



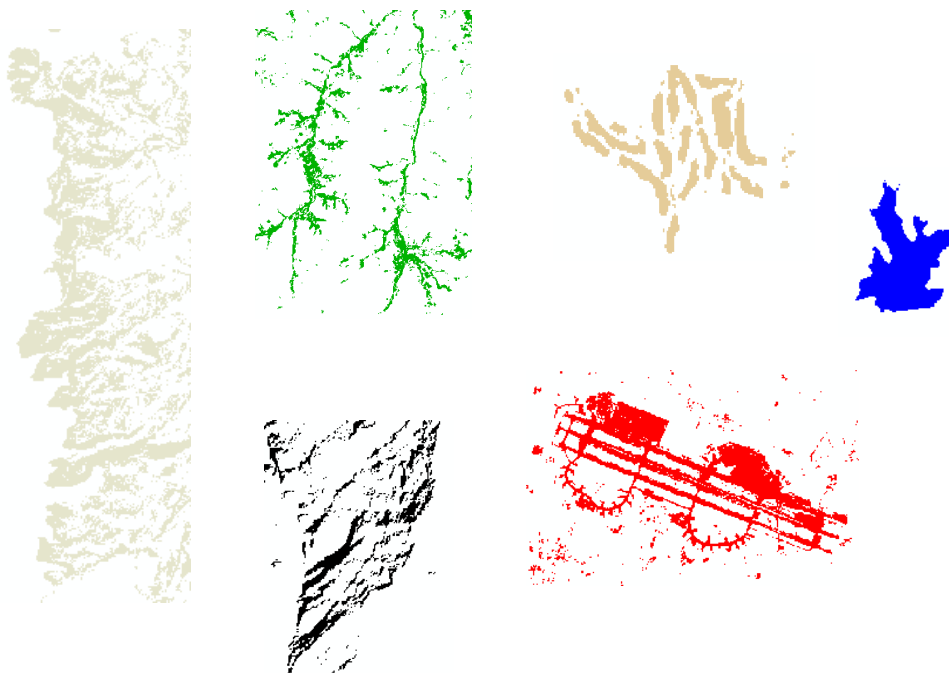
Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Τμήμα Γεωγραφίας

ΠΜΣ Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου

Κατεύθυνση Γεωπληροφορικής

**ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΓΗΣ ΤΗΣ
ΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL 2**



Μεταπτυχιακή Εργασία

της

Καρκαλέτσου Αγορής

Επιβλέπων καθηγητής: Παρχαρίδης Ισαάκ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017



Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο

Τμήμα Γεωγραφίας

ΠΜΣ Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου

Κατεύθυνση Γεωπληροφορικής

**ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΗΣ ΚΑΛΥΨΗΣ ΓΗΣ ΤΗΣ
ΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ
ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL 2**

Μεταπτυχιακή Εργασία

της

Καρκαλέτσου Αγορής

Επιβλέπων καθηγητής: Παρχαρίδης Ισαάκ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2017

Copyright © – All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Καρκαλέτσου Αγορή, 2016.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο “Χαρτογράφηση της Κάλυψης Γης της Νήσου Κρήτης με Αξιοποίηση Δορυφορικών Δεδομένων Sentinel 2” εκπονήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Εφαρμοσμένης Γεωγραφίας και Διαχείρισης του Χώρου στην κατεύθυνση της Γεωπληροφορικής με επιβλέποντα τον αναπληρωτή καθηγητή Παρχαρίδη Ισαάκ. Στην εργασία αυτή αξιοποιήθηκαν τεχνολογίες Γεωπληροφορικής (με ειδική εφαρμογή στην τηλεπισκόπηση και στα συστήματα γεωγραφικών πληροφοριών) και τεχνολογίες Διαδικτύου. Το παρόν τεύχος είναι αποτέλεσμα μίας σημαντικής προσωπικής προσπάθειας προς ανάδειξη των δυνατοτήτων της γεωπληροφορικής στην μελέτη της κάλυψης γης και στην δημοσιοποίηση γεωγραφικών δεδομένων. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα αναπληρωτή καθηγητή Παρχαρίδη Ισαάκ για την προτροπή του να ασχοληθώ με τα προσφάτως διαθέσιμα δορυφορικά δεδομένα Sentinel 2. Ακόμη, να τον ευχαριστήσω για τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την διάρκεια των σπουδών μου στο τμήμα Γεωγραφίας.

Περίληψη

Οι θεματικοί χάρτες με την πληροφορία της κάλυψης γης, εξαγόμενη από δορυφορικά δεδομένα, έχουν γίνει η βάση για την ανάλυση πολλών κοινωνικο-οικολογικών ζητημάτων. Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα Sentinel 2 για την χαρτογράφηση της κάλυψης γης στο νησί της Κρήτης. Η εργασία αυτή χωρίζεται σε τρία κύρια μέρη τα οποία αφορούν στην προεπεξεργασία και ταξινόμηση εικόνας σε θεματικά επίπεδα κάλυψης γης και στην ανάπτυξη Web εφαρμογής που φιλοξενεί την παραγόμενη πληροφορία. Με σκοπό την προετοιμασία των δεδομένων για ταξινόμηση πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες διορθώσεις εικόνας. Αυτές αφορούν στην ατμοσφαιρική και τοπογραφική διόρθωση. Η ατμοσφαιρική διόρθωση πραγματοποιήθηκε με την βοήθεια του επεξεργαστή Sen2Cor. Για την υλοποίηση της τοπογραφικής διόρθωσης αναπτύχθηκε ένα μοντέλο βασιζόμενο στον αλγόριθμο Minnaert το οποίο λαμβάνει υπόψιν την σχέση ανακλαστικότητας, επιπέδου τοπογραφικών κλίσεων και συνθήκης φωτισμού. Η μέθοδος τοπογραφικής διόρθωσης που αναπτύχθηκε αποδείχτηκε αποτελεσματική επιφέροντας σημαντική αφαίρεση των σκιασμένων περιοχών λόγω του αναγλύφου με τελική τιμή του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ ανακλαστικότητας και φωτισμού να βρίσκεται πλησίον του μηδενός.

Για την ταξινόμηση εικόνας εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος ταξινόμησης SVM (Support Vector Machine). Ο SVM ταξινομητής βρέθηκε αποτελεσματικός στον προσδιορισμό των κατηγοριών κάλυψης γης επιτυγχάνοντας συνολική ακρίβεια 97% και τιμή συντελεστή kappa 0.96. Στην υψηλή ακρίβεια ταξινόμησης συνέβαλλε η προεπεξεργασία των δεδομένων, η κατάλληλη επιλογή του αλγορίθμου ταξινόμησης, η ορθή επιλογή δειγμάτων εκπαίδευσης και η χωρική και φασματική ανάλυση του Sentinel 2. Τα Sentinel 2 δεδομένα τα οποία βοηθούν στην ανίχνευση μικρών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του τοπίου μαζί με την χρήση της SVM η οποία έχει την ικανότητα να διατηρεί τα χωρικά χαρακτηριστικά αποτέλεσαν τον κατάλληλο συνδυασμό για την δημιουργία του θεματικού χάρτη κάλυψης γης της Κρήτης. Με Sentinel 2 δορυφορικά δεδομένα έγινε αποτύπωση της κάλυψης γης με λεπτομέρεια και ακρίβεια, ειδικά σε υψηλά ετερογενείς περιοχές όπως είναι τα παράκτια περιβάλλοντα και σε υψηλά κατακερματισμένα τοπία όπως είναι οι περιαστικές περιοχές. Ειδικότερα, στην υψηλή ακρίβεια ταξινόμησης των δασών και της βλάστησης συνέβαλλε η αξιοποίηση ανοιξιάτικων δορυφορικών εικόνων οι οποίες

είναι από τις πρώτες ανοιξιάτικες εικόνες που κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel 2. Η κάλυψη γης που απεικονίζει την τρέχουσα πραγματικότητα φανέρωσε μεταξύ άλλων καταστροφές στο φυσικό περιβάλλον όπως είναι οι καμένες εκτάσεις.

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως στην Κρήτη υπερέχει το φυσικό περιβάλλον. Το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης γης στο νησί καταλαμβάνει το μωσαϊκό της αραιής βλάστησης με τις καλλιέργειες (40.85%) και ακολουθεί η κατηγορία των δασών (31.55%). Το 2.81% ανήκει στις τεχνητές επιφάνειες. Ο Sentinel 2 θα συμβάλλει σημαντικά στην διαχρονική παρακολούθηση της κάλυψης γης σε περιφερειακό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο εξαιτίας του μεγάλου πλάτους σάρωσης, της συχνής επίσκεψης σημείου και της καλής χωρικής του ανάλυσης. Η τακτική ενημέρωση των δεδομένων κάλυψης γης με Sentinel 2 δορυφορικά δεδομένα μπορεί να συμβάλλει στη προσφορά χρήσιμης και βελτιωμένης πληροφορίας στον τομέα της επιστήμης και της πολιτικής.

Λέξεις κλειδιά: Κάλυψη γης, Sentinel 2, Sen2Cor, Minnaert, ταξινόμηση, SVM, συντελεστής kappa, Κρήτη, Διαδικτυακή εφαρμογή.

Abstract

Thematic land cover maps derived from satellite data have become the basis for analyzing many socio-ecological issues. In the current study, Sentinel 2 satellite data used to map land cover on the island of Crete. The study is divided into three main parts which relate to the image preprocessing, the image classification into thematic land cover types and the development of a Web application hosting the generated information. In order to prepare the data for classification made the required image corrections. These relate to atmospheric and topographic correction. The atmospheric correction is performed with Sen2Cor processor. A model for the implementation of topographic correction was developed based on Minnaert algorithm which takes into account the relationship between reflectance, topographic slopes and illumination. The proposed topographic correction method proved to be effective resulting in a significant removal of shaded areas having a value of correlation coefficient between reflectance and lighting close to zero.

The image classification was based on classification algorithm SVM (Support Vector Machine). The SVM classifier was found effective in identification of land cover classes achieving an overall accuracy of 97% and a kappa coefficient of 0.96. Data preprocessing, appropriate choice of the classification algorithm, careful selection of training samples, spatial and spectral resolution of Sentinel 2 were the key factors to high classification accuracy. Land cover types were recognized in detail and accuracy, especially at high heterogeneous areas such as coastal environments and in highly fragmented landscapes such as peri-urban areas. In particular, the classification of forests and vegetation was highly accurate because of the use of satellite images that captured during the spring. The land cover classification also revealed the damage to the natural environment such as that in burned areas of west and east Crete.

The results show that in Crete the natural environment is superior. The mosaic of sparse vegetation with crops covers 40.85% of the total area. The category of forests covers 31.55% of the total area. The category of artificial surfaces covers 2.81% of the total area. Sentinel 2 will significantly contribute to the temporal monitoring of land cover at regional, national and global level due to the large swath width, the frequent revisit time of each point and the fine spatial analysis. Regular updating of land cover data

based on Sentinel 2 can contribute to an offer of improved and useful information to science and policy.

Key words: Land cover, Sentinel 2, Sen2Cor, Minnaert, classification, SVM, kappa coefficient, Crete, Web application.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Πρόλογος.....	iv
Περίληψη.....	v
Abstract	vii
Κατάλογος σχημάτων	x
Κατάλογος πινάκων.....	xiii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1. Αντικείμενο της διπλωματικής.....	2
1.2. Οργάνωση του τόμου	5
2. ΚΑΛΥΨΗ ΓΗΣ	6
3. Ο ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ SENTINEL 2	9
4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	18
5. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ DEM.....	20
6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL 2 ...	24
6.1. Προεπεξεργασία εικόνων.....	24
6.1.1. Ατμοσφαιρική διόρθωση	24
6.1.2. Τοπογραφική διόρθωση.....	28
6.2. Μωσαϊκό	46
6.3. Ο αλγόριθμος ταξινόμησης SVM	47
6.4. Μεθοδολογία ταξινόμησης εικόνας	53
6.5. Εξαγωγή της πληροφορίας της ακτογραμμής με χρήση του θεματικού επιπέδου της κάλυψης γης.....	55
6.6. Αξιολόγηση της ακρίβειας του αποτελέσματος ταξινόμησης	56
7. Χαρτογράφηση της Κάλυψης Γης της Ν. Κρήτης	58
8. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ	90
8.1. Συστήματα και λογισμικά της εφαρμογής.....	90
8.1.1. Λογισμικά στη πλευρά του πελάτη (client).....	90
8.1.2. Λογισμικά στη πλευρά του εξυπηρετητή (server)	91
8.2. Λειτουργίες της εφαρμογής.....	91
9. Συζήτηση – Συμπεράσματα	98
10. Βιβλιογραφία.....	105

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1. Ο δορυφόρος Sentinel 2 και η τροχιά του. Πηγή: (http://www.cesbio.ups-tlse.fr , http://spaceflight101.com/copernicus/sentinel-2).	10
Σχήμα 2. Χαρακτηριστικά του πολυφασματικού οργάνου καταγραφής MSI του Sentinel 2.	11
Σχήμα 3. Σύγκριση καναλιών μεταξύ του Landsat 7 και 8 και του Sentinel 2. Πηγή: (http://landsat.gsfc.nasa.gov)	13
Σχήμα 4. Η επάνω εικόνα αποκτήθηκε από τον Landsat 8 (2015) με συνδυασμό καναλιών near-infrared, red, green (5,4,3) και η κάτω από τον Sentinel 2 (2015) με συνδυασμό καναλιών near-infrared, red, green (8,4,3). Πηγή: (http://esri-de-6.maps.arcgis.com/apps/MapSeries).....	14
Σχήμα 5. Η θέση της περιοχής μελέτης στην Ελλάδα και το πλαίσιο εστίασης στην περιοχή και ανάδειξης του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (Aster GDEM v2).	18
Σχήμα 6. Χαρτογραφική αποτύπωση του μέσου ετήσιου ύψους βροχής. Πηγή: (Βάρλας et al., 2013),	19
Σχήμα 7. Διαφορά πλακιδίων Level 1B (granules) και Level 1C (tiles). Πηγή: (https://eox.at/wp-content).....	20
Σχήμα 8. Πλέγμα πλακιδίων δορυφορικών προϊόντων Sentinel 2 στον ελληνικό χώρο.....	21
Σχήμα 9. Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου Ελλάδας.	23
Σχήμα 10. Ροή διαδικασίας για την μετατροπή L1C προϊόντων σε L2A.	26
Σχήμα 11. Οργάνωση εικόνων πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση.....	26
Σχήμα 12. Η εικόνα της Αττικής πριν (Α) και μετά (Β) την ατμοσφαιρική διόρθωση.....	27
Σχήμα 13. Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό του επιπέδου του φωτισμού και την υλοποίηση τυχαίας στρωματοποιημένης δειγματοληψίας.	30
Σχήμα 14. Δημιουργία μοντέλου για τον εμπλουτισμό του πίνακα περιεχομένων των σημείων δειγματοληψίας κάθε κλάσης κλίσεων με την πληροφορία των παραμέτρων χρήσιμων για τον υπολογισμό του συντελεστή Minnaert.....	31
Σχήμα 15. Σύνθεση τοπογραφικά διορθωμένης δορυφορικής εικόνας.	34
Σχήμα 16. Δημιουργία μοντέλου εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου κατά την φάση 6.35	
Σχήμα 17. Συντελεστές Minnaert για κάθε MSI (multispectral instrument) κανάλι που αντιστοιχεί στις διαφορετικές κλάσεις κλίσεων.	36
Σχήμα 18. Συντελεστές Minnaert για κάθε MSI κανάλι που αντιστοιχεί στις διαφορετικές κλάσεις φωτισμού (διαχωρισμένες με διακεκομμένη γραμμή) της κλάσης κλίσεων 9 και συντελεστές Minnaert για κάθε MSI κανάλι της κλάσης κλίσεων 9 χωρίς τον διαχωρισμό βάσει φωτισμού (εντός κύκλου).	36
Σχήμα 19. Οπτική της περιοχής εστίασης μέσα από το Google Earth.....	39
Σχήμα 20. Οπτική αναπαράσταση του επιπέδου του φωτισμού και του επιπέδου των επαναταξινομημένων κλίσεων.	40
Σχήμα 21. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Α) και φωτισμός (Β).	41
Σχήμα 22. Οπτική εντύπωση των αποτελεσμάτων της τοπογραφικής διόρθωσης της υφιστάμενης μεθόδου Minnaert with Slope σε 9 κατηγορίες κλίσεων (Α) και της προτεινόμενης (Β) μέσα από την χρωματική σύνθεση RGB των καναλιών 8, 4, 3.	42
Σχήμα 23. Εικόνες Sentinel 2 σε χρωματική σύνθεση 8, 4, 3 πριν (Α) και μετά την τοπογραφική διόρθωση (Β).	43
Σχήμα 24. Οπτική αντιπαράθεση του καναλιού 8 (NIR) πριν (Α) και μετά (Β) την τοπογραφική διόρθωση.....	44
Σχήμα 25. Διαγράμματα διασποράς και τοποθέτηση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης της ανακλαστικότητας του καναλιού 8 και του φωτισμού πριν και μετά την διόρθωση.	45

Σχήμα 26. Μωσαϊκό Κρήτης.....	46
Σχήμα 27. Βέλτιστο υπερεπίπεδο διαχωρισμού δύο κλάσεων. Πηγή: (https://www.mathworks.com/help/stats/svmhyperplane.png).....	48
Σχήμα 28. Διαχωρισμός κλάσεων με βάση τη λειτουργία πυρήνα της συνάρτησης ακτινωτής βάσης. Πηγή: (http://journals.plos.org/plosone).	49
Σχήμα 29. Σκελετός της ανεπτυγμένης προσέγγισης ταξινόμησης.	54
Σχήμα 30. Παρουσίαση τμήματος της δημιουργούμενης ακτογραμμής στο βορειοανατολικό άκρο της Κρήτης.	56
Σχήμα 31. Χάρτης κάλυψης γης της Ν. Κρήτης.	60
Σχήμα 32. Συμμετοχή της κάθε κατηγορίας κάλυψης γης στην συνολική επιφάνεια της Κρήτης και ανά νομό.	61
Σχήμα 33. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των τεχνητών επιφανειών. Επάνω: το αεροδρόμιο των Χανίων, Μέση: τα Χανιά, Κάτω: το Ηράκλειο.	64
Σχήμα 34. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των τεχνητών επιφανειών. Επάνω: Πλησίον του οικισμού Άγιοι Θεόδωροι στα νοτιοδυτικά προάστια του Ηρακλείου, Μέση: Τα θερμοκήπια πάνω από τον οικισμό Τυμπάκι στην πεδιάδα της Μεσαράς, Κάτω: Οι οικισμοί Αλμυρίδα, Άσπρο, Πλάκα, Καμπιά, Κόκκινο χωριό, Δράπανος στα βορειοανατολικά των Χανίων.	65
Σχήμα 35. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των καλλιεργείων. Επάνω: Καλλιέργειες πέριξ από τα άνω Μούλια, Μέση: Η ζώνη καλλιεργείων στην κεντρική Κρήτη, Κάτω: Ο οικισμός Ινία και οι γύρω καλλιέργειες.	67
Σχήμα 36. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας της υδάτινης μάζας. Επάνω: Τεχνητή λίμνη φράγματος Ινίου, Μέση: Τεχνητή λίμνη Μπραμιανών, Κάτω: Τεχνητή λίμνη Φανερωμένης.	68
Σχήμα 37. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των πλατύφυλλων δασών. Επάνω: Τα πλατύφυλλα δάση στην δυτική Κρήτη, Μέση: Εστίαση σε πλατύφυλλα δάση στα νοτιοδυτικά του Ρεθύμνου, Κάτω: Πλατύφυλλα δάση με σημείο αναφοράς τον οικισμό Αυλή στα δυτικά του οροπεδίου Λασιθίου.	70
Σχήμα 38. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των κωνοφόρων δασών. Επάνω: Δάση κωνοφόρων στην Σαμαριά, Μέση: Δάση κωνοφόρων στα βόρεια της χώρας των Σφακίων, Κάτω: Δάση κωνοφόρων πλησίον των οικισμών Βαθύ και Καλό Χωριό στην ανατολική Κρήτη, κοντά στον Άγιο Νικόλαο.	71
Σχήμα 39. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των μικτών δασών. Επάνω: Μικτά δάση γύρω από τον οικισμό Δάφνη, Μέση: Μικτά δάση στο Οροπέδιο Ασκούφου, Κάτω: Μικτά δάση στα νότια του οικισμού Γωνιές κοντά στα Μάλια.	72
Σχήμα 40. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των θάμνων. Επάνω: Κάλυψη των θάμνων δυτικά του Ρεθύμνου, Μέση: Θάμνοι σε υποπεριοχή νότια των Χανίων, Κάτω: Σκιαγράφιση των θάμνων στα βορειοανατολικά της Κρήτης με σημείο αναφοράς τον οικισμό του Παλαΐκαστρου.	74
Σχήμα 41. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των χαμηλών θάμνων. Επάνω: Το βορειοανατολικό άκρο της Κρήτης καλυμμένο από χαμηλούς θάμνους, Μέση: Χαρακτηριστική κάλυψη χαμηλών θάμνων στα Λευκά όρη, Κάτω: Στεριά καλυμμένη από χαμηλούς θάμνους, παραθαλάσσια περιοχή στα βορειοδυτικά της Κρήτης.	75
Σχήμα 42. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας της αραιής βλάστησης. Επάνω: Διάσπαρτη αραιή βλάστηση στο Όρος Δίκητη,	

Μέση: Συμπαγείς υποπεριοχές αραιής βλάστησης στα νοτιοδυτικά της Κρήτης με νοτιότερους οικισμούς τα Λιβανιανά και το Λουτρό, Κάτω: Εκτεταμένη αραιή βλάστηση περίξ του οικισμού Κάτω Ροδάκινο, νότια του νομού Ρεθύμνου.	76
Σχήμα 43. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των χορτολιβαδικών εκτάσεων. Επάνω: Γήπεδο γκολφ Κρήτης κοντά στον Λιμένα Χερσονήσου, Μέση: Βορειοδυτικά της πόλης του ορεινού όγκου της Δίκτυς, Κάτω: Παράδειγμα χορτολιβαδικών εκτάσεων σε ορεινή ζώνη.	77
Σχήμα 44. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας του γυμνού εδάφους. Επάνω: Γυμνό έδαφος από εξόρυξη κοιτάσματος κοντά στον Κάνδανο, Μέση: Τα Λευκά όρη, Κάτω: Η παραλία της Φαλάσαρνας στην δυτική Κρήτη.	78
Σχήμα 45. Ιστορική εικόνα Google Earth με ημερομηνία 01/05/2016 αποτύπωσης των καμένων εκτάσεων πλησίον του οικισμού Σφηνάρι.	80
Σχήμα 46. Ιστορική εικόνα Google Earth με ημερομηνία 15/06/2016 όπου απεικονίζονται οι καμένες εκτάσεις στα βόρεια του οικισμού Μάλες.	80
Σχήμα 47. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των καμένων εκτάσεων. Επάνω: Καμένες εκτάσεις πλησίον του οικισμού Σφηνάρι, Μέση: Καμένες εκτάσεις σε κοντινή απόσταση από το Σφηνάρι και πλησιέστερα του οικισμού Μπερμπαθιανά, Κάτω: Καμένες εκτάσεις βόρεια και σε κοντινή απόσταση από τους οικισμούς Μάλες και Καλαμαύκα.	81
Σχήμα 48. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των σκιών. Επάνω, Μέση και Κάτω: Έντονα σκιασμένες πλαγιές μηδενικού φωτισμού όπου απουσιάζει η πληροφορία της εδαφοκάλυψης.	82
Σχήμα 49. Εστιασμένες υποπεριοχές του χάρτη κάλυψης γης της Ν. Κρήτης. Επάνω: Γενική οπτική της κάλυψης γης περιμετρικά του κόλπου Μιραμπέλου, Κάτω: Οι ανεμογεννήτριες στην βορειοανατολική Κρήτη.	84
Σχήμα 50. Εστιασμένες υποπεριοχές του χάρτη κάλυψης γης της Ν. Κρήτης. Επάνω: Η Ιεράπετρα και η θέαση της πυκνότητας των θερμοκηπίων στην παράκτια ζώνη, Κάτω: Πρότυπο οικισμών, καλλιεργείων και λιμνών στα νοτιοανατολικά του Ν. Ηρακλείου.	85
Σχήμα 51. Εστιασμένες υποπεριοχές του χάρτη κάλυψης γης της Ν. Κρήτης. Επάνω: Τα Λευκά όρη και ανάμεσα το φαράγγι της Σαμαριάς, Κάτω: Το Ηράκλειο και η γύρω περιοχή.	87
Σχήμα 52. Εστιασμένες υποπεριοχές του χάρτη κάλυψης γης της Ν. Κρήτης. Ο αυτοκινητόδρομος πλάτους 22 μέτρων και μήκους 41 χιλιομέτρων νότια των Χανίων, Κάτω: Οι καμένες εκτάσεις στην βορειοδυτική Κρήτη και ο δρόμος που ακολουθεί την ισούψη καμπύλη στον ορεινό όγκο.	88
Σχήμα 53. Προβολή των καμένων εκτάσεων στην ιστορική εικόνα του Google Earth με μία οπτική ανάδειξης της λεκάνης απορροής.	89
Σχήμα 54. Η διεπαφή της χαρτογραφικής εφαρμογής.	91
Σχήμα 55. Εμφάνιση του χάρτη OSM μέσω της εφαρμογής.	92
Σχήμα 56. Εμφάνιση της ψευδέχρωμης εικόνας Sentinel 2 μέσω της εφαρμογής.	92
Σχήμα 57. Εμφάνιση του ενιαίου θεματικού επιπέδου με όλες τις κατηγορίες κάλυψης γης.	93
Σχήμα 58. Υπέρθεση του επιπέδου των Πλατύφυλλων Δασών στο χαρτογραφικό υπόβαθρο Stamen.	93
Σχήμα 59. Υπέρθεση του θεματικού επιπέδου των Υδάτων στην εικόνα φυσικών χρωμάτων του Sentinel 2.	94

Σχήμα 60. Υπέρθεση των θεματικών επιπέδων των Τεχνητών επιφανειών και Καλλιεργειών στην εικόνα φυσικών χρωμάτων του Sentinel 2.....	94
Σχήμα 61. Υπέρθεση της ακτογραμμής της Ν. Κρήτης στο χάρτη OSM.....	95
Σχήμα 62. Εμφάνιση των Καλλικρατικών δήμων της Ν. Κρήτης.....	95
Σχήμα 63. Εμφάνιση του υπομνήματος των θεματικών επιπέδων της κάλυψης γης.....	96
Σχήμα 65. Ένδειξη του ποσοστού της έκτασης των κατηγοριών κάλυψης γης με μετακίνηση του δείκτη του ποντικιού στο γράφημα της πίτας.....	97
Σχήμα 64. Στατιστικά γραφήματα – πίτες των ποσοστών έκτασης των κατηγοριών κάλυψης γης ανά νομό.	97

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1. Σύγκριση προδιαγραφών εικόνων Landsat και Sentinel 2.	13
Πίνακας 2. Ανασκόπηση των πρώτων εργασιών που εξερεύνησαν τα δεδομένα Sentinel 2.15	
Πίνακας 3. Δεδομένα Sentinel 2 - Copernicus Sentinel data [2016].....	22
Πίνακας 4. Ταξινόμηση κλίσεων σε 10 κλάσεις εκ των οποίων η πρώτη αφαιρείται.	32
Πίνακας 5. Συντελεστής συσχέτισης μεταξύ ανακλαστικότητας και φωτισμού.	37
Πίνακας 6. Πίνακας σύγχυσης για την SVM ταξινόμηση των Sentinel 2 δεδομένων.....	57
Πίνακας 7. Ποσοστά κάλυψης γης ανά κατηγορία για ολόκληρη την περιοχή μελέτης και ανά νομό.....	62

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κάλυψη γης έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα σημαντικότερα συστατικά στοιχεία για ένα σύνολο μελετών και περιβαλλοντικών εφαρμογών (Huang et al., 2002). Η παραγωγή των πληροφοριών κάλυψης γης όλο και περισσότερο βασίζεται στην τεχνολογία της τηλεπισκόπησης χάρη στην ικανότητά της να αποκτά μετρήσεις των επιφανειών γης σε διάφορες χωρικές κλίμακες (Guo et al., 2012). Οι αλλαγές στην κάλυψη γης έρχονται φυσικά με την πάροδο του χρόνου καθώς και λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Η παρακολούθηση και χαρτογράφηση της κάλυψης γης σε μεγάλες περιοχές γίνεται δυνατή με δορυφορικά δεδομένα. Τα προϊόντα της κάλυψης γης που πληρούν μια σειρά από ανάγκες για πληροφόρηση της επιστήμης και της πολιτικής παράγονται σήμερα σε τακτά χρονικά διαστήματα σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες (Gómez et al., 2016). Η αυξημένη διαθεσιμότητα ελεύθερων δορυφορικών δεδομένων μεσαίας χωρικής ανάλυσης υποστηρίζει την διαχρονική ανάλυση της κάλυψης γης σε περιφερειακό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο. Μία από τις κύριες προσεγγίσεις στην απόκτηση της πληροφορίας κάλυψης γης από δορυφορικές εικόνες είναι η ταξινόμηση. Έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμοι αλγόριθμοι ταξινόμησης. Ένας δημοφιλής και συχνά αξιοποιούμενος αλγόριθμος είναι ο SVM.

Η χαρτογράφηση της κάλυψης γης με χρήση δορυφορικών δεδομένων ξεκίνησε το 1972 με τον δορυφόρο Landsat 1. Από τότε μέχρι σήμερα έχουν γίνει μεγάλα άλματα στην ανάπτυξη της τεχνολογίας. Ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια η επιστημονική και τεχνολογική πρόοδος στον τομέα της Τηλεπισκόπησης είναι μεγάλη. Ο πιο πρόσφατος δορυφόρος ο Sentinel 2 που εκτοξεύτηκε τον Ιούνιο του 2015 αποτελεί μία βελτιωμένη συνέχεια των δορυφόρων SPOT και Landsat. Έχει μεγαλύτερη συχνότητα επίσκεψης κάθε σημείου, περισσότερα φασματικά κανάλια με στενότερο εύρος ζώνης στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και βελτιωμένη χωρική ανάλυση. Η αποστολή Sentinel 2 παρέχει ένα πολυφασματικό σύστημα παρατήρησης της γης που συμπληρώνει τις παρατηρήσεις SPOT και Landsat διαθέτοντας στους χρήστες βελτιωμένα δεδομένα. Με την απόκτηση οπτικών εικόνων Sentinel 2 μεσαίας ανάλυσης αναμένονται σημαντικές βελτιώσεις στην χαρτογράφηση της κάλυψης γης σε παγκόσμιο επίπεδο. Η πρόσφατη διαθεσιμότητα των δεδομένων Sentinel-2 αναμένεται να φέρει την χαρτογράφηση της κάλυψης γης και της παρακολούθησής αυτής σε ένα πρωτοφανές επίπεδο. Με τον Sentinel 2 αναμένονται υψηλότερες ακρίβειες ταξινόμησης

συνυπολογίζοντας και την δυνατότητα χρήσης πολλαπλών διαχρονικών δεδομένων σύντομου χρονικού διαστήματος μεταξύ τους. Ο Sentinel 2 θα συμβάλλει στην βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων με έμφαση σε εφαρμογές ταξινόμησης της κάλυψης γης.

Η υιοθέτηση της πολιτικής της ελεύθερης διανομής δεδομένων Sentinel και Landsat είναι καταλυτική στην ανάπτυξη υπηρεσιών τηλεπισκόπησης. Η αξιοποίηση Sentinel και Landsat δορυφορικών δεδομένων είναι απαραίτητη για την διαχρονική παρατήρηση σε εφαρμογές στους τομείς των φυσικών και ανθρωπογενών διαδικασιών. Η διαχρονική παρακολούθηση της κάλυψης γης και η τακτική ενημέρωση της πληροφορίας αυτής έχουν ιδιαίτερη αξία για τον σχεδιασμό και την διαχείριση των φυσικών πόρων, την μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών μεταβλητών και την κατανόηση της διανομής των οικοτόπων. Τα τελευταία χρόνια η ερευνητική κοινότητα που ασχολείται με την τηλεπισκόπηση έχει δείξει μεγάλο ενδιαφέρον στο κομμάτι της εξερεύνησης της κάλυψης γης.

1.1. Αντικείμενο της διπλωματικής

Αντικείμενο εργασίας:

Αξιοποίηση δορυφορικών δεδομένων Sentinel 2 με σκοπό την εξαγωγή της πληροφορίας της κάλυψης γης στο νησί της Κρήτης.

Στόχοι:

- ❖ Ανάδειξη των δυνατοτήτων του Sentinel 2.
- ❖ Εξερεύνηση των καινούργιων δεδομένων.
- ❖ Αξιολόγηση των εργαλείων προεπεξεργασίας εικόνων Sentinel 2.
- ❖ Βελτίωση της μεθόδου τοπογραφικής διόρθωσης Minnaert με βάση την σχέση των συντελεστών Minnaert, των τοπογραφικών κλίσεων και των συνθηκών φωτισμού. Η τοπογραφική επίδραση στην ανακλαστικότητα της επιφάνειας της γης είναι ένα σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την ποσοτική ανάλυση στα δορυφορικά δεδομένα στις ορεινές περιοχές (Lu et al., 2008).
- ❖ Αξιολόγηση των δεδομένων Sentinel 2 σε εφαρμογή ταξινόμησης της κάλυψης γης.

- ❖ Εξέταση της απόδοσης των καναλιών του οργάνου καταγραφής MSI του δορυφόρου Sentinel 2 στον διαχωρισμό μεταξύ των διαφορετικών κατηγοριών κάλυψης γης.
- ❖ Δημιουργία προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου για την ορθή εξαγωγή της κάλυψης γης από τα καινούργια δορυφορικά δεδομένα.
- ❖ Ταξινόμηση όλων των εικονοστοιχείων της δορυφορικής εικόνας σε 13 βασικές ομάδες κάλυψης γης με βάση την φασματική τους υπογραφή.
- ❖ Ανανέωση των δεδομένων κάλυψης γης για την νήσο Κρήτη με βελτιωμένη χωρική ανάλυση με σκοπό την δημιουργία και προσφορά ποιοτικής θεματικής πληροφορίας κάλυψης γης με αξιόλογη ακρίβεια ταξινόμησης.
- ❖ Μέτρηση της καταλληλότητας του Sentinel-2 για την ανίχνευση μικρών χωρικών αντικειμένων. Το ελάχιστο μέγεθος ψηφίδας στα 10 m και τα στενά φασματικά κανάλια που έχουν επιλεγεί για την συγκεκριμένη τους απόκριση σε βασικές ιδιότητες της επιφάνειας της γης είναι πράγματι πολύ ελπιδοφόρα.

Σκοπός:

Ο κύριος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να καταγράψει με τη χρήση των εικόνων Sentinel 2 την πρόσφατη κάλυψη γης στο νησί της Κρήτης. Η θεματική πληροφορία της κάλυψης γης προτίθεται να συμβάλει ως ένα ενημερωτικό υπόβαθρο για μελλοντικές μελέτες, επηρεάζοντας τις πολιτικές και στρατηγικές, για την ορθή διαχείριση της περιοχής. Ακόμη, σκοπός της εργασίας είναι να καταδείξει την δυνατότητα εφαρμογής του ταξινομητή SVM στην λήψη πληροφοριών κάλυψης γης από το πολυφασματικό όργανο καταγραφής του Sentinel 2 και να γίνει αξιολόγηση της επίδοσής του.

Ερωτήματα:

- ❖ Πόσο αποτελεσματικά είναι τα εργαλεία προεπεξεργασίας των νέων δεδομένων.
- ❖ Κατά πόσο ο συνδυασμός των Sentinel 2 δεδομένων με τον ταξινομητή SVM είναι αποδοτικός στην ταξινόμηση της κάλυψης γης.
- ❖ Ο δορυφόρος Sentinel-2A παρέχει την δυνατότητα για χαρτογράφηση της κάλυψης γης με μεσαία χωρική ανάλυση στα 10m. Μέχρι ποιο βαθμό αυξάνεται η θεματική λεπτομέρεια στα αποτελέσματα της ταξινόμησης.

- ❖ Ποια κανάλια συμβάλλουν στον καλύτερο διαχωρισμό μεταξύ των κατηγοριών κάλυψης γης.
- ❖ Κατά πόσο ο συνδυασμός της χωρικής και φασματικής ανάλυσης μπορεί να χαρακτηρίσει την απόδοση του Sentinel-2 στην ανίχνευση αντικειμένων, ανεξάρτητα από τη σύνθεση του τοπίου.
- ❖ Κατά πόσο η ατμοσφαιρική και τοπογραφική διόρθωση συνεισφέρουν στην βελτίωση του ταξινομημένου αποτελέσματος.
- ❖ Πως συνδέεται η κάλυψη γης με το ανάγλυφο.
- ❖ Τι πρότυπα κάλυψης γης παρατηρούνται και σε ποια κατηγορία αναφέρονται.

Τέλος, τμήμα της εργασίας αποτελεί η δημιουργία μίας διαδικτυακής χαρτογραφικής εφαρμογής με αξιοποίηση τεχνολογιών που στηρίζονται σε Ελεύθερο Λογισμικό / Λογισμικό Ανοιχτού Κώδικα (ΕΛ/ΛΑΚ) για την δημοσιοποίηση των παραγόμενων θεματικών χαρτών κάλυψης γης στο παγκόσμιο ιστό. Μέσω της εφαρμογής παρέχονται λειτουργίες φόρτωσης και θέασης δημοφιλών χαρτογραφικών υποβάθρων όπως ο Open Street Map (OSM) και ο Stamen και δυνατότητες υπέρθεσης σε αυτά των επιπέδων κάλυψης γης της Ν. Κρήτης. Επιπρόσθετα, με τη χρήση διαδραστικών στατιστικών γραφημάτων παρέχεται πληροφόρηση σχετικά με τα ποσοστά έκτασης που καταλαμβάνει κάθε κατηγορία κάλυψης γης σε επίπεδο νομού.

1.2. Οργάνωση του τόμου

Η υπόλοιπη εργασία δομείται ως εξής: στην ενότητα 2 και 3 βρίσκεται το θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με την κάλυψη γης και τον δορυφόρο Sentinel 2, στην ενότητα 4 γίνεται μία μικρή περιγραφή της περιοχής μελέτης και στην ενότητα 5 παρουσιάζεται το σύνολο δεδομένων που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Στην επόμενη ενότητα την ενότητα 6 περιγράφονται οι μέθοδοι επεξεργασίας και ανάλυσης δορυφορικών δεδομένων Sentinel 2. Η ενότητα αυτή χωρίζεται σε υποενότητες που αφορούν 1) την προεπεξεργασία εικόνων όπου περιγράφονται όλες οι διαδικασίες που ακολουθούνται για την προετοιμασία των δορυφορικών εικόνων Sentinel 2 για την ταξινόμηση, 2) την δημιουργία μωσαϊκού όπου γίνεται σύνθεση των δορυφορικών εικόνων που καλύπτουν την περιοχή μελέτης σε μία ενιαία εικόνα, 3) την ταξινόμηση εικόνας όπου αναλύεται ο αλγόριθμος ταξινόμησης και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την υλοποίηση της ταξινόμησης εικόνας, 4) την μεθοδολογία εξαγωγής της πληροφορίας της ακτογραμμής και 5) την αξιολόγηση της ακρίβειας του αποτελέσματος ταξινόμησης. Στην ενότητα 7 περιλαμβάνονται τα αποτελέσματα της ταξινόμησης. Η ενότητα αυτή παρουσιάζει τα χαρτογραφικά αποτελέσματα με την θεματική πληροφορία της κάλυψης γης της νήσου Κρήτης. Στην συνέχεια, η ενότητα 8 αφορά στην ανάπτυξη διαδικτυακής χαρτογραφικής εφαρμογής η οποία φιλοξενεί τα θεματικά επίπεδα κάλυψης γης της νήσου Κρήτης. Στην τελευταία ενότητα, στην ενότητα 9 τοποθετούνται τα συμπεράσματα της εργασίας και οι μελλοντικές προτάσεις.

2. ΚΑΛΥΨΗ ΓΗΣ

Η κάλυψη γης αποτελεί σημαντικό παράγοντα σε περιπτώσεις γεωγραφικής ανάλυσης, από μελέτες φυσικής γεωγραφίας μέχρι και περιβαλλοντικές αναλύσεις και προσεγγίσεις χωροταξικού σχεδιασμού. Είναι μια δυναμική μεταβλητή διότι αντανακλά την αλληλεπίδραση μεταξύ των κοινωνικο-οικονομικών δραστηριοτήτων και περιβαλλοντικών αλλαγών και για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να ενημερώνεται συχνά (Rujoiu-Mare and Mihai, 2016). Σύμφωνα με την οδηγία INSPIRE (Harrison et al., 2013) η κάλυψη γης αντιπροσωπεύει την φυσική και βιολογική κάλυψη της επιφάνεια της Γης όπως είναι οι κατηγορίες που αφορούν τις τεχνητές επιφάνειες, τα δάση, τις γεωργικές εκτάσεις, τους υγροτόπους, τις (ημι-) φυσικές περιοχές και τα ύδατα.

Η κάλυψη γης αποτελεί θεμελιώδη μεταβλητή του συστήματος της γης στενά συνδεδεμένη με πολλά σημεία του ανθρώπινου και φυσικού περιβάλλοντος (Petrooulos et al., 2012). Η πληροφορία της κάλυψης γης παίζει έναν ρόλο κλειδί στην διαχείριση των φυσικών πόρων (Soffianian and Madanian, 2015; Wang et al., 2015; Wentz et al., 2006). Ακόμη, οι χάρτες κάλυψης γης είναι πρωταρχικά εισαγόμενα για τον σχεδιασμό και την μοντελοποίηση οικοσυστημικών δραστηριοτήτων (Helmer, 2008; Martinuzzi et al., 2009) και την διενέργεια περιβαλλοντικής ανάλυσης (Yousefi et al., 2015). Τις τελευταίες δεκαετίες η χαρτογράφηση της κάλυψης γης με χρήση δορυφορικών εικόνων έχει γίνει ευρέως δημοφιλής (Mohammady et al., 2015; Soffianian and Madanian, 2015; Van der Linden, 2007). Η ταξινόμηση της κάλυψης γης αποτελεί βασικό πεδίο έρευνας στην τηλεπισκόπηση. Οι θεματικοί χάρτες παρουσίασης των χωροχρονικών μεταβολών της κάλυψης γης που προέρχονται από δορυφορικά δεδομένα έχουν γίνει η βάση για την ανάλυση πολλών κοινωνικο-οικολογικών ζητημάτων (Kolios and Stylios, 2013; Paneque-Gálvez et al., 2013; Singh et al., 2014).

Η τηλεπισκόπηση προσφέρει μία μοναδική δυνατότητα για άντληση της πληροφορίας της χρήσης και κάλυψης γης μέσω της διαδικασίας της ερμηνείας και της ταξινόμησης εικόνας καλύπτοντας μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή και με υψηλή χρονική συχνότητα (Li, 2014). Συνεπώς η τηλεπισκόπηση παρέχει την ευκαιρία κατασκευής χαρτών κάλυψης γης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών εγκαίρως, για μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή ή επί συνεχή χρονική περίοδο ή διαχρονικά και με τρόπο πρακτικό και

οικονομικό (Langley et al., 2001; Nordberg and Evertson, 2005; Xie et al., 2008; Yousefi et al., 2015).

Η χαρτογράφηση της βλάστησης παρουσιάζει πολύτιμη πληροφορία για την κατανόηση του φυσικού και τεχνητού περιβάλλοντος μέσω της αναγνώρισης της κάλυψης της βλάστησης από τοπικές μέχρι και παγκόσμιες κλίμακες (Xie et al., 2008). Έχουν ληφθεί πολυάριθμες προσπάθειες για την χαρτογράφηση της βλάστησης σε περιφερειακό ή σε εθνικό επίπεδο. Ο χαρακτηρισμός και η χαρτογράφηση της κάλυψης γης είναι απαραίτητα για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των φυσικών πόρων (π.χ. ανάπτυξη, συντήρηση), την μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών μεταβλητών καθώς και για την κατανόηση της διανομής των οικοτόπων. Η τηλεπισκόπηση και η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας επιτρέπουν την παρατήρηση, αναγνώριση, χαρτογράφηση, αξιολόγηση και παρακολούθηση της κάλυψης γης σε ένα εύρος χωρικής, χρονικής και θεματικής κλίμακας αναφοράς. Ο προσδιορισμός των τύπων κάλυψης γης παρέχει βασικές πληροφορίες για την παραγωγή άλλων θεματικών χαρτών και καθιερώνει μια βάση σε δραστηριότητες παρακολούθησης.

Η παραγωγή χαρτών κάλυψης γης ήταν από τις πρώτες εφαρμογές τηλεπισκόπησης με χρήση πολυφασματικών δεδομένων. Ουσιαστικά, οι χάρτες κάλυψης γης δημιουργούνται χρησιμοποιώντας προσεγγίσεις ταξινόμησης εικόνας. Για τους σκοπούς της ταξινόμησης αποκλειστική είναι η εξάρτηση από φασματικές πληροφορίες και δεν απαιτούνται συμπληρωματικά σύνολα δεδομένων (Gómez et al., 2016). Η ταξινόμηση της κάλυψης γης είναι ένα σημαντικό και απαιτητικό πεδίο έρευνας στην τηλεπισκόπηση και η διαχρονική της χαρτογράφηση και παρακολούθηση έχει γίνει βασική πηγή πληροφοριών για την ανάλυση αρκετών περιβαλλοντικών ζητημάτων (Topaloglu et al., 2016).

Η έρευνα που εστιάζει στην ταξινόμηση της εικόνας έχει από καιρό τραβήξει την προσοχή της κοινότητας που ασχολείται με την τηλεπισκόπηση επειδή τα αποτελέσματα της ταξινόμησης είναι η βάση για πολλές περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές εφαρμογές (Maulik and Chakraborty, 2012). Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, όπως είναι ο αστικός και περιφερειακός σχεδιασμός και η διατήρηση και διαχείριση των φυσικών πόρων, η ενημερωμένη πληροφορία της κάλυψης γης είναι απαραίτητη (Li, 2014) και συχνά επιζητείται. Τα προϊόντα κάλυψης γης καλύπτουν μια σειρά από ανάγκες προς πληροφόρηση της επιστήμης και της πολιτικής και χρειάζεται

να παράγονται σε τακτά χρονικά διαστήματα σε διαφορετικές χωρικές και χρονικές κλίμακες. Η συμβολή της διαθεσιμότητας των δεδομένων, οι τεχνολογικές εξελίξεις και όλο και περισσότερο η ανάγκη για αναλυτικές πληροφορίες έχουν ως κίνητρο την εξέλιξη της έρευνας και την ύπαρξη επιχειρησιακών προσπαθειών για τη δημιουργία χρονικά, χωρικά και θεματικά βελτιωμένων βάσεων δεδομένων κάλυψης γης (Gómez et al., 2016).

Η εστίασή γίνεται σε δεδομένα και προϊόντα κάλυψης του εδάφους με επαρκή χρονική συχνότητα (δηλαδή σε ετήσια βάση) και χωρική ανάλυση για την υποστήριξη των προσπαθειών παρακολούθησης. Συγκεκριμένα, ενδιαφέρον παρουσιάζουν χρονοσειρές δορυφορικών δεδομένων μέσης χωρικής ανάλυσης (π.χ. 10-100 m), κυρίως Landsat και Sentinel 2. Η αυξημένη διαθεσιμότητα των δεδομένων παρατήρησης της γης σε ένα εύρος χωρικής και χρονικής ανάλυσης, σε συνδυασμό με τις ανάγκες για όλο και πιο σύνθετες πληροφορίες για την επιστήμη και την χάραξη πολιτικής καθώς και οι τεχνολογικές βελτιώσεις στην επεξεργασία εικόνας και στην αποθήκευση μεγάλου όγκου δεδομένων οδηγούν στην ανάπτυξη των μεθόδων και στην επακόλουθη δημιουργία προϊόντων κάλυψης γης σε συχνή βάση και με ακρίβεια.

Επί του παρόντος, υπάρχουν πολλοί χάρτες κάλυψης γης διαθέσιμοι, οι οποίοι παράγονται σε παγκόσμιο, ευρωπαϊκό, εθνικό ή περιφερειακό επίπεδο αλλά αυτοί δεν είναι κάθε φορά ακριβείς ή σε λεπτομερείς κλίμακες ή ενημερωμένοι σύμφωνα με τις τελευταίες αλλαγές.

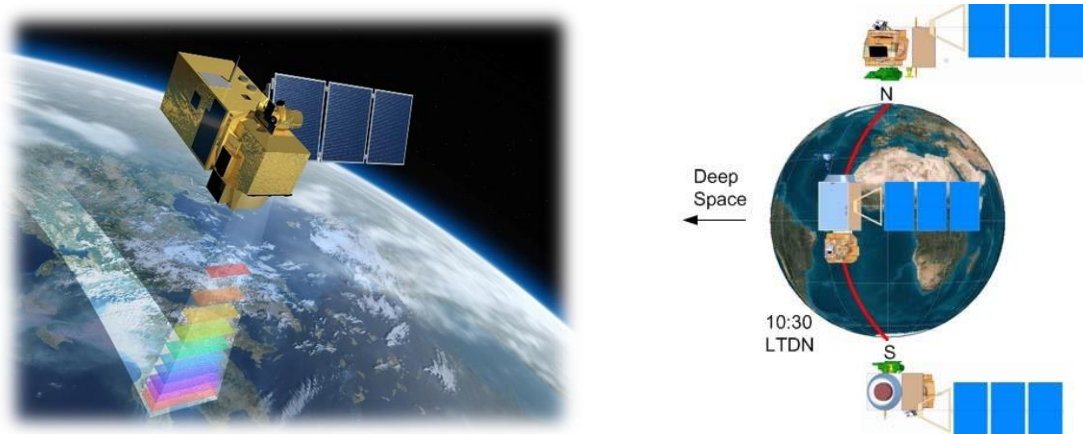
3. Ο ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ SENTINEL 2

Η αποστολή Sentinel 2 έχει αναπτυχθεί από τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA) ως μέρος της συνεργασίας της ESA με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή διαχείρισης του προγράμματος Copernicus. Οι δορυφόροι Sentinel 2 καλύπτουν περιορισμούς οι οποίοι εντοπίστηκαν από την προηγούμενη εμπειρία των δορυφόρων SPOT και Landsat (Hojas-Gascon et al., 2015). Έχουν μεγαλύτερη συχνότητα επίσκεψης κάθε σημείου, περισσότερα φασματικά κανάλια με στενότερο εύρος ζώνης στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και βελτιωμένη χωρική ανάλυση, με σκοπό την ενίσχυση υπηρεσιών όπως είναι ο έλεγχος της βλάστησης. Επομένως, η αποστολή Sentinel 2 παρέχει ένα πολυφασματικό σύστημα παρατήρησης της γης που συμπληρώνει τις παρατηρήσεις SPOT και Landsat διαθέτοντας στους χρήστες βελτιωμένα δεδομένα. Με την απόκτηση οπτικών εικόνων παγκοσμίως μεσαίας ανάλυσης αναμένονται σημαντικές βελτιώσεις στην χαρτογράφηση της κάλυψης γης, παρέχοντας ενισχυμένη συνέχεια του τύπου δεδομένων SPOT και Landsat (Isola et al., 2010; Wulder et al., 2015). Βέβαια, η χρήση δεδομένων διαφορετικών δορυφόρων για την διαχρονική μελέτη της κάλυψης γης αποτελεί πρόκληση λόγω των διαφορετικών τεχνικών χαρακτηριστικών τους.

