

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

Συγκριτική μελέτη τιτανιτών από πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα

Χρήστος Σπυρομήτρος Ξιούφης
Διπλωματική Εργασία

Επιβλέπων: Επ. Καθηγητής Αντώνιος Κορωνάιος

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2010

Πρόλογος

Ο τιτανίτης είναι ένα ορυκτό το οποίο απαντάται σε πυριγενή αλλά και σε μεταμορφωμένα πετρώματα. Όπως είναι γνωστό, ο χημική σύσταση του τιτανίτη συνδέεται άμεσα με το πέτρωμα στο οποίο βρίσκεται. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να ερευνήσει την ύπαρξη διαφορών (και να τις προσδιορίσει) στη χημική σύσταση των τιτανιτών μεταμορφικής από τιτανίτες πυριγενούς προέλευσης, έτσι ώστε να προκύψει αν είναι δυνατόν ένας σαφής διαχωρισμός. Αυτό γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας αναλύσεις τιτανιτών από πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα από διάφορες περιοχές, έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχούσες τοπικές διαφοροποιήσεις. Στη συνέχεια θα γίνουν δέντρα απόφασης και διαγράμματα με τη χρήση του Weka και του MS Excel αντίστοιχα και θα βρεθεί εαν τελικά υπάρχουν σαφείς διαφορές ή όχι.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου Αντώνιο Κορωναίο για την συνδρομή του κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής καθώς και τον αδερφό μου Ελευθέριο Σπυρομήτρο Ξιούφη για την συνδρομή του σε ότι αφορά το Weka.

1. Εισαγωγή

Ο τιτανίτης ή σφήνα βρίσκεται στα ενδιάμεσα και όξινα πυριγενή, πηγματίτες, αλπικές φλέβες και σε γνευσίους, σχιστόλιθους, εκλογίτες και skarn. Εμφανίζεται κυρίως σαν δευτερεύον αλλά μερικές φορές γίνεται κύριο ορυκτό. Κρυσταλλώνεται στο μονοκλινές σύστημα, έχει καθαρό σχισμό στα [110], το χρώμα του μπορεί να είναι άχρωμο, καστανό, γκρί, κίτρινο, πράσινο (Σχ. 1), κόκκινο, έχει ειδικό βάρος 3.48, μπορεί να είναι από διάφανο μέχρι αδιαφανές, έχει σκληρότητα 5-5.5, αδαμάντινη λάμψη και λευκή γραμμή σκόνης.

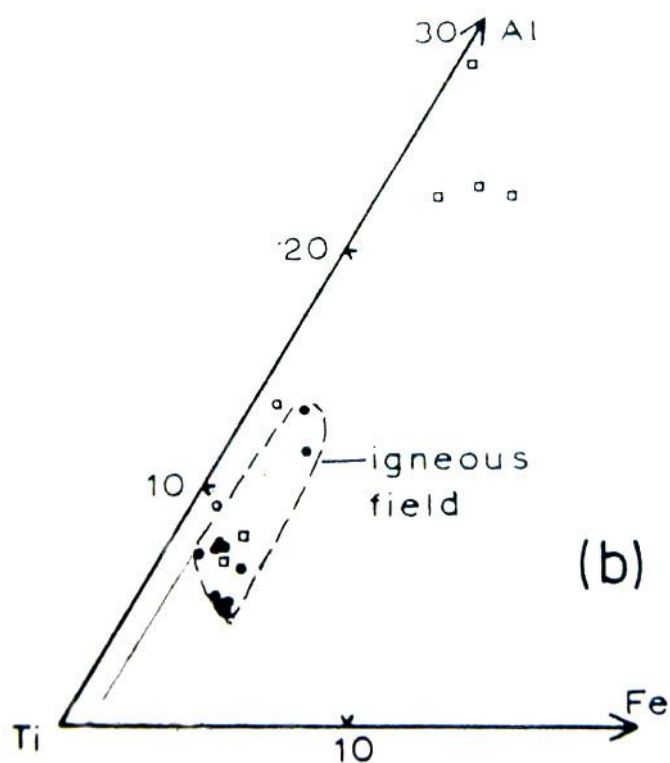


Σχήμα 1. Πράσινος τιτανίτης πάνω σε άστριο

2. Προηγούμενες έρευνες

Προηγούμενες ανάλογες προσπάθειες για την εύρεση διαφορών στη σύσταση τιτανιτών διαφορετικών προελεύσεων έγιναν από τους Tulloch (1979) και King et al. (2001).

Ειδικότερα ο Tulloch σε τριγωνικό διάγραμμα Al-Ti-Fe (Σχ. 2) και με τη χρήση 20 συνολικά αναλύσεων βρήκε ότι οι περισσότεροι τιτανίτες πυριγενούς προέλευσης συγκεντρώνονται σε ένα ορισμένο πεδίο μέσα στο διάγραμμα, ενώ οι περισσότεροι τιτανίτες μεταμορφικής προέλευσης βρίσκονται εκτός του πεδίου αυτού.



Σχήμα 2. Διάγραμμα Al-Ti-Fe. Βρέθηκε ένα πεδίο στο οποίο συγκεντρώνονται οι περισσότεροι τιτανίτες πυριγενούς προέλευσης. Tulloch (1979)

Η προσπάθεια διάκρισης τιτανιτών διαφορετικών προελεύσεων που έγινε από τους King et al. (2001) βασίστηκε στα ισότοπα οξυγόνου.

3. Ορυκτοχημεία του Τιτανίτη

Τιτανίτης: $\text{Ca}_{0.95}\text{REE}_{0.05}\text{Ti}_{0.75}\text{Al}_{0.2}\text{Fe}^{3+}_{0.05}\text{SiO}_{4.9}\text{F}_{0.1}$

Η χημεία των ορυκτών της ομάδας του Τιτανίτη ερευνήθηκε από τον Sahama (1946) που θεώρησε ότι το Na, οι σπάνιες γαίες, το Mn, Sr & Ba, υποκαθιστούν το Ca και τα OH, F (και Cl) υποκαθιστούν το οξυγόνο. Επίσης θεώρησε ότι τα Al, Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg, Nb, Ta, V & Cr υποκαθιστούν το Ti. Πιο πρόσφατες αναλύσεις τιτανιτών και ειδικά αυτές που πάρθηκαν με την χρήση μικροαναλυτή (EMP) έχουν παράξει αποτελέσματα τα οποία δείχνουν ότι οι χημικές αντικαταστάσεις κύριας σημασίας είναι $\rightarrow (\text{Al}, \text{Fe}^{3+}) + (\text{F}, \text{OH})^- = \text{Ti} + \text{O}^{2-}$. Το σύνολο των $\text{Al} + \text{Fe}^{3+}$ δεν είναι μεγαλύτερο από 30mol% και το Al είναι συνήθως επικρατέστερο. Τα αποτελέσματα της λεπτομερούς δομικής τελειοποίησης, δείχνουν ότι τα Al και Fe^{3+} καταλαμβάνουν οκταεδρικές θέσεις σε φυσικούς τιτανίτες και ότι τα REE αντικαθιστούν το Ca. Έτσι, παρόλο που ο συνθετικός τιτανίτης ιδανικής σύστασης CaTiSiO_5 δεν περιέχει (F,OH), τα φυσικά δείγματα σχεδόν πάντα περιέχουν μικρές ποσότητες αλλά το μοριακό ποσοστό ποικίλλει, ανάλογα με τις ποσότητες $\text{Al} + \text{Fe}^{3+}$. Ο Coombs et.al. (1976) συμφωνεί ότι οι τετραεδρικές θέσεις γεμίζουν με Si και αφού αντιστοιχίσουν τα Ti, Al, Fe^{3+} στο γέμισμα των Y οκταεδρικών θέσεων, τοποθετούν περίσσεια Fe σαν Fe^{2+} μαζί με Ca, Mg, Na, K κτλ. στην θέση X. Η θέση των Zr, Nb, V, Cr είναι αβέβαιη. Η ποικιλία «γκροθίτης» του τιτανίτη, περιέχει σεβαστό ποσό Fe και Al, ενώ αυτά που περιέχουν αρκετές σπάνιες γαίες αναφέρονται σαν κείλχοιτης, ή υττροτιτανίτης. Υπάρχουν γνωστά δείγματα με μέχρι 12% $(\text{Y}, \text{Ce})_2\text{O}_3$, όμως ποσότητες όπως 3-5% είναι πιο συνηθισμένες. Στα γρανιτικά πετρώματα, οι διαθέσιμες σπάνιες γαίες, τείνουν να συγκεντρώνονται στους δευτερεύουσων φάσεων τιτανίτες, ζirkόνια και απατίτες. Ο Staatz et al. (1977) έχουν δείξει ότι παρόλο που ο τιτανίτης θα αφομοιώσει οποιεσδήποτε λανθανίδες είναι διαθέσιμες όταν κρυσταλλωθεί, το ποσό των REE και Th στον τιτανίτη επηρεάζεται από την παρουσία άλλων ορυκτών. Τιτανίτης σε πετρώματα που περιέχουν αλλανίτη ή ζirkόνιο έχει λιγότερο Th απ' ότι τιτανίτης από πετρώματα που δεν περιέχουν αυτά τα ορυκτά. Επανεξέταση 271 δημοσιευμένων αναλύσεων για τα σχετικά ποσοστά λανθανίδων και Y στον τιτανίτη, δείχνει ότι στην ακολουθία αλκαλικός πηγματίτης, αλκαλικό πέτρωμα, γάββροι και πυροξενίτης, γρανοδιορίτης, γρανίτης και γρανιτικός πηγματίτης, τα μέσα ποσά των ελαφριών λανθανίδων (La, Ce & La-Nd) αυξάνονται, των μέσων λανθανίδων (Sm-Ho) αυξάνονται, των βαρέων λανθανίδων (Er-Lu), του Y αυξάνεται και η αναλογία

