



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Χωροχρονική Ανάλυση Καλύψεων Γης σε Επιφανειακά Ορυχεία
με Τεχνικές Επιβλεπόμενης Ταξινόμησης.
Εφαρμογή στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βλαχογιάννη Σοφία

Επιβλέπουσα: Μενεγάκη Μαρία,
Καθηγήτρια

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

Χωροχρονική Ανάλυση Καλύψεων Γης σε Επιφανειακά Ορυχεία

με Τεχνικές Επιβλεπόμενης Ταξινόμησης.

Εφαρμογή στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Βλαχογιάννη Σοφία

Επιβλέπουσα: Μενεγάκη Μαρία,

Καθηγήτρια

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 25/07/2023

Μενεγάκη Μαρία, Καθηγήτρια,

Μπενάρδος Ανδρέας, Καθηγητής,

Τσαγγαράτος Παρασκευάς, Επίκουρος Καθηγητής,

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

Copyright © Βλαχογιάννη Σοφία, 2023
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο «Χωροχρονική Ανάλυση Καλύψεων Γης σε Επιφανειακά Ορυχεία με Τεχνικές Επιβλεπόμενης Ταξινόμησης. Εφαρμογή στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας», εκπονήθηκε στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Μεταλλειολόγων- Μεταλλουργών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η τρέχουσα εργασία πραγματοποιήθηκε σε άμεση συνεργασία με τη Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων της ΔΕΗ, σε συνέχεια της πρακτικής μου άσκησης τον Ιούλιο τους έτους 2022, η οποία αποτέλεσε εφαλτήριο για την ενασχόλησή μου με το συγκεκριμένο θέμα.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που συνέβαλλαν με τον τρόπο τους στην ολοκλήρωσή της.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα Καθηγήτρια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κα. Μαρία Μενεγάκη για την εμπιστοσύνη και το ενδιαφέρον που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της, για τις προτάσεις της και για το ότι ήταν πάντα διαθέσιμη να συζητήσουμε τυχόν απορίες.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Ανδρέα Μπενάρδο και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Παρασκευά Τσαγγαράτο για τη συμμετοχή τους στην τριμελή επιτροπή αξιολόγησης και για τις χρήσιμες παρατηρήσεις τους.

Για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας οφείλω να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα Μεταλλειολόγο Μηχανικό και Διευθυντή της Διεύθυνσης Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων της ΔΕΗ, κ. Χρήστο Ρούμπο, για τη βοήθεια που μου προσέφερε, καθώς και για τις χρήσιμες υποδείξεις και την καθοδήγηση που μου παρείχε.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον MSc Μεταλλειολόγο Μηχανικό κ. Νικόλαο Παρασκευή για την παραχώρηση βοηθητικού υλικού για το θέμα της εργασίας, για τον χρόνο που αφιέρωσε ώστε να με βοηθήσει να τη βελτιώσω, για την εξαιρετική συνεργασία, τις συμβουλές και την υποστήριξη που μου προσέφερε.

Η συγγραφή της συγκεκριμένης εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την πολύτιμη βοήθεια του MSc Μηχανικού Γεωγραφικών Συστημάτων κ. Κωνσταντίνου Καραλίδη, τον οποίο θέλω να

ευχαριστήσω θερμά για την υπομονή, την όρεξη, και τον χρόνο που διέθεσε κατά την εκμάθηση του λογισμικού QGIS, αλλά και για την επίλυση οποιασδήποτε δυσκολίας προέκυπτε, καθώς και για τις γνώσεις που μου προσέφερε .

Ακόμη, οφείλω να ευχαριστήσω την υποψήφια Διδάκτορα Γεωλόγο κα. Κατερίνα Σέρβου για την προθυμία της να με βοηθήσει σε ό,τι χρειάστηκα, για την υποστήριξη, την αισιοδοξία και τη θετική ενέργεια που μου μετέφερε όταν τη χρειαζόμουν.

Τέλος, περισσότερο από όλους, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που ήταν πάντα δίπλα μου, καθώς και για την υποστήριξη και για τη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας και των σπουδών μου.

Περίληψη

Η μεταλλευτική αποτελεί μια δραστηριότητα, η οποία συμβάλλει στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη της περιοχής στην οποία αναπτύσσεται. Ωστόσο, λόγω των μεγάλων εκτάσεων που απαιτούνται κατά την εξορυκτική δραστηριότητα, ιδιαίτερα σε επιφανειακές εκμεταλλεύσεις μεγάλης οριζόντιας εξάπλωσης όπως των ανθρακωρυχείων, προκαλούνται έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και μεταβολές στις καλύψεις και στις χρήσεις γης των περιοχών επέμβασης. Μια τέτοια δραστηριότητα είναι και αυτή που πραγματοποιείται από το 1957 στα λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας. Η ανάπτυξη και η προχώρηση των Ορυχείων κατά την πάροδο των ετών, έχει επιφέρει σημαντικές μεταβολές στην ευρύτερη περιοχή. Η ανάλυση των καλύψεων γης για την ευρύτερη περιοχή των Ορυχείων Πτολεμαΐδας για τη χρονική περίοδο 1988- 2022, αποτελεί στόχο της παρούσας εργασίας, καθώς μπορεί να συμβάλλει στην παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και αποκαταστάσεων που πραγματοποιούνται, αλλά και στην επιλογή κατάλληλων χρήσεων γης για την περιοχή μετά το πέρας της εξορυκτικής δραστηριότητας. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε η επιστήμη της τηλεπισκόπησης σε συνδυασμό με τη χρήση δορυφορικών εικόνων και την εφαρμογή της μεθόδου της επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Αφού λήφθηκαν δορυφορικές εικόνες των ετών 1998, 1993, 1998, 2003, 2008, 2013, 2018 και 2022 και τροποποιήθηκαν καταλλήλως ώστε να εστιάζουν στην ευρύτερη περιοχή ανάπτυξης των Ορυχείων, εφαρμόστηκε σε αυτές η επιβλεπόμενη ταξινόμηση, η οποία στη συνέχεια αξιολογήθηκε ως προς την ακρίβειά της. Μέσω της διαδικασίας αυτής, προέκυψαν οχτώ ταξινομημένοι χάρτες, στους οποίους διακρίθηκαν πέντε κατηγορίες καλύψεων γης (υψηλή φυτοκάλυψη, χαμηλή φυτοκάλυψη, άγονη γη, υδάτινα σώματα και ανθρωπογενείς κατασκευές). Έπειτα, οι συγκεκριμένοι χάρτες μελετήθηκαν ως προς τις μεταβολές των καλύψεων γης που πραγματοποιούνται εντός και εκτός του εγκεκριμένου ορίου Περιβαλλοντικών Όρων σε σχέση με τον χρόνο και συγκρίθηκαν οι αλλαγές στις εκτάσεις των καλύψεων ανά δεκαετία. Από αυτή τη διερεύνηση, προέκυψε ότι παρ' όλο που η λιγνιτική δραστηριότητα στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας έχει προκαλέσει μεταβολές στις καλύψεις γης της περιοχής επέμβασης, έχει επιτευχθεί σημαντικό έργο στην αναβάθμιση του περιβαλλοντικού τοπίου μέσω των εργασιών αποκατάστασης που έχουν πραγματοποιηθεί. Τέλος, η ταξινόμηση του έτους 2022 αξιολογήθηκε ως η πιο ακριβής ως προς την αποτύπωση

των καλύψεων γης σε σχέση με την πραγματικότητα, κάτι που τεκμηριώνεται από τη διαχρονική βελτίωση της ποιότητας των δορυφορικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.

Abstract

Mining is an activity that contributes to the economic and social development of the region in which it is developed. However, the large required areas during the mining activity, especially in surface mining operations with large horizontal spread such as coal mines, are caused intense environmental impacts, land cover and land use changes in the intervention areas. Such activity is the one that has been taking place since 1957 in the Ptolemais lignite mines. The development and progress of the Mines over the years have brought about significant changes in the wider area. The present thesis deals with the land cover analysis of the wider area of Ptolemais lignite mines for the period 1988-2022. The main target is to contribute to the monitoring of the environmental impacts and reclamations that are taking place, but also to the selection of the most suitable post-mining land uses for this area. For this purpose, the science of remote sensing was used in combination with the use of satellite images and the supervised classification method. After downloading and appropriately processing the satellite images of the years 1998, 1993, 1998, 2003, 2008, 2013, 2018 and 2022 in order to focus on the wider development area of the Mines, the supervised classification was performed, which was later evaluated for its accuracy. Through this process, eight classified maps were generated, where five land cover categories (high-density forest, low-density forest, barren soil, water bodies and human structures) were distinguished. Afterwards, these maps were evaluated regarding the land use changes within and outside the approved Environmental Limit through time, while the land cover changes in the affected areas were assessed per decade. The results of this research showed that even though the lignite activity at the Ptolemais Mines has caused changes in the intervention area, a significant improvement of the landscape has been achieved due to the reclamation works that have occurred. Finally, the classification of the 2022 satellite image was evaluated as the most accurate over capturing land covers in relation to reality, which is justified by the diachronic improvement in the quality of the used satellite data.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Αντικείμενο έρευνας.....	2
1.2 Περιορισμοί έρευνας	2
1.3 Διάρθρωση εργασίας	3
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	5
2.1 Καλύψεις και χρήσεις γης στα ορυχεία	5
2.1.1 Παραγωγική διαδικασία Ορυχείων Πτολεμαΐδας	7
2.1.2 Περιβαλλοντική αποκατάσταση- Ορυχεία Πτολεμαΐδας	11
2.1.3 Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα και Σχέδιο Δίκαιης και Αναπτυξιακής Μετάβασης	13
2.2 Δορυφορικά δεδομένα	16
2.2.1 Δορυφόροι Landsat.....	18
2.2.2 Δορυφόρος Sentinel.....	21
2.3 Εφαρμογές μηχανικής μάθησης στις καλύψεις γης.....	24
2.3.1 Γενικά	24
2.3.2 Επιλογή επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης	28
2.3.3 Επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση.....	30
2.3.4 Περιπτώσεις εφαρμογής.....	32
3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	35
3.1 Περιοχή έρευνας.....	35
3.2 Επιλογή και επεξεργασία δορυφορικών εικόνων.....	36
3.3 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων.....	39
3.3.1 Αποτύπωση καλύψεων γης.....	39
3.3.2 Αξιολόγηση ακρίβειας ταξινόμησης	41
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	43
4.1 Αποτελέσματα επιβλεπόμενης ταξινόμησης.....	43
4.2 Αποτελέσματα αξιολόγησης ακρίβειας ταξινόμησης.....	58
4.3 Αλλαγές καλύψεων γης	66
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	77
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	81
Παράρτημα: Ανεπεξέργαστες δορυφορικές εικόνες Landsat 5, Landsat 8 και Sentinel-2	85

Εικόνες

Εικόνα 1: Πανοραμική άποψη του Ορυχείου Μαυροπηγής στην Πτολεμαΐδα (Πηγή: ΔΕΗ- Γενική Διεύθυνση Λιγνιτικής Παραγωγής).....	8
Εικόνα 2: Τυπικό δείγμα αποκατάστασης πρανών απόθεσης με δασικά είδη (Πηγή: ΔΕΗ- Γενική Διεύθυνση Λιγνιτικής Παραγωγής).....	12
Εικόνα 3: Λιμναίο οικοσύστημα στην αποκατεστημένη περιοχή του Ορυχείου Μαυροπηγής (Πηγή: ΔΕΗ- Γενική Διεύθυνση Λιγνιτικής Παραγωγής)	12
Εικόνα 4: Αρχές λειτουργίας τηλεπισκόπησης (Πηγή: Εθνικό Πανεπιστήμιο Σιγκαπούρης)..	16
Εικόνα 5: Το φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Πηγή: Kern and Ozsoy, 2018).....	17
Εικόνα 6: Δορυφόρος Landsat 5 (Πηγή: NASA).....	18
Εικόνα 7: Εκτόξευση δορυφόρου Landsat 5 (Πηγή: USGS)	19
Εικόνα 8: Δορυφόρος Landsat 8 (Πηγή: USGS).....	20
Εικόνα 9: Εκτόξευση δορυφόρου Landsat 8 (Πηγή: NASA).....	21
Εικόνα 10: Δορυφόρος Sentinel-2A (Πηγή: ESA).....	22
Εικόνα 11: Εκτόξευση δορυφόρου Sentinel-2A (Πηγή: ESA)	23
Εικόνα 12: Διαδικασία επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης (Πηγή: v7labs.com).....	30

Χάρτες

Χάρτης 1: Στάθμη εκμετάλλευσης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας (2022) (Πηγή: ΔΕΗ- Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων).....	13
Χάρτης 2: Γεωγραφική θέση Ορυχείων Πτολεμαΐδας	36
Χάρτης 3: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 1988.....	44
Χάρτης 4: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 1993.....	45
Χάρτης 5: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 1998.....	47
Χάρτης 6: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2003.....	48
Χάρτης 7: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2008.....	50
Χάρτης 8: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2013.....	52
Χάρτης 9: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2018.....	54
Χάρτης 10: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2022.....	56
Χάρτης 11: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές υψηλής φυτοκάλυψης (1988-1998)	68

Χάρτης 12: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές χαμηλής φυτοκάλυψης (1988-1998).....	68
Χάρτης 13: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές άγονης γης (1988-1998).....	69
Χάρτης 14: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές ανθρωπογενών κατασκευών (1988-1998)	69
Χάρτης 15: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές υψηλής φυτοκάλυψης (1998-2008)	71
Χάρτης 16: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές χαμηλής φυτοκάλυψης (1998-2008).....	71
Χάρτης 17: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές άγονης γης (1998-2008).....	72
Χάρτης 18: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές ανθρωπογενών κατασκευών (1998-2008)	72
Χάρτης 19: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές υψηλής φυτοκάλυψης (2008-2022)	75
Χάρτης 20: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές χαμηλής φυτοκάλυψης (2008-2022).....	75
Χάρτης 21: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές άγονης γης (2008-2022).....	76
Χάρτης 22: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές ανθρωπογενών κατασκευών (2008-2022)	76

Πίνακες

Πίνακας 1: Γενικά χαρακτηριστικά δορυφόρου Landsat 5 (Πηγή: ESA).....	19
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών Multispectral Scanner (MSS) (Πηγή: USGS)	19
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών αισθητήρων Thematic Mapper (TM) (Πηγή: USGS).....	19
Πίνακας 4: Γενικά χαρακτηριστικά δορυφόρου Landsat 8 (Πηγή: ESA).....	20
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών Operational Land Imager (OLI) (Πηγή: USGS).....	21
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών αισθητήρα Thermal Infrared Sensor (TIRS) (Πηγή: USGS)	21
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών δορυφόρου Sentinel-2 (Πηγή: Montoya S.)	22
Πίνακας 8: Διαφορές επιβλεπόμενης και μη επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης (Πηγή: Bansal, 2023).....	29
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά εικόνων δορυφόρων Landsat 5, Landsat 8 και Sentinel-2	38
Πίνακας 10: Αριθμός δειγμάτων εκπαίδευσης σε σχέση με τα μελετώμενα έτη και τις κλάσεις της ταξινόμησης	40

Πίνακας 11: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 1988	59
Πίνακας 12: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 1993	60
Πίνακας 13: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 1998	61
Πίνακας 14: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2003	62
Πίνακας 15: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2008	62
Πίνακας 16: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2013	63
Πίνακας 17: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2018	64
Πίνακας 18: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2022	65
Πίνακας 19: Σύγκριση μεταβολών στις εκτάσεις των καλύψεων γης μεταξύ των ετών 1988 και 1998	67
Πίνακας 20: Σύγκριση μεταβολών στις εκτάσεις των καλύψεων γης μεταξύ των ετών 1998 και 2008	70
Πίνακας 21: Σύγκριση μεταβολών στις εκτάσεις των καλύψεων γης μεταξύ των ετών 2008 και 2022	73

Διαγράμματα

Διάγραμμα 1: Παραγωγή λιγνίτη στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας (1957-2022) (Πηγή: ΔΕΗ- Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων).....	9
Διάγραμμα 2: Σχέση εκμετάλλευσης στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας (1957-2022) (Πηγή: ΔΕΗ- Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων).....	10
Διάγραμμα 3: Συνολικές εκσκαφές στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας (1957-2022) (Πηγή: ΔΕΗ- Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων).....	10

Διάγραμμα 4: Μεθοδολογία εργασίας- στάδια προ-επεξεργασίας, επεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας.....	35
Διάγραμμα 5: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 1988.....	44
Διάγραμμα 6: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 1993.....	46
Διάγραμμα 7: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 1998.....	47
Διάγραμμα 8: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2003.....	49
Διάγραμμα 9: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2008.....	50
Διάγραμμα 10: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2013.....	52
Διάγραμμα 11: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2018.....	54
Διάγραμμα 12: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2022.....	56
Διάγραμμα 13: Μεταβολές καλύψεων γης στην ευρύτερη περιοχή των Ορυχείων Πτολεμαΐδας (1988-2022)	57
Διάγραμμα 14: Χρονική εξέλιξη συντελεστή Kappa (1988-2022)	65

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι υπαίθριες εκμεταλλεύσεις αποτελούν παράγοντα βιώσιμης ανάπτυξης των περιοχών στις οποίες αναπτύσσονται. Η μεταλλευτική δραστηριότητα συμβάλλει στην οικονομική ανάπτυξη και την αύξηση της απασχόλησης. Πρόκειται για δραστηριότητα ευρείας κλίμακας, η οποία απαιτεί μεγάλες εκτάσεις, αφήνει έντονο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και επιφέρει συνεχείς μεταβολές τόσο στις χρήσεις, όσο και στις καλύψεις των περιοχών επέμβασης.

Τα λιγνιτωρυχεία, κυρίως της ΔΕΗ αλλά και δευτερευόντως ιδιωτών, στην περιοχή της Κοζάνης- Πτολεμαΐδας- Φλώρινας και στην περιοχή της Μεγαλόπολης εξασφάλιζαν επί σειρά ετών, το σημαντικό για την ελληνική οικονομία ενεργειακό καύσιμο, τον λιγνίτη, στον οποίο βασίστηκε ο εξηλεκτρισμός της χώρας. Τα τελευταία χρόνια όμως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη έχει μειωθεί σημαντικά, κυρίως λόγω της σημαντικής αύξησης της τιμής των δικαιωμάτων εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα, που έχουν επιβληθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση στις βιομηχανίες που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα, λόγω του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής. Η εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη βαίνει τα τελευταία χρόνια συνεχώς μειούμενη, με απώτερο σκοπό την πλήρη αντικατάστασή της από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η λειτουργία των λιγνιτωρυχείων έχει περάσει πλέον στη φάση της περάτωσης και η μελέτη των μεταβολών στις εκτάσεις επέμβασης λόγω της μεταλλευτικής δραστηριότητας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τις μελλοντικές προτεινόμενες χρήσεις γης και την περιβαλλοντική αποκατάσταση των ευρύτερων περιοχών.

Η χωροχρονική ανάλυση των καλύψεων γης αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη διερεύνηση των επιπτώσεων των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων στο περιβάλλον, όπως είναι η ανάπτυξη υπαίθριων εκμεταλλεύσεων αλλά και των φυσικών διεργασιών που εν τέλει διαμορφώνουν το τοπίο. Η μελέτη των καλύψεων γης οδηγεί στην κατανόηση των δραστηριοτήτων που μεταβάλουν τον χώρο, αλλά και των τάσεων που επικρατούν και αποτελεί αναπόσπαστο τμήμα για την αποτίμηση των κοινωνικοοικονομικών παραμέτρων και τη βιώσιμη ανάπτυξη της υπό διερεύνηση περιοχής.

Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας τις τελευταίες δεκαετίες έχει διευκολύνει το έργο της παρατήρησης και της ανάλυσης. Η επιστήμη της τηλεπισκόπησης παρέχει τα κατάλληλα εργαλεία για τη χωροχρονική μελέτη των καλύψεων γης και την εξαγωγή συμπερασμάτων που

σχετίζονται με τη διαχρονική εξέλιξη των ορυχείων και τον σχεδιασμό της μελλοντικής αποκατάστασης.

Στην παρούσα εργασία μελετάται η χωροχρονική μεταβολή των καλύψεων γης στην ευρύτερη περιοχή ανάπτυξης των λιγνιτωρυχείων Πτολεμαΐδας, στη Δυτική Μακεδονία.

1.1 Αντικείμενο έρευνας

Αντικείμενο έρευνας της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η παρακολούθηση και η ανάλυση των μεταβολών στις καλύψεις γης στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας και στην περιβάλλουσα περιοχή, μέσω της επεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων και της εφαρμογής της μεθόδου της επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Η μελέτη των προαναφερόμενων μεταβολών έχει τόσο χωρική, όσο και χρονική διάσταση, καθώς αφορά στη χρονική περίοδο μεταξύ των ετών 1988- 2022.

Οι μεταβολές στις καλύψεις γης στη μελετώμενη μεταλλευτική περιοχή πραγματοποιούνται με ταχύ ρυθμό και επηρεάζουν μεγάλες εκτάσεις, στις οποίες προκαλούν έντονες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για τον λόγο αυτό, η χωροχρονική ανάλυση αυτών είναι σημαντική. Ακόμη, η διερεύνησή τους συντελεί στην παρακολούθηση, στην αξιολόγηση, αλλά και στον σχεδιασμό των περιβαλλοντικών αποκαταστάσεων στις περιοχές επέμβασης.

Ως στόχοι της εργασίας, τίθενται η μελέτη της επίδρασης της εξέλιξης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας στις καλύψεις γης της ευρύτερης περιοχής και η παρατήρηση των μεταβολών στις καλύψεις γης σε σχέση με τον χρόνο για τη συγκεκριμένη λιγνιτική εκμετάλλευση, καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την τάση των μεταβολών και πως αυτή ενδέχεται να επηρεάσει και να καθορίσει τις μελλοντικές χρήσεις γης μετά την περάτωση της εκμετάλλευσης.

1.2 Περιορισμοί έρευνας

Δεδομένου ότι για την ανάλυση των χωροχρονικών μεταβολών των καλύψεων γης στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας εφαρμόστηκε η τεχνική της τηλεπισκόπησης και η μέθοδος της επιβλεπόμενης ταξινόμησης μέσω του λογισμικού Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών Quantum Geographical Information System (QGIS), υπήρξαν κάποιοι περιορισμοί.

Αρχικά, για την επιλογή των προς επεξεργασία δορυφορικών εικόνων, ήταν απαραίτητη η ευκρίνεια της εικόνας κάθε έτους στην περιοχή μελέτης. Προκειμένου να απεικονίζονται ευκρινώς τα Ορυχεία και η ευρύτερη περιοχή, επιλέχθηκαν εικόνες στις οποίες η νεφοκάλυψη ήταν μικρότερη από 10%. Για να αυξηθεί η πιθανότητα εύρεσης τέτοιων εικόνων, η αναζήτησή τους περιορίστηκε στους καλοκαιρινούς και φθινοπωρινούς μήνες του εκάστοτε έτους. Σύμφωνα με αυτό, αλλά και για να μπορέσει να βασιστεί η ανάλυση στην ίδια εποχιακή περίοδο, επιλέχθηκαν δορυφορικές εικόνες οι οποίες είχαν ληφθεί κατά τους μήνες Αύγουστο και Σεπτέμβριο.

Ένας ακόμη περιορισμός προέκυψε κατά το στάδιο της εφαρμογής της επιβλεπόμενης ταξινόμησης και αφορούσε στη δυσκολία διάκρισης των περιοχών όπου δραστηριοποιείται το Ορυχείο και των περιοχών των ανθρωπογενών κατασκευών. Η φασματική υπογραφή των περιοχών αυτών είναι παρόμοια και για τον λόγο αυτό, έπρεπε να γίνονται συνεχώς διορθώσεις και κατάλληλες προσαρμογές ώστε να μη συγχέονται οι συγκεκριμένες καλύψεις κατά την ταξινόμηση. Για τον ίδιο λόγο, οι εκτάσεις των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων επιλέχθηκαν να συμπεριληφθούν στην κατηγορία της άγονης γης.

Τέλος, δυσκολία υπήρξε και κατά την αποτύπωση των υδάτινων όγκων εξαιτίας των πολύ μικρών εμφανίσεών τους στην περιοχή μελέτης. Η έκτασή τους ήταν αμελητέα σε σχέση με αυτή των υπόλοιπων καλύψεων γης, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει δυνατότητα αποτύπωσης με ακρίβεια στους ταξινομημένους χάρτες και στα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν.

1.3 Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα εργασία δομείται σε πέντε κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 1 περιγράφεται το ευρύτερο πλαίσιο και το αντικείμενο της εργασίας και παρουσιάζονται οι περιορισμοί που προέκυψαν κατά το ερευνητικό στάδιο.

Το Κεφάλαιο 2 αφορά στο θεωρητικό μέρος της εργασίας και σε αυτό γίνεται μια γενική αναφορά στις καλύψεις γης στα ορυχεία, παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν στην παραγωγική διαδικασία και στην περιβαλλοντική αποκατάσταση των Ορυχείων της Πτολεμαΐδας. Ακόμη, περιγράφεται η επιστήμη της τηλεπισκόπησης και τα δορυφορικά συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν για τον σκοπό της εργασίας. Τέλος, αναλύονται οι μέθοδοι

της μηχανικής μάθησης και παρουσιάζονται περιπτώσεις εφαρμογών της τηλεπισκόπησης για την ανάλυση των καλύψεων γης.

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η περιοχή έρευνας και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τη μελέτη των μεταβολών στις καλύψεις γης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας. Ειδικότερα, αναλύεται ο τρόπος επιλογής και επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, όπως και ο τρόπος εφαρμογής και αξιολόγησης της επιβλεπόμενης ταξινόμησης.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης, δηλαδή οι ταξινομημένοι χάρτες που δημιουργήθηκαν και διαγράμματα τα οποία αποτυπώνουν από πλευράς έκτασης, αλλά και ποσοστιαία τις καλύψεις γης κάθε έτους. Επίσης, αναλύονται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της ταξινόμησης μέσω αντίστοιχων πινάκων και διαγραμμάτων και τέλος συγκρίνονται τρία ζεύγη ετών ως προς τις μεταβολές στις καλύψεις γης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη συγκεκριμένη εργασία, καθώς και η συζήτηση σε σχέση με αυτά.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1 Καλύψεις και χρήσεις γης στα ορυχεία

Η μεταλλευτική και ειδικότερα η εξόρυξη, είναι μία δραστηριότητα, η οποία απαιτεί ευρεία χρήση εδαφικής γης (Yildiz, 2021). Μετά το πέρας της εξόρυξης, οι εκτάσεις γης οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τις δραστηριότητες της εκμετάλλευσης έχουν υποστεί τεράστιες αλλαγές (Hendrychová et al., 2020). Επομένως, η εξόρυξη φυσικών πόρων συνδέεται άμεσα με τις αλλαγές των χρήσεων και των καλύψεων γης. Από περιβαλλοντική σκοπιά, η δυναμική που χαρακτηρίζει τις αλλαγές αυτές, αποτελεί τη μεγαλύτερη ανθρωπογενή και μακροχρόνια διαταραχή του συστήματος της γήινης επιφάνειας (Garai and Narayana, 2018; Guan and Yu, 2021).

Οι υπαίθριες μεταλλευτικές εκμεταλλεύσεις, εκτός από τη συνεισφορά τους στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη, αφήνουν μεγάλο περιβαλλοντικό αποτύπωμα στις γύρω περιοχές (Worlanyo and Jiangfeng, 2021; Zhang et al., 2023). Μερικές από τις επιπτώσεις που προκαλεί η εξορυκτική δραστηριότητα, ανάλογα και με το μέγεθός της, είναι: η απώλεια φυτικής κάλυψης, η επέμβαση σε υδάτινα σώματα, η αλλοίωση των φυσικών χαρακτηριστικών του εδάφους, αλλά και της δομής του, η αλλαγή στην τοπογραφία της περιοχής, η επέμβαση στη βιοποικιλότητα και στη βλάστηση, οι αλλαγές στις χρήσεις γης, η ατμοσφαιρική ρύπανση, η ρύπανση των γεωργικών εδαφών, των υπόγειων και των επιφανειακών υδάτων, η απώλεια της παραγωγικότητας του εδάφους, η αύξηση των ασθενειών που σχετίζονται με το αναπνευστικό και η μετακίνηση ανθρώπων ή ακόμη και ολόκληρων οικισμών (Zhang et al., 2019; Worlanyo and Jiangfeng, 2021; Yu and Zahidi, 2023). Επιπλέον, χαρακτηριστικό των δραστηριοτήτων εξόρυξης αποτελεί η άμεση κατάληψη εδαφικών εκτάσεων, η οποία προκαλείται από τις εξωτερικές αποθέσεις που δημιουργούνται από τα στείρα υλικά, αλλά και η σταδιακή αποκατάστασή τους προς νέες χρήσεις (Ibid.). Είναι προφανές, ότι η εξορυκτική βιομηχανία αλλάζει ολοκληρωτικά τοπία και οικοσυστήματα.

Σύμφωνα με τους (Hendrychová et al., 2020), οι αλλαγές των καλύψεων γης είναι η κυριότερη αιτία για την απώλεια της χερσαίας βιοποικιλότητας και τις αλλοιώσεις στις λειτουργίες των οικοσυστημάτων. Για τον λόγο αυτό, η διερεύνηση των μεταβολών στις καλύψεις γης σε μία μεταλλευτική περιοχή, συμβάλλει στον σχεδιασμό της τελικής αποκατάστασης, αλλά και στην επιλογή των κατάλληλων χρήσεων γης για την περιοχή (Zhang et al., 2019).

Η περιβαλλοντική αποκατάσταση και οι δραστηριότητες που σχετίζονται με τη μετα-μεταλλευτική περίοδο, καθώς και η επιλογή των κατάλληλων χρήσεων γης για την προς αποκατάσταση μεταλλευτική περιοχή είναι πολύ σημαντικές σε κάθε εκμετάλλευση. Ωστόσο, η επιλογή αυτή αποτελεί μια σύνθετη πολυκριτηριακή απόφαση εξαιτίας των πολλών παραμέτρων (γεωτεχνικές, τοπογραφικές, υδρογεωλογικές, περιβαλλοντικές, νομικές, οικονομικές και κοινωνικές) που πρέπει να ληφθούν υπόψη ώστε τα προτεινόμενα μέτρα αποκατάστασης να γίνουν αποδεκτά και να θεωρηθούν επιτυχή από τις κοινότητες της επηρεαζόμενης περιοχής (Palogos et al., 2017). Επομένως, η απόφαση για την καταλληλότερη χρήση γης σε κάθε τμήμα της μεταλλευτικής περιοχής, βασίζεται στα χαρακτηριστικά της εν λόγω περιοχής, στην κρίση των μηχανικών και των επιστημόνων, στα σχέδια ανάπτυξης των τοπικών κοινοτήτων και αρχών, στο θεσμικό περιβαλλοντικό πλαίσιο και στους περιβαλλοντικούς περιορισμούς (Ibid.).

Στον σχεδιασμό της περάτωσης λειτουργίας ενός ορυχείου, είναι κρίσιμο να υπάρχει μελέτη για τις τελικές χρήσεις γης, οι οποίες θα πρέπει να αφορούν σε ασφαλείς, μη ρυπογόνες και σταθερές εδαφικές μορφές και να είναι οικονομικά παραγωγικές για την τοπική κοινότητα, καθώς στην πραγματικότητα οι τελικές χρήσεις γης ορίζονται με γνώμονα την οικονομική βιωσιμότητα και ανάπτυξη (Hendrychová et al., 2020). Σύμφωνα με την μελέτη των (Worlanyo and Jiangfeng, 2021), οι χρήσεις γης μετά το πέρας της μεταλλευτικής δραστηριότητας σε μια περιοχή, μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες: δασικές εκτάσεις, αγροτικές καλύψεις, ανθρωπογενείς κατασκευές (οικιστικές, βιομηχανικές εγκαταστάσεις κλπ.), εκτάσεις χρήσεων αναψυχής, λιμναίες εκτάσεις, εκτάσεις ειδικής χρήσης (υπόγειες και υπαίθριες εγκαταστάσεις παροχής νερού).

Τέλος, αναφέρεται ότι στόχος της αποκατάστασης αποτελεί η διαμόρφωση του τοπίου σε καλύτερη κατάσταση από την αρχική του μορφή ή η επαναφορά του στην πρότερή του μορφή, δηλαδή αυτή που είχε πριν την έναρξη της εξόρυξης, στις περιοχές όπου αυτή είναι εφικτή (Worlanyo and Jiangfeng, 2021). Επομένως, ο σχεδιασμός συστηματικής περιβαλλοντικής αποκατάστασης στο τμήμα της γης που έχει υποστεί αλλοίωση από τη δραστηριότητα της εκμετάλλευσης είναι απαραίτητος, ώστε να επανεξετασθεί το πρότυπο των χρήσεων γης στις συγκεκριμένες περιοχές και παράλληλα να επιδιωχθεί η περιβαλλοντική βιωσιμότητά τους (Paraskevis et al., 2021; Zhang et al., 2023). Τονίζεται ότι, οι εργασίες αποκατάστασης

διενεργούνται παράλληλα με τις εργασίες εκμετάλλευσης και αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα της μεταλλευτικής δραστηριότητας.

Η τρέχουσα εργασία θα εστιάσει στις μεταβολές των καλύψεων γης στα λιγνιτωρυχεία Πτολεμαΐδας, τα οποία αποτελούν το μεγαλύτερο ενεργειακό κέντρο της χώρας, αλλά και στην ευρύτερη περιοχή τους, η οποία επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την εξορυκτική δραστηριότητα.

2.1.1 Παραγωγική διαδικασία Ορυχείων Πτολεμαΐδας

Σήμερα, στο Λιγνιτικό Κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (ΛΚΔΜ), βρίσκονται σε λειτουργία το Ορυχείο Νοτίου Πεδίου και το Ορυχείο Μαυροπηγής (Εικόνα 1), το οποίο υπάγεται στον Κλάδο Ορυχείου Κεντρικού Πεδίου.

Τα δύο προαναφερόμενα Ορυχεία, τροφοδοτούν με λιγνίτη τις μονάδες του Ατμοηλεκτρικού Σταθμού (ΑΗΣ) Αγίου Δημητρίου και πρόκειται να τροφοδοτήσουν τη νέα μονάδα V του ΑΗΣ Πτολεμαΐδας, η οποία βρίσκεται σε δοκιμαστική λειτουργία από το τέλος του έτους 2022, για όσο χρονικό διάστημα λειτουργήσει με λιγνίτη (ΔΕΗ, 2021a).

