



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών  
Σπουδών  
Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων

Διερεύνηση της αλληλεπίδρασης εδαφικών  
υποχωρήσεων και πλημμυρικών φαινομένων σε  
παράκτιες περιοχές του Ελλαδικού χώρου με την  
συνδυαστική χρήση τεχνικών συμβολομετρίας και  
δεδομένων πεδίου. Τα παραδείγματα των πόλεων του  
Μεσολογγίου και του Αιτωλικού

Πτυχιακή Εργασία

Αντωνιάδης Νικόλαος

Επιβλέπων Καθηγητής:  
Κωνσταντίνος Λουπασάκης,  
Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2023



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών  
Σπουδών  
Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων

Διερεύνηση της αλληλεπίδρασης εδαφικών  
υποχωρήσεων και πλημμυρικών φαινομένων σε  
παράκτιες περιοχές του Ελλαδικού χώρου με την  
συνδυαστική χρήση τεχνικών συμβολομετρίας και  
δεδομένων πεδίου. Τα παραδείγματα των πόλεων του  
Μεσολογγίου και του Αιτωλικού

Πτυχιακή Εργασία

Αντωνιάδης Νικόλαος

Επιβλέπων Καθηγητής: Κωνσταντίνος Λουπασάκης, Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις XX/06/2023:

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής, ΕΜΠ .....(Υπογραφή)  
Τσακίρη Μαρία, Καθηγήτρια, ΕΜΠ .....(Υπογραφή)  
Χαράλαμπος Κοντοές, Διευθυντής Ερευνών, ΕΑΑ .....(Υπογραφή)

Copyright © Αντωνιάδης Νικόλαος, 2023

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.



## Πρόλογος

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των μεταπτυχιακών σπουδών του Διατμηματικού Προγράμματος «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Καταρχάς οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, κ. Κωνσταντίνο Λουπασάκη, Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για την ευκαιρία επιλογής ενός τόσο ενδιαφέροντος θέματος, για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξη, τις καίριες συμβουλές, την πολύτιμη συμπαράσταση και ενθάρρυνση που αφειδώς μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια του εαρινού εξαμήνου, καθώς και για τον ενδελεχή έλεγχο της εργασίας μου.

Επιπροσθέτως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Χαράλαμπο Κοντοέ, Διευθυντή Ερευνών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (ΕΑΑ), για τη δυνατότητα που μου έδωσε να πραγματοποιήσω τις επιλύσεις InSAR στο “Κέντρο Επιστημών Παρατήρησης της Γης και Δορυφορικής Παρακολούθησης – BEYOND” του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών καθώς και την κα. Αλατζά Σταυρούλα για την καθοδήγηση που μου πρόσφερε στην κατανόηση των προγραμμάτων επίλυσης και την πραγματοποίησή τους καθώς και την εν γένει αρωγή της τόσο κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας μου όσο και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας δημοσίευσής της στο περιοδικό Remote Sensing του MDPI.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ απευθύνεται στους γονείς μου για τη συνεχή προσπάθειά τους να μου προσφέρουν ερεθίσματα και να δημιουργούν τις καλύτερες δυνατές συνθήκες, προκειμένου να προοδεύσω και να γίνω καλύτερος άνθρωπος. Ήταν και είναι ανεκτίμητο στήριγμα για εμένα και σε αυτούς οφείλω τη διαδρομή μου μέχρι σήμερα. Το ίδιο ισχύει και για τον αδελφό μου, που αποτελεί για μένα παράδειγμα προς μίμηση για την επιμονή και την άοκνη προσπάθειά του να κατακτά υψηλούς στόχους παρά τις δυσκολίες του.



## Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	1
1. Εισαγωγή.....	10
2. Φαινόμενο εδαφικών υποχωρήσεων.....	11
2.1. Αιτίες πρόκλησης εδαφικών υποχωρήσεων .....	11
2.1.1. Φυσικές αιτίες.....	11
2.1.2. Ανθρωπογενείς αιτίες .....	11
2.2. Ομοιόμορφες – Διαφορικές υποχωρήσεις εδάφους.....	13
2.3. Επιπτώσεις .....	13
3. Καθιζήσεις.....	13
3.1. Στάδια καθίζησης .....	13
3.1.1. Αρχική καθίζηση (άμεση ή αστραγγιστη) .....	13
3.1.2. Καθίζηση λόγω στερεοποίησης.....	14
3.1.2.1. Καθιζήσεις σε αμμώδη εδάφη.....	18
3.1.2.2. Καθιζήσεις σε συνεκτικά εδάφη.....	18
3.1.2.3. Δοκιμή Συμπιεστότητας (Οιδήμετρο) ή Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης .....	19
3.1.3. Δευτερογενής στερεοποίηση - ερπυσμός .....	23
4. Μέθοδοι παρατήρησης – μέτρησης εδαφικών υποχωρήσεων και καθιζήσεων	24
5. Τηλεπισκόπηση.....	26
5.1. Παθητικά συστήματα δορυφόρων .....	26
5.2. Ενεργητικά συστήματα δορυφόρων .....	26
5.3. RADAR.....	27
5.4. Γεωμετρία λήψης εικόνων με RADAR .....	27
5.5. Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar - SAR) 29	
5.5.1. Ιδιότητες πηγής – Χαρακτηριστικά συστήματος ραντάρ .....	30
5.5.2. Ιδιότητες στόχου – Χαρακτηριστικά επιφάνειας.....	32
5.6. Χαρακτηριστικά απεικονίσεων SAR.....	34
5.6.1. Γεωμετρικές παραμορφώσεις .....	34
5.6.2. Κηλίδωση.....	36

5.7.	Συμβολομετρία SAR (Interferometric SAR - InSAR).....	37
5.7.1.	Βασικά βήματα της συμβολομετρικής επεξεργασίας.....	38
5.7.1.1.	Συμπροσαρμογή εικόνων SAR (Co-registration) .....	38
5.7.1.2.	Συνάφεια (Coherence) .....	41
5.7.1.3.	Ανακατασκευή ή αποκατάσταση της πλήρους συμβολομετρικής φάσης (Phase unwrapping) .....	42
5.8.	Διαφορική συμβολομετρία SAR – DInSAR.....	42
5.8.1.	Διαχρονική συμβολομετρία SAR.....	43
5.8.2.	Μέθοδος των σταθερών σκεδαστών (Persistent Scatterer Interferometry) .....	43
5.8.3.	StaMPS – Stanford Method for Persistent Scatterers.....	44
5.8.4.	Μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων (Small Baseline Subset) ..	44
6.	Περιοχή μελέτης.....	45
6.2.	Γεωλογία περιοχής μελέτης .....	46
6.2.1.	Γεωλογία Μεσολογγίου και Αιτωλικού.....	49
6.3.	Γεωτεχνικά δεδομένα περιοχής μελέτης.....	53
6.4.	Υδρογεωλογία περιοχής μελέτης.....	60
6.5.	Αύξηση της στάθμης της θάλασσας & βροχοπτώσεις.....	61
7.	Μελέτη εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος με τη μέθοδο των σταθερών σκεδαστών.....	69
7.1.	Επεξεργασία εικόνων – Sentinel 1 .....	69
7.2.	European Ground Motion Service of Copernicus .....	75
7.3.	Αποτελέσματα.....	76
8.	Δεδομένα πεδίου.....	79
9.	Συσχέτιση Δεδομένων .....	81
9.1.	Εδαφικές υποχωρήσεις στο Μεσολόγγι.....	81
9.1.1.	Γεωτεχνικά δεδομένα .....	83
9.1.2.	Βροχοπτώσεις .....	84
9.1.3.	Εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.....	86
9.1.4.	Χρήση γης.....	90
9.1.5.	Άλλοι παράγοντες.....	92
9.1.5.1.	Τεκτονική .....	92
9.1.5.2.	Παρόμοιες μελέτες.....	92



9.2. Εδαφικές υποχωρήσεις στο Αιτωλικό .....	93
9.2.1. Εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα & Βροχοπτώσεις	96
9.2.2. Γεωτεχνικά δεδομένα .....	97
10. Συμπεράσματα .....	98
Αναφορές.....	99
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΩΝ ΠΛΗΓΕΝΤΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙ.....	107
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΩΝ ΠΛΗΓΕΝΤΩΝ ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΑΙΤΩΛΙΚΟ .....	116

## Λίστα Εικόνων

Εικόνα 1. Αιτίες που προκαλούν εδαφικές υποχωρήσεις .....	12
Εικόνα 2. Νομογράφημα προσδιορισμού του παράγοντα χρόνου, $Tv$ , σε συνάρτηση με το βάθος και το βαθμό στερεοποίησης, $U$ (Taylor, 1948). .....	15
Εικόνα 3. Σκαρίφημα της δοκιμής συμπεσσιόμετρου (αριστερά) και η διάταξη στο εργαστήριο (δεξιά).....	19
Εικόνα 4. Τυπική δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης μαλακής αργίλου (Constantinos Loupasakis 2013) .....	21
Εικόνα 5. Παθητικά και ενεργητικά συστήματα (EarthData - NASA. 2021) .....	27
Εικόνα 6. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά λήψης εικόνας SAR.....	29
Εικόνα 7. Ευαισθησία των μετρήσεων SAR σε δασικές περιοχές και διείδυση για διαφορετικά μήκη κύματος .....	31
Εικόνα 8. Δύναμη σκέδασης ανά είδος πόλωσης (Franz 2019) .....	32
Εικόνα 9. Παραμορφώσεις στην πλευρική απόσταση (Natural Resources Canada 2019) .....	34
Εικόνα 10. Τα φαινόμενα της πτύχωσης, σμίκρυνσης και σκίασης (Delikaraoglou 2005) .....	35
Εικόνα 11. Γεωμετρία συστήματος SAR. Αναγράφονται το συμβολομετρικό διάνυσμα βάσης και το κάθετο διάνυσμα βάσης, καθώς και οι 2 τροχιές του δορυφόρου (Osmanoğlu et al. 2016) .....	37
Εικόνα 12. Βασικά βήματα της συμβολομετρικής επεξεργασίας (Ferretti et al. 2007) .....	38
Εικόνα 13. Διάγραμμα μετρούμενων, αποκατεστημένων, και απόλυτων τιμών φάσης (Osmanoğlu et al. 2016).....	42
Εικόνα 14. Δίκτυο συμβολογραφημάτων με τη μέθοδο PS και τη μέθοδο SBAS (Papoutsis 2014).....	43
Εικόνα 15. (a) Οι πόλεις του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού & (b) Η περιοχή μελέτης .....	45
Εικόνα 16. Φύλλο Αγρίνιον, ΙΓΜΕ (1996) .....	48
Εικόνα 17. Γεωλογικός χάρτης Μεσολογγίου (αριστερά) και Αιτωλικού (δεξιά) (τροποποιημένο από φύλλο «Μεσολόγγιον» και «Ευηνοχώριον» του ΙΓΜΕ (Antoniadis et al. 2023).....	49
Εικόνα 18. Υδρογραφικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής του Μεσολογγίου .....	50

Εικόνα 19. (α) Τοποθεσίες γεωτρήσεων στην πόλη του Μεσολογγίου & (β) Ενδεικτικές γεωτρήσεις κατά μήκος της τομής που αναπαρίσταται στην Εικόνα 20(α) (Antoniadis et al. 2023).....	52
Εικόνα 20. (α) Χάρτης της Ευρώπης όσον αφορά τη ευαισθησία των εδαφικών σχηματισμών σε συμπύκνωση (Houšková 2008) (b) Εστίαση στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο .....	59
Εικόνα 21. Ισοϋψείς καμπύλες στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για τον Οκτώβριο 2005 και τον Απρίλιο 2006, τροποποιημένα από Lemesios 2008 (Antoniadis et al. 2023) .....	61
Εικόνα 22. Οι τοποθεσίες του παριλλοιογράφων του Κατάκολου και της Πάτρας .....	62
Εικόνα 23. Η χρονοσειρά του παλιρροιογράφου της Πάτρας.....	63
Εικόνα 24. Αναμενόμενη αύξηση της στάθμης της θάλασσας στις παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας σύμφωνα με τα σενάρια RCP.....	64
Εικόνα 25. Αναμενόμενη αύξηση της στάθμης της λιμνοθάλασσας του Μεσολογγίου σύμφωνα με τα σενάρια SSP.....	64
Εικόνα 26. Πλημμυρισμένα τμήματα του Μεσολογγίου (αριστερά) και του Αιτωλικού (δεξιά) το 2100 σύμφωνα με το SSP5-8.5.....	65
Εικόνα 27. Τιμές μηνιαίων βροχοπτώσεων που καταγράφηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό του Αιτωλικού. Κάθε μπλε μπάρα αντιπροσωπεύει τις τιμές για έναν μήνα (Lagouvardos et al. 2017).....	66
Εικόνα 28. Πλημμυρισμένο Μεσολόγγι - 03/12/2021 (“Οι Αιτίες Που Πλημμυρίζει Το Μεσολόγγι” 2022).....	66
Εικόνα 29. Πλημμυρισμένο Αιτωλικό - 04/09/2015 (“Προβλήματα Από Την Κακοκαιρία Στην Αιτωλοακαρνανία” 2014).....	67
Εικόνα 30. Πλημμυρισμένο Αιτωλικό - 26/10/2020 (“Αγανάκτησαν Στο Αιτωλικό-Βροχή Και...πλημμύρα” 2022) .....	67
Εικόνα 31. Τα frame του δορυφόρου Sentinel 1τα οποία επιλέχθηκαν για την καθοδική και ανοδική ανάλυση (πράσινο χρώμα) και η περιοχή μελέτη (κόκκινο χρώμα).....	69
Εικόνα 32. LOS μετακινήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης για την καθοδική τροχιά (pass no. 80) - EAA .....	76
Εικόνα 33. LOS μετακινήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης για την ανοδική τροχιά (pass no. 175) - EAA .....	77
Εικόνα 34. Κατακόρυφες μετακινήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης για την καθοδική τροχιά (pass no. 80) - EAA.....	77

Εικόνα 35. Κατακόρυφες μετακινήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης για την ανοδική τροχιά (pass no. 175) - ΕΑΑ .....	78
Εικόνα 36. Δυτικό Μεσολόγγι, Τοποθεσίες κτηρίων με ζημιές (αριστερά). Ανατολικό Μεσολόγγι, Η περιοχή με τους πιο έντονους ρυθμούς ετήσιων παραμορφώσεων (δεξιά).....	79
Εικόνα 37. Ζημιές που λόγω διαφορετικών καθιζήσεων (α) Νότιο μπαλκόνι του Κτηρίου D (β) Δυτικό μπαλκόνι του Κτηρίου D (γ) Κτήριο E. Τα βέλη υποδεικνύουν την τάση κίνησης.....	80
Εικόνα 38. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Μεσολογγίου από την καθοδική τροχιά (pass no. 80) – ΕΑΑ.....	81
Εικόνα 39. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Μεσολογγίου από την ανοδική τροχιά (pass no. 175) - ΕΑΑ .....	82
Εικόνα 40. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Μεσολογγίου - EGMS.....	82
Εικόνα 41. Χρονοσειρά κατακόρυφων μετακινήσεων για το κτήριο της Περιφερειακής Ενότητας Αιτωλοακαρνανίας – EGMS. Επισημαίνεται το μοτίβο επιβράδυνσης .....	85
Εικόνα 42. Χρονοσειρά κατακόρυφων μετακινήσεων για την ανοδική και καθοδική τροχιά για το κτήριο της Περιφερειακής Ενότητας Αιτωλοακαρνανίας – ΕΑΑ.....	85
Εικόνα 43. Τοποθεσίες των γεωτρήσεων του δικτύου του ΕΑΓΜΕ (κόκκινο χρώμα) και του Lemesios (2008) (κίτρινο χρώμα) .....	87
Εικόνα 44. Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα για τις γεωτρήσεις (α) EL04250402 και W5 και (β) EL04090402 and W11.....	88
Εικόνα 45. Χρήση γης για την πόλη του Μεσολογγίου κατά το έτος (α) 2006 και (β) 2018.....	90
Εικόνα 46. Χρήση γης για την πόλη του Μεσολογγίου κατά το έτος (α) 2006 και (β) 2018 και συσχέτιση με τις κατακόρυφες μετακινήσεις της καθοδικής τροχιάς ....	91
Εικόνα 47. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Αιτωλικού από την καθοδική τροχιά (pass no. 80) – ΕΑΑ.....	93
Εικόνα 48. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Αιτωλικού από την ανοδική τροχιά (pass no. 175) - ΕΑΑ.....	93
Εικόνα 49. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Μεσολογγίου - EGMS.....	94
Εικόνα 50. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Αιτωλικού από την ανοδική τροχιά και η τοποθεσία των κτηρίων που εμφανίζουν ζημιές.....	94

Εικόνα 51. Ζημιές σε μπαλκόνι παλαιού κτηρίου λόγω διαφορικών καθιζήσεων (Μ).....	95
Εικόνα 52. Χρονοσειρά κατακόρυφων μετακινήσεων για το Μουσείο Βάσω Κατράκη– EGMS. ....	96
Εικόνα 53. Χρονοσειρά κατακόρυφων μετακινήσεων για το Μουσείο Βάσω Κατράκη για την ανοδική τροχιά– ΕΑΑ. ....	96

## Λίστα Πινάκων

Πίνακας 1. Αντιστοιχία τιμών του παράγοντα χρόνου $T_v$ και του βαθμού στερεοποίησης.....	17
Πίνακας 2. Ζώνες μήκους κύματος λειτουργίας συστημάτων SAR (EarthData - NASA 2020).....	31
Πίνακας 3. Είδη πόλωσης ανά διάφορα στοιχεία (S.-D. E. Alatza 2020).....	32
Πίνακας 4. Κατάταξη εδαφών από τις δοκιμές SPT και CPT για μη συνεκτικά και συνεκτικά εδάφη.....	54
Πίνακας 5. Φυσικές και Μηχανικές παράμετροι της Αργιλώδους Ιλύος, της Οργανικής Αργίλου και της Αργιλώδους Άμμου.....	55
Πίνακας 6. Φυσικές και Μηχανικές παράμετροι της Ιλύος και της Ιλυώδους Άμμου.....	56
Πίνακας 7. Φυσικές και Μηχανικές παράμετροι της Ιλυώδους Αργίλου και της Αμμώδους Αργίλου.....	57
Πίνακας 8. Δεδομένα αναλύσεων για την καθοδική και ανοδική τροχιά.....	70
Πίνακας 9. Στοιχεία εικόνων για την καθοδική τροχιά.....	71
Πίνακας 10. Στοιχεία εικόνων για την ανοδική τροχιά.....	72
Πίνακας 11. Δεδομένα στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για τις γεωτρήσεις του ΕΑΓΜΕ και του Lemesios (2008).....	89

## 1. Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι ο εντοπισμός των εδαφικών υποχωρήσεων στις πόλεις του Μεσολογίου και του Αιτωλικού με την χρήση της τεχνικής συμβολομετρίας σε ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (InSAR), καθώς και την εύρεση των αιτιών εμφάνισης αυτού του φαινομένου. Το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων συναντάται ευρέως σε παγκόσμιο επίπεδο, παράγει ένα τεράστιο οικονομικό κόστος για τις κυβερνήσεις και δημιουργεί σοβαρά κοινωνικά και περιβαλλοντικά προβλήματα.

Η εξέλιξη του φαινομένου αυτού είναι άλλοτε σταδιακή και άλλοτε ραγδαία, ενώ τα αίτια ποικίλουν και κυμαίνονται από την φυσική στερεοποίηση του εδάφους και την αύξηση των βροχοπτώσεων, έως αμιγώς ανθρωπογενείς παράγοντες, όπως η υπεράντληση υδάτων και η μεγάλη οικοδομική δραστηριότητα. Ο εντοπισμός και η παρακολούθηση του φαινομένου αποτελεί μια δύσκολη διαδικασία και μία από τις πιο σύγχρονες τεχνικές που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια είναι αυτή της συμβολομετρίας με ραντάρ συνθετικού ανοίγματος και ιδιαίτερα η τεχνική των σταθερών σκεδαστών με τη μέθοδο των χρονοσειρών (PS-InSAR).

Στα πρώτα κεφάλαια της εργασίας πραγματοποιείται ανάλυση του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων (Κεφάλαιο 2) και των καθιζήσεων (Κεφάλαιο 3), καθώς και των αιτιών πρόκλησής τους και των μηχανισμών εκδήλωσής τους. Στη συνέχεια, επεξηγούνται η μέθοδος της συμβολομετρίας και η τεχνική PS-InSAR (Κεφάλαιο 4). Ακολουθεί η ανάλυση της περιοχής μελέτης, των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών χαρακτηριστικών της, καθώς και των τιμών των μηνιαίων βροχοπτώσεων και της αύξησης της στάθμης της θάλασσας (Κεφάλαιο 5). Τέλος, παρουσιάζεται η διαδικασία της επίλυσης που πραγματοποιήθηκε (Κεφάλαιο 6) και τα αποτελέσματα αυτής, ενώ γίνεται και συσχέτιση με τα προαναφερόμενα δεδομένα και τα δεδομένα πεδίου (Κεφάλαιο 7 και 8).

## 2. Φαινόμενο εδαφικών υποχωρήσεων

Ως εδαφική υποχώρηση ορίζεται η σταδιακή υποχώρηση ή ξαφνική καταβύθιση της επιφάνειας του εδάφους χωρίς πλευρικές διογκώσεις. Κατά το φαινόμενο αυτό οι βασικές διαδικασίες που πραγματοποιούνται είναι η αναδιάταξη των κόκκων το οποίο συνδυάζεται με την απόρριψη του περιεχόμενου, μεταξύ των κόκκων, νερού και την στερεοποίηση του εδάφους. (Mahmoudpour et al. 2016)

### 2.1. Αιτίες πρόκλησης εδαφικών υποχωρήσεων

#### 2.1.1. Φυσικές αιτίες

- Η φυσική στερεοποίηση υπο-στερεοποιημένων εδαφικών σχηματισμών
- Η κατάρρευση διαβρωσιγενών κοιλοτήτων, κυρίως σε εβαποριτικούς και δευτερευόντως ανθρακικούς σχηματισμούς. Η κατάρρευση αυτή μπορεί να οφείλεται είτε σε προοδευτική διάβρωση, είτε λόγω αύξησης των φορτίσεων της οροφής.
- Η ενεργός τεκτονική

#### 2.1.2. Ανθρωπογενείς αιτίες

- Η αφαίρεση ρευστών από το έδαφος

Η απομάκρυνση ενός ρευστού από το έδαφος συνεπάγεται αύξηση των ενεργών τάσεων και στερεοποίηση του σχηματισμού. Κατά τη διάρκεια της στερεοποίησης, οι εδαφικοί κόκκοι επαναπροσανατολίζονται και καλύπτουν τα κενά τα οποία καταλαμβάνονταν προηγουμένως από το ρευστό. Έτσι, αυξάνεται η πυκνότητα του εδάφους που υφίσταται την όλη διαδικασία και κατά συνέπεια μειώνεται ο όγκος του. Η κυριότερη αιτία πρόκλησης εδαφικών υποχωρήσεων είναι η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα από υπεράντληση λόγω άναρχης εντατικοποίησης των αντλήσεων σε αγροτικές περιοχές. Ωστόσο, όταν τα φαινόμενα αυτά είναι εκτεταμένα οι συνέπειές τους εμφανίζονται και σε κατοικημένες περιοχές.

Κύριοι παράγοντες οι οποίοι συμβάλουν στην υπεράντληση υδάτων σε μια περιοχή είναι η αύξηση του πληθυσμού, η εκβιομηχάνιση περιοχών καθώς και η αυξημένη γεωργική δραστηριότητα.

- Η οξείδωση οργανικών εδαφών ως συνέπεια του υποβιβασμού της στάθμης των υδροφόρων.

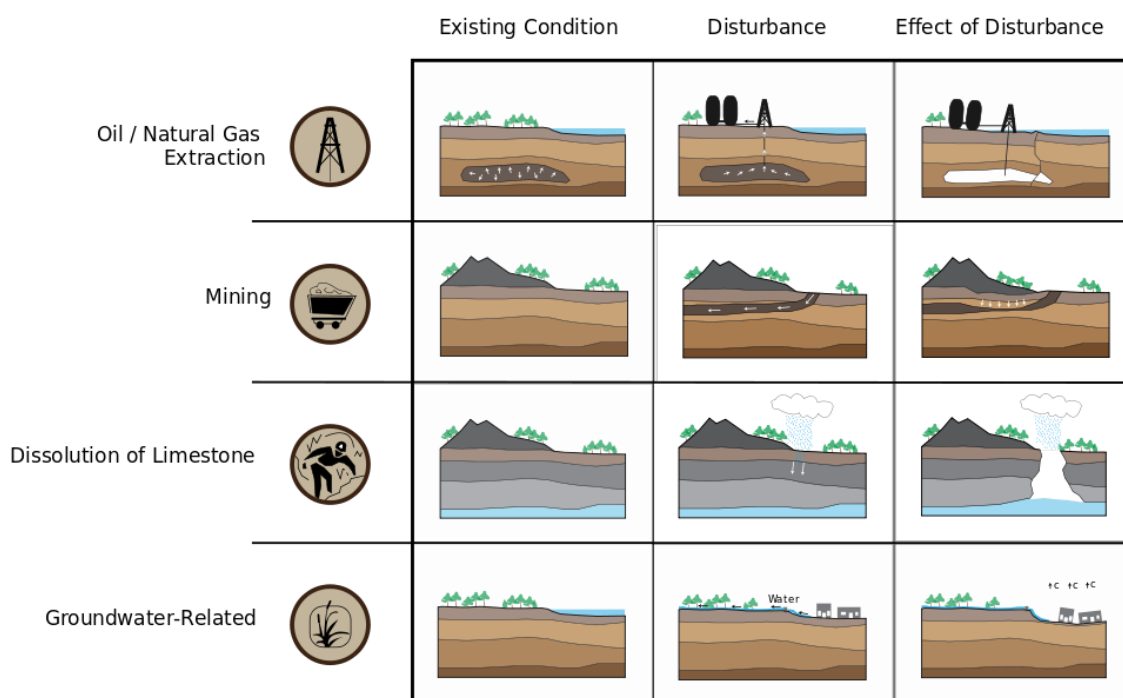
Η οξείδωση οργανικών εδαφών εκδηλώνεται σε εδάφη πλούσια σε οργανικό περιεχόμενο όταν αυτά αποστραγγίζονται. Όταν η στάθμη των υδροφόρων

υποβιβαστεί, μπορεί να οδηγήσει στην οξείδωση του οργανικού μέρους του εδαφικού σχηματισμού. Κατά τη διάρκεια της οξείδωσης, το οργανικό περιεχόμενο αντιδρά με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας και μετατρέπεται σε διοξείδιο του άνθρακα και νερό. (Λουπασάκης 2013)

Μετά την αποστράγγιση άλλοι μηχανισμοί μπορούν επίσης να εκδηλωθούν όπως:

- Ξήρανση και συρρίκνωση
  - Διάβρωση από το νερό και τον αέρα
  - Καύση του οργανικού περιεχομένου επί σκοπό ή από ατύχημα
- Η κατάρρευση ανθρωπογενών κοιλοτήτων (π.χ. στοές, θάλαμοι μεταλλείων, θύλακες υδρογονανθράκων κ.α.).

Ένας άλλος παράγοντας πρόκλησης εδαφικών υποχωρήσεων είναι η μεταλλευτική δραστηριότητα. Η τελευταία μπορεί να προκαλέσει κατάρρευση των ανθρωπογενών κοιλοτήτων στην περίπτωση αφαίρεσης της υποστήριξης στοών ενός μεταλλείου ή ορυχείου, με τη μορφή σταδιακής καταστροφής των στοιχείων υποστήριξης και τελικά τη εμφάνισή της στην επιφάνεια. (Λουπασάκης 2013)



Εικόνα 1. Αιτίες που προκαλούν εδαφικές υποχωρήσεις



## 2.2. Ομοιόμορφες – Διαφορικές υποχωρήσεις εδάφους

Ανάλογα με τον τρόπο εμφάνισής τους, οι εδαφικές υποχωρήσεις διακρίνονται σε ομοιόμορφες και σε διαφορικές εδαφικές υποχωρήσεις.

Οι ομοιόμορφες υποχωρήσεις εμφανίζονται με συμμετρικές υποχωρήσεις του εδάφους. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο να μην δημιουργούνται έντονα προβλήματα στα έργα (π.χ. ρωγμές), τα οποία μπορεί να βρίσκονται στην περιοχή.

Αντιθέτως, οι διαφορικές υποχωρήσεις συνήθως εμφανίζουν πολλά και έντονα σημάδια στα τεχνικά έργα. Αυτός ο τύπος υποχωρήσεων κάνει την εμφάνισή του σε περιπτώσεις όπου υπάρχει διαφοροποίηση των συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να οφείλονται σε:

- Διαφοροποίηση του πάχους των συμπιεστών εδαφικών σχηματισμών λόγω της ανισότροπης απόθεσης των ιζημάτων
- Διαφοροποίηση του πάχους των συμπιεστών εδαφικών σχηματισμών λόγω διακυμάνσεως στο βάθος εμφάνισης των σχηματισμών του υποβάθρου
- Διαφοροποίηση του πάχους των συμπιεστών εδαφικών σχηματισμών λόγω εμφάνισης ρήγματος

## 2.3. Επιπτώσεις

- Εδαφικές διαρρήξεις
- Αστοχίες δύσκαμπτων κτιριακών κατασκευών
- Φθορές στα γραμμικά δίκτυα παροχών κοινής ωφέλειας καθώς και στα έργα οδοποιίας
- Προέλαση της θάλασσας στην ενδοχώρα
- Καταστροφή υδρογεωτρήσεων

## 3. Καθίζήσεις

Ως καθίζηση ορίζεται η υποχώρηση του επιπέδου έδρασης μιας κατασκευής λόγω παραμόρφωσης του υποκείμενου εδάφους, χωρίς πλευρική διόγκωση. Η καθίζηση οφείλεται αποκλειστικά σε αναδιάταξη των κόκκων με το χρόνο και μείωση του δείκτη πόρων του εδάφους, με απομάκρυνση του νερού των πόρων, στην περιοχή της φόρτισης.

### 3.1. Στάδια καθίζησης

#### 3.1.1. Αρχική καθίζηση (άμεση ή αστράγγιστη)

Η αρχική καθίζηση παρατηρείται μετά την εφαρμογή της φόρτισης. Είναι αποτέλεσμα των διατμητικών τάσεων που αναπτύσσονται και πραγματοποιείται

με σταθερό όγκο και χωρίς αποστράγγιση του νερού των πόρων. Το μέγεθός της είναι συνήθως μικρό.

### 3.1.2. Καθίζηση λόγω στερεοποίησης

Στερεοποίηση των εδαφικών υλικών ονομάζεται το φαινόμενο κατά το οποίο τα κορεσμένα εδάφη δεν παρουσιάζουν άμεση απόκριση (δηλαδή παραμόρφωση) στην επιβολή εξωτερικών φορτίων αλλά αντίθετα παραμορφώνονται επί αρκετό χρόνο μετά την επιβολή της φόρτισης. Τούτο συμβαίνει, επειδή οι παραμορφώσεις τους συνδέονται με ταυτόχρονη διαφυγή του νερού των πόρων, η οποία δεν μπορεί να συμβεί ακαριαία. Το φαινόμενο της στερεοποίησης οφείλεται στη μεγάλη διαφορά συμπιεστότητας μεταξύ του εδαφικού σκελετού και του νερού των πόρων. Καθώς οι εδαφικοί κόκκοι και το νερό των πόρων είναι πρακτικά ασυμπίεστα, η μεταβολή του όγκου ενός κορεσμένου εδαφικού στοιχείου πρέπει να συνοδεύεται από ισόποση διαφυγή ή εισρόφιση νερού. Κατά την εξέλιξη του φαινομένου της στερεοποίησης τα εξωτερικώς επιβεβλημένα φορτία, που αρχικώς αναλαμβάνονται εξ' ολοκλήρου από την υγρή φάση με τη μορφή υδατικών υπερπίεσεων, βαθμιαίως αναλαμβάνονται από τον εδαφικό σκελετό με την αύξηση των ενεργών τάσεων, την ταυτόχρονη μείωση των υδατικών υπερπίεσεων και τη συνεχιζόμενη παραμόρφωση του εδάφους. (Kanvadas 2006; Loupasakis 2013)

Πιο αναλυτικά, η διαφυγή του νερού μέσα από τους πόρους του εδάφους δεν συμβαίνει ακαριαία αλλά διαρκεί για κάποιο χρονικό διάστημα. Είναι προφανές ότι όσο μικρότερο είναι το μέγεθος των εδαφικών πόρων (όσο δηλαδή πιο λεπτόκοκκο είναι το εδαφικό υλικό), τόσο περισσότερο παρεμποδίζεται η διόδος του νερού και καθυστερεί η διαφυγή του, με συνέπεια να καθυστερεί και η συμπίεση του εδάφους. Κατά την επιβολή του φορτίου το νερό διαφεύγει και ο όγκος του μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα το έδαφος συμπιέζεται, υποχωρεί και αναλαμβάνει πλέον μέρος του φορτίου. Με την πάροδο του χρόνου και τη συνεχιζόμενη διαφυγή νερού το έδαφος συνεχίζει να συμπιέζεται και να αναλαμβάνει διαρκώς μεγαλύτερο φορτίο. Ταυτόχρονα η υπερπίεση των πόρων διαρκώς μειώνεται, λόγω της διαφυγής του νερού, η οποία θα συνεχισθεί έως ότου διαφύγει αρκετή ποσότητα νερού, ώστε το έδαφος να συμπιεσθεί επαρκώς και να αναλάβει το σύνολο του εξωτερικώς επιβεβλημένου φορτίου. Τότε το νερό θα πάψει να διαφεύγει επειδή δεν θα διαθέτει πλέον την απαραίτητη υπερπίεση. (Kanvadas 2006; Loupasakis 2013)

Αντίστοιχο φαινόμενο στερεοποίησης παρατηρείται και κατά τη μείωση των επιβεβλημένων φορτίων. Στην περίπτωση αυτή η μείωση των φορτίων δημιουργεί υδατικές υποπίεσεις (δηλαδή μείωση των πιέσεων πόρων), οι οποίες με τη βαθμιαία εισροή νερού στους πόρους σταδιακά μειώνονται και τελικώς

μηδενίζονται με ταυτόχρονη διόγκωση του εδαφικού σκελετού και μείωση των ενεργών τάσεων. (Καννβας 2006)

Ο συντελεστής μονοδιάστατης στερεοποίησης για ένα ισότροπο γραμμικό έδαφος δίνεται από την σχέση (Barnes 2010):

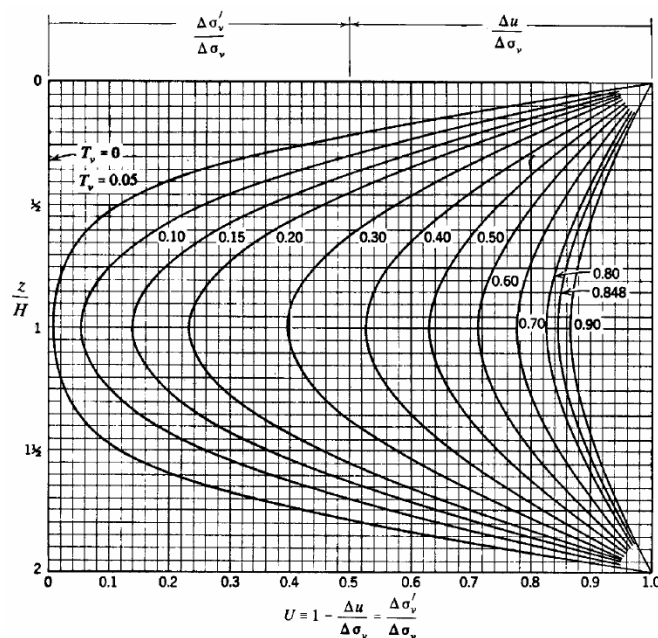
$$C_v = \frac{k}{m_v * \gamma_w} \quad (1)$$

Όπου:

$k$ , ο συντελεστής διαπερατότητας

$m_v$ , ο συντελεστής συμπίεστότητας

Στο παρακάτω νομογράφημα του Taylor 1948 αναπαρίστανται ο προσδιορισμός του παράγοντα χρόνου  $T_v$  σε συνάρτηση με το βάθος και το βαθμό στερεοποίησης  $U$ . Ο συντελεστής  $T_v$ , που εκφράζει το χρόνο με αδιάστατη μορφή, ονομάζεται χρονικός παράγων και καθορίζει τη χρονική κλίμακα εξέλιξης του φαινομένου της στερεοποίησης. (Καννβας 2006)



Εικόνα 2. Νομογράφημα προσδιορισμού του παράγοντα χρόνου,  $T_v$ , σε συνάρτηση με το βάθος και το βαθμό στερεοποίησης,  $U$  (Taylor, 1948).

1. Στην αρχή του φαινομένου της στερεοποίησης, δηλαδή για μικρές τιμές του χρονικού παράγοντα, οι κλίσεις του διαγράμματος των υπερπίεσεων πόρων κοντά στα άνω και κάτω όρια (δηλαδή κοντά στα όρια στράγγισης) είναι πολύ μεγάλες, με συνέπεια οι ταχύτητες ροής στις περιοχές αυτές να είναι πολύ μεγάλες. Αντίθετα, στην περιοχή περί το μέσον του στρώματος οι κλίσεις είναι μικρές σε όλους τους χρόνους (και μάλιστα, ακριβώς στο μέσον η κλίση είναι συνεχώς μηδέν), που σημαίνει ότι στις περιοχές αυτές η ταχύτητα ροής είναι μικρή (ακριβώς στο μέσον η ταχύτητα ροής είναι μηδέν λόγω συμμετρίας).
2. Στις περιοχές κοντά στα όρια στράγγισης οι υπερπίεσεις πόρων μειώνονται ραγδαία και, κατά συνέπεια, οι ενεργές τάσεις αυξάνονται με τους ίδιους ταχείς ρυθμούς, δηλαδή οι περιοχές κοντά στα όρια στράγγισης συμπιέζονται πρώτες, ενώ κοντά στο μέσον η συμπίεση είναι ακόμη πολύ μικρή (μεγάλες τιμές της υπερπίεσης πόρων  $\Delta u$ ).

Η χρονική εξέλιξη των υποχωρήσεων της επιφάνειας του εδάφους παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα με την αδιάστατη μορφή του βαθμού στερεοποίησης  $U$ , που ορίζεται από τη σχέση:

$$\bar{U}(t) = \frac{\delta(t)}{\delta(\infty)} \quad (2)$$

Ο ρυθμός εξέλιξης των υποχωρήσεων της επιφάνειας είναι ταχύς στην αρχή της στερεοποίησης (μικρά  $T_v$ ) και βαθμιαία μειώνεται για μεγαλύτερους χρόνους. Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει μερικές χαρακτηριστικές τιμές της σχέσης  $U = f(T_v)$  (Kavvas 2006; Loupasakis 2013).

