

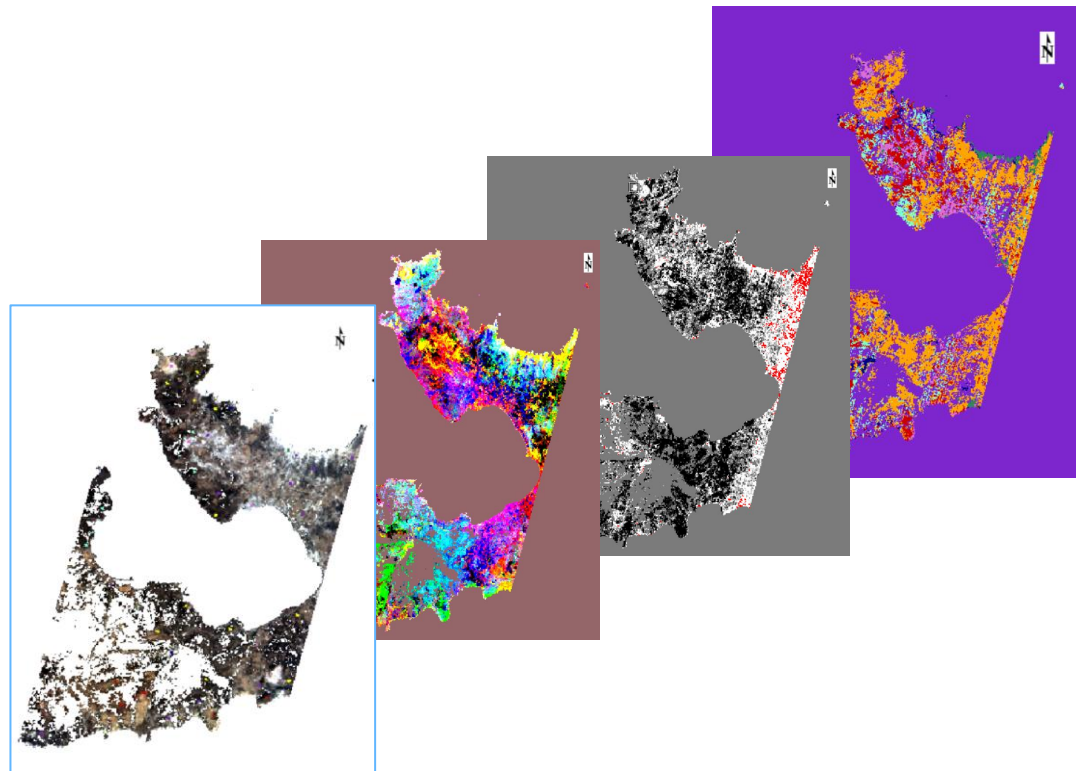


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Δ.Π.Μ.Σ. ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ



Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών  
Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας  
Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

Σταυρούλα Γιαννακοπούλου

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....                                                       | 9  |
| ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....                                                      | 10 |
| EXECUTIVE SUMMARY.....                                              | 13 |
| I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....                                                   | 14 |
| I.1. Βασικές Αρχές Ψηφιακής Τηλεπισκόπησης.....                     | 14 |
| I.2. Δορυφόρος EO-1 .....                                           | 17 |
| I.2.1. Γενικά χαρακτηριστικά.....                                   | 17 |
| I.2.2. Προϊόντα.....                                                | 21 |
| I.3. Δορυφορικά Δεδομένα .....                                      | 21 |
| I.4. ΦασματόΡΑΔΙΟμετρα – ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΔΕΚΤΕΣ.....                 | 22 |
| I.5. Φασματικές υπογραφές.....                                      | 23 |
| I.6. Ταξινομήσεις .....                                             | 25 |
| II. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....                                   | 26 |
| III. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....                                           | 30 |
| III.1. Γεωγραφικά – διοικητικά χαρακτηριστικά .....                 | 30 |
| III.2. Γεωμορφολογία.....                                           | 31 |
| III.3. Ηφαιστειότητα .....                                          | 33 |
| III.4. Γεωλογικό πλαίσιο .....                                      | 33 |
| III.5. Κοιτασματολογία.....                                         | 35 |
| III.6. Μεταλλευτική Δραστηριότητα.....                              | 40 |
| III.7. Γεωθερμικό πεδίο .....                                       | 41 |
| III.8. Τεκτονική δραστηριότητα .....                                | 41 |
| III.9. Υδρολογία – υδρογεωλογία .....                               | 41 |
| III.10. Βλάστηση.....                                               | 42 |
| IV. ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ HYPERION .....                           | 44 |
| IV.1. Ραδιομετρική διόρθωση .....                                   | 44 |
| IV.2. Ατμοσφαιρική διόρθωση .....                                   | 45 |
| IV.3. Επιλογή Bad bands .....                                       | 49 |
| IV.4. Γεωμετρική διόρθωση.....                                      | 53 |
| IV.5. Απόκρυψη θάλασσας και βλάστησης .....                         | 54 |
| IV.6. Λόγοι Καναλιών - Εγχρωμα Σύνθετα.....                         | 55 |
| V. ΕΞΑΓΩΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ – ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ..... | 63 |

|        |                                                 |     |
|--------|-------------------------------------------------|-----|
| V.1.   | PCA – Principal Component Analysis.....         | 63  |
| V.2.   | MNF – Minimum Noise Fraction .....              | 69  |
| V.3.   | ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΜΕΣΩ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ..... | 73  |
| VI.    | ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ.....                     | 74  |
| VI.1.  | Εξαγωγή Καθαρών Στόχων .....                    | 75  |
| VI.2.  | Spectral Feature Fitting .....                  | 80  |
| VI.3.  | Mixture Tuned Matched Filtering .....           | 90  |
| VII.   | ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ .....                              | 96  |
| VII.1. | Spectral Angle Mapper .....                     | 96  |
| VII.2. | mahalanobis distance.....                       | 107 |
| VIII.  | ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ..... | 110 |
| IX.    | ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....                              | 119 |
|        | ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....                              | 120 |
|        | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΡΤΩΝ .....                          | 127 |
|        | ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ .....                         | 130 |

## Ευρετήριο Εικόνων

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικ. 0-1: Διάγραμμα ροής εργασιών .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 12 |
| Εικ. I-1: Χωρική διακριτική ικανότητα ( <a href="http://www.satimagingcorp.com/">www.satimagingcorp.com/</a> ).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 15 |
| Εικ. I-2: Χρονική διακριτική ικανότητα - δορυφόρος IKONOS, με παγχρωματικούς και πολυφασματικούς αισθητήρες ( <a href="http://www.esa.int/">www.esa.int/</a> ; <a href="http://www.satimagingcorp.com/">www.satimagingcorp.com/</a> ).....                                                                                                                                                                                                                          | 15 |
| Εικ. I-3: <i>Μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος</i> ( <a href="http://www.satimagingcorp.com/">www.satimagingcorp.com/</a> )... 16                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
| Εικ. I-4: Δειγματοληψία δεδομένων - δορυφόρος EO-1, με αριθμό δεδομένων μεγαλύτερο των 79,000 από την ημερομηνία εκτόξευσης του δορυφόρου (12/2000 – 2/2015). Με κίτρινο χρώμα οι συλλογές από το 2013; περισσότερες από 13,000. Πηγή: Middleton E., M., et al., 2015.....                                                                                                                                                                                          | 17 |
| Εικ. I-5: <i>Υπερφασματική απεικόνιση</i> . Πηγή: Yokoya et al., 2000.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 19 |
| Εικ. I-6: Δορυφορική εικόνα Landsat 7 ETM+ (7 κανάλια) και φασματικό προφίλ ενός pixel (αριστερές εικόνες) και δορυφορική εικόνα AVIRIS (224 κανάλια) και φασματικό προφίλ του ίδιου pixel (δεξιές εικόνες). Πηγή: <a href="http://www.harrisgeospatial.com">www.harrisgeospatial.com</a> .....                                                                                                                                                                     | 20 |
| Εικ. I-7: <i>Στην εικόνα παρουσιάζονται τα ίχνη στην επιφάνεια του εδάφους, για τον αισθητήρα Landsat 7 ETM+ και τους τρεις αισθητήρες του EO-1: EO-1 Atmospheric Corrector, EO-1 ALI και EO-1 Hyperion. Η πλατφόρμα του EO-1 έχει ρυθμιστεί, ώστε να έχει χρονική καθυστέρηση, σε σχέση με τον Landsat 7, ενός λεπτού, στο ύψος των 705 km. Στην εικόνα φαίνονται τα swath width, κάθε αισθητήρα</i> . Πηγή: <a href="http://www.nasa.gov">www.nasa.gov</a> . .... | 20 |
| Εικ. I-8: Χρήση του Google Earth, με το footprint του αισθητήρα Hyperion, στην περιοχή του Ν. Αιγαίου, σκιαγραφημένο με κόκκινο χρώμα. Η απεικόνιση Hyperion προβάλεται RGB, με χρήση των καναλιών 29, 20 και 11. ....                                                                                                                                                                                                                                              | 22 |
| Εικ. I-9: Φασματική διακριτική ικανότητα, διάστημα φασματικής δειγματοληψίας, FWHM και κέντρο μήκους κύματος Gaussian (Schaerpmann, 1998).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 23 |
| Εικ. I-10: Ανάλυση φασματικής ανάμιξης (Spectral Mixture Analysis). Παραδείγματα φασματικών υπογραφών. Πηγή: Καραθανάση, χ.χ.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 25 |
| Εικ. I-11: Κατηγορίες ταξινομήσεων εικονοστοιχείου. Πηγή: Lu & Weng, 2007 .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 26 |
| Εικ. III-1: Γεωγραφική θέση Μήλου από τον Landsat 5 TM, για την ημερομηνία 27/07/2001, με χρήση GIS.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 31 |
| Εικ. III-2: Χάρτης με τις σημαντικότερες γεωμορφολογικές δομές της Μήλου. 1: Προ - ηφαιστειακό υπόβαθρο, 2: δομές λάβας, 3: Ηφαιστειακοί κρατήρες Φυρίπλακα και Τράχηλας, 4: Φρεατικοί κρατήρες και 5: Τάσεις δομών. Πηγή: Fytikas et. al., 1986. ....                                                                                                                                                                                                              | 33 |
| Εικ. III-3: Λατομείο μπεντονίτη που περιορίζεται από τις πυροκλαστικές ροές. Επικαλύπτεται από μάργα κόκκινου χρώματος. Πηγή: Christidis, & Huff, 2009.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 37 |
| Εικ. III-4: Λατομείο εξόρυξης καολινίτη. Περιοχή Ραλάκι – Δυτική Μήλος. Πηγή: Plimer & Πέτρου 2000.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 40 |
| Εικ. III-5: Οι δύο δορυφορικές εικόνες είναι από τον δορυφόρο Landsat 5 TM, για την ημερομηνία λήψης 27/07/2001, με χρήση του προγράμματος ENVI, έκδοση 5.3. Η πρώτη εικόνα εμφανίζει έναν συνδυασμό καναλιών RGB 321 και η δεύτερη δείχνει την υγιή βλάστηση του νησιού έπειτα από έναν συνδυασμό καναλιών RGB 432.....                                                                                                                                            | 43 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικ. IV-1: Η εικόνα παρουσιάζει τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις που επηρεάζουν τη μέτρηση της ανακλώμενης ενέργειας από τους διάφορους αισθητήρες. Πηγή: <a href="https://bit.ly/2POcn2J">https://bit.ly/2POcn2J</a> ).                                                                                                                                                                                                                           | 44 |
| Εικ. IV-2: Εφαρμογή της ατμοσφαιρικής μεθόδου FLAASH, στο περιβάλλον ENVI 5.3.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 47 |
| Εικ. IV-3: Φασματικές υπογραφές περιοχών με βλάστηση, με την ατμοσφαιρική μέθοδο QUAC (πρώτη εικόνα) και FLAASH (δεύτερη εικόνα).                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 48 |
| Εικ. IV-4: Στατιστικά δεδομένα έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου QUAC (πρώτη εικόνα) και FLAASH (δεύτερη εικόνα).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 48 |
| Εικ. IV-5: Εικόνα grayscale για τα κανάλια 17 (αποδεκτό κανάλι, αριστερή εικόνα) και 220 (μη αποδεκτό κανάλι, δεξιά εικόνα).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 49 |
| Εικ. IV-6: Γεωαναφορά image to image εικόνας Hyperion (δεξιά) με εικόνα Landsat 5 TM (αριστερή) – Πίνακας με τα σφάλματα γεωαναφοράς.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 54 |
| Εικ. IV-7: Δείκτης Normalized Difference Vegetation Index – NDVI.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 55 |
| Εικ. IV-9: Red Edge Normalized Difference Vegetation Index (RENDVI) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 55 |
| Εικ. IV-8: Simple Ratio Index ( $B_{30}/B_{204}$ ) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 55 |
| Εικ. IV-10: Διαγράμματα ανακλαστικότητας.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 58 |
| Εικ. IV-11: Διάγραμμα ανακλαστικότητας για σύγκριση Μέσων Όρων φασματικών υπογραφών .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 59 |
| Εικ. IV-12: Εντοπισμός ορυκτών ενδιαφέροντος, για λόγους καναλιών ( $B_{30} \rightarrow 33$ )/ ( $B_{204} \rightarrow 207$ ) (αριστερή εικόνα) και ( $B_{38} \rightarrow 41$ )/( $B_{204} \rightarrow 207$ ) (δεξιά εικόνα).....                                                                                                                                                                                                               | 60 |
| Εικ. IV-13: Έγχρωμο σύνθετο (1) για $B_{30} \rightarrow 33 = 650.67 - 681.2$ nm (Red), $B_{159} \rightarrow 161 = 1739.7 - 1769.99$ nm (Green), και $B_{204} \rightarrow 207 = 2193.73 - 2224.03$ nm (Blue) (αριστερή εικόνα). Έγχρωμο σύνθετο (2) για $B_{30} \rightarrow 33 = 732.07 - 762.6$ nm (Red), $B_{159} \rightarrow 161 = 1739.7 - 1769.99$ nm (Green), και $B_{204} \rightarrow 207 = 2193.73 - 2224.03$ nm (Blue) (δεξιά εικόνα). | 62 |
| Εικ. V-1: Παράδειγμα εικονοστοιχείου – διανύσματος κατά την εφαρμογή της μεθόδου PCA (πρώτη εικόνα) και η γεωμετρία των καναλιών κατά τη διαδικασία της PCA (δεύτερη εικόνα) (Rodarmel, & Shan, 2002).                                                                                                                                                                                                                                         | 65 |
| Εικ. V-2: Διάγραμμα ποσοστού μεταβλητότητας ιδιοτιμών, PCA. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 66 |
| Εικ. V-3: Κύριες Συνιστώσες της μεθόδου PCA (PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC6, αντίστοιχα).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 67 |
| Εικ. V-4: : Οπτικοποίηση της PCA - ψευδέγχρωμα σύνθετα RGB: PC1,PC2,PC3 και RGB: PC1,PC2,PC5. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 68 |
| Εικ. V-5: Μέθοδος MNF. Πηγή: Department of Land, Air and Water Resources, 2011.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 69 |
| Εικ. V-6: Οπτικοποίηση της MNF - ψευδέγχρωμα σύνθετα RGB: MNF3,MNF2,MNF1 και RGB: MNF6,MNF5,MNF4. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 70 |
| Εικ. V-7: Διάγραμμα ποσοστού μεταβλητότητας ιδιοτιμών, MNF. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 71 |
| Εικ. V-8: Κύριες Συνιστώσες της μεθόδου MNF (MNF1, MNF2, MNF3, MNF4, MNF5, MNF6, αντίστοιχα).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 72 |
| Εικ. V-9: Διάγραμμα συντελεστή συσχέτισης - καναλιών.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 73 |

|                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικ. VI-1: Διάγραμμα επιφανειακής εξάπλωσης γεωλογικών σχηματισμών - κεντρικό τμήμα Μήλου. * Ονοματοδοσία σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη (Παράρτημα Χαρτών, Εικόνα 1).                                                             | 75 |
| Εικ. VI-2: Απεικόνιση φασματικών υπογραφών – μέσης τιμής περιοχών εκπαίδευσης.....                                                                                                                                                 | 78 |
| Εικ. VI-3: Resampled φασματικές υπογραφές των ορυκτών & των πετρωμάτων επιλογής.                                                                                                                                                   | 78 |
| Εικ. VI-4: Ροή εργασιών στον Spectral Hourglass Wizard. Σχήμα «κλεψύδρας» για τις εργασίες υπερφασματικής ανάλυσης, με μείωση των υπερφασματικών δεδομένων και δημιουργία χαρτών κατανομής ή/και αφθονίας. Πηγή: Harris, 2006..... | 80 |
| Εικ. VI-5: Αφαίρεση συνέχειας (Continuum Removal).....                                                                                                                                                                             | 81 |
| Εικ. VI-6: Μέθοδος SFF, τρόπος προσέγγισης του προβλήματος σύγκρισης γνωστής φασματικής υπογραφής με άγνωστη υπογραφή εικονοστοιχείου. Harris, 2006. ....                                                                          | 82 |
| Εικ. VI-7: Μέθοδος SFF για 27 κανάλια. Εικόνα fit περλίτη – Διάγραμμα Scale, συναρτήσει του RMS error.....                                                                                                                         | 83 |
| Εικ. VI-8: Μέθοδος SFF για 27 κανάλια. Εικόνα fit μπεντονίτη – Διάγραμμα Scale, συναρτήσει του RMS error.....                                                                                                                      | 83 |
| Εικ. VI-9: Μέθοδος SFF για 27 κανάλια. Εικόνα fit καολίνη – Διάγραμμα Scale, συναρτήσει του RMS error.....                                                                                                                         | 84 |
| Εικ. VI-10: Σύγκριση εικόνων fit περλίτη για <b>27</b> (αριστερή εικόνα) και για <b>48 κανάλια</b> (δεξιά εικόνα).....                                                                                                             | 84 |
| Εικ. VI-11: Αθροιστικό αποτέλεσμα των fit και διάγραμμα στατιστικών δεδομένων – παράδειγμα περιοχής περλίτη με χαμηλές τιμές και περιοχής ρυόλιθου με υψηλές τιμές..                                                               | 85 |
| Εικ. VI-12 Εικόνες fit (αριστερά) και χάρτες αφθονίας (δεξιά) για κάθε υλικό/στόχο .....                                                                                                                                           | 90 |
| Εικ. VI-13: Διαδικασία MTMF. Πηγή: <a href="http://www.harrisgeospatial.com">www.harrisgeospatial.com</a> .....                                                                                                                    | 91 |
| Εικ. VI-14: Παράμετρος infeasibility .....                                                                                                                                                                                         | 92 |
| Εικ. VI-15: Χάρτες αφθονίας για τα 8 endmembers από την αυτόματη εξαγωγή.....                                                                                                                                                      | 94 |
| Εικ. VI-16: Επιλογή του MF score του endmember 4, για ανάδειξη των στόχων του περλίτη - καολίνη – μπεντονίτη. Χρήση της μη κανονικοποιημένης εικόνας.....                                                                          | 95 |
| Εικ. VII-1: Μέθοδος SAM, τρόπος προσέγγισης του προβλήματος σύγκρισης γνωστής φασματικής υπογραφής με άγνωστη υπογραφή εικονοστοιχείου. Πηγή: Hamza et al., 2016. ....                                                             | 96 |
| Εικ. VII-2: Ανίχνευση περλίτη (υδρογροσσουλάριου) με τον αλγόριθμο SAM για φασματική γωνία 0.18 στο βόρειο τμήμα του νησιού. Η κλάση του υδρογροσσουλάριου (πρώτη εικόνα) – η rule image σε grayscale (δεύτερη εικόνα). ....       | 97 |
| Εικ. VII-3: Ανίχνευση μπεντονίτη (μοντμοριλλονίτη) με τον αλγόριθμο SAM για φασματική γωνία 0.158 στο βόρειο τμήμα του νησιού. Η κλάση του μοντμοριλλονίτη (πρώτη εικόνα) – η rule image σε grayscale (δεύτερη εικόνα). ....       | 98 |
| Εικ. VII-4: Ανίχνευση καολίνη (καολινίτης) με τον αλγόριθμο SAM για φασματική γωνία 0.18 στο βόρειο τμήμα του νησιού. Η κλάση του καολινίτη (πρώτη εικόνα) – η rule image σε grayscale (δεύτερη εικόνα). ....                      | 98 |

|                                                                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικ. VII-5: Διάγραμμα PPI – n-D Visualizer, παράδειγμα νέφους δεδομένων .....                                                                                                                              | 100 |
| Εικ. VII-6: Ταξινόμηση SAM με χρήση φασματικών υπογραφών για την περίπτωση δύο (αριστερή εικόνα) και μίας ρυολιθικής λάβας (δεξιά εικόνα).....                                                             | 102 |
| Εικ. VII-7: Ταξινόμηση SAM με χρήση περιοχών εκπαίδευσης για την περίπτωση δύο (αριστερή εικόνα) και μίας ρυολιθικής λάβας (δεξιά εικόνα).....                                                             | 103 |
| Εικ. VII-8: Ταξινόμηση SAM για τη μετασχηματισμένη εικόνα MNF με χρήση καθαρών στόχων όπως ορίστηκαν από τον χρήστη για την περίπτωση δύο (αριστερή εικόνα) και μίας ρυολιθικής λάβας (δεξιά εικόνα) ..... | 104 |
| Εικ. VII-9: Ταξινόμηση SAM για τη μετασχηματισμένη εικόνα MNF με χρήση καθαρών στόχων μέσω αυτόματης εξαγωγής για την περίπτωση δύο (αριστερή εικόνα) και μίας ρυολιθικής λάβας (δεξιά εικόνα) .....       | 105 |
| Εικ. VII-10: Ταξινόμηση Mahalanobis distance για την εικόνα με τα κανάλια χαμηλού συντελεστή συσχέτισης με χρήση καθαρών στόχων όπως ορίστηκαν από τον χρήστη .....                                        | 108 |
| Εικ. VII-11: Ταξινόμηση Mahalanobis distance για την εικόνα από τη μέθοδο MTMF με χρήση καθαρών στόχων όπως ορίστηκαν από τον χρήστη .....                                                                 | 109 |

## Ευρετήριο Πινάκων

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας I-1: Βασικά χαρακτηριστικά υπερφασματικού αισθητήρα Hyperion. Πηγή: <a href="http://bit.ly/2QdSNMK">bit.ly/2QdSNMK</a> .....        | 19  |
| Πίνακας III-1: Γεωλογικές έρευνες με χρήση Τηλεπισκόπησης στη Μήλο .....                                                                    | 29  |
| Πίνακας IV-1: Τιμές Radiance Gains (gain values) και Radiance Offsets (offset values) του αισθητήρα Hyperion.....                           | 45  |
| Πίνακας IV-2: Τιμές FWHM – Radiance Gains – Radiance Offsets.....                                                                           | 45  |
| Πίνακας IV-3 Ποσό στήλης υδρατμών και επιφανειακών θερμοκρασιών αέρα για τα διαφορετικά ατμοσφαιρικά μοντέλα MODTRAN. Πηγή: ENVI, 2009..... | 47  |
| Πίνακας IV-4: Οπτική εκτίμηση καναλιών Hyperion.....                                                                                        | 50  |
| Πίνακας V-1: Πίνακας συνδιασποράς, συσχέτισης και ιδιοδιανυσμάτων. ....                                                                     | 65  |
| Πίνακας V-2: Πίνακας ιδιοτιμών – ποσοστό πληροφορίας - αθροιστικό ποσοστό πληροφορίας για τις 15 κύριες συνιστώσες, PCA.....                | 66  |
| Πίνακας V-3: Πίνακας ιδιοτιμών – ποσοστό πληροφορίας - αθροιστικό ποσοστό πληροφορίας για τις 15 κύριες συνιστώσες, MNF.....                | 71  |
| Πίνακας VI-1: Γεωλογικοί σχηματισμοί και ορυκτά καταγραφής.....                                                                             | 74  |
| Πίνακας VI-2: Σύγκριση φασματικών υπογραφών επιλογής – μέσης τιμής περιοχών εκπαίδευσης.....                                                | 77  |
| Πίνακας VII-1: Φασματικές γωνίες ανά κατηγορία – ταξινόμηση SAM με φασματικές υπογραφές .....                                               | 100 |
| Πίνακας VII-2: Φασματικές γωνίες ανά κατηγορία – ταξινόμηση SAM με καθαρούς στόχους από τον χρήστη .....                                    | 101 |

|                                                                                                                                          |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| Πίνακας VII-3: Φασματικές γωνίες ανά κατηγορία – ταξινόμηση SAM με καθαρούς στόχους από τον χρήστη – εικόνα MNF .....                    | 101        |
| Πίνακας VII-4: Φασματικές γωνίες ανά κατηγορία – ταξινόμηση SAM με καθαρούς στόχους από αυτόματη εξαγωγή – εικόνα MNF .....              | 101        |
| Πίνακας VIII-1: Αλγόριθμος SFF για τα 27 κανάλια (>2,000 nm) με χρήση καθαρών στόχων από τον χρήστη. ....                                | 112        |
| Πίνακας VIII-2: Αλγόριθμος SFF για τα 11 κανάλια (<1,000 nm) με χρήση καθαρών στόχων από τον χρήστη. ....                                | 112        |
| Πίνακας VIII-3: Αλγόριθμος MTMF για καθαρούς στόχους από τον χρήστη(πρώτος πίνακας) και μέσω αυτόματης εξαγωγής (δεύτερος πίνακας) ..... | 114        |
| Πίνακας VIII-4 Αλγόριθμος SAM - αρχική εικόνα, ταξινόμηση με χρήση φασματικών υπογραφών .....                                            | 115        |
| Πίνακας VIII-5: Omission και commission errors .....                                                                                     | 115        |
| Πίνακας VIII-6: Αλγόριθμος SAM - αρχική εικόνα, ταξινόμηση με χρήση καθαρών στόχων όπως ορίστηκαν από τον χρήστη. ....                   | 116        |
| Πίνακας VIII-7: Omission και commission errors .....                                                                                     | 116        |
| Πίνακας VIII-8: Αλγόριθμος SAM – μετασχηματισμένη εικόνα, ταξινόμηση με χρήση καθαρών στόχων από τον χρήστη.....                         | 117        |
| Πίνακας VIII-9 Omission και commission errors .....                                                                                      | 117        |
| <i>Πίνακας VIII-10: Αλγόριθμος SAM – μετασχηματισμένη εικόνα, ταξινόμηση με χρήση καθαρών στόχων από την αυτόματη εξαγωγή. ....</i>      | <i>118</i> |
| Πίνακας VIII-11: Omission και commission errors .....                                                                                    | 118        |



## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Για την υλοποίηση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να απευθύνω τις θερμές μου ευχαριστίες σε κάποια άτομα που με υποστήριξαν από την αρχή μέχρι το τέλος της συγκεκριμένης διπλωματικής.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα τον επιβλέποντα καθηγητή της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Αργιαλά Δημήτρη, για την βοήθεια, τις ιδέες και τις συμβουλές του σε θέματα τηλεπισκόπησης. Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω θερμά την κ. Καραθανάση για τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις της πάνω σε θέματα υπερφασματικής ανάλυσης.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Κολοκούση Πολυχρόνη, για τις πολύτιμες συμβουλές στο θεωρητικό και τεχνικό κομμάτι της διπλωματικής μου και για τις κατευθυντήριες γραμμές και μεθοδολογίες που μου πρότεινε, ώστε να προσεγγίσω το συγκεκριμένο, πολυδιάστατο θέμα, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, καθώς και τον κ. Ιωσηφίδη Χρήστο, τον κ. Ανδρώνη Βασίλη, και τον κ. Βαμβουκάκη Κώστα από το εργαστήριο Τηλεπισκόπησης.

Επιπρόσθετα, η κ. Συκιώτη Όλγα, Κύρια Ερευνήτρια στο Ινστιτούτο Αστρονομίας, Αστροφυσικής, Διαστημικών Εφαρμογών & Τηλεπισκόπησης με βοήθησε, με συμβούλευσε κι έθεσε τις βάσεις ώστε να χτίσω και ν' αντιληφθώ καλύτερα τις ιδιαίτερες πτυχές του θέματος.

Εν κατακλείδι, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω κυρίως στην οικογένεια και στους φίλους μου, Τσιρώνη Βαρβάρα και Κόσσυβα Θεοδώρα για την υπομονή, την στήριξη και την εμπύχωση που έδειξαν όλο αυτό το χρονικό διάστημα, μέχρι να υλοποιήσω το στόχο μου!

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

---

Η παρούσα εργασία έχει ως περιοχή μελέτης το **κεντρικό τμήμα** της Μήλου, χρησιμοποιώντας μεθόδους τηλεπισκόπησης. Ο στόχος της είναι **διττός**, καθώς εστιάζει στη χαρτογράφηση των **γεωλογικών σχηματισμών** (ρυσολιθικών και ανδεδεικτικών λαβών, ηφαιστειακών τόφφων, ασβεστόλιθων), καθώς και τον εντοπισμό των **Ορυκτών Πρώτων Υλών** (ΟΠΥ) (όπως περλίτη, μπεντονίτη, καολίνη), οι οποίες συνέβαλαν και συμβάλουν στη μεταλλευτική δραστηριότητα του νησιού.

Πρόκειται για ένα νησί το οποίο καλύπτεται κατά το μεγαλύτερο μέρος από **ηφαιστειακά πετρώματα** και το οποίο έχει εμφανίσει έντονη, ηφαιστειακή δραστηριότητα εκφρασμένη σε πέντε στάδια. Η δράση υδροθεμικών ρευστών είχε ως αποτέλεσμα την υδροθερμική εξαλλοίωση των ηφαιστειακών πετρωμάτων της Μήλου και τη δημιουργία **βιομηχανικών ορυκτών** (όπως μπεντονίτη, καολίνη κλπ.), των οποίων και γίνεται εκμετάλλευση στο νησί. Το έντονο οικονομικό ενδιαφέρον και η ύπαρξη μεγάλων εκτάσεων δίχως βλάστηση, οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου νησιού, για την εφαρμογή των παρακάτω μεθοδολογιών.

Για τον εντοπισμό των υλικών-στόχων που προαναφέρθηκαν, **συνδυάστηκαν γνώσεις** από δύο τομείς της **Γεωλογίας** και της **Ψηφιακής Τηλεπισκόπησης**, ενώ η γνώση της υφιστάμενης κατάστασης του νησιού (έκταση βλάστησης, θέση δρόμων κ.λπ.) ήταν επίσης απαραίτητη ώστε η ερμηνεία των αποτελεσμάτων να οδηγήσει σε αληθή συμπεράσματα.

Για την προκειμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε η **υπερφασματική εικόνα** του Hyperion, για την ημερομηνία 20/08/2001, με την χωρική ανάλυση της εικόνας να είναι 30 μέτρα και τη φασματική της ανάλυση ν' αντιστοιχεί στα 10 nm.

Στο πρώτο επίπεδο εφαρμόστηκαν οι απαραίτητες **διαδικασίες προεπεξεργασίας** (όπως η ραδιομετρική και ατμοσφαιρική διόρθωση, η επιλογή των bad bands κ.λπ.), με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη απεικόνιση της ανακλαστικότητας επιφανείας, όπως αναφέρεται στο **§ IV**. Επιπρόσθετα, εφαρμόστηκαν και κάποιες μέθοδοι για την **εξαγωγή χαρακτηριστικών** (PCA, MNF, συντελεστής συσχέτισης), ώστε να γινόταν χρήση των αποτελεσμάτων μεταγενέστερα (Εικ. 0-1).

Στο δεύτερο στάδιο έγινε **επιλογή και κατηγοριοποίηση** των πετρωμάτων και ορυκτών, σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη της Μήλου όπως φαίνεται στο **§ VI**, για τα οποία εφαρμόστηκαν οι διαδικασίες του **φασματικού διαχωρισμού (SFF και MTMF)** και οι μέθοδοι **ταξινόμησης (SAM και Mahalanobis distance)** ολόκληρου του εικονοστοιχείου (Εικ. 0-1).

Για τις δοκιμές εντοπισμού των υλικών-στόχων χρησιμοποιήθηκαν καθαροί στόχοι όπως φασματικές υπογραφές (ορυκτών και πετρωμάτων ενδιαφέροντος), από τις διαθέσιμες φασματικές βιβλιοθήκες (USGS, JHU κλπ), οι οποίες υπάρχουν ενσωματωμένες στο λογισμικό ENVI 5.3, ή φασματικές υπογραφές όπως προέκυψαν από τις περιοχές ενδιαφέροντος που εντοπίστηκαν από τον χρήστη μέσω οπτικού ελέγχου και χρησιμοποιώντας τον διαθέσιμο γεωλογικό χάρτη. Επιπρόσθετα, υπήρχε και η περίπτωση που τα υλικά-στόχοι καθορίστηκαν μέσω αυτόματης εξαγωγής, από τη διαδικασία Spectral Hourglass Wizard του λογισμικού ENVI, όπως συνέβη στη μετασχηματισμένη Minimum Noise Fraction (MNF) εικόνα με 15 κανάλια.

Στη συνέχεια του § VI αναπτύχθηκαν οι μεθοδολογίες φασματικού διαχωρισμού του υπο-εικονοστοιχείου μέσω της **Spectral Feature Fitting (SFF)**, και της **Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF)**, με αποτέλεσμα να προκύψουν οι **κλασματικές καλύψεις** για κάθε **καθαρό στόχο (endmember)** και να δημιουργηθούν οι απαραίτητοι χάρτες αφθονίας. Τα πιο ακριβή αποτελέσματα να προέκυψαν με τη μέθοδο MTMF (βλ. § VIII & IX). Σε επόμενο βήμα χρησιμοποιήθηκαν μεθοδολογίες ταξινόμησης ολόκληρου του εικονοστοιχείου, όπως φαίνεται στο § VII, μέσω των **Spectral Angle Mapper (SAM)**, και **Mahalanobis distance, κάνοντας δοκιμές** για τις διάφορες κατηγορίες καθαρών στόχων που είχαν δημιουργηθεί. Σ' αυτές τις μεθοδολογίες τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν στην ταξινόμηση της μετασχηματισμένης εικόνας **MNF** για την SAM, και με τη χρήση της εικόνας από την **MTMF** για την περίπτωση της Mahalanobis distance.

Τέλος στο του § VIII πραγματοποιούνται ποιοτικοί έλεγχοι των αποτελεσμάτων και συγκρίνονται τ' αποτελέσματα ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για την καταλληλότητα των μεθοδολογιών. Η απόδοση της συνολικής ακρίβειας της ταξινόμησης συμβάλει στη σύγκριση των αποτελεσμάτων από διαφορετικές μεθοδολογικές προσεγγίσεις για την ίδια υπερφασματική εικόνα. Ωστόσο, στην προκειμένη εργασία, οι μεθοδολογίες δεν ήταν εφικτό ν' αξιολογηθούν με τον ίδιο τρόπο, γεγονός όχι ιδιαίτερα βοηθητικό σε αυτήν την κατεύθυνση.

Συμπερασματικά, προέκυψε ότι ο **συνδυασμός γνώσεων** από τους δύο τομείς (Γεωλογία και Τηλεπισκόπηση) είναι σημαντικός στην κατανόηση και στην ορθή ερμηνεία της γεωλογίας, ωστόσο είναι απαραίτητη και η γνώση σε βάθος της περιοχής μέσω της γεωλογικής χαρτογράφησης του πεδίου, σε συνδυασμό με τη δειγματοληψία, ώστε να γίνει αξιόπιστος ποιοτικός έλεγχος των αποτελεσμάτων.

**Λέξεις – κλειδιά:** Ταξινόμηση, Κλασματική κάλυψη, Hyperion, Φασματική υπογραφή, Ποιοτικός έλεγχος, Γεωλογικός σχηματισμός, Ορυκτές πρώτες ύλες, Υλικό-στόχος, Καθαρός στόχος, Χαρτογράφηση

## Δεδομένα Hyperion

- Ημερομηνία λήψης: 20/08/2001
- Νεφοκάλυψη 10-19%



## Προεπεξεργασία Εικόνας

- Ραδιομετρική διόρθωση
- Ατμοσφαιρική διόρθωση
- Επιλογή Bad Bands
- Γεωμετρική διόρθωση
- Εφαρμογή Μάσκας / NDVI, NDWI
- Λόγοι Καναλιών



## Εξαγωγή χαρακτηριστικών

- Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών / PCA
- Τεχνική Ελαχιστοποίησης Θορύβου / MNF
- Επιλογή καναλιών μέσω συσχέτισης

Μετασχ.  
εικόνα 15B

Ναι

Εικόνα από 20B  
χαμηλού συντ.  
συσχέτισης

Όχι

Αρχική εικόνα  
132B

## Καθαροί Στοιχοί

- Περιοχές εκπαίδευσης
- Αυτόματη εξαγωγή στόχων / PPI, n- D Visualizer
- Φασματικές υπογραφές

## Ταξινομήσεις

- Spectral Angle Mapper / SAM
- Mahalanobis distance

## Φασματικός διαχωρισμός

- Spectral Feature Fitting / SFF
- Mixture Tuned Matched Filtering / MTMF

## Αποτελέσματα & Σύγκριση

- Επανάληψη διαδικασιών
- Αναφορά στατιστικών
- Σύγκριση ταξινομήσεων

## Ανάλυση Σφαλμάτων

- Σημεία εκπαίδευσης / GCPs
- Εκτίμηση ακρίβειας από Confusion matrix

Εικ. 0-1: Διάγραμμα ροής εργασιών

## EXECUTIVE SUMMARY

---

The aims of this thesis are two. The first one, emphasizes on **mapping the geological formations** of **central part of Milos island**, such as limestones, rhyolitic and andesitic lavas, volcanic tuffs, and the second one is to record **specific mineral deposits** namely perlite, mpentonite and kaolin. Milos island mainly constitutes of volcanic rocks. Hydrothermal activities resulted in the formation of industrial rocks, by those volcanic rocks.

In this work **hyperspectral images** with 242 bands from the **satellite EO-1**, and to be more specific from the hyperspectral sensor named **Hyperion**, have been used. To succeed in the referred aims of the study, it was necessary to combine knowledge from both fields geology and remote sensing.

Chapter IV includes **preprocessing stage** of hyperspectral image, which is a first essential step for the work that follows. To be more specific, that Chapter refers to:

- Radiometric and Atmospheric corrections,
- Selection of Bad Bands,
- Geometric correction,
- Creation of sea and vegetation's masks, and
- Creation of band ratios, as well color composites.

At the second step, it was necessary to emphasize on rocks and mineral deposits that will be mapped through **methods of remote sensing**. It was necessary to use a geological map, that supplies the relevant information, regarding locations of rocks and minerals. Those data are included in Chapter VI.

The main algorithms used for this thesis are Spectral Angle Mapper, Mahalanobis distance, Mixture Tuned Matched Filtering and Spectral Feature Fitting. According to the results of this work MTMF and SFF, MTMF lead to better results, as can be seen on validation tables in Chapter VIII. Emphasizing on the results from SAM and Mahalanobis distance, validation indicates that Mahalanobis distance corresponds to higher values of overall accuracy.

To sum up, the combination of both the scientific fields of Geology and Remote sensing is very helpful for geological mapping and detection of mineral deposits, but in-situ data and field mapping is a necessity in order to soundly evaluate the results.

## I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

---

### I.1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Με τον όρο **Τηλεπισκόπηση** (remote sensing), γίνεται αναφορά στην επιστήμη που ασχολείται με την παρατήρηση της γήινης επιφάνειας, από απόσταση. Πρόκειται για τη διαδικασία ανίχνευσης - καταγραφής της ανακλώμενης – εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, με τον στόχο – δέκτη να βρίσκονται σε **μεγάλη απόσταση** ([www.usgs.gov/](http://www.usgs.gov/)).

Λόγω του συγκεκριμένου πλεονεκτήματος της τηλεπισκόπησης, η **πληθώρα των εφαρμογών** της, συμβάλλει στη σκιαγράφηση τόσο του φυσικού όσο και του ανθρωπογενούς περιβάλλοντος, καθώς και στη διασφάλισή τους. Πιο συγκεκριμένα, κάποιες από τις εφαρμογές της περιλαμβάνουν:

- την χαρτογράφηση των πετρωμάτων και τον εντοπισμό ορυκτών πρώτων υλών,
- την παρακολούθηση των δασών – την χαρτογράφηση καμμένων εκτάσεων από ενδεχόμενη πυρκαγιά, και
- την παρακολούθηση της νεφοκάλυψης.

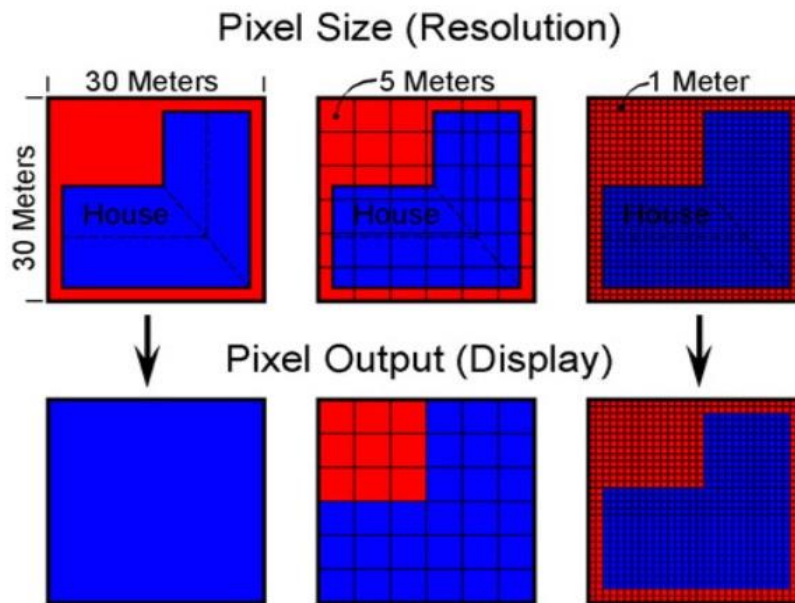
Τα συστήματα για την παρακολούθηση - ανίχνευση της γήινης επιφάνειας ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες: τα **παθητικά** και τα **ενεργητικά**, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια (Περάκης, κ.α. 2015):

- Αναφορικά με τα παθητικά, είναι **όργανα τα οποία δεν εκπέμπουν τα ίδια την ακτινοβολία** αλλά ανιχνεύουν και καταγράφουν τόσο την ανακλώμενη ηλιακή, όσο και την θερμική ακτινοβολία στα ορατά και στα υπέρυθρα μήκη κύματος, που εντοπίζονται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι περισσότεροι δορυφόροι.
- Σε σχέση με τα ενεργητικά, η διαφορά έγκειται στο ότι **εκπέμπουν τη δική τους ακτινοβολία**, με αποτέλεσμα να υφίσταται τα φαινόμενα της ανάκλασης, διάθλασης ή διάχυσης στη γήινη επιφάνεια και να γίνεται καταγραφή της κατά την επιστροφή της στο όργανο, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των οργάνων καταγραφής ραντάρ.

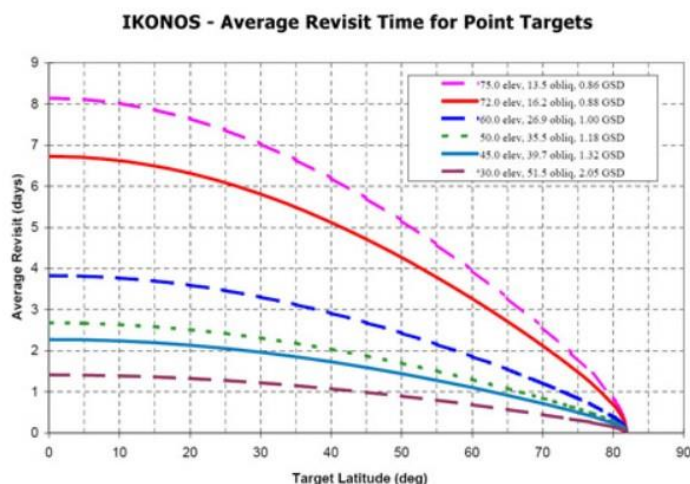
Τα **προϊόντα**, τα οποία προκύπτουν από τη χρήση των δορυφόρων, είναι ψηφιακές εικόνες των διαφόρων περιοχών της γήινης επιφάνειας, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα των πολλαπλών εφαρμογών, μερικές εκ των οποίων αναφέρθηκαν. Κάθε δορυφορική εικόνα είναι **ψηφιακή**, και επιτρέπει την αναπαράσταση μέσω των **δύο διαστάσεων**, των όποιων αντικειμένων. Συνεπώς, κάθε εικόνα συνιστά έναν δυσδιάστατο πίνακα, αποτελούμενο από **εικονοστοιχεία (pixels)**, καθένα εκ των οποίων διαθέτει μία **τιμή (ψηφιακός αριθμός, digital number)**, καθώς και μία θέση στον δυσδιάστατο πίνακα. Η θέση του ορίζεται από τους αριθμούς **στήλης (column)** και **σειράς (row)** ([crisp.nus.edu.sg/](http://crisp.nus.edu.sg/)).

Η τιμή ενός ψηφιακού αριθμού για κάθε εικονοστοιχείο, αντιστοιχεί ουσιαστικά σε μία φυσική ποσότητα, όπως είναι η ηλιακή ακτινοβολία που καταγράφεται, για ένα συγκεκριμένο εύρος από μήκη κύματος. Λόγω της **περιορισμένης χωρητικότητας** αποθήκευσης, ένας ψηφιακός αριθμός αποθηκεύεται με έναν πεπερασμένο αριθμό **δυναμικών ψηφίων (binary digits)**, με τον αριθμό αυτόν να καθορίζει τη **ραδιομετρική ανάλυση (radiometric resolution)** της εικόνας. Η ραδιομετρική ανάλυση εξαρτάται από το λόγο που έχει το **σήμα** προς το **θόρυβο** του ανιχνευτή ([crisp.nus.edu.sg/](http://crisp.nus.edu.sg/)).

Πέραν της ραδιομετρικής ανάλυσης – ικανότητας, η οποία και περιγράφει την ικανότητα του συστήματος να καταγράφει τις διαφορές στην ισχύ του σήματος, υπάρχουν και άλλα σημαντικά χαρακτηριστικά που ορίζουν τις ιδιότητες του συστήματος, όπως η **χωρική (spatial resolution)**, η **χρονική (temporal resolution)**, και η **φασματική διακριτική ικανότητα (spectral resolution)**. Με τον πρώτο όρο γίνεται αναφορά στο μέγεθος του μικρότερου χαρακτηριστικού της εικόνας, το οποίο και μπορεί ν' ανιχνευτεί (Εικ. 1-1). Σε σχέση με τη χρονική διακριτική ικανότητα, αναφέρεται ουσιαστικά στη συχνότητα λήψης εικόνων από την ίδια περιοχή, δηλαδή στην περίοδο επαναληψιμότητας ενός δορυφορικού συστήματος (Εικ. 1-2). Τέλος, ο όρος φασματική διακριτική ικανότητα, έχει άμεση συσχέτιση με τον αριθμό των φασματικών ζωνών του **ηλεκτρομαγνητικού φάσματος**, που εντοπίζονται σ' ένα δορυφορικό σύστημα (Παρχαρίδης, 2015).



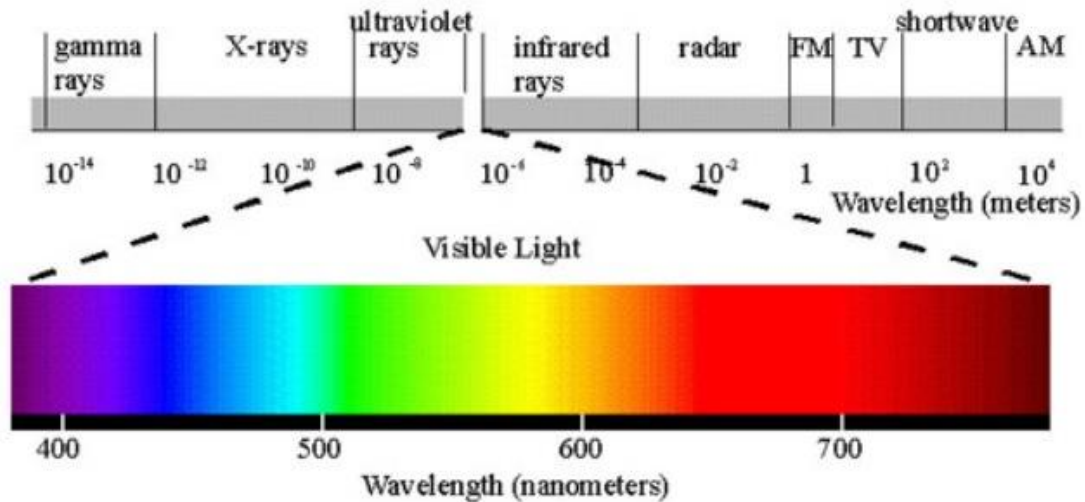
Εικ. 1-1: Χωρική διακριτική ικανότητα ([www.satimagingcorp.com/](http://www.satimagingcorp.com/))



Εικ. 1-2: Χρονική διακριτική ικανότητα - δορυφόρος IKONOS, με παγχρωματικούς και πολυφασματικούς αισθητήρες ([www.esa.int/](http://www.esa.int/))

Όπως προαναφέρθηκε και στις κατηγορίες των δορυφορικών συστημάτων, η **ακτινοβολία (radiance)** που θα καταγράψουν οι ανιχνευτές, έχει ως κυριότερη πηγή ενέργειας τον ήλιο, με την ενέργεια να είναι γνωστή ως **ηλεκτρομαγνητική**. Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας απεικονίζεται αναλόγως με το μήκος κύματος, το οποίο αντιστοιχεί στο επίπεδο

ενέργειας κάθε φωτονίου. Το φως, καθώς και άλλες μορφές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, διακρίνονται σε επιμέρους ζώνες οι οποίες είναι τα ραδιοκύματα, τα μικροκύματα, η υπέρυθρη ακτινοβολία, η ορατή ακτινοβολία, η υπεριώδης ακτινοβολία, οι ακτίνες Χ και οι ακτίνες γ, όπως φαίνεται και στην εικόνα (Εικ. 1.1 3) (Young, 1804).



Εικ. 1-3: Μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ([www.satimagingcorp.com/](http://www.satimagingcorp.com/)).

Η **ακτινοβολία** είναι η μεταβλητή που μετριέται και καταγράφεται απευθείας με τους τηλεπισκοπικούς δέκτες, και αποτελεί την ποσότητα φωτός που ανιχνεύει το όργανο από το παρατηρούμενο αντικείμενο – στόχο. Εξαρτάται από τον φωτισμό (από την ένταση και την κατεύθυνση του φωτός), τον προσανατολισμό, τη θέση του στόχου, καθώς και από την πορεία του φωτός μέσω της ατμόσφαιρας.

Από την άλλη η **ανακλαστικότητα (reflectance)** ορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας φωτός που εκπέμπει ένας στόχος προς την ποσότητα του φωτός που λαμβάνει ο στόχος, κι εξαρτάται από την ιδιότητα του παρατηρούμενου υλικού/στόχου. Η ανακλαστικότητα διακρίνεται σε **φαινόμενη και πραγματική ανακλαστικότητα**, με την φαινόμενη ανακλαστικότητα να διαφέρει από την πραγματική, στο γεγονός ότι η επίδραση της ατμόσφαιρας και του ηλιακού φωτισμού, οι σκιές και οι απευθείας επιδράσεις στην ανακλαστικότητα δεν έχουν αντιμετωπιστεί.

Δεδομένου ότι ο αισθητήρας βρίσκεται σε απόσταση από την επιφάνεια, η ηλιακή ακτινοβολία θα επιδράσει με την ατμόσφαιρα, η οποία έχει σημαντικό ρόλο στην ηλιακή ακτινοβολία που τελικά θα καταγραφεί από τον υπερφασματικό αισθητήρα. Στην καταγραφή αυτή έχουν σημασία οι παρακάτω παράγοντες, και πιο συγκεκριμένα (Borengasser, M., et al. 2007; Ray, 1994):

- Το ποσό της ατμοσφαιρικής ανάκλασης,
- Το ποσό της ατμοσφαιρικής απορρόφησης,
- Η μοριακή απορρόφηση,
- Το ποσό της ατμοσφαιρικής σκέδασης, και
- Η σκέδαση Rayleigh, Mie κ.λπ.



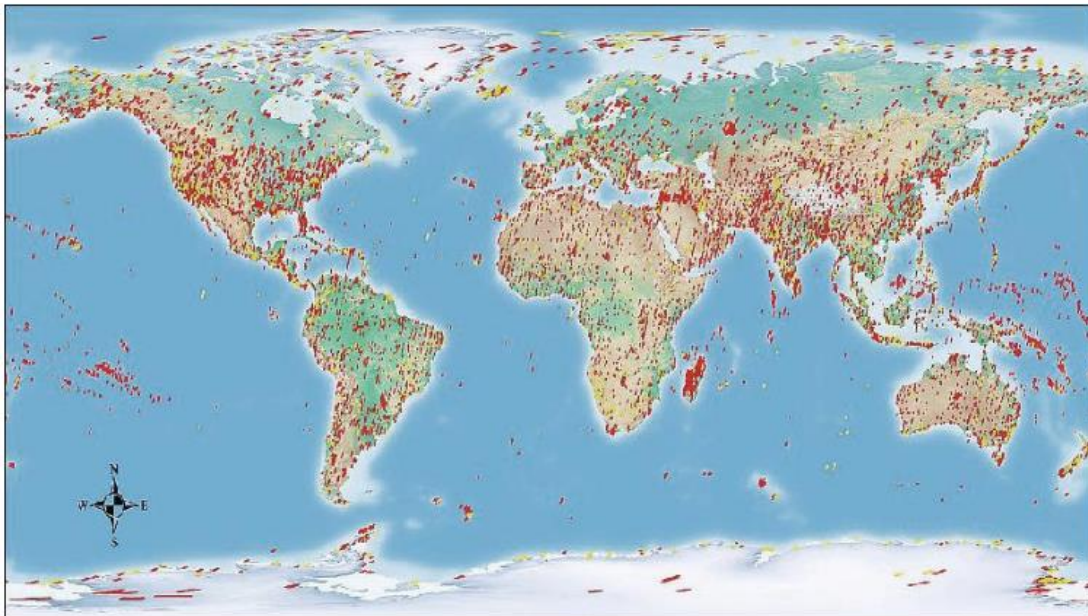
Επομένως, η καταγραφή της φασματικής συμπεριφοράς των αντικειμένων από τους υπερφασματικούς αισθητήρες, εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, δηλαδή των αλγορίθμων φασματικής διόρθωσης που θα χρησιμοποιηθούν, ώστε να αφαιρεθεί η επίδραση της ατμόσφαιρας από την εικόνα, όπως και αναλύεται εκτενώς στο § IV.2.

## 1.2. ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ EO-1

### 1.2.1. Γενικά χαρακτηριστικά

Ο δορυφόρος Earth Observing (EO-1) πραγματοποίησε την πρώτη αποστολή του την 21<sup>η</sup> Νοεμβρίου του 2000, με διάρκεια ενός έτους, υπό τον έλεγχο του U.S. Geological Survey (USGS) και της National Aeronautics and Space Administration (NASA). Η αποστολή του συγκεκριμένου δορυφόρου πραγματοποιήθηκε για τον έλεγχο της ακρίβειας των τηλεπισκοπικών δεδομένων του προγράμματος Landsat Data Continuity Mission (LDCM). Ωστόσο, λόγω του έντονου ενδιαφέροντος για τη συλλογή και τη διανομή των συγκεκριμένων δεδομένων, όπως φαίνεται και στην εικόνα (Εικ. 1-4), το πρόγραμμα του EO-1 συνεχίστηκε και μετά την ολοκλήρωση του πρώτου έτους ([archive.usgs.gov](http://archive.usgs.gov)).

Ο συγκεκριμένος δορυφόρος EO-1 ακολουθούσε κυκλική, επαναληπτική, ηλιοσύγχρονη και σχεδόν πολική τροχιά, σε υψόμετρο 705 km στο γεωγραφικό πλάτος του Ισημερινού, «ταξιδεύοντας» από τον βορρά προς το νότο. Η ταχύτητα του είναι 7.5 km/s, με το κατώτερο σημείο να εμφανίζει ταχύτητα 6.74 km/s, και η κλίση τροχιάς του αντιστοιχεί στους 98.2 βαθμούς. Η τροχιακή περίοδος του δορυφόρου υπολογίζεται στα 98.6 λεπτά, συνεπώς μέσα σε μία μέρα πραγματοποιεί 14 τροχιές, με κύκλο επανεπίσκεψης τις 16 ημέρες (Παρχαρίδης, 2015). Ο επόμενος χάρτης δείχνει τις δειγματοληψίες δεδομένων του δορυφόρου EO-1, από το ξεκίνημα της εκτόξευσής του, μέχρι και το έτος 2015:



Εικ. 1-4: Δειγματοληψία δεδομένων - δορυφόρος EO-1, με αριθμό δεδομένων μεγαλύτερο των 79,000 από την ημερομηνία εκτόξευσης του δορυφόρου (12/2000 – 2/2015). Με κίτρινο

χρώμα οι συλλογές από το 2013; περισσότερες από 13,000. Πηγή: Middleton E., M., et al., 2015.

Τα όργανα τα οποία διαθέτει ο δορυφόρος για την καταγραφή των υπερφασματικών και των πολυφασματικών καναλιών είναι τα τρία ακόλουθα (Pearlman et al., 2001):

1. Δύο οπτικά όργανα, τον Linear Etalon Imaging Spectral Array (LEISA) Atmospheric Corrector (LAC) και τον Advanced Land Imager (ALI),
2. Τον υπερφασματικό αισθητήρα Hyperion.

Οι αισθητήρες ALI και Hyperion, αρχικά είχε υπολογιστεί να είναι ενσωματωμένοι στο ίδιο όργανο, αλλά τελικά κατασκευάστηκαν ως ξεχωριστά όργανα. Ένα από τα πλεονεκτήματα τους είναι το ότι δίνουν τη δυνατότητα να σκοπεύουν και πλάγια, γεγονός που επιτρέπει την απόκτηση εικόνων και πέραν της τρέχουσας διαδρομής που πραγματοποιεί ο δορυφόρος (πέραν της διαδρομής ναδίου).

Αναφορικά με το υπερφασματικό όργανο Hyperion, κατασκευάστηκε σε 12 μήνες και πρόκειται για ένα αξιοσημείωτο επίτευγμα, λόγω του τόσο μικρού χρονικού διαστήματος. Δεδομένου ότι η αποστολή Hyperion σχεδιάστηκε μόνο ως τεχνική επίδειξη και κατασκευάστηκε μέσα σε τόσο μικρό, χρονικό διάστημα, τα παραγόμενα δεδομένα απαιτούν ορισμένα βήματα επεξεργασίας, εάν αυτά πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για επιστημονική έρευνα (Pearlman et al., 2001). Ο Hyperion «ταξίδευσε» με τον δορυφόρο EO-1 από το 2000 μέχρι το 2017, ενώ το πολυφασματικό όργανο του EO-1, ALI, ήταν ένα από τα όργανα που συμμετείχε μετέπειτα στη δημιουργία του Landsat 8 (Pearlman et al., 2001)

Το όργανο Hyperion δίνει τη δυνατότητα καταγραφής ανά εικόνα επιφάνειας των 7.5 km<sup>2</sup>, με χωρική ανάλυση τα 30 m και σε ορθή γωνία ως προς τη φορά κίνησης του δορυφόρου και τα δεδομένα του συλλέγονται από δύο όργανα τύπου pushbroom, που σαρώνουν την επιφάνεια της Γης, γραμμή προς γραμμή κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης του συστήματος απεικόνισης. Το όργανο Hyperion αποτελείται από τρεις φυσικές ενότητες: (i) τη δέσμη του Hyperion sensor (HAS), (ii) τη δέσμη Hyperion electronics (HEA) και (iii) την δέσμη Cryocooler electronics (CEA). Αναφορικά με την πρώτη δέσμη, είναι αυτή στην οποία συμπεριλαμβάνονται οι δύο αισθητήρες για την καταγραφή του εγγύς υπέρυθρου (Visible Near Infrared, VNIR) και του μέσου υπέρυθρου (Short Wave Infrared, SWIR), αντίστοιχα (Folkman, M. A., et al., 2001).

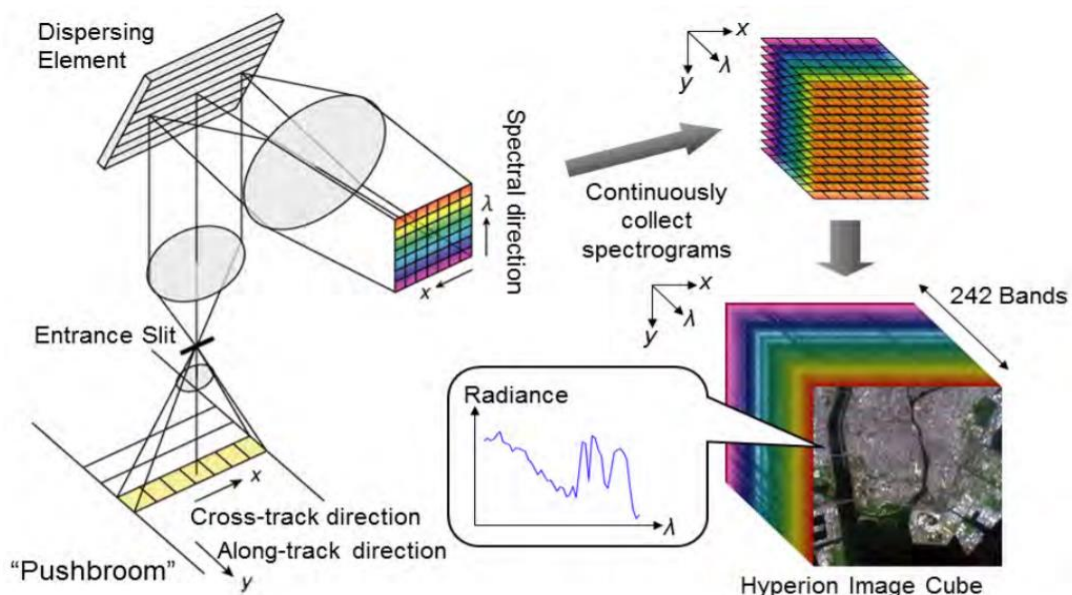
Επιπρόσθετα το όργανο Hyperion παρέχει μια υψηλής χωρικής ανάλυσης εικόνα, σε συνολικά 242 διαύλους στο συνεχές φάσμα, με τον ανιχνευτή του εγγύς υπέρυθρου (VNIR) να έχει 70 κανάλια και του μέσου υπέρυθρου (SWIR), 172. Ορισμένα απ' τα κανάλια είναι μη βαθμονομημένα, ενώ κάποια δεν επιστρέφουν καθόλου δεδομένα, γεγονός που οφείλεται στην απώλεια σήματος του αισθητήρα, λόγω της χαμηλής ευαισθησίας των ανιχνευτών (Pearlman et al., 2001).

Ως εκ τούτου, ένα τμήμα από τους διαύλους αφαιρείται με αποτέλεσμα να προκύπτουν 196 κανάλια (στο σύνολο 198 κανάλια και λόγω επικάλυψης των καναλιών VNIR με τα κανάλια SWIR, προκύπτουν τελικά 196 κανάλια), εκ των οποίων από 8 έως 57 (497-925nm) αντιστοιχούν στο εγγύς υπέρυθρο, και από 77 έως 224 (912-2395nm) στο μέσο υπέρυθρο. Εν κατακλείδι, το σύστημά του Hyperion συνίσταται από δύο φασματόμετρα (VNIR και SWIR), με αποτέλεσμα να μπορεί να συλλάβει 198 κανάλια, με το φασματικό του εύρος να υπολογίζεται από 0.4 έως 2.5 μm., δηλαδή από 50 κανάλια VNIR και 148 SWIR, και την φασματική ανάλυση ν' αντιστοιχεί στα 10 nm (Πίνακας I-1) (Pearlman et al., 2001).

Πίνακας I-1: Βασικά χαρακτηριστικά υπερφασματικού αισθητήρα Hyperion. Πηγή: [bit.ly/2QdSNMK](http://bit.ly/2QdSNMK).

| Χαρακτηριστικά Hyperion    |                                          |
|----------------------------|------------------------------------------|
| Εύρος φάσματος             | VNIR: 400 - 1000nm<br>SWIR: 900 - 2500nm |
| Χωρική ανάλυση             | 30 m                                     |
| Πλάτος λωρίδας             | 7.5 km                                   |
| Φασματική ανάλυση          | 10 nm                                    |
| Φασματική κάλυψη           | Συνεχής                                  |
| Συνολικός αριθμός καναλιών | 242                                      |
| Ραδιομετρική ακρίβεια      | 6 %                                      |
| Χρόνος ζωής                | 1 χρόνος (2 χρόνοι ο στόχος)             |
| Μάζα                       | 49 kg                                    |
| VNIR SNR 550 – 700 nm      | 144 - 161                                |
| SWIR SNR 1000 – 1050 nm    | 90                                       |
| SWIR SNR 1200 – 1250 nm    | 110                                      |
| SWIR SNR 1550 – 1600 nm    | 89                                       |

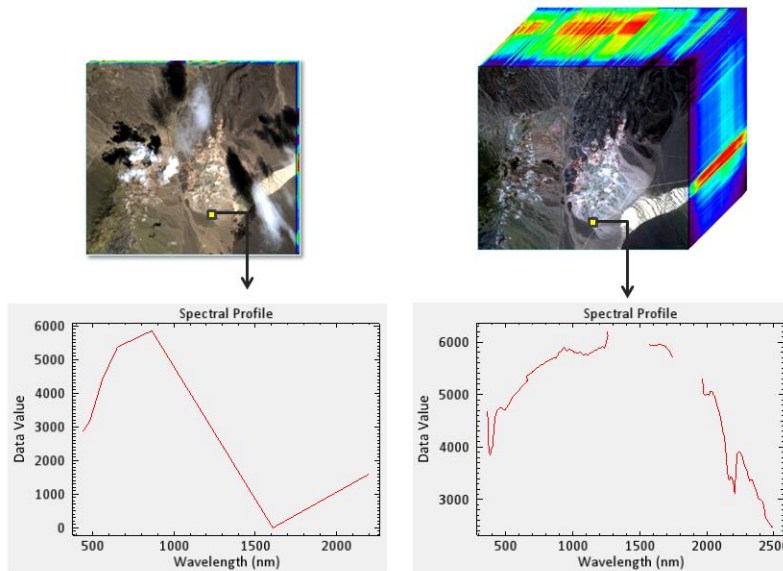
Άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό για τον αισθητήρα Hyperion είναι ότι συλλέγει φασματογραφήματα, τα οποία διαμορφώνουν έναν **υπερφασματικό κύβο (hyperspectral cube)**, που συνίσταται από τις 3 ακόλουθες διαστάσεις: την **cross-track (x)**, την **along-track (y)** και την **spectrum ( $\lambda$ )**, όπως φαίνεται στην Εικ. I-5:



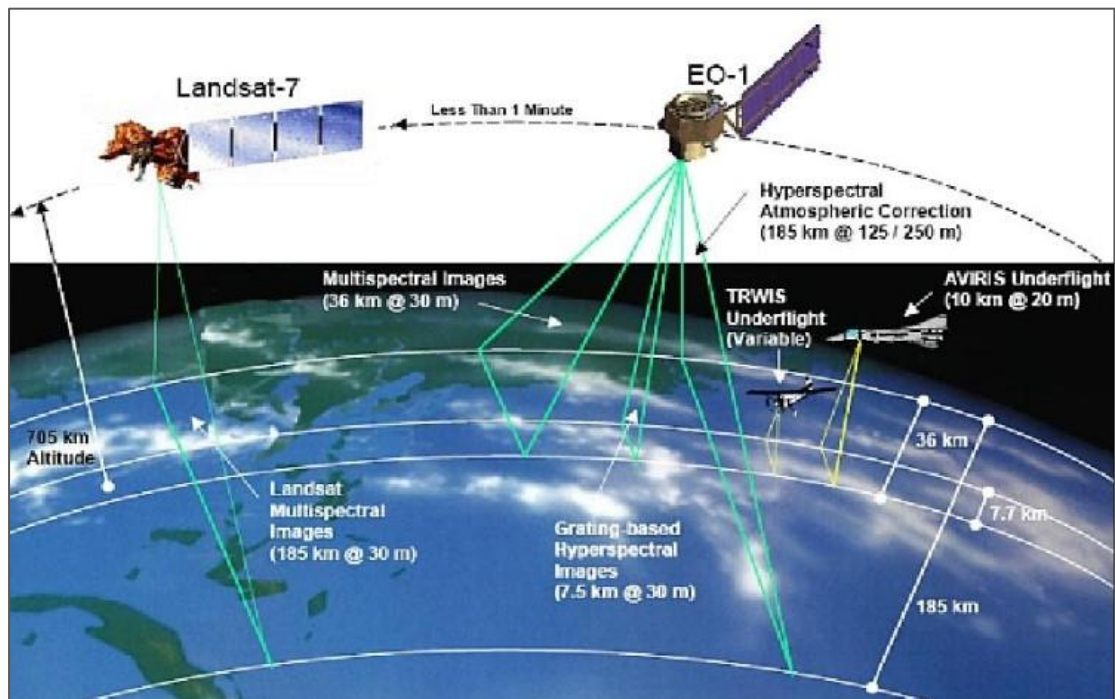
Εικ. I-5: Υπερφασματική απεικόνιση. Πηγή: Yokoya et al., 2000.

