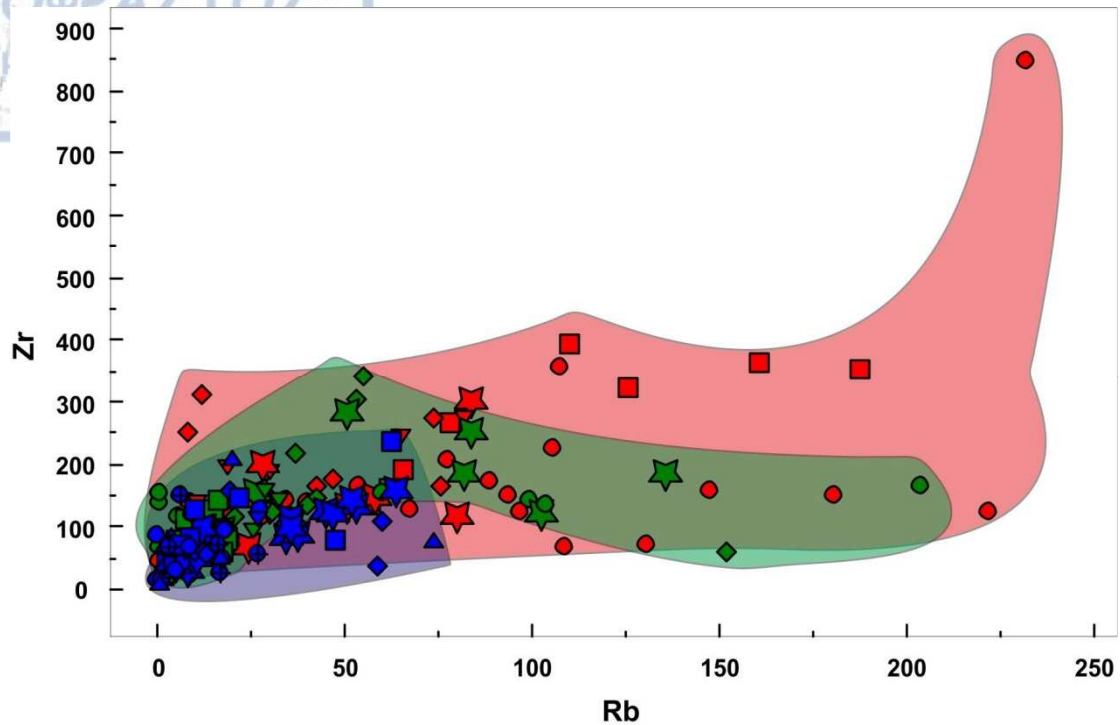
Σχήμα 4.4.1.5.11 Διαγράμματα ανηγμένων τιμών λόγων Nd/Hf-MgO, Nd/Hf-SiO₂. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)

Στο διάγραμμα Nd/Hf ως προς SiO₂ (Σχ. 4.4.1.5.11): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου για την πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνονται μεταξύ 7.5-20 και οι τιμές έχουν φθίνουσα τάση με την αύξηση του SiO₂. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου για την πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνονται μεταξύ 5-16.5 και έχουν φθίνουσα τάση με την αύξηση του SiO₂. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου για την πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνονται μεταξύ 5-20 και έχουν φθίνουσα τάση με την αύξηση του SiO₂. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους.



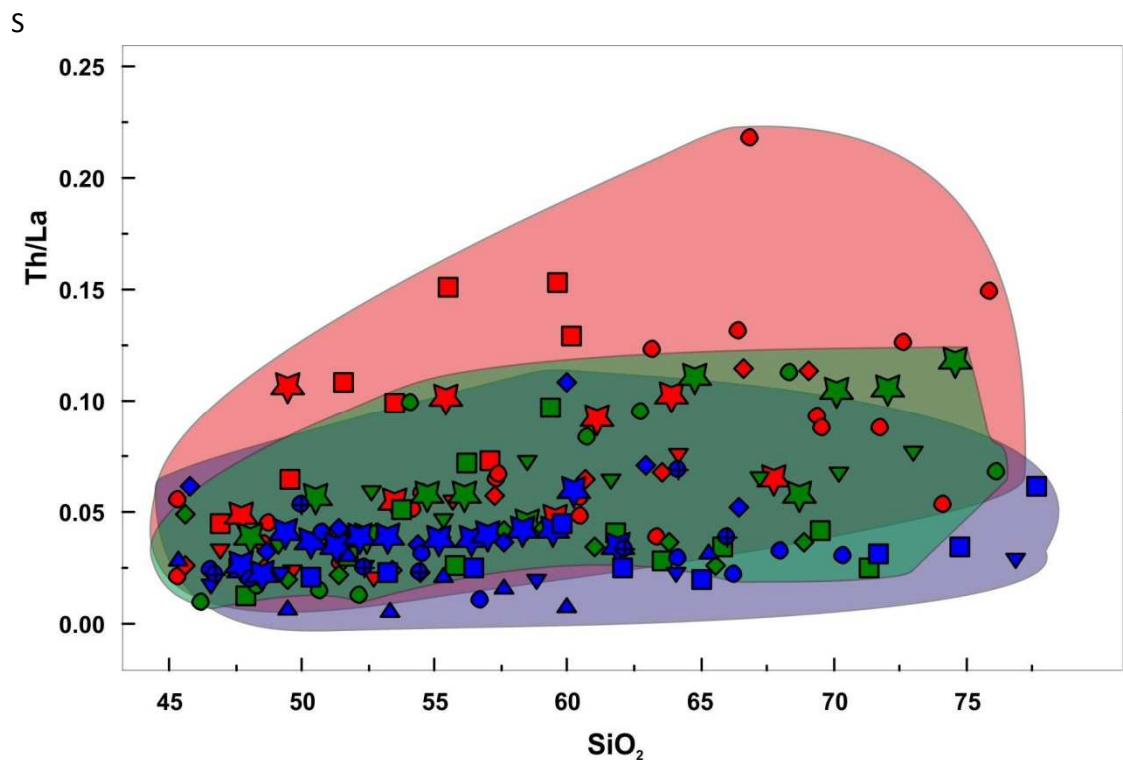
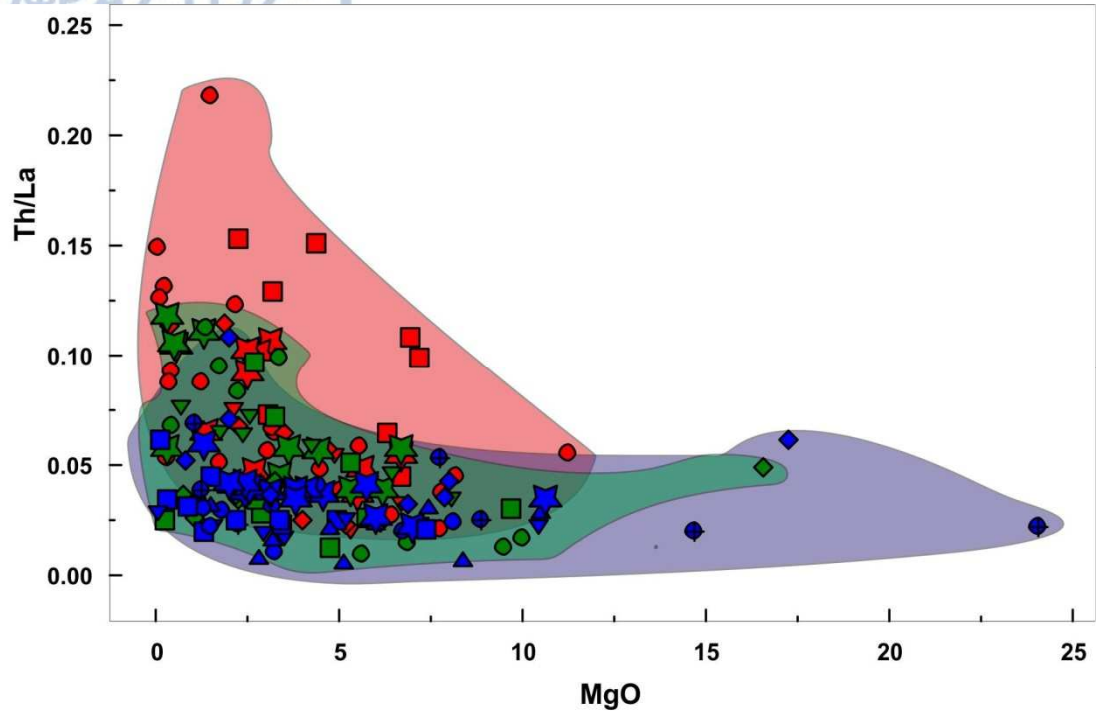
Σχήμα 4.4.1.5.12 Διάγραμμα Sr-Rb. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

Στο διάγραμμα Sr ως προς Rb (Σχ. 4.4.1.5.12): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές Sr κυμαίνονται μεταξύ 0-1200. Εμφανίζονται τόσο χαμηλές, όσο και υψηλές τιμές Sr για Rb=0-70. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές κυμαίνονται από 50-1750. Για Rb=0 εμφανίζεται όλο το εύρος τιμών Sr, αλλά για Rb=0-205, Sr=100-250. Η κλίση της νοητής γραμμής που ακολουθούν τα δείγματα είναι οριζόντια για Rb>0. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου για την πλειοψηφία των δειγμάτων κυμαίνονται μεταξύ 200-1200. Για Rb=0-60 το Sr αυξάνεται με την αύξηση του Rb. Για Rb=60-110, Sr=200-1000 και για Rb>110, Sr=200-300. Εμφανίζονται δείγματα που παρουσιάζουν τιμές Sr=2500, 2250, 1500, 1250, 100 για Rb>100. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται για Rb=0-70. Για Rb>70 τα ensialic, ενεργά περιθώρια ξεχωρίζουν από τα ensimatic γιατί συνεχίζουν να έχουν τιμές Sr, ενώ τα ensimatic όχι. Όμως τα ensialic, ενεργά περιθώρια δεν ξεχωρίζουν μεταξύ τους, εκτός από το ότι τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν και δείγματα με Sr>500.



Σχήμα 4.4.1.5.13 Διάγραμμα Zr-Rb. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

Στο διάγραμμα Zr ως προς Rb (Σχ. 4.4.1.5.13): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του Zr κυμαίνονται μεταξύ 0-250. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του Rb. **Για τα ensialic** οι τιμές Zr κυμαίνονται μεταξύ 0-350. Οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του Rb, για Rb=0-50 οι τιμές Zr αποκτούν φθίνουσα τάση με την αύξηση του Rb και μειώνονται από 350-50. **Για τα ενεργά περιθώρια** για Rb=0-85, Zr=0-300 και οι τιμές έχουν αυξητική τάση με την αύξηση του Rb. Για Rb>85, Zr=70-400, με ένα δείγμα να εμφανίζει την μέγιστη τιμή Zr=850. 2) Συμπεράσματα: Τα ensialic τόξα διαφοροποιούνται από τα ensimatic διότι εμφανίζουν τιμές Zr για Rb>50. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών Zr με τα ηνσιώτικα τόξα, όμως είναι τα μόνα που εμφανίζουν Zr>350.

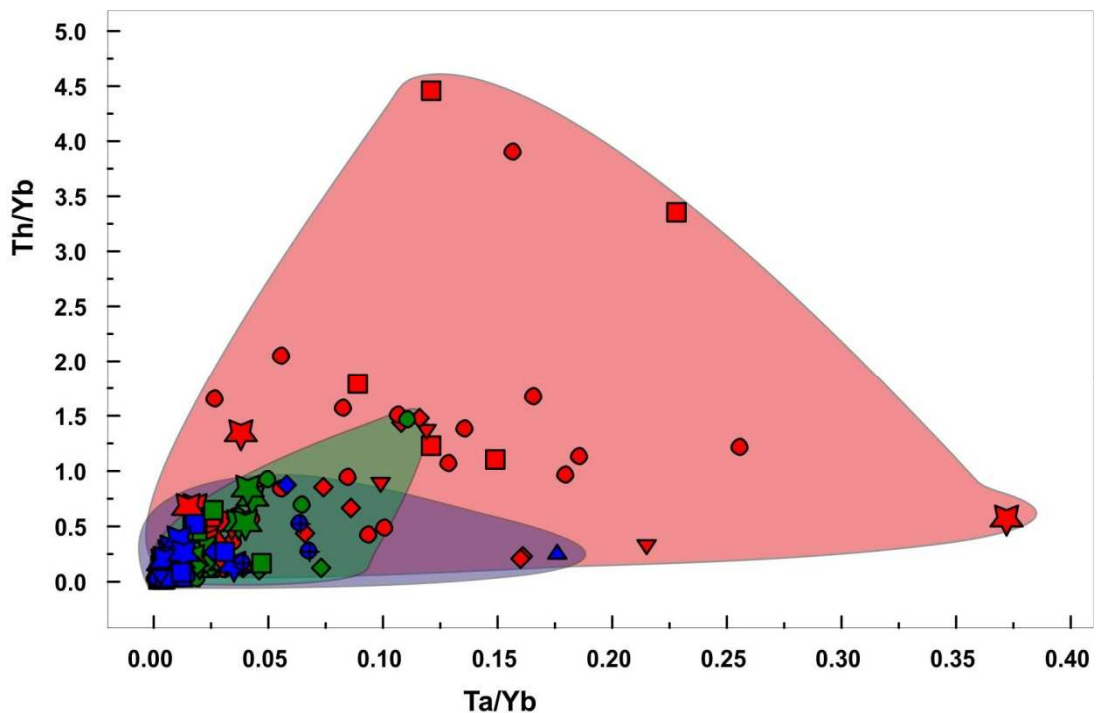


Σχήμα 4.4.1.5.14 Διαγράμματα ανηγμένων τιμών λόγων Th/La-MgO, Th/La-SiO₂. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)

Στο διάγραμμα Th/La ως προς MgO (Σχ. 4.4.1.5.14): 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0.02-0.11 περίπου. Οι τιμές των δειγμάτων έχουν οριζόντια κλίση. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0.03-0.12 περίπου για MgO=0-16 και η πλειοψηφία των δειγμάτων έχει οριζόντια κλίση. Οι τιμές Th/La>0.075 εμφανίζονται για MgO=0-3. **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0.22-0.025 περίπου. Οι τιμές έχουν φθίνουσα τάση με την αύξηση του

MgO, για $MgO=0=11$. 2)Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, εκτός από το ότι τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που εμφανίζουν $Th/La>0.12$.

Στο διάγραμμα Th/La ως προς SiO_2 (Σχ. 4.4.1.5.14): 1)Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 0.01-0.1 και έχουν περίπου οριζόντια κλίση. **Για τα ensialic τόξα** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται από 0.01-0.12 περίπου και υπάρχει μια ελαφριά αυξητική τάση με την αύξηση του SiO_2 . **Για τα ενεργά περιθώρια** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται 0.025-0.22 και παρατηρείται αύξηση των τιμών του λόγου με την αύξηση του SiO_2 . 2)Συμπεράσματα: Τα ensimatic και ensialic δεν διαφοροποιούνται μεταξύ τους εκτός από το ότι τα ensialic τείνουν να έχουν υψηλότερες μέγιστες τιμές Th/La από τα ensimatic και έχουν πιο απότομη κλίση τα πρώτα από τα δεύτερα για $SiO_2>65$. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών Th/La με τα νησιώτικα τόξα, αλλά είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές $Th/La>0.12$. Γενικά ενώ στις αρχικές τιμές SiO_2 οι 3 ομάδες δεν διαχωρίζονται στην συνέχεια τα ensimatic παραμένουν χαμηλά στις τιμές Th/La , ενώ τα ensialic και τα ενεργά έχουν υψηλότερες τιμές του λόγου, με τα δεύτερα να ξεπερνούν τα πρώτα.

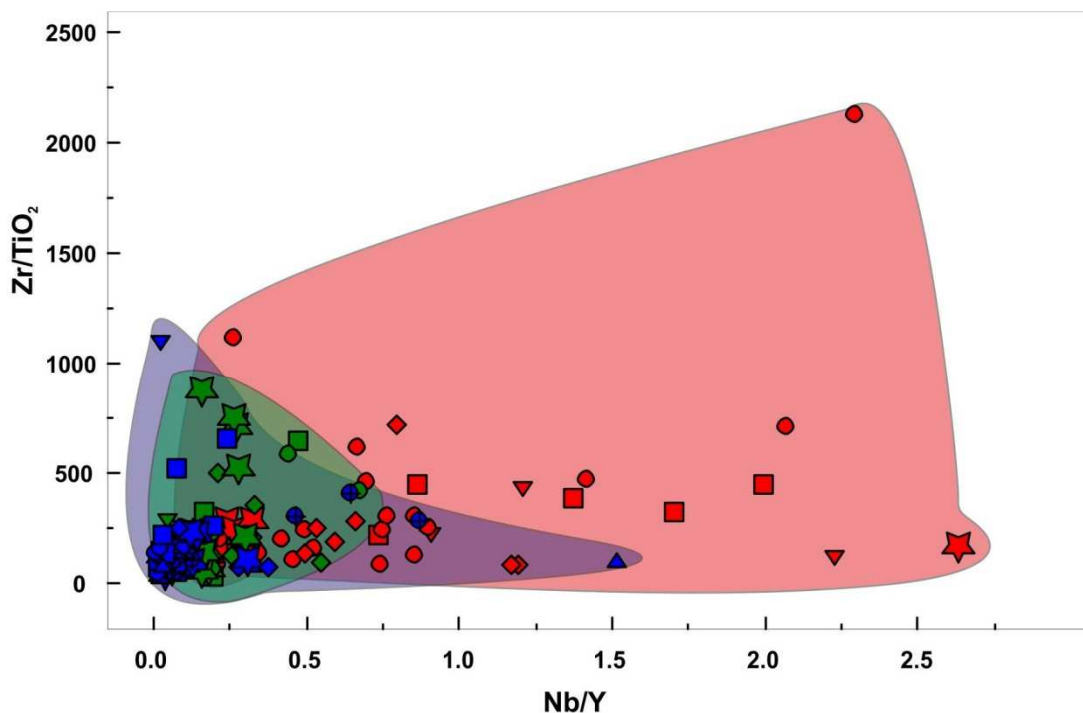


Σχήμα 4.4.1.5.15 Διάγραμμα ανηγμένων τιμών λόγων $Th/Yb-Ta/Yb$. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)

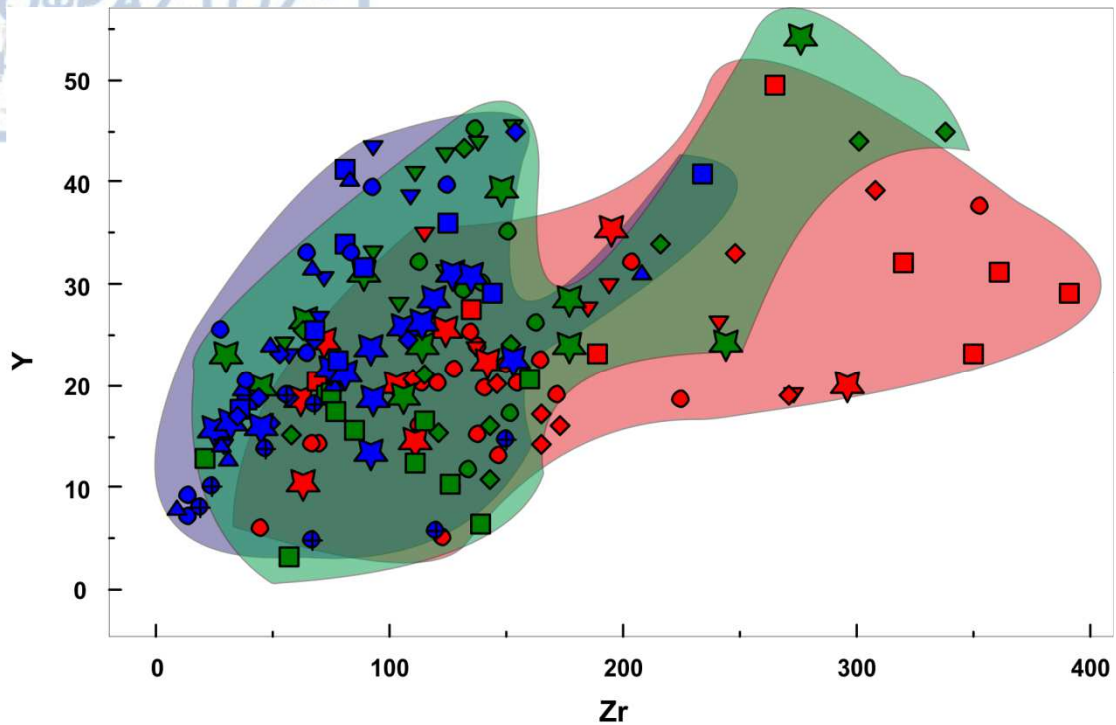
Στο διάγραμμα Th/Yb ως προς Ta/Yb (Σχήμα 4.4.1.5.15): 1)Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic** οι τιμές του λόγου κυμαίνονται μεταξύ 0-0.9. Για $Ta/Yb=0-0.06$ υπάρχει αυξητική τάση του Th/Yb από την ελάχιστη ως την μέγιστη τιμή που αναφέρθηκαν. Για $Ta/Yb>0.06$, $Th/Yb=0.3-0.5$. **Για τα ensialic** οι τιμές Th/Yb κυμαίνονται μεταξύ 0-1.5 και υπάρχει αυξητική τάση του Th/Yb με την αύξηση του Ta/Yb . **Για τα ενεργά περιθώρια**, $Th/Yb=0-4.5$. 2)Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic έχουν διαφορετική κλίση και τα πρώτα έχουν χαμηλότερη μέγιστη τιμή Th/Yb από τα δεύτερα. Επίσης τα πρώτα εμφανίζουν τιμή Th/Yb για $Ta/Yb>0.11$, ενώ

τα δεύτερα όχι. Τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που εμφανίζουν τιμές $\text{Th/Yb} > 0.9$ και έχουν τιμές Th/Yb για $\text{Ta/Yb} > 0.175$.

