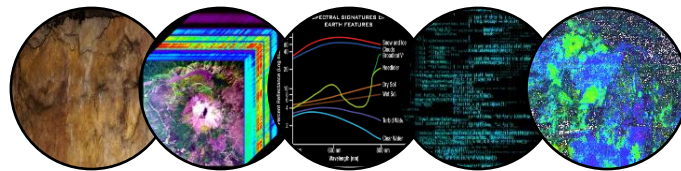


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



# Ανάλυση υπερφασματικών δεδομένων για ανίχνευση ορυκτών πόρων σε υπόγειο μεταλλείο



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Μαυρουδή

Επιβλέπων: Αθανασίας Κωνσταντίνος, Επ. Καθηγητής

Αθήνα, Οκτώβριος 2022



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ



# Ανάλυση υπερφασματικών δεδομένων για ανίχνευση ορυκτών πόρων σε υπόγειο μεταλλείο

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Μαυρουδή

Επιβλέπων: Αθανασίας Κωνσταντίνος, Επ. Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 26/10/2022.

Αθανασίας Κωνσταντίνος, Επ. Καθηγητής .....(υπογραφή)

Περούκη Μαρία, Καθηγήτρια .....(υπογραφή)

Τσακιρίδης Πέτρος, Επ. Καθηγητής .....(υπογραφή)

Αθήνα, Οκτώβριος 2022



# Ευχαριστίες

Η εργασία αποτελεί μέρος της διευρυμένη έρευνας που γίνεται στο ερευνητικό ινστιτούτο HIF (Helmholtz Institute Freiberg) και ειδικότερα στην ερευνητική ομάδα EXPL0 με επικεφαλής τον Dr. Richard Gloaguen, που επικεντρώνεται στην εφαρμογή νέων μεθόδων γεωλογικής έρευνας και τον συνδυασμό επαναστατικών τεχνολογιών, που θα φέρουν στο προσκήνιο καινοτόμες μεθόδους. Πολλές ευχαριστίες προς το Ινστιτούτο για την παροχή των δεδομένων και την χρήση υλικοτεχνικών υποστηρικτικών μέσων καθ'όλη την διάρκεια της εργασίας μου.

Με τον Dr. Moritz Kirsch, που ηγήθηκε του συγκεκριμένου πρότζεκτ, αλλά και όλη την ομάδα του Ινστιτούτου έγινε μία προσπάθεια για να καταγραφεί μία επιτυχής ροή εργασιών (εργασίες πεδίου, επεξεργασία δεδομένων, ερμηνεία αποτελεσμάτων) που απαντά επιτυχώς στο αρχικό ερώτημα. Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντά μου στο HIF, Dr. Moritz Kirsch για την ανεξάντλητη υποστήριξη και καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την παραμονή μου εκεί, καθώς και τον επιβλέποντα καθηγητή στο ΕΜΠ, Καθ. Κωνσταντίνο Αθανασά, που χωρίς την πολύτιμη βοήθειά του και την άφογη συνεργασία μας, δεν θα ήταν εφικτή η υλοποίηση της εργασίας. Πολλές ευχαριστίες επίσης σε όλο το προσωπικό του HIF, που συμπαραστάθηκαν και βοήθησαν με κάθε τρόπο την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Επιπλέον, θέλω να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου όλους όσους βρέθηκαν στην πορεία της φοιτητικής μου ζωής, φίλους, συμφοιτητές και καθηγητές που με τον τρόπο τους συνέβαλλαν στην ακαδημαϊκή και προσωπική εξέλιξη, καθώς και την οικογένειά μου για την πολύτιμη υποστήριξη τους.

Τα αποτελέσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας έχουν συμβάλει σε ερευνητικό άρθρο που πρόκειται να δημοσιευτεί σύντομα.

# Περίληψη

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα της μεταλλευτικής και πιο συγκεκριμένα στην υπόγεια εκμετάλλευση εξελίσσονται με γρήγορους ρυθμούς όσον αφορά την αυτοματοποίηση και την ένταξη της μηχανικής μάθησης στην παραγωγική διαδικασία. Η γεωλογική έρευνα, ως βασικό κομμάτι της εκμετάλλευσης ορυκτών πόρων, ακολουθώντας την τάση αυτή, τείνει με την βοήθεια ειδικών αισθητήρων, να ξεφύγει από τις παραδοσιακές τεχνικές και να χρησιμοποιήσει τα τεχνολογικά μέσα που πλέον διατίθενται. Σκοπός της εργασίας, είναι να μελετηθεί η εφαρμοσιμότητα της υπερφασματικής μεθόδου για την ανίχνευση ορυκτών, σε ένα κοίτασμα λιθίου, και παράλληλα, να εξεταστούν μέθοδοι ανάλυσης των δεδομένων. Εκτός από την διάταξη και τις συνθήκες της μέτρησης, εξετάζονται και οι αποδοτικότεροι μέθοδοι επεξεργασίας των δεδομένων. Η περιοχή μελέτης είναι το ορυχείο στην περιοχή Zinnwald στην ανατολική Σαξονία στην διασυνοριακή περιοχή με την Τσεχία, όπου εδώ και εκατοντάδες χρόνια υπάρχει έντονη εκμετάλλευση, για πολλά ορυκτά εκ των οποίων Sn και W, αλλά και με το Li να έχει μπει πλέον στο επίκεντρο. Στο κοίτασμα κυριαρχούν οι στρώσεις και φλέβες του αλβιτικού γρανίτη μέσα σε γρανίτη, όπου ο αλβιτικός γρανίτης ορυκτολογικά συνίσταται κυρίως από χαλαζία, ζιννβαλδίτη (μαρμαρυγία με Li) και τοπάζιο. Λαμβάνουν χώρα αρκετές υπερφασματικές μετρήσεις, αρχικά σε εργαστηριακό επίπεδο για να προσδιοριστούν οι παράμετροι που οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα, και σε δεύτερο επίπεδο στο ορυχείο όπου σαρώνονται τα μέτωπα. Στην συνέχεια, με βασικό άξονα το υπολογιστικό εργαλείο *hylite* (Thiele, et al., 2021), γίνεται η επεξεργασία και έπειτα η επεξεργασία των μετρήσεων, όπου αξιολογούνται μέθοδοι μείωσης διάστασης εικόνας (PCA, MNF) καθώς και μέθοδοι ταξινόμησης (στοιχεία απορροφήσεων, ελάχιστα μήκη κύματος, αναλογία φασματικών καναλιών). Φαίνεται πως τελικά οι μέθοδοι των στοιχείων απορροφήσεων και των ελάχιστων μηκών κύματος έχουν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα και έτσι η χαρτογράφηση των ορυκτών στο υπόγειο μεταλλείο γίνεται με επιτυχία.

# Abstract

Technological developments in the mining sector and more specifically in underground mining, are progressing rapidly in terms of automation and the integration of machine learning in the industrial process. Geological exploration, as a key part of mineral resource exploitation, following this trend, tends, with the help of special sensors, to move away from traditional techniques and use the technological tools now available. The aim of this work, is to study the applicability of the hyperspectral method for the detection of minerals, in a lithium deposit, and at the same time, to consider methods of data analysis. Except from the setup and the conditions of the measurements, the most efficient methods of processing the data are also being examined. The study area is an underground mine in the Zinnwald region in eastern Saxony, in the cross-border area with the Czech Republic, where for hundreds of years there has been intensive exploitation for many minerals of which Sn and W, but also Li now coming into focus. The deposit is dominated by beds and veins of albite granite within granite, where albite granite mineralogically consists mainly of quartz, zircalite (mica with Li) and topaz. Several hyperspectral measurements take place, first at the laboratory level to determine the parameters that lead to better results, and secondly at the mine where some outcrops are scanned. Subsequently, with the computational tool *hylite* (Thiele, et al., 2021) as a main focus, pre-processing and then processing of the measurements is performed, where image dimension reduction methods (PCA, MNF) as well as classification methods (absorption elements, minimum wavelengths, band ratios) are evaluated. It appears that finally the methods of absorption elements and minimum wavelengths have quite satisfactory results and thus the mapping of minerals in the underground mine is done successfully.





## Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή – Στόχος.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο .....	6
2.1. Αρχές της οπτικής.....	6
2.2. Τηλεπισκόπηση .....	8
2.2.1. Ανάλυση δεδομένων.....	11
2.3. Υπερφασματική τηλεπισκόπηση.....	12
2.3.1. Πηγή.....	14
2.3.2. Αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα.....	15
2.3.3. Αισθητήρας.....	16
2.4. Φασματικές ιδιότητες ορυκτών .....	17
2.4.1. Φασματική βιβλιοθήκη USGS.....	20
2.5. Επεξεργασία εικόνας και μηχανική μάθηση .....	22
2.5.1. Τεχνικές μείωσης διάστασης (HSI).....	28
2.5.2. Μεθοδολογίες ταξινόμησης, διορθώσεις .....	32
2.6. Περιπτώσεις μελέτης.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Περιοχή Μελέτης .....	45
3.1. Γεωλογία.....	45
3.1.1. Το κοίτασμα Li-Sn-W Greisen .....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μεθοδολογία.....	51
4.1. Μέσα.....	51
4.1.1. Λογισμικά/Κώδικας.....	51
4.1.2. Τεχνολογικά μέσα.....	54
4.2. Φασματική βιβλιοθήκη.....	61
4.3. Συλλογή δεδομένων .....	63

4.3.1.	Εργαστηριακές δοκιμές .....	63
4.3.2.	Μετρήσεις πεδίου .....	69
4.3.3.	Τεχνικά προβλήματα .....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάλυση δεδομένων.....		75
5.1.	Προεπεξεργασία εργαστηριακών δοκιμών και μετρήσεων πεδίου....	76
5.2.	Επεξεργασία εργαστηριακών δοκιμών και μετρήσεων πεδίου.....	80
5.2.1.	Εφαρμογή μάσκας .....	81
5.2.2.	Μείωση διάστασης υπερφασματικών απεικονίσεων (HIS) .....	82
5.2.3.	Χαρτογράφηση και ταξινόμηση.....	83
5.2.4.	Φωτογραμμετρία .....	97
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αποτελέσματα.....		99
6.1.	Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών .....	99
6.1.1.	Αποτελέσματα δοκιμών λαμπτήρων.....	99
6.1.2.	Αποτελέσματα δοκιμών υγρασίας.....	102
6.2.	Αποτελέσματα δοκιμών σύγκρισης αισθητήρων .....	103
6.2.1.	Τεχνικές μείωσης διάστασης υπερφασματικών απεικονίσεων λήψεων εργαστηρίου.....	104
6.2.2.	Μεθοδολογίες ταξινόμησης.....	106
6.3.	Αποτελέσματα λήψεων πεδίου.....	110
6.3.1.	Τεχνικές μείωσης διάστασης υπερφασματικών απεικονίσεων υπόγειων λήψεων .....	111
6.3.2.	Στοιχεία απορροφήσεων .....	112
6.3.3.	MWL.....	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα και προοπτικές.....		118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι .....		133

---

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II ..... 152

## Περιεχόμενα εικόνων

Εικόνα 2-1: Αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε σχέση με τα φασματικά κανάλια (Πηγή: <a href="https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing">https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing</a> )....	7
Εικόνα 2-2: Το ευρύ φάσμα της τηλεπισκόπησης (Πηγή: <a href="http://www.gisgeography.com">www.gisgeography.com</a> ).....	8
Εικόνα 2-3: Χρήσεις και εφαρμογές της τηλεπισκόπησης. (Πηγή: <a href="https://www.gisbox.ro/remote-sensing/">https://www.gisbox.ro/remote-sensing/</a> ).....	9
Εικόνα 2-4: Αισθητήρες τηλεπισκόπησης (Πηγή: <a href="http://www.gisgeography.com">www.gisgeography.com</a> ).....	10
Εικόνα 2-5: Αναπαράσταση τρισδιάστατου υπερφασματικού κύβου (Πηγή: <a href="https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral_imaging">https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral_imaging</a> ).....	13
Εικόνα 2-6: Διαφορές πολυφασματικής με υπερφασματική μεθόδου (Πηγή: <a href="https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/hyperspectral-and-multispectral-imaging/">https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/hyperspectral-and-multispectral-imaging/</a> ).....	14
Εικόνα 2-7: Φασματικές περιοχές υπερφασματικής απεικόνισης (Πηγή: <a href="https://www.middletonspectral.com/resources/what-is-hyperspectral-imaging/">https://www.middletonspectral.com/resources/what-is-hyperspectral-imaging/</a> ).....	14
Εικόνα 2-8: Ενεργητικά και παθητικά συστήματα τηλεπισκόπησης (Πηγή: <a href="https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing">https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing</a> ).....	15
Εικόνα 2-9: Σχεδιάγραμμα λήψης μέτρησης (Πηγή: <a href="https://www.mathworks.com/help/images/hyperspectral-data-correction.html">https://www.mathworks.com/help/images/hyperspectral-data-correction.html</a> )	16
Εικόνα 2-10: Φασματικές υπογραφές διαφορετικών χαρακτηριστικών στην Γη στο ορατό φάσμα (Πηγή: <a href="https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing#spectral-resolution">https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing#spectral-resolution</a> ).....	18
Εικόνα 2-11: Φασματική υπογραφή διαφόρων ορυκτών (Πηγή: Hunt, 1977).....	20
Εικόνα 2-12: Παράδειγμα επιφάνειας εργασίας της φασματικής βιβλιοθήκης USGS (Πηγή: <a href="https://www.usgs.gov/labs/spectroscopy-lab/science/spectral-library">https://www.usgs.gov/labs/spectroscopy-lab/science/spectral-library</a> ).....	21

Εικόνα 2-13: Σχεδιάγραμμα απόδοσης εννοιών σχετικές με την AI (Πηγή: <a href="https://nealanalytics.com/expertise/azure-ai-ml/">https://nealanalytics.com/expertise/azure-ai-ml/</a> ).....	23
Εικόνα 2-14: Διάγραμμα λειτουργίας της μηχανικής μάθησης (Πηγή: <a href="https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-ml/">https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-ml/</a> ) ...	25
Εικόνα 2-15: Διαφορές μεταξύ μεθόδων ταξινομήσεων και παλινδρόμησης της επιβλεπόμενης μάθησης (Πηγή: <a href="https://towardsdatascience.com/supervised-vs-unsupervised-learning-14f68e32ea8d">https://towardsdatascience.com/supervised-vs-unsupervised-learning-14f68e32ea8d</a> ).....	26
Εικόνα 2-16: Διαφορές μεταξύ μεθόδων ομαδοποίησης και συσχέτισης της μη επιβλεπόμενης μάθησης (Πηγή: <a href="https://medium.datadriveninvestor.com/supervised-vs-unsupervised-machine-learning-732d49413986?gi=3a5d4f5601d3">https://medium.datadriveninvestor.com/supervised-vs-unsupervised-machine-learning-732d49413986?gi=3a5d4f5601d3</a> ) .....	27
Εικόνα 2-17: Διαφορά μεταξύ μη επιβλεπόμενης και επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης (Πηγή: <a href="https://www.explorium.ai/wiki/supervised-learning/">https://www.explorium.ai/wiki/supervised-learning/</a> ) .....	27
Εικόνα 2-18: Μείωση διαστάσεων με την μέθοδο PCA (Πηγή: <a href="https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0248896">https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0248896</a> ) ....	29
Εικόνα 2-19: Τρεις απεικονίσεις μετά από εφαρμογή της MNF σε στεφανιαία τομή μέσου εγκεφάλου ποντικού (Πηγή: Stone et al, 2012).....	32
Εικόνα 2-20: Παράδειγμα γκαουσιανής κατανομής δεδομένων (με μπλε σημεία) και γκαουσιανής προσαρμοσμένης συνάρτησης (με πορτοκαλί) (Πηγή: <a href="https://education.molssi.org/python-data-analysis/03-data-fitting/index.html">https://education.molssi.org/python-data-analysis/03-data-fitting/index.html</a> ) ...	33
Εικόνα 2-21: Σχήματα επεξηγηματικά της μεθόδου διαίρει και βασίλευε κυρτού περιβλήματος (Πηγή: <a href="https://www.geeksforgeeks.org/convex-hull-using-divide-and-conquer-algorithm/">https://www.geeksforgeeks.org/convex-hull-using-divide-and-conquer-algorithm/</a> ) .....	35
Εικόνα 2-22: Εικονική επεξήγηση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης (Πηγή: <a href="https://sixsigmadsi.com/glossary/simple-linear-regression">https://sixsigmadsi.com/glossary/simple-linear-regression</a> ) .....	37
Εικόνα 2-23: Στιγμιότυπο από την μέτρηση της λήψης δεδομένων (Πηγή: Kurz et al. 2017) .....	40
Εικόνα 2-24: Αποτύπωση διάταξης πειράματος και έκθεση αποτελεσμάτων ύστερα από διάφορες αναλυτικές μεθόδους (Πηγή: Lobo et al. 2021) .....	42

Εικόνα 2-25: Αποτύπωση του συνδυασμού των συλλεγμένων δειγμάτων και των σαρώσεων της υπαίθριας εκμετάλλευσης προς μελέτη (Πηγή: Thiele et al. 2021) .....	44
Εικόνα 3-1: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Erzgebirge (Πηγή: Sebastian, 2013) .....	46
Εικόνα 3-2: Γεωλογία και δομές του κοιτάσματος Li-Sn-W Zinnwald. Α) Σχηματικός γεωλογικός χάρτης του νοτιοανατολικού Erzgebirge (Altenberg-TerliceCaldera, τροποποιημένος από Neßler et al. 2017 σύμφωνα με Seifert και Kemppe 1994). Β) Γεωλογική τομή κατά μήκος της γραμμής A-A' (τροποποιημένη από Neßler et al. 2017). Γ) Σχηματική τομή A-Δ μέσα από τα κοιτάσματα κασίτερου του ανατολικού Erzgebirge (τροποποιημένη κατά Sebastian 2013). Δ) Χωρική θέση των επιμέρους greisen μεταλλευμάτων (Bock et al. 2020). ....	48
Εικόνα 4-1: Απεικόνιση περιβάλλοντος εργασίας hylite .....	52
Εικόνα 4-2: Παρουσίαση διαγράμματος ροής υπολογιστικού εργαλείου hylite (Πηγή: Thiele et al. 2021).....	53
Εικόνα 4-3: Αισθητήρας SisROCK στις εγκαταστάσεις του HIF .....	56
Εικόνα 4-4: Αισθητήρας FENIX.....	57
Εικόνα 4-5: Αισθητήρας FENIX 1K.....	58
Εικόνα 4-6: Αισθητήρας Mjolnir .....	59
Εικόνα 4-7: Λάμπα αλογόνου 1000 W, λάμπα αλογόνου 500 W, θεατρικός προβολέας, λαμπτήρας θερμότητας (από αριστερά προς τα δεξιά).....	61
Εικόνα 4-8: Απεικόνιση των φασματικών υπογραφών των ορυκτών τοπάζιο (πράσινο), μοσχοβίτη (μωβ) και καολινίτη (πορτοκαλί) μαζί με τις τυπικές τους απορροφήσεις (Πηγή: <a href="https://www.samthiele.science/app/iSpec/">https://www.samthiele.science/app/iSpec/</a> ) .....	62
Εικόνα 4-9: Διάγραμμα με α. τις εργαστηριακές μετρήσεις του αισθητήρα SisuROCK και τα επιλεγμένα σημεία και β. οι φασματικές υπογραφές των σημειών .....	63
Εικόνα 4-10: Αποτύπωση των συνθηκών στις εργαστηριακές μετρήσεις .....	64
Εικόνα 4-11: Αποτύπωση της διάταξης των μέσων κατα τις εργαστηριακές μετρήσεις .....	66

Εικόνα 4-12: Στιγμιότυπο από τις μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό των λαμπτήρων .....	67
Εικόνα 4-13: Στιγμιότυπο από τις εργαστηριακές μετρήσεις με την υγρασία..	69
Εικόνα 4-14: Απεικόνιση των σημείων λήψης A, B, C κατά τις υπόγειες μετρήσεις (Πηγή: Lorenz, S., Kirsch, M.) .....	70
Εικόνα 4-15: Αποτελέσματα φωτογραμμετρικής επεξεργασίας για τις υπόγειες σκηνές A, B, C .....	71
Εικόνα 4-16: Στιγμιότυπο από τις υπόγειες λήψεις παρουσία επιφάνεια βαθμονόμησης και των ταινιών B-N, A-Δ και διεύθυνσης z.....	72
Εικόνα 4-17: Αποτυχημένη προσπάθεια δημιουργίας μωσαϊκού .....	73
Εικόνα 5-1: Διάγραμμα ροής προ-επεξεργασίας δεδομένων.....	75
Εικόνα 5-2: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας δεδομένων .....	76
Εικόνα 5-3: Στιγμιότυπο εφαρμογής της διόρθωσης ELC .....	78
Εικόνα 5-4: Παράδειγμα από το ειδικό λογισμικό προ-επεξεργασίας του αισθητήρα Mjorlin .....	78
Εικόνα 5-5: Στιγμιότυπο εφαρμογής της συννένωσης .....	80
Εικόνα 5-6: Παράδειγμα λανθασμένου εντοπισμού endmember .....	81
Εικόνα 5-7: Στιγμιότυπο εφαρμογής μάσκας στο Δείγμα 1 .....	81
Εικόνα 5-8: Διαδικασία δημιουργίας «μάσκας» .....	82
Εικόνα 5-9: Φασματική βιβλιοθήκη ορυκτών μοσχοβίτη, τοπάζιου, ζινβαλδίτη και καολινίτη για το φασματικό εύρος 450nm-2500nm (Πηγή: Moritz K.).....	84
Εικόνα 5-10: Επιλογή τυχαίων σημείων στις εργαστηριακές λήψεις (πάνω) και συγκριτική απεικόνιση φασματικής υπογραφής τους (κάτω) μαζί με την φασματική υπογραφή πρότυπου δείγματος λιθίου για φασματικό εύρος 450nm-2500nm .....	86
Εικόνα 5-11: Απεικόνιση με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) αντίστοιχα για τις εργαστηριακές λήψεις.....	87
Εικόνα 5-12: Απεικόνιση με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη A87	

Εικόνα 5-13: Απεικόνιση με επεξεργασία band ratios για φασματικό εύρος 2000 nm – 2300 nm για τις εργαστηριακές λήψεις .....	88
Εικόνα 5-14: Απεικόνιση με επεξεργασία band ratios για φασματικό εύρος 2000 nm – 2300 nm για την Υπόγεια Λήψη Α.....	89
Εικόνα 5-15: Απεικόνιση με επεξεργασία band ratios για φασματικό εύρος 2200 nm – 2260 nm για την Υπόγεια Λήψη Α.....	90
Εικόνα 5-16: Ενδεδλεχής γραφική αναπαράσταση διαφόρων παραμέτρων στα πλαίσια του MWL Spectral Feature Summary για το φασματικό εύρος 2050 nm – 2400 nm εφαρμοσμένο στις εργαστηριακές λήψεις .....	91
Εικόνα 5-17: Γραφική ποσοτικοποίηση θέσης και βάθους χαρακτηριστικών απορρόφησης για φασματικό εύρος 2180 nm - 2260 nm για τις εργαστηριακές λήψεις .....	92
Εικόνα 5-18: Ενδεδλεχής γραφική αναπαράσταση διαφόρων παραμέτρων στα πλαίσια του Spectral Feature Summary για το φασματικό εύρος 2050 nm – 2400 nm εφαρμοσμένο στην Υπόγεια Λήψη Α.....	93
Εικόνα 5-19: Γραφική ποσοτικοποίηση θέσης και βάθους χαρακτηριστικών απορρόφησης για φασματικό εύρος 2180 nm - 2260 nm για την Υπόγεια Λήψη Α .....	94
Εικόνα 5-20: Συγκριτική απεικόνιση των εργαστηριακών λήψεων χωρίς και με εφαρμογή Hull Correction .....	95
Εικόνα 5-21: Εφαρμογή αλγορίθμου PPI εύρεσης endmember στις εργαστηριακές λήψεις .....	96
Εικόνα 5-22: Εφαρμογή αλγορίθμου NFINDR εύρεσης endmember στις εργαστηριακές λήψεις ` .....	96
Εικόνα 5-23: Εφαρμογή αλγορίθμου ATGP εύρεσης endmember στις εργαστηριακές λήψεις .....	97
Εικόνα 5-24: Εφαρμογή αλγορίθμου FIPPI εύρεσης endmember στις εργαστηριακές λήψεις .....	97
Εικόνα 5-25: Αποτελέσματα φωτογραμμετρικών μοντέλων για τις Υπόγειες Λήψεις Α,Β,С με και χωρίς flash .....	98



Εικόνα 6-1: Συγκριτική απεικόνιση της φασματικής υπογραφής διαφόρων τύπων λαμπτήρων για το φασματικό εύρος 400 nm – 2500 nm .....	100
Εικόνα 6-2: Ανακλαστικότητα διαφόρων τύπων λαμπτήρων συναρτήσει της απόστασης για ακτινοβολία 2200 nm .....	101
Εικόνα 6-3: Συγκριτική απεικόνιση λαμπτήρων ισχύος 500W και 1000W, και φακών βαθμωτού και frosted με λαμπτήρα 1000W .....	101
Εικόνα 6-4: Συγκριτική απεικόνιση της ανακλαστικότητας και της επίπτωσης υγρασίας σε τυχαία σημεία των Δειγμάτων 1,2,3 (Κόκκινο = ξηρές συνθήκες, Πράσινο = ελαφρώς υγρές συνθήκες, Μπλε = πολύ υγρές συνθήκες) .....	103
Εικόνα 6-5: Χωρική και φασματική ανάλυση 4 αισθητήρων για τις εργαστηριακές λήψεις .....	104
Εικόνα 6-6: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου PCA για τον συνδυασμό καναλιών 1,3,4 στις εργαστηριακές λήψεις .....	105
Εικόνα 6-7: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για τον συνδυασμό καναλιών 6,12,18 στις εργαστηριακές λήψεις .....	105
Εικόνα 6-8: Διάγραμμα με α. ψευδο-χρωματική εικόνα των εργαστηριακών λήψεων από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir) και b. συγκριτική απεικόνιση των φασματικών υπογραφών 5 τυχαίων σημείων για το φασματικό εύρος 2000 nm – 2500 nm .....	106
Εικόνα 6-9: Απεικόνιση με ψευδο-χρωματική εικόνα για απορροφήσεις στα 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) αντίστοιχα για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir) .....	107
Εικόνα 6-10: Ενδεδειγμένη γραφική αναπαράσταση διαφόρων παραμέτρων στα πλαίσια του MWL Spectral Feature Summary για το φασματικό εύρος 2050 nm – 2400 nm εφαρμοσμένο στις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir) .....	108
Εικόνα 6-11: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2190 nm - 2300 nm (με χαρτογράφηση 2240 nm - 2270 nm) για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir) .....	109

Εικόνα 6-12: Απεικόνιση θέσης και βάθους φασματικών ανακλάσεων (MWL) γύρω από τα 2252 nm για φασματικό εύρος 2190 nm - 2270 nm για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir) .....	110
Εικόνα 6-13: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για τον συνδυασμό καναλιών 6,12,18 στην Υπόγεια Λήψη A .....	112
Εικόνα 6-14: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα a. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη A με $v_{min}=2$ , $v_{max}=98$ .....	113
Εικόνα 6-15: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα a. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη A με $v_{min}=0$ , $v_{max}=75$ .....	114
Εικόνα 6-16: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2050 nm - 2060 nm (με χαρτογράφηση 2240 nm - 2270 nm) για την Υπόγεια Λήψη A .....	115
Εικόνα 6-17: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2050 nm - 2060 nm (με χαρτογράφηση 2240 nm - 2270 nm) για την Υπόγεια Λήψη B.....	116
Εικόνα 6-18: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2050 nm - 2060 nm (με χαρτογράφηση 2240 nm - 2270 nm) για την Υπόγεια Λήψη C .....	116
Εικόνα 7-0-1: Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδου PCA για τα αναγραφόμενα κανάλια στις εργαστηριακές λήψεις .....	133
Εικόνα 7-0-2: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για αναγραφόμενα κανάλια στις εργαστηριακές λήψεις .....	133
Εικόνα 7-0-3: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2160 nm - 2300 nm (με χαρτογράφηση 2210 nm - 2270 nm) για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir) .....	134

---

Εικόνα 7-0-4: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2180 nm - 2240 nm (με χαρτογράφηση 2190 nm - 2230 nm) για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir) .....	135
Εικόνα 7-0-5: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2190 nm - 2300 nm (με χαρτογράφηση 2200 nm - 2270 nm) για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir) .....	136
Εικόνα 7-0-6: Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδου PCA για τα αναγραφόμενα κανάλια στην Υπόγεια Λήψη Α .....	137
Εικόνα 7-0-7: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για αναγραφόμενα κανάλια στην Υπόγεια Λήψη Α .....	138
Εικόνα 7-0-8: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για τον συνδυασμό καναλιών 6,12,18 στην Υπόγεια Λήψη Β .....	139
Εικόνα 7-0-9: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για τον συνδυασμό καναλιών 6,12,18 στην Υπόγεια Λήψη C .....	139
Εικόνα 7-0-10: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα a. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη Β με $v_{min}=2$ , $v_{max}=98$ .....	140
Εικόνα 7-0-11: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα a. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη Β με $v_{min}=0$ , $v_{max}=75$ .....	141
Εικόνα 7-0-12: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα a. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη C με $v_{min}=2$ , $v_{max}=98$ .....	142
Εικόνα 7-0-13: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα a. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm	

(R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη C με $v_{min}=0$ , $v_{max}=75$ .....	143
Εικόνα 7-0-14: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2080 nm - 2090 nm (με χαρτογράφηση 2070 nm - 2100 nm) για την Υπόγεια Λήψη A .....	144
Εικόνα 7-0-15: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2170 nm - 2180 nm (με χαρτογράφηση 2160 nm - 2190 nm) για την Υπόγεια Λήψη A .....	144
Εικόνα 7-0-16: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2200 nm - 2210 nm (με χαρτογράφηση 2190 nm - 2220 nm) για την Υπόγεια Λήψη A .....	145
Εικόνα 7-0-17: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2320 nm - 2360 nm (με χαρτογράφηση 2295 nm - 2400 nm) για την Υπόγεια Λήψη A .....	145
Εικόνα 7-0-18: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2080 nm - 2090 nm (με χαρτογράφηση 2070 nm - 2100 nm) για την Υπόγεια Λήψη B.....	146
Εικόνα 7-0-19: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2170 nm - 2180 nm (με χαρτογράφηση 2160 nm - 2190 nm) για την Υπόγεια Λήψη B.....	146
Εικόνα 7-0-20: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2200 nm - 2210 nm (με χαρτογράφηση 2190 nm - 2220 nm) για την Σκηνή 2 .....	147
Εικόνα 7-0-21: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2320 nm - 2360 nm (με χαρτογράφηση 2295 nm - 2400 nm) για την Υπόγεια Λήψη B.....	147
Εικόνα 7-0-22: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2080 nm - 2090 nm (με χαρτογράφηση 2070 nm - 2100 nm) για την Υπόγεια Λήψη C .....	148

Εικόνα 7-0-23: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2170 nm - 2180 nm (με χαρτογράφηση 2160 nm - 2190 nm) για την Υπόγεια Λήψη C ..... 149

Εικόνα 7-0-24: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2200 nm - 2210 nm (με χαρτογράφηση 2190 nm - 2220 nm) για την Υπόγεια Λήψη C ..... 150

Εικόνα 7-0-25: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2320 nm - 2360 nm (με χαρτογράφηση 2295 nm - 2400 nm) για την Υπόγεια Λήψη C ..... 151

## Περιεχόμενα πινάκων

Πίνακας 4-1: Λεπτομερής σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών αισθητήρων SPECIM AsiaFenix 1K, SPECIM AsiaFenix, HySPEX Mjølner VS-620 (τροποποιημένος από Moritz K., Madriz Y.).....	55
Πίνακας 4-2: Λεπτομερής σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών 4 «καμερών» (VNIR, SWIR, MWIR, LWIR) αισθητήρα SisuROCK (τροποποιημένος από Moritz K., Madriz Y.).....	56
Πίνακας 4-3: Αντιστοίχιση των ξύλινων επιφανειών με τα πετρώματα, την ορυκτολογία και την ονοματοδοσία τους .....	65
Πίνακας 4-4: Συνοπτικός πίνακας μετρήσεων και διατάξεων εργαστηριακών μετρήσεων .....	67
Πίνακας 4-5: Συνοπτικός πίνακας υπογείων λήψεων και των διατάξεων τους	71

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή – Στόχος

Η μεταλλευτική δραστηριότητα τα τελευταία χρόνια αποτελεί όλο και πιο πολύ αφορμή διχασμού και πόλωσης μεταξύ των τοπικών κοινωνιών, διοικήσεων, μεταλλευτικών εταιρειών, ακτιβιστικών οργανώσεων και απλών πολιτών που αρθρώνουν την εϋνοιά τους ή όχι για τα εκάστοτε εξορυκτικά πλάνα. Ομολογουμένως, δικαιολογημένη σε κάποιες και αδικαιολόγητη σε άλλες περιπτώσεις, η εκμετάλλευση ορυκτών πόρων είναι μια επεμβατική για το περιβάλλον πρακτική, η οποία σε σχεδόν όλες τις φάσεις της έχει άμεσο αντίκτυπο στις κοινωνίες (Sahu et al. 2015). Ωστόσο, η σύγχρονη ανθρώπινη κοινωνία και ο τρόπος ζωής που έχει καθιερωθεί με το πέρασ των αιώνων, επιβάλλει την εξόρυξη απαραίτητων πρώτων υλών λόγω της καθημερινής ζήτησης των υλικών αγαθών από τον άνθρωπο. Και μάλιστα δε, τον 21<sup>ο</sup> αιώνα, όπου οι έννοιες ενεργειακή μετάβαση, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τεχνολογική εξέλιξη κ.α. μετατρέπονται σε επιτακτικές ανάγκες για την επιβίωση και εξέλιξη της κοινωνίας. Κρίσιμο ρόλο στην επίτευξη της ενεργειακής μετάβασης κατέχει το στοιχείο λίθιο.

Το λίθιο, ή όπως έχει αρχίσει να αποκαλείται, ο 'λευκός χρυσός', αποτελεί ένα από τα ορυκτά τα οποία πρωταγωνιστούν σε αυτήν την επερχόμενη ενεργειακή μετάβαση –ή επανάσταση- λόγω της υψηλής αποδοτικότητάς του στις μπαταρίες σε συνδυασμό, με το μικρό του ατομικό βάρος (Agulló, 2022). Για τον λόγο του ότι η ανάγκες είναι πολύ μεγαλύτερες από τα γνωστά αποθέματα, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει χαρακτηρίσει το λίθιο ως κρίσιμη πρώτη ύλη (*critical raw material*) (European Commission, 2020). Όπως παρουσιάζεται σε έκθεση της ΕΕ, στο διάστημα 2025-2028 υπολογίζεται να κυκλοφορούν μεταξύ 50 εκ. και 200 εκ. ηλεκτρικών αυτοκινήτων, δεκαπλασιάζοντας την ζήτηση για μπαταρίες και αποθήκες ενέργειας (Tsiropoulos et al. 2018). Παρόλα αυτά, την στιγμή αυτή στην ΕΕ συνολικά υπάρχει μόνο ένα ενεργό μέτωπο εξόρυξης στην Πορτογαλία και 10 δυνητικά βιώσιμες εκμεταλλεύσεις λιθίου (3 στην Πορτογαλία, 2 στην Ισπανία, 2 στην Γερμανία και από 1 στην Αυστρία, Τσεχία και Φινλανδία), εκ των οποίων

μόνο 3 από αυτές (της Τσεχίας, της Γερμανίας και της Αυστρίας) έχουν σχεδιαστεί υπογείως.

Η κοινωνική ευαισθητοποίηση σχετικά με τις επιπτώσεις της επιφανειακής εξόρυξης -περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές- σε συνδυασμό με τα προηγμένα τεχνολογικά εργαλεία εξόρυξης οδηγεί σε ένα υπόγειο εξορυκτικό μέλλον, προκειμένου να καλυφθεί η παγκόσμια ζήτηση για γήινους πόρους (Renn et al. 2022). Οι υπόγειες εκμεταλλεύσεις υπερτερούν σε πολλούς τομείς, όπως στην απουσία οπτικής μόλυνσης, ηχορύπανσης, ρύπων και άλλων βλαβερών σωματιδίων που ενδεχομένως να παράγουν οι υπαίθριες εκμεταλλεύσεις, καθώς όλα τα παραπάνω είναι χωρικά ελεγχόμενα και επιπλέον, έχουν μεγαλύτερα περιθώρια αποκατάστασης ύστερα από το πέρας της εξόρυξης (Roman, 2022).

Από την άλλη, η έως τώρα έντονη υπαίθρια εξόρυξη, λόγω ευκολίας και απουσίας τεχνογνωσίας, έχει εξαντλήσει μεγάλο αριθμό από τα διαθέσιμα επιφανειακά κοιτάσματα και δίνει έδαφος στην υπόγεια μεταλλευτική δραστηριότητα. Παρ'όλαυτα, σημαντικό ρόλο στην σύγκριση αυτή, έχει η ασφάλεια του προσωπικού, η οποία όπως είναι λογικό, σε περίπτωση προβλήματος, στις υπόγειες εκμεταλλεύσεις υπάρχει μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Ωστόσο, χάρη στην τεχνολογική εξέλιξη, στην αυτοματοποίηση και στην συνεχή βελτίωση των τεχνικών εξόρυξης, μεγάλες μεταλλευτικές εταιρείες, αλλά και πολιτικές τείνουν στην προτίμηση υπόγειων εκμεταλλεύσεων και την εγκατάλειψη των υπαίθριων (Sahu et al. 2015).

Η αυτοματοποίηση της εργασίας καθιστά την μεταλλευτική δραστηριότητα πιο ασφαλή και παραγωγική, συνδυάζοντας την δε, με τις κοινωνικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Έτσι, γίνεται λόγος για υπεύθυνη εξόρυξη, που τηρεί όλες τις προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν για να είναι και βιώσιμη. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, υπάρχει και ο όρος RTM (Real Time Mining), δηλαδή *εξόρυξη σε πραγματικό χρόνο*, ο οποίος προβλέπεται να αναφέρεται όλο και πιο συχνά, καθώς ανατρέχει σε μεταλλευτικές δραστηριότητες πλήρως αυτοματοποιημένες, χρησιμοποιώντας την ανάλυση μεγάλων δεδομένων σε



πραγματικό χρόνο και σε συνδυασμό με την τεχνητή νοημοσύνη, να επιτυγχάνεται τελικά, η εξόρυξη των πρώτων υλών (Song et al. 2013).

Μέθοδοι όπως οι γεωτρήσεις και η επιτόπια συλλογή πετρωμάτων για την γεωλογική έρευνα προς εξερεύνηση κοιτασμάτων και αποθέσεων ορυκτών πόρων, έχουν πλέον εμπλουτιστεί με γεωφυσικές και τηλεπισκοπικές μεθόδους, δηλαδή τρόπους εξ αποστάσεως συλλογής πληροφοριών σχετιζόμενες με το φυσικό περιβάλλον. Η γεωλογική χαρτογράφηση με αυτόν τον τρόπο έχει γίνει πιο έγκυρη, εύκολη, γρήγορη και οικονομική, καθώς, είτε πρόκειται για γεωφυσικές μεθόδους, είτε για τηλεπισκοπικές, από την ανάλυση των δεδομένων, προκύπτει η λεπτομερής θέση και μέτρηση των στόχων που συναντώνται (Kerr et al. 1994; Tichauer et al. 2020). Οι μετρήσεις αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό κάθε φορά (πχ. ορυκτό), και έτσι με την ερμηνεία, προσδιορίζεται αυτό το χαρακτηριστικό και η τοποθεσία του. Φασματοσκοπία είναι η μέτρηση του φωτός ως συνάρτηση του μήκους κύματος που ανακλάται ή εκπέμπεται από ένα υλικό (Clark, 1999) και χρησιμοποιείται για πολλούς σκοπούς, όπως για παράδειγμα από την NASA με το αερομεταφερόμενο AVIRIS. Στην ανίχνευση ορυκτών, οι φασματοσκοπικές μέθοδοι, χρησιμοποιούνται αρκετά λόγω της ευκολίας σάρωσης δύσβατων περιοχών, μεγάλων εκτάσεων αλλά και λόγω της ευκολίας χρήσης των μεθόδων (Anifadi et al. 2019; Mamouch et al. 2022).

Η υπερφασματική σάρωση είναι μια αναδυόμενη, μη επεμβατική τεχνική τηλεπισκόπησης επιφανειών που ξεχωρίζει για την ευκολία, την αποτελεσματικότητα και το χαμηλό κόστος της μεθόδου. Στην υπερφασματική μέθοδο, το ανακλώμενο φως είναι η φυσική ιδιότητα που μετράται, ωστόσο, αντίθετα με την πολυφασματική μέθοδο, για συνεχόμενο φασματικό εύρος. Η κύρια εφαρμογή ήταν η ανάζητηση ορυκτών, η οποία επεκτάθηκε αργότερα σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η ιατρική (Yoon, 2022), η γεωργία (Sethy et al. 2022), η στρατιωτική παρακολούθηση, η περιβαλλοντική παρακολούθηση, η παρακολούθηση δημοσίων έργων και υποδομών κ.α.. Εστιάζοντας στην εξερεύνηση ορυκτών πόρων, χρησιμοποιούνται σήμερα διάφορες προσεγγίσεις, όπως η υπερφασματική σάρωση μετώπου, η αερομεταφερόμενη σάρωση και η

υπερφασματική σάρωση πυρήνων γεωτρήσεων (De La Rosa et al. 2021). Ορισμένες επιστημονικές αναφορές αναλύουν τη χρήση της υπόγειας υπερφασματικής σάρωσης με UAV (Papachristos et al. 2019), τη συμβολή της υπερφασματικής απεικόνισης στη γεωμηχανική (Kurz et al. 2017) ή την προσομοίωση της υπερφασματικής σάρωσης υπόγειων κοιτασμάτων ορυκτών (Lobo et al. 2021) σε εσωτερικούς χώρους, επιτάσσοντας την ανάγκη για την εξέλιξη μίας ολοκληρωμένης μεθόδου επίγειας υπερφασματικής σάρωσης υπόγειων κοιτασμάτων.

Η υπερφασματική σάρωση, ως μη επεμβατική και βιώσιμη μέθοδος, ενσωματώνει καλά όλες τις προϋποθέσεις για μια καινοτόμο ερευνητική χαρτογράφηση ορυκτών κοιτασμάτων (Buckley et al. 2013; Fraser et al. 2006; Krupnik & Khan, 2019). Η χαρτογράφηση μιας επιφάνειας και η ακριβής θέση των ορυκτών είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την ακριβέστερη επιλογή δειγμάτων, αλλά και για την καλύτερη κατανόηση της θέσης και της επέκτασης των ορυκτών σε όλο το κοίτασμα. Καθιστά, επιπλέον, ένα πολύ σημαντικό κομμάτι στην εύκολη και γρήγορη αυτοματοποίηση της γεωλογικής έρευνας.

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η διερεύνηση της υπερφασματικής σάρωσης, και ενδεχομένως η βελτιστοποίηση της τεχνολογίας αυτής, για την ανίχνευση ορυκτών σε υπόγεια μεταλλεία. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε μια παλιά μεταλλευτική στοά η οποία αποτελεί σήμερα μέρος του ορυχείου επισκεπτών στο Zinnwald της Σαξονίας. Έτσι, συντάσσεται μία μεθοδολογία και προσδιορίζονται τα μέσα που απαιτούνται γι' αυτήν, λαμβάνοντας υπόψη τις ασυνήθιστες συνθήκες που μπορεί να συναντήσει κανείς σε ένα τέτοιο περιβάλλον. Η μέθοδος βασίζεται στη σύγκριση διαφορετικών αισθητήρων υπό συνθήκες χαμηλού φωτισμού με σάρωση των επιφανειών της στοάς του ορυχείου, καθορίζοντας την πιο αποτελεσματική διάταξη. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται σε μια παλιά μεταλλευτική στοά η οποία αποτελεί σήμερα μέρος του ορυχείου επισκεπτών στο Zinnwald της Σαξονίας.

Η διασυνοριακή περιοχή εξόρυξης Zinnwald-Cinovec εκτείνεται στο Erzgebirge ή στα Ore Mountains, τα οποία χωρίζονται μεταξύ της Γερμανίας και της Τσεχικής

Δημοκρατίας, και έχει μεγάλη ιστορία εξόρυξης, κυρίως κασίτερου και βολφραμίου, που χρονολογείται από το 1230. Οι μεταλλευτικές στοές εκτείνονται σε πολλά χιλιόμετρα, φτάνοντας ακόμα και στα σύνορα με την γειτονική Τσεχία. Το κοίτασμα περιλαμβάνει τη μεγαλύτερη συγκέντρωση λιθίου στη Γερμανία (Bock et al, 2020) και σχηματίζεται κυρίως από το αλβιτικό γρανιτικό πέτρωμα ζιννβαλδίτη, το οποίο περιέχει κυρίως μαζικά στρώματα ενός τύπου γρανίτη με σύσταση 70%-80% σε χαλαζία και 20%-30% ζιννβαλδίτη (Dittrich, 2019).

Μέσα από την εργασία, αναπτύσσεται ένα καινοτόμο διάγραμμα ροής υπόγειας υπερφασματικής χαρτογράφησης ορυκτών, συγκρίνοντας εργαστηριακές δοκιμές με την επιτόπια λήψη δεδομένων και χρησιμοποιώντας την μηχανική μάθηση, και ειδικότερα το περιβάλλον *hylite*, για την επεξεργασία των δεδομένων, με αποτέλεσμα τη χαρτογράφηση της αφθονίας των ορυκτών που βρίσκονται στις επιφάνειες που μελετώνται.

Ταυτόχρονα, η επεξεργασία των δεδομένων στον μεγαλύτερο βαθμό διενεργήθηκε με το υπολογιστικό πρόγραμμα *hylite* (Thiele et al. 2021). Με τον Dr. Moritz Kirsch, που ηγήθηκε του συγκεκριμένου πρότζεκτ, αλλά και όλη την ομάδα, έγινε μία προσπάθεια για να καταγραφεί μία επιτυχής ροή εργασιών (εργασίες πεδίου, επεξεργασία δεδομένων, ερμηνεία αποτελεσμάτων) που να απαντά επιτυχώς στο αρχικό ερώτημα. Επιπλέον, η παρούσα πτυχιακή εργασία έχει βασιστεί σε δημοσίευση που πρόκειται να δημοσιευτεί.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Θεωρητικό υπόβαθρο

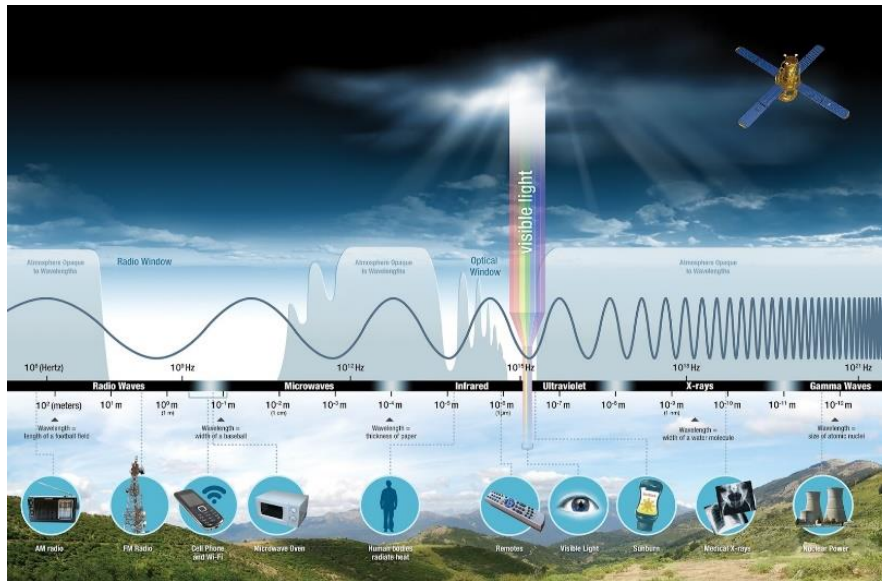
### 2.1. Αρχές της οπτικής

Οπτική είναι κλάδος της Φυσικής που μελετά φαινόμενα που σχετίζονται με το φως. Η Γεωμετρική Οπτική μπορεί να ερμηνεύσει πολλά από αυτά τα φαινόμενα, κάνοντας τη θεώρηση ότι το φως διαδίδεται ευθύγραμμα, με τη μορφή φωτεινών ακτίνων. (Αρχοντής et al. 2017)

Το φως είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα που διαδίδονται στον χώρο. Δηλαδή μεταβολές ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου που διαδίδονται στον χώρο ως κύμα. Οι συχνότητες αυτών των μεταβολών για το σύνολο των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων συνιστούν το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, μέρος του οποίου αντιστοιχεί στο ορατό φως. Πρωτογενείς πηγές της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κάθε είδους είναι ηλεκτρικά φορτία σε επιταχυνόμενη κίνηση.

Ορισμένα, όπως τα ραδιοκύματα, τα κύματα μικροκυμάτων και τα υπέρυθρα κύματα, έχουν μεγαλύτερο μήκος κύματος, ενώ άλλα, όπως οι υπεριώδεις ακτίνες, οι ακτίνες Χ και οι ακτίνες γάμμα, έχουν πολύ μικρότερο μήκος κύματος. Το ορατό φως βρίσκεται στη μέση αυτού του εύρους ακτινοβολίας μεγάλου και μικρού μήκους κύματος. Αυτό το μικρό τμήμα ενέργειας είναι το μόνο που μπορεί να ανιχνεύσει το ανθρώπινο μάτι. Για την ανίχνευση όλων των άλλων μορφών ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας απαιτούνται όργανα (Περάκης et al. 2015)

Ανάλογα με το μήκος κύματος, η ακτινοβολία κατατάσσεται σε κάποια περιοχή του φάσματος. Το ορατό φως βρίσκεται περίπου στη μέση αυτού του φάσματος και χαρακτηρίζεται από μήκους κύματος στο διάστημα περίπου 400 nm – 700 nm. Αυτό το μικρό τμήμα είναι το μόνο που μπορεί να ανιχνεύσει το ανθρώπινο μάτι. Οι υπόλοιπες περιοχές είναι οι ακτίνες γ, ακτίνες x, η υπεριώδης ακτινοβολία, η υπέρυθη ακτινοβολία, τα ραδιοκύματα και τα μικροκύματα. Όλες αυτές οι ακτινοβολίες καλύπτουν ένα εύρος από 0,0001 nm μέχρι 1 m.



Εικόνα 2-1: Αναπαράσταση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος σε σχέση με τα φασματικά κανάλια (Πηγή: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>)

Η ακτινοβολία καταγράφεται άμεσα από τα όργανα τηλεπισκόπησης. Η ατμόσφαιρα απορροφά επίσης φως, το οποίο μειώνει την παρατηρούμενη ακτινοβολία. Η ακτινοβολία έχει μετράται συνήθως σε μονάδες  $\frac{\text{watt}}{\text{steradian} \cdot \text{m}^2}$ .

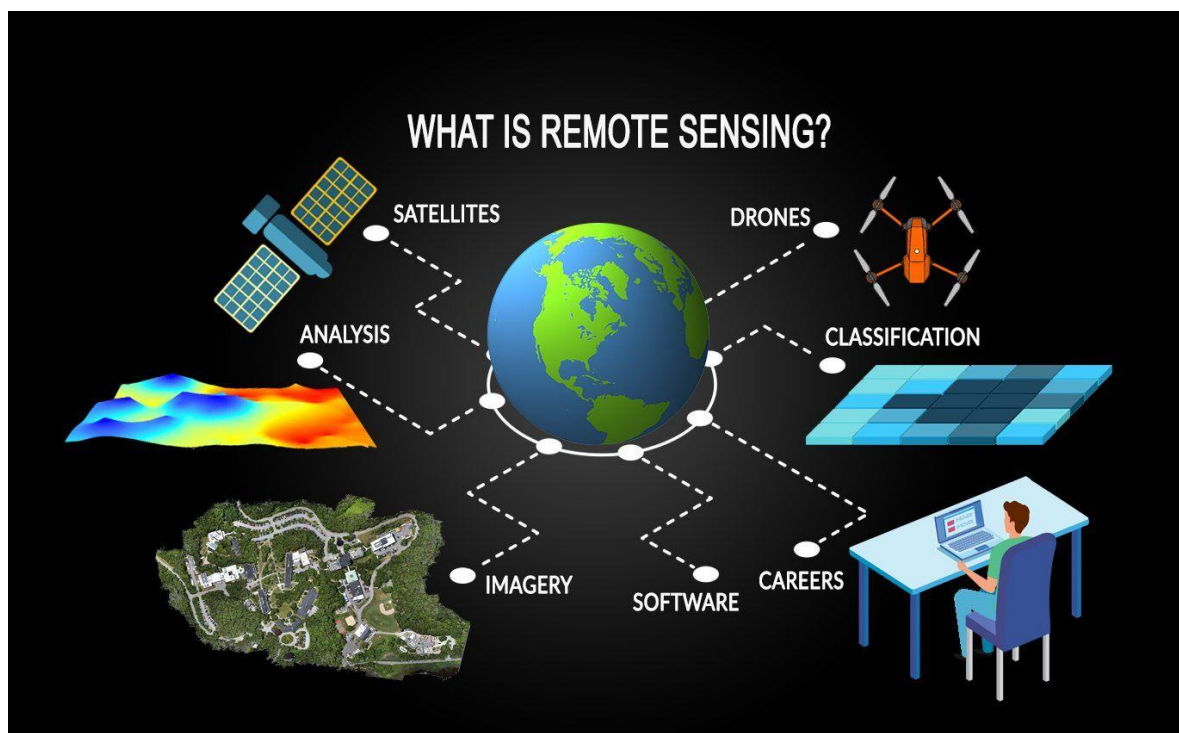
Η **ανακλαστικότητα** είναι ο λόγος της ποσότητας φωτός που φεύγει από ένα στόχο προς την ποσότητα φωτός που προσπίπτει στο στόχο και δεν έχει μονάδες. Εάν για τη μέτρηση της ανακλαστικότητας αναχαιτίζεται όλο το φως που εξέρχεται από το στόχο, το αποτέλεσμα ονομάζεται «ημισφαιρική ανακλαστικότητα».

Η ανάκλαση (ή πιο συγκεκριμένα η *ημισφαιρική ανάκλαση*, εφόσον υποθέσουμε πως αντιστοιχεί σε όλο το φως που ανακλάται από τον στόχο) είναι μια ιδιότητα του υλικού που παρατηρείται. Η ακτινοβολία, από την άλλη πλευρά, εξαρτάται από την ένταση και την κατεύθυνση του φωτισμού, τον προσανατολισμό και τη θέση του στόχου και τη διαδρομή του φωτός μέσω της ατμόσφαιρας. Η «φαινόμενη ανάκλαση» διαφέρει από την πραγματική ανάκλαση στο ότι αντιμετωπίζονται οι σκιές και οι επιδράσεις κατεύθυνσης στην ανάκλαση. Πολλοί άνθρωποι αναφέρονται σε αυτό το φαινόμενο ως «ανακλαστικότητα» (Ray, 1994).

Σε πολλές εφαρμογές, η ακτινοβολία, η ανακλαστικότητα και η φαινομενική ανακλαστικότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά για μετρήσεις. Ωστόσο, δεδομένου ότι η ανακλαστικότητα είναι μια ιδιότητα του ίδιου του υλικού, είναι πιο αντιπροσωπευτική για αυτό και έτσι προτιμάται η χρήση της όταν προσδιορίζεται το ίδιο το υλικό (Ray, 1994).

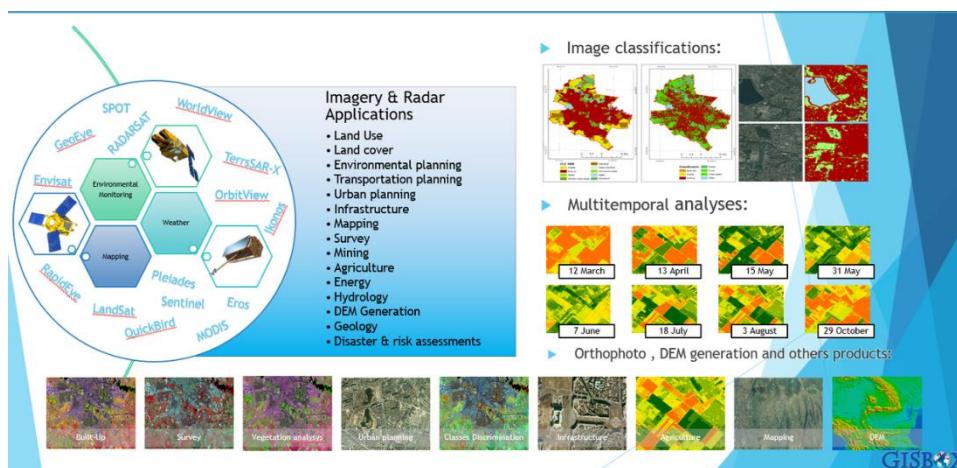
## 2.2. Τηλεπισκόπηση

Στο Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας (Μπαμπινιώτης, 2002) η τηλεπισκόπηση ορίζεται ως: η τεχνική συλλογής στοιχείων για τους πόρους της γήινης επιφάνειας (ύπαρξη νερού, μεταλλεύματος κλπ.) με την ανάλυση των δεδομένων που παρέχουν ειδικά όργανα, τα οποία βρίσκονται σε δορυφόρους και σε αεροπλάνα: την χρησιμοποιούν ακόμη και αλιευτικοί στόλοι, για να εντοπίζουν τα κοπάδια των ψαριών. Η εκτενής γλωσσολογική αναφορά παρατίθεται για να αντικατοπτριστεί η ευρύτητα του ορισμού αυτού και την εφαρμογή που είχε και έχει στην ανθρωπότητα.



Εικόνα 2-2: Το ευρύ φάσμα της τηλεπισκόπησης (Πηγή: [www.gisgeography.com](http://www.gisgeography.com) )

Το στοιχείο που κάνει την τηλεπισκόπηση να είναι ξεχωριστή από κάθε άλλη μέθοδο, είναι αφενός η παρατήρηση ενός φαινομένου ή αντικειμένου και αφετέρου η έννοια της εξ αποστάσεως παρατήρησης και η απουσία επαφής μεταξύ του παρατηρητή και του στόχου. Η συλλογή της πληροφορίας, η οποία μπορεί να έχει διαφορετικές μορφές αλλά αφορά φυσικές παραμέτρους, σε συνδυασμό με τα τεχνολογικά επιτεύγματα του τελευταίου αιώνα, έχουν δώσει βήμα στην ανάπτυξη νέων μεθόδων για την συλλογή μεγάλου όγκου πληροφοριών αλλά και την επεξεργασία των δεδομένων, με ευκολία, μικρό κόστος και πρόσβαση σε περιοχές που δεν ήταν εφικτό. Η τηλεπισκόπηση είναι μια τεχνολογία που αποσκοπεί στην παρατήρηση και μελέτη του πλανήτη Γη, του περιβάλλοντός του και της δυναμικής του, σε διάφορες κλίμακες. Συνολικά, ο όρος περιλαμβάνει όλες τις διεργασίες και τα μέσα, όπως τους διαφορετικούς αισθητήρες χρησιμοποιούνται, τα δεδομένα, τα λογισμικά, την προ-επεξεργασία και την έπειτα την επεξεργασία, καθώς και την ανάλυση και τα τελικά συμπεράσματα, όπως φαίνεται και στην Εικ. 2-2. Μερικές από τις πολλές εφαρμογές της τηλεπισκόπησης μπορούν να εντοπιστούν στην γεωλογική χαρτογράφηση, την ανίχνευση ορυκτών υλών, την περιβαλλοντική παρακολούθηση, την στρατιωτική κατασκοπεία, την γεωργία, την διαχείριση της γης κ.α.