Αναφορικά με τις **φασματικές ζώνες**, ο υπερφασματικός αισθητήρας Hyperion εμφανίζει πλεονέκτημα συγκριτικά με πολυφασματικούς αισθητήρες. Το παρακάτω σχήμα (Εικ. I-6)

δείχνει πως ένα δεδομένο εικονοστοιχείο από μια πολυφασματική εικόνα καλύπτει μόνο διακριτές, φασματικές ζώνες. Ένας πολυφασματικός αισθητήρας (όπως είναι ο Landsat 8) που μπορεί να έχει πολλές ζώνες καλύπτοντας από το ορατό έως και το θερμικό φάσμα, δε δίνει τη δυνατότητα να παράγει ένα συνεχές φάσμα ενός αντικειμένου, εν αντιθέσει με έναν υπερφασματικό αισθητήρα (όπως είναι ο AVIRIS του παραδείγματος ή ο Hyperion). Επιπλέον στην Εικ. 1-7 φαίνονται τα ίχνη στην επιφάνεια του εδάφους για κάθε αισθητήρα, κάνοντας μία σύγκριση με τον αισθητήρα Landsat 7 ETM+, καθώς και με τα όργανα παρατήρησης του υπερφασματικού δέκτη AVIRIS.



Εικ. 1-6: Δορυφορική εικόνα Landsat 7 ETM+ (7 κανάλια) και φασματικό προφίλ ενός pixel (εικόνες σ'αριστερά) και δορυφορική εικόνα AVIRIS (224 κανάλια) και φασματικό προφίλ του ίδιου pixel (εικόνες στα δεξιά). Πηγή: [www.harrisgeospatial.com](http://www.harrisgeospatial.com).



Εικ. 1-7: Στην εικόνα παρουσιάζονται τα ίχνη στην επιφάνεια του εδάφους, για τον αισθητήρα Landsat 7 ETM+ και τους τρεις αισθητήρες του EO-1: EO-1 Atmospheric Corrector, EO-1 ALI

και EO-1 Hyperion. Η πλατφόρμα του EO-1 έχει ρυθμιστεί, ώστε να έχει χρονική καθυστέρηση, σε σχέση με τον Landsat 7, ενός λεπτού, στο ύψος των 705 km. Στην εικόνα φαίνονται τα swath width, κάθε αισθητήρα. Πηγή: [www.nasa.gov](http://www.nasa.gov).

## 1.2.2. Προϊόντα

Γενικά, υπάρχουν διάφορα επίπεδα της επεξεργασίας εικόνων Hyperion, τα οποία και περιγράφονται (Thenkabail et al., 2019):

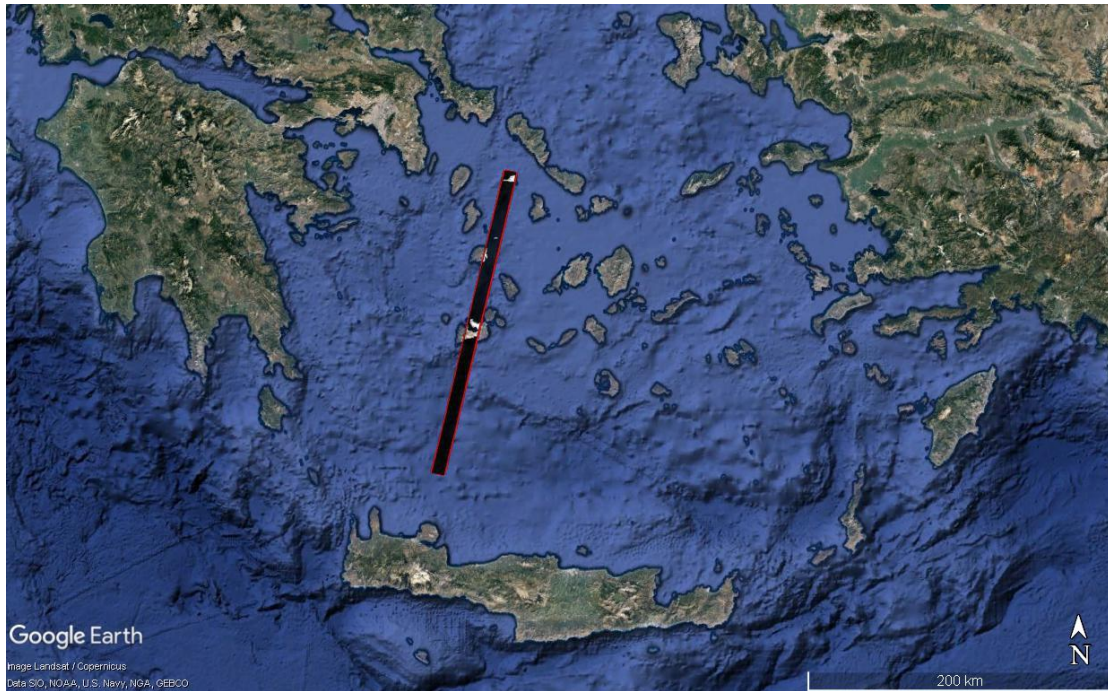
- Level 0: τα δεδομένα αυτού του επιπέδου αποκωδικοποιούνται, διαχωρίζονται σε φακέλους και επαληθεύεται η ακεραιότητα των δεδομένων, καθώς και η απόδοση του οργάνου. Συνδυάζονται τα δεδομένα για μήκη κύματος VNIR και SWIR, και μετατρέπονται σε μορφή HDF.
- Level 1: παράγονται όταν εφαρμόζεται στα δεδομένα του Level 0, smear correction και echo removal. Τα δεδομένα βαθμονομούνται χρησιμοποιώντας dark frames, σε προγενέστερο και μεταγενέστερο στάδιο. Έπειτα, γίνεται μετακίνηση του υποβάθρου κι επομένως τα δεδομένα έχουν υποστεί ραδιομετρική διόρθωση, με τα γνωστά “bad pixels” επιδιορθώνονται τότε.
- Level 1A: τα δεδομένα αυτού του επιπέδου είναι σε “signed integers”, εν αντιθέσει με τα προϊόντα του Level 1, που είναι σε “unsigned integers”.
- Level 1B: περιλαμβάνει την χωρική εγγραφή εικόνας σε εικόνα των καναλιών VNIR και SWIR.
- Level 1R: περιλαμβάνει τα προϊόντα που έχουν υποστεί ραδιομετρική και όχι γεωμετρική διόρθωση, και τα δεδομένα είναι σε μορφή HDF.
- Level 1Gst: περιλαμβάνει τα προϊόντα που έχουν υποστεί ραδιομετρική και γεωμετρική διόρθωση, και τα δεδομένα είναι σε μορφή GeoTIFF.
- Level 1T: περιλαμβάνει τα προϊόντα που έχουν υποστεί ραδιομετρική και γεωμετρική διόρθωση, με χρήση σημείων ελέγχου, και τα δεδομένα είναι σε μορφή GeoTIFF.

## 1.3. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Οι διαθέσιμες εικόνες από τον δορυφόρο EO-1, με χρήση του υπερφασματικού οργάνου του Hyperion, αφορούσαν τις εξής ημερομηνίες για την περιοχή ενδιαφέροντος της Μήλου:

- 04-08-2001,
- 20-08-2001, και
- 05-09-2001

Επιλέχθηκε τελικά η εικόνα που λήφθηκε στις 20-08-2001, με κωδικό **EO1H1820352001232111PP\_SGS\_01** (με νεφοκάλυψη 10-19%). Τα δεδομένα Hyperion διατίθενται σε μορφή GeoTIFF, ενώ το προϊόν από τον Hyperion περιέχει κι ένα metadata file. Η παρακάτω Εικ. 1-8 δείχνει την περιοχή λήψης του αισθητήρα Hyperion, στο Ν. Αιγαίο.



Εικ. I-8: Χρήση του Google Earth, με το footprint του αισθητήρα Hyperion, στην περιοχή του Ν. Αιγαίου, σκιαγραφημένο με κόκκινο χρώμα. Η απεικόνιση Hyperion προβάλλεται RGB, με χρήση των καναλιών 29, 20 και 11.

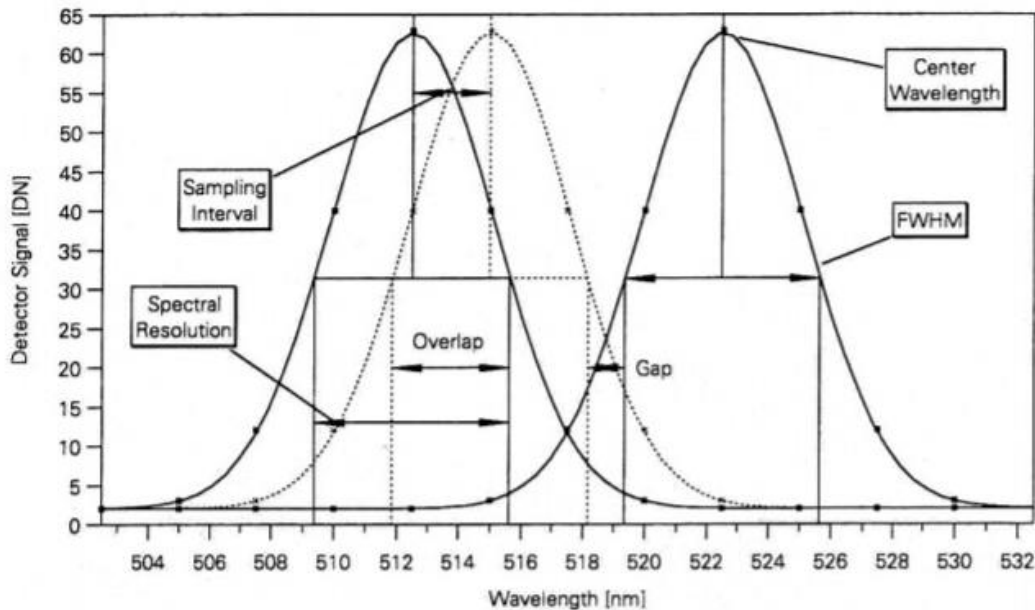
#### I.4. ΦΑΣΜΑΤΟΡΑΔΙΟΜΕΤΡΑ – ΥΠΕΡΦΑΣΜΑΤΙΚΟΙ ΔΕΚΤΕΣ

Τα φασματοραδιόμετρα (spectroradiometers) είναι τα όργανα καταγραφής του φάσματος που αντιστοιχεί στα διάφορα υλικά και χρησιμοποιούνται ευρέως στο εργαστήριο, στο πεδίο, σε αεροσκάφη και σε δορυφόρους. Στην παρούσα εργασία δεν υπήρξε έρευνα στο πεδίο, ώστε να χρησιμοποιηθούν για την καταγραφή των φασματικών υπογραφών. Ωστόσο, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που προέκυψαν από τον υπερφασματικό δέκτη Hyperion, τα οποία αποκτώνται από δύο ξεχωριστά φασματοραδιόμετρα τύπου pushbroom, που σαρώνουν την επιφάνεια της Γης γραμμή προς γραμμή κάθετα στη διεύθυνση της κίνησης του συστήματος απεικόνισης κι εμφανίζουν μία περιοχή φασματικής επικάλυψης, μεταξύ των 852 και 1,058 nm (Παρχαρίδης, 2015).

Οι σημαντικότεροι παράμετροι για ένα φασματοραδιόμετρο ή/και ένα υπερφασματικό δέκτη είναι οι παρακάτω, μερικές εκ των οποίων φαίνονται και στην Εικ. I-9:

- Το φασματικό εύρος (spectral range), που είναι σημαντικό ώστε να περιλαμβάνονται τα μήκη κύματος για χαρακτηριστική απορρόφηση του υλικού,
- Το φασματικό εύρος ζώνης (spectral bandwidth), που ορίζεται ως το πλάτος ενός μεμονωμένου φασματικού καναλιού στο φασματομέτρο,
- Η φασματική διακριτική ικανότητα (spectral resolution), που αντιστοιχεί στο πλήρες πλάτος του μισού μέγιστου (full width half maximum - FWHM) στην περίπτωση της κανονικής Gaussian κατανομής,
- Η φασματική δειγματοληψία (spectral sampling), παράμετρος που καθορίζει τη φασματική, διακριτική ικανότητα του δορυφόρου και δηλώνει την απόσταση μεταξύ δύο κοντινών σημείων από το φάσμα, και

- Ο λόγος σήματος – θορύβου (signal to noise ratio), που εξαρτάται από παράγοντες όπως είναι η ευαισθησία του οργάνου, το φασματικό εύρος ζώνης κ.λπ.



Εικ. 1-9: Φασματική διακριτική ικανότητα, διάστημα φασματικής δειγματοληψίας, FWHM και κέντρο μήκους κύματος Gaussian (Schaerpan, 1998).

Η ευρεία χρήση των φασματοραδιόμετρων στηρίχθηκε σε πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα όργανα, όπως είναι η ευαισθησία τους στην αλλαγή των χημικών δεσμών ενός αντικειμένου, καθώς και η διάκριση των κρυσταλλικών, έναντι των άμορφων υλικών. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι χρησιμοποιούνται για διαφορετικές κλίμακες παρατηρήσεις (εργαστήριο, δορυφόροι κ.λπ.) αποτελεί ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημά τους. Η ευαισθησία τους ακόμα και σε μικρές αλλαγές στις χημικές συστάσεις του υλικού, τα καθιστά ως τα κατάλληλα όργανα για την αναγνώριση και ανίχνευση των διαφορετικών ορυκτών – πετρωμάτων, με διαφορετικά χαρακτηριστικά απορρόφησης (Clark, 1999).

## 1.5. ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΥΠΟΓΡΑΦΕΣ

Σε σχέση με την φασματική συμπεριφορά των αντικειμένων, καθορίζεται από την απόκριση των φωτονίων, σε σχέση με το υλικό, και η χρήση της φασματικής συμπεριφοράς των υλικών-στόχων, συμβάλλει στην αναγνώρισή τους κατά την υπερφασματική ανάλυση.

Για τα φωτόνια ισχύει ότι ένα μέρος που προσπίπτει στα ορυκτά καθώς και τα πετρώματα, ανακλάται στην επιφάνεια των κόκκων, ένα άλλο μέρος διέρχεται μέσω των κόκκων κι ένα μέρος αυτής της ακτινοβολίας απορροφάται από τους κόκκους, με τα φωτόνια που αντανακλώνται ή διαθλώνται στις επιφάνειές τους να λέγονται σκεδαζόμενα (Clark, 1999).

Όταν μία δέσμη φωτονίων συναντήσει ένα διαφορετικό μέσο, η αλλαγή του δείκτη διάθλασης έχει ως αποτέλεσμα κάποια από τα φωτόνια να ανακλώνται και κάποια άλλα να διαθλώνται, με τον υπολογισμό του σύνθετου δείκτη διάθλασης των υλικών να γίνεται μέσω της μαθηματικής σχέσης (1):

$m = n - jK$ , (1) όπου  $j = (-1)^{1/2}$  και  $m$ : σύνθετος δείκτης διάθλασης

$n$ : πραγματικός δείκτης διάθλασης

$K$ : φανταστικό μέρος του δείκτη διάθλασης

(συντελεστής απόσβεσης)

Επιπλέον, σύμφωνα με τον νόμο του Beers, για τα φωτόνια που συναντούν ένα μέσο στο οποίο απορροφώνται, ισχύει η εξίσωση (2):

$I = I_0 e^{-kx}$ , (2) όπου  $I$ : παρατηρούμενη ένταση

$I_0$ : πραγματική ένταση του φωτός

$k$ : συντελεστής απορρόφησης

$x$ : απόσταση μέχρι το μέσο

Με τη σχέση μεταξύ συντελεστή απορρόφησης και τον σύνθετο δείκτη διάθλασης, να δίνεται από την εξίσωση (3):

$k = 4\pi K/\lambda$ , (3) όπου  $\lambda$ : μήκος κύματος του φωτός

Τέλος, η ανάκλαση του φωτός  $R$ , για την περίπτωση της επίπεδης επιφάνειας, δίνεται από την εξίσωση Fresnel (4):

$R = [(n - 1)^2 + K^2] / [(n + 1)^2 + K^2]$  (4)

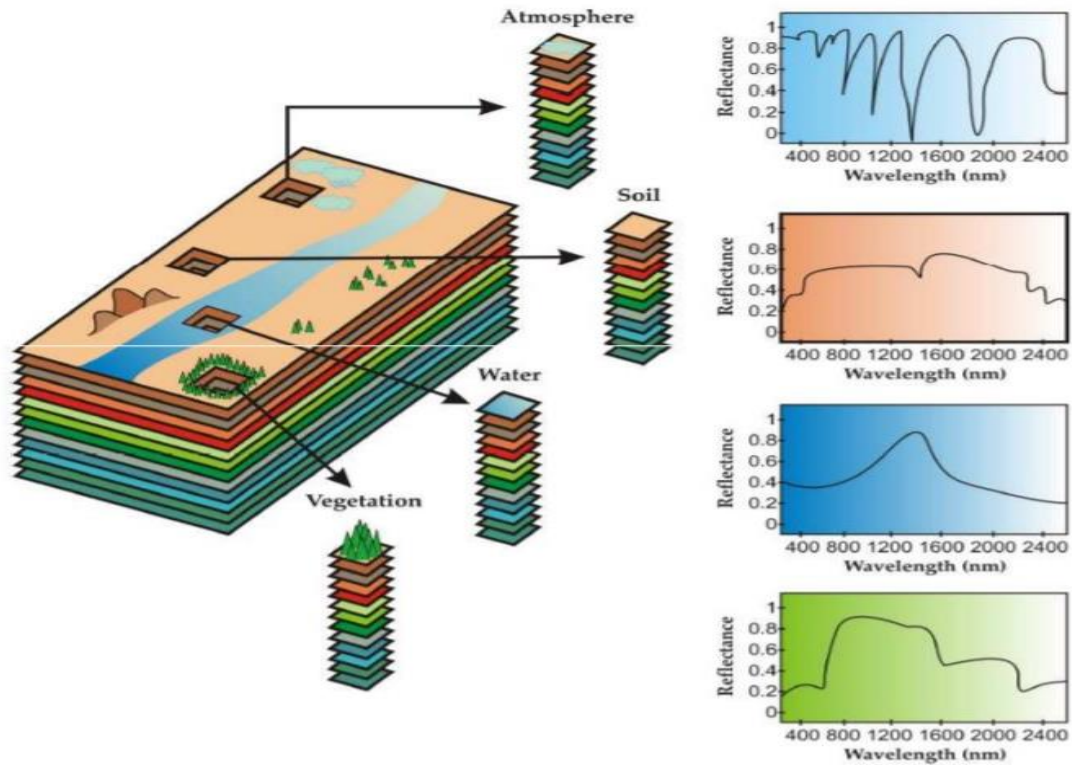
Ενώ για διαφορετικές γωνίες, η ανάκλαση υπολογίζεται από πιο περίπλοκες συναρτήσεις. Έπειτα από την ανάκλαση – διάθλαση – απορρόφηση που πραγματοποιείται, τα σκεδαζόμενα φωτόνια είτε συναντούν κάποιον άλλον κόκκο του ορυκτού, είτε διασκορπίζονται από την επιφάνεια, με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η ανίχνευση και η μέτρησή τους (Clark, 1999).

Οι διαδικασίες απορρόφησης για τα καταγραφόμενα μήκη κύματος, επιτρέπουν την άντληση των απαραίτητων πληροφοριών, σε σχέση με τις χημικές ιδιότητες των ορυκτών – πετρωμάτων, στα διάφορα μήκη κύματος και συμβάλουν στον εντοπισμό του εκάστοτε υλικού-στόχου είτε πρόκειται για βλάστηση, έδαφος, πέτρωμα κ.λπ. Διακρίνονται δύο περιπτώσεις για τις φασματικές υπογραφές που καταγράφονται από τους αισθητήρες (Καραθανάση, χ.χ.):

- Οι **καθαροί στόχοι (endmembers)**, στους οποίους οι καθαρές φασματικές υπογραφές της απεικόνισης, ανήκουν κάθε φορά σε ένα μοναδικό υλικό/στόχο, και
- Τα **μεικτά εικονοστοιχεία (mixed pixels)**, τα οποία λόγω της παρουσίας διαφορετικών υλικών που συνθέτουν ένα εικονοστοιχείο, βρίσκονται μαζί με περισσότερα από ένα υλικά.

Στην επόμενη Εικ. 1.10 απεικονίζονται ορισμένα παραδείγματα για την περίπτωση καθαρών στόχων ή μεικτών εικονοστοιχείων, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Επιπλέον, φαίνεται ακόμα η θεώρηση ότι κάθε εικονοστοιχείο αναπαρίσταται ως ένα **διάνυσμα στήλης**.





Εικ. 1-10: Ανάλυση φασματικής ανάμιξης (Spectral Mixture Analysis). Παραδείγματα φασματικών υπογραφών. Πηγή: [Καραθανάση, χ.χ.](#)

Για την χαρτογράφηση χρησιμοποιήθηκε η ιδιότητά των ορυκτών και των πετρωμάτων να ανακλούν και ν' απορροφούν με διαφορετικό τρόπο την προσπίπτουσα ακτινοβολία, για τις διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, με τ' αντικείμενα να εμφανίζουν το δικό τους φασματικό πρότυπο ανακλαστικότητας, σε διαφορετικά μήκη κύματος, όπως αναλύεται στο § VI.

## 1.6. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ

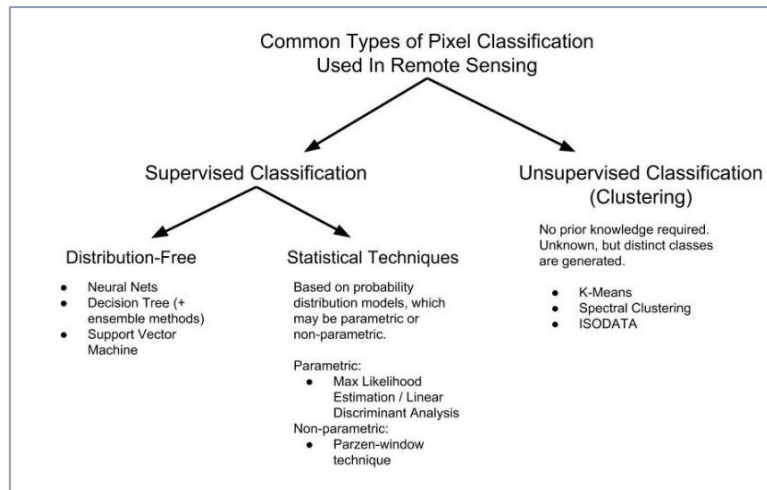
Η έννοια των ταξινομήσεων αφορά πολυάριθμες επιστήμες, μία εκ των οποίων και η Τηλεπισκόπηση. Η **ταξινόμηση** των εικονοστοιχείων μέσω ενός αλγόριθμου, πραγματοποιείται με τέτοιο τρόπο ώστε τα διαφορετικά εικονοστοιχεία να ομαδοποιούνται και να υπάγονται σε μία κλάση. Στόχος είναι η ομαδοποίηση των εικονοστοιχείων σε ορισμένο αριθμό φασματικών ομάδων, με αποτέλεσμα τη σύνδεσή τους με συγκεκριμένες **κατηγορίες καλύψεων γης** (Niblack 1986).

Οι ταξινομήσεις υλοποιούνται χρησιμοποιώντας όλες τις διαθέσιμες πληροφορίες που παρουσιάζουν τα εικονοστοιχεία στο συνολικό αριθμό καναλιών τους, με τα εικονοστοιχεία έπειτα από την ταξινόμησή να εμφανίζουν μία και μόνο αριθμητική τιμή, που αντιστοιχεί στην κλάση κάλυψης γης (Περάκης, κ.α. 2015).

Η διάκριση των ταξινομήσεων, πραγματοποιείται σύμφωνα με την παράμετρο που εξετάζεται κάθε φορά. Για παράδειγμα υπάρχει κατηγοριοποίηση των ταξινομήσεων σύμφωνα με τη **χωρική μονάδα**, όπως **ολόκληρου του εικονοστοιχείου (per pixel)**, του υπο-

**εικονοστοιχείου (per subpixel) ή άλλης χωρικής μονάδας (per field).** Η πιο διαδεδομένη κατηγοριοποίηση, είναι αυτή των **επιβλεπόμενων και μη επιβλεπόμενων ταξινομήσεων (supervised και unsupervised classifications)**, οι οποίες στηρίζονται στην εκ των προτέρων γνώση ή όχι της περιοχής από το χρήστη για τον ορισμό των κλάσεων κάλυψης γης (Περάκης, κ.α. 2015).

Πιο συγκεκριμένα, για τις **επιβλεπόμενες ταξινομήσεις**, η εκ των προτέρων γνώση της περιοχής και των κλάσεων κάλυψης – χρήσης γης, έχει ως αποτέλεσμα τον εντοπισμό και τη δειγματοληψία των σημείων με καθαρούς στόχους, καθώς και την εκπαίδευση του αλγόριθμου σύμφωνα μ’ αυτές τις περιοχές και μετέπειτα την ταξινόμηση των κλάσεων. Από την άλλη, σε σχέση με τη **μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση**, η γνώση αυτή δεν προϋπάρχει και οι κλάσεις δεν είναι γνωστές από την αρχή της διαδικασίας. Πέραν των παραπάνω, υπάρχουν και οι **υβριδικές ταξινομήσεις**, που συνδυάζουν χαρακτηριστικά των δύο κατηγοριών (Περάκης, κ.α. 2015). Στο § VI περιγράφονται αναλυτικότερα οι αλγόριθμοι για επιβλεπόμενη ταξινόμηση που χρησιμοποιήθηκαν. Παραδείγματα παρουσιάζονται στην Εικ. I-11:



Εικ. I-11: Κατηγορίες ταξινομήσεων εικονοστοιχείου. Πηγή: Lu & Weng, 2007

## II. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Για την εφαρμογή των τεχνικών που θ’ αναφερθούν, απαραίτητη ήταν η ανάπτυξη του τομέα της φασματοσκοπίας, για τα ορυκτά καθώς και για τα πετρώματα, με στόχο τη μελέτη της **φασματικής συμπεριφοράς** τους, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους κ.λπ. Η **φασματοσκοπία** αναπτύχθηκε κυρίως από τους Adams (1975), Hunt (1977), Farmer (1974), Hunt (1982), Clark & Roush (1984), Clark et al. (1990a), Gaffey et al. (1993), Salisbury (1993), που μελέτησαν τις **φασματικές ιδιότητες** των ορυκτών, αλλά και τις αρχές που διέπουν κάθε υλικό. Ένα από τα παραδείγματα φασματικών υπογραφών που μελετήθηκαν, τα φασματικά χαρακτηριστικά του οποίου χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι το ορυκτό του **καολινίτη**, με **χαρακτηριστικές απορροφήσεις** στα 1.4 μm και στα 2.1-2.2 μm (Clark, 1999).

Εστιάζοντας σε εφαρμογές στις οποίες παρατηρήθηκε η χρήση δεδομένων από τον αισθητήρα Hyperion, για την **χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών**, με παρεμφερή χαρακτηριστικά με τους γεωλογικούς σχηματισμούς της Μήλου, ή για τον **εντοπισμό**

**ορυκτών πρώτων υλών** όπως αυτές που κυριαρχούν στη Μήλο, παρατίθενται οι εξής ερευνητικές εργασίες:

Οι **Zhang και Pazner (2007)** ασχολήθηκαν με την περιοχή της οροσειράς Chocolate, στις ΗΠΑ, συγκρίνοντας δεδομένα από τους ASTER, Hyperion και ETM, ώστε να πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση των λιθολογικών σχηματισμών και να εντοπιστούν μέσω της χρήσης των τριών αισθητήρων, οι σχηματισμοί που σχετίζονται με χρυσό. Αναλυτικότερα, οι τηλεπισκοπικές μέθοδοι που εφαρμόστηκαν, ήταν οι **αλγόριθμοι Maximum Likelihood και Matched Filter**, για την ταξινόμηση γεωλογικών σχηματισμών όπως **ηφαιστειακών πετρωμάτων, βασαλτικών ρωών, κλαστικών πετρωμάτων κ.λπ.** Ο ποιοτικός έλεγχος των ταξινομήσεων έδωσε υψηλά ποσοστά συνολικής ακρίβειας, με τα δεδομένα του αισθητήρα Hyperion να δίνουν τη δυνατότητα διαχωρισμού των όμοιων κλάσεων, συγκριτικά με τους άλλους δύο αισθητήρες (Zhang & Pazner, 2007).

Μία άλλη ερευνητική εργασία με χρήση των δεδομένων Hyperion για την **χαρτογράφηση των υδροθερμικών, εξαλλοιωμένων πετρωμάτων, των μεταμορφωμένων πετρωμάτων**, και ενός **ηφαιστειακού δόμου**, από την περιοχή Danakil, της Eritrea, προέκυψε από τους **Gersman, Ben-Dor, Beyth, Avigad, Abraha, και Kibreab (2008)**. Στη συγκεκριμένη εργασία, η χαρτογράφηση των πετρωμάτων συνδυάστηκε με χημικές αναλύσεις με χρήση του XRD και οι μέθοδοι χαρτογράφησης που χρησιμοποιήθηκαν συμπεριέλαβαν την επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση Spectral Angle Mapper, αφού προηγήθηκε επιλογή των καθαρών στόχων, χρησιμοποιώντας τους PPI και n-D Vizualizer (όπως αναλύεται στην **§VI**) του λογισμικού ENVI (Gersman, et al., 2008).

Οι **Bhattacharya, Majumdar, Rajawat, Panigrahi, και Das (2012)** χρησιμοποίησαν επίσης δεδομένα από τον αισθητήρα Hyperion, για την **ανάδειξη των εξαλλοιωμένων και αργλικών ορυκτών**, από την περιοχή Dongargarh, στην Ινδία. Επισημαίνεται ότι στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης, εντοπίστηκαν κυρίως πετρώματα όπως ο γρανίτης, ο ρυόλιθος και τα ηφαιστειακά, ενώ τα ορυκτά που επικρατούν είναι ο άστριος, ο καολινίτης κ.λπ. Οι μεθοδολογίες για την ανάδειξη των παραπάνω ορυκτών συμπεριέλαβαν πέραν των διαδικασιών προεπεξεργασίας της εικόνας, την εφαρμογή της PPI και του n-D Vizualizer, για την επιλογή των καθαρών στόχων και στη συνέχεια τη χρήση της μεθόδου Spectral Angle Mapper όπως και της Spectral Feature Fitting (Bhattacharya, et al., 2012).

Μία άλλη ερευνητική εργασία των **Zhang, και Li (2014)** ταξινόμησε γεωλογικούς σχηματισμούς **όπως γρανίτες, ηφαιστειακούς τόφφους, ψαμμίτες, ασβεστόλιθους κ.λπ.** Πιο συγκεκριμένα, η έρευνα είχε ως περιοχή μελέτης την Xinjiang, της βορειοδυτικής Κίνας. Με δεδομένα από τον Hyperion κι εφαρμόζοντας μεθόδους όπως η Matched Filter και η Spectral Angle Mapper, με την ταξινόμηση για τη δεύτερη μέθοδο να πραγματοποιείται για τον μέσο όρο των φασμάτων ή για τον συνδυασμό του μέσου όρου των φασμάτων με την πρώτη παράγωγο ή πολλαπλών φασμάτων αναφοράς προέκυψε ότι η μεγαλύτερη συνολική ακρίβεια εμφανίστηκε κατά τη χρήση πολλαπλών φασμάτων αναφοράς, στη μέθοδο Spectral Angle Mapper (Zhang, & Li, 2014).

Επιπλέον η ερευνητική εργασία που πραγματοποιήθηκε από τον **Govil (2016)** στην περιοχή του Delhi, στην Ινδία είχε ως στόχο την ανίχνευση και τη **χαρτογράφηση υδροθερμικών, εξαλλοιωμένων ορυκτών, όπως του καολινίτη, του μοντμοριλλονίτη κ.λπ.** από τα δεδομένα του Hyperion, μέσω και πάλι του αλγόριθμου Spectral Angle Mapper κι αφότου έγινε επιλογή των καθαρών στόχων, με τη μέθοδο PPI και n-D Vizualizer. (Govil, 2016).

Στη συνέχεια δίνεται έμφαση σε ορισμένα από τα σημαντικότερα παραδείγματα ερευνητικών εργασιών για το νησί της Μήλου στα οποία έγινε συνδυασμός των τομέων τηλεπισκόπησης και γεωλογίας:

Σε πρώτη φάση, οι **Παρχαρίδης, Γκάρτζος, και Ψωμιάδης (2001)** χρησιμοποίησαν τηλεπισκοπικά δεδομένα για ανίχνευση υδροθερμικών εξαλλοιώσεων στη Μήλο. Πιο συγκεκριμένα, στα δεδομένα από τον δορυφόρο Landsat 5 TM εφαρμόστηκαν δύο τεχνικές: η τεχνική Crosta και οι Λόγοι καναλιών. Οι συγκεκριμένες τεχνικές είναι συμπληρωματικές και μέσω αυτών εστίαζαν στην ανίχνευση των εξαλλοιώσεων, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τα αργιλικά ορυκτά και τα οξειδία του σιδήρου. Αναλυτικότερα, κατά την τεχνική Crosta, μέσω των συνιστωσών PC3, PC6 και PC2, κατασκευάστηκε ψευδέγχρωμο σύνθετο, ώστε ν' ανιχνευτούν τ' αργιλικά ορυκτά και τα οξειδία του σιδήρου, για το ανατολικό τμήμα του νησιού. Κατά τη δεύτερη τεχνική κατασκευάστηκαν οι λόγοι καναλιών 3/1, 4/7, και 5/7, με τον πρώτο λόγο να υποδηλώνει την παρουσία οξειδίων του σιδήρου, τον δεύτερο την βλάστηση και τον τρίτο την παρουσία αργιλικών ορυκτών, και συνδυάστηκαν δημιουργώντας το ψευδέγχρωμο RGB 3/1, 4/7, 5/7. Η προκειμένη ερευνητική εργασία σκιαγράφησε μ' επιτυχία τις περιοχές εξαλλοίωσης, αποδεικνύοντας το γεγονός ότι οι δύο τεχνικές είναι συμπληρωματικές (Παρχαρίδης, Γκάρτζος, & Ψωμιάδης, 2001).

Οι **Γκανάς και Ferrier (2002)** ασχολήθηκαν επίσης με το νησί της Μήλου, και πιο συγκεκριμένα με το δυτικό της τμήμα. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από τον αερομεταφερόμενο, υπερφασματικό σαρωτή DAIS και η μέθοδος που εφαρμόστηκε για τον εντοπισμό αργιλικών ορυκτών, με χαρακτηριστικότερη την εμφάνιση καολινίτη, ήταν ο Γραμμικός Φασματικός Διαχωρισμός (Linear Spectral Unmixing, LSU). Τα κανάλια του DAIS στα οποία εφαρμόστηκε η μέθοδος LSU είναι αυτά του μέσου και θερμικού υπέρυθρου, με τ' αποτελέσματα να δείχνουν την επιτυχή χρήση των μεθόδων τηλεπισκόπησης για ανίχνευση αργιλικών ορυκτών (Γκανάς, & Ferrier, 2002)

Επόμενη ερευνητική εργασία ήταν αυτή των **Νικολακόπουλος, Βαϊόπουλος και Σκιάνης (2007)**, οι οποίοι και χρησιμοποίησαν δεδομένα από τον Hyperion, για να χαρτογραφήσουν την εξάπλωση των 5 αργιλικών ορυκτών (καολινίτης, αλουνίτης, ιλλίτης, μοντμοριλονίτης και πυροφυλλίτης), ενδεικτικών των υδροθερμικών ζωνών εξαλλοίωσης, για το κεντρικό τμήμα του νησιού. Οι ταξινομήσεις που εφαρμόστηκαν ήταν η Spectral Angle Mapper, η Linear Spectral Unmixing καθώς και η Mixture Tuned Matched Filtering, με τις ταξινομήσεις να πραγματοποιούνται για τις φασματικές υπογραφές, όπως αυτές προέκυψαν από τις φασματικές βιβλιοθήκες (Nikolaopoulos, Vaioroulos, & Skianis, 2007). Επιπλέον, μία ακόμα ερευνητική εργασία των **Νικολακόπουλος, Τσομπός, Σκιάνης και Βαϊόπουλος (2008)**, με στόχο την χαρτογράφηση αυτή τη φορά, των ορυκτών του σιδήρου και των υδροθερμικών εξαλλοιωμένων ζωνών του κεντρικού τμήματος του νησιού, υλοποιήθηκε με δεδομένα από τους αισθητήρες Hyperion, Advanced Land Imager, και Landsat 7 ETM+, μέσω λόγων καναλιών, και συγκρίνοντας τα προϊόντα από τους λόγους για κάθε δορυφορικό αισθητήρα. Τέλος, η ανίχνευση λατομείων αργιλικών ορυκτών με χρήση πολυφασματικών (Advanced Land Imager και Landsat 7 EMT+), και υπερφασματικών (Hyperion) δεδομένων, στο ανατολικό τμήμα του νησιού, επίσης πραγματοποιήθηκε από τους **Νικολακόπουλος, και Γιώτη (2011)**. Η μέθοδος που αναπτύχθηκε ήταν η δημιουργία έγχρωμων σύνθετων, η μέθοδος μετασηματισμού Hue Intensity Saturation (HIS), καθώς και η Principal Component Analysis (PCA). Τα προϊόντα των παραπάνω μεθόδων συγκρίθηκαν για τους τρεις αισθητήρες και προέκυψε ότι εμφανίζουν παρεμφερή αποτελέσματα, ενώ για τις μεθόδους HIS και PCA,

θεωρήθηκαν κατάλληλες για τον εντοπισμό λατομικών περιοχών (Nikolakopoulos, και Gioti, 2011).

Με την περιοχή της κεντρικής Μήλου έχει επίσης ασχοληθεί ο **Παντέρας (2013)**, χρησιμοποιώντας τους αλγόριθμους Spectral Angle Mapper και Mixture Tuned Matched Filtering, ώστε να ανιχνευτούν με επιτυχία περιοχές με αργιλικά και πυριτικά ορυκτά από υπερφασματικά δεδομένα του Hyperion (Panteras, 2013).

Τέλος, οι **Ferrier, Naden, Γκανάς, Kemp, και Pope, (2016)** με την ερευνητική τους εργασία για το δυτικό τμήμα του νησιού, χρησιμοποίησαν τα κανάλια SWIR και TIR, του πολυφασματικού αισθητήρα ASTER, ώστε να καταγράψουν τις ζώνες υδροθερμικών εξαλλοιώσεων. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν η Matched Filter, καθώς και οι Λόγοι Καναλιών, ενώ τ' αποτελέσματα αξιολογήθηκαν μέσω των χημικών αναλύσεων XRD και της χαρτογράφησης του πεδίου (Ferrier, et al., 2016). Μία από τις πιο πρόσφατες έρευνες πραγματοποιήθηκε από τους **Ferrier, Γκανας, Pope, και Miles (2019)** εφαρμόζοντας πολυκριτριακή μέθοδο με στόχο την ανίχνευση επιθερμικών κοιτασμάτων, έπειτα από χαρτογράφηση των υδροθερμικώς εξαλλοιωμένων πετρωμάτων και χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τον DAIS (Ferrier, et al., 2019).

Πίνακας III-1: Γεωλογικές έρευνες με χρήση Τηλεπισκόπησης στη Μήλο

| Τοποθεσία                 |              | Βιβλιογραφική αναφορά                                 | Σχόλια - Παρατηρήσεις                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------|--------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Ανατολικό Μήλου</b>    | <b>τμήμα</b> | Παρχαρίδης, Γκάρτζος, & Ψωμιάδης, 2001                | Εφαρμογή τεχνικής Crosta και Λόγων Καναλιών για ανίχνευση ορυκτών από υδροθερμικές ζώνες εξαλλοίωσης (αργιλικά ορυκτά και οξειδία σιδήρου), με χρήση των δορυφορικών δεδομένων Landsat 5 TM                                                                                                      |
| <b>Δυτικό τμήμα Μήλου</b> |              | Ganas, & Ferrier, 2002                                | Εφαρμογή της μεθόδου Linear Spectral Unimixing (LSU) για ανίχνευση ορυκτών από υδροθερμικές ζώνες εξαλλοίωσης (αργιλικά ορυκτά), με δεδομένα DAIS                                                                                                                                                |
| <b>Κεντρικό Μήλου</b>     | <b>τμήμα</b> | Nikolakopoulos, Vaiopoulos, & Skianis, 2007           | Εφαρμογή της μεθόδου Spectral Angle Mapper (SAM), Linear Spectral Unimixing (LSU) και Mixture Tuned Matched Filter (MTMF) για ανίχνευση ορυκτών από υδροθερμικές ζώνες εξαλλοίωσης (αργιλικά ορυκτά όπως καολινίτης, αλουνίτης, ιλλίτης, μοντμοριλονίτης και πυροφυλλίτης), με δεδομένα Hyperion |
| <b>Κεντρικό Μήλου</b>     | <b>τμήμα</b> | Nikolakopoulos, Tsombos, Skianis, & Vaiopoulos, 2008. | Δημιουργία λόγων καναλιών για ανίχνευση ορυκτών του σιδήρου και ορυκτών από υδροθερμικές                                                                                                                                                                                                         |

---

|                                                 |                                           |                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                 |                                           | ζώνες εξαλλοίωσης με δεδομένα Hyperion, Advanced Land Imager, και Landsat 7 ETM <sup>+</sup>                                                                                                                                           |
| <b>Περιοχή Τράχηλας / Ανατολικό τμήμα Μήλου</b> | Nikolakopoulos, & Gioti, 2011             | Ανίχνευση λατομικών περιοχών για αργιλικά ορυκτά με τη μέθοδο των έγχρωμων σύνθετων, την IHS και την PCA με δεδομένα ALI και Landsat 7 EMT <sup>+</sup> και Hyperion                                                                   |
| <b>Κεντρικό τμήμα Μήλου</b>                     | Panteras, 2013                            | Εφαρμογή της μεθόδου SAM και MTMF για ανίχνευση ορυκτών από υδροθερμικές ζώνες εξαλλοίωσης (αργιλικά ορυκτά) μέσω υπερφασματικών δεδομένων Hyperion                                                                                    |
| <b>Δυτικό τμήμα Μήλου</b>                       | Ferrier, Naden, Ganas, Kemp, & Pope, 2016 | Εφαρμογή της μεθόδου MF και Λόγων Καναλιών για ανίχνευση ορυκτών από υδροθερμικές ζώνες εξαλλοίωσης (αλουμίτη-καολινίτη-πυροφυλλίτη, σερικήτη-ιλλίτη-σμεκτίτη, ένυδρη πυριτία-σερικήτης-ιαροσίτης, δείκτης χαλαζία) με χρήση του ASTER |
| <b>Δυτικό τμήμα Μήλου</b>                       | Ferrier, Ganas, Pope, & Jo Miles, 2019    | Εφαρμογή Πολυκριτιριακής μεθόδου με στόχο την ανίχνευση επιθερμικών κοιτασμάτων από τον DAIS                                                                                                                                           |

---

### III. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

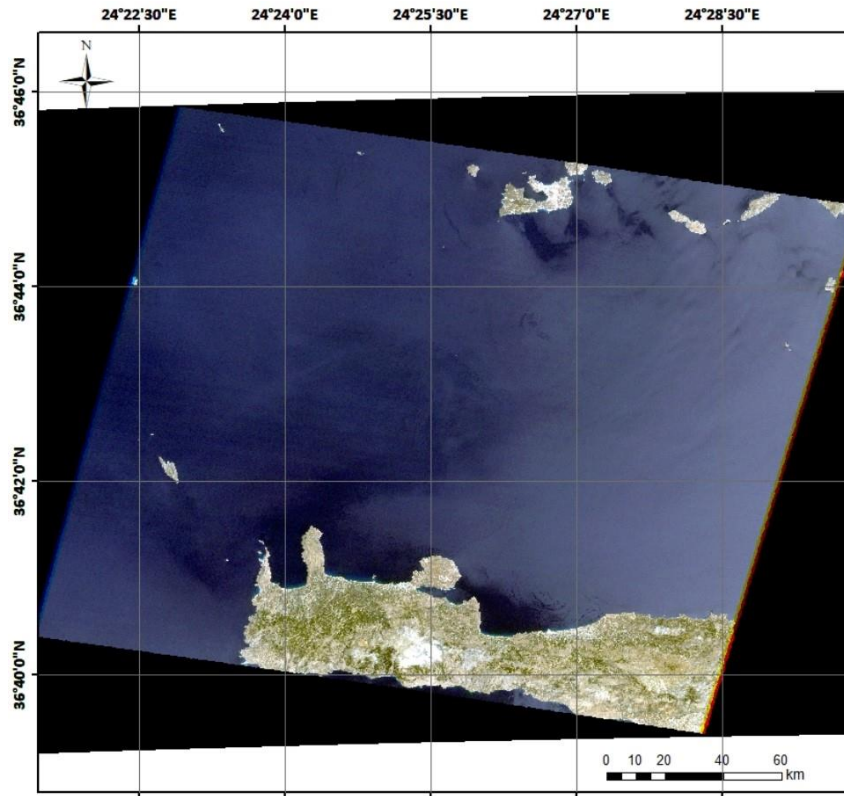
---

#### III.1. ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ – ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η Μήλος, όπως και τα νησιά Κίμωλος, Πολύαιγος, Αντίμηλος, βρίσκονται στο νοτιοδυτικό άκρο των Κυκλάδων (νησιωτικό σύμπλεγμα του Αιγαίου Πελάγους) και στο εξωτερικό μέτωπο του ηφαιστειακού τόξου του νοτίου Αιγαίου, με το γεωγραφικό της πλάτος να κυμαίνεται μεταξύ 36° 46' 27'' έως 36° 38' 37'' και το γεωγραφικό της μήκος από 24° 19' 01'' έως 24° 32' 47'' (Εικ. III-1).

Με την εφαρμογή της νέας διοικητικής διαίρεσης της χώρας, μέσω του Προγράμματος Καλλικράτης, δεν επήλθε καμία αλλαγή στον Δήμο της Μήλου, ο οποίος συγκροτείται από το νησί της Μήλου, όπως επίσης και από τις γύρω νησίδες. Σύμφωνα με το Πρόγραμμα Καλλικράτης, η Μήλος είναι η έδρα της περιφερειακής ενότητας της Μήλου (Μήλος-Κίμωλος-Σέριφος-Σίφνος) και αποτελεί τον ενιαίο Δήμο Μήλου ([el.wikipedia.org](http://el.wikipedia.org)).

Η έκταση της Μήλου υπολογίζεται στα 151 km<sup>2</sup>, αποτελώντας το πέμπτο μεγαλύτερο νησί των Κυκλάδων, με το μήκος της ακτογραμμής της να υπολογίζεται στα 126 km. Τέλος, σύμφωνα με το Επιχειρησιακό Σχέδιο Αγροτικής Ανάπτυξης 2014 – 2020, Μήλου, η απόστασή της από το λιμάνι του Πειραιά είναι 87 ναυτικά μίλια, από τη Σύρο 63 ναυτικά μίλια, από την Κίμωλο 0,5 ναυτικά μίλια, από την Σίφνο 27 ναυτικά μίλια και από την Σέριφο 30 ναυτικά μίλια.



Εικ. III-1: Γεωγραφική θέση Μήλου από τον Landsat 5 TM, για την ημερομηνία 27/07/2001, με χρήση GIS

## III.2. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ

Η μορφολογία του νησιού είναι ποικίλη και χαρακτηρίζεται ως λοφώδης, με χαμηλά υψόμετρα. Πιο συγκεκριμένα, το 86% της έκτασης είναι υψομετρικά χαμηλότερο από 200 m, ενώ μόλις το 2,2% αντιπροσωπεύεται από υψόμετρα μεγαλύτερα των 400 m.

Στο νησί σημειώνονται εκτάσεις πεδινές σε περιοχές όπως στον Προβατά, στην Ζεφυριά, στον Αδάμαντα, στον Μικρό & Μεγάλο Αρχοντιμιό, στην Φυλακωπή, στην Πάχαινα, στην Αγία Ειρήνη, στον Εμπουρειό και στα Απολλώνια. Λοφώδεις εκτάσεις με επίπεδες επιφάνειες, οι οποίες και χρησιμοποιούνται για καλλιέργειες, παρατηρούνται στις περιοχές Κάλαμος, Αγριλιές, Άνω και Κάτω Κώμια, Ψαθάδικα, Ξυλοκερατιά, Χάλακας, Αγία Μαρίνα και Μύτακας (Επιχειρησιακό Σχέδιο Αγροτικής Ανάπτυξης 2014 – 2020, Μήλος).

Το ανάγλυφο του νησιού παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις, με το δυτικό τμήμα να είναι πιο ορεινό και με πιο έντονες κλίσεις, συγκριτικά με το ανατολικό τμήμα, γεγονός που συνδέεται άμεσα με τη γεωλογία της περιοχής. Στο δυτικό τμήμα συναντώνται οι δύο υψηλότερες κορυφές του νησιού: ο Προφήτης Ηλίας, με υψόμετρο 751 m και το Χονδρό Βουνό με

υψόμετρο 636 m, ενώ στο ανατολικό τμήμα η υψηλότερη κορυφή σημειώνεται στην Μουρτοράχη, με υψόμετρο 251 m.

Η μορφολογία της ακτογραμμής της Μήλου εμφανίζει έντονες διακυμάνσεις, εξαρτώμενες κυρίως από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής και από την τεκτονική δραστηριότητα του νησιού. Σε ακτές με πυροκλαστικά πετρώματα και χαλαρούς σχηματισμούς, επικρατεί ήπια μορφολογία, ενώ σε ακτές με δόμους και ρεύματα λαβών, η μορφολογία είναι έντονη. Συνεπώς, οι ανατολικές, οι νότιες και οι δυτικές ακτές του νησιού εμφανίζουν ανάγλυφο απότομο, λόγω του πρόσφατου τεκτονισμού της περιοχής, με χαρακτηριστικές περιπτώσεις τους κρημούς της ακτογραμμής ανατολικά της περιοχής Δεμενεγάκι και Θειορυχείων, στα μεγάλα ρήγματα (Λεκάνη Ζεφυρίας) και στα ορυχεία της βορειοανατολικής Μήλου. Οι βόρειες, εξωτερικές ακτές του νησιού, που συνίστανται από μαλακούς, πυροκλαστικούς σχηματισμούς, εμφανίζουν ήπια μορφολογία, ενώ ο κόλπος της Μήλου, εμφανίζει ποικιλία ακτών σε σχέση με τη μορφολογία τους.

Αναφορικά με τα γεωλογικά χαρακτηριστικά των δύο τμημάτων (ανατολικό και δυτικό), όπως προαναφέρθηκε, το έντονο ανάγλυφο του δυτικού τμήματος του νησιού σχετίζεται άμεσα με τη γεωλογία, καθώς στο νότιο και στο νοτιοδυτικό τμήμα, επικρατούν οι ηφαιστειακοί δόμοι, όπως φαίνεται και στην Εικ. III-2. Εν αντιθέσει, στο ανατολικό τμήμα του νησιού, τα πετρώματα είναι χαλαρά κι εξαλλοιωμένα, συνεπώς επιδρούν σ' αυτά σε μεγαλύτερο βαθμό εξωγενείς παράγοντες όπως είναι η διάβρωση (Πασσά, 2007). Οι μορφολογικές κλίσεις στο νησί εμφανίζουν ποικιλία, με μεγάλες κλιθείς να εμφανίζονται στους δύο ηφαιστειακούς κώνους (Φυρίπλακα, Προφήτης Ηλίας και Πλάκα). Επιπλέον, απότομες κλιθείς εμφανίζονται στις ανατολικές ακτές με χαρακτηριστικές τις περιπτώσεις κρημών της ακτογραμμής ανατολικά της περιοχής Δεμενεγάκι και Θειορυχείων, στα μεγάλα ρήγματα (Λεκάνη Ζεφυρίας) και στα ορυχεία της ΒΑ Μήλου.

Αναλυτικότερα η γεωμορφολογία του νησιού συνίσταται από (Mendrinou, 1988):

α. Χαμηλούς λόφους ήπιας μορφολογίας, όπου κυριαρχούν τα πυροκλαστικά προϊόντα των ηφαιστειακών εκρήξεων, καθώς και οι εξαλλοιωμένοι σε αργιλικά ορυκτά, ηφαιστίτες.

β. Μορφές με μεγάλη ποικιλία, σχηματισμένες από την εξαλλοίωση των ηφαιστιτών.

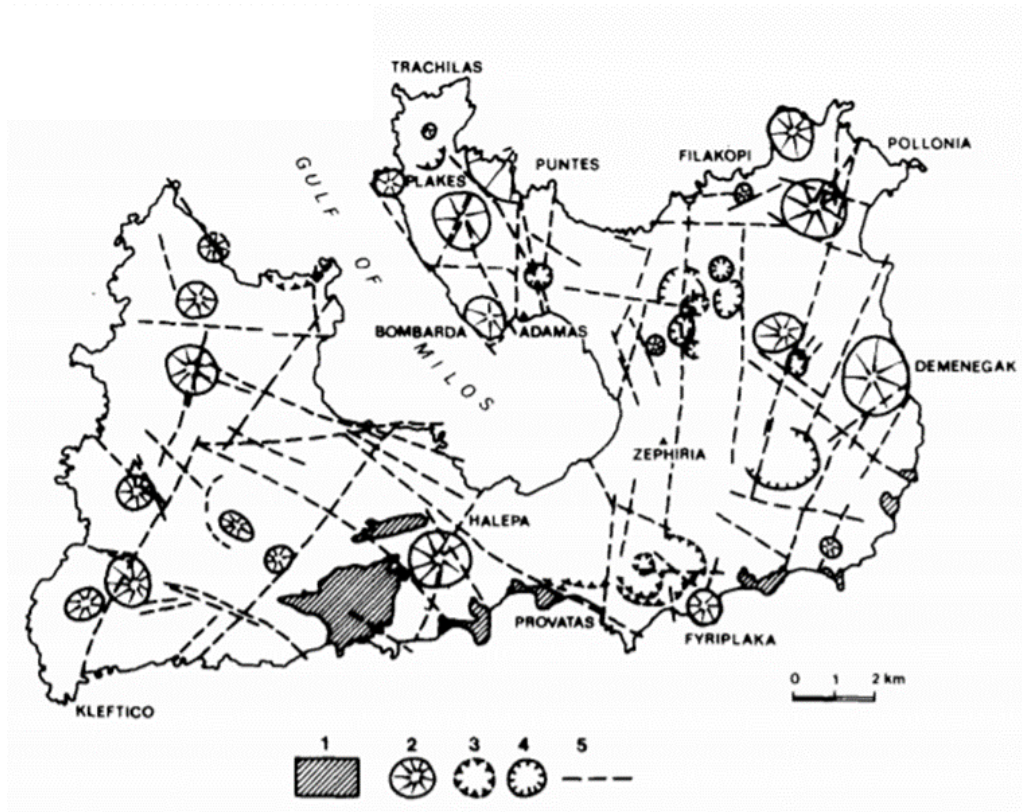
γ. Λόφους και μικρά υψώματα με απότομες πλαγιές, όπως η περίπτωση των ηφαιστειακών θόλων με ρεύματα λάβας.

δ. Ιδιόμορφοι σχηματισμοί, καλούμενοι κρατήρες φρεατικών εκρήξεων.

ε. Σχηματισμούς τύπου "πράσινου λαχάρ", οι οποίοι παρουσιάζουν επιφάνειες ήπιες έως και οριζόντιες, σχηματισμένες από χαλαρό υλικό, που διακόπτονται από βαθιές κοιλαδικές τομές, προερχόμενες από τις εποχιακές βροχοπτώσεις.

στ. Αλουβιακές χαμηλές πεδιάδες που έχουν πληρωθεί από υλικό ποικίλης προέλευσης, όπως είναι η πεδιάδα της Ζεφυρίας (Φυτίκας, 1977)





Εικ. III-2: Χάρτης με τις σημαντικότερες γεωμορφολογικές δομές της Μήλου. 1: Προ - ηφαιστειακό υπόβαθρο, 2: δομές λάβας, 3: Ηφαιστειακοί κρατήρες Φυρίπλακα και Τράχηλας, 4: Φρεατικοί κρατήρες και 5: Τάσεις δομών. Πηγή: Fytikas et. al., 1986.

### III.3. ΗΦΑΙΣΤΕΙΟΤΗΤΑ

Όπως προαναφέρθηκε, η ηφαιστειακή ακολουθία του νησιού, δείχνει ότι οι προκείμενες αποθέσεις πραγματοποιήθηκαν σε 5 στάδια, με αποτέλεσμα την εκδήλωση ηφαιστειακής δραστηριότητας ασβεσταλκαλικού τύπου, κατά το Αν. Πλειόκαινο μέχρι το Αν. Τεταρτογενές. Τα τρία απ' αυτά πραγματοποιήθηκαν κατά το Αν. Πλειόκαινο, το τέταρτο κατά το Κατ. Τεταρτογενές, ενώ το τελευταίο επεισόδιο ηφαιστειακής δραστηριότητας, κατά το Αν. Πλειστόκαινο. Εκτενέστερη περιγραφή ακολουθεί στο § III.4 (Fytikas et. al., 1986).

### III.4. ΓΕΩΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

Πρόκειται για ένα νησί το οποίο βρίσκεται στο κεντρικό τμήμα του ενεργού ηφαιστειακού τόξου του Ν. Αιγαίου, αποτελούμενο κυρίως από ηφαιστειακά προϊόντα, σε εναλλαγές πυροκλαστικών προϊόντων χερσαίας απόθεσης και τοφφίτων, αποτεθειμένων σε θαλάσσιο περιβάλλον. Σύμφωνα με τους Fytikas et. al. (Fytikas et. al., 1976) στο νησί της Μήλου συμπεριλαμβάνονται κυρίως οι εξής σχηματισμοί:

1. Το Παλαιοζωϊκό, μεταμορφωμένο, κρυσταλλικό υπόβαθρο της Μήλου
2. Τα νεογενή επικλυσιογενή κροκαλοπαγή και οι ασβεστόλιθοι ηλικίας Κρητιδικής - Ηωκαινικής

3. Τα ηφαιστειακά πετρώματα και οι ηφαιστειοϊζηματογενείς σειρές, ηλικίας μεταξύ Αν. Πλειόκαινου - Ολόκαινου και
4. Οι σπάνιες αλλουβιακές αποθέσεις

Πιο συγκεκριμένα εμφανίζονται οι εξής γεωλογικοί σχηματισμοί:

#### Κρυσταλλικό υπόβαθρο

Το κρυσταλλικό, μεταμορφωμένο υπόβαθρο του νησιού, το οποίο εμφανίζει έντονη παραμόρφωση, εμφανίζεται στο νότιο τμήμα του νησιού. Από ορυκτολογικής σύστασης, το υπόβαθρο αποτελείται από ελαφρώς μεταμορφωμένα πετρώματα, με ορυκτά πρασινοσχιστολιθικών φάσεων (ή κυανοσχιστολιθικών). Τα κύρια πετρώματα είναι οι σχίστες, οι αποτελούνται κυρίως από χαλαζία, μοσχοβίτη και χλωρίτη, με σταδιακή μετάβαση από χαλαζίτες, ασβεστούχους σχίστες, κ.λπ. Εάν ληφθούν υπόψιν όλα τα πετρώματα αυτής της σειράς, πρόκειται για μία ακολουθία μεταμορφωμένου φλύσχη (Fytikas et. al., 1976).

Σύμφωνα με τη ραδιοχρονολόγηση των κυανοσχιστολιθικών φάσεων, η μεταμόρφωσή τους, η ηλικία του υπολογίζεται στα 65 Ma, ενώ για την πρασινοσχιστολιθική φάση, η ηλικία καθορίστηκε στα 33.2 Ma και δείχνει το τέλος του παραπάνω φαινομένου. Η Αλπική ηλικία του κρυσταλλικού υποβάθρου, καθιστά αδύνατη την Κρητιδική – Ηωκαινική ηλικία των μη μεταμορφωμένων – επικλυσιγενών σειρών που έχουν τοποθετηθεί πάνω από το κρυσταλλικό υπόβαθρο (Fytikas et. al., 1976).

Το κρυσταλλικό υπόβαθρο της Μήλου εμφανίζει κατατμήσεις, οι οποίες είναι πολύ πρόσφατες και θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στην κυκλοφορία των ρευστών, στο εσωτερικό των πετρωμάτων (Fytikas et. al., 1976).

#### Νεογενείς επικλυσιγενείς σειρές

Για τις Νεογενείς, transgressive σειρές, εμφανίζονται στο νότιο – νοτιοδυτικό τμήμα της Μήλου, να επικαλύπτουν το μεταμορφωμένο υπόβαθρο. Ωστόσο, σε κάποια σημεία, στα νοτιοανατολικά τμήματα του νησιού, τα ηφαιστειοϊζηματογενή προϊόντα επικαλύπτουν απευθείας το μεταμορφωμένο υπόβαθρο, χωρίς την παρουσία των Νεογενών σειρών. Στις περιπτώσεις αυτές, είτε οι σειρές αυτές δεν επηρέασαν τα υψηλότερα τμήματα του νησιού, είτε διαβρώθηκαν έπειτα από τον σχηματισμό τους. (Fytikas et. al., 1976).

Οι Νεογενείς, επικλυσιγενείς σειρές συνίστανται κυρίως από ένα κροκαλοπαγές κι ένα ασβεστολιθικό τμήμα; το κατώτερο τμήμα να αποτελείται από κλαστικές αποθέσεις και το ανώτερο τμήμα από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους. Αναφορικά με το κροκαλοπαγές τμήμα, το χρώμα του κυμαίνεται από γκρι έως καστανοκόκκινο και το πάχος του ορίζεται περίπου στα 30 m. Σε σχέση με το ανθρακικό τμήμα, το μέγιστο του πάχους του φτάνει τα 150 m., ενώ η ορυκτολογική του σύσταση εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις. Προς τη βάση του σχηματισμού marly and arenaceous κίτρινοι ασβεστόλιθοι επικρατούν – gypsum lenses and veins στο κατώτερο τμήμα (Fytikas et. al., 1976; 1986).

Η ηλικία των πετρωμάτων δεν είναι μεγαλύτερη από το Μειόκαινο και πιο συγκεκριμένα ορίστηκε Αν. Μειόκαινο – Κατ. Πλειόκαινο. Αυτές οι νεογενείς σειρές δεν περιέχουν ηφαιστειακά τμήματα, ενώ τα πετρώματα αυτά είχαν αναδυθεί και διαβρωθεί πριν την επικάλυψη από τα πρώτα ηφαιστειακά προϊόντα (Fytikas et. al., 1976; 1986).

#### **✚ Ηφαιστειοϊζηματογενείς ακολουθίες**

Παρουσία ενός καλύμματος αποτελούμενο από ηφαιστειακά ή ηφαιστειοϊζηματογενή προϊόντα, το οποίο δημιουργήθηκαν σε πέντε στάδια ηφαιστειακής δραστηριότητας (Αν. Πλειόκαινο – Αν. Τεταρτογενές). Το κάλυμμα αυτό είναι μετασχηματισμένο σε μπεντονίτη και καολίνη από υδροθερμικά φαινόμενα (Fytikas et. al., 1976).

Οι ηφαιστειοϊζηματογενείς ακολουθίες καλύπτουν το μεγαλύτερο τμήμα του νησιού της Μήλου. Το πάχος των στρωμάτων τους αντιστοιχεί σε τιμές μεγαλύτερες από 400 m. – οι τιμές του πάχους των σχηματισμών φτάνουν μέχρι και τα 700 m., όπως στην περιοχή της Ζεφυριάς (Fytikas et. al., 1976).

Από στρωματογραφικής άποψης, τα τρία γεγονότα παλαιότερης ηφαιστειακής δραστηριότητας συνίσταται από ρυόλιθους, ρυολιθικούς τόφφους και δακίτες κι έχει ηλικία Αν. Πλειόκαινο, το τέταρτο γεγονός πραγματοποιήθηκε κατά το Κατ. Τεταρτογενές, δίνοντας ηφαιστειακά πετρώματα ανδεσιτικής σύστασης και πιο βασικά, ενώ το πέμπτο πραγματοποιήθηκε κατά το Αν. Πλειστόκαινο, με αποτέλεσμα τον σχηματισμό των ρυολιθικών λαβών και τοφφιδίων, Φυρίπλακα – Τράχηλα.

Παρατηρήθηκε ότι τα κέντρα, στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι ηφαιστειακές εκρήξεις, μετακινήθηκαν με τα χρόνια προς το κεντρικό τμήμα της Μήλου. Συνεπώς, από ανδεσίτες και δακίτες, ξεκίνησε κατά την πιο πρόσφατη ηφαιστειακή δραστηριότητα, η δημιουργία κυρίως ρυόλιθων. Η ηφαιστειακή εξέλιξη και τα γεωχημικά χαρακτηριστικά προτείνουν τη μετάβαση από το σύστημα τροφοδοσίας της παλαιότερης ηφαιστειακής δραστηριότητας που βρισκόταν στον βαθύ, ηπειρωτικό φλοιό, σ' ένα σύστημα τροφοδοσίας, αποτελούμενο από ρηχούς και μικρούς θαλάμους μάγματος (Fytikas et. al., 1976; 1986).

Η κατανόηση της διαδικασίας των ηφαιστειακών φαινομένων καθίσταται δύσκολη λόγω της δράσης του έντονου τεκτονισμού και των υδροθερμικών ρευστών στα πετρώματα. Λόγω της προκείμενης υδροθερμικής δραστηριότητας, κατέστη εφικτή η δημιουργία πολυάριθμων ορυκτών πρώτων υλών, συχνά υψηλού οικονομικού ενδιαφέροντος. Στις ορυκτές πρώτες ύλες συγκαταλέγονται ορυκτά όπως είναι ο μπεντονίτης, ο καολίνης, ο βαρίτης, ο οψιδιανός κ.ο.κ. (Fytikas 1977; Hauck 1988).

#### **✚ Αλλουβιακές αποθέσεις**

Σε σχέση με τις αλλουβιακές αποθέσεις, πρόκειται για σχηματισμούς αποτελούμενους κυρίως από προϊόντα ηφαιστειακής προέλευσης. Αποτελούνται από υλικά της αργίλου και αμμώδη υλικά. Οι αλλουβιακές αποθέσεις, είναι περιορισμένες σε έκταση στο νησί της Μήλο, με τις σημαντικότερες να βρίσκονται στη Ζεφυριά, σε άλλες επίπεδες επιφάνειες καθώς και στις κοιλάδες (Εικόνα 1) (Παράρτημα Χαρτών) (Fytikas et. al., 1976).

### **III.5. ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΟΛΟΓΙΑ**

Η δράση του υδροθερμικού συστήματος Τρογάλας – Αγγεριά – Βούδια (TAB), ηλικίας Πλειστοκαινικής στο ηφαιστειακό νησί της Μήλου, οδήγησε στη δημιουργία κοιτασμάτων μπεντονίτη, καολινίτη, σουλφιδίων και βαρύτη, στο ανατολικό τμήμα του νησιού. Η υδροθερμική δραστηριότητα στο νησί της Μήλου είναι πρόσφατη και σχετίζεται με τις θερμικές ανωμαλίες, εξαιτίας της δημιουργίας ρηχών, μαγματικών θαλάμων (Ballanti, 1997; Vavelidis, et. al., 1998).

Η ηφαιστειότητα του νησιού αναπτύχθηκε πάνω στο μεταμορφωμένο υπόβαθρο και στις ιζηματογενείς ακολουθίες, κατά το Μ. Πλειόκαινο – Αν. Πλειστόκαινο. Τα πιο πρόσφατα σημάδια της προκείμενης, ηφαιστειακής δραστηριότητας είναι ο ηφαιστειακός κρατήρας Φυρίπλακας καθώς και οι ροές λάβας, που συνοδεύτηκαν από υδροθερμικές εκρήξεις, οι οποίες έδρασαν πιο πρόσφατα (όπως φάνηκε από τους υδροθερμικούς κρατήρες και τις υδροκλαστικές αποθέσεις που καλύπτουν μεγάλο μέρος της ανατολικής Μήλου). Πλέον, η υδροθερμική δραστηριότητα εμφανίζεται στο νοτιοανατολικό τμήμα του νησιού, με βασικά χαρακτηριστικά την εμφάνιση θερμών πηγών και φουραμόλων.

