

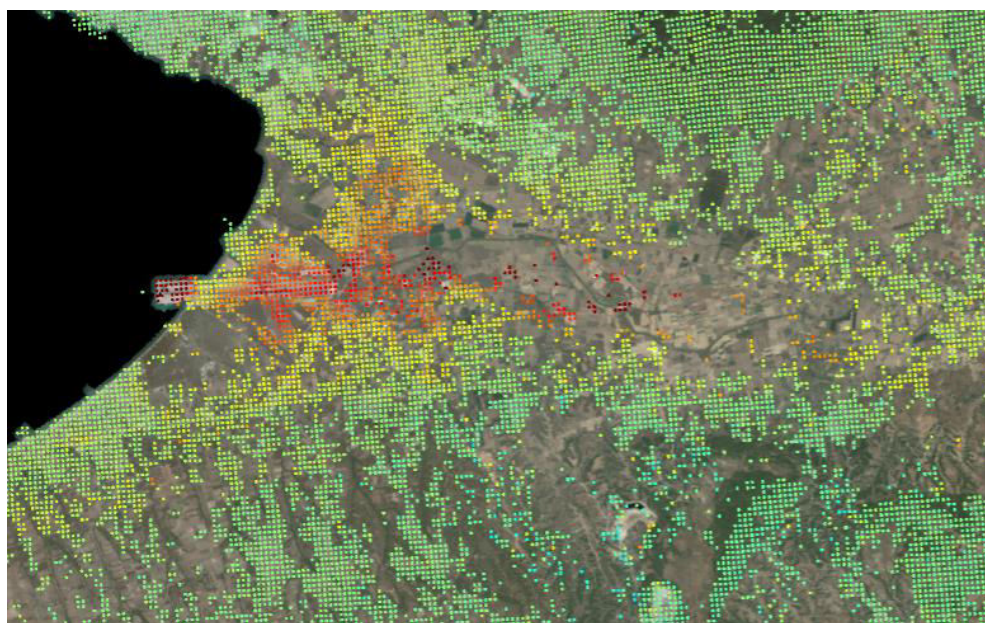


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΠΜΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ

Διερεύνηση των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων στη Λεκάνη του Ανθεμούντα με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Σοφιανόπουλος Νικόλαος

Επιβλέπουσα: Τσακίρη Μαρία, Καθηγήτρια ΕΜΠ

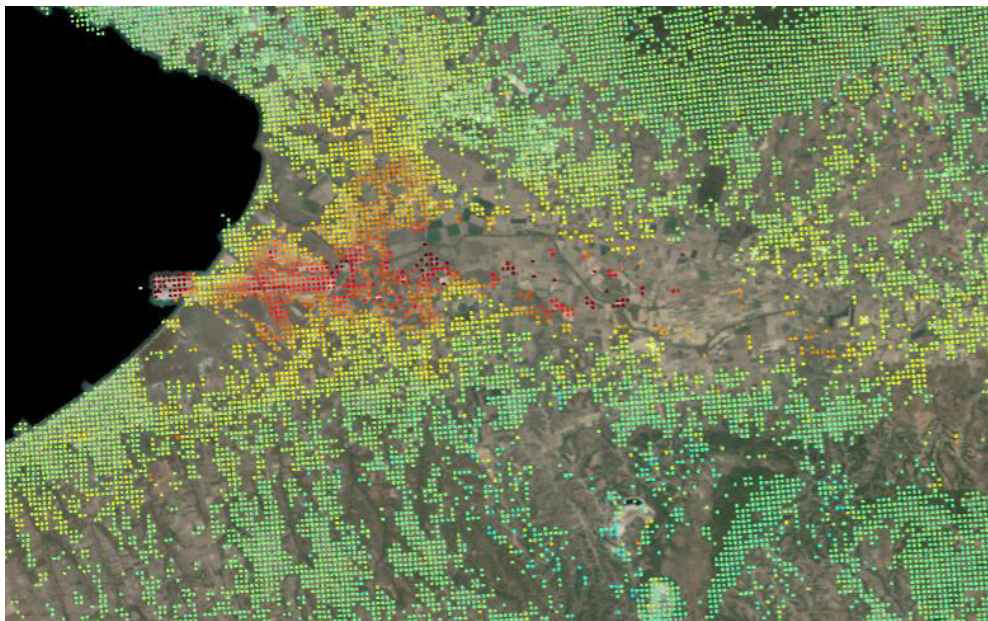
Αθήνα, Οκτώβριος 2024



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
DESIGN AND CONSTRUCTION OF UNDERGROUND WORKS

Investigation of the land subsidence phenomena in the Anthemountas graben utilizing Geographic Coordinate Systems

POSTGRADUATE THESIS



Sofianopoulos Nikolaos

Supervisor: Tsakiri Maria, Professor NTUA

Athens, October 2024

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την κυρία Τσακίρη Μαρία, Καθηγήτρια ΕΜΠ και επιβλέπουσα της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας για τη συνεχή καθοδήγηση και υποστήριξή καθ' όλη της διάρκεια εκπόνησης της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κύριο Λουπασάκη Κωνσταντίνο, Καθηγητή ΕΜΠ, για την παροχή στοιχείων, την καθοδήγηση αλλά και τη διάθεση επιστημονικής γνώσης, τόσο συνολικά, όσο και σε κρίσιμα σημεία της παρούσας διερεύνησης.

Ακόμη, οφείλω να ευχαριστήσω τον κύριο Χατζηχρήστο Θωμά, Ε.ΔΙ.Π ΕΜΠ για την πολύτιμη βοήθεια στη μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας και στη χρήση των εργαλείων των λογισμικών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το ΝΠΔΔ “Ελληνικό Κτηματολόγιο” για τη διάθεση Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους υψηλής ακρίβειας για την περιοχή μελέτης, στα πλαίσια των αναγκών της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ανθεμούντα λόγω υπεραντλήσεων, στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, όπως αυτά διαχρονικά έχουν εντοπιστεί και ποσοτικοποιηθεί από ειδικούς επιστήμονες. Τα φαινόμενα αυτά εδώ και δεκαετίες έχουν αποτελέσει σημαντικό θέμα διερεύνησης για την ευρύτερη περιοχή ενώ ταυτόχρονα έχουν δημιουργήσει ανησυχία στην τοπική κοινωνία, λόγω των εμφανών αστοχιών που έχουν προκύψει σε ανθρωπογενείς κατασκευές. Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας μελετήθηκε αναλυτικά η σχετική με τα εν λόγω φαινόμενα υπάρχουσα βιβλιογραφία τόσο σε περιπτώσεις εμφάνισης του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων στο εξωτερικό, στην Ελλάδα, αλλά και στην ίδια την περιοχή μελέτης. Επιπλέον, από επίσημες πηγές και δημοσιευμένες επιστημονικές εργασίες, αποκτήθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα για την εφαρμογή της μεθοδολογικής προσέγγισης, ενώ ταυτόχρονα αξιοποιήθηκε δορυφορική εικόνα υψηλής ανάλυσης, με σκοπό την καλύτερη οπτικοποίηση των ενδιάμεσων διαδικασιών, αλλά και του τελικού αποτελέσματος. Τελικός σκοπός της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η δημιουργία Χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης για τη λεκάνη απορροής, ενώ η μεθοδολογία που επιλέχθηκε ήταν η ημιποσοτική μέθοδος της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας μέσω εργαλείων Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Με βάση όλα τα στάδια της προσέγγισης και μελετώντας τα τελικά αποτελέσματα, προέκυψε ένα σημαντικό ποσοστό της έκτασης της λεκάνης απορροής, >40% να ανήκει σε ζώνες υψηλής και άνω επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης. Λόγω περιορισμένου αριθμού στοιχείων, ιδιαιτεροτήτων της περιοχής μελέτης και της πολυπλοκότητας του υπό μελέτη φαινομένου, τα τελικά αποτελέσματα και η ακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης, αξιολογήθηκαν ποσοτικά, με σύγκριση του τελικού χάρτη με τα αποτελέσματα άλλων αντίστοιχων διερευνήσεων της ίδιας περιοχής, αλλά και δορυφορικών δεδομένων παρατηρήσεων. Ο τελικός χάρτης που παράχθηκε, θα μπορούσε να αποτελέσει αρωγή και αρχικό υπόβαθρο για λεπτομερέστερες διερευνήσεις στην υπό μελέτη περιοχή, ενώ ταυτόχρονα θα μπορούσε προσφέρει μια αρχική προσέγγιση στο βαθμό επικινδυνότητας που διατρέχει η λεκάνη, και συνεπώς στην οργάνωση και λήψη των απαραίτητων μέτρων αποφυγής πιθανών απωλειών.

Λέξεις κλειδιά: Εδαφικές υποχωρήσεις, Επιδεκτικότητα, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, Λεκάνη απορροής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΑ ΑΓΓΛΙΚΑ

This postgraduate thesis examines the topic of land subsidence caused by groundwater overpumping in the Anthemountas River Graben, within the greater Thessaloniki area. These subsidence events have been identified and quantified over time and are well documented in relevant literature. For decades, they have been a significant topic of study in the region and have raised concerns within the local community due to the visible damage to man-made structures. In conducting this investigation, existing literature on land subsidence was thoroughly reviewed, covering cases both internationally and within Greece, with particular attention to the study area. Additionally, data essential for the methodological approach were gathered from official sources and published scientific studies. High-resolution satellite imagery was employed to better visualize the intermediate processes and the final outcome. The primary goal of this thesis was to create a Land Subsidence Susceptibility Map for the basin. The selected methodology was a semi-quantitative approach using the Analytical Hierarchy Process (AHP) with Geographical Information Systems (GIS) tools. The analysis indicated that a substantial portion of the area, over 40%, is classified as having high to very high susceptibility to land subsidence. Given the limited data, specific characteristics of the study area, and the complexity of the phenomenon, the final results and the accuracy of the prediction model were quantitatively assessed. This was done by comparing the final map with results from other relevant studies in the same area, as well as with satellite observation data. The map produced by this thesis can serve as a useful tool and a foundational reference for more detailed investigations in the study area. It also offers an initial assessment of the risk level faced by the graben, providing guidance for the necessary measures to mitigate potential damage.

Key words: Land subsidence, Susceptibility, Geographic Information Systems, Analytical Hierarchy Process, graben.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	4
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΣΤΑ ΑΓΓΛΙΚΑ	5
Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή	5
1.1. Εισαγωγικά στοιχεία	5
1.2. Στόχοι και σκοπός της εργασίας	6
1.3. Δομή της εργασίας.....	8
Κεφάλαιο 2 – Εδαφικές υποχωρήσεις	9
2.1. Το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων.....	9
2.1.1. Ορισμοί	9
2.1.2. Μηχανισμοί εκδήλωσης	10
2.1.3. Καθιζήσεις	16
2.2. Συνήθεις επιστημονικές προσεγγίσεις.....	18
2.3. Παραδείγματα από τη διεθνή βιβλιογραφία	29
2.4. Περιπτώσεις στον ελλαδικό χώρο	43
2.5. Οι χάρτες επιδεκτικότητας και παραδείγματα εφαρμογής τους στις εδαφικές υποχωρήσεις	51
Κεφάλαιο 3 - Η περιοχή μελέτης	55
3.1. Γενικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής	55
3.1.1. Διοικητική δομή και πληθυσμός	55
3.1.2. Χρήσεις γης	58
3.1.3. Γεωγραφική θέση και γεωμορφολογία	59
3.1.4. Κλίμα	59
3.1.5. Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά	59
3.1.6. Υδατικοί πόροι και συστήματα επιφανειακών υδάτων	61
3.1.7. Συστήματα υπογείων υδάτων.....	65
3.1.8. Προστατευόμενες περιοχές.....	66
3.2. Η Λεκάνη του Ανθεμούντα	67
3.2.1. Γεωμορφολογία της περιοχής.....	67
3.2.2. Γεωλογία και Τεκτονική της περιοχής	68
3.2.3. Υδρογεωλογία της λεκάνης.....	71
3.2.4. Τα φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων	73
Κεφάλαιο 4 – Ανάλυση και αποτελέσματα	76

4.1. Τα Γεωπληροφοριακά Συστήματα	76
4.2. Χαρτογραφικό υλικό	78
4.3. Μεθοδολογική προσέγγιση	87
4.3.1. Διαμόρφωση Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας	87
4.3.2. Μεθοδολογία	97
4.3.2. Στατιστική ανάλυση των ΘΕΠ.....	108
4.3.3. Ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων	113
Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα και προτάσεις.....	116
5.1. Συμπεράσματα.....	116
5.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	117
Βιβλιογραφία	118
EXTENDED ABSTRACT.....	123

Ευρετήριο Σχημάτων και Πινάκων

Σχήμα 1.1. Ο μηχανισμός εκδήλωσης (Ρόζος, 2007)	11
Σχήμα 2.2. Κατάρρευση καρστικών εγκοίλων (Ρόζος, 2007)	12
Σχήμα 2.3. Ο μηχανισμός εκδήλωσης (Λουπασάκης, 2014).....	13
Σχήμα 2.4. Φαινόμενα στον ελλαδικό χώρο (Λουπασάκης, 2014).....	13
Σχήμα 2.5. Η γεωμετρία της κατάρρευσης (Λουπασάκης, 2014)	15
Σχήμα 2.6. Στάδια εξέλιξης καθιζήσεων (Ρόζος, 2007)	17
Σχήμα 2.7. Η εκπομπή σημάτων (Παραδείσης, 2000)	19
Σχήμα 2.8. Το εικονικό διάφραγμα (Δεληκαράογλου, 2005).....	22
Σχήμα 2.9. Η μέθοδος SAR (Δεληκαράογλου, 2005).....	23
Σχήμα 2.10. Η γεωμετρία των ακτίνων (Δεληκαράογλου, 2005)	24
Σχήμα 2.11. Μορφές Συμβολομετρίας SAR (Δεληκαράογλου, 2005)	25
Σχήμα 2.12. Η Διαφορική Συμβολομετρία (ga.gov.au)	26
Σχήμα 2.13. Οι κροσσοί συμβολής (ga.gov.gr)	27
Σχήμα 2.14. Η μέθοδος PSInSAR (Sun et al., 2017).....	29
Σχήμα 2.15. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Zhu et al., 2015).....	30
Σχήμα 2.16. Συσχέτιση εδαφικής υποχώρησης και υπεράντλησης (Zhang et al., 2013).....	31
Σχήμα 2.17. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Ghazifard et al., 2016).....	31
Σχήμα 2.18. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Rahnama and Moafi, 2009).....	32
Σχήμα 2.19. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Suganthi and Elango, 2020).....	33
Σχήμα 2.20. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Kumar et al., 2022)	34
Σχήμα 2.21. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Liosis et al., 2018).....	35
Σχήμα 2.22. Πτώση της στάθμης των υπογείων υδάτων (Kakar et al., 2019).....	36
Σχήμα 2.23. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Sajjad et al., 2023).....	37
Σχήμα 2.24. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Yalvac et al., 2023)	38
Σχήμα 2.25. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Cigna et al., 2012)	39
Σχήμα 2.26. Ταχύτητες κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων (Peng et al., 2022).....	40
Σχήμα 2.27. Χρονική εξέλιξη εδαφικών υποχωρήσεων (Modoni et al., 2013).....	41
Σχήμα 2.28. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Aragwal et al., 2023)	42
Σχήμα 2.29. Εδαφικές υποχωρήσεις ανά κατηγορία λιθολογίας (Wolkersdorfer and Thiem, 1999)	43
Σχήμα 2.30. Παραδείγματα αστοχιών (Rozos et al., 2010).....	44
Σχήμα 2.31. Εδαφικές παραμορφώσεις (Ilia et al., 2018).....	45
Σχήμα 2.32. Εδαφικές παραμορφώσεις – Plaxis 3D (Tzampoglou and Loupasakis, 2019)	46
Σχήμα 2.33. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Antoniadis et al., 2023)	47
Σχήμα 2.34. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Kaitantzian et al., 2020)	48
Σχήμα 2.35. Κατανομή εδαφικών υποχωρήσεων (Metrikas et al., 2009).....	48
Σχήμα 2.36. Χωρική κατανομή εδαφικών υποχωρήσεων (Svigas et al., 2020)	49
Σχήμα 2.37. Η εξέλιξη των εδαφικών παραμορφώσεων (Svigas et al., 2016).....	50
Σχήμα 2.38. Χωρική κατανομή εδαφικών παραμορφώσεων (Raspini et al., 2014).....	50
Σχήμα 2.39. Θέσεις σημείων ελέγχου εδαφικών παραμορφώσεων (Psimoulis et al., 2007).....	51
Σχήμα 2.40. Χάρτες επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης (Pradhan et al., 2014).....	52
Σχήμα 2.41. Οι τελικοί χάρτες (Hakim et al., 2020).....	53
Σχήμα 2.42. Δύο εκ των ΘΕΠ (Zhang et al., 2023).....	53

Σχήμα 2.43. Ένας εκ των χαρτών ΕΕΥ (Zhang et al., 2023).....	54
Σχήμα 2.44. Ο χάρτης ΕΕΥ μέσω της μεθόδου AHP (Razaei et al., 2020)	54
Σχήμα 3.1. Η Διοικητική Διαίρεση σε επίπεδο Δήμων (https://ypen.gov.gr)	55
Σχήμα 3.2. Πληθυσμιακά στοιχεία του ΥΔ (https://ypen.gov.gr).....	56
Σχήμα 3.3. Οι λεκάνες απορροής του ΥΔ (https://ypen.gov.gr).....	57
Σχήμα 3.4. Τα επιφανειακά υδατικά συστήματα (https://ypen.gov.gr).....	62
Σχήμα 3.5. Συγκεντρωτικά τα επιφανειακά ΥΣ (https://ypen.gov.gr).....	63
Σχήμα 3.6. Τα λιμναία ΥΣ του ΥΔ (https://ypen.gov.gr).....	63
Σχήμα 3.7. Τα μεταβατικά ύδατα του ΥΔ (https://ypen.gov.gr).....	64
Σχήμα 3.8. Τα παράκτια ΥΣ του ΥΔ (https://ypen.gov.gr)	64
Σχήμα 3.9. Τα ΥΣΣ του ΥΔ (https://ypen.gov.gr).....	65
Σχήμα 3.10. Η κατάσταση των ΤΥΣ (https://ypen.gov.gr)	66
Σχήμα 3.11. Αριθμός ΥΣ που σχετίζονται με περιοχές προστασίας (https://ypen.gov.gr).....	67
Σχήμα 3.12. Γεωμορφολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης (Φίκος, 2005).....	68
Σχήμα 3.13. Η γεωλογία της περιοχής (Loupasakis et al., 2020)	70
Σχήμα 3.14. Τα ρήγματα της περιοχής μελέτης (www.eagme.gr).....	71
Σχήμα 3.15. Τα υδροφόρα συστήματα της λεκάνης (Kazakis et al., 2013)	72
Σχήμα 3.16. Ο ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου (Loupasakis et al., 2013)	74
Σχήμα 3.17. Καταστροφές σε υποδομές (Loupasakis et al., 2013).....	74
Σχήμα 3.18. Ο ρυθμός των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή της Περαίας (Svigas et al., 2020)	75
Χάρτης 1: Οι καλύψεις γης της περιοχής μελέτης	80
Χάρτης 2: Οι κύριες υποδομές της περιοχής μελέτης.....	81
Χάρτης 3: Το υδρογραφικό δίκτυο και η λεκάνη απορροής	82
Χάρτης 4: Περιοχές εμφάνισης υπογείων υδάτων	83
Χάρτης 5: Πλημμυρικές καταγραφές	84
Χάρτης 6: Κατακόρυφες εδαφικές μικρομετακινήσεις (mm/year).....	85
Χάρτης 7: Οριζόντιες μικρομετακινήσεις (mm/year).....	86
Σχήμα 4.1. ΘΕΠ Χρήσεων Γης.....	89
Σχήμα 4.2. ΘΕΠ Θέσεων Υδροληψίας.....	90
Σχήμα 4.3. ΘΕΠ Ενοποιημένων Γεωλογικών Σχηματισμών	91
Σχήμα 4.4. Πιεζομετρικές καμπύλες για τα έτη 1993, 1998 και 2007 (Svigas et al., 2020)	92
Σχήμα 4.5. ΘΕΠ Πτώσης Πιεζομετρικού Φορτίου	93
Πίνακας 4.1. Γεωτεχνικές παράμετροι για τις Τεταρτογενείς αποθέσεις (πηγή: www.eagme.gr).95	95
Σχήμα 4.6. Στοιχεία γεωτρήσεων (Loupasakis et al., 2013)	95
Σχήμα 4.7. Στοιχεία γεωτρήσεων για την ευρύτερη περιοχή του αεροδρομίου (Doani et al., 2021)	96
Σχήμα 4.8. ΘΕΠ Πάχους Τεταρτογενών Αποθέσεων.....	97
Σχήμα 4.9. Η μέθοδος AHP για τις κατολισθήσεις (Τσαγγαράτος, 2012)	98
Σχήμα 4.10. Τιμές του RI (Τσαγγαράτος, 2012).....	99
Σχήμα 4.11. Κλίμακα συγκρίσεων κατά AHP (Τσαγγαράτος, 2012)	100
Πίνακας 4.2. Συντελεστές βαρύτητας παραμέτρων	100
Πίνακας 4.3. Εφαρμογή της AHP για την παράμετρο Χρήσεις Γης	101
Πίνακας 4.4. Εφαρμογή της AHP για την παράμετρο Ενοποιημένοι Γεωλογικοί Σχηματισμοί... 101	101

Πίνακας 4.5. Εφαρμογή της AHP για την παράμετρο Πτώση Πιεζομετρικού Φορτίου.....	101
Πίνακας 4.6. Εφαρμογή της AHP για την παράμετρο Πάχος Τεταρτογενών Αποθέσεων	102
Πίνακας 4.7. Τιμές βαρών για τις 4 παραμέτρους	102
Πίνακας 4.8. Τιμές βαρών για την παράμετρο Χρήσεις Γης	103
Πίνακας 4.9. Τιμές βαρών για την παράμετρο Ενοποιημένοι Γεωλογικοί Σχηματισμοί	104
Πίνακας 4.10. Τιμές βαρών για την παράμετρο Πτώση Πιεζομετρικού Φορτίου.....	104
Πίνακας 4.11. Τιμές βαρών για την παράμετρο Πάχος Τεταρτογενών Αποθέσεων.....	105
Σχήμα 4.12. Τα εμβαδά των κλάσεων	105
Πίνακας 4.12. Αποτελέσματα σύγκρισης της μεθόδου με θέσεις υδροληψίας.....	106
Σχήμα 4.13. Ο Χάρτης Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης.....	107
Πίνακας 4.13. Συχνότητα και σχετική συχνότητα εμφάνισης θέσεων υδροληψίας κατά χρήση γης	108
Σχήμα 4.14. Κατανομή σχετικής συχνότητας θέσεων υδροληψίας ανά χρήση γης	109
Πίνακας 4.14. Συχνότητα και σχετική συχνότητα εμφάνισης θέσεων υδροληψίας κατά γεωλογικό σχηματισμό.....	109
Σχήμα 4.15. Κατανομή σχετικής συχνότητας θέσεων υδροληψίας ανά γεωλογικό σχηματισμό.....	110
Πίνακας 4.15. Συχνότητα και σχετική συχνότητα εμφάνισης θέσεων υδροληψίας κατά πτώση πιεζομετρικού φορτίου	110
Σχήμα 4.16. Κατανομή σχετικής συχνότητας θέσεων υδροληψίας κατά πτώση πιεζομετρικού φορτίου.....	111
Πίνακας 4.16. Συχνότητα και σχετική συχνότητα εμφάνισης θέσεων υδροληψίας κατά πάχος Τεταρτογενών	111
Σχήμα 4.17. Κατανομή σχετικής συχνότητας θέσεων υδροληψίας κατά πάχος Τεταρτογενών.....	112
Σχήμα 4.18. Ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων	113
Σχήμα 4.19. Ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων.....	114
Σχήμα 4.20. Ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων	114
Figure 1. Thematic Level of Land Use	125
Figure 2. Thematic Level of water intake sites	125
Figure 3. Thematic Level of Geology	126
Figure 4. Thematic Level of Drop in Piezometric Load	126
Figure 5. Thematic Level of Quaternary Deposits Thickness.....	127
Table 1. Grading the importance of the four parameters	128
Figure 6. Areas of each class	129
Figure 7. Land Subsidence Susceptibility Map of the Anthemountas Basin.....	130
Table 2. Frequency and relative incidence of water abstraction sites by land use	131
Figure 8. Frequency and relative incidence of water abstraction sites by land use	131
Figure 9. Qualitative comparison of results.....	132

Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων, όπως αυτά θα οριστούν λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 2, αποτελούν εκτεταμένα φαινόμενα υποχωρήσεων της επιφάνειας του εδάφους, αίτια των οποίων μπορούν να εντοπιστούν σε ενδογενείς παράγοντες όπως η αφαίρεση ρευστών (πχ υπερναντλήσεις υπογείων υδάτων) ή κατάρρευση φυσικών και τεχνητών εγκοίλων. Πιο συγκεκριμένα, το έδαφος, δύναται να μεταβάλλει την αρχική κατάσταση ισορροπίας του λόγω αλλαγών οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε ποικιλία αιτιών, όπως για παράδειγμα ο υποβιβασμός της στάθμης του υπόγειου ρευστού, δηλαδή του υδροφόρου ορίζοντα με αποτέλεσμα τη μεταβολή της αντοχής του εδάφους. Ένας άλλος παράγοντας θα μπορούσε να είναι η αφαίρεση της υποστήριξης, όπως θα μπορούσε να λάβει χώρα σε μια υπόγεια στοά μεταλλείου και συνεπώς αυτό να οδηγήσει σε μεταβολή του φορτίου του εδάφους και τελικώς της αντοχής του. Στην περίπτωση ύπαρξης των προαναφερθέντων καταστάσεων, οι βαρυτικές και οι τεκτονικές δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στους σχηματισμούς οι οποίοι ανήκουν στη ζώνη αποστράγγισης ή υπέρκεινται της υπόγειας εκσκαφής, έχουν την τάση να μεταβάλλουν το καθεστώς ισορροπίας. Με άλλα λόγια, παραμορφώσεις σχετιζόμενες ή όχι με το χρόνο, συνδυαζόμενες με το βαθμό κερματισμού των πετρωμάτων, μπορούν να προκαλέσουν την υποχώρηση των υπερκείμενων σχηματισμών κάποιου υπόγειου ανοίγματος προς αυτό. Στη συνέχεια, η υποχώρηση αυτή μετακινείται σταδιακά προς την επιφάνεια, με αποτέλεσμα την εμφάνιση εδαφικών βυθισμάτων διαφορετικών μεγεθών. Με βάση τα παραπάνω, η συμπίκνωση ή κατάρρευση των υπερκείμενων σχηματισμών ονομάζεται εδαφική υποχώρηση (subsidence). Τα φαινόμενα αυτά, όπως αποδεικνύει η διεθνής βιβλιογραφία, εμφανίζονται ιδιαίτερα συχνά, τόσο ανά τον κόσμο, όσο και στον ελλαδικό χώρο, και οι επιπτώσεις τους ποικίλουν, από απλές αστοχίες σε ανθρωπογενείς κατασκευές έως και κίνδυνο για την ανθρώπινη ζωή, συναρτήσει της έντασης εμφάνισής τους.

Τα τελευταία χρόνια, έχει αναπτυχθεί μεγάλη ποικιλία μεθόδων με βάση τις οποίες μπορούν να μετρηθούν, να ποσοτικοποιηθούν και να οπτικοποιηθούν τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων. Οι μέθοδοι αυτές χαρακτηρίζονται από διαφορετικές ακρίβειες και εύρη εφαρμογής, ενώ η συνδυαστική αξιοποίηση τους σε πολλές περιπτώσεις έχει οδηγήσει σε βέλτιστα αποτελέσματα. Στις μεθόδους αυτές ανήκουν οι επίγειες γεωδαιτικές μέθοδοι, οι γεωδαιτικές δορυφορικές μέθοδοι (GNSS), οι κλασσικές γεωτεχνικές μέθοδοι αλλά και οι μέθοδοι με ραντάρ. Οι τελευταίες διαφοροποιούνται και εξελίσσονται συνεχώς και αφορούν σε συμβατικές μεθόδους με ραντάρ, στην τεχνολογία SAR καθώς και σε τεχνολογικές εξελίξεις της όπως η DInSAR και PS-InSAR.

Η παρούσα εργασία, αξιοποιώντας διαθέσιμα δεδομένα, όπως αυτά θα παρουσιαστούν σε επόμενα κεφάλαια, διερευνά και οπτικοποιεί τη χωρική ένταση των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων της περιοχής της λεκάνης απορροής του ποταμού Ανθεμούντα αξιοποιώντας εργαλεία Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, προσφέροντας ένα αρχικό υπόβαθρο μελέτης για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου συναρτήσει των διαθεσίμων

στοιχείων. Ωστόσο τα φαινόμενα αυτά δεν παρατηρούνται μόνο στην περιοχή μελέτης. Ο Θεσσαλικός κάμπος, η περιοχή του Ορυχείου του Αμύνταιου, η ευρύτερη περιοχή των πεδιάδων της Θεσσαλονίκης και της Χαλκιδικής, η Αιτωλοακαρνανία αλλά και η περιοχή του Φαληρικού Δέλτα, είναι κάποιες από τις βασικές περιοχές του ελλαδικού χώρου που έχουν διερευνηθεί και σχετίζονται με σημαντικές εμφανίσεις φαινομένων εδαφικών υποχωρήσεων.

Η περιοχή μελέτης που επιλέχθηκε για την εκπόνηση της εργασίας, ήτοι η λεκάνη απορροής του ποταμού Ανθεμούντα στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, όπως έχει προαναφερθεί αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχής επιρρεπούς σε τέτοια φαινόμενα. Η σχετική βιβλιογραφία και οι επιστημονικές διερευνήσεις όπως αυτές πραγματοποιήθηκαν, έχουν αποδείξει σημαντικούς ρυθμούς εδαφικών υποχωρήσεων στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης και κυρίως στο παραλιακό μέτωπο πλησίον του Διεθνούς Αερολιμένα Θεσσαλονίκης, ενώ ταυτόχρονα έχει αποδειχθεί, ότι κύρια γενεσιουργός αιτία είναι οι υπεραντλήσεις υπογείων υδάτων. Οι υπεραντλήσεις αυτές παρατηρούνται εδώ και δεκαετίες στη περιοχή μελέτης και πραγματοποιούνται για την κάλυψη των γεωργικών και βιομηχανικών δραστηριοτήτων που λαμβάνουν χώρα στη λεκάνη. Ωστόσο, η διαχρονική και έντονη πραγματοποίησή τους, έχει οδηγήσει σε σημαντική ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα η οποία συναρτήσει των γεωλογικών χαρακτηριστικών της ευρύτερης περιοχής, έχει πλέον οδηγήσει σε έντονα φαινόμενα υποχωρήσεων, εμφανών στις ανθρωπογενείς κατασκευές.

1.2. Στόχοι και σκοπός της εργασίας

Ως αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας ορίστηκε η διερεύνηση των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ανθεμούντα στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης, λόγω υπεραντλήσεων. Η περιοχή μελέτης επιλέχθηκε να αποτελεί το κύριο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού, όπως αυτό οριοθετείται στα δυτικά τμήματα της Χερσονήσου της Χαλκιδικής. Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία και τις αντίστοιχες επιστημονικές διερευνήσεις που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί, η περιοχή μελέτης ψηφιοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να περιέχει τις ήδη γνωστές ζώνες όπου παρατηρούνται οι υποχωρήσεις του εδάφους, αλλά και αστοχίες σε ανθρωπογενείς κατασκευές.

Για την εκπόνηση της εργασίας ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία, σύμφωνα με την οποία παρουσιάστηκαν αναλυτικά μέθοδοι και διαδικασίες μελέτης και ποσοτικοποίησης των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων, όπως αυτές έχουν εφαρμοστεί στις σχετικές επιστημονικές διερευνήσεις, ενώ παρουσιάστηκαν σημαντικά χαρακτηριστικά στοιχεία της περιοχής μελέτης σε μορφή χαρτών ως αρχικό υπόβαθρο εξοικείωσης με την ευρύτερη περιοχή. Ακόμη, λόγω της ιδιαίτερης σημασίας τους στην εμφάνιση και εξέλιξη του υπό μελέτη φαινομένου, έμφαση δόθηκε στην αναλυτική περιγραφή χαρακτηριστικών της περιοχής όπως:

- Γεωλογική δομή
- Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά
- Τεκτονικά χαρακτηριστικά
- Χρήσεις γης

Με την ολοκλήρωση των παραπάνω περιγραφών και ταυτόχρονα συναρτήσει των διαθέσιμων δεδομένων και των χαρακτηριστικών της περιοχής, οριοθετήθηκε η τελική περιοχή ανάλυσης, ήτοι το βασικό τμήμα της λεκάνης απορροής. Στη συνέχεια ακολούθησε η διαδικασία εκτίμησης της επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης της τελικής περιοχής με χρήση ημιποσοτικών μεθόδων και εν κατακλείδι παράχθηκε ο ζητούμενος Χάρτης Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης της Λεκάνης απορροής του ποταμού Ανθεμούντα, μια διαδικασία χαρτογράφησης με ιδιαίτερο τεχνικογεωλογικό ενδιαφέρον.

Για τη δημιουργία του χάρτη ακολουθήθηκε συνοπτικά η παρακάτω διαδικασία:

- Μελετήθηκαν συναρτήσει της διαθέσιμης βιβλιογραφίας και με γνώμονα τις ιδιαιτερότητες της περιοχής μελέτης οι βασικές παράμετροι που συμμετέχουν στην εκδήλωση των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων. Αυτές προέκυψαν να είναι:
 - Η γεωλογία της περιοχής
 - Οι υπάρχουσες χρήσεις γης
 - Η πτώση του πιεζομετρικού φορτίου
 - Το πάχος των Τετατογενών αποθέσεων
- Αξιοποιήθηκαν εργαλεία Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών μέσω των οποίων παράχθηκαν τα Θεματικά Επίπεδα Πληροφορίας συναρτήσει των κρίσιμων προαναφερθέντων παραμέτρων που επηρεάζουν την εμφάνιση και εξέλιξη του φαινομένου και μέσω των οποίων δημιουργήθηκε ο τελικός Χάρτης Επιδεκτικότητας.
- Τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν και αξιολογήθηκαν ποιοτικά, λόγω της μορφής των διαθέσιμων δεδομένων μέσω ειδικού ΘΕΠ, ήτοι των θέσεων υδροληψίας εντός της λεκάνης απορροής, αλλά και μέσω των αποτελεσμάτων άλλων διερευνήσεων οι οποίες μελέτησαν το ίδιο φαινόμενο, στην ίδια περιοχή.

Ο τελικός χάρτης, που αποτελεί ταυτόχρονα και τη στόχευση της παρούσας εργασίας μπορεί να θεωρηθεί ως σημαντικό αρχικό υπόβαθρο για τη μελέτη των εδαφικών υποχωρήσεων στην εν λόγω περιοχή, ενώ ταυτόχρονα η συνδυαστική του χρήση σε δυνητικές μελλοντικές διερευνήσεις μεγαλύτερης λεπτομέρειας θα μπορούσε να οδηγήσει σε μια ολοκληρωμένη μελέτη της επικινδυνότητας που διατρέχει η λεκάνη και εν τέλει στη λήψη μέτρων περιορισμού της εξέλιξης του φαινομένου και αποφυγής απωλειών.

1.3. Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία δομείται ως εξής:

- Στο 2^ο Κεφάλαιο δίνεται η απαραίτητη περιγραφή των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων όπως αυτά έχουν οριστεί από τους επιστήμονες ενώ ταυτόχρονα αναφέρονται οι μηχανισμοί εκδήλωσής του. Επιπλέον, αναφέρονται αναλυτικά οι διάφορες μέθοδοι προσέγγισης των φαινομένων καθώς και οι τρόποι ποσοτικής και ποιοτικής ανάλυσης της εμφάνισής τους. Ακόμη, δίνονται αρκετά παραδείγματα τέτοιων φαινομένων τόσο στο εξωτερικό, όσο και στην Ελλάδα, οι τρόποι ανάλυσης του και τα σχετικά συμπεράσματα στην εκάστοτε περίπτωση. Τέλος αναφέρονται τα χαρακτηριστικά των Χαρτών Επιδεκτικότητας και των πεδίων εφαρμογής τους.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά τα φυσικά και ανθρωπογενή χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής μελέτης, ήτοι του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας ενώ στη συνέχεια περιγράφονται τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά στην περιοχή της Λεκάνης Απορροής του ποταμού Ανθεμούνα, καθώς και παραδείγματα διερευνήσεων της περιοχής που εξέτασαν τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων.
- Στο 4^ο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογική προσέγγιση ανάλυσης, τα απαραίτητα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν και αξιοποιήθηκαν, οι επιμέρους διαδικασίες, τα χαρακτηριστικά των εργαλείων ανάλυσης και των λογισμικών, ο τελικός Χάρτης Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης της περιοχής καθώς και σημαντικές στατιστικές αναλύσεις.
- Τέλος, στο 5^ο Κεφάλαιο αξιολογούνται τα αποτελέσματα ποιοτικά συναρτήσκει άλλων διερευνήσεων, εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα και δίνονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Κεφάλαιο 2 – Εδαφικές υποχωρήσεις

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά στοιχεία που περιγράφουν το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων όπως αυτές εμφανίζονται τόσο στον Ελλαδικό χώρο, όσο και ανά τον κόσμο. Είτε εγχώρια, είτε στο εξωτερικό, ακολουθεί περιγραφή της εκάστοτε περίπτωσης όπως αυτή έχει μελετηθεί από τους αντίστοιχους ερευνητές. Επιπλέον, παρουσιάζονται συνοπτικά μέθοδοι παρακολούθησης των καθιζήσεων και κατ' επέκταση των εδαφικών υποχωρήσεων.

2.1. Το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων

Στα επόμενα δύο υποκεφάλαια δίνονται οι βασικοί ορισμοί και ο μηχανισμός εκδήλωσης του φαινομένου αξιοποιώντας τη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

2.1.1. Ορισμοί

Σύμφωνα με το Ρόζο (2007), το έδαφος, πριν να λάβει χώρα η οποιαδήποτε παρέμβαση, βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Η κατάσταση αυτή δύναται να μεταβληθεί, λόγω αλλαγών οι οποίες μπορεί να οφείλονται σε ποικιλία αιτιών, όπως για παράδειγμα ο υποβιβασμός της στάθμης του υπόγειου ρευστού, δηλαδή του υδροφόρου ορίζοντα με αποτέλεσμα τη μεταβολή της αντοχής του εδάφους. Ένας άλλος παράγοντας θα μπορούσε να είναι η αφαίρεση της υποστήριξης, όπως θα μπορούσε να λάβει χώρα σε μια υπόγεια στοά μεταλλείου και συνεπώς αυτό να οδηγήσει σε μεταβολή του φορτίου του εδάφους και τελικώς της αντοχής του. Στην περίπτωση ύπαρξης των προαναφερθέντων καταστάσεων, οι βαρυτικές και οι τεκτονικές δυνάμεις οι οποίες ασκούνται στους σχηματισμούς οι οποίοι ανήκουν στη ζώνη αποστράγγισης ή υπέρκεινται της υπόγειας εκσκαφής, έχουν την τάση να μεταβάλλουν το καθεστώς ισορροπίας. Με άλλα λόγια, παραμορφώσεις σχετιζόμενες ή όχι με το χρόνο, συνδυαζόμενες με το βαθμό κερματισμού των πετρωμάτων, μπορούν να προκαλέσουν την υποχώρηση των υπερκείμενων σχηματισμών κάποιου υπόγειου ανοίγματος προς αυτό. Στη συνέχεια, η υποχώρηση αυτή μετακινείται σταδιακά προς την επιφάνεια, με αποτέλεσμα την εμφάνιση εδαφικών βυθισμάτων διαφορετικών μεγεθών. Με βάση τα παραπάνω, η συμπύκνωση ή κατάρρευση των υπερκείμενων σχηματισμών ονομάζεται εδαφική υποχώρηση (subsidence), η οποία χαρακτηρίζει και περιγράφει τις επιδράσεις σε συγκεκριμένο τμήμα της επιφάνειας της γης και προέρχεται, όπως έχει προαναφερθεί, από την εξάλειψη της υποστήριξης σε βάθος ή τον υποβιβασμό της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Οι εδαφικές υποχωρήσεις διαφέρουν από τις καθιζήσεις (settlements) ή τη συμπίεστικότητα των αργίλων (consolidation of clays), καθώς αυτές οφείλονται στην παρουσία εσωτερικών φορτίσεων, σε αντίθεση με τις επόμενες δύο προαναφερθέντες καταστάσεις, οι οποίες σχετίζονται με προβλήματα επιβολής πρόσθετης εξωτερικής φόρτισης. Συμπερασματικά, ως εδαφική υποχώρηση, μπορεί να οριστεί ο υποβιβασμός της επιφάνειας του εδάφους λόγω

αλλαγών είτε στη στάθμη κάποιου υπόγειου ρευστού (νερού, πετρελαίου), είτε στη μεταβολή της αντοχής του εδάφους λόγω αφαίρεσης της υποστήριξης αυτού σε συγκεκριμένη θέση.

Σύμφωνα με το Λουπασάκη, (2014), οι εδαφικές υποχωρήσεις (land subsidence), ορίζονται ως τα εκτεταμένα φαινόμενα υποχωρήσεων της επιφάνειας του εδάφους, τα οποία προκαλούνται από ενδογενείς παράγοντες όπως η αφαίρεση ρευστών ή η κατάρρευση φυσικών και τεχνητών εγκοίλων και διαφοροποιούνται από τις καθιζήσεις λόγω της απουσίας επιβολής πρόσθετης εξωτερικής φόρτισης κατά την εκδήλωση του φαινομένου.

Ως βασικότερες αιτίες πρόκλησης των εδαφικών υποχωρήσεων μπορούν να θεωρηθούν οι εξής:

- Η αφαίρεση ρευστών από το έδαφος και η στερεοποίηση λόγω μεταβολής του γεωστατικού πεδίου των τάσεων.
- Η οξείδωση οργανικών εδαφών λόγω του υποβιβασμού της στάθμης των υδροφόρων.
- Η κατάρρευση διαβρωσιγενών κοιλοτήτων κυρίως σε εβαποριτικούς και δευτερευόντως ανθρακικούς σχηματισμούς, λόγω προοδευτικής διάβρωσης ή λόγω αύξησης των φορτίσεων της οροφής.
- Η κατάρρευση ανθρωπογενών κοιλοτήτων, όπως οι στοές, οι θάλαμοι μεταλλείων, οι θύλακες υδρογονανθράκων και άλλα.

Οι εδαφικές υποχωρήσεις διαφοροποιούνται ανάλογα τον σχηματισμό, όπως για παράδειγμα στις περιπτώσεις των αδρομερών σχηματισμών (άμμοι, αμμοχάλικα, κ.λπ.), διότι η κίνηση του νερού σε αυτούς πραγματοποιείται με μεγαλύτερη ευκολία, λόγω της υψηλής διαπερατότητας, ενώ το μεγαλύτερο μέγεθος των κόκκων εμποδίζει την αναδιάταξη τους και συνεπώς την εκδήλωση των εδαφικών υποχωρήσεων. Αντίθετα, στους λεπτομερείς σχηματισμούς, όπως οι αργιλοκοί, οι ιλυώδεις και λοιπά, το φαινόμενο πραγματοποιείται με μεγαλύτερες εντάσεις, λόγω του μικρού μεγέθους των κόκκων αλλά και της υψηλής τιμής του δείκτη συμπίεστότητας C_c που παρατηρείται σε κάποιους από αυτούς. Σε περιπτώσεις σχηματισμών που ανήκουν σε ενδιάμεση κατηγορία από άποψη κοκκομετρικής διαβάθμισης, η εξέλιξη του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων ακολουθεί αντίστοιχη ενδιάμεση πορεία (Σίδηρη Δ., 2008).

2.1.2. Μηχανισμοί εκδήλωσης

➤ Μεταβολή της στάθμης των ρευστών μέσα στο έδαφος.

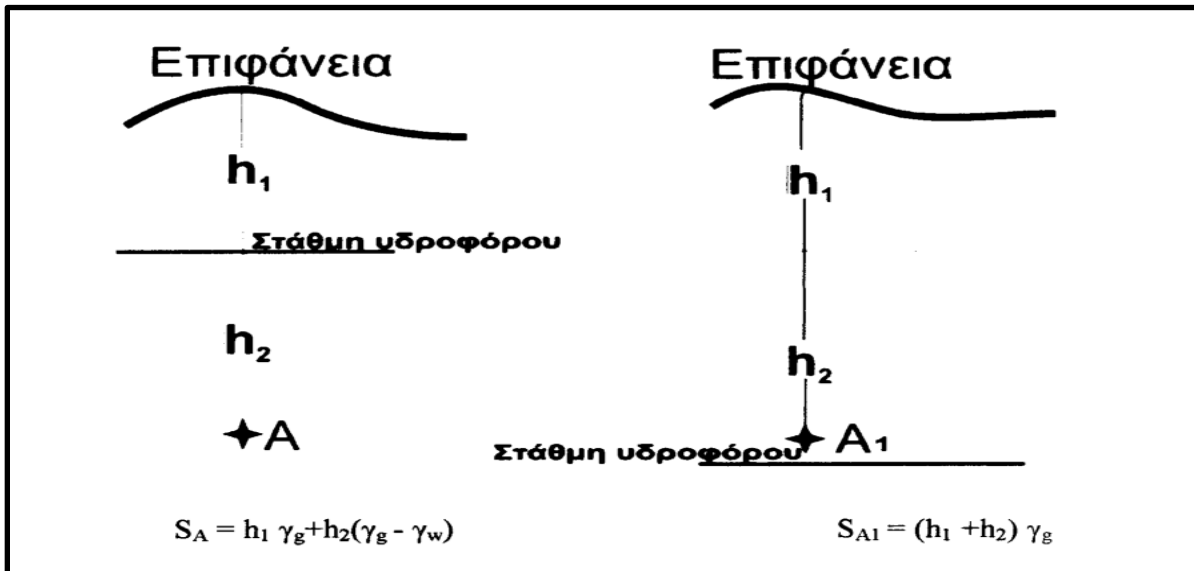
Σύμφωνα με το Ρόζο, (2007) υποβιβασμός της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα ισοδυναμεί με προφόρτιση των οριζόντων στους οποίους θα δημιουργηθεί η απουσία του. Έστω μια συσσώρευση εδαφικών σωματιδίων στη θέση Α του ακόλουθου σχήματος τα οποία σε αρχικό στάδιο βρίσκονταν υπό τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα με πυκνότητα γ_g , ενώ αντίστοιχα η πυκνότητα του νερού είναι γ_w . Σε αυτή την περίπτωση η τάση στο σημείο Α υπολογίζεται ως εξής:

$$S_A = h_1 * \gamma + h_2 * (\gamma_g - \gamma_w) \text{ (Εξ. 2.1.)}$$

Στη συνέχεια, με φυσικό ή τεχνητό υποβιβασμό του υδροφόρου ορίζοντα σε σημείο κατώτερο από αυτό του σημείου A, η νέα τάση στο σημείο αυτό υπολογίζεται ως εξής:

$$S_{A1} = (h_1 + h_2) * \gamma_g \text{ (Εξ. 2.2.)}$$

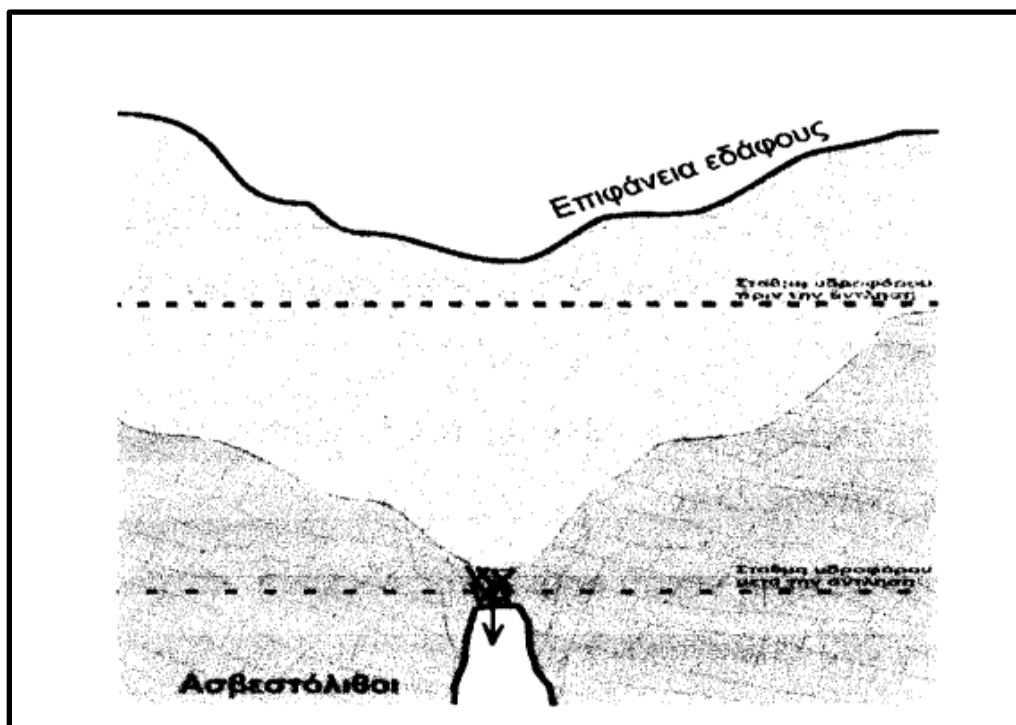
Με βάση τα παραπάνω, προκύπτει η παρατήρηση ότι $S_{A1} > S_A$ με αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση της τάσης στο εδαφικό κομμάτι A και συνεπώς την εκδήλωση εδαφικών υποχωρήσεων εφόσον τα χαρακτηριστικά των σχηματισμών το επιτρέπουν. Επιπλέον, το μέγεθος της εδαφικής υποχώρησης στην επιφάνεια αποτελεί συνάρτηση του πάχους των στρωμάτων που πρόκειται να υποστούν συμπίκνωση, της συμπιεστότητας τους, αλλά και της ποσότητας νερού που απομακρύνεται κατά τον υποβιβασμό της στάθμης, παράγοντες οι οποίοι πρέπει να συνυπολογίζονται ταυτόχρονα κατά τη διερεύνηση των εν λόγω φαινομένων. (Σχήμα 1.1.)



Σχήμα 1.1. Ο μηχανισμός εκδήλωσης (Ρόζος, 2007)

Στην περίπτωση του επόμενου σχήματος, τα εδαφικά υλικά που παρατηρούνται βρίσκονται υπέρ ασβεστολιθικών σχηματισμών, οι οποίοι φέρουν καρστικά έγκοιλα. Λόγω άντλησης, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα υποβιβάζεται και στη συνέχεια η αύξηση της φόρτισης επιφέρει την εμφάνιση βαθιών εδαφικών υποχωρήσεων, ήτοι βυθίσεων στην επιφάνεια, κυκλικής μορφής (sink holes) ή και αβαθών (shallow holes) ως αποτέλεσμα της κατάρρευσης των εδαφικών υλικών στο χώρο των εγκοίλων. Συμπερασματικά, οι βασικότεροι παράγοντες εμφάνισης των εδαφικών υποχωρήσεων προκύπτουν να είναι οι προαναφερθέντες σε προηγούμενη παράγραφο. Η απομάκρυνση του ρευστού και η ακόλουθη αύξηση των τάσεων οδηγεί σε εκ νέου προσανατολισμό των εδαφικών σωματιδίων και συνεπώς σε αύξηση της πυκνότητας του εδάφους στην εν λόγω περιοχή, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μείωση του όγκου του, η οποία εκδηλώνεται με τη μορφή εδαφικής υποχώρησης. Σε περιπτώσεις ομαλών εδαφικών

υποχωρήσεων, στην περιοχή επικρατούν ομοιόμορφες συνθήκες, ενώ, αντίθετα σε καταστάσεις διαφοροποιημένων εδαφικών υποχωρήσεων ανά περιοχή, οι εφελκυστικές ρωγμές που εμφανίζονται απειλούν σε σημαντικότερο βαθμό τις υπάρχουσες διαμορφώσεις. (Σχήμα 2.2.)

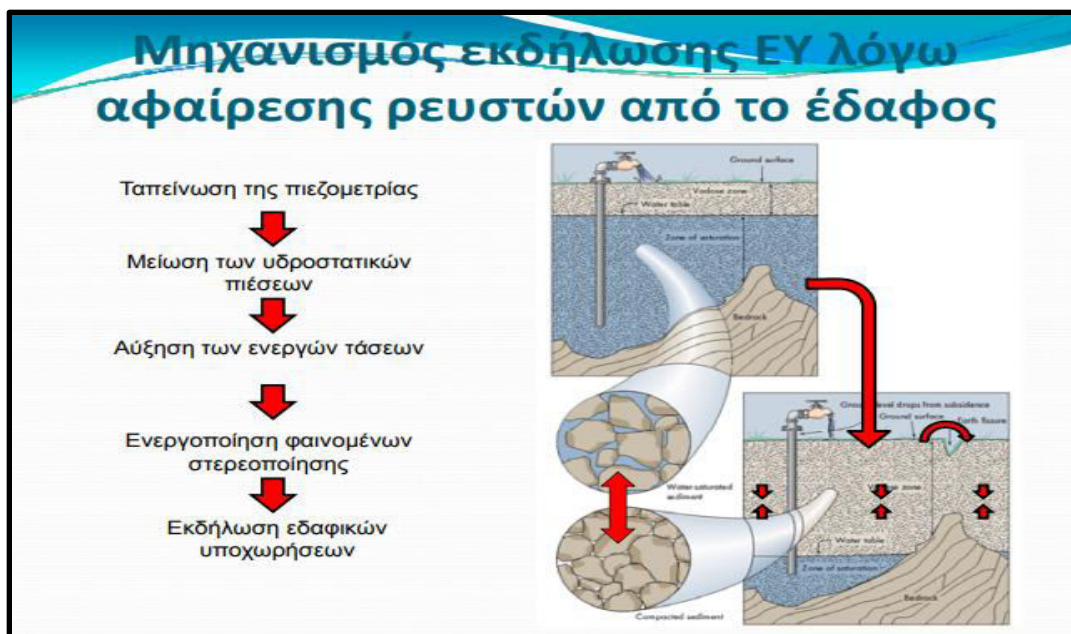


Σχήμα 2.2. Κατάρρευση καρστικών εγκοίλων (Ρόζος, 2007)

Σε κάθε περίπτωση οι εδαφικές υποχωρήσεις εμφανίζονται με τη μορφή διαφορικών ή μη παραμορφώσεων. Σε καταστάσεις εμφάνισης επιφανειακών διαρρήξεων, αυτές αποτυπώνουν την εκδήλωση διαφορικών εδαφικών υποχωρήσεων. Για να εμφανιστούν οι διαφορικές εδαφικές υποχωρήσεις ισχύουν τα παρακάτω κριτήρια (Λουπασάκης, 2014):

- Διαφοροποίηση του πάχους των συμπιεστών εδαφικών σχηματισμών λόγω της ανισότροπης απόθεσης των ιζημάτων.
- Διαφοροποίηση του πάχους των συμπιεστών εδαφικών σχηματισμών λόγω διακύμανσης στο βάθος εμφάνισης των σχηματισμών του υποβάθρου.
- Διαφοροποίηση του πάχους των συμπιεστών εδαφικών σχηματισμών εκατέρωθεν ρηγμάτων.
- Η ύπαρξη ορίου μεταξύ βραχωδών και εδαφικών σχηματισμών.

Παρακάτω παρουσιάζεται σχηματικά ο μηχανισμός εκδήλωσης των εδαφικών υποχωρήσεων λόγω αφαίρεσης ρευστών από το έδαφος, η οποία οδηγεί σε στερεοποίηση λόγω υποβιβασμού του υδροφόρου. (Σχήμα 2.3.)



Σχήμα 2.3. Ο μηχανισμός εκδήλωσης (Λουπασάκης, 2014)

Ακριβώς παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικές θέσεις εντός του ελλαδικού χώρου στις οποίες έχουν εντοπιστεί και διερευνηθεί εδαφικές υποχωρήσεις ως αποτέλεσμα των υπεραντλήσεων που έχουν λάβει χώρα καθώς και της στερεοποίησης των εδαφών που ακολούθησε. (Σχήμα 2.4.)



Σχήμα 2.4. Φαινόμενα στον ελλαδικό χώρο (Λουπασάκης, 2014)

Επιπλέον κατηγορίες του φαινομένου είναι οι ακόλουθες (Λουπασάκης, 2014):

➤ **Εδαφικές υποχωρήσεις λόγω οξείδωσης οργανικών εδαφών.**

Ο μηχανισμός εκδήλωσης της παραπάνω μορφής εδαφικών υποχωρήσεων φέρει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Εκδηλώνεται σε περιπτώσεις παρουσίας οργανικών, δηλαδή πλούσιων σε οργανικό άνθρακα εδαφών τα οποία αποστραγγίζονται. Η αύξηση της ποσότητας του οξυγόνου των εδαφών αυτών έχει ως αποτέλεσμα τη μικροβιακή αποσύνθεση των οργανικών, τα οποία με τη σειρά τους μετατρέπονται σε αέριο διοξείδιο του άνθρακα και νερό.
- Υπάρχει η πιθανότητα ενεργοποίησης και άλλων μηχανισμών κατά την αποστράγγιση των εδαφών που μπορούν να οδηγήσουν σε εδαφικές υποχωρήσεις οι οποίοι αφορούν στην ξήρανση και συρρίκνωσή τους, τη διάβρωση τους από το νερό και τον αέρα, καθώς και την καύση τους τόσο τυχαία, όσο και εσκεμμένα.

➤ **Εδαφικές υποχωρήσεις λόγω κατάρρευσης διαβρωσιγενών κοιλοτήτων.**

Ο μηχανισμός εκδήλωσης της προαναφερθείσας μορφής πραγματοποιείται όπως περιγράφεται στη συνέχεια:

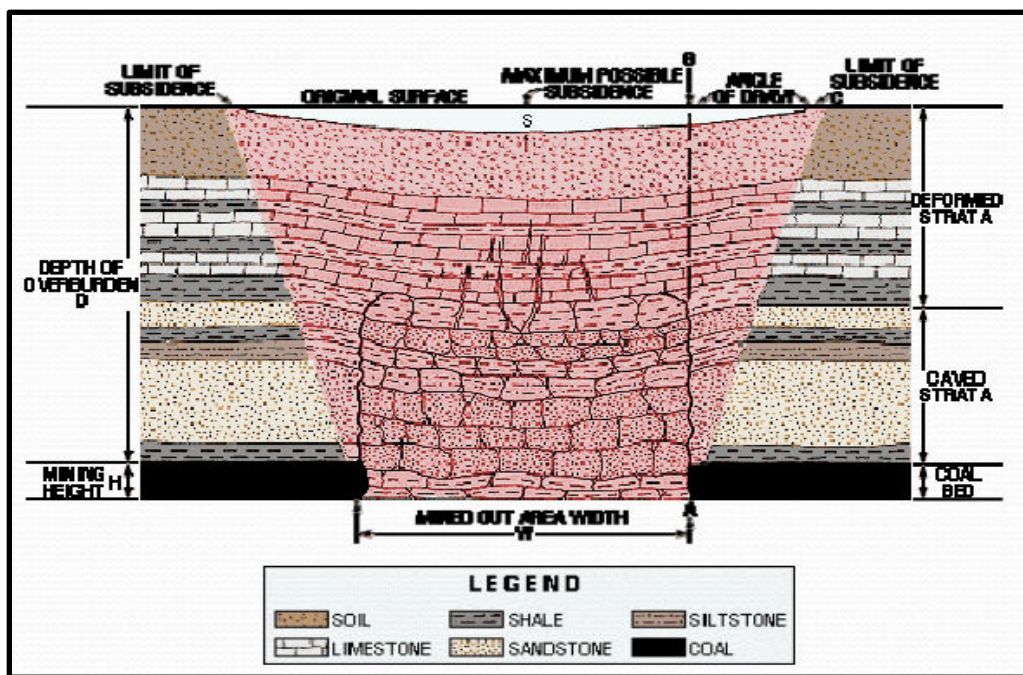
- Σε διαβρωσιγενείς κοιλότητες, σε περιπτώσεις εβαποριτικών σχηματισμών ως επί των πλείστων, αλλά και δευτερευόντως σε ανθρακικούς, λόγω της συνεχούς διεύρυνσής τους, σταδιακά χάνεται η δυνατότητα αυτοϋποστήριξης τους.
- Στη συνέχεια, η αύξηση των γεωστατικών φορτίσεων ενδέχεται να επιταχύνει την κατάρρευση τους. Η αύξηση αυτή μπορεί να προκληθεί είτε από την υποβίβαση των υπόγειων υδροφόρων που συνεπάγεται και την αύξηση των ενεργών φορτίσεων, είτε από την επιβολή εξωτερικών φορτίσεων από κατασκευές.
- Σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του μηχανισμού εκδήλωσης των καταρρεύσεων παίζει η ύπαρξη τεκτονικών επιφανειών όπως ρήγματα και ασυνέχειες, τα οποία σε πολλές περιπτώσεις ορίζουν τη γεωμετρία της μάζας που καταρρέει.

➤ **Εδαφικές υποχωρήσεις λόγω κατάρρευσης ανθρωπογενών κοιλοτήτων.**

Αυτή η μορφή εδαφικών υποχωρήσεων κατά την εκδήλωση της ακολουθεί την εξής πορεία ως προς την εξέλιξη της:

- Πραγματοποιείται μετανάστευση προς την επιφάνεια των κενών που εμφανίζονται κατά τις καταρρεύσεις υπόγειων ανθρωπογενών κοιλοτήτων όπως στοές, θάλαμοι μεταλλείων και θύλακες υδρογονανθράκων.
- Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να αποτελούν παλαιές ανυποστήρικτες υπόγειες εκμεταλλεύσεις, παλαιές υπόγειες εκμεταλλεύσεις όπου έλαβε χώρα αστοχία των μέτρων υποστήριξης, σύγχρονες εκμεταλλεύσεις που διανοίγονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η δυνητική κατάρρευσή τους.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γεωμετρία της κατάρρευσης ανθρωπογενούς κατασκευής μέσω απεικόνισης σε εγκάρσια τομή (Σχήμα 2.5.):



Σχήμα 2.5. Η γεωμετρία της κατάρρευσης (Λουπασάκης, 2014)

Με βάση τα παραπάνω, το πλάτος της έκτασης στην επιφάνεια του εδάφους που επηρεάζεται είναι μεγαλύτερο από το πλάτος εκσκαφής. Επιπλέον, η γωνία επίδρασης που σχηματίζεται μεταξύ της κατακόρυφης από το όριο της υπόγειας εκσκαφής (A-B) και της ευθείας που συνδέει το όριο της υπόγειας εκσκαφής και το αντίστοιχο της εδαφικής υποχώρησης δεν ξεπερνά τις 45 μοίρες. Τέλος, η μέγιστη δυνατή εδαφική υποχώρηση (S) σπανίως ξεπερνά το 65% του ύψους της υπόγειας εκσκαφής που καταρρέει (H).