Στο διάγραμμα Zr/TiO_2 ως προς Nb/Y (Σχ. 4.4.1.5.16): **Για τα ensimatic** στην πλειοψηφία των δειγμάτων ισχύει $\text{Zr/TiO}_2 = 0-250$, για $\text{Nb/Y} = 0-0.3$ περίπου. Οι τιμές Zr/TiO_2 μπορούν να κυμανθούν βέβαια από 1100 ως 0. Η μέγιστη τιμή Zr/TiO_2 έχει φθίνουσα τάση με την αύξηση του Nb/Y . **Για τα ensialic τόξα** $\text{Zr/TiO}_2 = 0-900$. **Για τα ενεργά περιθώρια** στην πλειοψηφία των δειγμάτων ισχύει $\text{Zr/TiO}_2 = 125-750$, αν και οι τιμές μπορούν να κυμανθούν ως 2000. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic δεν διαφοροποιούνται από τα ensialic. Τα ενεργά περιθώρια έχουν κοινή περιοχή τιμών Zr/TiO_2 με τα νησιώτικα τόξα, όμως είναι τα μόνα που παρουσιάζουν τιμές Zr/TiO_2 για $\text{Nb/Y} > 1.5$ και $\text{Zr/TiO}_2 > 1100$.



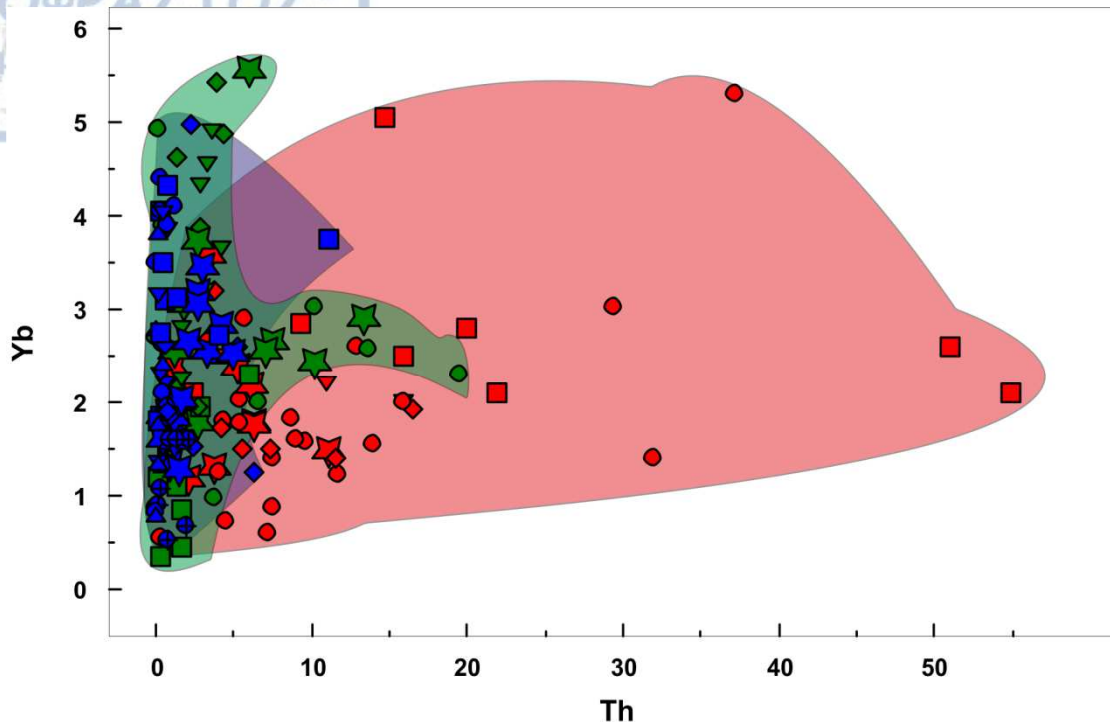
Σχήμα 4.4.1.5.16 Διάγραμμα Zr/TiO_2 ως προς ανηγμένων τιμών λόγου Nb/Y . Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun & Macdonough 1989)



Σχήμα 4.4.1.5.17 Διάγραμμα Y-Zr. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

Στο διάγραμμα Y-Zr (Σχ. 4.4.1.5.17): 1) Παρατηρήσεις: Τα **ensimatic** έχουν $Y=5-45$ για $Zr=0-225$. Τα **ensialic** έχουν $Y=2.5-55$, $Zr=2.5-310$. Τα **ενεργά περιθώρια** έχουν $Y=3-50$, $Zr=4.5-400$. 2) Συμπεράσματα: Οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται, πέρα από το ότι τα ensialic συνεχίζουν να παρουσιάζουν τιμές Y για $Zr>225$ σε αντίθεση με τα ensimatic. Επίσης τα ενεργά περιθώρια συνεχίζουν να παρουσιάζουν τιμές Y για $Zr>310$ σε αντίθεση με τις άλλες 2 ομάδες. Τέλος τα ensialic και ενεργά περιθώρια έχουν $Zr>45$ σε αντίθεση με τα ensimatic.

Στο διάγραμμα Yb-Th (Σχ. 4.4.1.5.18): 1) Παρατηρήσεις: Τα **ensimatic** τόξα έχουν $Yb=0.5-5$, για $Th=0-10$. Τα **ensialic** έχουν $Yb=0.4-5.5$ για $Th=0-5$ και $Yb=1.8-3$ για $Th=5-20$. Τα **ενεργά περιθώρια** έχουν $Yb=0.5-5$ για $Th=0-55$. 2) Συμπεράσματα: Για $Th=0-10$ οι 3 ομάδες δεν διαφοροποιούνται. Για $Th=10-20$ υπάρχουν μόνο δείγματα ensialic και ενεργών περιθωρίων, ενώ για $Th>20$ τα ενεργά περιθώρια είναι τα μόνα που συνεχίζουν.



Σχήμα 4.4.1.5.18 Διάγραμμα ανηγμένων τιμών Yb ως προς Th. Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1 (κανονικοποίηση σύμφωνα με Sun&Macdonough 1989)

4.4.2 Διαγράμματα σπανίων γαιών

Τα διαγράμματα σπανίων γαιών είναι διαγράμματα που απεικονίζουν τις συγκεντρώσεις των σπανίων γαιών στα πετρώματα ως προς τον ατομικό τους αριθμό (Rollinson 1993). Οι συγκεντρώσεις είναι κανονικοποιημένες σύμφωνα με κάποιο υλικό αναφοράς και εκφράζονται ως λογάριθμοι με βάση το 10. Συνήθως αυτό το υλικό αναφοράς είναι οι τιμές των συγκεντρώσεων των σπανίων γαιών στους χονδρίτες (είδος μετεωρίτη). Η επιλογή των χονδρίτων ως υλικό αναφοράς έγινε διότι θεωρούνται ως αμετάβλητο δείγμα της χημικής σύστασης του ηλιακού μας συστήματος, με ηλικία την αρχική νουκλεοσύνθεση του τελευταίου. Η κανονικοποίηση με βάση τον χονδρίτη έχει τις εξής λειτουργίες:

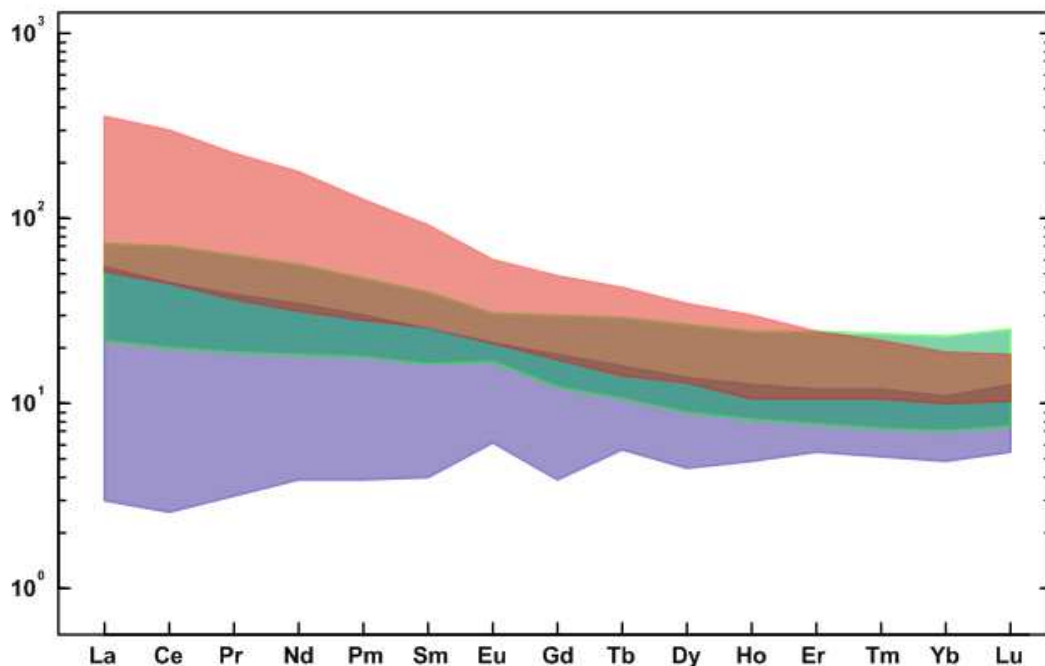
- 1) Ελαττώνει τις διαφορές ως προς την περιεκτικότητα μεταξύ σπανίων γαιών με περιττό και άρτιο ατομικό αριθμό
- 2) Επιτρέπει τον διαχωρισμό των σπανίων γαιών σε ελαφριές και βαριές σπάνιες γαίες

Υπάρχουν διάφορα είδη διαγραμμάτων σπανίων γαιών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν:

Α) Τα κλασσικά διαγράμματα σπανίων γαιών κανονικοποιημένα ως προς χονδρίτη που περιγράφηκαν παραπάνω, με την κανονικοποίηση να έχει γίνει σύμφωνα με Sun&Macdonough (1989)

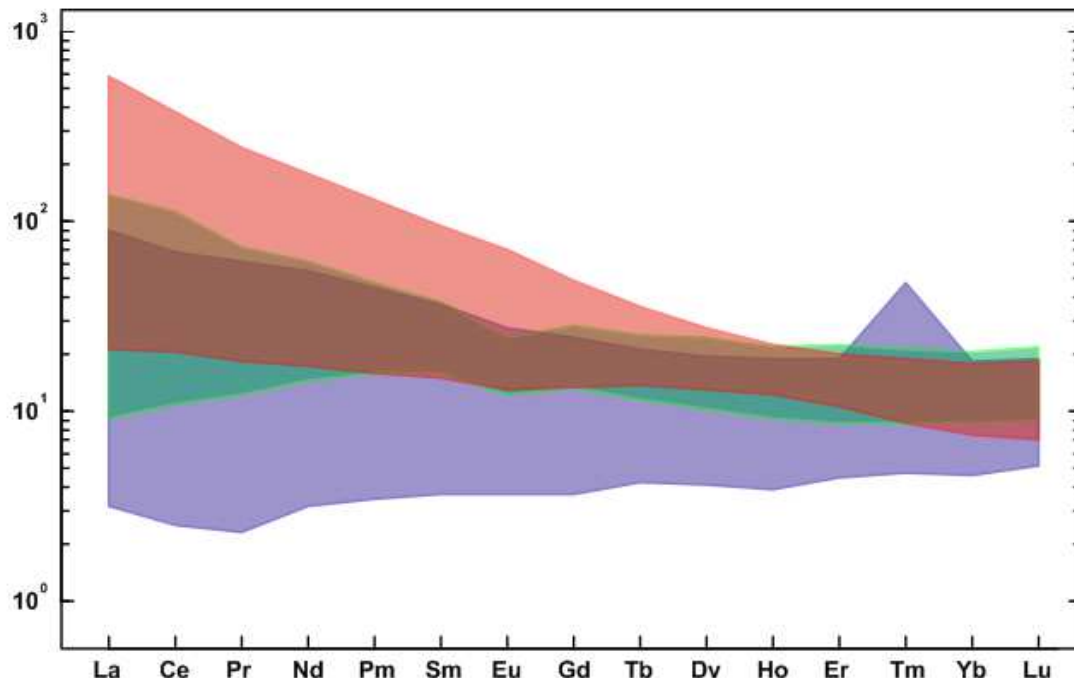
Β) Αραχνογράμματα κανονικοποιημένα ως προς πρωταρχικό μανδύα: Τα αραχνογράμματα βασίζονται πάνω σε μια ομαδοποίηση στοιχείων ασυμβίβαστων ως προς μια τυπική μαδυακή σύσταση. Είναι προέκταση των κλασσικών διαγραμμάτων σπανίων

γαιών κανονικοποιημένων ως προς χονδρίτη με την προσθήκη επιπλέον χημικών στοιχείων. Οι συγκεντρώσεις των στοιχείων αυτών στον μανδύα, που χρησιμοποιούνται για την κανονικοποίηση, μετρούν την απόκλιση των συγκεντρώσεων των στοιχείων αυτών του δείγματος από την πρωταρχική σύσταση. Ως πρωταρχικός μανδύας χαρακτηρίζεται η χημική σύσταση του μανδύα πριν τον σχηματισμό του ηπειρωτικού φλοιού. Οι κανονικοποιημένες συγκεντρώσεις των στοιχείων πλοτάρονται σε λογαριθμική κλίμακα, ως μια σχετικά στρωτή καμπύλη που μειώνεται στα πιο ασυμβίβαστα στοιχεία. Στα διαγράμματα της εργασίας η κανονικοποίηση γίνεται σύμφωνα με τον McDonough (1992)



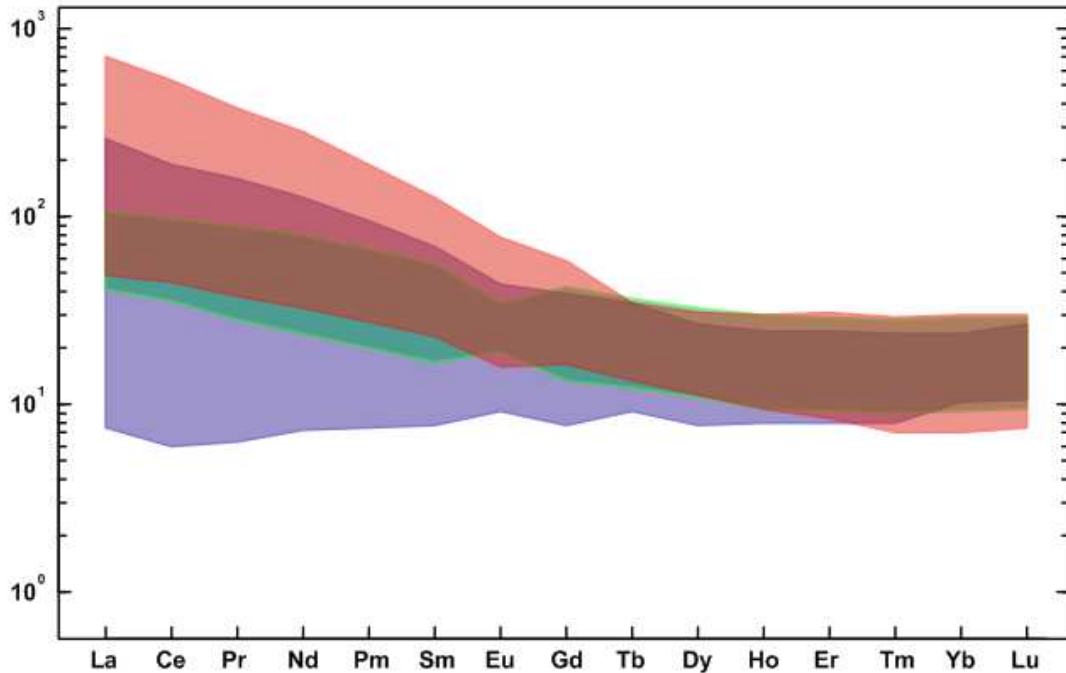
Σχήμα 4.4.2.1 Διάγραμμα σπάνιων γαιών ανηγμένων σύμφωνα με Sun&Macdonough (1989) ως προς SiO_2 , για $\text{SiO}_2=47-50$. Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.

Στο Σχ.4.4.2.1 φαίνεται ότι και οι 3 ομάδες είναι πιο πολύ εμπλουτισμένες στις ελαφριές σπάνιες γαίες (La-Gd) από ότι στις βαριές σπάνιες γαίες (Gd-Lu). Τα ενεργά περιθώρια είναι τα πιο εμπλουτισμένα στις ελαφριές σπάνιες γαίες, Και οι 3 ομάδες έχουν κοινή περιοχή τιμών σπάνιων γαιών (στο διάγραμμα είναι η ζώνη με καφέ απόχρωση) όπου αλληλεπικαλύπτονται. Τα ensimatic τόξα εμφανίζουν μικρότερο εμπλουτισμό στις βαριές σπάνιες γαίες από τις άλλες 2 ομάδες. Τα ensialic τόξα μπορούν να εμφανίσουν υψηλότερο εμπλουτισμό στις βαριές σπάνιες γαίες από τα ενεργά περιθώρια, συγκεκριμένα στις τιμές των Er, Tm, Yb, Lu.



Σχήμα 4.4.2.2 Διάγραμμα σπάνιων γαιών ανηγμένων σύμφωνα με Sun&Macdonough (1989) ως προς SiO_2 , για $\text{SiO}_2=50-55$. Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.