Ορισμένα από τα σημαντικότερα κοιτάσματα του νησιού, κάποια εκ των οποίων θα εντοπιστούν μέσω των μεθόδων τηλεπισκόπησης, είναι τα εξής:

#### Μπεντονίτης

Το νησί της Μήλου εμφανίζει τα βασικότερα κοιτάσματα μπεντονίτη στον ελλαδικό χώρο, με τις κύριες συγκεντρώσεις οικονομικής σημασίας να εντοπίζονται στο βόρειο και στο ανατολικό τμήμα του νησιού. Γενικότερα οι τρόποι δημιουργία των μπεντονιτών είναι οι τρεις ακόλουθοι: (α) από διαγενετική εξαλλοίωση ηφαιστειακής ύελου, (β) από υδροθερμική εξαλλοίωση ηφαιστειακής ύελου, και (γ) από ιζήματα πλούσια σε σμεκτίτες, σε sabkha περιβάλλον και αλατούχες λίμνες (Christidis, & Huff, 2009).

Η επικρατούσα θεωρία αναφέρει για τους μπεντονίτες της Μήλου τη δημιουργία τους από την υδροθερμική εξαλλοίωση πυροκλαστικών τόφφων, καθώς και λαβών ανδεσιτικής – ρυολιθικής χημικής σύστασης, σε υποθαλάσσιο περιβάλλον. Στους βασικούς παράγοντες που ελέγχουν το σχηματισμό των μπεντονιτών συμπεριλαμβάνεται η χημική σύσταση των πρωτόλιθων, όπως και το σύστημα ρηγμάτων της περιοχής (ΒΔ-ΝΑ και Α-Δ) (Ballanti, 1997; Christidis, & Dunham, 1993; Christidis, & Huff, 2009).

Οι μπεντονίτες της Μήλου εμφανίζουν την ορυκτολογική παραγένεση<sup>1</sup>: ασβεστούχος μοντμοριλλονίτης, χριστοβαλίτης (χαλαζίας και/ή οπάλιος), σανίδινο, ασβεστίτης, ενώ ως επουσιώδη τα ορυκτά καολινίτης, πλαγιόκλαστα και σουλφίδια (όπως ο σιδηροπυρίτης ή/και ο μαρκασίτης) (Ballanti, 1997; [www.orykta.gr](http://www.orykta.gr)).

Χωρίς να γίνεται σαφής αναφορά στο όνομα του μπεντονίτη, φαίνεται ότι οι αρχαίοι Έλληνες και οι Ρωμαίοι εξόρυσαν μπεντονίτη, λόγω της απορρυπαντικής ιδιότητας που εμφανίζει. Έπειτα από τα χρόνια της Τουρκοκρατίας, φαίνεται ότι άρχισε ξανά η εκμετάλλευση του μπεντονίτη – και όχι μόνο – μιας και υπήρξε αυτή η δυνατότητα για τα διάφορα βιομηχανικά ορυκτά και μεταλλεύματα, έπειτα από την παραχώρηση άδειας για την εξόρυξη θείου στην περιοχή του Παλιορέμματος ([www.milosminingmuseum.com](http://www.milosminingmuseum.com)).

Το 1952 ξεκινά η εκμετάλλευση βιομηχανικών ορυκτών, όπως του μπεντονίτη. Έκτοτε, και μετά την εξαγορά της S&B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε., πρώην Αργυρομεταλλευμάτων & Βαρυτίνης Α.Ε.Ε., στο νησί της Μήλου στην εξόρυξη μπεντονίτη και περλίτη, δραστηριοποιείται η Imerys Βιομηχανικά Ορυκτά Ελλάς Α.Ε., η οποία και κατέχει πρώτες θέσεις σε παγκόσμιο επίπεδο, σε σχέση με την εξαγωγική της δραστηριότητα για τα συγκεκριμένα βιομηχανικά ορυκτά ([www.milosminingmuseum.com](http://www.milosminingmuseum.com)).

Σύμφωνα με στοιχεία της USGS, η μεταλλευτική βιομηχανία της Ελλάδας κατέχει ηγετική θέση, τόσο στην παραγωγή, όσο και στην εξαγωγική δραστηριότητα μπεντονίτη, σε

---

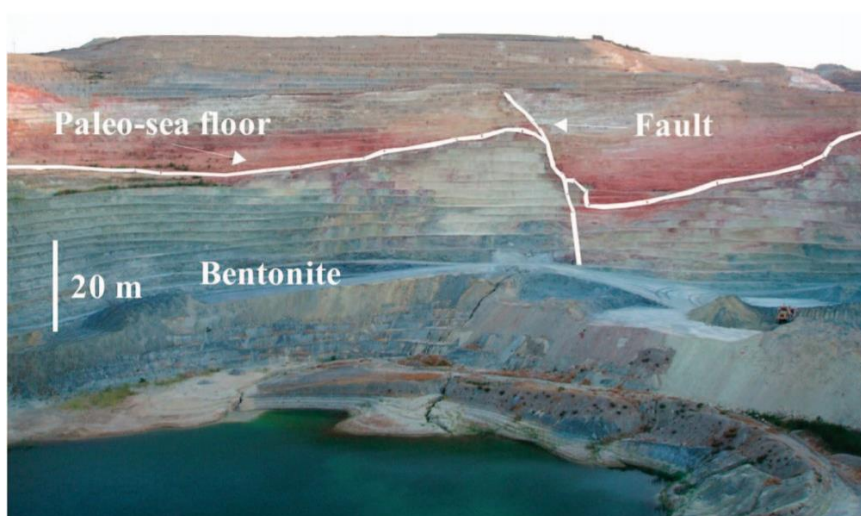
<sup>1</sup> Φάση ισορροπίας των ορυκτών φάσεων

παγκόσμιο επίπεδο, καταλαμβάνοντας το 2014 την τέταρτη θέση στην παραγωγή μπεντονίτη. Τα ενδεικτικά αποθέματα μπεντονίτη έχουν υπολογιστεί στους 100 εκατ. τόνοι. Σημαντικά χαρακτηριστικά, τα οποία και ορίζουν την τιμή πώλησης του μπεντονίτη, είναι το μέγεθος των κόκκων, ο βαθμός επεξεργασίας και η συσκευασία του μπεντονίτη ([www.miloterranean.gr](http://www.miloterranean.gr); [www.orykta.gr](http://www.orykta.gr); USGS, 2014).

Ο μπεντονίτης της Μήλου εμφανίζει τρεις ξεχωριστές συγκεντρώσεις ελαφρά διαφορετικών ιδιοτήτων: κοίτασμα Ζούλια – Ασπροχωριού - Τσαντίλη, κοίτασμα Αγγελιάς - Κουφής, κοίτασμα στα Άνω και Κάτω Κομιά – Ρέμα - Μαυρόγιαννο. Μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης κατηγορίας υπάρχει και η απομονωμένη απόθεση Αγγιλιάς. Οι θέσεις του μπεντονίτη παρουσιάζονται στην Εικόνα 1 (Παράρτημα Χαρτών). Πέραν της Μήλου, σημαντικά μπεντονιτικά κοιτάσματα υπάρχουν στα νησιά Κίμωλος και Πολύαιγος.

Όπως προαναφέρθηκε η παραγένεση του μπεντονίτη ή αλλιώς της μοντμοριλλονιτικής αργίλου, αποτελείται κυρίως από αργιλοπυριτικά ορυκτά της ομάδας των σμεκτιτών και ειδικότερα από αβεστούχο μοντμοριλλονίτη, σε ποσοστό μεγαλύτερο του 80%, καθώς και χαλαζία, αστρίους, καολινίτη καθώς και σανίδινο. Εμφανίζει ένα σύνολο από φυσικές και χημικές ιδιότητες, που τον καθιστούν κατάλληλο για πολυάριθμες, βιομηχανικές εφαρμογές. Διαθέτει μεγάλη προσροφητική ικανότητα, υψηλή πλαστικότητα, δυνατότητα ιοντοανταλλαγής, θιξοτροπία σε ιξώδη αιωρήματα όπως επίσης και τη δυνατότητα να δρα ως συνδετικό υλικό.

Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων, ο μπεντονίτης χρησιμοποιείται ευρέως ως συνδετικό υλικό σε άμμους καλουπιών χυτηρίων και στη σφαιροποίηση σιδηρομεταλλεύματος, ως θιξοτροπικό πρόσθετο για θεμελιώσεις, σήραγγες και εκσκαφές και στη στεγανοποίηση χωματερών, ως λειαντικό των γεωτρήσεων και στεγανοποιητικό των τοιχωμάτων της γεώτρησης, ως άμμος για την υγιεινή των κατοικιδίων ζώων, ως βοηθητικό στην παραγωγή χάρτου, την απομελάνωση χάρτου από ανακύκλωση και στα αυτογραφικά χαρτιά, καθώς και στην κατεργασία υδάτων και αποβλήτων, στα κεραμικά, στις βιομηχανίες ποτών και στις χημικές βιομηχανίες, ενώ πολυάριθμες είναι και οι περιβαλλοντικές του χρήσεις (για στεγανοποίηση χώρων υγειονομικής ταφής απορριμμάτων, ως περίβλημα σε δοχεία όπου αποθηκεύονται ραδιενεργά απόβλητα, στην κατεργασία υδάτων και υγρών αποβλήτων κ.λπ.) ([bit.ly/2Kl8bW5](http://bit.ly/2Kl8bW5)).



Εικ. III-3: Λατομείο μπεντονίτη που περιορίζεται από τις πυροκλαστικές ροές. Επικαλύπτεται από μάργα κόκκινου χρώματος. Πηγή: Christidis, & Huff, 2009.

## ✚ Περλίτης

Πρόκειται για **όξινη και ενυδατωμένη ηφαιστειακή ύελο ρυολιθικής** σύστασης, για την οποία υπάρχουν δύο θεωρίες δημιουργίας. Αναφορικά με την πρώτη, σε πρώτο επίπεδο γίνεται συσσώρευση των αερίων στο ανώτερο τμήμα του ηφαιστειακού πόρου, και κατά την έκρηξη τα αέρια σπάζουν τους ηφαιστίτες. Η απότομη ψύξη του μάγματος των 950-1200°C, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του περλίτη (Ρούλια, 1996). Στη δεύτερη θεωρία, ο περλίτης δημιουργείται δευτερογενώς από την ενσωμάτωση ύδατος στην δομή του οψιδιανού, δηλαδή, από την ενυδάτωση της ηφαιστειακής ύελου κατά την ψύξη (Friedman et al., 1963).

Το ορυκτό του περλίτη εμφανίζει ξεχωριστές ιδιότητες θερμικής και ηχητικής μόνωσης, όπως είναι η χαρακτηριστική ιδιότητα διόγκωσης όταν θερμανθεί, σε θερμοκρασίες 800° - 950°C, ενώ παράλληλα μπορεί να γίνει εξαιρετικά πορώδες. Ως εκ τούτου, οι χρήσεις του είναι πολυάριθμες, μερικές εκ των οποίων είναι στη βιομηχανία κατασκευών και στις οικοδομές, ως πρόσθετο σε εδάφη για καλλιέργειες φυτών και στην υδροπονία, ως μέσο διήθησης για διάφορα υλικά, ως πληρωτικό στη βιομηχανία πλαστικών, χρωμάτων, σε τροφές ζώων, σε χημικές βιομηχανίες και βιομηχανίες τροφών κ.λπ. (Σκαρπέλης, 2006; [bit.ly/2Kl8bW5](http://bit.ly/2Kl8bW5); [www.miloterranean.gr](http://www.miloterranean.gr)).

Στη Μήλο διακρίνονται περλίτες από δύο διαφορετικές, γεωλογικές περιόδους: ο περλίτης της **Χαλέπας** (από τα Μαύρα Γκρεμνά ως τη Χιβαδόλιμνη και ως την Αγία Μαρίνα) και ο περλίτης στα υποθαλάσσια ηφαίστεια του **Τράχηλα** και της **Φυριπλάκας**, στο βόρειο και στο νότιο τμήμα του νησιού αντίστοιχα. Ο πρώτος περλίτης είναι παλαιότερος σε ηλικία, κι επειδή έχει μεταβληθεί από φυσική ύελο σε κρυσταλλικό υλικό, δε διογκώνεται με τον ίδιο τρόπο, όπως οι νεότεροι περλίτες. Ο δεύτερος περλίτης είναι μεταγενέστερος και είναι βέλτιστος από πλευράς χημικής σύστασης από τον περλίτη της Χαλέπας, διότι είναι υαλώδης και περιέχει μεγάλη ποσότητα νερού που τους κάνει ιδιαίτερα ελαφρούς όταν διογκωθούν. Οι θέσεις του περλίτη παρουσιάζονται στην Εικόνα 1 (Παράρτημα Χαρτών) ([www.miloterranean.gr](http://www.miloterranean.gr)).

Πέραν της Μήλου, κοιτάσματα περλίτη έχουν εντοπιστεί κοιτάσματα στην Κω, καθώς και στα νησιά Λέσβος, Γυαλί, Αντίπαρος, Νίσηρο, καθώς και στον Έβρο, με την Κω να εμφανίζει θέσεις στις οποίες γινόταν παλαιότερα εξόρυξη, ενώ μικρές ποσότητες εξορύσσονται περιοδικά και σήμερα ([www.orykta.gr](http://www.orykta.gr)).

## ✚ Ποζολάνη

Η ποζολάνη εξορύσσεται στο νησί της Μήλου κι έχει δημιουργηθεί από την ηφαιστειακή δραστηριότητα. Πρόκειται για **ηφαιστειακές γαιές, ρυολιθικής, δακτιτικής ή ανδεσιτικής** προέλευσης, οι οποίες διακρίνονται σε φυσικές (όπως είναι η κίσηρις, η ηφαιστειακή σποδός, η ηφαιστειακή τέφρα κ.λπ.) και σε τεχνητές που αποκτούν ποζολανικές ιδιότητες έπειτα από την επεξεργασία τους (όπως είναι ο διογκωμένος περλίτης, οι άργιλοι κ.λπ.) κι εμφανίζουν αφρώδη ή σπογγώδη δομή λόγω της απελευθέρωσης αερίων της λάβας. Οι χρήσεις της εστιάζονται στον τομέα τηςτσιμεντοβιομηχανίας και την παραγωγή δομικών στοιχείων. Ενεργά ορυχεία ποζολάνης εντοπίζονται στον ελλαδικό χώρο στα νησιά Κίμωλος, Γυαλί και Μήλος. Στην Μήλο, τα ενεργά ορυχεία ποζολάνης εντοπίζονται στο νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού, κοντά στην περιοχή Ξυλοκερατιά, με τις θέσεις εξόρυξης ποζολανικού υλικού να φαίνονται στην Εικόνα 1 (Παράρτημα Χαρτών) (Κατερινόπουλος & Σταματάκης (1995); [www.orykta.gr](http://www.orykta.gr)).

### Πυριτικό

Πρόκειται για **πολύμορφο χαλαζία**, μικροκρυσταλλικής δομής, α- τύπου, που παράγεται στη Μήλο που δημιουργήθηκε από την υδροθερμική εξαλλοίωση του μητρικού, ηφαιστειακού πετρώματος της Μήλου. Η εταιρεία ΛΑΒΑ Μεταλλευτική & Λατομική, που δραστηριοποιείται στο νησί, παράγει δύο ποιότητες πυριτικού: το υψηλής καθαρότητας SSL10 (με λευκότητα μεγαλύτερη από 80% και μεγαλύτερα ποσοστά SiO<sub>2</sub>, 97-99%) και το SSL20 (χρώματος ροζ και με ποσοστά SiO<sub>2</sub>, 88-92%), με διαφορές στην περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου και στις διάφορες προσμίξεις. Η περιεκτικότητα σε οξείδια του σιδήρου δίνει ουσιαστικά την χρωματική αλλαγή, στις δύο ποιότητες πυριτικού. Το πυριτικό εμφανίζει ποικιλία χρήσεων, όπως στην υαλουργία, στην κεραμική βιομηχανία (πλακάκια, κόλλες πλακιδίων, είδη υγιεινής, κεραμικές μάζες), στην παραγωγή υδρούλου, στην βιομηχανία πυριμάχων, στην τσιμεντοβιομηχανία, σε οικοδομικές χρήσεις (κονιάματα, διακοσμητικά πλακίδια κ.λπ.), στη βιομηχανία χρωμάτων ως filler και ως άμμος χυτηρίων ([www.lava.gr](http://www.lava.gr)).

### Ζεόλιθος

Η ομάδα των ορυκτών των ζεόλιθων εμφανίζεται σε πολυάριθμες θέσεις στον Ελλαδικό χώρο, μερικές εκ των οποίων είναι ο Έβρος, η Σάμος, και νησιά των Κυκλάδων. Πρόκειται για φυσικά, αργιλοπυριτικά κι ένυδρα ορυκτά που υπάρχουν στο νησί της Μήλου και τα οποία χαρακτηρίζονται από μέτριας έως φτωχής ποιότητας. Οι εφαρμογές των ζεόλιθων εξαρτώνται από τις προσροφητικές ιδιότητες που διαθέτουν.

### Καολίνης

Πρόκειται για το βιομηχανικό πέτρωμα λευκού ή υπόλευκου χρώματος, το οποίο αποτελείται από ένυδρα αργιλοπυριτικά ορυκτά της ομάδας του καολινίτη, όπως είναι ο καολινίτης, ο νακρίτης, ο δικίτης, ο αλουνίτης κ.λπ. Η Μήλος εμφανίζει κοιτάσματα καολινίτη, που είναι γενικά χαμηλής ποιότητας, με υψηλό ποσοστό πυριτίου, ένα μέρος του οποίου βρίσκεται σε κολλοειδή μορφή και επομένως είναι δύσκολο να απομακρυνθεί και υψηλά ποσοστά επιβλαβών προσμίξεων όπως σιδηροξείδια, αλουνίτη και θείο. Ο καολινίτης της Μήλου είναι προϊόν υδροθερμικής εξαλλοίωσης ηφαιστειακών πετρωμάτων (Κατερινόπουλος και Σταματάκης, 1995).

Στη Μήλο η κύρια εμφάνιση καολίνη απαντάται κοντά στην περιοχή Βάνι (Pflumio et al., 1991). Οι εμφανίσεις με μορφή φλεβών, θυλάκων ή με ακανόνιστο σχήμα εκτείνονται σε βάθος μέσα στο μητρικό πέτρωμα. Λόγω της μορφής αυτής των κοιτασμάτων, η εκμετάλλευση τους γίνεται εκλεκτικά, με αποτέλεσμα να παραμένει ανεκμετάλλευτο μεγάλο μέρος υλικού κατώτερης ποιότητας, το οποίο δε θα είναι εκμεταλλεύσιμο σε μελλοντικό στάδιο επανάληψης των εργασιών. Έτσι, παρόλο που οι εμφανίσεις καολίνη στη Μήλο είναι σημαντικές δεν έχει γίνει προσπάθεια για πλήρη αξιοποίηση των αποθεμάτων του, τόσο για την παραγωγή εξευγενισμένων προϊόντων υψηλής τιμής. Πιο συγκεκριμένα, τα κοιτάσματα καολίνη στις περιοχές του Κάλαμου και της Παλαιόχωρας, της νήσου Μήλου, απαντώνται μέσα σε ανδρείτες και ανέρχονται σε μερικές χιλιάδες τόνους καλής ποιότητας. Τα κοιτάσματα του όρμου Εμποριό βρίσκονται μέσα σε ανδρείτικές και λιπαρτικές λάβες και ανέρχονται σε εκατοντάδες χιλιάδες τόνους. Τέλος, κοιτάσματα καολίνη απαντώνται και στο όρος Χάλακα, καθώς και στις θέσεις Κόνταρος και Τρία Πηγάδια, στη βόρεια Μήλο (Περράκη-Λοϊσίου, 2007). (Κατερινόπουλος και Σταματάκης, 1995).

Οι κυριότερες χρήσεις των καολίνων είναι στην βιομηχανία χαρτιού, στην τσιμεντοβιομηχανία, στα κεραμικά και στη βιομηχανία ελαστικών, με την παγκόσμια παραγωγή καολίνη ν' απορροφάται από τη χαρτοβιομηχανία (Κατερινόπουλος και Σταματάκης, 1995).



Εικ. III-4: Λατομείο εξόρυξης καολινίτη. Περιοχή Ραλάκι – Δυτική Μήλος. Πηγή: Plimer & Πέτρου 2000

#### Βαρυτίνη

Η βαρυτίνη εμφανίζει παρόμοια προέλευση με τις υπόλοιπες ΟΠΥ. Η άνοδος θερμού νερού, με μεταλλικά στοιχεία μέσω ρηγμάτων και η “συνάντηση” με ψυχρό νερό, είχε ως αποτέλεσμα την απόθεση θειϊκού βαρίου. Τέτοιες αποθέσεις παρατηρούνται κατά μήκος παλαιών ρηγμάτων στις Τριάδες, στα Κώμια και στα Βούδια, όπου παλιότερα γινόταν εξόρυξη βαρυτίνης.

### III.6. ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Στην Μήλο πραγματοποιείται εκμετάλλευση και εξαγωγή μετάλλων και βιομηχανικών ορυκτών, τα οποία έχουν σημαντικό ρόλο στην τοπική οικονομία. Στο νησί της Μήλου αναπτύχθηκε και εδραιώθηκε η παραγωγή και εμπορία των παρακάτω ορυκτών, σύμφωνα με την ομιλία του Οικονομόπουλου (Οικονομόπουλος, 1998; [www.milosminingmuseum.com](http://www.milosminingmuseum.com)):

- **Θείο αυτοφυές:** Μεγάλες ποσότητες θείου εξορύχθηκαν κατά την αρχαιοελληνική περίοδο στη Μήλο. Χρησιμοποιήθηκε για απολυμαντικούς, αντισηπτικούς και θρησκευτικούς σκοπούς.
- **Πωρόλιθοι:** Οι πωρόλιθοι χρησιμοποιήθηκαν από την αρχιτεκτονική, σε μεγάλες για την εποχή οικοδομές και δημόσια κτίρια.
- **Τραχείτης ή ανδεσίτης:** Μεγάλες ποσότητες του εξορύχθηκαν στα λατομεία της Μήλου, κυρίως στην Αγ. Κυριακή, κατά την κλασική περίοδο. Ο τραχείτης χρησιμοποιήθηκε για



την κατασκευή μυλόλιθων (μυλόπετρες) για άλεση δημητριακών αλλά και σκληρότερων υλών, όπως μεταλλευμάτων. Πιθανόν εξαγόταν και στο αρχαίο Λαύριο, για την κατάτμηση του αργυρούχου μεταλλεύματος.

- **Καολίνης:** Τον χρησιμοποιούσαν οι ζωγράφοι για να επιτύχουν το λευκό χρώμα. Ακόμη, χρησιμοποιήθηκε στην αγγειοπλαστική και στην κεραμική, όπως και στην επάλειψη τραυμάτων. Αναφέρεται ως «μηλιακή γη» από τον Θεόφραστο.
- **Μπεντονίτης:** χωρίς να γίνεται σαφής αναφορά στο όνομα, οι αρχαίοι Έλληνες και οι Ρωμαίοι τον εξόρυσαν για την απορρυπαντική ικανότητά του, χρησιμοποιώντας τον ως σαπούνι.
- **Κίσηρις** (ελαφρόπετρα): Χρήση της για τη λείανση και στίλβωση μωσαϊκών, κεραμικών, αγαλμάτων κ.λπ. Ένα από παράδειγμα της χρήσης της ελαφρόπετρας, ως άριστο στιλβωτικό κατά την αρχαιότητα, είναι το περίφημο άγαλμα της Αφροδίτης της Μήλου από παριανό μάρμαρο.
- **Αλουνίτης** (στυπτηριάτη λίθου ή στυπτηρίας ή Άλουμ): Χρήση στη φαρμακευτική ως δραστικό φάρμακο ή συστατικό φαρμάκων. Επιπλέον με τη μετατροπή του σε στυπτηρία, έβαφαν τα ρούχα. Στη Λαγκάδα υπάρχουν αρχαία ορυχεία, ενώ στην Αγία Κυριακή σώζονται απομεινάρια δεξαμενών για τη μετατροπή του σε στυπτηρία.
- **Αιματίτης** (Ψιμύθιο): χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή χρωστικών ουσιών για βαφές, αλλά και ως καλλυντικό.
- **Χαλαζιακές άμμοι και διάφορα σύμπλοκα πυριτικά ορυκτά:** Χρήση σε ορισμένες εφαρμογές.

### III.7. ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ

Παρουσία κρατήρων, δημιουργούμενους από φρεατικές εκρήξεις. Οι κρατήρες αυτοί εμφανίζουν περιορισμένη διάμετρο (μικρότερη των 20 μ.) και είναι πολύ συχνοί στις περιοχές όπου το αδιαπέραστο κάλυμμα (a cover consisting of volcanic or volcano-sedimentary products) είναι λεπτό. στις περιοχές όπου το κάλυμμα είναι παχύτερο, είναι λιγότερο πολυάριθμες αλλά πολύ μεγαλύτερες (περισσότερο από 600 m σε διάμετρο) (Fytikas et. al., 1976).

### III.8. ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Αναφορικά με την τεκτονική δραστηριότητα του νησιού, έχει προκύψει το συμπέρασμα ότι πολύ πρόσφατη τεκτονική δραστηριότητα, έχει επηρεάσει το νησί της Μήλου, καθώς και τα γειτονικά νησιά (Fytikas et. al., 1976).

### III.9. ΥΔΡΟΛΟΓΙΑ – ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ

Η μορφή του υδρογραφικού δικτύου της Μήλου έχει επηρεαστεί από τη γεωμορφολογία, τις τεκτονικές δομές, τις ορυκτολογικές συστάσεις των πετρωμάτων. Επιπλέον, στη μορφή ανάπτυξής του επίδρασαν η ηλικία των γεωλογικών σχηματισμών, ενώ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και το κλίμα του νησιού (Δίκτυο Αειφόρων Νήσων, 2006).

Το υδρογραφικό δίκτυο της Μήλου μπορεί να χαρακτηριστεί ως αραιό, με τη μορφή του να είναι ακτινωτή, σε περιοχές όπου υπάρχουν δόμοι, καθώς και ηφαιστειακοί κώνοι. Στη Μήλο υπάρχουν πολλές «κενές περιοχές», δηλαδή περιοχές στις οποίες το υδρογραφικό δίκτυο δεν υφίσταται. Τέτοιες περιοχές εμφανίζονται στο δυτικό τμήμα της, όπου τα ρέματα Άγιος Ιωάννης, Δασίφνους, Κακοπόταμος, Τούλι, Λεμονιάς και άλλα ενδιάμεσα ρέματα αποκλίνουν. Στο ανατολικό της τμήμα, στην περιοχή Άγιοι Θεόδωροι (Μουρτόραχη) υπάρχει κενή περιοχή χωρίς ρέματα, λόγω απόκλισης εξαιτίας της έντονης μορφολογίας του εδάφους. Η ανάπτυξη υδρογραφικού δικτύου παρατηρείται στα δυτικά και νοτιοδυτικά, όπου υπάρχουν απότομες κλιθείς (Δίκτυο Αειφόρων Νήσων, 2006).

Οι κύριοι κλάδοι της είναι παράλληλοι μεταξύ τους και σε κάποιες περιπτώσεις και οι δευτερεύοντες κλάδοι έχουν ίδια διάταξη. Για τους δευτερεύοντες κλάδους, σε πολλές περιοχές, η σύνδεση με τους κύριους κλάδους πραγματοποιείται ορθογωνίως.

Τέλος, σε θέσεις όπως Ζεφύρια, Λειβαδιά, Βουβάλια και Λουτρά, τα πετρώματα (αλλούβια, ηφαιστειακοί σχηματισμοί πρόσφατοι και ρεύματα λάβας) παρουσιάζουν μεγάλη υδροπερατότητα. Συνεπώς, το υδρογραφικό δίκτυο λείπει ή είναι ελάχιστα ανεπτυγμένο (τυφλά ρέματα διότι δεν εκβάλλουν στη θάλασσα), εξαιτίας των πετρωμάτων, ενώ στην περιοχή της Ζεφυριάς εντοπίζεται ο πιο σημαντικός, υδροφόρος ορίζοντας της Μήλου (Δίκτυο Αειφόρων Νήσων, 2006).

### III.10. ΒΛΑΣΤΗΣΗ

Η βλάστηση της Μήλου ταξινομείται στην Ευμεσογειακή ζώνη βλάστησης, η οποία αντιστοιχεί σε περιοχές όπου το κλίμα χαρακτηρίζεται ως Μεσογειακό. Γενικότερα το ανάγλυφο της Μήλου χαρακτηρίζεται ως ορεινό, με χαμηλό ύψος βουνών το οποίο δεν ξεπερνά τα 400 m, ενώ εκλείπει η δενδρώδης βλάστηση από την περιοχή ([bit.ly/2Kl8bW5](http://bit.ly/2Kl8bW5); [www.milosminingmuseum.com](http://www.milosminingmuseum.com)).

Όπως φαίνεται και στις Εικ. III-5, το δυτικό τμήμα εμφανίζει πιο έντονη βλάστηση, συγκριτικά με το ανατολικό τμήμα της Μήλου, ενώ στις προκείμενες δορυφορικές εικόνες, είναι εμφανείς και οι περιοχές με μεταλλεία – λατομεία, με λευκό χρώμα (συμπεριλαμβάνονται και οικισμοί).

Όπως παρατηρείται και από τα δεδομένα του Corine Land Cover για το έτος 2000, στο νησί επικρατεί η σκληροφυλλική βλάστηση, η οποία και καταλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος στο δυτικό τμήμα του νησιού. Πέραν της σκληροφυλλικής βλάστησης, στο νησί εντοπίζονται φυσικά λιβάδια αλλά και περιοχές με αραιή βλάστηση. Σε σχέση με τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις, διακρίνονται οι κατηγορίες των μη αρδευόμενων εκτάσεων, οι μόνιμες καλλιέργειες που συμπεριλαμβάνουν εκτάσεις με ελιές, όπως επίσης και από τις ετερογενείς, καλλιεργήσιμες περιοχές, διακρίνονται τα σύνθετα μοτίβα καλλιέργειας και οι εκτάσεις που καταλαμβάνονται κυρίως από καλλιέργειες και από φυσική βλάστηση.

Επιπλέον, μεγάλο τμήμα από την έκταση της Μήλου κατατάσσεται στο Ευρωπαϊκό οικολογικό δίκτυο Natura 2000. Πιο συγκεκριμένο στη Μήλο έχουν οριοθετηθεί δύο Ζώνες Ειδικής Προστασίας (ΖΕΠ ή SPA) κι ένας Τόπος Κοινοτικής Σημασίας (ΤΚΣ ή SCI), καθώς κι ένα Καταφύγιο Άγριας Ζωής (ΚΑΖ). Οι κωδικοί των περιοχών προστασίας ΤΚΣ και ΖΕΠ είναι: GR4220005 (ΖΕΠ), GR4220020 (ΤΚΣ) και GR4220030 (ΖΕΠ) ([votaniki.gr](http://votaniki.gr)).

Όσον αφορά τον Τόπο Κοινοτικής Σημασίας, πρόκειται για μία έκταση 5242.08 ha, στο δυτικό τμήμα του νησιού, με την ονομασία: Νήσος Μήλος: Προφήτης Ηλίας – Ευρύτερη

Περιοχή. Στην περιοχή αυτή συμπεριλαμβάνονται τα φρύγανα, τα μακκί (*Pistacia lentiscus*, *Juniperus phoenicea*) καθώς και είδη όπως τα *Arbutus unedo* και τα *Nerium oleander*. Ο ένας εκ των δύο Ζωνών Ειδικής Προστασίας, με κωδικό GR4220005 και την ονομασία Παράκτια Ζώνη της Δυτικής Μήλου, καταλαμβάνει έκταση η οποία αντιστοιχεί σε 5365.23 ha. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται κυρίως από βραχώδεις παραλίες, με τη θαλάσσια περιοχή να καταλαμβάνεται από *Cymodocea* και *Posidonia*. Τέλος, η ΖΕΠ με κωδικό GR42200030 και την ονομασία Δυτική Μήλος, Αντίμηλος, Πολύαιγος και Νησίδες, έκτασης 9171.66 ha, καταλαμβάνει την περιοχή του ΤΚΣ και κάποιες περιοχές εκτός της Μήλου ([votaniki.gr](http://votaniki.gr)).



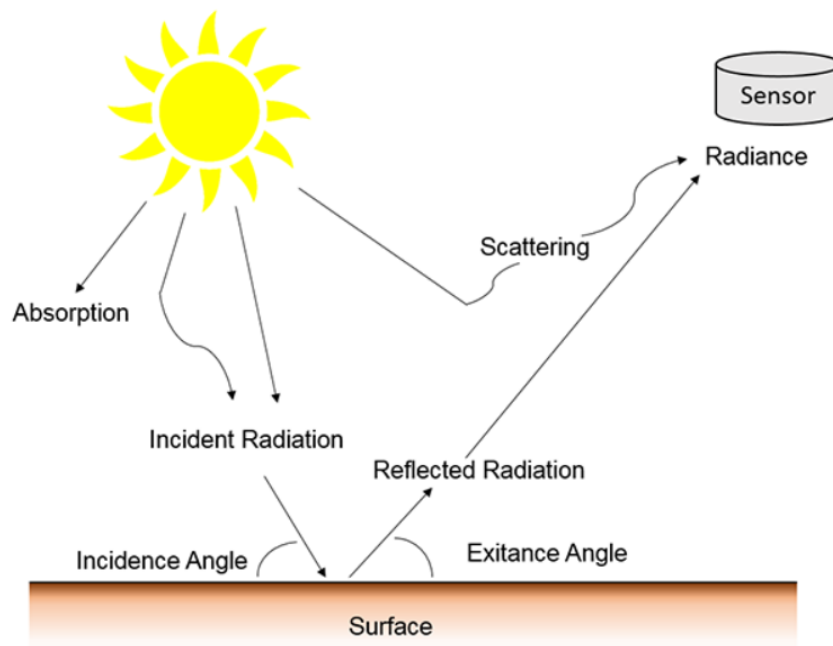
Εικ. III-5: Οι δύο δορυφορικές εικόνες είναι από τον δορυφόρο Landsat 5 TM, για την ημερομηνία λήψης 27/07/2001, με χρήση του προγράμματος ENVI, έκδοση 5.3. Η πρώτη εικόνα εμφανίζει έναν συνδυασμό καναλιών RGB 321 και η δεύτερη δείχνει την υγιή βλάστηση του νησιού έπειτα από έναν συνδυασμό καναλιών RGB 432.



## IV. ΠΡΟΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΕΙΚΟΝΑΣ HYPERION

Είναι σημαντικό ν' αναφερθεί ότι για τα προϊόντα του Hyperion και γενικότερα για τα προϊόντα υπερφασματικής ανάλυσης, απαραίτητη είναι η **προεπεξεργασία των εικόνων** για την οποιαδήποτε ερευνητική διαδικασία. Η προεπεξεργασία των συγκεκριμένων δεδομένων είναι ιδιαίτερος σημαντική και αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα για τ' αποτελέσματα των μετέπειτα διαδικασιών.

Απαιτείται τόσο για την απεικόνιση όσο και για την κατάλληλη επιλογή των καναλιών, που θα οδηγήσει στη **μείωση της διαστατικότητας (dimensionality)** των δεδομένων και της **υπολογιστικής πολυπλοκότητας (computational complexity)**. Στην διαδικασία προεπεξεργασίας των δεδομένων από **υπερφασματικούς αισθητήρες (hyperspectral or imaging spectrometers)** είναι απαραίτητη η **φασματική και ραδιομετρική βαθμονόμηση** καθώς και οι **ατμοσφαιρικές διορθώσεις** των εικόνων, ώστε να μετατραπεί η **ακτινοβολία (radiance)**, σε **ανακλαστικότητα επιφανείας (reflectance)**. Εκτενέστερη αναφορά στις παραπάνω διαδικασίες, γίνεται στις παραγράφους που ακολουθούν.



Εικ. IV-1: Η εικόνα παρουσιάζει τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις που επηρεάζουν τη μέτρηση της ανακλώμενης ενέργειας από τους διάφορους αισθητήρες. Πηγή: <https://bit.ly/2POcv2J>.

### IV.1. ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ

Οι τιμές που καταγράφονται στα εικονοστοιχεία μίας δορυφορικής εικόνας συμπεριλαμβάνουν πέραν της **εκπεμπόμενης** κι **ανακλώμενης** επιφανειακής ακτινοβολίας, την **οπισθοσκεδάζουσα** κι **εκπεμπόμενη ακτινοβολία** της ατμόσφαιρας. Επειδή για τις

διάφορες εφαρμογές, η πραγματική ακτινοβολία είναι αυτή που αντιστοιχεί στις πραγματικές, επιφανειακές τιμές, είναι απαραίτητη η **ραδιομετρική διόρθωση** των δεδομένων, η οποία ωστόσο δεν περιορίζει τα σφάλματα που προκύπτουν από την επίδραση της ατμόσφαιρας (<https://bit.ly/2POcv2J>).

Σε πρώτη φάση, ο αισθητήρας Hyperion έχει καταγράψει την ένταση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε κάθε εικονοστοιχείο, με έναν **ψηφιακό αριθμό (digital number ή DN)**, ο οποίος είναι απαραίτητο να μετατραπεί σε μεταβλητές όπως αυτές της ακτινοβολίας, της ανακλαστικότητας κ.λπ., ανάλογα με τα στοιχεία που είναι διαθέσιμα για την εικόνα. Στην προκειμένη περίπτωση, έγινε μετατροπή των **12-bit δεδομένων** σε **δεδομένα ακτινοβολίας (radiance floating-point data)** με μονάδα μέτρησης  $W/m^2 \cdot \mu m \cdot sr$ , για την εφαρμογή στη συνέχεια του κατάλληλου μοντέλου ατμοσφαιρικής διόρθωσης. Η μετατροπή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των **rescaling factors** και σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση υπολογίστηκε η **ακτινοβολία,  $L_\lambda$**  (<https://bit.ly/2POcv2J>):

$$L_\lambda = \text{Gain} * \text{pixel value} + \text{Offset}$$

Κατά τη διάρκεια της ραδιομετρικής διόρθωσης, τα κανάλια με αριθμό 1-70, δηλαδή οι μπάντες του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου (Visible and Near Infrared - VNIR) πολλαπλασιάστηκαν με την Gain value 0.025, ενώ για τις μπάντες 71-242 έγινε πολλαπλασιασμός του εύρους τους με την Offset value 0.0125 (Πίνακας IV-2) (<https://bit.ly/2sfBvHI>).

Πίνακας IV-1: Τιμές Radiance Gains (gain values) και Radiance Offsets (offset values) του αισθητήρα Hyperion.

|   | Band Names                         | Wavelengths | FWHM    | Radiance Gains | Radiance Offsets |
|---|------------------------------------|-------------|---------|----------------|------------------|
| 1 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 1 | 355.59      | 11.3871 | 0.025          | 0.0              |
| 2 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 2 | 365.76      | 11.3871 | 0.025          | 0.0              |
| 3 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 3 | 375.94      | 11.3871 | 0.025          | 0.0              |
| 4 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 4 | 386.11      | 11.3871 | 0.025          | 0.0              |
| 5 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 5 | 396.29      | 11.3871 | 0.025          | 0.0              |

Πίνακας IV-2: Τιμές FWHM – Radiance Gains – Radiance Offsets.

|    | Band Names                          | Wavelengths | FWHM    | Radiance Gains | Radiance Offsets |
|----|-------------------------------------|-------------|---------|----------------|------------------|
| 71 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 71 | 851.92      | 11.0457 | 0.0125         | 0.0              |
| 72 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 72 | 862.01      | 11.0457 | 0.0125         | 0.0              |
| 73 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 73 | 872.1       | 11.0457 | 0.0125         | 0.0              |
| 74 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 74 | 882.19      | 11.0457 | 0.0125         | 0.0              |
| 75 | (256x242x6703):Hyperion L1: Band 75 | 892.28      | 11.0457 | 0.0125         | 0.0              |

Στη συνέχεια αφαιρέθηκαν τα μη ραδιομετρικώς βαθμονομημένα κανάλια κι από το σύνολο των **242**, επιλέχθηκαν τα **198**. Εξαιτίας της φασματικής επικάλυψης των δυο φασματοσκοπιών τελικά η πληροφορία συμπεριλαμβάνεται στα **196 κανάλια**.

## IV.2. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ

Το βήμα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, στόχο έχει την αφαίρεση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων - σφαλμάτων (όπως την επίδραση των ατμοσφαιρικών αερίων του νερού, του όζοντος, του διοξειδίου του άνθρακα κ.λπ.) για την μετατροπή της **ακτινοβολίας** σε

**ανακλαστικότητα επιφανείας.** Αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα προεπεξεργασίας, με την ποιότητα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης να συμβάλλει στην ποιότητα και στην ακρίβεια των προϊόντων των υπερφασματικών αισθητήρων που θα χρησιμοποιηθούν στις μεθοδολογίες.

Η ατμοσφαιρική διόρθωση συμβάλλει και μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ερμηνεία καθώς και τη χρήση της κάθε δορυφορικής εικόνας ενώ μέσω αυτής καθίσταται δυνατή και η σύγκριση διαχρονικών εικόνων εάν ο στόχος έρευνας είναι αυτός. Ωστόσο η εφαρμογή της είναι προαιρετική, ανάλογα με την επίδραση των ατμοσφαιρικών συνθηκών στα δεδομένα. Στους παράγοντες που επηρεάζουν εάν η συλλογή δεδομένων είναι επιτυχής ή όχι συμπεριλαμβάνεται η **βαθμονόμηση του οργάνου, ο επιτυχής καθορισμός των ατμοσφαιρικών ιδιοτήτων, η ορθή εφαρμογή των αλγορίθμων για την ατμοσφαιρική διόρθωση, και η ικανότητα στη συλλογή και στη μοντελοποίηση των ιδιοτήτων επιφάνειας** (Borengasser, et al., 2007).

Επειδή οι απευθείας μετρήσεις των ατμοσφαιρικών ιδιοτήτων είναι σπάνια διαθέσιμες, υπάρχουν τεχνικές για να καταστεί σαφής η επίδρασή τους στα υπερφασματικά, δεδομένα ακτινοβολίας, με τη χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων. Τ' **ατμοσφαιρικά μοντέλα** χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν φαινόμενα διασποράς και απορρόφησης στην ατμόσφαιρα. Εφαρμόστηκαν δύο ατμοσφαιρικά μοντέλα για την αφαίρεση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων στην εικόνα: το μοντέλο **QUick Atmospheric Correction (QUAC)** και το **Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH)**.

Για την εκτέλεση των μοντέλων της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον του **ENVI 5.3**. Τα δύο μοντέλα δημιουργήθηκαν από την **Spectral Science Inc.** υπό την αιγίδα του **U.S. Air Force Research Laboratory**, ενώ χρησιμοποιεί τον κώδικα μετατροπής ακτινοβολίας **MODTRAN**.

Πρωτίστως χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ατμοσφαιρικής διόρθωσης **QUAC**, που είναι μία ατμοσφαιρική διόρθωση **image-based**, στην οποία δεν απαιτείται η εκ των προτέρων γνώση των ατμοσφαιρικών συνθηκών, με τις παραμέτρους της να υπολογίζονται απευθείας από το φάσμα του κάθε εικονοστοιχείου. Εφαρμόζεται σε όλους τους αισθητήρες, ενώ βασίζεται στο ότι η μέση τιμή ανακλαστικότητας για τα διαφορετικά υλικά, είναι ανεξάρτητη από τη σκηνή.

Στα πλεονεκτήματα της QUAC συμπεριλαμβάνεται το γεγονός ότι απαιτεί μικρότερο χρονικό διάστημα για την εφαρμογή της και ότι εφαρμόζεται σε όλους τους αισθητήρες. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου συγκαταλέγεται το γεγονός ότι εφαρμόζεται η ίδια διόρθωση σε ολόκληρη την εικόνα, ενώ ενδέχεται να απαιτείται διαφορετική διόρθωση, ανάλογα με το σημείο της εικόνας. Επιπλέον, ένα άλλο μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι πρόκειται για μία όχι και τόσο αξιόπιστη μέθοδο ατμοσφαιρικής διόρθωσης (Smith, M. J., 2015).

Η ατμοσφαιρική μέθοδος **FLAASH**, που επίσης χρησιμοποιήθηκε, είναι μία μεθοδολογία η οποία βασίζεται στη φυσική της μετάδοσης της ακτινοβολίας (**physics-based**), και συνεπώς είναι πιο αξιόπιστη. Χρησιμοποιείται ευρέως για τη διόρθωση πολυφασματικών και υπερφασματικών εικόνων. Μερικά από τα μειονεκτήματά της είναι το ότι για την εφαρμογή της απαιτείται η γνώση των ατμοσφαιρικών συνθηκών λήψης της εικόνας, ενώ απαιτείται μεγαλύτερο χρονικό διάστημα για την εφαρμογή της, σε σχέση με άλλες μεθόδους (Smith, M. J., 2015). Η παρακάτω Εικ. IV-2 παρουσιάζει τις παραμέτρους που τέθηκαν για την ατμοσφαιρική διόρθωση της εικόνας Hyperion, με τη μέθοδο FLAASH.

|                          |                     |                         |          |                             |         |
|--------------------------|---------------------|-------------------------|----------|-----------------------------|---------|
| Scene Center Location    | DD <-> DMS          | Sensor Type             | HYPERION | Flight Date                 |         |
| Lat                      | 36 42 57.60         | Sensor Altitude (km)    | 0.705    | Aug                         | 20 2001 |
| Lon                      | 24 25 55.20         | Ground Elevation (km)   | 0.150    | Flight Time GMT (HH:MM:SS)  |         |
|                          |                     | Pixel Size (m)          | 30.000   | 8                           | 48 11   |
| Atmospheric Model        | Mid-Latitude Summer | Aerosol Model           | Rural    | Spectral Polishing No       |         |
| Water Retrieval          | Yes                 | Aerosol Retrieval       | None     | Wavelength Recalibration No |         |
| Water Absorption Feature | 1135 nm             | Initial Visibility (km) | 40.00    |                             |         |

Εικ. IV-2: Εφαρμογή της ατμοσφαιρικής μεθόδου FLAASH, στο περιβάλλον ENVI 5.3.

Τέθηκε σε πρώτο στάδιο το **γεωγραφικό πλάτος** (36° 42' 57.60'') και **μήκος** (24° 25' 55.20'') του **κέντρου** της εικόνας Hyperion, κι έπειτα συμπληρώθηκε ο τύπος του αισθητήρα, από τον οποίο λήφθηκε η εικόνα, καθώς και χαρακτηριστικά, όπως το **ύψος** της τροχιάς του (705 m), το **μέσο υψόμετρο** του νησιού της Μήλου (150 m), και το **μέγεθος** του εικονοστοιχείου (30 m). Γνωρίζοντας ακόμα ότι η λήψη της εικόνας πραγματοποιήθηκε στις **20/08/2001** και την συγκεκριμένη ώρα (**08:48:11**), συμπληρώθηκαν και αυτά τα στοιχεία.

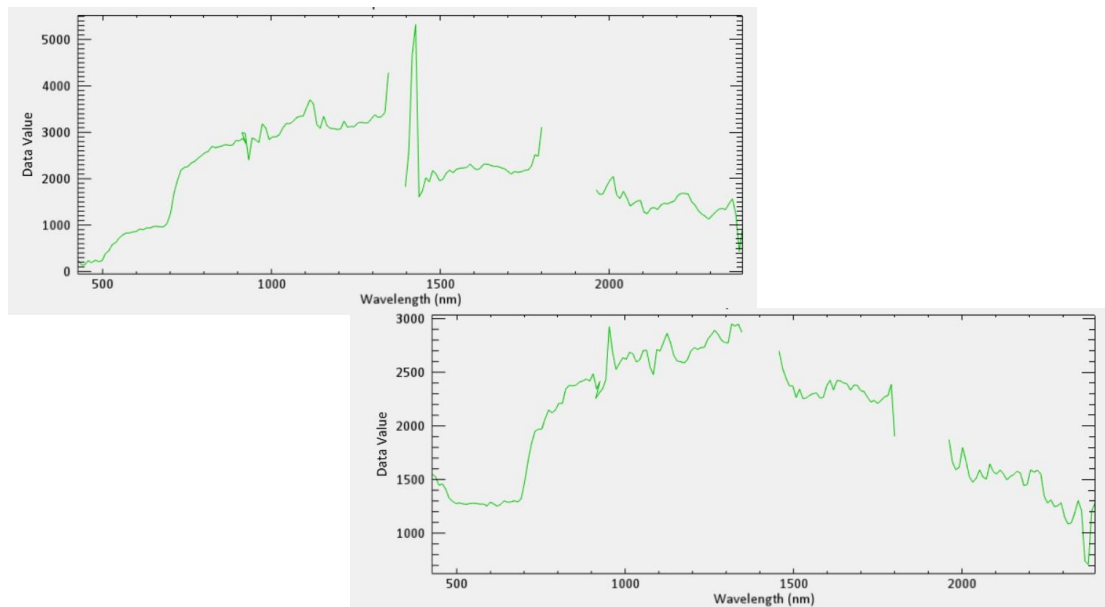
Σε δεύτερο στάδιο ορίστηκαν τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά για την ατμοσφαιρική διόρθωση της Hyperion. Επιλέχθηκε το ατμοσφαιρικό μοντέλο **Mid-Latitude Summer**, λόγω του ότι ανταποκρίνεται καλύτερα στις ατμοσφαιρικές συνθήκες της Μήλου λαμβάνοντας υπόψιν τον Πίνακα IV-3. Εν συνεχεία, ως χαρακτηριστικό κανάλι φάσματος για την **απορρόφηση του νερού**, επιλέχθηκαν τα **1135 nm**. Το **μοντέλο αεροζόλ** που ανταποκρινόταν καλύτερα στις συνθήκες που επικρατούν στο νησί της Μήλου, είναι το **αγροτικό (rural)**, κυρίως λόγω των δραστηριοτήτων που πραγματοποιούνται στο νησί. Τέλος, για την ορατότητα τέθηκαν τα **40 km**, με αποτέλεσμα ο τύπος μοντέλου αεροζόλ που επιλέχθηκε, να μην παίζει τόσο σημαντικό ρόλο, λόγω της υψηλής τιμής της.

Πίνακας IV-3 Ποσό στήλης υδρατμών και επιφανειακών θερμοκρασιών αέρα για τα διαφορετικά ατμοσφαιρικά μοντέλα MODTRAN. Πηγή: ENVI, 2009.

| Model Atmosphere          | WATER VAPOR (STD ATM-CM) | Water Vapor (g/cm2) | Surface Air Temperature |
|---------------------------|--------------------------|---------------------|-------------------------|
| Sub-Arctic Winter (SAW)   | 518                      | 0.42                | -16°C or 3°F            |
| Mid-Latitude Winter (MLW) | 1060                     | 0.85                | -1°C or 30°F            |
| U.S. Standard (US)        | 1762                     | 1.42                | 15°C or 59°F            |
| Sub-Arctic Summer (SAS)   | 2589                     | 2.08                | 14°C or 57°F            |
| Mid-Latitude Summer (MLS) | 3636                     | 2.92                | 21°C or 70°F            |
| Tropical (T)              | 5119                     | 4.11                | 27°C or 80°F            |

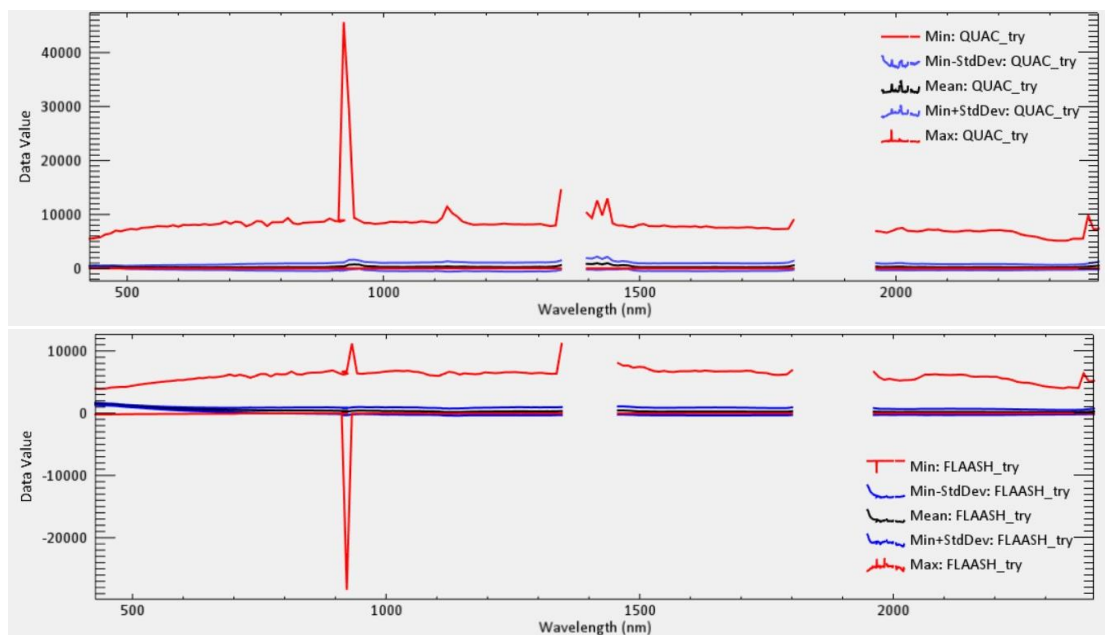
Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των δύο μεθόδων, ελέγχθηκαν περιοχές με γνωστές φασματικές υπογραφές (όπως περιοχές με αυξημένη κάλυψη βλάστησης), και σε δεύτερο στάδιο υπολογίστηκαν τα στατιστικά δεδομένα των εικόνων. Παρατηρήθηκε ότι οι

φασματικές υπογραφές για τη βλάστηση από τις δύο μεθόδους εμφανίζουν ομοιότητες, με τη μέθοδο QUAC να εμφανίζει καλύτερα αποτελέσματα στο ορατό, ενώ τη μέθοδο FLAASH στο εγγύς υπέρυθρο (Εικ. IV-3).



Εικ. IV-3: Φασματικές υπογραφές περιοχών με βλάστηση, με την ατμοσφαιρική μέθοδο QUAC (πρώτη εικόνα) και FLAASH (δεύτερη εικόνα).

Τα διαγράμματα που ακολουθούν (Εικ. IV-4) απεικονίζουν τα στατιστικά δεδομένα των μεθόδων, ώστε ν' αξιολογηθούν οι τιμές ανακλαστικότητας που προέκυψαν. Παρατηρήθηκε ότι στην περίπτωση της μεθόδου QUAC, υπήρχαν κάποια εικονοστοιχεία με τιμές μεγαλύτερες των 10,000, ενώ δεν υπήρχαν καθόλου αρνητικές τιμές. Αντίθετα στη μέθοδο FLAASH, υπήρχαν αρκετά εικονοστοιχεία με τιμές μεγαλύτερες του 10,000 αλλά και αρνητικές.



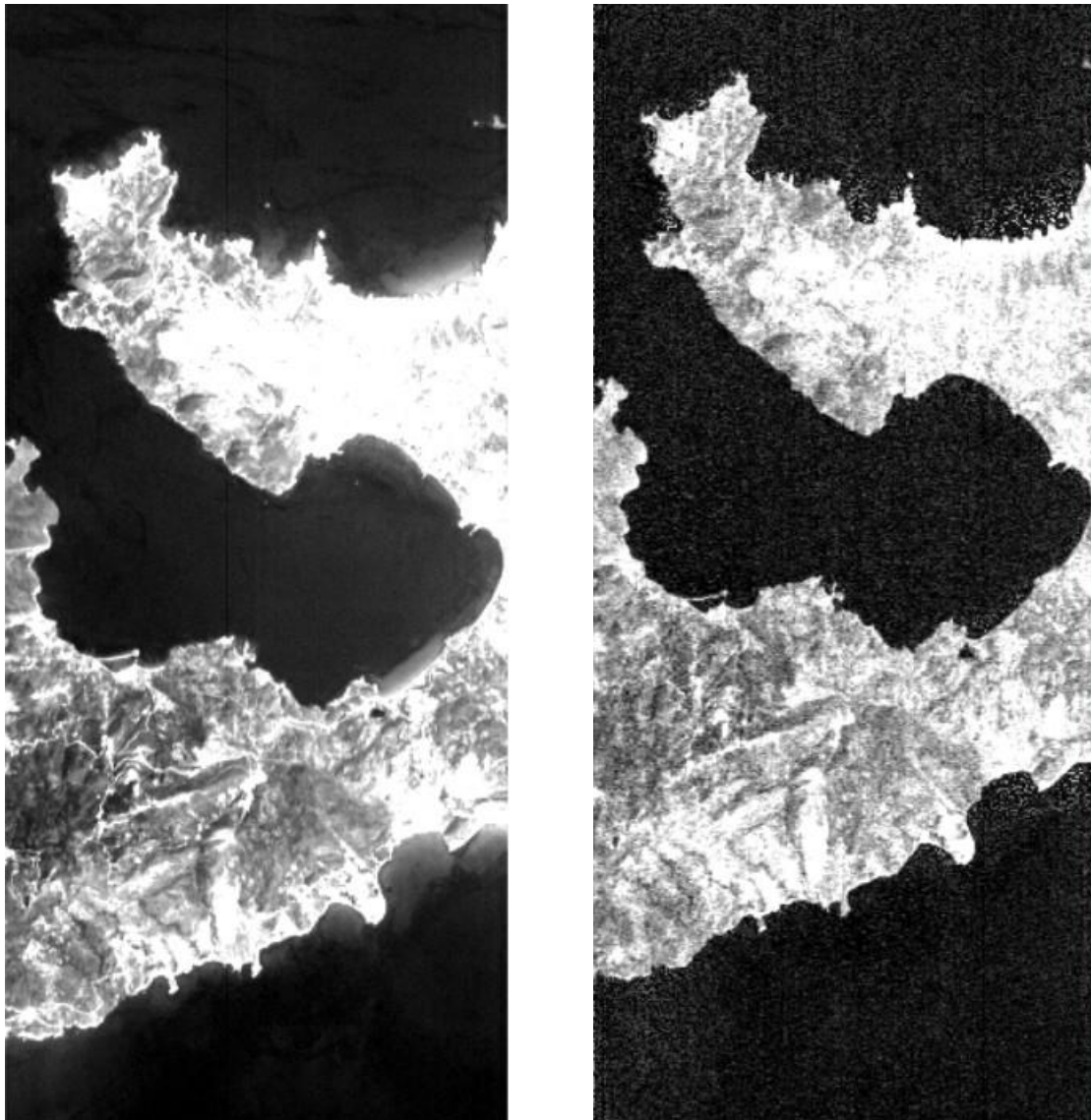
Εικ. IV-4: Στατιστικά δεδομένα έπειτα από την εφαρμογή της μεθόδου QUAC (πρώτη εικόνα) και FLAASH (δεύτερη εικόνα).



Συμπερασματικά, ενώ η QUAC φαίνεται ότι έχει καλύτερα αποτελέσματα, αναφορικά με τις τιμές ανακλαστικότητας των εικονοστοιχείων, χρησιμοποιήθηκαν τελικά τ' αποτελέσματα της FLAASH, κυρίως διότι αποτελεί μία physical model based ατμοσφαιρική διόρθωση, και στηρίζεται στις παραμέτρους που ορίζονται από τον χρήστη. Για τις τιμές εκτός εύρους ανακλαστικότητας, εφαρμόστηκε μάσκα στην εικόνα (για τις πολύ θετικές ή αρνητικές τιμές ανακλαστικότητας), ενώ η ανακλαστικότητα διαιρέθηκε με το 10,000 ώστε ν' αντιστοιχεί στο εύρος μεταξύ 0 - 1.

### IV.3. ΕΠΙΛΟΓΗ BAD BANDS

Έπειτα από την επεξεργασία της ατμοσφαιρικής διόρθωσης, έγινε επιλογή των **bad bands**, δηλαδή των καναλιών με θόρυβο που θα δημιουργούσαν πρόβλημα στις επόμενες επεξεργασίες. Η Εικ. IV-5 παρουσιάζει με κλίμακα του γκρι δύο παραδείγματα για κανάλια της εικόνας που είναι ή όχι αποδεκτά, ανάλογα με την ύπαρξη θορύβου. Ο Πίνακας IV-4 απεικονίζει τα **132 από το σύνολο των 242 καναλιών**, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα επόμενα βήματα επεξεργασίας για περαιτέρω ανάλυση.



Εικ. IV-5: Εικόνα grayscale για τα κανάλια 17 (αποδεκτό κανάλι, αριστερή εικόνα) και 220 (μη αποδεκτό κανάλι, δεξιά εικόνα).

Πίνακας IV-4: Οπτική εκτίμηση καναλιών Hyperion.

| <b>Αύξων Αριθμός</b> | <b>Κανάλι</b> | <b>Μήκος κύματος (nm)</b> |
|----------------------|---------------|---------------------------|
| 1                    | 11            | 457.34                    |
| 2                    | 12            | 467.52                    |
| 3                    | 13            | 477.69                    |
| 4                    | 14            | 487.87                    |
| 5                    | 15            | 498.04                    |
| 6                    | 16            | 508.22                    |
| 7                    | 17            | 518.39                    |
| 8                    | 18            | 528.57                    |
| 9                    | 19            | 538.74                    |
| 10                   | 20            | 548.92                    |
| 11                   | 21            | 559.09                    |
| 12                   | 22            | 569.27                    |
| 13                   | 23            | 579.45                    |
| 14                   | 24            | 589.62                    |
| 15                   | 25            | 599.8                     |
| 16                   | 26            | 609.97                    |
| 17                   | 27            | 620.15                    |
| 18                   | 28            | 630.32                    |
| 19                   | 29            | 640.5                     |
| 20                   | 30            | 650.67                    |
| 21                   | 31            | 660.85                    |
| 22                   | 32            | 671.02                    |
| 23                   | 33            | 681.2                     |
| 24                   | 34            | 691.37                    |
| 25                   | 35            | 701.55                    |
| 26                   | 36            | 711.72                    |
| 27                   | 37            | 721.9                     |
| 28                   | 38            | 732.07                    |
| 29                   | 39            | 742.25                    |
| 30                   | 40            | 752.43                    |
| 31                   | 41            | 762.6                     |
| 32                   | 42            | 772.78                    |
| 33                   | 43            | 782.95                    |
| 34                   | 44            | 793.13                    |
| 35                   | 45            | 803.3                     |
| 36                   | 46            | 813.48                    |
| 37                   | 47            | 823.65                    |
| 38                   | 48            | 833.83                    |
| 39                   | 49            | 844                       |
| 40                   | 50            | 854.18                    |
| 41                   | 51            | 864.35                    |
| 42                   | 52            | 874.53                    |

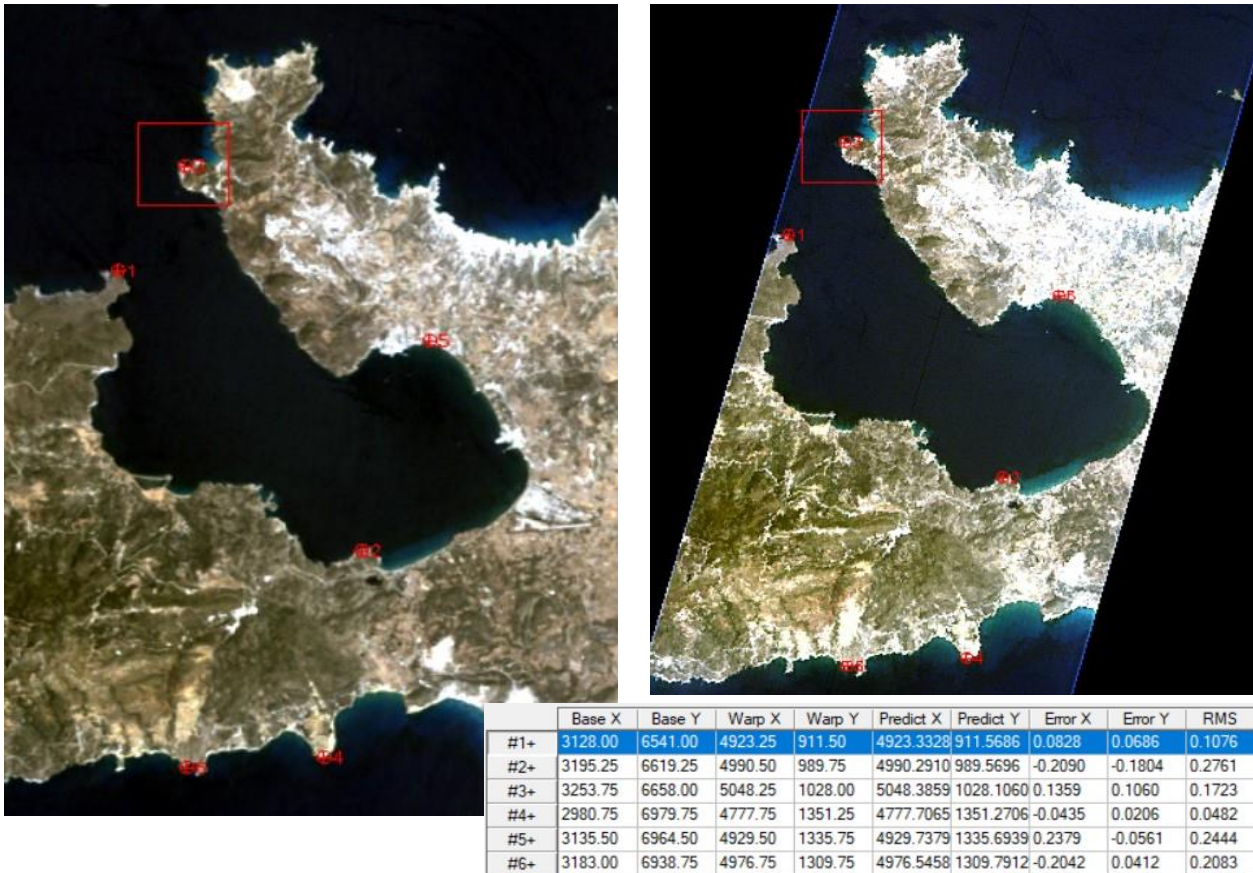
|    |     |           |
|----|-----|-----------|
| 43 | 53  | 884.7     |
| 44 | 54  | 894.88    |
| 45 | 83  | 972.99    |
| 46 | 84  | 983.08    |
| 47 | 85  | 993.17    |
| 48 | 86  | 1003.3    |
| 49 | 87  | 1013.3    |
| 50 | 88  | 1023.4    |
| 51 | 89  | 1033.49   |
| 52 | 90  | 1043.59   |
| 53 | 91  | 1053.6899 |
| 54 | 92  | 1063.79   |
| 55 | 93  | 1073.89   |
| 56 | 95  | 1094.09   |
| 57 | 96  | 1104.1899 |
| 58 | 101 | 1154.58   |
| 59 | 102 | 1164.6801 |
| 60 | 103 | 1174.77   |
| 61 | 104 | 1184.87   |
| 62 | 105 | 1194.97   |
| 63 | 106 | 1205.0699 |
| 64 | 107 | 1215.17   |
| 65 | 108 | 1225.17   |
| 66 | 109 | 1235.27   |
| 67 | 110 | 1245.36   |
| 68 | 111 | 1255.46   |
| 69 | 112 | 1265.5601 |
| 70 | 113 | 1275.66   |
| 71 | 114 | 1285.76   |
| 72 | 115 | 1295.86   |
| 73 | 117 | 1316.05   |
| 74 | 118 | 1326.05   |
| 75 | 134 | 1487.53   |
| 76 | 135 | 1497.63   |
| 77 | 136 | 1507.73   |
| 78 | 137 | 1517.83   |
| 79 | 138 | 1527.92   |
| 80 | 139 | 1537.92   |
| 81 | 140 | 1548.02   |
| 82 | 141 | 1558.12   |
| 83 | 142 | 1568.22   |
| 84 | 143 | 1578.3199 |
| 85 | 144 | 1588.42   |
| 86 | 145 | 1598.51   |
| 87 | 146 | 1608.61   |
| 88 | 147 | 1618.71   |
| 89 | 148 | 1628.8101 |

|            |     |           |
|------------|-----|-----------|
| <b>90</b>  | 149 | 1638.8101 |
| <b>91</b>  | 150 | 1648.9    |
| <b>92</b>  | 151 | 1659      |
| <b>93</b>  | 152 | 1669.1    |
| <b>94</b>  | 153 | 1679.2    |
| <b>95</b>  | 154 | 1689.3    |
| <b>96</b>  | 155 | 1699.4    |
| <b>97</b>  | 156 | 1709.5    |
| <b>98</b>  | 157 | 1719.6    |
| <b>99</b>  | 158 | 1729.7    |
| <b>100</b> | 159 | 1739.7    |
| <b>101</b> | 160 | 1749.79   |
| <b>102</b> | 161 | 1759.89   |
| <b>103</b> | 162 | 1769.99   |
| <b>104</b> | 163 | 1780.09   |
| <b>105</b> | 164 | 1790.1899 |
| <b>106</b> | 188 | 2032.35   |
| <b>107</b> | 189 | 2042.45   |
| <b>108</b> | 191 | 2062.55   |
| <b>109</b> | 192 | 2072.6499 |
| <b>110</b> | 193 | 2082.75   |
| <b>111</b> | 194 | 2092.8401 |
| <b>112</b> | 195 | 2102.9399 |
| <b>113</b> | 196 | 2113.04   |
| <b>114</b> | 197 | 2123.1399 |
| <b>115</b> | 198 | 2133.24   |
| <b>116</b> | 199 | 2143.3401 |
| <b>117</b> | 202 | 2173.53   |
| <b>118</b> | 204 | 2193.73   |
| <b>119</b> | 205 | 2203.8301 |
| <b>120</b> | 206 | 2213.9299 |
| <b>121</b> | 207 | 2224.03   |
| <b>122</b> | 208 | 2234.1201 |
| <b>123</b> | 209 | 2244.22   |
| <b>124</b> | 210 | 2254.22   |
| <b>125</b> | 211 | 2264.3201 |
| <b>126</b> | 212 | 2274.4199 |
| <b>127</b> | 213 | 2284.52   |
| <b>128</b> | 214 | 2294.6101 |
| <b>129</b> | 215 | 2304.71   |
| <b>130</b> | 216 | 2314.8101 |
| <b>131</b> | 217 | 2324.9099 |
| <b>132</b> | 218 | 2335.01   |

#### IV.4. ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ

Έπειτα από την επιλογή των καναλιών που θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα βήματα, πραγματοποιήθηκε η **γεωμετρική διόρθωση** της εικόνας. Η γεωμετρική διόρθωση είναι απαραίτητη διαδικασία καθώς η δορυφορική εικόνα, ως πρωτογενές δεδομένο, δεν εμφανίζει τις ιδιότητες ενός χάρτη, όπως κάποιο σύστημα αναφοράς, κλίμακα κ.λπ. Παράλληλα εμφανίζει γεωμετρικές παραμορφώσεις, σχετιζόμενες με το τοπογραφικό ανάγλυφο, την καμπυλότητα και περιστροφή της Γης, τις ιδιότητες της εξέδρας (όπως το ύψος, η ταχύτητα) κ.λπ. Με τη γεωμετρική διόρθωση επιτυγχάνεται ο μετασχηματισμός από το σύστημα συντεταγμένων της εικόνας ( $x, y$ ), το οποίο έχει παραμορφώσεις σε ένα συγκεκριμένο σύστημα ( $X, Y$ ) χαρτογραφικής προβολής (Mather, 1999). Είναι ένα σημαντικό βήμα στην επεξεργασία των δεδομένων διότι επιτρέπει π.χ. την εισαγωγή τους σε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (εν προκειμένω και στη χρήση στο επόμενο βήμα του Google Earth για την ταυτοποίηση των περιοχών με βλάστηση) και την ταυτόχρονη χρήση τους μαζί με άλλα θεματικά επίπεδα πληροφορίας. Κατά τη γεωμετρική διόρθωση, ουσιαστικά γίνεται μετατροπή της δορυφορικής εικόνας, από ένα σύστημα κανάβου σε άλλο (Παρχαρίδης, 2015).