Η παραγωγική διαδικασία της επιφανειακής εκμετάλλευσης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας αποτελείται από τις εξής δραστηριότητες:

- i. Αποκάλυψη του κοιτάσματος με χρήση κυρίως καδοφόρων εκσκαφών και λιγότερο με χρήση συμβατικού εξοπλισμού (προωθητές γαιών, φορτωτές κτλ.) για την εκσκαφή των υπερκείμενων αγόνων.
- ii. Διακίνηση των αγόνων (στείων αποκάλυψης, καθώς και στείων ενδιάμεσων ενστρώσεων) προς τους χώρους απόθεσης. Η διακίνηση αυτή από τους καδοφόρους εκσκαφείς προς τους αποθέτες πραγματοποιείται με μεταφορικές ταινίες. Όταν η εκσκαφή γίνεται με χρήση συμβατικού εξοπλισμού (εκσκαφείς ανεστραμμένου ή μετωπικού κάδου), η διακίνηση αγόνων διενεργείται με χωματουργικά αυτοκίνητα.
- iii. Εξόρυξη λιγνίτη με χρήση καδοφόρων εκσκαφών και εξοπλισμού ασυνεχούς λειτουργίας.
- iv. Μεταφορά και αποθήκευση λιγνίτη σε υπαίθριες αποθήκες (αυλές λιγνίτη των ΑΗΣ).

v. Τροφοδοσία με λιγνίτη των ΑΗΣ από τις αυλές.



Εικόνα 1: Πανοραμική άποψη του Ορυχείου Μαυροπηγής στην Πτολεμαΐδα (Πηγή: ΔΕΗ- Γενική Διεύθυνση Λιγνιτικής Παραγωγής)

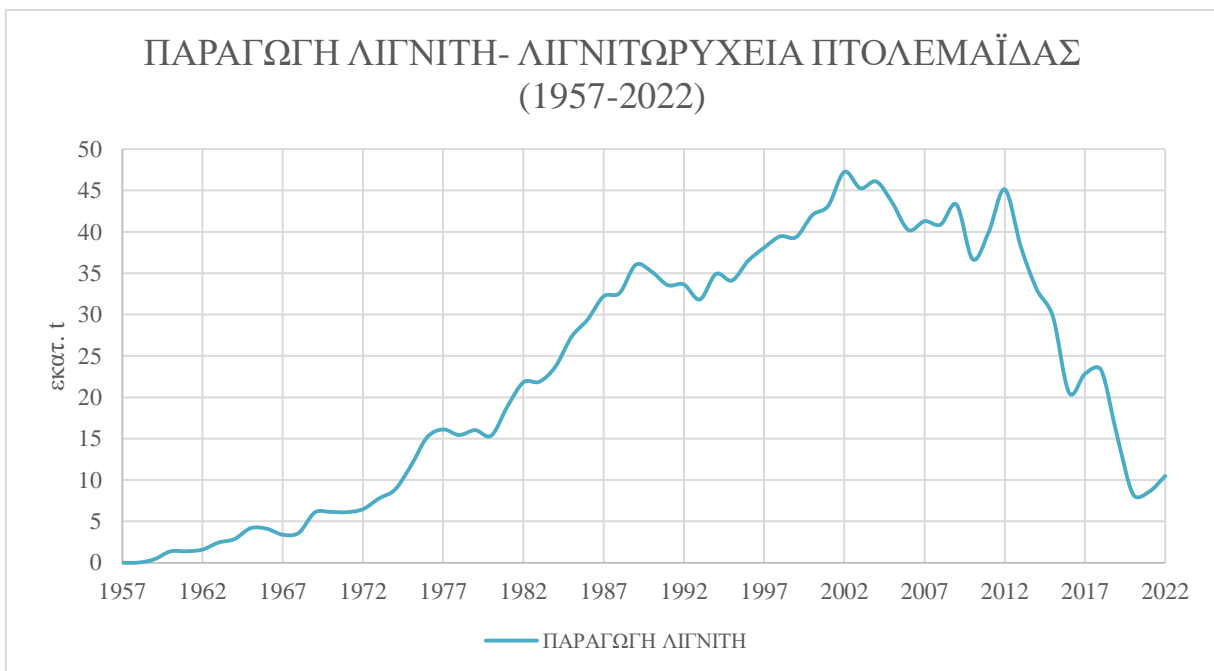
Όσον αφορά τη διακίνηση των εξορυσσόμενων υλικών (περιλαμβανομένου και του λιγνίτη) από την περιοχή εξόρυξης ή φόρτωσης προς τον τελικό προορισμό (αυλές αποθήκευσης ή χώροι απόθεσης αγόνων υλικών), σημειώνεται ότι υπάρχει δυνατότητα να πραγματοποιηθεί με τους παρακάτω τρόπους (ΔΕΗ, 2010):

- Εξόρυξη- φόρτωση, μεταφορά και απόθεση με εξοπλισμό συνεχούς λειτουργίας.
- Εξόρυξη- φόρτωση, μεταφορά και απόθεση με εξοπλισμό ασυνεχούς λειτουργίας.
- Διακίνηση με συνδυασμό των δύο μεθόδων, συνεχούς και ασυνεχούς λειτουργίας. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις τέτοιων συνδυασμών αποτελούν οι ακόλουθες εφαρμογές:
 - Εξόρυξη με χρήση καδοφόρου εκσκαφέα και απόθεση του εξορυσσόμενου υλικού επί του δαπέδου της βαθμίδας (πλευρική απόθεση), και έπειτα, φόρτωση, μεταφορά και απόθεση του υλικού με εξοπλισμό ασυνεχούς λειτουργίας.
 - Εξόρυξη- φόρτωση, μεταφορά και απόθεση του εξορυσσόμενου υλικού στην περιοχή λειτουργίας του καδοφόρου εκσκαφέα με εξοπλισμό ασυνεχούς λειτουργίας, και ακολούθως φόρτωση με τον καδοφόρο εκσκαφέα και διακίνησή του μέσω του συστήματος συνεχούς λειτουργίας.

Η απόθεση αγόνων υλικών, πραγματοποιείται μέσω των αποθετών, με κατάλληλο σχεδιασμό, έτσι ώστε να εναρμονίζεται με το γενικότερο τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής. Η εσωτερική απόθεση αγόνων ακολουθεί τις εκσκαφές του Ορυχείου για λόγους ευστάθειας των

πρανών, αλλά και για λόγους κατάλληλης περιβαλλοντικής αποκατάστασης παράλληλα με την εξέλιξη της εκμετάλλευσης (Ibid.).

Στα Διαγράμματα 1, 2 και 3 παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη της παραγωγής λιγνίτη (εκ. t), των συνολικών εκσκαφών (εκ. m³) και της σχέσης εκμετάλλευσης (m³ αγόνων υλικών προς t παραγόμενου λιγνίτη), που αφορά στα λιγνιτωρυχεία της Πτολεμαΐδας, για τη χρονική περίοδο από το έτος 1957 (έτος έναρξης της εκμετάλλευσης) έως το έτος 2022.



Διάγραμμα 1: Παραγωγή λιγνίτη στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας (1957-2022) (Πηγή: ΔΕΗ- Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων)



Διάγραμμα 2: Συνολικές εκσκαφές στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας (1957-2022) (Πηγή: ΔΕΗ- Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων)



Διάγραμμα 3: Σχέση εκμετάλλευσης στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας (1957-2022) (Πηγή: ΔΕΗ- Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων)

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων, διαφαίνεται η συνεχής ανάπτυξη των Ορυχείων της Πτολεμαΐδας από την έναρξη της εκμετάλλευσης έως και τα έτη 2012- 2013, με την κορύφωση της παραγωγικής δραστηριότητας να εντοπίζεται τη χρονική περίοδο 2000- 2012, κατά την οποία ο παραγόμενος λιγνίτης κυμαινόταν σταθερά πάνω από 40 εκ. t. Επίσης, από τα διαγράμματα παρατηρείται η σταδιακή πτώση της παραγωγής από το έτος 2014 και μετά, ιδιαίτερα μετά, γεγονός που ενισχύθηκε από την ανακοίνωση του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ, 2019) και την απόφαση για σταδιακή απεξάρτηση της ηλεκτροπαραγωγής από λιγνίτη. Τέλος, την τελευταία δεκαπενταετία παρατηρείται μικρή αύξηση της σχέσης εκμετάλλευσης, η οποία οφείλεται σε διάφορα προβλήματα που παρουσιάστηκαν αυτή την περίοδο, κατά την λειτουργία των λιγνιτωρυχείων (ιδιοκτησιακά θέματα- ζητήματα απαλλοτριώσεων, αρχαιολογικές ανασκαφές, θέματα γεωτεχνικής ευστάθειας, δυσχερέστερες συνθήκες εκμετάλλευσης, βαθύτερα κοιτάσματα, καθυστερήσεις σε έργα παραλλαγών οδικού δικτύου, κ.ά.).

2.1.2 Περιβαλλοντική αποκατάσταση- Ορυχεία Πτολεμαΐδας

Ο σχεδιασμός της περιβαλλοντικής αποκατάστασης της άμεσης περιοχής επέμβασης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας από μεριάς οικοσυστημάτων και τοπίου, πραγματοποιείται σύμφωνα με τα ακόλουθα (ΔΕΗ, 2010):

- Τα οικοσυστήματα που θα προκύψουν έπειτα από τις εργασίες αποκατάστασης, χρειάζεται να ενσωματωθούν οπτικά, αλλά και λειτουργικά στο φυσικό περιβάλλον της περιοχής.
- Τα συγκεκριμένα οικοσυστήματα, θα πρέπει να είναι υγιή και σταθερά.
- Τα προγραμματιζόμενα έργα αποκατάστασης, είναι σημαντικό να συμβάλλουν στην προστασία, καθώς και στην ανάδειξη του φυσικού περιβάλλοντος της περιοχής.

Η διαφύλαξη του φυσικού οικοσυστήματος της ευρύτερης περιοχής των Ορυχείων Πτολεμαΐδας είναι αναγκαία για τους παρακάτω λόγους:

- Τη διατήρηση της φυσικής ισορροπίας (οικολογική αλυσίδα).
- Τη βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης του ανθρώπου.

- Τη βελτίωση του τοπίου.
- Τη συγκράτηση της αιωρούμενης σκόνης.

Το αποτέλεσμα που επιδιώκεται αφού ολοκληρωθούν οι εξορυκτικές εργασίες στο ΛΚΔΜ, είναι η παράδοση στους κατοίκους της περιοχής, ενός αναβαθμισμένου περιβαλλοντικού τοπίου σε σχέση με την υφιστάμενη κατάσταση.

Η προοπτική για την πραγματοποίηση παρεμβάσεων στις περιοχές όπου ήδη έχει ολοκληρωθεί η εξόρυξη, έχει δημιουργηθεί από τη δεκαετία του '90, με την έναρξη των εργασιών περιβαλλοντικής αποκατάστασης. Οι εν λόγω παρεμβάσεις στις τελικές επιφάνειες των Ορυχείων Πτολεμαΐδας, διαμορφώνονταν έως τώρα ως εξής, βάσει των χρήσεων γης (Ibid.):

- Δημιουργία εκτάσεων με δασική βλάστηση με σκοπό:
 - την ξυλοπαραγωγή,
 - τη δημιουργία κτηνοτροφικών ζωνών και
 - τη δημιουργία αποκατεστημένων δασικών εκτάσεων (Εικόνα 2)



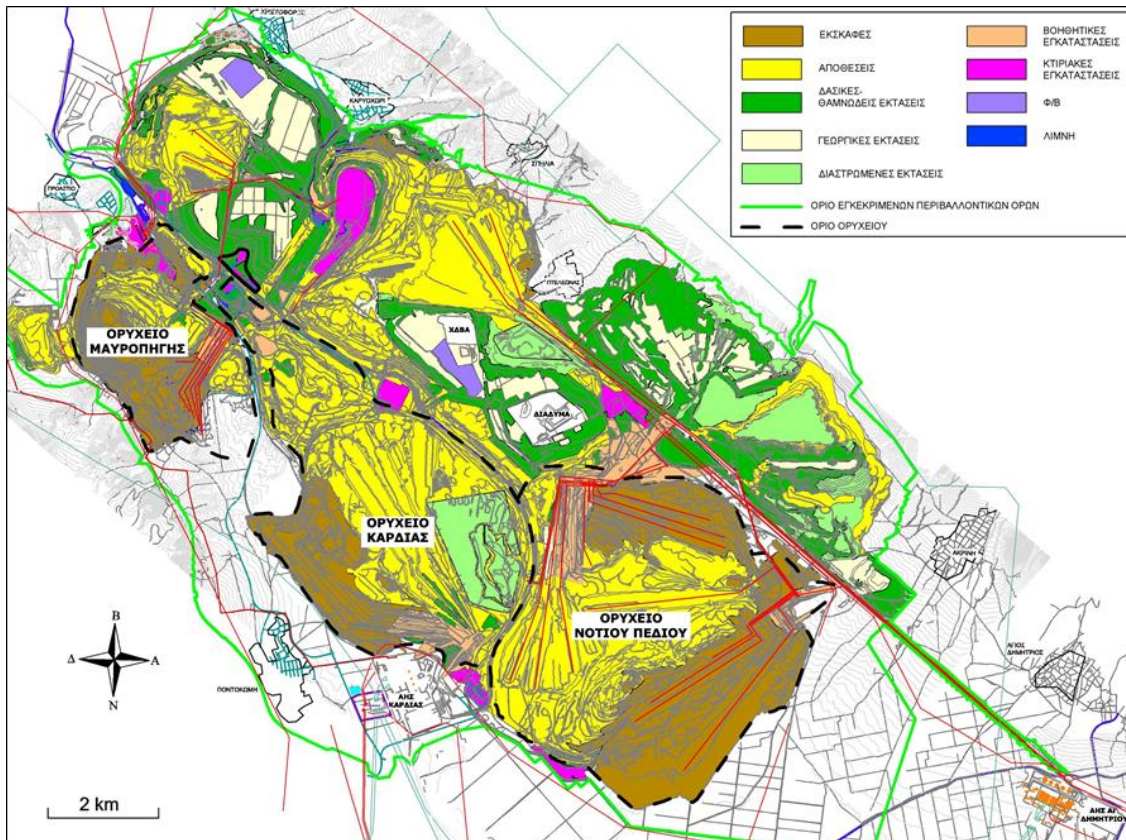
Εικόνα 2: Τυπικό δείγμα αποκατάστασης πρανών απόθεσης με δασικά είδη (Πηγή: ΔΕΗ- Γενική Διεύθυνση Λιγνιτικής Παραγωγής)



Εικόνα 3: Λιμναίο οικοσύστημα στην αποκατεστημένη περιοχή του Ορυχείου Μαυροπηγής (Πηγή: ΔΕΗ- Γενική Διεύθυνση Λιγνιτικής Παραγωγής)

- Δημιουργία εκτάσεων για αγροτική χρήση.
- Δημιουργία λιμναίων οικοσυστημάτων στα κενά ορύγματα των Ορυχείων (Εικόνα 3).
- Δημιουργία χρήσεων αναψυχής.

Στον παρακάτω χάρτη απεικονίζονται η στάθμη εκμετάλλευσης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας του έτους 2022, καθώς και οι υφιστάμενες χρήσεις γης. Από τον χάρτη φαίνεται ότι παράλληλα με την παραγωγική δραστηριότητα έχουν πραγματοποιηθεί και εκτεταμένες εργασίες αποκατάστασης (δασικές και γεωργικές εκτάσεις). Επίσης, φαίνεται ότι έχει ξεκινήσει και η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων, τα οποία σταδιακά θα παράγουν ενέργεια που θα αντικαταστήσει την παραγόμενη ενέργεια των αποσυρόμενων ΑΗΣ.



Χάρτης 1: Στάθμη εκμετάλλευσης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας (2022) (Πηγή: ΔΕΗ- Διεύθυνση Μελετών Εκμετάλλευσης και Περάτωσης Ορυχείων)

2.1.3 Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα και Σχέδιο Δίκαιης και Αναπτυξιακής Μετάβασης

Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ, ΦΕΚ 4893/Β/2019) αποτελεί ένα Στρατηγικό Σχέδιο για τα θέματα του Κλίματος και της Ενέργειας και στοχεύει στην επίτευξη συγκριμένων Ενεργειακών και Κλιματικών Στόχων έως το έτος 2030, οι οποίοι θα συμβάλλουν στην απαραίτητη ενεργειακή μετάβαση με τον πιο οικονομικά ανταγωνιστικό τρόπο για την

εθνική οικονομία, καθώς και στην επίτευξη της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2019).

Το ΕΣΕΚ, συμβαδίζοντας πλήρως με τον φιλόδοξο στόχο της ΕΕ για την ανάδειξη της Ευρώπης ως την πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρο έως το 2050, προβλέπει την πλήρη απολιγνιτοποίηση της Χώρας μέχρι το 2028 (ΔΕΗ, 2021b).

Στο πλαίσιο του ΕΣΕΚ και της προγραμματιζόμενης σταδιακής περάτωσης λειτουργίας των λιγνιτωρυχείων, καθώς και της απόσυρσης των ΑΗΣ έως το 2028, βασικός στόχος είναι η δίκαιη αναπτυξιακή μετάβαση των επηρεαζόμενων περιοχών, η δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και η ελαχιστοποίηση των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων που συνεπάγονται.

Οι Περιφερειακές Ενότητες Κοζάνης και Φλώρινας καθορίστηκαν ως Ζώνες Απολιγνιτοποίησης (ΖΑΠ) σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 155 του ν.4759/2020. Οι περιοχές εντός των παραπάνω ΖΑΠ, στις οποίες εκτείνονται οι ζώνες εξόρυξης λιγνίτη και λειτουργίας των ΑΗΣ της ΔΕΗ, καθορίζονται ως «Πυρήνες» των παραπάνω ΖΑΠ (Ibid.).

Οι βασικοί στόχοι στο Πλαίσιο της Δίκαιης Αναπτυξιακής Μετάβασης, εντός των Πυρήνων ΖΑΠ είναι οι παρακάτω:

- Η αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εξαιτίας της εξόρυξης του λιγνίτη και της λειτουργίας των ΑΗΣ, τόσο στα φυσικά και ανθρωπογενή της συστήματα, όσο και στο τοπίο.
- Η εναρμόνιση με τη γενικότερη ενεργειακή πολιτική και την πολιτική για την κλιματική αλλαγή της ΕΕ και της χώρας, όπως εκφράζεται στον Οδικό Χάρτη για την Ενέργεια με ορίζοντα το 2050 και τον Εθνικό Ενεργειακό Σχεδιασμό.
- Η αναδιάρθρωση της παραγωγικής ενεργειακής δραστηριότητας και η «ανασυγκρότηση» και ο ανασχεδιασμός των επιχειρηματικών προοπτικών ανάπτυξης των τριών τομέων παραγωγής (πρωτογενής, δευτερογενής και τριτογενής).
- Η σύνταξη ολοκληρωμένων σχεδίων αποκατάστασης και η αξιοποίηση των εξοφλημένων πεδίων εξόρυξης λιγνίτη, με προτεραιότητα στην εγκατάσταση καθαρών μορφών ενέργειας- Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

Ο επαναπροσδιορισμός των χρήσεων γης αποτελεί κρίσιμη παράμετρο για τη μετάβαση μιας περιοχής όπου κυριαρχεί ο κλάδος της εξόρυξης, καθώς είναι πιθανό η γη να αποτελεί το βασικότερο στοιχείο ανάπτυξης. Ο προσδιορισμός των βέλτιστων χρήσεων στις περιοχές των Ορυχείων της Πτολεμαΐδας βασίζεται σε πέντε παραμέτρους:

- Στη μορφολογία του εδάφους,
- σε στοιχεία υδρογραφίας,
- σε γεωτεχνικούς κινδύνους/ περιορισμούς,
- σε κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες και
- στην αξία της γης.

Οι άξονες, στους οποίους βασίζεται η ανάπτυξη των σεναρίων για τη χωροθέτηση των νέων χρήσεων γης είναι οι παρακάτω:

- Αξιοποίηση των υφιστάμενων χρήσεων με στόχο μια οικονομικά ορθολογική μετάβαση με το ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα και περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Επιμέρους στόχοι του συγκεκριμένου άξονα είναι:
 - Διατήρηση των ήδη αποκατεστημένων δασικών- αγροτικών εκτάσεων, όπου ήταν δυνατόν.
 - Αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων κτηριακών εγκαταστάσεων για ανάπτυξη βιομηχανικών και επιχειρηματικών ζωνών.
 - Χωροθετήσεις λιμνών/ λιμνοδεξαμενών στα κενά ορύγματα.
- Προτεραιότητα στις ήδη δεσμευμένες περιοχές, βάσει των σχετικών αιτήσεων/ αδειών προς τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ), αλλά και στις προτάσεις/ σχέδια της ΔΕΗ Ανανεώσιμες (ΔΕΗΑΝ) για χωροθέτηση φωτοβολταϊκών σταθμών.
- Προτεραιότητα στη χωροθέτηση Βιομηχανικών/Επιχειρηματικών Ζωνών σε περιοχές που ήδη υπάρχουν κτηριακές εγκαταστάσεις, σε αδιατάρακτα εδάφη και σε περιοχές που γειτνιάζουν και συνδέονται με το βασικό οδικό δίκτυο και άλλες υποδομές, με σκοπό την υλοποίηση όλων των αναπτυξιακών, επιχειρηματικών και επενδυτικών δράσεων.
- Προτεραιότητα στη χωροθέτηση χρήσεων/ καλύψεων με χαμηλή επεμβατικότητα (ήτοι εύκολα αναστρέψιμων) σε περιοχές με λιγνιτικά κοιτάσματα που δεν έχουν εξαντληθεί.
- Εφαρμογή ορθολογικών χωρικών κανόνων για τη χωροθέτηση μη-ανταγωνιστικών χρήσεων σε χωρική εγγύτητα, για την προστασία των ιδιαίτερης σημασίας χώρων π.χ.

αρχαιολογικοί χώροι/μνημεία και για την συμμόρφωση με τις κατευθύνσεις της τρέχουσας έκδοσης των Περιφερειακών Χωροταξικών Πλαισίων των δύο χωρικών ενοτήτων επέμβασης.

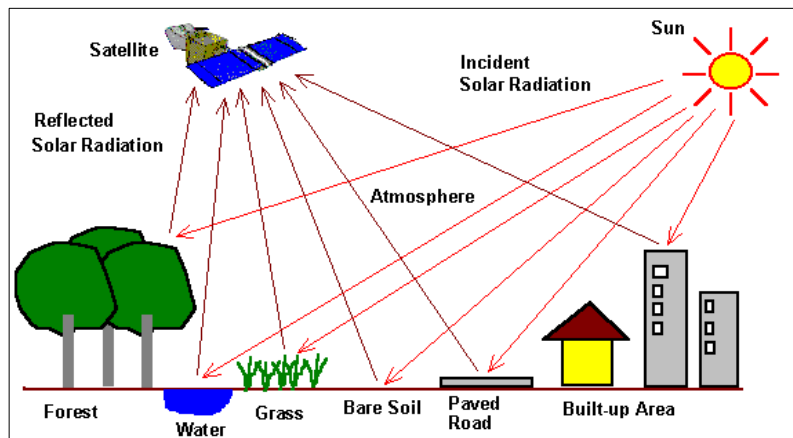
Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι είναι πολύ σημαντική η μελέτη των καλύψεων γης και η διαχρονική μεταβολή τους, βάσει της εξέλιξης των μεταλλευτικών εργασιών.

Η ανάλυση των διαχρονικών μεταβολών στις καλύψεις γης θα αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο και θα συνδράμει στην πρόταση των νέων τελικών χρήσεων γης για τη βέλτιστη οικονομική, κοινωνική και περιβαλλοντική βιώσιμη ανάπτυξη της ευρύτερης περιοχής μετά την ολοκλήρωση των μεταλλευτικών εργασιών.

2.2 Δορυφορικά δεδομένα

Για την πραγματοποίηση της χωροχρονικής ανάλυσης των μεταβολών στις καλύψεις γης, χρησιμοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες (Landsat 5, Landsat 8 και Sentinel- 2), η επεξεργασία των οποίων έγινε με τεχνικές που βασίζονται στην τεχνική της τηλεπισκόπησης (remote sensing).

Η τηλεπισκόπηση ή αλλιώς τηλεανίχνευση ορίζεται ως η επιστήμη και η τεχνική απόκτησης, ανάλυσης και ερμηνείας πληροφοριών γύρω από ένα αντικείμενο μελέτης (όπως ένα φυσικό φαινόμενο ή οι αλλαγές στις χρήσεις γης μιας περιοχής), το οποίο βρίσκεται στην επιφάνεια της



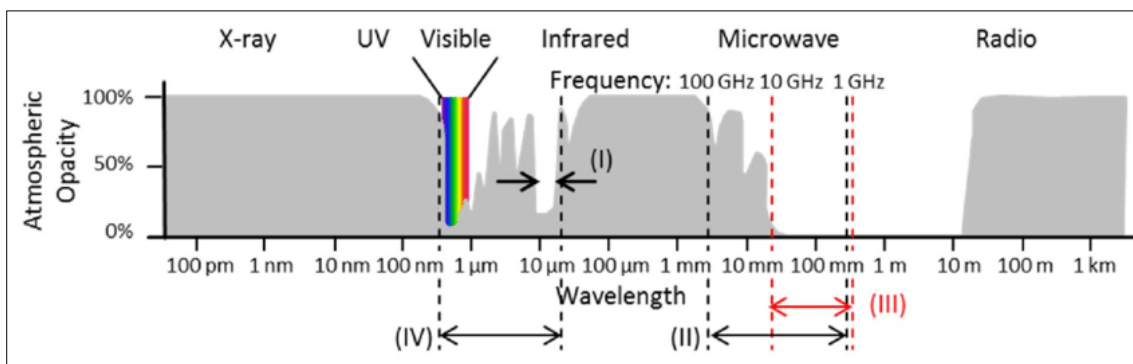
Εικόνα 4: Αρχές λειτουργίας τηλεπισκόπησης (Πηγή: Εθνικό Πανεπιστήμιο Σιγκαπούρης)

γης (Μερτίκας, 1999; Alqurashi and Kumar, 2013). Για τη συλλογή των δεδομένων μελέτης χρησιμοποιούνται ειδικά όργανα, τα οποία δεν έρχονται σε επαφή με το προς εξέταση αντικείμενο.

Αναφέρεται ότι οι δορυφορικές εικόνες αποτελούν μία μορφή συλλογής δεδομένων τηλεπισκόπησης. Για να μπορέσουν οι αισθητήρες των δορυφορικών συστημάτων να

συλλέξουν δεδομένα τηλεπισκόπησης, απαιτείται η ύπαρξη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία αντανακλάται σε διαφορετικό μήκος κύματος από κάθε αντικείμενο, επιφάνεια και υλικό που βρίσκεται στη γήινη επιφάνεια (Καρτάλης and Φείδας, 2013). Στην Εικόνα 4 απεικονίζονται παραστατικά οι αρχές λειτουργίας της τηλεπισκόπησης.

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα (Εικόνα 5) αποτελεί την ταξινόμηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας βάσει του μήκους κύματος, της συχνότητας ή της ενέργειας (Μερτίκας, 1999). Περιλαμβάνει από τα μικρότερα μήκη κύματος (ακτίνες X) έως και τα μεγάλα μήκη κύματος (ραδιοκύματα) (Kern and Ozsoy, 2018).



Εικόνα 5: Το φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (Πηγή: Kern. and Ozsoy, 2018)

Σύμφωνα με τα προαναφερόμενα, κάθε αντικείμενο και κάθε γήινο χαρακτηριστικό επηρεάζει το ποσοστό της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, το οποίο ανακλάται στα διαφορετικά μήκη κύματος. Η ποσότητα και η φασματική κατανομή της ανακλώμενης ή εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από ένα αντικείμενο σε σχέση με το μήκος κύματος, ονομάζεται φασματική απόκριση και η μορφή της καμπύλης της, σε συνάρτηση με το μήκος κύματος ονομάζεται φασματική ταυτότητα ή φασματική υπογραφή (Μερτίκας, 1999; Καρτάλης και Φείδας, 2013). Η φασματική υπογραφή είναι διαφορετική για κάθε επιφάνεια και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται για τη διάκριση και την αναγνώριση των καλύψεων στην επιφάνεια της γης .

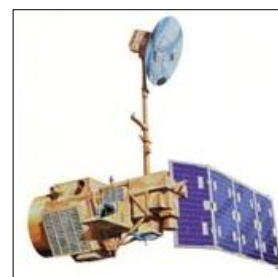
2.2.1 Δορυφόροι Landsat

Το πρόγραμμα Landsat είναι ένα κοινό εγχείρημα του Γεωλογικού Ινστιτούτου των Ηνωμένων Πολιτειών (United States Geological Survey- USGS) και της Εθνικής Διοίκησης Αεροναυτικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration- NASA) για την παρατήρηση της Γης και αποτελεί το μεγαλύτερης χρονικής διάρκειας πρόγραμμα απόκτησης δεδομένων τηλεπισκόπησης για ξηρά, παράκτιες περιοχές και ρηγά νερά (European Space Agency (ESA), n.d.).

Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά στοιχεία για αποστολές δορυφόρων, τα δεδομένα των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για τη χωροχρονική ανάλυση που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία.

- Landsat 5

Ο δορυφόρος Landsat 5 (Εικόνα 6), ο οποίος αναπτύχθηκε από τη NASA, εκτοξεύτηκε από την αεροπορική βάση Vandenberg στην Καλιφόρνια την 1η Μαρτίου του 1984 (Εικόνα 7), και έφερε τον Πολυφασματικό Σαρωτή (Multispectral Scanner- MSS) και τους αισθητήρες Thematic Mapper (TM). Ο Landsat 5, παρείχε δεδομένα απεικόνισης της Γης για σχεδόν 29 χρόνια- σημειώνοντας παγκόσμιο ρεκόρ Γκίνες για τον «Μακροβιότερο Λειτουργικό Δορυφόρο Παρατήρησης Γης», προτού παροπλιστεί στις 5 Ιουνίου του 2013 (European Space Agency (ESA), n.d.; United States Geological Survey (USGS), n.d.).



Εικόνα 6: Δορυφόρος Landsat 5 (Πηγή: NASA)

Οι Πίνακες 1, 2 και 3 που παρατίθενται παρακάτω παρουσιάζουν τα γενικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Landsat 5 και τα χαρακτηριστικά των φασματικών ζωνών του Πολυφασματικού Σαρωτή (MSS) και των αισθητήρων TM.

Πίνακας 1: Γενικά χαρακτηριστικά δορυφόρου Landsat 5 (Πηγή: ESA)

Ημερομηνία εκτόξευσης	1 Μαρτίου 1984
Ημερομηνία διακοπής λειτουργίας	5 Ιουνίου 2013
Ύψος τροχιάς	705 km
Τύπος τροχιάς	Sun-synchronous near-polar
Περίοδος τροχιάς	99 λεπτά
Κλίση	98,2°
Χρόνος επαναληψιμότητας	16 ημέρες

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών Multispectral Scanner (MSS) (Πηγή: USGS)

Φασματική ζώνη	Μήκος κύματος (μm)	Ανάλυση (m)
Band 4- Visible green (απενεργοποιήθηκε λόγω υψηλού ρεύματος τον Αύγουστο του 1995)	0,5- 0,6	57 x 79
Band 5- Visible red	0,6- 0,7	57 x 79
Band 6- Near-Infrared	0,7- 0,8	57 x 79
Band 7- Near-Infrared	0,8- 1,1	57 x 79

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών αισθητήρων Thematic Mapper (TM) (Πηγή: USGS)

Φασματική ζώνη	Μήκος κύματος (μm)	Ανάλυση (m)
Band 1- Visible	0,45- 0,52	30
Band 2- Visible	0,52- 0,60	30
Band 3- Visible	0,63- 0,69	30
Band 4- Near-Infrared	0,76- 0,90	30
Band 5- Near-Infrared	1,55- 1,75	30
Band 6- Thermal	10,40- 12,50	120
Band 7- Mid-Infrared	2,08- 2,35	30

Μετά από τις πειραματικές αποστολές (Landsat-1, Landsat-2 και Landsat-3), οι Landsat-4 και Landsat-5 ήταν οι πρώτες επιχειρησιακές αποστολές Landsat με πρωταρχικό στόχο την παρακολούθηση των πόρων της Γης, μέσω πολυφασματικών εικόνων υψηλής χωρικής ανάλυσης της ηλιακής ακτινοβολίας, η οποία ανακλάται από την επιφάνεια της Γης (Kramer, 2012). Χάρη στους αισθητήρες TM, υπήρχε η δυνατότητα απεικόνισης επτά φασματικών ζωνών στις ορατές, υπέρυθρες και θερμικές περιοχές που χρησιμοποιούνταν σε πεδία εφαρμογών, όπως η έρευνα για



Εικόνα 7: Εκτόξευση δορυφόρου Landsat 5 (Πηγή: USGS)

τις παγκόσμιες αλλαγές, η γεωργία, η δασοκομία, η γεωλογία, η διαχείριση πόρων, η ποιότητα των υδάτων και η ωκεανογραφία (Ibid.). Σε αντίθεση με τις πρώτες τρεις αποστολές, τα δεδομένα των TM από τους Landsat-4 και Landsat-5 κάλυπταν ένα ευρύτερο φάσμα εφαρμογών σε σχέση με τα δεδομένα του MSS λόγω της αύξησης των φασματικών ζωνών και της βελτιωμένης χωρικής ανάλυσης, με αποτέλεσμα οι προαναφερόμενοι αισθητήρες να χρησιμεύσουν ως κύριο όργανο.

- Landsat 8



Εικόνα 8: Δορυφόρος Landsat 8 (Πηγή: USGS)

Ο δορυφόρος Landsat 8 (Εικόνα 8) εκτοξεύτηκε στις 11 Φεβρουαρίου του 2013 από την αεροπορική βάση Vandenberg της Καλιφόρνια με πύραυλο Atlas-V (Εικόνα 9). Ο δορυφόρος αποτελεί μέρος του μακροχρόνιου προγράμματος Landsat υπό την ηγεσία των USGS και NASA και φέρει τον Operational Land Imager (OLI) και τον Θερμικό Υπέρυθρο Αισθητήρα (Thermal Infrared Sensor- TIRS). Ο Landsat 8, είναι ο πρώτος δορυφόρος Landsat τον 21ο αιώνα, που παρέχει πληροφορίες ζωτικής σημασίας με αυτά τα δύο νέα όργανα (European Space Agency (ESA), n.d.; United States Geological Survey (USGS), n.d.).

Στους Πίνακες 4, 5 και 6 που παρατίθενται παρακάτω, παρουσιάζονται τα γενικά χαρακτηριστικά του δορυφόρου Landsat 8 και τα χαρακτηριστικά των φασματικών ζωνών του OLI και του αισθητήρα TIRS.