Πίνακας 1. Αντιστοιχία τιμών του παράγοντα χρόνου  $T_v$  και του βαθμού στερεοποίησης

U%	$T_v$
0	0
5	0,0017
10	0,0077
15	0,0177
20	0,0314
25	0,0491
30	0,0707
35	0,0962
40	0,126
45	0,159
50	0,196
55	0,238
60	0,286
65	0,342
70	0,403
75	0,477
80	0,567
85	0,684
90	0,848
95	1,129
100	$\infty$

Η χρονική εξέλιξη του φαινομένου της μονοδιάστατης στερεοποίησης εξαρτάται από τον αδιάστατο χρονικό παράγοντα:

$$T_v = \frac{c_v}{H^2} t = \frac{k}{m_v * \gamma_w * H^2} t \quad (3)$$

Όπου:

$k$ , ο συντελεστής διαπερατότητας

$m_v$ , ο συντελεστής συμπιεστότητας

$\gamma_w$ , το ειδικό βάρος του νερού

$H$ , η απόσταση αποστράγγισης

Από το παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

1. Ο ρυθμός εξέλιξης της στερεοποίησης είναι ανάλογος του συντελεστή διαπερατότητας και του μέτρου μονοδιάστατης συμπίεσης του εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι σε εδάφη με μεγάλη διαπερατότητα (π.χ. αμμώδη) και μεγάλο μέτρο συμπίεσης (π.χ. με πυκνή δομή) το φαινόμενο της στερεοποίησης εξελίσσεται ραγδαία και η εκτόνωση των υπερπιέσεων πόρων συντελείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα. Αντίθετα, σε εδάφη με μικρή διαπερατότητα και μικρό μέτρο συμπίεσης (π.χ. μαλακές αργίλους) η στερεοποίηση διαρκεί επί μεγάλο χρονικό διάστημα.

2. Ο ρυθμός εξέλιξης της στερεοποίησης είναι αντιστρόφως ανάλογος του τετραγώνου του πάχους της συμπιεστής στρώσης. Έτσι, αν διπλασιασθεί το πάχος της συμπιεστής στρώσης, τετραπλασιάζεται ο χρόνος που απαιτείται για να συντελέσει η στερεοποίηση.

#### 3.1.2.1. Καθιζήσεις σε αμμώδη εδάφη

Γενικά τα αμμώδη εδάφη παρουσιάζουν μεγάλη διαπερατότητα και για αυτό το λόγο η εκτόνωση της πίεσης του νερού των πόρων γίνεται αμέσως μετά την επιβολή της φόρτισης. Το φορτίο παραλαμβάνεται πρακτικά άμεσα από τον εδαφικό σκελετό και συνεπώς οι καθιζήσεις στα αμμώδη εδάφη είναι άμεσες και ελαστικές.

#### 3.1.2.2. Καθιζήσεις σε συνεκτικά εδάφη

Αντιθέτως, τα συνεκτικά εδάφη παρουσιάζουν πολύ μικρή διαπερατότητα και η αναπτυσσόμενη λόγω των φορτίων υπερπίεση του νερού των πόρων αργεί πολύ να εκτονωθεί. Η διαδικασία ανάληψης του φορτίου από τον εδαφικό σκελετό εξελίσσεται με αργό ρυθμό και συνεπώς οι καθιζήσεις στα συνεκτικά (λεπτόκκοκα) εδάφη εξελίσσονται το ίδιο. Κατά τη στερεοποίηση παρατηρείται προοδευτική μείωση του πορώδους στα αργιλικά εδάφη.

Προκειμένου να εξετάσουμε το φαινόμενο των καθιζήσεων λόγω στερεοποίησης πρέπει να υπολογίσουμε τις παραμέτρους συμπιεστότητας  $C_c$  και  $C_r$  (από τη λογαριθμική σχέση τάσης- παραμόρφωσης στη δοκιμή οίδημέτρου).

Πρέπει να επισημανθεί πως οι καθιζήσεις στα αργιλικά εδάφη επηρεάζονται από το βαθμό στερεοποίησης (OCR) των αργιλικών εδαφών.

$$OCR = \frac{\sigma'_{v,p}}{\sigma'_{v,n}} \quad (4)$$

Όπου:

$\sigma'_{v,p}$ : Η κατακόρυφη ενεργός τάση που ασκήθηκε στο έδαφος στο παρελθόν

$\sigma'_{v,n}$ : Η κατακόρυφη ενεργός τάση που ασκείται τώρα στο έδαφος

Ανάλογα με το βαθμό στερεοποίησης τα αργιλικά εδάφη χωρίζονται σε δύο (2) κατηγορίες:

a) Κανονικά στερεοποιημένες αργίλους

Οι κανονικά στερεοποιημένες αργίλοι δεν έχουν δεχτεί στο παρελθόν φορτία μεγαλύτερα από αυτά που τώρα δρουν πάνω τους. Έχουν βαθμό στερεοποίησης  $OCR = 1$

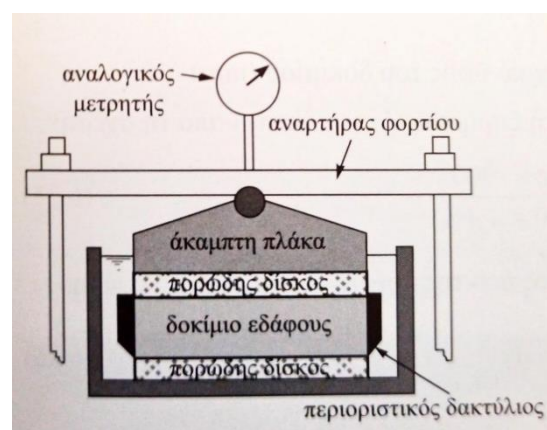
b) Υπερστερεοποιημένες αργίλους

Οι υπερστερεοποιημένες αργίλοι είναι εδάφη στα οποία η κατακόρυφη ενεργός τάση που αναπτύχθηκε στο παρελθόν υπήρξε μεγαλύτερη από αυτήν που παρατηρείται σήμερα. Τα εδάφη αυτά έχουν βαθμό στερεοποίησης  $OCR > 1$ .

Οι παράμετροι συμπίεστος,  $C_c$ , και επανασυμπίεστος,  $C_r$ , μπορούν να υπολογιστούν μέσω της εργαστηριακής δοκιμής συμπίεστος (οιδήμετρο) η οποία είναι αλλιώς γνωστή ως δοκιμή μονοδιάστατης στερεοποίησης.

### 3.1.2.3. Δοκιμή Συμπίεστος (Οιδήμετρο) ή Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης

Η μελέτη της μονοδιάστατης παραμόρφωσης και στερεοποίησης ενός αδιατάραχτου ή αναζυμωμένου εδαφικού δοκιμίου, υπό την επίδραση κατακόρυφου φορτίου και με περιοριζόμενη πλευρική παραμόρφωση, μελετάται με τη Δοκιμή Μονοδιάστατης Στερεοποίησης ή Δοκιμή Οιδημέτρου, η οποία ανταποκρίνεται τέλεια στο ρεολογικό μοντέλο του Terzaghi. (Loupasakis 2013; Papacharisis et. al 2015)



Εικόνα 3. Σκαρίφημα της δοκιμής συμπίεσιόμετρου (αριστερά) και η διάταξη στο εργαστήριο (δεξιά)

Η δοκιμή του οιδημέτρου σχεδιάστηκε για να αναπαράγει τη μονοδιάστατη στερεοποίηση και διαθέτει (Barnes 2010):

1. Έναν περιοριστικό δακτύλιο, που εμποδίζει τις πλευρικές παραμορφώσεις, δημιουργεί συνθήκες  $K_0$  και εμποδίζει την πλευρική αποστράγγιση, εξασφαλίζοντας έτσι συνθήκες μονοδιάστατης αποστράγγισης. Η εσωτερική επιφάνεια πρέπει να είναι ομαλή και καλυμμένη με υλικό χαμηλής τριβής ή λιπαντικό, ώστε να ελαχιστοποιείται η τριβή στα τοιχώματα καθώς μειώνεται το πάχος του δοκιμίου.
2. Πορώδεις δίσκους άνω και κάτω, που συμπεριφέρονται ως διαπερατά όρια και σε συνδυασμό με ένα σχετικά λεπτό δοκίμιο αποτελούν τα ελάχιστα μήκη διαδρομών αποστράγγισης. Αυτό πρέπει να επιτρέπει την ολοκλήρωση της στερεοποίησης σε κάθε βήμα αύξησης της ασκούμενης πίεσης σε βολικό χρόνο περίπου 24 ωρών. Ένα τυπικό ύψος δοκιμίου είναι 19 ή 20 mm, με διαμέτρους 75 ή 100 mm. Με παχύτερα δοκίμια η επιφάνεια του περιοριστικού δακτυλίου παράγει υπερβολική τριβή κατά τη διάρκεια της φόρτισης, υπερβολική διατάραξη κατά τη διάρκεια της ετοιμασίας του και ο απαιτούμενος χρόνος για τη στερεοποίηση αυξάνεται. Από την άλλη πλευρά, το δοκίμιο πρέπει να είναι τουλάχιστον πέντε φορές παχύτερο από τη διάμετρο του μεγαλύτερου κόκκου για να αποφευχθούν φαινόμενα αλληλεπίδρασης.
3. Μια δύσκαμπτη πλάκα φόρτισης που εξασφαλίζει ίσες καθιζήσεις.
4. Μια δεξαμενή νερού στην οποία βυθίζεται το δείγμα και οι πορώδεις πέτρες για να εξασφαλιστεί ο πλήρης κορεσμός. Για αυτό, όλα τα μεταλλικά στοιχεία πρέπει να μην είναι ευπαθή σε διάβρωση. Το νερό προστίθεται μετά την τοποθέτηση του δοκιμίου και τη συναρμολόγηση του πλαισίου φόρτισης, επειδή μερικά εδάφη μπορεί να έχουν την τάση να διογκώνονται με την παρουσία νερού και άλλα μπορεί να καθιζήσουν γρήγορα λόγω δομικής κατάρρευσης από τη διαβροχή. Αυτή η συμπεριφορά θα ερευνηθεί ξεχωριστά.

Κατά τη δοκιμή επιβάλλεται φόρτιση στο δοκίμιο μέσω μιας δοκού ή ενός αναρτήρα φορτίων και ενός συστήματος μοχλών με ρυθμιστικά αντίβαρα και λόγο φορτίου περίπου 10:1, ώστε μια σχετικά μικρή μάζα στον αναρτήρα να μπορεί να παράγει στο δοκίμιο τις μεγάλες τάσεις που απαιτούνται. (Barnes 2010)

Αρχικά εφαρμόζεται μια τάση προκειμένου το δείγμα να επαναφερθεί κοντά στην ενεργό τάση της φυσικής του θέσης ( $P_0'$ ).

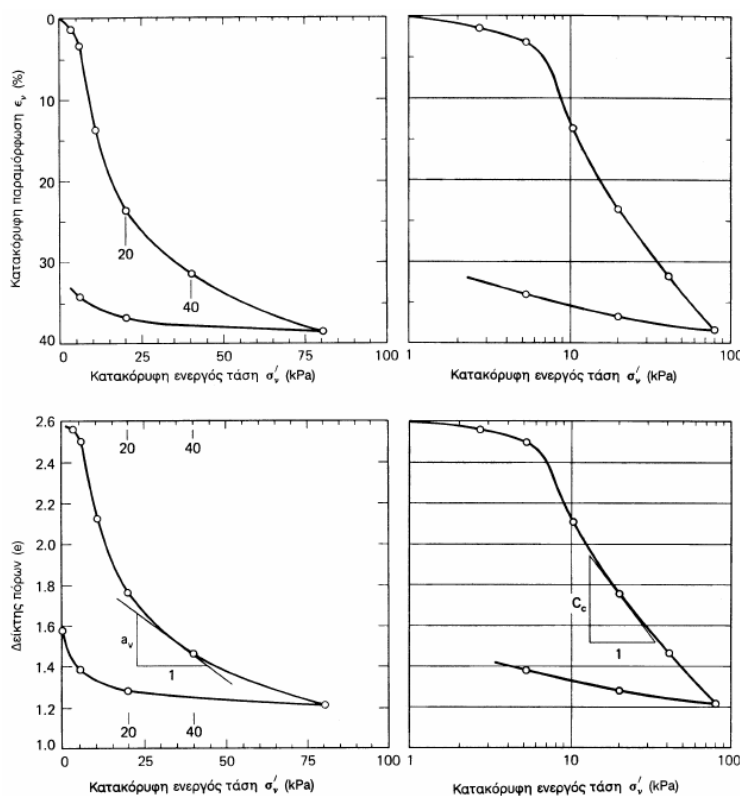
Στη συνέχεια, ακολουθείται σταδιακή αύξηση της τάσης επάνω από την  $P_0'$ . Συνήθως επιλέγονται 4 έως 6 βήματα αύξησης του φορτίου και 1 ή 2 βήματα αποφόρτισης με την εξής συνιστώμενη σειρά:

6, 12, 25, 50, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 kPa



Μικρότερα βήματα μπορούν να εφαρμοστούν σε δείγματα που έχουν ληφθεί από μικρά βάθη και για μικρές ασκούμενες πιέσεις από την κατασκευή. Αν το έδαφος είναι υπερστερεοποιημένο, η φόρτιση πρέπει να συνεχιστεί μέχρι την περιοχή της κανονικής στερεοποίησης, ώστε να προκύψει ένα μέτρο για την τάση προστερεοποίησης.

Η μεταβολή στο πάχος του δοκιμίου (είτε συμπίεση είτε διόγκωση) μετράται με έναν αναλογικό μετρητή ή ένα ηλεκτρικό μηκυνσιόμετρο που έχει εισαχθεί στη δοκό φόρτισης. Οι αναγνώσεις στην αρχή, όταν το πάχος του δοκιμίου μεταβάλλεται γρήγορα, πρέπει να γίνονται σε συχνά διαστήματα και στη συνέχεια σε πιο αραιά. (Loupasakis 2013)



Εικόνα 4. Τυπική δοκιμή μονοδιάστατης συμπίεσης μαλακής αργίλου (Constantinos Loupasakis 2013)

στη φύση υφίσταται κάποια κατακόρυφη τάση, αφαιρεθεί από το έδαφος (αποφόρτιση), τοποθετηθεί στη συσκευή του συμπιεσομέτρου και επαναφορτισθεί, τότε κατά την επαναφόρτιση η συμπίεστότητά του είναι μικρή μέχρις ότου η κατακόρυφη τάση φθάσει την προηγούμενη μέγιστη τάση (την τάση προστερεοποίησης). Με την περαιτέρω αύξηση της κατακόρυφης τάσης, η συμπίεστότητα του δοκιμίου αυξάνει απότομα και, στη συνέχεια, η καμπύλη φόρτισης ακολουθεί τον κλάδο της μονοδιάστατης συμπίεσης. (Kanvadas 2006)

Στην Εικόνα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μίας τυπικής δοκιμής μονοδιάστατης συμπίεσης σε μαλακή άργιλο αργίλου. Στα διαγράμματα η κατακόρυφη τάση μετράται σε γραμμική και σε λογαριθμική κλίμακα.

Παρατηρείται ότι για κατακόρυφη τάση 6 kPa η συμπίεστότητα του δοκιμίου αυξάνει απότομα.

Η απότομη αύξηση της συμπίεστότητας συμβαίνει όταν το δοκίμιο φορτισθεί με τάση ίση με τη μέγιστη τάση που του έχει επιβληθεί στο παρελθόν (τη λεγόμενη τάση προστερεοποίησης).

Εάν ένα εδαφικό δοκίμιο, που

Από τη δοκιμή οιδημέτρου λαμβάνονται οι εξής παράμετροι:

1. Το αρχικό και το τελικό ποσοστό υγρασίας, η φαινόμενη πυκνότητα, η ξηρή πυκνότητα, και ο βαθμός κορεσμού
2. Ο δείκτης πόρων στο τέλος κάθε αύξησης της τάσης.
3. Ο συντελεστής συμπίεσης  $C_c$

$$C_c = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (5)$$

4. Ο συντελεστής διόγκωσης  $C_s$

$$C_s = -\frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'_v} \quad (6)$$

5. Ο συντελεστής επανασυμπίεσης  $C_r$
6. Το μέτρο ελαστικότητας συμπίεσομέτρου,  $E_{oed}$

$$E_{oed} = \frac{\Delta \sigma'_v}{\Delta e} \quad (7)$$

7. Ο συντελεστής συμπίεστότητας όγκου  $m_v$ , για κάθε αύξηση της φόρτισης

$$m_v = \frac{\Delta H}{H} \frac{1}{\Delta \sigma'_v} = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'_v} \quad (8)$$

8. Ο συντελεστής στερεοποίησης  $c_v$
9. Ο συντελεστής δευτερεύουσας στερεοποίησης,  $C_a$

$$C_a = \frac{\Delta e}{\log \frac{t_2}{t_1}} \quad (9)$$

Ο δείκτης διόγκωσης,  $C_s$ , εκφράζει το πόσο διογκώνεται ο εδαφικός σχηματισμός κατά το στάδιο της αποφόρτισης. Ο δείκτης επανασυμπίεσης,  $C_r$ , εκφράζει το

πόσο συμπιέζεται ο εδαφικός σχηματισμός κατά το στάδιο της επανασυμπίεσης. (Loupasakis 2013; Papacharisis et al. 2015)

Σε ένα διάγραμμα δείκτη πόρων-ενεργού τάσης, ο δείκτης  $C_c$  αντιπροσωπεύει την κλίση της γραμμής κανονικής στερεοποίησης μόνο, και ο δείκτης  $C_r$  την κλίση του κλάδου υπερστερεοποίησης στη γραμμή επαναφόρτισης. Ο δείκτης  $C_s$  χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των μετακινήσεων ανύψωσης υπό στραγγισμένες συνθήκες, όταν αφαιρούνται οι τάσεις από το έδαφος. Τυπικά ο λόγος των δύο τιμών είναι κατά προσέγγιση:  $C_s \approx 0.1-0.3 \cdot C_c$ .

Οι τιμές που λαμβάνονται από τη δοκιμή συμπεσιμομέτρου μπορεί να είναι υπερεκτιμημένες λόγω της διατάραξης του δοκιμίου. (Barnes 2010)

### 3.1.3. Δευτερογενής στερεοποίηση - ερπυσμός

Η δευτερογενής στερεοποίηση παρατηρείται μετά το τέλος της στερεοποίησης, σε συνάρτηση με το χρόνο, και δεν έχει σχέση με την μεταβολή της πίεσης των πόρων. Τα αίτια και ο μηχανισμός ανάπτυξης της δευτερογενούς καθίζησης φαίνεται ότι ποικίλλουν στα διάφορα εδάφη.

- Αναδιάταξη των δυνάμεων. Ορισμένα τμήματα του εδάφους δέχονται ως επί το πλείστον το μεγαλύτερο μέρος των δυνάμεων και κάποια άλλα όχι.
- Στην τύρφη, για παράδειγμα, η οξειδωση της οργανικής ύλης μπορεί να προκαλέσει δευτερογενή στερεοποίηση (ή ερπυσμό), καθώς το νερό που συνδέεται με την οργανική ύλη χάνεται με την πάροδο του χρόνου. Σε πολλές περιπτώσεις το ποσοστό του νερού φτάνει το 70% του δείγματος.
- Η ασβεστολιθική άμμος ή πετρώματα μπορεί να διαλυθούν κάτω από όξινες βροχές.

## 4. Μέθοδοι παρατήρησης – μέτρησης εδαφικών υποχωρήσεων και καθιζήσεων

Η μέτρηση και η παρατήρηση του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων αποτελούν τα κύρια εργαλεία για την κατανόηση και αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού.

Η παρακολούθηση του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με ποικίλους τρόπους όπως:

- Γεωδαιτικές τεχνικές και έρευνες επίγειου εδάφους
  - ο Μέθοδος ακριβούς διαφορικής μέτρησης μεταβολής επιπέδου  
Η παραπάνω μέθοδος είναι μια σχετικά απλή και ακριβής μέθοδος μέτρησης εδαφικών υποχωρήσεων, κατά την οποία γίνεται χρήση κλασικών τοπογραφικών οργάνων μέτρησης. Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή είναι χρονοβόρα και δαπανηρή καθώς απαιτούνται συνεχείς έλεγχοι και μετρήσεις. Η αρχή της μεθόδου είναι η εύρεση και χρήση σταθερών σημείων αναφοράς έξω από την επηρεαζόμενη περιοχή. Στην τελευταία τοποθετούνται «σημάδια». Ο συνδυασμός των σταθερών σημείων και των «σημαδιών» δημιουργεί ένα δίκτυο σημείων αναφοράς. Κατά την περίοδο της έρευνας γίνονται συχνοί έλεγχοι και μετρήσεις στο δίκτυο ώστε να μπορέσουν να γίνουν αντιληπτές Οι τυχόν κατακόρυφες μετακινήσεις σε σύγκριση με τα σημεία αναφοράς γίνονται αντιληπτές μέσω συνεχών ελέγχων και μετρήσεων.
  - ο Συγκλισιόμετρα  
Το συγκλισιόμετρα είναι ένα όργανο το οποίο αποτελείται από ένα μηχανήμα εγγραφής και ένα σωλήνα ή καλώδιο. Το συγκλισιόμετρα τοποθετείται εντός του εδάφους και έως ένα καθοριζόμενο βάθος και εκτείνεται έως την επιφάνεια του εδάφους. Κατά την συμπίεση του εδάφους, το καταγραφικό του οργάνου σημειώνει την μεταβολή της σχετικής απόστασης μεταξύ της βάσης οργάνου και της επιφάνειας εδάφους. Αυτές οι μετρήσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν σε διάφορα βάθη. Η εγκατάσταση των συγκλισιόμετρα είναι σχετικά απλή και γίνεται σε προσεκτικά επιλεγμένα σημεία.
- Υπέργειες μέθοδοι παρατήρησης
  - ο Μέθοδοι που βασίζονται σε δορυφορικά δεδομένα, όπως η χρήση του Παγκόσμιου Συστήματος Στιγματοθέτησης (Global Positioning System – GPS)

Το Παγκόσμιο Σύστημα Στιγματοθέτησης είναι ένα παθητικό, δορυφορικό σύστημα πλοήγησης. Η λειτουργία του βασίζεται στη λήψη σημάτων από τουλάχιστον τέσσερις δορυφόρους και στην χρήση συγκεκριμένων σταθμών GPS, με γνωστές συντεταγμένες, εγκατεστημένων σε διάφορα επίγεια σημεία. Το σύστημα αυτό προσδιορίζει επακριβώς τόσο τρισδιάστατες θέσεις (X, Y, Z) όσο και πληροφορίες χρόνου σε σχέση με ένα καλά καθορισμένο παγκόσμιο σύστημα γεωκεντρικής αναφοράς. Όσον αφορά περιοχές μελέτης μεγάλης έκτασης, η χρήση GPS έχει μεγαλύτερη ακρίβεια από τις συμβατικές μεθόδους. Η χρήση του συστήματος αυτού μπορεί να είναι συνεχής, ανεξάρτητη του χρόνου ή των καιρικών συνθηκών που επικρατούν, ενώ η ακρίβειά του αναφέρεται σε αρκετά mm. Παρόλα αυτά, στα σήματα μπορεί να περιέχονται σφάλματα και θορύβοι, προερχόμενα από καθυστερήσεις και εμπόδια στην διαδρομή του σήματος μέσω της ατμόσφαιρας.

- ο Σύστημα Εικονοληπτικής Συμβολομετρίας Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (Interferometric Synthetic Aperture Radar – InSAR).

Η τεχνική μέτρησης με χρήση του συστήματος εικονοληπτικής συμβολομετρίας ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (Interferometric Synthetic Aperture Radar – InSAR) άρχισε να χρησιμοποιείται ευρέως κατά τη δεκαετία του 1990. Η τεχνική InSAR χρησιμοποιείται για την εξαγωγή πληροφοριών σχετικά με παραμορφώσεις της επιφάνειας του εδάφους έχοντας υψηλή ανάλυση και χωρική λεπτομέρεια. Για τους υπολογισμούς γίνεται χρήση εικόνων από ραντάρ συνθετικού ανοίγματος σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Η διαφορά φάσης των λήψεων οι οποίες πραγματοποιήθηκαν στην ίδια περιοχή, από σχεδόν ίδια γωνία εμφάνισης, αξιοποιείται προκειμένου να δημιουργηθεί ένας συμβολομετρικός χάρτης μετακινήσεων - συμβολογράφημα (interferogram). Ο χάρτης αυτός περιλαμβάνει διάφορες πληροφορίες, όπως τοπογραφικές πληροφορίες και πληροφορίες μετατόπισης, ατμοσφαιρικά αποτελέσματα, τροχιακά σφάλματα και θορύβους. Στη συνέχεια υπόκειται σε διάφορα στάδια επεξεργασίας με σκοπό την δημιουργία ενός ψηφιακού μοντέλου παραμορφώσεων της υπό μελέτη περιοχής.

## 5. Τηλεπισκόπηση

Η τηλεπισκόπηση είναι ένας τρόπος συλλογής πληροφοριών για διάφορα αντικείμενα, χρησιμοποιώντας όργανα που δεν έρχονται σε επαφή με τα αντικείμενα αυτά, μέσω της αλληλεπίδρασής τους με την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Στην τηλεπισκόπηση είναι απαραίτητα τρία (3) στοιχεία:

1. Μία πλατφόρμα στην οποία είναι τοποθετημένο το όργανο μέτρησης
2. Ένα αντικείμενο προς παρατήρηση
3. Ένα όργανο μέτρησης ή αισθητήρας με τον οποίο παρατηρείται το αντικείμενο

Κατά την τηλεπισκόπηση πραγματοποιείται ανίχνευση και καταγραφή της ανακλώμενης ή της εκπεμπόμενης ενέργειας από τους στόχους, και επεξεργασία των δεδομένων αυτών. (European Space Agency 2010)

Η χρήση των συστημάτων ραντάρ για εφαρμογές τηλεπισκόπησης στηρίζεται στη λειτουργία ενός αισθητήρα ραντάρ εγκαταστημένου σε μια κινούμενη πλατφόρμα (π.χ. αεροπλάνο ή δορυφόρος), ο οποίος καταγράφει την ένταση και την φάση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται από τους στόχους στην επιφάνεια της Γης. (Natural Resources Canada 2019; Delikaraoglou 2005)

Τα συστήματα αυτά χωρίζονται σε παθητικά και ενεργητικά συστήματα.

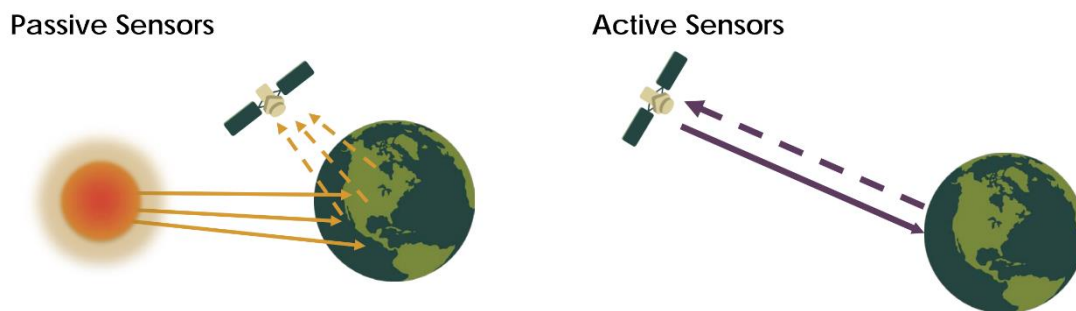
### 5.1. Παθητικά συστήματα δορυφόρων

Τα παθητικά συστήματα δορυφόρων κάνουν χρήση της φυσικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από διάφορα φυσικά και άλλα αντικείμενα, καθώς και την ενέργεια ειδικών στόχων από άλλες πηγές (π.χ. θερμική ακτινοβολία) για τη λήψη μετρήσεων. Η χρήση τους ωστόσο είναι δυνατή μόνο όταν η ενέργεια αυτή είναι διαθέσιμη. Όσον αφορά την ηλιακή ενέργεια αυτό μπορεί να γίνει την ημέρα, όπου ο ήλιος φωτίζει τη γη. Ένα μειονέκτημα των παθητικών συστημάτων είναι ότι με τους αισθητήρες τους δεν μπορούν να ληφθούν καλής ποιότητας εικόνες σε ομίχλη, όταν παρεμβάλλονται σύννεφα ή σε σκοτάδι. (Natural Resources Canada 2019; Delikaraoglou 2005)

### 5.2. Ενεργητικά συστήματα δορυφόρων

Τα ενεργητικά συστήματα εκπέμπουν τα ίδια την απαιτούμενη για τις μετρήσεις ενέργεια. Ο δορυφόρος εκπέμπει ακτινοβολία με κατεύθυνση προς τον στόχο που επιθυμείται να διερευνηθεί. Η ακτινοβολία που ανακλάται από τον στόχο στη συνέχεια ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή του δορυφόρου. Σε αντίθεση με τους παθητικούς δορυφόρους, οι ενεργητικοί έχουν την δυνατότητα λήψης μετρήσεων

οποιασδήποτε στιγμή. Στην κατηγορία των ενεργών συστημάτων ανήκουν και τα RADAR. Επιπλέον, επειδή τα μήκη κύματος των σημάτων ραντάρ είναι πολύ πιο μεγάλα από εκείνα της ακτινοβολίας του ορατού ή υπέρυθρου φωτός, τα ενεργητικά συστήματα μπορούν επίσης να πραγματοποιήσουν μετρήσεις υπό νεφελώδεις συνθήκες, ύπαρξη ομίχλης και αιθαλομίχλης. (Natural Resources Canada 2019; Delikaraoglou 2005)



Εικόνα 5. Παθητικά και ενεργητικά συστήματα (EarthData - NASA. 2021)

### 5.3. RADAR

Η ονομασία RADAR προέρχεται από τους αγγλικούς όρους RAdio Detection And Ranging, δηλαδή ανίχνευση ραδιοκυμάτων και μέτρηση απόστασης.

Ένα τυπικό ραντάρ μετρά τη ένταση της ενέργειας και το χρόνο της διπλής διαδρομής των κυμάτων που εκπέμπονται από μια κεραία και ανακλώνται από την επιφάνεια διαφόρων αντικειμένων που παρεμβάλλονται στην πορεία τους. Το φάσμα των συχνοτήτων του RADAR είναι περίπου από 300 MHz μέχρι 30 GHz.

Το μήκος κύματος είναι αυτό το οποίο καθορίζει το βάθος διείσδυσης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας στον κάθε στόχο. Όσο μεγαλύτερο το μήκος κύματος τόσο μεγαλύτερο το βάθος διείσδυσης στο στόχο. Λόγω του μεγάλου φασματικού εύρους που λειτουργούν τα RADAR δίνεται η δυνατότητα επιλογής ζώνης μήκους κύματος (καναλιού) στο οποίο θα εκπέμπουν. (Natural Resources Canada 2019)

### 5.4. Γεωμετρία λήψης εικόνων με RADAR

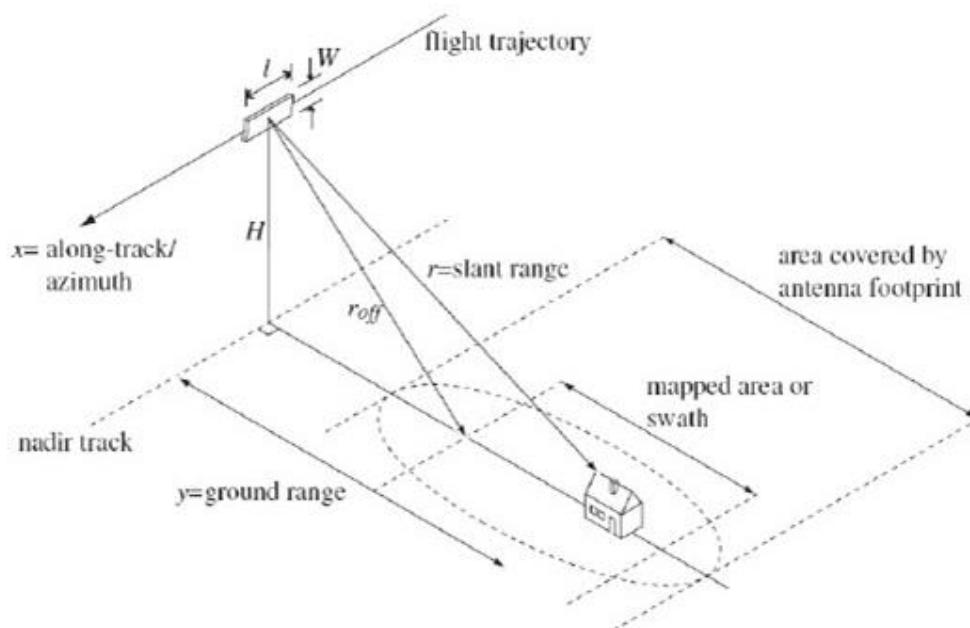
Η διαδρομή που ακολουθεί ο δορυφόρος ονομάζεται τροχιά. Οι περισσότεροι δορυφόροι βρίσκονται σε σχεδόν πολικές τροχιές, πράγμα που σημαίνει πως ταξιδεύουν προς τον Βόρειο Πόλο στη μία πλευρά της Γης (ανοδική σάρωση) και στη συνέχεια προς τον Νότιο Πόλο στο δεύτερο μισό της τροχιάς του (καθοδική σάρωση). Εάν η τροχιά έχει συγχρονιστεί με τον ήλιο, τότε το ανερχόμενο

πέρασμα είναι πιθανότατα στη σκιασμένη πλευρά της Γης, ενώ το κατερχόμενο στην φωτισμένη πλευρά της Γης. (Natural Resources Canada 2019)

Καθώς ο δορυφόρος περιστρέφεται γύρω από τη Γη, το RADAR «βλέπει» ένα συγκεκριμένο μέρος της επιφάνειας της Γης. Η περιοχή αυτή ονομάζεται λωρίδα (swath). Το πλάτος της λωρίδας ποικίλει μεταξύ δεκάδων και εκατοντάδων χιλιομέτρων. Η τροχιά του δορυφόρου σε συνδυασμό με τη περιστροφή της Γης επιτρέπει στη λωρίδα του δορυφόρου να καλύπτει νέα περιοχή με κάθε διαδοχικό πέρασμα. Θεωρώντας ένα σημείο πάνω στη τροχιά του δορυφόρου, τότε ένας κύκλος τροχιάς θα ολοκληρωθεί όταν ο δορυφόρος επανέλθει στο ίδιο σημείο. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για ολοκληρώσει ο δορυφόρος το κύκλο τροχιάς και η περίοδος «επανεπίσκεψης» του σημείου διαφέρουν εξαιτίας των κατευθυνόμενων αισθητήρων του δορυφόρου, οι οποίοι του δίνουν τη δυνατότητα να «δει» μία περιοχή πριν και μετά τη διέλευσή του πάνω από το στόχο (off-nadir). Συνεπώς, ο χρόνος «επανεπισκέψης» είναι μικρότερος από το χρόνο κύκλου τροχιάς. (Natural Resources Canada 2019)

Ο δορυφόρος έχει την κεραία του στραμμένη προς το έδαφος. Η διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου είναι παράλληλη με τη διεύθυνση απεικόνισης η οποία ονομάζεται αζιμούθιο (azimuth). Η προβολή της τροχιάς στο έδαφος ονομάζεται ναδίρ (nadir). Η κλίση της κεραίας σε σχέση με την προβολή της τροχιάς στο έδαφος ονομάζεται off-nadir angle και αναλόγως το σύστημα κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 20° και 50°. Η πλευρική απόσταση (slant range) είναι αυτή μεταξύ του άξονα του δορυφόρου και του στόχου, ενώ η επίγεια απόσταση (ground range) υπολογίζεται από το σημείο ναδίρ έως τον στόχο. Η προαναφερόμενη λωρίδα εδάφους (swath) καταγράφεται μέσω δέσμης της κεραίας η οποία εκπέμπεται σε συγκεκριμένη γωνία, γωνία θέασης (look angle), σε σχέση με την προβολή της πλατφόρμας στο έδαφος, ναδίρ, κατά μήκος της δέσμης ραντάρ (Line Of Sight-LOS). Η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) είναι η σχηματιζόμενη γωνία της δέσμης με την κάθετη στην επιφάνεια. Η γωνία αυτή αυξάνεται όσο απομακρύνεται ο στόχος από το ναδίρ. Λόγω της καμπυλότητας της επιφάνειας της Γης, η γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) είναι μεγαλύτερη της off-nadir angle. Το τμήμα της λωρίδας το οποίο βρίσκεται πιο κοντά στο ναδίρ, καλείται εγγύς πλάγια απόσταση (near range) ενώ αυτό που βρίσκεται μακρύτερα, απώτερη πλάγια απόσταση (far range). (Natural Resources Canada 2019; Ferretti et al. 2007)





Εικόνα 6. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά λήψης εικόνας SAR

## 5.5. Συστήματα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar - SAR)

Το Synthetic Aperture Radar (SAR) είναι ένα σύστημα ραντάρ που παρέχει εικόνες τηλεπισκόπησης υψηλής ανάλυσης, ανεξάρτητα από την ύπαρξη σύννεφων και καιρικών συνθηκών. Καθώς το σύστημα ραντάρ κινείται κατά μήκος της τροχιάς του, εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς. Κάθε ένας από αυτούς τους παλμούς «φωτίζει» μια λωρίδα (strip ή swath) της επιφάνειας του εδάφους. (S.-D. E. Alatza 2020)

Ο όρος άνοιγμα υποδηλώνει το (φυσικό) άνοιγμα που χρησιμοποιείται για τη συλλογή της ανακλώμενης ενέργειας του παλμού του ραντάρ για τη διαμόρφωση μιας εικόνας. Ένα συνθετικό άνοιγμα δημιουργείται με την κίνηση του πραγματικού ανοίγματος (ή σωστότερα της αντένας) ενός ραντάρ μέσω μιας σειράς θέσεων κατά μήκος της διαδρομής πτήσης του αισθητήρα ραντάρ και συνδυάζεται με το φαινόμενο Doppler ώστε να προκύψουν οι απεικονίσεις. (Delikaraoglou 2005)

Εκ της φύσεώς τους ως ενεργά συστήματα τηλεπισκόπησης, τα συστήματα SAR, λειτουργούν συγχρόνως ως πομποί και ως δέκτες. Αυτό σημαίνει πως:

- Εκπέμπουν το σήμα τους προς την επιφάνεια της Γης σε τακτικά χρονικά διαστήματα (τυπικά 10-50  $\mu\text{sec}$ )

- Λαμβάνουν πίσω στην αντένα την ενέργεια που ανακλάται από τα διάφορα φυσικά ή άλλα αντικείμενα (τους λεγόμενους στόχους ή σκεδαστές) στην περιοχή υπερπτήσης του αισθητήρα που χρησιμοποιείται.
- Υπολογίζουν την απόσταση των στόχων από την αντένα του αισθητήρα μετρώντας το χρόνο της διπλής διαδρομής του σήματος και καταγράφουν το πλάτος, τη φάση και τη συχνότητα του ανακλώμενου σήματος.