Η γεωμετρική διόρθωση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο **image to image**, δηλαδή με τη χρήση μίας άλλης εικόνας γεωαναφερμένης, σε γνωστό σύστημα συντεταγμένων, για την καταγραφή του συστήματος συντεταγμένων, της Hyperion εικόνας. Η γεωαναφερμένη εικόνα που χρησιμοποιήθηκε είναι ορθοεικόνα του **Landsat 5 TM** για την ημερομηνία 27/07/2001, με τα 6 **εδafικά σημεία ελέγχου (ground control points, GCP)** για τη γεωαναφορά της εικόνας Hyperion, να εμφανίζουν κανονική διασπορά (Εικ. IV-6). Η επιλογή των GCP καθορίζει την ποιότητα της γεωμετρικής διόρθωσης, με το **μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS)**, για την προκειμένη περίπτωση να υπολογίζεται στα **0.21** (Εικ. IV-6). Τέλος, κατά τη γεωμετρική διόρθωση είναι απαραίτητη η **αναδόμηση (resampling)** και για την εικόνα εφαρμόστηκε η **μέθοδος του εγγύτερου γείτονα (nearest neighbor)**, με τα εικονοστοιχεία της προκύπτουσας εικόνας να λαμβάνουν τιμές DN από το πλησιέστερο εικονοστοιχείο της αρχικής.



Εικ. IV-6: Γεωαναφορά image to image εικόνας Hyperion (δεξιά) με εικόνα Landsat 5 TM (αριστερή) – Πίνακας με τα σφάλματα γεωαναφοράς.

## IV.5. ΑΠΟΚΡΥΨΗ ΘΑΛΑΣΣΑΣ ΚΑΙ ΒΛΑΣΤΗΣΗΣ

Στα επόμενα στάδια εφαρμόστηκε μάσκα για την απόκρυψη της θάλασσας, καθώς και της βλάστησης, ώστε να μην επηρεάσει τη διαδικασία εξαγωγής των φασματικών στόχων. Πιο συγκεκριμένα για την απόκρυψη της θάλασσας, έγινε υπολογισμός του τύπου (Gao, B. C., 1996):

$$NDWI = (B_{51} - B_{110}) / (B_{51} + B_{110})$$

με τα κανάλια **B51** και **B110** ν' αντιστοιχούν στα **864.35** και **1245.36 nm** της υπερφασματικής εικόνας. Υπολογίστηκε ο δείκτης NDWI και κατασκευάστηκε η μάσκα για την απόκρυψη των περιοχών με κάλυψη από νερό. Τέθηκε ως τιμή για τις περιοχές που είναι απαραίτητο να γίνει εφαρμογή μάσκας το μηδέν, ενώ πρότινος είχαν δημιουργηθεί color slices της περιοχής μελέτης, για την εξαγωγή και χρήση τους με τα σημεία ενδιαφέροντος, στο βήμα δημιουργίας της μάσκας.

Αναφορικά με τη βλάστηση, έγιναν δοκιμές για διάφορους, προτεινόμενους δείκτες (μέσω του Vegetation Index Calculator), στο περιβάλλον του λογισμικού ENVI 5.3, με μερικά από τ' αποτελέσματα να παρουσιάζονται στις Εικ. IV-7, IV-8 και IV-9. Έπειτα από δοκιμές, επιλέχθηκε ως καταλληλότερος για την καλύτερη απεικόνιση της βλάστησης του νησιού ο δείκτης NDVI, κι από τα color slices που δημιουργήθηκαν για την περιοχή (με τη βοήθεια του

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

Google Earth), επιλέχθηκαν οι περιοχές στις οποίες επικρατούσε η βλάστηση. Ο δείκτης NDVI για την περίπτωση των δεδομένων από τον Hyperion, δίνεται σύμφωνα με τη βιβλιογραφία από τον τύπο:

$$NDVI = (B_{32} - B_{45}) / (B_{32} + B_{45})$$

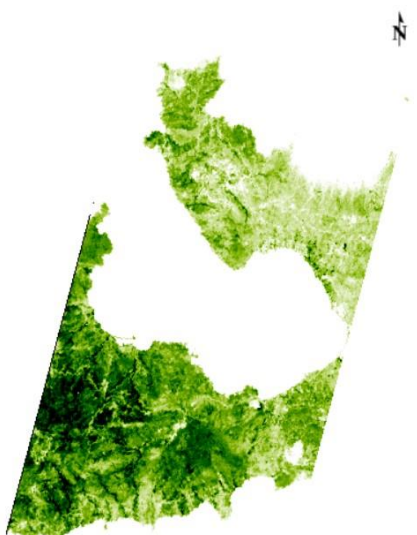
με τα κανάλια **B32** και **B45** ν' αντιστοιχούν στα **671.02** και **803.3 nm** της υπερφασματικής εικόνας (Ferencz, C., et al., 2004).



Εικ. IV-7: Δείκτης Normalized Difference Vegetation Index – NDVI



Εικ. IV-8: Simple Ratio Index ( $B_{NIR}/B_{RED}$ )



Εικ. IV-9: Red Edge Normalized Difference Vegetation Index ( $RENDVI = B_{40} - B_{35} / B_{40} + B_{35}$  με την  $B_{40}$  ν' αντιστοιχεί στα  $752.43 \text{ nm}$  και την  $B_{35}$  στα  $701.55 \text{ nm}$ )

## IV.6. ΛΟΓΟΙ ΚΑΝΑΛΙΩΝ - ΕΓΧΡΩΜΑ ΣΥΝΘΕΤΑ

Οι αριθμητικές πράξεις μεταξύ των καναλιών μίας ψηφιακής εικόνας, όπως είναι η πρόσθεση, η αφαίρεση, ο πολλαπλασιασμός και η διαίρεση, αποτελούν μερικούς από τους τρόπους για τον μετασχηματισμό της. Μία από τις πιο ευρέως διαδεδομένες μεθόδους για την εξαγωγή – ανάδειξη των επιθυμητών στόχων (στην προκειμένη περίπτωση των πετρωμάτων και των ορυκτών), είναι οι διαιρέσεις/λόγοι καναλιών μιας εικόνας, που προκύπτουν από τη διαίρεση των ψηφιακών τιμών σ' ένα κανάλι με τις αντίστοιχες τιμές σ' ένα άλλο κανάλι Εικ. IV-12.

Τα πλεονεκτήματα από την εφαρμογή των λόγων καναλιών είναι τα εξής:

1. Η **μείωση των σκιάσεων** και των **επιδράσεων του ανάγλυφου**, και
2. Ο **περιορισμός των επιπτώσεων** από τις **ατμοσφαιρικές συνθήκες** (Μηλιαρέσης, 2003).

Για την αποτύπωση με έγχρωμα σύνθετα, των διαφορετικών αντικειμένων χρησιμοποιείται η ιδιότητά τους να ανακλούν με διαφορετικό τρόπο την προσπίπτουσα ακτινοβολία, για τις διάφορες περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Πιο συγκεκριμένα, τ' αντικείμενα να εμφανίζουν το δικό τους φασματικό πρότυπο ανακλαστικότητας σε διαφορετικά μήκη κύματος, με αποτέλεσμα την απορρόφηση και την ανάκλαση σε διαφορετικά μήκη, στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα.

Για την ανάδειξη των ορυκτών ενδιαφέροντος σε σχέση με το διοξείδιο του πυριτίου, συλλέχθηκαν οι φασματικές υπογραφές, από τις φασματικές βιβλιοθήκες του ENVI 5.3. Για παράδειγμα στην περίπτωση του καολινίτη, η φασματική υπογραφή συμπεριελάμβανε τα χαρακτηριστικά απορρόφησης στα 1.396 μm και 1.413 μm, τα οποία οφείλονται στην επιμήκυνση του δεσμού του OH και στα 2.166 και 2.209 μm, τα οποία οφείλονται στον συνδυασμό της κάμψης του Al-OH και στην επιμήκυνση του δεσμού του OH, σ' αυτά τα μήκη κύματος. Εντοπίστηκαν επομένως οι φασματικές υπογραφές, ώστε να αναδειχθούν οι περιοχές του φάσματος που θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα βήματα, για την εύρεση των υλικών/στόχων.

Έπειτα από τον υπολογισμό των μέσων όρων για τα ομοειδή ορυκτά, και του ποσοστού σφάλματος (+/- 15%) (όπως φαίνεται στην Εικ. IV-10), προέκυψε το κοινό διάγραμμα ανακλαστικότητας για τα υπο διερεύνηση ορυκτά της Εικ. IV-11 κι εντοπίστηκαν οι ζώνες στις οποίες τ' αντικείμενα εμφανίζουν μεγάλες διαφορές.

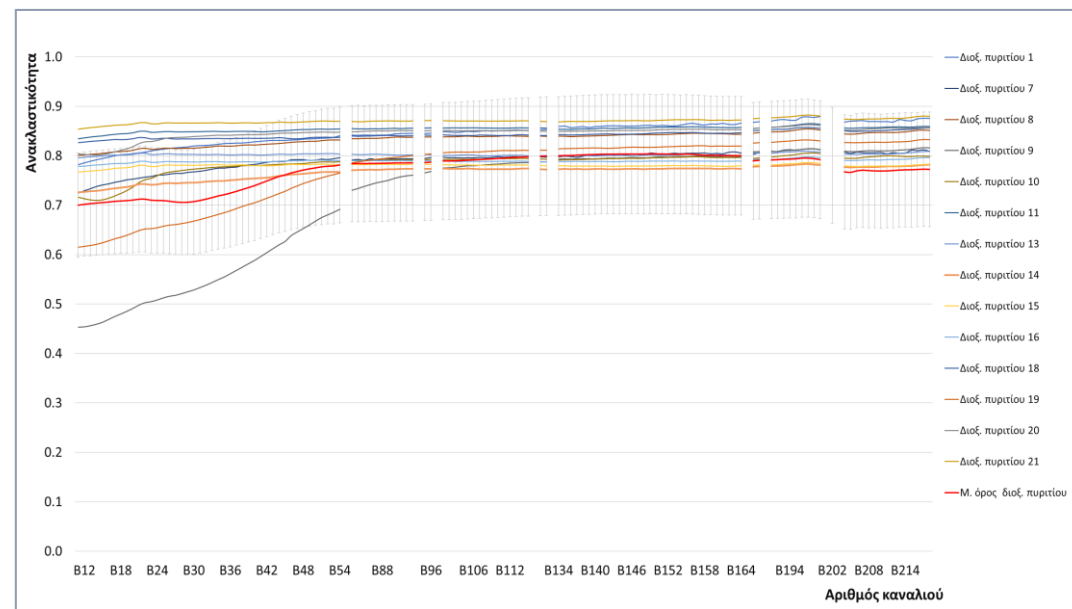
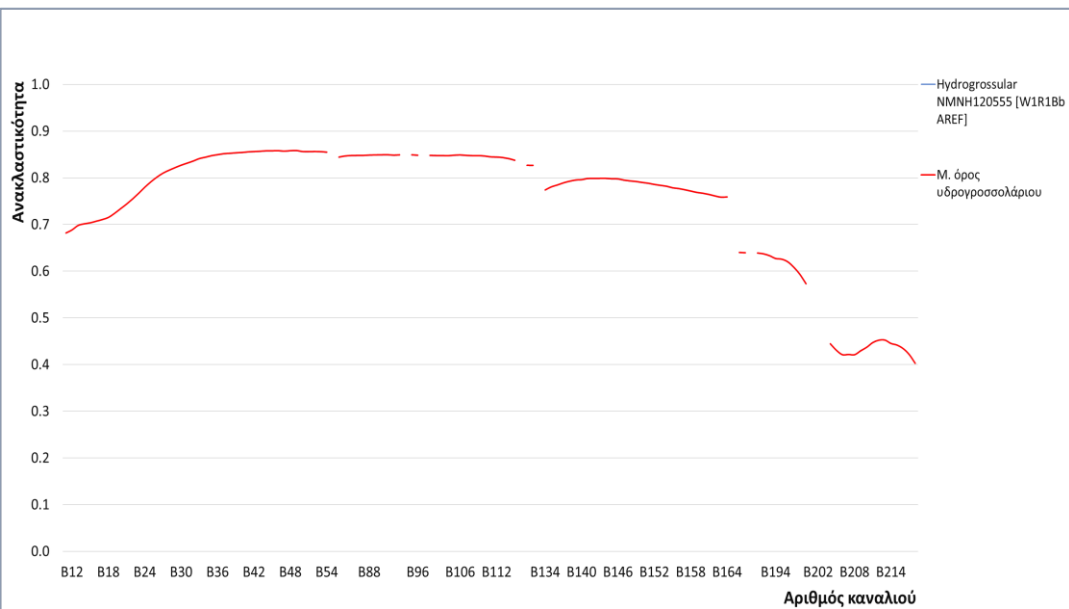
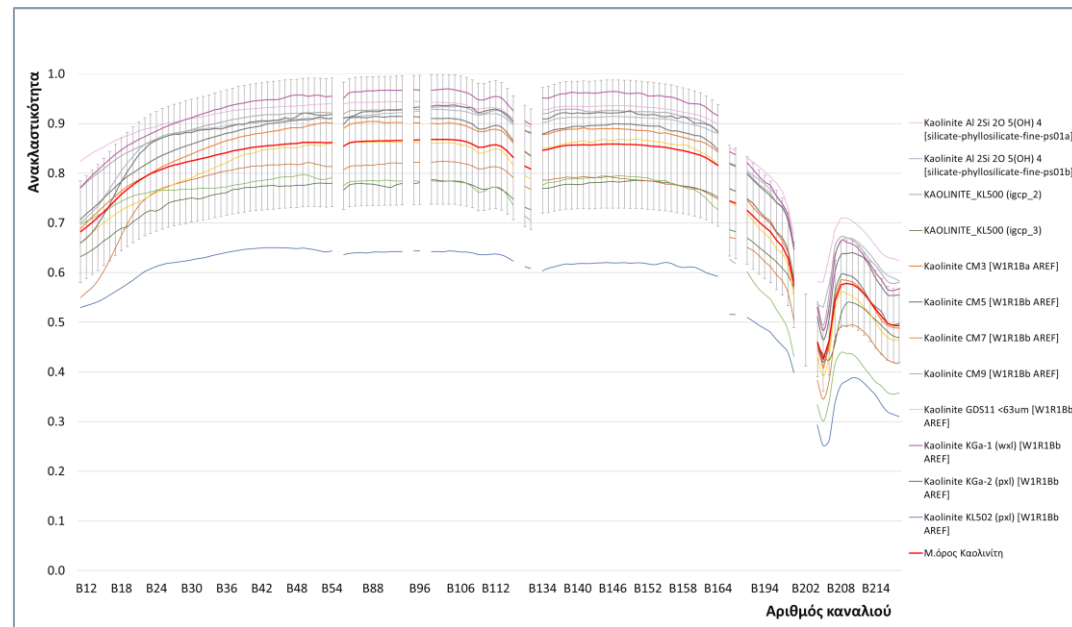
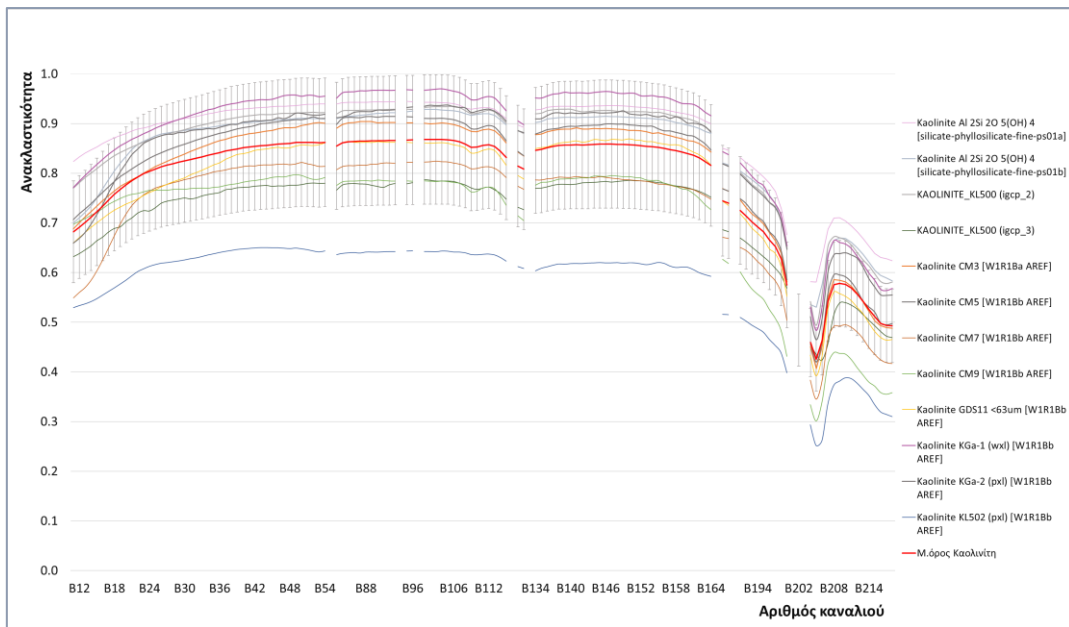
Με βάση το κοινό διάγραμμα ανακλαστικότητας (Εικ. IV-11) χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω λόγοι καναλιών της υπερφασματικής εικόνας για την ανάδειξη των ορυκτών ενδιαφέροντος (καολινίτη, υδρογροσσουλάριος, μοντμοριλλονίτης, βλ. § VI για αιτιολόγηση φασματικών υπογραφών) έναντι του διοξειδίου του πυριτίου. Τα κανάλια επιλέχθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε ο αριθμητής να εμφανίζει μεγάλες τιμές ανακλαστικότητας, σε σχέση με τον παρονομαστή, για τα ορυκτά ενδιαφέροντος όπως φαίνεται στο κοινό διάγραμμα (Εικ. IV-11). Οι λόγοι καναλιών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των Εικ. IV-12 σε grayscale επιλέχθηκαν για ένα εύρος καναλιών, χρησιμοποιώντας τους παρακάτω λόγους:



- **(B<sub>30→33</sub>)/(B<sub>204→B207</sub>)**
- **(B<sub>38→41</sub>)/(B<sub>204→B207</sub>)**

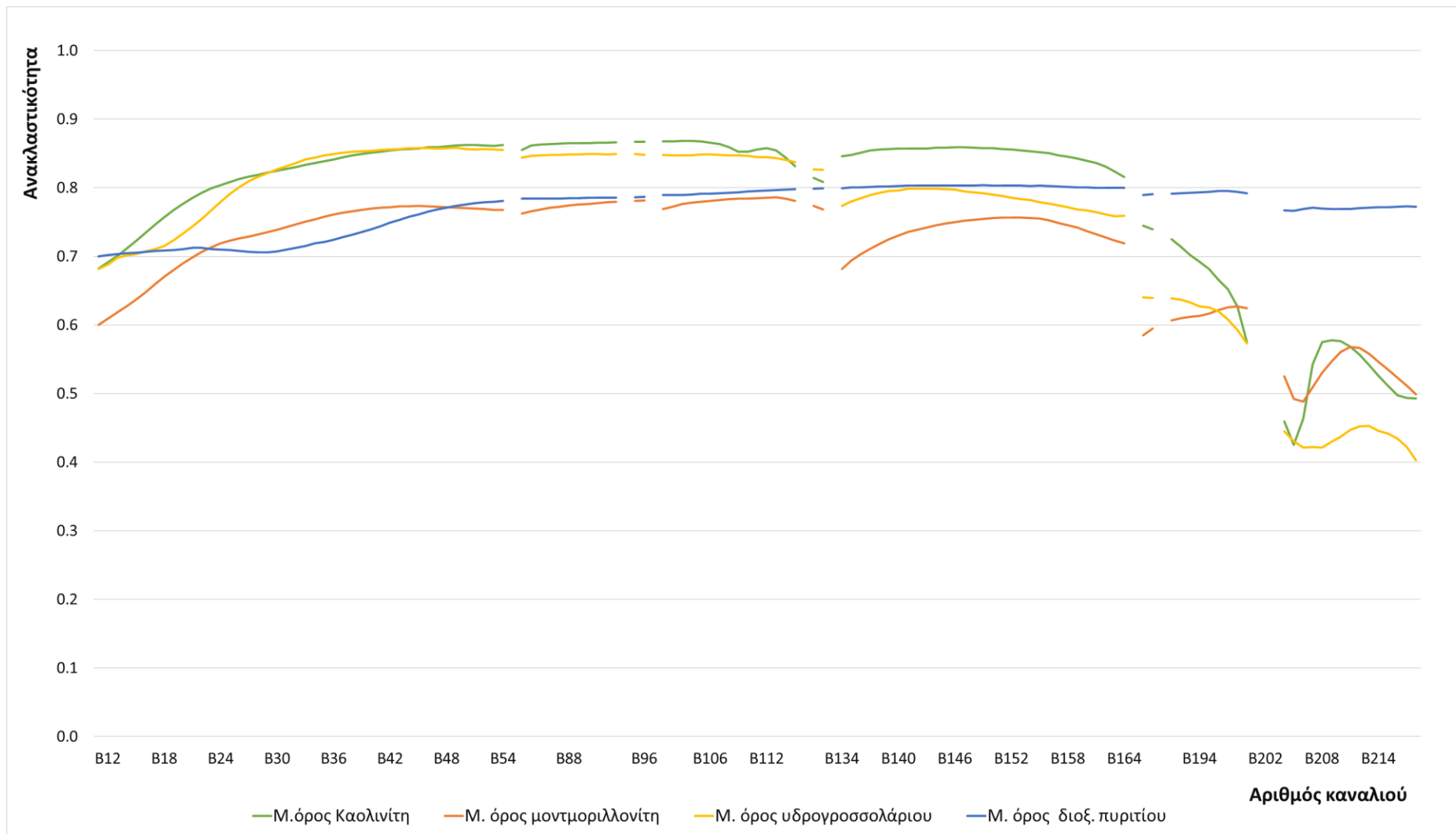
Ο πρώτος λόγος δίνει καλύτερα αποτελέσματα, αναπαριστώντας με λευκό χρώμα τις περιοχές εμφάνισης των ορυκτών του περλίτη, του μπεντονίτη και του καολίνη (περιοχές Τράχηλας, Σαρακίτικο, Φυρίπλακα κ.λπ.) (Εικ. IV-12). Στο βόρειο τμήμα ωστόσο εντοπίζονται με λευκό χρώμα, και αστικές περιοχές (όπως είναι Αδάμαντας, Κάναβα κ.λπ.). Τα ορυκτά οικονομικού ενδιαφέροντος διακρίνονται σε σχέση με το διοξείδιο του πυριτίου, το οποίο εμφανίζεται σε μεγάλο ποσοστό στα πετρώματα του νησιού, ωστόσο λόγω της ομοιότητας μεταξύ των φασματικών υπογραφών, ο διαχωρισμός περλίτη-καολίνη-μπεντονίτη δεν είναι εφικτός, χρησιμοποιώντας τους λόγους καναλιών.

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

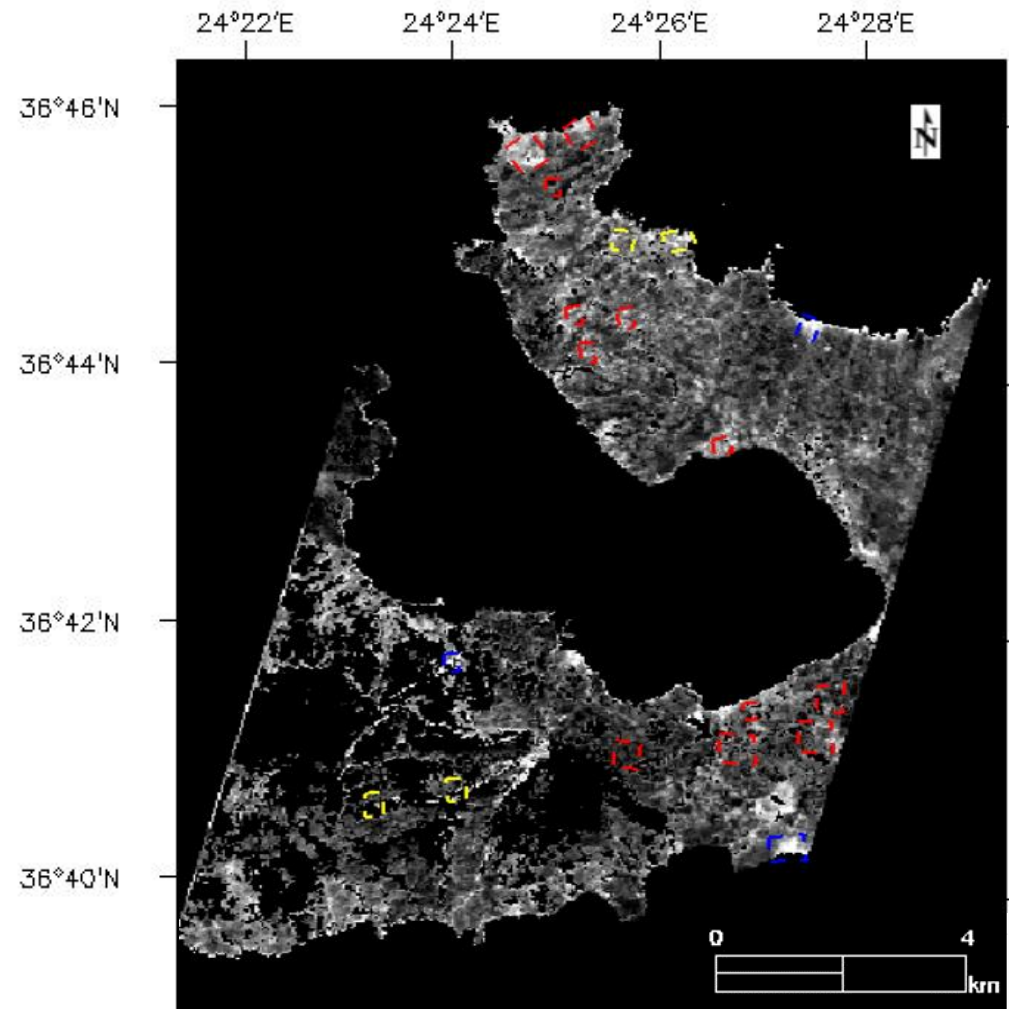
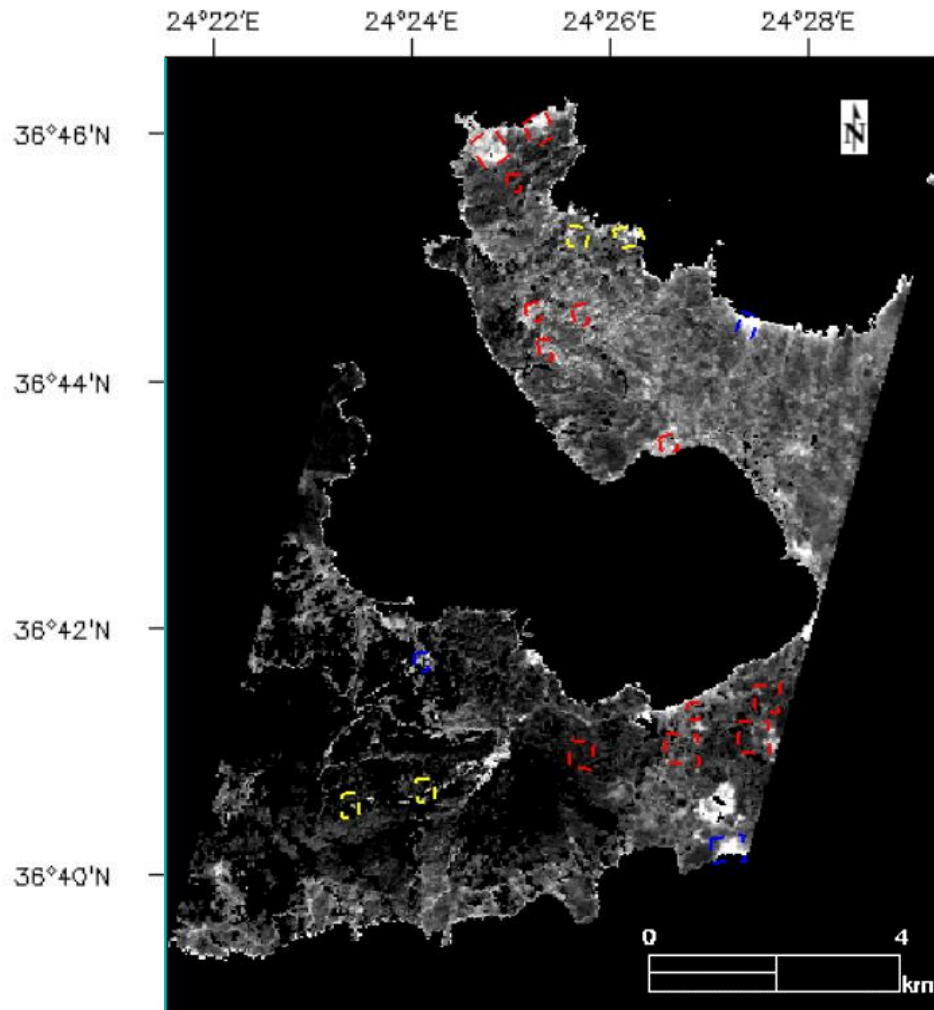





Εικ. IV-10: Διαγράμματα ανακλαστικότητας

(πρώτη εικόνα: μοντμοριλλονίτης, δεύτερη εικόνα: καολινίτης, τρίτη εικόνα: υδρογροσσουλάριου, τέταρτη εικόνα: διοξείδιο του πυριτίου)



Εικ. IV-11: Διάγραμμα ανακλαστικότητας για σύγκριση Μέσων Όρων φασματικών υπογραφών



Υπόμνημα:  Λατομείο – εμφάνιση καολίνη  Λατομείο – εμφάνιση μπεντονίτη  Λατομείο – εμφάνιση περλίτη

Εικ. IV-12: Εντοπισμός ορυκτών ενδιαφέροντος, για λόγους καναλιών (B30 → 33)/(B204 → 207) (αριστερή εικόνα) και (B38 → 41)/(B204 → 207) (δεξιά εικόνα).

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε το έγχρωμο σύνθετο στο RGB (1) για τα εξής εύρη καναλιών, κατ' αντιστοιχία:

- $B_{30} \rightarrow 33 = 650.67 - 681.2 \text{ nm}$  (Red),
- $B_{159} \rightarrow 161 = 1739.7 - 1769.99 \text{ nm}$  (Green), και
- $B_{204} \rightarrow 207 = 2193.73 - 2224.03 \text{ nm}$  (Blue) (Εικ. IV-13 – αριστερή εικόνα)

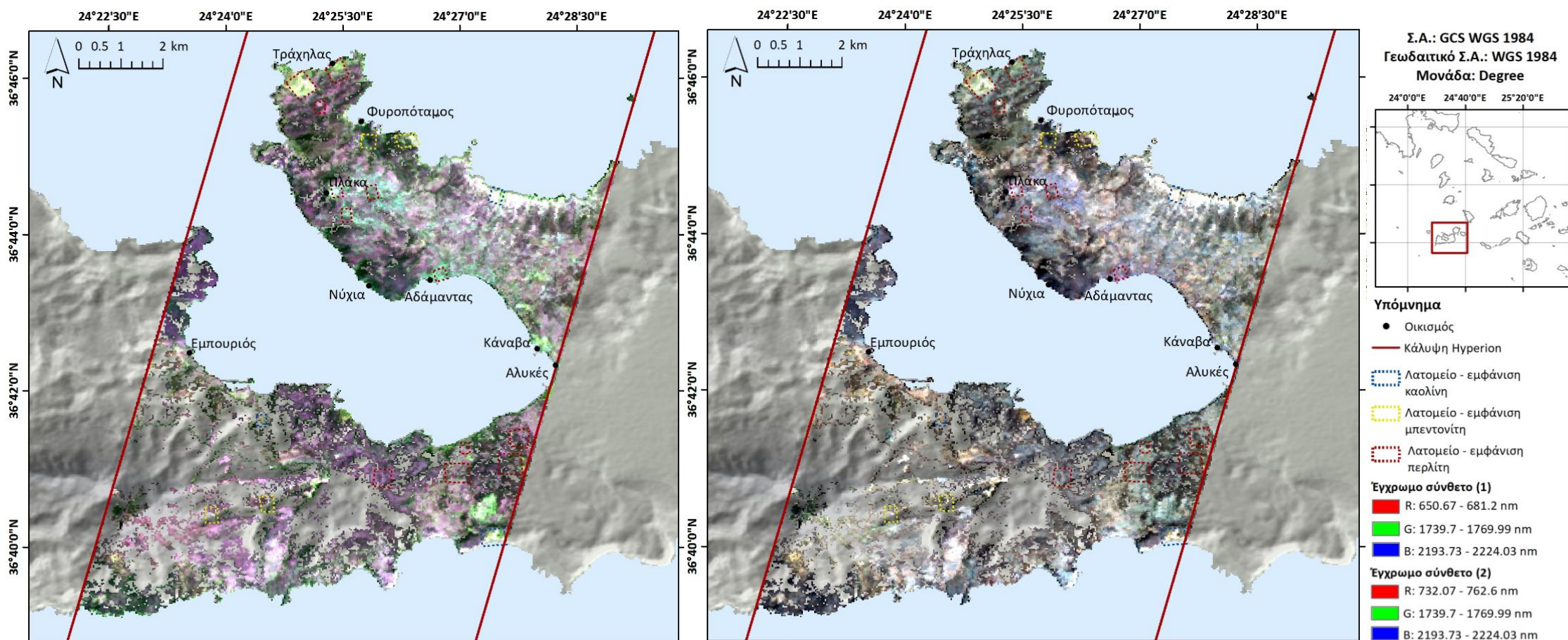
Και το έγχρωμο σύνθετο RGB (2):

- $B_{38} \rightarrow 41 = 732.07 - 762.6 \text{ nm}$  (Red),
- $B_{159} \rightarrow 161 = 1739.7 - 1769.99 \text{ nm}$  (Green), και
- $B_{204} \rightarrow 207 = 2193.73 - 2224.03 \text{ nm}$  (Blue) (Εικ. IV-13 – δεξιά εικόνα)

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω έγχρωμα σύνθετα, σε συνδυασμό με τα στοιχεία από το διάγραμμα ανακλαστικότητας (Εικ. IV-11), χαρακτηριστικές απορροφήσεις εμφανίζουν το διοξείδιο του πυριτίου στα κανάλια κόκκινου χρώματος, ενώ για τα ορυκτά οικονομικού ενδιαφέροντος, εντοπίζονται στα κανάλια που απεικονίζονται με μπλε χρώμα. Ακόμα, στους χάρτες με τα έγχρωμα σύνθετα (Εικ. IV-13) παρατηρούνται τα εξής:

- οι **λατομικές περιοχές** κυρίως με λευκό-πράσινο χρώμα, ενώ σύμφωνα με το διάγραμμα ανακλαστικότητας, θα έπρεπε να ανακλούν το κόκκινο-πράσινο χρώμα. Εξαιρέση αποτελεί η λατομική περιοχή Τράχηλα με περλίτη (RGB (1)).
- οι **εμφανίσεις διοξειδίου του πυριτίου** στο ΒΑ τμήμα του νησιού με πράσινο-μπλε χρώμα, κι απορρόφηση στο κόκκινο κανάλι. Η παρουσία διοξειδίου του πυριτίου – ηφαιστειακής υέλου συνδέεται με τις εμφανίσεις ηφαιστειακών τόφφων στο ΒΑ τμήμα του νησιού. Ακόμα περιοχές όπως στον Αδάμαντα, στην Πλάκα, στον Τριοβάσαλο με περλίτη, εμφανίζονται με διοξείδιο του πυριτίου, δεδομένου του ότι ο περλίτης αποτελεί άμορφη, ηφαιστειακή ύελο, με μεγάλη περιεκτικότητα σε νερό (RGB (1)).
- οι **γεωμορφές** των πρόσφατων, ηφαιστειακών κρατήρων, στα ακρωτήρια Φυριπλάκα και Κεδράρι, στο βόρειο και στο νότιο τμήμα αντίστοιχα (RGB (1)).
- η **ανάκλαση** των καναλιών με κόκκινο χρώμα σε μεγαλύτερο βαθμό για το δεύτερο έγχρωμο σύνθετο (RGB (2)).

Τα έγχρωμα σύνθετα λόγω του συνδυασμού των καναλιών εμφανίζουν σε μεγάλο βαθμό τις λιθολογικές αντιθέσεις, λόγω της διαφορετικής χρωματικής κλίμακας, σε σχέση με τα προϊόντα από τους λόγους καναλιών. Τέλος, μεταξύ τους τα συγκεκριμένα έγχρωμα σύνθετα εμφανίζουν μικρές διαφοροποιήσεις.



Εικ. IV-13: Έγχρωμο σύνθετο (1) για  $B_{30 \rightarrow 33} = 650.67 - 681.2 \text{ nm}$  (Red),  $B_{159 \rightarrow 161} = 1739.7 - 1769.99 \text{ nm}$  (Green), και  $B_{204 \rightarrow 207} = 2193.73 - 2224.03 \text{ nm}$  (Blue) (αριστερή εικόνα). Έγχρωμο σύνθετο (2) για  $B_{30 \rightarrow 33} = 732.07 - 762.6 \text{ nm}$  (Red),  $B_{159 \rightarrow 161} = 1739.7 - 1769.99 \text{ nm}$  (Green), και  $B_{204 \rightarrow 207} = 2193.73 - 2224.03 \text{ nm}$  (Blue) (δεξιά εικόνα).

## V. ΕΞΑΓΩΓΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ – ΦΩΤΟΕΡΜΗΝΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΝΑΛΙΩΝ

Σκοπός του κεφαλαίου, είναι η **εξαγωγή χαρακτηριστικών μέσω της μείωσης της διαστατικότητας των υπερφασματικών δεδομένων**. Στην παρούσα εργασία, το μέγεθος του υπερφασματικού κύβου αντιστοιχεί σε **944 pixels × 480 pixels** με **132 φασματικές ζώνες** και λόγω της πληθώρας φασματικών καναλιών απαιτείται η μείωσή τους για την πιο αποδοτική λειτουργία των αλγορίθμων ταξινόμησης.

Αναφορικά με τις μεθόδους για τη μείωση των φασματικών διαστάσεων της εικόνας, ανήκουν σε μία από τις εξής κατηγορίες: **γεωμετρικές**, μέθοδοι που βασίζονται σε **μη αρνητικούς πίνακες παραγοντοποίησης (non-negative matrix factorization)** και **στατιστικές** μέθοδοι (Ceamanos, X., & Valero, S., 2016). Πιο συγκεκριμένα μερικές απ' αυτές είναι οι εξής:

- η **Ανάλυση Κυρίων Συνιστωσών (Principal Component Analysis - PCA)** ή της **Κατατμημένης Ανάλυσης Κυρίων Συνιστωσών (Segmented PCA)**,
- η τεχνική **Ελαχιστοποίησης του Θορύβου (Minimum Noise Fraction – MNF)**,
- η **Ανάλυση σε Ανεξάρτητες Συνιστώσες (Independent Component Analysis - ICA)**,
- η τεχνική των **Διαχωριστικών Επιφανειών (Decision Boundary)**, και
- η τεχνική της **Διαχωριστικής Ανάλυσης (Discriminant Analysis)**

Με τις δύο τελευταίες να πραγματοποιούνται μέσω των διαθέσιμων σημείων ελέγχου (Κολοκούσης Π., 2008). Τέλος υπάρχουν και οι μέθοδοι επιλογής των καναλιών ταξινόμησης.

Στην παρούσα εργασία έγιναν δοκιμές των μεθόδων PCA και MNF, καθώς και των μεθόδων επιλογής καναλιών, μέσω συσχέτισης, με τ' αποτελέσματα της MNF και της μεθόδου επιλογής καναλιών μέσω των συντελεστών συσχέτισης, να χρησιμοποιούνται στα επόμενα βήματα για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

### V.1. PCA – PRINCIPAL COMPONENT ANALYSIS

Η **ανάλυση κύριων συνιστωσών (principal component analysis – PCA)** είναι ένας γραμμικός, πολυπαραγοντικός μετασχηματισμός που στόχο έχει την **συμπύεση – μείωση** της διαστατικότητας λόγω του ότι τα δεδομένα συνιστούν έναν μεγάλο αριθμό από αλληλοσυνδεόμενες μεταβλητές. Κύριος στόχος της PCA είναι η διατήρηση όσο το δυνατόν περισσότερο της διακύμανσης των δεδομένων. Στηρίζεται στο γεγονός ότι τα γειτονικά κανάλια εμφανίζουν **υψηλή συσχέτιση**, συμπεριλαμβάνοντας τις ίδιες πληροφορίες για το υλικό/στόχο (Mishra et al., 2017; Rodarmel, & Shan, 2002).

Η PCA είναι η τεχνική που μετατρέπει ένα άθροισμα από αλληλοσυνδεόμενες, ποσοτικές, εξαρτώμενες μεταβλητές, σ' ένα μικρότερο σύνολο αποτελούμενο από **κύριες συνιστώσες (principal components)**. Είναι ένας τρόπος για τον προσδιορισμό των **μοτίβων** στα δεδομένα, με στόχο την εύρεση των ομοιοτήτων και των διαφορών τους (Mishra et al., 2017).

Οι **κύριες συνιστώσες (κανάλια PCA)** είναι το αποτέλεσμα ενός **γραμμικού συνδυασμού** προερχόμενου από τα αρχικά κανάλια, που προβάλλονται σε **ορθογώνιο άξονα**. Τα επικείμενα σημεία διατηρούν μια **φθίνουσα σειρά** όσον αφορά την τιμή της συμμεταβλητότητάς τους, με αποτέλεσμα στην πρώτη κύρια συνιστώσα να περιλαμβάνεται το μεγαλύτερο ποσοστό πληροφοριών. Κατά τη διαδικασία PCA, προσδιορίζεται ο βέλτιστος γραμμικός συνδυασμός των αρχικών καναλιών, υπολογίζοντας την συμμεταβλητότητα των τιμών των εικονοστοιχείων. Οι κύριες συνιστώσες που θα προκύψουν από τη διαδικασία, θα έχουν ίδιο αριθμό με τα αρχικά κανάλια, με τις πρώτες να διατηρούν το **μεγαλύτερο ποσοστό** πληροφορίας. Το γεγονός αυτό είναι βοηθητικό στο επόμενο στάδιο για τη μείωση του αριθμού των καναλιών, και τη δημιουργία έγχρωμων σύνθετων, για την **απεικόνιση** των απαραίτητων **χαρακτηριστικών**.

Η PCA χρησιμοποιήθηκε για τα κανάλια του αισθητήρα Hyperion. Στον συγκεκριμένο, γραμμικό μετασχηματισμό χρησιμοποιήθηκαν οι στατιστικές ιδιότητες της υπερφασματικής εικόνας για να εξεταστούν η εξάρτηση ή η συσχέτιση των καναλιών. Βασικά σημεία για τη μέθοδο PCA είναι τα εξής:

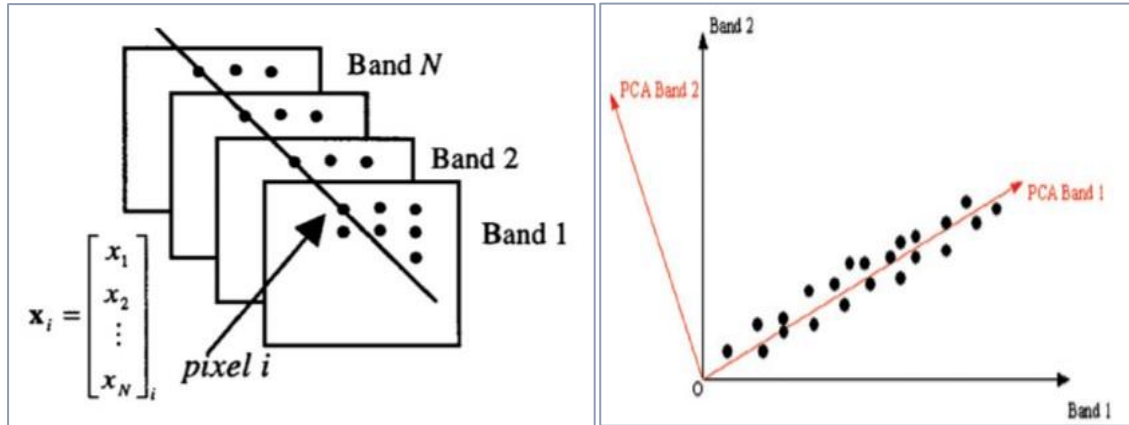
- Η εκτίμηση του **πίνακα συσχέτισης (correlation)** και **συνδιασποράς (covariance)** των υπερφασματικών δεδομένων, που έχει μεγάλη σημασία καθώς δηλώνει το βαθμό συσχέτισης μεταξύ των καναλιών. Εμφανίζει επομένως τον βαθμό επαναληψιμότητας της πληροφορίας μεταξύ των καναλιών. Πρότινος αυτού του βήματος, είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση των δεδομένων.
- Ο υπολογισμός των **ιδιοτιμών (eigenvalues)** και των **ιδιοδιανυσμάτων (eigenvectors)** του πίνακα συσχέτισης. Με τον όρο ιδιοτιμή, γίνεται αναφορά στο μέγεθος των διανυσμάτων και στο ποσό της πληροφορίας για κάθε συνιστώσα, και με τον όρο ιδιοδιάνυσμα, στη διεύθυνση των διανυσμάτων του πίνακα συνδιασποράς, και στο βαθμό συσχέτισης μεταξύ των συνιστωσών και των αρχικών καναλιών της εικόνας.
- Η χρήση των ιδιοτιμών και ιδιοδιανυσμάτων, για την **επιλογή** μόνο των σημαντικότερων χαρακτηριστικών ιδιοδιανυσμάτων κι έπειτα η μετατροπή αυτών, για τη μείωση της διαστατικότητας.

Η PCA αναδιοργανώνει τη **συμμεταβλητότητα (covariance)** των καναλιών σ' ένα νέο σύνολο, με αποτέλεσμα μετά την PCA να προκύπτουν **ασυσχέτιστες συνιστώσες (PCs)** κατά φθίνουσα σειρά μεταβλητότητας. Γίνεται εκτίμηση των πινάκων συσχέτισης και συνδιασποράς και στη συνέχεια γίνεται η περιστροφή των PCs. Επιπλέον η PCA κανονικοποιεί τους υπολογισμένους πίνακες και μειώνει τα κανάλια με τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα και το αντίστροφο (Sivashankari et al., 2019).

Σε γενικές γραμμές λοιπόν, η μέθοδος βρίσκει τη σχέση μεταξύ **εξαρτημένων** και **ανεξάρτητων μεταβλητών** και ιεραρχεί, με τέτοιο τρόπο ώστε η πρώτη να εξαπλώνεται κατά μήκος μιας ευθείας γραμμής, έχοντας τη μεγαλύτερη διάσταση των δεδομένων και η δεύτερη να προβάλλεται κάθετα προς αυτή, προσαρμόζοντας το σφάλμα που παράγεται από την πρώτη (Sivashankari et al., 2019).

Για την τοποθέτηση των κύριων συνιστωσών στη διακύμανση των δεδομένων, είναι απαραίτητη η αξιολόγηση των ιδιοτιμών και των ιδιοδιανυσμάτων. Στόχος είναι η μείωση των  $n$  διαστάσεων σ' ένα υποχώρο  $k$  διαστάσεων, στον οποίο ισχύει  $k < n$ , διατηρώντας τα κανάλια με σημαντική πληροφορία, κι αυξάνοντας την υπολογιστική ακρίβεια (Sivashankari et al., 2019).





Εικ. V-1: Παράδειγμα εικονοστοιχείου – διανύσματος κατά την εφαρμογή της μεθόδου PCA (πρώτη εικόνα) και η γεωμετρία των καναλιών κατά τη διαδικασία της PCA (δεύτερη εικόνα) (Rodarmel, & Shan, 2002).

Η τεχνική της PCA βρίσκει εφαρμογή στα εξής:

1. Εξαγωγή των σημαντικότερων πληροφοριών από τα υπερφασματικά δεδομένα,
2. Συμπύεση του μεγέθους της σειράς των δεδομένων, με τη μείωση της διαστατικότητας, χωρίς την απώλεια σημαντικών πληροφοριών, και
3. Απλοποίηση του συνόλου των δεδομένων.

Από την εφαρμογή της PCA δημιουργήθηκαν οι πίνακες συνδιασποράς, συσχέτισης και ιδιοδιανυσμάτων (Πίνακας V-1). Παρατηρήθηκε ότι το σύνολο της πληροφορίας συγκεντρώθηκε στην **πρώτη κύρια συνιστώσα** (PCA1 με ποσοστό 99,5% της συνολικής πληροφορίας) (Εικ. V-2 και Πίνακας V-2), έπειτα από υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στις διαθέσιμες ιδιοτιμές (Πίνακας V-1) και δημιουργήθηκε το διάγραμμα ποσοστού μεταβλητότητας των ιδιοτιμών. Τ' αποτελέσματα για τις έξι κύριες συνιστώσες, σε grayscale, εμφανίζονται στις Εικ. V-3, με τον λόγο σήμα προς θόρυβο (SNR) να αυξάνεται, από την PCA1, στην PCA6.

Πίνακας V-1: Πίνακας συνδιασποράς, συσχέτισης και ιδιοδιανυσμάτων.

| Covariance | Band 4   | Band 5   | Band 6   | Band 7   | Band 8   | Band 9   | Band 10  |
|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Band 4     | 0.002678 | 0.002661 | 0.002590 | 0.002559 | 0.002565 | 0.002585 | 0.002615 |
| Band 5     | 0.002661 | 0.002645 | 0.002574 | 0.002543 | 0.002550 | 0.002570 | 0.002600 |
| Band 6     | 0.002590 | 0.002574 | 0.002507 | 0.002477 | 0.002484 | 0.002503 | 0.002533 |
| Band 7     | 0.002559 | 0.002543 | 0.002477 | 0.002448 | 0.002455 | 0.002474 | 0.002504 |
| Band 8     | 0.002565 | 0.002550 | 0.002484 | 0.002455 | 0.002462 | 0.002482 | 0.002512 |

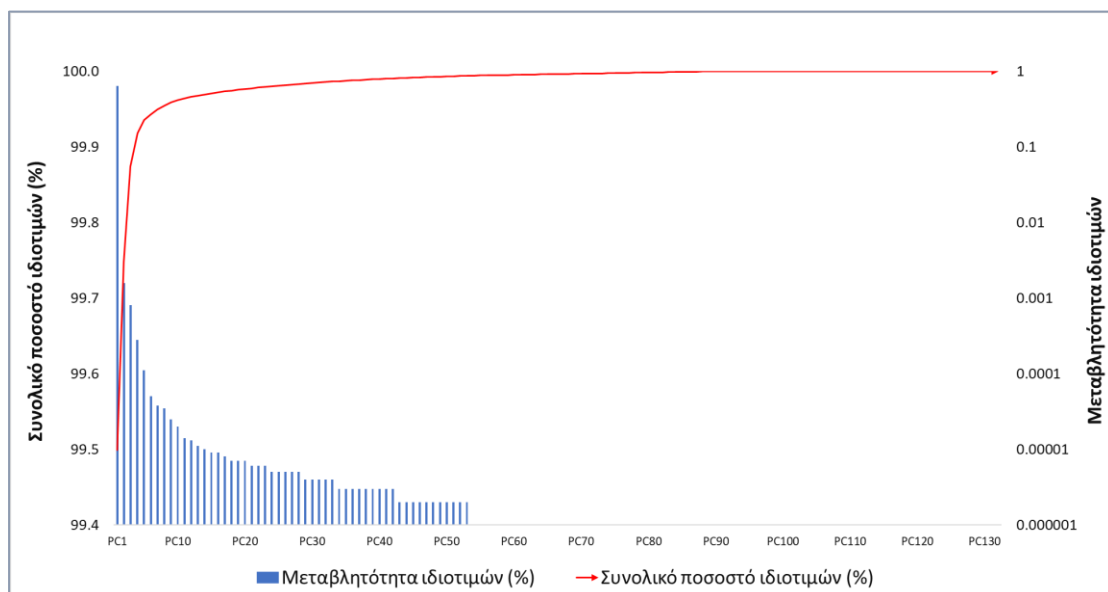
| Correlation | Band 4   | Band 5   | Band 6   | Band 7   | Band 8   | Band 9   | Band 10  |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Band 4      | 1.000000 | 0.999826 | 0.999631 | 0.999329 | 0.998878 | 0.998346 | 0.997734 |
| Band 5      | 0.999826 | 1.000000 | 0.999840 | 0.999653 | 0.999329 | 0.998911 | 0.998401 |
| Band 6      | 0.999631 | 0.999840 | 1.000000 | 0.999863 | 0.999676 | 0.999380 | 0.998978 |
| Band 7      | 0.999329 | 0.999653 | 0.999863 | 1.000000 | 0.999870 | 0.999686 | 0.999405 |
| Band 8      | 0.998878 | 0.999329 | 0.999676 | 0.999870 | 1.000000 | 0.999884 | 0.999712 |

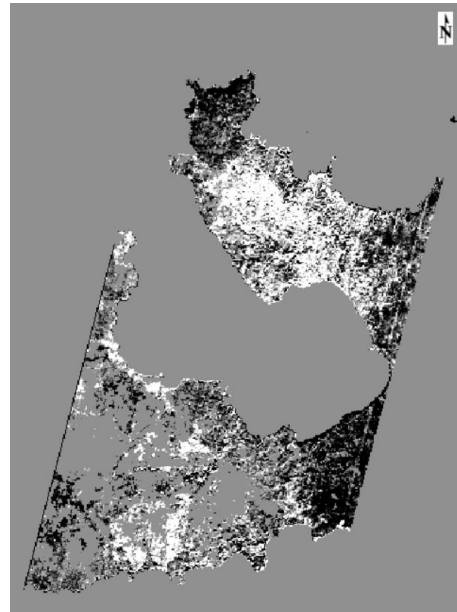
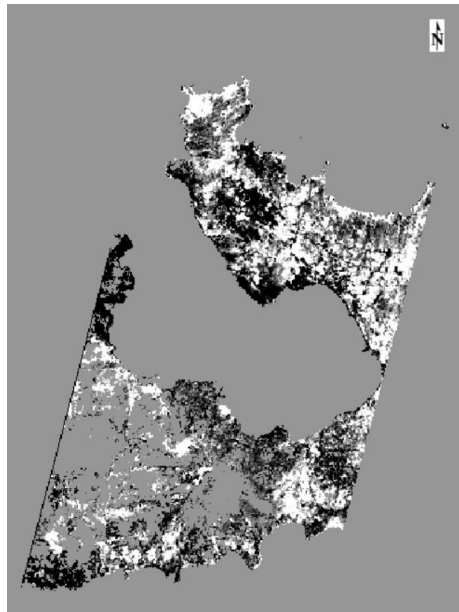
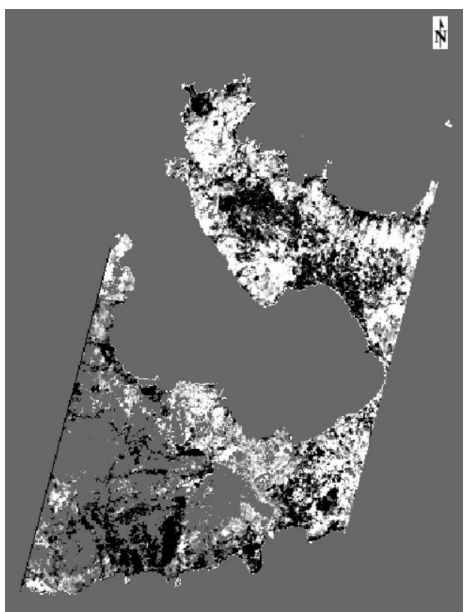
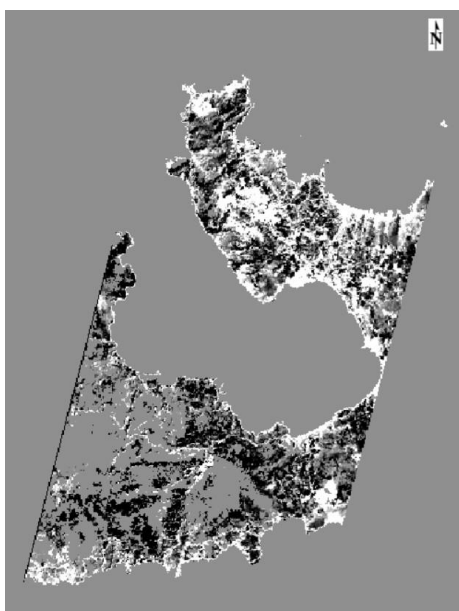
| Eigenvectors | Band 4    | Band 5    | Band 6    | Band 7    | Band 8    | Band 9    | Band 10   |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Band 4       | 0.064282  | 0.063903  | 0.062233  | 0.061512  | 0.061709  | 0.062219  | 0.063000  |
| Band 5       | 0.112206  | 0.118791  | 0.122660  | 0.126995  | 0.133391  | 0.139623  | 0.145844  |
| Band 6       | 0.066859  | 0.057449  | 0.046265  | 0.036745  | 0.026852  | 0.018092  | 0.009939  |
| Band 7       | 0.282377  | 0.265546  | 0.243761  | 0.224022  | 0.207900  | 0.190747  | 0.172507  |
| Band 8       | -0.227034 | -0.206021 | -0.177640 | -0.155456 | -0.132103 | -0.109846 | -0.091274 |

Πίνακας V-2: Πίνακας ιδιοτιμών – ποσοστό πληροφορίας - αθροιστικό ποσοστό πληροφορίας για τις 15 κύριες συνιστώσες, PCA.

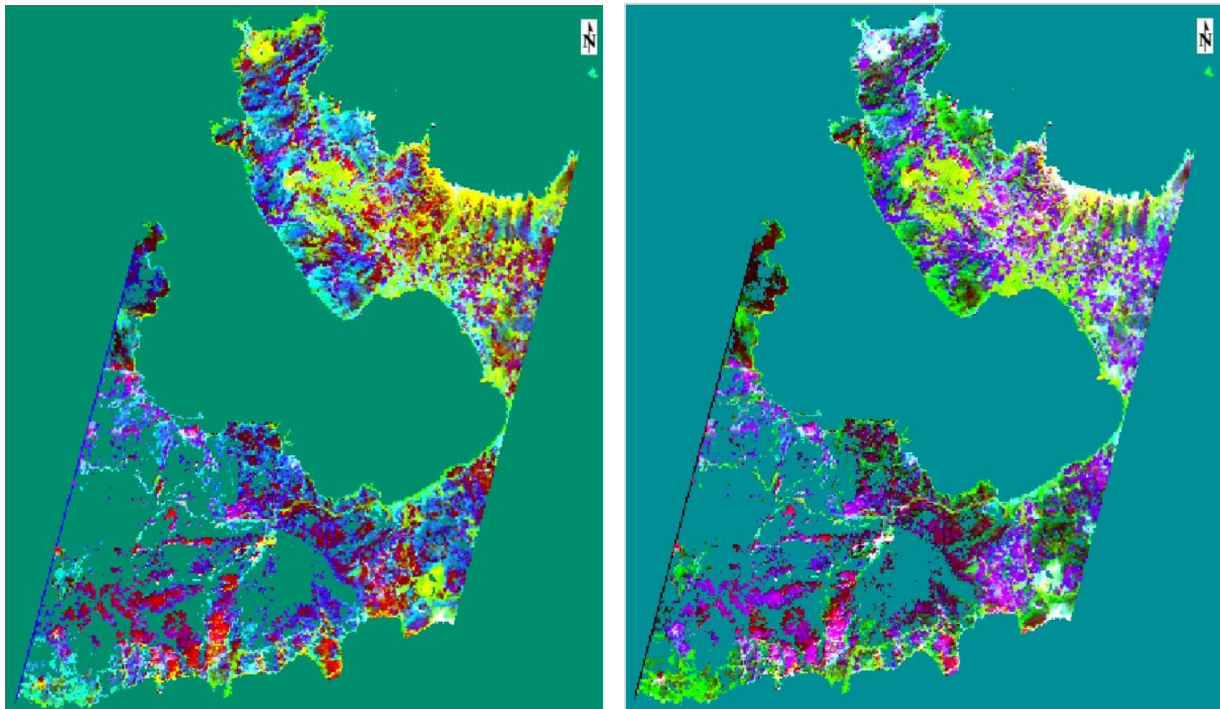
| PCA | Eigenvalue | Percentage | Cumulative |
|-----|------------|------------|------------|
| 1   | 63.5238    | 99.499     | 99.499     |
| 2   | 0.1591     | 0.249      | 99.748     |
| 3   | 0.0807     | 0.126      | 99.874     |
| 4   | 0.028      | 0.044      | 99.918     |
| 5   | 0.0111     | 0.017      | 99.935     |
| 6   | 0.005      | 0.008      | 99.943     |
| 7   | 0.0038     | 0.006      | 99.949     |
| 8   | 0.0035     | 0.005      | 99.955     |
| 9   | 0.0025     | 0.004      | 99.959     |
| 10  | 0.002      | 0.003      | 99.962     |
| 11  | 0.0014     | 0.002      | 99.964     |
| 12  | 0.0013     | 0.002      | 99.966     |
| 13  | 0.0011     | 0.002      | 99.968     |
| 14  | 0.001      | 0.002      | 99.969     |
| 15  | 0.0009     | 0.001      | 99.971     |



Εικ. V-2: Διάγραμμα ποσοστού μεταβλητότητας ιδιοτιμών, PCA.



Εικ. V-3: Κύριες Συνιστώσες της μεθόδου PCA (PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC6, αντίστοιχα).



Εικ. V-4: : Οπτικοποίηση της PCA - ψευδέγχρωμα σύνθετα RGB: PC1,PC2,PC3 και RGB: PC1,PC2,PC5.

Κατασκευάστηκαν οι ψευδέγχρωμες εικόνες από τις PCs (Εικ. V-4), στις οποίες παρατηρούνται οι διαφορές στην κάλυψη της επιφάνειας της Μήλου. Η διάκριση των ορυκτών και πετρωμάτων στα διάφορα τμήματα του νησιού δεν είναι εφικτή, ωστόσο η μέθοδος PCA βοηθά στην καλύτερη κατανόηση του γεωλογικού πλαισίου της περιοχής. Η κατάταξη για τις PCs δηλώνει ότι η PC με την μεγαλύτερη μεταβλητότητα, είναι η PCA1, ακολουθεί η PCA2 κ.ο.κ. Στην περίπτωση του ψευδέγχρωμου RGB: PCA 1,2,5 χρησιμοποιήθηκε και η PC5, με μικρότερη μεταβλητότητα, γεγονός σύνηθες για γεωλογικές εφαρμογές, καθώς οι PCs με μεγαλύτερη μεταβλητότητα δεν συμπεριλαμβάνουν απαραίτητα την απαιτούμενη γεωλογική πληροφορία (Yuan et al., 1998).

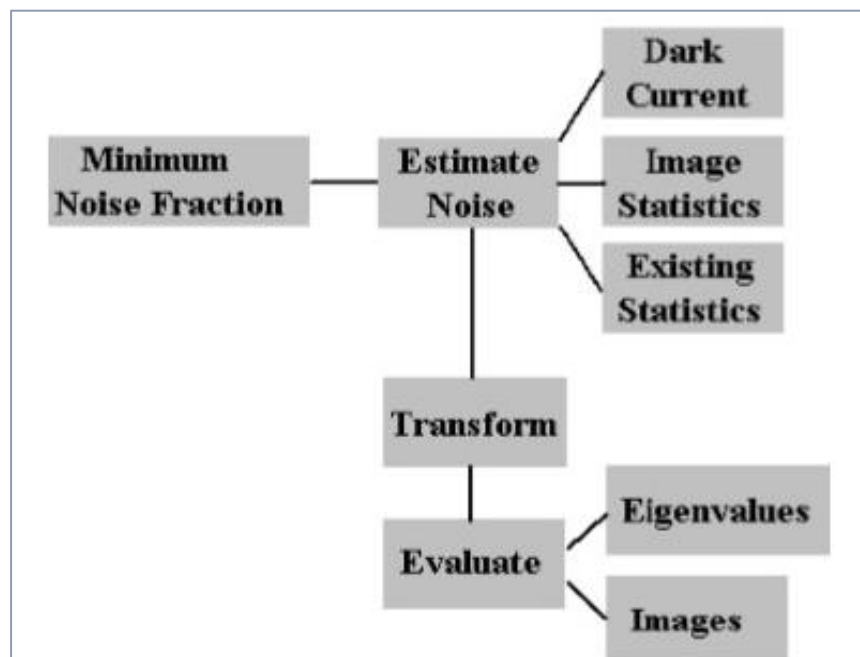
Στα ψευδέγχρωμα RGB: PCA 1,2,3, και RGB: PCA 1,2,5, είναι εφικτή η διάκριση των περιοχών με περλίτη, μπεντονίτη και καολινίτη (κυρίως με κίτρινο – πράσινο χρώμα και λευκό – γαλάζιο χρώμα αντίστοιχα). Στο RGB: PC1,PC2,PC3 πέραν των περιοχών των λατομείων, ίδιο χρώμα εμφανίζεται και σε κάποιες αστικές περιοχές (όπως ο Τριοβάσαλος, η Τρυπητή κ.λπ.) ενώ στο RGB: PC1,PC2,PC5, οι εμφανίσεις των λατομείων είναι πιο ευκρινείς.

## V.2. MNF – MINIMUM NOISE FRACTION

Πέραν της δοκιμής μέσω της μεθόδου μείωσης των φασματικών διαστάσεων PCA, χρησιμοποιήθηκε και ο γραμμικός μετασχηματισμός Minimum Noise Fraction (MNF), ο οποίος είναι επίσης πολύ διαδεδομένος για την μείωση της διαστατικότητας και του θορύβου των υπερφασματικών δεδομένων.