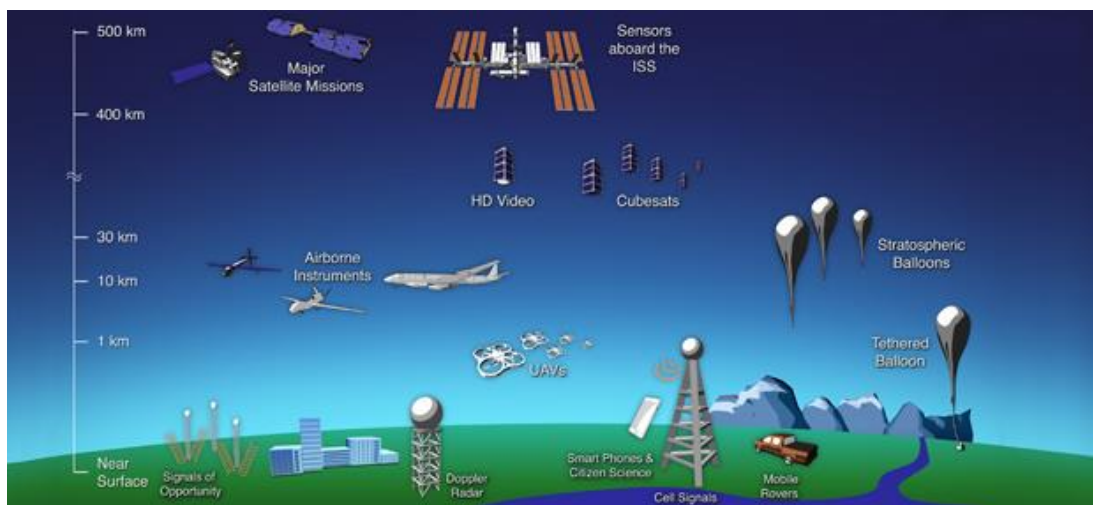


Εικόνα 2-3: Χρήσεις και εφαρμογές της τηλεπισκόπησης. (Πηγή: <https://www.gisbox.ro/remote-sensing/>)

Όπως αναφέρθηκε, η τηλεπισκόπηση αποτελείται από ξεχωριστές ενότητες που αποσκοπούν στην επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Αρχικά,

επιλέγεται ο χώρος μελέτης ο οποίος συνήθως πρόκειται για κάποιο φυσικό ή ανθρωπογενές περιβάλλον και όπου εφαρμόζεται κάποια συγκεκριμένη αρχή όπως για παράδειγμα της γεωλογίας, εδαφολογίας, γεωγραφίας κ.α. Κατά την διάρκεια της μέτρησης, ο αισθητήρας καταγράφει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία εκπέμπεται ή αντανακλάται από το χώρο μελέτης και έπειτα από επεξεργασία των μετρήσεων, όπου ουσιαστικά τα δεδομένα υπόκεινται σε μία «ερμηνεία», καταλήγουν σε μορφή αξιοποιήσιμων πληροφοριών. Οι ίδιες μετρήσεις, αναλόγως με τον τρόπο τον οποίο επεξεργάζονται και που δίνεται έμφαση, μπορούν να παραδώσουν διαφορετικά τελικά αποτελέσματα. Μεγάλη σημασία, σε αυτό το σημείο, έχει ο συνδυασμός των δεδομένων και με άλλες γεωχωρικές εφαρμογές, όπου η έννοια του χώρου και των γεωγραφικών συντεταγμένων εμπλουτίζουν παραπάνω την πληροφορία (Campbell & Wynne, 2011).

Τα μέσα ανίχνευσης μπορούν να εντοπιστούν σε ένα πολύ ευρύ φάσμα, ώστε να ανταποκρίνονται στην πολυπλοκότητα, την διαφορετικότητα και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε περίπτωσης. Τα βασικά χαρακτηριστικά που τα διαφοροποιούν είναι αν πρόκειται για εναέριο ή για επίγειο μέσο, η ανάλυση εικόνας, η έκταση κάλυψης, οι περιορισμοί πτήσης (όπως βάρος, όριο πτήσης, υψόμετρο, οι ενεργειακές ανάγκες κ.α.). Όταν γίνεται λόγος για εναέρια μέσα, οι επιλογές είναι πολλές, καθώς μπορεί να είναι δορυφόροι, μη επανδρωμένα αεροσκάφη, ελικόπτερα ή διαφόρων τύπων ραδιοεντοπιστές (radar).



Εικόνα 2-4: Αισθητήρες τηλεπισκόπησης (Πηγή: [www.gisgeography.com](http://www.gisgeography.com))



### 2.2.1. Ανάλυση δεδομένων

Η ανάλυση παίζει ρόλο στον τρόπο με τον οποίο μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα από έναν αισθητήρα. Η ανάλυση μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την τροχιά του δορυφόρου και το σχεδιασμό του αισθητήρα. Υπάρχουν τέσσερις τύποι ανάλυσης που πρέπει να ληφθούν υπόψη για κάθε σύνολο δεδομένων η ραδιομετρική, η χωρική, η φασματική και η χρονική.

Η ραδιομετρική ανάλυση είναι η ποσότητα πληροφορίας σε κάθε εικονοστοιχείο, δηλαδή ο αριθμός των bits που αντιπροσωπεύουν την καταγεγραμμένη ενέργεια. Κάθε bit καταγράφει έναν εκθέτη της δύναμης 2. Για παράδειγμα, μια ανάλυση 8 bit είναι  $2^8$ , που σημαίνει ότι ο αισθητήρας διαθέτει 256 πιθανές ψηφιακές τιμές (0-255) για την αποθήκευση πληροφοριών. Έτσι, όσο υψηλότερη είναι η ραδιομετρική ανάλυση, τόσο περισσότερες τιμές είναι διαθέσιμες για την αποθήκευση πληροφοριών, παρέχοντας καλύτερη διάκριση μεταξύ ακόμη και των πιο μικρών διαφορών στην ενέργεια. Για παράδειγμα, κατά την αξιολόγηση της ποιότητας των υδάτων, η ραδιομετρική ανάλυση είναι απαραίτητη για τη διάκριση μεταξύ λεπτών διαφορών στο χρώμα του ωκεανού.

Η χωρική ανάλυση ορίζεται από το μέγεθος κάθε εικονοστοιχείου σε μια ψηφιακή εικόνα και την περιοχή της γήινης επιφάνειας που αντιπροσωπεύει το εν λόγω εικονοστοιχείο. Επί παραδείγματι, οι περισσότερες από τις ζώνες που παρατηρούνται από το φασματοραδιόμετρο μέτριας ανάλυσης (MODIS) έχουν χωρική ανάλυση 1 km -κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει μια περιοχή 1 km x 1 km στο έδαφος. Το MODIS περιλαμβάνει επίσης ζώνες με χωρική ανάλυση 250 m ή 500 m. Όσο πιο λεπτή είναι η ανάλυση, δηλαδή, όσο μικρότερος είναι ο αριθμός, τόσο περισσότερες λεπτομέρειες είναι ορατές.

Φασματική ανάλυση είναι η ικανότητα ενός αισθητήρα να διακρίνει λεπτότερα μήκη κύματος, δηλαδή να έχει περισσότερες και στενότερες ζώνες. Οι πολυφασματικοί αισθητήρες διαθέτουν 3-10 ζώνες (φασματικά κανάλια), ενώ οι υπερφασματικοί έχουν εκατοντάδες έως και χιλιάδες ζώνες. Όσο στενότερο είναι το εύρος των μηκών κύματος για μια δεδομένη ζώνη, τόσο πιο λεπτομερής

είναι η φασματική ανάλυση. Για παράδειγμα, το Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) καταγράφει πληροφορίες σε 224 φασματικά κανάλια. Σε αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας, μπορούν να γίνουν διακρίσεις μεταξύ τύπων πετρωμάτων και ορυκτών, τύπων βλάστησης και άλλων χαρακτηριστικών.

Η χρονική ανάλυση είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένας δορυφόρος για να ολοκληρώσει μια τροχιά και να επισκεφθεί εκ νέου την ίδια περιοχή παρατήρησης. Η ανάλυση αυτή εξαρτάται από την τροχιά, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και το πλάτος της σάρωσης. Επειδή οι γεωστατικοί δορυφόροι αντιστοιχούν στο ρυθμό με τον οποίο περιστρέφεται η Γη, η χρονική ανάλυση είναι πολύ πιο λεπτή. Οι πολικοί δορυφόροι σε τροχιά έχουν χρονική ανάλυση που μπορεί να κυμαίνεται από 1 ημέρα έως 16 ημέρες. Για παράδειγμα, ο αισθητήρας MODIS που βρίσκεται στους δορυφόρους Terra και Aqua της NASA έχει χρονική ανάλυση 1-2 ημερών, επιτρέποντας στον αισθητήρα να απεικονίζει τη Γη όπως αλλάζει μέρα με τη μέρα. Από την άλλη πλευρά, ο αισθητήρας Operational Land Imager (OLI) που βρίσκεται στον κοινό δορυφόρο Landsat 8 των NASA/USGS έχει μικρότερο πλάτος σάρωσης και χρονική ανάλυση 16 ημερών- απεικονίζει όχι τις ημερήσιες αλλαγές, αλλά τις διμηνιαίες.

### 2.3. Υπερφασματική τηλεπισκόπηση

Η υπερφασματική μέθοδος είναι μία απεικονιστική μέθοδος, η οποία τις τελευταίες δεκαετίες χρησιμοποιείται όλο και πιο συχνά, λόγω της ευκολίας χρήσης της και του χαμηλού κόστους της. Η διαφορά της με τις γνωστές σε όλους ψηφιακές εικόνες είναι το γεγονός της ύπαρξης μίας τρίτης διάστασης, αυτής των φασματικών δεδομένων του κάθε σημείου της εικόνας. Χρησιμοποιεί φάσματα ανάκλασης ή μέτρηση μήκους κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που διασκορπίζεται από ένα υλικό στόχο και σε συνδυασμό με τις άλλες δύο διαστάσεις, οι οποίες προσδιορίζουν χωρικά τα σημεία. Όλα μαζί συνθέτουν τον υπερφασματικό κύβο (hypercube) (Εικ. 2-5), ο οποίος συνεπώς προσδιορίζεται από 3 διαστάσεις σε κάθε σημείο του (χωρική και φασματική πληροφορία), για παράδειγμα ένα pixel.

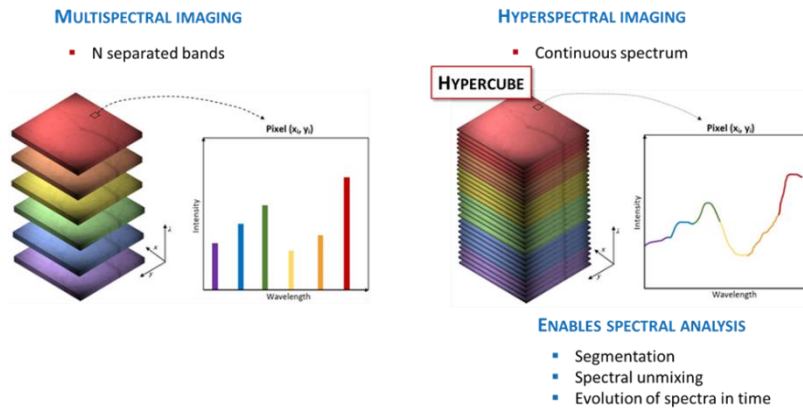


Εικόνα 2-5: Αναπαράσταση τρισδιάστατου υπερφασματικού κύβου (Πηγή: [https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral\\_imaging](https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral_imaging))

Οι χρήσεις της μεθόδου σήμερα, έχουν ένα τεράστιο πεδίο εφαρμογής το οποίο καλύπτει από καθημερινές έως ειδικές δραστηριότητες του ανθρώπου. Συγκεκριμένα, η απεικονιστική φασματομετρία, ή υπερφασματική απεικόνιση, όπως ονομάζεται τώρα, έχει μακρά ιστορία ανάπτυξης και μετρημένη αποδοχή από την επιστημονική κοινότητα. Η ώθηση για την ανάπτυξη της απεικονιστικής φασματομετρίας προήλθε την δεκαετία του 1970 από τις φασματικές μετρήσεις πεδίου για την ανάλυση των δεδομένων του Landsat-1. Η πρόοδος απαιτούσε εξελίξεις στα ηλεκτρονικά, τους υπολογιστές και το λογισμικό καθ' όλη τη δεκαετία του 1980 και μέχρι το 1990, προτού ένα μεγαλύτερο τμήμα της κοινότητας παρατήρησης της Γης αγκαλιάσει την τεχνική. Η ανάπτυξη του υλικού πραγματοποιήθηκε στη NASA/JPL, ξεκινώντας με το αερομεταφερόμενο φασματόμετρο απεικόνισης (AIS) το 1983. Το 1987 ακολούθησε το αερομεταφερόμενο φασματόμετρο απεικόνισης ορατού/υπέρουθρου (AVIRIS), το οποίο έχει αποδειχθεί μέχρι σήμερα ότι είναι ο κύριος πάροχος υπερφασματικών δεδομένων υψηλής ποιότητας για την επιστημονική κοινότητα. Άλλα κρίσιμα στοιχεία για την αξιοποίηση αυτής της πηγής δεδομένων ήταν τα λογισμικά, κυρίως το ENVI, και άλλα φασματόμετρα πεδίου (Goetz, 2009).

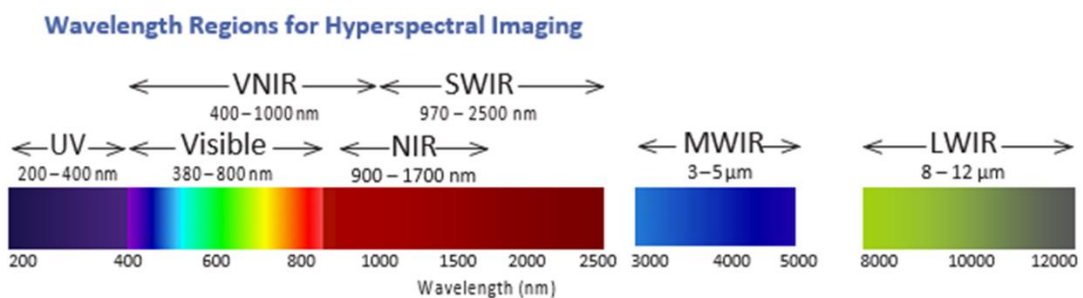
Ο όρος *υπερφασματική* εδραιώθηκε καθώς, από *πολυφασματική* που ήταν ευρέως γνωστή στην αρχή, άρχισαν να επεκτείνονται οι φασματικές περιοχές, και έτσι επικράτησε ο όρος υπερφασματική τηλεσκόπηση. Μία ακόμη διαφορά της πολυφασματικής μεθόδου με την υπερφασματική (Εικ. 2-6), είναι η συνέχεια

των φασματικών περιοχών της δεύτερης, δηλαδή στην υπερφασματική μέθοδο οι φασματικές περιοχές αναλύονται με μία συνέχεια, ενώ στην πολυφασματική εξετάζονται συγκεκριμένα εύρη αυτών των περιοχών (Manolakis et al. 2016).



Εικόνα 2-6: Διαφορές πολυφασματικής με υπερφασματική μεθόδου (Πηγή: <https://www.edmundoptics.eu/knowledge-center/application-notes/imaging/hyperspectral-and-multispectral-imaging/>)

Η ανίχνευση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσω τηλεπισκόπησης έχει τέσσερις μεγάλες συνιστώσες: μια πηγή ακτινοβολίας, αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα, αλληλεπίδραση με το γήινο επιφάνεια και έναν αισθητήρα. Η σύνδεση μεταξύ των συστατικών του συστήματος είναι η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που μεταφέρεται μέσω της ακτινοβολίας (Manolakis et al. 2016).

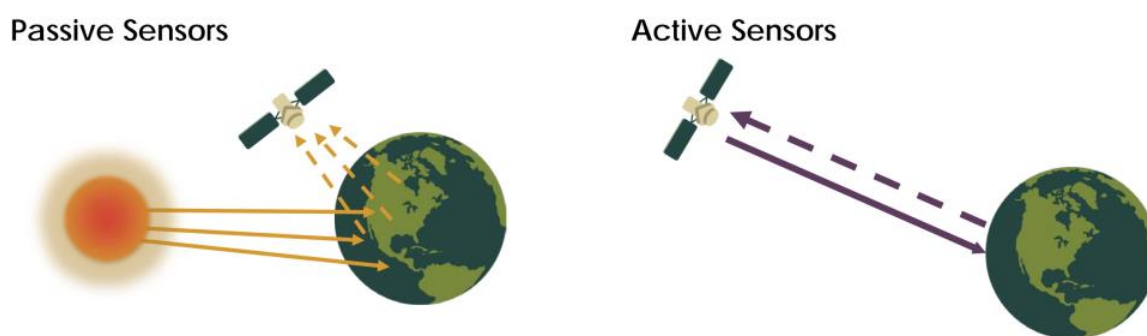


Εικόνα 2-7: Φασματικές περιοχές υπερφασματικής απεικόνισης (Πηγή: <https://www.middletonspectral.com/resources/what-is-hyperspectral-imaging/>)

### 2.3.1. Πηγή

Η πηγή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μπορεί να είναι φυσική, όπως ο ήλιος ανακλώμενο φως του ήλιου ή η εκπεμπόμενη θερμότητα της γης, ή ανθρωπογενής, όπως το ραντάρ μικροκυμάτων. Αυτό οδηγεί στην ταξινόμηση

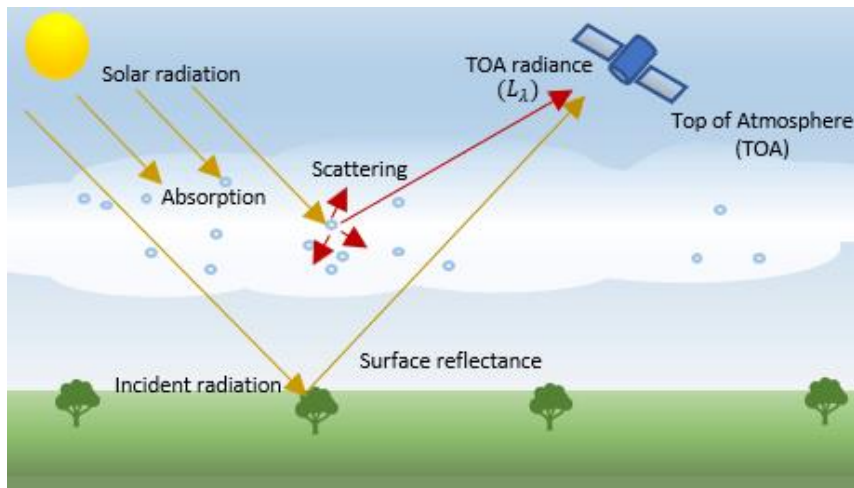
των συστημάτων τηλεπισκόπησης σε ενεργητικούς και παθητικούς τύπους. Τα ενεργά συστήματα εκπέμπουν ακτινοβολία και αναλύουν το επιστρεφόμενο σήμα (Εικ. 2-8). Τα παθητικά συστήματα ανιχνεύουν φυσική ακτινοβολία που εκπέμπεται είτε από τον ήλιο είτε από τη θερμική ακτινοβολία που εκπέμπεται από όλα τα αντικείμενα με θερμοκρασίες πάνω από το απόλυτο μηδέν. Με τα ενεργά συστήματα, όπως το ραντάρ μικροκυμάτων, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η απόσταση ενός στόχου από τον αισθητήρα (εμβέλεια), ενώ τα παθητικά συστήματα δεν μπορούν να παρέχουν πληροφορίες για την απόσταση (Manolakis et al. 2016).



Εικόνα 2-8: Ενεργητικά και παθητικά συστήματα τηλεπισκόπησης (Πηγή: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>)

### 2.3.2. Αλληλεπίδραση με την ατμόσφαιρα

Τα χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που διαδίδεται μέσω της ατμόσφαιρας τροποποιούνται από διάφορες διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της απορρόφησης και της σκέδασης. Αυτή η παραμόρφωση είναι ανεπιθύμητη και απαιτεί διόρθωση εάν θέλουμε να μελετήσουμε την επιφάνεια της γης, ή επιθυμητή αν θέλουμε να μελετήσουμε την ίδια την ατμόσφαιρα (Manolakis et al. 2016).



Εικόνα 2-9: Σχεδιάγραμμα λήψης μέτρησης (Πηγή: <https://www.mathworks.com/help/images/hyperspectral-data-correction.html>)

Η ποσότητα και η φασματική κατανομή της ακτινοβολίας που εκπέμπεται ή ανακλάται από την επιφάνεια της γης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της των υλικών "στόχων". Η αλληλεπίδραση μεταξύ της ύλης και της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας καθορίζεται από α) τις φυσικές ιδιότητες της ύλης και β) το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας που ανιχνεύεται εξ αποστάσεως (Manolakis et al. 2016).

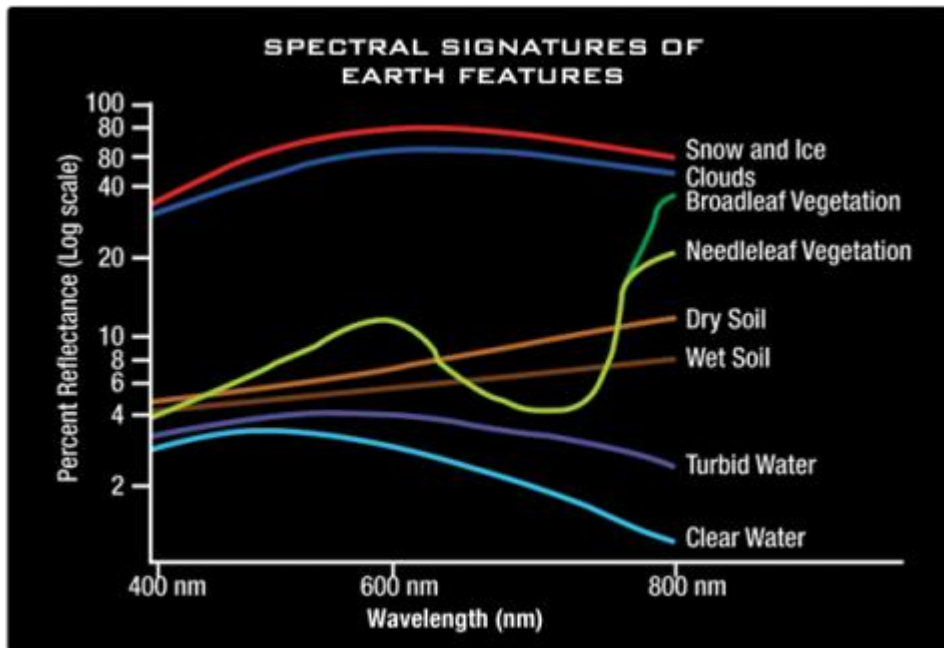
### 2.3.3. Αισθητήρας

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία έχει αλληλεπιδράσει με την επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα και έχει υποστεί κάποια μορφή φασματικής διαφοροποίησης στο σύνολο της μέτρησης, καθώς μεταδίδεται μέσω ενός φασματικού ανιχνευτή, καταγράφεται από έναν ηλεκτροοπτικό ανιχνευτή ο οποίος μετατρέπει την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ηλεκτρικό σήμα που σχετίζεται άμεσα με την ακτινοβολία σε μια συγκεκριμένη φασματική ζώνη από τη σκηνή που σαρώθηκε. Το ηλεκτρικό σήμα ενισχύεται, μετατρέπεται σε ψηφιακά δεδομένα και οργανώνεται σε μια δομή δεδομένων για περαιτέρω επεξεργασία. Μόλις τα δεδομένα συλλεχθούν από τον αισθητήρα, πρέπει να αναλυθούν είτε επιτόπια ή είτε αργότερα. Η ακτινοβολία που λαμβάνει ο αισθητήρας μπορεί να μετρηθεί σε διάφορες θέσεις μίας σκηνής, σε ένα εύρος μηκών κύματος και μερικές φορές σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Αυτό οδηγεί σε πλούσια σύνολα δεδομένων τα οποία μπορούν να οργανωθούν και να

διερευνηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Παραδοσιακά, για να σχηματιστεί μια ψηφιακή εικόνα, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα από μία μόνο ζώνη μήκους κύματος, όπου κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει την ενέργεια ακτινοβολίας μίας αντίστοιχης περιοχής. Στη συνέχεια, κάθε μεμονωμένη εικόνα μπορεί να επεξεργαστεί και να αναλυθεί χρησιμοποιώντας καθιερωμένες τεχνικές επεξεργασίας εικόνας που εκμεταλλεύονται γεωμετρικές πληροφορίες ή πληροφορίες που αφορούν το σχήμα. Ωστόσο, εάν συλλέξουμε τις μετρήσεις της ακτινοβολίας σε διαφορετικές ζώνες μήκους κύματος για το ίδιο χωρικό δείγμα, και να τις διατάξουμε σε ένα διάγραμμα, μπορούμε να αναλύσουμε τα «φασματικά» δεδομένα που προκύπτουν χρησιμοποιώντας πολυμεταβλητές στατιστικές τεχνικές (Manolakis et al. 2016).

#### 2.4. Φασματικές ιδιότητες ορυκτών

Όλα τα πράγματα στη Γη αντανακλούν, απορροφούν ή μεταδίδουν ενέργεια, και η ποσότητα της οποίας ποικίλλει ανάλογα με το μήκος κύματος. Τα πάντα στη Γη έχουν ένα μοναδικό φασματικό αποτύπωμα, όπως στην Εικ. 2-10. Οι ερευνητές μπορούν να χρησιμοποιήσουν αυτές τις πληροφορίες για να αναγνωρίσουν διαφορετικά χαρακτηριστικά της Γης καθώς και διαφορετικούς τύπους πετρωμάτων και ορυκτών. Ο αριθμός των φασματικών ζωνών που ανιχνεύονται από ένα συγκεκριμένο όργανο, η φασματική του ανάλυση, καθορίζει το πόσο μεγάλη διαφοροποίηση μπορεί να εντοπίσει ένας ερευνητής μεταξύ των υλικών.



Εικόνα 2-10: Φασματικές υπογραφές διαφορετικών χαρακτηριστικών στην Γη στο ορατό φάσμα (Πηγή: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing#spectral-resolution>)

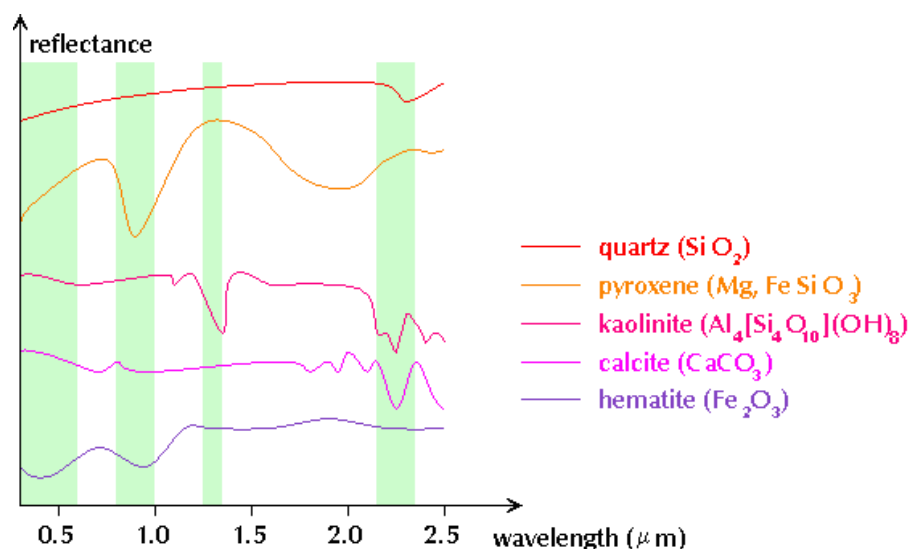
Οι φασματικές υπογραφές των πετρωμάτων και των ορυκτών παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη χημική τους σύνθεση και τις κρυσταλλικές τους ιδιότητες, το μέγεθος των κόκκων και την τραχύτητά τους, σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος από το ορατό έως το υπέρυθρο. Στην περιοχή του ορατού και του εγγύς υπέρυθρου (VNIR: 400-1000 nm), τα φασματικά χαρακτηριστικά κυριαρχούνται από ηλεκτρονιακές διεργασίες σε μεταβατικά μέταλλα, όπως Fe, Mn, Cu, Ni, Cr κ.λπ. Επομένως, ο σίδηρος είναι το σημαντικότερο συστατικό με φασματικές ιδιότητες στο VNIR και τα ορυκτά πλούσια σε σίδηρο χαρακτηρίζονται από χαμηλή ανάκλαση (υψηλή απορρόφηση) κάτω από τα 700 nm. Άλλα ορυκτά, τα οποία αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος των πετρωμάτων της γήινης επιφάνειας, όπως το Si, το Al και ορισμένες ομάδες ανιόντων (π.χ. πυριτικά, ανθρακικά, οξείδια) υδροξειδία, έχουν λιγότερα φασματικά χαρακτηριστικά στην περιοχή VNIR, αλλά παρουσιάζουν πολύ περισσότερες ενδείξεις στην περιοχή βραχέων κυμάτων υπέρυθρου (SWIR: 1000-3000 nm) (Kazantzidis et al. 2022).

Στην πραγματικότητα, τα φασματικά χαρακτηριστικά των υδροξυλίων και των ανθρακικών αλάτων χαρακτηρίζουν την περιοχή SWIR. Το υδροξύλιο είναι ένα



ευρέως διαδεδομένο συστατικό που απαντάται σε ορυκτά που σχηματίζουν πετρώματα, όπως οι άργιλοι, οι μάικες, ο χλωρίτης κλπ. Παρουσιάζει μια βασική ζώνη απορρόφησης περίπου στα 2740 nm -2770 nm και άλλη μία στα 1440 nm. Τα ανθρακικά άλατα, τα οποία απαντούν συνήθως στα πετρώματα της γήινης επιφάνειας με τη μορφή ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ), μαγνησίτη ( $\text{MgCO}_3$ ), δολομίτη [(Ca-Mg)  $\text{CO}_3$ ] και σιδερίτη ( $\text{FeCO}_3$ ), παρουσιάζουν μία τυπική απορρόφηση γύρω στα 2300 nm, ενώ η περιεκτικότητα σε νερό μπορεί να εκτιμηθεί από το βάθος της απορρόφησης στα 1400 nm και 1900 nm. Η περιοχή του θερμικού υπέρυθρου (TIR: 1000-20000 nm), από γεωλογική άποψη, είναι μια ιδιαίτερα σημαντική φασματική περιοχή για την τηλεπισκόπηση με στόχο τη διερεύνηση της σύνθεσης των γήινων υλικών. Πράγματι, τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά απορρόφησης πολλών ομάδων ορυκτών που σχηματίζουν πετρώματα (π.χ. πυριτικά, ανθρακικά, οξειδία, φωσφορικά, θειικά, νιτρικά, νιτρώδη, υδροξύλια) εμφανίζονται στην περιοχή TIR. Συνοπτικά:

- a. Τα πυριτικά, που είναι η πιο άφθονη ομάδα ορυκτών στον φλοιό της Γης, εμφανίζουν φασματικά χαρακτηριστικά λόγω της παρουσίας του τετραέδρου  $\text{SiO}_4$  γύρω στα 8000 nm έως 12000 nm
- b. Τα ανθρακικά εμφανίζουν ένα ασθενές χαρακτηριστικό γύρω στα 11300 nm που μπορεί να ανιχνευθεί
- c. Τα θειικά εμφανίζουν ζώνες κοντά στα 9000 nm και 16000 nm
- d. Τα φωσφορικά έχουν επίσης θεμελιώδη χαρακτηριστικά κοντά στα 9250 nm και 10300 nm
- e. Τα χαρακτηριστικά στα οξειδία καταλαμβάνουν συνήθως το ίδιο εύρος με εκείνο των ζωνών στο Si-O, δηλαδή 8000 nm έως 12000 nm
- f. Τα νιτρικά έχουν φασματικά χαρακτηριστικά στα 7200 nm και τα νιτρώδη στα 8000 nm και 11800 nm
- g. Τα ιόντα υδροξυλίου εμφανίζουν θεμελιώδεις ζώνες δόνησης στα 11000 nm.



Εικόνα 2-11: Φασματική υπογραφή διαφόρων ορυκτών (Πηγή: Hunt, 1977)

Όπως είναι λογικό, σε ένα πέτρωμα το οποίο αποτελείται από διάφορα ορυκτά αλλά και μίξεις αυτών, συνυπάρχει μία ποικιλία χημικών ενώσεων και άρα δεν είναι πάντα εύκολη η φασματική αναγνώριση των καθαρών ορυκτών. Ως end-member ορίζεται μια καθαρή χημική ένωση, σε ορισμένες περιπτώσεις πλασματική, αλλά θεωρούμενη ως συστατικό που εισέρχεται σε στερεό διάλυμα με άλλες καθарές χημικές ενώσεις για να σχηματίσει μια ισόμορφη σειρά ορυκτών, σύμφωνα με το λεξικό *Merian-Webster* (Merriam-Webster, 2022). Σε έναν πιο γενικευμένο ορισμό, θα μπορούσε να περιγραφεί ως ένα εξιδανικευμένο και αντιπροσωπευτικό σημείο για μία κλάση. Για παράδειγμα ο φαγιαλίτης  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  και ο φορστερίτης  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  είναι end-members του ολιβίνη  $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ , καθώς ο ολιβίνης είναι μία παράμιξη αυτών των δύο.

#### 2.4.1. Φασματική βιβλιοθήκη USGS

Όταν οι φασματικές υπογραφές καταγραφούν λεπτομερώς και συγκεντρωθούν, τότε γίνεται λόγος για μία φασματική βιβλιοθήκη, όπου κάθε ορυκτό ή ό,τι άλλο μελετάται, έχει καταγεγραμμένη μία ξεχωριστή φασματική υπογραφή. Να τονιστεί σε αυτό το σημείο, πως η υπογραφή είναι μοναδική για κάθε επιφάνεια, παρότι ενδεχομένως να υπάρχουν πολλά κοινά σημεία με άλλες.

Μία πολύ επιτυχής και με παγκόσμιο αντίκτυπο φασματική βιβλιοθήκη είναι διαθέσιμη προς το ευρύ κοινό από την Εθνική Γεωλογική Υπηρεσία των ΗΠΑ (USGS). Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη, αποτελεί σημείο αναφοράς για τους περισσότερους που ασχολούνται με το αντικείμενο, ειδικά για τα ορυκτά, και επί του παρόντος χρησιμοποιείται η 7<sup>η</sup> Έκδοση. Οι μετρήσεις περιλαμβάνουν εργαστηριακές μετρήσεις, αλλά και επίγειες και εναέριες μετρήσεις υπαίθρου. Καλύπτεται συνολικά ένα φασματικό εύρος από 0.2 μm έως 200 μm (200 nm – 200.000 nm). Τέλος, εκτός από ορυκτά, έχουν καταγραφεί φάσματα από χλωρίδα, χημικές ενώσεις, καθώς και τεχνητά υλικά. Παρακάτω στην Εικ. 2-12 παρατίθεται ένα παράδειγμα από το περιβάλλον εργασίας της εν λόγω βιβλιοθήκης, όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το αντικείμενο που επιθυμεί να βρει τις λεπτομέρειες.

The screenshot displays the USGS Spectral Library interface. At the top, it says 'Spectral Library Version 7'. Below the navigation bar, there's a section for 'Base Spectra (spib07a)'. A table lists various spectra with columns for Spectrum Title, Category, HTML Description, and several plot types. A blue arrow points from the 'Full GIF Plot' column to a detailed plot of the spectrum for Actinolite NMNH 132746 Pyroxene BECDA AREF (spib07a rec=99). The plot shows reflectance versus wavelength (μm) with a prominent absorption feature around 10 μm.

#	Spectrum Title	Category	HTML Description	Full GIF Plot	Range2 Uv To Visible GIF Plot	Range2 Visible To Swir GIF Plot	Range2 Swir GIF Plot	Range4 Swir To Mir GIF Plot	Range5 Swir To Fir Wavenumber GIF Plot	ZIP File With ASCII Data
01	Actinolite NMNH133746 Pyroxene BECDA AREF	Minerals	<a href="#">Description</a>	<a href="#">Full Plot</a>	<a href="#">0.2 to 1.0 μm Plot</a>	<a href="#">0.2 to 2.5 μm Plot</a>	<a href="#">1.5 to 5.5 μm Plot</a>			<a href="#">Zip</a>
02	Actinolite HS116.1B ASDFRb AREF	Minerals	<a href="#">Description</a>	<a href="#">Full Plot</a>	<a href="#">0.2 to 1.0 μm Plot</a>	<a href="#">0.2 to 2.5 μm Plot</a>	<a href="#">1.5 to 5.5 μm Plot</a>			<a href="#">Zip</a>
03	Actinolite HS116.2B ASDFRb AREF	Minerals	<a href="#">Description</a>	<a href="#">Full Plot</a>	<a href="#">0.2 to 1.0 μm Plot</a>	<a href="#">0.2 to 2.5 μm Plot</a>	<a href="#">1.5 to 5.5 μm Plot</a>			<a href="#">Zip</a>
04	Actinolite HS116.3B BECDA AREF	Minerals	<a href="#">Description</a>	<a href="#">Full Plot</a>	<a href="#">0.2 to 1.0 μm Plot</a>	<a href="#">0.2 to 2.5 μm Plot</a>	<a href="#">1.5 to 5.5 μm Plot</a>			<a href="#">Zip</a>
05	Actinolite HS116.4B ASDFRb AREF	Minerals	<a href="#">Description</a>	<a href="#">Full Plot</a>	<a href="#">0.2 to 1.0 μm Plot</a>	<a href="#">0.2 to 2.5 μm Plot</a>	<a href="#">1.5 to 5.5 μm Plot</a>			<a href="#">Zip</a>
06	Actinolite HS116.4B ASDFRb AREF	Minerals	<a href="#">Description</a>	<a href="#">Full Plot</a>	<a href="#">0.2 to 1.0 μm Plot</a>	<a href="#">0.2 to 2.5 μm Plot</a>	<a href="#">1.5 to 5.5 μm Plot</a>			<a href="#">Zip</a>
07	Actinolite HS116.1B ASDFRb AREF	Minerals	<a href="#">Description</a>	<a href="#">Full Plot</a>	<a href="#">0.2 to 1.0 μm Plot</a>	<a href="#">0.2 to 2.5 μm Plot</a>	<a href="#">1.5 to 5.5 μm Plot</a>			<a href="#">Zip</a>
08	Actinolite HS12.2B ASDFRb AREF	Minerals	<a href="#">Description</a>	<a href="#">Full Plot</a>	<a href="#">0.2 to 1.0 μm Plot</a>	<a href="#">0.2 to 2.5 μm Plot</a>	<a href="#">1.5 to 5.5 μm Plot</a>			<a href="#">Zip</a>
09	Actinolite HS12.3B BECDA AREF	Minerals	<a href="#">Description</a>	<a href="#">Full Plot</a>	<a href="#">0.2 to 1.0 μm Plot</a>	<a href="#">0.2 to 2.5 μm Plot</a>	<a href="#">1.5 to 5.5 μm Plot</a>			<a href="#">Zip</a>

Actinolite NMNH 132746 Pyroxene BECDA AREF (spib07a rec=99)  
 Formulas:  $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}\text{F}_2$   
 Mineral=Actinolite (Asgr, Pyroxene Group) Type=inosilicate  
 Spectral Purify=2

Wavelength (μm)

Εικόνα 2-12: Παράδειγμα επιφάνειας εργασίας της φασματικής βιβλιοθήκης USGS (Πηγή: <https://www.usgs.gov/labs/spectroscopy-lab/science/spectral-library>)

## 2.5. Επεξεργασία εικόνας και μηχανική μάθηση

Όπως έχει αναφερθεί, η υπερφασματική απεικόνιση ως μέθοδος προϋπάρχει εδώ και αρκετές δεκαετίες, λύνοντας πολλαπλά προβλήματα. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1980, είχαν κυκλοφορήσει στην αγορά αρκετοί εμπορικοί υπερφασματικοί απεικονιστές. Ωστόσο, μέχρι το 1989 δεν υπήρχαν ακόμη εμπορικά διαθέσιμα πακέτα λογισμικού επεξεργασίας εικόνας ικανά να χειριστούν περισσότερες από 10 φασματικές ζώνες. Επιπλέον, το λογισμικό που είχε γραφτεί σε μια πλατφόρμα δεν μπορούσε να μεταφερθεί σε μια άλλη χωρίς τη συγγραφή ειδικού κώδικα απεικόνισης εικόνας. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, το πρόγραμμα Spectral Image Processing System (SIPS) του Κέντρου για τη Μελέτη της Γης από το Διάστημα, ανέπτυξε τον πρώτο κύβο εικόνας (image cube). Το SIPS εξελίχθηκε αργότερα στο ENVI (Environment for Visualizing Images), το οποίο έδωσε τη δυνατότητα σε σχετικά αρχάριους να επεξεργάζονται εικόνες, και αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα λογισμικά επεξεργασίας εικόνας (Goetz, 2011).

Λόγω της προόδου στην τεχνολογία των υπολογιστών και των αισθητήρων πλέον η απόκτηση, αποθήκευση, πρόσβαση, αλλά κυρίως και η ανάλυση μεγάλων συνόλων δεδομένων εικόνας γίνεται με μεγαλύτερη ευκολία. Σημαντική τομή δε στην επεξεργασία των εικόνων διαδραματίζει και η χρήση της μηχανικής μάθησης, μαζί με εργαλεία και συγκεκριμένα διαγράμματα ροής, που από τη μία θέτουν σε ένα πλαίσιο την ανάλυση της εικόνας, αλλά από την άλλη, δίνουν αμέτρητες δυνατότητες αναλόγως τις ανάγκες.

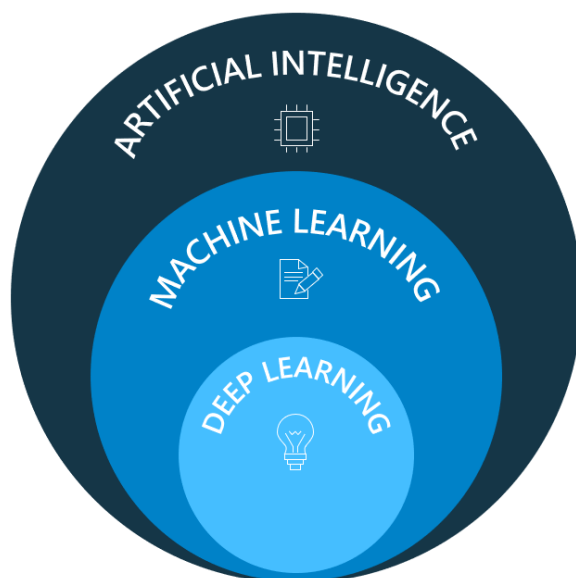
Στο παρόν υποκεφάλαιο, γίνεται μία προσπάθεια να εξηγηθούν περιληπτικά αλλά κατανοητά, τα εργαλεία της μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των υπερφασματικών απεικονίσεων, ώστε να καταλήξουν σε ένα αποτέλεσμα από το οποίο θα μπορούν να εξαχθούν βάσιμα συμπεράσματα. Γίνεται μία σύντομη αναφορά στις μαθηματικές ακολουθίες που βασίζονται οι αλγόριθμοι, αλλά και που αποσκοπούν.

Η μηχανική μάθηση (ML) είναι ένας κλάδος της τεχνητής νοημοσύνης (AI) που παρέχει στις μηχανές την ικανότητα να μαθαίνουν αυτόματα από δεδομένα και

προηγούμενες εμπειρίες, ενώ παράλληλα εντοπίζουν μοτίβα για να κάνουν προβλέψεις με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση (Kanade, 2022). Συνοπτικά, θα μπορούσαμε να πούμε πως είναι ένας τρόπος διαχείρισης πολλών δεδομένων και εξαγωγής χρήσιμων πληροφοριών από αυτά.

Ως τεχνητή νοημοσύνη (AI) , προσδιορίζεται η προσομοίωση των διαδικασιών ανθρώπινης νοημοσύνης από μηχανές, κυρίως υπολογιστές. Η AI πλεονεκτεί, όπως είναι λογικό, σε οικονομία χρόνου και πόρων, καθώς και σε ακριβέστερα υπολογιστικά αποτελέσματα.

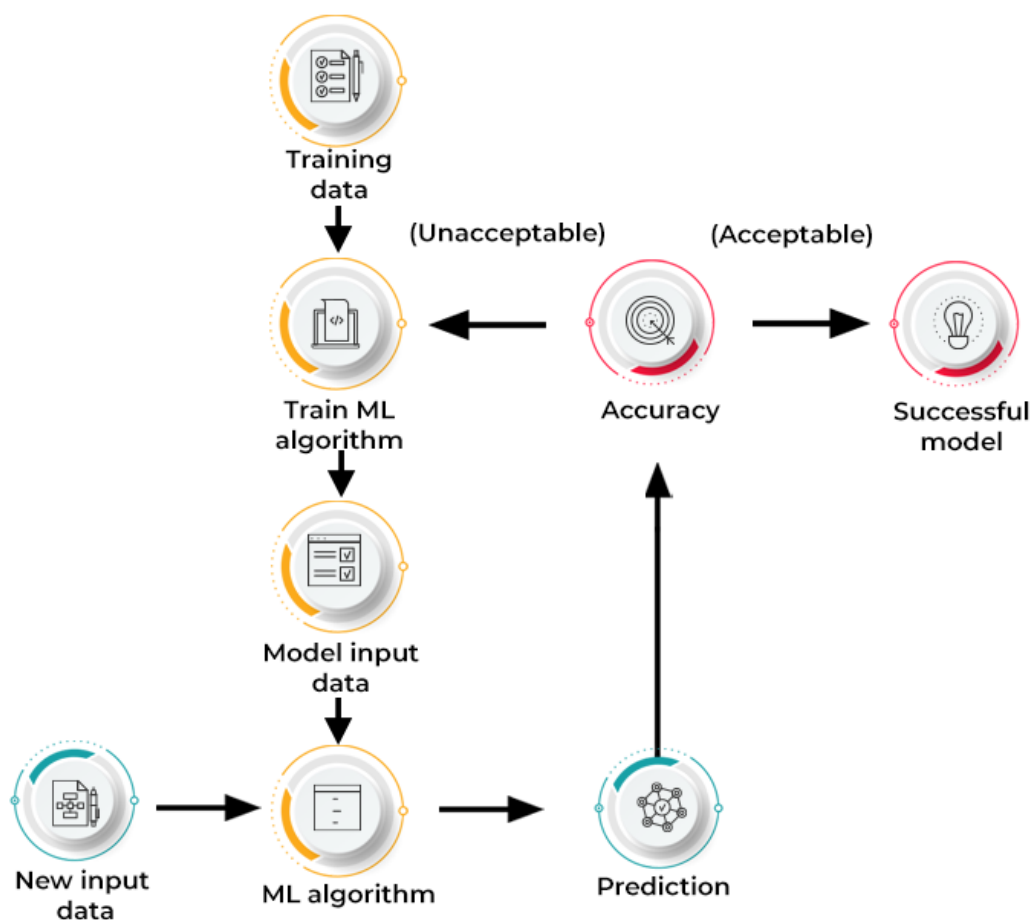
Σε ένα ακόμα πιο εξειδικευμένο επίπεδο, η βαθιά μάθηση (Deep Learning, DL) είναι μια εξέλιξη των τεχνικών μηχανικής μάθησης εμπνευσμένων από την αρχιτεκτονική των ανθρώπινων νευρωνικών δικτύων. Ως στόχο έχει αξιοποίηση τεραστίων ποσοτήτων δεδομένων και κρυφών στρωμάτων, για να υλοποιηθούν συνδέσεις, επιτρέποντάς τους να επιλύουν πιο σύνθετα προβλήματα από ό,τι θα επέτρεπαν οι παραδοσιακές δυνατότητες της στατιστικής ML. Παράδειγμα της εφαρμογής της DL είναι η ανάλυση εικόνας, αναγνώριση ή σύνθεση φωνής, μηχανική μετάφραση κ.α.



Εικόνα 2-13: Σχεδιάγραμμα απόδοσης εννοιών σχετικές με την AI (Πηγή: <https://nealanalytics.com/expertise/azure-ai-ml/>)

Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης επιτρέπουν στους υπολογιστές να λειτουργούν αυτόνομα χωρίς ρητό προγραμματισμό. Οι εφαρμογές ML τροφοδοτούνται με νέα δεδομένα και μπορούν να μαθαίνουν, να αναπτύσσονται, να εξελίσσονται και να προσαρμόζονται ανεξάρτητα. Η μηχανική μάθηση αντλεί διορατικές πληροφορίες από μεγάλο όγκο δεδομένων αξιοποιώντας αλγόριθμους για τον εντοπισμό μοτίβων και τη μάθηση σε μια επαναληπτική διαδικασία. Οι αλγόριθμοι ML χρησιμοποιούν μεθόδους υπολογισμού για να μαθαίνουν απευθείας από τα δεδομένα αντί να βασίζονται σε οποιαδήποτε προκαθορισμένη εξίσωση που μπορεί να χρησιμεύσει ως μοντέλο. Η απόδοση των αλγορίθμων ML βελτιώνεται προσαρμοστικά με την αύξηση του αριθμού των διαθέσιμων δειγμάτων κατά τη διάρκεια των διαδικασιών «μάθησης». Για παράδειγμα, η βαθιά μάθηση (deep learning) είναι ένας υποτομέας της μηχανικής μάθησης που εκπαιδεύει τους υπολογιστές να μιμούνται φυσικά ανθρώπινα χαρακτηριστικά, όπως η μάθηση από παραδείγματα. Προσφέρει καλύτερες παραμέτρους απόδοσης από τους συμβατικούς αλγορίθμους ML (Kanade, 2022).

## HOW DOES MACHINE LEARNING WORK?

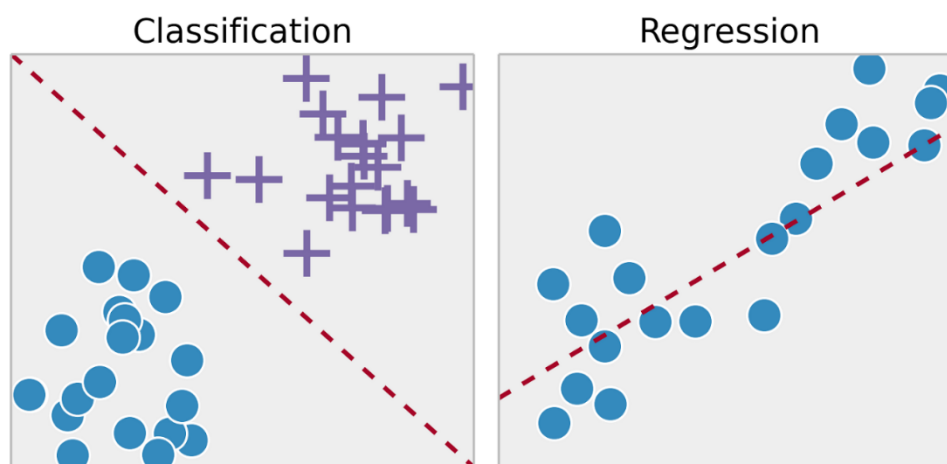


Εικόνα 2-14: Διάγραμμα λειτουργίας της μηχανικής μάθησης (Πηγή: <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-ml/>)

Υποκατηγορίες της μηχανικής μάθησης αποτελούν η επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση (supervised) και μη επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση (unsupervised). Η επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση είναι μια υποκατηγορία της μηχανικής μάθησης και της τεχνητής νοημοσύνης, και παράλληλα η πιο συχνή. Ορίζεται από τη χρήση επισημειωμένων συνόλων δεδομένων για την εκπαίδευση αλγορίθμων που ταξινομούν δεδομένα ή προβλέπουν αποτελέσματα με ακρίβεια (IBM, 2020).

Η επιβλεπόμενη μάθηση χωρίζεται σε δύο υποκατηγορίες: την ταξινόμηση (classification) και την παλινδρόμηση (regression), όπως φαίνεται στην Εικ. 2-15. Η πρώτη, εστιάζει στην πρόβλεψη των δεδομένων εξόδου, οι οποίες είναι διακριτές μεταβλητές, από δεδομένα εισόδου τα οποία δεν είναι γνωστά, σύμφωνα την συσχέτιση των ήδη ταξινομημένων δεδομένων εισόδου. Η δεύτερη,

λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο, με την διαφορά ότι τα δεδομένα εξόδου είναι συνεχείς μεταβλητές



Εικόνα 2-15: Διαφορές μεταξύ μεθόδων ταξινόμησης και παλινδρόμησης της επιβλεπόμενης μάθησης (Πηγή: <https://towardsdatascience.com/supervised-vs-unsupervised-learning-14f68e32ea8d>)

Για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση, πρακτικά, αν υποθέσουμε πως έχουμε μία συνάρτηση  $y = f(x)$ , με  $x$ , τα δεδομένα εισόδου (δηλαδή σημεία),  $y$ , τα δεδομένα εξόδου και με  $f$  την συνάρτηση, δηλαδή την σχέση που συνδέει τα δεδομένα εισόδου και εξόδου, επιδιώκεται η «εκπαίδευση» του αλγορίθμου από τα ήδη γνωστά δεδομένα εισόδου για να γίνει γνωστή η συνάρτηση  $f$ , ούτως ώστε να μπορέσει να γίνει πρόβλεψη για δεδομένα εισόδου, με την συνάρτηση  $\hat{y} = \hat{f}(x)$ , για τα οποία δεν μας δίνονται πληροφορίες. Στην περίπτωση της παλινδρόμησης ενδεχομένως να προκύψουν διάφορες επεκτάσεις αυτού του βασικού προβλήματος, όπως η ύπαρξη εισόδων υψηλής διάστασης, ακραίες τιμές, μη ομαλές αποκρίσεις κλπ. (Murphy, 2012).

Ωστόσο, στην περίπτωση μας, για τον λόγο του ότι δεν έχουμε στην διάθεσή μας πολλά δεδομένα αλλά ούτε και πληροφορίες τους, για τα οποία οι αλγόριθμοι να έχουν εκπαιδευτεί και άρα να είναι επιβλεπόμενοι, συνεπώς τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται κατά κόρον με το υπολογιστικό εργαλείο *hylite* (Thiele et al. 2021) αφορούν μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση.

Στην μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση, δίνονται τα δεδομένα, χωρίς κανένα δεδομένο εισόδου. Αυτό που πρέπει να επιτευχθεί, είναι να ανακαλυφθεί το

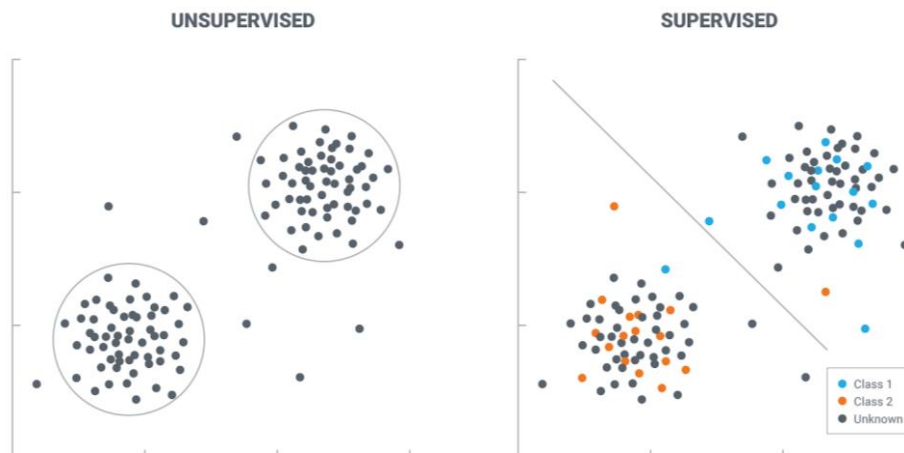


μοντέλο ή η δομή των δεδομένων εξόδου, παρότι δεν δίνεται καμία προτίμηση ή συσχέτιση μεταξύ δεδομένων εξόδου και εισόδου. Και αυτή με την σειρά της, χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες: την ομαδοποίηση (clustering), όπου τα δεδομένα χωρίζονται σε ομάδες ανάλογα με τα κοινά τους χαρακτηριστικά και την συσχέτιση (association), η οποία εστιάζει στην ανακάλυψη σχέσεων σε μεγάλα σύνολα δεδομένων (Εικ 2-16).



Εικόνα 2-16: Διαφορές μεταξύ μεθόδων ομαδοποίησης και συσχέτισης της μη επιβλεπόμενης μάθησης (Πηγή: <https://medium.datadriveninvestor.com/supervised-vs-unsupervised-machine-learning-732d49413986?gi=3a5d4f5601d3>)

Η διαφορά μεταξύ επιβλεπόμενης και μη επιβλεπόμενης μάθησης, έγκειται κυρίως στο ότι ενώ στην πρώτη έχουμε εξάρτηση μεταβλητών και άρα η εκτίμηση πυκνότητας γίνεται υπό όρους  $[p(y_i|x_i, \theta)]$  ενώ στην δεύτερη εκτιμάται η πυκνότητα χωρίς όρους  $[p(x_i|\theta)]$ . Επιπλέον, ο παράγοντας  $x_i$  απαιτεί δημιουργία πολυμεταβλητών μοντέλων πιθανοτήτων, ενώ με τον παράγοντα  $y_i$  οριοθετείται και απαιτείται η πρόβλεψη μόνο μίας μεταβλητής, και με παραμέτρους που εξαρτώνται από την είσοδο.



Εικόνα 2-17: Διαφορά μεταξύ μη επιβλεπόμενης και επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης (Πηγή: <https://www.explorium.ai/wiki/supervised-learning/>)

Παρότι, η μη επιβλεπόμενη είναι πιο εύκολη, φθηνή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως χωρίς ιδιαίτερες απαιτήσεις, οι πληροφορίες που εν τέλει μας δίνονται δεν μπορούν να εκτιμήσουν παραμέτρους πολύπλοκων μοντέλων (Murphy, 2012).

### 2.5.1. Τεχνικές μείωσης διάστασης (HSI)

Ο στόχος της μείωσης διάστασης της εικόνας για μια υπερφασματική εικόνα είναι να επινοήσει έναν μη επιβλεπόμενο αλγόριθμο που χωρίζει την εικόνα τοποθετώντας κάθε εικονοστοιχείο σε ένα από πολλά συμπλέγματα ή φασματικές κατηγορίες. Αυτό, θα έχει ως αποτέλεσμα την γρηγορότερη επεξεργασία των δεδομένων και, ενδεχομένως, πιο έγκυρα αποτελέσματα.

Ενώ, θεωρητικά, για απεικονίσεις μεγάλης ακρίβειας, όπως οι λήψεις του αισθητήρα SisuROCK, η μέθοδος PCA, έχει καλύτερη απόδοση καθώς διατηρείται η διακύμανση των αρχικών δεδομένων, στις υπόγειες λήψεις, η μέθοδος MNF παρουσιάζει καλύτερη εφαρμογή, καθώς υπάρχει αρκετός θόρυβος, λόγω των ανωμαλιών της υπαίθρου, της ατμόσφαιρας κ.α. (Thiele & Lorentz, 2022).

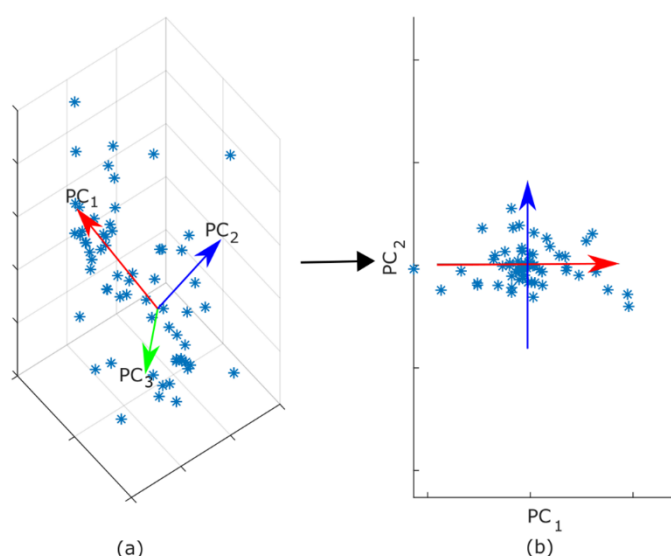
#### 2.5.1.1. PCA

Τα μεγάλα σύνολα δεδομένων είναι όλο και πιο συνηθισμένα και συχνά δύσκολα ερμηνεύονται. Η ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCA) είναι μια τεχνική μη επιβλεπόμενης ταξινόμησης, για τη μείωση της διαστατικότητας τέτοιων συνόλων δεδομένων, αυξάνοντας την ερμηνευσιμότητα αλλά ταυτόχρονα ελαχιστοποιώντας την απώλεια πληροφοριών, επιλέγοντας ορισμένα δεδομένα από το σύνολο δεδομένων. Δηλαδή στοχεύει στην εύρεση μιας ασυσχέτιστης γραμμικής αναπαράστασης χαμηλής διάστασης των δεδομένων εισόδου.

Αυτό επιτυγχάνεται με τη δημιουργία νέων ασυσχέτιστων μεταβλητών που μεγιστοποιούν διαδοχικά τη διακύμανση. Η εύρεση αυτών των νέων μεταβλητών, των κύριων συνιστωσών, ανάγεται στην επίλυση ενός προβλήματος ιδιοτιμών/ιδιοδιανυσμάτων και οι νέες μεταβλητές ορίζονται από το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων και όχι εκ των προτέρων, καθιστώντας έτσι την PCA μια προσαρμοστική τεχνική ανάλυσης δεδομένων. Είναι προσαρμοστική

και με μια άλλη έννοια, δεδομένου ότι έχουν αναπτυχθεί παραλλαγές της τεχνικής που είναι προσαρμοσμένες σε διάφορους διαφορετικούς τύπους και δομές δεδομένων (Jolliffe, Cadima, 2016).