Η υιοθέτηση της πολιτικής της ελεύθερης διανομής δεδομένων Sentinel και Landsat είναι καταλυτική στην ανάπτυξη υπηρεσιών τηλεπισκόπησης. Άλλωστε τα προϊόντα Sentinel και Landsat χρησιμεύουν σε παρόμοιες στοχευμένες εφαρμογές στους τομείς των φυσικών και ανθρωπογενών διαδικασιών. Παραδειγματικά μερικές από αυτές τις εφαρμογές αφορούν σε διαχείριση κινδύνου (π.χ. πλημμυρικά φαινόμενα), σε αλλαγές κάλυψης γης, στην αστική εξάπλωση, σε φυσικές καταστροφές, σε διαχείριση του νερού και προστασία του εδάφους, στην υποχώρηση παγετώνων, στην διαφύλαξη του δάσους και της τροφής, σε καλλιέργειες, σε υδροβιότοπους και σε παράκτιες περιοχές (Bontemps et al., 2015; Drusch et al., 2012; Santos and Goncalves, 2014).

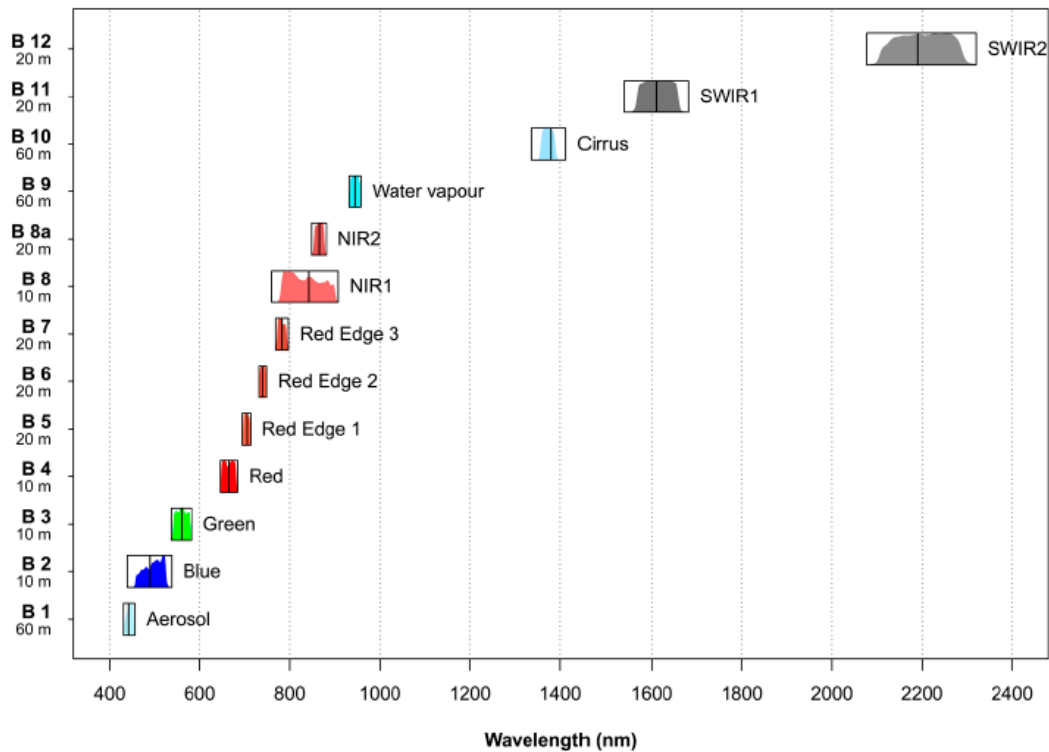
Η πλήρης αποστολή Sentinel 2 περιλαμβάνει δύο δίδυμους πολικής ηλιο-σύγχρονης τροχιάς δορυφόρους (Sentinel 2A, Sentinel 2B) που ακολουθούν την ίδια τροχιά με διαφορά φάσης 180° μεταξύ τους. Με τους δύο δορυφόρους η επίσκεψη κάθε σημείου θα γίνεται ανά πέντε μέρες. Με τον δορυφόρο Sentinel 2A που εκτοξεύτηκε επιτυχώς στις 22 Ιουνίου 2015 η επίσκεψη κάθε σημείου πραγματοποιείται κάθε δέκα μέρες.

Ο δορυφόρος Sentinel 2 εκτελεί τροχιά ηλιο-σύγχρονη σε υψόμετρο 786 χιλιομέτρων με μια κλίση 98.5 μοιρών, για 14.3 στροφές ανά ημέρα, στις 10:30 τοπική ώρα φθίνοντα (descending) κόμβου που έχει επιλεγεί για την ελαχιστοποίηση της νεφοκάλυψης και την εξασφάλιση ενός καλού ηλιακού φωτισμού της επιφάνειας της Γης (Σχ. 1).



Σχήμα 1. Ο δορυφόρος Sentinel 2 και η τροχιά του. Πηγή: (<http://www.cesbio.ups-tlse.fr>, <http://spaceflight101.com/copernicus/sentinel-2>).

Το πολυφασματικό όργανο καταγραφής (Multispectral Instrument – MSI) του Sentinel 2 δημιουργεί οπτικές εικόνες σε 13 φασματικά κανάλια σε φασματικά εύρη από τη ζώνη του οπτικού έως τη ζώνη υπέρυθρων βραχέος μήκους κύματος (Short Wave Infrared - SWIR). Το MSI έχει μεγάλο πλάτος σάρωσης στα 290 km, με την χωρική ανάλυση να φτάνει τα 10 m στα κανάλια του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου. Από τα 13 φασματικά κανάλια τα 4 αφορούν τα κανάλια B2, B3, B4 του ορατού και το B8 του εγγύς υπέρυθρου 1 (NIR1) με χωρική ανάλυση στα 10 m, τα 5 με χωρική ανάλυση στα 20 m αφορούν στα κανάλια B5, B6, B7 της κόκκινης ακμής (red edge), B8a του εγγύς υπέρυθρου 2 (NIR2), B11 και B12 του βραχύ υπέρυθρου (SWIR) και τα 3 με χωρική ανάλυση στα 60 m τα οποία συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική διόρθωση και στην ανίχνευση συννέφων (Σχ. 2). Το κέντρο του πρώτου καναλιού είναι τα 433 nm και του τελευταίου 2190 nm.



Σχήμα 2. Χαρακτηριστικά του πολυφασματικού οργάνου καταγραφής MSI του Sentinel 2.
Πηγή: (Immitzer et al., 2016).

Στον πίνακα 1 ακολουθεί σύγκριση μεταξύ των προδιαγραφών εικόνων Landsat και Sentinel 2 προς ανάδειξη των διαφορών τους.

Ο Sentinel 2 αποτελεί ενισχυμένη συνέχεια του Landsat με στενότερο εύρος μήκους κύματος καναλιών για τη βελτίωση της αναγνώρισης χαρακτηριστικών, με πρόσθετα κόκκινα κανάλια για την αξιολόγηση της βλάστησης και αφιερωμένα κανάλια για την βελτίωση της ατμοσφαιρικής διόρθωσης και την ανίχνευση Cirrus σύννεφων.

Ακολουθούν παρατηρήσεις από την σύγκριση μεταξύ Landsat και Sentinel 2:



Οι Landsat 8 and Sentinel 2 παρέχουν πιο στενά κανάλια σε σχέση με τους προηγούμενους δορυφόρους Landsat και διαθέτουν καλύτερη ραδιομετρική ανάλυση στα 12 bit σε σχέση με τα 8 bit των παλαιότερων Landsat οργάνων καταγραφής. Το στένεμα του πλάτους των φασματικών καναλιών Sentinel 2 περιορίζει την επίδραση των ατμοσφαιρικών συστατικών, συμπεριλαμβανομένων των υδρατμών. Το κανάλι του εγγύς υπέρυθρου του Landsat 7 (0.77-0.90 μm) βρέθηκε πλούσιο σε υδρατμούς

με απουσία ευαισθησίας σε παραμέτρους όπως η περιεκτικότητα του εδάφους σε οξείδιο σιδήρου. Για τον λόγο αυτό σχεδιάστηκε το κανάλι B8a το οποίο διορθώνει τα παραπάνω. Για την διόρθωση των συννέφων Cirrus σχεδιάστηκε το κανάλι B10 με κεντρική τιμή 1375 nm. Στην βελτίωση των ατμοσφαιρικών διορθώσεων συνεισφέρουν τα δύο επιπρόσθετα κανάλια για την ανίχνευση του αεροζόλ και της υγρασίας. Το κανάλι που είναι αφιερωμένο για την ανίχνευση της υγρασίας είναι ακόμη μία πρωτοτυπία του Sentinel 2.



Το όργανο καταγραφής MSI του Sentinel 2 έχει πλάτος σάρωσης 290 km σε αντίθεση με τη σάρωση των οργάνων καταγραφής ETM+ και OLI-TIRS των Landsat 7 και 8 αντίστοιχα στα 185 km. Η ευρεία κάλυψη ευνοεί μελέτες σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο.



Η συχνότητα επίσκεψης σημείου ανά 5 μέρες με τον δορυφόρο Sentinel 2 συνεπάγεται μεγαλύτερες πιθανότητες απουσίας νεφοκάλυψης στην περιοχή μελέτης. Το διάστημα των 16 ημερών στην περίπτωση του Landsat είναι αρκετά μεγαλύτερο.



Μία ακόμη διαφορά έγκειται στην απουσία θερμικών καναλιών στον αισθητήρα Sentinel 2. Τα θερμικά δεδομένα θα μπορούσε να παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε μετρήσεις θερμοκρασίας της επιφάνειας της γης, για την ατμοσφαιρική ρύθμιση και για τον έλεγχο της εξατμισοδιαπνοής και της κατάστασης των υδάτων (Whitcraft et al., 2015).



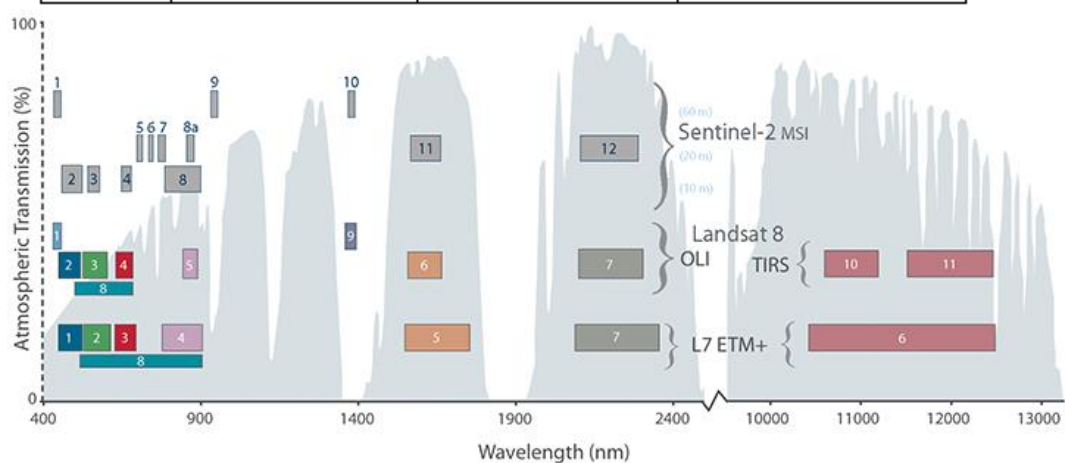
Ακόμη, ο Sentinel 2 παρέχει εικόνες καλύτερης χωρικής ανάλυσης. Στο σχήμα 4 γίνεται αντιπαράθεση μίας εικόνας Landsat 8 και μίας εικόνας Sentinel 2A της ίδιας περιοχής και της ίδιας εστίασης. Η εικόνα Sentinel 2A υπερέχει της αντίστοιχης Landsat 8 τόσο στην χωρική ανάλυση και διακριτοποίηση των οντοτήτων όσο και στην ανάδειξη των χρωμάτων της κάθε κατηγορίας κάλυψης γης.

Ο Sentinel 2 θα συμβάλλει σημαντικά, λαμβάνοντας υπόψιν και τα παραπάνω, στην παρακολούθηση της κάλυψης γης.

Πίνακας 1. Σύγκριση προδιαγραφών εικόνων Landsat και Sentinel 2.

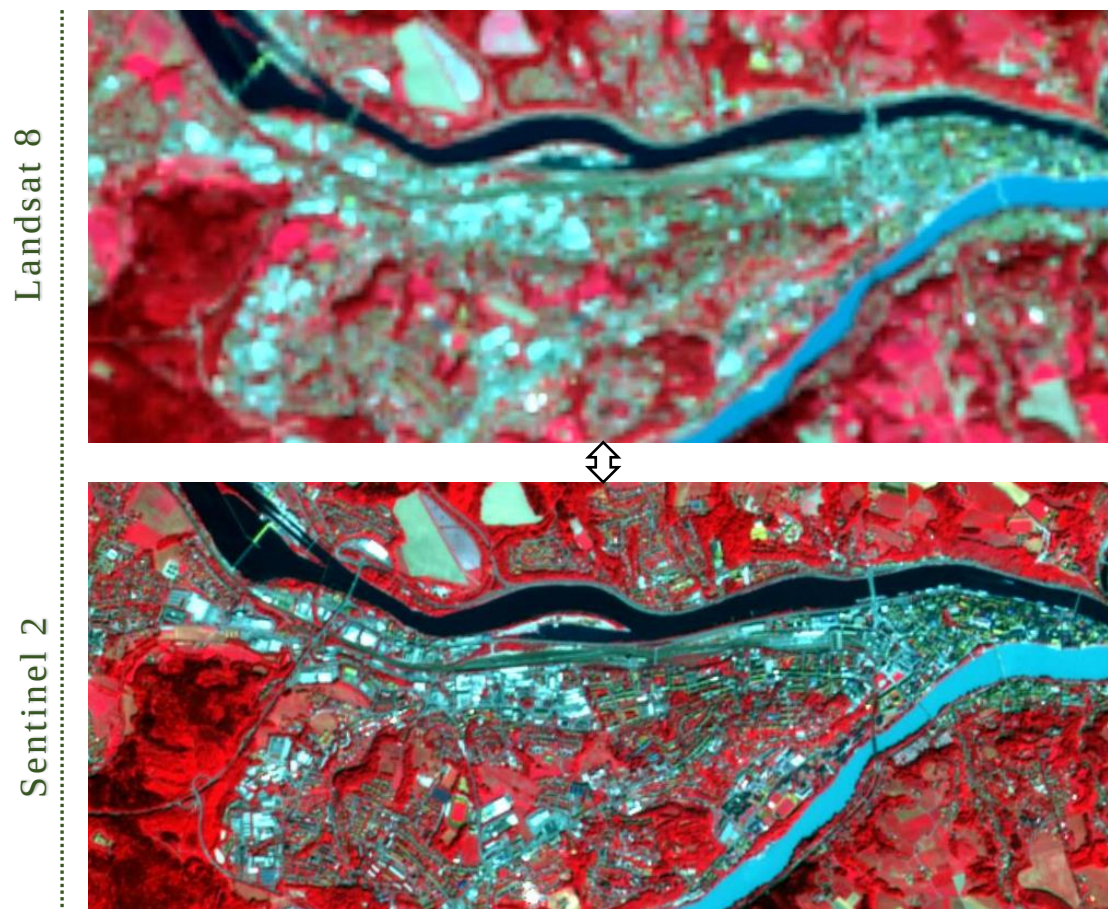
Πηγή: (Santos and Goncalves, 2014)

Parameter	Landsat-7 ETM+		Landsat-8 OLI		Sentinel-2 MSI	
Spectral bands	Band	Wavelength μm	Band	Wavelength μm	Band	Wavelength μm
	-	-	1 (coastal / aerosol)	0.43-0.45	B1 (blue)	0.43-0.45
	1 (blue)	0.45-0.52	2 (blue)	0.45-0.52	B2 (blue)	0.46-0.52
	2 (green)	0.52-0.60	3 (green)	0.52-0.60	B3 (green)	0.54-0.58
	3 (red)	0.63-0.69	4 (red)	0.63-0.68	B4 (red)	0.65-0.68
	-	-	-	-	B5 (red edge)	0.70-0.71
	-	-	-	-	B6 (red edge)	0.73-0.75
	4 (NIR)	0.77-0.90	-	-	B7 (red edge)	0.77-0.79
	-	-	-	-	B8 (NIR)	0.78-0.90
	-	-	5 (NIR)	0.84-0.88	B8a (NIR)	0.86-0.88
	-	-	-	-	B9 (water vapor)	0.93-0.95
	-	-	9 (cirrus)	1.36-1.39	B10 (cirrus)	1.37-1.39
	5 (SWIR1)	1.55-1.75	6 (SWIR1)	1.56-1.66	B11 (SWIR1)	1.57-1.66
	7 (SWIR2)	2.09-2.35	7 (SWIR2)	2.10-2.30	B12 (SWIR2)	2.10-2.28
	8 (PAN)	0.52-0.90	8 (PAN)	0.50 - 0.68	-	-
	L7 ETM+ thermal	-	Landsat8 TIRS	-	-	-
	6 (TIR)	10.40-12.50	10 (TIR1)	10.3-11.3	-	-
	-	-	11 (TIR2)	11.5-12.5	-	-
GSD at nadir	30 m VNIR 15 m Pan 100 (30) m TIR		30 m VNIR 15 m Pan 100 (30) m TIR		10 m (B2, B3, B4, B8) 20 m (B5, B6, B7, B8a, B11, B12) 60 m (B1, B9, B10)	
Quantization	8 bit		12 bit		12 bit	
Onboard Calibration	Yes		Yes		Yes	
Off-axis viewing	Up to 7.5 deg off Nadir		Up to 7.5° off nadir		Up to 10.3° off nadir (w/o pointing)	
Orbit altitude	705 km		705 km		786 km	
Swath width	185km		185km		290km	



Σχήμα 3. Σύγκριση καναλιών μεταξύ του Landsat 7 και 8 και του Sentinel 2.

Πηγή: (<http://landsat.gsfc.nasa.gov>)



Σχήμα 4. Η επάνω εικόνα αποκτήθηκε από τον Landsat 8 (2015) με συνδυασμό καναλιών near-infrared, red, green (5,4,3) και η κάτω από τον Sentinel 2 (2015) με συνδυασμό καναλιών near-infrared, red, green (8,4,3). Πηγή: (<http://esri-de-6.maps.arcgis.com/apps/MapSeries>).

Στον πίνακα 2 ακολουθεί βιβλιογραφική ανασκόπηση των πρόσφατων εργασιών που χρησιμοποίησαν Sentinel 2 δορυφορικά δεδομένα. Ο ρόλος του έγκειται στην ανάδειξη των πρώτων εμπειριών από την αξιοποίηση των νέων δεδομένων σε μία γκάμα θεματολογίας. Τα πρώτα συμπεράσματα τονίζουν την αξία των εικόνων Sentinel 2 και την θετική συμβολή τους στην απάντηση πληθώρας ερωτημάτων που θέτει η επιστημονική κοινότητα. Στο άμεσο μέλλον αναμένονται εκπληκτικά αποτελέσματα. Μέχρι τότε γίνεται έρευνα πάνω στα νέα δεδομένα και στην δημιουργία – βελτιστοποίηση των εργαλείων διαχείρισης και επεξεργασίας τους.

Πίνακας 2. Ανασκόπηση των πρώτων εργασιών που εξερεύνησαν τα δεδομένα Sentinel 2.

Πηγή	Τίτλος	Θέμα
(Radoux et al., 2016)	Sentinel-2's Potential for Sub-Pixel Landscape Feature Detection	Μέτρηση της καταλληλότητας του Sentinel 2 για την ανίχνευση μικρών χωρικών αντικειμένων που παίζουν ρόλο στα οικολογικά δίκτυα.
(Immitzer et al., 2016)	First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe	Αξιολόγηση της καταλληλότητας των Sentinel 2 δεδομένων για λεπτομερή ταξινόμηση καλλιεργειών και δάσους σε είδη.
(Topaloglu et al., 2016)	Assessment of classification accuracies of Sentinel 2 and Landsat 8 data for land cover / use mapping	Σύγκριση μεθόδων ταξινόμησης [Maximum Likelihood (MLC), Support Vector Machine (SVM)] σε δεδομένα Sentinel 2 και Landsat 8. Υπεροχή των αποτελεσμάτων της SVM σε δεδομένα Sentinel 2.
(Kääb et al., 2016)	Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part I: Radiometric and Geometric Performance, and Application to Ice Velocity	Ανάλυση της ραδιομετρικής και γεωμετρικής απόδοσης των δεδομένων Sentinel-2A με έμφαση σε εφαρμογές σε παγετωνικά περιβάλλοντα, και αξιολόγηση των δυνατοτήτων για μέτρηση της ροής των παγετώνων. Ενίσχυση της παγκόσμιας παρακολούθησης των παγετώνων και της μάζας πάγου διαχρονικά.
(Paul et al., 2016)	Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies, and Comparison to Landsat 8	Συνδυασμοί φασματικών καναλιών για την χαρτογράφηση παγετώνων, σύγκριση των οριοθετημένων παγετώνων από Sentinel 2 και Landsat 8 δεδομένα, χαρτογράφηση πάγου και χιονιού σε Sentinel 2 δεδομένα.
(Lefebvre et al., 2016)	Monitoring Urban Areas with Sentinel-2A Data: Application to the Update of the Copernicus High Resolution Layer Imperviousness Degree	Χρήση ξεχωριστών ταξινομημένων εικόνων οι οποίες συγχέονται βάσει της θεωρίας Dempster-Shafer για την ενίσχυση της ακρίβειας της ταξινόμησης και την δημιουργία μίας εικόνας απαλλαγμένης από σύννεφα. Ένας δείκτης υφής (PANTEX) αντιπροσωπεύει με ακρίβεια τις αστικές περιοχές.

Συνέχεια του πίνακα 2.		
(Pesaresi et al., 2016)	Assessment of the Added-Value of Sentinel-2 for Detecting Built-up Areas	Η προστιθέμενη αξία των Sentinel 2 δεδομένων στην ανίχνευση αστικών περιοχών.
(Toming et al., 2016)	First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery	Έλεγχος της καταλληλότητας των Sentinel 2 δεδομένων για τη χαρτογράφηση των διαφορετικών παραμέτρων εξέτασης της ποιότητας του νερού λίμνης. • Βρέθηκε πως τα Sentinel 2 δεδομένα έχουν μεγάλες δυνατότητες στην εξέταση της ποιότητας λιμνών (χαρτογράφηση διαφόρων συγκεντρώσεων όπως χλωροφύλλης, διαλυμένης οργανικής ύλης, διαλυμένου οργανικού άνθρακα).
(Yan et al., 2016)	An Automated Approach for Sub-Pixel Registration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) Imagery	Μια προσέγγιση για την αυτόματη εγγραφή εικόνας Sentinel-2 σε εικόνα Landsat-8.
(Du et al., 2016)	Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band	Χρήση φασματικών δεικτών νερού για την χαρτογράφηση υδάτινων σωμάτων με Sentinel 2 δεδομένα. • Ενίσχυση του διαχωρισμού των υδάτινων σωμάτων από τους υπόλοιπους τύπους κάλυψης γης.
(Huang et al., 2016)	Separability Analysis of Sentinel-2A Multi-Spectral Instrument (MSI) Data for Burned Area Discrimination	Χρήση φασματικών καναλιών Sentinel 2 και δεικτών για την ανίχνευση καμένων εκτάσεων.

Ακολουθεί αναφορά των κύριων σημείων της εργασίας του Pesaresi et al., (2016).

1. Χρήση των φασματικών καναλιών b2, b3, b4, b8 χωρικής ανάλυσης 10 μέτρων για την δυνατότητα τους στην διακριτοποίηση διαφορετικών τύπων κάλυψης γης.
2. Βελτίωση της ποιότητας των ταξινομημένων τεχνητών επιφανειών με Sentinel 2 συγκριτικά με Landsat.
3. Μετρίαση του προβλήματος σύγχυσης μεταξύ των γυμνών εδαφών σε καλλιέργειες και των περιοχών τεχνητής επιφάνειας.
4. Άμβλυνση της φασματικής σύγχυσης των αποτελεσμάτων του Landsat σε εκείνα του Sentinel 2 ειδικά για ασφαλτοστρωμένους δρόμους και άγονη γη σε γεωργικές εκτάσεις.
5. Παρατήρηση του δύσκολου εντοπισμού μικρών τεχνητών επιφανειών περιτριγυρισμένων και με Sentinel 2 δεδομένα. Εκεί απαιτούνται δεδομένα καλύτερης χωρικής ανάλυσης.

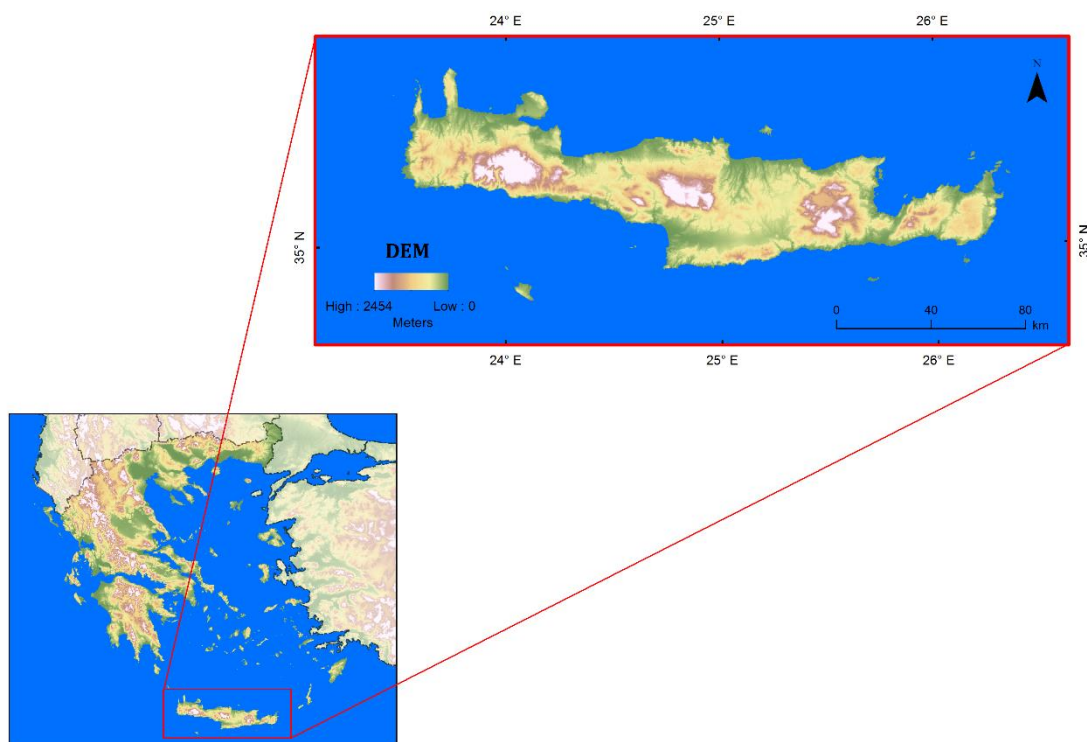
Συμπερασματικές προτάσεις:

6. Ο δορυφόρος είναι κατάλληλος για την χαρτογράφηση και παρακολούθηση ανθρώπινων οικισμών σε παγκόσμιο επίπεδο εξαιτίας του μεγάλου πλάτους σάρωσης, της συχνής επίσκεψης σημείου και της καλής χωρικής ανάλυσης.
7. Η πρόσφατη διαθεσιμότητα των δεδομένων Sentinel-2 αναμένεται να φέρει τη χαρτογράφηση κάλυψης γης και παρακολούθησης σε ένα πρωτοφανές επίπεδο.

Βελτίωση στην ταξινόμηση της κάλυψης γης που αναφέρεται στο σημείο 2 σημειώθηκε και στην εργασία του Topaloglu et al., (2016). Σε γενικές γραμμές, μελλοντικά οι ακρίβειες ταξινόμησης αναμένονται υψηλότερες (Immitzer et al., 2016), δεδομένου ότι υποστηρίζεται και η χρήση πολλαπλών διαχρονικών δεδομένων σύντομου χρονικού διαστήματος μεταξύ τους. Επομένως, συνοψίζοντας τα παραπάνω, γίνεται λόγος για την βελτίωση της ποιότητας των αποτελεσμάτων με έμφαση σε εφαρμογές ταξινόμησης της κάλυψης γης.

4. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η Κρήτη είναι το πρώτο σε μέγεθος νησί του ελληνικού χώρου με έκταση 8.336 km². Το μήκος της είναι 260 Km και το πλάτος της κυμαίνεται από 60 km μέχρι και 12 km στο στενό της Ιεράπετρας. Προς βορρά βρέχεται από το Κρητικό Πέλαγος και προς νότο από το Λιβυκό. Μαζί με τις νοτιότερες νησίδες (Γαύδο, Γαυδιπούλα, Παξιμάδια, Χρυσή) είναι η νοτιότερη περιοχή της Ευρώπης (Σχ. 5).

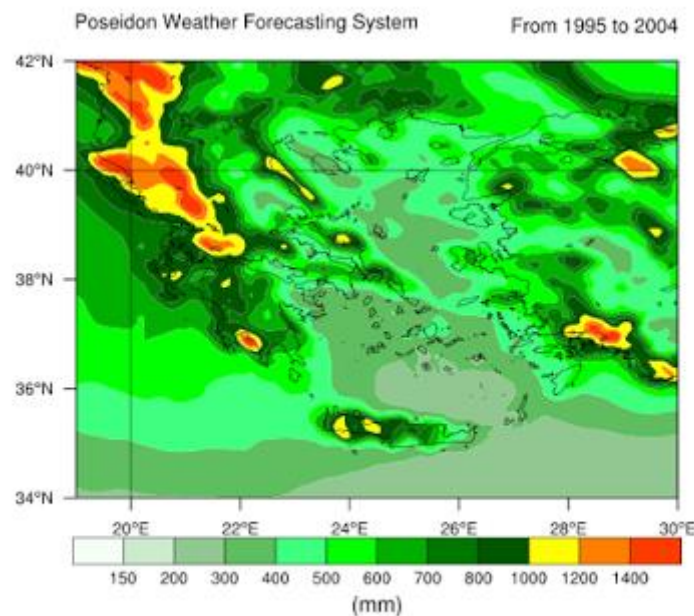


Σχήμα 5. Η θέση της περιοχής μελέτης στην Ελλάδα και το πλαίσιο εστίασης στην περιοχή και ανάδειξης του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους (Aster GDEM v2).

Χαρακτηριστικό της τοπογραφίας του νησιού είναι οι κυρίαρχοι ορεινοί όγκοι. Τρεις μεγάλες οροσειρές διασχίζουν το νησί, τα Λευκά όρη στο νομό Χανίων, ο Ψιλορείτης στην κεντρική Κρήτη και το όρος Δίκτη στο νομό Λασιθίου. Οι ορεινοί όγκοι είναι κατά κύριο λόγο ασβεστολιθικοί και η καρστική διάβρωση είναι έντονη. Το πέτρωμα είναι πορώδες και δεν επιτρέπει την επιφανειακή συγκέντρωση των υδάτων.

Η μεγαλύτερη πεδιάδα στην Κρήτη είναι η πεδιάδα της Μεσσαράς στην νότια Κρήτη στον νομό Ηρακλείου. Ανάμεσα στα βουνά σχηματίζονται οροπέδια όπως του Ομαλού και του Ασκύφου στα Λευκά όρη, της Νίδας στον Ψιλορείτη και του Λασιθίου στο όρος Δίκτυ. Διοικητικά διαιρείται σε τέσσερις νομούς, τον νομό Χανίων, τον νομό Ρεθύμνου, τον νομό Ηρακλείου και τον νομό Λασιθίου.

Το κλίμα της Κρήτης χαρακτηρίζεται γενικά ως εύκρατο μεσογειακό, το οποίο στους ορεινούς όγκους τείνει να διαφοροποιηθεί παρουσιάζοντας χαρακτηριστικά ηπειρωτικού τύπου. Λόγω της τοπογραφίας σημειώνονται κλιματικές διαφοροποιήσεις ανάμεσα στο ανατολικό και δυτικό τμήμα και ανάμεσα στις βόρειες και νότιες ακτές διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στην εξάπλωση και προσαρμογή των διαφόρων φυτικών ειδών. Σε σχέση με την ηπειρωτική Ελλάδα η Κρήτη διανύει πιο εκτενή ξηρή περίοδο. Ακόμη, από τα δυτικά προς τα ανατολικά έχει παρατηρηθεί μείωση του μέσου ετήσιου ύψους βροχής (Panagos et al., 2016; Βάρλας et al., 2013), (Σχ. 6).

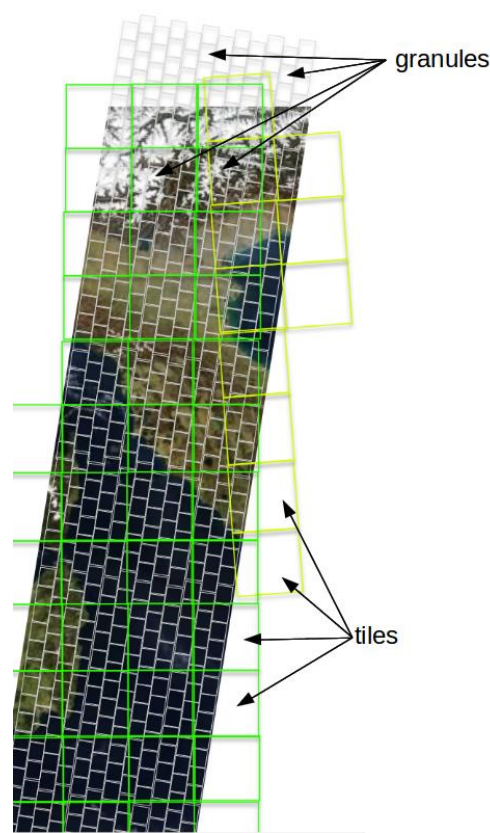


Σχήμα 6. Χαρτογραφική αποτύπωση του μέσου ετήσιου ύψους βροχής.

Πηγή: (Βάρλας et al., 2013),

5. ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ DEM

Τα Sentinel 2 προϊόντα (Level 1C) διατίθενται μέσω του Sentinels Scientific Data Hub ως σύνολα δεδομένων ορθοεικόνων των 100 km² σε UTM/WGS84 προβολή με την πληροφορία της ανακλαστικότητας στην κορυφή της ατμόσφαιρας (top-of-atmosphere reflectance). Το UTM (Universal Transverse Mercator) σύστημα χωρίζει την επιφάνεια της γης σε 60 ζώνες. Κάθε ζώνη UTM έχει κάθετο πλάτος 6° γεωγραφικού μήκους και οριζόντιο πλάτος 8° γεωγραφικού πλάτους. Με το σύστημα αυτό τα πλακίδια (tiles) καλύπτονται είτε πλήρως είτε μερικώς από τα δεδομένα της εικόνας. Τα μερικώς καλυμμένα αντιστοιχούν στα άκρα της λωρίδας σάρωσης. Το κάθε πλακίδιο (tile) έχει μέγεθος 500 MB. Τα Level 1C προκύπτουν από τα Level 1B προϊόντα τα οποία είναι ραδιομετρικά διορθωμένα σε τιμές

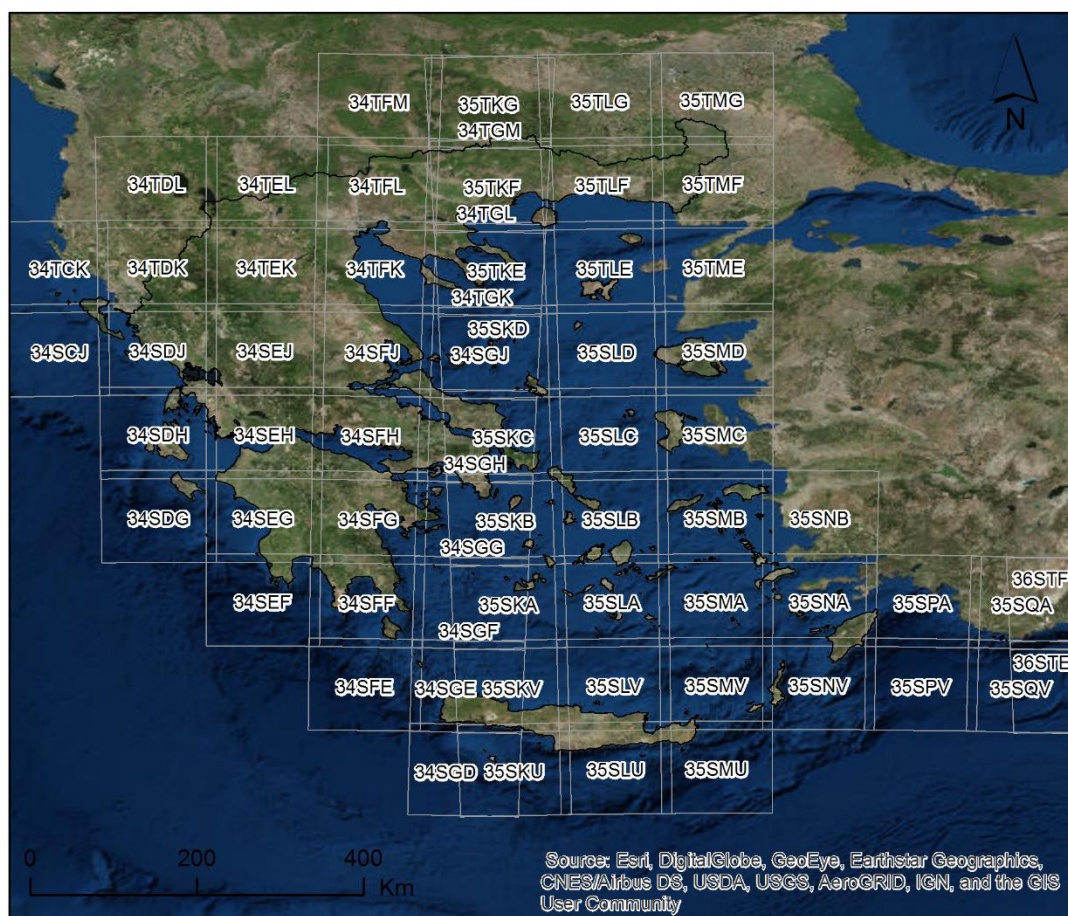


Σχήμα 7. Διαφορά πλακιδίων Level 1B (granules) και Level 1C (tiles). Πηγή: <https://eox.at/wp-content/>.

ακτινοβολίας στην κορυφή της ατμόσφαιρας και έχουν την γεωμετρία του δορυφόρου. Το κάθε πλακίδιο (granule) έχει έκταση 25×23 km² (Σχ. 7).

Κάθε tile αποτελείται από 13 JPEG-2000 εικόνες όσα και τα φασματικά κανάλια ενώ κάθε προϊόν περιλαμβάνει ένα σύνολο από tiles (περίπου 10-16). Τον ελληνικό χώρο συνθέτουν 64 tiles (εκ των οποίων τα 29 ανήκουν στην ζώνη 34 και τα υπόλοιπα 35 στην ζώνη 35) το καθένα από τα οποία διαθέτει μοναδικό κωδικό (Σχ. 8). Η κωδικοποίηση αυτή εξυπηρετεί στην διαχείριση και οργάνωση των Sentinel 2 δεδομένων. Για την εξερεύνηση των προϊόντων παρέχεται η εργαλειοθήκη Sentinel 2 (SENTINEL-2 Toolbox) εντός της πλατφόρμας SNAP, η οποία μαζί με τον κώδικά της διατίθεται ελεύθερα από την ESA¹.

¹ Step – science toolbox exploitation platform (<http://step.esa.int/main/download/>).
User discussion forum: step forum.



Σχήμα 8. Πλέγμα πλακιδίων δορυφορικών προϊόντων Sentinel 2 στον ελληνικό χώρο.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας τα Sentinel 2 δεδομένα αποκτήθηκαν μέσω του Sentinels Scientific Data Hub και καλύπτουν το σύνολο του ελληνικού χώρου. Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν αφορούν την εποχή της άνοιξης 2016 (Μάρτιος, Απρίλιος, Μάιος) και είναι οι πρώτες ανοιξιάτικες εικόνες του Sentinel 2 για την Ελλάδα απαλλαγμένες από σύννεφα (καθόλου σύννεφα ή πολύ μικρό ποσοστό συννέφων τα οποία εντοπίζονται κυρίως στον θαλάσσιο χώρο). Η επιλογή της άνοιξης έχει ιδιαίτερη σημασία. Η εικόνα την άνοιξη διακρίνεται μεταξύ της νέας ανάπτυξης της βλάστησης των χειμερινών καλλιεργειών και λιβαδιών, της γερασμένης βλάστησης σε χέρσα χωράφια και του εκτιθέμενου εδάφους μετά το όργωμα για τις θερινές καλλιέργειες (Prishchepov et al., 2012). Οι εικόνες που αποκτούνται άνοιξη (προς τα τέλη) ή και αργότερα στις αρχές φθινοπώρου οδηγούν κατά πάσα πιθανότητα σε υψηλότερη

ακρίβεια ταξινόμησης δασών (Immitzer et al., 2016). Επομένως, η επιλογή της εποχής δεν έγινε τυχαία για την συγκεκριμένη εργασία.

Χρήσιμες πληροφορίες για τα Sentinel 2 δεδομένα εντοπίζονται στα μεταδεδομένα. Παραδειγματικά στον πίνακα 3 τοποθετούνται τα στοιχεία εικόνων που αφορούν την Κρήτη όπως είναι το ύψος και το αζιμούθιο ηλίου που αποτελούν χρήσιμες πληροφορίες και απαραίτητες στην ενότητα της τοπογραφικής διόρθωσης.

Πίνακας 3. Δεδομένα Sentinel 2 - Copernicus Sentinel data [2016].

Ημερομηνία απόκτησης	Ώρα απόκτησης	Κωδικός πλακιδίου	Ύψος ηλίου	Αζιμούθιο ηλίου
2016-04-18	09:04:32 UTC	35SMU	62.35°	145.29°
2016-04-18	09:04:32 UTC	35SLU	61.84°	143.30°
2016-04-18	09:04:32 UTC	35SKU	61.31°	141.37°
2016-05-01	09:18:49 UTC	34SGE	65.48°	142.22°
2016-05-01	09:18:49 UTC	35SKV	65.71°	143.17°
2016-04-28	09:00:22 UTC	35SLV	64.16°	141.38°
2016-04-28	09:00:22 UTC	35SMV	64.69°	143.50°

Το ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου (digital elevation model – DEM) που αξιοποιήθηκε στην εργασία είναι το ASTER GDEM v.2 χωρικής ανάλυσης 28 m (Σχ. 9). Για τις ανάγκες της τοπογραφικής διόρθωσης πραγματοποιήθηκε προβολικός μετασχηματισμός του DEM σε WGS84 ζώνη 34 και WGS84 ζώνη 35 για τις δύο διαφορετικές ζώνες και αναδόμηση (resampling) στα 10 μέτρα με βάση τη μέθοδο bilinear ώστε να συμπίπτει η χωρική πληροφορία των εικόνων με του DEM (ένα βήμα απαραίτητο για την υλοποίηση των διαδικασιών της τοπογραφικής διόρθωσης). Με την αναδόμηση διατηρείται η αρχική πληροφορία και αλλάζει το μέγεθος της χωρικής μονάδας της ψηφίδας. Το ASTER GDEM v.2 ² είναι ελεύθερα διαθέσιμο ³ με καλή χωρική διακριτική ικανότητα για την κάλυψη των απαιτήσεων της εργασίας.

² v.2: version 2, διαθέσιμη από το 2011.

³ Απόκτηση DEM από πηγή: (<http://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>).



Σχήμα 9. Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου Ελλάδας.

6. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL 2

6.1. Προεπεξεργασία εικόνων

Η προεπεξεργασία εικόνας αφορά όλα τα προπαρασκευαστικά βήματα που είναι απαραίτητα για την βελτίωση της ποιότητας των αρχικών εικόνων (Xie et al., 2008). Αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά στάδια της ψηφιακής επεξεργασίας και θα πρέπει να γίνεται πολύ προσεκτικά διότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα επόμενα στάδια όπως είναι η βελτίωση και ταξινόμησή της εικόνας. Στην παρούσα εργασία τα βήματα της προεπεξεργασίας αφορούν κατά σειρά την ατμοσφαιρική διόρθωση, την γεωαναφορά, την τοπογραφική διόρθωση, τον προβολικό μετασχηματισμό για την δημιουργία μωσαϊκού και την βελτίωση εικόνας.

6.1.1. Ατμοσφαιρική διόρθωση

Η ακτινοβολία που επιστρέφει στο διάστημα και καταγράφεται από τον δορυφορικό αισθητήρα επηρεάζεται από την επιφάνεια ανάκλασης και από τα συστατικά της ατμόσφαιρας τα οποία μεταβάλλονται στον χώρο-χρόνο (Huang et al., 2016; Καρτάλης and Φείδας, 2006). Η πολλαπλή σκέδαση της ανακλώμενης ακτινοβολίας μεταξύ της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας εισάγει μία εξάρτηση μεταξύ της ανάκλασης επιφάνειας και της συνεισφοράς της ατμόσφαιρας στην TOA (top of atmosphere - κορυφή της ατμόσφαιρας) ανάκλαση (Huang et al., 2016). Η έντονη σκέδαση της ορατής ακτινοβολίας από την ατμόσφαιρα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των κατώτερων τιμών στα κανάλια του ορατού, ιδιαίτερα στα μικρότερα μήκη κύματος δίνοντας μία ομιχλώδη εμφάνιση στην εικόνα (haze). Με την ατμοσφαιρική διόρθωση διορθώνεται η ατμοσφαιρική σκέδαση αλλά και η ατμοσφαιρική απορρόφηση η οποία εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από το ποσό των υδρατμών, την ποσότητα και κατανομή τους (Καρτάλης and Φείδας, 2006).

Για την υλοποίηση της ατμοσφαιρικής διόρθωσης και την μετατροπή των Sentinel 2 L1C προϊόντων, με μετρούμενη ανακλαστικότητα στην κορυφή της ατμόσφαιρας, σε L2A προϊόντα, με μετρούμενη ανακλαστικότητα κάτω από την ατμόσφαιρα – ανακλαστικότητα επιφανείας, χρησιμοποιήθηκε ο επεξεργαστής Sen2Cor 2.2.1⁴. Η έκδοση αυτή έτρεξε σε λειτουργικό σύστημα Windows 10 (64 bit). Επίσης, η εφαρμογή Sen2Cor λειτουργεί κάτω από την ομπρέλα του πακέτου διανομής Anaconda (Python 2.7). Είναι χτισμένη με Anaconda2 v.4.0. Συνεπώς η εγκατάσταση του Anaconda προηγείται της εγκατάστασης του Sen2Cor. Να σημειωθεί ότι, ο επεξεργαστής Sen2Cor μπορεί να ξεκινήσει από την γραμμή εντολών (Command Prompt) ή με την ενσωμάτωση του επεξεργαστή στην πλατφόρμα SNAP. Στην παρούσα εργασία επιλέχτηκε ο πρώτος τρόπος εκτελώντας την εντολή:

L2A_Process --resolution 10 *διεύθυνση*

διεύθυνση: διεύθυνση όπου εντοπίζονται τα L1C προϊόντα.

Παραδειγματικά η εντολή:

L2A_Process --resolution 10

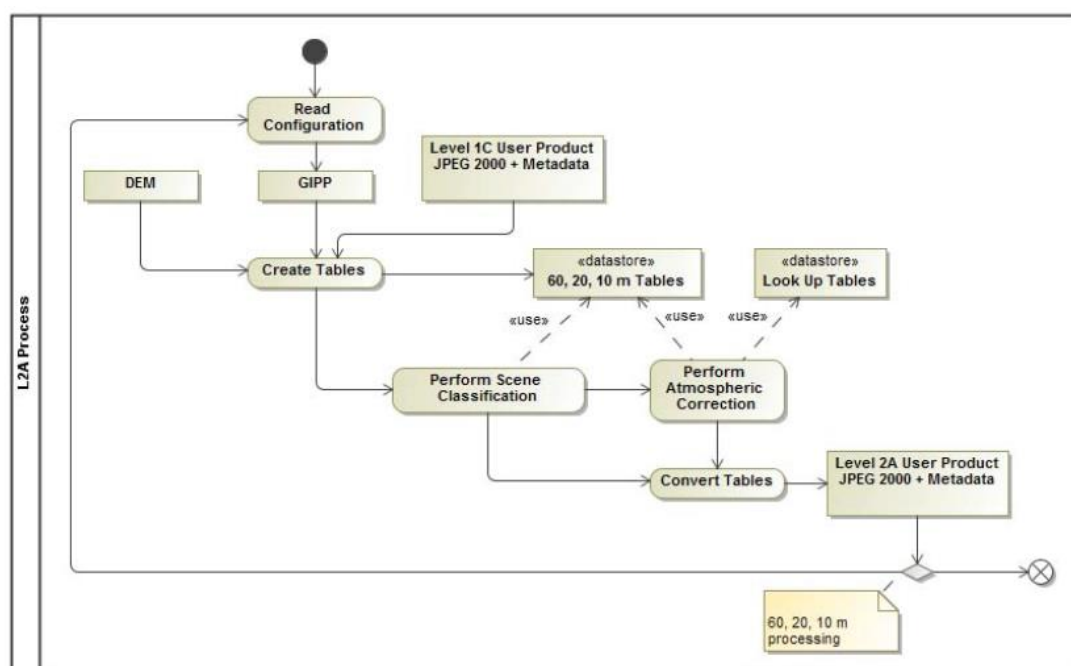
R:\Sentinel2\S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160514T173748_R093_V20160514T092034_20160514T092034.SAFE

αφορά περίπτωση διόρθωσης όλων των πλακιδίων του εν λόγω προϊόντος.

Πριν την εκτέλεση της εντολής γίνεται έλεγχος των βοηθητικών δεδομένων [Ground Image Processing Parameters (GIPPs)] τα οποία διαμορφώνονται στο αρχείο L2A_GIPP.xml το οποίο βρίσκεται στην υποδιεύθυνση cfg του επεξεργαστή Sen2Cor. Επεξηγηματικά ο χρήστης μπορεί να ρυθμίσει το αρχείο αλλάζοντας τις παραμέτρους. Η παράμετρος η οποία τροποποιήθηκε αφορά στην ενεργοποίηση της διόρθωσης Cirrus συννέφων. Ο επεξεργαστής Sen2Cor είναι κατάλληλος για ατμοσφαιρική διόρθωση, όμως απαιτούνται βελτιώσεις στο κομμάτι των προσφερόμενων χαρτών ταξινόμησης της εικόνας (π.χ. βελτίωση στην μάσκα συννέφων, σκιάς συννέφων και χιονιού που αποτελεί χρήσιμη πληροφορία σε περιπτώσεις σύνθεσης εικόνων κοντινής χρονικής περιόδου με σκοπό την δημιουργία μίας εικόνας απαλλαγμένης από σύννεφα) και της τοπογραφικής διόρθωσης (αυτόματη χρήση DEM χωρικής ανάλυσης 90 m που

⁴ Η έκδοση 2.2.1 κυκλοφόρησε στις 4 Μάη 2016.

είναι μη κατάλληλη για τα υπάρχοντα δεδομένα). Η παράμετρος χρήσης DEM για τοπογραφική διόρθωση παρέμεινε απενεργοποιημένη.



Σχήμα 10. Ροή διαδικασίας για την μετατροπή L1C προϊόντων σε L2A.