Ο γραμμικός μετασχηματισμός MNF χρησιμοποιείται για να οριστεί ο απαραίτητος αριθμός των διαστάσεων στα δεδομένα, για να διαχωριστεί ο θόρυβος από τα δεδομένα και για να μειωθούν οι υπολογιστικές απαιτήσεις, των διαδικασιών που θα ακολουθήσουν (Green et al., 1988; Boardman & Kruse, 1994). Η μέθοδος MNF υλοποιείται μέσω των εξής σταδίων:

- Στο πρώτο βήμα εφαρμόζεται μία **πρώτη περιστροφή** των δεδομένων, χρησιμοποιώντας τις κύριες συνιστώσες του πίνακα συνδιασποράς θορύβου (**διαδικασία λεύκανσης θορύβου** ή **noise whitening**), δημιουργώντας μετασχηματισμένα δεδομένα, στα οποία η διακύμανση αντιστοιχεί στη μονάδα. Μετά απ' αυτό το βήμα, δεν υφίστανται συσχετίσεις μεταξύ των καναλιών.
- Στο δεύτερο βήμα της MNF χρησιμοποιούνται οι κύριες συνιστώσες από την αρχική εικόνα, εφόσον έχουν υποστεί **τηλεύκανση θορύβου** κατά την πρώτη περιστροφή, κι έχουν **αναπροσαρμοστεί** με βάση την **τυπική απόκλιση του θορύβου**. Δεδομένου ότι θα πραγματοποιηθεί περαιτέρω φασματική επεξεργασία, η μείωση των διαστάσεων προσδιορίζεται εξετάζοντας τις τελικές ιδιοτιμές και τις εικόνες που προκύπτουν.
- Έπειτα από τα δύο βήματα, τα υπερφασματικά δεδομένα χωρίζονται στο χώρο σε δύο μέρη: ένα μέρος που σχετίζεται με **ιδιοτιμές** που υπερβαίνουν **κατά πολύ τη μονάδα** και τις συσχετιζόμενες ιδιοεικόνες, κι ένα συμπληρωματικό μέρος με **ιδιοτιμές κοντά στην μονάδα** και τις αντίστοιχες εικόνες στις οποίες κυριαρχεί ο θόρυβος. Στο τέλος της διαδικασίας, χρησιμοποιούνται τελικά μόνο τα τμήματα με ιδιοτιμές μεγαλύτερες της μονάδας, ώστε να **διαχωριστεί ο θόρυβος από τα δεδομένα**, με αποτέλεσμα την βελτίωση της φασματικής επεξεργασίας στα επόμενα βήματα (Green et al., 1988).



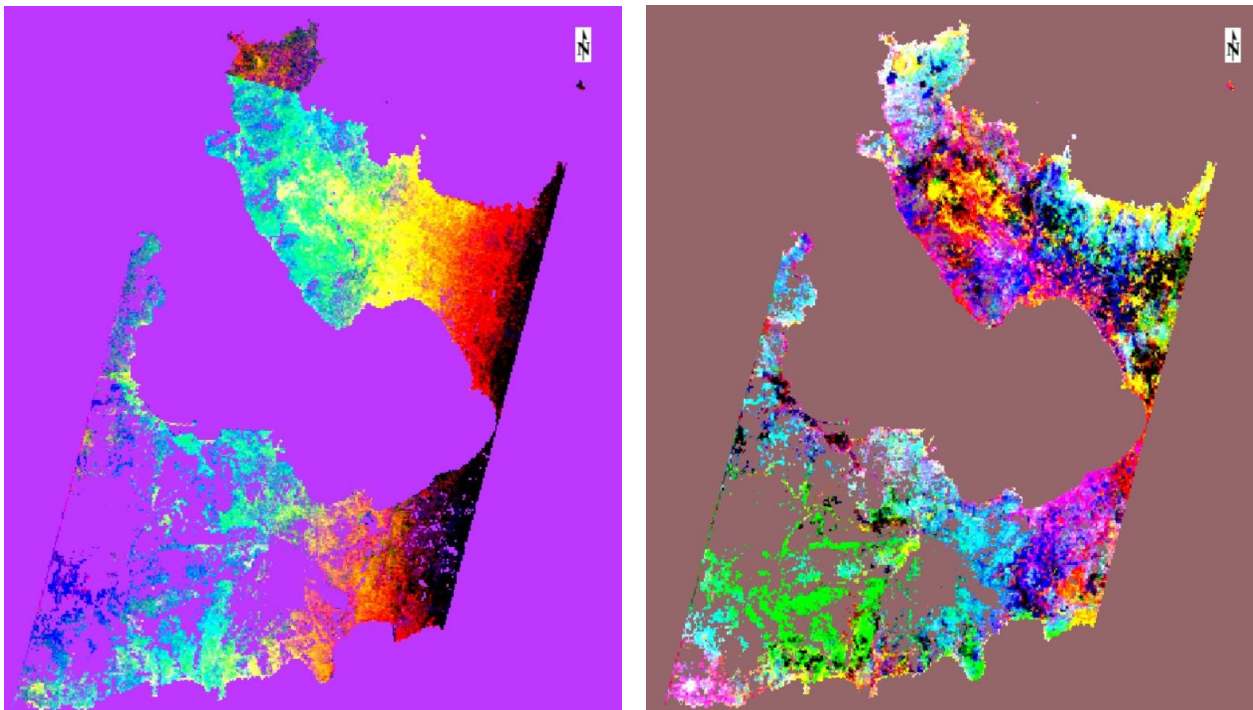
Εικ. V-5: Μέθοδος MNF. Πηγή: Department of Land, Air and Water Resources, 2011.

Η μείωση του θορύβου με τη χρήση του μετασχηματισμού MNF, έχει ως αποτέλεσμα η πληροφορία να συγκεντρώνεται στους πρώτους διαύλους, ενώ ο θόρυβος απομονώνεται στους επόμενους. Για την αποφυγή καναλιών με θόρυβο, εξετάστηκαν οι ιδιοτιμές, με τον αριθμό 1, ν' αποτελεί κατώφλι για το διαχωρισμό μεταξύ καναλιών με πληροφορία και καναλιών με θόρυβο. Σε σχέση με τον αριθμό των ιδιοτιμών (Πίνακας V-3) όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της Εικ. V-7, μειώνεται απότομα έπειτα από τις 15 πρώτες συνιστώσες. Πέραν των ιδιοτιμών, έγινε απεικόνιση των **ιδιοεικόνων (eigenimages)** (Εικ. V-8), για την επιλογή του κατωφλιού καναλιών, και την απομόνωση του θορύβου

Συγκρίνοντας τ' αποτελέσματα των δύο μεθόδων για τη μείωση της διαστατικότητας, καθώς ο αριθμός των ιδιοτιμών μειώνεται, μειώνεται και το ποσοστό της διαθέσιμης πληροφορίας. Για τις δύο μεθόδους ισχύει ότι:

- Οι ιδιοτιμές της μεθόδου PCA είναι κατά πολύ μικρότερες από τις αντίστοιχες της MNF, δείχνοντας κατά πόσο καλά είναι κατανομημένα τα δεδομένα σε σχέση με τη μεγαλύτερη μεταβλητότητα (Εικ. V-2 & V-7).
- Επιπλέον, στη μέθοδο MNF παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές στους διαύλους για το λόγο σήμα προς θόρυβο (Sivashankari et al., 2019).

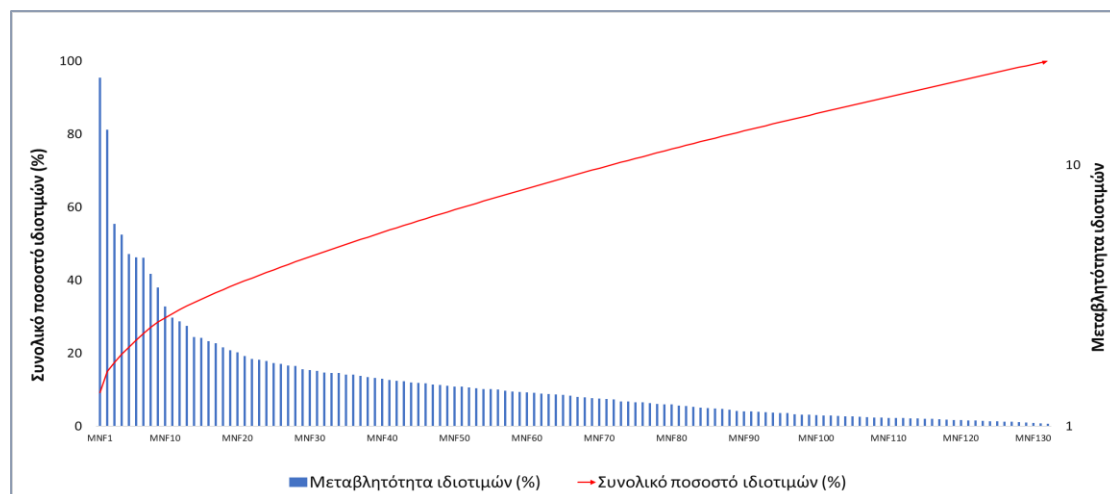
Σύμφωνα με τα παραπάνω, η MNF δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με την PCA, με το προϊόν της να επιλέγεται σε επόμενα βήματα για τις μεθόδους φασματικής επεξεργασίας.



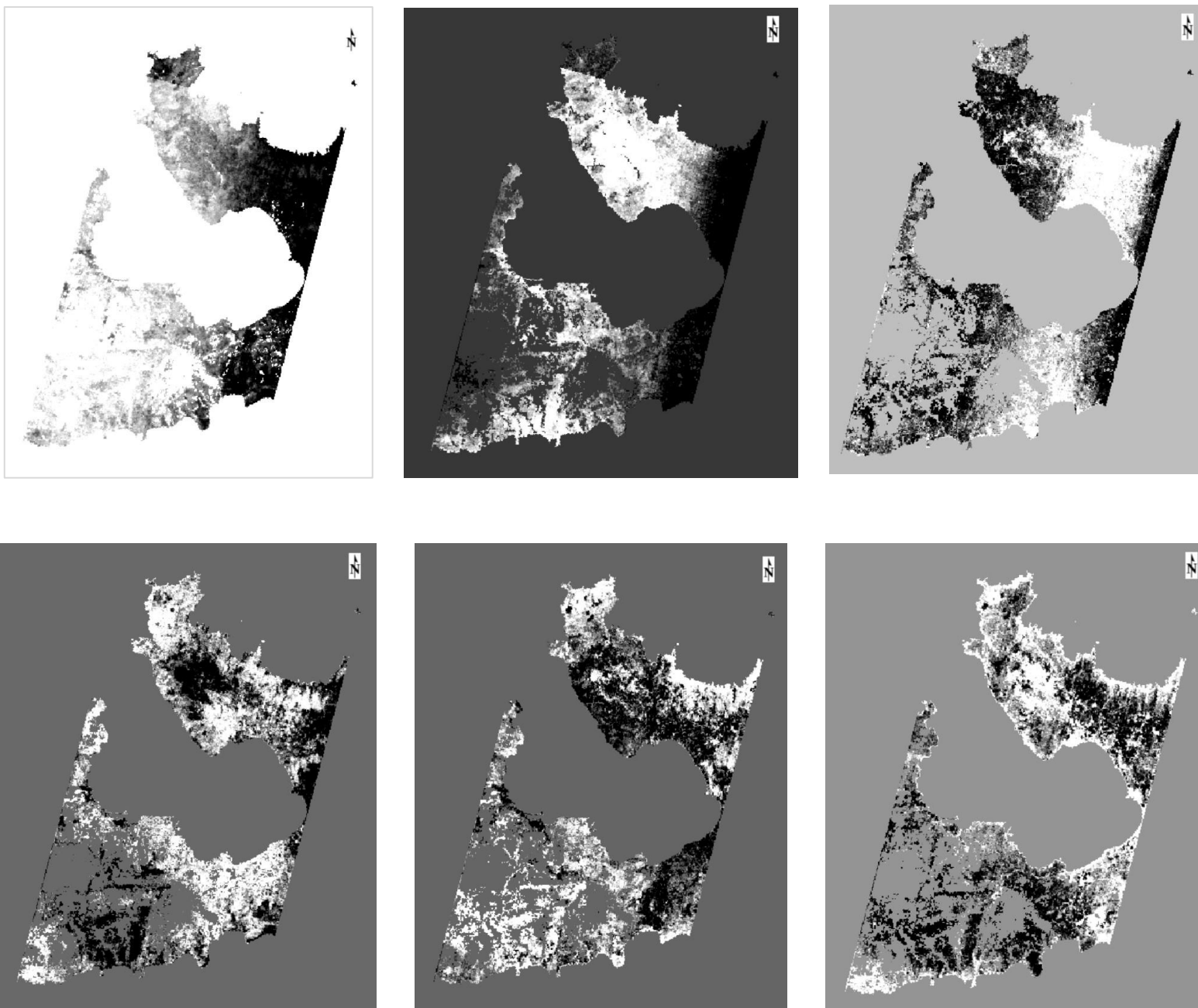
Εικ. V-6: Οπτικοποίηση της MNF - ψευδέγχρωμα σύνθετα RGB: MNF3,MNF2,MNF1 και RGB: MNF6,MNF5,MNF4.

Πίνακας V-3: Πίνακας ιδιοτιμών – ποσοστό πληροφορίας - αθροιστικό ποσοστό πληροφορίας για τις 15 κύριες συνιστώσες, MNF.

| MNF | Eigenvalue | Percentage | Cumulative |
|-----|------------|------------|------------|
| 1   | 21.593369  | 9.152      | 9.152      |
| 2   | 13.624105  | 5.774      | 14.926     |
| 3   | 5.942522   | 2.519      | 17.445     |
| 4   | 5.414192   | 2.295      | 19.740     |
| 5   | 4.564354   | 1.935      | 21.674     |
| 6   | 4.43474    | 1.880      | 23.554     |
| 7   | 4.405908   | 1.867      | 25.421     |
| 8   | 3.828428   | 1.623      | 27.044     |
| 9   | 3.399026   | 1.441      | 28.484     |
| 10  | 2.874402   | 1.218      | 29.703     |
| 11  | 2.60302    | 1.103      | 30.806     |
| 12  | 2.520337   | 1.068      | 31.874     |
| 13  | 2.422085   | 1.027      | 32.901     |
| 14  | 2.194641   | 0.930      | 33.831     |
| 15  | 2.177609   | 0.923      | 34.754     |



Εικ. V-7: Διάγραμμα ποσοστού μεταβλητότητας ιδιοτιμών, MNF.



Εικ. V-8: Κύριες Συνιστώσες της μεθόδου MNF (MN1, MN2, MN3, MN4, MN5, MN6, αντίστοιχα).



### V.3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΚΑΝΑΛΙΩΝ ΜΕΣΩ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ

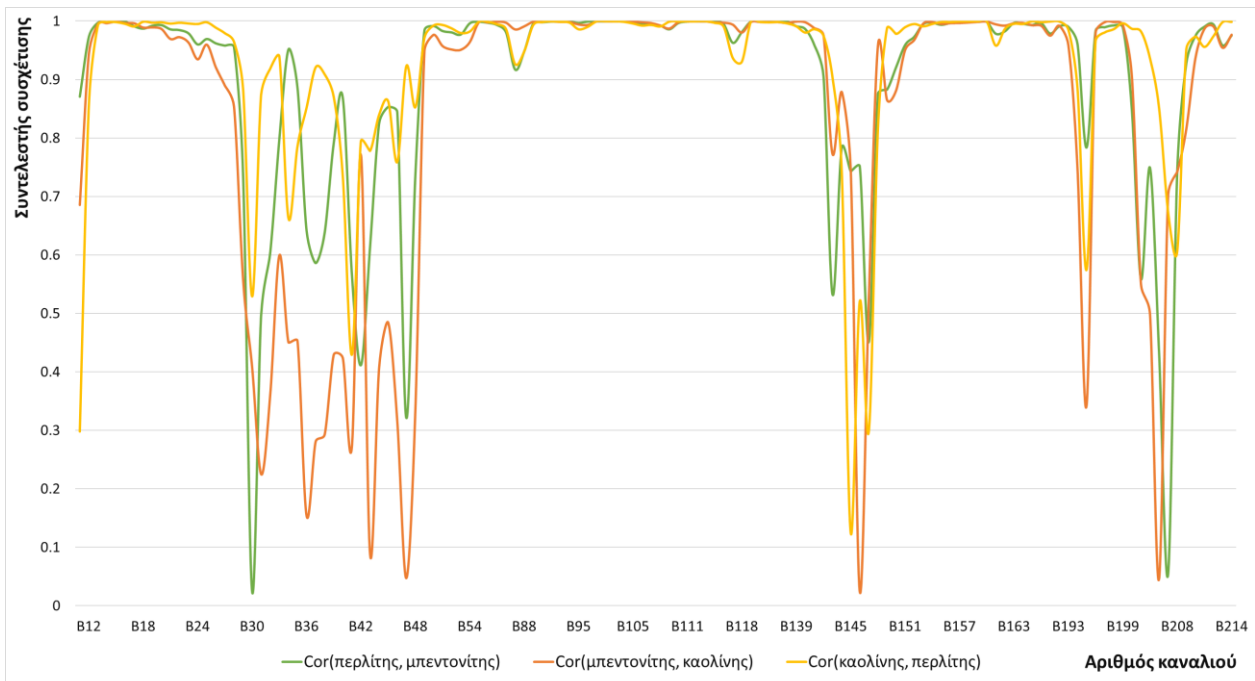
Το συγκεκριμένο βήμα είναι ανεξάρτητο της συμπίεσης και της εξαγωγής χαρακτηριστικών που εφαρμόστηκε μέσω των αλγορίθμων PCA και MNF, που προαναφέρθηκαν. Στην εξαγωγή χαρακτηριστικών μέσω συσχέτισης, χρησιμοποιήθηκε η **αρχική εικόνα**, εφόσον πραγματοποιήθηκαν στα τηλεπισκοπικά δεδομένα οι απαραίτητες προεπεξεργασίες (ραδιομετρική και γεωμετρική διόρθωση, χρήση μάσκας κ.ο.κ.). Στόχος του βήματος είναι η **ανίχνευση των καναλιών** που θα ήταν βοηθητικά στις μετέπειτα ταξινομήσεις, λόγω χαμηλής συσχέτισης που θα παρουσιάζουν τα υλικά/στόχοι.

Αναλυτικότερα για τον εντοπισμό των **3 ορυκτών ενδιαφέροντος**, χρησιμοποιήθηκαν τα τηλεπισκοπικά δεδομένα από τους καθαρούς στόχους, όπως ορίστηκαν από το χρήστη (βλ. § VI). Από τους μέσους όρους των φασματικών υπογραφών, πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση των υπερφασματικών καταγραφών, σύμφωνα με την αρχή ότι σε περιοχές με **πολύ χαμηλό βαθμό συσχέτισης**, είναι δυνατή η διάκριση – εξαγωγή της απαραίτητης πληροφορίας (εν προκειμένω οι θέσεις των 3 ορυκτών) (Κολοκούσης, 2008). Οι συσχετίσεις υλοποιήθηκαν ανά πέντε κανάλια, και σύμφωνα με τον μαθηματικό τύπο της συσχέτισης (1):

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Όπου  $r_{xy}$ : συντελεστής συσχέτισης για τη γραμμική σχέση των μεταβλητών  $x$  και  $y$ ,  $x_i$ : τιμές της μεταβλητής  $x$  σ' ένα δείγμα,  $\bar{x}$ : η μέση τιμή για τη μεταβλητή  $x$ ,  $y_i$ : τιμές της μεταβλητής  $y$  σ' ένα δείγμα και  $\bar{y}$ : η μέση τιμή για τη μεταβλητή  $y$ .

Στο παρακάτω γράφημα (Εικ. V-9) απεικονίζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των ορυκτών, με το οποίο κατέστη σαφές ότι ο αριθμός των καναλιών που θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή των περιοχών ενδιαφέροντος, λόγω χαμηλών τιμών του συντελεστή συσχέτισης είναι 20. Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για τα κανάλια **35-45**, **142-145** και **204-208**. Τα συγκεκριμένα κανάλια θα χρησιμοποιηθούν στα επόμενα βήματα, ορίζοντας τον αριθμό των καναλιών στις **ταξινομήσεις** της εικόνας (§ VII-2).



Εικ. V-9: Διάγραμμα συντελεστή συσχέτισης - καναλιών.

## VI. ΦΑΣΜΑΤΙΚΟΣ ΔΙΑΧΩΡΙΣΜΟΣ

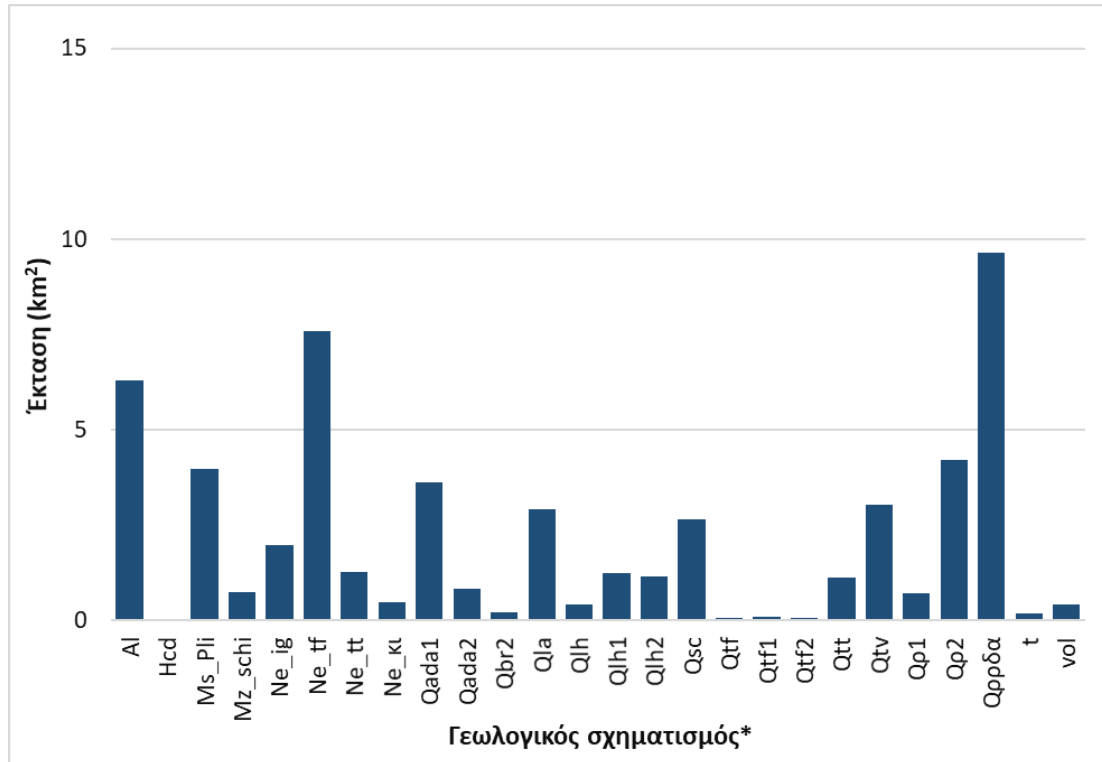
Για την χαρτογράφηση της εικόνας Hyperion, πέραν των διαδικασιών προεπεξεργασίας που εφαρμόστηκαν, είναι απαραίτητο να γίνει σωστή επιλογή των υλικών/στόχων της εικόνας. Για την υλοποίηση των μεθοδολογιών χρησιμοποιήθηκαν φασματικές υπογραφές από τις υπάρχουσες φασματικές βιβλιοθήκες, ή οι φασματικές υπογραφές από τις περιοχές ενδιαφέροντος (regions of interest ή ground truth points), που συλλέχθηκαν με προσεκτική παρατήρηση, χρησιμοποιώντας τα δεδομένα από τον γεωλογικό χάρτη (Εικόνα 1, Παράρτημα Χαρτών), όπως θ' αναλυθεί στη συνέχεια. Η επιλογή φασματικών υπογραφών-καθαρών στόχων, παίζει σημαντικό ρόλο στην ακρίβεια των ταξινομήσεων και στην αποτελεσματικότητα των διαδικασιών που θα εφαρμοστούν.

Στο πρώτο επίπεδο, είναι απαραίτητη η κατηγοριοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών, ώστε να επιλεγθούν τα υλικά/στόχοι. Τα πετρώματα σε συνδυασμό με τα ορυκτά οικονομικού ενδιαφέροντος του κεντρικού τμήματος της Μήλου καταγράφονται στον ακόλουθο Πίνακα VI-1, με την ονοματολογία να προκύπτει σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη (Εικόνα 1). Αναφέρεται ακόμα η κατηγορία στην οποία θα υπαχθούν ώστε να ταξινομηθούν ή να καταμετρηθεί το ποσοστό αφθονίας τους, στα επόμενα βήματα.

Πίνακας VI-1: Γεωλογικοί σχηματισμοί και ορυκτά καταγραφής

| Κατηγορία           | Εμφάνιση                                                                                                                                                        |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ανδεσίτης           | <ul style="list-style-type: none"><li>• Λάβες ανδεσιτικές, δακτιτικές έως ρυοδακτιτικές /Qada1</li><li>• Λάβες ανδεσιτικές και δακτιτικές /Qada2</li></ul>      |
| Ρυόλιθος (1)        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Λάβες ρυολιθικές – ρυοδακτιτικές/Qrrδα</li></ul>                                                                        |
| Ρυόλιθος (2)        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Πυροκλαστικοί κώνοι φυριπλάκας και Τράχηλα/Qr1</li><li>• Ρυολιθικές λάβες τελευταίας ηφαιστειότητας/Qr2</li></ul>       |
| Ηφαιστειακός τόφφος | <ul style="list-style-type: none"><li>• Παλαιοί τόφφοι/Netf</li><li>• Παλαιοί τοφφίτες/Nett</li><li>• Νέοι τοφφίτες/Qtt</li><li>• Πορώδεις τόφφοι/Qtv</li></ul> |
| Ασβεστόλιθος        | <ul style="list-style-type: none"><li>• Ασβεστόλιθος/Ms-Pli</li></ul>                                                                                           |
| Περλίτης            | <ul style="list-style-type: none"><li>• Περλίτης</li></ul>                                                                                                      |
| Μπεντονίτης         | <ul style="list-style-type: none"><li>• Μπεντονίτης</li></ul>                                                                                                   |
| Καολίνης            | <ul style="list-style-type: none"><li>• Καολινίτης</li></ul>                                                                                                    |

Πέραν των κατηγοριών που προαναφέρθηκαν, υπάρχουν πετρώματα στο κεντρικό τμήμα όπως οι παράκτιες αποθέσεις, το κρυσταλλικό υπόβαθρο κ.λπ., τα οποία λόγω της μικρής επιφανειακής εξάπλωσης που εμφανίζουν δεν ταξινομήθηκαν. Η επιφανειακή εξάπλωση φαίνεται όπως υπολογίστηκε στο διάγραμμα της Εικ. VI 1:



Εικ. VI-1: Διάγραμμα επιφανειακής εξάπλωσης γεωλογικών σχηματισμών - κεντρικό τμήμα Μήλου. \* Ονοματοδοσία σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη (Παράρτημα Χαρτών, Εικόνα 1).

Επιπλέον, σχηματισμοί των αλλουβιακών αποθέσεων καθώς και τα διάφορα είδη λαχάρ, δεν θα υπαχθούν σε κάποια κατηγορία, λόγω της ανομοιογενούς, ορυκτολογικής σύστασης. Έπειτα από την κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων – ορυκτών, οι καθαροί στόχοι που θα χρησιμοποιηθούν είναι οι ακόλουθοι:

## VI.1. ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΣΤΟΧΩΝ

### ✚ Φασματικές υπογραφές (Spectral signatures)

Όπως προαναφέρθηκε στο § 1.5 η φασματική συμπεριφορά των αντικειμένων που καλύπτουν την επιφάνεια του εδάφους, καθορίζεται από την απόκριση των φωτονίων, σε σχέση με το υλικό. Η γραφική παράσταση που περιγράφει το ποσοστό ανακλαστικότητας του υλικού (άξονας των  $\gamma$ ) σε σχέση με το μήκος κύματος (άξονας των  $x$ ), ονομάζεται καμπύλη φασματικής ανάκλασης του αντικειμένου. Η καμπύλη αυτή χαρακτηρίζεται από μοναδικότητα για κάθε αντικείμενο και καλείται αλλιώς φασματική υπογραφή ή φασματική ταυτότητα του αντικειμένου, συνεπώς χρησιμοποιείται για την αναγνώριση των διαφόρων υλικών στη δορυφορική εικόνα (Περάκης, κ.α. 2015).

Το σύνολο των φασματικών υπογραφών, συγκεντρωμένο σε βάσεις δεδομένων συνιστούν τις φασματικές βιβλιοθήκες. Οι φασματικές βιβλιοθήκες αποτελούνται από φασματικές

υπογραφές διαφόρων υλικών (όπως βλάστηση, ορυκτά, πετρώματα κ.α.) κι έχουν καταγραφεί είτε στο πεδίο είτε στο εργαστήριο.

Σε πρώτο στάδιο χρησιμοποιήθηκαν οι φασματικές υπογραφές από τη βάση των φασματικών βιβλιοθηκών στο περιβάλλον του ENVI 5.3 (USGS, JHU κ.λπ.). Για τα πετρώματα επιλέχθηκαν από τις United States Geological Survey (USGS) και Johns Hopkins University (JHU), και για τα ορυκτά από την USGS. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε αναδόμηση των φασματικών υπογραφών (resampling) σύμφωνα με τα μήκη κύματος των καναλιών της υπερφασματικής εικόνας (Εικ. VI-3). Για την επιλογή των φασματικών υπογραφών λήφθηκαν υπόψιν τ' αποτελέσματα του Spectral Analyst, ώστε να συγκριθούν οι άγνωστες, φασματικές υπογραφές με τις διαθέσιμες από τις φασματικές βιβλιοθήκες, χρησιμοποιώντας τεχνικές όπως η SAM, η SFF. Επομένως, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές και αναλυτικά:

- Για την περίπτωση των σχηματισμών Qαδα1 και Qαδα2 (δακτικίων – ροδοακτικίων και ανδεδιτικών λαβών), επιλέχθηκε η φασματική υπογραφή του ανδεδιτή, παρουσία αυγίτη και υπερσθενή (Εικ. VI-2), λόγω των πετρογενετικών ορυκτών στους δύο γεωλογικούς σχηματισμούς λάβας. Στην Εικ. VI-3 παρατηρούνται τα χαρακτηριστικά απορρόφησης για τη φασματική υπογραφή του ανδεδιτή, στα 450 – 500 nm και στα 850 – 950 nm. Οι απορροφήσεις στα συγκεκριμένα μήκη κύματος σχετίζονται με την παρουσία οξειδίων σιδήρου σε ορυκτά όπως ο υπερσθενής και ο αυγίτης (Zhou, & Wang, 2017).
- Σε σχέση με τις ρουλιθικές λάβες επιλέχθηκαν δύο φασματικές υπογραφές ώστε να γίνει διάκριση μεταξύ των διαφορετικής ηλικίας λαβών. Συγκεκριμένα η μία φασματική υπογραφή επιλέχθηκε για τις ρουλιθικές – ροδοακτικικές λάβες (Qρρδα), γεωλογικής ηλικίας Κατώτερο Πλειστόκαινο και η δεύτερη για τις ρουλιθικές λάβες (Qρ2) καθώς και τους πυροκλαστικούς κώνους (Qρ1), που βγήκαν από τα ηφαιστειακά κέντρα Φυριπλάκα και Τράχηλα, κατά την τελευταία ηφαιστειότητα στο Μέσο με Ανώτερο Πλειστόκαινο. Έπειτα από σύγκριση των φασματικών υπογραφών της εικόνας με των φασματικών βιβλιοθηκών, επιλέχθηκαν οι υπογραφές στις Εικ. VI-3 αντίστοιχα, οι οποίες έχουν πολλές ομοιότητες μεταξύ τους. Εμφανίζουν χαρακτηριστικές απορροφήσεις στα μήκη κύματος 450 - 500 nm και 2200 nm Οι απορροφήσεις στα συγκεκριμένα μήκη κύματος σχετίζονται με την παρουσία σιδήρου και μαγνησίου, σε ορυκτά όπως ο βιοτίτης και η κερουσίλβη (Zhou, & Wang, 2017).
- Για την ταξινόμηση των ηφαιστειακών τόφφων (Netf, Nett, Qtf, Qtt), δύο διαφορετικών γεωλογικών περιόδων (Ανώτερο Πλειόκαινο και Τεταρτογενές) επιλέχθηκε η φασματική υπογραφή της Εικ. VI-3, έπειτα από δοκιμές.
- Για την χαρτογράφηση του ασβεστόλιθου, λόγω του ότι εμφανίζει κάποιους ορίζοντες πολύ απολιθωματοφόρους (με μαλάκια και κοράλλια), χρησιμοποιήθηκε η υπογραφή φάσματος του fossiliferous limestone. Κύριο πετρογενετικό ορυκτό είναι ο ασβεσίτης, ο οποίος από τη βιβλιογραφία (Gaffey, 1986) εμφανίζει χαρακτηριστικές απορροφήσεις (7 χαρακτηριστικές απορροφήσεις στο μήκος κύματος 1600 - 2550 nm).
- Για τον περλίτη δεν υπάρχει φασματική υπογραφή διαθέσιμη οπότε χρειάστηκε ν' αντικατασταθεί από κάποιο άλλο ορυκτό (Εικ. VI-3). Η φασματική υπογραφή που θα αντικαταστήσει τον περλίτη είναι ο υδρογροσσουλάριος, σύμφωνα με τον Panteras διότι εμφανίζει αρκετές ομοιότητες με τον περλίτη (υψηλή περιεκτικότητα σε νερό, επικράτηση του διοξειδίου του πυριτίου, υαλώδης ιστός) (Panteras, 2013).
- Ο Spectral Analyst χρησιμοποιήθηκε και για τον καολινίτη και τον μπεντονίτη, όχι για την ταυτοποίηση των ορυκτών αλλά για τη σύγκριση των διαθέσιμων υπογραφών. Για τον μπεντονίτη επιλέχθηκε η φασματική υπογραφή του μοντμοριλλονίτη, δεδομένου του ότι κατά το μεγαλύτερο μέρος ο μπεντονίτης της Μήλου συνίσταται από ασβεστούχο

μοντμοριλλονίτη και για τον καολινίτη επιλέχθηκε επίσης μία από τις διαθέσιμες φασματικές υπογραφές.

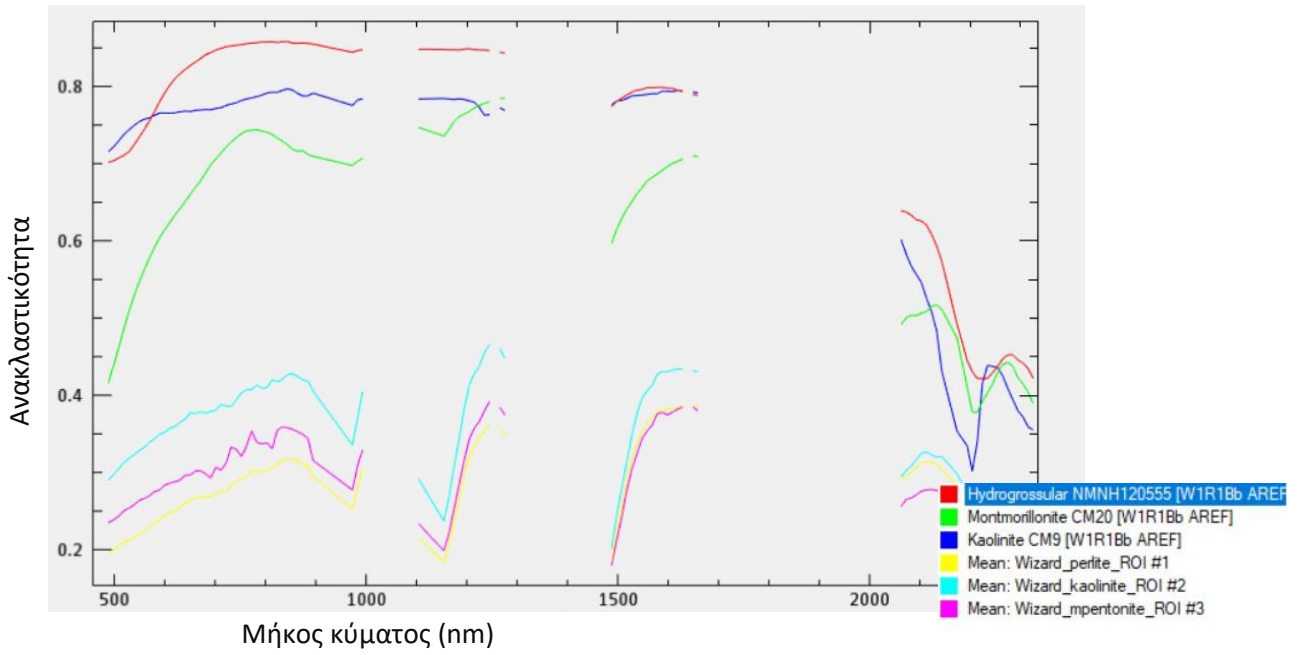
Ακολουθούν οι συγκρίσεις των φασματικών υπογραφών με τους μέσους όρους για τις φασματικές υπογραφές των περιοχών εκπαίδευσης (καθαροί στόχοι όπως προέκυψαν από τον χρήστη) (Πίνακας VI-2 και Εικ. VI-2). Παρότι υπάρχουν υπογραφές που εμφανίζουν μεγαλύτερο συνολικό score, οι υπογραφές επιλέχθηκαν ώστε:

1. Να ληφθούν υπόψιν οι **ορυκτολογικές συστάσεις** των πετρωμάτων.
2. Να είναι εφικτός ο **διαχωρισμός των πετρωμάτων – ορυκτών**. Για παράδειγμα στην περίπτωση του μοντμοριλλονίτη, με τη χρήση της φασματικής υπογραφής υψηλότερου score, ο διαχωρισμός μεταξύ των ορυκτών δεν ήταν δυνατός, καθώς ταξινομούσε τις περιοχές λατόμευσης του περλίτη στην κλάση του μπεντονίτη.
3. Να υπάρχει μία **συνάφεια** με την διαθέσιμη περιγραφή από τη βιβλιογραφία για τις φασματικές υπογραφές. Για παράδειγμα στην περίπτωση του ασβεστόλιθου, λόγω της παρουσίας απολιθωμάτων έγινε επιλογή της συγκεκριμένης φασματικής υπογραφής.

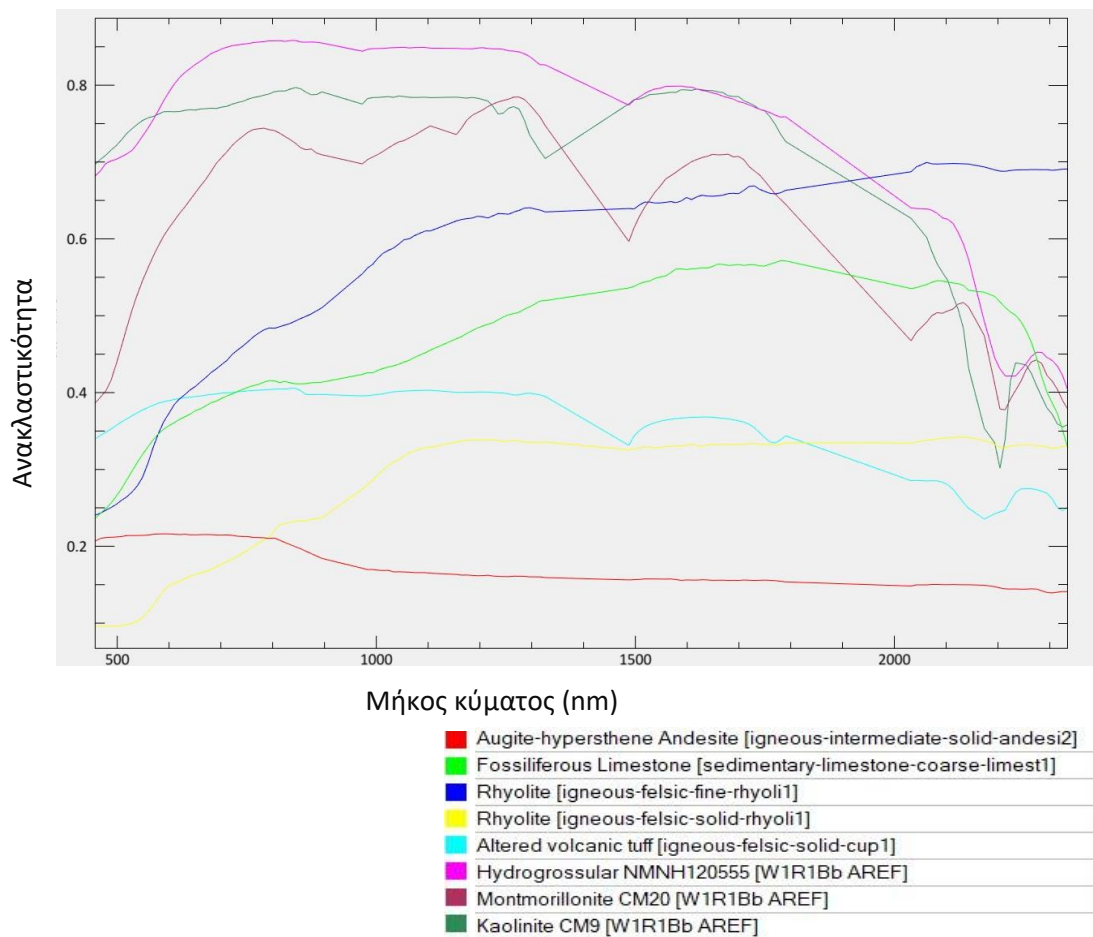
Συνεπώς οι φασματικές υπογραφές που επιλέχθηκαν, αναπαριστώνται στην Εικ. VI-3.

Πίνακας VI-2: Σύγκριση φασματικών υπογραφών επιλογής – μέσης τιμής περιοχών εκπαίδευσης.

| Φασματική υπογραφή επιλογής                                             | Συνολικό Score | SAM   | SFF   |
|-------------------------------------------------------------------------|----------------|-------|-------|
| <i>Augite-hypersthene Andesite [igneous-intermediate-solid-andesi2]</i> | 0.882          | 0.611 | 0.271 |
| <i>Rhyolite [igneous-felsic-fine-rhyoli1]</i>                           | 1.42           | 0.685 | 0.735 |
| <i>Rhyolite [igneous-felsic-solid-rhyoli1]</i>                          | 1.237          | 0.664 | 0.573 |
| <i>Altered volcanic tuff [igneous-felsic-solid-cup1]</i>                | 1.322          | 0.73  | 0.592 |
| <i>Fossiliferous Limestone [sedimentary-limestone-coarse-limest1]</i>   | 1.586          | 0.791 | 0.795 |
| <i>Hydrogrossular NMNH120555 [W1R1Bb AREF]</i>                          | 1.313          | 0.736 | 0.577 |
| <i>Montmorillonite CM20 [W1R1Bb AREF]</i>                               | 1.315          | 0.807 | 0.508 |
| <i>Kaolinite CM9 [W1R1Bb AREF]</i>                                      | 1.123          | 0.782 | 0.341 |



Εικ. VI-2: Απεικόνιση φασματικών υπογραφών – μέσης τιμής περιοχών εκπαίδευσης



Εικ. VI-3: Resampled φασματικές υπογραφές των ορυκτών & των πετρωμάτων επιλογής.

### ✚ Περιοχές εκπαίδευσης από τον χρήστη

Πέραν των φασματικών υπογραφών, έγιναν δοκιμές και μέσω καθαρών στόχων – περιοχών εκπαίδευσης, όπως προέκυψαν έπειτα από **οπτική εκτίμηση** από τον **χρήστη (user defined)**. Για το βήμα αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα των **γεωλογικών** κυρίως **χαρτών** για την περιοχή μελέτης, όπως του γεωλογικού χάρτη της Εικόνας 1 (Παράρτημα Χαρτών). Ο αριθμός των εικονοστοιχείων για κάθε κατηγορία, καθορίστηκε σύμφωνα με την **επιφανειακή εξάπλωση** του γεωλογικού σχηματισμού στο κεντρικό τμήμα του νησιού (Εικ. VI-1).

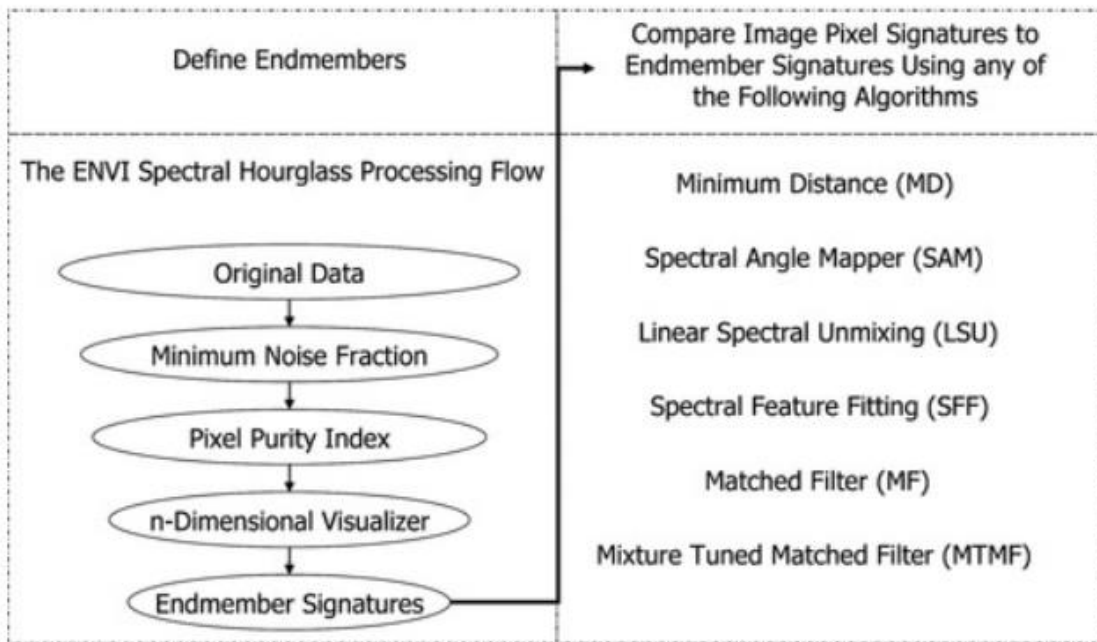
### ✚ Αυτόματη εξαγωγή

Η **αυτόματη εξαγωγή** των **καθαρών στόχων** έγινε χρησιμοποιώντας τη διαδικασία του **Spectral Hourglass Wizard** (Εικ. VI-4). Σ' αυτή τη διαδικασία, το αρχείο εισόδου απεικονίζει την ανακλαστικότητα των εικονοστοιχείων. Σε πρώτη φάση μειώνονται η **φασματική (μετασχηματισμός MNF)** και **χωρική διαστατικότητα (Purest Pixel Index, PPI)** των δεδομένων. Η φασματική να ορίζει τον αριθμό των καθαρών στόχων που θα προκύψουν, ενώ επιλέγονται τα κανάλια με ιδιοτιμές μεγαλύτερες της μονάδας (Green et al., 1988; Boardman & Kruse, 1994).

Στη χωρική μείωση των διαστάσεων εντοπίζονται τα **“pure pixels”** ή ακραία εικονοστοιχεία και καταγράφεται ο αριθμός τους για κάθε προβολή, καθώς και ο αριθμός των φορών που κάθε εικονοστοιχείο είχε ακραία τιμή. Η **τιμή κατωφλίου** στον PPI θα καθορίσει τον αριθμό των ακραίων εικονοστοιχείων στα άκρα του προβαλλόμενου διανύσματος. Η τιμή κατωφλίου πρέπει να είναι δύο έως τρεις φορές υψηλότερη από το επίπεδο θορύβου στα δεδομένα (1 για τα μετασχηματισμένα δεδομένα MNF). Με τη χρήση μεγάλου κατωφλίου, ο PPI βρίσκει τα πιο ακραία pixels, τα οποία είναι λιγότερο πιθανό ν' αντιστοιχούν σε **καθαρούς στόχους (endmembers)**.

Τέλος γίνεται επαναλαμβανόμενα απεικόνιση των διαγραμμάτων διασποράς n-D διαστάσεων σε μία τυχαία μονάδα διανύσματος στον **n-D Vizualiser**, δημιουργούνται **συστάδες** των καθαρών εικονοστοιχείων κι εξάγονται τελικά τα endmembers που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των **χαρτών κατανομής ή/και αφθονίας** (Green et al., 1988; Boardman & Kruse, 1994).

Είναι σημαντικό ν' αναφερθεί πέραν των βημάτων που αναφέρθηκαν κατά την αυτόματη εξαγωγή στόχων, κατά τη διάρκεια του φασματικού διαχωρισμού συνήθως χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι για τη **μείωση της διαστατικότητας**, τον **καθορισμό του αριθμού των endmembers** (π.χ. μέθοδος ακραίων τιμών, ODM) και την **εξαγωγή** (π.χ. η μέθοδος N-FINDR) τους, καθώς και την **εκτίμηση αφθονίας**. Πέραν της μείωσης της διαστατικότητας, οι υπόλοιπες διαδικασίες δεν πραγματοποιήθηκαν και οι στόχοι εξήχθησαν με τη χρήση του Spectral Analyst, με τον οποίο έγιναν οι απαραίτητες συγκρίσεις για την επιλογή τους.



Εικ. VI-4: Ροή εργασιών στον Spectral Hourglass Wizard. Σχήμα «κλεψύδρας» για τις εργασίες υπερφασματικής ανάλυσης, με μείωση των υπερφασματικών δεδομένων και δημιουργία χαρτών κατανομής ή/και αφθονίας. Πηγή: Harris, 2006.

## VI.2. SPECTRAL FEATURE FITTING

Η Spectral Feature Fitting (SFF) αποτελεί μία από τις βασικές μεθόδους ανάλυσης για τις περιπτώσεις των υπερφασματικών εικόνων, με ανάλυση **ολόκληρου του εικονοστοιχείου (whole pixel ή per-pixel method)**, με τον αλγόριθμο να βασίζεται στα χαρακτηριστικά απορρόφησης των φασματικών στόχων. Σύμφωνα μ' αυτά ορίζεται εάν ένα ή περισσότερα υλικά/στόχοι βρίσκονται σε **αφθονία** στην υπερφασματική εικόνα. Βασική αρχή της μεθόδου είναι η σύγκριση του φάσματος του εικονοστοιχείου της εικόνας, με το γνωστό φάσμα αναφοράς, το οποίο κι έχει επιλεγεί (Clark et al., 1991; Clark et al., 1999).

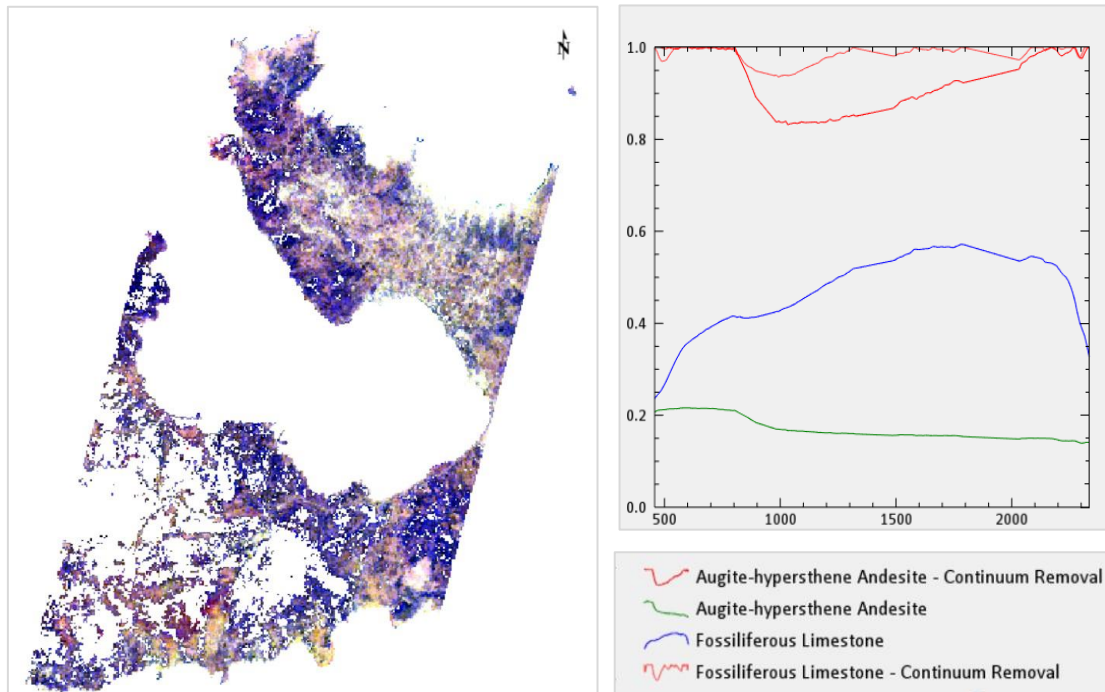
Σημαντικά χαρακτηριστικά τα οποία εξετάζονται στη διάρκεια της διαδικασίας, αφορούν στη **θέση (position)**, στο **σχήμα (shape)** και στην **ένταση (strength)** των καναλιών απορρόφησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω, γίνεται αντιστοίχιση του φάσματος της εικόνας, με το γνωστό φάσμα. Σε πρώτο στάδιο γίνεται **αφαίρεση της συνέχειας (continuum removal)** από το φάσμα αναφοράς, όπως επίσης και από το φάσμα της εικόνας. Τα φάσματα που προκύπτουν συγκρίνονται μεταξύ τους κι εφαρμόζεται η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, με το **“ταίριασμά”** τους, να πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας τους συντελεστές συσχέτισης των εικόνων **“fit”** (Clark et. al, 1993; Van der Meer, 2013).

Η αφαίρεση της συνέχειας χρησιμοποιείται στον εντοπισμό των χαρακτηριστικών καναλιών απορρόφησης. Η εξίσωση που συνδέει το **αρχικό φάσμα: S**, την **αφαίρεση συνέχειας: C** και το **φάσμα αφαίρεσης συνέχειας: S<sub>cr</sub>**, δίνεται από τον τύπο (1) (Kruse, 1993; [www.harrisgeospatial.com](http://www.harrisgeospatial.com)):

$$S_{cr} = \frac{S}{C} (1)$$



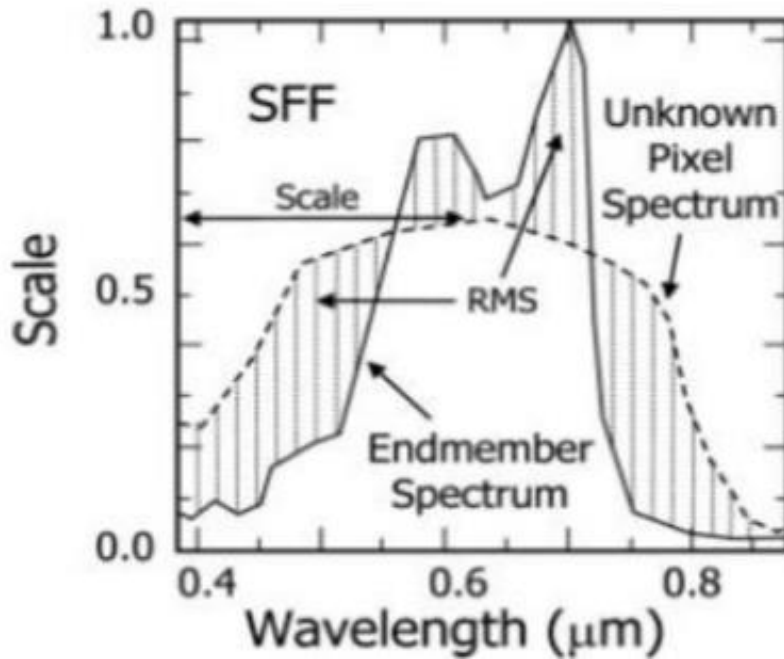
Ακολουθούν εικόνες από την αφαίρεση της συνέχειας των υπερφασματικών καταγραφών της κεντρικής Μήλου, καθώς και η αφαίρεση της συνέχειας για κάποιες από τις φασματικές υπογραφές των υλικών/στόχων (Εικ. VI-5):



Εικ. VI-5: Αφαίρεση συνέχειας (Continuum Removal)

Σε επόμενο βήμα, το φάσμα **Scr** αφαιρείται από τη μονάδα (Εικ. VI-6), ώστε να δημιουργηθούν οι **εικόνες Scale**, που συνδέονται με το βάθος των χαρακτηριστικών απορρόφησης ξεχωριστά για κάθε εικονοστοιχείο στην εικόνα, και με την αφθονία των ορυκτών/πετρωμάτων (Van der Meer, 2004; Verdel et al., 2001). Στις εικόνες Scale, οι υψηλές τιμές, που απεικονίζονται με φωτεινά εικονοστοιχεία, παραπέμπουν σε πολύ καλή αντιστοιχία, μεταξύ φάσματος εικόνας και φάσματος αναφοράς.

Κατά τη διαδικασία SFF, παράγονται πέραν των Scale, και οι **εικόνες RMS (Root Mean Square) error** (Εικ. VI-6) για κάθε υλικό/στόχο, με τις οποίες εξετάζεται η παρουσία ή η απουσία των ορυκτών/πετρωμάτων. Στην περίπτωση των εικόνων RMS, όπως και στις Scale, τα φωτεινά εικονοστοιχεία σχετίζονται με τις υψηλές τιμές RMS error.



Εικ. VI-6: Μέθοδος SFF, τρόπος προσέγγισης του προβήματος σύγκρισης γνωστής φασματικής υπογραφής με άγνωστη υπογραφή εικονοστοιχείου. Harris, 2006.

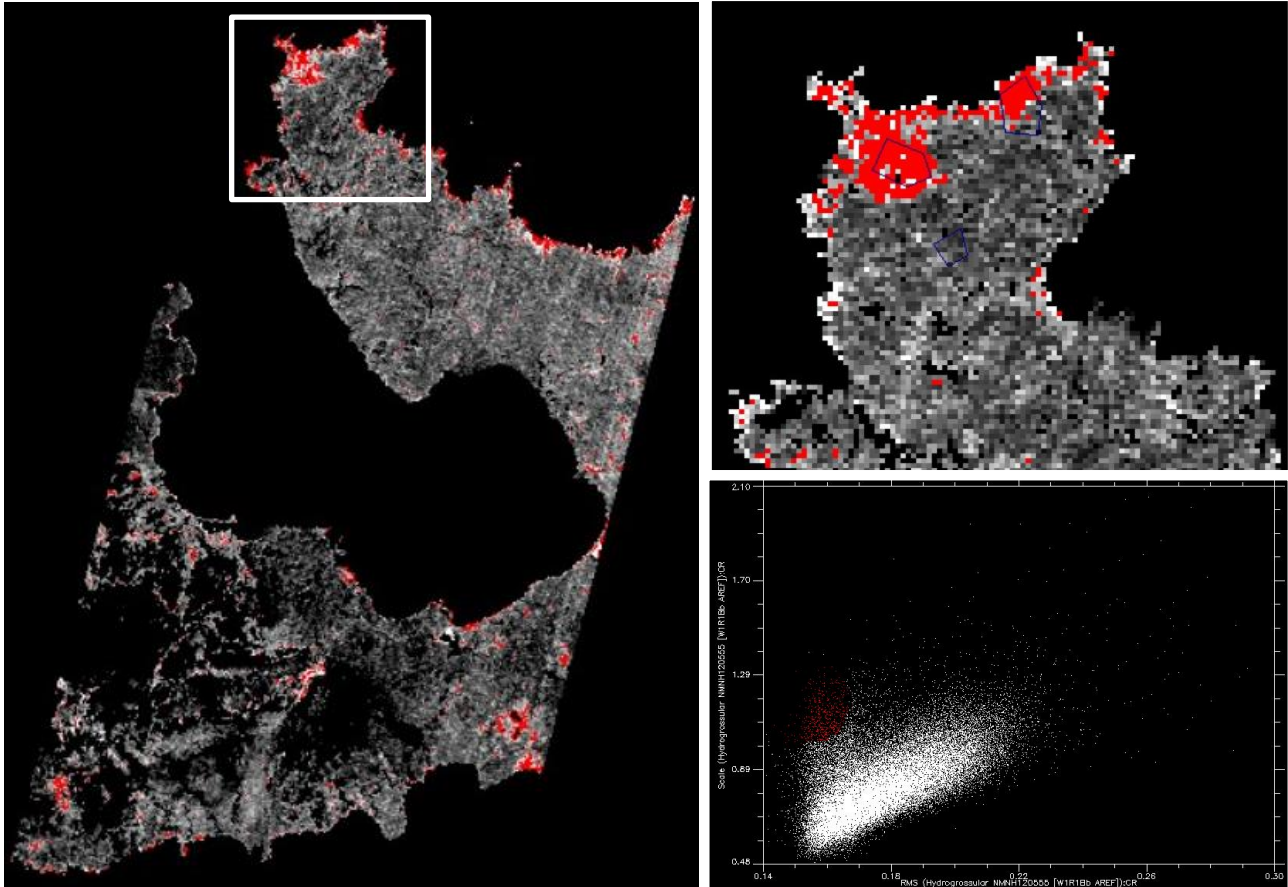
Για να επιτευχθεί η σύγκριση του φάσματος της υπερφασματικής καταγραφής με το φάσμα αναφοράς και για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, συνηθίζεται να κατασκευάζονται οι εικόνες **Fit** από τους λόγους **Scale/RMS**. Εφόσον οι **υψηλές τιμές** στην εικόνα **Scale** και οι **χαμηλές τιμές** στην εικόνα **RMS error** για ένα υλικό/στόχο, παραπέμπουν σε καλή αντιστοιχία του άγνωστου φάσματος και του φάσματος αναφοράς, ο λόγος τους θα δηλώνει την παρουσία και αφθονία του επιθυμητού υλικού/στόχου.

Σε πρώτη φάση πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για τα κανάλια που θα χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία SFF, χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες φασματικές υπογραφές από το περιβάλλον του ENVI 5.3, καθώς και τις περιοχές αφθονίας των υλικών/στόχων, όπως ορίστηκαν από το χρήστη, επιλέγοντας τελικά τους καθαρούς στόχους από τη **δεύτερη περίπτωση**, που έδιναν μεγαλύτερη ακρίβεια, συμπέρασμα που προέκυψε από την εκτίμηση των αφθονιών.

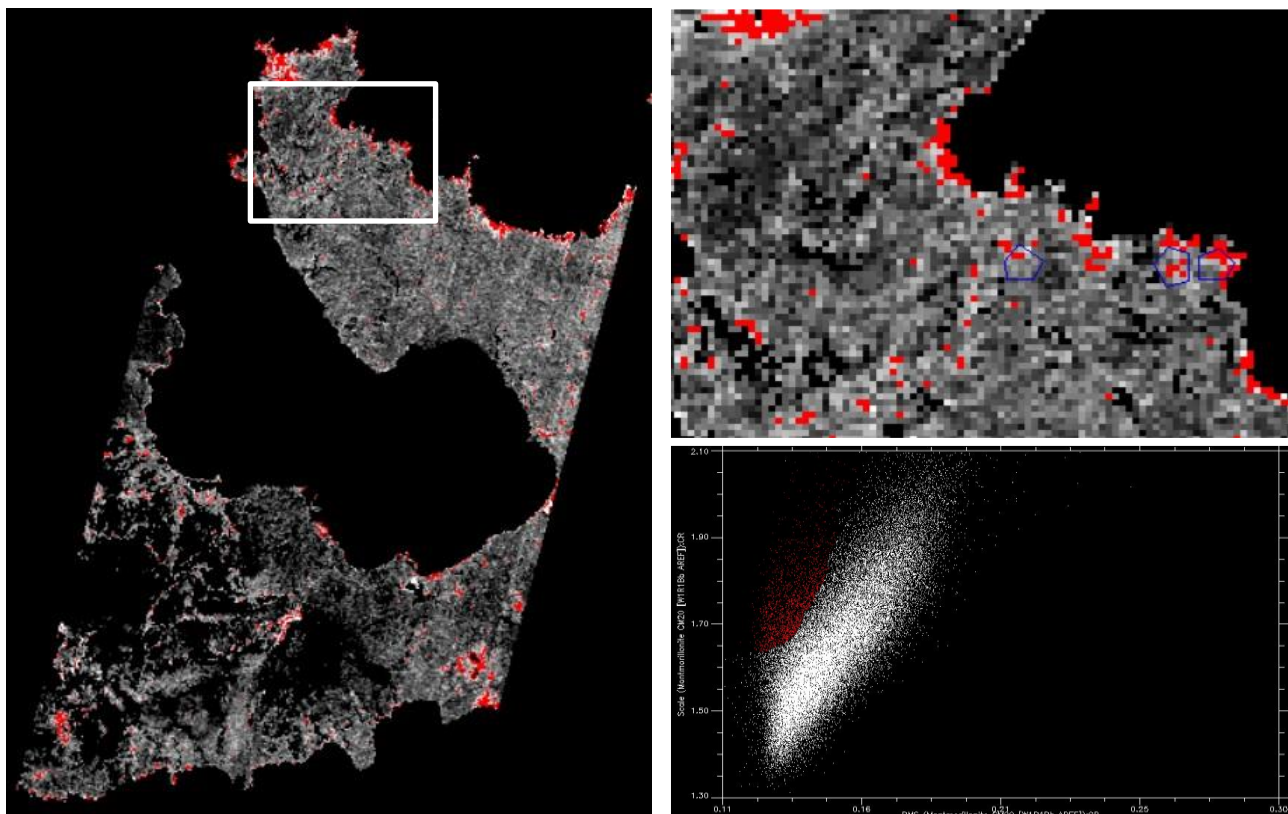
Στη συνέχεια λήφθηκαν υπόψιν συνολικά τα **132 κανάλια**, και δεδομένης της εμφάνισης υψηλού RMS error, σε περιοχές στις οποίες η αφθονία του ορυκτού ή πετρώματος ήταν επίσης υψηλή, υποδηλώθηκε η ύπαρξη σφαλμάτων της μεθοδολογίας. Έγιναν επομένως δοκιμές για αύξηση της ακρίβειας, **επιλέγοντας μικρότερο εύρος στο μήκος κύματος**, και σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές απορροφήσεις του ορυκτού ή πετρώματος ενδιαφέροντος. Χρησιμοποιήθηκαν τελικά τα κανάλια για τιμές μήκους κύματος μεγαλύτερες των 2,000 nm (**27 κανάλια για B<sub>188→218</sub>**), λόγω των χαρακτηριστικών απορρόφησής των στόχων στο συγκεκριμένο εύρος (Εικ. VI-7, VI-8, VI-9) και μιας και τα SWIR κανάλια είναι σύνηθες να χρησιμοποιούνται σε γεωλογικές εφαρμογές για την ανάδειξη του υδροθερμικώς εξαλλοιωμένου καολινίτη (Azizi, 2010).