Η "διατήρηση όσο το δυνατόν μεγαλύτερης μεταβλητότητας" μεταφράζεται στην εξεύρεση νέων μεταβλητών που είναι γραμμικές συναρτήσεις εκείνων του αρχικού συνόλου δεδομένων, οι οποίες διαδοχικά μεγιστοποιούν διακύμανση και είναι ασυσχέτιστες μεταξύ τους. Βρίσκοντας τέτοιες νέες μεταβλητές, τις κύριες συνιστώσες (PCs), ανάγεται στην επίλυση ενός προβλήματος ιδιοτιμών/ιδιοδιανυσμάτων (Jolliffe & Cadima, 2016). Αν και για σκοπούς εξαγωγής συμπερασμάτων, η πολυμεταβλητή κανονική (γκουσιανή) κατανομή του συνόλου δεδομένων συνήθως υποτίθεται, η PCA ως περιγραφικό εργαλείο δεν χρειάζεται υποθέσεις κατανομής και, ως εκ τούτου, είναι σε μεγάλο βαθμό μια προσαρμοστική διερευνητική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αριθμητικά δεδομένα διαφόρων τύπων.



Εικόνα 2-18: Μείωση διαστάσεων με την μέθοδο PCA (Πηγή: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0248896> )

Παρακάτω, θα γίνει μία προσπάθεια να εξηγηθεί το μαθηματικό υπόβαθρο της μεθόδου συνοπτικά:

Έστω ότι έχουμε ένα τρισδιάστατο σύνολο δεδομένων  $A$  (μεταβλητές  $x, y, z$ ). Σε πρώτη φάση πρέπει από τρισδιάστατο να μετατραπεί σε δισδιάστατο χωρίς να χαθούν πολλά δεδομένα, με την βοήθεια της μέσης τιμής για κάθε διάσταση και

για όλο το σύνολο δεδομένων. Ύστερα υπολογίζεται ο πίνακας συνδιακύμανσης του πίνακα δεδομένων με τον παρακάτω τύπο όπου  $cov$  είναι η συνδιακύμανση των  $X, Y$ ,  $\bar{x}, \bar{y}$  οι μέσες τιμές των  $x$  και  $y$ , και τέλος  $n$  το πλήθος των τιμών.

$$cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(y - \bar{y}) \quad (Eξ. 1)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα ιδιοδιανύσματα, διανύσματα των οποίων η κατεύθυνση παραμένει αμετάβλητη όταν εφαρμόζεται σε αυτό ένας γραμμικός μετασχηματισμός και οι ιδιοτιμές, από τον πίνακα συνδιακύμανσης. Σε έναν ορθογωνικό πίνακα  $A$ , όπου ισχύει  $Av = \lambda v$ , με  $v$  διάνυσμα, το  $\lambda$  είναι ιδιοδιάνυσμα σχετιζόμενο με το διάνυσμα του πίνακα  $A$ . Με  $I$  πίνακα ταυτοτήτων, ισχύει ότι :

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (Eξ. 2)$$

Στο επόμενο βήμα, πρέπει να ταξινομηθούν τα ιδιοδιανύσματα κατά φθίνουσες ιδιοτιμές και να επιλεγούν  $i$  ιδιοδιανύσματα με τις μεγαλύτερες ιδιοτιμές για να σχηματιστεί ένας πίνακας  $K$  διαστάσεων  $i \times d$ . Αυτό συμβαίνει γιατί πρέπει να δεδομένα να «φιλτραριστούν» με κάποιο τρόπο, ώστε εν τέλει τα παραμείνουν τα δεδομένα με τις περισσότερες πληροφορίες. Τα ιδιοδιανύσματα με τις μικρότερες ιδιοτιμές έχουν τις λιγότερες πληροφορίες για την κατανομή τους, για αυτόν τον λόγο τα συγκεκριμένα δεν επιλέγονται και άρα απομένουν  $i$  ιδιοδιανύσματα, τα οποία οργανώνονται στον πίνακα  $K$ . Τέλος, τα δείγματα που έχουν επιλεγεί, μετασχηματίζονται στον νέο υποχώρο μέσω του πίνακα  $K$  και της εξίσωσης

$$y = W' \times x \quad (Eξ. 3)$$

(Dubey, 2018).

#### 2.5.1.2. Ελάχιστο κλάσμα θορύβου (MNF)

Η μέθοδος Minimum Noise Fraction (MNF) είναι μια γνωστή τεχνική για την αποθορυβοποίηση υπερφασματικών εικόνων. Αναφέρθηκε αρχικά στην δημοσίευση των (Green et al. 1988), όπου προέκυψε το ερώτημα για μία γραμμική

μείωση του λόγου σήματος-θορύβου με αύξηση του δείκτη εξάρτησης, μία συνθήκη που με την προϋπάρχουσα μέθοδο PCA δεν ικανοποιούνταν.

Στην ουσία, ένας κύβος δεδομένων με θόρυβο, δηλαδή σήματα που περιέχουν δεδομένα, αλλά και δεδομένα χωρίς ουσία, μετασχηματίζεται σε εικόνες καναλιών εξόδου με σταθερά αυξανόμενα επίπεδα θορύβου, πράγμα που σημαίνει ότι οι εικόνες εξόδου MNF περιέχουν σταθερά μειούμενη ποιότητα εικόνας. Οι αρχές λειτουργίας του βασίζονται στα δίκτυα Bayesian, ένα εργαλείο πολύ χρήσιμο στην στατιστική και τις πιθανότητες.

Εάν υποθέσουμε ότι έχουμε ένα κύβο δεδομένων  $X$  με διαστάσεις  $d$  και  $n$  πίξελ, όπου  $X = d \times n$ . Ισχύει, με  $S$  το σήμα και  $e$  τον θόρυβο, ότι :

$$X_i = S_i + e_i \quad (\text{Εξ. 4})$$

Λόγω της μη συσχέτισης σήματος/θορύβου ισχύει :

$$\Sigma_X^T = \Sigma_X^S + \Sigma_X^N \quad (\text{Εξ. 5})$$

όπου με  $\Sigma$  εκφράζεται η συνδιακύμανση.

Στο μετασχηματισμό MNF, οι πίνακες συνδιακύμανσης του σήματος και του θορύβου διαγωνοποιούνται ταυτόχρονα, δηλαδή ο πίνακας  $d \times d$ ,  $A$ , των ιδιοδιανυσμάτων, που ικανοποιεί τις ακόλουθες προϋποθέσεις τις ακόλουθες εξισώσεις, αλλάζει ως:

$$A\Sigma_X^S A^T = \Lambda, A\Sigma_X^N A^T = I \quad (\text{Εξ. 6})$$

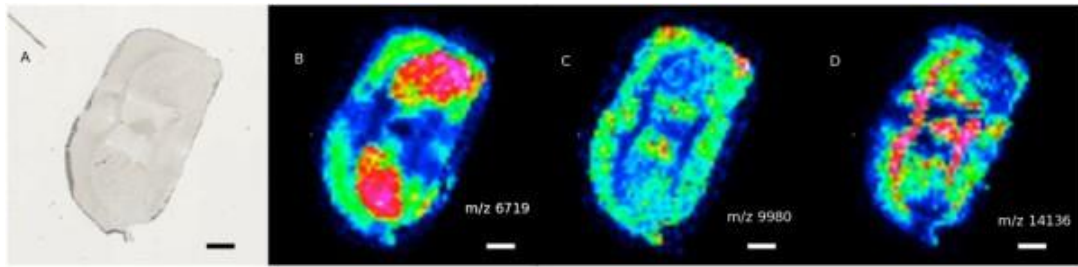
όπου  $\Lambda$  είναι ένας διαγώνιος πίνακας μη αρνητικών ιδιοτιμών, με  $\lambda \geq \lambda_1 \geq \lambda_2 \dots \geq \lambda_d \geq 0$ , και  $I$  είναι ο ταυτοτικός πίνακας.

Στόχος είναι η πρόβλεψη της συνδιακύμανσης  $\Sigma_X^T$ . Εφαρμόζοντας τετραγωνικό φίλτρο  $3 \times 3$  του Nielsen στην παραπάνω εξίσωση και μαζί με την προηγούμενη εξίσωση έχουμε:

$$A\Sigma_X^T A^T = \Lambda + I, A\Sigma_X^N A^T = I \quad (\text{Εξ. 7})$$

ώστε η ταυτόχρονη διαγωνιοποίηση των  $\Sigma_X^T$  και  $\Sigma_X^N$  να έχουν τα ίδια ιδιοδιανύσματα όπως τα  $\Sigma_X^S$  και  $\Sigma_X^N$  με :

$$\mu_i = \lambda_i + 1, i = 1, \dots, d \quad (\text{Εξ. 8})$$



Εικόνα 2-19: Τρεις απεικονίσεις μετά από εφαρμογή της MNF σε στεφανιαία τομή μέσου εγκεφάλου ποντικού (Πηγή: Stone et al, 2012)

## 2.5.2. Μεθοδολογίες ταξινόμησης, διορθώσεις

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα κύρια εργαλεία στα πλαίσια της μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση των δεδομένων είναι μη επιβλεπόμενες μέθοδοι ταξινόμησης και ύστερα εντοπισμός χωρικών περιοχών ή πληθών που έχουν παρόμοιες φασματικές ιδιότητες. Αναλύονται παρακάτω τα βασικά εργαλεία που βοηθούν στην επεξεργασία και ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

### 2.5.2.1. Gaussian

Οι ερμηνείες που βασίζονται στη γνώση, βασίζονται γενικά στην ερμηνεία των χαρακτηριστικών φασματικής απορρόφησης. Πρόκειται για διακριτά ελάχιστα στο φάσμα ανάκλασης ενός υλικού που προκαλούνται από την απορρόφηση (και όχι την ανάκλαση) του φωτός σε πολύ συγκεκριμένα μήκη κύματος. Με την ποσοτικοποίηση της θέσης και του (σχετικού) βάθους αυτών των χαρακτηριστικών ή την προσαρμογή χαρακτηριστικών απορρόφησης είναι δυνατόν να εκτιμηθεί (συνήθως με σχετική έννοια) π.χ. η αφθονία, η σύνθεση και η κρυσταλλικότητα των φασματικά ενεργών ορυκτών (Thiele & Lorentz, 2022). Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πολύ χρήσιμη για την χαρτογράφηση ορυκτών.

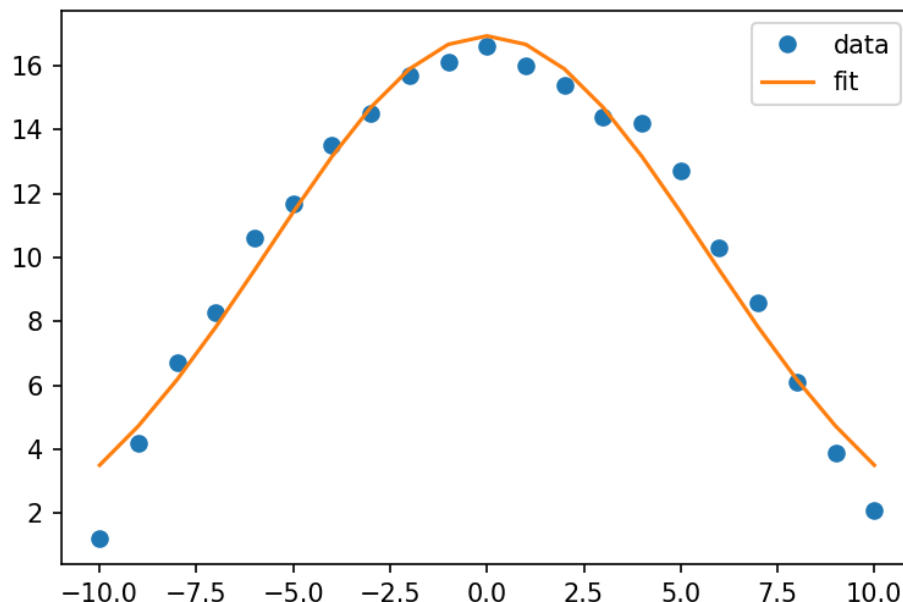
Το εργαλείο που βοηθά να εκτελεστούν όλες αυτές οι εντολές, είναι τα Γκαουσιανά μοντέλα (Gaussian models). Τα πολυμεταβλητά γκαουσιανά μοντέλα αποτελούν τη βάση για τους περισσότερους κλασικούς αλγόριθμους ταξινόμησης κάλυψης γης και ανίχνευσης στόχων. Ένας δημοφιλής υπερφασματικός αλγόριθμος ταξινόμησης κάλυψης γης είναι ο τετραγωνικός διακριτικός αλγόριθμος ανάλυση, επίσης γνωστός ως ταξινομητής μέγιστης

πιθανοφάνειας Gauss ή απλώς ταξινομητής μέγιστης πιθανοφάνειας. Πρόκειται για ένα διακριτικό μοντέλο όπου η υπό συνθήκη κατανομή των δεδομένων σε κλάσεις υποτίθεται ότι περιγράφεται από μια πολυμεταβλητή γκαουσιανή κατανομή, με τα διανύσματα μέσης τιμής και τους πίνακες συνδιακύμανσης να εκτιμώνται χρησιμοποιώντας τη μέγιστη πιθανοφάνεια. Μια ειδική περίπτωση όπου όλοι οι πίνακες συνδιακύμανσης των κλάσεων υποτίθεται ότι είναι ίδιοι ονομάζεται γραμμική διακριτική ανάλυση (Gewali et al. 2019).

Μία γκαουσιανή συνάρτηση ή αλλιώς κωνοειδής καμπύλη, χρησιμοποιείται για να περιγράψει μία κανονική κατανομή συνεχών τιμών με την ακριβέστερη προσαρμογή (Εικ. 2-20). Έτσι, αναζητούνται οι μεταβλητές:  $A$ , το πλάτος της συνάρτησης, δηλαδή η μέγιστη τιμή  $y$  για  $x=\mu$ ,  $\mu$ , η μέση τιμή των  $x$  και  $\sigma$  η τυπική απόκλιση στην παρακάτω εξίσωση η οποία εκφράζει την γκαουσιανή κατανομή :

$$y(x) = Ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (\text{Εξ. 9})$$

Χρησιμοποιείται η μέθοδος των μη-γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων και τα ζεύγη δεδομένων  $x,y$  με  $f(x)=y$ . Τέλος, υπολογίζονται οι τιμές της συνάρτησης για να προσδιοριστεί η συνάρτηση.



Εικόνα 2-20: Παράδειγμα γκαουσιανής κατανομής δεδομένων (με μπλε σημεία) και γκαουσιανής προσαρμοσμένης συνάρτησης (με πορτοκαλί) (Πηγή: <https://education.molssi.org/python-data-analysis/03-data-fitting/index.html>)

Η μέθοδος χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για τις μεθόδους Ελάχιστα Μήκη Κύματος (MWL) , Αναλογία Καναλιών (Band Ratios) και Στοιχεία Απορρόφησης (Absorbance features) που θα αναφερθούν στα επόμενα κεφάλαια.

#### 2.5.2.2. Κυρτό περίβλημα (Convex hull)

Το πρόβλημα του κυρτού περιβλήματος είναι δομή της υπολογιστικής γεωμετρίας, όπου μελετά τον βέλτιστο υπολογισμό του κυρτού περιβλήματος ενός συνόλου δεδομένων. Υπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί αλγόριθμοι που προσπαθούν να δώσουν την λύση, όμως στο *hylite* (Thiele et al. 2021) γίνεται η χρήση της μεθόδου *διαίρει και βασίλευε* (divide and conquer).

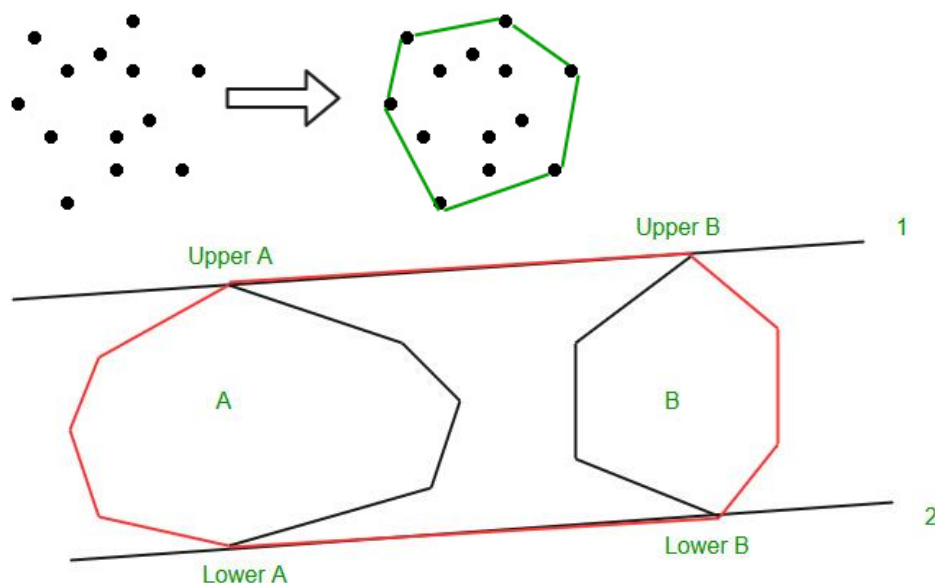
Τα χαρακτηριστικά απορρόφησης σε πιο ανακλαστικά δείγματα τείνουν να είναι βαθύτερα από ότι σε λιγότερο ανακλαστικά. Για να βοηθηθεί η αντίθεση αυτών των χαρακτηριστικών, είναι σύνηθες να εφαρμόζεται μια διόρθωση στα φάσματα η οποία ονομάζεται hull, για την κανονικοποίηση της διαφοράς στην ανακλαστικότητα και τον τονισμό των τοπικών απορροφήσεων με την αφαίρεση των τάσεων μεγάλου μήκους κύματος στα δεδομένα. Για παράδειγμα, αν εφαρμόσουμε τη διόρθωση hull στη φασματική βιβλιοθήκη, είναι πολύ πιο εύκολο να εντοπίσουμε την απορρόφηση FeOH στο χλωριτικό δείγμα, καθώς και τη μετατόπιση της θέσης του χαρακτηριστικού AlOH μεταξύ των φεγγιτικών και μοσχοβιτικών τροποποιημένων δειγμάτων. (Thiele & Lorentz, 2022)

Οι αλγόριθμοι "διαίρει και βασίλευε" επιλύουν προβλήματα χωρίζοντάς τα σε μικρότερες περιπτώσεις, επιλύοντας αναδρομικά κάθε περίπτωση και συγχωνεύοντας τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε μια πλήρη λύση (Εικ. 2-21). Περαιτέρω, ισχυρίζεται ότι όλες οι περιπτώσεις έχουν ακριβώς την ίδια δομή με το αρχικό πρόβλημα και μπορούν να επιλυθούν ανεξάρτητα η μία από την άλλη, και έτσι μπορούν εύκολα να κατανεμηθούν σε έναν αριθμό παράλληλων διεργασιών ή νημάτων. Αυτοί οι αλγόριθμοι εκμεταλλεύονται το γεγονός ότι οι λύσεις μικρότερων προβλημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση μεγαλύτερων προβλημάτων.

Ως παράδειγμα, έστω ότι έχουμε το παρακάτω σύνολο δεδομένων με  $n$  στοιχεία, και έστω ότι χωρίζονται σε δύο υποσύνολα A και B, όπου το A περιλαμβάνει τα



αριστερά ( $n/2$ ) στοιχεία και το B τα δεξιά ( $n/2$ ) στοιχεία. Εφαρμόζεται η μέθοδος κυρτού περιβλήματος για τα υποσύνολα A, B, παράλληλα υπολογίζονται τα περιβλήματα και στην συνέχεια συνενώνονται τα κυρτά περιβλήματα σε ένα κυρτό πολύγωνο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έχοντας περισσότερα υποσύνολα με τον ίδιο τρόπο, ώσπου εν τέλει να καταλήξει  $n \leq 3$ , δηλαδή ένα τρίγωνο.



Εικόνα 2-21: Σχήματα επεξηγηματικά της μεθόδου διαίρει και βασίλευε κυρτού περιβλήματος (Πηγή: <https://www.geeksforgeeks.org/convex-hull-using-divide-and-conquer-algorithm/>)

### 2.5.2.3. Μέθοδος εμπειρικής γραμμής (Empirical line correction – ELC)

Η απλούστερη τοπογραφική διόρθωση είναι η εμπειρική διόρθωση γραμμής ή ELC. Αυτή προϋποθέτει ένα σταθερό φάσμα φωτισμού σε όλη τη σκηνή, το οποίο ανακατασκευάζεται με την προσαρμογή μιας γραμμής στους πίνακες βαθμονόμησης και χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της ακτινοβολίας σε ανάκλαση, όπως αναλύεται και στο Κεφ. 5.1 (Thiele & Lorentz, 2022). Η χρησιμότητα αυτής της διόρθωσης είναι η αποφυγή σφαλμάτων ή ανακρίβειών που αφορούν την φωτεινότητα της εικόνας και εν συνεχεία, που θα δώσουν αναληθή αποτελέσματα και ερμηνεία.

Εάν σε μια σκηνή τοποθετηθούν δύο ή περισσότεροι επίγειοι στόχοι με γνωστό συντελεστή ανάκλασης, η βαθμονόμηση για κάθε φασματική ζώνη ανάγεται σε μια απλή διαδικασία παλινδρόμησης της παρατηρούμενης ακτινοβολίας έναντι των γνωστών τιμών του συντελεστή ανάκλασης (Ortiz et al. 2017). Έτσι, υπολογίζονται οι πραγματικές τιμές ανάκλασης, λαμβάνοντας υπόψιν ομοιόμορφες συνθήκες για όλο το εύρος της εικόνας.

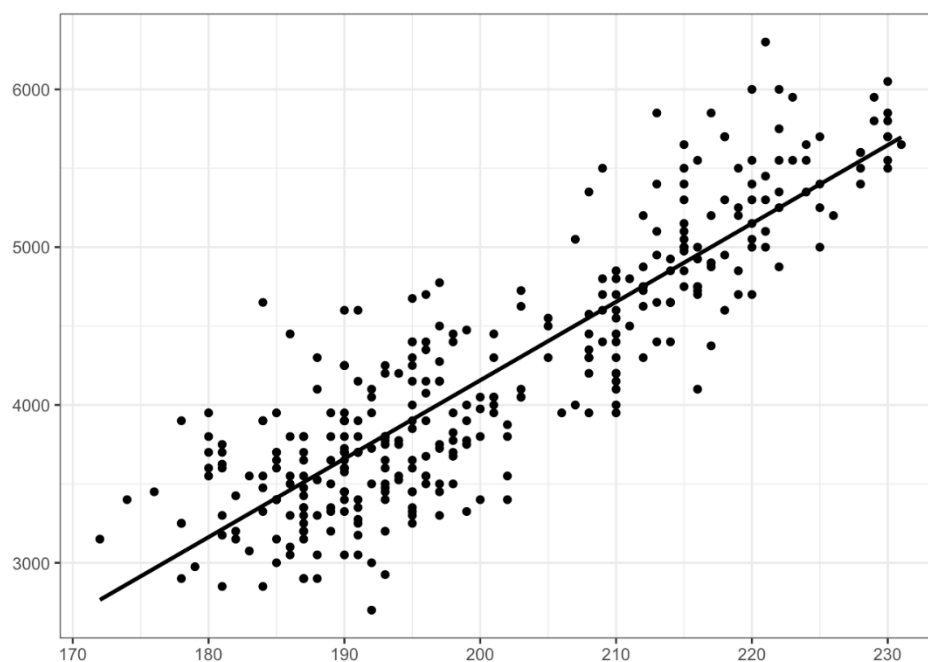
Η μετατροπή βασίζεται στο απλό μαθηματικό μοντέλο της γραμμικής παλινδρόμησης, όπου ουσιαστικά εξετάζεται η σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών για να προβλεφθεί η τιμή της μίας μέσω της άλλης, με το κλασικό μοντέλο

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i \quad (\text{Εξ.10})$$

Ως γνωστό μοντέλο, χρησιμοποιούνται αρχικά οι τιμές μέτρησης με το λευκό ή/και μαύρο πανελ βαθμονόμησης. Πιο συγκεκριμένα έχουμε την εξίσωση:

$$\rho_\lambda = m r_\lambda + offset \quad (\text{Εξ.11})$$

όπου  $\rho_\lambda$  είναι η γνωστή τιμή της ανάκλασης για το πάνελ βαθμονόμησης,  $r_\lambda$  η ακτινοβολία που μετράται από το φασματοραδιόμετρο, φυσικά για το πάνελ, και  $offset$ ,  $m$  οι άγνωστες μεταβλητές. Η γραμμική παλινδρόμηση, υπολογίζει τις άγνωστες μεταβλητές και ύστερα συνεχίζει με τις κανονικές μετρήσεις και μετατροπές.



Εικόνα 2-22: Εικονική επεξήγηση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης (Πηγή: <https://sixsigmadsi.com/glossary/simple-linear-regression> )

Έτσι εφόσον υπολογιστούν οι «πρότυπες» τιμές, τα δεδομένα εισόδου (δηλαδή η ακτινοβολία) θα επαναδειγματοληφθούν αυτόματα ώστε να ταιριάζουν στα δεδομένα εξόδου (δηλαδή την ανάκλαση). Εάν χρησιμοποιούνται περισσότερα από ένα φάσματα, τότε η παλινδρόμηση για κάθε ζώνη θα υπολογιστεί με προσαρμογή της γραμμής παλινδρόμησης σε όλα τα φάσματα.

#### 2.5.2.4. *Endmember*

Η έννοια του *endmember* θα επισημανθεί και στο κεφάλαιο 5.2.3.5., ωστόσο παρακάτω αναγράφονται πληροφορίες όσον αφορά την χρήση της μεθόδου για την συγκεκριμένη περίπτωση. Στο *hylite* μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές μέθοδοι για τον εντοπισμό *endmember* στην εικόνα.

Να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι όλες οι παρακάτω μέθοδοι συνηθίζεται να εφαρμόζονται σε ήδη διαστασολογικά μικρότερες εικόνες, με την μέθοδο MNF ή PCA.

##### A. Pixel Purity Index (PPI)

Η PPI είναι μία μέθοδος γραμμικής φασματικής ανάλυσης ή απόμειξης (unmixing), δομημένη από τον Boardman J., 1994 και βασισμένη σε γεωμετρικά

μοντέλα. Η PPI υπολογίζεται προβάλλοντας επανειλημμένα n-D διαγράμματα διασποράς σε ένα τυχαίο μοναδιαίο διάνυσμα. Έτσι, δημιουργείται μια εικόνα καθαρότητας εικονοστοιχείων (Pixel Purity Image) όπου κάθε τιμή εικονοστοιχείου αντιστοιχεί στον αριθμό των φορών που το συγκεκριμένο εικονοστοιχείο καταγράφηκε ως ακραίο (Chaudhry et al. 2006).

#### B. Fast Iterative PPI (FIPPI)

Η FIPPI είναι μία μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί έναν αλγόριθμο αρχικοποίησης για την παραγωγή ενός κατάλληλου συνόλου αρχικών endmembers, έτσι ώστε το τελικό σύνολο των τελικών μελών να συγκλίνει στα επιθυμητά endmembers. Δεν έχει σχέση με την PPI.

Για να λειτουργήσει πρέπει να προσδιοριστεί ο αριθμός των εικονοστοιχείων-στόχων που πρέπει να δημιουργηθούν από την ATGP ως endmembers, με την βοήθεια της μεθόδου εικονικής διάστασης (VD). Η FIPPI χρειάζεται μόνο τον ίδιο αριθμό των διαστάσεων  $p$ , που απαιτείται να διατηρηθεί μετά τη διαστασιολόγηση και αυτό το  $p$  καθορίστηκε από την εικονική διάσταση VD (Chaudhry et al. 2006).

#### C. Automatic Target Generation Process (ATGP)

Η διαδικασία αυτόματης δημιουργίας στόχων (ATGP) αναπτύχθηκε για την εύρεση πιθανών εικονοστοιχείων-στόχων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία ενός πίνακα υπογραφής που χρησιμοποιείται σε μια προσέγγιση προβολής ορθογώνιου υποδιαστήματος (OSP). Είναι μία από τις δύο διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στην αυτόματη ανίχνευση στόχων και στον αλγόριθμο ταξινόμησης (ATDCA).

Η ATGP χρησιμοποιεί με επαναλήψεις την παραπάνω εξίσωση για την εύρεση διανυσμάτων εικονοστοιχείων στόχου του ενδιαφέροντος από τα άγνωστα δεδομένα, ανεξάρτητα από το τι είδους εικονοστοιχεία είναι αυτοί οι στόχοι (Chaudhry et al. 2006).

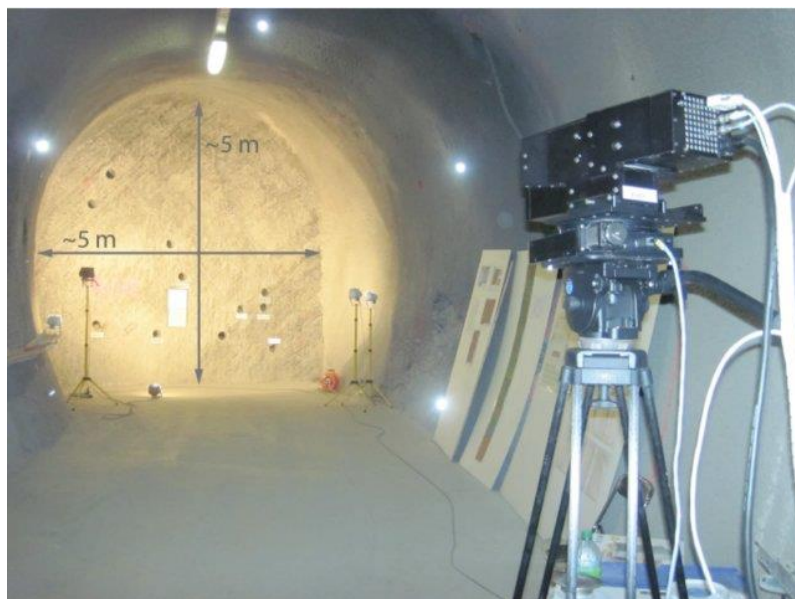
#### D. N-finder (NFINDR)

Η τεχνική βασίζεται στο γεγονός ότι σε  $n$  φασματικές διαστάσεις, ο  $n$ -όγκος που περιέχεται σε ένα απλό σύστημα που σχηματίζεται από τα καθαρότερα εικονοστοιχεία είναι μεγαλύτερος, από οποιονδήποτε άλλο όγκο που σχηματίζεται από διαφορετικό συνδυασμό εικονοστοιχείων. Ο αλγόριθμος λειτουργεί "φουσκώνοντας" ένα simplex μέσα στα δεδομένα, ξεκινώντας με ένα τυχαίο σύνολο εικονοστοιχείων. Για κάθε εικονοστοιχείο και κάθε endmember, το endmember αντικαθίσταται με το φάσμα του εικονοστοιχείου και ο όγκος υπολογίζεται εκ νέου. Εάν αυξάνεται, το φάσμα του νέου εικονοστοιχείου αντικαθιστά το εν λόγω endmember. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να μην γίνονται άλλες αντικαταστάσεις. Αυτός ο αλγόριθμος εξάγει με επιτυχία τα end-members σε ένα συνθετικό σύνολο δεδομένων και κρίνεται επιτυχής (Winter, 1999).

### 2.6. Περιπτώσεις μελέτης

Παρακάτω θα αναλυθούν τρία case studies δημοσιευμένα σε έγκριτα επιστημονικά περιοδικά. Η επιλογή αυτών έγινε αφ' ενός διότι καθιστούν την συγκεκριμένη μέθοδο ως έγκυρη, αφήνοντας ωστόσο περιθώριο βελτίωσης και αφ' ετέρου διότι τονίζουν το γνωστικό κενό που υπάρχει στο ευρύτερο πεδίο της υπερφασματικής απεικόνισης και χαρτογράφησης ορυκτών υλών, υπό τις συνθήκες του υπογείου χώρου με επίγειους αισθητήρες.

Η πρώτη μέλετη είναι των (Kurz et al. 2012) και αφορά μία ερευνητική προσπάθεια που διεξήχθη στο υπόγειο εργαστήριο βραχομηχανικής Mont Terri στην Ελβετία (Εικ. 2-23), όπου διερευνάται η εφαρμογή συνδυασμού μεθόδων υπερφασματικής απεικόνισης και LIDAR για τον προσδιορισμό της γεωλογίας και άλλων γεωτεχνικών χαρακτηριστικών στην κατασκευή σηράγγων. Η σημασία της πρότερης γνώσης των γεωλογικών/γεωτεχνικών χαρακτηριστικών ενός έργου είναι σημαντικότερη, και για αυτόν τον λόγο, με την υπερφασματική απεικόνιση κοντινής εμβέλειας γίνεται προσπάθεια να χαρτογραφηθεί η ορυκτολογία και η λιθολογία στα μέτωπα των σηράγγων.



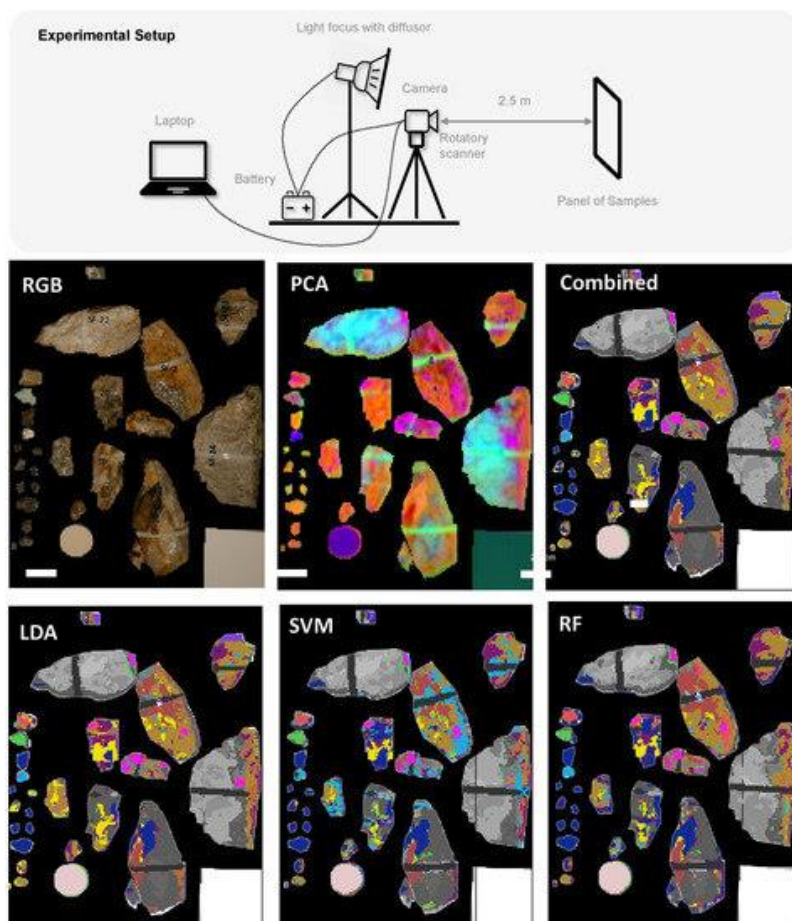
Εικόνα 2-23: Στιγμιότυπο από την μέτρηση της λήψης δεδομένων (Πηγή: Kurz et al. 2017)

Η υπερφασματική μέθοδος επιλέγεται καθώς, παρέχει ταχεία και αυτόματη χαρτογράφηση της γεωλογίας, βελτιώνοντας τη διαδικασία τεκμηρίωσης και την ενημέρωση των γεωλογικών μοντέλων κατά τη διάρκεια της κατασκευής, επιτρέποντας: (i) πλήρη κάλυψη της σήραγγας επιφανειών, (ii) τη χαρτογράφηση τύπων ορυκτών που μπορεί να είναι δύσκολο να εντοπιστούν με το μάτι, (iii) την αρχειοθέτηση της γεωλογίας για αξιολόγηση μετά την εκσκαφή και την επιφανειακή σφράγιση.

Ως συμπέρασμα φαίνεται πως ορισμένα προβλήματα που απασχολούσαν πρότινος την χειροκίνητη χαρτογράφηση, αντιμετωπίζονται με επιτυχία. Η μελέτη δείχνει ότι η υπερφασματική απεικόνιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χαρτογράφηση της εξάπλωσης στην Opalinus Clay (το πέτρωμα που κυριαρχεί στο σημείο), με υψηλότερη ανάλυση από ό,τι η προηγούμενως. Ειδικότερα, εντοπίστηκαν νέες μεγάλης κλίμακας στρώσεις, που ερμηνεύονται ως ανθρακικό τσιμέντο, οι οποίες είχαν διαφύγει από την προηγούμενη εργασία, λόγω των προβλημάτων που υπήρχαν με την προσβασιμότητα και την οπτική ταυτοποίηση. Οι φασματικές καμπύλες υποδηλώνουν ότι μπορούν να εντοπιστούν διαφορετικές ζώνες υλικού και που σχετίζονται με φυσικές ιδιότητες, αν και απαιτούνται περαιτέρω εργασίες για την πλήρη κατανόηση των

σχέσεων μεταξύ των υλικών και των φασμάτων των εικονοστοιχείων. Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλές άλλες γεωλογικές καταστάσεις, συμπεριλαμβανομένων των μεταμορφωμένων κρυσταλλικών πετρωμάτων, ή για την επιθεώρηση συστημάτων στήριξης της σήραγγας, σκυροδέτησης ή όταν η μεταβολές του υλικού στον χώρο είναι σημαντικές.

Η δεύτερη μελέτη των (Lobo et al. 2021), αφορά την αξιολόγηση της υπερφασματικής μεθόδου ως προς την αναγνώριση και την χαρτογράφηση ορυκτών σε κοίτασμα κασίτερου-βολφραμίου, χρησιμοποιώντας συλλεγμένα δείγματα, σε δύο βασικές εικόνες: από υψηλής ποιότητας σάρωσης με εργαστηριακές συνθήκες και μέσα, και από προσομοίωση μετώπου υπόγειου ορυχείου με τις συνθήκες που θα ίσχυαν εκεί. Τα ορυκτά που χαρακτηρίζονται είναι ο κασιτερίτης (κασσίτερος), ο βολφραμίτης (μετάλλευμα βολφραμίου), ο χαλκοπυρίτης, ο μαλαχίτης, ο μοσχοβίτης και ο χαλαζίας. Σε ένα δεύτερο επίπεδο, γίνεται και σύγκριση των αποτελεσμάτων σε συγκεκριμένες φασματικές περιοχές, αλλά και της απόδοσης διαφορετικών μεθόδων ανάλυσης μηχανικής μάθησης (Linear Discriminant Analysis, Singular Vector Machines and Random Forest) με την τελευταία να έχει τα μεγαλύτερα ποσοστά επιτυχίας. Συνολικά, επιβεβαιώνεται η καταλληλότητα της υπερφασματικής απεικόνισης για την καταγραφή της χωρικής κατανομής της μεταλλοφορίας του μεταλλεύματος στο ορυχείο βολφραμίου κασίτερου.



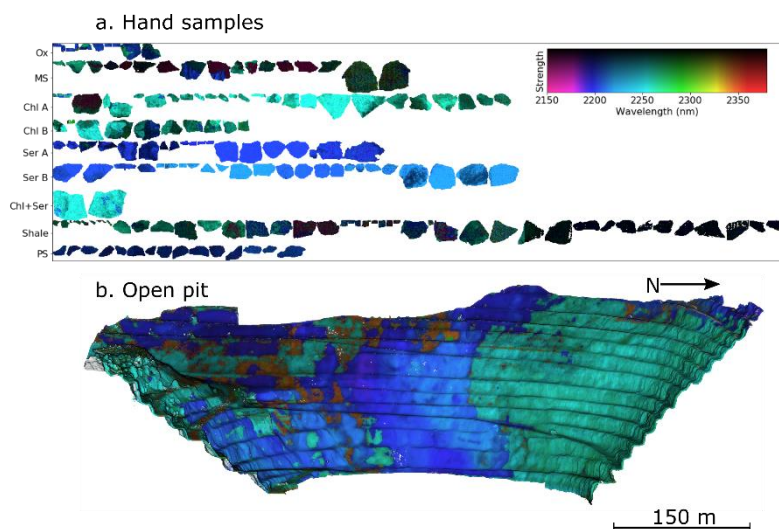
Εικόνα 2-24: Αποτύπωση διάταξης πειράματος και έκθεση αποτελεσμάτων ύστερα από διάφορες αναλυτικές μεθόδους (Πηγή: Lobo et al. 2021)

Συμπερασματικά, φαίνεται πως η έρευνα αποφέρει αισιόδοξα αποτελέσματα ως προς την ανίχνευση των ορυκτών. Όσον αφορά την εργαστηριακή διάταξη, η περιοχή 450-1650 nm, ανελυμένη με την μέθοδο Linear Discriminant Analysis έχει την μεγαλύτερη ακρίβεια. Για την προσομοιωμένη διάταξη, παρατηρείται χαμηλότερη επιτυχία στην αναγνώριση των ορυκτών έναντι της εργαστηριακής διάταξης (84,9%), όπου συνδυάζοντας και τις τρεις μεθόδους μηχανικής μάθησης ανεβαίνει στα 87,5%. Ο κασιτερίτης συγγέεται πολύ συχνά με τον βολφραμίτη, ωστόσο εφόσον χαρακτηριστεί ως ένα ορυκτό κασιτερίτης-βολφραμίτης έχει ποσοστό επιτυχίας 94,9%. Αυτά τα αποτελέσματα ενθαρρύνουν επικείμενες μελέτες για την ανάπτυξη επίγειων υπερφασματικών συστημάτων στην πραγματική στοά του ορυχείου για τη χαρτογράφηση του μετώπου εκσκαφής. Μια ακολουθία αυτών των χαρτών σε δεδομένα χρονικά διαστήματα κατά την πρόοδο της εκσκαφής, θα βελτιώσει την αξιολόγηση του μεταλλεύματος και θα



τεκμηριώσει τη δομή του κοιτάσματος ως τομογραφία, ανοίγοντας το δρόμο για λεπτομερείς μελέτες των της χωρικής κατανομής της μεταλλοφορίας του μεταλλεύματος και την αξιολόγηση των γεωλογικών μοντέλων του κοιτάσματος.

Η τρίτη μελέτη των (Thiele et al. 2021), είναι και η πιο σχετική με την παρούσα διπλωματική, καθώς το εργαλείο που χρησιμοποιείται και στις δύο περιπτώσεις είναι το προγραμματιστικό πακέτο *rython* ανοικτού κώδικα για την προεπεξεργασία και επεξεργασία υπερφασματικών εικόνων, *hylite*. Παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο διάγραμμα ροής, από την δημιουργία υπερσυννέφων (*hypercloud*) με την απρόσκοπτη συγχώνευση γεωμετρικών πληροφοριών με δεδομένα από διάφορους αισθητήρες υπερφασματικής απεικόνισης και εφαρμόζοντας τις απαραίτητες ατμοσφαιρικές και διορθώσεις φωτισμού. Σε συνδυασμό με εργαλεία όπως τα ελάχιστα μήκη κύματος και τους φασματικούς δείκτες είναι εφικτή η ακριβής χαρτογράφηση γεωλογικών αντικειμένων από απόσταση, το ζητούμενο δηλαδή και της παρούσας διπλωματικής. Τα υπερφασματικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται, γίνονται από εργαστηριακές λήψεις, λήψεις με τρίποδα και μη επανδρωμένα αεροσκάφη για την αυτόματη χαρτογράφηση των σχετικών λιθολογιών και αλλοιώσεων στο κοίτασμα ηφαιστειακών μαζικών θειούχων (VHMS) στο ανοιχτό ορυχείο *Corta Atalaya*, Ισπανία. Οι αναλύσεις αυτές επιτρέπουν την ποσοτική και αντικειμενική χαρτογράφηση των ορυκτών σε κλίμακα εξόρυξης και ανοικτού ορυχείου, διευκολύνοντας την ποσοτική έρευνα και τις προσεγγίσεις έξυπνης εξόρυξης. Τελικά, η ενσωμάτωση αισθητήρων με το *hylite* και η ισχύς των μεθόδων χαρτογράφησης με βάση τα δεδομένα καθίστανται επιτυχή και ακριβή, καθώς επίσης και ότι δείγματα του κοιτάσματος μπορούν να εκπαιδεύσουν την μέθοδο *Random Forest* για την διόρθωση δεδομένων.



Εικόνα 2-25: Αποτύπωση του συνδυασμού των συλλεγμένων δειγμάτων και των σαρώσεων της υπαίθριας εκμετάλλευσης προς μελέτη (Πηγή: Thiele et al. 2021)

Έτσι, μέσα από 10 επίγειες και 357 εναέριες υπερφασματικές εικόνες συγχωνευμένες σε ένα υπερσύννεφο (hycloud) είναι εφικτή η ανίχνευση γεωλογικά δεδομένων, με εργαλεία όπως χάρτες ελάχιστου μήκους κύματος, αναλογίες καναλιών και φασματικές ταξινομήσεις, για την χαρτογράφηση της λιθολογίας και της αλλοίωσης ορυκτολογίας στο μεταλλείο, η οποία συνδέεται με την μεταλλοφορία. Τα αποτελέσματα αυτά αναδεικνύουν τις δυνατότητες της υπερφασματικής απεικόνισης για την ταχεία και αντικειμενική χαρτογράφηση του ορυχείου και τις ερευνητικές γεωτρήσεις, ζητούμενα που είναι απαραίτητα για τη σύγχρονη έρευνα σε εξόρυξη, εξερεύνηση και εκμετάλλευση μεταλλευτικών κοιτασμάτων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Περιοχή Μελέτης

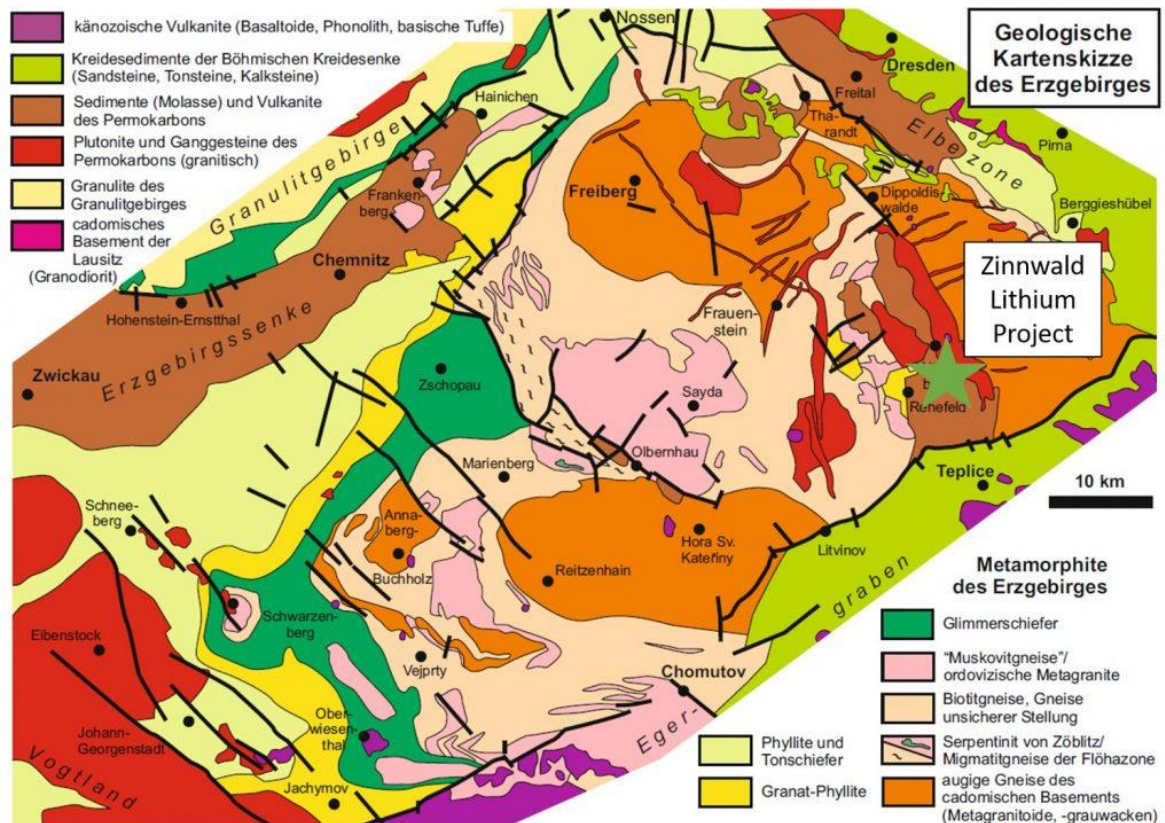
Η έρευνα διεξήχθη σε ορυχείο το οποίο βρίσκεται στην περιοχή Zinnwald, Altenberg στην Σαξονία της ανατολικής Γερμανίας κοντά στα σύνορα με την Τσεχία. Οι παρακάτω πληροφορίες που αφορούν στην γεωλογική διαμόρφωση του χώρου, ανήκουν στην μελέτη βιωσιμότητας (Dittrich, 2019) για ένα καινούργιο εξορυκτικό σχέδιο το οποίο έχει δρομολογηθεί από την εταιρεία Deutsche Lithium GmbH, λίγο πιο μακριά από τον μέρος που έλαβε χώρα η παρούσα έρευνα.

Η περιοχή Erzgebirge ιστορικά έχει μεγάλο παρελθόν από την εποχή του χαλκού, αφού βρίσκονται πολλά κοιτάσματα μεταλλευμάτων που αποτελούσαν πηγές για Fe, Sn, Ag, Cu, Co και αργότερα επίσης Zn, Pb και U, προμηθεύοντας με πρώτες ύλες την Σαξονία αλλά και ολόκληρη την περιοχή της Κεντρικής Γερμανίας για αρκετούς αιώνες. Ιστορικά, τα γνωστά κοιτάσματα γρανιτών αυτής της περιοχής (π.χ. Zinnwald/Σίνονεβ, Altenberg, Sadisdorf) αποτελούσαν αρχικά μία σημαντικό πηγή Sn (1300-1800), ενώ κατά την διάρκεια της ανάπτυξης της βιομηχανίας του χάλυβα, το W πρωταγωνίστησε. Και τα δύο μέταλλα παρέμειναν κύριοι στόχοι εξόρυξης μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1990, όταν οι οικονομικές συνθήκες διέκοψαν την μεταλλευτική δραστηριότητα της περιοχής.

### 3.1. Γεωλογία

Το κοίτασμα Li-Sn-W greisen Zinnwald/Σίνονεβ βρίσκεται στο ανατολικό Erzgebirge/Krušné hory. Αυτή η μονάδα φλοιού αντιπροσωπεύει τη βορειότερη επέκταση του Bohemian Massif, η οποία σχηματίστηκε ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης της Γκοντβάνα και της Λαυρασίας κατά τη διάρκεια της Ερκύνιας Ορογένεσης. Η γεωλογική της δομή χαρακτηρίζεται από ένα κρυσταλλικό υπόβαθρο που αποτελείται από λιθολογίες του Προτεροζωικού και Παλαιοζωικού, οι οποίες διεισδύθηκαν από διάφορους παλμούς μετακινηματικών μαγματιτών που ανήκουν στον βαθύλιθο Erzgebirge/Krušnéhory. Αυτός ο μαγματισμός της ύστερης βαρύσκιας ορογένεσης συνοδεύτηκε από εκτεταμένη ηφαιστειακή δραστηριότητα, της

οποίας ο σχηματισμός της καλδέρας Altenberg-Teplice είναι ένα πολύ σημαντικό γεγονός. Η καλδέρα Altenberg Teplice Caldera είναι μια μεγάλη ελλειπτική δομή (περίπου 35 επί 22 χλμ. πλάτος) που φιλοξενεί μια πυκνή ηφαιστειακή διαδοχή και αρκετές φάσεις γρανιτικών διεισδύσεων. Το μοντέλο των μικρών διεισδύσεων που σχετίζονται με βαθιές ζώνες ρήγματος Li-F γρανιτών και συναφών Sn-W-Mo-Li αποθέσεων στο (ανατολικό) Erzgebirge, συνοδεύεται επίσης από την επιρροή της μαγματικών παλμών που προέρχονται από τον μανδύα.



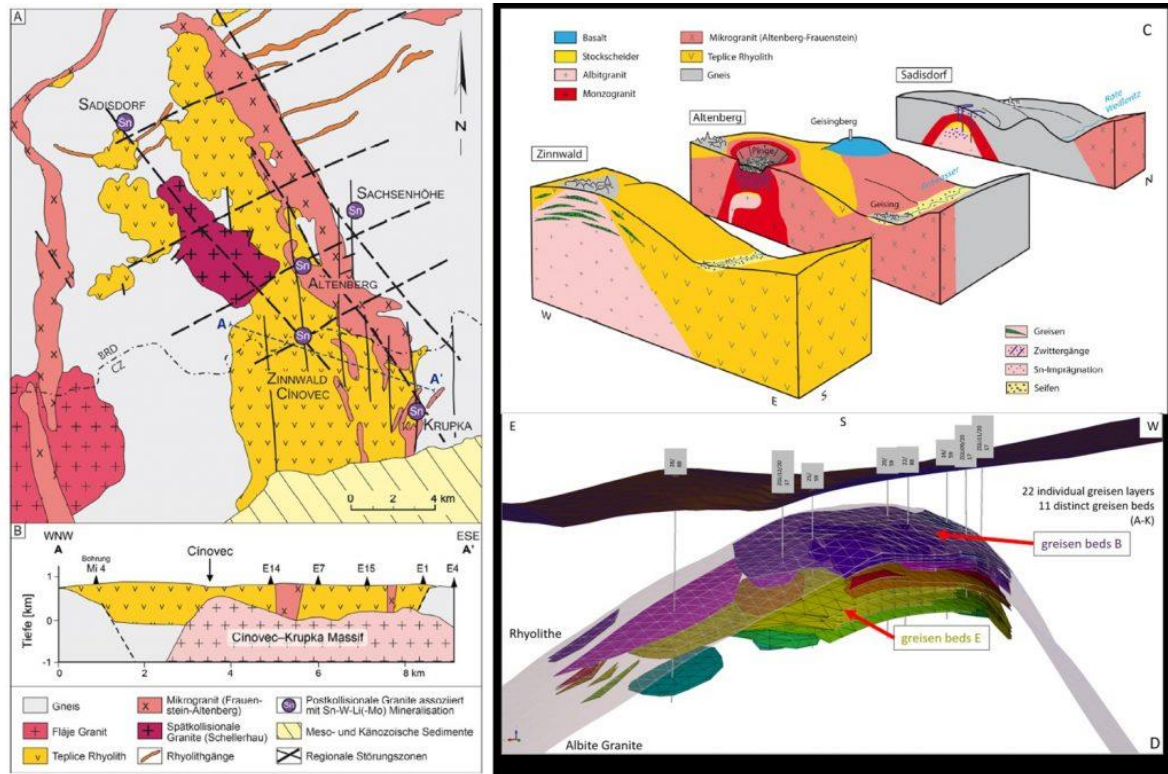
Εικόνα 3-1: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής Erzgebirge (Πηγή: Sebastian, 2013)

Στις τομές αυτών των τεκτονικών ζωνών, ή κοντά τους, διεισδύουν διάφορα όξινα μάγματα της ύστερης βαρίσκιας ορογένεσης στο κρυσταλλικό υπόβαθρο της περιοχή Erzgebirge. Λόγω των θερμοκρασιών των μαγμάτων, εμφανίζονται μόνο χαμηλές περιεκτικότητες σε Sn, W και Li. Αντίθετα, τα τήγματα υψηλής θερμοκρασίας που δεν μπόρεσαν να διαπεράσουν το γνευσιακό υπόβαθρο μπορούσαν να κλασματοποιηθούν και έτσι είναι εμπλουτισμένα σε Sn, W και Li και άλλα γρανιτόφιλα στοιχεία. Αυτά τα τήγματα παγιδεύτηκαν κάτω από το

υπόβαθρο μέχρι την κατάρρευσή του, στα 320-318 Ma, και το σχηματισμό της καλδέρας Altenberg-Terlice. Τα ιδιαίτερα κλασματοποιημένα τήγματα μπόρεσαν τότε να ανέβουν κατά μήκος του προκύπτοντος δικτύου ρηγμάτων στον υπερκείμενο φλοιό, όπου σχημάτισαν μικρούς θόλους ή σωληνοειδείς διεισδύσεις (π.χ. γρανίτης Schellerhau). Αυτοί οι γρανίτες όψιμου σταδίου παρουσιάζουν μονζο- έως συενο- και αλκαλιοσχιστολιθικές γρανιτικές συνθέσεις και συνήθως σχηματίζονται με αυτή τη σειρά (π.χ. Altenberg, Sadisorf).

### 3.1.1. Το κοιτάσμα Li-Sn-W Greisen

Όσον αφορά το λίθιο, το κοιτάσμα Zinnwald είναι το πιο εξερευνημένο και πλούσιο μεταξύ των γνωστών μεταλλευτικών κοιτασμάτων γρανίτη στο Erzgebirge. Το κοιτάσμα βρίσκεται περίπου 3 χλμ. νότια του Altenberg και χωρίζεται σε δύο μέρη: το μικρότερο γερμανικό (Zinnwald, που περιέχει περίπου ένα το ένα τρίτο του κοιτάσματος) και το μεγαλύτερο τσεχικό τμήμα (Cínovec) κατά μήκος των γερμανο-τσεχικών συνόρων. Η γεωλογική δομή του κοιτάσματος είναι σχετικά απλή και καθορίζεται κυρίως από τα πετρώματα του αλβιτικού γρανίτη διείσδυσης του Zinnwald, που φιλοξενείται από τον ρογολίτη Terlice.



Εικόνα 3-2: Γεωλογία και δομές του κοιτάσματος Li-Sn-W Zinnwald. Α) Σχηματικός γεωλογικός χάρτης του νοτιοανατολικού Erzgebirge (Altenberg-Teplice Caldera, τροποποιημένος από Neßler et al. 2017 σύμφωνα με Seifert και Kemppe 1994). Β) Γεωλογική τομή κατά μήκος της γραμμής A-A' (τροποποιημένη από Neßler et al. 2017). Γ) Σχηματική τομή A-Δ μέσα από τα κοιτάσματα κασσίτερου του ανατολικού Erzgebirge (τροποποιημένη κατά Sebastian 2013). Δ) Χωρική θέση των επιμέρους greisen μεταλλευμάτων (Bock et al. 2020).

Το μεγαλύτερο μέρος της μεταλλοφορίας Li-Sn-W εμφανίζεται ως στρώματα και φλέβες αλλοιωμένου γρανίτη εντός του γρανίτη και μόνο σε μικρότερο βαθμό στον περιβάλλοντα ρυόλιθο Teplice. Ο αλβιτικός γρανίτης είναι μια μικρής κλίμακας γρανιτική διείδυση που σχηματίζει μια ελλειψοειδή επιφανειακή εμφάνιση μήκους περίπου 1.300 μέτρων (B-N) και περίπου 300 m σε πλάτος (A-Δ). Παρουσιάζει ένα ανοιχτό κίτρινο έως πρασινωπό χρώμα, έχει ασθενώς πορφυριτική έως ποικιλιτική υφή και αποτελείται κυρίως από πλαγιόκλαστο, χαλαζία, ορθόκλαστο, Li-Fe-F μαρμαρυγίες (ζιννβαλδίτη) και σερικήτη. Εκτός από τις προοδευτικές ενδείξεις της αλλοίωσης γρανίτη (ιδίως αποσύνθεση του αστρίου, του χαλαζία και του ζιννβαλδίτη μεταβολισμός), ο αλβιτικός γρανίτης επηρεάζεται επίσης από αργιλοποίηση και αιματίωση. Με βάση την τεχνοτροπία, τον προσανατολισμό, την έκταση και ορυκτού αποθέματος, οι μεταλλοφορίες

αλβιτικού γρανίτη και φλεβών χωρίζονται σε διαφορετικούς τύπους αποθεμάτων:

- Τα μαζικά στρώματα αλβιτικού γρανίτη, που ακολουθούν με υποπαράλληλη βύθιση τη μορφολογία των επιφάνειας των γρανιτών
- Μαζικά αποθέματα αλβιτικού γρανίτη, που συνδέονται με ρήγματα ΒΔ-ΝΑ διεύθυνσης
- Φλέβες χαλαζία-αλβιτικού γρανίτη υπο-οριζόντιας βύθισης (αποκαλούμενες "Flöze")
- Φλέβες με υποκατακόρυφη κλίση (αποκαλούμενες "Morgengänge").

Η ορυκτολογική σύσταση των μαζικών στρωμάτων αλλοιωμένου γρανίτη είναι σχετικά απλή και αποτελείται από κατά κύριο λόγο από χαλαζία (70-80 %), ζιννβαλδίτη (20-30 %) και περιέχει επίσης μικρές ποσότητες τοπαζίου και υπολείμματα αστρίων. Αυτές οι μεταλλοφορίες σχηματίζουν επίπεδα, φακοειδή, ακανόνιστα μεταλλευτικά σώματα και αναπτύσσονται στα ανώτερα στρώματα τμήμα του θόλου του γρανίτη καθώς και κατά μήκος των πλευρών του. Μεμονωμένα σώματα αλλοιωμένου γρανίτη έχουν πλευρική έκταση έως και αρκετές εκατοντάδες μέτρα με πάχη από <1 m έως 30 m και σε αρκετές θέσεις έως και 50 μέτρα συχνότητα και τα πάχη τους μειώνονται με αυξανόμενο βάθος (Neßler et al. 2017).

