

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ
ΠΜΣ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΧΩΡΟΥ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ SENTINEL 1 ΓΙΑ
ΤΟΝ ΣΕΙΣΜΟ ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙΟΥ 2021

ANNA ΔΟΣΙΟΥ

ΓΕΩΛΟΓΟΣ

ΑΜ: 222305

ΑΘΗΝΑ 2023

Περίληψη

Η παρούσα εργασία εκπονείται στο πλαίσιο του μαθήματος «Εφαρμογές Γεωπληροφορικής στη Διαχείριση Καταστροφών», του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Εφαρμοσμένη Γεωγραφία και Διαχείριση του Χώρου», στο Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, με καθηγητή τον κύριο Παρχαρίδη Ισαάκ. Η εργασία πραγματεύεται τον σεισμό του Σεπτεμβρίου του 2021 στο Αρκαλοχώρι Κρήτης που προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές και απώλειες ζωών. Στόχος είναι ο υπολογισμός της σεισμικής παραμόρφωσης στο Αρκαλοχώρι και την κοντινή περιοχή με τη χρήση δορυφορικών εικόνων από τον Sentinel-1.

Για να επιτευχθεί αυτός ο στόχος, αναλύθηκαν οι συνθήκες γένεσης του σεισμού, τα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης και οι δυνατότητες των SAR αισθητήρων. Από το συμβολόγραμμα που προέκυψε υπολογίστηκε οπτικά μία προσέγγιση του τύπου και της τιμής της παραμόρφωσης στην περιοχή.

Για να μελετηθεί το φαινόμενο υλοποιήθηκε επεξεργασία δύο δορυφορικών εικόνων Sentinel-1 SLC IW από τον Σεπτέμβριο – Οκτώβριο του 2021 στην περιοχή μελέτης, στο λογισμικό “SNAP Desktop 8.0” και “SNAP Desktop 9.0”, όπου υπολογίστηκαν οι εδαφικές παραμορφώσεις που προκλήθηκαν. Τα αποτελέσματα χαρτογραφήθηκαν στο λογισμικό “QGIS 3.22.14” μαζί με τα κύρια ρήγματα της περιοχής, και οπτικοποιήθηκαν στο “Google Earth”.

Abstract

The present paper is carried out in the context of the course "Geoinformatics Applications in Disaster Management", of the postgraduate program "Applied Geography and Spatial Management", at the Harokopio University of Athens, under the supervision of Mr. Parcharidis Isaak. The project deals with the earthquake of September 2021 in Arkalochori, Crete, which caused extensive damage and loss of life. The aim is to calculate the seismic deformation in Arkalochori and the nearby area using satellite images from Sentinel-1.

To achieve this objective, the earthquake generation conditions, the characteristics of the study area, and the capabilities of the SAR sensors were analyzed. From the resulting interferogram, an approximation of the type and value of the deformation in the area was visually calculated.

In order to study the phenomenon, two Sentinel-1 SLC IW satellite images from September - October 2021 in the study area were processed in "SNAP Desktop 8.0" and "SNAP Desktop 9.0" software, where the induced ground deformations were calculated. The results were mapped in "QGIS 3.22.14" software along with the main faults in the area, and visualized in "Google Earth".

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract.....	3
Περιεχόμενα	4
1. Εισαγωγή.....	5
2. Περιγραφή Περιοχής Μελέτης	5
2.1 Ανθρωπογεωγραφικά Χαρακτηριστικά	5
2.2 Φυσικο-Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά	5
3. Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	6
4. Δορυφόρος Sentinel-1 και οπτικά δεδομένα	7
4.1 Δορυφόρος Sentinel-1	7
4.2 SAR Δεδομένα – Σημασία, Υπολογισμός	8
5. Δεδομένα Και Μεθοδολογία	10
5.1 Δεδομένα	10
5.2 Μεθοδολογία.....	11
6. Αποτελέσματα	13
7. Συζήτηση – Συμπεράσματα	15
Βιβλιογραφία	16

1. Εισαγωγή

Ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι ο υπολογισμός της εδαφική παραμόρφωσης της ευρύτερης περιοχής του Αρκαλοχωρίου Κρήτης με τη χρήση δεδομένων από τον δορυφόρο Sentinel-1, λόγω του ισχυρού σεισμού που έλαβε χώρα στις 27/09/2021. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται δύο δορυφορικές εικόνες Sentinel-1 IW SLC (Single Look Complex) και υπολογίζεται το συμβολόγραμμα της περιοχής. Μέσω αυτού προκύπτει το είδος της εδαφικής παραμόρφωσης αλλά και το μέγεθός της. Η έντονη σεισμική δραστηριότητα της περιοχής μελέτης συνάδει με τα σημαντικά τεκτονικά χαρακτηριστικά της.

2. Περιγραφή Περιοχής Μελέτης

2.1 Ανθρωπογεωγραφικά Χαρακτηριστικά

Το Αρκαλοχώρι ανήκει στον Δήμο Μινώα Πεδιάδας του νομού Ηρακλείου. Στον ίδιο δήμο ανήκουν και άλλοι δύο κεντρικοί οικισμοί, το Καστέλι και το Θράψανο. Η γεωγραφική έκταση του δήμου ανέρχεται στα 394 km² με πληθυσμό περίπου 20000 κατοίκους. Οι καλλιέργειες και ο τουρισμός είναι οι βασικές πηγές ανάπτυξης της οικονομίας της περιοχής. Η δημοτική ενότητα Αρκαλοχωρίου απαριθμεί περίπου 10476 μόνιμους κατοίκους και εκτείνεται σε 237589 στρέμματα. Βρίσκεται στο νότιο τμήμα του Νομού Ηρακλείου και βρέχεται στα νότια από το Λιβυκό Πέλαγος. Η δημοτική ενότητα αποτελούσε παλαιότερα ανεξάρτητο δήμο έως το 2010 (Δήμος Μινώα Πεδιάδας, 2023). Στην περιοχή στεγάζονται πολυάριθμες σημαντικές υποδομές όπως σχολεία, νοσοκομείο, αθλητικές εγκαταστάσεις, και προσεχώς ο Νέος Διεθνής Αερολιμένας Ηρακλείου (Βικιπαίδεια, 2023).