Πηγή: (Muller-Wilm et al., 2013).

Τα L2A προϊόντα δημιουργούνται στην πλευρά του χρήστη, στον ίδιο φάκελο και ακριβώς από κάτω από τα L1C προϊόντα, με αλλαγή στην ονομασία του OPER σε USER και του L1C σε L2A και με το κάθε tile να έχει μέγεθος 600 MB ⁵. Οι φάκελοι στα L2A προϊόντα οργανώνονται διαφορετικά εξαιτίας του διαχωρισμού των φασματικών καναλιών σε φακέλους βάσει της διαφορετικής χωρικής ανάλυσης (Σχ. 11). Ακόμη, το Cirrus κανάλι 10 παραλείπεται καθώς δεν περιλαμβάνει πληροφορία επιφάνειας (Muller-Wilm et al., 2013).

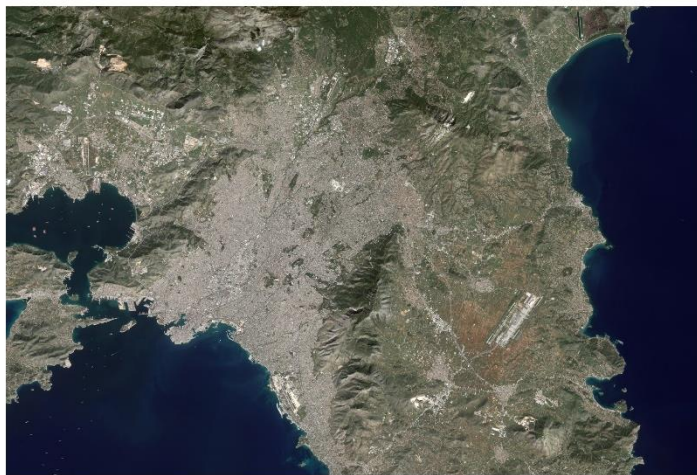


Σχήμα 11. Οργάνωση εικόνων πριν και μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση.

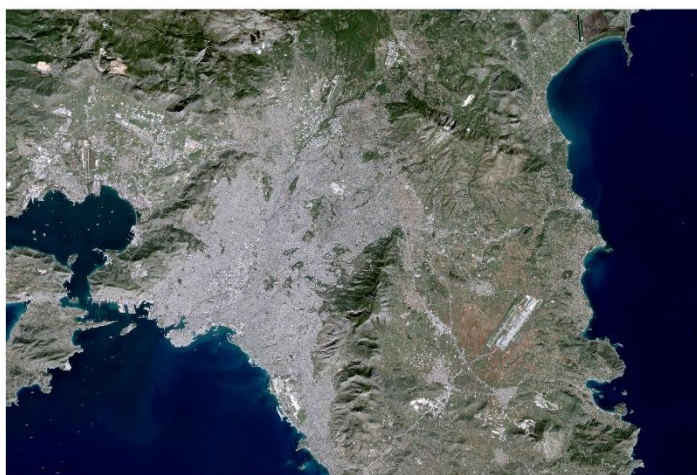
⁵ Παράρτημα α: OPER και USER προϊόντα.

Για την μεταφορά της γεωαναφοράς και του προβολικού από τα L1C στα L2A προϊόντα χρησιμοποιήθηκε ο κώδικας του Nicolas Matton (2016)⁶. Για την εκτέλεση του κώδικα σε γλώσσα Python έγινε εγκατάσταση του Anaconda σε Ubuntu 16.04 και έπειτα ακολούθησε η εγκατάσταση του πακέτου osgeo gdal 1.11.2 το οποίο υποστηρίζει τον jp2 driver. Μέσω της γραμμής εντολών (command line) έτρεξε η εντολή \$pwd>python georefL1cToL2A.py -i /direction/Sentinel2/ -e jp2 δίνοντας την διεύθυνση που βρίσκεται το αρχείο georefL1cToL2A.py και τα προϊόντα Sentinel 2 L1C και L2A, τα οποία (πρέπει να) βρίσκονται όλα μαζί σε έναν κοινό φάκελο.

Στο Σχήμα 12 έγινε εστίαση στην περιοχή της Αττικής για την ανάδειξη του αποτελέσματος της ατμοσφαιρικής διόρθωσης (ενίσχυση χρωμάτων και βελτίωση της οπτικής εμφάνισης διευκολύνοντας την οπτική αντίληψη και ερμηνεία της εικόνας).



A



B

Σχήμα 12. Η εικόνα της Αττικής πριν (A) και μετά (B) την ατμοσφαιρική διόρθωση.

⁶ Πηγή κώδικα: (https://bitbucket.org/nmatton/public-scripts/src/3a3f132314b04440b9e753dfe000d42e31d34d32/python/S2_tests/georefL1cToL2A.py?at=master&fileviewer=file-view-default).

6.1.2. Τοπογραφική διόρθωση

Η τοπογραφική διόρθωση συνιστά ένα σημαντικό βήμα στην προεπεξεργασία δορυφορικών δεδομένων και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις ταξινόμησης της κάλυψης γης και ποσοτικής ανάλυσης σε πολυφασματικά δεδομένα καθώς οι επιδράσεις του ηλιακού φωτισμού μπορούν να προκαλέσουν διακυμάνσεις στην ανακλαστικότητα παρόμοιων οντοτήτων του εδάφους με αποτέλεσμα μία πιθανή εσφαλμένη ταξινόμηση εξαιτίας των διαφορετικών τοπογραφικών θέσεων. Το αντίκτυπο αυτών των επιπτώσεων επηρεάζεται κυρίως από την τοπική ηλιακή γωνία πρόσπτωσης, το μήκος κύματος της εισερχόμενης ακτινοβολίας και την διαφορετική χαρακτηριστική ανακλαστικότητα κάθε οντότητας του εδάφους που χαρακτηρίζεται από διαφορετικό τύπο στην κάλυψη γης (Gao et al., 2014; Twele et al., 2006).

Μέσα από μία πλειάδα μελετών έχει αποδειχθεί πως η εφαρμογή του βήματος της τοπογραφικής διόρθωσης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τα αποτελέσματα της ακρίβειας μίας ταξινόμησης εικόνας καθότι η τοπογραφική επίδραση είναι υπεύθυνη για μεγάλο μέρος της φασματικής διακύμανσης της κάλυψης γης σε τραχύ ανάγλυφο (Burns and Nolin, 2014; Hale and Rock, 2003; Moreira et al., 2016; Vanonckelen et al., 2013). Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες μέθοδοι που βασίζονται σε DEM και οι οποίες διακρίνονται σε Lambertian⁷ [όπως οι εξής: Cosine, C-correction, SCS (Sun Canopy Sensor)], non-Lambertian [όπως οι εξής: Minnaert, BRDF correction, Slope Matching Method] και εμπειρικές [όπως οι εξής: Dual Partitioning Regression, Normalization]. Αυτές οι μέθοδοι έχουν δοκιμαστεί αυτούσιες ή σε συνδυασμούς αλλά και με μικρές τροποποιήσεις στην εφαρμογή τους από την ερευνητική κοινότητα και έχουν αξιολογηθεί μέσα από την διαδικασία της σύγκρισης. Κοινός σκοπός όλων είναι η απόκτηση ενός αποτελέσματος όπου τα ίδια αντικείμενα, στην υπό εξέταση εικόνα και περιοχή μελέτης, να έχουν την ίδια φασματική απόκριση. Εξαιτίας των υποθέσεων των Lambertian μεθόδων (υποσημείωση 1) τα αποτελέσματα αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της υπερδιόρθωσης. Εν όψει αυτού του ελαττώματος οι non-Lambertian μέθοδοι είναι προτιμητέοι. Ανάμεσα σε αυτές η πιο γνωστή και η πιο

⁷ Υποθέσεις των Lambertian μεθόδων: 1) η επιφάνεια αντανακλά την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις και ως εκ τούτου η ανακλαστικότητα είναι ανεξάρτητη από την γωνία παρατήρησης 2) η διόρθωση είναι ανεξάρτητη του μήκους κύματος 3) η απόσταση μεταξύ γης και ήλιου είναι σταθερή 4) η ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που φωτίζει τη γη είναι σταθερή.

χρησιμοποιούμενη είναι η Minnaert (Lu et al., 2008) η οποία σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες έχει δείξει την υπεροχή της σε σχέση με άλλες μεθόδους (Goslee, 2012). Η μέθοδος αυτή επιλέγεται αφού έχει την ικανότητα να προσαρμόζει το μέγεθος της τοπογραφικής διόρθωσης μέσω της εμπειρικής σταθεράς k ώστε να ταιριάζει στις δυ-διευθυνσιακές συναρτήσεις κατανομής της ανάκλασης (bidirectional reflectance distribution function, BRDF) που παρατηρούνται. Η σταθερά k μοντελοποιεί την έκταση στην οποία μία επιφάνεια έχει ιδιότητες μη Λαμπερτιανής ανακλαστικότητας. Λαμβάνει τιμές από 0 έως 1 με το 1 να ορίζει ότι η επιφάνεια είναι Λαμπερτιανή (Gao et al., 2014; Law and Nichol, 2004). Ακόμη, η σταθερά είναι εξαρτώμενη του μήκους κύματος και επομένως εξάγονται διαφορετικές σταθερές για κάθε κανάλι ξεχωριστά (Gao et al., 2014; Moffiet et al., 2010; Twele et al., 2006). Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζεται η σταθερά περιγράφεται παρακάτω (εξίσωση 3).

Η συνάρτηση Minnaert αναπτύχθηκε από τον Minnaert το 1941 (Holben and Justice, 1980) και το 1980 ο Smith et al εισήγαγε την σταθερά k για τον έλεγχο της Λαμπερτιανής υπόθεσης για τις επιφάνειες. Η συνάρτηση Minnaert εκφράζεται στην εξίσωση 1:

$$L_H = L_T \cos e / (\cos e \cos i)^k \quad (1)$$

όπου L_H είναι η ισοδύναμη ανακλαστικότητα σε μία επίπεδη επιφάνεια με την γωνία πρόσπτωσης να είναι μηδέν, L_T είναι η μετρούμενη ακτινοβολία στα δορυφορικά δεδομένα, k είναι η σταθερά Minnaert, e είναι η κλίση και i είναι η ηλιακή προσπίπτουσα γωνία σε σχέση με την επιφάνεια. Το συνημίτονο της προσπίπτουσας ηλιακής γωνίας ($\cos i$) γνωστό και ως φωτισμός (illumination) υπολογίζεται με την χρήση της εξίσωσης 2 (Holben and Justice, 1980; Smith et al., 1980):

$$\cos i = \cos \theta \cos e + \sin \theta \sin e \cos (\varphi_m - \varphi_s) \quad (2)$$

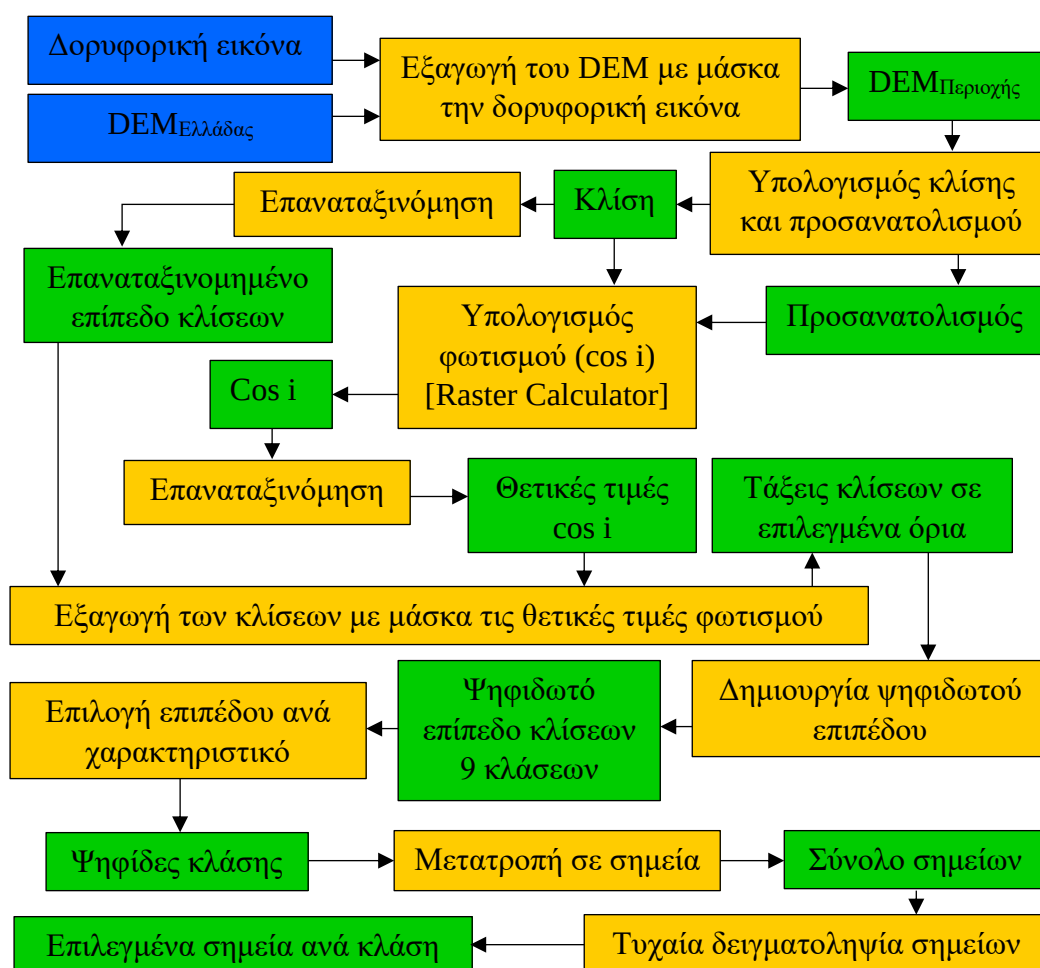
όπου θ και φ_m είναι η ηλιακή γωνία ζενίθ και αζιμούθιου αντίστοιχα, e η κλίση και φ_s ο προσανατολισμός του αναγλύφου.

Για την εύρεση του συντελεστή k επιλύεται η εξίσωση 1 ως εξής:

$$\log (L_T \cos e) = \log L_H + k \log (\cos e \cos i). \quad (3)$$

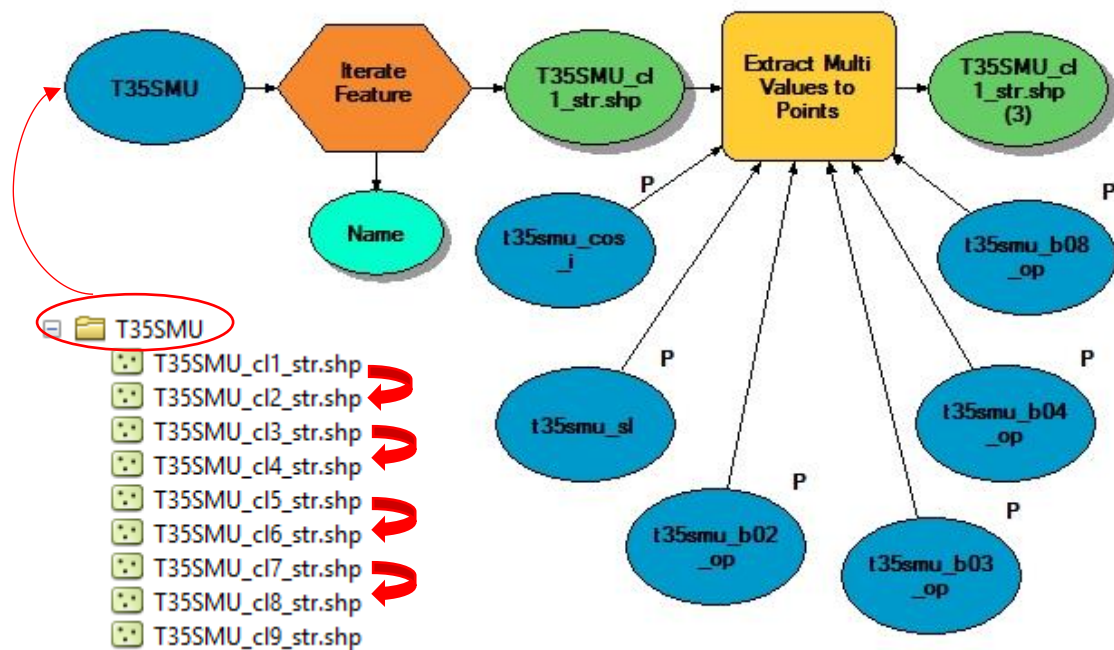
Η εξίσωση 3 δηλώνει πως ο συντελεστής k ισοδυναμεί με την κλίση της εξίσωσης παλινδρόμησης. Συνεπώς η εξίσωση 3 αποτελεί μία γραμμική εξίσωση παλινδρόμησης με άγνωστο τον συντελεστή k .

Από την ανάλυση παλινδρόμησης η τιμή k βρίσκεται για κάθε κανάλι βάσει του επιλεγόμενου δείγματος από τα δορυφορικά δεδομένα. Ένας γενικός συντελεστής δεν μπορεί να μειώσει αποτελεσματικά τις τοπογραφικές επιδράσεις στις δορυφορικές εικόνες και ιδιαίτερα σε περιοχές με απότομες κλίσεις (Lu et al., 2008). Για τον λόγο αυτό έχει προταθεί η μέθοδος Pixel-based Minnaert από τον Lu et al (2008) κατά την οποία γίνεται χρήση διαφορετικών συντελεστών k ανά κανάλι και ανά κατηγορία κλίσεων. Η προσέγγιση αυτή έχει δείξει πιο θετικά αποτελέσματα στην βελτίωση της απόδοσης της τοπογραφικής διόρθωσης σε σχέση με την χρήση ενός γενικού συντελεστή ή πολλαπλών συντελεστών με βάση τον τύπο κάλυψης γης⁸ αφού λαμβάνει υπόψιν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του k και των τοπογραφικών συνθηκών.



Σχήμα 13. Διάγραμμα ροής για τον υπολογισμό του επιπέδου του φωτισμού και την υλοποίηση τυχαίας στρωματοποιημένης δειγματοληψίας.

⁸ Η εξαγωγή πολλαπλών συντελεστών για τις διαφορετικές κατηγορίες κάλυψης γης έχει χρησιμοποιηθεί (Gao et al., 2014; Mariotto and Gutschick, 2010; Sola et al., 2016) όμως δεν θεωρείται πως ο τρόπος αυτός είναι κατάλληλος διότι διαφορετικές τοπογραφικές κλίσεις έχουν ποικίλες επιδράσεις στην ανακλαστικότητα της κάλυψης γης.



Σχήμα 14. Δημιουργία μοντέλου για τον εμπλουτισμό του πίνακα περιεχομένων των σημείων δειγματοληψίας κάθε κλάσης κλίσεων με την πληροφορία των παραμέτρων χρήσιμων για τον υπολογισμό του συντελεστή Minnaert.

Οι διαδικασίες για την υλοποίηση της τοπογραφικής διόρθωσης διακρίνονται σε 6 φάσεις. Στις 2 πρώτες και στις 2 τελευταίες όπου έγινε η χρήση του ArcMap 10.4.1 οι διαδικασίες αυτοματοποιήθηκαν με την βοήθεια του ModelBuilder δίνοντας την δυνατότητα κατασκευής μίας εργαλειοθήκης αποτελούμενη από δημιουργούμενα μοντέλα ροής εργασιών. Σε πρώτη φάση κατασκευάστηκε το μοντέλο για τον υπολογισμό του $\cos i$ και για την δημιουργία του σημειακού επιπέδου από την τυχαία στρωματοποιημένη δειγματοληψία όπως αναπαρίσταται στο Σχήμα 13. Οι απαιτούμενοι παράμετροι για την εκτέλεση του μοντέλου διόρθωσης κατά Minnaert είναι η κλίση, ο προσανατολισμός, η ηλιακή γωνία ζενίθ και αζιμούθιου (δες εξίσωση 1 και 2). Τα δεδομένα DEM χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των επιπέδων της κλίσης και του προσανατολισμού. Η πληροφορία της ηλιακής γωνίας ζενίθ και αζιμούθιου βρίσκεται στα Sentinel 2 μεταδεδομένα. Οι παραπάνω τέσσερις παράμετροι εισάγονται στην εξίσωση 2 για τον υπολογισμό του επιπέδου του φωτισμού ($\cos i$) με την βοήθεια του raster calculator αφού πρώτα έχει πραγματοποιηθεί η μετατροπή της ηλιακής γωνίας ζενίθ και αζιμούθιου από μοίρες σε ακτίνια. Στην συνέχεια επαναταξινομήθηκε το επίπεδο των κλίσεων σε εννέα κλάσεις (Πίνακας 4), μία κατηγοριοποίηση που προτείνει ο Lu et al. (2008).

Πίνακας 4. Ταξινόμηση κλίσεων σε 10 κλάσεις εκ των οποίων η πρώτη αφαιρείται.

<i>Εύρος κλίσεων σε μοίρες (°)</i>	<i>Χαρακτηρισμός κλάσης</i>
< 1	No Data
1-5	1
5-10	2
10-15	3
15-20	4
20-25	5
25-30	6
30-35	7
35-40	8
> 40	9

Αφού αφαιρέθηκαν οι υποπεριοχές με κλίσεις μικρότερες της μίας μοίρας, καθώς στις υποπεριοχές αυτές δεν υπάρχει επίδραση της τοπογραφίας και οι υποπεριοχές όπου ο φωτισμός είναι αρνητικός (διότι το μοντέλο Minnaert δεν λαμβάνει αρνητικές τιμές) πραγματοποιήθηκε τυχαία δειγματοληψία σημείων ανά κλάση. Συγκεκριμένα, για κάθε κλάση έγινε εξαγωγή 25.000 σημείων ανά 50 m δηλαδή ανά 5 ψηφίδες. Σε δεύτερη φάση ο πίνακας περιεχομένων των σημειακών επιπέδων από την δειγματοληψία εμπλουτίστηκε με την πληροφορία των παραμέτρων που είναι απαραίτητοι για τον υπολογισμό του συντελεστή k δηλαδή του $\cos i$, της κλίσης και της ανακλαστικότητας των καναλιών 2, 3, 4 και 8 των δορυφορικών δεδομένων (Σχ. 14).

Σε επόμενη φάση, στην φάση 3, έγινε διαχείριση των πινάκων περιεχομένων των σημείων δειγματοληψίας σε φύλλα Excel και έπειτα υπολογίστηκαν τα γνωστά μέρη της εξίσωσης 3 [δηλ. **$\log (L_T \cos e) = \log L_H + k \log (\cos e \cos i)$** : σε bold τα γνωστά μέρη]. Αξιοποιώντας την συνάρτηση LINEST επιλύθηκε η γραμμική εξίσωση παλινδρόμησης 3 και βρέθηκε ο συντελεστής k , η άγνωστη τιμή, για κάθε κανάλι (b2, b3, b4, b8) και για κάθε κλάση κλίσεων⁹. Να σημειωθεί πως για κάθε δορυφορική εικόνα οι συντελεστές διαφέρουν δεδομένου ότι οι τιμές του ύψους ηλίου και του

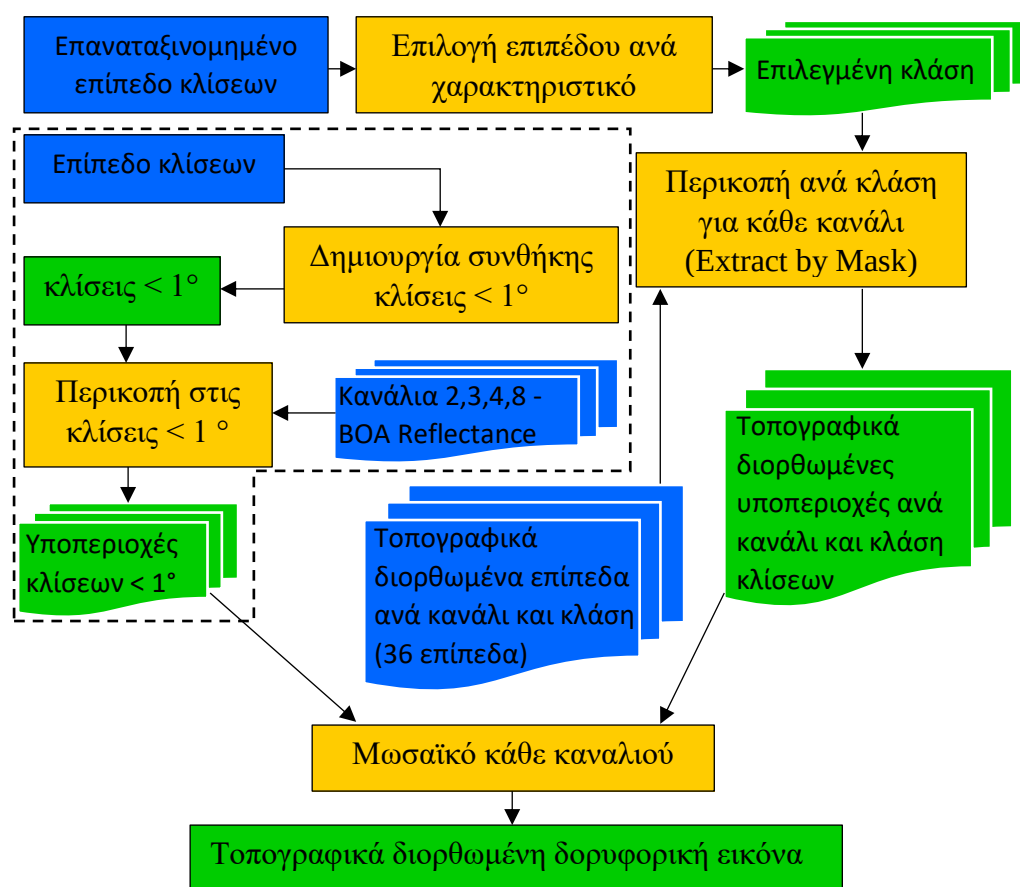
⁹ Προσοχή οι κλίσεις να είναι σε ακτίνια, να μην υπάρχουν αρνητικές τιμές $\cos i$, τιμές ανακλαστικότητας 0 (υγρό στοιχείο) να αφαιρούνται και η ανακλαστικότητα να προκύπτει από τα operational δεδομένα σε top of atmosphere τιμές διαιρούμενες με το quantification value το οποίο ισούται με 10000 (πηγή από τα μεταδεδομένα).

αζιμούθιου δεν είναι οι ίδιες. Επομένως η κάθε περίπτωση είναι ξεχωριστή και για τον λόγο αυτό δεν υπάρχει κατάλογος με τις τιμές των συντελεστών (οι συνδυασμοί ύψους ηλίου και αζιμούθιου είναι αμέτρητοι). Αναφέρω συντελεστές, αν και ο συντελεστής είναι ένας, διότι περιλαμβάνω τον κάθε συντελεστή που υπολογίζεται από την παραπάνω μεθοδολογία για μία δορυφορική εικόνα. Εάν οι δορυφορικές εικόνες έχουν πολύ κοντινές τιμές ύψους ηλίου και αζιμούθιου τότε προβλέπεται η εξαγωγή των συντελεστών από μία δορυφορική εικόνα προς όφελος όλων. Συνοψίζοντας τα παραπάνω, πριν από την εφαρμογή της τοπογραφικής διόρθωσης υπολογίζονται οι παράμετροι του κάθε μοντέλου μέσα από την στρωματοποιημένη δειγματοληψία κάθε δορυφορικής εικόνας και βρίσκεται ο συντελεστής k .

Συνεχίζοντας με την τέταρτη φάση, αξιοποιήθηκε το QGIS 2.16 για την εφαρμογή της τοπογραφικής διόρθωσης με την μέθοδο Minnaert with Slope των Law και Nichol (2004). Λόγω της εκτέλεσης της 36 φορές για τους 36 διαφορετικούς συντελεστές (4 κανάλια $\times$ 9 κλάσεις κλίσεων) έγινε η εκμετάλλευση της επεξεργασίας δέσμης (batch processing). Απαιτούμενοι παράμετροι για το βήμα αυτό είναι το DEM, η ανακλαστικότητα επιφάνειας, το αζιμούθιο, το ύψος ήλιου και ο συντελεστής k . Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε ανακλαστικότητα επιφάνειας [(bottom of atmosphere reflectance ή αλλιώς surface reflectance), (δηλαδή μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση όπως στην παρούσα εργασία)] ή σε εξω-ατμοσφαιρική ανακλαστικότητα (top of atmosphere reflectance). Οι υπόλοιπες μέθοδοι που προτείνονται μέσω του QGIS και ελέγχθηκαν αλλά απορρίφθηκαν μέσω της διαδικασίας της σύγκρισης (περισσότερο μέσω της οπτικής αντιπαράθεσης) είναι οι Cosine, C, και Normalization. Ακόμη 3 μοντέλα που κατασκευάστηκαν με την βοήθεια του ModelBuilder απορρίφθηκαν και αυτά. Το πρώτο αφορούσε στην μέθοδο Dual Partitioning Regression (Sakamoto et al., 2009), το δεύτερο στην Modified Minnaert μέθοδο (Richter et al., 2009) και το τρίτο στην μέθοδο παρόμοια της προτεινόμενης (Minnaert with Slope) με έναν επιπρόσθετο διαχωρισμό βάσει των τιμών του κανονικοποιημένου δείκτη βλάστησης [normalized difference vegetation index (NDVI)] (Sola et al., 2016). Οι μέθοδοι αυτοί αναπτύχθηκαν όπως αναλύονται στην βιβλιογραφία.

Προχωρώντας με την πέμπτη σε σειρά φάση, οι υποπεριοχές διαφορετικών χαρακτηριστικών και συντελεστών k επιλέχθηκαν, διαχωρίστηκαν από την συνολική περιοχή και στην συνέχεια αποτέλεσαν κομμάτια ενός πάζλ για την σύνθεση του αποτελέσματος μίας τοπογραφικά διορθωμένης δορυφορικής εικόνας. Στο πάζλ

προστίθενται και οι υποπεριοχές κλίσεων μικρότερων της μίας μοίρας οι οποίες εξαιρούνται εξ' αρχής από την διαδικασία της τοπογραφικής διόρθωσης (Σχ. 15).



Σχήμα 15. Σύνθεση τοπογραφικά διορθωμένης δορυφορικής εικόνας.

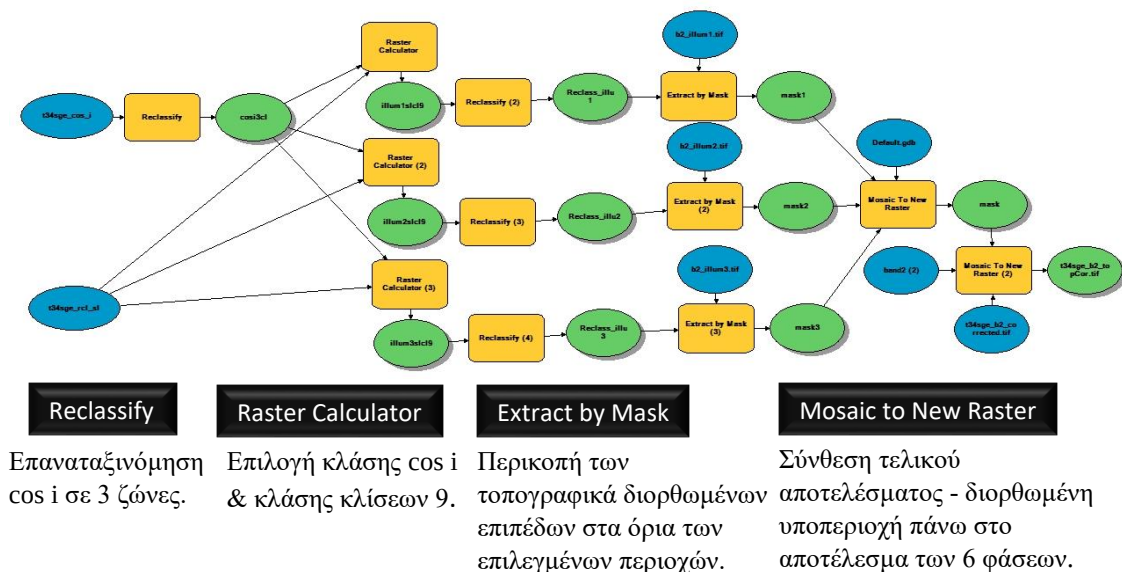
Σε πολλές από τις μελέτες που έχουν ασχοληθεί με το ζήτημα της τοπογραφικής διόρθωσης αναφέρονται στο φαινόμενο της υπερδιόρθωσης σε περιοχές αμυδρού φωτισμού, ένα φαινόμενο το οποίο παρατηρήθηκε και στην παρούσα εργασία. Για τον λόγο αυτό προτείνεται μία καινούργια μέθοδος, μία μέθοδος ουσιαστικά συμπληρωματική της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε παραπάνω και η οποία συμβάλλει στην εξασθένηση ή/και απαλοιφή του φαινομένου. Η νέα πρακτική αφορά στην παρατήρηση της διαφορετικής συμπεριφοράς των εικονοστοιχείων σε χαμηλό φωτισμό και σε μέτριο προς υψηλό¹⁰ απέναντι στον κοινό συντελεστή k στην κατηγορία της τελευταίας κλάσης μεγάλων κλίσεων. Να σημειωθεί στο σημείο αυτό πως στον χαμηλό φωτισμό οι διακυμάνσεις στην ανακλαστικότητα κοινού τύπου κάλυψης είναι ιδιαίτερα έντονες. Επομένως, η διακύμανση δεν οφείλεται στον

¹⁰ $\cos i \leq 0.65 \implies$ χαμηλός, $0.65 < \cos i < 0.85 \implies$ μέτριος, $\cos i \geq 0.85 \implies$ υψηλός, διάκριση κατά Vanonckelen et al. (2013)

διαφορετικό τύπο κάλυψης όπως πολλοί αναφέρουν ως ενδεχόμενο λόγο στα συμπεράσματα της εργασίας τους. Αυτό που βρέθηκε να είναι ο κύριος λόγος επηρεασμού είναι ο ίδιος ο φωτισμός. Η διάκριση του χαμηλού φωτισμού σε τρεις ζώνες κρίθηκε απαραίτητη ενώ έπειτα χαρακτηρίστηκε και ως αποτελεσματική. Οι ζώνες αυτές έχουν συγκεκριμένα όρια τα οποία ορίστηκαν ύστερα από δεκάδες δοκιμές και έλεγχο των αποτελεσμάτων τους στο τελικό παραγόμενο με σκοπό την ομαλότητα μεταξύ των ορίων τόσο μεταξύ των ζωνών όσο και μεταξύ των ζωνών και της υπόλοιπης περιοχής. Καθότι στις ζώνες αρνητικού φωτισμού το αποτέλεσμα είναι ανεπηρέαστο και δεν διορθώνεται λόγω της φύσης της μεθόδου, οι ζώνες που σχηματίστηκαν είναι οι εξής:

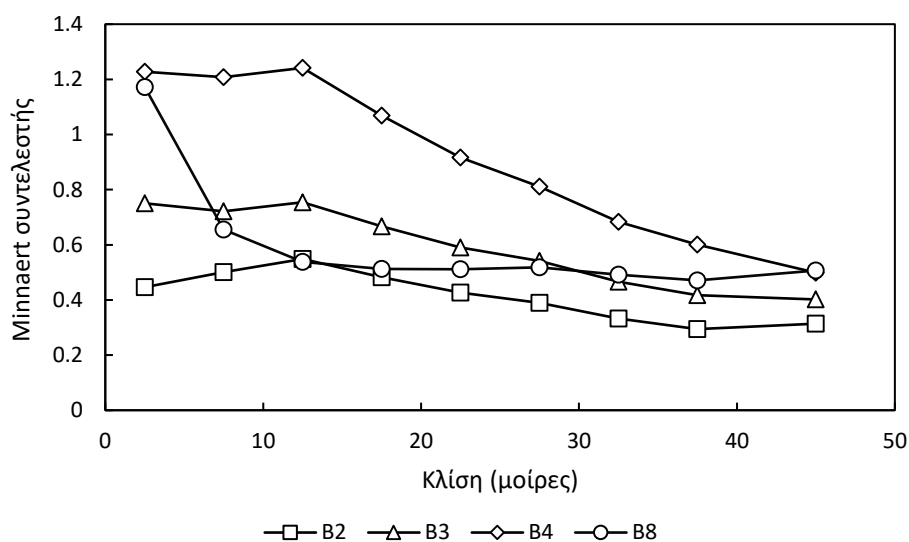
1^η) $\cos i$: **0 – 0.15**, 2^η) $\cos i$: **0.15 – 0.4** και 3^η) $\cos i$: **0.4 – 0.65**.

Για κάθε νέα ζώνη υπολογίστηκε και εφαρμόστηκε καινούργιος συντελεστής k με το ίδιο σκεπτικό που περιγράφηκε παραπάνω με την διαφορά ότι αξιοποιήθηκαν τα ήδη υπάρχοντα σημεία δειγματοληψίας με την ενσωματωμένη πληροφορία των παραμέτρων στον πίνακα περιεχομένων. Άλλη σημαντική διαφορά αφορά στην φάση 6 όπου στην παρούσα ο διαχωρισμός γίνεται με βάση το $\cos i$ ενώ η κλάση κλίσεων είναι σταθερά η 9^η και τελευταία (Σχ. 16). Συνεπώς, αλλάζει η υποπεριοχή χαμηλού φωτισμού με την μεγαλύτερη υποπεριοχή του συνόλου της περιοχής να διατηρείται όπως προέκυψε από την τοπογραφική διόρθωση των 6 φάσεων. Αυτή αποτελεί μία προτεινόμενη λύση η οποία ενδείκνυται ιδιαίτερα όταν η περιοχή μελέτης καλύπτει σημαντική έκταση η οποία περιλαμβάνει ορεινές, ημι-ορεινές και πεδινές ζώνες.

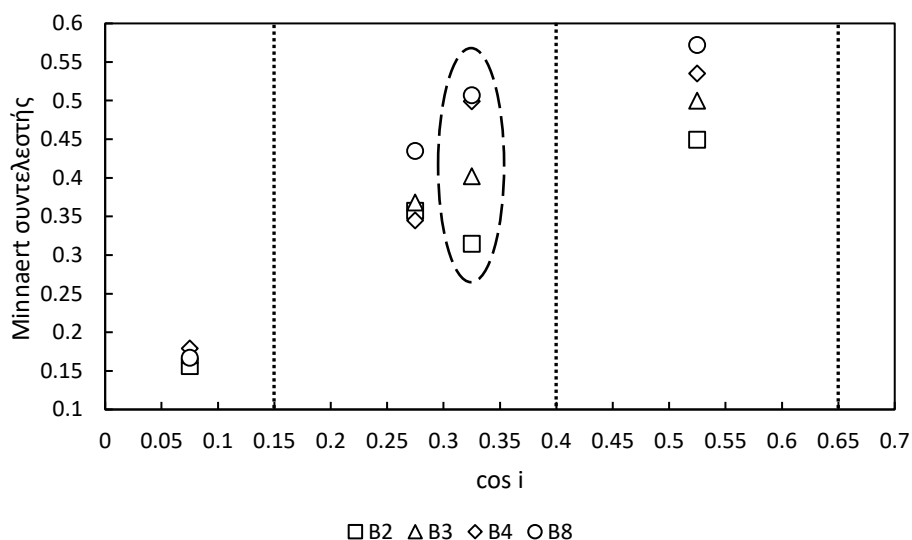


Σχήμα 16. Δημιουργία μοντέλου εκτέλεσης της προτεινόμενης μεθόδου κατά την φάση 6.

Ο συντελεστής k εξαρτάται από το μήκος κύματος και σχετίζεται με τις κλίσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται οι συντελεστές k ή αλλιώς Minnaert όπως υπολογίστηκαν για την δυτική Κρήτη με κωδικό πλακιδίου 34SGE, ύψος ήλιου 65.48° και αζιμούθιο 142.22° (Πίνακας 3, Σχ. 8).



Σχήμα 17. Συντελεστές Minnaert για κάθε MSI (multispectral instrument) κανάλι που αντιστοιχεί στις διαφορετικές κλάσεις κλίσεων.



Σχήμα 18. Συντελεστές Minnaert για κάθε MSI κανάλι που αντιστοιχεί στις διαφορετικές κλάσεις φωτισμού (διαχωρισμένες με διακεκομμένη γραμμή) της κλάσης κλίσεων 9 και συντελεστές Minnaert για κάθε MSI κανάλι της κλάσης κλίσεων 9 χωρίς τον διαχωρισμό βάσει φωτισμού (εντός κύκλου).

Όπως δείχνει το σχήμα 17 ο συντελεστής k έχει την τάση να μειώνεται όσο η κλίση αυξάνεται όμως με μη γραμμικές τάσεις. Για το κανάλι 8 η μείωση είναι ραγδαία από 1° έως 15° ενώ έπειτα παρατηρείται μία σταθεροποίηση μέχρι να σημειωθεί άνοδος στην τελευταία κλάση κλίσεων. Στα υπόλοιπα κανάλια συμβαίνει το αντίθετο, δηλαδή στις χαμηλές κλίσεις έως 15° οι τιμές δεν μεταβάλλονται σε σημαντικό βαθμό κάτι το οποίο αλλάζει στην συνέχεια με τις τιμές να ακολουθούν μία μειωτική τάση όσο οι κλίσεις αυξάνονται. Τις υψηλότερες τιμές κατέχει το κανάλι 4 και τις χαμηλότερες το κανάλι 2 για τις ίδιες κλίσεις το οποίο αποδεικνύει ότι ο συντελεστής εξαρτάται από το μήκος κύματος. Γενικότερα, μία αύξηση στο μήκος κύματος φέρει αύξηση στον συντελεστή χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν υπάρχουν και οι εξαιρέσεις όπως συμβαίνει με το κανάλι 8 στην περίπτωση του παρόντος παραδείγματος. Όσο μικρότερος είναι ο συντελεστής τόσο περισσότερο συμβάλλει στη εξασθένηση των τοπογραφικών επιδράσεων οι οποίες ήταν πιο έντονες στο κανάλι 8 για τις κλάσεις κλίσεων 4 με 9 (υψηλότερος συντελεστής συσχέτισης R^2 από τον έλεγχο του διαγράμματος διασποράς της σχέσης ανακλαστικότητας-φωτισμού) σε σχέση με το 4 και σε σχέση με το 3 για το εύρος κλίσεων από 5° έως 25° (Πίνακας 5). Από την άλλη μεριά η απότομη μείωση στις χαμηλές κλίσεις για το κανάλι 8 εντοπίζεται και στην έρευνα των Lu et al. (2008). Το σχήμα 17 έχει ιδιαίτερη αξία διότι επιβεβαιώνεται για μία ακόμη φορά πως ένας συντελεστής για ολόκληρη την εικόνα είναι άκρως ακατάλληλος (βλέποντας την διαφορά ανάμεσα στις πιο χαμηλές και στις πιο υψηλές κλίσεις) εξαιτίας του διαφορετικού αντίκτυπου των τοπογραφικών συνθηκών στα δορυφορικά δεδομένα.

Πίνακας 5. Συντελεστής συσχέτισης μεταξύ ανακλαστικότητας και φωτισμού.

$R^2 (Y, X)$	Κανάλια (Y)				Cos i (x)
Κλίσεις	Κανάλι 2	Κανάλι 3	Κανάλι 4	Κανάλι 8	
Κλάση 1	0.001	0.002	0.003	0.004	
Κλάση 2	0.008	0.012	0.015	0.013	
Κλάση 3	0.036	0.044	0.048	0.040	
Κλάση 4	0.054	0.065	0.067	0.08	
Κλάση 5	0.068	0.082	0.083	0.14	
Κλάση 6	0.082	0.098	0.097	0.2	
Κλάση 7	0.083	0.10	0.10	0.24	
Κλάση 8	0.10	0.12	0.12	0.27	
Κλάση 9	0.12	0.15	0.14	0.32	

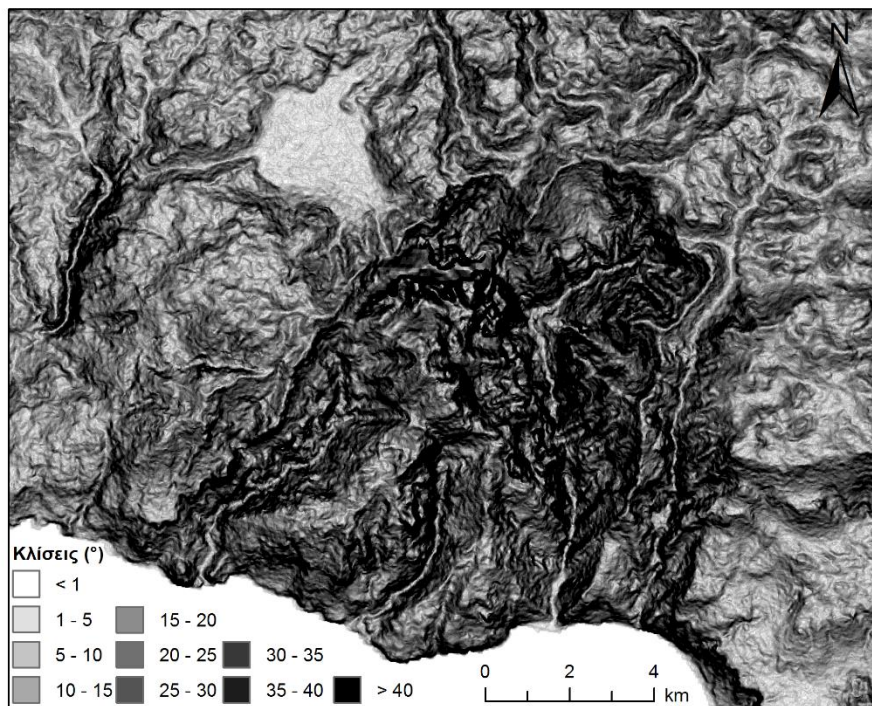
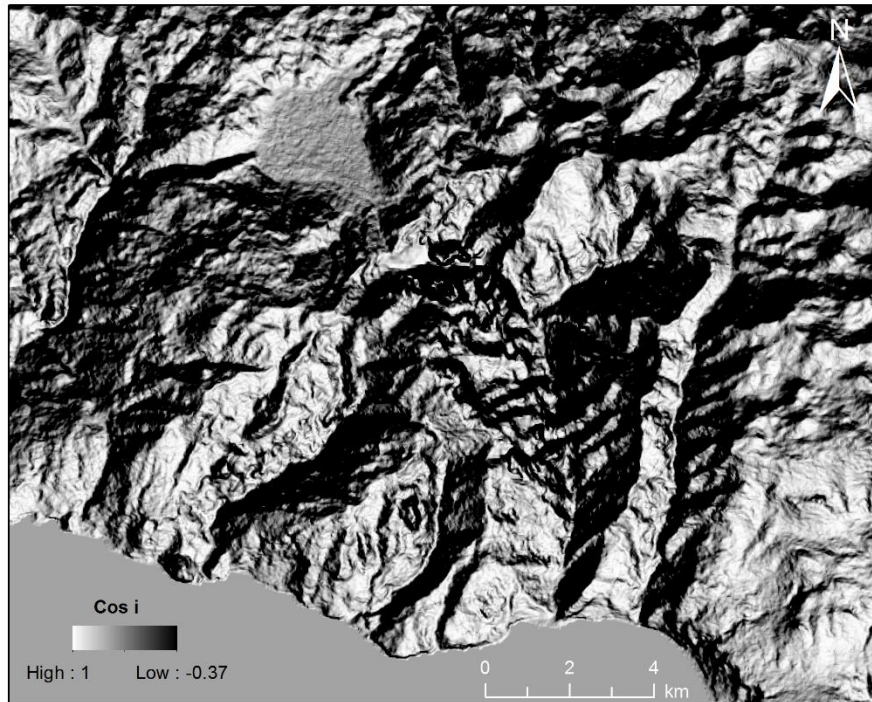
Η παράθεση του σχήματος 18 αποτελεί μία ακόμη ισχυρή ένδειξη της αξίας της προτεινόμενης μεθόδου. Ουσιαστικά γίνεται μία προβολή της αποτελεσματικότητας της διακριτοποίησης, τονίζοντας τον ρόλο της, στην βελτίωση της τοπογραφικής διόρθωσης σε μεγάλες κλίσεις χαμηλού φωτισμού. Με οδηγό το σχήμα 18, οι συντελεστές k είναι εντελώς διαφορετικοί ανάμεσα στις τρεις κατηγορίες φωτισμού. Στο μεγαλύτερο επίπεδο ανήκουν οι συντελεστές στην κατηγορία φωτισμού 0.4 έως 0.65, στο μεσαίο επίπεδο οι συντελεστές στην κατηγορία φωτισμού 0.15 έως 0.4 και στο χαμηλότερο οι συντελεστές στην κατηγορία φωτισμού 0 έως 0.15. Συνεπώς, όσο χαμηλώνει ο φωτισμός τόσο περισσότερο μικραίνει και ο συντελεστής. Με λίγα λόγια, η μέθοδος χρήσης ενιαίων συντελεστών στην ζώνη κλίσεων άνω των 40° δεν είναι η πλέον κατάλληλη. Οι ενιαίοι συντελεστές τοποθετούνται κάπου ανάμεσα σε αυτούς που προέκυψαν από τον διαχωρισμό, με εγγύτητα στην δεύτερη κατηγορία φωτισμού. Δηλαδή, λόγω βαρύτητας ορθά τοποθετούνται εκεί ενδιάμεσα. Το σκαλοπάτι ανάμεσα στους συντελεστές χαμηλότερου φωτισμού και στους ενιαίους συντελεστές είναι μεγάλο. Για τον λόγο αυτό ενιαίοι συντελεστές σε υποπεριοχές με τον χαμηλότερο φωτισμό και υψηλές κλίσεις οδηγούν σε μία τρανταχτή υπερδιόρθωση ισοπεδώνοντας την τοπογραφία και αλλοιώνοντας την εικόνα, καθιστώντας το αποτέλεσμα μη αποδεκτό. Η μέθοδος που προτείνεται στην παρούσα εργασία και η οποία περιγράφηκε στην φάση 6 πιο πάνω καταπολεμά το φαινόμενο της υπερδιόρθωσης με έμφαση στις υποπεριοχές εκείνες που αυτό ήταν ιδιαίτερα έντονο.

Η προτεινόμενη μέθοδος έχει ιδιαίτερη αξία σε περιπτώσεις όπου το ανάγλυφο είναι τραχύ (σε ορεινούς όγκους και στα πρηνή παράκτιων περιοχών). Προς ανάδειξη της μεθόδου ακολουθεί παράδειγμα το οποίο εστιάζει σε μία χαρακτηριστική περιοχή της νότιο-δυτικής Κρήτης με ιδιαίτερο γεωμορφολογικό ενδιαφέρον, όπου εντοπίζεται το φαράγγι της Σαμαριάς (συντεταγμένες σημείου εντός φαραγγιού x : 496573.545, y : 3903841.336 μέτρα) περιβαλλόμενο από τα Λευκά Όρη (Σχ. 19). Στην συνέχεια ακολουθεί παρουσίαση της ευρύτερης περιοχής της δυτικής Κρήτης με σκοπό την προβολή της αποτελεσματικότητάς της διόρθωσης σε όλη την γκάμα κλίσεων. Να σημειωθεί ότι τα αποτελέσματα που προβάλλονται αποτελούν δείγματα της συνολικής δουλειάς.