Οι υπο-οριζόντιες βυθιζόμενες φλέβες χαλαζία-αλλοιωμένου γρανίτη ήταν η βάση των ιστορικών εξορυκτικών δραστηριοτήτων. Αυτές οι φλέβες γρανίτη ακολουθούν επίσης με υποπαράλληλες τη μορφολογία της επιφάνειας του γρανίτη. Ο συνηθέστερος τύπος φλεβών αντιπροσωπεύεται από φλέβες χαλαζία-ζιννβαλδίτη, όπου ο ζιννβαλδίτης εμφανίζεται εμφωλευμένος ή σε ζώνες μέσα στο χαλαζιακό στρώμα (Nessler et al. 2017). Οι φλέβες με υποκατακόρυφη κλίση είναι μόνο μία δευτερεύουσα μεταλλοφορία στο κοίτασμα. Η ορυκτολογική τους σύνθεση είναι παρόμοια με εκείνη των φλεβών με ρηγή κλίση. Το πάχος είναι συνήθως περίπου 10 έως 20 cm και δεν υπερβαίνει το 1 m (Neßler et al. 2017). Ο ζιννβαλδίτης είναι μόνο ένα δευτερεύον συστατικό των αυτού του τρόπου μεταλλοφορίας και εμφανίζεται ως διάσπαρτος

κρύσταλλος ή σε ροζέτες σε συμπαγείς πυρήνες χαλαζία. Εκτός από την μεταλλοφορία Li, το κοίτασμα περιέχει επίσης δευτερεύουσα μεταλλοφορία του Sn(-W)-μεταλλικού ορυκτού αλβιτικού γρανίτη, ασβεστο-απατίτες, θειούχα μεταλλεύματα Sn-(In)-Zn-CuPb, καθώς και βαρίτη(-φθορίτη) μεταλλοφορία.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Μεθοδολογία

Η μέθοδος που ακολουθείται, εκμεταλλεύεται κυρίως τις υπολογιστικές δυνατότητες που δίνονται μέσα από το *hylite*. Προσπαθεί να λάβει υπόψιν όλες τις παραμέτρους των συνθηκών για κάθε περίπτωση και η σύγκριση να είναι όσο το δυνατόν πιο ίση. Εξετάζει την δυνατότητα λήψης υπογείων υπερφασματικών αναλύσεων, την διάταξη των μέσων φωτισμού και αισθητήρων που ωφελεί το μέγιστο τις υπόγειες αλλά και εργαστηριακές λήψεις, την διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων με την εναλλαγή αισθητήρων.

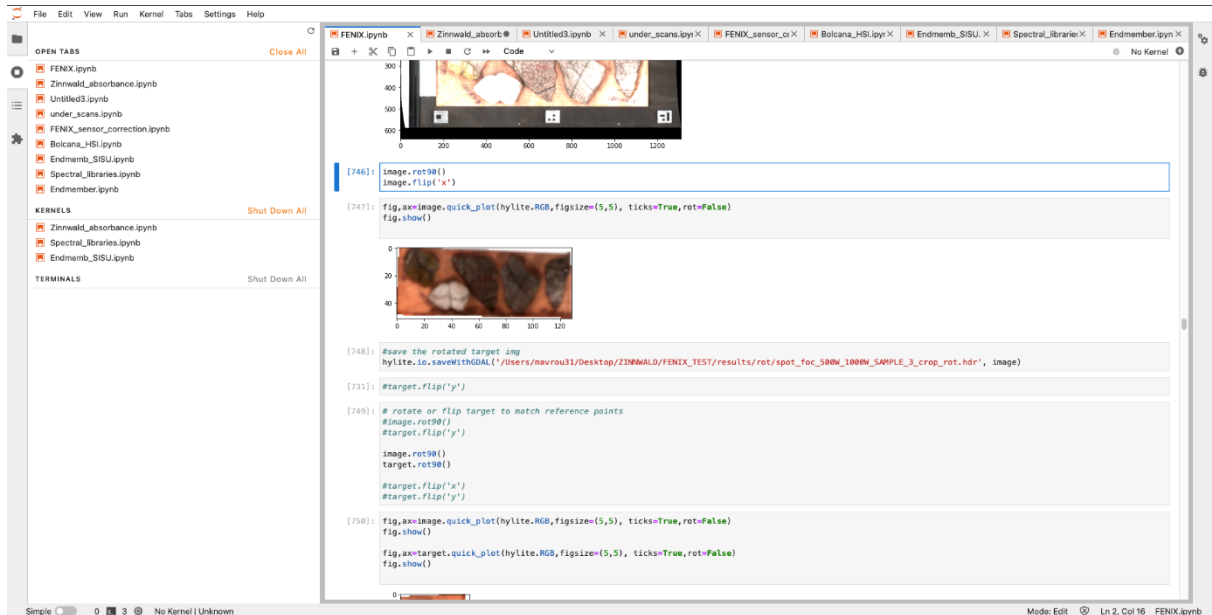
### 4.1. Μέσα

Τα τεχνολογικά μέσα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια του ερευνητικού προγράμματος διακρίνονται σε λογισμικά και αλγόριθμους μηχανικής μάθησης όσον αφορά την επεξεργασία των δεδομένων και σε υπερφασματικούς αισθητήρες (κάμερες), εμπορικές λάμπες φωτός και ψηφιακές κάμερες. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών και λεπτομερειών που αφορούν την χρήση των μέσων.

#### 4.1.1. Λογισμικά/Κώδικας

##### 4.1.1.1. *Hylite*

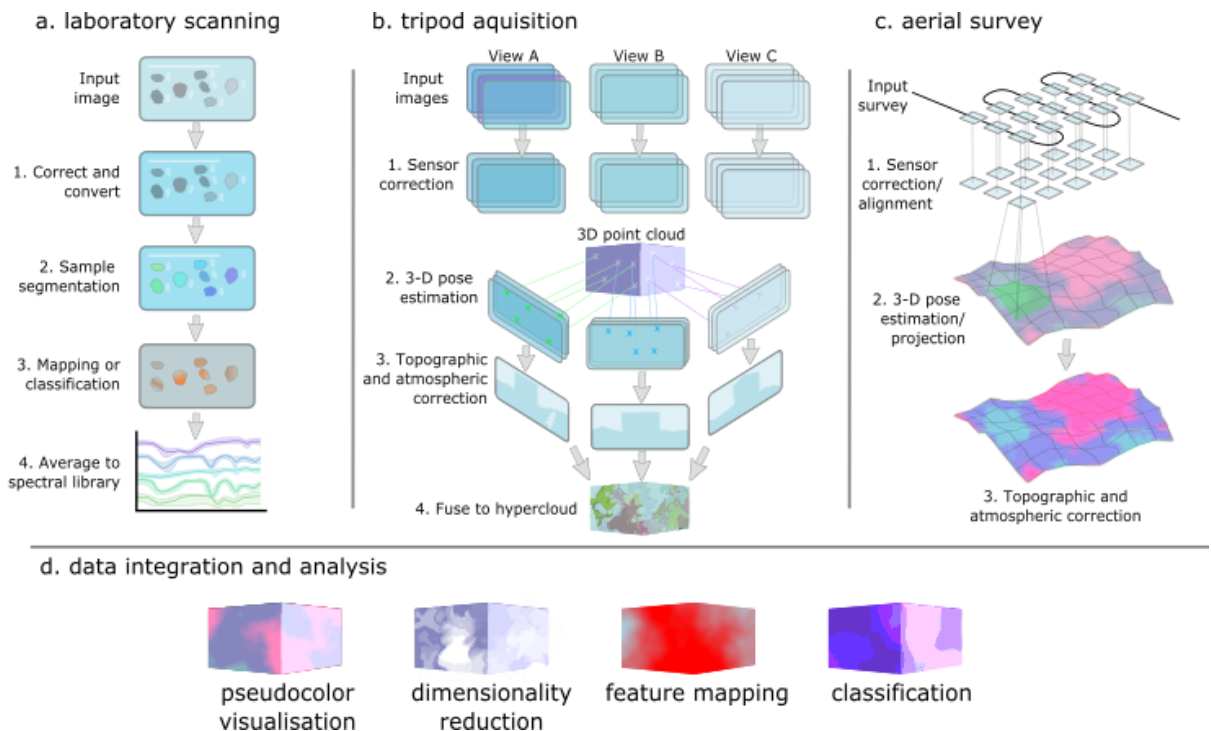
Το *hylite* είναι ένα υπολογιστικό πακέτο python ανοικτού κώδικα για την προεπεξεργασία εικόνων από διάφορους υπερφασματικούς αισθητήρες και τη συνένωση των αποτελεσμάτων με δεδομένα point-cloud υψηλής ανάλυσης για τη δημιουργία ομοιογενών και ραδιομετρικά διορθωμένων hyper-cloud. Εφαρμόζονται επίσης διάφορες τεχνικές ανάλυσης, συμπεριλαμβανομένης της χαρτογράφησης ελάχιστου μήκους κύματος, της μείωσης διαστάσεων και της χαρτογράφησης φασματικών γωνιών. Φασματικές υπογραφές αναφοράς από φασματικές βιβλιοθήκες, επίγειες ή εργαστηριακές μετρήσεις μπορούν επίσης να ενσωματωθούν και να χρησιμοποιηθούν για την εκτέλεση επιβλεπόμενων ταξινομήσεων με τη χρήση τεχνικών μηχανικής μάθησης.



Εικόνα 4-1: Απεικόνιση περιβάλλοντος εργασίας hylite

Ένα βασικό σχεδιαστικό χαρακτηριστικό του hylite είναι ο πολυμορφισμός μεταξύ διαφορετικών τύπων φασματικών δεδομένων, έτσι ώστε φασματικές βιβλιοθήκες, εικόνες και νέφη σημείων να μπορούν εύκολα να αναλυθούν και να ενσωματωθούν. Έχουν επίσης υλοποιηθεί ροές εργασίας προεπεξεργασίας για καθέναν από αυτούς τους τύπους δεδομένων.

Το hylite περιλαμβάνει επίσης μια ποικιλία εργαλείων για την οπτικοποίηση διαφορετικών συνόλων υπερφασματικών δεδομένων και των σχετικών παραγώγων τα οποία παρουσιάζονται στην Εικ. 4-2 συνοπτικά. Για παράδειγμα, οι χάρτες ελάχιστου μήκους κύματος μπορούν εύκολα να υπολογιστούν και να απεικονιστούν για φασματικές βιβλιοθήκες, εργαστηριακές σαρώσεις και σκηνές σε εξωτερικούς χώρους (Thiele & Lorentz, 2022).



Εικόνα 4-2: Παρουσίαση διαγράμματος ροής υπολογιστικού εργαλείου hylite (Πηγή: Thiele et al. 2021)

#### 4.1.1.2. CloudCompare

Το CloudCompare είναι ένα λογισμικό επεξεργασίας τρισδιάστατων νεφών σημείων (όπως αυτά που λαμβάνονται με σαρωτή λέιζερ). Μπορεί επίσης να χειριστεί τριγωνικά πλέγματα και βαθμονομημένες εικόνες. Έχει ως σκοπό την ανίχνευση αλλαγών σε τρισδιάστατα γεωμετρικά δεδομένα και αποτελεί ένα ανεξάρτητο έργο ανοικτού κώδικα και ένα ελεύθερο λογισμικό.

Το CloudCompare παρέχει ένα σύνολο βασικών εργαλείων για τη χειροκίνητη επεξεργασία και απόδοση τρισδιάστατων νεφών σημείων και τριγωνικών πλεγμάτων.

Ο χρήστης μπορεί να τμηματοποιήσει διαδραστικά τρισδιάστατες οντότητες (με μια δισδιάστατη πολυγραμμή που σχεδιάζεται στην οθόνη), να περιστρέψει/μετατοπίσει διαδραστικά μία ή περισσότερες οντότητες σε σχέση με τις άλλες, να επιλέξει διαδραστικά μεμονωμένα σημεία ή ζεύγη σημείων (για να λάβει το αντίστοιχο μήκος τμήματος) ή τριπλέτες σημείων (για να λάβει την αντίστοιχη γωνία και την κανονική επιπέδου). Η τελευταία έκδοση υποστηρίζει

επίσης τη δημιουργία ετικετών 2D που συνδέονται με σημεία ή ορθογώνιες περιοχές σχολιασμού (Wikipedia, 2022).

#### 4.1.1.3. ENVI

Το ENVI είναι το βιομηχανικό πρότυπο για το λογισμικό επεξεργασίας και ανάλυσης εικόνων. Χρησιμοποιείται από αναλυτές εικόνων, επαγγελματίες GIS και επιστήμονες για την εξαγωγή έγκαιρων, αξιόπιστων και ακριβών πληροφοριών από γεωχωρικές εικόνες. Αυτό το γεωχωρικό λογισμικό είναι επιστημονικά αποδεδειγμένο, εύκολο στη χρήση και στενά ενσωματωμένο στην πλατφόρμα ArcGIS της Esri.

Το λογισμικό ανάλυσης εικόνων ENVI παραμένει στην αιχμή της καινοτομίας για περισσότερες από τρεις δεκαετίες, εν μέρει λόγω της υποστήριξής του για όλους τους τύπους δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων των πολυφασματικών, υπερφασματικών, θερμικών, LiDAR και SAR. Το ENVI καθιστά τη βαθιά μάθηση προσιτή στους ανθρώπους μέσω διαισθητικών εργαλείων και ροών εργασίας που δεν απαιτούν προγραμματισμό. Η ανάλυση γεωχωρικών εικόνων ENVI μπορεί επίσης να προσαρμοστεί μέσω ενός API και ενός περιβάλλοντος οπτικού προγραμματισμού για την κάλυψη συγκεκριμένων απαιτήσεων του έργου (L3HARRIS, 2022).

#### 4.1.1.4. QGIS

Το QGIS είναι το κορυφαίο ελεύθερο και ανοικτού κώδικα πρόγραμμα GIS. Επιτρέπει την δημιουργία, την επεξεργασία, την οπτικοποίηση, την ανάλυση και την δημοσιοποίηση γεωχωρικών πληροφοριών σε Windows, Mac OS, Linux, BSD και Android (μέσω της εφαρμογής QField) (OsGeo, 2022).

### 4.1.2. Τεχνολογικά μέσα

#### 4.1.2.1. Αισθητήρες

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται καθ'όλη την διάρκεια των μετρήσεων, λόγω των διαφορετικών μεταξύ τους χαρακτηριστικών και της διαφορετικής τεχνολογίας τους, δίνουν το πλεονέκτημα της ανάκτησης πληθώρας πληροφοριών και την δυνατότητα σύγκρισης των μετρήσεων μεταξύ τους,

αυξάνοντας την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Πρόκειται για τους υπερφασματικούς αισθητήρες Fenix, Fenix 1K, Mjølñir και SiSuRock. Οι αισθητήρες Fenix, Fenix 1K και Mjølñir είναι επίγειοι σαρωτές, οι οποίοι στερεώνονται σε τρίποδο και ανάλογα την γωνία μέτρησης, λαμβάνουν πληροφορίες για την επιφάνεια σάρωσης. Ο αισθητήρας SisuROCK ουσιαστικά αποτελεί έναν σαρωτή αποτελούμενο από 4 διαφορετικές «κάμερες» τοποθετημένες σε διάταξη μεταφορικής ταινίας και προσφέρει δεδομένα μεγαλύτερης ανάλυσης και μεγαλύτερου φασματικού εύρους. Τέλος, χρησιμοποιείται μεμονωμένα ο αισθητήρας PSR 3500 της Spectral Evolution ο οποίος είναι κινητός και αντί για μεγάλες επιφάνειες, δρα σε μεμονωμένα σημεία.

Με τους εν λόγω αισθητήρες διεξάγονται πειραματικές καμπάνιες στο πεδίο αλλά και στο πεδίο προσομοίωσης. Όσον αφορά τον αισθητήρα SiSuRock, γίνεται μόνο σάρωση υψηλής ακρίβειας στις εργαστηριακά σανίδες, όπως θα εξηγηθεί στην συνέχεια.

*Πίνακας 4-1: Λεπτομερής σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών αισθητήρων SPECIM AsiaFenix 1K, SPECIM AsiaFenix, HySPEX Mjølñir VS-620 (τροποποιημένος από Moritz K., Madriz Y.)*

	<b>SPECIM AsiaFenix 1K</b>	<b>SPECIM AsiaFenix</b>	<b>HySPEX Mjølñir VS-620</b>
Φασματικό εύρος	380–2500 nm	380–2500 nm	400–2500 nm
Φασματικά κανάλια	VNIR: 348 (2) SWIR: 256	VNIR: 175 (4) SWIR: 275	VNIR 200 SWIR 300 Combined 490
Χωρική ανάλυση	1024 pixels	384 pixels	VNIR 1240 pixels SWIR 620 pixels Combined 620 pixels
Οπτικό πεδίο	40°	32.3°	20°
Φασματική ανάλυση	VNIR 4.5 nm SWIR 14 nm	VNIR 3.5 nm SWIR 12 nm	-
Φασματική δειγματοληψία	VNIR 1.7 nm SWIR 6.3 nm	VNIR 3.4 nm SWIR 5.7 nm	VNIR 3.0 nm SWIR 5.1 nm
Βάρος	22.5 Kg	15.0 Kg	6 kg
Διαστάσεις (l-w-h)	530–530–210 mm	450–387–223 mm	374–202–178 mm
Τιμή	περ. €715,000	περ. €240,000	περ. €190,000
Μέγιστη ηλεκτρική κατανάλωση	300 W	500 W	50W (με μπαταρία)

Πίνακας 4-2: Λεπτομερής σύνοψη τεχνικών χαρακτηριστικών 4 «καμερών» (VNIR, SWIR, MWIR, LWIR) αισθητήρα Sisurock (τροποποιημένος από Moritz K., Madriz Y.)

SPECIM Camera	AisaFENIX	AisaFENIX	FX50	AisaOWL
Φασματικό εύρος	380–970 nm	970–2500 nm	2700–5300 nm	7700–12300 nm
Φασματικά κανάλια	VNIR: 175 (4)	SWIR: 275 (1)	MWIR: 154 (1)	LWIR: 96 (1)
Χωρική ανάλυση	1.66 mm/px	1.66 mm/px	1.18 mm/px	1.18 mm/px
Μέγιστη συχνότητα καρτέ	100 Hz	100 Hz	380 Hz	100 Hz
Βαθμονομητές	Λευκό/γκρι πάνελ		Θερμική βαθμονόμηση	

## Sisurock

Το συγκρότημα Sisurock είναι ένα πλήρως αυτοματοποιημένο όργανο απεικόνισης υπερφασματικού πυρήνα για εύκολη και υψηλής ταχύτητας σάρωση πυρήνων γεωτρήσεων και άλλων γεωλογικών δειγμάτων. Έχει τη δυνατότητα απεικόνισης ενός πυρήνα γεώτρησης σε λειτουργία υψηλής ανάλυσης ή ολόκληρου πυρήνα σε λειτουργία σάρωσης υψηλής ταχύτητας.

Αποτελείται από τις υπερφασματικές κάμερες τελευταίας τεχνολογίας της Specim για τις φασματικές περιοχές SWIR, VNIR και LWIR για την ταχεία συλλογή πολλών υπερφασματικών δεδομένων από διάφορα γεωλογικά δείγματα (Specim).

Οι αισθητήρες που αποτελούν το Sisurock είναι οι AisaFENIX για την φασματική περιοχή VNIR και SWIR, FX50 για την περιοχή MWIR και τέλος AisaOWL για LWIR.

Βρίσκεται στις εγκαταστάσεις του Ινστιτούτου συμμετέχει κυρίως στην σάρωση πυρήνων γεωτρήσεων.

## FENIX

Ο αισθητήρας FENIX της Specim είναι ένας βελτιστοποιημένος επίγειος αισθητήρας, που στερεώνεται σε τρίποδο. Σαρώνει περιοχές με μήκη κύματος VNIR, NIR και SWIR, όπου διαθέτει αρκετά καλή ανάλυση.



Εικόνα 4-3: Αισθητήρας Sisurock στις εγκαταστάσεις του HIF



*Εικόνα 4-4: Αισθητήρας FENIX*

Ο αισθητήρας FENIX προσφέρει εξαιρετική ανθεκτικότητα και 75% μείωση μεγέθους και βάρους σε σύγκριση με προηγούμενα συστήματα πολλαπλών αισθητήρων. Η υπεροχή στις τεχνικές επιδόσεις και το μέγεθος έχει επιτευχθεί μέσω του καινοτόμου και μοναδικού σχεδιασμού διπλού φασματογράφου με ένα οπτικό σύστημα το οποίο παρουσιάζει:

- ✓ Συνεχές φασματικό εύρος VNIR/SWIR από 380 έως 2500 nm
- ✓ Έως 450 φασματικές ζώνες
- ✓ Υψηλής απόδοσης φασματογράφο με διαπερατή απεικόνιση
- ✓ Όλες οι φασματικές ζώνες είναι χωρικά συγχρονισμένες, ανεξάρτητα από την απόσταση από τον στόχο
- ✓ Απόδοση ανεξάρτητη της ευαισθησίας πόλωσης

(Specim).

## FENIX 1K

Ο υπερφασματικός αισθητήρας πλήρους φάσματος AisaFENIX 1K της Specim, αποτελεί ιδανική λύση για την τηλεπισκόπηση του περιβάλλοντος και άλλες εφαρμογές εναέριας έρευνας. Με 1024 χωρικά εικονοστοιχεία βελτιώνει την παραγωγικότητα της υπερφασματικής απεικόνισης, παράγοντας τα ίδια κορυφαίας ποιότητας υπερφασματικά δεδομένα πλήρους φάσματος με τον προκάτοχό του, τον AisaFENIX. Ταυτόχρονα, στην περίπτωση των εναέριων μετρήσεων, μειώνει το κόστος πτήσης κατά 60 %, καθώς απαιτούνται λιγότερες γραμμές πτήσης ή συλλέγει δεδομένα με μεγαλύτερη ακρίβεια όταν πετάει στο ίδιο ύψος με πριν. Έχει:



Εικόνα 4-5: Αισθητήρας FENIX 1K

- ✓ Συνεχές φασματικό εύρος VNIR/SWIR από 380 έως 2500 nm
- ✓ Έως 620 φασματικά κανάλια
- ✓ Εύκολα συγχρονισμένα δεδομένα με ενιαία κοινή εμπρόσθια οπτική
- ✓ Όλες οι φασματικές ζώνες είναι χωρικά συγχρονισμένες, ανεξάρτητα της απόστασης από τον στόχο
- ✓ Βελτιστοποιημένη ευαισθησία και λόγο σήματος προς θόρυβο (SNR)
- ✓ Υποστηρίζει τη διασύνδεση με τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα συστήματα GNSS/IMU
- ✓ Συμπαγές για εγκατάσταση σε σταθερή βάση, σε τυπικές βάσεις αερομεταφερόμενης κάμερας, καθώς και σε πυργίσκους και UAV μεσαίου μεγέθους

(Specim).

## Mjolnir VS-620

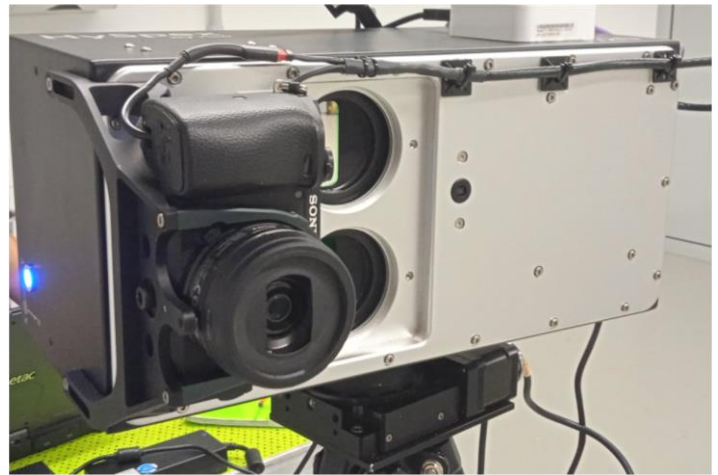
Ο αισθητήρας Mjolnir VS-620 της HySpex είναι κατάλληλος για εφαρμογές που απαιτούν μικρό βάρος, σε συνδυασμό με υψηλή ακρίβεια και ποιότητα επιστημονικών δεδομένων σε όλο το φάσμα VNIR-SWIR. Ενδείκνυται για



εναέριες μετρήσεις όπου στερεώνεται πάνω σε UAV. Στον αισθητήρα είναι ενσωματωμένη η μονάδα συλλογής δεδομένων και το σύστημα πλοήγησης. Οι οπτικοί άξονες VNIR και SWIR είναι ευθυγραμμισμένοι στην κατεύθυνση κατά μήκος της τροχιάς, εξασφαλίζοντας τέλεια συσχέτιση στην κατεύθυνση της πτήσης. Εκτός από τον υψηλής ποιότητας κύβο υπερφασματικών δεδομένων (hycube) που καλύπτει το φασματικό εύρος από 400 - 2500 nm, με 490 κανάλια, παρέχονται δεδομένα διπλής ανάλυσης στην περιοχή VNIR.

Συνολικά, πρόκειται για έναν ελαφρύ, στιβαρό, συμπαγή και αυτόνομο σχεδιασμό που μπορεί να τροφοδοτηθεί πλήρως με μπαταρία (διάρκεια πτήσης περίπου 30 λεπτά).

Οι αποστάσεις εργασίας είναι περίπου 20 m για να γίνει σωστή εστίαση, ωστόσο διατίθεται ένας φακός κοντινής λήψης 1m για μετρήσεις εδάφους σε κοντινότερη απόσταση. Χαρακτηρίζεται για την γρήγορη τοποθέτηση και εύκολη λειτουργία με ταχύτητα σάρωσης πλήρως συγχρονισμένη με το ρυθμό καρέ της κάμερας καθώς και για την εύκολη ασύρματη λειτουργία από tablet ή φορητό υπολογιστή (HySpex, 2022).



Εικόνα 4-6: Αισθητήρας Mjolnir

### PSR+ 3500

Ο αισθητήρας PSR+ 3500 της Spectral Evolution είναι ένα φορητό φασματοραδιόμετρο το οποίο στην προκειμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε μόνο για τον χαρακτηρισμό των λαμπτήρων.

Το PSR+ μπορεί να συνδυαστεί με ένα ευρύ φάσμα αξεσουάρ, συμπεριλαμβανομένης μιας σειράς επιλογών οπτικού πεδίου, όπως απευθείας σύνδεση φακών 4°, 8° ή 14°, οπτικών ινών 25°, διαχύτη ή σφαίρας ολοκλήρωσης. Οι επιλογές τοποθέτησης οπτικών ινών περιλαμβάνουν φακούς 1°, 2°, 3°, 4°, 5°, 8° και 10°. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με καθετήρα επαφής, με δείγμα, λαβή

πιστολιού, κλιπ φύλλου ή καθετήρα πάγκου με συμπιεστή δείγματος. Επιτρέπει την γρήγορη και εύκολη δημιουργία φασματικών βιβλιοθηκών (Spectral Evolution, 2022).

#### 4.1.2.2. Πηγή φωτισμού

Οι λαμπτήρες που χρησιμοποιούνται προμηθεύτηκαν από διαφορετικούς κατασκευαστές για να εντοπιστούν δυνητικές διαφορές μεταξύ τους. Πρόκειται για κοινές λάμπες αλογόνου 500W και 1000W και για έναν προβολέα θεάτρου, ο οποίος θα είναι η βασική πηγή φωτός στις μετρήσεις. Για λόγους συγκρισιμότητας, χρησιμοποιήθηκαν και λαμπτήρες NEON, LED αλλά και λαμπτήρες θερμότητας που προϋπήρχαν στο εργαστήριο. Συνοπτικά οι λαμπτήρες που δοκιμάστηκαν είναι οι εξής :

- DTS Scena 650 1000W προβολέας θεάτρου
- Philips 500W λαμπτήρας
- OSRAM 500W 2900K λαμπτήρας
- OSRAM 1000W λαμπτήρας
- Omnilux 500W λαμπτήρας
- Omnilux 1000W λαμπτήρας
- Omnilux 1000W 3000K λαμπτήρας
- Omnilux 1000W 3200K λαμπτήρας
- Λαμπτήρας θερμότητας
- NEON λαμπτήρας
- LED λαμπτήρας

Ορισμένοι από τους λαμπτήρες φαίνονται στην Εικ 4-7.



Εικόνα 4-7: Λάμπα αλογόνου 1000 W, λάμπα αλογόνου 500 W, θεατρικός προβολέας, λαμπτήρας θερμότητας (από αριστερά προς τα δεξιά)

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αναλύονται παρακάτω στο κεφάλαιο 5.1.1..

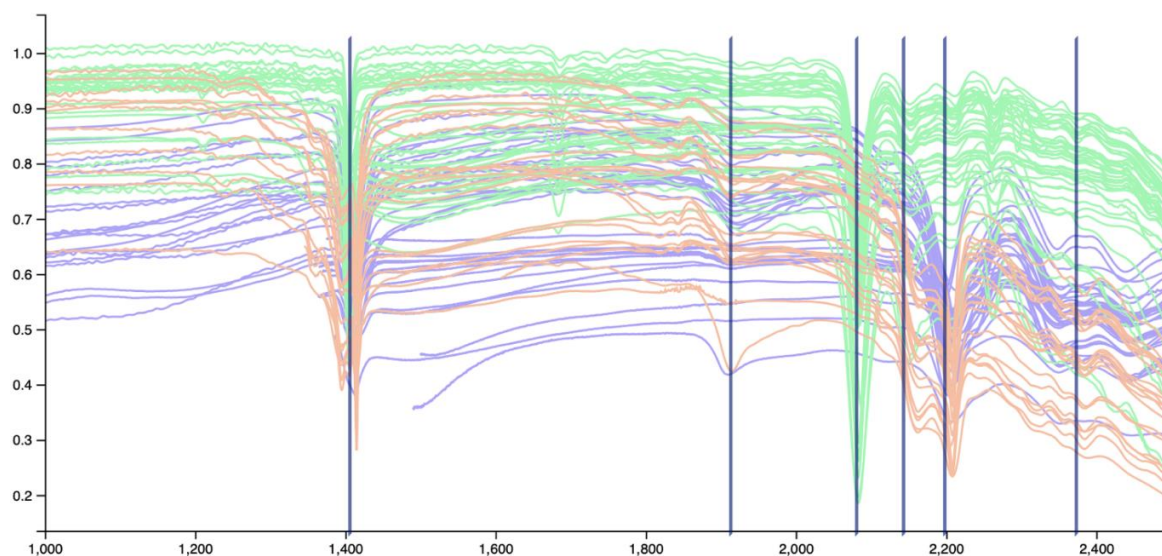
#### 4.1.2.3. Ψηφιακή κάμερα

Για την λήψη ψηφιακών φωτογραφιών που εξυπηρετούν τους σκοπούς της φωτογραμμετρίας, χρησιμοποιείται ψηφιακή κάμερα Nikon d850 με φακό 35mm/1.8.

## 4.2. Φασματική βιβλιοθήκη

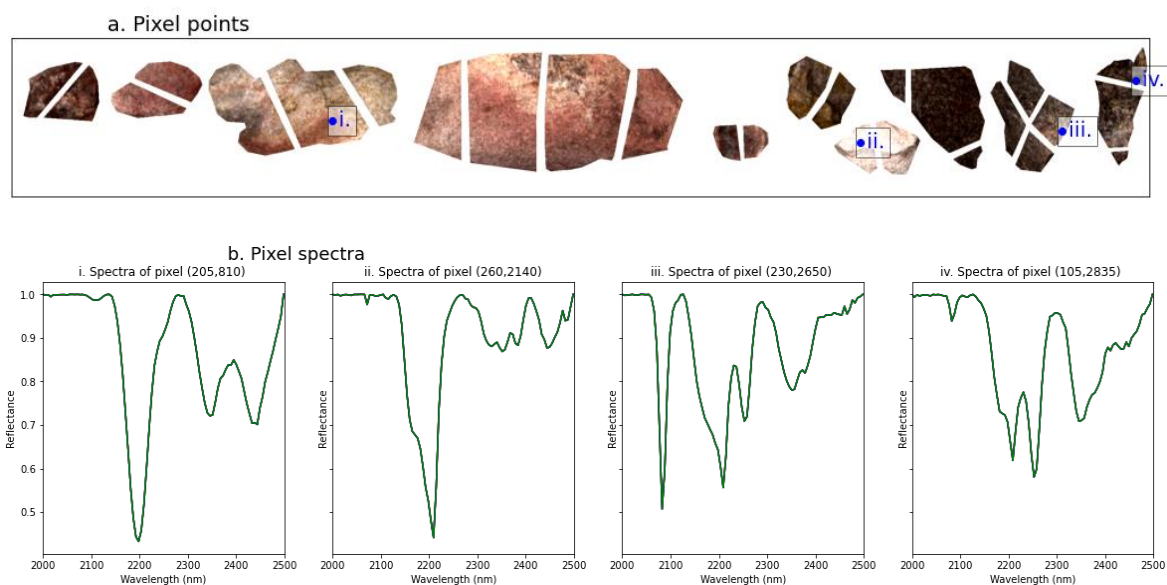
Η όλη σύλληψη και εκπόνηση της συγκεκριμένης μεθόδου έχει αφετηρία, την προϋπάρχουσα γνώση πάνω στις φασματικές υπογραφές και την ανακλαστικότητα του κάθε υλικού, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2.4, όπου στην περίπτωση αυτή, είναι τα 3 ορυκτά που θέλουμε να εντοπίσουμε. Στην

εικόνα που ακολουθεί, παρατίθενται οι φασματικές υπογραφές για τα ορυκτά τοπάζιο, μωσχοβίτη και καολινίτη όπως έχουν καταγραφεί από την USGS και όπως έχουν αναπαραχθεί από την φασματική βιβλιοθήκη *iSpec*, η οποία βασίζεται στην φασματική βιβλιοθήκη USGS. Με κατακόρυφες γραμμώσεις έχουν τονιστεί κάποιες από τις βασικές απορροφήσεις που έχουν ενδιαφέρον για το πρότζεκτ και αποδεικνύονται ιδιαίτερα βοηθητικές για να καταγραφούν τα εν λόγω ορυκτά.



Εικόνα 4-8: Απεικόνιση των φασματικών υπογραφών των ορυκτών τοπάζιο (πράσινο), μωσχοβίτη (μωβ) και καολινίτη (πορτοκαλί) μαζί με τις τυπικές τους απορροφήσεις (Πηγή: <https://www.samthiele.science/app/iSpec/>)

Ουσιαστικά, η κάθε φασματική υπογραφή για κάθε υλικό ή ορυκτό αποτελεί την «ταυτότητά» του και για αυτόν τον λόγο αποτελεί το βασικό χαρακτηριστικό που αναζητείται σε αυτό το πρόγραμμα. Για παράδειγμα, στην εικόνα που ακολουθεί προβάλλονται κάποια σημεία που έχουν επιλεγεί τυχαία και το φάσμα του όπως αυτό καταγράφεται από τον αισθητήρα SiSuROCK:



Εικόνα 4-9: Διάγραμμα με *a.* τις εργαστηριακές μετρήσεις του αισθητήρα *SisuROCK* και τα επιλεγμένα σημεία και *b.* οι φασματικές υπογραφές των σημείων

Συνδυάζοντας τα αποτελέσματα της Εικ. 4-8, που αποτελούν τα πρότυπα και της Εικ. 4-9, που αποτελούν τα δείγματα που θέλουμε να προσδιορίσουμε, μπορούμε να χαρακτηρίσουμε το είδος του ορυκτού σε κάθε περίπτωση.

### 4.3. Συλλογή δεδομένων

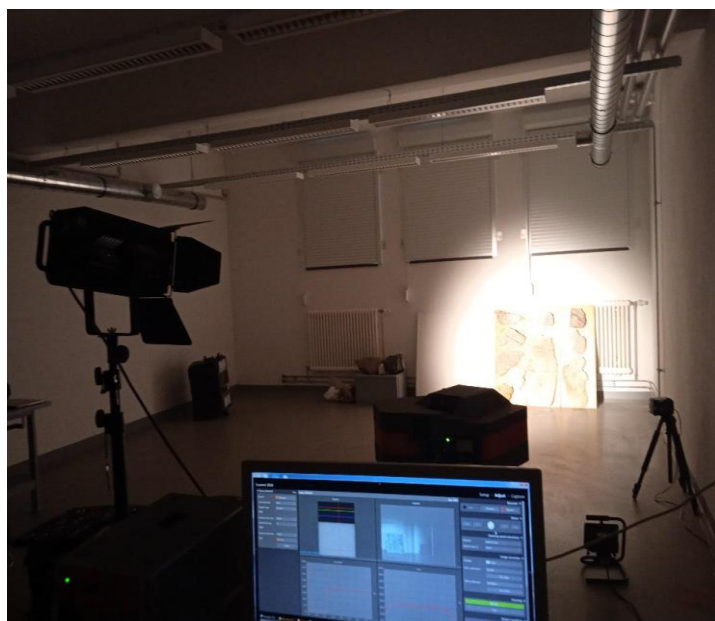
Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την διάρκεια της έρευνας για την επίτευξη του σκοπού αποτελείται από δύο βασικές επί μέρους εργασίες ανάκτησης εργαστηριακών δεδομένων και δεδομένων πεδίου, οι οποίες συντελούν στην σύγκριση τους και την καλύτερη προετοιμασία της ομάδας για τις μετρήσεις πεδίου. Έτσι οι δύο εργασίες λειτουργούν αλληλένδετα καθώς ελέγχουν την αξιοπιστία των μετρήσεων αλλά και εξήγηση των μετέπειτα αποτελεσμάτων.

#### 4.3.1. Εργαστηριακές δοκιμές

Οι εργαστηριακές δοκιμές αποσκοπούν στην διεξαγωγή μιας σειράς μετρήσεων που θα μας επιτρέψουν να έχουμε μία συγκριτική βάση δεδομένων σε σχέση με τις μετρήσεις που θα αποκτηθούν στο πεδίο, αλλά και για να προσδιοριστούν οι βέλτιστες συνθήκες ανάκτησης δεδομένων στο πεδίο εργασίας. Σε αυτές,

περιλαμβάνονται μία σειρά από χαρακτηριστικά που μπορεί να έχουν μεγάλο αντίκτυπο στα τελικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται δοκιμή από μία σειρά εμπορικών λαμπτήρων με διαφορετικά χαρακτηριστικά και συνδυασμούς, μεταβάλλοντας κάθε φορά χαρακτηριστικά που αφορούν την απόσταση, την υγρασία της μετρούμενης επιφάνειας και την εστίαση του φακού της πηγής φωτός. Εκτός από τις διαφορετικές συνθήκες που δοκιμάζονται στις εξωτερικές παραμέτρους που επιδρούν, γίνεται και σύγκριση των τεσσάρων αισθητήρων που διαθέτει το Ινστιτούτο, ώστε να εντοπιστεί ο αποδοτικότερος εξ αυτών.

Οι δοκιμές διεξάγονται σε ένα ειδικά διαμορφωμένο δωμάτιο όπου είναι στημένα τα δείγματα και οι λαμπτήρες. Καθ'όλη τη διάρκεια των μετρήσεων, επικρατεί σκοτάδι για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη προσομοίωση στις υπόγειες συνθήκες.



*Εικόνα 4-10: Αποτύπωση των συνθηκών στις εργαστηριακές μετρήσεις*

Η υπερφασματική μέθοδος, όπως έχει αναφερθεί, απαιτεί την ύπαρξη πηγής φωτός, η οποία εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και, εν συνεχεία, επιτρέπει στον αισθητήρα να καταγράψει τις μετρήσεις. Σε εξωτερικά μέρη ή υπαίθριες εκμεταλλεύσεις, η πηγή φωτός είναι ο ήλιος, κατά τη διάρκεια της ημέρα. Στην περίπτωση μας, εφόσον πρόκειται για υπόγεια εκμετάλλευση, θα

πρέπει να αντικατασταθεί με σύστημα φωτισμού. Εν τούτοις, ένα από τα πιο σημαντικά πράγματα που προσδιορίζονται είναι το είδος της πηγής που έχει τη μεγαλύτερη απόδοση και οι εν λόγω συνθήκες.

Οι υπόγειες μεταλλευτικές στοές, όπως είναι γνωστό, χαρακτηρίζονται από αρκετά υψηλά ποσοστά υγρασίας λόγω του βάθους και των υπόγειων νερών που διατρέχουν συνήθως τις στοές. Μέσω των πειραμάτων αναζητείται και η καταγραφή του αντίκτυπου της υγρασίας. Έτσι, είναι λογικό να καταγραφεί με κάποιο τρόπο ποσοτικά η επίδραση αυτού του φαινομένου προκειμένου να υπάρχει μία πιο σαφής εικόνα για τα αποτελέσματα που αναμένονται.

Για τις εργαστηριακές μετρήσεις, χρησιμοποιούνται ως επιφάνειες μετρήσεων 3 ξύλινες επιφάνειες στις οποίες έχουν στερεωθεί συνολικά 10 πετρώματα, όπως φαίνονται στον Πίν.4-3. Τα δείγματα συλλέχθηκαν από διάφορα σημεία του μεταλλείου και αποτελούν μια σχετικά αντιπροσωπευτική ποικιλία των πετρωμάτων και τον ορυκτών που, με βάση την γεωλογία, αναμένεται να βρούμε κατά τις μετρήσεις στο πεδίο. Πρόκειται για γρανίτες και ρυόλιθους και αλλοιωμένους γρανίτες.

Πίνακας 4-3: Αντιστοίχιση των ξύλινων επιφανειών με τα πετρώματα, την ορυκτολογία και την ονοματοδοσία τους

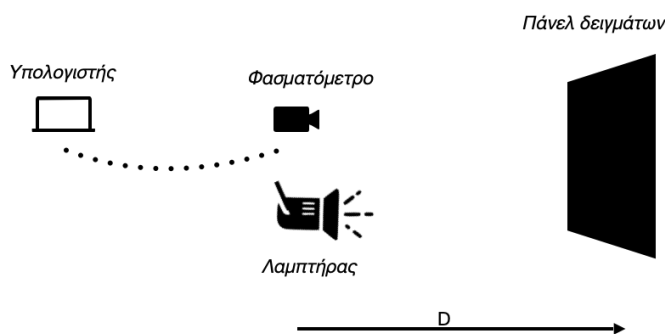
No	Πετρολογία	Εικόνα
1	Γρανίτης, ρυόλιθος	
2	Γρανίτη	
3	Αλλοιωμένα πετρώματα γρανιτικά	

Σε όλες τις πειραματικές μετρήσεις που διεξήχθησαν, το περιβάλλον μέτρησης αποτελεί προσομοίωση των συνθηκών που επικρατούν σε υπόγειες

εκμεταλλεύσεις, όπως για παράδειγμα η έλλειψη φυσικού φωτισμού, τα υψηλά επίπεδα υγρασίας και τις μικρές αποστάσεις που συναντώνται στα συνήθη μεγέθη των μεταλλευτικών στοών. Σκοπός των εργαστηριακών δοκιμών είναι η καταγραφή της διαφοροποίησης μεταξύ των δεδομένων που λαμβάνονται κάθε φορά από τους αισθητήρες, ώστε να γίνει αντιληπτή η επίδραση της μεταβολής των συνθηκών στις τελικές μετρήσεις.

#### 4.3.1.1. Δοκιμές λαμπτήρων

Όπως προαναφέρθηκε, διεξήχθησαν πληθώρα από δοκιμές όπου εξετάζονται διάφορα χαρακτηριστικά των λαμπτήρων. Συγκεκριμένα, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το φάσμα των λαμπτήρων, την ένταση τους αλλά και την εστίαση που έχουν. Αυτά τα δεδομένα λαμβάνονται από υπερφασματικές μετρήσεις πάνω στα δείγματα όπου διαδοχικά αλλάζουν οι λαμπτήρες και αξιολογείται η ανακλαστικότητα της ακτινοβολίας. Εκτός από τις λάμπες μεμονωμένα, δοκιμάζονται και συνδυασμοί με άλλους λαμπτήρες, ώστε να παρατηρηθεί η αλλαγή στο φάσμα τους.



Εικόνα 4-11: Αποτύπωση της διάταξης των μέσων κατά τις εργαστηριακές μετρήσεις

Οι μετρήσεις που αφορούν τους λαμπτήρες ελήφθησαν μεταξύ των μηνών Μαρτίου και Μαΐου 2022 και οι συνθήκες φωτισμού, θερμοκρασίας, υγρασίας και άλλων εξωτερικών παραμέτρων ήταν οι ίδιες. Για τις δοκιμές των λαμπτήρων χρησιμοποιήθηκε ο κινητός υπερφασματικός αισθητήρας PSR 3500 της Spectral Evolution.



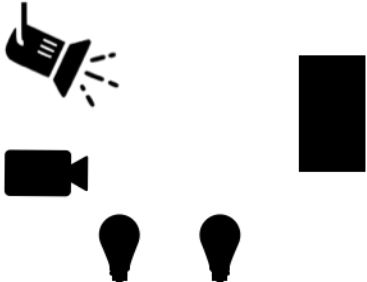




Εικόνα 4-12: Στιγμιότυπο από τις μετρήσεις για τον χαρακτηρισμό των λαμπτήρων

Ακολουθεί ένας πίνακας στον οποίο συνοψίζονται οι δοκιμές λαμπτήρων:

Πίνακας 4-4: Συνοπτικός πίνακας μετρήσεων και διατάξεων εργαστηριακών μετρήσεων

No	Τι δοκιμάστηκε;	Τι μετρήθηκε;	Διάταξη
1	λάμπες αλογόνου + NEON + LED	ακτινοβολία, ανάκλαση στα 2200nm, απόσταση	
2	προβολέας θεάτρου (2 φακοί)	ακτινοβολία, απόσταση	
3	προβολέας θεάτρου με λάμπες αλογόνου	συνδυασμός προβολέα θεάτρου με λάμπες αλογόνου, άνοιγμα φακού	

Εκτός από την ακτινοβολία, την ανακλαστικότητα σε συνάρτηση με τα μήκη κύματος εξετάστηκε και η συμβολή της απόστασης της φωτεινής πηγής από τον μετρούμενο στόχο. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν διαδοχικά σε αποστάσεις

4 m, 3.5 m, 3 m, 2.5 m, 2 m, 1.5 m και 1 m , μετακινώντας τον μετρούμενο στόχο και διατηρώντας το φασματομέτρο και την φωτεινή πηγή σταθερή. Οι μετρήσεις διενεργήθηκαν με τον αισθητήρα PSR 3500.

Ο προβολέας θέατρου DTS Scena 650 διαθέτει δύο φακούς τον βαθμωτό (gradient) και τον frosted. Ελέγχονται και οι δύο φακοί σε απόσταση 3 μέτρων από την επιφάνεια ανάκλασης. Οι μετρήσεις διενεργήθηκαν με τον αισθητήρα PSR 3500.

Στις τελικές δοκιμές των λαμπτήρων, δοκιμάζεται ο συνδυασμός των λαμπτήρων με τον προβολέα με μία σειρά διατάξεων όπου ο προβολέας τοποθετείται:

- Δεξιά από τα πανελ με τα δείγματα
- Αριστερά από τα πανελ με τα δείγματα
- Δεξιά από τα πανελ με τα δείγματα σε συνδυασμό με λαμπτήρες 1000W και 500W στην δεξιά μεριά
- Αριστερά με τελείως ανοιχτό φακό

Οι μετρήσεις διενεργήθηκαν με τον αισθητήρα Fenix 1K.

#### **4.3.1.2. Δοκιμές υγρασίας**

Σε παρόμοιο πλαίσιο όπως αυτό των δοκιμών λαμπτήρων, εκπονήθηκαν εργαστηριακές δοκιμές ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση της υγρασίας στην ανάκλαση του φάσματος. Το πείραμα χωρίστηκε σε τρεις φάσεις, η πρώτη αφορά την σάρωση των 3 πανελ σε απόλυτα στεγνές συνθήκες, η δεύτερη σε ήπιες συνθήκες υγρασίας και η τρίτη σε αρκετά υγρές συνθήκες. Η υγρασία προσάπτεται στις επιφάνειες με ένα δοχείο σπρέυ γεμισμένο με νερό σε μορφή σταγονιδίων και εφαρμόζεται ίδια ποσότητα σε κάθε δείγμα για κάθε φάση. Οι μετρήσεις διενεργήθηκαν με τον αισθητήρα Asia Fenix 1K.



*Εικόνα 4-13: Στιγμιότυπο από τις εργαστηριακές μετρήσεις με την υγρασία*

Ήδη είναι γνωστό ότι τις επιφάνειες που έχουν κάποια ποσότητα υγρασίας ή νερού τις αντιλαμβανόμαστε πιο σκοτεινές από τις ίδιες στεγνές, καθώς το νερό ανακλά λιγότερη ποσότητα φωτός (Lekner & Dorf, 1988). Έτσι αναμένουμε πως οι μετρήσεις των ξηρών επιφανειών θα έχουν πιο υψηλή αντανάκλαση, ύστερα θα ακολουθεί σε ένταση η δεύτερη φάση και τέλος η τρίτη.

#### **4.3.1.3. Σύγκριση αισθητήρων**

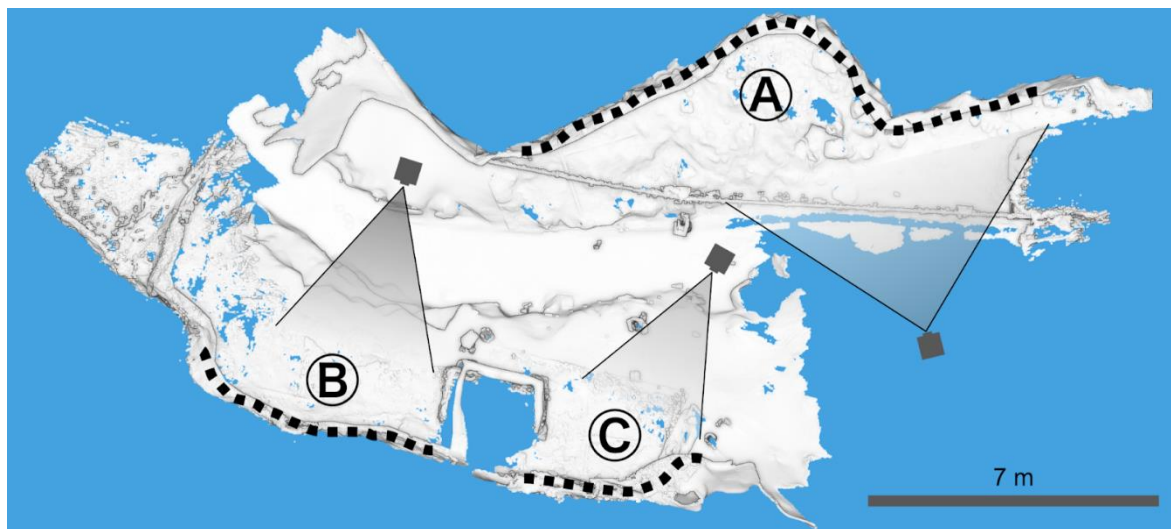
Λόγω της πληθώρας των αισθητήρων που διατίθενται από το Ινστιτούτο και της άνεσης για εκπόνηση μεγάλου αριθμού μετρήσεων, υπάρχει η δυνατότητα να συγκριθούν οι αισθητήρες μεταξύ τους. Επιλέγονται να συγκριθούν οι αισθητήρες SisuRock, Fenix, Fenix 1K, Mjolnir, ως ένα κομμάτι της εργασίας επί μέρους, που θα προσδιορίσει την καταλληλότητα του κάθε αισθητήρα για την δεδομένη εργασία.

#### **4.3.2. Μετρήσεις πεδίου**

Οι μετρήσεις στην υπόγεια μεταλλευτική στοά διενεργήθηκαν την 31.05.2022 κατά την διάρκεια της ημέρας. Συνολικά χρειάστηκε να μεταφερθούν όλα τα υλικά στο σημείο των μετρήσεων που απείχε περίπου 900 m από την είσοδο της στοάς. Καθώς ο αισθητήρας είναι στερεωμένος πάνω σε τρίποδο και κάθε φορά

έχει δυνατότητα μέγιστου οπτικού πεδίου 40 μοιρών, για την σάρωση πολλαπλών επιφανειών απαιτείται κάθε φορά η μεταφορά όλης της διάταξης που αποτελείται από τον αισθητήρα και τις πηγές φωτός.

Επιλέγονται για περαιτέρω διερεύνηση συνολικά τρεις διαφορετικοί επιφάνειες σάρωσης με διαφορετικά χαρακτηριστικά ο καθένας, όλοι ωστόσο στο ίδιο σημείο. Και τα τρία σημεία μετρήσεων παρουσιάζουν φλέβες και γενικό γεωλογικό ενδιαφέρον. Τα σημεία που επιλέγονται, φαίνονται στην Εικ. 4-14.



Εικόνα 4-14: Απεικόνιση των σημείων λήψης A, B, C κατά τις υπόγειες μετρήσεις (Πηγή: Lorenz, S., Kirsch, M.)

Ανακτώνται δεδομένα από τον υπερφασματικό αισθητήρα Asia Fenix1K που αποσκοπούν στην υπερφασματική απεικόνιση, αλλά και ψηφιακές φωτογραφίες με την ψηφιακή κάμερα για την εφαρμογή της μεθόδου φωτογραμμετρίας.



Εικόνα 4-15: Αποτελέσματα φωτογραμμετρικής επεξεργασίας για τις υπόγειες σπηλιές A, B, C

#### 4.3.2.1. Λήψεις outcrop

Και για τα τρία σημεία διενεργήθηκαν πολλαπλές υπερφασματικές μετρήσεις. Στον πίνακα που ακολουθεί εξηγούνται αναλυτικά οι μετρήσεις και τα χαρακτηριστικά της κάθε μέτρησης :

Πίνακας 4-5: Συνοπτικός πίνακας υπογείων λήψεων και των διατάξεων τους

Αριθμός	Outcrop	Διάταξη
0123	1	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0124	1	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0125	1	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0126	1	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0127	1	προβολέας αριστερά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0128	1	προβολέας αριστερά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0129	1	προβολέας αριστερά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0130	1	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0131	1	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0133	1	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0135	2	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0136	2	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0137	2	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0138	2	προβολέας δεξιά πλευρά+ 500W + 500W + 500W

0139	3	προβολέας αριστερά πλευρά + 500W + 500W + 500W
0140	3	προβολέας αριστερά πλευρά+ 500W + 500W + 500W
0141	3	προβολέας αριστερά πλευρά+ 500W + 500W + 500W

---

Στις σκηνές σάρωσης, τοποθετείται μία επιφάνεια αναφοράς προσαρμοσμένη στον αισθητήρα με χρώμα λευκό που λειτουργεί ως βαθμονόμηση για την μέγιστη ανάκλαση, λόγω της μέγιστης ανακλαστικότητάς της. Επιπλέον, δύο τεμνόμενα ταινιόμετρα που λειτουργούν ως πυξίδα για τον ορισμό των Β-Ν και Α-Δ και άλλο ένα ταινιόμετρο επικρεμάμενο που υποδηλώνει την κατακόρυφη συνιστώσα.



*Εικόνα 4-16: Στιγμιότυπο από τις υπόγειες λήψεις παρουσία επιφάνεια βαθμονόμησης και των ταινιών Β-Ν, Α-Δ και διεύθυνσης z*

Λόγω του ότι ο αισθητήρας έχει εστιακό μήκος 10 m γίνεται προσπάθεια τοποθέτησης του όσο το δυνατόν πιο μακριά από τον στόχο. Παρόλαυτα, λόγω της χωρικής ιδιαιτερότητας των μεταλλευτικών στοών, η απόσταση του προβολέα από την επιφάνεια σάρωσης είναι περίπου ίση με 8m και στις τρεις σκηνές.

Τα χαρακτηριστικά του χρησιμοποιούμενου αισθητήρα περιγράφονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2.3.3.

#### 4.3.2.2. Φωτογραμμετρία

Για την φωτογραμμετρία χρησιμοποιήθηκαν φωτογραφίες που λήφθηκαν από την ψηφιακή κάμερα Nikon D850 με φακό 35mm/1.8. Ουσιαστικά, ένας μεγάλος αριθμός από ψηφιακές φωτογραφίες οι οποίες λήφθηκαν από διαφορετικές γωνίες αλλά με ίδιο στόχο, συνάπτονται με το ειδικό λογισμικό *CloudCompare*, προς την δημιουργία ψηφιακού τρισδιάστατου μοντέλου. Συνολικά για την παραγωγή κάθε μοντέλου συνδυάζονται περίπου 40 - 60 φωτογραφίες.

#### 4.3.3. Τεχνικά προβλήματα

##### ✓ Φακός προβολέα

Ο φακός που αρχικά είχε προσδιοριστεί ότι είναι ο καταλληλότερος, δεν μπορούσε να βρεθεί την ημέρα της λόγω ανωτέρας βίας και έτσι οι μετρήσεις στο πεδίο πραγματοποιήθηκαν με τον φακό gradient.

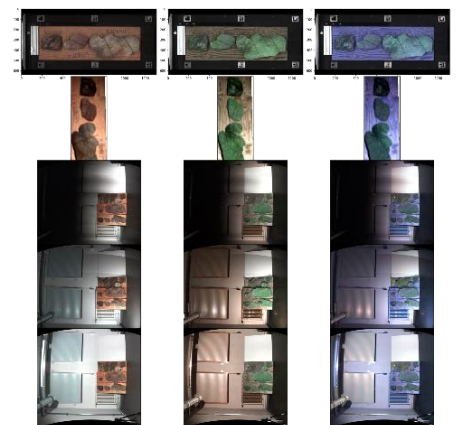
##### ✓ Δυσλειτουργία αισθητήρα MjorIn

Ο αισθητήρας MjorIn είχε μόλις επιστρέψει από καθιερωμένο service και update και για αυτόν τον λόγο, οι μετρήσεις που είχαν προγραμματιστεί, δεν έγιναν όλες τις φορές με απόλυτη επιτυχία.

##### ✓ Προβλήματα κώδικα

Όπως περιμένουμε, δεδομένου του ότι η επεξεργασία γίνεται σχεδόν εξ ολοκλήρου με αλγορίθμους, πολλές φορές οι εντολές ήταν λανθασμένες ή έπρεπε να τροποποιηθούν για κάθε σετ δεδομένων από την αρχή. Το αποτέλεσμα ήταν ατυχές όπως φαίνεται στο παράδειγμα της Εικ. 4-17 και χρειαζόταν να εισαχθούν τα ορθά χαρακτηριστικά.

- ✓ Συνεχής αναπροσαρμογή δεδομένων για την σύγκριση διαφορετικών αισθητήρων - διαφορετικών μεγέθων δεδομένων (πχ. Fenix = 450 bands, Mjorn = 300 bands).



Εικόνα 4-17: Αποτυχημένη προσπάθεια δημιουργίας μωσαϊκού

Τα αποτελέσματα που εμφανίζονταν στην αρχή, ενημερώνονταν συνεχώς, καθώς προέκυπταν νέα δεδομένα. Έτσι, η επεξεργασία τους πολλές φορές γίνεται πολλαπλές φορές λόγω των ενημερώσεων.

✓ Όγκος δεδομένων

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο όγκος των δεδομένων που απαιτείται να επεξεργαστεί είναι αρκετά μεγάλος, με αποτέλεσμα να υπάρχουν συγχύσεις όσον αφορά την ταξινόμηση των δεδομένων και αποτελεσμάτων.

Παρ' όλα αυτά, τα τεχνικά προβλήματα και το ανθρώπινο λάθος είναι αναμενόμενα σε ερευνητικά ή συναφή προγράμματα.