Η ακτινοβολία, που μεταδίδεται από το RADAR, αλληλοεπιδρά με τους στόχους στο έδαφος και κατόπιν, επιστρέφει στο δέκτη. Οι ανακλαστές που βρίσκονται σε διαφορετικές αποστάσεις από το ραντάρ (διαφορετικά υψόμετρα και κλίσεις), προκαλούν διαφορετικούς χρόνους επιστροφής του εκπεμπόμενου σήματος. Λόγω των περιοδικών ιδιοτήτων και της ημιτονοειδούς φύσης των ραδιοκυμάτων, αυτή η καθυστέρηση μεταφράζεται σε αλλαγή φάσης μεταξύ των δύο σημάτων, που είναι ανάλογη με την απόσταση διαδρομής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. (Delikaraoglou 2005)

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R \quad (10)$$

Το μέγεθος ή η ένταση αυτής της οπισθοσκεδασμένης ενέργειας εξαρτάται από την αλληλεπίδραση της ενέργειας με την επιφάνεια, η οποία είναι συνάρτηση πολλών μεταβλητών και παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά του συστήματος ραντάρ (συχνότητα, γεωμετρία θέασης κ.λπ.) καθώς και τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τύπος κάλυψης εδάφους, τοπογραφία, ανάγλυφο κ.λπ.).

### 5.5.1. Ιδιότητες πηγής – Χαρακτηριστικά συστήματος ραντάρ

Οι ιδιότητες της πηγής διακρίνονται στα ακόλουθα:

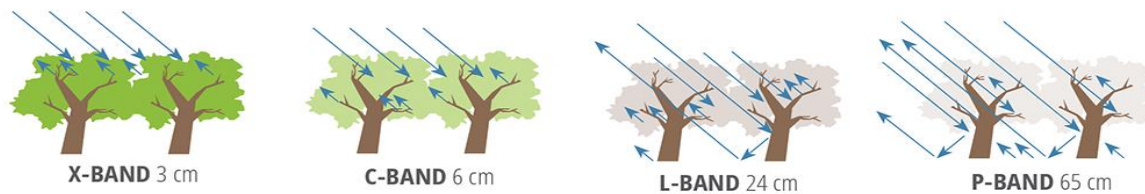
- Το μήκος κύματος ή τη συχνότητα του σήματος που χρησιμοποιείται.

Τα συστήματα SAR λειτουργούν σε ζώνη X, C, L ή P (Πίνακας 2).

Πίνακας 2. Ζώνες μήκους κύματος λειτουργίας συστημάτων SAR (EarthData - NASA 2020)

Ζώνη μήκους κύματος	Συχνότητα	Μήκος κύματος
X	8-12 GHz	3.8–2.4 cm
C	4-8 GHz	7.5–3.8 cm
L	1-2 GHz	30–15 cm
P	0.3-1 GHz	100–30 cm

Το μήκος κύματος είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, καθώς καθορίζει πώς το σήμα του ραντάρ αλληλοεπιδρά με την επιφάνεια και σε τι βάθος μπορεί να διεισδύσει. Ένα σύστημα SAR με ζώνη μήκους κύματος X (μήκος κύματος περίπου 3 cm) έχει πολύ μικρή ικανότητα να διεισδύσει στο πλατύφυλλο δάσος και έτσι αλληλοεπιδρά κυρίως με τα φύλλα στην κορυφή του θόλου του δέντρου. Αντιθέτως ένα σύστημα SAR με ζώνη μήκους κύματος L (μήκος κύματος περίπου 23 cm) μπορεί να διεισδύσει σε μεγαλύτερο βάθος σε μία δασική περιοχή, επιτρέποντας έτσι καλύτερη αλληλεπίδραση μεταξύ του σήματος και των κλαδιών και κορμών των δέντρων (Εικόνα 7). Το μήκος κύματος επηρεάζει επίσης και το βάθος διείσδυσης στο έδαφος και στον πάγο. (EarthData - NASA 2020)



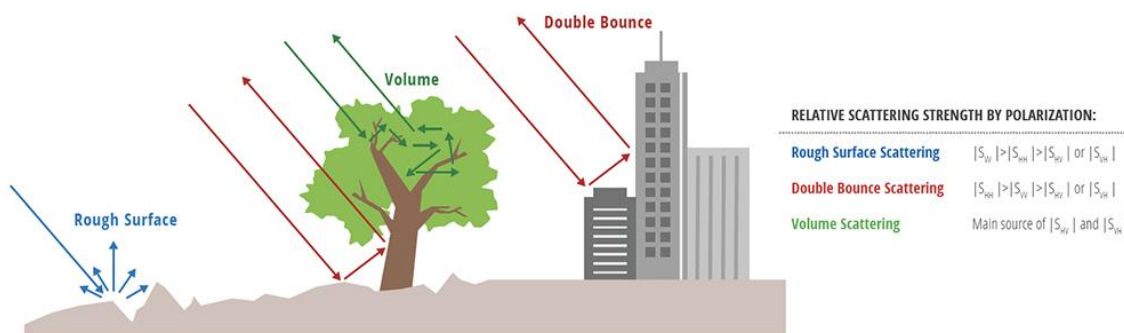
Εικόνα 7. Ευαισθησία των μετρήσεων SAR σε δασικές περιοχές και διείσδυση για διαφορετικά μήκη κύματος

- Το μέγεθος και τις διηλεκτρικές ιδιότητες των σκεδαστών στην εκάστοτε περιοχή που απεικονίζεται. (Delikaraoglou 2005)
- Την πόλωση των παλμών του σήματος. Στα συστήματα SAR η κεραία μπορεί να εκπέμπει και να δέχεται οριζόντια (H) ή κάθετη ηλεκτρομαγνητική (V) ακτινοβολία. Οι ιδιότητες της επιφάνειας της Γης μπορούν να επηρεάσουν την πόλωση του κύματος του ραντάρ, επηρεάζοντας τον τρόπο με τον οποίο φωτίζεται στις πολωμετρικές εικόνες ραντάρ. Η πολλαπλή πόλωση είναι σημαντική για τη διάκριση των επιφανειακών σκεδαστών, επομένως προτιμώνται διαφορετικοί τύποι πόλωσης ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εδάφους που μας ενδιαφέρει να προσδιορίσουμε. (Delikaraoglou 2005)

Πίνακας 3. Είδη πόλωσης ανά διάφορα στοιχεία (S.-D. E. Alatza 2020)

Χαρακτηριστικά εδάφους	Πόλωση
Τεχνητές Κατασκευές	HH
Βλάστηση	VH, HV
Έδαφος/Ωκεανοί	VV

Οι τύποι σκέδασης δεν συνεισφέρουν εξίσου σε όλα τα είδη πόλωσης. Αντίθετα, κάθε είδος πόλωσης «προτιμά» ορισμένους τύπους σκέδασης (Πίνακας 3 και Εικόνα 8). Η ισχυρή σκέδαση σε HH υποδηλώνει την κυριαρχία της σκέδασης διπλής αναπήδησης (double-bounce) (π.χ. τεχνητές κατασκευές), ενώ η ισχυρή σκέδαση σε VV σχετίζεται με τραχιές επιφάνειες (π.χ. έδαφος, νερό). Τέλος οι χωρικές διακυμάνσεις στη διπλή πόλωση υποδεικνύουν την ύπαρξη διασκορπισμού (π.χ. βλάστηση). (Franz 2019)



Εικόνα 8. Δύναμη σκέδασης ανά είδος πόλωσης (Franz 2019)

- Την γωνία πρόσπτωσης (incident angle) του παλμού σε σχέση με την κατακόρυφο στο εκάστοτε σημείο σκέδασης του σήματος. Παραδείγματος χάριν, όσο μικρότερες είναι οι γωνίες πρόσπτωσης τόσο μεγαλύτερη είναι η οπισθοσκέδαση που προκαλείται (Delikaraoglou 2005).

### 5.5.2. Ιδιότητες στόχου – Χαρακτηριστικά επιφάνειας

Οι ιδιότητες του στόχου διακρίνονται στα ακόλουθα:

- Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (τοπογραφία, μορφολογία, τραχύτητα του εδάφους)

Η τραχύτητα της επιφάνειας ελέγχει τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια μικροκυμάτων αλληλοεπιδρά με αυτήν την επιφάνεια ή τον στόχο και είναι γενικά ο κυρίαρχος παράγοντας για τον προσδιορισμό των τόνων που εμφανίζονται σε μια εικόνα ραντάρ.

Μια επιφάνεια θεωρείται «λεία» εάν οι διακυμάνσεις ύψους είναι πολύ μικρότερες από το μήκος κύματος του ραντάρ. Όταν οι διακυμάνσεις του ύψους της επιφάνειας αρχίσουν να πλησιάζουν το μέγεθος του μήκους κύματος, τότε η επιφάνεια θα παρουσιάζεται ως «τραχεία».

Μια λεία επιφάνεια προκαλεί κατοπτρική ανάκλαση (specular reflection) της προσπίπτουσας ενέργειας, δηλαδή όλο ή το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας κατευθύνεται μακριά από την επιφάνεια σε μία μοναδική κατεύθυνση μακριά από τον αισθητήρα, και έτσι μόνο μια μικρή ποσότητα ενέργειας επιστρέφεται στο ραντάρ. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι λείες επιφάνειες να εμφανίζονται ως πιο σκουρόχρωμες περιοχές σε μια εικόνα. (Natural Resources Canada 2019; Kouli 2015)

Αντιθέτως, μια τραχιά επιφάνεια θα διασκορπίσει την ενέργεια περίπου εξίσου προς όλες τις κατευθύνσεις και ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας θα κατευθυνθεί πίσω στο ραντάρ. Έτσι, οι τραχιές επιφάνειες θα παρουσιάζονται πιο ανοιχτόχρωμες σε μια εικόνα. (Natural Resources Canada 2019; Kouli 2015)

Τα περισσότερα αντικείμενα πάνω στην επιφάνεια της Γης βρίσκονται κάπου ανάμεσα στις δύο προαναφερόμενες περιπτώσεις. Ο τρόπος ανάκλασης εξαρτάται από την τραχύτητα της επιφάνειας πρόσπτωσης της ακτινοβολίας σε συνδυασμό με το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. (Natural Resources Canada 2019; Kouli 2015)

Για μια δεδομένη επιφάνεια και μήκος κύματος, η επιφάνεια θα φαίνεται πιο λεία καθώς αυξάνεται η γωνία πρόσπτωσης. Έτσι, καθώς κινούμαστε κατά μήκος της λωρίδας, από την εγγύς πλάγια απόσταση προς την απώτερη πλάγια απόσταση, λιγότερη ενέργεια θα επιστρέφει στον αισθητήρα και η εικόνα θα γίνεται όλο και πιο σκοτεινή. (Natural Resources Canada 2019; Kouli 2015)

- Διηλεκτρικές ιδιότητες των υλικών (π.χ. υγρασία)

Η παρουσία (ή απουσία) υγρασίας επηρεάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες ενός μέσου, καθώς επιδρά στην απορρόφηση, στη μετάδοση και στην ανάκλαση της ενέργειας των κυμάτων. Συνεπώς, θα επηρεαστεί ο τρόπος με τον οποίο οι επιφάνειες αντανακλούν την ενέργεια από το ραντάρ. Αύξηση της υγρασίας συνεπάγεται αύξηση της ανακλαστικής ικανότητας του μέσου. (Natural Resources Canada 2019)

- Συντονισμό της ακτινοβολίας

Ο συντονισμός της ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει σε ορισμένες περιπτώσεις την αύξηση της έντασης των οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων από κάποια πολύ μικρά σώματα έτσι ώστε να είναι πολύ πιο έντονα από σήματα μεγαλύτερων σωμάτων (μεταλλικές κατασκευές). (Natural Resources Canada 2019)

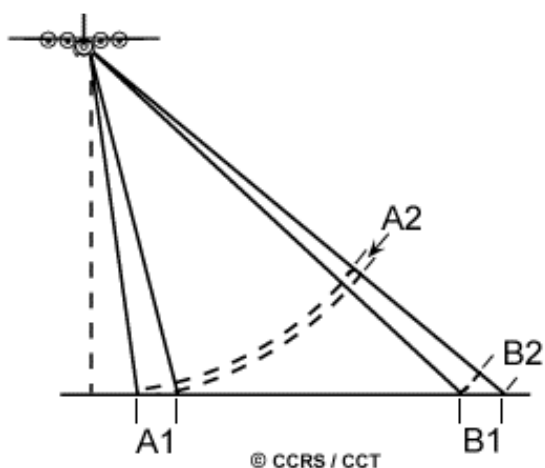
## 5.6. Χαρακτηριστικά απεικονίσεων SAR

Τα πρωτογενή δεδομένα, τα οποία λαμβάνονται, απαιτούν σημαντική επεξεργασία ώστε να δημιουργηθεί η εικόνα SLC (Single Look Complex), η οποία διατηρεί τις πληροφορίες της φάσης. Στα ακατέργαστα δεδομένα SAR πραγματοποιείται συμπίεση εύρους και αζιμουθίου (range and azimuth compression). Οι εικόνες SLC είναι αυτές που θα υποστούν περαιτέρω επεξεργασία προκειμένου να δημιουργηθεί το συμβολογράφημα.

Κατά τη διαδικασία αυτή δίνεται ιδιαίτερη σημασία στις ανεπιθύμητες παραμορφώσεις με προέλευση την καμπυλότητα της πλάγιας απόστασης, την περιστροφή της γης, την εκκεντρότητα της τροχιάς, τους θορύβους της πλατφόρμας και τη συνάφεια των οπισθοσκεδαζόμενων σημάτων. Τα παραπάνω διορθώνονται μέσω κανονικοποιήσεων στο σύστημα SAR και εφαρμογής μιας σειράς επαναληπτικών διορθωτικών διαδικασιών. Ωστόσο, υπάρχουν και οι γεωμετρικές παραμορφώσεις (πτύχωση, σμίκρυνση, σκίαση), οι οποίες προέρχονται από την γεωμετρία λήψης εικόνων με SAR. (Natural Resources Canada 2019; Delikaraoglou 2005)

### 5.6.1. Γεωμετρικές παραμορφώσεις

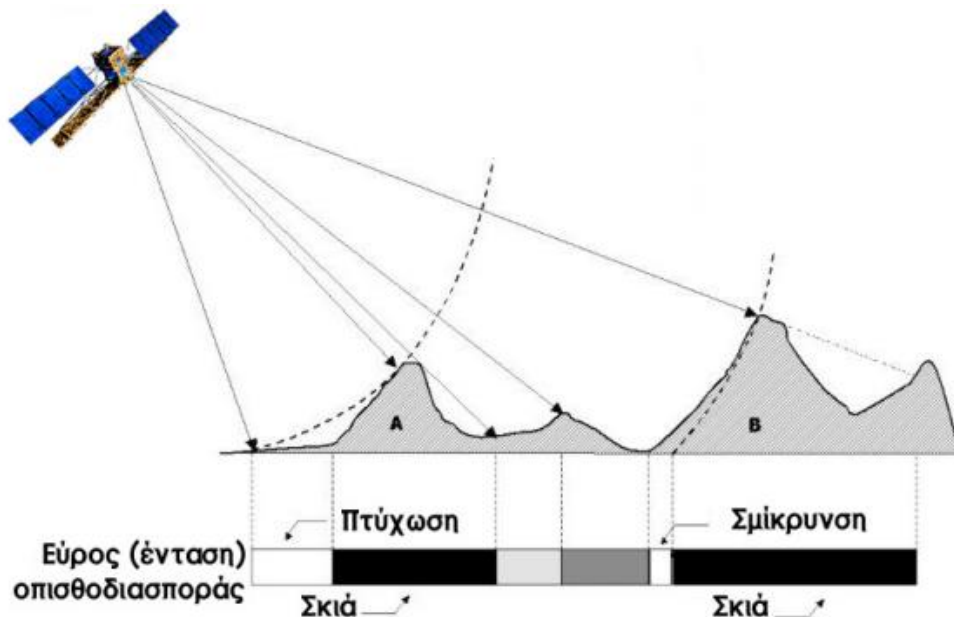
Η θέση ενός αντικειμένου στην επιφάνεια της Γης, όπως γίνεται αντιληπτή από το σύστημα RADAR, εξαρτάται από την απόσταση μεταξύ της πλατφόρμας και του στόχου. Επομένως, οι διαφοροποιήσεις του ανάγλυφου (relief displacement) μπορεί να αποτελέσουν πηγή παραμορφώσεων. (S.-D. E. Alatza 2020)



Εικόνα 9. Παραμορφώσεις στην πλευρική απόσταση (Natural Resources Canada 2019)

Παραμορφώσεις στην πλευρική απόσταση (slant-range distortions) συμβαίνουν επειδή το ραντάρ μετράει την απόσταση των στόχων σε πλευρική απόσταση και όχι στην οριζόντια απόσταση κατά μήκος του έδαφος. Παρόλο που οι στόχοι A1 και B1, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 9, έχουν το ίδιο μέγεθος στο έδαφος, οι φαινομενικές διαστάσεις τους σε πλευρική απόσταση (A2 και B2) είναι διαφορετικές. Έτσι, οι στόχοι στην εγγύς πλάγια απόσταση εμφανίζονται συμπιεσμένοι σε σχέση με την απώτερη πλάγια απόσταση. Μέσω τριγωνομετρίας, είναι δυνατόν να υπολογιστούν οι επίγειες αποστάσεις από τις πλευρικές αποστάσεις και το υψόμετρο της πλατφόρμας, για να γίνει η κατάλληλη μετατροπή. (Natural Resources Canada 2019)

Εξαιτίας των γεωμετρικών παραμορφώσεων προκαλούνται η σμίκρυνση (foreshortening) και η πτύχωση (layover).



Εικόνα 10. Τα φαινόμενα της πτύχωσης, σμίκρυνσης και σκίασης (Delikaraoglou 2005)

Όταν η δέσμη του ραντάρ φτάσει στη βάση ενός ψηλού στόχου, πριν φτάσει στην κορυφή του, τότε θα προκύψει σμίκρυνση. Αναλόγως με την γωνία κλίσης του στόχου, σε σχέση με την γωνία πρόσπτωσης της δέσμης, η σοβαρότητα της σμίκρυνσης ποικίλλει. Έντονα ανάγλυφα και μικρές γωνίες πρόσπτωσης αυξάνουν τη σοβαρότητα του φαινομένου της σμίκρυνσης. Η μέγιστη σμίκρυνση θα εμφανίζεται όταν η δέσμη του ραντάρ είναι κάθετη στην πλαγιά του στόχου του βουνού απεικονίζοντας ταυτόχρονα τη κορυφή και τους πρόποδες του βουνού (Εικόνα 10). Το μήκος της πλαγιάς θα μειωθεί σε ένα πραγματικό μήκος μηδέν στην πλευρική απόσταση. (Natural Resources Canada 2019; Delikaraoglou 2005; S.-D. E. Alatza 2020)

Η πτύχωση συμβαίνει, όταν η δέσμη του ραντάρ φτάσει στην κορυφή ενός ψηλού στόχου, πριν φτάσει στη βάση. Το σήμα επιστροφής από την κορυφή του στόχου θα ληφθεί πριν από το σήμα της βάσης. Ως αποτέλεσμα, η κορυφή του στόχου μετατοπίζεται προς το ραντάρ από την πραγματική του θέση στο έδαφος και «απλώνει» τη βάση του στόχου. Τα αποτελέσματα της πτύχωσης σε μία εικόνα ραντάρ παρουσιάζουν ομοιότητες με αυτά που οφείλονται στη σμίκρυνση. Όπως και με τη σμίκρυνση, η πτύχωση είναι πιο σοβαρή για μικρές γωνίες πρόσπτωσης, στην εγγύς πλαγιά απόσταση της λωρίδας και σε ορεινά εδάφη. (Natural Resources Canada 2019; Delikaraoglou 2005; S.-D. E. Alatza 2020)

Τόσο η σμίκρυνση όσο και πτύχωση προκαλούν σκίαση στις εικόνες του ραντάρ. Η σκίαση εμφανίζεται όταν η όπισθεν κλίση του εδάφους είναι μεγαλύτερη από

τη γωνία όρασης του ραντάρ. Εφόσον η δέσμη του ραντάρ δεν μπορεί να φτάσει την επιφάνεια του εδάφους, οι περιοχές θα εμφανίζονται σκοτεινές στην εικόνα. Αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης συνεπάγεται αύξηση των φαινομένων σκίασης καθώς η δέσμη του ραντάρ στοχεύει όλο και πιο λοξά την επιφάνεια. (Natural Resources Canada 2019)

Είναι σημαντικό να υπάρχει σωστή κατεύθυνση θέασης (look direction) στις ορεινές περιοχές, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα φαινόμενα της πτύχωσης και της σκίασης. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την απόκτηση εικόνων από διαφορετικές κατευθύνσεις θέασης. (Natural Resources Canada 2019)

Πρέπει να σημειωθεί ότι εάν είναι διαθέσιμο ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους της εικονιζόμενης περιοχής (Digital Elevation Model - DEM), οι εικόνες SAR μπορούν να διορθωθούν από τις παραπάνω παραμορφώσεις. (Delikaraoglou 2005)

### 5.6.2. Κηλίδωση

Η κηλίδωση αποτελεί μια μορφή έντονου θορύβου η οποία εμφανίζεται στις εικόνες με την παρουσία έντονων μεταβολών σε διαβαθμίσεις του γκρι για γειτονικά στοιχεία και είναι κοινή για όλα τα εικονοληπτικά συστήματα RADAR.

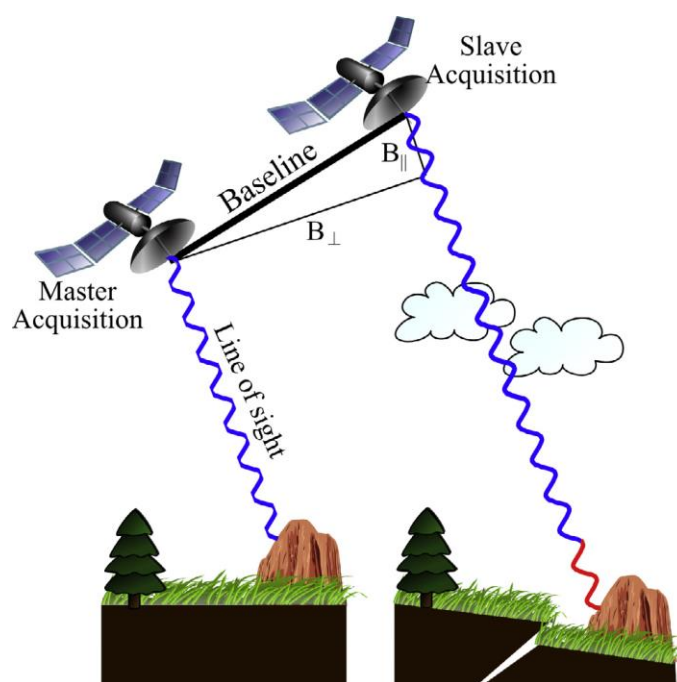
Η κηλίδωση είναι αποτέλεσμα της τυχαίας πολλαπλής σκέδασης των σκεδαστών που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους. Τα ανακλώμενα σήματα, τα οποία έχουν τυχαία φάση εξαιτίας των πολλαπλών ανακλάσεων μεταξύ των αντικειμένων, προστίθενται στην απευθείας ανακλώμενη ακτινοβολία. Όσο αυξάνεται η επιφάνεια του εδάφους που περιλαμβάνεται σε κάθε εικονοστοιχείο, τόσο μεγαλύτερος είναι και ο βαθμός κηλίδωσης.

Για την μείωση του φαινομένου αυτού, εφαρμόζονται μέθοδοι αφαίρεσης του αναφερόμενου θορύβου με χρήση χωρικού φίλτρου (spatial filtering) ή με την επεξεργασία περισσότερων εικόνων της ίδιας περιοχής σε διαφορετικούς χρόνους ή από ελαφρώς διαφορετικές γωνίες εμφάνισης (multi-look processing). (Natural Resources Canada 2019)



## 5.7. Συμβολομετρία SAR (Interferometric SAR - InSAR)

Η αρχή της συμβολομετρίας εκμεταλλεύεται τις διαφορές μεταξύ των εικόνων ραντάρ. Για να εφαρμοστεί η τεχνική της συμβολομετρίας, πρέπει να υπάρχουν τουλάχιστον δύο εικόνες του ίδιου στόχου. Η τεχνική InSAR εκμεταλλεύεται τη διαφορά φάσης μεταξύ δύο ή περισσότερων εικόνων SAR, που λαμβάνονται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας εικόνας, γνωστής ως συμβολογράφημα.



Εικόνα 11. Γεωμετρία συστήματος SAR.

Αναγράφονται το συμβολομετρικό διάνυσμα βάσης και το κάθετο διάνυσμα βάσης, καθώς και οι 2 τροχιές του δορυφόρου (Osmanoğlu et al. 2016)

Ένας δορυφόρος SAR μπορεί να περάσει από την ίδια περιοχή, με ελαφρώς διαφορετική γεωμετρία ή με διαφορετικές γωνίες θέασης και να εξάγει πληροφορίες σχετικά με την επιφάνεια της Γης όπως κινήσεις εδάφους, ή να παράγει ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους. Το παραπάνω επιτυγχάνεται είτε μέσω δύο ραντάρ, τοποθετημένων σε μια πλατφόρμα (single-pass interferometry) είτε από επαναλαμβανόμενες τροχιές του ίδιου ραντάρ (repeat-pass interferometry). Η απόσταση μεταξύ των δύο δορυφόρων (ή τροχιών) ονομάζεται συμβολομετρικό διάνυσμα βάσης (interferometer baseline). Η κάθετη προβολή του στη διεύθυνση παρατήρησης ονομάζεται κάθετο διάνυσμα βάσης (perpendicular baseline) (Ferretti et al. 2007). Τα παραπάνω αναπαρίστανται στην Εικόνα 11.

Το συμβολογράφημα SAR δημιουργείται μέσω πολλαπλασιασμού (cross-multiplying), εικονοστοιχείο προς εικονοστοιχείο, της πρώτης εικόνας SAR με το μιγαδικό συζυγές της δεύτερης. Έτσι, το πλάτος του συμβολογραφήματος είναι το πλάτος της πρώτης εικόνας πολλαπλασιασμένο με αυτό της δεύτερης, ενώ η φάση του (συμβολομετρική φάση) είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των εικόνων. (Ferretti et al. 2007)

Οι εικόνες SAR, που χρησιμοποιούνται, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, στις πρωτεύουσες (master) και δευτερεύουσες (slave), που εγγράφονται η μία επάνω στην άλλη με τη βοήθεια του Μοντέλου Ψηφιακού Εδάφους (DEM) και των δορυφορικών τροχιών. Η πρωτεύουσα εικόνα χρησιμοποιείται ως η «γραμμή

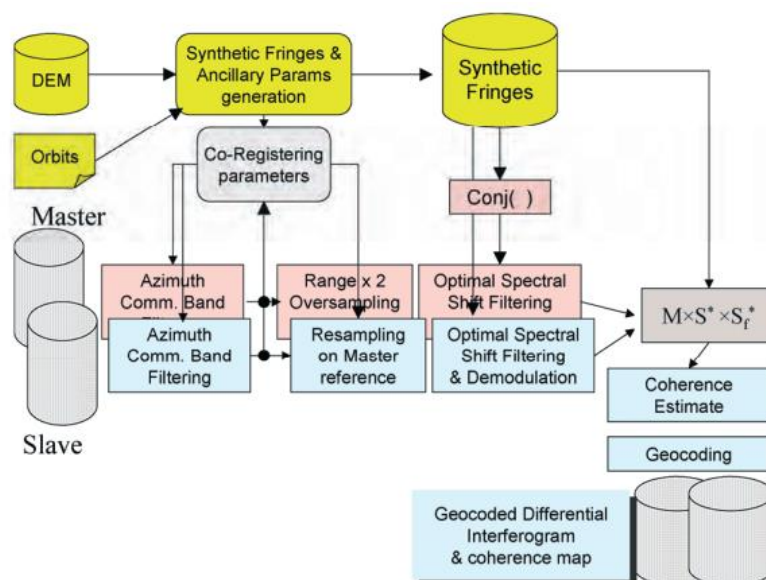
βάσης» για σύγκριση με τις δευτερεύουσες εικόνες προκειμένου να μετρηθούν τυχόν παραμορφώσεις με την πάροδο του χρόνου.

Τα προϊόντα, που προκύπτουν από την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας, είναι το συμβολογράφημα ή τα διαγράμματα συμβολής κροσσών.

Η τεχνική της συμβολομετρίας χρησιμοποιείται πλέον για ποικίλους σκοπούς όπως για την παρατήρηση παραμορφώσεων της επιφάνειας της Γης, της υδρολογίας, της δασολογίας, των εξορυκτικών δραστηριοτήτων και της εκμετάλλευσης αερίου ή πετρελαίου.

### 5.7.1. Βασικά βήματα της συμβολομετρικής επεξεργασίας

Τα βασικά βήματα της συμβολομετρικής επεξεργασίας αναπαρίστανται στο παρακάτω διάγραμμα και αναλύονται παρακάτω.



Εικόνα 12. Βασικά βήματα της συμβολομετρικής επεξεργασίας (Ferretti et al. 2007)

#### 5.7.1.1. Συμπροσαρμογή εικόνων SAR (Co-registration)

Οι εικόνες SAR συσχετίζονται με την παρεμβολή μιας εικόνας (slave) ή περισσότερων στην εικόνα αναφοράς (master). Η παρεμβολή αυτή πραγματοποιείται μεταξύ των εικονοστοιχείων τα οποία απεικονίζουν την ίδια τοποθεσία τόσο στη δευτερεύουσα εικόνα όσο και στην εικόνα αναφοράς. Αρχικά, όλες οι εικόνες (master και slave) αποκτούν την ίδια γεωχωρική πληροφορία και παρόμοιες διαστάσεις (InSAR Stack). Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ευθυγράμμιση μεταξύ των δευτερευουσών εικόνων και της εικόνας αναφοράς. Τέλος, γίνεται επαναδειγματοληψία εικονοστοιχείων των δευτερευουσών

εικόνων σε εικονοστοιχεία της εικόνας αναφοράς (Resample). Μετά τη συσχέτιση των εικόνων, γίνεται πολλαπλασιασμός όλων των αντίστοιχων εικονοστοιχείων των εικόνων και παράγεται η συμβολομετρική φάση. (S.-D. E. Alatza 2020; Ferretti et al. 2007)

Τη διαφορά της συμβολομετρικής φάσης ( $\Delta\Phi$ ) δύο εικόνων επηρεάζουν διάφοροι παράγοντες, όπως η καμπυλότητα της Γης, η τοπογραφία του εδάφους, οι παραμορφώσεις του εδάφους μεταξύ των χρονικών στιγμών λήψης των δύο εικόνων, τα τροχιακά σφάλματα, οι επιδράσεις της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας στα σήματα του ραντάρ και διάφοροι θόρυβοι των μετρήσεων. (Delikaraoglou 2005)

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{topography} + \Delta\varphi_{displacement} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{noise} + \Delta\varphi_{orbit} \quad (11)$$

- Η Εξίσωση 12 αναφέρεται στην επίδραση της καμπυλότητας της Γης.

$$\Delta\varphi_{flat} = \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{b_{\perp}s}{r \tan\theta} \quad (12)$$

Όπου:

$\lambda$ : μήκος κύματος ακτινοβολίας

$b_{\perp}$ : κάθετο διάνυσμα βάσης

$s$ : διαφορά μεταξύ των κεκλιμένων αποστάσεων των στόχων

$R$ : απόσταση μεταξύ της κεραίας του ραντάρ και του στόχου

$\theta$ : γωνία πρόσπτωσης ακτινοβολίας

- Η Εξίσωση 13 αναφέρεται στη συμβολή της φάσης λόγω της ελλιπούς γνώσης της τοπογραφίας.

$$\Delta\varphi_{topography} = \frac{-4\pi}{\lambda} \frac{b_{\perp}}{r \sin\theta} \Delta z \quad (13)$$

Όπου:

$\Delta z$ : η διαφορά μεταξύ των υψομέτρων

$\theta$ : η γωνία θέασης

$\lambda$ : μήκος κύματος ακτινοβολίας

$b_{\perp}$ : κάθετο διάνυσμα βάσης

$r$ : πλευρική απόσταση μεταξύ του δορυφόρου και του εδάφους

Με τη χρήση ενός εξωτερικού μοντέλου DEM η φάση της τοπογραφίας μπορεί να εξαλειφθεί.

- Η Εξίσωση 14 αναφέρεται στη συμβολή φάσης λόγω της πιθανής μετατόπισης του εδάφους μεταξύ των χρονικών στιγμών λήψης των εικόνων.

$$\Delta\varphi_{displacement} = \frac{4\pi}{\lambda} d_{LOS} \quad (14)$$

Το Line of Sight (LOS) είναι η προβολή του διανύσματος μετατόπισης κατά μήκος της δέσμης του ραντάρ.

- $\Delta\varphi_{atmosphere}$ , αναφέρεται στην επίδραση της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα και ιονόσφαιρα). Τα διάφορα στρώματα της ατμόσφαιρας έχουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης ο οποίος επηρεάζει τη διάδοση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που διαδίδεται μέσω της ιονόσφαιρας έχει την τάση να επιταχύνεται, ενώ η τροπόσφαιρα επιβραδύνει την ταχύτητα διάδοσης της ακτινοβολίας. Το σφάλμα στη μέτρηση της φάσης, που προκύπτει λόγω της ατμόσφαιρας, μπορεί να περιοριστεί με χρήση διάφορων μεθόδων, όπως επίγειες μετεωρολογικές παρατηρήσεις, χρήση ατμοσφαιρικών μοντέλων, δεδομένων GPS, πληροφορίες για την ατμοσφαιρική υγρασία διατιθέμενη από όργανα δορυφόρων με την τεχνική της συμβολομετρίας SAR σταθερών σκεδαστών (PSInSAR) κ.α..
- $\Delta\varphi_{noise}$ , οφείλεται στην παρουσία πολλών σκεδαστών εντός ενός κελιού ανάλυσης και τις χρονικές αλλαγές στα χαρακτηριστικά τους. Το φαινόμενο αυτό κυριαρχεί σε περιοχές με βλάστηση, όπου οι σκεδαστές

μπορεί να μην εντοπίζονται στο έδαφος, αλλά στον όγκο ενός δέντρου. Επιπλέον, μεγάλη συμβολομετρική βάση είναι μια ακόμη πηγή θορύβου.

#### 5.7.1.2. Συνάφεια (Coherence)

Η διαφορά των φάσεων μεταξύ δύο εικόνων SAR περιέχει πληροφορίες σχετικά με το «θόρυβο», όταν διάφορα φαινόμενα αποσυσχέτισης συμβαίνουν. Οι τιμές της συνάφειας κυμαίνονται μεταξύ 0, που αντιστοιχεί σε πλήρη αποσυσχέτιση, και 1, όταν δεν υπάρχει θόρυβος στην φάση. Οι χρονικές αλλαγές των χαρακτηριστικών σκέδασης ενός στόχου επηρεάζουν τη συνάφεια ενός συμβολομετρικού ζεύγους. Τα υδάτινα σώματα χαρακτηρίζονται από πλήρη αποσυσχέτιση και παρουσιάζονται σκοτεινά σε μια εικόνα συσχέτισης, λόγω της συνεχούς κίνησής τους. Η βλάστηση επίσης επηρεάζει τη συσχέτιση, καθώς η τελευταία μειώνεται με την αύξηση της πυκνότητας των βλάστησης ή του ύψους των καλλιεργειών. (Osmanoğlu et al. 2016)

Γενικά, η συνολική συνοχή μπορεί να περιγραφεί ως το άθροισμα των πηγών αποσυσχέτισης, όπως περιγράφεται στην Εξίσωση 15.

$$\gamma_{total} = \gamma_{spatial} + \gamma_{Doppler} + \gamma_{temporal} + \gamma_{thermal} \quad (15)$$

Όπου:

$\gamma_{total}$ : η συνολική συνάφεια

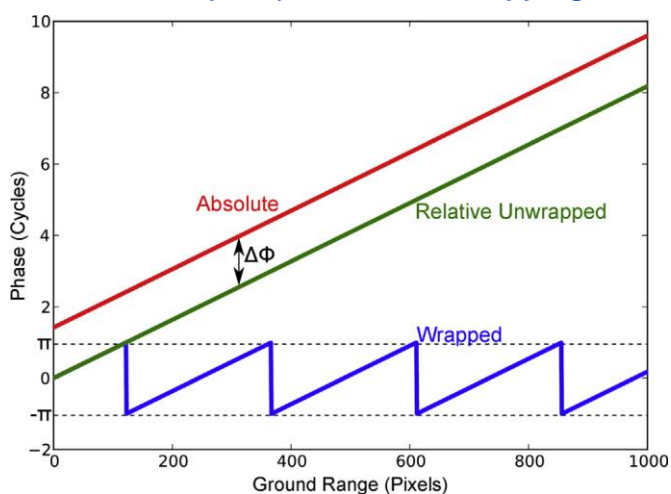
$\gamma_{spatial}$ : η χωρική αποσυσχέτιση της βάσης

$\gamma_{temporal}$ : η χρονική συνάφεια

$\gamma_{Doppler}$ : η κεντροειδής αποσυσχέτιση Doppler

$\gamma_{thermal}$ : η θερμική αποσυσχέτιση.

### 5.7.1.3. Ανακατασκευή ή αποκατάσταση της πλήρους συμβολομετρικής φάσης (Phase unwrapping)



Εικόνα 13. Διάγραμμα μετρούμενων, αποκατεστημένων, και απόλυτων τιμών φάσης

ακέραίου πολλαπλασίου του  $2\pi$  στις τιμές φάσης, έτσι ώστε να μπορεί να βρεθεί η πραγματική υψομετρική διακύμανση, ονομάζεται αποκατάσταση συμβολομετρικής φάσης (Delikaraoglou 2005). Η αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης πραγματοποιείται με τη χρήση σταθερών σημείων (stable points) τα οποία ονομάζονται και σημεία αναφοράς (reference point). Το σημείο αναφοράς είναι ένα σημείο το οποίο κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου, που πραγματοποιείται η ανάλυση, παρουσιάζει ελάχιστη διακύμανση της φάσης του και χρησιμοποιείται ως αναφορά για την αποκατάσταση της φάσης.

Το εξομαλυμένο συμβολογράφημα παρέχει μια μέτρηση του σχετικού υψομέτρου του εδάφους. Η πληροφορία που εκμεταλλεύεται η συμβολομετρία είναι η διαφορά φάσης μεταξύ των αντίστοιχων εικονοστοιχείων στις δύο εικόνες, η οποία μετρείται σε rad. Στο εξομαλυμένο συμβολογράφημα έχουν διαγραφεί οι ακέραιοι κύκλοι των τιμών φάσης, με αποτέλεσμα η διαφορά φάσης να κυμαίνεται από  $-\pi$  έως  $\pi$ . Η διαδικασία της εύρεσης και πρόσθεσης του κατάλληλου

## 5.8. Διαφορική συμβολομετρία SAR – DInSAR

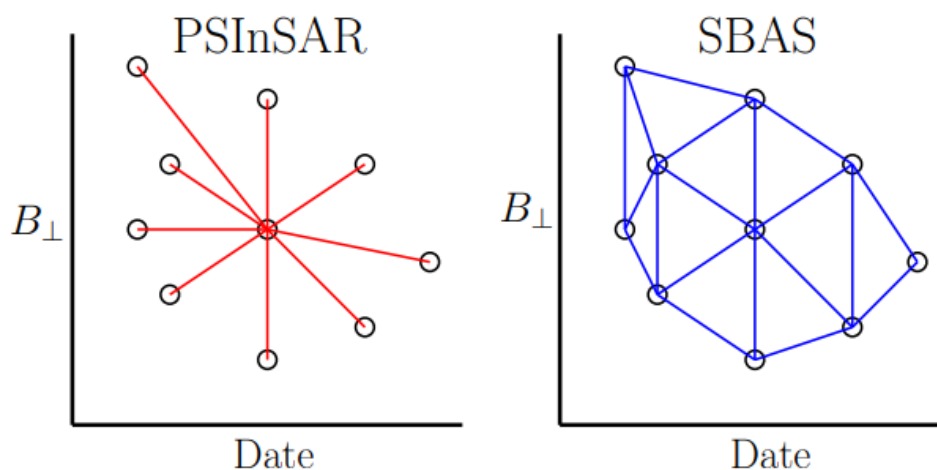
Η διαφορική συμβολομετρία SAR (Differential SAR Interferometry - DInSAR) αποτελεί επέκταση της βασικής συμβολομετρίας. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και παρακολούθηση παραμορφώσεων, που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια τους εδάφους, όπως καθιζήσεις, σεισμοί, κατολισθήσεις. Ο εντοπισμός των παραμορφώσεων πραγματοποιείται μέσω της σχετικής αλλαγής της θέσης διάφορων σκεδαστών μεταξύ δύο (2) διαφορετικών χρονικά λήψεων SAR.

Η βασική αρχή της διαφορικής συμβολομετρίας είναι ο διαχωρισμός και η απομάκρυνση της φάσης της τοπογραφίας από το συμβολόγραμμα, απομονώνοντας έτσι την φάση που αναπαριστά τις πραγματικές εδαφικές μετακινήσεις/παραμορφώσεις μεταξύ δύο λήψεων.

### 5.8.1. Διαχρονική συμβολομετρία SAR

Διαχρονική συμβολομετρία SAR ονομάζεται η επεξεργασία και εκμετάλλευση μιας σειράς  $N$  εικόνων SAR για την ίδια περιοχή μελέτης και για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η τεχνική αυτή επιτρέπει την αναγνώριση περιοχών που παρουσιάζουν μετατόπιση (displacement) με την πάροδο του χρόνου και το προϊόν της τεχνικής αυτής είναι ένα διάγραμμα ετήσιου ρυθμού εδαφικής μετατόπισης για το χρονικό διάστημα της ανάλυσης. Δύο από τις πιο δημοφιλείς προσεγγίσεις είναι η Μέθοδος των σταθερών σκεδαστών και η Μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων.

### 5.8.2. Μέθοδος των σταθερών σκεδαστών (Persistent Scatterer Interferometry)



Εικόνα 14. Δίκτυο συμβολογραφημάτων με τη μέθοδο PS και τη μέθοδο SBAS (Papoutsis 2014)

Η τεχνική συμβολομετρίας σταθερών σκεδαστών (PSInSAR) αναπτύχθηκε το 1999 στο Πολυτεχνείο του Μιλάνο ως επέκταση της DInSAR, για την επίλυση προβλημάτων χωρικής και χρονικής αποσυσχέτισης και ατμοσφαιρικών επιδράσεων. Η τεχνική αυτή ανήκει στην κατηγορία των μεθόδων μελέτης χρονοσειρών αφού κάνει χρήση ενός συνόλου πολυχρονικών απεικονίσεων SAR της ίδιας περιοχής.

Με την μέθοδο των σταθερών σκεδαστών αξιοποιούνται πολλές δευτερεύουσες εικόνες οι οποίες έχουν την ίδια εικόνα αναφοράς και λαμβάνονται πάνω από την ίδια περιοχή. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αναγνώριση στόχων (κυρίως ανθρωπογενών κατασκευών) επί του εδάφους οι οποίοι έχουν διαστάσεις μικρότερες από το μέγεθος του εικονοστοιχείου της εικόνας SAR στο έδαφος και έχουν υψηλή και σταθερή ανακλαστικότητα για χρονικό διάστημα πολλών ετών.

Η κύρια εικόνα υπολογίζεται να είναι κοντά στο μέσο χρονικό και χωρικό όρο των εικόνων, αν και σίγουρα θα δημιουργηθούν συμβολογραφήματα με μεγάλη χωρική και χρονική απόσταση. Ο αριθμός των εικόνων παίζει μεγάλο ρόλο για την ύπαρξη συνάφειας μεταξύ των εικόνων.

Τα κύρια αποτελέσματα που προκύπτουν από την ανάλυση των σταθερών σκεδαστών είναι το μέγεθος και η ταχύτητα των παραμορφώσεων μιας περιοχής σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. (Crosetto et al. 2016)

### **5.8.3. StaMPS – Stanford Method for Persistent Scatterers**

Η κύρια διαφορά μεταξύ της Μεθόδου Σταθερών Σκεδαστών και της Μεθόδου Stanford για Σταθερούς Σκεδαστές έγκειται στα κριτήρια επιλογής των pixel των PS. Αυτό το βασικό στοιχείο της μεθόδου StaMPS επιτρέπει την εφαρμογή της τεχνικής σε διάφορα εδάφη, ανεξάρτητα από την παρουσία ανθρωπογενών κατασκευών.

Δεδομένου ότι δεν υπάρχει εκ των προτέρων γνώση των πιθανών θέσεων των σκεδαστών, αρχικά χρησιμοποιείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για τον εντοπισμό των θέσεων τους. Η επιλογή των σταθερών σκεδαστών βασίζεται στη διασπορά εύρους (amplitude), δεδομένης μιας μέγιστης τιμής της παραμέτρου. Η χρονική συνάφεια αυτών των εικονοστοιχείων εκτιμάται και μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Μόνο τα εικονοστοιχεία σταθερών σκεδαστών με υψηλή τιμή συνάφειας, δηλαδή υψηλή σταθερότητα φάσης, θεωρούνται σταθεροί σκεδαστές.

### **5.8.4. Μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων (Small Baseline Subset)**

Σε αντίθεση με τη μέθοδο PS, η μέθοδος υποσυνόλων μικρών βάσεων (SBAS) είναι μια μέθοδος η οποία βασίζεται στην εξέταση των παραμορφώσεων σκεδαστών οι οποίοι είναι διάσπαρτα κατανεμημένοι στο χώρο και δεν λαμβάνονται υπόψη οι μεταβολές και η ένταση της ανακλαστικότητάς τους. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η χωρική πυκνότητα των σκεδαστών ειδικά σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές. Με τη μέθοδο SBAS χρησιμοποιούνται ζεύγη εικόνων τα οποία σχηματίζουν μικρά μήκη βάσεων που είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και είναι υποσύνολα μεγαλύτερων βάσεων. Ακόμη, η χρονική βάση των εικόνων είναι μικρή. Έτσι περιορίζεται η χωρική και χρονική αποσυσχέτιση και παράγονται συμβολογραφήματα υψηλά συσχετισμένα. (S.-D. E. Alatza 2020; Papoutsis 2014)

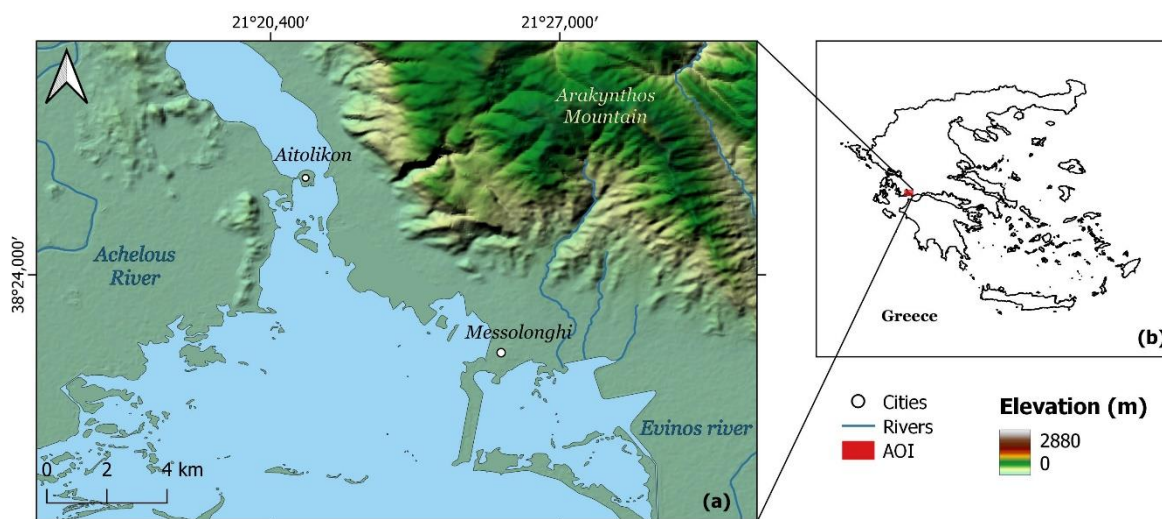
Να σημειωθεί πως στην παρούσα εργασία έγινε χρήση των δορυφόρων Sentinel 1A/B, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ των λειτουργιών Stripmap, ScanSAR και Spotlight. Ο κύκλος επανάληψής τους είναι 12 ημέρες.



## 6. Περιοχή μελέτης

### 6.1. Γεωμορφολογία περιοχής μελέτης

Οι περιοχές μελέτης της παρούσας εργασίας είναι οι πόλεις του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού.



Εικόνα 15. (a) Οι πόλεις του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού & (b) Η περιοχή μελέτης

Η πόλη του Μεσολογγίου περιβάλλεται από την ομώνυμη λιμνοθάλασσα. Η λιμνοθάλασσα του Μεσολογγίου θεωρείται μία από τις πιο σημαντικές λιμνοθάλασσες της Ευρώπης τόσο από οικολογική όσο και από περιβαλλοντική άποψη, καθώς φιλοξενεί μια μεγάλη ποικιλία σπάνιων φυτών και ζώων. Το τμήμα της περιοχής γύρω από το Μεσολόγγι είναι προσχωσιγενές που δημιουργήθηκε κατά το Μειόκαινο και Πλειόκαινο από τις αποθέσεις των ποταμών Εύηνου και Αχελώου με τη σχετική συμβολή των χειμάρρων που αποστράγγιζαν τον ορεινό όγκο του Αρακύνθου. Η περιοχή γύρω από το Μεσολόγγι αποτελείται κυρίως από καλλιεργούμενες εκτάσεις και σε συγκεκριμένες περιοχές, περιφερειακά της λιμνοθάλασσας και στις εκβολές των ποταμών, διακρίνονται βάλτοι, λασποτόπια και αλατούχα εδάφη. Στο μέτωπο των λιμνοθαλασσών με την ανοικτή θάλασσα διακρίνονται αμμώδεις νησίδες, οι οποίες αποτελούν ιδιαίτερα ευαίσθητο μορφολογικό στοιχείο μεγάλης σπουδαιότητας για την προστασία του λιμνοθαλάσσιου συστήματος. Βόρεια του Μεσολογγίου εντοπίζεται ο ορεινός όγκος Αράκυνθος με μέγιστο υψόμετρο τα 937 μ. και ανατολικά η λεκάνη απορροής του ποταμού Εύηνου.

Από την άλλη πλευρά, το Αιτωλικό βρίσκεται στο κέντρο της λιμνοθάλασσας του Αιτωλικού, 10 χιλιόμετρα βορειοανατολικά του Μεσολογγίου. Δύο πέτρινες γέφυρες του 19<sup>ου</sup> αιώνα, μήκους περίπου 300 μέτρων η καθεμία, συνδέουν το νησί

με την ακτή τόσο στην ανατολική όσο και στη δυτική πλευρά. Το Αιτωλικό αρχικά αποτελούνταν από 4-5 νησίδες στο κέντρο της ομώνυμης λιμνοθάλασσας, οι οποίες κατά τη διάρκεια του χειμώνα ήταν πλήρως βυθισμένες. Οι πρώτες προσπάθειες σύνδεσης των νησίδων πραγματοποιήθηκαν από ψαράδες, οι οποίοι χρησιμοποίησαν ξύλινους πασσάλους και επιχωματώσεις. Με το πέρασμα των χρόνων επιπλέον επιχωματώσεις προστέθηκαν, με αποτέλεσμα να σχηματιστεί ένα νησί ακανόνιστου σχήματος διαμέτρου 300 m. Το τελευταίο επίχωμα προστέθηκε το 1969, κυρίως στη βόρεια και νότια πλευρά του νησιού. Η προσθήκη των επιχωμάτων επέτρεψε την κατασκευή περισσότερων κατοικιών. Ωστόσο, η βόρεια πλευρά του νησιού παρουσίαζε ιδιαίτερα μεγάλα προβλήματα καθώς τα θεμέλια των κτηρίων βρίσκονταν στο νερό.

## 6.2. Γεωλογία περιοχής μελέτης

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την περιοχή του Μεσολογγίου και Αιτωλικού σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ φύλλο «Μεσολόγγιον» και «Ευηνοχώριον» κλίμακας 1:50.000 (ΙΓΜΕ 1996), είναι από τους νεότερους προς τους παλαιότερους, οι ακόλουθοι:

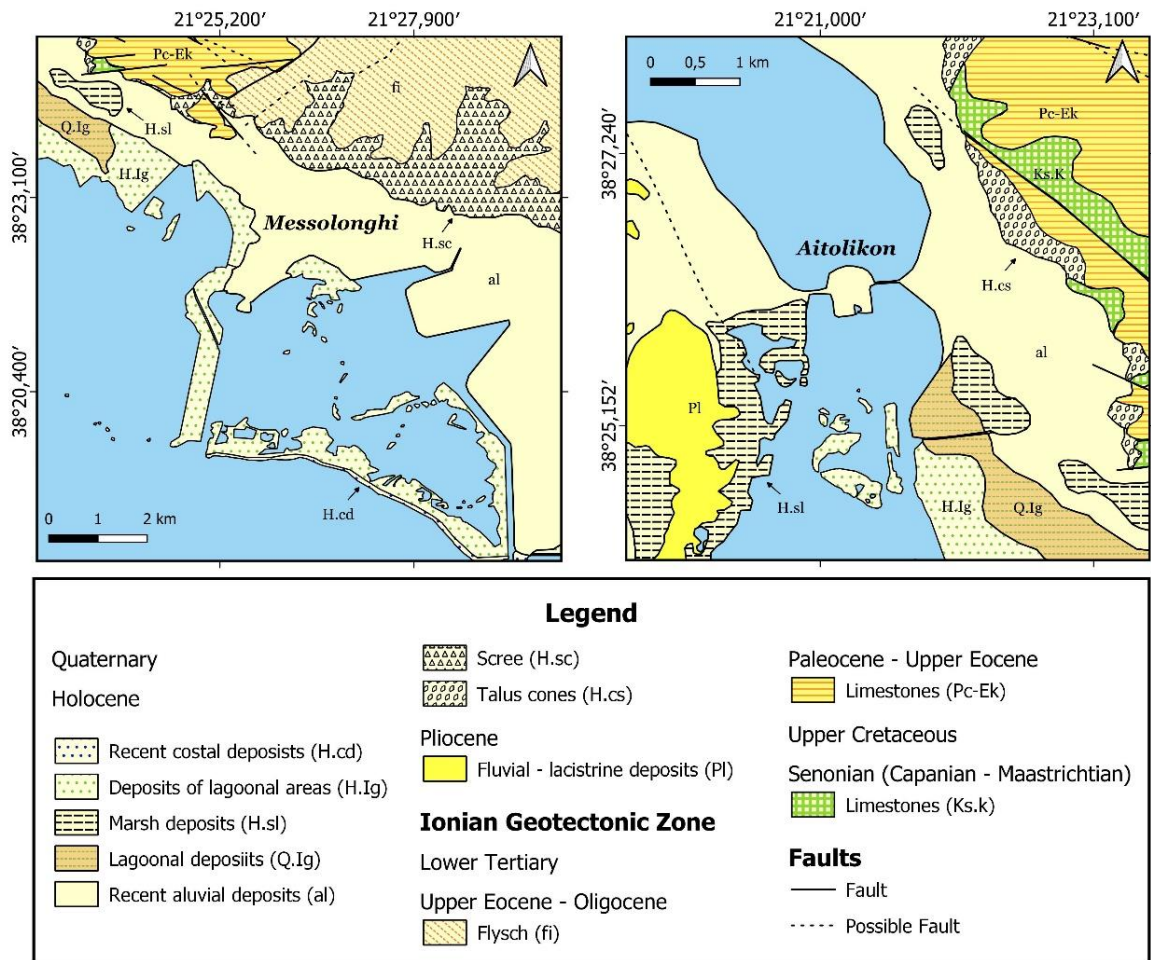
- Αδρομερή υλικά (**H.c,s**): Πρόκειται για κροκαλολατύπες και άμμους στην κοίτη του Εύηνου ποταμού.
- Αποθέσεις σύγχρονου δέλτα – αποθέσεις τελμάτων (**H.sq,st**): Πρόκειται για αποθέσεις του ποταμού Εύηνου που σχηματίζουν τενάγη και τέλματα με υφάλμυρα νερά και αποτελούνται από λεπτόκοκκους άμμους, πηλούς, αργιλούχους πηλούς και αργίλους. Το χρώμα των αποθέσεων αυτών είναι τεφρόμαυρο εξαιτίας της οργανικής ύλης που περιέχουν.
- Αποθέσεις παραλιμνοθαλασσίων περιοχών – Λιμνοθαλάσσιες αποθέσεις (**H.lg**): αποτελούνται από ιλύς, αργιλοαμμώδεις αποθέσεις, αργίλους, αμμούχες αργίλους και λεπτόκοκκους άμμους.
- Αλλουβιακές αποθέσεις (**Al**): Αποτελούνται από άμμους, κροκαλολατύπες και προσχώσεις από άργιλο, αργιλοαμμώδη και πηλοαμμώδη υλικά.
- Πλευρικά κορήματα – κώνοι κορημάτων (**H.sc**): Πρόκειται κυρίως για ασύνδετες ανθρακικές και πυριτικές αποστρωγγυλωμένες κροκάλες και λατύπες, κατά θέσεις συγκολλημένες με ανθρακικό και αργιλικό υλικό.
- Καστανόχρωμες ποταμοχερσαίες αποθέσεις (**PtF**): Ο σχηματισμός αποτελείται από κροκαλοπαγή, μη συνεκτικά και λεπτομερή καστανόχρωμα υλικά που αναπτύσσονται κοντά στο φλυσχικό υπόβαθρο.

- Ασβεστόλιθοι (**Pc-E.k**): Πρόκειται για μικρολατυποπαγείς ασβεστόλιθους χρώματος λευκού έως λευκοκίτρινου, λεπτοστρωματώδεις έως μεσοστρωματώδεις με κονδύλους και διαστρώσεις πυριτολίθων.
- Λιμνοθαλάσιες αποθέσεις (**Q.Ig**): Άργιλοι, αμμούχες άργιλοι και λεπτόκοκκες άμμοι με πλήθος γαστεροπόδων

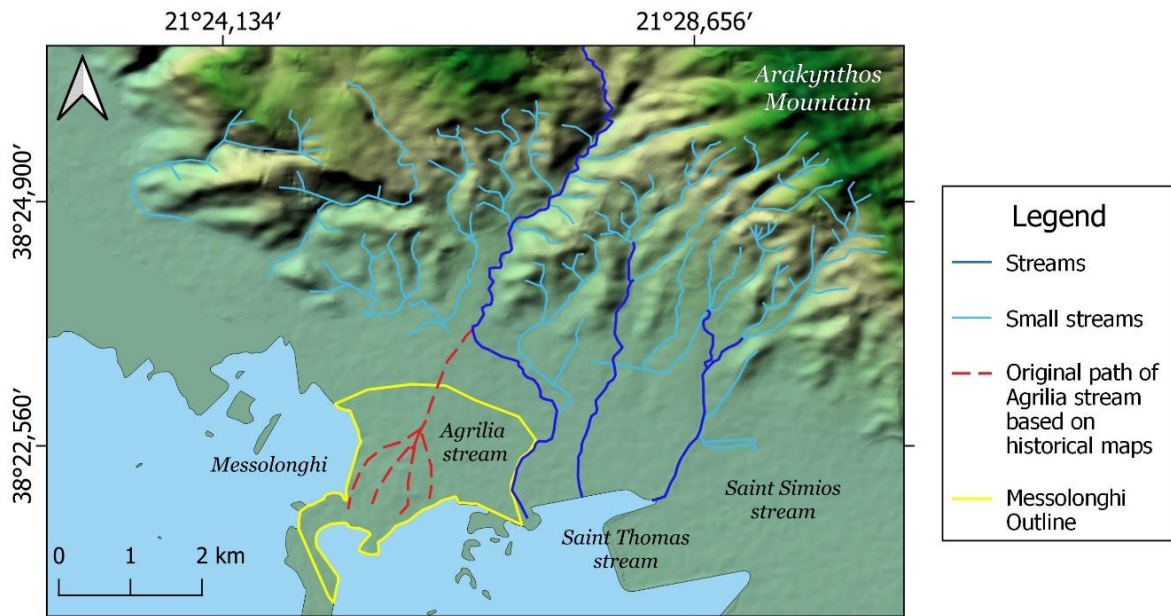
Η μεγαλύτερη έκταση του Μεσολογίου καλύπτεται επιφανειακά από τον σχηματισμό των αλλουβιακών αποθέσεων. Οι αποθέσεις παραλιμνοθαλασσίων περιοχών καλύπτουν μια παράκτια ζώνη στο δυτικό τμήμα της περιοχής ενώ τα αδρομερή υλικά μόνο τη ζώνη της κοίτης του ποταμού Εύηνου. Οι αποθέσεις τελμάτων εντοπίζονται σε μικρές εκτάσεις κοντά στο Αιτωλικό. Τα πλευρικά κορήματα εμφανίζονται μόνο στα προνή βόρεια του Μεσολογίου. (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής 2018)



## 6.2.1. Γεωλογία Μεσολογγίου και Αιτωλικού



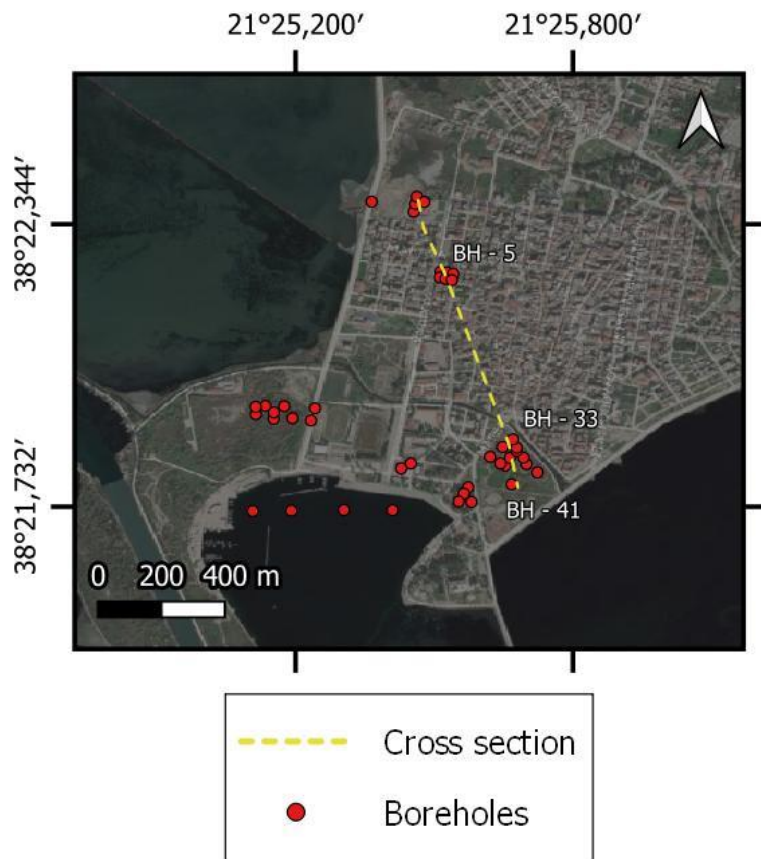
Εικόνα 17. Γεωλογικός χάρτης Μεσολογγίου (αριστερά) και Αιτωλικού (δεξιά) (τροποποιημένο από φύλλο «Μεσολόγγιον» και «Ευηνοχώριον» του ΙΓΜΕ (Antoniadis et al. 2023)

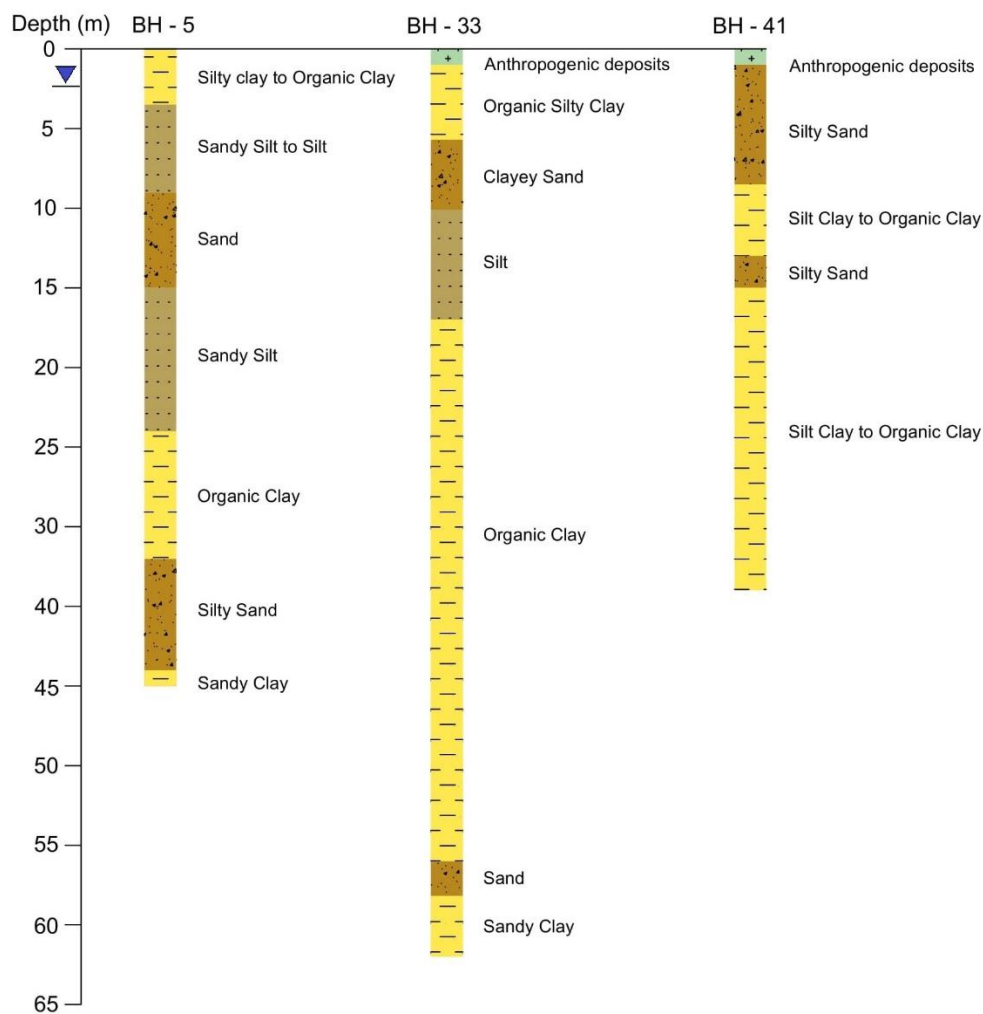


Εικόνα 18. Υδρογραφικό δίκτυο της ευρύτερης περιοχής του Μεσολογγίου

Όσον αφορά το γεωλογικό υπόβαθρο του Μεσολογγίου, η πόλη βρίσκεται σε τεταρτογενείς αλλουβιακές αποθέσεις που αποτελούνται από λεπτόκοκκα ιζήματα (κυρίως άργιλοι και ιλύς).

Το ρέμα της Αग्रιλιάς, που προέρχεται από το όρος Αράκυνθος, υπήρξε στο παρελθόν ο κύριος πάροχος ποτάμιων αποθεμάτων για την πόλη του Μεσολογγίου. Επί του παρόντος, το ρέμα ακολουθεί έως ένα σημείο τη φυσική του ροή. Στη συνέχεια αλλάζει πορεία και καταλήγει στη λιμνοθάλασσα της Κλείσοβας (Εικόνα 18). Θεωρείται πως οι πρώτοι άποικοι της περιοχής επενέβησαν στην φυσική ροή του ποταμού, προκειμένου να αποτρέψουν την πόλη από το να πλημμυρίζει. Το εκτιμώμενο δίκτυο φυσικής ροής του ρέματος, πριν από την αποίκηση της περιοχής, παρουσιάζεται στην Εικόνα 18 με κόκκινες διακεκομμένες γραμμές. Υπό φυσικές συνθήκες, η συμπίεση των σχηματισμών σε δέλτα των ποταμών αντισταθμίζεται από την εναπόθεση ιζημάτων που μεταφέρονται από τα ποτάμια και τα ρέματα, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια έντονων πλημμυρών. Σε αυτή την περίπτωση, η εκτροπή του ρέματος έχει εμποδίσει τα ιζήματα του ποταμού να φτάσουν την πόλη του Μεσολογγίου, και συνεπώς η εδαφική υποχώρηση των σχηματισμών δεν έχει αντισταθμιστεί από την εναπόθεση ιζημάτων.





Εικόνα 19. (α) Τοποθεσίες γεωτρήσεων στην πόλη του Μεσολογγίου & (β) Ενδεικτικές γεωτρήσεις κατά μήκος της τομής που αναπαρίσταται στην Εικόνα 20(α) (Antoniadis et al. 2023)

Σύμφωνα με στοιχεία που ελήφθησαν από γεωτρήσεις, οι σχηματισμοί του Τεταρτογενούς αποτελούνται από πρόσφατες προσχωσιγενείς αποθέσεις (Εικόνα 19). Οι χαλαρές παράκτιες αποθέσεις του Τεταρτογενούς εκτείνονται οριζόντια κατά μήκος της πόλης του Μεσολογγίου και αποτελούνται από οριζόντες μαλακής αργίλου που εναλλάσσεται με οριζόντες αμμώδους ιλύος, ιλυώδους άμμου και ιλύος, φθάνοντας σε μέγιστο βάθος τα 100 m.

Εστιάζοντας στα ανώτερα στρώματα, που φέρουν τα φορτία των κτιρίων, παρατηρούνται εναλλαγές λεπτόκοκκων σχηματισμών (άργιλος και ιλύς) με άμμο.



Οι στρώσεις μπορούν να διαχωριστούν σε:

- Οργανική άργιλος, με πάχος 5–10 μ.
- Οργανική αργιλώδης ιλύς έως ιλύς, με πάχος 5–10μ.
- Αργιλώδης άμμος έως άμμος, με πάχος 2–3μ

Το οργανικό στρώμα αργίλου περιέχει σημαντική ποσότητα φυτικών υπολειμμάτων και θραυσμάτων ασβεστόλιθου. Οι έρευνες των εδαφικών σχηματισμών στην ευρύτερη περιοχή του Μεσολογγίου αποκάλυψαν ότι τα στρώματα αργίλου είναι πλούσια σε κελύφη και βιογενές περιεχόμενο (Lemesios 2008). Η περιεκτικότητα σε οργανική ύλη στα στρώματα αργίλου είναι σημαντική και κυμαίνεται από 5 έως 13%. Σε αρκετές περιοχές της πόλης, ο ορίζοντας από οργανική άργιλο βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, με αποτέλεσμα το οργανικό περιεχόμενο της αργίλου να οξειδώνεται.

Σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες της Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (ΕΑΓΜΕ), οι αποθέσεις του Πλειόκαινου έχουν πάχος 80–100 μ. Ο φλύσχης υπόκειται των σχηματισμών αυτών με πάχος 1200–1400 μ., ακολουθούμενος από τον Παλαιόκαινο και τον Σενώνιο ασβεστόλιθο με πάχος 300–400 μ. Οι σχηματισμοί αυτοί μπορούν να παρατηρηθούν στο όρος Αράκυνθος που βρίσκεται πίσω από την πόλη του Μεσολογγίου.

### **6.3. Γεωτεχνικά δεδομένα περιοχής μελέτης**

Συνολικά 44 γεωτρήσεις (Εικόνα 19) και πάνω από 100 δοκιμές οδομέτρου συλλέχθηκαν για την πόλη του Μεσολογγίου από το αρχείο της Ελληνικής Αρχής Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (1958, 1987), του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων (1997) και από εκθέσεις ιδιωτικών γεωτεχνικών συμβούλων (Dounetas et al. 2007). Αυτά τα δεδομένα αναλύθηκαν και έτυχαν επεξεργασίας στατιστικά. Τα αποτελέσματα, για τους σχηματισμούς που εντοπίζονται στην πόλη του Μεσολογγίου, παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 5, Πίνακας 6 και Πίνακας 7).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών, όλα τα στρώματα που ανιχνεύονται στην περιοχή μελέτης είναι εξαιρετικά συμπιεστά, παρουσιάζοντας υψηλές έως πολύ υψηλές τιμές δείκτη συμπίεσης ( $C_c$ ) που κυμαίνονται από 0.187 έως 0.467. Επιπλέον, όπως υποδεικνύεται από τις χαμηλές τιμές της επιτόπου δοκιμής δυναμικής διεύδυσης ( $N_{SPT}$ ), οι σχηματισμοί μπορούν να χαρακτηριστούν ως πολύ μαλακοί έως μέσης συνεκτικότητας (Πίνακας 4). Πιο συγκεκριμένα, τα στρώματα της οργανικής αργίλου, τα οποία εντοπίζονται σχεδόν σε όλη την πόλη του Μεσολογγίου, έχουν τιμές SPT μεταξύ 3 και 18. Αξίζει να σημειωθεί πως η περιοχή του Μεσολογγίου έχει επισημανθεί ως περιοχή με εξαιρετική ευαισθησία όσον αφορά τη συμπύκνωση εδαφικών σχηματισμών (Εικόνα 20).