Πίνακας 4: Γενικά χαρακτηριστικά δορυφόρου Landsat 8 (Πηγή: ESA)

Ημερομηνία εκτόξευσης	11 Φεβρουαρίου 2013
Ύψος τροχιάς	705 km
Τύπος τροχιάς	Sun-synchronous near-polar
Περίοδος τροχιάς	99 λεπτά
Κλίση	98,2°
Χρόνος επαναληψιμότητας	16 ημέρες

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών Operational Land Imager (OLI) (Πηγή: USGS)

Φασματική ζώνη	Μήκος κύματος (μm)	Ανάλυση (m)
Band 1- Coastal Aerosol	0,43- 0,45	30
Band 2- Blue	0,45- 0,51	30
Band 3- Green	0,53- 0,59	30
Band 4- Red	0,64- 0,67	30
Band 5- Near-Infrared	0,85- 0,88	30
Band 6- SWIR 1	1,57- 1,65	30
Band 7- SWIR 2	2,11- 2,29	30
Band 8- Panchromatic (PAN)	0,50- 0,68	15
Band 9- Cirrus	1,36- 1,38	30

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών αισθητήρα Thermal Infrared Sensor (TIRS) (Πηγή: USGS)

Φασματική ζώνη	Μήκος κύματος (μm)	Ανάλυση (m)
Band 10- TIRS 1	10,6- 11,19	100
Band 11- TIRS 2	11,5- 12,51	100

Οι στόχοι της αποστολής του δορυφόρου Landsat-8 αφορούν:

- στη συλλογή και αρχειοθέτηση δεδομένων πολυφασματικών εικόνων μέσης ανάλυσης που παρέχουν εποχική κάλυψη της παγκόσμιας ηπειρωτικής μάζας,
- στη διασφάλιση της συνέπειας των δεδομένων του Landsat-8 σε σχέση με τα δεδομένα προηγούμενων αποστολών Landsat, όσον αφορά τη γεωμετρία απόκτησης, τη βαθμονόμηση, τα χαρακτηριστικά κάλυψης, τα φασματικά χαρακτηριστικά, την ποιότητα των παραγόμενων δεδομένων και τη διαθεσιμότητά τους και
- στη διασφάλιση της διαθεσιμότητας των δεδομένων για λήψη εντός τριών ωρών (European Space Agency (ESA), n.d.; Ridwan et al., 2018).



Εικόνα 9: Εκτόξευση δορυφόρου Landsat 8 (Πηγή: NASA)

2.2.2 Δορυφόρος Sentinel

- Sentinel- 2

Ο δορυφόρος Sentinel-2A (Εικόνα 10) εκτοξεύτηκε στις 23 Ιουνίου του 2015 με πύραυλο Vega από το διαστημοδρόμιο της Ευρώπης κοντά στο Κουρου στη Γαλλική Γουιάνα (Εικόνα 11). Ο Sentinel-2B εκτοξεύτηκε από την ίδια τοποθεσία στις 7 Μαρτίου του 2017. Η αποστολή Copernicus Sentinel-2 βασίζεται σε έναν συνδυασμό δύο πανομοιότυπων δορυφόρων στην ίδια τροχιά. Κάθε δορυφόρος φέρει μια καινοτόμο συσκευή απεικόνισης ευρείας ζώνης υψηλής ανάλυσης πολυφασματικής απεικόνισης με 13 φασματικές ζώνες για την παρακολούθηση των επιφανειακών αλλαγών της Γης (European Space Agency (ESA), n.d.).



Εικόνα 10: Δορυφόρος Sentinel-2A (Πηγή: ESA)

Στον Πίνακα 7, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των φασματικών ζωνών του δορυφόρου Sentinel- 2.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά φασματικών ζωνών δορυφόρου Sentinel-2 (Πηγή: Montoya S.)

Φασματική ζώνη	Κεντρικό μήκος κύματος (μm)	Ανάλυση (m)
Band 1- Coastal aerosol	0,443	60
Band 2- Blue	0,490	10
Band 3- Green	0,560	10
Band 4- Red	0,665	10
Band 5- Vegetation Red Edge	0,705	20
Band 6- Vegetation Red Edge	0,740	20
Band 7- Vegetation Red Edge	0,783	20
Band 8- NIR	0,842	10
Band 8A- Vegetation Red Edge	0,865	20
Band 9- Water vapour	0,945	60
Band 10- SWIR- Cirrus	1,375	60
Band 11- SWIR	1,610	20
Band 12- SWIR	2,190	20

Σκοπός της αποστολής Sentinel-2 είναι η διασφάλιση υψηλής συχνότητας επανεπίσκεψης και υψηλής ανάλυσης εικόνων για την υποστήριξη προγραμμάτων Copernicus. Ο δορυφόρος Sentinel-2 παρέχει υπηρεσίες τροφοδοσίας δεδομένων για τις εξής εφαρμογές (European Space Agency (ESA), n.d.):



Εικόνα 11: Εκτόξευση δορυφόρου Sentinel-2A (Πηγή: ESA)

- Παρακολούθηση γης

Η υπηρεσία παρακολούθησης της γης Copernicus λειτουργεί από το 2012 και παρέχει γεωγραφικές πληροφορίες για την κάλυψη της γης και για μεταβλητές που σχετίζονται με θέματα όπως η κατάσταση της βλάστησης και ο κύκλος του νερού. Επιπλέον, υποστηρίζει μια ποικιλία εφαρμογών, όπως χωροταξικό σχεδιασμό, διαχείριση δασών, διαχείριση υδάτων, γεωργία και επισιτιστική ασφάλεια.

- Ναυτιλιακή Παρακολούθηση

Η Υπηρεσία Παρακολούθησης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος Copernicus παρέχει συστηματικά πληροφορίες αναφοράς για τη φυσική κατάσταση, τη μεταβλητότητα και τη δυναμική των ωκεανών και των θαλάσσιων οικοσυστημάτων τόσο σε παγκόσμιο, όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Οι τομείς εφαρμογών που υποστηρίζονται από τη συγκεκριμένη υπηρεσία, περιλαμβάνουν τη θαλάσσια ασφάλεια, τους θαλάσσιους πόρους, το παράκτιο και θαλάσσιο περιβάλλον, τον καιρό, τις εποχιακές προβλέψεις και το κλίμα.

- Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης

Η υπηρεσία διαχείρισης έκτακτης ανάγκης Copernicus, λειτουργεί από τον Απρίλιο του 2012 με χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής και παρέχει ακριβείς και έγκαιρες γεωχωρικές πληροφορίες μέσω δορυφορικής τηλεπισκόπησης σε όλους τους οργανισμούς που εμπλέκονται στη διαχείριση φυσικών καταστροφών, ανθρωπογενών καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και ανθρωπιστικών κρίσεων. Η χαρτογράφηση που πραγματοποιείται από τη συγκεκριμένη υπηρεσία, έχει παγκόσμια κάλυψη και βασίζεται σε δορυφορικές εικόνες.

- Ασφάλεια

Οι υπηρεσίες Copernicus που αφορούν σε εφαρμογές ασφάλειας, στοχεύουν στην υποστήριξη των σχετικών πολιτικών της Ευρωπαϊκής Ένωσης στους τομείς της επιτήρησης των συνόρων και των θαλασσών και της υποστήριξης της εξωτερικής δράσης της ΕΕ.

2.3 Εφαρμογές μηχανικής μάθησης στις καλύψεις γης

2.3.1 Γενικά

Η μηχανική μάθηση είναι ένας κλάδος της τεχνητής νοημοσύνης και της επιστήμης των ηλεκτρονικών υπολογιστών που εστιάζει στη χρήση δεδομένων και αλγορίθμων, ώστε ένα σύστημα να μιμηθεί τον τρόπο μάθησης των ανθρώπων, βελτιώνοντας σταδιακά την ακρίβεια και την απόδοσή του, χωρίς να υπάρχει ανάγκη να προγραμματιστεί εκ νέου, αλλά αξιοποιώντας προηγούμενη γνώση και εμπειρία (Γεωργούλη, 2015; IBM- United States, n.d.). Ο τρόπος λειτουργίας της μηχανικής μάθησης βασίζεται στις παρακάτω διαδικασίες (UC Berkeley School of Information, 2020):

Διαδικασία απόφασης: Γενικά, οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης χρησιμοποιούνται για να κάνουν μια πρόβλεψη ή μια ταξινόμηση. Με βάση ορισμένα δεδομένα εισόδου, τα οποία είτε φέρουν ετικέτα (labeled data), είτε όχι (unlabeled data), ο αλγόριθμος θα κάνει μία εκτίμηση σχετικά με ένα μοτίβο που υπάρχει στα δεδομένα.

Συνάρτηση σφάλματος: Μια συνάρτηση σφάλματος αξιολογεί την πρόβλεψη του μοντέλου. Εάν υπάρχουν γνωστά παραδείγματα, μια συνάρτηση σφάλματος μπορεί να κάνει σύγκριση με σκοπό την αξιολόγηση της ακρίβειας του μοντέλου.

Διαδικασία βελτιστοποίησης μοντέλου: Εάν το μοντέλο ταιριάζει καλύτερα στα σημεία δεδομένων του συνόλου εκπαίδευσης (training set), γίνεται προσαρμογή ώστε να μειωθεί η απόκλιση μεταξύ του γνωστού παραδείγματος και της εκτίμησης του μοντέλου. Ο αλγόριθμος θα επαναλάβει αυτή τη διαδικασία αξιολόγησης και βελτιστοποίησης, μέχρι να επιτευχθεί ένα όριο ακρίβειας.

Η μηχανική μάθηση στηρίζεται σε δεδομένα- αριθμούς, φωτογραφίες ή κείμενο. Τα δεδομένα συλλέγονται και προετοιμάζονται ώστε να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εκπαίδευσης ή ως πληροφορία, στην οποία θα εκπαιδευτεί το μοντέλο μηχανικής μάθησης (Brown, 2021). Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός δεδομένων, τόσο καλύτερο είναι το μοντέλο.

Έπειτα, οι προγραμματιστές επιλέγουν το μοντέλο μηχανικής μάθησης που θα χρησιμοποιηθεί, εισάγουν τα δεδομένα και αφήνουν τον αλγόριθμο να εκπαιδευτεί στο να βρίσκει μοτίβα ή να κάνει προβλέψεις. Με την πάροδο του χρόνου ο ανθρώπινος προγραμματιστής μπορεί επίσης να τροποποιήσει το μοντέλο, συμπεριλαμβανομένης της αλλαγής των παραμέτρων του, για να το καθοδηγήσει προς ακριβέστερα αποτελέσματα.

Κάποια δεδομένα μένουν εκτός των δεδομένων εκπαίδευσης ώστε να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα αξιολόγησης, κάτι το οποίο ελέγχει πόσο ακριβές είναι το μοντέλο μηχανικής μάθησης όταν εμφανίζονται νέα δεδομένα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ένα μοντέλο το οποίο στο μέλλον μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διαφορετικά σύνολα δεδομένων.

Οι μέθοδοι της μηχανικής μάθησης είναι τέσσερις και βασίζονται στους τρόπους μάθησης του ανθρώπου (Brown, 2021; IBM- United States, n.d.):

- Επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση (Supervised machine learning)

Κατά την επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση, οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται εκπαιδεύονται με τη χρήση συνόλων δεδομένων που φέρουν ετικέτα στην ταξινόμηση δεδομένων ή στην ακριβή πρόβλεψη των αποτελεσμάτων. Αυτό, επιτρέπει στα μοντέλα να μαθαίνουν και να εξελίσσονται με μεγαλύτερη ακρίβεια κατά την πάροδο του χρόνου. Η επιβλεπόμενη μάθηση είναι η πιο συνηθισμένη μέθοδος μηχανικής μάθησης που χρησιμοποιείται στις μέρες μας. Χρησιμοποιείται σε προβλήματα ταξινόμησης (classification), πρόγνωσης (prediction) και διερμηνείας (interpretation).

- Μη επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση (Unsupervised machine learning)

Η μη επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση, χρησιμοποιεί αλγόριθμους ώστε να αναλύσει και να ομαδοποιήσει σύνολα δεδομένων που δε φέρουν ετικέτα. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι μπορούν να ανακαλύψουν κρυφά μοτίβα ή ομαδοποιήσεις δεδομένων χωρίς την ανάγκη ανθρώπινης παρέμβασης. Η μη επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση χρησιμοποιείται σε προβλήματα ανάλυσης συσχετισμών (association analysis) και ομαδοποίησης (clustering)

- Ημι- επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση (Semi-supervised learning)

Η ημι- επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση, βρίσκεται στο ενδιάμεσο της επιβλεπόμενης και της μη επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης των αλγορίθμων,

χρησιμοποιεί ένα μικρότερο σύνολο δεδομένων που φέρουν ετικέτα, με σκοπό την καθοδήγηση της ταξινόμησης και τη συλλογή πληροφοριών από ένα μεγαλύτερο σύνολο δεδομένων που δεν φέρουν ετικέτα. Ακόμη, μπορεί να λύσει το πρόβλημα της έλλειψης επαρκών δεδομένων με ετικέτα για έναν αλγόριθμο επιβλεπόμενης μάθησης.

- Ενισχυτική μηχανική μάθηση (Reinforcement machine learning)

Η ενισχυτική μηχανική μάθηση είναι μία μέθοδος μηχανικής μάθησης παρόμοια με αυτή της επιβλεπόμενης μάθησης, με τη διαφορά ότι οι αλγόριθμοι δεν εκπαιδεύονται χρησιμοποιώντας δείγματα δεδομένων. Το συγκεκριμένο μοντέλο μαθαίνει καθώς η διαδικασία προχωρά, δηλαδή εκπαιδεύει τις μηχανές μέσω δοκιμής και λάθους, ώστε να ενεργούν με τον καλύτερο τρόπο και να αναπτυχθεί η καλύτερη λύση για ένα δεδομένο πρόβλημα. Χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα σχεδιασμού (planning).

Για κάθε πρόβλημα προς επίλυση στον χώρο της μηχανικής μάθησης υπάρχει μία κατάλληλη μέθοδος μάθησης και για κάθε μέθοδο μηχανικής μάθησης υπάρχει τουλάχιστον ένας κατάλληλος αλγόριθμος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί (Γεωργούλη, 2015). Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι συνηθέστεροι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στη μηχανική μάθηση (Wakefield, n.d.; IBM- United States, n.d.):

- Τεχνητά Νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks): Τα νευρωνικά δίκτυα προσομοιώνουν τον τρόπο λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου με έναν τεράστιο αριθμό συνδεδεμένων κόμβων επεξεργασίας. Τα νευρωνικά δίκτυα πλεονεκτούν στην αναγνώριση μοτίβων και παίζουν σημαντικό ρόλο σε εφαρμογές όπως η μετάφραση φυσικής γλώσσας, η αναγνώριση εικόνας, η αναγνώριση ομιλίας και η δημιουργία εικόνων.
- Αλγόριθμος Κ-πλησιέστερων γειτόνων (K-Nearest-Neighbour): Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εκτιμά πόσο πιθανό είναι ένα σημείο δεδομένων να αποτελεί μέλος της μιας ή της άλλης ομάδας. Ουσιαστικά προσπαθεί να προσδιορίσει την ομάδα στην οποία βρίσκεται πραγματικά το σημείο δεδομένων, καθώς εξετάζει τη θέση των σημείων δεδομένων γύρω από αυτό, εστιάζοντας στην πλειοψηφία.
- Γραμμική παλινδρόμηση (Linear regression): Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη αριθμητικών τιμών, βάσει μίας γραμμικής σχέσης μεταξύ διαφορετικών τιμών.

- Λογιστική παλινδρόμηση (Logistic regression): Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιβλεπόμενης μάθησης κάνει προβλέψεις για μεταβλητές κατηγορηματικής απάντησης, όπως «ναι/όχι» ως απάντηση σε ερωτήσεις.
- Ταξινόμηση κατά Naïve Bayes (Naïve Bayes Classifier Algorithm): Ο αλγόριθμος αυτός είναι βασισμένος στο θεώρημα του Bayes και σκοπός του είναι η ταξινόμηση κάθε τιμής ως ανεξάρτητη από οποιαδήποτε άλλη τιμή. Ακόμη, δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να προβλέψει μία κλάση, βάσει ενός δεδομένου συνόλου χαρακτηριστικών, χρησιμοποιώντας την έννοια της πιθανότητας. Ενώ είναι απλός, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρησιμοποιείται συχνά, καθώς δίνει πολύ καλά αποτελέσματα.
- Ομαδοποίηση (Clustering): Μέσω της χρήσης μη επιβλεπόμενης μάθησης, οι αλγόριθμοι ομαδοποίησης μπορούν να προσδιορίσουν μοτίβα στα δεδομένα ώστε να μπορούν να ομαδοποιηθούν. Οι υπολογιστές μπορούν να βοηθήσουν τους επιστήμονες δεδομένων, εντοπίζοντας διαφορές μεταξύ στοιχείων δεδομένων που οι άνθρωποι έχουν παραβλέψει.
- Συσταδοποίηση K- Means (K- Means Clustering): Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι ένας τύπος μη επιβλεπόμενης μάθησης, ο οποίος χρησιμοποιείται για να κατηγοριοποιηθούν δεδομένα που δεν φέρουν ετικέτα. Η λειτουργία του βασίζεται στην εύρεση ομάδων εντός των δεδομένων, ο αριθμός των οποίων αντιπροσωπεύεται από τη μεταβλητή K. Έπειτα, λειτουργεί επαναληπτικά ώστε να αντιστοιχήσει κάθε σημείο δεδομένων σε μία από τις K ομάδες, βάσει των παρεχόμενων χαρακτηριστικών.
- Δέντρα αποφάσεων (Decision trees): Τα δέντρα αποφάσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την πρόβλεψη αριθμητικών τιμών, όσο και για την ταξινόμηση δεδομένων σε κατηγορίες. Τα δέντρα αποφάσεων χρησιμοποιούν μια ακολουθία συνδεδεμένων αποφάσεων με διακλαδώσεις που μπορούν να αναπαρασταθούν με ένα διάγραμμα υπό τη μορφή δέντρου. Ένα από τα πλεονεκτήματα των δέντρων αποφάσεων είναι ότι είναι εύκολο να επικυρωθούν και να ελεγχθούν, σε αντίθεση με τη διαδικασία που ακολουθείται στα νευρωνικά δίκτυα.
- Τυχαία δάση (Random forests): Σε ένα τυχαίο δάσος, ο αλγόριθμος μηχανικής μάθησης προβλέπει μια τιμή ή μια κατηγορία συνδυάζοντας τα αποτελέσματα από έναν αριθμό δέντρων αποφάσεων.

- Μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machine): Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ανήκει στα μοντέλα επιβλεπόμενης μάθησης, τα οποία αναλύουν δεδομένα που χρησιμοποιούνται για τις αναλύσεις της ταξινόμησης και της παλινδρόμησης. Ουσιαστικά, μέσω των συνόλων εκπαίδευσης, καθένα από τα οποία ανήκει σε μία κατηγορία από τις δύο, διαχωρίζει τα δεδομένα σε κατηγορίες. Έπειτα, προσπαθεί να δημιουργήσει ένα μοντέλο το οποίο αντιστοιχίζει νέες τιμές στη μία ή στην άλλη κατηγορία.

2.3.2 Επιλογή επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης, καθώς και οι διαφορές της με τη μη επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση. Βάσει αυτών των πλεονεκτημάτων και των διάφορων, για τον σκοπό της τρέχουσας εργασίας επιλέχθηκε η επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση.

Πλεονεκτήματα επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης:

- Η επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων και παράγει δεδομένα από προηγούμενες εμπειρίες.
- Βοηθά στη βελτιστοποίηση των κριτηρίων απόδοσης με τη βοήθεια της εμπειρίας. Η επιβλεπόμενη μάθηση βοηθά στην επίλυση διαφόρων τύπων ρεαλιστικών προβλημάτων υπολογισμού (Bansal, 2023).
- Η επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση εφαρμόζεται και λειτουργεί επαρκώς σε προβλήματα ταξινόμησης και παλινδρόμησης, δηλαδή όταν υπάρχουν καλά καθορισμένα προβλήματα και προβλέψιμα αποτελέσματα (LogicMonitor, 2023).
- Επιτρέπει την εκτίμηση ή την αντιστοίχιση του αποτελέσματος σε ένα νέο δείγμα.
- Υπάρχει ο απόλυτος έλεγχος στην επιλογή του αριθμού των τάξεων που θέλουμε στα δεδομένα εκπαίδευσης (Ibid.).

Στον Πίνακα 8, παρουσιάζονται οι διαφορές της επιβλεπόμενης και της μη επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης.

Πίνακας 8: Διαφορές επιβλεπόμενης και μη επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης (Πηγή: Bansal, 2023)

	Επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση	Μη επιβλεπόμενη μηχανική μάθηση
Δεδομένα εισόδου	Γνωστά δεδομένα- που φέρουν ετικέτα	Άγνωστα δεδομένα- που δε φέρουν ετικέτα
Υπολογιστική πολυπλοκότητα	Μικρότερη	Μεγαλύτερη
Ακρίβεια αποτελεσμάτων	Υψηλή ακρίβεια και αξιοπιστία	Μέτρια ακρίβεια και αξιοπιστία
Αριθμός κλάσεων	Γνωστός	Άγνωστος
Ανάλυση δεδομένων	Ανάλυση offline	Ανάλυση real- time
Παραγόμενο αποτέλεσμα	Επιθυμητό αποτέλεσμα	Μη επιθυμητό αποτέλεσμα
Δεδομένα εκπαίδευσης	Χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του μοντέλου	Δεν χρησιμοποιούνται
Έλεγχος μοντέλου	Μπορεί να ελεγχθεί	Δεν μπορεί να ελεγχθεί
Άλλη ονομασία	Ταξινόμηση	Ομαδοποίηση

Η βασική διαφορά της επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης από τη μη επιβλεπόμενη, είναι ο τύπος των δεδομένων εισόδου που απαιτούνται. Η πρώτη απαιτεί δεδομένα εκπαίδευσης που φέρουν ετικέτα, ενώ η δεύτερη βασίζεται σε ανεπεξέργαστα δεδομένα, τα οποία δεν φέρουν ετικέτα (Baheti, 2021). Ακόμη, η επιβλεπόμενη μάθηση εκπαιδεύεται από το σύνολο δεδομένων κάνοντας επαναληπτικές προβλέψεις για τα δεδομένα και προσαρμόζοντας τη σωστή απάντηση. Τα μοντέλα επιβλεπόμενης μάθησης σχετίζονται με δεδομένα που φέρουν ετικέτα όπου τα μοτίβα των δεδομένων εξόδου είναι γνωστά στο σύστημα. Το γεγονός αυτό, τα καθιστά πιο ακριβή από τα μοντέλα της μη επιβλεπόμενης μάθησης, καθώς το αποτέλεσμα που αναμένεται είναι ήδη γνωστό. Τέλος, ο στόχος της επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης είναι γνωστός πριν ξεκινήσει η εκπαίδευση, όπως και ο τύπος του αναμενομένου παραγόμενου αποτελέσματος από το μοντέλο, ο οποίος χρειάζεται απλώς να προβλεφθεί για νέα δεδομένα (Ibid.). Για τον λόγο αυτό, η επιβλεπόμενη μάθηση είναι συγκριτικά λιγότερο περίπλοκη από

τη μη επιβλεπόμενη μάθηση, με αποτέλεσμα η διαδικασία εκπαίδευσης να καθίσταται πολύ πιο απλή.

2.3.3 Επιβλεπόμενη και μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση

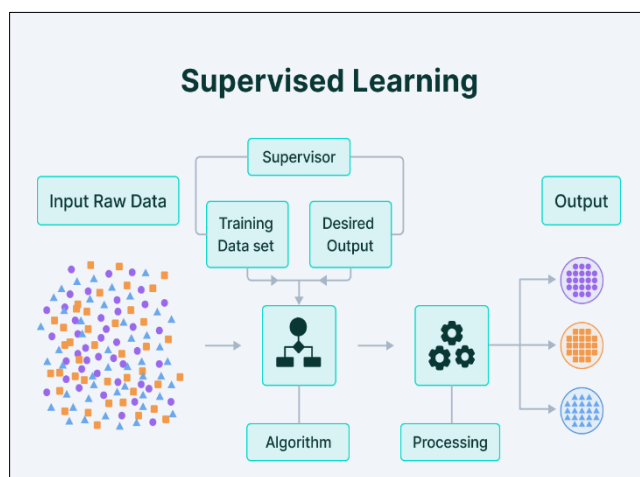
Η επιβλεπόμενη και η μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση αποτελούν τεχνικές εικόνες οι οποίες περιλαμβάνουν ταξινόμηση υπό την καθοδήγηση ανθρώπου και υπολογισμό μέσω χρήσης λογισμικού, αντίστοιχα. Οι προαναφερόμενες τεχνικές, κατατάσσονται επίσης στις μεθόδους τηλεπισκόπησης (Gikunda, 2021).

Οι τρεις πιο συνηθισμένες μέθοδοι ταξινόμησης τηλεπισκόπησης είναι (GIS Geography, 2022):

- Μη επιβλεπόμενη ταξινόμηση (Unsupervised classification)
- Επιβλεπόμενη ταξινόμηση (Supervised classification)
- Ανάλυση εικόνας με βάση το αντικείμενο (Object-based image analysis)

Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία και οι αρχές εφαρμογής της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, η οποία χρησιμοποιείται για τη χωροχρονική ανάλυση που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία.

Η επιβλεπόμενη ταξινόμηση είναι η συχνότερα χρησιμοποιούμενη τεχνική για την ποσοτική ανάλυση δεδομένων εικόνων τηλεπισκόπησης. Βασικό κομμάτι της αποτελεί η τμηματοποίηση του φασματικού τομέα σε περιοχές οι οποίες ενδεχομένως να σχετίζονται με τις κατηγορίες εδαφικών καλύψεων που ενδιαφέρουν μια συγκεκριμένη εφαρμογή (Richards, 2013). Στην πράξη, αυτές οι



Εικόνα 12: Διαδικασία επιβλεπόμενης μηχανικής μάθησης (Πηγή: v7labs.com)

περιοχές είναι πιθανό μερικές φορές να επικαλύπτονται. Για τη συγκεκριμένη δραστηριότητα διατίθεται ποικιλία αλγορίθμων. Ουσιαστικά, οι διαφορετικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται, αλλάζουν ως προς τον τρόπο με τον οποίο αναγνωρίζουν και περιγράφουν τις περιοχές στον φασματικό χώρο. Κάποιοι αναζητούν μια απλή γεωμετρική κατάτμηση, ενώ

άλλοι λειτουργούν με στατιστικά μοντέλα, μέσω των οποίων συσχετίζουν τις φασματικές μετρήσεις και τις κατηγορίες ενδιαφέροντος (Ibid.).

Ειδικότερα, η επιβλεπόμενη ταξινόμηση (Εικόνα 12) είναι μία διαδικασία, η οποία στηρίζεται στο ότι ένας χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει και να συλλέξει δείγματα εικονοστοιχείων (pixels) από μία εικόνα, τα οποία αντιπροσωπεύουν συγκεκριμένες κλάσεις (κατηγορίες καλύψεων γης). Στη συνέχεια, ο χρήστης κατευθύνει το λογισμικό επεξεργασίας εικόνας ώστε να χρησιμοποιήσει ως αναφορές τα προαναφερόμενα σημεία- δείγματα για να ταξινομήσει και να ομαδοποιήσει και τα υπόλοιπα εικονοστοιχεία που υπάρχουν στη συγκεκριμένη εικόνα (Mapasyst, 2019; Gikunda, 2021).

Τα σύνολα/ δεδομένα εκπαίδευσης ή αλλιώς τα δεδομένα εισόδου επιλέγονται βάσει των γνώσεων και την αντίληψη του χρήστη και εφαρμόζονται σε ολόκληρη την εικόνα μέσω της χρήσης λογισμικού. Τα σύνολα εκπαίδευσης είναι πολύ σημαντικά, διότι αυτά είναι που θα καθορίσουν σε ποια κλάση ανήκει κάθε εικονοστοιχείο που υπάρχει στην εικόνα (GIS Geography, 2022). Σημειώνεται ότι τα δεδομένα εκπαίδευσης στην επιβλεπόμενη ταξινόμηση, συλλέγονται από το πεδίο με τη χρήση μιας συσκευής GPS υψηλής ακρίβειας (Gikunda, 2021).

Ακόμη, ο χρήστης είναι εκείνος που θέτει τα όρια για την ομοιομορφία που πρέπει να έχουν τα pixels ώστε να επιτευχθεί η ομαδοποίησή τους. Αυτά τα όρια τίθενται συχνά βάσει των φασματικών χαρακτηριστικών της περιοχής στην οποία εκπαιδεύεται ο αλγόριθμος. Επίσης, οι κλάσεις στις οποίες γίνεται η ταξινόμηση της εικόνας προσδιορίζονται από τον χρήστη, ο οποίος έχει τη δυνατότητα να προσθέτει πληροφορίες σε αυτές, όπως το να δημιουργεί υποκατηγορίες (Mapasyst, 2019; Gikunda, 2021).

Κατά τη διαδικασία της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, ακολουθούνται τα παρακάτω βήματα (GIS Geography, 2022):

i. Επιλογή των περιοχών εκπαίδευσης:

Σε αυτό το βήμα, επιλέγονται τα δείγματα εκπαίδευσης για κάθε κατηγορία κάλυψης γης που είναι επιθυμητό να δημιουργηθεί. Δηλαδή, φτιάχνονται πολύγωνα, το καθένα εκ των οποίων αντιπροσωπεύει μία συγκεκριμένη κλάση. Για κάθε κατηγορία, είναι αναγκαίο να υπάρχουν περισσότερα από ένα πολύγωνα.

ii. Δημιουργία αρχείου υπογραφής:

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να υπάρχουν δείγματα εκπαίδευσης (πολύγωνα) για κάθε κλάση. Το αρχείο υπογραφής είναι αυτό που περιέχει όλα τα δείγματα εκπαίδευσης που έχουν συλλεχθεί και ουσιαστικά τα κρατά αποθηκευμένα έως ότου ξαναχρησιμοποιηθούν.

iii. Ταξινόμηση:

Στο βήμα αυτό, το δεδομένο εισόδου είναι το αρχείο υπογραφής που περιέχει τα δείγματα εκπαίδευσης. Η διαδικασία της ταξινόμησης τρέχει και σε περίπτωση που το αποτέλεσμα δεν είναι ικανοποιητικό, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επαληθεύσει τα δείγματα εκπαίδευσης. Αυτός, είναι ένας τρόπος ανίχνευσης των σφαλμάτων της ταξινόμησης που ενδεχομένως υπάρχουν.

2.3.4 Περιπτώσεις εφαρμογής

Οι μέθοδοι μηχανικής μάθησης αποτελούν μια αναλυτική τεχνική, η οποία πλεονεκτεί στην παρακολούθηση, στη χαρτογράφηση και στην ποσοτικοποίηση των χρήσεων και των καλύψεων γης, αλλά και των χρονικών αλλαγών τους (Yuh et al., 2023). Ακόμη, τα τελευταία χρόνια, η τηλεπισκόπηση προοδεύει σημαντικά στη συλλογή δεδομένων και στην εξαγωγή πληροφοριών που χρειάζονται για την ταξινόμηση και τη μοντελοποίηση του συστήματος της γης. Το γεγονός αυτό, προκύπτει από την ανάγκη για ακριβή και λεπτομερή δεδομένα, τα οποία προέρχονται από την ύπαρξη νέων δορυφόρων που έχουν τη δυνατότητα να καταγράφουν εικόνες υψηλής ανάλυσης. Η δυνατότητα αυτή, αποτελεί λύση για μελέτες που εφαρμόζονται σε αστικές και αγροτικές περιοχές, αλλά και σε έρευνες που σχετίζονται με χαρτογραφικά δεδομένα (Wahbi et al., 2023).

Στη συνέχεια, αναφέρονται ενδεικτικά ερευνητικές εργασίες που βασίστηκαν σε μεθόδους τηλεπισκόπησης για την ανάλυση των καλύψεων γης.

Στην έρευνα των (He et al., 2019) προτείνεται μία μέθοδος παρακολούθησης των αλλαγών στις περιοχές εξόρυξης άνθρακα, μέσω της εφαρμογής της στο ανθρακωρυχείο Shenhua Baori Xile, το οποίο βρίσκεται στην πόλη Hulun Buir, στην Κίνα.

Συνδυάζοντας την επιστήμη των υπολογιστών, την τεχνική της δορυφορικής τηλεπισκόπησης και τη φασματοσκοπία, συλλέχθηκαν δείγματα άνθρακα, αλλά και στείων υλικών από το ορυχείο και έπειτα μετρήθηκε η φασματική ανάκλασή τους στο έδαφος. Ως δορυφορικά

δεδομένα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα που προέκυψαν από την αφαίρεση των πληροφοριών παρεμβολής των φασμάτων ανάκλασης των εικόνων και από τη δημιουργία μιας σχέσης με τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις στο έδαφος. Έτσι, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο ταξινόμησης με χρήση ενός αλγορίθμου ρίζας δέντρου, το οποίο όταν εφαρμόστηκε στις εικόνες τηλεπισκόπησης έδωσε ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα οποία έδειξαν ότι το μοντέλο μπορεί να παρακολουθεί ανά πάσα στιγμή τόσο τις περιοχές εξόρυξης άνθρακα, όσο και τις περιοχές με τα στείρα υλικά. Οι (He et al., 2019) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος που εφαρμόσαν πλεονεκτεί όσον αφορά την ακρίβεια, το κόστος, την ταχύτητα, αλλά και την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο, σε σχέση με τις τυπικές μεθόδους παρακολούθησης.

Η μελέτη των (Karan et al., 2016) αξιολόγησε την επιτυχία της αποκατάστασης στην περιοχή Block II του κοιτάσματος άνθρακα στο πεδίο Jharia, στην Ινδία, χρησιμοποιώντας την τηλεπισκόπηση και την τεχνολογία GIS, καθώς και δορυφορικές εικόνες Landsat για τα έτη 2000 και 2015.

Για την ποσοτικοποίηση των αλλαγών στη βλάστηση μεταξύ των προαναφερόμενων ετών, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις μέθοδοι επεξεργασίας εικόνας: μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machine), δείκτης αναλογίας βλάστησης (Ratio Vegetation Index), ενισχυμένος δείκτης βλάστησης (Enhanced Vegetation Index), δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης (Normalized Difference Vegetation Index). Ακόμη, με τη χρήση τεχνικών τηλεπισκόπησης αξιολογήθηκε η σχέση μεταξύ της υγείας της βλάστησης και της περιεκτικότητας σε υγρασία της περιοχής μελέτης, για να διαπιστωθεί αν η διαθέσιμη φυτική υγρασία ήταν αρκετή για να υποστηρίξει τη ζωή των φυτών και να βρεθεί ποιος συνδυασμός των δεικτών βλάστησης μαζί με τον δείκτη κανονικοποιημένης διαφοράς υγρασίας (Normalized Difference Moisture Index) έδωσε το καλύτερο αποτέλεσμα. Προέκυψε λοιπόν, ότι ο δείκτης κανονικοποιημένης διαφοράς βλάστησης σε συνδυασμό με τον προαναφερόμενο είναι η καλύτερη μέθοδος για την παρακολούθηση της βλάστησης στη μελετώμενη περιοχή. Η αύξηση που παρατηρήθηκε στη φυτική κάλυψη, αλλά και η βελτίωση της υγείας της με την πάροδο του χρόνου, ήταν αρκετά μεγάλη, κρίνοντας τη δραστηριότητα αποκατάστασης ικανοποιητική. Για χαρακτηριστικά που αφορούσαν στην περιοχή της εξόρυξης, στις υδάτινες και στις υποβαθμισμένες περιοχές προέκυψαν χαμηλότερες τιμές εξαιτίας της χαμηλής χωρικής

ανάλυσης των δορυφορικών εικόνων και της παρόμοιας φασματικής υπογραφής που έχουν κάποια από αυτά. Για το τμήμα αυτό, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της επιβλεπόμενης ταξινόμησης η οποία διέκρινε αποτελεσματικά τα προαναφερόμενα χαρακτηριστικά, δίνοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα.