Με βάση όλα τα παραπάνω οι πιο συνηθισμένες επιπτώσεις των εδαφικών υποχωρήσεων που μπορούν να παρατηρηθούν είναι οι εξής:

- Εδαφικές διαρρήξεις.
- Αστοχίες σε δύσκαμπτες κατασκευές κτιρίων.
- Φθορές στα έργα κοινής ωφέλειας όπως ηλεκτροδότησης και υδροδότησης αλλά και στα έργα οδοποιίας.
- Εισχώρηση της θάλασσας στην ενδοχώρα σε παράκτιες περιοχές.
- Καταστροφή υδρογεωτρήσεων.

2.1.3. Καθιζήσεις

Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικές αρχές που αφορούν στην εμφάνιση των φαινομένων των καθιζήσεων (Ρόζος, 2007).

Κατά τη μελέτη των καθιζήσεων πρέπει να διευκρινιστούν δύο βασικές παράμετροι που αφορούν τόσο στο μέγεθος αυτού αλλά και ταυτόχρονα στο χρόνο εκδήλωσης του, δηλαδή με άλλα λόγια στο βαθμό εξέλιξης και ολοκλήρωσης του. Καθώς στις περιπτώσεις των καθιζήσεων, καθοριστικό ρόλο παίζουν και οι εξωτερικές φορτίσεις, αυτές επιφέρουν σταδιακή συμπίεση στους εδαφικούς σχηματισμούς ως εξής:

- Ελαστική συμπίεση (elastic compression) η οποία εκδηλώνεται αμέσως μετά την εφαρμογή του φορτίου και σε περιπτώσεις κατά τις οποίες το έδαφος δεν είναι κορεσμένο. Ουσιαστικά προκαλείται μια άμεση καθίζηση (immediate settlement) που οφείλεται στην απομάκρυνση του αέρα των κενών αλλά και στον επαναπροσανατολισμό των κόκκων του εδάφους. Αντιθέτως, σε περιπτώσεις κορεσμένων εδαφών, η αρχική καθίζηση αποτελεί την κατακόρυφη συμπίεση του εδάφους πριν μεταβληθεί ο όγκος του.
- Αρχική συμπίεση (primary compression) η οποία προκαλεί στο έδαφος το οποίο έχει ήδη κορεστεί μια αύξηση στην υδροστατική πίεση και παρουσιάζεται στη συνέχεια. Η υψηλή πίεση του νερού των πόρων μπορεί να σταματήσει να υπάρχει με τη σταδιακή απομάκρυνση του νερού που περιέχεται στα κενά των εδαφικών κόκκων η οποία μάλιστα εξαρτάται από το χρόνο. Τα εδάφη τα οποία παρουσιάζουν την εν λόγω μεταβολή του όγκου τους χαρακτηρίζονται ως συμπιεσμένα και η κατακόρυφη συνιστώσα της μεταβολής του όγκου ονομάζεται καθίζηση λόγω συμπίεσης (consolidation settlement).
- Οποιαδήποτε μεταβολή του όγκου η οποία δεν οφείλεται στην υποβάθμιση της αυξημένης πίεσης του νερού των πόρων αλλά είναι συνάρτηση άλλων παραγόντων όπως για παράδειγμα η εσωτερική πλαστική ροή των εδαφικών στοιχείων μεγάλης διάρκειας.

Σε περιπτώσεις απομάκρυνσης του φορτίου από τον εδαφικό σχηματισμό, αναμένεται μικρή ανάκτηση των συνθηκών του όπως αυτές ίσχυαν προ της άσκησης του φορτίου. Επιπλέον, σε αργιλικά / συνεκτικά εδάφη, τα οποία χαρακτηρίζονται από πολύ χαμηλό συντελεστή υδροπετατότητας, η απότομη αύξηση του φορτίου δεν έχει ως αποτέλεσμα μεταβολή του όγκου, ενώ ο κατακόρυφος αποσχηματισμός που εμφανίζεται οφείλεται στη άμεση καθίζηση. Επίσης, η

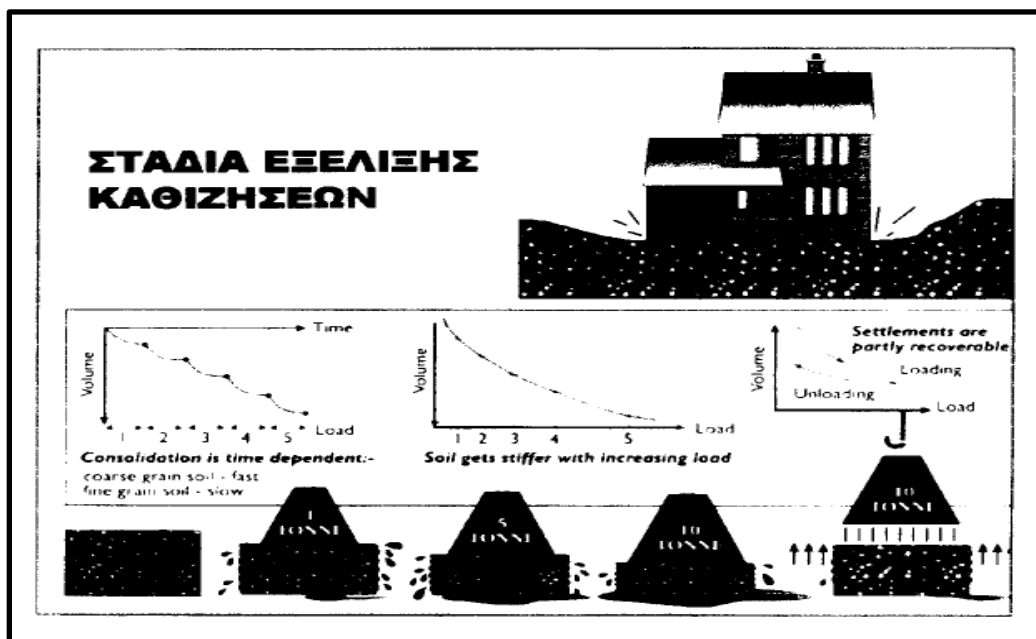
δυνατή απομείωση της αυξημένης τιμής της πίεσης του νερού των πόρων απαιτεί ένα σημαντικό χρονικό διάστημα για να πραγματοποιηθεί. Από την άλλη πλευρά, σε περιπτώσεις αμμωδών / μη συνεκτικών εδαφών, η υψηλή υδροπερατότητα έχει ως αποτέλεσμα την ταυτόχρονα παρουσία της ελαστικής και της αρχικής συμπίεσης και η εμφανιζόμενη συμπίεση που παρατηρείται αποτελεί την άμεση.

Σημαντική παράμετρος αποτελεί επίσης το πόσο μεγάλη καθίζηση μπορεί να αντέξει η εκάστοτε κατασκευή. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση πολλών παραμέτρων όπως:

- Οι ιδιότητες του εδάφους.
- Η χρονική διάρκεια των καθιζήσεων.
- Η επανακατανομή των τάσεων λόγω της διαφορικής καθίζησης.
- Η συνεργασία και η αλληλεπίδραση των δομικών στοιχείων της κατασκευής.

Επιπρόσθετα, η καθίζηση που μπορεί να γίνεται ανεκτή από την κάθε κατασκευή σαν μέγεθος, δεν αναμένεται να προκαλέσει σημαντικές συνέπειες με δεδομένο ότι είναι ομοιόμορφη, και έτσι οι ζημιές θα είναι περιορισμένες στα έργα που συνδέονται με την κατασκευή, όπως αγωγοί ύδρευσης, αποχέτευσης, ρεύματος και λοιπά. Αντιθέτως, ιδιαίτερη σημασία για τις κατασκευές παρουσιάζουν οι διαφορικές καθιζήσεις μεταξύ γειτονικών στοιχείων θεμελίωσης. Οι εν λόγω καθιζήσεις μπορούν να προκαλέσουν κάμψη, η οποία είναι κυρίως εμφανής σε ψηλά κτίρια, αλλά και γενικότερη στρόφη στο σύνολο της κατασκευής.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα στάδια του μηχανισμού εξέλιξης των καθιζήσεων (Σχήμα 2.6.):



Σχήμα 2.6. Στάδια εξέλιξης καθιζήσεων (Ρόζος, 2007)

2.2. Συνήθειες επιστημονικές προσεγγίσεις

Στο παρόν υποκεφάλαιο γίνεται σύντομη παρουσίαση των βασικών τεχνικών με τις οποίες οι επιστήμονες διαχρονικά έχουν επιλέξει να μελετήσουν τα φαινόμενα των καθιζήσεων και κατ' επέκταση των εδαφικών υποχωρήσεων. Οι τεχνικές αυτές προσφέρουν σημαντικές εμβαθύνσεις στην ανάλυση του φαινομένου και βρίσκονται σε διαρκή διαδικασία βελτίωσης και τεχνολογικής εξέλιξης.

➤ Επίγειες γεωδαιτικές μέθοδοι.

Στη σημερινή εποχή, η γεωδαιτική μεθοδολογία εξακολουθεί να έχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στον εντοπισμό, τον προσδιορισμό του μεγέθους καθώς και το διαχρονικό έλεγχο της εξέλιξης των κατακόρυφων μετακινήσεων σε περιοχές ενδιαφέροντος μέσω της μέτρησης των απαραίτητων στοιχείων σε περισσότερες από μία χρονικές φάσεις. Για την πραγματοποίηση των απαραίτητων μετρήσεων χρησιμοποιούνται ολοκληρωμένοι γεωδαιτικοί σταθμοί και ψηφιακοί χωροβάτες με εφαρμογή στις εκάστοτε περιπτώσεις στις οποίες εξειδικεύονται.

Για την πραγματοποίηση της συνολικής διαδικασίας ακολουθείται μια συγκεκριμένη σειρά βημάτων με αρχική φάση την αναγνώριση των σημείων ενδιαφέροντος μέσω επιτόπιας επίσκεψης και συνεργασίας με άλλες ειδικότητες επιστημόνων. Στη συνέχεια ακολουθεί ο σχεδιασμός του δικτύου κατακόρυφου ελέγχου. Για το σχεδιασμό του δικτύου προσδιορίζεται αρχικώς η γεωμετρία του μέσω των θέσεων των σημείων αναφοράς και ελέγχου ενώ ταυτόχρονα καθορίζεται ο αριθμός των απαιτούμενων παρατηρήσεων στην ύπαιθρο καθώς και των αντίστοιχων αβεβαιοτήτων. Κατά το σχεδιασμό του δικτύου επίσης, απαιτείται και η βελτιστοποίηση του, ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη δυνατή ποιότητα του συναρτήσεως της ακρίβειας, της αξιοπιστίας, της ευαισθησίας, της οικονομίας και του χρόνου (Γεωργόπουλος et al., 2005).

Η επιλογή της θέσης των σημείων αναφοράς και ελέγχου του δικτύου με τα πρώτα να είναι υποχρεωτικά προσιτά, ενώ τα δεύτερα ενδέχεται να είναι και απρόσιτα. Κατά την υλοποίηση των σημείων αυτών, αυτή πρέπει να πραγματοποιείται με τέτοιες διαδικασίες, ώστε να εξασφαλίζεται η μονιμότητα τους όσες μετρήσεις κι αν απαιτηθούν. Η επόμενη διαδικασία που πραγματοποιείται είναι οι μετρήσεις των στοιχείων του δικτύου με γεωδαιτικές μεθόδους. Για τις μετρήσεις των υψομετρικών διαφορών μεταξύ των κορυφών, αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν με τις εξής επίγειες μεθόδους (Μπαλοδήμος και Αραμπατζή, 2004):

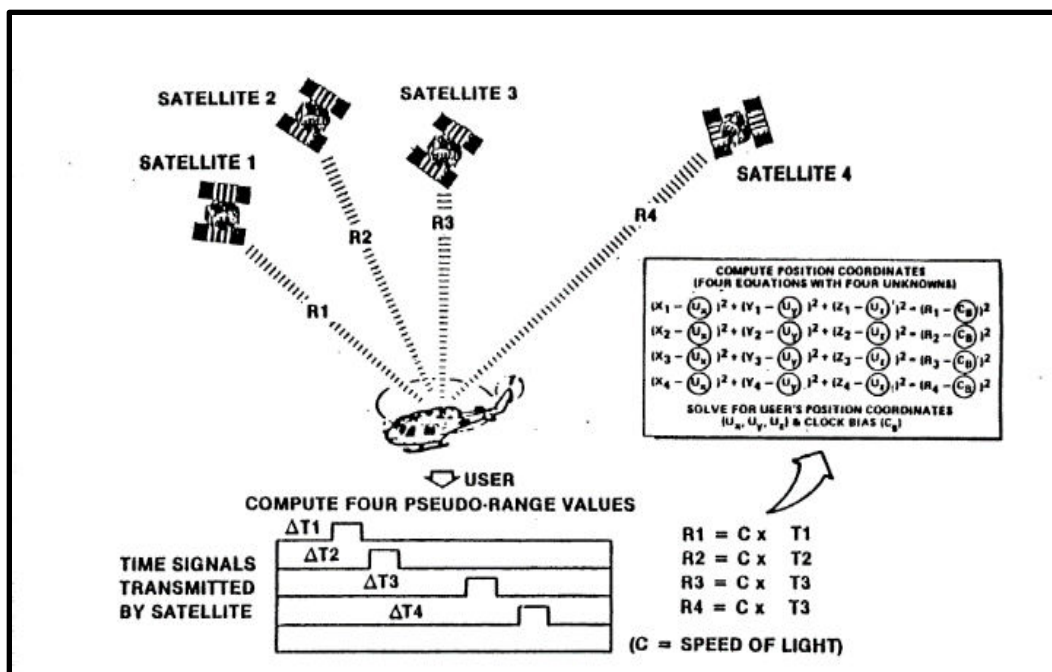
- Γεωμετρική Χωροστάθμηση Ακρίβειας
- Τριγωνομετρική Υψομετρία

Η Γεωμετρική Χωροστάθμηση Ακρίβειας προσδιορίζει τις υψομετρικές διαφορές άμεσα, σε αντίθεση με την Τριγωνομετρική Υψομετρία που το πραγματοποιεί έμμεσα. Συνήθως επιλέγεται η πρώτη λόγω της απλότητας εφαρμογής της και της κορυφαίας ακρίβειας της η οποία αγγίζει τα λίγα χιλιοστά.

Η επόμενη φάση αφορά στην επεξεργασία των μετρήσεων, τη συνόρθωσή τους και την επίλυση του δικτύου. Εφόσον έχουν ήδη πραγματοποιηθεί οι αναγωγές που απαιτούνται, οι υψομετρικές διαφορές σε κάθε φάση μέτρησης συνορθώνονται ανεξάρτητα, σε κάθε φάση ξεχωριστά με τις ελάχιστες εξωτερικές δεσμεύσεις μέσω της Μεθόδου των Ελαχίστων Τετραγώνων. Από την εφαρμογή της μεθόδου προκύπτουν τα υψόμετρα των κορυφών του δικτύου και ο πίνακας μεταβλητότητας – συμμεταβλητότητας τους ενώ επιπλέον ακολουθεί στατιστικός έλεγχος. Με δεδομένο ότι δεν έχουν εντοπιστεί χονδροειδή σφάλματα, το επόμενο βήμα σχετίζεται με την ανίχνευση των κατακόρυφων μετακινήσεων, τόσο των απόλυτων όσο και των σχετικών, ενώ το δίκτυο ανίχνευσης μετριέται κατ' ελάχιστο σε τρεις διαφορετικές χρονικές στιγμές για την επίτευξη στατιστικής σημαντικότητας στις μεταβολές των υψομέτρων των κορυφών. Τελικώς, πραγματοποιείται η ερμηνεία των μετακινήσεων και εξάγονται τα σχετικά συμπεράσματα ή και καθορίζονται οι αναγκαίες παρεμβάσεις.

➤ **Γεωδαιτική Δορυφορική Μέθοδος – Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Εντοπισμού Θέσης (GNSS).**

Τα Παγκόσμια Δορυφορικά Συστήματα Εντοπισμού Θέσης χρησιμοποιούνται πλέον ευρέως σε εφαρμογές για την παρακολούθηση των πιθανών επιφανειακών μετακινήσεων. Σε αντιστοιχία με τις επίγειες γεωδαιτικές μεθόδους οι οποίες προαναφέρθηκαν, οι δέκτες έχουν τη δυνατότητα να προσδιορίσουν τα γεωμετρικά υψόμετρα των κορυφών του δικτύου ελέγχου (αξιοποιώντας τα υψόμετρα του γεωειδούς τα οποία εν συνεχεία ανάγονται σε ορθομετρικά) με ακρίβεια της τάξης του 1.5 εκατοστού. Τα υψόμετρα αυτά συγκρίνονται με αντίστοιχα υψόμετρα που έχουν μετρηθεί σε προηγούμενες χρονικές περιόδους και φάσεις και σε περίπτωση που εντοπιστούν μεταβολές, ελέγχεται η στατιστική σημαντικότητα τους. (Σχήμα 2.7.)



Σχήμα 2.7. Η εκπομπή σημάτων (Παραδείσης, 2000)

Για τον εντοπισμό της θέσης ενός σημείου στο χώρο με τη χρήση των GNSS μπορούν να εφαρμοστούν δύο συγκεκριμένες μεθοδολογίες. Οι μέθοδοι αυτές διακρίνονται στον απόλυτο και το σχετικό εντοπισμό. Οι μετρήσεις επηρεάζονται από σφάλματα τα οποία είναι συνάρτηση των ίδιων των δορυφόρων, των δεκτών, αλλά και της επίδρασης που ασκεί η ατμόσφαιρα κατά τη διαδικασία μετρήσεων. Παρόλα αυτά, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, ο δορυφορικός εντοπισμός έχει τη δυνατότητα να προσφέρει ικανοποιητική ακρίβεια τόσο οριζοντιογραφικά, όσο και υψομετρικά, αξιοποιώντας τις σύγχρονες τεχνολογίες. Επιπλέον, η ακρίβεια προσδιορισμού των ορθομετρικών εν τέλει υψομέτρων σχετίζεται άμεσα με την ακρίβεια προσδιορισμού των αντίστοιχων γεωμετρικών, καθώς και με την αποχή του γεωειδούς.

➤ Γεωτεχνικές Μέθοδοι.

Οι γεωτεχνικές οργανομετρήσεις μπορούν να παίξουν ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην παρατήρηση των μικρομετακινήσεων του εδάφους τόσο οριζόντια όσο και κατακόρυφα, αποτελώντας εργαλεία ελέγχου κατ' επέκταση και των εδαφικών υποχωρήσεων. Με βάση τις οργανομετρήσεις μπορούν να προσδιοριστούν παράμετροι που αφορούν άμεσα στην υποχώρηση του εδάφους όπως η απώλεια νερού και η μεταβολή της πίεσης των πόρων. Τα βασικότερα όργανα που πραγματοποιούν την παρακολούθηση των παραπάνω διαδικασιών είναι τα εξής (Γεωργιάννου, 2000):

- Πιεζόμετρο: Αποτελεί όργανο μέτρησης της πίεσης του νερού σε συγκεκριμένο βάθος. Είναι ικανά να προσδιορίσουν τις συνθήκες ροής των υδάτων, τη μεταβολή της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα όπως μπορεί να προκύψει σε περιπτώσεις υπεραντλήσεων καθώς και τις πιθανές μεταβολές των ενεργών τάσεων.
- Κλισιόμετρο: Όργανο μέτρησης των εγκάρσιων παραμορφώσεων του εδάφους κυρίως μέσω αξιοποίησης γεωτρήσεων.
- Κλινόμετρο: Όργανο μέτρησης των στρωφών σε κατασκευές όπως αυτές μπορούν να προκύψουν από διαφορικές καθιζήσεις.
- Μηκυνσιόμετρο: Βασικό όργανο μέτρησης της μεταβολής του μήκους μεταξύ δύο σημείων και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για τις μετρήσεις κατακόρυφων μετακινήσεων αλλά και οριζοντίων. Και αυτό αξιοποιεί συχνά υπάρχουσες γεωτρήσεις μέσα στις οποίες αγκυρώνεται.

Οι γεωτεχνικές οργανομετρήσεις χαρακτηρίζονται από υψηλή ακρίβεια η οποία εξαρτάται από την κατάσταση λειτουργίας των οργάνων και τη σωστή τοποθέτηση τους στα σημεία ελέγχου. Επίσης παρέχουν άμεσα αποτελέσματα τα οποία δε χρειάζονται συνήθως ιδιαίτερες εκ των υστέρων επεξεργασίες. Επιπλέον, η συνδυαστική χρήση τους με τις επίγειες γεωδαιτικές μετρήσεις μπορεί να προσφέρει αξιόπιστη και λεπτομερή παρακολούθηση των πιθανών μετακινήσεων και παραμορφώσεων του εδάφους.

➤ **Μέθοδοι με ραντάρ.**

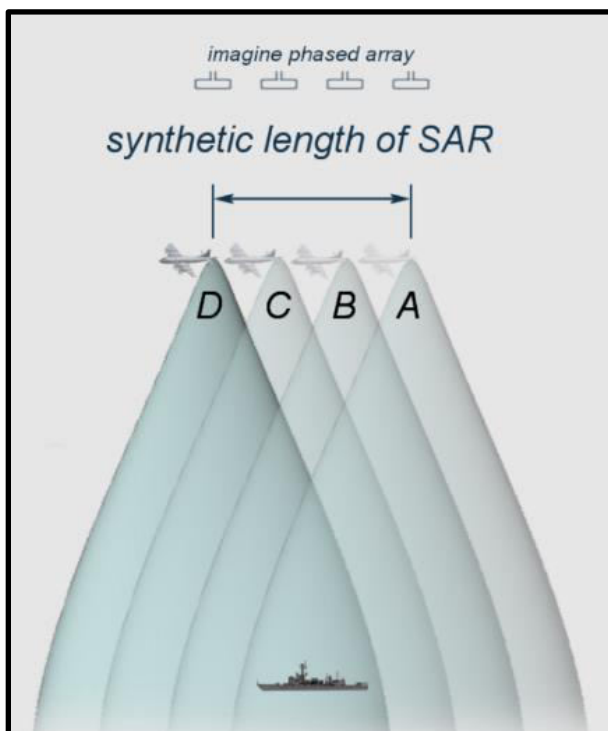
Τα ραντάρ αποτελούν σημαντικό βήμα των τεχνολογικών εξελίξεων αναφορικά με τη μελέτη των μικρομετακινήσεων του εδάφους και εν γένει των εδαφικών υποχωρήσεων καθώς παράγουν εικόνες υψηλής ανάλυσης και μπορούν να πραγματοποιήσουν μετρήσεις με μεγάλη ταχύτητα και ανεξάρτητες από τις καιρικές συνθήκες που ενδέχεται να επικρατούν στην περιοχή ενδιαφέροντος.

• **Συμβατικά ραντάρ παλαιότερου τύπου.**

Τα συμβατικά στατικά ραντάρ αποτελούν συστήματα εντοπισμού συγκεκριμένου στόχου, ανεξάρτητα αν αυτός βρίσκεται στο έδαφος ή στον αέρα. Η μέθοδος που χρησιμοποιούν είναι η κλασσική κατά την οποία εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητικό κύμα μέσω μιας κεραίας η οποία στη συνέχεια προσπίπτει και ανακλάται επί του αντικειμένου – στόχου που οποίου απαιτείται να εντοπιστεί η θέση του. Μετά την ανάκλαση, τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα επιστρέφουν στην πηγή και μέσω συγκεκριμένης διαδικασίας καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης και των κινηματικών χαρακτηριστικών των στόχων.

• **SAR (Synthetic Aperture Radar).**

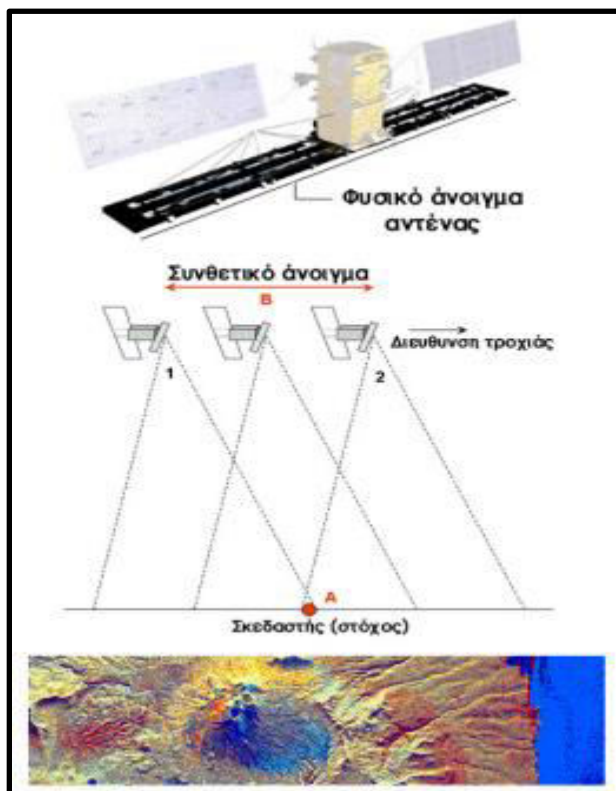
Σύμφωνα με τον Δεληκαράογλου, (2005) τα ραντάρ συνθετικού ανοίγματος αποτελούν σημαντική τεχνολογική εξέλιξη των συμβατικών ραντάρ καθώς εφαρμόζουν μια διαδικασία κατά την οποία συντίθενται οι μετρήσεις μιας αντένας μεγάλου μήκους με το συνδυασμό των σημάτων που λαμβάνονται από ένα ραντάρ καθώς αυτό βρίσκεται σε κίνηση κατά τη διαδρομή πτήσης του. Η ονομασία του συγκεκριμένου συστήματος έχει προέλθει από το φυσικό άνοιγμα που αξιοποιείται για τη συλλογή της ανακλώμενης ενέργειας του παλμού του ραντάρ ο οποίος αξιοποιείται για τη δημιουργία εικόνας. Το συνθετικό άνοιγμα δημιουργείται με την κίνηση του φυσικού ανοίγματος του ραντάρ μέσω μιας σειράς θέσεων κατά μήκος της διαδρομής πτήσης του αισθητήρα. Στη συνέχεια στο Σχήμα 2.8. παρουσιάζεται η δημιουργία του εικονικού διαφράγματος όπως αυτή προκύπτει κατά την κίνηση του αισθητήρα (Σχήμα 2.8.):



Σχήμα 2.8. Το εικονικό διάφραγμα (Δεληκαράογλου, 2005)

Κατά την κίνηση του ραντάρ, εκπέμπεται διαδοχικά ένας παλμός κατά μέσο όρο όσο ανά 10 – 50 μ s και η ανακλώμενη ενέργεια από κάθε παλμό από τα σημεία του εδάφους ή των αντικειμένων που υπάρχουν επί αυτού λαμβάνονται από το δέκτη του ραντάρ ενώ στη συνέχεια καταγράφονται το πλάτος, η φάση και η συχνότητα του ανακλώμενου σήματος. Επιπλέον, επειδή το ραντάρ κινείται σε σχέση με το έδαφος, το ανακλώμενο σήμα που επιστρέφει είναι μετατοπισμένο εξαιτίας του φαινομένου Doppler. Η σύγκριση της μετατόπισης εξαιτίας του προαναφερθέντος φαινομένου και της συχνότητας του εκάστοτε ανακλώμενου τμήματος με την αντίστοιχη συχνότητα αναφοράς του εκπεμπόμενου παλμού δίνει τη δυνατότητα ανίχνευσης πολλών ανακλώμενων σημάτων τα οποία αφορούν σε κάθε σημείο του κάθε αντικειμένου το οποίο προκαλεί την ανάκλαση. Στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η επεξεργασία SAR, το αποτέλεσμα της οποίας αποτελεί μια υψηλής διακριτικότητας εικόνα της οποίας το κάθε

εικονοστοιχείο αντιστοιχεί σε ένα μιγαδικό αριθμό ο οποίος αναπαριστά το εύρος και τη φάση του ανακλώμενου σήματος από το συγκεκριμένο σημείο του εδάφους στο οποίο αναφέρεται το εκάστοτε εικονοστοιχείο. Παρακάτω, παρουσιάζεται η λειτουργία της μεθόδου σε συνάρτηση με το τελικό προϊόν. (Σχήμα 2.9.)



Σχήμα 2.9. Η μέθοδος SAR (Δεληκαράογλου, 2005)

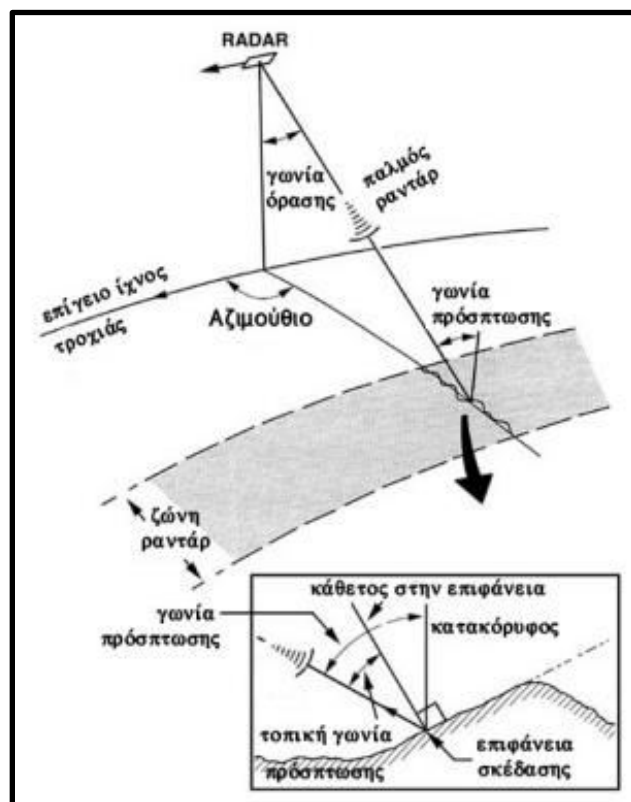
Τα συστήματα SAR μπορούν να λειτουργήσουν ταυτόχρονα ως πομποί και δέκτες ακολουθώντας μια συγκεκριμένη διαδικασία. Σε αρχικό στάδιο εκπέμπουν το σήμα προς τη γήινη επιφάνεια. Στη συνέχεια η ενέργεια αυτή λαμβάνεται όταν επιστρέφει στην πηγή από την αντένα όπως αυτή έχει ανακλαστεί από το έδαφος ή τα αντικείμενα τα οποία ονομάζονται στόχοι ή σκεδαστές και βρίσκονται εντός της περιοχής υπερπτήσης του αισθητήρα. Τέλος, υπολογίζεται η απόσταση των στόχων από την αντένα μέσω του χρόνου της διπλής διαδρομής του σήματος. Η αρχική πληροφορία που παρέχεται από τα συστήματα αυτά προέρχεται από την κωδικοποίηση της ισχύος του ανακλώμενου σήματος ή το εύρος του παλμού, το οποίο επηρεάζεται από τις φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας που ανακλά το σήμα, καθώς επίσης και της κλίσης της επιφάνειας, του μεγέθους των αντικειμένων αλλά και της υγρασίας του εδάφους. Επιπλέον, για την πραγματοποίηση διαφορετικών εφαρμογών, τείνουν να χρησιμοποιούνται συστήματα με σήματα ραντάρ σε συχνότητες με διαφορετικά μήκη κύματος, ώστε να προσαρμόζονται στις ιδιαίτερες ανάγκες της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Σαν δεύτερο είδος πληροφοριών που περιλαμβάνεται στο επιστρεφόμενο σήμα αναφέρεται η απόσταση του κάθε στόχου που βρίσκεται στο έδαφος από το δορυφόρο. Συνεπώς, σε περιπτώσεις που υπάρχει η

δυνατότητα απόκτησης εικόνων ραντάρ της ίδιας περιοχής σε διαφορετικούς χρόνους, η οποιαδήποτε μετακίνηση της γήινης επιφάνειας είναι δυνατό να εκφραστεί ως διαφορά φάσης των σημάτων που αφορούν στα αντίστοιχα εικονοστοιχεία των δύο εικόνων. Στο τελικό προϊόν, δηλαδή τις εικόνες του SAR, η φωτεινότητα που χαρακτηρίζει κάθε εικονοστοιχείο αντικατοπτρίζει το βαθμό της οπισθοδιασποράς του σήματος στην επιφάνεια του αντικειμένου που έλαβε χώρα η ανάκλαση.

Η οπισθοδιασπορά ενός σήματος ραντάρ εξαρτάται από ποικιλία παραγόντων όπως:

- Το μήκος κύματος και τη συχνότητα του σήματος.
- Το μέγεθος και τις διηλεκτρικές ιδιότητες του σκεδαστή.
- Την πόλωση των παλμών του σήματος
- Τη γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων.

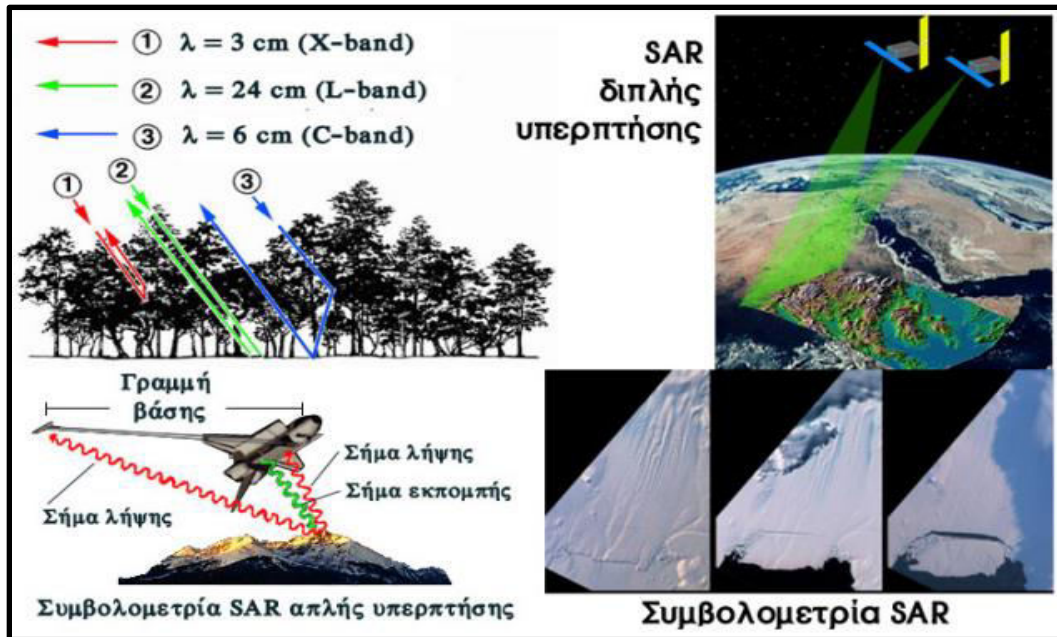
Στη συνέχεια παρουσιάζεται ενδεικτικό σχήμα που οπτικοποιεί την πορεία των ακτίνων και τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά (Σχήμα 2.10.):



Σχήμα 2.10. Η γεωμετρία των ακτίνων (Δεληκαράογλου, 2005)

Η Συμβολομετρία SAR μπορεί να εφαρμοστεί με δύο διαφορετικούς τρόπους και να προκύψουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα (Σχήμα 2.11.):

- Συμβολομετρία στην κάθετη στην τροχιά διεύθυνση, η οποία διακρίνεται στις εξής επί μέρους περιπτώσεις όπως θα παρουσιαστεί και στην ακόλουθη εικόνα:
 - Συμβολομετρία απλής ή μονής υπερπτήσης.
 - Συμβολομετρία διπλής υπερπτήσης.
- Συμβολομετρία κατά μήκος της τροχιάς.



Σχήμα 2.11. Μορφές Συμβολομετρίας SAR (Δεληκαράογλου, 2005)

Αναφορικά με τη μελέτη των κατακόρυφων μετακινήσεων και των εδαφικών υποχωρήσεων, η Συμβολομετρία SAR παρέχει σημαντικές δυνατότητες στην παρακολούθηση τέτοιων φαινομένων σε χρονικά διαστήματα από ημέρες έως έτη με ακρίβεια της τάξης των λίγων χιλιοστών. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα δημιουργίας ψηφιακών τοπογραφικών χαρτών και μοντέλων εδάφους υψηλής διακριτικότητας της τάξης των λίγων μέτρων. Τέλος, με συνδυασμό εικόνων SAR της ίδιας περιοχής μπορούν να παραχθούν ψηφιακά μοντέλα εδάφους και χάρτες μεταβολών της γήινης επιφάνειας πολύ υψηλής ακρίβειας.

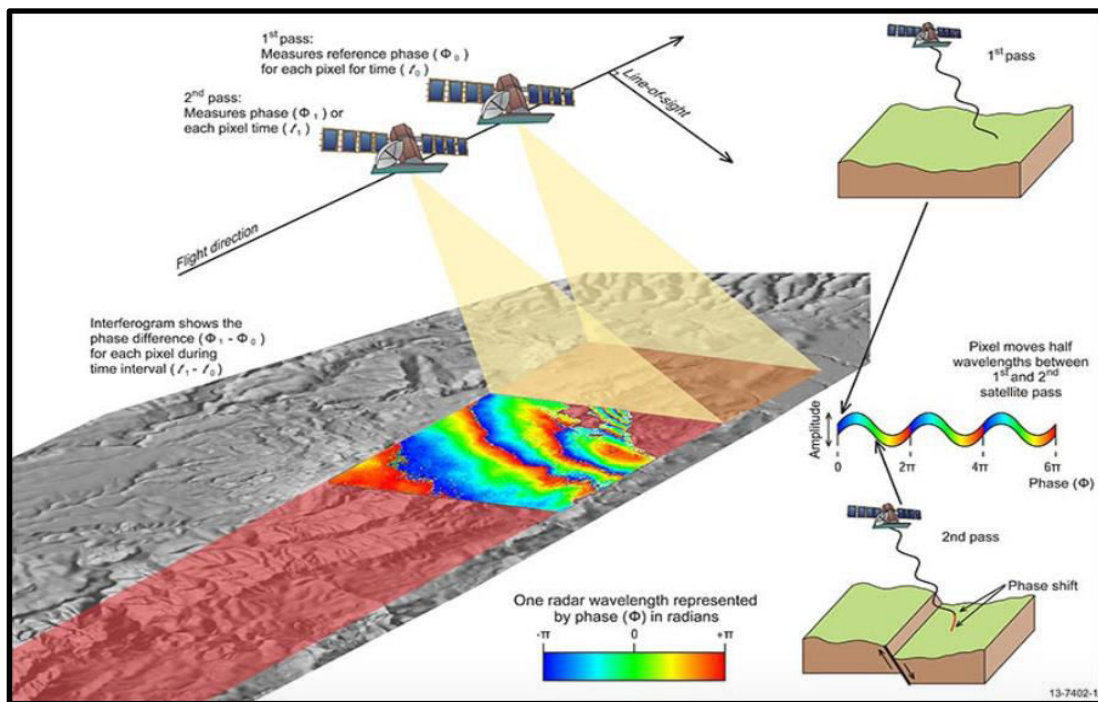
- **DInSAR (Differential Interferometric Aperture Radar).**

Σύμφωνα με το Geoscience Australia (ga.gov.au) η εν λόγω μέθοδος αποτελεί μια σύγχρονη τεχνολογική εξέλιξη της μεθόδου που αναφέρθηκε στην προηγούμενη υποενότητα. Η χρήση της Διαφορικής Συμβολομετρίας SAR έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί μια γεωδαιτική τεχνική με ιδιαίτερη εφαρμογή στην ανίχνευση των κινήσεων της επιφάνειας της Γης. Η μέθοδος χρησιμοποιείται κατά κόρον για την παρακολούθηση των μεταβολών της επιφάνειας του εδάφους όπως αυτές μπορούν να προκύψουν τόσο από γεωφυσικές διεργασίες, όσο και μέσω

ανθρωπογενούς δραστηριότητας. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η συνδυαστική του χρήση με άλλες γεωδαιτικές μεθόδους, δορυφορικές (GPS) ή επίγειες, μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στον εντοπισμό επιφανειακών μετακινήσεων, όπως είναι και οι εδαφικές υποχωρήσεις, με ακρίβεια χιλιοστού έως μερικών εκατοστών και τα αντίστοιχα προϊόντα να χαρακτηρίζονται από υψηλή χωρική ανάλυση. Ένα γενικό πλαίσιο μελετών που τείνει να χρησιμοποιείται η εν λόγω μέθοδος περιλαμβάνει τα εξής:

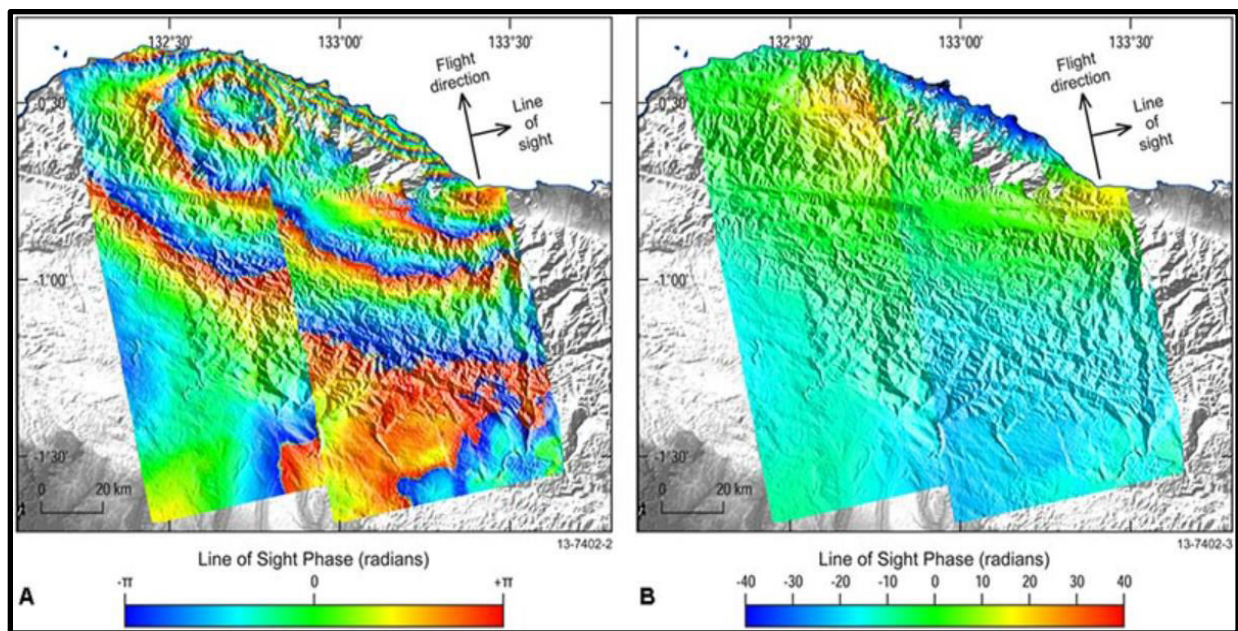
- Εδαφικές υποχωρήσεις, καθιζήσεις ή ανυψώσεις του εδάφους όπως αυτές μπορεί να προκύψουν από ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως η υπεράντληση και ο υποβιβασμός του υδροφόρου ορίζοντα.
- Σεισμικές παραμορφώσεις οι οποίες ενδέχεται να προκύψουν μετά από κάποιον σεισμό.
- Μετασεισμικές και διασεισμικές παραμορφώσεις σε περιοχές ρηγμάτων.
- Μεταβολές σε υπογείους θαλάμους μάγματος πριν από ηφαιστειακές εκρήξεις.
- Παρακολούθηση κινήσεων της επιφάνειας του εδάφους εντός δομημένου αστικού περιβάλλοντος.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου, ο οποίος έχει περιγραφεί στην προηγούμενη υποενότητα. Όπως έχει αναλυθεί, η χρήση δύο εικόνων SAR της ίδιας περιοχής αλλά από διαφορετικές χρονικές στιγμές, καθιστούν δυνατό τον εντοπισμό μεταβολών της επιφάνειας του εδάφους μέσω της καταγραφής διαφορών φάσης (Σχήμα 2.12.):



Σχήμα 2.12. Η Διαφορική Συμβολομετρία (ga.gov.au)

Τα ραντάρ και σε αυτή την περίπτωση μεταδίδουν παλμούς ενέργειας μικροκυμάτων προς την επιφάνεια του εδάφους η οποία ανακλάται και επιστρέφει, με τους αισθητήρες να καταγράφουν το σήμα οπισθοσκέδασης. Η μέθοδος είναι ανεπηρέαστη από τα καιρικά φαινόμενα καθώς φέρει μικρή ευαισθησία στα σύννεφα και τη βροχή. Οι εικόνες περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την κλίση και την τραχύτητα του εδάφους, ενώ ταυτόχρονα έχουν καταγραφεί και πληροφορίες σχετικά με την απόσταση δορυφόρου και της επιφάνειας της Γης στο εκάστοτε σημείο. Συνεπώς, όπως προαναφέρθηκε, οποιαδήποτε μεταβολή / αύξηση σε αυτή την απόσταση, θα μπορούσε να είναι προϊόν κάποιας εδαφικής υποχώρησης. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου με βάση τις αρχές λειτουργίας της δημιουργούνται εικόνες οι οποίες ονομάζονται συμβολογραφήματα. Σε περιπτώσεις περιοχών στις οποίες παρατηρείται μεταβολή στην επιφάνεια του εδάφους, για παράδειγμα προς τα πάνω, μεταξύ του χρονικού διαστήματος λήψης των δύο εικόνων, το συμβολογράφημα θα παρουσίαζε ομόκεντρους κύκλους χρωμάτων σε μορφή ζωνών, τους λεγόμενους κροσσούς συμβολής. Ο κάθε κροσσός συμβολής αφορά στη μετακίνηση της επιφάνειας προς το δορυφόρο ίση με το μισό του μήκους κύματος του ραντάρ. Οι κροσσοί καταγράφονται σύμφωνα με τη μέθοδο ως τιμές στο διάστημα $[0, 2\pi]$. Ουσιαστικά, για να ευρεθεί η συνολική μετακίνηση στην υπό μελέτη περιοχή μεταξύ των δύο διαφορετικών χρονικών στιγμών, μετριέται ο αριθμός των κροσσών συμβολής. Επιπλέον, η κάθε πλήρης μετάβαση από όλα τα χρώματα του φάσματος αποτελεί έναν κροσσό συμβολής. Με δεδομένο ότι τα διαγράμματα των κροσσών συμβολής παρουσιάζουν και οπτικοποιούν τις διαφορές φάσης του σήματος μεταξύ των εικόνων SAR, είναι δυνατή η δημιουργία ψηφιακών μοντέλων εδάφους ή μοντέλων παραμορφώσεων, μέσω της απομόνωσης των αιτιών των διαφορών φάσης λόγω τοπογραφίας ή παραμόρφωσης του εδάφους. Ακολούθως, αριστερά εμφανίζονται οι κροσσοί συμβολής χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί αφαίρεση του τοπογραφικού ανάγλυφου. Αντίστοιχα δεξιά, έπειτα από επεξεργασία, το πεδίο μεταβολής της φάσης που αντικατοπτρίζει τις εδαφικές μεταβολές, παρουσιάζεται με ομοιόμορφο τρόπο (Σχήμα 2.13.):



Σχήμα 2.13. Οι κροσσοί συμβολής (ga.gov.gr)

- **PS – InSAR (Persistent Scattered Interferometry).**

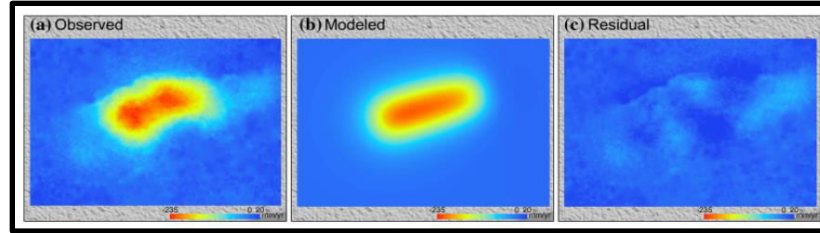
Η μέθοδος της Συμβολομετρίας Σταθερών Σκεδαστών αποτελεί μια επιπλέον τεχνολογική εξέλιξη της προαναφερθείσας μεθόδου της Διαφορικής Συμβολομετρίας (Ferreti et al., 2001). Με βάση τις αρχές λειτουργίας της, η συγκεκριμένη έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει και να καταγράψει μετακινήσεις μόνο στις τοποθεσίες στις οποίες βρίσκονται οι σταθεροί σκεδαστές (Persistent Scatterers). Οι σκεδαστές αυτοί στις περισσότερες περιπτώσεις πρέπει να είναι αντικείμενα που να χαρακτηρίζονται από υψηλή ανακλαστικότητα όπως έχουν υλοποιηθεί στις εκάστοτε θέσεις στις οποίες βρίσκονται. Τέτοια αντικείμενα για παράδειγμα μπορεί να είναι μεταλλικές κεραίες, ηλιακοί θερμοσίφωνες και λοιπά. Η ανακλαστικότητα διαφέρει σημαντικά μεταξύ των αντικειμένων που μπορούν να εντοπιστούν στο ανάγλυφο όπως για παράδειγμα στα δάση, στα οποία θεωρείται ιδιαίτερα μικρή. Ο σωστός εντοπισμός των σημείων του αναγλύφου τα οποία θα θεωρηθούν ως σκεδαστές και θα αξιοποιηθούν από τη μέθοδο, παίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην επιτυχία εφαρμογής της. Για τον κάθε σκεδαστή, στα αντίστοιχα συμβολογραφήματα που θα δημιουργηθούν, υπάρχουν αρκετές κατηγορίες στις οποίες μπορούν να αναλυθούν οι φάσεις:

- Το τοπογραφικό ανάγλυφο.
- Η φάση λόγω ατμοσφαιρικών φαινομένων.
- Η φάση σχετική με τις ανακρίβειες τις τροχιάς.
- Η κίνηση του στόχου που λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε διαδοχικές μετρήσεις.
- Η φάση σκέδασης του εκάστοτε αντικειμένου σε συνάρτηση με τη γραμμή πτήσης.
- Ο θόρυβος.

Με σκοπό την αφαίρεση των σφαλμάτων τα οποία σχετίζονται με την ατμόσφαιρα, η μέθοδος κατά την εφαρμογή της χρησιμοποιεί περισσότερες από είκοσι εικόνες SAR διαφορετικών χρονικών στιγμών, οι οποίες αναφέρονται στην ίδια περιοχή. Επιπλέον, σε περιπτώσεις δομημένου αστικού περιβάλλοντος, με συγκεκριμένες τοπογραφικές μεθόδους, καταργούνται τα σημεία πολλαπλής σκέδασης και αξιοποιούνται μόνο τα σημεία μονής σκέδασης.

Η εν λόγω μέθοδος έχει τη δυνατότητα να επιτύχει υψηλότερες ακρίβειες από τις υπόλοιπες μεθόδους κλασσικής Συμβολομετρίας όσον αφορά τον προσδιορισμό των εδαφικών μετακινήσεων. Για λόγους παραδείγματος, η μέτρηση μιας καθίζησης μιας περιοχής για την οποία έχουν δημιουργηθεί περισσότερες από πενήντα εικόνες για χρονικό διάστημα πέντε ετών μπορεί να αγγίξει ακρίβειες μικρότερες του 1mm ανά έτος (Werner et al., 2016).

Ένα από τα βασικότερα μειονεκτήματα της μεθόδου αφορά στην ευαισθησία της στην επίδραση της ατμόσφαιρας που μπορεί να οδηγήσει σε σφάλματα κατά τις διαδοχικές διελεύσεις του δορυφόρου, καθώς τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα κινούνται μέσα στην τροπόσφαιρα με χαμηλότερες ταχύτητες (Zebker et al., 1997). Παρακάτω παρουσιάζεται ενδεικτικό αποτέλεσμα της υπό ανάλυση μεθόδου σε διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην Κίνα για εδαφικές υποχωρήσεις (Σχήμα 2.14.):



Σχήμα 2.14. Η μέθοδος PSInSAR (Sun et al., 2017)

2.3. Παραδείγματα από τη διεθνή βιβλιογραφία

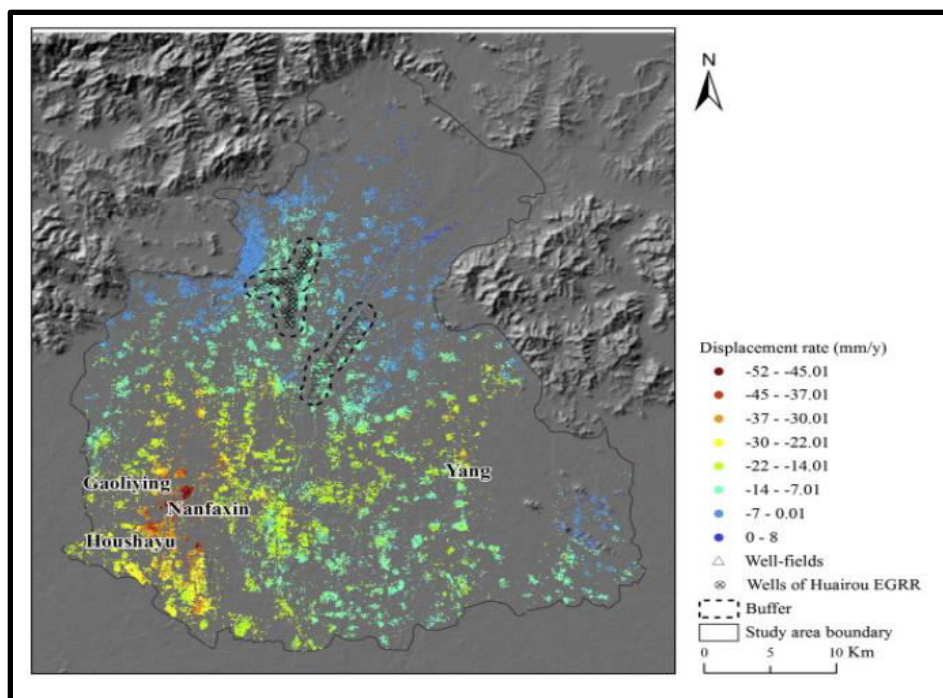
Το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων, έχει αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για σημαντικό αριθμό επιστημόνων ανά τον κόσμο. Το εν λόγω φαινόμενο έχει διερευνηθεί και αναλυθεί με ποικιλία επιστημονικών προσεγγίσεων. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται παραδείγματα εκδήλωσης του φαινομένου ανά την υφήλιο, καθώς και το πως διερευνήθηκαν από τους εκάστοτε ειδικούς.

- **Κίνα**

Στο βόρειο τμήμα της πεδιάδας του Πεκίνου, οι Zhu et al., (2015), διερεύνησαν το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων που είχε παρατηρηθεί στην περιοχή, λόγω υπεραντλήσεων των τοπικών υπόγειων υδροφορέων για το χρονικό διάστημα από το 2003 έως το 2010.

Για την πραγματοποίηση της διερεύνησης χρησιμοποιήθηκαν και συγκεντρώθηκαν διαφορετικών ειδών στοιχεία, όπως δεδομένα από γεωτεχνικά όργανα που βρίσκονταν σε γεωτρήσεις, στοιχεία εδαφικών υποχωρήσεων από εικόνες μέσω της μεθόδου της Συμβολομετρίας Σταθερών Σκεδαστών (PS – InSAR), δεδομένα για τη στάθμη των υπογείων υδάτων, περαιτέρω υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης αλλά και μία εικόνα του δορυφόρου Landsat TM ώστε να διερευνηθεί τόσο η χωρική όσο και η χρονική συσχέτιση των εδαφικών υποχωρήσεων, καθώς και να καταστεί δυνατή η σύνδεση τους με τις υπεραντλήσεις, τα πάχη των στρώσεων και την έντονη αστική ανάπτυξη.

Στη συνέχεια με εφαρμογή μαθηματικών μεθόδων, βαθμονόμηση μοντέλων αλλά και χωρική συσχέτιση των δεδομένων προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα. Για την περίοδο μελέτης η υποχώρηση του εδάφους άγγιξε τα 92.5 χιλιοστά κατά μέσο όρο με μέγιστο ρυθμό τα 52 χιλιοστά ανά έτος. Επιπλέον, η κατανομή των εδαφικών υποχωρήσεων συνδέεται σε ένα μέρος με τις υπεραντλήσεις, με τα αποτελέσματα να διαφοροποιούνται ανάλογα τα χαρακτηριστικά των στρώσεων των εδαφικών σχηματισμών. Τέλος, δεν μπόρεσε να θεωρηθεί βάσιμη η σύνδεση της χωρικής κατανομής με τη αύξηση του βάρους του υπερκείμενου εδάφους λόγω της αύξησης του από υπερκείμενες κατασκευές. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η χωρική εξάπλωση και το μέγεθος των εδαφικών υποχωρήσεων ανά έτος με βάση τους ερευνητές. (Σχήμα 2.15.)

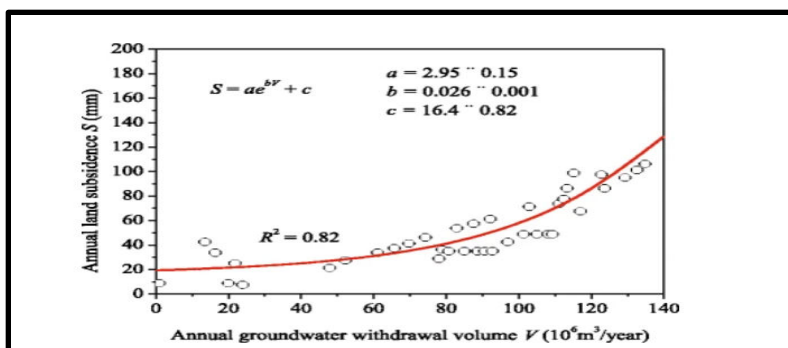


Σχήμα 2.15. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Zhu et al., 2015)

Στην πόλη Xi'an της κεντρικής Κίνας οι Wang et al., (2019), διερεύνησαν τις εμφανιζόμενες εδαφικές υποχωρήσεις της ευρύτερης περιοχής λόγω της έντονης άντλησης των υπογείων υδάτων σε τρεις διακριτές περιόδους από τη δεκαετία του 1960 έως σήμερα.

Οι ερευνητές συγκέντρωσαν και ανέλυσαν τα αποτελέσματα άλλων σχετικών διερευνήσεων της ίδιας κατηγορίας στην περιοχή μελέτης και στη συνέχεια προσέγγισαν την πρόβλεψη του εμφανιζόμενου προβλήματος με μαθηματικές στατιστικές μεθόδους, με αριθμητικές μεθόδους, αλλά και με μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης. Επιπρόσθετα, σχολιάστηκαν τρεις βασικές ανερχόμενες μελλοντικές διερευνήσεις που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν, με σκοπό μια καλύτερη οπτική στην παρατήρηση του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων. Το πρώτο αφορούσε στη συσχέτιση του φαινομένου με τις υπάρχουσες ρωγμές του εδάφους, το δεύτερο τη μελέτη των υπάρχουσών μεθόδων παρατήρησης του φαινομένου ώστε να ευρεθεί η πλέον κατάλληλη για την απόκτηση ακριβών αποτελεσμάτων, ενώ η τρίτη στη διερεύνηση της επίδρασης της σύνθλιψης των σωματιδίων των εδαφικών σχηματισμών λόγω υψηλών επιπέδων καταπόνησης ως συνάρτηση της αυξημένης ανάπτυξης υποχωρήσεων του εδάφους.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα διάγραμμα το οποίο αντικατοπτρίζει τον υψηλό βαθμό συσχέτισης μεταξύ της ετήσιας εδαφικής υποχώρησης και του ετήσιου βαθμού άντλησης ύδατος, όπως προέκυψε από τη διερεύνηση των Zhang et al. (2013). (Σχήμα 2.16.)

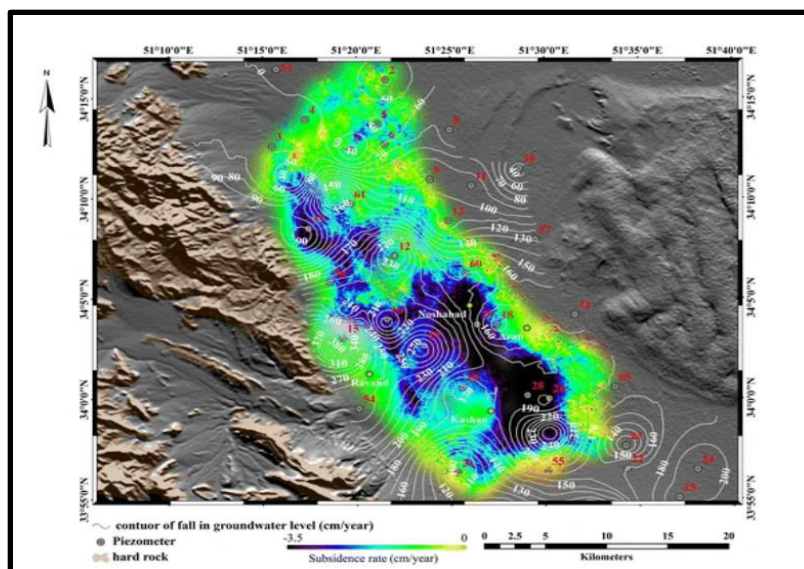


Σχήμα 2.16. Συσχέτιση εδαφικής υποχώρησης και υπεράντλησης (Zhang et al., 2013)

- Ιράν

Στην πεδιάδα του Keshan, οι Ghazifard et al., (2016) συσχέτισαν τις ρωγμές που είχαν εμφανιστεί στο έδαφος της περιοχής μελέτης με τις εδαφικές υποχωρήσεις λόγω υπεραντλήσεων των υπόγειων νερών. Οι ρωγμές στην επιφάνεια του εδάφους είχαν αρχίσει να εμφανίζονται από το 1991, προκαλώντας αρκετές ζημιές σε κτίρια και υφιστάμενες διαμορφώσεις.

Για την εκπόνηση της έρευνας, οι επιστήμονες συγκέντρωσαν δεδομένα Envisat ASAR από το 2003 έως το 2008 ενώ οι χάρτες μετακινήσεων του εδάφους που κατασκευάστηκαν προέκυψαν μέσω της μεθόδου της Διαφορικής Συμβολομετρίας, αξιοποιώντας δεδομένα από τα αντίστοιχα συμβολογραφήματα. Με βάση τις αναλύσεις που ακολούθησαν, η μέγιστη εδαφική υποχώρηση για το διάστημα μελέτης προέκυψε να είναι της τάξης των 3.5 εκατοστών το χρόνο, όπως παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 2.17.):

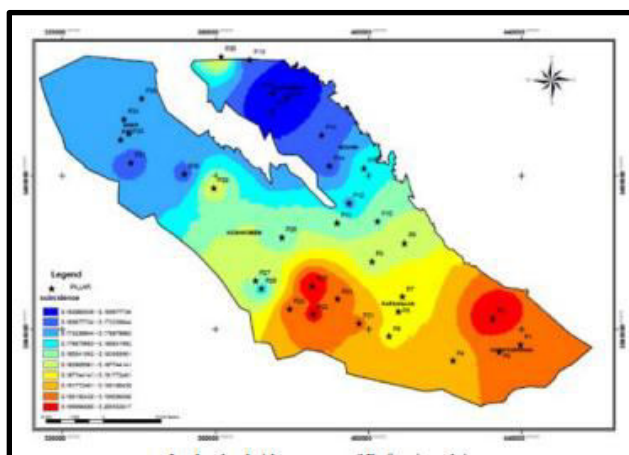


Σχήμα 2.17. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Ghazifard et al., 2016)

Αντίστοιχα, οι Rahnama and Moafi, (2009), διερεύνησαν τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων που παρατηρήθηκαν στην πεδιάδα του Rafsanjan, αξιοποιώντας εργαλεία και δυνατότητες των λογισμικών GIS.