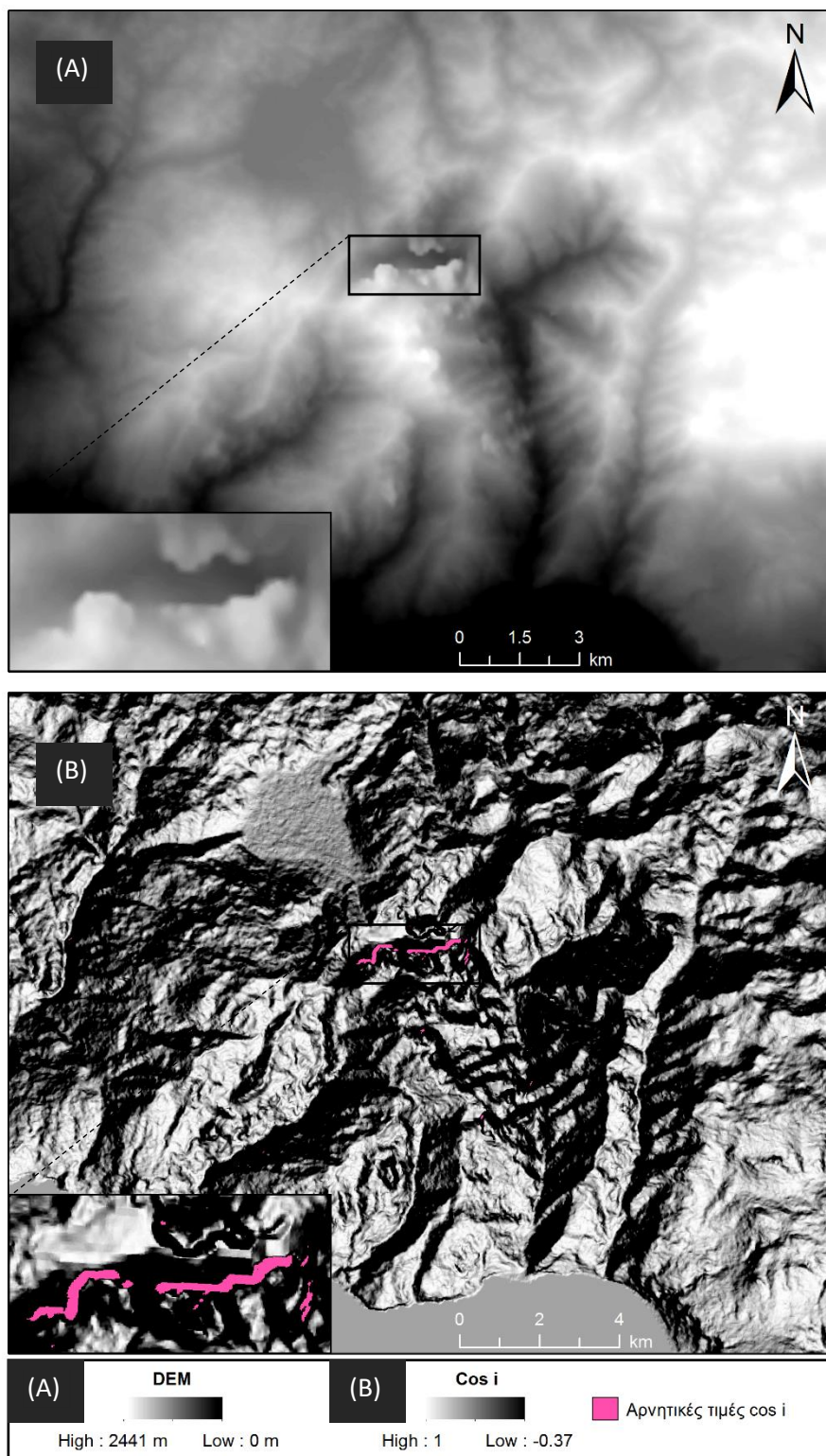


Σχήμα 19. Οπτική της περιοχής εστίασης μέσα από το Google Earth.

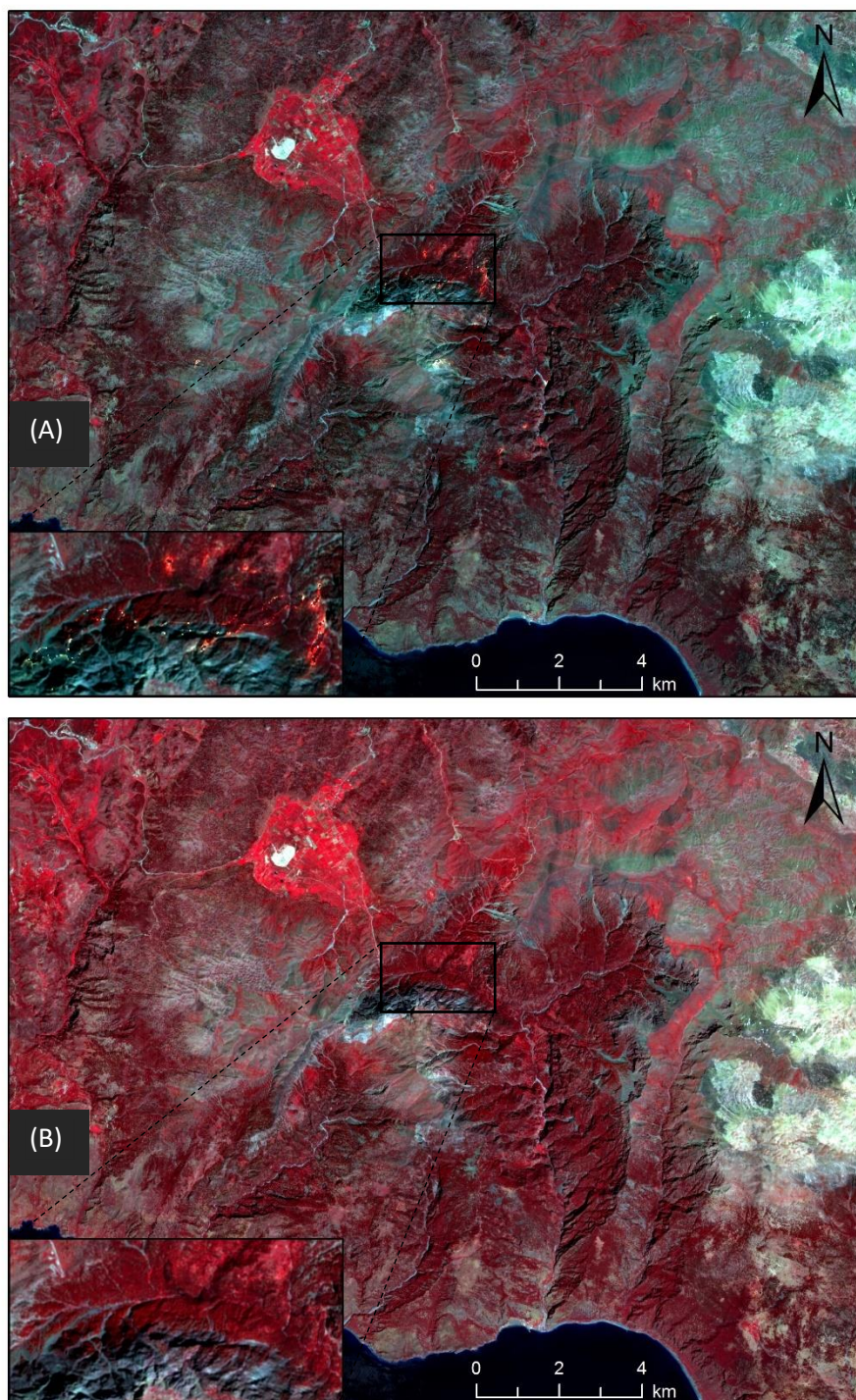
Η εφαρμογή της μεθόδου Minnaert with Slope σε 9 κατηγορίες κλίσεων μειονεκτεί σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο, με κλίσεις άνω των 40° αλλά συνήθως άνω των 50° και με χαμηλό φωτισμό (Σχ. 20, Σχ. 21, Σχ. 22). Οι περιοχές με αρνητικές τιμές φωτισμού (Σχ. 21, Σχ. 22) δεν διορθώνονται οπότε η διαφορά ανάμεσα στις περιοχές αυτές και στις άμεσα γειτονικές με τον πολύ χαμηλό και αρκετά χαμηλό φωτισμό είναι εντυπωσιακή. Η υπερδιόρθωση αυτών των περιοχών (ακραίες τιμές ανακλαστικότητας) επηρεάζει την συνολική αισθητική της εικόνας. Η αλλοίωση σε τέτοιο βαθμό δεν είναι αποδεκτή ενώ παράλληλα συνιστά σημάδι – προειδοποίηση για την μη καταλληλότητα των συντελεστών που χρησιμοποιήθηκαν. Επιτακτική κρίθηκε η ανάγκη εύρεσης νέων συντελεστών και αυτή η ανάγκη αποτέλεσε το κίνητρο της δημιουργίας της νέας μεθόδου και εφαρμογής της με θεαματικά αποτελέσματα (Σχ. 22). Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη μέθοδος συνέβαλλε στην βελτίωση της συνοχής της εικόνας, στην αφαίρεση των ακραίων τιμών και στην ενίσχυση της αισθητικής και της ποιότητας.



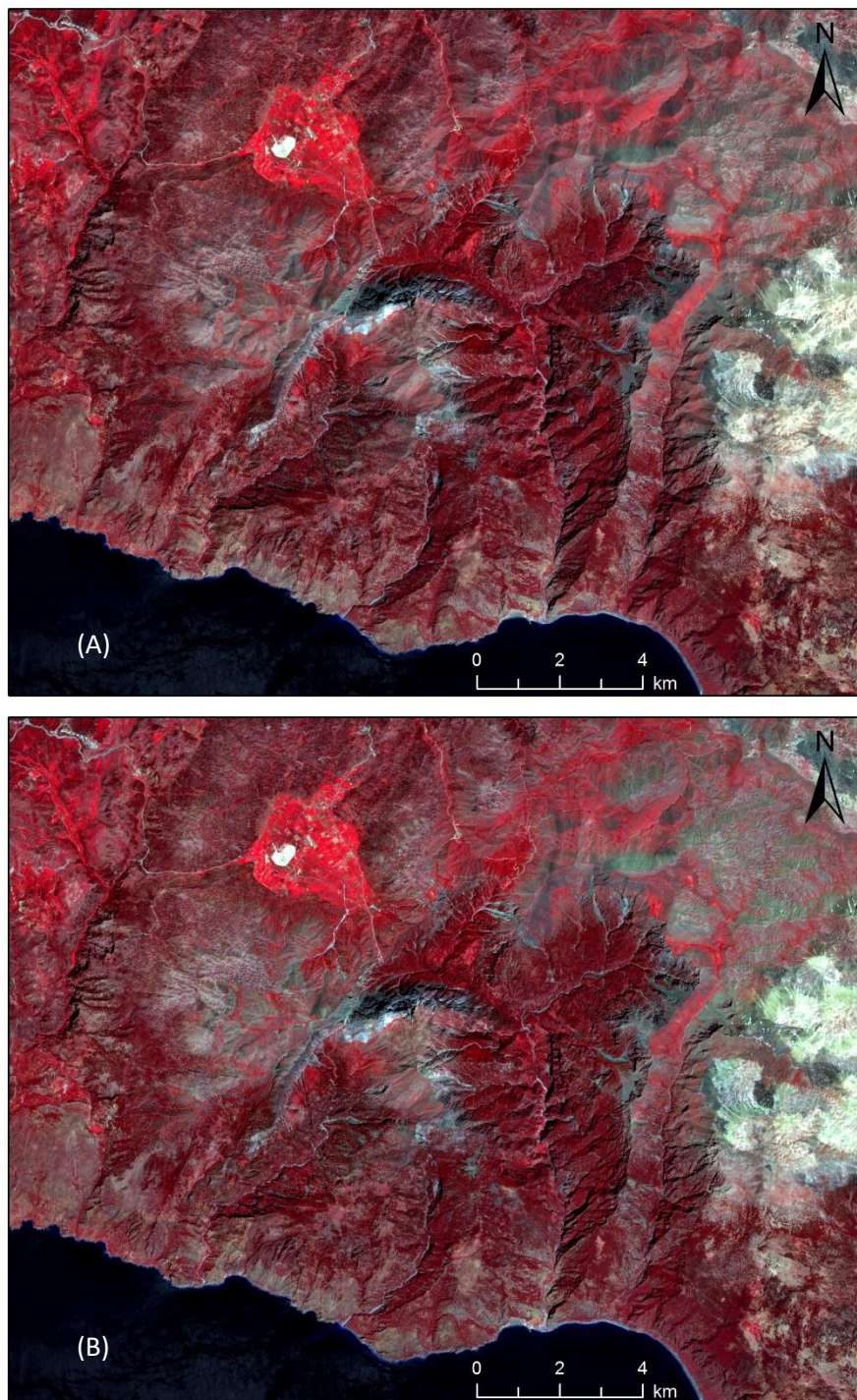
Σχήμα 20. Οπτική αναπαράσταση του επιπέδου του φωτισμού και του επιπέδου των επανатаξινομημένων κλίσεων.



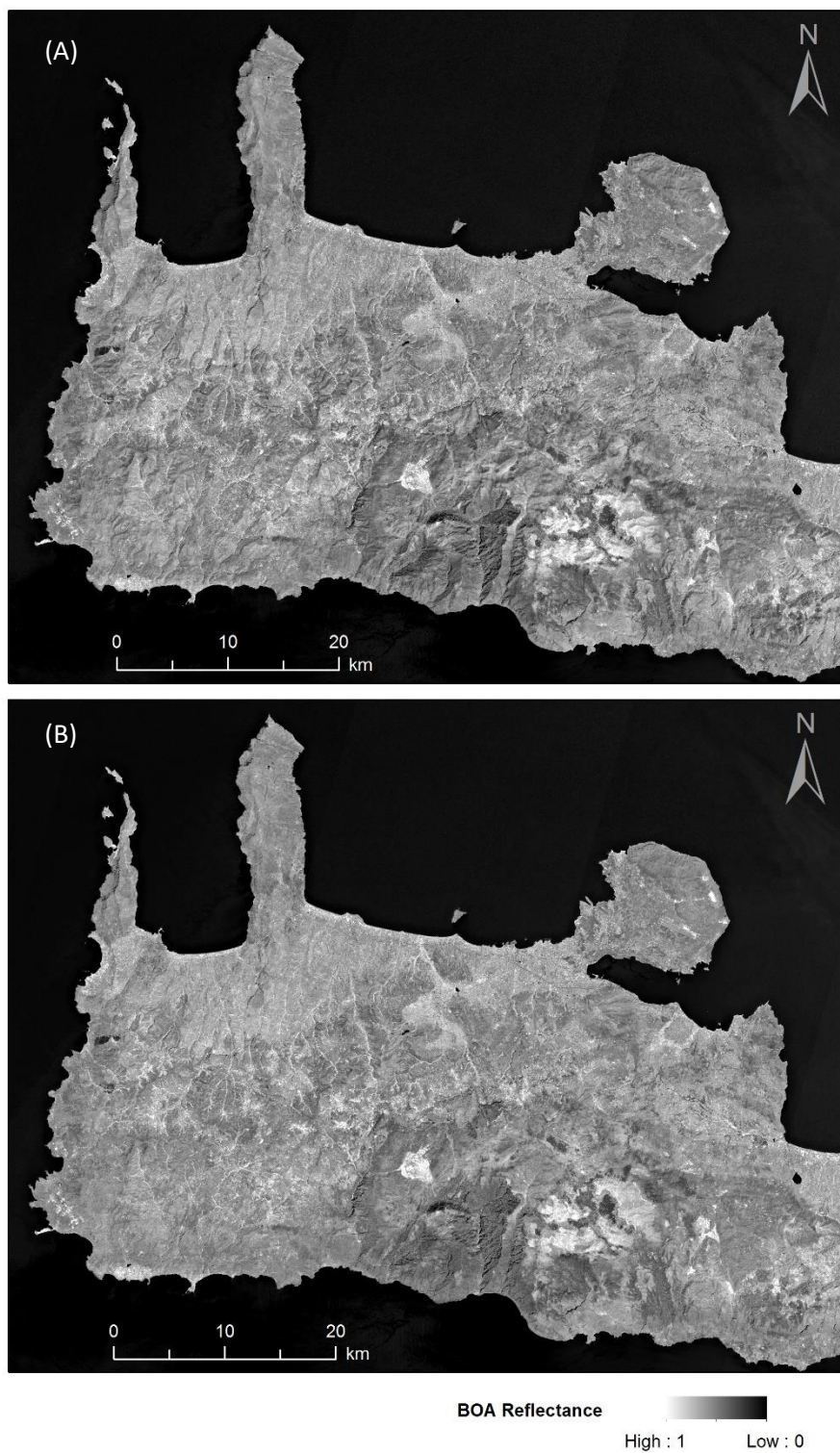
Σχήμα 21. Ψηφιακό μοντέλο εδάφους (A) και φωτισμός (B).



Σχήμα 22. Οπτική εντύπωση των αποτελεσμάτων της τοπογραφικής διόρθωσης της υφιστάμενης μεθόδου Minnaert with Slope σε 9 κατηγορίες κλίσεων (Α) και της προτεινόμενης (Β) μέσα από την χρωματική σύνθεση RGB των καναλιών 8, 4, 3.

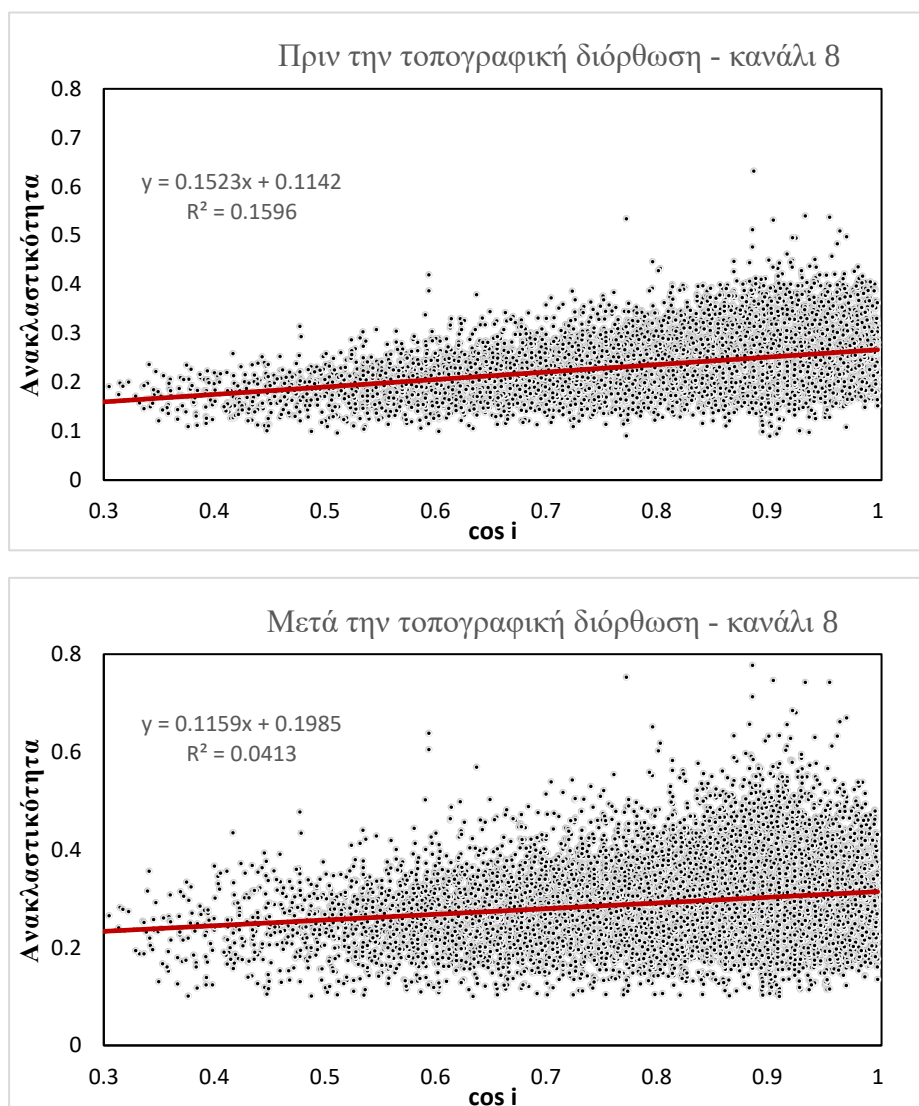


Σχήμα 23. Εικόνες Sentinel 2 σε χρωματική σύνθεση 8, 4, 3 πριν (Α) και μετά την τοπογραφική διόρθωση (Β).



Σχήμα 24. Οπτική αντιπαράθεση του καναλιού 8 (NIR) πριν (Α) και μετά (Β) την τοπογραφική διόρθωση.

Από την σύγκριση των εικόνων του σχήματος 23 προκύπτει ότι η μέθοδος που εφαρμόστηκε ελαχιστοποίησε την τοπογραφική επίδραση στην τοπογραφικά κανονικοποιημένη εικόνα. Ένα συμπέρασμα το οποίο εξάγεται και από το σχήμα 24 όπου η διαφορά ανάμεσα στην τοπογραφικά διορθωμένη και μη εικόνα του καναλιού 8 είναι εμφανής καθότι εξομαλύνεται η αίσθηση της διάστασης που προσδίδει η τοπογραφία. Πέρα από την οπτική εντύπωση το αποτέλεσμα στηρίχθηκε στα ίδια τα δεδομένα με την βοήθεια της ανάλυσης συσχέτισης μεταξύ της ανακλαστικότητας και του φωτισμού. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής συσχέτισης τόσο πιο φανερές είναι οι τοπογραφικές επιδράσεις.



Σχήμα 25. Διαγράμματα διασποράς και τοποθέτηση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης της ανακλαστικότητας του καναλιού 8 και του φωτισμού πριν και μετά την διόρθωση.

Το μοντέλο διόρθωσης αποδυνάμωσε την επίδραση του αναγλύφου. Πιο συγκεκριμένα, για το κανάλι 8 (Σχ. 25) ο συντελεστής συσχέτισης R^2 μειώθηκε κατά 74.12% φτάνοντας πολύ κοντά στο 0 ($R^2 = 0.04$). Το 0 συμβολίζει την απουσία της τοπογραφικής επίδρασης. Προχωρώντας, ένα ακόμη θετικό της μεθόδου είναι η διόρθωση των τιμών σε λογικά πλαίσια. Με λίγα λόγια απουσιάζει η υπερδιόρθωση στην γενική εικόνα και αυτό συμπεραίνεται από την μικρή θετική κλίση της ευθείας γραμμικής παλινδρόμησης (Σχ. 25). Σε περίπτωση υπερδιόρθωσης η σχέση ανακλαστικότητα - φωτισμού θα μετατρεπόταν σε αρνητική.

6.2. Μωσαϊκό

Κατά την προετοιμασία των εικόνων στην κατασκευή του μωσαϊκού πραγματοποιήθηκε προβολικός μετασχηματισμός σε κοινό σύστημα αναφοράς το οποίο για την Ελλάδα είναι το ΕΓΣΑ 87. Στην συνέχεια οι εικόνες (7 στον αριθμό που συνθέτουν την Κρήτη) με το νέο σύστημα αναφοράς αποτέλεσαν το σύνολο δεδομένων τροφοδοσίας του μωσαϊκού στην δημιουργία ενός ενιαίου ψηφιδωτού επιπέδου (Σχ. 26).



Σχήμα 26. Μωσαϊκό Κρήτης.

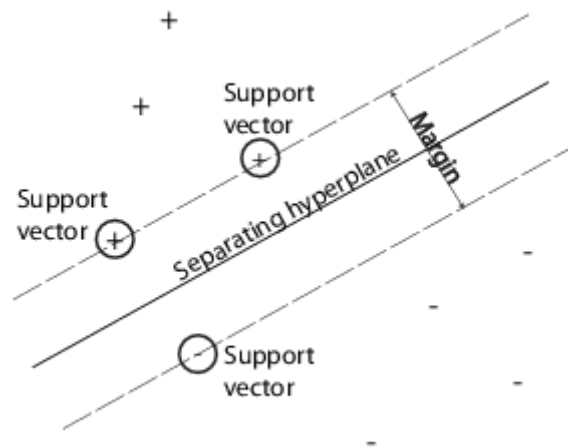
6.3. Ο αλγόριθμος ταξινόμησης SVM

Ο SVM¹¹ είναι ένας πιο πρόσφατος προηγμένος αλγόριθμος ταξινόμησης που χρησιμοποιείται ευρέως για την ταξινόμηση της κάλυψης γης (Huang et al., 2008, 2002; Mountrakis et al., 2011). Η ιδέα του SVM είναι να βρεθεί το ιδανικό υπερεπίπεδο που μεγιστοποιεί το διαχωριστικό περιθώριο μεταξύ δύο κλάσεων με ελάχιστο σφάλμα λανθασμένης ταξινόμησης (Yousefi et al., 2015).

Η πρώτη ανάπτυξη της SVM ξεκίνησε το 1970 με την σύσταση της θεωρίας της από τους Vapnik and Chervonenkis ενώ η δημοτικότητα της στην αναγνώριση προτύπων και στην ταξινόμηση στην πραγματικότητα αυξήθηκε στα τέλη της δεκαετία του 1990 (Vapnik, 2000; Vapnik and Chervonenkis, 1971). Η SVM χρησιμοποιεί μία οριζόμενη από τον χρήστη συνάρτηση πυρήνα για να προσδιορίσει ένα σύνολο μη γραμμικών ορίων απόφασης στο αρχικό σύνολο δεδομένων σε γραμμικά όρια ενός υψηλότερων διαστάσεων δομήματος (Huang et al., 2002; Islam et al., 2012; Srivastava et al., 2012). Η SVM επιχειρεί να βρει το βέλτιστο διαχωριστικό υπερεπίπεδο μέσω μίας προσέγγισης βελτιστοποίησης, η οποία χρησιμοποιεί Lagrange πολλαπλασιαστές και εφαρμόζει τις μεθόδους του τετραγωνικού προγραμματισμού (quadratic programming methods) (Foody, 2004; Pal and Mather, 2005a).

Η SVM είναι μία τεχνική ελεγχόμενης μηχανικής μάθησης που εκτελεί ταξινόμηση βάσει της θεωρίας στατιστικής μάθησης. Εν συντομία, για την απλή περίπτωση του διαχωρισμού δύο κλάσεων, η λειτουργία SVM βασίζεται στην τοποθέτηση ενός υπερεπιπέδου (hyperplane) που παρέχει τον καλύτερο διαχωρισμό μεταξύ των δύο κλάσεων σε έναν πολυδιάστατο χώρο χαρακτηριστικών. Αυτό το υπερεπίπεδο διαμορφώνει ουσιαστικά την επιφάνεια απόφασης στην οποία λαμβάνει χώρα ο βέλτιστος διαχωρισμός των κλάσεων. Διαισθητικά, το βέλτιστο υπερεπίπεδο είναι αυτό που μεγιστοποιεί την απόσταση μεταξύ του υπερεπιπέδου και του πλησιέστερου θετικού και αρνητικού παραδείγματος εκπαίδευσης, το οποίο ονομάζεται περιθώριο [(margin), Σχ. 27].

¹¹ Support Vector Machines – SVM – Μηχανές Διανυσμάτων Υποστήριξης



Σχήμα 27. Βέλτιστο υπερεπίπεδο διαχωρισμού δύο κλάσεων.

Πηγή:

(<https://www.mathworks.com/help/stats/svmhyperplane.png>).

Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερο είναι το περιθώριο, τόσο χαμηλότερη είναι η γενίκευση του σφάλματος του ταξινομητή. Από ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης, το πρόβλημα βελτιστοποίησης λύνεται για να βρεθεί το υπερεπίπεδο που οδηγεί σε μία αραιή λύση. Ως εκ τούτου, μόνο ένα υποσύνολο των δειγμάτων εκπαίδευσης, εκείνα που βρίσκονται στο περιθώριο (που ονομάζονται «support vectors», Σχ. 27) χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν το υπερεπίπεδο. Έτσι, συχνά, δεν χρησιμοποιούνται όλα τα αποκτηθέντα παραδείγματα εκπαίδευσης στον σχεδιασμό του διαχωριστικού επιπέδου και αυτό είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό γενίκευσης των SVM σε σύγκριση με άλλους μη παραμετρικούς ταξινομητές. Σε περίπτωση μη γραμμικά διαχωρίσιμου χώρου, συχνά χρησιμοποιείται μία λειτουργία πυρήνα (kernel function) για να χαρτογραφήσει τις μη γραμμικές συσχετίσεις σε έναν χώρο με διαστάσεις [(dimensional space), Σχ. 28]. Συνήθως οι πυρήνες που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τους εξής πυρήνες: πολωνυμικό, σιγμοειδή (sigmoid), συνάρτηση ακτινωτής βάσης [radial basis function (RBF)].



Σχήμα 28. Διαχωρισμός κλάσεων με βάση τη λειτουργία πυρήνα της συνάρτησης ακτινωτής βάσης. Πηγή: (<http://journals.plos.org/plosone>).

Ο ταξινομητής SVM έχει επιτυχώς χρησιμοποιηθεί στο πεδίο της τηλεπισκόπησης σε εφαρμογές ταξινόμησης πολυφασματικών δεδομένων (Dixon and Candade, 2008; Foody, 2002; Huang et al., 2002, 2016, Pal and Mather, 2005a, 2005b; Waske and Benediktsson, 2007). Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι η SVM έδειξε καλή ακρίβεια ταξινόμησης σε σχέση με άλλες παραδοσιακές τεχνικές όπως ο ταξινομητής της μέγιστης πιθανοφάνειας (Otukey and Blaschke, 2010; Srivastava et al., 2012; Szuster et al., 2011).

Οι Melgani και Bruzzone (2004) και οι Huang et al. (2002) παρείχαν λεπτομερή εισαγωγή της μεθόδου στην κοινότητα που ασχολείται με την τηλεπισκόπηση. Ο Mountrakis et al. (2011) συνοψίζει τα εμπειρικά αποτελέσματα πάνω από 100 δημοσιεύσεων για τον SVM αλγόριθμο ταξινόμησης εικόνας. Το κύριο πλεονέκτημα της SVM είναι η καλή ικανότητα γενίκευσης με περιορισμένα δείγματα εκπαίδευσης. Οι συγγραφείς αναγνώρισαν τους περιορισμούς της SVM στην επιλογή των παραμέτρων και στις υπολογιστικές απαιτήσεις. Ωστόσο, η SVM παρέχει ανώτερη απόδοση σε σύγκριση με τους περισσότερους άλλους αλγόριθμους ταξινόμησης εικόνας τόσο για πραγματικά δορυφορικά όσο και δεδομένα προερχόμενα από πειράματα προσομοίωσης (Mountrakis et al., 2011). Η ανώτερη απόδοση της SVM αναφέρθηκε σε πολλές έρευνες. Ο Huang et al. (2002) εφάρμοσαν την ταξινόμηση

SVM για χωρικά υποβαθμισμένα Landsat Thematic Mapper (TM) δεδομένα. Η SVM ακρίβεια ταξινόμησης ήταν ανώτερη από αυτήν που προέκυψε χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο μέγιστης πιθανοφάνειας και τον αλγόριθμο κατασκευής δέντρων απόφασης (decision trees). Ο Camps-Valls et al. (2008) παρουσίασαν μία πρωτότυπη οικογένεια μεθόδων βασισμένων σε πυρήνα για δεδομένα με χρονοσειρές εικόνων. Η προσέγγιση SVM απέδειξε την ανώτερη απόδοσή της σε σχέση με τα νευρωνικά δίκτυα για τα υψηλής ανάλυσης φασματικά δεδομένα. Ο Bovolo et al., (2010) έδειξαν την ισχυρή ικανότητα ανίχνευσης έκτροπων τιμών από την SVM. Η εφαρμογή της SVM σε δορυφορικά δεδομένα έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τον χαρακτηρισμό της κάλυψης γης σε περιφερειακό επίπεδο όπως αναφέρουν και οι Shao και Lunetta (2012) για (MODIS) χρονοσειρές δεδομένων. Ένα σύνολο ακόμη μελετών έχουν δείξει ότι η μέθοδος ταξινόμησης SVM μπορεί να παρέχει καλά αποτελέσματα για δεδομένα τηλεπισκόπησης ενώ τα αποτελέσματά της έχει βρεθεί να είναι καλύτερα σε σχέση με παραδοσιακούς αλγόριθμους ταξινόμησης όπως ο αλγόριθμος της μέγιστης πιθανοφάνειας, ο αλγόριθμος του k-πλησιέστερου γείτονα και ο αλγόριθμος των νευρωνικών δικτύων (Huang et al., 2002; Melgani and Bruzzone, 2004; Pal and Mather, 2005a). Η πιο ελκυστική ιδιότητα της SVM είναι η υψηλή ικανότητα για γενίκευση με σχετικά μικρά δείγματα εκπαίδευσης (Pal and Mather, 2005a).

Στη μελέτη παρακολούθησης της φυσικής βλάστησης στη Μεσόγειο, ο Sluiter (2005) ερευνήσε ένα ευρύ φάσμα μεθόδων ταξινόμησης της βλάστησης σε δορυφορική εικόνα. Οι μέθοδοι τυχαία δάση (random forests) και SVM που διερευνήθηκαν, έδειξαν καλύτερες επιδόσεις έναντι των παραδοσιακών τεχνικών ταξινόμησης (Sluiter, 2005). Τα αποτελέσματα από την μελέτη του Yousefi et al., (2015) έδειξαν ότι οι μέθοδοι SVM και νευρωνικά δίκτυα μπορούν να επιτύχουν υψηλότερη συνολική ακρίβεια σε σχέση με τους άλλους εξεταζόμενους αλγορίθμους [maximum likelihood (ML), minimum distance to mean (MDM), Mahalanobis distance (MD)], με ένα ελαφρώς πλεονέκτημα για την SVM. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής επιβεβαίωσαν τα αποτελέσματα ενός συνόλου ανάλογων μελετών (Huang et al., 2008, 2002; Oommen et al., 2008; Szuster et al., 2011).

Η χρήση των αλγορίθμων μηχανικής μάθησης έχει αποκτήσει δυναμική τα τελευταία χρόνια και κάποιες εκτιμήσεις της σχετικής την απόδοσή τους σε σύγκριση με άλλους ταξινομητές έχουν διεξαχθεί (Lu and Weng, 2007). Συγκεκριμένα, η SVM έχει αποδειχθεί για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας σε χαρτογράφηση της κάλυψης γης και

ξεπερνά άλλους αλγόριθμους (Foody, 2002; Huang et al., 2002; Kavzoglu and Colkesen, 2009; Mountrakis et al., 2011; Pal and Mather, 2005a). Η SVM έχει δύο σημαντικά πλεονεκτήματα για χαρτογράφηση κάλυψης γης. Πρώτον, δεδομένου ότι ο SVM ταξινομητής επιδιώκει τον διαχωρισμό των κλάσεων – τύπων κάλυψης γης βρίσκοντας ένα επίπεδο στον πολυδιάστατο χώρο που μεγιστοποιεί τον διαχωρισμό τους, παρά από τον χαρακτηρισμό αυτών των κλάσεων με στατιστικά στοιχεία, δεν χρειάζονται ένα μεγάλο σύνολο εκπαίδευσης αλλά μόνο τα δείγματα εκπαίδευσης που είναι διανύσματα υποστήριξης (Foody and Mathur, 2006). Έτσι, για τον SVM ταξινομητή οι Foody και Mathur (2006) προτείνουν τη χρήση μικρών συνόλων εκπαίδευσης που αποτελούνται από σκόπιμα επιλεγμένες ψηφίδες που περιέχουν τα διανύσματα υποστήριξης καθώς η προσέγγιση αυτή δεν θέτει σε κίνδυνο την ακρίβεια της ταξινόμησης και μπορεί να εξοικονομήσει σημαντικό χρόνο. Δεύτερον, οι SVM αλγόριθμοι είναι ανεξάρτητοι των διαστάσεων των δεδομένων (Dixon και Candade, 2008), το οποίο είναι ένα βασικό χαρακτηριστικό όταν χρησιμοποιούνται πολλά φασματικά κανάλια όπως σε υπερφασματικές εικόνες ή όταν βοηθητικά δεδομένα περιλαμβάνονται στη διαδικασία ταξινόμησης. Αντιστρόφως, για ταξινομητές που εξαρτώνται από την διάσταση (π.χ. τεχνητά νευρωνικά δίκτυα), τα σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης πρέπει εκθετικά να αυξάνονται σε μέγεθος ώστε να διατηρηθεί η απόδοση του ταξινομητή (Dixon και Candade, 2008).

Οι Shao και Lunetta (2012) επικεντρώθηκαν στην επίδραση του μεγέθους του δείγματος εκπαίδευσης ανά κλάση χρησιμοποιώντας τυχαία επιλεγμένα δείγματα από μία μεγάλη συλλογή δεδομένων με σημεία εκπαίδευσης. Χρήσιμα συμπεράσματα της μελέτης ακολουθούν:

- i. Η SVM έχει εκπληκτική δυνατότητα γενίκευσης και ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούνται μικρά δείγματα εκπαίδευσης.
- ii. Παρουσιάζεται μικρή διακύμανση της απόδοσης της SVM στις επαναλαμβανόμενες δοκιμές ταξινόμησης με χρήση διαφορετικών συνόλων εκπαίδευσης.
- iii. Η ακρίβεια της ταξινόμησης συσχετίζεται απευθείας με την ομογένεια/ετερογένεια του δείγματος. Μεγαλύτερη ομογένεια συνεπάγεται και μεγαλύτερη ακρίβεια.

- iv. Η ακρίβεια στην ταξινόμηση της κάλυψης γης είναι μεγαλύτερη με την SVM παρά με νευρωνικά δίκτυα και δέντρα ταξινόμησης και παλινδρόμησης (CART - classification and regression trees).

Η δυνατότητα για χαρακτηρισμό της κάλυψης γης σε περιφερειακή κλίμακα είναι υψηλή (Shao and Lunetta, 2012).

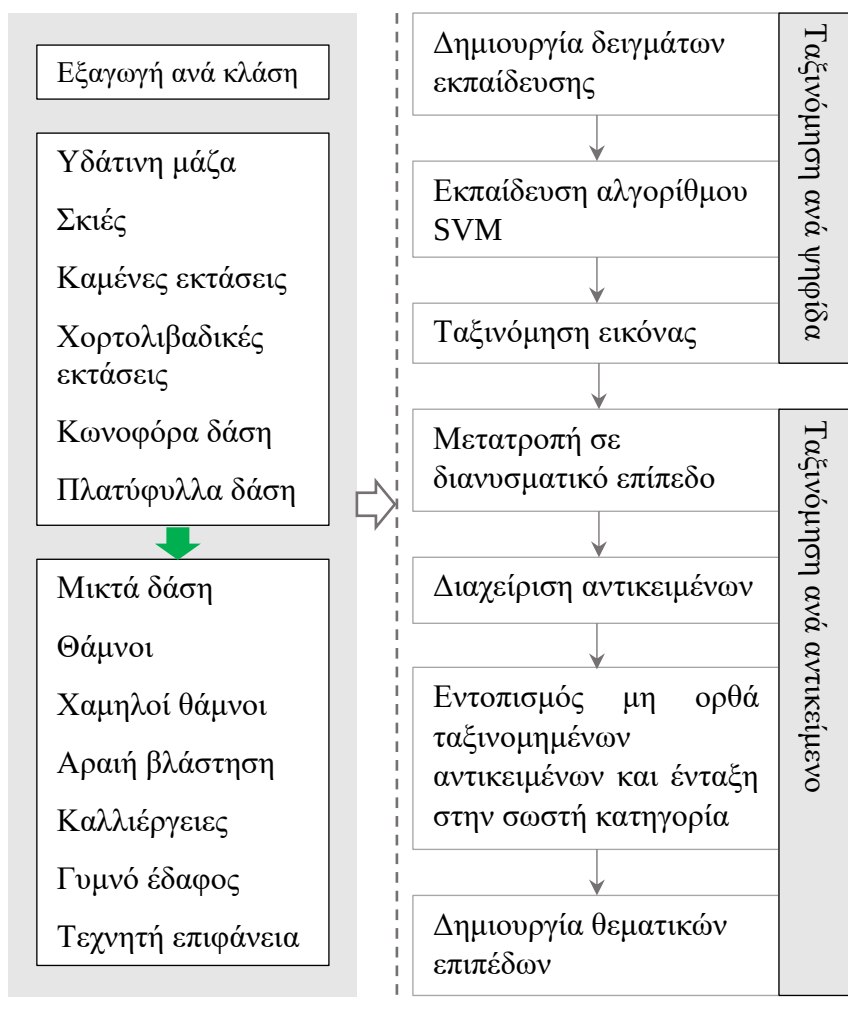
Προσθέτοντας στο σημείο iii, οι προσεγγίσεις ταξινόμησης με βάση το pixel όταν εφαρμόζονται σε ετερογενείς περιοχές έχουν περιορισμούς, καθώς το μέγεθος του αντικειμένου μπορεί να είναι μικρότερο από το μέγεθος του pixel (Li, 2014). Ο χωρικός διαχωρισμός και η χαμηλότερη μείξη των κατηγοριών κάλυψης γης μπορούν να αυξήσουν την συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης (Yousefi et al., 2015). Η προσέγγιση ταξινόμησης SVM έχει χαρακτηριστεί ως πολύ καλά προσαρμοσμένη στο να χαρτογραφείται με ακρίβεια η κάλυψη γης ετερογενών τοπίων, έχοντας έτσι μεγάλες δυνατότητες να συμβάλει σε συστήματα άμβλυνσης της κλιματικής αλλαγής, σε πρωτοβουλίες διατήρησης και σχεδιασμού των σχεδίων διαχείρισης και των πολιτικών αγροτικής ανάπτυξης (Paneque-Gálvez et al., 2013). Στην μελέτη του Paneque-Gálvez et al. (2013), μεταξύ των παραμετρικών (Μέγιστης πιθανοφάνειας - MLC), μη-παραμετρικών (k-πλησιέστερου γείτονα και τεσσάρων διαφορετικών SVM και υβριδικών (χωρίς επίβλεψη-με επίβλεψη) ταξινομητών, χρησιμοποιώντας αυστηρές και λιγότερο αυστηρές (ασαφείς) αξιολογήσεις ακρίβειας οι ταξινομητές SVM ξεπέρασαν σε απόδοση όλους τους υπόλοιπους σε εικόνες που αντιστοιχούν σε ξηρές και υγρές εποχές. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί πως το μικρό μέγεθος και η κακή ποιότητα του μοτίβου εκπαίδευσης τα οποία ενέχουν προβλήματα ταξινόμησης αντιμετωπίζονται με την προσέγγιση της χρήσης του κόλπου του πυρήνα (kernel trick) στις ελεγχόμενες μεθόδους ταξινόμησης, όπως σε αυτήν της SVM (Baraldi et al., 2005; Chi and Bruzzone, 2005 αναφορά σε Maulik and Chakraborty, 2012). Άλλο ένα θετικό σημείο της μεθόδου.

Η MLC ως παραδοσιακή μέθοδος δείχνει λιγότερο ικανοποιητικές επιτυχίες από την στιγμή που η υπόθεση της μεθόδου ότι τα δεδομένα ακολουθούν Gaussian κατανομή μπορεί να μην διατηρείται πάντα σε πολύπλοκες περιοχές (Xie et al., 2008). Από την άλλη μεριά, η SVM είναι κατάλληλη για να διαχωρίσει πολυτροπικές κλάσεις, κάτι το οποίο είναι δύσκολο για τους παραμετρικούς ταξινομητές (όπως η MLC) να ταξινομήσουν με ακρίβεια λόγω της παραβίασης της υπόθεσης της κανονικής κατανομής

των τιμών ανάκλασης μέσα σε μία κλάση. Αυτή η διαφορά είναι εξαιρετικής σημασίας για τις κλάσεις στον τομέα της γεωργίας, όπου καλλιεργήσιμο έδαφος, λιβάδια και ώριμες καλλιέργειες παρουσιάζουν πολυτροπικές ανακλάσεις. Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι η SVM μπορεί να συλλάβει καλά την γεωργική εγκατάλειψη της γης και ειδικά όταν εικόνες με την βέλτιστη ημερομηνία είναι διαθέσιμες (Baumann et al., 2011; Kuemmerle et al., 2009; Prishchepov et al., 2012). Επιπλέον, σε αντίθεση με την SVM, η MLC με μικρότερο δείγμα εκπαίδευσης από το συνολικό καταλήγει σε ένα λιγότερο ακριβές αποτέλεσμα (Prishchepov et al., 2012). Ολοκληρώνοντας την ενότητα αυτή, ένα σημείο της SVM, το οποίο θα μπορούσε να αναφερθεί ως αρνητικό και το οποίο διαφέρει από τις υπόλοιπες μεθόδους είναι το γεγονός ότι είναι υπολογιστικά απαιτητική (Huang et al., 2002). Αυτό όμως αντισταθμίζεται από την ικανοποίηση του αποτελέσματος και την υψηλή συνολική ακρίβεια του αλγορίθμου SVM (Petrooulos et al., 2011; Srivastava et al., 2012).

6.4. Μεθοδολογία ταξινόμησης εικόνας

Για την χαρτογράφηση της κάλυψης γης από εικόνες MSI προτείνεται μεθοδολογικό σχήμα με την προσέγγιση ταξινόμησης που αναπτύχθηκε στην εξαγωγή πληροφορίας με εμφανή βελτιωμένα αποτελέσματα (Σχ. 29). Σε πρώτη φάση ορίστηκαν οι κατηγορίες κάλυψης γης και πραγματοποιήθηκε ανάθεση περιοχών εκπαίδευσης (πολυγώνων) για κάθε μία από αυτές βάσει εμπειρικής γνώσης και με υπόβαθρο την δορυφορική εικόνα της περιοχής μελέτης. Οι περιοχές εκπαίδευσης είναι αντιπροσωπευτικές της συνολικής εικόνας, είναι διαφορετικής έκτασης ανά κατηγορία για την ικανοποίηση της υπόθεσης του κατάλληλου μεγέθους δείγματος και χαρακτηρίζονται από έναν πολύ καλό διαχωρισμό φασματικών υπογραφών μεταξύ των περισσότερων κατηγοριών κάλυψης γης. Με σημείο αναφοράς τα δείγματα εκπαίδευσης πραγματοποιήθηκε εκπαίδευση του αλγορίθμου του ταξινομητή SVM, ένα βήμα απαραίτητο το οποίο προηγείται της ταξινόμησης. Ακολούθως διεξήχθη η ταξινόμηση εικόνας και η οπτική ερμηνεία του αποτελέσματος. Η διαδικασία μέχρι το σημείο αυτό είναι κυκλική και σταματά όταν το αποτέλεσμα του θεματικού χάρτη προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό την πραγματική κάλυψη του εδάφους. Η υφή, το μέγεθος, το χρώμα και η τιμή ανακλαστικότητας των αντικειμένων του χώρου βοήθησαν στον χαρακτηρισμό τους.



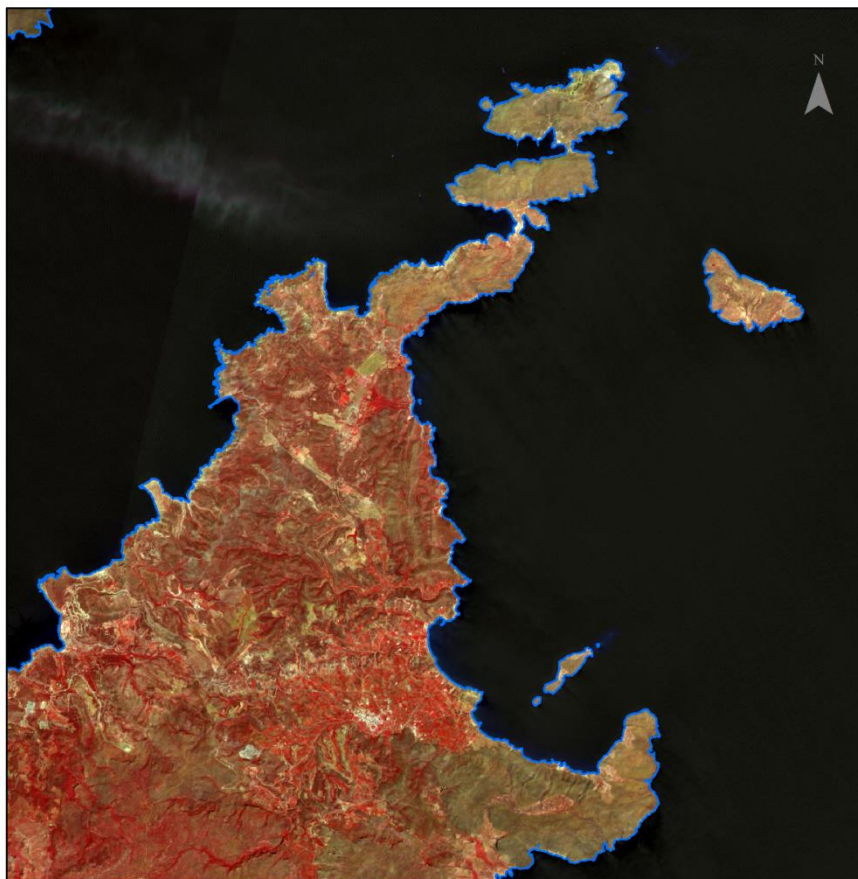
Σχήμα 29. Σκελετός της ανεπτυγμένης προσέγγισης ταξινόμησης.

Οι υποπεριοχές των πρώτων έξι κλάσεων (Σχ. 29) που ταξινομήθηκαν ορθά αφαιρέθηκαν από την συνολική εικόνα και η διαδικασία συνεχίστηκε για την υπόλοιπη περιοχή. Μετά την ταξινόμηση του συνόλου της περιοχής μελέτης, τα ψηφιδωτά επίπεδα μετατράπηκαν σε διανυσματικά. Το βήμα αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία καθότι διευκολύνεται η διαχείριση των θεματικών επιπέδων τα οποία από την ταξινόμηση βάσει ψηφίδας εμπεριέχουν έναν αριθμό αναμενόμενων μη ορθά ταξινομημένων ψηφίδων εξαιτίας της φασματικής σύγχυσης μεταξύ ζευγών τύπων κάλυψης γης και της φασματικής ποικιλότητας εντός του ίδιου τύπου κάλυψης (Chen et al., 2015). Παραδειγματικά, ζεύγη τύπων που εμφάνισαν φασματική ομοιότητα είναι οι σκιές με την υδάτινη μάζα, το γυμνό έδαφος με τις τεχνητές επιφάνειες, τα θερμοκήπια (τεχνητές επιφάνειες) με τις καλλιέργειες και οι καλλιέργειες με την αραιή βλάστηση. Στην αντιμετώπιση του ζητήματος αυτού εξετάστηκαν τα αντικείμενα του χώρου στα διανυσματικά επίπεδα και στην συνέχεια ακολούθησε η επεξεργασία αυτών με σκοπό

την ένταξη των λανθασμένα ταξινομημένων αντικειμένων στην σωστή κατηγορία. Στην διεξαγωγή αυτού του βήματος χρησιμοποιήθηκαν ως βοηθητικά δεδομένα οι χάρτες του Google Earth. Το βήμα αυτό της διόρθωσης έχει ιδιαίτερη αξία καθώς ψηφίδες ίδιας τιμής ανακλαστικότητας αλλά διαφορετικής κατηγορίας δεν δύναται να διακριθούν όσοι δείκτες και να υπολογιστούν. Μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας τα έτοιμα θεματικά επίπεδα αποτελούνται από ένα σύνολο πολυάριθμων τεμαχισμένων αντικειμένων. Για την μείωση των αντικειμένων στον ελάχιστο αριθμό αξιοποιήθηκε η λειτουργία της συγχώνευσης δεδομένων με βάση τον ξεχωριστό αριθμό ταυτότητας που περιγράφει την θεματική πληροφορία. Τα ξεχωριστά θεματικά επίπεδα συνενώθηκαν σε ένα επίπεδο, το επίπεδο της κάλυψης γης με δεκατρείς κατηγορίες. Το σύνολο της μεθοδολογίας της ταξινόμησης και της αξιολόγησης της ακρίβειας, όπως αναφέρεται παρακάτω, υλοποιήθηκαν με τη βοήθεια του ArcMap 10.4.1.

6.5. Εξαγωγή της πληροφορίας της ακτογραμμής με χρήση του θεματικού επιπέδου της κάλυψης γης

Αξιοποιώντας το θεματικό επίπεδο της κάλυψης γης και πιο συγκεκριμένα το επίπεδο της υδάτινης μάζας επιτεύχθηκε η εξαγωγή της πληροφορίας της ακτογραμμής. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τρία. Το πρώτο αφορά την απαλοιφή της πολυγωνικής οντότητας της υδάτινης μάζας από το πολύγωνο που οριοθετεί το σύνολο της δορυφορικής εικόνας. Το δεύτερο αφορά στην επεξεργασία του παραγόμενου επιπέδου από το πρώτο βήμα δηλαδή στην αφαίρεση όλων των οντοτήτων της υδάτινης μάζας εντός της στεριάς. Το τρίτο και τελευταίο βήμα αναφέρεται στην μετατροπή του πολυγώνου της ακτογραμμής σε γραμμικό επίπεδο. Αυτός είναι ένας απλός τρόπος απόκτησης της πληροφορίας της ακτογραμμής, ο οποίος προτείνεται εφόσον υπάρχει η πληροφορία της κάλυψης γης και σε περιπτώσεις οριοθέτησης της κάλυψης γης εντός της στεριάς. Σε περιπτώσεις αφαίρεσης της θάλασσας από δορυφορικές εικόνες και εστίασης στην στεριά να επιλέγεται είτε μία ορθή ακτογραμμή, η οποία δεν θα αφαιρεί πληροφορία από την στεριά, είτε η δημιουργία ενός ορίου πολύ κοντά στην ακτογραμμή. Στο σχήμα 30 που ακολουθεί παρουσιάζεται τμήμα της δημιουργούμενης ακτογραμμής η οποία ορίζει σε βέλτιστο βαθμό την στεριά. Στην παρούσα εργασία η πληροφορία της ακτογραμμής είναι απαραίτητη για την εξαίρεση της θάλασσας από τα υπόλοιπα στάδια και την εστίαση στην στεριά.



Σχήμα 30. Παρουσίαση τμήματος της δημιουργούμενης ακτογραμμής στο βορειοανατολικό άκρο της Κρήτης.

6.6. Αξιολόγηση της ακρίβειας του αποτελέσματος ταξινόμησης

Η ανάκτηση δεδομένων αναφοράς για την εκτίμηση της ακρίβειας βασίζεται σε μια στρωματοποιημένη τυχαία επιλογή του δείγματος σε σημεία ισάριθμα ανά τύπο κάλυψης γης στα οποία απουσιάζει η χωρική αυτοσυσχέτιση. Τα δεδομένα αναφοράς επαληθεύτηκαν με εμπειρική γνώση από τις ίδιες τις δορυφορικές εικόνες. Συνολικά για την αξιολόγηση της ακρίβειας του αποτελέσματος της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκαν τόσα σημεία όσος είναι και ο αριθμός των τύπων κάλυψης γης επί τον αριθμό αυτό αυξημένο κατά την μονάδα. Συνεπώς έγινε αξιολόγηση σε 182 σημεία συνολικά, υποστηρίζοντας την άποψη πως με τα ελάχιστα αυτά σημεία η κρίση του αποτελέσματος είναι πιο αυστηρή. Τα σημεία αυτά ορίζονται εντός της στεριάς. Από

την σύγκριση των ταξινομημένων ψηφίδων με τα πραγματικά δεδομένα χρησιμοποιώντας μία μήτρα σύγχυσης πραγματοποιήθηκε η ανάλυση της ακρίβειας.

Τύποι κάλυψης γης	ClassValue,C	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_10	C_11	C_12	C_14	Total	U_Accuracy	Kappa
καμένες εκτάσεις	C_1	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	1	0
χορτολιβαδικές εκτάσεις	C_2	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	1	0
πλατύφυλλα δάση	C_3	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	1	0
κωνοφόρα δάση	C_4	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	1	0
υδάτινη μάζα	C_5	0	0	0	0	12	1	1	0	0	0	0	0	0	14	0.86	0
σκιές	C_6	0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0	0	14	1	0
τεχνητές επιφάνειες	C_7	0	0	0	0	0	0	13	0	0	1	0	0	0	14	0.93	0
θάμνοι	C_8	0	0	0	0	0	0	0	13	0	0	1	0	0	14	0.93	0
χαμηλοί θάμνοι	C_9	0	0	0	0	0	0	1	0	12	1	0	0	0	14	0.86	0
γυμνό έδαφος	C_10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	0	14	1	0
καλλιέργειες	C_11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	0	14	1	0
αραιή βλάστηση	C_12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	0	14	1	0
μικτά δάση	C_14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14	14	1	0
	Total	14	14	14	14	12	15	15	13	12	16	15	14	14	182	0	0
	P_Accuracy	1	1	1	1	1	0.93	0.87	1	1	0.88	0.93	1	1	0	0.97	0
	Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.96

Πίνακας 6. Πίνακας σύγχυσης για την SVM ταξινόμηση των Sentinel 2 δεδομένων.

Η συνολική ακρίβεια με ποσοστό 97% δηλώνει πως η ταξινόμηση είναι καλή στο να διαχωρίζει τις ψηφίδες στις κλάσεις τους με πολύ λίγες ψηφίδες να μην έχουν ταξινομηθεί σωστά (Πίνακας 6). Η τιμή 0.96 του συντελεστή kappa δείχνει πως τα αποτελέσματα της ταξινόμησης και τα πραγματικά δεδομένα είναι σε μία πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους. Ως προς την ακρίβεια του παραγωγού το ποσοστό είναι 100% σε 9 από τις συνολικά 13 κλάσεις δηλώνοντας ότι όλα τα συλλεγόμενα δείγματα επικύρωσης βρέθηκαν επίσης να ανήκουν στην ίδια κλάση με την ταξινομημένη εικόνα. Το 87% των τεχνητών επιφανειών στην ακρίβεια παραγωγού δηλώνει την λανθασμένη ταξινόμηση δύο ψηφίδων που ταξινομήθηκαν ως χαμηλοί θάμνοι και υδάτινη μάζα (στην περίπτωση αυτή είναι αθλητικό γήπεδο του οποίου η φασματική υπογραφή συγχέεται με αυτή της υδάτινης μάζας) ενώ στην πραγματικότητα ανήκουν στην ομάδα των τεχνητών επιφανειών. Ακόμη, το αποτέλεσμα το οποίο ήταν αναμενόμενο αναφέρεται στην λανθασμένη ταξινόμηση ψηφίδας ως νερό αντί σκιάς λόγω φασματικής σύγχυσης. Ως προς την ακρίβεια του χρήστη και την ερμηνεία της αυτή είναι 93% για τις τεχνητές επιφάνειες διότι ψηφίδα τεχνητής επιφάνειας στην πραγματικότητα είναι γυμνό έδαφος. Συνεπώς, η ακρίβεια χρήστη 93% υποδηλώνει ότι το 93% των σημείων που ταξινομήθηκαν στην κλάση των τεχνητών επιφανειών αναμενόταν να ήταν η ίδια περιοχή όταν πραγματοποιείται εξέταση των δορυφορικών δεδομένων. Συμπερασματικά η ακρίβεια ταξινόμησης είναι υψηλή.

7. Χαρτογράφηση της Κάλυψης Γης της Ν. Κρήτης

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται οι θεματικοί χάρτες κάλυψης γης της Ν. Κρήτης όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την ταξινόμηση των δορυφορικών εικόνων που περιγράφηκε παραπάνω. Η χαρτοσύνθεση πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του λογισμικού ArcMap 10.4.1 της ESRI αποδίδοντας για κάθε κατηγορία κάλυψης γης κατάλληλη χρωματική απόχρωση σύμφωνα με δημοφιλείς διεθνείς πρακτικές. Ο ομαδοποιημένος θεματικός χάρτης των κατηγοριών κάλυψης γης της Ν. Κρήτης απεικονίζεται στο Σχήμα 31.

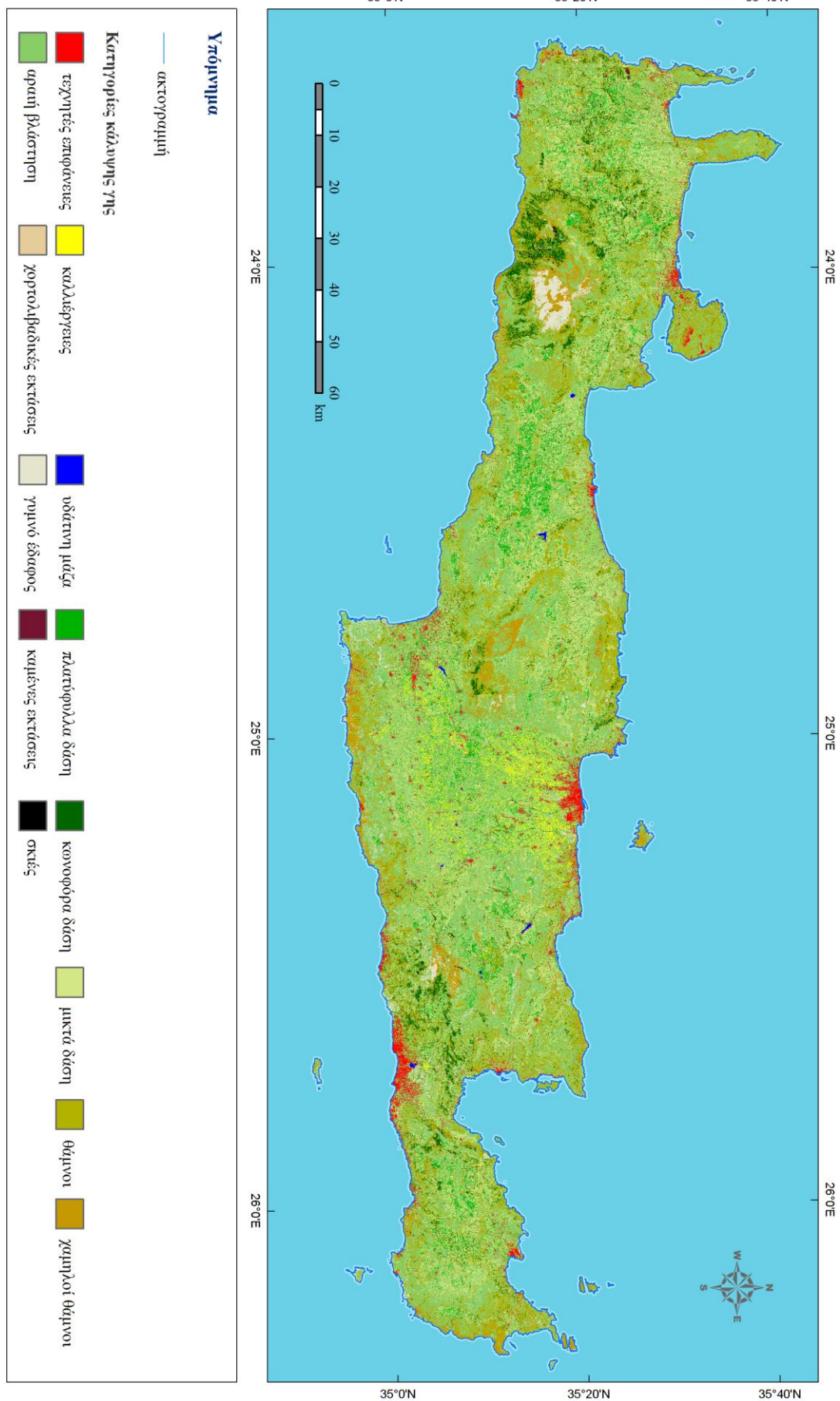
Η συνολική περιοχή της Κρήτης που ταξινομήθηκε είναι έκτασης 8291.191 km². Από το σύνολο του νησιού τα 232.75 km² είναι τεχνητές επιφάνειες. Συνεπώς το 2.81% της συνολικής επιφάνειας της περιοχής μελέτης είναι τεχνητές επιφάνειες. Η κατηγορία αυτή αποτελείται κυρίως από αστικές περιοχές, βιομηχανικές περιοχές, δρόμους, αεροδρόμια, λιμάνια, μικρούς οικισμούς, απομονωμένες κτιριακές υποδομές, απομονωμένα σπίτια, φωτοβολταϊκά πάρκα, ανεμογεννήτριες και θερμοκήπια. Στην Κρήτη το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης γης καταλαμβάνει το μωσαϊκό της αραιής βλάστησης με τις καλλιέργειες αγγίζοντας το 40.85% (Σχ. 32, Πίνακας 7). Η φασματική υπογραφή των καλλιεργούμενων εκτάσεων που καλύπτονται από φυτά είναι σχεδόν ταυτόσημη με αυτή της φυσικής βλάστησης προκαλώντας σύγχυση μεταξύ των κατηγοριών. Η παρατήρηση αυτή έχει αναφερθεί σε μία πληθώρα ερευνών εξέτασης της κάλυψης γης με δορυφορικές εικόνες.

Η κατηγορία των δασών συμπεριλαμβανομένων των πλατύφυλλων, των κωνοφόρων και των μικτών διατηρεί ένα ποσοστό της τάξεως του 31.55%. Η δυτική Κρήτη και συγκεκριμένα ο Ν. Χανίων είναι πρώτος σε έκταση κωνοφόρων δασών (190.38 km²) ενώ ο Ν. Ρεθύμνου είναι πρώτος σε έκταση πλατύφυλλων δασών (132.11 km²). Συνεχίζοντας με την υδάτινη μάζα στο εσωτερικό της Κρήτης αυτή αφορά κυρίως φυσικές και τεχνητές λίμνες, η πλειοψηφία των οποίων εντοπίζεται πλησίον οικισμών και καλλιεργειών. Τα ύδατα συνιστούν το 0.09% της συνολικής κάλυψης. Όσον αφορά το πρότυπο των χαμηλών θάμνων αυτό παρατηρείται συχνά στις παράκτιες περιοχές και σε υψηλά υψόμετρα στα Λευκά Όρη, την Ίδη (Ψηλορείτης) και τη Δίκτη (Λασιθιώτικα Όρη). Οι πιο ανεπτυγμένες αστικές περιοχές τοποθετούνται στην βόρεια παράκτια Κρήτη ενώ πολλοί και διάσπαρτοι οικισμοί σε κοντινές μεταξύ τους

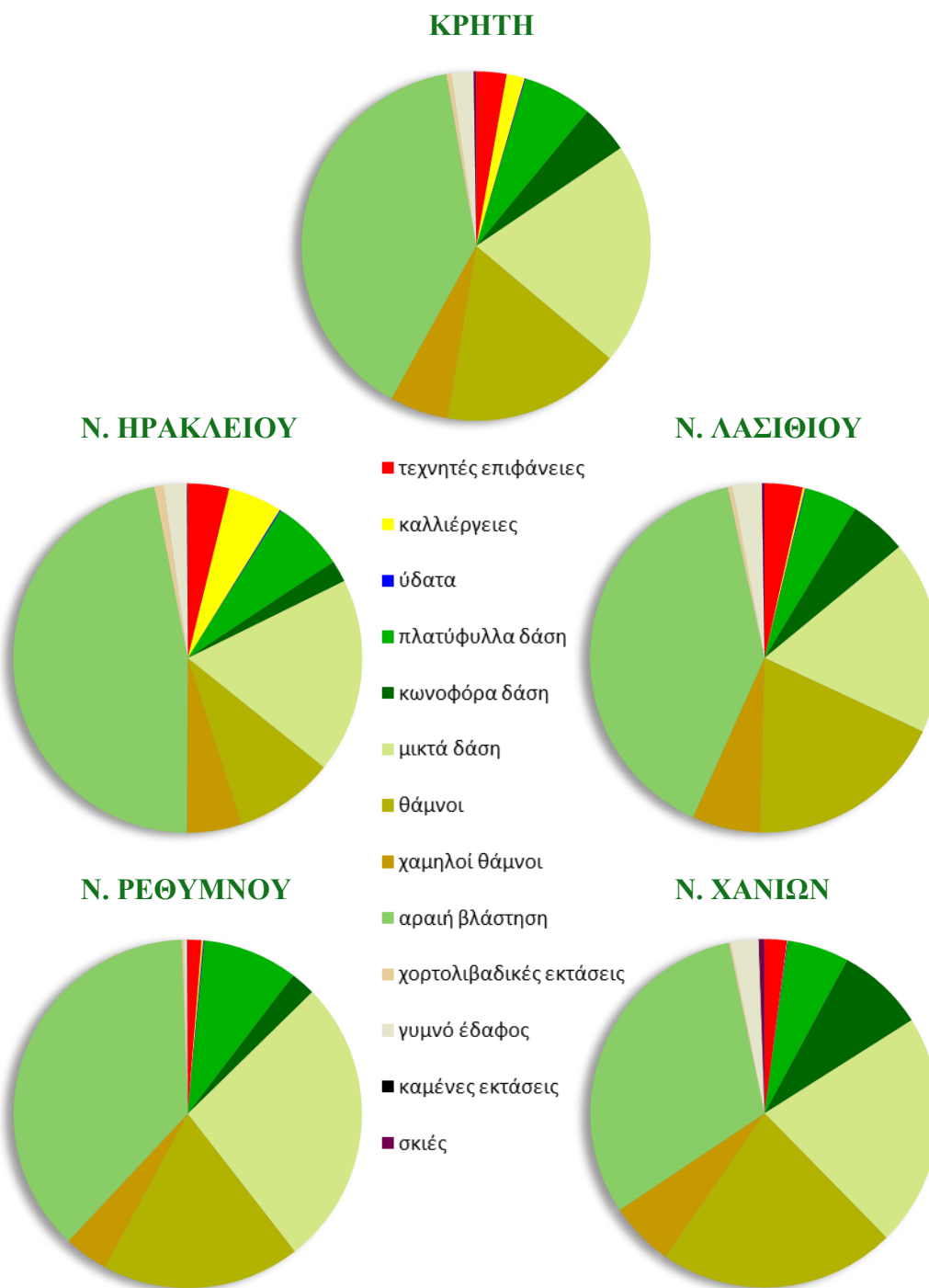
αποστάσεις παρατηρούνται σε όλη την έκταση της μεγάλης εσωτερικής πεδιάδας Μεσσαρά στην νότια Κρήτη στον Νομό Ηρακλείου. Τεχνητές επιφάνειες σημαντικής έκτασης στην νότια Κρήτη αφορούν θερμοκήπια. Το κεντρικό κομμάτι της Κρήτης χαρακτηρίζεται από τις μεγάλες εκτάσεις καλλιεργειών και το νότιο από τις πολλές θερμοκηπιακές μονάδες. Επομένως παρατηρείται σημαντική αγροτική δραστηριότητα.

Τα κύρια στοιχεία του φυσικού περιβάλλοντος καταλαμβάνουν σημαντική έκταση σε όλη την Κρήτη. Το ποσοστό κάλυψης ανέρχεται στο 97.19%. Το υπόλοιπο 2.81% αφορά το ανθρωπογενές περιβάλλον. Ο Ν. Ηρακλείου εμφανίζει μεγαλύτερο ποσοστό στις κατηγορίες των τεχνητών επιφανειών (3.83%), των καλλιεργειών, της αραιής βλάστησης, των υδάτων και των χορτολιβαδικών εκτάσεων σε σχέση με τους υπόλοιπους νομούς (Σχ. 31, 32, Πίνακας 7). Γενικότερα, στα ομαλότερα τμήματα του νησιού όπως ο Ν. Ηρακλείου ευνοούνται οι καλλιέργειες και η εξάπλωση του αστικού ιστού. Ο Ν. Ρεθύμνου εμφανίζει το μικρότερο ποσοστό τεχνητών επιφανειών (1.28%) και το μεγαλύτερο ποσοστό πλατύφυλλων (8.84%) και μικτών δασών (26.8%). Ο Ν. Λασιθίου με τη σειρά του διατηρεί μεγαλύτερα ποσοστά σε σχέση με τους υπόλοιπους νομούς στις κατηγορίες των χαμηλών θάμνων (6.3%) και του γυμνού εδάφους (2.73%).

Ο Ν. Χανίων χαρακτηρίζεται για τα κωνοφόρα του δάση (8.14%) και διαθέτει ένα σημαντικό ποσοστό θάμνων (22%). Οι σκιές στον Ν. Χανίων φτάνουν το 0.49% εξαιτίας του έντονου αναγλύφου στα Λευκά όρη. Επίσης, το ποσοστό των τεχνητών επιφανειών του Ν. Λασιθίου (3.53%) είναι κοντά στο ποσοστό της αντίστοιχης κατηγορίας για τον Ν. Ηρακλείου (3.83%). Υπάρχει όμως σημαντική διαφορά καθότι μεγάλο μέρος του ποσοστού των τεχνητών επιφανειών στον Ν. Λασιθίου αφορά θερμοκήπια ενώ στον Ν. Ηρακλείου αφορά περισσότερο οικιστική ανάπτυξη και βιομηχανικές εγκαταστάσεις, αν και στο νότιο κομμάτι του εντοπίζονται αρκετές θερμοκηπιακές μονάδες. Σύμφωνα με το Σχήμα 32 ο Ν. Ρεθύμνου και ο Ν. Χανίων υπερτερούν σε δάση και θάμνους. Συγκεκριμένα ο Ν. Ρεθύμνου με ποσοστό 60.46%, ο Ν. Χανίων με ποσοστό 63.48% και ακολουθεί ο Ν. Λασιθίου με ποσοστό 52.91%. Συνεπώς η δυτική Κρήτη διαθέτει μεγαλύτερες εκτάσεις δασών και θάμνων σε σχέση με την ανατολική. Για όλους του νομούς οι κατηγορίες με τα μεγαλύτερα ποσοστά κάλυψης είναι η αραιή βλάστηση, οι θάμνοι και τα μικτά δάση.



Σχήμα 31. Χάρτης κάλυψης γης της Ν. Κρήτης.



Σχήμα 32. Συμμετοχή της κάθε κατηγορίας κάλυψης γης στην συνολική επιφάνεια της Κρήτης και ανά νομό.

Πίνακας 7. Ποσοστά κάλυψης γης ανά κατηγορία για ολόκληρη την περιοχή μελέτης και ανά νομό.

Κατηγορίες κάλυψης γης	Ν. Ηρακλείου	Ν. Λασιθίου	Ν. Ρεθύμνου	Ν. Χανίων	Κρήτη
τεχνητές επιφάνειες	3.83	3.53	1.28	2.06	2.81
καλλιέργειες	5.03	0.21	0.16	0.04	1.68
ύδατα	0.11	0.08	0.09	0.05	0.09
πλατύφυλλα δάση	6.73	4.89	8.84	5.72	6.42
κωνοφόρα δάση	2.02	5.34	2.30	8.14	4.53
μικτά δάση	18.04	17.89	26.80	21.63	20.60
θάμνοι	9.24	18.50	18.43	22.00	16.53
χαμηλοί θάμνοι	5.09	6.30	4.09	5.98	5.43
αραχή βλάστηση	46.83	39.88	37.46	31.07	39.17
χορτολιβαδικές εκτάσεις	0.84	0.42	0.21	0.15	0.44
γυμνό έδαφος	2.16	2.73	0.27	2.60	2.07
καμένες εκτάσεις	0.00	0.01	0.00	0.05	0.02
σκιές	0.08	0.23	0.06	0.49	0.23

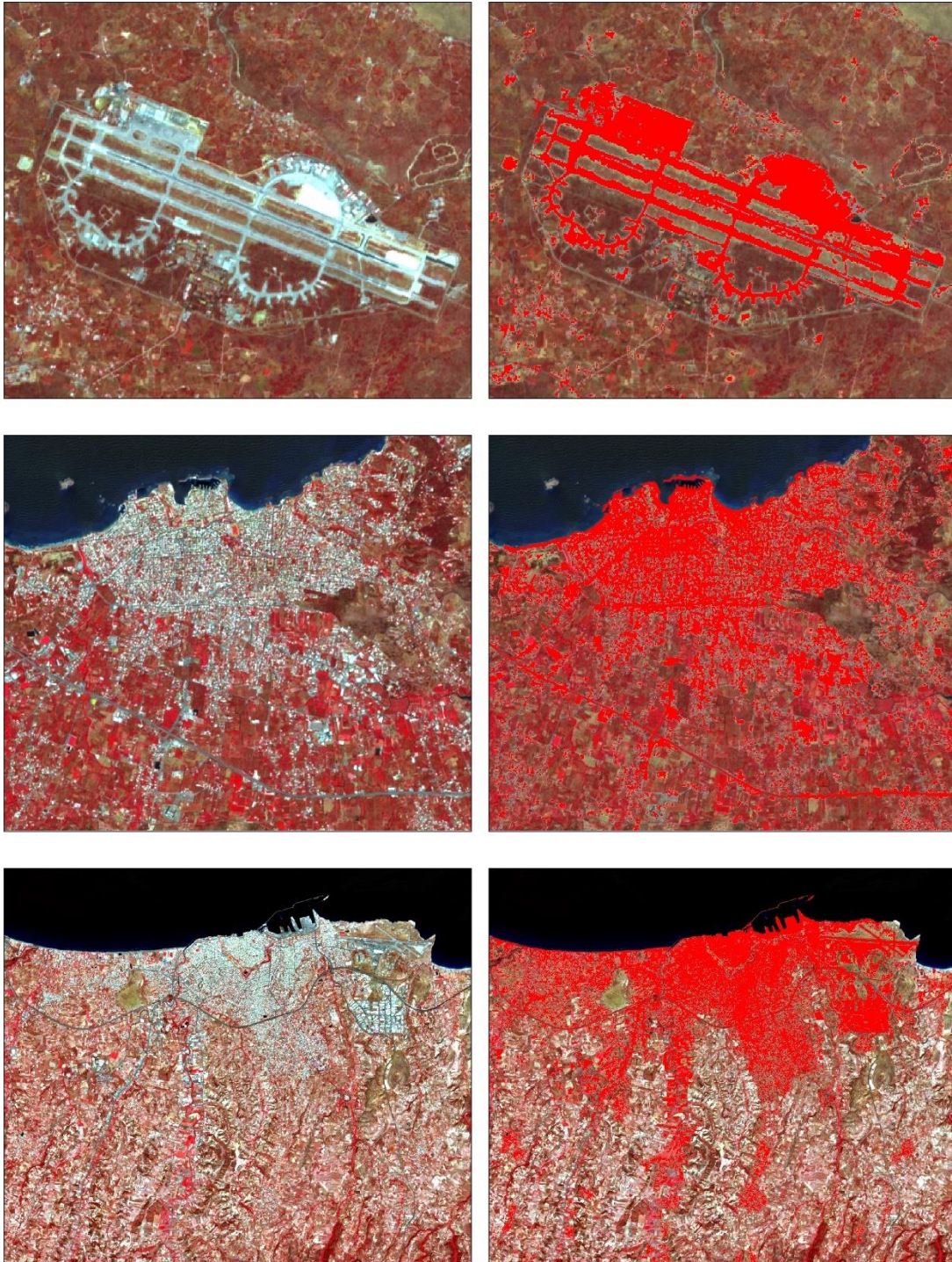


Με σκοπό την επίδειξη της υψηλής ακρίβειας του ταξινομημένου χάρτη της Κρήτης ακολουθούν χαρακτηριστικά στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης σε αντιπαράθεση με την προβολή του αποτυπώματος της κάθε κατηγορίας πάνω σε αυτά. Οι εστιασμένες υποπεριοχές επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτουν ένα εύρος χωρικών στοιχείων του χώρου που παρουσιάζουν ενδιαφέρον και αποτελούν ενδεικτικά παραδείγματα για την κάθε κατηγορία κάλυψης γης. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων αποτελεί σπουδαίο υλικό το οποίο αποκαλύπτει φανερά την ευκρινή οριοθέτηση των αντικειμένων του χώρου φανερώνοντας μέσα από την οπτική ερμηνεία την υψηλή συνολική απόδοση της ταξινόμησης με τη χρήση δεδομένων Sentinel 2 και την προτίμηση εφαρμογής του ταξινομητή SVM. Η προσέγγιση που προτείνεται στην μεθοδολογία συμβάλλει στην δημιουργία και παροχή ενός αξιόπιστου προϊόντος με ακρίβεια και χωρική λεπτομέρεια.

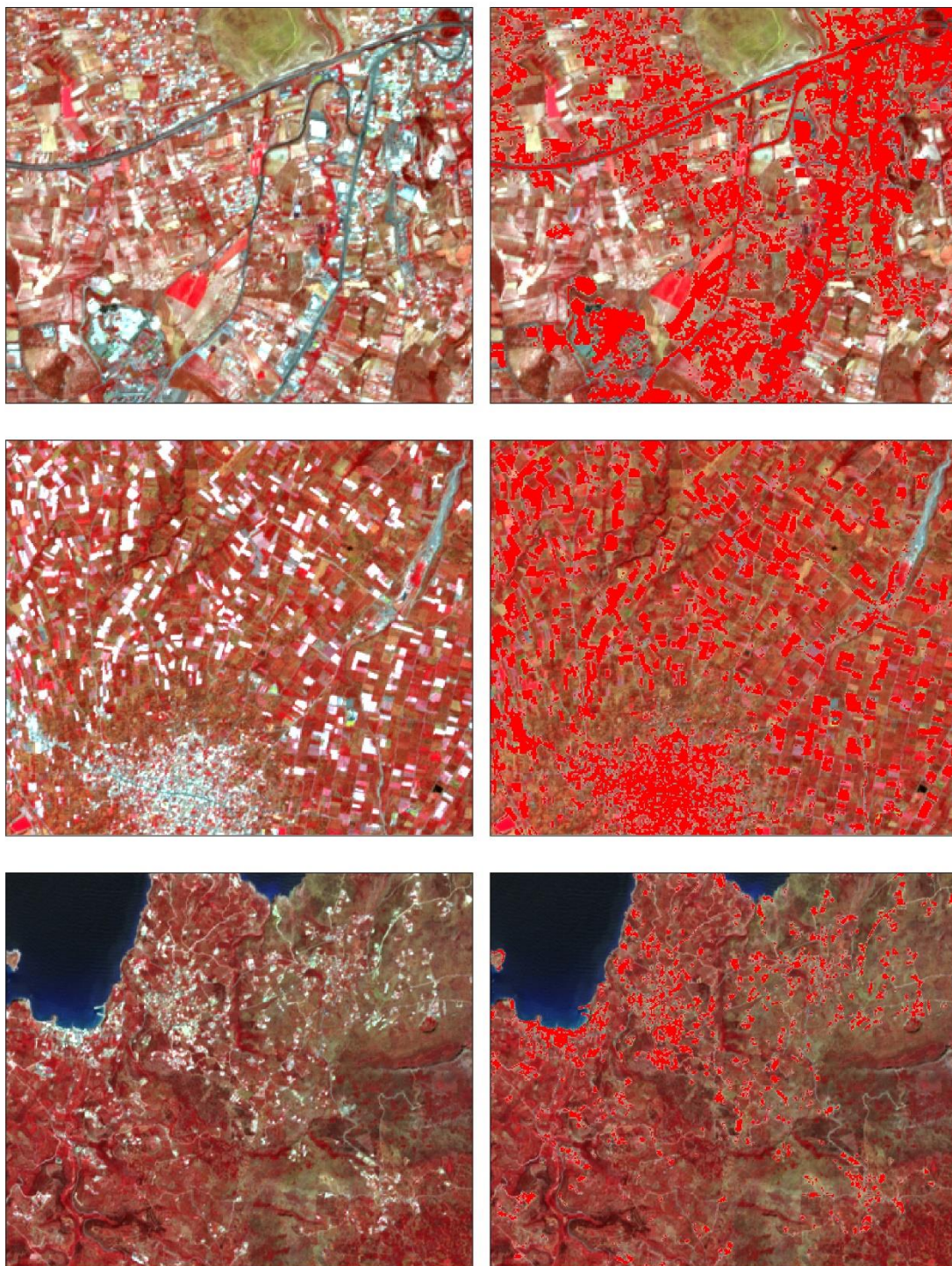
Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι για αυτό το είδος των δορυφορικών εικόνων Sentinel 2 με μεσαία χωρική ανάλυση στα 10m, η SVM μέθοδος ταξινόμησης διατηρεί τα κατακερματισμένα στοιχεία του τοπίου συμβάλλοντας με τον τρόπο αυτό στην μεγαλύτερη ακρίβεια του προϊόντος που προσφέρει την θεματική πληροφορία της κάλυψης γης. Αποδείχθηκε πως η SVM διατηρεί τα χωρικά χαρακτηριστικά των τοπίων και ιδιαίτερα εκεί όπου παρατηρείται κατακερματισμός και απομόνωση στοιχείων του χώρου όπως για παράδειγμα στα αστικά περιβάλλοντα. Άρα η ανίχνευση μικρών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του τοπίου με Sentinel 2 δεδομένα μαζί με την χρήση της SVM για την διατήρηση των χωρικών χαρακτηριστικών συνιστούν τον κατάλληλο συνδυασμό για την δημιουργία θεματικών χαρτών. Πιο απλά, τα αντικείμενα αναγνωρίζονται με ευκρίνεια και αποτυπώνονται στον θεματικό χάρτη τόσο εντός της κύριας αστικής μάζας όσο και περιαστικά.

Στο Σχήμα 33 παρατηρείται η λεπτομέρεια με την οποία έχει αποτυπωθεί το αεροδρόμιο των Χανίων. Το αντικείμενο αυτό είναι σαφώς οριζόμενο. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζεται η γενική εικόνα των Χανίων και του Ηρακλείου. Ο αστικός ιστός δεν αποτελεί μία συμπαγή και ενιαία μάζα. Διακρίνονται τα οικοδομικά τετράγωνα και το αστικό πράσινο εντός των πόλεων, οι κύριοι οδικοί άξονες και οι προβλήτες των λιμανιών. Στα προάστια τα διάσπαρτα μεμονωμένα και σε συστάδες κτίρια καθώς και διάφορες εμπορικές μονάδες και βιομηχανικές εγκαταστάσεις ορίστηκαν σαφώς χωρίς να υπάρχει σύγχυση μεταξύ τεχνητών επιφανειών και εδάφους ή καλλιέργειών. Ακόμη και οδικό δίκτυο του οποίου το πλάτος είναι μικρότερο από 10m διακρίνεται στην δορυφορική εικόνα με μία αίσθηση θολούρας. Αυτό δεν αρκεί για την ορθή του ταξινόμηση. Στην περίπτωση αυτή ενδείκνυνται δορυφορικά δεδομένα βελτιωμένης χωρικής ανάλυσης.

Στο Ηράκλειο διακρίνονται πέντε άξονες επέκτασης του αστικού ιστού ανάμεσα σε καλλιεργήσιμες εκτάσεις. Στο Σχήμα 34 γίνεται εστίαση σε έναν από αυτούς σε υποπεριοχή του Ηρακλείου και πιο συγκεκριμένα σε μία έκταση πλησίον του οικισμού Άγιοι Θεόδωροι στα νοτιοδυτικά προάστια. Μία γενική παρατήρηση είναι ότι ακόμη και τα πιο μικρά κτίρια όπως διακρίνονται στα βορειοδυτικά της υποπεριοχής έχουν το αποτύπωμά τους στον θεματικό χάρτη. Εκεί τα σπίτια τοποθετούνται ανάμεσα στις καλλιέργειες. Στην υπόλοιπη υποπεριοχή τα κτίρια συγκεντρώνονται πλησίον του οδικού άξονα αλλά και ανάμεσα σε καλλιέργειες. Αυτά είναι στοιχεία του περιαστικού τοπίου.



Σχήμα 33. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των τεχνητών επιφανειών. Επάνω: το αεροδρόμιο των Χανίων, Μέση: τα Χανιά, Κάτω: το Ηράκλειο.



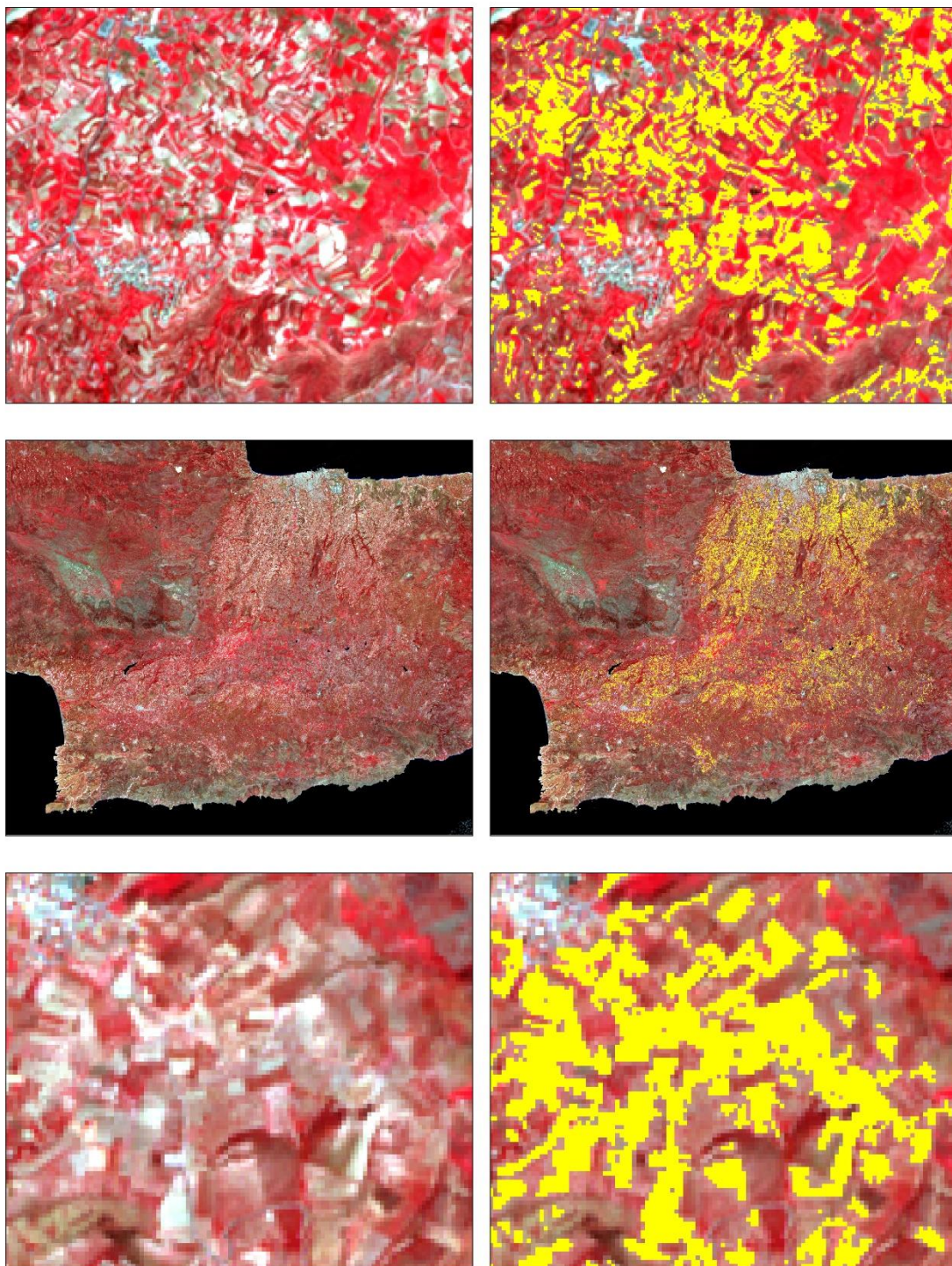
Σχήμα 34. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των τεχνητών επιφανειών. Επάνω: Πλησίον του οικισμού Άγιοι Θεόδωροι στα νοτιοδυτικά προάστια του Ηρακλείου, Μέση: Τα θερμοκήπια πάνω από τον οικισμό Τυμπάκι στην πεδιάδα της Μεσαράς, Κάτω: Οι οικισμοί Αλμυρίδα, Άσπρο, Πλάκα, Καμπιά, Κόκκινο χωριό, Δράπανος στα βορειοανατολικά των Χανίων.

Στο Σχήμα 34 στην μεσαία εικόνα γίνεται παρουσίαση των θερμοκηπίων πάνω από τον οικισμό Τυμπάκι στην πεδιάδα της Μεσαράς. Η κωμόπολη Τυμπάκι στο δυτικό άκρο της πεδιάδας Μεσαρά στην νότια Κρήτη είναι πλησίον της θάλασσας και στα βόρειά της απλώνονται πολυάριθμες θερμοκηπιακές μονάδες. Τα γεωμετρικά σχήματα των θερμοκηπίων τα διαχωρίζουν σαφώς από τα υπόλοιπα αντικείμενα που ανήκουν στη κατηγορία των τεχνητών επιφανειών. Κύριος οδικός άξονας χωρίζει το Τυμπάκι στη μέση. Όσο απομακρυνόμαστε από αυτόν προς τα έξω τα κτίρια είναι πιο αραιά τοποθετημένα φτάνοντας σε αυτά που είναι μεμονωμένα.

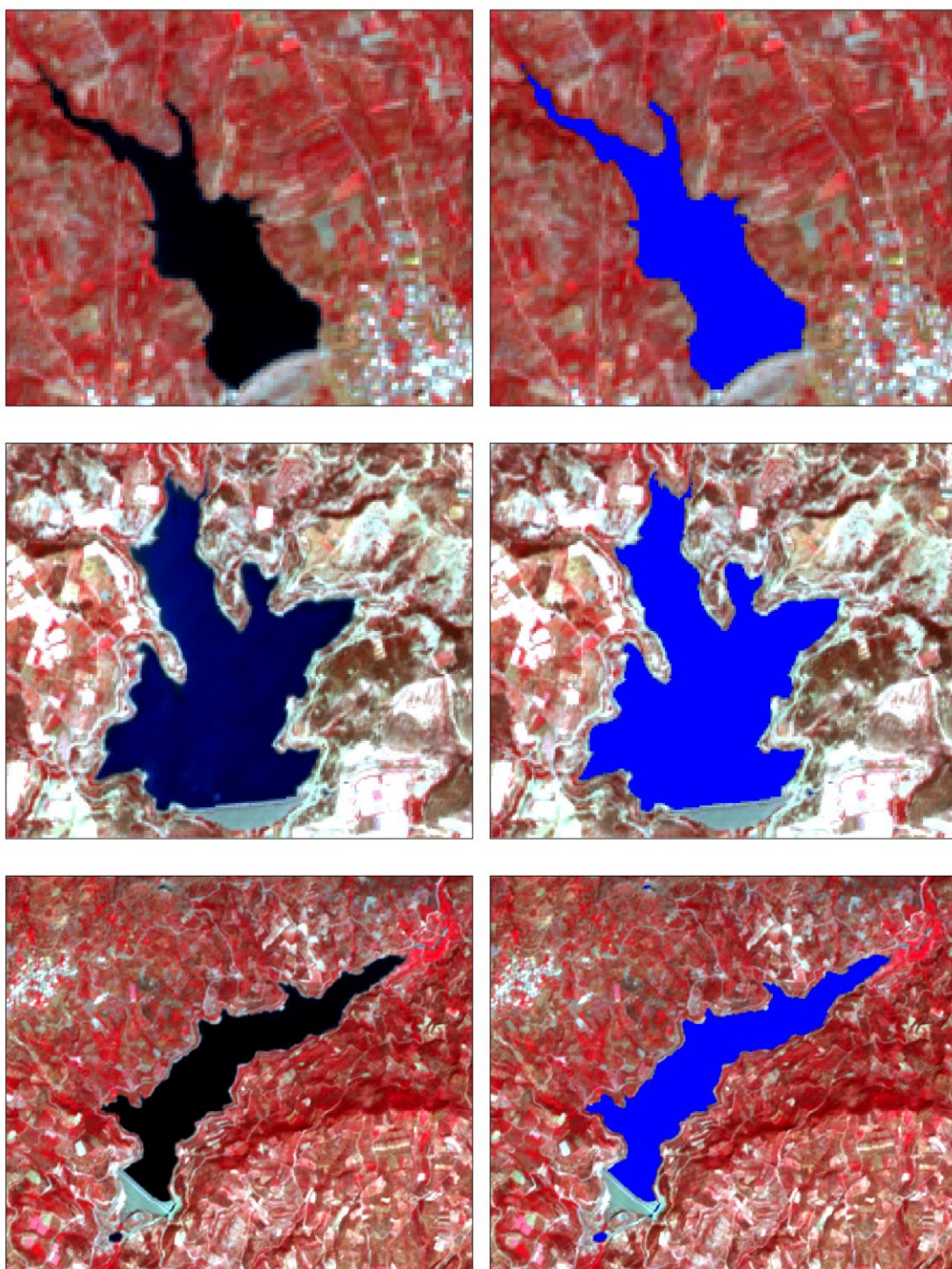
Στο Σχήμα 34 στην κάτω εικόνα απεικονίζεται ένα σύνολο διάσπαρτων οικισμών στα βορειοανατολικά των Χανίων. Το πρότυπο αυτό αποτελείται από οικισμούς (Αλμυρίδα, Άσπρο, Πλάκα, Καμπιά, Κόκκινο χωριό και Δράπανο) με σημαντική διασπορά στον χώρο και από πληθώρα δρόμων. Είναι μία περίπτωση όπου τα αντικείμενα των τεχνητών επιφανειών είναι αραιά τοποθετημένα ανάμεσα στο φυσικό περιβάλλον. Η διάνοιξη δρόμων και η ύπαρξη αυτού του προτύπου οδηγεί στην υποβάθμιση του τοπίου.

Το ήπιο κλίμα και η ομαλότητα του εδάφους ευνοούν σε μεγάλο βαθμό την αγροτική δραστηριότητα στον Ν. Ηρακλείου. Ο κεντρικός και δυτικός τομέας του νομού είναι πλούσιος σε καλλιέργειες (Σχ. 35) διαφόρων τύπων. Τα αγροτεμάχια είναι ποικίλα σε μέγεθος, σχήμα και προσανατολισμό στον χώρο. Στην οριοθετημένη ζώνη καλλιεργειών ένα σύνολο αγροτεμαχίων ταξινομήθηκαν ως αραιή βλάστηση λόγω φασματικής σύγχυσης. Όμως στην οριοθετημένη αυτή ζώνη η αραιή βλάστηση δεν ανήκει σε όλες τις περιπτώσεις σε αγροτεμάχια. Κάποια αγροτεμάχια είναι γυμνά άλλα με φυτά και άλλα με φυτά σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους όπου ανάμεσά τους υπάρχει χώμα. Τα γυμνά εδάφη στα αγροτεμάχια (π.χ. στο Σχ. 35 οι λευκές επιφάνειες) που αρχικά ταξινομήθηκαν ως τεχνητές επιφάνειες στην συνέχεια διορθώθηκαν με τον τρόπο που αναφέρθηκε στην μεθοδολογία.

Στο Σχήμα 36 γίνεται προβολή της κατηγορίας της υδάτινης μάζας πάνω σε στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης. Η υδάτινη μάζα έχει οριοθετηθεί με πολύ μεγάλη ακρίβεια όπως φαίνεται και από τα παραδείγματα στο Σχήμα 36. Με τη σειρά παρουσιάζονται η τεχνητή λίμνη του φράγματος Ινίου, η τεχνητή λίμνη Μπραμιανών και η τεχνητή λίμνη Φανερωμένης. Το σχήμα της κάθε λίμνης είναι ιδιαίτερο. Κοινό και των τριών είναι η ύπαρξη φράγματος στην νότια μεριά τους.



Σχήμα 35. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των καλλιεργειών. Επάνω: Καλλιέργειες περίξ από τα άνω Μούλια, Μέση: Η ζώνη καλλιεργειών στην κεντρική Κρήτη, Κάτω: Ο οικισμός Ινία και οι γύρω καλλιέργειες.

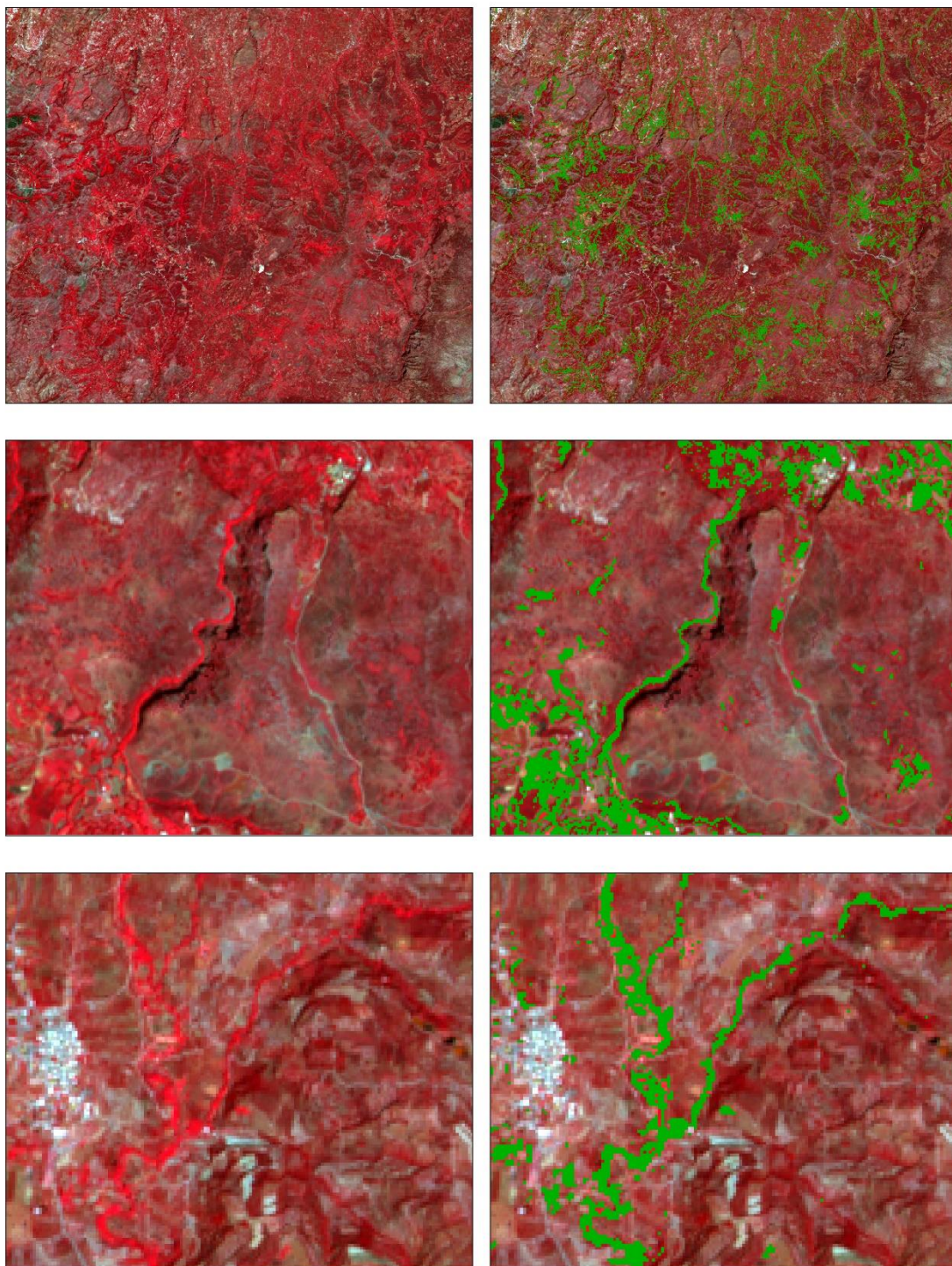


Σχήμα 36. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας της υδάτινης μάζας. Επάνω: Τεχνητή λίμνη φράγματος Ινίου, Μέση: Τεχνητή λίμνη Μπραμμιανών, Κάτω: Τεχνητή λίμνη Φανερωμένης.