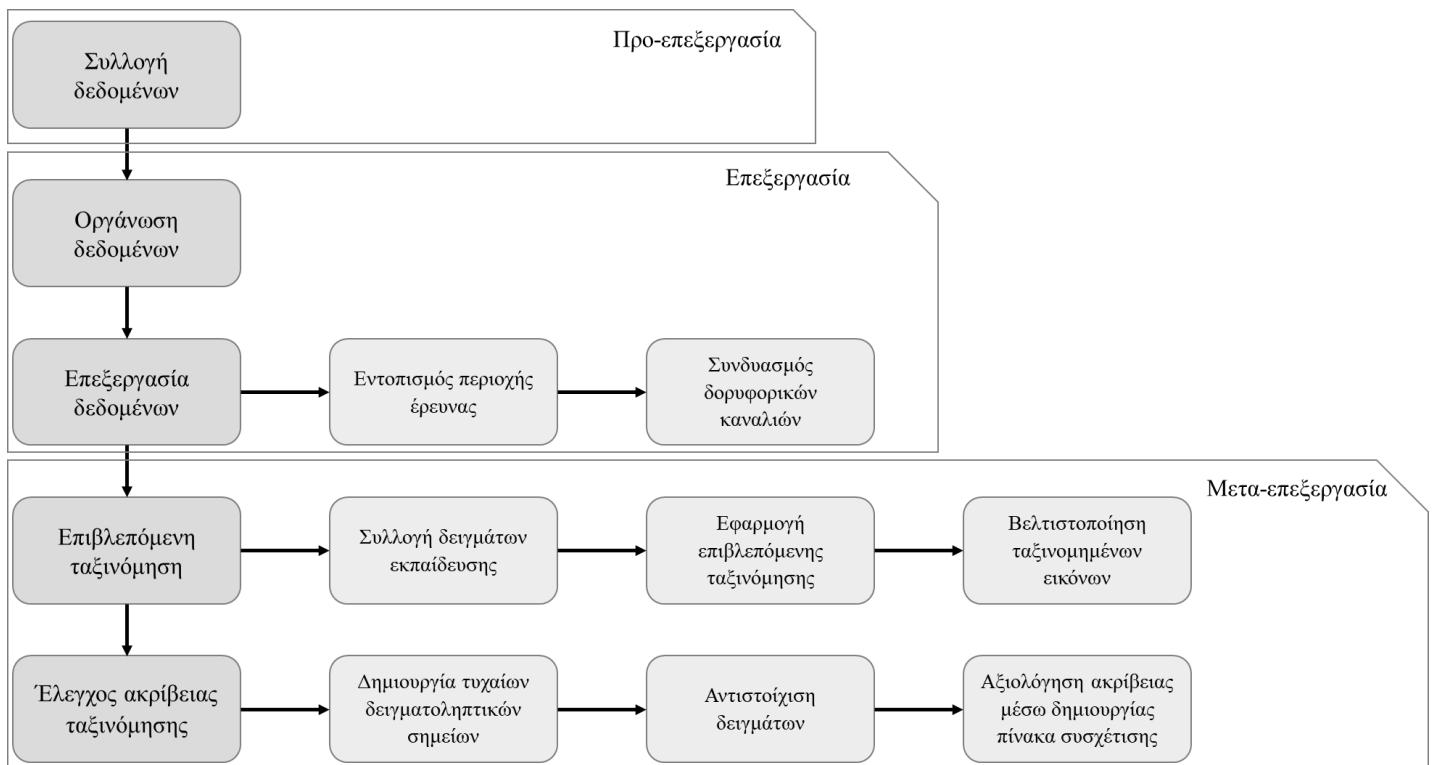
Στην έρευνα των (Wahbi et al., 2023) χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος μηχανικής μάθησης τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, προκειμένου να ταξινομηθούν εικόνες από το δορυφόρο Sentinel-2. Στόχος της συγκεκριμένης μελέτης αποτέλεσε ο εντοπισμός και η χαρτογράφηση οικισμών σε αγροτικές περιοχές στην περιοχή Souss-Massa, στο Μαρόκο.

Τα κτήρια στο Μαρόκο, είναι κατασκευασμένα από εδαφικά υλικά, ποικίλουν σε σχήμα και μέγεθος και η κατανομή τους είναι τυχαία. Για τους λογούς αυτούς, η ανίχνευση και η χαρτογράφησή τους όταν αυτά βρίσκονται σε αγροτικές περιοχές, είναι δύσκολη και ανακριβής μέσω επεξεργασίας εικόνων με παραδοσιακές τεχνικές. Η ταξινόμηση των δορυφορικών εικόνων με μεθόδους μηχανικής μάθησης αποτελεί λύση. Χρησιμοποιώντας λοιπόν τα νευρωνικά δίκτυα, προέκυψε ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα στη διάκριση των διαφορετικών κατηγοριών στις εικόνες. Έπειτα αυξάνοντας τα φίλτρα στο επίπεδο συνέλιξης των εικόνων, η ακρίβεια της ταξινόμησης αυξήθηκε. Σύμφωνα με το τελικό αποτέλεσμα της ταξινόμησης, η αποτελεσματικότητα των νευρωνικών δικτύων στην ανίχνευση οικισμών σε αγροτικές περιοχές εξαρτάται από την ποιότητα, την ανάλυση και τον αριθμό των δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιούνται για την εκπαίδευση του αλγορίθμου και από τη ρύθμιση των παραμέτρων των δικτύων, η οποία επιδρά στην απόδοση μάθησης του μοντέλου.

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για το σκοπό της τρέχουσας εργασίας, δηλαδή για τη χωροχρονική ανάλυση των μεταβολών που προέκυψαν στις καλύψεις γης κατά την περίοδο 1988- 2022 στην περιοχή των Ορυχείων Πτολεμαΐδας, μέσω της μεθόδου της επιβλεπόμενης ταξινόμησης.

Στο Διάγραμμα 4, παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν κατά το στάδιο της προ-επεξεργασίας, της επεξεργασίας και της μετα-επεξεργασίας των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν.



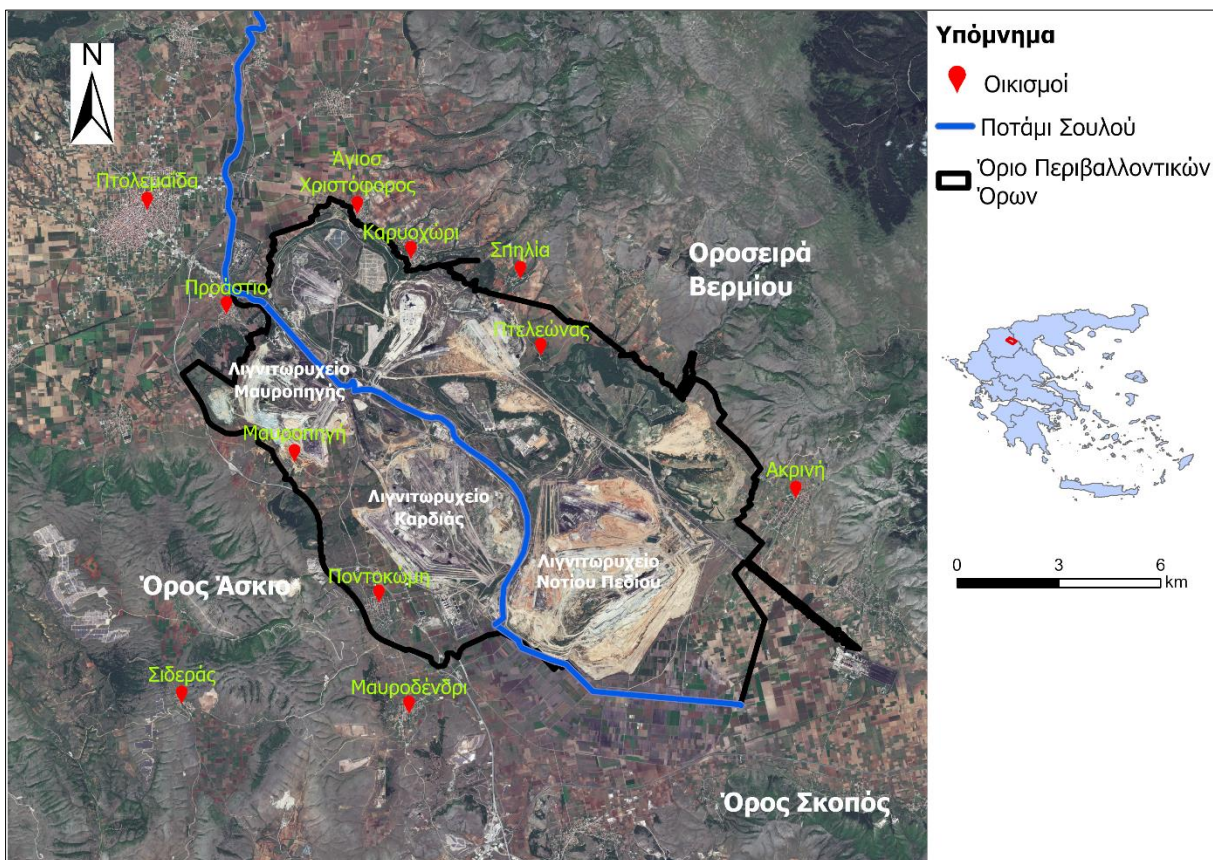
Διάγραμμα 4: Μεθοδολογία εργασίας- στάδια προ-επεξεργασίας, επεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας

3.1 Περιοχή έρευνας

Η περιοχή έρευνας βρίσκεται στη βόρεια Ελλάδα και ειδικότερα στη Δυτική Μακεδονία στον Νομό Κοζάνης. Η επιλογή της συγκεκριμένης περιοχής έγινε ώστε να μελετηθούν τόσο οι αλλαγές στις καλύψεις γης λόγω της ανάπτυξης των Ορυχείων που δραστηριοποιούνται και της

περιβαλλοντικής αποκατάστασης που έχει πραγματοποιηθεί, όσο και οι αλλαγές που οφείλονται σε δραστηριότητες ανεξάρτητες της λιγνιτικής εκμετάλλευσης.

Ειδικότερα, η έκταση της μελετώμενης περιοχής είναι περί τα 400.000 στρέμματα και περιβάλλεται από τα όρη Άσκιο και Σκοπό στα ΝΔ και ΝΑ όρια αντίστοιχα και την οροσειρά Βερμίου στα ΒΑ όρια. Ακόμη, περικλείει τα Ορυχεία Πτολεμαΐδας, ενώ στην ευρύτερη περιοχή εντοπίζονται η πόλη της Πτολεμαΐδας και οι οικισμοί Προαστίου, Ποντοκόμης, Ακρινής, Πτελεώνα, Σπηλιάς, Καρυχωρίου και Αγίου Χριστοφόρου.



Χάρτης 2: Γεωγραφική θέση Ορυχείων Πτολεμαΐδας

3.2 Επιλογή και επεξεργασία δορυφορικών εικόνων

Το πρώτο και βασικό βήμα που πραγματοποιήθηκε ήταν η επιλογή των προς επεξεργασία δορυφορικών εικόνων (Παράρτημα).

Δεδομένου ότι τα έτη μελέτης είναι 35, επιλέχθηκε ανά 5 έτη (δηλαδή τις χρονιές 1988, 1993, 1998, 2003, 2008, 2013, 2018 και 2022) μία ευκρινής- με χαμηλή επικάλυψη σε σύννεφα δορυφορική εικόνα, για τη μελέτη της περιοχής. Σημειώνεται ότι οι ημερομηνίες λήψης των δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν, είναι κοντινές ως προς τον μήνα (επιλέχθηκε ο Αύγουστος και ο Σεπτέμβριος, λόγω καλύτερων καιρικών συνθηκών), ώστε αυτές να μελετηθούν σε παρόμοια εποχιακή περίοδο.

Συγκεκριμένα για τις εικόνες που αφορούν στα έτη 1988, 1993, 1998, 2003 και 2008, χρησιμοποιήθηκε ο δορυφόρος Landsat 5 με ημερομηνίες λήψης τις 06/08/1988, 27/08/1993, 02/08/1998, 16/08/2003 και 13/08/2008, αντίστοιχα. Για την εικόνα που αφορά στο έτος 2013, χρησιμοποιήθηκε ο δορυφόρος Landsat 8 με ημερομηνία λήψης τη 19/09/2013. Τέλος, για τις εικόνες που αφορούν στα έτη 2018 και 2022 (όχι στο έτος 2023, διότι ακόμη δεν υπάρχουν δορυφορικές εικόνες για τους προαναφερόμενους μήνες), χρησιμοποιήθηκε ο δορυφόρος Sentinel- 2 με ημερομηνίες λήψης τις 21/09/2018 και 20/09/2022, αντίστοιχα.

Αναφέρεται ότι επιλέχθηκαν οι δορυφόροι Landsat 5 και 8, οι οποίοι είναι τύπου Collection 2, Level- 2 και για το λόγο αυτό πλεονεκτούν όσον αφορά την ακρίβεια γεωεντοπισμού του συνόλου δεδομένων αναφοράς εδάφους, την ψηφιακή μοντελοποίηση υψομέτρου και την ραδιομετρική βαθμονόμηση. Επομένως δεν χρειάζεται περαιτέρω διόρθωση των εικόνων, καθότι είναι ήδη ατμοσφαιρικά και ραδιομετρικά διορθωμένες (United States Geological Survey (USGS), n.d.).

Στον Πίνακα 9, παρουσιάζεται ο τύπος πλέγματος, το μέγεθος του εικονοστοιχείου, η ταυτότητα, η πηγή λήψης και οι ημερομηνίες λήψης των εικόνων που προέρχονται από τους δορυφόρους Landsat 5, Landsat 8 και Sentinel- 2.

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά εικόνων δορυφόρων Landsat 5, Landsat 8 και Sentinel-2

Δορυφόρος	Τύπος Πλέγματος	Μέγεθος Εικονοστοιχείου	ID	Πηγή	Χρονική Περίοδος
Landsat 5	Raster Grid	30×30 m	LT05_LS2P_185032	USGS- Earth Explorer	06/08/1988, 27/08/1993, 02/08/1998, 16/08/2003, 13/08/2008
Landsat 8	Raster Grid	30×30 m	LT08_LS2P_185032	USGS- Earth Explorer	19/09/2013
Sentinel- 2	Raster Grid	10- 60 m	S2A_MSIL2A (S2A_*, S2MSI2A)	Esa- Copernicus Open Access Hub	21/09/2018, 20/09/2022

Έπειτα από τη λήψη των δορυφορικών εικόνων, ακολούθησε η επεξεργασία τους. Οι εικόνες αρχικά προσαρμόστηκαν στην περιοχή ενδιαφέροντος, η οποία καταλαμβάνει 399.326 στρέμματα. Ειδικότερα, για κάθε δορυφορική εικόνα, δημιουργήθηκε ένας συνδυασμός (raster) από τα ληφθέντα κανάλια (bands) και στη συνέχεια ένα γεωμετρικό πολύγωνο, το οποίο οριοθέτησε τη μελετώμενη περιοχή και περιέκοψε την εικόνα.

Σημειώνεται ότι για τη συνολική επεξεργασία των εικόνων, την πραγματοποίηση της ταξινόμησης, αλλά και για την εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων, χρησιμοποιήθηκε το Quantum Geographical Information System (QGIS), το οποίο αποτελεί ένα λογισμικό Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών δομημένο σε ανοικτό και ελεύθερο κώδικα. Το GIS αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο για την ανίχνευση, την παρακολούθηση και τη μέτρηση των αλλαγών χρήσης και κάλυψης γης σε μια περιοχή μεταξύ δύο ή περισσότερων χρονικών περιόδων, μέσω χρονικών και χωρικών αναλύσεων (Alqurashi and Kumar, 2013). Αναφέρεται επίσης ότι επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί το Semi- Automatic Classification Plugin (SCP), το οποίο είναι ένα δωρεάν πρόσθετο ανοιχτού κώδικα για το QGIS, που δίνει τη δυνατότητα πραγματοποίησης επιβλεπόμενης ταξινόμησης σε εικόνες τηλεπισκόπησης, παρέχοντας εργαλεία για τη συνολική επεξεργασία τους.

3.3 Επιβλεπόμενη ταξινόμηση δορυφορικών εικόνων

3.3.1 Αποτύπωση καλύψεων γης

Ξεκινώντας τη διαδικασία της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, αρχικά έπρεπε να ορισθούν οι κατηγορίες των καλύψεων γης, δηλαδή οι κλάσεις της ταξινόμησης. Ορίστηκαν λοιπόν οι πέντε παρακάτω κατηγορίες:

1. Υψηλή φυτοκάλυψη
2. Χαμηλή φυτοκάλυψη
3. Άγονη γη
4. Υδάτινα σώματα
5. Ανθρωπογενείς κατασκευές

Οι εκτάσεις οι οποίες σχετίζονται με την ανάπτυξη των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων, επιλέχθηκε να συμπεριληφθούν στην κατηγορία της άγονης γης. Η επιλογή αυτή βασίστηκε στο ότι οι προαναφερόμενες μεταλλευτικές εκτάσεις έχουν παρόμοια φασματική υπογραφή με αυτή των ανθρωπογενών κατασκευών και κατά την ταξινόμηση δεν θα μπορούσε να γίνει διαχωρισμός μεταξύ αυτών των καλύψεων γης.

Η κάθε κλάση επιλέχθηκε να αντιπροσωπευτεί από ένα χρώμα με σκοπό την οπτική βελτίωση του τελικού αποτελέσματος. Σημειώνεται ότι για τις περιοχές υψηλής φυτοκάλυψης επιλέχθηκε σκούρο πράσινο χρώμα, για τις περιοχές χαμηλής φυτοκάλυψης ανοιχτό πράσινο, η άγονη γη συμβολίστηκε με καφέ χρώμα, τα υδάτινα σώματα με μπλε και οι ανθρωπογενείς κατασκευές με γκρι.

Έπειτα, ακολούθησε η συλλογή των δειγμάτων εκπαίδευσης. Ειδικότερα, σε κάθε δορυφορική εικόνα, δημιουργήθηκαν χειροκίνητα πολύγωνα, δηλαδή δείγματα εικονοστοιχείων, το καθένα από τα οποία αντιπροσώπευε μια συγκεκριμένη κλάση. Ο αριθμός των δειγμάτων που συλλέχθηκε για κάθε κατηγορία κάλυψης γης για την εικόνα κάθε έτους παρουσιάζεται στον Πίνακα 10:

Πίνακας 10: Αριθμός δειγμάτων εκπαίδευσης σε σχέση με τα μελετώμενα έτη και τις κλάσεις της ταξινόμησης

	1988	1993	1998	2003	2008	2013	2018	2022
Υψηλή φυτοκάλυψη	10	10	10	10	10	10	10	10
Χαμηλή φυτοκάλυψη	10	10	10	10	10	10	10	11
Άγονη γη	23	25	22	28	21	32	25	25
Υδάτινα σώματα	-	1	1	3	4	1	3	3
Ανθρωπογενείς κατασκευές	4	6	6	6	8	8	1	6

Από το σύνολο των δειγμάτων εκπαίδευσης προέκυψε το αρχείο υπογραφής κάθε εικόνας, βάσει του οποίου πραγματοποιήθηκε η ταξινόμηση κάθε έτους.

Για την επιβλεπομένη ταξινόμηση έγινε χρήση της μεθόδου της μέγιστης πιθανότητας (maximum likelihood), η οποία προέρχεται από το θεώρημα του Bayes, σύμφωνα με το οποίο η κατανομή $P(i|\omega)$ που προκύπτει, δηλαδή η πιθανότητα ότι ένα δείγμα εικονοστοιχείου (πολύγωνο) με διάνυσμα χαρακτηριστικών ω ανήκει στην κατηγορία i , δίνεται από τον τύπο:

$$P(i|\omega) = \frac{P(\omega|i)P(i)}{P(\omega)} \quad (1)$$

όπου $P(\omega|i)$ η συνάρτηση πιθανότητας, $P(i)$ η πιθανότητα εμφάνισης της κλάσης i στην περιοχή μελέτης και $P(\omega)$ η πιθανότητα παρατήρησης του ω , η οποία δίνεται από τον τύπο:

$$P(\omega) = \sum_{i=1}^M P(\omega|i)P(i) \quad (2)$$

όπου M ο αριθμός των κλάσεων.

Επομένως, η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιεί μια διακριτική συνάρτηση για να εκχωρήσει κάθε πολύγωνο που έχει δημιουργηθεί στην κλάση στην οποία παρουσιάζει την υψηλότερη πιθανότητα να ανήκει (Ahmad and Quegan, 2012).

Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν μια ταξινομημένη εικόνα- χάρτης για κάθε έτος, στην οποία υπάρχουν τέσσερις ή πέντε κατηγορίες κάλυψης γης επισημασμένες με τα προαναφερόμενα χρώματα.

Για τη βελτίωση των παραγόμενων εικόνων χρησιμοποιήθηκαν τα φίλτρα Majority/ Minority και Sieve του QGIS, ώστε να ομαδοποιηθούν καλύτερα στις υπάρχουσες κλάσεις ή και να

απαλειφθούν τυχόν διασκορπισμένα εικονοστοιχεία και κατ' επέκταση η ταξινόμηση να είναι οπτικά πιο καθαρή. Σημειώνεται ότι το πρώτο φίλτρο χρησιμοποιήθηκε στις εικόνες των ετών 1988, 1998 και 2022, ενώ το δεύτερο σε αυτές των ετών 1993, 2003, 2008, 2013 και 2018. Η επιλογή του φίλτρου κάθε φορά έγινε με κριτήριο τη μέγιστη βελτίωση των εικόνων.

3.3.2 Αξιολόγηση ακρίβειας ταξινόμησης

Μετά την επιβλεπόμενη ταξινόμηση των οκτώ δορυφορικών εικόνων, ακολούθησε ο έλεγχος της ακρίβειάς της.

Για τον σκοπό αυτό, αρχικά δημιουργήθηκαν καινούργια σύνολα εκπαίδευσης στην εικόνα κάθε έτους τα οποία αποτελούνταν από τυχαία δειγματοληπτικά σημεία (500 σημεία στην εικόνα του έτους 1988 και 510 σε αυτές των υπολοίπων ετών, διότι στην πρώτη η ταξινόμηση έγινε σε τέσσερις κλάσεις και όχι σε πέντε, καθώς δεν υπήρχαν υδάτινα σώματα). Για τη δημιουργία των σημείων αυτών, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της στρωματοποιημένης τυχαίας δειγματοληψίας (stratified random sampling), κατά την οποία ο αριθμός των δειγμάτων για κάθε κατηγορία κάλυψης γης προέκυψε ανάλογα με την επιφάνεια που καταλαμβάνει στην περιοχή μελέτης.

Έπειτα, για κάθε εικόνα ελέγχθηκε χειροκίνητα η ορθότητα της αντιστοίχισης των δειγμάτων, δηλαδή αν κάθε τυχαίο σημείο που δημιουργήθηκε αυτόματα για κάθε κατηγορία κάλυψης γης συνέπιπτε με την κατηγορία στην οποία ανήκε στην πραγματικότητα. Σε περίπτωση που ένα τυχαίο σημείο είχε δημιουργηθεί σε μια κλάση στην οποία δεν ανήκε πραγματικά, τότε γινόταν διόρθωση ώστε να υπάρξει σωστή αντιστοίχιση.

Τέλος, από τα αρχεία των τυχαίων δειγμάτων και από αυτά της αντιστοίχισής τους δημιουργήθηκε ένας πίνακας συσχέτισης (confusion matrix) για την εικόνα κάθε έτους, στην οποία περιέχονται δύο βασικά μεγέθη και ένας συντελεστής για την αξιολόγηση της ταξινόμησης (Darem et al., 2023). Αυτά είναι:

- Ακρίβεια Παραγωγού (Producer's Accuracy-PA): το μέγεθος αυτό προκύπτει από τη διαίρεση του αριθμού των σημείων αναφοράς που ταξινομούνται σύμφωνα με τα δεδομένα εκπαίδευσης με τον συνολικό αριθμό των σημείων αναφοράς σε μία συγκεκριμένη κλάση. Δηλαδή, το PA αναφέρεται στην ακρίβεια της ταξινόμησης από

τη σκοπιά του παραγωγού, δείχνοντας πόσο συχνά τα πραγματικά χαρακτηριστικά του εδάφους (ground truth) απεικονίζονται σωστά στην ταξινομημένη εικόνα ή την πιθανότητα να έχει ταξινομηθεί όπως είναι πραγματικά μια συγκεκριμένη κάλυψη γης (Laboratory of GIS & RS at the Czech University of Life Sciences, n.d.).

- Ακρίβεια Χρήστη (User's Accuracy-UA): το μέγεθος αυτό υπολογίζεται από τη διαίρεση του συνολικού αριθμού των σωστά ταξινομημένων σημείων με το σύνολο της σειράς. Δηλαδή, το UA αναφέρεται στην ακρίβεια από τη σκοπιά του χρήστη και εκφράζει την πιθανότητα ένα εικονοστοιχείο που έχει ταξινομηθεί σε μια συγκεκριμένη κλάση να την αντιπροσωπεύει πραγματικά στο έδαφος (Ibid.).
- Συντελεστής Kappa του Cohen (Cohen's Kappa statistic): ο συντελεστής αυτός χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ακρίβειας μιας ταξινόμησης. Πιο συγκεκριμένα, η αξιολόγηση αφορά στην απόδοση της ταξινόμησης που έχει πραγματοποιηθεί συγκριτικά με μία ταξινόμηση στην οποία η αντιστοίχιση των δειγμάτων γίνεται τυχαία, ανάλογα με τη συχνότητα κάθε κλάσης. Ο συντελεστής Kappa δίνεται από τον τύπο:

$$K = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} = 1 - \frac{1 - p_o}{1 - p_e} \quad (3)$$

όπου p_o και p_e , η παρατηρούμενη και η αναμενόμενη συμφωνία αντίστοιχα.

Σημειώνεται ότι ο Kappa παίρνει πάντα τιμές μικρότερες ή ίσες του 1. Όταν αυτός παίρνει τιμές μικρότερες του 0, σημαίνει ότι η ταξινόμηση δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί (όχι συμφωνία), για τιμές 0- 0,20 υποδηλώνεται ελαφρά συμφωνία, 0,21- 0,40 δίκαιη συμφωνία, 0,41- 0,60 μέτρια συμφωνία, 0,61- 0,80 ουσιαστική συμφωνία και 0,81- 1 σχεδόν τέλεια συμφωνία (Landis and Koch, 1977).

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

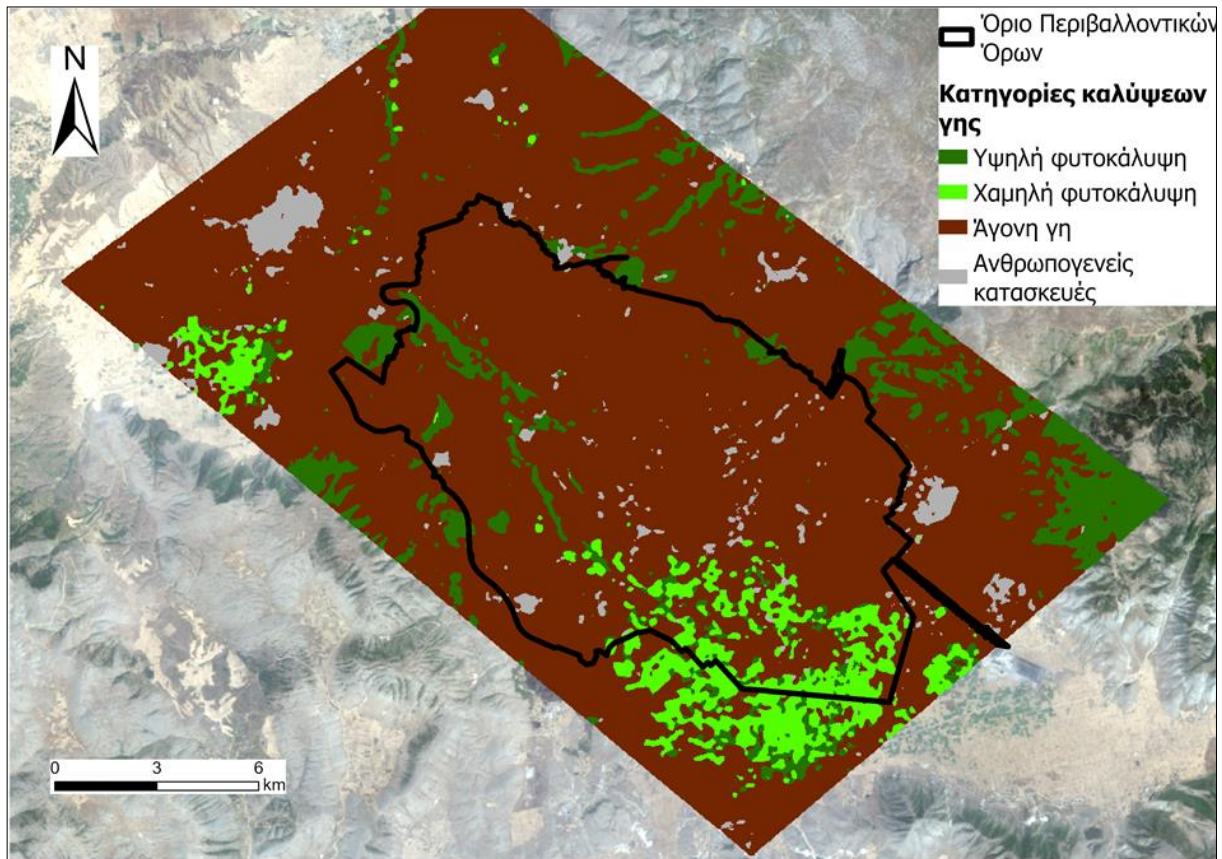
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από τη διαδικασία της επιβλεπόμενης ταξινόμησης που εφαρμόστηκε στις δορυφορικές εικόνες των Ορυχείων της Πτολεμαΐδας για τα έτη 1988, 1993, 1998, 2003, 2008, 2013, 2018 και 2022.

4.1 Αποτελέσματα επιβλεπόμενης ταξινόμησης

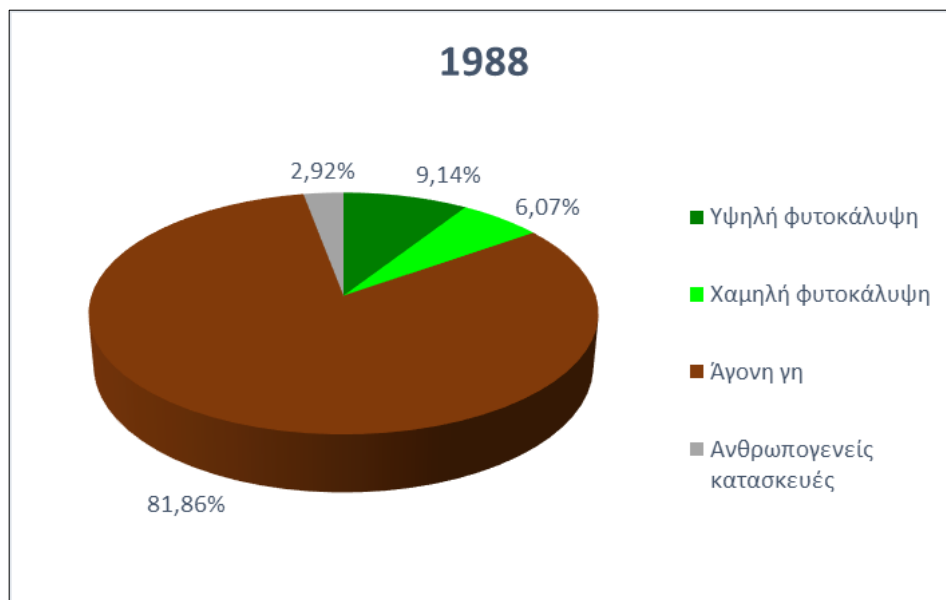
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ταξινομημένοι χάρτες- εικόνες που δημιουργήθηκαν κατά την επεξεργασία, καθώς και διαγράμματα υπό μορφή πίτας τα οποία αφορούν στο ποσοστό κάθε κατηγορίας κάλυψης γης για κάθε έτος. Όσον αφορά τους χάρτες σημειώνεται ότι σε αυτούς απεικονίζεται και το εγκεκριμένο όριο Περιβαλλοντικών Όρων (Απόφαση Έγκρισης Περιβαλλοντικών Όρων (ΑΕΠΟ) 133314/2929/09.11.2011) των Ορυχείων της ΔΕΗ στην Πτολεμαΐδα, εντός του οποίου έχει αδειοδοτηθεί η λειτουργία τους. Το εν λόγω όριο χρησιμοποιείται ώστε να εντοπιστούν οι μεταβολές που οφείλονται στην ανάπτυξη της μεταλλευτικής δραστηριότητας και των σχετικών αποκαταστάσεων και να διαχωριστούν από τις λοιπές αλλαγές.

Οι μεταβολές στις καλύψεις γης δεν παραμένουν σταθερές κατά την πάροδο των ετών. Αντίθετα, σημειώνονται αυξομειώσεις σε όλες τις κατηγορίες καλύψεων γης εκτός από αυτή των υδάτινων σωμάτων, η οποία στην κλίμακα και στο χρονικό διάστημα που εξετάστηκε δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές. Τα υδάτινα σώματα διατηρούνται σε πολύ χαμηλά ποσοστά κάλυψης καθ' όλη τη μελετώμενη χρονική περίοδο, εξαιτίας των μικρών συγκεντρώσεών τους στην περιοχή, ενώ η κλάση της άγονης γης σημειώνει τα υψηλότερα, καθώς σε αυτήν συμπεριλαμβάνονται και οι μεταλλευτικές δραστηριότητες. Οι κατηγορίες της υψηλής και της χαμηλής φυτοκάλυψης παρουσιάζουν τις πιο εμφανείς αλλαγές από έτος σε έτος, οι οποίες οφείλονται κυρίως στην εξέλιξη των Ορυχείων, αλλά και στην πραγματοποίηση αποκαταστάσεων εντός του ορίου Περιβαλλοντικών Όρων (ΠΟ). Τέλος, το ποσοστό κάλυψης των ανθρωπογενών κατασκευών αυξάνεται συνολικά κατά 2,71% από το έτος 1988 έως το 2022, όμως εντός αυτής της χρονικής περιόδου υπάρχουν σημαντικές μεταβολές στην κλάση αυτή, λόγω πραγματοποίησης απαλλοτριώσεων σε οικισμούς εντός της περιοχής των Ορυχείων.