Πίνακας 4. Κατάταξη εδαφών από τις δοκιμές SPT και CPT για μη συνεκτικά και συνεκτικά εδάφη

1. ΜΗ-ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΔΑΦΗ				
Πυκνότητα	$D_r$ (%)	SPT $N$	$q_c$ (MPa)	$f_s / q_c$ (%)
πολύ χαλαρά	< 15	< 5	< 2	
χαλαρά	15 - 35	5 - 10	2 - 5	
μέσα	35 - 65	10 - 30	5 - 12	0.5 - 1.5
πυκνά	65 - 85	30 - 50	12 - 30	
πολύ πυκνά	85 - 100	> 50	> 30	

2. ΣΥΝΕΚΤΙΚΑ ΕΔΑΦΗ				
Συνεκτικότητα	$q_u$ (kPa)	SPT $N$	$q_c$ (MPa)	$f_s / q_c$ (%)
πολύ μαλακά	< 25	< 2	< 0.4	3 - 5
μαλακά	25 - 50	2 - 4	0.4 - 0.7	3 - 5
μέσα	50 - 100	4 - 8	0.7 - 1.5	3.5 - 6
στιφρά	100 - 200	8 - 16	1.5 - 3	4 - 6
πολύ στιφρά	200 - 400	16 - 32	3 - 4	4 - 6.5
σκληρά	> 400	> 32	> 4	4.5 - 6.5

\* αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Πίνακας 5. Φυσικές και Μηχανικές παράμετροι της Αργιλώδους Ιλύος, της Οργανικής Αργίλου και της Αργιλώδους Άμμου

	Αργιλώδης Ιλύς			Οργανική Αργίλος			Αργιλώδης Άμμος		
	Unified Soil Classification System (USCS) Classification								
	SL			CL			ML		
	Min	Average	Max	Min	Average	Max	Min	Average	Max
Φυσικές Παράμετροι									
Όριο υδαρότητας - LL (%)	29	33.1	38.1	24.9	36.01	49.7	-	-	-
Όριο πλαστικότητας - PL (%)	18	19.8	21	12	18.94	27.7	-	-	-
Κορεσμένο ειδικό βάρος - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.4	19.2	21.6	18.5	19.5	20.3	-	20.3	-
Μηχανικές Παράμετροι									
Αρχικός δείκτης κενών - e	0.69	0.86	1.07	0.56	0.8	1	-	0.86	-
Δείκτης συμπίεσης - $C_c$	0.222	0.276	0.3	0.23	0.282	0.328	-	-	-
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή- $q_u$ (kPa)	-	-	-	-	61.9	-	-	-	-
Δοκιμή διάτμησης									
Συνοχή - c (kN/m <sup>2</sup> )	1.89	7.82	17.76	8.54	20.9	33.3	-	39.08	-
Γωνία τριβής - $\phi$	3.7	13	22.1	19.1	21.6	24.1	-	40	-
Standard Penetration Test									
$N_{SPT}$	7	7	8	3	8	18	-	13	-

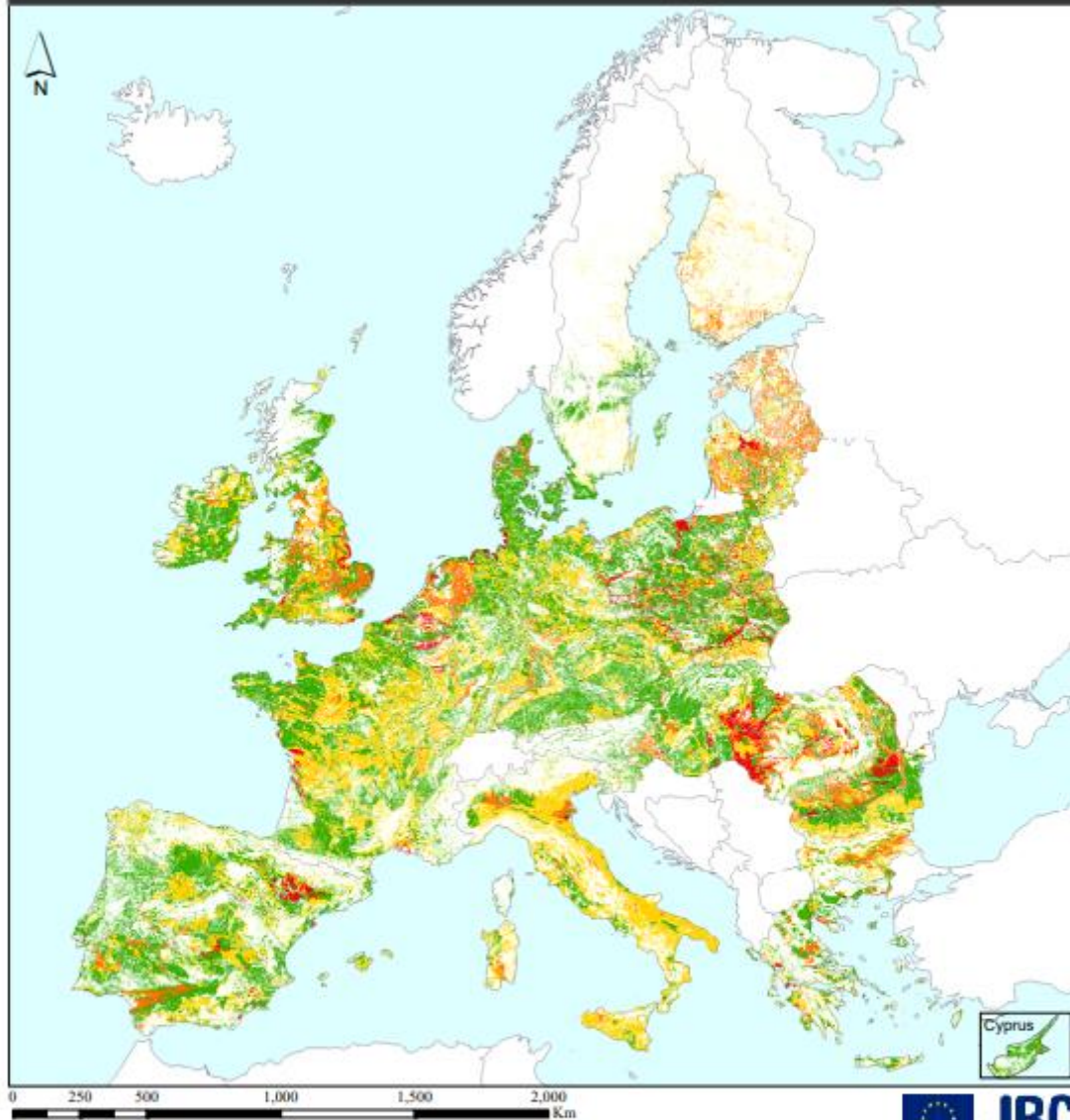
Πίνακας 6. Φυσικές και Μηχανικές παράμετροι της Ιλύος και της Ιλυώδους Άμμου

	Ιλύς			Ιλυώδης άμμος		
	Unified Soil Classification System (USCS) classification					
	CL			ML		
	Min	Average	Max	Min	Average	Max
Φυσικές Παράμετροι						
Όριο υδαρότητας - LL (%)	22.8	24.6	27.8	-	30.4	-
Όριο πλαστικότητας - PL (%)	5.6	14.7	16.4	-	18	-
Κορεσμένο ειδικό βάρος - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.3	20.7	21.4	-	20.3	-
Μηχανικές Παράμετροι						
Αρχικός δείκτης κενών - e	-	-	-	-	-	-
Δείκτης συμπίεσης - C <sub>c</sub>	-	-	-	0.16	0.334	0.467
Δοκιμή διάτμησης						
Συνοχή - c (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-
Γωνία τριβής - $\varphi$	-	-	-	-	-	-
Standard Penetration Test						
N <sub>SPT</sub>	16	21	31	-	16	-

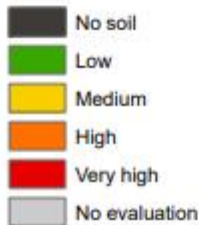
Πίνακας 7. Φυσικές και Μηχανικές παράμετροι της Ιλυώδους Αργίλου και της Αμμώδους Αργίλου

	Ιλυώδης Αργίλος			Αμμώδης Αργίλος		
	Unified Soil Classification System (USCS) classification					
	CL			CL		
	Min	Average	Max	Min	Average	Max
Φυσικές Παράμετροι						
Όριο υδαρότητας - LL (%)	26	33.9	39	-	31.7	-
Όριο πλαστικότητας - PL (%)	17	17.8	19	-	15	-
Κορεσμένο ειδικό βάρος - $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.5	19.5	20.3	-	-	-
Μηχανικές Παράμετροι						
Αρχικός δείκτης κενών - e	-	0.8	-	-	0.84	-
Δείκτης συμπίεσης - $C_c$	0.286	0.318	0.373	-	0.187	-
Αστράγγιστη διατμητική αντοχή- $q_u$ (kPa)	-	-	-	-	-	-
Δοκιμή διάτμησης						
Συνοχή - c (kN/m <sup>2</sup> )	-	-	-	-	-	-
Γωνία τριβής - $\phi$	-	-	-	-	-	-
Standard Penetration Test						
$N_{SPT}$	-	-	-	-	17	-

# The natural susceptibility of soils to compaction



## Natural susceptibility to compaction



This map shows the natural susceptibility of agricultural soils to compaction if they were to be exposed to compaction. The evaluation of the soil's natural susceptibility is based on the creation of logical connections between relevant parameters (pedotransfer rules). The input parameters for these pedotransfer rules are taken from the attributes of the European soil database, e.g. soil properties: type, texture and water regime, depth to textural change and the limitation of the soil for agricultural use. Besides the main parameters auxiliary parameters have been used as impermeable layer, depth of an obstacle to roots, water management system, dominant and secondary land use. It was assumed that every soil, as a porous medium, could be compacted.

### MAP INFORMATION

Spatial coverage: 27 Member States of the European Union where data available.

Pixel size: 1km  
Projection: ETRS89 Lambert Azimuthal Equal Area

Input data - source  
Soil data - European Soil Database v2  
Land Use - CORINE Land Cover 2000

### BIBLIOGRAPHIC INFORMATION

Author: Beata Houšková

For more information:

Beata Houšková, European Commission,  
Institute of Environment and Sustainability,  
Land Management and Natural Hazards Unit,  
Ispra, Italy.  
Email: [beata.houskova@ec.europa.eu](mailto:beata.houskova@ec.europa.eu)

Digital datasets can be downloaded from  
<http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/>



© European Communities, 2005

(a)



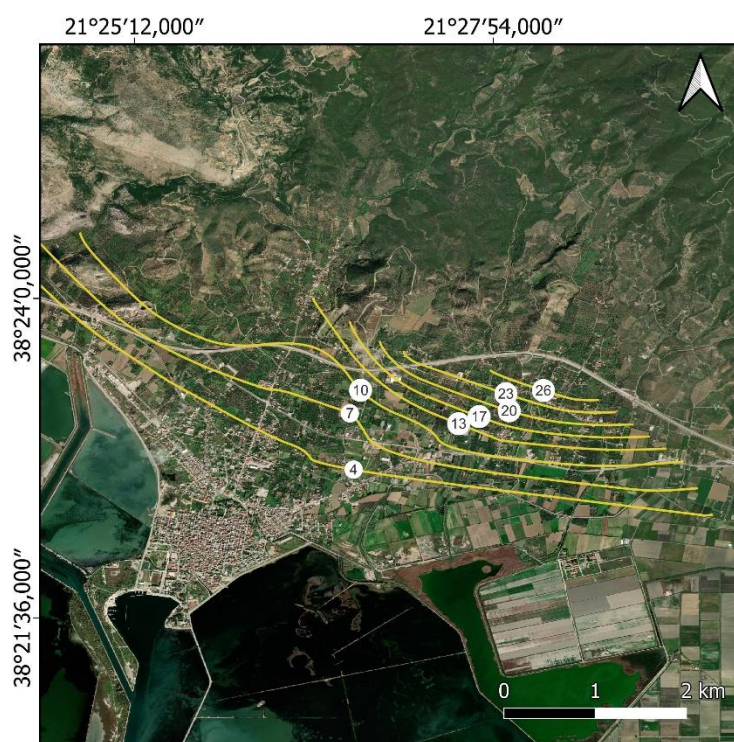
(b)

Εικόνα 20. (a) Χάρτης της Ευρώπης όσον αφορά τη ευαισθησία των εδαφικών σχηματισμών σε συμπίκνωση (Houšková 2008) (b) Εστίαση στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο

#### 6.4. Υδρογεωλογία περιοχής μελέτης

Στην ευρύτερη περιοχή του Μεσολογγίου, εντοπίζονται δύο υδροφόροι ορίζοντες, ένας καρστικός ορίζοντας στους αλπικούς-προαλπικούς σχηματισμούς (Ρε-Εκ και Κs.k) και ένας υδροφόρος ορίζοντας εντός των Τεταρτογενών σχηματισμών (Εικόνα 17), που καταλαμβάνει την ευρύτερη περιοχή δυτικά του Μεσολογγίου.

Ο φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας τροφοδοτείται από τον καρστικό υδροφόρο ορίζοντα, μέσω των κορημάτων, και από τις επιφανειακές απορροές. Γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο παρελθόν εντόπισαν τη στάθμη των υπόγειων υδάτων εντός της πόλης του Μεσολογγίου περίπου 2 μ. κάτω από την επιφάνεια (Εικόνα 19).



— Contour lines (October 2005)





Εικόνα 21. Ισοϋψείς καμπύλες στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για τον Οκτώβριο 2005 και τον Απρίλιο 2006, τροποποιημένα από Lemesios 2008 (Antoniadis et al. 2023)

Σύμφωνα με τις ισοπιεζομετρικές καμπύλες (Εικόνα 21), ο υδροφόρος ορίζοντας ρέει από τους πρόποδες του όρους Αράκυνθος, πίσω από την πόλη του Μεσολογγίου, προς την ακτογραμμή (νότια-νοτιοδυτικά). Μια προηγούμενη υδροχημική μελέτη (Lemesios 2008) εντόπισε αυξημένη αλατότητα στον υδροφόρο ορίζοντα προς την ακτογραμμή, η οποία μπορεί να συσχετιστεί με τη διείσδυση του θαλασσινού νερού και πιθανώς τη διάλυση του περιεχομένου σε αλάτι των ιζημάτων.

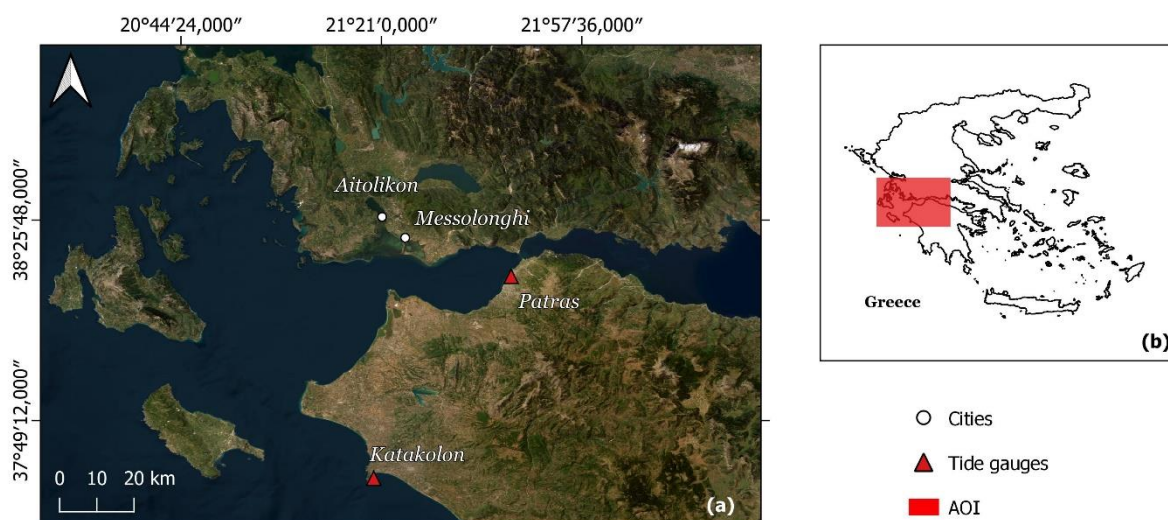
Στο Αιτωλικό οι υδρογεωλογικές συνθήκες είναι οι προφανείς. Η λιμνοθάλασσα διεισδύει στις επιχωματώσεις, η στάθμη της οποίας εντοπίζεται 1 έως 1.5 m κάτω από το έδαφος.

### 6.5. Αύξηση της στάθμης της θάλασσας & βροχοπτώσεις

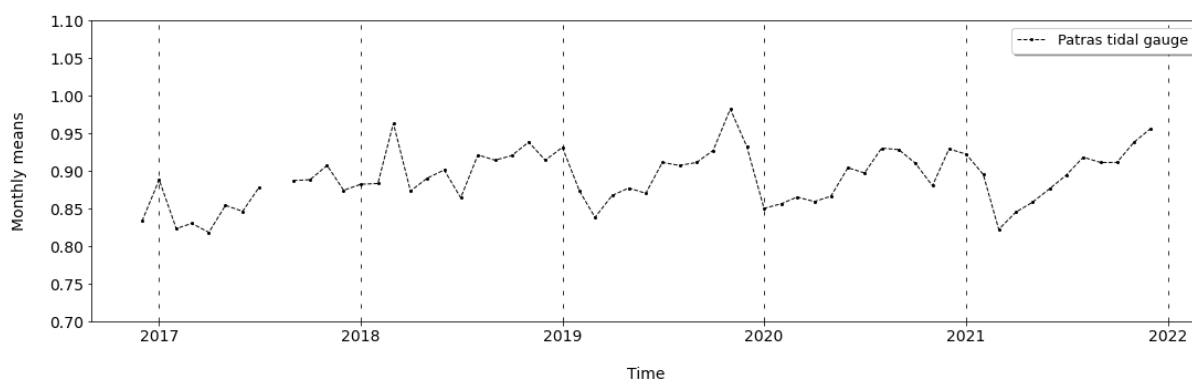
Η κλιμάκωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη και η κλιματική αλλαγή έχει οδηγήσει σε αύξηση των ακραίων υδρομετεωρολογικών και υδρολογικών φαινομένων. Στην περίπτωση του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού, τα φαινόμενα αυτά έχουν συχνά ως αποτέλεσμα πλημμύρες. Η κλιματική αλλαγή έχει αυξήσει

τη συχνότητα και τον όγκο των βροχοπτώσεων στην περιοχή μελέτης και έχει προκαλέσει την άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

Με τη χρήση δορυφορικών μέσων έχουν διεξαχθεί πολυάριθμες μελέτες και ερευνητικά έργα σχετικά με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας στις ευρωπαϊκές παράκτιες περιοχές, με τα αποτελέσματα να ποικίλουν (Vignudelli et al. 2019; The Climate Change Initiative Coastal Sea Level team 2020; Legeais et al. 2021; Frederikse et al. 2020; Hamlington et al. 2020; Fasullo and Nerem 2018; Nerem et al. 2018). Σύμφωνα με τους Marcos et al. 2016, η Μεσόγειος Θάλασσα παρουσίασε μέση άνοδο της στάθμης  $2.6 \pm 0,2$  χλ/έτος μεταξύ του 1993 και 2015. Στις περισσότερες παραθαλάσσιες περιοχές της Ευρώπης, η Copernicus Climate Change Service εκτίμησε ότι η τιμή ανόδου της στάθμης της θάλασσας από το 1993 έως το 2021 κυμαίνονταν από  $2-4 \pm 0,9$  χλ/έτος, ενώ το NOAA/STAR Laboratory for Satellite Altimetry υπολόγισε μια μέση τιμή  $2.2 \pm 0,4$  χλ/έτος.



Εικόνα 22. Οι τοποθεσίες του παριλλοιογράφων του Κατάκολου και της Πάτρας



Εικόνα 23. Η χρονοσειρά του παλιρροιογράφου της Πάτρας

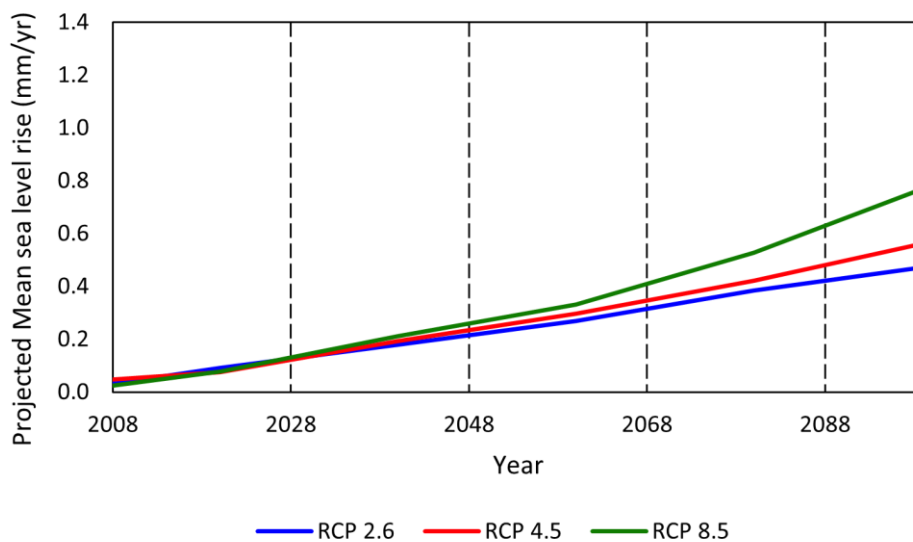
Αυτά τα ευρήματα επιβεβαιώνονται και από το παλιρροιογράφο του Κατάκολου (Εικόνα 22), που βρίσκεται 81 χλμ. Νοτιοδυτικά από την περιοχή μελέτης. Ο παλιρροιογράφος κατέγραψε άνοδο της στάθμης της θάλασσας κατά 2.09 mm/έτος από το 1970 έως το 2021, που συνεπάγεται συνολική αύξηση 11 εκ. (Flanders Marine Institute (VLIZ) and Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) 2022). Ωστόσο, ο παλιρροιογράφος στο λιμάνι της Πάτρας, 32 χλμ. Νότια από την περιοχή μελέτης, κατέγραψε υψηλότερη τιμή ανόδου της στάθμης της θάλασσας στον ομώνυμο κόλπο κατά 7 χλ/έτος από το 2017 έως το 2021. (Εικόνα 23). Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι τα δεδομένα του παλιρροιογράφου της Πάτρας ανταποκρίνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Παρόλα αυτά, τα ευρήματα και από τους δύο (2) παλιρροιογράφους αποδεικνύουν την άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

Προκειμένου να γίνει μία πρώτη εκτίμηση για την προβλεπόμενη αύξηση της στάθμης της θάλασσας στην περιοχή μελέτης, χρησιμοποιήθηκαν τα μελλοντικά σενάρια Representative Concentration Pathway (RCP) και Shared Socioeconomic Pathways (SSP) τα οποία εξετάζουν τις κοινωνικοοικονομικές και κλιματικές εξελίξεις και χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της κλιματικής αλλαγής, των συνεπειών που αυτή προκαλεί και των μέτρων που μπορεί να ληφθούν.

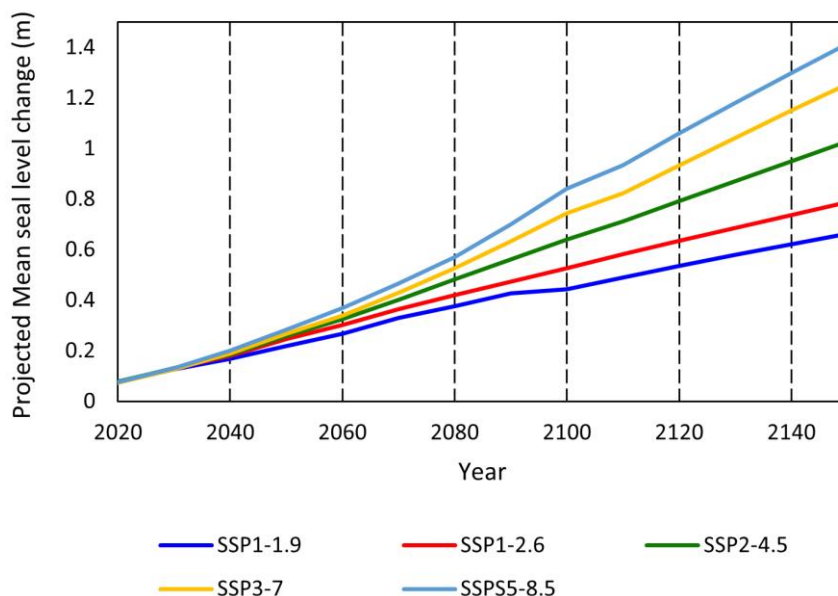
Τα σενάρια RCP είναι ένα σύνολο τεσσάρων νέων διαδρομών κλιματολογικής μοντελοποίησης, το οποίο αναπτύχθηκε με σκοπό τη θεμελίωση των μελλοντικών βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων σεναρίων μοντελοποίησης. Ο συνδυασμός των τεσσάρων διαδρομών RCP καλύπτει το εύρος των τιμών που υπολογίζονται έως το 2100. Η ονομασία των RCP αντιστοιχεί στο επίπεδο ακτινοβολίας (σε  $\text{Watt/m}^2$  – μονάδα SI) για το έτος 2100 στο οποίο στοχεύει κάθε σενάριο. Οι εκτιμήσεις για την ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας βασίζονται στα ύψη των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ουσιών της ατμόσφαιρας (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 και RCP 8.5).

Ωστόσο, τα σενάρια RCP δεν περιλάμβαναν κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες και τις πιθανές τάσεις στην εξέλιξη της κοινωνίας και των οικοσυστημάτων κατά

τον 21ο αιώνα, σε παγκόσμιο και περιφερειακό επίπεδο. Αυτοί οι παράγοντες εξετάστηκαν στα SSP και περιλάμβαναν μεταβλητές όπως ο πληθυσμός, η οικονομική ανάπτυξη, η εκπαίδευση, η αστικοποίηση και ο ρυθμός τεχνολογικής ανάπτυξης. Συνολικά, αξιολογήθηκαν πέντε (5) διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους θα μπορούσε να εξελιχθεί ο κόσμος με την απουσία κλιματικής πολιτικής.



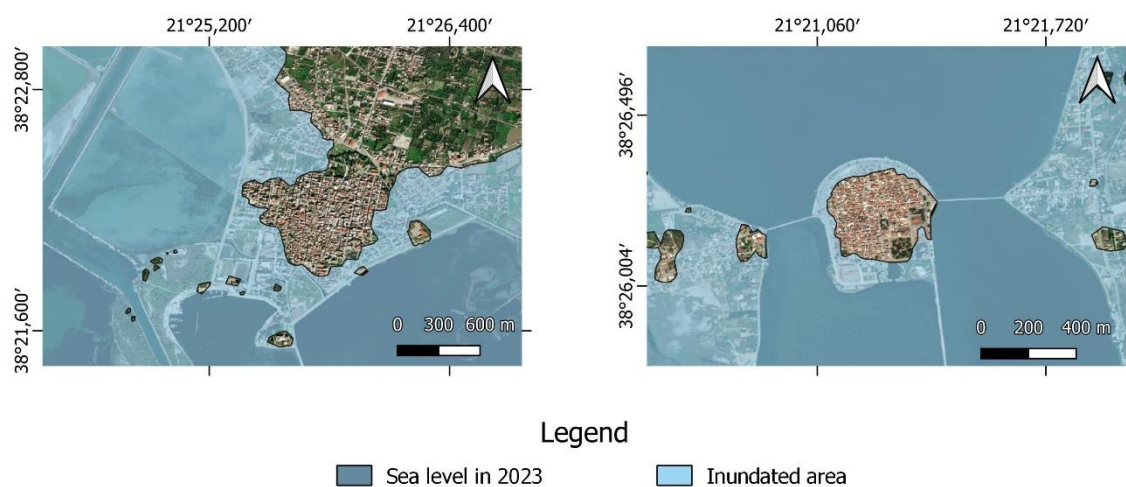
Εικόνα 24. Αναμενόμενη αύξηση της στάθμης της θάλασσας στις παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας σύμφωνα με τα σενάρια RCP



Εικόνα 25. Αναμενόμενη αύξηση της στάθμης της λιμνοθάλασσας του Μεσολογίου σύμφωνα με τα σενάρια SSP

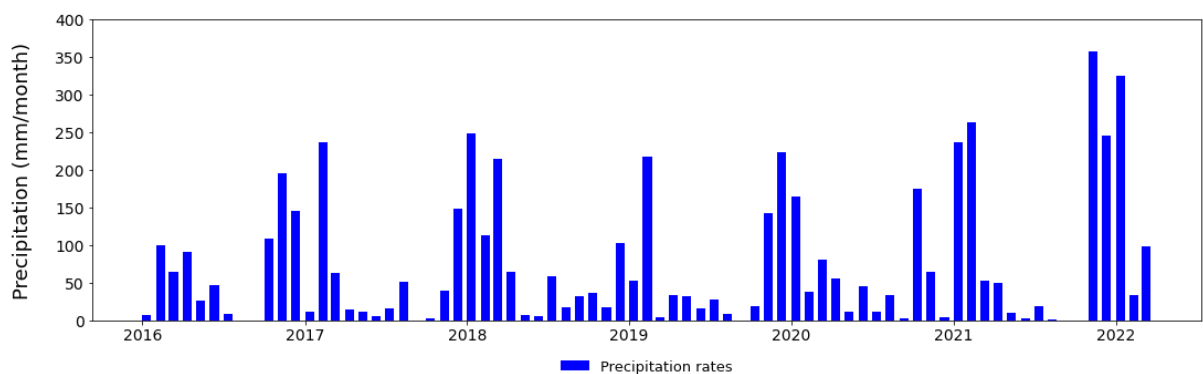
Στην Εικόνα 24 παρουσιάζεται η προβλεπόμενη άνοδος της στάθμης της θάλασσας για τις παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας. Στην Εικόνα 25 παρουσιάζεται η αύξηση της στάθμης της λιμνοθάλασσας του Μεσολογγίου με βάση αυτά τα σενάρια.

Το μοντέλο RCP2.6, το χαμηλότερο σενάριο εκπομπών, υποδεικνύει μια άνοδο της στάθμης της θάλασσας στις παραθαλάσσιες περιοχές της Ελλάδας κατά 0.5 m μέσα στα επόμενα 80 χρόνια, ενώ το RCP 8.5, το υψηλότερο σενάριο εκπομπών, υποδεικνύει μία αύξηση 0.77 m (Climate Change Knowledge Portal). Εάν εξεταστεί ένα σενάριο πολύ υψηλών εκπομπών (SSP5-8.5), τότε η στάθμη της λιμνοθάλασσας του Μεσολογγίου αναμένεται να ανέλθει κατά 0.85 m έως το 2100 (NASA).



Εικόνα 26. Πλημμυρισμένα τμήματα του Μεσολογγίου (αριστερά) και του Αιτωλικού (δεξιά) το 2100 σύμφωνα με το SSP5-8.5.

Η συνεχής άνοδος της στάθμης της θάλασσας έχει προκαλέσει εισροή της θάλασσας στις πόλεις Μεσολογγίου και του Αιτωλικού, καθώς και στις γύρω περιοχές. Η κατάσταση αναμένεται να επιδεινωθεί τα επόμενα χρόνια λόγω της σταδιακής καθίζησης των περιοχών και της αύξησης της έντασης των βροχοπτώσεων που προκαλείται από την κλιματική αλλαγή. Μία πρώτη εκτίμηση των τμημάτων των πόλεων του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού που θα μπορούσαν να πλημμυρίσουν μέχρι το 2100, λαμβάνοντας υπόψη μόνο το υψόμετρο των τοποθεσιών, παρουσιάζονται στην Εικόνα 26. Οι χάρτες δημιουργήθηκαν με χρήση του FloodMap. Κατά τη διάρκεια των υπολογισμών η άνοδος της στάθμης της θάλασσας θεωρήθηκε ίση με 85 εκ. (SSP5-8.5 - χειρότερο σενάριο) και η εδαφική υποχώρηση των πόλεων ίση με 15 εκ. (Pavlopoulos 2022).



Εικόνα 27. Τιμές μηνιαίων βροχοπτώσεων που καταγράφηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό του Αιτωλικού. Κάθε μπλε μπάρα αντιπροσωπεύει τις τιμές για έναν μήνα (Lagouvardos et al. 2017)



Εικόνα 28. Πλημμυρισμένο Μεσολόγγι - 03/12/2021 (“Οι Αιτίες Που Πλημμυρίζει Το Μεσολόγγι” 2022)



Εικόνα 29. Πλημμυρισμένο Αιτωλικό - 04/09/2015 (“Προβλήματα Από Την Κακοκαιρία Στην Αιτωλοακαρνανία” 2014)



Εικόνα 30. Πλημμυρισμένο Αιτωλικό - 26/10/2020 (“Αγανάκτησαν Στο Αιτωλικό- Βροχή Και...πλημμύρα” 2022)

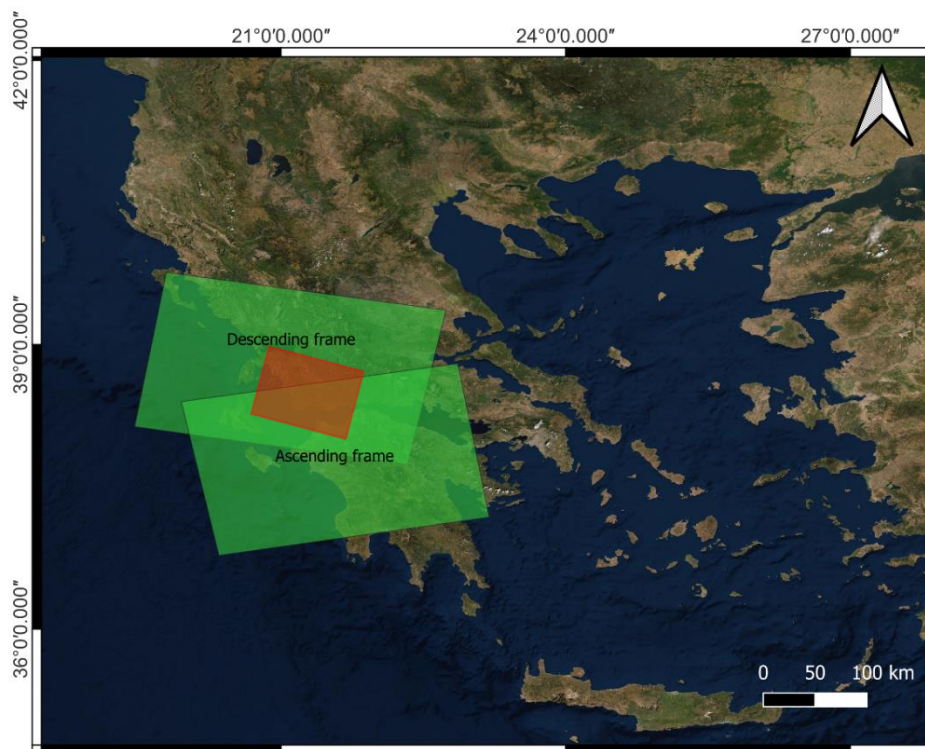
Τα δεδομένα βροχοπτώσεων για το μετεωρολογικό σταθμό του Αιτωλικού, που λήφθηκαν από το δίκτυο NOANN των αυτόματων μετεωρολογικών σταθμών του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Lagouvardos et al. 2017) υποβλήθηκαν σε στατιστική επεξεργασία και αναλύθηκαν για να υπολογισθεί η μηνιαία και η ετήσια βροχόπτωση. Για την εξεταζόμενη περίοδο (2015–2022), οι μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης κυμαίνονταν από 0 έως 357 χλ., ενώ η μέση ετήσια βροχόπτωση ήταν 750 χλ./έτος. Οι πιο σημαντικές βροχοπτώσεις εντοπίζονται κυρίως μεταξύ Οκτωβρίου και Φεβρουαρίου, όπου ο μέσος ρυθμός κατακρημνίσεων ήταν 133 χλ. (Εικόνα 27). Όπως αναφέρθηκε, οι βροχοπτώσεις ήταν σημαντικά υψηλές κατά την υγρή περίοδο, γεγονός που οδήγησε σε δυσκολίες στην αποστράγγιση της ροής του ποταμού και σε αύξηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα. Λόγω της συνολικής αύξησης του όγκου των βροχοπτώσεων και της ανόδου της στάθμης της θάλασσας, τα πλημμυρικά φαινόμενα έχουν αυξηθεί αρκετά τα τελευταία χρόνια (Εικόνα 28, Εικόνα 29 και Εικόνα 30). Να αναφερθεί ότι τόσο οι ερευνητές όσο και το Υπουργείο Προστασίας του Πολίτη έχουν χαρακτηρίσει το Μεσολόγγι και το Αιτωλικό ως ζώνες δυνητικά υψηλού κινδύνου πλημμύρας, ενώ το 2015 και το 2019 κηρύχθηκαν περιοχές σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης λόγω πλημμυρών.



## 7. Μελέτη εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή ενδιαφέροντος με τη μέθοδο των σταθερών σκεδαστών

### 7.1. Επεξεργασία εικόνων – Sentinel 1

Στην παρούσα εργασία, εφαρμόστηκε η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών για τον εντοπισμό εδαφικών μετακινήσεων. Η μέθοδος αυτή είναι μια ακριβής μέθοδος και ταυτόχρονα οικονομική. Ακολουθεί αναλυτική επεξήγηση της διαδικασίας που απαιτείται για την των τελικών χαρτών εδαφικής παραμόρφωσης. Οι δορυφορικές εικόνες που χρησιμοποιήθηκαν ελήφθησαν από την βάση δεδομένων της NASA, Alaska Satellite Facility (ASF) Data Search. Εικόνες και από τις δύο (2) τροχιές, καθοδική και ανοδική χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Οι απεικονίσεις του δορυφόρου Sentinel 1A&B καλύπτουν στο χρονικό διάστημα από 11 Νοεμβρίου 2015 έως 21 Δεκέμβρη 2021 και 13 Αυγούστου 2015 έως 13 Φεβρουαρίου 2022, για την καθοδική και ανοδική τροχιά αντίστοιχα. Επιλέχθηκαν SLC απεικονίσεις και των δύο υπό-τύπων δορυφόρου, S1A και S1B. Η μέθοδος λήψης αυτών ήταν η ευρεία λήψη, IW (Interferometric Wide Swath) η οποία είναι κατάλληλη για δεδομένα ξηράς. Από την παραπάνω αναζήτηση επιλέχθηκαν συνολικά 163 και 120 εικόνες, για την καθοδική και ανοδική τροχιά αντίστοιχα.



Εικόνα 31. Τα frame του δορυφόρου Sentinel 1τα οποία επιλέχθηκαν για την καθοδική και ανοδική ανάλυση (πράσινο χρώμα) και η περιοχή μελέτη (κόκκινο χρώμα)

Η επεξεργασία των εικόνων πραγματοποιήθηκε μέσω μέσω διακομιστή της Επιχειρησιακής μονάδας «Κέντρο Επιστημών Παρατήρησης της Γης και Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης BEYOND» του ΙΑΑΔΕΤ/ΕΑΑ τμήματος BEYOND. Προτού γίνει επεξεργασία των δεδομένων με το λογισμικό ανάλυσης StaMPS (Hooper et al. 2007) απαιτείται προ-επεξεργασία των δεδομένων με το ISCE. Το ISCE είναι ένα υπολογιστικό περιβάλλον το οποίο δημιουργήθηκε από την NASA για την επεξεργασία γεωδαιτικών εικόνων InSAR. Τα εξαγόμενα δεδομένα από το ISCE, μέσω τροποποιήσεων των αρχείων, είναι συμβατά για μετέπειτα επεξεργασία σε άλλα προγράμματα όπως το StaMPS.

Δημιουργήθηκε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους (DEM) για τη γεωαναφορά των εικόνων. Στη συνέχεια επιλέχθηκε η πρωτεύουσα εικόνα. Η πρωτεύουσα εικόνα πρέπει να είναι αυτή που ελαχιστοποιεί χρονικά και χωρικά τα διανύσματα βάσης με τις υπόλοιπες εικόνες. Για την επιλογή της πρωτεύουσας εικόνας, επιλέχθηκε η χωρική απόσταση να μην ξεπερνάει τα  $\pm 200\text{m}$ . Στην προκειμένη περίπτωση ως πρωτεύουσα ορίστηκε η εικόνα στις 12 Απριλίου 2019 και 22 Ιουνίου 2018 για την καθοδική και ανοδική τροχιά αντίστοιχα. Τα συγκεντρωτικά δεδομένα για τις αναλύσεις παρατίθενται παρακάτω (Πίνακας 8).

Πίνακας 8. Δεδομένα αναλύσεων για την καθοδική και ανοδική τροχιά

Δορυφόρος	Τροχιά	Path-Frame	Συνολικός αριθμός εικόνων	Αριθμός σταθερών σκεδαστών	Χρονική κάλυψη	Πρωτεύουσα εικόνα
Sentinel 1A/1B	Descending	80–463	163	160,819	11 Νοεμβρίου 2015 – 21 Δεκέμβρη 2021	12 Απριλίου 2019
	Ascending	175–119	120	49,378	13 Αυγούστου 2015 – 13 Φεβρουαρίου 2022	22 Ιουνίου 2018

Αρχικά πραγματοποιήθηκε unpack των εικόνων SLC του δορυφόρου Sentinel-1 και σχηματίστηκε ο φάκελος της πρωτεύουσας εικόνας. Στη συνέχεια έγινε υπολογισμός του διανύσματος βάσης, εκτίμηση των λανθασμένων καταγραφών του αζιμούθιου και των γεωμετρικών λαθών μεταξύ της πρωτεύουσας και των δευτερευουσών εικόνων. Έπειτα εκτιμήθηκαν οι λανθασμένες καταγραφές του αζιμούθιου και των αποστάσεων σε σχέση με την πρωτεύουσα εικόνα. Έπειτα πραγματοποιήθηκε γεωμετρική αντιστάθμιση μεταξύ όλων των δευτερευουσών με την πρωτεύουσα εικόνα, κάνοντας χρήση των τροχιακών δεδομένων και του DEM. Έπειτα έγινε εξαγωγή των επικαλύψεων οι οποίες εντοπίστηκαν κατά τα προηγούμενα βήματα, καθώς μέσω αυτών δημιουργούνται κάποιες μικρές μεταβολές. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιηθούν κατά την συγχώνευση (stack).