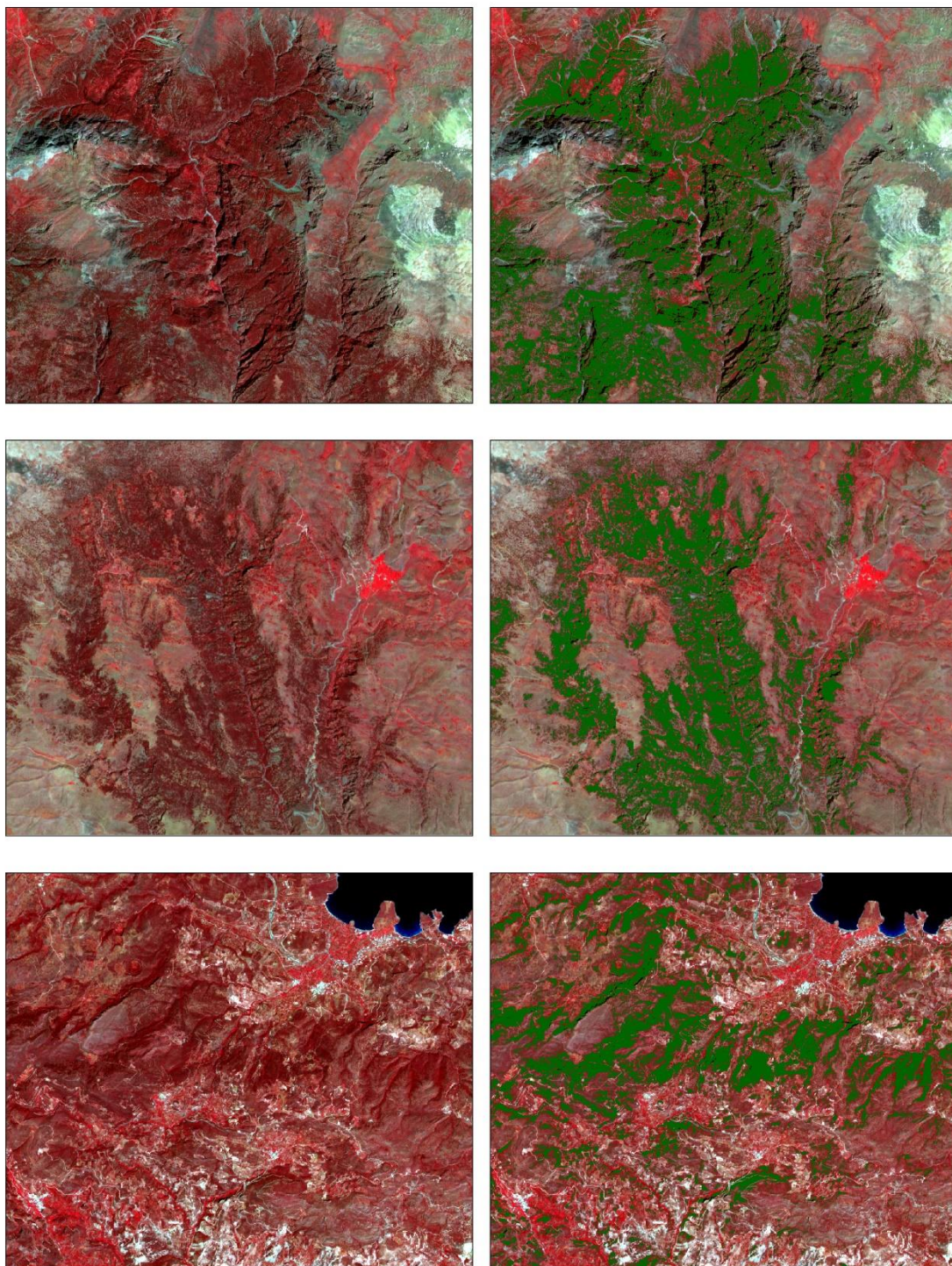
Τα πλατύφυλλα δάση εντοπίζονται ιδιαίτερα κατά μήκος κοιτών ρεμάτων. Χαρακτηριστικά είναι τα παραδείγματα που προσφέρονται στο Σχήμα 37. Με την παρατήρηση του παραδείγματος της δυτικής Κρήτης διαπιστώνεται η παρουσία πλατύφυλλων δασών κατά μήκος του ανεπτυγμένου υδρογραφικού δικτύου σε όλους τους βασικούς και δευτερεύοντες κλάδους. Στις πιο εστιασμένες περιοχές αναπαρίστανται επίσης κοίτες ποταμών με ανάπτυξη πλατύφυλλων δασών. Τα πλατύφυλλα δάση διαθέτουν ιδιαίτερη φασματική υπογραφή. Έχουν υψηλότερη ανακλαστικότητα στην περιοχή του κοντινού υπέρυθρου σε σχέση με τα κωνοφόρα δάση και για τον λόγο αυτό στην ψευδέγχρωμη δορυφορική εικόνα έχουν έντονο κόκκινο χρώμα. Επίσης, τα δάση γίνονται αντιληπτά μέσω της υφής στην εικόνα (Σχ. 37 μεσαία εικόνα στα νοτιοδυτικά).

Τα κωνοφόρα δάση έχουν ιδιαίτερη φασματική υπογραφή ενώ λόγω της χαμηλότερης ανακλαστικότητας στο κοντινό υπέρυθρο σε σχέση με τα πλατύφυλλα διαθέτουν μία πιο σκούρα μπορντό χρωματική απόχρωση στην δορυφορική εικόνα. Τα κωνοφόρα δάση εμφανίζουν συγκεντρώσεις σε συγκεκριμένες περιοχές της Κρήτης στις οποίες απλώνονται. Δάση κωνοφόρων με ξεχωριστή διαμόρφωση στον χώρο και αισθητική εντοπίζονται στην Σαμαριά, στα βόρεια της χώρας των Σφακίων και πλησίον των οικισμών Βαθύ και Καλό Χωριό στην ανατολική Κρήτη, κοντά στον Άγιο Νικόλαο (Σχ. 38). Σε ορεινές περιοχές της Κρήτης η παρουσία των κωνοφόρων δασών είναι έντονη.

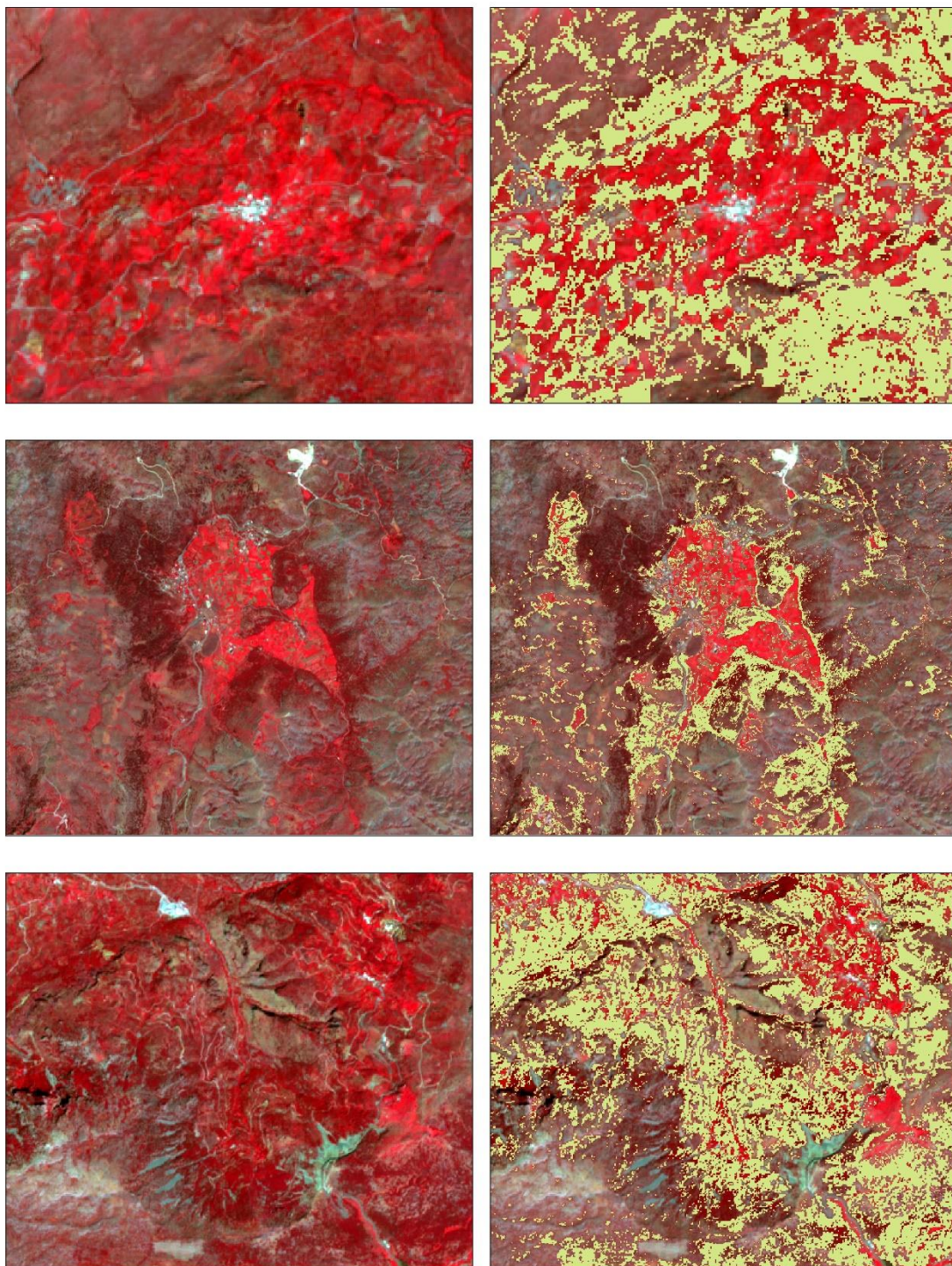
Ανάμεσα σε κωνοφόρα και πλατύφυλλα είδη από το μπλέξιμο των δύο δημιουργούνται τα μικτά δάση. Ακόμη και στην περίπτωση των μικτών δασών η φασματική υπογραφή είναι ξεχωριστή και από τις άλλες δύο κατηγορίες δασών. Με βάση τα κατάλληλα εκπαιδευτικά πεδία το αποτύπωμα των μικτών δασών δημιουργήθηκε σωστά και σε μεγάλη συμφωνία με την πραγματικότητα. Στο Σχήμα 39 απεικονίζονται τα μικτά δάση γύρω από τον οικισμό Δάφνη, στο Οροπέδιο Ασκήφου και στα νότια του οικισμού Γωνιές κοντά στα Μάλια. Το τελευταίο παράδειγμα είναι άκρως βοηθητικό διότι οι ζώνη των μικτών δασών είναι ευδιάκριτη ανάμεσα στην ζώνη των κωνοφόρων και των πλατύφυλλων.



Σχήμα 37. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των πλατύφυλλων δασών. Επάνω: Τα πλατύφυλλα δάση στην δυτική Κρήτη, Μέση: Εστίαση σε πλατύφυλλα δάση στα νοτιοδυτικά του Ρεθύμνου, Κάτω: Πλατύφυλλα δάση με σημείο αναφοράς τον οικισμό Αυλή στα δυτικά του οροπεδίου Λασιθίου.



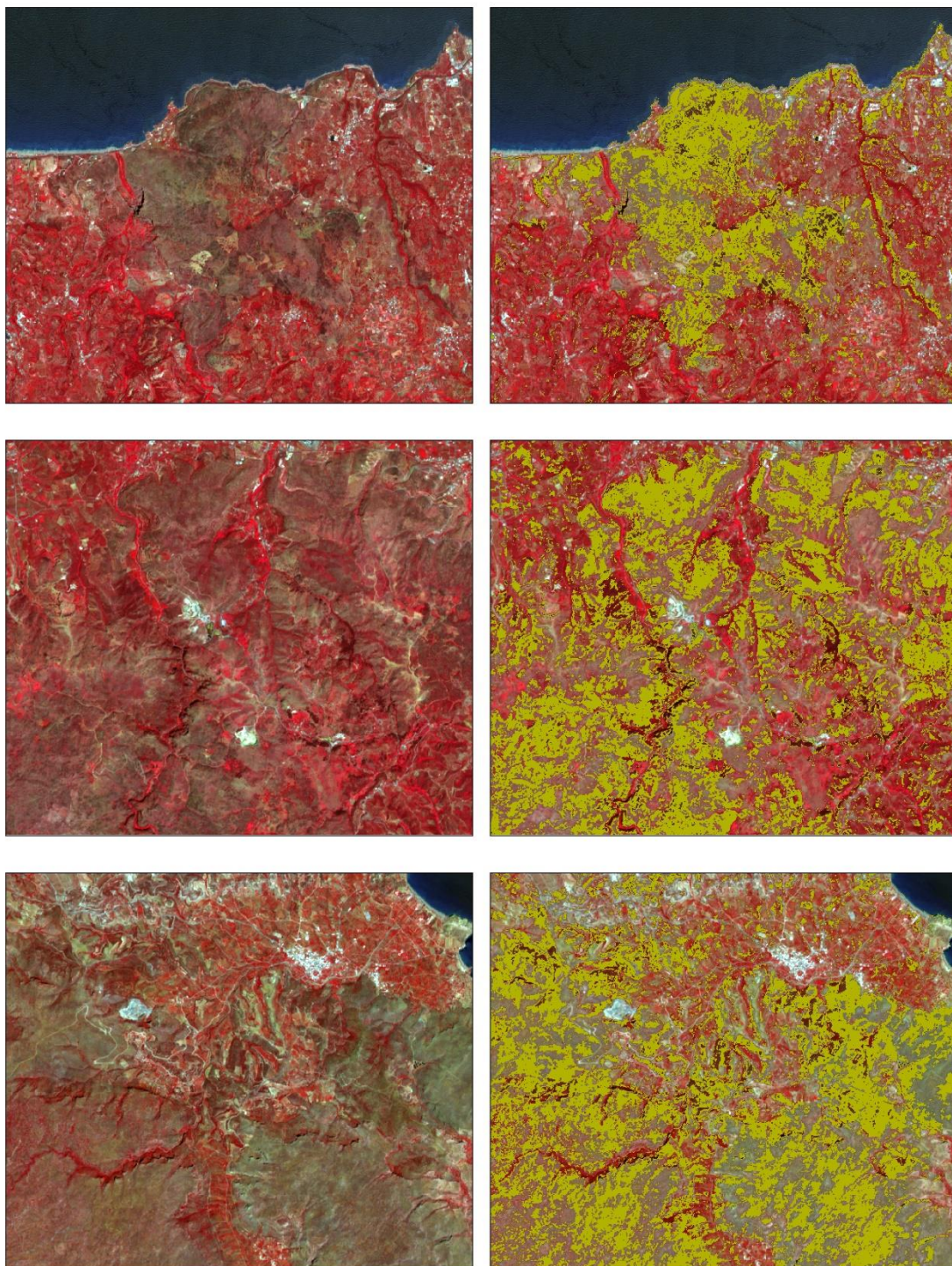
Σχήμα 38. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των κωνοφόρων δασών. Επάνω: Δάση κωνοφόρων στην Σαμαριά, Μέση: Δάση κωνοφόρων στα βόρεια της χώρας των Σφακίων, Κάτω: Δάση κωνοφόρων πλησίον των οικισμών Βαθύ και Καλό Χωριό στην ανατολική Κρήτη, κοντά στον Άγιο Νικόλαο.



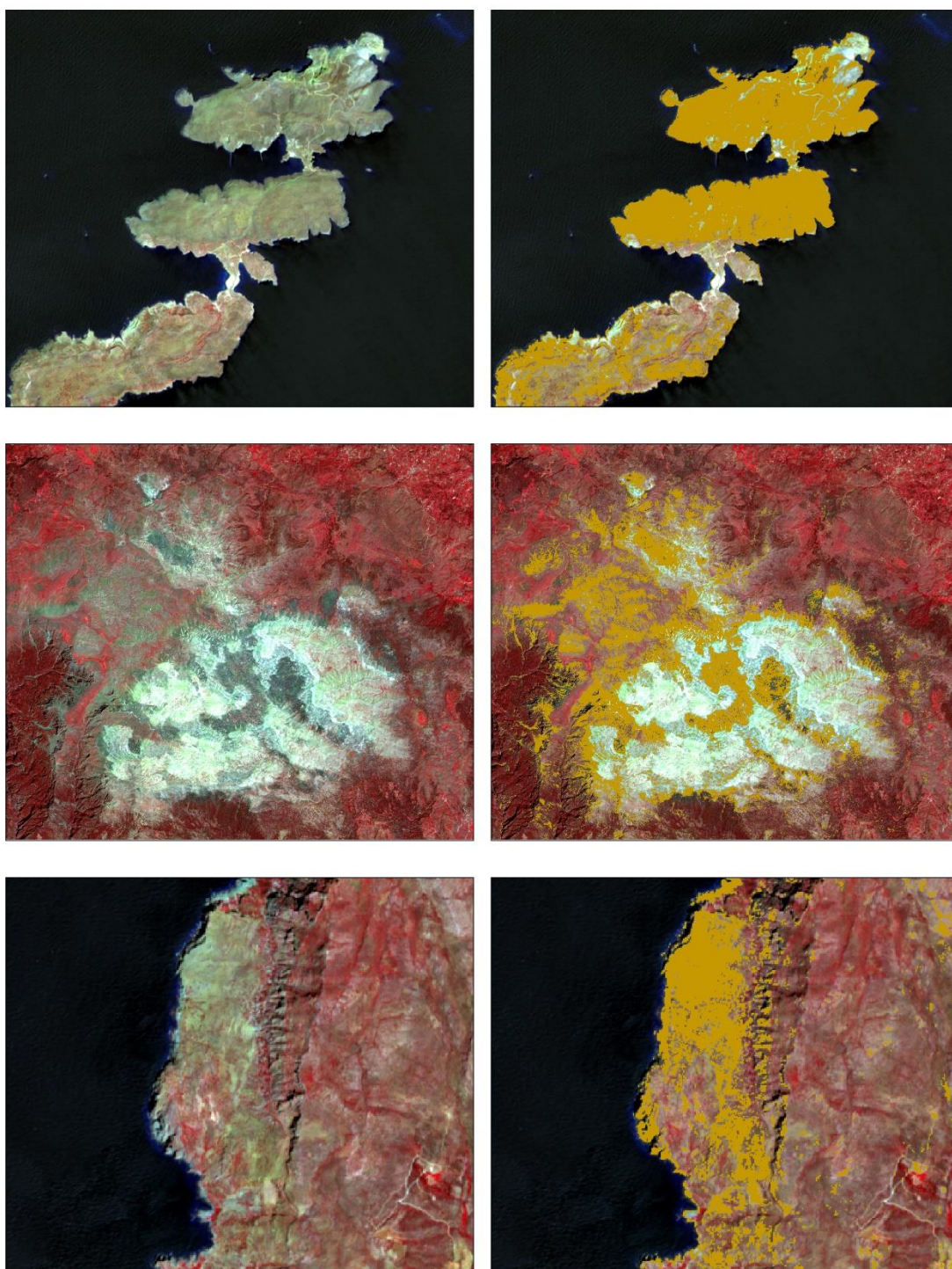
Σχήμα 39. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των μικτών δασών. Επάνω: Μικτά δάση γύρω από τον οικισμό Δάφνη, Μέση: Μικτά δάση στο Οροπέδιο Ασκύφου, Κάτω: Μικτά δάση στα νότια του οικισμού Γωνιές κοντά στα Μάλια.

Κυρίαρχο γνώρισμα των παράκτιων περιοχών και των τριών κύριων οροσειρών της Κρήτης είναι η παρουσία θάμνων και χαμηλών θάμνων. Για την κατανόηση της διαφοράς μεταξύ των θάμνων και των χαμηλών θάμνων ακολουθούν παραδείγματα στα Σχήματα 40 και 41. Οι χαμηλοί θάμνοι βρίσκονται είτε εγγύτερα της θάλασσας είτε σε μεγάλα υψόμετρα. Οι θάμνοι βρίσκονται στην ευρύτερη παράκτια ζώνη και στο εσωτερικό της στεριάς με σημαντική εμφάνιση κατά τόπους σε ολόκληρο το νησί. Την πρώτη θέση ως προς την μεγαλύτερη εμφάνιση στο νησί, όπως παρουσιάστηκε στον χάρτη κάλυψης γης της Κρήτης και όπως περιγράφηκε από τα ποσοτικά στοιχεία, κατέχει η κατηγορία της αραιής βλάστησης. Στο Σχήμα 42 προβάλλονται η διάσπαρτη αραιή βλάστηση στο Όρος Δίκτη, οι συμπαγείς υποπεριοχές αραιής βλάστησης στα νοτιοδυτικά της Κρήτης με νοτιότερους οικισμούς τα Λιβανιανά και το Λουτρό και το παράδειγμα της εκτεταμένης αραιής βλάστησης περίξ του οικισμού Κάτω Ροδάκινο, νότια του νομού Ρεθύμνου.

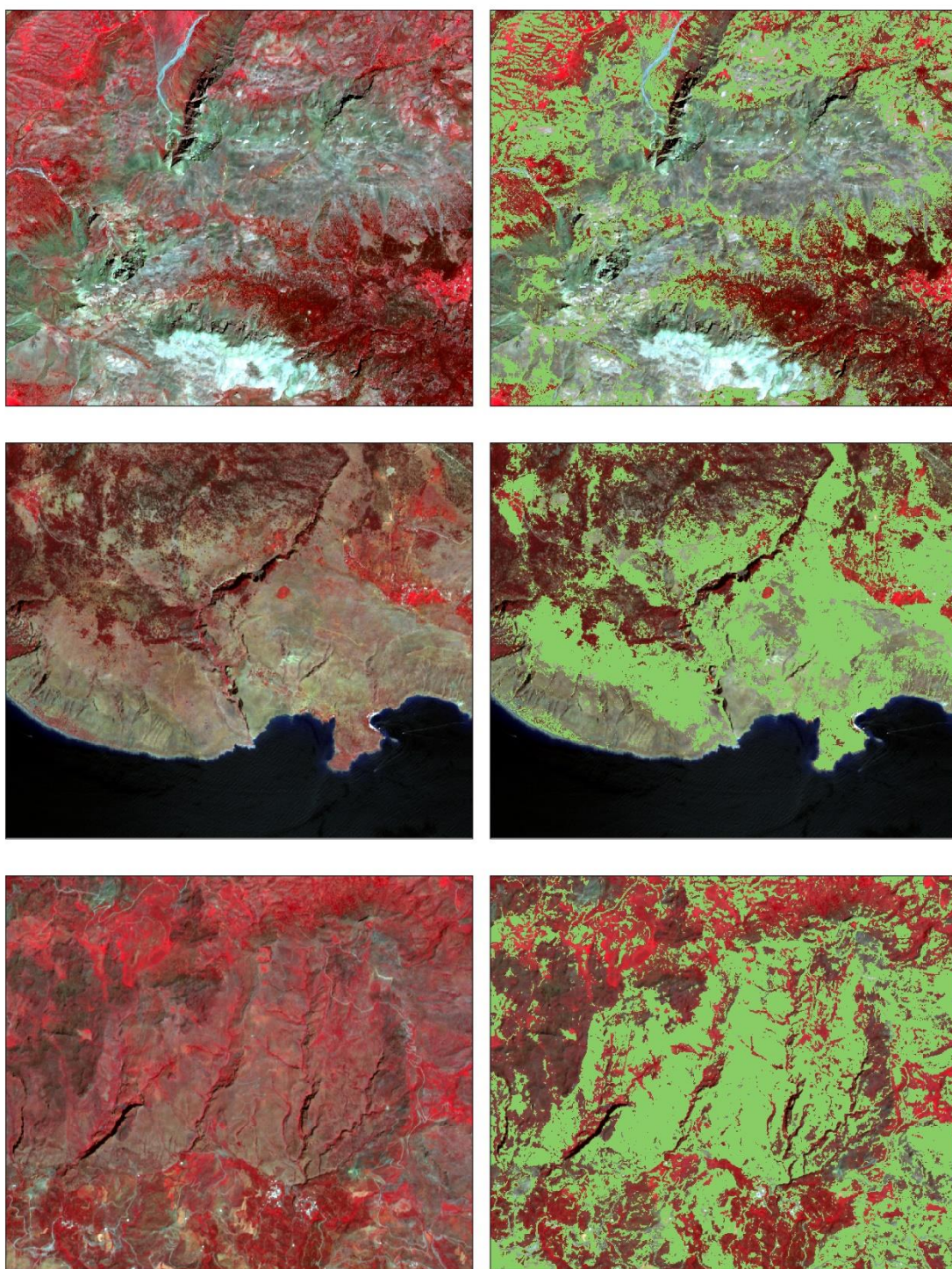
Οι χορτολιβαδικές εκτάσεις δεν εμφανίζουν σημαντική έκταση στον χώρο όμως έχουν μοναδική παρουσία και αξία. Στην δορυφορική εικόνα διακρίνεται η παλ απόχρωση του κόκκινου που τις ξεχωρίζει από τις υπόλοιπες οντότητες (Σχ. 43). Τέτοια παραδείγματα αποτελούν το γήπεδο του γκολφ κοντά στον Λιμένα Χερσονήσου, χορτολιβαδικές εκτάσεις στα βορειοδυτικά της πόλης του ορεινού όγκου της Δίκτυς και χορτολιβαδικές εκτάσεις σε ορεινή ζώνη (Σχ. 43). Στην επόμενη κατηγορία κάλυψης γης που αφορά το γυμνό έδαφος συμπεριλαμβάνονται γυμνά εδάφη μη φυσικά προερχόμενα δηλαδή απογυμνωμένα λόγω εξόρυξης κοιτασμάτων και φυσικά όπως οι παραλίες και οι κορυφές των βουνών. Στο Σχήμα 44 παρουσιάζονται με σειρά γυμνό έδαφος από εξόρυξη κοιτάσματος κοντά στον Κάνδανο, τα Λευκά όρη και η παραλία της Φαλάσαρνας στην δυτική Κρήτη. Η παραλία στα Φαλάσαρνα είναι μεγάλη με λευκή αμμουδιά. Από την άλλη τα Λευκά όρη είναι η μεγαλύτερη σε έκταση οροσειρά της Κρήτης και αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα του τοπίου στον Ν. Χανίων. Οι υψηλότερες ιδίως κορυφές τους είναι τελείως γυμνές από κάθε είδους χλωρίδα και το πέτρωμά τους είναι ασβεστολιθικό και ασπριδερό.



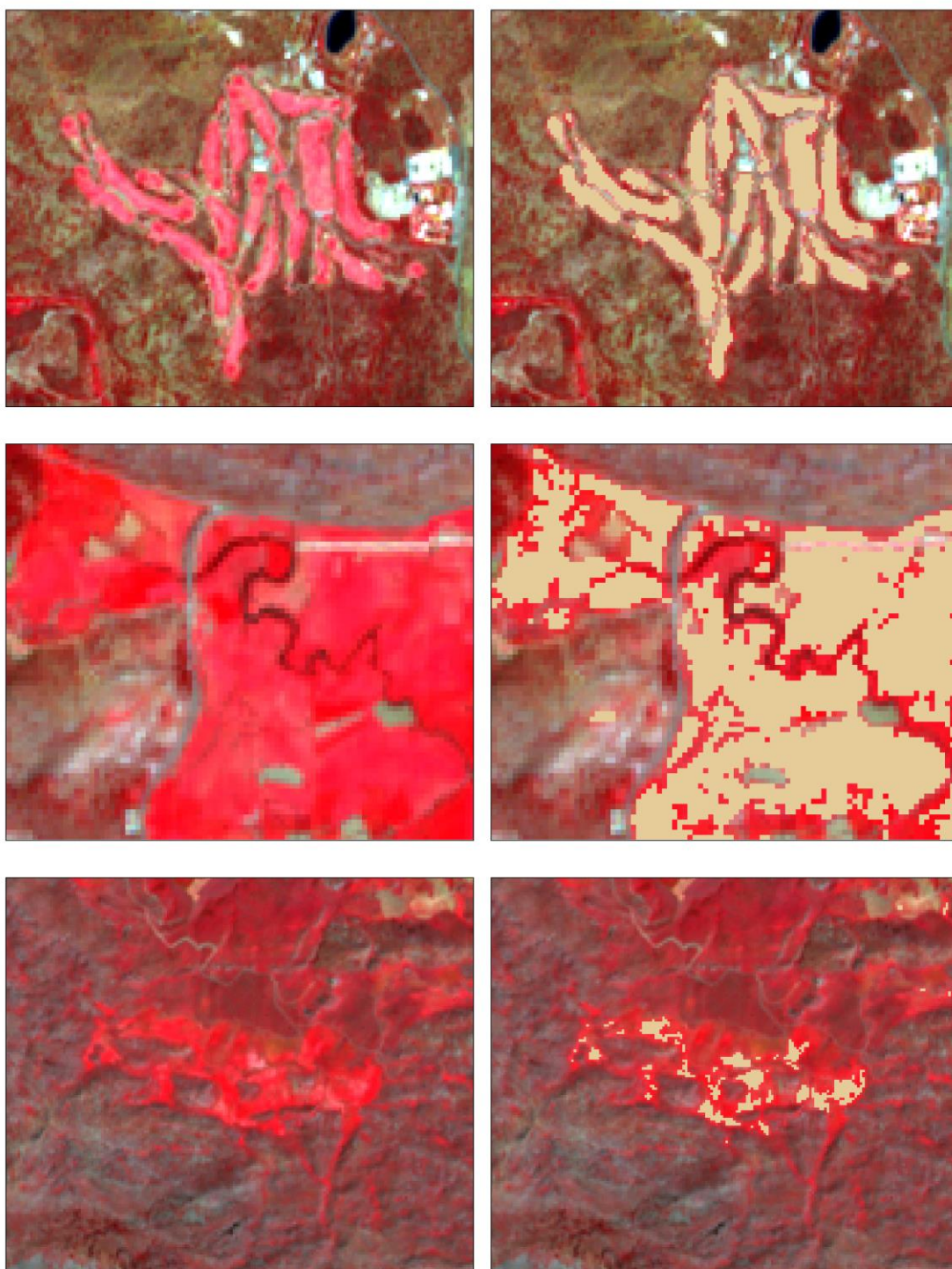
Σχήμα 40. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των θάμνων. Επάνω: Κάλυψη των θάμνων δυτικά του Ρεθύμνου, Μέση: Θάμνοι σε υποπεριοχή νότια των Χανίων, Κάτω: Σκιαγράφιση των θάμνων στα βορειοανατολικά της Κρήτης με σημείο αναφοράς τον οικισμό του Παλαϊκάστρου.



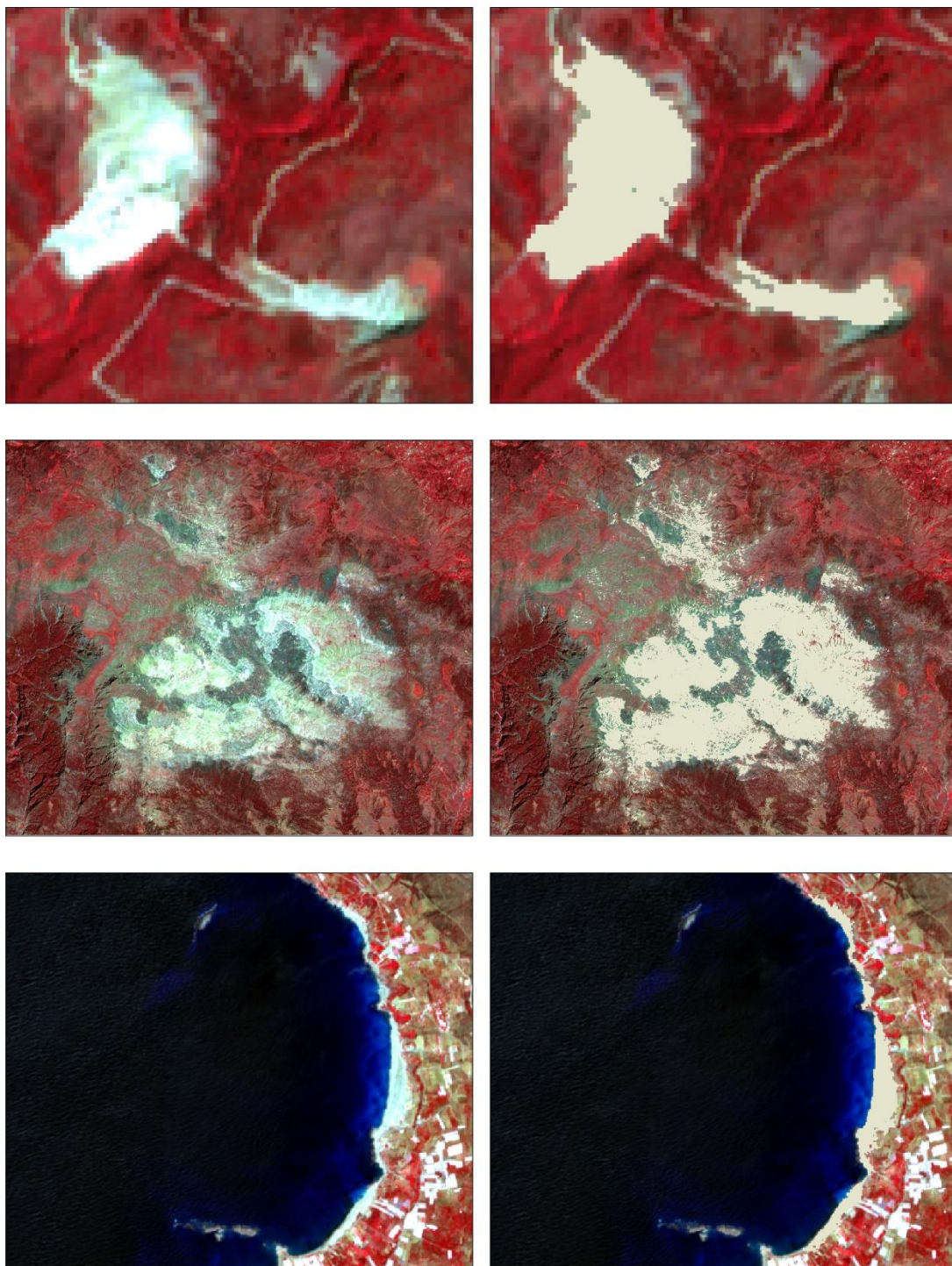
Σχήμα 41. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των χαμηλών θάμνων. Επάνω: Το βορειοανατολικό άκρο της Κρήτης καλυμμένο από χαμηλούς θάμνους, Μέση: Χαρακτηριστική κάλυψη χαμηλών θάμνων στα Λευκά όρη, Κάτω: Στεριά καλυμμένη από χαμηλούς θάμνους, παραθαλάσσια περιοχή στα βορειοδυτικά της Κρήτης.



Σχήμα 42. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας της αραιής βλάστησης. Επάνω: Διάσπαρτη αραιή βλάστηση στο Όρος Δίκτη, Μέση: Συμπαγείς υποπεριοχές αραιής βλάστησης στα νοτιοδυτικά της Κρήτης με νοτιότερους οικισμούς τα Λιβανιανά και το Λουτρό, Κάτω: Εκτεταμένη αραιή βλάστηση πέριξ του οικισμού Κάτω Ροδάκινο, νότια του νομού Ρεθύμνου.



Σχήμα 43. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των χορτολιβαδικών εκτάσεων. Επάνω: Γήπεδο γκολφ Κρήτης κοντά στον Λιμένα Χερσονήσου, Μέση: Βορειοδυτικά της πόλης του ορεινού όγκου της Δίκτυς, Κάτω: Παράδειγμα χορτολιβαδικών εκτάσεων σε ορεινή ζώνη.



Σχήμα 44. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας του γυμνού εδάφους. Επάνω: Γυμνό έδαφος από εξόρυξη κοιτάσματος κοντά στον Κάνδανο, Μέση: Τα Λευκά όρη, Κάτω: Η παραλία της Φαλάσαρνας στην δυτική Κρήτη.

Η διάκριση των καμένων εκτάσεων ενισχύεται από την χρήση του καναλιού 8 του κοντινού υπέρυθρου λόγω του γεγονότος ότι η ανακλαστικότητα είναι μειωμένη σε αυτά τα μήκη κύματος. Η καύση επιδρά στην μείωση της ανακλαστικότητας στο κοντινό υπέρυθρο. Σύμφωνα με προηγούμενες μελέτες το κοντινό υπέρυθρο παρέχει υψηλή διάκριση μεταξύ καμένων και μη εκτάσεων (Huang et al., 2016). Η διαπίστωση αυτή αποδεικνύεται και στην παρούσα εργασία. Γίνεται φανερό πως η σύνθεση των συγκεκριμένων καναλιών Sentinel 2A MSI, του κοντινού υπέρυθρου, του κόκκινου και του πράσινου, καθίσταται κατάλληλη στην ανίχνευση των καμένων εκτάσεων. Τα δεδομένα Sentinel 2A είναι πολύτιμα στην χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων. Παρέχονται δωρεάν, ανά τακτά χρονικά διαστήματα και η εξαγωγή της πληροφορίας της καμένης έκτασης είναι άμεση.

Στα παραδείγματα του Σχήματος 47 έχουν χαρτογραφηθεί οι καμένες εκτάσεις περιοχών της Κρήτης όπως αποτυπώθηκαν από τον δορυφόρο την άνοιξη του 2016. Στην επάνω εικόνα αποτυπώνονται οι καμένες εκτάσεις πλησίον του οικισμού Σφηνάρι. Για την περιοχή αυτή υπάρχει ιστορική εικόνα του Google Earth με ημερομηνία 01/05/2016 (Σχ. 45). Στην μεσαία εικόνα του Σχήματος 47 απεικονίζονται οι καμένες εκτάσεις σε κοντινή απόσταση από το Σφηνάρι και πλησιέστερα του οικισμού Μπερμπαθιανά για την ίδια χρονική περίοδο. Τα στρέμματα που καταστράφηκαν από τις φωτιές στη δυτική Κρήτη στις δύο αυτές πολύ κοντινές υποπεριοχές είναι πολλά. Συγκεκριμένα, υπολογίστηκαν να είναι 1214 στρέμματα. Μεγάλη έκταση που κάηκε αφορούσε κωνοφόρα δάση. Σύμφωνα με το Σχήμα 47 η φωτιά πλησίασε αρκετά τους οικισμούς Σφηνάρι και Μπερμπαθιανά. Στην ψευδέγχρωμη εικόνα οι καμένες εκτάσεις εμφανίζονται με σκούρο πράσινο χρώμα με συγκεκριμένη υφή.

Στο Σχήμα 47 στην κάτω εικόνα παρουσιάζονται οι καμένες εκτάσεις βόρεια και σε κοντινή απόσταση από τους οικισμούς Μάλες και Καλαμαύκα. Οι υποπεριοχές αυτές ανήκουν στον Ν. Λασιθίου στην ανατολική Κρήτη ενώ τα προηγούμενα παραδείγματα αναφέρονται στον Ν. Χανίων στην δυτική Κρήτη και η χρονική περίοδος αναφοράς είναι η ίδια. Οι εκτάσεις που κάηκαν στην ανατολική Κρήτη αφορούν 205.5 στρέμματα. Το σχήμα της καμένης έκτασης στα δυτικά της υποπεριοχής εμφανίζει μία κάθετη εξάπλωση όπως παρουσιάζεται με μεγαλύτερη εστίαση στην ιστορική εικόνα του Google Earth με ημερομηνία 15/06/2016 (Σχ. 46). Καταστράφηκαν μεγάλες

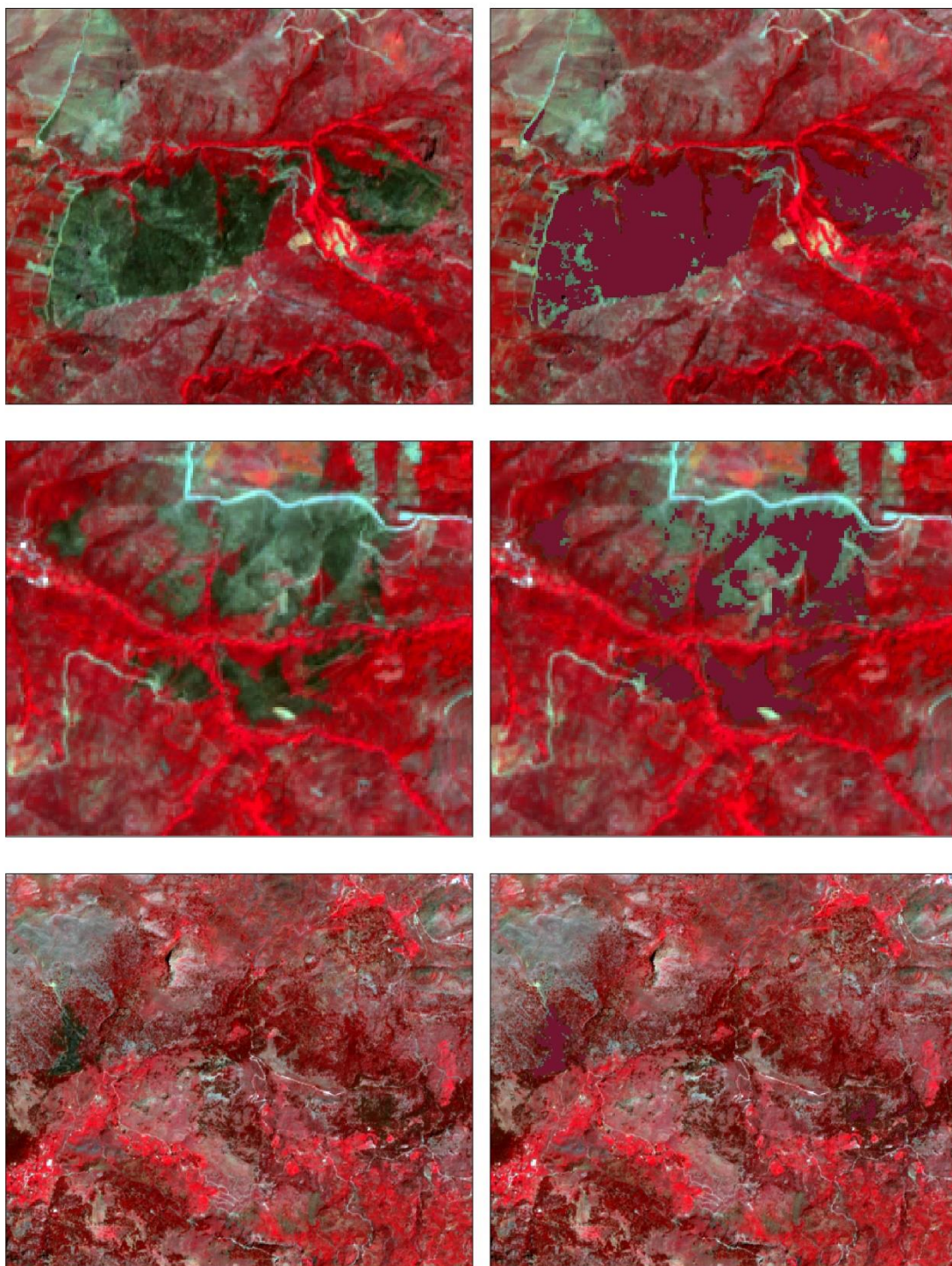
εκτάσεις κωνοφόρων δασών κοντά σε οικισμούς. Σύμφωνα με τις εικόνες οι περιοχές που κάηκαν έχουν πρόσβαση από χωματόδρομους.



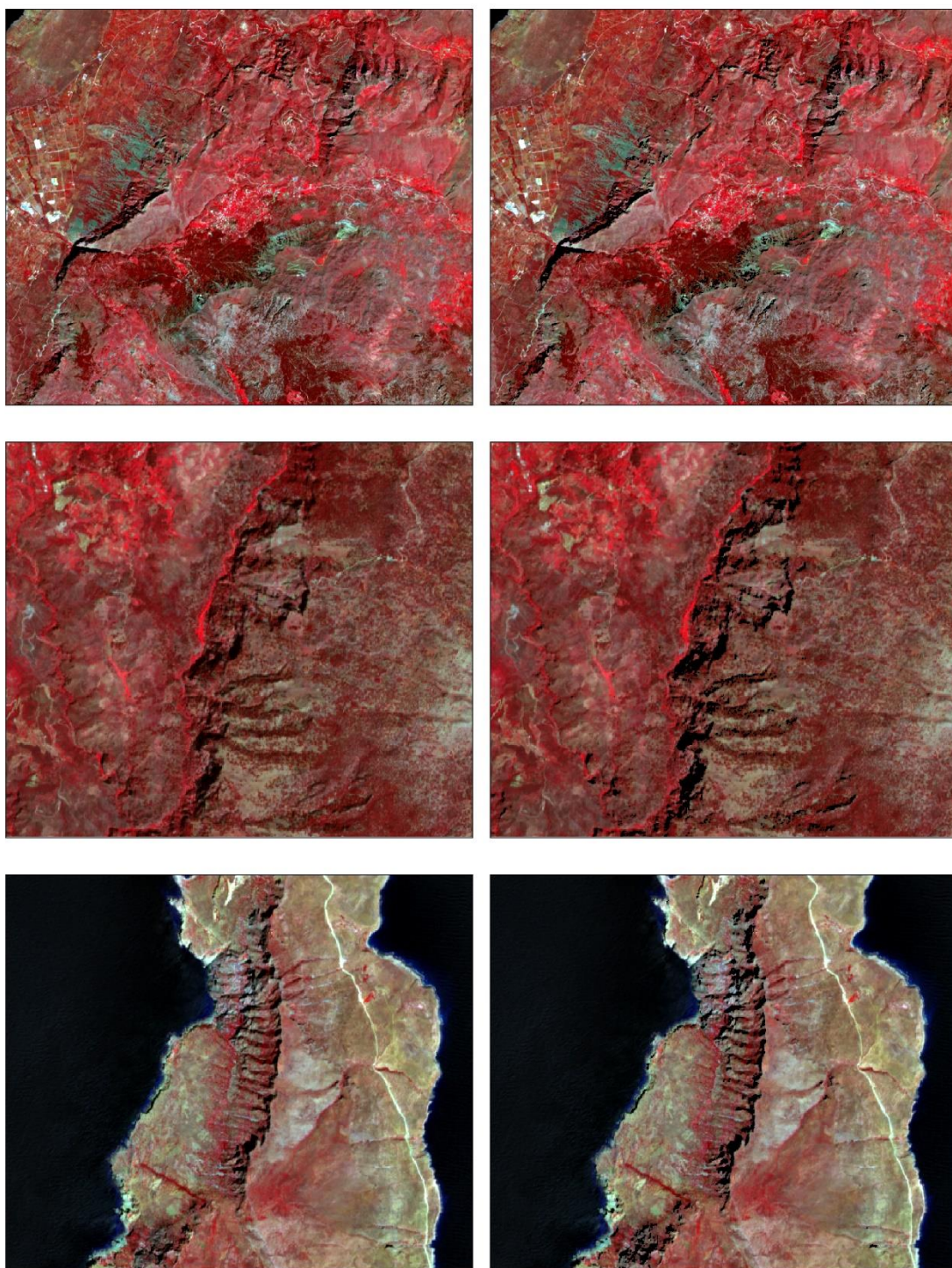
Σχήμα 45. Ιστορική εικόνα Google Earth με ημερομηνία 01/05/2016 αποτύπωσης των καμένων εκτάσεων πλησίον του οικισμού Σφηνάρι.



Σχήμα 46. Ιστορική εικόνα Google Earth με ημερομηνία 15/06/2016 όπου απεικονίζονται οι καμένες εκτάσεις στα βόρεια του οικισμού Μάλες.



Σχήμα 47. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των καμένων εκτάσεων. Επάνω: Καμένες εκτάσεις πλησίον του οικισμού Σφηνάρι, Μέση: Καμένες εκτάσεις σε κοντινή απόσταση από το Σφηνάρι και πλησιέστερα του οικισμού Μπερμπαθιανά, Κάτω: Καμένες εκτάσεις βόρεια και σε κοντινή απόσταση από τους οικισμούς Μάλες και Καλαμαύκα.

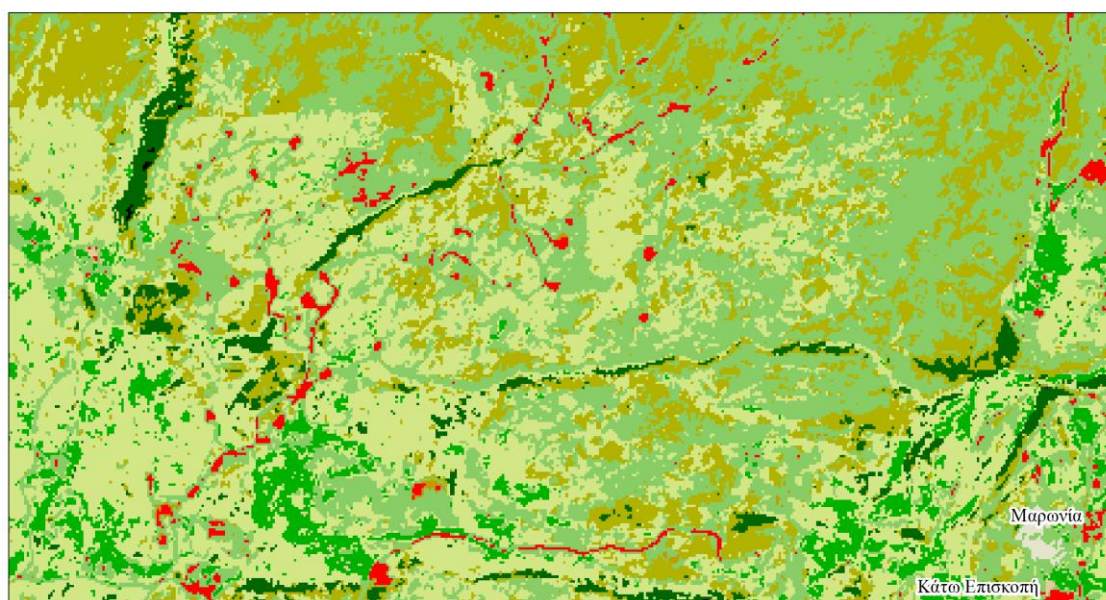
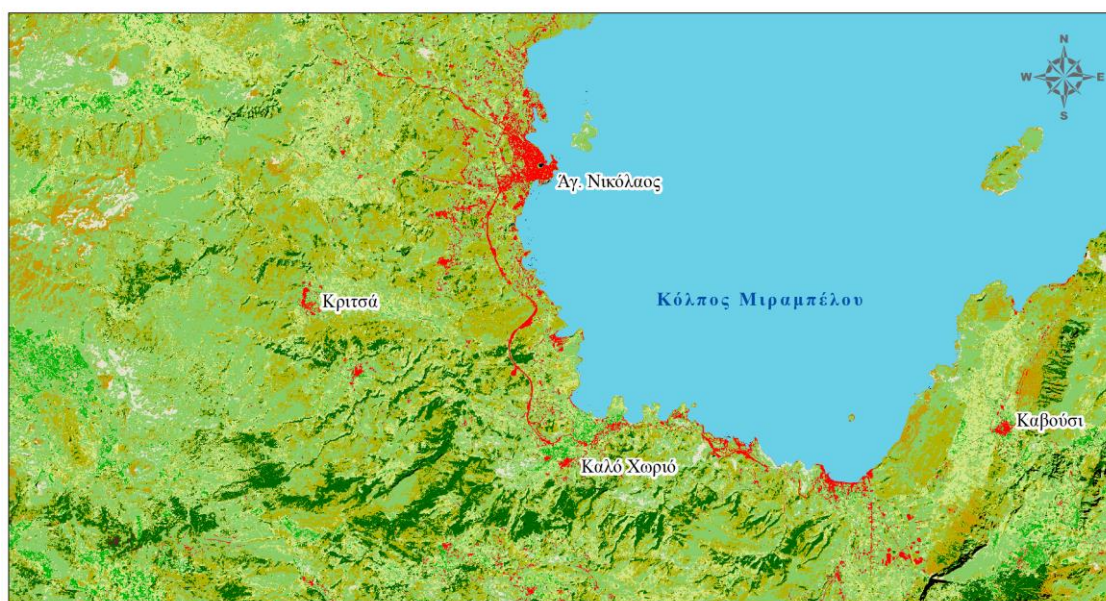


Σχήμα 48. Στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης και προβολή της κατηγορίας των σκιών. Επάνω, Μέση και Κάτω: Έντονα σκιασμένες πλαγιές μηδενικού φωτισμού όπου απουσιάζει η πληροφορία της εδαφικάλυψης.