La/Nd μειώνεται, δείχνοντας ότι το γεωλογικό περιβάλλον έχει μια σημαντική επίδραση στις σχετικές συγκεντρώσεις των λανθανίδων. Η πιο συχνή λανθανίδα σε τιτανίτες γρανιτικών πετρωμάτων και γρανιτικούς πηγματίτες μπορεί να είναι La, Ce, Nd, Gd ή Y. Το Y είναι πολύ υψηλότερο σε τιτανίτη, παρά σε μοναζίτη από παρόμοια πετρώματα. Οι περισσότερες αναλύσεις τιτανίτη δείχνουν ένα αξιοσημείωτο ποσό δομικού νερού και το F είναι επίσης παρόν. Οι τιτανίτες είναι συνήθως αρκετά πλούσιοι σε ιχνοστοιχεία, ειδικά αυτοί από late-stage γρανίτες και πηγματίτες.

4. Αναλύσεις που χρησιμοποιήθηκαν

Παρόλου που τιτανίτης είναι σταθερός σε ένα ευρύ πεδίο μεταμορφικών συνθηκών, έχει παρατηρηθεί πιο σύνθετη συμπεριφορά, όπως εμφάνιση κληρονομημένου τιτανίτη σε πυριγενή πετρώματα και συνύπαρξη πρωτολίθου και μεταμορφικού τιτανίτη σε παραμορφωμένους πλουτωνικούς γνεύσιους (Για τη διάκριση πυριγενούς, μεταμορφικού ή υδροθερμικού τιτανίτη, μπορεί επίσης να γίνει χρήση ισοτόπων οξυγόνου).

Οι αναλύσεις τιτανιτών μεταμορφικής προέλευσης που χρησιμοποιήθηκαν, επιλέχθηκαν έτσι ώστε να είναι βέβαιη η προέλευσή τους.

Συγκεκριμένα, από τη βιβλιογραφία αναζητήθηκαν αναλύσεις τιτανιτών από πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα που να έχουν αναλυθεί και για ιχνοστοιχεία. Οι αναλύσεις που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον πίνακα 1. Έγινε αναγωγή των αποτελεσμάτων στο 100, ώστε να είναι αυτά συγκρίσιμα.

Στον πίνακα 2 φαίνονται τα αποτελέσματα ύστερα από τον υπολογισμό του τύπου δομής τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα δένδρα απόφασης και στα διαγράμματα.

Πίνακας 1. Αναλύσεις τιτανιτών από πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα.

Αναφορά	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4	4
Προέλευση	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν
Δείγμα							T-70	T-88			
Αρ. Ανάλ.	1	2	3	4	6	7	101	103	1	2	3
SiO ₂	30,881	29,735	29,600	30,380	30,023	30,018	29,954	30,020	30,215	30,509	29,775
TiO ₂	31,756	32,866	32,137	36,861	36,650	36,102	36,865	36,071	39,268	39,433	38,063
Al ₂ O ₃	2,364	2,159	1,910	0,466	0,864	0,209	1,065	1,117	0,020	0,020	0,070
FeO	3,151	3,094	3,013	1,965	1,466	1,917	1,380	1,584	1,861	1,256	2,135
MnO	0,101	0,101	0,091				0,173	0,142	0,091	0,020	0,282
MgO	0,080	0,081	0,071						0,000	0,000	0,000
CaO	24,655	25,742	25,214	28,658	28,617	28,123	27,925	28,071	27,298	27,404	27,006
Na ₂ O	0,050	0,041	0,051	0,091	0,050	0,349			0,010	0,040	0,000
K ₂ O	0,111	0,000	0,010								
Y ₂ O ₃	0,513	0,486	0,485	0,000	0,030	0,000	0,487	0,497	0,050	0,332	0,262
ZrO ₂	0,563	1,540	2,577	0,678	0,703	1,197	0,000	0,000	0,111	0,020	0,040
Nb ₂ O ₅	1,076	0,932	1,041	0,324	0,372	1,137			0,091	0,100	0,503
Ta ₂ O ₅									0,010	0,000	0,050
La ₂ O ₃	0,684	0,750	0,778	0,041	0,030	0,020	0,183	0,254	0,101	0,080	0,242
Ce ₂ O ₃	1,549	1,145	1,445	0,476	1,074	0,898	0,365	0,365	0,875	0,784	1,571
Pr ₂ O ₃	0,754	0,385	0,192	0,010	0,020	0,000	0,122	0,071			
Nd ₂ O ₃	1,167	0,801	0,990	0,051	0,090	0,020	0,873	0,792			
Sm ₂ O ₃	0,241	0,081	0,172	0,000	0,000	0,000	0,112	0,213			
Eu ₂ O ₃							0,142	0,000			
Gd ₂ O ₃	0,241	0,051	0,222	0,000	0,010	0,010	0,193	0,254			
Tb ₂ O ₃							0,000	0,081			
Dy ₂ O ₃	0,060	0,010	0,000				0,071	0,234			
Ho ₂ O ₃							0,091	0,132			
Lu ₂ O ₃							0,000	0,102			
Total	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

Αναλύσεις τιτανιτών από πυριγενή πετρώματα. Από τις εργασίες των:

- 1: Carlier & Lorand (2008)
- 2: Dawson et al. (1994)
- 3: Broska et al. (2007)
- 4: Wang et al. (2001)

Πίνακας 1. (Συνέχεια)

Αναφορά	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	6
Προέλευση	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν
Δείγμα				CS-10	CS-12	GRO	2359	2359	2359	2359	251/1
Αρ. Ανάλ.	7	8	9	20	21	22	2b	5b	6b	7b	
SiO ₂	30,055	30,178	29,736	29,845	30,390	30,543	29,343	29,971	29,594	29,950	29,738
TiO ₂	33,662	33,482	37,433	33,969	35,005	36,954	30,865	29,437	30,483	29,439	33,976
Al ₂ O ₃	0,020	0,000	0,020	1,805	1,771	1,268	1,652	1,824	1,099	1,373	0,703
FeO	5,151	4,981	3,358	1,723	1,999	1,648	3,840	3,668	3,442	3,014	2,421
MnO	1,280	1,425	2,357	0,192	0,132	0,131	0,150	0,131	0,170	0,140	
MgO	0,051	0,020	0,010	0,000	0,000	0,000	0,120	0,151	0,100	0,090	
CaO	23,451	23,277	21,240	27,304	27,850	27,977	25,509	27,028	26,356	26,874	27,344
Na ₂ O	0,335	0,364	0,991	0,071	0,040	0,020	0,060	0,050	0,040	0,080	0,377
K ₂ O											0,000
Y ₂ O ₃	1,544	1,808	1,113	0,181	0,040	0,211	0,360	0,252	0,220	0,150	
ZrO ₂	0,163	0,192	0,081	0,918	0,840	0,443	2,223	5,009	5,717	6,273	0,805
Nb ₂ O ₅	2,266	2,243	1,588	2,117	0,972	0,221	1,332	0,967	0,590	1,012	3,678
Ta ₂ O ₅	0,203	0,152	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,000	0,160	
La ₂ O ₃	0,112	0,162	0,314	0,565	0,344	0,111	0,881	0,131	0,500	0,190	0,092
Ce ₂ O ₃	1,707	1,718	1,760	1,311	0,617	0,473	2,403	0,716	1,189	0,762	0,499
Pr ₂ O ₃				0,000	0,000	0,000	0,350	0,151	0,090	0,080	0,061
Nd ₂ O ₃				0,000	0,000	0,000	0,841	0,403	0,350	0,351	0,306
Sm ₂ O ₃				0,000	0,000	0,000	0,070	0,060	0,060	0,060	
Eu ₂ O ₃											
Gd ₂ O ₃											
Tb ₂ O ₃											
Dy ₂ O ₃											
Ho ₂ O ₃											
Lu ₂ O ₃											
Total	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