Στο Σχ.4.4.2.2 φαίνεται ότι και οι 3 ομάδες είναι πιο εμπλουτισμένες στις ελαφριές σπάνιες γαίες (La-Gd) από ότι στις βαριές σπάνιες γαίες (Gd-Lu). Τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν μεγαλύτερο εμπλουτισμό στις ελαφριές σπάνιες γαίες από τα νησιώτικα τόξα, όμως μικρότερο εμπλουτισμό στις βαριές σπάνιες γαίες από αυτά, καθώς κάποια δείγματα νησιώτικων τόξων είναι πιο εμπλουτισμένα από τα ενεργά περιθώρια στις τιμές των Er, Tm, Yb, Lu. Και οι 3 ομάδες έχουν κοινή περιοχή τιμών σπάνιων γαιών (στο διάγραμμα είναι η ζώνη με καφέ απόχρωση) όπου αλληλεπικαλύπτονται. Τα δείγματα των ensimatic τόξων έχουν μεγάλο εύρος τιμών σπάνιων γαιών, ξεκινώντας πιο χαμηλά από τις άλλες 2 ομάδες και φτάνουν σε ίδιες τιμές με τα ensialic, ένα δείγμα παρουσιάζει θετική ανωμαλία Tm, όμως δεν λαμβάνεται υπόψιν καθώς δεν παρουσιάζουν το ίδιο και τα υπόλοιπα δείγματα.



Σχήμα 4.4.2.3 Διάγραμμα σπάνιων γαιών ανηγμένων σύμφωνα με Sun&Macdonough (1989) ως προς SiO_2 , για $\text{SiO}_2 = 55-60$. Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.

Στο Σχ.4.4.2.3 οι 3 ομάδες είναι περισσότερο εμπλουτισμένες στις ελαφριές σπάνιες γαίες (La-Gd) από ότι στις βαριές σπάνιες γαίες (Gd-Lu). Τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν μεγαλύτερο εμπλουτισμό στις ελαφριές σπάνιες γαίες από τα νησιώτικα τόξα. Οι 3 ομάδες παρουσιάζουν τον ίδιο βαθμό εμπλουτισμού στις βαριές σπάνιες γαίες, με τα ενεργά περιθώρια να έχουν και λίγο χαμηλότερες τιμές από τα νησιώτικα τόξα. Τα τρία είδη τόξων έχουν κοινή περιοχή τιμών σπάνιων γαιών (στο διάγραμμα είναι η ζώνη με καφέ απόχρωση) όπου αλληλεπικαλύπτονται. Στα ensialic τόξα τα χαμηλότερα δείγματα έχουν θετική ανωμαλία Eu, ενώ τα ανώτερα δείγματα έχουν αρνητική ανωμαλία Eu. Κάποια δείγματα των ενεργών περιθωρίων παρουσιάζουν αρνητική ανωμαλία Eu. Στα ensimatic μόνο το χαμηλότερο δείγμα έχει θετική ανωμαλία Eu, Tb και αρνητική ανωμαλία Gd, οπότε δεν είναι χαρακτηριστική.

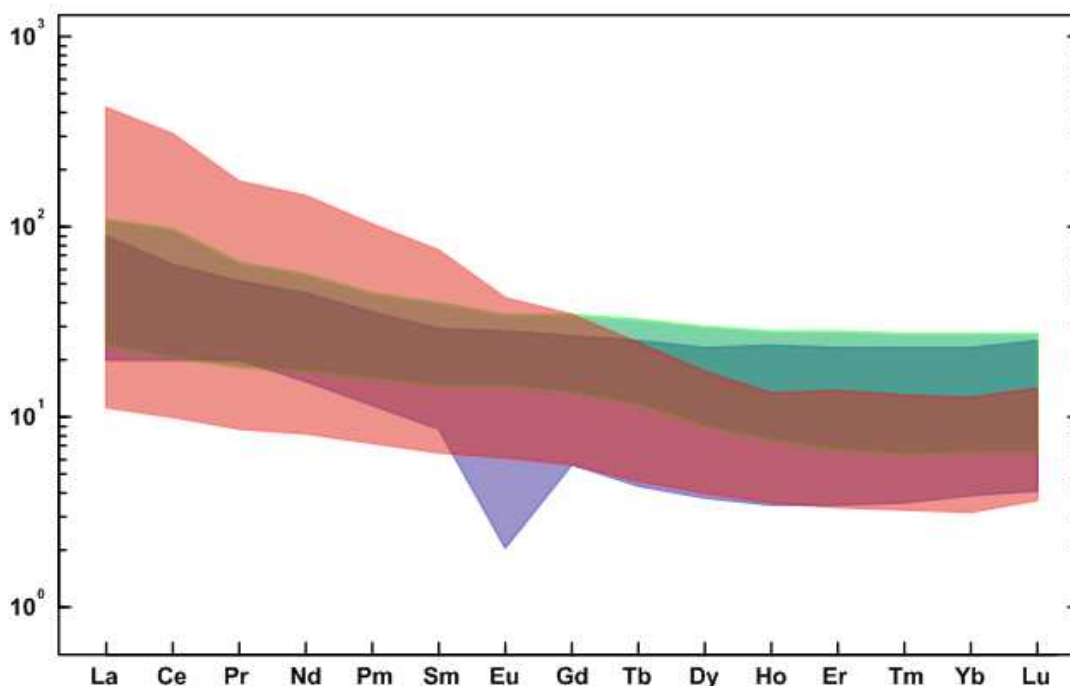
Στο Σχ. 4.4.2.4 Και οι 3 ομάδες είναι πιο εμπλουτισμένες σε ελαφριές σπάνιες γαίες από ότι σε βαριές. Τα ενεργά περιθώρια είναι περισσότερο εμπλουτισμένα στις ελαφριές σπάνιες γαίες και λιγότερο εμπλουτισμένα στις βαριές σπάνιες γαίες από τα νησιώτικα τόξα. Τα ensialic παρουσιάζουν περισσότερο εμπλουτισμό στις βαριές σπάνιες γαίες από τα ensimatic τόξα. Η σκούρη καφέ ζώνη αποτελεί κοινή ζώνη και για τις 3 ομάδες. Τα ενεργά περιθώρια και ensimatic έχουν ορισμένα δείγματα με αρνητική ανωμαλία Eu, όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί χαρακτηριστική, γιατί δεν το παρουσιάζουν αυτό η πλειοψηφία των δειγμάτων.

Στο Σχ. 4.4.2.5 Τα ενεργά περιθώρια και τα ensialic τόξα είναι πιο εμπλουτισμένα στις ελαφριές σπάνιες γαίες από ότι στις βαριές. Στα ensimatic τόξα τα μισά άνω δείγματα είναι επίσης περισσότερο εμπλουτισμένα στις ελαφριές από τις βαριές σπάνιες γαίες, όμως τα

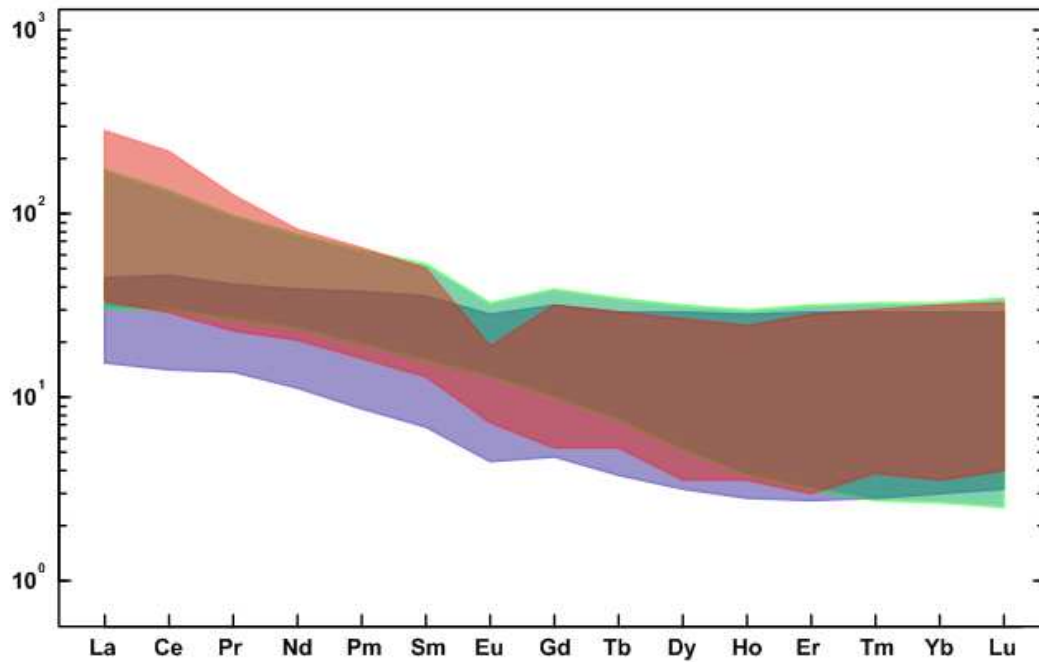
μιας κατώτερα δείγματα είναι περισσότερο εμπλουτισμένα στις βαριές από τις ελαφριές σπάνιες γαίες. Τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο εμπλουτισμό στις ελαφριές σπάνιες γαίες και τον μικρότερο στις βαριές. Τα ensialic τόξα παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο εμπλουτισμό στις βαριές σπάνιες γαίες. Επιπλέον τα ενεργά περιθώρια και τα ensialic έχουν κάποια δείγματα με αρνητική ανωμαλία Eu. Η καφέ ζώνη αποτελεί κοινή ζώνη και για τις 3 ομάδες.

Στο Σχ. 4.4.2. 6 Και οι 3 ομάδες είναι πιο εμπλουτισμένες σε ελαφριές σπάνιες γαίες από ότι σε βαριές. Τα ensialic τόξα έχουν το μεγαλύτερο εύρος τιμών των σπάνιων γαιών, ξεκινώντας χαμηλότερα και φτάνοντας ψηλότερα από τις άλλες 2 ομάδες. Τα ενεργά περιθώρια είναι περισσότερο εμπλουτισμένα στα La-Nd και λιγότερο εμπλουτισμένα στις υπόλοιπες σπάνιες γαίες από τα ensimatic και πολλά δείγματα των ensialic. Τα ενεργά και τα ensimatic έχουν κάποια δείγματα που παρουσιάζουν αρνητική ανωμαλία Eu. Τα ensialic κάποια πιο ανώτερα δείγματα παρουσιάζουν αρνητική, κάποια χαμηλότερα θετική ανωμαλία Eu. Η σκούρη καφέ ζώνη αποτελεί κοινή ζώνη και για τις 3 ομάδες.

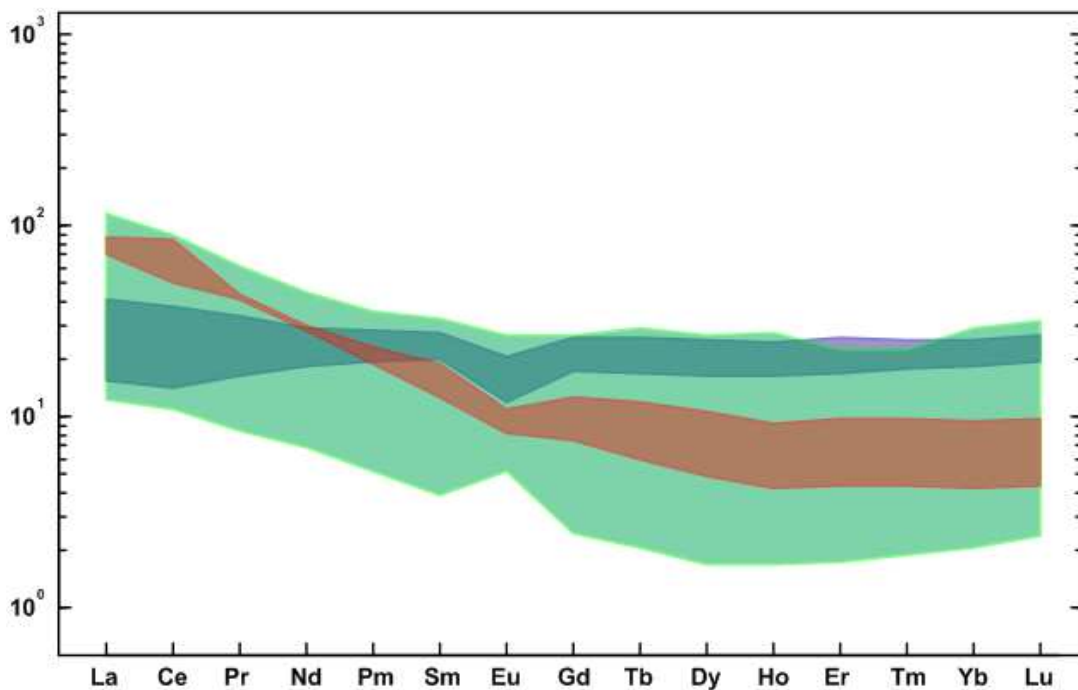
Στο Σχ. 4.4.2.7 Και οι 3 ομάδες είναι πιο εμπλουτισμένες σε ελαφριές σπάνιες γαίες από ότι σε βαριές και παρουσιάζουν αρνητική ανωμαλία Eu και θετική ανωμαλία Gd. Τα ενεργά παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο εμπλουτισμό στις ελαφριές σπάνιες γαίες, τα ensimatic στις βαριές και τον χαμηλότερο στις ελαφριές. Τα ensialic παρουσιάζουν μεσαίο εμπλουτισμό στις ελαφριές και τον χαμηλότερο στις βαριές σπάνιες γαίες.



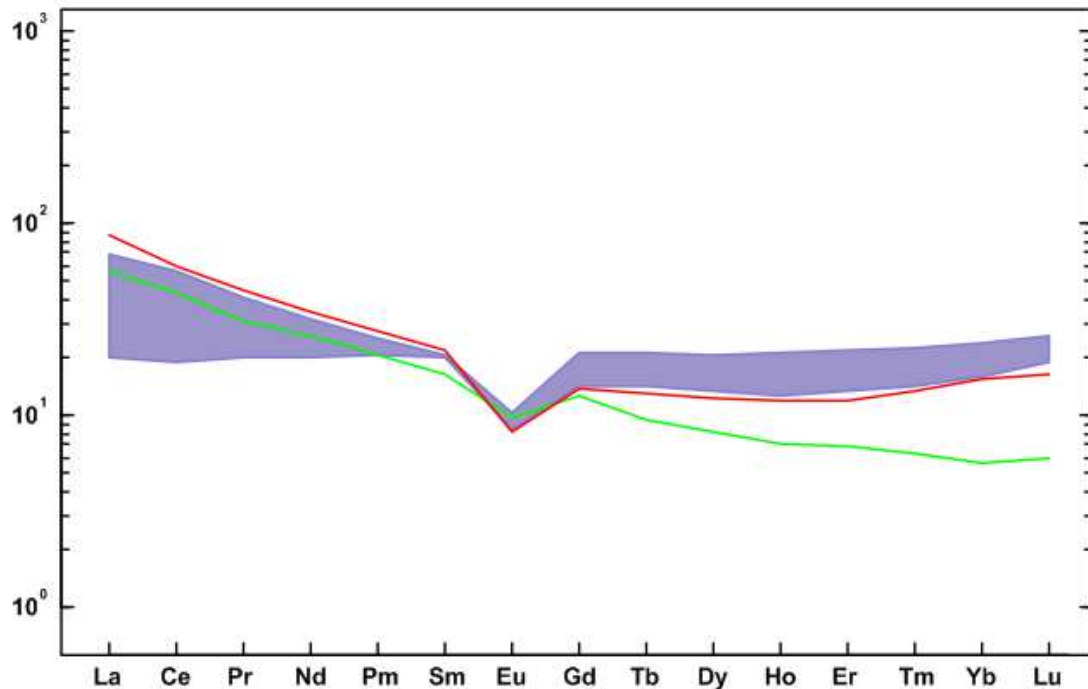
Σχήμα 4.4.2.4 Διάγραμμα σπανίων γαιών ανηγμένων σύμφωνα με Sun&Macdonough (1989) ως προς SiO_2 , για $\text{SiO}_2 = 60-65$. Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.



Σχήμα 4.4.2.5 Διάγραμμα σπανίων γαιών ανηγμένων σύμφωνα με Sun&Macdonough (1989) ως προς SiO_2 , για $\text{SiO}_2=65-70$. Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.



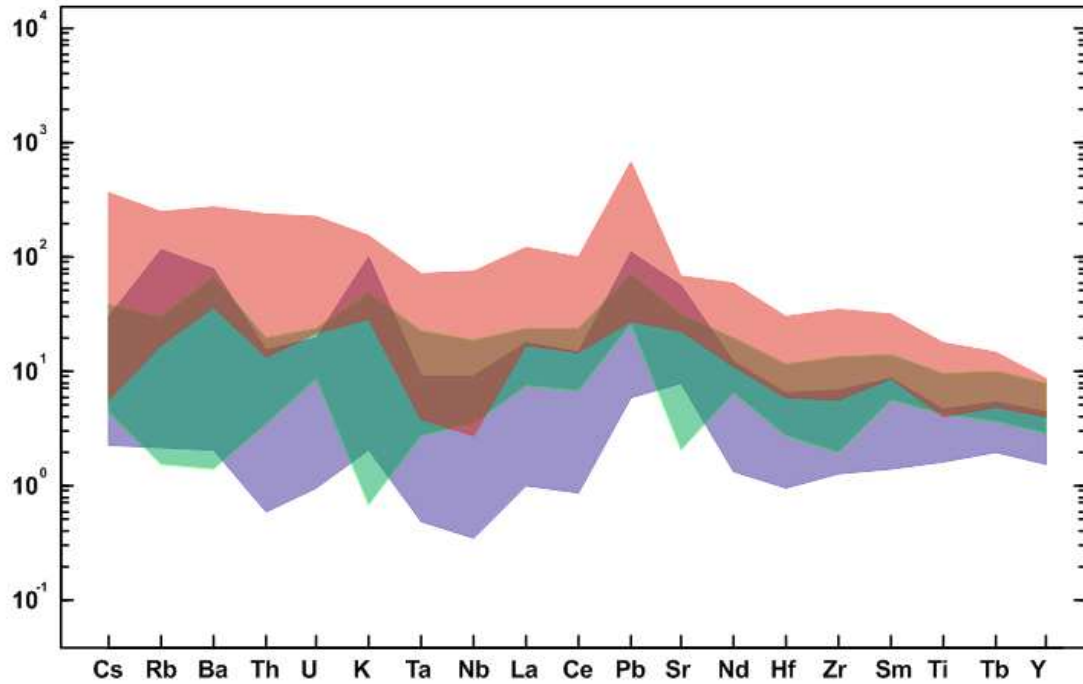
Σχήμα 4.4.2.6 Διάγραμμα σπανίων γαιών ανηγμένων σύμφωνα με Sun&Macdonough (1989) ως προς SiO_2 , για $\text{SiO}_2=70-75$. Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.