Τέλος, πραγματοποιείται η συγχώνευση της πρωτεύουσας και των υπόλοιπων καταγεγραμμένων εικόνων, η συγχώνευση των φακέλων οι οποίοι περιέχουν τα γεωμετρικά δεδομένα (μήκος, πλάτος, σκίαση, LOS κ.ά.), ενώ παράγεται ένα πλέγμα των διανυσμάτων βάσεων των δευτερευουσών και πρωτεύουσας εικόνας. Στη συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία τους με το λογισμικό StaMPS.

Η λίστα των εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις της καθοδικής και ανοδικής τροχιάς παρατίθενται παρακάτω (Πίνακας 9 και Πίνακας 10).

Πίνακας 9. Στοιχεία εικόνων για την καθοδική τροχιά

Date	Baseline	Date	Baseline	Date	Baseline
11-Nov-2015	-22m	21-Aug-2018	-44m	2-Nov-2019	-96m
23-Nov-2015	-90m	27-Aug-2018	-59m	14-Nov-2019	-147m
5-Dec-2015	-98m	2-Sep-2018	-17m	26-Nov-2019	-146m
17-Dec-2015	-7m	8-Sep-2018	-102m	8-Dec-2019	-51m
29-Dec-2015	-153m	14-Sep-2018	-52m	20-Dec-2019	-49m
10-Jan-2016	-155m	20-Sep-2018	-60m	7-Jan-2020	-84m
22-Jan-2016	-105m	26-Sep-2018	-43m	13-Jan-2020	-147m
3-Feb-2016	-72m	2-Oct-2018	11m	19-Jan-2020	-39m
15-Feb-2016	-38m	8-Oct-2018	-144m	12-Feb-2020	-141m
27-Feb-2016	-83m	14-Oct-2018	-94m	18-Feb-2020	-41m
10-Mar-2016	-68m	20-Oct-2018	-86m	13-Mar-2020	-96m
3-Apr-2016	-85m	26-Oct-2018	-105m	19-Mar-2020	-68m
15-Apr-2016	-33m	1-Nov-2018	-91m	12-Apr-2020	-28m
27-Apr-2016	-45m	13-Nov-2018	-143m	18-Apr-2020	-79m
9-May-2016	-90m	19-Nov-2018	-67m	12-May-2020	25m
6-Oct-2016	-72m	1-Dec-2018	-43m	18-May-2020	-22m
18-Oct-2016	-53m	13-Dec-2018	7m	11-Jun-2020	-50m
30-Oct-2016	-142m	25-Dec-2018	-160m	17-Jun-2020	-112m
10-May-2017	-124m	6-Jan-2019	-114m	11-Jul-2020	11m
22-May-2017	-113m	18-Jan-2019	-92m	17-Jul-2020	-50m
9-Jun-2017	-140m	30-Jan-2019	-101m	10-Aug-2020	-68m
21-Jun-2017	-99m	11-Feb-2019	-38m	16-Aug-2020	-48m
3-Jul-2017	-16m	23-Feb-2019	-116m	15-Sep-2020	-100m
15-Jul-2017	-10m	7-Mar-2019	-191m	21-Sep-2020	-91m
8-Aug-2017	-122m	19-Mar-2019	-100m	15-Oct-2020	-115m
20-Aug-2017	-60m	31-Mar-2019	-91m	21-Oct-2020	28m
1-Sep-2017	-60m	12-Apr-2019	0m	8-Nov-2020	-87m
13-Sep-2017	-59m	24-Apr-2019	-103m	14-Nov-2020	-98m
25-Sep-2017	-55m	6-May-2019	-123m	2-Dec-2020	-120m
7-Oct-2017	-97m	18-May-2019	-156m	14-Dec-2020	-164m
19-Oct-2017	-83m	24-May-2019	-75m	7-Jan-2021	19m
31-Oct-2017	-95m	30-May-2019	-66m	19-Jan-2021	-4m
12-Nov-2017	-47m	5-Jun-2019	-80m	12-Feb-2021	-202m
24-Nov-2017	-88m	11-Jun-2019	38m	24-Feb-2021	-72m

6-Dec-2017	-55m	17-Jun-2019	-131m	8-Mar-2021	-1m
18-Dec-2017	-141m	23-Jun-2019	-4m	20-Mar-2021	49m
30-Dec-2017	-48m	11-Jul-2019	-48m	1-Apr-2021	12m
11-Jan-2018	-60m	17-Jul-2019	-108m	13-Apr-2021	-78m
23-Jan-2018	-64m	23-Jul-2019	-40m	7-May-2021	-45m
4-Feb-2018	-118m	29-Jul-2019	-45m	19-May-2021	20m
16-Feb-2018	-161m	4-Aug-2019	-27m	12-Jun-2021	-109m
28-Feb-2018	-112m	10-Aug-2019	-77m	24-Jun-2021	-83m
12-Mar-2018	-1m	16-Aug-2019	-119m	6-Jul-2021	-70m
10-Jun-2018	-53m	22-Aug-2019	-78m	18-Jul-2021	-40m
16-Jun-2018	-62m	28-Aug-2019	-28m	23-Aug-2021	-116m
22-Jun-2018	2m	3-Sep-2019	-52m	4-Sep-2021	-31m
28-Jun-2018	-105m	9-Sep-2019	-70m	16-Sep-2021	-33m
4-Jul-2018	-76m	15-Sep-2019	-33m	28-Sep-2021	-84m
10-Jul-2018	-52m	21-Sep-2019	-55m	10-Oct-2021	-85m
16-Jul-2018	7m	27-Sep-2019	-156m	3-Nov-2021	-89m
22-Jul-2018	-37m	3-Oct-2019	-82m	15-Nov-2021	-89m
28-Jul-2018	-66m	9-Oct-2019	-33m	9-Dec-2021	-78m
3-Aug-2018	-7m	15-Oct-2019	-92m	21-Dec-2021	-137m
9-Aug-2018	-20m	21-Oct-2019	10m		
15-Aug-2018	-34m	27-Oct-2019	-72m		

Πίνακας 10. Στοιχεία εικόνων για την ανοδική τροχιά

Date	Baseline	Date	Baseline	Date	Baseline
13-Aug-2015	-60m	14-Aug-2017	72m	21-Sep-2019	62m
25-Aug-2015	42m	26-Aug-2017	1m	15-Oct-2019	-85m
6-Sep-2015	81m	19-Sep-2017	-45m	27-Oct-2019	-141m
18-Sep-2015	6m	13-Oct-2017	66m	20-Nov-2019	33m
30-Sep-2015	-44m	25-Oct-2017	42m	14-Dec-2019	-46m
12-Oct-2015	-55m	18-Nov-2017	-74m	19-Jan-2020	-26m
24-Oct-2015	-70m	30-Nov-2017	-87m	24-Feb-2020	-50m
5-Nov-2015	16m	24-Dec-2017	-85m	19-Mar-2020	24m
8-Jun-2016	-18m	5-Jan-2018	-77m	24-Apr-2020	36m
2-Jul-2016	-1m	17-Jan-2018	-93m	18-May-2020	-25m
14-Jul-2016	-3m	29-Jan-2018	-99m	23-Jun-2020	-30m
26-Jul-2016	27m	22-Feb-2018	2m	17-Jul-2020	-25m
7-Aug-2016	15m	6-Mar-2018	-13m	10-Aug-2020	72m
19-Aug-2016	-36m	18-Mar-2018	-64m	22-Aug-2020	-17m
31-Aug-2016	-124m	30-Mar-2018	-67m	15-Sep-2020	-24m
12-Sep-2016	14m	11-Apr-2018	-25m	9-Oct-2020	117m
24-Sep-2016	57m	23-Apr-2018	9m	21-Oct-2020	9m
6-Oct-2016	-6m	17-May-2018	-27m	14-Nov-2020	-73m
18-Oct-2016	-77m	29-May-2018	-43m	8-Dec-2020	-1m
30-Oct-2016	-73m	22-Jun-2018	0m	20-Dec-2020	23m
11-Nov-2016	-28m	16-Jul-2018	-19m	13-Jan-2021	-91m
23-Nov-2016	11m	28-Jul-2018	-68m	6-Feb-2021	-34m
17-Dec-2016	-11m	21-Aug-2018	10m	18-Feb-2021	-22m

10-Jan-2017	-93m	2-Sep-2018	83m	14-Mar-2021	-51m
22-Jan-2017	-33m	14-Sep-2018	-1m	7-Apr-2021	-22m
3-Feb-2017	-14m	20-Oct-2018	-3m	19-Apr-2021	42m
15-Feb-2017	-39m	13-Nov-2018	-2m	13-May-2021	-33m
27-Feb-2017	-82m	19-Dec-2018	-125m	6-Jun-2021	17m
11-Mar-2017	-56m	12-Jan-2019	1m	18-Jun-2021	49m
23-Mar-2017	-43m	17-Feb-2019	-71m	12-Jul-2021	-38m
4-Apr-2017	25m	13-Mar-2019	19m	24-Jul-2021	-54m
16-Apr-2017	76m	25-Mar-2019	54m	17-Aug-2021	10m
28-Apr-2017	-57m	18-Apr-2019	39m	10-Sep-2021	-14m
10-May-2017	12m	30-Apr-2019	64m	22-Sep-2021	-50m
22-May-2017	-23m	24-May-2019	-6m	16-Oct-2021	4m
15-Jun-2017	1m	17-Jun-2019	-86m	9-Nov-2021	27m
27-Jun-2017	-15m	29-Jun-2019	-15m	21-Nov-2021	-36m
9-Jul-2017	-83m	23-Jul-2019	51m	15-Dec-2021	-46m
21-Jul-2017	-55m	16-Aug-2019	-25m	20-Jan-2022	-130m
2-Aug-2017	10m	28-Aug-2019	-37m	13-Feb-2022	-25m

Το StaMPS (Hooper et al. 2007) είναι ένα λογισμικό το οποίο εφαρμόζει τη μέθοδο συμβολομετρίας σταθερών σκεδαστών, η οποία λειτουργεί και σε εδάφη τα οποία δεν έχουν ανθρωπογενείς κατασκευές ή υφιστάμενες ασταθείς παραμορφώσεις.

Προτού ξεκινήσει η επεξεργασία, γίνεται προετοιμασία των δεδομένων και αναγνωρίζονται οι υποψήφιοι σταθεροί σκεδαστές.

Διάφοροι παράμετροι επηρεάζουν την επιλογή των σκεδαστών όπως:

- Η φωτεινότητα των εικονοστοιχείων
- Ο αριθμός των επικαλυπτόμενων εικονοστοιχείων ανάμεσα στα επιμέρους τμήματα κατά μήκος της πλάγιας διεύθυνσης και κατά μήκος της διεύθυνσης του αζιμουθίου
- `weed_max_noise`, όπου ορίζεται το κατώφλι της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής του θορύβου για κάθε εικονοστοιχείο.
- `weed_standard_dev`, όπου ορίζεται το κατώφλι της τυπικής απόκλισης του θορύβου της φάσης για κάθε εικονοστοιχείο και για όλα τα ζευγάρια εικονοστοιχείων.
- `max_topo_err`, όπου ορίζεται η μέγιστη τιμή του σφάλματος του μη συσχετισμένου DEM.

Τα βήματα της επεξεργασίας με τη μέθοδο των σταθερών σκεδαστών συνοψίζονται στα εξής:

1. Στο πρώτο βήμα της επεξεργασίας μετατρέπονται τα δεδομένα για τα εικονοστοιχεία που έχουν επιλεγεί ως υποψήφιοι σταθεροί σκεδαστές σε κατάλληλη μορφή για την επεξεργασία τους στο StaMPS και αποθηκεύονται σε περιβάλλον εργασίας MATLAB.
2. Το δεύτερο βήμα της επεξεργασίας είναι επαναλαμβανόμενο. Υπολογίζεται η τιμή του θορύβου της φάσης για κάθε υποψήφιο σταθερό σκεδαστή σε όλα τα συμβολογραφήματα.
3. Στο τρίτο βήμα της επεξεργασίας γίνεται η επιλογή των σταθερών σκεδαστών με βάση τα χαρακτηριστικά του θορύβου των εικονοστοιχείων. Ακόμη, υπολογίζεται το ποσοστό των εικονοστοιχείων τα οποία δεν θα χρησιμοποιηθούν ως σταθεροί σκεδαστές σε μια περιοχή και η πυκνότητα των εικονοστοιχείων αυτών ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο.
4. Στο τέταρτο βήμα της επεξεργασίας γίνεται περαιτέρω διαλογή των σταθερών σκεδαστών. Απορρίπτονται αυτοί που είχαν επιλεγθεί λόγω της συνεισφοράς του σήματος γειτονικών εικονοστοιχείων και αυτοί που θεωρείται πως έχουν υψηλή τιμή θορύβου.
5. Στο πέμπτο βήμα της επεξεργασίας γίνεται διόρθωση της φάσης των επιλεγμένων σταθερών σκεδαστών για το χωρικά μη συσχετισμένο σφάλμα της γωνίας θέασης (spatially uncorrelated look angle error). Στο τέλος της επεξεργασίας τα επιμέρους τμήματα της επεξεργαζόμενης εικόνας συγχωνεύονται.
6. Στο έκτο βήμα της επεξεργασίας γίνεται το ξετύλιγμα της συμβολομετρικής φάσης. Επιλέγεται η προτιμότερη μέθοδος ξετυλίγματος. Η φάση φιλτράρεται πριν ξετυλιχθεί για μείωση του θορύβου. Κατά τη διάρκεια του ξετυλίγματος της φάσης γίνεται προσωρινή επαναδειγματοληψία των δεδομένων σε ένα πλέγμα το μέγεθος του οποίου μπορεί να καθοριστεί. Ακόμη, επιλέγεται το μέγεθος του παραθύρου του εφαρμοζόμενου φίλτρου. Τα συμβολογραφήματα που έχουν υψηλά επίπεδα θορύβου αφαιρούνται. Στο στάδιο αυτό, ορίζονται οι γεωγραφικές συντεταγμένες του σταθερού σημείου αναφοράς.
7. Στο έβδομο βήμα της επεξεργασίας υπολογίζεται το χωρικά συσχετισμένο σφάλμα της γωνίας θέασης ( $d$ ) το οποίο προκύπτει σχεδόν αποκλειστικά από το χωρικά συσχετισμένο σφάλμα του DEM το οποίο πηγάζει από το εσφαλμένο DEM και από λανθασμένη αντιστοίχιση των συντεταγμένων του DEM με τις συντεταγμένες των εικόνων SAR. Ταυτόχρονα, υπολογίζεται το ατμοσφαιρικό και τροχιακό σφάλμα (AOE) φάσης της εικόνας αναφοράς ( $m$ ) και η αναπήδηση της φάσης (phase ramp) ( $o$ ). Επιλέγεται αν θα ενισχυθεί ή όχι η φάση για κάθε συμβολογράφημα. Απορρίφθηκαν οι εικόνες των οποίων τα συμβολογραφήματα είχαν υψηλό θόρυβο με την εντολή `drop_ifg_index`.

Από την ολοκλήρωση της μελέτης χρονοσειρών με τη μέθοδο των σταθερών σκεδαστών, με το λογισμικό StaMPS, προκύπτουν εδαφικές μετατοπίσεις (ανύψωση-καθίζηση), αναφερόμενες ως προς την διεύθυνση της γραμμής θέασης του δορυφόρου (Line Of Sight). Στη συνέχεια τα αποτελέσματα αυτά μετατράπηκαν σε κατακόρυφες μετακινήσεις μέσω της παρακάτω εξίσωσης:

$$v_{vertical} = \frac{v_{LOS}}{\cos\theta} \quad (16)$$

Όπου:

$v_{vertical}$ , η κατακόρυφη μετακίνηση για κάθε σκεδαστή

$v_{LOS}$ , η Line of Sight μετακίνηση για κάθε σκεδαστή

$\theta$ , η γωνία πρόσπτωσης

Συγκεκριμένα έγινε εξαγωγή των εξής αποτελεσμάτων:

- των ταχυτήτων μετακίνησης της επιφάνειας του εδάφους, σε χιλιοστά ανά χρόνο, απαλλαγμένες από την επίδραση του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης και την επίδραση της αναπήδησης της φάσης. Οι ταχύτητες μετακίνησης των σκεδαστών δίνονται ως προς την σταθερή επιφάνεια αναφοράς που ορίστηκε με το πέρας του έκτου βήματος της επεξεργασίας.
- της τυπικής απόκλισης των ταχυτήτων μετακίνησης της επιφάνειας του εδάφους από την μέση τιμή της ταχύτητας, σε χιλιοστά ανά χρόνο, απαλλαγμένες από την επίδραση του χωρικά συσχετισμένου σφάλματος της γωνίας θέασης και την επίδραση της αναπήδησης της φάσης (vs-do).

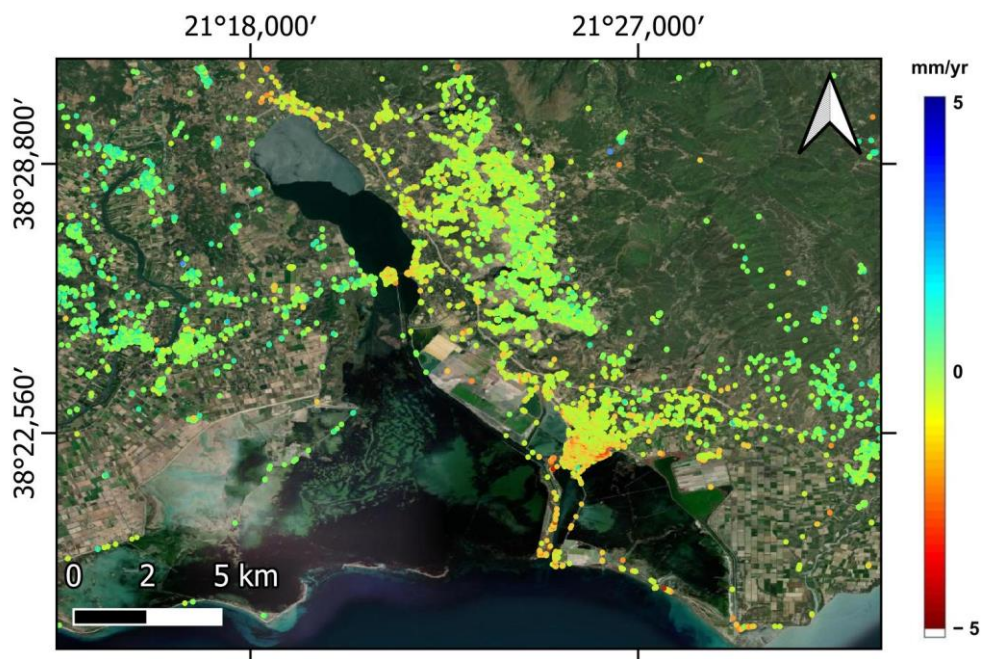
## 7.2. European Ground Motion Service of Copernicus

Σε συνδυασμό με τα δεδομένα τα οποία αποκτήθηκαν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στους διακομιστές του BEYOND, έγινε χρήση των δεδομένων του European Ground Motion Service. Το EGMS είναι η μεγαλύτερη υπηρεσία A-DInSAR που σχεδιάστηκε ποτέ. Η πρωτοβουλία αυτή σχεδιάστηκε την περίοδο 2016-2017 και ολοκληρώθηκε το 2017, ενώ την ίδια χρονιά εγκρίθηκε. Το EGMS στοχεύει στην παροχή αξιόπιστων πληροφοριών σχετικά με φυσικά και ανθρωπογενή φαινόμενα εδαφικών μετακινήσεων στην Ευρώπη για τη μελέτη

των γεωκινδύνων, όπως κατολισθήσεις, καθιζήσεις λόγω εκμετάλλευσης υπόγειων υδάτων ή υπόγειας εξόρυξης, ηφαιστειακά φαινόμενα κ.α. (Crosetto et al. 2020, Costantini et al. 2021). Αυτός ο στόχος επιτυγχάνεται με τη χρήση εικόνων SAR από τους δορυφόρους Sentinel-1A και 1B, που λαμβάνονται από δύο διαφορετικές τροχιές (ανοδική και καθοδική), με χρονική κάλυψη έξι (6) ημερών. Τα βασικά στοιχεία του European Ground Motion Service (EGMS) είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο στη διεύθυνση <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-white-paper> ("EGMS White Paper" 2017). Το EGMS περιλαμβάνεται στην Copernicus Land Monitoring Service (Land | Copernicus n.d.).

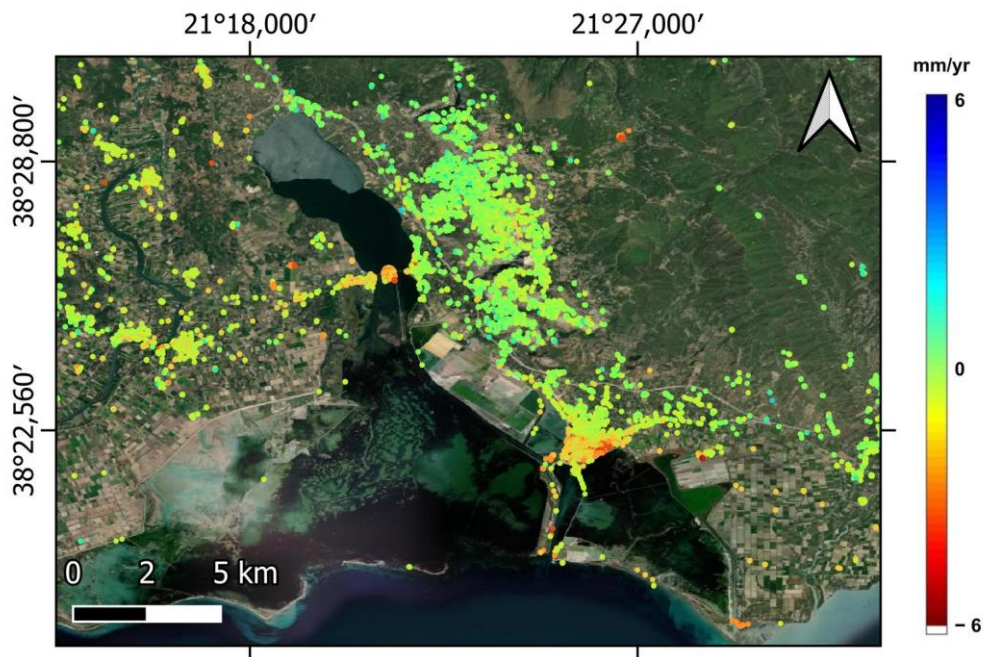
### 7.3. Αποτελέσματα

Οι LOS μετακινήσεις από την ανάλυση του BEYOND παρουσιάζονται στην Εικόνα 32 και Εικόνα 33, ενώ οι κατακόρυφες μετακινήσεις, από την ανάλυση του BEYOND, παρουσιάζονται στην Εικόνα 34 και Εικόνα 35. Τα αποτελέσματα δείχνουν εκτεταμένες μετακινήσεις στις πόλεις του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού κατά τη διάρκεια της χρονικής κλίμακας εξέτασης. Προκειμένου να αξιολογηθεί και να επικυρωθεί η χωρική κατανομή των μετακινήσεων, ήταν απαραίτητη η συσχέτιση των αποτελεσμάτων με δεδομένα πεδίου, γεωλογικά και γεωτεχνικά δεδομένα που αποκτήθηκαν από χάρτες, τεχνικές εκθέσεις και προφίλ γεωτρήσεων.

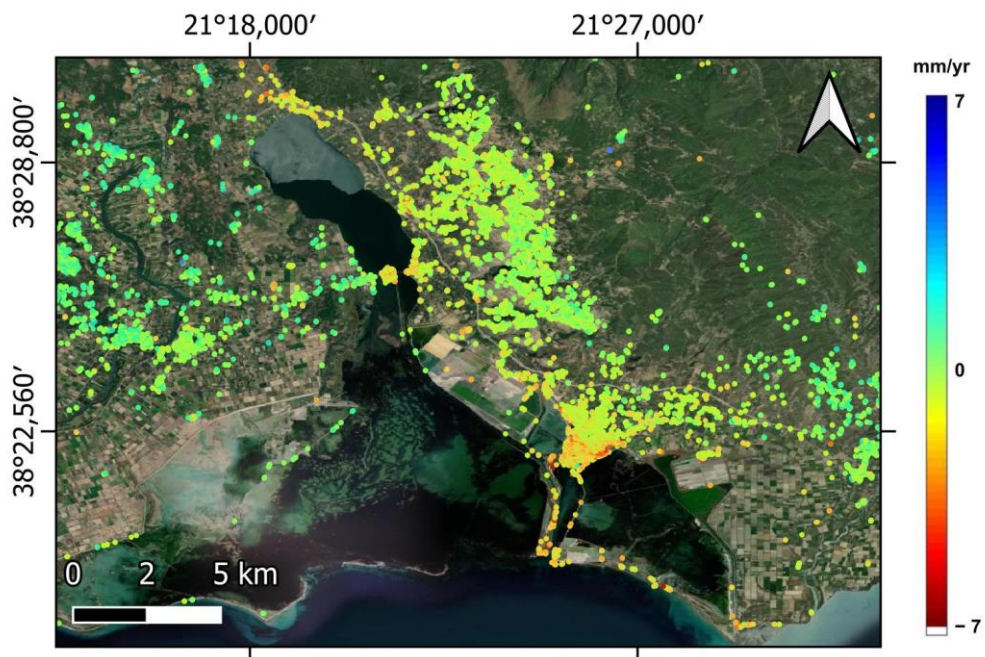


Εικόνα 32. LOS μετακινήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης για την καθοδική τροχιά (pass no. 80) - EAA

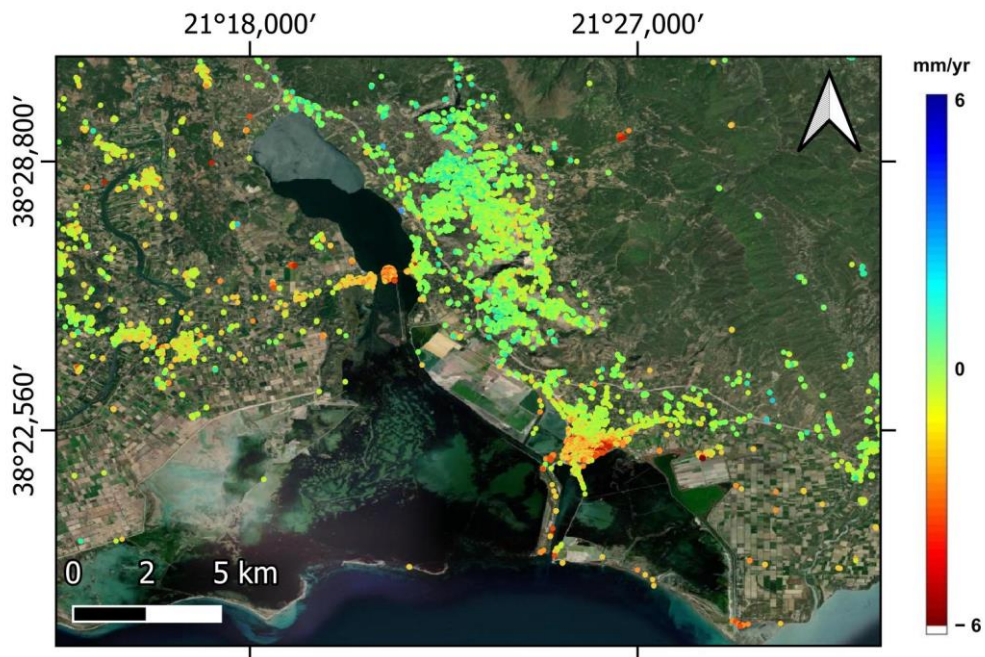




Εικόνα 33. LOS μετακινήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης για την ανοδική τροχιά (pass no. 175) - EAA

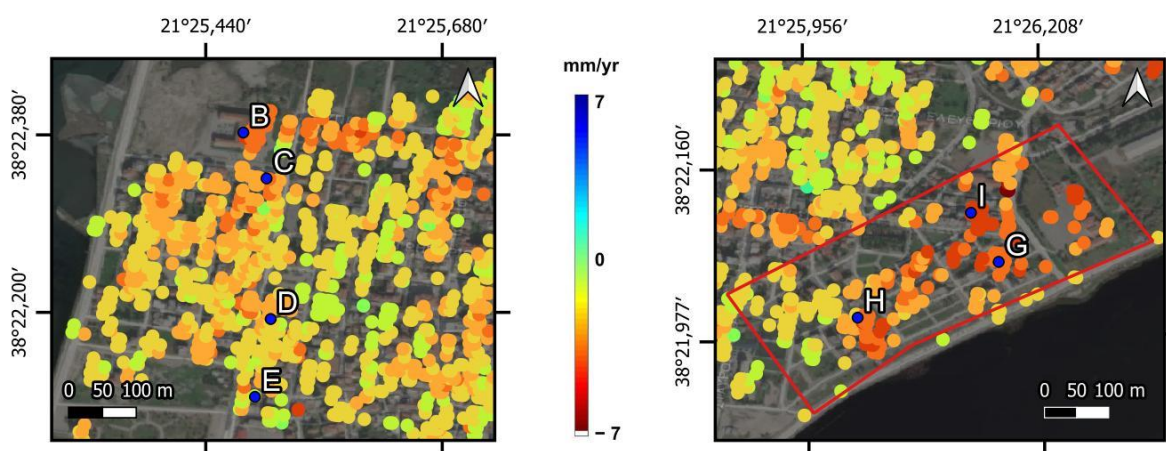


Εικόνα 34. Κατακόρυφες μετακινήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης για την καθοδική τροχιά (pass no. 80) - EAA



Εικόνα 35. Κατακόρυφες μετακινήσεις στην ευρύτερη περιοχή μελέτης για την ανοδική τροχιά (pass no. 175) - EAA

## 8. Δεδομένα πεδίου



Εικόνα 36. Δυτικό Μεσολόγγι, Τοποθεσίες κτηρίων με ζημιές (αριστερά). Ανατολικό Μεσολόγγι, Η περιοχή με τους πιο έντονους ρυθμούς ετήσιων παραμορφώσεων (δεξιά)

Το καλοκαίρι του 2022 πραγματοποιήθηκαν επισκέψεις στις πόλεις του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού, προκειμένου να αξιολογηθεί η κατάσταση των κτηρίων, καθώς και να καταγραφούν τυχόν ζημιές. Κατά τις επισκέψεις διαπιστώθηκαν ζημιές σε διάφορα κτήρια, οι οποίες συσχετίστηκαν με τις διαφορικές καθιζήσεις που προκαλούνται εξαιτίας των εδαφικών υποχωρήσεων. Μερικά εκ των κτηρίων αυτών είναι τα κτήρια της Περιφερειακής Ενότητας Αιτωλοακαρνανίας (Διοικητήριο) - (Εικόνα 37, θέση Β), του Λιμεναρχείου και της Δημόσιας Οικονομικής Υπηρεσίας του Μεσολογγίου - (Εικόνα 37, θέση Ε). Τα δύο τελευταία κτήρια εντοπίζονται στη θέση Ε, καθώς βρίσκονται το ένα δίπλα στο άλλο. Σημαντικές ζημιές διαπιστώθηκαν και σε άλλα, παλαιότερα κτήρια. Μερικές εκ των καταγεγραμμένων ζημιών παρουσιάζονται στις Παράρτημα Α.



(α)



(β)



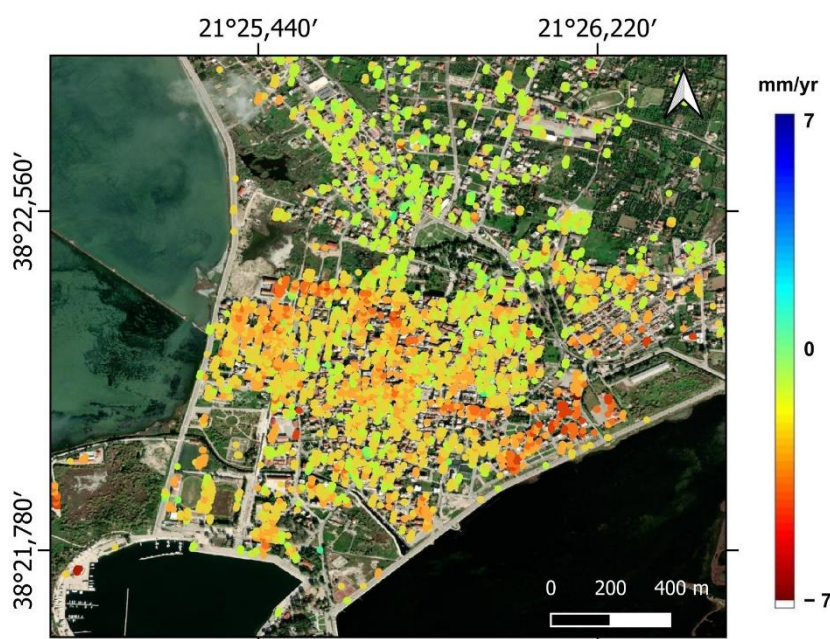
(γ)

Εικόνα 37. Ζημιές που λόγω διαφορετικών καθιζήσεων (α) Νότιο μπαλκόνι του Κτηρίου D (β) Δυτικό μπαλκόνι του Κτηρίου D (γ) Κτήριο E. Τα βέλη υποδεικνύουν την τάση κίνησης.

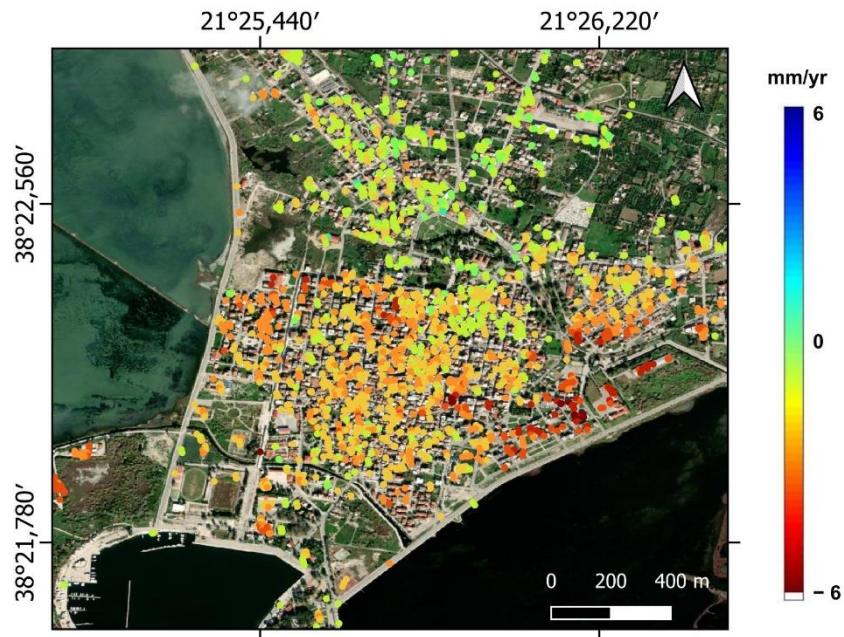
## 9. Συσχέτιση Δεδομένων

Ο στόχος της παρούσας έρευνας είναι διττός: πρώτον, να εντοπίσει και να ερμηνεύσει τους κυρίαρχους μηχανισμούς των παρατηρούμενων επιφανειακών παραμορφώσεων και, δεύτερον, να εντοπίσει περιοχές σημαντικών μετακινήσεων. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, αξιολογήθηκαν όλοι οι παράγοντες που μπορεί να έχουν επηρεάσει την εξέλιξη των εδαφικών υποχωρήσεων (γεωλογικοί, γεωτεχνικοί και υδρογεωλογικοί) χρησιμοποιώντας δεδομένα τηλεπισκόπησης, δεδομένα ανόδου της στάθμης της θάλασσας και τιμές βροχόπτωσης. Η συσχέτιση των προαναφερόμενων παραγόντων πραγματοποιήθηκε σε συνδυασμό με τις κατακόρυφες μετατοπίσεις που υπολογίστηκαν από τις αναλύσεις του BEYOND.

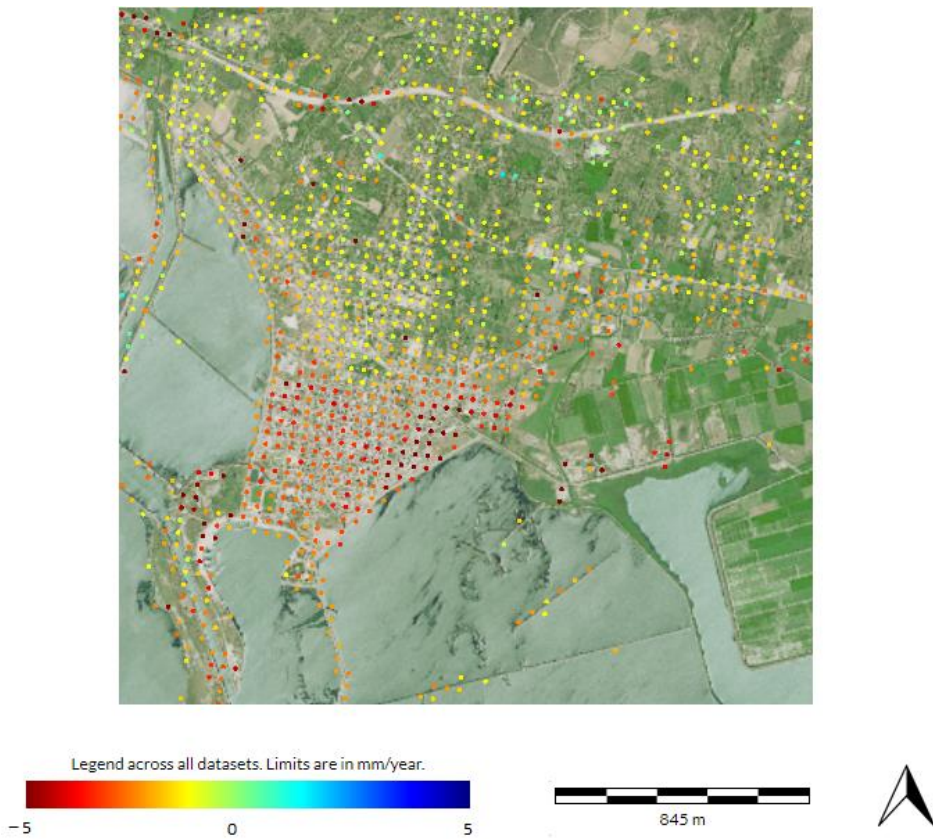
### 9.1. Εδαφικές υποχωρήσεις στο Μεσολόγγι



Εικόνα 38. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Μεσολογγίου από την καθοδική τροχιά (pass no. 80) – ΕΑΑ



Εικόνα 39. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Μεσολογγίου από την ανοδική τροχιά (pass no. 175) - EAA



Εικόνα 40. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Μεσολογγίου - EGMS

Η τιμές των κατακόρυφων μετατοπίσεων στην πόλη του Μεσολογγίου ποικίλουν (Εικόνα 38 και Εικόνα 39). Οι μέγιστες τιμές μετατοπίσεων είναι της τάξης των -5 χλ/έτος. Στο βόρειο τμήμα της πόλης εντοπίζονται σταθερές συνθήκες καθώς οι μετακινήσεις κατά την διερευνώμενη χρονική περίοδο κυμαίνονταν από 0.3 έως 1.3 χλ/έτος. Οι καταγεγραμμένες παραμορφώσεις παρουσιάζουν αύξηση σε άλλα μέρη της πόλης. Οι σκεδαστές, που παρουσιάζουν κατακόρυφες μετακινήσεις, εντοπίζονται κυρίως κατά μήκος της παράκτιας ζώνης, με τη πλειοψηφία αυτών να συγκεντρώνονται στο ανατολικό τμήμα της πόλης (μέσος ρυθμός παραμόρφωσης -5 χλ/έτος). Το νότιο και δυτικό τμήμα της πόλης παρουσίασαν, επίσης, μέσο ρυθμό καθίζησης -2.5 χλ/έτος και -3 χλ/έτος, αντίστοιχα. Η χωρική κατανομή των παραμορφώσεων παρουσιάζεται στην Εικόνα 38 και στην Εικόνα 39 για την καθοδική και ανοδική τροχιά αντίστοιχα. Το σφάλμα των μετρήσεων για την πόλη του Μεσολογγίου ήταν 0.4-0.62 χλ/έτος για την καθοδική τροχιά και 0.33-0.58 χλ/έτος για την ανοδική τροχιά.