2.2 Φυσικο-Γεωγραφικά Χαρακτηριστικά

Το Αρκαλοχώρι είναι μία ημιορεινή κωμόπολη στα 425 μέτρα υψόμετρο. Η Κρήτη γενικότερα εντοπίζεται στον νοτιότερο άκρο του Ελληνικού νησιωτικού τόξου, όπου σημειώνεται υψηλή σεισμική δραστηριότητα. Λόγω της καταβύθισης της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική πλάκα, στην περιοχή έχει σχηματιστεί ένα πολύπλοκο τεκτονικό περιβάλλον με υψηλές εκτατικές και συμπιεστικές τάσεις, και έντονες οριζόντιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις. Επιπλέον, στην ξηρά της κεντρικής Κρήτης εντοπίζονται δύο τάφροι, του Ηρακλείου στα βόρεια και της Μεσσαράς στα νοτιοδυτικά (Peleli, Kouli, & Vallianatos, 2022).

Την τάφρο του Ηρακλείου οριοθετούν τα όρη Ίδα και Δίκη στα δυτικά και ανατολικά αντίστοιχα, κατά μήκος των ανατολικών ρηξιγενών ζωνών του Ψηλορείτη και του Καστελίου. Η διεύθυνση των

ρηξιγενών ζωνών είναι BA – ND. Επίσης, το όρος Ίδα οριοθετεί στα βόρεια την τάφρο Μεσσαράς, ενώ στα νότια την οριοθετούν τα Αστερούσια Όρη. Οι ρηξιγενείς τους ζώνες είναι διεύθυνσης A – Δ. Στην κεντρική Κρήτη τα ρήγματα ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες. Η πρώτη ομάδα αφορά ρήγματα A – Δ που τέμνουν βραχώδη πετρώματα και Μειοκαινικά ιζήματα. Στην δεύτερη ομάδα συναντώνται ρήγματα μεγάλα και μεσαία, διεύθυνσης B – N, που διαπερνούν τις ίδιες ομάδες πετρωμάτων, ενώ στην τρίτη και τέταρτη ομάδα τα ρήγματα τοποθετούνται BA – ND και BD – NA αντίστοιχα (Peleli, Kouli, & Vallianatos, 2022).

Η γεωλογία στην Κεντρική Κρήτη ποικίλλει. Η περιοχή μελέτης αποτελείται κυρίως από Μειοκαινικά – Πλειοκαινικά ιζήματα στα κεντρικά και δυτικά, τα οποία επικαλύπτονται από αποθέσεις Τεταρτογενούς ηλικίας. Οι αποθέσεις Νεογενούς δημιουργήθηκαν σε χερσαία και θαλάσσια περιβάλλοντα μεγάλου βάθους, τα οποία αποτελούν ενδείξεις μεγάλων βαθυμετρικών αλλαγών λόγω κατακόρυφων μετακινήσεων και εναλλασσόμενων κλιματικών συνθηκών. Ακόμα, στα βορειοανατολικά της περιοχής εμφανίζονται ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τριπόλεως, και σε λόφους στα ανατολικά εντοπίζονται φυλλίτες, χαλαζίτες και ασβεστόλιθοι Plattenkalk (Peleli, Kouli, & Vallianatos, 2022).

Μορφολογικά η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται ορεινή με απότομες πλαγιές, συχνά μεγαλύτερες της τάξης των 45, επειδή επηρεάζονται και χωρίζονται από ενεργά ρήγματα που κινούνται ανεξάρτητα ή ομαδικά. Το υψηλότερο όρος είναι το Δίκτη με υψόμετρο μεγαλύτερο των 2100 μέτρων, ενώ τα Αστερούσια Όρη ανέρχονται περίπου στα 1200 μέτρα (Vassilakis, και συν., 2022).

3. Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Βάσει των Peleli, Kouli, & Vallianatos, 2022 στις 27 Σεπτεμβρίου του 2021 έλαβε χώρα ένας χερσαίος σεισμός μεγέθους Mw 6.0, στις 09:17:21 (τοπική ώρα), κοντά στο Αρκαλοχώρι, στο γεωγραφικό πλάτος 35.15 Β και στο γεωγραφικό μήκος 25.27 Α . Το εστιακό βάθος του σεισμού ήταν της τάξεως των 10 χιλιομέτρων και σχετιζόταν άμεσα με την ρηξιγενή ζώνη Καστελίου. Πριν τον κύριο σεισμό είχαν παρατηρηθεί πολλοί προσεισμοί από αρχές Ιουνίου, με τον μεγαλύτερο μεγέθους Mw 4.8 να καταγράφεται στις 24 Ιουλίου. Μέχρι το κύριο γεγονός καταγράφηκαν πάνω από 250 σεισμοί σε περιοχή με προσανατολισμό B – N και απόσταση 15 km δυτικά από το Αρκαλοχώρι. Στις 27 Σεπτεμβρίου μετά τον κύριο σεισμό έλαβαν χώρα επιπλέον 8 μετασεισμοί με $Mw \geq 4.2$, ενώ ο μεγαλύτερος μετασεισμός έγινε την επόμενη ημέρα και είχε μέγεθος Mw 5.3. Από τον σεισμό καταστράφηκαν πολλά κτίρια και πέθανε ένας άνθρωπος.