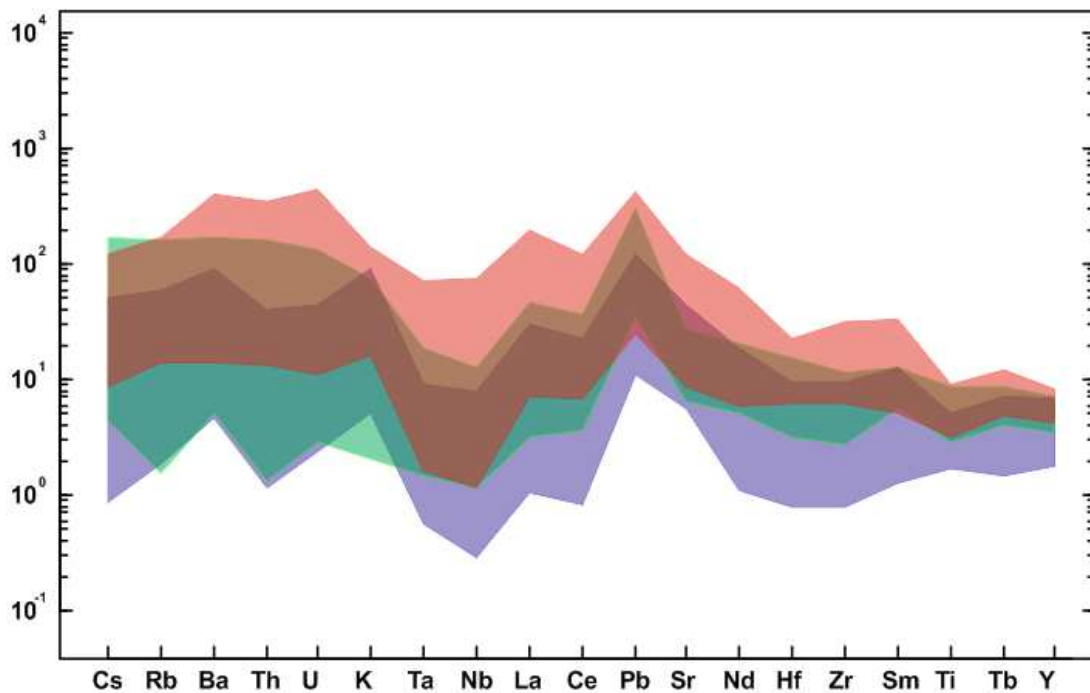
Σχήμα 4.4.2.7 Διάγραμμα σπάνιων γαιών ανηγμένων σύμφωνα με Sun&Macdonough (1989) ως προς SiO_2 , για $\text{SiO}_2=75-80$. Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη γραμμή ένα δείγμα του ensialic τόξου Μπάντα, ενώ η κόκκινη γραμμή ένα δείγμα του ενεργού ηπειρωτικού περιθώριου των Άνδεων.

Στο Σχ. 4.4.2.8 Η καφέ ζώνη αποτελεί κοινή ζώνη και για τις 3 ομάδες. Τα ensimatic έχουν θετική ανωμαλία Ba, K, Pb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb, Th. Τα ensialic έχουν θετική ανωμαλία Pb, αρνητική ανωμαλία Ta, Nb. Τα ενεργά περιθώρια έχουν θετική ανωμαλία Pb, αρνητική Ta, Nb. Τα ενεργά περιθώρια τείνουν να έχουν τις υψηλότερες τιμές των ιχνοστοιχείων, τα ensimatic τις χαμηλότερες, ενώ τα ensialic τις μεσαίες.

Στο Σχ. 4.4.2.9 Η καφέ ζώνη αποτελεί κοινή ζώνη και για τις 3 ομάδες. Τα ensimatic τόξα έχουν θετική ανωμαλία στο Ba, K, Pb, La και αρνητική ανωμαλία στο Th, Ta, Nb, Ce. Τα ensialic έχουν θετική ανωμαλία στο Ba, Pb και αρνητική ανωμαλία στο Rb, Th, Ta, Nb. Τα ενεργά περιθώρια εμφανίζουν θετική ανωμαλία Pb, Tb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb, Ti. Τα ενεργά περιθώρια τείνουν να έχουν τις υψηλότερες τιμές των ιχνοστοιχείων, τα ensimatic τις χαμηλότερες, ενώ τα ensialic τις μεσαίες.



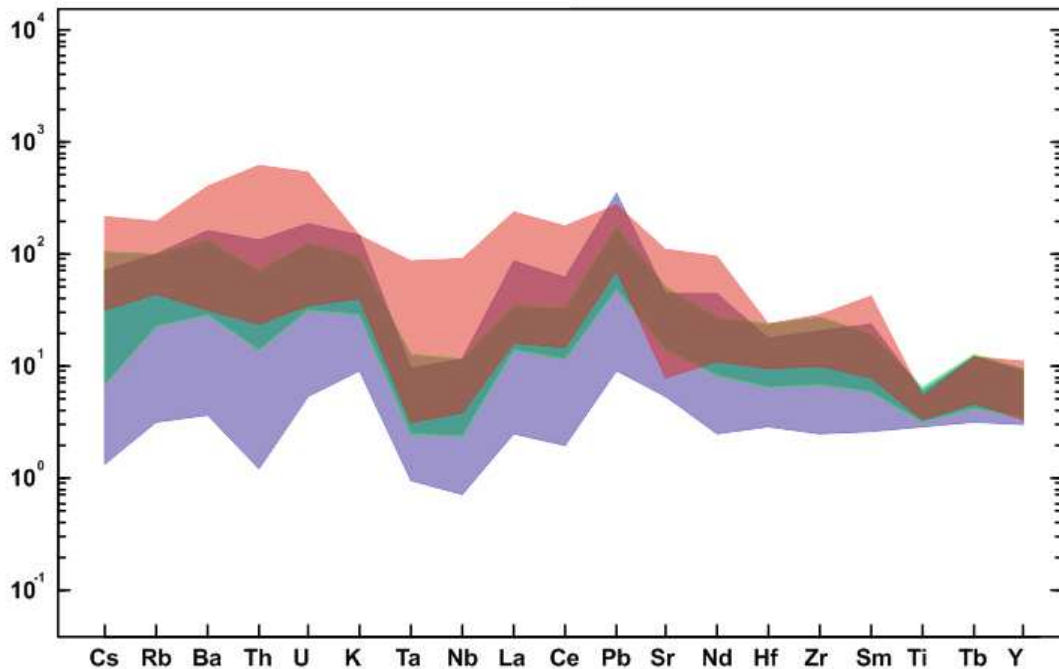
Σχήμα 4.4.2.8 Διάγραμμα πρωταρχικού μανδύα για δείγματα τιμών $\text{SiO}_2=47-50$, σύμφωνα με Macdonough et al (1992). Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.



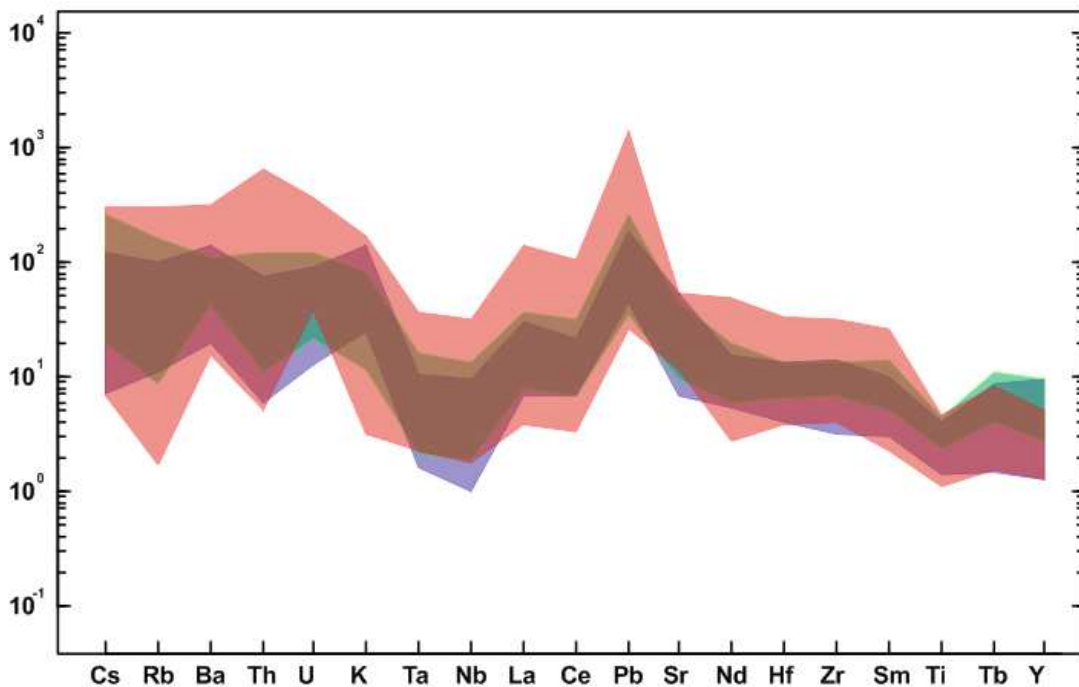
Σχήμα 4.4.2.9 Διάγραμμα πρωταρχικού μανδύα για δείγματα τιμών $\text{SiO}_2=50-55$, σύμφωνα με Macdonough et al (1992). Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.

Στο Σχ. 4.4.2.10 Η καφέ ζώνη αποτελεί κοινή ζώνη και για τις 3 ομάδες. Τα ensimatic παρουσιάζουν θετική ανωμαλία Ba, K, La, Pb και αρνητική ανωμαλία Th, Ta, Nb, Ce, Ti. Τα ensialic παρουσιάζουν θετική ανωμαλία U, K, La, Pb και αρνητική ανωμαλία Th, Ta, Nb, Ce, Ti. Τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν θετική ανωμαλία La, Pb και αρνητική ανωμαλία Ta,

Nb, Ce, Ti. Για την πλειοψηφία των δειγμάτων τα ενεργά περιθώρια τείνουν να έχουν τις υψηλότερες τιμές των ιχνοστοιχείων, τα ensimatic τις χαμηλότερες, ενώ τα ensialic τις μεσαίες.



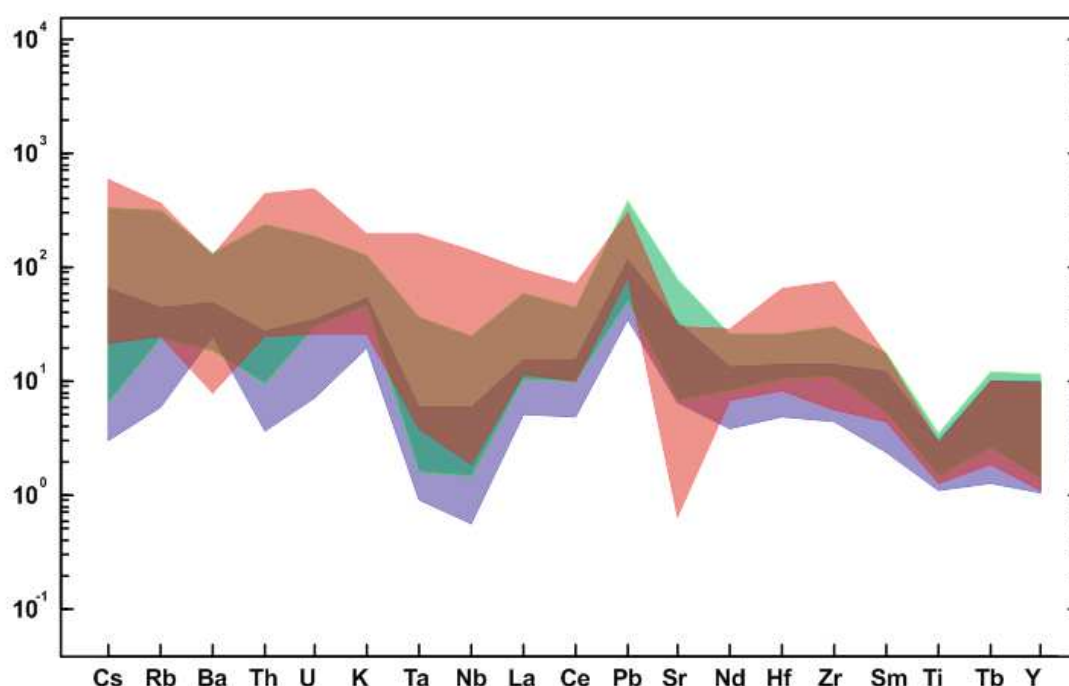
Σχήμα 4.4.2.10 Διάγραμμα πρωταρχικού μανδύα για δείγματα τιμών $\text{SiO}_2=55-60$, σύμφωνα με Macdonough et al (1992). Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.



Σχήμα 4.4.2.11 Διάγραμμα πρωταρχικού μανδύα για δείγματα τιμών $\text{SiO}_2=60-65$, σύμφωνα με Macdonough et al (1992). Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.

Στο Σχ. 4.4.2.11 Η καφέ ζώνη αποτελεί κοινή ζώνη και για τις 3 ομάδες. Τα ensimatic έχουν θετική ανωμαλία K, Pb, La και αρνητική ανωμαλία Th, Ta, Nb, Ce, Ti. Τα ensialic τόξα εμφανίζουν θετική ανωμαλία Ba, La, Pb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb, Ce, Ti. Τα ενεργά περιθώρια εμφανίζουν θετική ανωμαλία La, Pb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb, Ce, Ti.

Στο Σχ. 4.4.2.12 Η σκούρα καφέ ζώνη αποτελεί κοινή περιοχή και για τις 3 ομάδες, ενώ η πιο ανοιχτή καφέ αποτελεί κοινή περιοχή μόνο για τα ensialic και ενεργά περιθώρια. Τα ensimatic εμφανίζουν θετική ανωμαλία Ba, K, Pb, La και αρνητική ανωμαλία Th, Ta, Nb, Ce, Ti. Τα ensialic εμφανίζουν θετική ανωμαλία K, La, Pb, Tb και αρνητική ανωμαλία Th, Ta, Nb, Ce, Ti. Τα ενεργά περιθώρια εμφανίζουν θετική ανωμαλία La, Pb, Tb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb, Ce, Ti.

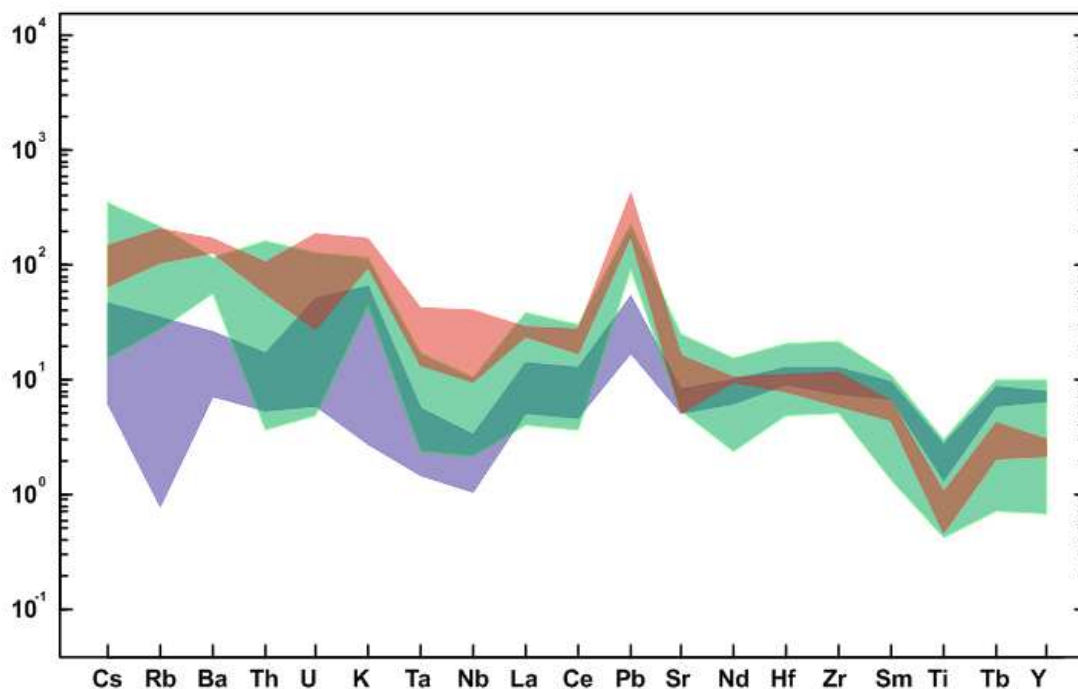


Σχήμα 4.4.2.12 Διάγραμμα πρωταρχικού μανδύα για δείγματα τιμών $\text{SiO}_2=65-70$, σύμφωνα με Macdonough et al (1992). Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.

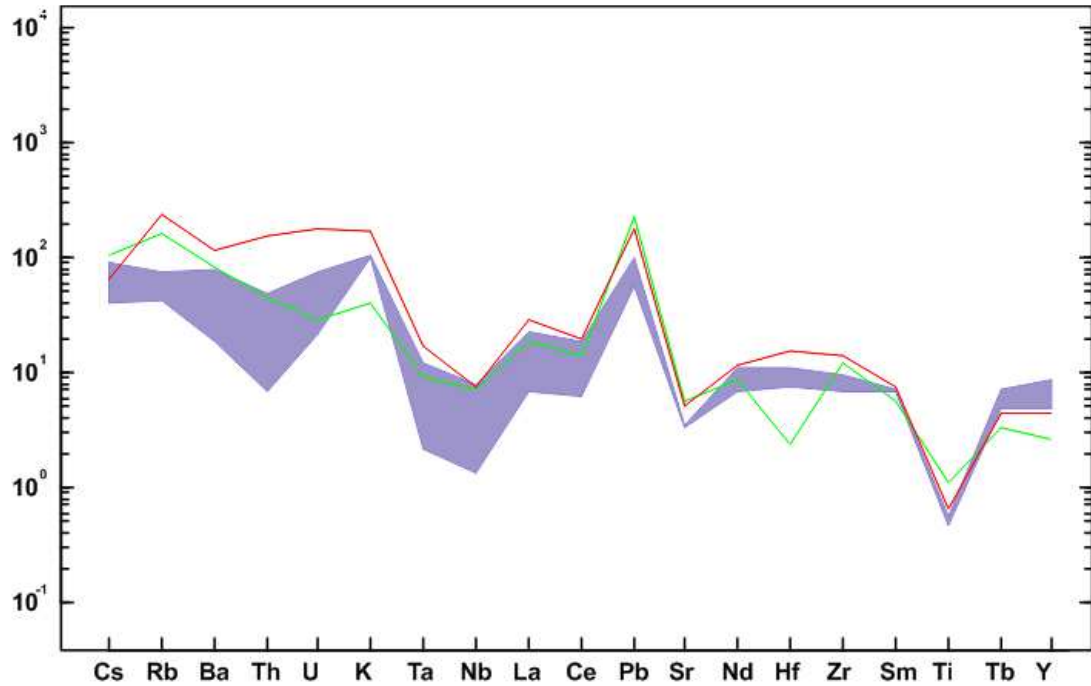
Στο Σχ. 4.4.2.13 Η σκούρα καφέ ζώνη αποτελεί κοινή περιοχή και για τις 3 ομάδες, ενώ η πιο ανοιχτή καφέ αποτελεί κοινή περιοχή μόνο για τα ensialic και ενεργά περιθώρια. Τα ensimatic τόξα έχουν θετική ανωμαλία K, La, Pb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb, Ce, Sr, Ti. Τα ensialic τόξα έχουν θετική ανωμαλία K, Pb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb, Ce, Sr, Ti. Τα ενεργά περιθώρια έχουν θετική ανωμαλία La, Pb, Tb και αρνητική Ta, Nb, Ce, Ti. Τα ενεργά περιθώρια τείνουν να έχουν τις υψηλότερες τιμές των ιχνοστοιχείων, τα ensimatic τις χαμηλότερες, ενώ τα ensialic τις μεσαίες.

Στο Σχ. 4.4.2.14 Τα ensimatic παρουσιάζουν θετική ανωμαλία K, La, Pb, Tb και αρνητική ανωμαλία Th, Ta, Nb, Ce, Sr, Ti. Τα ensialic παρουσιάζουν θετική ανωμαλία Rb, K, La, Pb, Nd, Zr, Tb και αρνητική ανωμαλία U, Nb, Ce, Sr, Hf, Ti. Τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν θετική ανωμαλία Rb, K, La, Pb, Tb και αρνητική ανωμαλία Ba, Nb, Ce, Sr, Ti.

Τα ενεργά περιθώρια τείνουν να έχουν τις υψηλότερες τιμές των ιχνοστοιχείων, τα ensimatic τις χαμηλότερες, ενώ τα ensialic τις μεσαίες. Επειδή σε αυτό το διάγραμμα τα ensialic και ενεργά αντιπροσωπεύονται μόνο από ένα δείγμα οι ανωμαλίες δεν μπορούν να θεωρηθούν χαρακτηριστικές.