- 1988



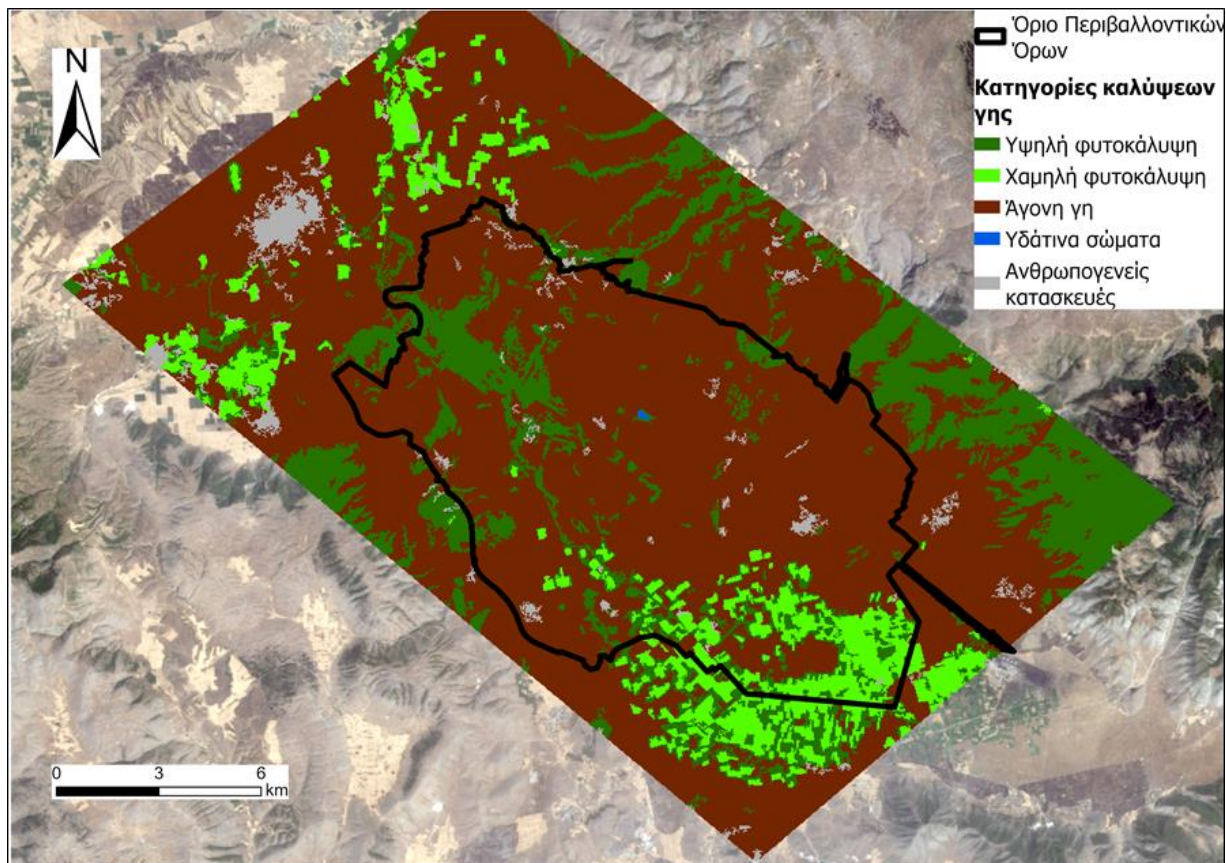
Χάρτης 3: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 1988



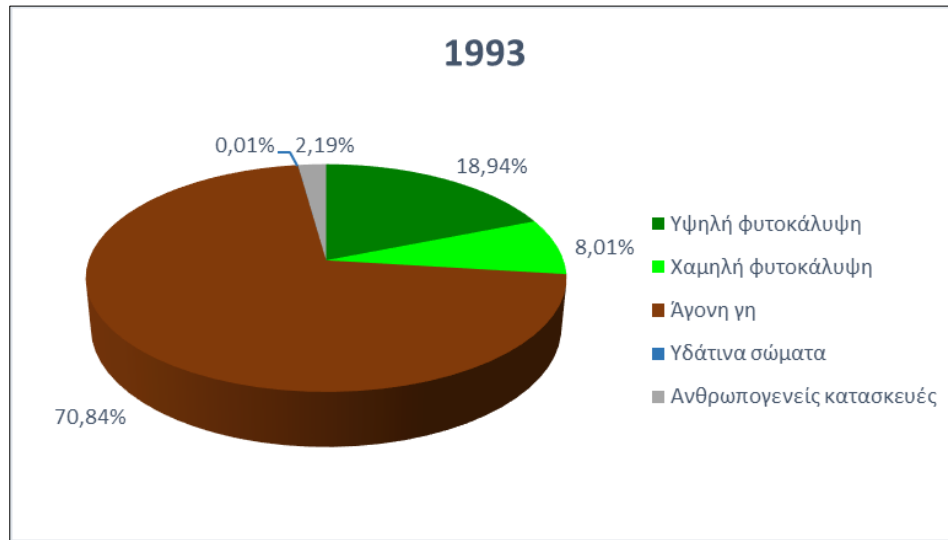
Διάγραμμα 5: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 1988

Σύμφωνα με τον Χάρτη 3 και το Διάγραμμα 5, η επικρατέστερη κατηγορία κάλυψης γης στη μελετώμενη περιοχή για το έτος 1988, με ποσοστό 81,86%, είναι αυτή της άγονης γης, καθώς η συγκεκριμένη κλάση εμπεριέχει και τις μεταλλευτικές δραστηριότητες, δηλαδή τις περιοχές εκσκαφών και αποθέσεων. Παρατηρείται επίσης η απουσία υδάτινων σωμάτων, όπως και η μειωμένη παρουσία των ανθρωπογενών κατασκευών (2,92%), με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη μικρή έκταση της πόλης της Πτολεμαΐδας. Επιπλέον, οι εκτάσεις με υψηλή φυτοκάλυψη βρίσκονται κυρίως εκτός της περιοχής των Ορυχείων και εντοπίζονται στην οροσειρά Βερμίου και στο όρος Άσκιο, ενώ οι περιοχές με χαμηλή φυτοκάλυψη παρατηρούνται τόσο εντός, όσο και εκτός του εγκεκριμένου ορίου ΠΟ.

- 1993



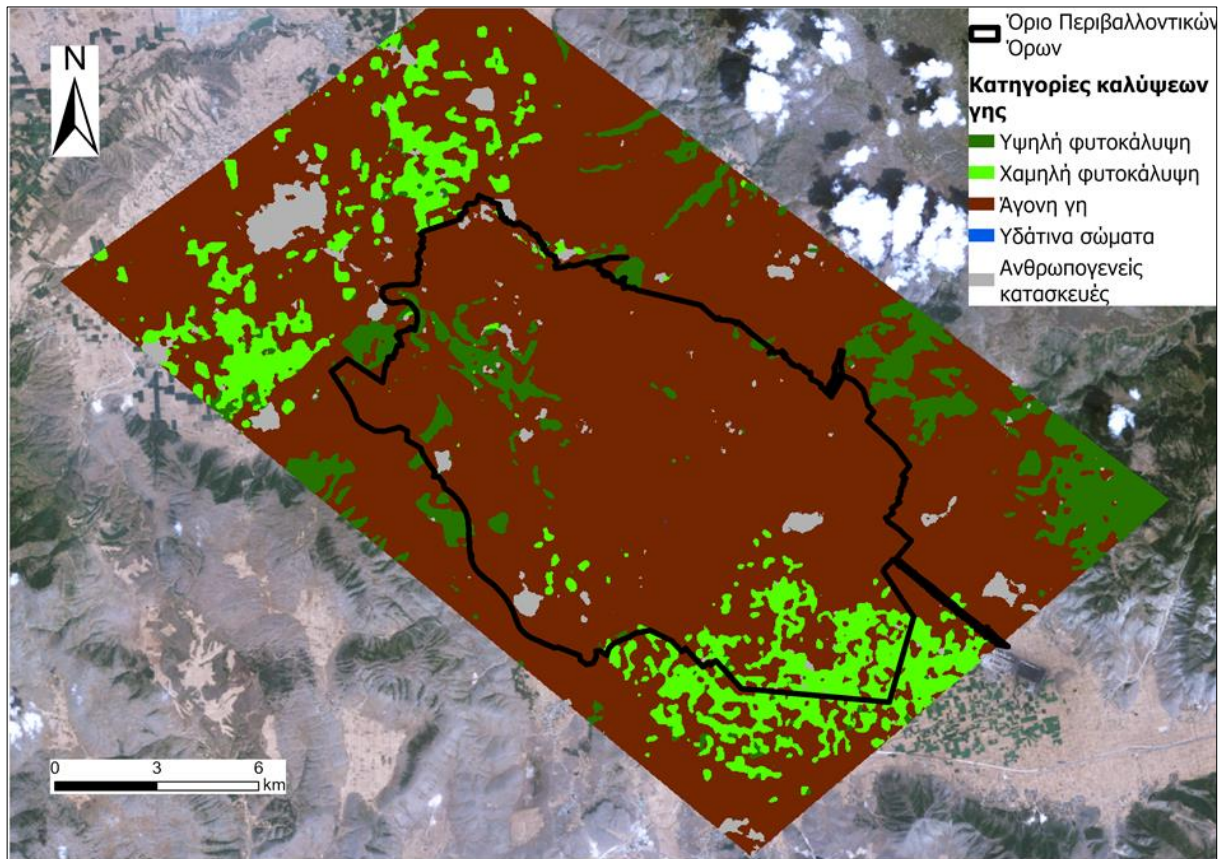
Χάρτης 4: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 1993



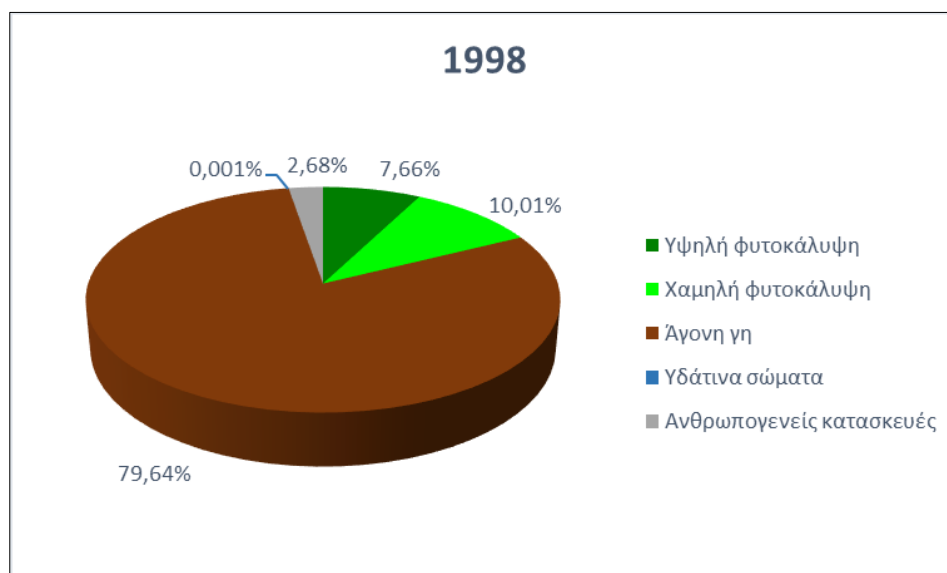
Διάγραμμα 6: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 1993

Σύμφωνα με τον Χάρτη 4 και το Διάγραμμα 6, η επικρατέστερη κατηγορία κάλυψης γης για το έτος 1993 στη μελετώμενη περιοχή, είναι ξανά αυτή της άγονης γης, με ποσοστό 70,84%. Συγκριτικά με το έτος 1988, η άγονη γη μειώνεται κατά 11,02%. Αντίθετα, όπως μπορεί να παρατηρηθεί από τον προαναφερόμενο χάρτη, οι εκτάσεις με υψηλή και χαμηλή φυτοκάλυψη αυξάνονται κατά 14,80% και 1,94% αντίστοιχα. Η αύξηση αυτών των καλύψεων παρατηρείται τόσο εντός, όσο και εκτός του ορίου ΠΟ, λόγω της ανάπτυξης των δασικών περιοχών. Επίσης, παρατηρείται η εμφάνιση μικρών υδάτινων σωμάτων, λόγω της προσωρινής συγκέντρωσής τους στις χαμηλότερες υψομετρικές στάθμες των Ορυχείων. Το ποσοστό των συγκεντρώσεων αυτών είναι αμελητέο (0,01%) σε σχέση με τα ποσοστά των υπόλοιπων κατηγοριών και για τον λόγο αυτό δεν μπορούν να διακριθούν χρωματικά στο παραπάνω διάγραμμα. Τέλος, η κλάση των ανθρωπογενών κατασκευών δεν παρουσιάζει κάποια αξιοσημείωτη μεταβολή, καθώς μειώνεται κατά 0,73%.

- 1998



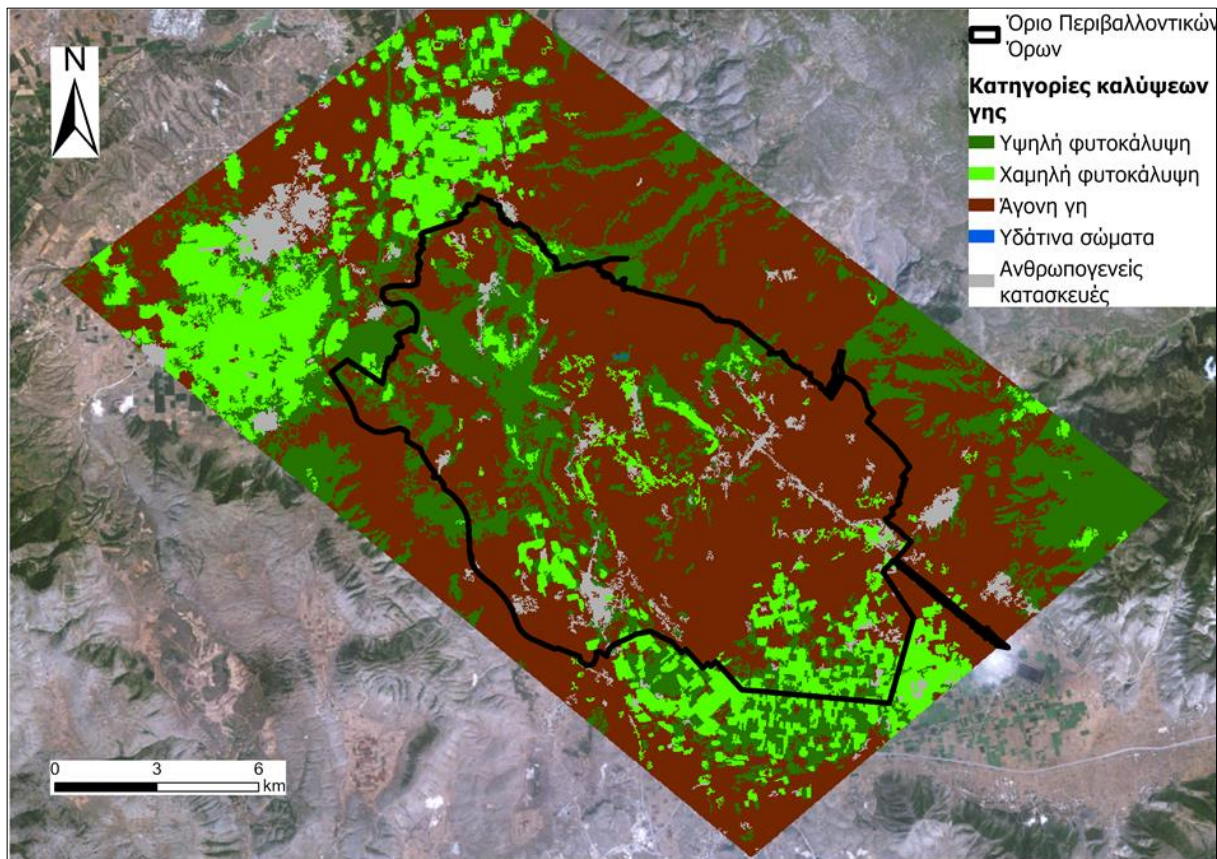
Χάρτης 5: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 1998



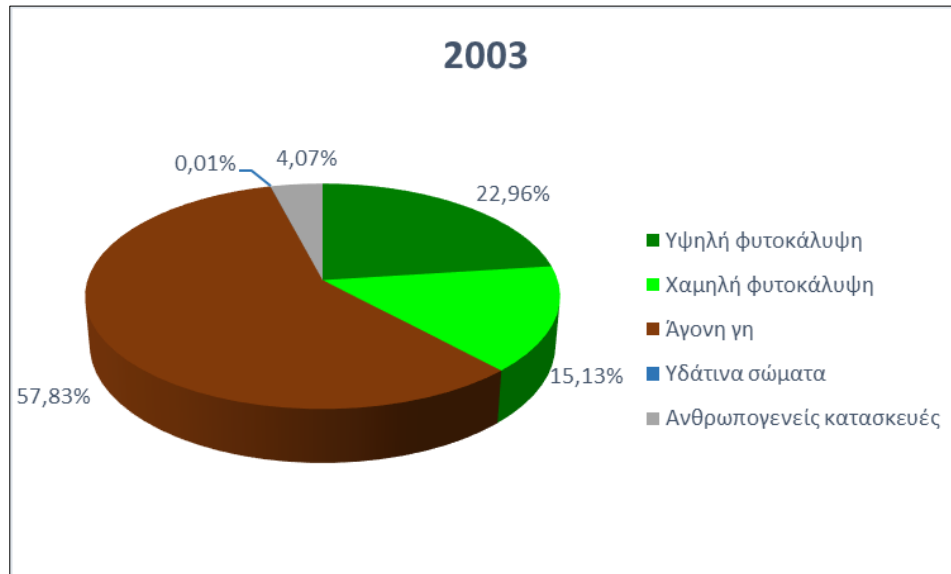
Διάγραμμα 7: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 1998

Σύμφωνα με τον Χάρτη 5 και το Διάγραμμα 7, που αντιστοιχούν στο έτος 1998, η άγονη γη εξακολουθεί να επικρατεί ως κατηγορία κάλυψης γης στην περιοχή, με ποσοστό 79,64%, για τους προαναφερόμενους λόγους. Παρ' όλα αυτά, παρουσιάζει μικρή αύξηση σε σχέση με το έτος 1993, λόγω της προχώρησης των Ορυχείων στο νοτιοανατολικό τμήμα του ορίου ΠΟ (ανάπτυξη Ορυχείου Νοτίου Πεδίου). Η αύξηση της άγονης γης εντός του ορίου αυτού, συνεπάγεται τη μείωση των εκτάσεων με χαμηλή φυτοκάλυψη στην ίδια περιοχή. Η υψηλή φυτοκάλυψη ελαττώνεται στις ορεινές περιοχές, με αποτέλεσμα να μειώνεται συνολικά κατά 11,28%. Ωστόσο, ενώ η χαμηλή φυτοκάλυψη μειώνεται στην περιοχή του Ορυχείου, αυξάνεται περιμετρικά της πόλης της Πτολεμαΐδας, συνεπώς αυξάνεται συνολικά κατά 2%. Η παρουσία των υδάτινων σωμάτων συνεχίζει να κυμαίνεται σε πολύ μικρά ποσοστά (0,001%) και η κατηγορία των ανθρωπογενών κατασκευών παρουσιάζει μικρή αύξηση κατά 0,49%.

- 2003



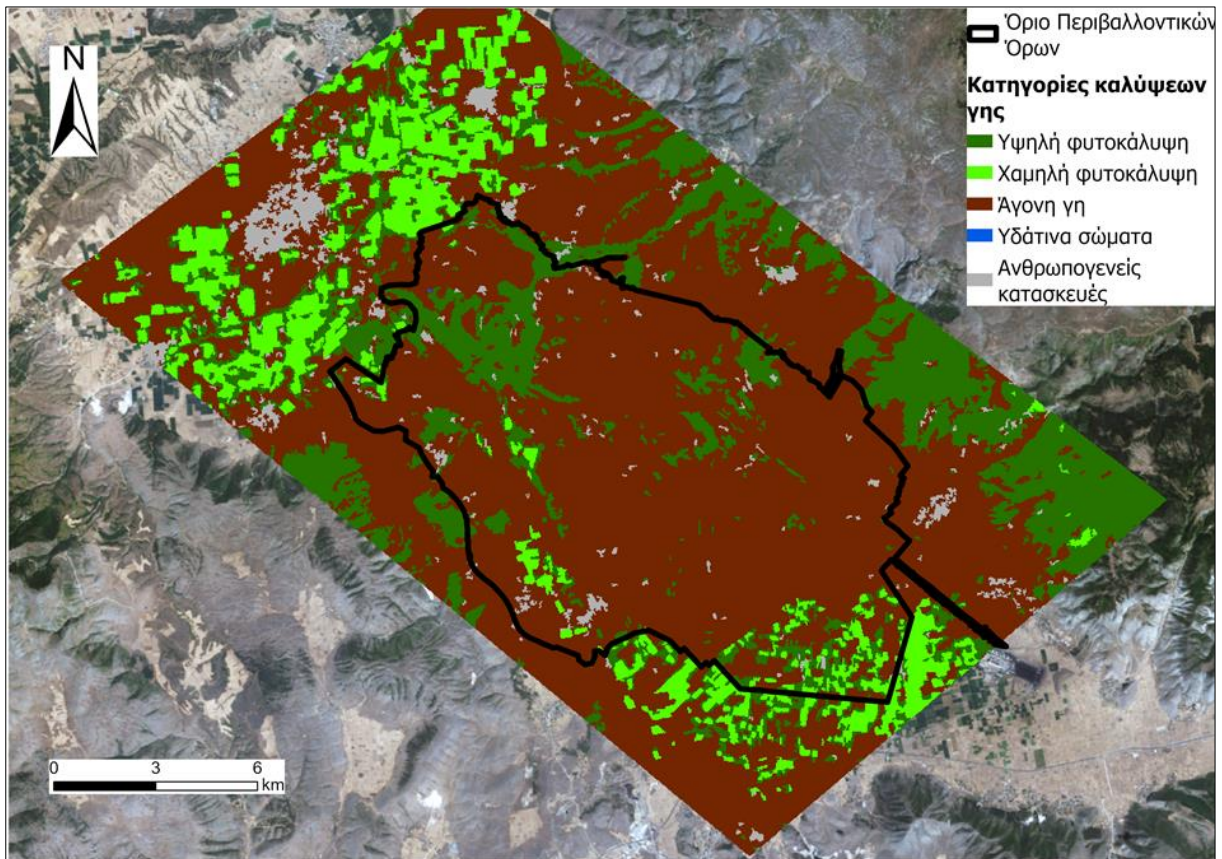
Χάρτης 6: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2003



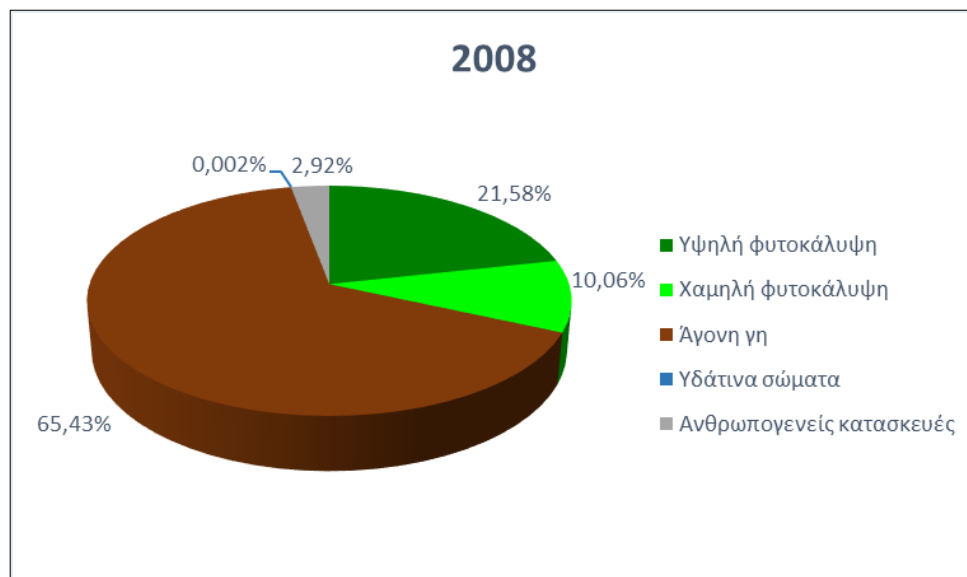
Διάγραμμα 8: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2003

Σύμφωνα με τον Χάρτη 6 και το Διάγραμμα 8, η κατηγορία της άγονης γης, ενώ είναι η επικρατέστερη το έτος 2003 με ποσοστό 57,83%, παρουσιάζει μείωση κατά 21,81%, σε σχέση με το έτος 1998. Οι αποκαταστάσεις εντός του ορίου ΠΟ αυξάνονται σημαντικά, με αποτέλεσμα να αυξάνονται και οι εκτάσεις με υψηλή φυτοκάλυψη και να μειώνεται η έκταση της άγονης γης. Είναι χαρακτηριστική η αύξηση των εκτάσεων με υψηλή φυτοκάλυψη σε θέσεις βόρεια και κεντρικά εντός του ορίου ΠΟ, που αντιστοιχούν σε αποκατεστημένες περιοχές με δασικά είδη. Ακόμη, η υψηλή φυτοκάλυψη αυξάνεται και στις ορεινές περιοχές, αλλά και στις περιοχές περιμετρικά και εκτός του ορίου ΠΟ, παρουσιάζοντας συνολική αύξηση κατά 15,30%. Όσον αφορά τη χαμηλή φυτοκάλυψη, αυξάνεται συνολικά κατά 5,12%, με τη μεγαλύτερη πύκνωσή της συγκριτικά με το έτος 1998 να παρατηρείται περιμετρικά της πόλης της Πτολεμαΐδας. Ακόμη, όπως φαίνεται στον παραπάνω χάρτη, ο οικισμός Κλείτος, ο οποίος βρισκόταν στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής των Ορυχείων τα προηγούμενα έτη, στην ταξινομημένη εικόνα του έτους 2008 δεν εμφανίζεται διότι έχει απαλλοτριωθεί. Η κατηγορία των ανθρωπογενών κατασκευών σημειώνει αύξηση κατά 1,39% σε σχέση με το προαναφερόμενο έτος, ενώ οι συγκεντρώσεις υδάτων στην περιοχή είναι αμελητέες (0,01%) συγκριτικά με την έκταση των υπολοίπων καλύψεων γης.

- 2008



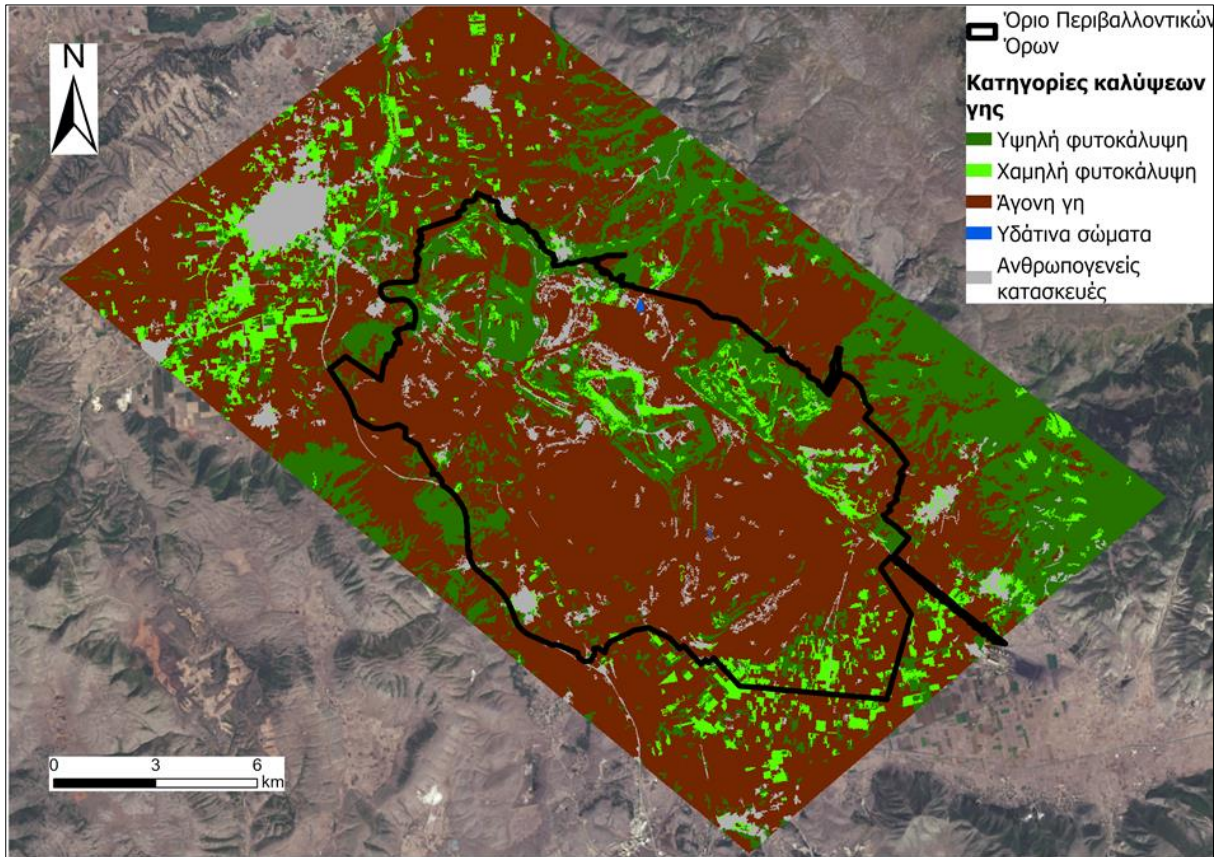
Χάρτης 7: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2008



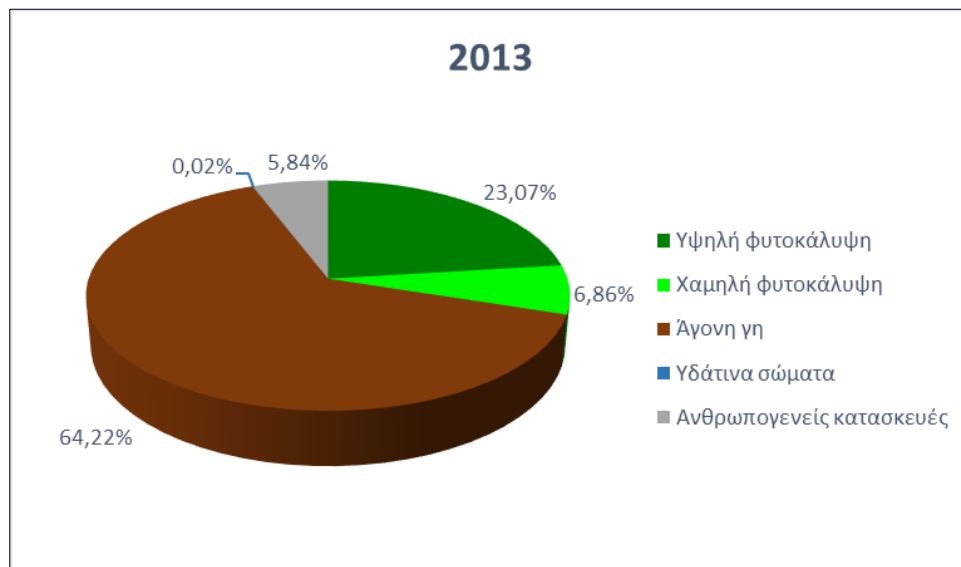
Διάγραμμα 9: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2008

Σύμφωνα με τον Χάρτη 7 και το Διάγραμμα 9 για το έτος 2008, η κατηγορία της άγονης γης αυξάνεται κατά 7,60% σε σχέση με το έτος 2003 και καταλαμβάνει το 65,43% της συνολικής έκτασης της περιοχής μελέτης. Πρόκειται για περίοδο εκτεταμένης μεταλλευτικής δραστηριότητας και έντονης ανάπτυξης των Ορυχείων. Παράλληλα με την αύξηση της άγονης γης, η οποία στην ταξινομημένη εικόνα εντοπίζεται κυρίως εντός της περιοχής των Ορυχείων, μειώνεται η υψηλή και η χαμηλή φυτοκάλυψη, εξαιτίας της επέκτασης της λιγνιτικής δραστηριότητας (ΝΔ επέκταση Ορυχείου Καρδιάς και ΝΑ επέκταση Ορυχείου Νοτίου Πεδίου, αρχική διάνοιξη Ορυχείου Μαυροπηγής). Η υψηλή φυτοκάλυψη ενώ μειώνεται εντός του ορίου ΠΟ, πυκνώνει στις ορεινές περιοχές, όμως παρ' όλα αυτά μειώνεται συνολικά κατά 1,38%. Αντίθετα, η χαμηλή φυτοκάλυψη αραιώνει εξωτερικά του ορίου και παρουσιάζει συνολική μείωση κατά 5,07%. Η κατηγορία των ανθρωπογενών κατασκευών μειώνεται κατά 1,15% συγκριτικά με το έτος 2003. Τέλος, οι υδάτινες συγκεντρώσεις είναι αμελητέες σε σχέση με τη συνολική έκταση της μελετώμενης περιοχής, καταλαμβάνοντας μόνο το 0,002% αυτής.

- 2013



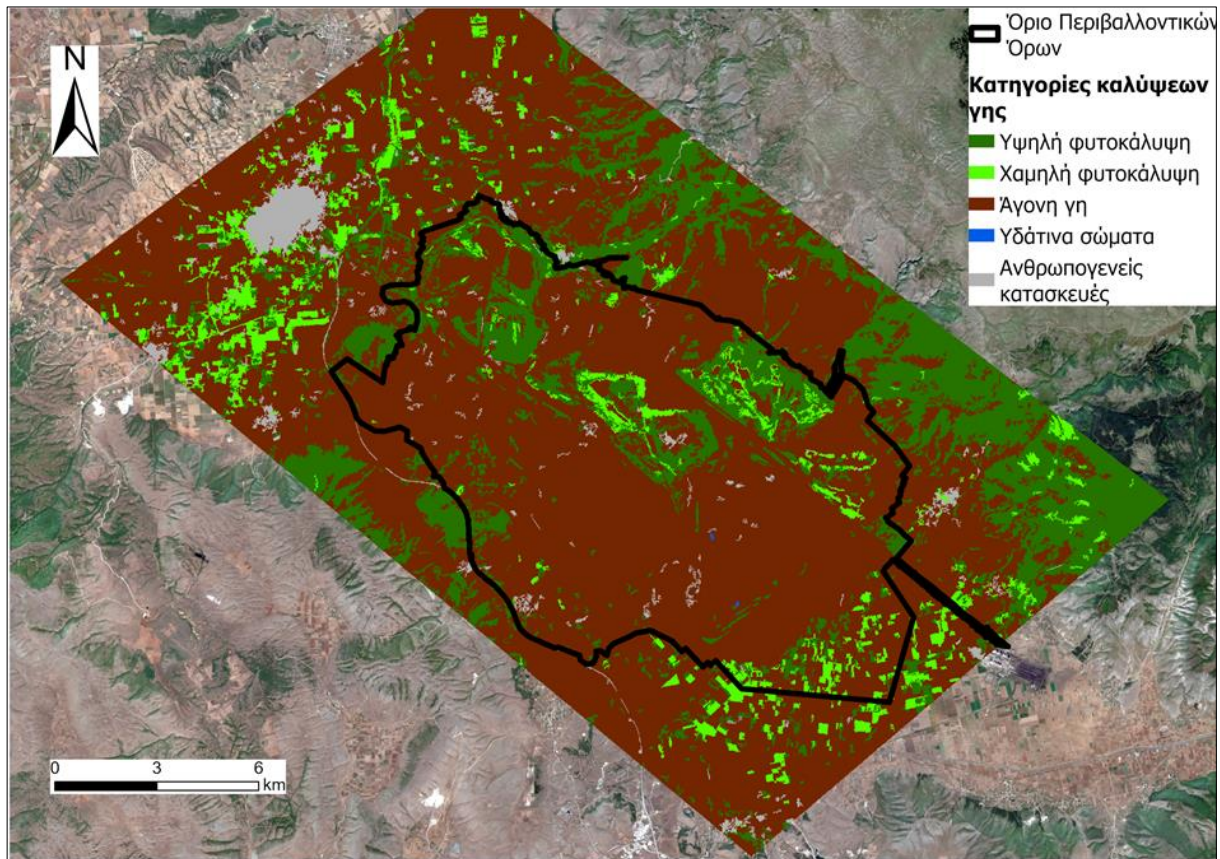
Χάρτης 8: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2013



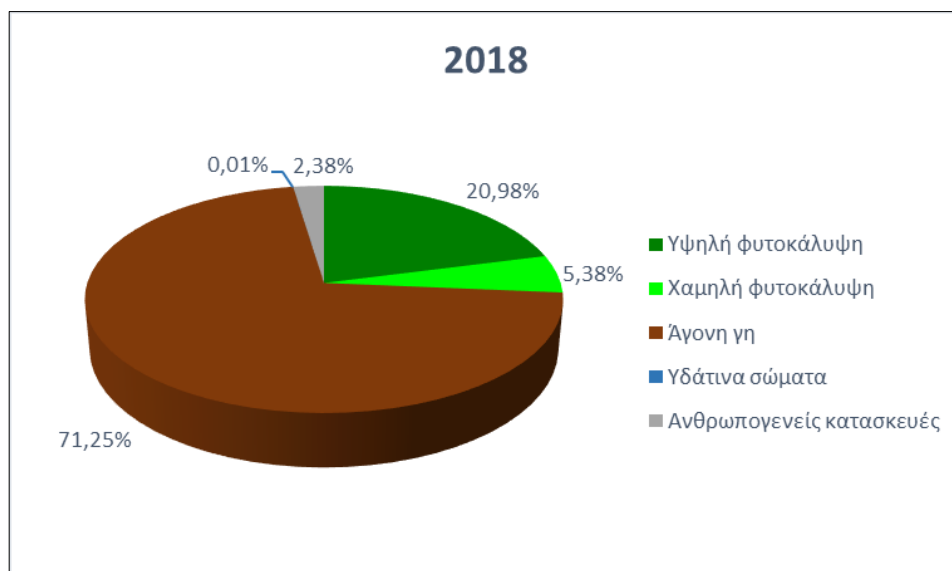
Διάγραμμα 10: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2013

Σύμφωνα με τον Χάρτη 8 και το Διάγραμμα 10, το έτος 2013 η άγονη γη εξακολουθεί να επικρατεί σαν κάλυψη γης στην περιοχή, καταλαμβάνοντας το 64,22% της συνολικής έκτασης. Οι ποσοστιαίες μεταβολές που σημειώνονται το έτος 2013 σε σχέση με το έτος 2008, δεν είναι σημαντικές, αφού η υψηλή φυτοκάλυψη αυξάνεται κατά 1,49%, η χαμηλή φυτοκάλυψη και η άγονη γη μειώνονται κατά 3,20% και 1,22% αντίστοιχα και η συγκέντρωση υδάτων παραμένει αμελητέα, με ποσοστό 0,02%. Παρ' όλα αυτά, όπως φαίνεται στην ταξινομημένη εικόνα, οι αποκαταστάσεις εντός του ορίου ΠΟ αυξάνονται και οι εκτάσεις με χαμηλή φυτοκάλυψη εκτός αυτού, μειώνονται. Επίσης, η κατηγορία των ανθρωπογενών κατασκευών αυξάνεται κατά 2,91%. Η μεταβολή αυτή στη συγκεκριμένη κάλυψη γης, παρατηρείται διότι από το συγκεκριμένο έτος και μετά, λόγω της εξέλιξης των δορυφορικών συστημάτων, οι δορυφορικές εικόνες βελτιώνονται ως προς την ανάλυσή τους, με αποτέλεσμα να βελτιώνεται και η ακρίβεια στην αποτύπωση και στη διάκριση των καλύψεων γης κατά την ταξινόμηση. Πλέον, μπορεί να διακριθεί το οδικό δίκτυο νοτιοδυτικά της περιοχής των Ορυχείων, καθώς και η επέκταση της πόλης της Πτολεμαΐδας.

- 2018



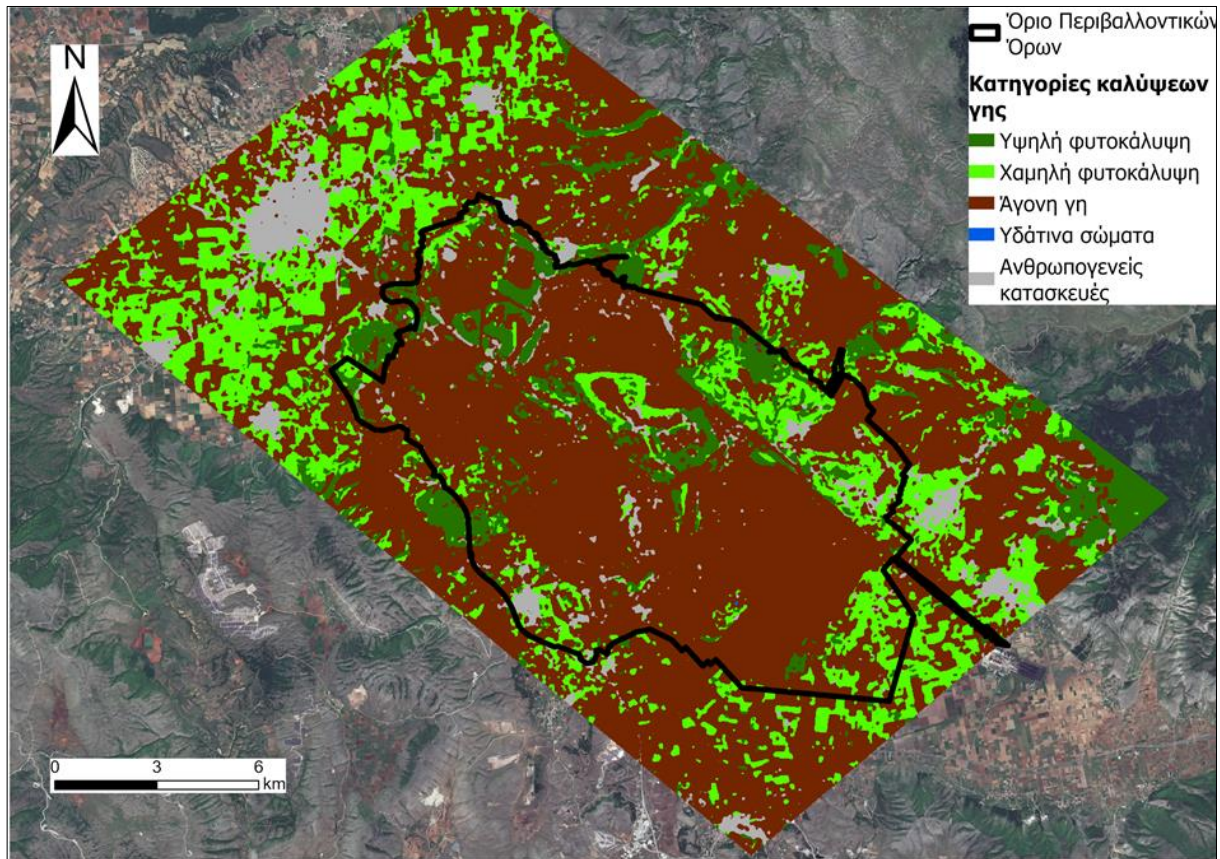
Χάρτης 9: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2018



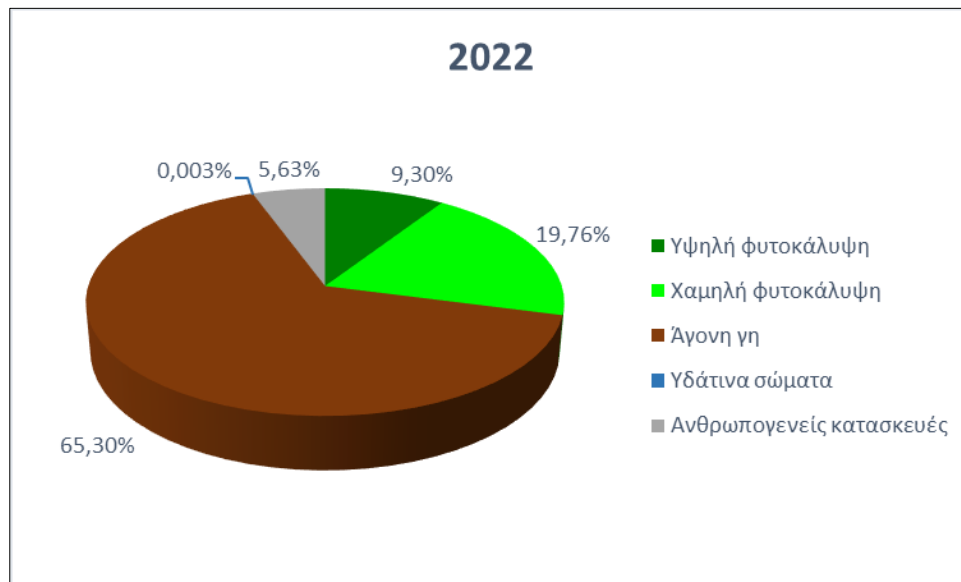
Διάγραμμα 11: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2018

Σύμφωνα με τον Χάρτη 9 και το Διάγραμμα 11, που αντιστοιχούν στο έτος 2018, η κατηγορία της άγονης γης εξακολουθεί να επικρατεί σε ποσοστό κάλυψης (71,25%) στη μελετώμενη περιοχή, παρουσιάζοντας αύξηση, κατά 7,03%, σε σχέση με το έτος 2013. Συγκρίνοντας τις εικόνες και τα διαγράμματα των ετών 2013 και 2018, παρατηρείται μείωση της κατηγορίας των ανθρωπογενών κατασκευών κατά 3,46%. Η μείωση αυτή οφείλεται στον καλύτερο διαχωρισμό των φασματικών υπογραφών των κατηγοριών της άγονης γης και των ανθρωπογενών κατασκευών, οι οποίες είναι παρόμοιες με αποτέλεσμα οι δυο αυτές κατηγορίες να συγχέονται, καθώς οι μεταλλευτικές δραστηριότητες συμπεριλαμβάνονται στην πρώτη κατηγορία. Επομένως, με τη βελτίωση της ανάλυσης της δορυφορικής εικόνας λόγω εξέλιξης των δορυφορικών συστημάτων, αλλά και με την πραγματοποίηση διορθώσεων κατά το στάδιο της ταξινόμησης, οι φασματικές υπογραφές των προαναφερόμενων κατηγοριών διαχωρίστηκαν σε μεγάλο βαθμό, με αποτέλεσμα να διακρίνονται με μεγαλύτερη ακρίβεια οι αντίστοιχες καλύψεις γης για το έτος 2018. Ένας άλλος λόγος για τη μείωση αυτή, είναι η απουσία του οικισμού της Μαυροπηγής στο δυτικό τμήμα εντός του ορίου ΠΟ, ο οποίος έχει απαλλοτριωθεί και προσβληθεί από την εκμετάλλευση, με αποτέλεσμα η έκταση που καταλάμβανε να μετατραπεί σε άγονη γη. Επιπλέον, τα ποσοστά της χαμηλής και της υψηλής φυτοκάλυψης δεν παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές συγκριτικά με το προαναφερόμενο έτος, αφού μειώνονται κατά 1,48% και 2,09% αντίστοιχα. Τέλος, αναφέρεται ότι η συγκέντρωση των υδάτινων σωμάτων παραμένει αμελητέα με ποσοστό 0,01%.

- 2022



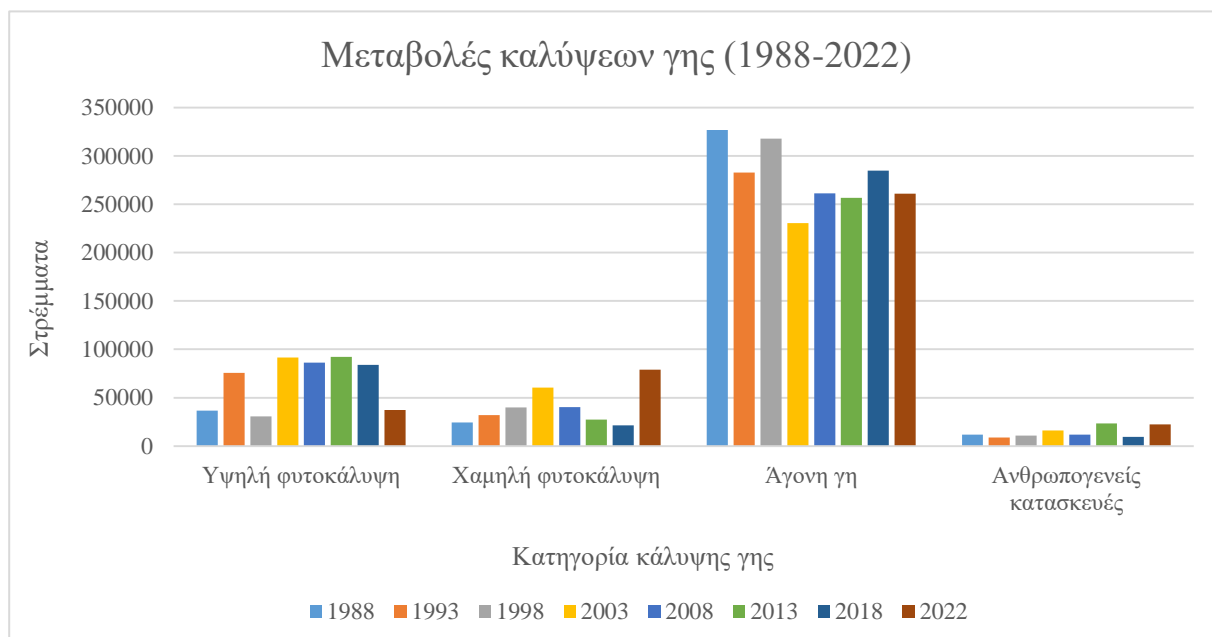
Χάρτης 10: Αποτέλεσμα ταξινόμησης για το έτος 2022



Διάγραμμα 12: Ποσοστά κατηγοριών καλύψεων γης για το έτος 2022

Σύμφωνα με τον Χάρτη 9 και το Διάγραμμα 12, το έτος 2022 η κατηγορία της άγονης γης καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη έκταση στην περιοχή μελέτης με ποσοστό 65,30%, παρουσιάζοντας όμως μείωση κατά 5,95% σε σχέση με το έτος 2018. Η μείωση αυτή οφείλεται στην αύξηση κατά 14,38% των περιοχών με χαμηλή φυτοκάλυψη τόσο εντός, όσο και εκτός της περιοχής των Ορυχείων. Το έτος 2022, η κατηγορία της χαμηλής φυτοκάλυψης κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό (19,76%) σε σχέση με όλα τα προαναφερόμενα έτη, λόγω των αυξημένων εργασιών αποκατάστασης (κύρια στο βορειοανατολικό τμήμα, εξωτερική απόθεση Ορυχείου Νοτίου Πεδίου) εντός του ορίου ΠΟ, αλλά και της αύξησης των εκτάσεων με χαμηλή φυτοκάλυψη εξωτερικά από αυτό. Αντίθετα, οι εκτάσεις με υψηλή φυτοκάλυψη μειώνονται κατά 11,68%, λόγω της ελάττωσής τους και στην περιοχή των Ορυχείων, αλλά και στις ορεινές περιοχές. Επιπλέον, οι ανθρωπογενείς κατασκευές αυξάνονται κατά 3,25%, λόγω της ανάπτυξης του αστικού ιστού και το ποσοστό κάλυψης των υδάτινων σωμάτων ελαχιστοποιείται σε σχέση με όλα τα προαναφερόμενα έτη, λαμβάνοντας την τιμή 0,003%.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα συνολικό ραβδόγραμμα με την έκταση όλων των καλύψεων γης εκτός από αυτή των υδάτινων σωμάτων, για όλα τα μελετώμενα έτη. Λόγω της πολύ μικρής συγκέντρωσής τους σε σχέση με της υπόλοιπες κατηγορίες κάλυψης γης, η έκταση των υδάτινων σωμάτων δεν μπορεί να αποτυπωθεί.



Διάγραμμα 13: Μεταβολές καλύψεων γης στην ευρύτερη περιοχή των Ορυχείων Πτολεμαΐδας (1988-2022)

Από το Διάγραμμα 13, διαφαίνεται η μεγάλη έκταση κάλυψης της άγονης γης καθ' όλη τη μελετώμενη περίοδο, η οποία όμως παρουσιάζει αξιοσημείωτες μεταβολές. Όπως έχει προαναφερθεί, στην κατηγορία της άγονης γης εμπεριέχονται και οι μεταλλευτικές δραστηριότητες (εκσκαφές και αποθέσεις), με αποτέλεσμα να καταλαμβάνει τη μεγαλύτερη έκταση στην περιοχή μελέτης. Ακόμη, οι κατηγορίες της χαμηλής και της υψηλής φυτοκάλυψης κατά κύριο λόγο αυξάνονται και μειώνονται όταν η άγονη γη μειώνεται και αυξάνεται αντίστοιχα. Συνεπώς, οι τρεις αυτές κατηγορίες κάλυψης, αλληλοεπιδρούν λόγω της επέκτασης των Ορυχείων, η οποία συνεπάγεται αύξηση της άγονης γης και μείωση των φυτοκαλύψεων και της πραγματοποίησης περιβαλλοντικών αποκαταστάσεων, δηλαδή της αύξησης των φυτοκαλύψεων και της μείωσης της άγονης γης. Τέλος, οι ανθρωπογενείς κατασκευές παρουσιάζουν μικρή συνολική αύξηση από το πρώτο έως το τελευταίο έτος μελέτης, η οποία οφείλεται κυρίως στην επέκταση του αστικού ιστού, αλλά συγκρατείται σε χαμηλά επίπεδα λόγω και της προσβολής οικισμών από την εξέλιξη της μεταλλευτικής δραστηριότητας.

4.2 Αποτελέσματα αξιολόγησης ακρίβειας ταξινόμησης

Στη συνέχεια αναλύονται πίνακες που αντιστοιχούν σε κάθε μελετώμενο έτος και στους οποίους παρουσιάζονται οι κατηγορίες της ταξινόμησης, ο αριθμός των τυχαίων δειγματοληπτικών σημείων που δημιουργήθηκαν για κάθε κλάση και τέλος τα μεγέθη PA, UA και ο συντελεστής Kappa, από τα οποία αξιολογείται η ταξινόμηση κάθε έτους.

- 1988

Σύμφωνα με τον Πίνακα 11, για την αξιολόγηση της ταξινόμησης του έτους 1988, δημιουργήθηκαν συνολικά 500 τυχαία δειγματοληπτικά σημεία. Τα 46 από αυτά δημιουργήθηκαν στην κατηγορία της υψηλής φυτοκάλυψης, όμως στην πραγματικότητα στην κατηγορία αυτή ανήκαν τα 34, καθώς 8 ανήκαν στην κατηγορία της χαμηλής φυτοκάλυψης και 4 στην κλάση της άγονης γης. Από τα 500 σημεία, 30 δημιουργήθηκαν στην κατηγορία της χαμηλής φυτοκάλυψης και από αυτά, 28 ανήκαν στην πραγματικότητα σε αυτή, αφού 1 ανήκε στην κλάση της υψηλής φυτοκάλυψης και άλλο 1 σε αυτή των ανθρωπογενών κατασκευών. Τα περισσότερα σημεία, δηλαδή 409 από τα 500 δημιουργήθηκαν στην κλάση της άγονης γης,

καθώς ήταν η μεγαλύτερη σε εδαφική κάλυψη για το συγκεκριμένο έτος. Στην πραγματικότητα, 390 σημεία ανήκαν στη συγκεκριμένη κατηγορία, καθώς 2, 4 και 13 σημεία ανήκαν στις κλάσεις της υψηλής φυτοκάλυψης, της χαμηλής φυτοκάλυψης και των ανθρωπογενών κατασκευών αντίστοιχα. Στην κλάση των ανθρωπογενών κατασκευών δημιουργήθηκαν συνολικά 15 σημεία, από τα οποία 11 ανήκαν σε αυτή πραγματικά και 4 στην κατηγορία της άγονης γης. Σημειώνεται ότι και στους πίνακες που παρατίθενται για τα υπόλοιπα έτη, ακολουθείται η ίδια λογική για την ερμηνεία του αριθμού των δειγματοληπτικών σημείων.

Όσον αφορά το μέγεθος UA για το έτος 1988, αυτό παρουσιάζει σχετικά υψηλές τιμές, με τις υψηλότερες να καταγράφονται στην κατηγορία της χαμηλής φυτοκάλυψης και της άγονης γης. Χαμηλότερες τιμές καταγράφονται στην κατηγορία της υψηλής φυτοκάλυψης και των ανθρωπογενών κατασκευών. Παρ' όλα αυτά, η τιμή του UA είναι σε όλες τις κλάσεις μεγαλύτερη από 0,70, επομένως τα εικονοστοιχεία που δεν έχουν ταξινομηθεί σωστά είναι λίγα. Το μέγεθος PA, παρουσιάζει υψηλές τιμές στην κατηγορία της υψηλής φυτοκάλυψης και της άγονης γης και χαμηλότερη τιμή στην κλάση της χαμηλής φυτοκάλυψης. Στην κατηγορία των ανθρωπογενών κατασκευών, καταγράφεται πολύ χαμηλή τιμή του συγκεκριμένου μεγέθους, οποία υποδηλώνει μειωμένη ακρίβεια στην απεικόνιση των πραγματικών χαρακτηριστικών αυτής της κάλυψης γης στην ταξινομημένη εικόνα, λόγω των παρόμοιων φασματικών υπογράφων των περιοχών της συγκεκριμένης κατηγορίας με αυτών της άγονης. Τέλος, ο συντελεστής Kappa για την ταξινόμηση του έτους 1988 είναι σχετικά υψηλός (0,78) και σύμφωνα με τους (Landis and Koch, 1977), η ταξινόμηση είναι σε ουσιαστική συμφωνία με την πραγματικότητα.

Πίνακας 11: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 1988

Κατηγορία	Αριθμός δειγμάτων (1)	Αριθμός δειγμάτων (2)	Αριθμός δειγμάτων (3)	Αριθμός δειγμάτων (4)	Σύνολο	U_Accuracy	Kappa
1. Υψηλή φυτοκάλυψη	34	8	4	0	46	0,74	0,78
2. Χαμηλή φυτοκάλυψη	1	28	0	1	30	0,93	
3. Άγονη γη	2	4	390	13	409	0,95	
4. Ανθρωπογενείς κατασκευές	0	0	4	11	15	0,73	
Σύνολο	37	40	398	25	500	0	
P_Accuracy	0,92	0,70	0,98	0,44	0	0,93	

- 1993

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 12, ο οποίος αντιστοιχεί στο έτος 1993, το μέγεθος UA παρουσιάζει γενικά υψηλές τιμές, με τις υψηλότερες να καταγράφονται στην κατηγορία της χαμηλής φυτοκάλυψης, της άγονης γης και τη μέγιστη, η οποία ισούται με 1, στην κατηγορία των υδάτινων σωμάτων. Στις προαναφερόμενες κλάσεις, τα δειγματοληπτικά σημεία που δεν έχουν ταξινομηθεί σωστά είναι ελάχιστα. Αντίθετα, στην κατηγορία της υψηλής φυτοκάλυψης και των ανθρωπογενών κατασκευών, παρατηρούνται σχετικά χαμηλές τιμές του UA, φανερώνοντας τη λανθασμένη ταξινόμηση κάποιων εικονοστοιχείων στις συγκεκριμένες κλάσεις. Το μέγεθος PA, παρουσιάζει υψηλές τιμές σε όλες της κατηγορίες καλύψεων γης, εκτός από αυτή στην κλάση των ανθρωπογενών κατασκευών, εξαιτίας των προαναφερόμενων λόγων που σχετίζονται με την φασματική υπογραφή της συγκεκριμένης κατηγορίας και της άγονης γης. Τέλος, για το έτος 1993, σύμφωνα με την τιμή του συντελεστή Kappa (0,75) η ταξινόμηση είναι σε ουσιαστική συμφωνία με την πραγματικότητα.

Πίνακας 12: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 1993

Κατηγορία	Αριθμός δειγμάτων (1)	Αριθμός δειγμάτων (2)	Αριθμός δειγμάτων (3)	Αριθμός δειγμάτων (4)	Αριθμός δειγμάτων (5)	Σύνολο	U_Accuracy	Kappa
1. Υψηλή φυτοκάλυψη	56	6	33	0	0	95	0,59	0,75
2. Χαμηλή φυτοκάλυψη	0	38	2	0	0	40	0,95	
3. Άγονη γη	2	2	343	0	7	354	0,97	
4. Υδάτινα σώματα	0	0	0	10	0	10	1,00	
5. Ανθρωπογενείς κατασκευές	0	0	6	0	5	11	0,45	
Σύνολο	58	46	384	10	12	510	0,00	
P_Accuracy	0,97	0,83	0,89	1,00	0,42	0,00	0,89	

- 1998

Σύμφωνα με τον Πίνακα 13, το έτος 1998 το μέγεθος UA παρουσιάζει υψηλές τιμές σε όλες τις κατηγορίες της ταξινόμησης, με τη μέγιστη τιμή του να ισούται με 1 και να καταγράφεται στην κατηγορία των υδάτινων σωμάτων. Η τιμή του UA είναι σε όλες τις κλάσεις μεγαλύτερη από 0,70, επομένως το ποσοστό των εικονοστοιχείων που δεν έχουν ταξινομηθεί σωστά είναι χαμηλό. Το μέγεθος PA, παρουσιάζει επίσης υψηλές τιμές σε όλες της κατηγορίες καλύψεων

γης, υποδηλώνοντας υψηλή ακρίβεια στην απεικόνιση των πραγματικών χαρακτηριστικών του εδάφους στην ταξινομημένη εικόνα. Εκτός από τη μέγιστη τιμή του UA και η μέγιστη τιμή του PA (1), καταγράφεται στην κατηγορία των υδάτινων σωμάτων. Τέλος, για το έτος 1998, σύμφωνα με τους (Landis and Koch, 1977), η τιμή του Kappa (0,86) υποδηλώνει σχεδόν τέλεια συμφωνία μεταξύ της ταξινόμησης και της πραγματικότητας.

Πίνακας 13: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 1998

Κατηγορία	Αριθμός δειγμάτων (1)	Αριθμός δειγμάτων (2)	Αριθμός δειγμάτων (3)	Αριθμός δειγμάτων (4)	Αριθμός δειγμάτων (5)	Σύνολο	U_Accuracy	Kappa
1. Υψηλή φυτοκάλυψη	33	4	8	0	0	45	0,73	0,86
2. Χαμηλή φυτοκάλυψη	0	46	1	0	0	47	0,98	
3. Άγονη γη	4	1	373	0	8	386	0,97	
4. Υδάτινα σώματα	0	0	0	10	0	10	1,00	
5. Ανθρωπογενείς κατασκευές	1	0	2	0	19	22	0,86	
Σύνολο	38	51	384	10	27	510	0,00	
P_Accuracy	0,87	0,90	0,97	1,00	0,70	0,00	0,94	

- 2003

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 14, το έτος 2003, οι υψηλότερες τιμές του μεγέθους UA παρατηρούνται στις κατηγορίες της χαμηλής φυτοκάλυψης, της άγονης γης και των υδάτινων σωμάτων. Ωστόσο, στην κλάση της υψηλής φυτοκάλυψης και των ανθρωπογενών κατασκευών καταγράφονται χαμηλότερες τιμές, φανερώνοντας τη λανθασμένη ταξινόμηση ενός ποσοστού των δειγματοληπτικών σημείων. Όσον αφορά το μέγεθος PA, οι τιμές που λαμβάνει είναι υψηλές σε όλες τις κλάσεις της ταξινόμησης, εκτός από αυτή των ανθρωπογενών κατασκευών. Η χαμηλή τιμή που παρουσιάζει σε αυτή την κατηγορία κάλυψης γης, προκύπτει λόγω της δυσκολίας διάκρισης των περιοχών της συγκεκριμένης κατηγορίας με αυτών της άγονης γης, εξαιτίας των παρόμοιων φασματικών υπογραφών τους. Τέλος, για το συγκεκριμένο έτος, η τιμή του Kappa (0,76) φανερώνει ότι η ταξινόμηση είναι σε ουσιαστική συμφωνία με την πραγματικότητα.

Πίνακας 14: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2003

Κατηγορία	Αριθμός δειγμάτων (1)	Αριθμός δειγμάτων (2)	Αριθμός δειγμάτων (3)	Αριθμός δειγμάτων (4)	Αριθμός δειγμάτων (5)	Σύνολο	U_Accuracy	Kappa
1. Υψηλή φυτοκάλυψη	75	10	30	0	0	115	0,65	0,76
2. Χαμηλή φυτοκάλυψη	5	66	4	0	1	76	0,87	
3. Άγονη γη	4	1	280	0	4	289	0,97	
4. Υδάτινα σώματα	0	0	0	10	0	10	1,00	
5. Ανθρωπογενείς κατασκευές	0	0	11	0	9	20	0,45	
Σύνολο	84	77	325	10	14	510	0,00	
P_Accuracy	0,89	0,86	0,86	1,00	0,64	0,00	0,86	

- 2008

Σύμφωνα με τον Πίνακα 15, ο οποίος αντιστοιχεί στο έτος 2008, το μέγεθος UA παρουσιάζει υψηλές τιμές, με τη μέγιστη να καταγράφεται στην κατηγορία των υδάτινων σωμάτων. Σε όλες τις κατηγορίες καλύψεων γης, το UA είναι μεγαλύτερο του 0,70, με εξαίρεση την τιμή του στην κλάση της υψηλής φυτοκάλυψης, η οποία ισούται με 0,69. Για τον λόγο αυτό, προκύπτει ότι στη συγκεκριμένη κατηγορία υπάρχουν περισσότερα λάθος ταξινομημένα εικονοστοιχεία συγκριτικά με τις υπόλοιπες. Επιπλέον, οι τιμές που παρουσιάζει το μέγεθος PA είναι υψηλές σε όλες τις κλάσεις της ταξινόμησης, εκτός από αυτή των ανθρωπογενών κατασκευών, λόγω των προαναφερόμενων αιτιών που σχετίζονται με τη δυσκολία διάκρισης των περιοχών της συγκεκριμένης κατηγορίας με αυτών της άγονης γης. Όσον αφορά την τιμή του Kappa (0,82), υποδηλώνει σχεδόν τέλεια συμφωνία μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας τους προαναφερόμενου έτους και της πραγματικότητας.

Πίνακας 15: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2008

Κατηγορία	Αριθμός δειγμάτων (1)	Αριθμός δειγμάτων (2)	Αριθμός δειγμάτων (3)	Αριθμός δειγμάτων (4)	Αριθμός δειγμάτων (5)	Σύνολο	U_Accuracy	Kappa
1. Υψηλή φυτοκάλυψη	74	7	26	0	1	108	0,69	0,82
2. Χαμηλή φυτοκάλυψη	1	48	1	0	0	50	0,96	
3. Άγονη γη	2	4	310	0	5	321	0,97	
4. Υδάτινα σώματα	0	0	0	10	0	10	1,00	
5. Ανθρωπογενείς κατασκευές	0	0	3	0	18	21	0,86	
Σύνολο	77	59	340	10	24	510	0,00	
P_Accuracy	0,96	0,81	0,91	1,00	0,75	0,00	0,90	

- 2013

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 16, το μέγεθος UA παρουσιάζει σχετικά υψηλές τιμές το έτος 2013, με τη μέγιστη να καταγράφεται στην κατηγορία των υδάτινων σωμάτων και τις επόμενες μεγαλύτερες σε αυτή της άγονης γης και της υψηλής φυτοκάλυψης. Ελαφρά χαμηλότερη τιμή παρουσιάζεται στην κλάση και των ανθρωπογενών κατασκευών και ακόμα πιο μειωμένη σε αυτή της χαμηλής φυτοκάλυψης. Λόγω αυτού, η κλάση της χαμηλής φυτοκάλυψης παρουσιάζει περισσότερα λάθος ταξινομημένα δειγματοληπτικά σημεία σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ακόμη, το μέγεθος PA, παρουσιάζει υψηλές τιμές σε όλες τις κατηγορίες καλύψεων γης, καθώς παραμένει μεγαλύτερο από 0,70, φανερώνοντας υψηλή ακρίβεια στην απεικόνιση των πραγματικών χαρακτηριστικών του εδάφους στην ταξινομημένη εικόνα του συγκεκριμένου έτους. Τέλος, σύμφωνα με την τιμή του Kappa (0,81), υποδηλώνεται σχεδόν τέλεια συμφωνία μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας και της πραγματικότητας του συγκεκριμένου έτους.

Πίνακας 16: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2013

Κατηγορία	Αριθμός δειγμάτων (1)	Αριθμός δειγμάτων (2)	Αριθμός δειγμάτων (3)	Αριθμός δειγμάτων (4)	Αριθμός δειγμάτων (5)	Σύνολο	U_Accuracy	Kappa
1. Υψηλή φυτοκάλυψη	94	3	15	0	3	115	0,82	0,81
2. Χαμηλή φυτοκάλυψη	2	23	4	0	5	34	0,68	
3. Άγονη γη	3	5	309	0	4	321	0,96	
4. Υδάτινα σώματα	0	0	0	10	0	10	1,00	
5. Ανθρωπογενείς κατασκευές	0	0	7	0	22	29	0,76	
Σύνολο	99	31	335	10	34	509	0,00	
P_Accuracy	0,95	0,74	0,92	1,00	0,65	0,00	0,90	

- 2018

Σύμφωνα με τον Πίνακα 17, το έτος 2018 οι τιμές του μεγέθους UA είναι αρκετά υψηλές σε όλες τις κατηγορίες καλύψεων γης. Η μεγαλύτερη τιμή του καταγράφεται στην κλάση των υδάτινων σωμάτων και ισούται με 1. Σημειώνεται ότι σε όλες τις κλάσεις της ταξινόμησης, το UA είναι μεγαλύτερο ή ίσο με 0,80, υποδηλώνοντας πολύ μικρό ποσοστό εικονοστοιχείων που δεν έχουν ταξινομηθεί σωστά. Επίσης, το μέγεθος PA, παρουσιάζει υψηλές τιμές σε όλες τις κατηγορίες εκτός από αυτή των ανθρωπογενών κατασκευών (0,65), σύμφωνα με την οποία προκύπτει χαμηλότερη ακρίβεια στην απεικόνιση της συγκεκριμένης κατηγορίας στην

ταξινομημένη εικόνα σε σχέση με τις υπόλοιπες. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό, όπως έχει προαναφερθεί, σχετίζεται με τη δυσκολία διάκρισης των περιοχών των ανθρωπογενών κατασκευών με αυτών της άγονης γης, λόγω παρόμοιων φασματικών υπογράφων. Τέλος, όσον αφορά την τιμή του Kappa (0,86), υποδηλώνει σχεδόν τέλεια συμφωνία μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας τους προαναφερόμενου έτους και της πραγματικότητας.

Πίνακας 17: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2018

Κατηγορία	Αριθμός δειγμάτων (1)	Αριθμός δειγμάτων (2)	Αριθμός δειγμάτων (3)	Αριθμός δειγμάτων (4)	Αριθμός δειγμάτων (5)	Σύνολο	U_Accuracy	Kappa
1. Υψηλή φυτοκάλυψη	84	3	18	0	0	105	0,80	0,86
2. Χαμηλή φυτοκάλυψη	1	24	2	0	0	27	0,89	
3. Άγονη γη	0	0	350	0	6	356	0,98	
4. Υδάτινα σώματα	0	0	0	10	0	10	1,00	
5. Ανθρωπογενείς κατασκευές	0	1	1	0	10	12	0,83	
Σύνολο	85	28	371	10	16	510	0,00	
P_Accuracy	0,99	0,86	0,94	1,00	0,63	0,00	0,94	

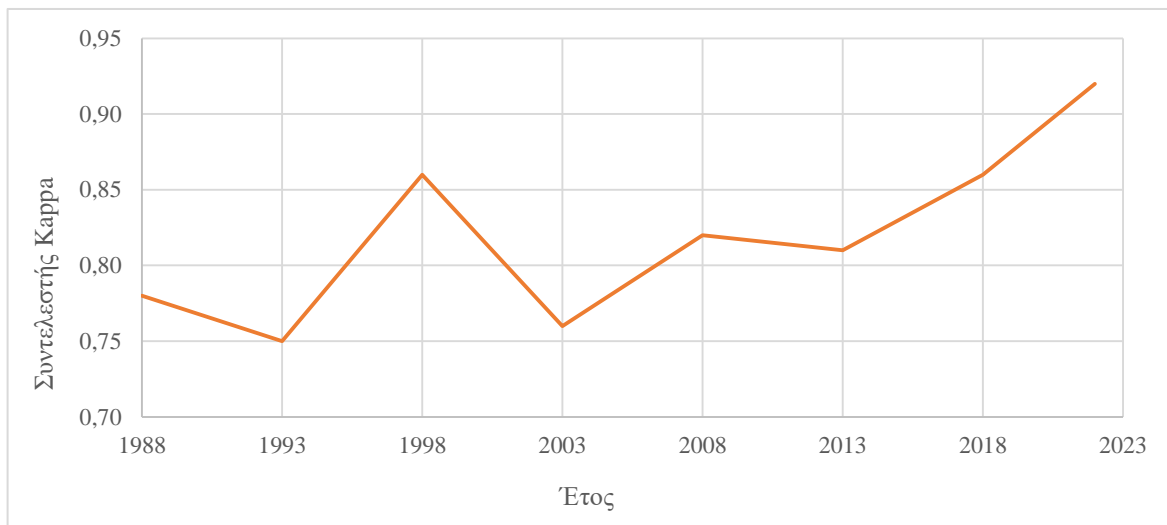
- 2022

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 18, ο οποίος αντιστοιχεί στο έτος 2022, τα μεγέθη PA και UA παρουσιάζουν πολύ υψηλές τιμές. Και τα δύο αυτά μεγέθη λαμβάνουν τη μέγιστη τιμή τους στην κατηγορία των υδάτινων σωμάτων και οι τιμές που καταγράφονται για αυτά σε όλες τις κατηγορίες καλύψεων γης είναι μεγαλύτερες από 0,80. Σύμφωνα με αυτό, τα τυχαία δειγματοληπτικά σημεία που δεν ταξινομήθηκαν σωστά είναι ελάχιστα και η ακρίβεια στην απεικόνιση των πραγματικών χαρακτηριστικών του εδάφους στην ταξινομημένη εικόνα του συγκεκριμένου έτους, είναι πολύ υψηλή. Ακόμη, σύμφωνα με την τιμή του Kappa (0,92), η οποία είναι η υψηλότερη συγκριτικά με όλα τα προηγούμενα έτη, υποδηλώνεται σχεδόν τέλεια συμφωνία μεταξύ της ταξινομημένης εικόνας και της πραγματικότητας για το συγκεκριμένο έτος. Τέλος, τα μεγέθη που παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, φανερώνουν ότι η ταξινόμηση του έτους 2022, ήταν η πιο ακριβής, όσον αφορά την αποτύπωση των καλύψεων γης σε σχέση με την πραγματικότητα, συγκριτικά με τις ταξινομήσεις των προηγούμενων ετών.

Πίνακας 18: Αριθμός δειγμάτων και μεγέθη αξιολόγησης για την ταξινόμηση του έτους 2022

Κατηγορία	Αριθμός δειγμάτων (1)	Αριθμός δειγμάτων (2)	Αριθμός δειγμάτων (3)	Αριθμός δειγμάτων (4)	Αριθμός δειγμάτων (5)	Σύνολο	U_Accuracy	Kappa
1. Υψηλή φυτοκάλυψη	42	2	2	0	0	46	0,91	0,92
2. Χαμηλή φυτοκάλυψη	7	87	5	0	0	99	0,88	
3. Άγονη γη	1	0	325	0	1	327	0,99	
4. Υδάτινα σώματα	0	0	0	10	0	10	1,00	
5. Ανθρωπογενείς κατασκευές	1	0	4	0	23	28	0,82	
Σύνολο	51	89	336	10	24	510	0,00	
P_Accuracy	0,82	0,98	0,97	1,00	0,96	0,00	0,95	

Στο διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η εξέλιξη του συντελεστή Kappa με την πάροδο των ετών.



Διάγραμμα 14: Χρονική εξέλιξη συντελεστή Kappa (1988-2022)

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 14, ο συντελεστής Kappa αυξάνεται με την πάροδο των ετών. Αυτό σημαίνει ότι η ακρίβεια των ταξινομήσεων βελτιώνεται αντίστοιχα, λόγω της εξέλιξης των δορυφορικών συστημάτων και κατ' επέκταση της ποιότητας και της ανάλυσης των δορυφορικών εικόνων. Παρατηρείται επίσης, ότι στην ταξινόμηση του έτους 2022 ο προαναφερόμενος συντελεστής παίρνει τη μεγαλύτερή του τιμή (0,92), επομένως η συγκεκριμένη ταξινόμηση θεωρείται η πιο ακριβής.

4.3 Αλλαγές καλύψεων γης

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνδυαστικά πίνακες και χάρτες βάσει των οποίων συγκρίνονται οι αλλαγές των καλύψεων γης ανά δεκαετία, δηλαδή για τα έτη 1988- 1998, 1998- 2008 και 2008- 2022. Η μετατροπή εκτάσεων με χαμηλή και υψηλή φυτοκάλυψη σε εκτάσεις άγονης γης, εντός του ορίου ΠΟ, οφείλεται κυρίως στην ανάπτυξη της μεταλλευτικής δραστηριότητας (εκσκαφές- αποθέσεις), ενώ η μετατροπή άγονης γης σε εκτάσεις με χαμηλή και υψηλή φυτοκάλυψη (εντός ορίου ΠΟ) οφείλεται στην πραγματοποίηση εργασιών αποκατάστασης στην περιοχή των Ορυχείων. Ακόμη, η μετατροπή εκτάσεων ανθρωπογενών κατασκευών σε άγονη γη, εντός του ορίου ΠΟ, πιθανόν οφείλεται σε απαλλοτριώσεις οικισμών που πραγματοποιήθηκαν με σκοπό την επέκταση του Ορυχείου, είτε σε σφάλμα διάκρισης της φασματικής υπογραφής των δύο κατηγοριών κατά την εφαρμογή της ταξινόμησης, καθώς στην κατηγορία της άγονης γης συμπεριλαμβάνονται και οι μεταλλευτικές δραστηριότητες. Η μετατροπή εκτάσεων άγονης γης σε ανθρωπογενείς κατασκευές οφείλεται είτε στην ανάπτυξη του αστικού ιστού, είτε στο προαναφερόμενο σφάλμα. Τέλος, η μετατροπή εκτάσεων άγονης γης σε υδάτινα σώματα και αντίστροφα, αντιστοιχεί σε τοπικές συγκεντρώσεις υδάτων στις χαμηλότερες υψομετρικές στάθμες των Ορυχείων και στην κάλυψή τους με αποθέσεις αγόνων υλικών κατά την επέκτασή τους.

- 1988- 1998

Στον Πίνακα 19, παρουσιάζονται οι αλλαγές στις εκτάσεις των καλύψεων γης μεταξύ των ετών 1988 και 1998. Ειδικότερα, φαίνονται πόσα από τα στρέμματα που καταλάμβανε η υψηλή φυτοκάλυψη το 1988 παρέμειναν με υψηλή φυτοκάλυψη και πόσα από αυτά μετατράπηκαν σε χαμηλή φυτοκάλυψη, άγονη γη και ανθρωπογενείς κατασκευές το έτος 1998. Σημειώνεται ότι ο πίνακας ερμηνεύεται αντίστοιχα και για τις υπόλοιπες κατηγορίες κάλυψης γης, αλλά και για τα δύο ζεύγη ετών τα οποία παρατίθενται παρακάτω.

Σύμφωνα με τη σύγκριση της έκτασης των καλύψεων γης για τα έτη 1988 και 1998, η μεγαλύτερη αλλαγή που λαμβάνει χώρα μεταξύ της μελετώμενης δεκαετίας, είναι η μετατροπή 23.689 στρεμμάτων άγονης γης το 1988 σε χαμηλή φυτοκάλυψη το 1998. Η αλλαγή αυτή

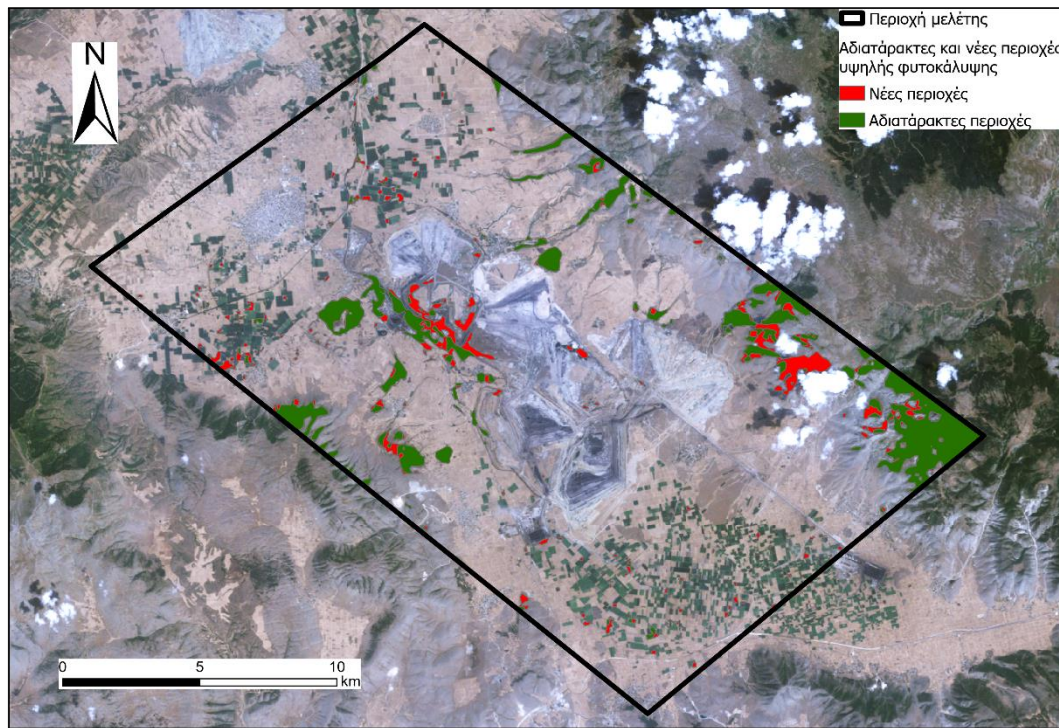
οφείλεται κατά κύριο λόγο στην πύκνωση της χαμηλής φυτοκάλυψης εξωτερικά της περιοχής των Ορυχείων, λόγω αύξησης των γεωργικών εκτάσεων γύρω από την πόλη της Πτολεμαΐδας.

Πίνακας 19: Σύγκριση μεταβολών στις εκτάσεις των καλύψεων γης μεταξύ των ετών 1988 και 1998

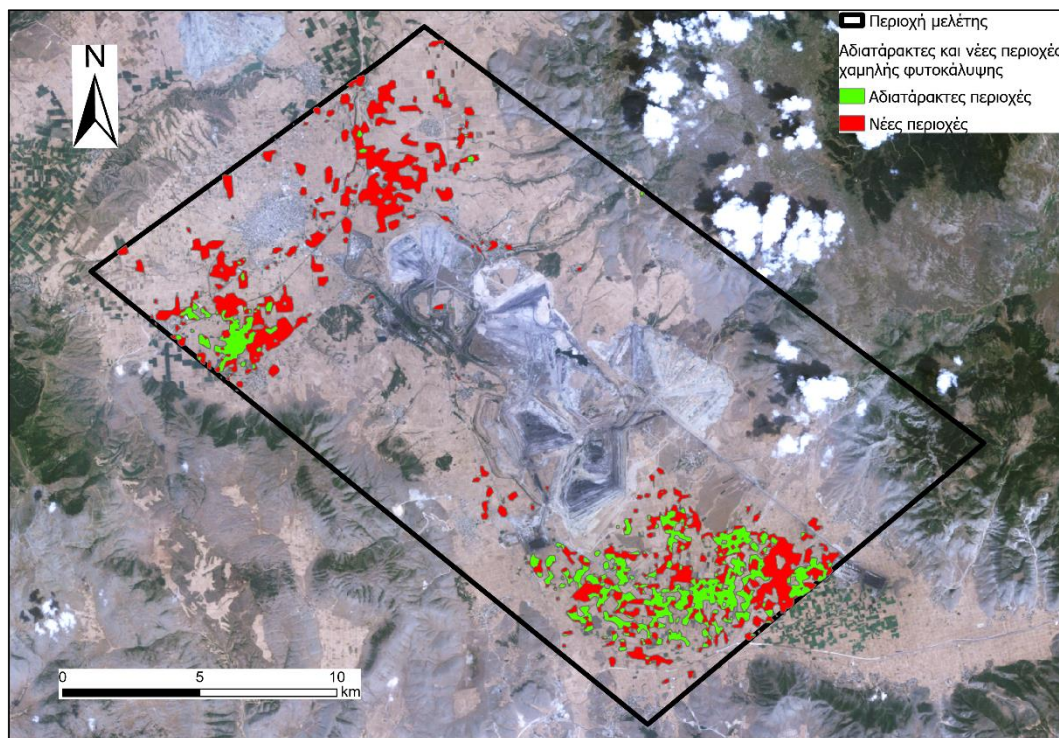
1988	1998	Έκταση (στρέμματα)
Υψηλή φυτοκάλυψη	Υψηλή φυτοκάλυψη	22.007
Υψηλή φυτοκάλυψη	Χαμηλή φυτοκάλυψη	3.534
Υψηλή φυτοκάλυψη	Άγονη γη	10.678
Υψηλή φυτοκάλυψη	Ανθρωπογενείς κατασκευές	242
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Υψηλή φυτοκάλυψη	575
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Χαμηλή φυτοκάλυψη	12.344
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Άγονη γη	11.154
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Ανθρωπογενείς κατασκευές	170
Άγονη γη	Υψηλή φυτοκάλυψη	7.945
Άγονη γη	Χαμηλή φυτοκάλυψη	23.689
Άγονη γη	Άγονη γη	290.394
Άγονη γη	Υδάτινα σώματα	4
Άγονη γη	Ανθρωπογενείς κατασκευές	4.678
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Υψηλή φυτοκάλυψη	40
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Χαμηλή φυτοκάλυψη	390
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Άγονη γη	5.614
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Ανθρωπογενείς κατασκευές	5.623

Ακολουθούν οι Χάρτες 11, 12, 13 και 14, στους οποίους διακρίνονται οι αδιατάρακτες και οι νέες περιοχές για τις κλάσεις της υψηλής και της χαμηλής φυτοκάλυψης, της άγονης γης και των ανθρωπογενών κατασκευών για τη δεκαετία 1988- 1998.

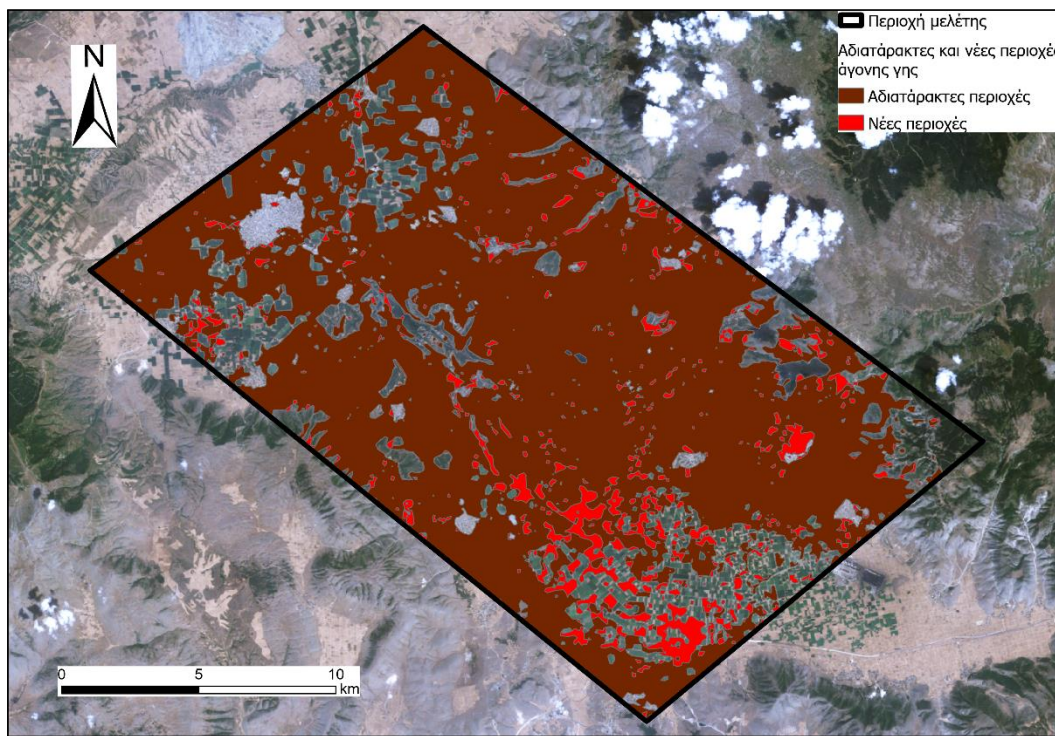
Αναφέρεται ότι οι αλλαγές που αφορούν στα υδάτινα σώματα, δεν μπορούν να αποτυπωθούν σε κανένα από τα μελετώμενα ζεύγη ετών, καθώς καταλαμβάνουν πολύ μικρή έκταση σε σχέση με αυτή της περιοχής μελέτης.



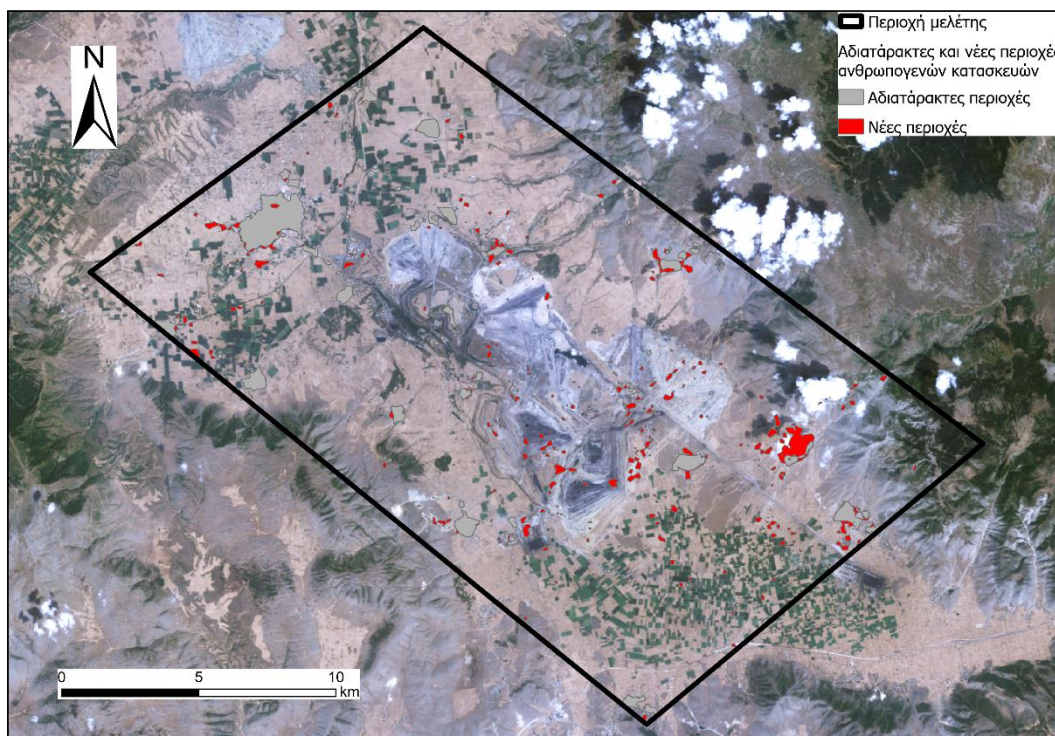
Χάρτης 11: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές υψηλής φυτοκάλυψης (1988-1998)



Χάρτης 12: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές χαμηλής φυτοκάλυψης (1988-1998)



Χάρτης 13: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές άγονης γης (1988-1998)



Χάρτης 14: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές ανθρωπογενών κατασκευών (1988-1998)

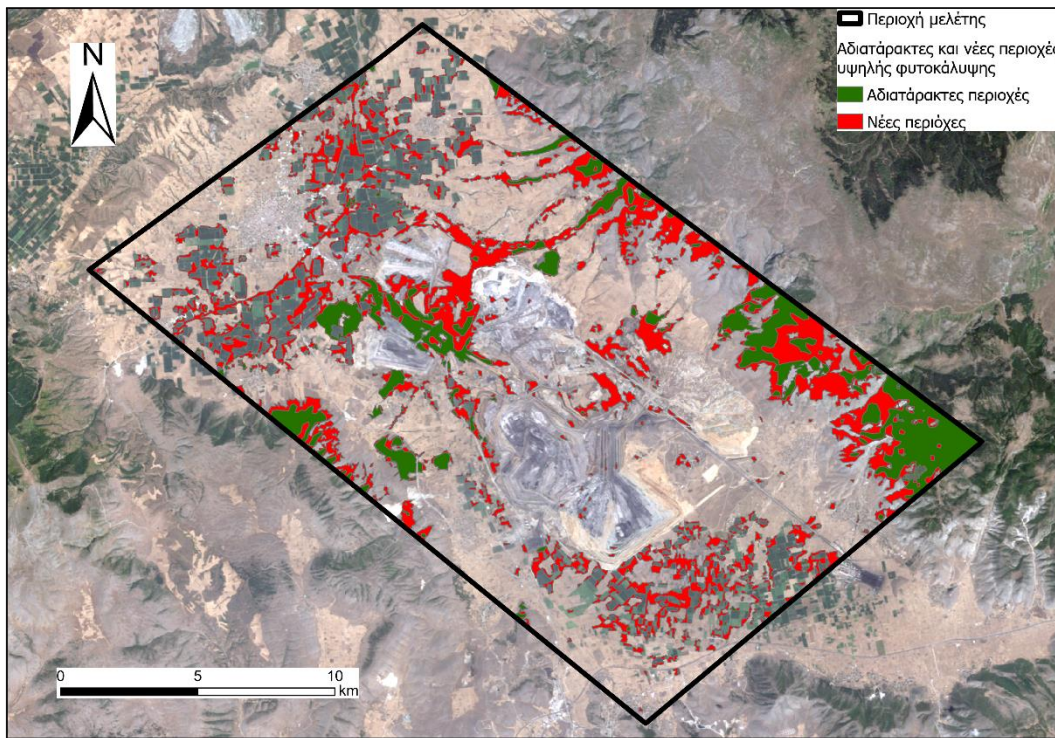
- 1998- 2008

Ο Πίνακας 20, παρουσιάζει τις αλλαγές των εκτάσεων στις καλύψεις γης μεταξύ των ετών 1998 και 2008. Σύμφωνα με τον πίνακα αυτό, η μεγαλύτερη μεταβολή που λαμβάνει χώρα μεταξύ της μελετώμενης δεκαετίας, είναι η μετατροπή 48.733 στρεμμάτων άγονης γης το 1998 σε υψηλή φυτοκάλυψη το 2008. Η αλλαγή αυτή, οφείλεται στην αύξηση της υψηλής φυτοκάλυψης τόσο εντός του ορίου ΠΟ, λόγω πραγματοποίησης αποκαταστάσεων, όσο και στην πύκνωσή της στην οροσειρά Βερμίου και στο όρος Άσκιο, λόγω της φυσικής ανάπτυξης των δασικών περιοχών.

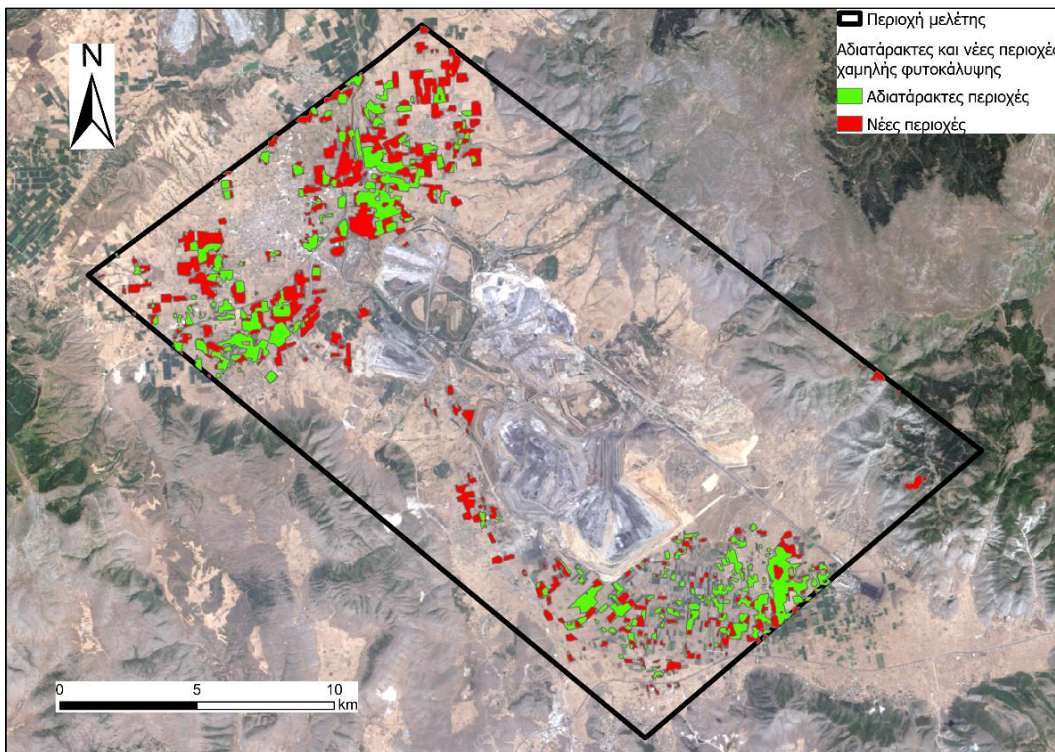
Πίνακας 20: Σύγκριση μεταβολών στις εκτάσεις των καλύψεων γης μεταξύ των ετών 1998 και 2008

1998	2008	Έκταση (στρέμματα)
Υψηλή φυτοκάλυψη	Υψηλή φυτοκάλυψη	26.676
Υψηλή φυτοκάλυψη	Χαμηλή φυτοκάλυψη	1.141
Υψηλή φυτοκάλυψη	Άγονη γη	2.614
Υψηλή φυτοκάλυψη	Ανθρωπογενείς κατασκευές	120
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Υψηλή φυτοκάλυψη	9.183
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Χαμηλή φυτοκάλυψη	17.965
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Άγονη γη	12.420
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Ανθρωπογενείς κατασκευές	389
Άγονη γη	Υψηλή φυτοκάλυψη	48.733
Άγονη γη	Χαμηλή φυτοκάλυψη	20.826
Άγονη γη	Άγονη γη	242.045
Άγονη γη	Υδάτινα σώματα	10
Άγονη γη	Ανθρωπογενείς κατασκευές	6.159
Υδάτινα σώματα	Άγονη γη	4
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Υψηλή φυτοκάλυψη	1.449
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Χαμηλή φυτοκάλυψη	183
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Άγονη γη	4.073
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Ανθρωπογενείς κατασκευές	4.996

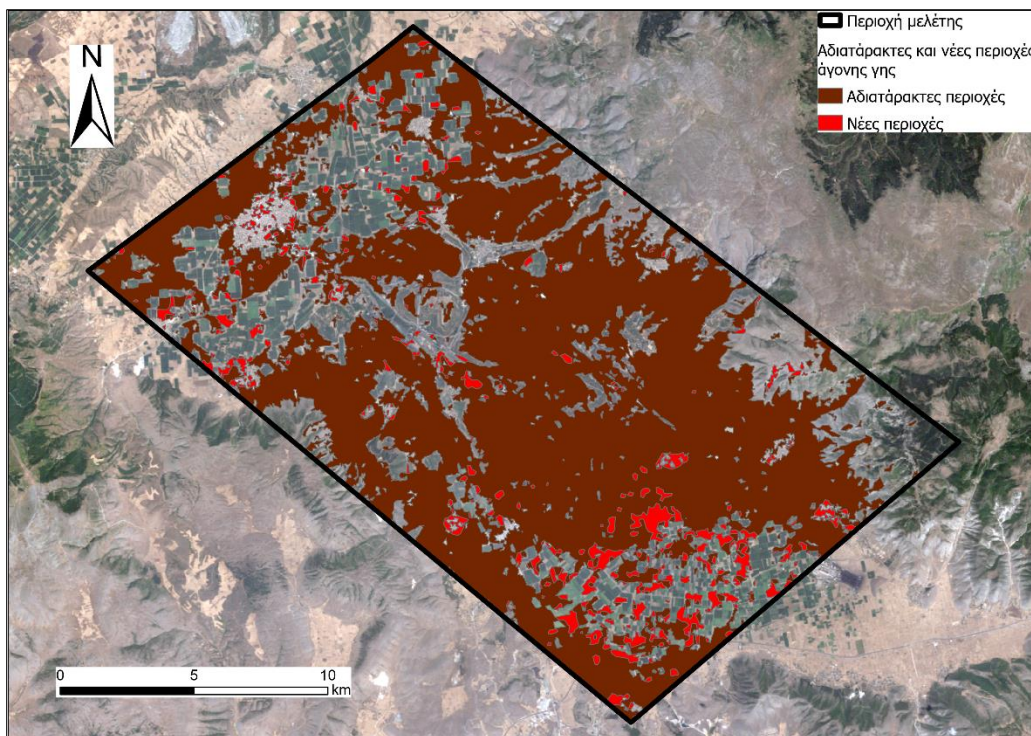
Ακολουθούν οι Χάρτες 15, 16, 17 και 18, που αφορούν στη δεκαετία 1998- 2008 και παρουσιάζουν τις αδιατάρακτες και τις νέες περιοχές για τις κλάσεις της υψηλής και της χαμηλής φυτοκάλυψης, της άγονης γης και των ανθρωπογενών κατασκευών.