Στο Σχήμα 48 προβάλλονται στιγμιότυπα της δορυφορικής εικόνας Sentinel 2 της Κρήτης με έμφαση στην κατηγορία των σκιών. Οι σκιές αποτυπώνονται στον θεματικό χάρτη με μαύρο χρώμα το οποίο δηλώνει την απουσία πληροφορίας λόγω σκιάς. Η κατηγορία αυτή εντοπίζεται σε έντονες πλαγιές βουνών, στην δυτική – βορειοδυτική μεριά τους.

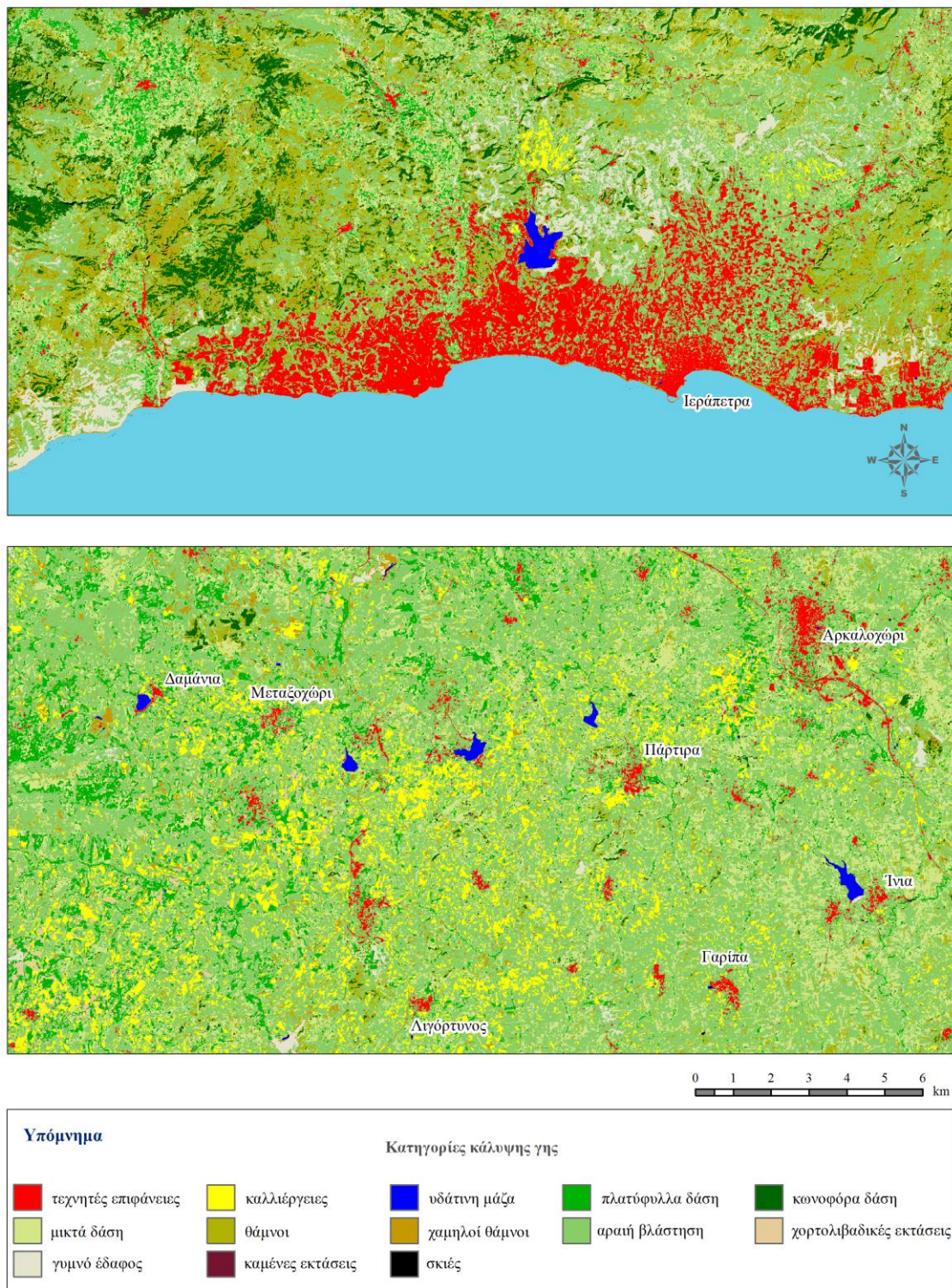
Στο σημείο αυτό ακολουθεί παρουσίαση εστιασμένων υποπεριοχών του παραγόμενου χάρτη κάλυψης γης της Ν. Κρήτης εξαιρετικού ενδιαφέροντος. Στο Σχήμα 49 στην επάνω εικόνα η στοχευμένη περιοχή αναδεικνύει το τοπίο περιμετρικά του κόλπου Μιραμπέλου. Η εικόνα αυτή περιλαμβάνει εννέα από τις δεκατρείς κατηγορίες κάλυψης γης (οι κατηγορίες που δεν συμμετέχουν είναι οι καλλιέργειες, τα εσωτερικά ύδατα, οι χορτολιβαδικές εκτάσεις και οι καμένες εκτάσεις). Στην κάτω εικόνα φανερώνεται το μοτίβο κατανομής των ανεμογεννητριών στην βορειοανατολική Κρήτη κοντά στον οικισμό Βούβαλοι και βορειοδυτικά του οικισμού της Κάτω Επισκοπής. Οι ανεμογεννήτριες τοποθετούνται σε απόσταση η μία από την άλλη με αποτέλεσμα να εκτείνονται από τα βορειοανατολικά του βουνού στα νοτιοδυτικά. Στην κατεύθυνση αυτή το υψόμετρο αυξάνεται από τα 366 m στα 682 m περίπου. Στην εικόνα διακρίνονται τα δρομάκια που έχουν διανοιχτεί προς όφελος της εγκατάστασης και πρόσβασης των ανεμογεννητριών. Το μήκος στο οποίο εκτείνονται είναι περίπου 3820 m σε ευθεία απόσταση.

Στο επόμενο σχήμα (Σχ. 50) γίνεται εστίαση στον θεματικό χάρτη κάλυψης γης στην περιοχή της Ιεράπετρας με σκοπό την επίδειξη της έκτασης που καταλαμβάνουν οι τεχνητές επιφάνειες που αφορούν σε θερμοκηπιακές μονάδες. Στην ανατολική πλευρά εκεί όπου βρίσκεται ο οικισμός της Ιεράπετρας τα θερμοκήπια έχουν μεγαλύτερη εξάπλωση προς τα βόρεια. Κινούμενοι προς τα δυτικά τα θερμοκήπια περιορίζονται στην παράκτια ζώνη λόγω του αναγλύφου στα βόρεια. Τα θερμοκήπια υδροδοτούνται από την τεχνητή λίμνη Μπραμιανών η οποία βρίσκεται σε κεντρικό σημείο όπως φαίνεται στο Σχήμα 50 στην επάνω εικόνα. Στην παράκτια ζώνη τα θερμοκήπια συνιστούν μία συμπαγή μάζα λόγω της πυκνής τοποθέτησής τους στον χώρο. Στο ίδιο σχήμα στην κάτω εικόνα αναπαρίσταται ένα πρότυπο οικισμών, καλλιεργειών και λιμνών στα νοτιοανατολικά του Ν. Ηρακλείου. Με το μοτίβο αυτό δηλώνεται φανερά πως η αγροτική δραστηριότητα είναι κυρίαρχη στην περιοχή.



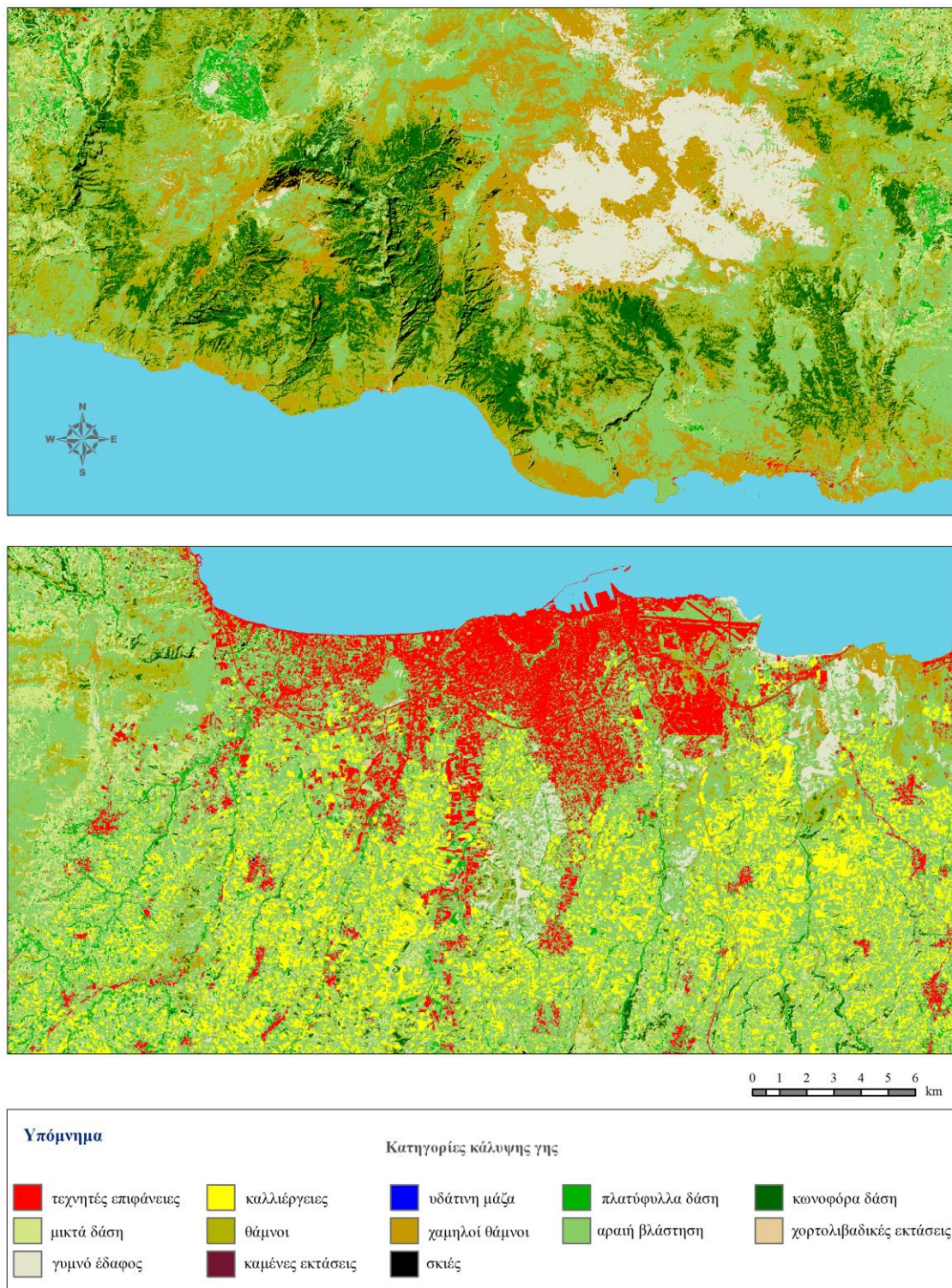
Υπόμνημα		Κατηγορίες κάλυψης γης			
■	τεχνητές επιφάνειες	■	καλλιέργειες	■	υδάτινη μάζα
■	μικτά δάση	■	θάμνοι	■	χαμηλοί θάμνοι
■	γυμνό έδαφος	■	καμένες εκτάσεις	■	σκιές
		■	πλατύφυλλα δάση	■	κωνοφόρα δάση
		■	αραϊή βλάστηση	■	χορτολιβαδικές εκτάσεις

Σχήμα 49. Εστιασμένες υποπεριοχές του χάρτη κάλυψης γης της Ν. Κρήτης. Επάνω: Γενική οπτική της κάλυψης γης περιμετρικά του κόλπου Μιραμπέλου, Κάτω: Οι ανεμογεννήτριες στην βορειοανατολική Κρήτη.

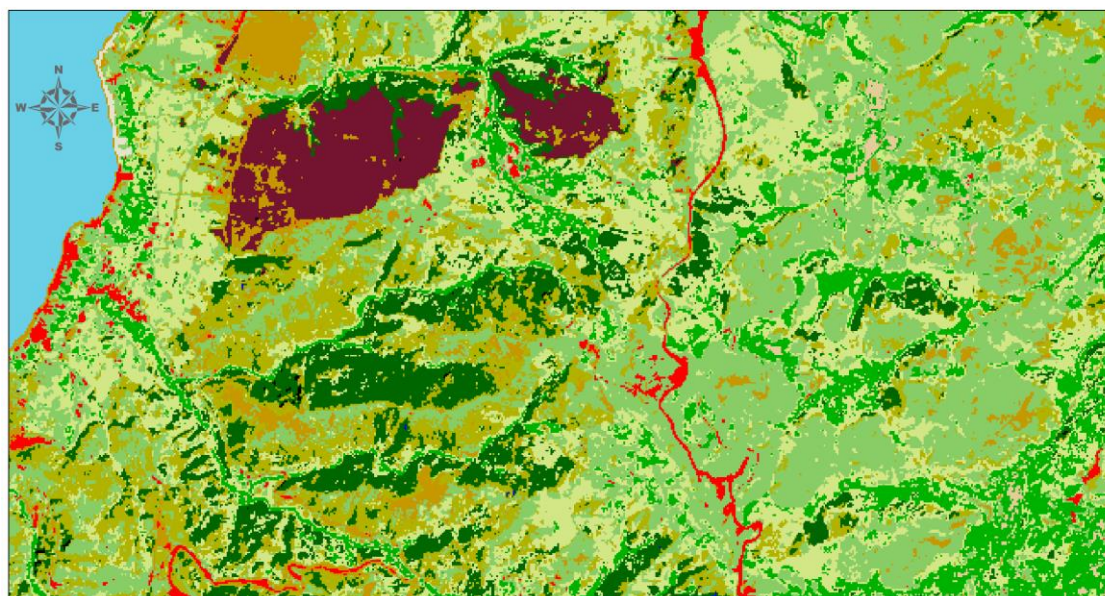
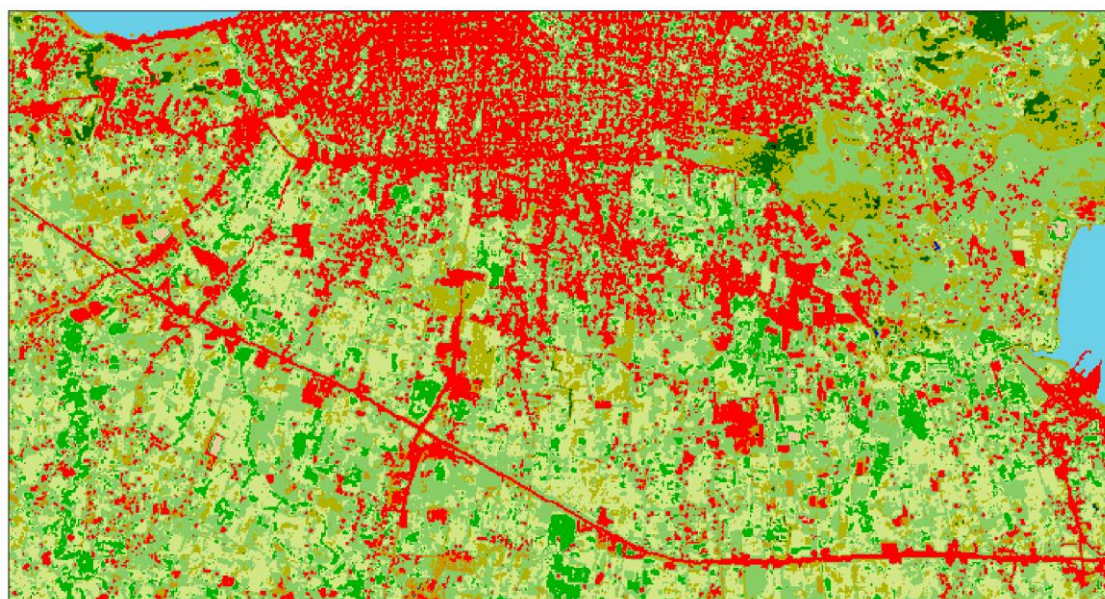


Σχήμα 50. Εστιασμένες υποπεριοχές του χάρτη κάλυψης γης της Ν. Κρήτης. Επάνω: Η Ιεράπετρα και η θέαση της πυκνότητας των θερμοκηπίων στην παράκτια ζώνη, Κάτω: Πρότυπο οικισμών, καλλιεργειών και λιμνών στα νοτιοανατολικά του Ν. Ηρακλείου.

Στο Σχήμα 51 γίνεται αντιπαράθεση δύο ξεχωριστών τοπίων στην Κρήτη. Στην επάνω εικόνα τα κύρια στοιχεία της συνθέτουν ένα φυσικό περιβάλλον στο οποίο η ανθρώπινη παρέμβαση είναι μηδαμινή. Από την άλλη μεριά η κάτω εικόνα αποτελεί μία περίπτωση στην οποία το ανθρωπογενές περιβάλλον είναι ανεπτυγμένο. Δίνοντας μία στοιχειώδη περιγραφή στην επάνω εικόνα αντικατοπτρίζονται τα Λευκά όρη και ανάμεσα το φαράγγι της Σαμαριάς. Οι κατηγορίες κάλυψης γης δένουν μεταξύ τους. Με αρχή το κέντρο του φαραγγιού της Σαμαριάς και κινούμενοι προς τα δεξιά προς την κορυφή Πάχνες στα Λευκά όρη η αλληλουχία των κατηγοριών κάλυψης γης είναι η εξής: κωνοφόρα δάση, θάμνοι, χαμηλοί θάμνοι, αραιή βλάστηση, χαμηλοί θάμνοι και γυμνό έδαφος. Στην κάτω εικόνα απεικονίζεται η έκταση του αστικού ιστού του Ηρακλείου στην συνέχεια του οποίου και προς τα νότια την θέση του παίρνουν οι καλλιέργειες και μικρότεροι διάσπαρτοι οικισμοί. Το γυμνό έδαφος εντοπίζεται σε συστάδες σε ευδιάκριτες υποπεριοχές στην ανατολική κυρίως πλευρά του Ηρακλείου. Η μάζα του αστικού ιστού δεν είναι ενιαία αλλά διακόπτεται ιδίως από την υπάρχουσα αραιή βλάστηση και σε μικρότερο βαθμό από δέντρα. Το ομαλό έδαφος στα προάστια ευνοεί την προς τα έξω εξάπλωση της οικιστικής δόμησης. Η δόμηση είναι πιο πυκνή και συμπαγής στα βόρεια και αραιώνει προς τα νότια. Το Ηράκλειο διαθέτει λιμάνι, αεροδρόμιο, βιομηχανική ζώνη στα νοτιοανατολικά και νοτιοδυτικά και καλλιέργειες εκεί που τελειώνει ο αστικός ιστός. Διακριτό επίσης στοιχείο στο Ηράκλειο είναι ο αυτοκινητόδρομος 90 (Α90) πλάτους 22 μέτρων. Επίσης το σχήμα και μέγεθος του κάθε οικισμού γύρω από το Ηράκλειο διαφέρει ενώ το μοτίβο τους δείχνει πως είναι τυχαία τοποθετημένοι στον χώρο.



Σχήμα 51. Εστιασμένες υποπεριοχές του χάρτη κάλυψης γης της Ν. Κρήτης. Επάνω: Τα Λευκά όρη και ανάμεσα το φαράγγι της Σαμαριάς, Κάτω: Το Ηράκλειο και η γύρω περιοχή.



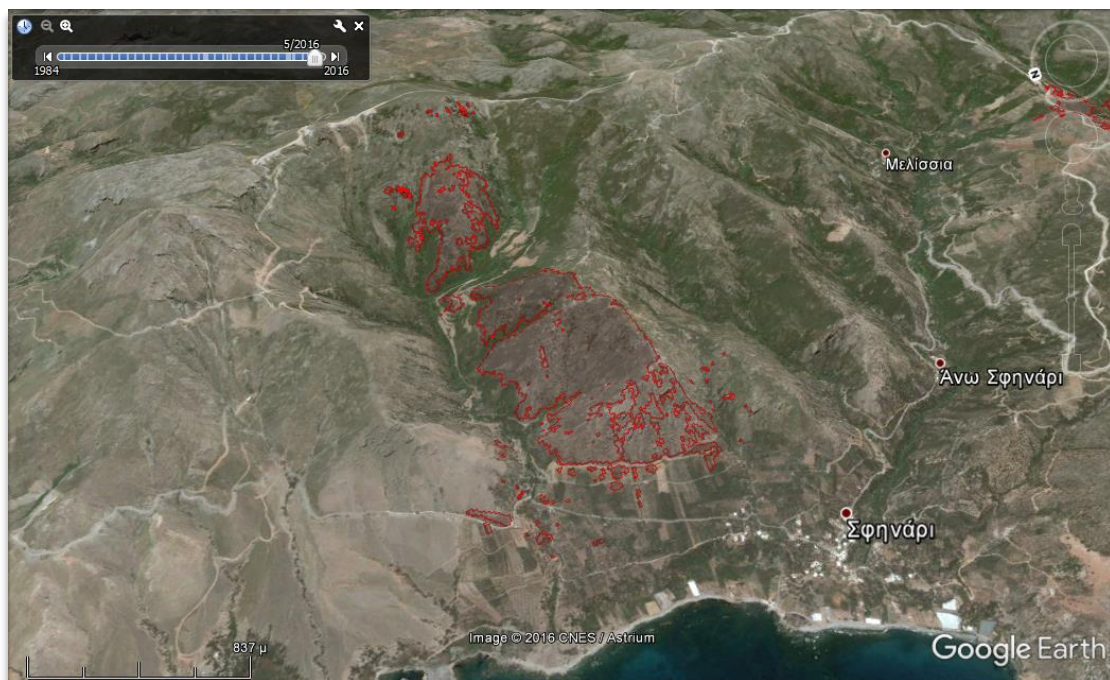
0 0.25 0.5 0.75 1 1.25 1.5 km

Υπόμνημα		Κατηγορίες κάλυψης γης							
	τεχνητές επιφάνειες		καλλιέργειες		υδάτινη μάζα		πλατύφυλλα δάση		κονοφόρα δάση
	μικτά δάση		θάμνοι		χαμηλοί θάμνοι		αραιή βλάστηση		χορτολιβαδικές εκτάσεις
	γυμνό έδαφος		καμένες εκτάσεις		σκιές				

Σχήμα 52. Εστιασμένες υποπεριοχές του χάρτη κάλυψης γης της Ν. Κρήτης. Ο αυτοκινητόδρομος πλάτους 22 μέτρων και μήκους 41 χιλιομέτρων νότια των Χανίων, Κάτω: Οι καμένες εκτάσεις στην βορειοδυτική Κρήτη και ο δρόμος που ακολουθεί την ισοϋψή καμπύλη στον ορεινό όγκο.

Στο Σχήμα 52 στην επάνω εικόνα διακρίνονται σε πρώτη φάση τα οικοδομικά τετράγωνα των Χανίων και ο αυτοκινητόδρομος πλάτους 22 μέτρων και μήκους 41 χιλιομέτρων στα νότια. Ο αυτοκινητόδρομος χωρίζει τα Χανιά από τους υπόλοιπους μικρότερους οικισμούς. Η δόμηση των Χανίων είναι προσεγμένη στο κύριο αστικό κομμάτι με την συγκέντρωση των κτιρίων σε οικοδομικά τετράγωνα.

Σε δεύτερη φάση παρατηρούνται εστίες денδροκάλυψης πλησίον των οικισμών. Σημαντική παρατήρηση είναι το γεγονός πως στα νοτιοανατολικά έχει εισχωρήσει τεχνητή επιφάνεια εντός της ζώνης κάλυψης θάμνων και δέντρων. Προχωρώντας στην περιγραφή της κάτω εικόνας του ίδιου σχήματος είναι φανερή η διάκριση των καμένων εκτάσεων στην βορειοδυτική Κρήτη και ο δρόμος που ακολουθεί την ισοϋψή καμπύλη στον ορεινό όγκο. Οι καμένες εκτάσεις βρίσκονται εντός λεκάνης απορροής και κοντινός μικρός οικισμός είναι το Σφηνάρι στα παραλιακά (Σχ. 52, 53).



Σχήμα 53. Προβολή των καμένων εκτάσεων στην ιστορική εικόνα του Google Earth με μία οπτική ανάδειξης της λεκάνης απορροής.

8. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΗΣ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Για τη δημοσιοποίηση και την εμφάνιση των τελικών θεματικών χαρτών κάλυψης γης της Ν. Κρήτης στον παγκόσμιο ιστό (web) σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε διαδικτυακή χαρτογραφική εφαρμογή (Web Mapping Application). Η ανάπτυξη της εφαρμογής πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τεχνολογίες και Ελεύθερο Λογισμικό / Λογισμικό Ανοιχτού Κώδικα (ΕΛ/ΛΑΚ) προσανατολισμένο στα γεωχωρικά δεδομένα υιοθετώντας τις τυποποιήσεις και προδιαγραφές των υπηρεσιών του οργανισμού OGC (Open Geospatial Consortium). Τα συστήματα λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κύριες κατηγορίες: i) Λογισμικά που εκτελούνται στη πλευρά του πελάτη και ii) Λογισμικά που εκτελούνται στον εξυπηρετητή.

8.1. Συστήματα και λογισμικά της εφαρμογής

8.1.1. Λογισμικά στη πλευρά του πελάτη (client)

Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στο επίπεδο του πελάτη ευθύνονται για την εύρυθμη αλληλεπίδραση του χρήστη με τα στοιχεία της χαρτογραφικής εφαρμογής. Για την ανάπτυξη της διεπαφής χρήστη χρησιμοποιήθηκαν οι δημοφιλείς γλώσσες προγραμματισμού στο web όπως είναι η HTML, CSS και JavaScript. Για την χαρτογραφική αλληλεπίδραση αξιοποιήθηκε η βιβλιοθήκη *OpenLayers* η οποία συνιστά μια χαρτογραφική διεπαφή προγραμματισμού στον παγκόσμιο ιστό (Web Mapping API) που έχει υλοποιηθεί σε JavaScript, μέσω της οποίας παρέχονται τα διαδραστικά εργαλεία για την εμφάνιση και την αλληλεπίδραση με τον χάρτη στο περιβάλλον ενός φυλλομετρητή (browser). Η *OpenLayers* παρέχει μια πληθώρα εργαλείων και λειτουργιών για την ανάπτυξη πλούσιων διαδικτυακών χαρτογραφικών εφαρμογών και ολοκληρωμένων διαδικτυακών GIS (Web GIS). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μέσω της *OpenLayers* επιτυγχάνεται η άντληση και εμφάνιση των χαρτογραφικών δεδομένων κάλυψης γης από τον χωρικό εξυπηρετητή καθώς και η παροχή εργαλείων αλληλεπίδρασης όπως μεγέθυνση (zoom in) και σμίκρυνση (zoom out), κεντρική εστίαση (zoom to extent), γραφική κλίμακα (scale) και εμφάνιση συντεταγμένων στο προβολικό σύστημα αναφοράς ΈΓΣΑ 87.

8.1.2. Λογισμικά στη πλευρά του εξυπηρετητή (server)

Τα συστήματα που συνθέτουν τις εφαρμογές στη πλευρά του εξυπηρετητή και υποστηρίζουν τη χαρτογραφική εφαρμογή αφορούν τον εξυπηρετητή ιστού Apache HTTP Server και τον GeoServer. Ο πρώτος χρησιμοποιήθηκε για την ορθή λειτουργία της χαρτογραφικής εφαρμογής στο περιβάλλον των φυλλομετρητών (Chrome, Firefox κ.λπ.). Ο GeoServer είναι ο δημοφιλέστερος ανοιχτού κώδικα εξυπηρετητής χωρικών δεδομένων στον οποίο φιλοξενούνται και διαχέονται στο διαδίκτυο μέσω των υπηρεσιών WMS (Web Map Service) και WFS (Web Feature Service) τα δεδομένα κάλυψης γης της Ν. Κρήτης.

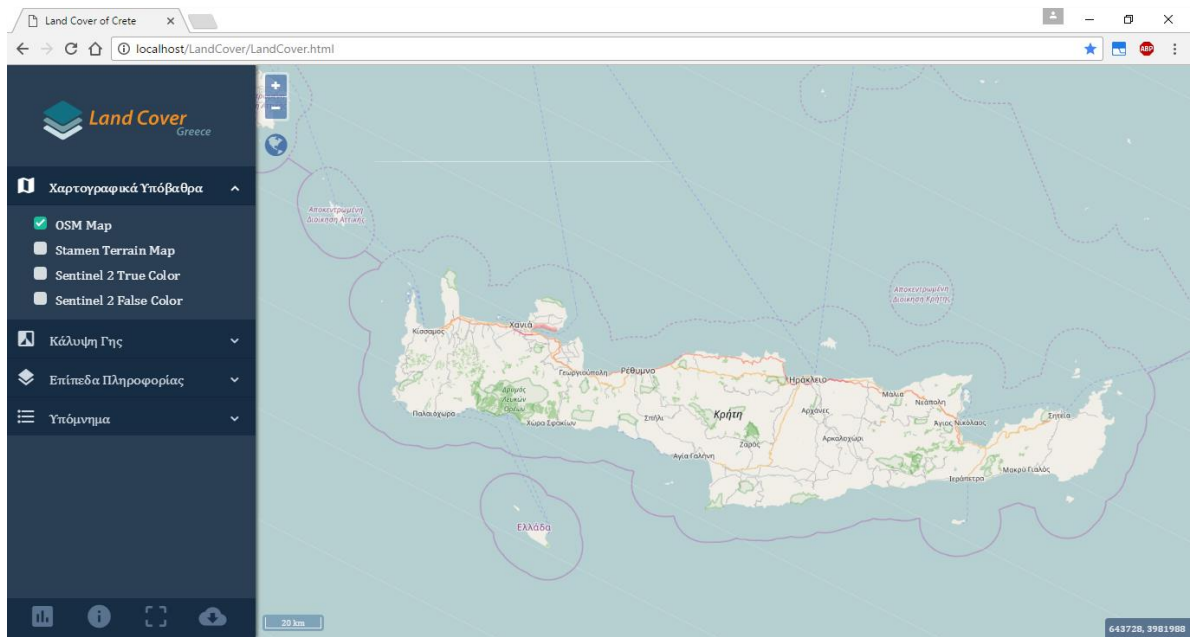
8.2. Λειτουργίες της εφαρμογής

Η χαρτογραφική εφαρμογή στο παρόν στάδιο τρέχει στον τοπικό server (localhost) συνεπώς στα ακόλουθα παραδείγματα όλες οι υπηρεσίες καλούν τον τοπικό εξυπηρετητή. Με την είσοδο στην εφαρμογή λαμβάνεται η ακόλουθη οθόνη η οποία αποτελεί τη διεπαφή της εφαρμογής (Σχ. 54). Με τη φόρτωση της εφαρμογής, στο κεντρικό παράθυρο εμφανίζεται αυτομάτως ο θεματικός χάρτης κάλυψης γης της Ν. Κρήτης .

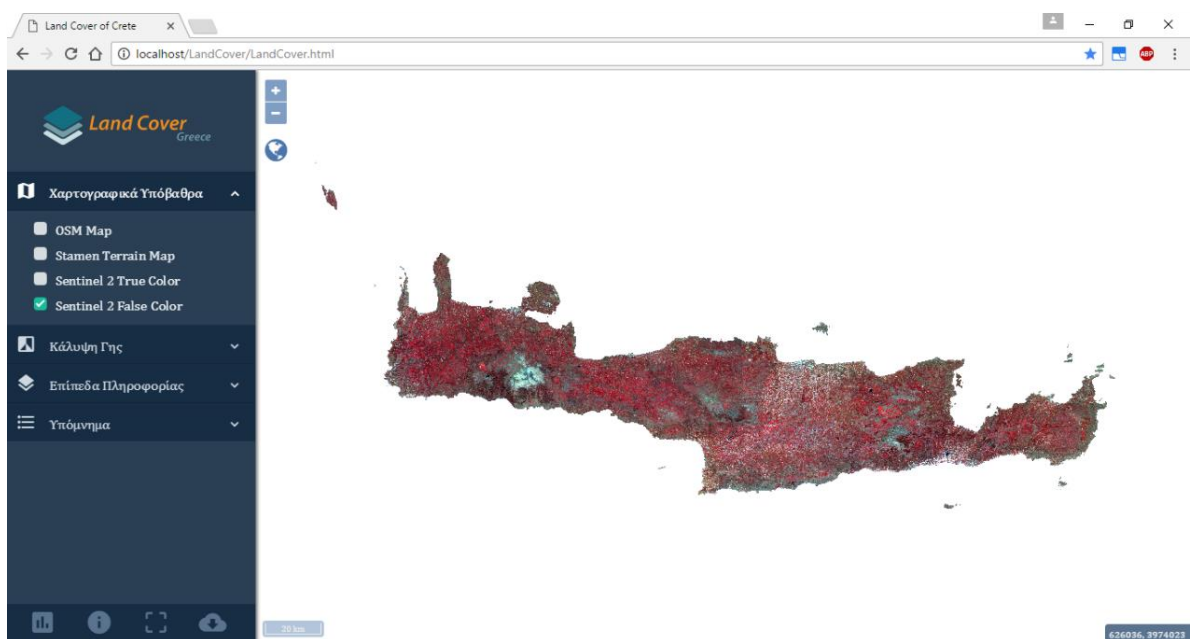


Σχήμα 54. Η διεπαφή της χαρτογραφικής εφαρμογής.

Μέσω του βασικού menu επιλέγοντας την πρώτη επιλογή των χαρτογραφικών υποβάθρων εμφανίζεται μια σειρά από διαθέσιμες επιλογές για την φόρτωση και εμφάνιση ορισμένων χαρτογραφικών υποβάθρων όπως ο χάρτης Open Street Map, Stamen Map καθώς και οι δορυφορικές εικόνες Sentinel 2 της Ν. Κρήτης (Σχ. 55, Σχ. 56).

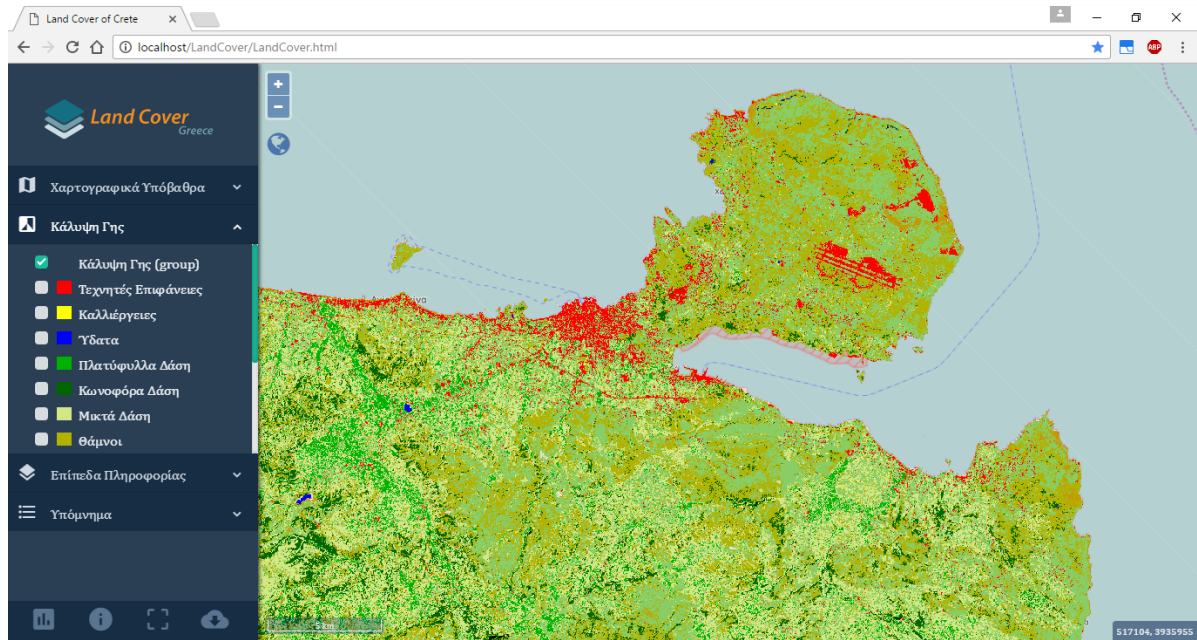


Σχήμα 55. Εμφάνιση του χάρτη OSM μέσω της εφαρμογής.

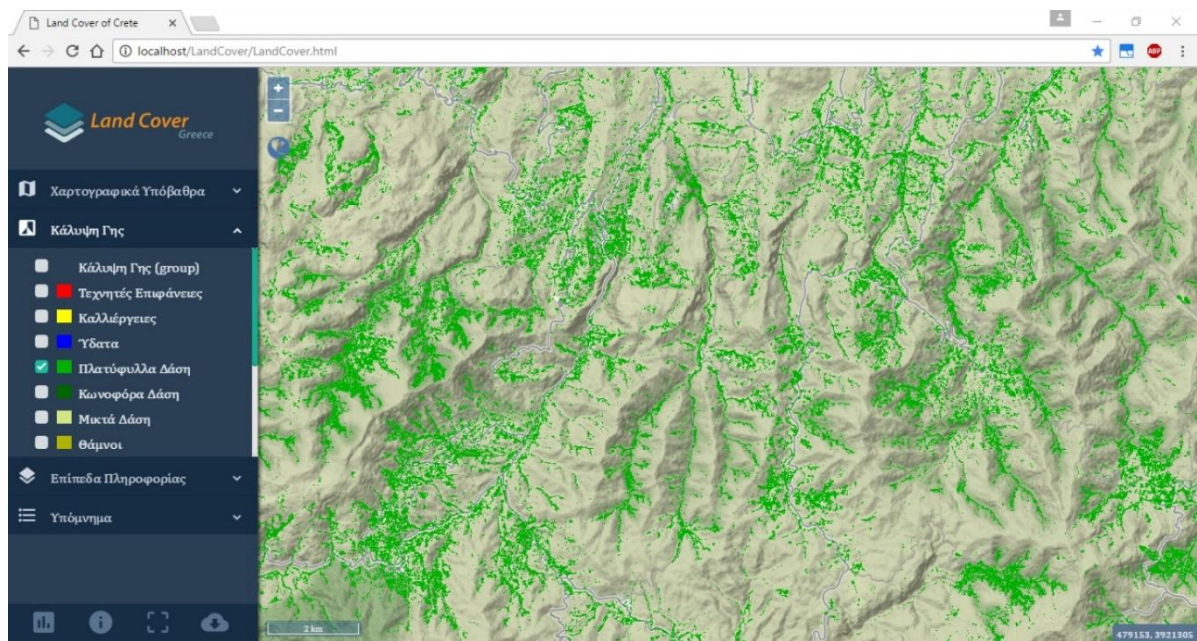


Σχήμα 56. Εμφάνιση της ψευδέγχρωμης εικόνας Sentinel 2 μέσω της εφαρμογής.

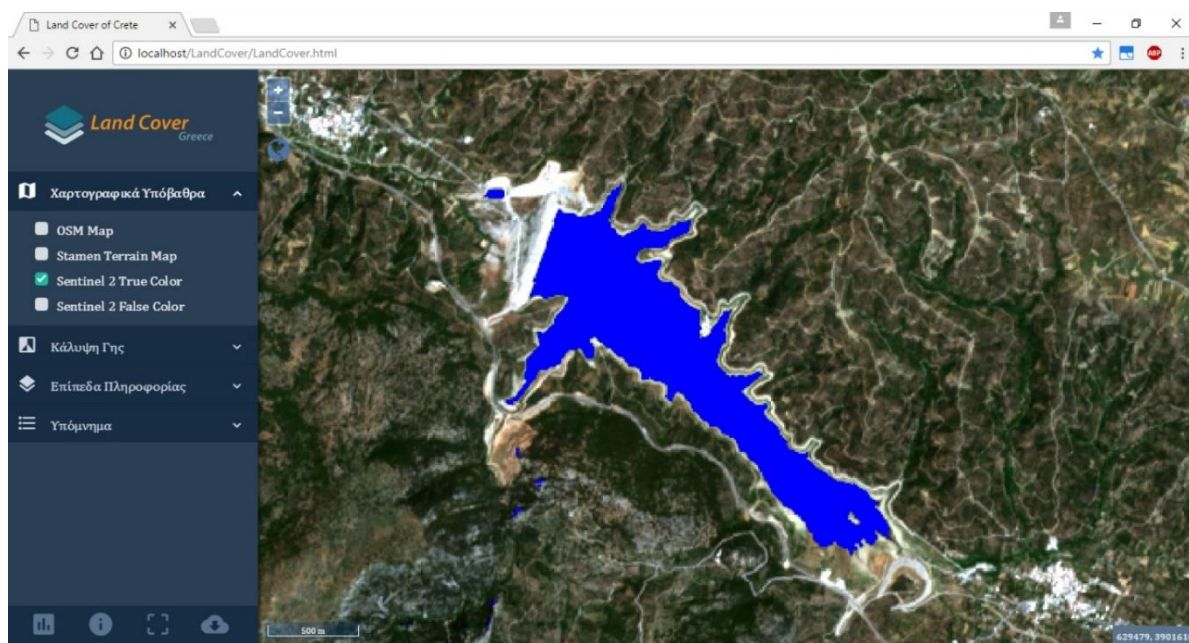
Με επιλογή της δεύτερης ενότητας στο menu εμφανίζονται όλες οι κατηγορίες κάλυψης γης, τόσο ως ενιαίο θεματικό επίπεδο (group layer) αλλά και ως μεμονωμένα επίπεδα. Στα ακόλουθα σχήματα παρουσιάζονται ορισμένα παραδείγματα.



Σχήμα 57. Εμφάνιση του ενιαίου θεματικού επιπέδου με όλες τις κατηγορίες κάλυψης γης.



Σχήμα 58. Υπέρθεση του επιπέδου των Πλατύφυλλων Δασών στο χαρτογραφικό υπόβαθρο Stamen.

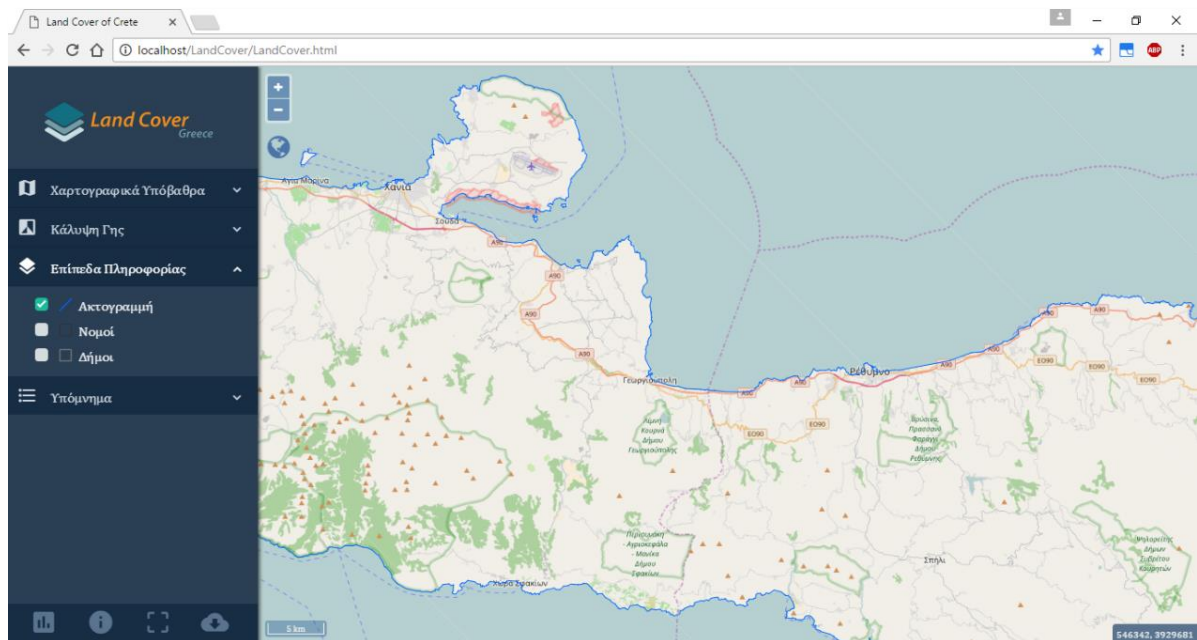


Σχήμα 59. Υπέρθεση του θεματικού επιπέδου των Υδάτων στην εικόνα φυσικών χρωμάτων του Sentinel 2.



Σχήμα 60. Υπέρθεση των θεματικών επιπέδων των Τεχνητών επιφανειών και Καλλιεργειών στην εικόνα φυσικών χρωμάτων του Sentinel 2.

Επιλέγοντας τη Τρίτη καρτέλα προσφέρονται προς εμφάνιση επιπρόσθετα επίπεδα πληροφορίας που αφορούν την Ακτογραμμή, τους Νομούς και τους Καλλικρατικούς Δήμους της Ν. Κρήτης.

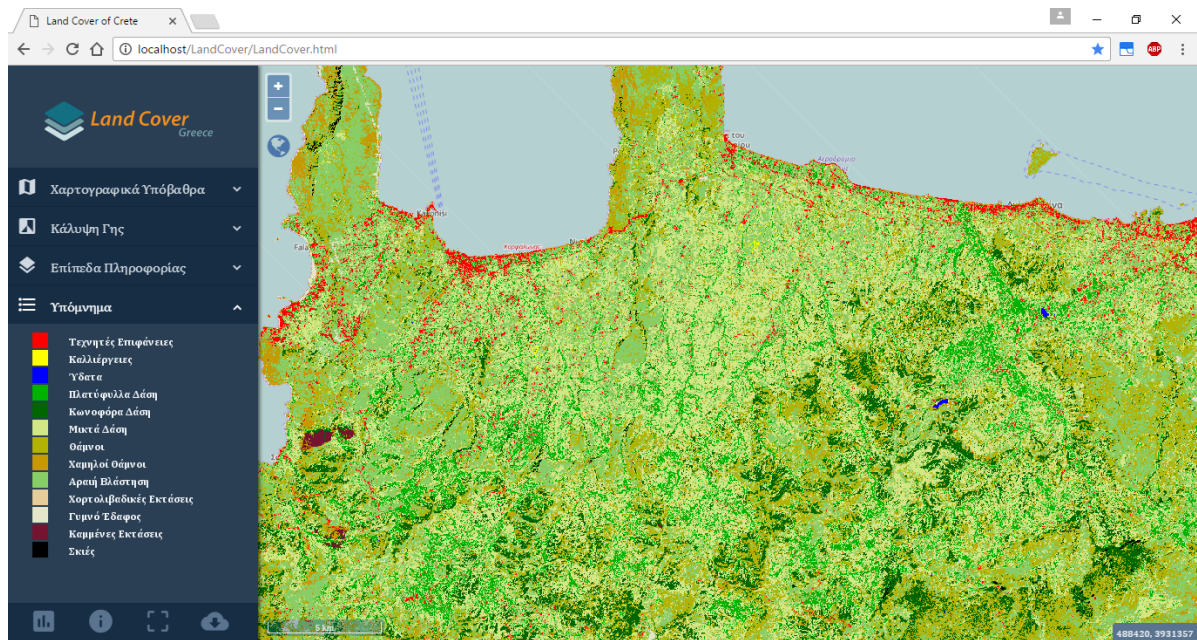


Σχήμα 61. Υπέρθωση της ακτογραμμής της Ν. Κρήτης στο χάρτη OSM.



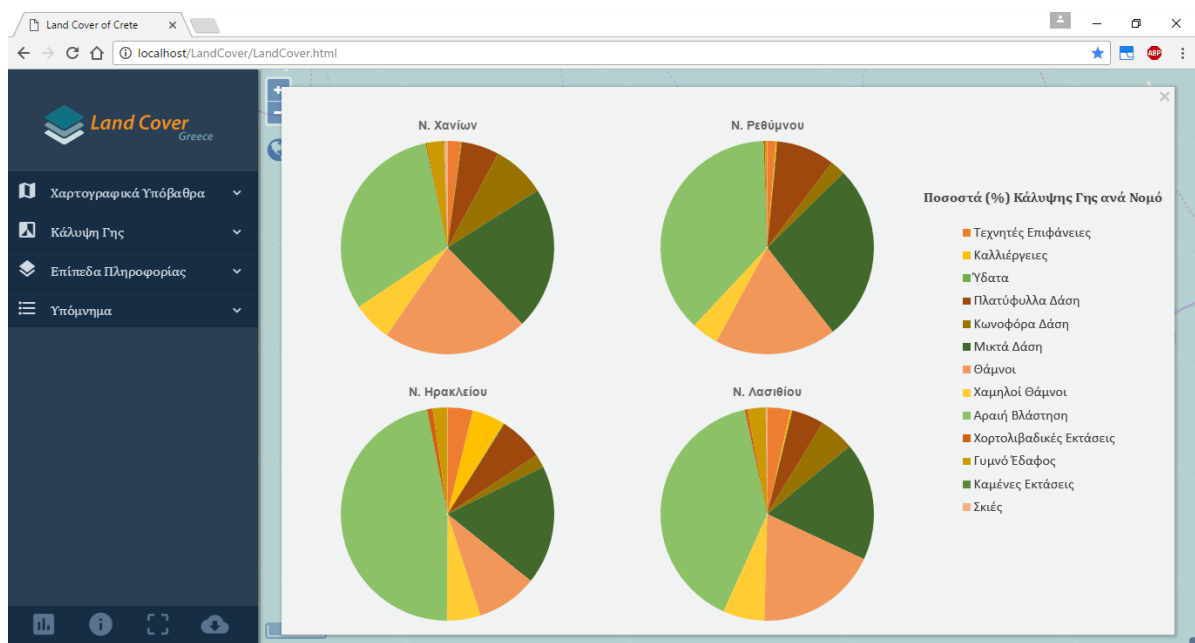
Σχήμα 62. Εμφάνιση των Καλλικρατικών δήμων της Ν. Κρήτης.

Επιλέγοντας τη τελευταία καρτέλα εμφανίζεται το υπόμνημα των θεματικών επιπέδων της κάλυψης γης (Σχ. 63).

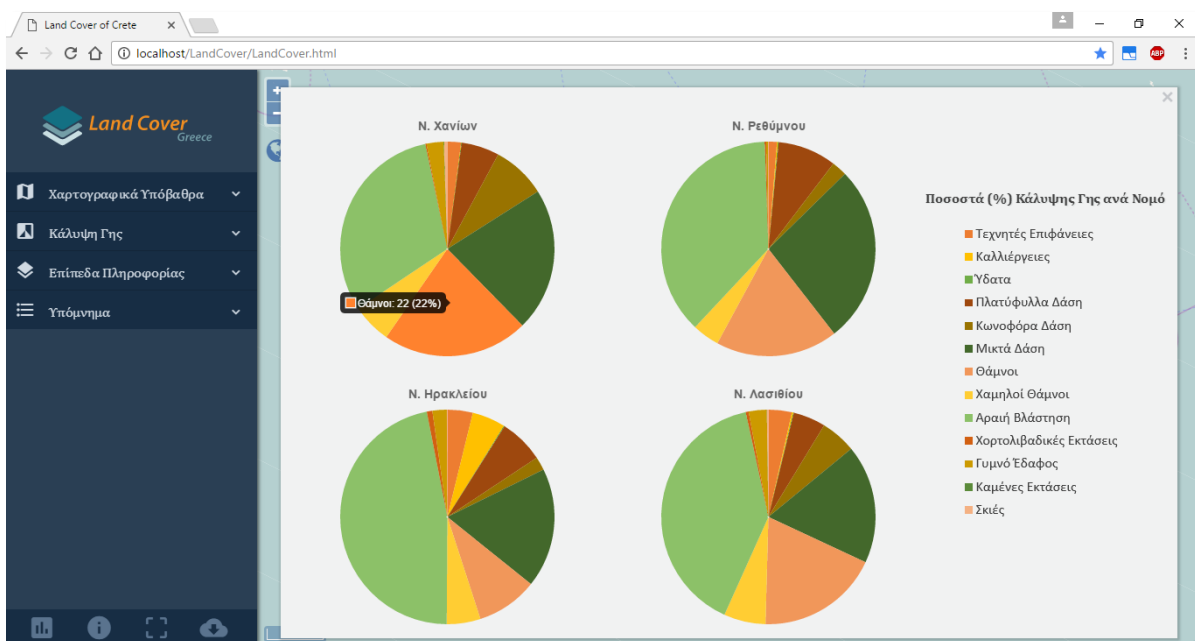


Σχήμα 63. Εμφάνιση του υπομνήματος των θεματικών επιπέδων της κάλυψης γης.

Τέλος, μέσω της εφαρμογής παρέχεται η πληροφόρηση σχετικά με το ποσοστό έκτασης που καταλαμβάνει κάθε κατηγορία κάλυψης γης ανά επίπεδο νομού με την χρήση στατιστικών γραφημάτων με τη μορφή της πίτας (pie) (Σχ. 64). Τα γραφήματα είναι διαδραστικά συνεπώς μετακινώντας το δείκτη του ποντικιού πάνω σε αυτά εμφανίζεται και το αντίστοιχο ποσοστό της εκάστοτε κατηγορίας (Σχ. 65).



Σχήμα 65. Στατιστικά γραφήματα – πίτες των ποσοστών έκτασης των κατηγοριών κάλυψης γης ανά νομό.



Σχήμα 64. Ένδειξη του ποσοστού της έκτασης των κατηγοριών κάλυψης γης με μετακίνηση του δείκτη του ποντικιού στο γράφημα της πίτας.

9. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αξιοποιήθηκαν Sentinel 2 δορυφορικά δεδομένα για την εξαγωγή της πληροφορίας της κάλυψης γης στο νησί της Κρήτης. Τα κύρια μέρη της εργασίας αυτής αφορούν στην προεπεξεργασία (ατμοσφαιρική και τοπογραφική διόρθωση) και ταξινόμηση εικόνας σε θεματικά επίπεδα κάλυψης γης και στην ανάπτυξη Web εφαρμογής που φιλοξενεί την παραγόμενη πληροφορία.

Η ατμοσφαιρική διόρθωση σε Sentinel 2 εικόνες με τον επεξεργαστή Sen2Cor συμβάλλει στην αφαίρεση της επίδρασης των Cirrus συννέφων, στην ενίσχυση των χρωμάτων και στην βελτίωση της οπτικής εμφάνισης. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η οπτική αντίληψη και η ερμηνεία της εικόνας. Οι δορυφορικές εικόνες που εξετάστηκαν είναι κοντινής ημερομηνίας οι οποίες λήφθηκαν την άνοιξη του 2016. Μετά την ατμοσφαιρική διόρθωση παρατηρήθηκε έντονη διαφορά στις εικόνες ανάμεσα στην δυτική και ανατολική Κρήτη εξαιτίας του διαφορετικού ποσού υδρατμών στην ατμόσφαιρα. Ο επεξεργαστής Sen2Cor δημιουργήθηκε αποκλειστικά για την προεπεξεργασία Sentinel 2 εικόνων. Βρέθηκε πως είναι κατάλληλος για ατμοσφαιρική διόρθωση όμως απαιτούνται βελτιώσεις πρώτον στο κομμάτι των προσφερόμενων χαρτών ταξινόμησης της εικόνας όπως για παράδειγμα βελτίωση στις μάσκες συννέφων, σκιών συννέφων και χιονιού που αποτελούν βασική πληροφορία σε περιπτώσεις σύνθεσης εικόνων κοντινής χρονικής περιόδου για την δημιουργία εικόνας απουσία συννέφων και δεύτερον στο κομμάτι της τοπογραφικής διόρθωσης όπου η αυτόματη χρήση DEM χωρικής ανάλυσης ενενήντα μέτρων (90 m) δεν ενδείκνυται για την μείωση της επίδρασης του αναγλύφου σε τέτοια δεδομένα με χωρική ανάλυση στα δέκα μέτρα (10 m) όπως διαπιστώθηκε και στην πράξη. Τα προϊόντα της ατμοσφαιρικής διόρθωσης οργανώνονται διαφορετικά εξαιτίας του διαχωρισμού των φασματικών καναλιών σε φακέλους βάσει της διαφορετικής χωρικής ανάλυσης. Η γεωαναφορά και το προβολικό μεταφέρθηκαν από τα αρχικά προϊόντα στα ατμοσφαιρικά διορθωμένα προϊόντα.

Στην μέθοδο τοπογραφικής διόρθωσης Minnaert η επιλογή του συντελεστή k είναι πολύ κρίσιμη. Η μέθοδος εφαρμογής ενός ενιαίου συντελεστή για μία ολόκληρη εικόνα είναι ένας συνηθισμένος και εύκολος τρόπος τοπογραφικής διόρθωσης ο οποίος έχει αποδειχτεί προβληματικός στην διόρθωση των τοπογραφικών επιδράσεων, ιδιαίτερα σε περιοχές με απότομες πλαγιές, επειδή η τιμή του συντελεστή k εξαρτάται από τις τοπογραφικές συνθήκες. Διαφορετικές κλίσεις στην τοπογραφία έχουν διαφορετικό αντίκτυπο στην κάλυψη γης. Ο υπολογισμός του συντελεστή k ανά επίπεδο κλίσεων βελτιώνει την απόδοση της τοπογραφικής διόρθωσης. Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλοί συντελεστές οι οποίοι ανταποκρίνονται σε διαφορετικές τάξεις τοπογραφικών κλίσεων. Οι συντελεστές εξαρτώνται από το μήκος κύματος και επομένως έγινε εξαγωγή διαφορετικών συντελεστών για κάθε κανάλι ξεχωριστά. Άρα για κάθε δορυφορική εικόνα σε κάθε κανάλι και για κάθε τάξη κλίσεων υπολογίστηκε διαφορετικός συντελεστής. Ωστόσο, η χρήση ενός ενιαίου συντελεστή σε μεγάλες κλίσεις, με χαμηλό φωτισμό και ίδιο τύπο κάλυψης γης προκαλεί το φαινόμενο της υπερδιόρθωσης στην εικόνα. Έτσι, για την αποτελεσματική μείωση των τοπογραφικών επιδράσεων στις συγκεκριμένες υποπεριοχές αναπτύχθηκε μεθοδολογία η οποία προτείνει την εξαγωγή πολλαπλών συντελεστών σε ζώνες φωτισμού.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει δείξει πολλά πλεονεκτήματα στην βελτίωση της απόδοσης της τοπογραφικής διόρθωσης. Το μοντέλο τοπογραφικής διόρθωσης που αναπτύχθηκε αποδείχτηκε αποτελεσματικό καθώς μειώθηκε η επίδραση του αναγλύφου στον επιθυμητό βαθμό επιτυγχάνοντας ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ ανακλαστικότητας και φωτισμού να φτάσει πολύ κοντά στο μηδέν. Στην εργασία αυτή αποδείχτηκε πως δεν πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν μόνο η κλίση και ο τύπος κάλυψης γης αλλά θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν το επίπεδο του φωτισμού σε σχέση με το εύρος ανακλαστικότητας σε κάθε επίπεδο κλίσεων και για κάθε τύπο κάλυψης γης. Ουσιαστικά προσφέρεται ένας τρόπος καταπολέμησης της υπερδιόρθωσης σε υψηλές κλίσεις, χαμηλού φωτισμού και ίδιου τύπου κάλυψης γης. Η υπερδιόρθωση είναι ένα φαινόμενο το οποίο αλλοιώνει την εικόνα και τις τιμές της. Η υπερδιόρθωση εντοπίζεται ιδιαίτερα έντονη σε ζώνες χαμηλού φωτισμού γύρω από ζώνες αρνητικού φωτισμού όπου εκεί δεν επιδρά η διόρθωση. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί σε πολλές εργασίες. Η μέθοδος που προτείνουν ο Sakamoto κ.α. (2009) για την διαφορετική διαχείριση των αρνητικών τιμών φωτισμού σε σχέση με τις θετικές δεν είναι κατάλληλη στην παρούσα περίπτωση μελέτης διότι το ύψος ηλίου δεν είναι

χαμηλό. Παρά τα όλα αυτά δοκιμάστηκε και απορρίφθηκε. Άλλη μία μέθοδος προτεινόμενη σε δημοσίευση που δοκιμάστηκε και απορρίφθηκε είναι η Modified Minnaert (Richter et al., 2009). Η μέθοδος που προτείνεται στην εργασία αυτή διαφέρει από τις εν λόγω μεθόδους στο ότι εστιάζει μόνο στις υποπεριοχές εκείνες που χρήζουν διόρθωσης. Έτοιμοι αλγόριθμοι που προσφέρονται (όπως οι Cosine, C, Normalization) πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή. Σε κάθε περίπτωση να μην ισοπεδώνεται το ανάγλυφο ούτε να αλλάζουν σε μεγάλο βαθμό οι τιμές ανακλαστικότητας. Το βήμα της τοπογραφικής διόρθωσης είναι εξαιρετικά σημαντικό αφού οι τοπογραφικά διορθωμένες εικόνες είναι αυτές που αξιοποιούνται στην διαδικασία της ταξινόμησης εικόνας. Μία λάθος τοπογραφικά διορθωμένη εικόνα καλό θα ήταν να μην χρησιμοποιείται και να επιλέγεται η χρήση των εικόνων προ διόρθωσης. Σαφώς στο κομμάτι της τοπογραφικής διόρθωσης είναι απαραίτητη η περαιτέρω έρευνα για την δημιουργία και προσφορά περισσότερων και αποτελεσματικότερων μεθοδολογιών και εργαλείων τοπογραφικής διόρθωσης.

Η SVM τεχνική βρέθηκε αποτελεσματική στον προσδιορισμό των κατηγοριών κάλυψης γης επιτυγχάνοντας συνολική ακρίβεια 97% και τιμή συντελεστή kappa 0.96. Συμπεραίνεται ότι η SVM παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα ακόμη και για μεγάλες περιοχές περίπλοκου αναγλύφου. Στην υψηλή ακρίβεια συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό η ορθή επιλογή δειγμάτων εκπαίδευσης από την συνολική περιοχή μελέτης, τα οποία μεταξύ των κατηγοριών κάλυψης γης είναι καλά διαχωρίσιμα και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην ελεγχόμενη ταξινόμηση. Επομένως, σημαντικό ρόλο στην προσέγγιση αυτή παίζει η σωστή εκπαίδευση του αλγορίθμου. Ο SVM ταξινομητής μπορεί να χρησιμοποιεί μικρότερα σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης, χωρίς να διακυβεύεται η ακρίβεια ταξινόμησης. Σε πολλές περιπτώσεις στην παρούσα εφαρμογή τα αποτελέσματα της ταξινόμησης ήταν καλύτερα με μικρότερα σύνολα δεδομένων εκπαίδευσης τα οποία ήταν ομοιογενή και χαρακτηριστικά της εκάστοτε κατηγορίας. Ο αλγόριθμος SVM παρέχει αξιόπιστα αποτελέσματα στην χαρτογράφηση της κάλυψης γης και η εφαρμογή του είναι εύκολη.

Η φασματική διάκριση των χωρικών αντικειμένων συνεπάγεται και μεγαλύτερη πιθανότητα για ένταξή τους στην σωστή κατηγορία κάλυψης γης. Στην παρούσα περίπτωση μελέτης εντοπίστηκαν αντικείμενα διαφορετικής κατηγορίας με ίδια ή παρόμοια φασματική υπογραφή. Η εύρεση των σχέσεων μεταξύ των φασματικών υπογραφών και των αντικειμένων συνιστά κομμάτι της διαδικασίας για την επίτευξη

μίας ορθής ταξινόμησης. Χωρικά αντικείμενα με φασματική σύγχυση διακριτοποιούνται σε δεύτερο χρόνο, έπειτα του αποτελέσματος της ταξινόμησης ανά ψηφίδα. Η διαχείριση των χωρικών αντικειμένων συνίσταται στην ολοκλήρωση της προσέγγισης ταξινόμησης. Το φαινόμενο της φασματικής σύγχυσης έχει αναφερθεί σε πολλές μελέτες κάλυψης γης. Προσοχή θα πρέπει να δίνεται στην σύγχυση των υδάτων με αθλητικά γήπεδα, των υδάτων με σκιές, των τεχνητών επιφανειών με γυμνό έδαφος και με καλλιέργειες και των καλλιεργειών με αραιή βλάστηση.

Μέσα από τα ταξινομημένα θεματικά επίπεδα αναδεικνύονται οι δυνατότητες του Sentinel 2 για ανίχνευση μικρών οντοτήτων του χώρου. Η ανίχνευση μικρών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του τοπίου με Sentinel 2 δεδομένα μαζί με την χρήση της SVM η οποία έχει την ικανότητα να διατηρεί τα χωρικά χαρακτηριστικά συνιστούν τον κατάλληλο συνδυασμό για την δημιουργία θεματικών χαρτών κάλυψης γης. Με Sentinel 2 δορυφορικά δεδομένα αναλύεται η κάλυψη γης με λεπτομέρεια και ειδικά σε υψηλά ετερογενείς περιοχές όπως είναι τα παράκτια περιβάλλοντα και σε υψηλά κατακερματισμένα τοπία όπως είναι οι περιαστικές περιοχές. Η μέθοδος ταξινόμησης SVM διατηρεί τα στοιχεία του χώρου και παρέχει ένα πολύ ακριβές προϊόν. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας συνιστούν ισχυρή ένδειξη της καλής ποιότητας της θεματικής πληροφορίας κάλυψης γης η οποία δικαιολογεί και την μεγάλη ακρίβεια του προϊόντος.

Στην υψηλή ακρίβεια ταξινόμησης των δασών και της βλάστησης συνέβαλλε η αξιοποίηση ανοιξιάτικων δορυφορικών εικόνων. Είναι από τις πρώτες ανοιξιάτικες εικόνες που κατέγραψε ο δορυφόρος Sentinel 2. Το αποτύπωμα των θεματικών επιπέδων των δασών συμπίπτει με το υπόβαθρο της δορυφορική εικόνας. Το ίδιο συμπεραίνεται και για τα υπόλοιπα θεματικά επίπεδα κάλυψης γης. Το αποτύπωμα κάθε θεματικού επιπέδου πάνω στην δορυφορική εικόνα αποτελεί κομμάτι της οπτικής ερμηνείας και αξιολόγησης των αποτελεσμάτων. Η κάλυψη γης που απεικονίζει την τρέχουσα πραγματικότητα φανερώνει ζημιές στο φυσικό περιβάλλον όπως είναι οι καμένες εκτάσεις στην Κρήτη που καταγράφηκαν από τις δορυφορικές εικόνες του 2016. Τα συστηματικά μέτρα παρακολούθησης και ελέγχου χρειάζονται για την προστασία των φυσικών περιβαλλόντων. Η τακτική παρακολούθηση και χαρτογράφηση επιτυγχάνεται γρήγορα και οικονομικά με μεθόδους τηλεπισκόπησης. Η διατήρηση των φυσικών πόρων είναι πολύτιμη για την οικονομία και για το ίδιο το περιβάλλον.

Η προτεινόμενη μεθοδολογική προσέγγιση εξαγωγής της πληροφορίας της ακτογραμμής είναι χρήσιμη στην αφαίρεση της θάλασσας διατηρώντας κάθε ψηφίδα στεριάς. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη στην ενίσχυση του αισθητικού αποτελέσματος του θεματικού χάρτη και περισσότερο στην διεξαγωγή ποσοτικής ανάλυσης στα αποτελέσματα που προέκυψαν μέσα από την ροή διαδικασιών ταξινόμησης εικόνας εντός της στεριάς. Για την εστίαση στην στεριά και την ταυτόχρονη διατήρηση των υδάτων εντός της η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε αποτελεί μία εύκολη λύση.

Από τα αποτελέσματα της ταξινόμησης και την ποσοτική ανάλυση συμπεραίνεται ότι στην Κρήτη υπερέχει το φυσικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, από την συνολική επιφάνεια της περιοχής μελέτης, το 2.81% ανήκει στις τεχνητές επιφάνειες. Το μεγαλύτερο ποσοστό κάλυψης γης στο νησί καταλαμβάνει το μωσαϊκό της αραιής βλάστησης με τις καλλιέργειες (40.85%) και ακολουθεί η κατηγορία των δασών (31.55%). Τα εσωτερικά ύδατα αφορούν κυρίως λίμνες μικρής έκτασης οι οποίες εντοπίζονται συχνά πλησίον οικισμών και καλλιεργειών. Στις παράκτιες περιοχές και σε υψηλά υψόμετρα στα Λευκά Όρη, την Ίδη και τη Δίκτη, η κατηγορία με σημαντική εμφάνιση είναι οι χαμηλοί θάμνοι. Σε γενικές γραμμές, οι πιο ανεπτυγμένες αστικές περιοχές τοποθετούνται στην βόρεια παράκτια Κρήτη ενώ πολλοί μικροί και διάσπαρτοι οικισμοί παρατηρούνται σε όλη την έκταση της μεγάλης εσωτερικής πεδιάδας Μεσσαρά στην νότια Κρήτη στον Νομό Ηρακλείου. Τον κεντρικό κορμό της Κρήτης χαρακτηρίζουν οι μεγάλες εκτάσεις καλλιεργειών και την νότια πλευρά της οι πολλές θερμοκηπιακές μονάδες. Γενικότερα, οι καλλιέργειες και η εξάπλωση του αστικού ιστού ευνοούνται στα ομαλότερα τμήματα του νησιού.

Ο Sentinel 2 θα συμβάλλει σημαντικά στην παρακολούθηση της κάλυψης γης σε περιφερειακό, εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο διαχρονικά. Ο δορυφόρος είναι κατάλληλος για την χαρτογράφηση και παρακολούθηση τεχνητών και φυσικών περιβαλλόντων σε παγκόσμιο επίπεδο εξαιτίας του μεγάλου πλάτους σάρωσης, της συχνής επίσκεψης σημείου και της καλής χωρικής ανάλυσης. Η χρήση πολλαπλών διαχρονικών δεδομένων σύντομου χρονικού διαστήματος μεταξύ τους βοηθά στην σύνθεση εικόνων απαλλαγμένων από σύννεφα και ενθαρρύνει την ολοκληρωμένη μελέτη της κάλυψης γης σε μία περιοχή. Η διαθεσιμότητα των δεδομένων Sentinel 2 αναμένεται να φέρει τη χαρτογράφηση κάλυψης γης και παρακολούθησης σε ένα πρωτοφανές επίπεδο.

Τα δεδομένα Sentinel 2 θα συμβάλλουν στην ανανέωση των δεδομένων κάλυψης γης με βελτίωση της ποιότητας και της ακρίβειας. Στην παρούσα εργασία δημιουργήθηκε η βάση δεδομένων της κάλυψης γης της Κρήτης. Μελλοντικά αυτή η βάση μπορεί να εμπλουτιστεί με δεδομένα για όλη την Ελλάδα. Η τρέχουσα κατάσταση της κάλυψης γης είναι αναγκαία τόσο για την παρατήρηση της τωρινής κατάστασης όσο και για την σύγκρισή της με παλαιότερα δεδομένα τα οποία είτε προϋπάρχουν είτε δημιουργούνται σκοπίμως για την ανίχνευση των διαχρονικών αλλαγών. Η πληροφορία της κάλυψης γης είναι απαραίτητη σε πολλές περιπτώσεις. Για παράδειγμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση των πιθανών παραγόντων που την επηρεάζουν στο να αλλάζει, σε περιβαλλοντικές μελέτες, σε περιπτώσεις μοντελοποίησης φαινομένων, σε κοινωνικοοικονομικές εφαρμογές, στον σχεδιασμό και την διαχείριση φυσικών πόρων, στον αστικό και περιφερειακό σχεδιασμό, στην ενημέρωση φορέων διαχείρισης και προστασίας του περιβάλλοντος και στην πληροφόρηση των αρχών λήψης πολιτικών αποφάσεων. Η εξαγόμενη πληροφορία της κάλυψης γης όπως στην παρούσα περίπτωση της Κρήτης είναι μία χρήσιμη πληροφορία και απαραίτητη στον τομέα της επιστήμης και της πολιτικής. Για τον λόγο αυτό τα δεδομένα κάλυψης γης είναι σημαντικό να ανανεώνονται. Η ενημερωμένη πληροφορία είναι αυτή που συχνά επιζητείται. Στην γρήγορη και οικονομική αναγνώριση της κάλυψης γης με αξιοπιστία η ταξινόμηση χρησιμοποιώντας δορυφορικές εικόνες είναι ένα ισχυρό εργαλείο.

Μέσω της διαδικτυακής χαρτογραφικής εφαρμογής *Land Cover Greece* γίνεται γρήγορη και εύκολη η πρόσβαση στην χωρική πληροφορία της κάλυψης γης. Ο χρήστης αλληλοεπιδρά δυναμικά με τον θεματικό χάρτη κάλυψης γης, με τις δορυφορικές εικόνες Sentinel 2 και με χάρτες υποβάθρου όπως ο OpenStreetMap και ο Stamen. Συνεπώς, δίνεται η δυνατότητα υπέρθεσης των θεματικών επιπέδων κάλυψης γης με βοηθητικά δεδομένα τα οποία διευκολύνουν στην κατανόηση της κατανομής των αντικειμένων του χώρου. Επιπρόσθετα, προσφέρεται η πληροφορία του ποσοστού της έκτασης που καταλαμβάνει η κάθε κατηγορία κάλυψης γης ανά νομό η οποία παρουσιάζεται σε γραφήματα (πίτες).

Με την διαδικτυακή εφαρμογή επιτυγχάνεται η προβολή και η ελεύθερη διάθεση γεωγραφικών δεδομένων. Το να μοιράζεσαι μία τέτοια πληροφορία όπως είναι η κάλυψη γης είναι ωφέλιμο για την επιστημονική κοινότητα στον τομέα των γεωεπιστημών και της τηλεπισκόπησης.

Μελλοντικά, θα μπορούσε να γίνει εξαγωγή της πληροφορίας της Κάλυψης Γης για όλη την Ελλάδα για το έτος 2016 με Sentinel 2 δεδομένα. Στην ολοκλήρωση αυτού του έργου θα βοηθούσε η βελτίωση των εργαλείων προεπεξεργασίας των εικόνων Sentinel 2 για την αυτοματοποίηση των βημάτων προετοιμασίας των εικόνων για ταξινόμηση. Στόχος είναι η προσφορά της ενημερωμένης πληροφορίας κάλυψης γης της Ελλάδας. Η διάθεση της πληροφορίας αυτής γίνεται δυνατή μέσω της διαδικτυακής εφαρμογής Land Cover Greece. Στην παρούσα φάση, η εφαρμογή δεν είναι διαθέσιμη δημόσια ωστόσο στο άμεσο μέλλον αναμένεται η αγορά κάποιου χώρου φιλοξενίας για την δημοσιοποίησή της στον παγκόσμιο ιστό. Με τον δορυφόρο Sentinel 2A και με τον δίδυμό του Sentinel 2B ο οποίος θα εκτοξευθεί σύντομα, θα γίνεται αποτύπωση της κάθε περιοχής ανά πέντε ημέρες κάτι το οποίο ενθαρρύνει την διαχρονική παρακολούθηση σε πιο τακτά χρονικά διαστήματα. Ο Sentinel 2 θα συμβάλλει σημαντικά στην παρακολούθηση της κάλυψης γης.

10. Βιβλιογραφία

- Baraldi, A., Bruzzone, L., Blonda, P., 2005. Quality assessment of classification and cluster maps without ground truth knowledge. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 43, 857–873. doi:10.1109/TGRS.2004.843074
- Baumann, M., Kuemmerle, T., Elbakidze, M., Ozdogan, M., Radeloff, V.C., Keuler, N.S., Prishchepov, A.V., Kruhlov, I., Hostert, P., 2011. Patterns and drivers of post-socialist farmland abandonment in Western Ukraine. *Land Use Policy* 28, 552–562. doi:10.1016/j.landusepol.2010.11.003
- Bontemps, S., Arias, M., Cara, C., Dedieu, G., Guzzonato, E., Hagolle, O., Inglada, J., Matton, N., Morin, D., Popescu, R., Rabaute, T., Savinaud, M., Sepulcre, G., Valero, S., Ahmad, I., Bégué, A., Wu, B., de Aballeyra, D., Diarra, A., Dupuy, S., French, A., ul Hassan Akhtar, I., Kussul, N., Lebourgeois, V., Le Page, M., Newby, T., Savin, I., Verón, S., Koetz, B., Defourny, P., 2015. Building a Data Set over 12 Globally Distributed Sites to Support the Development of Agriculture Monitoring Applications with Sentinel-2. *Remote Sens.* 7, 16062–16090. doi:10.3390/rs71215815
- Bovolo, F., Camps-Valls, G., Bruzzone, L., 2010. A support vector domain method for change detection in multitemporal images. *Pattern Recognit. Lett.* 31, 1148–1154. doi:10.1016/j.patrec.2009.07.002
- Burns, P., Nolin, A., 2014. Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sens. Environ.* 140, 165–178. doi:10.1016/j.rse.2013.08.026
- Chen, J., Chen, J., Liao, A., Cao, X., Chen, L., Chen, X., He, C., Han, G., Peng, S., Lu, M., Zhang, W., Tong, X., Mills, J., 2015. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 103, 7–27. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002
- Chi, M., Bruzzone, L., 2005. A semilabeled-sample driven bagging technique for ill-posed classification problem. *IEEE Trans Geosci Remote Sens Lett* 2.
- Dixon, B., Candade, N., 2008. Multispectral landuse classification using neural networks and support vector machines: one or the other, or both? *Int. J. Remote Sens.* 29, 1185–1206. doi:10.1080/01431160701294661
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., Bargellini, P., 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens. Environ.* 120, 25–36. doi:10.1016/j.rse.2011.11.026
- Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., Li, X., 2016. Water Bodies' Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sens.* 8, 354. doi:10.3390/rs8040354
- Foody, G.M., 2004. Thematic map comparison: evaluating the statistical significance of differences in classification accuracy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 70, 627–633.
- Foody, G.M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sens. Environ.* 80, 185–201. doi:10.1016/S0034-4257(01)00295-4
- Foody, G.M., Mathur, A., 2006. The use of small training sets containing mixed pixels for accurate hard image classification: Training on mixed spectral responses for classification by a SVM. *Remote Sens. Environ.* 103, 179–189. doi:10.1016/j.rse.2006.04.001
- Gao, M.-L., Zhao, W.-J., Gong, Z.-N., Gong, H.-L., Chen, Z., Tang, X.-M., 2014. Topographic Correction of ZY-3 Satellite Images and Its Effects on Estimation of Shrub Leaf Biomass in Mountainous Areas. *Remote Sens.* 6, 2745–2764. doi:10.3390/rs6042745

- Gómez, C., White, J.C., Wulder, M.A., 2016. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 116, 55–72. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008
- Goslee, S.C., 2012. Topographic Corrections of Satellite Data for Regional Monitoring. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 78, 973–981. doi:10.14358/PERS.78.9.973
- Guo, Y., De Jong, K., Liu, F., Wang, X., Li, C., 2012. A comparison of artificial neural networks and support vector machines on land cover classification, in: *Computational Intelligence and Intelligent Systems*. Springer, pp. 531–539.
- Hale, S.R., Rock, B.N., 2003. Impact of topographic normalization on land-cover classification accuracy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 69, 785–791.
- Harrison, M., Thomas, F., Barredo, J.I., Bojilov, V., Castella, R.C., Cerba, O., Exadaktylos, G., Isidro, M.L., Pfeiffer, M., Tomas, R., others, 2013. Data Specification on Natural Risk Zones-Technical Guidelines.
- Helmer, E.H., 2008. Mapping land cover and estimating forest structure using satellite imagery and coarse resolution lidar in the Virgin Islands. *J. Appl. Remote Sens.* 2, 23551. doi:10.1117/1.3063939
- Hojas-Gascon, L., Belward, A., Eva, H., Ceccherini, G., Hagolle, O., Garcia, J., Cerutti, P., 2015. Potential improvement for forest cover and forest degradation mapping with the forthcoming Sentinel-2 program. *ISPRS - Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XL-7/W3, 417–423. doi:10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-417-2015
- Holben, B., Justice, C.O., 1980. The Topographic Effect on Spectral Response from Nadir-Pointing Sensors. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 46, 1191–1200.
- Huang, C., Davis, L.S., Townshend, J.R.G., 2002. An assessment of support vector machines for land cover classification. *Int. J. Remote Sens.* 23, 725–749. doi:10.1080/01431160110040323
- Huang, C., Song, K., Kim, S., Townshend, J.R.G., Davis, P., Masek, J.G., Goward, S.N., 2008. Use of a dark object concept and support vector machines to automate forest cover change analysis. *Remote Sens. Environ.* 112, 970–985. doi:10.1016/j.rse.2007.07.023
- Huang, H., Roy, D., Boschetti, L., Zhang, H., Yan, L., Kumar, S., Gomez-Dans, J., Li, J., 2016. Separability Analysis of Sentinel-2A Multi-Spectral Instrument (MSI) Data for Burned Area Discrimination. *Remote Sens.* 8, 873. doi:10.3390/rs8100873
- Immitzer, M., Vuolo, F., Atzberger, C., 2016. First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sens.* 8, 166. doi:10.3390/rs8030166
- Islam, T., Rico-Ramirez, M.A., Han, D., Srivastava, P.K., 2012. Artificial intelligence techniques for clutter identification with polarimetric radar signatures. *Atmospheric Res.* 109–10, 95–113.
- Isola, C., Drusch, M., Gascon, F., Martimort, P., Del Bello, U., Spoto, F., Sy, O., Laberinti, P., 2010. Sentinel-2 Optical High Resolution Mission for GMES Land Operational Services, in: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. p. 9476.
- Kääb, A., Winsvold, S.H., Altena, B., Nuth, C., Nagler, T., Wuite, J., 2016. Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part I: Radiometric and Geometric Performance, and Application to Ice Velocity. *Remote Sens.*
- Kavzoglu, T., Colkesen, I., 2009. A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 11.
- Kolios, S., Stylios, C.D., 2013. Identification of land cover/land use changes in the greater area of the Preveza peninsula in Greece using Landsat satellite data. *Appl. Geogr.* 40, 150–160. doi:10.1016/j.apgeog.2013.02.005
- Kuemmerle, T., Chaskovskyy, O., Knorn, J., Radeloff, V.C., Kruhlov, I., Keeton, W.S., Hostert, P., 2009. Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the

- transition period from 1988 to 2007. *Remote Sens. Environ.* 113, 1194–1207.
doi:10.1016/j.rse.2009.02.006
- Langley, S., Cheshire, H., Humes, K., 2001. A comparison of single date and multitemporal satellite image classifications in a semi-arid grassland. *J Arid Env.* 49, 401–11.
- Law, K.H., Nichol, J., 2004. Topographic correction for differential illumination effects on IKONOS satellite imagery. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf. Sci* 35, 641–646.
- Lefebvre, A., Sannier, C., Corpetti, T., 2016. Monitoring Urban Areas with Sentinel-2A Data: Application to the Update of the Copernicus High Resolution Layer Imperviousness Degree. *Remote Sens.* 8, 606. doi:10.3390/rs8070606
- Li, M., 2014. A Review of Remote Sensing Image Classification Techniques: the Role of Spatio-contextual Information. *Eur. J. Remote Sens.* 389–411.
doi:10.5721/EuJRS20144723
- Lu, D., Ge, H., He, S., Xu, A., Zhou, G., Du, H., 2008. Pixel-based Minnaert Correction Method for Reducing Topographic Effects on a Landsat 7 ETM+ Image. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 74, 1343–1350. doi:10.14358/PERS.74.11.1343
- Lu, D., Weng, Q., 2007. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *Int. J. Remote Sens.* 28, 823–870.
doi:10.1080/01431160600746456
- Mariotto, I., Gutschick, V.P., 2010. Non-Lambertian Corrected Albedo and Vegetation Index for Estimating Land Evapotranspiration in a Heterogeneous Semi-Arid Landscape. *Remote Sens.* 2, 926–938. doi:10.3390/rs2040926
- Martinuzzi, S., Vierling, L.A., Gould, W.A., Vierling, K.T., Hudak, A.T., 2009. Incorporating remotely sensed tree canopy cover data into broad scale assessments of wildlife habitat distribution and conservation. *ResearchGate* 3.
- Maulik, U., Chakraborty, D., 2012. A novel semisupervised SVM for pixel classification of remote sensing imagery. *Int. J. Mach. Learn. Cybern.* 3, 247–258.
doi:10.1007/s13042-011-0059-3
- Melgani, F., Bruzzone, L., 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 42, 1778–1790.
doi:10.1109/TGRS.2004.831865
- Moffiet, T., Armston, J.D., Mengersen, K., 2010. Motivation, development and validation of a new spectral greenness index: A spectral dimension related to foliage projective cover. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 65, 26–41.
- Mohammady, M., Moradi, H.R., Zeinivand, H., Temme, A.J.A.M., 2015. A comparison of supervised, unsupervised and synthetic land use classification methods in the north of Iran. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 12, 1515–1526. doi:10.1007/s13762-014-0728-3
- Moreira, E.P., Valeriano, M. de M., Sanches, I.D.A., Formaggio, A.R., 2016. TOPOGRAPHIC EFFECT ON SPECTRAL VEGETATION INDICES FROM LANDSAT TM DATA: IS TOPOGRAPHIC CORRECTION NECESSARY? *Bol. Ciênc. Geodésicas* 22, 95–107.
doi:10.1590/S1982-21702016000100006
- Mountrakis, G., Im, J., Ogole, C., 2011. Support vector machines in remote sensing: A review. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 66, 247–259.
doi:10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001
- Muller-Wilm, U., Louis, J., Richter, R., Gascon, F., Niezette, M., 2013. Sentinel-2 Level 2A Prototype Processor: Architecture, Algorithms And First Results, in: *ESA Special Publication*. p. 98.
- Nordberg, M.-L., Evertson, J., 2005. Vegetation index differencing and linear regression for change detection in a Swedish mountain range using Landsat TM® and ETM+® imagery. *Land Degrad. Dev.* 16, 139–149. doi:10.1002/ldr.660

- Oommen, T., Misra, D., Twarakavi, N.K.C., Prakash, A., Sahoo, B., Bandopadhyay, S., 2008. An Objective Analysis of Support Vector Machine Based Classification for Remote Sensing. *Math. Geosci.* 40, 409–424. doi:10.1007/s11004-008-9156-6
- Otukey, J.R., Blaschke, T., 2010. Land cover change assessment using decision trees, support vector machines and maximum likelihood classification algorithms. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 12. doi:10.1016/j.jag.2009.11.002
- Pal, M., Mather, P.M., 2005a. Support vector machines for classification in remote sensing. *Int. J. Remote Sens.* 26, 1007–1011. doi:10.1080/01431160512331314083
- Pal, M., Mather, P.M., 2005b. Support vector machines for classification in remote sensing. *Int. J. Remote Sens.* 26, 1007–1011. doi:10.1080/01431160512331314083
- Panagos, P., Ballabio, C., Borrelli, P., Meusburger, K., 2016. Spatio-temporal analysis of rainfall erosivity and erosivity density in Greece. *CATENA* 137, 161–172. doi:10.1016/j.catena.2015.09.015
- Paneque-Gálvez, J., Mas, J.-F., Moré, G., Cristóbal, J., Orta-Martínez, M., Luz, A.C., Guèze, M., Macía, M.J., Reyes-García, V., 2013. Enhanced land use/cover classification of heterogeneous tropical landscapes using support vector machines and textural homogeneity. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 23, 372–383. doi:10.1016/j.jag.2012.10.007
- Paul, F., Winsvold, S., Kääb, A., Nagler, T., Schwaizer, G., 2016. Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies, and Comparison to Landsat 8. *Remote Sens.* 8, 575. doi:10.3390/rs8070575
- Pesaresi, M., Corbane, C., Julea, A., Florczyk, A., Syrris, V., Soille, P., 2016. Assessment of the Added-Value of Sentinel-2 for Detecting Built-up Areas. *Remote Sens.* 8, 299. doi:10.3390/rs8040299
- Petropoulos, G.P., Kontoes, C., Keramitsoglou, I., 2011. Burnt area delineation from a uni-temporal perspective based on Landsat TM imagery classification using Support Vector Machines. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 13, 70–80. doi:10.1016/j.jag.2010.06.008
- Petropoulos, G.P., Kontoes, C.C., Keramitsoglou, I., 2012. Land cover mapping with emphasis to burnt area delineation using co-orbital ALI and Landsat TM imagery. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 18, 344–355. doi:10.1016/j.jag.2012.02.004
- Prishchepov, A.V., Radeloff, V.C., Dubinin, M., Alcantara, C., 2012. The effect of Landsat ETM/ETM+ image acquisition dates on the detection of agricultural land abandonment in Eastern Europe. *Remote Sens. Environ.* 126, 195–209. doi:10.1016/j.rse.2012.08.017
- Radoux, J., Chomé, G., Jacques, D., Waldner, F., Bellemans, N., Matton, N., Lamarche, C., d'Andrimont, R., Defourny, P., 2016. Sentinel-2's Potential for Sub-Pixel Landscape Feature Detection. *Remote Sens.* 8, 488. doi:10.3390/rs8060488
- Richter, R., Kellenberger, T., Kaufmann, H., 2009. Comparison of Topographic Correction Methods. *Remote Sens.* 1, 184–196. doi:10.3390/rs1030184
- Rujoiu-Mare, M.-R., Mihai, B.-A., 2016. Mapping Land Cover Using Remote Sensing Data and GIS Techniques: A Case Study of Prahova Subcarpathians. *Procedia Environ. Sci.* 32, 244–255. doi:10.1016/j.proenv.2016.03.029
- Sakamoto, K., Nakayama, D., Matsuyama, H., 2009. New Topographic Correction Method of Satellite Image in the season of Low Solar Elevation. *Remote Sens. Soc. Jpn.* 29, 471–484.
- Santos, N.D., Goncalves, G., 2014. Remote Sensing Applications BASED on Satellite Open Data (Landsat 8 and Sentinel-2). *Conferência Nac. Geodécisão*.
- Shao, Y., Lunetta, R.S., 2012. Comparison of support vector machine, neural network, and CART algorithms for the land-cover classification using limited training data points. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 70, 78–87. doi:10.1016/j.isprsjprs.2012.04.001

- Singh, S.K., Srivastava, P.K., Gupta, M., Thakur, J.K., Mukherjee, S., 2014. Appraisal of land use/land cover of mangrove forest ecosystem using support vector machine. *Environ. Earth Sci.* 71, 2245–2255. doi:10.1007/s12665-013-2628-0
- Sluiter, R., 2005. Mediterranean land cover change : modelling and monitoring natural vegetation using GIS and remote sensing [WWW Document]. *Ned. Geogr. Stud.* URL <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/7425> (accessed 6.14.16).
- Smith, J.A., Lin, T.L., Ranson, K.J., 1980. The Lambertian Assumption and Landsat Data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 46, 1183–1189.
- Soffianian, A., Madanian, M., 2015. Monitoring land cover changes in Isfahan Province, Iran using Landsat satellite data. *Environ. Monit. Assess.* 187. doi:10.1007/s10661-015-4442-5
- Sola, I., González-Audícana, M., Álvarez-Mozos, J., 2016. The Added Value of Stratified Topographic Correction of Multispectral Images. *Remote Sens.* 131.
- Srivastava, P., Han, D., Rico-Ramirez, M., Bray, M., Islam, T., 2012. Selection of classification techniques for land use/land cover change investigation. *Adv. Space Res.* 50, 1250–1265.
- Szuster, B.W., Chen, Q., Borger, M., 2011. A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. *Appl. Geogr.* 31, 525–532. doi:10.1016/j.apgeog.2010.11.007
- Toming, K., Kutser, T., Laas, A., Sepp, M., Paavel, B., Nöges, T., 2016. First Experiences in Mapping Lake Water Quality Parameters with Sentinel-2 MSI Imagery. *Remote Sens.* 8, 640. doi:10.3390/rs8080640
- Topaloglu, R.H., Sertel, E., Musaoglu, N., 2016. Assessment of classification accuracies of Sentinel 2 and Landsat 8 data for land cover / use mapping. *Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XLI-B8.
- Twele, A., Kappas, M., Lauer, J., Erasmi, S., 2006. The effect of stratified topographic correction on land cover classification in tropical mountainous regions, in: *ISPRS Commission VII Mid-Term Symposium “ Remote Sensing: From Pixels to Processes”*, Enschede, the Netherlands. pp. 8–11.
- Van der Linden, S., 2007. Classifying segmented hyperspectral data from a heterogeneous urban environment using support vector machines. *J. Appl. Remote Sens.* 1, 13543. doi:10.1117/1.2813466
- Vanonckelen, S., Lhermitte, S., Van Rompaey, A., 2013. The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 24, 9–21. doi:10.1016/j.jag.2013.02.003
- Vapnik, V.N., 2000. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Springer New York, New York, NY.
- Vapnik, V.N., Chervonenkis, A.Y., 1971. On the Uniform Convergence of Relative Frequencies of Events to Their Probabilities. *Theory Probab. Its Appl.* 16, 264–280. doi:10.1137/1116025
- Wang, Z.-J., Jiao, J.-Y., Lei, B., Su, Y., 2015. An approach for detecting five typical vegetation types on the Chinese Loess Plateau using Landsat TM data. *Environ. Monit. Assess.* 187, 1–16. doi:10.1007/s10661-015-4799-5
- Waske, B., Benediktsson, J.A., 2007. Fusion of Support Vector Machines for Classification of Multisensor Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 45, 3858–3866. doi:10.1109/TGRS.2007.898446
- Wentz, E., Stefanov, W.L., Gries, C., Hope, D., 2006. Land use and land cover mapping from diverse data sources for an arid urban environments. *Comput. Environ. Urban Syst.* 30. doi:10.1016/j.compenurbsys.2004.07.002

- Wulder, M.A., Hilker, T., White, J.C., Coops, N.C., Masek, J.G., Pflugmacher, D., Crevier, Y., 2015. Virtual constellations for global terrestrial monitoring. *Remote Sens. Environ.* 170, 62–76. doi:10.1016/j.rse.2015.09.001
- Xie, Y., Sha, Z., Yu, M., 2008. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *J. Plant Ecol.* 1, 9–23. doi:10.1093/jpe/rtm005
- Yan, L., Roy, D., Zhang, H., Li, J., Huang, H., 2016. An Automated Approach for Sub-Pixel Registration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) Imagery. *Remote Sens.* 8, 520. doi:10.3390/rs8060520
- Yousefi, S., Khatami, R., Mountrakis, G., Mirzaee, S., Pourghasemi, H.R., Tazeh, M., 2015. Accuracy assessment of land cover/land use classifiers in dry and humid areas of Iran. *Environ. Monit. Assess.* 187. doi:10.1007/s10661-015-4847-1
- Βάρλας, Γ., Παπαδόπουλος, Α., Κατσαφάδος, Π., 2013. Μακροπρόθεσμη χωροχρονική απεικόνιση του υετού στην Ελλάδα. 1ο Συνέδριο Χωρικής Ανάλυσης Πρακτικά Αθήνα.
- Καρτάλης, Κ., Φείδας, Χ., 2006. Αρχές & Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης. Β. Γκιούρδας, Αθήνα.

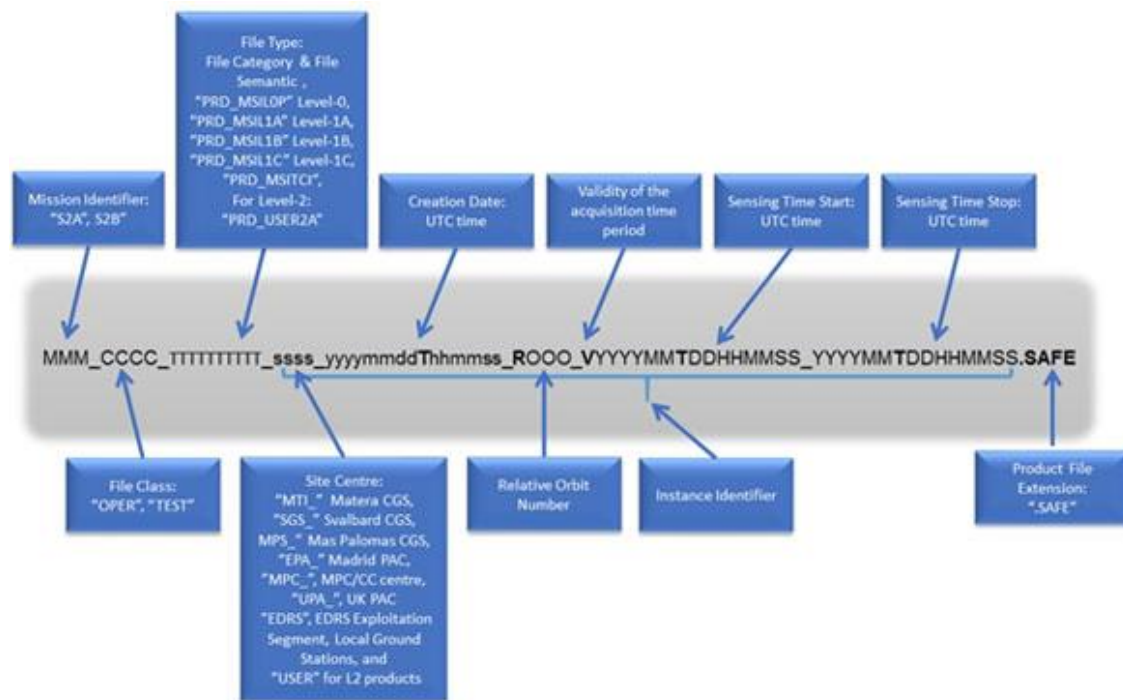
Παράρτημα α

Τα προϊόντα OPER και τα αντίστοιχα USER τα οποία καλύπτουν τον ελληνικό χώρο (μέγεθος 111GB).

S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160203T163603_R050_V20160201T091841_20160201T091841.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160302T154706_R050_V20160302T091432_20160302T091432.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160302T155634_R050_V20160302T091432_20160302T091432.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160406T142024_R093_V20160404T092409_20160404T092409.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160406T142745_R093_V20160404T092409_20160404T092409.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160406T143016_R093_V20160404T092409_20160404T092409.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160406T212803_R107_V20160405T085750_20160405T085750.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160417T152728_R136_V20160417T093708_20160417T093708.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160418T172211_R007_V20160418T090432_20160418T090432.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160418T180340_R007_V20160418T090432_20160418T090432.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160418T180610_R007_V20160418T090432_20160418T090432.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160421T151723_R050_V20160421T091226_20160421T091226.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160428T170736_R007_V20160428T090022_20160428T090022.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160428T170750_R007_V20160428T090022_20160428T090022.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160501T184435_R050_V20160501T091849_20160501T091849.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160501T184804_R050_V20160501T091849_20160501T091849.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160501T185424_R050_V20160501T091849_20160501T091849.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160514T173748_R093_V20160514T092034_20160514T092034.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160527T210513_R136_V20160527T093441_20160527T093441.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160614T230104_R050_V20160610T090901_20160610T090901.SAFE
S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160620T193844_R050_V20160620T091908_20160620T091908.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160203T163603_R050_V20160201T091841_20160201T091841.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160302T154706_R050_V20160302T091432_20160302T091432.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160302T155634_R050_V20160302T091432_20160302T091432.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160406T142024_R093_V20160404T092409_20160404T092409.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160406T142745_R093_V20160404T092409_20160404T092409.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160406T143016_R093_V20160404T092409_20160404T092409.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160406T212803_R107_V20160405T085750_20160405T085750.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160417T152728_R136_V20160417T093708_20160417T093708.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160418T172211_R007_V20160418T090432_20160418T090432.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160418T180340_R007_V20160418T090432_20160418T090432.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160418T180610_R007_V20160418T090432_20160418T090432.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160421T151723_R050_V20160421T091226_20160421T091226.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160428T170736_R007_V20160428T090022_20160428T090022.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160428T170750_R007_V20160428T090022_20160428T090022.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160501T184435_R050_V20160501T091849_20160501T091849.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160501T184804_R050_V20160501T091849_20160501T091849.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160501T185424_R050_V20160501T091849_20160501T091849.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160514T173748_R093_V20160514T092034_20160514T092034.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160527T210513_R136_V20160527T093441_20160527T093441.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160614T230104_R050_V20160610T090901_20160610T090901.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160620T193844_R050_V20160620T091908_20160620T091908.SAFE
S2A_USER_PRD_MSIL2A_PDMC_20160620T194134_R050_V20160620T091908_20160620T091908.SAFE

S2 Data

Η ονομασία των προϊόντων περιλαμβάνει μία σειρά πληροφοριών (Σχ. α).



Σχήμα α: Επεξήγηση ονοματολογίας προϊόντος. Πηγή: (<https://sentinel.esa.int/documents>).

Παράδειγμα:

S2A_OPER_PRD_MSIL1C_PDMC_20160514T173748_R093_V20160514T092034_20160514T092034.SAFE

S2A: αναγνώριση αποστολής

OPER: κλάση φακέλου

PRD: κατηγορία προϊόντος

MSI: πολυφασματικό όργανο

L1C: τύπος προϊόντος

20160514T173748: ημερομηνία δημιουργίας (UTC)

R093: σχετική τροχιά & αριθμός τροχιάς

20160514T092034: χρόνος λήψης (UTC)

.SAFE: επέκταση αρχείου