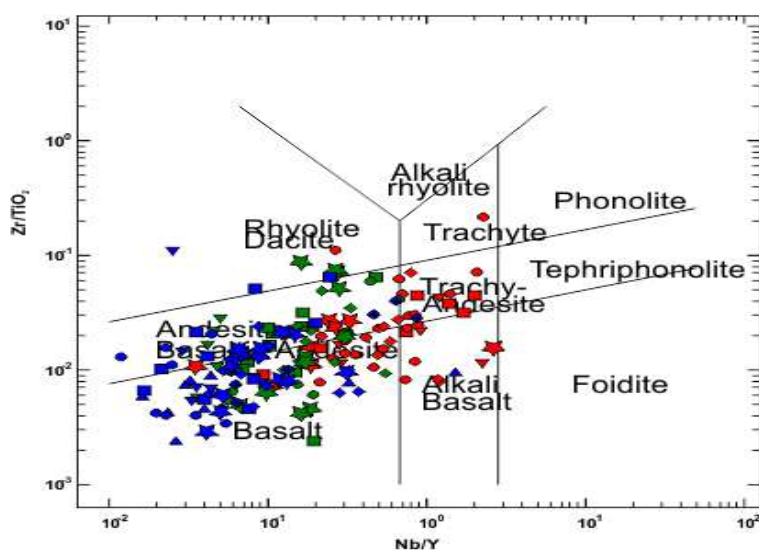
Σχήμα 4.4.2.13 Διάγραμμα πρωταρχικού μανδύα για δείγματα τιμών $SiO_2=70-75$, σύμφωνα με Macdonough et al (1992). Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη τα ensialic τόξα, ενώ η κόκκινη περιοχή τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια.



Σχήμα 4.4.2.14 Διάγραμμα πρωταρχικού μανδύα για δείγματα τιμών $\text{SiO}_2=75-80$, σύμφωνα με Macdonough et al (1992). Η μπλε περιοχή αντιπροσωπεύει τα ensimatic, η πράσινη γραμμή ένα δείγμα του ensialic τόξου Μπάντα, ενώ η κόκκινη γραμμή ένα δείγμα του ενεργού ηπειρωτικού περιθωρίου των Άνδεων.

4.4.3 Πετροτεκτονικά διαγράμματα

Τα διαγράμματα αυτού του τύπου χρησιμεύουν στο να κατηγοριοποιούν τα πετρώματα με βάση την χημική τους σύσταση, το καθένα σχεδιασμένο για συγκεκριμένα είδη πετρωμάτων (Rollinson 1993). Παρακάτω χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα των Pearce (1996), Middlemost (1975), Peccerillo&Taylor (1976), LeBas (1986), τα οποία είναι κατάλληλα για ηφαιστειακά πετρώματα.

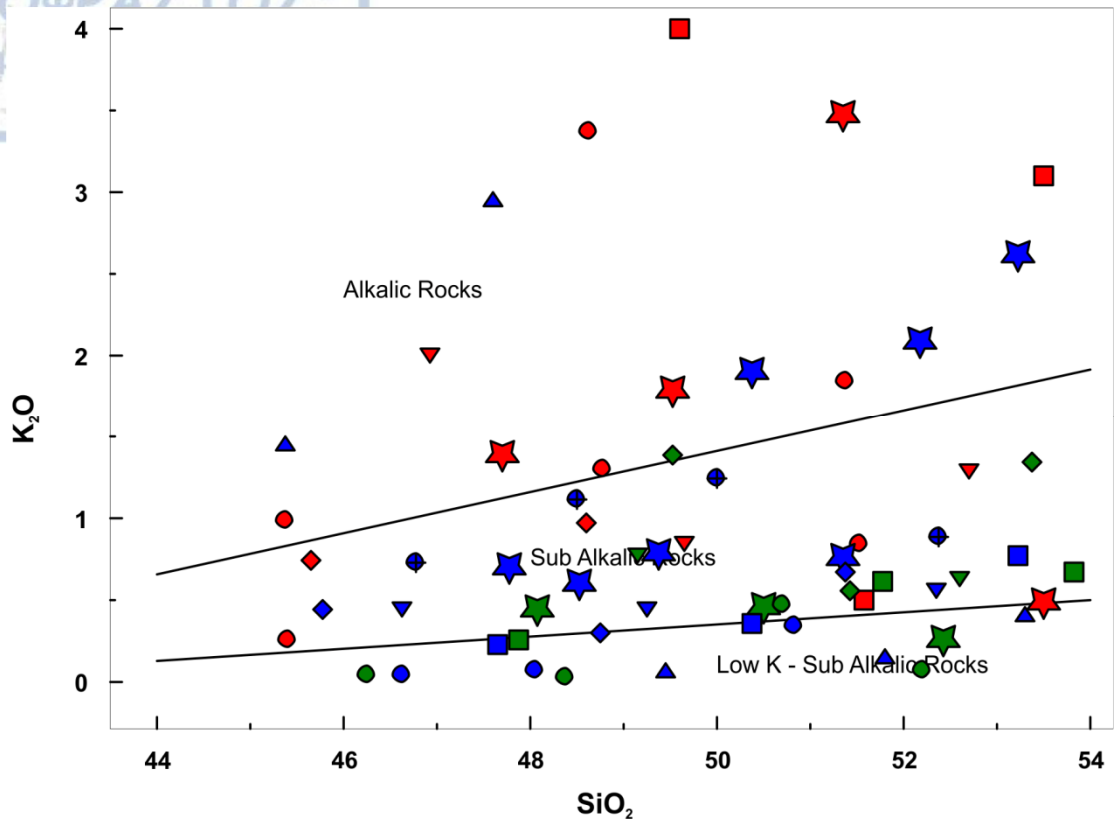


Σχήμα 4.4.3.1 Διάγραμμα Zr/TiO_2 - Nb/Y . σύμφωνα με Pearce (1996). Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

Στο διάγραμμα $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ σύμφωνα με Pearce (1996) (Σχ. 4.4.3.1):
1) Παρατηρήσεις: Τα **ensimatic τόξα** αποτελούνται από βασάλτες, ανδεσίτες και βασαλτικούς ανδεσίτες ως και ρυόλιθους ή δακίτες. Άρα τα πετρώματα είναι στην πλειοψηφία τους υποαλκαλικά βασικά, ενδιάμεσα και μερικά δείγματα είναι όξινα. Το ίδιο συμβαίνει και για τα **ensialic τόξα**. Τα **ενεργά περιθώρια** αποτελούνται από βασάλτες, ανδεσίτες και βασαλτικούς ανδεσίτες, ρυόλιθους και δακίτες, αλκαλικούς βασάλτες, τραχυανδεσίτες ως τραχύτες. Τα πετρώματα είναι υποαλκαλικά ως αλκαλικά και στο όριο βασικού και ενδιάμεσου σταδίου. Μερικά δείγματα φτάνουν στο όξινο στάδιο. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic, ensialic τόξα δεν διαχωρίζονται μεταξύ τους, ενώ τα ενεργά είναι τα μόνα που ανήκουν και στο αλκαλικό στάδιο.

Στο διάγραμμα K_2O-SiO_2 σύμφωνα με Middlemost (1975) (Σχ. 4.4.3.2):
1) Παρατηρήσεις: Τα **ensimatic τόξα** ανήκουν κυρίως στην υποαλκαλική ομάδα, όμως μπορούν να ανήκουν και στην χαμηλού K-υποαλκαλική και την αλκαλική ομάδα. Τα **ensialic τόξα** ανήκουν κυρίως στην υποαλκαλική και μετά την χαμηλού K-υποαλκαλική ομάδα, με ένα δείγμα να αγγίζει την αλκαλική ομάδα. Τα **ενεργά περιθώρια** ανήκουν κυρίως στην αλκαλική ομάδα και μετά στην υποαλκαλική, με ένα δείγμα να αγγίζει την χαμηλού K υποαλκαλική. 2) Συμπεράσματα: Με βάση το σε ποια ομάδα πέφτει η πλειοψηφία των δειγμάτων του κάθε τόξου: Τα ensialic τόξα διαφοροποιούνται από τα ενεργά στο ότι τα ensialic ανήκουν κυρίως χαμηλά στην υποαλκαλική ομάδα, ενώ τα ενεργά στην αλκαλική, δεν διαφοροποιούνται από τα ensimatic. Τα ensimatic ανήκουν στην υποαλκαλική ομάδα, ενώ τα ενεργά στην αλκαλική.

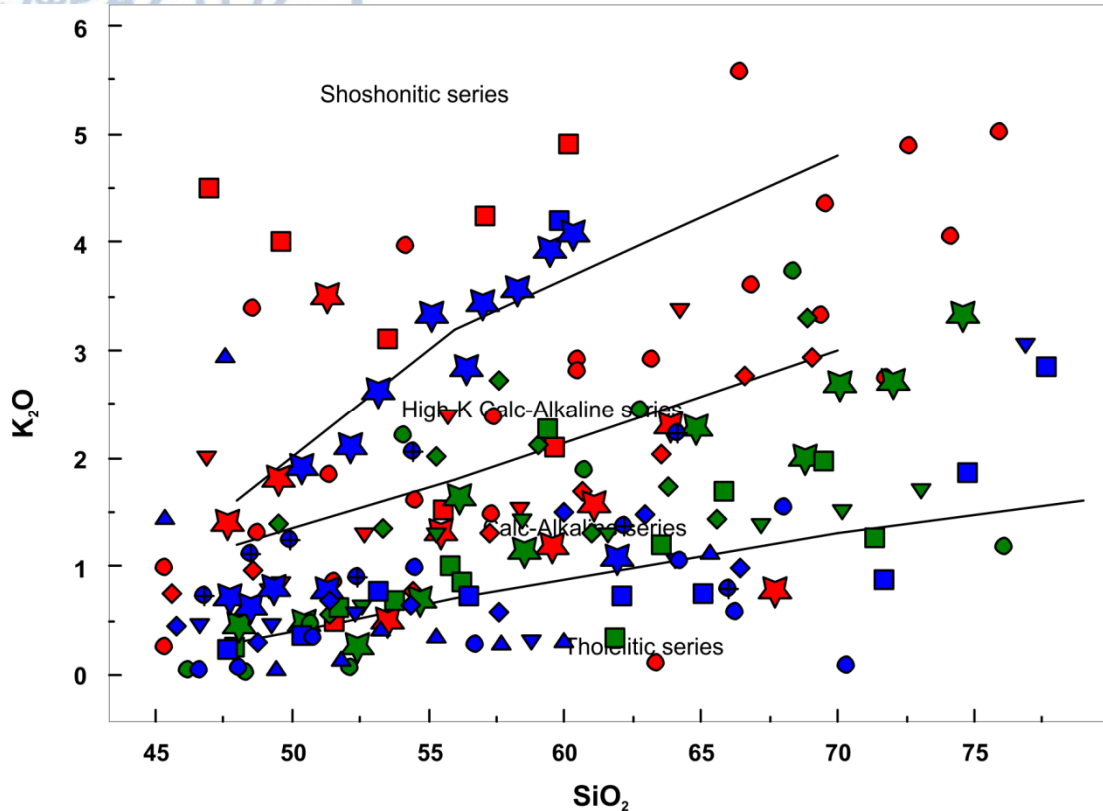
Στο διάγραμμα K_2O ως προς SiO_2 σύμφωνα με Peccerillo&Taylor (1976) (Σχ.4.4.3.3):
1) Παρατηρήσεις: Τα **ensimatic τόξα** βρίσκονται κυρίως χαμηλά στην ασβεσταλκαλική και στην θολεϊτική σειρά. Επίσης βρίσκονται και στην σωσονιτική σειρά. Μερικά δείγματα βρίσκονται ψηλά στην ασβεσταλκαλική σειρά και πολύ λίγα χαμηλά στην υψηλού K ασβεσταλκαλική. Τα **ensialic τόξα** βρίσκονται κυρίως στην ασβεσταλκαλική σειρά με μερικά δείγματα να πέφτουν και στην θολεϊτική. Τα **ενεργά περιθώρια** βρίσκονται στην ασβεσταλκαλική, την υψηλού K ασβεσταλκαλική και την σωσονιτική σειρά, με μερικά δείγματα να βρίσκονται και στην θολεϊτική. 2) Συμπεράσματα: Τα ensimatic και τα ενεργά περιθώρια διαφέρουν από τα ensialic στο ότι τα τρίτα δεν έχουν δείγματα στην σωσονιτική σειρά, σε αντίθεση με τα 2 πρώτα, παρά μόνο στην ασβεσταλκαλική.



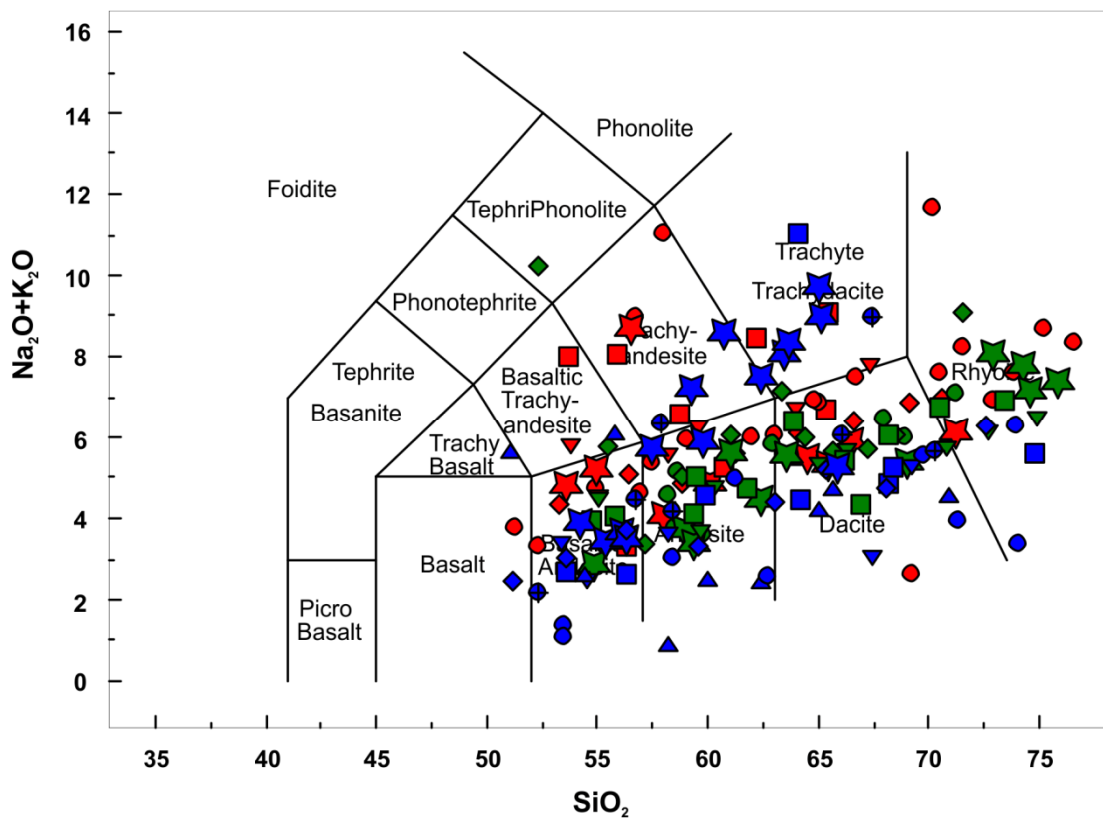
Σχήμα 4.4.3.2 Διάγραμμα K_2O - SiO_2 σύμφωνα με Middlemost (1975). Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

Στο διάγραμμα Na_2O+K_2O ως προς SiO_2 σύμφωνα με LeBas (1986) (Σχ. 4.4.3.4):

- 1) Παρατηρήσεις: **Για τα ensimatic τόξα** η πλειοψηφία των δειγμάτων πέφτει στους βασάλτες, βασαλτικούς ανδεσίτες, ανδεσίτες και δακίτες, χαμηλά στους ρυόλιθους άρα πρόκειται για θολεϊτική, υποαλκαλική ηφαιστειότητα που παράγει πετρώματα βασικά, ενδιάμεσα ως όξινα. Δευτερευόντως δείγματα πέφτουν στους τραχυβασάλτες, βασαλτικούς -τραχυανδεσίτες, τραχυανδεσίτες και τραχείτες, τραχυδακίτες. Επομένως πρόκειται για αλκαλική ηφαιστειότητα που παράγει πετρώματα βασικά ως όξινα. **Για τα ensialic τόξα** τα δείγματα πέφτουν στους βασαλτικούς ανδεσίτες, ανδεσίτες, δακίτες, χαμηλά στους ρυόλιθους. Άρα πρόκειται για θολεϊτική, υποαλκαλική ηφαιστειότητα που παράγει πετρώματα ενδιάμεσα ως όξινα. Ένα δείγμα πέφτει στους τεφροφωνολίτες που είναι αλκαλική, βασική ως ενδιάμεση ηφαιστειότητα. **Για τα ενεργά περιθώρια** η πλειοψηφία των δειγμάτων πέφτει στους βασαλτικούς ανδεσίτες, ανδεσίτες, δακίτες και ρυόλιθους και βασάλτες. Άρα πρόκειται για θολεϊτική, υποαλκαλική ηφαιστειότητα με πετρώματα ενδιάμεσα ως όξινα και σπάνια βασικά. Δευτερευόντως δείγματα πέφτουν στους βασαλτικούς - τραχυανδεσίτες, τραχυανδεσίτες, τραχείτες-τραχυδακίτες και ψηλά στους ρυόλιθους. Άρα πρόκειται για αλκαλική ηφαιστειότητα ενδιάμεση ως όξινη.
- 2) Συμπεράσματα: Τα ensialic τόξα είναι τα μόνα που δεν παρουσιάζουν αλκαλική ηφαιστειότητα, με εξαίρεση ένα δείγμα. Τα ενεργά περιθώρια, έχουν πολύ παρόμοια ηφαιστειότητα με τα νησιώτικα τόξα, όμως μπορούν να είναι πιο όξινα.



Σχήμα 4.4.3.3 Διάγραμμα διαχωρισμού της υποαλκαλικής σειράς σύμφωνα με Peccerillo&Taylor (1976). Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1



Σχήμα 4.4.3.4 Διάγραμμα Na_2O+K_2O ως προς SiO_2 σύμφωνα με LeBas (1986). Ο συμβολισμός έχει γίνει σύμφωνα με το σχήμα 4.4.1.1

5. Συζήτηση/Αποτελέσματα

Στα διαγράμματα Harker κύριων στοιχείων (Σχ. 4.4.1.1.1) δεν μπόρεσε να βρεθεί γενικό γεωχημικό χαρακτηριστικό που να ξεχωρίζει την μία ομάδα από την άλλη, εκτός από τα διαγράμματα La-SiO_2 , Nb-SiO_2 , όπου η κλίση των δειγμάτων των τριών ομάδων είναι διαφορετική. Στα ensimatic παραμένει κυρίως οριζόντια, στα ensialic είναι οριζόντια για $\text{SiO}_2=45-65$ και για $\text{SiO}_2 \geq 65$ η κλίση γίνεται μεγαλύτερη στο La-SiO_2 ή παραμένει οριζόντια στο Nb-SiO_2 , όμως με τάση υψηλότερων τιμών Nb των ensialic από τα ensimatic. Τα ενεργά περιθώρια μπορούν να έχουν πολύ υψηλότερες τιμές La, Nb από τα νησιωτικά τόξα. Τα περισσότερα δείγματα και από τα τρία γεωτεκτονικά περιβάλλοντα μοιράζονται κοινό εύρος τιμών στον γ και χ άξονα. Παρατηρήθηκε βέβαια ότι τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια στα περισσότερα διαγράμματα τείνουν να παρουσιάζουν ταυτόχρονα και υψηλότερες τιμές στον γ άξονα από τα νησιωτικά τόξα, ενώ τα ensimatic και χαμηλότερες τιμές στον γ άξονα από τα άλλα δύο γεωτεκτονικά περιβάλλοντα. Τα ensialic πάντα είναι ενδιάμεσα από τις άλλες δύο ομάδες και δεν ξεχωρίζουν.

Στα διαγράμματα με MgO στον χ άξονα κύριων στοιχείων (Σχ.4.4.1.2.1) εξάγονται τα ίδια συμπεράσματα με τα διαγράμματα Harker κύριων στοιχείων.