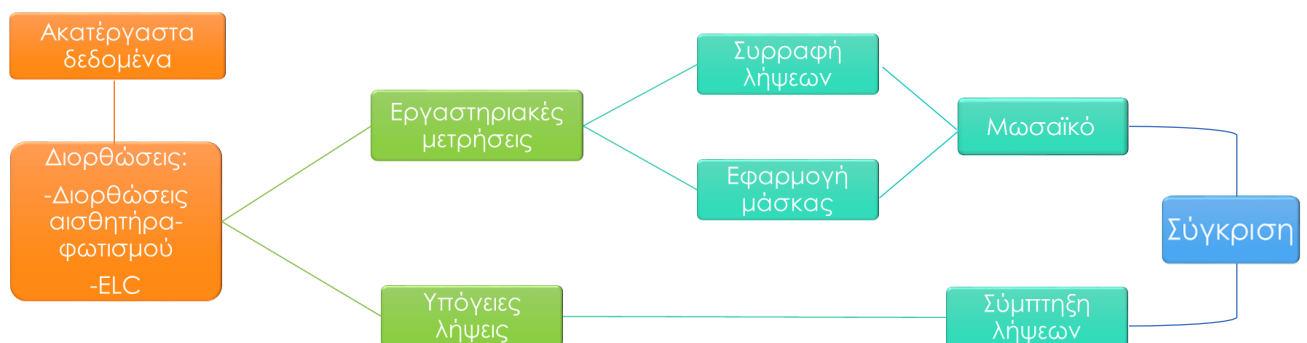


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Ανάλυση δεδομένων

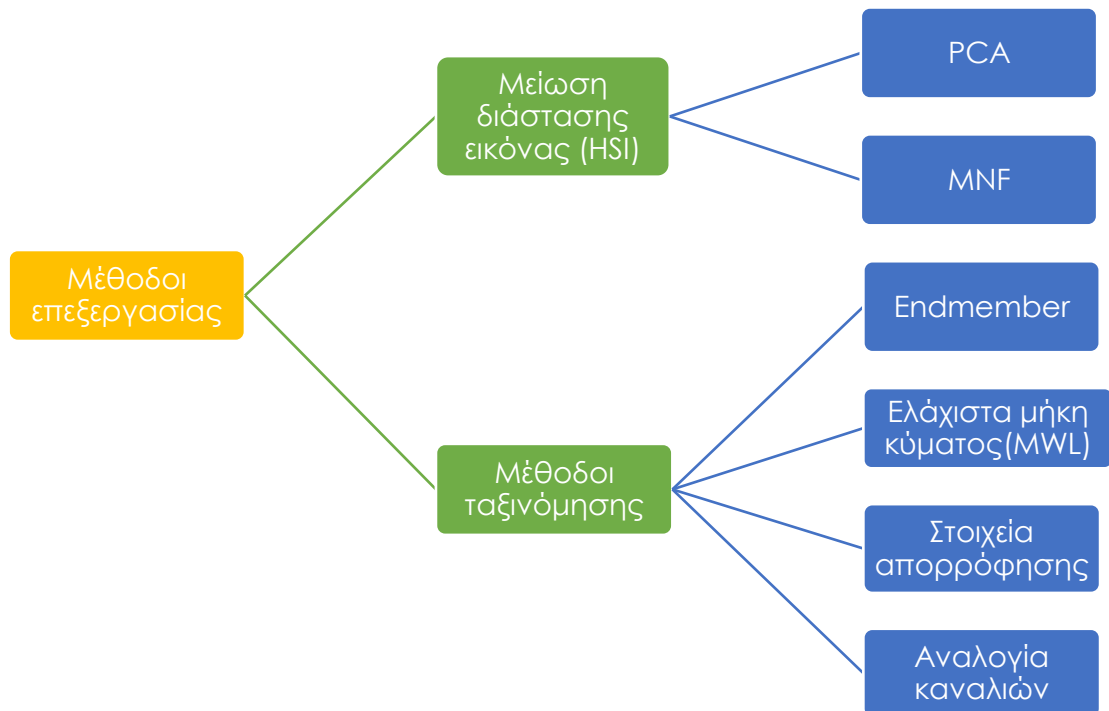
Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν και θα παρουσιαστούν η επεξεργασία και τα αποτελέσματα των μετρήσεων που ανακτήθηκαν κατά τις εργαστηριακές δοκιμές. Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών θα δώσουν μία βάση σύγκρισης σε σχέση με τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από την επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου. Επιπλέον, θα προσδιορίσουν το αντίκτυπο διαφόρων συνθηκών που επικρατούν κατά τις μετρήσεις των δειγμάτων και είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν υπο άλλες συνθήκες.

Η επεξεργασία των δεδομένων που ανακτώνται κατά τις εργαστηριακές δοκιμές και τις μετρήσεις πεδίου, όπως έχει αναφερθεί και στο Κεφ. 5.1.1, γίνεται εξ' ολοκλήρου με τον αλγόριθμο hylite (Thiele et al. 2021) και με τα λογισμικά που αυτό απαιτεί. Συνοπτικά, η διαδικασία περιλαμβάνει το στάδιο της προ-επεξεργασίας των δεδομένων και στην συνέχεια τα προ-επεξεργασμένα δεδομένα υποβάλλονται σε περαιτέρω ανάλυση για διεξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα συνοπτικό διάγραμμα επεξήγησης για την ροή εργασιών που ακολουθείται κατά την διάρκεια της προεπεξεργασίας και της επεξεργασίας μέχρι να φθάσει η αρχική πληροφορία στην τελική της μορφή.



Εικόνα 5-1: Διάγραμμα ροής προ-επεξεργασίας δεδομένων



Εικόνα 5-2: Διάγραμμα ροής επεξεργασίας δεδομένων

## 5.1. Προεπεξεργασία εργαστηριακών δοκιμών και μετρήσεων πεδίου

Η προεπεξεργασία των δεδομένων έχει ως στόχο την προετοιμασία των δεδομένων, στην προκειμένη φάση, των υπερφασματικών δεδομένων, με τις απαραίτητες διορθώσεις και ενέργειες, ώστε να μπορούν να συγκριθούν ορθά. Κάθε λήψη είναι μοναδική και επηρεάζεται από τους εξωτερικούς παράγοντες και τις εκάστοτε συνθήκες. Λόγω αυτής της ιδιαιτερότητας, τα δεδομένα πρέπει να τροποποιηθούν με τις κατάλληλες διορθώσεις. Το πακέτο αυτό απαρτίζεται από τέσσερα βασικά βήματα. Σημαντικό να σημειωθεί πως τα δεδομένα του αισθητήρα SiSuROCK δεν υπόκεινται στις διορθώσεις καθώς η προ-επεξεργασία πραγματοποιείται αυτόματα κατά την εισαγωγή των δεδομένων στην μονάδα επεξεργασίας του αισθητήρα.

### A. Διορθώσεις φωτισμού

Ο φωτισμός, λόγω της ανώμαλης κατανομής του στο πεδίο μετρήσεων, αποτελεί τροχοπέδη για την ομοιογένεια των μετρήσεων και την ορθή σύγκρισή

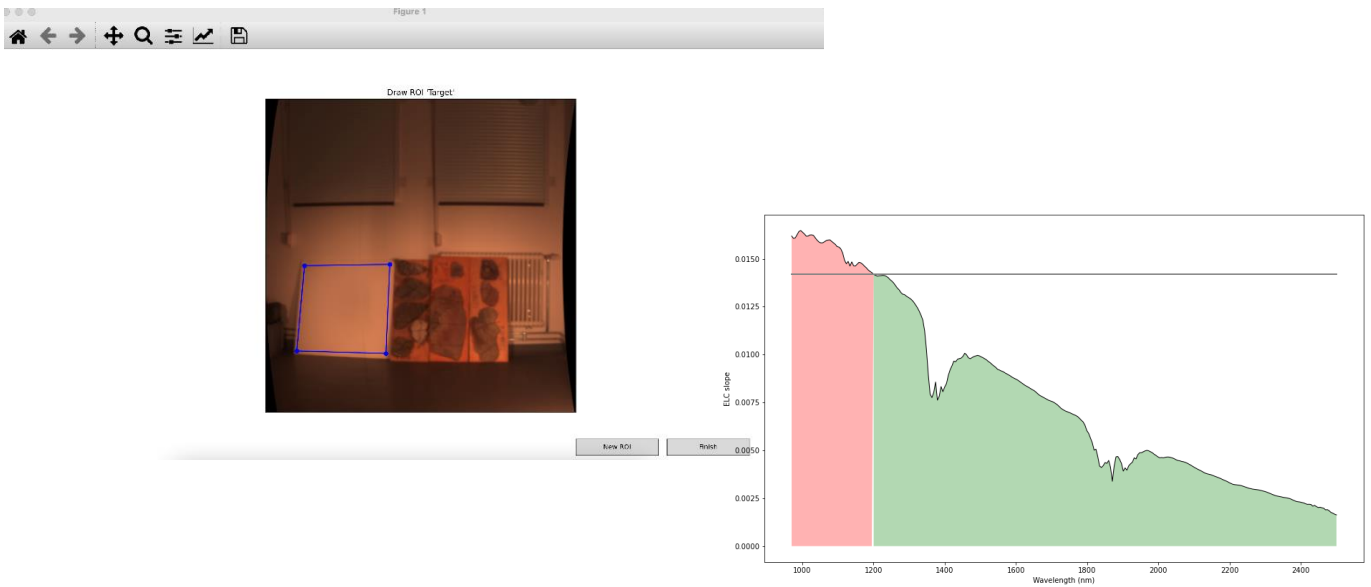
τους. Έτσι, οι μετρήσεις όπως λαμβάνονται από τον αισθητήρα, υπόκεινται σε διορθώσεις που αφορούν την ομογενοποίηση του φωτισμού και εν γένει της ακτινοβολίας στην εικόνα. Λαμβάνονται υπόψιν τοπογραφικά και ατμοσφαιρικά φαινόμενα, έτσι ώστε να προσομοιώνεται ένα σύνολο δεδομένων ακτινοβολίας όπως θα μπορούσε να μετρηθεί από ένα φασματόμετρο πεδίου. Η ποσότητα του ανακλώμενου φωτός εξαρτάται από το συντελεστή ανάκλασης του υλικού στο σχετικό μήκος κύματος, καθώς και από την ποσότητα και τον προσανατολισμό του καθοδικού φωτός. Έτσι η εξίσωση που εκφράζει την τελική ακτινοβολία, λαμβάνοντας υπόψιν της γωνίες πρόσπτωσης  $\alpha$ ,  $\beta$  του φωτός των λαμπτήρων δίνεται

$$radiance = reflectance \times (skylight \times \alpha + skylight \times \beta) + path\_radiance \quad (Eξ. 12)$$

Όπου  $\alpha$ ,  $\beta$  είναι μεταβλητές που εκφράζουν την επίδραση της τοπογραφίας και γεωμετρίας στην ανάκλαση και, ανάλογα με το μοντέλο που χρησιμοποιείται, λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η γωνία πρόσπτωσης της πηγής φωτός και η τραχύτητα της επιφάνειας (Thiele et al. 2021).

### **B. Μετατροπή ακτινοβολίας σε ανακλαστικότητα**

Η μεταβλητή που μετράται από τα όργανα τηλεπισκόπησης και ειδικότερα από τα φασματόμετρα είναι η ακτινοβολία που ανακλάται από μία επιφάνεια ή ένα σημείο. Ωστόσο, η ακτινοβολία δεν αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός υλικού ή μιας επιφάνειας, όπως η ανακλαστικότητα, καθώς εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής πηγής. Έτσι, η μετατροπή των μετρήσεων του αισθητήρα σε ανακλαστικότητα είναι αναγκαία και γίνεται με την χρήση διορθώσεων. Συγκεκριμένα, η διόρθωση ονομάζεται *ELC (Empirical Line Correction)*. Η μετατροπή πρέπει να λαμβάνει υπόψη το φάσμα της ηλιακής πηγής, τα εφέ φωτισμού λόγω της γωνίας και της τοπογραφίας του ήλιου, την ατμοσφαιρική μετάδοση και η ευαισθησία του αισθητήρα (Smith, 2012). Επιπλέον, στις διορθώσεις λαμβάνεται υπόψη η λευκή επιφάνεια βαθμονόμησης.



Εικόνα 5-3: Στιγμιότυπο εφαρμογής της διόρθωσης ELC

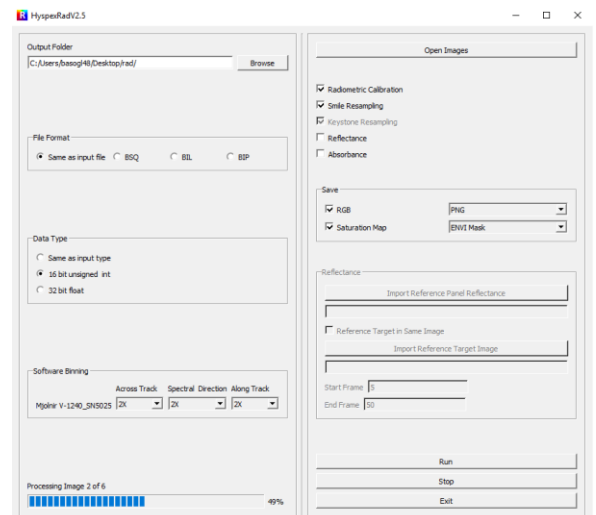
### Κ. Γεωμετρικές διορθώσεις

#### Εφαρμογή διόρθωσης αισθητήρα FENIX

Για να αποφευχθεί η παραμόρφωση των τελικών ενδείξεων λόγω του φακού του αισθητήρα εφαρμόζεται μία σειρά διορθώσεων που σκοπό έχουν να καταργήσουν αυτές τις αλλοιώσεις. Αυτές οι διορθώσεις αποτελούνται από μία σειρά εντολών μέσα στον κώδικα και τροποποιούν αναλόγως τα δεδομένα. Στοχεύουν σε συγκεκριμένες διορθώσεις που απαιτεί ο εν λόγω αισθητήρας, όπως το φιλτράρισμα κακής ποιότητας πίξελ και διορθώσεις του φακού.

#### Εφαρμογή διόρθωσης αισθητήρα Mjolnir

Η προεπεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνονται με τον αισθητήρα Mjolnir υπόκεινται σε αυτόματη προεπεξεργασία με το ειδικό λογισμικό που διατίθεται από την αντίστοιχη εταιρεία. Το λογισμικό



Εικόνα 5-4: Παράδειγμα από το ειδικό λογισμικό προ-επεξεργασίας του αισθητήρα Mjolnir

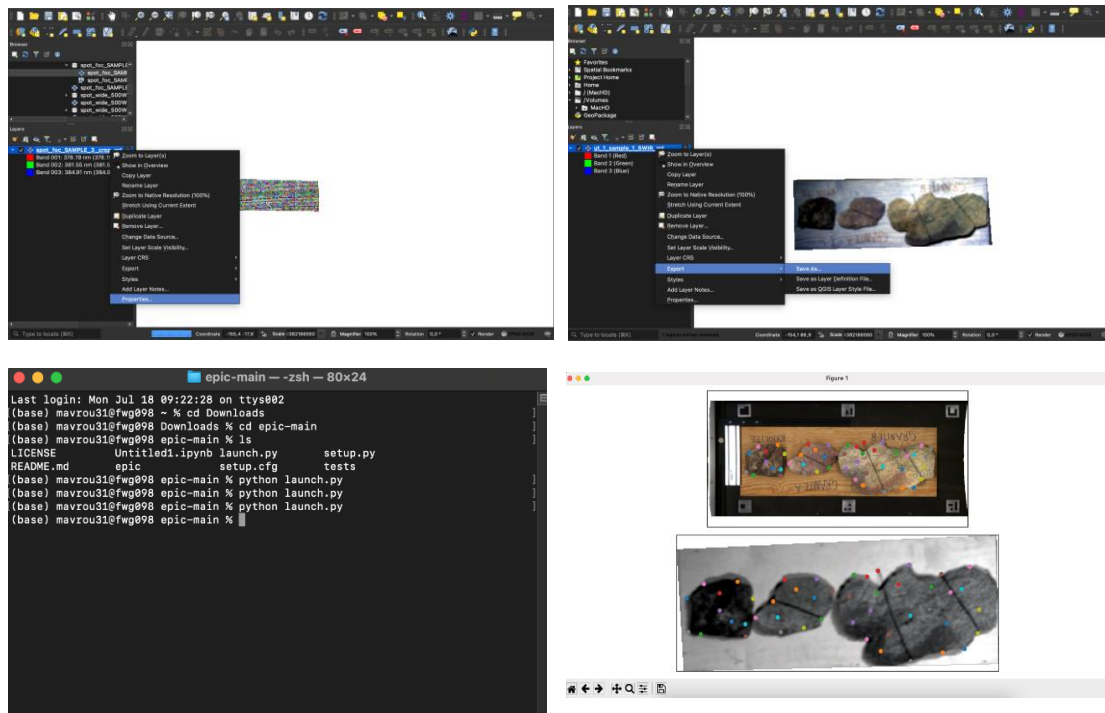
HySrex RAD μετατρέπει τις δεδομένα σε ακτινοβολία με μονάδα μέτρησης τα  $\frac{\text{watt}}{\text{steradian} \cdot \text{m}^2}$ .

#### **D. Αφαίρεση καναλιών**

Λόγω του θορύβου που εντοπίζεται συνήθως στα αρχικά κανάλια, επιλέγεται να αφαιρεθούν κάθε φορά 20 ή παραπάνω κανάλια, ώστε τα δεδομένα να μην περιέχουν τόσο πολύ θόρυβο. Η αφαίρεση θορύβου έχει ως στόχο την κατάληξη σε πιο έγκυρα αποτελέσματα, τα οποία με την σειρά τους θα οδηγήσουν σε πιο άρτια συμπεράσματα. Ο θόρυβος είναι πάρα πολύ συχνό φαινόμενο σε μετρήσεις, για αυτό και πάντα εφαρμόζονται μέθοδοι που αφαιρούν τα κανάλια που έχουν χαμηλό λόγο σήματος προς θόρυβο.

#### **E. Συννένωση λήψεων**

Για τους σκοπούς της έρευνας, είναι θεμιτό να συνεννωθούν γεωγραφικά οι διαφορετικές λήψεις από τις εργαστηριακές μετρήσεις και τους διαφορετικούς αισθητήρες, ώστε να είναι εφικτή η σύγκριση των αποτελεσμάτων του ίδιου σημείου (Εικ. 5-5). Η διαδικασία επιτυγχάνεται αρχικά με ευθυγράμμιση (alignment) των λήψεων προς την επίτευξη ίδιας φοράς και πλευράς μεταξύ αυτών. Η αλλαγή των συντεταγμένων των λήψεων πραγματοποιείται με το λογισμικό *QGIS* και τα τελειωμένα αρχεία, εξάγονται σε μορφή *.tiff*, ιδιαίτερα χρησιμοποιούμενο για ψηφιογραφικές (raster) εικόνες. Ύστερα με μία σειρά εντολών που εκτελούνται με το πακέτο *epic-main*, επιλέγονται τα δύο αρχεία *.tiff* που ενδιαφερόμαστε για την συννένωση και επιλέγονται διαδοχικά τα ίδια σημεία στις δύο λήψεις. Με την επιλογή των κοινών σημείων και με ειδικό αλγόριθμο, οι δύο λήψεις συνενώνονται με την ελάχιστη απόκλιση. Έτσι με ειδικά εργαλεία του κώδικα επιτυγχάνεται η σύναψη των λήψεων που ενδιαφερόμαστε.



Εικόνα 5-5: Στιγμιότυπο εφαρμογής της συνένωσης

## 5.2. Επεξεργασία εργαστηριακών δοκιμών και μετρήσεων πεδίου

Το που εστιάζει και τι επιτυγχάνεται με καθεμία από τις παρακάτω μεθόδους έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο Κεφ. 2.5. Παρακάτω θα σχολιαστεί το πως εφαρμόστηκε στην περίπτωση αυτή. Για λόγους ευκολίας και συγκρισιμότητας, συντίθεται ένα μωσαϊκό με τις εργαστηριακές δοκιμές που αφορούν τους διαφορετικούς αισθητήρες και πάνω σε αυτό εφαρμόζονται οι επεξεργασίες.

Σε γενικές γραμμές, η μεθοδολογία που ακολουθείται αποσκοπεί στο να :

- Να προσδιοριστούν τα αναγνωριστικά χαρακτηριστικά με βάση την γεωλογία της περιοχής
- Να εντοπιστούν τα χαρακτηριστικά αυτά στις λήψεις
- Να συσχετιστούν οι εργαστηριακές μετρήσεις με τις υπόγειες
- Να γίνει σύγκριση της χωρικής και φασματικής ανάλυσης κάθε αισθητήρα

Είναι σημαντικό, σε αυτό το σημείο να τονιστεί πως η αρχή που ακολουθείται κατά την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων για να αναγνωριστεί, εν

τέλει, η πιο κατάλληλη από αυτές είναι η *trial and error*. Καθώς, διατίθεται μία πληθώρα εργαλείων που ενδεχομένως να εξυπηρετεί τους σκοπούς, η όλη εργασία συγκεντρώνεται στην διερεύνηση τους και την κριτική αντιμετώπιση των αποτελεσμάτων τους.

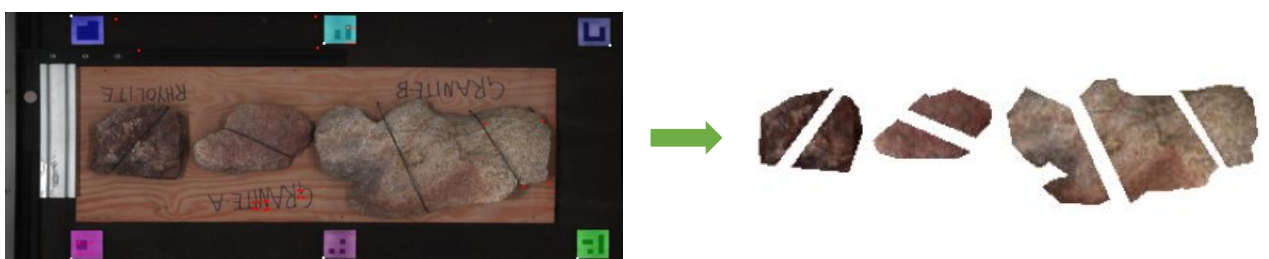
### 5.2.1. Εφαρμογή μάσκας

Όπως είναι λογικό, στην λήψη υπάρχουν πολλά στοιχεία όπως το φόντο των αντικειμένων που πρέπει να καταγράψουμε, που δεν είναι χρήσιμα και καλό είναι να φύγουν από την τελική εικόνα που θα επεξεργαστούμε. Αυτό διότι αρχικά θα χαθεί πολύτιμος χρόνος στην επεξεργασία των δεδομένων, λόγω του μεγέθους τους και δεύτερον ενδεχομένως να εντοπιστούν στοιχεία, λανθασμένα, που επηρεάσουν τα τελικά αποτελέσματα, όπως στην Εικ. 5-6.



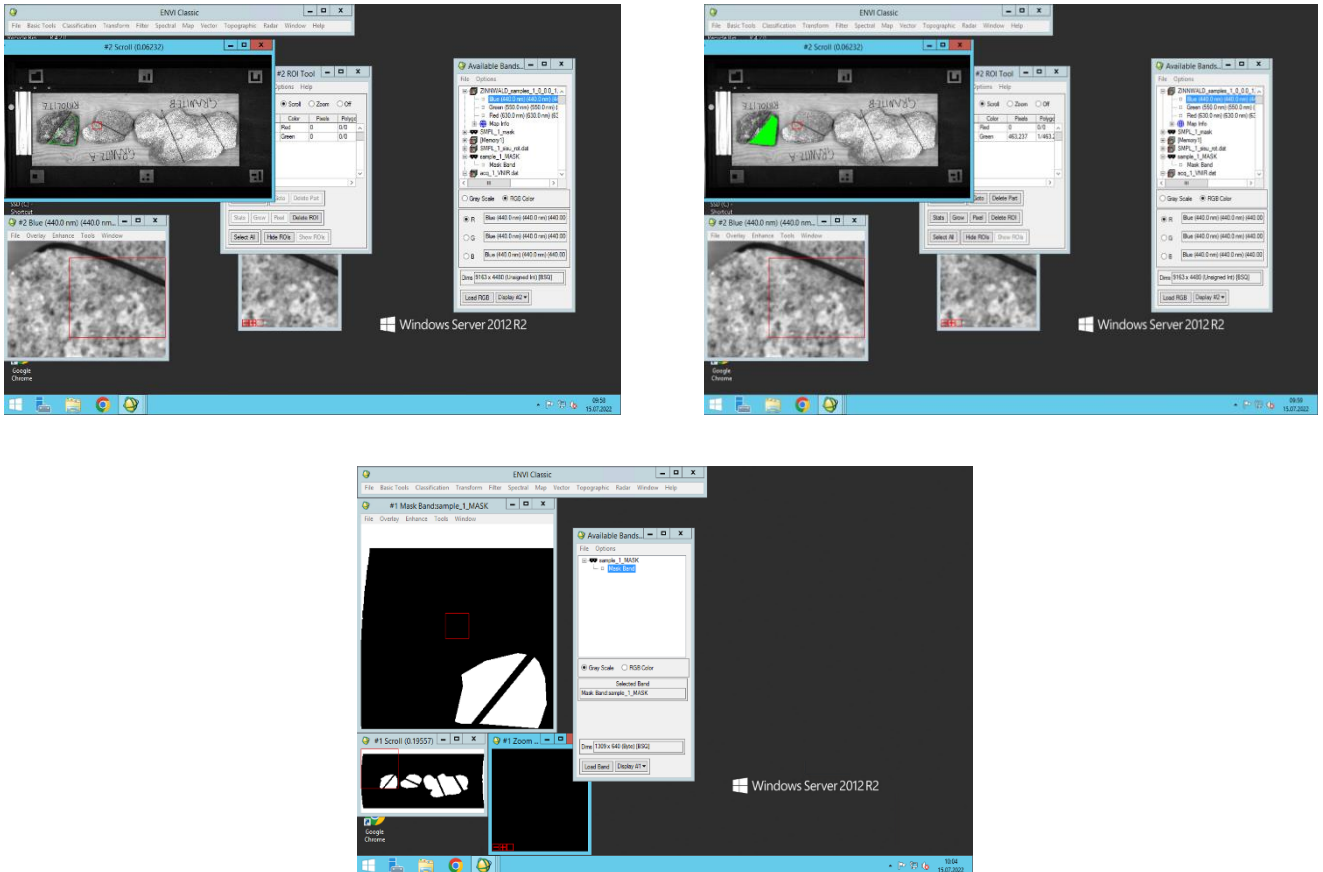
Εικόνα 5-6: Παράδειγμα λανθασμένου εντοπισμού *endmember*

Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο να εφαρμόσουμε ένα είδος «μάσκας» (Εικ. 5-7), όπου επιλέγονται τα στοιχεία τα οποία επιθυμούμε να παραμείνουν στην εικόνα και τα υπόλοιπα αποσύρονται (*crop*). Από την εικόνα καταργείται το φόντο καθώς επίσης και το σύρμα που έχει χρησιμοποιηθεί για να στερεωθούν τα δείγματα πάνω στις ξύλινες επιφάνειες.



Εικόνα 5-7: Στιγμιότυπο εφαρμογής μάσκας στο Δείγμα 1

Η διαδικασία επιτυγχάνεται με το λογισμικό *ENVI* όπου επιλέγονται τα στοιχεία που θα επεξεργαστούν περαιτέρω με την εντολή ROI (Region of Interest) και μετά με την εντολή *Make a mask* → *Import ROI* συντίθεται η «μάσκα». Έτσι η εικόνα αποτελείται πλέον μόνο από τα δεδομένα που θέλουμε να αναλυθούν.



Εικόνα 5-8: Διαδικασία δημιουργίας «μάσκας»

### 5.2.2. Μείωση διάστασης υπερφασματικών απεικονίσεων (HIS)

Τα προ-επεξεργασμένα δεδομένα, αφού γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες, έχουν μεγέθη και μορφή που, αυτούσια, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόσπαση αποτελεσμάτων. Η διάστασή τους μειώνεται λόγω της ταξινόμησης των δεδομένων με συγκεκριμένο τρόπο από την HIS.

Επιλέγεται να δοκιμαστεί το μωσαϊκό με τις λήψεις από τον αισθητήρα υψηλής ακρίβειας *SisuROCK*, αλλά και οι 3 υπόγειες λήψεις.

Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η εύρεση της βέλτιστης μεθόδου μείωσης διάστασης των απεικονίσεων μεταξύ των δύο (PCA & MNF).

Τα αποτελέσματα των μεθόδων παρατίθενται στο Κεφ.6 και στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.



### 5.2.2.1. PCA (Principal Components Analysis)

Εφαρμόζεται η μέθοδος PCA στην λήψη του αισθητήρα SisuROCK για τα τρία δείγματα πετρωμάτων. Ουσιαστικά, με μαθηματικές υπολογιστικές εφαρμογές που αναφέρονται περιληπτικά στο Κεφ. 2.5.1., από τις πολλές συνιστώσες που ανήκουν όλα τα δεδομένα των υπερφασματικών απεικονίσεων, επιλέγονται να κατηγοροποιηθούν σε 5 κανάλια, τα οποία διαφέρουν όσο το δυνατόν περισσότερο. Στην συνέχεια, γίνονται δοκιμές ως προς το ποιος συνδυασμός καναλιών είναι ο πιο κατάλληλος.

Μπορούν να απεικονιστούν 3 κανάλια σε κάθε συνδυασμό καναλιών, και αυτά που επιλέγονται να προβληθούν είναι αντιστοίχως :

(0, 0, 0)	(1, 2, 3)	(1, 3, 4)
(1, 1, 1)	(2, 3, 4)	(1, 2, 3)
(2, 2, 2)	(3, 4, 4)	(1, 2, 4)
(3, 3, 3)	(2, 3, 4)	(0, 3, 4)

Το κάθε κανάλι (0-4) , αντιπροσωπεύει μία συνιστώσα από τις 5 στις οποίες έχουν αντιστοιχηθεί όλα τα δεδομένα.

### 5.2.2.2. MNF (Minimum Noise Fraction)

Αντιστοίχως η μέθοδος MNF κατηγοροποιεί όλα τα δεδομένα της υπερφασματικής απεικόνισης σε 20 κανάλια, δηλαδή στα κανάλια 0-19.

Οι συνδυασμοί καναλιών που επιλέγονται να προβληθούν τυχαία είναι αντιστοίχως :

(5, 7, 10),	(7, 10, 13)	(10, 15, 19)
(7, 10, 13)	(6, 10, 14)	(4, 12, 17),
(3, 10, 16)	(10, 12, 15)	(6, 12, 18),
(8, 10, 12)	(5, 10, 13)	(11, 14, 17)

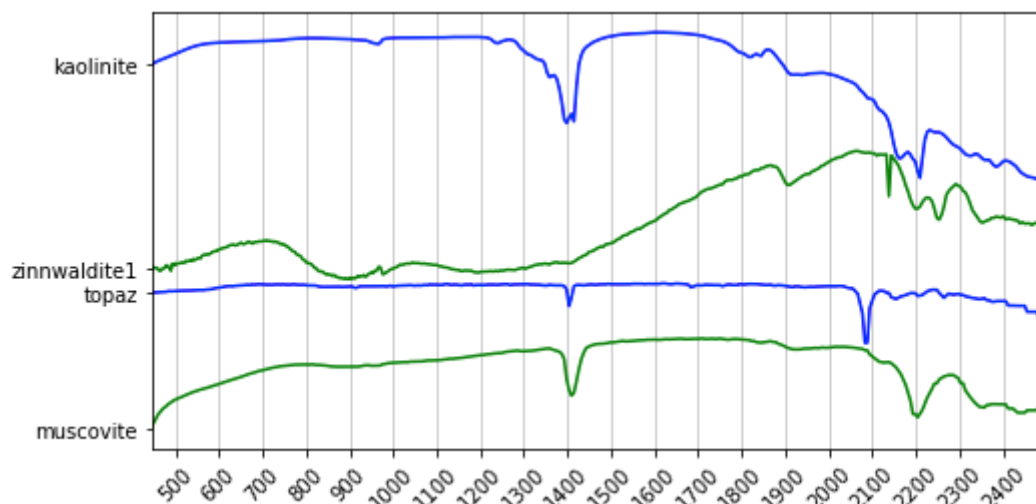
Η μέθοδος θα εφαρμοστεί συγκριτικά και για τις υπόγειες λήψεις, ώστε να γίνει αντιληπτές οι διαφορές σε σχέση με την μέθοδο PCA.

### 5.2.3. Χαρτογράφηση και ταξινόμηση

Όλη η αρχή της μεθόδου βασίζεται στην γνώση των χαρακτηριστικών απορρόφησης των ορυκτών που μας ενδιαφέρουν. Αυτό προκύπτει από τις

φασματικές υπογραφές που έχουν τα εν λόγω ορυκτών. Στην περίπτωση αυτή, το ενδιαφέρον πρωτίστως είναι να χαρτογραφηθεί είναι ο ζιννβαλδίτης (zinnwaldite), το τοπάζιο (topaz) , ο μοσχοβίτης (muscovite) και ο καολινίτης (kaolinite). Λόγω της γεωλογίας και της ορυκτολογίας της περιοχής, είναι υποδειγματικό για τον εντοπισμό της τοποθεσίας αποθέσεων λιθίου.

Συνολικά η επεξεργασία και η εξαγωγή των συμπερασμάτων θα εξεταστεί στο διάστημα του φάσματος SWIR. Αυτό διότι αρχικά, όπως φαίνεται και από την φασματική βιβλιοθήκη των ορυκτών που αναζητούνται, τα περισσότερα σημεία απορρόφησης της ακτινοβολίας παρατηρούνται για το διάστημα 2000nm – 2500nm και μάλιστα με όχι πολλές επικαλύψεις μεταξύ των ορυκτών. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στην εικόνα παρακάτω, στα 1400 nm και τα 4 ορυκτά έχουν απορρόφηση ακτινοβολίας, ή στα 1900 nm 3 ορυκτά απορροφούν ακτινοβολία. Αυτό διότι στις συγκεκριμένες τιμές παρουσιάζει το H<sub>2</sub>O απορρόφηση. Από την άλλη, δεν παρατηρούνται άλλες ενδιαφέρουσες και πληροφοριακά πλούσιες απορροφήσεις στο διάστημα >2000nm. Από την άλλη το LWIR φασματικό διάστημα, εκτός από το ότι δεν ενδείκνυται για τα ορυκτά αυτά, δεν καταγράφεται στους κινητούς αισθητήρες που διατίθενται για τους σκοπούς αυτής της έρευνας.



Εικόνα 5-9: Φασματική βιβλιοθήκη ορυκτών μοσχοβίτη, τοπάζιου, ζιννβαλδίτη και καολινίτη για το φασματικό εύρος 450nm-2500nm (Πηγή: Moritz K.)

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, τα χαρακτηριστικά απορρόφησης που θα μας απασχολήσουν καθ'όλη την διάρκεια της έρευνας είναι τα ακόλουθα:

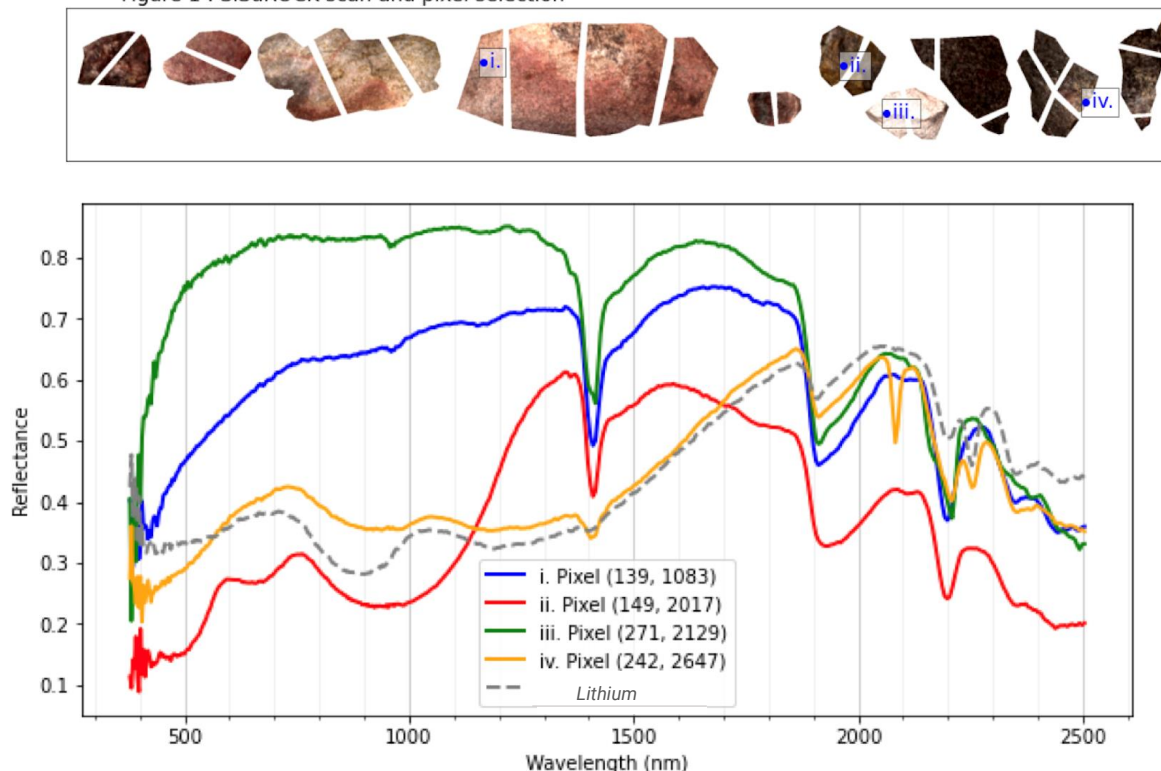
- Καολινίτης : 2150 nm, 2200 nm
- Ζιννβαλδίτης : 2250 nm,
- Τοπάζιο : 2080 nm
- Μοσχοβίτης : 2200 nm

Όπως έχει αναφερθεί στην θεωρία, η συλλογή των φασματικών υπογραφών συντάσσει την φασματική βιβλιοθήκη. Καθώς η επιφάνεια που ερευνάται θα περιέχει πολλαπλά ορυκτά και αυτά με διαφορετική γεωχημική σύνθεση και άρα φασματική υπογραφή, μας ενδιαφέρει η ανάλυση των φασμάτων σε όσο πιο μικρό μέγεθος είναι δυνατό, δηλαδή σε μέγεθος pixel.

Η σύγκριση μπορεί να γίνει σε δύο επίπεδα :

- Εξαγωγή φασμάτων συγκεκριμένων pixel και σύγκριση με τα πρότυπα φάσματα όπως αυτά δίνονται από την φασματική βιβλιοθήκη, όπως για παράδειγμα στο σχεδιάγραμμα που ακολουθεί.

Figure 1 : SiSuROCK scan and pixel selection



Εικόνα 5-10: Επιλογή τυχαίων σημείων στις εργαστηριακές λήψεις (πάνω) και συγκριτική απεικόνιση φασματικής υπογραφής τους (κάτω) μαζί με την φασματική υπογραφή πρότυπου δείγματος λιθίου για φασματικό εύρος 450nm-2500nm

- Χαρτογράφηση ανάκλασης συγκεκριμένων μηκών κύματος όπως αυτά δίνονται από την φασματική βιβλιοθήκη και κάθε φορά για ένα χαρακτηριστικό/ορυκτό.

#### 5.2.3.1. Ψευδοχρώμα στοιχείων απορρόφησης (Absorbance features)

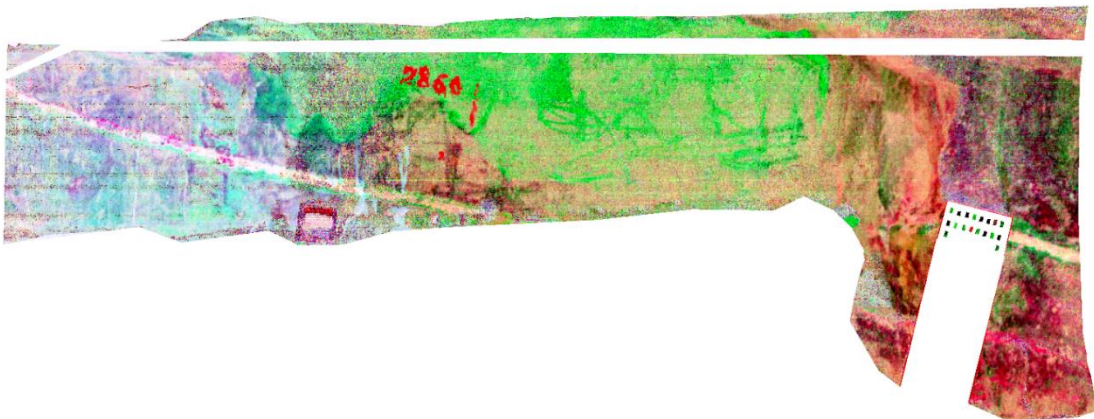
Η συγκεκριμένη μέθοδος απεικόνισης, δίνει την δυνατότητα να χαρτογραφηθούν οι απορροφήσεις που επιλέγονται κατά την απεικόνιση. Τα στοιχεία απορρόφησης είναι ουσιαστικά το ίδιο με την MWL χαρτογράφηση, χωρίς να δίνουν πολλές πληροφορίες για την διασπορά των στοιχείων. Ο αλγόριθμος λειτουργεί με την εισαγωγή των τιμών απορροφήσεων που θέλουμε να χαρτογραφηθούν σε nm. Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.5.2.

Επιλέγονται οι συγκεκριμένες απορροφήσεις, καθώς ήδη είναι γνωστά τα ορυκτά και οι απορροφήσεις που μας ενδιαφέρουν.



Εικόνα 5-11: Απεικόνιση με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) αντίστοιχα για τις εργαστηριακές λήψεις

Η ίδια μεθοδολογία εφαρμόζεται και στην υπόγεια λήψη. Ωστόσο δεν διακρίνεται αρκετά μεγάλη ευκρίνεια ως προς τον διαχωρισμό χαρακτηριστικών που μπορούν να ταυτιστούν με διαφορετικά ορυκτά (Εικ. 5-12).



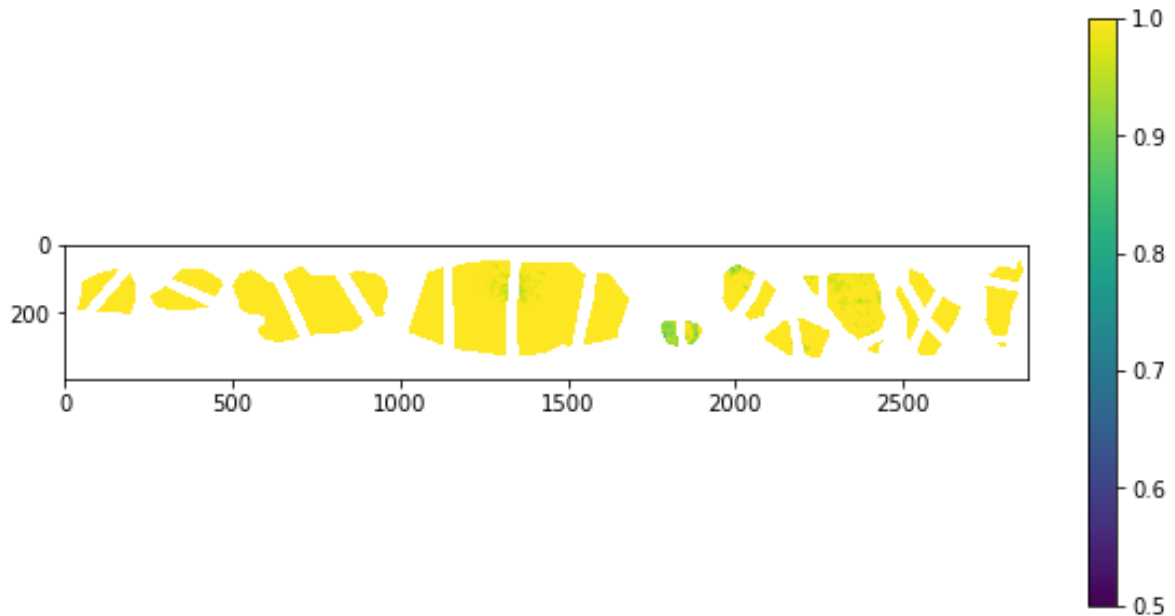
Εικόνα 5-12: Απεικόνιση με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη Α

#### 5.2.3.2. Αναλογία φασματικών καναλιών (Band ratios)

Ένα άλλο πολύτιμο εργαλείο που διατίθεται είναι η ταξινόμηση με βάση την αναλογία καναλιών. Η εντολή υπολογίζει τον λόγο δύο καναλιών. Εάν η εικόνα περιέχει λίστα μηκών κύματος, τότε τα κανάλια πρέπει να καθοριστούν ως μήκη κύματος. Εάν η εικόνα δεν περιέχει λίστα μηκών κύματος τότε οι δύο αριθμοί λαμβάνονται ως αριθμοί καναλιών. Ουσιαστικά, δηλαδή, ορίζεται ένα διάστημα φασματικών μηκών για το οποίο προϋπάρχει η γνώση της ύπαρξης πληροφοριών αναλόγως με τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν να χαρτογραφηθούν.

Το αποτέλεσμα είναι μια εικόνα σε μορφή *float* ενός καναλιού η οποία είναι ο λόγος των δύο ζωνών. Η μέθοδος εφαρμόζεται διερευνητικά στις δύο δοκιμαστικές λήψεις.

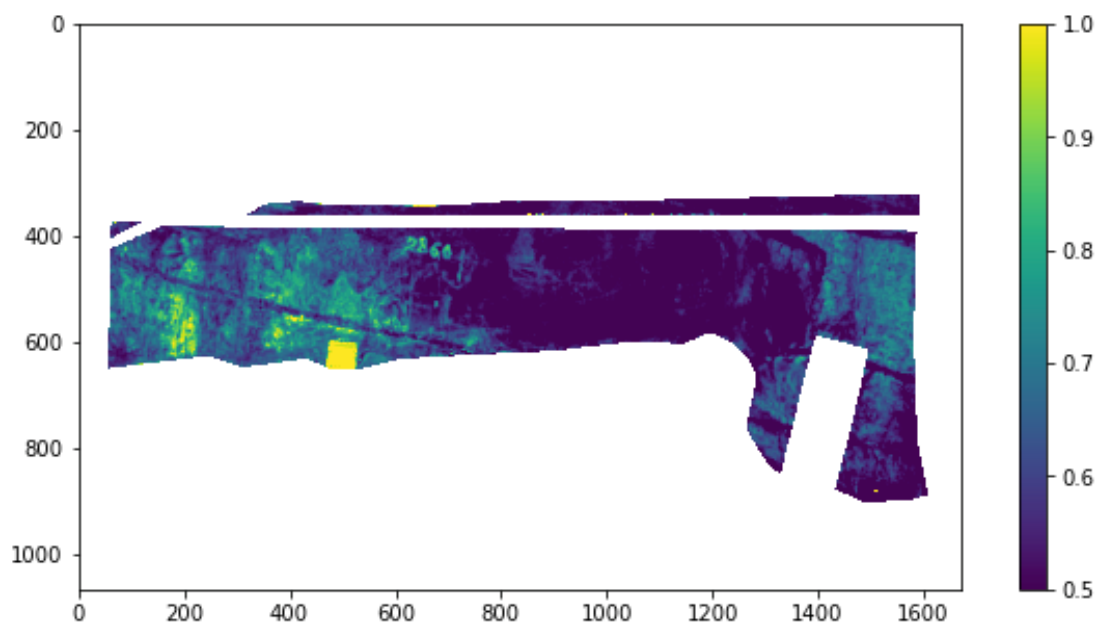
Ο πρώτος αριθμός του διαστήματος ορίζεται ως ο αριθμητής του κλάσματος και ο δεύτερος ως ο παρονομαστής. Επιλέγεται το διάστημα 2000 nm με 2300 nm.



Εικόνα 5-13: Απεικόνιση με επεξεργασία *band ratios* για φασματικό εύρος 2000 nm – 2300 nm για τις εργαστηριακές λήψεις

Έτσι με απλά μαθηματικά, στο παραπάνω παράδειγμα, με την τιμή 1.0 και συνεπώς με το κίτρινο χρώμα χαρτογραφούνται όποια σημεία έχουν απορρόφηση της ακτινοβολίας στα 2300nm. Αυτό διότι :  $\lambda = \frac{2300nm-2000nm}{2300nm-2000nm} = 1$

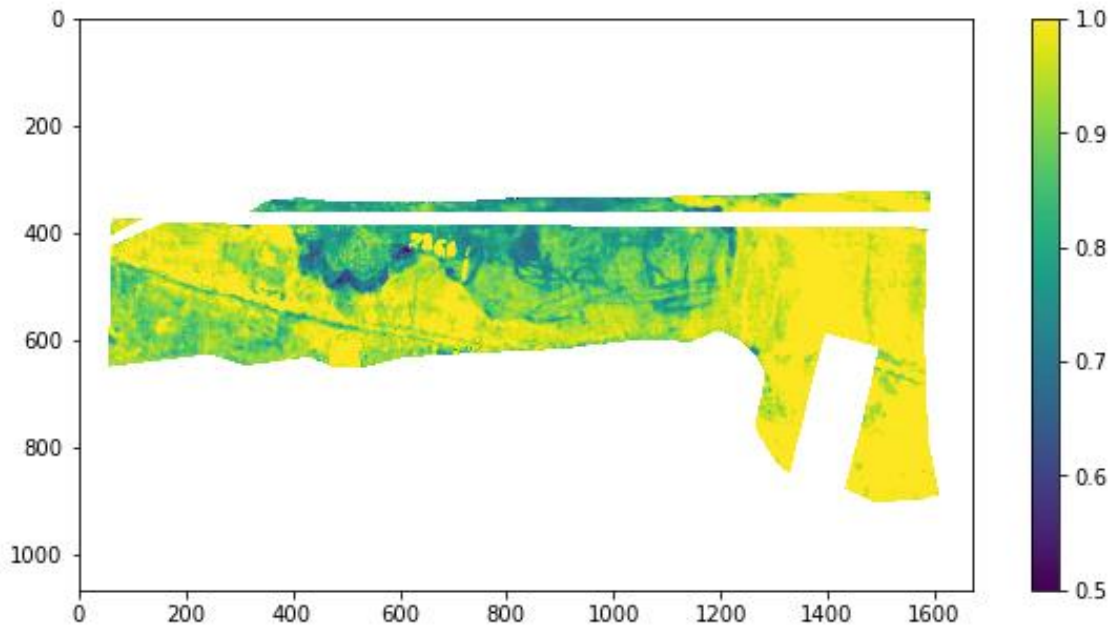
Αντιστοίχως πχ. για τα σημεία που έχουν απορρόφηση στα 2252nm θα ισχύει πώς:  $\lambda = \frac{2252nm - 2000nm}{2300nm - 2000nm} = 0,84$  το οποίο θα απεικονιστεί με ελαφρύ πράσινο χρώμα όπως φαίνεται από την κλίμακα.



Εικόνα 5-14: Απεικόνιση με επεξεργασία band ratios για φασματικό εύρος 2000 nm – 2300 nm για την Υπόγεια Λήψη Α

Προκύπτει ότι για το ίδιο φασματικό περιθώριο, τα αποτελέσματα είναι διαφορετικά αλλά και στις δύο περιπτώσεις όχι ιδιαίτερα βοηθητικά ως προς τα στοιχεία που φάχνουμε.

Μεταβάλλοντας το φασματικό διάστημα σε πχ. 2250 nm – 2260 nm ή σε 2200 nm - 2260 nm (Εικ. 5-15) τα αποτελέσματα μεταβάλλονται, χωρίς όμως να καταλήξουμε κοντά στον τελικό στόχο.



Εικόνα 5-15: Απεικόνιση με επεξεργασία *band ratios* για φασματικό εύρος 2200 nm – 2260 nm για την Υπόγεια Λήψη Α

Τελικά, βλέπουμε πως ούτε η συγκεκριμένη μέθοδος δεν έχει αρκετά καλή απόδοση ως προς την ποικιλία των στοιχείων που χαρτογραφούνται αλλά και ως προς την θέση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων.

#### 5.2.3.3. Ελάχιστο μήκος κύματος (MWL)

Η συγκεκριμένη εντολή χαρτογραφεί τις μικρότερες τιμές των μηκών κύματος του φάσματος της εκάστοτε λήψης. Συνήθως ορίζεται ένα εύρος μέσα στο οποίο θέλουμε να γίνει η εν λόγω χαρτογράφηση. Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στο Κεφ. 2.5.2.

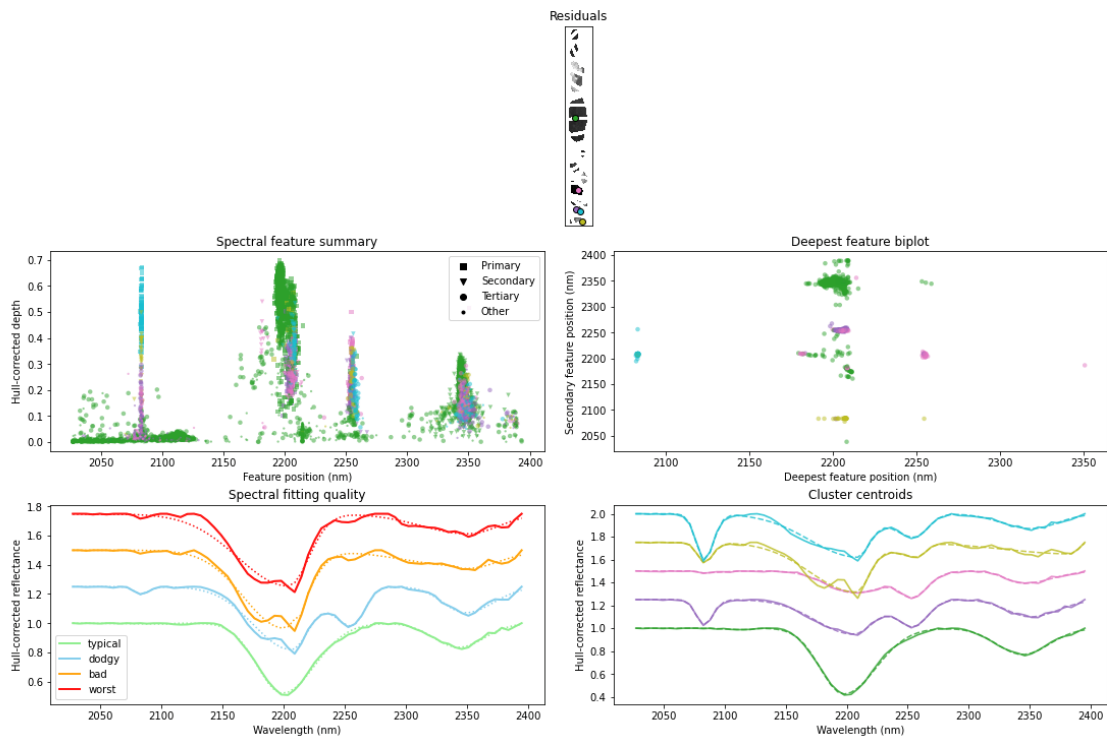
Για την χαρτογράφηση ελάχιστου μήκους κύματος εκτελείται εντολή του υπολογιστικού εργαλείου *hylite*. Κατά την εφαρμογή του, διακρίνονται οι θέσεις απορρόφησης ακτινοβολίας οι οποίες, εν συνεχεία, γίνονται τα χαρακτηριστικά ανίχνευσης του ορυκτού. Η εντολή δίνει αρκετά στοιχεία ως προς την εν λόγω χαρτογράφηση.

Παρακάτω φαίνεται η δομή της εντολής. Στον αλγόριθμο ορίζεται το εύρος του φάσματος που θέλουμε να γίνει η ταξινόμηση, αν θα εφαρμοστεί διόρθωση *hull*, η μαθηματική προσαρμογή που θέλουμε να βασιστεί (στην προκειμένη περίπτωση επιλέγεται πάντα η μέθοδος *Gauss*), τον αριθμό των στοιχείων που θέλουμε να



προσδιοριστούν, αν πρέπει να υπάρχει συμμετρία μεταξύ των εν λόγω στοιχείων, αν θα ταξινομηθούν τα μέγιστα ή τα ελάχιστα (στην προκειμένη περίπτωση χαρτογραφούμε τις απορροφήσεις και άρα τα ελάχιστα).

Το αποτέλεσμα της ταξινόμησης που λαμβάνεται μετά έχει αυτήν την μορφή:

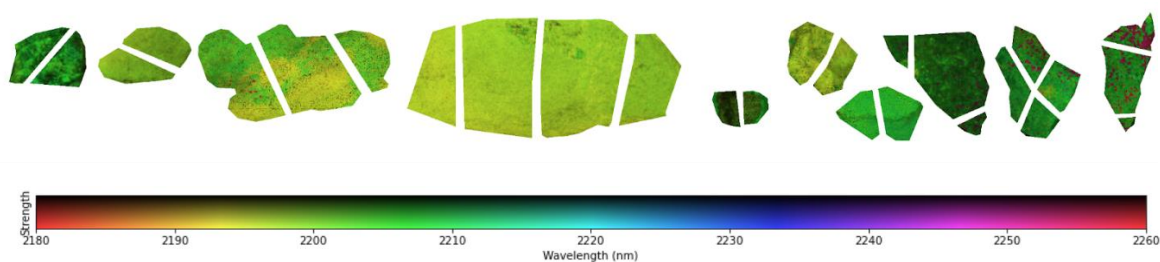


Εικόνα 5-16: Ενδεικτική γραφική αναπαράσταση διαφόρων παραμέτρων στα πλαίσια του MWL Spectral Feature Summary για το φασματικό εύρος 2050 nm – 2400 nm εφαρμοσμένο στις εργαστηριακές λήψεις

Συγκεκριμένα, στο γράφημα *Spectral Feature Summary*, γίνεται μία σύνοψη των απορροφήσεων που εντοπίζονται κατά το εύρος του μήκους κύματος που έχει οριστεί και κατατάσσονται σε Πρωτεύοντα (Primary), Δευτερεύοντα (Secondary), Τριτεύοντα (Tertiary) και Άλλα (Other). Η κατάταξη αυτή προκύπτει από μία ιεράρχηση των απορροφήσεων ακτινοβολίας. Στο διπλανό γράφημα *Deepest feature biplot* εμφανίζεται η διασπορά των πρωτεύοντων απορροφήσεων σε συνάρτηση με τις δευτερεύουσες για κάθε φασματική υπογραφή η οποία ανήκει σε ένα EM. Στο γράφημα στην παρακάτω σειρά αριστερά, *Spectral Fitting Quality*, παρουσιάζεται η ποιότητα των συναρτήσεων σε σχέση με την αναμενόμενη, εντοπίζονται δηλαδή τυχόν παραλλαγές και αποκλίνοντα, από τα συνήθη, χαρακτηριστικά των φασματικών υπογραφών. Τέλος, στο γράφημα *Cluster*

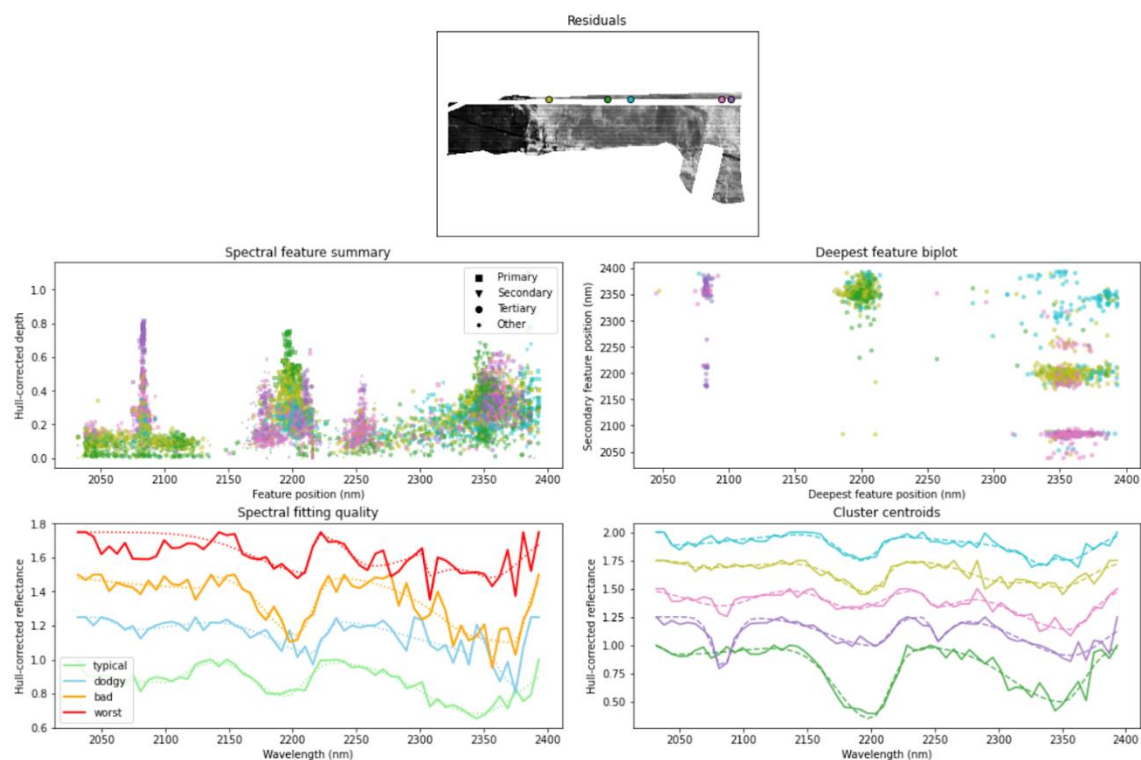
*centroids* παρατίθενται οι φασματικές υπογραφές και εντοπίζονται οι απορροφήσεις συνοπτικά.

Στην εφαρμογή της μεθόδου εφαρμόζονται διάφορα διαστήματα μήκων κύματος για τα οποία θέλουμε να γίνει η απεικόνιση των απορροφήσεων της ακτινοβολίας. Εν τέλει, προκύπτει πως τα βέλτιστα αποτελέσματα προκύπτουν για το διάστημα  $2050\text{ nm} - 2400\text{ nm}$ . Το συγκεκριμένο περιθώριο είναι ιδανικό, καθώς περιέχονται όλες οι τιμές απορροφήσεων που ενδιαφερόμαστε να δούμε.



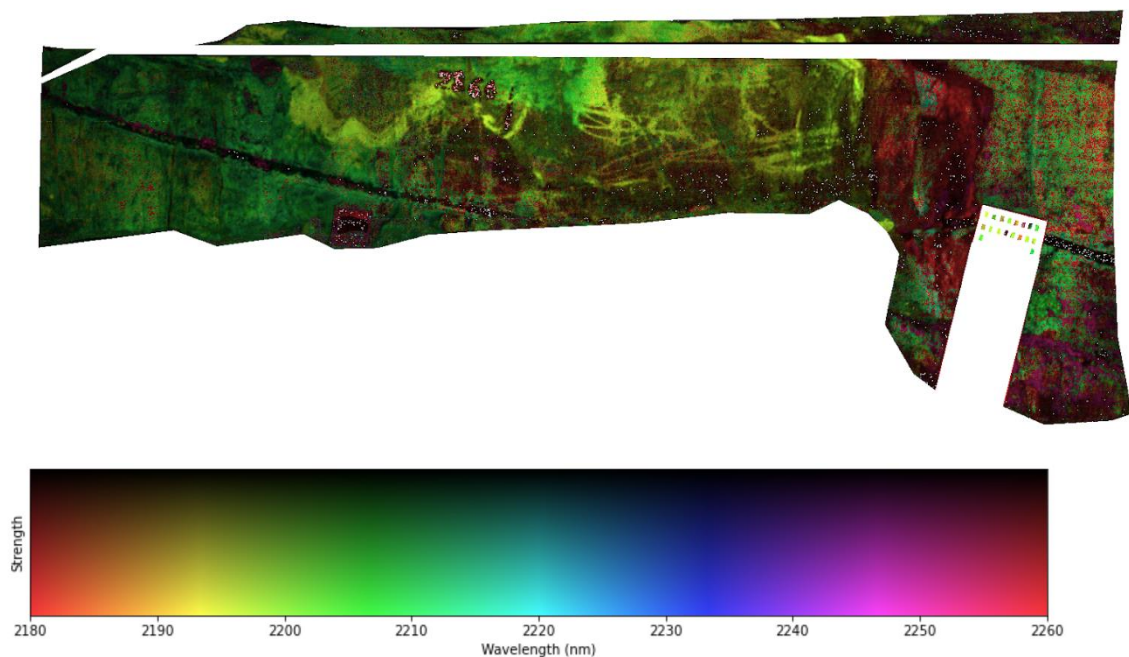
Εικόνα 5-17: Γραφική ποσοτικοποίηση θέσης και βάθους χαρακτηριστικών απορρόφησης για φασματικό εύρος  $2180\text{ nm} - 2260\text{ nm}$  για τις εργαστηριακές λήψεις

Σε αντίστοιχη περίπτωση για την λήψη Z1 ισχύει :



Εικόνα 5-18: Ενδελεχής γραφική αναπαράσταση διαφόρων παραμέτρων στα πλαίσια του Spectral Feature Summary για το φασματικό εύρος 2050 nm – 2400 nm εφαρμοσμένο στην Υπόγεια Λήψη Α

Φαίνεται πως, η συγκεκριμένη μέθοδος εκτός από το ότι δεν έχει εντοπίσει τα Endmember (EM) πάνω στην επιφάνεια που μας ενδιαφέρει (τα EM είναι πάνω στην λευκή-κενή λωρίδα), τα αποτελέσματα που δίνονται όσον αφορά τις φασματικές υπογραφές, εμπεριέχουν πολύ θόρυβο. Παρότι λοιπόν, για τις εργαστηριακές μετρήσεις, όπου οι διαταραχές όσον αφορά την ΗΜ ακτινοβολία και την φασματική ανάκλαση είναι αρκετά βελτιωμένες, στις υπόγειες σκηνές δεν έχει νόημα να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη μέθοδος.



Εικόνα 5-19: Γραφική ποσοτικοποίηση θέσης και βάθους χαρακτηριστικών απορρόφησης για φασματικό εύρος 2180 nm - 2260 nm για την Υπόγεια Λήψη Α

#### 5.2.3.4. Διόρθωση hull

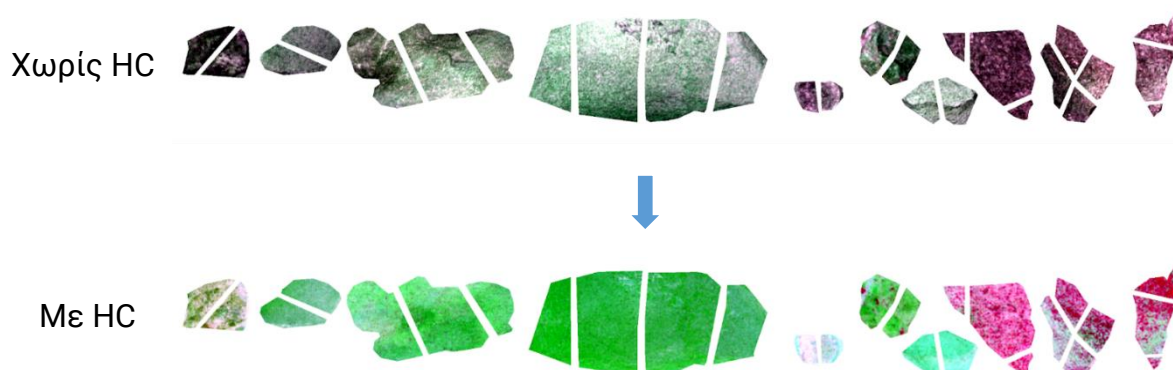
Η διόρθωση hull εφαρμόζεται ώστε να δοθεί έμφαση στα χαρακτηριστικά που επιλέγονται κάθε φορά και να ενισχυθεί η παρουσία τους. Κατά κάποιο τρόπο, ξεχωρίζονται τα σημεία ενδιαφέροντος από θόρυβο ή άλλα στοιχεία τα οποία μπορεί να αποπροσανατολίσουν από τα σημαντικά χαρακτηριστικά. Περισσότερες πληροφορίες αναφέρονται στο κεφάλαιο 2.5.2.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, επιλέγεται να διορθωθεί το φάσμα για μήκη κύματος από 2000 nm και άνω. Αυτό διότι, όπως έχει αναφερθεί, το διάστημα που μας ενδιαφέρει είναι το SWIR.

Ο γενικός στόχος είναι η εξαγωγή των χαρακτηριστικών του φάσματος. Για να προσδιοριστεί ένα φασματικό χαρακτηριστικό από τη θέση και το σχήμα του μήκους κύματος, πρέπει να απομονωθεί από φαινόμενα όπως οι αλλαγές στάθμης και οι κλίσεις. Το πρώτο βήμα είναι η κανονικοποίηση του φάσματος με την εφαρμογή ενός συνεχούς αλγορίθμου αφαίρεσης. Υπάρχουν δύο τρόποι για να γίνει αυτό: με διαίρεση σε φάσματα ανάκλασης, διαπερατότητας και εκπομπής

ή με αφαίρεση με φάσματα απορρόφησης ή συντελεστή απορρόφησης (Thieren, 2018).

Για παράδειγμα, αν εφαρμοστεί η εν λόγω διόρθωση στα διαθέσιμα δείγματα για SWIR, η διαφορά στην απεικόνιση είναι η εξής :



Εικόνα 5-20: Συγκριτική απεικόνιση των εργαστηριακών λήψεων χωρίς και με εφαρμογή Hull Correction

Η συγκεκριμένη διόρθωση χρησιμοποιείται πάντα για την απεικόνιση των Στοιχείων Απορρόφησης.

#### 5.2.3.5. Φασματική υπογραφή (Endmember - Spectra extraction)

Μία άλλη μέθοδος που είναι ενδεικτική για την απεικόνιση των στοιχείων που μας ενδιαφέρουν είναι η εύρεση endmembers (EM).

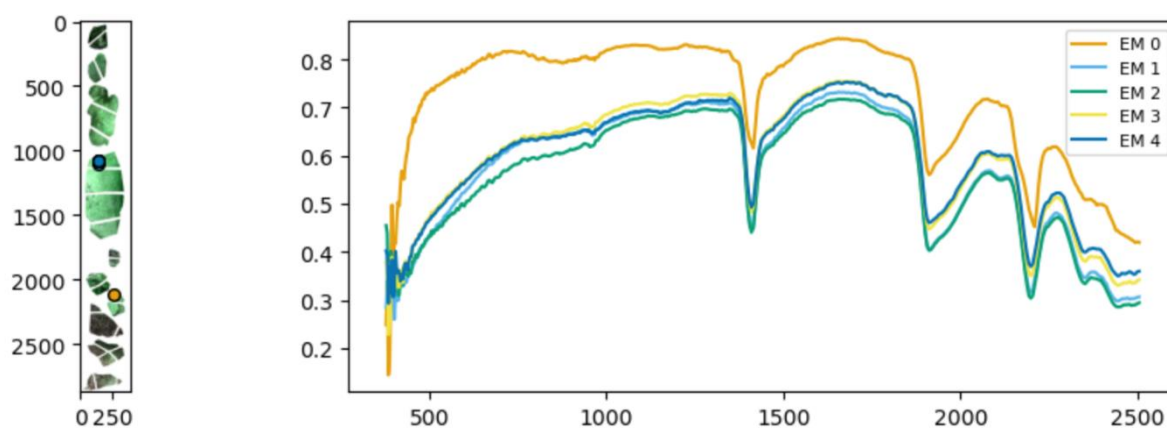
Σε πρώτη φάση συγκρίνονται διαφορετικοί τρόποι υπολογισμών και χαρτογράφησης τους, ώστε να βρεθούν όσο το δυνατόν πιο πολλά στοιχεία μπορούν και όσο πιο διαφορετικά μεταξύ τους. Ύστερα, σε δεύτερη φάση, θα γίνει σύγκριση των φασματικών υπογραφών των EM που έχουν βρεθεί με τις πρωτότυπες φασματικές υπογραφές των ορυκτών που μας ενδιαφέρουν.

Οι φασματικές υπογραφές αποτελούν το βασικό γνώρισμα που βοηθάει στην αναγνώριση και εντοπισμό των ορυκτών. Με εντολή στον αλγόριθμο επιλέγεται το σημείο ή το pixel για το οποίο θέλουμε να εμφανιστεί η φασματική υπογραφή και ύστερα γίνεται σύγκριση με τις φασματικές υπογραφές που μας δίνονται από άλλες μετρήσεις.

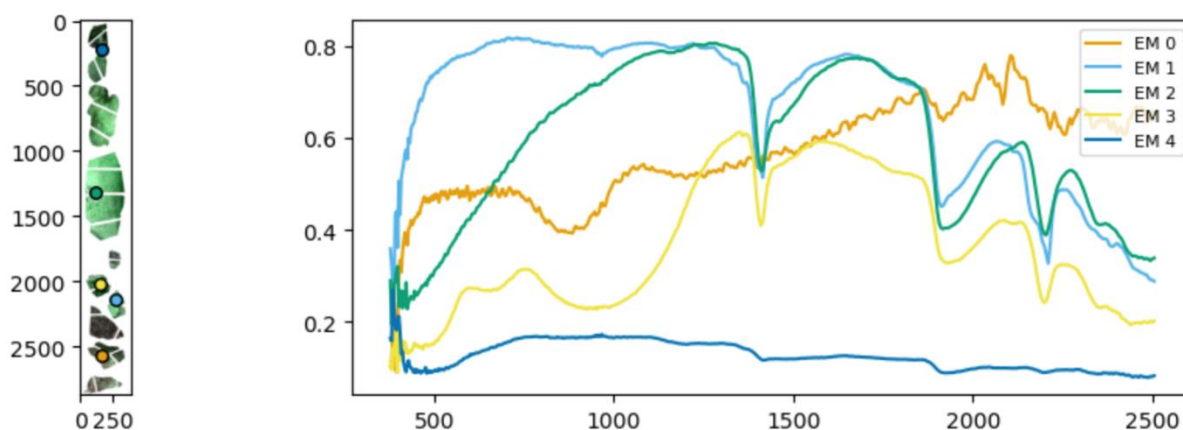
Ο εντοπισμός των συγκεκριμένων σημείων ή *pixel*, επιτυγχάνεται με αλγόριθμο μη επιβλεπόμενο και εντοπίζει τα *endmembers* στην εκάστοτε υπερφασματική εικόνα. Η εντολή συνδυάζεται συνήθως με την εξαγωγή των φασματικών υπογραφών των *endmembers*.

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι για τον μη επιβλεπόμενο εντοπισμό *endmembers*. Για την πιο ολοκληρωμένη εικόνα και την μεγαλύτερη απόδοση δοκιμάζονται 4 διαφορετικοί αλγόριθμοι. Συγκεκριμένα δοκιμάζονται στην υψηλής ανάλυσης απεικόνιση του αισθητήρα SiSuROCK οι αλγόριθμοι PPI, NFINDR, ATGP και FIPPI.

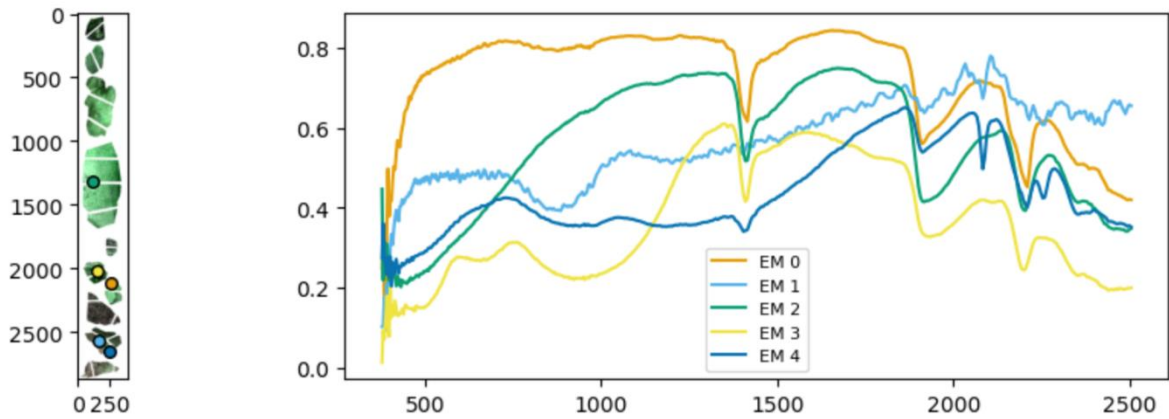
Στην υπόγεια απεικόνιση δεν υπάρχει πολύ νόημα να εφαρμοστούν οι αλγόριθμοι των EM λόγω του πλήθους δεδομένων και του χρονικού αντίκτυπου αυτού. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω :



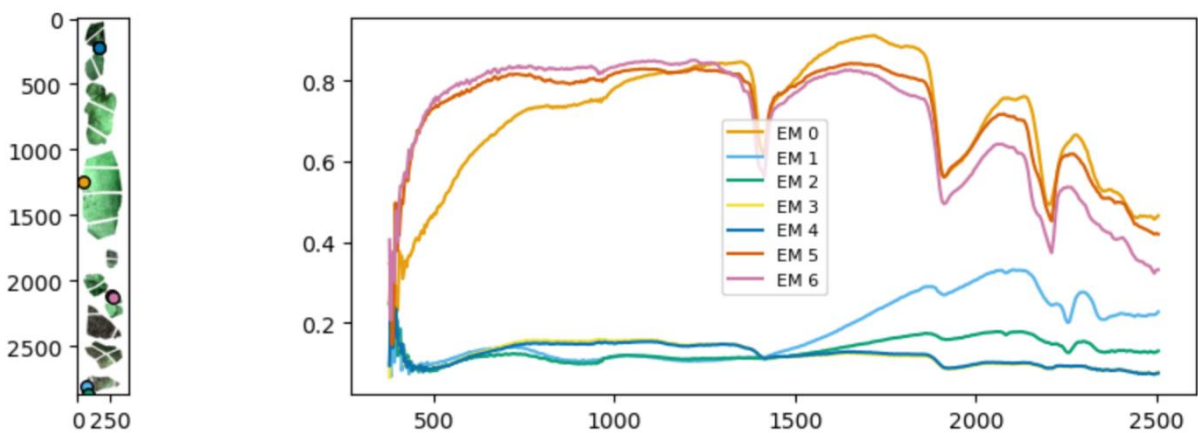
Εικόνα 5-21: Εφαρμογή αλγορίθμου PPI εύρεσης *endmember* στις εργαστηριακές λήψεις



Εικόνα 5-22: Εφαρμογή αλγορίθμου NFINDR εύρεσης *endmember* στις εργαστηριακές λήψεις



Εικόνα 5-23: Εφαρμογή αλγορίθμου ATGP εύρεσης endmember στις εργαστηριακές λήψεις



Εικόνα 5-24: Εφαρμογή αλγορίθμου FIPPI εύρεσης endmember στις εργαστηριακές λήψεις

Προκύπτει ότι οι αλγόριθμοι NFINDR (Εικ. 5-22) και ATGP (Εικ. 5-23) είναι ικανοί να εντοπίσουν πιο πολλά EM τα οποία δεν σχετίζονται μεταξύ τους σε τοποθεσία και φασματική υπογραφή. Παρόλαυτα, πρέπει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα δεν είναι ιδιαίτερα αισιόδοξα ως προς την ποικιλία των EM που μπορούν να εντοπιστούν.

#### 5.2.4. Φωτογραμμετρία

Για τους σκοπούς της φωτογραμμετρίας και της παραγωγής τρισδιάστατου μοντέλου, λαμβάνονται φωτογραφίες με ψηφιακή κάμερα με ειδική τρόπο λήψης εικόνων. Δοκιμάζονται δύο διαφορετικές μέθοδοι λήψης, μία με φλας της κάμερας και χωρίς άλλες εξωτερικές πηγές φωτός και δεύτερη χωρίς το φλας, αλλά με τον φωτισμό που υπάρχει για την λήψεις. Τα αποτελέσματα

παρατίθενται παρακάτω στην Εικ. 5-25. Στην συνέχεια το φωτογραφμικό τρισδιάστατο μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για την σύνοψη των υπερφασματικών λήψεων σε αυτό.



Εικόνα 5-25: Αποτελέσματα φωτογραμμετρικών μοντέλων για τις Υπόγειες Λήψεις A,B,C με και χωρίς flash

Φαίνεται λοιπόν, πως τα μοντέλα που έχουν παραχθεί μόνο με flash έχουν μεγαλύτερη ομοιογένεια και άρα θα είναι αυτά που θα χρησιμοποιηθούν.



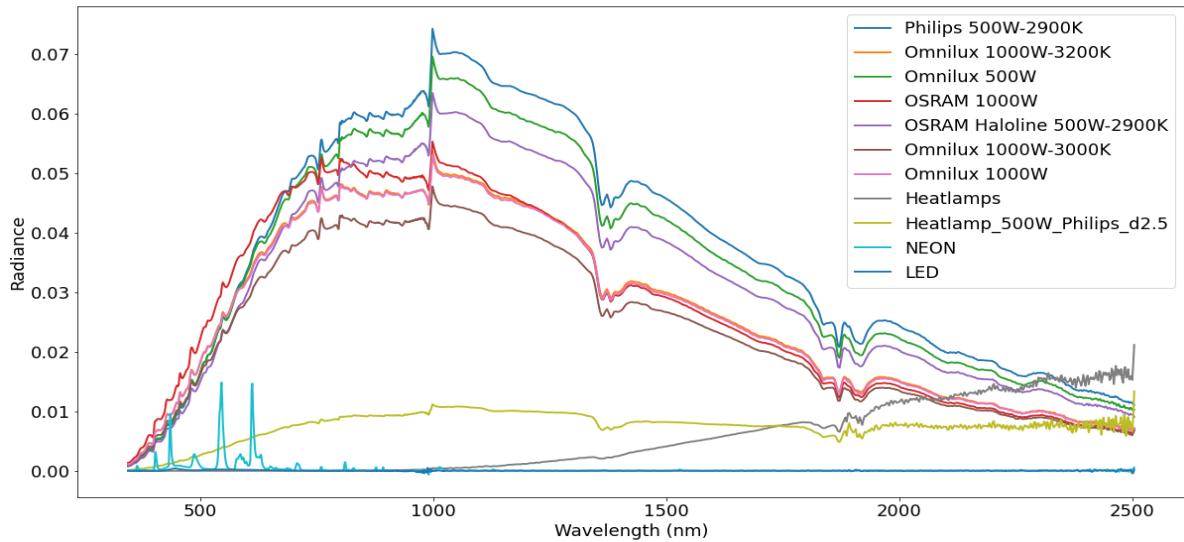
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αποτελέσματα

Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται με τα εργαλεία που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 4.2.. Η επεξεργασία γίνεται με αυτές τις μεθόδους, καθώς τα αποτελέσματα δίνουν την δυνατότητα να προβάλλουν χρήσιμα στοιχεία για την σύγκριση και την εξαγωγή τελικών πορισμάτων. Είναι τεχνικές που χρησιμοποιούνται εκτενώς στην φασματική γεωλογία και δίνουν βήμα στις μικροσκοπικές τεχνικές να εφαρμοστούν σε μεγάλες κλίμακες. Τελικά, θέλουμε να καταλήξουμε στις πιο αποτελεσματικές μεθόδους όσον αφορά την ποικιλία των διαφορετικών χαρακτηριστικών που αναγνωρίζονται και, φυσικά, σε αυτές που είναι πιο έγκυρες.

### 6.1. Αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών

#### 6.1.1. Αποτελέσματα δοκιμών λαμπτήρων

Προκύπτει ότι οι λάμπες αλογόνου ίδιας ισχύος (500W/1000W), δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Οι λάμπες ισχύος 500W έχουν μεγαλύτερη ανάκλαση, συγκριτικά με τις λάμπες 1000W και μάλιστα, όλες οι λάμπες αλογόνου έχουν ίδιες φασματικές υπογραφές. Οι λάμπες NEON και LED χαρακτηρίζονται αρκετά ακατάλληλες για τον σκοπό της παρούσας εργασίας, καθώς η ανακλαστικότητά τους είναι σχεδόν μηδαμινή, λόγω της χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης που έχουν. Από την άλλη, οι λάμπες θερμότητας, εκδηλώνουν μια ενδιαφέρουσα φασματική υπογραφή, η οποία σταδιακά ενισχύει την αντανάκλασή της. Ενδιαφέρουσα είναι η φασματική υπογραφή που προκύπτει από τον συνδυασμό της λάμπας θερμότητας με τον λαμπτήρα αλογόνου 500W, όπου φαίνεται να είναι αρκετά ομοιογενής. Ωστόσο, λόγω της δομής των λαμπτήρων θερμότητας στο πεδίο εργασιών, δεν καθίσταται δυνατή η μεταφορά τους.

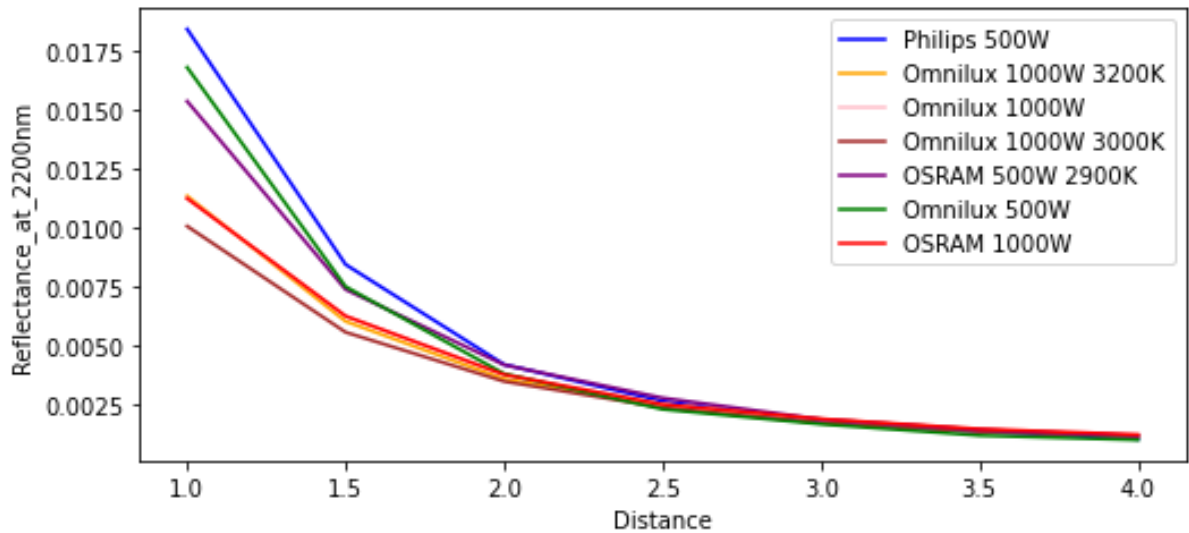


Εικόνα 6-1: Συγκριτική απεικόνιση της φασματικής υπογραφής διαφόρων τύπων λαμπτήρων για το φασματικό εύρος 400 nm – 2500 nm

Στην Εικ. 6-2 φαίνεται η ανακλαστικότητα που αντιστοιχεί σε ακτινοβολία μήκους κύματος 2200 nm σε συνάρτηση με την απόσταση για τις λάμπες που αναφέρονται. Προκύπτει ότι για  $d=1m$  έχουμε την μεγαλύτερη τιμή ανάκλασης, ενώ για  $d=4m$  την μικρότερη. Αυτό άλλωστε είναι το λογικό καθώς η ποσότητα φωτός μικραίνει κατά το τετράγωνο της απόστασης,  $d^2$ , λόγω της εξίσωσης :

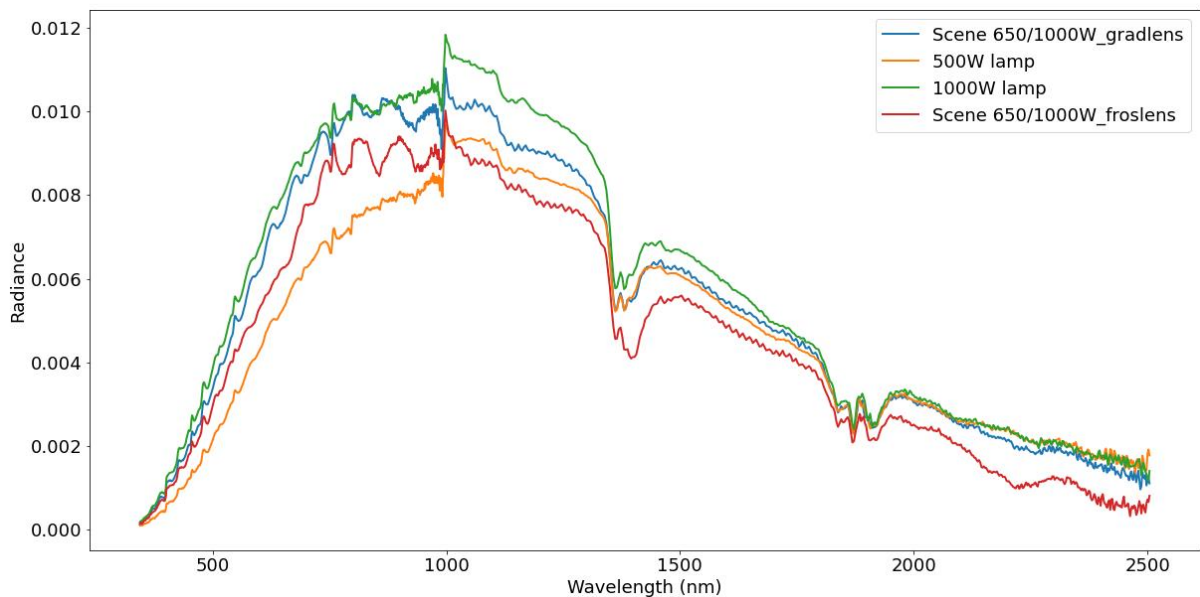
$$I = \frac{1}{d^2} , \quad \left( cd = \frac{W}{m^2} \right) \quad (Εξ. 13)$$

όπου με  $I$  συμβολίζεται η ένταση του φωτός. Παρατηρείται επίσης πως μετά τα 2 m η διαφοροποίηση στις τιμές ανάκλασης δεν έχουν αξιοσημείωτη διαφορά.



Εικόνα 6-2: Ανακλαστικότητα διαφόρων τύπων λαμπτήρων συναρτήσει της απόστασης για ακτινοβολία 2200 nm

Ύστερα από έλεγχο των δύο φακών, προκύπτει ότι το φως που εκλύεται από τον βαθμωτό φακό έχει μεγαλύτερη αντανακλαστικότητα.



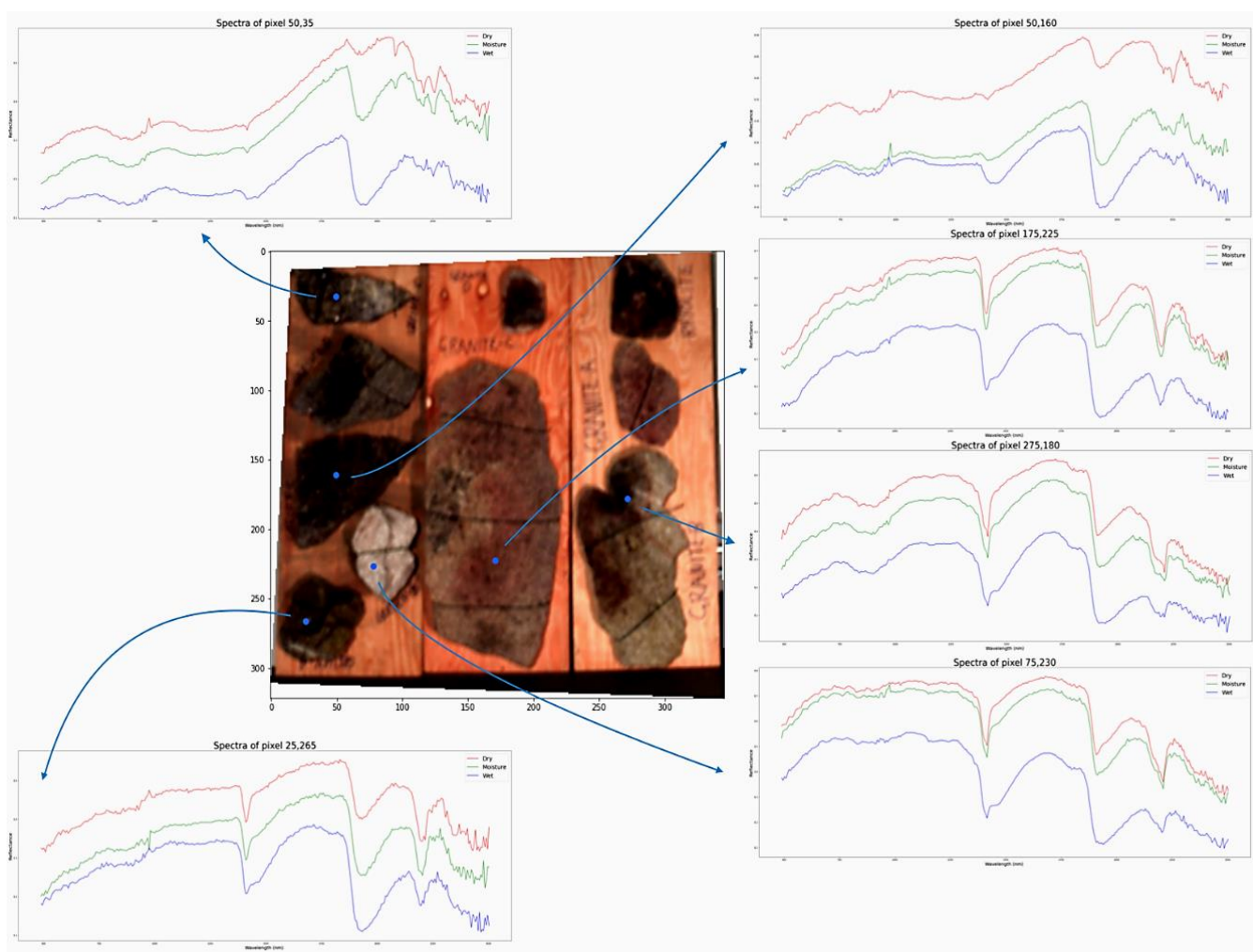
Εικόνα 6-3: Συγκριτική απεικόνιση λαμπτήρων ισχύος 500W και 1000W, και φακών βαθμωτού και frosted με λαμπτήρα 1000W

Συνολικά, επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η διάταξη με κύρια πηγή τον προβολέα με τον βαθμωτό φακό και υποστηρικτικά 3 λαμπτήρες 500W οι οποίοι θα τοποθετηθούν σε αμφιθεατρική διάταξη.

### 6.1.2. Αποτελέσματα δοκιμών υγρασίας

Για την εύλογη σύγκριση των δειγμάτων με την υγρασία, οι τρεις διαφορετικές λήψεις, συννεώνονται μεταξύ τους και στην συνέχεια επιλέγονται κάποια σημεία για την εξαγωγή των φασμάτων στα συγκεκριμένα σημεία (Εικ. 6-4).

Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν ακριβώς αυτή την θεωρία. Ωστόσο έχει ενδιαφέρον το γεγονός ότι για το κάθε δείγμα ή ριχελ στην προκειμένη περίπτωση, οι τιμές των αντανάκλασεων δεν διαφοροποιούνται ισόποσα και ομοιόμορφα. Οι τιμές των φασμάτων, συνεπώς, δεν διακυμαίνονται ανάλογα, αλλά για παράδειγμα, ενώ το φάσμα του σημείου (75, 230) της μέτρησης με ήπια υγρασία είναι αρκετά κοντινό στην ξηρή μέτρηση, αντίθετα, για το φάσμα του σημείου (50,160) ισχύει ότι το φάσμα της ήπιας υγρασίας είναι πιο κοντά στην υγρή μέτρηση.



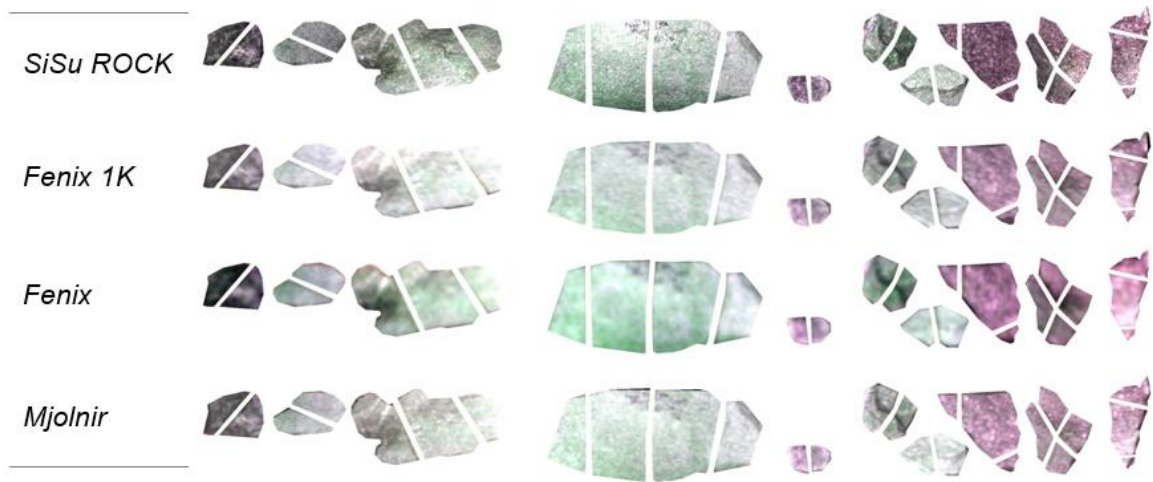
Εικόνα 6-4: Συγκριτική απεικόνιση της ανακλαστικότητας και της επίπτωσης υγρασίας σε τυχαία σημεία των Δειγμάτων 1,2,3 (Κόκκινο = ξηρές συνθήκες, Πράσινο = ελαφρώς υγρές συνθήκες, Μπλε = πολύ υγρές συνθήκες)

Παρατηρείται το αναμενόμενο, ότι όσο πιο πολύ υγρασία (ή νερό) εφαρμόζεται στα δείγματα, τόσο λιγότερη ανακλαστικότητα έχουν.

## 6.2. Αποτελέσματα δοκιμών σύγκρισης αισθητήρων

Στην προσπάθεια να βρεθούν οι ομοιότητες και οι διαφορές όσον αφορά την απόδοση των διαφορετικών αισθητήρων υπό τις ίδιες συνθήκες, συντάσσεται ένα μωσαϊκό το οποίο περιέχει τις λήψεις από 1) τον αισθητήρα SiSuROCK, 2) τον αισθητήρα FENIX 1K, 3) τον αισθητήρα FENIX, 4) τον αισθητήρα Mjolnir. Με το

μωσαϊκό μπορεί να γίνει μια πιο άμεση και έγκυρη σύγκριση των αισθητήρων όσον αφορά την χωρική και την φασματική ανάλυση. Για παράδειγμα, στην Εικ. 6-5 είναι ξεκάθαρες οι διαφορές στην χωρική ανάλυση των αισθητήρων.



Εικόνα 6-5: Χωρική και φασματική ανάλυση 4 αισθητήρων για τις εργαστηριακές λήψεις

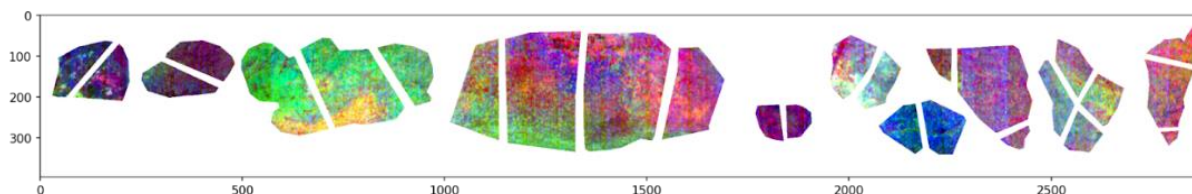
Ήδη από την προβολή των 4 αισθητήρων μπορούν να διαπιστωθούν κάποια συμπεράσματα ως προς την ποιότητα των λήψεων που μας δίνεται στην κάθε περίπτωση. Ο αισθητήρας SiSuROCK έχει την μεγαλύτερη ανάλυση εικόνας και ακολουθεί ο Mjolnir. Την χαμηλότερη ανάλυση εικόνας παρουσιάζει ο αισθητήρας Fenix. Αυτό επαληθεύεται και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της κάθε κάμερας, καθώς η χωρική ανάλυση και η γωνία του οπτικού πεδίου αποδίδουν την ανάλυση που θα έχουμε στο τέλος κάθε λήψης.

Για την εξαγωγή περισσότερων συμπερασμάτων που αφορούν την χαρτογράφηση και την απεικόνιση των ορυκτών οφείλουμε να επεξεργαστούμε το μωσαϊκό με τις κατάλληλες τεχνικές επιβλεπόμενης ταξινόμησης.

#### 6.2.1. Τεχνικές μείωσης διάστασης υπερφασματικών απεικονίσεων λήψεων εργαστηρίου

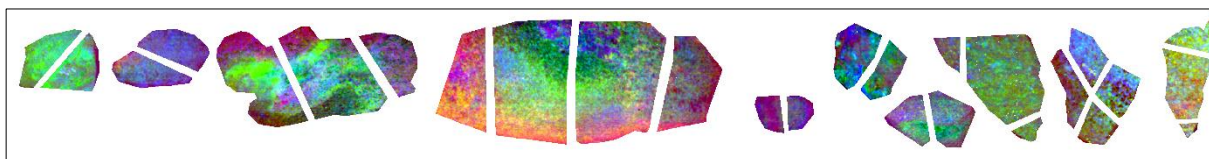
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή HIS στην λήψη του αισθητήρα SisuROCK για τις μεθόδους PCA και MNF αντίστοιχα, παρουσιάζονται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι και παρακάτω.

Εν τέλει, μετά την εμφάνιση όλων των αποτελεσμάτων, καταλήγουμε στα κανάλια (1,3,4) καθώς φαίνεται ότι παρουσιάζουν την μεγαλύτερη διαφοροποίηση σε σχέση με τους άλλους συνδυασμούς καναλιών. Ωστόσο πρέπει αυτή η υπόθεση να επαληθευτεί και με άλλες μεθόδους.



Εικόνα 6-6: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου PCA για τον συνδυασμό καναλιών 1,3,4 στις εργαστηριακές λήψεις

Με το ίδιο σκεπτικό, για την μέθοδο MNF με μία γρήγορη εκτίμηση, ο συνδυασμός καναλιών (6,12,18) φαίνεται να έχει αρκετά καλή ταξινόμηση και για αυτό επιλέγεται και για περαιτέρω μελέτη (Εικ. 6-7).



Εικόνα 6-7: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για τον συνδυασμό καναλιών 6,12,18 στις εργαστηριακές λήψεις

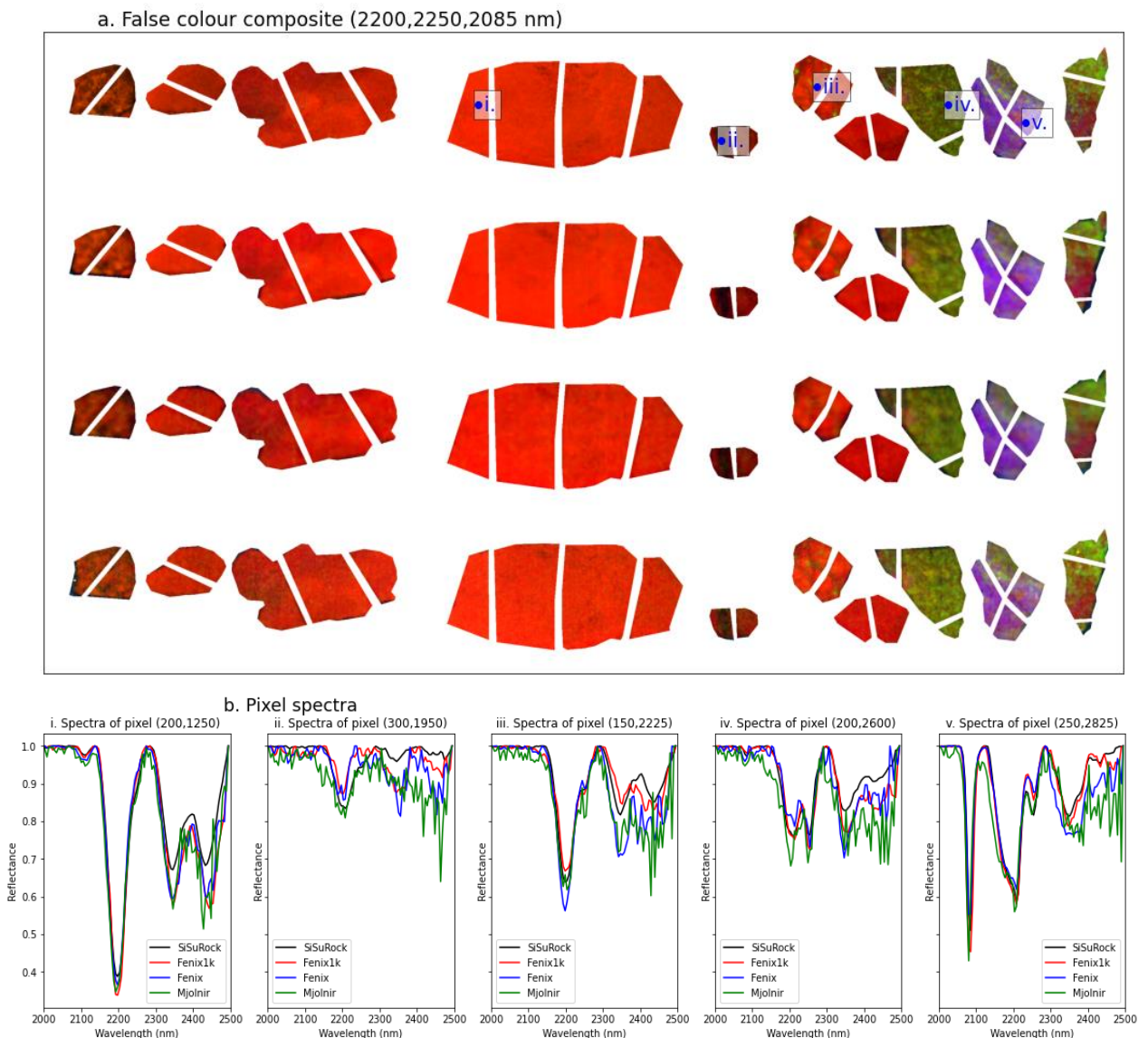
Σε (Luo et al. 2016) αναφέρεται πως τα πειράματα καταδεικνύουν ότι οι μέθοδοι που βασίζονται στην MNF επιτυγχάνουν υψηλότερο λόγο σήματος προς θόρυβο από τις μεθόδους που βασίζονται στην PCA για θόρυβο εξαρτώμενο από το σήμα. Δεδομένου ότι στις υπόγειες λήψεις είναι γνωστό πως η μέθοδος MNF έχει καλύτερα αποτελέσματα, επιλέγεται για τις περαιτέρω επεξεργασίες των υπόγειων λήψεων.

## 6.2.2. Μεθοδολογίες ταξινόμησης

### 6.2.2.1. Στοιχεία απορροφήσεων

Αρχικά εφαρμόζεται φίλτρο προς την δημιουργία απεικόνισης ψευδοχρώματος στα μήκη κύματος (2200 nm, 2250 nm, 2085 nm). Τα συγκεκριμένα μήκη κύματος επιλέγονται καθώς εκεί εντοπίζονται οι απορροφήσεις των στοιχείων που μας ενδιαφέρουν.

Στο μωσαϊκό επίσης εφαρμόζεται η διόρθωση *hull correction* η οποία σκοπό έχει να τονίσει περισσότερο τα στοιχεία που εισάγουμε στον κώδικα.



Εικόνα 6-8: Διάγραμμα με α. ψευδο-χρωματική εικόνα των εργαστηριακών λήψεων από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir) και β. συγκριτική απεικόνιση των φασματικών υπογραφών 5 τυχαίων σημείων για το φασματικό εύρος 2000 nm – 2500 nm



Από το σύνθετο διάγραμμα της Εικ. 6-8 μπορούν να εξαχθούν δύο συμπεράσματα:

1) Όσον αφορά το διάγραμμα ψευδοχρώματος *a.* τα χαρτογραφούμενα χαρακτηριστικά που μας ενδιαφέρουν είναι αντιληπτά σε όλες τις περιπτώσεις, ανεξαρτήτως από την χωρική και φασματική ανάλυση των αισθητήρων. Έτσι, στην εφαρμογή μπορούμε να ισχυριστούμε ότι, δεν έχει ιδιαίτερη αλλαγή η ικανότητα διαφοροποίησης των ορυκτών από αισθητήρα σε αισθητήρα, τουλάχιστον για τους αισθητήρες που εξετάστηκαν στο πλαίσιο αυτής της εργασίας.

2) Όσον αφορά το διάγραμμα *b.* της Εικ.6-8 στο οποίο γίνεται εξαγωγή των φασμάτων κάποιων συγκεκριμένων ρίξει και η ανακλαστικότητα που ο κάθε αισθητήρας λαμβάνει είναι της ίδιας τάξης, ωστόσο η μεγάλη διαφορά είναι ο θόρυβος που ο κάθε αισθητήρας προβάλλει. Συγκεκριμένα στα αποτελέσματα του αισθητήρα *Mjolnir* ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι αρκετά χαμηλός σε σχέση με των άλλων αισθητήρων. Αυτό είναι αναμενόμενο λόγω του μικρού του μεγέθους, όπου ο θόρυβος δεν προλαβαίνει να παραμεριστεί.



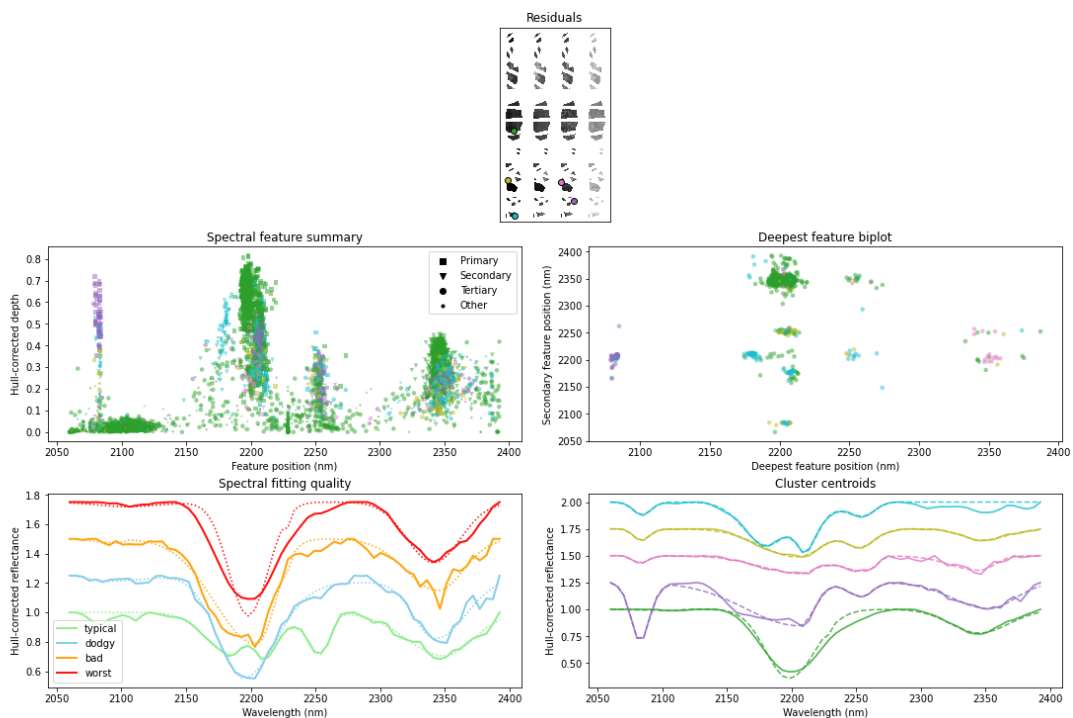
Εικόνα 6-9: Απεικόνιση με ψευδο-χρωματική εικόνα για απορροφήσεις στα 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) αντίστοιχα για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir)

Στην παραπάνω εικόνα αποτυπώνονται με τα τρία χρώματα: κόκκινο R (Red), πράσινο G (Green) και μπλε B (Blue) τα σημεία στα οποία παρατηρούνται απορροφήσεις αντίστοιχα στα 2085nm, 2200nm και 2250nm.

Δεν εντοπίζονται άλλα χαρακτηριστικά σε σχέση με την Εικ. 6-9 και η διαφορά είναι καθαρά αισθητική. Ωστόσο, φαίνεται πως χωρικά δεν παρέχει σαφείς και λεπτομερείς πληροφορίες ως προς τον διαχωρισμό των σημείων με τις απορροφήσεις τους. Επιπλέον, ενώ σε μεγάλη κλίμακα γίνεται ένας υποτυπώδης χαρακτηρισμός των ορυκτών, δεν φαίνεται η συγκεκριμένη μέθοδος να έχει τη δυνατότητα να εντοπίσει σε μικρή κλίμακα (για την οποία πρόκειται και το συγκεκριμένο μωσαϊκό) τις συγκεντρώσεις των ορυκτών με ιδιαίτερη επιτυχία.

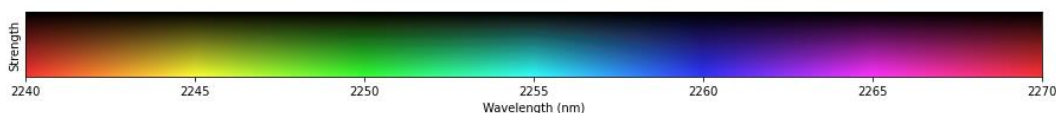
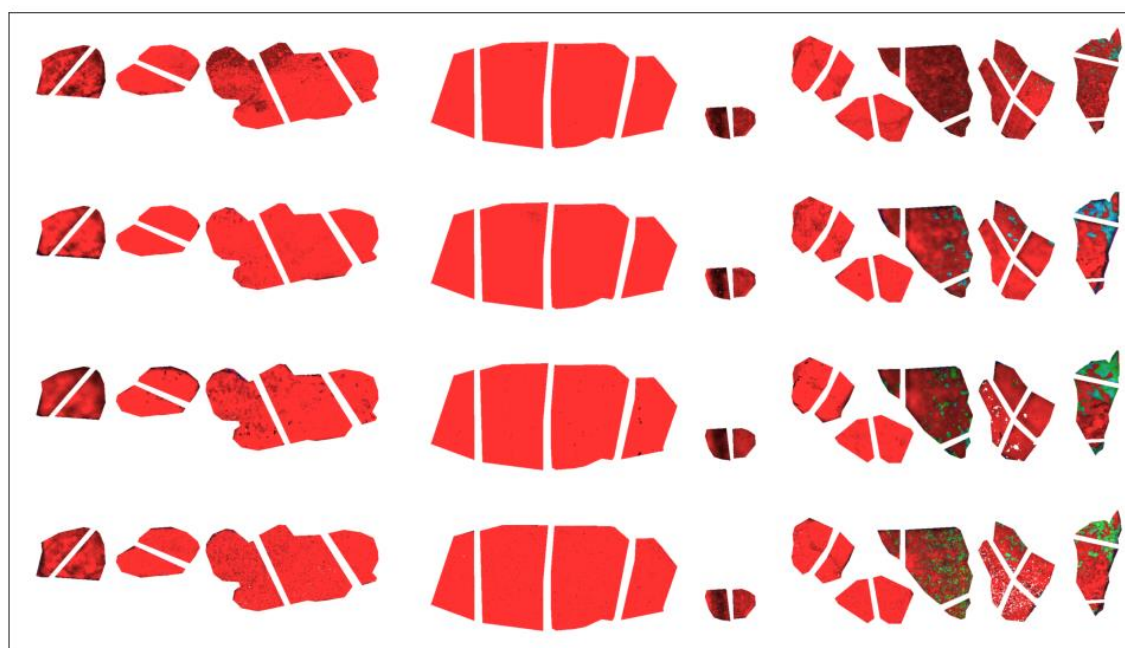
#### 6.2.2.2. MWL

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής ελάχιστων μηκών κύματος παρουσιάζονται παρακάτω αλλά και στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.



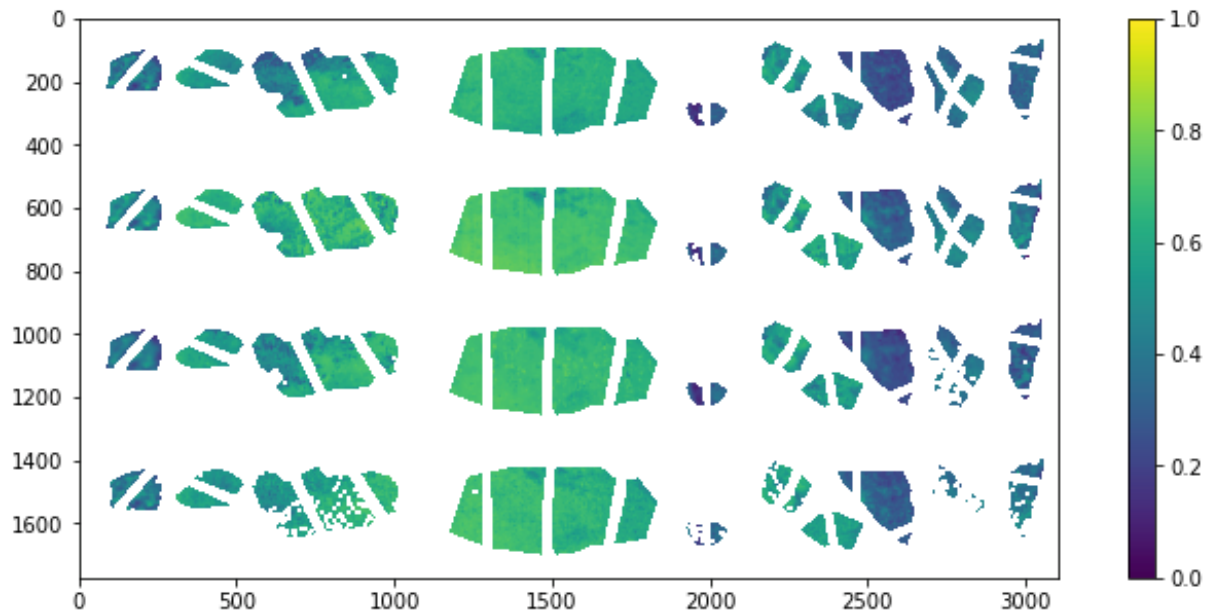
Εικόνα 6-10: Ενδεδλεχής γραφική αναπαράσταση διαφόρων παραμέτρων στα πλαίσια του MWL Spectral Feature Summary για το φασματικό εύρος 2050 nm – 2400 nm εφαρμοσμένο στις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolinir)

Φαίνονται ξεκάθαρα κάποια χαρακτηριστικά απορρόφησης όπως για παράδειγμα στα 2200 nm, 2250 nm και 2350 nm. Μάλιστα παρότι στα 2200 nm εμφανίζονται οι περισσότερες απορροφήσεις, γίνεται ανίχνευση απορροφητικών στοιχείων στα 2250 nm. Τα endmember που έχουν επιλεχθεί από το πρόγραμμα βρίσκονται στα ορυκτά της δεξιάς πλευράς, κάτι που επαληθεύεται και τα προηγούμενα αποτελέσματα στα Κεφ. 6.2.1., 6.2.2.



Εικόνα 6-11: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2190 nm - 2300 nm (με χαρτογράφηση 2240 nm - 2270 nm) για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir)

Το λίθιο χαρτογραφείται με χρώμα πράσινο, όπως υποδεικνύεται και από την κλίμακα, στα πετρώματα της δεξιάς πλευράς (Εικ. 6-11). Ωστόσο, φαίνεται δύσκολο να διακριθούν στα υπόλοιπα πετρώματα, πιθανώς λόγω της μικρής συγκέντρωσης ή και απουσίας λιθίου.



Εικόνα 6-12: Απεικόνιση θέσης και βάθους φασματικών ανακλάσεων (MWL) γύρω από τα 2252 nm για φασματικό εύρος 2190 nm - 2270 nm για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir)

Η Εικ. 6-12, δεν φαίνεται να παρουσιάζει ενδιαφέροντα στοιχεία, διότι στην απεικόνιση δεν υπάρχουν ευδιάκριτα στοιχεία.

### 6.3. Αποτελέσματα λήψεων πεδίου

Λόγω του μεγάλου αριθμού λήψεων για τις ίδιες σκηνές, ακολουθείται μία διαδικασία για να αποκτηθεί μία υπερφασματική απεικόνιση για κάθε σκηνή, η οποία με αλγόριθμο έχει προκύψει από τον μέσο όρο όλων των λήψεων. Η σύμπτυξη αυτή εκτελείται από μέλος της ομάδας και λαμβάνουμε συνολικά 1 αρχείο για κάθε υπόγεια λήψη.

Αυτές οι λήψεις, δεδομένου του ότι εμπεριέχουν σημεία τα οποία μπορεί να παραμορφώσουν τα αποτελέσματα, όπως καλώδια είτε άλλα αντικείμενα, του εφαρμόζεται «μάσκα» και τα σημεία που μπορεί να επηρεάσουν την επεξεργασία της εικόνας απομακρύνονται. Επίσης, αποσύρονται από την εικόνα και η οροφή με το δάπεδο καθώς δεν είναι κομμάτι της περιοχής που θέλουμε να επεξεργαστούμε.

Στην συνέχεια, οι απεικονίσεις αυτές είναι έτοιμες να επιδεχτούν την επεξεργασία που απαιτείται ώστε να ελεγχθεί η αποδοτικότητα ανίχνευσης των επιλεγμένων ορυκτών σε υπόγειες συνθήκες.