Σε επόμενο βήμα υπολογίστηκαν γι' αυτά τα κανάλια, οι λόγοι Scale/RMS και τα γραφήματα δύο διαστάσεων της κάθε εικόνας για το Scale συναρτήσει του RMS error, ώστε να οπτικοποιηθούν τα προϊόντα της SFF. Με τη βοήθεια των δυσδιάστατων διαγραμμάτων, επιλέχθηκαν οι περιοχές με υψηλή τιμή στην εικόνα fit, χρησιμοποιώντας για κάθε στόχο μία διαφορετική τιμή κατωφλιού. Με τον τρόπο αυτό έγινε οπτικοποίηση των εικονοστοιχείων

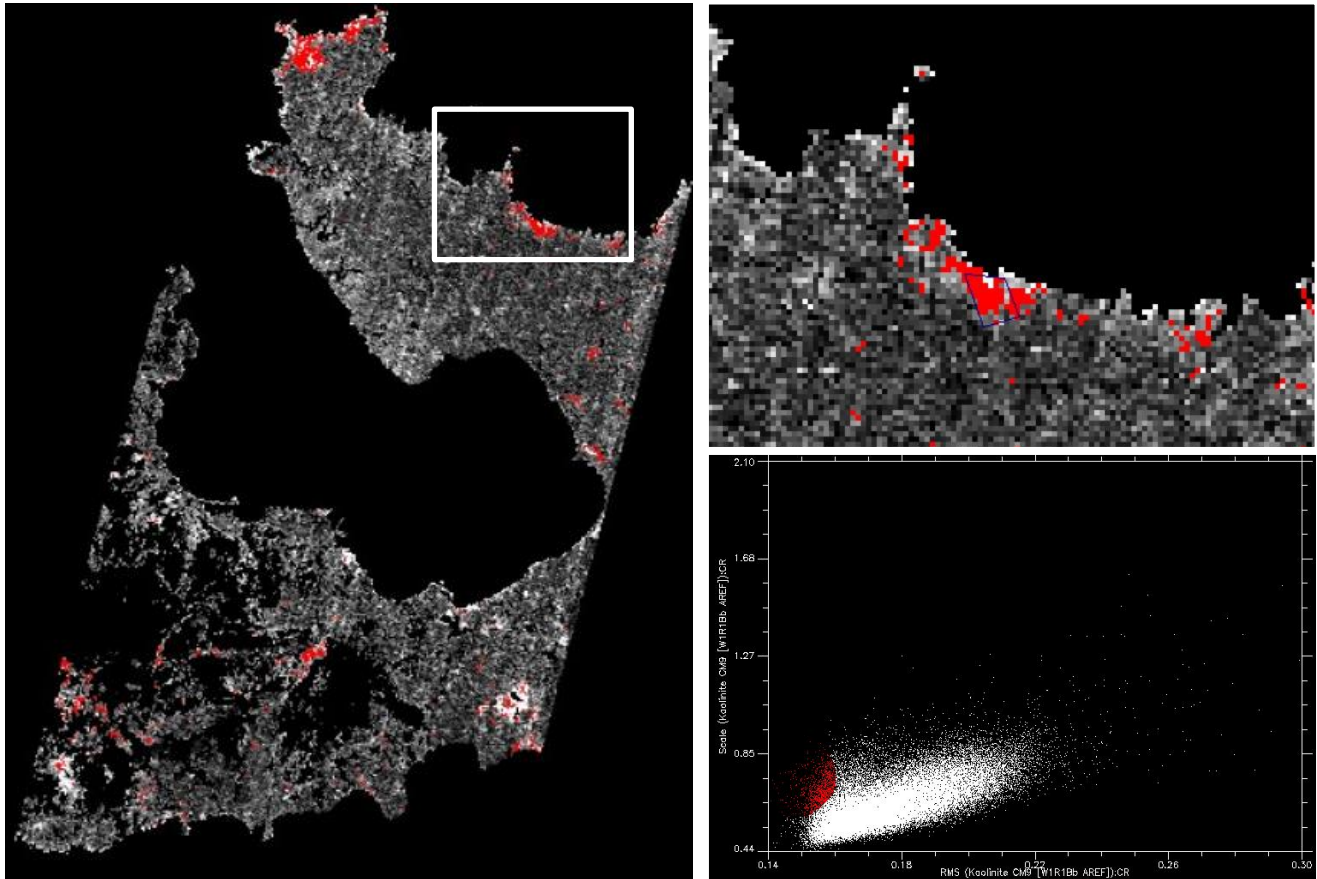
τα οποία εμφανίζουν υψηλή αφθονία (υψηλές τιμές Scale) και παρουσία (χαμηλές τιμές RMS) του εκάστοτε υλικού/στόχου (Εικ. VI-7, VI-8, VI-9). Παρατηρήθηκε η συμμετοχή θορύβου για τα συγκεκριμένα κανάλια, και γι' αυτό έγινε δοκιμή για άλλο εύρος καναλιών.



Εικ. VI-7: Μέθοδος SFF για 27 κανάλια. Εικόνα fit περλίτη – Διάγραμμα Scale, συναρτήσεσι του RMS error

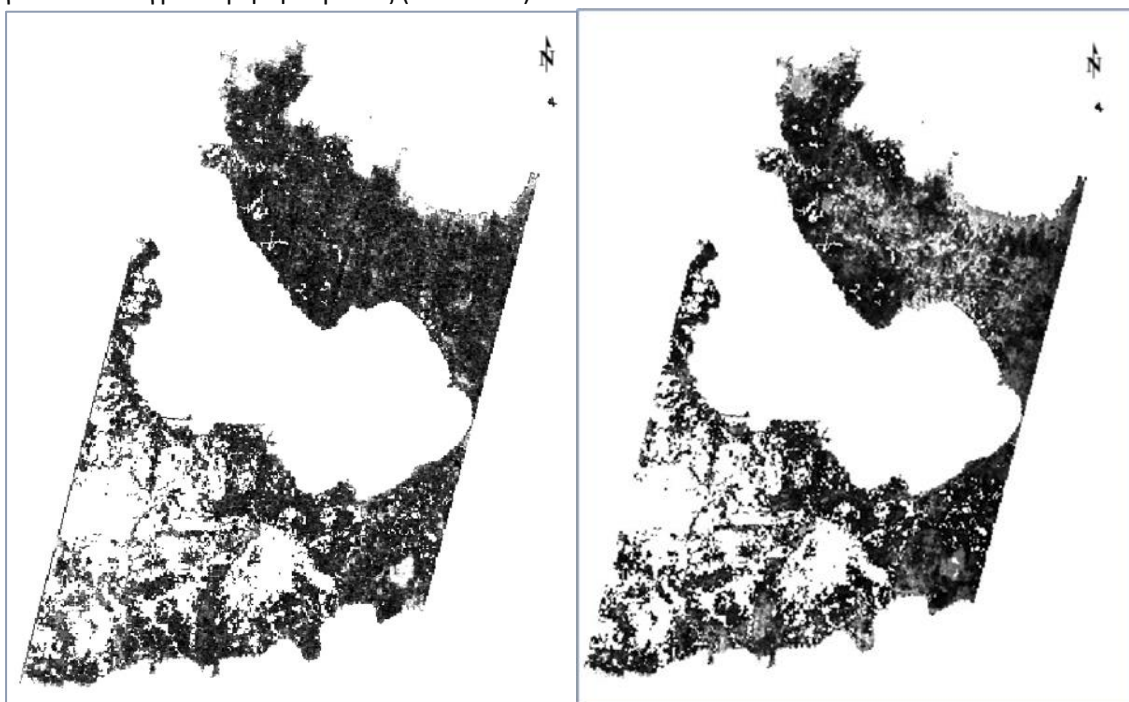


Εικ. VI-8: Μέθοδος SFF για 27 κανάλια. Εικόνα fit μπεντονίτη – Διάγραμμα Scale, συναρτήσεσι του RMS error



Εικ. VI-9: Μέθοδος SFF για 27 κανάλια. Εικόνα fit καολίνη – Διάγραμμα Scale, συναρτήσεσι του RMS error

Επιλέχθηκαν τελικά τα κανάλια για μήκος κύματος μέχρι 1,000 nm (48 κανάλια για B<sub>11</sub>→54 και B<sub>83</sub>→86), για τα οποία και κατασκευάστηκαν οι εικόνες fit, ώστε ν' αξιολογηθούν τ' αποτελέσματα της SFF. Όπως φαίνεται στις εικόνες fit παρατηρήθηκε η ελάττωση θορύβου για τα επιλεγμένα μήκη κύματος (Εικ. VI-10).



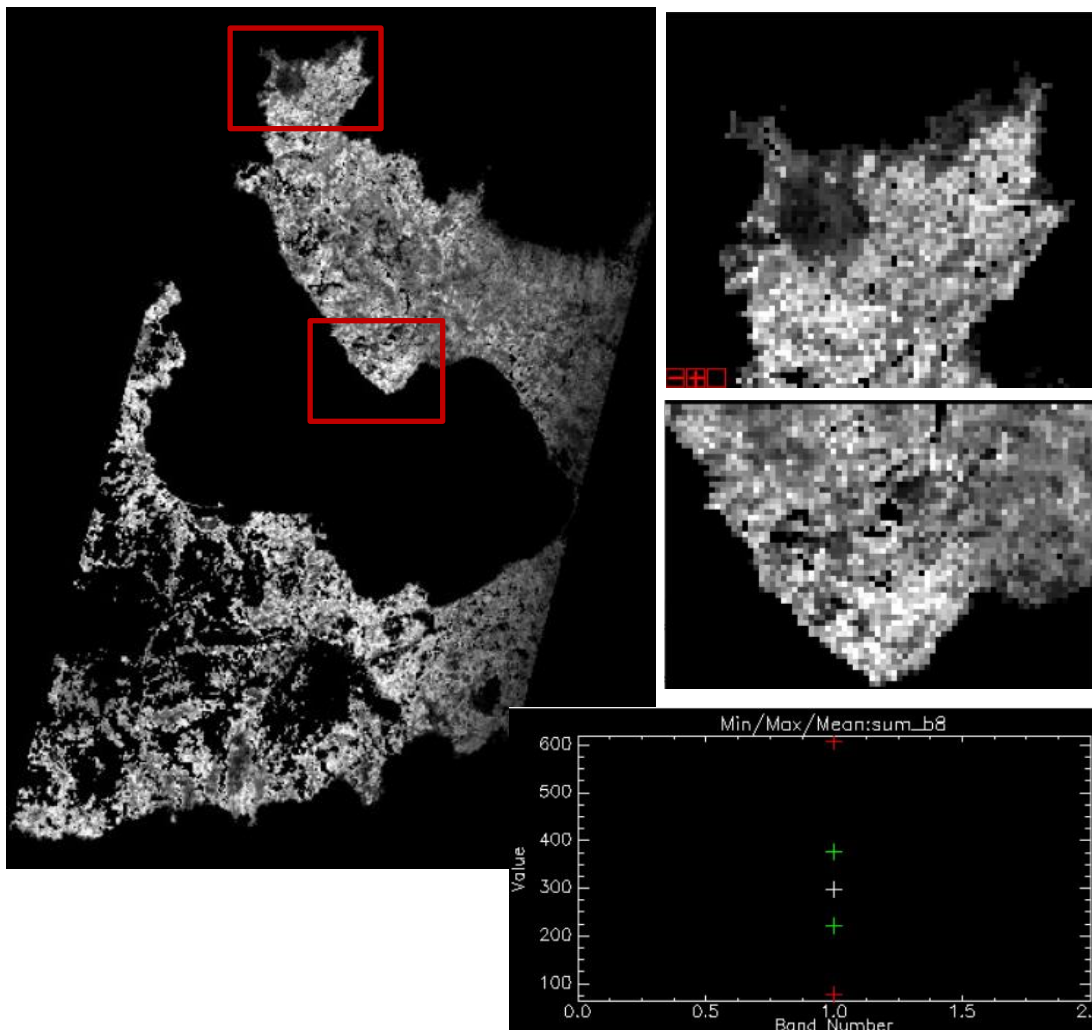
Εικ. VI-10: Σύγκριση εικόνων fit περλίτη για 27 (αριστερή εικόνα) και για 48 κανάλια (δεξιά εικόνα).

Εφόσον κατασκευάστηκαν οι fit για κάθε στόχο, απαραίτητη είναι η οπτικοποίηση, και η αξιολόγηση της SFF. Για να επιτευχθεί αυτή η διαδικασία χρειάστηκε τα τηλεπισκοπικά δεδομένα να κανονικοποιηθούν, με βάση τον παρακάτω τύπο (1):

$$B = \frac{B_{fit} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}(1)$$

Όπου **B**: τιμή κανονικοποιημένης εικόνας fit, **Bfit**: τιμή εικόνας fit, **xmin**: συνολικό ελάχιστο από τις fit και **xmax**: μέγιστο αθροίσματος των fit.

Λόγω του ότι η τιμή που προέκυψε ως μέγιστη, από το άθροισμα των εικόνων είναι πολύ μεγάλη, σε σύγκριση με τα στατιστικά της εκάστοτε fit εικόνας, η χρήση της συγκεκριμένης τιμής δεν επιλέχθηκε για την αξιολόγηση της διαδικασίας. Αυτό το οποίο παρατηρήθηκε στην Εικ. VI-11 του αθροίσματος των fit εικόνων, είναι ότι οι υψηλότερες-φωτεινότερες τιμές παρατηρούνται σε περιοχές με ρυολιθικές και ανδεσιτικές λάβες. Οι υψηλές τιμές στις συγκεκριμένες περιοχές, είναι αποτέλεσμα της επιλογής καθαρών στόχων οι οποίοι εμφανίζουν πολλές ομοιότητες στις φασματικές τους υπογραφές (όπως τα δύο είδη ρυολιθικής λάβας), με αποτέλεσμα η διάκρισή τους να καθίσταται δύσκολη. Από την άλλη, τα λατομεία εμφανίζονται με σκοτεινά εικονοστοιχεία, γεγονός όχι βοηθητικό για την ανίχνευσή τους.



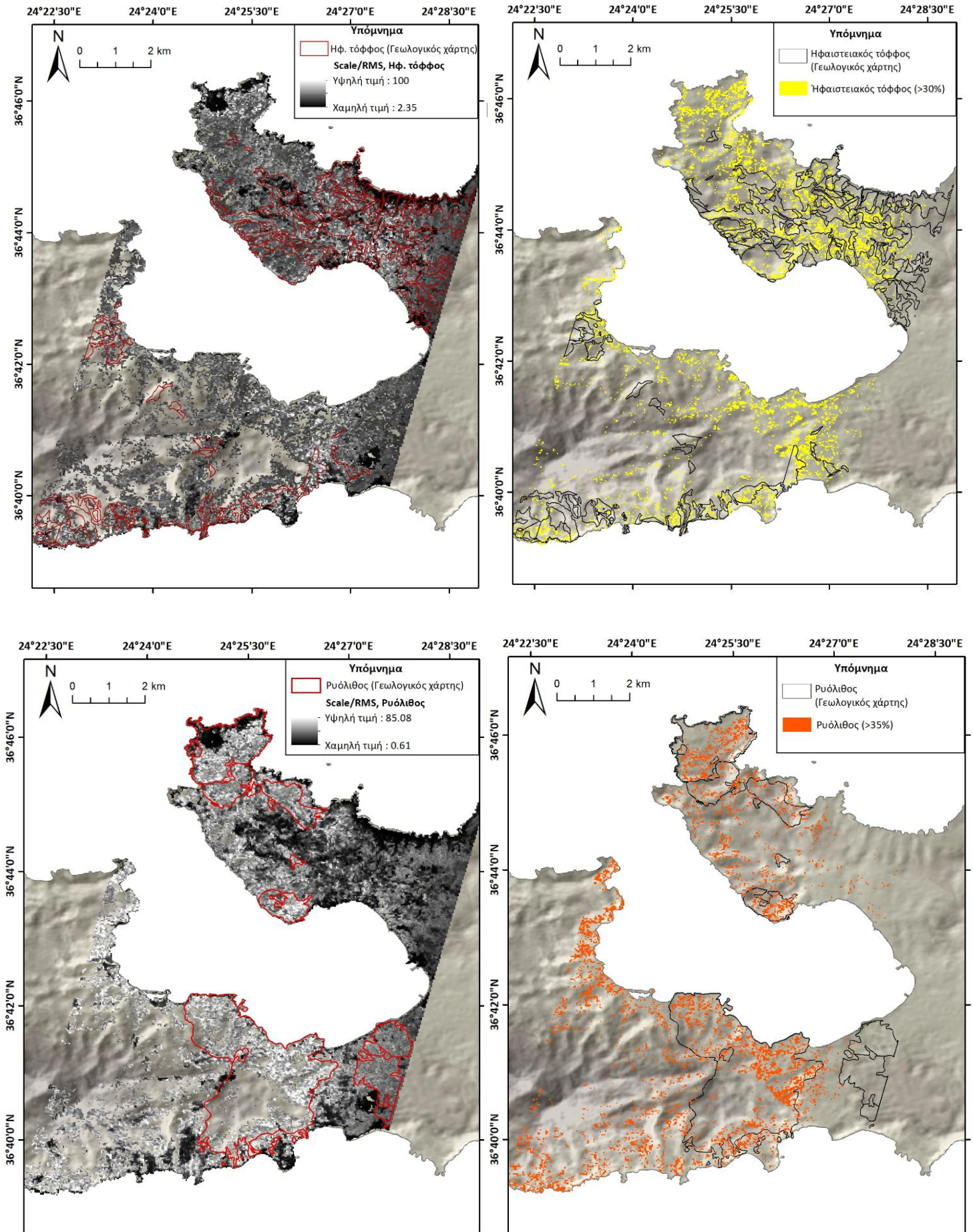
Εικ. VI-11: Αθροιστικό αποτέλεσμα των fit και διάγραμμα στατιστικών δεδομένων – παράδειγμα περιοχής περλίτη με χαμηλές τιμές και περιοχής ρυόλιθου με υψηλές τιμές

Συνεπώς, για την κανονικοποίηση επιλέχθηκαν η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή από το σύνολο των fit. Η αξιολόγηση έγινε σε πρώτη φάση στο λογισμικό QGIS, με χρήση των σημείων ποιοτικού ελέγχου, υπολογίζοντας τα στατιστικά στοιχεία κάθε πολυγώνου (εργαλείο Raster stats), κι εξετάζοντας τα ποσοστά αφθονίας – συμμετοχής των υλικών/στόχων. Τα παραπάνω έγιναν και για τους καθαρούς στόχους μίας μόνο ρυολιθικής λάβας, με τ' αποτελέσματα να είναι καλύτερα με τη μείωση των κλάσεων των ρυολιθικών λαβών.

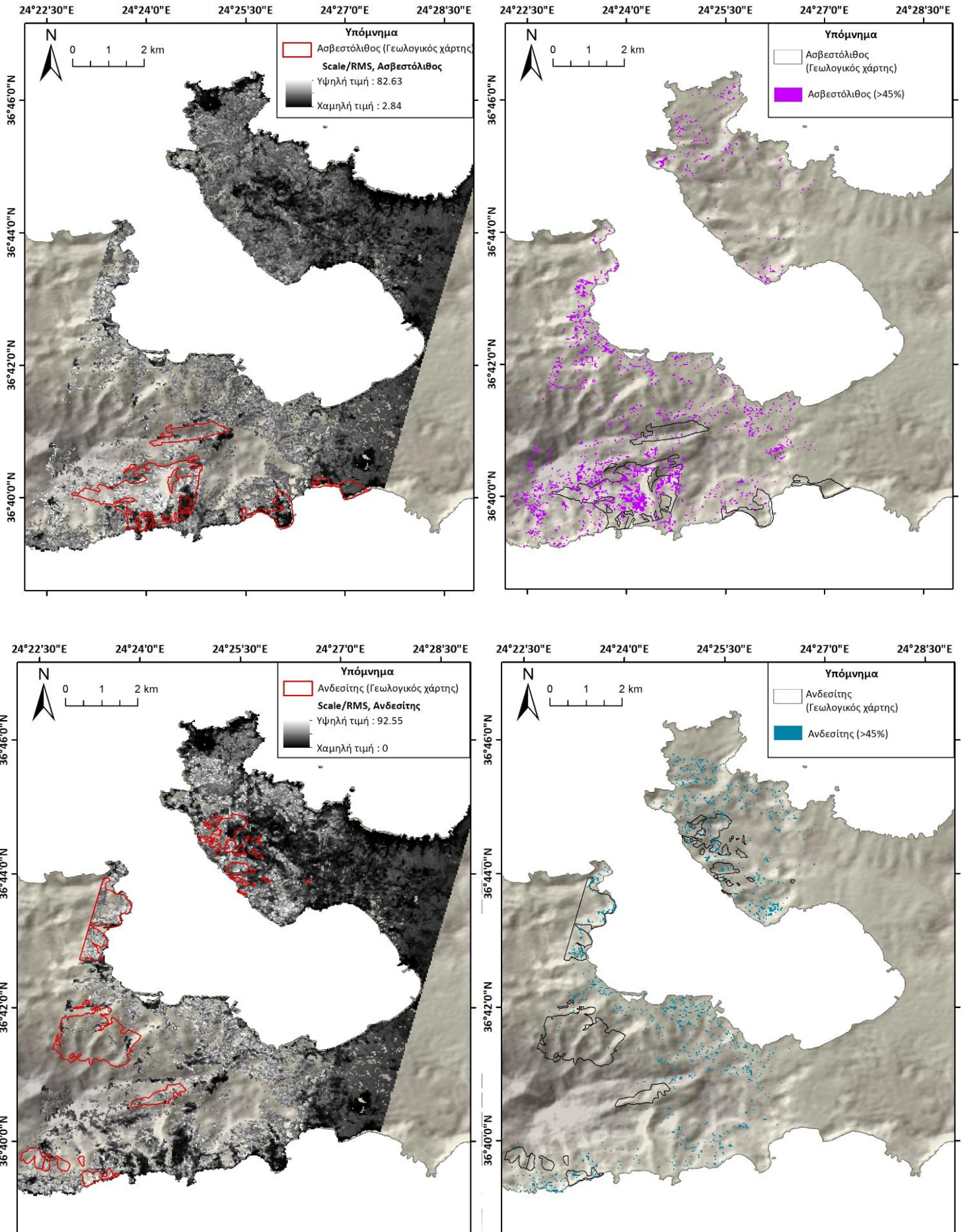
Από την εφαρμογή της μεθόδου SFF παρατηρούνται τα εξής:

- ✚ Περιοχές στις οποίες επικρατεί η μία κλάση, εμφανίζουν υψηλά ποσοστά αφθονίας και σε άλλες κλάσεις υποδηλώνοντας την ύπαρξη mixtures, όπως είχε παρατηρηθεί και από τη χρήση του Spectral Analyst, αφού υπήρχαν υψηλές τιμές για μεγάλο αριθμό καθαρών στόχων, ταυτόχρονα.
- ✚ Τα ποσοστά συμμετοχής εμφανίζουν μικρές τιμές για τις αφθονίες των κλάσεων, όπως φαίνεται και στο κεφάλαιο που εφαρμόστηκε ποιοτικός έλεγχος της μεθόδου (§ VIII).

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

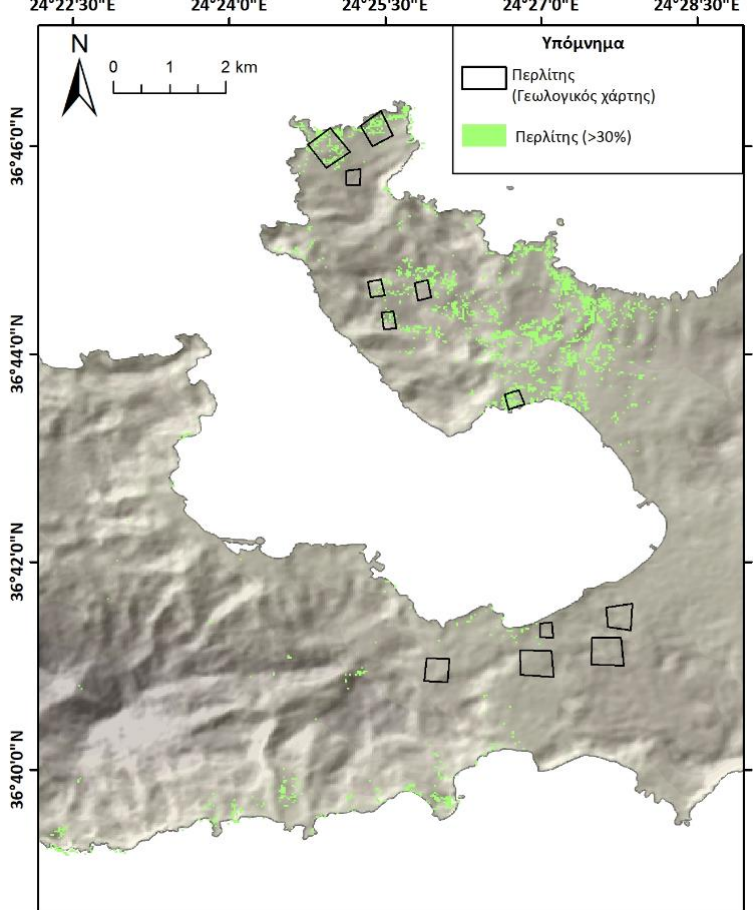
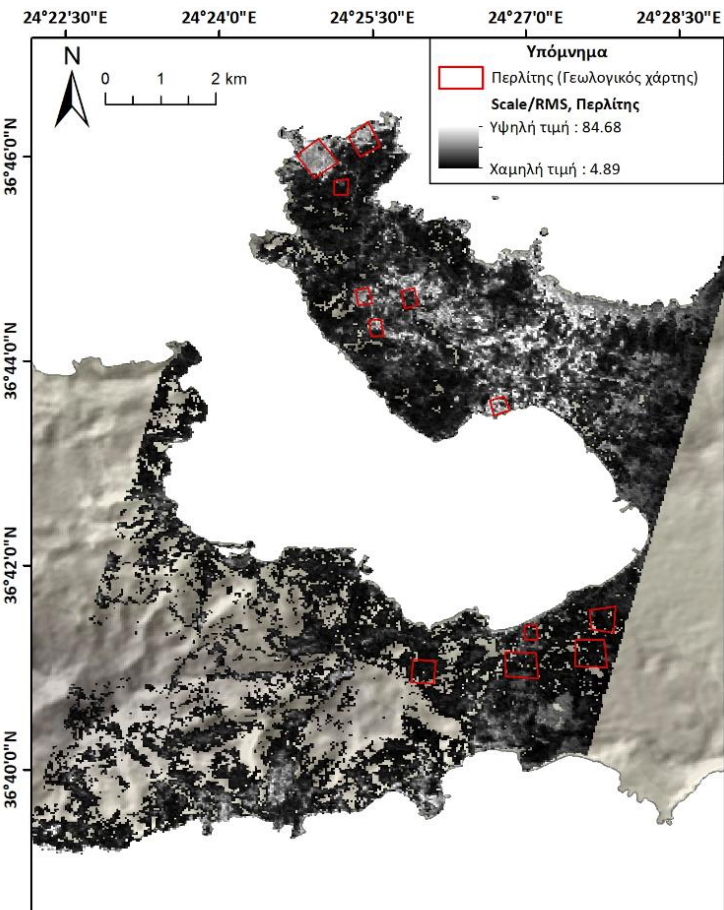
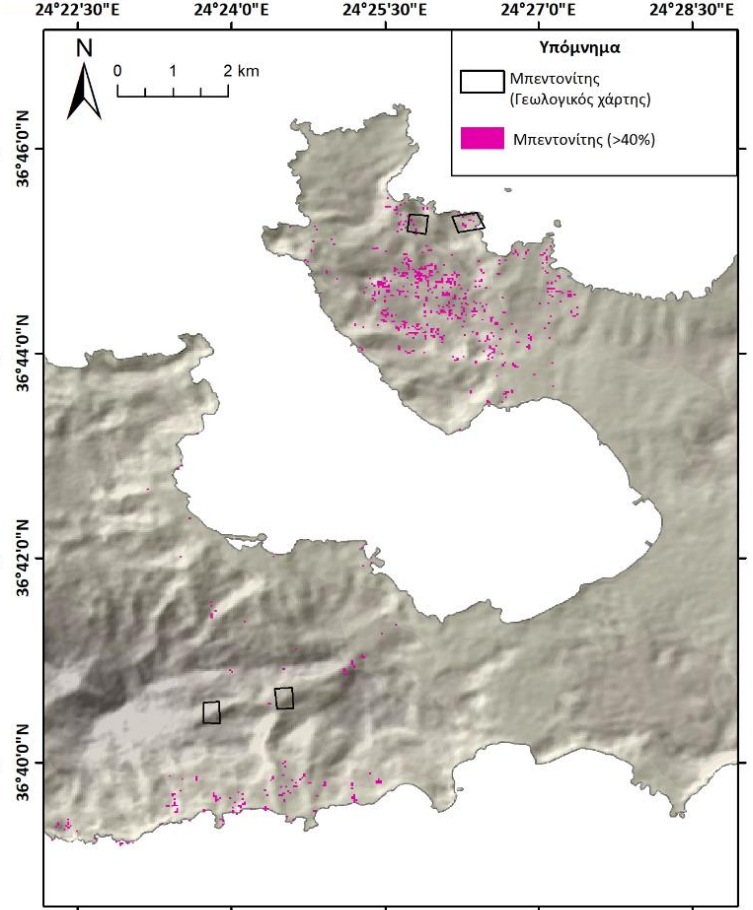
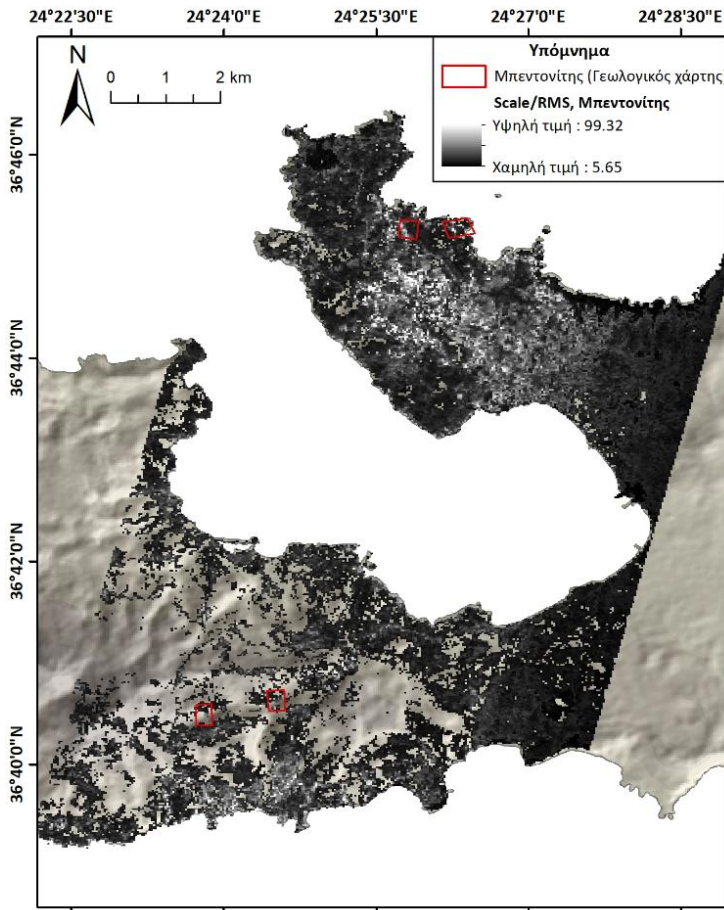


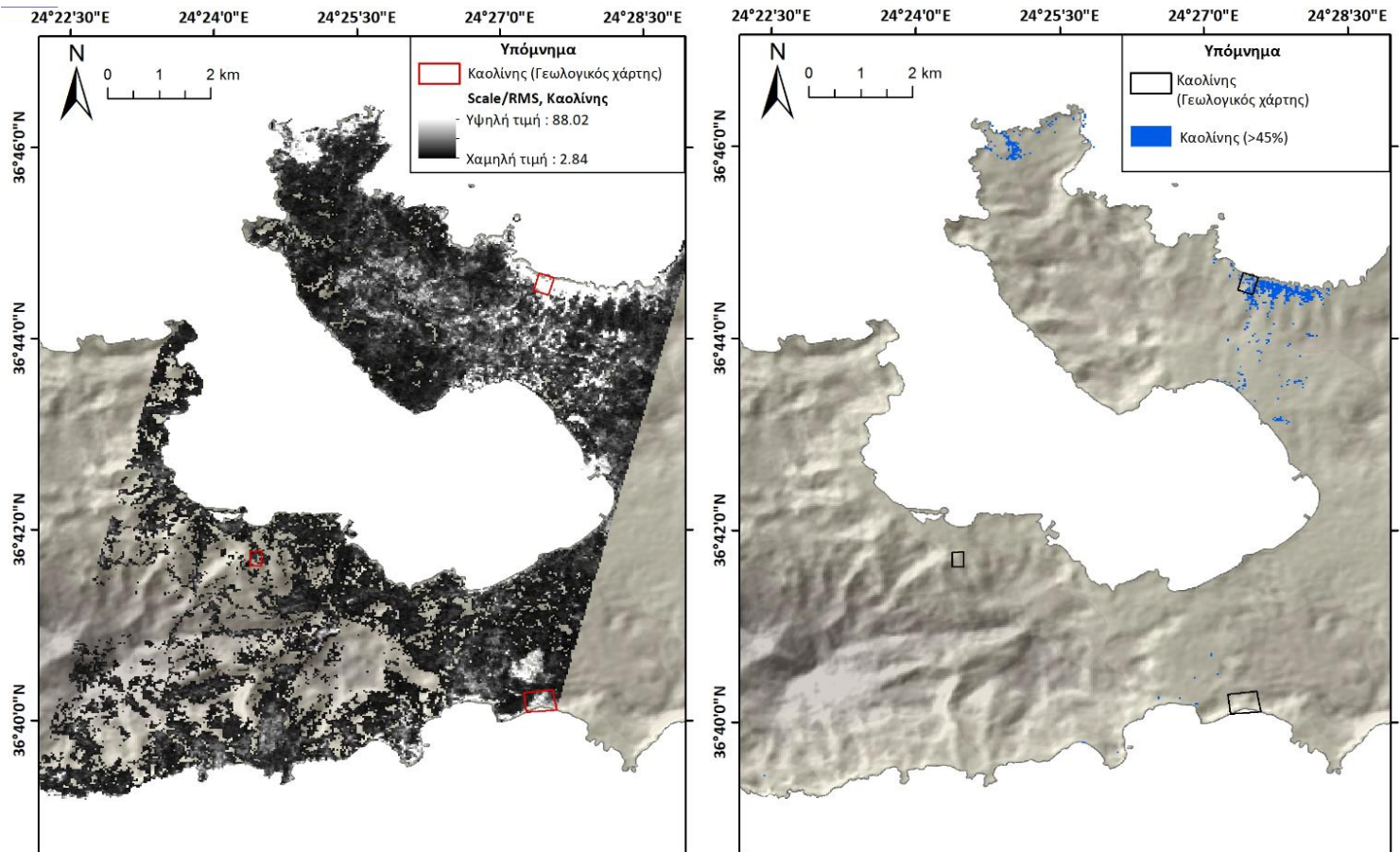
Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος





Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος





Εικ. VI-12 Εικόνες fit (αριστερά) και χάρτες αφθονίας (δεξιά) για κάθε υλικό/στόχο

### VI.3. MIXTURE TUNED MATCHED FILTERING

Μία άλλη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην κεντρική Μήλο, είναι η υβριδική μορφή **Mixture Tuned Matched Filtering (MTMF)**, που αναπτύχθηκε από τον Boardman (Boardman, 1998). Σε αντίθεση με τις ταξινομήσεις SAM και SFF, πρόκειται για μέθοδο από την οποία προκύπτουν οι **κλασματικές καλύψεις** των υπο-εικονοστοιχείων, για κάθε φασματική υπογραφή του υλικού/στόχου.

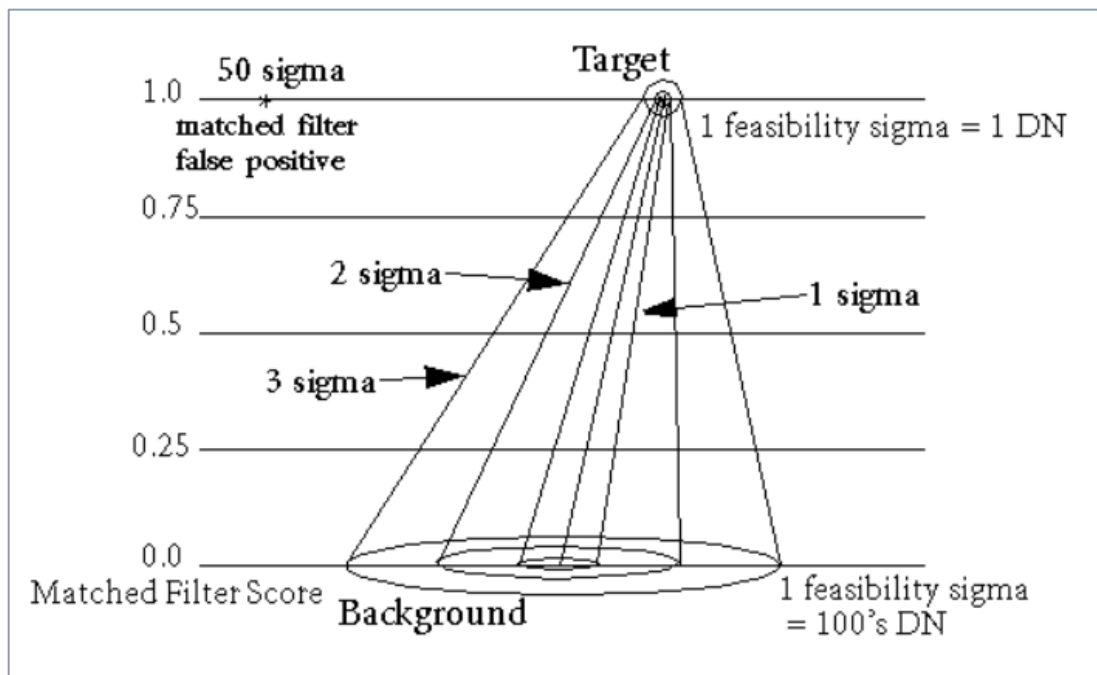
Αναλυτικότερα για τη λειτουργία της MTMF, πρόκειται ουσιαστικά για τον ίδιο αλγόριθμο που χρησιμοποιείται στην τεχνική MF. Η μεθοδολογία MTMF παρέχει μερικώς unmixing, σύμφωνα με τις επιμέρους υπογραφές των τελικών μελών, κάνοντας μεγιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ του επιλεγμένου μέλους και του άγνωστου υποβάθρου, με αποτέλεσμα αφθονίες **υπο-εικονοστοιχείου** για κάθε endmember.

Ο αλγόριθμος MTMF συνδυάζει πλεονεκτήματα των τεχνικών **Matched Filtered (MF)** και **Linear Spectral Unimixing (LSU)**, με τη διαφορά ότι προστίθεται και η μεταβλητή **infeasibility**. Πρόκειται για αλγόριθμο, που έχει την ικανότητα να ανιχνεύει λεπτές αλλαγές στα φάσματα, καθώς και να υπογραμμίζει τις πιο **feasible** περιοχές.

Η χρήση του δείκτη infeasibility έχει ως αποτέλεσμα την μεγαλύτερη ακρίβεια των προϊόντων που προκύπτουν από τη μέθοδο για κάθε endmember. Αποτελεί μεταβλητή που βοηθά στον εντοπισμό περιοχών που πιθανά αποτελούν σημεία, τα οποία λανθασμένα τοποθετήθηκαν σε μία κλάση από τον αλγόριθμο. Συνεπώς, όταν η μεταβλητή infeasibility έχει υψηλές τιμές,

χρησιμοποιείται για τη μείωση του αριθμού των λανθασμένων «θετικών» σημείων, δυνατότητα την οποία ο MF αλγόριθμος δεν συμπεριλαμβάνει.

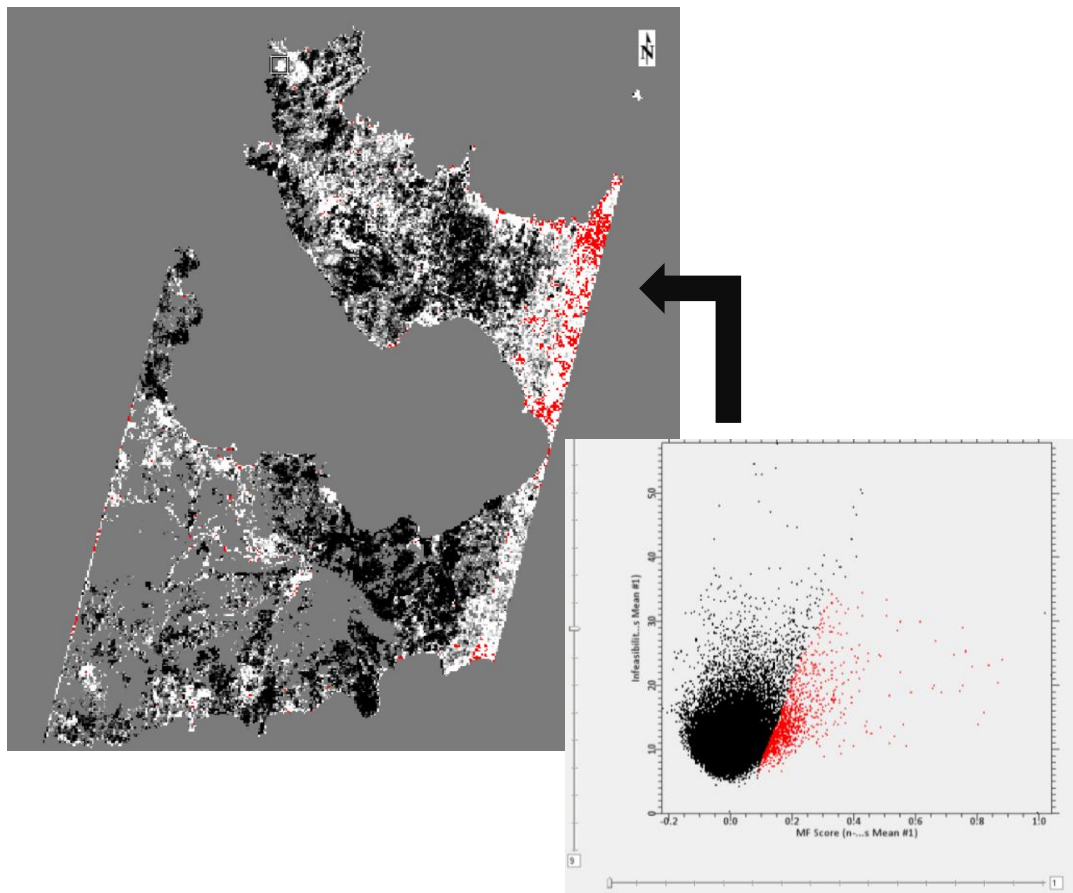
Στην περίπτωση της MTMF λοιπόν, τα προϊόντα τα οποία προκύπτουν συμπεριλαμβάνουν ένα σύνολο από εικόνες Rule, που αντιστοιχούν στο MF score και στη μεταβλητή infeasibility για κάθε εικονοστοιχείο σε σύγκριση με κάθε φάσμα endmember (δύο εικόνες κανόνων ανά endmember). Τα σωστά χαρτογραφημένα εικονοστοιχεία από την παραπάνω διαδικασία, έχουν τιμές MF score πάνω από την κατανομή του υποβάθρου, η οποία έχει περιορισμένη διαφορά θορύβου γύρω από το μηδέν και χαμηλή τιμή infeasibility. Η μεταβλητή infeasibility μετριέται σε μονάδες σφάλματος θορύβου που διαφέρουν σε κλίμακα DN με ένα σκορ MF, όπως φαίνεται στην Εικ. VI-13.



Εικ. VI-13: Διαδικασία MTMF. Πηγή: [www.harrisgeospatial.com](http://www.harrisgeospatial.com)

Πριν εφαρμοστεί η μέθοδος MTMF, απαραίτητο ήταν το βήμα του μετασχηματισμού των τηλεπισκοπικών δεδομένων, μέσω του MNF, ώστε να **έχει διαχωριστεί ο θόρυβος από τα δεδομένα** εισόδου. Χρησιμοποιήθηκε σ' αυτό το βήμα το αρχείο με την επεξεργασία MNF και προέκυψε η ταξινόμηση MTMF, με χρήση της ροής εργασιών του Spectral Hourglass Wizard.

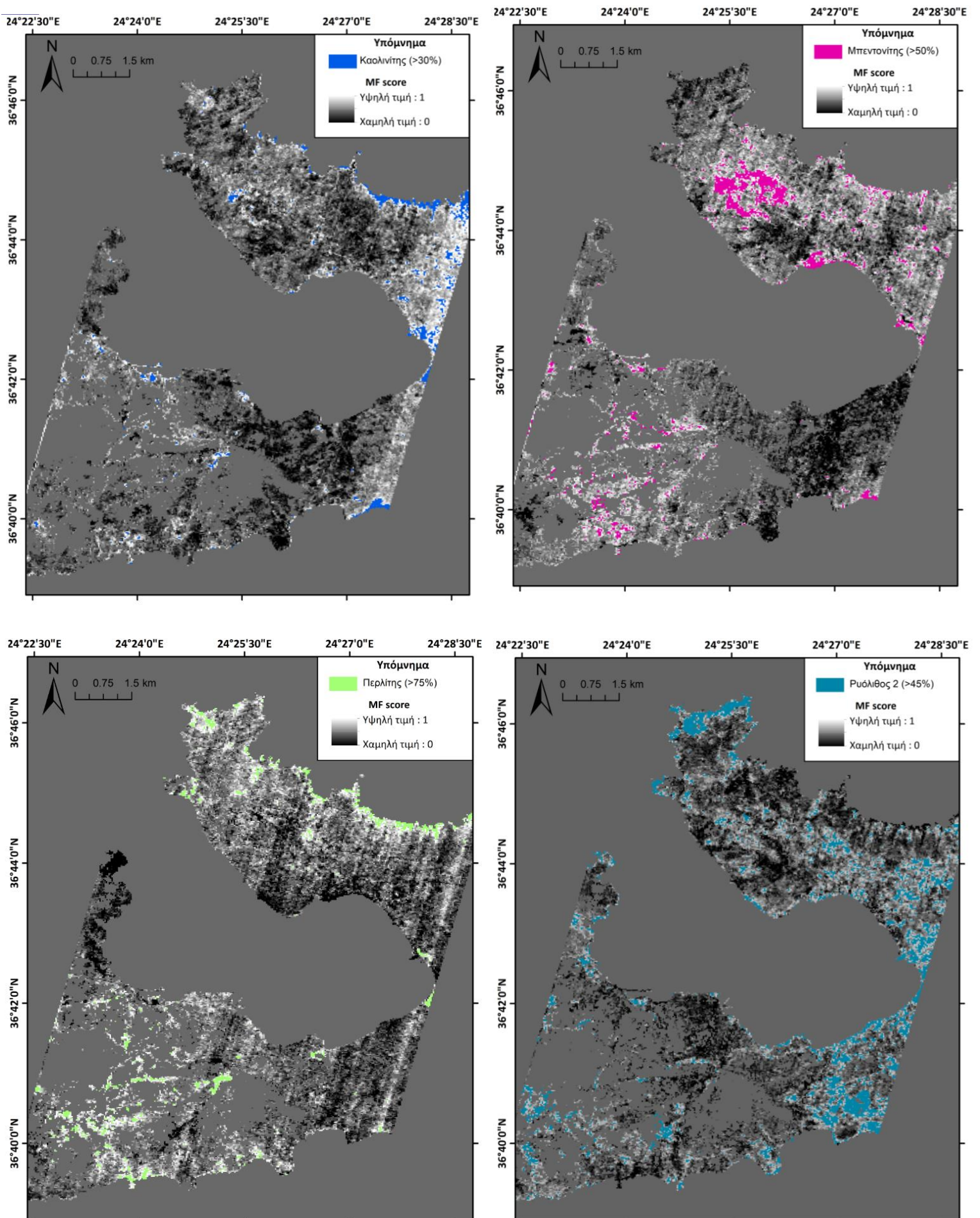
Αναφορικά με τα endmembers μέσω αυτόματης εξαγωγής, χρησιμοποιήθηκε σε πρώτη φάση ο συνολικός αριθμός τους (8 endmembers). Παρατηρήθηκε ότι τα δεδομένα αφθονίας σύμφωνα με την παράμετρο MF score, εμφανίζουν διαφοροποιήσεις για κάθε endmember επιλογής, για το οποίο επιλέγεται η κατασκευή του MF score σε grayscale. Στη συνέχεια παρατηρήθηκαν τ' αποτελέσματα της μεταβλητής infeasibility και κατασκευάστηκαν τα διαγράμματά της, συναρτήσεως του MF score, ώστε να μειωθεί ο αριθμός των εικονοστοιχείων τα οποία λανθασμένα ταξινομήθηκαν σε κάποια κατηγορία. Αυτό το οποίο παρατηρήθηκε, όπως φαίνεται και στις Εικ. VI-14, με τη χρήση του διαγράμματος δύο διαστάσεων, είναι τα εικονοστοιχεία με υψηλές τιμές MF και χαμηλές τιμές infeasibility. Τα παρακάτω διαγράμματα χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση της μεθόδου MTMF και για τον εντοπισμό των false positives.



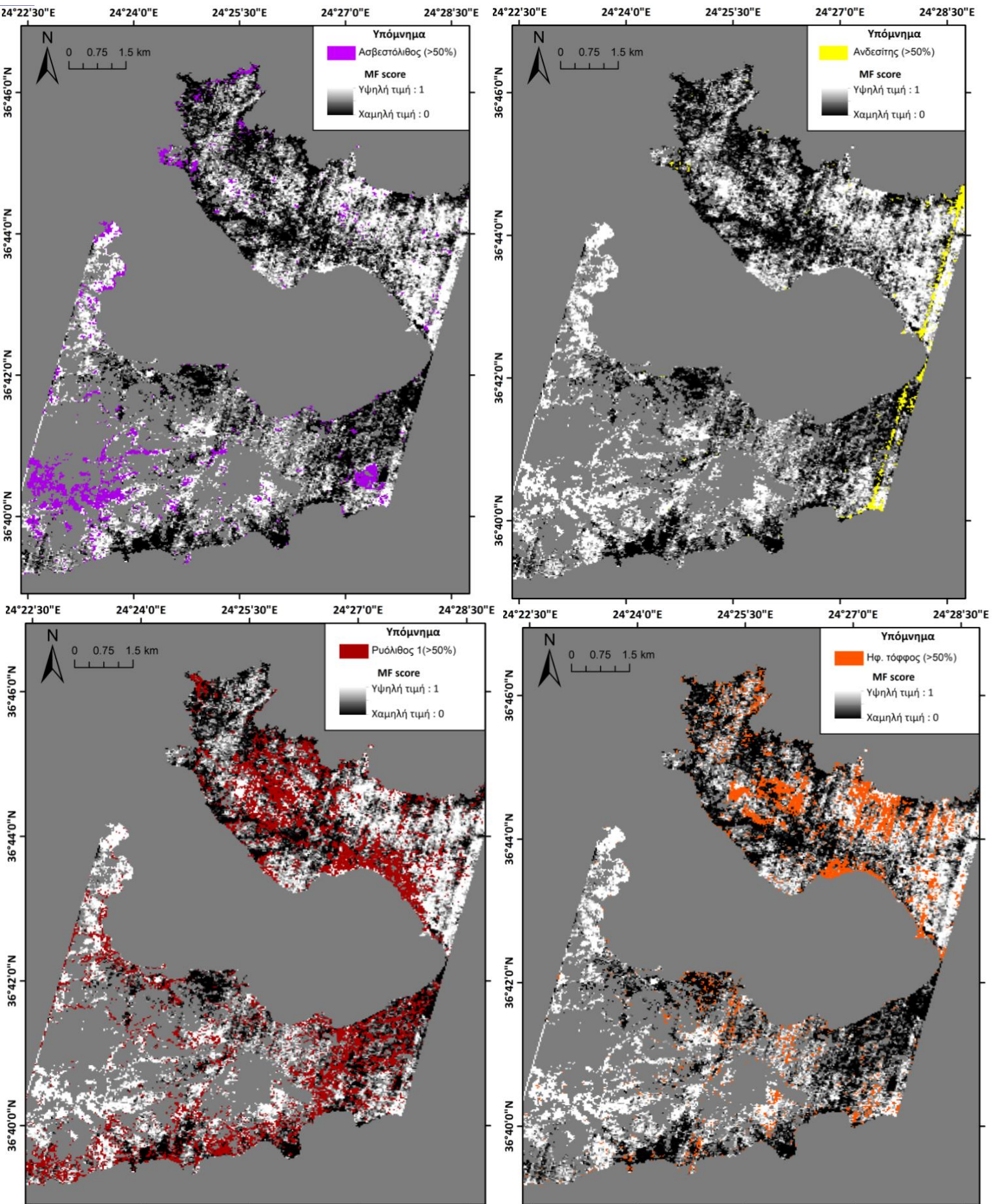
Εικ. VI-14: Παράμετρος infeasibility

Έπειτα από την κατασκευή των διαγραμμάτων, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του MF score, τα οποία κανονικοποιήθηκαν ώστε να βρίσκονται στο εύρος μεταξύ 0-1 και βρέθηκαν οι περιοχές με τις υψηλότερες τιμές για τα υλικά/στόχοι. Τ' αποτελέσματα της μεταβλητής MF score, παρουσιάζονται στους χάρτες αφθονίας, όπως προέκυψαν για κάθε endmember. Τα συγκεκριμένα σημεία ελέγχθηκαν σύμφωνα με την μεταβλητή infeasibility σε πρώτη φάση και στη συνέχεια, μέσω των στατιστικών δεδομένων του σημείου ελέγχου στο § VIII.

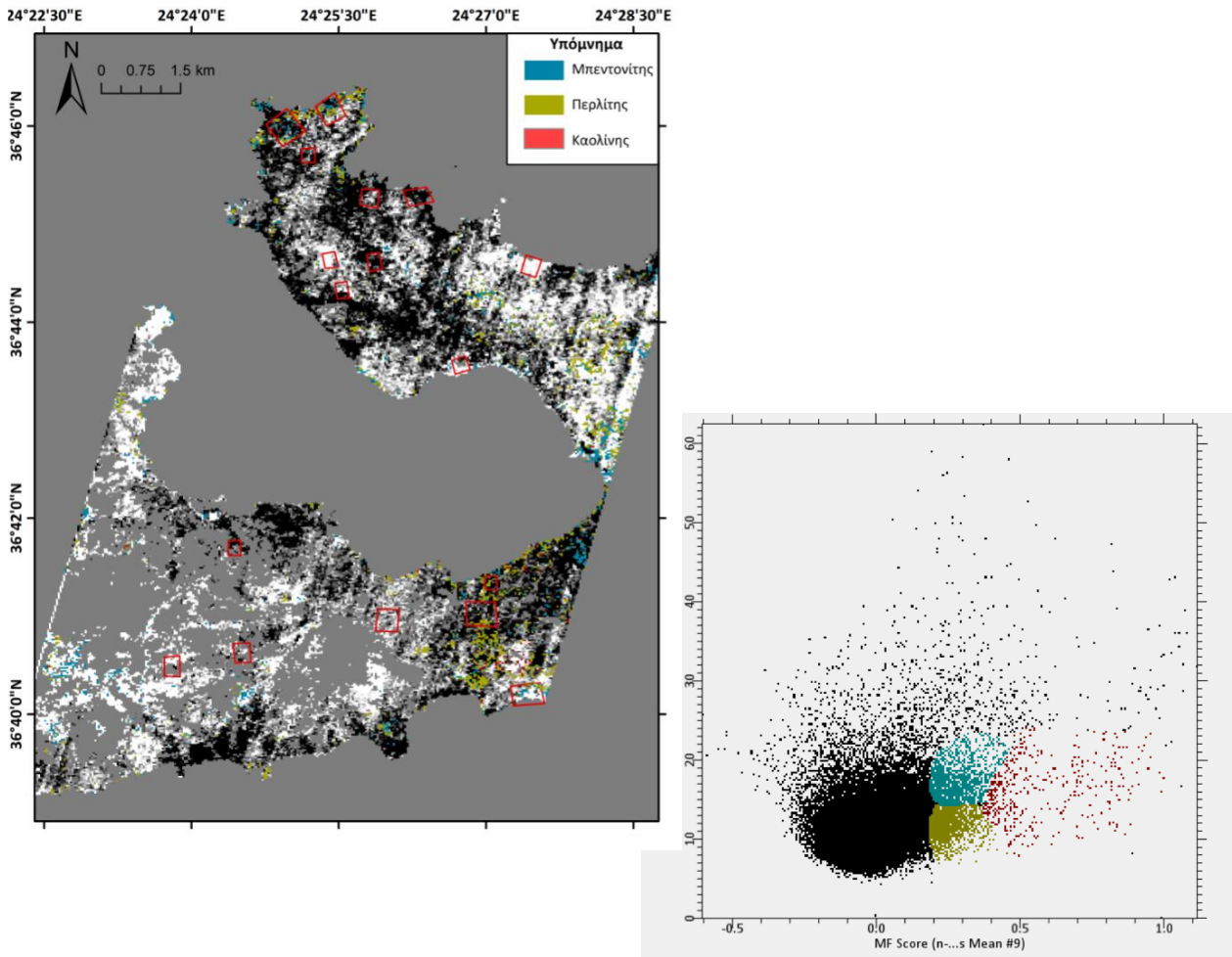
Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος



Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος



Εικ. VI-15: Χάρτες αφθονίας για τα 8 endmembers από την αυτόματη εξαγωγή



Εικ. VI-16: Επιλογή του MF score του endmember 4, για ανάδειξη των στόχων του περλίτη - καολίνη - μπεντονίτη. Χρήση της μη κανονικοποιημένης εικόνας.

Τα παραπάνω βήματα πραγματοποιήθηκαν και για τα endmembers όπως ορίστηκαν από το χρήστη. Από τις διαδικασίες του MTMF διαπιστώθηκαν τα εξής:

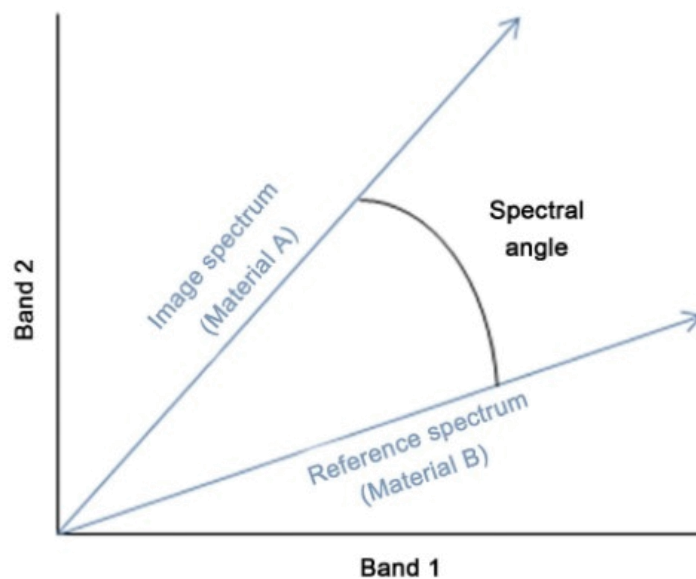
- Οι μεταβλητές του MF score, έχουν επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από την **ύπαρξη θορύβου**, όπως φαίνεται στους χάρτες αφθονίας που κατασκευάστηκαν,
- Η μεταβλητή της **infeasibility** συμβάλει στην αξιολόγηση της διαδικασίας και λειτουργεί **βοηθητικά** στη μείωση των σημείων που λανθασμένα ταξινομήθηκαν στις κατηγορίες, και
- Το ποσοστά αφθονίας που προκύπτουν για την πλειονότητα των χαρτών αφθονίας εμφανίζουν **υψηλές τιμές διακύμανσης** (μεγαλύτερο από 50% στην πλειονότητά).
- Παρατηρούνται περιοχές με **υψηλά ποσοστά αφθονίας**, για διαφορετικά endmembers.

## VII. ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΕΙΣ

### VII.1. SPECTRAL ANGLE MAPPER

Η Spectral Angle Mapper (SAM) είναι μία μέθοδος αυτόματης ταξινόμησης, που ανήκει στις επιβλεπόμενες και αφορά στην ταξινόμηση **ολόκληρου του εικονοστοιχείου (whole-pixel ή per pixel method)**. Αναπτύχθηκε από τον Kruse et al. και λειτουργεί με ανακλαστικότητα επιφανείας. Βασίζεται στην καταγραφή της ομοιότητας, μεταξύ δύο γωνιών: του **φάσματος αναφοράς** και του **φάσματος εικόνας** (Εικ. VII-1). Η γωνιακή τους διαφορά, επιτρέπει την ταξινόμηση του φάσματος της εικόνας, αντιστοιχίζοντας τα εικονοστοιχεία με το φάσμα αναφοράς και ταξινομώντας τα σε μία από τις διαθέσιμες κλάσεις. Για τον υπολογισμό της γωνιακής διαφοράς, ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί το φάσμα αναφοράς και το φάσμα της εικόνας ως διανύσματα, σ' έναν χώρο αποτελούμενο από τόσες διαστάσεις, όσες και τα κανάλια που έχουν επιλεγεί (Kruse et al., 1993; Yuhas et al., 1992).

Η παρακάτω Εικ. VII-1 αποτελεί μία **απλουστευμένη εκδοχή της μεθόδου SAM** χρησιμοποιώντας δύο κανάλια, για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της μεθόδου. Κατά την SAM, λαμβάνονται υπόψιν όλα τα κανάλια και δημιουργείται μία **hyper-angle** μεταξύ του κάθε φάσματος αναφοράς και του φάσματος του υλικού/στόχου (Shipper, 2003).



Εικ. VII-1: Μέθοδος SAM, τρόπος προσέγγισης του προβλήματος σύγκρισης γνωστής φασματικής υπογραφής με άγνωστη υπογραφή εικονοστοιχείου. Πηγή: Hamza et al., 2016.

Η προκείμενη γωνία δίνεται από τον παρακάτω τύπο (1), με  **$\theta$** : φασματική γωνία,  **$nb$** : αριθμός καναλιών,  **$t_i$** : φάσμα εικόνας και  **$r_i$** : φάσμα αναφοράς, και μετρείται σε radians (rad) (Kruse et al., 1993):

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{nb} t_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{nb} r_i^2}} \quad (1)$$

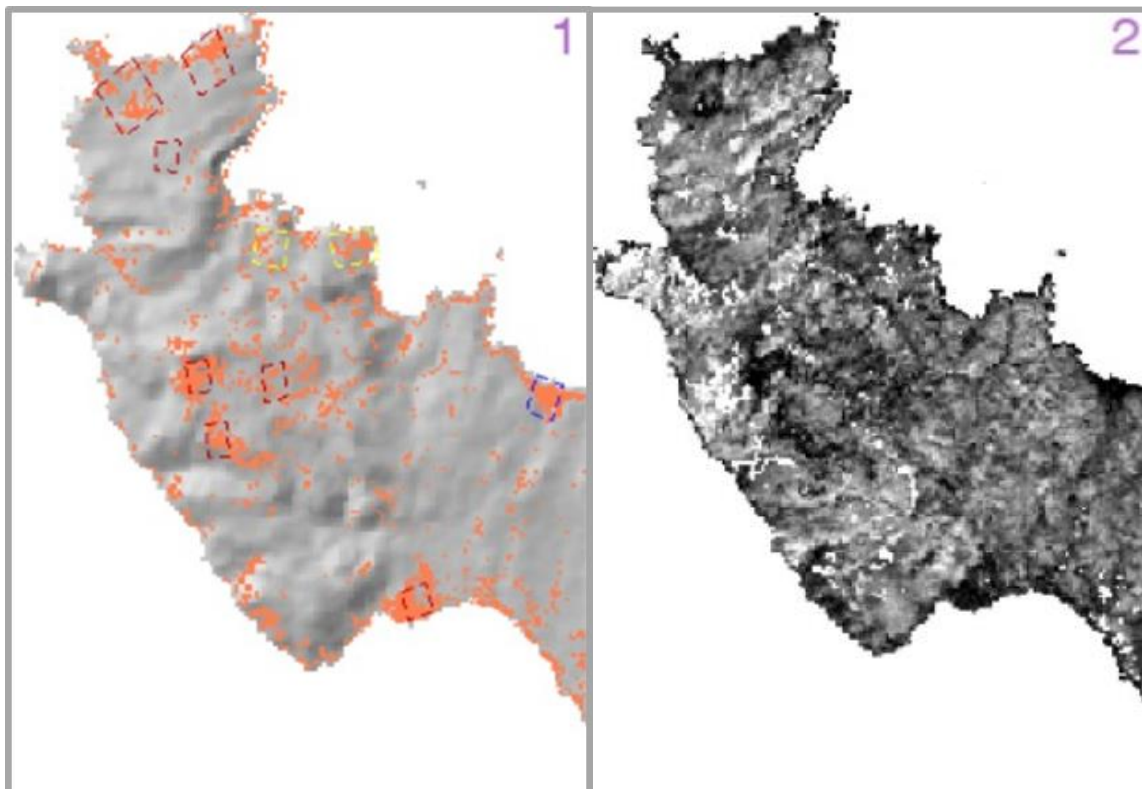






Η επιλογή του **κατάλληλου κατωφλιού**, δηλαδή της γωνιακής διαφοράς μεταξύ του φάσματος αναφοράς και του φάσματος της εικόνας, είναι ένα από τα σημαντικότερα βήματα, όπως και η επιλογή των κατάλληλων φασμάτων αναφοράς.

Εστιάζοντας στα **πλεονεκτήματα** της μεθόδου περιλαμβάνεται το ότι δεν επηρεάζεται από αλλαγές στις σκιάσεις, εξαιτίας του τοπογραφικού αναγλύφου και από φαινόμενα λευκαύγειας (albedo). Αυτό γιατί οι αλλαγές στις σκιάσεις δε μεταβάλουν τη διεύθυνση του διανύσματος, αλλά μόνο το μέγεθός του φάσματος του εικονοστοιχείου. Κατά τη SAM λαμβάνεται υπόψιν μόνο η διεύθυνση του φάσματος. Επιπλέον πρόκειται για μία μέθοδο που πραγματοποιείται σε μικρό χρονικό διάστημα. Από την άλλη, στα **μειονεκτήματα** της μεθόδου περιλαμβάνεται το ότι πραγματοποιεί ταξινόμηση σε ολόκληρο το εικονοστοιχείο. Το γεγονός αυτό αποτελεί μειονέκτημα καθώς μία εικόνα αποτελείται κυρίως από μεικτά εικονοστοιχεία, και όχι από καθαρούς στόχους που ανήκουν κάθε φορά σ' ένα υλικό/στόχο.

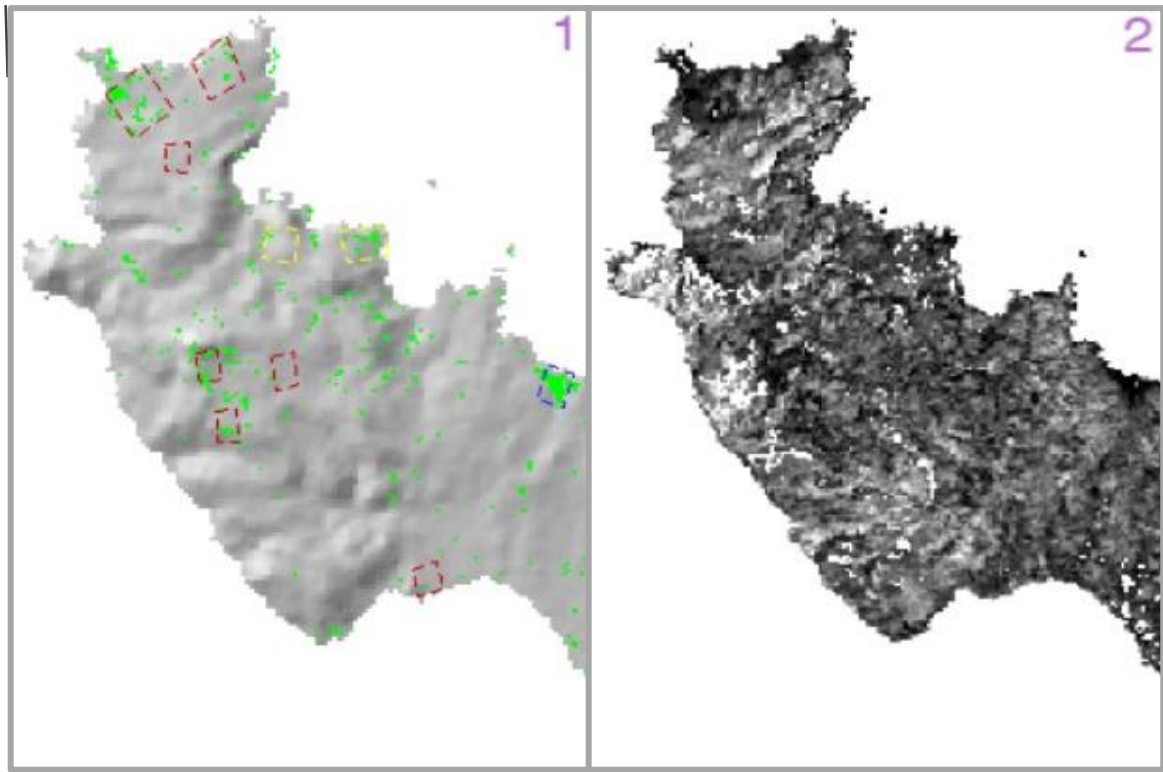
#### ✚ Φασματικές υπογραφές (Spectral signatures)

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιήθηκε **ταξινόμηση με φασματικές υπογραφές**. Έγιναν δοκιμές μόνο για τα ορυκτά ενδιαφέροντος (Εικ. VII-2, VII-3, VII-4), για τον εντοπισμό των περιοχών λατόμευσης. Στις εικόνες Rule (Εικ VII-2, VII-3, VII-4) που ακολουθούν, τα **σκοτεινότερα εικονοστοιχεία** αναπαριστούν τις περιοχές για κάθε ορυκτό. Παρατηρείται ότι τα λατομεία διακρίνονται επιτυχώς, ωστόσο η διάκριση των ορυκτών μεταξύ τους, μέσω των φασματικών γωνιών **δεν είναι εφικτή**.