Οι ερευνητές συγκέντρωσαν και δημιούργησαν βάση δεδομένων με σημαντικό αριθμό στοιχείων σχετικών με τα χαρακτηριστικά των υδάτων του υπεδάφους της περιοχής μελέτης, τα οποία στη συνέχεια εισήχθησαν και αξιοποιήθηκαν από τα προαναφερθέντα λογισμικά. Επιπλέον, χρησιμοποίησαν δεδομένα εδαφικών υποχωρήσεων τα οποία είχαν συγκεντρωθεί τα έτη 1998 και 1999 με δορυφορικές μετρήσεις GPS.

Εφαρμόζοντας τα εργαλεία του λογισμικού για να αναλύσουν τα δεδομένα, οι επιστήμονες απέδειξαν ότι το βασικό αίτιο των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή μελέτης, είναι οι υπεραντλήσεις. Στη συνέχεια οπτικοποίησαν τα αποτελέσματα με έναν αριθμό χαρτών, όπως ενδεικτικά φαίνεται παρακάτω η κατανομή των εδαφικών υποχωρήσεων χωρικά. (Σχήμα 2.18.)



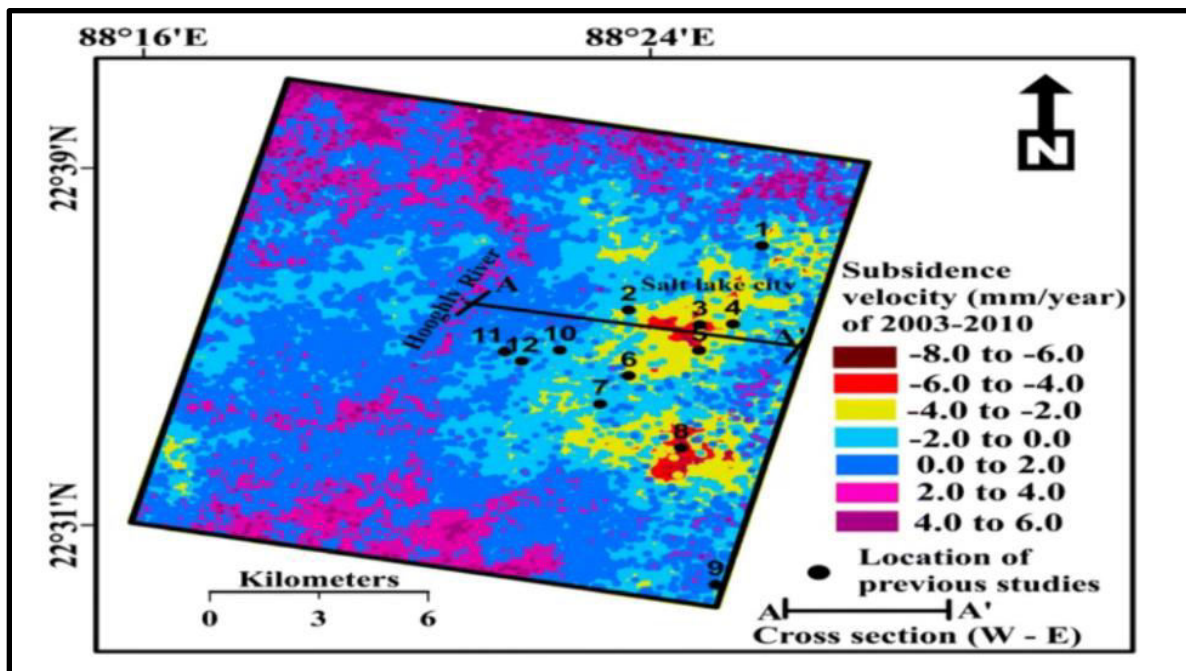
Σχήμα 2.18. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Rahnama and Moafi, 2009)

- Ινδία

Στην περιοχή Kolkata της Ινδίας, οι Suganthi and Elango, (2020) ανέφεραν ότι η υπεράντληση των υπογείων υδάτων και οι εδαφικές υποχωρήσεις οι οποίες ακολουθούν, αποτελούν έναν από τους μεγαλύτερους κινδύνους σε περιπτώσεις αλλουβιακών υδροφόρων.

Για την εκπόνηση της εργασίας και τον καθορισμό της ταχύτητας με την οποία πραγματοποιούνται οι εδαφικές υποχωρήσεις, οι επιστήμονες συγκέντρωσαν δεδομένα ENVISAT SAR σε έξι διαφορετικές περιόδους. Για το τμήμα της ανάλυσης επέλεξαν τη μέθοδο SBAS (Small Baseline Subset) λόγω της ιδιαίτερης εφαρμογής και χρησιμότητας της ως προς τη δημιουργία χαρτών μέσης παραμόρφωσης.

Αναφέροντας τα αποτελέσματα προέκυψε ότι η πτώση της πιεζομετρικής γραμμής της περιοχής μελέτης ήταν της τάξης των 6 μέτρων από το 2003 έως το 2010 ενώ η ταχύτητα της εδαφικής υποχώρησης προέκυψε να είναι της τάξης των 8 χιλιοστών ανά έτος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Τέλος, η βασική αιτία του φαινομένου αποδείχτηκε ότι είναι όντως η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων. (Σχήμα 2.19.)

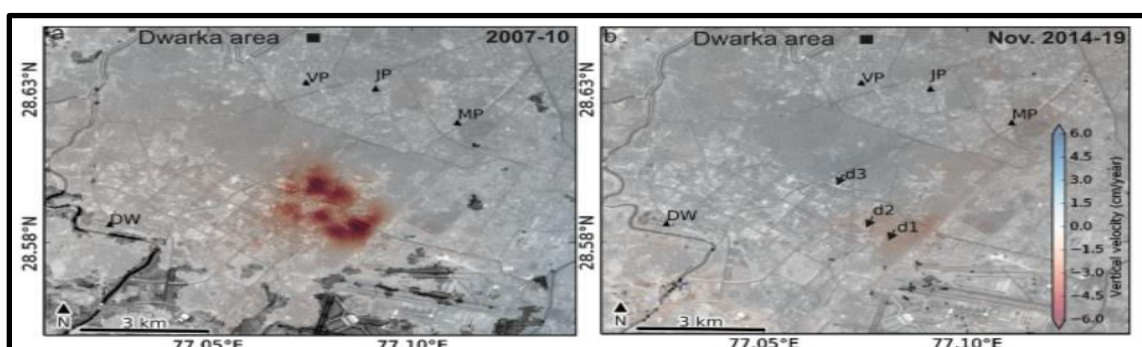


Σχήμα 2.19. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Suganthi and Elango, 2020)

Στην ευρύτερη περιοχή της πρωτεύουσας της Ινδίας, οι Kumar et al., (2022) συσχέτισαν τα φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων που έχουν παρατηρηθεί στην περιοχή με την υπεράντληση των υδάτων του υδροφόρου ορίζοντα.

Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν αφορούσαν σε βάσεις δεδομένων από τους δορυφόρους ALOS-1 (2007-2011) και Sentinel-1 (Νοέμβριος 2014-2019) και η περιοχή μελέτης διαχωρίστηκε σε δύο επί μέρους περιοχές. Για την εφαρμογή της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν τα συμβολογραφήματα διαφορετικών χρονικών περιόδων όπως αυτά προκύπτουν με βάση τις αρχές της μεθόδου InSAR.

Τα αποτελέσματα της μεθόδου κατέληξαν σε σημαντική συσχέτιση της υπεράντλησης με την ταχύτητα εξέλιξης των εδαφικών υποχωρήσεων, καθώς σε περιοχές που οι αντλήσεις έχουν ελεγχθεί, η ταχύτητα του φαινομένου παρουσίασε ύφεση. Τέλος τονίστηκε η σημασία της παρακολούθησης του εν λόγω φαινομένου, ώστε να είναι δυνατός ο έγκαιρος εντοπισμός φαινομένων υπερεκμετάλλευσης των υπογείων υδάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μιας υποπεριοχής με βάση την ανάλυση των δύο βάσεων δεδομένων. (Σχήμα 2.20.)



Σχήμα 2.20. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Kumar et al., 2022)

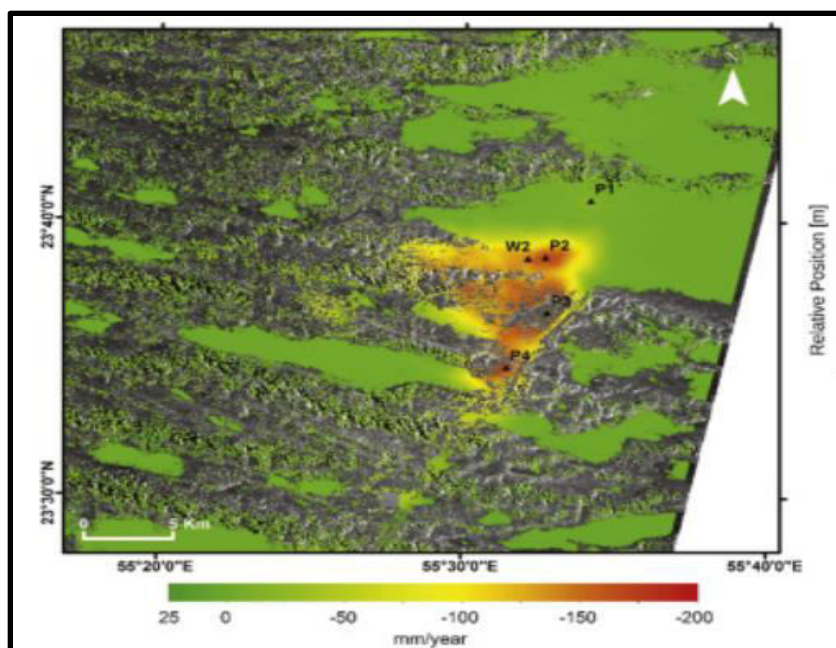
- **Σαουδική Αραβία και ΗΑΕ**

Στο κεντρικό τμήμα της Σαουδικής Αραβίας και συγκεκριμένα στην περιοχή Al-Qassim, οι Othman and Abotalib, (2019) πραγματοποίησαν επιστημονική διερεύνηση σχετική με τις εδαφικές υποχωρήσεις που είχαν παρατηρηθεί στην περιοχή και έχουν διαρκέσει για περίπου δύο δεκαετίες. Για την πραγματοποίηση της έλαβε χώρα σημαντικός αριθμός διαδικασιών, όπως οι επιτόπιες έρευνες υπαίθρου για την παρατήρηση και αξιολόγηση του βαθμού εξέλιξης του φαινομένου, χωρικές συσχετίσεις σε περιβάλλον GIS, με συνυπολογισμό των χαρακτηριστικών των γεωλογικών σχηματισμών και του βαθμού εκμετάλλευσης του υδροφόρου, χρήση της τεχνικής SBAS μέσω στοιχείων βάσεων δεδομένων ENVISAT καθώς και μια συσχέτιση του βαθμού εξέλιξης του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων χωρικά και χρονικά με δεδομένα μεταβολών μάζας GRACE.

Με βάση τα αποτελέσματα των μεθόδων προέκυψαν ταχύτητες εξέλιξης των εδαφικών παραμορφώσεων της τάξης των 5 με 12 χιλιοστά το χρόνο σε τμήματα της περιοχής μελέτης, αποδεικνύοντας τη γρήγορη επιρροή που έχουν οι ανθρώπινες δραστηριότητες σε τέτοιου είδους ξηρά άνωδρα περιβάλλοντα.

Αντίστοιχα στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, οι Liosis et al., (2018) απέδειξαν ότι οι εδαφικές υποχωρήσεις στην περιοχή AL Wagan, ακολουθούν αντίστοιχο μοτίβο με την πτώση της στάθμης των νερών των υπογείων υδάτων. Όπως και στην προηγούμενη επιστημονική διερεύνηση αξιοποιήθηκαν δορυφορικές εικόνες από τους ENVISAT, ALOS και Sentinel-1A, ενώ τα δεδομένα αναλύθηκαν με βάση τις αρχές της Διαφορικής Συμβολομετρίας αλλά και της τεχνικής SBAS ώστε να είναι δυνατό να εξαχθούν αποτελέσματα σχετικά με την εξέλιξη των προτύπων των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα, μεταξύ των ετών 2003 και 2010, προέκυψαν ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων της τάξης των 18 εκατοστών ανά έτος με μια μικρή τάση μείωσης τα επόμενα χρόνια (2016-2018). Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (2003-2010). (Σχήμα 2.21.)



Σχήμα 2.21. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Liosis et al., 2018)

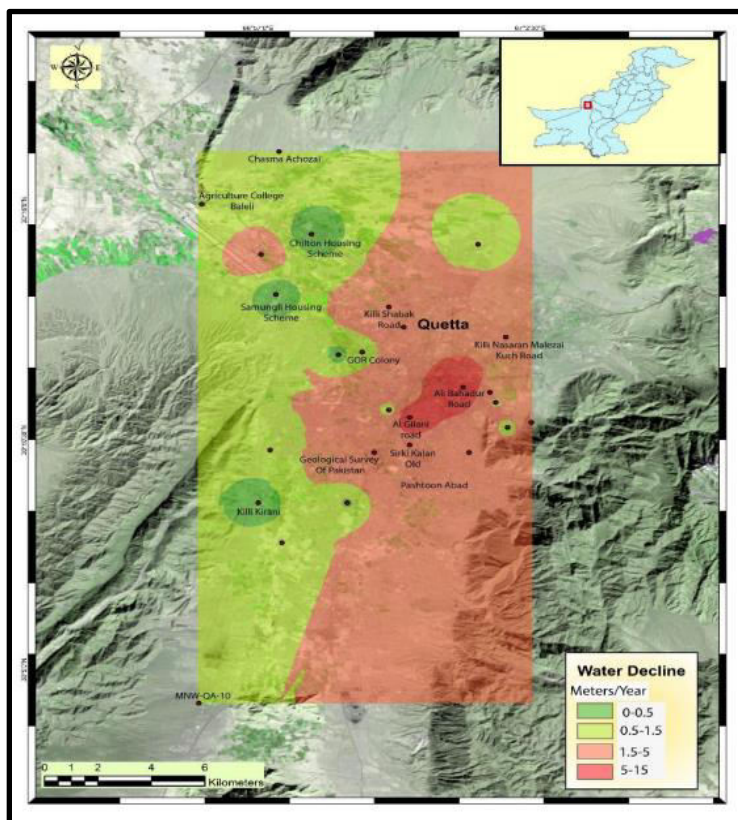
- **Πακιστάν**

Σε επιστημονική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην κοιλάδα Quetta του Πακιστάν, οι Kakar et al., (2019) διερεύνησαν τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων που παρουσιάστηκαν στην εν λόγω περιοχή, μια έκταση η οποία βασίζεται στα υπόγεια νερά ως επί

το πλείστων για την κάλυψη των αναγκών της, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζει σημαντική πληθυσμιακή αύξηση.

Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας, αφορούσαν σε δεδομένα από πέντε σταθμούς GPS της περιοχής τα οποία συγκεντρώθηκαν και έλαβαν επεξεργασία. Επιπλέον, δεδομένα αναφορικά με τη μείωση της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου αξιοποιήθηκαν μέσω μετρήσεων σε 41 πηγάνδια της περιοχής για τη χρονική περίοδο από το 2010 έως το 2015. Τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν συσχετίστηκαν και αναλύθηκαν μέσω στατιστικών διαδικασιών και δημιουργίας διαγραμμάτων.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της διερεύνησης, αυτά απέδειξαν ότι το εύρος της ταχύτητας της εδαφικής υποχώρησης στην κοιλάδα κυμαίνεται από 30 έως 120 χιλιοστά το χρόνο, ενώ υπάρχει άμεση συσχέτιση με τις υπεραντλήσεις, όπως έγινε φανερό από τα δεδομένα μέγιστης υδατικής υποχώρησης. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της κατανομής της πτώσης της στάθμης του υπόγειου νερού στην περιοχή μελέτης (Σχήμα 2.22.):

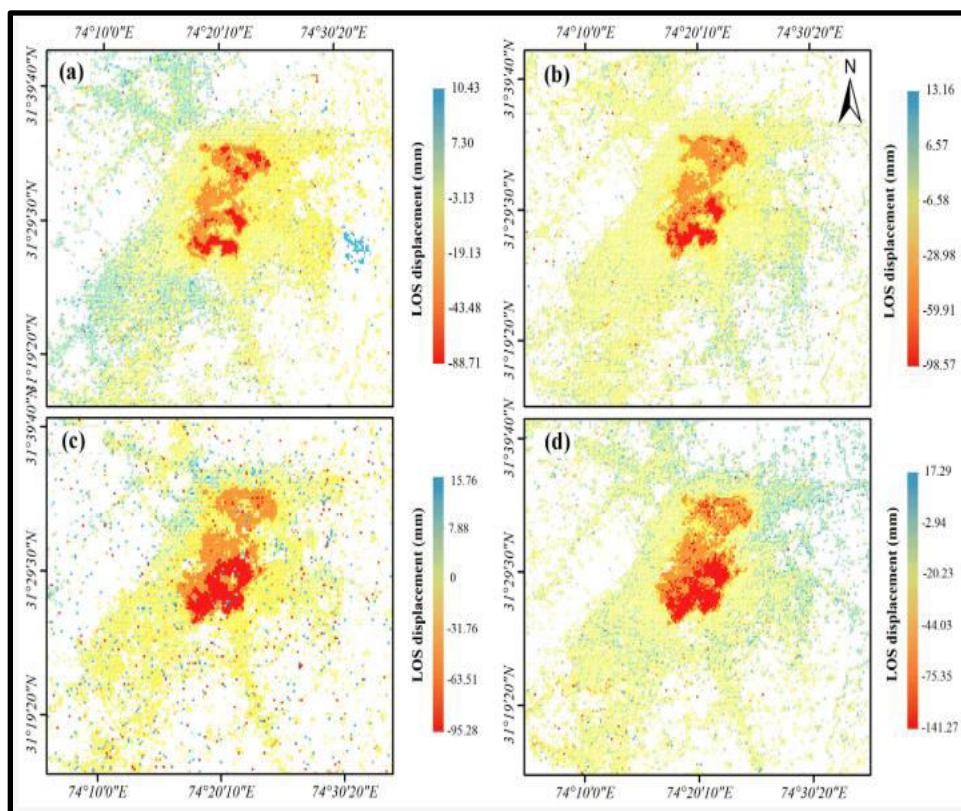


Σχήμα 2.22. Πτώση της στάθμης των υπογείων υδάτων (Kakar et al., 2019)

Στην πρωτεύουσα του Πακιστάν, οι Sajjad et al., (2023) διερεύνησαν τη συσχέτιση των εδαφικών υποχωρήσεων που παρατηρούνται στην περιοχή με την αυξητική τάση των αντλήσεων των υπογείων υδάτων.

Η βασική μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι αυτή της Συμβολομετρίας Σταθερών Σκεδαστών (Persistent Scattered Interferometry) ώστε να λάβει χώρα η παρακολούθηση των εδαφικών μεταβολών / μετακινήσεων αλλά και να ερευνηθεί η σχέση με την πτώση της στάθμης του υδροφόρου. Για την πραγματοποίηση της διαδικασίας αξιοποιήθηκε σειρά δορυφορικών εικόνων του Sentinel-1 από το 2017 έως το 2020, ενώ για τον εντοπισμό χωρικών σχέσεων και μελλοντικών τάσεων, εκπονήθηκαν στατιστικές μέθοδοι, όπως το τεστ Mann-Kendall.

Τα αποτελέσματα υπέδειξαν αυξανόμενη τάση των μέσων εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή από το 2017 στο 2020, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, με την ταχύτητα εξέλιξης τους να αγγίζει τα 106 χιλιοστά το χρόνο. Αντίστοιχα, τα στατιστικά τεστ, απέδειξαν πτωτική τάση στα επίπεδα της στάθμης του υπόγειου νερού. (Σχήμα 2.23.)



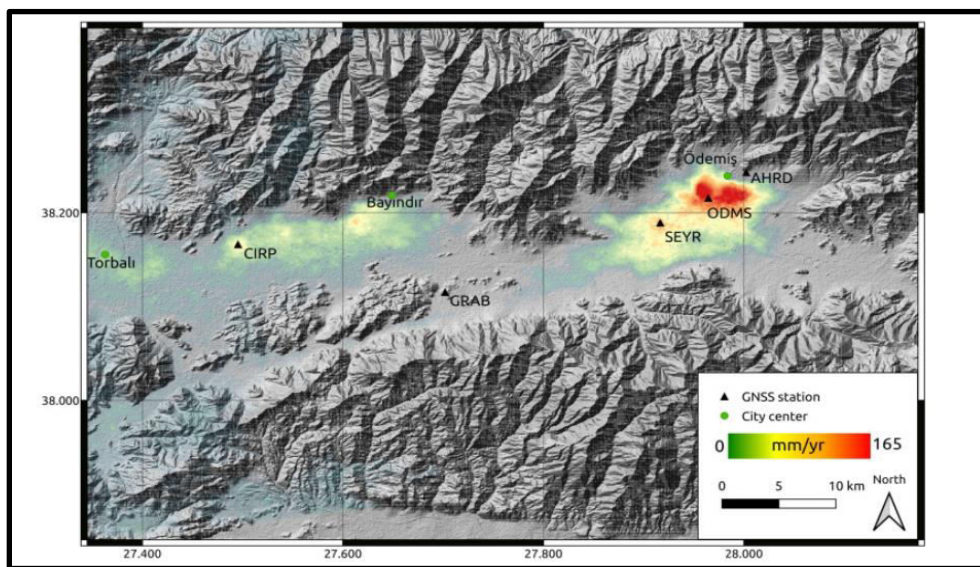
Σχήμα 2.23. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Sajjad et al., 2023)

- **Τουρκία**

Σε επιστημονική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην κοιλάδα του ποταμού Kızık Menderes, οι Yalvaç et al., (2023) απέδειξαν ότι τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων που παρατηρούνται στην περιοχή, έχουν άμεση σχέση με τις υπεραντλήσεις υπόγειων υδάτων που πραγματοποιούνται.

Για την εκπόνηση της εργασίας, εφαρμόστηκε η μέθοδος της Συμβολομετρίας SAR και συγκεκριμένα η InSAR-SBAS συνδυαστικά με δεδομένα δορυφορικών μεθόδων (GNSS). Για την πρώτη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν 74 εικόνες SAR από το 2017 έως το 2022 και στη δεύτερη περίπτωση αξιοποιήθηκαν δορυφορικά δεδομένα από πέντε σταθμούς από το 2021 ως το 2023.

Με βάση τα αποτελέσματα, όπως θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, σημαντική ταχύτητα εδαφικής υποχώρησης της τάξης έως 165 χιλιοστά ανά έτος παρατηρήθηκε σε συγκεκριμένες θέσεις της περιοχής μελέτης με αρκετές διαφοροποιήσεις ανάλογα την ένταση των αντλήσεων του υπογείου νερού και το μέγεθος των κατακρημνίσεων. (Σχήμα 2.24.)



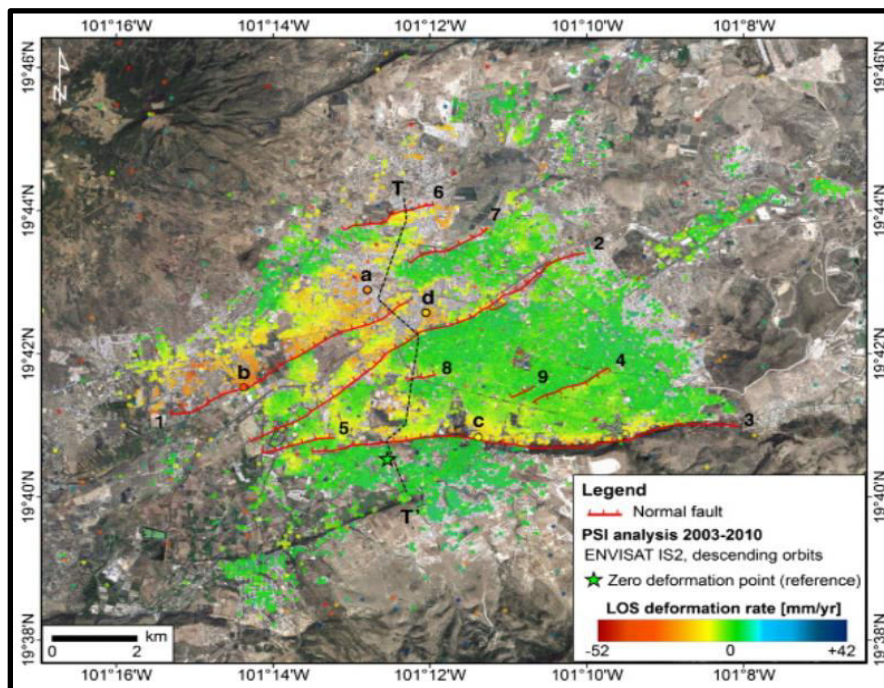
Σχήμα 2.24. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Yalvac et al., 2023)

- **Μεξικό**

Οι Cigna et al., (2012) διερεύνησαν στη Morelia του Μεξικό τις εδαφικές υποχωρήσεις που έχουν εμφανιστεί στην περιοχή. Ανέφεραν ότι σε πολλές αγροτικές περιοχές της χώρας, οι καθημερινές ανάγκες σε νερό, για την ικανοποίηση των καθημερινών αναγκών, καλύπτονται από εκμετάλλευση των τοπικών υπόγειων νερών. Σε περιπτώσεις ακατάσχετης χρήσης τους η πτώση της στάθμης του νερού καθίσταται πλέον μόνιμη.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αφορούσαν σε 23 εικόνες ENVISAT SAR από το 2003 έως το 2010, ενώ η επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε μέσω δύο τεχνικών. Η πρώτη αποτέλεσε την κλασσική Συμβολομετρία SAR (InSAR), ενώ η δεύτερη τη Συμβολομετρία Σταθερών Σκεδαστών (PS – InSAR). Και στις δύο περιπτώσεις, αξιοποιώντας τις δορυφορικές εικόνες διαφορετικών χρονικών στιγμών και τα αντίστοιχα συμβολογράμματα που προέκυψαν, εξήχθησαν τα απαραίτητα αποτελέσματα.

Αναφορικά με αυτά, η ανάπτυξη των εδαφικών υποχωρήσεων βρέθηκε σε συμφωνία με την πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα λόγω των υπεραντλήσεων, με ταχύτητες διαφοροποιούμενες ανάλογα την περιοχή, της τάξης των 7 με 8 εκατοστών το χρόνο ως προς τις μέγιστες εμφανιζόμενες τιμές τους. Επιπλέον, προέκυψαν έντονες αντιθέσεις του βαθμού εδαφικής υποχώρησης πλησίον περιοχών ρηγμάτων, τα οποία θεωρήθηκε ότι λειτουργούν ως φυσικοί φραγμοί στην κίνηση του υπόγειου νερού του εδάφους. Ακολούθως, οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα με τη μέθοδο της Συμβολομετρίας Σταθερών Σκεδαστών, όπως προέκυψαν με βάση τους ερευνητές (Σχήμα 2.25.):



Σχήμα 2.25. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Cigna et al., 2012)

- **Ηνωμένες Πολιτείες**

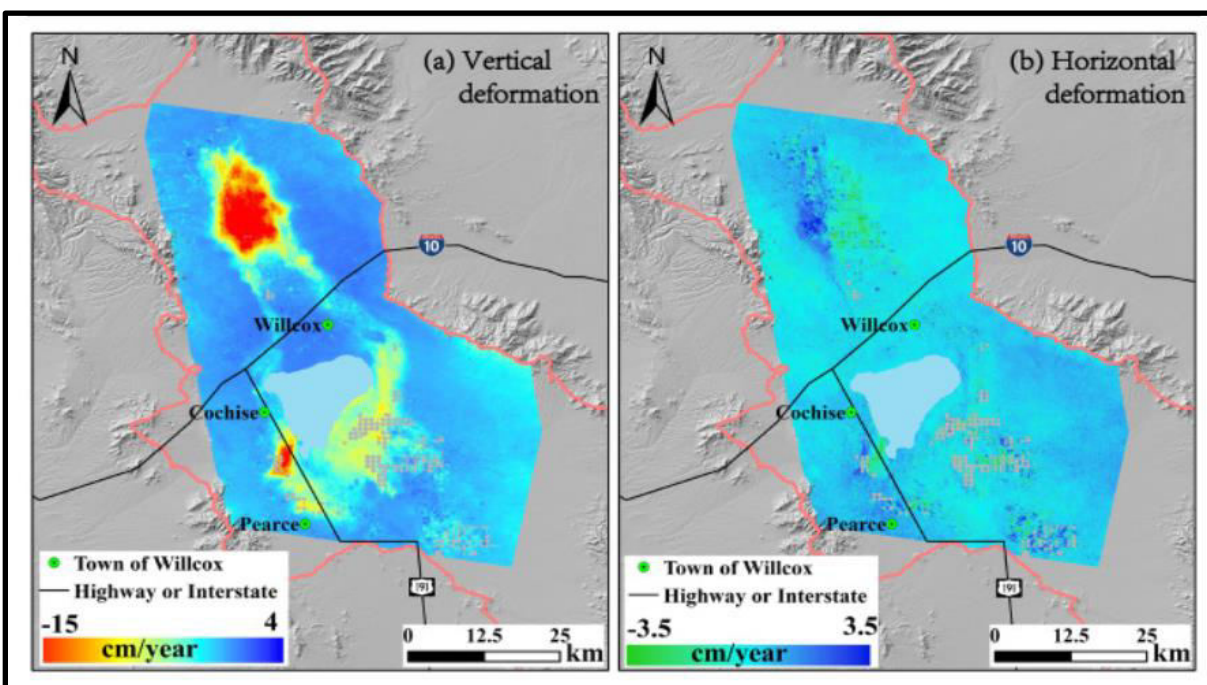
Οι Peng et al., (2022) διερεύνησαν στην κοιλάδα Willcox της Αριζόνα τις εδαφικές υποχωρήσεις που παρατηρούνται στην περιοχή, λόγω της διαρκούς και διαχρονικής υπερεκμετάλλευσης των υπόγειων νερών. Επιπλέον, ανέφεραν ότι η χρόνια εξέλιξη του φαινομένου όχι μόνο δεν έχει σταθεροποιηθεί με την πάροδο των ετών, αλλά αντιστρόφως έχει παρατηρηθεί ότι οι ρυθμοί της αυξάνονται.

Τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν αφορούσαν σε δεδομένα Συμβολομετρίας SAR από το Κανάλι L του δορυφόρου ALOS και το Κανάλι C του δορυφόρου Sentinel-1. Τα χρησιμοποιηθέντα δεδομένα κάλυπταν χρονικό διάστημα από το 2006 έως το 2020 ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή της εν λόγω επιστημονικής προσέγγισης. Για την επιπλέον ανάλυση των στοιχείων και την εξαγωγή ορθών συμπερασμάτων εφαρμόστηκε η μέθοδος ICA (Independent

Component Analysis) ώστε να διαχωριστούν τα ανακλώμενα σήματα σε επιμέρους και να εξαλειφθούν τα σφάλματα κατά την εφαρμογή της Συμβολομετρίας SAR, προσέγγιση η οποία θεωρήθηκε ότι θα οδηγούσε σε πιο λεπτομερή αποτελέσματα.

Σύμφωνα με αυτά για την περιοχή μελέτης, εντοπίστηκαν δύο διαφορετικά χωροχρονικά χαρακτηριστικά εδαφικής παραμόρφωσης τα οποία συνυπάρχουν σε αυτήν. Ταυτόχρονα, συνυπολογίστηκαν δεδομένα της πτώσης της στάθμης των υπόγειων νερών ποσοτικοποιώντας τα αποτελέσματα με στοιχεία από το 1990 έως το 2020.

Παρακάτω παρουσιάζονται οπτικοποιημένα τα αποτελέσματα σε μορφή χάρτη, των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων με βάση τα δεδομένα Sentinel SAR (Σχήμα 2.26.):



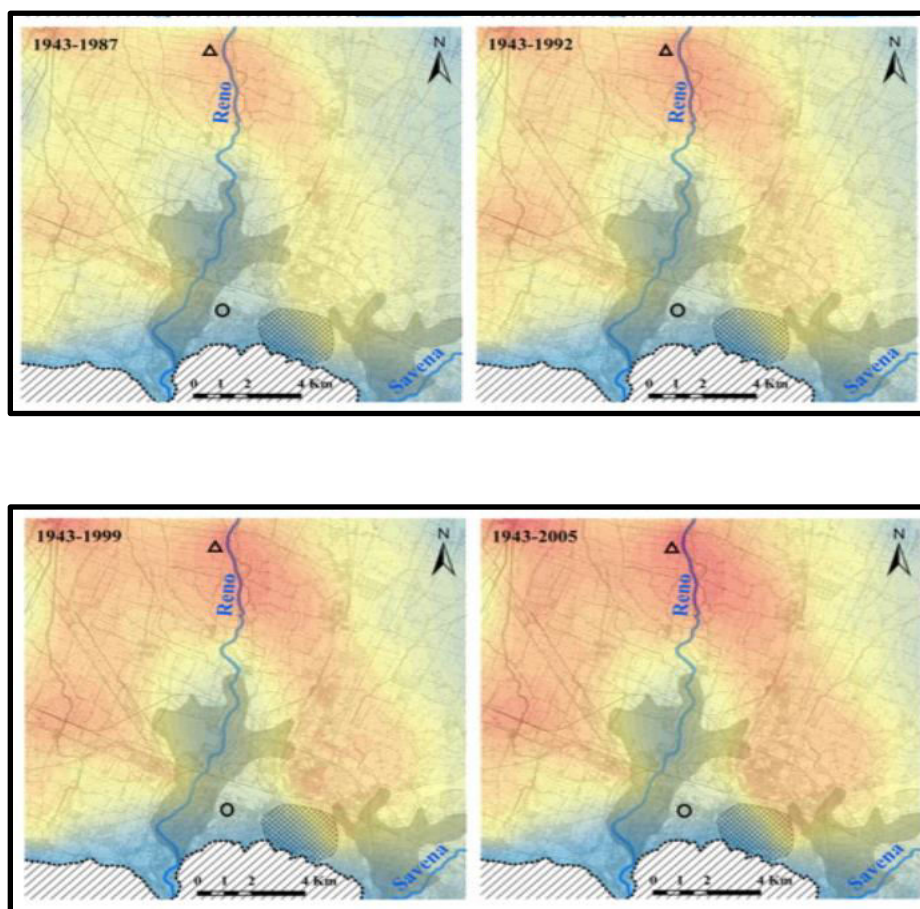
Σχήμα 2.26. Ταχύτητες κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων (Peng et al., 2022)

- **Ιταλία**

Οι Modoni et al., (2013) εκπόνησαν επιστημονική διερεύνηση στην περιοχή της Μπολόνια της Ιταλίας με σκοπό να αναλύσουν τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων και παραμορφώσεων που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης.

Για το εφαρμοσμένο μέρος της εργασίας, οι επιστήμονες συγκέντρωσαν σημαντικό αριθμό δεδομένων για ένα μεγάλο ευρύτερο τμήμα της περιοχής μελέτης αξιοποιώντας στοιχεία από παλαιότερες γεωλογικές, υδρογεωλογικές, τοπογραφικές και γεωτεχνικές μελέτες που είχαν πραγματοποιηθεί στην περιοχή για ποικιλία διαφορετικών σκοπών. Για τον συνυπολογισμό όλων των δεδομένων και την δυνατότητα ανάλυσης αλλά και εξαγωγής συμπερασμάτων, όλα τα στοιχεία εισήχθησαν σε Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών, στο οποίο παρεμβλήθηκε και γεωστατιστική ανάλυση.

Με βάση το μεγάλο διαφορετικό αριθμό και είδος των δεδομένων που συμμετείχαν στην ανάλυση, οι επιστήμονες απέδειξαν σημαντική συσχέτιση μεταξύ των εδαφικών υποχωρήσεων, τη σύσταση του υπεδάφους και την άντληση των υπογείων υδάτων. Παρακάτω παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη των υποχωρήσεων του εδάφους (Σχήμα 2.27.):



Σχήμα 2.27. Χρονική εξέλιξη εδαφικών υποχωρήσεων (Modoni et al., 2013)

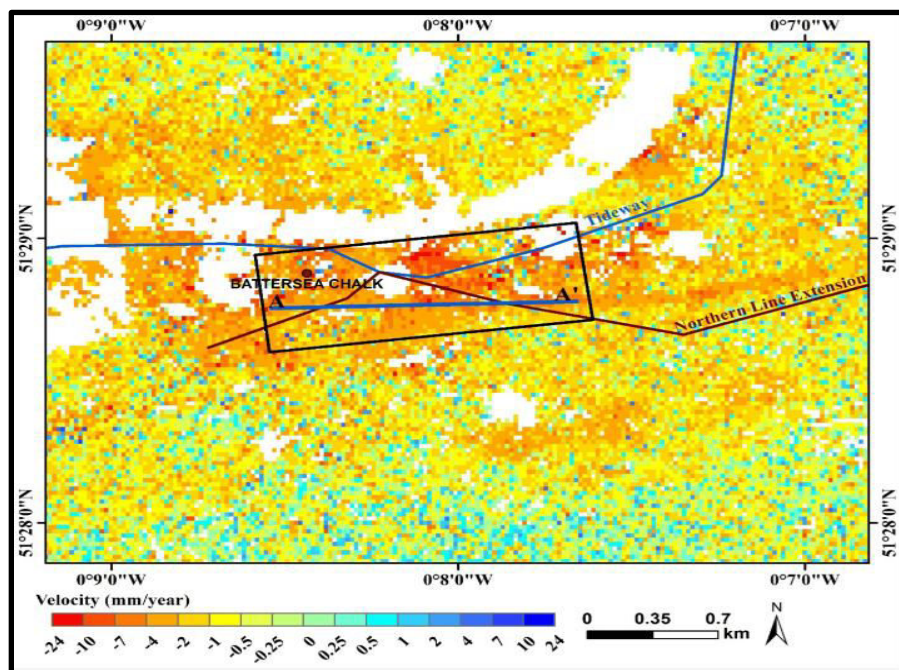
- **Μεγάλη Βρετανία**

Στην περιοχή Battersea του Λονδίνου, πραγματοποιήθηκε διερεύνηση από τους Aragwal et al., (2023) σχετική με τις εδαφικές υποχωρήσεις στην περιοχή συναρτήσεως της άντλησης των υπογείων νερών αλλά και των κατασκευών.

Για την εκπόνηση της επιστημονικής διερεύνησης, οι επιστήμονες αξιοποίησαν εικόνες από το Κανάλι C του δορυφόρου Sentinel-1 για το χρονικό διάστημα από το 2016 έως το 2020 ενώ η επιστημονική προσέγγιση ήταν αυτή της Συμβολομετρίας Σταθερών Σκεδαστών (PSInSAR).

Τα αποτελέσματα απέδειξαν εδαφικές υποχωρήσεις της τάξης περίπου των 7 χιλιοστών ανά έτος οι οποίες αποδόθηκαν στις εντατικές υπεραντλήσεις των υπογείων υδάτων της περιοχής με

σκοπό την κατασκευή υπογείων πασσάλων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των εδαφικών υποχωρήσεων (Σχήμα 2.28.):



Σχήμα 2.28. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Aragwal et al., 2023)

- **Γερμανία**

Οι Wolkersdorfer and Thiem, (1999) διερεύνησαν τις εδαφικές υποχωρήσεις στην περιοχή της βορειοανατολικής Σαξονίας της Γερμανίας, με σκοπό τη συσχέτιση του φαινομένου με τις συστηματικές αντλήσεις υπογείων υδάτων λόγω της ύπαρξης ορυχείων λιγνίτη, αλλά και τον πιθανό κίνδυνο για τις υπάρχουσες ανθρωπογενείς κατασκευές.

Αξιοποιώντας δεδομένα γεωλογικής και υδρογεωλογικής φύσεως, τα χαρακτηριστικά του εδάφους αλλά και το ρυθμό άντλησης των υπογείων υδάτων, οι συγγραφείς εφαρμόζοντας εμπειρικά αλλά και αριθμητικά στατιστικά μοντέλα κατάφεραν να προβλέψουν την τάση εξέλιξης των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή μελέτης.

Τα αποτελέσματα υπολογίστηκαν για δύο διαφορετικές βάσεις με γνώμονα τις εργασίες εξόρυξης λιγνίτη στην περιοχή με χρονικό ορίζοντα το 2026. Για την πρώτη φάση η μέση εδαφική υποχώρηση προέκυψε να είναι της τάξης των 0.16 μέτρων ενώ αντίστοιχα για τη δεύτερη φάση με πέρασ τη λήξη της λιγνιτικής εξόρυξης το 2026, η εδαφική υποχώρηση προβλέφθηκε να είναι της τάξης των 0.36 μέτρων. Παρακάτω, παρουσιάζονται σε μορφή πίνακα τα αποτελέσματα των εδαφικών υποχωρήσεων ανά φάση και λιθολογία για την περιοχή μελέτης, όπως προέκυψαν από τις αναλύσεις των επιστημόνων (Σχήμα 2.29.):

Bed	Lithology	Thickness M m	Compressibility E, MN/m	Porosity n I	Average subsidence (phase I: 1994) cm	Average subsidence (phase II: 2026) cm
1	Sand/gravel	15	80-200	0.32	0.7	0.7
2	Sand/gravel	1	80-200	0.32	0.1	0.1
3	Clay	5	4-10	0.53	10.5	10.5
4	Sand/gravel	2	80-200	0.32	0.2	0.2
5	Clay	6	4-10	0.53	16.8	16.8
6	Sand/gravel	1	80-200	0.32	0.2	0.2
7	Clay	2	4-10	0.53	6.5	6.5
8	Sand/gravel	2	80-200	0.32	0.3	0.3
9	Clay	3	4-10	0.53	11.1	11.1
10	Lignite	2	20-30	0.6	1.9	1.9
11	Sand	9	60-150	0.35	2.4	2.7
12	Lignite	1	20-30	0.6	0.9	1.2
13	Sand, silt	16	40-100	0.35	6.3	9.5
14	Lignite	4	20-30	0.6	3.8	6.7
15	Sand, silt	22	40-100	0.35	8.7	15.7
16	Silt	3	5-15	0.4	9.0	16.3
17	Lignite	11	20-30	0.6	10.4	18.7
18	Fine sand	4	40-80	0.35	1.7	3.1
19	Lignite	3	20-30	0.6	2.8	5.1
20	Fine sand	4	40-80	0.35	1.7	3.1
21	Silt	5	5-15	0.4	15.1	27.2
22	Fine sand	4	40-80	0.35	1.7	3.1
Σ	—	125	—	—	113	161

Σχήμα 2.29. Εδαφικές υποχωρήσεις ανά κατηγορία λιθολογίας (Wolkersdorfer and Thiem, 1999)

2.4. Περιπτώσεις στον ελλαδικό χώρο

Στον ελλαδικό χώρο, έχουν παρουσιαστεί σημαντικά φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων τα οποία έχουν μελετηθεί από σχετικές επιστημονικές ομάδες. Στο παρόν υποκεφάλαιο, παρουσιάζονται χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων περιπτώσεων.

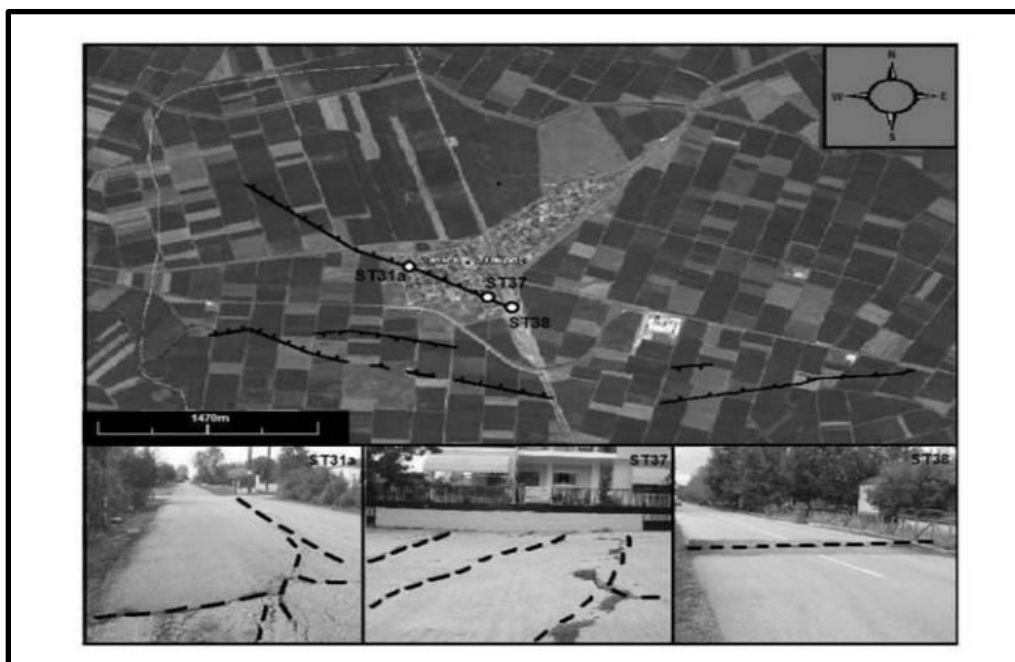
- **Θεσσαλία**

Στην περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας και συγκεκριμένα στις εκτάσεις πλησίον των Φαρσάλων και του Σταυρού, οι Rozos et al., (2010) διερεύνησαν τις εδαφικές υποχωρήσεις που παρατηρούνται από το 1990 στην περιοχή λόγω των υπεραντλήσεων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

Οι εδαφικές υποχωρήσεις που εξελίσσονται στην περιοχή, οδήγησαν στη δημιουργία έντονων επιφανειακών ρωγμών το 2002, με αποτέλεσμα να επηρεαστούν πολλές ανθρωπογενείς κατασκευές. Οι ερευνητές εξέτασαν τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης με σκοπό να συσχετιστούν με τις εμφανιζόμενες εδαφικές υποχωρήσεις λόγω της άντλησης των υπογείων νερών.

Κατέληξαν ότι τα εμφανιζόμενα φαινόμενα έχουν άμεση σχέση με τα φαινόμενα των αντλήσεων λόγω της αγροτικής φύσης της περιοχής αλλά ταυτόχρονα συσχετίζονται με τα χαρακτηριστικά

των γεωλογικών σχηματισμών καθώς η ένταση του φαινομένου αυξάνεται σε περιπτώσεις εναλλαγών αδιαπέρατων ή ημιπερατών σχηματισμών με περατούς. Τέλος, κατέληξαν ότι το φαινόμενο αναμένεται να εξελιχθεί περισσότερο τα επόμενα χρόνια με αυξανόμενη ένταση. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα των εμφανιζόμενων αστοχιών με βάση τη διερεύνηση (Σχήμα 2.30.):

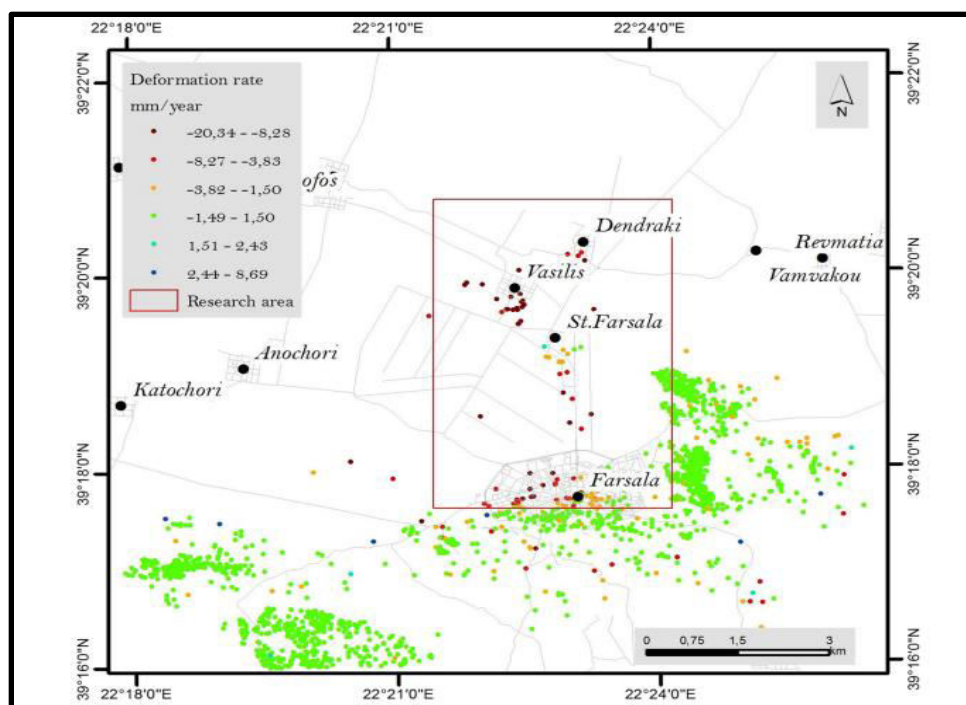


Σχήμα 2.30. Παραδείγματα αστοχιών (Rozos et al., 2010)

Σε μία ακόμη επιστημονική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή της Δυτικής Θεσσαλίας, οι Ilia et al., (2018) εξέτασαν τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων της περιοχής σε συνάρτηση με την χωροχρονική μεταβολή της εκμετάλλευσης των υπογείων νερών

Για την πραγματοποίηση της εργασίας αξιοποιήθηκαν διάφορες πηγές δεδομένων και μεθόδων ανάλυσης. Για τις τάσεις των μεταβολών των υπογείων νερών, εφαρμόστηκε το μη παραμετρικό τεστ Mann-Kendal και ο Sen's slope estimator. Αντίστοιχα, για την παρακολούθηση των εδαφικών υποχωρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν εικόνες SAR, με εφαρμογή της μεθόδου της Συμβολομετρίας Σταθερών Σκεδαστών. Τέλος η μέθοδος Random forest (RF), αξιοποιήθηκε με σκοπό την πρόβλεψη του ρυθμού της εδαφικής υποχώρησης, βασισμένη σε συγκεκριμένες παραμέτρους.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα, αυτά υπέδειξαν ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ του πάχους των χαλαρών επιφανειακών αποθέσεων και του ρυθμού εκδήλωσης του φαινομένου, καθώς και της τάσης εξέλιξης των εδαφικών υποχωρήσεων με τις διακυμάνσεις του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μέσω της μεθόδου PSInSAR. (Σχήμα 2.31.)



Σχήμα 2.31. Εδαφικές παραμορφώσεις (Ilia et al., 2018)

Σε επιστημονική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε επίσης στην περιοχή της Θεσσαλίας, αλλά με μεγαλύτερο χωρικό εύρος, οι Argyrakis et al., (2020) διερεύνησαν τις εδαφικές υποχωρήσεις σε διάφορες επιμέρους περιοχές της Περιφέρειας, λόγω των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων.

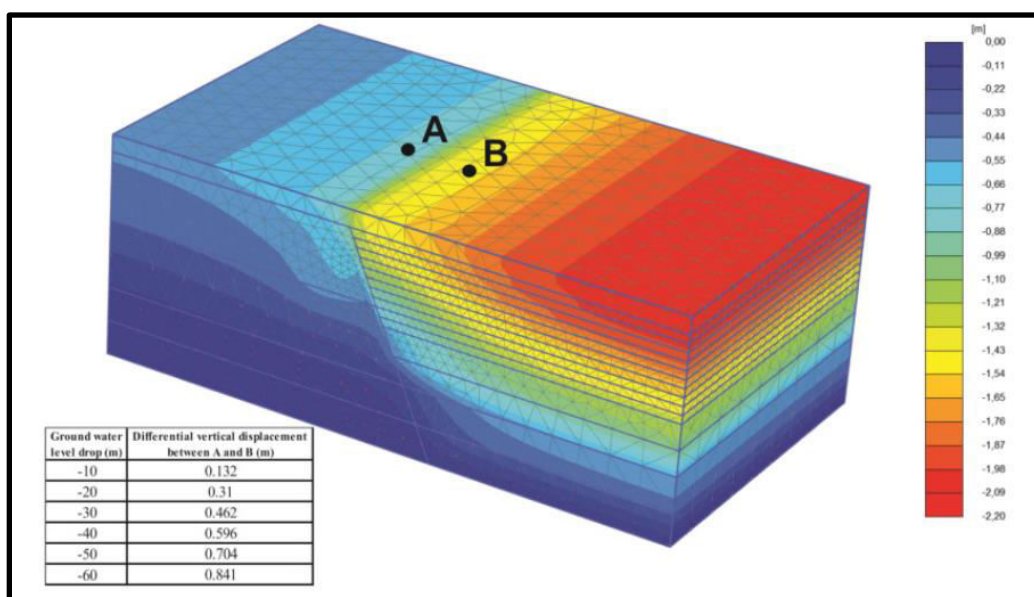
Τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν αφορούσαν σε περίπου 10 χρόνια παρατηρήσεων GNSS με στοιχεία από τέσσερις σταθμούς στην περιοχή μελέτης, συνδυαστικά με δεδομένα κατακρημνίσεων και αυξομειώσεων των υπογείων υδάτων τα οποία επεξεργάστηκαν με συγκεκριμένα λογισμικά.

Τα αποτελέσματα από τα στοιχεία των τεσσάρων σταθμών παρατήρησης υπέδειξαν εδαφικές υποχωρήσεις από ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην ευρύτερη περιοχή της Λίμνης Κάρλα. Αντίθετα, στην ευρύτερη περιοχή των άλλων σταθμών (Λάρισα, Καρδίτσα και Κλοκοτός) δεν αποδείχθηκαν φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων.

- **Ορυχείο Αμύνταιου**

Στην ευρύτερη περιοχή του Αμύνταιου, οι Tzampoglou and Loupasakis (2019) διερεύνησαν τις εδαφικές υποχωρήσεις που παρουσιάζονται και επεκτείνονται στην περιοχή, προκαλώντας ζημιές στις ανθρωπογενείς κατασκευές. Η λειτουργία του ορυχείου αλλά και οι αρδευτικές δραστηριότητες έχουν οδηγήσει τις τελευταίες δεκαετίες σε υπερεκμετάλλευση των υπογείων νερών της περιοχής, με αποτέλεσμα την εμφάνιση του φαινομένου.

Εφόσον το φαινόμενο είναι συνάρτηση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και τεκτονικών χαρακτηριστικών της περιοχής και ταυτόχρονα έχει προκαλέσει ζημίες στα χωριά των Αναργύρων, των Βαλτόνερων και του Φανού, οι επιστήμονες ανέπτυξαν αριθμητικά μοντέλα με σκοπό να προσομοιώσουν και να προβλέψουν την εξέλιξη του μηχανισμού αστοχίας εφαρμόζοντας αναλύσεις σε περιβάλλον Plaxis 3D. Για τη λεπτομερέστερη συσχέτιση των εδαφικών υποχωρήσεων με τα γεωτεχνικά και τεκτονικά χαρακτηριστικά της περιοχής αλλά και τη μεταβολή της στάθμης των υπογείων νερών, αναπτύχθηκαν τρία επιμέρους σενάρια ανάλυσης για τα τρία προαναφερθέντα χωριά. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης απέδειξαν υψηλή συσχέτιση με τις επιτόπιες παρατηρήσεις. Ενδεικτικά παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εδαφικών υποχωρήσεων για το χωριό των Αναργύρων λόγω της πτώσης της στάθμης του υπόγειου νερού (Σχήμα 2.32.):



Σχήμα 2.32. Εδαφικές παραμορφώσεις – Plaxis 3D (Tzampoglou and Loupasakis, 2019)

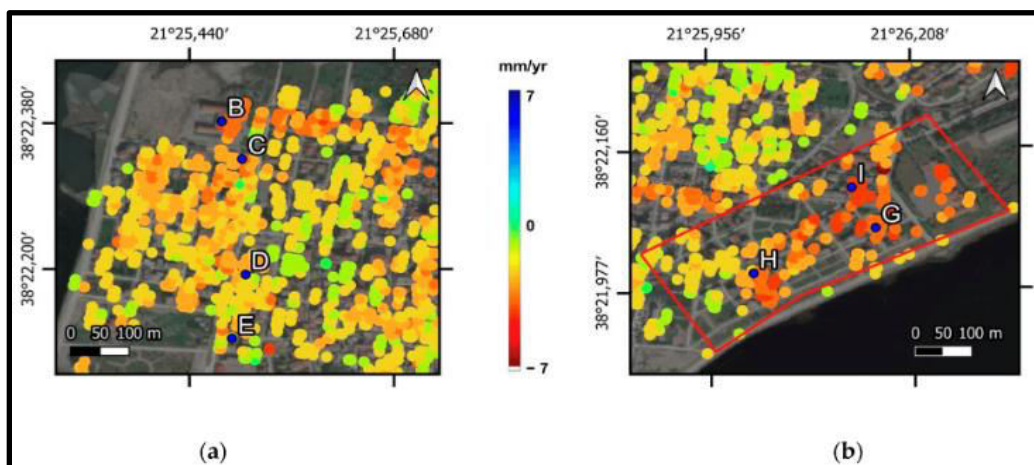
- **Αιτωλοακαρνανία**

Στην περιοχή του Μεσολογγίου και του Αιτωλικού, οι Antoniadis et al., (2023) εκπόνησαν επιστημονική διερεύνηση για τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων που έχουν παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια στην περιοχή, τα οποία συσχετίζονται και με περιστασιακά πλημμυρικά φαινόμενα.

Για την πραγματοποίηση της εργασίας αξιοποιήθηκε καινοτόμα μορφή της Συμβολομετρίας Σταθερών Σκεδαστών, η P-PSI (Parallelized PSI) όπως αυτή αναπτύχθηκε από αναφερόμενες επιστημονικές ομάδες, συνδυαστικά με στοιχεία του Copernicus EGMS. Επιπλέον αξιοποιήθηκαν στοιχεία για να συσχετιστούν τα αποτελέσματα της προαναφερθείσας μεθόδου, όπως δεδομένα για την εκμετάλλευση των υπογείων υδάτων, στοιχεία κατακρημνίσεων,

δεδομένα συμπύκνωσης των αργιλικών στρωμάτων, η οξείδωση των οργανικών εδαφών, στοιχεία παλιρροιακών μετρητών και άλλα.

Τα αποτελέσματα υπέδειξαν ταχύτητες εδαφικής υποχώρησης της τάξης των 5 και 4.5 χιλιοστών ανά έτος για το Μεσολόγγι και το Αιτωλικό αντίστοιχα, ενώ οι συσχετίσεις του φαινομένου ήταν εμφανείς με τις βροχοπτώσεις και τις φορτίσεις των υπερκείμενων κατασκευών. Ενδεικτικά αποτελέσματα των εδαφικών υποχωρήσεων για το Μεσολόγγι παρουσιάζονται ακριβώς παρακάτω (Σχήμα 2.33.):



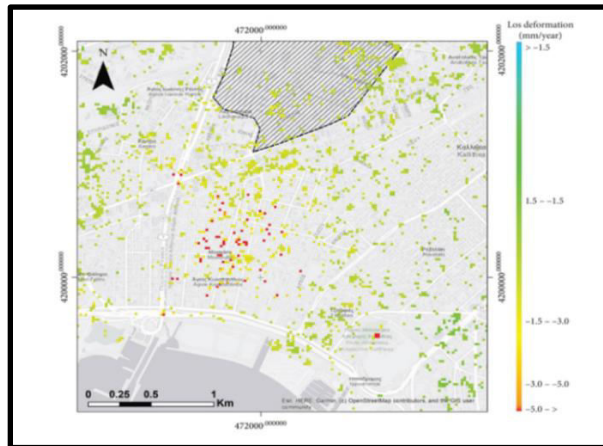
Σχήμα 2.33. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Antoniadis et al., 2023)

- **Αττική – Περιοχή Φαληρικού Κόλπου**

Οι Kaitantzian et al., (2020) διερεύνησαν τις αστικές εδαφικές υποχωρήσεις που παρατηρούνται στις περιοχές του Νέου Φαλήρου, του Μοσχάτου και της Καλλιθέας κατά μήκος του Φαληρικού Κόλπου, λόγω της υπεράντλησης υπογείων υδάτων, με αποτελέσματα την παρουσίαση ζημιών σε ανθρωπογενείς κατασκευές.

Τα χρησιμοποιηθέντα δεδομένα αποτέλεσαν γεωλογικά, υδρογεωλογικά και γεωτεχνικά στοιχεία της περιοχής μελέτης, ενώ η επιστημονική προσέγγιση της ποσοτικής μέτρησης των εδαφικών υποχωρήσεων ήταν αυτή της Συμβολομετρίας SAR (InSAR) συνυπολογίζοντας και στοιχεία δορυφορικών γεωδαιτικών μεθόδων για έλεγχο. Για την παραγωγή χαρτών παραμορφώσεων του εδάφους εφαρμόστηκαν μέθοδοι όπως η SVD (Singular Value Decomposition) και η IPTA (Interferometric Point Target Analysis) με στοιχεία από το 2002 έως το 2010. Ακόμη, αξιοποιήθηκε και η μέθοδος PSI-InSAR για στοιχεία μεταξύ 1992 και 2001.

Με βάση τα αποτελέσματα, η εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων για βιομηχανική χρήση, συνδυαζόμενη με τη συμπύκνωση των εδαφικών σχηματισμών στην περιοχή μελέτης, αποτελούν τις κυριότερες αιτίες του φαινομένου. Ενδεικτικά αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω μέσω της μεθόδου SVD (Σχήμα 2.34.):



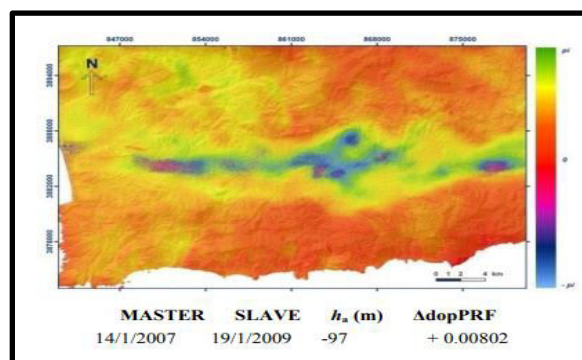
Σχήμα 2.34. Ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων (Kaitantzian et al., 2020)

- **Κρήτη**

Σύμφωνα με τους Mertikas et al., (2009) η κοιλάδα της Μεσσαράς στην Κρήτη υπόκειται σε φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων λόγω υπεραντλήσεων των υπόγειων νερών, η στάθμη των οποίων έχει μειωθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια.

Για τη διερεύνηση του φαινομένου, οι επιστήμονες αξιοποίησαν και εφάρμοσαν τη μέθοδο της Διαφορικής Συμβολομετρίας SAR (DInSAR) χρησιμοποιώντας εικόνες ERS-SAR και ALOS-PALSAR για χρονικά διαστήματα από το 1992 ως το 2000 και το 2007 ως το 2009 αντίστοιχα ενώ ταυτόχρονα αξιοποιήθηκε και ψηφιακό μοντέλο εδάφους με συγκεκριμένη ακρίβεια.

Με βάση τα αποτελέσματα, στην κοιλάδα προέκυψε ταχύτητα εδαφικής υποχώρησης της τάξης των 4 εκατοστών ανά έτος συναρτήσει των υπεραντλήσεων και των γεωλογικών παραμέτρων της περιοχής. Παρακάτω παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των εδαφικών παραμορφώσεων στην κοιλάδα (Σχήμα 2.35.):



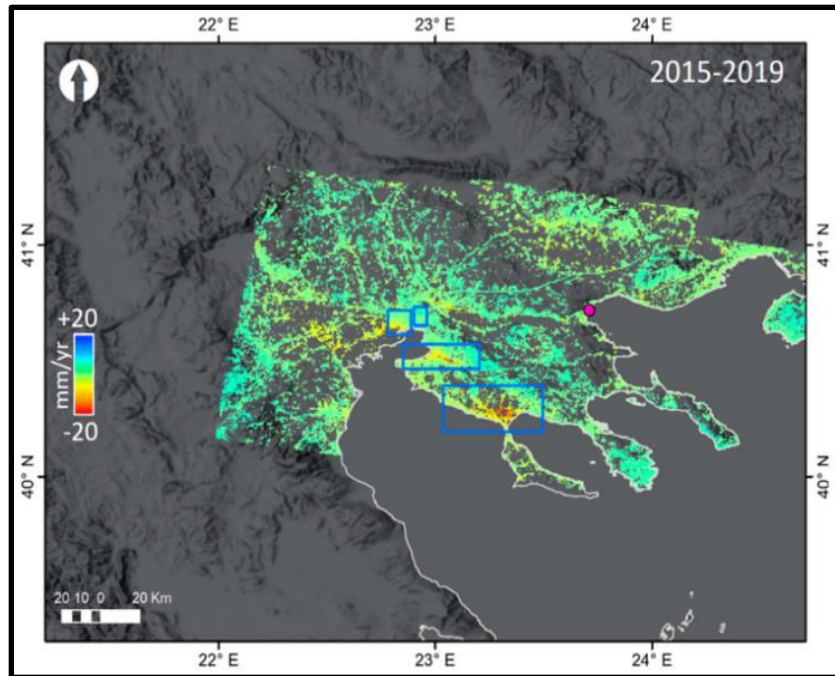
Σχήμα 2.35. Κατανομή εδαφικών υποχωρήσεων (Mertikas et al., 2009)

- **Κεντρική Μακεδονία**

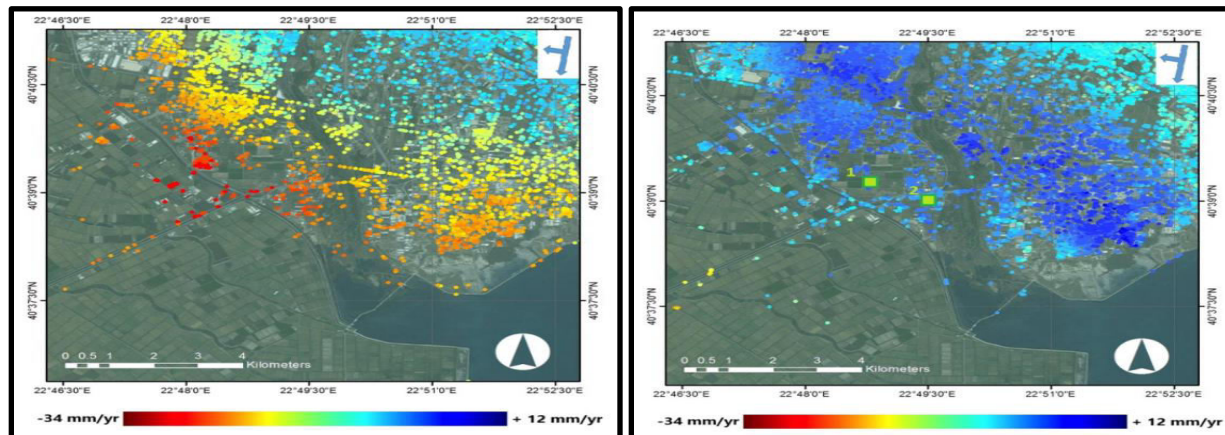
Στην ευρύτερη περιοχή της Θεσσαλονίκης και της Χαλκιδικής έχουν παρατηρηθεί αρκετά φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων λόγω υπεραντλήσεων και αντίστοιχα έχουν εκπονηθεί και σημαντικές επιστημονικές διερευνήσεις.

Οι Svigkas et al., (2020) διερεύνησαν τα φαινόμενα αυτά στις προαναφερθείσες περιοχές αξιοποιώντας δεδομένα από το δορυφόρο Sentinel-1 από το 2015 έως το 2019 και εφαρμόζοντας τις μεθόδους της Συμβολομετρίας SAR (InSAR) καθώς και την καινοτόμα προσέγγιση της προαναφερθείσας μεθόδου P-PSI. Συγκεντρωτικά, τα αποτελέσματα υπέδειξαν επανέναρξη του φαινομένου στην περιοχή της Σίνδου και του Καλοχωρίου, διατήρηση των ανυψωτικών φαινομένων στην περιοχή του Ωραιόκαστρου, επιμονή του φαινομένου της εδαφικής υποχώρησης στη λεκάνη του Ανθεμούντα με έμφαση στην περιοχή του αεροδρομίου Θεσσαλονίκης, ενώ εντοπίστηκε και η περιοχή της Νέας Μουδανιάς να επηρεάζεται από φαινόμενα εδαφικών παραμορφώσεων.

Ακόμη, σε πιο χωρικά συγκεκριμενοποιημένη διερεύνηση των Svigkas et al., (2016), στην περιοχή της Σίνδου και του Καλοχωρίου εφαρμόζοντας τη Μέθοδο της Συμβολομετρίας Σταθερών Σκεδαστών και την προσέγγιση SBAS σε βάση δεδομένων εικοσαετίας των ERS 1,2 και ENVISAT προέκυψαν εδαφικές υποχωρήσεις στην υπό μελέτη περιοχή της τάξης των 35 χιλιοστών ανά έτος. Ακόμη, κατά τα δεδομένα της δεύτερης δεκαετίας παρατηρήθηκε μεταβολή του μοτίβου της εδαφικής παραμόρφωσης σε τάση ανύψωσης το οποίο έρχεται σε συμφωνία με τις μεταβολές της στάθμης του τοπικού υδροφόρου ορίζοντα. Ενδεικτικά αποτελέσματα των ανωτέρω διερευνήσεων παρουσιάζονται παρακάτω αντίστοιχα (Σχήμα 2.36.) (Σχήμα 2.37.):

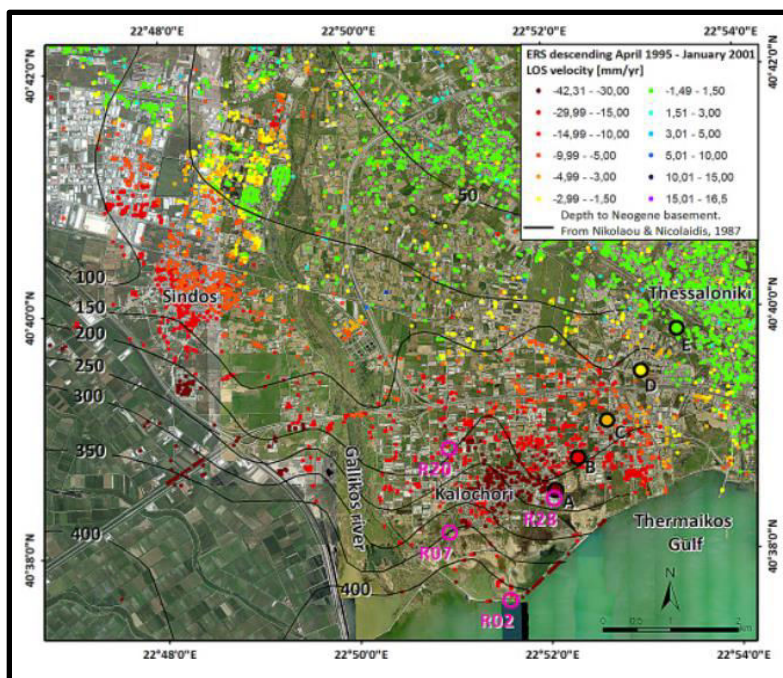


Σχήμα 2.36. Χωρική κατανομή εδαφικών υποχωρήσεων (Svigas et al., 2020)



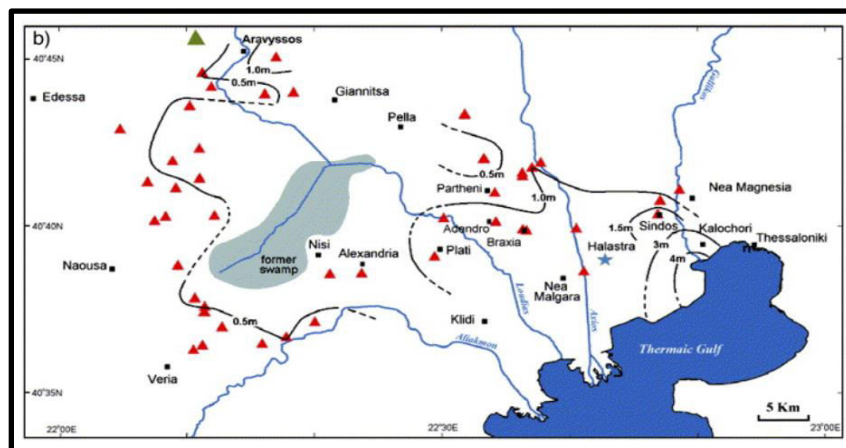
Σχήμα 2.37. Η εξέλιξη των εδαφικών παραμορφώσεων (Svigas et al., 2016)

Στην περιοχή του Δήμου Δέλτα Θεσσαλονίκης οι Raspini et al., (2014) χρησιμοποιώντας 42 εικόνες SAR και εφαρμόζοντας τη μέθοδο της Συμβολομετρίας Σταθερών Σκεδαστών διερεύνησαν φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων στην προαναφερθείσα περιοχή συσχετιζόμενα με τις υπεραντλήσεις υπογείων υδάτων, με την περιοχή εκατέρωθεν του Γαλλικού ποταμού για χρονική περίοδο 1995 - 2001 να εμφανίζει τις μέγιστες ταχύτητες εδαφικής υποχώρησης της τάξης των 4.5 εκατοστών ανά έτος, όπως παρουσιάζεται ακολούθως (Σχήμα 2.38.):



Σχήμα 2.38. Χωρική κατανομή εδαφικών παραμορφώσεων (Raspini et al., 2014)

Ακόμη, οι Psimoulis et al., (2007) σε επιστημονική διερεύνηση που πραγματοποίησαν στην περιοχή του Δέλτα Θεσσαλονίκης συγκρίνοντας διαχρονικές καταγραφές εδαφικών παραμορφώσεων αλλά και δεδομένα GPS για τις μετακινήσεις συγκεκριμένων σταθερών σημείων στην περιοχή μελέτης, κατέληξαν σε αντίστοιχα συμπεράσματα εδαφικών υποχωρήσεων, τα οποία έρχονται σε συμφωνία με τις προαναφερθείσες εργασίες. (Σχήμα 2.39.)



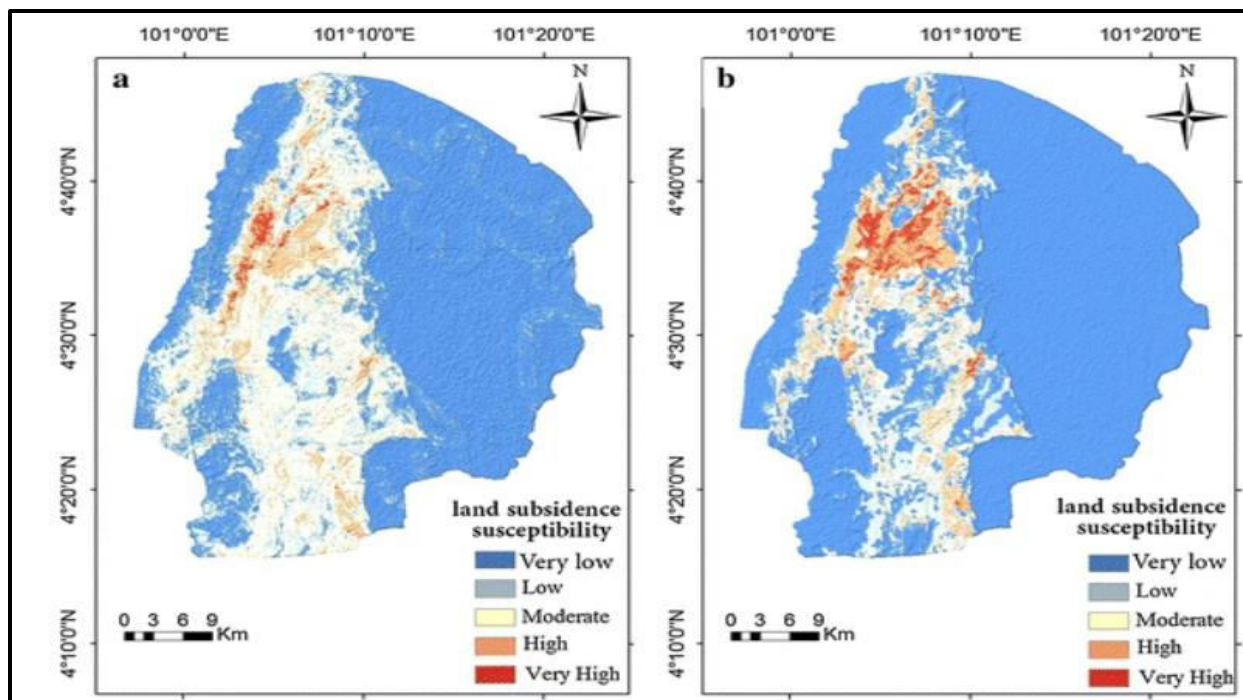
Σχήμα 2.39. Θέσεις σημείων ελέγχου εδαφικών παραμορφώσεων (Psimoulis et al., 2007)

2.5. Οι χάρτες επιδεκτικότητας και παραδείγματα εφαρμογής τους στις εδαφικές υποχωρήσεις

Η δημιουργία χαρτών επιδεκτικότητας έχει αποτελέσει σημαντικό εργαλείο οπτικοποίησης των αποτελεσμάτων επιστημονικών διερευνήσεων μεγάλου φάσματος. Συχνή εφαρμογή τους παρατηρείται για παράδειγμα στις περιπτώσεις των κατολισθήσεων όπου δημιουργούνται σε πολλές περιπτώσεις οι αντίστοιχοι χάρτες κατολισθητικής επιδεκτικότητας. Σύμφωνα με τον Τσαγγαράτο (2012), η χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας αποτελεί ειδική και εξειδικευμένη περίπτωση τεχνικογεωλογικής χαρτογράφησης όπου παρουσιάζονται χωρικά κατανεμημένες οι θέσεις οι οποίες εμφανίζουν συγκεκριμένες τιμές επιδεκτικότητας ενός υπό μελέτη φαινομένου ή με άλλα λόγια ζωνοποίηση. Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται συνοπτικά ενδεικτικά παραδείγματα παραγωγής χαρτών επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης από διερευνήσεις που πραγματοποιήθηκαν ανά τον κόσμο.

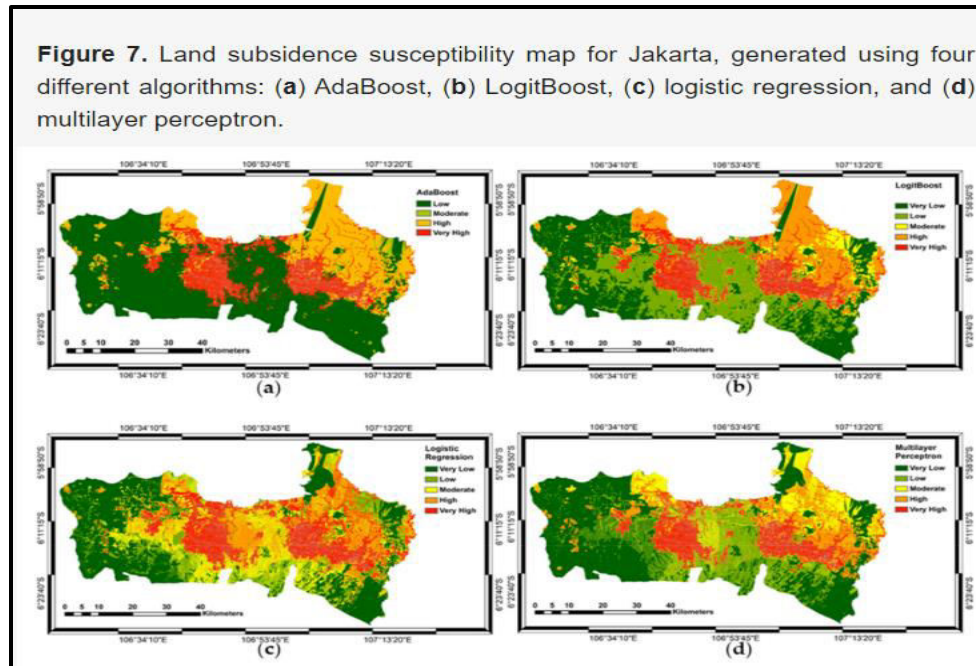
Σε επιστημονική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην κοιλάδα Kinta της Μαλαισίας, οι Pradhan et al., (2014) μελέτησαν τα φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων που παρατηρήθηκαν στην περιοχή μέσω της εμφάνισης καταβοθρών, αξιοποιώντας εργαλεία γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών. Οι θέσεις όπου παρατηρήθηκαν τα φαινόμενα αυτά εντοπίστηκαν μέσω χρήσης μετρήσεων GPS. Για την πραγματοποίηση της διερεύνησης, λήφθηκε υπόψη σημαντικός αριθμός στοιχείων όπως το υψόμετρο, οι κλίση του εδάφους, η τοπογραφική υγρασία, οι χρήσεις γης, η γεωλογία της περιοχής και άλλα.

Για την εκπόνηση της εργασίας αξιοποιήθηκαν διαφορετικές επιστημονικές προσεγγίσεις όπως η ανάλυση EBF καθώς και ο λόγος συχνότητας FR ώστε να συγκριθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων από την πρώτη μέθοδο. Ακόμη, μετά τη δημιουργία των χαρτών πρόβλεψης, τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν με εφαρμογή των καμπυλών ROC. Το τελικό αποτέλεσμα αφορούσε στη δημιουργία δύο χαρτών επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης όπως θα φανεί ακριβώς παρακάτω (Σχήμα 2.40.):



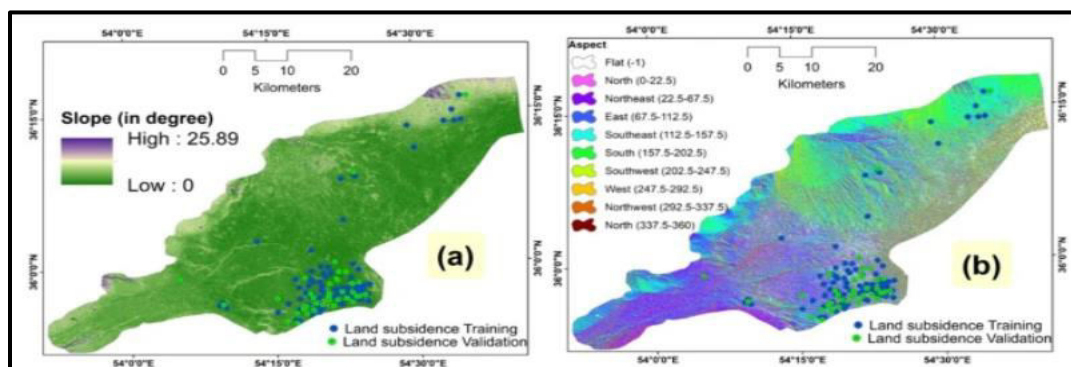
Σχήμα 2.40. Χάρτες επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης (Pradhan et al., 2014)

Σε αντίστοιχου αντικειμένου διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στη πρωτεύουσα της Ινδονησίας, Τζακάρτα, οι Hakim et al., (2020) ασχολήθηκαν με τη μελέτη των εδαφικών υποχωρήσεων που παρατηρούνται στην περιοχή αξιοποιώντας δεδομένα SAR (Sentinel-1) για χρονικό διάστημα από το 2017 έως το 2020, ενώ οι κυριότερες θέσεις εμφάνισης του φαινομένου εντοπίστηκαν μέσω των μεθόδων InSAR και StaMPS. Για την παραγωγή του χάρτη επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης αξιοποιήθηκαν 14 παράγοντες που θεωρείται ότι επηρεάζουν το φαινόμενο ως θεματικά επίπεδα. Τέλος, η αξιοποίηση των καμπυλών ROC αξιολόγησε τα αποτελέσματα των χρησιμοποιηθέντων μεθόδων με υψηλά αποτελέσματα πρόβλεψης της εδαφικής υποχώρησης της τάξης του 81.1%, αποτέλεσμα υψηλότερο από άλλες μεθόδους ελέγχου που εφαρμόστηκαν όπως λογιστική παλινδρόμηση και άλλες. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 2.41.):

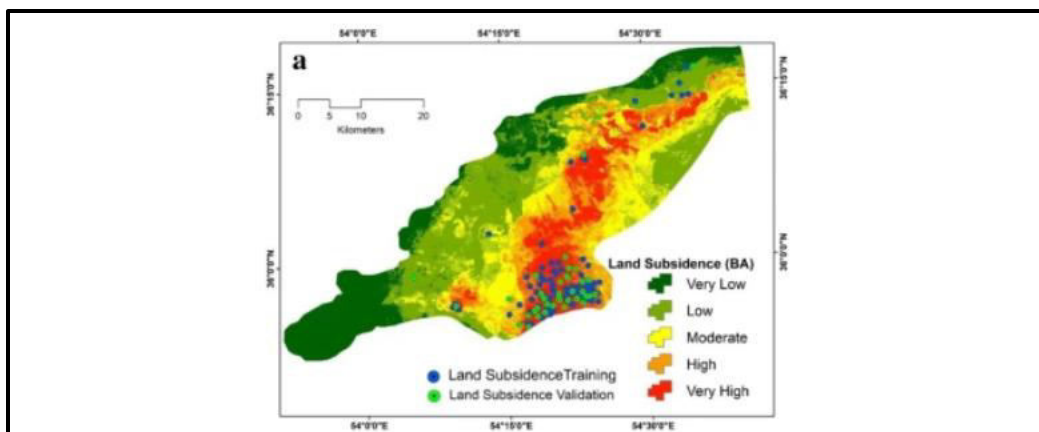


Σχήμα 2.41. Οι τελικοί χάρτες (Hakim et al., 2020)

Οι Zhang et al., (2023) διερεύνησαν τις εδαφικές υποχωρήσεις που έχουν παρατηρηθεί στην πεδιάδα Daumeghan του Ιράν ελέγχοντας την αξιοπιστία και αποτελεσματικότητα πέντε διαφορετικών μεθόδων. Οι περιοχές που το φαινόμενο εμφανίζεται με σημαντική ένταση εντοπίστηκαν μέσω επιτόπιας έρευνας. Όπως και στην περίπτωση της προηγούμενης επιστημονικής διερεύνησης, λήφθηκαν υπόψη 14 διαφορετικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη του φαινομένου ενώ δημιουργήθηκαν πέντε διαφορετικοί χάρτες επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο. Και στην παρούσα περίπτωση τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν μέσω εφαρμογής των καμπυλών ROC. Αυτά, υπέδειξαν υψηλότερη αξιοπιστία στην πρόβλεψη των εδαφικών υποχωρήσεων σε συγκεκριμένα χρησιμοποιηθέντα μοντέλα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα (Σχήμα 2.42.) (Σχήμα 2.43.):

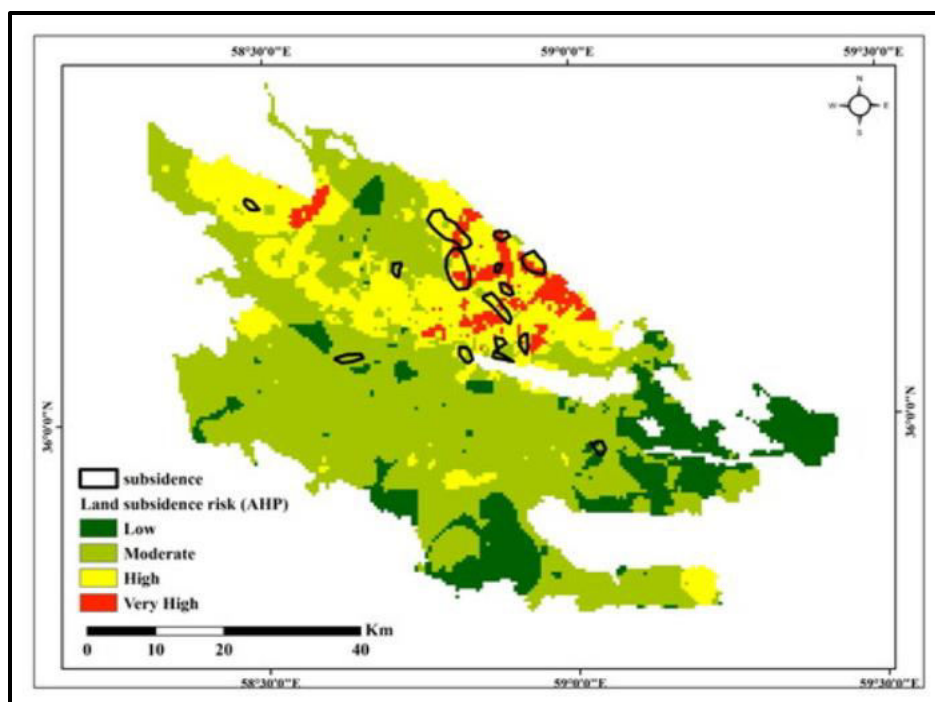


Σχήμα 2.42. Δύο εκ των ΘΕΠ (Zhang et al., 2023)



Σχήμα 2.43. Ένας εκ των χαρτών ΕΕΥ (Zhang et al., 2023)

Στην πεδιάδα Neyshabur του Ιράν, οι Rezaei et al., (2020) διερεύνησαν τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων που παρατηρούνται στην ευρύτερη περιοχή συγκρίνοντας τα αποτελέσματα δύο διαφορετικών μεθόδων, αυτή της AHP (Analytical Hierarchy Process) και CF (Certain Factor). Με βάση αυτά, το 60% των περιοχών που παρατηρείται εδαφική υποχώρηση αξιοποιήθηκε για να παραχθεί χάρτης επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης, ενώ το υπόλοιπο 40% για την αξιολόγηση των μεθόδων. Επιπλέον, όπως και στις προηγούμενες εργασίες, λήφθηκαν υπόψη παράγοντες που επηρεάζουν την εξέλιξη του υπό μελέτη φαινομένου. Τα αποτελέσματα αξιολογήθηκαν και προέκυψαν υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας. (Σχήμα 2.44.)



Σχήμα 2.44. Ο χάρτης ΕΕΥ μέσω της μεθόδου AHP (Razaei et al., 2020)

Κεφάλαιο 3 - Η περιοχή μελέτης

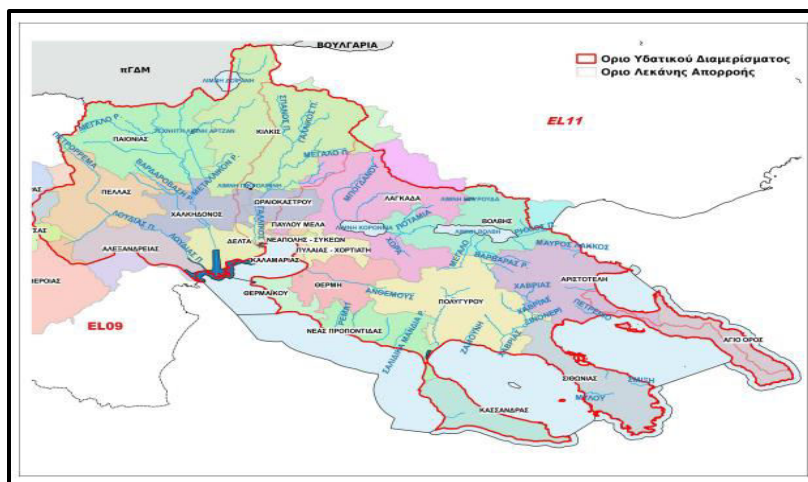
Στο παρόν κεφάλαιο, καθώς και στα επιμέρους υποκεφάλαια από τα οποία αποτελείται, θα πραγματοποιηθεί περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης, ήτοι της Λεκάνης του Ανθεμούντα, αλλά και της ευρύτερης περιοχής του υδατικού διαμερίσματος της Κεντρικής Μακεδονίας. Η σύντομη ανάλυση των χαρακτηριστικών αυτών επιλέχθηκε με σκοπό την παρουσίαση πληροφοριών σχετικά με την υπάρχουσα κατάσταση, ως αρχικό υπόβαθρο πριν την εφαρμογή της ανάλυσης.

3.1. Γενικά χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής

Αξιοποιώντας στοιχεία από την 1^η Αναθεώρηση του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος της Κεντρικής Μακεδονίας (EL10) (<https://ypen.gov.gr>), παρακάτω (στις υποενότητες 3.1.1. έως 3.1.8.) θα περιγραφούν στοιχεία του φυσικού και ανθρωπογενούς περιβάλλοντος της ευρύτερης περιοχής που ανήκει η Λεκάνη του Ανθεμούντα, με έμφαση στα χαρακτηριστικά που αφορούν στην επιφανειακή και υπόγεια απορροή του νερού.

3.1.1. Διοικητική δομή και πληθυσμός

Σύμφωνα με το ΣΔΛΑΠ, το σύνολο του Υδατικού Διαμερίσματος της Κεντρικής Μακεδονίας ανήκει διοικητικά στην ομώνυμη περιφέρεια. Εντός των ορίων του βρίσκεται το σύνολο της έκτασης των Περιφερειακών Ενοτήτων Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής καθώς και σημαντικά τμήματα των εκτάσεων των ΠΕ Πέλλας και Ημαθίας, όπως επίσης και το Άγιο Όρος. Παρακάτω παρουσιάζεται η Διοικητική Διάρθρωση του Υδατικού Διαμερίσματος σε επίπεδο Δήμων (σχήμα 3.1.):



Σχήμα 3.1. Η Διοικητική Διαίρεση σε επίπεδο Δήμων (<https://ypen.gov.gr>)

Όσον αφορά τον πληθυσμό του Υδατικού Διαμερίσματος, αξιοποιώντας τα στοιχεία από την Ελληνική Στατιστική Αρχή για τη δεκαετία από το 2001 έως το 2011, σε επίπεδο ΠΕ, αύξηση του πληθυσμού παρατηρείται στις ΠΕ Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής κατά 2,43% και 9,35% αντίστοιχα. Επιπλέον, στην ΠΕ Χαλκιδικής, σε όλους του Δήμους παρατηρείται αύξηση του πληθυσμού. Στις υπόλοιπες Περιφερειακές Ενότητες, η μεταβολή του πληθυσμού διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή αλλά και μεταξύ των διαφορετικών αστικών κέντρων. Συγκεντρωτικά οι παραπάνω παρατηρήσεις παρουσιάζονται στη συνέχεια συναρτήσεως του μόνιμου πληθυσμού σε επίπεδο Καλλικρατικού Δήμου αλλά και της ποσοστιαίας μεταβολής αυτού στο διάστημα 2001-2011 (Σχήμα 3.2.):

Διοικητική Διάρθρωση	Μόνιμος Πληθυσμός		Ποσοστιαία μεταβολή
	2001	2011	
Περιφερειακή Ενότητα Θεσσαλονίκης			
Δήμος Αμπελοκήπων Μενεμένης	58.149	52.127	-10,36%
Δήμος Βόλβης	24.454	23.478	-3,99%
Δήμος Δέλτα	40.206	45.839	14,01%
Δήμος Θερμαϊκού	37.126	50.264	35,39%
Δήμος Θέρμης	34.436	53.201	54,49%
Δήμος Θεσσαλονίκης	397.156	325.182	-18,12%
Δήμος Καλαμαριάς	90.096	91.279	1,31%
Δήμος Κορδελιού Ευόσμου	77.174	101.753	31,85%
Δήμος Λαγκαδά	39.160	41.103	4,96%
Δήμος Νεάπολης Συκεών	89.274	84.741	-5,08%
Δήμος Παύλου Μελά	87.587	99.245	13,31%
Δήμος Πυλαίας Χορτιάτη	49.922	70.110	40,44%
Δήμος Χαλκηδόνος	34.299	33.673	-1,83%
Δήμος Ωραιόκαστρου	24.962	38.317	53,50%
Περιφερειακή Ενότητα Χαλκιδικής			
Δήμος Αριστοτέλη	17.752	18.294	3,05%
Δήμος Κασσάνδρας	14.971	16.672	11,36%
Δήμος Νέας Προποντίδας	30.397	36.500	20,08%
Δήμος Πολυγύρου	21.931	22.048	0,53%
Δήμος Σιθωνίας	11.798	12.394	5,05%
Περιφερειακή Ενότητα Κιλκίς			
Δήμος Κιλκίς	54.750	51.926	-5,16%

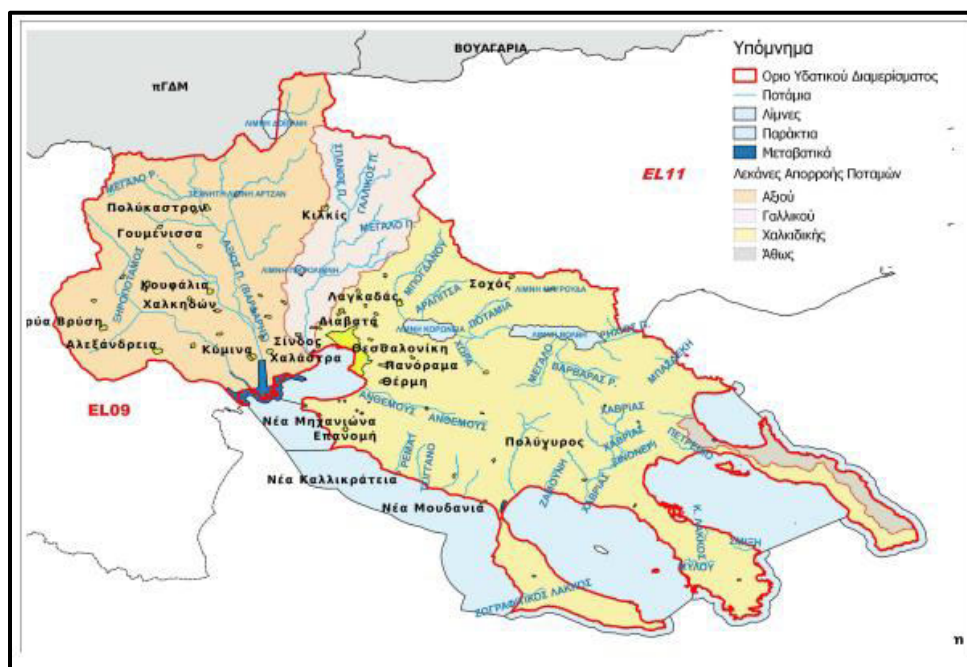
Διοικητική Διάρθρωση	Μόνιμος Πληθυσμός		Ποσοστιαία μεταβολή
	2001	2011	
Δήμος Παιονίας	31.674	28.493	-10,04%
Περιφερειακή Ενότητα Ημαθίας			
Δήμος Αλεξάνδρειας	42.777	41.570	-2,82%
Δήμος Βέροιας	65.530	66.547	1,55%
Δήμος Νάουσας	34.164	32.494	-4,89%
Περιφερειακή Ενότητα Πέλλας			
Δήμος Αλμωπίας	28.822	27.556	-4,39%
Δήμος Πέλλας	64.847	63.122	-2,66%
Δήμος Σκιδρας	20.720	20.188	-2,57%
Περιφερειακή Ενότητα Σερρών			
Δήμος Σιντικής	27.432	22.195	-19,09%
Άγιο Όρος ¹⁸	1.961	1.811	-7,65%

Σχήμα 3.2. Πληθυσμιακά στοιχεία του ΥΔ (<https://ypen.gov.gr>)

Εκτός της διοικητικής διαίρεσης σε επίπεδο Δήμων, το ΥΔ μπορεί να διαιρεθεί με βάση τις εμφανιζόμενες εντός της έκτασης του λεκάνης απορροής, στις εξής τέσσερις επιμέρους λεκάνες:

- Αξιού (EL1003), με έκταση 3.327,85 km²
- Γαλλικού (EL1004), με έκταση 1.050,23 km²
- Χαλκιδικής (EL1005), με έκταση 5.545, 86 km²
- Άθως (EL1043), με έκταση 239,44 km²

Η Λεκάνη Απορροής Χαλκιδικής, στην οποία ανήκει και η περιοχή μελέτης, ήτοι η λεκάνη του ποταμού Ανθεμούντα, η οποία διοικητικά υπάγεται στην Περιφέρεια Κεντρικής Μακεδονίας, είναι η μεγαλύτερη ΛΑΠ του ΥΔ. Αποτελείται από τις λεκάνες απορροής των λιμνών Βόλβη και Λαγκαδά (Κορώνεια), την τεχνητή λίμνη Μαυρούδας, των ποταμών Ανθεμούντα και Χαβρία, τις υδρολογικές λεκάνες του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Θεσσαλονίκης και περί αυτού, καθώς και άλλες μικρότερες υπολεκάνες της ΠΕ Χαλκιδικής. Εκτείνεται από το κέντρο σχεδόν του ΥΔ έως το νότιο-ανατολικό τμήμα του, στο δυτικό και κεντρικό ακρωτήριο της Χαλκιδικής. Στο βόρειο τμήμα του βρίσκεται ο ορεινός όγκος Βερτίσκος και στο κεντρικό τμήμα του εντοπίζονται οι ορεινοί όγκοι του Χορτιάτη και του Χολομώντα. Μεταξύ των προαναφερθέντων ορεινών όγκων, όπως και νότια αυτών, μέχρι τα ακρωτήρια της Χαλκιδικής εντοπίζονται πεδινές εκτάσεις. Τα ακρωτήρια Κασσάνδρας και Σιθωνίας εμφανίζουν έντονο ανάγλυφο, με εντονότερο αυτό του ακρωτηρίου της Σιθωνίας, όπου παρατηρούνται και τα μεγαλύτερα υψόμετρα. Έτσι, από τη συνολική έκταση της ΛΑΠ, ποσοστό 27% έχει υψόμετρο κάτω από 100 m, 20% έχει υψόμετρο 100-200 m, 14% έχει υψόμετρο 200-300 m και το υπόλοιπο 39% έχει μεγαλύτερο υψόμετρο, ενώ το μέσο υψόμετρο της ΛΑΠ είναι περίπου 275 m. Η συνολική προσφορά νερού στη ΛΑΠ ανέρχεται σε 653x106 m³. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι θέσεις των επιμέρους λεκανών απορροής του ΥΔ (Σχήμα 3.3.):



Σχήμα 3.3. Οι λεκάνες απορροής του ΥΔ (<https://ypen.gov.gr>)

Αναφορικά με τα πληθυσμιακά χαρακτηριστικά σε επίπεδο λεκάνης απορροής και συγκεκριμένα για τη λεκάνη ενδιαφέροντος, ήτοι αυτή της Χαλκιδικής, η προαναφερθείσα συγκεντρώνει και το μεγαλύτερο πληθυσμό του ΥΔ Κεντρικής Μακεδονίας της τάξης του 81% του συνόλου του ΥΔ καθώς σε αυτή βρίσκεται το Πολεοδομικό Συγκρότημα Θεσσαλονίκης και η Περιφερειακή Ζώνη αυτού, καθώς και οι χερσόνησοι της Κασσάνδρας και της Σιθωνίας της Περιφερειακής Ενότητας Χαλκιδικής. Επιπλέον, ενώ στο σύνολο της η ΛΑΠ Χαλκιδικής παρουσιάζει αύξηση πληθυσμού της τάξης του 3,25%, εντοπίζονται οικισμοί, και ιδίως δήμοι του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, όπου παρατηρείται σημαντική μείωση πληθυσμού που σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει στο 18%. Ωστόσο αυτό αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι στην ίδια ΛΑΠ εμφανίζονται οικισμοί με μεγάλη ποσοστιαία αύξηση του πληθυσμού τους, ιδίως Πυλαία και Ωραιόκαστρο με ποσοστά αύξησης 51% και 73% αντίστοιχα. Ως γενικό συμπέρασμα, έχει παρατηρηθεί ότι κυρίαρχη τάση είναι η μείωση του πληθυσμού σε πυκνοκατοικημένες περιοχές εντός του πολεοδομικού συγκροτήματος και αύξηση του πληθυσμού των περιφερειακών Δήμων και Δημοτικών Ενοτήτων, είτε εντός του ίδιου του Πολεοδομικού Συγκροτήματος της Θεσσαλονίκης είτε εντός της Περιφερειακής Ζώνης αυτής. Σημαντική αύξηση πληθυσμού, σημειώνεται και στις χερσονήσους Σιθωνίας και Κασσάνδρας, στις οποίες εντοπίζονται τουριστικοί προορισμοί, οι οποίοι τα τελευταία χρόνια τείνουν να εξελιχθούν σε δυναμικούς οικισμούς, όχι μόνο συγκρατώντας τον πληθυσμό τους αλλά και παρουσιάζοντας, πολλοί από αυτούς, όπως τα μεγαλύτερα αστικά κέντρα (Μουδανιά, Πολύγυρος, Μαρμαράς) ακόμη και αύξηση.

3.1.2. Χρήσεις γης

Με βάση τα στοιχεία του Σχεδίου Διαχείρισης Λεκανών Απορροής, επικρατούσα χρήση γης είναι αυτή της γεωργικής γης με ποσοστό 56,74 % επί του συνόλου. Η μόνιμα αρδευόμενη γεωργική γη αποτελεί ένα μεγάλο ποσοστό ήτοι 9,72% επί του συνόλου και 17,5% επί του συνόλου της γεωργικής γης και εμφανίζεται κυρίως στο νότιο και δυτικό τμήμα του Υδατικού Διαμερίσματος στις περιοχές των Δήμων Δέλτα, Αλεξάνδρειας, Χαλκηδόνος και Πέλλας, ενώ κάποια τμήματα εντοπίζονται στην περιοχή του Πολυκάστρου του Δήμου Παιονίας και στην περιοχή της Απολλωνείας του Δήμου Βόλβης. Το μεγαλύτερο ποσοστό της γεωργικής γης αποτελεί η κατηγορία αρόσιμη γεωργική γη με ποσοστό 30,40% επί του συνόλου του ΥΔ και εντοπίζεται κυρίως στις πεδινές περιοχές των Περιφερειακών Ενοτήτων Κιλκίς, Πέλλας και Ημαθίας, καθώς και σε περιοχές της Περιφερειακής Ενότητας Θεσσαλονίκης, κυρίως των Δήμων Λαγκαδά και Βόλβης. Οι μόνιμες καλλιέργειες, με ποσοστό 2,22% επί του συνόλου, καταλαμβάνουν εκτάσεις κυρίως στην Περιφερειακή Ενότητα Χαλκιδικής.

Αμέσως επόμενη κυρίαρχη χρήση, είναι οι δασικές περιοχές οι οποίες αποτελούν το 37,89% επί του συνόλου της έκτασης του ΥΔ. Οι ορεινές περιοχές που καλύπτονται από μεικτά δάση και δάση πλατύφυλλων δέντρων, ενώ σε μικρότερο βαθμό από δάση κωνοφόρων εντοπίζονται κυρίως στη χερσόνησο του Άθω και σε ορεινές περιοχές της Περιφερειακής ενότητας Χαλκιδικής, στους Δήμους Αριστοτέλη και Πολυγύρου, αλλά και στο ορεινό τμήμα των Δήμων Παιονίας και Πέλλας των Περιφερειακών Ενοτήτων Κιλκίς και Πέλλας, αντίστοιχα. Οι φυσικοί βοσκότοποι και οι λιβαδικές εκτάσεις και οι εκτάσεις με αραιή βλάστηση, καταλαμβάνουν τμήμα της τάξης του 4,26% επί της επιφάνειας του Υδατικού Διαμερίσματος και εμφανίζονται κυρίως ενδιάμεσα των δασικών εκτάσεων.

Οι τεχνητές επιφάνειες όπως οι οικιστικές περιοχές, βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες, δίκτυα μεταφορών κ.λπ., καταλαμβάνουν αρκετά μικρό ποσοστό κάλυψης στο σύνολο του Υδατικού Διαμερίσματος. Οι μεγαλύτερες εκτάσεις που καλύπτουν οι οικισμοί εντοπίζονται, στην ΠΕ Θεσσαλονίκης, λόγω του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Θεσσαλονίκης, αλλά και σε παραλιακές περιοχές της ΠΕ Χαλκιδικής. Στις περιοχές αυτές εμφανίζεται εντονότερα και η βιομηχανική ή εμπορική χρήση αντίστοιχα.

Εμπορικές και παραγωγικές χρήσεις, εντοπίζονται κυρίως γύρω από τα αστικά και δευτερευόντως γύρω από τα ημιαστικά κέντρα και σε γειννίαση με τους μεγάλους οδικούς άξονες της Περιφέρειας, ενώ καταλαμβάνουν ποσοστό 0,54% επί του συνόλου της επιφάνειας του ΥΔ. Οι βιομηχανικές και εμπορικές ζώνες συγκεκριμένα εντοπίζονται κυρίως γύρω από την περιοχή της Θεσσαλονίκης, αλλά και σε μικρότερα αστικά κέντρα περιφερειακά από αυτή.

Όσον αφορά τα δίκτυα μεταφορών, αυτά καταλαμβάνουν ένα μικρό ποσοστό της τάξης του 0,12%, ωστόσο, στο Υδατικό Διαμέρισμα Κεντρικής Μακεδονίας εντοπίζεται το λιμάνι της Θεσσαλονίκης και το αεροδρόμιο «Μακεδονία», τα οποία χαρακτηρίζονται ως διεθνούς σημασίας, ενώ το Υδατικό Διαμέρισμα διασχίζουν μεγάλοι οδικοί άξονες της χώρας όπως ο ΠΑΘΕ και η Εγνατία Οδός.

Την υπόλοιπη έκταση που αντιστοιχεί σε ποσοστό της τάξης του 2,1% του συνόλου της έκτασης του Υδατικού Διαμερίσματος καταλαμβάνουν υδάτινες επιφάνειες και υγρότοποι, στα οποία περιλαμβάνονται κυρίως χερσαία ύδατα όπως ποτάμια, λίμνες, βάλτοι κ.λπ., ενώ ένα μικρό ποσοστό καταλαμβάνουν μεταβατικά ύδατα ήτοι οι εκβολές των ποταμών της περιοχής.

3.1.3. Γεωγραφική θέση και γεωμορφολογία

Το Υδατικό Διαμέρισμα Κεντρικής Μακεδονίας οριοθετείται από τα όρη Κερδύλια, Βερτίσκοι, Κρούσια και Μπέλες στα ανατολικά, το όρος Πάικο και την Περιφερειακή Τάφρο στα δυτικά και στα βόρεια από την οροσειρά Κερκίνη και τα σύνορα Ελλάδας και Βόρειας Μακεδονίας. Στα ανατολικά συνορεύει με το Υδατικό Διαμέρισμα Ανατολικής Μακεδονίας και στα δυτικά με το Υδατικό Διαμέρισμα Δυτικής Μακεδονίας.

Το ΥΔ της Κεντρικής Μακεδονίας χαρακτηρίζεται από εκτεταμένες πεδιάδες, κυρίως στο δυτικό του τμήμα, οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι αυτές της Θεσσαλονίκης, των Γιαννιτσών και του Λαγκαδά, ενώ στο ανατολικό του τμήμα εντοπίζεται η λεκάνη της Χαλκιδικής. Η μορφολογία του χαρακτηρίζεται κυρίως ως ημιορεινή με μέσο υψόμετρο τα 245 m, ενώ το 36% της έκτασής του έχει υψόμετρο κάτω από 100 m και μόλις το 3% της έκτασής του έχει υψόμετρο πάνω από 800 m. Οι ακτές του, συνολικού μήκους 910 km, χαρακτηρίζονται από έντονο ανάγλυφο, με αποτέλεσμα το σχηματισμό σημαντικού αριθμού βραχωδών κόλπων.

3.1.4. Κλίμα

Το ΥΔ χαρακτηρίζεται από ποικιλία κλιμάτων, όπως μεσογειακό στην περιοχή της Χαλκιδικής, και τις παράκτιες περιοχές, (συμπεριλαμβανομένης και της λεκάνης απορροής του ποταμού

Ανθεμούντα), ηπειρωτικό στο εσωτερικό του και ορεινό στις περιοχές με μεγάλο υψόμετρο. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής κυμαίνεται από 400 μέχρι 800 mm, ενώ στα ορεινά τμήματα ξεπερνάει τα 1000 mm. Οι χιονοπτώσεις εμφανίζονται αρκετά συχνά κατά το διάστημα από το Σεπτέμβριο έως τον Απρίλιο. Η μέση ετήσια θερμοκρασία κυμαίνεται μεταξύ 14,5°C και 17°C, με ψυχρότερο μήνα τον Ιανουάριο και θερμότερο τον Ιούλιο.

3.1.5. Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά

Σύμφωνα με το ΣΔΛΑΠ, στο ΥΔ αναπτύσσονται υπόγειες υδροφορίες εντός των Τεταρτογενών σχηματισμών και εντός των καρστικών ανθρακικών σχηματισμών ενώ μικρότερης σημασίας υδροφορίες αναπτύσσονται σε ρωγματικούς σχηματισμούς. Τα υπόγεια υδατικά συστήματα που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία χαρακτηρίζονται ως κύρια και τα υπόλοιπα ως δευτερεύοντα. Οι υδροφορίες που αναπτύσσονται στην περιοχή του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας χρησιμοποιούνται για ύδρευση, άρδευση, βιομηχανική και κτηνοτροφική χρήση.

Οι τύποι υδροφορίας είναι οι ακόλουθοι:

Υδροφορίες εντός των προσχωματικών σχηματισμών: Τα προσχωματικά ή κοκκώδη υδροφόρα συστήματα αποτελούνται από εναλλαγές οριζόντων αδρο-μεσοκλαστικών υλικών (άμμοι, χάλικες, κροκάλες με ποικίλα ποσοστά λεπτοκλαστικού κλάσματος) και οριζόντων λεπτοκλαστικών υλικών (άργιλοι, ιλύες, πηλοί με ποικίλο ποσοστό αδρο-μεσοκλαστικού κλάσματος). Κύρια χαρακτηριστικά των υδροφορέων αυτών είναι:

- Η γρήγορη αλλαγή της κοκκομετρικής σύνθεσης των υλικών τόσο κατά την κατακόρυφο όσο και κατά την οριζόντια διεύθυνση.
- Η κατά θέσεις, επικράτηση του ενός ή του άλλου λιθολογικού τύπου.
- Η παρουσία φακών, διασταυρούμενης στρώσης κ.λπ.

Εντός των προσχωματικών σχηματισμών αναπτύσσεται:

- Ένας ελεύθερος ή φρεάτιος υδροφόρος ορίζοντας, ο οποίος συναντάται συνήθως στην ευρύτερη κοίτη των ποταμών / χειμάρρων και λιμνών.
- Μία σειρά επάλληλων υπόγειων υδροφόρων μερικώς υπό πίεση, οι οποίοι συνήθως παρουσιάζουν μερική επικοινωνία με τον ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα.
- Μία σειρά επάλληλων υπόγειων υδροφόρων υπό πίεση.

Η δημιουργία επάλληλων υδροφορέων, μερικώς υπό πίεση ή υπό πίεση, οφείλεται στην παρεμβολή εντός των αδρο-μεσοκλαστικών αποθέσεων, υδροστεγανών οριζόντων. Επιπλέον, η συνεχής με το βάθος, παρεμβολή υδροστεγανών (συνήθως αργιλικών) ενστρώσεων, λειτουργεί θετικά στην προστασία από τη ρύπανση των βαθύτερα υπαρχόντων υδροφορέων. Έτσι, οι κοκκώδεις υδροφορείς παρουσιάζουν μεγάλη τρωτότητα στα πρώτα επιφανειακά μέτρα και μέτρια με το βάθος. Η εκφόρτιση των κοκκωδών ΥΥΣ γίνεται προς θέσεις με χαμηλότερα υψόμετρα (επιφανειακά συστήματα, κοίτες ποταμών ή ρεμάτων, λίμνες κ.λπ.) προς τη θάλασσα (εφόσον πρόκειται για παράκτια συστήματα) και μέσω των απολήψεων που λαμβάνουν χώρα

για την εξυπηρέτηση διαφόρων χρήσεων ύδατος. Στο ΥΔ προσχωματικοί υδροφορείς συναντώνται κυρίως κατά μήκος των ποταμών Λουδία, Αξιού, Γαλλικού, Ανθεμούντα, Ασπρόλακκα, των λιμνών Δοϊράνης, Μαυρούδας και της Μυγδονίας Λεκάνης καθώς και στις περιοχές Κασσάνδρας, Ορμύλιας, Ιερισσού, και Ολυμπιάδας.

Καρστικοί υδροφορείς: Τα υδροφόρα συστήματα αποτελούνται από καρστικοποιημένους ανθρακικούς σχηματισμούς. Η κυκλοφορία του νερού γίνεται μέσω των καρστικών δομών (διευρυμένες ρωγμές, έγκοιλα, αγωγοί κ.λπ.) και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά (άνοιγμα, συνέχεια κ.λπ.) αλλά και το βαθμό πλήρωσης αυτών. Η εκφόρτιση των καρστικών υδροφορέων γίνεται μέσω καρστικών πηγών, προς συνορεύοντα ή άλλα υδατικά συστήματα και προς τη θάλασσα (εφόσον πρόκειται για παράκτιους σχηματισμούς). Οι καρστικοί υδροφορείς παρουσιάζουν μεγάλη τρωτότητα στη ρύπανση, καθώς φθάνουν συνήθως ακάλυπτοι στην επιφάνεια του εδάφους, παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή κατείσδυσης και γρήγορη κίνηση του νερού. Οι καρστικοί υδροφορείς στο ΥΔ εντοπίζονται σε ορεινές, ημιορεινές, λοφώδεις περιοχές όπου οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες απουσιάζουν ή είναι ελάχιστες (καλλιέργειες, κτηνοτροφία, λατομεία αδρανών). Στο ΥΔ καρστική υδροφορία αναπτύσσεται κυρίως στο όρος Πάικο αλλά και σε άλλες περιοχές (Ντεβέ-Κοράν, Βαφειοχώριο κ.α.).

Ρωγματικοί υδροφορείς: Οι υδροφορείς αυτοί αναπτύσσονται σε κάθε είδους λιθολογικό σχηματισμό βραχώδους δομής (πλην των ανθρακικών σχηματισμών), ο οποίος παρουσιάζει αναπτυγμένο και συνεχές δίκτυο δομικών ασυνεχειών ή / και ζώνες έντονου κερματισμού, οι οποίες συνήθως ταυτίζονται με μεγάλες τεκτονικές δομές. Η κυκλοφορία του νερού γίνεται μόνο μέσω του δικτύου ασυνεχειών και συνήθως μέσω των κερματισμένων δομών καθώς και στη διεπιφάνεια που αναπτύσσεται μεταξύ της επιφανειακής ζώνης χαλάρωσης (πλευρικά κορήματα) και του υποκείμενου υγιούς βραχώδους υποβάθρου. Ακόμη, στους υπόψη σχηματισμούς σημαντικό ρόλο παίζει η παρουσία τεκτονισμένων ζωνών με ζώνη μυλωνιτίωσης από αργιλοϊλυώδη υλικά, καθώς αυτή λειτουργεί ως στεγανό διάφραγμα για την κίνηση του νερού. Η εκφόρτιση των ρωγματικών υδροφορέων γίνεται μέσω πηγών, οι οποίες εμφανίζονται πλησίον της βαθιάς γραμμής ρεμάτων ή σε θέσεις όπου είτε το υγιές βραχώδες υπόβαθρο είτε η ζώνη έντονου τεκτονισμού εμφανίζεται στο φυσικό έδαφος και με πλευρική διήθηση προς τους εκατέρωθεν υπάρχοντες σχηματισμούς. Η ανόρυξη υδρογεωτρήσεων στοχεύει στον εντοπισμό μεγάλων τεκτονικών δομών όπου λαμβάνει χώρα η επιλεκτική κίνηση του υπόγειου νερού. Η τρωτότητα των υδροφορέων αυτών έναντι ρύπανσης εξαρτάται από το είδος του σχηματισμού και την παρουσία εδαφικού καλύμματος λεπτοκλαστικών υλικών, το οποίο μειώνει την κατείσδυση ή δεσμεύει το ρυπαντικό φορτίο. Οι ρωγματικοί υδροφορείς που αναπτύσσονται στο ΥΔ είναι τοπικής σημασίας, στις περιοχές: Κερδυλλίων-Κρουσίων, Μαυρονερίου, Αγ. Όρους, Σιθωνίας, Ανατολικού Πάικου και Ποντοηράκλειας, καθώς και σε μια μεγαλύτερη περιοχή από το όρος Χολομώντα έως το όρος του Χορτιάτη.

Κριτήριο για το διαχωρισμό των Υπόγειων Υδατικών Συστημάτων έχει αποτελέσει η υδρολιθολογική συμπεριφορά των σχηματισμών εντός των οποίων αναπτύσσονται οι υπόγειες υδροφορίες. Τα κριτήρια που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατηγοριοποίηση των υδροφόρων συστημάτων είναι η υδροπερατότητα των σχηματισμών και η δυναμικότητα των υπόγειων υδροφορέων. Οι σχηματισμοί έχουν διακριθεί αρχικά σε υδροπερατούς, ημιπερατούς και υδροστεγανούς, και στη συνέχεια σε περαιτέρω κατηγορίες βάσει της δυναμικότητας, της έκτασης και της λιθολογίας του κάθε σχηματισμού, οπότε έχει προκύψει το παρακάτω σύστημα ταξινόμησης:

- Υδροπερατοί σχηματισμοί: Χωρίζονται σε δύο επί μέρους κατηγορίες: τους μικροπερατούς ή πορώδεις σχηματισμούς και τους μακροπερατούς ή ρωγμώδεις σχηματισμούς.
- Ημιπερατοί σχηματισμοί: Αποτελούν μικροπερατούς ή και μακροπερατούς σχηματισμούς. Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται επίσης όλοι οι υδροπερατοί σχηματισμοί μικρής έκτασης, μικρής δυναμικότητας και περιορισμένης σημασίας.
- Υδροστεγανοί σχηματισμοί: Χωρίζονται σε δύο επί μέρους κατηγορίες, τους πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς και τους αδιαπέρατους σχηματισμούς ή σχηματισμούς μικρού πάχους που από κάτω τους αναπτύσσονται αξιόλογα υδροφόρα συστήματα

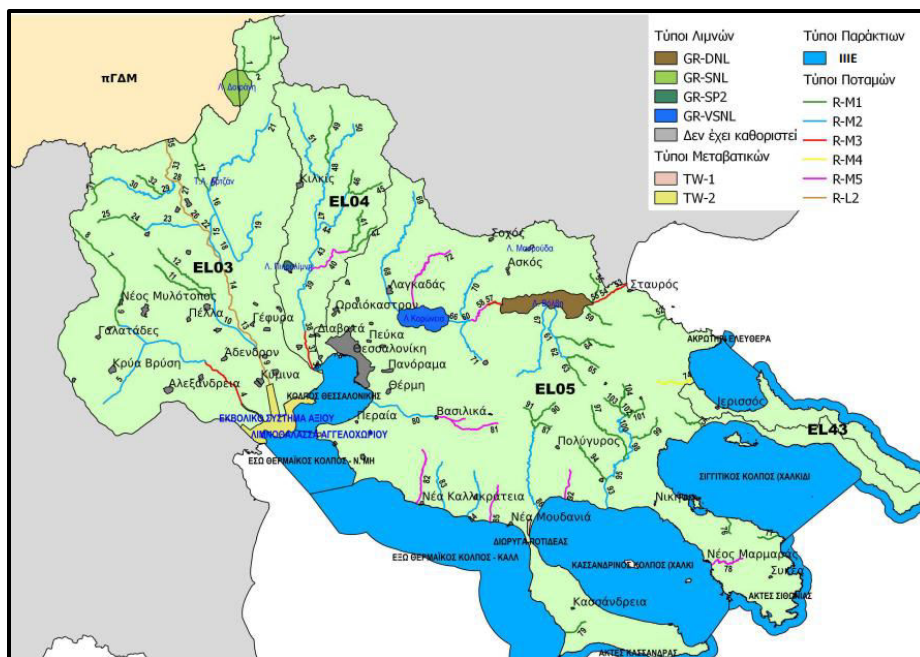
3.1.6. Υδατικοί πόροι και συστήματα επιφανειακών υδάτων

Η μέση ετήσια συνολική προσφορά νερού στο Υδατικό Διαμέρισμα Κεντρικής Μακεδονίας, ανέρχεται σε $5,3 \times 10^9 \text{ m}^3$, εκ των οποίων ποσοστό 32%, ήτοι $1,7 \times 10^9 \text{ m}^3$, προέρχεται από ίδιους πόρους του Διαμερίσματος, ενώ το υπόλοιπο 68% ($3,6 \times 10^9 \text{ m}^3$) προέρχεται από την εισροή νερού του ποταμού Αξιού από τη Βόρεια Μακεδονία. Επιπλέον, στο ΥΔ μεταφέρεται νερό από τον ποταμό Αλιάκμονα, μέσω της Ενωτικής Διώρυγας Αλιάκμονα-Αξιού, σε ποσότητα της τάξεως των $500 \times 10^6 \text{ m}^3$ περίπου για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών της Πεδιάδας Θεσσαλονίκης-Λαγκαδά και του αρδευτικού δικτύου Αλεξάνδρειας καθώς και ποσότητα της τάξεως των $50 \times 10^6 \text{ m}^3$ (με μέγιστο $98 \times 10^6 \text{ m}^3$ ανάλογα με τις ανάγκες), για την κάλυψη των υδρευτικών αναγκών του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Θεσσαλονίκης.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα νομοθεσία, ο χαρακτηρισμός και καθορισμός των επιφανειακών υδάτων στοχεύει αρχικά στην αναγνώριση των επιφανειακών υδατικών συστημάτων και την κατάταξή τους σε 4 κατηγορίες:

- Ποταμοί: Συστήματα εσωτερικών υδάτων τα οποία ρέουν, ως επί το πλείστον στην επιφάνεια του εδάφους αλλά μπορεί ένα μέρος της διαδρομής τους να ρέουν υπογείως.
- Λίμνες: Συστήματα στάσιμων εσωτερικών υδάτων.
- Μεταβατικά ύδατα: Συστήματα επιφανειακών υδάτων πλησίον του στομίου ποταμών τα οποία είναι εν μέρει αλμυρά λόγω της γειννιάσής τους με παράκτια ύδατα αλλά τα οποία μπορεί να επηρεάζονται ουσιαστικά από ρεύματα γλυκού νερού.
- Παράκτια: τα επιφανειακά ύδατα που βρίσκονται στην πλευρά της ξηράς μίας γραμμής κάθε σημείο της οποίας βρίσκεται σε απόσταση ενός ναυτικού μιλίου προς τη θάλασσα από το πλησιέστερο σημείο της γραμμής βάσης από την οποία μετράται το εύρος των χωρικών υδάτων και τα οποία κατά περίπτωση εκτείνονται μέχρι το απώτερο όριο των μεταβατικών υδάτων.