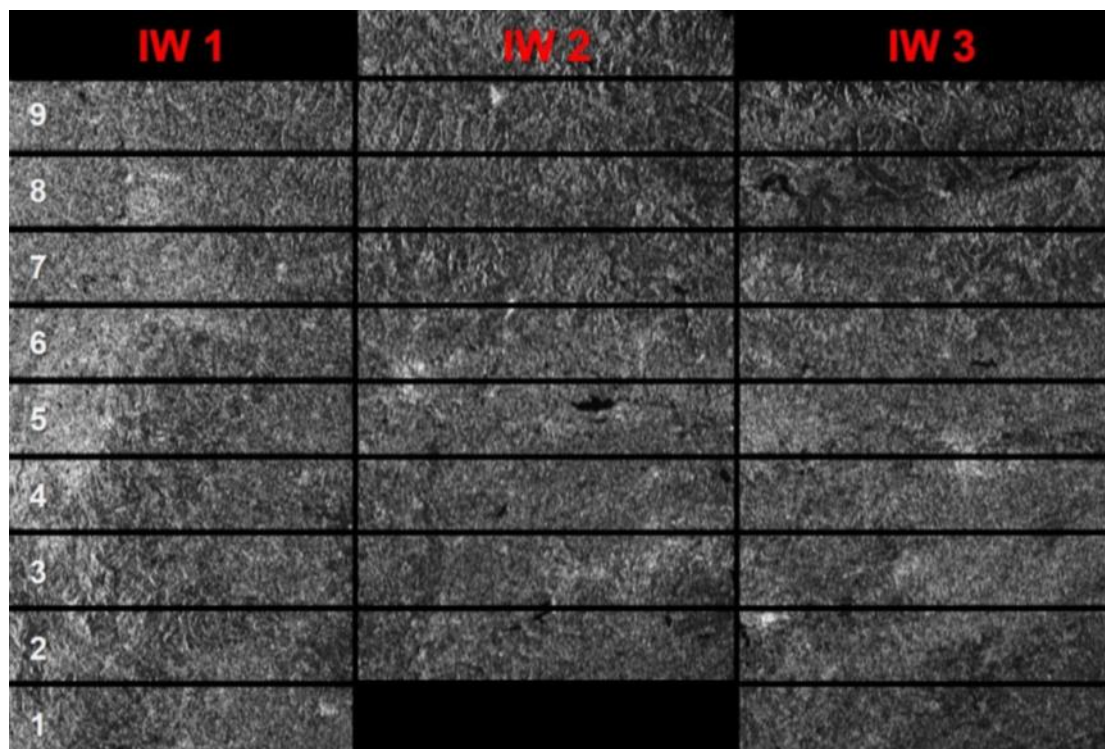
Σύμφωνα με τους Vassilakis, et al. (2022) περισσότερα από 6150 σπίτια στον δήμο Μινώα Πεδιάδας κηρύχθηκαν μετά την σεισμική ακολουθία μη κατοικήσιμα. Με την μέθοδο DInSAR η εδαφική παραμόρφωση υπολογίστηκε στα σημεία με καθίζηση 18 – 20 cm, ενώ 8 cm όπου σημειώθηκε ανύψωση.

4. Δορυφόρος Sentinel-1 και οπτικά δεδομένα

4.1 Δορυφόρος Sentinel-1

Το πρόγραμμα Copernicus δραστηριοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα τομέων με τη βοήθεια ειδικών δορυφόρων (οικογένειες δορυφόρων Sentinel) και άλλων αποστολών (εμπορικοί και δημόσιοι δορυφόροι), και διαχειρίζεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Διαστήματος (ESA). Η αποστολή του Sentinel-1 αποτελούνταν έως το τέλος του 2021 από έναν αστερισμό δύο δορυφόρων, οι οποίοι κινούνταν σε πολική τροχιά, λαμβάνοντας εικόνες με Synthetic Aperture Radar (SAR) καναλιού C (The European Space Agency, 2023). Το κανάλι C έχει τυπική τιμή μήκους κύματος τα 5.6 cm (Παρχαρίδης, 2015). Οι δορυφόροι ήταν οι Sentinel-1A και Sentinel-1B, όπου ο καθένας λάμβανε εικόνες ανά 12 ημέρες, όμως για κάθε περιοχή ήταν διαθέσιμη εικόνα ανά έξι ημέρες γιατί διερχόταν ένας από τους δύο δορυφόρους. Ο Sentinel-1A εκτοξεύτηκε τον Απρίλιο του 2014 (The European Space Agency, 2023).

Υπάρχουν τέσσερις δυνατοί τρόποι λειτουργίας του radar του δορυφόρου Sentinel-1, οι οποίοι είναι οι Interferometric Wide Swath (IW), Extra Wide Swath (EW), Wave (WV) και Stripmap (SM). Σε όλα εκτός από το Wave (μονή) εφαρμόζεται μονή και διπλή πόλωση (HH+ HV). Τα προϊόντα που δημιουργούνται διακρίνονται σε επίπεδο 0, 1–SLC, 1-GRD, και 2. Το επίπεδο μηδέν αφορά δεδομένα χωρίς επεξεργασία, το επίπεδο 1-GRD (Ground Range Detected) δεδομένα με προβολή γεωμετρίας εδάφους, και το επίπεδο 2 προϊόντα σχετικά με ωκεανούς. Στο επίπεδο 1–SLC (Single Look Complex) τα δεδομένα είναι γεωαναφερμένα βάσει της τροχιάς και της κλίσης εμβέλειας του δορυφόρου, και το μέγεθός τους σε IW διπλής πόλωσης ανέρχεται περίπου στα 8GB (Παρχαρίδης, 2015). Τα προϊόντα IW καταγράφουν τρεις υποδιαδρομές καθώς χρησιμοποιούν την αρχή Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR). Τα προϊόντα IW SLC παρέχουν μία εικόνα ανά υποδιαδρομή και μία ανά κανάλι πόλωσης, για συνολικά τρεις (μονής πόλωσης) ή έξι (διπλής πόλωσης) εικόνες σε ένα προϊόν IW. Κάθε εικόνα subswath αποτελείται από κάποια bursts, που το καθένα έχει επεξεργάζεται σαν αυτόνομη εικόνα SLC, και μετά ενώνονται σε μία εικόνα βάσει του αζιμούθιου και του χρόνου. Ανάμεσα από τα bursts στην ενιαία εικόνα σχηματίζονται μαύρες γραμμές, όπως στην εικόνα 1 (Alaska Satellite Facility, 2023).



Εικόνα 1: Οι κάθετες στήλες απεικονίζουν τα sub-swaths, ενώ οι οριζόντιες γραμμές τα bursts (Braun, 2021).