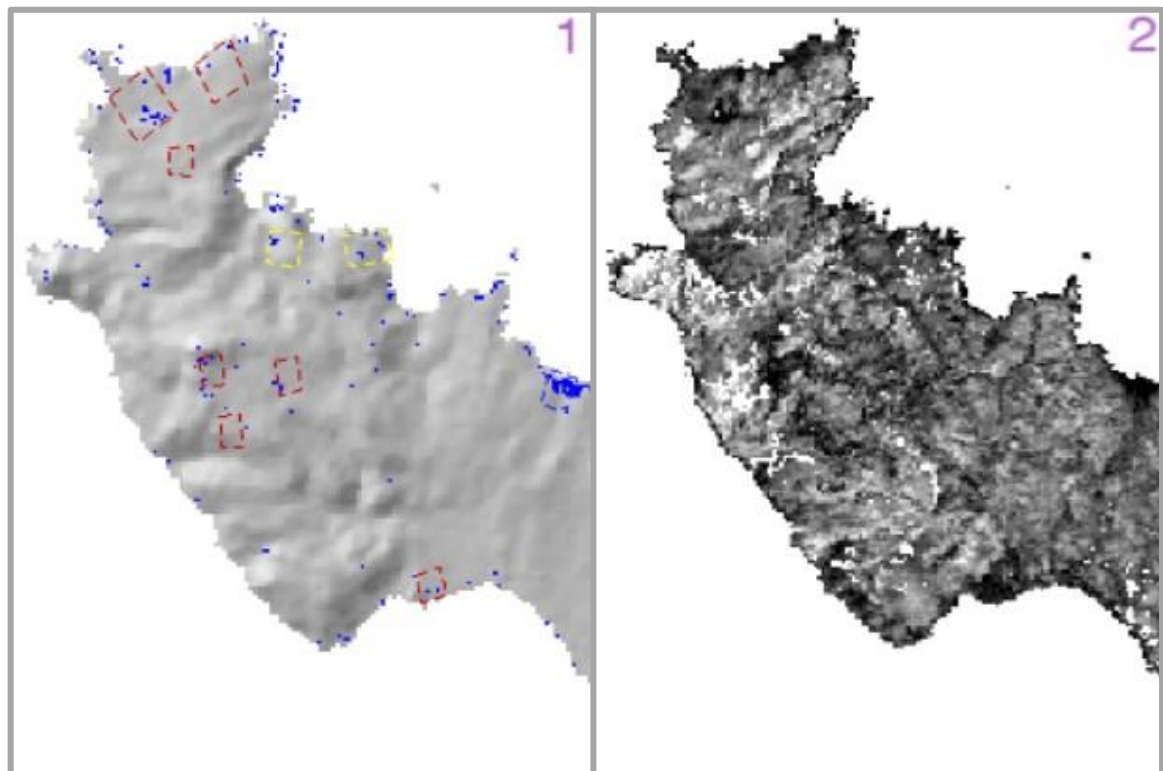
-  Υδρογροσσουλάριος
-  Περιοχή λατόμευσης – εμφάνιση καολίνη
-  Περιοχή λατόμευσης – εμφάνιση μπεντονίτη
-  Περιοχή λατόμευσης – εμφάνιση περλίτη

Εικ. VII-2: Ανίχνευση περλίτη (υδρογροσσουλάριου) με τον αλγόριθμο SAM για φασματική γωνία 0.18 στο βόρειο τμήμα του νησιού. Η κλάση του υδρογροσσουλάριου (πρώτη εικόνα) – η rule image σε grayscale (δεύτερη εικόνα).



- Μοντμοριλλονίτης
- Περιοχή λατόμευσης – εμφάνιση καολίνη
- Περιοχή λατόμευσης – εμφάνιση μπεντονίτη
- Περιοχή λατόμευσης – εμφάνιση περλίτη

Εικ. VII-3: Ανίχνευση μπεντονίτη (μοντμοριλλονίτη) με τον αλγόριθμο SAM για φασματική γωνία 0.158 στο βόρειο τμήμα του νησιού. Η κλάση του μοντμοριλλονίτη (πρώτη εικόνα) – η rule image σε grayscale (δεύτερη εικόνα).



- Καολίνης
- Περιοχή λατόμευσης – εμφάνιση καολίνη
- Περιοχή λατόμευσης – εμφάνιση μπεντονίτη
- Περιοχή λατόμευσης – εμφάνιση περλίτη

Εικ. VII-4: Ανίχνευση καολίνη (καοлинίτης) με τον αλγόριθμο SAM για φασματική γωνία 0.18 στο βόρειο τμήμα του νησιού. Η κλάση του καοлинίτη (πρώτη εικόνα) – η rule image σε grayscale (δεύτερη εικόνα).

Εφαρμόζοντας την SAM για τα **3 ορυκτά** και πιο συγκεκριμένα για: τον υδρογροσσουλάριο ( $\theta_1=0.18$  rad), τον μοντμοριλλονίτη ( $\theta_2=0.158$  rad) και τον καολινίτη ( $\theta_3=0.2$  rad), συμπεραίνεται ότι η φασματική υπογραφή του μοντμοριλλονίτη, λόγω της μικρότερης φασματικής γωνίας που χρησιμοποιήθηκε, εμφανίζει την καλύτερη αντιστοίχιση του ορυκτού με το φάσμα αναφοράς. Αυτό γιατί οι μικρές φασματικές γωνίες υποδεικνύουν **στενές αντιστοιχίες** με το φάσμα αναφοράς.

Στο επόμενο βήμα εισήχθησαν στην ταξινόμηση SAM οι φασματικές υπογραφές και των πετρωμάτων. Σύμφωνα με τις φασματικές γωνίες των γεωλογικών σχηματισμών που επιλέχθηκαν, ο μοντμοριλλονίτης, ο ασβεστόλιθος καθώς και ο τόφφος, εμφανίζουν **στενές αντιστοιχίες** με τα φάσματα αναφοράς της εικόνας (Πίνακας VII-1), με τη συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης να εμφανίζει **μικρή τιμή** (της τάξεως του **36%**).

Στη συνέχεια, για αύξηση της ακρίβειας της ταξινόμησης, συνδυάστηκαν οι δύο κλάσεις των ρυόλιθων, ώστε να μειωθούν τα σφάλματα. Η Εικ. VII-6 δείχνει την κάλυψη πετρωμάτων και ορυκτών, εφαρμόζοντας τη μέθοδο SAM έπειτα από την **μείωση κλάσεων**, δίνοντας **συνολική ακρίβεια 43%**, όπως φαίνεται στο § VIII.

#### Περιοχές εκπαίδευσης από τον χρήστη

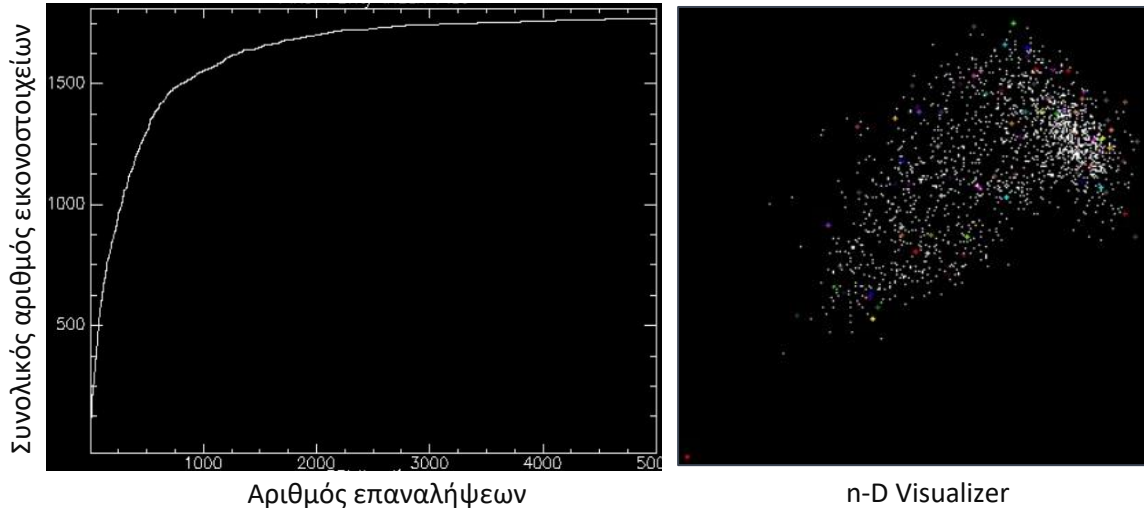
Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε για την ταξινόμηση SAM με **καθαρούς στόχους**, όπως προέκυψαν **από τον χρήστη**, με τις τιμές των φασματικών γωνιών (Πίνακας VII-2) για τον **υδρογροσσουλάριο** καθώς και για τον **καολινίτη**, να δείχνουν τη **στενή αντιστοιχία** του φάσματος των καθαρών στόχων, με το φάσμα αναφοράς της εικόνας.

#### Αυτόματη εξαγωγή

Σε επόμενο βήμα, έγιναν δοκιμές για τους **φασματικούς στόχους**, όπως προέκυψαν από την διαδικασία **αυτόματης εξαγωγής**, με τη χρήση του PPI. Η **μέθοδος PPI** εφαρμόστηκε έπειτα από την MNF, επιλέγοντας τα 15 πρώτα κανάλια. Κατά τη μέθοδο PPI επιλέχθηκαν τα “**pure pixels**” ή **ακραία εικονοστοιχεία** (βλ. § VI, καθαροί στόχοι), τα οποία βρίσκονται στις ακραίες γωνίες ή ακμές του **νέφους δεδομένων (data cloud)**. Ο υπολογισμός των ακραίων εικονοστοιχείων πραγματοποιήθηκε μέσω της κατασκευής του διαγράμματος αθροιστικού αριθμού εικονοστοιχείων συναρτήσεως του αριθμού επαναλήψεων, ο οποίος τέθηκε στο προηγούμενο βήμα, με την συνάρτηση να γίνεται οριζόντια με την ολοκλήρωση των επαναλήψεων, εφόσον έχουν βρεθεί όλα τα ακραία εικονοστοιχεία (Εικ. VII-5). Στο τέλος της διαδικασίας, δημιουργείται η εικόνα PPI, με την τιμή του κάθε εικονοστοιχείου ν’ αντιστοιχεί στις φορές που ένα εικονοστοιχείο καταγράφηκε ως **ακραίο**.

Τα εικονοστοιχεία με τις υψηλότερες τιμές θα εισαχθούν στον **n-Dimensional Visualizer** και ο αριθμός τους θα τεθεί μέσω του κατωφλιού PPI. Ο n-D Visualizer είναι ένα εργαλείο για την εύρεση των καθαρών στόχων, μέσω της τοποθέτησής τους στον **χώρο n-D**, με το φάσμα ν’ αναπαρίσταται ως σημείο σε χώρο n διαστάσεων, με τον n ν’ αντιστοιχεί στα κανάλια MNF που επιλέχθηκαν (εν προκειμένω 15). Στο βήμα του n-D είναι δυνατή η **σύγκριση** των δεδομένων, με τους διαθέσιμους στόχους, στον **Spectral Analyst**. Οι ταξινομήσεις με τον

αλγόριθμο SAM για φασματικές γωνίες **0.5 rad** και **0.8 rad** αντίστοιχα, πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τους **καθαρούς στόχους από αυτόματη εξαγωγή** στην πρώτη περίπτωση (Πίνακας VII-3), και τους **καθαρούς στόχους όπως ορίστηκαν από τον χρήστη** (Πίνακας VII-4), στη δεύτερη περίπτωση.



Εικ. VII-5: Διάγραμμα PPI – n-D Visualizer, παράδειγμα νέφους δεδομένων

Τ' αποτελέσματα της πρώτης περίπτωσης εμφανίζουν μεγαλύτερη συνολική ακρίβεια, όπως φαίνεται στο § VIII. Στις συγκεκριμένες δοκιμές, η συνολική ακρίβεια ταξινόμησης με μία ρυθμιστική λάβα, αντιστοιχεί στις υψηλότερες τιμές για τη μεθοδολογία SAM. Αναφορικά με τις ταξινομήσεις μέσω των φασματικών υπογραφών, δεν είχαν καλά αποτελέσματα, συνεπώς δεν συμπεριλήφθηκαν στην παρούσα εργασία.

Ακολουθούν οι **τιμές κατωφλιού** που επιλέχθηκαν για τις φασματικές γωνίες, για τις διάφορες προσπάθειες που πραγματοποιήθηκαν με τον αλγόριθμο SAM, καθώς και **χαρτογραφικό υλικό** κάθε προσπάθειας, για **μία ή δύο κατηγορίες ρυθμιστικής λάβας**.

Πίνακας VII-1: Φασματικές γωνίες ανά κατηγορία – ταξινόμηση SAM με φασματικές υπογραφές

| Κατηγορία                      | Φασματική γωνία (rad) |
|--------------------------------|-----------------------|
| Ανδεσίτης                      | 0.35                  |
| Ρυόλιθος (1)                   | 0.28                  |
| Ρυόλιθος (2)                   | 0.235                 |
| Τόφφος                         | 0.19                  |
| Ασβεστόλιθος                   | 0.17                  |
| Υδρογροσσουάριος (Περλίτης)    | 0.21                  |
| Μοντμοριλλονίτης (Μπεντονίτης) | 0.165                 |
| Καολινίτης (Καολίνης)          | 0.225                 |

Πίνακας VII-2: Φασματικές γωνίες ανά κατηγορία – ταξινόμηση SAM με καθαρούς στόχους από τον χρήστη

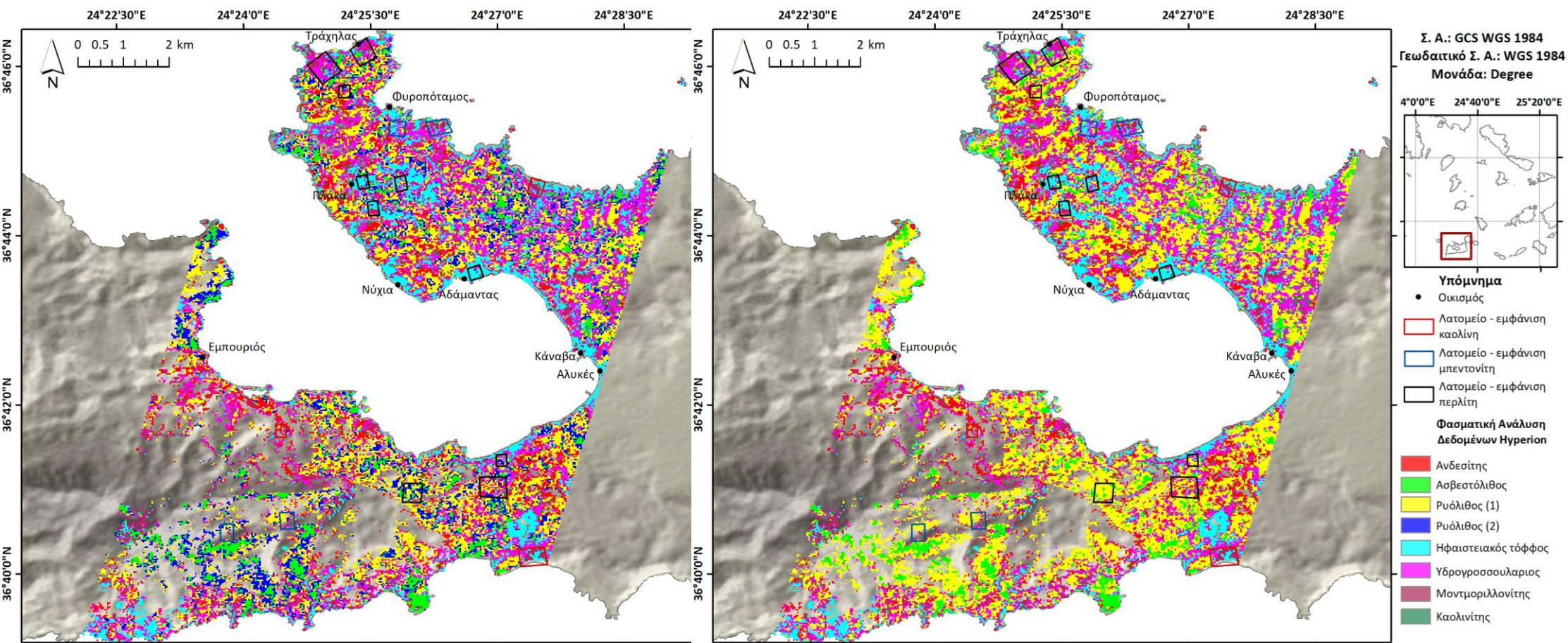
| Κατηγορία                    | Φασματική γωνία (rad) |
|------------------------------|-----------------------|
| Ανδρσιίης                    | 0.14                  |
| Ρυόλιθος (1)                 | 0.24                  |
| Ρυόλιθος (2)                 | 0.22                  |
| Τόφφος                       | 0.7                   |
| Ασβεστόλιθος                 | 0.2                   |
| Υδρογροσσουάριος (Περλίης)   | 0.05                  |
| Μοντμοριλλονίης (Μπεντονίης) | 0.14                  |
| Καολινίης (Καολίνης)         | 0.2                   |

Πίνακας VII-3: Φασματικές γωνίες ανά κατηγορία – ταξινόμηση SAM με καθαρούς στόχους από τον χρήστη – εικόνα MNF

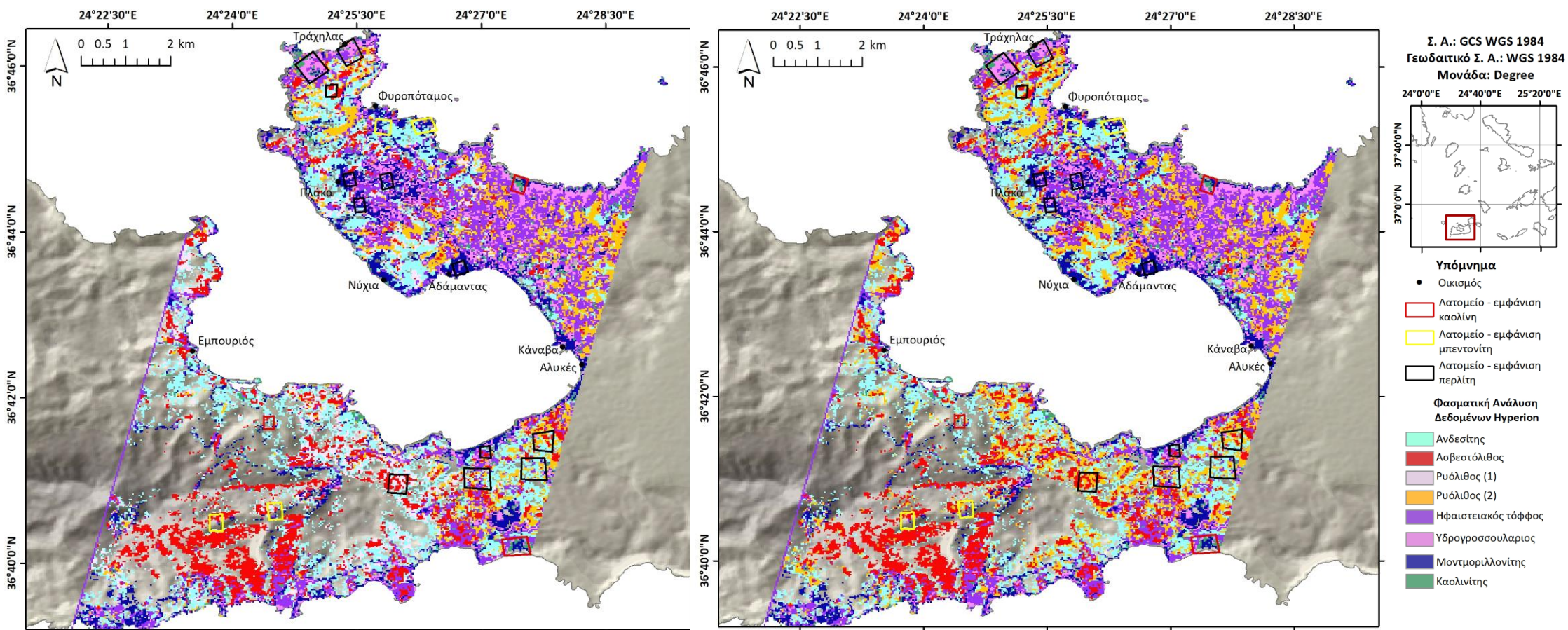
| Κατηγορία                    | Φασματική γωνία (rad) |
|------------------------------|-----------------------|
| Ανδρσιίης                    |                       |
| Ρυόλιθος (1)                 |                       |
| Ρυόλιθος (2)                 |                       |
| Τόφφος                       |                       |
| Ασβεστόλιθος                 | 0.8                   |
| Υδρογροσσουάριος (Περλίης)   |                       |
| Μοντμοριλλονίης (Μπεντονίης) |                       |
| Καολινίης (Καολίνης)         |                       |

Πίνακας VII-4: Φασματικές γωνίες ανά κατηγορία – ταξινόμηση SAM με καθαρούς στόχους από αυτόματη εξαγωγή – εικόνα MNF

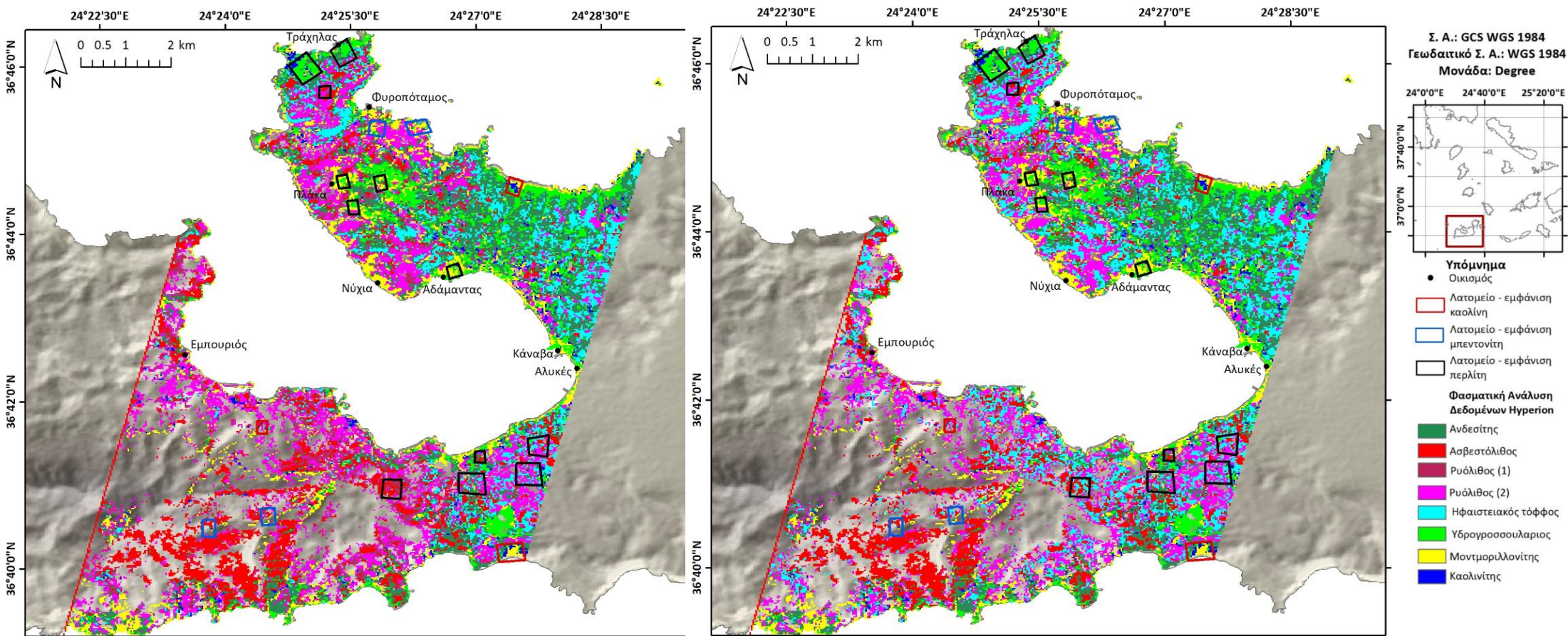
| Κατηγορία                    | Φασματική γωνία (rad) |
|------------------------------|-----------------------|
| Ανδρσιίης                    |                       |
| Ρυόλιθος (1)                 |                       |
| Ρυόλιθος (2)                 |                       |
| Τόφφος                       |                       |
| Ασβεστόλιθος                 | 0.5                   |
| Υδρογροσσουάριος (Περλίης)   |                       |
| Μοντμοριλλονίης (Μπεντονίης) |                       |
| Καολινίης (Καολίνης)         |                       |



Εικ. VII-6: Ταξινόμηση SAM με χρήση φασματικών υπογραφών για την περίπτωση δύο (αριστερή εικόνα) και μίας ρυολιθικής λάβας (δεξιά εικόνα)

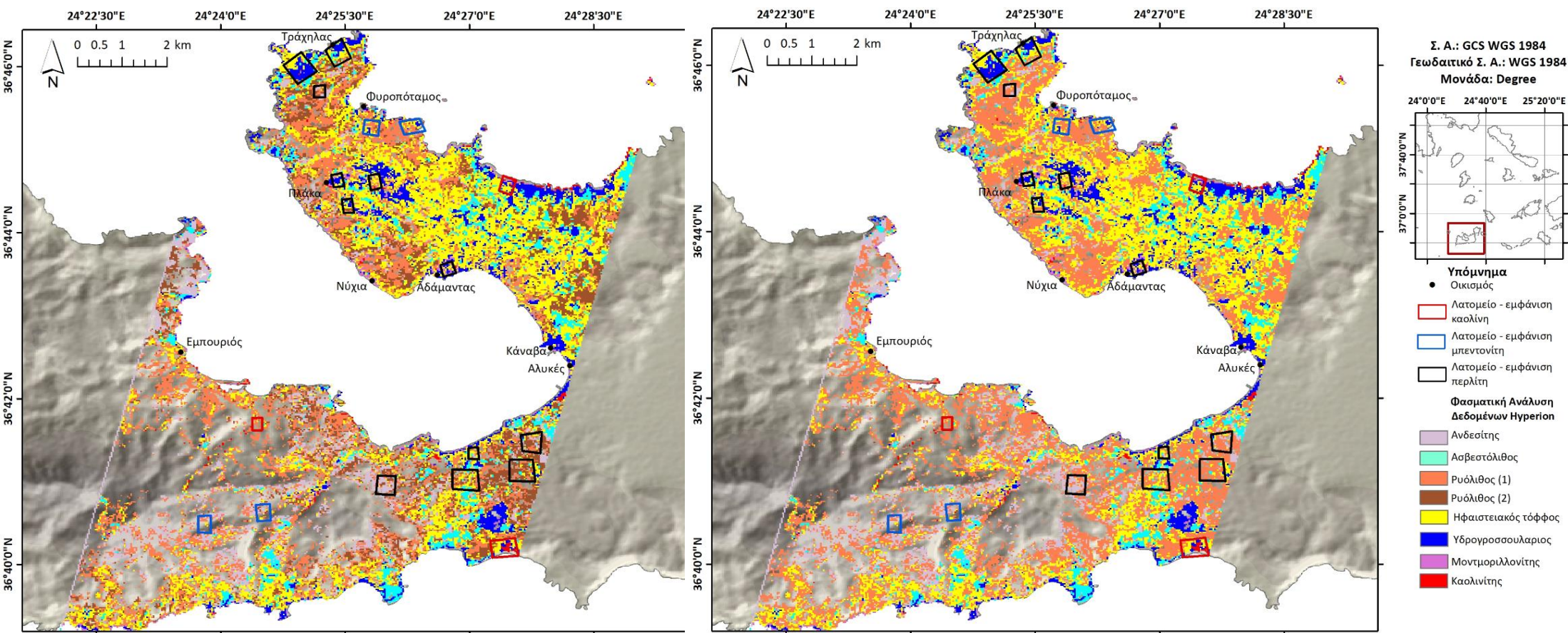


Εικ. VII-7: Ταξινόμηση SAM με χρήση περιοχών εκπαίδευσης για την περίπτωση δύο (αριστερή εικόνα) και μίας ρυολιδικής λάθας (δεξιά εικόνα)



Εικ. VII-8: Ταξινόμηση SAM για τη μετασχηματισμένη εικόνα MNF με χρήση καθαρών στόχων όπως ορίστηκαν από τον χρήστη για την περίπτωση δύο (αριστερή εικόνα) και μίας ρυολιθικής λάβας (δεξιά εικόνα)





Εικ. VII-9: Ταξινόμηση SAM για τη μετασηματισμένη εικόνα MNF με χρήση καθαρών στόχων μέσω αυτόματης εξαγωγής για την περίπτωση δύο (αριστερή εικόνα) και μίας ρυολιθικής λάθας (δεξιά εικόνα)

Για τ' αποτελέσματα της μεθόδου SAM (Εικ. VII-6, VII-7) παρατηρείται ότι:

- ✚ Στην ταξινόμηση με φασματικές υπογραφές, ο μοντμοριλλονίτης, ο ασβεστόλιθος καθώς και ο τόφφος, εμφανίζουν στενές αντιστοιχίες με τα φάσματα αναφοράς της εικόνας, ενώ στην περίπτωση των καθαρών στόχων από τον χρήστη, καλύτερη αντιστοιχία εμφανίζουν οι φασματικές γωνίες του υδρογροσσουλάριου καθώς και του καολινίτη.
- ✚ Η ταξινόμηση με χρήση των καθαρών στόχων από τον χρήστη, παρέχει μεγαλύτερη λεπτομέρεια για την εικόνα και μεγαλύτερη συνολική ακρίβεια, σε σχέση με την ταξινόμηση από φασματικές υπογραφές (§ VIII). Στην ταξινόμηση με καθαρούς στόχους από το χρήστη, διακρίνονται λατομεία περλίτη, μπεντονίτη και καολίνη.
- ✚ Γενικότερα τα **λατομεία περλίτη** και **μπεντονίτη** ανιχνεύονται με μεγαλύτερη επιτυχία, σε αντίθεση με τον **καολίνη**. Ο καολινίτης ταξινομείται στις κλάσεις των μοντμοριλλονίτη και εξαλλοιωμένων ηφαιστειακών τόφφων (Εικ. VII-6, VII-7). Τα λάθη της ταξινόμησης πιθανά να οφείλονται στο γεγονός ότι μία από τις κύριες μορφές εξαλλοίωσης, των τόφφων είναι η καολινιτίωση. Στους χάρτες οι **εξαλλοιωμένοι, ηφαιστειακοί τόφφοι** εντοπίστηκαν επιτυχώς στο βορειοανατολικό και νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού, ωστόσο κάποιες περιοχές ταξινομήθηκαν ως **περλίτης**, λόγω της ομοιότητας που παρουσιάζει η ηφαιστειακή ύελος που περιέχεται στους τόφφους, με τον υδρογροσσουλάριο, στον οποίο επικρατεί το διοξείδιο του πυριτίου. Ο διαχωρισμός των **λαβών** (ρυολιθικών και ανδεσιτικών) δεν επιτεύχθηκε σε μεγάλο βαθμό. Αντίθετα, η ταξινόμηση του **ασβεστόλιθου** είναι βοηθητική για τη διάκρισή του και πραγματοποιείται κυρίως λόγω διαφορετικής, ορυκτολογικής σύστασης από τα περιβάλλοντα πετρώματα.
- ✚ Με την **μείωση των κλάσεων** των ρυολιθικών λαβών, οι γεωλογικοί σχηματισμοί ταξινομούνται καλύτερα και η συνολική ακρίβεια των ταξινομήσεων αυξάνεται, όπως φαίνεται στις τιμές των πιο υψηλών ταξινομήσεων στο § VIII.

Για τ' αποτελέσματα της μεθόδου SAM (Εικ. VII-8, VII-9) για την μετασχηματισμένη εικόνα MNF, παρατηρείται ότι:

- ✚ Κάποιες περιοχές λατόμευσης των Ορυκτών Πρώτων Υλών ταυτίζονται στους δύο χάρτες. Επιτυχώς εντοπίστηκαν περιοχές λατόμευσης περλίτη, καολίνη και μπεντονίτη στο βόρειο τμήμα της Μήλου. Επιπλέον διακρίθηκαν και κάποια λατομεία στο νότιο τμήμα. Ο διαχωρισμός των ορυκτών μεταξύ τους δεν είναι εφικτός σε όλες τις περιπτώσεις, ωστόσο τ' αποτελέσματα είναι πιο ακριβή για την μετασχηματισμένη εικόνα με MNF.
- ✚ Τα προϊόντα από τις δύο ταξινομήσεων εμφανίζουν ομοιότητες στην επιφανειακή εξάπλωση των σχηματισμών, με εξαίρεση τους γεωλογικούς σχηματισμούς των ανδεσιτικών λαβών και του ασβεστόλιθου, που εμφανίζουν μεγαλύτερη έκταση, σε σύγκριση με το γεωλογικό χάρτη (βλ. Παράρτημα Χαρτών, Εικόνα 1). Επιπλέον, όπως και στις ταξινομήσεις για όλα τα κανάλια της αρχικής εικόνας, η **μείωση των κλάσεων** των ρυολιθικών λαβών, δίνει μεγαλύτερη ακρίβεια (§ VII).

## VII.2. MAHALANOBIS DISTANCE

Η τελευταία προσπάθεια για την ταξινόμηση των σχηματισμών καλείται Mahalanobis distance. Ανήκει στις πιο συχνές μεθόδους επιβλεπόμενης ταξινόμησης, ενώ εμφανίζει πολλές ομοιότητες με τις κατηγορίες της **Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood Classification - MLC)** και της **Ελάχιστης Απόστασης (Minimum Distance Classification)**. Παρά τις ομοιότητες με την MLC, βασική διαφορά είναι ότι θεωρεί το σύνολο των συνδιακυμάνσεων, ως ίδιο.

Η **απόσταση Mahalanobis** δημιουργήθηκε κυρίως για την επίλυση του θέματος των λανθασμένα ταξινομημένων δεδομένων με την ευκλείδεια απόσταση, όταν αυτά εμφανίζουν συσχέτιση. Ο μαθηματικός τύπος για τον υπολογισμό της απόστασης Mahalanobis είναι ο εξής (1):

$$M_h^2 = \frac{1}{2}(x - m_i)^t C_i^{-1}(x - m_i) \quad (1)$$

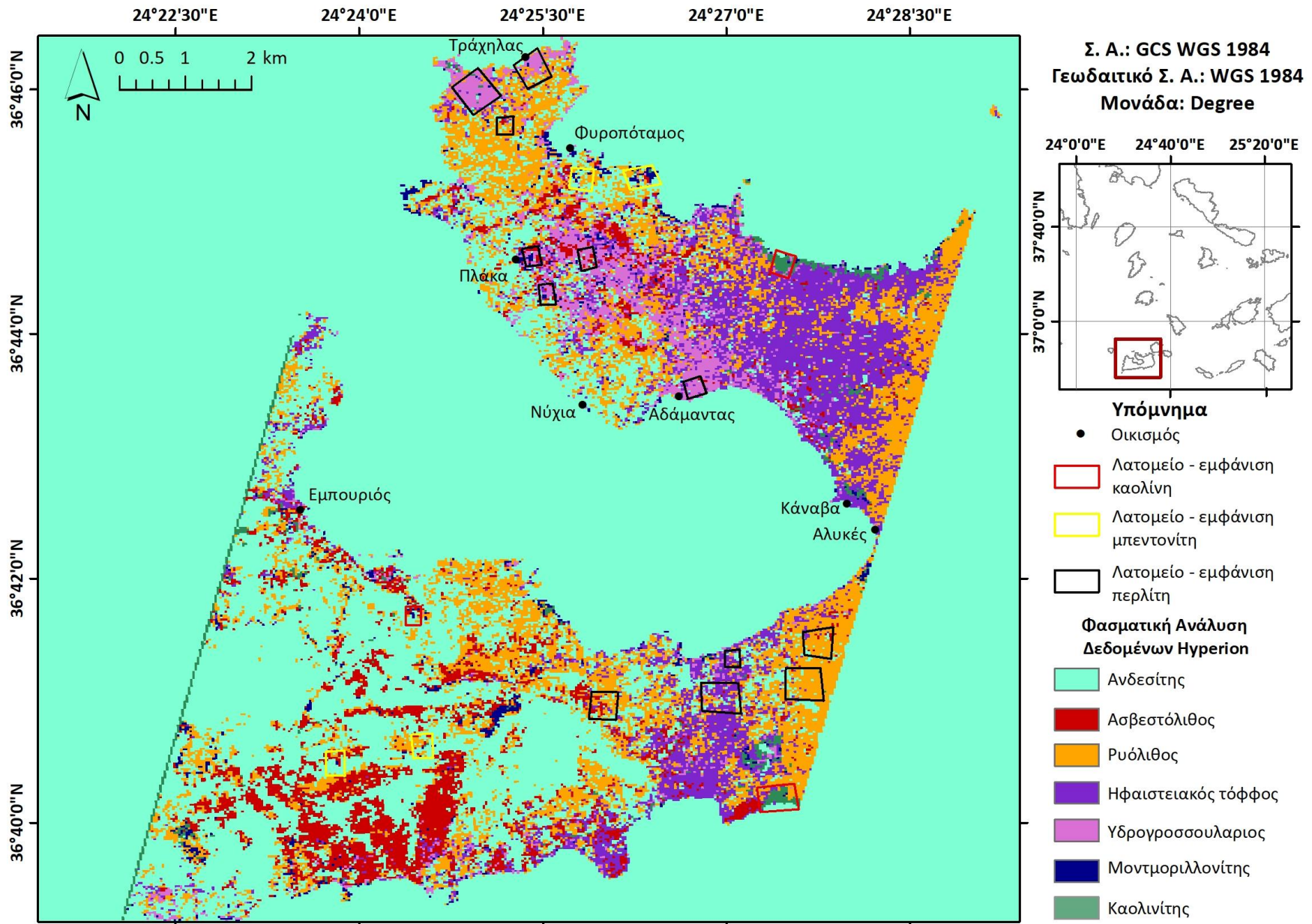
Με  $M_h$ : απόσταση Mahalanobis,  $|C_i|$ : ορίζουσα του πίνακα συνδιασποράς για μία κλάση  $i$ ,  $x$ : ένας πίνακας  $n$ -διαστάσεων του pixel,  $m_i$ : μέσο διάνυσμα και  $t$ : ο εκθέτης του πίνακα βάσης. Ο μαθηματικός τύπος για τον υπολογισμό της απόστασης Mahalanobis, αποτελεί ουσιαστικά μία τροποποίηση του τύπου της Ευκλείδειας απόστασης, σύμφωνα με τη διασπορά κάθε κλάσης (Περάκης, κ.α., 2015; Shahbaz, et al., 2007).

Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκε για την κατηγοριοποίηση των πετρωμάτων και των ορυκτών της κεντρικής Μήλου, είναι η υψηλή συσχέτιση που εμφανίζουν τα δεδομένα, όπως έγινε αντιληπτό στο § V.3, για την περίπτωση των ορυκτών. Επιλέχθηκαν επομένως σύμφωνα με το χαμηλό συντελεστή συσχέτισης που εμφανίζουν τα δεδομένα, τα κανάλια **35-45, 142-145 και 204-208**, χρησιμοποιώντας ως δεδομένα εισόδου, τους καθαρούς στόχους από τον χρήστη. Η ταξινόμηση εμφάνισε **υψηλό ποσοστό συνολικής ακρίβειας ταξινόμησης (§ VIII)**, κατά την επιλογή δύο ειδών ρυολιθικής λάβας (>50%), καθώς και ακόμα υψηλότερη για την προσπάθεια ταξινόμησης με μία ρυολιθική λάβα (57.7%) (Εικ. VII-10).

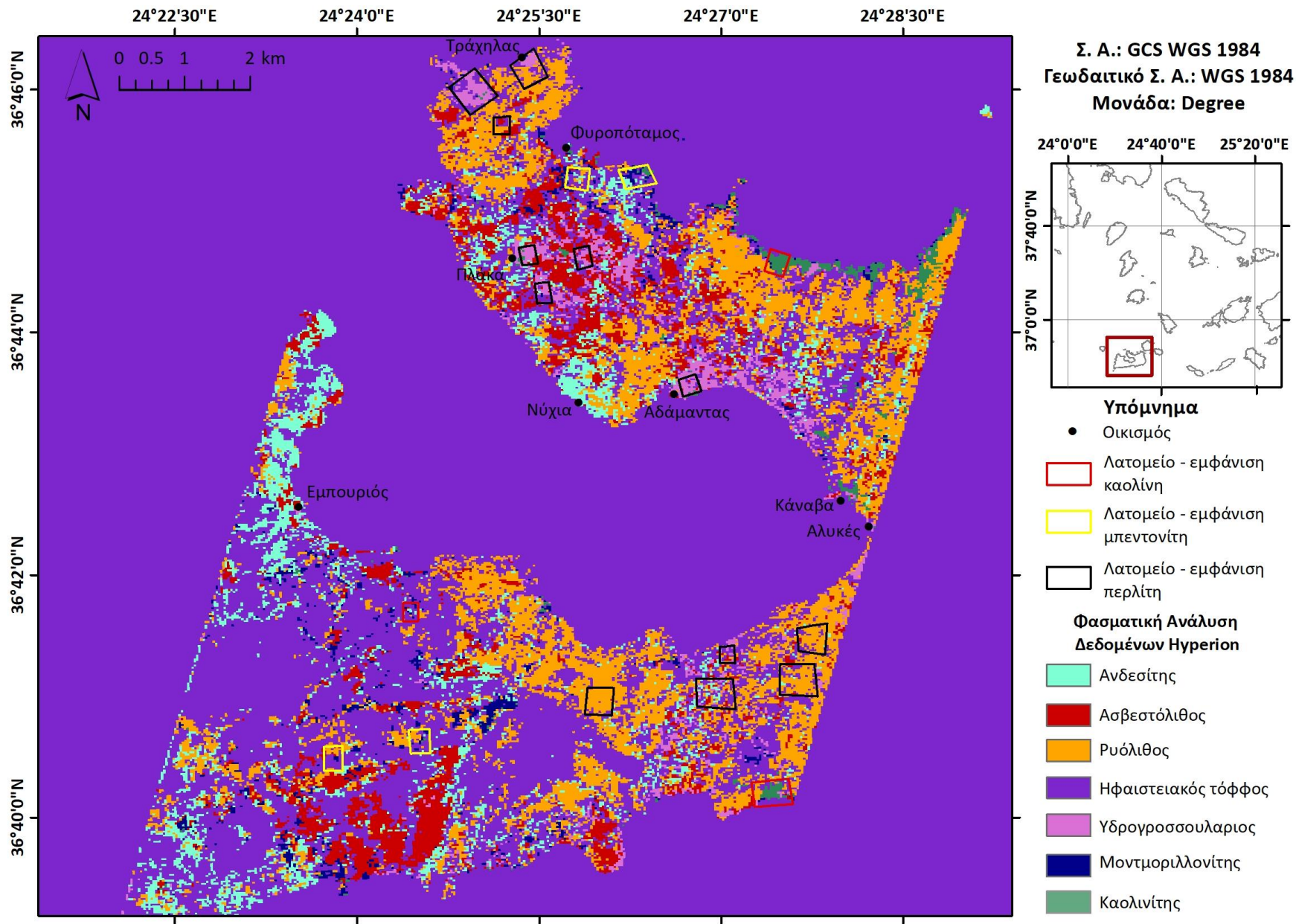
Σε συνέχεια της ταξινόμησης και για μείωση της συσχέτισης μεταξύ των endmembers, εισήχθησε η ήδη ταξινομημένη εικόνα από τη **μέθοδο MTMF**, στον αλγόριθμο Mahalanobis και κατηγοριοποιήθηκε (με δύο και με μία ρυολιθική λάβα). Τ' αποτελέσματα που προέκυψαν εμφανίζουν το **υψηλότερο ποσοστό ακρίβειας ταξινόμησης** (60% για επιλογή μίας ρυολιθικής λάβας), με αποτέλεσμα την καλύτερη δυνατή χαρτογράφηση του νησιού (Εικ. VII-11).

Ακολουθεί το χαρτογραφικό υλικό για τις ταξινομήσεις, χρησιμοποιώντας την απόσταση Mahalanobis.

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος



Εικ. VII-10: Ταξινόμηση Mahalanobis distance για την εικόνα με τα κανάλια χαμηλού συντελεστή συσχέτισης με χρήση καθαρών στόχων όπως ορίστηκαν από τον χρήστη



Εικ. VII-11: Ταξινόμηση Mahalanobis distance για την εικόνα από τη μέθοδο MTMF με χρήση καθαρών στόχων όπως ορίστηκαν από τον χρήστη

Συγκρίνοντας τ' αποτελέσματα που προέκυψαν, με τον **γεωλογικό χάρτη της Μήλου** (Εικ. VII-10, VII-11), παρατηρείται ότι:

- ✚ Για την **εικόνα των 20 καναλιών, χαμηλού συντελεστή συσχέτισης**: η χαρτογράφηση των ορυκτών πρώτων υλών, πραγματοποιήθηκε με μεγάλη επιτυχία. Επιπλέον, γεωλογικοί σχηματισμοί όπως ρυολιθικές και ανδρσιτικές λάβες, και ασβεστόλιθοι έχουν επίσης ταξινομηθεί μ' επιτυχία. Ωστόσο για τις προαναφερθείσες κατηγορίες, παρατηρούνται κάποιες αστοχίες (όπως για το σχηματισμό του ασβεστόλιθου στο βόρειο τμήμα του νησιού). Ακόμα, αστοχίες υπάρχουν και για τους ηφαιστειακούς τόφφους, λόγω μεγάλης, επιφανειακής εξάπλωσης. Το ίδιο παρατηρείται και για την ορυκτή πρώτη ύλη του περλίτη, η οποία επίσης εμφανίζεται σε μεγάλη έκταση, έπειτα από τη διαδικασία ταξινόμησης Mahalanobis distance.
- ✚ Για την **εικόνα από τη διαδικασία MTMF**: παρατηρείται ότι η πλειονότητα των σχηματισμών ταξινομήθηκε με μεγάλη επιτυχία. Εξάιρεση αποτελεί ο ασβεστολιθικός σχηματισμός, με εξάπλωση και στο βόρειο τμήμα του νησιού.

## VIII. ΠΟΙΟΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ & ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

---

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο τρόπος, σύμφωνα με τον οποίο έγινε η αξιολόγηση των προϊόντων που παρήχθησαν για κάθε μεθοδολογία. Είναι σημαντικό ακόμα ν' αναφερθεί ότι τα σημεία, με τα οποία πραγματοποιήθηκε ο ποιοτικός έλεγχος των μεθοδολογιών, παρουσιάζονται στην Εικόνα 2 (Παράρτημα Χαρτών).

Αναλυτικότερα, σε σχέση με τον ποιοτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε με τους εξής, δύο τρόπους:

- ✚ Κατασκευή των πινάκων της **συνολικής ακρίβειας της ταξινόμησης (overall accuracy)** και των πινάκων error of **omission – comission**
- ✚ **Οπτικός έλεγχος** των αποτελεσμάτων

**Αναφορικά με τους πίνακες συνολικής ακρίβειας**, κατασκευάστηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε το άθροισμα των ποσοστών για κάθε κατηγορία από την οποία ταξινομήθηκαν οι επιθυμητές κατηγορίες, να είναι ίσο με το 100%. Η συνολική ακρίβεια υπολογίζεται αθροίζοντας τον αριθμό των σωστά ταξινομημένων τιμών και διαιρώντας με τον συνολικό αριθμό των τιμών που ελέγχονται.

Τα σφάλματα στις ταξινομήσεις, προκύπτουν κάθε φορά που τα εικονοστοιχεία που θα έπρεπε να έχουν αναγνωριστεί ότι ανήκουν σε μια συγκεκριμένη κλάση, δεν αναγνωρίστηκαν ως παρόντα, με αποτέλεσμα να ταξινομηθούν σε διαφορετική κλάση (**omission error**), αλλά και κάθε φορά που τα εικονοστοιχεία που σχετίζονται με μια τάξη είναι εσφαλμένα αναγνωρισμένα ως άλλες κλάσεις (**comission error**). Η ακρίβεια χαρτογράφησης για κάθε κλάση αναφέρεται ως ο αριθμός των σωστά ταυτοποιημένων εικονοστοιχείων στο σύνολο της εμφανιζόμενης περιοχής διαιρούμενος με αυτόν τον αριθμό μαζί με τα pixel omission-comission errors (Faculty of Biology, 1999).

Οι παραπάνω μεταβλητές, προέκυψαν χρησιμοποιώντας το **confusion matrix** για κάθε προσπάθεια ταξινόμησης. Τα **commission** και **omission errors** είναι ένας τρόπος για την καταμέτρηση των true negatives και false positives, με την διαγώνιο να συμπεριλαμβάνει και στις δύο περιπτώσεις σφαλμάτων, τις τιμές των εικονοστοιχείων που ταξινομήθηκαν σωστά.

Τέλος η **μεταβλητή k**, είναι το μέτρο που δηλώνει τη συμφωνία μεταξύ της ταξινόμησης και των σωστών τιμών. Ο υπολογισμός της γίνεται από τον τύπο (1):

$$k = \frac{N \sum_{i=1}^n m_{i,i} - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)} \quad (1)$$

Με **k**: συντελεστής kappa, **i**: αριθμός κλάσης, **N**: συνολικός αριθμός των ταξινομημένων τιμών, σε σχέση με τις αληθείς τιμές, **m<sub>i,i</sub>**: αριθμός τιμών που ανήκουν κι έχουν ταξινομηθεί στην αληθή κλάση **i** - τιμές κατά μήκος της διαγωνίου, **C<sub>i</sub>**: ο συνολικός αριθμός των προβλεπόμενων τιμών που ανήκουν στην κλάση **i** και ο **G<sub>i</sub>**: αριθμός αληθών τιμών που ανήκει στην κλάση **i** ([www.harrisgeospatial.com](http://www.harrisgeospatial.com)).

#### Spectral Feature Fitting (SFF)

Όπως προαναφέρθηκε στο § VI.2, η αξιολόγηση της SFF έγινε στο περιβάλλον του QGIS, με το εργαλείο **Raster stats**. Αναλυτικότερα, προέκυψαν τα **στατιστικά δεδομένα** για τις περιοχές ποιοτικού ελέγχου, παρέχοντας στατιστικά δεδομένα για τα σημεία (όπως η μέση τιμή, η μέγιστη και η ελάχιστη, η τυπική απόκλιση κ.ο.κ.), όπως προέκυψαν από τον **μέσο όρο των πολυγώνων** (βλ. Παράρτημα Πινάκων – Διαγραμμάτων).

Για την αξιολόγηση της **επιτυχίας του αλγόριθμου**, στις δύο προσπάθειες που έγιναν για **διαφορετικό αριθμό καναλιών**, επιλέχθηκε να αξιοποιηθεί η μέση τιμή των σημείων ελέγχου ποιότητας, ώστε να συγκριθούν οι fit images που δημιουργήθηκαν μέσω της μεθοδολογίας της SFF.

#### 1. Αρχική εικόνα (27 κανάλια)/καθαροί στόχοι (χρήστης):

Παρατηρήθηκε ότι για τις fit images που δημιουργήθηκαν έπειτα από την SFF για τα κανάλια, με μήκος κύματος μεγαλύτερο από τα 2,000 nm, τα μέγιστα ποσοστά αφθονίας υπολογίζονται για τα σημεία ελέγχου όπου επικρατούν οι σχηματισμοί των ρυόλιθων. Αντίθετα, για τους υπόλοιπους καθαρούς στόχους, διακρίνονται δύο εύρη τιμών (5-10% και 10-20%), στα οποία τα ποσοστά αφθονίας των υλικών/στόχων αντιστοιχούν σε πολύ χαμηλές τιμές (Πίνακας VIII-1), με τα χαμηλά ποσοστά αφθονίας να δείχνουν την μειωμένη ακρίβεια των ποσοστών αφθονίας για τα 27 κανάλια.

#### 2. Αρχική εικόνα (11 κανάλια)/καθαροί στόχοι (χρήστης):

Σύμφωνα με τον ποιοτικό έλεγχο που έγινε μέσω των στατιστικών στοιχείων των πολυγώνων που πάρθηκαν ως σημεία ελέγχου, η επιλογή των 11 καναλιών, έχει καλύτερα αποτελέσματα, σε σχέση τ' αποτελέσματα της SFF με τα 27 κανάλια. Όπως φαίνεται στον Πίνακα VIII-2, υπάρχουν υψηλά ποσοστά αφθονίας για τις διαφορετικές κατηγορίες των ορυκτών και των

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος  
 γεωλογικών σχηματισμών (όχι υψηλά ποσοστά μόνο για τη μία κατηγορία), γεγονός βοηθητικό στη δημιουργία των χαρτών αφθονίας, μέσω της SFF.

Ωστόσο, αυτό που παρατηρείται και στις δύο ταξινομήσεις με τον αλγόριθμο SFF είναι τα **χαμηλά ποσοστά**, συγκρινόμενα με το επιθυμητό 100%, για τα σημεία ποιοτικού ελέγχου.

Πίνακας VIII-1: Αλγόριθμος SFF για τα 27 κανάλια (>2,000 nm) με χρήση καθαρών στόχων από τον χρήστη.

| Κατηγορία    | Περλ.        | Μπεντ.       | Καολ.        | Ρυόλ. 1      | Ρυόλ. 2      | Ρυόλ. 1,2    | Ανδειςίτης   | Ηφ. Τόφφος   | Ασβεστόλιθος |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Περλ.        | 16.43        | 17.71        | 15.53        | 8.25         | 10.03        | 10.86        | 10.36        | 10.25        | 10.81        |
| Μπεντ.       | 13.08        | 15.47        | 14.34        | 9.94         | 8.49         | 9.28         | 9.44         | 10.83        | 9.13         |
| Καολ.        | 15.78        | 16.65        | 19.10        | 8.38         | 9.94         | 9.59         | 9.96         | 9.78         | 10.60        |
| Ρυόλ. 1      | 5.82         | 5.27         | 5.71         | 10.35        | 16.39        | 15.26        | 14.55        | 11.00        | 15.65        |
| Ρυόλ. 2      | 7.20         | 5.49         | 5.85         | 11.59        | 15.26        | 14.59        | 14.17        | 11.00        | 14.84        |
| Ρυόλ. 1,2    | <b>26.16</b> | <b>26.86</b> | <b>26.39</b> | <b>24.90</b> | <b>21.84</b> | <b>25.66</b> | <b>27.52</b> | <b>28.77</b> | <b>23.45</b> |
| Ανδειςίτης   | 14.17        | 11.97        | 13.52        | 12.27        | 8.42         | 9.62         | 9.18         | 11.71        | 9.15         |
| Ηφ. Τόφφος   | 11.65        | 13.22        | 12.63        | 9.54         | 10.53        | 10.10        | 10.77        | 10.89        | 10.67        |
| Ασβεστόλιθος | 7.20         | 5.49         | 5.85         | 11.59        | 15.26        | 14.59        | 14.17        | 11.00        | 14.84        |

Πίνακας VIII-2: Αλγόριθμος SFF για τα 11 κανάλια (<1,000 nm) με χρήση καθαρών στόχων από τον χρήστη.

| Κατηγορία    | Περλ.       | Μπεντ.      | Καολ.       | Ρυόλ. 1     | Ρυόλ. 2     | Ρυόλ. 1,2   | Ανδειςίτης  | Ηφ. Τόφφος  | Ασβεστόλιθος |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Περλ.        | <b>23.4</b> | 15.7        | <b>24.4</b> | 6.7         | 8.1         | 8.2         | 15.4        | 16.3        | 8.0          |
| Μπεντ.       | 21.2        | 18.3        | 16.4        | 7.1         | 5.7         | 6.8         | 7.5         | 9.5         | 6.0          |
| Καολ.        | 15.2        | 9.9         | 21.9        | 9.2         | 7.2         | 8.9         | 20.7        | 11.2        | 8.6          |
| Ρυόλ. 1      | 9.2         | 13.2        | 6.2         | <b>36.2</b> | 27.4        | <b>33.1</b> | 22.8        | 23.7        | <b>25.1</b>  |
| Ρυόλ. 2      | 9.9         | 13.1        | 6.9         | 24.2        | 27.4        | 26.5        | 14.1        | 25.1        | 20.9         |
| Ρυόλ. 1,2    | 10.0        | 13.5        | 6.8         | 30.7        | <b>27.7</b> | 30.3        | 19.9        | 25.7        | 23.9         |
| Ανδειςίτης   | 10.6        | 14.7        | 7.0         | 33.9        | 24.9        | 30.9        | <b>28.8</b> | 23.8        | 26.2         |
| Ηφ. Τόφφος   | 16.6        | <b>20.2</b> | 11.4        | 16.6        | 17.2        | 18.1        | 13.4        | <b>26.7</b> | 15.6         |
| Ασβεστόλιθος | 16.0        | 17.1        | 11.9        | 12.7        | 11.8        | 13.1        | 24.6        | 17.9        | 14.9         |





### **Mixture Tuned Matched Filtering και Linear Spectral Unmixing**

Για την αξιολόγηση των προϊόντων της MTMF χρησιμοποιήθηκε ο ίδιος τρόπος ποιοτικού ελέγχου με την SFF. Οι πίνακες (Πίνακας VIII-3) αναπαριστούν τα στατιστικά δεδομένα, όπως προέκυψαν από τον μέσο όρο των πολυγώνων (βλ. Παράρτημα Πινάκων – Διαγραμμάτων). Αναφορικά με την MTMF, τα **ποσοστά αφθονίας** εμφανίζουν **υψηλές τιμές**, μέσω της χρήσης και των **δύο τύπων καθαρών στόχων**. Το γεγονός αυτό είναι θετικό για τη διαδικασία ταξινόμησης, καθώς είναι ένας δείκτης του ότι υλοποιήθηκε με επιτυχία.

#### **1. Μετασηματισμένη εικόνα /καθαροί στόχοι (χρήστης):**

Για την πρώτη προσπάθεια, με χρήση των καθαρών στόχων από τον χρήστη, προέκυψαν οι τιμές αφθονίας που δίνονται στον πρώτο πίνακα (Πίνακας VIII-3). Παρατηρούνται γενικά υψηλές τιμές αφθονίας για τα endmembers και πολύ υψηλές τιμές (μέχρι και 77%) για το endmember του ρυόλιθου 2.

#### **2. Μετασηματισμένη εικόνα /καθαροί στόχοι (αυτόματη εξαγωγή):**

Κατά τη δεύτερη προσπάθεια με χρήση των καθαρών στόχων από αυτόματη εξαγωγή, παρατηρούνται υψηλά ποσοστά αφθονίας, κυρίως στο endmember του καολίνης, όπως φαίνεται στον δεύτερο πίνακα (Πίνακας VIII-3). Ωστόσο, οι τιμές αφθονίας στα πολύγωνα των περιοχών ελέγχου, εμφανίζουν τιμές μεγαλύτερες του 50%, στις περισσότερες περιπτώσεις.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων, προκύπτει ότι η **MTMF είναι πιο ακριβής και βοηθητική** για τη δημιουργία χαρτών αφθονίας στην περίπτωση χρήσης των καθαρών στόχων, όπως προέκυψαν από την αυτόματη εξαγωγή, λόγω του ότι εμφανίζονται **υψηλά ποσοστά για τα περισσότερα από τα endmembers**, σε αντίθεση με τη μέθοδο MTMF, με χρήση καθαρών στόχων όπως ορίστηκαν από τον χρήστη, κατά την οποία παρατηρούνται υψηλά ποσοστά κυρίως για ένα από τα endmembers.

Πίνακας VIII-3: Αλγόριθμος MTMF για καθαρούς στόχους από τον χρήστη(πρώτος πίνακας) και μέσω αυτόματης εξαγωγής (δεύτερος πίνακας)

| Κατηγορία    | Περλ.       | Μπεντ.      | Καολ.       | Ρυόλ. 1     | Ρυόλ. 2     | Ανδεσίτης   | Ηφ. τόφφος  | Ασβεστόλιθος |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Περλ.        | 0.32        | 0.17        | <b>0.45</b> | <b>0.46</b> | 0.7         | 0.32        | 0.41        | <b>0.5</b>   |
| Μπεντ.       | 0.38        | 0.28        | 0.44        | 0.45        | <b>0.77</b> | 0.26        | 0.35        | 0.31         |
| Καολ.        | <b>0.51</b> | <b>0.42</b> | 0.42        | 0.46        | 0.72        | 0.4         | 0.42        | 0.37         |
| Ρυόλ. 1      | 0.33        | 0.14        | 0.4         | 0.45        | 0.66        | 0.29        | <b>0.44</b> | 0.3          |
| Ρυόλ. 2      | 0.31        | 0.16        | 0.4         | 0.44        | 0.67        | 0.32        | 0.42        | 0.35         |
| Ρυόλ. 1,2    | 0.32        | 0.15        | 0.42        | 0.44        | 0.67        | 0.31        | <b>0.44</b> | 0.34         |
| Ανδεσίτης    | 0.39        | 0.17        | <b>0.45</b> | <b>0.46</b> | 0.65        | 0.27        | 0.41        | 0.37         |
| Ηφ. Τόφφος   | 0.36        | 0.17        | 0.4         | <b>0.46</b> | 0.67        | 0.31        | 0.43        | 0.33         |
| Ασβεστόλιθος | 0.38        | 0.16        | 0.43        | 0.4         | 0.69        | <b>0.34</b> | 0.37        | 0.39         |

| Κατηγορία    | Περλ.       | Μπεντ.      | Καολ.       | Ρυόλ. 1     | Ρυόλ. 2    | Ανδεσίτης   | Ηφ. τόφφος  | Ασβεστόλιθος |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|--------------|
| Περλ.        | 0.49        | 0.49        | 0.17        | 0.5         | 0.35       | 0.51        | 0.5         | 0.5          |
| Μπεντ.       | 0.47        | 0.47        | 0.28        | 0.45        | 0.37       | 0.45        | 0.46        | 0.46         |
| Καολ.        | <b>0.62</b> | <b>0.62</b> | <b>0.42</b> | <b>0.62</b> | <b>0.5</b> | 0.6         | <b>0.62</b> | <b>0.62</b>  |
| Ρυόλ. 1      | 0.53        | 0.53        | 0.14        | 0.54        | 0.31       | 0.53        | 0.54        | 0.54         |
| Ρυόλ. 2      | 0.5         | 0.5         | 0.16        | 0.51        | 0.39       | 0.51        | 0.52        | 0.52         |
| Ρυόλ. 1,2    | 0.54        | 0.54        | 0.17        | 0.55        | 0.37       | 0.55        | 0.56        | 0.56         |
| Ανδεσίτης    | 0.59        | 0.59        | 0.17        | 0.61        | 0.3        | <b>0.61</b> | 0.61        | 0.61         |
| Ηφ. Τόφφος   | 0.53        | 0.53        | 0.15        | 0.54        | 0.34       | 0.54        | 0.54        | 0.54         |
| Ασβεστόλιθος | 0.51        | 0.51        | 0.16        | 0.52        | 0.33       | 0.52        | 0.52        | 0.52         |

 **Spectral Angle Mapper**

**1. Αρχική εικόνα/φασματικές υπογραφές:**

- Η συνολική ακρίβεια εκτιμήθηκε στο **42.78%** (**169/395** εικονοστοιχεία), με τη μεταβλητή συμφωνίας **k**, να υπολογίζεται **0.3024**.
- Η ακρίβεια της ταξινόμησης είναι μικρή, ωστόσο οι κατηγορίες του περλίτη (υδρογροσσουλάριου) και του μπεντονίτη (μοντμοριλλονίτης), ταξινομούνται καλά.
- Οι κατηγορίες του μοντμοριλλονίτη, του ρυόλιθου και του ασβεστόλιθου εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια ταξινόμησης, λόγω της καλής αντιστοιχίας της φασματικής υπογραφής, με το φάσμα της εικόνας.
- Ο καολινίτης, ο ηφαιστειακός τόφφος και ο ανδεσίτης, δεν ταξινομήθηκαν σωστά κυρίως λόγω της ύπαρξης καολινιτιωμένων τόφφων στο νησί, και λόγω του δύσκολου διαχωρισμού μεταξύ ανδεσίτη και ρυόλιθου, ακόμα και μακροσκοπικά στην ύπαιθρο, λόγω παρεμφερών ορυκτολογικών χαρακτηριστικών.

*Πίνακας VIII-4 Αλγόριθμος SAM - αρχική εικόνα, ταξινόμηση με χρήση φασματικών υπογραφών*

| Κλάση        | Υδρο.        | Μοντμ.       | Καολ.  | Ρυόλ.        | Ανδεσίτης    | Ηφ. τόφφος  | Ασβεστόλιθος | Άθροισμα (%) |
|--------------|--------------|--------------|--------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| Αταξινόμητα  | --           | --           | --     | --           | 6.00         | --          | --           | 0.76         |
| Υδρο.        | <b>53.33</b> | 4.00         | --     | 9.00         | 10.00        | 28.00       | 2.00         | 17.22        |
| Μοντμ.       | --           | <b>76.00</b> | 28.00  | --           | 6.00         | 3.00        | --           | 8.10         |
| Καολ.        | --           | --           | --     | 3.00         | --           | 3.00        | --           | 1.52         |
| Ρυόλ.        | 22.22        | --           | 8.00   | <b>71.00</b> | 60.00        | 51.00       | 10.00        | 42.78        |
| Ανδεσίτης    | 2.22         | --           | 8.00   | 12.00        | <b>10.00</b> | 3.00        | --           | 5.82         |
| Ηφ. τόφφος   | --           | 20.00        | 56.00  | 1.00         | --           | <b>6.00</b> | --           | 6.58         |
| Ασβεστόλιθος | 22.22        | --           | --     | 4.00         | 8.00         | 6.00        | <b>88.00</b> | 17.22        |
| Άθροισμα     | 100.00       | 100.00       | 100.00 | 100.00       | 100.00       | 100.00      | 100.00       | 100.00       |

*Πίνακας VIII-5: Omission και commission errors*

| Κλάση        | Commission (%) | Omission (%) | Prod acc (%) | User acc (%) |
|--------------|----------------|--------------|--------------|--------------|
| Υδρο.        | 64.71          | 46.67        | 53.33        | 35.29        |
| Μοντμ.       | 40.63          | 24.00        | 76.00        | 59.38        |
| Καολ.        | 100.00         | 100.00       | 0.00         | 0.00         |
| Ρυόλ.        | 57.99          | 29.00        | 71.00        | 42.01        |
| Ανδεσίτης    | 78.26          | 90.00        | 10.00        | 21.74        |
| Ηφ. τόφφος   | 76.92          | 94.00        | 6.00         | 23.08        |
| Ασβεστόλιθος | <b>35.29</b>   | <b>12.00</b> | 88.00        | 64.71        |

## 2. Αρχική εικόνα/καθαροί στόχοι (χρήστης):

- Η συνολική ακρίβεια είναι υψηλότερη, δείχνοντας την καλύτερη απόδοση του αλγόριθμου, χρησιμοποιώντας περιοχές για τις οποίες έχει γίνει οπτικός έλεγχος από το χρήστη. Η ακρίβεια εκτιμήθηκε στο **52.91% (209/395 εικονοστοιχεία)**, για  $k=0.4235$ .
- Τα μεγαλύτερα ποσοστά επιτυχίας σημειώθηκαν στις κατηγορίες του μοντμοριλλονίτη (80%), καθώς και του ηφαιστειακού τόφφου (59%), και του ρυόλιθου (57%).

Σε αντίθεση με την πρώτη προσπάθεια, στην οποία ο καολίνης δεν ανιχνεύθηκε, στην δεύτερη περίπτωση ανιχνεύτηκαν ποσοστά και από τις τρεις κατηγορίες ορυκτών, συνεπώς και από τις θέσεις του καολίνη (28%).

Πίνακας VIII-6: Αλγόριθμος SAM - αρχική εικόνα, ταξινόμηση με χρήση καθαρών στόχων όπως ορίστηκαν από τον χρήστη.

| Κλάση        | Υδρο.        | Μοντμ.       | Καολ.        | Ρυόλ.        | Ανδεσίτης    | Ηφ. τόφφος   | Ασβεστόλιθος | Άθροισμα |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| Αταξινόμητα  | --           | --           | --           | --           | 6.00         | --           | --           | 0.76     |
| Υδρο.        | <b>44.44</b> | 8.00         | --           | --           | 2.00         | 6.00         | --           | 7.34     |
| Μοντμ.       | --           | <b>80.00</b> | 56.00        | --           | 4.00         | 1.00         | --           | 9.37     |
| Καολ.        | --           | 8.00         | <b>28.00</b> | --           | --           | 3.00         | --           | 3.04     |
| Ρυόλ.        | 2.22         | --           | 8.00         | <b>57.00</b> | 14.00        | 19.00        | --           | 21.77    |
| Ανδεσίτης    | --           | 4.00         | --           | 20.00        | <b>36.00</b> | 2.00         | 2.00         | 10.63    |
| Ηφ. τόφφος   | 51.11        | --           | --           | 12.00        | 12.00        | <b>59.00</b> | 42.00        | 30.63    |
| Ασβεστόλιθος | 2.22         | --           | 8.00         | 11.00        | 26.00        | 10.00        | <b>56.00</b> | 16.46    |
| Άθροισμα     | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00   |

Πίνακας VIII-7: Omission και commission errors

| Κλάση        | Commission (%) | Omission (%) | Prod. Acc. (%) | User Acc. (%) |
|--------------|----------------|--------------|----------------|---------------|
| Υδρο.        | 31.03          | 55.56        | 44.44          | 68.97         |
| Μοντμ.       | 45.95          | 20.00        | 80.00          | 54.05         |
| Καολ.        | 41.67          | 72.00        | 28.00          | 58.33         |
| Ρυόλ.        | 33.72          | 43.00        | 57.00          | 66.28         |
| Ανδεσίτης    | 57.14          | 64.00        | 36.00          | 42.86         |
| Ηφ. Τόφφος   | 51.24          | 41.00        | 59.00          | 48.76         |
| Ασβεστόλιθος | 56.92          | 44.00        | 56.00          | 43.08         |

### 3. Μετασηματισμένη εικόνα/καθαροί στόχοι (χρήστης):

- Η συνολική ακρίβεια εκτιμήθηκε **53.42%** (**211/395** εικονοστοιχεία), με το αντίστοιχο **k** να υπολογίζεται **0.4309**. Αποτελεί τη δεύτερη, καλύτερη προσπάθεια ταξινόμησης, με τον αλγόριθμο SAM.
- Οι περισσότερες κατηγορίες, εμφανίζουν ακρίβεια μεγαλύτερη του 50%. Εξαιρέση αποτελούν οι κατηγορίες του καολίνη (καολινίτης) και της ανδεσιτικής λάβας.
- Έχουν ανιχνευτεί και οι τρεις κατηγορίες ορυκτών, πρώτων υλών, με τον μοντμοριλλονίτη να εμφανίζει το μεγαλύτερο ποσοστό ανιχνευσιμότητας (80%).
- Αναφορικά με τα πετρώματα, η καλύτερη ανίχνευση πραγματοποιήθηκε για τους ηφαιστειακούς τόφφους (59%).

Πίνακας VIII-8: Αλγόριθμος SAM – μετασηματισμένη εικόνα, ταξινόμηση με χρήση καθαρών στόχων από τον χρήστη.

| Κλάση        | Υδρο.        | Μοντμ.       | Καολ.        | Ρυόλ.        | Ανδεσίτης    | Ηφ. τόφφος   | Ασβεστόλιθος | Άθροισμα |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------|
| Αταξινόμητα  | --           | --           | --           | --           | 6.00         | --           | --           | 0.76     |
| Υδρο.        | <b>53.33</b> | 8.00         | --           | --           | 2.00         | 6.00         | 2.00         | 8.61     |
| Μοντμ.       | --           | <b>80.00</b> | 64.00        | --           | 4.00         | 1.00         | --           | 9.87     |
| Καολ.        | --           | 8.00         | <b>20.00</b> | --           | --           | 3.00         | --           | 2.53     |
| Ρυόλ.        | 2.22         | --           | 8.00         | <b>57.00</b> | 14.00        | 19.00        | --           | 21.77    |
| Ανδεσίτης    | --           | 4.00         | --           | 20.00        | <b>36.00</b> | 2.00         | 2.00         | 10.63    |
| Ηφ. τόφφος   | 42.22        | --           | --           | 12.00        | 12.00        | <b>59.00</b> | 40.00        | 29.37    |
| Ασβεστόλιθος | 2.22         | 0.00         | --           | 11.00        | 26.00        | 10.00        | <b>56.00</b> | 16.46    |
| Άθροισμα     | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00       | 100.00   |

Πίνακας VIII-9 Omission και commission errors

| Κλάση        | Commission (%) | Omission (%) | Prod. Acc. (%) | User Acc. (%) |
|--------------|----------------|--------------|----------------|---------------|
| Υδρο.        | 29.41          | 46.67        | 53.33          | 70.59         |
| Μοντμ.       | 48.72          | 20.00        | 80.00          | 51.28         |
| Καολ.        | 50.00          | 80.00        | 20.00          | 50.00         |
| Ρυόλ.        | 33.72          | 43.00        | 57.00          | 66.28         |
| Ανδεσίτης    | 57.14          | 64.00        | 36.00          | 42.86         |
| Ηφ. τόφφος   | 49.14          | 41.00        | 59.00          | 50.86         |
| Ασβεστόλιθος | 56.92          | 44.00        | 56.00          | 43.08         |

#### 4. Μετασηματισμένη εικόνα/καθαροί στόχοι (αυτόματη εξαγωγή):

- Η συγκεκριμένη προσπάθεια είχε τα καλύτερα, δυνατά αποτελέσματα, από την εφαρμογή του αλγόριθμου SAM, δίνοντας συνολική ακρίβεια **54.94%** (**217/395** εικονοστοιχεία) και με το **k** να είναι **0.4495**.
- Η ανίχνευση ορυκτών πρώτων υλών πραγματοποιήθηκε και για τις 3 κατηγορίες, με τον περλίτη (υδρογροσσουλάριο) ν' ανιχνεύεται με μεγάλη επιτυχία (93%). Αναφορικά με τα πετρώματα του νησιού, η ανίχνευση του ρυόλιθου χαρακτηρίστηκε επίσης από μεγάλη ακρίβεια (77%).

Πίνακας VIII-10: Αλγόριθμος SAM – μετασηματισμένη εικόνα, ταξινόμηση με χρήση καθαρών στόχων από την αυτόματη εξαγωγή.

| Κλάση        | Υδρο.  | Μοντμ. | Καολ.  | Ρυόλ.  | Ανδεσίτης | Ηφ.    | Ασβεστόλιθος | Άθροισμα |
|--------------|--------|--------|--------|--------|-----------|--------|--------------|----------|
| Αταξινόμητα  | --     | --     | --     | --     | 6.00      | --     | --           | 0.76     |
| Υδρο.        | 93.33  | 48.00  | 16.00  | 2.00   | 4.00      | 22.00  | 6.00         | 22.03    |
| Μοντμ.       | --     | 48.00  | 36.00  | --     | 10.00     | 1.00   | --           | 6.84     |
| Καολ.        | 2.22   | --     | 32.00  | --     | --        | --     | 16.00        | 4.30     |
| Ρυόλ.        | --     | 4.00   | 4.00   | 77.00  | 38.00     | 25.00  | --           | 31.14    |
| Ανδεσίτης    | --     | --     | --     | 1.00   | 8.00      | 2.00   | 8.00         | 2.78     |
| Ηφ. τόφφος   | 4.44   | --     | 12.00  | 20.00  | 34.00     | 50.00  | 24.00        | 26.33    |
| Ασβεστόλιθος | --     | --     | --     | --     | --        | --     | 46.00        | 5.82     |
| Άθροισμα     | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00    | 100.00 | 100.00       | 100.00   |

Πίνακας VIII-11: Omission και commission errors

| Κλάση        | Commission (%) | Omission (%) | Prod. Acc. (%) | User Acc. (%) |
|--------------|----------------|--------------|----------------|---------------|
| Υδρο.        | 51.72          | 6.67         | 93.33          | 48.28         |
| Μοντμ.       | 55.56          | 52.00        | 48.00          | 44.44         |
| Καολ.        | 52.94          | 68.00        | 32.00          | 47.06         |
| Ρυόλ.        | 37.40          | 23.00        | 77.00          | 62.60         |
| Ανδεσίτης    | 63.64          | 92.00        | 8.00           | 36.36         |
| Ηφ. τόφφος   | 51.92          | 50.00        | 50.00          | 48.08         |
| Ασβεστόλιθος | 0.00           | 54.00        | 46.00          | 100.00        |

## ΙΧ. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η νήσος της Μήλου **εμφανίζει έντονο, γεωλογικό ενδιαφέρον, σε σχέση με τις Ορυκτές Πρώτες Ύλες**. Η διαθεσιμότητα πληροφοριών σε σχέση με τις θέσεις ενδιαφέροντος καθώς και η μειωμένη, εξάπλωση της βλάστησης, αποτελούν βοηθητικά χαρακτηριστικά για την ανάπτυξη των μεθοδολογιών τηλεπισκόπησης στο νησί.

Εφαρμόζοντας σε υπερφασματικές εικόνες Hyperion τις μεθοδολογίες του φασματικού διαχωρισμού, όπως και ταξινομήσεις ολόκληρων εικονοστοιχείων, για την χαρτογράφηση των πετρωμάτων και την ανίχνευση των ΟΠΥ, τα συμπεράσματα τα οποία προέκυψαν είναι τ' ακόλουθα:

- ✚ **Η μείωση των κλάσεων, όπως των ρυολιθικών λαβών, καθώς και των ηφαιστειακών τόφφων** αυξάνει την ακρίβεια των μεθοδολογιών επιλογής.
- ✚ **Για τη μέθοδο Spectral Feature Fitting (SFF):** καλύτερα αποτελέσματα εμφανίζονται όταν γίνεται επιλογή μικρότερου εύρους από τα διαθέσιμα μήκη κύματος. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν τα 27 κανάλια, για μήκος κύματος μεγαλύτερο των 2,000 nm και τα 11 κανάλια για μήκος κύματος μικρότερο των 1,000 nm. **Μεγαλύτερη ακρίβεια** εμφάνισαν τ' αποτελέσματα για τα **11 κανάλια**, κυρίως λόγω της **εμφάνισης θορύβου στα 27 κανάλια**, γεγονός μη βοηθητικό για την εφαρμογή της SFF.
- ✚ **Για τη μέθοδο Minimum Tuned Matched Filtering (MTMF):** Η χρήση της μεταβλητής **infeasibility** είναι βοηθητική για τη διαδικασία της MTMF. Μεγαλύτερη ακρίβεια παρατηρήθηκε όταν εφαρμόστηκε η μέθοδος, χρησιμοποιώντας τους καθαρούς στόχους από την **αυτόματη εξαγωγή**. Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με το ότι πριν την εφαρμογή MTMF, έγινε **μετασχηματισμός με την Minimum Noise Fraction (MNF)**. Επομένως, εφόσον ακολουθείται η **διαδικασία του Wizard**, η χρήση των καθαρών στόχων από αυτόματη εξαγωγή, δίνει καλύτερα αποτελέσματα.
- ✚ **Συγκρίνοντας τις μεθόδους SFF και MTMF:** Ο MTMF δίνει **μεγαλύτερα ποσοστά αφθονίας** και είναι **πιο αξιόπιστος** για κλασματικές καλύψεις των καθαρών στόχων, σε σχέση με τον αλγόριθμο SFF.
- ✚ **Για την ταξινόμηση Spectral Angle Mapper (SAM):** διαπιστώθηκε ότι η αυτοματοποιημένη διαδικασία εξαγωγής καθαρών στόχων για την εικόνα από MNF, δίνει καλύτερα αποτελέσματα (Overall accuracy = 54.9%), και η επόμενη καλύτερη ταξινόμηση έγινε με καθαρούς στόχους όπως ορίστηκαν από το χρήστη, στην οποία ο χρήστης πραγματοποιεί οπτικό έλεγχο των περιοχών (Overall accuracy = 52.9%).
- ✚ **Συγκρίνοντας τις μεθόδους SAM και Mahalanobis distance:** Η ταξινόμηση **Mahalanobis distance** εμφάνισε **καλύτερα αποτελέσματα** συγκριτικά με την SAM. Πιο συγκεκριμένα, εμφανίζει τη **μεγαλύτερη ακρίβεια ταξινόμησης** για την **εύρεση Ορυκτών Πρώτων Υλών**, χρησιμοποιώντας την εικόνα **χαμηλού συντελεστή συσχέτισης**, των 20 καναλιών, και τη **μεγαλύτερη ακρίβεια ταξινόμησης** για την **Χαρτογράφηση των πετρωμάτων** του νησιού, με χρήση της **μετασχηματισμένης εικόνας**.
- ✚ Δεν ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, αλλά ο **συνδυασμός** των δορυφορικών δεδομένων με επίγεια σημεία ελέγχου και περιοχών εκπαίδευσης από την **ύπαιθρο (in-situ)**, θα έδινε καλύτερα αποτελέσματα, στους αλγόριθμους που χρησιμοποιήθηκαν για την ταξινόμηση της εικόνας, τη δημιουργία χαρτών αφθονίας κ.ο.κ. Δεδομένου αυτού του περιορισμού (δηλ. της μη ύπαρξης in-situ δεδομένων) τα παραπάνω αποτελέσματα χαρτογράφησης ΟΠΥ κρίνονται πολύ ενθαρρυντικά.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

Γκάνας, Α., & Ferrier, G. (2002). Ψηφιακή ανάλυση υπερφασματικών δεδομένων DAIS για την χαρτογράφηση εμφανίσεων διαγνωστικών αργιλικών ορυκτών επιθερμικού χρυσού στη νήσο Μήλο. Πανελλήνια και Διεθνή Γεωγραφικά Συνέδρια, Συλλογή Πρακτικών, 2, 118-126.

Δίκτυο Αειφόρων Νήσων (ΔΑΦΝΗ) (2006), Μήλος, Διαθέσιμο στο: [www.itia.ntua.gr/dafni](http://www.itia.ntua.gr/dafni). Τελευταία επίσκεψη:

Επιχειρησιακό Σχέδιο Αγροτικής Ανάπτυξης 2014 – 2020, Μήλος.

**Καραθανάση, Β. (χ.χ.).** Spectral unmixing. Φασματικός διαχωρισμός υπερφασματικών εικόνων. Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Κατερινόπουλος, Α. & Σταματάκης, Μ. (1995). "Εφαρμοσμένη ΟρυκτολογίαΠετρολογία: Τα Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα και οι Χρήσεις τους", Τμήμα Γεωλογίας, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών.

Κολοκούσης Π. Θ. (2008). Ανάπτυξη Ολοκληρωμένου Συστήματος Υπερφασματικών και Θερμικών Ψηφιακών Τηλεπισκοπικών δεκτών για την Ανίχνευση Παρακτίων και Υποθαλασσιών Πηγών Νερού. Διδακτορική διατριβή , Αθήνα ΕΜΠ. (σελ. 61-68)

Διαθέσιμο στο: Τελευταία επίσκεψη:

Μηλιαρέσης, Γ. Χ. (2003). Φωτοερμηνεία – τηλεπισκόπηση. Αθήνα: Εκδόσεις Ίων.

Οικονομόπουλος Ι., 1998, 'Η μεταλλευτική ιστορία της Μήλου': Ομιλία από τα εγκαίνια του Μεταλλευτικού Μουσείου Μήλου στις 23 Μαΐου 1998, υπό την αιγίδα της S&B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε.

Παρχαρίδης, Ι. 2015. Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. κεφ 4. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/3964>

Παρχαρίδης, Ι. Α., Γκάρτζος, Ε. Γ., & Ψωμιάδης, Ε. (2001). Evaluation of remote sensing methods for the detection of hydrothermal alteration zones in Milos island (Greece). Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 34(5), 2047-2054.

Πασσά, Κ. Σ. (2007). *Βιομηχανικά ορυκτά για περιβαλλοντικές χρήσεις: μελέτη φυσικών, χημικών και ορυκτολογικών ιδιοτήτων του Περλίτη της νήσου Μήλου* (Doctoral dissertation).

Περάκης, Κ., Μωυσιάδης, Α., Φαρασλής, Ι., 2015. Η τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <https://repository.kallipos.gr/handle/11419/3960>

Ρούλια Μ., 1996, "Περλίτης: ένα βιομηχανικό ορυκτό κάτω από το βλέμμα ενός χημικού", Χημικά Χρονικά, τευχ.5, σελ.458-460.

Σκαρπέλης Ν. (2006). Εισαγωγή στην Κοιτασματολογία. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τομές Οικονομικής Γεωλογίας και Γεωχημείας.



Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

Azizi, H., Tarverdi, M. A., & Akbarpour, A. (2010). Extraction of hydrothermal alterations from ASTER SWIR data from east Zanjan, northern Iran. *Advances in Space Research*, 46(1), 99-109.

Bhattacharya, S., Majumdar, T. J., Rajawat, A. S., Panigrahi, M. K., & Das, P. R. (2012). Utilization of Hyperion data over Dongargarh, India, for mapping altered/weathered and clay minerals along with field spectral measurements. *International journal of remote sensing*, 33(17), 5438-5450.

Boardman, J. W. (1998). Leveraging the high dimensionality of AVIRIS data for improved sub-pixel target unmixing and rejection of false positives: mixture tuned matched filtering. In *Summaries of the seventh JPL Airborne Geoscience Workshop, JPL Publication, 1998* (Vol. 97, No. 1, pp. 55-56). NASA Jet Propulsion Laboratory.

Boardman, J. W., and Kruse, F. A. (1994). Automated spectral analysis: a geological example using AVIRIS data, north Grapevine Mountains, Nevada: in *Proceedings, ERIM Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, MI, pp. I-407 - I-418.

Borengasser, M., Hungate, W. S., & Watkins, R. (2007). *Hyperspectral remote sensing: Principles and Applications*. CRC press.

Ceamanos, X., & Valero, S. (2016). Processing hyperspectral images. In *Optical Remote Sensing of Land Surface* (pp. 163-200). Elsevier.

Christidis, G., & Dunham, A. C. (1993). Compositional variations in smectites: Part I. Alteration of intermediate volcanic rocks. A case study from Milos Island, Greece. *Clay Minerals*, 28(2), 255-273.

Christidis, G. E., & Huff, W. D. (2009). Geological aspects and genesis of bentonites. *Elements*, 5(2), 93-98.

Clark, R.N., Swayze, G., Boardman, J., & Kruse, F. (1993). Comparison of Three methods for Material Identification and mapping. In *JPL, Summaries of the 4th Annual JPL Airborne Geoscience Workshop. Volume 1: AVIRIS Workshop* (pp. 31–33). United States: JPL Publication.

Clark, R. N., Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, in *Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences*, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, p 3- 58, 1999.

Clark, R.N., Swayze, G.A., Gallagher, A., Gorelick, N., Kruse, F.A. (1991). Mapping with imaging spectrometer data using the complete band shape least-squares algorithm simultaneously fit to multiple spectral features from multiple materials. In: *Proceedings, 2nd Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) workshop*, JPL Publication, 94-54, pp. 176–187.

Clark, R.N. (1999). Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy, in *Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences*, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, p 3- 58.

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος  
Department of Land, Air and Water Resources (2011, Spring). ERS 186 lab manual. Davis, California. University of California, Davis. Retrieved from: <http://cstars.metro.ucdavis.edu>

ENVI (2009). Atmospheric Correction Module: QUAC and FLAASH User's Guide.

EO-1 Hyperion Vegetation Indices Tutorial. Διαθέσιμο στο: <https://bit.ly/2sfBvHl>. Τελευταία επίσκεψη:

European Space Agency. Διαθέσιμο στο: <https://www.esa.int/>. Τελευταία επίσκεψη:

Faculty of Biology (1999). Remote sensing lab manual. Davis, California. Latvijas Universitātes, Rīga. Retrieved from: <http://priede.bf.lu.lv/GIS/>

Ferencz, C., Bogнар, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarcsai, G., Timár, G., ... & Ferencz, O. E. (2004). Crop yield estimation by satellite remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 25(20), 4113-4149.

Ferrier, G., Naden, J., Ganas, A., Kemp, S., & Pope, R. (2016). Identification of multi-style hydrothermal alteration using integrated compositional and topographic remote sensing datasets. *Geosciences*, 6(3), 36.

Ferrier, G., Ganas, A., Pope, R., & Jo Miles, A. (2019). Prospectivity Mapping for Epithermal Deposits of Western Milos Using a Fuzzy Multi Criteria Evaluation Approach Parameterized by Airborne Hyperspectral Remote Sensing Data. *Geosciences*, 9(3), 116.

Friedman I., Long W. and Smith R.L., 1963, "Viscosity and water content of rhyolite glass", *J. Geophys. Res.*, v.68, p.6523–6535.

Folkman, M. A., Pearlman, J., Liao, L. B., & Jarecke, P. J. (2001). EO-1/Hyperion hyperspectral imager design, development, characterization, and calibration. In *Hyperspectral Remote Sensing of the Land and Atmosphere* (Vol. 4151, pp. 40-51). International Society for Optics and Photonics.

Fytikas, M., Innocenti, F., Kolios, N., Manetti, P., Mazzuoli, R., Poli, G., ... & Villari, L. (1986). Volcanology and petrology of volcanic products from the island of Milos and neighbouring islets. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 28(3-4), 297-317.

Fytikas, M., & Marinelli, G. (1976). *Geology and geothermics of the island of Milos (Greece)* (No. NP-22876). Institute of Geology and Mining Research, Athens (Greece); Pisa Univ. (Italy). Istituto di Mineralogia e Petrografia.

Gaffey, S. J. (1986). Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 microns); calcite, aragonite, and dolomite. *American Mineralogist*, 71(1-2), 151-162.

Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.

Gersman, R., Ben-Dor, E., Beyth, M., Avigad, D., Abraha, M., & Kibreab, A. (2008). Mapping of hydrothermally altered rocks by the EO-1 Hyperion sensor, Northern Danakil Depression, Eritrea. *International Journal of Remote Sensing*, 29(13), 3911-3936.

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., and Craig, M. D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 26, no. 1, p. 65-74.

Govil, H. (2016). Identification and mapping of hydrothermally altered minerals in parts of Delhi fold belt, Jaipur, India, through EO-1 Hyperion data. In *Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques and Applications VI* (Vol. 9880, p. 988015). International Society for Optics and Photonics.

GSP 216, Introduction to Remote Sensing. Διαθέσιμο στο: <https://bit.ly/2POcv2J>. Τελευταία επίσκεψη:

Hamza, M. H., Al-Thubaiti, A. S., Dhieb, M., Ali, A. B. H., Garbouj, M. S., & Ajmi, M. (2016). Dasymeric mapping as a tool to assess the spatial distribution of population in Jeddah City (Kingdom of Saudi Arabia). *Current Urban Studies*, 4(3), 329-342.

Harris, A. T. (2006). Spectral mapping tools from the Earth Sciences applied to Spectral Microscopy Data. *International Society for Analytical Cytology*, 69A (8), 872–879. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20309>

Kruse, F. A. (1993). Artificial Intelligence for geologic mapping with Imaging Spectrometers Center for the Study of Earth from Space (CSES). United States.

Kruse, F. A., and Lefkoff, A. B. (1993). Knowledge-based geologic mapping with imaging spectrometers: Remote Sensing Reviews, Special Issue on NASA Innovative Research Program (IRP) results, v. 8, p. 3 - 28.

Kruse, F. A., Perry, S. L., & Caballero, A. (2006). District-level mineral survey using airborne hyperspectral data, Los Menucos, Argentina. *Annals of Geophysics*, 49(1).

Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International journal of Remote sensing*, 28(5), 823-870.

Mather, M.P. (1999). Computer Processing of Remotely-Sensed Images. UK: J. Wiley & Sons, 2nd edition, p. 292.

Mishra, S., Sarkar, U., Taraphder, S., Datta, S., Swain, D., & Saikhom, R. et al. (2017). Multivariate Statistical Data Analysis- Principal Component Analysis (PCA). *International Journal of Livestock Research*, 7(5), 60-78. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.5455/ijlr.20170415115235>

NASA. Διαθέσιμο στο: <https://www.nasa.gov/>. Τελευταία επίσκεψη:

Niblack, W., 1986. An Introduction to Digital Image Processing. Prentice Hall.

Nikolakopoulos, G. K., Vaiopoulos, D. A., & Skianis, G. A. (2007). A preliminary approach on the use of satellite hyperspectral data for geological mapping. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 40(4), 1998-2007.

Nikolakopoulos, K. G., Tsombos, P. I., Skianis, G. A., & Vaiopoulos, D. A. (2008). EO-1 Hyperion and ALI bands simulation to Landsat 7 ETM+ bands for mineral mapping in Milos Island. In

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος  
Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology VIII (Vol. 7110, p. 711010). International Society for Optics and Photonics.

Nikolakopoulos, K. G., & Gioti, E. (2011). Open Quarry Detection Using Multispectral and Hyperspectral Data. In Proceedings of the 31st EARSeL Symposium "Remote Sensing and Geoinformation Not Only for Scientific Cooperation", Prague, Czech Republic (pp. 152-159).

Panteras, G. (2013). Spectral Mixture Analysis of EO-1 Hyperion data for the identification and detection of clay and silicate minerals in Milos island, Greece.

Pearlman, J., Segal, C., Clancy, P., Nelson, N., Jarecke, P., Ono, M., Beiso, D., Liao, L., Yokohama, K., Carman, S., Browne, B., Ong, L. and Ungar, S., 2001. The EO-1 Hyperion Imaging Spectrometer. IEEE Aerospace Conference, 11 pp.

Pflumio C., Boulègue J., Liakopoulos A. & Briquieu L. (1991). Oxygen, hydrogen, strontium isotopes and metals in the present-day and past geothermal systems of Milos island (Aegean arc). In: Source, transport and depositions of metals, Pagel M. and Leroy J.L. (eds), Balkema, Rotterdam, p.107-112.

Plimer, I. & Πέτρου, Ν. (2000). Μήλος: Η Γεωλογική Ιστορία. Αθήνα.

Pour, B. A., & Hashim, M. (2011). The Earth Observing-1 (EO-1) satellite data for geological mapping, southeastern segment of the Central Iranian Volcanic Belt, Iran. *International Journal of the Physical Sciences*, 6(33), 7638-7650.

Principles of Remote Sensing. Διαθέσιμο στο: <https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/rsmain.htm>. Τελευταία επίσκεψη:

Remote Sensing Data Sets at the NCI. Διαθέσιμο στο: <https://bit.ly/2QdSNMK>. Τελευταία επίσκεψη:

Rodarmel, C., & Shan, J. (2002). Principal component analysis for hyperspectral image classification. *Surveying and Land Information Science*, 62(2), 115-122.

Sabine C (1999) Remote sensing strategies for mineral exploration. In: Rencz A (ed) Remote sensing for the earth sciences—manual of remote sensing. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, pp. 375–447

Sabins FF (1999) Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geol Rev* 14:157–183

Satellite Imaging Corporation. Διαθέσιμο στο: <https://www.satimagingcorp.com/>. Τελευταία επίσκεψη:

Schaepman, M.E. (1998). Calibration of a Field Spectroradiometer. Remote Sensing Series Vol.31. Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich.

Shahbaz, B., Ali, T., & Suleri, A. Q. (2007). A critical analysis of forest policies of Pakistan: implications for sustainable livelihoods. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(4), 441-453. Ballanti, D. D. (1997). *Origin of the bentonite and barite deposits on Milos Island (Central Aegean, Greece)* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

Shippert, P. (2003). Introduction to hyperspectral image analysis. *Online Journal of Space Communication*, 3(2003), 13.

Sivashankari, V., Shekhar, S., & Balasubramani, K. (2019). Comparison and evaluation of dimensionality reduction techniques for hyperspectral data analysis.

Smith, M. J., (2015). A Comparison of DG AComp, FLAASH and QUAC Atmospheric Compensation Algorithms Using WorldView-2 Imagery. Department of Civil Engineering Master's Report, University of Colorado.

Thenkabail P. S., Lyon J. G., & Huete Al. (2019). Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation. Fundamentals, Sensor Systems, Spectral Libraries, and Data Mining for Vegetation (2<sup>nd</sup> Edition, Volume 1). CRC Press: Taylor & Francis Group.

USGS (2014). The Mineral Industry of Greece. Available at: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/country/2014/myb3-2014-gr.pdf>

Van der Meer, F., & De Jong, S. (2003). Spectral Mapping Methods: Many Problems, Some Solutions. In 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy (pp. 146–162). Herrsching. Retrieved from: [https://www.itc.nl/library/Papers\\_2003/peer\\_ref\\_conf/vandermeer\\_spectral.pdf](https://www.itc.nl/library/Papers_2003/peer_ref_conf/vandermeer_spectral.pdf)

Vavelidis, M. (1998). Fluid inclusion evidence for the origin of the barite-silver-gold-bearing Pb-Zn mineralization of the Triades area, Milos Island, Greece. *Bull. Geol. Soc. Greece*, 32, 137-144.

Yokoya, N., Miyamura, N., & Iwasaki, A. (2010, November). Preprocessing of hyperspectral imagery with consideration of smile and keystone properties. In *Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Remote Sensing Technology, Techniques, and Applications III* (Vol. 7857, p. 78570B). International Society for Optics and Photonics.

Young, T. 1804. The Bakerian lecture: Experiments and calculations relative to physical optics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 94, 1–16.

Yuan, D., Lucas, J. R., & Holland, D. E. (1998). A Landsat MSS time series model and its applications in geological mapping. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 53(1), 39-53.

Yuhas, R.H., Goetz, A. F. H., and Boardman, J. W., 1992, Discrimination among semiarid landscape endmembers using the spectral angle mapper (SAM) algorithm. In *Summaries of the Third Annual JPL Airborne Geoscience Workshop*, JPL Publication 92-14, vol. 1, pp. 147-149.

Zhang, X., & Pazner, M. (2007). Comparison of lithologic mapping with ASTER, hyperion, and ETM data in the southeastern Chocolate Mountains, USA. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(5), 555-561.

Zhang, X., & Li, P. (2014). Lithological mapping from hyperspectral data by improved use of spectral angle mapper. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 31, 95-109.

Μεταλλευτικό Μουσείο Μήλου. <https://www.milosminingmuseum.com/>

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

<https://bit.ly/2Kl8bW5>

<https://www.orykta.gr>

<http://votaniki.gr/prostasia/diktio-natura-2000/>

<el.wikipedia.org/>

<http://www.lava.gr/>

<https://www.miloterranean.gr/>

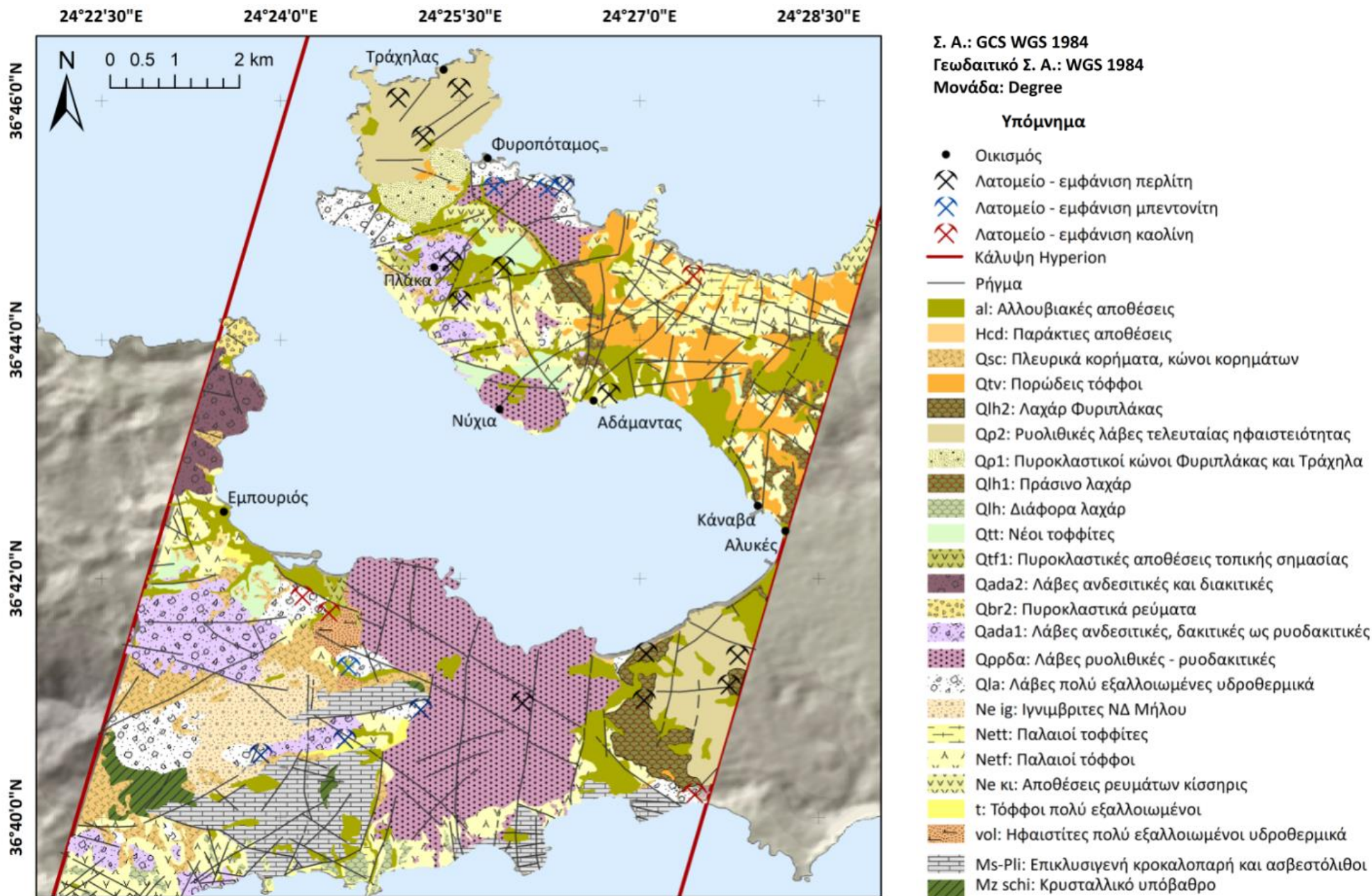
<https://archive.usgs.gov/archive/sites/eo1.usgs.gov/index.html>

<https://www.harrisgeospatial.com/>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΧΑΡΤΩΝ

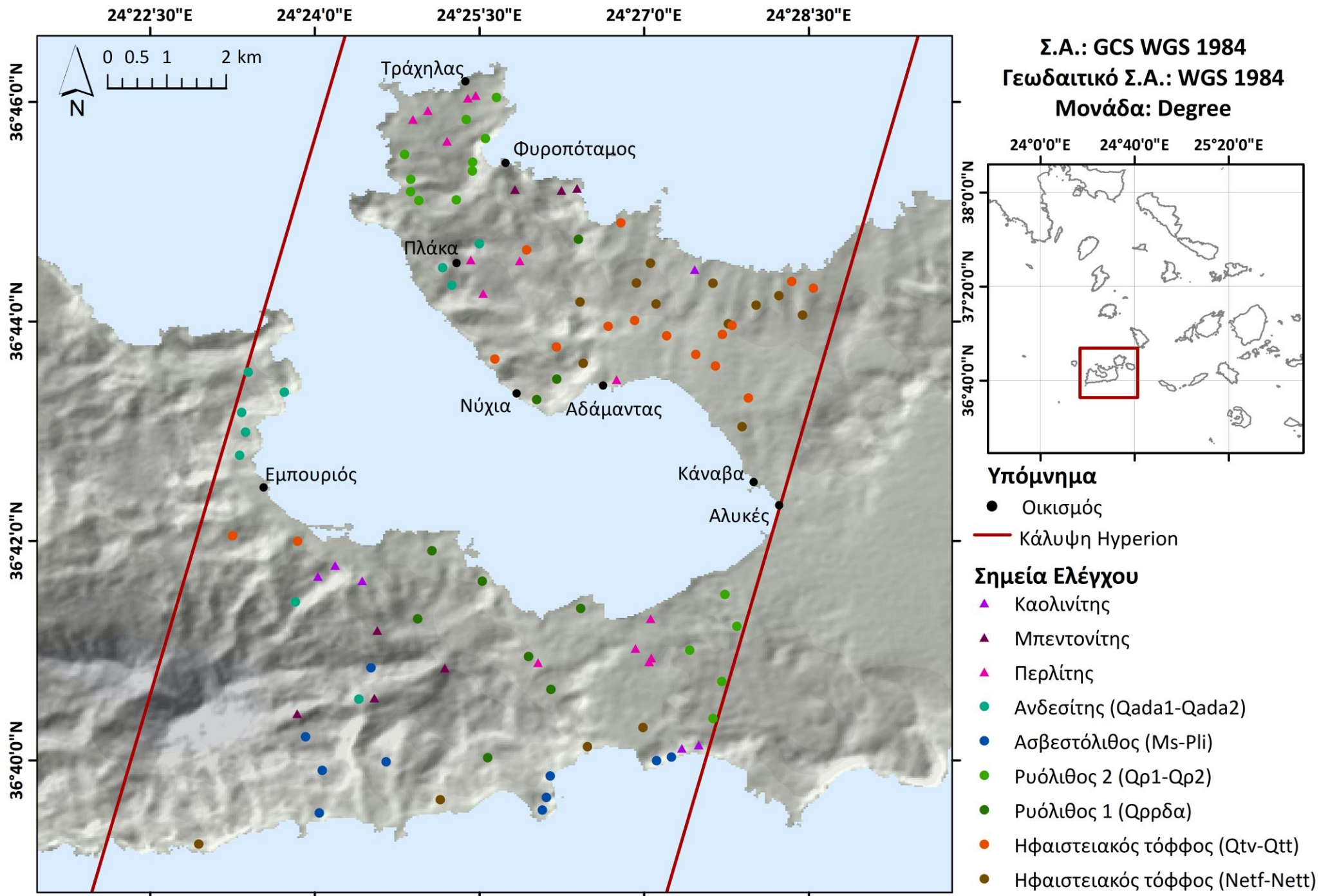
---

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος



Εικόνα 1: Γεωλογικός Χάρτης της κεντρικής Μήλου. Πηγή: ίδια επεξεργασία από χάρτη ΙΓΜΕ





Εικόνα 2: Σημεία Ελέγχου, που χρησιμοποιήθηκαν στην κεντρική Μήλο. Πηγή: ίδια επεξεργασία από χάρτη ΙΓΜΕ

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

---

Πίνακας. 0-1: Πρωτογενή δεδομένα για συντελεστές συσχέτισης των 3 ορυκτών ενδιαφέροντος

| Κανάλια | Cor(περλίτης, μπεντονίτης) | Cor(μπεντονίτης, καολίνης) | Cor(καολίνης, περλίτης) | Κανάλια   | Cor(περλίτης, μπεντονίτης) | Cor(μπεντονίτης, καολίνης) | Cor(καολίνης, περλίτης) |
|---------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|-----------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| B11-B15 | 0.871                      | 0.686                      | 0.298                   | B108-B112 | 0.993                      | 0.993                      | 0.991                   |
| B12-B16 | 0.973                      | 0.944                      | 0.857                   | B109-B113 | 0.986                      | 0.987                      | 0.999                   |
| B13-B17 | 0.998                      | 0.995                      | 0.993                   | B110-B114 | 0.997                      | 0.998                      | 1.000                   |
| B14-B18 | 0.998                      | 0.997                      | 0.998                   | B111-B115 | 0.999                      | 1.000                      | 1.000                   |
| B15-B19 | 0.999                      | 0.999                      | 0.998                   | B112-B117 | 1.000                      | 1.000                      | 1.000                   |
| B16-B20 | 0.999                      | 0.997                      | 0.996                   | B113-B118 | 1.000                      | 1.000                      | 1.000                   |
| B17-B21 | 0.991                      | 0.997                      | 0.991                   | B114-B134 | 1.000                      | 0.998                      | 0.997                   |
| B18-B22 | 0.987                      | 0.989                      | 0.999                   | B115-B135 | 0.995                      | 0.997                      | 0.990                   |
| B19-B23 | 0.992                      | 0.989                      | 0.997                   | B117-B136 | 0.963                      | 0.994                      | 0.937                   |
| B20-B24 | 0.993                      | 0.987                      | 0.998                   | B118-B137 | 0.982                      | 0.981                      | 0.931                   |
| B21-B25 | 0.986                      | 0.970                      | 0.996                   | B134-B138 | 1.000                      | 0.999                      | 1.000                   |
| B22-B26 | 0.985                      | 0.973                      | 0.997                   | B135-B139 | 1.000                      | 0.999                      | 0.999                   |
| B23-B27 | 0.979                      | 0.963                      | 0.996                   | B136-B140 | 0.999                      | 0.998                      | 0.998                   |
| B24-B28 | 0.960                      | 0.935                      | 0.995                   | B137-B141 | 0.999                      | 0.998                      | 0.999                   |
| B25-B29 | 0.970                      | 0.960                      | 0.998                   | B138-B142 | 1.000                      | 0.997                      | 0.996                   |
| B26-B30 | 0.962                      | 0.921                      | 0.989                   | B139-B143 | 0.992                      | 0.999                      | 0.991                   |
| B27-B31 | 0.958                      | 0.890                      | 0.979                   | B140-B144 | 0.986                      | 0.998                      | 0.980                   |
| B28-B32 | 0.956                      | 0.854                      | 0.965                   | B141-B145 | 0.959                      | 0.988                      | 0.986                   |
| B29-B33 | 0.738                      | 0.559                      | 0.884                   | B142-B146 | 0.906                      | 0.976                      | 0.975                   |
| B30-B34 | 0.024                      | 0.408                      | 0.529                   | B143-B147 | 0.532                      | 0.772                      | 0.903                   |
| B31-B35 | 0.496                      | 0.225                      | 0.874                   | B144-B148 | 0.783                      | 0.879                      | 0.747                   |
| B32-B36 | 0.605                      | 0.362                      | 0.919                   | B145-B149 | 0.743                      | 0.745                      | 0.124                   |
| B33-B37 | 0.799                      | 0.600                      | 0.939                   | B146-B150 | 0.752                      | 0.024                      | 0.521                   |
| B34-B38 | 0.952                      | 0.451                      | 0.663                   | B147-B151 | 0.451                      | 0.527                      | 0.299                   |
| B35-B39 | 0.886                      | 0.453                      | 0.786                   | B148-B152 | 0.876                      | 0.958                      | 0.816                   |

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hygerion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

|          |       |       |       |           |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| B36-B40  | 0.642 | 0.154 | 0.852 | B149-B153 | 0.883 | 0.865 | 0.988 |
| B37-B41  | 0.586 | 0.281 | 0.921 | B150-B154 | 0.921 | 0.881 | 0.978 |
| B38-B42  | 0.638 | 0.293 | 0.909 | B151-B155 | 0.960 | 0.951 | 0.990 |
| B39-B43  | 0.792 | 0.430 | 0.870 | B152-B156 | 0.973 | 0.968 | 0.995 |
| B40-B44  | 0.868 | 0.424 | 0.733 | B153-B157 | 0.995 | 0.996 | 0.991 |
| B41-B45  | 0.566 | 0.273 | 0.429 | B154-B158 | 0.997 | 0.999 | 0.995 |
| B42-B46  | 0.412 | 0.771 | 0.795 | B155-B159 | 0.994 | 0.995 | 0.999 |
| B43-B47  | 0.613 | 0.089 | 0.778 | B156-B160 | 0.997 | 0.997 | 0.999 |
| B44-B48  | 0.825 | 0.407 | 0.840 | B157-B161 | 0.999 | 0.997 | 1.000 |
| B45-B49  | 0.853 | 0.484 | 0.863 | B158-B162 | 0.999 | 0.998 | 1.000 |
| B46-B50  | 0.845 | 0.316 | 0.759 | B159-B163 | 0.999 | 0.999 | 1.000 |
| B47-B51  | 0.321 | 0.047 | 0.923 | B160-B164 | 0.999 | 0.999 | 1.000 |
| B48-B52  | 0.737 | 0.335 | 0.853 | B161-B188 | 0.979 | 0.995 | 0.958 |
| B49-B53  | 0.985 | 0.949 | 0.972 | B162-B189 | 0.983 | 0.992 | 0.987 |
| B50-B54  | 0.992 | 0.977 | 0.993 | B163-B191 | 0.997 | 0.997 | 0.995 |
| B51-B83  | 0.983 | 0.957 | 0.994 | B164-B192 | 0.996 | 0.997 | 0.995 |
| B52-B84  | 0.981 | 0.952 | 0.988 | B188-B193 | 0.994 | 0.993 | 1.000 |
| B53-B85  | 0.977 | 0.951 | 0.980 | B189-B194 | 0.997 | 0.992 | 0.998 |
| B54-B86  | 0.997 | 0.964 | 0.982 | B191-B195 | 0.979 | 0.975 | 0.999 |
| B83-B87  | 0.999 | 0.998 | 0.999 | B192-B196 | 0.991 | 0.992 | 0.999 |
| B84-B88  | 0.997 | 0.998 | 0.999 | B193-B197 | 0.990 | 0.959 | 0.985 |
| B85-B89  | 0.994 | 0.999 | 0.995 | B194-B198 | 0.961 | 0.748 | 0.885 |
| B86-B90  | 0.981 | 0.997 | 0.986 | B195-B199 | 0.784 | 0.342 | 0.574 |
| B87-B91  | 0.917 | 0.986 | 0.927 | B196-B202 | 0.984 | 0.980 | 0.966 |
| B88-B92  | 0.948 | 0.991 | 0.948 | B197-B204 | 0.990 | 0.998 | 0.981 |
| B89-B93  | 0.996 | 0.999 | 0.994 | B198-B205 | 0.993 | 0.999 | 0.986 |
| B90-B95  | 0.998 | 1.000 | 0.999 | B199-B206 | 0.990 | 0.994 | 0.997 |
| B91-B96  | 1.000 | 1.000 | 1.000 | B202-B207 | 0.848 | 0.906 | 0.987 |
| B92-B101 | 1.000 | 0.999 | 0.999 | B204-B208 | 0.559 | 0.550 | 0.983 |
| B93-B102 | 1.000 | 0.999 | 0.998 | B205-B209 | 0.749 | 0.498 | 0.936 |

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hygerion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

|           |       |       |       |           |       |       |       |
|-----------|-------|-------|-------|-----------|-------|-------|-------|
| B95-B103  | 0.997 | 0.994 | 0.986 | B206-B210 | 0.433 | 0.046 | 0.851 |
| B96-B104  | 0.999 | 0.994 | 0.990 | B207-B211 | 0.055 | 0.703 | 0.673 |
| B101-B105 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | B208-B212 | 0.742 | 0.742 | 0.606 |
| B102-B106 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | B209-B213 | 0.928 | 0.816 | 0.952 |
| B103-B107 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | B210-B214 | 0.975 | 0.936 | 0.974 |
| B104-B108 | 1.000 | 1.000 | 0.999 | B211-B215 | 0.991 | 0.987 | 0.956 |
| B105-B109 | 0.998 | 0.999 | 0.996 | B212-B216 | 0.994 | 0.991 | 0.974 |
| B106-B110 | 0.995 | 0.998 | 0.992 | B213-B217 | 0.959 | 0.955 | 0.998 |
| B107-B111 | 0.994 | 0.997 | 0.994 | B214-B218 | 0.976 | 0.977 | 0.999 |

Πίνακας. 0-2: Ακρίβεια φασματικού διαχωρισμού για τον αλγόριθμο SFF για τα 11 κανάλια.

| Κατηγορία      | Περλίτης      | Μπεντονίτης   | Καολίνης      | Ρυόλιθος 1   | Ρυόλιθος 2   | Ρυόλιθοι 1,2 | Ανδεσίτης     | Ηφ. Τόφφος    | Ασβεστόλιθος |
|----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| Περλίτης       | 25.324        | 15.628        | 21.241        | 11.129       | 11.777       | 12.893       | 23.614        | 19.735        | 11.642       |
|                | 27.601        | 16.610        | 22.640        | 6.465        | 8.047        | 8.147        | 15.559        | 17.814        | 8.446        |
|                | 28.993        | 9.339         | 53.211        | 1.127        | 1.586        | 1.591        | 13.601        | 4.913         | 1.635        |
|                | 25.914        | 9.276         | 35.010        | 1.403        | 1.943        | 1.929        | 7.228         | 5.427         | 2.073        |
|                | 22.940        | 30.597        | 14.312        | 8.957        | 8.875        | 9.884        | 0.586         | 20.285        | 9.570        |
|                | 17.489        | 15.869        | 12.453        | 10.101       | 13.397       | 12.783       | 5.776         | 25.298        | 12.416       |
|                | 15.677        | 12.891        | 11.992        | 7.783        | 11.015       | 10.204       | 41.694        | 20.340        | 10.392       |
| <b>Μ. Όρος</b> | <b>23.420</b> | <b>15.744</b> | <b>24.408</b> | <b>6.709</b> | <b>8.092</b> | <b>8.204</b> | <b>15.437</b> | <b>16.259</b> | <b>8.025</b> |
| Μπεντονίτης    | 17.601        | 16.181        | 13.624        | 11.548       | 8.545        | 10.504       | 7.255         | 11.905        | 3.180        |
|                | 24.718        | 20.342        | 19.122        | 2.658        | 2.834        | 3.045        | 7.753         | 7.065         | 10.742       |
| <b>Μ. Όρος</b> | <b>21.159</b> | <b>18.262</b> | <b>16.373</b> | <b>7.103</b> | <b>5.689</b> | <b>6.775</b> | <b>7.504</b>  | <b>9.485</b>  | <b>6.961</b> |
| Καολίνης       | 21.628        | 9.057         | 37.828        | 0.978        | 1.281        | 1.327        | 31.147        | 4.198         | 1.249        |
|                | 8.916         | 12.991        | 5.937         | 24.790       | 17.922       | 23.040       | 21.027        | 23.917        | 22.449       |
|                | 14.924        | 7.699         | 21.890        | 1.713        | 2.519        | 2.307        | 9.814         | 5.453         | 2.109        |
| <b>Μ. Όρος</b> | <b>15.156</b> | <b>9.916</b>  | <b>21.885</b> | <b>9.161</b> | <b>7.241</b> | <b>8.892</b> | <b>20.663</b> | <b>11.189</b> | <b>8.602</b> |
| Ρυόλιθος 1     | 8.271         | 11.867        | 5.402         | 30.079       | 21.677       | 25.073       | 33.865        | 18.607        | 21.516       |
|                | 9.678         | 14.090        | 6.189         | 28.941       | 21.449       | 25.697       | 19.851        | 22.077        | 26.299       |

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

|                     |              |               |              |               |               |               |               |               |               |
|---------------------|--------------|---------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                     | 9.162        | 13.368        | 6.140        | 41.932        | 25.791        | 33.370        | 21.272        | 23.334        | 23.996        |
|                     | 9.285        | 13.752        | 6.021        | 36.897        | 22.570        | 28.132        | 13.792        | 21.358        | 24.440        |
|                     | 8.535        | 11.629        | 5.822        | 32.159        | 32.993        | 36.094        | 29.130        | 23.372        | 24.956        |
|                     | 9.146        | 13.251        | 6.008        | 37.736        | 23.866        | 30.164        | 32.392        | 22.353        | 25.043        |
|                     | 9.246        | 13.220        | 6.234        | 37.914        | 28.605        | 33.866        | 15.040        | 23.650        | 34.561        |
|                     | 10.653       | 14.613        | 7.434        | 43.584        | 41.989        | 52.165        | 17.227        | 34.561        | 26.241        |
| <b>Μ. Όρος</b>      | <b>9.247</b> | <b>13.224</b> | <b>6.156</b> | <b>36.155</b> | <b>27.368</b> | <b>33.070</b> | <b>22.821</b> | <b>23.664</b> | <b>25.881</b> |
| <b>Ρυόλιθος 2</b>   | 9.281        | 12.390        | 6.425        | 33.135        | 36.719        | 37.970        | 20.407        | 25.914        | 28.852        |
|                     | 11.314       | 15.474        | 8.106        | 27.364        | 28.160        | 30.484        | 8.860         | 36.602        | 22.057        |
|                     | 8.570        | 12.547        | 5.571        | 35.858        | 22.486        | 27.825        | 4.994         | 20.634        | 23.992        |
|                     | 13.297       | 19.708        | 8.433        | 25.015        | 20.435        | 24.488        | 0.679         | 28.647        | 21.496        |
|                     | 9.736        | 11.365        | 7.148        | 15.772        | 24.703        | 20.335        | 29.132        | 22.971        | 16.238        |
|                     | 9.958        | 11.577        | 7.185        | 17.474        | 29.534        | 23.320        | 0.900         | 23.676        | 18.283        |
|                     | 8.140        | 10.600        | 5.661        | 18.940        | 23.659        | 21.471        | 23.766        | 18.603        | 16.305        |
|                     | 9.126        | 11.152        | 6.658        | 20.075        | 33.216        | 26.471        | 23.800        | 23.978        | 20.243        |
| <b>Μ. Όρος</b>      | <b>9.928</b> | <b>13.102</b> | <b>6.898</b> | <b>24.204</b> | <b>27.364</b> | <b>26.545</b> | <b>14.067</b> | <b>25.128</b> | <b>20.933</b> |
| <b>Ρυόλιθοι 1,2</b> | 13.916       | 16.389        | 9.846        | 25.092        | 28.901        | 30.971        | 8.224         | 35.436        | 29.158        |
|                     | 9.705        | 13.355        | 6.676        | 37.759        | 33.920        | 39.833        | 17.343        | 28.252        | 24.716        |
|                     | 8.313        | 11.795        | 5.577        | 37.118        | 26.316        | 31.910        | 35.452        | 20.520        | 23.668        |
|                     | 11.409       | 15.319        | 8.126        | 27.864        | 31.114        | 32.884        | 35.338        | 34.980        | 27.722        |
|                     | 10.953       | 15.711        | 7.013        | 29.038        | 22.948        | 27.789        | 13.154        | 26.149        | 20.782        |
|                     | 7.684        | 10.906        | 5.024        | 33.246        | 23.213        | 27.363        | 1.988         | 18.207        | 21.583        |
|                     | 10.586       | 15.313        | 7.006        | 29.529        | 23.272        | 27.220        | 17.698        | 26.066        | 26.329        |
|                     | 10.196       | 15.229        | 6.731        | 41.821        | 25.042        | 32.013        | 6.250         | 24.975        | 19.080        |
|                     | 9.149        | 11.245        | 6.543        | 19.606        | 31.148        | 25.146        | 15.947        | 22.723        | 24.887        |
|                     | 8.713        | 12.307        | 5.811        | 38.701        | 28.460        | 34.172        | 32.617        | 21.738        | 19.140        |
|                     | 9.142        | 11.039        | 6.771        | 18.389        | 29.818        | 24.154        | 34.566        | 23.315        | 18.742        |
| <b>Μ. Όρος</b>      | <b>9.979</b> | <b>13.510</b> | <b>6.829</b> | <b>30.742</b> | <b>27.650</b> | <b>30.314</b> | <b>19.871</b> | <b>25.669</b> | <b>23.255</b> |
| <b>Ανδεσίτης</b>    | 17.847       | 23.678        | 10.923       | 16.519        | 14.981        | 17.358        | 37.205        | 24.272        | 25.813        |
|                     | 9.281        | 13.265        | 6.122        | 41.635        | 26.991        | 34.746        | 12.146        | 23.487        | 31.264        |
|                     | 12.404       | 17.733        | 8.327        | 33.006        | 25.185        | 31.739        | 41.211        | 31.277        | 31.695        |
|                     | 9.275        | 12.709        | 6.240        | 42.103        | 31.548        | 38.878        | 8.777         | 24.691        | 31.090        |

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

|                     |               |               |               |               |               |               |               |               |               |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                     | 8.870         | 12.288        | 5.951         | 45.755        | 31.839        | 39.750        | 36.485        | 23.018        | 20.310        |
|                     | 6.180         | 8.623         | 4.306         | 24.662        | 18.959        | 22.939        | 36.831        | 15.975        | 20.277        |
| <b>Μ. Όρος</b>      | <b>10.643</b> | <b>14.716</b> | <b>6.978</b>  | <b>33.947</b> | <b>24.917</b> | <b>30.902</b> | <b>28.776</b> | <b>23.787</b> | <b>26.742</b> |
| <b>Ηφ. τόφφος</b>   | 13.128        | 17.921        | 8.346         | 18.647        | 18.234        | 20.187        | 17.297        | 27.791        | 18.741        |
|                     | 17.434        | 29.454        | 11.293        | 17.587        | 15.439        | 18.025        | 14.656        | 31.511        | 16.447        |
|                     | 11.328        | 17.038        | 7.511         | 28.312        | 20.744        | 26.214        | 1.211         | 29.346        | 25.724        |
|                     | 31.146        | 34.263        | 19.765        | 7.116         | 7.552         | 8.013         | 7.941         | 17.771        | 7.489         |
|                     | 16.931        | 14.848        | 15.293        | 8.738         | 12.036        | 10.956        | 33.155        | 20.049        | 9.530         |
|                     | 25.859        | 33.929        | 14.627        | 9.554         | 10.336        | 10.948        | 19.014        | 24.979        | 10.574        |
|                     | 14.711        | 15.573        | 11.349        | 16.245        | 19.270        | 18.774        | 1.288         | 26.908        | 14.957        |
|                     | 9.812         | 13.863        | 6.344         | 31.102        | 23.521        | 28.227        | 10.026        | 22.555        | 21.259        |
|                     | 18.586        | 17.140        | 13.402        | 11.029        | 14.774        | 14.030        | 14.517        | 28.654        | 12.320        |
|                     | 10.698        | 12.282        | 7.802         | 14.066        | 18.932        | 16.912        | 5.007         | 21.349        | 13.818        |
| 13.047              | 16.095        | 9.475         | 20.282        | 28.192        | 27.007        | 23.268        | 42.784        | 20.509        |               |
| <b>Μ. Όρος</b>      | <b>16.607</b> | <b>20.219</b> | <b>11.382</b> | <b>16.607</b> | <b>17.184</b> | <b>18.118</b> | <b>13.398</b> | <b>26.700</b> | <b>15.579</b> |
| <b>Ασβεστόλιθος</b> | 10.278        | 11.206        | 7.725         | 10.272        | 14.267        | 12.601        | 14.145        | 17.414        | 18.018        |
|                     | 10.909        | 16.818        | 7.014         | 17.300        | 13.845        | 16.934        | 30.802        | 21.940        | 19.717        |
|                     | 13.468        | 21.410        | 8.824         | 18.523        | 14.549        | 17.222        | 9.096         | 20.866        | 13.370        |
|                     | 17.063        | 19.066        | 11.434        | 10.338        | 9.754         | 10.877        | 29.676        | 16.832        | 30.087        |
|                     | 11.113        | 15.618        | 7.287         | 24.335        | 19.562        | 22.985        | 34.305        | 22.011        | 2.370         |
|                     | 17.145        | 8.758         | 20.635        | 1.813         | 2.293         | 2.270         | 26.170        | 5.439         | 16.547        |
|                     | 16.156        | 24.400        | 10.357        | 12.887        | 12.262        | 13.749        | 26.688        | 22.648        | 8.066         |
|                     | 32.180        | 19.152        | 22.168        | 6.500         | 7.583         | 7.891         | 25.872        | 16.029        | 17.030        |
| <b>Μ. Όρος</b>      | <b>16.039</b> | <b>17.053</b> | <b>11.931</b> | <b>12.746</b> | <b>11.764</b> | <b>13.066</b> | <b>24.594</b> | <b>17.897</b> | <b>15.651</b> |

Πίνακας. 0-3: Ακρίβεια φασματικού διαχωρισμού για τον αλγόριθμο MTMF για καθαρούς στόχους μέσω αυτόματης εξαγωγής.

| Κατηγορία     | Καολινίτης | Μπεντονίτης | Περλίτης | Ρυόλιθος 2 | Ασβεστόλιθος | Ανδεδίτης | Ρυόλιθος 1 | Ηφ. τόφφος |
|---------------|------------|-------------|----------|------------|--------------|-----------|------------|------------|
| Περλίτης      | 0.469      | 0.153       | 0.298    | 0.699      | 0.470        | 0.318     | 0.375      | 0.457      |
|               | 0.475      | 0.157       | 0.295    | 0.705      | 0.493        | 0.306     | 0.432      | 0.414      |
|               | 0.433      | 0.253       | 0.333    | 0.768      | 0.517        | 0.384     | 0.446      | 0.436      |
|               | 0.503      | 0.220       | 0.269    | 0.737      | 0.651        | 0.350     | 0.453      | 0.345      |
|               | 0.384      | 0.197       | 0.513    | 0.686      | 0.352        | 0.354     | 0.533      | 0.466      |
|               | 0.396      | 0.123       | 0.273    | 0.640      | 0.445        | 0.252     | 0.504      | 0.371      |
|               | 0.471      | 0.098       | 0.232    | 0.650      | 0.550        | 0.247     | 0.489      | 0.370      |
| <b>Μ.Όρος</b> | 0.447      | 0.172       | 0.316    | 0.698      | 0.497        | 0.316     | 0.462      | 0.409      |
| Μπεντονίτης   | 0.358      | 0.276       | 0.361    | 0.743      | 0.285        | 0.259     | 0.470      | 0.367      |
|               | 0.515      | 0.282       | 0.397    | 0.806      | 0.334        | 0.266     | 0.431      | 0.332      |
| <b>Μ.Όρος</b> | 0.437      | 0.279       | 0.379    | 0.774      | 0.310        | 0.263     | 0.451      | 0.349      |
| Καολίνης      | 0.416      | 0.386       | 0.481    | 0.729      | 0.288        | 0.233     | 0.473      | 0.483      |
|               | 0.403      | 0.210       | 0.339    | 0.699      | 0.324        | 0.274     | 0.470      | 0.331      |
|               | 0.436      | 0.650       | 0.700    | 0.723      | 0.484        | 0.680     | 0.440      | 0.448      |
| <b>Μ.Όρος</b> | 0.418      | 0.415       | 0.507    | 0.717      | 0.366        | 0.395     | 0.461      | 0.421      |
| Ρυόλιθος 1    | 0.387      | 0.191       | 0.354    | 0.676      | 0.277        | 0.306     | 0.496      | 0.415      |
|               | 0.441      | 0.178       | 0.389    | 0.623      | 0.409        | 0.235     | 0.455      | 0.471      |
|               | 0.383      | 0.156       | 0.337    | 0.684      | 0.284        | 0.313     | 0.411      | 0.463      |
|               | 0.371      | 0.116       | 0.285    | 0.695      | 0.244        | 0.305     | 0.434      | 0.409      |
|               | 0.414      | 0.134       | 0.308    | 0.661      | 0.331        | 0.320     | 0.504      | 0.421      |
|               | 0.388      | 0.143       | 0.330    | 0.654      | 0.272        | 0.207     | 0.409      | 0.454      |
|               | 0.390      | 0.118       | 0.303    | 0.657      | 0.267        | 0.283     | 0.451      | 0.452      |
|               | 0.423      | 0.107       | 0.313    | 0.666      | 0.328        | 0.341     | 0.475      | 0.425      |
| <b>Μ.Όρος</b> | 0.400      | 0.143       | 0.327    | 0.664      | 0.301        | 0.289     | 0.454      | 0.439      |
| Ρυόλιθος 2    | 0.415      | 0.172       | 0.312    | 0.662      | 0.342        | 0.278     | 0.431      | 0.439      |
|               | 0.391      | 0.191       | 0.340    | 0.675      | 0.304        | 0.285     | 0.404      | 0.467      |



Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

|                     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 0.390 | 0.172 | 0.354 | 0.669 | 0.317 | 0.315 | 0.409 | 0.472 |
|                     | 0.446 | 0.129 | 0.361 | 0.691 | 0.401 | 0.289 | 0.377 | 0.482 |
|                     | 0.377 | 0.188 | 0.259 | 0.686 | 0.356 | 0.432 | 0.510 | 0.294 |
|                     | 0.389 | 0.124 | 0.248 | 0.645 | 0.396 | 0.314 | 0.431 | 0.413 |
|                     | 0.381 | 0.158 | 0.283 | 0.647 | 0.330 | 0.323 | 0.462 | 0.402 |
|                     | 0.386 | 0.148 | 0.287 | 0.656 | 0.364 | 0.343 | 0.535 | 0.373 |
| <b>Μ.Όρος</b>       | 0.397 | 0.160 | 0.305 | 0.666 | 0.351 | 0.322 | 0.445 | 0.418 |
|                     | 0.421 | 0.169 | 0.331 | 0.671 | 0.367 | 0.307 | 0.415 | 0.469 |
|                     | 0.410 | 0.118 | 0.307 | 0.677 | 0.301 | 0.319 | 0.498 | 0.404 |
|                     | 0.428 | 0.147 | 0.308 | 0.672 | 0.333 | 0.307 | 0.412 | 0.457 |
|                     | 0.416 | 0.173 | 0.338 | 0.676 | 0.333 | 0.321 | 0.413 | 0.470 |
| <b>Ρυόλιθοι 1,2</b> | 0.447 | 0.168 | 0.361 | 0.683 | 0.372 | 0.259 | 0.345 | 0.444 |
|                     | 0.420 | 0.166 | 0.345 | 0.662 | 0.314 | 0.306 | 0.456 | 0.425 |
|                     | 0.448 | 0.158 | 0.353 | 0.645 | 0.355 | 0.335 | 0.398 | 0.440 |
|                     | 0.375 | 0.132 | 0.317 | 0.689 | 0.272 | 0.311 | 0.425 | 0.446 |
|                     | 0.379 | 0.148 | 0.260 | 0.650 | 0.377 | 0.314 | 0.485 | 0.408 |
|                     | 0.414 | 0.125 | 0.307 | 0.655 | 0.307 | 0.316 | 0.453 | 0.478 |
|                     | 0.432 | 0.172 | 0.332 | 0.658 | 0.432 | 0.366 | 0.538 | 0.386 |
| <b>Μ.Όρος</b>       | 0.417 | 0.152 | 0.323 | 0.667 | 0.342 | 0.315 | 0.440 | 0.439 |
|                     | 0.452 | 0.207 | 0.525 | 0.679 | 0.370 | 0.334 | 0.431 | 0.462 |
|                     | 0.410 | 0.173 | 0.404 | 0.650 | 0.340 | 0.249 | 0.489 | 0.442 |
| <b>Ανδρσιίτης</b>   | 0.474 | 0.145 | 0.322 | 0.632 | 0.379 | 0.254 | 0.476 | 0.322 |
|                     | 0.492 | 0.148 | 0.347 | 0.630 | 0.405 | 0.275 | 0.462 | 0.388 |
|                     | 0.456 | 0.135 | 0.322 | 0.621 | 0.363 | 0.246 | 0.425 | 0.402 |
|                     | 0.441 | 0.210 | 0.414 | 0.678 | 0.345 | 0.281 | 0.479 | 0.419 |
| <b>Μ.Όρος</b>       | 0.454 | 0.170 | 0.389 | 0.648 | 0.367 | 0.273 | 0.461 | 0.406 |
|                     | 0.392 | 0.161 | 0.315 | 0.670 | 0.334 | 0.304 | 0.417 | 0.373 |
|                     | 0.387 | 0.164 | 0.409 | 0.718 | 0.316 | 0.326 | 0.582 | 0.412 |
|                     | 0.467 | 0.159 | 0.379 | 0.662 | 0.394 | 0.274 | 0.474 | 0.411 |
| <b>Ηφ. τόφος</b>    | 0.435 | 0.194 | 0.429 | 0.711 | 0.301 | 0.365 | 0.442 | 0.525 |
|                     | 0.388 | 0.215 | 0.392 | 0.671 | 0.350 | 0.403 | 0.393 | 0.455 |
|                     | 0.388 | 0.164 | 0.372 | 0.687 | 0.327 | 0.397 | 0.443 | 0.441 |
|                     | 0.401 | 0.179 | 0.340 | 0.657 | 0.332 | 0.266 | 0.458 | 0.444 |

Γεωλογική χαρτογράφηση & Ανίχνευση Ορυκτών Πρώτων Υλών με ανάλυση δορυφορικής εικόνας Hyperion. Περιοχή μελέτης: Κεντρική Μήλος

|                     |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 0.356 | 0.137 | 0.283 | 0.673 | 0.272 | 0.229 | 0.434 | 0.358 |
|                     | 0.363 | 0.196 | 0.347 | 0.640 | 0.359 | 0.270 | 0.444 | 0.405 |
|                     | 0.436 | 0.195 | 0.352 | 0.658 | 0.363 | 0.311 | 0.420 | 0.459 |
|                     | 0.359 | 0.157 | 0.310 | 0.661 | 0.319 | 0.276 | 0.557 | 0.397 |
| <b>Μ.Όρος</b>       | 0.397 | 0.175 | 0.357 | 0.673 | 0.333 | 0.311 | 0.460 | 0.426 |
|                     | 0.424 | 0.224 | 0.409 | 0.644 | 0.464 | 0.418 | 0.310 | 0.474 |
|                     | 0.440 | 0.168 | 0.471 | 0.692 | 0.322 | 0.272 | 0.441 | 0.403 |
|                     | 0.482 | 0.184 | 0.449 | 0.746 | 0.296 | 0.342 | 0.391 | 0.387 |
| <b>Ασβεστόλιθος</b> | 0.454 | 0.160 | 0.345 | 0.684 | 0.433 | 0.357 | 0.409 | 0.262 |
|                     | 0.521 | 0.115 | 0.385 | 0.721 | 0.409 | 0.335 | 0.456 | 0.299 |
|                     | 0.320 | 0.235 | 0.348 | 0.650 | 0.409 | 0.410 | 0.382 | 0.414 |
|                     | 0.386 | 0.158 | 0.359 | 0.696 | 0.341 | 0.304 | 0.418 | 0.350 |
|                     | 0.423 | 0.059 | 0.238 | 0.702 | 0.413 | 0.290 | 0.401 | 0.383 |
| <b>Μ.Όρος</b>       | 0.431 | 0.163 | 0.375 | 0.692 | 0.386 | 0.341 | 0.401 | 0.372 |