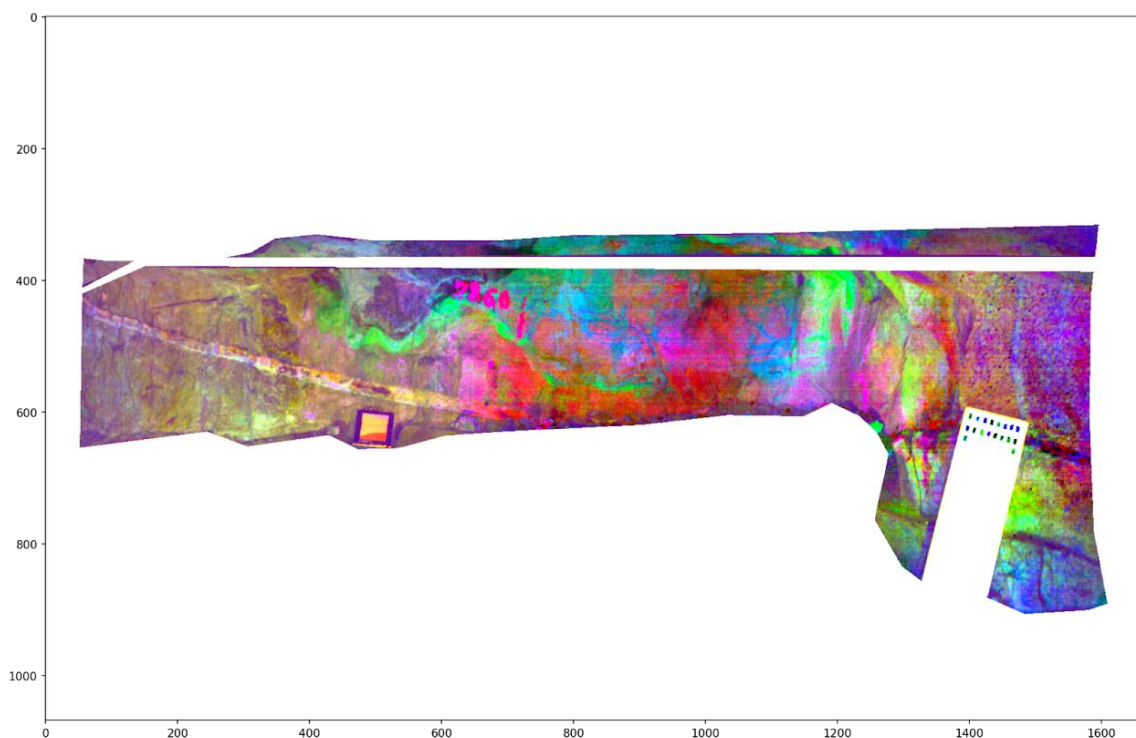
### 6.3.1. Τεχνικές μείωσης διάστασης υπερφασματικών απεικονίσεων υπόγειων λήψεων

Τα αποτελέσματα για την μέθοδο PCA δεν είναι ιδιαίτερα ενδιαφέροντα στην εφαρμογή της στην υπόγεια λήψη (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι), ούτε εμφανίζουν μεγάλη διαφοροποίηση στην εικόνα ώστε να δηλώνεται η αλλαγή σύστασης των ορυκτών, όπως και είναι αναμενόμενο.

Έτσι, καταλήγουμε πως δεν υπάρχει λόγος να χρησιμοποιηθεί για τις υπόγειες λήψεις, καθώς ο θόρυβος αλλοιώνει σημαντικά τα χαρακτηριστικά που θέλουμε να απεικονιστούν.

Επιβεβαιωτικά, βλέπουμε πως και στις υπόγειες λήψεις η μέθοδος MNF έχει πολύ καλύτερη απόδοση ως προς τα αποτελέσματα σε σχέση με την μέθοδο PCA, όπως μάλιστα αναμένεται.

Αντίστοιχα ο συνδυασμός καναλιών (6,12,18) φέρει τα αποτελέσματα, τα οποία είναι αρκετά ικανοποιητικά :



Εικόνα 6-13: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για τον συνδυασμό καναλιών 6,12,18 στην Υπόγεια Λήψη Α

Ωστόσο, είναι αρκετά δύσκολο να συσχετιστούν τα αποτελέσματα αυτά με τα υπόλοιπα από τις άλλες μεθόδους ταξινόμησης, για να ερμηνευτούν. Έτσι, ούτε η μέθοδος MNF, μπορεί να θεωρηθεί ένα εργαλείο το οποίο απαντά στο αρχικό ζήτημα της έρευνας.

### 6.3.2. Στοιχεία απορροφήσεων

Η μέθοδος των Απορροφήσεων εφαρμόζεται και στις υπόγειες λήψεις. Συνολικά παράγονται 12 εικόνες, ουσιαστικά 4 για κάθε υπόγεια λήψη. Αυτό διότι αρχικά δοκιμάζονται δύο συνδυασμοί χαρτογράφησης των απορροφήσεων α. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) και β. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B), και επίσης σε κάθε συνδυασμό αντιστοιχούν 2 εικόνες μία για  $v_{min}=2$ ,  $v_{max}=98$  και μία για  $v_{min}=0$ ,  $v_{max}=75$ . Αυτό, για να διαπιστωθεί εάν έχει κάποια αλλαγή στην φωτεινότητα της εικόνας, με σκοπό να είναι πιο ευδιάκριτα τα χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται είναι:



Εικόνα 6-14: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα a. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη Α με  $v_{min}=2$ ,  $v_{max}=98$



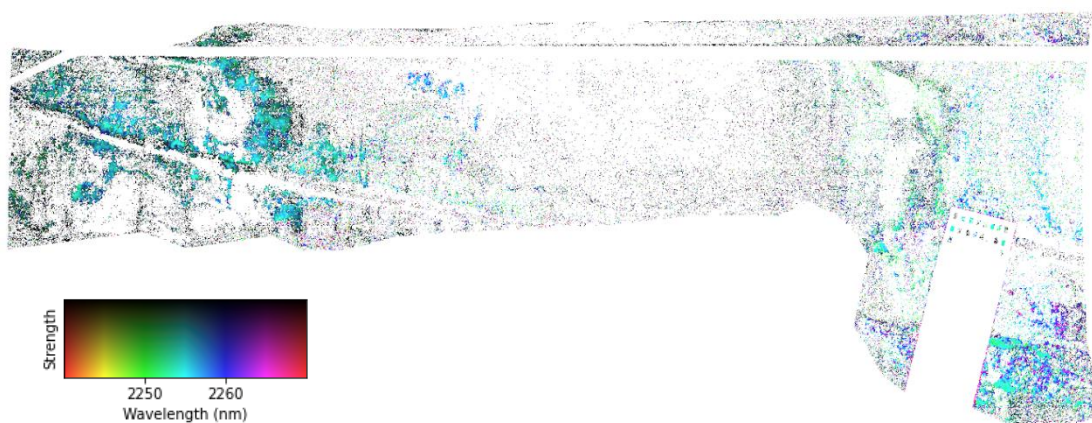
Εικόνα 6-15: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα α. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη Α με  $v_{min}=0$ ,  $v_{max}=75$



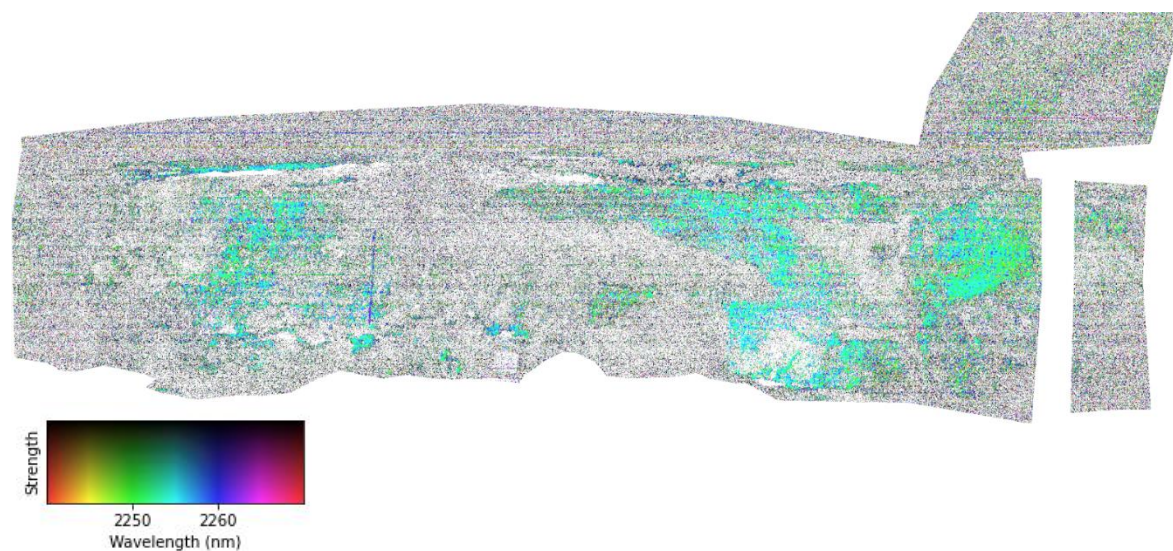
Φαίνεται πως ενώ για την υπόγεια λήψη A υπάρχει σημαντική βελτίωση στην απεικόνιση, για τις υπόλοιπες υπόγειες λήψεις δεν ισχύει το ίδιο (βλ. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I). Επίσης βλέπουμε πως οι φασματικοί συνδυασμοί που εφαρμόζονται δεν αλλάζουν τα αποτελέσματα.

### 6.3.3. MWL

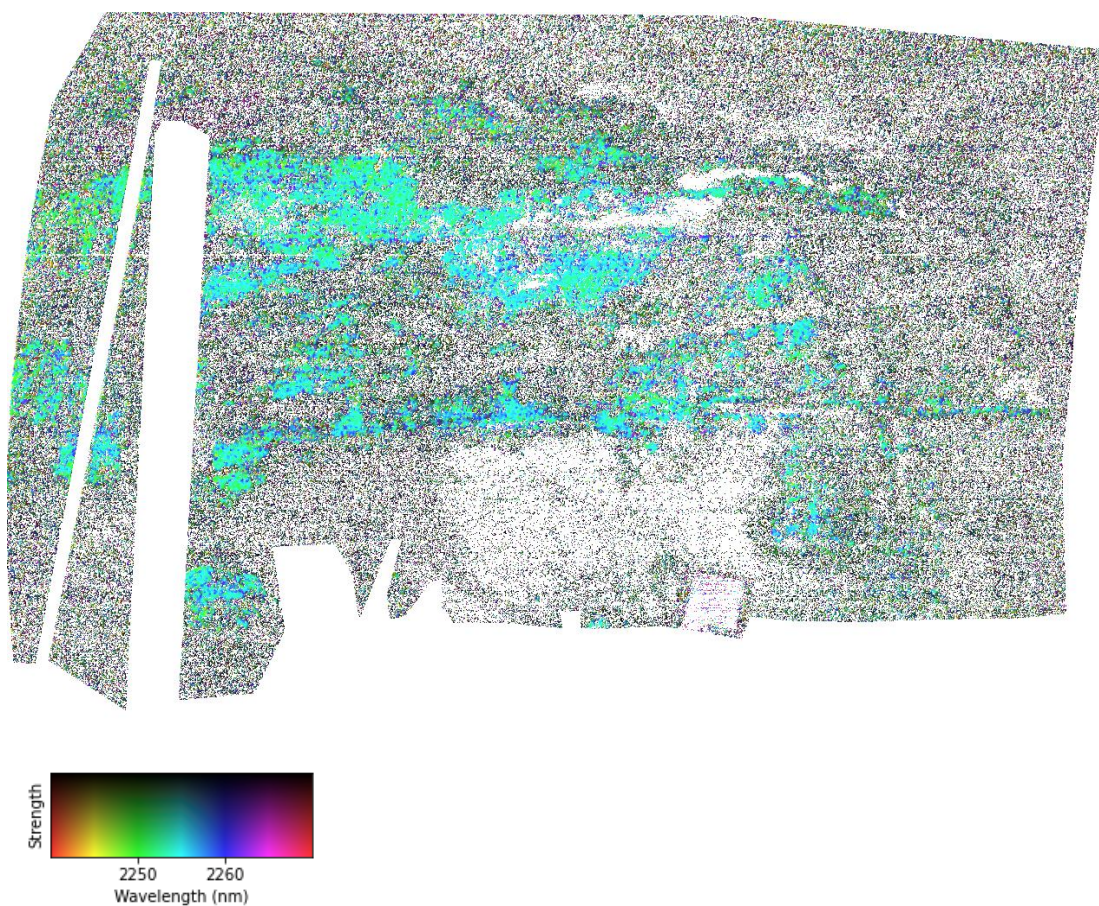
Τέλος, εφαρμόζεται η μέθοδος των ελάχιστων μηκών κύματος (MWL) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο, αλλά και στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I.



Εικόνα 6-16: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2050 nm - 2060 nm (με χαρτογράφηση 2240 nm - 2270 nm) για την Υπόγεια Λήψη A



Εικόνα 6-17: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2050 nm - 2060 nm (με χαρτογράφηση 2240 nm - 2270 nm) για την Υπόγεια Λήψη Β



Εικόνα 6-18: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2050 nm - 2060 nm (με χαρτογράφηση 2240 nm - 2270 nm) για την Υπόγεια Λήψη C

Καθώς είναι μία πολύ στοχευμένη μέθοδος στο τι θα χαρτογραφηθεί, φαίνεται πως όλα τα χαρακτηριστικά τα οποία ζητούνται, απεικονίζονται με επιτυχία. Άλλα περισσότερο και άλλα λιγότερο, λόγω της κυριαρχίας ή της σπανιότητας, ωστόσο εφαρμόζεται χωρίς πρόβλημα για όλα τα ορυκτά.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Συμπεράσματα και προοπτικές

Στην εργασία μελετήθηκε η εφαρμογή της υπερφασματικής τηλεπισκόπησης ορυκτών με επίγεια μέσα, σε υπόγειο χώρο παλαιού ορυχείου. Η έρευνα αποσκοπούσε αρχικά στην διερεύνηση των συνθηκών υλοποίησή της υπό συγκεκριμένες συνθήκες και τις επιπτώσεις, στην αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων και τέλος στην εγκυρότητα τους. Η έρευνα χωρίστηκε σε 4 μέρη: την εργαστηριακή προεργασία και καθορισμό των μέσων για τα οποία οι μετρήσεις θα ήταν βέλτιστες, τις εργαστηριακές μετρήσεις, την μέτρηση στο πεδίο και εν συνεχεία το στάδιο της ανάλυσης των δεδομένων, όπου ανήκει η προ-επεξεργασία των εικόνων, η επεξεργασία τους, τα τελικά αποτελέσματα και η ερμηνεία τους. Καθ' όλη την διάρκεια των προαναφερθέντων σταδίων, ακολουθείτο μία κοινή γραμμή όσον αφορά τις δύο μετρήσεις και την ανάλυση των δεδομένων, ώστε η σύγκριση και η τελική ερμηνεία να έχουν ακεραιότητα και υπόσταση. Το κομμάτι της ανάλυσης διενεργήθηκε σχεδόν εξ' ολοκλήρου με το υπολογιστικό εργαλείο *hylite*, το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για την ανάλυση υπερφασματικών δεδομένων και εφαρμόζει πάνω στους αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν.

Αρχικά, να αναφερθεί ξανά πως τα αποτελέσματα σκοπό έχουν να απαντήσουν σε:

- i. Καταλληλότητα αισθητήρων για την υπόγεια λήψη (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir)
- ii. Καταλληλότητα μεθόδων επεξεργασίας για την ανίχνευση των ορυκτών
- iii. Καταλληλότητα συνθηκών για βέλτιστες μετρήσεις

Έτσι, μετά από πολλές δοκιμές μεθόδων, μέσων, αισθητήρων και πολλές ακόμα προσπάθειες, μπορούμε να αποφανθούμε πως η υπερφασματική μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία σε υπόγειες συνθήκες για την χαρτογράφηση ορυκτών.

Ένας αριθμός λαμπών αλογόνου μαζί με έναν προβολέα είναι ικανά να προσδώσουν αρκετή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε έναν χώρο χωρίς φως και να είναι τα χαρακτηριστικά απορρόφησης έντονα και διαφορετικά ώστε να

ανιχνευθούν. Στην έρευνα που διενεργήσαμε, η διάταξη με 3 λαμπτήρες αλογόνου ισχύος 500W και έναν θεατρικό προβολέα με αμφιθεατρική διάταξη κρίνεται επαρκής και δεν διακρίνεται ιδιαίτερη διαφορά κατά την αλλαγή της θέσης του προβολέα. Η υγρασία τροποποιεί με αναμενόμενο τρόπο τα αποτελέσματα. Τέλος, η απόσταση μεταξύ των λαμπτήρων και της επιφάνειας μέτρησης κατά τις υπόγειες λήψεις ήταν μεγαλύτερη από τις εργαστηριακές μετρήσεις λόγω της ιδιομορφίας της υπόγειας στοάς.

Ως προς την σύγκριση των αισθητήρων, όπως αναλύθηκε και παραπάνω, όλοι οι αισθητήρες καταφέρνουν να αποτυπώσουν με σχετικά καλή ανάλυση την ανίχνευση των ζητούμενων ορυκτών, ωστόσο αυτός που ξεχωρίζει ως προς τον βέλτιστο συνδυασμό είναι ο αισθητήρας Fenix, για τις Υπόγειες Λήψεις πεδίου.

Τέλος, βλέπουμε πως οι συνδυασμοί των μεθόδων *χαρτογράφησης απορροφητικών στοιχείων* και *MWL*, καταφέρνουν με αρκετή εγκυρότητα να ανιχνεύσουν και να χαρτογραφήσουν τα ζητούμενα ορυκτά, εφόσον βέβαια υπόκεινται στα κατάλληλα στάδια προ-επεξεργασίας.

Όπως αναλύθηκε από την αρχή, η πρότερη γνώση των φασματικών απορροφήσεων και γενικότερα της φασματικής απόκρισης των ορυκτών είναι ενδεχομένως η πιο βασική τομή στην περάτωση αυτής της μεθοδολογίας και στην τρόπο επεξεργασίας των δεδομένων που ακολουθείται.

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που μπορούν να εφαρμοστούν στα πλαίσια της επεξεργασίας των δεδομένων ύστερα από την προ-επεξεργασία και μέρος αυτών επιλέχθηκε να εφαρμοστεί στην εργασία. Μπορούν να αφορούν την μείωση διάστασης των δεδομένων (HIS), την ταξινόμηση, επιβλεπόμενη ή μη, των δεδομένων και την επιλεκτική χαρτογράφηση.

Στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω, εφαρμόστηκαν συγκριτικά, με τις ίδιες παραμέτρους, σε δύο διαφορετικές λήψεις, σε μία υψηλής ακρίβειας εργαστηριακή σάρωση από τον αισθητήρα SiSuROCK και στην Υπόγεια Λήψη Α, η οποία αφορά μία επιφάνεια του υπόγειου μεταλλείου. Στα πλαίσια της αναζήτησης της πιο αποτελεσματικής μεθόδου για τις συνθήκες που επικρατούν, έλαβαν χώρα αρκετές επεξεργασίες δεδομένων. Συνοπτικά, μπορούμε να πούμε,

ότι τα αποτελέσματα των μεθόδων που φαίνεται να έχουν καλύτερη απόδοση, που συμφωνούν με τα γνωστά στοιχεία του πεδίου έρευνας και που προτείνονται για την επίλυση του ερωτήματος που έχει τεθεί από την αρχή, είναι η *χαρτογράφηση ελαχίστου μήκους κύματος (MWL)* και η *χαρτογράφηση των απορροφητικών στοιχείων (Absorbance features)*. Σε δεύτερο επίπεδο, μπορεί να εξεταστεί και η συσχέτιση των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα από την μέθοδο MNF για τις υπόγειες λήψεις, αλλά και για το μωσαϊκό σύγκρισης των αισθητήρων.

Οι συγκεκριμένες μέθοδοι καταγράφουν με αρκετή επιτυχία σε σχέση με τις υπόλοιπες την διαφοροποίηση της ανακλαστικότητας του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος που εφαρμόζεται στις λήψεις του αισθητήρα SiSuROCK, αλλά και στην υπόγεια λήψη του ορυχείου, και μάλιστα με αρκετά παρόμοια αποτελέσματα. Γι'αυτό και επιλέγονται οι δύο αυτές μέθοδοι για την χαρτογράφηση των τελικών δεδομένων και την διεξαγωγή των συμπερασμάτων.

Στο μωσαϊκό που παρατίθενται οι λήψεις Εικ. 6-5 των διαφορετικών αισθητήρων συνολικά, επιλέγεται να εφαρμοστούν οι ίδιες μέθοδοι, δηλαδή *MWL*, η *χαρτογράφηση των χαρακτηριστικών απορρόφησης (absorbance features)* και *MNF*. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, διακρίνονται ορισμένες διαφορές σε σχέση με τις χωρικές και φασματικές αναλύσεις των αισθητήρων, ωστόσο για τους σκοπούς που τους χρειαζόμαστε, το τελικό αποτέλεσμα δεν διαφοροποιείται ιδιαίτερα. Παρότι ο αισθητήρας Mjolnir έχει αρκετά καλή επίδοση ως προς την χωρική ανάλυση, η φασματική ανάλυση παρουσιάζει μεγάλους θορύβους. Έτσι, για την αναγνώριση και την χαρτογράφηση των ορυκτών οι φορητοί αισθητήρες Fenix και Fenix 1K μπορούν να διατελέσουν ικανοποιητικά την αποστολή τους. Ύστερα, όσον αφορά τα χαρακτηριστικά απορρόφησης, όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η διακριτική ικανότητα δεν είναι ιδιαίτερα επιτυχής στην μικρή κλίμακα που ερευνάται. Στην συνέχεια, κατά την επεξεργασία του μωσαϊκού με την μέθοδο *MWL*, φαίνεται ότι ενώ για ορισμένα φασματικά εύρη παρατηρούνται αρκετές ανιχνεύσεις ορυκτών, για άλλα υπάρχει πιο μικρή διαφοροποίηση. Συγκεκριμένα, στο εύρος 2180 nm - 2240 nm διακρίνονται διαφορετικές ορυκτολογικές συστάσεις και στα 3 Δείγματα (και

κυρίως στους αισθητήρες Fenix, Mjolnir) ενώ στα υπόλοιπα εύρη οι διαφοροποιήσεις εστιάζουν κυρίως στα Δείγματα 1 και 3, κάτι που βέβαια μπορεί να εξηγηθεί εφόσον συνδυαστεί η ορυκτολογική γνώση με τις φασματικές ιδιότητες του κάθε πετρώματος. Παρόλαυτα, φαίνεται ότι το ορυκτό ζιννβαλδίτης, χαρτογραφείται επιτυχώς και ευκρινώς σε σχέση με τα υπόλοιπα ορυκτά, γύρω από την φασματική απορρόφηση 2250 nm.

Όσον αφορά τις Υπόγειες Λήψεις, που είναι ίσως ο βασικότερος πυλώνας της εργασίας, η μέθοδος *MWL* και τα *χαρακτηριστικά απορρόφησης* καταφέρνουν να ανιχνεύσουν και να προσδιορίσουν την θέση σε επιφάνειες μεγάλης κλίμακας, όπως των υπόγειων στοών, με αρκετή επιτυχία. Η μέθοδος *MNF*, παρότι με τα φασματικά κανάλια που έχουν επιλεχθεί, παρατηρείται μία πληθώρα διαφορετικών φασματικών και άρα ορυκτολογικών χαρακτηριστικών, στην συνέχεια δεν μπορεί να επαληθευτεί με τις άλλες δύο μεθόδους. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί καθώς πρόκειται για μία μη επιβλεπόμενη μέθοδο ταξινόμησης, η οποία στην ουσία ομαδοποιεί τα δεδομένα με έναν συγκεκριμένο τρόπο, στον οποίο ωστόσο ο χρήστης δεν μπορεί θέσει κάποιου είδους φίλτρο. Έτσι ενδεχομένως να χαρτογραφούνται περισσότερα χαρακτηριστικά από τις άλλες μεθόδους, ωστόσο δεν δίνεται κάποιος χαρακτηρισμός ως προς αυτά τα χαρακτηριστικά. Η μέθοδος των *χαρακτηριστικών απορρόφησης*, από την μία εμφανίζει αρκετή συσκότιση και στις 3 Υπόγειες Λήψεις (κυρίως στην 2<sup>η</sup> και 3<sup>η</sup>), και άρα δυσχαιρένεται η ικανότητα εντοπισμού απορροφητικών χαρακτηριστικών για τον εντοπισμό των ορυκτών και από την άλλη δίνεται μία μεγαλύτερη εικόνα για τις συγκεντρώσεις αλλά σε πιο μικροσκελές επίπεδο δεν καθίσταται εφικτός αυτός ο εντοπισμός των χαρακτηριστικών. Έτσι, εντοπίζονται οι κυρίαρχες συγκεντρώσεις των ορυκτών μοσχοβίτη και τοπάζιου, στις Υπόγειες Λήψεις 2 και 3, ωστόσο άλλα χαρακτηριστικά δεν διακρίνονται με ευκολία. Στην υπόγεια Λήψη 1, είναι ελαφρώς πιο εύκολο, λόγω μεγαλύτερης φωτεινότητας της εικόνας, να διακριθούν και διασπορές ζιννβαλδίτη. Για αυτούς του λόγους, επιλέγεται η επανάληψη της μεθόδου, αυτή τη φορά με  $v_{min}=0$ ,  $v_{max}=75$ , με σκοπό να αυξηθεί η φωτεινότητα. Οι αλλαγές είναι θετικές καθώς οι χαρτογραφήσεις των ορυκτών είναι αρκετά πιο ευδιάκριτες σε σχέση με πριν

κυρίως στην Υπόγεια Λήψη 1. Με την *MWL*, τα αποτελέσματα είναι αρκετά πιο εύκολο να ερμηνευτούν αλλά και να εντοπιστούν, χαρακτηρίζοντας με μεγάλη ακρίβεια το σημείο αλλά και το φασματικό χαρακτηριστικό που θέλουμε να εντοπιστεί. Έτσι η χαρτογράφηση είναι απόλυτα επιτυχής στην περίπτωση που ζητείται η εστιασμένη ανίχνευση σε ένα ή λίγα χαρακτηριστικά, ωστόσο το γεγονός ότι γίνεται τόσο ειδική και μόνο για ορισμένα φασματικά χαρακτηριστικά κάθε φορά, κάνει αδύνατη μία πιο γενική άποψη ως προς την συνύπαρξη πολλών χαρακτηριστικών. Με αυτόν τον τρόπο, εστιάζεται κάθε φορά η προσοχή στον εντοπισμό ενός ορυκτού και άρα ενός φασματικού χαρακτηριστικού.

Φυσικά, τα αποτελέσματα που μας δίνονται θα ήταν χρήσιμο να τεθούν σε περαιτέρω επεξεργασία προς επιβεβαίωση των πορισμάτων. Αυτή η διαδικασία λόγω χρονικού ορίου της έρευνας, δεν ολοκληρώθηκε και έτσι δεν υπάρχουν αναφορές στην εργασία.

Η μεθοδολογία που αναλύθηκε και εξετάστηκε για τις υπερφασματικές απεικονίσεις του ορυχείου, μπορεί να ληφθεί ως βάση για μελλοντικές αντίστοιχες έρευνες. Την ίδια στιγμή, αποτελεί μέρος της αυτόματης γεωλογικής χαρτογράφησης, το οποίο σε συνδυασμό με τις εξελίξεις της ρομποτικής, και με μία διαφορετική διάταξη, είναι κομμάτι της αυτοματοποιημένης εξόρυξης σε υπόγεια μεταλλεία. Ήδη γίνονται προσπάθειες για ενσωμάτωση τεχνικών τηλεπισκόπησης σε τηλεχειριζόμενα μηχανήματα που προορίζονται για την εξορυκτική βιομηχανία. Η συγκεκριμένη απεικονιστική μέθοδος, όπως τονίζεται στην εργασία, έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Έτσι, εφόσον πληρωθούν οι προαπαιτούμενες τεχνικές προϋποθέσεις, είναι ζήτημα χρόνου να συνυπάρξει η υπερφασματική τηλεπισκόπηση με ανιχνευτικά και εξορυκτικά ρομπότ, εξυπηρετώντας τους σκοπούς της αυτοματοποιημένης εξόρυξης σε πραγματικό χρόνο.



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

### Ξένη βιβλιογραφία

- Agulló, J., 2022. White gold: the geopolitical emergence of lithium. *Latinoamerica21*, 2 May.
- Anifadi, A., Sykioti, O. & Vassilakis, E., 2019. Detection of chromite minerals using Spectral Linear Unmixing on Sentinel-2 imagery. Case study: Ingessana Hills, Blue Nile Province, Sudan. *15th International Congress of the Geological Society of Greece, 22-24 May 2019*.
- ESA., 2014. *ESA eduspace*. [Online]  
Available at: [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_EN/SEMF9R3Z2OF\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN/SEMF9R3Z2OF_0.html)
- Wikipedia., 2022.[Online]  
Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/CloudCompare>
- NASA, 2022. *EARTH DATA*. [Online]  
Available at: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>
- OsGeo, 2022. *OsGeo*. [Online]  
Available at: <https://www.osgeo.org/projects/qgis/>
- L3HARRIS, 2022. *Software & Technology*. [Online]  
Available at: [https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI?gclid=Cj0KCQjw8uOWBhDXARIsAOxKJ2GnMfsw6kMzoc\\_quivcL271F-DpMP8Qjj152ifGia1XNHnc6arMDI0aApLpEALw\\_wcB](https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI?gclid=Cj0KCQjw8uOWBhDXARIsAOxKJ2GnMfsw6kMzoc_quivcL271F-DpMP8Qjj152ifGia1XNHnc6arMDI0aApLpEALw_wcB)
- Ayma Quirita, V. A., Ostwald Pedro da Costa, G. A. & Beltran, C., 2022. A Distributed N-FINDR Cloud Computing-Based Solution for the Endmembers Extraction on Large-Scale Hyperspectral Remote Sensing Data. *MDPI Remote Sensing*, 14 (9), pp. 1-22.
- Barton, I. F. et al., 2021. Extending geometallurgy to the mine scale with hyperspectral imaging: a pilot study using drone- and ground-based scanning. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38, pp. 799-818.

Berman, M., Phatak, A. & Traylen, A., 2012. Some Invariance Properties of the Minimum Noise Fraction Transform. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 117, pp. 189-199.

Bioucas-Dias, J. M. et al., 2013. Hyperspectral Remote Sensing Data Analysis and Future Challenges. *IEEE Geoscience and remote sensing magazine*, 1(2), pp. 6-36.

Boardman, J. W., 1994. Geometric Mixture Analysis of Imaging Spectrometry Data. *IEEE*, 41 (6), pp. 2369-2371.

A. Brosinsky, T. Kuester, S. Foerster, H. Kaufmann, K. Segl, L. Guanter (2019). Principles of imaging spectroscopy - Electromagnetic radiation and its interactions with earth surface materials, HYPERedu, EnMAP education initiative, August 2019, German Centre for Geosciences GFZ.

Buckley, S. J., Kurz, T. H., Howell, J. A. & Schneider, D., 2013. Terrestrial lidar and hyperspectral data fusion products for geological outcrop analysis. *Computers & Geosciences*, 54, pp. 249-258.

Campbell, J. B. & Wynne, R. H., 2011. Introduction to Remote Sensing, The Guilford Press, New York. 634 p.

Chang, C.-I., 2013. Hyperspectral Data Processing, John Wiley & Sons Inc., Maryland. 1135 p.

Chaudhry, F. et al., 2006. Pixel purity index-based algorithms for endmember extraction from hyperspectral imagery. *Transworld Research Network*, pp. 29-62.

Clark, R., 1999. Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy. In A.N. Rencz (Eds). *Manual of Remote Sensing* (3-58). John Wiley and Sons, New York.

Congalton, R. G. & Green, K., 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data, CRC Press, Boca Raton. 348 p.

Contreras Acosta, I. C., Khodadadzadeh, M. & Gloaguen, R., 2021. Resolution Enhancement for Drill-Core Hyperspectral for Drill-Core Hyperspectral Mineral Mapping. *MDPI Remote Sensing*, 13, pp. 1-21.

De La Rosa, R. et al., 2021. Mineral quantification at deposit scale using drill-core hyperspectral data: A case study in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 139, pp. 1-14.

De La Rosa, R., Tolosana-Delgado, R., Kirsch, M. & Gloaguen, R., 2022. Automated Multi-Scale and Multivariate Geological Logging from Drill-Core Hyperspectral Data. *MDPI Remote Sensing*, 14, pp. 1-23.

Dittrich, T., 2019. Technical Report on the Feasibility Study for the Zinnwald Lithium Project, Germany. Deutsche Lithium GmbH, Freiberg, 20 p.

Dittrich, T., Helbig, M. & Kuhn, K., 2020. The Zinnwald Lithium Project: Transferring legacy exploration data into new mineral resources. *European Geologist*, 49, pp. 12-18.

Dubey, A., 2018. *Towards Data Science*. [Online]  
Available at: <https://towardsdatascience.com/the-mathematics-behind-principal-component-analysis-fff2d7f4b643>

European Commission, 2020. *Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability*, European Commission, Brussels.

Fraser, S. J. et al., 2006. Mineralogical Face-Mapping Using Hyperspectral Scanning for Mine Mapping and Control. *International Mining Geology Conference, Darwin, 21 - 23 August 2006*, 227-232.

Gewali, U. B., Monteiro, S. T. & Saber, E., 2019. Machine learning based hyperspectral image analysis: A survey. *ArXiv*, *abs/1802.08701*.

Goetz, A. F. H., 2009. Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113, pp. 5-6.

Goetz, A. F. H., 2011. [Online]  
Available at:  
[https://www.photonics.com/Articles/Measuring\\_the\\_Earth\\_from\\_Above\\_30\\_years\\_and/a47298](https://www.photonics.com/Articles/Measuring_the_Earth_from_Above_30_years_and/a47298)

Green, A. A., Berman, M., Switzer, P. & Craig, M. D., 1988. A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implications for Noise. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 26, pp. 65-73.

Hecker, C. et al., 2019. Spectral Absorption Feature Analysis for Finding Ore. *IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING MAGAZINE*, Vol. 7, pp. 51-71.

Heincke, B. et al., 2019. Developing multi-sensor drones for geological mapping and mineral exploration: setup and first results from the MULSEDRO project. *GEUS Bulletin*, 43.

HySpex, 2022. *HySpex by neo*. [Online]  
Available at: <https://www.hyspex.com/hyspex-products/hyspex-mjolnir/hyspex-mjolnir-vs-620/>

IBM, E. C., 2020. *IBM Cloud Learn Hub*. [Online]  
Available at: <https://www.ibm.com/cloud/learn/supervised-learning>

Jackisch, R. et al., 2018. Drone-Borne Hyperspectral Monitoring of Acid Mine Drainage: An Example from the Sokolov Lignite District. *MDPI Remote Sensing*, 10, pp. 1-23.

Jolliffe, I. & Cadima, J., 2016. Principal component analysis: a review and recent developments. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 374, pp. 1-16..

Kanade, V., 2022. *Artificial Intelligence*. [Online]  
Available at: <https://www.spiceworks.com/tech/artificial-intelligence/articles/what-is-ml/>

Kazantzidis, A., Genzano, N. & Tramutoli, V., 2022. [PP1-3-5] *Spectral Signature of Mineral and Rocks*. [Online]  
Available at: <https://ltb.itc.utwente.nl/553/concept/102868>

Keller, S. et al., 2018. Modeling Subsurface Soil Moisture Based on Hyperspectral Data - First Results of a Multilateral Field Campaign. 38. *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF und PFGK18 Tagung, Munich, 7- 9 May 2018*, pp. 34-48.

Kerr, T. L. et al., 1994. RON: Geophysics and iron ore exploration: examples from the Jimblebar and Shay Gap-Yarrie regions, Western Australia. *Exploration Geophysics*, 25 (3), pp. 169-170.

Krupnik, D. & Khan, S., 2019. Close-range, ground-based hyperspectral imaging for mining applications at various scales: Review and case studies. *Earth-Science Reviews*, 198, pp. 1-34.

Kruse, F. A., Boardman, J. W. & Huntington, J. F., 2003. Comparison of Airborne Hyperspectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 41 (6), pp. 1388-1400.

Kurz, T. H., Buckey, S. J. & Howell, J. A., 2012. Close range hyperspectral imaging integrated with terrestrial lidar scanning applied to rock characterisation at centimetre scale. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Melbourne , Volume XXXIX-B5, pp. 417-422.

Kurz, T. H., Buckley, S. J. & Becker, J. K., 2017. Hyperspectral imaging: a novel geological mapping technique for subsurface construction sites. *World Tunnel Congress (WTC), Bergen, 9 -15 June 2017*, p. 10.

Laukamp, C. et al., 2018. *Mapping Mineral Footprints Through Cover Using Surface and Subsurface Mineralogy and Geochemistry. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia, Spain, 23-27 July 2018*, pp. 8352-8355.

Lekner, J. & Dorf, M. C., 1988. Why some things are darker when wet. *Applied Optics*, 27 (7), pp. 1279-1280.

Lobo, A. et al., 2021. Machine Learning for Mineral Identification and Ore Estimation from Hyperspectral Imagery in Tin–Tungsten Deposits: Simulation under Indoor Conditions. *MDPI remote sensing*, 13, 3258, pp. 1-18.

Lorenz, S. et al., 2018. Radiometric Correction and 3D Integration of Long-Range Ground-Based Hyperspectral Imagery for Mineral Exploration of Vertical Outcrops. *MDPI Remote Sensing*, 10 (176) pp. 1-23.

Lorenz, S. et al., 2022. Three-Dimensional, Km-Scale Hyperspectral Data of Hyperspectral Data of Well-Exposed Zn-Pb Mineralization at Black Angel Mountain, Greenland. *MDPI Data*, 7 (104), pp. 1-15.

Luo, G. et al., 2016. Minimum Noise Fraction versus Principal Component Analysis as a Preprocessing Step for Hyperspectral Imagery Denoising, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 42 (2), pp. 106-116.

Mamouch, Y. et al., 2022. Mapping of Hydrothermal Alteration Zones in the Kelâat M'Gouna Region Using Airborne Gamma-Ray Spectrometry and Remote Sensing Data: Mining Implications (Eastern Anti-Atlas, Morocco). *Applied Sciences MDPI*, 12 (957), pp. 1-19.

Manolakis, D., Lockwood, R. & Cooley, T., 2016. Hyperspectral Imaging & Remote Sensing: Physics, Sensors, and Algorithms, Cambridge University Press, Cambridge.

Merriam-Webster, 2022. *End-member*. [Online]  
Available at: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/end-member>

Muller, A., Herklotz, G. & Giegling, H., 2018. Chemistry of quartz related to the Zinnwald/Cínovec Sn-W-Li greisen-type deposit, Eastern Erzgebirge, Germany. *Journal of Geochemical Exploration*, Volume 190, pp. 357-373.

Murphy, K. P., 2012. Machine Learning: A probabilistic perspective, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.

Neßler, J., 2017. Geologischer Aufbau, Mineralogie, Geochemie und Geochronologie der Li-Sn-W-Greisenlagerstätte Zinnwald, Osterzgebirge, Deutschland, Department of Mineralogy, Technische Universität Freiberg, Freiberg.

Ortiz, J. D. et al., 2017. Intercomparison of Approaches to the Empirical Line Method for Vicarious Hyperspectral Reflectance Calibration. *Frontiers in marine science*, 4 (296), pp. 1-21.

Papachristos, C., Khattak, S. & Mascarich, F., 2019. Autonomous Navigation and Mapping in Underground Mines Using Aerial Robots. *2019 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1-8.

Pfizer, K. S., Harford, A. J., Whiteside, T. G. & Bartolo, R. E., 2018. Mapping magnesium sulfate salts from saline mine discharge with airborne hyperspectral data. *Science of the Total Environment*, Vol. 640-641, pp. 1259-1271.

Plaza, A. & Chang, C.-I., 2005. Fast Implementation of Pixel Purity Index Algorithm. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Bellingham*, Vol. 5806, pp. 307-317.

Pontual, S., Merry, N. & Gamson, P., 1997. Spectral Interpretation Field Manual, AusSpec International Pty. Ltd., Queenstown.

Portela, B. et al., 2021. Using hyperspectral imagery for identification of pyrophyllite-muscovite. *Ore Geology Reviews*, 131, pp. 1-14.

Rajesh, H., 2004. Application of remote sensing and GIS in mineral resource mapping - An overview. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, Vol. 99, pp. 83-103.

Ray, T. W., 1994. A FAQ on Vegetation in Remote Sensing, Div. of Geological and Planetary Sciences, California.

Renn, O. et al., 2022. Metal Sourcing For a Sustainable Future. *Earth Science, Systems and Society*, 2 (10049), pp. 1-13.

Roman, M., 2022. Open Pit Mining Pros & Cons. *Sciencing*, pp.1.

Sahu, H. B., Prakash, N. & Jayanthu, S., 2015. Underground Mining for Meeting Environmental Concerns – A Strategic Approach for Sustainable Mining in Future. *Procedia Earth and Planetary Science*, 11, pp. 232-241.

Schneider, A. et al., 2017. Lithium extraction from the mineral zinnwaldite: Part I: Effect of thermal treatment on properties and structure of zinnwaldite. *Minerals Engineering*, 111, pp. 55-67.

Sethy, P., Pandey, C., Sahu, Y. & Behera, S., 2022. Hyperspectral imagery applications for precision agriculture - a systemic survey. *Multimedia Tools and Applications*, Vol.81, pp. 3005-3028.

Siebels, K., Goite, K. & Germain, M., 2021. A semi-empirical approach to quantify and handle the effect of moisture on spectral unmixing. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 96, pp. 1-14.

Smith, R. B., 2012. *Introduction to Hyperspectral Imaging*. MicrolImages Inc.

Song, Z., Rinne, M. & van Wageningen, A., 2013. A review of real-time optimization in underground mining production. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, Vol. 113, pp. 889-897.

Specim, S. I. L., n.d. *Specim*. [Online]

Available at: <https://www.specim.fi/products/sisurock/>

Thiele, S. & Lorentz, S., 2022. *GitHub*. [Online]

Available at:

[https://github.com/samthiele/hylite\\_demo2/blob/master/06\\_band\\_ratio\\_and\\_MWL\\_mapping.ipynb](https://github.com/samthiele/hylite_demo2/blob/master/06_band_ratio_and_MWL_mapping.ipynb)

Thiele, S. T. et al., 2021. Mineralogical Mapping with Accurately Corrected Shortwave Infrared Hyperspectral Data Acquired Obliquely from UAVs. *MDPI Remote Sensing*, 14 (5), pp. 1-21.

Thiele, S. T. et al., 2021. Multi-scale, multi-sensor data integration for automated 3-D geological mapping. *Ore Geology Reviews*, 136, pp. 1-12.

Thiele, S. T., Lorenz, S., Kirsch, M. & Gloaguen, R., 2022. A Novel and Open-Source Illumination Correction for Hyperspectral Digital Outcrop Models. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, Vol. 60, pp. 1-12.

Thieren, C., 2018. *pysptools*. [Online]

Available at: <https://pysptools.sourceforge.io/example5.html>

Tichauer, R., Martins, A. C., Silva, R. S. & De Tomi, G., 2020. The role of geophysics in enhancing mine planning decision-making in small-scale mining. *Royal Society*, 7 (200384), pp. 1-19.



Tischendorf, G., Forster, H. J., Gottesmann, B. & Rieder, M., 2017. True and brittle micas: composition and solid-solution series. *Mineralogical Magazine*, Vol. 71, pp. 285-320.

Tsiropoulos, I., Tarvydas, D. & Lebedeva, N., 2018. Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications – Scenarios for costs and market growth, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2 p.

Vaiopoulos, A. D. & Nikolakopoulos, K. G., 2012. Comparison of the mineral mapping performance of three fusion techniques in Hyperion hyperspectral imagery. 4 th EARSeL Workshop on Remote Sensing and Geology, Mykonos, Greece, 24-25 May 2012, pp. 178-196.

van der Meer, F. D. et al., 2012. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14, pp. 112-118.

Vempati, A. S. et al., 2017. Onboard Real-time Dense Reconstruction of Large-scale Environments for UAV. *EEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 3479-3486.

Winter, M. E., 1999. N-FINDR: an algorithm for fast autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data. *SPIE Conference on Imaging Spectrometry V, Denver, Colorado*, pp. 266-275.

Xue, T., Wang, Y. & Deng, X., 2022. A Novel Method for Fast Kernel Minimum Noise Fraction. *MDPI Remote Sensing*, 14, 1737, pp. 1-22.

Yoon, J., 2022. Hyperspectral Imaging for Clinical Applications. *BioChip Journal*, 16, pp. 1-12.

### **Ελληνική βιβλιογραφία**

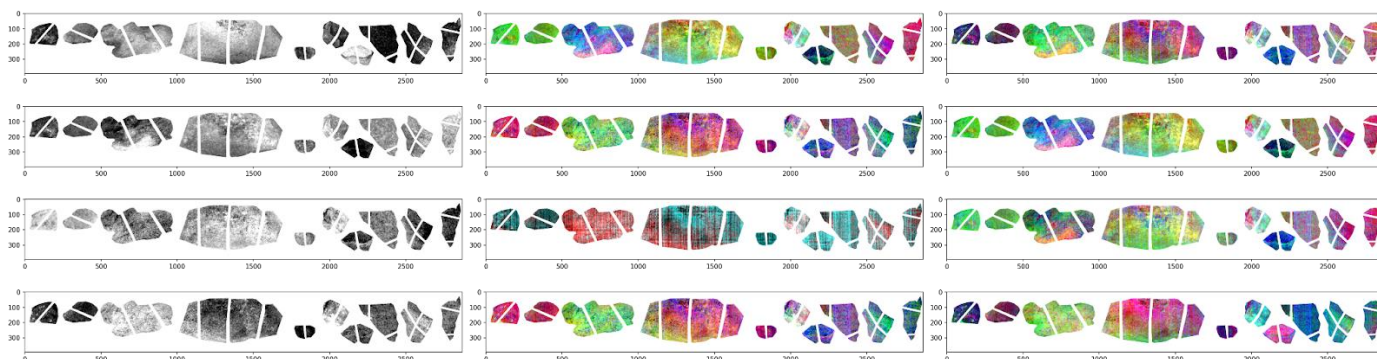
Αρχοντής, Γ. και συν., 2017. *Φυσική Α' Λυκείου*, Παιδαγωγικό Ινστιτούτο Κύπρου, Λευκωσία.

Μπαμπινιώτης, Γ., 2002. *Λεξικό της Νέας Ελληνικής Γλώσσας*, Κέντρο Λεξικολογίας, Αθήνα.

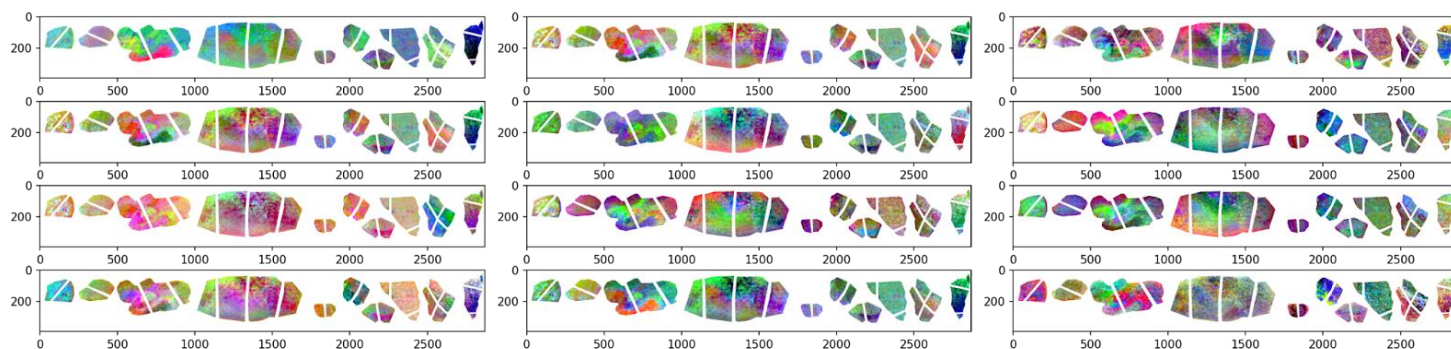
Παρχαρίδης, Ι., 2015. Αρχές δορυφορικής τηλεπισκόπησης: Θεωρία και Εφαρμογές, ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Αθήνα.

Περάκης, Κ. Γ., Φαρασλής, Ι. Ν. & Μωυσιάδης, Α. Κ., 2015. Η Τηλεπισκόπηση σε 13 ενότητες, ΣΥΝΔΕΣΜΟΣ ΕΛΛΗΝΙΚΩΝ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΩΝ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΩΝ, Αθήνα.

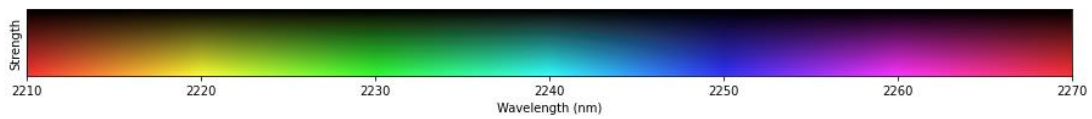
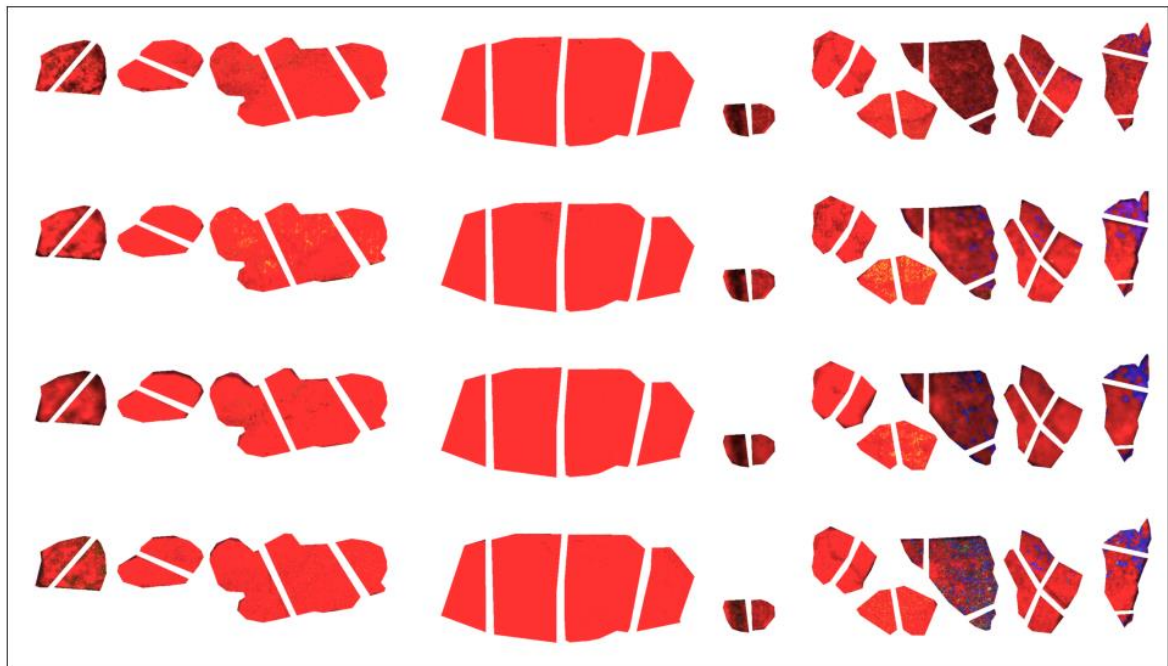
## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι



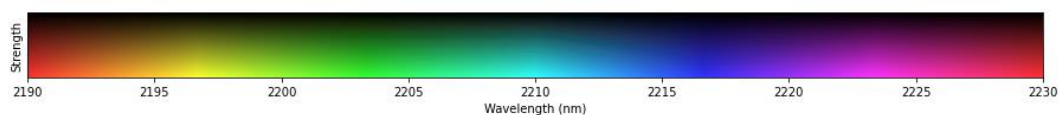
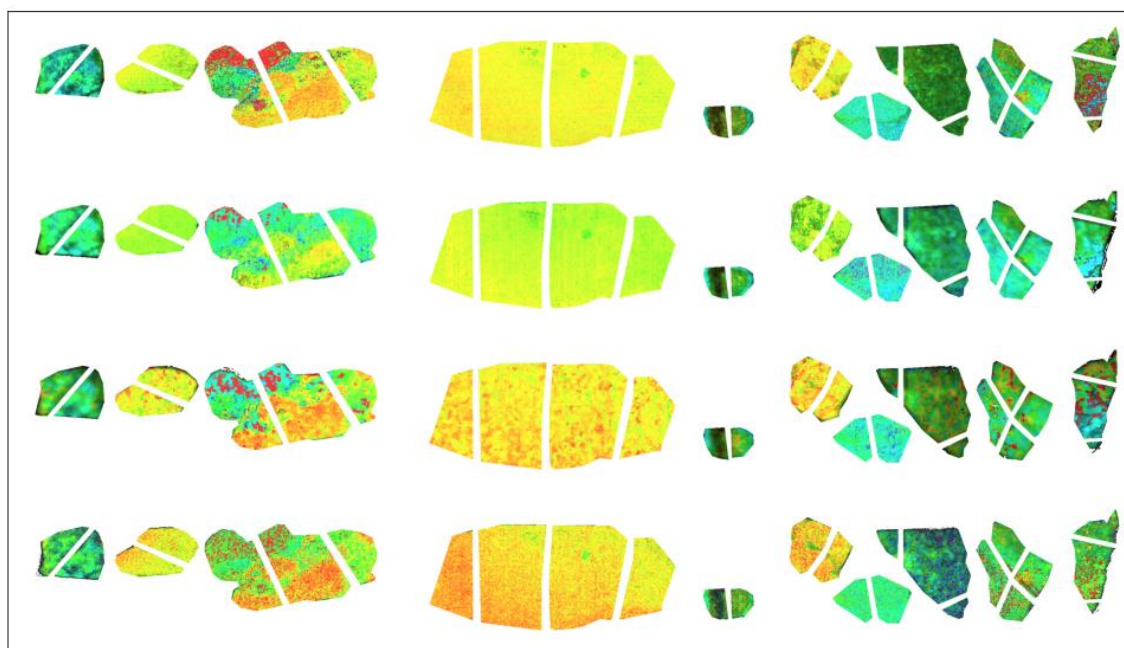
Εικόνα 7-0-1: Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδου PCA για τα αναγραφόμενα κανάλια στις εργαστηριακές λήψεις



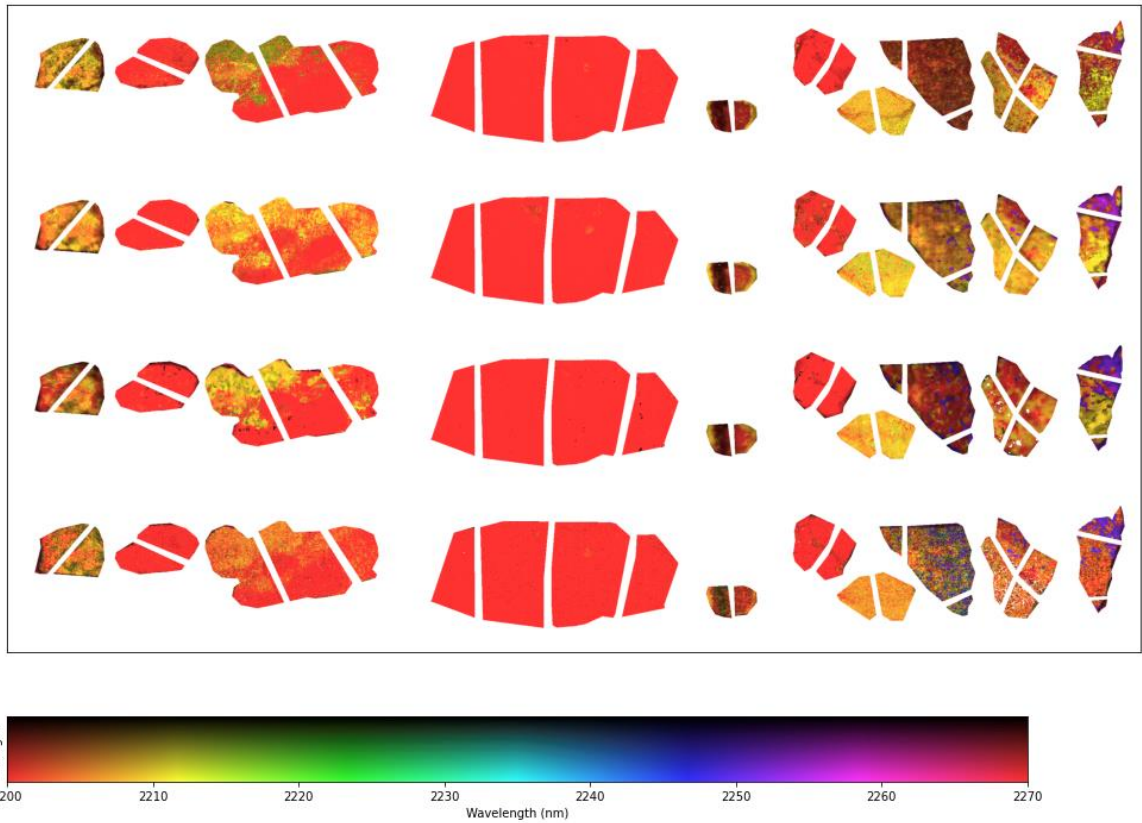
Εικόνα 7-0-2: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για αναγραφόμενα κανάλια στις εργαστηριακές λήψεις



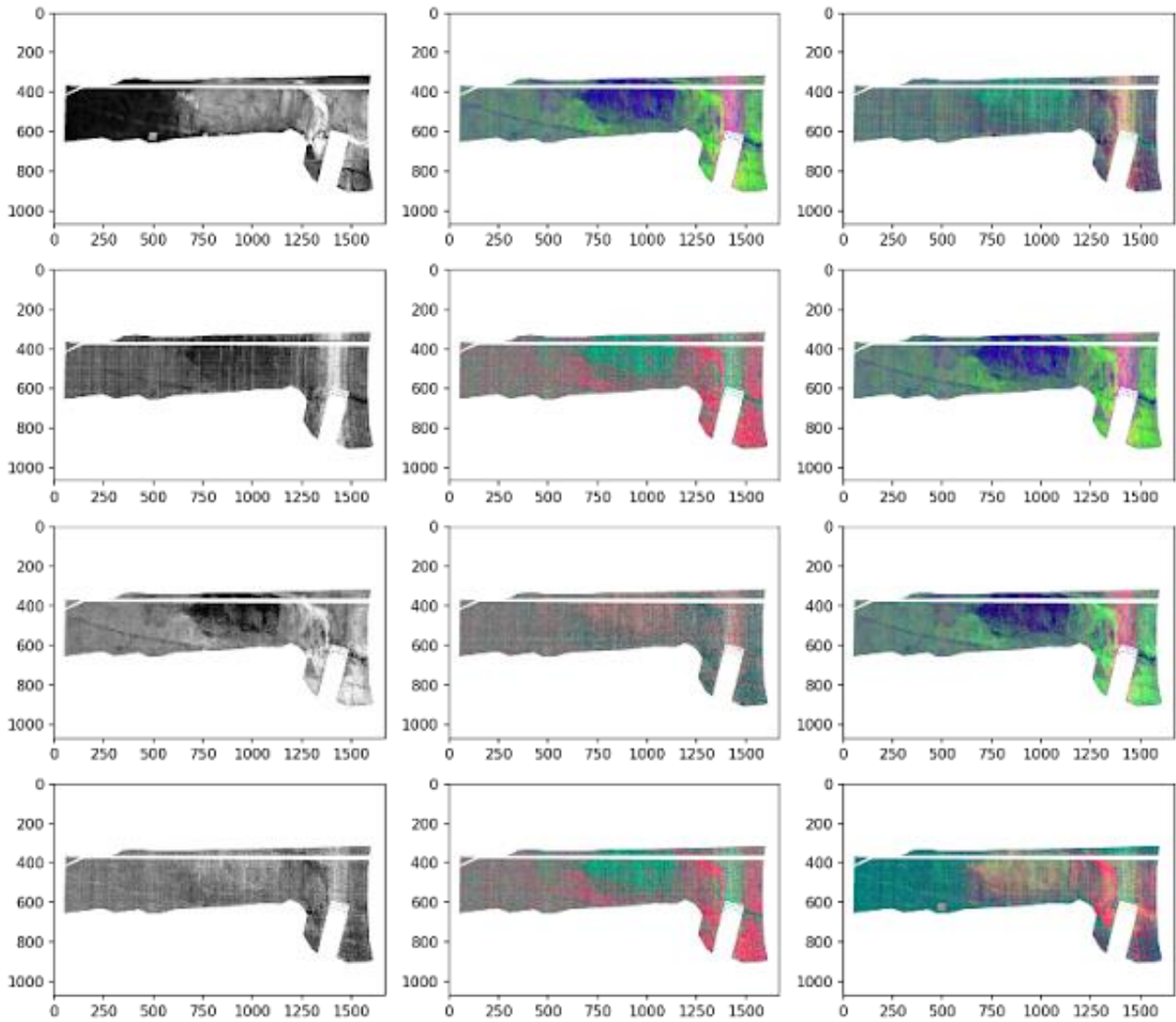
Εικόνα 7-0-3: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2160 nm - 2300 nm (με χαρτογράφηση 2210 nm - 2270 nm) για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir)



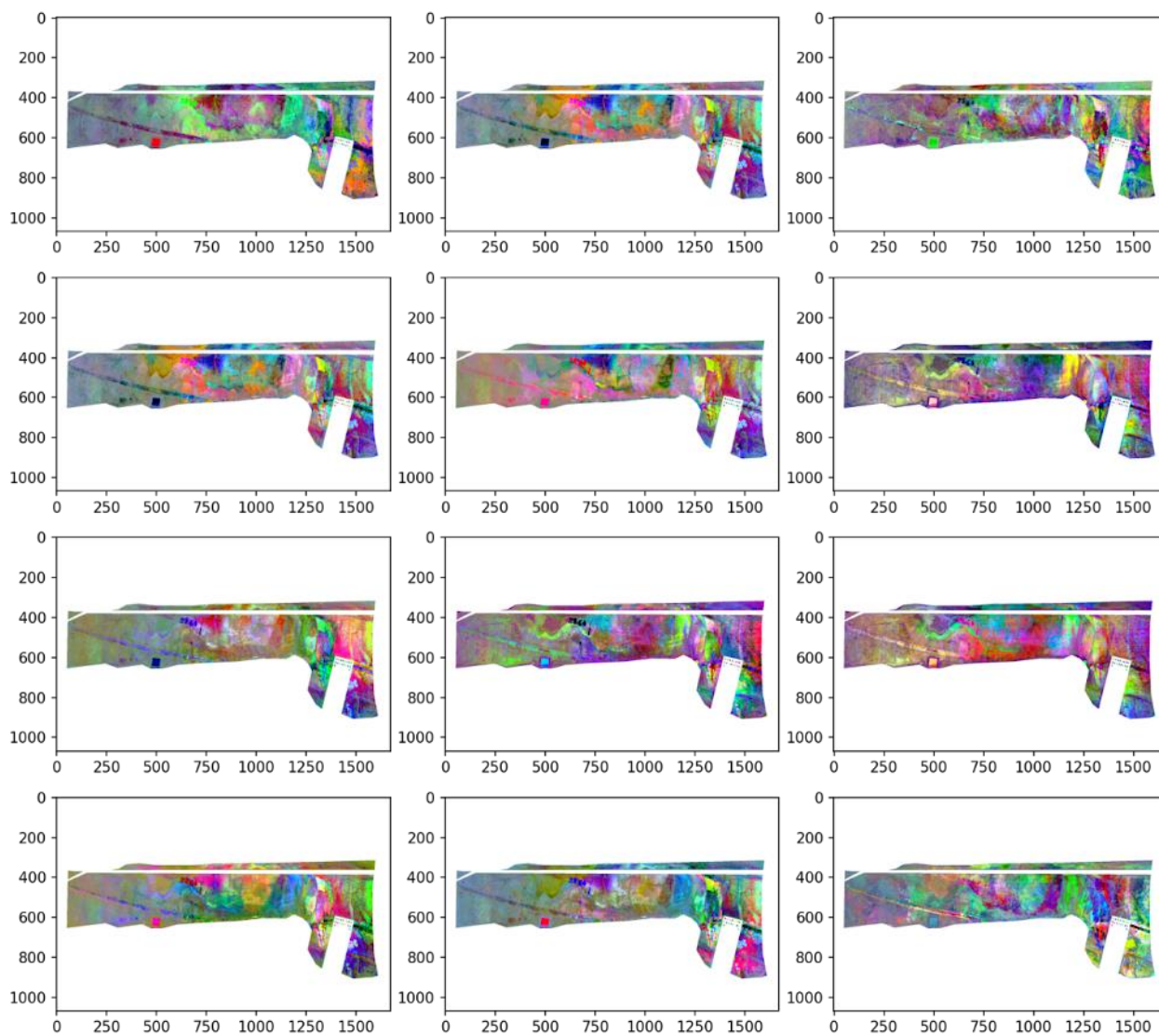
Εικόνα 7-0-4: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2180 nm - 2240 nm (με χαρτογράφηση 2190 nm - 2230 nm) για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir)



Εικόνα 7-0-5: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2190 nm - 2300 nm (με χαρτογράφηση 2200 nm - 2270 nm) για τις εργαστηριακές λήψεις από 4 διαφορετικούς αισθητήρες (SiSuRock, Fenix1K, Fenix, Mjolnir)

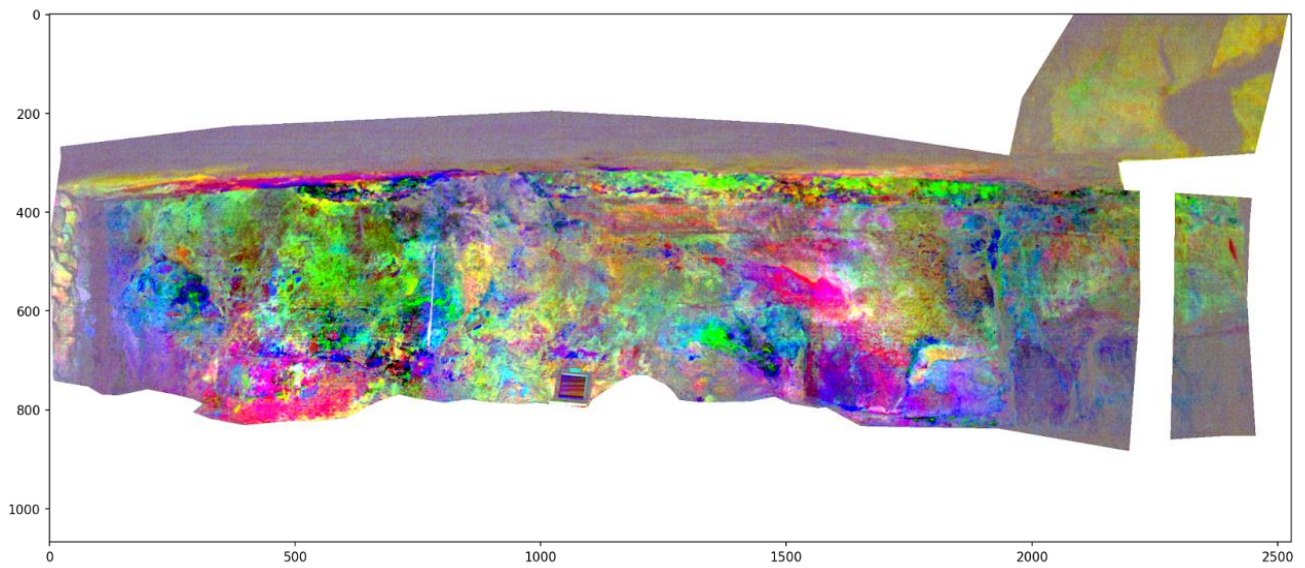


Εικόνα 7-0-6: Αποτελέσματα εφαρμογής μεθόδου PCA για τα αναγραφόμενα κανάλια στην Υπόγεια Λήψη Α

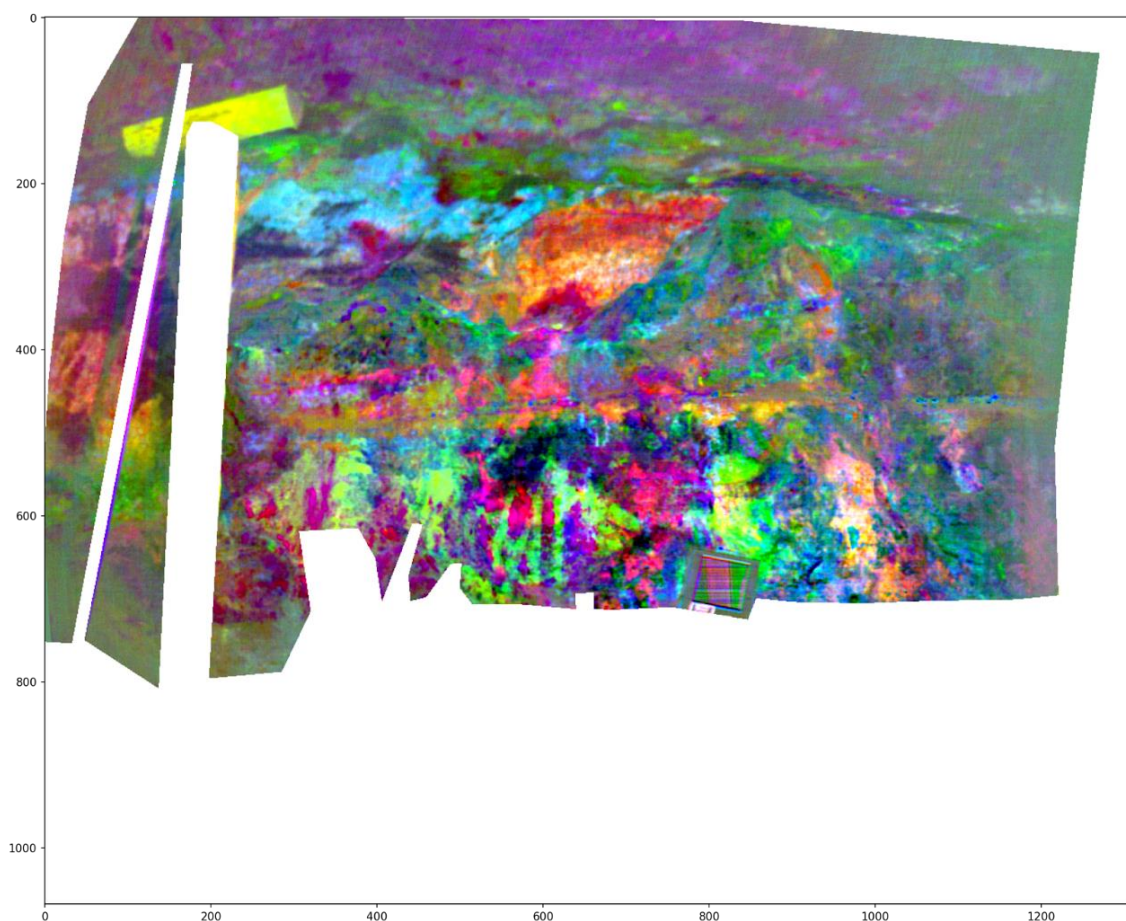


Εικόνα 7-0-7: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για αναγραφόμενα κανάλια στην Υπόγεια Λήψη Α

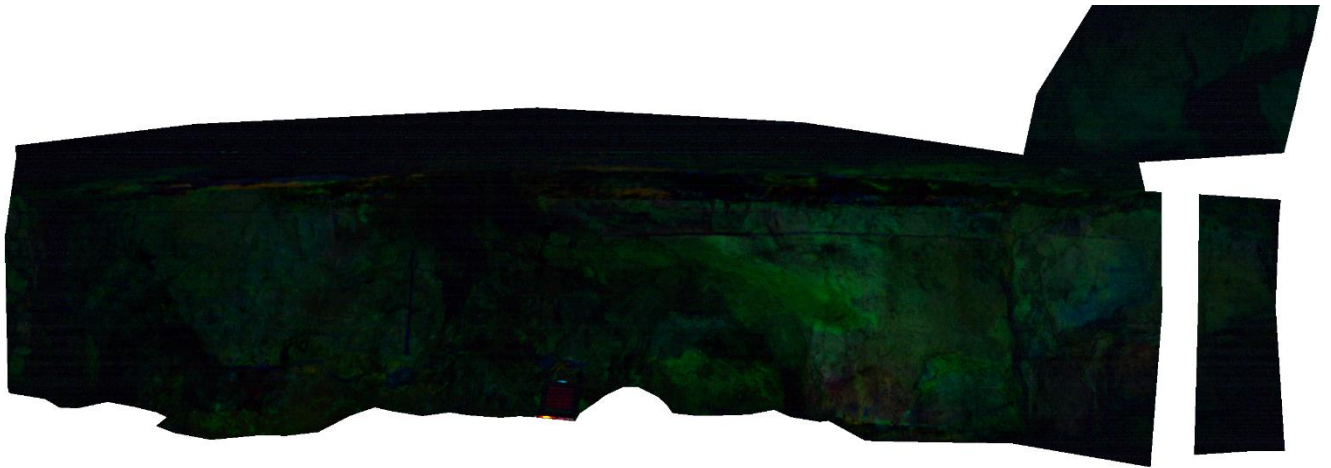




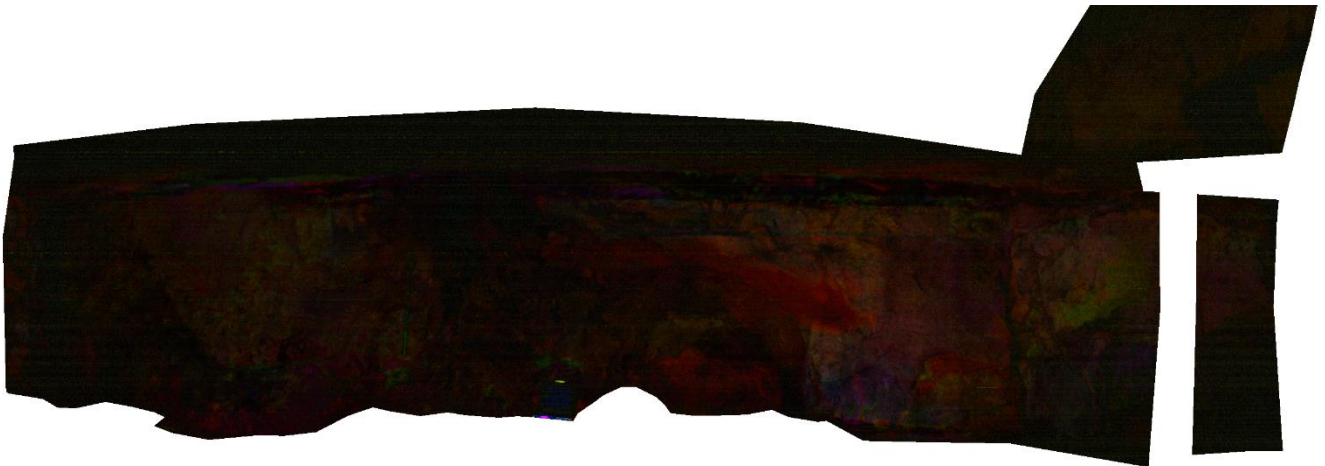
Εικόνα 7-0-8: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για τον συνδυασμό καναλιών 6,12,18 στην Υπόγεια Λήψη Β



Εικόνα 7-0-9: Αποτέλεσμα εφαρμογής μεθόδου MNF για τον συνδυασμό καναλιών 6,12,18 στην Υπόγεια Λήψη C



Εικόνα 7-0-10: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα α. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη Β με  $v_{min}=2$ ,  $v_{max}=98$



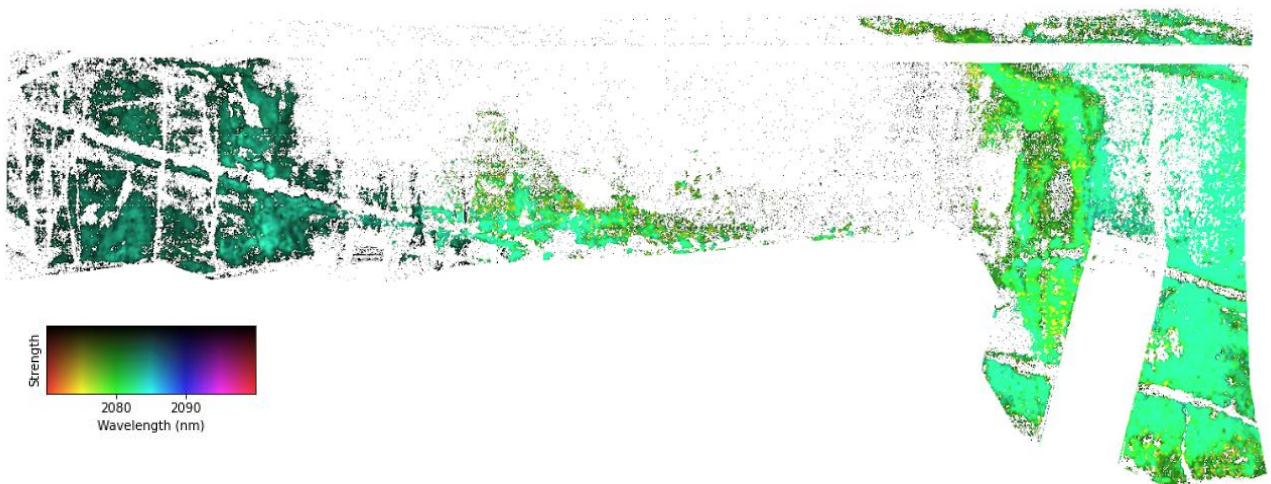
Εικόνα 7-0-11: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα α. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη Β με  $v_{min}=0$ ,  $v_{max}=75$



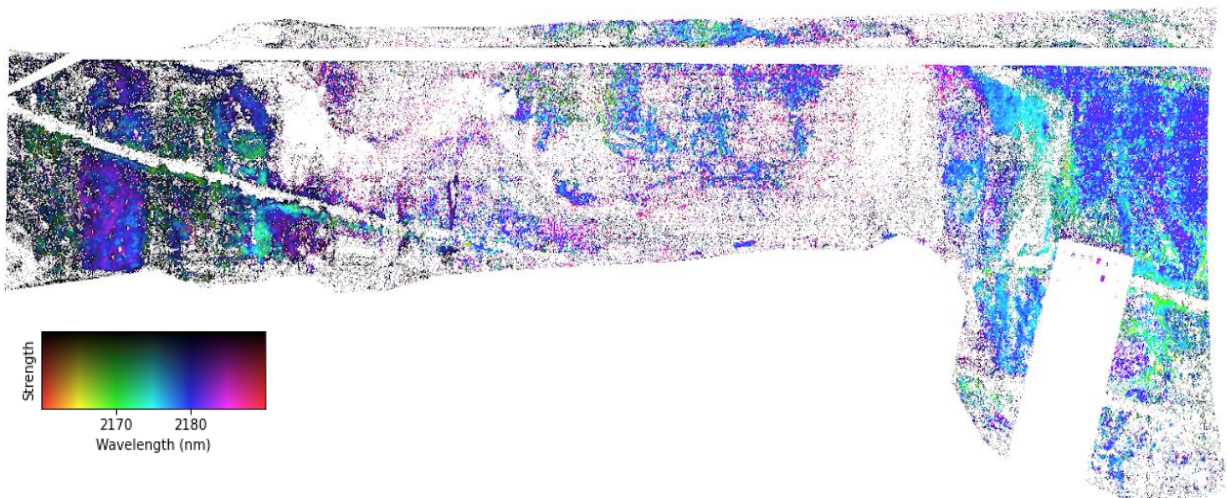
Εικόνα 7-0-12: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα α. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη C με  $v_{min}=2$ ,  $v_{max}=98$



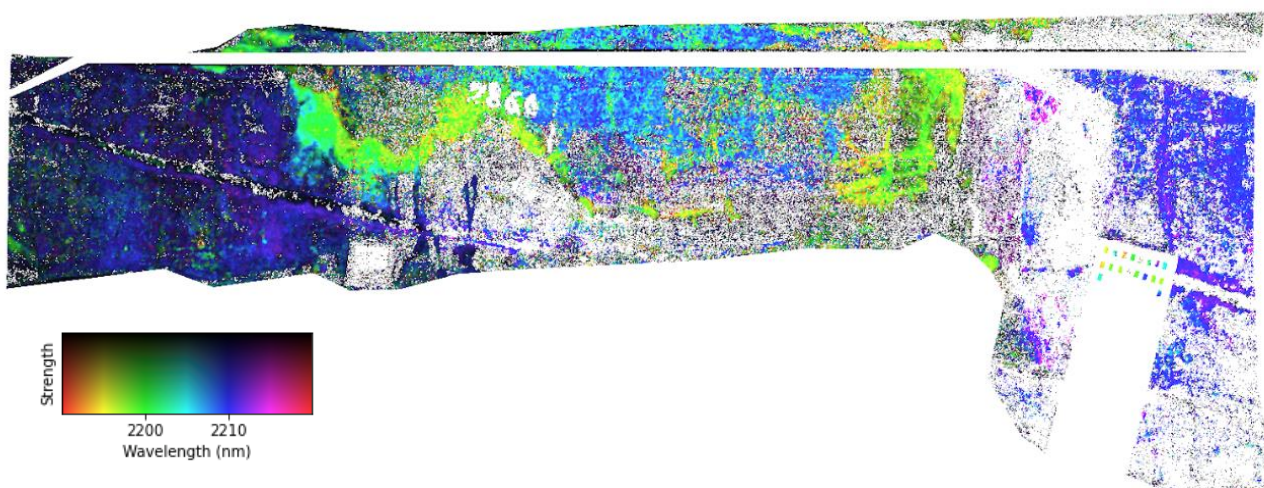
Εικόνα 7-0-13: Απεικονίσεις με επεξεργασία ψευδοχρώματος για απορροφήσεις στα α. 2085 nm (R), 2200 nm (G), 2250 nm (B) (πάνω) b. 2200 nm (R), 2250 nm (G), 2085 nm (B) (κάτω) αντίστοιχα για την Υπόγεια Λήψη C με  $v_{min}=0$ ,  $v_{max}=75$



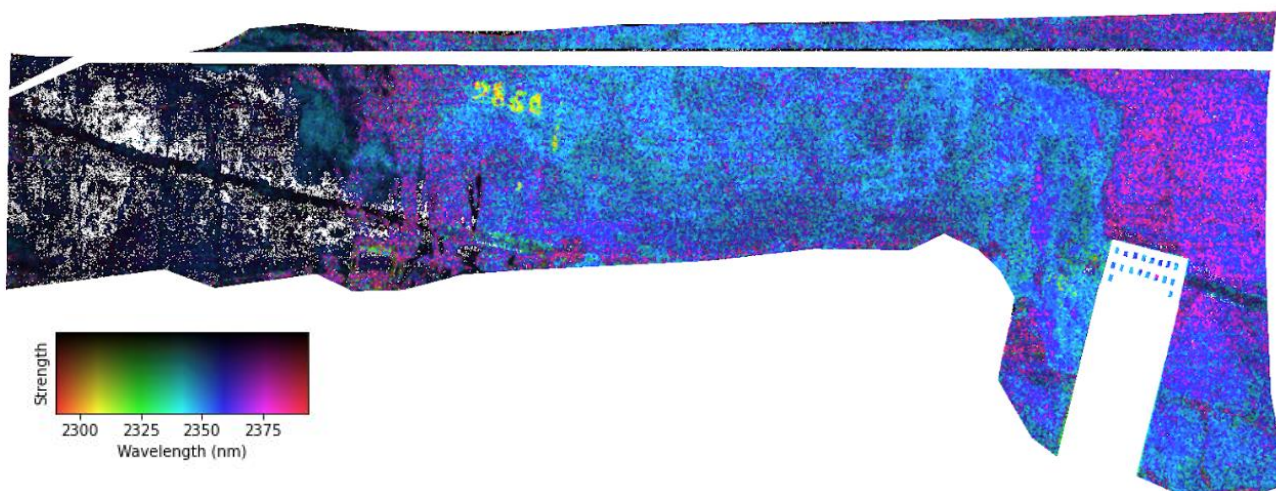
Εικόνα 7-0-14: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2080 nm - 2090 nm (με χαρτογράφηση 2070 nm - 2100 nm) για την Υπόγεια Λήψη Α



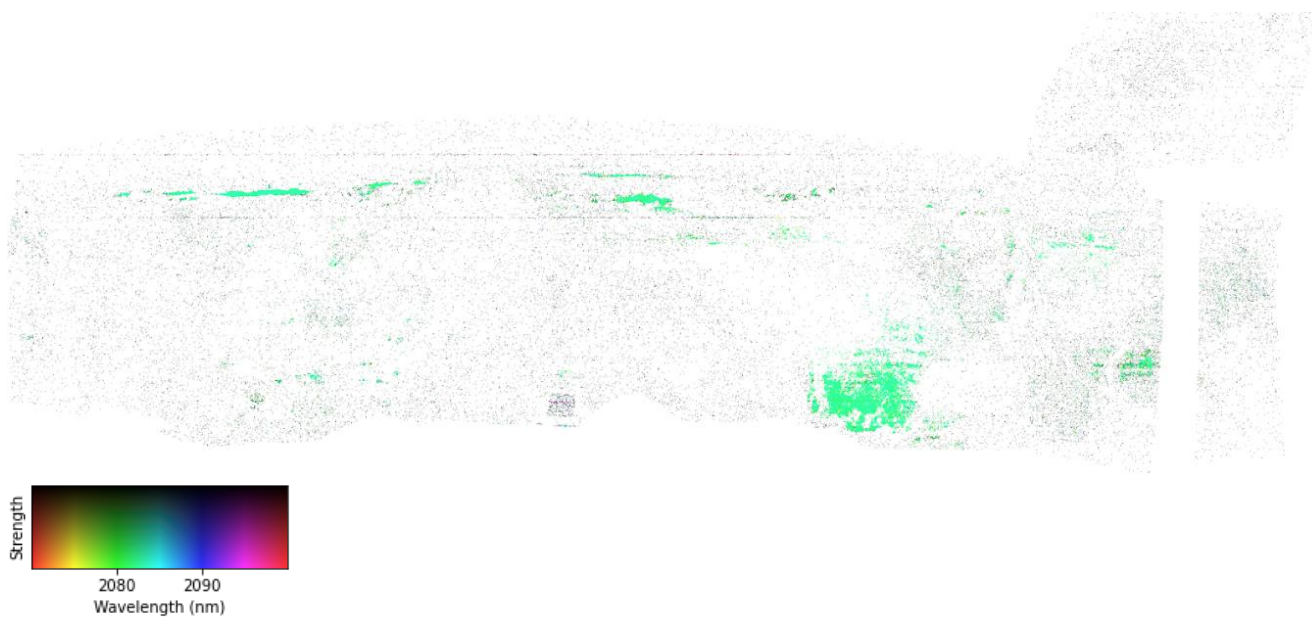
Εικόνα 7-0-15: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2170 nm - 2180 nm (με χαρτογράφηση 2160 nm - 2190 nm) για την Υπόγεια Λήψη Α



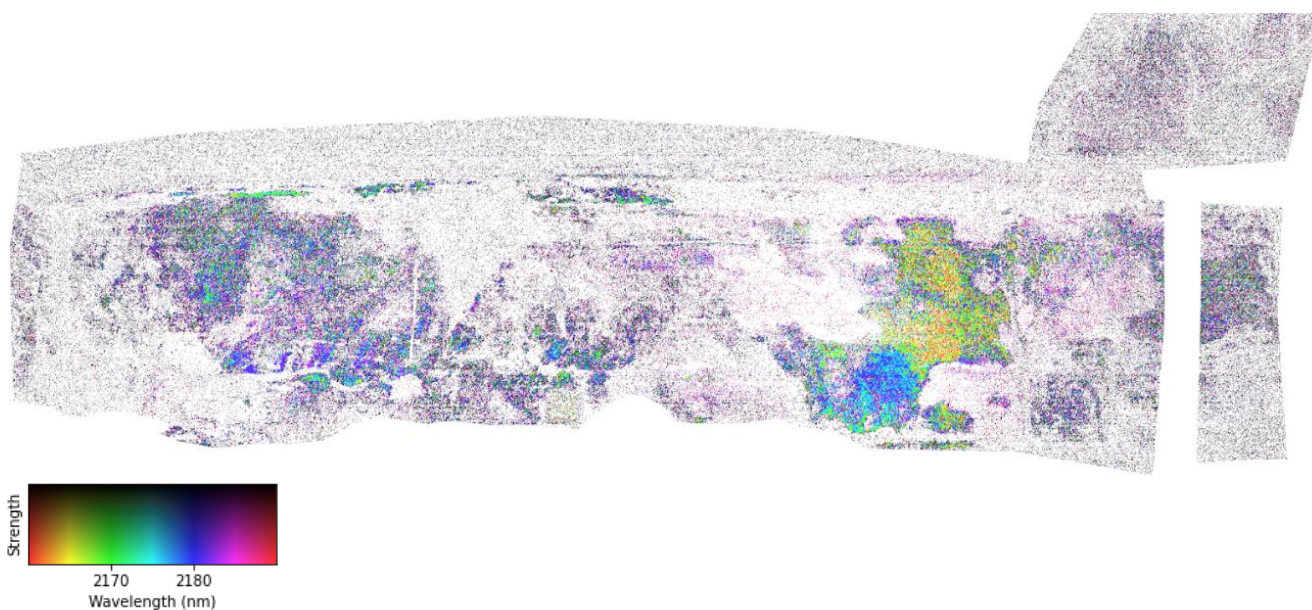
Εικόνα 7-0-16: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2200 nm - 2210 nm (με χαρτογράφηση 2190 nm - 2220 nm) για την Υπόγεια Λήψη Α



Εικόνα 7-0-17: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2320 nm - 2360 nm (με χαρτογράφηση 2295 nm - 2400 nm) για την Υπόγεια Λήψη Α

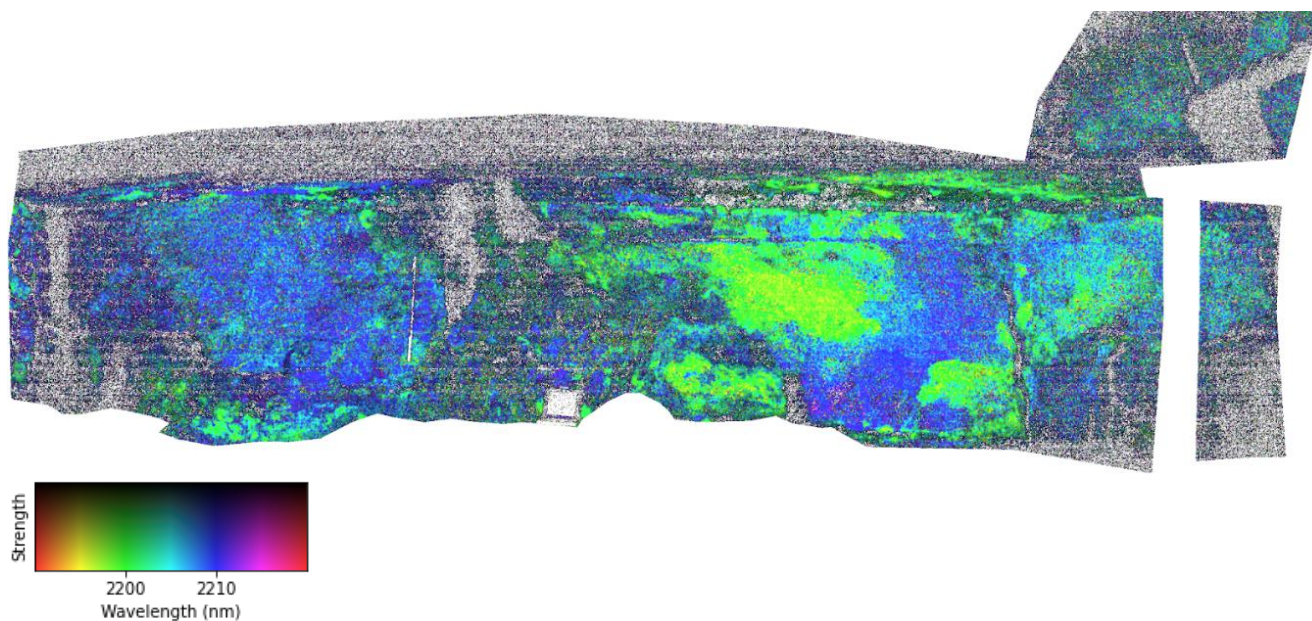


Εικόνα 7-0-18: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2080 nm - 2090 nm (με χαρτογράφηση 2070 nm - 2100 nm) για την Υπόγεια Λήψη Β

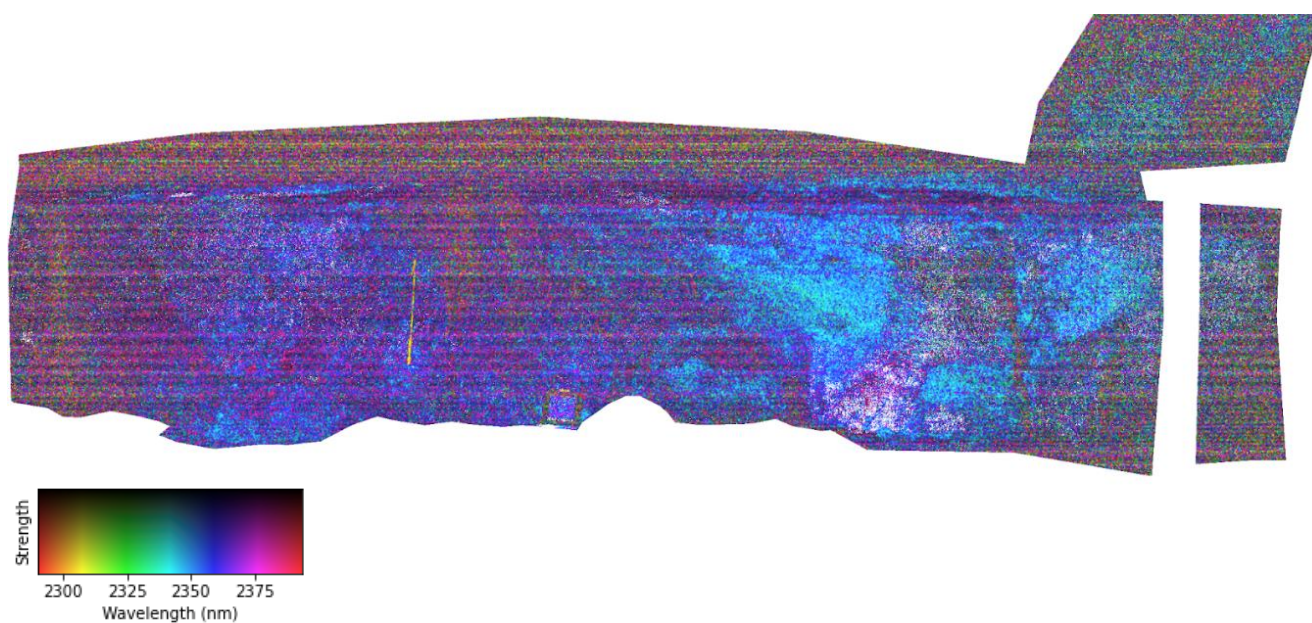


Εικόνα 7-0-19: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2170 nm - 2180 nm (με χαρτογράφηση 2160 nm - 2190 nm) για την Υπόγεια Λήψη Β

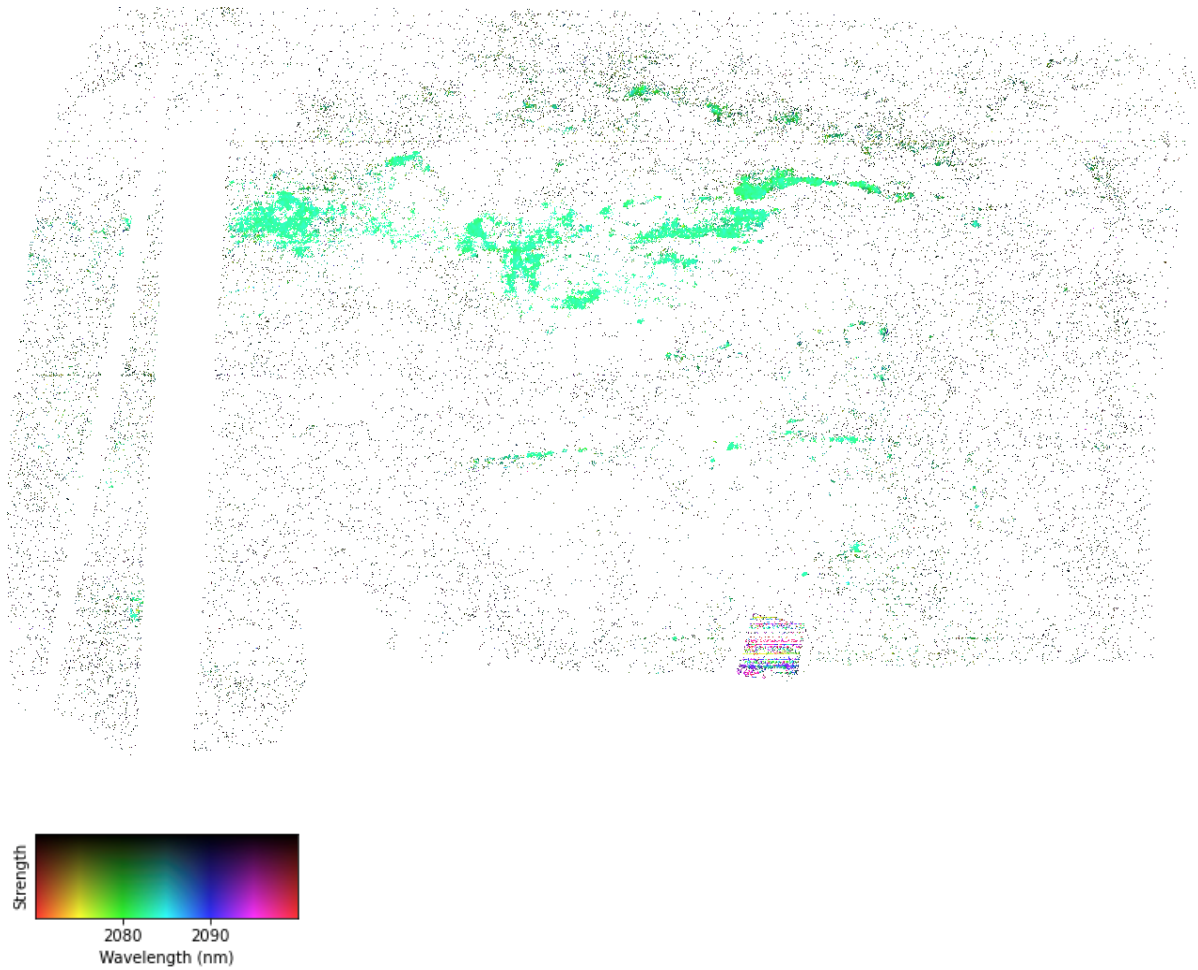




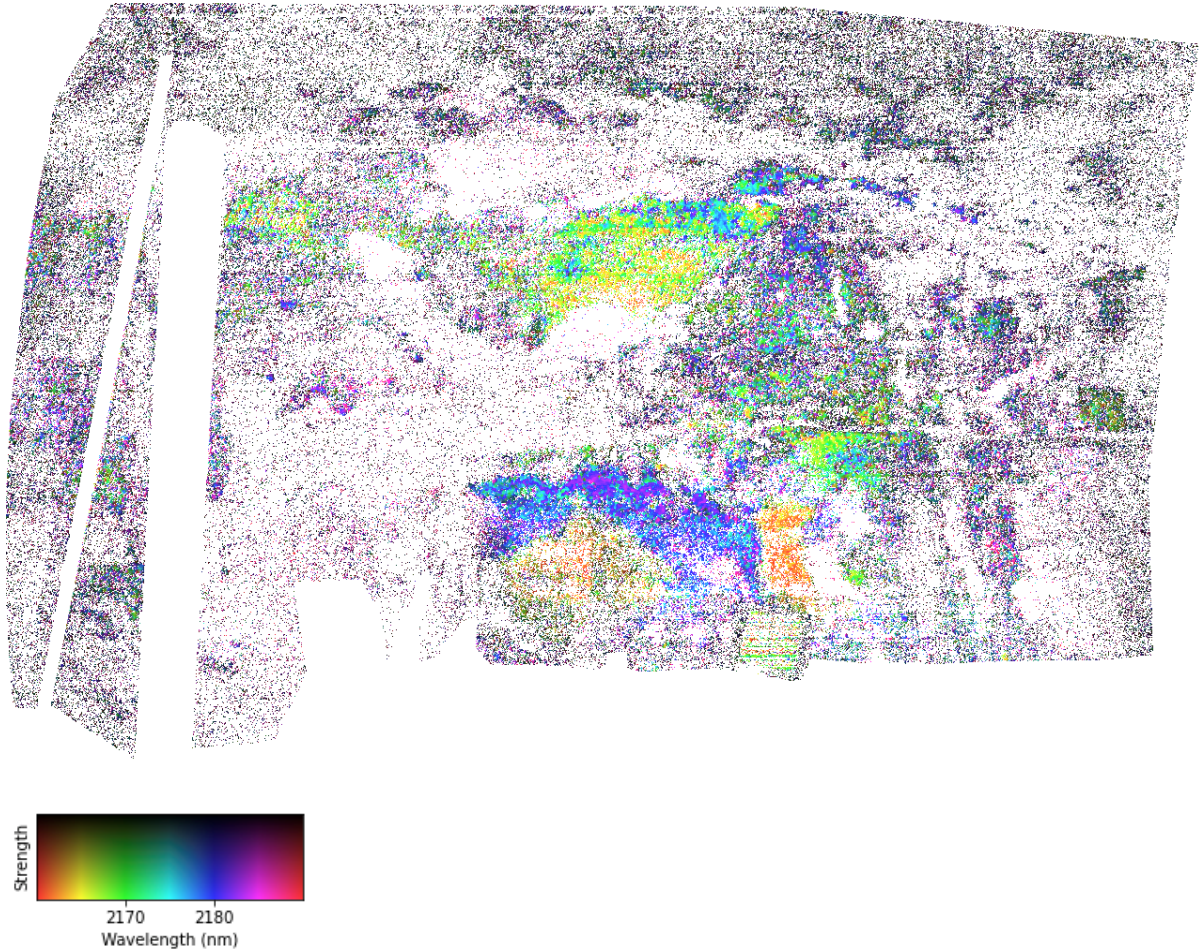
Εικόνα 7-0-20: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2200 nm - 2210 nm (με χαρτογράφηση 2190 nm - 2220 nm) για την Σκηνή 2



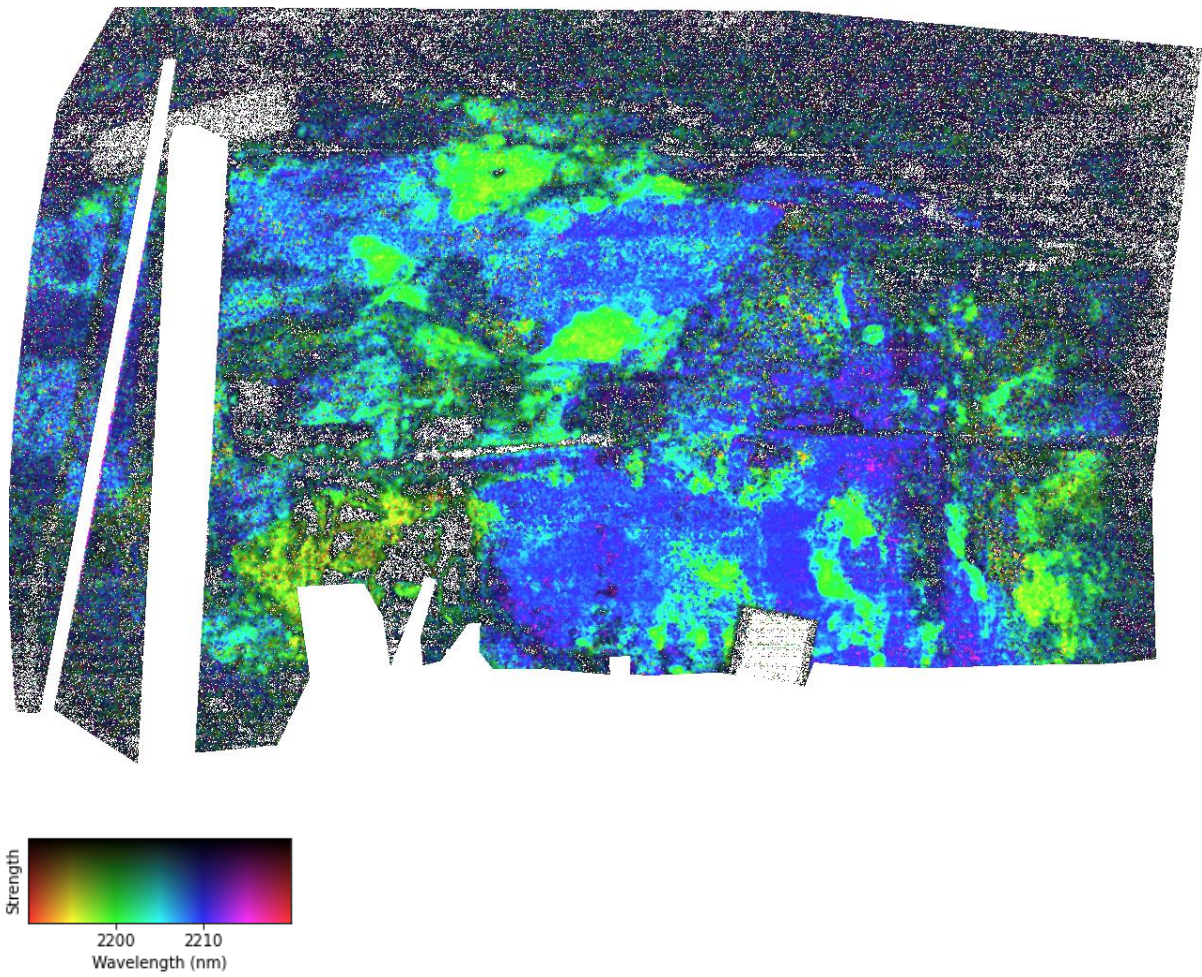
Εικόνα 7-0-21: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2320 nm - 2360 nm (με χαρτογράφηση 2295 nm - 2400 nm) για την Υπόγεια Λήψη Β



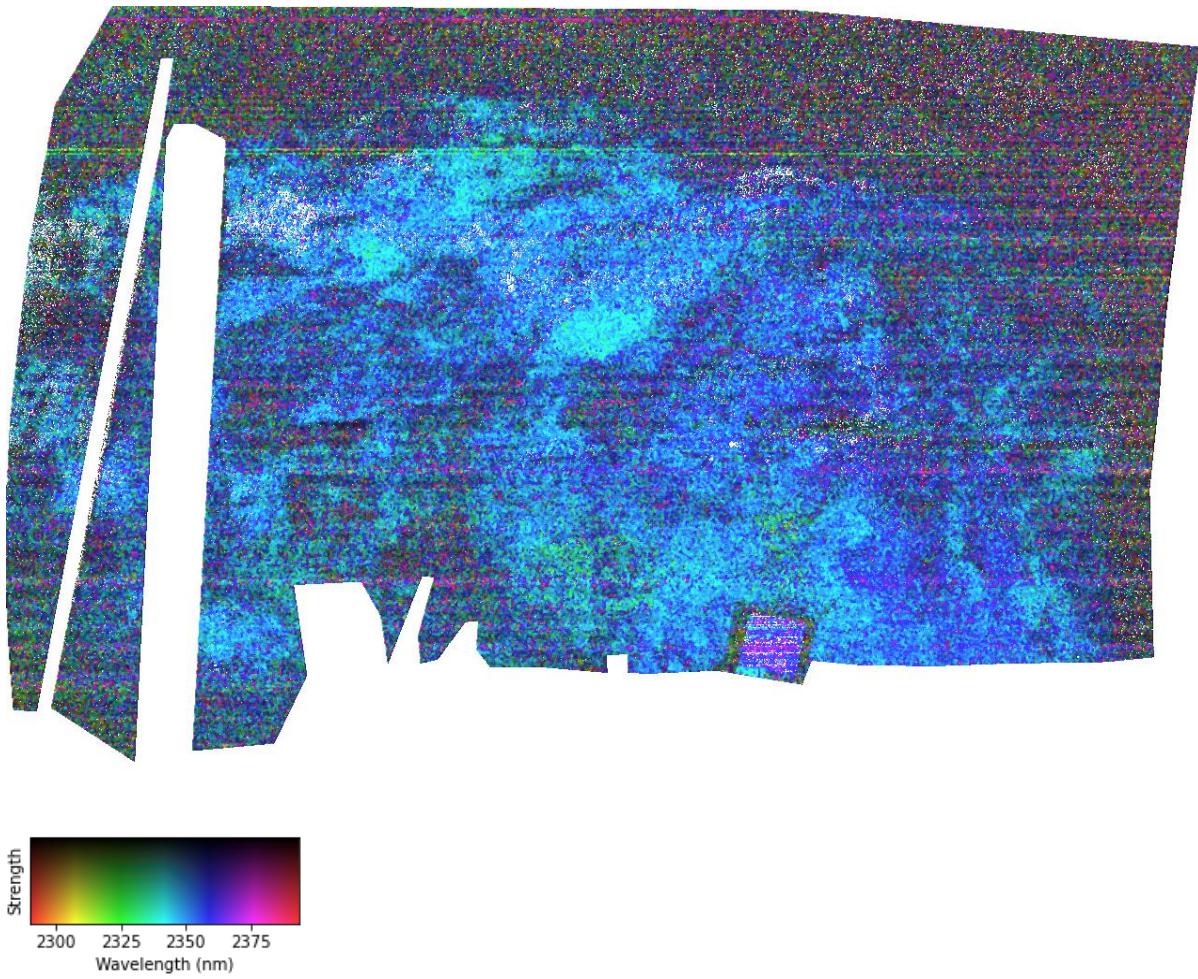
Εικόνα 7-0-22: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2080 nm - 2090 nm (με χαρτογράφηση 2070 nm - 2100 nm) για την Υπόγεια Λήψη C



Εικόνα 7-0-23: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2170 nm - 2180 nm (με χαρτογράφηση 2160 nm - 2190 nm) για την Υπόγεια Λήψη C



Εικόνα 7-0-24: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2200 nm - 2210 nm (με χαρτογράφηση 2190 nm - 2220 nm) για την Υπόγεια Λήψη C



Εικόνα 7-0-25: Απεικόνιση θέσης και βάθους ελάχιστων τιμών μήκους κύματος φασματικών ανακλάσεων (MWL) για φασματικό εύρος 2320 nm - 2360 nm (με χαρτογράφηση 2295 nm - 2400 nm) για την Υπόγεια Λήψη C

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

Ο κώδικας αρχικά για να λειτουργήσει πρέπει να έχει εγκατασταθεί το πακέτο *hylite*.

### Αρχικά imports

Πρέπει να ενεργοποιηθούν διάφορες βοηθητικές λειτουργίες όπως τα εργαλεία *numpy*, *matplotlib*, *IO* και άλλα τα οποία ήδη βρίσκονται μέσα στο *hylite*:

```
import hylite
import numpy as np

from hylite import io, HyLibrary
import matplotlib.pyplot as plt
from hylite.filter import MNF
from hylite.filter import PCA
from hylite.analyse import band_ratio, minimum_wavelength,
colourise_mwl
from IPython.display import clear_output
from hylite.project import proj_pano
from hylite.project.align import align_to_cloud_manual

from hylite import io, HyLibrary
from hylite.filter import MNF
from hylite.filter import PCA

import os
import os.path as osp
import cProfile, pstats

import pysptools.util as util
import pysptools.eea as eea
import pysptools.abundance_maps as amp
```

```
from osgeo import gdal
import os
import glob
import numpy as np
from tqdm.auto import tqdm
import hylite
import hylite.io as io
from hylite.correct import Panel
import gdal

#εισάγεται μία υπερφασματική εικόνα (hyimage) από τον
υπολογιστή
image = io.load('/Users/mavrou31/Desktop/.../image.hdr')

#οπτικοποίηση hyimage
image.quick_plot(hylite.SWIR, vmin=2, vmax=98,
rot=True)#επιλέγεται το φασματικό διάστημα που θέλουμε την
οπτικοποίηση, ποιος φασματικός χώρος να χαρτογραφηθεί και αν
θέλουμε να αναστραφεί 90° η εικόνα

#ορίζεται ένας φάκελος αποθήκευσης αποτελεσμάτων
outdir = '/Users/mavrou31/Desktop/.../results'

#αποθήκευση αρχείου
io.save('/Users/mavrou31/Desktop/image_2.hdr', image)

#imputs διορθώσεων αισθητήρων
from hylite.sensors import Fenix
#εφαρμογή διορθώσεων ανάλογα με το είδος αισθητήρα
images = [ Fenix.correct_folder( p,
                                flip = False, #True εφόσον η
κάμερα τοποθετήθηκε με ανάστροφη διάταξη
                                shift = False, #True για να
διορθωθεί η χωρική διαφορά μεταξύ διαστήματοςVNIR καιSWIR
                                verbose=True ) for p in
paths]

#προεπισκόπηση
```

```

for i,image in enumerate(images):
    fig,ax = image.quick_plot( hylite.RGB, cfac=2.5 )
    ax.set_title( os.path.basename( paths[i] ) )
    fig.show()

    fig, ax = image.plot_spectra()#οπτικοποίηση μέσου
φάσματος εικόνας
    ax.set_title( os.path.basename( paths[i] ) )
    fig.show()
for i,image in enumerate(images):
    outpath = os.path.join(outdir,
os.path.basename(paths[i]) + "_sc_hdr")
    hylite.io.saveWithGDAL(outpath, image)

#εισαγωγή του βαθμονομικού πανελ
from hylite.correct import Panel
from hylite.reference.spectra import R90, R50, PVC_Red,
PVC_White, PVC_Grey
M = R90 #προσδιορισμός του πανελ που χρησιμοποιήθηκε
#χειροκίνητος προσδιορισμός του πανελ στην λήψη
white = Panel(R90,image,method='manual', bands=hylite.RGB)
image.header.add_panel(white)
from hylite.correct.illumination import ELC
elc = ELC([white])
elc.quick_plot()
bbl1 = elc.apply( image)
image=image.export_bands((20,-1))#αφαιρούνται τα 20 πρώτα
φασμαστικά κανάλια καθώς είναι αρκετά θορυβώδη
image.plot_spectra( indices=[(225,300)])#δημιουργία
γραφήματος με το φάσμα ενός πιξελ

Εξαγωγή φάσματος pixel
pixels =
[(200,1250),(290,1875),(150,2350),(300,2600),(250,2800)]
#προσδιορισμός των συντεταγμένων των πιξελ
fig,ax =
plt.subplots(1,len(pixels),figsize=(30,10),sharey=True)

```



```
for px,a in zip(pixels, ax):
    a.set_xlim(2000., 2500.)#προσδιορισμός φασματικού εύρους
    fig.show()

PCA
pca_image, pca_factors_f, _ = PCA(image, output_bands=5,
step=1 )#σε πόσα κανάλια κατηγοριοποιούνται τα δεδομένα της
εικόνας

pca_image.quick_plot((1, 3, 4),ticks=True, vmin=2, vmax=98,
tscale=True)#ποία κανάλια θα παρουσιαστούν στην εικόνα

MNF
image _mnf, w = MNF(image)

image _mnf.quick_plot((6, 12, 18), vmin=2, vmax=98,
tscale=True, ticks=True)

plt.savefig('/Users/mavrou31/Desktop/ZINNWALD/MNF.png' ,
dpi=150)

Absorbance features
#διόρθωση hull correction

from hylite.correct import get_hull_corrected

imagehc = get_hull_corrected(image, (2000.,-1))#προσδιορισμός
του διαστήματος που θα γίνει η διόρθωση (εδώ από 2000nm και
πάνω)

#μετατροπή ακτινοβολίας σε ανακλαστικότητα
imagehc.data = 1-imagehc.data

fig,ax =
image.quick_plot((2085.,2200.,2250.),path='/Users/mavrou31/De
sktop/ZINNWALD/image_2085_2200_2250.png',vmin=0,vmax=75,
tscale=False, figsize=(12,5))

ax.set_title("Absorbance of the Z1 scan in 2085nm, 2200nm,
2250nm")#τίτλος γραφήματος

Band ratios
ratio = band_ratio( image, 2250., 2260.)#πρώτα ο αριθμητής
και μετά ο παρονομαστής του κλάσματος

fig,ax = ratio.quick_plot(0, vmin=0.5,
vmax=1.,figsize=(10,5),ticks=True, rot=True)

fig.colorbar(ax.cbar)#εισαγωγή κλίμακας βαθμονόμησης

np.nanpercentile(ratio.data, (25,99))
```

```

MWL
mwl_image = minimum_wavelength( image, #εικόνα επεξεργασίας
                                2126.,#αρχή          χαρτογραφούμενου
εύρους
                                2360.,#τέλος χαρτογράφησης
hc
                                trend='hull', #εφαρμογή διόρθωσης

                                method='gauss',#επιλογή μεθόδου
                                n=3, #πόσα γκαουσιανά στοιχεία
                                sym=False, #συμμετρικά στοιχεία;
                                minima=True,          #χαρτογράφηση
ελάχιστων μήκων κύματος ή μέγιστων
                                nthreads=-1

mwl_image.quick_plot()

rgb = mwl_image.closest( 2252., (2240., 2270.),
depth_cutoff=0.05 ) #χαρτογράφηση κοντινών στοιχείων σε κάποιο
φάσμα

fig,ax = rgb.quick_plot( 0, vmin=0.,
vmax=0.7,figsize=(12,5),ticks=True, rot= True)
fig.colorbar(ax.cbar)
fig.show()

rgb, leg = colourise_mwl( img.deepest(2100.,2400.),
                        hue_map=(2150., 2350.), #εύρος
μηκών κύματος για χρωματική χαρτογράφηση
                        val_map=(0,0.35), #βάθος
στοιχείων για χαρτογράφηση φωτεινότητας
                        )

fig,ax = rgb.quick_plot( (0,1,2), vmin=0.,
vmax=1.,figsize=(20,10), rot=True)

leg.plot(ax, pos=(0,-0.3), s=(0.9,0.2) ) )#εισαγωγή κλίμακας
βαθμονόμησης
fig.show()

Endmembers
PPI
ppi = eea.PPI()

U = ppi.extract(image.data, 5, normalize=False,
mask=np.isfinite(image.data).all(axis=-1))#προσδιορισμός
πόρων EM ψάχνουμε

```

```

print(' End members indexes:', ppi.get_idx())
p_ppi=ppi.get_idx()
p_ppi=np.array(p_ppi)

p_ppi = [ np.argwhere( (image.data == U[i]).all(axis=-1)
).flatten() for i in range(U.shape[0]) ]
p_ppi=np.array(p_ppi)
p_ppi

NFINDR
nfindr = eea.NFINDR()
U = nfindr.extract(image.data, 5, normalize=False,
mask=np.isfinite(image.data).all(axis=-1))
print(' End members indexes:', nfindr.get_idx())
p_nfindr=nfindr.get_idx()
p_nfindr=np.array(p_nfindr)
p_nfindr = [ np.argwhere( (image.data == U[i]).all(axis=-1)
).flatten() for i in range(U.shape[0]) ]
p_nfindr=np.array(p_nfindr)
p_nfindr

fig,ax = plt.subplots(1,2,figsize=(10,3),dpi=100)
image.quick_plot(hylite.RGB, vmin=1,
vmax=99,rot=False,ticks=True,ax=ax[0])
ax[0].set_prop_cycle(color=[

'#E69F00','#56B4E9','#009E73','#F0E442','#0072B2','#D55E00','
CC79A7'])#οπτικοποίηση των EM με συγκεκριμένα χρώματα
for i,(x,y) in enumerate(p_nfindr):
    ax[0].scatter(
p_nfindr[i,1],s=30,edgecolors= "black" )
ax[1].set_prop_cycle(color=[

'#E69F00','#56B4E9','#009E73','#F0E442','#0072B2','#D55E00','
CC79A7'])
for i,(x,y) in enumerate(p_nfindr):
    ax[1].plot( image.get_wavelengths(), image.data[x,y,:],
label="EM %d" % i)
ax[1].legend(fontsize=8)

```

```

fig.show()
fig.tight_layout()

ATGP
atgp = eea.ATGP()
U = atgp.extract(image.data, 5, normalize=False,
mask=np.isfinite(image.data).all(axis=-1))
print(' End members indexes:', atgp.get_idx())
p_atgp=atgp.get_idx()
p_atgp=np.array(p_atgp)
p_atgp = [ np.argwhere( (image.data == U[i]).all(axis=-1)
).flatten() for i in range(U.shape[0]) ]
p_atgp=np.array(p_atgp)
p_atgp
fig,ax = plt.subplots(1,2,figsize=(10,3),dpi=100)
image.quick_plot(hylite.RGB, vmin=1,
vmax=99,rot=False,ticks=True,ax=ax[0])
ax[0].set_prop_cycle(color=[
'#E69F00','#56B4E9','#009E73','#F0E442','#0072B2','#D55E00',
'CC79A7'])
for i,(x,y) in enumerate(p_atgp):
    ax[0].scatter( p_atgp[i,0], p_atgp[i,1],s=30,edgecolors=
"black" )
ax[1].set_prop_cycle(color=[
'#E69F00','#56B4E9','#009E73','#F0E442','#0072B2','#D55E00',
'CC79A7'])
for i,(x,y) in enumerate(p_atgp):
    ax[1].plot( image.get_wavelengths(), image.data[x,y,:],
label="EM %d" % i)
    fenix.plot_spectra(indices=p_atgp,band_range=(500.,
2450.),quantiles =False,median=False)
ax[1].legend(fontsize=8)
fig.show()
fig.tight_layout()

```

FIPPI

---

```

fippi = eea.FIPPI()
U = fippi.extract(image.data, 9, normalize=False,
mask=np.isfinite(image.data).all(axis=-1))
print(' End members indexes:', fippi.get_idx())
p_fippi=fippi.get_idx()
p_fippi = [ np.argwhere( (image.data == U[i]).all(axis=-1)
).flatten() for i in range(U.shape[0]) ]
p_fippi=np.array(p_fippi)
p_fippi
fig,ax = plt.subplots(1,2,figsize=(10,3),dpi=100)
image.quick_plot(hylite.RGB, vmin=1,
vmax=99,rot=False,ticks=True,ax=ax[0])
ax[0].set_prop_cycle(color=[
'#E69F00','#56B4E9','#009E73','#F0E442','#0072B2','#D55E00',
'CC79A7'])
for i,(x,y) in enumerate(p_fippi):
    ax[0].scatter( p_fippi[i,0],
p_fippi[i,1],s=30,edgecolors= "black" )
ax[1].set_prop_cycle(color=[
'#E69F00','#56B4E9','#009E73','#F0E442','#0072B2','#D55E00',
'CC79A7'])
for i,(x,y) in enumerate(p_fippi):
    ax[1].plot( image.get_wavelengths(), image.data[x,y,:],
label="EM %d" % i)
ax[1].legend(fontsize=8)
fig.show()
fig.tight_layout()

```