Κάποιοι από τους στόχους της αποστολής Sentinel-1 είναι η συλλογή πληροφοριών για τους ωκεανούς και την Αρκτική, και την γεωργία και την δασολογία ως προς την κάλυψη της γης και την ταξινόμησή της, αλλά και για την αποψίλωση των δασών. Επιπλέον, καθίσταται εφικτό να μελετηθεί ο κίνδυνος καθίζησης βάσει της παρακολούθησης γεωκινδύνων, εξορύξεων, και γεωλογικών σχηματισμών, καθώς και να ενισχυθεί η ασφάλεια ναυτιλιακών διαδρομών, και ο εντοπισμός παράνομων ενεργειών. Η αποστολή ωφελεί σημαντικά την αντιμετώπιση έκτακτων γεγονότων όπως πλημμύρες, σεισμούς, κατολισθήσεις, και ηφαιστειακές εκρήξεις (The European Space Agency, 2023).

Από τις 23 Δεκεμβρίου του 2021 ο δορυφόρος Sentinel-1B χάθηκε εκτός της τροχιάς του και δεν κατέστη δυνατό να ανακτηθεί για να υποστηρίξει την αποστολή. Προγραμματίζεται το συντομότερο να εκτοξευθεί ο Sentinel-1C για να αποκατασταθεί η χρονική δορυφορική κάλυψη των περιοχών (The European Space Agency, 2023).

4.2 SAR Δεδομένα – Σημασία, Υπολογισμός

Το SAR (Synthetic Aperture Radar) απεικονίζει μικροκυματική ακτινοβολία, διεισδύει στα σύννεφα και χρησιμοποιείται τόσο για την ημέρα όσο και την νύχτα ως ενεργό (active) σύστημα. Με αυτό

πραγματοποιούνται μετρήσεις ακτινοβολίας υψηλής ακρίβειας. Οι μεταβολές που παρατηρούνται στην διάδοση της ακτινοβολίας, σε συνδυασμό με τον χρόνο λήψης και την θέση του δορυφόρου, συντελούν στον υπολογισμό της παραμόρφωσης του εδάφους και στην δημιουργία ψηφιακών μοντέλων υψομέτρου (Digital Elevation Model – DEM) (The European Space Agency, 2007). Οι εικόνες του ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (SAR) αξιοποιούνται συνήθως στην μέτρηση επιφανειακών μετατοπίσεων λόγω σεισμών με βάση την τεχνική DInSAR. Με το DInSAR χαρτογραφείται η σεισμική παραμόρφωση με τη χρήση δύο δορυφορικών εικόνων που λαμβάνονται πριν και μετά από έναν σεισμό (Vassilakis, και συν., 2022).

Το κανάλι μικροκυματικής ακτινοβολίας εκτείνεται στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα μεταξύ του υπέρυθρου και των ραδιοκυμάτων, σε μήκη κύματος 0,1 cm – 1 m. Στο συγκεκριμένο κομμάτι του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος λειτουργούν και οι ενεργητικοί (π.χ. SAR) και οι παθητικοί αισθητήρες. Στους ενεργητικούς το σήμα εκπέμπεται προς τον στόχο και καθώς επιστρέφει καταγράφεται από κάποιους δέκτες, ενώ οι παθητικοί αισθητήρες καταγράφουν την ακτινοβολία που προέρχεται από ένα στόχο. Επομένως, ο ίδιο αισθητήρας SAR λειτουργεί ως πηγή και δέκτης της ακτινοβολίας (Παρχαρίδης, 2015). Ο χρόνος επιστροφής των παλμών που καταγράφεται στους δορυφορικούς αισθητήρες ορίζει την θέση των διάφορων χαρακτηριστικών στην εικόνα (Peleli, Kouli, & Vallianatos, 2022).

Η κεραία του RADAR του Sentinel-1 είναι προσανατολισμένη πάντα προς τα δεξιά κατά τη διάρκεια διέλευσής του. Στις εικόνες καθοδικού περάσματος (descending) ο δορυφόρος κινείται από βορρά προς νότο, και ενώ κοιτάει προς τα δεξιά στην πραγματικότητα κοιτάει προς τα δυτικά. Λόγω αυτού οι εικόνες προβάλλονται σαν αντανάκλαση της πραγματικότητας, αφού τα εικονοστοιχεία απεικονίζονται βάσει της σειράς λήψης των δεδομένων. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε ένα ζεύγος descending προϊόντων, το IW1 είναι αυτό που βρίσκεται ανατολικά, ενώ σε ascending εικόνες, το IW1 εντοπίζεται στα δυτικά (Serco Italia SPA, 2019).

Επιπλέον, το διάστημα των τιμών στο συμβολόγραμμα ορίζεται για τους κροσσούς συμβολής από – π έως π, ενώ για την συνάφεια των εικόνων (coherence) από 0 έως 1, με το 1 να φανερώνει υψηλή συνάφεια (Serco Italia SPA, 2019). Τα διαφορετικά χρώματα και οι εναλλαγές τους σε ένα συμβολόγραμμα αντιπροσωπεύουν τους κροσσούς συμβολής και την αλλαγή φάσης των κυμάτων radar αντίστοιχα. Η απόσταση των κροσσών συμβολής φανερώνει το μέγεθος της εδαφικής κίνησης, αφού όσο μικρότερη η απόσταση μεταξύ τους, τόσο μεγαλύτερη η τάση που υπέστη το έδαφος από έναν σεισμό, άρα τόσο μεγαλύτερη η παρατηρούμενη μετακίνηση (University of Leeds, 2023).

5. Δεδομένα Και Μεθοδολογία

5.1 Δεδομένα

Κατά την εκπόνηση αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα λογισμικά προγράμματα: το SNAP 8.0, SNAP 9.0, το QGIS 3.22.14, και το Google Earth. Αρχικά από την ιστοσελίδα Alaska Satellite Facility έγινε λήψη δορυφορικών εικόνων από τον δορυφόρο Sentinel-1 με σκοπό να υπολογιστεί η παραμόρφωση του εδάφους μετά τον σεισμό. Για να υλοποιηθεί αυτό χρειάζονται δύο δορυφορικές εικόνες, μία πριν και μία μετά τον σεισμό, τύπου (Product Type) SLC (Single Look Complex), με λειτουργία αισθητήρα (Sensor Mode) IW (Interferometric Wide), με ίδια τροχιά (Relative Orbit), και με την μικρότερη δυνατή χρονική διαφορά λήψης των εικόνων. Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν, με relative orbit ίσο με 109, είναι οι εξής:

S1B_IW_SLC__1SDV_20210924T042341_20210924T042408_028835_0370FA_C6B9

S1B_IW_SLC__1SDV_20211006T042341_20211006T042408_029010_03763C_29C5

Όπως φαίνεται και από τα ονόματα παραπάνω, οι εικόνες είναι για τις ημερομηνίες 24/09 και 06/10 για το έτος 2021. Η επεξεργασία των εικόνων στο SNAP έγινε με γνώμονα την εργασία της Serco Italia “Earthquake Deformation Using InSAR, with Sentinel-1. (version 1.1)”.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στους πίνακες που ακολουθούν. Ο πίνακας συγκεντρώνει κάποια από τα σημαντικά κοινά χαρακτηριστικά των εικόνων. Το absolute orbit της πρώτης εικόνας είναι 29010, ενώ της δεύτερης 28835.