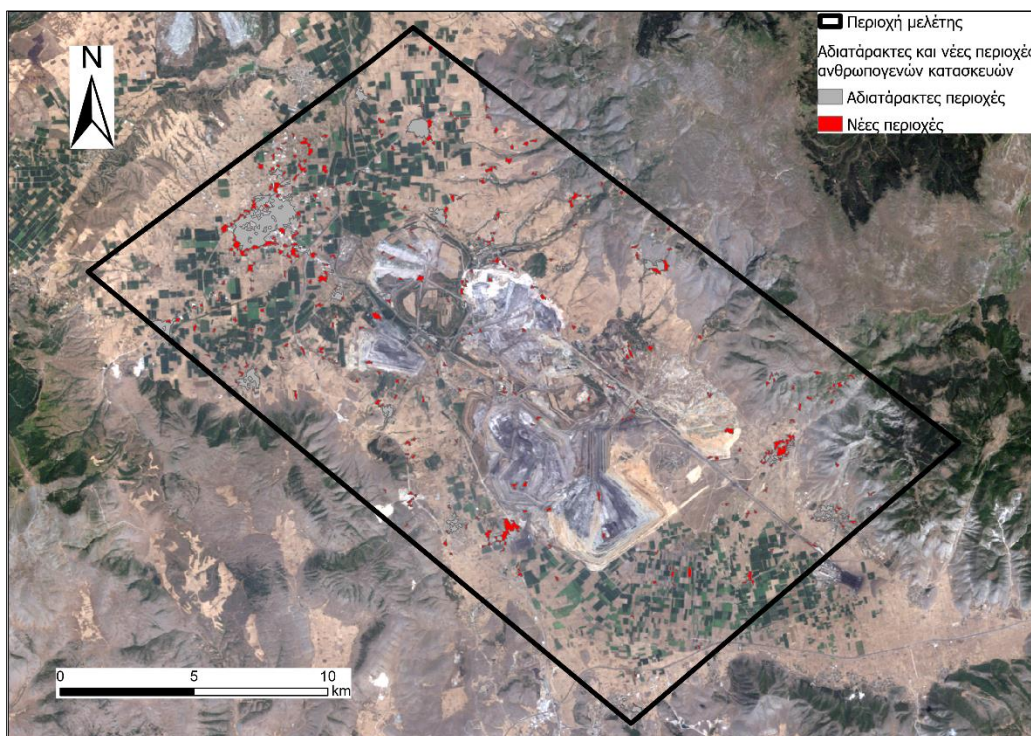
Χάρτης 15: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές υψηλής φυτοκάλυψης (1998-2008)



Χάρτης 16: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές χαμηλής φυτοκάλυψης (1998-2008)



Χάρτης 17: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές άγονης γης (1998-2008)



Χάρτης 18: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές ανθρωπογενών κατασκευών (1998-2008)

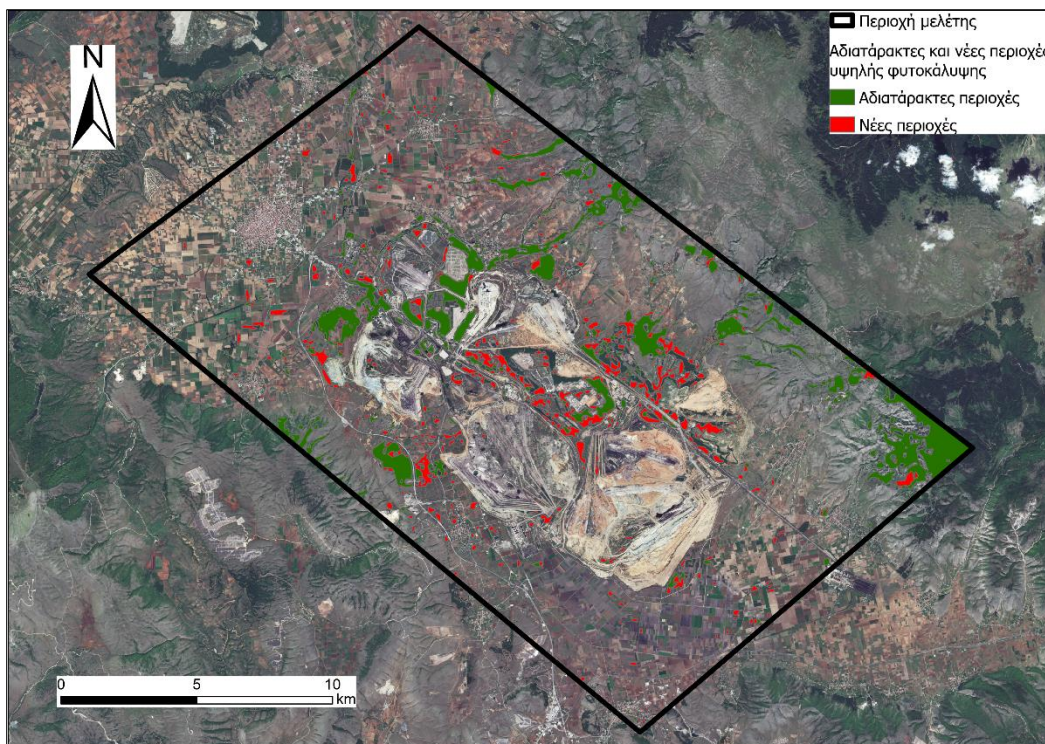
- 2008- 2022

Ο παρακάτω πίνακας αφορά στις αλλαγές στις καλύψεις γης μεταξύ των ετών 2008 και 2022 όσον αφορά την έκτασή τους. Σύμφωνα με τη σύγκριση της έκτασης των καλύψεων γης για τα έτη 2008 και 2022, η μεγαλύτερη αλλαγή που λαμβάνει χώρα, είναι η μετατροπή 42.151 στρεμμάτων άγονης γης το 2008 σε χαμηλή φυτοκάλυψη το 2022. Όπως προαναφέρθηκε, η αλλαγή αυτή οφείλεται κατά κύριο λόγο σε αποκαταστάσεις που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή των Ορυχείων, αλλά και στην πύκνωση της χαμηλής φυτοκάλυψης στην οροσειρά του Βερμίου και στην αύξηση των γεωργικών εκτάσεων περιμετρικά της πόλης της Πτολεμαΐδας και στο νοτιοανατολικό τμήμα της μελετώμενης περιοχής.

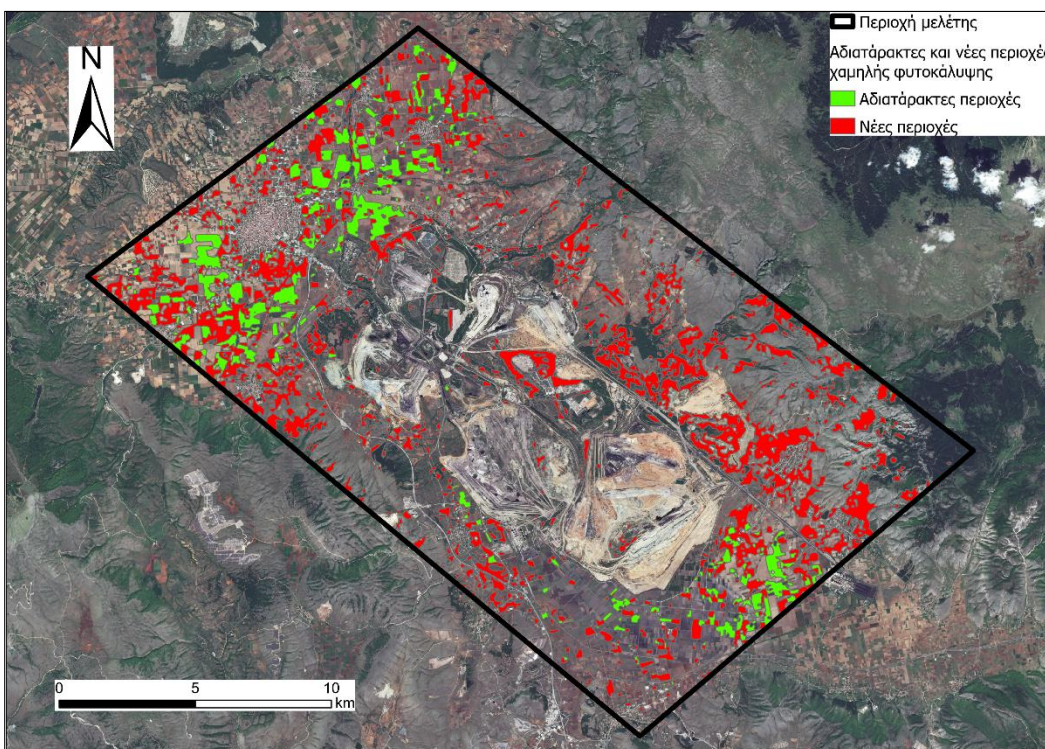
Πίνακας 21: Σύγκριση μεταβολών στις εκτάσεις των καλύψεων γης μεταξύ των ετών 2008 και 2022

2008	2022	Έκταση (στρέμματα)
Υψηλή φυτοκάλυψη	Υψηλή φυτοκάλυψη	24.414
Υψηλή φυτοκάλυψη	Χαμηλή φυτοκάλυψη	17.518
Υψηλή φυτοκάλυψη	Άγονη γη	41.512
Υψηλή φυτοκάλυψη	Υδάτινα σώματα	5
Υψηλή φυτοκάλυψη	Ανθρωπογενείς κατασκευές	2.670
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Υψηλή φυτοκάλυψη	1.755
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Χαμηλή φυτοκάλυψη	17.883
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Άγονη γη	20.023
Χαμηλή φυτοκάλυψη	Ανθρωπογενείς κατασκευές	458
Άγονη γη	Υψηλή φυτοκάλυψη	10.555
Άγονη γη	Χαμηλή φυτοκάλυψη	42.151
Άγονη γη	Άγονη γη	195.367
Άγονη γη	Υδάτινα σώματα	9
Άγονη γη	Ανθρωπογενείς κατασκευές	12.982
Υδάτινα σώματα	Υψηλή φυτοκάλυψη	4
Υδάτινα σώματα	Χαμηλή φυτοκάλυψη	0,4
Υδάτινα σώματα	Άγονη γη	6
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Υψηλή φυτοκάλυψη	322
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Χαμηλή φυτοκάλυψη	1.293
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Άγονη γη	3.684
Ανθρωπογενείς κατασκευές	Ανθρωπογενείς κατασκευές	6.362

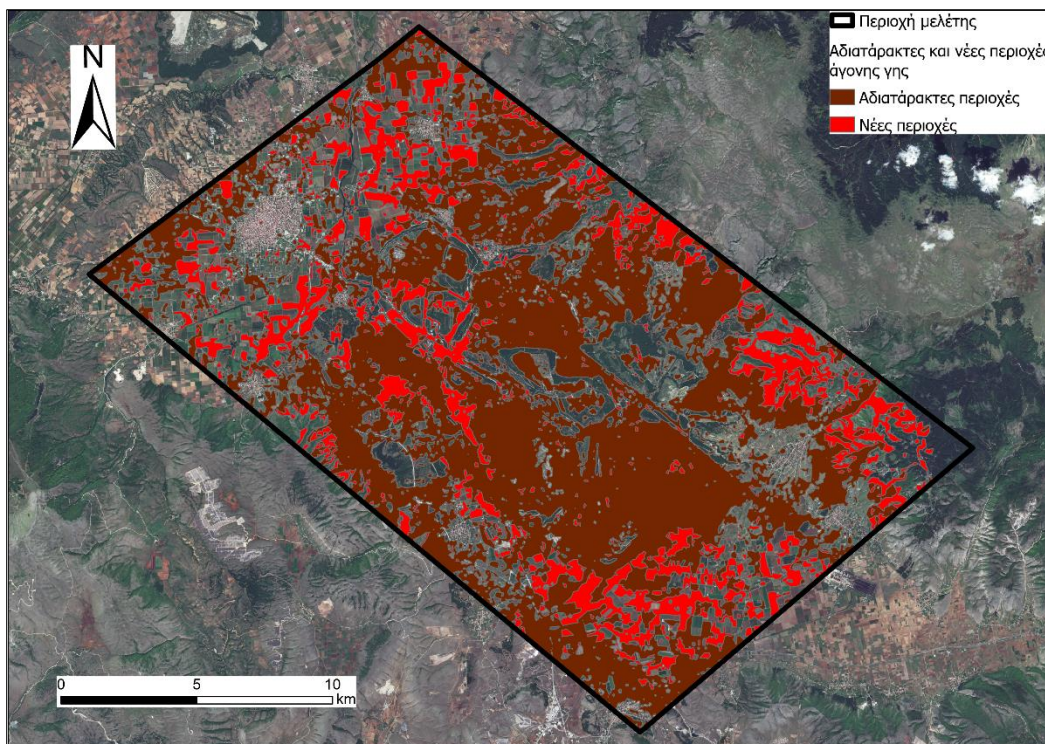
Ακολουθούν οι Χάρτες 19, 20, 21 και 22 που αφορούν στη χρονική περίοδο μεταξύ των ετών 2008- 2022, και παρουσιάζουν τις αδιατάρακτες και τις νέες περιοχές για τις κλάσεις της υψηλής και της χαμηλής φυτοκάλυψης, της άγονης γης και των ανθρωπογενών κατασκευών.



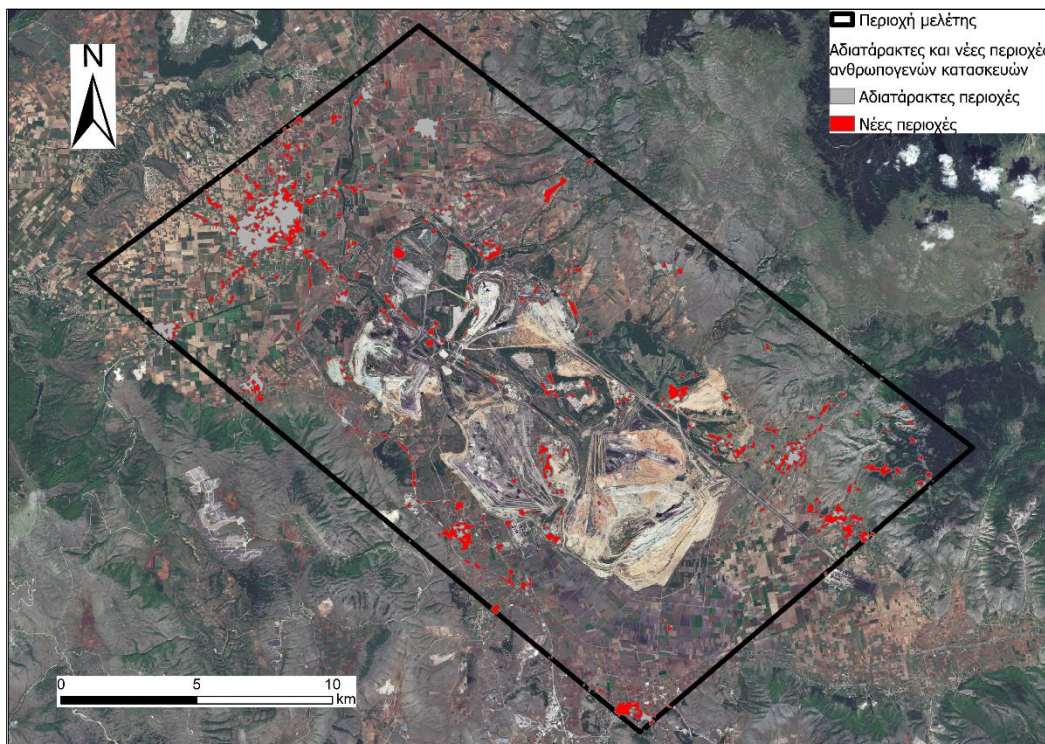
Χάρτης 19: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές υψηλής φυτοκάλυψης (2008-2022)



Χάρτης 20: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές χαμηλής φυτοκάλυψης (2008-2022)



Χάρτης 21: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές άγονης γης (2008-2022)



Χάρτης 22: Αδιατάρακτες και νέες περιοχές ανθρωπογενών κατασκευών (2008-2022)

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο έρευνας της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η χωροχρονική ανάλυση των μεταβολών που προέκυψαν στις καλύψεις γης κατά την περίοδο μεταξύ των ετών 1988-2022 στην περιοχή ανάπτυξης των Ορυχείων της Πτολεμαΐδας. Σκοπός ήταν να μελετηθεί η επίδραση της εξέλιξης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας στις καλύψεις γης της ευρύτερης περιοχής και να παρακολουθηθούν οι μεταβολές στις καλύψεις γης χρονικά και χωρικά σε σχέση με το εγκεκριμένο όριο ΠΟ.

Συγκεκριμένα, για τον σκοπό αυτό, εφαρμόστηκε η μέθοδος της επιβλεπόμενης ταξινόμησης σε οχτώ δορυφορικές εικόνες, οι οποίες έχουν ληφθεί παρόμοιες εποχιακές περιόδους, κατά την περίοδο 1988- 2022. Οι εικόνες αυτές απεικονίζουν τα Ορυχεία Πτολεμαΐδας και την ευρύτερη περιοχή, η οποία περιβάλλεται από όρη και εντός της, μεταξύ άλλων, εντοπίζονται και αρκετοί οικισμοί.

Από τους ταξινομημένους χάρτες που δημιουργήθηκαν, από τα αποτελέσματα της αξιολόγησης της ταξινόμησης και από τη σύγκριση των τριών ζευγών ετών ως προς τις μεταβολές των καλύψεων γης, εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα. Τα συμπεράσματα αυτά αφορούν στην άμεση και έμμεση επίδραση της μεταλλευτικής δραστηριότητας στην περιοχή, λόγω της οποίας μεταβάλλονται οι καλύψεις γης αλλάζοντας το περιβαλλοντικό και το αστικό τοπίο.

Οι καλύψεις γης στη μελετώμενη περιοχή παρουσιάζουν μεταβολές τόσο εντός, όσο και εκτός του εγκεκριμένου ορίου ΠΟ, διότι εκτός από την εξορυκτική δραστηριότητα που επιδρά σε αυτή, ένα μεγάλο τμήμα των αλλαγών στο περιβαλλοντικό τοπίο οφείλεται σε φυσικές διεργασίες. Στις ταξινομημένες εικόνες στις οποίες παρατηρείται αύξηση της υψηλής φυτοκάλυψης, εκτός από τις περιβαλλοντικές αποκαταστάσεις που πραγματοποιούνται στις περιοχές των Ορυχείων, αναπτύσσονται και οι δασικές περιοχές στην οροσειρά του Βερμίου, συμβάλλοντας σε αυτή τη μεταβολή, ενώ η αύξηση της χαμηλής φυτοκάλυψης εκτός του ορίου των Ορυχείων, συνήθως οφείλεται στην ανάπτυξη των γεωργικών χρήσεων γης.

Ακόμη, η μετατροπή των κλάσεων χαμηλής και υψηλής φυτοκάλυψης σε άγονη γη εντός του ορίου ΠΟ, συνδέεται κυρίως με την εξέλιξη και την επέκταση των Ορυχείων. Αντίθετα, η μετατροπή της άγονης γης στις περιοχές των Ορυχείων σε εδάφη με χαμηλή ή υψηλή φυτοκάλυψη υποδηλώνει την πραγματοποίηση περιβαλλοντικής αποκατάστασης και συνδέεται

άμεσα με περιοχές εσωτερικής και εξωτερικής απόθεσης, στις οποίες έχει ολοκληρωθεί η μεταλλευτική δραστηριότητα. Από τη διαφορά των εκτάσεων φυτοκάλυψης μεταξύ του ταξινομημένου χάρτη του έτους 1988 και αυτού του έτους 2022, εντός του ορίου των Ορυχείων, προκύπτει ότι η έκταση των αποκατεστημένων εδαφών είναι μεγαλύτερη από την έκταση της επιφάνειας που έχει υποστεί μεταβολή εξαιτίας της ανάπτυξης των Ορυχείων. Επίσης, από τις μεταβολές που λαμβάνουν χώρα και αφορούν σε αυτές τις τρεις κατηγορίες κάλυψης γης, γίνεται αντιληπτή η φορά της προχώρησης των Ορυχείων.

Η κάλυψη γης η οποία δεν αποτυπώθηκε με ακρίβεια στους ταξινομημένους χάρτες, είναι αυτή των υδάτινων σωμάτων. Οι συγκεντρώσεις υδάτων στη μελετώμενη περιοχή είναι πολύ μικρές και όπου εμφανίζονται, οφείλονται κυρίως στη συγκέντρωση υδάτων στις χαμηλότερες υψομετρικές στάθμες των Ορυχείων. Με την εξέλιξη και την προχώρηση του Ορυχείου, αυτές οι τοπικές συγκεντρώσεις καλύπτονται από τις αποθέσεις αγόνων υλικών και δημιουργούνται κάθε φορά νέες, οπότε ποτέ δεν καταλαμβάνουν σταθερή θέση μέσα στην περιοχή μελέτης. Συνεπώς, λόγω έλλειψης μεγάλων και εμφανών υδάτινων σωμάτων στην περιοχή, η ταξινόμηση αυτής της κάλυψης γης δεν ήταν ακριβής.

Αναφορικά με τις ανθρωπογενείς κατασκευές (οικισμοί) που λαμβάνουν χώρα εντός της μελετώμενης περιοχής, παρουσιάζεται αύξηση των εκτάσεών τους εκτός του εγκεκριμένου ορίου ΠΟ, καθώς ο αστικός ιστός με την πάροδο των ετών αναπτύσσεται και λόγω της εξέλιξης των λιγνιτωρυχείων, η οποία οδήγησε σε οικονομική άνθιση της περιοχής. Η μεταλλευτική δραστηριότητα αποτελεί πηγή θέσεων εργασίας και ως εκ τούτου είναι σύνηθες ένα μεγάλο ποσοστό των κατοίκων των κοντινών στα Ορυχεία οικισμών και πόλεων να απασχολούνται σε αυτά. Πέρα από τον λόγο αυτό, η επέκταση των πόλεων με την πάροδο των ετών, όπως αυτή της πόλης της Πτολεμαΐδας το έτος 2022 σε σχέση με το 1988, είναι φυσιολογική ανάπτυξη των κυρίως αστικών κέντρων. Από την άλλη, η μετατροπή εμφανών και συμπαγών εκτάσεων που ανήκουν στην κατηγορία των ανθρωπογενών κατασκευών (οικισμοί), οι οποίοι βρίσκονται εντός της περιοχής των Ορυχείων, σε άγονη γη, αντιστοιχεί κυρίως σε απαλλοτριώσεις οικισμών (Κόμανος, Κλείτος, Μαυροπηγή) που πραγματοποιήθηκαν για τις ανάγκες επέκτασης της λιγνιτικής δραστηριότητας.

Σχετικά με την ακρίβεια στην αποτύπωση και στον διαχωρισμό των κατηγοριών των καλύψεων γης, παρουσιάζεται βελτίωση με την πάροδο των ετών λόγω της καλύτερης ποιότητας και

ανάλυσης των δορυφορικών εικόνων, οι οποίες προέρχονται από ολοένα και πιο εξελιγμένους δορυφόρους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διάκριση του οδικού δικτύου νοτιοδυτικά των Ορυχείων από το έτος 2013 και μετά. Επιπλέον, η εξέλιξη των δορυφορικών συστημάτων και κατ' επέκταση των εικόνων, συνετέλεσε στη βελτίωση της ακρίβειας της ταξινόμησης, με την καλύτερα ταξινομημένη εικόνα να είναι αυτή του έτους 2022. Ο ταξινομημένος χάρτης που δημιουργήθηκε για το συγκεκριμένο έτος συμφωνεί σε μεγάλο ποσοστό με τον χάρτη που αποτυπώνει τις καλύψεις και τις χρήσεις γης των Ορυχείων Πτολεμαΐδας για το ίδιο έτος. Το συμπέρασμα αυτό μπορεί να προκύψει και από το γεγονός ότι ο συντελεστής Kappa για την ταξινόμηση του έτους 2022, έχει πολύ υψηλή τιμή, η οποία όπως έχει προαναφερθεί υποδηλώνει σχεδόν τέλεια συμφωνία της ταξινομημένης εικόνας με την πραγματικότητα.

Σύμφωνα με όλα τα προαναφερόμενα, η λιγνιτική δραστηριότητα στα Ορυχεία Πτολεμαΐδας έχει προκαλέσει έντονες και μεγάλης κλίμακας μεταβολές στις καλύψεις γης της περιοχής επέμβασης. Ωστόσο, οι εκτάσεις των αποκατεστημένων περιοχών είναι αξιοσημείωτες και μέσω αυτών επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση του περιβαλλοντικού τοπίου. Παρ' όλο που οι εκτάσεις αυτές δεν θα επανέλθουν στη μορφή και στην κατάσταση στην οποία βρίσκονταν πριν την έναρξη της εξορυκτικής δραστηριότητας, οι νέες χρήσεις γης που θα δημιουργηθούν στην περιοχή θα την αναβαθμίσουν τόσο σε περιβαλλοντικό, όσο και σε κοινωνικό και οικονομικό επίπεδο.

Για τον λόγο αυτό, πέρα από την αναγκαιότητα σχεδιασμού αποκαταστάσεων των εδαφών στα οποία έχει αναπτυχθεί δραστηριότητα εξόρυξης λιγνίτη, είναι σημαντικό να αξιοποιηθεί η τεχνική της τηλεπισκόπησης στην παρακολούθηση των μεταβολών στις καλύψεις γης των μεταλλευτικών περιοχών, με σκοπό την επιλογή κατάλληλων χρήσεων γης που προάγουν την περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική βιωσιμότητα. Οι προτεινόμενες χρήσεις γης θα πρέπει να συμβάλλουν στην εξομάλυνση του τοπίου διατηρώντας τις αποκατεστημένες εκτάσεις, στην αναβάθμιση της περιοχής μετά το πέρας της εκμετάλλευσης, στην οικονομική ανάπτυξη και στην ευημερία των επηρεαζόμενων τοπικών κοινωνιών.

Σε περαιτέρω στάδιο μελέτης, θα μπορούσε να διαχωριστεί η περιοχή των Ορυχείων από την άγονη γη, ώστε να μπορούν να διακρίνονται τόσο οι εκσκαφές, όσο και οι αποθέσεις σε σχέση με τα αδιατάρακτα από τη μεταλλευτική δραστηριότητα εδάφη. Ακόμη, θα είχε ενδιαφέρον να γίνει σύγκριση των αλλαγών στις καλύψεις γης εντός και εκτός του εγκεκριμένου ορίου ΠΟ,

ώστε να φανεί ο βαθμός επιρροής της εξορυκτικής δραστηριότητας στην ευρύτερη περιοχή. Τέλος, όσον αφορά το κομμάτι της ταξινόμησης, θα μπορούσε να διερευνηθεί ποια από τις μεθόδους επιβλεπόμενης ταξινόμησης ενδεχομένως αποδίδει καλύτερα στη διάκριση των καλύψεων γης για την περιοχή των Ορυχείων Πτολεμαΐδας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ahmad, A., Quegan, S., 2012. Analysis of maximum likelihood classification on multispectral data. *Appl. Math. Sci.* 6, 6425–6436.
2. Alqurashi, A.F., Kumar, L., 2013. Investigating the Use of Remote Sensing and GIS Techniques to Detect Land Use and Land Cover Change: A Review. *Adv. Remote Sens.* 02, 193–204. <https://doi.org/10.4236/ars.2013.22022>
3. Baheti, P., 2021. Supervised and Unsupervised Learning [Differences & Examples]. v7labs. URL <https://www.v7labs.com/blog/supervised-vs-unsupervised-learning> (accessed 4.20.23).
4. Bansal, S., 2023. Supervised and Unsupervised learning. URL <https://www.geeksforgeeks.org/supervised-unsupervised-learning/> (accessed 4.20.23).
5. Brown, S., 2021. Machine learning, explained. MIT Manag. Sloan Sch. URL <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/machine-learning-explained> (accessed 4.11.23).
6. Darem, A.A., Alhashmi, A.A., Almadani, A.M., Alanazi, A.K., Sutantra, G.A., 2023. Development of a map for land use and land cover classification of the Northern Border Region using remote sensing and GIS. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* 26, 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2023.04.005>
7. European Space Agency (ESA), n.d. About Landsat-4 and 5. URL <https://earth.esa.int/eogateway/missions/landsat-4-and-landsat-5> (accessed 2.27.23a).
8. European Space Agency (ESA), n.d. About Landsat-8. URL <https://earth.esa.int/eogateway/missions/landsat-8> (accessed 2.27.23b).
9. European Space Agency (ESA), n.d. Sentinel-2, The mission. URL https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2 (accessed 2.27.23c).
10. European Space Agency (ESA), n.d. Sentinel-2, Applications. URL <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/applications> (accessed 2.27.23d).
11. Garai, D., Narayana, A.C., 2018. Land use/land cover changes in the mining area of Godavari coal fields of southern India. *Egypt. J. Remote Sens. Space Sci.* 21, 375–381. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.01.002>
12. Gikunda, A., 2021. Differences between supervised and unsupervised classification GIS. GrindGIS. URL https://grindgis.com/gis/differences-between-supervised-and-unsupervised-classification-gis?utm_content=cmp-true (accessed 4.20.23).

13. GIS Geography, 2022. Supervised and Unsupervised Classification Techniques in Action. URL <https://gisgeography.com/supervised-unsupervised-classification-arccgis/> (accessed 4.20.23).
14. Guan, J., Yu, P., 2021. Does Coal Mining Have Effects on Land Use Changes in a Coal Resource-Based City? Evidence from Huaibei City on the North China Plain. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18, 11616. <https://doi.org/10.3390/ijerph182111616>
15. He, D., Le, B.T., Xiao, D., Mao, Y., Shan, F., Ha, T.T.L., 2019. Coal mine area monitoring method by machine learning and multispectral remote sensing images. *Infrared Phys. Technol.* 103, 103070. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.103070>
16. Hendrychová, M., Svobodova, K., Kabrna, M., 2020. Mine reclamation planning and management: Integrating natural habitats into post-mining land use. *Resour. Policy* 69, 101882. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101882>
17. IBM- United States, n.d. What is machine learning? URL <https://www.ibm.com/topics/machine-learning> (accessed 4.11.23).
18. Karan, S.K., Samadder, S.R., Maiti, S.K., 2016. Assessment of the capability of remote sensing and GIS techniques for monitoring reclamation success in coal mine degraded lands. *J. Environ. Manage.* 182, 272–283. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.070>
19. Kern, S., Ozsoy, B., 2018. *Remote Sensing*. pp. 175–206.
20. Kramer, H.J., 2012. *Observation of the Earth and Its Environment Survey of Missions and Sensors*. Springer Berlin Heidelberg, S.I.
21. Laboratory of GIS & RS at the Czech University of Life Sciences, n.d. QGIS AND ITS OPTIONS OF IMAGE CLASSIFICATIONS. Study Mater. Semin. Remote Sens. Courses. URL https://home.czu.cz/storage/941/113103_rs-qgis-4-classifications.pdf (accessed 5.25.23).
22. Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics* 33, 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
23. LogicMonitor, 2023. What is the difference between unsupervised and supervised learning in machine learning? LogicBlog. URL <https://www.logicmonitor.com/blog/what-is-the-difference-between-unsupervised-and-supervised-learning-in-machine-learning> (accessed 4.20.23).
24. Mapasyst, 2019. What's the difference between a supervised and unsupervised image classification? URL <https://mapasyst.extension.org/whats-the-difference-between-a-supervised-and-unsupervised-image-classification/> (accessed 4.20.23).
25. Palogos, I., Galetakis, M., Roumpos, C., Pavloudakis, F., 2017. Selection of optimal land uses for the reclamation of surface mines by using evolutionary algorithms. *Int. J. Min. Sci. Technol.* 27, 491–498. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.03.008>

26. Paraskevis, N., Servou, A., Roumpos, C., Pavloudakis, F., 2021. Spatiotemporal Interactions between Surface Coal Mining and Land Cover and Use Changes. *J. Sustain. Min.* 20, 72–89. <https://doi.org/10.46873/2300-3960.1053>
27. Richards, J.A., 2013. Supervised Classification Techniques, in: *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 247–318. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30062-2_8
28. Ridwan, M.A., Radzi, N.A.M., Ahmad, W.S.H.M.W., Mustafa, I.S., Din, N.M., Jalil, Y.E., Isa, A.M., Othman, N.S., Zaki, W.M.D.W., 2018. Applications of Landsat-8 Data: a Survey. *Int. J. Eng. Technol.* 7, 436. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.35.22858>
29. UC Berkeley School of Information, 2020. What Is Machine Learning (ML)? URL <https://ischoolonline.berkeley.edu/blog/what-is-machine-learning/> (accessed 6.9.23).
30. United States Geological Survey (USGS), n.d. Landsat 5. URL <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5> (accessed 2.27.23a).
31. United States Geological Survey (USGS), n.d. Landsat 8. URL <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8> (accessed 2.27.23b).
32. United States Geological Survey (USGS), n.d. Landsat Collection 2. URL <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2> (accessed 5.18.23c).
33. Wahbi, M., El Bakali, I., Ez-zahouani, B., Azmi, R., Moujahid, A., Zouiten, M., Alaoui, O.Y., Boulaassal, H., Maatouk, M., El Kharki, O., 2023. A deep learning classification approach using high spatial satellite images for detection of built-up areas in rural zones: Case study of Souss-Massa region - Morocco. *Remote Sens. Appl. Soc. Environ.* 29, 100898. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100898>
34. Wakefield, K., n.d. A guide to the types of machine learning algorithms and their applications. *SAS Anal. Artif. Intell. Data Manag.* URL https://www.sas.com/en_gb/insights/articles/analytics/machine-learning-algorithms.html (accessed 4.11.23).
35. Worlanyo, A.S., Jiangfeng, L., 2021. Evaluating the environmental and economic impact of mining for post-mined land restoration and land-use: A review. *J. Environ. Manage.* 279, 111623. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111623>
36. Yıldız, T.D., 2021. Overlapping of mine sites and highway route in Turkey: Evaluation in terms of mining land use criteria and land-use planning. *Land Use Policy* 106, 105444. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105444>
37. Yu, H., Zahidi, I., 2023. Spatial and temporal variation of vegetation cover in the main mining area of Qibaoshan Town, China: Potential impacts from mining damage, solid waste discharge and land reclamation. *Sci. Total Environ.* 859, 160392. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160392>

38. Yuh, Y.G., Tracz, W., Matthews, H.D., Turner, S.E., 2023. Application of machine learning approaches for land cover monitoring in northern Cameroon. *Ecol. Inform.* 74, 101955. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101955>
39. Zhang, M., Wang, J., Feng, Y., 2019. Temporal and spatial change of land use in a large-scale opencast coal mine area: A complex network approach. *Land Use Policy* 86, 375–386. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.05.020>
40. Zhang, M., Wang, Jinman, Zhang, Y., Wang, Jin, 2023. Ecological response of land use change in a large opencast coal mine area of China. *Resour. Policy* 82, 103551. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103551>
41. Γεωργούλη, Α., 2015. Μηχανική Μάθηση, Τεχνητή Νοημοσύνη- Μια Εισαγωγική Προσέγγιση. Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, pp. 127–196.
42. ΔΕΗ, 2021a. Συμβατική Παραγωγή. URL <https://www.dei.gr/el/dei-omilos/i-dei/tomeis-drastiriotitas/symvatiki-paragogi/> (accessed 5.8.23).
43. ΔΕΗ, 2021b. Απολιγνιτοποίηση. URL <https://www.dei.gr/el/dei-omilos/perivallon/apolignitopoiisi/> (accessed 5.10.23).
44. ΔΕΗ, 2010. Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Ορυχείων Πτολεμαΐδας, Ν. Κοζάνης.
45. Καρτάλης, Κ., Φείδας, Χ., 2013. Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης. Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.
46. Μερτίκας, Σ.Π., 1999. Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας. Ίων, Αθήνα.
47. Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2019. Εθνικό Σχέδιο για την Ένεργεια και το Κλίμα.

Παράρτημα: Αντεξέργαστες δορυφορικές εικόνες Landsat 5, Landsat 8 και Sentinel-2

- 1988



- 1993



• 1998



- 2003



- 2008



- 2013



• 2018



• 2022