Αναλύσεις τιτανιτών από πυριγενή πετρώματα. Από τις εργασίες των:

4: Wang et al. (2001)

5: Seifert & Kramer (2003)

6: Vuorinen et al. (2005)

Πίνακας 1. (Συνέχεια)

Αναφορά	6	6	6	6	6	6	5	7	8	8	8
Προέλευση	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν
Δείγμα	251	3 AC	3 AA	26 AA	20 AA	3 HA	2359	OS76	FO-16E	FO-16E	TH-16E
Αρ. Ανάλ.							8b	11	3*	5*	2*
SiO ₂	30,353	30,399	29,679	30,338	30,120	30,159	29,160	29,826	29,261	29,442	29,177
TiO ₂	35,440	34,736	35,313	33,671	34,442	32,698	29,080	36,240	38,102	37,380	37,795
Al ₂ O ₃	1,136	1,018	0,776	0,841	0,931	0,819	1,098	1,283	1,030	1,306	1,136
FeO	1,682	2,175	2,054	2,461	1,856	2,826	2,537	2,050	1,288	1,364	1,282
MnO							0,121		0,099	0,095	0,278
MgO							0,060		0,086	0,102	0,056
CaO	28,091	28,160	27,452	27,502	27,691	27,378	25,967	27,806	28,215	28,093	27,879
Na ₂ O	0,040	0,061	0,081	0,182	0,152	0,233	0,040	0,101	0,106	0,088	0,020
K ₂ O									0,070	0,073	0,050
Y ₂ O ₃							0,111		0,119	0,245	0,338
ZrO ₂	0,040	1,120	0,967	0,902	1,518	0,870	9,559		0,218	0,342	0,177
Nb ₂ O ₅	2,322	1,242	2,368	2,917	2,267	4,046	0,947	1,416	0,000	0,188	0,177
Ta ₂ O ₅							0,151		0,715	0,506	0,722
La ₂ O ₃	0,101	0,071	0,141	0,172	0,101	0,101	0,171				
Ce ₂ O ₃	0,543	0,601	0,685	0,669	0,547	0,576	0,574	1,278	0,372	0,409	0,384
Pr ₂ O ₃	0,030	0,051	0,121	0,030	0,111	0,051	0,091				
Nd ₂ O ₃	0,221	0,367	0,363	0,314	0,263	0,243	0,282		0,318	0,366	0,530
Sm ₂ O ₃							0,050				
Eu ₂ O ₃											
Gd ₂ O ₃											
Tb ₂ O ₃											
Dy ₂ O ₃											
Ho ₂ O ₃											
Lu ₂ O ₃											
Total	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

Αναλύσεις τιτανιτών από πυριγενή πετρώματα. Από τις εργασίες των:

6: Vuorinen et al. (2005)

5: Seifert & Kramer (2003)

7: Buhn et al. (2001)

8: Grigoriadou et al. (2003)

Πίνακας 1. (Συνέχεια)

Αναφορά	8	8	8	8	8	8	8	8	8	9
Προέλευση	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν
Δείγμα	PE-9E	TH-12E	TH-5E	PE-11	TH-5	PE-3	TH-15	TH-8	FO-9	
Αρ. Ανάλ.	3*	3*	2*	3*	3*	3*	3*	2*	2*	3
SiO ₂	29,673	30,783	29,772	29,610	29,899	30,532	30,623	30,657	30,644	31,203
TiO ₂	37,531	34,177	37,276	38,134	37,493	35,215	35,671	36,056	35,605	35,703
Al ₂ O ₃	1,100	1,819	1,330	1,153	1,251	1,327	1,263	1,231	1,303	1,143
FeO	1,203	1,925	1,690	1,370	1,610	1,472	1,527	1,500	1,439	1,305
MnO	0,053	0,088	0,250	0,220	0,303	0,109	0,190	0,165	0,151	0,192
MgO	0,000	0,013	0,150	0,080	0,093	0,069	0,024	0,053	0,079	
CaO	27,662	27,311	27,647	27,461	27,902	26,544	27,224	26,942	27,033	27,495
Na ₂ O	0,060	0,028	0,000	0,093	0,107	0,064	0,037	0,096	0,028	
K ₂ O	0,013	0,000	0,050	0,027	0,010	0,034	0,027	0,000	0,031	
Y ₂ O ₃	0,508	0,960	0,150	0,177	0,180	1,738	1,370	1,106	1,524	0,150
ZrO ₂	0,309	1,315	0,150	0,110	0,000	0,572	0,471	0,455	0,531	0,108
Nb ₂ O ₅	0,159	0,558	0,230	0,137	0,235	0,672	0,837	0,432	0,660	0,308
Ta ₂ O ₅	0,658	0,000	0,470	0,415	0,000	0,374	0,000	0,000	0,000	0,097
La ₂ O ₃										
Ce ₂ O ₃	0,673	0,463	0,605	0,647	0,376	0,861	0,265	0,529	0,465	1,527
Pr ₂ O ₃										0,358
Nd ₂ O ₃	0,399	0,559	0,230	0,367	0,542	0,418	0,470	0,778	0,507	0,121
Sm ₂ O ₃										0,040
Eu ₂ O ₃										
Gd ₂ O ₃										0,113
Tb ₂ O ₃										
Dy ₂ O ₃										0,136
Ho ₂ O ₃										
Lu ₂ O ₃										
Total	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

Αναλύσεις τιτανιτών από πυριγενή πετρώματα. Από τις εργασίες των:

8: Grigoriadou et al. (2003)

9: Prowatke & Klemme (2005)

Πίνακας 1. (Συνέχεια)

Αναφορά	9	10	10	10	10	10	10	10	10	11
Προέλευση	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ
Δείγμα		TN59	TN88	TN203	VST-19	IV 97-4a	IZ94-17a	IZ93-102	306 WO	
Αρ. Ανάλ.	4									6
SiO ₂	30,692	30,423	30,597	30,173	29,990	29,839	30,527	30,758	30,294	30,885
TiO ₂	36,814	37,192	38,649	39,153	38,287	39,101	37,820	37,953	39,131	34,328
Al ₂ O ₃	1,618	1,911	1,270	1,274	1,809	1,466	1,796	1,758	1,116	4,523
FeO	0,623	1,137	0,757	0,652	0,463	0,513	0,682	1,073	0,734	0,204
MnO	0,071	0,121	0,080	0,070	0,040	0,071	0,061	0,040	0,040	0,010
MgO										0,163
CaO	29,344	27,929	28,307	28,306	28,581	28,767	28,257	28,045	28,424	28,929
Na ₂ O		0,020	0,020	0,030	0,000	0,010	0,020	0,040	0,010	0,163
K ₂ O										
Y ₂ O ₃	0,008	0,724	0,020	0,080	0,040	0,101	0,282	0,010	0,020	
ZrO ₂	0,000									0,061
Nb ₂ O ₅	0,399	0,322	0,100	0,030	0,230	0,010	0,121	0,151	0,161	0,703
Ta ₂ O ₅	0,122									0,031
La ₂ O ₃		0,000	0,030	0,000	0,020	0,000	0,040	0,000	0,000	
Ce ₂ O ₃	0,247	0,040	0,100	0,130	0,250	0,061	0,202	0,100	0,040	
Pr ₂ O ₃	0,000									
Nd ₂ O ₃	0,000	0,080	0,020	0,080	0,220	0,040	0,121	0,060	0,010	
Sm ₂ O ₃	0,000	0,101	0,050	0,020	0,070	0,020	0,071	0,010	0,020	
Eu ₂ O ₃										
Gd ₂ O ₃	0,061									
Tb ₂ O ₃										
Dy ₂ O ₃	0,000									
Ho ₂ O ₃										
Lu ₂ O ₃										
Total	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000	100,000

Αναλύσεις τιτανιτών από μεταμορφωμένα πετρώματα. Από τις εργασίες των:

9: Prowatke & Klemme (2005)

10: Harlov et al. (2006)

Πίνακας 2. Τύπος δομής τιτανιτών από πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα

Αναφορά	1	1	1	2	2	2	3	3	4	4	4
Προέλευση	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν
Δείγμα							T-70	T-88			
Αρ. Ανάλ.	1	2	3	4	6	7	101	103	1	2	3
Si	4,171	4,002	3,998	4,020	3,983	3,994	3,994	4,016	3,995	4,022	3,977
Ti	3,226	3,327	3,264	3,668	3,656	3,612	3,697	3,629	3,904	3,909	3,823
Al	0,376	0,342	0,304	0,073	0,135	0,033	0,167	0,176	0,003	0,003	0,011
Fe	0,356	0,348	0,340	0,217	0,163	0,213	0,154	0,177	0,206	0,138	0,238
Mn	0,012	0,012	0,010				0,019	0,016	0,010	0,002	0,032
Mg	0,016	0,016	0,014						0,000	0,000	0,000
Ca	3,568	3,712	3,649	4,063	4,067	4,009	3,990	4,024	3,867	3,871	3,864
Na	0,013	0,011	0,013	0,023	0,013	0,090			0,003	0,010	0,000
K	0,019	0,000	0,002								
Y	0,037	0,035	0,035	0,000	0,002	0,000	0,035	0,035	0,004	0,023	0,019
Zr	0,037	0,101	0,170	0,044	0,045	0,078	0,000	0,000	0,007	0,001	0,003
Nb	0,066	0,057	0,064	0,019	0,022	0,068			0,005	0,006	0,030
Ta									0,000	0,000	0,002
La	0,034	0,037	0,039	0,002	0,001	0,001	0,009	0,013	0,005	0,004	0,012
Ce	0,077	0,056	0,071	0,023	0,052	0,044	0,018	0,018	0,042	0,038	0,077
Pr	0,037	0,019	0,009	0,000	0,001	0,000	0,006	0,003			
Nd	0,056	0,038	0,048	0,002	0,004	0,001	0,042	0,038			
Sm	0,011	0,004	0,008	0,000	0,000	0,000	0,005	0,010			
Eu							0,006	0,000			
Gd	0,011	0,002	0,010	0,000	0,000	0,000	0,009	0,011			
Tb							0,000	0,004			
Dy	0,003	0,000	0,000				0,003	0,010			
Ho							0,004	0,006			
Lu							0,000	0,004			
TrElem	0,368	0,350	0,454	0,091	0,129	0,192	0,136	0,152	0,064	0,072	0,142
LREE	0,215	0,155	0,175	0,028	0,059	0,046	0,079	0,082	0,047	0,042	0,089

Τύπος δομής τιτανιτών από πυριγενή πετρώματα (αποτελέσματα ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων του πίνακα 1) . Από τις εργασίες των:

- 1: Carlier & Lorand (2008)
- 2: Dawson et al. (1994)
- 3: Broska et al. (2007)
- 4: Wang et al. (2001)

Πίνακας 2. (Συνέχεια)

Αναφορά	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	6
Προέλευση	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν
Δείγμα				CS-10	CS-12	GRO	2359	2359	2359	2359	251/1
Αρ. Ανάλ.	7	8	9	20	21	22	2b	5b	6b	7b	
Si	4,093	4,111	4,011	3,984	4,022	4,025	4,007	4,015	3,977	4,004	3,982
Ti	3,447	3,430	3,797	3,410	3,484	3,662	3,169	2,965	3,081	2,960	3,421
Al	0,003	0,000	0,003	0,284	0,276	0,197	0,266	0,288	0,174	0,216	0,111
Fe	0,587	0,567	0,379	0,192	0,221	0,182	0,439	0,411	0,387	0,337	0,271
Mn	0,148	0,164	0,269	0,022	0,015	0,015	0,017	0,015	0,019	0,016	
Mg	0,010	0,004	0,002	0,000	0,000	0,000	0,024	0,030	0,020	0,018	
Ca	3,422	3,398	3,069	3,906	3,949	3,950	3,732	3,879	3,795	3,850	3,923
Na	0,089	0,096	0,259	0,018	0,010	0,005	0,016	0,013	0,010	0,021	0,098
K											0,000
Y	0,112	0,131	0,080	0,013	0,003	0,015	0,026	0,018	0,016	0,011	
Zr	0,011	0,013	0,005	0,060	0,054	0,028	0,148	0,327	0,375	0,409	0,053
Nb	0,140	0,138	0,097	0,128	0,058	0,013	0,082	0,059	0,036	0,061	0,223
Ta	0,008	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,000	0,006	0,000
La	0,006	0,008	0,016	0,028	0,017	0,005	0,044	0,006	0,025	0,009	0,005
Ce	0,085	0,086	0,087	0,064	0,030	0,023	0,120	0,035	0,059	0,037	0,024
Pr				0,000	0,000	0,000	0,017	0,007	0,004	0,004	0,003
Nd				0,000	0,000	0,000	0,041	0,019	0,017	0,017	0,015
Sm				0,000	0,000	0,000	0,003	0,003	0,003	0,003	
Eu											
Gd											
Tb											
Dy											
Ho											
Lu											
TrElem	0,360	0,381	0,285	0,292	0,162	0,085	0,483	0,477	0,533	0,557	0,322
LREE	0,091	0,094	0,102	0,092	0,047	0,028	0,226	0,071	0,107	0,070	0,047

Τύπος δομής τιτανιτών από πυριγενή πετρώματα (αποτελέσματα ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων του πίνακα 1) . Από τις εργασίες των:

4: Wang et al. (2001)

5: Seifert & Kramer (2003)

6: Vuorinen et al. (2005)

Πίνακας 2. (Συνέχεια)

Αναφορά	6	6	6	6	6	6	5	7	8	8	8
Προέλευση	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν
Δείγμα	251	3 AC	3 AA	26 AA	20 AA	3 HA	2359	OS76	FO-16E	FO-16E	TH-16E
Αρ. Ανάλ.							8b	11	3*	5*	2*
Si	4,027	4,039	3,961	4,051	4,005	4,042	3,887	3,968	3,886	3,908	3,884
Ti	3,536	3,471	3,544	3,381	3,444	3,295	2,915	3,626	3,805	3,731	3,784
Al	0,178	0,159	0,122	0,132	0,146	0,129	0,172	0,201	0,161	0,204	0,178
Fe	0,187	0,242	0,229	0,275	0,206	0,317	0,283	0,228	0,143	0,151	0,143
Mn							0,014		0,011	0,011	0,031
Mg							0,012		0,017	0,020	0,011
Ca	3,993	4,009	3,925	3,935	3,945	3,931	3,708	3,963	4,015	3,995	3,977
Na	0,010	0,016	0,021	0,047	0,039	0,060	0,010	0,026	0,027	0,023	0,005
K									0,012	0,012	0,009
Y							0,008		0,008	0,017	0,024
Zr	0,003	0,073	0,063	0,059	0,098	0,057	0,621		0,014	0,022	0,011
Nb	0,139	0,075	0,143	0,176	0,136	0,245	0,057	0,085	0,000	0,011	0,011
Ta							0,005		0,026	0,018	0,026
La	0,005	0,003	0,007	0,008	0,005	0,005	0,008				
Ce	0,026	0,029	0,033	0,033	0,027	0,028	0,028	0,062	0,018	0,020	0,019
Pr	0,001	0,002	0,006	0,001	0,005	0,002	0,004				
Nd	0,010	0,017	0,017	0,015	0,012	0,012	0,013		0,015	0,017	0,025
Sm							0,002				
Eu											
Gd											
Tb											
Dy											
Ho											
Lu											
TrElem	0,185	0,200	0,269	0,292	0,284	0,349	0,748	0,147	0,082	0,106	0,116
LREE	0,043	0,053	0,064	0,058	0,049	0,047	0,057	0,062	0,033	0,037	0,044

Τύπος δομής τιτανιτών από πυριγενή πετρώματα (αποτελέσματα ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων του πίνακα 1) . Από τις εργασίες των:

6: Vuorinen et al. (2005)

5: Seifert & Kramer (2003)

7: Buhn et al. (2001)

8: Grigoriadou et al. (2003)

Πίνακας 2. (Συνέχεια)

Αναφορά	8	8	8	8	8	8	8	8	8	9
Προέλευση	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν	Πυριγεν
Δείγμα	PE-9E	TH-12E	TH-5E	PE-11	TH-5	PE-3	TH-15	TH-8	FO-9	
Αρ. Ανάλ.	3*	3*	2*	3*	3*	3*	3*	2*	2*	3
Si	3,942	4,076	3,948	3,925	3,959	4,064	4,057	4,063	4,062	4,139
Ti	3,749	3,403	3,717	3,801	3,733	3,525	3,554	3,594	3,549	3,562
Al	0,172	0,284	0,208	0,180	0,195	0,208	0,197	0,192	0,204	0,179
Fe	0,134	0,213	0,187	0,152	0,178	0,164	0,169	0,166	0,160	0,145
Mn	0,006	0,010	0,028	0,025	0,034	0,012	0,021	0,019	0,017	0,022
Mg	0,000	0,003	0,030	0,016	0,018	0,014	0,005	0,011	0,016	
Ca	3,937	3,874	3,928	3,900	3,958	3,785	3,865	3,826	3,840	3,908
Na	0,015	0,007	0,000	0,024	0,027	0,016	0,010	0,025	0,007	
K	0,002	0,000	0,008	0,005	0,002	0,006	0,005	0,000	0,005	
Y	0,036	0,068	0,011	0,012	0,013	0,123	0,097	0,078	0,108	0,011
Zr	0,020	0,085	0,010	0,007	0,000	0,037	0,030	0,029	0,034	0,007
Nb	0,010	0,033	0,014	0,008	0,014	0,040	0,050	0,026	0,040	0,018
Ta	0,024	0,000	0,017	0,015	0,000	0,014	0,000	0,000	0,000	0,003
La										
Ce	0,033	0,022	0,029	0,031	0,018	0,042	0,013	0,026	0,023	0,074
Pr										0,017
Nd	0,019	0,026	0,011	0,017	0,026	0,020	0,022	0,037	0,024	0,006
Sm										0,002
Eu										
Gd										0,005
Tb										
Dy										0,006
Ho										
Lu										
TrElem	0,141	0,235	0,091	0,092	0,071	0,276	0,212	0,196	0,228	0,149
LREE	0,052	0,049	0,040	0,049	0,044	0,062	0,035	0,062	0,047	0,099