Επίσης, χρησιμοποιήθηκε ένα γραμμικό διανυσματικό επίπεδο των κύριων ρηγμάτων της Κρήτης από την ιστοσελίδα της αποκεντρωμένης διοίκησης Κρήτης (<https://data.apdkritis.gov.gr/el/dataset/%CF%81%CE%AE%CE%B3%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1-%CF%84%CE%B7%CF%82-%CE%BA%CF%81%CE%AE%CF%84%CE%B7%CF%82>) .

Attributes of the Satellite Images	
Satellite	Sentinel-1
Band	C-Band
Start Time	04:23:41Z
Stop Time	04:24:08Z
Beam Mode	IW
Path	109
Frame	473
Flight Direction	Descending
Polarization	VV+VH
Citation	ESA
Satellite Number	B

5.2 Μεθοδολογία

Αρχικά, στο λογισμικό SNAP 8.0 εισήχθησαν τα .zip αρχεία των εικόνων και ξεκίνησε η διαδικασία του pre-processing των εικόνων. Μέσω του εργαλείου Graph Builder δημιουργήθηκε γράφημα που εφαρμόστηκε ξεχωριστά στην κάθε εικόνα. Κάθε προϊόν S1 IW χωρίζεται σε bursts και sub-swaths. Για να περιοριστεί το εύρος της περιοχής που απεικονίζουν οι εικόνες, μιας και είναι πολύ μεγαλύτερο από αυτό που χρειάζεται, χρησιμοποιήθηκε για κάθε εικόνα η εντολή “TOPSAR-Split” όπου επιλέχθηκαν τα ακόλουθα: sub-swath → IW1, polarization → VV και bursts → 5 – 9. Στη συνέχεια, εκτελέστηκε η εντολή “Apply Orbit File” με την οποία προστέθηκαν σε κάθε δορυφορική εικόνα τα δεδομένα κίνησης του δορυφόρου. Στην παράμετρο “Orbit State Vectors” χρησιμοποιήθηκε το “Sentinel Precise (Auto Download)” και ορίστηκε η επιλογή “Do not fail if new orbit file is not found”.

Στο επόμενο βήμα ευθυγραμμίστηκαν οι εικόνες των δύο ημερομηνιών με τη χρήση του εργαλείου Graph Builder. Στο νέο γράφημα που δημιουργήθηκε διαβάστηκαν οι δύο δορυφορικές εικόνες και έπειτα ενώθηκαν με την επιλογή “Back-Geocoding”, όπου επιλέχθηκε ως Digital Elevation Model → SRTM 1Sec HGT (Auto Download), ως DEM Resampling Method και Resampling Type → BILINEAR_INTERPOLATION, και ορίστηκε η επιλογή “Output Deramp and Demod Phase”. Το συγκεκριμένο ψηφιακό υψομετρικό μοντέλο έχει χωρική ανάλυση ~30 μέτρων. Για να βελτιωθεί η ποιότητα του προϊόντος που παράχθηκε, αφού επιλέχθηκαν προηγουμένως πάνω από ένα bursts, εκτελέστηκε το “Enhanced-Spectral-Diversity”. Ακόμα, η εντολή “Interferogram” είναι απαραίτητη για να υπολογιστεί το συμβολόγραμμα. Σε αυτή την εντολή επιλέχθηκαν οι παράμετροι “Subtract flat-earth phase”, “Include coherence estimation” και “Square Pixel”, και ορίστηκαν τα “Coherence Range Window

Size” και “Coherence Azimuth Window Size” ίσα με 18 και 5 αντίστοιχα. Για να αφαιρεθούν οι μαύρες γραμμές που υπάρχουν ανάμεσα στα bursts χρησιμοποιήθηκε η εντολή “TOPSAR-Deburst”.

Στη συνέχεια, σε ένα νέο γράφημα στο graph builder εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα. Για να αφαιρεθεί η τοπογραφική φάση του συμβολογράμματος εφαρμόστηκε η εντολή “TopoPhaseRemoval”, με Digital Elevation Model → SRTM 1Sec HGT (Auto Download) και ενεργή την επιλογή “Output topographic phase band”. Για να μειωθεί ο θόρυβος από τα αρχικά δεδομένα SAR επιλέχθηκε η εντολή “Multilook” και ορίστηκε Number of Range Looks → 6. Για να μειωθεί ο θόρυβος φάσης και να βελτιωθεί η ποιότητα των κροσσών συμβολής στο διάγραμμα εφαρμόστηκε το φίλτρο “Goldstein Phase Filtering” με FFT Size → 128. Έπειτα, ορίστηκε το output της εικόνας αλλά και το “SnpHuExport” καθώς είναι απαραίτητο για να μετρηθεί η εδαφική παραμόρφωση βάσει των κροσσών συμβολής. Σε αυτή την εντολή διαμορφώθηκαν οι παράμετροι Initial method: MCF, Number of Tile Rows: 1, Number of Tile Columns: 1, Row Overlap: 0, και Column Overlap: 0.