Στα διαγράμματα Harker ιχνοστοιχείων (Σχ. 4.4.1.3.1) πάλι δεν βρέθηκε γενικό γεωχημικό χαρακτηριστικό που να ξεχωρίζει την μία ομάδα από την άλλη. Τα περισσότερα δείγματα και από τα τρία γεωτεκτονικά περιβάλλοντα μοιράζονται κοινό εύρος τιμών στον γ και χ άξονα. Στην πλειοψηφία των διαγραμμάτων τα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια παρουσιάζουν ταυτόχρονα και υψηλότερες τιμές στον γ άξονα από τα νησιωτικά τόξα. Αυτό αλλάζει στα Co-SiO_2 , Cr-SiO_2 , Cu-SiO_2 , Ni-SiO_2 , Sc-SiO_2 , Zn-SiO_2 , V-SiO_2 , Ga-SiO_2 , όπου τα ensimatic παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές γ άξονα από τις άλλες δύο ομάδες. Παρατηρήθηκαν τοπικές διαφοροποιήσεις στα εξής διαγράμματα:

- 1) Ba-SiO_2 : Για $\text{SiO}_2 > 60$, τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές Ba από τα ensimatic τόξα, όμως δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα ενεργά περιθώρια.
- 2) Ce-SiO_2 : Για $\text{SiO}_2 > 65$, τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές Ce από τα ensimatic τόξα, όμως δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα ενεργά περιθώρια.
- 3) Cs-SiO_2 : Για $\text{SiO}_2 > 67$, τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές Cs από τα ensimatic τόξα, όμως δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα ενεργά περιθώρια.
- 4) La-SiO_2 : Για $\text{SiO}_2 > 65$, τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές La από τα ensimatic τόξα, όμως δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα ενεργά περιθώρια.
- 5) Pb-SiO_2 : Για $\text{SiO}_2 > 67$, τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές Pb από τα ensimatic τόξα, όμως δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα ενεργά περιθώρια.
- 6) Rb-SiO_2 : Για $\text{SiO}_2 > 67$, τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές Rb από τα ensimatic τόξα, όμως δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα ενεργά περιθώρια.

7) Th-SiO₂: Για SiO₂ > 65, τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές Th από τα ensimatic τόξα, όμως δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα ενεργά περιθώρια.

8) U-SiO₂: Για SiO₂ > 65, τα ensialic τόξα έχουν υψηλότερες τιμές U από τα ensimatic τόξα, όμως δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα ενεργά περιθώρια.

Στα διαγράμματα με MgO στον χ άξονα ιχνοστοιχείων (Σχ. 4.4.1.4.1) δεν βρέθηκε γενικό γεωχημικό χαρακτηριστικό που να ξεχωρίζει την μία ομάδα από την άλλη. Τα περισσότερα δείγματα και από τα τρία γεωτεκτονικά περιβάλλοντα μοιράζονται κοινό εύρος τιμών στον γ και χ άξονα. Στην πλειοψηφία των διαγραμμάτων τα ενεργά περιθώρια για MgO ≤ 11 παρουσιάζουν ταυτόχρονα και μεγαλύτερες τιμές του γ άξονα από τα νησιώτικα τόξα. Αυτό αλλάζει στα Co-MgO, Cr-MgO, Cu-MgO, Ni-MgO, Sc-MgO, Zn-MgO, όπου τις ταυτόχρονες υψηλότερες τιμές τις παρουσιάζουν τα ensimatic από τις ενδιάμεσες ως τις υψηλότερες τιμές MgO. Στο Ga-MgO δεν διαχωρίζονται καθόλου οι ομάδες μεταξύ τους, ενώ στο V-MgO τις ταυτόχρονες υψηλότερες τιμές τις παρουσιάζουν μαζί τα ensimatic και ensialic τόξα. Στο Y-MgO τις ταυτόχρονες υψηλότερες τιμές τις παρουσιάζουν τα ensialic. Σε όλα τα διαγράμματα τα ενεργά περιθώρια σταματάνε να είναι εμπλουτισμένα στο ιχνοστοιχείο του γ άξονα για MgO > 11, ενώ το ίδιο συμβαίνει για τα ensialic τόξα για MgO > 16, εκτός από τα διαγράμματα Cu-MgO, Ga-MgO, Zn-MgO, όπου αυτό ισχύει για MgO > 10. Τα ensimatic τόξα συνεχίζουν να παρουσιάζουν τιμές του ιχνοστοιχείου του γ άξονα για όλο το εύρος τιμών MgO του κάθε διαγράμματος.

Στα διαγράμματα συνδυασμών λόγων ιχνοστοιχείων ως προς λόγους ιχνοστοιχείων ή οξειδίων κύριων (Σχ. 4.4.1.5.1 έως 4.4.1.5.18) στοιχείων, σε όλα τα διαγράμματα τα 2 είδη νησιώτικων τόξων και τα ενεργά περιθώρια έχουν πάντα μία κοινή περιοχή τιμών στον άξονα γ και χ. Τα συμπεράσματα εξάγονται με βάση την τάση της πλειοψηφίας των δειγμάτων της κάθε ομάδας. Στα διαγράμματα La/Lu-SiO₂ (Σχ. 4.4.1.5.4), La/Sm-SiO₂ (Σχ. 4.4.1.5.5), La/Yb-SiO₂ (Σχ. 4.4.1.5.8) βρέθηκε ότι η κλίση των σπανίων γαιών για τα τρία γεωτεκτονικά διαγράμματα είναι διαφορετική. Στα ensimatic παραμένει κυρίως οριζόντια, στα ensialic είναι οριζόντια για SiO₂ = 45-65 και για SiO₂ ≥ 65 η κλίση γίνεται μεγαλύτερη. Τα ενεργά περιθώρια μπορούν να έχουν πολύ υψηλότερο λόγο La/Lu, La/Sm, La/Yb από τα νησιώτικα τόξα. Πέρα από αυτό το γενικό γεωχημικό χαρακτηριστικό παρατηρήθηκαν τοπικές διαφοροποιήσεις στα εξής διαγράμματα:

- 1) Ba/Th-MgO και Ba/Th-SiO₂ (Σχ. 4.4.1.5.1): Τείνει να υπάρχει μια διαβάθμιση, όπου τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν τις χαμηλότερες τιμές Ba/Th, τα ensimatic τις υψηλότερες, ενώ τα ensialic τις μεσαίες.
- 2) Ba-K₂O (Σχ. 4.4.1.5.3): Τα 2 είδη νησιώτικων τόξων δεν μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους, όμως τα ενεργά περιθώρια φαίνεται να μπορούν να έχουν μεγαλύτερες τιμές Ba και K₂O.
- 3) La/Sm-MgO (Σχ. 4.4.1.5.4), La/Yb-Yb (Σχ. 4.4.1.5.8): Τα δύο είδη νησιώτικων τόξων δεν μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους, όμως τα ενεργά περιθώρια τείνουν να έχουν και πολύ μεγαλύτερες τιμές La/Sm, La/Yb και σταματούν νωρίτερα να έχουν τιμές MgO, Yb, από τα νησιώτικα τόξα.
- 4) La/Tb-La (Σχ. 4.4.1.5.5), La/Yb-La (Σχ. 4.4.1.5.6): Τα δύο είδη νησιώτικων τόξων δεν μπορούν να διαχωριστούν μεταξύ τους. Τα ενεργά περιθώρια μπορούν να

έχουν μεγαλύτερες τιμές του λόγου και μεγαλύτερο εμπλουτισμό σε La, από τα νησιώτικα τόξα.

- 5) Nb/Ta-Th/La (Σχ. 4.4.1.5.10): Τα ensimatic και ensialic έχουν διαφορετική τάση του Nb/Ta ως προς το Th/La. Στα πρώτα το Nb/Ta αυξάνεται με την αύξηση του Th/La, ενώ στα δεύτερα το Nb/Ta μειώνεται με την αύξηση του Th/La. Στα ενεργά περιθώρια το Nb/Ta μειώνεται με την αύξηση του Th/La. Επιπλέον είναι τα μόνα που παρουσιάζουν $Th/La > 0.11$.
- 6) Sr-Rb (Σχ. 4.4.1.5.12), Zr-Rb (Σχ. 4.4.1.5.13): Τα ensimatic τόξα παραμένουν συγκεντρωμένα στις περιοχές των διαγραμμάτων $Sr=0-1000$, $Rb=0-60$, $Zr=0-200$, $Rb=0-60$ αντίστοιχα, ενώ τα ensialic τόξα έχουν και υψηλότερες τιμές Rb. Τα ενεργά περιθώρια μπορούν να έχουν υψηλότερες τιμές Sr, Zr, Rb από τα νησιωτικά τόξα. Τα ensialic δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα ενεργά περιθώρια.
- 7) Th/La-SiO₂ (Σχ. 4.4.1.5.14): Παρατηρείται ότι τα ensimatic έχουν τις χαμηλότερες τιμές Th/La, τα ενεργά περιθώρια τις υψηλότερες, ενώ τα ensialic βρίσκονται στην μέση των δύο χωρίς να μπορούν να διαχωριστούν.
- 8) Th/Yb-Ta/Yb (Σχ. 4.4.1.5.15), Zr/TiO₂-Nb/Y (Σχ. 4.4.1.5.16): Και στα δύο διαγράμματα τα δύο είδη νησιωτικών τόξων δεν ξεχωρίζουν μεταξύ τους. Τα ενεργά περιθώρια μπορούν να παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερες τιμές των δύο λόγων του κάθε διαγράμματος αντίστοιχα.
- 9) Y-Zr (Σχ. 4.4.1.5.17): Οι τρεις ομάδες δεν μπορούν να διαχωριστούν ως προς το Y. Ως προς το Zr τα ενεργά περιθώρια μπορούν να έχουν πολύ μεγαλύτερες τιμές από τα νησιώτικα τόξα, τα ensimatic έχουν τις μικρότερες τιμές Zr και τα ensialic είναι στην μέση των δύο.
- 10) Yb-Th (Σχ. 4.4.1.5.18): Οι τρεις ομάδες δεν μπορούν να διαχωριστούν ως προς το Yb. Ως προς το Th τα νησιώτικα τόξα έχουν πολύ χαμηλές τιμές, με τα ensialic να μπορούν να έχουν και μεγαλύτερες τιμές από τα ensimatic. Τα ενεργά περιθώρια έχουν πολύ μεγαλύτερες τιμές Th από τα νησιωτικά τόξα.

Στα διαγράμματα σπανίων γαιών:

1) Διαγράμματα σπανίων γαιών ανηγμένων σύμφωνα με Sun & Macdonough (1989)

(Σχ. 4.4.2.1 έως Σχ. 4.4.2.7): Τα τρία γεωτεκτονικά περιβάλλοντα έχουν πάντα μία κοινή ζώνη εύρους τιμών σπανίων γαιών (η καφέ ζώνη στα διαγράμματα). Παρατηρήθηκε ότι και οι 3 ομάδες στην πλειοψηφία των διαγραμμάτων είναι περισσότερο εμπλουτισμένες στις ελαφριές σπάνιες γαίες (La-Gd) από ότι στις βαριές σπάνιες γαίες (Gd-Lu). Τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο εμπλουτισμό στις ελαφριές σπάνιες γαίες και τις περισσότερες φορές τον μικρότερο εμπλουτισμό στις βαριές σε σχέση με τα νησιώτικα τόξα. Τα ensialic τόξα σχεδόν σε όλα τα εύρη SiO₂ παρουσιάζουν μεγαλύτερο εμπλουτισμό στις βαριές σπάνιες γαίες από τις άλλες δύο ομάδες. Για SiO₂ > 55 και οι 3 ομάδες είχαν δείγματα κυρίως με αρνητική και κάποιες φορές με θετική ανωμαλία Eu. Όμως δεν θεωρείται χαρακτηριστική, διότι δεν είναι χαρακτηριστικό που παρουσιάζει η πλειοψηφία των δειγμάτων.

2) Διαγράμματα πρωταρχικού μανδύα σύμφωνα με McDonough et al (1992) (Σχ. 4.4.2.8 έως Σχ. 4.4.2.14): Τα τρία γεωτεκτονικά περιβάλλοντα έχουν πάντα μία κοινή

ζώνη εύρους τιμών σπανίων γαιών (καφέ ζώνη στα διαγράμματα). Τα ensimatic τόξα παρουσιάζουν σε όλα τα διαγράμματα θετική ανωμαλία K, Pb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb και σχεδόν σε όλα θετική ανωμαλία La, Ba και αρνητική ανωμαλία Th, Ce, Ti. Τα ensialic τόξα παρουσιάζουν σε όλα τα διαγράμματα θετική ανωμαλία Pb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb και σχεδόν σε όλα θετική ανωμαλία K, La και αρνητική ανωμαλία Ce, Ti, Th. Σε λίγα διαγράμματα παρουσιάζουν θετική ανωμαλία Ba, Tb, Rb, Zr και αρνητική ανωμαλία U, Sr, Hf. Τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν σε όλα τα διαγράμματα θετική ανωμαλία Pb και αρνητική ανωμαλία Ta, Nb. Σχεδόν σε όλα τα διαγράμματα παρουσιάζουν θετική ανωμαλία La, Tb και αρνητική ανωμαλία Ce, Ti. Σε ένα διάγραμμα παρουσίασαν θετική ανωμαλία Rb, K και αρνητική ανωμαλία Ba, Sr. Διαφορές: 1) η θετική ανωμαλία Ba παρατηρείται σε λιγότερα εύρη SiO_2 στα ensialic από τα ensimatic τόξα και δεν υπάρχει καθόλου στα ενεργά περιθώρια. 2) το ίδιο με την ανωμαλία Ba συμβαίνει με την αρνητική ανωμαλία Th. 3) η θετική ανωμαλία K υπάρχει σε περισσότερα εύρη SiO_2 από τα ensialic σε σχέση με τα ensimatic και δεν υπάρχει καθόλου στα ενεργά περιθώρια. 4) Η αρνητική ανωμαλία Ti παρατηρείται στα περισσότερα εύρη SiO_2 των ενεργών περιθωρίων και των ensialic τόξων, ενώ υπάρχει πολύ λιγότερο στα ensimatic τόξα.

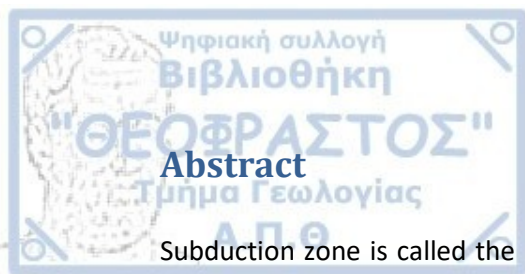
Πετροτεκτονικά διαγράμματα:

- 1) Διάγραμμα $\text{Zr/TiO}_2\text{-Nb/Y}$ (Pearce 1996) (Σχ. 4.4.3.1): Τα ensimatic, ensialic τόξα ανήκουν στην υποαλκαλική ομάδα και τα ηφαιστειακά πετρώματα των δειγμάτων τους είναι κυρίως βασικά, ενδιάμεσα, με μερικά δείγματα να φθάνουν στο όξινο στάδιο. Τα ενεργά περιθώρια είναι υποαλκαλικά ως αλκαλικά και τα ηφαιστειακά πετρώματα των δειγμάτων τους είναι βασικά ως όξινα.
- 2) Διάγραμμα $\text{K}_2\text{O-SiO}_2$ (Middlemost 1975) (Σχ. 4.4.3.2): Με βάση την τάση της πλειοψηφίας των δειγμάτων της κάθε ομάδας τα ensimatic τόξα ανήκουν στην υποαλκαλική, τα ensialic χαμηλά στην υποαλκαλική και ψηλά στην χαμηλού K υποαλκαλική ομάδα, ενώ τα ενεργά περιθώρια στην αλκαλική ομάδα.
- 3) $\text{K}_2\text{O-SiO}_2$ (Peccherillo&Taylor 1976) (Σχ. 4.4.3.3): Τα ensimatic τόξα ανήκουν στην ασβεσταλκαλική, θολεϊτική και σωσονιτική σειρά και λίγα δείγματα ανήκουν χαμηλά στην υψηλού K ασβεσταλκαλική. Στα ensialic τόξα η πλειοψηφία των δειγμάτων ανήκει στην ασβεσταλκαλική σειρά, με μερικά να ανήκουν χαμηλά στην υψηλού K ασβεσταλκαλική και την θολεϊτική. Είναι τα μόνα που δεν ανήκουν καθόλου στην σωσονιτική σειρά. Τα ενεργά περιθώρια ανήκουν κυρίως στην ασβεσταλκαλική και υψηλού K ασβεσταλκαλική σειρά, μερικά δείγματα ανήκουν στην σωσονιτική και πολύ λίγα δείγματα στην θολεϊτική ομάδα.
- 4) Διάγραμμα $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O-SiO}_2$ (LeBas 1986) (Σχ. 4.4.3.4): Τα ensimatic μπορούν να έχουν θολεϊτική, υποαλκαλική ηφαιστειότητα με πετρώματα βασικά έως όξινα, όπως επίσης και αλκαλική ηφαιστειότητα με πετρώματα πάλι βασικά έως όξινα. Τα ensialic τόξα έχουν θολεϊτική, υποαλκαλική ηφαιστειότητα με πετρώματα ενδιάμεσα έως όξινα. Είναι τα μόνα που δεν έχουν αλκαλική ηφαιστειότητα. Τα ενεργά περιθώρια μπορούν να έχουν θολεϊτική, υποαλκαλική ηφαιστειότητα με πετρώματα ενδιάμεσα έως όξινα. Επιπλέον μπορούν να έχουν αλκαλική ηφαιστειότητα με πετρώματα πάλι ενδιάμεσα έως όξινα.

6. Συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα που εξήχθησαν στην παρούσα εργασία είναι τα εξής: Σε όλα τα διαγράμματα τα ensimatic, ensialic, ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια μοιράζονται πάντα μια κοινή περιοχή εύρους τιμών γ , χ άξονα. Αυτό οφείλεται πιθανότατα στο ότι σε όλα τα τόξα υπάρχει μία ίδια πηγή μάγματος. Τα τρία συστήματα έχουν διαφορετική τάση ή κλίση σπανίων γαιών, όπως έδειξαν τα διαγράμματα La-SiO₂, Nb-SiO₂, La/Lu-SiO₂, La/Sm-SiO₂, La/Yb-SiO₂. Τα 3 είδη γεωτεκτονικών περιβαλλόντων στην πλειοψηφία των διαγραμμάτων σπανίων γαιών είναι περισσότερο εμπλουτισμένες στις ελαφριές σπάνιες γαίες (La-Gd) από ότι στις βαριές σπάνιες γαίες (Gd-Lu). Τα ενεργά περιθώρια παρουσιάζουν τον μεγαλύτερο εμπλουτισμό στις ελαφριές σπάνιες γαίες και τις περισσότερες φορές τον μικρότερο εμπλουτισμό στις βαριές σε σχέση με τα νησιώτικα τόξα. Τα ensialic τόξα σχεδόν σε όλα τα εύρη SiO₂ παρουσιάζουν μεγαλύτερο εμπλουτισμό στις βαριές σπάνιες γαίες από τις άλλες δύο ομάδες. Η θετική ανωμαλία Ba παρατηρείται σε λιγότερα εύρη SiO₂ στα ensialic από τα ensimatic τόξα και δεν υπάρχει καθόλου στα ενεργά περιθώρια, το ίδιο με την αρνητική ανωμαλία Th. Η θετική ανωμαλία K υπάρχει σε περισσότερα εύρη SiO₂ από τα ensialic σε σχέση με τα ensimatic και δεν υπάρχει καθόλου στα ενεργά περιθώρια. Η αρνητική ανωμαλία Ti παρατηρείται στα περισσότερα εύρη SiO₂ των ενεργών περιθωρίων και των ensialic τόξων, ενώ υπάρχει πολύ λιγότερο στα ensimatic τόξα. Τα ensialic τόξα είναι τα μόνα χωρίς αλκαλική ηφαιστειότητα και που δεν ανήκουν καθόλου στην σωσονιτική σειρά, αλλά κυρίως στην ασβεσταλκαλική.

Ζώνη υποβύθισης ονομάζεται το όριο μεταξύ δύο λιθοσφαιρικών πλακών, όπου μία πλάκα βυθίζεται κάτω από μία άλλη. Αναλόγως αν βυθίζεται ωκεάνια λιθόσφαιρα κάτω από ωκεάνια ή κάτω από ηπειρωτική, το σύστημα ονομάζεται νησιώτικο τόξο ή ενεργό ηπειρωτικό περιθώριο αντίστοιχα. Πρόσφατα η κατηγορία των νησιώτικων τόξων έχει αρχίσει να διαχωρίζεται από ορισμένους επιστήμονες σε ensimatic και ensialic. Τα πρώτα αντιστοιχούν στον κλασικό ορισμό του νησιώτικου τόξου, ενώ στα δεύτερα η ωκεάνια πλάκα βυθίζεται κάτω από ηπειρωτική λιθόσφαιρα, όπως στα ενεργά ηπειρωτικά περιθώρια. Σε αυτή την περίπτωση υπόκεινται ηπειρωτικός φλοιός κάτω από το σχηματιζόμενο νησιώτικο τόξο. Το τόξο χωρίζεται από την υπερκείμενη ενιαία ηπειρωτική πλάκα με μία θαλάσσια λεκάνη κάτω από την οποία υπόκεινται ωκεάνιος φλοιός, σε αντίθεση με τα ενεργά περιθώρια. Επομένως τεκτονικά υπάρχουν διαφορές μεταξύ ενός ensialic, ενός ενεργού περιθωρίου και ενός ensimatic τόξου. Ο στόχος της εργασίας αυτής είναι, κάνοντας σύγκριση των ηφαιστειακών πετρωμάτων μεταξύ των τριών γεωτεκτονικών περιβαλλόντων ensimatic, ensialic, ενεργών περιθωρίων, να απαντήσει στο ερώτημα εάν γεωχημικά υπάρχουν χαρακτηριστικά που να ξεχωρίζουν το ένα σύστημα από το άλλο. Στην εργασία γίνεται αρχικά η θεωρητική περιγραφή των νησιώτικων τόξων και στην συνέχεια των ensimatic, ensialic και των ενεργών περιθωρίων. Αναφέρονται τα χαρακτηριστικά που διαχωρίζουν τεκτονικά τα τρία συστήματα. Ύστερα περιγράφεται η διαδικασία της γένεσης μάγματος στα νησιώτικα τόξα και τα ενεργά περιθώρια. Επακολούθως αναφέρεται ο βιβλιογραφικός τρόπος επιλογής των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία και περιγράφονται σύντομα τα τόξα προέλευσής τους. Τέλος έγιναν διαγράμματα Harker με SiO_2 και MgO στον χ άξονα κύριων στοιχείων και ιχνοστοιχείων, διαγράμματα συνδυασμών λόγων ιχνοστοιχείων ως προς λόγους ιχνοστοιχείων και οξειδίων κύριων στοιχείων, διαγράμματα σπανίων γαιών, αραχνογράμματα πρωταρχικού μανδύα και ορισμένα πετροτεκτονικά διαγράμματα. Σε ορισμένα διαγράμματα είναι εμφανείς οι διαφορές μεταξύ των ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων και των ensimatic νησιώτικων τόξων. Αντίθετα τα ensialic νησιώτικα τόξα βρίσκονται γεωχημικά συνήθως μεταξύ των ενεργών ηπειρωτικών περιθωρίων και των ensimatic νησιώτικων τόξων και δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές με τα πρώτα και τα δεύτερα. Διαγράμματα που διακρίνουν τα 3 είδη τόξων είναι τα La-SiO_2 , Nb-SiO_2 , La/Lu-SiO_2 , La/Sm-SiO_2 , La/Yb-SiO_2 , τα διαγράμματα σπανίων γαιών και πρωταρχικού μανδύα και ορισμένα πετροτεκτονικά διαγράμματα.



Abstract

Subduction zone is called the boundary between two lithospheric plates, where an oceanic plate subducts beneath the other. Depending on whether the oceanic plate subducts beneath an oceanic or a continental plate, the system is called island arc or active continental margin respectively. Recently the term "island arc" has been divided in "ensimatic" and "ensialic" island arcs. Ensimatic arc corresponds to the classic definition of island arc, while the ensialic arc is a system where oceanic lithosphere subducts beneath continental lithosphere, just like in an active continental margin, and an island arc underlain by continental crust is formed. Also, in contrast to an active continental margin, between the continent and the arc there is a marine basin underlain by oceanic crust. Therefore, there are tectonic differences among an ensialic, an active continental margin and an ensimatic island arc. The aim of this thesis is to compare volcanic rocks, of the three above mentioned systems, from the geochemical point of view, in order to distinguish one type of arc from the others. At the beginning island arcs (both ensimatic and ensialic) and active continental margins are described. After that the tectonic characteristics distinguishing the three systems are mentioned. That is followed by the description of the process of magma genesis in island arcs and in active continental margins. Representative samples of each arc were selected and used in the thesis. A brief description of the arcs is given. Major and trace element Harker diagrams vs. SiO_2 and MgO , as well as plots of trace element ratios vs. trace element ratios and major element oxides, REE and spider diagrams and some petroctectonic diagrams were prepared. The most important conclusions, from all the above comparisons are: In all the diagrams the three systems share a common area of range values in the y and x axis. This is due, probably, to a common magma source. Additionally the three systems show different trends in the La-SiO_2 , Nb-SiO_2 , La/Lu-SiO_2 , La/Sm-SiO_2 , La/Yb-SiO_2 diagrams. The three groups, in the majority of the diagrams, are LREE enriched relative to HREE. The active continental margins are the most enriched in LREE and mostly the less HREE enriched. The ensialic arcs, are mostly HREE enriched compared to the other two groups. The Ba positive anomaly and the Th negative anomaly are observed more frequently in ensimatic arcs relative to the ensialic arcs and are not observed in active continental margins. The K positive anomaly exists more frequently in ensialic compared to ensimatic arcs and doesn't exist in active continental margins. The Ti negative anomaly is observed more frequently in active continental margins and in ensialic compared to ensimatic arcs. Ensialic arcs are the only not showing alkalic affinities and not belonging at all in the shosontitic series but mostly in the calc-alkaline series.

- Almееv R.R., Kimura J.I., Ariskin A.A., Ozerov A.Y., Decoding crystal fractionation in calc-alkaline magmas from the Bezymianny Volcano (Kamchatka, Russia) using mineral and bulk rock compositions, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2013), **263**, p. 141–171, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.01.003>
- Arakawa Y., Endo D., Oshika J., Shinmura T., Ikehata K., High-silica rhyolites of Niiijima volcano in the northern Izu–Bonin arc, Japan: Petrological and geochemical constraints on magma generation and supply, *Lithos* 330–331 (2019) 223–237, <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2019.02.014>
- Bailey J.C., Jensen E.S., Hansen A., Kann A.D.J., Kann K., Formation of heterogeneous magmatic series beneath North Santorini, South Aegean island arc, *Lithos* (2009), **110**, p. 20–36
- Beaumais A., Bertrand H., Chazot G., Dosso L., Robin C., Temporal magma source changes at Gaua volcano, Vanuatu island arc, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2016.02.026>
- Bloomer S.H., Stern R.J., Smoot N.C., Physical Volcanology of the submarine Mariana and Volcano Arcs, *Bulletin of Volcanology* (1989), **51**, p. 210–224
- Brown G.M., Holland J.G., Sigurdsson H., Tomblin J.F., Arculus R.J., Geochemistry of the Lesser Antilles volcanic island arc, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (1977), Vol. 41, p. 785–801
- Bryant J.A., Yogodzinski G.M., Hall M.L., Lewicki J.L., Bailey D.G., Geochemical Constraints on the Origin of Volcanic Rocks from the Andean Northern Volcanic Zone, Ecuador, *Journal of Petrology* (2006), Vol. 47, **6**, p. 1147–1175, doi: 10.1093/petrology/egl006
- Caulfield J.T., Turner S.P., Smith I.E.M., Cooper L.B., Jenner G.A., Magma Evolution in the Primitive, Intra-oceanic Tonga Arc: Petrogenesis of Basaltic Andesites at Tofua Volcano, *Journal of Petrology* (2012), Vol. 53, **6**, p. 1197–1230, doi: 10.1093/petrology/egs013
- Chandrasekharam D., Santo A.P., Capaccioni B., Vaselli O., Alam M.A., Manetti P., Tassi F., Volcanological and petrological evolution of Barren Island (Andaman Sea, Indian Ocean), *Journal of Asian Earth Sciences* (2009), **35**, p. 469–487, doi: 10.1016/j.jseaes.2009.02.010
- Chan .F., Tepper J.H., Nelson B.K., Petrology of the Grays River volcanics, southwest Washington: Plume-influenced slab window magmatism in the Cascadia forearc, *GSA Bulletin* (2012), Vol. 124, **7/8**, p. 1324–1338, doi: 10.1130/B30576.1
- Chiaradia M., Merino D., Spikings R., Rapid transition to long-lived deep crustal magmatic maturation and the formation of giant porphyry-related mineralization (Yanacocha, Peru), *Earth and Planetary Science Letters* (2009), **288**, p. 505–515
- Chiaradia M., Müntener O., Beate B., Enriched Basaltic Andesites from Mid-crustal Fractional Crystallization, Recharge, and Assimilation (Pilavo Volcano, Western Cordillera of Ecuador), *Journal of Petrology* (2011), Vol. 52, **6**, p. 1107–1141, doi: 10.1093/petrology/egr020
- Churikova T., Dorendorf F., Wörner G., Sources and Fluids in the Mantle Wedge below Kamchatka, Evidence from Across-arc Geochemical Variation, *Journal of Petrology* (2001), Vol. 42, **8**, p. 1567–1593
- Clark S.K., Reagan M.K., Plank T., Trace element and U-series systematics for 1963–1965 tephras from Irazú Volcano, Costa Rica: Implications for magma generation processes and transit times, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (1998), Vol. 62, **15**, p. 2689–2699

- Coats R.R., Magma Type and Crustal Structure in the Aleutian Arc, The Crust of the Pacific Basin (1962) Geophysical monograph Series, Vol.6, doi: <https://doi.org/10.1029/GM006p0092>
- Creixell C., Parada M.A., Morata D., Roperch P., Arriagada C., The genetic relationship between mafic dike swarms and plutonic reservoirs in the mesozoic of central chile (30_–33_450S):insights from AMS and geochemistry, *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)* (2009), 98:177–201, doi: 10.1007/s00531-007-0240-9
- De Grave J., Zhimulev F.I., Glorie S., Kuznetsov G.V., Evans N., Vanhaecke F., McInnes B., Late Palaeogene emplacement and late Neogene-Quaternary exhumation of the Kuril island-arc root (Kunashir island) constrained by multi-method thermochronometry, *Geoscience Frontiers* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2015.05.002>
- Di Piazza A., Rizzo A.L., Barberi F., Carapezza M.L., De Astis G., Romano C., Sortino F., Geochemistry of the mantle source and magma feeding system beneath Turrialba volcano, Costa Rica, *Lithos* (2015), **232**, p. 319–335
- DuFrane S.A., Turner S., Dosseto A., Soest M., Reappraisal of fluid and sediment contributions to Lesser Antilles magmas, *Chemical Geology* (2009), **265**, p. 272–278
- Duggen S., Portnyagin M., Baker J., Ulfbeck D., Hoernle K., Garbe-Schönberg D., Grassineau N., Drastic shift in lava geochemistry in the volcanic-front to rear-arc region of the Southern Kamchatkan subduction zone: Evidence for the transition from slab surface dehydration to sediment melting, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2007), **71**, p. 452–480, doi: 10.1016/j.gca.2006.09.018
- Elliott T., Plank T., Zindler A., White W., Bourdon B., Element transport from slab to volcanic front at the Mariana arc, *Journal of Geophysical research* (1997), Vol. 102, 14,991, 15019
- Ewart A., Brothers R.N., Mateen A., An Outline of the Geology and Geochemistry, and the possible Petrogenetic Evolution of the Volcanic rocks of the Tonga-Kermadec –New Zealand Island Arc, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (1977), **2**, p. 205-250
- Ewart A., Bryan W.B., Petrography and Geochemistry of the Igneous Rocks from Eua, Tongan Islands, *Geological Society of America Bulletin* (1972), Vol. 83, p. 3281-3298
- Fedorov P.I., Bogomolov E.S., Ultrapotassic Volcanism of the Valagin Ridge, Kamchatka, *Petrology* (2018), Vol. 26, **1**, p. 65–81, doi: 10.1134/S0869591118010034
- Feeley T., Davidson J.P., Petrology of Calc-Alkaline Lavas at Volcan Ollagüe and the Origin of Compositional Diversity at Central Andean Stratovolcanoes, *Journal of Petrology* (1994), Vol. 35, **5**, p. 1295-1340
- Fiorentini M.L., Garwin S.L., Evidence of a mantle contribution in the genesis of magmatic rocks from the Neogene Batu Hijau district in the Sunda Arc, South Western Sumbawa, Indonesia, *Contrib Mineral Petrol* (2010), **159**, p. 819–837, doi: 10.1007/s00410-009-0457-7
- Firth C.W., Cronin S.J., Turner S.P., Handley H.K., Gaidry C., Smith I., Dynamics and pre-eruptive conditions of catastrophic, ignimbrite-producing eruptions from the Yenkahe Caldera, Vanuatu, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2015), **308**, p. 39–60, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.10.012>
- Firth C., Handley H., Turner S., Cronin S., Smith I., Variable Conditions of Magma Storage and Differentiation with Links to Eruption Style at Ambrym Volcano, Vanuatu, *Journal of Petrology* (2016), Vol. 0, **0**, p. 1-24, doi: 10.1093/petrology/egw029
- Frisch W., Meschede M., Blakey R., Plate tectonics: Continental drift and mountain building, Springer (2011), p. 212

- Fytikas M., Manetti P., Mazzuoli R., Peccerillo A., Villari L., Tertiary to Quaternary evolution of volcanism in the Aegean region, Geological Society, London, Special Publications (1984), Vol. 17, p. 687-699, doi: 10.1144/GSL.SP.1984.017.01.55
- Garrison J.M., Davidson J.P., Hall M., Mothes P., Geochemistry and Petrology of the Most Recent Deposits from Cotopaxi Volcano, Northern Volcanic Zone, Ecuador, Journal of Petrology (2011), Vol 52, **9**, p. 1641-1678, doi: 10.1093/petrology/egr023
- Gill J., Whelan P., Postsubduction Ocean Island Alkali Basalts in Fiji, Journal of Geophysical Research (1989), Vol. 94, **B4**, p. 4579-4588
- Handley H.K., Davidson J.P., Macpherson C.G., Stimac J.A., Untangling differentiation in arc lavas: Constraints from unusual minor and trace element variations at Salak Volcano, Indonesia, Chemical Geology 255 (2008) 360–376, doi:10.1016/j.chemgeo.2008.07.007
- Handley H.K., Macpherson C.G., Davidson J.P., Geochemical and Sr–O isotopic constraints on magmatic differentiation at Gede Volcanic Complex, West Java, Indonesia, Contrib Mineral Petrol (2010), **159**, p. 885–908, doi: 10.1007/s00410-009-0460-z
- Handley H.K., Turner S., Macpherson C.G., Gertisser R., Davidson J.P., Hf–Nd isotope and trace element constraints on subduction inputs at island arcs: Limitations of Hf anomalies as sediment input indicators, Earth and Planetary Science Letters (2011), **304**, p. 212–223, doi: 10.1016/j.epsl.2011.01.034
- Harris R., Rise and fall of the Eastern Great Indonesian arc recorded by the assembly, dispersion and accretion of the Banda Terrane, Timor, Gondwana Research (2006), **10**, p. 207–231, doi: 10.1016/j.gr.2006.05.010
- Hergt J.M., Hawkesworth C.J., 28 Pb-, Sr-, and Nd- Isotopic Evolution of the Lau Basin: Implications for Mantle Dynamics during Backarc opening, Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results (1994), Vol. 135
- Hernando I.R., Aragón E., Frei R., González P.D., Spakman W., Constraints on the Origin and Evolution of Magmas in the Payún Matrú Volcanic Field, Quaternary Andean Back arc of Western Argentina, Journal of Petrology (2014), Vol. 55, **1**, p. 209-239, doi: 10.1093/petrology/egt066
- Herrington R.J., Scotney P.M., Roberts S., Boyce A.J., Harrison D., Temporal association of arc–continent collision, progressive magma contamination in arc volcanism and formation of gold-rich massive sulphide deposits on Wetar Island (Banda arc), Gondwana Research (2011), **19**, p. 583–593, doi: 10.1016/j.gr.2010.10.011
- Haschke M., Siebel W., Günther A., Scheuber E., Repeated crustal thickening and recycling during the Andean orogeny in north Chile (21°–26°S), Journal of Geophysical Research (2002), Vol. 107, **B1**, 2019, doi: 10.1029/2001JB00032
- Hastie A.R., Kerr A.C., Pearce J.A., Mitchell S.F., Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks using Immobile Trace Elements: Development of the Th/Co Discrimination Diagram, Journal of Petrology (2007), Vol. 48, **12**, p. 2341-2357, doi: 10.1093/petrology/egm062
- Heydolph K., Hoernle K., Hauff F., Bogaard P., Portnyagin M., Bindeman I., Garbe-Schönberg D., Along and across arc geochemical variations in NW Central America: Evidence for involvement of lithospheric pyroxenite, Geochimica et Cosmochimica Acta (2012), **84**, p. 459–491, doi: 10.1016/j.gca.2012.01.035
- Hickey-Vargas, R., Sun, M., Holbik, S., Geochemistry of basalts from small eruptive centers near Villarrica stratovolcano, Chile: Evidence for lithospheric mantle components in continental

- arc magmas, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2016.03.033>
- Hidalgo S., Gerbe M.C., Martin H., Samaniego P., Bourdon E., Role of crustal and slab components in the Northern Volcanic Zone of the Andes (Ecuador) constrained by Sr–Nd–O isotopes, *Lithos* 132–133 (2012) 180–192, doi:10.1016/j.lithos.2011.11.019
- Hoang N., Itoh J., Miyagi I., Subduction components in Pleistocene to recent Kurile arc magmas in NE Hokkaido, Japan, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2011), **200**, p. 255–266, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2011.01.002
- Hoang N., Miyagi I., Itoh J., Miocene–Pleistocene magmas in the Monbetsu area, Northeast Hokkaido, tap N-MORB-like sources contaminated by slab-derived fluids, *Journal of Geodynamics* (2015), **86**, p. 10–25, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2015.02.004>
- Holm, Paul M., Søger, Nina, Alfastsen, Mads, Bertotto, Gustavo W., Subduction Zone Mantle Enrichment by Fluids and Zr–Hf-depleted Crustal Melts as Indicated by Backarc Basalts of the Southern Volcanic Zone, Argentina, *Lithos* (2016), doi: 10.1016/j.lithos.2016.06.029
- Holm P.M., Søger N., Dyhr C.T., Nielsen M.R., Enrichments of the mantle sources beneath the Southern Volcanic Zone (Andes) by fluids and melts derived from abraded upper continental crust, *Contrib Mineral Petrol* (2014) 167:1004, doi: 10.1007/s00410-014-1004-8
- Ishikawa T., Tera F., Source, composition and distribution of the fluid in the Kurile mantle wedge: Constraints from across-arc variations of Br/Nb and B isotopes, *Earth and Planetary Science Letters* (1997), **152**, p. 123–138
- Ishizuka O., Taylor R.N., Yuasa M., Ohara Y., Making and breaking an island arc: A new perspective from the Oligocene Kyushu–Palau arc, Philippine Sea, *Geochem. Geophys. Geosyst.* (2011), Vol. 12, **5**, Q05005, ISSN: 1525-2027, doi: 10.1029/2010GC003440
- Jicha B.R., Singer B.S., Brophy J.G., Fournelle J.H., Johnson C.M., Beard B.L., Lapen T.J., Mahlen N.J., Variable Impact of the Subducted Slab on Aleutian Island Arc Magma Sources: Evidence from Sr, Nd, Pb, and Hf Isotopes and Trace Element Abundances, *Journal of Petrology* (2004), Vol. 45, **9**, p. 1845–1875, doi: 10.1093/petrology/egh036
- Kepezhinskas P., McDermott F., Defant M.J., Hochstaedter A., Drummond M.S., Hawkesworth C.J., Koloskov A., Maury R.C., Bellon H., Trace element and Sr–Nd–Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (1997), Vol. 61, **3**, p. 577–600
- Kuritani T., Yokoyama T., Nakamura E., Generation of Rear-arc Magmas Induced by Influx of Slab-derived Supercritical Liquids: Implications from Alkali Basalt Lavas from Rishiri Volcano, Kurile Arc, *Journal of Petrology* (2008), Vol. 49, **7**, p. 1319–1342, doi: 10.1093/petrology/egn027
- Labanieh S., Chauvel C., Germa A., Quidelleur X., Martinique: a Clear Case for Sediment Melting and Slab Dehydration as a Function of Distance to the Trench, *Journal of Petrology* (2012), Vol. 53, **12**, p. 2441–2464, doi: 10.1093/petrology/egs055
- Le Bas M.J., Le Maitre R.W., Streckeisen A., Zanettin B. (1986) A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *J Petrology* 27: 745–750
- Lebtí P.P., Thouret J.C., Wörner G., Fornari M., Neogene and Quaternary ignimbrites in the area of Arequipa, Southern Peru: Stratigraphical and petrological correlations, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2006), **154**, p. 251–275

- Lee H.Y., Chung S.L., Yang H.M., Late Cenozoic volcanism in central Myanmar: Geochemical characteristics and geodynamic significance, *Lithos* (2016), **245**, p. 174–190
- Leeman W.P., Smith D.R., Hildreth W., Palacz Z., Rogers N., Compositional Diversity of Late Cenozoic Basalts in a Transect Across the Southern Washington Cascades: Implications for Subduction zone Magmatism, *Journal of Geophysical Research* (1990), Vol. 95, **B12**, p. 19.561-19582
- Leslie R.A.J., Danyushevsky L.V., Crawford A.J., Verbeeten A.C., Primitive shoshonites from Fiji: Geochemistry and source components, *Geochem. Geophys. Geosyst.* (2009), Vol. 10, **7**, Q07001, doi:10.1029/2008GC002326
- Macdonald R., Hawkesworth C.J., Heath E., The Lesser Antilles volcanic chain: a study in arc magmatism, *Earth-Science Reviews* (2000), **49**, p. 1–76
- McDonough, W.F., Sun, S.-S., Ringwood, A.E., Jagoutz, E. and Hofmann, A.W. (1992). Potassium, Rubidium and Cesium in the Earth and Moon and the evolution of the mantle of the Earth. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56: 1,001-1,012. doi: 10.1016/00167037(92)90043I
- Mahlburg Kay S., Kay R.W., Citron G.P., Tectonic Controls on Tholeiitic and Calc-Alkaline magmas in the Aleutian Arc, *Journal of Geophysical Research* (1982), Vol. 87, **B5**, p. 4051-4072
- Martynov A.Y., Kimura J.I., Martynov Y.A., Rybin A.Y., Geochemistry of late Cenozoic lavas on Kunashir Island, Kurile Arc, *Island Arc* (2010), **19**, p. 86–104, doi: 10.1111/j.1440-1738.2009.00684.x
- Middlemost, E., The Basalt Clan. *Earth-Science Reviews* (1975), **11**, p. 337-564. [http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252\(75\)90039-2](http://dx.doi.org/10.1016/0012-8252(75)90039-2)
- Mitchell E.C., Asmerom Y., U-series isotope systematic of mafic magmas from central Oregon : Implications for fluid involvement and melting processes in the Cascade arc, *Earth and Planetary Science Letters* (2011), **312**, p. 378–389, doi:10.1016/j.epsl.2011.09.060
- Mitropoulos P., Tarney J., Significance of mineral composition variations in the Aegean Island arc, *Journal of Volcanology and Geothermal research* (1992), **51**, p. 283-303
- Nyström J.O., Vergara M., Morata D., Levi B., Tertiary volcanism during extension in the Andean foothills of central Chile (338159–338459S), *GSA Bulletin* (2003), Vol. 115, **12**, p. 1523–1537
- Park S.I., Kwon S., Kim S.W., Evidence for the Jurassic arc volcanism of the Lolotoi complex, Timor: Tectonic implications, *Journal of Asian Earth Sciences* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.05.007>
- Pearce J.A. (1996) A User's Guide to Basalt Discrimination Diagrams. In Wyman D A. (ed) *Trace Element Geochemistry of Volcanic Rocks: Applications for Massive Sulphide Exploration*. Geological Association of Canada, Short Course Notes 12, pp 79-113
- Pearce J.A., Stern R.J., Bloomer S.H., Fryer P., Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: Implications for the nature and distribution of subduction components, *Geochem. Geophys. Geosyst.* (2005), Vol. 6, Q07006, doi:10.1029/2004GC000895
- Peate D.W., Pearce J.A., Hawkesworth C.J., Colley H., Edwards C.M.H., Hirose Kei, Geochemical Variations in Vanuatu Arc Lavas: the Role of Subducted Material and a Variable Mantle Wedge Composition, *Journal of Petrology* (1997), Vol. 38, **10**, p. 1331-1358
- Peccerillo A., Taylor S.R. (1976) Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contrib Mineral Petrol* 58: 63-81
- Pe-Piper G., Piper D.J.W., Koukouvelas I., Dolansky L.M., Kokkalas S., Postorogenic shoshonitic rocks and their origin by melting underplated basalts: The Miocene of Limnos, Greece, *Geological Society of America Bulletin* (2009), **121**, p. 1-2;39-54

- Petrinovic I.A., Riller U., Brod J.A., The Negra Muerta Volcanic Complex, southern Central Andes: geochemical characteristics and magmatic evolution of an episodically active volcanic centre, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2005), **140**, p. 295–320
- Quandt, D., Trumbull, R.B., Altenberger, U., Cardona, A., Romer, R.L., Bayona, G., Ducea, M., Valencia, V., Vásquez, M., Cortes, E., Guzman, G., The geochemistry and geochronology of Early Jurassic igneous rocks from the Sierra Nevada de Santa Marta, NW Colombia, and tectono-magmatic implications, *Journal of South American Earth Sciences* (2018), doi: 10.1016/j.jsames.2018.06.019
- Reagan M.K., Hanan B.B., Heizler M.T., Hartman B.S., Hickey-Vargas R., Petrogenesis of Volcanic Rocks from Saipan and Rota, Mariana Islands, and Implications for the Evolution of Nascent Island Arcs, *Journal of Petrology* (2008), Vol. 49, **3**, p. 441-464, doi:10.1093/petrology/egm087
- Reagan M.K., Ishizuka O., Stern R.J., Kelley K.A., Ohara Y., Blichert-Toft J., Bloomer S.H., Cash J., Fryer P., Hanan B.B., Hickey-Vargas R., Ishii T., Kimura J.I., Peate D.W., Rowe M.C., Woods M., Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu-Bonin-Mariana system, *Geochem. Geophys. Geosyst.* (2010), Vol. 11, **3**, Q03X12, ISSN: 1525-2027, doi:10.1029/2009GC002871
- Reynaud C., Jaillard É., Lapierre H., Mamberti M., Mascle G.H., Oceanic plateau and island arcs of southwestern Ecuador: their place in the geodynamic evolution of northwestern South America, *Tectonophysics* (1999), **307**, p. 235–254
- Rioux M., Mattinson J., Hacker B., Kelemen P., Blusztajn J., Hanghøj K., Gehrels G., Intermediate to felsic middle crust in the accreted Talkeetna arc, the Alaska Peninsula and Kodiak Island, Alaska: An analogue for low-velocity middle crust in modern arcs, *Tectonics* (2010), Vol. 29, TC3001, doi: 10.1029/2009TC002541
- Risse A., Trumbull R.B., Kay S.M., Coira B., Romer R.L., Multi-stage Evolution of Late Neogene Mantle-derived Magmas from the Central Andes Back-arc in the Southern Puna Plateau of Argentina, *Journal Of Petrology* (2013), Vol. 0, **0**, p. 1-33, doi: 10.1093/petrology/egt038
- Rollinson H.R., *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*, Pearson Prentice Hall (1993), p. 352
- Rowe M.C., Kent A.J.R., Nielsen R.L., Subduction Influence on Oxygen Fugacity and Trace and Volatile Elements in Basalts Across the Cascade Volcanic Arc, *Journal of Petrology* (2009), Vol. 50, **1**, p. 61-91, doi:10.1093/petrology/egn072
- Rudnick R.L., Fountain D.M., Nature and Composition of Continental Crust: A Lower Crustal Perspective, *Reviews of Geophysics* (1995), 95RG01302, p. 267-309
- Schmidt M.E., Grunder A.L., Deep Mafic Roots to Arc Volcanoes: Mafic Recharge and Differentiation of Basaltic Andesite at North Sister Volcano, Oregon Cascades, *Journal of Petrology* (2011), Vol. 52, **3**, p. 603-641, doi: 10.1093/petrology/egq094
- Schmidt M.E., Grunder A.L., Rowe M.C., Segmentation of the Cascade Arc as indicated by Sr and Nd isotopic variation among diverse primitive basalts, *Earth and Planetary Science Letters* 266 (2008) 166–181, doi:10.1016/j.epsl.2007.11.013
- Schnurr W.B.W., Trumbull R.B., Clavero J., Hahne K., Siebel W., Gardeveg M., Twenty-five million years of silicic volcanism in the southern central volcanic zone of the Andes: Geochemistry and magma genesis of ignimbrites from 25 to 27 °S, 67 to 72 °W, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2007), **166**, p. 17–46

- Schuth S., Rohrbach A., Münker C., Ballhaus C., Garbe-Schönberg D., Qopoto C., Geochemical constraints on the petrogenesis of arc picrites and basalts, New Georgia Group, Solomon Islands, *Contrib Mineral Petrol* (2004), **148**, p. 288–304, doi: 10.1007/s00410-004-0604-0
- Schuth S., Rohrbach A., Münker C., König S., Qopoto C., Basi S., Garbe-Schönberg D., Ballhaus C., Petrogenesis of Lavas along the Solomon Island Arc, SW Pacific: Coupling of Compositional Variations and Subduction Zone Geometry, *Journal of Petrology* (2009), V. 50, **5**, p. 781-811, doi: 10.1093/petrology/egp019
- Shinjo R., Geochemistry of high Mg andesites and the tectonic evolution of the Okinawa Trough–Ryukyu arc system, *Chemical Geology* (1999), **157**, p. 69–88
- Shinjo R., Kato Y., Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin, *Lithos* (2000), **54**, p. 117–137
- Shinjo R., Woodhead J.D., Hergt J.M., Geochemical Variation within the northern Ryukyu Arc: magma source compositions and geodynamic implications, *Contrib Mineral Petrol* (2000), **140**, p. 263-282
- Shu, Y., Nielsen, S.G., Zeng, Z., Shinjo, R., Blusztajn, J., Wang, X., Chen, S., Tracing subducted sediment inputs to the Ryukyu arc-Okinawa Trough system: Evidence from thallium isotopes, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2017.08.035>
- Silver E.A., Reed D., McCaffrey R., Joyodiwiryō Y., Back Arc Thrusting in the Eastern Sunda Arc, Indonesia: A Consequence of Arc-Continent Collision, *Journal of Geophysical Research* (1983), Vol. 88, **B9**, p. 7429-7448
- Simon A., Yogodzinski G.M., Robertson K., Smith E., Selyangin O., Kiryukhin A., Mulcahy S.R., Walker J.D., Evolution and genesis of volcanic rocks from Mutnovsky Volcano, Kamchatka, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2014), **286**, p. 116–137
- Sisson T.W., Salters V.J.M., Larson P.B., Petrogenesis of Mount Rainier andesite: Magma flux and geologic controls on the contrasting differentiation styles at stratovolcanoes of the southern Washington Cascades, *Geological Society of America Bulletin* (2014), Vol. 126, **1/2**, p. 122-144, doi: 10.1130/B30852.1
- Smith I.E.M., Price R.C., The Tonga–Kermadec arc and Havre–Lau back-arc system: Their role in the development of tectonic and magmatic models for the western Pacific, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2006), **156**, p. 315–331 doi: 10.1016/j.jvolgeores.2006.03.006
- Smith I.E.M., Stewart R.B., Price R.C., The petrology of a large intra-oceanic silicic eruption: the Sandy Bay Tephra, Kermadec Arc, Southwest Pacific, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2003), **124**, 173-194
- Smith I.E.M., Stewart R.B., Price R.C., Worthington T.J., Are arc-type rocks the products of magma crystallisation? Observations from a simple oceanic arc volcano: Raoul Island, Kermadec Arc, SW Pacific, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2010), **190**, p. 219–234, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.05.006
- Soder C., Altherr R., Romer R.L., Mantle Metasomatism at the Edge of a Retreating Subduction Zone: Late Neogene Lamprophyres from the Island of Kos, Greece, *Journal of Petrology* (2016), Vol. 57, **9**, p. 1705-1728
- Steven Holbrook W., Lizarralde D., McGeary S., Bangs N., Diebold J., Structure and composition of the Aleutian island arc and implications for continental crustal growth, *Geology* (1999), Vol. 27, **1**, p. 31–34, doi: 10.1130/00917613(1999)027<0031:SACOTA>2.3.CO;2

- Streckeisen A., Le Maitre R. W. (1979) A chemical approximation to the modal QAPF classification of the igneous rocks. *Neu Jb Mineral, Abh* 136:169-206
- Sun C.H., Stern R.J., Genesis of Mariana shoshonites: Contribution of the subduction component, *Journal of Geophysical research* (2001), Vol. 106, **B1**, p. 589-608
- Sun, S.S. and McDonough, W.F. (1989). Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; implications for mantle composition and processes. In: *Magmatism in the ocean basins*. Saunders, A.D. and Norry, M.J. (Editors), Geological Society of London, London. 42: 313-345
- Tamura Y., Gill J.B., Tollstrup D., Kawabata H., Shukuno H., Chang G., Silicic Magmas in the Izu-Bonin Oceanic Arcband Implications for Crustal Evolution (2001)., *Journal of Petrology* , Vol. 50, **4**, p. 685-723, doi: 10.1093/petrology/egp017
- Tamura Y., Ishizuka O., Sato T., Nichols A.R.L., Nishinoshima volcano in the Ogasawara Arc: New continent from the ocean?, *Island arc* (2018), p. 1–20, <https://doi.org/10.1111/iar.12285>
- Tamura Y., Ishizuka O., Stern R.J., Nichols A.R.L., Kawabata H., Hirahara Y., Chang Q., Miyazaki T., Kimura J.I., Embley R.W., Tatsumi Y., Mission Immiscible: Distinct Subduction Components Generate Two Primary Magmas at Pagan Volcano, Mariana Arc, *Journal of Petrology* (2013), Vol. 0, **0**, p. 1-39, doi: 10.1093/petrology/egt061
- Tassara A., Götze H.J., Schmidt S., Hackney R., Three dimensional density model of the Nazca plate and the Andean continental margin, *Journal of Geophysical Research* (2006), Vol. 111, B09404, doi:10.1029/2005JB003976
- Taussi M., Godoy B., Piscaglia F., Morata D., Agostini S., Rouxe P.L., González-Maurel O., Gallmeyer G., Menzies A., Renzulli A., The upper crustal magma plumbing system of the Pleistocene Apacheta-Aguilucho Volcanic Complex area (Altiplano-Puna, northern Chile) as inferred from the erupted lavas and their enclaves, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (2019), **373**, p. 179–198
- Taylor R.N., Nesbitt R.W., Isotopic characteristics of subduction fluids in an intra-oceanic setting, Izu–Bonin Arc, Japan, *Earth and Planetary Science Letters* (1998), **164**, p. 79–98
- Todd E., Gill J.B., Wysoczanski R.J., Hergt J., Wright I.C., Leybourne M.I., Mortimer N., Hf isotopic evidence for small-scale heterogeneity in the mode of mantle wedge enrichment: Southern Havre Trough and South Fiji Basin back arcs, *Geochem. Geophys. Geosyst.* (2011), Vol. 12, **9**, Q09011, ISSN: 1525-2027, doi: 10.1029/2011GC003683
- Toothill J., Williams C.A., Macdonald R., Turner S.P., Rogers N.W., Hawkesworth C.J., Jerram D.A., Ottley C.J., Tindle A.G., A Complex Petrogenesis for an Arc Magmatic Suite, St Kitts, Lesser Antilles, *Journal of Petrology* (2007), Vol. 48, **1**, p.3-42, doi: 10.1093/petrology/egl052
- Turner S., Hawkesworth C., Rogers N., Bartlett J., Worthington T., Hergt J., Pearce J., Smith I., ²³⁸U-²³⁰Th disequilibria, magma petrogenesis, and flux rates beneath the depleted Tonga-Kermadec arc, *Geochimica et Cosmochimica Acta* (1997), Vol. 61, **22**, p. 4855-4884
- Turner S.P., Peate D.W., Hawkesworth C.J., Eggins S.M., Crawford A.J., Two mantle domains and the time scales of fluid transfer beneath the Vanuatu arc, *Geology* (1999), Vol. 27, **11**, p. 963-966
- Varekamp J.C., Hesse A., Mandeville C.W., Back-arc basalts from the Loncopue graben (Province of Neuquen, Argentina), *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 197 (2010) 313–328
- Von Der Borch C.C., Continent Island Arc Collision in the Banda arc, *Tectonophysics* (1979), **54**, p. 169-193

- Walker J.A., Patino I.C., Cameron B.I., Carr M.J., Petrogenetic insights provided by compositional transects across the Central American arc: Southeastern Guatemala and Honduras, *Journal of Geophysical Research* (2000), Vol. 105, **B8**, p. 18.949-18963
- Wheller G.E., Varne R., Foden J.D., Abbott M.J., Geochemistry of Quaternary Volcanism in the Sunda-Banda Arc, Indonesia, and three-component genesis of Island-Arc Basaltic magmas, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* (1987), **32**, p. 137-160
- Wilson M., *Igneous Petrogenesis*, Springer (1989), p. 466
- Yanagi T., *Arc Volcano of Japan: Generation of Continental Crust from the Mantle*, Springer (2011), p. 123, doi: 10.1007/978-4-431-53996-4
- Yogodzinski G.M., Brown S.T., Kelemen P.B., Vervoort J.D., Portnyagin M., Sims K.W.W., Hoernle K., Jicha B.R., Werner R., The Role of Subducted Basalt in the Source of Island Arc Magmas: Evidence from Seafloor Lavas of the Western Aleutians, *Journal of Petrology* (2015), p. 1–52, doi: 10.1093/petrology/egv006
- Yokoyama T., Kobayashi K., Kuritani T., Nakamura E., Mantle metasomatism and rapid ascent of slab components beneath island arcs: Evidence from ^{238}U - ^{230}Th - ^{226}Ra disequilibria of Miyakejima volcano, Izu arc, Japan, *Journal of Geophysical Research* (2003), Vol. 108, **B7**, p. 2329, doi: 10.1029/2002JB002103
- Zappettini E.O., Villar L.M., Hernández L.B., Santos J.O., Geochemical and isotopic constraints on the petrogenesis of the Puesto La Peña undersaturated potassic complex, Mendoza province, Argentina: Geodynamic implications, *Lithos* 162-163 (2013) 301–316

Ιστολόγιο

<http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>