Τύπος δομής τιτανιτών από πυριγενή πετρώματα (αποτελέσματα ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων του πίνακα 1) . Από τις εργασίες των:

8: Grigoriadou et al. (2003)

9: Prowatke & Klemme (2005)

Πίνακας 2. (Συνέχεια)

Αναφορά	9	10	10	10	10	10	10	10	10	11
Προέλευση	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ	Μεταμ
Δείγμα		TN59	TN88	TN203	VST-19	IV 97-4a	IZ94-17a	IZ93-102	306 WO	
Αρ. Ανάλ.	4									6
Si	4,029	3,997	4,003	3,953	3,936	3,912	4,000	4,021	3,966	4,014
Ti	3,634	3,675	3,803	3,857	3,779	3,855	3,727	3,731	3,853	3,355
Al	0,250	0,296	0,196	0,197	0,280	0,227	0,277	0,271	0,172	0,693
Fe	0,068	0,125	0,083	0,071	0,051	0,056	0,075	0,117	0,080	0,022
Mn	0,008	0,013	0,009	0,008	0,004	0,008	0,007	0,004	0,004	0,001
Mg										0,032
Ca	4,128	3,932	3,968	3,973	4,019	4,041	3,967	3,928	3,987	4,029
Na		0,005	0,005	0,008	0,000	0,003	0,005	0,010	0,003	0,041
K										
Y	0,001	0,051	0,001	0,006	0,003	0,007	0,020	0,001	0,001	
Zr	0,000									0,004
Nb	0,024	0,019	0,006	0,002	0,014	0,001	0,007	0,009	0,010	0,041
Ta	0,004									0,001
La		0,000	0,001	0,000	0,001	0,000	0,002	0,000	0,000	
Ce	0,012	0,002	0,005	0,006	0,012	0,003	0,010	0,005	0,002	
Pr	0,000									
Nd	0,000	0,004	0,001	0,004	0,010	0,002	0,006	0,003	0,000	
Sm	0,000	0,005	0,002	0,001	0,003	0,001	0,003	0,000	0,001	
Eu										
Gd	0,003									
Tb										
Dy	0,000									
Ho										
Lu										
TrElem	0,043	0,080	0,017	0,018	0,043	0,013	0,047	0,018	0,014	0,046
LREE	0,012	0,010	0,009	0,011	0,026	0,006	0,020	0,008	0,003	0,000

Τύπος δομής τιτανιτών από μεταμορφωμένα πετρώματα (αποτελέσματα ύστερα από επεξεργασία των δεδομένων του πίνακα 1) . Από τις εργασίες των:

9: Prowatke & Klemme (2005)

10: Harlov et al. (2006)

6. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε

Στην προσπάθεια διάκρισης τιτανιτών διαφορετικής προέλευσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Weka (ηλεκτρονική βιβλιοθήκη αλγορίθμων μηχανικής μάθησης) . Αυτό το λογισμικό, περιλαμβάνει μια διεπαφή χρήστη (user interface) που χρησιμεύει στην εφαρμογή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης πάνω σε δεδομένα που δίνονται. Από τους αλγορίθμους που περιέχονται στο Weka, χρησιμοποιήθηκαν αλγόριθμοι που κάνουν κατηγοριοποίηση (classification). Δηλαδή με βάση κάποια χαρακτηριστικά που έχει το σύνολο των δεδομένων που έχει δοθεί, δημιουργείται ένα μοντέλο το οποίο στη συνέχεια κατατάσσει νέα αντικείμενα - για τα οποία δεν είναι γνωστό σε ποιά κατηγορία ανήκουν - σε μια από τις κατηγορίες που έχουν δημιουργηθεί. Για την κατηγοριοποίηση χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος δένδρων απόφασης.

Συγκεκριμένα, δίνονται σε πρώτη φάση κάποια δεδομένα εκπαίδευσης του μοντέλου. Αυτά εμπεριέχουν στην περίπτωση μας τις αναλύσεις (περιεκτικότητες) και την κατηγορία στην οποία ανήκουν, αν είναι δηλαδή πυριγενούς ή μεταμορφικής προέλευσης. Το λογισμικό ψάχνει και βρίσκει μόνο του κάποιο χαρακτηριστικό ή συνδυασμό αυτών, το/τα οποίο/α να μπορεί να κατατάξει τα δείγματα στην μία ή την άλλη κατηγορία.

Μετά τη λήξη της διαδικασίας αυτής, μπορεί να εισαχθεί μια ανάλυση χωρίς την κλάση της και το πρόγραμμα κατατάσσει από μόνο του την ανάλυση σε μια κλάση, χρησιμοποιώντας το στοιχείο ή τον συνδυασμό στοιχείων που «έχει μάθει» ότι δίνει/ουν τον διαχωρισμό.

Το λογισμικό Weka που χρησιμοποιήθηκε και δημιουργεί τα δένδρα απόφασης (με τη χρήση του αντίστοιχου αλγορίθμου) χρησιμοποιείται ως εξής:

Στο λογισμικό εισάγονται οι αναλύσεις η προέλευση του κάθε δείγματος. Στη συνέχεια, με βάση τις αναλύσεις (δεδομένα εκπαίδευσης), γίνεται προσπάθεια (εκπαίδευση ενός μοντέλου) να κατηγοριοποιηθούν οι αναλύσεις σε αναλύσεις μεταμορφικών ή και πυριγενών (κατηγοριοποίηση). Χρησιμοποιείται το στοιχείο εκείνο, ή τον συνδυασμό στοιχείων που οδηγούν στην καλύτερη διάκριση.

Συγκεκριμένα, σε πρώτη φάση, γίνεται σαφής κατηγοριοποίηση με βάση το Fe, χωρίς την χρήση κανένα άλλου στοιχείου, λόγω απόλυτης ακρίβειας. Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια να βρεθούν και άλλα στοιχεία ή ομάδες στοιχείων που επίσης οδηγούν σε σωστή κατηγοριοποίηση. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να εξαιρεθεί ο Fe από τα δεδομένα. Αμέσως καλύτερη διάκριση γίνεται από τη χρήση του Ce. Στη συνέχεια

και έχοντας εξαιρέσει και το Ce από τα δεδομένα, γίνεται πολύ καλή διάκριση με βάση το άθροισμα των ελαφριών σπανίων γαιών (LREE). Συνεχίζοντας με την ίδια μέθοδο, εξίσου καλός διαχωρισμός φαίνεται γίνεται και με τη χρήση του αθροίσματος των ιχνοστοιχείων (TrElem).

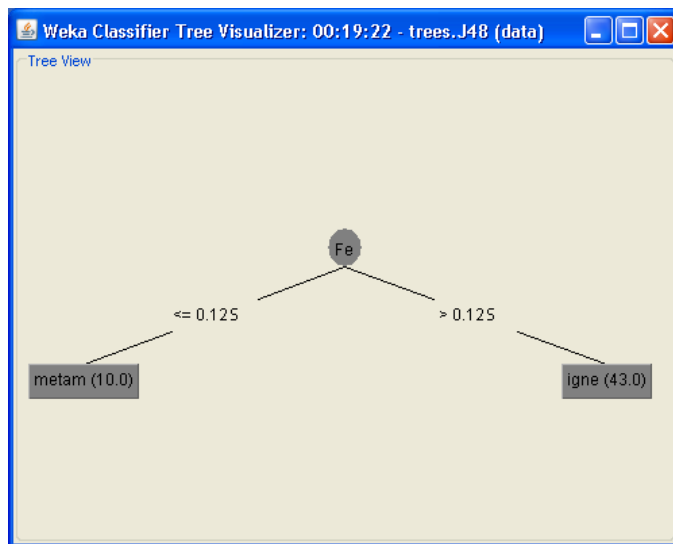
Συνεχίζοντας με τον ίδιο τρόπο και χρησιμοποιώντας όλα τα στοιχεία εξάγεται το συμπέρασμα ότι ασφαλή και σίγουρα αποτέλεσμα υπάρχουν μόνο με τη χρήση των Fe, Ce, LREE (άθροισμα των ελαφριών σπανίων γαιών) , TrElem (αθροίσμα των ιχνοστοιχείων) . Οποιαδήποτε άλλη κατηγοριοποίηση οδηγεί σε σχετικά μεγάλο ποσοστό λάθους.