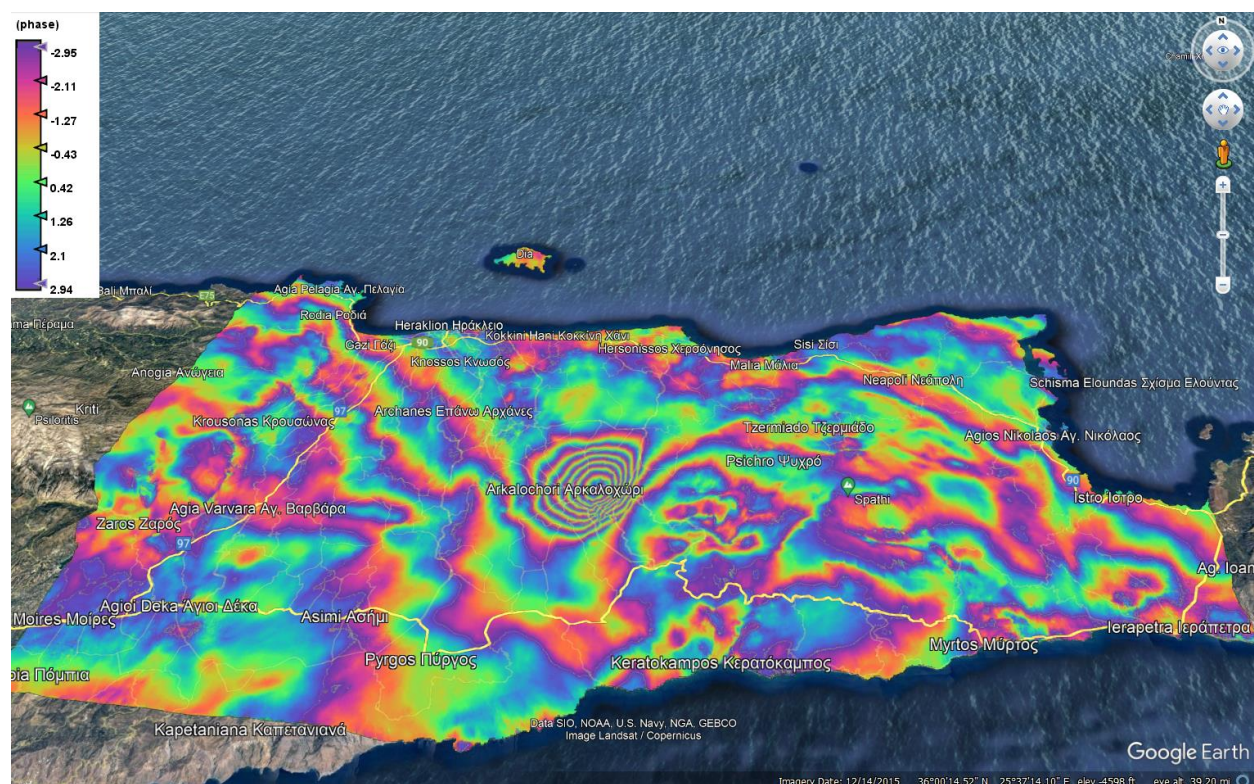
Έπειτα, εφαρμόστηκε στο λογισμικό SNAP 9.0 η γεωμετρική διόρθωση του συμβολογράμματος με την εντολή “Range-Doppler Terrain Correction”, με Digital Elevation Model → SRTM 1Sec HGT (Auto Download) και Source Bands → Intensity_ifg_VV_24Sep2021_06Oct2021, Phase_ifg_VV_24Sep2021_06Oct2021, topo_phase_VV_24Sep2021_06Oct2021, coh_IW1_VV_24Sep2021_06Oct2021. Απαραίτητο βάσει της περιοχής μελέτης είναι η αφαίρεση της επιφάνειας της θάλασσας με την εντολή “Land/Sea Mask”, όπου ορίζεται στην παραμέτρους “Mask out the Sea”. Το συμβολόγραμμα αποθηκεύτηκε ως αρχείο GeoTIFF (Band Subset: Phase_ifg_VV_24Sep2021_06Oct2021).

Επόμενο βήμα της μεθοδολογίας για αυτή την εργασία ήταν η παραγωγή χάρτη μέσω του λογισμικού QGIS. Αρχικά, προστέθηκε στο QGIS το raster αρχείο με τους κροσσούς συμβολής. Για να αφαιρεθεί η μαύρη έκταση που απεικονίζεται ορίστηκε στις παραμέτρους του επιπέδου Additional no data value → 0, και για καλύτερη οπτικοποίηση το transparency → 60%. Στο project προστέθηκε και το διανυσματικό επίπεδο των κύριων ρηγμάτων της Κρήτης το οποίο περιορίστηκε στην περιοχή μελέτης, δηλαδή σε όλη την περιοχή του συμβολογράμματος. Επιπλέον, δημιουργήθηκε ένα νέο σημειακό διανυσματικό επίπεδο με τα ονόματα του Αρκαλοχωριού και των μεγάλων πόλεων που βρίσκονται στην περιοχή.