Οι μέσοι ρυθμοί κατακόρυφων μετακινήσεων που λήφθηκαν από το EGMS (Εικόνα 40) ήταν -4.5 χλ/έτος. Η ανάλυση του Εθνικού Αστεροσκοπείου και τα δεδομένα του EGMS ήταν σε απόλυτη συμφωνία καθώς, και στα δύο σύνολα δεδομένων, η χωρική κατανομή των κατακόρυφων παραμορφώσεων ήταν η ίδια και το ανατολικό τμήμα της πόλης παρουσίασε τον υψηλότερο ρυθμό παραμόρφωσης.

Αξίζει να σημειωθεί πως για το χρονικό διάστημα της μελέτης (2016-2022) οι συνολικές κατακόρυφες μετακινήσεις που υπολογίστηκαν τόσο από τα δεδομένα του EGMS, όσο και από την ανάλυση του ΕΑΑ είναι 2.5εκ..

### **9.1.1. Γεωτεχνικά δεδομένα**

Όπως προαναφέρθηκε, η πόλη του Μεσολογγίου είναι χτισμένη πάνω σε συμπιεστούς σχηματισμούς. Οι σχηματισμοί αυτοί υπόκεινται σε καθίζηση λόγω των εξωτερικών φορτίων που τους επιβάλλονται από τα κτήρια, με αποτέλεσμα να εντοπίζονται καθιζήσεις στις θεμελιώσεις των κτηρίων. Τα περισσότερα κτήρια στο Μεσολόγγι είναι θεμελιωμένα με γενική κοιτόστρωση, και μόνο λίγα με μεμονωμένα πέδιλα. Οι κατακόρυφες παραμορφώσεις, που εντοπίστηκαν από τις αναλύσεις, εκδηλώνονται κυρίως σε κτήρια κατασκευασμένα με τον τελευταίο τύπο θεμελίωσης. Επιπλέον, σε διάφορα σημεία της πόλης, η οργανική στρώση αργίλου εντοπίζεται πάνω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, με αποτέλεσμα το οργανικό περιεχόμενο της στρώσης να οδηγείται σε οξείδωση με επακόλουθο τη καθίζηση.

Η δευτερογενής συμπίεση (ερπυσμός) μπορεί, επίσης, να θεωρηθεί ως ένας εκ των παραγόντων που οδηγούν το έδαφος σε καθίζηση. Σε ορισμένα τμήματα της

πόλης του Μεσολογγίου, ειδικά στο κεντρικό τμήμα, τα κτήρια κατασκευάστηκαν στα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα προς τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Οι κατακόρυφες μετακινήσεις που εντοπίστηκαν εξακολουθούν να εκδηλώνονται μέχρι και σήμερα. Συνεπώς, μπορεί να θεωρηθεί πως η στερεοποίηση των σχηματισμών έχει ολοκληρωθεί και πλέον η δευτερεύουσα στερεοποίηση (ερπυσμός) εκδηλώνεται. Ωστόσο, μια άλλη εξήγηση που μπορεί να δοθεί είναι ότι λόγω της συνεχούς αύξησης της στάθμης της θάλασσας και των αυξημένων ρυθμών βροχοπτώσεων, η στάθμη των υπόγειων υδάτων παρουσιάζει διακυμάνσεις καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, οδηγώντας στην επανενεργοποίηση της στερεοποίησης των σχηματισμών (Zwanenburg 2011).

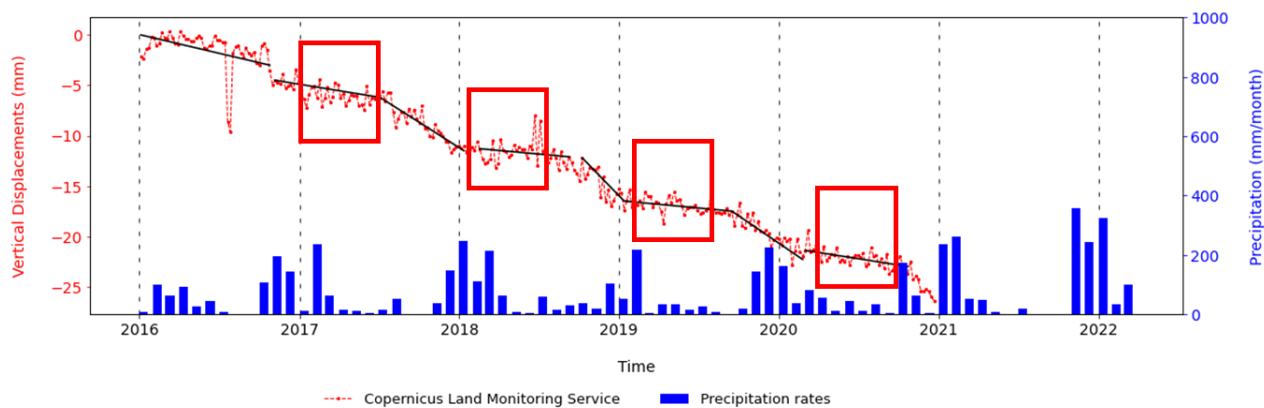
Ένας άλλος παράγοντας που επιφέρει τις εντοπιζόμενες κατακόρυφες μετακινήσεις είναι η φυσική στερεοποίηση των σχηματισμών. Καθώς τα δέλτα των ποταμών και των ρεμάτων εξελίσσονται, νέα ιζήματα εναποτίθενται πάνω από παλαιότερα ιζήματα. Το βαρυντικό φορτίο των υπερκείμενων ιζημάτων προκαλεί τη συμπίεση των υποκείμενων, με αποτέλεσμα τη μείωση του όγκου των ιζημάτων, την αναδιοργάνωση των κόκκων του εδάφους και την αποβολή υγρών. Οι παράγοντες, που καθορίζουν το ρυθμό της φυσικής στερεοποίησης, είναι ο τύπος των ιζημάτων (υδρογεωλογικές και γεωτεχνικές ιδιότητες) και το ιστορικό απόθεσης που οδήγησε στην παρούσα στρωματογραφία. Η καθυστερημένη μείωση των υδατικών υπερπίεσεων μπορεί να οδηγήσει σε στερεοποίηση των σχηματισμών αρκετό καιρό μετά την παύση της απόθεσης των ιζημάτων. Αυτή η διαδικασία είναι ιδιαίτερα εμφανής σε λεπτόκοκκα εδάφη, όπως η άργιλος (Zoccarato et al. 2018). Στο παρελθόν, η φυσική συμπύκνωση της πεδιάδας του δέλτα των ποταμών και των ρεμάτων αντισταθμιζόταν από την ιζηματογένεση, επιτρέποντας στο δέλτα να διατηρήσει την ανύψωσή του πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Ωστόσο, η καλλιέργεια της γης και η μείωση της παροχής ιζημάτων λόγω της αποικιοποίησης της περιοχής και της εκτροπής του ρέματος της Αγριλίας, έχουν διαταράξει αυτή τη φυσική ισορροπία.

### **9.1.2. Βροχοπτώσεις**

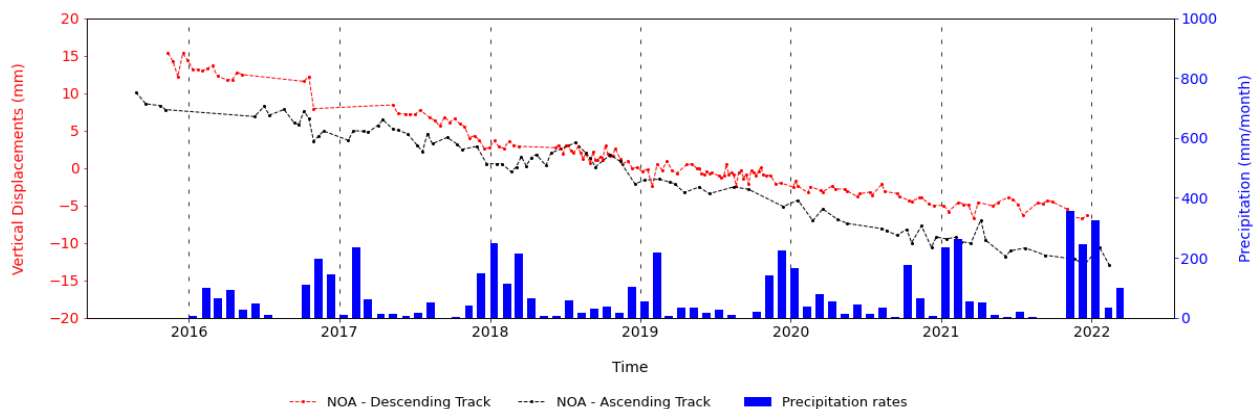
Κατά την εξέταση των χρονοσειρών των κατακόρυφων μετακινήσεων, που αναφέρονται στους σκεδαστές που βρίσκονται στα κτήρια όπου εντοπίζονται ζημιές, παρατηρείται ένα συγκεκριμένο μοτίβο. Κατά την υγρή περίοδο, κυρίως κατά τον Ιανουάριο, οι παραμορφώσεις επιβραδύνονται. Επιτάχυνση παρατηρείται στα μέσα της ξηρής περιόδου (Ιούνιος). Η επαναπλήρωση των υδροφορέων κατά την υγρή περίοδο (από τον Οκτώβριο έως τον Απρίλιο) αυξάνει την πίεση των πόρων των υπόγειων υδάτων και, με χρονική υστέρηση από την αρχή των βροχοπτώσεων, οδηγεί στην επιβράδυνση των εδαφικών υποχωρήσεων (Εικόνα 44). Αντίθετα, η εκμετάλλευση των υδροφορέων κατά την ξηρή περίοδο (Μάιος έως Σεπτέμβριος) οδηγεί στη μείωση της πίεσης των πόρων και συνεπώς στην επιτάχυνση των παραμορφώσεων, με χρονική υστέρηση από την αρχή της



αποστράγγισης (Εικόνα 44). Η χρονική υστέρηση, και στις δύο περιπτώσεις, δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από την ένταση των βροχοπτώσεων ή τη σφοδρότητα της εκμετάλλευσης των υδροφορέων για αγροτικές και βιομηχανικές χρήσεις.



Εικόνα 41. Χρονοσειρά κατακόρυφων μετακινήσεων για το κτήριο της Περιφερειακής Ενότητας Αιτωλοακαρνανίας – EGMS. Επισημαίνεται το μοτίβο επιβράδυνσης



Εικόνα 42. Χρονοσειρά κατακόρυφων μετακινήσεων για την ανοδική και καθοδική τροχιά για το κτήριο της Περιφερειακής Ενότητας Αιτωλοακαρνανίας – ΕΑΑ.

Το παραπάνω περιγραφόμενο μοτίβο παραμόρφωσης και η συσχέτισή του με τις βροχοπτώσεις μπορεί να παρατηρηθεί στην Εικόνα 41 και στην Εικόνα 42, για το κτήριο της Περιφερειακής Ενότητας Αιτωλοακαρνανίας (Κτήριο Β). Στο γράφημα αποτυπώνονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις από EGMS. Στην Εικόνα 42 παρατίθενται οι κατακόρυφες παραμορφώσεις από την ανάλυση των δορυφορικών δεδομένων P-PSI από την ομάδα του BEYOND του ΕΑΑ. Η χρονοσειρά του ΕΑΑ είναι λιγότερο ευαίσθητη στον εντοπισμό της διακύμανσης των κατακόρυφων παραμορφώσεων και, ως εκ τούτου, μόνο η συνεχής τάση καθίζησης είναι ορατή τόσο στις χρονοσειρές της καθοδικής όσο και της ανοδικής τροχιάς. Ωστόσο, ο κύριος λόγος που συμβαίνει αυτό είναι πως κατά την ανάλυση

έχουν χρησιμοποιηθεί έως 120 εικόνες, αρκετά λιγότερες σε σχέση με αυτές του EGMS, 363 εικόνες. Από τα παραπάνω μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η φυσική επαναφόρτιση των υδροφορέων προκαλεί μια μικρή μεταβολή στις τάσεις παραμόρφωσης του εδάφους, επιβραδύνοντάς τες. Ωστόσο, είναι σαφές ότι η εποχιακή διακύμανση της στάθμης των υπόγειων υδάτων δεν μπορεί να επηρεάσει τη συνολική τάση συνεχούς καθίζησης που παρατηρείται κατά τη χρονική διάρκεια της μελέτης.

### **9.1.3. Εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα**

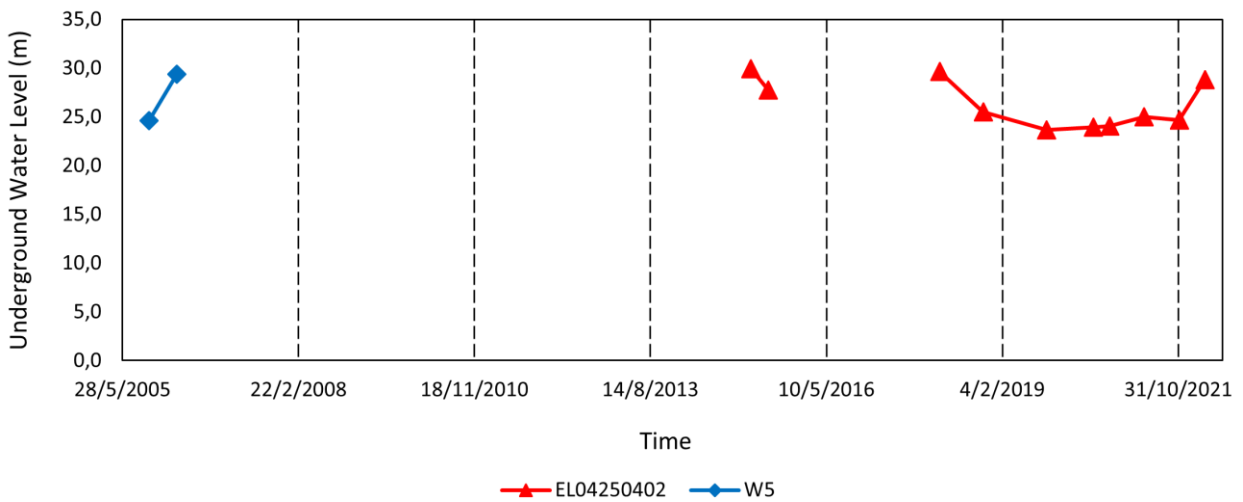
Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν ο υδροφόρος ορίζοντας έχει υποστεί υπερεκμετάλλευση κατά τα τελευταία έτη, οι μετρήσεις της στάθμης των υπόγειων υδάτων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του υδρολογικού έτους (Οκτώβριος 2005–Απρίλιος 2006) από τον Lemesios (2008) συγκρίθηκαν με μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν από την ΕΑΓΜΕ από το 2015 έως το 2022. Οι τοποθεσίες των γεωτρήσεων παρακολούθησης που περιλαμβάνονται στο υφιστάμενο δίκτυο ΕΑΓΜΕ (DIPYN) δεν επαρκούν για την παραγωγή νέων χαρτών ισοϋψών καμπύλων για τη στάθμη των υπόγειων υδάτων. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των μετρήσεων από γειτονικές γεωτρήσεις των δύο δικτύων.



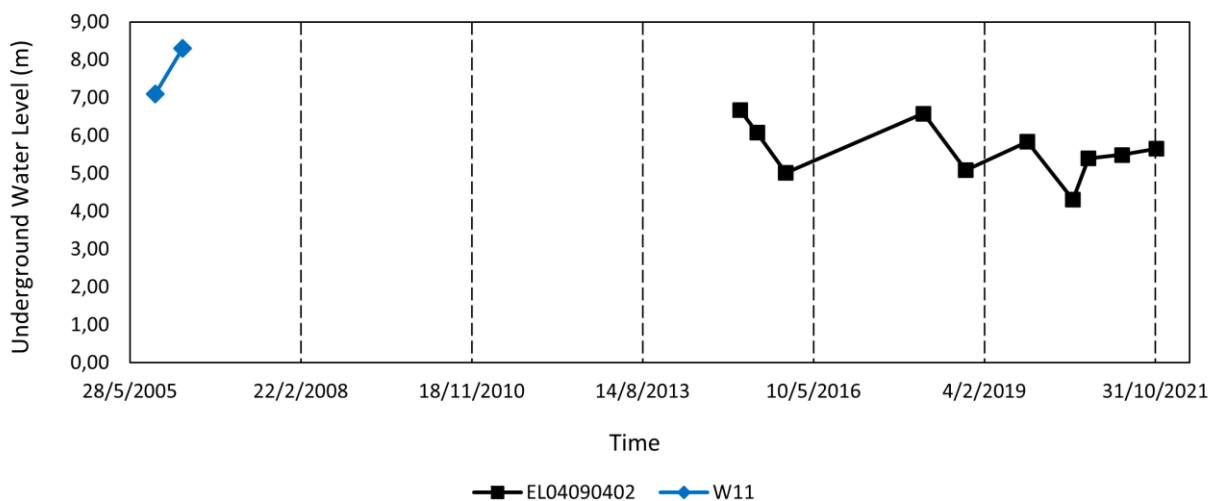
**Hydrogeological Boreholes**

- Groundwater Monitoring Network - DIPYN (EAGME)
- Lemesios (2008)

Εικόνα 43. Τοποθεσίες των γεωτρήσεων του δικτύου του ΕΑΓΜΕ (κόκκινο χρώμα) και του Lemesios (2008) (κίτρινο χρώμα)



(α)



(β)

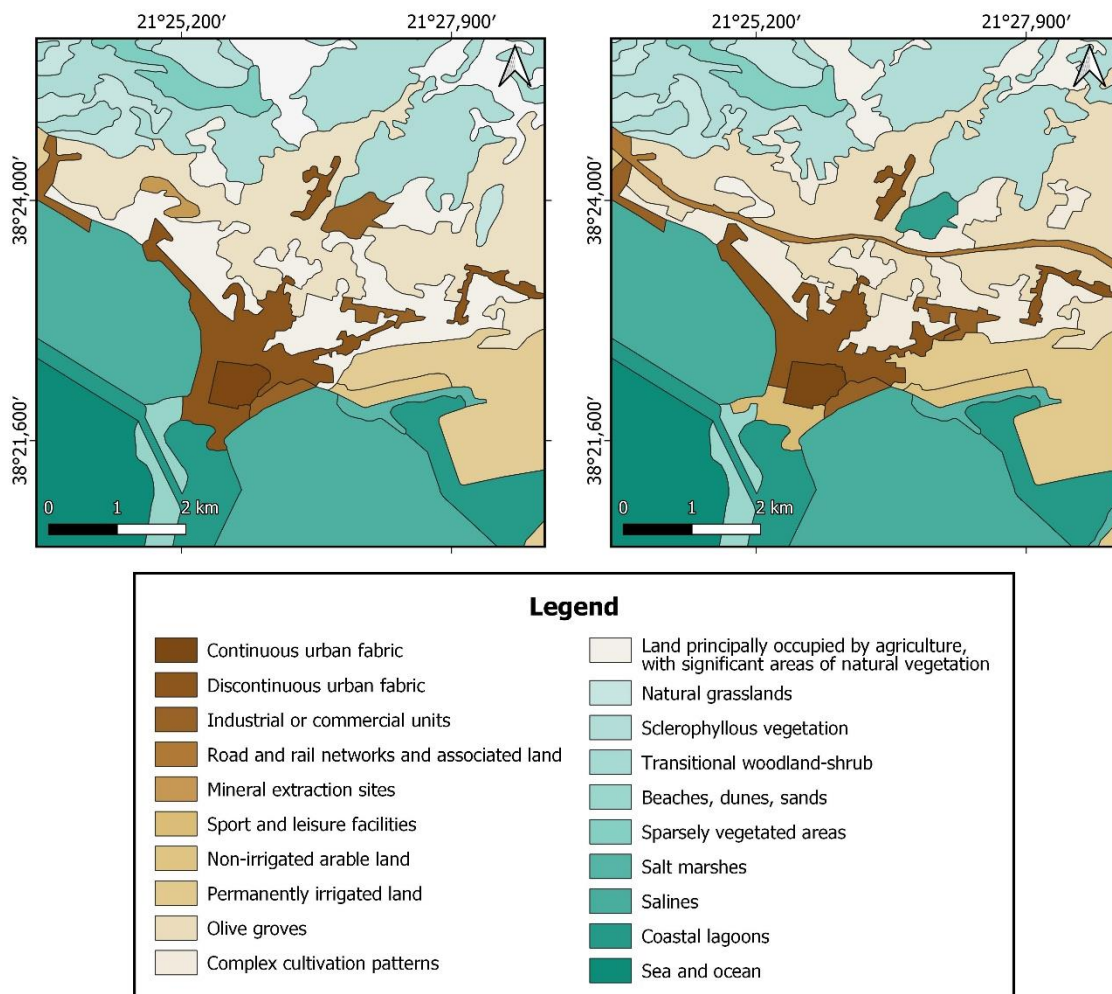
Εικόνα 44. Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα για τις γεωτρήσεις (α) EL04250402 και W5 και (β) EL04090402 and W11.

Συγκρίνοντας τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις γειτονικές γεωτρήσεις W5 και EL04250402 (Εικόνα 44α), είναι σαφές ότι η στάθμη των υπόγειων υδάτων έχει παραμείνει πρακτικά σταθερή από το 2005. Ειδικότερα, και στις δύο γεωτρήσεις η στάθμη των υπόγειων υδάτων κυμάνθηκε μεταξύ 25 και 30 μέτρων κατά το υδρολογικό έτος 2005-2006 και από το 2015. Το ίδιο συμπέρασμα μπορεί να εξαχθεί και για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις γεωτρήσεις W11 και EL04090402 (Εικόνα 44β), όπου η στάθμη των υπόγειων υδάτων κυμάνθηκε μεταξύ 6 και 8.5 m κατά τη διάρκεια των δύο προαναφερθεισών περιόδων. Με βάση τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι παραμορφώσεις δε μπορούν να αποδοθούν στην υπερεκμετάλλευση των υδροφορέων. Παρόλα αυτά σε μερικές γεωτρήσεις παρατηρούνται σκεδαστές που υποδεικνύουν τοπικά φαινόμενα υποχωρήσεων. Τα αναλυτικά δεδομένα διακύμανσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 11).

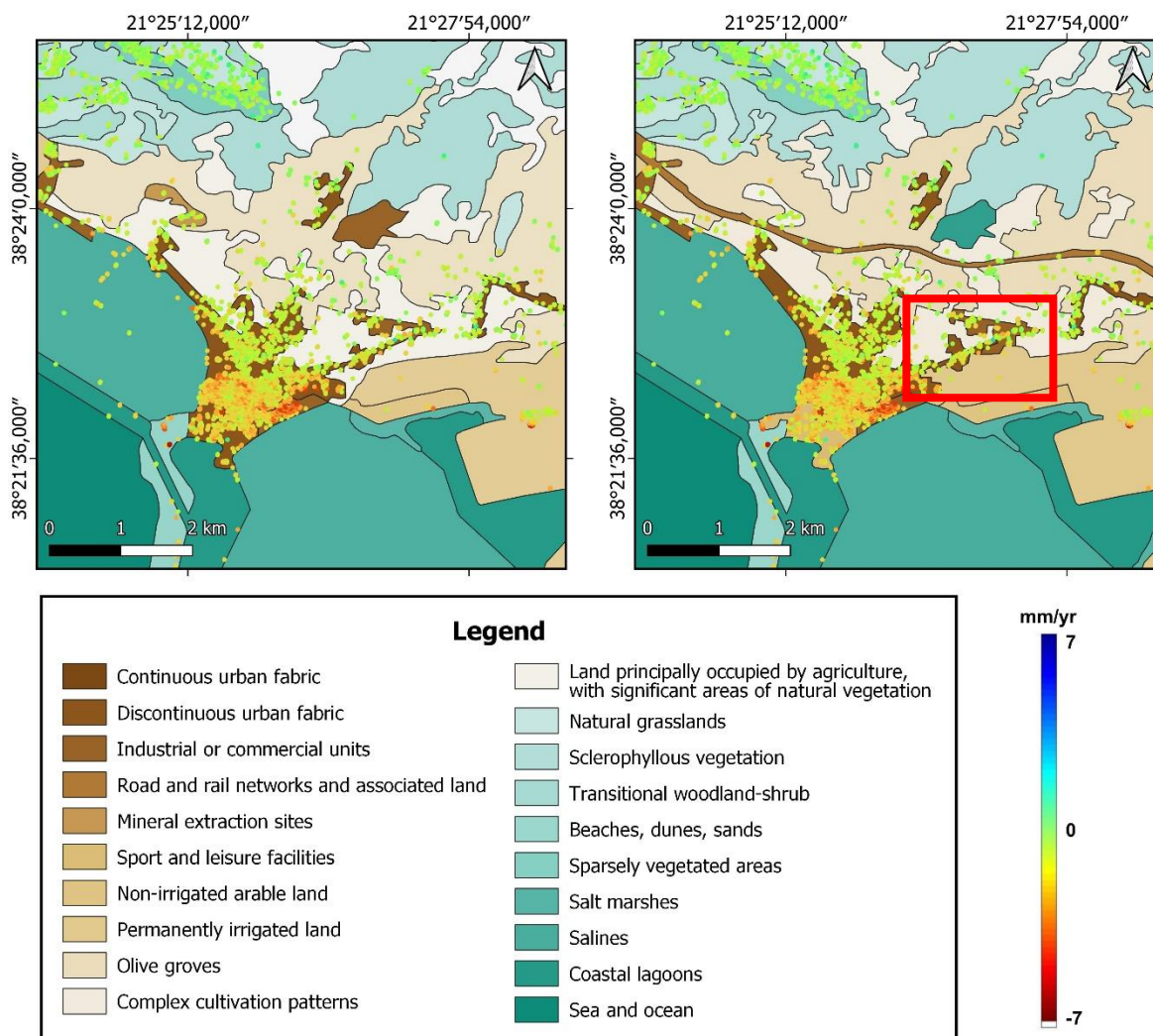
Πίνακας 11. Δεδομένα στάθμης υδροφόρου ορίζοντα για τις γεωτρήσεις του ΕΑΓΜΕ και του Lemesios (2008)

HSGME			Lemesios (2006)		
Ημερομηνία	Κωδικός γεώτρησης	Στάθμη (μ)	Ημερομηνία	Κωδικός γεώτρησης	Στάθμη (μ)
9/3/2015	EL04090402	6.68	24/10/2005	W5	24.6
15/6/2015	EL04090402	6.08	1/4/2006	W5	29.4
30/11/2015	EL04090402	5.01	24/10/2005	W11	7.1
12/2/2018	EL04090402	6.58	1/4/2006	W11	8.3
18/10/2018	EL04090402	5.09			
14/10/2019	EL04090402	5.84			
6/7/2020	EL04090402	4.31			
5/10/2020	EL04090402	5.40			
19/4/2021	EL04090402	5.49			
5/11/2021	EL04090402	5.65			
9/3/2015	EL04250402	29.9			
15/6/2015	EL04250402	27.7			
12/2/2018	EL04250402	29.6			
18/10/2018	EL04250402	25.5			
14/10/2019	EL04250402	23.6			
6/7/2020	EL04250402	23.9			
5/10/2020	EL04250402	24.0			
19/4/2021	EL04250402	25.0			
5/11/2021	EL04250402	24.7			
1/4/2022	EL04250402	28.8			

### 9.1.4. Χρήση γης



Εικόνα 45. Χρήση γης για την πόλη του Μεσολογγίου κατά το έτος (α) 2006 και (β) 2018



Εικόνα 46. Χρήση γης για την πόλη του Μεσολογγίου κατά το έτος (α) 2006 και (β) 2018 και συσχέτιση με τις κατακόρυφες μετακινήσεις της καθοδικής τροχιάς

Σύμφωνα με τον χάρτη χρήσεων γης του Corine για το 2006 (European Environment Agency (EEA) 2006) και το 2018 (European Environment Agency (EEA) 2018) (Εικόνα 45), σημειώθηκε αύξηση της έκτασης που χρησιμοποιείται για οικιστικούς και εμπορικούς σκοπούς στο ανατολικό τμήμα του Μεσολογγίου. Οι περιοχές που χρησιμοποιούνται για οικιστικούς σκοπούς αναφέρονται στο σχήμα 14 ως «Continuous urban fabric» (Συνεχής αστικός ιστός) και «Discontinuous urban fabric» (ασυνεχής αστικός ιστός) και για εμπορικούς σκοπούς ως «Industrial and commercial units» (Βιομηχανικές και εμπορικές μονάδες) και «Sport and leisure facilities» (Αθλητικές εγκαταστάσεις και εγκαταστάσεις αναψυχής). Η συσχέτιση μεταξύ του χάρτη χρήσεων γης και των κατακόρυφων παραμορφώσεων από την καθοδική τροχιά παρουσιάζεται στην Εικόνα 46. Η αύξηση της δόμησης στο ανατολικό τμήμα του Μεσολογγίου ενισχύει τα ευρήματα της ανάλυσης P-PSI,

σύμφωνα με την οποία το τελευταίο είναι το τμήμα με τον πιο έντονο ρυθμό καθιζήσεων. Αύξηση των εκτάσεων που χρησιμοποιούνται για βιομηχανικούς και εμπορικούς σκοπούς παρατηρείται και στο ανατολικό τμήμα του Μεσολογγίου, το οποίο εκτείνεται προς την εθνική οδό. Οι σταθεροί σκεδαστές υποδεικνύουν πώς η παραμόρφωση, που προκαλείται από τα φορτία των κτιρίων, αρχίζει να εκδηλώνεται τώρα στη περιοχή αυτή (Εικόνα 46).

### **9.1.5. Άλλοι παράγοντες**

#### **9.1.5.1. Τεκτονική**

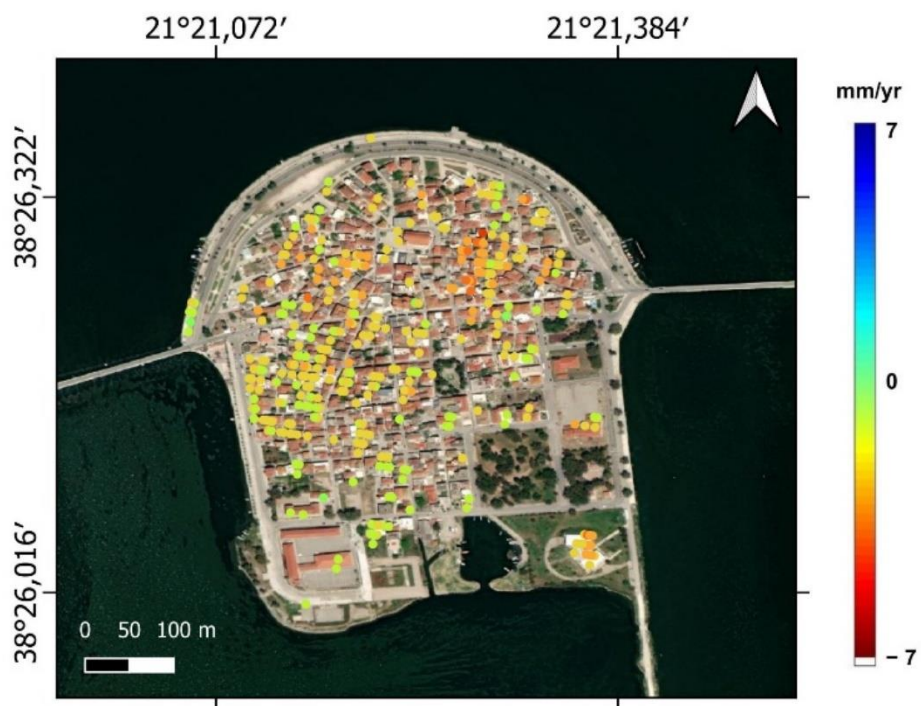
Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 17, το βραχώδες υπόβαθρο και τα ρήγματα εντοπίζονται πίσω από την περιοχή μελέτης. Η Ελλάδα είναι μια εξαιρετικά τεκτονικώς ενεργή χώρα και πληθώρα σεισμών έχουν συμβεί κατά την εξεταζόμενη χρονική περίοδο. Παρ' όλα αυτά, οι σεισμοί ήταν μέχρι 4 Α, και τα ρήγματα που βρίσκονται πλησίον της περιοχής μελέτης δεν ενεργοποιήθηκαν. Επιπλέον, αν προκαλούνταν παραμόρφωση, από τους σεισμούς αυτή θα εκδηλώνονταν στις χρονοσειρές των παραμορφώσεων ως ένα απότομο «άλμα» μετά το γεγονός.

#### **9.1.5.2. Παρόμοιες μελέτες**

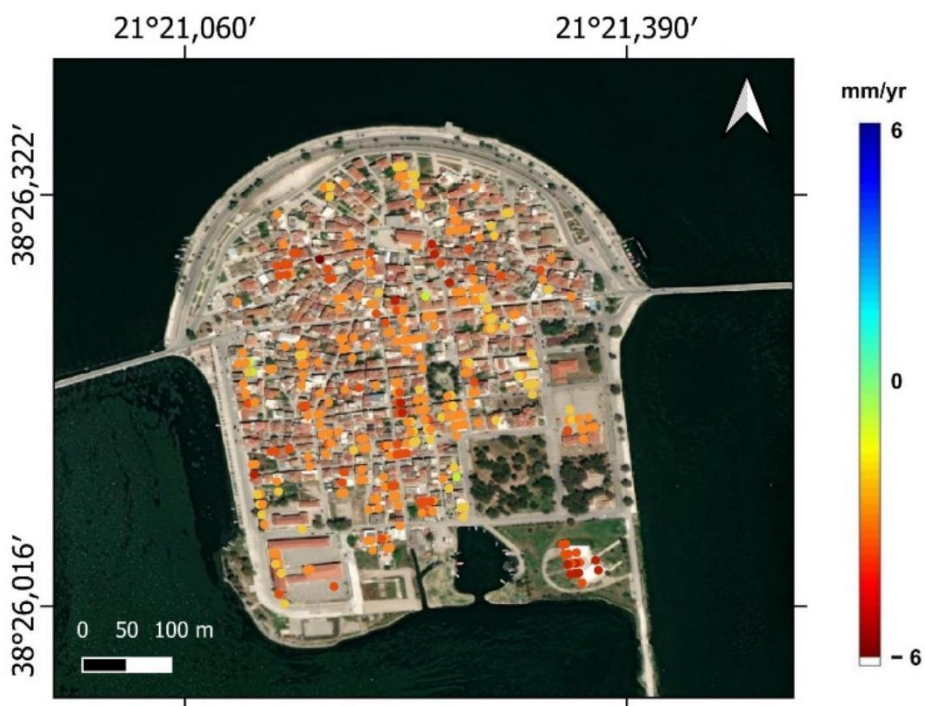
Από τα παραπάνω, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων στην πόλη του Μεσολογγίου μπορούν να αποδοθούν στη συμπίεση των σχηματισμών του Ολόκαινου, που εντοπίζονται συχνά σε ρέματα και δέλτα ποταμών και ρεμάτων. Η υπάρχουσα διεθνής βιβλιογραφία που ασχολείται με το ίδιο θέμα επιβεβαιώνει αυτά τα ευρήματα (Teatini, Tosi, and Strozzi 2011; Meckel, ten Brink, and Williams 2006; Törnqvist et al. 2008). Ο ρυθμός καθιζήσης που καταγράφηκε σε παρόμοιες μελέτες κυμαίνεται μεταξύ -3 και -15 χλ/έτος. Παρόμοιες τιμές έχουν καταγραφεί και από μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί και για άλλες περιοχές της Ελλάδας (Kaitantzian et al. 2020, Loupasakis & Rozos 2009; Tzampoglou & Loupasakis 2019, Svigkas et al. 2017, 2019, 2020, Alatzas et al. 2020, Papoutsis et al. 2020, Kontoes et al. 2021, 2022, Iliu et al. 2018, Tsangaratos et al. 2017, Raspini et al. 2014). Παρατηρείται μια μικρή διαφορά μεταξύ των τιμών που παρουσιάζονται σε αυτές τις μελέτες και εκείνων που υπολογίστηκαν για το Μεσολόγγι (-3 έως -5 χλ/έτος). Η διαφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί σε διάφορους λόγους, συμπεριλαμβανομένων των φορτίων κατασκευής, του χρόνου κατασκευής, της εποχής στην οποία σχηματίστηκε το δέλτα, καθώς και από τη στρωματογραφία του.



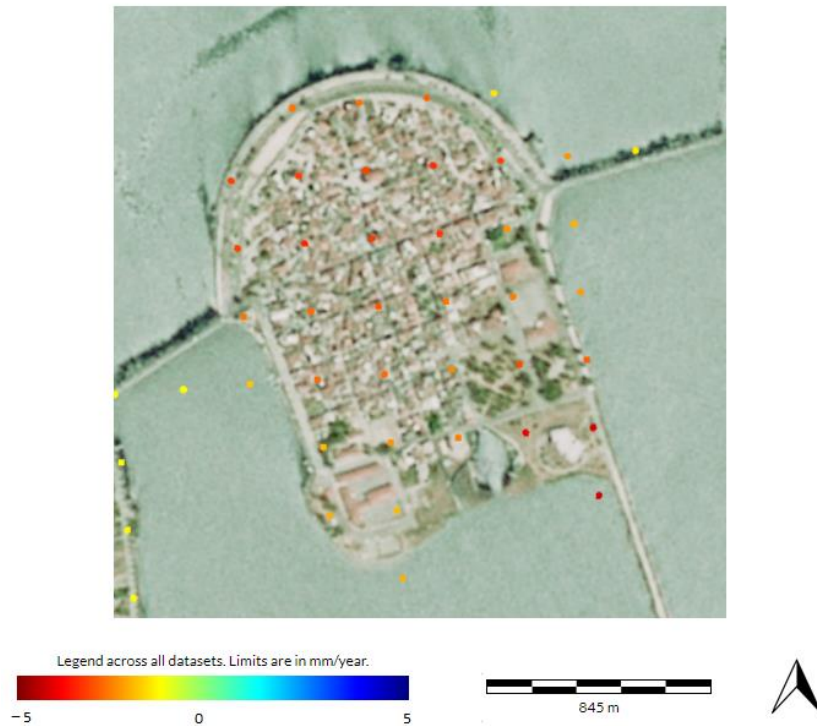
## 9.2. Εδαφικές υποχωρήσεις στο Αιτωλικό



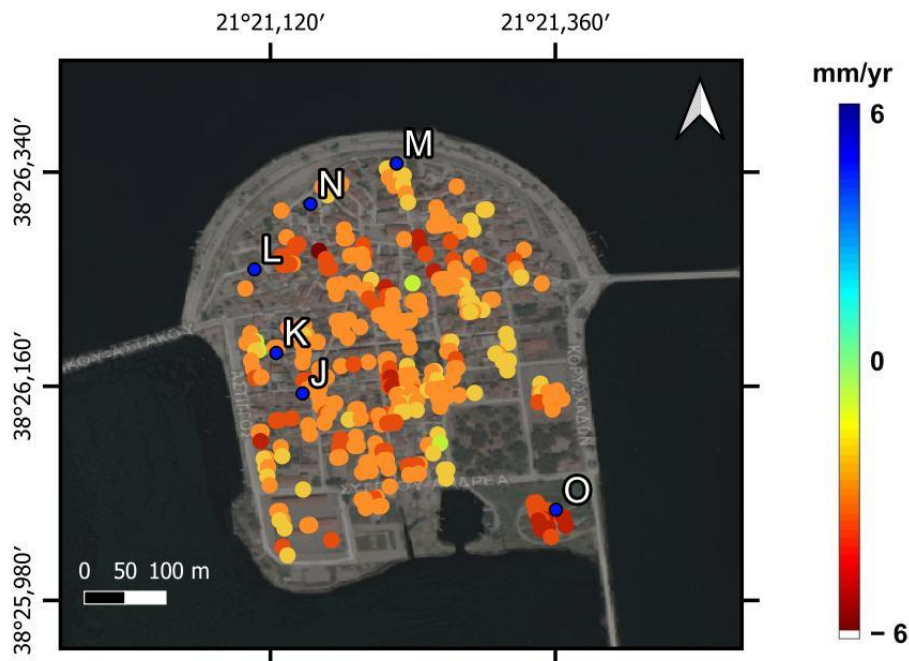
Εικόνα 47. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Αιτωλικού από την καθοδική τροχιά (pass no. 80) – ΕΑΑ



Εικόνα 48. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Αιτωλικού από την ανοδική τροχιά (pass no. 175) - ΕΑΑ



Εικόνα 49. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Μεσολογγίου - EGMS



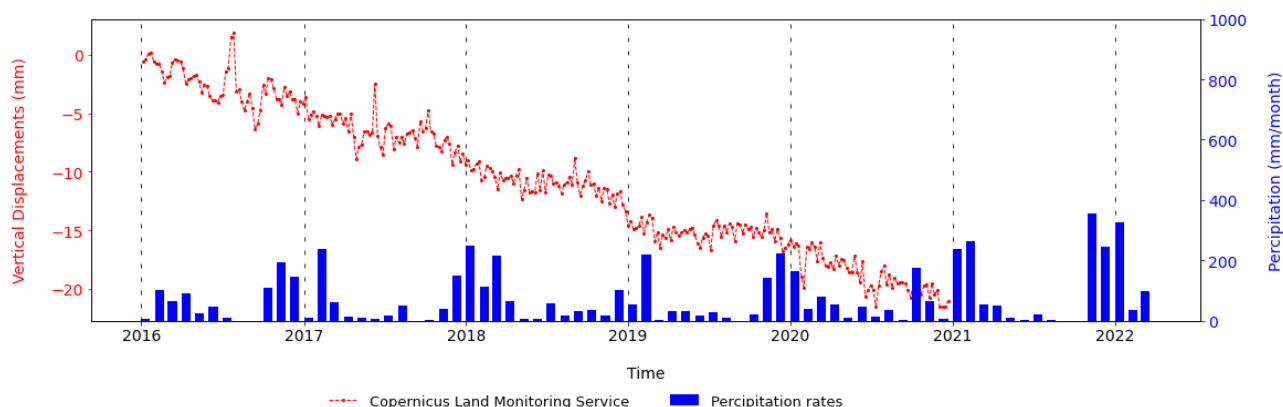
Εικόνα 50. Χωρική κατανομή κατακόρυφων παραμορφώσεων για την πόλη του Αιτωλικού από την ανοδική τροχιά και η τοποθεσία των κτηρίων που εμφανίζουν ζημιές



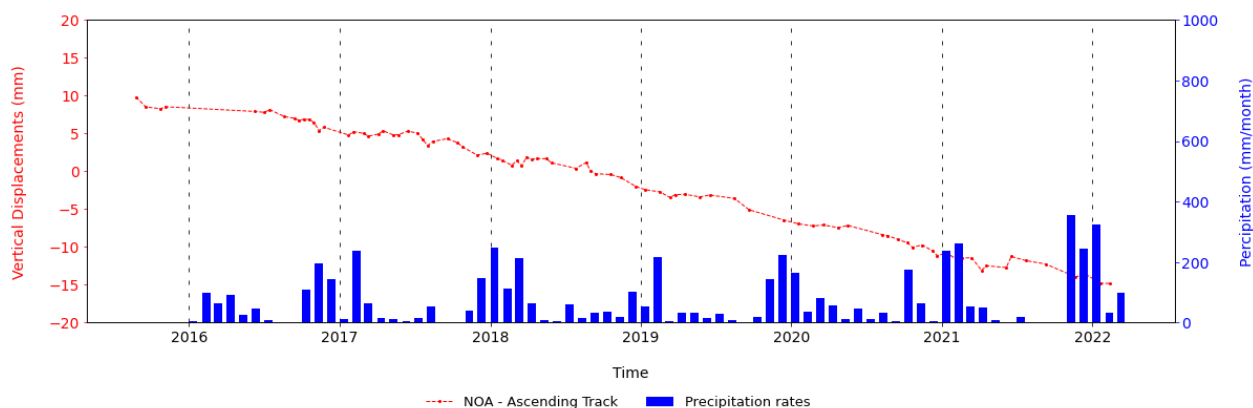
Εικόνα 51. Ζημιές σε μπαλκόνι παλαιού κτηρίου λόγω διαφορετικών καθιζήσεων (Μ)

Στο Αιτωλικό, οι μέγιστες τιμές του ρυθμού εκδήλωσης κατακόρυφων μετακινήσεων είναι  $-4$  χλ/έτος (Εικόνα 47, Εικόνα 48 και Εικόνα 49). Ρωγμές έχουν καταγραφεί σε κτήρια που εντοπίζονται κυρίως στο βόρειο τμήμα της πόλης και συγκεκριμένα στις θέσεις Μ, Ν και L στην Εικόνα 50. Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περιοχή αυτή τα θεμέλια των σπιτιών ήταν κατασκευασμένα μέσα στο νερό πριν την προσθήκη του επιχώματος το 1969. Οι υψηλότερες τιμές κατακόρυφων παραμορφώσεων,  $-4.5$  χλ/έτος, παρατηρήθηκαν στο νότιο τμήμα του νησιού, όπου βρίσκεται το Μουσείο Βάσω Κατράκη (Ο στην Εικόνα 50). Το μουσείο κατασκευάστηκε πάνω στο επίχωμα του 1969. Το σφάλμα των μετρήσεων για την πόλη του Αιτωλικού ήταν  $0.4-0.62$  χλ/έτος για την καθοδική τροχιά και  $0.33-0.58$  χλ/έτος για την ανοδική τροχιά.

### 9.2.1. Εκμετάλλευση του υπόγειου υδροφόρου οριζοντα & Βροχοπτώσεις



Εικόνα 52. Χρονοσειρά κατακόρυφων μετακινήσεων για το Μουσείο Βάσω Κατράκη– EGMS.



Εικόνα 53. Χρονοσειρά κατακόρυφων μετακινήσεων για το Μουσείο Βάσω Κατράκη για την ανοδική τροχιά– EAA.

Οι χρονοσειρές των σταθερών σκεδαστών που βρίσκονται στα κτήρια όπου εντοπίζονται ρωγμές δείχνουν μια συνεχή τάση κατακόρυφης μετακίνησης. Στις χρονοσειρές για την πόλη του Αιτωλικού δεν εντοπίζονται σημαντικές διακυμάνσεις που πιθανώς να σχετίζονται με τις μεταβολές της στάθμης των υπόγειων υδάτων, παρόμοιες με αυτές που εντοπίστηκαν στο Μεσολόγγι. Η συνεχής αυτή τάση είναι εμφανής από το σύνολο δεδομένων του EGMS, καθώς και από την ανάλυση δορυφορικών δεδομένων P-PSI που πραγματοποιήθηκε στο BEYOND. Στην Εικόνα 52 και στην Εικόνα 53 παρουσιάζονται οι χρονοσειρές παραμόρφωσης για τους σταθερούς σκεδαστές που εντοπίστηκαν στο Μουσείο Βάσω Κατράκη (Ο στην Εικόνα 50) από το EGMS και τη μελέτη του BEYOND για την ανοδική τροχιά, αντίστοιχα. Παρόλο που έντονες διακυμάνσεις δεν εντοπίζονται στις χρονοσειρές, η διαρκής τάση για καθοδική μετακίνηση του μουσείου είναι εμφανής. Η συνολική μετατόπιση που καταγράφηκε για το

χρονικό διάστημα της μελέτης είναι 2.5 εκ.. Δεδομένου ότι καμία γεώτρηση δεν εκμεταλλεύεται τα υπόγεια ύδατα στο Αιτωλικό, είναι σαφές ότι οποιαδήποτε διακύμανση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, οφείλεται στην διακύμανση της στάθμης της λιμνοθάλασσας και στην σφοδρότητα των βροχοπτώσεων, και επηρεάζει ελάχιστα τις καθιζήσεις.

### **9.2.2. Γεωτεχνικά δεδομένα**

Γεωτεχνικά δεδομένα για την πόλη του Αιτωλικού δεν βρέθηκαν. Παρ'όλα αυτά, το γεγονός ότι ολόκληρη η πόλη είναι θεμελιωμένη πάνω σε τυχαία εναποτιθέμενα, μη συμπιεσμένα υλικά δεν αφήνει καμία αμφιβολία για την υψηλή συμπίεστικότητα των σχηματισμών. Θα πρέπει, επίσης, να σημειωθεί ότι από την δορυφορική ανάλυση παρατηρήθηκαν διαφορετικοί ρυθμοί κατακόρυφων μετακινήσεων για κοντινά κτήρια, γεγονός που πιθανώς να οφείλεται στους διαφορετικούς τύπους θεμελίωσης που έχουν χρησιμοποιηθεί, καθώς και στην ετερογένεια των υλικών των επιχωμάτων. Από τα παραπάνω, είναι σαφές ότι η κύρια αιτία των εδαφικών υποχωρήσεων στο Αιτωλικό είναι η φυσική συμπίεση και η συμπίεση λόγω των εξωτερικά επιβαλλόμενων φορτίων των σχηματισμών.

## 10. Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία παρέχει μια προσέγγιση για τον προσδιορισμό του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων και καθιζήσεων που εντοπίστηκαν στις πόλεις του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού με την χρήση της τεχνικής συμβολομετρίας σε ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (InSAR). Οι μετατοπίσεις στις ανωτέρω πόλεις εντοπίστηκαν και καταγράφηκαν από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στο κέντρο BEYOND Centre for Earth Observation Research and Satellite Remote Sensing του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών και από τα δεδομένα του European Ground Motion Service του Copernicus. Τα αποτελέσματα των τεχνικών InSAR επικυρώθηκαν μέσω επιτόπιων επισκέψεων, που πραγματοποιήθηκαν στις πληγείσες περιοχές, όπου και τεκμηριώθηκαν οι ζημιές των κτιρίων.

Ο συνδυασμός των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και γεωτεχνικών δεδομένων, καθώς και των δεδομένων μεταβολής της στάθμης της θάλασσας και των βροχοπτώσεων κατέστησαν δυνατό τον εντοπισμό των βασικών αιτιών για την εκδήλωση των προαναφερθέντων φαινομένων. Η τάση κατακόρυφης παραμόρφωσης, που εντοπίστηκε στις πόλεις μελέτης, δεν μπορεί να αποδοθεί στην εκμετάλλευση της στάθμης των υπόγειων υδάτων, καθώς η μεταβολή της τελευταίας, κατά την εξεταζόμενη χρονική διάρκεια, ήταν αμελητέα.

Οι παράκτιες αποθέσεις, που καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής μελέτης, μπορούν να χαρακτηριστούν ως συμπιεστές λόγω των υψηλών τιμών του δείκτη συμπιεστότητας ( $C_c$ ) που εντοπίστηκαν. Ως εκ τούτου, η στερεοποίηση των σχηματισμών τόσο εξαιτίας της επιβολής εξωτερικών φορτίων όσο και της φυσικής στερεοποίησης θεωρούνται ως οι βασικοί παράγοντες που προκαλούν τα φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων και καθιζήσεων. Η δευτερογενής συμπίεση (ερπυσμός) μπορεί, επίσης, να θεωρηθεί ως ένας εκ των παραγόντων που οδηγούν το έδαφος σε καθίζηση, κυρίως στα τμήματα των δύο πόλεων όπου τα κτήρια κατασκευάστηκαν από τα μέσα του 19<sup>ου</sup> αιώνα έως τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα.

Τέλος, η άνοδος της στάθμης της θάλασσας και η αύξηση της έντασης των βροχοπτώσεων αποτελούν κρίσιμους παράγοντες που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στις επαναλαμβανόμενες πλημμύρες και των δύο παράκτιων πόλεων. Τα πλημμυρικά φαινόμενα αναμένονται να επιδεινωθούν τα επόμενα χρόνια, λαμβάνοντας υπόψη τη συνδυασμένη επίδραση της σταδιακής καθίζησης των περιοχών και της εντατικοποίησης των μετεωρολογικών φαινομένων που προκαλούνται από την κλιματική αλλαγή.

## Αναφορές

- Alatza, Stavroula-Drosoula E. 2020. “Multi-Temporal SAR Interferometry for Monitoring Ground Deformation in Greece (Ph.D Dissertation).” Athens. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.19802>.
- Alatza, Stavroula, Ioannis Papoutsis, Demitris Paradissis, Charalampos Kontoes, and Gerassimos A. Papadopoulos. 2020. “Multi-Temporal InSAR Analysis for Monitoring Ground Deformation in Amorgos Island, Greece.” *Sensors* 20 (2): 338. <https://doi.org/10.3390/s20020338>.
- Alatza, Stavroula, Ioannis Papoutsis, Demitris Paradissis, Charalampos Kontoes, Gerassimos A. Papadopoulos, and Costas Raptakis. 2020. “InSAR Time-Series Analysis for Monitoring Ground Displacement Trends in the Western Hellenic Arc: The Kythira Island, Greece.” *Geosciences* 10 (8): 293. <https://doi.org/10.3390/geosciences10080293>.
- Antoniadis, Nikolaos, Stavroula Alatza, Constantinos Loupasakis, and Charalampos Kontoes. 2023. “Land Subsidence Phenomena vs. Coastal Flood Hazard—The Cases of Messolonghi and Aitolikon (Greece).” *Remote Sensing* 15 (8): 2112. <https://doi.org/10.3390/RS15082112/S1>.
- Barnes, Graham. 2010. *Soil Mechanics: Principles and Practice*. 3rd ed. Palgrave Macmillan.
- Climate Change Knowledge Portal. n.d. “Greece - Sea Level Rise.” Accessed September 25, 2022. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/greece/impacts-sea-level-rise>.
- Copernicus Climate Change Service. n.d. “Sea Level | Copernicus.” Accessed September 25, 2022. <https://climate.copernicus.eu/climate-indicators/sea-level>.
- Costantini, Mario, Federico Minati, Francesco Trillo, Alessandro Ferretti, Fabrizio Novali, Emanuele Passera, John Dehls, et al. 2021. “European Ground Motion Service (EGMS).” In *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 3293–96. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553562>.
- Crosetto, Michele, Oriol Monserrat, María Cuevas-González, Núria Devanthéry, and Bruno Crippa. 2016. “Persistent Scatterer Interferometry: A Review.” *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115 (May): 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>.
- Crosetto, Michele, Lorenzo Solari, Marek Mróz, Joanna Balasis-Levinsen, Nicola Casagli, Michaela Frei, Anneleen Oyen, et al. 2020. “The Evolution of Wide-Area DInSAR: From Regional and National Services to the European Ground Motion

- Service." *Remote Sensing* 12 (12): 2043. <https://doi.org/10.3390/rs12122043>.
- Delikaraoglou, Dimitris. 2005. "Geodetic Applications of SAR Symbolometry." In *Special Topics in Satellite Geodesy (Lecture Notes)*. Athens: School of Rural, Surveying and Geoinformatics Engineering - NTUA. [http://portal.survey.ntua.gr/geohopper/iCommons/iC\\_OCW/iC\\_OCW\\_STSG/notes\\_STSG/SSG\\_ch7\\_SAR.pdf](http://portal.survey.ntua.gr/geohopper/iCommons/iC_OCW/iC_OCW_STSG/notes_STSG/SSG_ch7_SAR.pdf).
- DIPYN of HSGME. n.d. "Groundwater Monitoring Network."
- Douveas, N., D. Kavadia, and P. Papadopoulou. 2007. "Geotechnical Foundation Conditions of Mesologion Swimming Pool Center." *Bulletin of the Geological Society of Greece* 40 (4): 1644. <https://doi.org/10.12681/bgsg.17068>.
- EarthData - NASA. 2021. "What Is Remote Sensing? | Earthdata." December 2021. <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/remote-sensing>.
- EarthData - NASA. 2020. "What Is Synthetic Aperture Radar? | Earthdata." April 2020. <https://earthdata.nasa.gov/learn/backgrounders/what-is-sar>.
- "EGMS White Paper." 2017. 2017.
- European Environment Agency (EEA). 2006. "European Union, Copernicus Land Monitoring Service ." <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2006>.
- European Environment Agency (EEA). 2018. "European Union, Copernicus Land Monitoring Service." <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018>.
- European Space Agency. 2010. "ESA - Eduspace EN - Home - What Is Remote Sensing?" January 2010. [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_EN/SEMF9R3Z2OF\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_EN/SEMF9R3Z2OF_0.html).
- Fasullo, John T, and R Steven Nerem. 2018. "Altimeter-Era Emergence of the Patterns of Forced Sea-Level Rise in Climate Models and Implications for the Future." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (51): 12944–49. <https://doi.org/10.1073/pnas.1813233115>.
- Ferretti, Alessandro, Andrea Monti-Guarnieri, Claudio Prati, Fabio Rocca, and Didier Massonet. 2007. "InSAR Principles - Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation - Part A." *ESA Publications* TM-19\_a (February). [https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19\\_ptA.pdf](https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf).
- Flanders Marine Institute (VLIZ), and Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC). 2022. "Sea Level Station Monitoring Facility." 2022. <https://doi.org/https://doi.org/10.14284/482>.
- Franz, Meyer. 2019. "Spaceborne Synthetic Aperture Radar: Principles, Data Access,



and Basic Processing Techniques." In *SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*, edited by Africa Flores, Kelsey Herndon, Rajesh Thapa, and Emil Cherrington, 1st ed. NASA.

Frederikse, Thomas, Felix Landerer, Lambert Caron, Surendra Adhikari, David Parkes, Vincent W. Humphrey, Sönke Dangendorf, et al. 2020. "The Causes of Sea-Level Rise since 1900." *Nature* 2020 584:7821 584 (7821): 393–97. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2591-3>.

Hamlington, Benjamin D., Thomas Frederikse, R. Steven Nerem, John T. Fasullo, and Surendra Adhikari. 2020. "Investigating the Acceleration of Regional Sea Level Rise During the Satellite Altimeter Era." *Geophysical Research Letters* 47 (5): e2019GL086528. <https://doi.org/10.1029/2019GL086528>.

Hooper, A., P. Segall, and H. Zebker. 2007. "Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos." *Journal of Geophysical Research* 112 (B7): B07407. <https://doi.org/10.1029/2006JB004763>.

Houšková, Beata. 2008. "Map for Europe of Natural Susceptibility of Soils to Compaction."

Iliá, Ioanna, Constantinos Loupasakis, and Paraskevas Tsangaratos. 2018. "Land Subsidence Phenomena Investigated by Spatiotemporal Analysis of Groundwater Resources, Remote Sensing Techniques, and Random Forest Method: The Case of Western Thessaly, Greece." *Environmental Monitoring and Assessment* 190 (11): 1–19. <https://doi.org/10.1007/S10661-018-6992-9/TABLES/6>.

Kaitantzian, Agavni, Constantinos Loupasakis, Ploutarchos Tzampoglou, and Isaak Parcharidis. 2020. "Ground Subsidence Triggered by the Overexploitation of Aquifers Affecting Urban Sites: The Case of Athens Coastal Zone along Faliro Bay (Greece)." *Geofluids* 2020 (September): 1–18. <https://doi.org/10.1155/2020/8896907>.

Kavvas, Michael. 2006. "Soil Consolidation." In *Soil Mechanics*, 13th ed. Athens: National Technical University of Athens.

Kontoes, Charalampos (Haris), Stavroula Alatza, Konstantinos Chousianitis, Nikos Svingkas, Constantinos Loupasakis, Simone Atzori, and Alexis Apostolakis. 2022. "Coseismic Surface Deformation, Fault Modeling, and Coulomb Stress Changes of the March 2021 Thessaly, Greece, Earthquake Sequence Based on InSAR and GPS Data." *Seismological Research Letters* 93 (5): 2584–98. <https://doi.org/10.1785/0220210112>.

Kontoes, Charalampos, Constantinos Loupasakis, Ioannis Papoutsis, Stavroula Alatza, Eleftheria Poyiadji, Athanassios Ganas, Christina Psychogiou, Mariza Kaskara, Sylvia Antoniadis, and Natalia Spanou. 2021. "Landslide Susceptibility Mapping of Central and Western Greece, Combining NGI and WoE Methods,

- with Remote Sensing and Ground Truth Data." *Land* 10 (4): 402. <https://doi.org/10.3390/land10040402>.
- Kouli, Maria. 2015. "Remote Sensing and Digital Image Analysis (Lecture Notes)." Xania. [https://eclass.chania.hmu.gr/modules/document/file.php/FP137/REMOTE\\_SENSING\\_NOTES2015.pdf](https://eclass.chania.hmu.gr/modules/document/file.php/FP137/REMOTE_SENSING_NOTES2015.pdf).
- Lagouvardos, K, V Kotroni, A Bezes, I Koletsis, T Kopania, S Lykoudis, N Mazarakis, K Papagiannaki, and S Vougioukas. 2017. "The Automatic Weather Stations NOANN Network of the National Observatory of Athens: Operation and Database." *Geoscience Data Journal* 4 (1): 4–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/gdj3.44>.
- Land | Copernicus. n.d. "Land | Copernicus." Accessed June 10, 2023. <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/land>.
- Legeais, Jean François, Benoît Meyssignac, Yannice Faugère, Adrien Guerou, Michaël Ablain, Marie Isabelle Pujol, Claire Dufau, and Gérard Dibarboue. 2021. "Copernicus Sea Level Space Observations: A Basis for Assessing Mitigation and Developing Adaptation Strategies to Sea Level Rise." *Frontiers in Marine Science* 8 (November): 1668. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2021.704721/BIBTEX>.
- Lemesios, I. 2008. "Environmental Hydrogeological Survey of the Horizons of the Wider Area of the Municipality of Messolonghi in Relation to Its Natural Healing Resources." Patras: University of Patras. <https://hdl.handle.net/10889/823>.
- Loupasakis, C, and D Rozos. 2009. "Finite-Element Simulation of Land Subsidence Induced by Water Pumping in Kalochori Village, Greece." *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 42 (3): 369–82. <https://doi.org/10.1144/1470-9236/08-022>.
- Loupasakis, Constantinos. 2013. "Consolidation - Settlements." In *Soil Mechanics & Foundation Engineering*. Athens: National Technical University of Athens.
- Mahmoudpour, Masoud, Mashalah Khomehchian, Mohammad Reza Nikudel, and Mohammad Reza Ghassemi. 2016. "Numerical Simulation and Prediction of Regional Land Subsidence Caused by Groundwater Exploitation in the Southwest Plain of Tehran, Iran." *Engineering Geology* 201 (February): 6–28. <https://doi.org/10.1016/J.ENGGEOL.2015.12.004>.
- Marcos, Marta, Gabriel Jorda, and Gonéri Le Cozannet. 2016. "Sub-Chapter 2.2.1. Sea Level Rise and Its Impacts on the Mediterranean." In *The Mediterranean Region under Climate Change*, 265–75. IRD Éditions. <https://doi.org/10.4000/books.irdeditions.23454>.
- Meckel, T. A., U. S. ten Brink, and S. Jeffress Williams. 2006. "Current Subsidence Rates Due to Compaction of Holocene Sediments in Southern Louisiana." *Geophysical*

- Research Letters* 33 (11): 2006GL026300. <https://doi.org/10.1029/2006GL026300>.
- NASA. n.d. "Sea Level Projection Tool – NASA Sea Level Change Portal." Accessed September 27, 2022. <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>.
- Natural Resources Canada. 2019. *Fundamentals of Remote Sensing*. <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/satellite-imagery-and-air-photos/tutorial-fundamentals-remote-sensing/9309>.
- Nerem, R. S., B. D. Beckley, J. T. Fasullo, B. D. Hamlington, D. Masters, and G. T. Mitchum. 2018. "Climate-Change–Driven Accelerated Sea-Level Rise Detected in the Altimeter Era." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 115 (9): 2022–25. <https://doi.org/10.1073/PNAS.1717312115/ASSET/7B2ADB67-3200-4483-939B-EFE5698F7511/ASSETS/GRAPHIC/PNAS.1717312115FIG03.JPEG>.
- NOAA/STAR Laboratory for Satellite Altimetry. n.d. "NOAA / NESDIS / STAR - Laboratory for Satellite Altimetry / Sea Level Rise." Accessed September 25, 2022. [https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries.php).
- Osmanoğlu, Batuhan, Filiz Sunar, Shimon Wdowinski, and Enrique Cabral-Cano. 2016. "Time Series Analysis of InSAR Data: Methods and Trends." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115 (May): 90–102. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.003>.
- Papacharisis, Nikolaos, Ioannis Grammatikopoulos, and Niki Manou-Andreadi. 2015. *Geotechnical Engineering - Research - Drilling - Laboratory*. 2nd ed. Thessaloniki: Kyriakidis Editions.
- Papoutsis, Ioannis. 2014. "Radar Interferometry for Monitoring Crustal Deformation (Ph.D Dissertation)." Athens. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.26240/heal.ntua.1204>.
- Papoutsis, Ioannis, Charalampos Kontoes, Stavroula Alatza, Alexis Apostolakis, and Constantinos Loupasakis. 2020. "InSAR Greece with Parallelized Persistent Scatterer Interferometry: A National Ground Motion Service for Big Copernicus Sentinel-1 Data." *Remote Sensing* 12 (19): 3207. <https://doi.org/10.3390/rs12193207>.
- Pavlopoulos, K. 2022. Greek Case Studies: The Implications of the Expected Sea Level Rise on the Low Lying Areas of Continental Greece in the Next Century.
- Raspini, Federico, Constantinos Loupasakis, Dimitrios Rozos, Nico Adam, and Sandro Moretti. 2014. "Ground Subsidence Phenomena in the Delta Municipality Region (Northern Greece): Geotechnical Modeling and Validation with Persistent Scatterer Interferometry." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 28 (1): 78–89. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2013.11.010>.

- Svigkas, Nikos, Constantinos Loupasakis, Ioannis Papoutsis, Charalampos (Haris) Kontoes, Stavroula Alatza, Ploutarchos Tzampoglou, Cristiano Tolomei, and Thomas Spachos. 2020. "InSAR Campaign Reveals Ongoing Displacement Trends at High Impact Sites of Thessaloniki and Chalkidiki, Greece." *Remote Sensing* 12 (15): 2396. <https://doi.org/10.3390/rs12152396>.
- Svigkas, Nikos, Constantinos Loupasakis, Paraskevas Tsangaratos, Ioannis Papoutsis, Anastasia Kiratzi, and Charalambos Kontoes. 2020. "A Deformation Study of Anthemountas Graben (Northern Greece) Based on in Situ Data and New InSAR Results." *Arabian Journal of Geosciences* 13 (13): 518. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05393-9>.
- Svigkas, Nikos, Ioannis Papoutsis, Constantinos Loupasakis, Paraskevas Tsangaratos, Anastasia Kiratzi, and Charalambos (Haris) Kontoes. 2019. "Radar Space Measurements of the Deforming Trends at Northern Greece Resulting from Underground Water Activity BT - Advances in Remote Sensing and Geo Informatics Applications." In , edited by Hesham M El-Askary, Saro Lee, Essam Heggy, and Biswajeet Pradhan, 309–13. Cham: Springer International Publishing.
- Svigkas, Nikos, Ioannis Papoutsis, Constantinos Loupasakis, Paraskevas Tsangaratos, Anastasia Kiratzi, and Charalampos Haris Kontoes. 2017. "InSAR Time-Series Monitoring of Ground Displacement Trends in an Industrial Area (Oreokastro—Thessaloniki, Greece): Detection of Natural Surface Rebound and New Tectonic Insights." *Environmental Earth Sciences* 76 (5): 195. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6517-9>.
- Teatini, P., L. Tosi, and T. Strozzi. 2011. "Quantitative Evidence That Compaction of Holocene Sediments Drives the Present Land Subsidence of the Po Delta, Italy." *Journal of Geophysical Research* 116 (B8): B08407. <https://doi.org/10.1029/2010JB008122>.
- The Climate Change Initiative Coastal Sea Level team. 2020. "Coastal Sea Level Anomalies and Associated Trends from Jason Satellite Altimetry over 2002–2018." *Scientific Data* 2020 7:17 (1): 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00694-w>.
- Törnqvist, Torbjörn E., Davin J. Wallace, Joep E. A. Storms, Jakob Wallinga, Remke L. van Dam, Martijn Blaauw, Mayke S. Derksen, Cornelis J. W. Klerks, Camiel Meijneken, and Els M. A. Snijders. 2008. "Mississippi Delta Subsidence Primarily Caused by Compaction of Holocene Strata." *Nature Geoscience* 1 (3): 173–76. <https://doi.org/10.1038/ngeo129>.
- Tsangaratos, Paraskevas, Constantinos Loupasakis, and Ioanna Ilia. 2017. "Ground Subsidence Phenomena in Frakadona, West Thessaly, Greece." <https://doi.org/10.1117/12.2279082> 10444 (September): 149–57. <https://doi.org/10.1117/12.2279082>.

- Tzampoglou, P., and C. Loupasakis. 2019. "Numerical Simulation of the Factors Causing Land Subsidence Due to Overexploitation of the Aquifer in the Amyntaio Open Coal Mine, Greece." *HydroResearch* 1 (June): 8–24. <https://doi.org/10.1016/J.HYDRES.2019.04.002>.
- Vignudelli, Stefano, Florence Birol, Jérôme Benveniste, Lee Lueng Fu, Nicolas Picot, Matthias Raynal, and Hélène Roinard. 2019. "Satellite Altimetry Measurements of Sea Level in the Coastal Zone." *Surveys in Geophysics* 2019 40:6 40 (6): 1319–49. <https://doi.org/10.1007/S10712-019-09569-1>.
- Zoccarato, Claudia, Philip S.J. Minderhoud, and Pietro Teatini. 2018. "The Role of Sedimentation and Natural Compaction in a Prograding Delta: Insights from the Mega Mekong Delta, Vietnam." *Scientific Reports* 8 (1). <https://doi.org/10.1038/S41598-018-29734-7>.
- Zwanenburg, Cor. 2011. "Potential Head Response to River Level Fluctuations." In *A Feeling for Soil and Water*, 29–44. Delft: Deltares.
- "Αγανάκτησαν Στο Αιτωλικό- Βροχή Και...πλημμύρα." 2022. 2022. <https://www.agrinionews.gr/aganaktisan-aitoliko-vrochi-kai-plimmyra/>.
- Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. 1958. "Geological Report on the Messolonghi Lagoon Drainage Projects; Technical Report." Acharnes.
- Ελληνική Αρχή Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών. 1987. "Geotechnical Investigation of the Foundations for the Construction of Worker's Households in the Areas of Messolonghi-Aitolikon I, II-Agrinio." Acharnes. ESDAC.jrc.ec.europa.eu.
- ΓΓΜΕ. 1996. "Γεωλογικό Φύλλο «Μεσολόγγιον» Και «Ευηνοχώριον» Κλίμακας 1:50.000."
- Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων. 1997. "Messolonghi V—O.E.K." Athens.
- ΚΟΙΝΟΠΡΑΞΙΑ Γ.ΚΑΡΑΒΟΚΥΡΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ Α.Ε., ΕΝΒΕΚΟ ΑΝΩΝΥΜΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Α.Ε., ΟΜΙΚΡΟΝ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ Α.Ε., ΞΕΝΟΦΩΝ ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΚΑΙ ΣΥΝΕΡΓΑΤΕΣ Ε.Ε., ΟΜΙΚΡΟΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΙΑΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ Α.Ε., ΧΡΗΣΤΟΣ ΣΑΛΟΓΙΑΝΝΟΣ, ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΤΣΕΚΟΥΡΑΣ, and ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ. 2018. "ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΚΙΝΔΥΝΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ Των Λεκανών Απορροής Ποταμών Του Υδατικού Διαμερίσματος Δυτικής Στερεάς Ελλάδας. Ειδική Γραμματεία Υδάτων Και Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας. Στάδιο I - 1-3η Φάση - ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΑΣ."
- Λουπασάκης, Κωνσταντίνος. 2013. "Εδαφικές Υποχωρήσεις." In *Τεχνική Γεωλογία*

Ι. Αθήνα: ΕΜΠ.

“Οι Αιτίες Που Πλημμυρίζει Το Μεσολόγγι.” 2022. 2022.  
<https://messolonghibylocals.com/floodmessolonghi>.

“Προβλήματα Από Την Κακοκαιρία Στην Αιτωλοακαρνανία.” 2014. 2014.  
<https://www.agrinioculture.gr/2014/10/06/provlimata-apo-tin-kakokeria-stin-etoloakarnania/>.

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΩΝ ΠΛΗΓΕΝΤΩΝ  
ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙ**

# Κτήριο Α









## Κτήριο Δ





## Κτήριο Ε



## Κτήριο Η



# Κτήριο I



**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΚΤΗΡΙΩΝ ΠΛΗΓΕΝΤΩΝ  
ΑΠΟ ΤΙΣ ΕΔΑΦΙΚΕΣ ΥΠΟΧΩΡΗΣΕΙΣ ΣΤΟ ΑΙΤΩΛΙΚΟ**



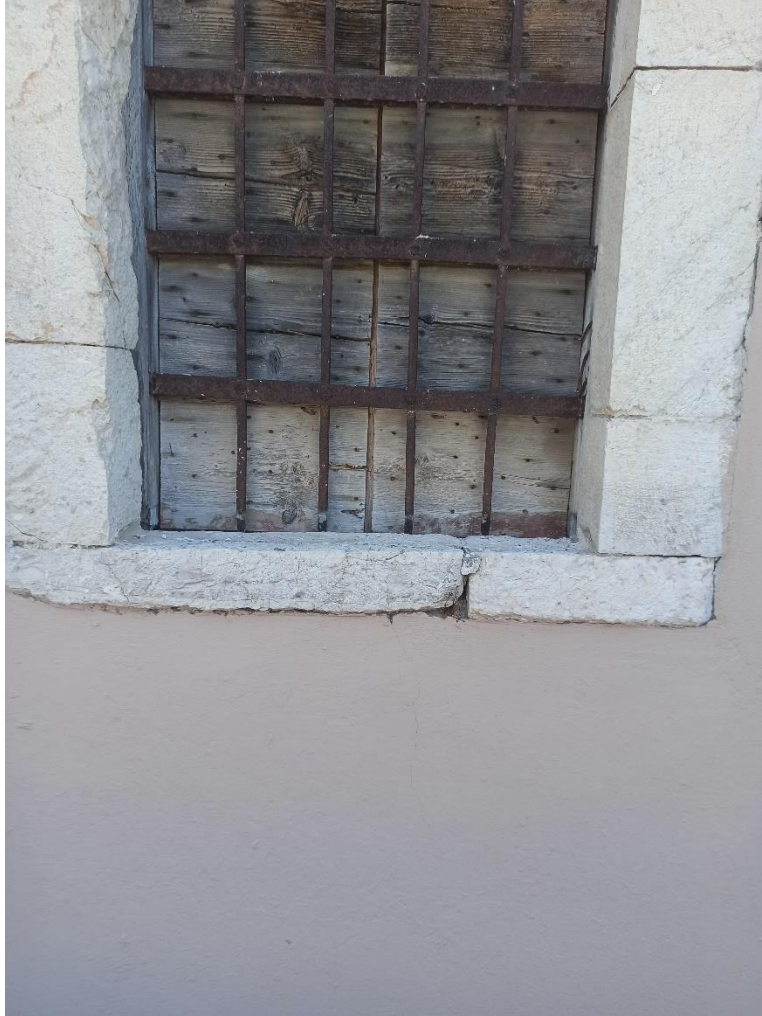
**Κτήριο J**



**Κτήριο K**



# Κτήριο Μ



## Κτήριο L