Από το λογισμικό υπολογίζονται κάποιες στατιστικές παραμέτροι όπως το ποσοστό λάθους. Αυτό υπολογίζεται ως εξής:

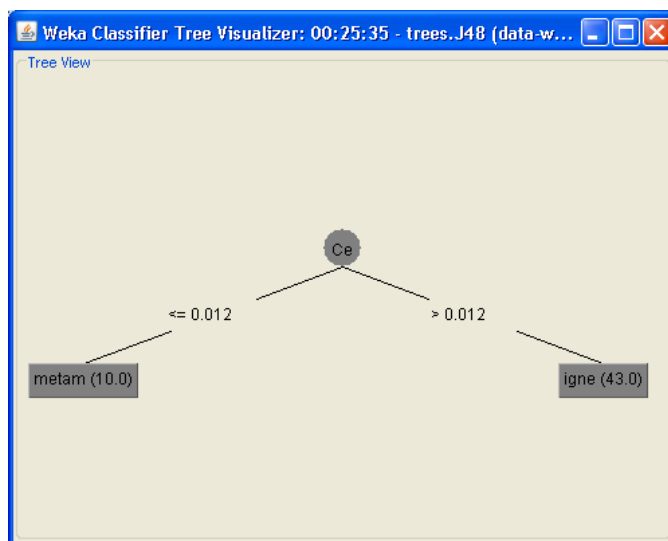
Αρχικά αφαιρούνται πέντε αναλύσεις από τα δεδομένα εκπαίδευσης και το μοντέλο εκπαιδεύεται από την αρχή. Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια να τοποθετηθούν τα πέντε νέα πλέον δεδομένα σε κατηγορίες και υπολογίζεται το ποσοστό επιτυχίας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται δέκα φορές και υπολογίζεται ο μέσος όρος, ο οποίος αποτελεί και το τελικό ποσοστό λάθους.

7. Αποτελέσματα δένδρων απόφασης

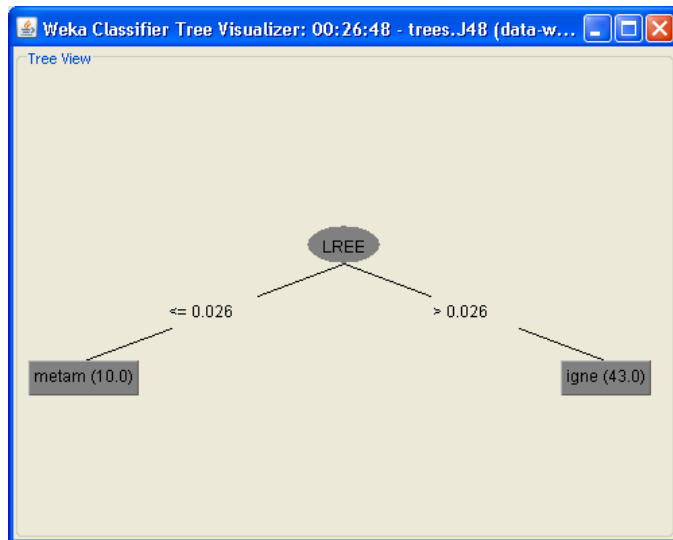
Στα παρακάτω σχήματα φαίνονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου δένδρων απόφασης για διάφορα στοιχεία, συνδυασμούς στοιχείων, ή αθροίσματα στοιχείων, όπως φαίνονται από το Weka. Το σύνολο των περιπτώσεων (αναλύσεων) που χρησιμοποιήθηκαν είναι 53. Χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του πίνακα 2.



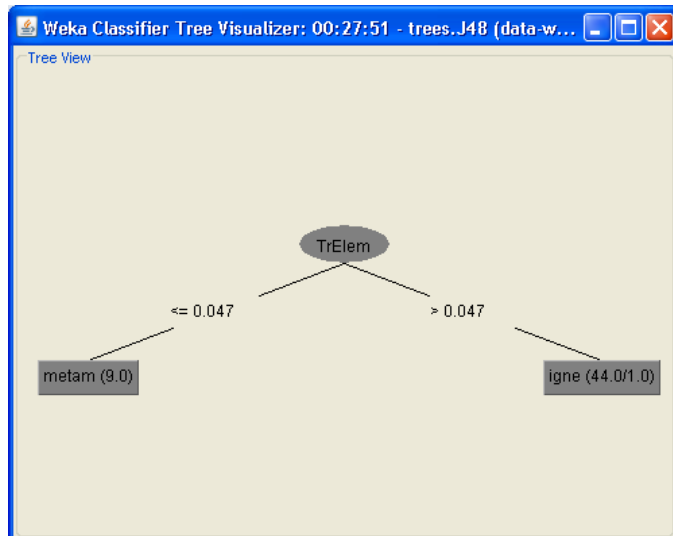
Σχήμα 3. Διαχωρισμός με βάση το Fe. Από το σύνολο των περιπτώσεων ταξινομήθηκε σωστά το 100% αυτών με βάση το Fe και στη συνέχεια υπολογίστηκαν το ποσοστά ακρίβειας και λάθους σε 98.113% και 1.886% αντίστοιχα (η διαφορά οφείλεται στη μέθοδο υπολογισμού του λάθους η οποία περιγράφηκε). Για τιμές ίσες ή μικρότερες του 0.125 οι αναλύσεις ανήκουν στην κατηγορία «μεταμορφικοί» (metam) ενώ για μεγαλύτερες τιμές ανήκουν στην κατηγορία «πυριγενείς» (Igne).



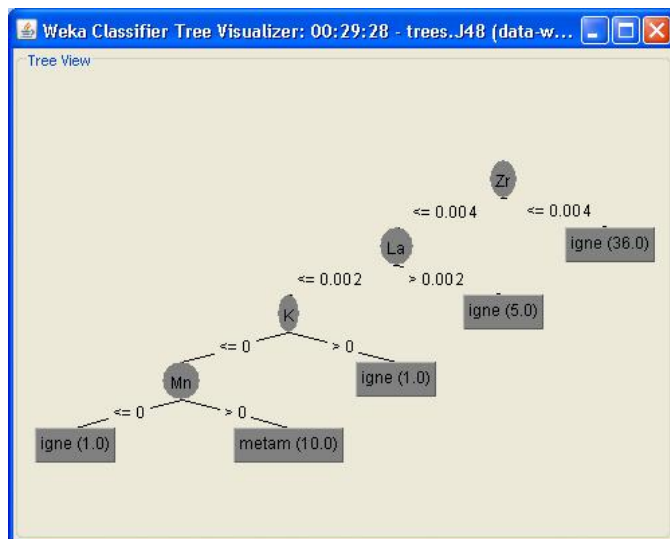
Σχήμα 4. Διαχωρισμός με βάση το Ce. Από το σύνολο των περιπτώσεων ταξινομήθηκε σωστά το 100% αυτών με βάση το Ce και στη συνέχεια υπολογίστηκαν το ποσοστά ακρίβειας και λάθους σε 98.113% και 1.886% αντίστοιχα (η διαφορά αυτή οφείλεται στη μέθοδο υπολογισμού του λάθους η οποία περιγράφηκε). Για τιμές ίσες ή μικρότερες του 0.012 οι αναλύσεις ανήκουν στην κατηγορία «μεταμορφικοί» (metam) ενώ για μεγαλύτερες τιμές ανήκουν στην κατηγορία «πυριγενείς» (Igne).



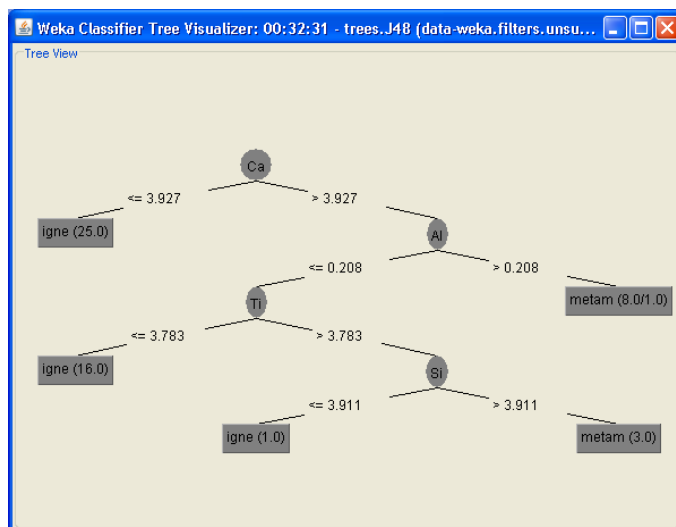
Σχήμα 5. Διαχωρισμός με βάση το άθροισμα των ελαφιών σπανίων γαιών (LREE). Από το σύνολο των περιπτώσεων ταξινομήθηκε σωστά το 100% αυτών με βάση το άθροισμα των ελαφιών σπανίων γαιών (LREE) και στη συνέχεια υπολογίστηκαν το ποσοστά ακρίβειας και λάθους σε 96.226% και 3.773% αντίστοιχα (η διαφορά αυτή οφείλεται στη μέθοδο υπολογισμού του λάθους η οποία περιγράφηκε). Για τιμές ίσες ή μικρότερες του 0.026 οι αναλύσεις ανήκουν στην κατηγορία «μεταμορφικοί» (metam) ενώ για μεγαλύτερες τιμές ανήκουν στην κατηγορία «πυριγενείς» (Igne).



Σχήμα 6. Διαχωρισμός με βάση το άθροισμα των ιχνοστοιχείων (TrElem). Από το σύνολο των περιπτώσεων ταξινομήθηκε σωστά το 99.18% αυτών με βάση το άθροισμα ιχνοστοιχείων (TrElem) και στη συνέχεια υπολογίστηκαν το ποσοστά ακρίβειας και λάθους σε 94.339 % και 5.660 % αντίστοιχα (η διαφορά αυτή οφείλεται στη μέθοδο υπολογισμού του λάθους η οποία περιγράφηκε). Για τιμές ίσες ή μικρότερες του 0.047 οι αναλύσεις ανήκουν στην κατηγορία «μεταμορφικοί» (metam) ενώ για μεγαλύτερες τιμές ανήκουν στην κατηγορία «πυριγενείς» (Igne).



Σχήμα 7. Μη αξιόπιστος διαχωρισμός. Από το σύνολο των περιπτώσεων ταξινομήθηκε σωστά νένα μεγάλο ποσοστό αυτών με βάση τα Zr, La, K, Mn και στη συνέχεια υπολογίστηκαν το ποσοστά ακρίβειας και λάθους σε 92.452 % και 7.547 % αντίστοιχα. Αυτό το δέντρο εμπεριέχει δύο ιχνοστοιχεία τα οποία έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στο άθροισμα των ιχνοστοιχείων. Επίσης λίγες μόνο από τις αναλύσεις που δώθηκαν ανέφεραν K ή Mn (θεωρήθηκε 0). Για τους λόγους αυτούς δεν κρίνεται αξιόπιστο.

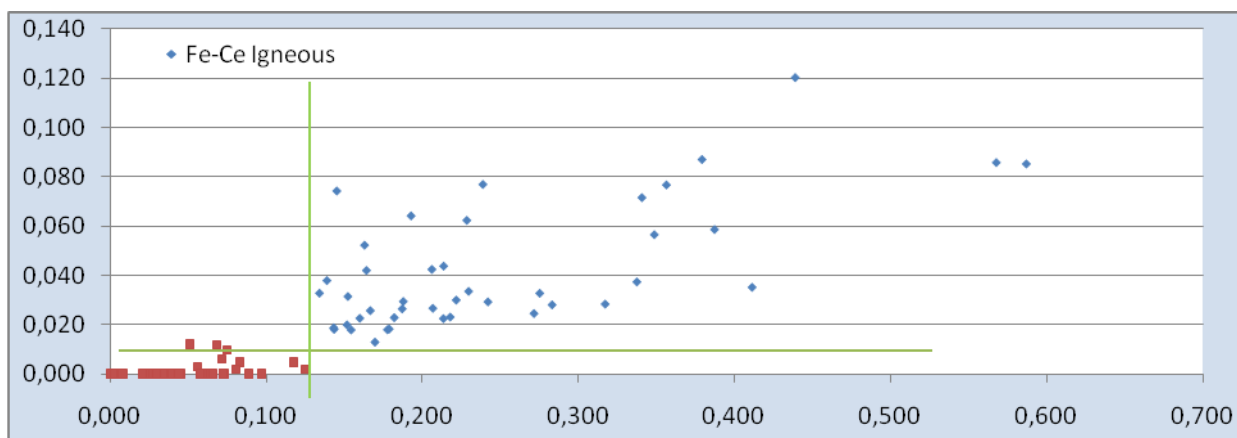


Σχήμα 8. Μη αξιόπιστος διαχωρισμός. Το ποσοστό λάθους αυξάνεται όσο αφαιρούνται τα προηγούμενα επιτυχημένα δεδομένα. Δεν χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση.

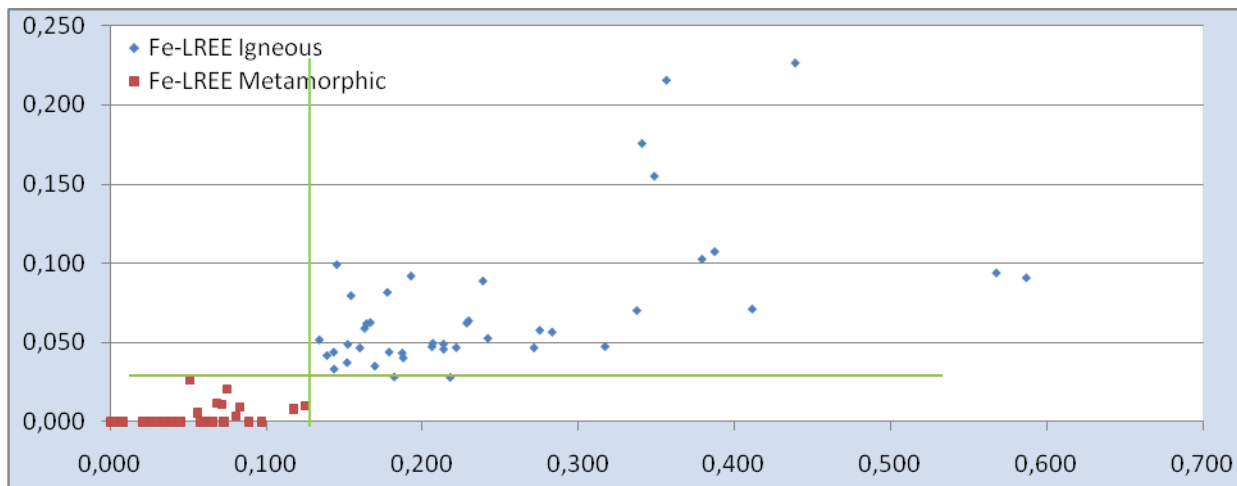
8. Συμπεράσματα

Η στατιστική ανάλυση των αναλύσεων από τιτανίτες πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων από διάφορες περιοχές έδειξε ότι οι τιτανίτες πυριγενούς προέλευσης έχουν $Fe > 0.125$, $Ce > 0.012$, άθροισμα ελαφριών σπανίων γαιών $LREE > 0.026$ και άθροισμα ιχνοστοιχείων $TrElem > 0.047$ όπως φαίνεται στα σχήματα 9, 10 και 11. Τα υπόλοιπα δείγματα με χαμηλότερες τιμές κατατάσσονται στους μεταμορφικής προέλευσης τιτανίτες. Δεν ήταν δυνατόν να γίνει άλλη εξίσου καλή κατηγοριοποίηση όπως φαίνεται ενδεικτικά στα σχήματα 12 και 13. Συμπεραίνεται επίσης ότι είναι δυνατόν να βρίσκεται η προέλευση ενός τιτανίτη, μόνο από την ανάλυσή του.

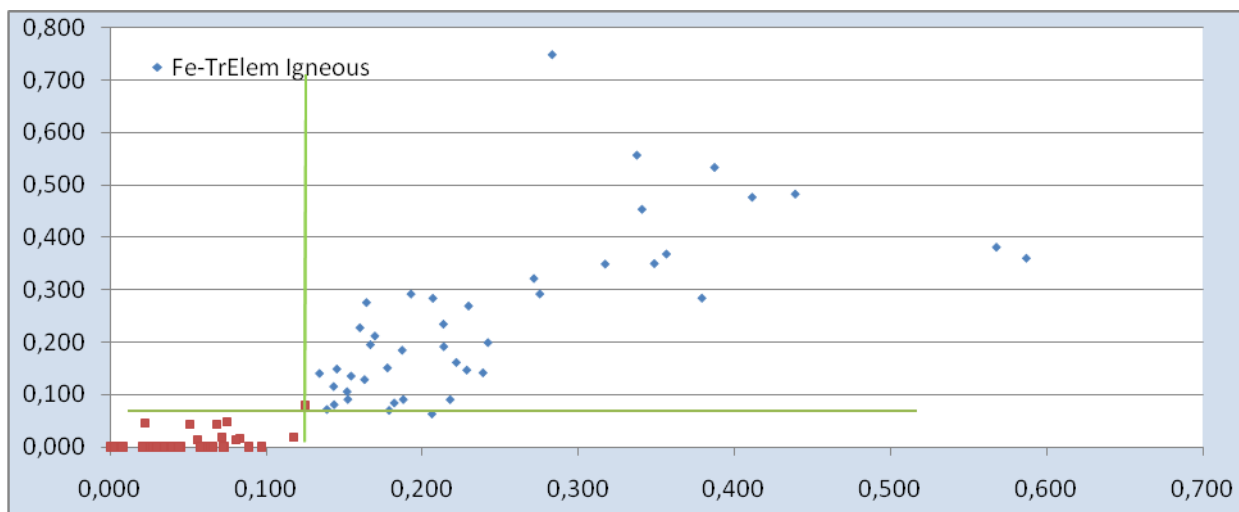
Τα παρακάτω διαγράμματα προέκυψαν από τη χρήση των αποτελεσμάτων του πίνακα 2.



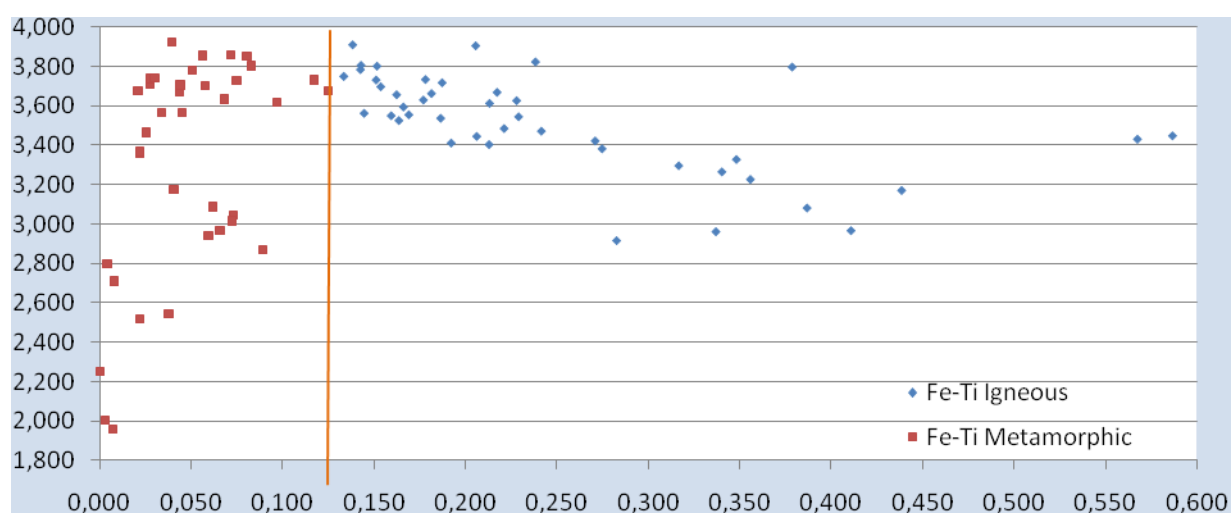
Σχήμα 9. Διάγραμμα Fe-Ce.



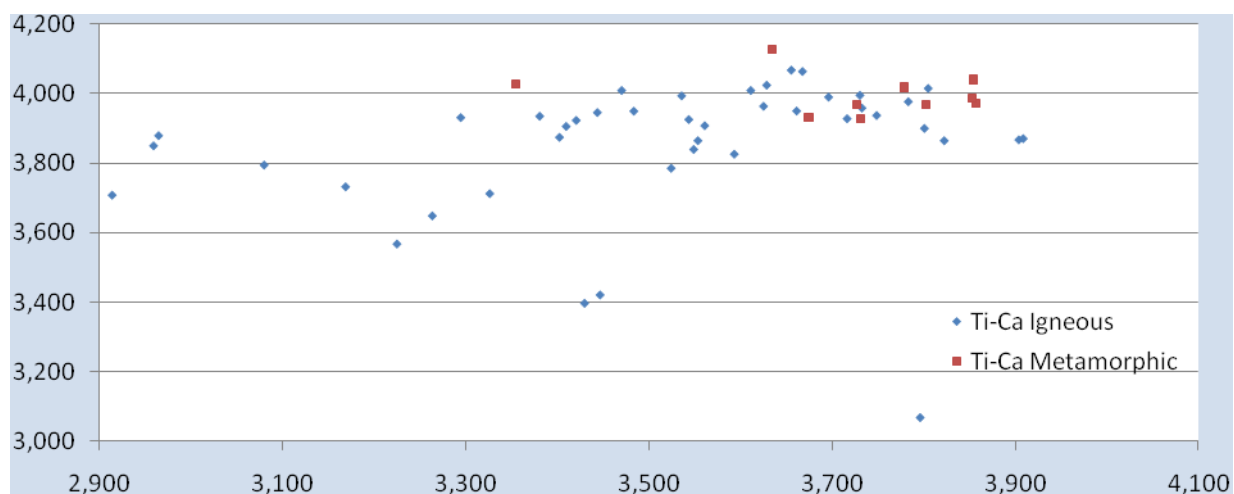
Σχήμα 10. Διάγραμμα Fe-LREE (άθροισμα ελαφριών σπανίων γαιών)



Σχήμα 11. Διάγραμμα Fe-TrElem (άθροισμα ιχνοστοιχείων)



Σχήμα 12. Διάγραμμα Fe-Ti



Σχήμα 13. Διάγραμμα Ti-Ca

9. Βιβλιογραφία

- Buhn B., Dorr W. & Brauns C.M. (2001). Petrology and age of the Otjisazu Carbonatite Complex, Namibia: implications for the pre- and synorogenic Damaran evolution. *Journal of African Earth Sciences*, **32**, 1-17.
- Broska I., Harlov D., Tropper P. & Siman P. (2007). Formation of magmatic titanite and titanite-ilmenite phase relations during granite alteration in the Tribeč Mountains, Western Carpathians, Slovakia. *Lithos*, **95**, 58-71.
- Carlier G. & Lorand J.-P. (2007). Zr-rich accessory minerals (titanite, perrierite, zirconolite, baddeleyite) record strong oxidation associated with magma mixing in the south Peruvian potassic province. *Lithos*, **104**, 54-70.
- Dawson J.B., Smith J.V. & Steele I.M. (1994). Trace-element distribution between coexisting perovskite, apatite and titanite from Oldoinyo Lengai, Tanzania. *Chemical Geology*, **117**, 285-290.
- Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. (1978). An introduction to the rock-forming minerals. Longman, Harlow, Essex, England, 528p.
- Essex R. M. & Gromet L. P. (2000). U-Pb dating of prograde and retrograde titanite growth during the Scandian orogeny. *Geology*, **28**, 419-422.
- Grigoriadou A., Koroneos A. & Eleftheriadis G. (2003). Mineralogy of the Kastoria pluton (Western Macedonia) . *Bulletin of the Geological Society of Greece*, **35**, 46-60.
- Harlov D., Tropper P., Seifert W., Nijland T. & Forster H.-J. (2006). Formation of Al-rich titanite ($\text{CaTiSiO}_4\text{O}-\text{CaAlSiO}_4\text{OH}$) reaction rims on ilmenite in metamorphic rocks as a function of $f\text{H}_2\text{O}$ and $f\text{O}_2$. *Lithos*, **88**, 72-84.
- King E. M., Valley J. W., Davis D. W. & Kowallis B. J. (2001). Empirical determination of oxygen isotope fractionation factors for titanite with respect to Zircon and Quartz. *Geochimica et cosmochimica acta*, **65**, 3165-3175.
- Prowatke S. & Klemme S. (2005). Effect of melt composition on the partitioning of trace elements between titanite and silicate melt. *Geochimica et cosmochimica acta*, **69**, 695-709.
- Seifert W. & Kramer W. (2003). Accessory titanite: an important carrier of zirconium in lamprophyres. *Lithos*, **71**, 81-98.
- Tulloch A. J. (1979). Secondary Ca-Al silicates as low-grade alteration products of granitoid biotite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **69**, 105-117.
- Vuorinen J. H. & Halenius U. (2005). Nb-, Zr- and LREE-rich titanite from the Alnf alkaline complex: Crystal chemistry and its importance as a petrogenetic indicator. *Lithos*, **83**, 128-142.
- Wang R.-C., Wang D.-Z., Zhao G.-T., Lu J.-J., Chen X.-M. & Xu S.-J. (2001). Accessory Mineral Record of Magma-Fluid Interaction in the Laoshan I- and A-Type Granitic Complex, Eastern China. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, **26**, 835-849.