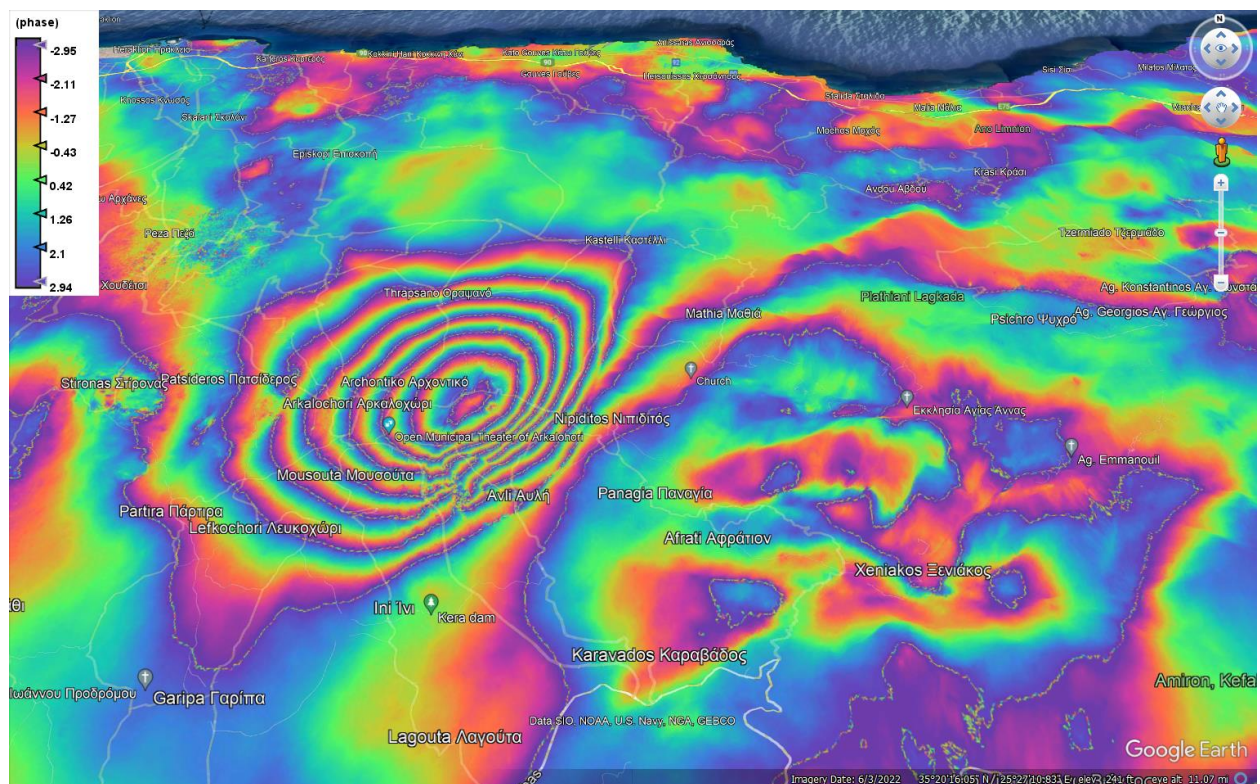
Επίσης το συμβολόγραμμα αποθηκεύτηκε ως KMZ αρχείο (File → Export → Other → View as Google Earth KMZ) για να προβληθεί στο λογισμικό Google Earth.

6. Αποτελέσματα

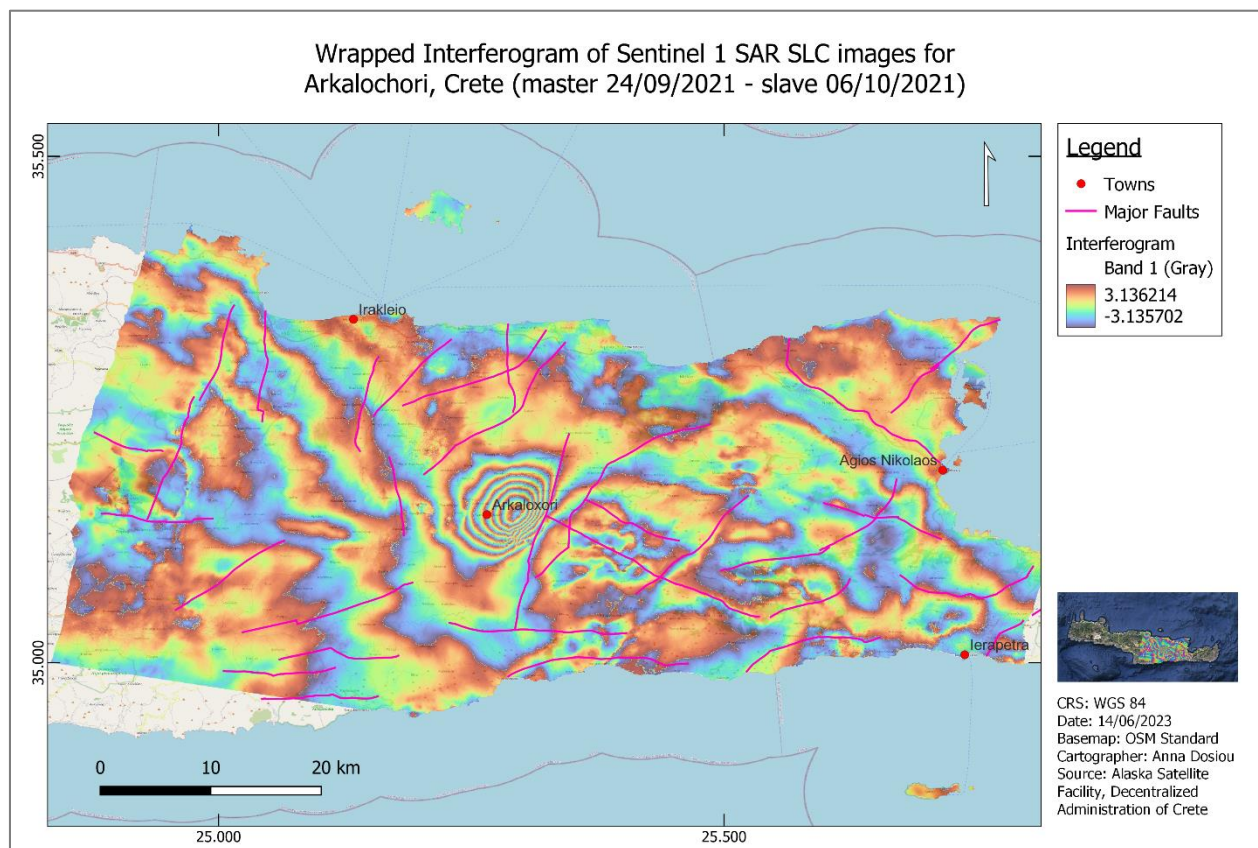
Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται στο συμβολόγραμμα της ευρύτερης περιοχής μελέτης στο λογισμικό Google Earth, και το ίδιο παρουσιάζεται και στην εικόνα 4 στο λογισμικό QGIS με την προσθήκη των κύριων ρηγμάτων, για να συσχετιστούν με το σεισμικό γεγονός. Η εικόνα 3 επικεντρώνεται στο Αρκαλοχώρι και στην κύρια εδαφική παραμόρφωση και τον υπολογισμό της. Στο Αρκαλοχώρι σχηματίζονται δύο λοβοί κροσσών συμβολής. Η παραμόρφωση στον κάθε λοβό υπολογίζεται από τον πολλαπλασιασμό: (αριθμός κροσσών * $\lambda_{\text{Cband}}/2$), όπου το $\lambda_{\text{Cband}}=5.6$ cm. Στον αριστερό παρατηρείται ότι οι κροσσοί είναι πολύ κοντινοί, άρα δηλώνουν ότι η παραμόρφωση είναι πιο έντονη σε σύγκριση με τον δεξί λοβό, όπου οι μεγάλη απόσταση των κροσσών φανερώνει την μικρότερη παραμόρφωση. Επίσης, στον αριστερό λοβό οι κροσσοί είναι 6, άρα η παραμόρφωση είναι $6 \cdot 5.6/2 = 16.8$ cm, ενώ στον δεξί ο αριθμός των κροσσών είναι 3, άρα η παραμόρφωση είναι $3 \cdot 5.6/2 = 8.4$ cm. Στις περιοχές που οι κροσσοί συμβολής, παρατηρώντας από την περιφέρεια προς το κέντρο, εξελίσσονται από αρνητικές σε θετικές τιμές, όπως στον αριστερό λοβό, συνέβη καθίζηση του εδάφους, ενώ στην αντίθετη περίπτωση που εξελίσσεται από θετικές προς αρνητικές συνέβη ανύψωση, όπως στον δεξί λοβό.