Για την περιοχή του ΥΔ τα επιφανειακά ύδατα ανά κατηγορία και ΛΑΠ παρουσιάζονται στη συνέχεια (Σχήμα 3.4.) (Σχήμα 3.5.):



Σχήμα 3.4. Τα επιφανειακά υδατικά συστήματα (<https://ypen.gov.gr>)

Τύπος ΥΣ	ΛΑΠ ΥΔ				Σύνολο ΥΔ
	ΛΑΠ Αξιού (EL1003)	ΛΑΠ Γαλλικού (EL1004)	ΛΑΠ Χαλκιδικής (EL1005)	ΛΑΠ Άθω (EL1043)	
Ποτάμια ΥΣ	35	16	53	-	104
Λιμναία ΥΣ	2	1	3	-	6
Μεταβατικά ΥΣ	1	-	2	-	3
Παράκτια ΥΣ	-	-	9	2	11
Σύνολο ΥΣ	38	17	67	2	124

Σχήμα 3.5. Συγκεντρωτικά τα επιφανειακά ΥΣ (<https://ypen.gov.gr>)

Τα ποτάμια υδατικά συστήματα του Κεντρικής Μακεδονίας, καθώς και η νέα τυπολογία τους παρουσιάζονται ανά Λεκάνη Απορροής παρακάτω. Επιπλέον πιο αναλυτικά ισχύουν τα εξής:

- Στη ΛΑΠ Αξιού εντοπίστηκαν συνολικά 35 ποτάμια ΥΣ, με συνολικό μήκος 402,24 km και διακρίθηκαν συνολικά 4 τύποι ποτάμιων ΥΣ.
- Στη ΛΑΠ Γαλλικού εντοπίστηκαν συνολικά δεκαέξι (16) ποτάμια ΥΣ, με συνολικό μήκος 183,49 Km και διακρίθηκαν συνολικά τέσσερεις (4) τύποι ποτάμιων ΥΣ.
- Στη ΛΑΠ Χαλκιδικής εντοπίστηκαν συνολικά πενήντα τρία (53) ποτάμια ΥΣ, με συνολικό μήκος 521,11 Km και διακρίθηκαν συνολικά πέντε (5) τύποι ποτάμιων ΥΣ.
- Στη ΛΑΠ Άθω δεν αναγνωρίστηκαν ποτάμια ΥΣ.

Αναφορικά με τα λιμναία ΥΣ του ΥΔ σε επίπεδο Λεκάνης Απορροής ισχύουν τα παρακάτω (Σχήμα 3.6.):

α/α	Όνομα ΥΣ	Κωδικός ΥΣ	Κατηγορία	Έκταση (km ²)	Τύπος ΥΣ
ΛΑΠ Αξιού (EL1003)					
1	Τεχνητή Λίμνη Αρτζάν	EL1003L000000006A	ΤΥΣ	1,4	Δεν έχει καθοριστεί
2	Λ. Δοιράνη	EL1003L0F0000001N	ΦΥΣ	38,87 (14,2 Ελλάς)	GR-SNL
ΛΑΠ Γαλλικού (EL1004)					
3	Λ. Πικρολίμνη	EL1004L000000005N	ΦΥΣ	4,27	GR-SP2
ΛΑΠ Χαλκιδικής (EL1005)					
4	Λ. Μαυρούδα	EL1005L000000002H	ΙΤΥΣ	1,13	Δεν έχει καθοριστεί
5	Λ. Βόλβη	EL1005L000000003N	ΦΥΣ	72,07	GR-DNL
6	Λ Κορώνεια	EL1005L000000004N	ΙΤΥΣ	48,19	GR-VSNL

Σχήμα 3.6. Τα λιμναία ΥΣ του ΥΔ (<https://ypen.gov.gr>)

Τα μεταβατικά ύδατα χαρακτηρίζονται από ευρείες διακυμάνσεις των φυσικών και χημικών παραμέτρων που καθορίζουν την κατανομή και τη δομή τους. Ο χαρακτηρισμός των τύπων στα μεταβατικά ύδατα αποτελεί ιδιαίτερα απαιτητική επιστημονική διαδικασία, εξαιτίας του μωσαϊκού τύπου των ενδαιτημάτων τους και της ιδιαίτερα υψηλής στο χώρο και στο χρόνο φυσικής τους μεταβλητότητας.

Η διάκριση των μεταβατικών υδάτων της Ελλάδας και συνεπώς και του ΥΔ μπορεί να διακριθεί σε δύο τύπους. Η υπάρχουσα κατάσταση για την περιοχή παρουσιάζεται ακριβώς παρακάτω (Σχήμα 3.7.):

- Λιμνοθάλασσες.
- Εκβολές ποταμών ή Δέλτα.

α/α	Όνομα ΥΣ	Κωδικός ΥΣ	Κατηγορία	Έκταση (km ²)	Τύπος ΥΣ
ΛΑΠ Αξιού (EL1003)					
1	Εκβολικό σύστημα Αξιού	EL1003T0001N	ΦΥΣ	66,05	TW 2
ΛΑΠ Χαλκιδικής (EL1005)					
2	Λιμνοθάλασσα Αγγελχωρίου	EL1005T0002N	ΦΥΣ	0,65	TW 1
3	Λιμνοθάλασσα Αγίου Μάμα	EL1005T0003N	ΦΥΣ	2,08	TW 1
ΦΥΣ: Φυσικό ΥΣ, ΙΤΥΣ: Ιδιαίτερα τροποποιημένο ΥΣ, ΤΥΣ: Τεχνητό ΥΣ					

Σχήμα 3.7. Τα μεταβατικά ύδατα του ΥΔ (<https://ypen.gov.gr>)

Τέλος, αναφορικά με τα παράκτια ΥΣ, στο ΥΔ Κεντρικής Μακεδονίας προσδιορίστηκαν 11 παράκτια υδατικά συστήματα, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω. Επισημαίνεται ότι στη ΛΑΠ Γαλλικού και στη ΛΑΠ Αξιού δεν προσδιορίστηκαν παράκτια ΥΣ καθώς το μεγαλύτερο τμήμα

των ακτών των παράκτιων ΥΣ (Κόλπος Θεσσαλονίκης και Έσω Θερμαϊκός Κόλπος) υπάγονται στη ΛΑΠ Χαλκιδικής. (Σχήμα 3.8.)

α/α	Όνομα ΥΣ	Κωδικός ΥΣ	Κατηγορία	Έκταση (km ²)	Τύπος ΥΣ
ΛΑΠ Χαλκιδικής (EL1005)					
1	Σιγγιτικός κόλπος (Χαλκιδική)	EL1005C0004N	ΦΥΣ	740,89	IIIΕ
2	Κασσανδρινός κόλπος (Χαλκιδική)	EL1005C0006N	ΦΥΣ	865,45	IIIΕ
3	Έξω Θερμαϊκός κόλπος - Καλλικράτεια	EL1005C0009N	ΦΥΣ	808,19	IIIΕ
4	Ακρ. Ελευθέρα	EL1005C0001N	ΦΥΣ	5,49	IIIΕ
5	Ακτές Κασσάνδρας	EL1005C0007N	ΦΥΣ	79,13	IIIΕ
6	Κόλπος Θεσσαλονίκης	EL1005C0011H	ΙΤΥΣ	179,94	IIIΕ
7	Ακτές Σιθωνίας	EL1005C0005N	ΦΥΣ	97,05	IIIΕ
8	Έσω Θερμαϊκός κόλπος - Ν. Μηχανιώνα	EL1005C0010N	ΦΥΣ	177,43	IIIΕ
9	Κανάλι Ποτίδαιας	EL1005C0008A	ΤΥΣ	0,01	IIIΕ
ΛΑΠ Άθω (EL1043)					
10	Ακτές Άθω	EL1043C0003N	ΦΥΣ	159,97	IIIΕ
11	Κόλπος Ιερισσού (Χαλκιδική)	EL1043C0002N	ΦΥΣ	181,62	IIIΕ
ΦΥΣ: Φυσικό ΥΣ, ΙΤΥΣ: Ιδιαίτερα τροποποιημένο ΥΣ, ΤΥΣ: Τεχνητό ΥΣ					

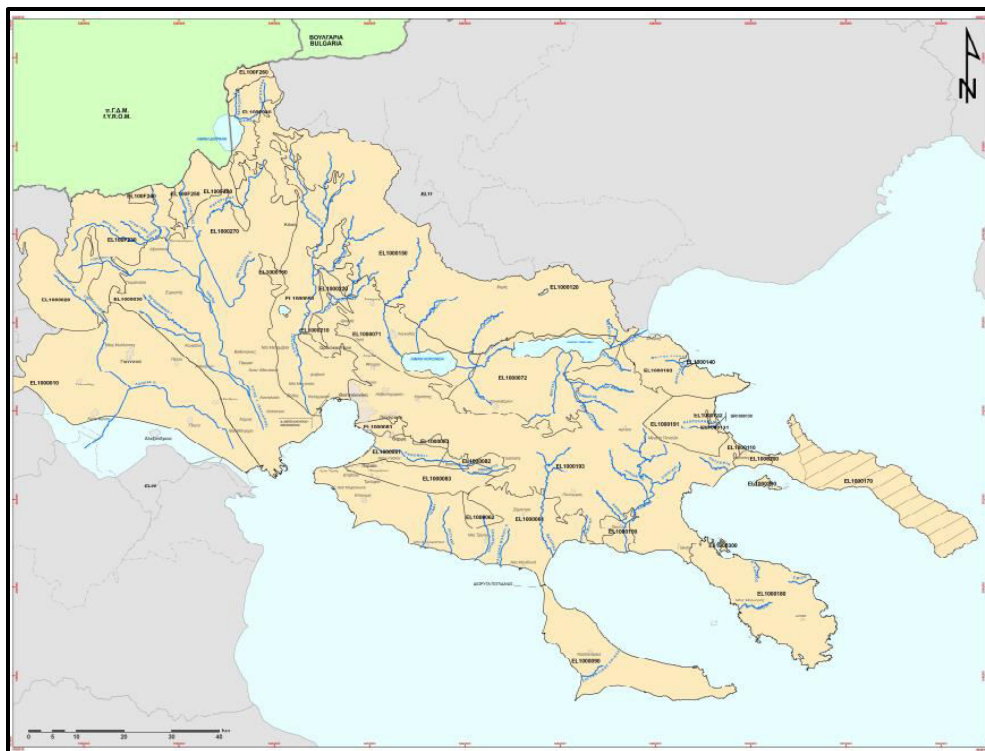
Σχήμα 3.8. Τα παράκτια ΥΣ του ΥΔ (<https://ypen.gov.gr>)

3.1.7. Συστήματα υπογείων υδάτων

Στα πλαίσια της 1ης Αναθεώρησης του ΣΔΛΑΠ του ΥΔ Κεντρικής Μακεδονίας επανεξετάστηκαν τα οριοθετημένα ΥΥΣ. Ο αρχικός προσδιορισμός και οριοθέτηση των ΥΥΣ είχε πραγματοποιηθεί με βάση τα ακόλουθα κριτήρια:

- Τον υδρογεωλογικό χαρακτήρα των γεωλογικών σχηματισμών που συνθέτουν το υπόγειο υδατικό σύστημα και την ανάπτυξη υπόγειας υδροφορίας. Έχει πραγματοποιηθεί διάκριση σε καρστικά, κοκκώδη, ρωγματώδη και μεικτά υπόγεια υδατικά συστήματα και έχουν ταυτόχρονα ενιαιοποιηθεί μικροί επιμέρους υδροφόροι.
- Τη δυναμικότητα των υπόγειων υδροφόρων η οποία προκύπτει από τα υφιστάμενα στοιχεία τροφοδοσίας, υδροληψίας και εκμετάλλευσης του υπόγειου δυναμικού.
- Τις χρήσεις του υπόγειου υδατικού συστήματος.
- Την αλληλεξάρτηση του υπόγειου υδατικού συστήματος με επιφανειακά ύδατα και χερσαία οικοσυστήματα.
- Την ύπαρξη περιοχών που βρίσκονται σε κίνδυνο λόγω πιέσεων (π.χ. υπεραντλήσεις, υπαλμύριση), κακή ποιοτική κατάσταση, ύπαρξη αυξημένου φυσικού υποβάθρου.

Στο ΥΔ εντοπίζεται σημαντικός αριθμός ΥΥΣ η χωροθέτηση των οποίων παρουσιάζεται αμέσως παρακάτω (Σχήμα 3.9.):



Σχήμα 3.9. Τα ΥΣΣ του ΥΔ (<https://ypen.gov.gr>)

Επιπλέον, ένας αριθμός ΥΣ ανεξαρτήτου είδους, έχουν υποστεί σημαντικές τροποποιήσεις για την κάλυψη των ανθρωπίνων αναγκών. Με βάση τις αντίστοιχες αναλύσεις, παρουσιάζεται η κατάσταση των υδατικών αυτών συστημάτων. Παρατηρείται η επιβαρυνμένη κατάσταση, από άποψη οικολογίας, του ποταμού Ανθεμούντα (Σχήμα 3.10.):

α/α	Όνομα ΥΣ	Κατηγορία	Κωδικός	Οικολογική κατάσταση	Χημική κατάσταση	Αριθμός Σταθμών
1	ΛΟΥΔΙΑΣ Π.	ΤΥΣ	EL1003R000400032A	Ελλιπής	Καλή	1
2	ΑΞΙΟΣ Π. (ΒΑΡΔΑΡΗΣ)	ΙΤΥΣ	EL1003R0F0201004H	Κακή	Κατώτερη της Καλής	1
3	ΒΑΡΔΑΡΟΒΑΣΗ Ρ.	ΤΥΣ	EL1003R0F0202014A	Ελλιπής	Καλή	1
4	ΔΕΡΒΕΝΙ Ρ.	ΤΥΣ	EL1005R000203005A	ΜΕΤΡΙΑ	Καλή	1
5	ΑΝΘΕΜΟΥΣ	ΙΤΥΣ	EL1005R001700029H	Κακή	Καλή	1

Σχήμα 3.10. Η κατάσταση των ΤΥΣ (<https://ypen.gov.gr>)

3.1.8. Προστατευόμενες περιοχές

Το Μητρώο Προστατευόμενων Περιοχών περιλαμβάνει, σύμφωνα με τη νομοθεσία όλους τους ακόλουθους τύπους περιοχών:

- Περιοχές που προορίζονται για την άντληση ύδατος για ανθρώπινη κατανάλωση.
- Περιοχές που προορίζονται για προστασία υδρόβιων ειδών με οικονομική σημασία.
- Υδατικά συστήματα που έχουν χαρακτηριστεί ως ύδατα αναψυχής, συμπεριλαμβανομένων περιοχών που έχουν χαρακτηριστεί ως ύδατα κολύμβησης.
- Περιοχές ευαίσθητες στην παρουσία θρεπτικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένων των περιοχών που χαρακτηρίζονται ως ευπρόσβλητες ζώνες, και των περιοχών που χαρακτηρίζονται ως ευαίσθητες.
- Περιοχές που προορίζονται για την προστασία οικοτόπων ή ειδών, όταν η διατήρηση ή η βελτίωση της κατάστασης των υδάτων είναι σημαντική για την προστασία τους, συμπεριλαμβανομένων των σχετικών τόπων του προγράμματος ΦΥΣΗ 2000 (NATURA 2000).

Για το ΥΔ της Κεντρικής Μακεδονίας, ο αριθμός των ΥΣ που ανήκουν στις παραπάνω κατηγορίες και χαρακτηρίζονται ως προστατευόμενες περιοχές είναι ο ακόλουθος (Σχήμα 3.11.):

Κατηγορίες Περιοχών Προστασίας		Αριθμός ΥΣ που σχετίζονται με τις περιοχές προστασίας				
		Ποτάμια	Λίμνες	Μεταβατικά	Παράκτια	ΥΥΣ
Άντληση ύδατος για ανθρώπινη κατανάλωση		1				3
Ύδατα αναψυχής					8	
Ευαίσθητες στην παρουσία θρεπτικών ουσιών	Ευπρόσβλητες Ζώνες	77	6	3		24
	Ευαίσθητες Περιοχές	3	2		1	
Προστασία οικοτόπων ή ειδών		56	5	3	10	
Προστασία υδρόβιων ειδών με οικονομική σημασία				1	3	

Σχήμα 3.11. Αριθμός ΥΣ που σχετίζονται με περιοχές προστασίας (<https://ypen.gov.gr>)

3.2. Η Λεκάνη του Ανθεμούντα

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων ενός τμήματος της λεκάνης απορροής του ποταμού Ανθεμούντα. Στα επόμενα υποκεφάλαια παρουσιάζονται συνοπτικά βασικά χαρακτηριστικά της λεκάνης.

3.2.1. Γεωμορφολογία της περιοχής

Η λεκάνη του Ανθεμούντα χαρακτηρίζεται ως ένα νεότερο τεκτονικό βύθισμα, έχει τη μορφή ισοσκελούς τριγώνου όπου στη μέση διέρχεται ο χείμαρρος Ανθεμούντας. Βόρεια της λεκάνης βρίσκονται τα υψώματα Χορτιάτη και Λανάρι με έντονες κλίσεις ενώ στο νότιο τμήμα εκτείνεται η πεδινή περιοχή η οποία φέρει ηπιότερες κλίσεις. Η πεδινή αυτή ζώνη στο νοτιοανατολικό τμήμα της ΠΕ, αποτελεί την ανατολική προέκταση της πεδιάδας της Θεσσαλονίκης. Η λεκάνη έχει διεύθυνση ΑΝΑ-ΔΒΔ με συνολική επιφάνεια 400 km² κι ένα μέσο υψόμετρο της τάξης των 550 μέτρων. Θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως πεδινή-λοφώδης με το μεγαλύτερο ποσοστό των υψομέτρων να βρίσκεται υπό των 600 μέτρων. Από ανατολικά η έκταση της λεκάνης ξεκινάει από την περιοχή του Βάβδου του νομού Χαλκιδικής και καταλήγει στις όχθες του Θερμαϊκού κόλπου. Επί του άξονα Ταγαράδες - Γαλαρινός εντοπίζεται η κλιμακωτή μετάπτωση του ανάγλυφου προς τα βόρεια, σε τρία επίπεδα καθώς και η εκτροπή κλάδων του υδρογραφικού δικτύου. (Μουντράκης et. al., 1993).

Η εξέλιξη του ανάγλυφου της λεκάνης, αποδεικνύει μια σταδιακή μετάπτωση κυρίως στο κεντρικό τμήμα της. Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα αποτελούν τη βασική αιτία προέλευσης της επιφανειακής απορροής, ενώ ο υδατικός όγκος της αποφορτίζεται στον Θερμαϊκό κόλπο μέσω ενός δικτύου ρεμάτων. Η λεκάνη μπορεί να διαιρεθεί σε δυο επιμέρους λεκάνες απορροής:

- Στην υπολεκάνη της Γαλάτιστας (δυτικά)
- Στην υπολεκάνη των Βασιλικών (ανατολικά)

Παρακάτω, παρουσιάζεται ενδεικτικός μορφολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής μελέτης (Σχήμα 3.12.):



Σχήμα 3.12. Γεωμορφολογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής της λεκάνης (Φίκος, 2005)

3.2.2. Γεωλογία και Τεκτονική της περιοχής

Η λεκάνη του ποταμού Ανθεμούντα ανήκει στην γεωτεκτονική ζώνη του Αξιού και λεπτομερέστερα στην υποζώνη της Παιονίας. Στα δυτικά τμήματα, εντάσσεται και στη γεωτεκτονική ζώνη της Περιοδοποτικής. Η ζώνη του Αξιού χαρακτηρίζεται από τα εξής: Το προαλπικό της υπόβαθρο και τα αλπικά ιζήματα και η παρουσία μεγάλων οφιολιθικών μαζών. Το δεύτερο παραπέμπει στο ότι η ζώνη του Αξιού αποτελεί παλιά ωκεάνια περιοχή από όπου προήλθαν οι οφιόλιθοι (Μουντράκης 1985). Η κύρια ορογενετική φάση για τη ζώνη, έλαβε χώρα στο Ηώκαινο όπου τα ιζήματά της βρέθηκαν ανάμεσα στις κρυσταλλικές μάζες της Ροδόπης και Πελαγονικής και υπέστησαν έντονο αναλεπισμό που αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της εν λόγω ζώνης. Στο προαλπικό υπόβαθρο της ζώνης παρατηρούνται μεταμορφωμένα πετρώματα η τεκτονική θέση των οποίων παραπέμπει σε προαλπικά πετρώματα. Παραδείγματα αποτελούν οι γνεύσιοι και οι χαλαζιακοί-μαρμαρυγιακοί-χλωριτικοί σχιστόλιθοι.

Στα κρυσταλλοσχιστώδη πετρώματα της λεκάνης ανήκουν τα εξής:

- Μαρμαρυγιακοί γνεύσιοι: Εντοπίζονται κυρίως στα νοτιοανατολικά όρια της λεκάνης και εμφανίζουν υψηλό τεκτονισμό ενώ είναι σε παράλληλη διάταξη με τα οφιολιθικά πετρώματα του Βάβδου.
- Βιοτικός γρανοδιορίτης Μονοπήγαδου: Εντοπίζονται στα κεντρικά τμήματα.
- Οφιόλιθοι: Εντοπίζονται στα βορειοανατολικά τμήματα και αποτελούνται από μεγάλη ποικιλία πετρωμάτων.

Για την υποζώνη της Παιονίας ισχύει ότι οι αλπικοί σχηματισμοί της καλύπτονται τη σημερινή εποχή από τα μεταλπικά Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα τα οποία παρουσιάζουν μεγάλη εξάπλωση στην περιοχή της δυτικής Χαλκιδικής και έχουν μεγάλο πάχος (Μουντράκης, 1985). Επιπλέον χαρακτηρίζονται από έντονες λεπιώσεις. (Συρίδης, 1990). Σημαντική ακόμη είναι και η παρουσία ιζηματογενών αποθέσεων με μεγάλα πάχη κυρίως στα παραλιακά τμήματα. Ο σχηματισμός τους πραγματοποιήθηκε κατά την ταφρογέννεση στην ευρύτερη περιοχή Αξιού-Θερμαϊκού και χαρακτηρίζονται σε χερσοποτάμιες, λιμναίες ποταμοδελταϊκές και χερσαίες αποθέσεις (Ψιλοβίκος et al., 1988, Συρίδης, 1990). Αποτελούνται από κροκαλοπαγή, ερυθροστρώματα, άμμους, ιλυούχους αργίλους, μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, τοφώδεις ασβεστόλιθους και τραβερτίνες. Πιο αναλυτικά παρακάτω παρουσιάζονται τα εξής:

1) Κατά το Τεταρτογενές - Ολιγόκαινο οι βασικοί σχηματισμοί είναι:

- Αλλουβιακές αποθέσεις: Ιζήματα που καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης της λεκάνης και εντοπίζονται παράκτια.
- Πλευρικά κορήματα: Αποτελούν αποτέλεσμα αποσάθρωσης κρυσταλλικού υποβάθρου και απαντώνται σε περιοχές πλησίον του ρήγματος Ανθεμούντα.

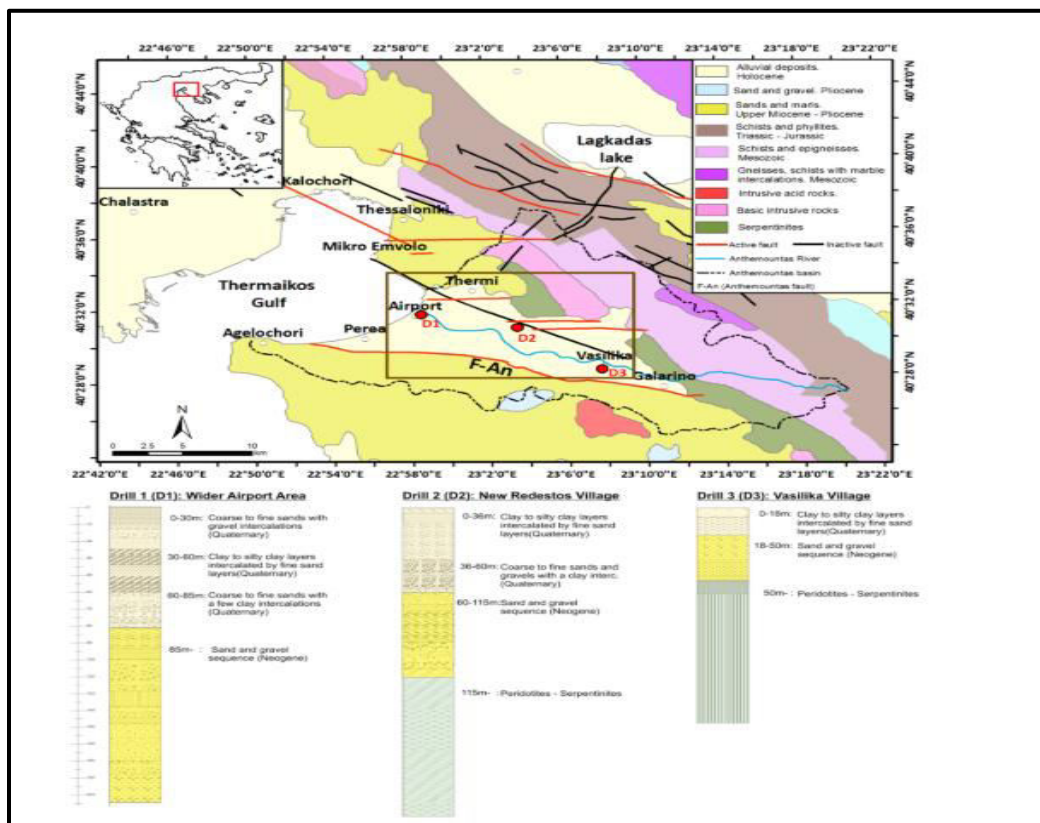
2) Κατά το Α. Μειόκαινο - Κ. Πλειόκαινο τα ιζηματογενή πετρώματα είναι τα εξής:

- Ασβεστόλιθοι με σκληρές μάργες
- Ψαμμιτομαργαϊκή σειρά: Άμμοι και κίτρινες μάργες σε ανάμειξη με κροκαλοπαγή.
- Σειρά ερυθρών αργίλων
- Τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι: Εμφανίζονται σε μορφή ενστρώσεων στα τμήματα που απαντώνται ερυθρές άργιλοι και κροκαλοπαγή.
- Βασική σειρά κροκαλοπαγών: Εντοπίζονται στα όρια της λεκάνης απορροής.

3) Τα ιζηματογενή πετρώματα της λεκάνης κατά το Α. Ιουραϊκό - Κ. Κρητιδικό (ενότητα Παιονίας) είναι τα ακόλουθα:

- Στρώματα Πρινοχωρίου: Κυρίως τεφροί αργιλικόι σχιστόλιθοι με εναλλαγές με ασβεστιτικούς.
- Ασβεστόλιθοι: Κυρίως τεφρών έως γαλαζωπών αποχρώσεων.

Ακριβώς παρακάτω παρουσιάζεται γεωλογικός χάρτης της περιοχής της λεκάνης (Σχήμα 3.13.):



Σχήμα 3.13. Η γεωλογία της περιοχής (Loupasakis et al., 2020)

Σχετικά με την τεκτονική της περιοχής, αυτή υπόκειται στην επιρροή της τεκτονικής του βορείου Αιγαίου (Ρήγμα Βόρειας Ανατολίας και εφελκυστικές τάσεις Ελληνικού τόξου) (Φίκος, 2010). Οι βασικές τεκτονικές δομές που παρατηρούνται στη λεκάνη είναι οι παρακάτω:

- Ενεργό ρήγμα Ανθεμούντα: Αποτελεί ένα κανονικό επίμηκες ρήγμα, με μετάπτωση προς Βορρά, βρίσκεται ΝΝΑ της Θεσσαλονίκης σε απόσταση 14 km και έχει διεύθυνση Α-Δ με συνολικό μήκος 32 km. Χωρίζεται σε τρία τμήματα,
 - α) Νέο Ρύσιο έως Γαλαρινό με παράταξη (B100-100)^ο και μήκος 17 km,
 - β) Αγγελοχώρι έως Νέο Ρύσιο με παράταξη (B90)^ο και μήκος 15 km
 - γ) πιθανό ρήγμα με μήκος περίπου 3 km και παράταξη (B90)^ο.

Μέσω του ρήγματος διαχωρίζονται οι Νεογενείς και οι Τεταρτογενείς αποθέσεις που εντοπίζονται στη λεκάνη, ενώ το ότι παραμένει ενεργό μπορεί να δικαιολογηθεί από τα παρακάτω:

- Τον προσανατολισμό του (B-N)
 - Τις τεκτονικές αναβαθμίδες που εντοπίζονται στην περιοχή.
 - Περιορισμός ανάπτυξης υδρογραφικού δικτύου νότια του Ανθεμούντα.
 - Συνδέεται με παλαιότερους σεισμούς (1988)
 - Οι Τεταρτογενείς αποθέσεις επηρεάστηκαν σημαντικά από αυτό. (Παπαζάχος και Παπαζάχος, 2003).
-
- Ρήγμα Αεροδρομίου: Βρίσκεται σε απόσταση 10 km από τη Θεσσαλονίκη, έχει διεύθυνση Α-Δ, παράταξη (B95)^ο και κλίση (70-80)^ο προς το νότο και μήκος 2 km. Θεωρείται ενεργό ρήγμα.

 - Ρήγματα Θέρμης: Αποτελείται από: α) από το ρήγμα με διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ με μήκος 20 km (ενδεχομένως ανενεργό) (Ζερνοβουλίου, 2007), β) από τέσσερα ρήγματα με διευθύνσεις Α-Δ.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι θέσεις των ενεργών (συμπαγής γραμμή) και ανενεργών ρηγμάτων της λεκάνης και της ευρύτερης περιοχής (Σχήμα 3.14.):



Σχήμα 3.14. Τα ρήγματα της περιοχής μελέτης (www.eagme.gr)

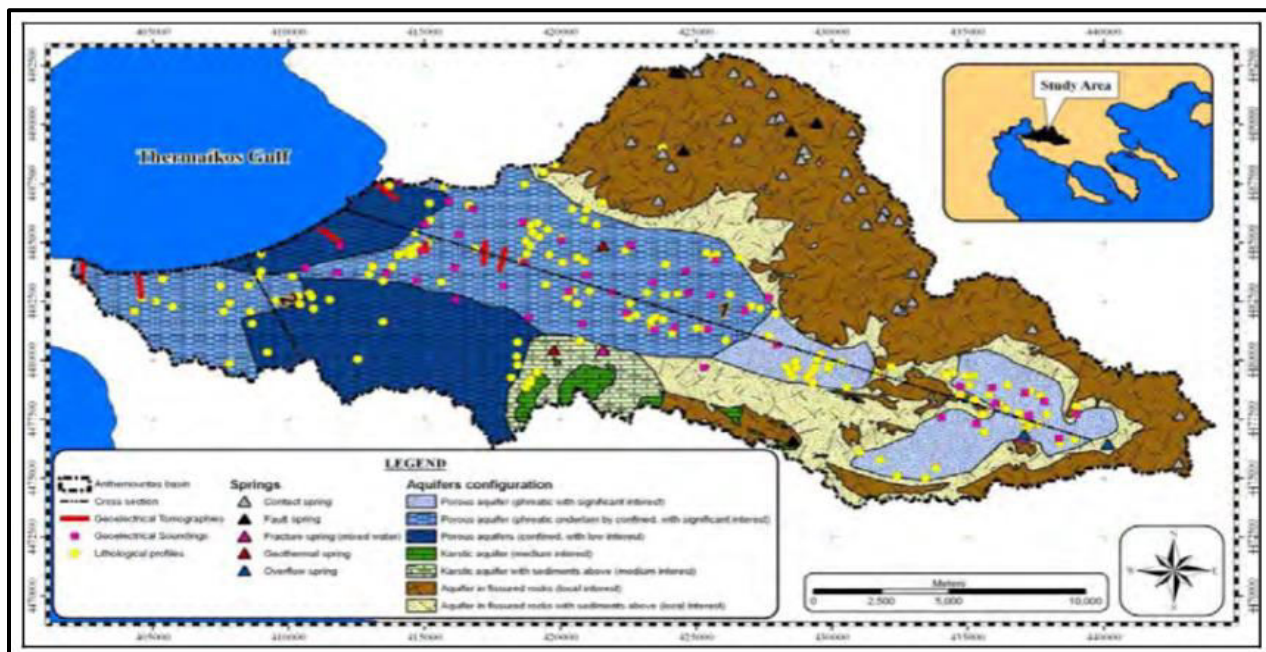
3.2.3. Υδρογεωλογία της λεκάνης

Η τεκτονική δράση και το πορώδες της περιοχής αποτελούν τους παράγοντες που παίζουν ρόλο στην υδρογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών. Η λιθολογία των σχηματισμών είναι τέτοια που τα πετρώματα χαρακτηρίζονται ως χαλαρά ιζηματογενή με πρωτογενές πορώδες 20-35% (Καλλέργης 1999). Στα διάμεσα τμήματα των ανώτερων αποθέσεων εντοπίζονται υδροφόροι ορίζοντες εντός στρωμάτων με αδρομερή υλικά όπως άμμος και χαλίκια και χαρακτηρίζονται ως ανισότροποι και ανομοιογενείς ενώ εμπλουτίζονται μέσω κατακρημνισμάτων και πλευρικών διηθήσεων. Οι υδροφορείς της λεκάνης είναι οι εξής (Καζάκης 2013):

- Πορώδεις υδροφορείς: Παρατηρούνται εντός των Νεογενών και Τεταρτογενών σχηματισμών με ανισότροπη λιθολογία και πάχος, αλλά και υδραυλικά χαρακτηριστικά. Αποτελούνται από άμμους, κροκάλες και χαλίκια ενώ τα κατακρημνίσματα είναι η αιτία για την τροφοδοσία τους καθώς και η διήθηση από τους χειμάρρους και τα ρέματα. Είναι τόσο ελεύθεροι όσο και υπό πίεση.
α) Ελεύθεροι υδροφορείς: Παρατηρούνται κυρίως στο τμήμα των πορωδών υδροφορέων και βρίσκονται κάτω από τους υπό πίεση με πάχη μεταξύ 10-30 μέτρων εκτός από το κομμάτι μεταξύ της Περαίας και της Αγίας Τριάδας που είναι μεγαλύτερο.
β) Υπό πίεση υδροφορείς: Βρίσκονται υπό των ελεύθερων με εξαίρεση μεταξύ Ταγαράδων και Τριλόφου. Το πάχος και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους μεταβάλλονται ανάλογα την περιοχή και τροφοδοτούνται πλευρικά από τους υδροφορείς των κερματισμένων πετρωμάτων.
- Καρστικοί υδροφορείς: Απαντώνται στο νότιο και κεντρικό τμήμα της λεκάνης ενδιάμεσα της Αγίας Παρασκευής και της Σουρωτής εντός των Μεσοζωϊκών ασβεστόλιθων. Οι υδροφορείς αυτοί βρίσκονται κάτω από μη υδροφόρους ιζηματογενείς σχηματισμούς και τροφοδοτούν τους πορώδεις.
- Υδροφορείς των διερρηγμένων πετρωμάτων: Απαντώνται στο μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής και σε μεγάλο βαθμό καλύπτονται από ιζήματα. Τροφοδοτούν πλευρικά τους πορώδεις υδροφορείς με υψηλές υδροφορίες ιδίως κοντά σε διερρηγμένες ζώνες.

Τέλος, το ρήγμα του Ανθεμούντα, παίζει σημαντικό ρόλο ως προς τα υδρολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής επηρεάζοντας την υδραυλική επικοινωνία των δύο υπολεκάνων. Ακόμη, αποτελεί παράγοντα παρουσίας γεωθερμίας και υποβάθμισης της ποιότητας του νερού.

Παρακάτω παρουσιάζεται χάρτης με τα υδροφόρα συστήματα της λεκάνης (Σχήμα 3.15.):



Σχήμα 3.15. Τα υδροφόρα συστήματα της λεκάνης (Kazakis et al., 2013)

3.2.4. Τα φαινόμενα εδαφικών υποχωρήσεων

Τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή μελέτης, ήτοι τη λεκάνη απορροής του ποταμού Ανθεμούντα, έχουν αποτελέσει αντικείμενο μελέτης για την επιστημονική κοινότητα, τόσο για τον εντοπισμό όσο και για την ποσοτικοποίηση της δράσης του φαινομένου. Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ενδεικτικά συνοπτικά παραδείγματα από τις διερευνήσεις.

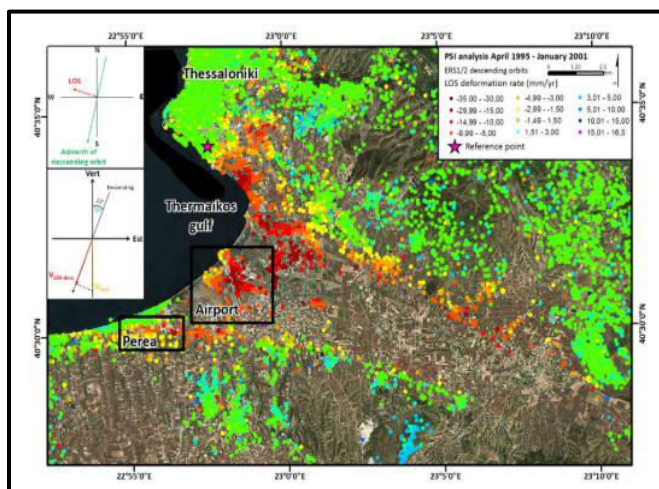
Οι Loupasakis et al., (2013) διερεύνησαν τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή της λεκάνης του Ανθεμούντα αξιοποιώντας δεδομένα της Συμβολομετρίας SAR. Πιο συγκεκριμένα, αξιοποιήθηκε η μέθοδος PSI η οποία βασίστηκε σε 42 εικόνες SAR που κάλυπταν μεγάλο χρονικό εύρος από το 1995 έως το 2001 μέσω των δορυφόρων ERS1/2. Έπειτα από τις απαραίτητες επεξεργασίες με βάση τις απαιτήσεις της μεθόδου, οι ερευνητές επέλεξαν να αναλύσουν και να καθορίσουν τα χωρικά μοτίβα των εδαφικών υποχωρήσεων στην εν λόγω περιοχή.

Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη χαρτογράφηση και χωρική απόδοση του φαινομένου στη περιοχή της Περαιάς και του Δήμου Θερμαϊκού, καθώς και στην περιοχή του αεροδρομίου Μακεδονία της

Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα της επιστημονικής προσέγγισης απέδειξαν μια μέτριας έντασης εδαφική υποχώρηση κατά μήκος της ευρύτερης περιοχής της ακτογραμμής της λεκάνης, η οποία συνδέθηκε άμεσα με τα φαινόμενα υπεραντλήσεων που παρατηρούνται στην περιοχή τα τελευταία χρόνια.

Με βάση της παρατηρήσεις, οι μέγιστες τιμές του ρυθμού της εδαφικής υποχώρησης στην ευρύτερη περιοχή του αεροδρομίου Μακεδονία άγγιξαν τα 20 χιλιοστά ανά έτος, συναρτήσει επίσης και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών που εντοπίζονται στην περιοχή. Επιπρόσθετα, υψηλοί ρυθμοί εδαφικών υποχωρήσεων προέκυψαν και για την περιοχή της Περαιάς, της τάξης των 10 έως 15 χιλιοστών ανά έτος. Επιπλέον, στην περιοχή αυτή κατά τα έτη 2005 και 2006, παρατηρήθηκαν λόγω των εδαφικών υποχωρήσεων επιφανειακές ρωγμές, με αποτέλεσμα ζημιές στις τοπικές υποδομές.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επιστημονικής διερεύνησης συναρτήσει της ταχύτητας εξέλιξης του φαινομένου στη λεκάνη, καθώς και ενδεικτικές εικόνες των ζημιών σε υποδομές (Σχήμα 3.16.) (Σχήμα 3.17.):



Σχήμα 3.16. Ο ρυθμός εξέλιξης του φαινομένου (Loupasakis et al., 2013)



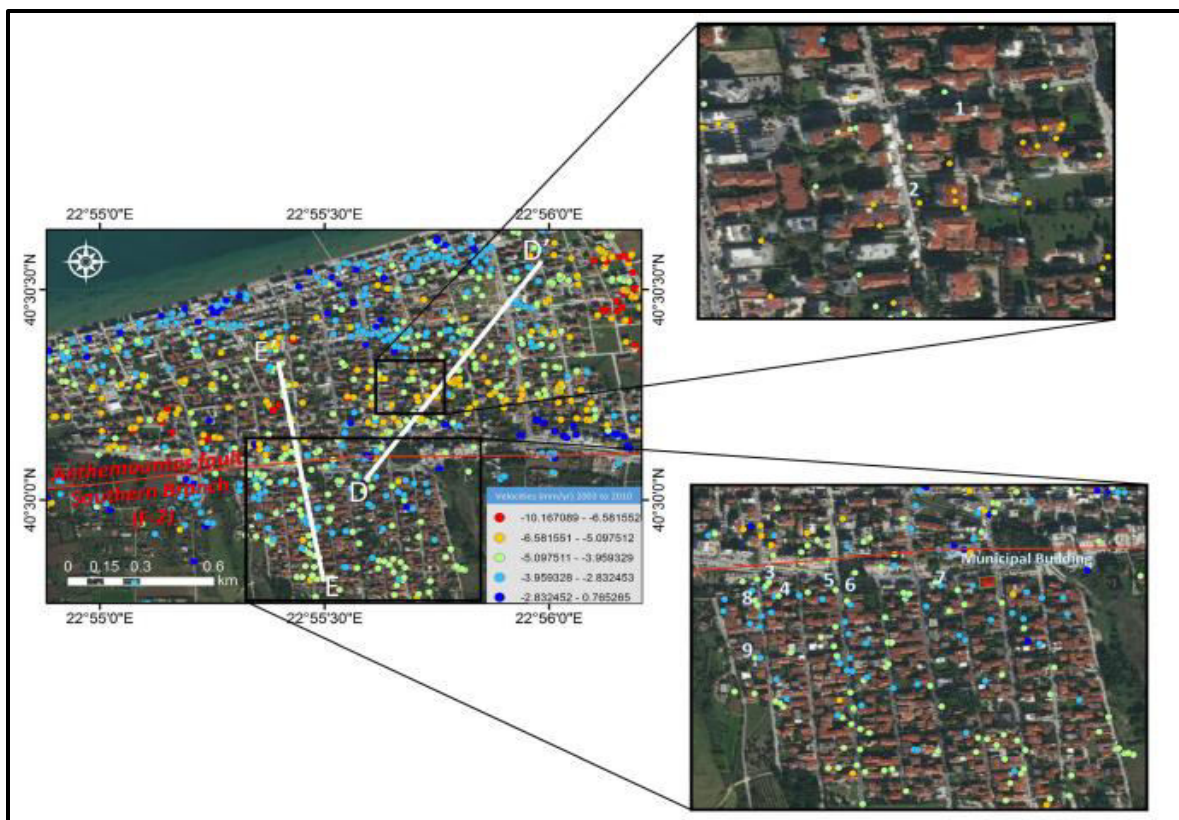
Σχήμα 3.17. Καταστροφές σε υποδομές (Loupasakis et al., 2013)

Σε αντίστοιχη επιστημονική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στην ίδια περιοχή, οι Svigas et al., (2020) μελέτησαν τα παρατηρηθέντα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή της λεκάνης.

Η διερεύνηση επικεντρώθηκε στην παρακολούθηση του φαινομένου και στον τρόπο με τον οποίο αυτό εξελίσσεται με την πάροδο του χρόνου, αξιοποιώντας δεδομένα InSAR σε χρονική ακολουθία και ταυτόχρονα ερευνώντας και τους κύριους μηχανισμούς που διαχρονικά επηρεάζουν το φαινόμενο. Τα αποτελέσματα προέκυψαν μέσω χρήσης δεδομένων από το δορυφόρο ENVISAR καθώς και μια βάση δεδομένων SAR για το χρονικό διάστημα από το 1992 έως το 2010, όπως αυτά αποκτήθηκαν μέσω των δορυφόρων ERS1, ERS2 και ENVISAT.

Οι τελικές παρατηρήσεις της διερεύνησης με έμφαση σε συγκεκριμένα κρίσιμα τμήματα της λεκάνης απέδειξαν στην περίπτωση και των δύο δεκαετιών επιφανειακές μετακινήσεις και μάλιστα με αυξανόμενη ένταση. Επιπλέον, τα αποτελέσματα της εργασίας συναρτήσε και των επιτόπιων παρατηρήσεων εξήγαγαν το συμπέρασμα, ότι ο βασικός παράγοντας επηρεασμού της ταχύτητας εξέλιξης του φαινομένου αποτελεί η υπερεκμετάλλευση των τοπικών υδροφορέων και στις δύο δεκαετίες.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διερεύνησης ως προς την ταχύτητα εξέλιξης του φαινομένου στην περιοχή της Περαίας. (Σχήμα 3.18.)



Σχήμα 3.18. Ο ρυθμός των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή της Πειραιάς (Svigas et al., 2020)

Κεφάλαιο 4 – Ανάλυση και αποτελέσματα

4.1. Τα Γεωπληροφοριακά Συστήματα

Το Γεωπληροφοριακό Σύστημα (ΓΣ) ορίζεται ένα ως σύνολο εργαλείων για τη συλλογή, τη διαχείριση και την απεικόνιση χωρικών δεδομένων, που υποστηρίζει τη διαδικασία του σχεδιασμού παρέχοντας τη δυνατότητα στο χρήστη, να αναλύει γεωγραφικές πληροφορίες για κάποιο συγκεκριμένο σκοπό, σύμφωνα με το δικό του μοντέλο λήψης αποφάσεων (Burrough, 1986). Γενικά τα ΓΣ μπορούν να θεωρηθούν σαν ένα σύνολο προγραμμάτων που λειτουργούν πάνω σε μια χωρική βάση δεδομένων (Goodchild, 1992).

Η αναπαράσταση στα Γεωπληροφοριακά Συστήματα πραγματοποιείται με δύο βασικούς τρόπους:

- με τα διανυσματικά μοντέλα (vector)
- και τα μοντέλα μορφής κανάβου (raster)

Στα διανυσματικά μοντέλα, η βασική λογική μονάδα στο γεωγραφικό χώρο είναι η γραμμή, η οποία χαρακτηρίζεται από έναν αριθμό σημείων με γνωστές συντεταγμένες. Αντίστοιχα, στα μοντέλα μορφής κανάβου, ο χώρος έχει τμηματοποιηθεί σε χωρία κανονικού σχήματος (φατνία), τα οποία συνολικά αποτελούν κάναβο. Δεν είναι απαραίτητο σε όλες τις περιπτώσεις να χρησιμοποιείται μόνο το τετράγωνο, αλλά αντιθέτως μπορεί να αξιοποιηθεί το παραλληλόγραμμο, ή οποιοδήποτε άλλο κανονικό πολύγωνο. Η απλούστερη δομή δεδομένων στο πλαίσιο των μοντέλων με μορφή κανάβου συνίσταται στη σειριακή (μονοδιάστατη) απόδοση των φατνίων. Κάθε φατνίο προσδιορίζεται με το ζεύγος γραμμής - στήλης του αντίστοιχου πίνακα και έναν αριθμό που προσδιορίζει το είδος ή την τιμή του χαρακτηριστικού που απεικονίζει.

Κάποια χαρακτηριστικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο μοντέλων σε σχέση με περιβαλλοντικά γεωγραφικά δεδομένα είναι τα ακόλουθα (Burrough, 1986, Tomlin, 1990). Τα πλεονεκτήματα των διανυσματικών μοντέλων είναι η συμπαγής δομή και η αποτελεσματική γενίκευση των γεωμετρικών δεδομένων, ενώ στα μειονεκτήματα τους είναι η πολύπλοκη δομή δεδομένων και η δυσκολία στη μαθηματική προσομοίωση, διότι οι μονάδες έχουν διαφορετικά μεγέθη. Τα πλεονεκτήματα των μοντέλων μορφής κανάβου είναι η απλή δομή δεδομένων, η εύκολη σύνδεση γεωγραφικών και τηλεπισκοπικών δεδομένων, η ευκολία μαθηματικής προσομοίωσης και απόδοσης συνεχών φαινομένων. Τα μειονεκτήματα της είναι ο μεγάλος όγκος δεδομένων, η σχέση μεγέθους κανάβου και πληροφορίας και η χρονοβόρα διαδικασία των προβολικών μετασχηματισμών

- **Τα υποσυστήματα των Γεωπληροφοριακών Συστημάτων**

Τα εργαλεία ενός Γεωπληροφοριακού Συστήματος περιλαμβάνουν τον απαραίτητο τεχνικό εξοπλισμό (Hardware) και το λογισμικό (Software) με σκοπό την εισαγωγή, διαχείριση, ανάλυση και απόδοση των δεδομένων.

Υλικό (hardware)

Βασικό συστατικό στοιχείο οποιουδήποτε συστήματος συμπεριλαμβανόμενου και των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών είναι η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU). Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας τους είναι όμοια με οποιουδήποτε άλλου γενικής χρήσης συστήματος πληροφοριών ενώ τα πιο γνωστά λειτουργικά συστήματα (UNIX, WINDOWS 98, WINDOWS NT) αξιοποιούνται από το μεγάλο αριθμό λογισμικών. Η οθόνη γραφικών πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καλύτερης ευκρίνειας. Το πληκτρολόγιο είναι ανάλογο μ' αυτό άλλων συστημάτων και επιτρέπει την εισαγωγή πληροφοριών και εντολών στον υπολογιστή ενώ είναι ένας εύκολος τρόπος για την εισαγωγή αλφαριθμητικών πληροφοριών κατά τη διάρκεια της ψηφιοποίησης. Επιπλέον απαραίτητα εργαλεία που αξιοποιούνται κατά τη λειτουργία τους αποτελούν οι ψηφιοποιητές, οι αυτόματοι σαρωτές και οι αυτόματοι σχεδιαστές (pen plotter ή inkjet plotter).

Λογισμικό (software)

Το λογισμικό ενός Γεωπληροφοριακού Συστήματος αποτελείται από πέντε βασικά μέρη που πραγματοποιούν τα ακόλουθα:

- Εισαγωγή δεδομένων, έλεγχος και επαλήθευση τους.
- Διαχείριση της γεωγραφικής βάσης δεδομένων.
- Εξαγωγή πληροφοριών και παρουσίαση.
- Μετασχηματισμό των δεδομένων.
- Εργαλεία χωρικής ανάλυσης

Η εισαγωγή των δεδομένων αφορά τόσο τα γεωγραφικά όσο και τα περιγραφικά δεδομένα. Τα γεωγραφικά δεδομένα προέρχονται από ετερόκλητες πηγές, όπως γεωδαιτικές επίγειες μετρήσεις, τηλεπισκοπικές, φωτογραμμετρικές μεθόδους και λοιπά. Τα περιγραφικά δεδομένα είναι γενικά περιπτώσεις ή φαινόμενα τα οποία σχετίζονται με τα γεωγραφικά δεδομένα μέσω χωρικής πληροφορίας.

Η διαχείριση των δεδομένων αφορά μετακίνηση και στροφή αντικειμένων, μεγέθυνση - σμίκρυνση παραθύρου εργασίας, μετατροπή δεδομένων από μια μορφή σε άλλη, γενίκευση στοιχείων και λοιπά. Ο μετασχηματισμός των δεδομένων αποτελείται από διαδικασίες για τη συνένωση χαρτών μεταξύ τους, μετασχηματισμούς που συνδέονται με αλλαγή της κλίμακας, προσαρμογή των δεδομένων σε άλλες προβολές και άλλα. Το στάδιο της χωρικής ανάλυσης περιλαμβάνει τις διαδικασίες μετατροπής των στοιχείων σε πληροφορία (Κουτσόπουλος, 1986, Noel, 1991). Σαν αποτέλεσμα η ανάλυση χώρου είναι ένα σύνολο από “ποσοτικές διαδικασίες

και τεχνικές που εφαρμόζονται σε χωρικές αναλυτικές εργασίες” (Johnston et. al., 1986.) και στοχεύουν σύμφωνα με τον Haining (1994):

- στην ορθή περιγραφή γεγονότων στο χώρο.
- στη συστηματική διερεύνηση των χωρικών προτύπων και των χωρικών σχέσεων.
- στην αύξηση της ικανότητας πρόβλεψης και ελέγχου γεγονότων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι σύμφωνα με τον Burrough (1986) τα κυριότερα χωρικά προβλήματα που επιλύει ένα Γεωπληροφοριακό Σύστημα είναι τα εξής:

- Τι βρίσκεται στην θέση A;
- Πού βρίσκονται τα X1, X2;
- Πού είναι το A σχετικά με το B;
- Ποιο είναι το μέγεθος του A (εμβαδό, περίμετρος);
- Ποιο είναι το αποτέλεσμα της επικάλυψης μεταξύ δύο ή περισσότερων επιπέδων (overlay);
- Πόσες εμφανίσεις τύπου A βρίσκονται σε απόσταση P από το B;
- Προσδιορισμός της ζώνης σε απόσταση P από το A (buffering).

Η επικάλυψη και η δημιουργία ζώνης αποτελούν τα βασικότερα εργαλεία του είναι ενσωματωμένα στη συντριπτική πλειοψηφία των Γεωπληροφοριακών Συστημάτων, βεβαίως με ορισμένες εξαιρέσεις.

4.2. Χαρτογραφικό υλικό

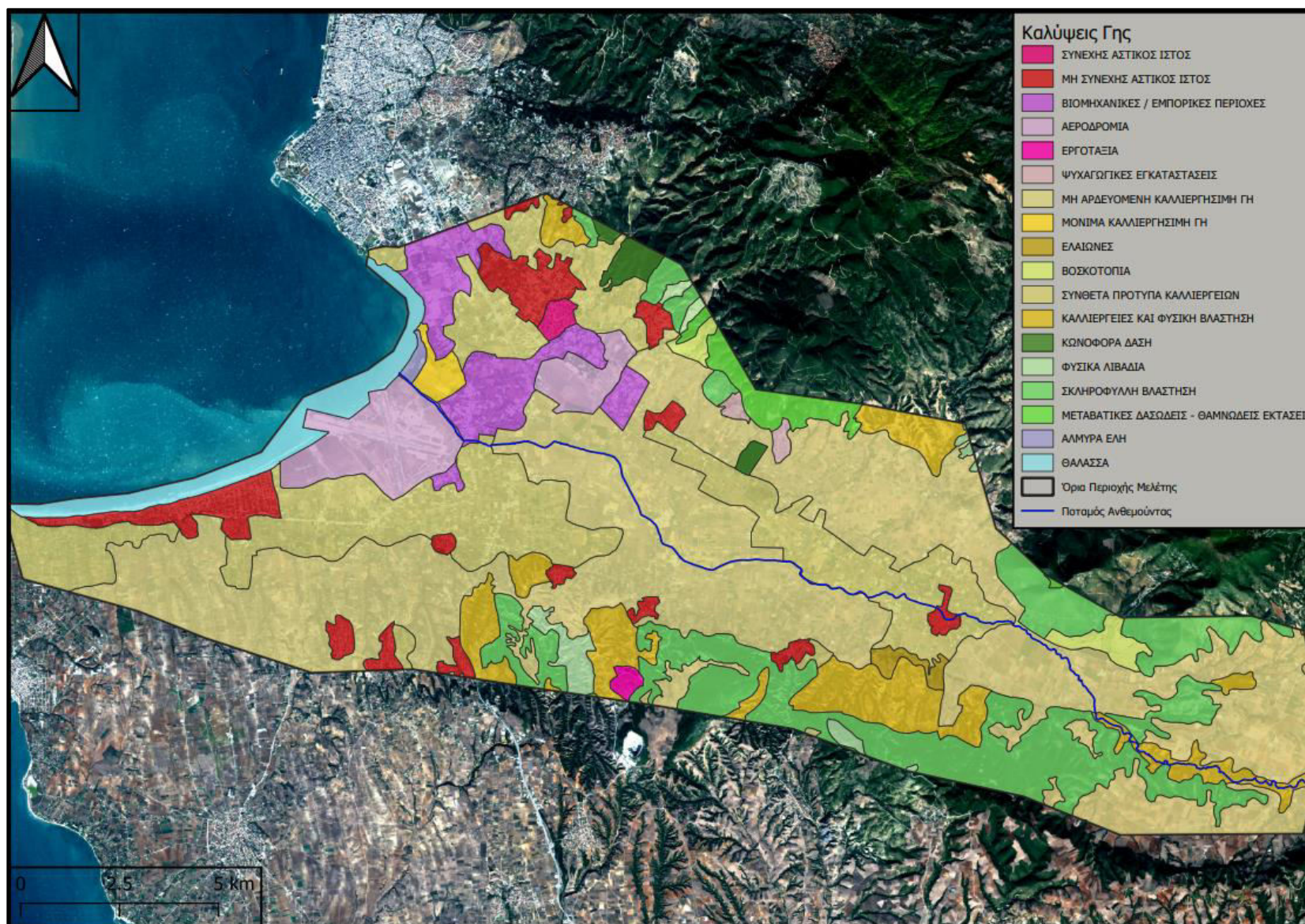
Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται ένας αριθμός χαρτών, οι οποίοι δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο της περιγραφής των χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης, ήτοι της λεκάνης απορροής του ποταμού Ανθεμούντα, με σκοπό την καλύτερη οπτικοποίηση της υπό μελέτη περιοχής συναρτήσει συγκεκριμένων παραμέτρων πριν την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης που πραγματεύεται η παρούσα εργασία.

Ως αρχικό στάδιο της δημιουργίας των παρακάτω χαρτών όπως αυτοί θα παρουσιαστούν παρακάτω αποτέλεσε η απόκτηση δορυφορικής εικόνας υψηλής ακρίβειας (της τάξης των 10 μέτρων και 12 κανάλια) από το δορυφόρο Sentinel 1 με ημερομηνία λήψης τη 19^η Νοεμβρίου 2023, με σκοπό τη χρήση της ως χαρτογραφικό υπόβαθρο. Η εικόνα έλαβε συγκεκριμένη επεξεργασία σε περιβάλλον ESA SNAP, μέσω της οποίας περικόπηκε στα ευρύτερα όρια της περιοχής ενδιαφέροντος, ενώ ταυτόχρονα εφαρμόστηκε φίλτρο συνέλιξης με σκοπό την ενίσχυση των χρωμάτων και των αντιθέσεων. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας εργαλεία του Q-GIS, η εικόνα διορθώθηκε από ατμοσφαιρικά σφάλματα, ενώ απομονώθηκαν συγκεκριμένα κανάλια του δορυφόρου, ώστε να μπορούν να δημιουργηθούν έγχρωμα σύνθετα με φυσικό νόημα. Το

έγχρωμο σύνθετο που εφαρμόστηκε σε όλες τις περιπτώσεις είναι το 432 RGB λόγω της φυσικής απεικόνισης που προσφέρει. Τέλος η εικόνα γεωαναφέρθηκε στο ΕΓΣΑ'87.

Για τη δημιουργία των χαρτών οριοθετήθηκε η λεκάνη απορροής αξιοποιώντας τα δεδομένα της υπάρχουσας βιβλιογραφίας. Για τη συντριπτική πλειοψηφία των απεικονίσεων αξιοποιήθηκαν δεδομένα σε διανυσματική μορφή μέσω της επίσημης ιστοσελίδας geodata.gov.gr. Τα δεδομένα που αποκτήθηκαν αφορούσαν σε στοιχεία των υποδομών, όπως οδικό δίκτυο, αεροδρόμια, οικισμοί, δεδομένα υδρογραφικού δικτύου, τόσο επιφανειακού, όσο και υπογείου, όρια υπολεκάνων απορροής κ.λπ. Σε όλες τις περιπτώσεις τα δεδομένα γεωαναφέρθηκαν, έλαβαν τις απαραίτητες χωρικές μορφοποιήσεις μέσω εργαλείων του προγράμματος, ή / και ψηφιοποιήθηκαν χειροκίνητα σε περιπτώσεις απώλειας ή μη αξιοπιστίας δεδομένων.

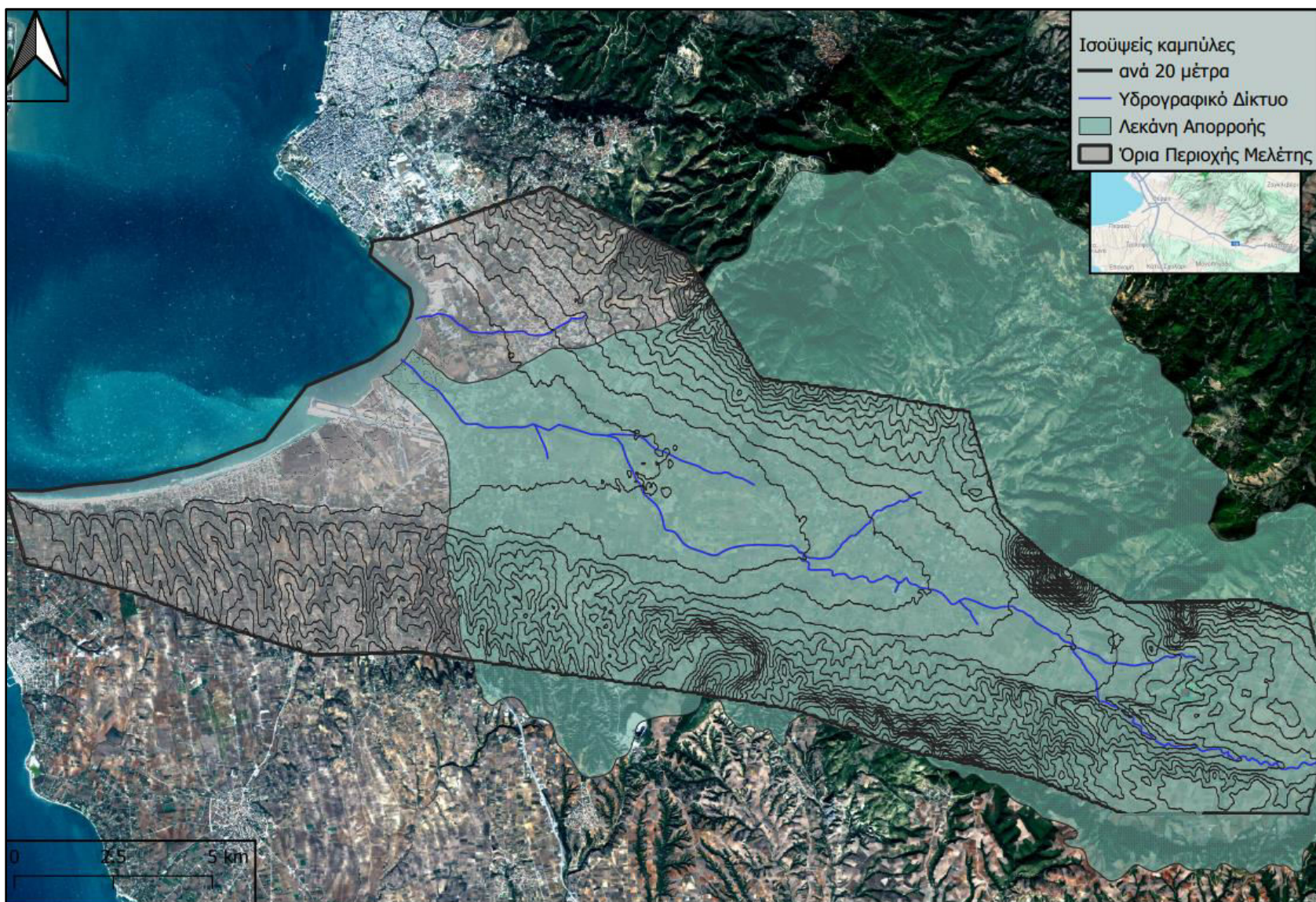
Για το χάρτη των χρήσεων γης, αξιοποιήθηκαν δεδομένα διανυσματικής μορφής μέσω του Corine Land Cover για το έτος 2018. Ακόμη, για τη δημιουργία του χάρτη πλημμυρικής επικινδυνότητας και τις καταγραφές ιστορικών πλημμυρών, χρησιμοποιήθηκαν διανυσματικά δεδομένα από το floods.yrpeka.gr. Τέλος, για τους χάρτες κατακόρυφων μετακινήσεων αξιοποιήθηκαν δεδομένα raster μέσω της ιστοσελίδας Copernicus EU, τα οποία έπειτα από τις απαραίτητες επεξεργασίες γεωαναφέρθηκαν και τοποθετήθηκαν επί της δορυφορικής εικόνας (overlay). Στην περίπτωση των κατακόρυφων μετακινήσεων, με θετικό πρόσημο παρουσιάζονται οι ανυψώσεις, ενώ στις οριζόντιες μετακινήσεις θετικό πρόσημο φέρουν οι μικρομετακινήσεις προς ανατολάς. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το χαρτογραφικό υλικό:



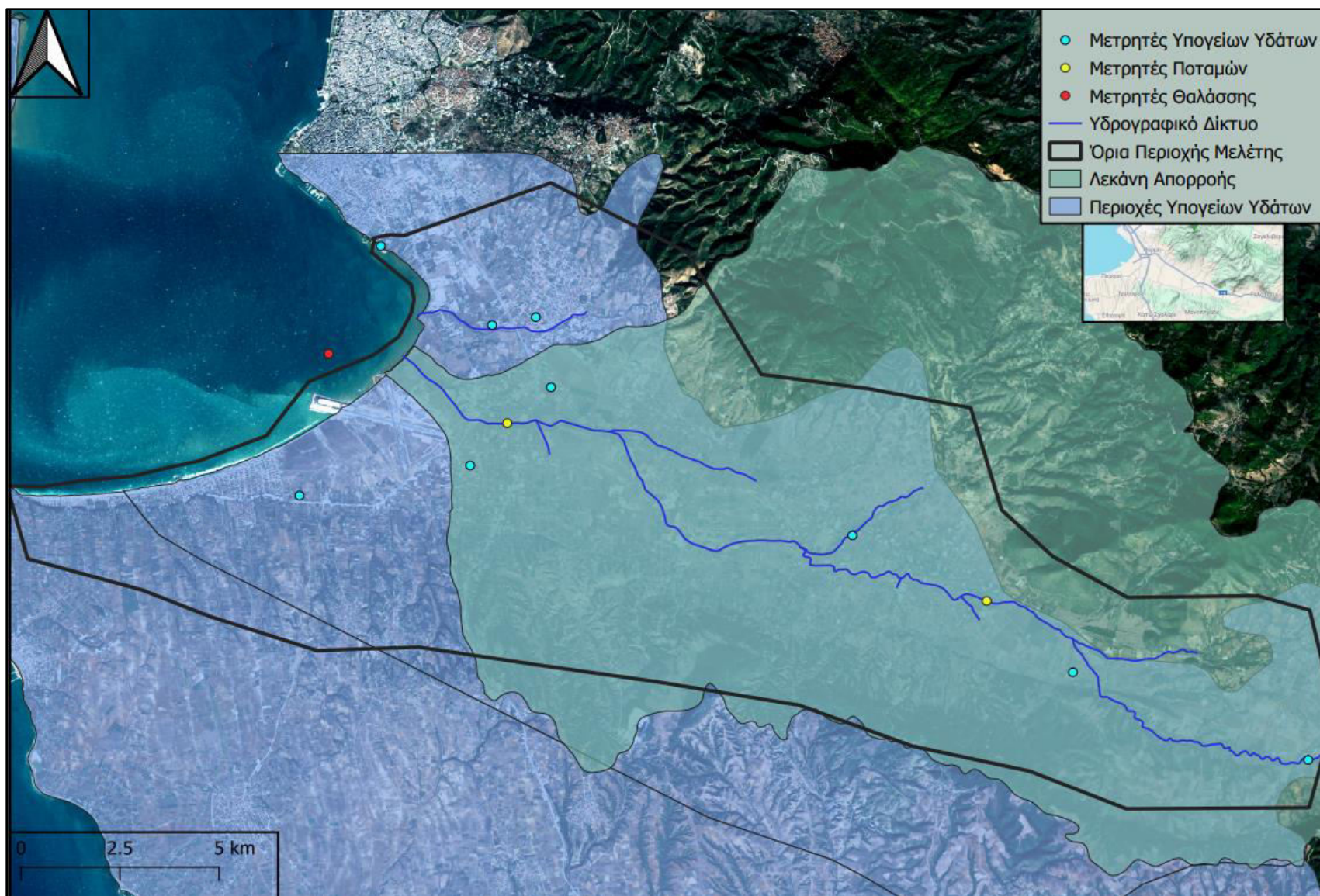
Χάρτης 1: Οι καλύψεις γης της περιοχής μελέτης



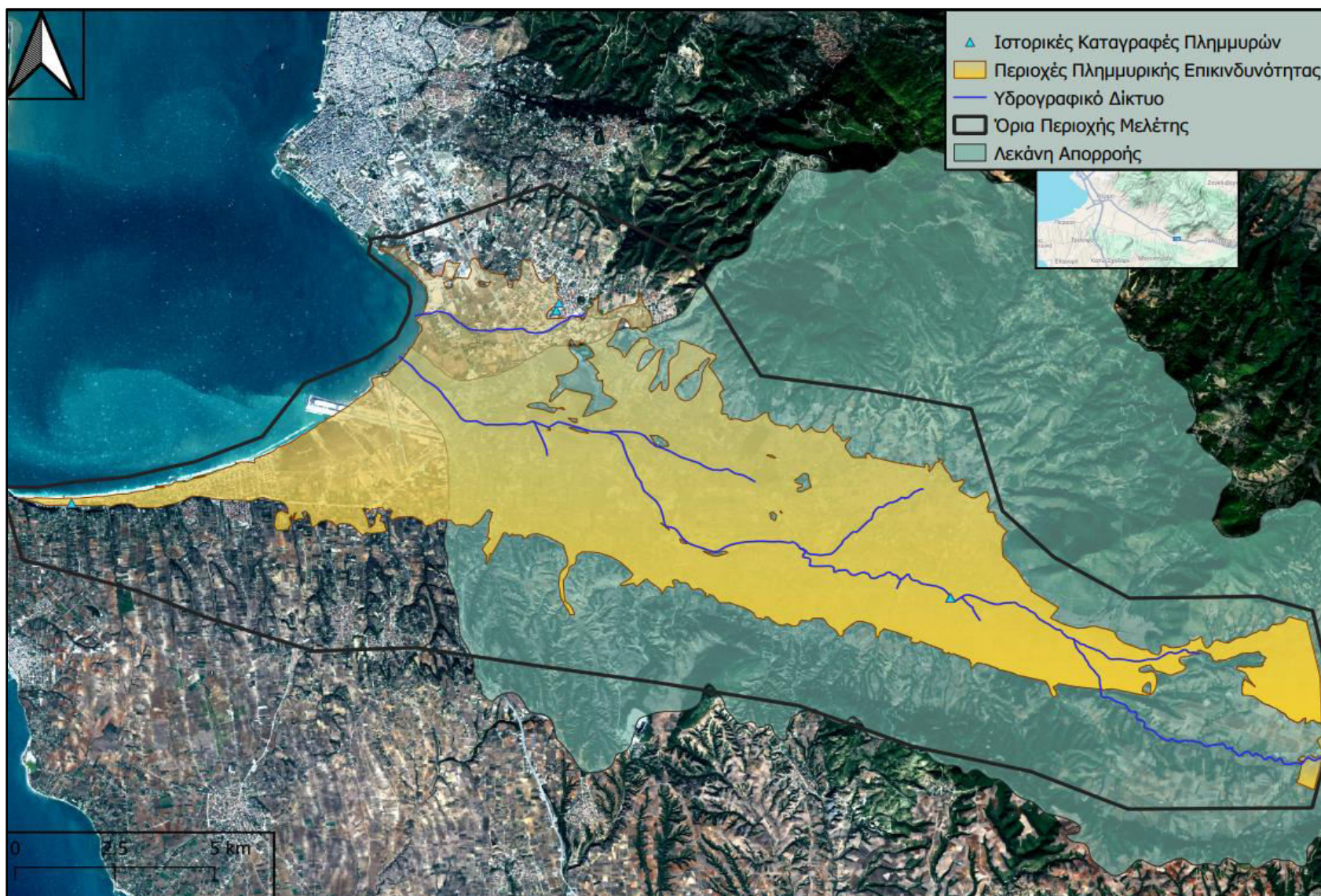
Χάρτης 2: Οι κύριες υποδομές της περιοχής μελέτης



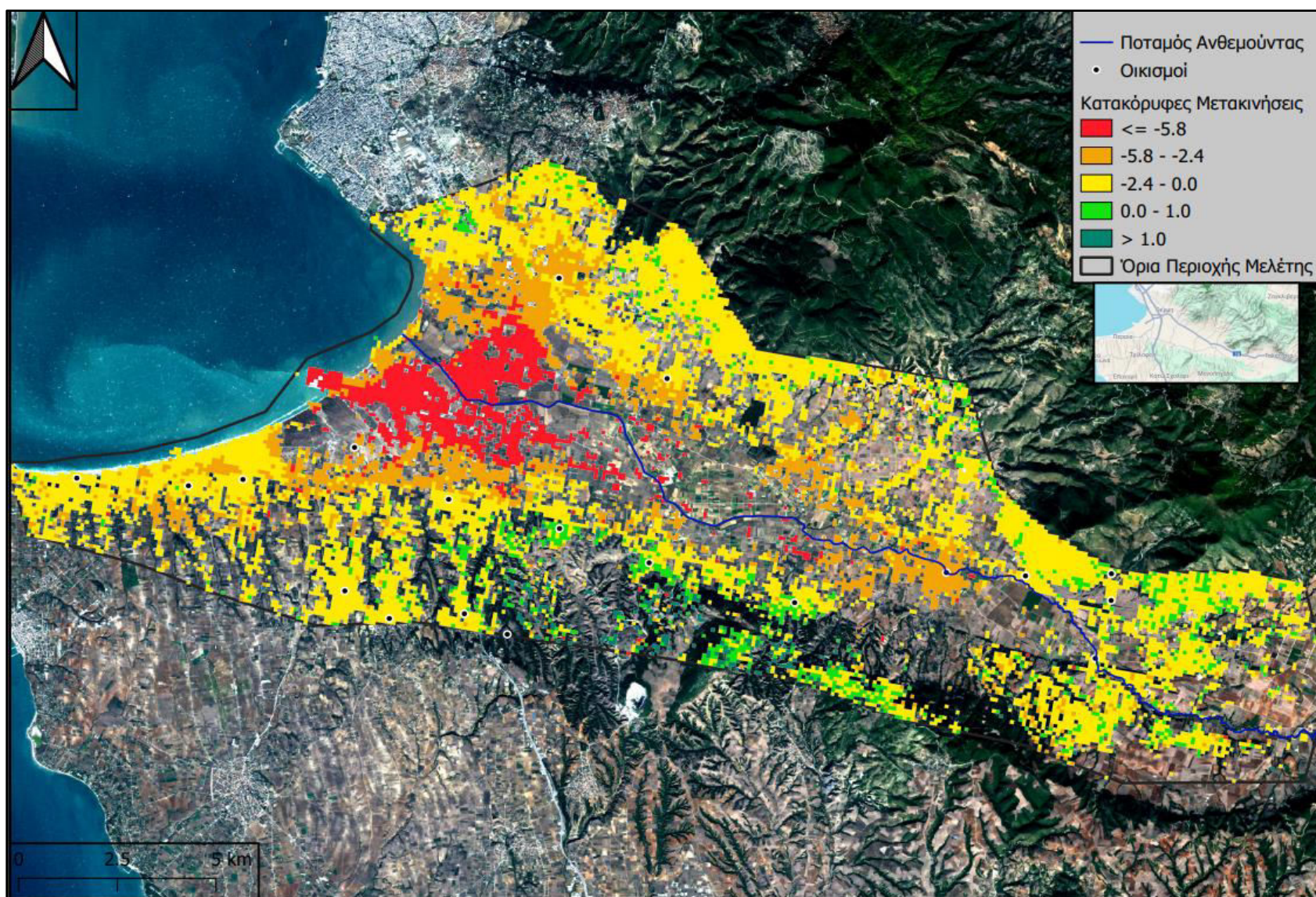
Χάρτης 3: Το υδρογραφικό δίκτυο και η λεκάνη απορροής



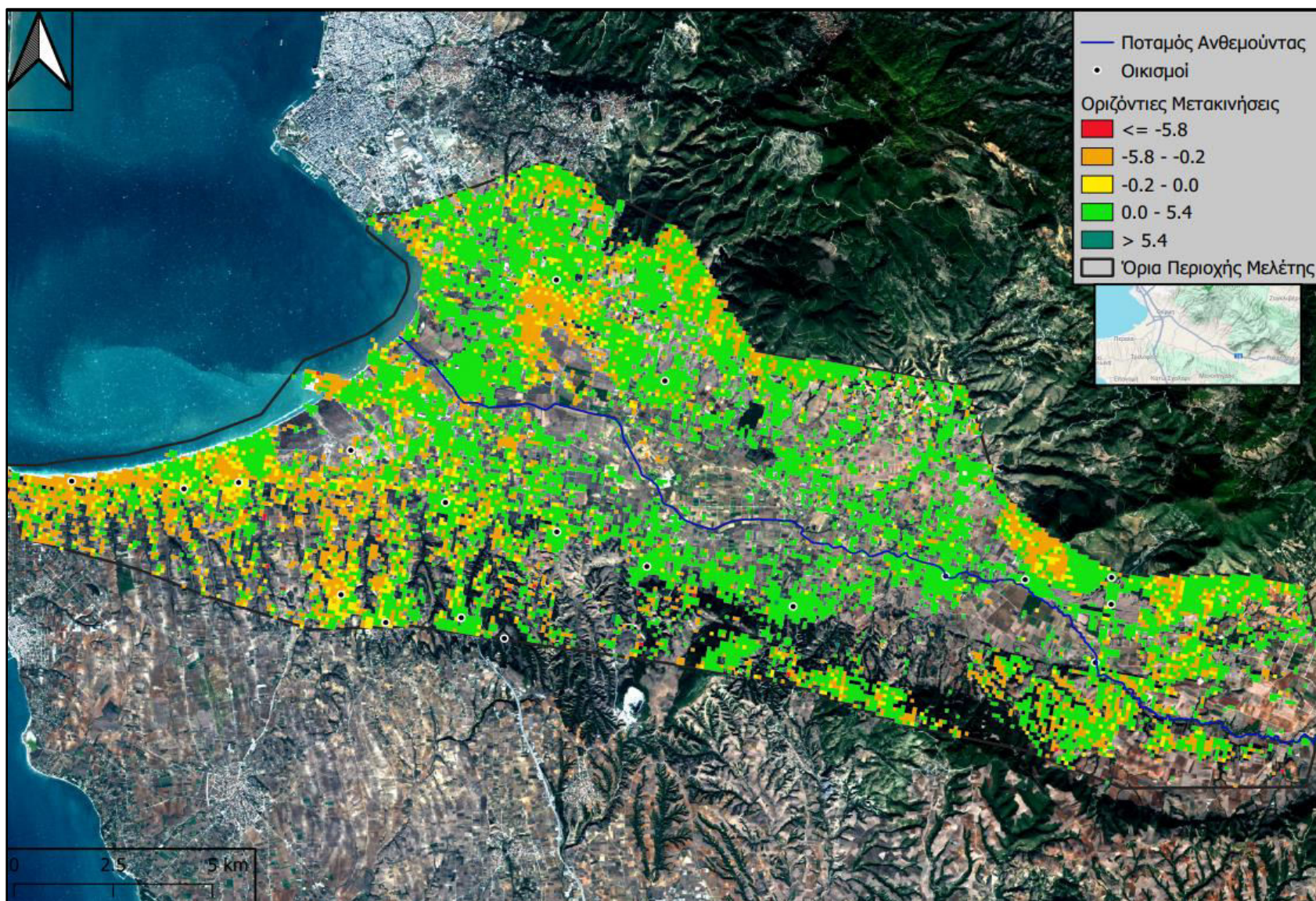
Χάρτης 4: Περιοχές εμφάνισης υπογείων υδάτων



Χάρτης 5: Πλημμυρικές καταγραφές



Χάρτης 6: Κατακόρυφες εδαφικές μικρομετακινήσεις (mm/year)



Χάρτης 7: Οριζόντιες μικρομετακινήσεις (mm/year)

4.3. Μεθοδολογική προσέγγιση

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα επιμέρους στάδια και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν με σκοπό τη δημιουργία του τελικού Χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης για το κύριο τμήμα της λεκάνης απορροής του ποταμού Ανθεμούντα, το οποίο αποτελεί και βασική στόχευση της παρούσας εργασίας.

4.3.1. Διαμόρφωση Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι πληροφορίες σχετικά με τους αντίστοιχους χάρτες των Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας, οι οποίοι δημιουργήθηκαν στο πλαίσιο της μεθοδολογικής προσέγγισης της παρούσας εργασίας. Η δημιουργία των χαρτών αυτών σε συνδυασμό με την αξιολόγηση τους, αλλά και την ανάλυση των χαρακτηριστικών τους αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της διαδικασίας για την προετοιμασία του Χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης για την περιοχή μελέτης. Για τη δημιουργία των χαρτών των ΘΕΠ αξιοποιήθηκαν στοιχεία από τη μελέτη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας καθώς και αξιολόγηση αντίστοιχων επιστημονικών εργασιών τόσο στην περιοχή μελέτης, όσο και σε περιοχές του ελλαδικού και μη χώρου, στις οποίες παρατηρούνται φαινόμενα υπεραντλήσεων και κατά συνέπεια εδαφικών υποχωρήσεων. Οι εργασίες αυτές προσέφεραν τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά στοιχεία για τη παραγωγή των χαρτών αυτών, ενώ λοιπά στοιχεία χωρικών δεδομένων αποκτήθηκαν από επίσημες ιστοσελίδες του κράτους. Τόσο οι ίδιοι οι χάρτες όσο και στατιστικά στοιχεία για την ανάλυση τους προέκυψαν μέσω διαδικασιών στα λογισμικά Arc-GIS 10.8 και Q-GIS, συναρτήσκει των δυνατοτήτων του κάθε προγράμματος κατά περίπτωση. Όλοι οι θεματικοί χάρτες που συμμετείχαν της εξαγωγή του Χάρτη Επιδεκτικότητας ψηφιοποιήθηκαν χειροκίνητα στα λογισμικά με τα αντίστοιχα layers να είναι σε διανυσματική μορφή, ενώ οι τελικοί χάρτες μετατράπηκαν και παράχθηκαν σε μορφή Raster υψηλής ακρίβειας (διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου 5x5 m.) μέσω εργαλείων του λογισμικού (Rasterize), ενώ όπου ήταν απαραίτητο ταξινομήθηκαν σε διακριτές κλάσεις (Classification). Λαμβάνοντας υπόψιν σχετικές επιστημονικές εργασίες, τη διεθνή βιβλιογραφία, αλλά και τα ιδιαίτερα γεωμορφολογικά, γεωτεκτονικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής που αποτελούν παράγοντες εμφάνισης των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων, δημιουργήθηκαν οι ακόλουθοι θεματικοί χάρτες. Επιπλέον, σε αρχικό στάδιο της εργασίας, αποκτήθηκε και Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους υψηλής ακρίβειας (pixel 5x5 m.), έπειτα από αίτημα που πραγματοποιήθηκε στο Ελληνικό Κτηματολόγιο. Ωστόσο, αξιολογώντας τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης, εξήχθη το συμπέρασμα ότι οι διαφοροποιήσεις του υψομέτρου της περιοχής, δεν αποτελούν βασικό και πρωταρχικό παράγοντα εμφάνισης ή / και ταχύτερης εξέλιξης των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων.

- Θεματικός χάρτης Χρήσεων Γης (Σχήμα 4.1.)
- Θεματικός χάρτης Ενοποιημένων Γεωλογικών Σχηματισμών (Σχήμα 4.3.)
- Θεματικός χάρτης Πτώσης Πιεζομετρικού Φορτίου (Σχήμα 4.5.)
- Θεματικός χάρτης Πάχους Τεταρτογενών Σχηματισμών (πάχος αλλουβιακών αποθέσεων κ.λπ.) (Σχήμα 4.8.)

- Θεματικός χάρτης Θέσεων Υδροληψίας (για αξιολόγηση των αποτελεσμάτων) (Σχήμα 4.2.)

Θεματικό Επίπεδο Χρήσεων Γης

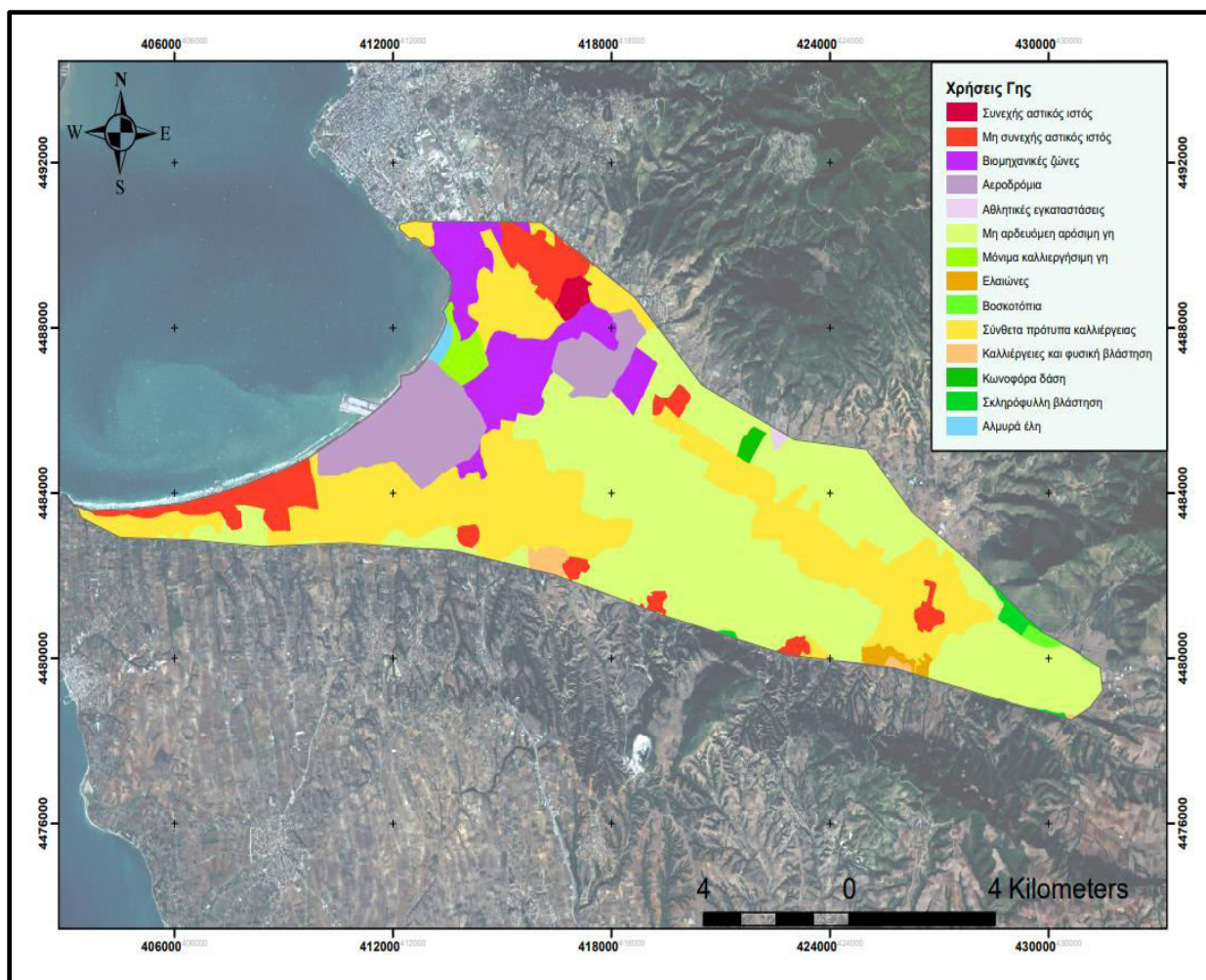
Το Θεματικό Επίπεδο των Χρήσεων Γης καθώς και ο αντίστοιχος Θεματικός Χάρτης αποτελούν σημαντική παράμετρο επηρεασμού του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων σε μια περιοχή μελέτης. Για την προετοιμασία του παρόντος ΘΕΠ λήφθηκαν δεδομένα πολυγωνικής διανυσματικής μορφής μέσω της ιστοσελίδας Corine Land Cover για το έτος 2018, ενώ τα δεδομένα έλαβαν επεξεργασία για την προσαρμογή της συγκεκριμένης έκτασης μελέτης. Ο τελικός χάρτης του ΘΕΠ παράχθηκε σε μορφή ράστερ υψηλής ακρίβειας με διαστάσεις μοναδιαίου στοιχείου 5 επί 5 μέτρα.

Στατιστικά στοιχεία για τα ποσοστιαία χαρακτηριστικά των χρήσεων γης που απαντώνται στην περιοχή μελέτης θα δοθούν σε επόμενη υποενότητα, ωστόσο κυρίαρχες χρήσεις γης του υπό μελέτης τμήματος της Λεκάνης του ποταμού Ανθεμούντα αποτελούν οι ακόλουθες:

- Συνεχής και μη αστικός ιστός
- Αεροδρόμια
- Εργοτάξια
- Βιομηχανικές και εμπορικές χρήσεις γης
- Ψυχαγωγικές εγκαταστάσεις
- Αρδευόμενες μορφές καλλιεργειών
- Μη αρδευόμενες μορφές καλλιεργειών
- Χορτολιβαδικές εκτάσεις και εκτάσεις με φυσική ή μεταβατική βλάστηση
- Διαφόρων ειδών δασώδεις εκτάσεις
- Ελαιώνες
- Υδάτινα στοιχεία

Με βάση τα παραπάνω δημιουργήθηκαν 14 κλάσεις για τις εμφανιζόμενες χρήσεις γης. Αξιοποιώντας τη διαθέσιμη βιβλιογραφία και σχετικές διερευνήσεις, η ιδιαιτερότητα της κάθε χρήσης γης επιβαρύνει διαφορετικά την εμφάνιση ή εξέλιξη των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων. Χρήσεις γης οι οποίες θεωρήθηκε ότι επηρεάζουν σημαντικά το εν λόγω φαινόμενο στην περιοχή της λεκάνης, λόγω των υψηλών απαιτήσεων σε ποσότητες άντλησης νερού με αποτέλεσμα και την αντίστοιχη ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα είναι οι περιοχές βιομηχανικών και εμπορικών εγκαταστάσεων καθώς και οι αρδευόμενες καλλιέργειες.

Ο χάρτης του ΘΕΠ, χρησιμοποιήθηκε στη δημιουργία του Χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης.



Σχήμα 4.1. ΘΕΠ Χρήσεων Γης

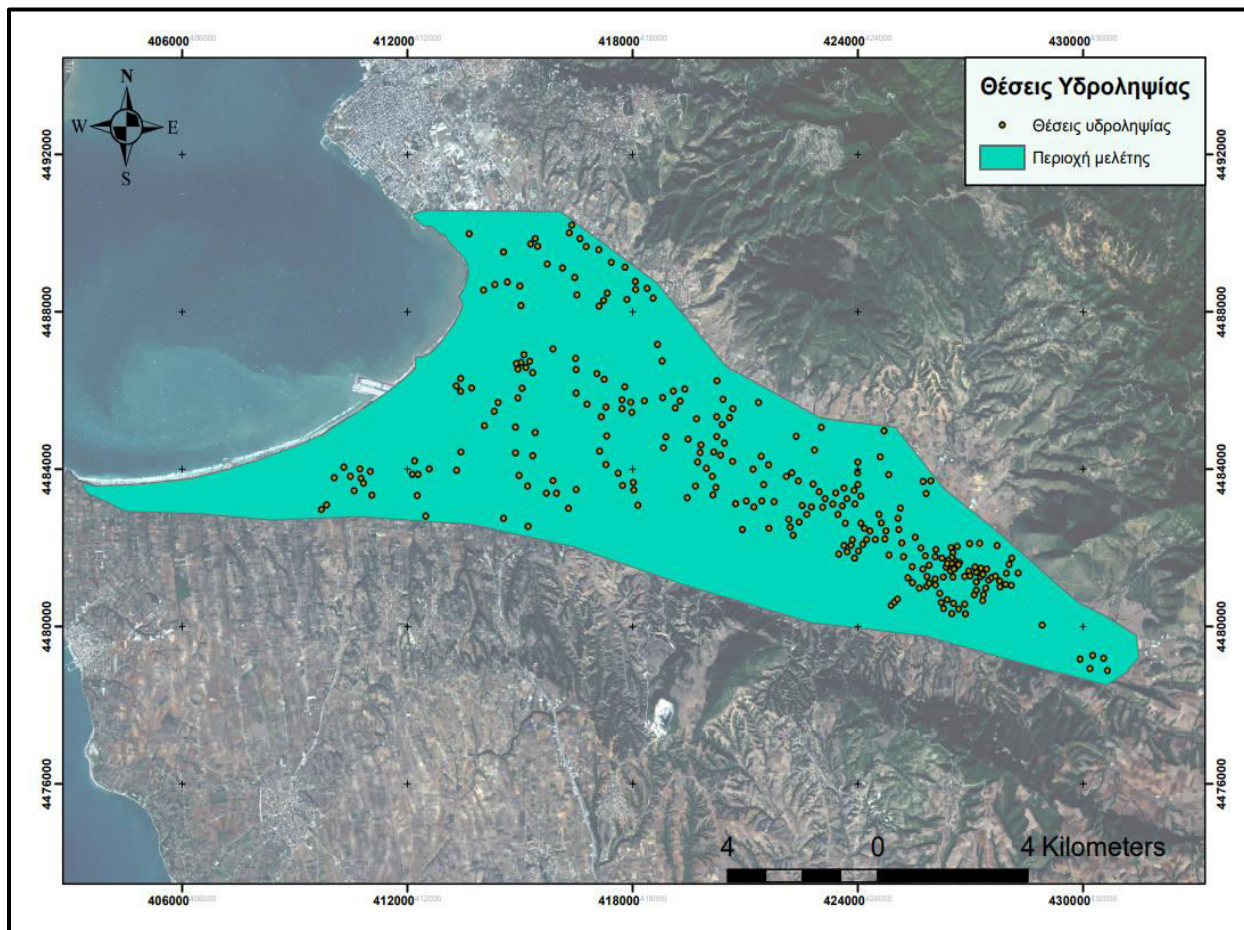
Θεματικό Επίπεδο Καταγραφής Θέσεων Υδροληψίας

Το παρόν ΘΕΠ περιλαμβάνει τις θέσεις εντός της περιοχής μελέτης στις οποίες πραγματοποιείται υδροληψία, όπως αυτές προέκυψαν αξιοποιώντας στοιχεία από το διαδραστικό χάρτη του greka.gr. Λαμβάνοντας υπόψιν τα εν λόγω δεδομένα, οι θέσεις αυτές ψηφιοποιήθηκαν μια προς μια κατά τη μέγιστη δυνατή χωρική ακρίβεια. Αναφέρεται επίσης ότι ψηφιοποιήθηκαν μόνο οι ενεργές θέσεις λήψης νερού, δηλαδή αυτές στις οποίες συνεχίζουν μέχρι και σήμερα να πραγματοποιούνται αντλήσεις.

Η ψηφιοποίηση πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον GIS και ο τελικός χάρτης παράχθηκε σε μορφή ράστερ ακρίβειας εικονοστοιχείου της τάξης των 5 μέτρων όπως και στις περιπτώσεις των υπόλοιπων θεματικών χαρτών.

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί οι θέσεις υδροληψίας είναι κατανομημένες άναρχα και σε μεγάλες πυκνότητες στο μεγαλύτερο τμήμα της υπό μελέτη περιοχής, γεγονός το οποίο θα

μπορούσε να δικαιολογήσει τα φαινόμενα υπεραντλήσεων που παρατηρούνται στην περιοχή. Το παρόν ΘΕΠ αξιοποιήθηκε για την αξιολόγηση του Χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης της περιοχής μελέτης, αλλά δε συμμετείχε κατά τη διαδικασία παραγωγής του.



Σχήμα 4.2. ΘΕΠ Θέσεων Υδροληψίας

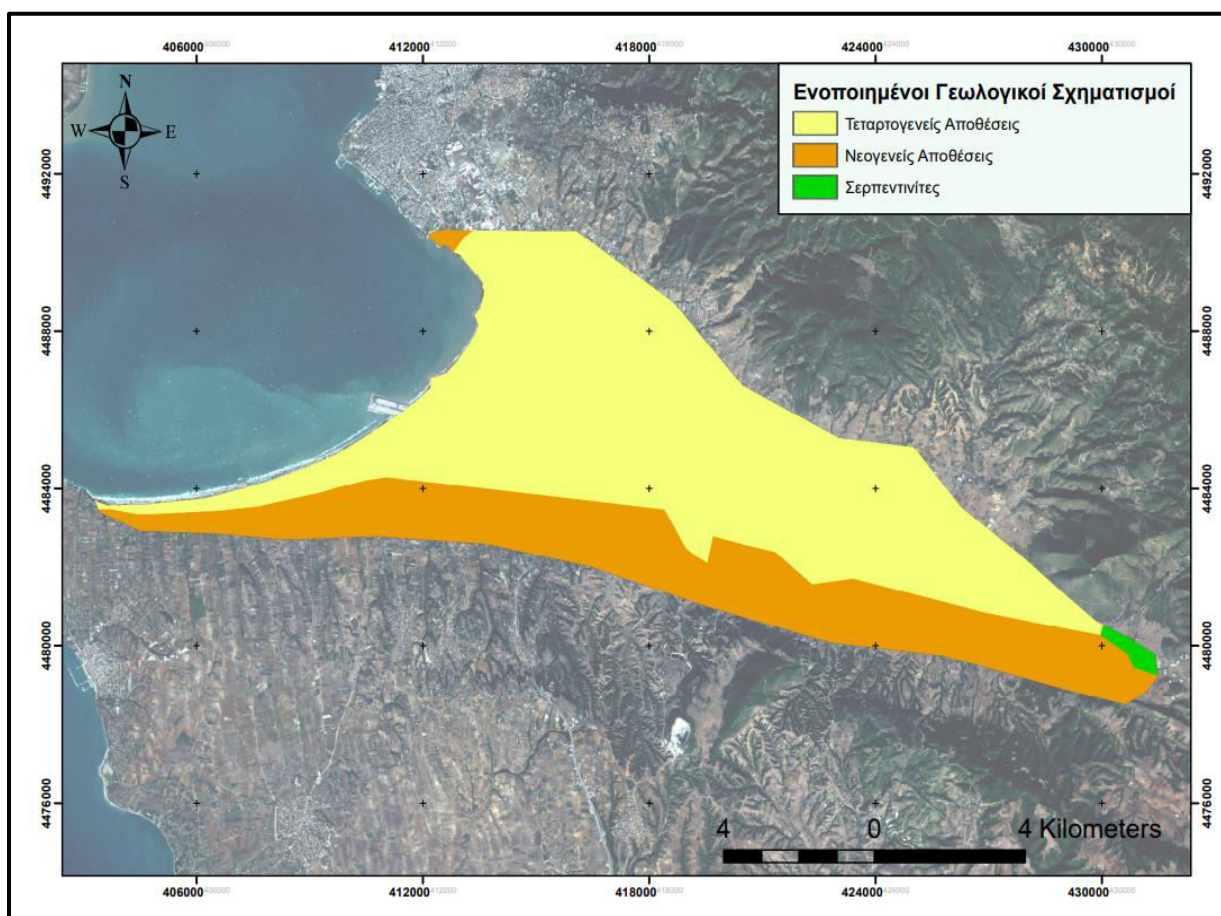
Θεματικό Επίπεδο Ενοποιημένων Γεωλογικών Ενοτήτων

Το γεωλογικό υπόβαθρο αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική παράμετρο ως προς την εκδήλωση και την εξέλιξη των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων. Για τη δημιουργία του συγκεκριμένου ΘΕΠ αξιοποιήθηκαν και ψηφιοποιήθηκαν συνδυαστικά στοιχεία όπως τρία φύλλα γεωλογικού χάρτη από την ΙΓΜΕ σε κλίμακα 1:50000 των περιοχών Θεσσαλονίκης, Θέρμης, Βασιλικών και Επανομής, σύγχρονα στοιχεία μέσω του γενικού Γεωλογικού Χάρτη της ΕΑΓΜΕ, καθώς και δεδομένα από την επιστημονική διερεύνηση των Loupasakis et. al., (2000). Το παρόν ΘΕΠ παράχθηκε σε μορφή ράστερ ακρίβειας εικονοστοιχείου της τάξης των 5 μέτρων.

Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψιν τη διαθέσιμη βιβλιογραφία δημιουργήθηκαν οι ενοποιημένοι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής μελέτης, οι οποίοι λόγω της μικρής έκτασης

της υπό ανάλυσης περιοχής διακρίθηκαν σε τρεις βασικές κλάσεις συναρτήσει της γεωλογικής τους ηλικίας αλλά και της συμπεριφοράς τους ως προς το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων. Αναλυτικά δεδομένα των γεωλογικών σχηματισμών έχουν δοθεί σε προηγούμενο υποκεφάλαιο. Οι τρεις κλάσεις της λεκάνης απορροής διακρίνονται ως εξής:

- Τεταρτογενείς αποθέσεις, οι οποίες εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης και αποτελούν βραδυτεκτονικά και μετατεκτονικά ιζήματα του Ολόκαινου (Αλλουβιακές αποθέσεις). Οι σχηματισμοί αυτοί με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία οι οποίοι εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή κατά μήκος της πορείας ροής του ποταμού Ανθεμόντα, αποτελούν τους περισσότερο επιρρεπείς ως προς τις εδαφικές υποχωρήσεις.
- Νεογενείς αποθέσεις, οι οποίες εντοπίζονται περιμετρικά ως επί το πλείστον των Τεταρτογενών και αποτελούν και πάλι βραδυτεκτονικά και μετατεκτονικά ιζήματα του Μειοπλειόκαινου.
- Πυριγενή πετρώματα (Σερπεντινίτες), τα οποία με βάση την οριοθέτηση της περιοχής μελέτης για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, εντοπίζονται σε μια μικρή περιοχή στα ανατολικά της λεκάνης.

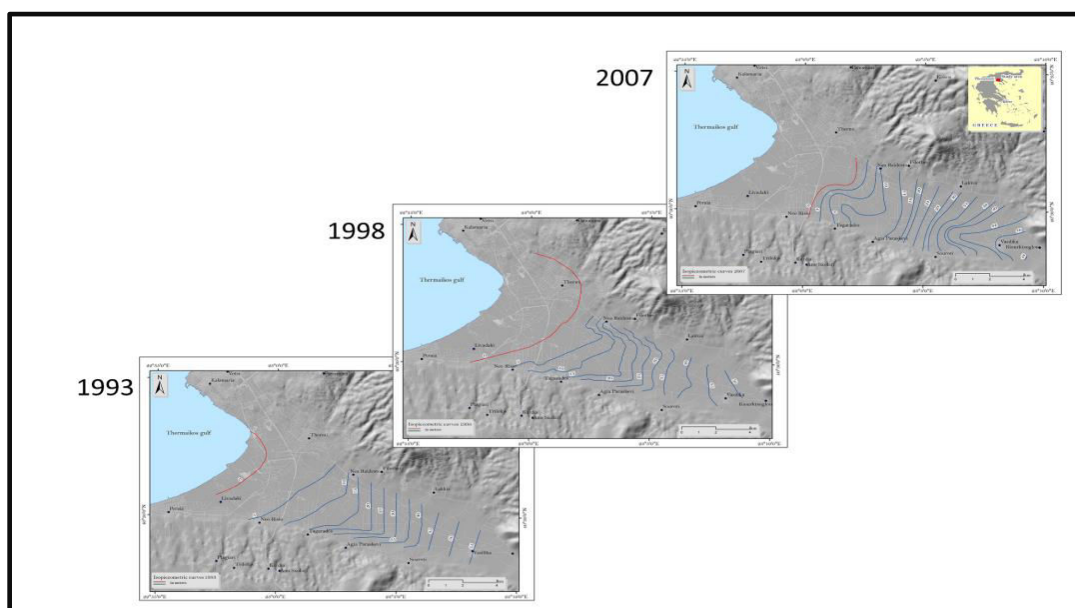


Σχήμα 4.3. ΘΕΠ Ενοποιημένων Γεωλογικών Σχηματισμών

Θεματικό Επίπεδο Πτώσης Πιεζομετρικού Φορτίου

Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ιδιαίτερα καθοριστικός παράγοντας ως προς την επιρροή στα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων αλλά και στην εξέλιξη τους, αποτελεί η πτώση του πιεζομετρικού φορτίου όπως αυτή μπορεί να παρατηρηθεί σε μια περιοχή μελέτης. Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ανθεμούντα, με τον μεγάλο αριθμό εν λειτουργία αντλιοστασίων, τη γεωργική και βαριά βιομηχανική φύση της, έχει αποτελέσει χαρακτηριστικό παράδειγμα περιοχής που υπόκειται σε τέτοια φαινόμενα, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα υποκεφάλαια συναρτήσει αρκετών επιστημονικών διερευνήσεων που έχουν πραγματοποιηθεί. Οι υπεραντλήσεις που λαμβάνουν χώρα για τους προαναφερθέντες σκοπούς, έχουν διαχρονικά οδηγήσει σε ταπείνωση των υπόγειων υδροφορέων. Το παρόν ΘΕΠ παράχθηκε σε μορφή ράστερ ακρίβειας εικονοστοιχείου της τάξης των 5 μέτρων, όπως και σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις.

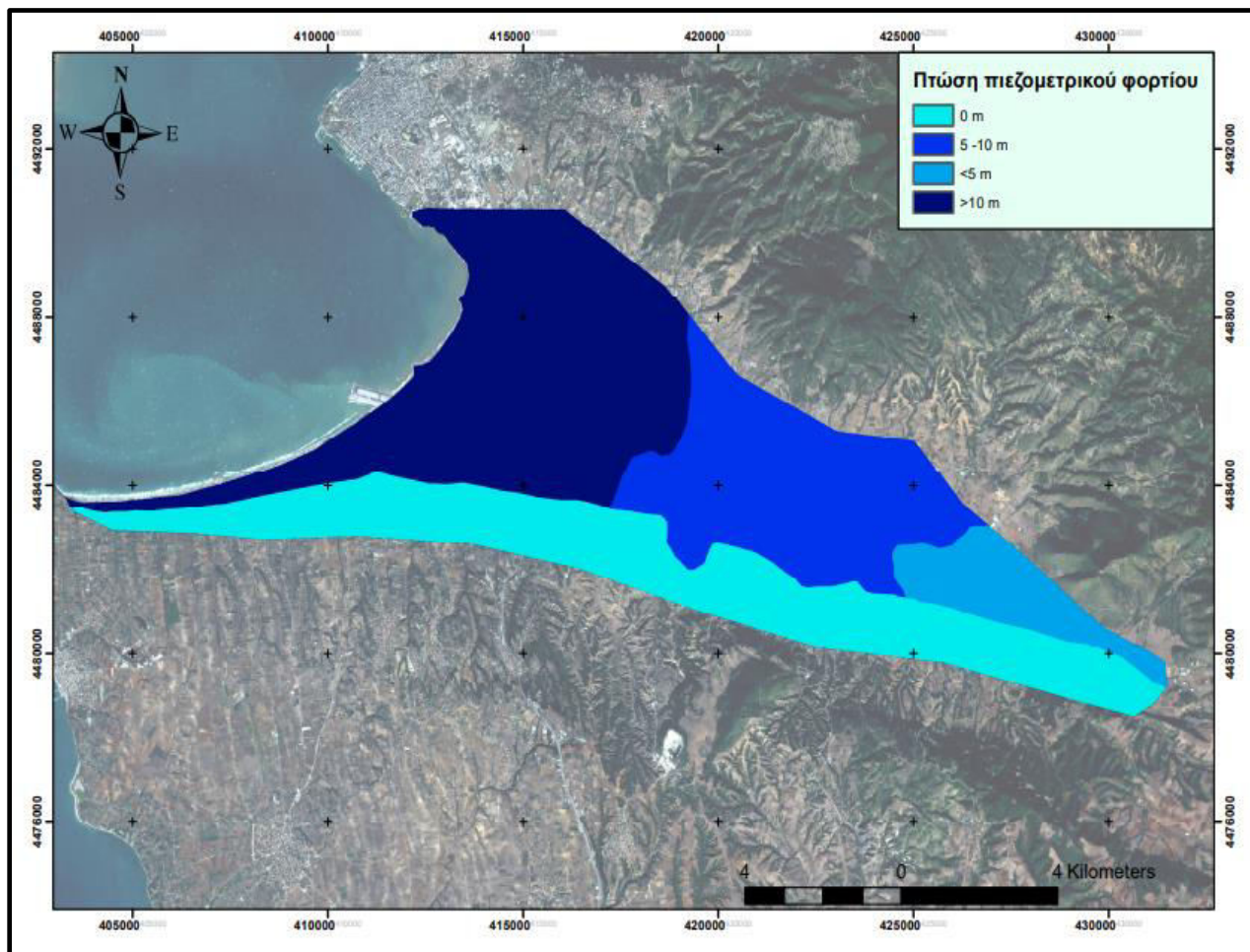
Για την ποσοτικοποίηση της πτώσης του πιεζομετρικού φορτίου και την εφαρμογή ζωνοποίησης στην περιοχή μελέτης, αξιοποιήθηκαν και μελετήθηκαν δεδομένα από την υπάρχουσα βιβλιογραφία και τις πραγματοποιηθείσες διερευνήσεις στην περιοχή μελέτης. Σημαντικά στοιχεία αποκτήθηκαν μέσω της εργασίας των Svigkas et al., (2020) μέσω της οποίας λήφθηκαν δεδομένα πιεζομετρικών καμπυλών για τρεις διαφορετικές χρονικές περιόδους (1993-1998-2007). (Σχήμα 4.4.)



Σχήμα 4.4. Πιεζομετρικές καμπύλες για τα έτη 1993, 1998 και 2007 (Svigkas et al., 2020)

Με βάση τις παραπάνω διαχρονικές παρατηρήσεις, προέκυψαν οι εξής 4 κλάσεις ως προς το επίπεδο πτώσης του πιεζομετρικού φορτίου από το 1993 έως το 2007:

- Λιγότερο από 5 μέτρα, κυρίως στα ανατολικά της λεκάνης προς τα Βασιλικά και το Γαλαρινό.
- Της τάξης των 5 - 10 μέτρων στην ευρύτερη περιοχή του εσωτερικού της λεκάνης και κυρίως στο κεντρικό της τμήμα.
- Περισσότερο από 10 μέτρα στην ευρύτερη περιοχή δυτικού τμήματος της λεκάνης έως τα παράλια του Θερμαϊκού.
- Μηδενική πτώση του πιεζομετρικού φορτίου στα νότια της λεκάνης στις θέσεις των Νεογενών σχηματισμών νοτίως του ρήγματος Ανθεμούντα.



Σχήμα 4.5. ΘΕΠ Πτώσης Πιεζομετρικού Φορτίου

Θεματικό Επίπεδο Πάχους Τεταρτογενών Σχηματισμών

Αξιοποιώντας τις υπάρχουσες βιβλιογραφικές πηγές και τις σχετικές με τις εδαφικές υποχωρήσεις επιστημονικές προσεγγίσεις, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που σχετίζεται με την εμφάνιση του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων, αλλά και της έντασης του,

αποτελεί το πάχος των Τεταρτογενών αποθέσεων. Η λεκάνη απορροής του ποταμού, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενα υποκεφάλαια, αποτελείται στο εσωτερικό τμήμα της από ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών οι οποίοι ανήκουν στη σχετική κατηγορία, όπως αναλυτικά έχει αναφερθεί στα τμήματα της εργασίας τα οποία περιγράφουν τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών αυτών είναι τέτοια, τα οποία υπό τις κατάλληλες συνθήκες φέρουν επιρρέπεια ως προς την εμφάνιση εδαφικών υποχωρήσεων, ήτοι σε περιπτώσεις υπεραντλήσεων και ταπείνωσης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Σε αυτή την περίπτωση, όπως άλλωστε και σε όλες τις υπόλοιπες, ο παραγόμενος χάρτης ήταν σε μορφή ράστερ ακρίβειας εικονοστοιχείου της τάξης των 5 μέτρων.

Σύμφωνα με στοιχεία της ΕΑΓΜΕ (www.eagme.gr), παρακάτω περιγράφονται χαρακτηριστικά των Νεογενών και Τεταρτογενών σχηματισμών της περιοχής μελέτης, οι οποίες καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό της εξεταζόμενης περιοχής:

- Οι Νεογενείς σχηματισμοί αποτελούνται από αποθέσεις και Μολασσικά ιζήματα Θράκης μεικτών φάσεων όπως άργιλοι, άμμοι, μάργες, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι σε ενστρώσεις μικρού πάχους. Ουσιαστικά πρόκειται για θαλάσσιες, λιμνοθαλάσσιες και λιμναίες αποθέσεις πάχους μέχρι πολλών εκατοντάδων μέτρων. Η υδροπερατότητα των σχηματισμών διαφοροποιείται ανάλογα τη σύσταση και των αλληλουχία των επιμέρους οριζόντων με αποτέλεσμα σε κάποιες περιπτώσεις να δημιουργούνται ελεύθεροι ή και υπό πίεση υδροφόρων τοπικής σημασίας. Οι λεπτομερείς οριζόντες φέρουν παχύ μανδύα με συχνή εκδήλωση επιφανειών θραύσεων και ολισθήσεων. Οι σχηματισμοί αυτοί δεν παρουσιάζουν μεγάλης έκτασης και σοβαρότητας κατολισθητικά φαινόμενα. Η ετερογένεια των σχηματισμών (σε μακροκλίμακα), και κυρίως οι πλευρικές εξελίξεις και αποσφηνώσεις των οριζόντων, συντελούν στην ανομοιομορφη και ανισότροπη συμπεριφορά αυτών στο σύνολό τους και την ταχεία μεταβολή των μηχανικών χαρακτηριστικών στους επί μέρους οριζόντες τόσο στην πλευρική όσο και την κατακόρυφη ανάπτυξη. Συνεπώς, η συνοχή ποικίλλει σε ευρύτατα όρια σε συνάρτηση με ορισμένους πρωτογενείς όπως η αρχική λιθολογική σύσταση, η διαγένεση, η φύση του συνδετικού υλικού, η κοκκομετρία κ.λπ, αλλά και δευτερογενείς όπως η εξαλλοίωση και η αποσάθρωση. Οι ψαμμίτες και τα κροκαλοπαγή χαρακτηρίζονται (σε υγιή κατάσταση), από υψηλές τιμές συνοχής και διατμητικής αντοχής.
- Οι Τεταρτογενείς σχηματισμοί αποτελούνται από Τεταρτογενή χαλαρά, μικτών φάσεων όπως αργιλοίλυες, άμμοι, ψηφίδες, χάλικες και κροκάλες ποικίλης διαβάθμισης και σε κυμαινόμενα ποσοστά. Αποτελούν αποθέσεις χαμηλών περιοχών, κοιλάδων, χειμάρρων και προέρχονται από τη διάβρωση και απόπλυση παλαιότερων σχηματισμών ποικίλης σύστασης. Έχουν συχνά σημαντικό πάχος, που φθάνει τις μερικές εκατοντάδες μέτρων και χαρακτηρίζονται από συχνές και ταχείες μεταβολές της λιθολογικής σύστασης και κοκκομετρίας κατά την οριζόντια και κατακόρυφη εξάπλωση του εκάστοτε σχηματισμού. Επίσης, χαρακτηρίζονται από μέτρια έως υψηλή υδροπερατότητα με αποτέλεσμα να δημιουργούν συνήθως υδροφόρους οριζόντες μεγάλης δυναμικότητας και με έντονες διακυμάνσεις. Λόγω της εκτεταμένης επιφανειακής τους εξάπλωσης επί αυτών έχουν αναπτυχθεί κατά το μεγαλύτερο μέρος οι οικισμοί της περιοχής και συχνά εμφανίζουν γεωτεχνικά προβλήματα καθιζήσεων και εδαφικών μετακινήσεων. Είναι επιδεκτικοί ευχερούς διάβρωσης και απόπλυσης. Τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά τους ποικίλουν ανάλογα με την επί μέρους λιθολογική σύσταση και κοκκομετρία, ενώ η συμπεριφορά τους ελέγχεται εκτός των ανωτέρω και από το πάχος των αποθέσεων και

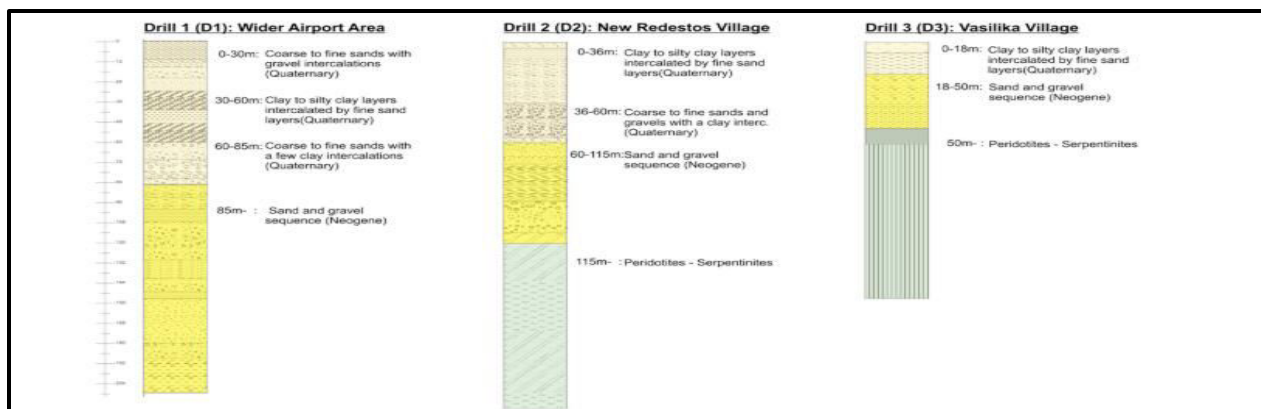
την κλίση του εδάφους (ιδιαίτερα στις δυναμικές φορτίσεις). Τέλος, παρουσιάζουν ταχείες πλευρικές μεταβολές στη λιθολογική σύσταση, που συνεπάγονται, σε μακροκλίμακα, ισχυρή ανισοτροπία στη μηχανική συμπεριφορά του σχηματισμού.

Παρακάτω δίνονται σε μορφή πίνακα (Πίνακας 4.1.) κάποια φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των Τεταρτογενών σχηματισμών της περιοχής μελέτης ενώ τα εύρη τιμών έχουν προκύψει από εργαστηριακές δοκιμές στη λεπτομερή κυρίως φάση τους.

Πίνακας 4.1. Γεωτεχνικές παράμετροι για τις Τεταρτογενείς αποθέσεις (πηγή: www.eagme.gr)

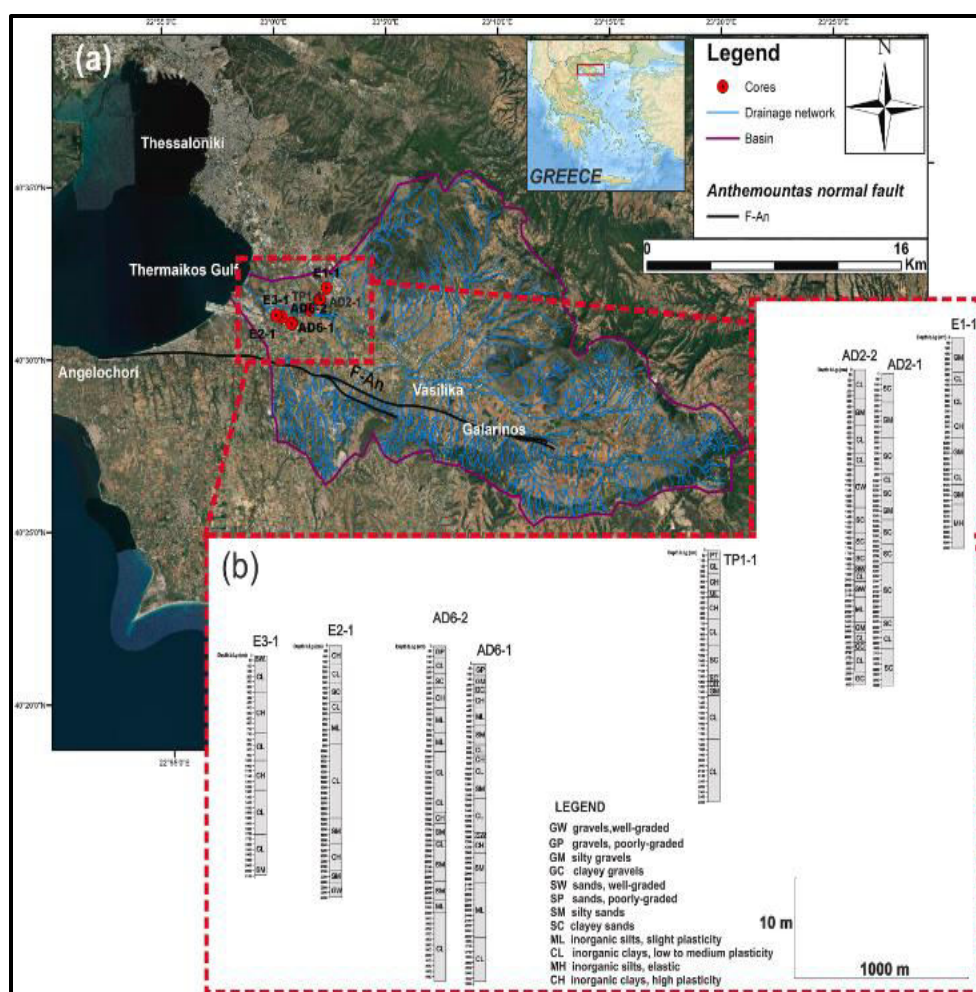
<u>Παράμετρος</u>	<u>Εύρη τιμών</u>
γ_b	1,8 - 2,2 gr/cm ³
W_{LL}	20 - 46%
W_{PL}	8 - 30%
c	0,2 - 0,5 Kg/cm ²
φ	15° - 35°
q_u	0,5 - 3,5 Kg/cm ²

Για τη ζωνοποίηση του πάχους των Τεταρτογενών αποθέσεων στη λεκάνη απορροής συλλέχθηκαν και αξιοποιήθηκαν στοιχεία γεωτρήσεων από υπάρχουσες επιστημονικές διερευνήσεις. Σύμφωνα με τους Loupasakis et al., (2013), το πάχος των σχηματισμών βαίνει μειούμενο από τα δυτικά προς τα ανατολικά της λεκάνης (Σχήμα 4.6.):



Σχήμα 4.6. Στοιχεία γεωτρήσεων (Loupasakis et al., 2013)

Αντίστοιχα, παρατηρώντας δεδομένα από την επιστημονική διερεύνηση των Doani et al., (2021), μπορεί να παρατηρηθεί το ιδιαίτερα μεγάλο πάχος των αποθέσεων στην ευρύτερη περιοχή του αεροδρομίου, κοντά στο δέλτα του ποταμού. (Σχήμα 4.7.)

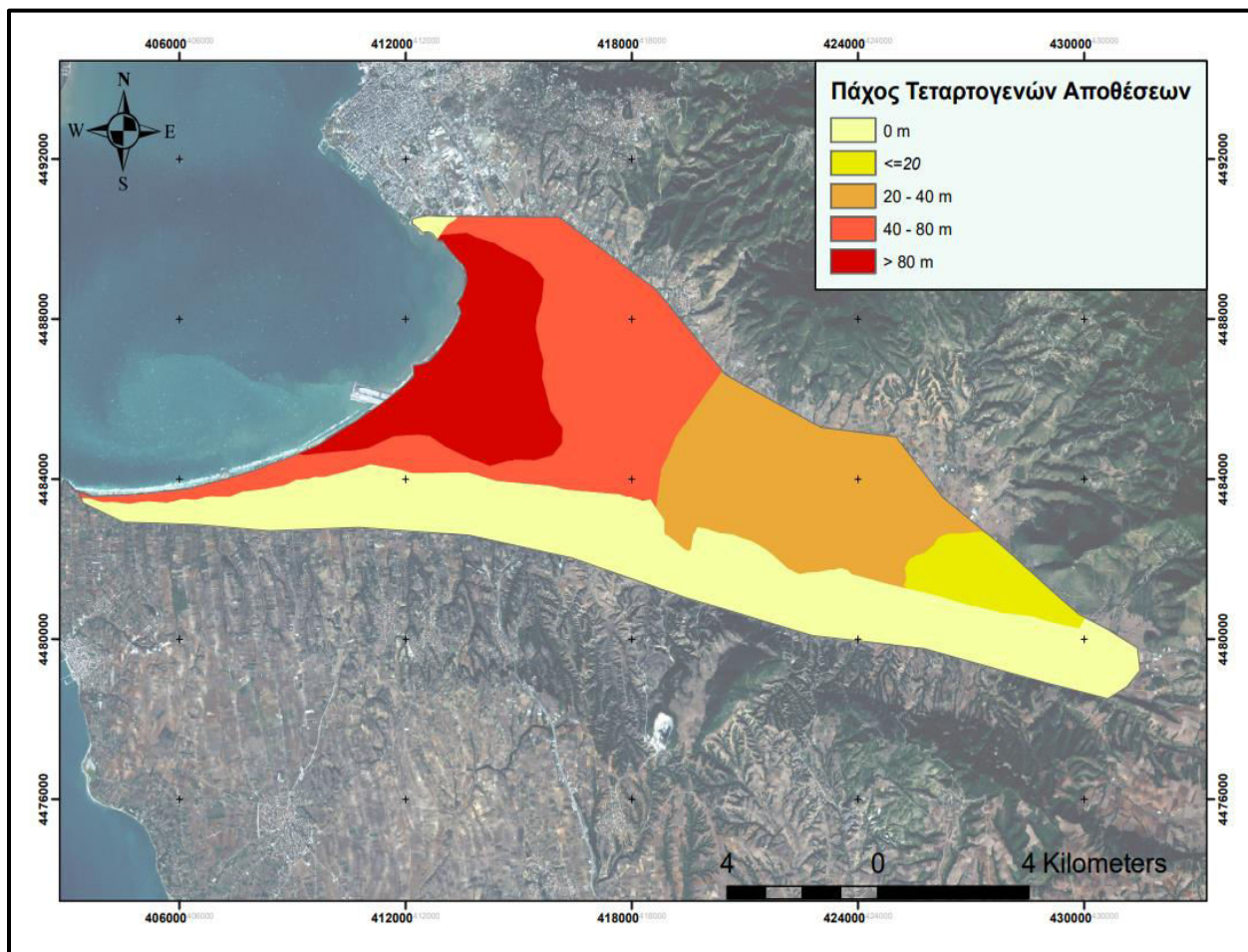


Σχήμα 4.7. Στοιχεία γεωτρήσεων για την ευρύτερη περιοχή του αεροδρομίου (Doani et al., 2021)

Συνεκτιμώντας συνεπώς τις παραπάνω πληροφορίες, κατά τη δημιουργία του ΘΕΠ, δημιουργήθηκαν οι εξής 5 κλάσεις επί της περιοχής μελέτης, αναφορικά με το πάχος των Τεταρτογενών αποθέσεων:

- Πάχος μεγαλύτερο των 80 μέτρων, για την περιοχή κοντά στις εκβολές του Ανθεμούντα.
- Πάχος μεγαλύτερο 40 - 80 μέτρα ανατολικότερα της περιοχής του αεροδρομίου.
- Πάχος έως 40 μέτρα κατά την κίνηση προς ανατολάς
- Πάχος έως 20 μέτρα στα ανατολικά, πλησίον της περιοχής των Βασιλικών.
- Μηδενικό πάχος στα τμήματα της λεκάνης που η γεωλογία της δεν αποτελείται από Τεταρτογενείς αποθέσεις.

Ο σχετικός θεματικός χάρτης παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Σχήμα 4.8. ΘΕΠ Πάχους Τεταρτογενών Αποθέσεων

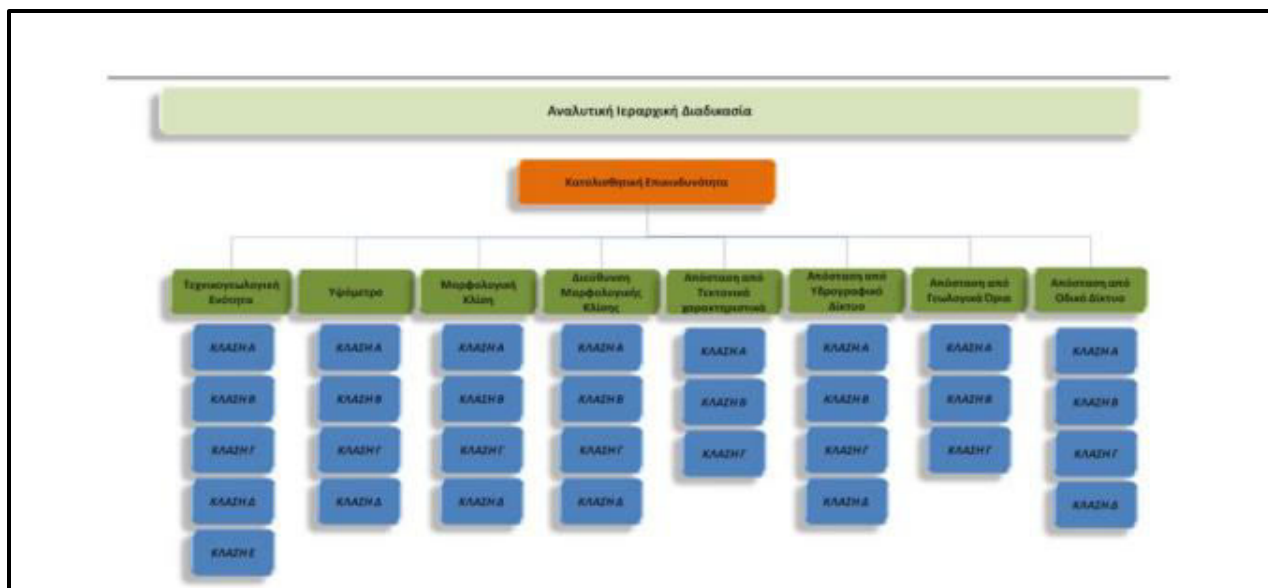
4.3.2. Μεθοδολογία

Στο παρόν υποκεφάλαιο περιγράφεται η μέθοδος της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (AHP) μέσω εφαρμογής της οποίας σε περιβάλλον Arc-GIS αξιοποιώντας τα εργαλεία του παράχθηκε ο τελικός Χάρτης Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης για την περιοχή μελέτης.

Σύμφωνα με τον Τσαγγαράτο, (2012), η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία αναπτύχθηκε στο Whaton School of Business, από τον Tohmas Saaty στα τέλη της δεκαετίας του 70' (Saaty, 1980). Βασίζεται σε τρεις αρχές:

- στην αρχή της αποσύνθεσης,
- στην αρχή των συγκριτικών κρίσεων
- και την αρχή της σύνθεσης προτεραιοτήτων (Malczewski, 1999).

Η αρχή της αποσύνθεσης αφορά στην ικανότητα της μεθόδου να διαρθρώνει ιεραρχικά ένα πολύπλοκο πρόβλημα, να ερευνά κάθε επίπεδο ιεραρχίας χωριστά, και να συνδυάζει τα αποτελέσματα καθώς εξελίσσεται η ανάλυση. Η αρχή των συγκριτικών κρίσεων αφορά στη δημιουργία ενός πίνακα προκειμένου να πραγματοποιηθούν κατά ζεύγη συγκρίσεις της σχετικής σημασίας των στοιχείων στο δεύτερο. Η κλιμακωτή αυτή διαδικασία εκφράζεται με βαρύτητες προτεραιότητας ή βαθμολογίες για την κατάταξη των εναλλακτικών δυνατοτήτων (Saaty, 1986). Το ζητούμενο, ήτοι ο υπολογισμός της επιδεκτικότητας, αναλύεται σε μια ιεραρχική δομή, μορφή δέντρου. Στην κορυφή του δέντρου, οριοθετείται η επιδεκτικότητα, η οποία αναλύεται σε πρώτο επίπεδο στις μεταβλητές και σε δεύτερο επίπεδο στις κλάσεις που αντιστοιχούν σε κάθε μεταβλητή. Το συγκεκριμένο παράδειγμα αφορά στην περίπτωση υπολογισμού της Κατολισθητικής Επιδεκτικότητας (Σχήμα 4.9.):



Σχήμα 4.9. Η μέθοδος AHP για τις κατολισθήσεις (Τσαγγαράτος, 2012)

Σύμφωνα με τους Τσαγγαράτος, (2012), Satty, (2008), Naumann, (1998) και Φερεντίνου & Χαλκιάς, (2012) η διαδικασία εφαρμογής ακολουθεί της παρακάτω βήματα:

- Κατανόηση του προβλήματος και η δημιουργία της ιεραρχικής δομής όπως αυτή παρουσιάστηκε παραπάνω για την περίπτωση των κατολισθήσεων.
- Σύγκριση κάθε στοιχείου του προβλήματος κατά ζεύγη συναρτήσει μιας κλίμακας σύγκρισης ως προς το βαθμό προτίμησης του ενός έναντι του άλλου επαναληπτικά τόσο για τις μεταβλητές όσο και για τις επιμέρους κλάσεις κάθε μεταβλητής.
- Οργάνωση των αποτελεσμάτων των συγκρίσεων σε πίνακες όπου πάντα η διαγώνια τιμή θα είναι το 1. Σε κάθε περίπτωση όταν ένα υπό μελέτη κριτήριο της σειράς i είναι πιο σημαντικό από ένα κριτήριο της σειράς j , τότε το κελί λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη του 1 και αντίστροφα.
- Στη συνέχεια υπολογίζονται τα σχετικά βάρη και οι σχετικές προτεραιότητες κάθε παραμέτρου καθώς και των κλάσεων των παραμέτρων μέσω των υπό σύγκριση πινάκων.
- Στη συνέχεια για τον προσδιορισμό της ποιότητας του κάθε πίνακα σύγκρισης υπολογίζεται ο δείκτης συνέπειας ως εξής:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (\text{Εξ. 5.1.})$$

Όπου $\lambda_{\max}$ η μέγιστη ιδιοτιμή στοιχείου Γραμμικής Άλγεβρας και n ο αριθμός των παραμέτρων ή κλάσεων που εξετάζονται αντίστοιχα.

Επίσης, ένας ακόμη δείκτης ποιότητας που εφαρμόζεται τακτικά είναι ο λόγος συνέπειας CR υπολογίζεται ως εξής:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Εξ. 5.2.})$$

Όπου RI ο τυχαίος δείκτης συνέπειας ο οποίος προκύπτει ως η μέση τιμή των δεικτών συνέπειας από τυχαίους πίνακες συγκρίσεων διαφόρων διαστάσεων και ακολουθούν την κλίμακα 1/9, 1/8, ..., 1, 8,9. Επιπλέον, σε περίπτωση που ο CR είναι μικρότερος από 0.10, τότε ο πίνακας θεωρείται ασυνεπής και οι τιμές σύγκρισης πρέπει να διαφοροποιηθούν. (Σχήμα 4.10.)

- Ο τελικός δείκτης της Επιδεκτικότητας (πχ. για την περίπτωση των κατολισθήσεων) υπολογίζεται μέσω της παρακάτω εξίσωσης κατά της μέθοδο Weighted Linear Combination:

$$LSI = \sum_{j=1}^n W_j w_{ij} \quad (\text{Εξ. 5.3.})$$

Όπου, LSI ο δείκτης κατολισθητικής επιδεκτικότητας, W_j η βαρύτητα της παραμέτρου j , w_{ij} ο συντελεστής βαρύτητας της κλάσης i στην παράμετρο j και n ο αριθμός των παραμέτρων.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Σχήμα 4.10. Τιμές του RI (Τσαγγαράτος, 2012)

Τιμή	Ορισμός	Εξήγηση
1	Ίση σπουδαιότητα	Και οι δύο παράγοντες συμβάλλουν εξίσου στον στόχο ή το κριτήριο.
3	Μικρή σπουδαιότητα ενός σε σχέση με άλλον	Η πείρα και η κρίση ευνοούν ελαφρώς τον έναν παράγοντα σε σχέση με τον άλλον.
5	Βασική ή μεγάλη σπουδαιότητα	Η πείρα και η κρίση ευνοούν σαφώς τον έναν παράγοντα σε σχέση με τον άλλον.
7	Πολύ ισχυρή ή αποδεδειγμένη σπουδαιότητα	Ένας παράγοντας ευνοείται ιδιαίτερα σε σχέση με έναν άλλον. Η κυριαρχία του αποδεικνύεται στην πράξη.
9	Απόλυτη σπουδαιότητα σε σχέση με άλλον	Τα στοιχεία που ευνοούν έναν παράγοντα είναι αδιαμφισβήτητα.
2,4,6,8	Ενδιάμεσες τιμές	Χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται συμβιβασμός.
0	Καμία σχέση	Ο παράγοντας δεν συμβάλλει στον στόχο.

Σχήμα 4.11. Κλίμακα συγκρίσεων κατά AHP (Τσαγγαράτος, 2012)

Αξιοποιώντας τις προαναφερθείσες διαδικασίες της μεθόδου, παρακάτω παρουσιάζονται σχετικοί πίνακες, όπως αυτοί δημιουργήθηκαν σε περιβάλλον Excel. Οι πίνακες αυτοί αφορούσαν τόσο στη βαθμολόγηση της σπουδαιότητας των τεσσάρων υπό μελέτη παραμέτρων μεταξύ τους αναφορικά με τη συμμετοχή τους στην πιθανότητα εμφάνισης και εξέλιξης του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων, όσο και στη βαθμολόγηση των επιμέρους κλάσεων της κάθε παραμέτρου. (Πίνακες 4.2.– 4.11.)

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ												
ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	[4]	VP	CP	D	E=(D/CP)	λ_{max}	CI	RI	CR=(CI/RI)
[1] ΧΡΗΣΙΣΤΗΣ	1	1/4	1/3	1/3	0,4082	0,0883	0,3562	4,0319	4,0206	0,0069	0,9000	0,007628
[2] ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	4	1	2	2	2,0000	0,4327	1,7439	4,0299				
[3] ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	3	1/2	1	1	1,1067	0,2395	0,9603	4,0103				
[4] ΠΛΗΧΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ	3	1/2	1	1	1,1067	0,2395	0,9603	4,0103				
					4,6216							

Πίνακας 4.2. Συντελεστές βαρύτητας παραμέτρων

Παρατηρώντας τον παραπάνω πίνακα αναφέρεται ότι οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας που επιλέχθηκαν για τη βαθμολόγηση της συμμετοχής των παραμέτρων ανά δύο, αποτέλεσαν συνάρτηση της διαθέσιμης βιβλιογραφίας, των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης αλλά και προσωπικής κρίσης. Επιπλέον, μετά τους απαραίτητους υπολογισμούς των ιδιοδιανυσμάτων όπως μπορεί να παρατηρηθεί, ο λόγος συνέπειας CR προέκυψε μικρότερος από 0.10, γεγονός που σημαίνει ότι ο πίνακας μπορεί να θεωρηθεί συνεπής και δεν απαιτήθηκε αναπροσαρμογή των συντελεστών βαρύτητας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι πίνακες για τις επιμέρους παραμέτρους κατά της εφαρμογή της ΑΗΡ.

ΧΡΗΣΕΙΣ															VP	CP	D	E=(D/CP)	λ_{max}	CI	RI	CR=(CI/RI)
ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]								
[1] ΣΥΝΕΧΗΣΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	1	2	1/5	3	5	5	1/5	2	3	1/5	1/3	5	5	5	1,5029	0,0717	1,1440	15,9453	15,5810	0,1216	1,5700	0,077463
[2] ΜΗ ΣΥΝΕΧΗΣΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	1/2	1	1/7	2	4	4	1/7	2	3	1/7	1/3	5	5	5	1,1918	0,0569	0,9121	16,0319				
[3] ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΣΧΗΜΕΣ	5	7	1	7	7	7	1/2	5	6	1/2	2	7	7	7	3,6015	0,1719	2,6840	15,6114				
[4] ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ	1/3	1/2	1/7	1	2	2	1/5	2	2	1/5	1/2	3	3	3	0,8932	0,0426	0,6264	14,6902				
[5] ΑΘΛΗΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	1/5	1/4	1/7	1/2	1	2	1/5	1/2	2	1/5	1/3	3	3	3	0,6531	0,0312	0,4782	15,3383				
[6] ΜΗ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΗ ΑΡΟΣΙΜΗ ΓΗ	1/5	1/4	1/7	1/2	1/2	1	1/7	2	3	1/5	1/2	3	3	3	0,6757	0,0323	0,5148	15,9596				
[7] ΜΟΝΙΜΑ ΚΑΛΛΙΕΡΘΙΜΗ ΓΗ	5	7	2	5	5	7	1	5	7	3	5	7	7	9	4,7336	0,2260	3,5661	15,7811				
[8] ΕΛΑΙΩΝΕΣ	1/2	1/2	1/5	1/2	2	1/2	1/5	1	2	1/5	1/4	5	5	5	0,8203	0,0392	0,6064	15,4839				
[9] ΒΟΣΚΟΤΟΠΙΑ	1/3	1/3	1/6	1/2	1/2	1/3	1/7	1/2	1	1/5	1/4	3	3	3	0,5329	0,0254	0,3824	15,0326				
[10] ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΛΛΙΕΡΘΕΑΣ	5	7	2	5	5	5	1/3	5	5	1	5	7	7	7	3,7876	0,1808	2,9070	16,0773				
[11] ΚΑΛΛΙΕΡΘΕΑΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	3	3	1/2	1/2	3	2	1/5	4	4	1/5	1	5	5	5	1,6469	0,0786	1,2864	16,3625				
[12] ΚΟΝΟΦΟΡΑ ΔΑΣΗ	1/5	1/5	1/7	1/3	1/3	1/3	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	1	1	1/2	0,2893	0,0138	0,2113	15,2978				
[13] ΣΚΛΗΡΟΦΥΛΛΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	1/5	1/5	1/7	1/3	1/3	1/3	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	1	1	1/2	0,2893	0,0138	0,2113	15,2978				
[14] ΑΛΜΥΡΑ ΕΓΗ	1/5	1/5	1/7	1/3	1/3	1/3	1/9	1/5	1/3	1/7	1/5	2	2	1	0,3297	0,0157	0,2396	15,2245				
															20,9479							

Πίνακας 4.3. Εφαρμογή της ΑΗΡ για την παράμετρο Χρήσεις Γης

ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ											
ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	VP	CP	D	E=(D/CP)	λmax	CI	RI	CR=(CI/RI)
[1] ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	1	4	8	3,1748	0,6986	2,1615	3,0940	3,0940	0,0470	0,5800	0,081048
[2] ΝΕΟΓΕΝΕΙΣ ΑΠΟΘΕΣΕΙΣ	1/4	1	5	1,0772	0,2370	0,7334	3,0940				
[3] ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΕΣ	1/8	1/5	1	0,2924	0,0643	0,1991	3,0940				
				4,5444							

Πίνακας 4.4. Εφαρμογή της ΑΗΡ για την παράμετρο Ενοποιημένοι Γεωλογικοί Σχηματισμοί

ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ													
ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	[4]	VP	CP	D	E=(D/CP)	λmax	CI	RI	CR=(CI/RI)	
[1] <5 m	1	1/3	1/5	3	0,6687	0,1178	0,4834	4,1041	4,1169	0,0390	0,9000	0,043309	
[2] 5- 10 m	3	1	1/3	5	1,4953	0,2634	1,0798	4,0998					
[3] >10 m	5	3	1	7	3,2011	0,5638	2,3280	4,1291					
[4] 0 m	1/3	1/5	1/7	1	0,3124	0,0550	0,2275	4,1348					
					5,6776								

Πίνακας 4.5. Εφαρμογή της ΑΗΡ για την παράμετρο Πτώση Πιεζομετρικού Φορτίου

ΠΑΧΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ													
ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	VP	CP	D	E=(D/CP)	λmax	CI	RI	CR=(CI/RI)
[1] 0 m	1	1/3	1/5	1/7	1/9	0,2540	0,0329	0,1744	5,2982	5,2372	0,0593	1,1200	0,052945
[2] 0-20 m	3	1	1/3	1/5	1/7	0,4911	0,0636	0,3312	5,2048				
[3] 20-40 m	5	3	1	1/3	1/5	1,0000	0,1296	0,6750	5,2096				
[4] 40-80 m	7	5	3	1	1/3	2,0362	0,2638	1,3712	5,1971				
[5] >80 m	9	7	5	3	1	3,9363	0,5100	2,6911	5,2763				
						7,7176							

Πίνακας 4.6. Εφαρμογή της ΑΗΡ για την παράμετρο Πάχος Τεταρτογενών Αποθέσεων

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί με βάση όλους τους παραπάνω πίνακες, οι τιμές του Δείκτη Συνέπειας είναι τέτοιες με αποτέλεσμα να έχουν προκύψει συνεπείς πίνακες, χωρίς απαίτηση αναπροσαρμογής των συντελεστών βαρύτητας. Στη συνέχεια, οι πίνακες κανονικοποιήθηκαν με σκοπό τον υπολογισμό των απαραίτητων βαρών, ώστε να αξιολογηθεί η συμμετοχή της κάθε παραμέτρου αλλά και κλάσης της εκάστοτε παραμέτρου ως προς την εμφάνιση του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων.

ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	[4]					W	W	%
[1] ΧΡΗΣΙΣΤΗΣ	1	1/4	1/3	1/3	0,0909	0,1111	0,0769	0,0769	0,3559	0,0890	8,8967
[2] ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	4	1	2	2	0,3636	0,4444	0,4615	0,4615	1,7312	0,4328	43,2789
[3] ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	3	1/2	1	1	0,2727	0,2222	0,2308	0,2308	0,9565	0,2391	23,9122
[4] ΠΑΧΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ	3	1/2	1	1	0,2727	0,2222	0,2308	0,2308	0,9565	0,2391	23,9122
	11,0000	2,2500	4,3333	4,3333					4,0000		

Πίνακας 4.7. Τιμές βαρών για τις 4 παραμέτρους

Συμπερασματικά, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.7. με βάση την επιλογή των συντελεστών βαρύτητας, συναρτήσει της βιβλιογραφίας, των χαρακτηριστικών της περιοχής και της προσωπικής κρίσης, η σημαντικότερη παράμετρος που επηρεάζει το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων είναι η γεωλογία της περιοχής με ποσοστό 43,28%, ακολουθούμενη από την πτώση του

πιεζομετρικού φορτίου και το πάχος των Τεταρτογενών με ίσα ποσοστά 23,91% (καθώς ο βαθμός επιρροής τους στο υπό μελέτη φαινόμενο θεωρήθηκε αντίστοιχος) και τέλος της χρήσεις γης με ποσοστό 8,89%.

ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ																						
ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]	[12]	[13]	[14]	VP	CP	D	E=(D/CP)	λmax	CI	RI	CR=(CI/RI)
[1] ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	1	2	1/5	3	5	5	1/5	2	3	1/5	1/3	5	5	5	1,5029	0,0717	1,1440	15,9453	15,5810	0,1216	1,5700	0,07746301
[2] ΜΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	1/2	1	1/7	2	4	4	1/7	2	3	1/7	1/3	5	5	5	1,1918	0,0569	0,9121	16,0319				
[3] ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΖΟΝΕΣ	5	7	1	7	7	7	1/2	5	6	1/2	2	7	7	7	3,6015	0,1719	2,6840	15,6114				
[4] ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ	1/3	1/2	1/7	1	2	2	1/5	2	2	1/5	1/2	3	3	3	0,8932	0,0426	0,6264	14,6902				
[5] ΑΘΛΗΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	1/5	1/4	1/7	1/2	1	2	1/5	1/2	2	1/5	1/3	3	3	3	0,6531	0,0312	0,4782	15,3383				
[6] ΜΗ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΗ ΑΡΟΣΙΜΗ ΓΗ	1/5	1/4	1/7	1/2	1/2	1	1/7	2	3	1/5	1/2	3	3	3	0,6757	0,0323	0,5148	15,9596				
[7] ΜΟΝΙΜΑ ΚΑΛΙΕΡΘΗΣΙΜΗ ΓΗ	5	7	2	5	5	7	1	5	7	3	5	7	7	9	4,7336	0,2260	3,5661	15,7811				
[8] ΕΛΛΙΩΝΕΣ	1/2	1/2	1/5	1/2	2	1/2	1/5	1	2	1/5	1/4	5	5	5	0,8203	0,0392	0,6064	15,4839				
[9] ΒΟΣΚΟΤΟΠΙΑ	1/3	1/3	1/6	1/2	1/2	1/3	1/7	1/2	1	1/5	1/4	3	3	3	0,5329	0,0254	0,3824	15,0326				
[10] ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΛΙΕΡΘΕΑΣ	5	7	2	5	5	5	1/3	5	5	1	5	7	7	7	3,7876	0,1808	2,9070	16,0773				
[11] ΚΑΛΙΕΡΘΕΑΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	3	3	1/2	1/2	3	2	1/5	4	4	1/5	1	5	5	5	1,6469	0,0786	1,2864	16,3625				
[12] ΚΟΝΟΦΟΡΑ ΔΑΣΗ	1/5	1/5	1/7	1/3	1/3	1/3	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	1	1	1/2	0,2893	0,0138	0,2113	15,2978				
[13] ΣΚΛΗΡΟΦΥΛΛΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	1/5	1/5	1/7	1/3	1/3	1/3	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	1	1	1/2	0,2893	0,0138	0,2113	15,2978				
[14] ΑΝΜΥΡΑ ΕΛΗ	1/5	1/5	1/7	1/3	1/3	1/3	1/9	1/5	1/3	1/7	1/5	2	2	1	0,3297	0,0157	0,2396	15,2245				
															20,9479							

Πίνακας 4.8. Τιμές βαρών για την παράμετρο Χρήσεις Γης

ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]				W	W	%
[1] ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗ	1	4	8	0,7273	0,7692	0,5714	2,0679	0,689311	68,93107
[2] ΝΕΟΓΕΝΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗ	1/4	1	5	0,1818	0,1923	0,3571	0,7313	0,243756	24,37562
[3] ΣΕΡΠΕΝΤΙΝΙΤΕΣ	1/8	1/5	1	0,0909	0,0385	0,0714	0,2008	0,066933	6,693307
	1,3750	5,2000	14,0000				3,0000		

Πίνακας 4.9. Τιμές βαρών για την παράμετρο Ενοποιημένοι Γεωλογικοί Σχηματισμοί

ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	[4]					W	W	%
[1] <5m	1	1/3	1/5	3	0,1071	0,0735	0,1193	0,1875	0,4875	0,1219	12,18726
[2] 5- 10m	3	1	1/3	5	0,3214	0,2206	0,1989	0,3125	1,0534	0,2633	26,33451
[3] >10m	5	3	1	7	0,5357	0,6618	0,5966	0,4375	2,2316	0,5579	55,78925
[4] 0m	1/3	1/5	1/7	1	0,0357	0,0441	0,0852	0,0625	0,2276	0,0569	5,68898
	9,3333	4,5333	1,6762	16,0000					4,0000		

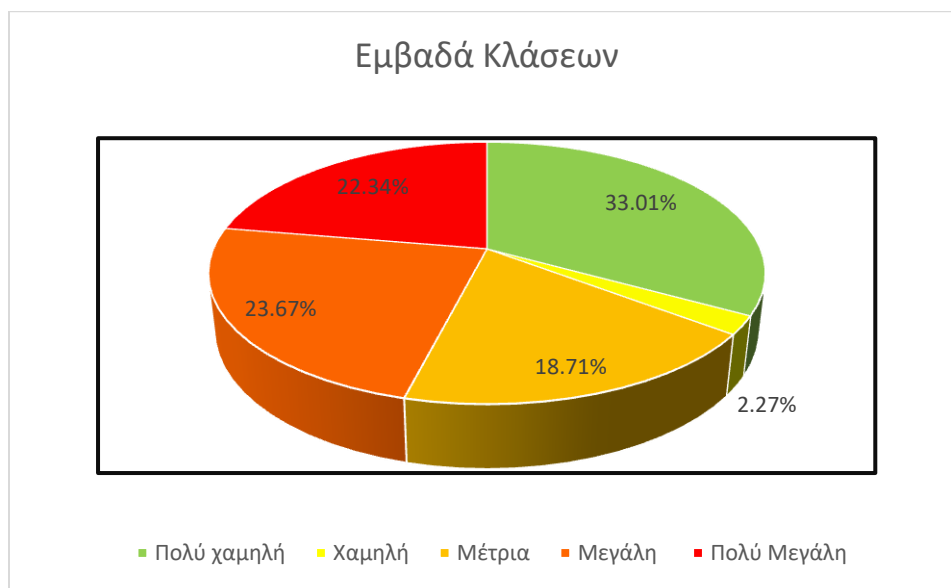
Πίνακας 4.10. Τιμές βαρών για την παράμετρο Πτώση Πιεζομετρικού Φορτίου

ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]						W	W	%
[1] 0m	1	1/3	1/5	1/7	1/9	0,0400	0,0204	0,0210	0,0305	0,0622	0,1741	0,0348	3,48
[2] 0-20m	3	1	1/3	1/5	1/7	0,1200	0,0612	0,0350	0,0428	0,0799	0,3389	0,0678	6,78
[3] 20-40m	5	3	1	1/3	1/5	0,2000	0,1837	0,1049	0,0713	0,1119	0,6718	0,1344	13,44
[4] 40-80m	7	5	3	1	1/3	0,2800	0,3061	0,3147	0,2138	0,1865	1,3012	0,2602	26,02
[5] >80m	9	7	5	3	1	0,3600	0,4286	0,5245	0,6415	0,5595	2,5141	0,5028	50,28
	25,0000	16,3333	9,5333	4,6762	1,7873						5,0000		

Πίνακας 4.11. Τιμές βαρών για την παράμετρο Πάχος Τεταρτογενών Αποθέσεων

Αξιοποιώντας ειδικό εργαλείο του λογισμικού (AHP Extension), το οποίο πραγματοποιεί τη μέθοδο της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας μέσω του συνολικού πίνακα με τις βαρύτητες των παραμέτρων, προέκυψε ο τελικός Χάρτης Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης για την περιοχή μελέτης. Πριν την τελική δημιουργία του χάρτη, το αρχικό raster που παράχθηκε από το εργαλείο του λογισμικού επαναταξινομήθηκε ώστε να προκύψει μια συνεχής επιφάνεια εύρους τιμών (Reclassification), και εν τέλει κατηγοριοποιήθηκε σε 5 κλάσεις επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης με τη διαβάθμιση: πολύ χαμηλή, χαμηλή, μέτρια, υψηλή και πολύ υψηλή. Η ομαδοποίηση των κλάσεων μέσω του λογισμικού έγινε χειροκίνητα (Manual Classification) και όχι αυτόματα από το ίδιο, αξιολογώντας το σχετικό ιστόγραμμα του ράστερ συναρτήσει των συγκεντρώσεων των τιμών των εικονοστοιχείων.

Το εμβαδά των εκάστοτε κλάσεων υπολογίστηκαν ως εξής: Για την πολύ χαμηλή προέκυψε να είναι της τάξης του 33,01% (πράσινη περιοχή), για τη χαμηλή της τάξης του 2,27% (κίτρινη περιοχή), για τη μέτρια 23,67% (κεραμιδί περιοχή), για την υψηλή 18,71% (πορτοκαλί περιοχή) και για την πολύ υψηλή 22,34% (κόκκινη περιοχή). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί το 41% της περιοχής μελέτης προέκυψε να ανήκει σε ζώνη που φέρει υψηλή και άνω επιδεκτικότητα εδαφικής υποχώρησης. (Σχήμα 4.12.)

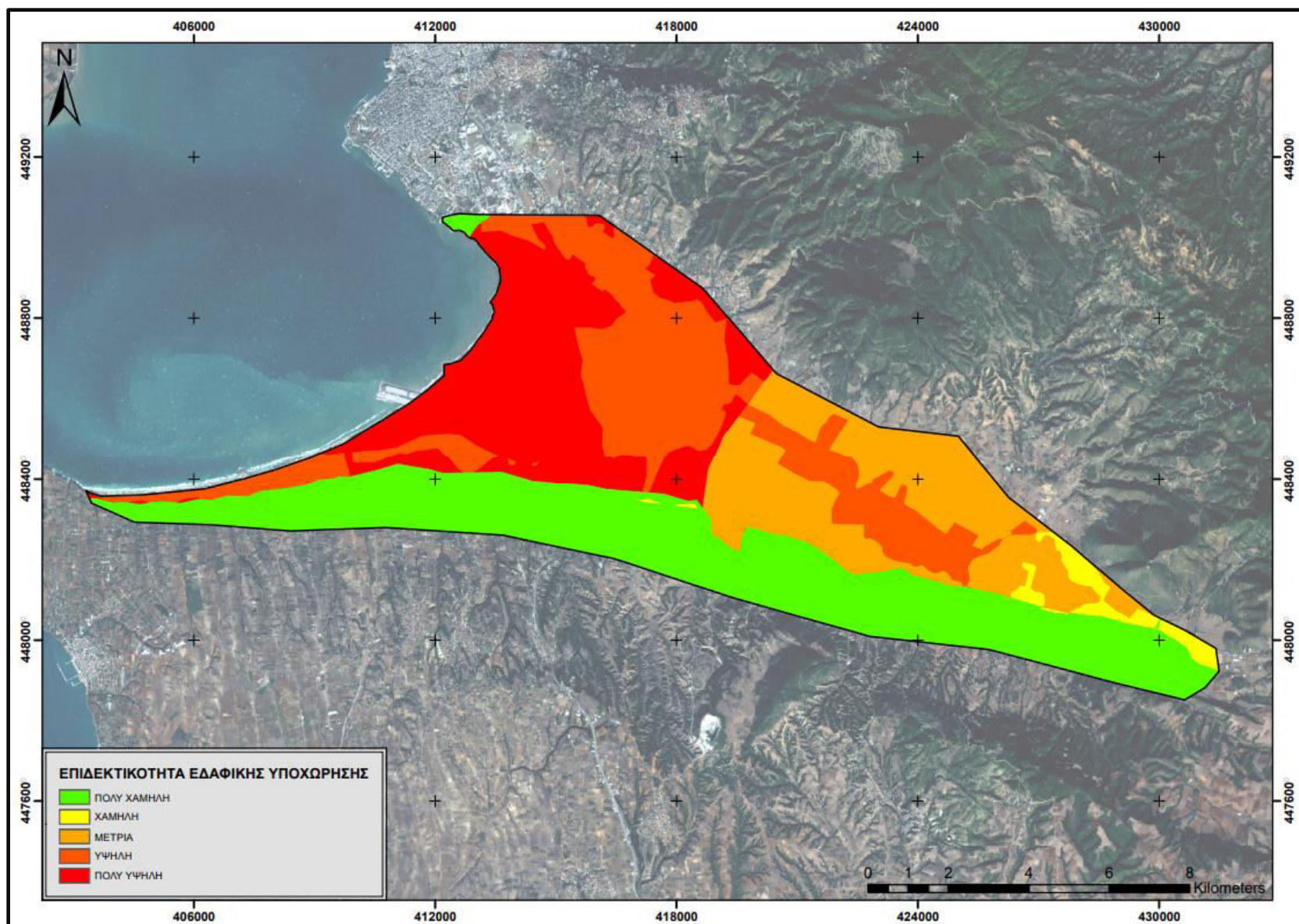


Σχήμα 4.12. Τα εμβαδά των κλάσεων

Μέσω τις προαναφερθείσας μεθόδου, στα δυτικά της λεκάνης απορροής και πλησίον της περιοχής του Διεθνούς Αερολιμένα Θεσσαλονίκης υπολογίστηκαν και εντοπίστηκαν οι περιοχές με τη μεγαλύτερη επιδεκτικότητα εδαφικής υποχώρησης. Επιπλέον, παρατηρείται ότι, το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης απορροής ανήκει σε περιοχές με υψηλή ή μέτρια επιδεκτικότητα εδαφικής υποχώρησης, κατά την κίνηση προς ανατολάς, εντός του οριοθετημένου τμήματος μελέτης. Στα νότια τμήματα της περιοχής μελέτης, όπως ήταν αναμενόμενο, λόγω της απουσίας Τεταρτογενών Αποθέσεων εμφανίζονται πολύ μικρές τιμές επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης και αυτός είναι ο λόγος που έχει κατηγοριοποιηθεί στην ασφαλέστερη ζώνη. Σε αυτό το τμήμα της λεκάνης, εντοπίζεται προσχωματικός υδροφορέας, ο οποίος ναι μεν αντλείται και δίνει υποχωρήσεις, αλλά αρκετά μικρότερες από τα βορειότερα τμήματα της λεκάνης. Ακόμη, τυχόν διαφοροποιήσεις μεταξύ της πολύ χαμηλής επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης και της μέτριας, με ενδιάμεσες περιοχές μικρής επιδεκτικότητας, οφείλονται σε μεταβολές των υπό εξέταση παραμέτρων που δρουν στην περιοχή και επηρέασαν με διαφορετικό τρόπο τα αποτελέσματα του λογισμικού. Τέτοιες μικρές χωρικές διαφοροποιήσεις πρόκειται πολύ πιθανόν να είναι συνάρτηση των μεταβολών των χρήσεων γης. Σε γενικές γραμμές, οι χαμηλότερες τιμές της επιδεκτικότητας εδαφικής υποχώρησης προς ανατολάς, αποτελούν λογικό αποτέλεσμα και συνάρτηση της μείωσης του πάχους των Τεταρτογενών αποθέσεων και της μικρότερης πτώσης του πιεζομετρικού φορτίου. Αξιοποιώντας το ΘΕΠ των θέσεων υδροληψίας, χρησιμοποιήθηκε μόνο για έλεγχο της διαδικασίας και του αποτελέσματος παραγωγής του χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης, παρουσιάζεται ο πίνακας των αποτελεσμάτων της μεθόδους ΑΗΡ συναρτήσει του εμβαδού των κλάσεων και της συχνότητας εμφάνισης θέσεων υδροληψίας στην εκάστοτε. (Πίνακας 4.12.) (Σχήμα 4.13.)

Πίνακας 4.12. Αποτελέσματα σύγκρισης της μεθόδου με θέσεις υδροληψίας

ΚΛΑΣΗ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΘΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ	ΕΜΒΑΔΟΝ	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
Πολύ χαμηλή	19,37%	33,01%	11,11%
Χαμηλή	2,11%	2,27%	17,60%
Μέτρια	36,74%	18,71%	37,18%
Μεγάλη	27,34%	23,67%	21,87%
Πολύ Μεγάλη	14,44%	22,34%	12,24%



Σχήμα 4.13. Ο Χάρτης Επίδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης

4.3.2. Στατιστική ανάλυση των ΘΕΠ

Στο συγκεκριμένο υποκεφάλαιο παρατίθενται στοιχεία από τη στατιστική ανάλυση των επιμέρους τεσσάρων Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας, όπως αυτά έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενη ενότητα. Τα δεδομένα αυτά αφορούν στον υπολογισμό της συχνότητας και της σχετικής συχνότητας εμφάνισης θέσεων υδροληψίας συναρτήσει των τεσσάρων παραγόντων επηρεασμού του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων. Όπως έχει προαναφερθεί, το ΘΕΠ θέσεων υδροληψίας παράχθηκε με σκοπό την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διαδικασίας παραγωγής του Χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης της περιοχής μελέτης. (Πίνακες 4.13. – 4.16. / Σχήματα 4.14. – 4.17.)

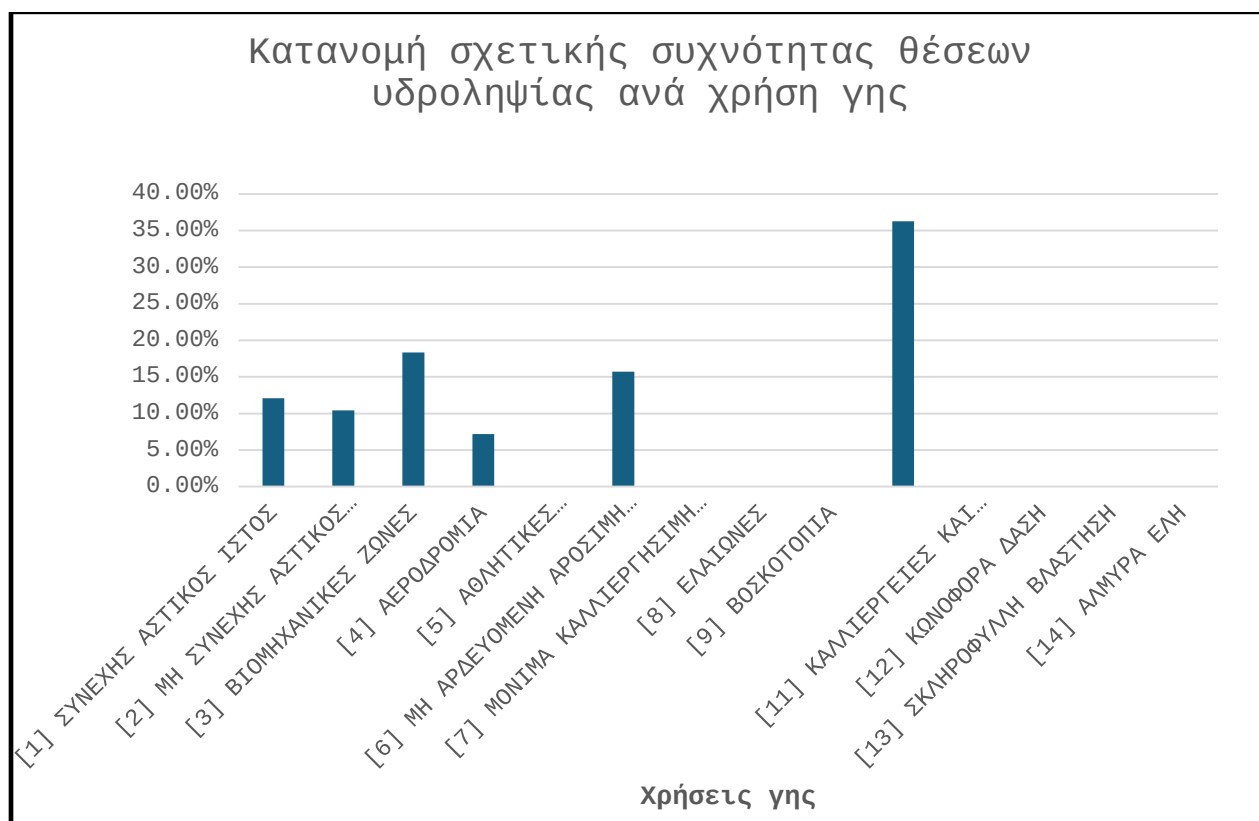
ΘΕΠ Χρήσεων Γης

ΧΡΗΣΗΣ ΓΗΣ	(1) ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΘΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ	(2) ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΚΤΑΣΗΣ	(1)/(2)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
[1] ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	0,35%	0,59%	0,5932	12,07%
[2] ΜΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	3,53%	6,90%	0,5116	10,41%
[3] ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ	7,07%	7,85%	0,9006	18,33%
[4] ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ	3,18%	8,98%	0,3541	7,21%
[5] ΑΘΛΗΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	0,00%	0,14%	0,0000	0,00%
[6] ΜΗ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΗ ΑΡΟΣΙΜΗ ΓΗ	32,16%	41,60%	0,7731	15,73%
[7] ΜΟΝΙΜΑ ΚΑΛΩΠΕΡΗΣΙΜΗ ΓΗ	0,00%	1,06%	0,0000	0,00%
[8] ΕΛΑΙΩΝΕΣ	0,00%	0,57%	0,0000	0,00%
[9] ΒΟΣΚΟΤΟΠΙΑ	0,00%	0,28%	0,0000	0,00%
[10] ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΛΩΠΕΡΕΙΑΣ	53,71%	30,14%	1,7820	36,26%
[11] ΚΑΛΩΠΕΡΕΙΑΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	0,00%	0,72%	0,0000	0,00%
[12] ΚΩΝΟΦΟΡΑ ΔΑΣΗ	0,00%	0,32%	0,0000	0,00%
[13] ΣΚΛΗΡΟΦΥΛΛΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	0,00%	0,54%	0,0000	0,00%
[14] ΑΝΜΥΡΑ ΕΛΗ	0,00%	0,31%	0,0000	0,00%

Πίνακας 4.13. Συχνότητα και σχετική συχνότητα εμφάνισης θέσεων υδροληψίας κατά χρήση γης

Παρατηρώντας τα σχετικά αποτελέσματα του εν λόγω ΘΕΠ, τόσο σε επίπεδο πίνακα όσο και σε επίπεδο διαγράμματος, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των θέσεων υδροληψίας εντοπίζεται στην περίπτωση των σύνθετων μοτίβων καλλιέργειών (53,71%) ακολουθούμενα από τη μη αρδευόμενη αρόσιμη γη (32,16%) και στη συνέχεια από βιομηχανικές και ανθρωπογενείς χρήσεις. Επίσης, σημαντικός αριθμός χρήσεων γης δεν παρουσιάζει καθόλου θέσεις υδροληψίας. Αναφορικά με τα ποσοστά σχετικής συχνότητας την πρώτη θέση κατέχει και πάλι η χρήση γης των σύνθετων μοτίβων καλλιέργειας (36,26%), ακολουθούμενα από τις βιομηχανικές ζώνες (18,33%) και τη μη αρδευόμενη αρόσιμη γη (15,73%). Οι παραπάνω παρατηρήσεις οδηγούν στο συμπέρασμα ότι προφανώς οι χρήσεις γης αποτελούν συνάρτηση των υπεραντλήσεων των υπόγειων νερών που οδηγούν σε φαινόμενα

εδαφικών υποχωρήσεων, ωστόσο, ενδεχομένως άλλοι παράγοντες (όπως η γεωλογία) να είναι οι καθοριστικότεροι για το βαθμό εξέλιξης και τις θέσεις εμφάνισης των φαινομένων.



Σχήμα 4.14. Κατανομή σχετικής συχνότητας θέσεων υδροληψίας ανά χρήση γης

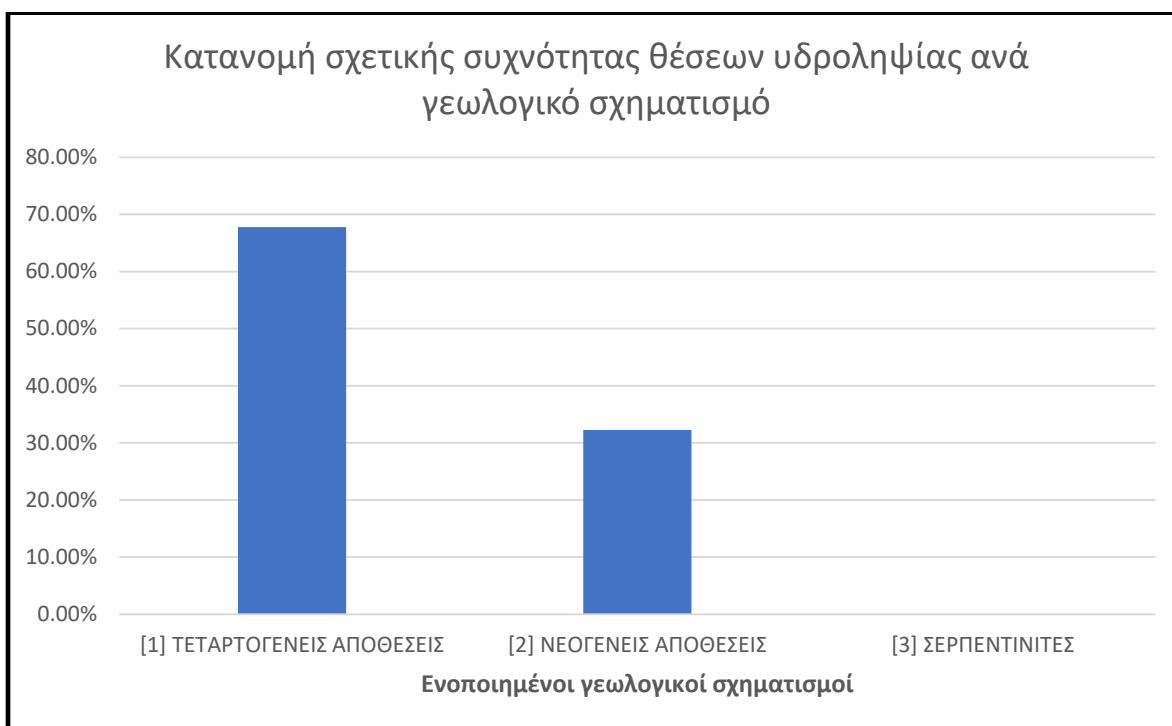
ΘΕΠ Ενοποιημένων Γεωλογικών Σχηματισμών

ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	(1) ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΘΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ	(2) ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΚΤΑΣΗΣ	(1)/(2)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
[1] ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ	81,62%	67,48%	1,2095	67,75%
[2] ΝΕΟΓΕΝΗΣ ΑΠΟΘΕΣΗΣ	18,38%	31,93%	0,5756	32,25%
[3] ΣΕΡΠΙΝΤΙΝΙΤΕΣ	0,00%	0,59%	0,0000	0,00%

Πίνακας 4.14. Συχνότητα και σχετική συχνότητα εμφάνισης θέσεων υδροληψίας κατά γεωλογικό σχηματισμό

Όπως αποδεικνύεται από τη διεθνή βιβλιογραφία (Pradhan et al., (2014) / Rezaei et al., (2020) / Loupasakis et al., (2013)), τα γεωλογικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής αποτελούν αν όχι τη σημαντικότερη, μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους επιρροής στην εκδήλωση ποικιλίας

φαινομένων, όπως και των εδαφικών υποχωρήσεων. Παρατηρώντας την ανάλυση, τόσο το ποσοστό εμφάνισης των θέσεων υδροληψίας ανά γεωλογικό σχηματισμό, αλλά και τη σχετική συχνότητα (συχνότητα εμφάνισης προς ποσοστό έκτασης για κάθε κλάση), στην πρώτη θέση βρίσκονται οι Τεταρτογενείς αποθέσεις με ποσοστά 81,62% και 67,75% αντίστοιχα. Συνεπώς, ο μεγάλος αριθμός των θέσεων υδροληψίας εντός αυτών των σχηματισμών, συναρτήσε των γεωτεχνικών τους χαρακτηριστικών και συμπεριφορών σε περιπτώσεις ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα, επιβεβαιώνουν τα αποτελέσματα του Χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης αλλά και δικαιολογούν τη επιλογή υψηλού ποσοστού συμμετοχής της παρούσας παραμέτρου κατά την εφαρμογή της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας.



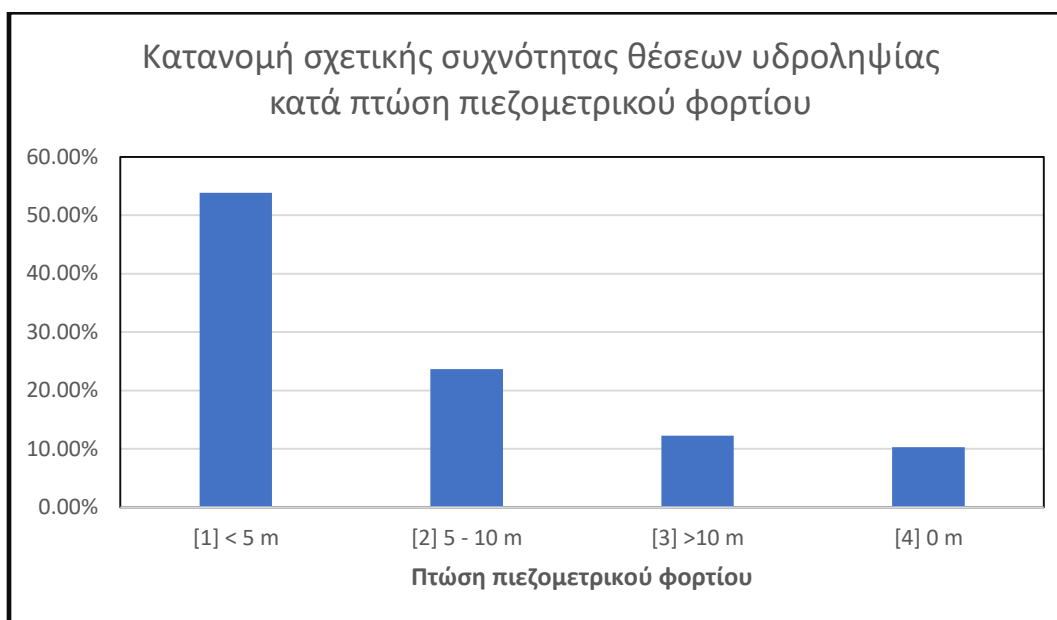
Σχήμα 4.15. Κατανομή σχετικής συχνότητας θέσεων υδροληψίας ανά γεωλογικό σχηματισμό

ΘΕΠ Πτώσης Πιεζομετρικού Φορτίου

ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	(1) ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΘΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ	(2) ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΚΤΑΣΗΣ	(1)/(2)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
[1] <5m	22,88%	7,44%	3,0753	53,85%
[2] 5- 10m	32,75%	24,27%	1,3494	23,63%
[3] >10m	26,76%	38,29%	0,6989	12,24%
[4] 0m	17,61%	30,00%	0,5870	10,28%

Πίνακας 4.15. Συχνότητα και σχετική συχνότητα εμφάνισης θέσεων υδροληψίας κατά πτώση πιεζομετρικού φορτίου

Οι υπεραντλήσεις που παρατηρούνται σε μια περιοχή έχουν σε πολλές περιπτώσεις ως αποτέλεσμα την ταπείνωση των υπογείων υδροφορέων και κατά προέκταση την πτώση του πιεζομετρικού φορτίου και την εμφάνιση φαινομένων εδαφικών υποχωρήσεων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, το μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης ανήκει στην τάξη των 5 έως 10 μέτρων (32,75%) αλλά η μέγιστη σχετική συχνότητα εντοπίζεται στις περιοχές με πτώση πιεζομετρικού φορτίου της τάξης των < 5 μέτρων (53,85%). Συνεπώς συνεκτιμώντας και τα αποτελέσματα του τελικού χάρτη, μπορεί να θεωρηθεί ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται εν τέλει από το βαθμό υδροληψίας που παρατηρείται σε κάθε περιοχή συναρτήσει των καλύψεων γης, έναντι του μεγάλου αριθμού θέσεων άντλησης. Ωστόσο, δεν κατέστη δυνατή η απόκτηση πληροφοριών βαθμού άντλησης ανά θέση. Σε συμφωνία με την παρούσα εργασία προέκυψαν και τα αποτελέσματα της επιστημονικής εργασίας των Svigas et al., (2020) όπου η μεγαλύτερη πτώση του πιεζομετρικού φορτίου εντοπίζεται σε θέσεις με χαρακτηριστικά (χρήσεων γης, γεωλογίας κ.λπ.) όπου εμφανίζεται μεγαλύτερος ρυθμός αντλήσεων των υπογείων υδάτων.



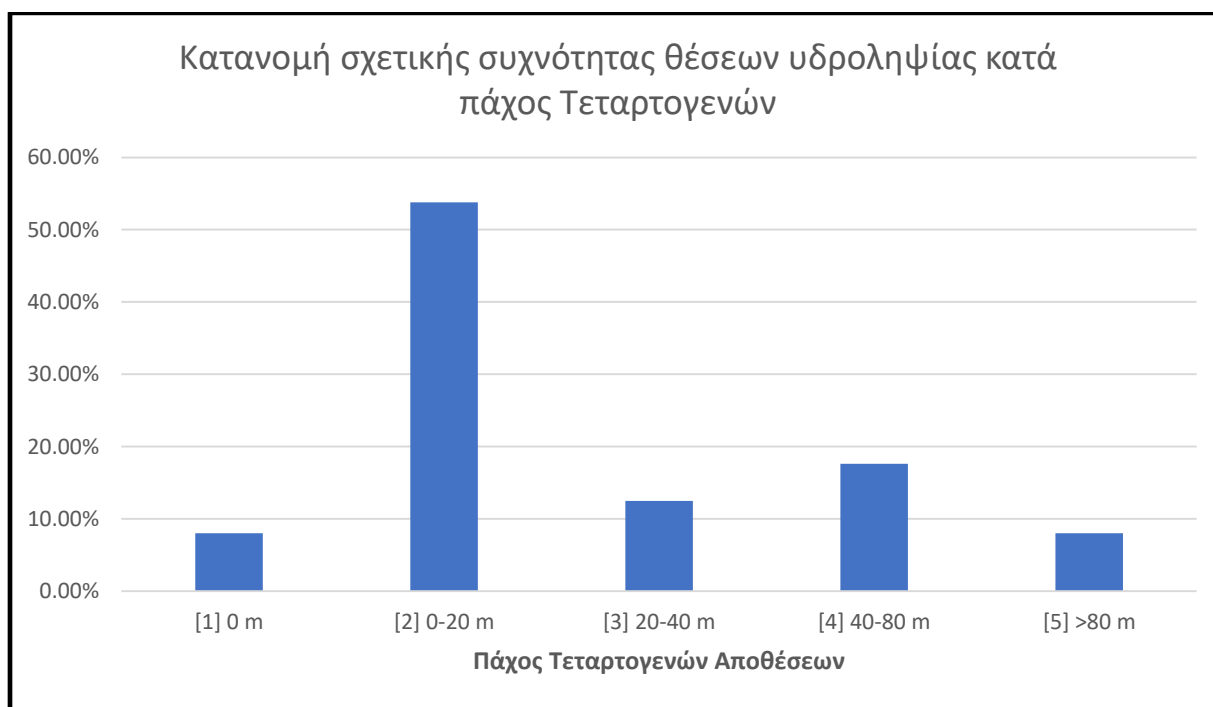
Σχήμα 4.16. Κατανομή σχετικής συχνότητας θέσεων υδροληψίας κατά πτώση πιεζομετρικού φορτίου

ΘΕΠ Πάχους Τεταρτογενών Αποθέσεων

ΠΑΧΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ	(1) ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΘΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ	(2) ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΚΤΑΣΗΣ	(1)/(2)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
[1] 0 m	19,79%	33,69%	0,5874	8,04%
[2] 0-20 m	19,44%	4,95%	3,9273	53,79%
[3] 20-40 m	19,79%	21,65%	0,9141	12,52%
[4] 40-80 m	32,50%	25,24%	1,2876	17,63%
[5] >80 m	8,48%	14,49%	0,5852	8,02%

Πίνακας 4.16. Συχνότητα και σχετική συχνότητα εμφάνισης θέσεων υδροληψίας κατά πάχος Τεταρτογενών

Το φαινόμενο των εδαφικών υποχωρήσεων θεωρείται ότι επηρεάζεται σημαντικά από το πάχος των Τεταρτογενών αποθέσεων, καθώς, όπως έχει προαναφερθεί, τα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά προσφέρουν συμπεριφορές επιδεκτικές σε τέτοια φαινόμενα. Το μεγάλο πάχος, που συνεπάγεται την απουσία βραχώδους υποβάθρου ή και άλλων αδιαπέρατων και μη επιδεκτικών σε τέτοιες καταστάσεις σχηματισμών λειτουργούν ως αρωγοί στην βαθμιαία εξελισσόμενη ανάπτυξη αντίστοιχων φαινομένων. Στην εν λόγω περίπτωση το μεγαλύτερο ποσοστό θέσεων υδροληψίας εντοπίζεται σε περιοχές με πάχος της τάξης των 40 με 80 μέτρων (32,50%) ενώ η σχετική συχνότητα μεγιστοποιείται σε πάχη της τάξης των 0-20 μέτρων. Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν τη σημασία του μη γνωστού ρυθμού υδροληψίας ανά θέση, την πολυπλοκότητα του μηχανισμού εκδήλωσης των εδαφικών υποχωρήσεων αλλά και την ανάγκη συνδυαστικής ανάλυσης των παραμέτρων επηρεασμού του φαινομένου, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Τέλος, αναφέρεται ότι στην επιστημονική εργασία των Loupasakis et al., (2013) όπου αξιοποιήθηκαν στοιχεία γεωτρήσεων για τα πάχη των γεωλογικών σχηματισμών, και προέκυψαν τα σχετικά αποτελέσματα του ρυθμού των εδαφικών υποχωρήσεων, αυτά έρχονται σε χωρική συμφωνία με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας αναφορικά με τις περιοχές μέγιστης Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης συναρτήσει του πάχους των Τεταρτογενών Αποθέσεων.

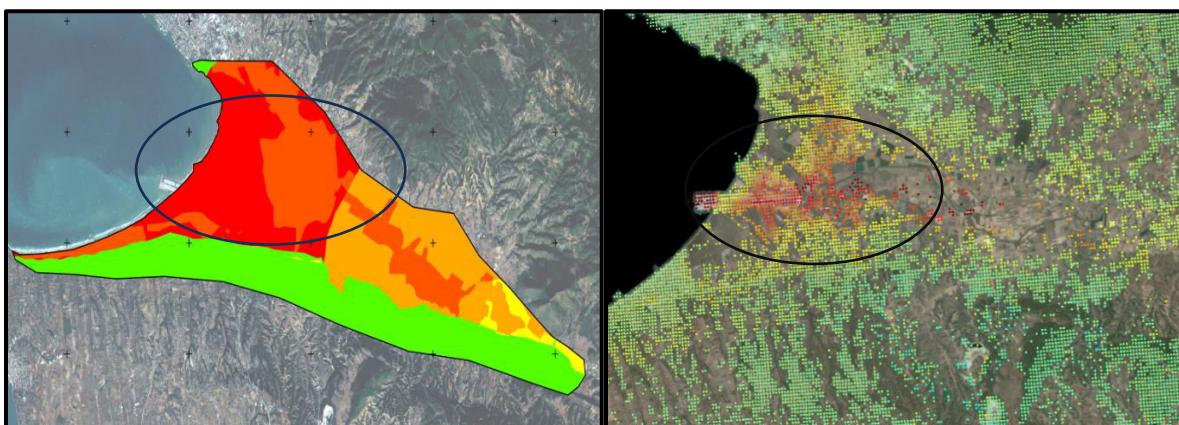


Σχήμα 4.17. Κατανομή σχετικής συχνότητας θέσεων υδροληψίας κατά πάχος Τεταρτογενών

4.3.3. Ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

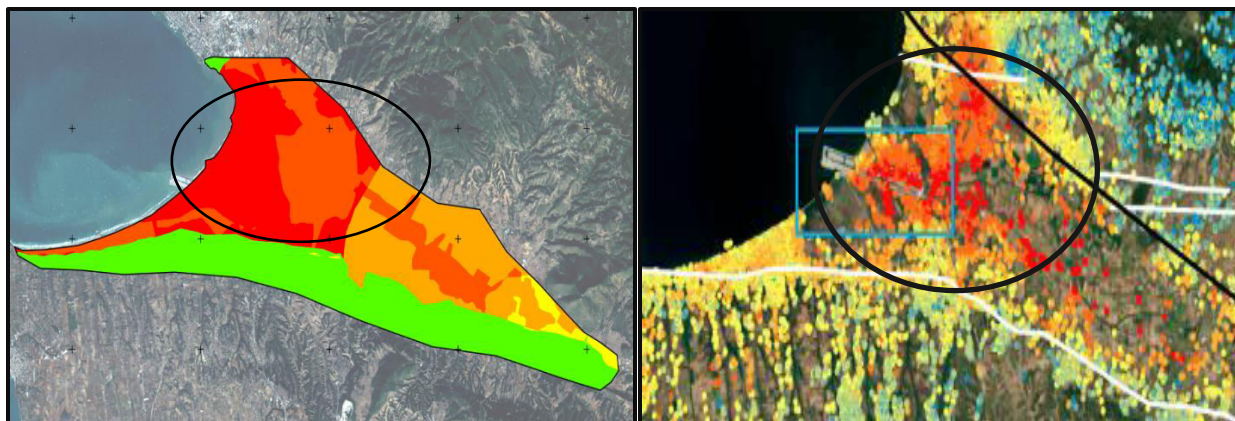
Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζεται η ποιοτική αξιολόγηση του αποτελέσματος της εργασίας, ήτοι του Χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης της λεκάνης απορροής του ποταμού Ανθεμούντα, καθώς και σχολιασμός των παρατηρήσεων της στατιστικής ανάλυσης των Θεματικών Επιπέδων Πληροφορίας.

Αξίζει να αναφερθεί, ότι σχετική αδυναμία της παρούσας διερεύνησης αφορά στην ποσοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Σε αντίστοιχες διερευνήσεις επιδεκτικότητας, όπως για παράδειγμα τις περιπτώσεις των κατολισθήσεων, χρησιμοποιούνται καταγεγραμμένες θέσεις κατολισθήσεων, ως έλεγχος της ποιότητας πρόβλεψης των μοντέλων μέσω των καμπυλών ROC. Ωστόσο, λόγω της εξειδικευμένης φύσης του φαινομένου των εδαφικών υποχωρήσεων, του περιορισμένου αριθμού στοιχείων και των ιδιοτήτων της περιοχής μελέτης, σε αυτή την περίπτωση, ένας τέτοιος έλεγχος δεν κατέστη δυνατός. Η χρήση των θέσεων υδροληψίας, αν και θα μπορούσαν δυνητικά να χρησιμοποιηθούν για τέτοιου είδους έλεγχο, στη δεδομένη περίπτωση αυτό δεν κρίθηκε αξιόπιστο, διότι όπως αποδείχθηκε και από τη στατιστική ανάλυση των ΘΕΠ, η κατανομές αυτών δεν έρχονται σε πλήρη συμφωνία με τις χωρικές διαφοροποιήσεις των παραμέτρων, λόγω προφανώς του διαφορετικού βαθμού άντλησης σε κάθε θέση και του σκοπού χρήσης τους, στοιχεία τα οποία δεν κατέστη δυνατό να γνωστοποιηθούν. Ωστόσο, όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, πραγματοποιήθηκε ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. (Σχήματα 4.18.. – 4.20.)



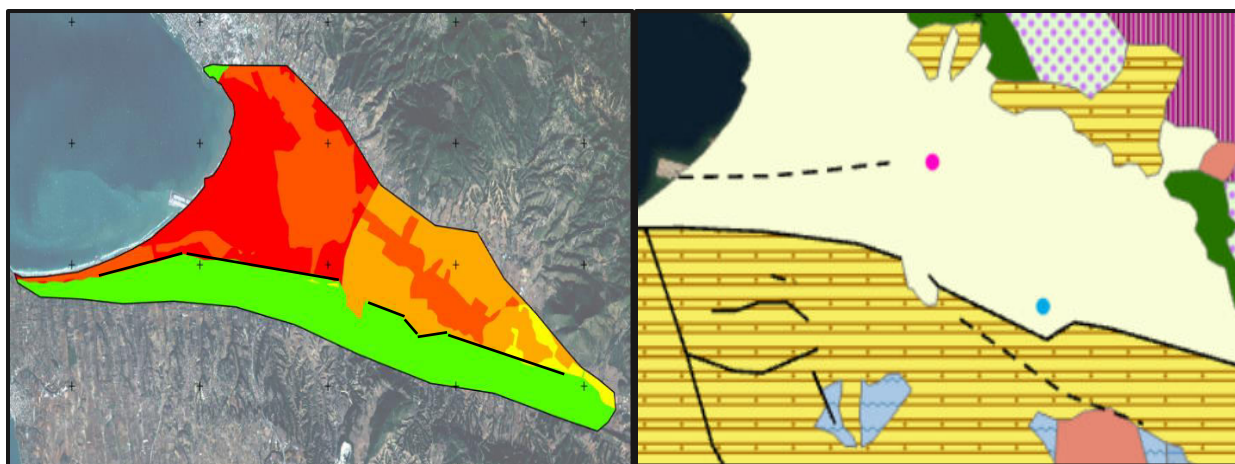
Σχήμα 4.18. Ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων

Παρατηρώντας τις δύο εικόνες, η δεξιά αποτελεί στιγμιότυπο από την επίσημη ιστοσελίδα του Corepnicus στην οποία φαίνονται με κόκκινο χρώμα οι μετρηθείσες και αποδεδειγμένες εδαφικές υποχωρήσεις οι οποίες έχουν ποσοτικοποιηθεί για την περιοχή μελέτης. Στα δυτικά της περιοχής παρουσιάζονται οι πιο κρίσιμες περιοχές. Όπως μπορεί να εντοπιστεί, το μοντέλο δημιουργίας του τελικού χάρτη, έρχεται σε χωρική συμφωνία με τις μετρημένες εδαφικές υποχωρήσεις, καθώς σε αντίστοιχα μέρη έχει προβλέψει τις πιο κρίσιμες περιοχές.



Σχήμα 4.19. Ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων

Αξιοποιώντας το χάρτη του ρυθμού (ταχύτητας) των εδαφικών υποχωρήσεων στην περιοχή μελέτης, όπως παράχθηκε κατά την επιστημονική εργασία των Loupasakis et al, (2020), στην οποία αξιοποιήθηκαν δεδομένα Συμβολομετρίας, μπορεί να παρατηρηθεί και πάλι η χωρική συμφωνία των κρίσιμων περιοχών υψηλής και πολύ υψηλής επιδεκτικότητας με τις υψηλές ταχύτητες εδαφικών υποχωρήσεων. Αντίστοιχα, στα νότια της περιοχής που έχει προβλεφθεί χαμηλότερη επιδεκτικότητα, έχουν υπολογιστεί και χαμηλότερες ταχύτητες.



Σχήμα 4.20. Ποιοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων

Τέλος, παρατηρώντας τα γεωλογικά δεδομένα από τη ΕΑΓΜΕ, μπορεί να παρατηρηθεί ότι το μοντέλο έχει διαφοροποιήσει ορθώς τη μεταβολή της επιδεκτικότητας εκατέρωθεν του ρήγματος του Ανθεμούντα, καθώς μεταβάλλονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί από βόρεια (Τεταρτογενείς) σε νότια (Νεογενείς), με διαφορετικά γεωτεχνικά χαρακτηριστικά και συνεπώς διαφορετικές επιδεκτικότητες εδαφικής υποχώρησης.

Εν κατακλείδι, μελετώντας τη στατιστική ανάλυση των ΘΕΠ που δημιουργήθηκαν προέκυψαν τα εξής:

- Για το ΘΕΠ Χρήσεων Γης το μεγαλύτερο ποσοστό των θέσεων υδροληψίας εντοπίζεται στην περίπτωση των σύνθετων μοτίβων καλλιέργειών (53,71%) ακολουθούμενα από τη μη αρδευόμενη αρόσιμη γη (32,16%) και στη συνέχεια από βιομηχανικές και ανθρωπογενείς χρήσεις. Επίσης, σημαντικός αριθμός χρήσεων γης δεν παρουσιάζει καθόλου θέσεις υδροληψίας. Αναφορικά με τα ποσοστά σχετικής συχνότητας την πρώτη θέση κατέχει και πάλι η χρήση γης των σύνθετων μοτίβων καλλιέργειας (36,26%), ακολουθούμενα από τις βιομηχανικές ζώνες (18,33%) και τη μη αρδευόμενη αρόσιμη γη (15,73%).
- Για το ΘΕΠ Ενοποιημένων Γεωλογικών Σχηματισμών τόσο το ποσοστό εμφάνισης των θέσεων υδροληψίας ανά γεωλογικό σχηματισμό, αλλά και τη σχετική συχνότητα (συχνότητα εμφάνισης προς ποσοστό έκτασης για κάθε κλάση), στην πρώτη θέση βρίσκονται οι Τεταρτογενείς αποθέσεις με ποσοστά 81,62% και 67,75% αντίστοιχα.
- Για το ΘΕΠ Πτώσης Πιεζομετρικού Φορτίου, το μεγαλύτερο ποσοστό εμφάνισης ανήκει στην τάξη των 5 έως 10 μέτρων (32,75%) αλλά η μέγιστη σχετική συχνότητα εντοπίζεται στις περιοχές με πτώση πιεζομετρικού φορτίου της τάξης των < 5 μέτρων (53,85%).
- Για το ΘΕΠ Πάχος Τεταρτογενών Αποθέσεων το μεγαλύτερο ποσοστό θέσεων υδροληψίας εντοπίζεται σε περιοχές με πάχος της τάξης των 40 με 80 μέτρων (32,50%) ενώ η σχετική συχνότητα μεγιστοποιείται σε πάχη της τάξης των 0-20 μέτρων.

Όλα τα παραπάνω επιβεβαιώνουν το γενικότερο συμπέρασμα της πολυπλοκότητας του υπό μελέτη φαινομένου, καθώς και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης που επηρέασαν τα αποτελέσματα.

Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα και προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία διερευνήθηκαν τα φαινόμενα των εδαφικών υποχωρήσεων που εδώ και χρόνια έχουν παρουσιαστεί στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ανθεμούντα, η οποία ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα της κεντρικής Μακεδονίας. Τα χαρακτηριστικά της υπό μελέτη περιοχής είναι τέτοια, τα οποία ευνοούν την εμφάνιση τέτοιων φαινομένων, όπως για παράδειγμα τα ιδιαίτερα γεωλογικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά, οι παρούσες χρήσεις γης, ο έντονος ρυθμός υπεραντλήσεων λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων κ.λπ.

5.1. Συμπεράσματα

Για την εκπόνηση της εργασίας και την παραγωγή του τελικού Χάρτη Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης για το οριοθετημένο τμήμα της λεκάνης, ακολουθήθηκε συγκεκριμένη διαδικασία. Σε αρχικό στάδιο, έλαβε χώρα αναφορά στο μηχανισμό εκδήλωσης των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων καθώς και παρουσίαση σχετικών διερευνήσεων τόσο στη χώρα, από τη διεθνή επιστημονική βιβλιογραφία, οι οποίες προσέγγισαν και ανέλυσαν τα φαινόμενα αυτά με ποικιλία επιστημονικών μεθόδων.

Σε κάθε περίπτωση, συναρτήσει των ιδιαίτερων ανθρωπογενών αλλά και φυσικών χαρακτηριστικών της περιοχής μελέτης, δόθηκε αναλυτική παρουσίαση αυτών, ώστε να προσφερθεί ένα αρχικό θεωρητικό υπόβαθρο για τις γενεσιουργές αιτίες των φαινομένων.

Για τη δημιουργία του τελικού χάρτη αξιοποιήθηκαν στοιχεία από έγκυρες επιστημονικές πηγές και σχετικές επιστημονικές διερευνήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στην περιοχή ενώ ως κρίσιμοι παράγοντες επηρεασμού τόσο της εμφάνισης όσο και της εξέλιξης του φαινομένου, με βάση τη διαθέσιμη βιβλιογραφία και τη γνώση των ειδικών θεωρήθηκαν: η γεωλογία της περιοχής, οι χρήσεις γης που απαντώνται σε αυτήν, η πτώση του πιεζομετρικού φορτίου όπως αυτή υπολογίστηκε σε άλλες διερευνήσεις, καθώς και το πάχος των Τεταρτογενών αποθέσεων όπως προκύπτει επίσης από άλλες έρευνες, οι οποίες σε πολλές περιπτώσεις πραγματοποιήσαν και σχετικές γεωτρήσεις.

Για την προετοιμασία της διαδικασίας παραγωγής του χάρτη δημιουργήθηκαν τα τέσσερα θεματικά επίπεδα πληροφοριών που αφορούσαν στις τέσσερις παραπάνω παραμέτρους επηρεασμού του φαινομένου. Επιπλέον, για έλεγχο των αποτελεσμάτων και εξέταση της επιτυχίας της μεθόδου, δημιουργήθηκε επιπλέον θεματικό επίπεδο, ήτοι αυτό των θέσεων υδροληψίας.

Για την ολοκλήρωση της διαδικασίας αξιοποιήθηκε η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία, η οποία αποτελεί ημιποσοτική μέθοδο που λειτουργεί συνδυαστικά αξιοποιώντας την επιστημονική γνώση αλλά και αριθμητικά μοντέλα. Με βάση τον γενικό πίνακα συγκρίσεων των παραμέτρων επηρεασμού η βασικότερη παράμετρος προέκυψε να είναι η γεωλογία της περιοχής (43,3%), ακολουθούμενη από την πτώση του πιεζομετρικού φορτίου και το πάχος των Τεταρτογενών με ίσα βάρη (23,9%) και τέλος τις χρήσεις γης (8,9%).

Κατά τη δημιουργία του χάρτη αυτός κατηγοριοποιήθηκε σε 5 ζώνες επιδεκτικότητας με διαβάθμιση πολύ υψηλή, υψηλή, μέτρια, χαμηλή και πολύ χαμηλή, με τις δύο κρισιμότερες ζώνες να καλύπτουν ποσοστά 23,67% και 22,34% ως προς την έκταση της υπό μελέτης περιοχής και σχετικές συχνότητες εμφάνισης θέσεων υδροληψίας 21,87% και 12,24% αντίστοιχα. Η μέθοδος ΑΗΡ προέβλεψε κρίσιμες περιοχές με υψηλές επιδεκτικότητες στα δυτικά της λεκάνης προς τις εκβολές του ποταμού, την περιοχή του αεροδρομίου και την Περαιά, οι οποίες βαίνουν μειούμενες κατά την κίνηση προς ανατολάς, συναρτήσει των χωρικών μεταβολών των παραμέτρων επηρεασμού του φαινομένου.

Κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της εργασίας, και αξιοποιώντας των ΘΕΠ ελέγχου, ήτοι αυτό των θέσεων υδροληψίας, παρατηρήθηκε ότι η σημαντική πληροφορία του βαθμού υδροληψίας ανά θέση (ανά αντλιοστάσιο) θα μπορούσε δυνητικά να δώσει μια περαιτέρω εμβάθυνση στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του φαινομένου, όπως αυτό εντοπίζεται και μεταβάλλεται χωρικά. Ωστόσο, λόγω αδυναμίας απόκτησης τέτοιων εξειδικευμένων στοιχείων, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί ποιοτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Κατά την αξιολόγηση αυτής της μορφής, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα άλλων εργασιών και προγραμμάτων που έχουν εκπονηθεί στην περιοχή, χρησιμοποιώντας μάλιστα διαφορετικά δεδομένα ανάλυσης (όπως για παράδειγμα δεδομένα Συμβολομετρίας και δορυφορικές παρατηρήσεις) προέκυψε υψηλή χωρική συμφωνία του βαθμού επιδεκτικότητας ανά θέση, συναρτήσει των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία σε σύγκριση με το ρυθμό εδαφικής υποχώρησης, όπως αυτός υπολογίστηκε μέσω των μεθόδων των λοιπών επιστημονικών εργασιών και προγραμμάτων. Ακόμη, λαμβάνοντας υπόψιν γεωλογικά δεδομένα της περιοχής, οι χωρικές μεταβολές του βαθμού επιδεκτικότητας έρχονται σε σημαντική συμφωνία με τις μεταβολές των γεωλογικών και τεκτονικών δομών της οριοθετημένης περιοχής μελέτης.

Το αποτέλεσμα της παρούσας διερεύνησης, ήτοι ο Χάρτης Επιδεκτικότητας Εδαφικής Υποχώρησης μπορεί να αποτελέσει σημαντική αρωγή για περαιτέρω διερεύνηση των φαινομένων αυτών στην περιοχή μελέτης ως ένα αρχικό βασικό υπόβαθρο αναφοράς.

5.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ο εμπλουτισμός των ελλিপών στοιχείων με υψηλό βαθμό λεπτομέρειας, η χρήση τοπικών χαρτών υψηλής ακρίβειας μπορούν να εφαρμοστούν συνδυαστικά με τη μέθοδο ΑΗΡ της παρούσας διπλωματικής με σκοπό την εξαγωγή χαρτών και αποτελεσμάτων μεγάλης ακρίβειας και μέγιστης αξιοπιστίας. Επιπλέον, η συνδυαστική χρήση επίγειων γεωδαιτικών μεθόδων με δορυφορικές παρατηρήσεις υψηλής ακρίβειας θα μπορούσαν να επιτύχουν μια διαχρονική παρατήρηση και έλεγχο της εξέλιξης τέτοιων φαινομένων. Τέλος, οι εφαρμογές της Συμβολομετρίας συνδυαζόμενες με χρήση δεδομένων μηχανικής μάθησης ήτοι για παράδειγμα εκπαίδευση αλγορίθμων θα μπορούσαν να προσφέρουν εξειδικευμένες και λεπτομερείς προσεγγίσεις ανάλυσης. Αξιοποιώντας τον παρόντα χάρτη δύναται να διερευνηθούν θέματα ασφάλειας των οικισμών εντός της λεκάνης απορροής και με περαιτέρω επιστημονική διερεύνηση και τα αντίστοιχα συμπεράσματα, να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα αν όχι ανατροπής, τουλάχιστον σταθεροποίησης των φαινομένων των εδαφικών υποχωρήσεων.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Agarwal, V., Kumar, A., Qin, Z., Gomes, R. L., & Marsh, S. (2023). Lessons for sustainable urban development: Interplay of construction, groundwater withdrawal, and land subsidence at Battersea, London. *Remote Sensing*, 15(15), 3798.
- Antoniadis, N., Alatza, S., Loupasakis, C., & Kontoes, C. (2023). Land Subsidence Phenomena vs. Coastal Flood Hazard—The Cases of Messolonghi and Aitolikon (Greece). *Remote Sensing*, 15(8), 2112.
- Argyris, P., Ganas, A., Valkaniotis, S., Tsioumas, V., Sagias, N., & Psiloglou, B. (2020). Anthropogenically induced subsidence in Thessaly, central Greece: new evidence from GNSS data. *Natural Hazards*, 102, 179-200.
- Cigna, F., Osmanoglu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., ... & Wdowinski, S. (2012). Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161.
- Doani, S., Hildebrandt-Radke, I., Vouvalidis, K., Albanakis, K., & Syrides, G. (2021). Sedimentological variability and depositional environment of the Anthemountas River (Northern Greece) during the Late Pleistocene and Holocene. *Quaternary International*, 589, 95-111.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2001): "Permanent Scatterers in SAR Interferometry", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol 39. No 1.
- Ghazifard, A., Moslehi, A., Safaei, H., & Roostaei, M. (2016). Effects of groundwater withdrawal on land subsidence in Kashan Plain, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75, 1157-1168.
- Hakim, W. L., Achmad, A. R., & Lee, C. W. (2020). Land subsidence susceptibility mapping in jakarta using functional and meta-ensemble machine learning algorithm based on time-series InSAR data. *Remote Sensing*, 12(21), 3627.
- Ilia, I., Loupasakis, C., & Tsangaratos, P. (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, 1-19.
- Kaitantzian, A., Loupasakis, C., Tzampoglou, P., & Parcharidis, I. (2020). Ground Subsidence Triggered by the Overexploitation of Aquifers Affecting Urban Sites: The Case of Athens Coastal Zone along Faliro Bay (Greece). *Geofluids*, 2020, 1-18.
- Kakar, N., Kakar, D. M., Khan, A. S., & Khan, S. D. (2019). Land subsidence caused by groundwater exploitation in Quetta Valley, Pakistan. *International Journal of Economic and Environmental Geology*, 10-19.

- Kazakis, N., Voudouris, K., Vargemezis, G., & Pavlou, A. (2013). Hydrogeological regime and groundwater occurrence in the Anthemountas River Basin. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 47(2), 711-720.
- Kumar, H., Syed, T. H., Amelung, F., Agrawal, R., & Venkatesh, A. S. (2022). Space-time evolution of land subsidence in the National Capital Region of India using ALOS-1 and Sentinel-1 SAR data: Evidence for groundwater overexploitation. *Journal of Hydrology*, 605, 127329.
- Liosis, N., Marpu, P. R., Pavlopoulos, K., & Ouarda, T. B. (2018). Ground subsidence monitoring with SAR interferometry techniques in the rural area of Al Wagan, UAE. *Remote Sensing of Environment*, 216, 276-288.
- Loupasakis, C. (2020). An overview of the land subsidence phenomena occurring in Greece, triggered by the overexploitation of the aquifers for irrigation and mining purposes. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 382, 321-326.
- Mertikas, S. P., Papadaki, E. S., & Paleologos, E. (2009, November). Radar Interferometry for Monitoring Land Subsidence due to over-pumping Ground Water in Crete, Greece. In *Proceedings of the fringe workshop, Frascati, Italy* (Vol. 30).
- Modoni, G., Darini, G., Spacagna, R. L., Saroli, M., Russo, G., & Croce, P. (2013). Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering geology*, 167, 59-71.
- Othman, A., & Abotalib, A. Z. (2019). Land subsidence triggered by groundwater withdrawal under hyper-arid conditions: case study from Central Saudi Arabia. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-8.
- Peng, M., Lu, Z., Zhao, C., Motagh, M., Bai, L., Conway, B. D., & Chen, H. (2022). Mapping land subsidence and aquifer system properties of the Willcox Basin, Arizona, from InSAR observations and independent component analysis. *Remote Sensing of Environment*, 271, 112894.
- Pradhan, B., Abokharima, M. H., Jebur, M. N., & Tehrany, M. S. (2014). Land subsidence susceptibility mapping at Kinta Valley (Malaysia) using the evidential belief function model in GIS. *Natural hazards*, 73, 1019-1042.
- Psimoulis, P., Ghilardi, M., Fouache, E., & Stiros, S. (2007). Subsidence and evolution of the Thessaloniki plain, Greece, based on historical leveling and GPS data. *Engineering Geology*, 90(1-2), 55-70.
- Rahnama, M. B., & Moafi, H. (2009). Investigation of land subsidence due to groundwater withdraw in Rafsanjan plain using GIS software. *Arabian Journal of Geosciences*, 2(3), 241-246.
- Raspini, F., Loupasakis, C., Rozos, D., & Moretti, S. (2013). Advanced interpretation of land subsidence by validating multi-interferometric SAR data: the case study of the Anthemountas basin (Northern Greece). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(10), 2425-2440.

- Raspini, F., Loupasakis, C., Rozos, D., Adam, N., & Moretti, S. (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, 78-89.
- Rezaei, M., Yazdani Noori, Z., & Dashti Barmaki, M. (2022). Land subsidence susceptibility mapping using Analytical Hierarchy Process (AHP) and Certain Factor (CF) models at Neyshabur plain, Iran. *Geocarto International*, 37(5), 1465-1481.
- Sajjad, M. M., Wang, J., Afzal, Z., Hussain, S., Siddique, A., Khan, R., ... & Iqbal, J. (2023). Assessing the impacts of groundwater depletion and aquifer degradation on land subsidence in Lahore, Pakistan: A PS-InSAR approach for sustainable urban development. *Remote Sensing*, 15(22), 5418.
- Suganthi, S., & Elango, L. (2020). Estimation of groundwater abstraction induced land subsidence by SBAS technique. *Journal of Earth System Science*, 129(1), 46.
- Sun, H., Zhang, Q., Zhao, C., Yang, C., Sun, Q., & Chen, W. (2017). Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique. *Remote sensing of environment*, 188, 73-84.
- Sviggas, N., Papoutsis, I., Loupasakis, C., Tsangaratos, P., Kiratzi, A., & Kontoes, C. (2016). Land subsidence rebound detected via multi-temporal InSAR and ground truth data in Kalochori and Sindos regions, Northern Greece. *Engineering Geology*, 209, 175-186.
- Svigkas, N., Loupasakis, C., Papoutsis, I., Kontoes, C., Alatza, S., Tzampoglou, P., ... & Spachos, T. (2020). InSAR campaign reveals ongoing displacement trends at high impact sites of Thessaloniki and Chalkidiki, Greece. *Remote Sensing*, 12(15), 2396. (Ελλάδα)
- Svigkas, N., Loupasakis, C., Tsangaratos, P., Papoutsis, I., Kiratzi, A., & Kontoes, C. (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.
- Tranos, M., Kilias, A., & Mountrakis, D. (1993). Emplacement and deformation of the Sithonia granitoid pluton (Macedonia, Greece) (No. RefW-15-11776). Aristotle University of Thessaloniki.
- Tsangaratos, P., Ilia, I., & Loupasakis, C. (2019). Land subsidence modelling using data mining techniques. The case study of Western Thessaly, Greece. *Natural Hazards GIS-Based Spatial Modeling Using Data Mining Techniques*, 79-103.
- Tsangaratos, P., Loupasakis, C., Rozos, D., & Ilia, I. (2015). Landslide susceptibility assessments using the k-Nearest Neighbor algorithm and expert knowledge. Case study of the basin of Selinounda River, Achaia County, Greece. *SafeChania* (2015). The knowledge triangle in the Civil Protection Service Center of Mediterranean Architecture, Chania, Crete, Greece, 10-14.
- Tzampoglou, P., & Loupasakis, C. (2017). Mining geohazards susceptibility and risk mapping: The case of the Amyntaio open-pit coal mine, West Macedonia, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 76, 1-16.

Tzampoglou, P., & Loupasakis, C. (2019). Numerical simulation of the factors causing land subsidence due to overexploitation of the aquifer in the Amyntaio open coal mine, Greece. *HydroResearch*, 1, 8-24.

Wang, Y. Q., Wang, Z. F., & Cheng, W. C. (2019). A review on land subsidence caused by groundwater withdrawal in Xi'an, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 2851-2863.

Wegmüller U., Werner C., Strozzi T., Wiesmann A., Frey O. & Santoro M., (2016): "Conference on Enterprise Information Systems / International Conference on Project Management / Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies", Centeris / Projman / HCist

Wolkersdorfer, C., & Thiem, G. (1999). Ground water withdrawal and land subsidence in northeastern Saxony (Germany). *Mine Water and the Environment*, 18(1), 81-92.

Yalvaç, S., Alemdağ, S., Zeybek, H. İ., & Yalvaç, M. (2023). Excessive groundwater withdrawal and resultant land subsidence in the Küçük Menderes River Basin, Turkey as estimated from InSAR-SBAS and GNSS measurements. *Advances in Space Research*, 72(10), 4282-4297.

Zebker H. A., Rosen P. A., Hensley S. (1997): «Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps», *J. Geophys.*, 102, 7547–7563.

Zervopoulou, A., Chatzipetros, A., Tsiokos, L., Syrides, G., & Pavlides, S. (2007, June). Non-seismic surface faulting: the Peraia fault case study (Thessaloniki, N. Greece). In *Proceedings of 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Paper (No. 1610).

Zhang, L., Arabameri, A., Santosh, M., & Pal, S. C. (2023). Land subsidence susceptibility mapping: comparative assessment of the efficacy of the five models. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-20.

Zhu, L., Gong, H., Li, X., Wang, R., Chen, B., Dai, Z., & Teatini, P. (2015). Land subsidence due to groundwater withdrawal in the northern Beijing plain, China. *Engineering Geology*, 193, 243-255.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γεωργιάνου Β.Ν. (2000): «Χρήση γεωτεχνικών οργάνων – οργανομετρήσεις» , Εκδ. Παρισιάνου Α.Ε., Αθήνα

Γεωργόπουλος Γ., Δογγούρης Σ., Λάμπρου Ε., Μπαλοδήμος Δ., Πανταζής Γ., (2005), Σημειώσεις Τεχνικής Γεωδαισίας, Εργαστήριο Γενικής Γεωδαισίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., ΑΘΗΝΑ

Δεληκαράογλου Δ., (2005): «Ειδικά Θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας», Σημειώσεις του μαθήματος, ΣΑΤΜ, Ε.Μ.Π., Αθήνα

ΖΕΡΒΟΠΟΥΛΟΥ, Α., & ΠΑΥΛΙΔΗΣ, Σ. (2005). Μορφοτεκτονική μελέτη της ευρύτερης περιοχής Θεσ/νίκης για τη χαρτογράφηση νεοτεκτονικών ρηγμάτων. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 38, 30-41.

Λουπασάκης Κ. (2014): «Σημειώσεις του μαθήματος «Τεχνική Γεωλογία Ι», Σ.Μ.Μ.-Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα

Μουντράκης, Δ. (1985). Γεωλογία Ελλάδος. Εκδόσεις University Studio Press, Θεσσαλονίκη.

ΜΠΑΛΟΔΗΜΟΣ Δ., ΑΡΑΜΠΑΤΖΗ Ο., (2004), Σημειώσεις του μαθήματος “ΥΨΟΜΕΤΡΙΑ”, ΑΘΗΝΑ, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ

Παπαζάχος, Β. Κ., & Παπαζάχου, Κ. (2003). Οι σεισμοί της Ελλάδας (No. RefW-15-11992). Εκδόσεις Ζήτη.

Παραδείσης Δ. (2000), Σημειώσεις Μαθήματος Δορυφορικής Γεωδαισίας, Κέντρο Δορυφόρων Διονύσου, Τομέας Τοπογραφίας, Σ.Α.Τ.Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα

Ρόζος Δ. (2007): «Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας Ι», Σ.Μ.Μ.-Μ., Ε.Μ.Π., Αθήνα

Ρόζος, Δ. Ε., Σιδέρη, Δ., Λουπασάκης, Κ., & Αποστολίδης, Ε. (2010). Land subsidence due to excessive ground water withdrawal. A case study from Stavros-Farsala site, west Thessaly Greece. Δελτίον της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας, 43(4), 1850-1857.

Σιδέρη, Δ. (2016). Διερεύνηση των εδαφικών υποχωρήσεων από υπεράντληση στον Δυτικό Θεσσαλικό κάμπο, με βάση τη γεωτεχνική συμπεριφορά των σχηματισμών και τη συμβολή γεωστατιστικού μοντέλου. (Διδακτορική Διατριβή)

Συρίδης, Γ. (1990). Λιθοστρωματογραφική Βιοστρωματογραφική και Παλαιογραφική μελέτη των Νεογενών - Τεταρτογενών Ιζηματογενών σχηματισμών της Χερσονήσου Χαλκιδικής (Doctoral dissertation, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Γεωλογίας).

Τσαγγαράτος, Π. Π. (2012). Διερεύνηση της τεχνικογεωλογικής συμπεριφοράς των γεωλογικών σχηματισμών με τη χρήση πληροφοριακών συστημάτων. (Διδακτορική Διατριβή)

Τσιώκος, Λ. (2007). Γεωλογική και μορφοτεκτονική μελέτη του ρήγματος Περαίας, δήμου Θερμαϊκού, νομού Θεσσαλονίκης.

Φερεντίνου, Μ., & Χαλκιάς, Χ. (2012). Προκαταρκτική Ανάλυση της διακινδύνευσης έναντι κατολισθήσεων με βάση τη χαρτογράφηση της επιδεκτικότητας – Εφαρμογή σε περιφερειακή κλίμακα. Γεωγραφίες, 41-58.

Χατζηχρήστος Θ., 1999, Προσδιορισμός Οικοπεριφερειών με τη χρήση ΓΣΠ & Τεχνητής Νοημοσύνης, Διδακτορική Διατριβή, ΣΑΤΜ, ΕΜΠ.

Ψιλοβίκος, Α. (1977). Παλαιογραφική εξέλιξη της λεκάνης και της λίμνης της Μυγδονίας (Λαγκαδά-Βόλβης). Διδακτορική διατριβή, ΑΠΘ.

Διαδικτυακές πηγές

[Interferometric Synthetic Aperture Radar | Geoscience Australia \(ga.gov.au\)](https://www.ga.gov.au/) (Σεπτέμβριος 2024)

<https://www.copernicus.eu/en> (Σεπτέμβριος 2024)

<https://www.eagme.gr/> (Σεπτέμβριος 2024)

http://lmt.ypeka.gr/public_view.html (Σεπτέμβριος 2024)

EXTENDED ABSTRACT

The subject of this Postgraduate Thesis was the investigation of the phenomena of land subsidence in the basin of the Anthemountas River in the wider area of Thessaloniki, due to excessive underwater pumping. The study area was chosen to be the main part of the river basin, as it is delimited to the western parts of the Chalkidiki Peninsula. Based on the existing literature and the corresponding scientific investigations that have already been carried out, the study area was digitized in such a way as to contain the already known zones where ground subsidence is observed, as well as failures in man-made structures.

For the preparation of the thesis, a specific procedure was followed, according to which analytical methods and procedures for studying and quantifying the phenomena of land subsidence were presented, as they have been applied in the relevant scientific investigations, while important characteristic elements of the study area were presented in the form of maps as an initial background familiarization with the wider area. Furthermore, due to their particular importance in the appearance and evolution of the phenomenon under study, emphasis was placed on the detailed description of the characteristics of the area such as:

- Geological structure
- Hydrogeological characteristics
- Tectonic features
- Land uses

With the completion of the above descriptions and at the same time depending on the available data and the characteristics of the area, the final area of analysis was defined, in other words, the main part of the graben. This procedure was followed by the process of assessing the land subsidence susceptibility of the final area using semi-quantitative methods and in conclusion the requested Land Recession Susceptibility Map of the Anthemountas River Basin was produced, a mapping process of technical and geological interest.

In the following bullets basic elements are described which can be used as an initial background to become familiar with the phenomena of land subsidence as well as the characteristics of the study area to understand the approaches and the targeting of this thesis:

- Land subsidence phenomena, as they will be defined in detail in Chapter 2, are extensive phenomena of land surface subsidence, the causes of which can be traced to endogenous factors such as the removal of fluids (for example over-pumping of groundwater) or the collapse of natural and artificial cavities. These phenomena, as evidenced by the international literature, occur very often, both around the world and in Greece, and their effects vary, from simple

failures in man-made structures to a risk to human life, depending on the intensity of their occurrence .

- The study area chosen for the preparation of the thesis, (the Anthemountas river basin) in the wider area of Thessaloniki, is a typical example of an area prone to such phenomena. The relevant literature and the scientific investigations as they have been carried out have proven significant rates of land subsidence in the wider area of the basin and especially on the coastal front near the International Airport of Thessaloniki, while at the same time it has been proven that the main generative cause is the over-pumping of groundwater. These overpumping phenomena have been observed for decades in the study area and are carried out to cover the agricultural and industrial activities that take place in the basin. However, their long-term and intense rate has led to a significant lowering of the water table which, depending on the geological characteristics of the wider region, has now led to strong subsidence phenomena, evident in man-made constructions. Generally, such phenomena can be investigated with a wide range of methods, as presented in subsequent chapters.

- The present work, utilizing available data, as will be presented in subsequent chapters, investigates and visualizes the spatial intensity of the phenomena of land subsidence in the basin area using Geographical Information Systems tools (Arc-GIS), offering an initial study background for the quantification of the phenomenon utilizing the available data. The results were found to be in significant agreement with the conclusions of earlier investigations in the area which analyzed the phenomenon both qualitatively and quantitatively by making use of a variety of approach methods in their analysis.

To create the Susceptibility Map, the following procedure was briefly followed:

- Based on the available literature and based on the characteristics of the study area, the main parameters involved in the manifestation of land subsidence phenomena were studied. These turned out to be:

- The geology of the area
- The existing land uses
- The drop in piezometric load
- The thickness of Quaternary deposits

- Geographical Information Systems tools were utilized through which the Thematic Levels of Information were produced depending on the critical parameters that influence the appearance and evolution of the phenomenon and through which the final Susceptibility Map was created.

- The results were checked and evaluated qualitatively, due to the form of data available through a special Thematic Level, the water intake sites within the basin, but also through the results of other investigations which studied the same phenomenon, in the same area.

In the following shapes, all Thematic Levels utilized are being presented.

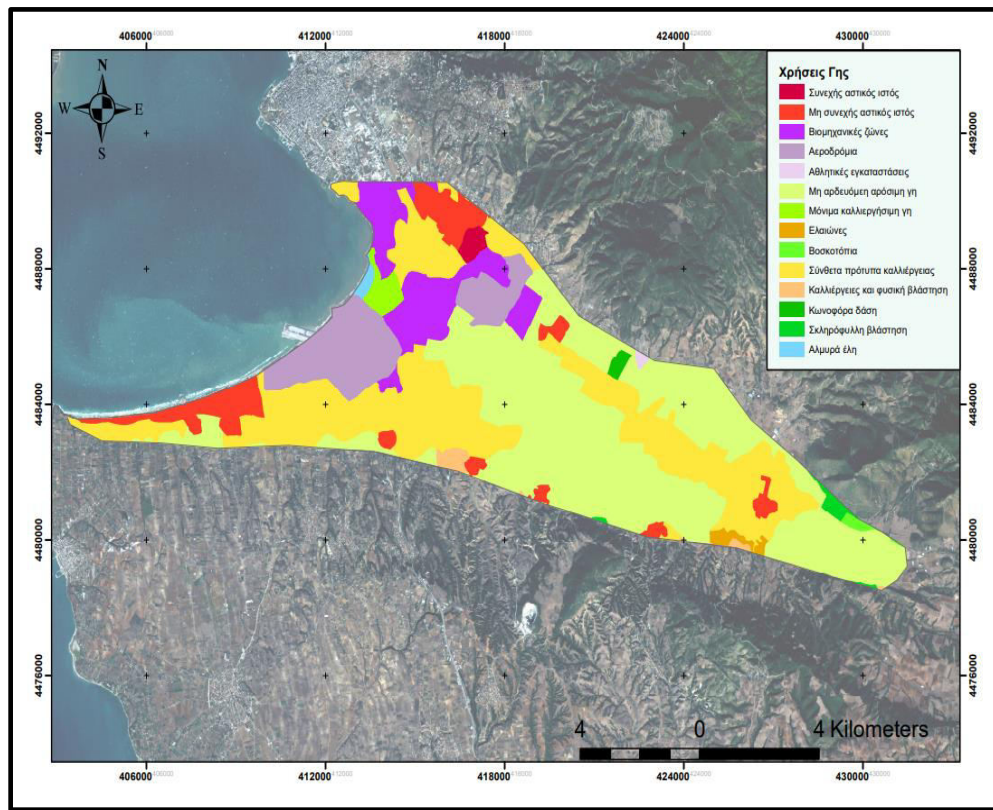


Figure 1. Thematic Level of Land Use

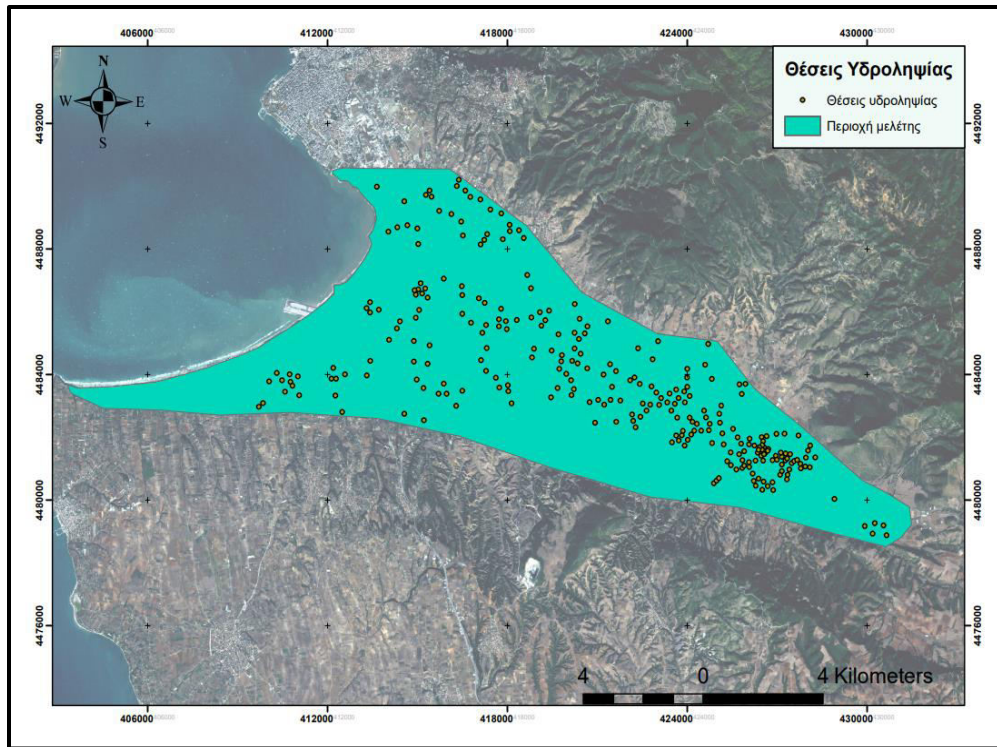


Figure 2. Thematic Level of water intake sites

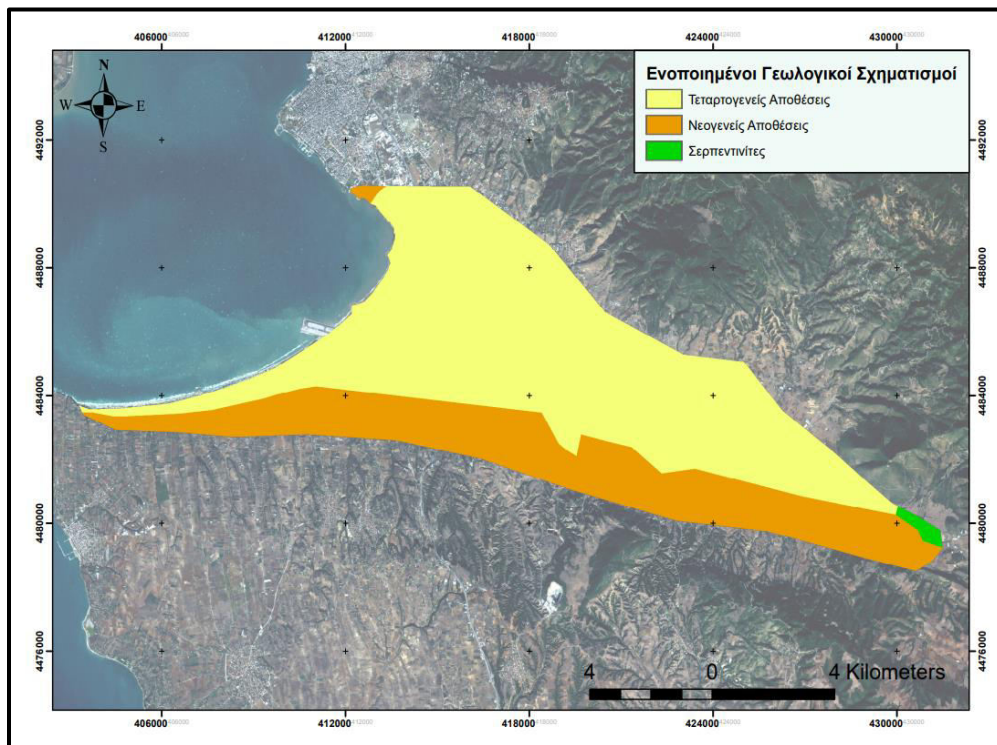


Figure 3. Thematic Level of Geology

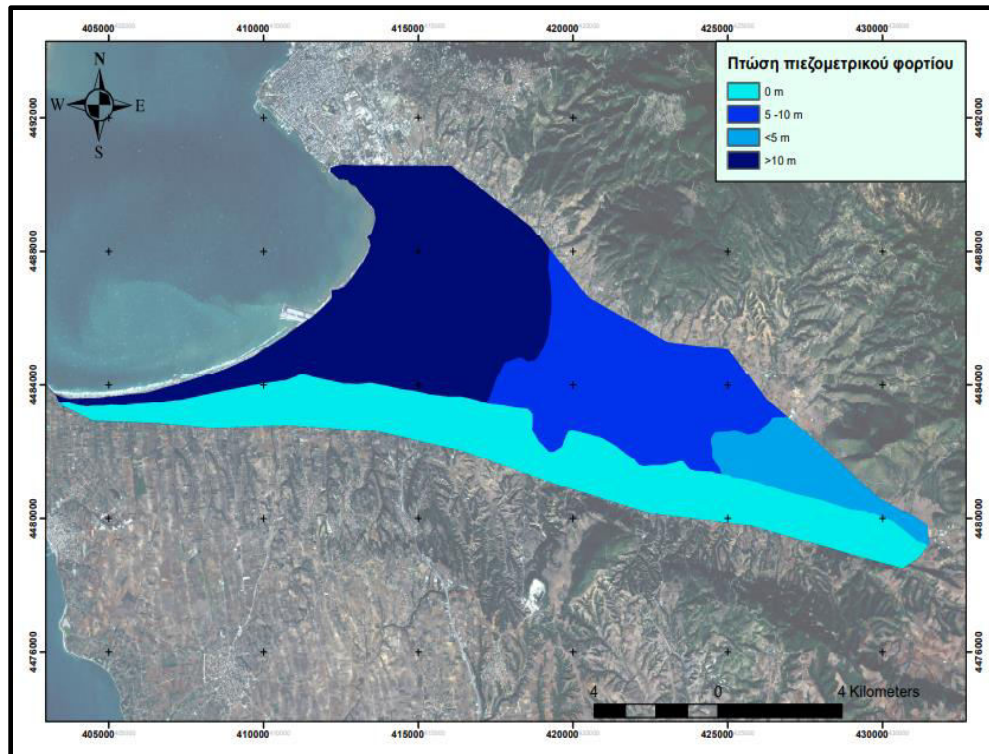


Figure 4. Thematic Level of Drop in Piezometric Load

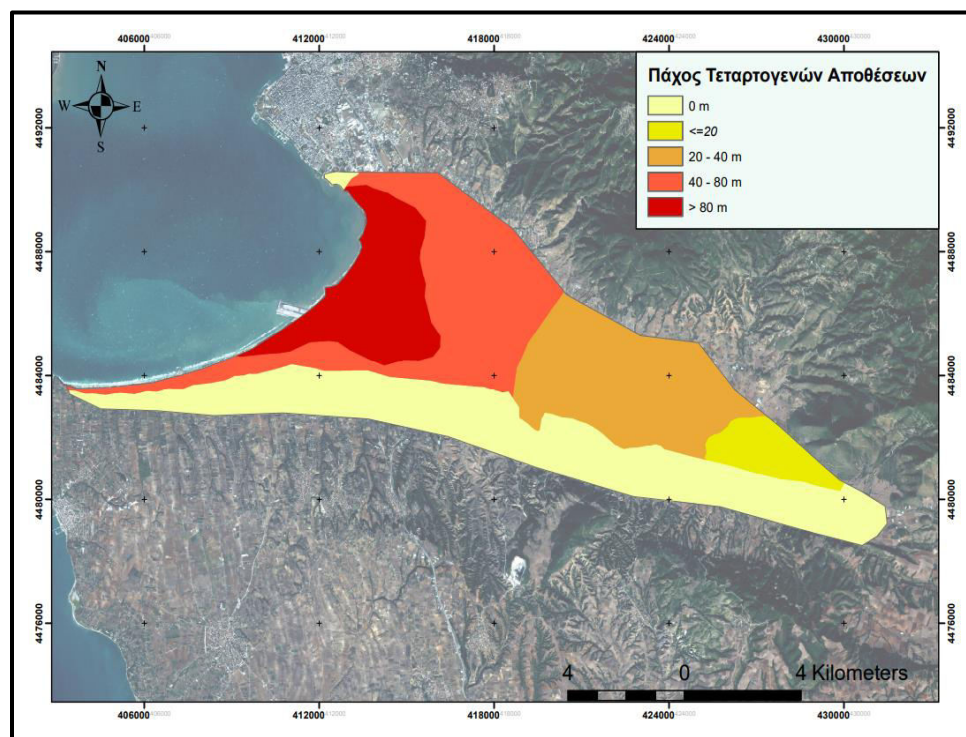


Figure 5. Thematic Level of Quaternary Deposits Thickness

In this thesis, the Analytical Hierarchy Process (AHP) method was used, through the application of which in an Arc-GIS environment, utilizing its tools (AHP extension), the final Land Subsidence Susceptibility Map for the study area was produced.

According to Tsangaratos, (2012), Satty, (2008), Naumann, (1998) and Ferentinou & Chalkias, (2012) the application process of the AHP method follows the steps:

- Understanding the problem and creating the hierarchical structure.
- Pairwise comparison of each element of the problem against a scale of comparison in terms of the degree of preference of one over the other iteratively for both the variables and for the individual classes of each variable.
- Organizing the results of the comparisons in tables where the diagonal value will always be 1. In any case when a criterion under study of row i is more important than a criterion of row j, then the cell receives a value greater than 1 and vice versa.
- Then the relative weights and relative priorities of each parameter as well as the classes of parameters are calculated through the tables under comparison.
- Then, to determine the quality of each comparison table, the consistency index is calculated as follows:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (\text{Eq.1})$$

Where $\lambda_{\max}$ is the maximum eigenvalue of a Linear Algebra element and n is the number of parameters or classes considered respectively.

Also, another regularly applied quality indicator is the CR consistency ratio calculated as follows:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (\text{Eq. 2})$$

Where RI is the random consistency index which is obtained as the average value of the consistency indices from random comparison tables of various dimensions and following the scale 1/9, 1/8, ..., 1, 8,9. Furthermore, in case the CR is less than 0.10, then the table is considered inconsistent and the comparison values must be differentiated.

- The final Susceptibility index (for example for the case of landslides) is calculated through the following equation against the Weighted Linear Combination method:

$$LSI = \sum_{j=1}^n W_j w_{ij} \quad (\text{Eq. 3})$$

Where, LSI the landslide susceptibility index, W_j the weight of parameter j , w_{ij} the weight factor of class i on parameter j and n the number of parameters.

Making use of the procedures of the method, the relevant table is presented below, as it was created in an Excel environment. This table concerned both the grading of the importance of the four parameters under study regarding their participation in the probability of the occurrence and development of the phenomenon of land subsidence, as well as the grading of the individual classes of each parameter.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ												
ΚΛΑΣΗ	[1]	[2]	[3]	[4]	VP	CP	D	E=(D/CP)	λmax	CI	RI	CR=(CI/RI)
[1] ΧΡΗΣΕΙΣ ΓΗΣ	1	1/4	1/3	1/3	0,4082	0,0883	0,3562	4,0319	4,0206	0,0069	0,9000	0,007628
[2] ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΟΙ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΙ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ	4	1	2	2	2,0000	0,4327	1,7439	4,0299				
[3] ΠΤΩΣΗ ΠΙΕΖΟΜΕΤΡΙΚΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ	3	1/2	1	1	1,1067	0,2395	0,9603	4,0103				
[4] ΠΛΑΧΟΣ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΩΝ ΑΠΟΘΕΣΕΩΝ	3	1/2	1	1	1,1067	0,2395	0,9603	4,0103				
					4,6216							

Table 1. Grading the importance of the four parameters

Utilizing the AHP Extension tool which as already mentioned carries out the Analytical Hierarchy Process method through the overall table with the weights of the parameters, the final Land Subsidence Susceptibility Map for the study area was obtained. Before the final creation of the map, the original raster produced by the software tool was reclassified to produce a continuous surface of a range of values (Reclassification), and finally categorized into 5 land subsidence susceptibility classes with gradation: very low, low, moderate , high and very high. The grouping of the classes through the software was done manually (Manual Classification) and not automatically by the same, evaluating the relevant histogram of the raster as a function of the concentrations of the pixel values.

The area of each class was calculated as follows: For the very low it turned out to be of the order of 33.01% (green area), for the low of the order of 2.27% (yellow area), for the moderate 23.67% (light orange area), for high 18.71% (orange area) and for very high 22.34% (red area). As can be seen, 41% of the study area was found to belong to a zone with a high and upper susceptibility to land subsidence.



Figure 6. Areas of each class

In the following shape, the final Land Subsidence Susceptibility Map is presented.

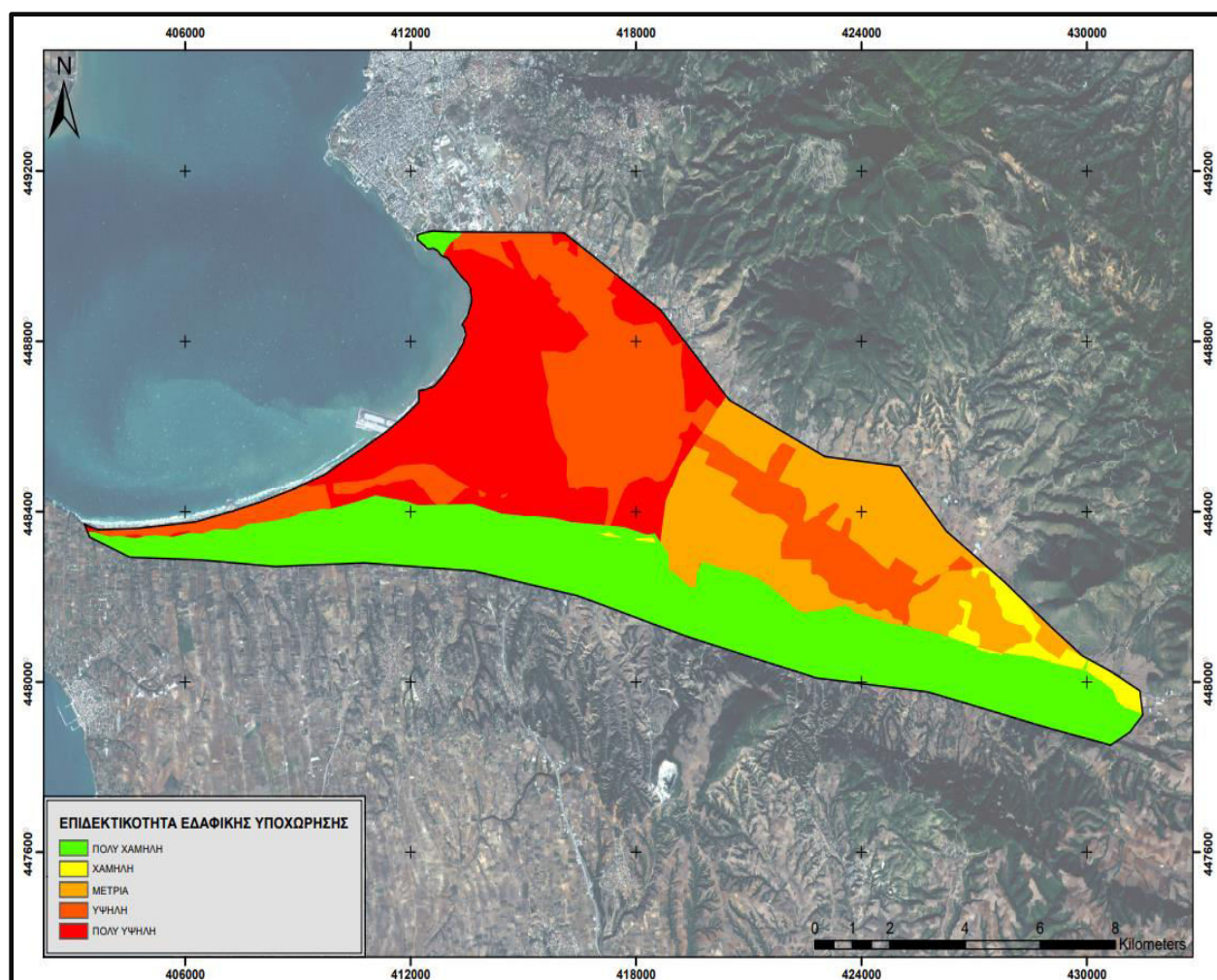


Figure 7. Land Subsidence Susceptibility Map of the Anthemountas Basin

Furthermore, data from the statistical analysis of the four Thematic Levels of Information were calculated. These data concern the calculation of the frequency and the relative frequency of occurrence of water intake sites as a function of the four factors influencing the phenomenon of land subsidence. As has been mentioned above, the Thematic Level of water intake sites was produced in order to evaluate the results of the production process of the Land Subsidence Susceptibility Map of the study area. At this point, the statistical results of the Thematic Level of Land Use are given.

ΧΡΗΣΗ ΓΗΣ	(1) ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΘΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΛΗΨΙΑΣ	(2) ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΚΤΑΣΗΣ	(1)/(2)	ΣΧΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ
[1] ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	0,35%	0,59%	0,5932	12,07%
[2] ΜΗ ΣΥΝΕΧΗΣ ΑΣΤΙΚΟΣ ΙΣΤΟΣ	3,53%	6,90%	0,5116	10,41%
[3] ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΖΟΝΕΣ	7,07%	7,85%	0,9006	18,33%
[4] ΑΕΡΟΔΡΟΜΙΑ	3,18%	8,98%	0,3541	7,21%
[5] ΑΘΛΗΤΙΚΕΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ	0,00%	0,14%	0,0000	0,00%
[6] ΜΗ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΗ ΑΡΟΣΙΜΗ ΓΗ	32,16%	41,60%	0,7731	15,73%
[7] ΜΟΝΙΜΑ ΚΑΛΛΙΕΡΤΗΣΙΜΗ ΓΗ	0,00%	1,06%	0,0000	0,00%
[8] ΕΛΑΙΩΝΕΣ	0,00%	0,57%	0,0000	0,00%
[9] ΒΟΣΚΟΤΟΠΙΑ	0,00%	0,28%	0,0000	0,00%
[10] ΣΥΝΘΕΤΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΚΑΛΛΙΕΡΤΕΙΑΣ	53,71%	30,14%	1,7820	36,26%
[11] ΚΑΛΛΙΕΡΤΕΙΕΣ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	0,00%	0,72%	0,0000	0,00%
[12] ΚΩΝΟΦΟΡΑ ΔΑΣΗ	0,00%	0,32%	0,0000	0,00%
[13] ΣΚΛΗΡΟΦΥΛΛΗ ΒΛΑΣΤΗΣΗ	0,00%	0,54%	0,0000	0,00%
[14] ΑΛΜΥΡΑ ΕΛΗ	0,00%	0,31%	0,0000	0,00%

Table 2. Frequency and relative incidence of water abstraction sites by land use

Observing the relevant statistical results, both at table and diagram level, it can be concluded that the largest percentage of water abstraction sites is found in the case of complex cropping patterns (53.71%) followed by non-irrigated arable land (32.16%) and then by industrial and anthropogenic uses. Also, a significant number of land uses do not have water intake sites at all. In terms of relative frequency rates, the first place is again occupied by the land use of complex cropping patterns (36.26%), followed by industrial zones (18.33%) and non-irrigated arable land (15.73%). The above observations lead to the conclusion that land uses are obviously a function of the over-pumping of groundwater that leads to land subsidence phenomena, however, other factors (such as geology) may be the most important for the degree of development and the places where the phenomena occur.

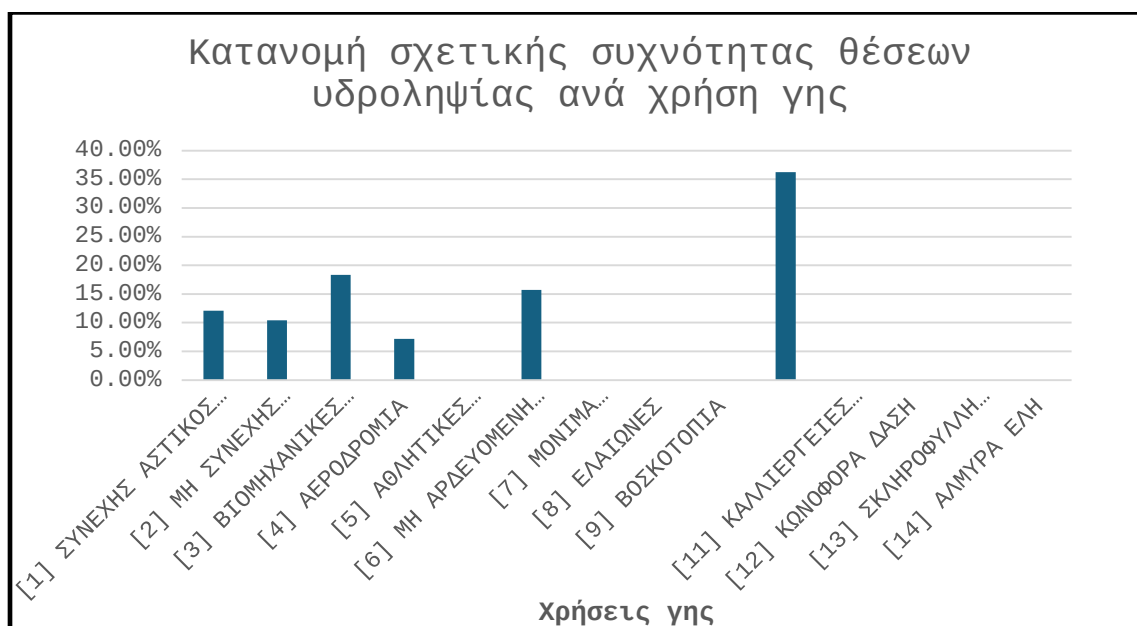


Figure 8. Frequency and relative incidence of water abstraction sites by land use

It is worth mentioning that a relative weakness of the present investigation concerns the quantitative evaluation of the results. In corresponding susceptibility investigations, as for example in the cases of landslides, recorded landslide locations are used as an evaluation of the prediction quality of the models through ROC curves. However, due to the specialized nature of the phenomenon of land subsidence, the limited number of data and the peculiarities of the study area, in this case, such an evaluation was not possible. The use of water intake points, although they could potentially be used for this type of evaluation, in the given case this was not considered reliable, because as it was shown by the statistical analysis of the Thematic Levels, their distribution does not fully agree with the spatial differences of the parameters, obviously due to the different degree of pumping in each position and the purpose of their use, data which could not be obtained. However, as will be presented below, a qualitative evaluation of the results was carried out. A specific example is given as follows.

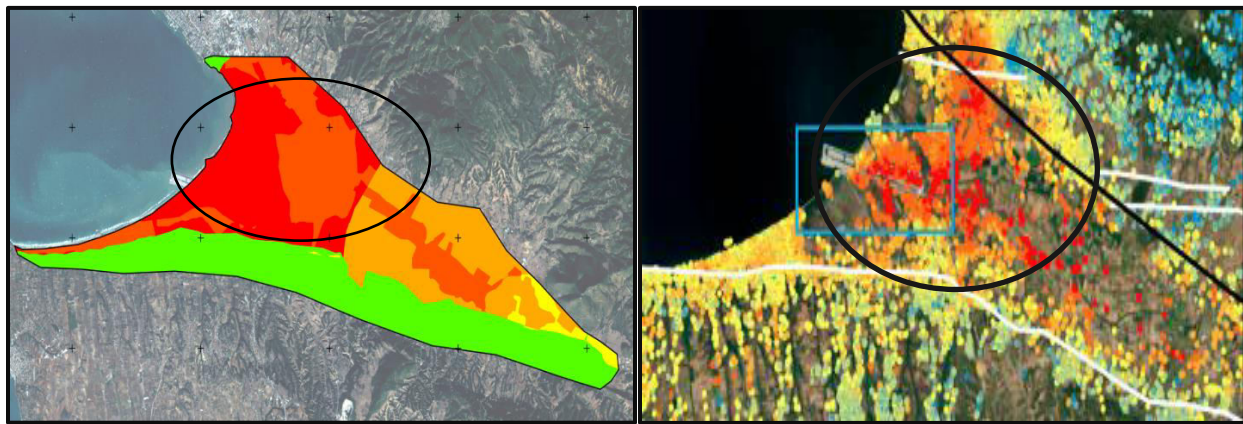


Figure 9. Qualitative comparison of results

Utilizing the map of the rate (velocity) of land subsidence in the study area, as produced during the scientific work of Loupasakis et al., (2020), in which Interferometric data was utilized, the spatial agreement of the critical areas of high and very highly susceptible areas to the high velocities of land subsidence can easily be observed. Accordingly, in the south of the area where lower susceptibility has been predicted, lower velocities have been calculated.

In conclusion, as far as everything is concerned, the final map produced could be an aid and an initial background for more detailed investigations in the area under study, while at the same time it could offer an initial approach to the degree of danger that the basin runs through, and therefore to the organization and taking of the necessary measures to avoid possible losses.