Εικόνα 2: Συμβολόγραμμα της ευρύτερης περιοχής μελέτης στο λογισμικό Google Earth



Εικόνα 3: Συμβολόγραμμα Αρκαλοχωρίου Κρήτης



Εικόνα 4: Χάρτης συμβολογράμματος Αρκαλοχωρίου και της ευρύτερης περιοχής μελέτης

7. Συζήτηση – Συμπεράσματα

Ο σεισμός του Αρκαλοχωρίου προκάλεσε υλικές καταστροφές και έναν θάνατο. Εξίσου σημαντικές όμως είναι και οι εδαφικές μετατοπίσεις που παρατηρήθηκαν μετά τον σεισμό. Στην περιοχή του δυτικού λοβού το έδαφος υπέστη καθίζηση της τάξης των 16 εκατοστών, ενώ στην ανατολική περιοχή παρατηρήθηκε ανύψωση του εδάφους κατά 8 cm. Ο υπολογισμός αποτελεί μία πρώτης τάξης εκτίμηση, και χρειάζεται να διερευνηθεί περαιτέρω με το phase unwrapping του συμβολογράμματος. Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας είναι παρόμοια με αυτά της βιβλιογραφικής επισκόπησης. Κρίνεται αναγκαίο να διερευνηθούν εκτεταμένα τα χαρακτηριστικά του σεισμού και της περιοχής, ώστε να κατανοηθούν εις βάθος με σκοπό να προστατευθούν ευάλωτες κατασκευές – περιοχές. Με αυτό τον τρόπο θα μειωθεί η επίδραση ενός παρόμοιου σεισμού στον άνθρωπο.

Βιβλιογραφία

Ξένα Βιβλιογραφία

- Alaska Satellite Facility. (2023, June 12). *How to Create an Interferogram Using ESA's Sentinel-1 Toolbox*. Retrieved from Distributed Active Archive Center: <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/create-an-interferogram-using-esas-sentinel-1-toolbox/>
- Braun, A. (2021). *DEM generation with Sentinel-1, Workflow and challenges*. SkyWatch Space Applications Inc.
- Peleli, S., Kouli, M., & Vallianatos, F. (2022). Satellite-Observed Thermal Anomalies and Deformation Patterns Associated to the 2021, Central Crete Seismic Sequence. *Remote Sensing*, 14(3413). doi:<https://doi.org/10.3390/rs14143413>
- Serco Italia SPA. (2019). *Earthquake Deformation Using InSAR, with Sentinel-1. (version 1.1)*. Research and User Support for Sentinel Core Products.
- The European Space Agency. (2007, April 20). *Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. Retrieved from ESA - InSAR Principles: https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation_br_ESA_TM-19
- The European Space Agency. (2023, June 12). *News*. Retrieved from Sentinel Online: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/-/end-of-mission-of-the-copernicus-sentinel-1b-satellite/1.5>
- The European Space Agency. (2023, June 12). *Sentinel-1 Missions*. Retrieved from Sentinel Online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- The European Space Agency. (2023, June 12). *Thematic Areas and Services*. Retrieved from Sentinel Online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/thematic-areas>
- University of Leeds. (2023, June 12). *How inSAR works*. Retrieved from Centre for the Observation and Modelling of Earthquakes, Volcanoes and Tectonics: <https://comet.nerc.ac.uk/earth-observation/insar/how-insar-works/>
- Vassilakis, E., Kaviris, G., Kapetanidis, V., Papageorgiou, E., Foumelis, M., Konsolaki, A., . . . Tselentis, G.-A. (2022). The 27 September 2021 Earthquake in Central Crete (Greece)—Detailed Analysis of the Earthquake Sequence and Indications for Contemporary Arc-Parallel Extension to the Hellenic Arc. *Applied Sciences*, 12(2815), 1-24. doi:<https://doi.org/10.3390/app12062815>

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Βικιπαίδεια. (2023, Μάιος 11). *Αρκαλοχώρι*. Retrieved from Βικιπαίδεια - Η Ελεύθερη Εγκυκλοπαίδεια: <https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%91%CF%81%CE%BA%CE%B1%CE%BB%CE%BF%CF%87%CF%8E%CF%81%CE%B9&oldid=10043199>

Δήμος Μινώα Πεδιάδας. (2023, June 12). *Δημοτική Ενότητα Αρκαλοχωρίου*. Retrieved from Δήμος Μινώα Πεδιάδας | Τουριστικός Οδηγός:
<http://www.discoverminoapediadas.gr/%ce%b4%ce%b7%ce%bc%ce%bf%cf%84%ce%b9%ce%ba%ce%ae-%ce%b5%ce%bd%cf%8c%cf%84%ce%b7%cf%84%ce%b1-%ce%b1%cf%81%ce%ba%ce%b1%ce%bb%ce%bf%cf%87%cf%89%cf%81%ce%af%ce%bf%cf%85/>

Παρχαρίδης, Ι. (2015). *Αρχές δορυφορικής Τηλεπισκόπησης: Θεωρία και εφαρμογές*. Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών.