



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ, ΙΣΤΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ



ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Ε. ΝΤΟΥΒΑΡΤΖΗΣ

ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ
ΤΟΥ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ 2023 ΣΤΗΝ ΤΟΥΡΚΙΑ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ
ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΑΡΧΟΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ
ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΟΡΟΝΤΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ 2024



[λευκή σελίδα]



ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ Ε. ΝΤΟΥΒΑΡΤΖΗΣ

Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 6113

ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ
ΤΟΥ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ 2023 ΣΤΗΝ ΤΟΥΡΚΙΑ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ
ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΑΡΧΟΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ
ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΟΡΟΝΤΗ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Τεκτονικής, Ιστορικής και Εφαρμοσμένης
Γεωλογίας

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας και Υδρογεωλογίας

Επιβλέπων

ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ
(Αναπληρωτής καθηγητής)

©Βασίλειος Ε. Ντουβαρτζής, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Τεκτονικής, Ιστορικής και
Εφαρμοσμένης Γεωλογίας, 2024

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΠΡΟΚΑΛΟΥΜΕΝΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΟΥ
ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΥ 2023 ΣΤΗΝ ΤΟΥΡΚΙΑ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ
ΤΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΥΠΑΡΧΟΝ ΥΔΡΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΟΥ ΠΟΤΑΜΟΥ ΟΡΟΝΤΗ

– Διπλωματική Εργασία



©Vasileios E. Ntouvartzis, School of Geology, Dept. of Structural, Historical & Applied Geology, 2024

All rights reserved.

MAPPING OF LIQUEFACTION CAUSED BY THE FEBRUARY 2023 EARTHQUAKE IN TURKEY AND CORRELATION OF ITS SPATIAL DISTRIBUTION WITH THE EXISTING HYDROGRAPHIC NETWORK OF THE ORONTES RIVER

– *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



Αφιερώνω την πτυχιακή αυτή εργασία στην οικογένειά μου...



Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσοι συνέβαλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Πρώτα απ' όλα, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα αναπληρωτή καθηγητή μου, Παπαθανασίου Γεώργιο, για την καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Τμήματος Γεωλογίας ΑΠΘ για την ακαδημαϊκή γνώση και τα εφόδια που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, δεν θα μπορούσα να παραλείψω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, των οποίων η συνεχής υποστήριξη, ηθική και υλική, ήταν απαραίτητη για την επίτευξη αυτού του στόχου.



Το φαινόμενο της ρευστοποίησης το οποίο συμβαίνει κατά την διάρκεια μίας σεισμικής δόνησης, αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα στις καταστροφές που υπέστησαν οι ανθρώπινες κατασκευές κατά τους σεισμούς της 6^{ης} Φεβρουαρίου του 2023 στην περιοχή του Hatay στην Τουρκία. Στην συγκεκριμένη περιοχή εκδηλώθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης κυρίως στην πλημμυρική πεδιάδα και στα εσωτερικά τμήματα των μαιάνδρων (point bars) του ποταμού Ορόντη. Με την λεπτομερή αποτύπωση των ρευστοποιήσεων εκατέρωθεν του ποταμού Ορόντη και τον προσδιορισμό του αποθετικού περιβάλλοντος, έγινε συσχέτιση της χωρικής κατανομής των εμφανίσεων ρευστοποίησης με το υπάρχον υδρογραφικό δίκτυο του ποταμού. Με την χρήση του προγράμματος QGIS 3.28.11 πραγματοποιήθηκε η λεπτομερής αποτύπωση των εμφανίσεων ρευστοποίησης στα εσωτερικά τμήματα των μαιάνδρων και με την βοήθεια του Google Earth Pro αποτυπώθηκαν οι πλευρικές εξαπλώσεις εκατέρωθεν του ποταμού. Το αποτέλεσμα που προέκυψε από την μελέτη είναι ότι το περιβάλλον απόθεσης έχει πολύ σημαντικό ρόλο στην επιδεκτικότητα ενός εδάφους στο φαινόμενο της ρευστοποίησης και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή μελέτης το μεγαλύτερο ποσοστό των εμφανίσεων ρευστοποίησης βρίσκονται στα εσωτερικά τμήματα των μαιάνδρων και σε απόσταση έως 180 μέτρα από το ελεύθερο μέτωπο του ποταμού Ορόντη.

Λέξεις κλειδιά

Ρευστοποίηση, περιβάλλον απόθεσης, Τουρκία, ποταμός Ορόντης



ABSTRACT

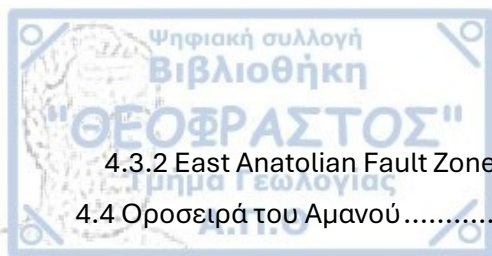
The liquefaction phenomenon that occurs during an earthquake tremor was a major factor in the damage to human structures during the February 6, 2023, earthquakes in the Hatay region of Turkey. In this region, liquefaction phenomena occurred mainly in the floodplain and the inner parts of the meanders (point bars) of the Orontes River. With the detailed mapping of liquefaction on both sides of the Orontes River and the identification of the depositional environment, the spatial distribution of liquefaction occurrences was correlated with the existing hydrographic network of the river. Using the QGIS program 3.28.11, a detailed mapping of the liquefaction occurrences was carried out in the inner parts of the meanders and with the help of Google Earth Pro were mapped the lateral spreadings on both sides of the river. The result obtained from the study is that the depositional environment has a very important role in the susceptibility of a soil to liquefaction phenomenon and more specifically in the study area the largest percentage of liquefaction occurrences are in the inner parts of the meanders and at a distance of up to 180 m from the free face of the Orontes River.

Key words

Liquefaction, depositional environment, point bar, counter point bar, Turkey, Orontes River

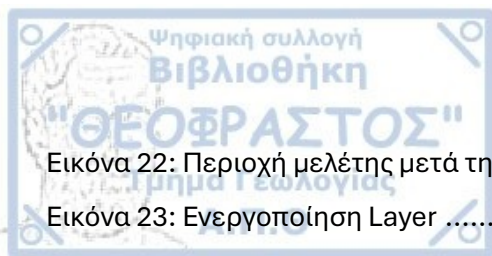


ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Φαινόμενα ρευστοποίησης	2
1.1 Ορισμοί ρευστοποίησης	2
1.2 Μηχανισμός γένεσης ρευστοποίησης	2
1.3 Διαδικασία ρευστοποίησης	2
1.4 Χαρακτηριστικά ρευστοποίησης	4
1.5 Χαρακτηριστικά φαινόμενα εκδήλωσης ρευστοποίησης	4
1.5.1 Κώννοι άμμου	6
1.5.2 Πλευρικές εξαπλώσεις	7
1.5.3 Καθιζήσεις	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Κριτήρια επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση	10
2.1 Ηλικία	10
2.2 Αποθετικό περιβάλλον	11
2.3 Υδροφόρος ορίζοντας	13
2.4 Σχετική πυκνότητα	14
2.5 Κοκκομετρική σύσταση	14
2.6 Σεισμικότητα	18
2.7 Ιστορικές εμφανίσεις ρευστοποίησης	18
2.8 Κριτήρια επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση σε κλίμακα περιφέρειας	19
2.9 Ταξινόμηση της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Συσχέτιση εξέλιξης ποτάμιων συστημάτων με την εκδήλωση φαινομένων ρευστοποίησης	22
3.1 Counter point bars	24
3.2 The Bar-Type Index (BTI)	25
3.3 Point bars – Scroll bars	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιοχή μελέτης	36
4.1 Λεκάνη απορροής του ποταμού Ορόντη-Ασί	37
4.2 Γενική τεκτονική και γεωλογία λεκάνης	38
4.3 Γενική τεκτονική της ανατολικής Μεσογείου	38
4.3.1 Cyprus – Antakya Fault (CAF)	39



4.3.2 East Anatolian Fault Zone (EAFZ)	40
4.4 Οροσειρά του Αμανού	41
4.5 Τάφος της Antakya	41
4.6 Πεδιάδα του Amik	42
4.7 Γεωλογία Antakya Graben	44
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σεισμοί Τουρκία 06/02/2023.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αστοχίες λόγω της ρευστοποίησης.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Ποσοτικοποίηση χωρικής κατανομής ρευστοποιήσεων με συγκεκριμένα γεωμορφολογικά συστήματα.....	58
7.1 Στόχος διπλωματικής εργασίας	58
7.2 Χωρική κατανομή ρευστοποιήσεων και λεπτομερή ψηφιακή αποτύπωση τους	58
7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με την διεθνή βιβλιογραφία	77
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

Εικόνα 1: Αστοχίες λόγω ρευστοποίησης στο σεισμό της Niigata το 1964 (Elfass et al., 2006)	5
Εικόνα 2: Πλευρική εξάπλωση κατά μήκος του ποταμού Πηνειού (Βαλκανιώτης et al., 2021 και Παπαθανασίου et al., 2022)	5
Εικόνα 3: Κρατήρας από άμμο (Βαλκανιώτης et al., 2021 και Παπαθανασίου et al., 2022)	6
Εικόνα 4: Αστοχία του φράγματος San Fernando, 1971 (Jinto and Davidson, 2010)	12
Εικόνα 5: (a) Ανάδυση (γκρι) λεπτόκοκκου υλικού στην περιοχή του Fishing Shelter στο Iskenderun , (b) Ένα μικρό ηφαίστειο άμμου κοντά στο Fishing Shelter στο Iskenderun [36ο 35' 26.54" N; 36ο 10' 34.619" E] (Φωτογραφίες από M.M. Monkul, 2023).....	52
Εικόνα 6: (a),(b) Αστοχία δίπλα σε πύργο ενός τεμένους του Nihal Atakas Mosque λόγω ρευστοποίησης στο Iskenderun (Φωτογραφίες από M.M. Monkul, 2023).....	53
Εικόνα 7: Διαρρηγμένος τοίχος λόγω της πλευρικής εξάπλωσης στο Iskenderun [36ο 35' 36.00' ' N; 36ο 9' 32.96" E] (Φωτογραφία από M.M. Monkul, 2023).	53
Εικόνα 8: a) Η κατάσταση της ασφάλτου και του πεζοδρομίου και οι ρωγμές που εμφανίζονται ανάμεσα στο εμπορικό κέντρο και στην στρατιωτική βάση στο Iskenderun , b) Πλευρικές παραμορφώσεις (περίπου 25 με 35 εκατοστά) της ασφάλτου σε διάφορες κατευθύνσεις [36° 35' 36.29" N ; 36° 9' 36.82" E] (Φωτογραφίες από M.M. Monkul, 2023).	54
Εικόνα 9: Αναδυόμενο αμμώδη υλικό γύρω από κατοικία στο Iskenderun (Demir et al., 2023).	54
Εικόνα 10: Αστοχίες λόγω ρευστοποίησης που παρατηρήθηκαν στην περιοχή Dört Yol του Hatay (Demir et al., 2023).....	56
Εικόνα 11: Ρευστοποίηση του εδάφους με αποτέλεσμα την κατακόρυφη μετατόπιση του δρόμου σε μία μεταλλουργική εγκατάσταση στην περιοχή του Dört Yol του Hatay (Cakir και Cetin, 2023).....	56
Εικόνα 12: Ανάδυση άμμου (αριστερά) και ανατροπή κτηρίου (δεξιά) στην περιοχή Gölbaşı του Adıyaman λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης (Demir et al., 2023).	57
Εικόνα 13: Τοποθέτηση Google Hybrid	58
Εικόνα 14: Δημιουργία New Shapefile Layer	59
Εικόνα 15: Καρτέλα New Shapefile Layer.....	59
Εικόνα 16: Συμπλήρωση στοιχείων στην καρτέλα New Shapefile Layer	60
Εικόνα 17: Επιλογή συστήματος αναφοράς συντεταγμένων	61
Εικόνα 18: Συμπλήρωση στοιχείων στην καρτέλα New Field	62
Εικόνα 19: Εμφάνιση και σωστή τοποθέτηση των Layers	63
Εικόνα 20: Τοποθέτηση γεωαναφερμένων δορυφορικών εικόνων	64
Εικόνα 21: Περιοχή μελέτης χωρίς επεξεργασία	64



Εικόνα 22: Περιοχή μελέτης μετά την επεξεργασία	65
Εικόνα 23: Ενεργοποίηση Layer	66
Εικόνα 24: Δημιουργία πολυγώνου.....	66
Εικόνα 25: Διαδικασία δημιουργίας πολυγώνου	67
Εικόνα 26: Εμφάνιση του πολυγώνου	68
Εικόνα 27: Διόρθωση πλευράς του πολυγώνου	68
Εικόνα 28: Πολύγωνο πριν την διόρθωση της πλευράς του	69
Εικόνα 29: Πολύγωνο μετά την διόρθωση της πλευράς του	69
Εικόνα 30: Προσθήκη ποταμού με χρώμα	70
Εικόνα 31: Προσθήκη γενικών σημείων εμφανίσεων ρευστοποιήσεων όλων των ειδών	71
Εικόνα 32: Περιοχή μελέτης (1) λεπτομερούς ψηφιοποίησης.....	71
Εικόνα 33: Περιοχή μελέτης (2) λεπτομερούς ψηφιοποίησης.....	72
Εικόνα 34: Εμφάνιση ψηφιοποιήσεων σε πίνακα	72
Εικόνα 35: Εμφάνιση πίνακα και επιλογές επεξεργασίας δεδομένων.....	73
Εικόνα 36: Πλευρική εξάπλωση 1 (lateral 1).....	74
Εικόνα 37: Πλευρικές εξαπλώσεις 2,3,4,5,6,7 (lateral 2, lateral 3, lateral 4, lateral 5, lateral 6, lateral 7)	74
Εικόνα 38: Πλευρική εξάπλωση 8 (lateral 8).....	75
Εικόνα 39: Πλευρικές εξαπλώσεις 9,10 (lateral 9, lateral 10)	75
Εικόνα 40: Μέτρηση έκτασης πλευρικής εξάπλωσης	76
Εικόνα 41: Μέτρηση μέγιστης απόστασης της πλευρικής εξάπλωσης από τον ποταμό	76
Εικόνα 42: Αξιολόγηση των τύπων ετερογένειας του ποταμού Ορόντη με βάση την μεθοδολογία που προτείνει η Russell, 2017, (Ταφτσόγλου et al., 2024).....	80



Σχήμα 1: Μηχανισμός ρευστοποίησης (Engineering Discoveries, 2020)	3
Σχήμα 2: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τα ρευστοποιημένα στρώματα και τα υπερκείμενα χαρακτηριστικά ρευστοποίησης (Tuttle, 2019).....	6
Σχήμα 3: Ρευστοποίηση του εδάφους και πλευρική εξάπλωση για διαφορετικές εδαφικές συνθήκες: (α) ήπια κλίση και (β) ελεύθερη επιφάνεια (Raja et al.,2023).	8
Σχήμα 4: Μηχανισμός καθίζησης (Engineering Discoveries, 2020)	9
Σχήμα 5: Επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στο φαινόμενο της ρευστοποίησης (Shioi, 2020).....	13
Σχήμα 6: Διάγραμμα μπλοκ με απλουστευμένες γεωμορφές μαιανδρικού ποταμού και ιζηματογενή χαρακτηριστικά(Από Ingabire Abayo et al. (2023) τροποποιημένο από Russell et al., 2021).	23
Σχήμα 7: Μοντέλο μετανάστευσης μαιάνδρου (Sylvester et al., 2021)	24
Σχήμα 8: Θεωρητικό μοντέλο μετανάστευσης μαιάνδρου, Sylvester et al., 2021	25
Σχήμα 9: Απεικόνιση του δείκτη BTI με ένα κινηματικό μοντέλο που βασίζεται στους Howard και Knutson (1984).	26
Σχήμα 10: Δορυφορική εικόνα και ανάλυση της περιοχής του ποταμού Mamoré στην Βολιβία. (A-F) Εξέλιξη των θέσεων των καναλιών, των αποκοπών και των αποθέσεων χρωματισμένων με τον τύπο BTI από το 1990 έως το 2018. (G) Αληθινό χρώμα δορυφορικής εικόνας του 2018 της περιοχής (ευγενική προσφορά της Planet Labs, Inc.) (H) Αποθέσεις καναλιών χρωματισμένες με βάση την ηλικία (Z. Sylvester et al., 2021).....	27
Σχήμα 11: Κατασκευή ενός μοντέλου ετερογένειας από μια εικόνα κάτοψης μαιάνδρου. (A) Εκτιμώμενες τροχιές μαιάνδρου μέσω των οποίων έχει μεταβεί στο πιο πρόσφατο σχήμα- (B) Συλλογή των ερμηνειών της ετερογένειας που έγιναν στα σημεία B i)-iv)- (C) ένας χάρτης των εκτιμώμενων σχετικών μεγεθών κόκκων για την πιο πρόσφατη μορφή του μαιάνδρου (Russell et al., 2018).	35



Χάρτης 1: Χάρτης επισκόπησης των περιοχών ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης που εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν με τη χρήση δορυφορικών εικόνων. Περιοχές με μεγάλες συγκεντρώσεις εκδηλώσεων ρευστοποίησης είναι η πεδιάδα Amik βόρεια Hatay/Antakya, οι εκτεταμένες ποτάμιες λεκάνες κοντά στο επίκεντρο M7,7 και οι παράκτιες πεδιάδες της Hatay/Antakya και Iskenderun. Απλοποιημένη γεωλογία από το MTA (2002), (Taftsoglou, 2023). ...	11
Χάρτης 2: Χωρική κατανομή φαινομένων ρευστοποίησης για την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου από το 373 π.Χ. έως το 2020 (Παπαθανασίου, 2022).	19
Χάρτης 3: Χάρτης των γεωγραφικών διαμερισμάτων της Τουρκίας (Dewdney και Yapp, 2024).....	36
Χάρτης 4: Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ορόντη – Ασί (Karataş, 2016)	37
Χάρτης 5: : Τεκτονικό περιβάλλον Ανατολικής Μεσογείου (Hall et al., 2005 και Reilinger et al., 2006)	39
Χάρτης 6: Ένα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου για την περιοχή μελέτης και την περιφέρειά της, στο οποίο φαίνονται τα κύρια ενεργά ρήγματα και οι μορφοτεκτονικές μονάδες (Tari et al., 2014).....	40
Χάρτης 7: Το γενικό τεκτονικό καθεστώς της Τουρκίας (μικρή εικόνα) και τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά του EAFZ (Demir et al., 2023).....	41
Χάρτης 8: Ο Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Hatay (Karataş, 2016).....	43
Χάρτης 9: Γεωλογία Antakya Graben (Tari et al., 2014)	47
Χάρτης 10: Ρήγματα, περιοχές σεισμών, πληγείσες επαρχίες και κατανομή epicέντρων σεισμών ($M \geq 4,0$) που συνέβησαν μεταξύ 6 Φεβρουαρίου 2023, και 20 Φεβρουαρίου 2023 (όπως τροποποιήθηκε από AFAD (2023)). Τα κόκκινα αστέρια και τα μαύρα τρίγωνα υποδεικνύουν την τοποθεσία των epicέντρων των δύο σεισμών που έλαβαν χώρα στις 6 Φεβρουαρίου 2023, και τις τοποθεσίες μέτρησης στη συγκεκριμένη μελέτη, αντίστοιχα.	49
Χάρτης 11: Χάρτης έντασης επιτάχυνσης για τον σεισμό Kahramanmaras-Pazarcik M7.8 (USGS, 2023).....	50
Χάρτης 12: Δορυφορική εικόνα (αριστερά) και Χάρτης επιδεκτικότητας (δεξιά) ενός τμήματος του ποταμού Ορόντη στην Τουρκία (Karakas et al., 2024).....	79



Πίνακας 1: Κατάταξη συνεκτικότητας και αντοχής εδαφών (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002).....	14
Πίνακας 2: Αξιολόγηση της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών με βάση το περιβάλλον απόθεσης και την ηλικία των ιζημάτων [Από Παπαθανασίου, Γ. (2022) τροποποιημένο από Youd και Perkins (1978)].	21
Πίνακας 3: Ταξινόμηση της μορφής του μαιάνδρου και των χαρακτηριστικών κάθε γεωμετρικά καθορισμένου σχήματος (Russell, 2017).	30
Πίνακας 4: Ένα σχήμα που δείχνει παραδείγματα της βιβλιογραφίας όπου απεικονίζεται η αλλαγή του σχήματος του μαιάνδρου- (Α) Ielpi & Ghinassi, (2014)- (Β) Hooke (1977)- (Γ) Bridge (2003).	31
Πίνακας 5: Ταξινόμηση της επιφανειακής έκφρασης του μοτίβου scroll-bar. Ορίστηκαν 8 τύποι (Type 1 - Type 8) και 22 υποτύποι σύμφωνα με τον εντοπισμό παραλλαγών στη συνολική διαδικασία που περιγράφεται από την κατηγορία τύπου (Russell et al., 2018).	32
Πίνακας 6: Ένας πίνακας για την περιγραφή των σχετικών αναλογιών της χονδρόκοκκης προς λεπτόκοκκης λιθολογίας για κάθε καθορισμένο τύπο ετερογένειας. Τα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αναφέρονται στα πιο χονδρόκοκκα και λεπτότερο ίζημα που παρατηρείται στην απόθεση point-bar (Russell et al., 2018).....	33
Πίνακας 7: Γεωλογία Antakya Graben (Tari et al., 2014)	45
Πίνακας 8: Αποτελέσματα μετρήσεων των παραπάνω παραμέτρων.....	77

Πίνακας διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Καμπύλη κατατομής του μεγέθους των υλικών του εδάφους για την επιδεκτικότητα ρευστοποίησης (Suprijanto, 2020)	15
Διάγραμμα 2: Προβολή περιοχών επιδεκτικών σε ρευστοποίηση, σύμφωνα με τα προτεινόμενα κριτήρια [Από Παπαθανασίου (2022) τροποποιημένο από Seed et al. (2003)].	17
Διάγραμμα 3: Προβολή περιοχής επιδεκτικής σε ρευστοποίηση, σύμφωνα με τα προτεινόμενα κριτήρια [Από Παπαθανασίου (2022) τροποποιημένο από Bray και Sancio (2006)].	17
Διάγραμμα 4: Στρωματογραφικό προφίλ εδάφους για τις παράκτιες περιοχές του Iskenderun με την χρήση των μέσων ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων (Vs) (Ozener et al., 2023)	51
Διάγραμμα 5: Καμπύλες κατανομής μεγέθους κόκκων τριών επιφανειακών δειγμάτων αναδυόμενου υλικού που συλλέχθηκαν από διαφορετικές τοποθεσίες και οι διαφορετικές ζώνες δυνατότητας ρευστοποίησης (Ozener et al., 2023).	55



Το φαινόμενο της ρευστοποίησης προκαλεί αστοχίες κρίσιμες για τις ανθρώπινες κατασκευές. Τα τελευταία δεκαπέντε (15) χρόνια έχουν καταγραφεί και μελετηθεί φαινόμενα ρευστοποίησης στη Νέα Ζηλανδία, την Ιταλία, την Ελλάδα και την Τουρκία. Το αποτέλεσμα που προέκυψε από την παραπάνω καταγραφή και μελέτη δείχνει ότι η χωρική κατανομή των εμφανίσεων ρευστοποίησης σχετίζεται με το περιβάλλον απόθεσης (Wotherspoon et al., 2012, Di Manna et al., 2012, Bastin et al., 2015, Papathanassiou et al., 2012; 2015; 2022, Civico et al., 2015, Taftsoglou et al., 2023, Abayo et al., 2023). Συγκεκριμένα, στη μελέτη για την Τουρκία (σεισμοί 6^{ης} Φεβρουαρίου 2023) καταγράφηκαν τα περισσότερα φαινόμενα ρευστοποίησης στην πλημμυρική πεδιάδα του ποταμού Ορόντη, που αποτελείται από αμμώδη, μη συνεκτικά, κορεσμένα με νερό εδάφη Ολοκαινικής ηλικίας. Επιπλέον, εκδηλώθηκαν φαινόμενα ρευστοποίησης σε παλαιοκοίτες και παλαιομάνες που βρίσκονται εκατέρωθεν του ποταμού. Για την λεπτομερή αποτύπωση των εμφανίσεων ρευστοποίησης, χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα QGIS και Google Earth Pro με αποτέλεσμα την καταγραφή της χωρικής κατανομής τους. Συμπερασματικά τα περισσότερα φαινόμενα ρευστοποίησης εκδηλώθηκαν στην πλημμυρική πεδιάδα του ποταμού Ορόντη και πιο συγκεκριμένα στα εσωτερικά τμήματα των μαιάνδρων (point bars) όπου αποτίθεται υλικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Φαινόμενα ρευστοποίησης

1.1 Ορισμοί ρευστοποίησης

Ο πρώτος ορισμός που δόθηκε για το φαινόμενο της ρευστοποίησης ήταν από τους Mogami και Kubo το 1953. Ως ρευστοποίηση όρισαν μια φυσική διεργασία η οποία συμβαίνει κατά την διάρκεια ενός σεισμού σε κορεσμένα, χαλαρά, αμμώδη εδάφη τα οποία είναι καλυμμένα από υπερκείμενα αδιαπέραστα ιζήματα σε ορισμένη απόσταση από το επίκεντρο του σεισμού. Μετά από είκοσι (20) χρόνια ο Youd (1973) όρισε την ρευστοποίηση ως την μεταβολή ενός κορεσμένου, μη συνεκτικού, κοκκώδους υλικού σε αστράγγιστες συνθήκες από την στερεή, στην ρευστή κατάσταση, ως συνέπεια της αύξησης της πίεσης των πόρων η οποία μειώνει την ενεργό αντοχή του υλικού. Σύμφωνα με τους Castro και Roulos (1977) η ρευστοποίηση είναι ένα φαινόμενο όπου κορεσμένο αμμώδες υλικό υπόκειται σε ανακυκλική δόνηση και χάνει μεγάλο ποσοστό της διατμητικής αντοχής του με αποτέλεσμα να συμπεριφερθεί το υλικό ως ρευστό. Ένας άλλος ορισμός για την ρευστοποίηση είναι ότι το κοκκώδες υλικό που είναι στερεό συμπεριφέρεται ως ρευστό λόγω της αύξησης της πίεσης των πόρων και της μείωσης της διατμητικής αντοχής (Marcuson, 1978).

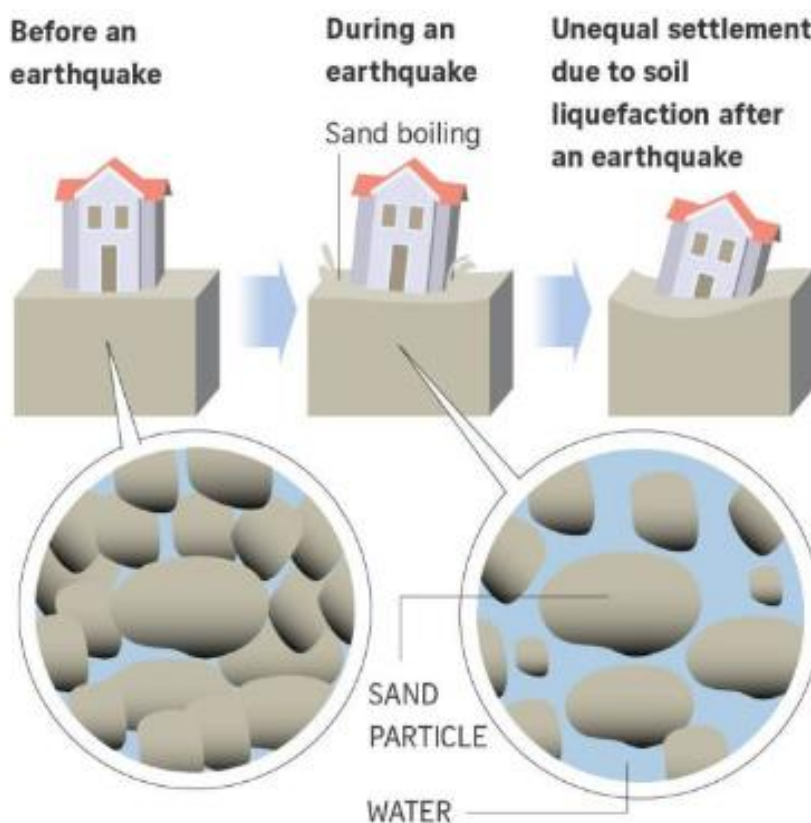
1.2 Μηχανισμός γένεσης ρευστοποίησης

Τα φαινόμενα ρευστοποίησης ομαδοποιούνται επίσης σε δύο (2) κατηγορίες ανάλογα τον μηχανισμό γένεσής τους. Η πρώτη κατηγορία είναι η ανακυκλική κινητικότητα (cyclic mobility) η οποία εμφανίζεται και πιο συχνά σε περιοχές που δεν έχουν κλίση ή έχουν πολύ μικρή κλίση έως και 3° . Οι επιπτώσεις που έχουν στο ανθρωπογενές περιβάλλον χαρακτηρίζονται ήπιες έως πολύ σοβαρές, ανάλογα με το μέγεθός τους. Αυτής της κατηγορίας φαινόμενα ρευστοποίησης προκαλούνται όταν η στατική διατμητική τάση είναι μικρότερη από την διατμητική αντοχή του εδάφους. Η δεύτερη κατηγορία είναι η εδαφική ροή (Flow Failure) η οποία εκδηλώνεται πιο σπάνια από την ανακυκλική κινητικότητα σε χαλαρά μη συνεκτικά ιζήματα τα οποία είναι σε πρηνή και έχουν μεγάλη κλίση. Οι επιπτώσεις αυτών των φαινομένων ρευστοποίησης είναι πάρα πολύ σοβαρές και εδαφικές ροές δημιουργούνται όταν διαβρώνεται ο πόδας ενός πρανού ή όταν αντίστοιχα φορτίζεται η κεφαλή του πρανού. Έτσι το αποτέλεσμα είναι ότι η εκδήλωση εδαφικής ροής προκαλείται όταν η διατμητική τάση που χρειάζεται για να υπάρξει στατική ισορροπία στους εδαφικούς σχηματισμούς, είναι μεγαλύτερη από την υπολειπόμενη διατμητική αντοχή του εδάφους (Kramer, 1996).

1.3 Διαδικασία ρευστοποίησης

Αρχικά το κορεσμένο, μη συνεκτικό, κοκκώδες, σε αστράγγιστες συνθήκες έδαφος βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας εφόσον δεν υπόκειται σε ανακυκλική δόνηση λόγω ενός σεισμού. Οι κόκκοι του συγκεκριμένου εδάφους συγκρατιούνται λόγω της μεταξύ τους τριβής. Κατά την

διάρκεια της δόνησης, οι κόκκοι του εδάφους αυτού προσπαθούν να μειώσουν τα κενά που έχουν μεταξύ τους. Η μετατόπιση αυτή εμποδίζεται από την παρουσία νερού διότι το έδαφος είναι υπό αστράγγιστες συνθήκες, με αποτέλεσμα να αυξάνεται απότομα η πίεση των πόρων, αφού δεν μπορεί να εκτονωθεί. Συνεπώς, η συνεχιζόμενη αύξηση της πίεσης των πόρων μειώνει την διατμητική αντοχή του εδάφους μέχρι που υπερνικάει την ενεργή τάση (σ') που υπάρχει μεταξύ των κόκκων και αστοχεί στο έδαφος. Όταν καταρρεύσει ο δομικός ιστός του εδάφους τότε το έδαφος θα συμπεριφερθεί ως ρευστό και θα εκδηλωθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Εξαιτίας της εκτόνωσης της πίεσης των πόρων το εγκλωβισμένο νερό μαζί με εδαφικό υλικό θα αναδυθεί στην επιφάνεια λόγω της μεγάλης υδραυλικής κλίσης και θα προκληθεί αστοχία στο έδαφος και στις κατασκευές που βρίσκονται από πάνω (Σχήμα 1). Τέλος, έχει παρατηρηθεί η συνέχιση του φαινομένου αυτού, δηλαδή η ανάδυση του εδαφικού υλικού μαζί με νερό, να εκδηλώνεται και μετά το τέλος της σεισμικής δόνησης (Παπαθανασίου, 2006).



Σχήμα 1: Μηχανισμός ρευστοποίησης (Engineering Discoveries, 2020)

1.4 Χαρακτηριστικά ρευστοποίησης

Σημαντικό ρόλο στην ρευστοποίηση και στις αστοχίες που προκαλούνται από αυτήν, έχουν η χωρική κατανομή των ρευστοποιήσιμων εδαφών αλλά και το μέγεθος του σεισμού που θα προκαλέσει το φαινόμενο αυτό. Έτσι ρευστοποιήσεις παρατηρούνται σε εδάφη που βρίσκονται στα επιφανειακά στρώματα μιας περιοχής αλλά και σε βαθύτερους εδαφικούς ορίζοντες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η πραγματική κατανομή των εμφανίσεων των ρευστοποιήσεων γιατί δεν μπορούν να παρατηρηθούν όλες οι ρευστοποιήσεις, αφού μερικές οδηγούν σε αστοχίες στην επιφάνεια του εδάφους και άλλες συμβαίνουν σε βάθος. Πέρα από τις αστοχίες που προκαλούνται κατά την εμφάνιση του φαινομένου της ρευστοποίησης στις ανθρώπινες κατασκευές, σημαντικές επιπτώσεις έχει επίσης στην οικονομία μιας περιοχής αλλά και γενικά στις ζωές των ανθρώπων. Όσον αφορά το μέγεθος του σεισμού, όσο ισχυρότερος είναι ένας σεισμός, τόσο πιθανότερο είναι να προκληθεί και το φαινόμενο της ρευστοποίησης (Yuan et al., 2023). Όπως προαναφέρθηκε, το φαινόμενο της ρευστοποίησης επιδρά καταλυτικά στις ανθρώπινες δραστηριότητες στις περιοχές όπου είναι επιδεκτικές σε αυτό το φαινόμενο. Εκτός από την προφανή αστοχία των κτηρίων, προκαλεί και ζημιές στις ευρύτερες γενικές υποδομές, όπως τα συστήματα ύδρευσης και αποχέτευσης. Ένα τέτοιο χαρακτηριστικό παράδειγμα αλυσίδας καταστροφών (chain effect) προκλήθηκε στον σεισμό του 1906 στο Σαν Φρανσίσκο. Εξαιτίας της ρευστοποίησης που προκλήθηκε από τον σεισμό, καταστράφηκαν οι υπόγειοι σωλήνες ύδρευσης. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει διαθέσιμο νερό στο δίκτυο πυρόσβεσης της πόλης και να καταστήσει αδύνατη την κατάσβεση των πυρκαγιών. Για αυτόν το λόγο, η ρευστοποίηση είναι συχνά ο λόγος που προκαλείται το φαινόμενο αλυσίδας και έχει σοβαρές επιπτώσεις σε όλες τις ανθρώπινες κατασκευές (Youn et al., 2010).

1.5 Χαρακτηριστικά φαινόμενα εκδήλωσης ρευστοποίησης

Το φαινόμενο της ρευστοποίησης εκδηλώνεται με διάφορους τρόπους οι οποίοι προκαλούν με την σειρά τους διαφορετικές αστοχίες στην επιφάνεια του εδάφους. Αρχικά, ένας από τους πιο συνηθισμένους τρόπους εκδήλωσης της ρευστοποίησης που συμβαίνει σε περιοχές χωρίς ή με μικρή κλίση (έως 3°), είναι η ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού με νερό στην επιφάνεια. Μια άλλη χαρακτηριστική εμφάνιση λόγω της ρευστοποίησης είναι τα ηφαίστεια άμμου ή και αλλιώς κρατήρες άμμου. Επιπλέον, εκτός από τις αναδύσεις άμμου, η ρευστοποίηση προκαλεί πλευρικές μετατοπίσεις στο έδαφος κάτω από τις ανθρώπινες κατασκευές αλλά και μερικές φορές προκαλούνται εδαφικές καθιζήσεις ή κατακόρυφες μετατοπίσεις που οδηγούν σε αστοχία τις κατασκευές. Τέλος, μια χαρακτηριστική αστοχία που παρατηρείται συνήθως στις ανθρώπινες κατασκευές λόγω της εκδήλωσης του φαινομένου της ρευστοποίησης, είναι η ανατροπή των κτιρίων (Παπαθανασίου, 2022).

Παρακάτω φαίνονται αρχικά στην εικόνα 1 ,μια χαρακτηριστική εικόνα από ανατροπή κτηριακών συγκροτημάτων λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης των υποκείμενων

εδαφικών σχηματισμών που συνέβη λόγω της σεισμικής δόνησης μεγέθους Ms 7,5 στην Niigata στην Ιαπωνία το 1964, και στην συνέχεια στην εικόνα 2 φαίνεται μια τυπική εμφάνιση πλευρικής εξάπλωσης η οποία βρίσκεται στην περιοχή του Πηνειού κατά μήκος του ποταμού και συνέβη λόγω της σεισμικής δόνησης μεγέθους 6,3 στην περιοχή του Τυρνάβου στη Θεσσαλία το 2021.



Εικόνα 1: Αστοχίες λόγω ρευστοποίησης στο σεισμό της Niigata το 1964 (Elfass et al., 2006)



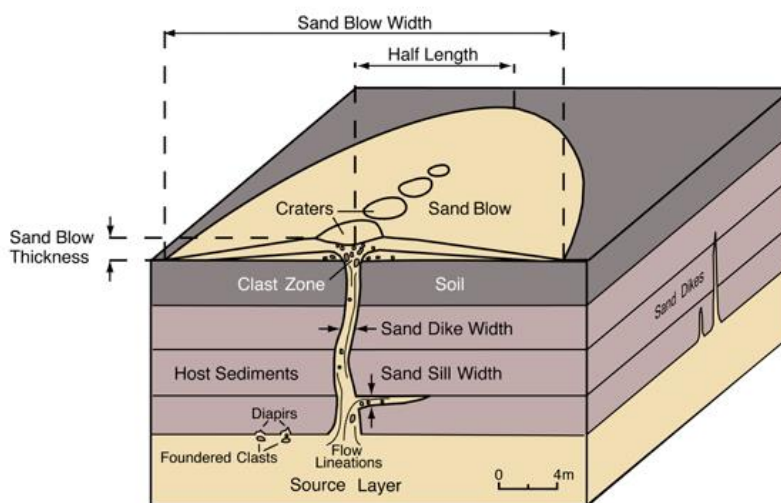
Εικόνα 2: Πλευρική εξάπλωση κατά μήκος του ποταμού Πηνειού (Βαλκανιώτης et al., 2021 και Παπαθανασίου et al., 2022)

1.5.1 Κώνοι άμμου

Στην συνέχεια φαίνεται αρχικά μια χαρακτηριστική εικόνα ενός κρατήρα άμμου ο οποίος δημιουργήθηκε λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης στην περιοχή του Πηνειού έπειτα του σεισμού μεγέθους 6,3 που συνέβη στις αρχές Μαρτίου του 2021 στην περιοχή (Εικόνα 3) και ένα σχηματικό διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η δημιουργία ενός κρατήρα άμμου όπου υπάρχει ένα ρευστοποιήσιμο στρώμα (κίτρινο) το οποίο μετά από μια σεισμική δόνηση ρευστοποιείται και αναδύεται υλικό προς την επιφάνεια σχηματίζοντας τον κρατήρα (Σχήμα 2)



Εικόνα 3: Κρατήρας από άμμο (Βαλκανιώτης et al., 2021 και Παπαθανασίου et al., 2022)



Σχήμα 2: Σχηματικό διάγραμμα που δείχνει τα ρευστοποιημένα στρώματα και τα υπερκείμενα χαρακτηριστικά ρευστοποίησης (Tuttle, 2019).

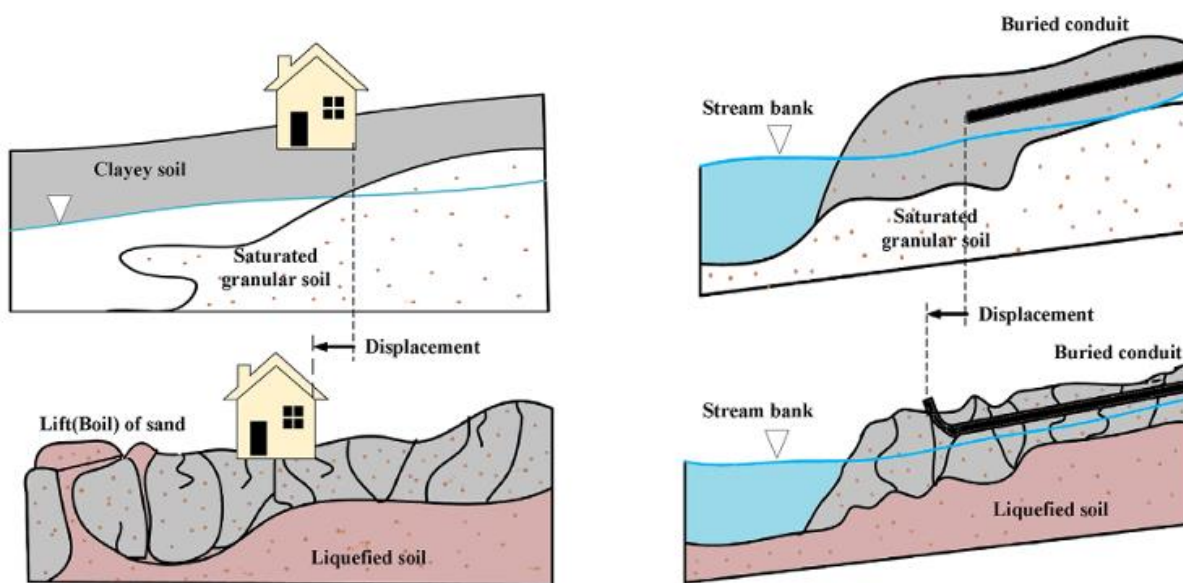
1.5.2 Πλευρικές εξαπλώσεις

Οι πλευρικές μετατοπίσεις ή αλλιώς πλευρικές εξαπλώσεις είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος εκδήλωσης του φαινομένου της ρευστοποίησης και επίσης είναι ένας πολύπλοκος μηχανισμός που προκαλεί αυτόν τον τύπο αστοχίας καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Σύμφωνα με τους Zhang και Zhao (2005), Chu et al (2006) και Valsamis et al (2010), οι πλευρικές εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης (Liquefaction – induced lateral spreading) είναι ένας σεισμικός κίνδυνος που μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ζημιές στις ανθρώπινες κατασκευές. Οι πλευρικές εξαπλώσεις (Dh) λόγω ρευστοποίησης προκαλούνται και σε ήπια κεκλιμένο έδαφος (gently slope) αλλά και σε επίπεδο έδαφος με ελεύθερη επιφάνεια (free face) και η έκτασή τους κυμαίνεται από μερικά χιλιοστά ως και αρκετά μέτρα (Bardet et al, 2002; Youd et al, 2002). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός αστοχίας δημιουργεί διαρρήξεις στο επιφανειακό εδαφικό στρώμα και τον διαχωρίζει σε διακριτά τμήματα (Kramer 1996). Οι διαρρήξεις αυτές γεμίζουν με αμμώδη υλικό και νερό που προέρχονται από υποκείμενο εδαφικό σχηματισμό που έχει ρευστοποιηθεί (Obermeier et al., 2005). Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος των πλευρικών εξαπλώσεων (Dh) χωρίζονται σε τρεις (3) κατηγορίες και ο πρώτος είναι οι σεισμολογικοί παράγοντες, ο δεύτερος είναι οι παράμετροι του ρευστοποιήσιμου στρώματος και ο τρίτος είναι οι τοπογραφικοί παράγοντες (Newmark, 1965; Byrne, 1991; Bartlett και Youd, 1995, Bardet et al, 2002; Youd et al, 2002; Valsamis et al., 2010).

Στους σεισμολογικούς παράγοντες συμπεριλαμβάνονται το μέγεθος του σεισμού (m) και η επικεντρική απόσταση (R). Όσο αυξάνεται το μέγεθος του σεισμού (m), τόσο αυξάνεται και το μέγεθος των πλευρικών εξαπλώσεων (Dh), ενώ όσο αυξάνεται η επικεντρική απόσταση (R), τόσο μειώνεται το μέγεθος των πλευρικών εξαπλώσεων (Dh). Αυτό σημαίνει ότι όσο πιο κοντά στο επίκεντρο (R) ενός σεισμού και όσο πιο ισχυρός είναι ένας σεισμός (m), τόσο μεγαλύτερες σε μέγεθος (έκταση και ποσότητα) θα είναι και οι πλευρικές εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης (Dh).

Στους παράγοντες των ρευστοποιήσιμων στρωμάτων συμπεριλαμβάνονται το αθροιστικό πάχος των κορεσμένων κοκκώδων στρωμάτων (λαμβάνοντας υπόψη τον διορθωμένο αριθμό κρούσεων (μικρότερες από 15)) (T_{15}), οι παράμετροι του εδάφους όπως το μόνο μέγεθος των κόκκων εντός του (T_{15}) ($D_{50_{15}}$) και το ποσοστό των λεπτόκοκκων εντός του T_{15} ($\%F_{15}$). Οπότε όσο η τιμή του T_{15} αυξάνεται, τόσο το μέγεθος των πλευρικών εξαπλώσεων (Dh) αυξάνεται, ενώ όσο αυξάνεται η τιμή $D_{50_{15}}$, τόσο μειώνεται το μέγεθος των πλευρικών εξαπλώσεων (Dh). Αυτό σημαίνει ότι όσο πιο παχύ είναι το στρώμα που είναι επιδεκτικό σε ρευστοποίηση, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η τιμή των πλευρικών εξαπλώσεων (Dh) (Kutter et al. 2004). Επιπλέον, όσο μεγαλύτεροι είναι οι κόκκοι (D_{50}) μέσα σε ένα εδαφικό στρώμα, τόσο πιο εύκολη είναι η αποστράγγισή του, επομένως είναι λιγότερο επιδεκτικό σε ρευστοποίηση και άρα μικρότερη πιθανότητα να προκληθεί πλευρική εξάπλωση (Dh) (Chen et al. 2022). Επίσης, όσο αυξάνεται η τιμή του F_{15} , δηλαδή η παρουσία λεπτόκοκκου υλικού, τόσο μειώνεται η πιθανότητα εκδήλωσης πλευρικών εξαπλώσεων (Dh).

Στους τοπογραφικούς παράγοντες συμπεριλαμβάνεται η γεωμετρία του εδάφους η οποία καθορίζεται από δύο (2) τοπογραφικές παραμέτρους που είναι το ήπιο κεκλιμένο έδαφος (S) και το επίπεδο έδαφος με ελεύθερη επιφάνεια (W) (Bardet et al., 2002; Rezanian et al., 2011; Chen et al., 2022) (Σχήμα 3). Το ήπιο κεκλιμένο έδαφος (S) χαρακτηρίζεται από την μέση κλίση της επιφάνειας του εδάφους και το επίπεδο έδαφος με ελεύθερη επιφάνεια (W) χαρακτηρίζεται από τον λόγο (H/L), όπου το H είναι το ύψος της ελεύθερης επιφάνειας και το L είναι η απόσταση από την ελεύθερη επιφάνεια. Το αποτέλεσμα είναι ότι όσο αυξάνεται ο λόγος ελεύθερης επιφάνειας (W) ή η κλίση (S) τόσο αυξάνει και η τιμή του Dh. Αυτό εξηγείται καθώς με την αύξηση της τιμής W ή S, θα αυξηθεί η διατμητική τάση που προκαλείται στο έδαφος και θα μειωθεί η πλευρική συγκράτηση (Chen et al., 2022). Τέλος, σύμφωνα με τους Bartlett και Yound(1995) θα πρέπει να πραγματοποιείται έλεγχος για την εμφάνιση πλευρικών εξαπλώσεων μέχρι τα σημεία όπου η μέγιστη απόσταση από το ελεύθερο μέτωπο μια υδάτινης επιφάνειας να είναι 100 φορές στο ύψος του μετώπου.

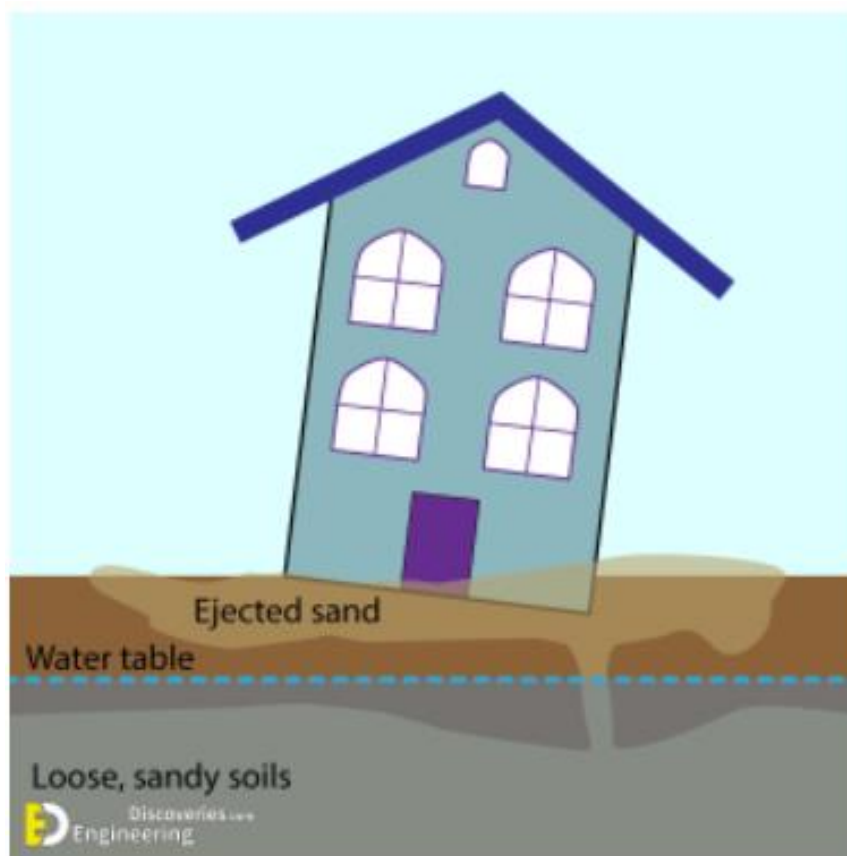


Σχήμα 3: Ρευστοποίηση του εδάφους και πλευρική εξάπλωση για διαφορετικές εδαφικές συνθήκες: (α) ήπια κλίση και (β) ελεύθερη επιφάνεια (Raja et al., 2023).

1.5.3 Καθιζήσεις

Εκτός από τις πλευρικές εξαπλώσεις όπου αναφέρθηκαν εκτενώς σε προηγούμενη παράγραφο, ένα άλλο χαρακτηριστικό φαινόμενο εκδήλωσης λόγω της ρευστοποίησης είναι οι καθιζήσεις. Οι καθιζήσεις προκαλούνται λόγω της σεισμικής δόνησης, η οποία παραμορφώνει το έδαφος στην κατακόρυφη διεύθυνση της επιφάνειάς του, δηλαδή μεταβάλλεται ο όγκος του εδαφικού σχηματισμού λόγω της συμπύκνωσης με αποτέλεσμα να αστοχήσουν οι θεμελιώσεις των

κτηρίων και γενικά οι ανθρώπινες κατασκευές όπως τα καλώδια και οι σωλήνες ύδρευσης και αποχέτευσης που είναι τοποθετημένα σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Ένα χαρακτηριστικό πρόβλημα που προκαλείται από την καθίζηση στις κατασκευές είναι η διαφορική καθίζηση η οποία συμβαίνει εξαιτίας της ποσότητας του αναδυόμενου υλικού η οποία δεν κατανέμεται ίσα σε όλη την επιφάνεια της θεμελίωσης ενός κτηρίου, με αποτέλεσμα να υπάρχουν τμήματα μιας κατασκευής που έχουν καθιζήσει περισσότερο από άλλα τμήματα της ίδιας κατασκευής (Σχήμα 4). Ένας τρόπος για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο των καθιζήσεων στις κατασκευές λόγω της ρευστοποίησης τοποθετούνται πάσσαλοι μεγάλου μήκους κατά την θεμελίωση της κατασκευής μέχρι το βάθος του εν δυνάμει ρευστοποιήσιμου στρώματος, με στόχο την συμπύκνωση του εδάφους ώστε να μην δημιουργηθούν οι κατάλληλες συνθήκες που θα προκαλέσουν την ρευστοποίηση του συγκεκριμένου στρώματος. Τέλος, για να υπολογιστούν οι κατακόρυφες μετατοπίσεις λόγω των σεισμικών δονήσεων σε αμμώδεις εδαφικούς σχηματισμούς έχουν αναπτύξει οι Tokimatsu και Seed (1987) και οι Ishihara και Yoshimine (1992) εμπειρικές σχέσεις οι οποίες κατά κύριο λόγο βασίζονται στο γεγονός ότι εξαιτίας των σεισμικών δονήσεων τα χαλαρά αμμώδη εδαφικά υλικά συμπυκνώνονται και μεταβάλλεται ο όγκος τους με αποτέλεσμα να υπάρχουν κατακόρυφες μετακινήσεις.



Σχήμα 4: Μηχανισμός καθίζησης (Engineering Discoveries, 2020)

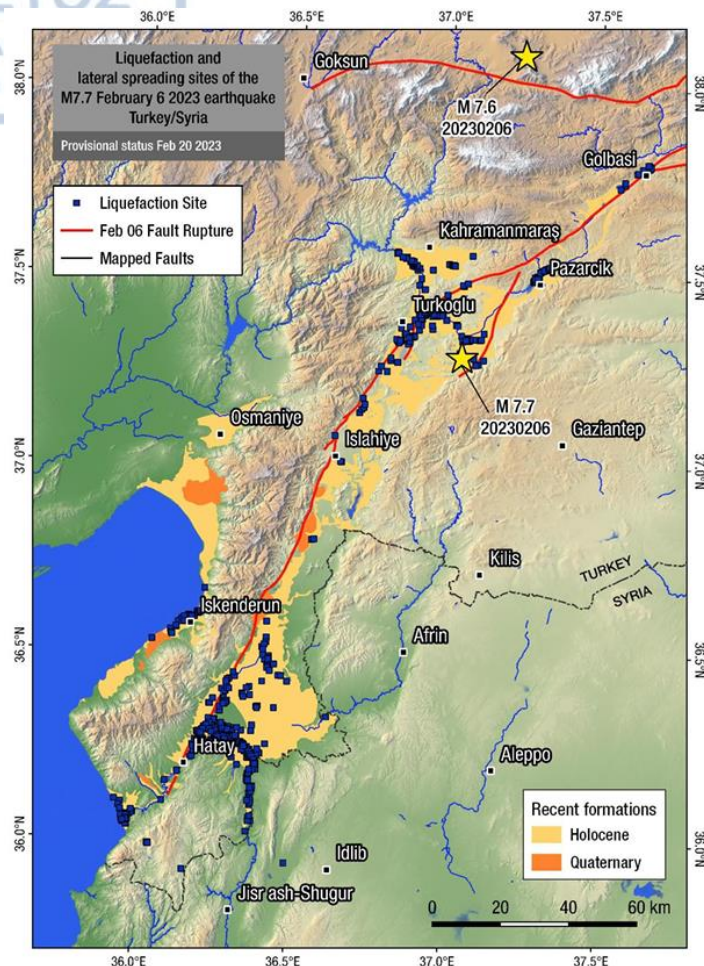
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Κριτήρια επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση

Όπως έχει προαναφερθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης είναι ένα φαινόμενο το οποίο είναι πολύπλοκο και επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Προκειμένου να διαπιστωθεί εάν ένα έδαφος είναι επιδεκτικό σε ρευστοποίηση, θα πρέπει να εξεταστούν διάφορα κριτήρια επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση, που έχουν προκύψει σύμφωνα με την μελέτη ιστορικών περιστατικών εμφάνισης ρευστοποίησης. Έτσι, ως επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση ενός εδαφικού σχηματισμού ορίζεται η ικανότητα του εδάφους να ρευστοποιείται υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

2.1 Ηλικία

Αρχικά, η γεωλογική ηλικία των εδαφικών σχηματισμών έχει σημαντικό ρόλο στην επιδεκτικότητα ρευστοποίησής του. Όσο νεότερες είναι οι αποθέσεις, τόσο μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση παρουσιάζουν (Kramer 1996). Εφόσον είναι κορεσμένες οι εδαφικές αυτές αποθέσεις, τότε θα έχουν μεγαλύτερο βαθμό επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση (Youd, 1998). Σύμφωνα με τον Obermier (1996), τα εδάφη που είναι ηλικίας Άνω Ολοκαίνου, παρουσιάζουν την υψηλότερη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση, εδαφικοί σχηματισμοί ηλικίας Ολοκαίνου έχουν μέση επιδεκτικότητα, ενώ εδάφη ηλικίας Πλειστοκαίνου παρουσιάζουν την χαμηλότερη επιδεκτικότητα. Τέλος, σε ιζήματα Προπλειστοκαινικής ηλικίας δεν έχουν παρατηρηθεί πρόσφατα φαινόμενα ρευστοποίησης.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τον παρακάτω χάρτη (Χάρτης 1) οι περισσότερες εμφανίσεις του φαινομένου της ρευστοποίησης είναι σε εδαφικούς σχηματισμούς ηλικίας Ολόκαινου και ηλικίας Τεταρτογενούς και αυτό συμβαίνει διότι οι εδαφικοί σχηματισμοί των περιοχών αυτών έχουν μικρή (γεωλογική) ηλικία και αποτελούνται από αμμώδη, κοκκώδη υλικά καθώς είναι αλλουβιακές αποθέσεις και λιμναίες αποθέσεις.



Χάρτης 1: Χάρτης επισκόπησης των περιοχών ρευστοποίησης και πλευρικής εξάπλωσης που εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν με τη χρήση δορυφορικών εικόνων. Περιοχές με μεγάλες συγκεντρώσεις εκδηλώσεων ρευστοποίησης είναι η πεδιάδα Amik βόρεια Hatay/Antakya, οι εκτεταμένες ποτάμιες λεκάνες κοντά στο επίκεντρο M7,7 και οι παράκτιες πεδιάδες της Hatay/Antakya και Iskenderun. Απλοποιημένη γεωλογία από το MTA (2002), (Taftoglou, 2023).

2.2 Αποθετικό περιβάλλον

Εκτός από την ηλικία, βασικό κριτήριο για την ταξινόμηση ενός εδαφικού σχηματισμού ως επιδεκτικού προς ρευστοποίηση είναι το περιβάλλον απόθεσής του. Το περιβάλλον απόθεσης ενός εδαφικού σχηματισμού και οι διεργασίες απόθεσής του καθορίζουν τον τύπο του εδάφους, το ιστορικό φόρτισής του και την δυναμική μηχανική συμπεριφορά του (Andreotti et al., 2013; Mitchell και Soga, 2005; Obermeier et al. 1990). Όσον αφορά τον τύπο του εδάφους, δεν είναι επιδεκτικά σε ρευστοποίηση όλα τα εδάφη. Την μεγαλύτερη επιδεκτικότητα στο φαινόμενο της ρευστοποίησης εμφανίζουν τα αμμώδη εδάφη ομοιόμορφης διαβάθμισης, αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί ρευστοποιήσεις σε ιλυώδες εδάφη και χαλικιώδες εδάφη ομοιόμορφης διαβάθμισης (Herl Suprijanto, 2020). Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στην πιθανότητα εκδήλωσης της ρευστοποίησης έχει και το ιστορικό φόρτισής του εδάφους. Πιο συγκεκριμένα

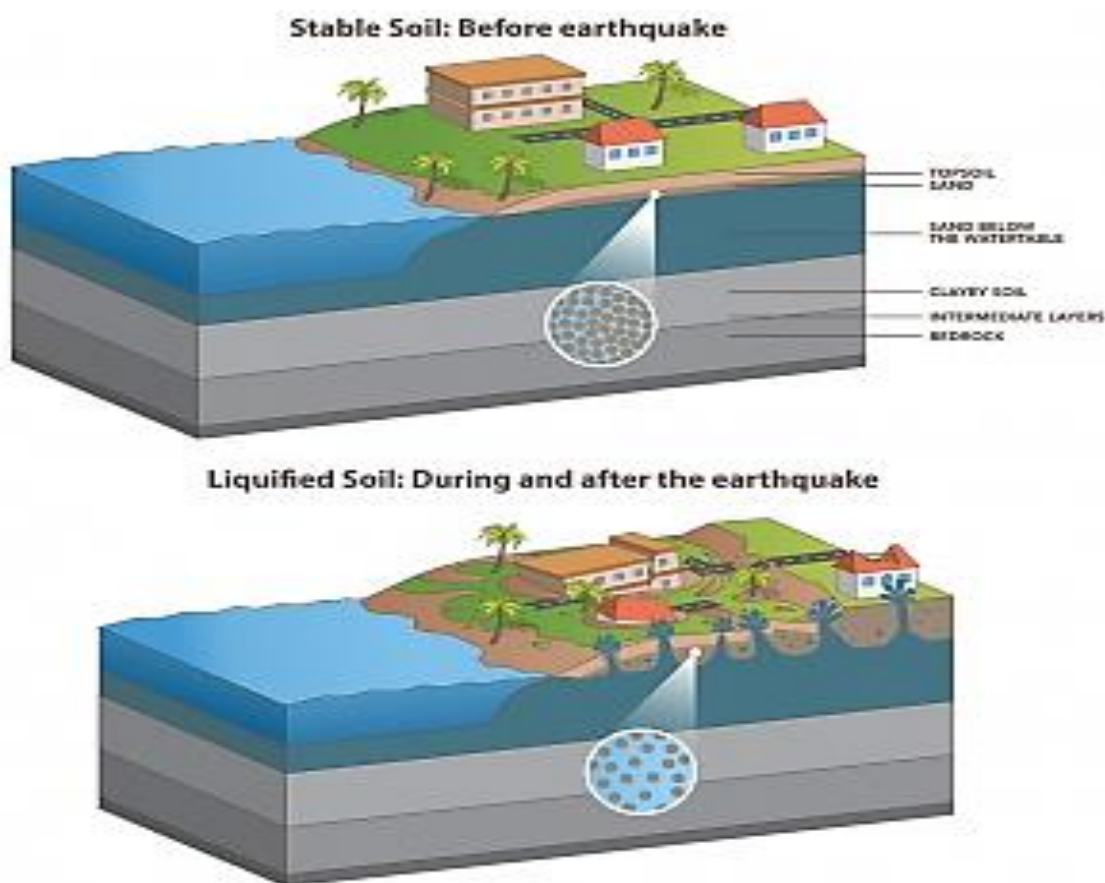
τα εδάφη τα οποία δεν έχουν υποστεί μεγάλα φορτία ώστε να συμπυκνωθούν, αποτελούν τα πιθανότερα εδάφη στην εμφάνιση του φαινομένου της ρευστοποίησης. Αυτό συμβαίνει καθώς στα μη συμπυκνωμένα εδάφη υπάρχουν κενά μεταξύ των κόκκων που συντελούν το έδαφος και το αποτέλεσμα είναι να μπορεί να κορεστεί το συγκεκριμένο έδαφος με νερό και έτσι κατά την διάρκεια μίας σεισμικής δόνησης να προκληθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Επίσης μεγάλης σημασίας είναι και η δυναμική μηχανική συμπεριφορά του εδάφους, καθώς ο κάθε τύπος εδάφους θα αστοχήσει λόγω μιας σεισμικής δόνησης με διαφορετικό τρόπο. Στην ουσία, τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά ενός εδάφους συμβάλλουν στην έκταση και στο μέγεθος της πλευρικής εξάπλωσης που θα δημιουργηθεί κατά την εκδήλωση του φαινομένου της ρευστοποίησης. Έτσι, τα πιο επιδεκτικά εδάφη σε ρευστοποίηση και πλευρική εξάπλωση είναι αυτά που είναι χαλαρά, κορεσμένα και ομοιόμορφης διαβάθμισης, όπως οι ποτάμιες, οι κολλουβιακές και οι αιολικές αποθέσεις (Kramer, 1996; Youd και Perkins, 1978). Κατά τη μελέτη των ρευστοποιήσεων, που προκλήθηκαν στη Νέα Ζηλανδία λόγω σοβαρών σεισμών, αλλά και κατά την μελέτη των ρευστοποιήσεων, που προκλήθηκαν στην Θεσσαλία επίσης εξαιτίας ισχυρών σεισμών, βγήκε το συμπέρασμα ότι σε παλαιομένες (oxbow lakes) ,σε παλαιοκοίτες ποταμών και στα εσωτερικά μέρη των μαιάνδρων (point bars) παρατηρούνται οι περισσότερες εκδηλώσεις ρευστοποίησης (Villamor et al. 2016; Bastin et al. 2018, 2020 και Παπαθανασίου et al. 2022). Επιπλέον, μεγάλη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση παρουσιάζουν και οι ανθρωπογενείς αποθέσεις στις οποίες όμως δεν έχει πραγματοποιηθεί συμπίκνωση κατά την τοποθέτησή τους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ανθρωπογενούς απόθεσης που οδήγησε σε αστοχία λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης είναι το φίλτρο του χωμάτινου φράγματος του San Fernando. Λόγω της τοποθέτησής του χωρίς την απαραίτητη συμπίκνωση, εισήλθε νερό και σε συνδυασμό με τον μεγάλο σεισμό 6,6 βαθμών της κλίμακας Richter της 9^{ης} Φεβρουαρίου του 1971, προκλήθηκε το φαινόμενο της ρευστοποίησης που οδήγησε στην αστοχία του φράγματος (Εικόνα 4). Τέλος, υπάρχουν και περιβάλλοντα απόθεσης, όπως οι αλλουβιακές πεδιάδες και τα δέλτα στα οποία έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα ρευστοποίησης αλλά με μικρότερη συχνότητα.



Εικόνα 4: Αστοχία του φράγματος San Fernando, 1971 (Jinto and Davidson, 2010)

2.3 Υδροφόρος ορίζοντας

Μεγάλης σημασίας και απαραίτητη προϋπόθεση για την πρόκληση του φαινομένου της ρευστοποίησης είναι ο κορεσμός των εδαφικών σχηματισμών. Από την μελέτη ιστορικών εκδηλώσεων ρευστοποίησης έχει αποδειχθεί ότι τα περισσότερα περιστατικά παρουσιάζονται σε περιοχές όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι έως 3 μέτρα βάθος από την επιφάνεια. Μερικές εμφανίσεις παρουσιάζονται και σε περιοχές όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κυμαίνεται από 3 έως 10 μέτρα από την επιφάνεια, ενώ οι λιγότερες εμφανίσεις ρευστοποίησης έχουν παρουσιαστεί σε περιοχές όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ξεπερνάει τα 15 μέτρα από την επιφάνεια (Youd 1998). Οπότε η πιθανότητα εμφάνισης ρευστοποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την θέση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα και όσο πιο βαθιά βρίσκεται η στάθμη, τόσο λιγότερο επιδεκτικό σε ρευστοποίηση είναι το έδαφος διότι υπάρχει και μεγαλύτερη γεωστατική τάση λόγω των υπερκείμενων σχηματισμών (Youd 1998).



Σχήμα 5: Επίδραση του υδροφόρου ορίζοντα στο φαινόμενο της ρευστοποίησης (Shioi, 2020)

2.4 Σχετική πυκνότητα

Επιπρόσθετα ανάλογα με την τιμή της σχετικής πυκνότητας καθορίζεται και η πιθανότητα εκδήλωσης του φαινομένου της ρευστοποίησης. Η τιμή της σχετικής πυκνότητας είναι μικρή, όταν η διάταξη των κόκκων ενός εδαφικού σχηματισμού είναι χαλαρή, κάτι που σημαίνει ότι η τιμή του δείκτη πόρων είναι μεγάλη, καθώς η σχετική πυκνότητα με τον δείκτη πόρων είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη. Με άλλα λόγια, όταν το έδαφος έχει μικρή σχετική πυκνότητα παρουσιάζει μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση από ένα έδαφος με μεγάλη σχετική πυκνότητα. Πιο συγκεκριμένα, στα αμμώδη εδάφη, η τιμή της σχετικής πυκνότητας συνδέεται με τον αριθμό κρούσεων N_{spt} της επιτόπου δοκιμής τυποποιημένης διείσδυσης SPT (Terzaghi και Peck, 1967). Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1 οι πολύ χαλαρές και οι χαλαρές άμμοι είναι οι πιο επιδεκτικές σε ρευστοποίηση διότι έχουν σχετικά μικρή τριβή (ϕ) οι κόκκοι μεταξύ τους. Σε αντίθεση με τις χαλαρές άμμους, για να ρευστοποιηθούν οι μετρίως πυκνές, οι πυκνές και οι πολύ πυκνές άμμοι θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια αρκετά ισχυρή σεισμική δόνηση.

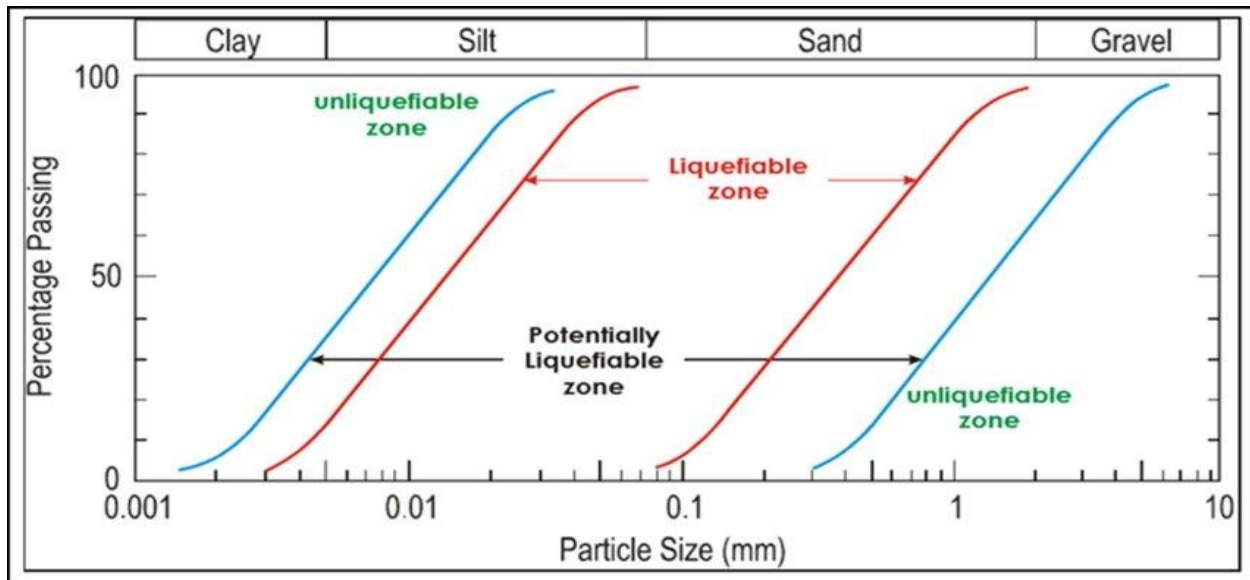
Πίνακας 1: Κατάταξη συνεκτικότητας και αντοχής εδαφών (Κούκης και Σαμπατακάκης, 2002)

Ιδιότητες Άμμου			
Πυκνότητα	SPT	CPT	ϕ
Πολύ χαλαρή	<5	<2	<30
Χαλαρή	5-10	2-4	30-32
Μετρίως πυκνή	11-30	4-12	32-36
Πυκνή	31-50	12-20	36-40
Πολύ πυκνή	>50	≥ 20	≥ 40

2.5 Κοκκομετρική σύσταση

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κοκκομετρική σύσταση και τα φυσικά χαρακτηριστικά ενός εδάφους αποτελούν βασικά κριτήρια για την ταξινόμηση του εδάφους ως εν δυνάμει ρευστοποιήσιμο. Έτσι τα ομοιόμορφης διαβάθμισης εδάφη είναι περισσότερο επιδεκτικά σε ρευστοποίηση σε σχέση με τα καλά διαβαθμισμένα εδάφη. Αυτό συμβαίνει, επειδή στους καλά διαβαθμισμένους εδαφικούς σχηματισμούς γίνεται πλήρωση των κενών, ανάμεσα από τους μεγαλύτερους κόκκους, από μικρότερους κόκκους και με την προϋπόθεση ότι επικρατούν συνθήκες πλήρους αποστράγγισης το αποτέλεσμα είναι η καλύτερη συμπίκνωση του εδάφους.

Κατά συνέπεια, σε καλά διαβαθμισμένα εδάφη είναι δυσκολότερο να εκδηλωθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης, καθώς προκύπτει ότι θα είναι μικρότερη η τιμή της πίεσης των πόρων (Kramer, 1996). Όπως είναι ορατό και στο διάγραμμα 1, εδαφικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αποτελούνται αποκλειστικά από κόκκους μεγέθους άμμου (περίπου 0,1mm – 1mm) παρουσιάζουν την μεγαλύτερη πιθανότητα εκδήλωσης του φαινομένου της ρευστοποίησης. Εκτός από αυτούς τους εδαφικούς σχηματισμούς, υπάρχουν και τα ομοιόμορφης διαβάθμισης χαλικώδεις εδάφη (περίπου 0,3mm – 5mm) αλλά και τα ομοιόμορφης διαβάθμισης ιλυώδεις εδάφη (περίπου 0,001mm – 0,03mm) τα οποία ανήκουν στην πιθανή ζώνη ρευστοποίησης και οπότε υπάρχει πιθανότητα υπό κάποιες συγκεκριμένες συνθήκες να εμφανίσουν ρευστοποίηση. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ρευστοποίησης εδαφικού σχηματισμού που αποτελείται από αδρόκοκκα υλικά συνέβη στον λιμένα του Ληξουρίου στην Κεφαλονιά, όπου κατά τον σεισμό του 2014 ($M_w = 6,5$) προκλήθηκε το φαινόμενο της ρευστοποίησης και αναδύθηκαν μαζί με το λεπτόκοκκο υλικό και κροκάλες (Παπαθανασίου et al. 2016).



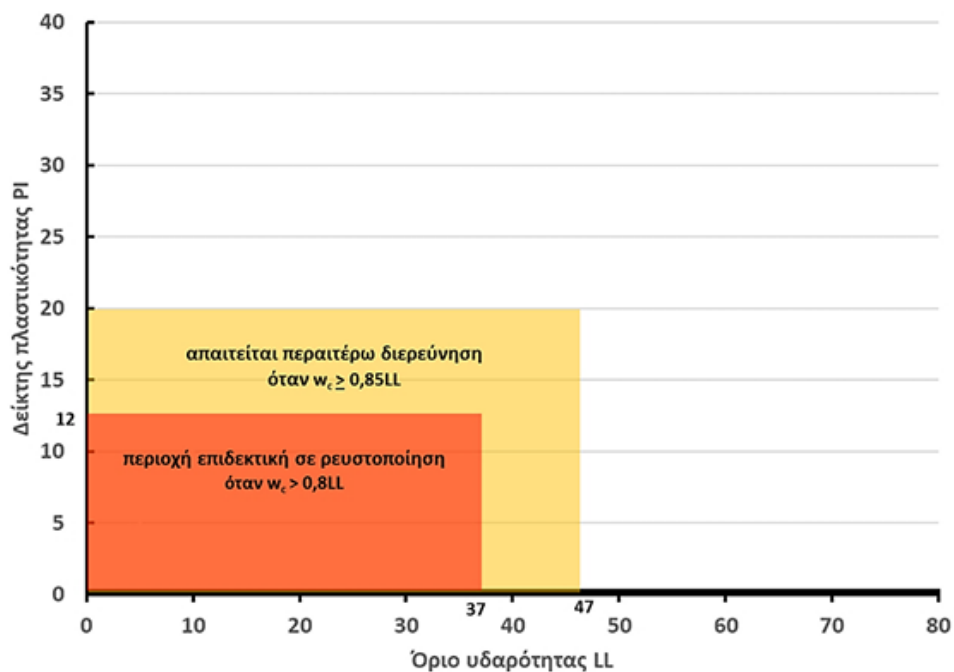
Διάγραμμα 1: Καμπύλη κατατομής του μεγέθους των υλικών του εδάφους για την επιδεκτικότητα ρευστοποίησης (Suprijanto, 2020)

Όσον αφορά το σχήμα των κόκκων ενός εδαφικού σχηματισμού, παρατηρείται ότι τα εδάφη τα οποία αποτελούνται από στρογγυλοποιημένους κόκκους αυξάνουν την πυκνότητά τους σε μεγαλύτερο βαθμό από τα εδάφη με γωνιώδεις κόκκους (Kramer 1996). Σύμφωνα με τους Kohji Tokimatsu και Yoshiaki Yoshimi (1983), οι οποίοι ήταν από τους πρώτους που μελέτησαν το φαινόμενο της ρευστοποίησης και με βάση παρατηρήσεων από ρευστοποιήσεις που συνέβησαν κατά την πάροδο των χρόνων σε συνδυασμό με εργαστηριακές δοκιμές που έκαναν πάνω σε υψηλής ποιότητας αδιατάρακτα δείγματα άμμου κατέληξαν στα εξής συμπεράσματα για την εκδήλωση του φαινομένου της ρευστοποίησης, στους εδαφικούς σχηματισμούς.

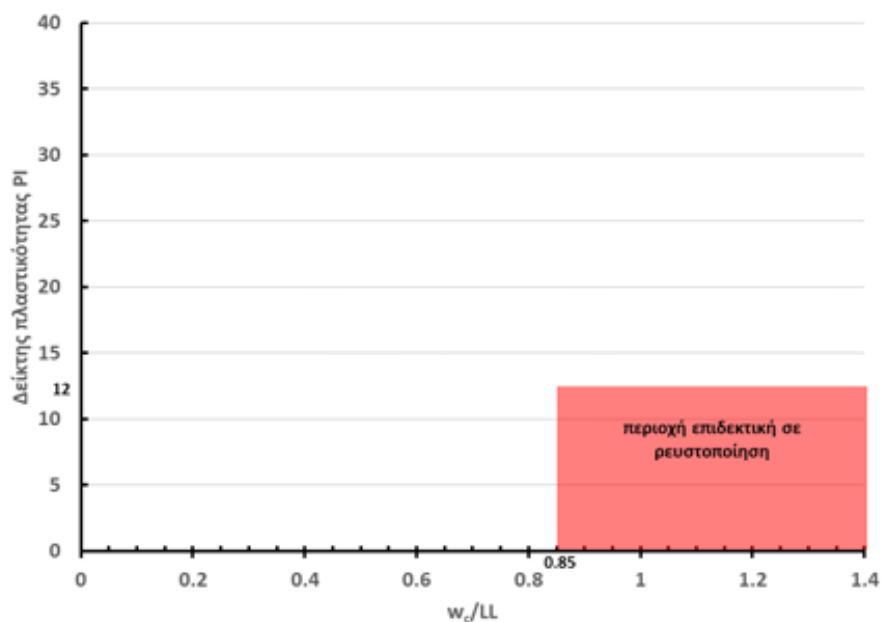
Αρχικά, τα αμμώδη εδάφη, τα οποία περιέχουν περισσότερο από 10% λεπτόκοκκα υλικά έχουν μικρότερη πιθανότητα εκδήλωσης ρευστοποίησης σε σχέση με εδαφικούς σχηματισμούς που αποτελούνται μόνο από κόκκους μεγέθους άμμου, έχοντας και οι δύο σχηματισμοί τις ίδιες τιμές NSPT. Κατά δεύτερον, αμμώδη εδάφη με αριθμό κρούσεων NSPT μεγαλύτερο από 25 και ιλυώδης άμμοι που περιέχουν περισσότερο από 10% λεπτόκοκκο υλικό (λεπτότερα από 74 μ m) με αριθμό κρούσεων NSPT μεγαλύτερο από 20 δεν θα προκαλέσουν εκτεταμένες καταστροφές λόγω της εκδήλωσης του φαινομένου της ρευστοποίησης. Επιπλέον, εδάφη τα οποία περιέχουν περισσότερο από 20% άργιλο (λιγότερο από 5mm) είναι πολύ δύσκολο να παρουσιάσουν ρευστοποίηση, εκτός εάν δείκτες πλαστικότητας τους είναι χαμηλοί. Τέλος, οι αμμώδεις σχηματισμοί που περιέχουν και χαλίκια είναι πιο επιδεκτικοί προς ρευστοποίηση από τους καθαρά αμμώδεις εδαφικούς σχηματισμούς (που δεν περιέχουν χαλίκια), με την προϋπόθεση ότι έχουν ίδιες τιμές NSPT.

Κατά την πάροδο των χρόνων πολλοί μελέτησαν το φαινόμενο της ρευστοποίησης και πρότειναν κριτήρια επιδεκτικότητας ρευστοποίησης, όπως αναφέρθηκαν και παραπάνω, αλλά σύμφωνα με τους Seed et al. 2003, τα προηγούμενα κριτήρια επιδεκτικότητας ρευστοποίησης θεωρήθηκαν συντηρητικά. Αφού προστέθηκαν και τα πρόσφατα στοιχεία από δοκιμές in situ που έγιναν μετά από τους δύο πρόσφατους καταστροφικούς σεισμούς του Kocaeli και της Ταϊβάν (Taiwan) το 1999, βγήκε το συμπέρασμα ότι η συμπεριφορά της πλαστικότητας των λεπτόκοκκων υλικών ενός εδαφικού σχηματισμού είναι περισσότερο σημαντική από το επι της εκατό ποσοστό της αργίλου που υπάρχει μέσα στον εδαφικό σχηματισμό και υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις εκδήλωσης του φαινομένου της ρευστοποίησης όπου το λεπτόκοκκο υλικό μεγέθους αργίλου του εδαφικού σχηματισμού, ανέρχονταν σε μεγαλύτερο ποσοστό από 10%.

Σύμφωνα, λοιπόν με τους Seed et al. 2003, οι εδαφικοί σχηματισμοί, οι οποίοι αποτελούνται από 35% και περισσότερο από λεπτόκοκκο υλικό, χαρακτηρίζονται ως δυνητικοί ρευστοποιήσιμοι σχηματισμοί όταν το όριο υδαρότητάς τους είναι μικρότερο από 37 και ο δείκτης πλαστικότητάς τους είναι μικρότερος από 12 ($LL \leq 37$ και $PI \leq 12$) και η περιεκτικότητα σε νερό είναι υψηλή σε σχέση με το όριο υδαρότητάς τους ($W_c > 0,8LL$). Τα εδάφη τα οποία έχουν δείκτη πλαστικότητας μικρότερο από 20, το όριο υδαρότητάς τους είναι μικρότερο από 47 ($PI \leq 20$ και $LL \leq 47$) θεωρούνται επιδεκτικά σε ρευστοποίηση μόνο όταν η περιεκτικότητα σε νερό είναι υψηλή σε σχέση με το όριο υδαρότητάς τους ($W_c > 0,85LL$) (Διάγραμμα 2). Τέλος, σύμφωνα με τους Bray και Sancio (2006), οι εδαφικοί σχηματισμοί οι οποίοι έχουν δείκτη πλαστικότητας μεγαλύτερο από 18 ($PI > 18$) θεωρούνται ότι είναι μη επιδεκτικοί σε ρευστοποίηση, ενώ επιδεκτικούς σε ρευστοποίηση πρότειναν τους εδαφικούς σχηματισμούς με δείκτη πλαστικότητας $PI \leq 12$ και $W_c > 0,85LL$ (Διάγραμμα 3).



Διάγραμμα 2: Προβολή περιοχών επιδεκτικών σε ρευστοποίηση, σύμφωνα με τα προτεινόμενα κριτήρια [Από Παπαθανασίου (2022) τροποποιημένο από Seed et al. (2003)].



Διάγραμμα 3: Προβολή περιοχής επιδεκτικής σε ρευστοποίηση, σύμφωνα με τα προτεινόμενα κριτήρια [Από Παπαθανασίου (2022) τροποποιημένο από Bray και Sancio (2006)].

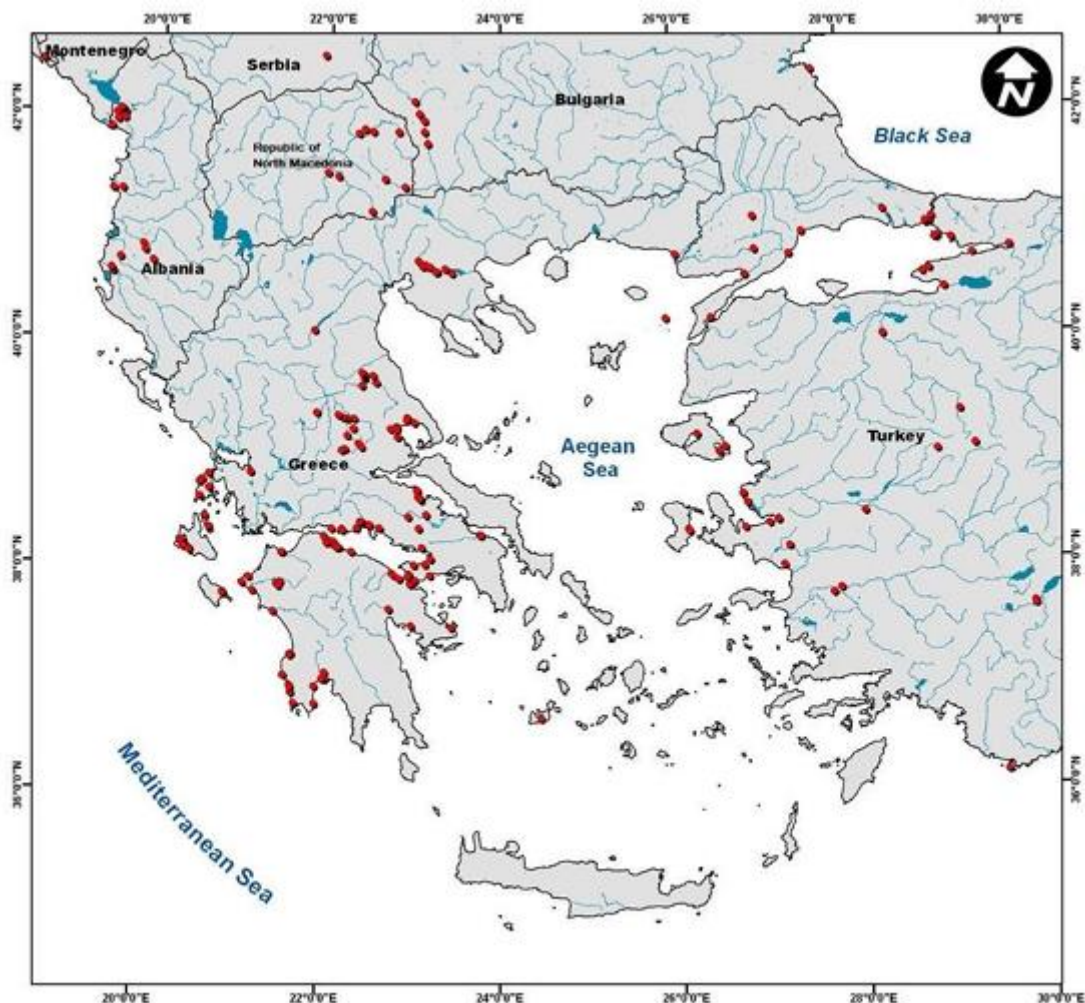
Σύμφωνα με το ευρωκώδικα 8 (Eurocode 8, (E(8))), οι εδαφικοί σχηματισμοί εντάσσονται στην κατηγορία S_2 και θα πρέπει να εξετάζεται η πιθανότητα εκδήλωσης του φαινομένου της ρευστοποίησης, όπου υπάρχουν καταγραφές μεγάλου πάχους χαλαρής άμμου και όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια (Πιτιλάκης, 2010). Επιπλέον, σύμφωνα πάλι με τον Eurocode 8, δεν χρειάζεται να γίνει έλεγχος για εκδήλωση ρευστοποίησης στις επιφανειακές θεμελιώσεις, όταν τα εδάφη που είναι επιδεκτικά σε ρευστοποίηση, βρίσκονται σε βάθος μεγαλύτερο των 15 μέτρων από την επιφάνεια του εδάφους. Ο λόγος που δεν απαιτείται ο έλεγχος αυτός είναι ότι η πιθανή ρευστοποίηση δεν θα επηρεάσει την κατασκευή.

2.6 Σεισμικότητα

Ένα ακόμα κριτήριο το οποίο είναι απαραίτητο για τον χαρακτηρισμό μια περιοχής ως εν δυνάμει ρευστοποιήσιμη, είναι η σεισμικότητα. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται χάρτες που παρουσιάζουν τις μέγιστες εδαφικές επιταχύνσεις (PGA) με διάφορες πιθανότητες υπέρβασης (Youd, 1998). Έτσι στις περιοχές με τις υψηλότερες εδαφικές επιταχύνσεις, σε συνδυασμό με την ηλικία των εδαφικών σχηματισμών και την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, είναι οι περιοχές οι οποίες χαρακτηρίζονται ως επιδεκτικές σε ρευστοποίηση.

2.7 Ιστορικές εμφανίσεις ρευστοποίησης

Τέλος, πολύ σημαντικό κριτήριο επιδεκτικότητας ρευστοποίησης αποτελεί η καταγραφή ιστορικών εμφανίσεων ρευστοποίησης (Kramer, 1996). Σε περιοχές, όπου έχουν παρατηρηθεί φαινόμενα ρευστοποίησης των εδαφικών σχηματισμών κατά το παρελθόν είναι πιθανότερο να συμβούν ξανά στο μέλλον, σε σχέση με περιοχές όπου δεν έχουν καταγραφεί ακόμα ιστορικές εμφανίσεις ρευστοποίησης (Iwasaki, 1986). Στον Χάρτη 2 φαίνεται ο χάρτης της Ελλάδας, της Αλβανίας, της Βόρειας Μακεδονίας και τμήματα των χωρών Σερβία, Μαυροβούνιο, Βουλγαρία και Τουρκία, καθώς και οι περιοχές που έχουν καταγραφεί φαινόμενα ρευστοποίησης κατά την πάροδο των χρόνων, από το 373 π.Χ. έως το 2020.



Χάρτης 2: Χωρική κατανομή φαινομένων ρευστοποίησης για την ευρύτερη περιοχή του Αιγαίου από το 373 π.Χ. έως το 2020 (Παπαθανασίου, 2022).

2.8 Κριτήρια επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση σε κλίμακα περιφέρειας

Μια διαδικασία, η οποία χαρακτηρίζει μια περιοχή ως ρευστοποιήσιμη προτάθηκε από το Τμήμα Διατήρησης της Καλιφόρνιας και το Τμήμα Μεταλλείων και Γεωλογίας (California Department of Conservation, Division of Mines and Geology), (CDMG, 1999). Σύμφωνα με αυτήν την διαδικασία μια περιοχή θεωρείται εν δυνάμει ρευστοποιήσιμη όταν αρχικά υπάρχουν ενδείξεις ιστορικών περιστατικών ρευστοποίησης και κατά δεύτερον όταν υπάρχουν δεδομένα από επιτόπιες δοκιμές και αναλύσεις που δείχνουν ότι οι συγκεκριμένοι εδαφικοί σχηματισμοί είναι επιδεκτικοί σε ρευστοποίηση. Εφόσον δεν υπάρχουν τα δεδομένα από τις επιτόπιες δοκιμές και τις αναλύσεις, τότε μια περιοχή μπορεί να θεωρηθεί εν δυνάμει ρευστοποιήσιμη όταν αποτελείται από εδάφη ηλικίας Άνω Ολόκαινου, ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται το πολύ μέχρι 13 μέτρα βάθος από την επιφάνεια και η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) που έχει 10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη να είναι μεγαλύτερη από 0,1g. Επίσης, μπορεί μια περιοχή να

χαρακτηριστεί με μεγάλη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση όταν αποτελείται από εδάφη ηλικίας Ολόκαινου, ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε λιγότερο από 10 μέτρα βάθος από την επιφάνεια και η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) του έχει 10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη είναι μεγαλύτερη από 0,2g. Τέλος, περιοχές που αποτελούνται από εδάφη ηλικίας Άνω Πλειστόκαινου, ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος μικρότερο από 6m από την επιφάνεια και η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) που έχει 10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη είναι μεγαλύτερη ή ίση με 0,3g, χαρακτηρίζεται ως εν δυνάμει ρευστοποιήσιμες περιοχές.

2.9 Ταξινόμηση της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση

Κατά την πάροδο των χρόνων πολλοί επιστήμονες προσπάθησαν να ταξινομήσουν την επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση, ώστε να συμπεράνουν ποιοι εδαφικοί σχηματισμοί αποτελούν τα εν δυνάμει ρευστοποιήσιμα εδάφη. Μια από τις πιο χαρακτηριστικές ταξινομήσεις εδαφών σε σχέση με την επιδεκτικότητά τους στο φαινόμενο της ρευστοποίησης η οποία αποτελεί και την πιο διαδεδομένη ταξινόμηση επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση σε όλον τον κόσμο, είναι των Youd και Perkins (1978). Η συγκεκριμένη ταξινόμηση αποτυπώνει την επιδεκτικότητα των διαφορετικών τύπων αποθέσεων ανάλογα με την ηλικία τους, αλλά με την προϋπόθεση ότι όλοι οι τύποι αποθέσεων είναι κορεσμένοι (Πίνακας 2). Σύμφωνα λοιπόν με τους Youd και Perkins (1978), ανεξάρτητα το περιβάλλον απόθεσης, Πλειστοκαινικής ηλικίας και Προπλειστοκαινικής ηλικίας εδαφικοί σχηματισμοί παρουσιάζουν από πολύ χαμηλή έως χαμηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση. Η μόνη εξαίρεση είναι οι αιολικές αποθέσεις Loess, οι οποίες όταν είναι Πλειστοκαινικής ηλικίας παρουσιάζουν υψηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση. Όσο οι ηλικίες των εδαφικών σχηματισμών γίνονται νεότερες δηλαδή Ολοκαινικής ηλικίας και νεότερες, η επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών αυξάνεται, με κάποιους λίγους τύπους αποθέσεων να παραμένουν με χαμηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση. Χαμηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση έχουν τα αλλουβιακά ριπίδια, οι αποθέσεις αναβαθμίδων, οι παγετώδεις αποθέσεις και το παραμένον έδαφος. Ολοκαινικής ηλικίας με μέτρια επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση παρουσιάζουν οι αποθέσεις της πλημμυρικής πεδιάδας, οι δελταϊκές αποθέσεις, οι λιμναίες αποθέσεις και οι αποθέσεις χαμηλής ενέργειας κυματισμού. Παρόλα αυτά υπάρχουν και κάποια αποθετικά περιβάλλοντα όπως οι περιοχές της κοίτης του ποταμού, οι περιοχές όπου έχει αποθεθεί τέφρα και οι περιοχές όπου βρίσκονται αποθέσεις Loess, όπου παρουσιάζουν υψηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση. Τέλος, σχεδόν όλοι οι τύποι αποθέσεων, οι οποίοι είναι ηλικίας μικρότερη των 500 χρόνων, παρουσιάζουν υψηλή έως πολύ υψηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση με τις πιο επιδεκτικές αποθέσεις σε ρευστοποίηση να είναι οι αποθέσεις της κοίτης ενός ποταμού, οι αποθέσεις ενός Δέλτα και οι τεχνητές αποθέσεις που αποτελούνται από μη συμπυκνωμένο υλικό. Εξαιρέσεις υπάρχουν και σε αυτήν την κατηγορία όπου οι παγετώδεις αποθέσεις το παραμένον έδαφος αλλά και οι τεχνητές αποθέσεις, οι οποίες αποτελούνται από συμπυκνωμένο υλικό, παρουσιάζουν χαμηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση παρόλο που είναι πάρα πολύ πρόσφατες (ηλικία < 500 χρόνια).

Πίνακας 2: Αξιολόγηση της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών με βάση το περιβάλλον απόθεσης και την ηλικία των ιζημάτων [Από Παπαθανασίου, Γ. (2022) τροποποιημένο από Youd και Perkins (1978)].

Τύπος αποθέσεων	Κατανομή μη συνεκτικών ιζημάτων στις αποθέσεις	Επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση των ιζημάτων όταν αυτά είναι κορεσμένα			
		<500 χρόνια	Ολοκαινικής ηλικίας	Πλειστοκαινικής ηλικίας	Προπλειστοκαινικής ηλικίας
Ηπειρωτική ζώνη					
Κοίτη ποταμού	Τοπικά μεταβαλλόμενη	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Πλημμυρική πεδιάδα	Τοπικά μεταβαλλόμενη	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Αλλουβιακά ρυτίδια και πεδιάδα	Εκτεταμένη	Μέτρια	Χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Αναβαθμίδες	Εκτεταμένη	-----	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Δελταϊκές αποθέσεις	Εκτεταμένη	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Λιμναίες αποθέσεις	Μεταβαλλόμενη	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Κολλούβιο	Μεταβαλλόμενη	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Talus	Εκτεταμένη	Χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Αμμόλοφοι	Εκτεταμένη	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Loess	Μεταβαλλόμενη	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή	άγνωστο
Παγετώδεις αποθέσεις	Μεταβαλλόμενη	Χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Τέφρα	Εκτεταμένη	Υψηλή	Υψηλή		
Παραμένον έδαφος	Σπάνια	Χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Παράκτια ζώνη					
Δέλτα	Εκτεταμένη	Πολύ υψηλή	Υψηλή	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Εκβολές ποταμού	Τοπικά μεταβαλλόμενη	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Παραλία					
Υψηλής ενέργειας κυματισμού	Εκτεταμένη	Μέτρια	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Χαμηλής ενέργειας κυματισμού	Εκτεταμένη	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Λιμνοθάλασσα	Τοπικά μεταβαλλόμενη	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή	Πολύ χαμηλή
Τεχνητές αποθέσεις / Επιχώσεις					
Μη συμπυκνωμένο υλικό	Μεταβαλλόμενη	Πολύ υψηλή	-----	-----	-----
συμπυκνωμένο υλικό	Μεταβαλλόμενη	Χαμηλή	-----	-----	-----

Παρόμοιες ταξινομήσεις επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση έχουν προταθεί από τους Kuribayashi και Tatsuoaka (1975) και από τον Wakamatsu (1992), οι οποίοι συμπεριλαμβάνουν εκτός από την ηλικία, τον τύπο απόθεσης και τον κορεσμό των αποθέσεων και την παράμετρο της σεισμικής φόρτισης στην αξιολόγησή τους.

Οι παραπάνω ταξινομήσεις της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση επαληθεύονται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στην τελευταία δεκαπενταετία στην Νέα Ζηλανδία (2010 – 2011), στην Ιταλία (2012) και στην Ελλάδα (2021). Πιο συγκεκριμένα, αποδείχθηκε ότι οι περισσότερες εμφανίσεις εκδήλωσης του φαινομένου της ρευστοποίησης, συγκεντρώνονται σε παλαιοκοίτες και σε παλαιομάνες (Wotherspoon et al, 2012; Di Manna et al., 2012; Bastin et al., 2015; Παπαθανασίου et al., 2012, 2015; Civico et al., 2015; Fontana et al., 2019; Amoroso et al., 2020; Mavroulis et al., 2021).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Συσχέτιση εξέλιξης ποτάμιων συστημάτων με την εκδήλωση φαινόμενων ρευστοποίησης

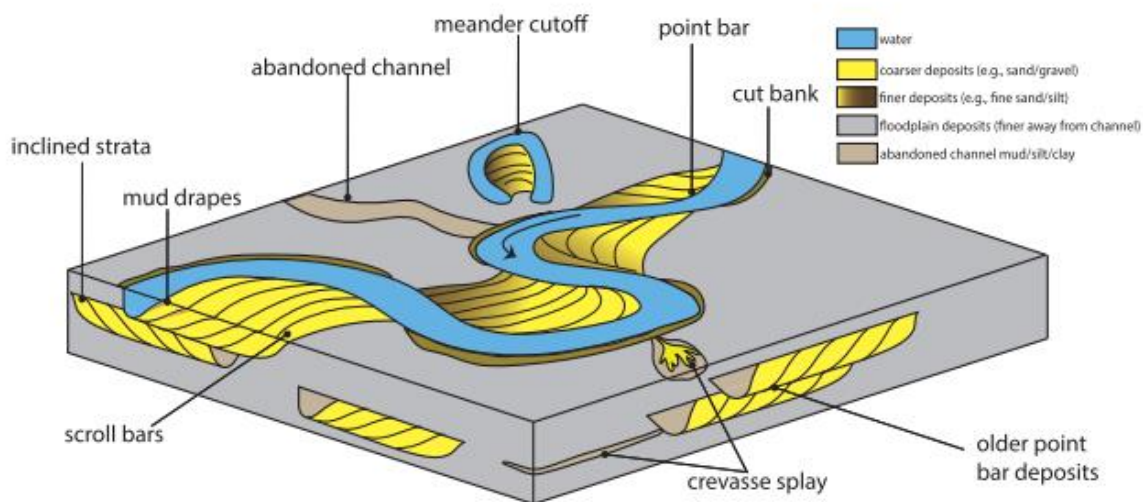
Η εξέλιξη ενός ποτάμιου συστήματος συμβάλλει στην εμφάνιση του φαινομένου της ρευστοποίησης διότι σε ένα αλλουβιακό αποθετικό περιβάλλον σχηματίζονται διάφοροι τύποι αποθέσεων οι οποίοι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες και υπό κάποιες προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 1, αποτελούν εν δυνάμει ρευστοποιήσιμοι σχηματισμοί. Στο σχήμα 6 φαίνονται οι πιο χαρακτηριστικές γεωμορφές ενός μαιανδρικού ποταμού οι οποίες χωρίζονται σε 2 κύριες κατηγορίες.

Η πρώτη κατηγορία είναι οι σχηματισμοί που δημιουργούνται λόγω της ενεργής κοίτης όπως για παράδειγμα τα point bars και τα cut banks ή counter point bars και η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή στην οποία ανήκουν οι σχηματισμοί που βρίσκονται σε απόσταση από την ενεργή κοίτη του ποταμού, μέσα στην πλημμυρική πεδιάδα, δηλαδή για παράδειγμα οι παλαιομάνες και οι παλαιοκοίτες. Ο κυριότερος σχηματισμός που ανήκει στην κατηγορία των σχηματισμών που δημιουργούνται λόγω της ενεργής κοίτης είναι οι αποθέσεις που δημιουργούνται στο κυρτό (εσωτερικό) κομμάτι ενός μαιάνδρου και ονομάζονται point bars. Οι αποθέσεις, οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 6 με κίτρινο χρώμα, αποτελούνται κατά κύριο λόγο από κόκκους μεγέθους χαλικιών και άμμου (e.g. Aslan, 2007; Russell et al., 2018; Thomas et al., 1987). Με τις αποθέσεις τύπου point bar συνδέονται άμεσα τα scroll bars, τα οποία αποτελούν τα επεισόδια της ανάπτυξης του μαιάνδρου δηλαδή αναπαριστούν τις διεργασίες που έχουν συμβεί μέσα σε ένα point bar ώστε να συσσωρευθεί περισσότερο υλικό και να πάρει την σημερινή μορφή και σχήμα που έχει (Allen, 1965; Thompson, 1986; Ielpi και Ghinassi, 2014). Τέτοιες διεργασίες είναι η επέκταση της κοίτης, η μετάθεσή της, η περιστροφή της ή και συνδυασμός 2 ή 3 διαφορετικού τύπου διεργασιών (Daniel, 1971). Το αποτέλεσμα είναι να αναπτύσσονται διαδοχικά πλευρικά συσσωρευμένα πακέτα scroll bars, τα οποία έχουν διαφορετική διεύθυνση εξαιτίας της διαφορετικής διεργασίας που λαμβάνει χώρα (Schumm, 1963; Allen, 1965; e.g. Bridge, 2003; Ielpi και Ghinassi, 2014). Επίσης λόγω της συνεχής απόθεσης point bar προκαλείται πλευρική μετανάστευση της κοίτης του ποταμού (van de Lageweg et al., 2014) και λόγω της συσσώρευσης μεγάλης ποσότητας αποθέσεων point bars, τα ιζήματα που αποτίθενται παίρνουν κλίση προς την κοίτη του ποταμού στο υπέδαφος και κάποιες αποθέσεις αυτών των point bars που ονομάζονται inclined strata βυθίζονται προς το κέντρο του καναλιού ακολουθώντας την φορά της μετατόπισης ή της έκτασης της κοίτης (e.g. Bridge et al., 1995; Cubrinovski et al., 2014; Grace 2015; Thomas et al., 1987).

Επιπλέον, ένας άλλος κύριος σχηματισμός στην κατηγορία των αποθέσεων που δημιουργούνται λόγω της εξέλιξης της ενεργής κοίτης είναι τα cut banks ή αλλιώς counter point bars, τα οποία σχηματίζονται όταν ο μαιανδρικός ποταμός μεταναστεύει και διαβρώνει την κοίλη (εξωτερική) πλευρά ενός μαιάνδρου. Πιο συγκεκριμένα τα counter point bars αποτίθενται όταν ο ποταμός μεταναστεύει πλευρικά ή κατά μήκος της ροής όπου η συσσώρευση συμβαίνει στην εξωτερική

πλευρά του μαιάνδρου, όπου τα scroll bars μετατρέπονται από κοίλα σε κυρτά (Smith et al., 2009). Τα cut banks αποτελούνται από ιλύ, λεπτόκοκκη άμμο και γενικά κόκκους με μικρότερο μέγεθος από ότι τα υλικά που συντελούν τις αποθέσεις point bars και εμφανίζονται στο σχήμα 6 με χρώμα καφέ – σκούρο γκρι.

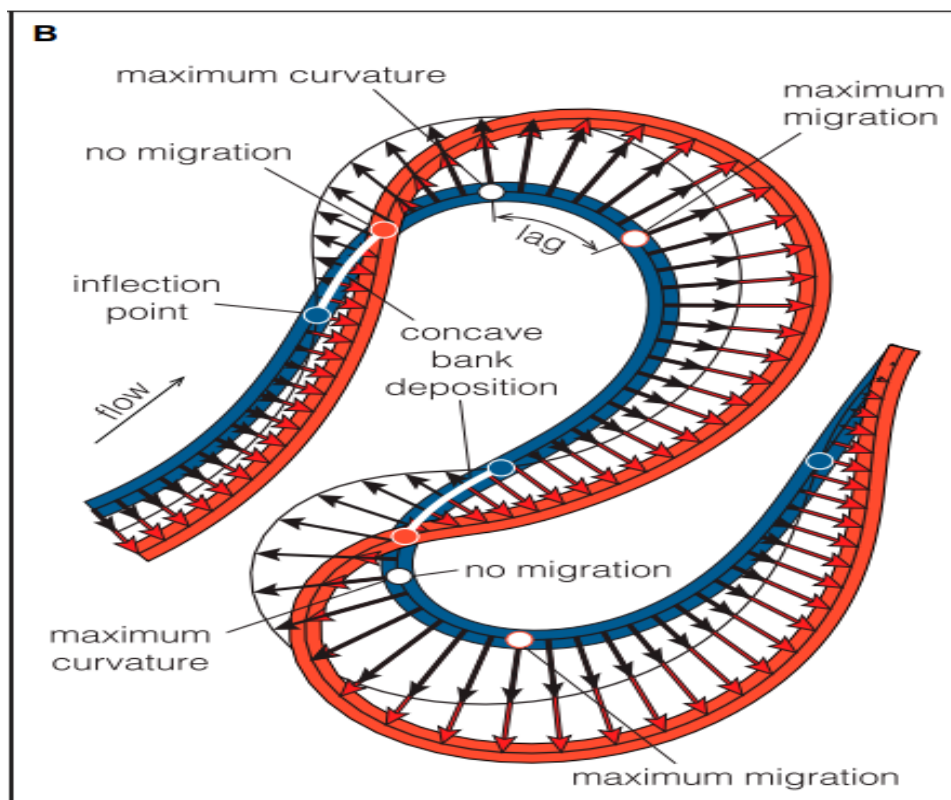
Όσον αφορά τους σχηματισμούς που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία, δηλαδή αυτοί που βρίσκονται μακριά από την ενεργή κοίτη του μαιανδρικού ποταμού, στις περισσότερες περιπτώσεις υπάρχουν στο υπέδαφος παλαιότερες αποθέσεις point bars οι οποίες καλύπτονται από λεπτόκοκκο υλικό. Επιπλέον, με την πάροδο των χρόνων και εξαιτίας της πλευρικής μετανάστευσης του ποταμού σχηματίζονται είτε παλαιομάνες (oxbow lake ή meander cutoff) είτε παλαιοκοίτες (abandoned channel). Στο εσωτερικό των παλαιομάνων βρίσκονται και αποθέσεις point bar, δηλαδή αμμώδης και χαλικώδης υλικό, ενώ οι παλαιοκοίτες καλύπτονται από λεπτόκοκκο υλικό, όπως ιλύ και άργιλο λόγω των πλημμυρικών επεισοδίων (e.g. Leopold et al., 1964; Σχήμα 6). Παρόλαυτά όπως και οι παλαιομάνες τόσο και οι παλαιοκοίτες αποτελούν εν δυνάμει ρευστοποιήσιμους σχηματισμούς καθώς μέσα στην παλαιομάνη βρίσκεται απόθεση point bar και κάτω από το λεπτόκοκκο υλικό των παλαιοκοιτών βρίσκονται οι παλαιότερες χονδρόκοκκες αποθέσεις (Bastin et al., 2018a, 2018b; Civico et al., 2015; Papathanassiou et al., 2022).



Σχήμα 6: Διάγραμμα μπλοκ με απλουστευμένες γεωμορφές μαιανδρικού ποταμού και ιζηματογενή χαρακτηριστικά (Από Ingabire Abayo et al. (2023) τροποποιημένο από Russell et al., 2021).

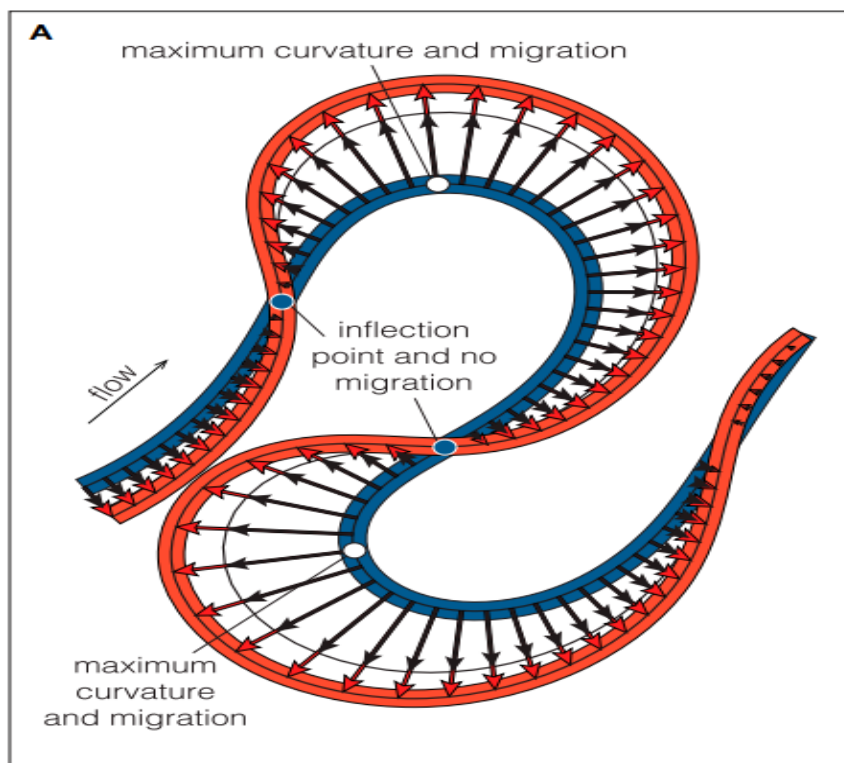
3.1 Counter point bars

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο επιγραμματικά, οι αποθέτες counter point bars αποτίθενται στο εξωτερικό (κοίλο) τμήμα ενός μαιάνδρου. Πιο αναλυτικά όμως η απόθεσή τους γίνεται ανάμεσα στο σημείο καμπής του μαιάνδρου με το σημείο όπου ο ποταμός δεν παρουσιάζει μετανάστευση. Όπως φαίνεται στο σχήμα 7, το οποίο απεικονίζει το μοντέλο μετανάστευσης του μαιάνδρου, ο ρυθμός μετανάστευσης είναι μια σταθμισμένη συνάρτηση των ανάντη καμπυλοτήτων (Sylvester et al., 2022). Με μπλε χρώμα απεικονίζεται η ροή του μαιανδρικού ποταμού σε σχέση με την καμπυλότητα των μαιάνδρων η οποία απεικονίζεται με μαύρο χρώμα και με την μετανάστευση που απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Είναι επίσης διακριτό ότι το σημείο της μέγιστης μετανάστευσης του ποταμού λαμβάνει χώρα κατάντη του σημείου της μέγιστης καμπυλότητας γεγονός που αποδεικνύει ότι ο ρυθμός μετανάστευσης δεν επηρεάζεται μόνο από την τοπική καμπυλότητα. Επιπλέον η εμφάνιση καθυστέρησης (lag) είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που εμφανίζεται λόγω του μαιανδρισμού (e.g. Sun et al., 1996; Seminara, 2006) και επιβεβαιώνεται και από μετρήσεις από δορυφορικές εικόνες που γίνονται ανά τακτικά χρονικά διαστήματα (Sylvester et al., 2019). Η καθυστέρηση (lag) οφείλεται επίσης στο γεγονός ότι ο ρυθμός μετανάστευσης (M) δεν επηρεάζεται μόνο από την τοπική καμπυλότητα αλλά επηρεάζεται από τη συνολική καμπυλότητα των ανάντη μαιάνδρων.



Σχήμα 7: Μοντέλο μετανάστευσης μαιάνδρου (Sylvester et al., 2021)

Εφόσον ο ρυθμός μετανάστευσης επηρεαζόταν μόνο από την τοπική καμπυλότητα τότε το σημείο της μέγιστης καμπυλότητας θα ταυτίζονταν με το σημείο της μέγιστης μετανάστευσης του μαιάνδρου. Αυτό όμως δεν συμβαίνει και αποτελεί ένα θεωρητικό μοντέλο μετανάστευσης μαιάνδρου (Σχήμα 8) διότι αν ίσχυε τότε δεν θα μπορούσαν να υπάρχουν αποθέσεις counter point bars, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τις παρατηρήσεις που έχουν γίνει στην ύπαιθρο αλλά και σε δορυφορικές εικόνες που αποδεικνύουν την ύπαρξη των αποθέσεων counter point bars (Sylvester et al., 2021).



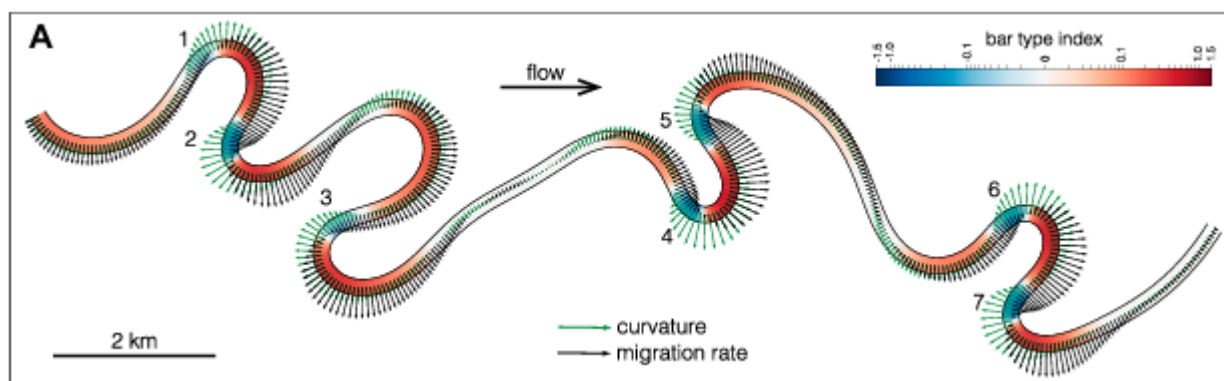
Σχήμα 8: Θεωρητικό μοντέλο μετανάστευσης μαιάνδρου, Sylvester et al., 2021

3.2 The Bar-Type Index (BTI)

Σε ένα ποτάμιο σύστημα πολλές φορές είναι δύσκολο να αναγνωριστούν οι αποθέσεις point bars και οι αποθέσεις counter point bars. Γιαυτό χρησιμοποιούνται χάρτες ή δορυφορικές εικόνες σε συνδυασμό με το τύπο BTI (Bar Type India) $BTI = \frac{WM}{RK_1}$ ώστε να χαρτογραφηθούν οι περιοχές όπου υπάρχουν αυτές οι δύο διαφορετικού τύπου αποθέσεις. Πιο αναλυτικά, ο αριθμητής του τύπου BTI αποτελείται από το πλάτος τους καναλιού (W) και τον ρυθμό μετανάστευσης του μαιάνδρου (M) και ο παρονομαστής αποτελείται από την ακτίνα καμπυλότητας (R) και την σταθερά ρυθμού μετανάστευσης (K_1). Ένα χαρακτηριστικό που καθιστά πολύτιμο τον τύπο BTI είναι ο συνδυασμός της παραμέτρου της καμπυλότητας (R) με

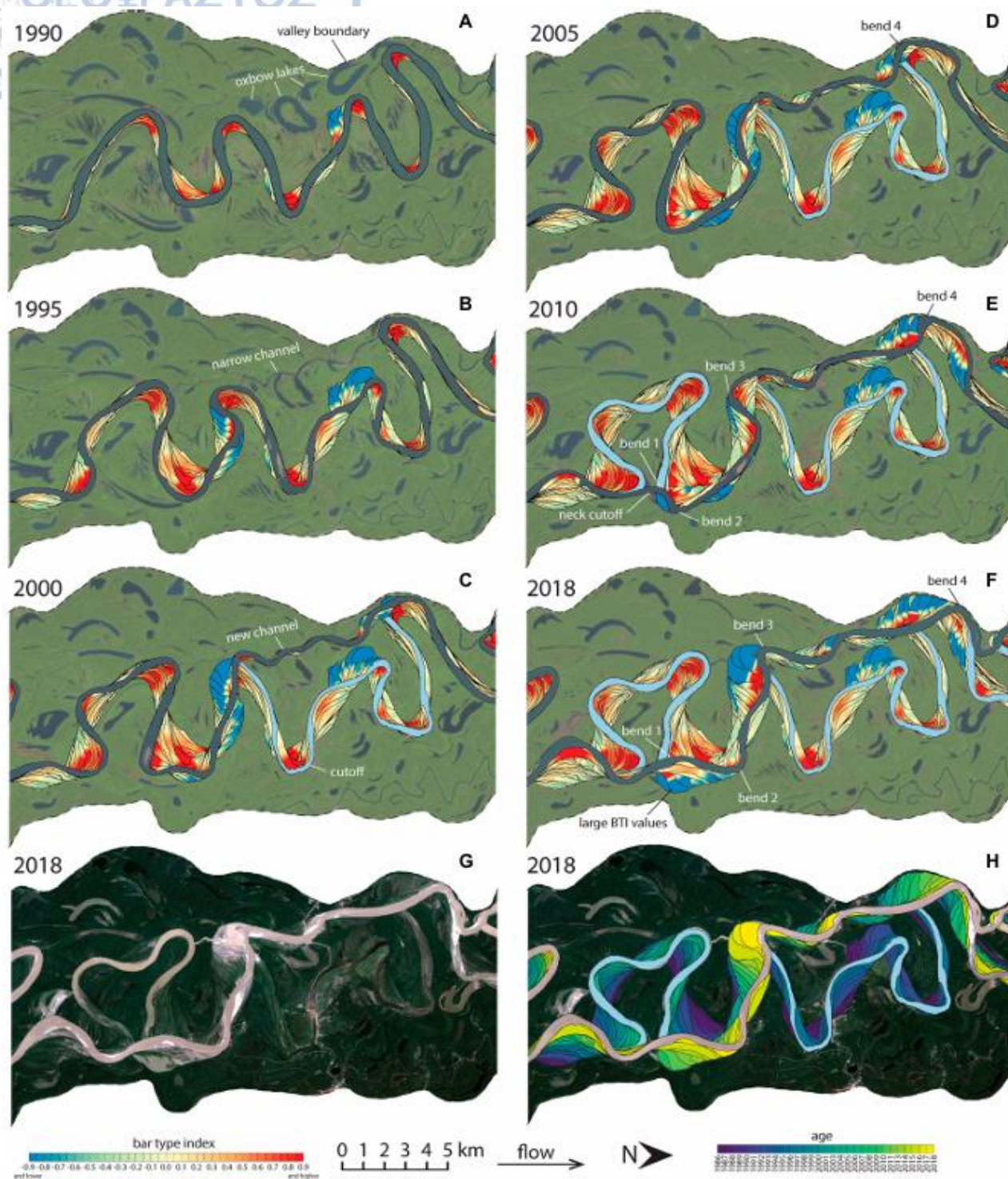
την παράμετρο της μετανάστευσης (M) και η δυνατότητα προσδιορισμού των μεγεθών και των πρόσημων τους. Ο ρυθμός μετανάστευσης (M) θεωρείται θετικός όταν ένα τμήμα του ποταμού κινείται προς τα δεξιά της τρέχουσας θέσης του, κοιτάζοντας προς τα κατάντη. Ομοίως και η καμπυλότητα θεωρείται θετική όταν προκαλεί μετανάστευση προς τα δεξιά, εάν η μετανάστευση ήταν μόνο συνάρτηση της τοπικής καμπυλότητας. Τέλος, οι αποθέσεις counter point bars αναπτύσσονται σε περιοχές όπου ο δείκτης BTI έχει μεγάλες και αρνητικές τιμές, ενώ οι αποθέσεις point bars αναπτύσσονται σε περιοχές όπου ο δείκτης BTI έχει μεγάλες και θετικές τιμές. Συνήθως το εύρος των τιμών που παίρνει ο τύπος BTI είναι από -1 έως 1 καθώς η καμπυλότητα (R) και ο κανονικοποιημένος ρυθμός μετανάστευσης (M) τείνουν να έχουν τιμές επίσης από -1 έως 1, αλλά όχι πάντα. Η τιμή του δείκτη BTI εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο γίνεται η εκτίμηση της καμπυλότητας (R), του ρυθμού μετανάστευσης (M) και της σταθεράς του ρυθμού μετανάστευσης (K_1) (Howard και Knutson, 1984).

Σε ένα κινηματικό μοντέλο κατά μήκος ενός τμήματος ενός ποταμού θα αποτυπώνονται οι αποθέσεις counter point bars σε συγκεκριμένες θέσεις όταν τα διανύσματα της καμπυλότητας (R) και του ρυθμού μετανάστευσης (M) θα έχουν αντίθετο προσανατολισμό και διαφορετικό πρόσημο. Στο σχήμα 9 οι θέσεις που βρίσκονται τα counter point bars φαίνονται με μπλε χρώμα σε αντίθεση με τις θέσεις όπου βρίσκονται τα point bars που φαίνονται με χρώμα κόκκινο.



Σχήμα 9: Απεικόνιση του δείκτη BTI με ένα κινηματικό μοντέλο που βασίζεται στους Howard και Knutson (1984).

Συνοψίζοντας με την βοήθεια των δορυφορικών εικόνων από διάφορες χρονολογίες σε συνδυασμό με τον δείκτη BTI είναι δυνατό να αποτυπωθούν οι 2 κύριοι και διαφορετικοί τύποι αποθέσεων (point bars και counter point bars) αλλά και οι θέσεις τους σε σχέση με την ενεργή κοίτη καθώς μπορεί να είναι πρόσφατες και να βρίσκονται κοντά στην ενεργή κοίτη του ποταμού, αλλά μπορεί να είναι και παλαιότερης ηλικίας και να βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μέσα στην πλημμυρική πεδιάδα σε παλαιοκοίτες όπως φαίνεται και στο παρακάτω παράδειγμα στο σχήμα 10.



Σχήμα 10: Δορυφορική εικόνα και ανάλυση της περιοχής του ποταμού Mamoré στην Βολιβία. (Α-Ε) Εξέλιξη των θέσεων των καναλιών, των αποκοπών και των αποθέσεων χρωματισμένων με τον τύπο BTI από το 1990 έως το 2018. (Γ) Αληθινό χρώμα δορυφορικής εικόνας του 2018 της περιοχής (ευγενική προσφορά της Planet Labs, Inc.) (Η) Αποθέσεις καναλιών χρωματισμένες με βάση την ηλικία (Z. Sylvester et al., 2021).

3.3 Point bars – Scroll bars

Όπως έγινε αναφορά σε προηγούμενο κεφάλαιο οι αποθέσεις point bars συνδέονται σε μεγάλο βαθμό με τα scroll bars καθώς μέσω αυτών μπορεί να βρεθεί η λιθολογική ετερογένεια των αποθέσεων point bars και έτσι να μπορεί να χαρακτηριστεί και η επιδεκτικότητα του εδάφους στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Για να προβλεφθεί η λιθολογική ετερογένεια πρέπει να εξεταστούν δύο κύριοι μορφολογικοί παράγοντες, οι οποίοι είναι το σχήμα του μαιάνδρου και η διεύθυνση συσσώρευσης των scroll bars μέσα στα point bars.

Σύμφωνα με παλαιότερες προσεγγίσεις για την περιγραφή και την ταξινόμηση των διαφορετικών μορφών των μαιάνδρων έπρεπε να γίνει αντιστοίχιση του σχήματος (e.g. Brice, 1974; Allen, 1982; Bridge, 2003; Ielpi και Ghinassi, 2014), μέτρηση της κυρτότητας (Hooke, 2004) και μέτρηση της ακτίνας καμπυλότητας (Nanson και Hickin, 1983 – Hudson και Kessel, 2000 – Sambrook Smith et al., 2016). Ωστόσο σύμφωνα με πρόσφατη μελέτη των Russel et al., 2017 χρησιμοποιήθηκε διαφορετική προσέγγιση στον προσδιορισμό της μορφής των μαιάνδρων και πιο συγκεκριμένα καθορίστηκαν τέσσερις (4) κύριες ομάδες (ανοικτή ασύμμετρη (open asymmetric), γωνιώδης (angular), βολβοειδής (bulbous) και ανοικτή συμμετρική (open symmetric) με έναν επαναλαμβανόμενο και ημι-ποσοτικά μετρήσιμο τρόπο (Πίνακας 3).

Για να προσδιοριστεί η διεύθυνση συσσώρευσης των scroll bars χρησιμοποιούνται μοντέλα τα οποία απεικονίζουν όμως μόνο το πιο πρόσφατο επεισόδιο ανάπτυξης του μαιάνδρου και συνήθως ξεκινούν με ένα συγκεκριμένο ημιτονοειδές σχήμα (e.g. Leopold και Wolman, 1960; Daniel, 1971; Willis και Tang, 2010). Επιπλέον, ελάχιστα είναι τα μοντέλα τα οποία απεικονίζουν την αρχή της ανάπτυξης των point bars με ένα σχετικά ευθύγραμμο σχήμα (Lewin, 1976; Thompson, 1986). Με άλλα λόγια τα μοντέλα αυτά τα οποία απεικονίζουν την ανάπτυξη των point bars και των scroll bars είναι αυτά που έχουν την μεγαλύτερη εφαρμογή στην σημερινή εποχή, αλλά υστερούν στην εξήγηση της μεγάλης μεταβλητότητας της μορφής των scroll bars και point bars που παρατηρούνται στα σύγχρονα συστήματα (Schumm, 1963; Allen, 1964, 1965, 1983; McGowen και Garner, 1970). Με τη χρήση του Google Earth (2001) γίνεται καλύτερη παρατήρηση των επιφανειακών μοτίβων scroll bars και επίσης φαίνεται η μεγάλη μεταβλητότητα στην κατεύθυνση ή στις κατευθύνσεις της μετανάστευσης των scroll bars. Σύμφωνα με τους Russel et al, 2017 αναπτύχθηκε ένα σύστημα ταξινόμησης το οποίο αποτελείται από οκτώ (8) διαφορετικούς τύπους scroll bar, οι οποίοι έχουν χωριστεί με βάση την διαδικασία ή τις διαδικασίες ανάπτυξης, δηλαδή για παράδειγμα την μετάθεση, την επέκταση, την μετατόπιση, την περιστροφή και τον συνδυασμό δύο (2) ή περισσότερων διαδικασιών ανάπτυξης των scroll bars (Πίνακας 4). Επιπλέον, ο κάθε τύπος από αυτούς τους οκτώ (8) αποτελείται από μερικές υποπεριπτώσεις οπότε συνολικά προκύπτουν είκοσι δύο (22) κατηγορίες scroll bars (Πίνακας 5). Η κωδική ονομασία που αναγράφεται κάτω από κάθε τύπο στον Πίνακα 5, αποτελείται από τρία μέρη. Το γράμμα (T) σημαίνει ότι είναι τύπος scroll bar δηλαδή ένα μοτίβο scroll bar. Ο πρώτος αριθμός (1 έως 8) αναφέρεται στην αρχική και γενική κατηγοριοποίηση των μοτίβων scroll bars και ο δεύτερος αριθμός (1 έως 4) αναφέρεται στην υποκατηγορία του γενικού τύπου του μοτίβου του scroll bar. Το πλεονέκτημα που έχει η

συγκεκριμένη κατηγοριοποίηση είναι ότι λαμβάνονται υπόψη όλα τα μοτίβα scroll bars που υπάρχουν μέσα σε ένα point bar με αποτέλεσμα να είναι εφικτό να αναγνωριστεί όλη η ιστορία της συσσώρευσης, δηλαδή όλα τα μοτίβα scroll bars που έχουν συμβεί.

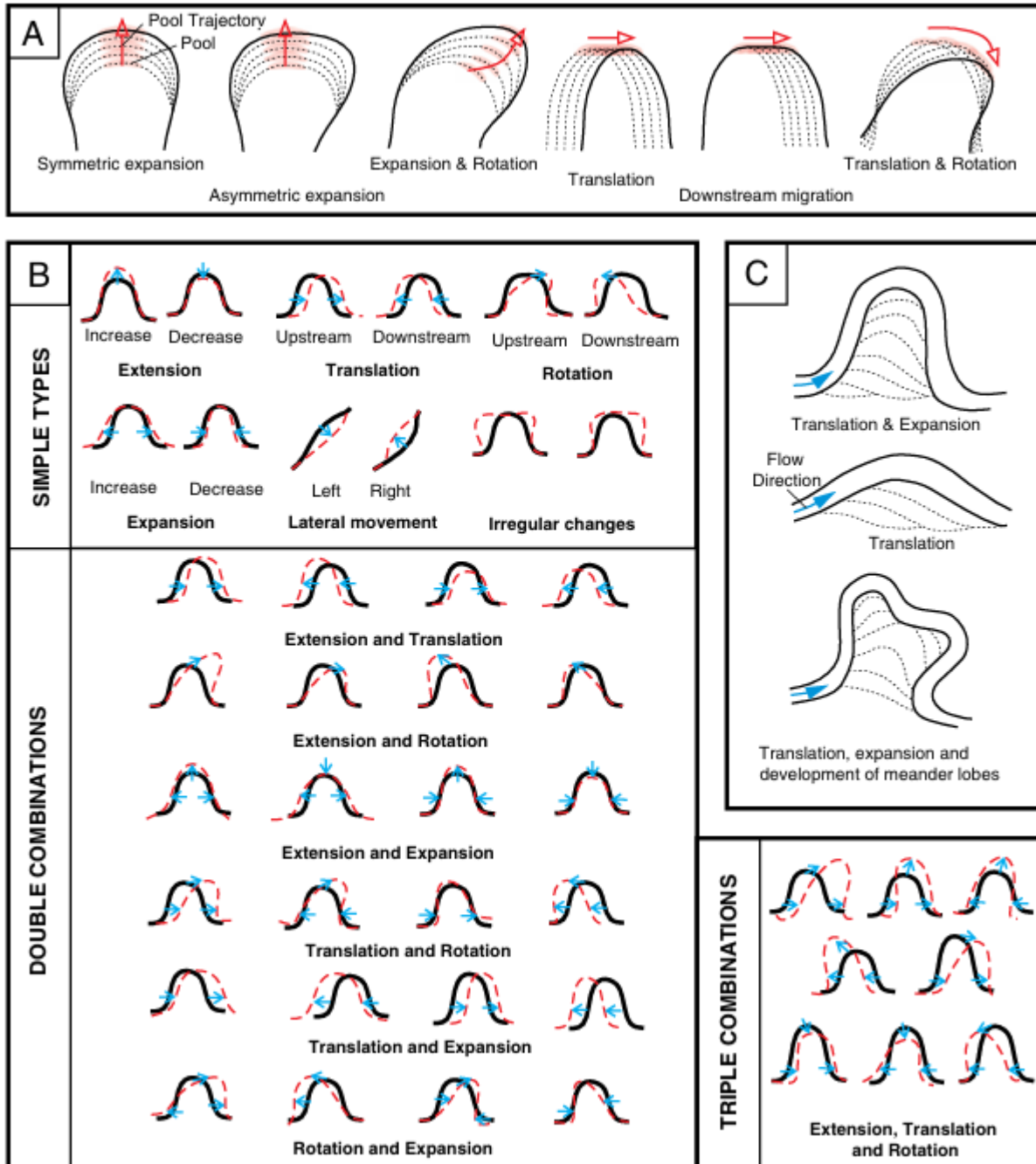
Με άλλα λόγια, η κατανόηση της ιστορίας της εξέλιξης ενός μαιάνδρου είναι πολύ σημαντική ώστε να μπορεί να προβλεφθεί και η κατανομή των λιθοστρωμάτων μέσα στις αποθέσεις των point bars. Σύμφωνα με τον Willis (1989), τα κριτήρια που επηρεάζουν την ιζηματολογία των point bars είναι η γεωμετρία του καναλιού, ο προσανατολισμός του καναλιού και η θέση του. Επιπλέον, ένας άλλος σχηματισμός ο οποίος είναι χαρακτηριστικός λόγω της ετερογένειάς του και αποτίθενται μέσα στα point bars, είναι τα κεκλιμένα ετερολιθικά στρώματα (Inclined heterolithic strata (HIS), τα οποία αποτελούνται από εναλλαγές στρωμάτων ιλυώδους υλικού με στρώματα ψαμμίτη (Thomas, 1987). Σύμφωνα με τον Smith et al. (2009), ετερογένεια παρουσιάζουν και οι αποθέσεις counter point bars καθώς η σύσταση αυτών των αποθέσεων είναι μια μεταβατική ζώνη όπου σταματάει με σχετικά αργό ρυθμό η απόθεση του αμμώδους υλικού, που σχηματίζουν τα point bars, και ξεκινάει η απόθεση ιλυώδους υλικού που κυριαρχεί στις αποθέσεις των counter point bars.

Για να εκτιμηθεί ο βαθμός της λιθολογικής ετερογένειας στα point bars χρησιμοποιείται το σχήμα του μαιάνδρου και το μοτίβο του scroll bar μέσω της εφαρμογής γνωστών μοτίβων και τάσεων (Russel et al. 2018). Ένας άλλος τρόπος εκτίμησης της ετερογένειας μέσα σε ένα point bar είναι με τη χρήση των ακτινών γάμμα (Gamma – ray) μέσω μετρήσεων που γίνονται μέσα σε γεωτρήσεις, διότι η μέθοδος αυτή ξεχωρίζει και καταγράφει τα διαφορετικά στρώματα αποθέσεων με βάση το υλικό απόθεσης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι καταγραφές των στρωμάτων των κεκλιμένων ετερολιθικών στρωμάτων (IHS) όπου με τη βοήθεια των ακτινών γάμμα μπορούν να ξεχωρίσουν τα όρια του στρώματος που αποτελείται από αμμώδη υλικό από αυτό που αποτελείται από ιλυώδη υλικό (Hubbard et al., 2011 – Labrecque et al., 2011). Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η χρήση της μεθόδου των ακτινών γάμμα, παράγονται προγνωστικά μοντέλα τα οποία συνήθως υπεραπλουστεύουν την λιθολογική ετερογένεια (Hohn et al., 1997 – Ramon και Cross, 1997 – Webb και Davis, 1998 – Pranter et al., 2000 – Tyge, 2004).

Πίνακας 3: Ταξινόμηση της μορφής του μαιάνδρου και των χαρακτηριστικών κάθε γεωμετρικά καθορισμένου σχήματος (Russell, 2017).

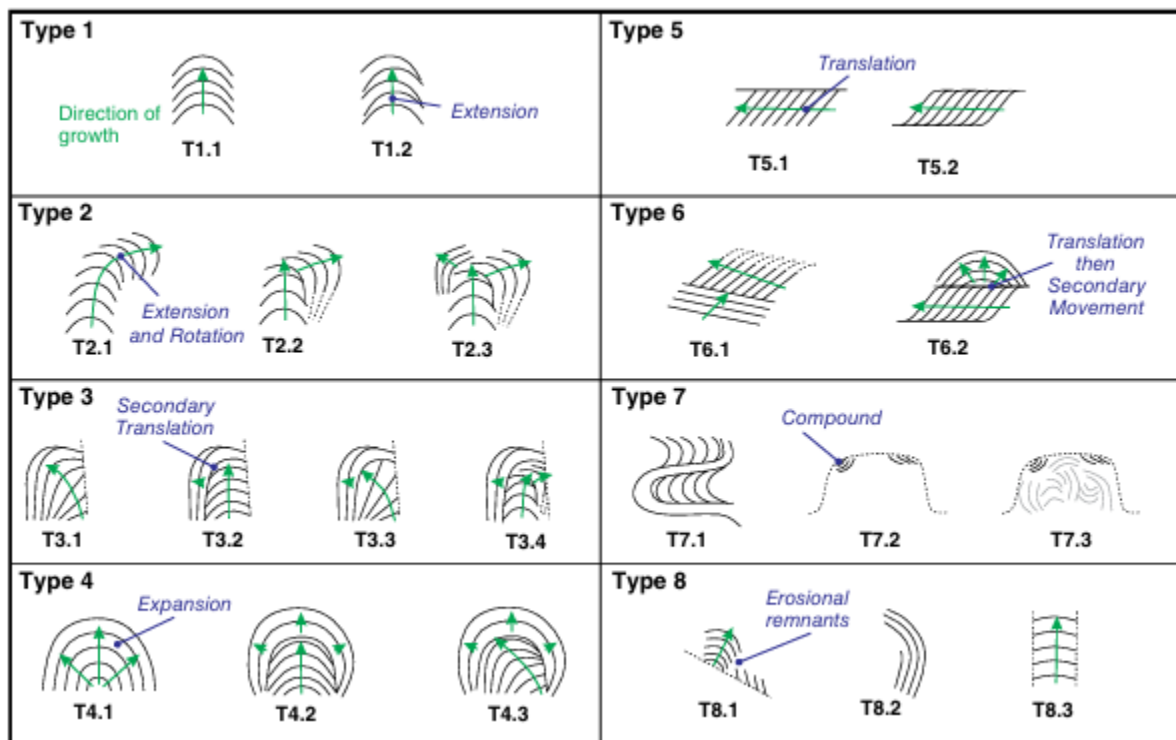
		CODE	OUTLINE	DESCRIPTION	APPX. RATIO IL:W	SHAPE AT APEX (Huddleston 1973)
Group 1	OPEN ASYMMETRIC	S1a		One limb perpendicular to width of meander.	1:1	B2 B3
		S1b		One limb perpendicular to width of meander	2:3	C4
		S1c		One limb perpendicular to width of meander. Box-like.	1:2	B2
		S1d		One limb perpendicular to width of meander.	1:2	D2
		S1e		Overtured. Limbs are approximately parallel.	2:1	B4
		S1f		Overtured.	1:1	B3
		S1g		Recumbent.	1:2	A2 B4
		S1h		Overtured. Limbs are approximately parallel.	1:1	B4
		S1i		Recumbent. Rounded apex.	1.5:1	B3 B4
Group 2	ANGULAR	S2a		Top is typically 'pinched'.	1:1	D4
		S2b		Symmetrical. Close to 90°.	1:1	E2
		S2c		Most commonly asymmetrical.	0.5:1	E2
		S2d		Most commonly symmetrical. Pronounced point.	0.5:1	E2
Group 3	BULBOUS	S3a		Not overtured. Rounded apex.	2:1	B3
		S3b		Sometimes overtured.	1:1	B2
		S3c		Not overtured.	2:3	B1 B2
		S3d		Sometimes asymmetrical. Rounded shape at apex.	2:1	C3
		S3e		Typically slight asymmetry.	2:1	B2
		S3f		Recumbent. Typically one straight limb.	2:1	B3
		S3g		Overtured. Rounded shape at apex. Irregular.	3:1	C3
Group 4	OPEN SYMMETRIC	S4a		Elongate. Limbs are approximately parallel.	3:1	B4
		S4b		Limbs are approximately parallel.	1:1	B3 B4
		S4c		Typically rounded apex.	1:1	B3 B4
		S4d		Typically skewed.	0.5:1	B3
		S4e		Typically not skewed.	0.25:1	D1

Πίνακας 4: Ένα σχήμα που δείχνει παραδείγματα της βιβλιογραφίας όπου απεικονίζεται η αλλαγή του σχήματος του μαιάνδρου- (A) Ielpi & Ghinassi, (2014)- (B) Hooke (1977)- (Γ) Bridge (2003).



Πίνακας 5: Ταξινόμηση της επιφανειακής έκφρασης του μοτίβου scroll-bar. Ορίστηκαν 8 τύποι (Type 1 - Type 8) και 22 υποτύποι σύμφωνα με τον εντοπισμό παραλλαγών στη συνολική διαδικασία που περιγράφεται από την κατηγορία τύπου (Russell et al., 2018).

Type	Type sub-division	Description
1	1.1	Extensional (cf. Knighton 1998)
1	1.2	Extensional punctuated rotation (cf. Durkin <i>et al.</i> , 2015)
2	2.1	Smooth extension and rotation
2	2.2	Extension and rotation with one major directional change
2	2.3	Extension and rotation with more than one major directional change
3	3.1	Rotation (cf. Daniel 1971) progressing to downstream translation
3	3.2	Extension then downstream translation
3	3.3	Rotation then downstream translation
3	3.4	Extension and rotation then one major directional change, then downstream translation
4	4.1	Expansion
4	4.2	Extension, then expansion is the most recent phase of growth
4	4.3	Rotation, then expansion is the most recent phase of growth
5	5.1	Translation with a straight form (cf. Daniel 1971)
5	5.2	Translation with a curved form (cf. Daniel 1971)
6	6.1	Initial translation then secondary translational movement in a different direction
6	6.2	Initial translation then secondary expansional movement in a different direction
7	7.1	Point-bar composed of recently abandoned point-bar remnants
7	7.2	Only minor movement is visible from surface expression
7	7.3	Point-bar composed of a complex of previously abandoned point-bar remnants
8	8.1	Selection of anomalous remnants of a variety of growth styles
8	8.2	Remnant where the length of the scroll bar is dominantly preserved over migration direction
8	8.3	Remnant where the migration direction is dominantly preserved over the length of the scroll bar



Οι Russel et al., 2018 κατηγοριοποίησε την λιθολογική ετερογένεια σε τέσσερις (4) τύπους, οι οποίοι διακρίνονται με βάση την αναλογία χονδρόκοκκου προς λεπτόκοκκου υλικού στην σύσταση ενός point bar (Πίνακας 6). Οι τύποι ετερογένειας i και iv ορίζονται από το χονδρόκοκκο και από το λεπτότερο ίζημα της απόθεσης αντίστοιχα. Στην περίπτωση που στις αποθέσεις point bars δεν είναι γνωστό ένα συγκεκριμένο μέγεθος κόκκων, τότε η ετερογένεια χαρακτηρίζεται ως σχετική. Αυτή η σχετικότητα αποτελεί πλεονέκτημα καθώς έτσι υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης διάφορων συστημάτων που αποτελούνται από διαφορετικές κατηγορίες μεγέθους κόκκων. Για παράδειγμα, εάν μια απόθεση point bar αποτελείται στο σύνολό της από χονδρόκοκκα υλικά τότε, ο τύπος iv θα αντιπροσωπεύει λεπτή άμμο, ενώ εάν μια απόθεση point bar αποτελείται στο σύνολό της από λεπτόκοκκα υλικά, τότε θα αντιπροσωπεύει ο τύπος iv πολύ λεπτή ιλύ ή ακόμα και λάσπη.

Πίνακας 6: Ένας πίνακας για την περιγραφή των σχετικών αναλογιών της χονδρόκοκκης προς λεπτόκοκκης λιθολογίας για κάθε καθορισμένο τύπο ετερογένειας. Τα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αναφέρονται στα πιο χονδρόκοκκα και λεπτότερο ίζημα που παρατηρείται στην απόθεση point-bar (Russel et al., 2018).

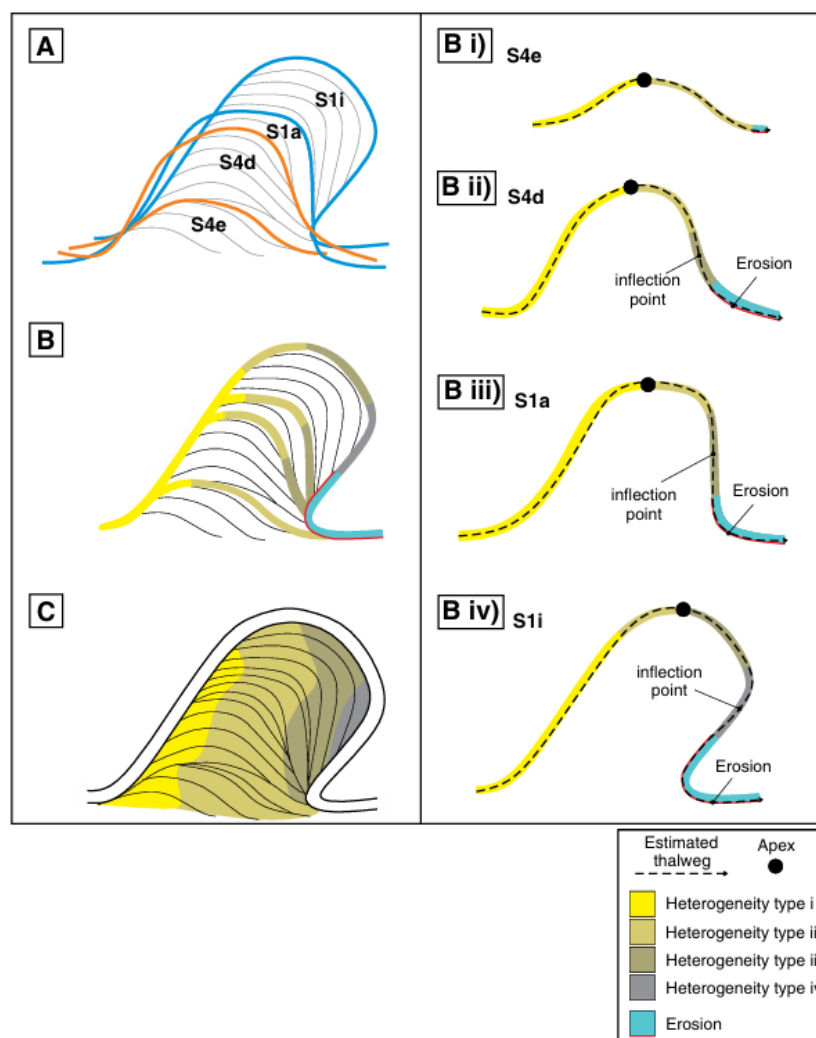
Heterogeneity type	Relative proportion of coarse to fine-grained lithology (coarse : fine)
i	75-100% : 0-25%
ii	50-75% : 25-50%
iii	25-50% : 50-75%
iv	0-25% : 75-100%

Συνοψίζοντας για να χαρτογραφηθεί η λιθολογική ετερογένεια σε ένα point bar, πρέπει πρώτα να βρεθούν τα σχήματα του μαιάνδρου που αναπτύχθηκαν σε διάφορα στάδια ανάπτυξης κατά την πάροδο των χρόνων (Σχήμα 11Α). Για να επιτευχθεί αυτό απαιτείται η παρατήρηση της γεωμετρίας των scroll bars και το πως αναπτύσσονται με βάση τον Πίνακα 5. Επειδή μπορεί να υπάρχουν πολλά στάδια ανάπτυξης των scroll bars θα πρέπει να διακριθούν και να σχεδιαστούν ξεχωριστά ώστε να βρεθεί σε κάθε ένα στάδιο αρχικά η κορυφή του σχήματος του μαιάνδρου (apex) και έπειτα να αποτυπωθεί η ετερογένεια με βάση τους τέσσερις (4) τύπους (i-iv) (Σχήμα 11B i-iv). Στην συνέχεια προσδιορίζεται στα κατάντη το σημείο καμπής (inflection point) το οποίο είναι το σημείο όπου πιθανώς υπάρχει ένα ρέμα ή μια διασταύρωση (cf. Leopold και Walman, 1957; Allen, 1965, 1982). Στο σημείο καμπής είναι πολύ πιθανό να αποτεθεί το πιο λεπτόκοκκο υλικό (Smith et al., 2001). Ανάλογα με το σχήμα του μαιάνδρου δηλαδή σε ποια από τις τέσσερις (4) κατηγορίες (Πίνακας 3) ανήκει, αντίστοιχα αποτυπώνονται και οι τέσσερις (4) τύποι ετερογένειας μέσα στον μαιάνδρο. Πιο συγκεκριμένα όταν οι μαιάνδροι έχουν σχήμα ανοιχτό ασύμμετρο, γωνιώδες ή ανοιχτό συμμετρικό (Κατηγορία 1, 2 και 4 αντίστοιχα), τότε οι τύποι ετερογένειας i και ii καταγράφονται στα ανάντη όπως παρατηρείται συσσώρευση υλικού. Ο τύπος ετερογένειας i δεν μπορεί να καταγραφεί στα κατάντη ενός μαιάνδρου καθώς η ενέργεια

στην εσωτερική πλευρά (κυρτό κομμάτι) του μαιάνδρου είναι πολύ χαμηλή και αποτίθενται συνήθως λεπτόκοκκα ιζήματα (Fustic et al., 2012). Η ετερογένεια τύπου ii εμφανίζεται στα ανάντη του μαιάνδρου αλλά ποικίλλει η έκταση του ως προς τα κατάντη ανάλογα με το σχήμα του μαιάνδρου και της διαδικασίας συσσώρευσης των αποθέσεων μέσα στο point bar. Ακολουθεί η ετερογένεια τύπου iii και iv όπου καταγράφονται στα κατάντη ενός μαιάνδρου και στο σημείο αυτό σχηματίζονται οι αποθέσεις counter point bars αφού εκεί μετατρέπονται τα scroll bars από κοίλα σε κυρτά (Smith et al., 2009). Στην περίπτωση που οι μαιάνδροι έχουν βολβοειδή σχήματα (bulbous), τότε υπάρχει περίπτωση να έχουν περισσότερα από δύο (2) σημεία καμπής, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλά σημεία με πρόσφατη ανάπτυξη οπότε και να εμφανίζουν λεπτόκοκκο υλικό (Carter, 2003). Επιπλέον, στους βολβοειδείς μαιάνδρους θα πρέπει οι τύποι ετερογένειας i-iv να χρησιμοποιούνται εφόσον είναι απαραίτητο, παραπάνω από μια φορά διότι είναι πολύπλοκοι και πολυφασικοί σχηματισμοί (Nanson et al., 1980). Τέλος για την σύνταξη του τελικού χάρτη της προβλεπόμενης κατανομής της ετερογένειας χρησιμοποιούνται πληροφορίες όπως οι έντονες αλλαγές των συσσωρεύσεων των scroll bars και οι σχέσεις διασταύρωσης ώστε να μπορέσει να γίνει σωστή πρόβλεψη της κατανομής των τύπων ετερογένειας μεταξύ των ανακατασκευασμένων γραμμών (Σχήμα 11C).

Σύμφωνα με τον Obermeier et al., 1990, οι πιο σημαντικές παράμετροι στην εκτίμηση της επιδεκτικότητας της ρευστοποίησης είναι οι σχετικές διαφορές στο μέγεθος των κόκκων και το επίπεδο συμπύκνωσης λόγω ηλικίας. Με βάση τις παραπάνω οι Abayo et al., 2023 έκανε μερικές υποθέσεις για την επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και σε άλλες περιοχές (πέρα από την περιοχή μελέτης Νέα Ζηλανδία, Christchurch) εφόσον υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα όπως είναι οι χάρτες (γεωμορφολογικά) και η χωρική κατανομή των εμφανίσεων των ρευστοποιήσεων. Σύμφωνα με την πρώτη υπόθεση το μεγαλύτερο ποσοστό της πλευρικής εξάπλωσης λόγω της ρευστοποίησης λαμβάνει χώρα μέσα στα point bars και μικρότερο ποσοστό λαμβάνει χώρα στα counter point bars. Αυτό συμβαίνει καθώς στα point bars υπάρχουν συχνότερες αποθέσεις υλικού που είναι και λιγότερο πυκνές από αυτές των counter point bars. Επιπλέον, οι αποθέσεις στα point bars αποτελούνται από χονδρόκοκκο υλικό σε σχέση με τις αποθέσεις των counter point bars που αποτελούνται από λεπτότερο υλικό με αποτέλεσμα οι αποθέσεις point bars να αποτελούν πιο επιδεκτικές σε ρευστοποίηση από τις αποθέσεις counter point bars (Bucci et al., 2018 – Thomas et al., 1987 – Youd και Perkins, 1978). Η δεύτερη υπόθεση αναφέρεται στο γεγονός ότι στις ανάντη περιοχές των point bars παρουσιάζεται μεγαλύτερη εμφάνιση πλευρικής εξάπλωσης λόγω της ρευστοποίησης σε σύγκριση με τις κατάντη περιοχές των point bars. Αυτό συμβαίνει διότι στα ανάντη αποτίθενται αδρόκοκκα υλικά σε αντίθεση με τα κατάντη όπου αποτίθενται πιο λεπτόκοκκα υλικά. Επιπλέον, στα κατάντη οι αποθέσεις είναι καλύτερης διαβάθμισης δηλαδή ανάμεσα στους μεγάλους κόκκους παρεμβάλλονται και μικρότεροι με αποτέλεσμα να αυξάνουν την πυκνότητα και την αντοχή των αποθέσεων καθιστώντας τις συγκεκριμένες αποθέσεις λιγότερο επιδεκτικές σε ρευστοποίηση (Bucci et al., 2018 – Obermeier et al., 1990 – Russel et al., 2018 – Thomas et al., 1987 – Youd και Perkins, 1978).

Η τρίτη και τελευταία υπόθεση αναφέρεται στις παρατηρήσεις που έχουν γίνει και καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι παρατηρούνται περισσότερες πλευρικές εξαπλώσεις στις αποθέσεις που δημιουργούνται λόγω της ενεργής κοίτης (point bars και counter point bars) σε σχέση με τις αποθέσεις που είναι παλαιότερης ηλικίας και βρίσκονται μακριά από στην ενεργή κοίτη, μέσα στην πλημμυρική πεδιάδα (θαμμένα point bars παλαιομάνες και παλαιοκοίτες). Αυτό συμβαίνει γιατί, σύμφωνα και με τα κριτήρια επιδεκτικότητας που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, όσο πιο πρόσφατος είναι ένας σχηματισμός τόσο μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση παρουσιάζει (Rosinski et al., 2004 – Youd και Perkins, 1978).



Σχήμα 11: Κατασκευή ενός μοντέλου ετερογένειας από μια εικόνα κάτοψης μαιάνδρου. (Α) Εκτιμώμενες τροχιές μαιάνδρου μέσω των οποίων έχει μεταβεί στο πιο πρόσφατο σχήμα- (Β) Συλλογή των ερμηνειών της ετερογένειας που έγιναν στα σημεία Β i)-iv)- (C) ένας χάρτης των εκτιμώμενων σχετικών μεγεθών κόκκων για την πιο πρόσφατη μορφή του μαιάνδρου (Russell et al., 2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Περιοχή μελέτης

Η περιοχή μελέτης είναι το γεωγραφικό διαμέρισμα του Hatay, το οποίο αποτελεί τμήμα της Τουρκίας. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στο νότιο τμήμα της χώρας, έχει πληθυσμό 1.483.674 κατοίκους, έκταση 5.403 τ.χλμ. και η πρωτεύουσά της είναι η Antakya. Όπως φαίνεται και στον χάρτη 3, στα δυτικά συνορεύει με την Μεσόγειο θάλασσα, στα βόρεια με τις περιοχές Osmaliye και Gaziantep και στα ανατολικά και νότια με την Συρία. Ο κύριος ποταμός που διασχίζει την περιοχή του Hatay είναι ο ποταμός Ορόντης ή Ασί, ο οποίος πηγάζει από την κοιλάδα Bekaa του Λιβάνου και διασχίζει πρώτα τη Συρία και μετά το Hatay και εκβάλλει στη Μεσόγειο θάλασσα στο δέλτα του στο Samandağ. Υπήρχε μια λίμνη στην πεδιάδα του Amik, αλλά αυτή αποξηράθηκε τη δεκαετία του 1970, και σήμερα η Amik είναι πλέον η μεγαλύτερη από τις πεδιάδες και ένα σημαντικό γεωργικό κέντρο. Το κλίμα είναι τυπικό της Μεσογείου, με θερμούς υγρούς χειμώνες και ζεστά, ξηρά καλοκαίρια.



Χάρτης 3: Χάρτης των γεωγραφικών διαμερισμάτων της Τουρκίας (Dewdney και Yapp, 2024)

4.1 Λεκάνη απορροής του ποταμού Ορόντη-Ασί

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ορόντη – Ασί σχηματίστηκε υπό την επίδραση της ζώνης ρηγμάτων της Νεκράς θάλασσας. Η τροφοδοσία του ποταμού γίνεται από τα Λιβάνια Όρη και οι εκβολές του βρίσκονται στην περιοχή της Antakya (Χάρτης 4). Το συνολικό μήκος του ποταμού Ορόντη – Ασί είναι 556 χιλιόμετρα όπου, 7% (39 χιλιόμετρα) βρίσκονται στον Λίβανο, 66% (367 χιλιόμετρα) βρίσκονται στη Συρία, 18% (100 χιλιόμετρα) βρίσκονται στην Τουρκία και 9% (50 χιλιόμετρα) αποτελούν την συνοριακή γραμμή Τουρκίας – Συρίας. Η συνολική επιφάνεια του ποταμού Ορόντη – Ασί είναι 24.870 km² (Korkmaz και Karatas 2009, Al Dbiyat και Geyer 2015).

THE ASI-ORONTES RIVER BASIN



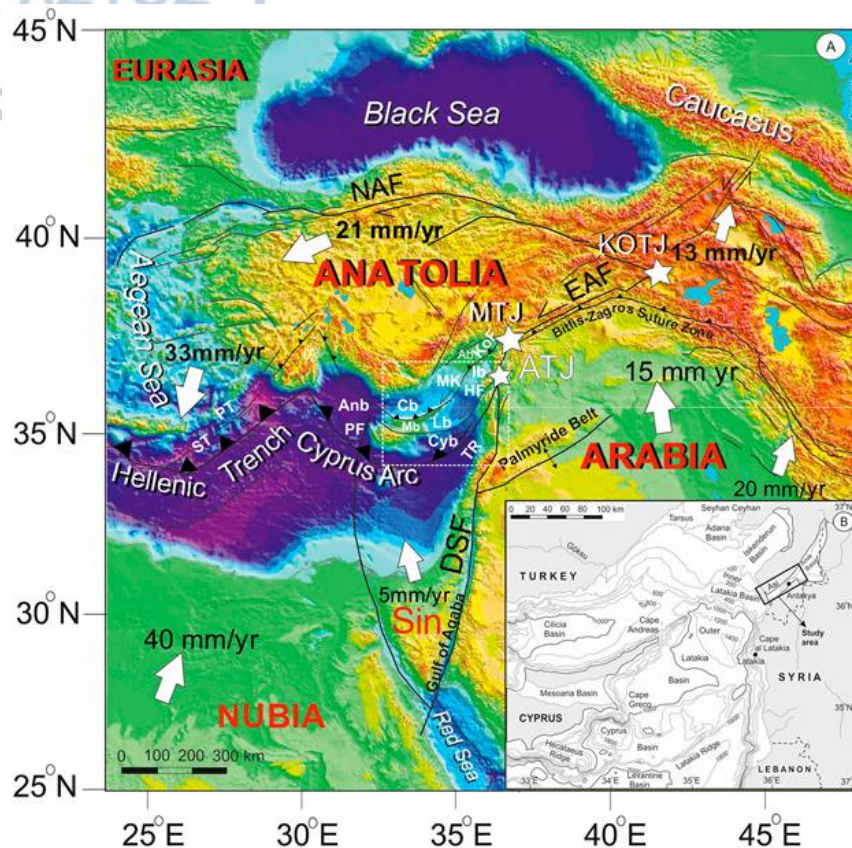
Χάρτης 4: Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ορόντη – Ασί (Karatas, 2016)

4.2 Γενική τεκτονική και γεωλογία λεκάνης

Η γενική γεωτεκτονική και γεωμορφολογική δομή της λεκάνης απορροής του ποταμού Ορόντη – Ασί, στο τουρκικό κομμάτι, έχει ως κυρίαρχο χαρακτηριστικό τον εφέλκυσμό. Εξαιτίας της επίδρασης των κανονικών ρηγμάτων στη λεκάνη του Ορόντη – Ασί, στο κάτω τέμαχος βρίσκονται κυρίως ανθρακικά πετρώματα και οφιόλιθοι ενώ στο άνω τέμαχος βρίσκονται σε μεγαλύτερο βαθμό οι τεταρτογενείς αποθέσεις και οι αλλουβιακές αποθέσεις αλλά και ψαμμιτικά πετρώματα και ασβεστόλιθοι, όπως φαίνεται και στον χάρτη 8 (Herece 2008) . Οι τεταρτογενείς αυτές αποθέσεις αποτελούνται από εναλλαγές χαλικίων, άμμου, ιλύ και αργίλου, έχουν μεγάλα πάχη (έως και 300 μέτρα) και εκτείνονται σε μεγάλο εύρος. Παρόλο που αυτές οι αποθέσεις έχουν μεγάλο πάχος και εύρος στην λεκάνη του Amik, κυρίαρχοι σχηματισμοί αποτελούν τα ιζηματογενή πετρώματα και ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πολύ κοντά στην επιφάνεια (Palutoglu και Sasmaz 2017).

4.3 Γενική τεκτονική της ανατολικής Μεσογείου

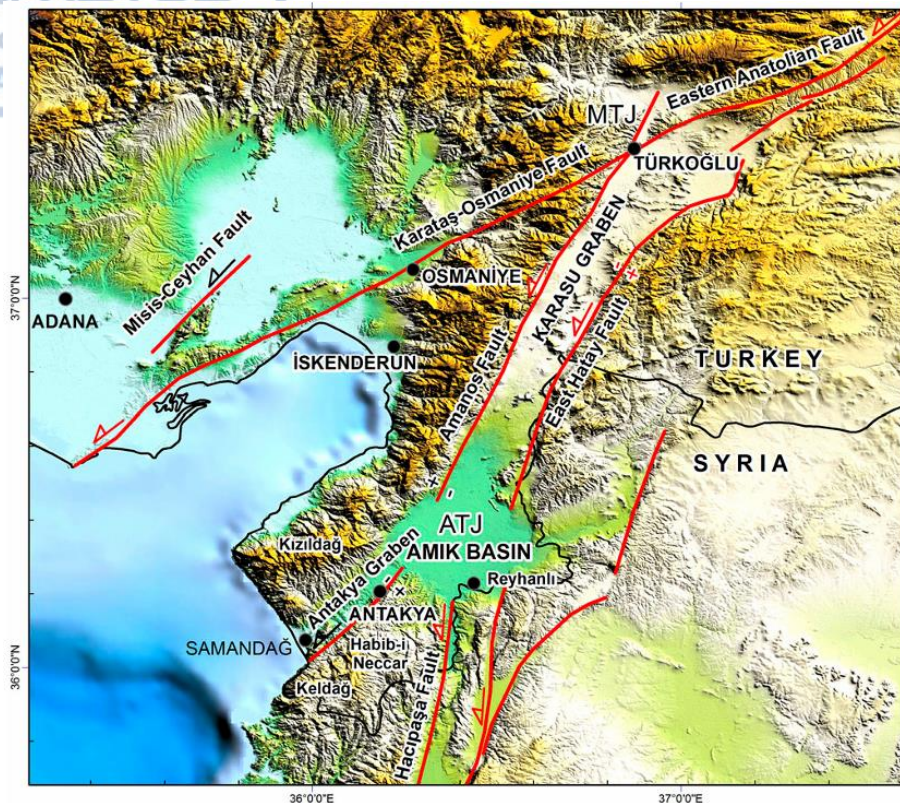
Η περιοχή του Hatay επηρεάζεται από την τεκτονική που επικρατεί στην ανατολική Μεσόγειο. Πιο συγκεκριμένα, από τα νότια η κύρια τεκτονική της περιοχής της Μεσογείου είναι η υποβύθιση της Αφρικανικής πλάκας (Nubia) κάτω από την Ευρασιατική πλάκα (Eurasia). Επίσης, λίγο πιο ανατολικά συγκρούεται η Αραβική (Arabia) πλάκα με την Ευρασιατική πλάκα και πιο συγκεκριμένα με την μικροπλάκα της Ανατολίας (Anatolia) όπου σχηματίζεται ορογένεση καθώς και οι δύο (2) πλάκες αποτελούνται από ηπειρωτικό φλοιό. Η αραβική πλάκα κινείται προς τα βόρεια με 15mm/yr και συγκρούεται με την πλάκα της Ανατολίας που κινείται προς τα δυτικά με 21mm/yr. Τα πιο σημαντικά ρήγματα της πλάκας της Ανατολίας, τα οποία οριοθετούν και την πλάκα και είναι τα μεγαλύτερα σε έκταση, είναι αρχικά το ρήγμα της Βόρειας Ανατολίας (NAF) που βρίσκεται στο βόρειο κομμάτι της Τουρκίας και το ρήγμα της Ανατολικής Ανατολίας (EAF) που βρίσκεται στο ανατολικό κομμάτι της Τουρκίας και επηρεάζει και την περιοχή της μελέτης (Hatay). Επιπλέον, ανάμεσα στις πλάκες της Αφρικής και της Αραβίας, υπάρχει μια πιο μικρή τεκτονική πλάκα η Sin η οποία και υποβυθίζεται κάτω από την Ευρασιατική πλάκα επίσης. Ο διαχωρισμός της Αφρικανικής πλάκας από την Sin είναι ότι έχουν διαφορετικές διευθύνσεις κίνησης (Αφρικανική πλάκα: BA, Sin: BD) και διαφορετικές μετατοπίσεις ανά έτος (Αφρικανική πλάκα: 40mm/yr, Sin: 5mm/yr), όπως φαίνεται και στον χάρτη 5.



Χάρτης 5: : Τεκτονικό περιβάλλον Ανατολικής Μεσογείου (Hall et al., 2005 και Reilinger et al., 2006)

4.3.1 Cyprus – Antakya Fault (CAF)

Το ρήγμα CAF είναι εν μέρει ένα υποθετικό ρήγμα, καθώς σύμφωνα με τους Hall et al (2005), είναι αριστερόστροφο ρήγμα οριζόντιας μετατόπισης (sinistral transtensional fault) το οποίο ξεκινάει από το όριο μεταξύ των λεκανών της Κύπρου και της Λατάκειας και πιθανώς συνεχίζει προς τα ανατολικά με το ρήγμα DSF (Dead Sea Fault) μέσω της τάφρου της Antakya. Εκτός από την τριπλή διασταύρωση ATJ στην πεδιάδα του Amik, σχηματίζεται ένας δεύτερος τριπλός κόμβος βορειότερα, ο οποίος ονομάζεται τριπλός κόμβος του Kahramanmaraş ή Türkoğlu (MTJ). Στον κόμβο αυτό συναντιούνται το ρήγμα της Ανατολικής Ανατολίας με το ρήγμα του Αμανού και το ρήγμα Karatas – Osmakiye (Χάρτης 6).



MTJ: τριπλός κόμβος Kahramanmaraş (ή Türkoğlu),

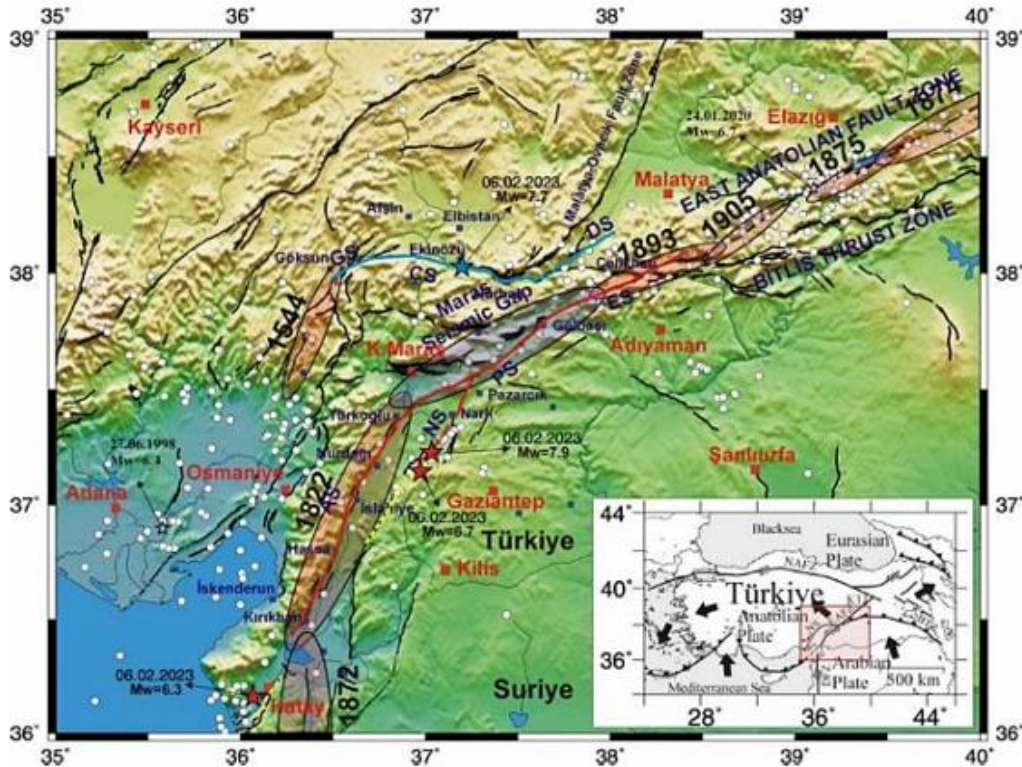
ATJ: τριπλός κόμβος Amik Junction

Χάρτης 6: Ένα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου για την περιοχή μελέτης και την περιφέρειά της, στο οποίο φαίνονται τα κύρια ενεργά ρήγματα και οι μορφοτεκτονικές μονάδες (Tari et al., 2014).

4.3.2 East Anatolian Fault Zone (EAFZ)

Όσον αφορά την γεωλογία και την σεισμοτεκτονική της περιοχής, σημαντικό ρόλο έχει η ζώνη ρηγμάτων EAFZ (East Anatolian Fault Zone), η οποία έχει μήκος 580 km και το κύριο ρήγμα είναι ένα αριστερόστροφο οριζόντιας μετατόπισης ρήγμα βορειοανατολικής διεύθυνσης. Το ρήγμα αυτό αποτελεί το όριο μεταξύ της Αραβικής πλάκας της Ανατολίας (Reilinger et al 2006, Moreno et al, 2011) και σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν γίνει με GPS στην Αραβική πλάκα κινείται προς τα βορειοανατολικά σε σχέση με την πλάκα της Ανατολής περίπου 11 ± 2 mm ανά έτος (Cetin et al 2003, AFAD 2013). Κατά μήκος του ρήγματος EAFZ έχουν σημειωθεί αρκετά ισχυροί ιστορικοί σεισμοί κατά την πάροδο των χρόνων, με τον μεγαλύτερο που έχει καταγραφεί να είναι το 1822 στην Antakya με μέγεθος 7,5 Ms κλίμακας του Richter. Άλλοι ισχυροί σεισμοί που έχουν καταγραφεί είναι στην Karilona το 1866 με μέγεθος $M_s = 7,2$, στην λίμνη Amin το 1872 με μέγεθος $M_s = 7,2$ στο Hazar το 1875 με μέγεθος $M_s = 7,1$ και στην Malatya το 1893 με μέγεθος $M_s = 7,1$, όπως φαίνεται και στον χάρτη 7 (Kartal και Kadiroglu 2019, Ozturk 2020). Πέρα από τους παραπάνω ιστορικούς σεισμούς που αναφέρθηκαν οι πιο πρόσφατοι και πιο ισχυροί

σεισμοί που σημειώθηκαν στον EAFZ είναι το 2023 στο Pazarcik με μέγεθος $M_w = 7,7 - 7,9$ και στο Elbistan – Ekinözü με μέγεθος $M_w = 7,6 - 7,7$, για τους οποίους θα αναφερθούμε πιο αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.



Χάρτης 7: Το γενικό τεκτονικό καθεστώς της Τουρκίας (μικρή εικόνα) και τα σεισμοτεκτονικά χαρακτηριστικά του EAFZ (Demir et al., 2023).

4.4 Οροσειρά του Αμανού

Στην περιοχή του Hatay στην βορειοδυτική πλευρά του ποταμού, λόγω της τεκτονικής σχηματίστηκε η οροσειρά του Αμανού η οποία αποτελεί μια μεγάλη αντικλινική δομή. Ο άξονας της έχει διεύθυνση από τα βορειοανατολικά προς τα νοτιοδυτικά. Η ηλικία του πυρήνα του αντικλίνου είναι το κατώτερο παλαιοζωικό και η τεκτονική και ο βαθμός πτύχωσης αυξάνονται από το νότο προς τον βορρά. (Ozkan et al 1986).

4.5 Τάφρος της Antakya

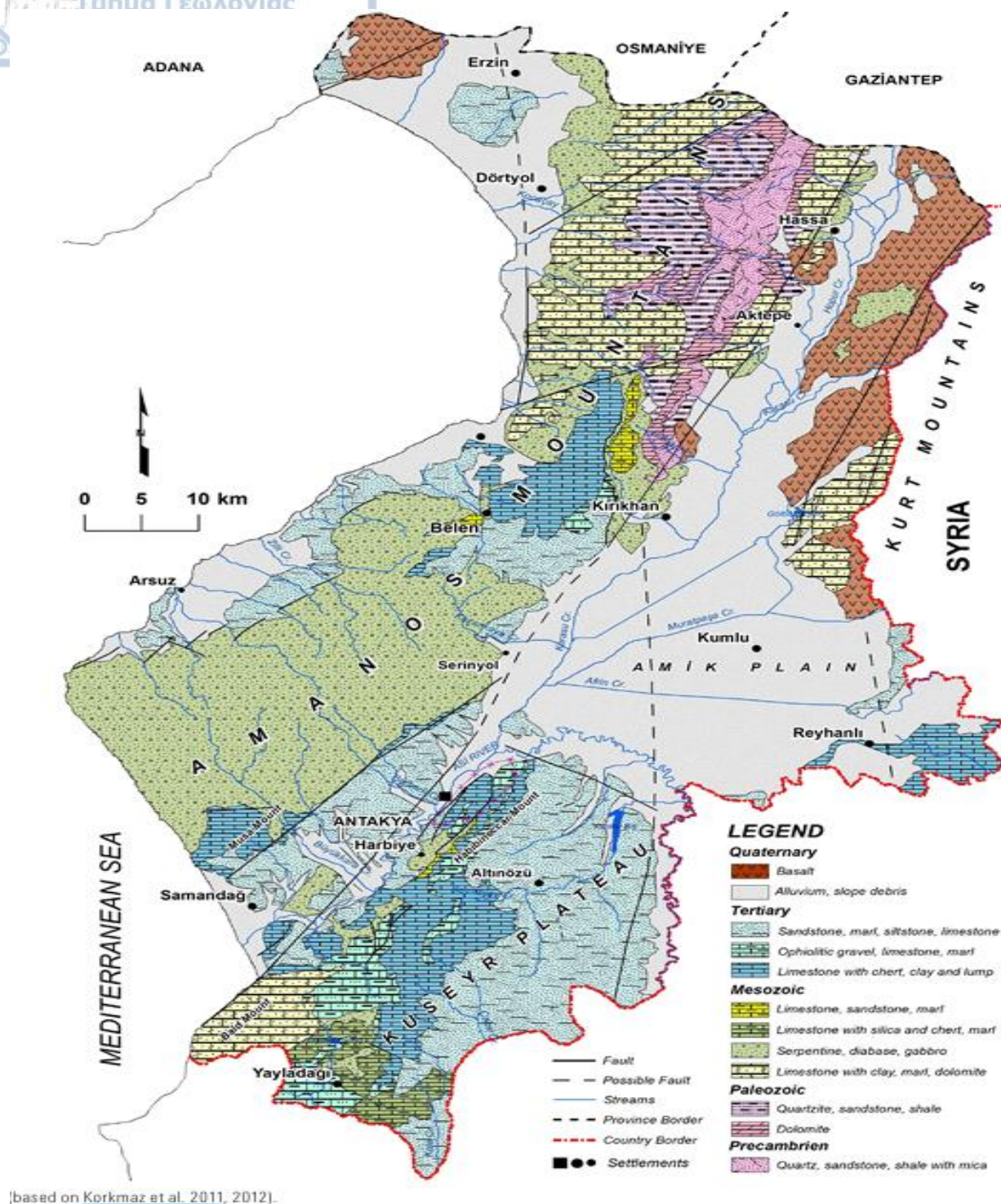
Στην περιοχή Hatay στην νοτιοανατολική Τουρκία βρίσκεται η τάφρος Antakya (Antakya Graben) η οποία περικλείεται βορειοδυτικά από την οροσειρά του Αμανού ενώ νοτιοανατολικά από τα βουνά Habib-i Nekar και Ceb-el Akra (Keldag). Η τάφρος Antakya συνορεύει στα νοτιοδυτικά με την Μεσόγειο Θάλασσα και είναι πιθανότατα συνδεδεμένη με την πεδιάδα Latakia (Latakia

Basin), η οποία βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, ενώ στα βορειοανατολικά συνορεύει με την πεδιάδα Amik (Amik basin) (Hall et al, 2005).

Η τάφρος Antakya είναι μια ασύμμετρη κοιλότητα με διεύθυνση προς τα βορειοανατολικά, όπου έχουν αποθεθεί θαλάσσια πυριτικά ιζήματα κατά το Πλειόκαινο. Στην συνέχεια αποτέθηκαν κατά το Πλειστόκαινο αλλουβιακές αποθέσεις και ιζήματα ποτάμιων αναβαθμίδων. Η τάφρος αυτή δημιουργήθηκε κατά το Πλειόκαινο καθώς το ρήγμα της Ανατολικής Ανατολίας στα βόρεια προκάλεσε την ανάπτυξη ενός αριστερόστροφου ρήγματος οριζόντιας μετατόπισης (sinistral transtensional). Σε μεταγενέστερα στάδια του ανοίγματος της τάφρου Antakya αναπτύχθηκαν κανονικά ρήγματα κατά μήκος του νοτιοανατολικού περιθωρίου τα οποία προκάλεσαν την κλίση της τάφρου προς τα νοτιοδυτικά. Επομένως, παρατηρούνται κατά μήκος της μεσογειακής ακτής της τάφρου οι θαλάσσιες αποθέσεις σε διαφορετικά υψόμετρα που κυμαίνονται από δύο (2) έως εκατών ογδόντα (180) μέτρα πάνω από το σημερινό επίπεδο της θάλασσας. Τα περισσότερα από αυτά τα κανονικά ρήγματα είναι ενεργά και σε συνδυασμό με τις τεκτονικές κινήσεις των τεμαχών τους και τις μεταβολές της στάθμης της θάλασσας της Μεσογείου κατά το Πλειστόκαινο επηρεάστηκε σημαντικά η γεωμορφολογία της περιοχής.

4.6 Πεδιάδα του Amik

Όπως φαίνεται και στον Χάρτη 6, στην πεδιάδα Amik σχηματίζεται ένας τριπλός κόμβος καθώς συνδέονται τα ρήγματα του Αμανού, του Hacipasa και το ρήγμα Κύπρου – Antakya (CAF). Σύμφωνα με τους Yurur και Chorowicz (1998) και Over, Kavak, Bellier και Ozden (2004), νότια συνέχεια του EAF (East Anatolian Fault) αποτελεί το ρήγμα του Αμανού, το οποίο ενώνεται με το DSF (Dead Sea Fault) κοντά στην πεδιάδα Amik και με το κυπριακό τόξο ενώνεται μέσω του ρήγματος CAF (Cyprus – Antakya Fault). Το αποτέλεσμα είναι ότι τα ρήγματα αυτά σχηματίζουν μια τριπλή διασταύρωση τύπου FFF (ATJ) στην λεκάνη του Amik.



[based on Korkmaz et al. 2011, 2012].

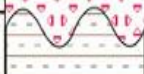
Χάρτης 8: Ο Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του Hatay (Karataş, 2016)

4.7 Γεωλογία Antakya Graben

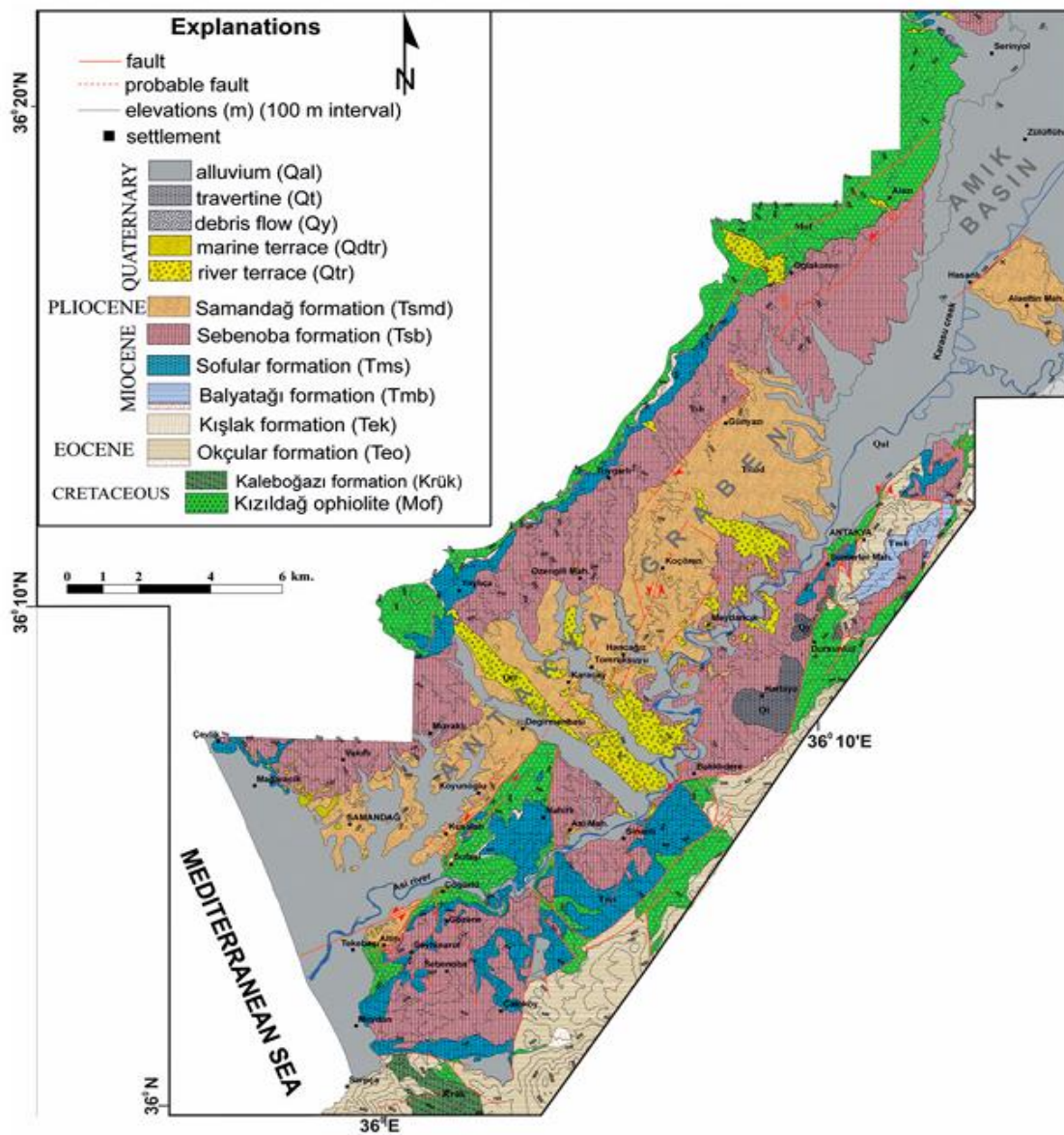
Στην περιοχή της τάφρου Antakya, οι γεωλογικοί σχηματισμοί κατηγοριοποιούνται σε δύο (2) μεγάλες ενότητες: η πρώτη ενότητα είναι τα πετρώματα και οι σχηματισμοί που αποτελούν το υπόβαθρο και η δεύτερη ενότητα είναι τα πετρώματα και οι σχηματισμοί που αποτελούν το υλικό πλήρωσης της τάφρου. Σύμφωνα με τους Aslamer, 1973, Bagci, Parlak και Hock 2005, 2008 Dubertret, 1953, Inwood, Anderson, Morris και Robertson, 2009, ο κατώτερος σχηματισμός, ο οποίος είναι ορατός στην επιφάνεια στην τάφρο Antakya, είναι ο οφιόλιθος Kizildag. Αυτός αποτελείται από κάτω προς τα πάνω από υπερμαφικούς τεκτονίτες, γάββρους, συμπλέγματα φυλλοειδών δακίτων, πλαγιογρανίτες, μαξιλαροειδής λάβα (pillow lava) και επι-οφιολιθικά ιζήματα (πίνακας 7). Ο οφιόλιθος Kizildag είναι ηλικίας Καμπάνιου - Μαιστρίχτιου και έχει συνήθως πάχος μεγαλύτερο από 1.500 μέτρα. Από πάνω του αποτίθεται σε ασυμφωνία κατά το Ανώτερο Μαιστρίχτιο ο σχηματισμός Kalebogazi, ο οποίος αποτελείται από εναλλαγές αργιλώδη ασβεστόλιθου και μάργες και έχει πάχος 50 με 150 μέτρα. Κατά το κατώτερο με μέσω Ηώκαινο αποτέθηκαν ασύμφωνα με τον σχηματισμό Kalebogazi, αρχικά κροκαλοπαγές βάσης και αργιλώδης ασβεστόλιθος πάχους 60-300m (Kocacifci και Unlugenc, 2008). Στη συνέχεια, στο ανώτερο Ηώκαινο αποτέθηκαν σε συμφωνία, με τον προηγούμενο σχηματισμό, ασβεστόλιθος, μάργες και ανθρακικός ιλυόλιθος με πάχος 200 – 250 μέτρα τα οποία αποτελούν ιζήματα ρηχής θαλάσσιας ακολουθίας. Όπως παρατηρείται και στον Χάρτη 8 ο σχηματισμός του ανώτερου Ηωκαίνου βρίσκεται στην επιφάνεια κυρίως στην περιοχή της τάφρου Antakya στο νοτιοανατολικό όριο και καλύπτει μεγάλες εκτάσεις. Ακολούθως έχουμε την απόθεση του σχηματισμού Balgatagi κατά το κατώτερο Μειόκαινο ασύμφωνα με τις προηγούμενες Ηωκαινικές αποθέσεις (Boulton και Robertson, 2007). Στην βάση αυτού του σχηματισμού υπάρχουν ερυθροστρώματα, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και αργιλώδης ασβεστόλιθος πάχους 0-150 μέτρα, τα οποία αποτέθηκαν σε ηπειρωτικό έως οριακό θαλάσσιο περιβάλλον (Safak 1993a, 1993b, Jelcuk, 1985). Από πάνω ακριβώς αποτέθηκε σε συμφωνία κατά το μέσο Μειόκαινο ο σχηματισμός Sofular (Safak, 1993a, 1993b, Selcuk 1985) με πάχος που κυμαίνεται από 10 έως 300 μέτρα, ο οποίος αποτελείται από ασβεστόλιθους που εμπεριέχουν απολιθώματα, κάτι που υποδηλώνει μια μετακίνηση που σχετίζεται με την εναπόθεση προς τα πάνω. Ο τελευταίος και ανώτερος σχηματισμός που βρίσκεται στην ενότητα των σχηματισμών του υπόβαθρου είναι ο σχηματισμός Sebenoba, ο οποίος αποτέθηκε με γωνιώδη ασυμφωνία κατά το ανώτερο Μειόκαινο πάνω από τον σχηματισμό Sofular και έχει πάχος 300 μέτρα περίπου. Στο κατώτερο κομμάτι αυτού του σχηματισμού υπάρχουν μάργες, οι οποίες υποδηλώνουν μια μετακίνηση που σχετίζεται με την εναπόθεση προς τα πάνω, αλλά μετά μετατρέπονται σε παχείς ορίζοντες κροκαλοπαγών στο ανώτερο τμήμα. Κατά το Μεσσήνιο εμφανίζονται αποθέσεις γύψου και εβαπορίτες πάχους 5 με 20 μέτρα. Αυτό συμβαίνει διότι κατά το Μεσσήνιο η Μεσόγειος ήταν απομονωμένη από τον Ατλαντικό ωκεανό και έτσι κατά την διάρκεια κρίσης της αλμυρότητας σχηματίστηκαν οι αποθέσεις αυτές του γύψου και των εβαποριτών όχι μόνο στην συγκεκριμένη

περιοχή (τάφρος Antakya) αλλά και σε όλη την ανατολική Μεσόγειο. (CIESM, 2008, Faranda et al, 2013).

Πίνακας 7: Γεωλογία Antakya Graben (Tari et al., 2014)

Era	Epoch		Stage	Formation		Thickness	Symbol	Lithology	Description		
Cenozoic	Quaternary	Holocene		alluvium		50 m >	Qal		pebble, sand, clay		
				travertine			Qt		usually pisolitic, rarely oolitic travertine		
				scree deposits			Qy		angular pebbles and blocks		
		Pleistocene		river terrace	marine terrace	Qtr	Qdtr		block, pebble, coarse sand alternation	well rounded pebble, sand, clay with fossil	
	Pliocene		GRABEN FILL	Piacenzian	Samandağ formation		100-500 m	Tsmd		unconformity	
	Miocene	UNITS	Messinian	Sebenoba formation	5-20 m	Tsb		unconformity			
			Tortonian				300 m		gypsum and evaporites		
			Serravallian						marl-claystone alternation		
			Langhian	Sofular formation	10-300 m	Tms		sparitic and micritic with fossiliferous limestone			
			Burdigalian	Balyatağı formation	0-150 m	Tmb		conglomerate, sandstone, clayey limestone			
			Aquitanian					poorly sorted, reddish conglomerate, composed of ophiolite and metamorphic			
	Eocene	BASEMENT	Lutetian-Ypresian	Kışlak formation	200-250 m	Tek		unconformity			
				Okçular formation	60-300 m	Teo		cherty, clayey limestones, bedrock conglomerate			
Mesozoic	Cretaceous	BASEMENT	Late Maastrichtian	Kaleboğazi formation		50-150 m	Krük		unconformity		
			Maastrichtian	Kızıldağ ophiolite	>1500 m	Mof		limestone, marl, clayey limestone			
			Campanian					unconformity			

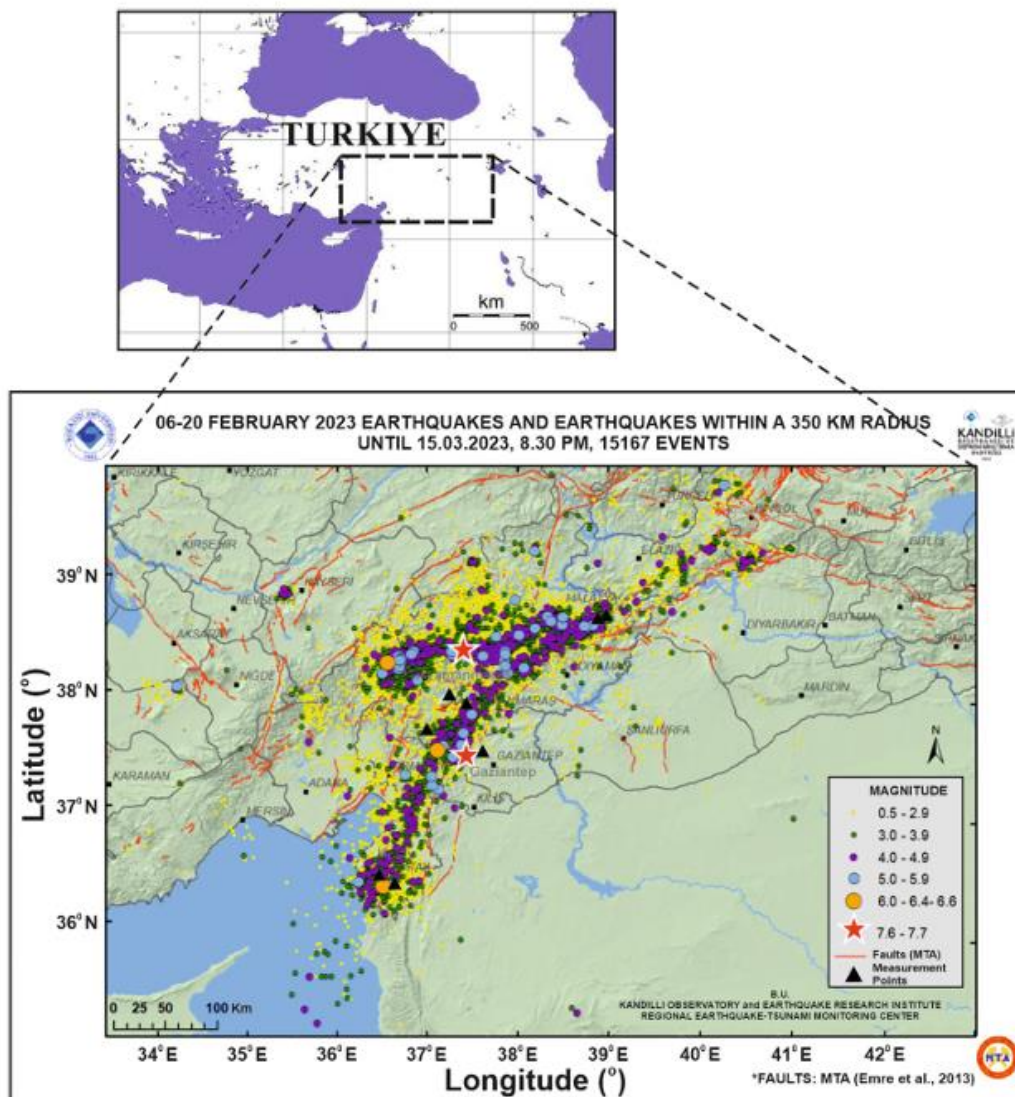
Κατά το Πλειόκαινο ξεκινάει η απόθεση των σχηματισμών που αποτελούν το «υλικό πλήρωσης» (Graben Fill) της τάφρου Antakya. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται η απόθεση του σχηματισμού Samandag ο οποίος αποτελείται κυρίως από εναλλασσόμενες αποθέσεις μαργών, ψαμμιτών, αργιλωδών ασβεστόλιθων και κροκαλοπαγών πάχους 100 με 500 μέτρα (Selcuk, 1985). Το κροκαλοπαγές κυριαρχεί στο ανώτερο και το κατώτερο κομμάτι της ακολουθίας του σχηματισμού, ενώ οι εναλλαγές ψαμμίτη με την μάργα και τον αργιλώδη ασβεστόλιθο αποτελούν το κύριο μέρος της ακολουθίας του σχηματισμού. Όσον αφορά την επαφή μεταξύ του σχηματισμού Samandag και του σχηματισμού Sebenoba υπάρχουν δύο πιθανές θεωρίες, επειδή είναι δύσκολο να προσδιοριστεί ο τύπος της επαφής, γιατί σπάνια συναντάται στην επιφάνεια του εδάφους μέσα στην τάφρο Antakya. Σύμφωνα με τους Boulton et al (2006, 2007) η επαφή μεταξύ των δύο σχηματισμών είναι διαβαθμισμένη και σύμφωνη, ενώ σύμφωνα με τους Selcuk (1985), Karakus και Taner (1994) και Safak (1993a, 1993b) η επαφή αυτή είναι μια γωνιακή ασυμφωνία. Πάνω από τον σχηματισμό Samandag υπάρχουν αποθέσεις ποτάμιων αναβαθμίδων αλλά και θαλάσσιων αναβαθμίδων, οι οποίες δημιουργήθηκαν στο Πλειστόκαινο. Στην τάφρο Antakya παρατηρούνται περισσότερες αποθέσεις ποτάμιων αναβαθμίδων σε μεγάλες εκτάσεις κυρίως γύρω από τους δύο μεγαλύτερους παραποτάμους του Ορόντη – Ασί, οι οποίοι είναι ο Buyuk και ο Kucuk Karacay. Αυτές οι αποθέσεις ποτάμιων αναβαθμίδων τοποθετούνται ασύμφωνα πάνω στον σχηματισμό Samandag, έχουν πάχος μεγαλύτερο των 50 μέτρων και αποτελούνται από αδρόκοκκα υλικά κυρίως κροκαλοπαγή σε εναλλαγή με άμμο κάτι που δείχνει ένα υψηλής ενέργειας περιβάλλον απόθεσης. Επίσης, υπάρχουν και στρογγυλεμένα και σφαιρικά βότσαλα και ογκόλιθοι με διάμετρο μέχρι 2 μέτρα, των οποίων η προέλευση είναι κυρίως από οφιόλιθους. Εκτός από τις αποθέσεις ποτάμιων αναβαθμίδων, υπάρχουν και οι αποθέσεις θαλάσσιων αναβαθμίδων οι οποίες παρατηρούνται κυρίως στο νοτιοδυτικό κομμάτι της τάφρου Antakya, όπου είναι κοντά στην μεσογειακή ακτή. Αυτές οι θαλάσσιες αποθέσεις αποτελούνται από ομογενή άμμο και κροκαλοπαγή και αποτέθηκαν και αυτές κατά το Πλειόκαινο και έχουν πάχος μεγαλύτερο από 50 μέτρα. Επιπλέον, οι θαλάσσιες αναβαθμίδες εμφανίζονται σε διαφορετικά υψόμετρα κατά μήκος της μεσογειακής ακτής, με την υψηλότερη εμφάνισή τους να βρίσκεται σε υψόμετρο 180 μέτρα στο νοτιοδυτικό κομμάτι της τάφρου Antakya. (Erol, 1963 – Pirazzoli, Laborel, Saliege, Kaya και Person, 1991). Τέλος, κατά το Ολόκαινο μέχρι και σήμερα αποτίθενται, σε συμφωνία με τις αποθέσεις θαλάσσιων και ποτάμιων αναβαθμίδων, αποθέσεις κορημάτων, αποθέσεις τραβερτίνη και αλλουβιακές αποθέσεις με πάχος που συνήθως ξεπερνάει τα 50 μέτρα. Οι αλλουβιακές αποθέσεις καταλαμβάνουν μεγάλες εκτάσεις μέσα στην τάφρο Antakya καθώς βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις από τον ποταμό Ορόντη, από την πεδιάδα του Amik μέχρι τις εκβολές του ποταμού στην Μεσόγειο θάλασσα (Χάρτης 9 και Πίνακας 7).



Χάρτης 9: Γεωλογία Antakya Graben (Tari et al., 2014)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Σεισμοί Τουρκία 06/02/2023

Στις 6 Φεβρουαρίου του 2023 συνέβησαν δύο καταστροφικοί σεισμοί κατά μήκος του ρήγματος ανατολικής Ανατολίας (EAF) σε διάστημα 9 ωρών. Ο πρώτος σεισμός καταγράφηκε στις 04.17 π.μ. τοπική ώρα στην περιοχή του Kahramanmaraş – Pazarcık με τις συντεταγμένες επικέντρου του σεισμού να είναι 37.288° N- 37.043° E, το μέγεθος σεισμικής ροπής να είναι $M_w = 7,7$ το βάθος σύμφωνα με το USGS να είναι $H = 8,6$ km. Ο δεύτερος σεισμός καταγράφηκε στις 13.24 μ.μ. τοπική ώρα στην περιοχή του Kahramanmaraş – Ekinözü με τις συντεταγμένες επικέντρου του σεισμού να είναι 38.089° N- 37.234° E, το μέγεθος σεισμικής ροπής να είναι $M_w = 7,6$ σύμφωνα με το USGS και το εστιακό βάθος να είναι $H = 7$ km. Ανάμεσα στους δύο κύριους σεισμούς σημειώθηκε και ένας πολύ μεγάλης σεισμικής ροπής μετασεισμός που είχε μέγεθος $M_w = 6,6$ και το επίκεντρο του σεισμού αυτού ήταν στην περιοχή Nurdagi στο Gaziantep. Αμέσως μετά τους 2 κύριους αυτούς σεισμούς ακολούθησαν, σε διάστημα ενός μήνα, πάνω από 10 χιλιάδες μετασεισμοί, σε ακτίνα 200 km από τα επίκεντρα των 2 αυτών σεισμών. Μεταξύ αυτών των μετασεισμών, περισσότερα από 400 είχαν μέγεθος σεισμικής ροπής (M_w) μεγαλύτερο ή ίσο με το 5. Ο μεγαλύτερος από αυτούς τους μετασεισμούς καταγράφηκε 2 εβδομάδες μετά τους κύριους σεισμούς στις 20 Φεβρουαρίου του 2023 στην περιοχή του Hatay, στο Yayladagi και το μέγεθος σεισμικής ροπής ήταν $M_w = 6,4$ και το εστιακό βάθος ήταν 21,73km (Χάρτης 10, AFAD 2023).

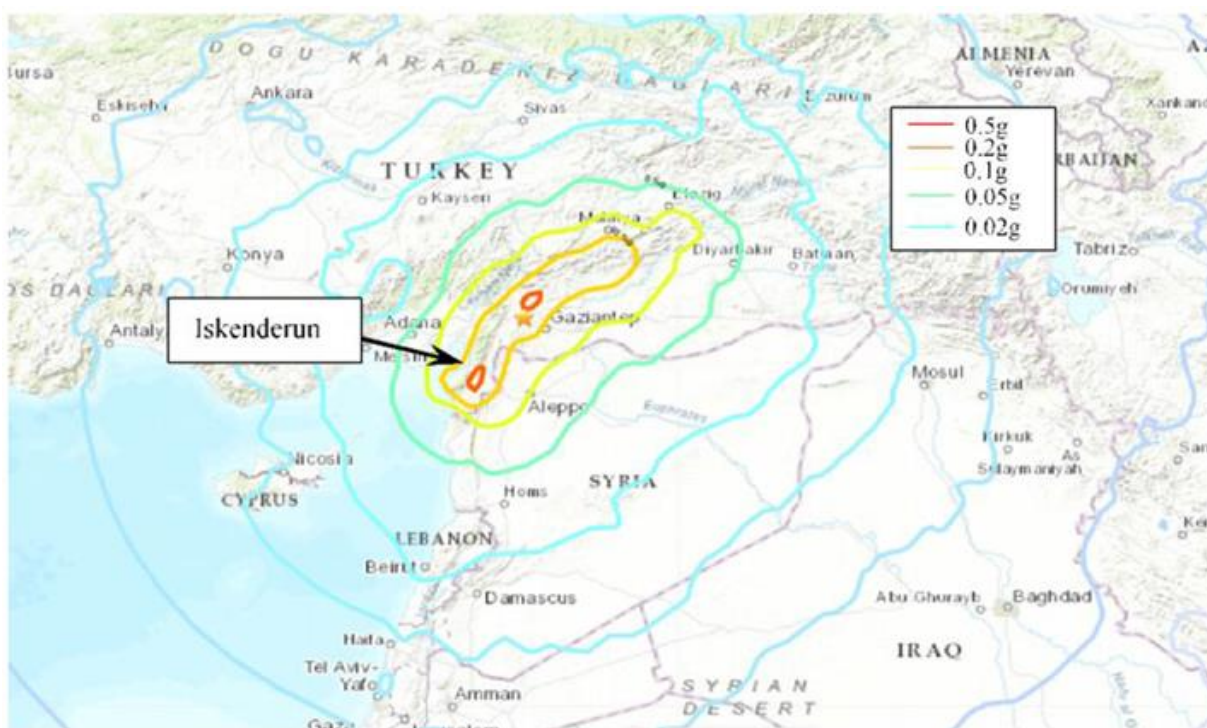


Χάρτης 10: Ρήγματα, περιοχές σεισμών, πληγείσες επαρχίες και κατανομή επικέντρων σεισμών ($M \geq 4,0$) που συνέβησαν μεταξύ 6 Φεβρουαρίου 2023, και 20 Φεβρουαρίου 2023 (όπως τροποποιήθηκε από AFAD (2023)).

Τα κόκκινα αστέρια και τα μαύρα τρίγωνα υποδεικνύουν την τοποθεσία των επίκεντρων των δύο σεισμών που έλαβαν χώρα στις 6 Φεβρουαρίου 2023, και τις τοποθεσίες μέτρησης στη συγκεκριμένη μελέτη, αντίστοιχα.

Συνολικά επηρεάστηκαν 11 περιοχές της νοτιοανατολικής Τουρκίας και της Βόρειας Συρίας οι οποίες ήταν μέχρι και 400 km μακριά από τα επίκεντρα των 2 κύριων σεισμών. Το αποτέλεσμα αυτών των σεισμών ήταν να χαθούν 50.000 ζωές ανθρώπων, να καταστραφούν μερικών ή τελείως περισσότερα από 100.000 σπίτια και να επηρεαστούν συνολικά 15 εκατομμύρια άνθρωποι, καθώς επλήγησαν και μεγάλες πόλεις και περιοχές όπως το Iskenderun, το Gaziantep, η Antakya και άλλες.

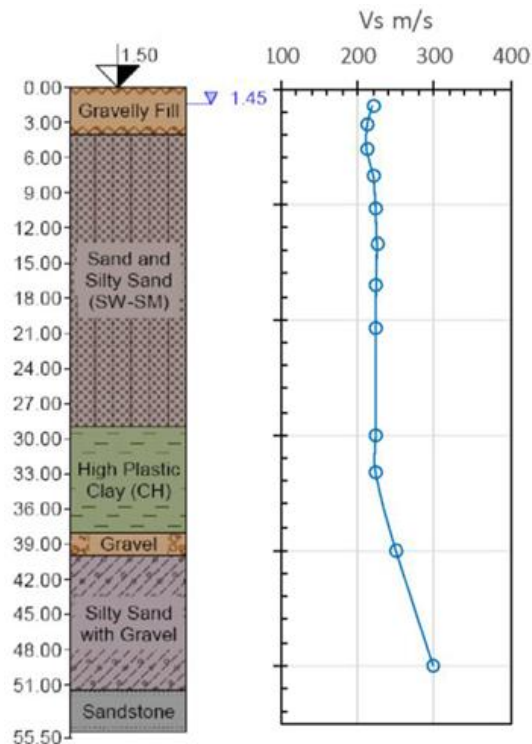
Σύμφωνα με τους Melgar et al. 2023 και Goldberg et al. 2023, η συνολική διάρρηξη του ρήγματος EAF που προκλήθηκε από τον πρώτο κύριο σεισμό στην περιοχή του Kahramanmaras – Pazarcik έφτασε τα 350 km ενώ η συνολική διάρρηξη του ρήγματος EAF που προκλήθηκε από τον δεύτερο κύριο σεισμό στην περιοχή του Kahramanmaras – Ekinözü έφτασε τα 160 km. Επιπλέον, από τα μακροσεισμικά αποτελέσματα των δύο κύριων σεισμών παρατηρήθηκε ότι ο πρώτος κύριος σεισμός επηρέασε περισσότερο την περιοχή του Kahramanmaras και του Hatay, ενώ ο δεύτερος κύριος σεισμός επηρέασε περισσότερο την περιοχή της Malatya (AFAD 2023). Όπως βλέπουμε και στον χάρτη 11, η πόλη του Iskenderun και γενικά οι γύρω περιοχές που είναι κατά μήκος της ακτής έχουν την μεγαλύτερη επιρροή από τον πρώτο κύριο σεισμό, καθώς η εδαφική επιτάχυνση (PGA) έχει τιμή από 0,2 g μέχρι και 0,5 g. Στο Iskenderun όπως και στις γύρω περιοχές κυριαρχούν οι αλλούβιες αποθέσεις, που έχουν μεγάλο πάχος και ο υπόγειος υδροφόρας βρίσκεται μόνο 1,50 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Οπότε η καταστροφική επίδραση που είχε ο πρώτος κύριος σεισμός στην περιοχή αυτή οφείλεται στην γενική γεωλογία της περιοχής, σε συνδυασμό με το μεγάλο μέγεθος του σεισμού, ο οποίος προκάλεσε πολλές αστοχίες στις ανθρώπινες κατασκευές, όπως θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο.



Χάρτης 11: Χάρτης έντασης επιτάχυνσης για τον σεισμό Kahramanmaras-Pazarcik M7.8 (USGS, 2023)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αστοχίες λόγω της ρευστοποίησης

Οι περισσότερες καταστροφές λόγω της ρευστοποίησης καταγράφηκαν στις πόλεις Iskenderun, Dörtöyl και Gölbaşı, λόγω της γεωλογίας της περιοχής και λόγω της μεγάλης έντασης των σεισμών. Το φαινόμενο της ρευστοποίησης του εδάφους ήταν το κυρίαρχο φαινόμενο που οδήγησε στις περισσότερες αστοχίες σε αυτές τις πόλεις, λόγω της μεγάλης επιδεκτικότητας που έχουν τα εδάφη στα οποία είναι χτισμένες πάνω οι πόλεις αυτές. Γενικά, όμως είδαμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, η πόλη με τις περισσότερες καταστροφές από τους σεισμούς Kahramanmaraş 2023 είναι το Iskenderun, διότι οι συνθήκες που επικρατούν στο έδαφος είναι ευνοϊκές για να προκληθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά την γενική στρωματογραφία, όπως απεικονίζεται και στο διάγραμμα 4, το ανώτερο στρώμα είναι ένα επίχωμα που αποτελείται κυρίως από χαλίκια και έχει πάχος 2 με 5 μέτρα. Επίσης, συνήθως μέσα σε αυτό το στρώμα συναντάμε και την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα, γύρω στα 1 με 2 μέτρα βάθος από την επιφάνεια. Ακριβώς από κάτω υπάρχουν αλλούβιες αποθέσεις, οι οποίες αποτελούνται από ιλύ και άμμο και έχουν πάχος 15 με 20 μέτρα. Κάτω από αυτές τις αποθέσεις υπάρχει ένα στρώμα αργίλου περίπου 10 μέτρα και από κάτω συνεχίζει αυτή η εναλλαγή αλλουβιακών αποθέσεων και αργίλου μέχρι να συναντήσουν τον ψαμμίτη που βρίσκεται περίπου στα 50 μέτρα βάθος από την επιφάνεια.



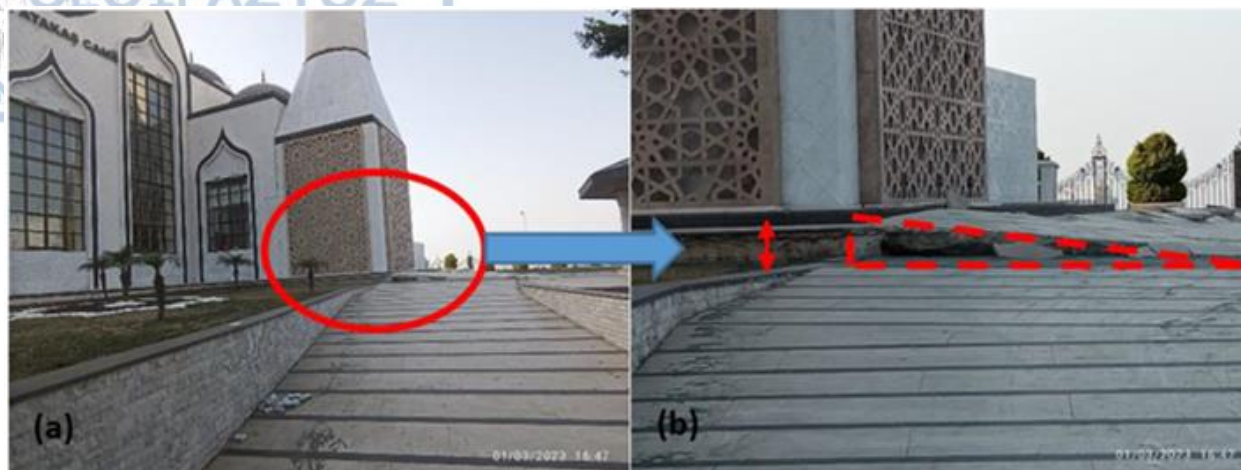
Διάγραμμα 4: Στρωματογραφικό προφίλ εδάφους για τις παράκτιες περιοχές του Iskenderun με την χρήση των μέσων ταχυτήτων των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) (Ozener et al., 2023)

Αρχικά, κατά τους σεισμούς του Kahramanmaraş 2023, παρατηρήθηκαν στην πόλη Iskenderun, η οποία είναι παράκτια πόλη, πολλές αναδύσεις λεπτόκοκκου υλικού κυρίως στο παραλιακό μέτωπο όπου είναι και οι εγκαταστάσεις του Fishing Shelter (Εικόνα 5a). Επίσης, ένα άλλο χαρακτηριστικό φαινόμενο που δείχνει την εκδήλωση της ρευστοποίησης φαίνεται στην εικόνα 5b, το οποίο είναι ένας κώνος άμμου ο οποίος είναι καλυμμένος με φύλλα. Το μέγεθος των κόκκων του υλικού, που μας δείχνει ότι είναι άμμος, και το γκρι χρώμα, τα οποία χαρακτηρίζουν το αναδυόμενο υλικό (ejecta), ταιριάζουν με το αμμώδη υλικό που συναντάμε στην στρωματογραφική στήλη της περιοχής στο παράκτιο κομμάτι του Iskenderun σε βάθος 5 με 25 μέτρα.



Εικόνα 5: (a) Ανάδυση (γκρι) λεπτόκοκκου υλικού στην περιοχή του Fishing Shelter στο Iskenderun , (b) Ένα μικρό ηφαίστειο άμμου κοντά στο Fishing Shelter στο Iskenderun [36ο 35' 26.54" N; 36ο 10' 34.619" E] (Φωτογραφίες από M.M. Monkul, 2023).

Σημαντικές αστοχίες παρουσίασαν και κτίρια θρησκευτικού ενδιαφέροντος όπως το Nihal Atakas Mosque, όπου καταγράφηκε αστοχία λόγω ρευστοποίησης δίπλα σε έναν από τους πύργους του τεμένους αυτού. (Εικόνα 6). Μικρότερης τάξης αστοχία παρατηρήθηκε σε τοίχους, όπως φαίνεται στην εικόνα 7, όπου λόγω της πλευρικής εξάπλωσης, που είναι χαρακτηριστικό φαινόμενο εκδήλωσης της ρευστοποίησης, προκλήθηκε η διάρρηξη του τοίχους.



Εικόνα 6: (a),(b) Αστοχία δίπλα σε πύργο ενός τεμένους του Nihal Atakas Mosque λόγω ρευστοποίησης στο Iskenderun (Φωτογραφίες από M.M. Monkul, 2023).



Εικόνα 7: Διαρρηγμένος τοίχος λόγω της πλευρικής εξάπλωσης στο Iskenderun [$36^{\circ} 35' 36.00''$ N; $36^{\circ} 9' 32.96''$ E] (Φωτογραφία από M.M. Monkul, 2023).

Μια άλλη ανθρώπινη κατασκευή η οποία κατέγραψε πολλές αστοχίες μικρού και μεγάλου μεγέθους, ήταν οι δρόμοι και τα πεζοδρόμια. Εκεί έχουν καταγραφεί πλευρικές μετατοπίσεις λόγω της εκδήλωσης της ρευστοποίησης που φτάνουν μέχρι και 25 με 35 εκατοστά προς

διάφορες κατευθύνσεις, όπως δείχνουν και τα κόκκινα βελάκια στην Εικόνα 8. Επιπλέον, καταστροφές και αστοχίες παρατηρήθηκαν και στις οικοδομές, όπου υλικό αναδύθηκε γύρω γύρω από αυτές και προκάλεσε την κλίση όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στην εικόνα 9.

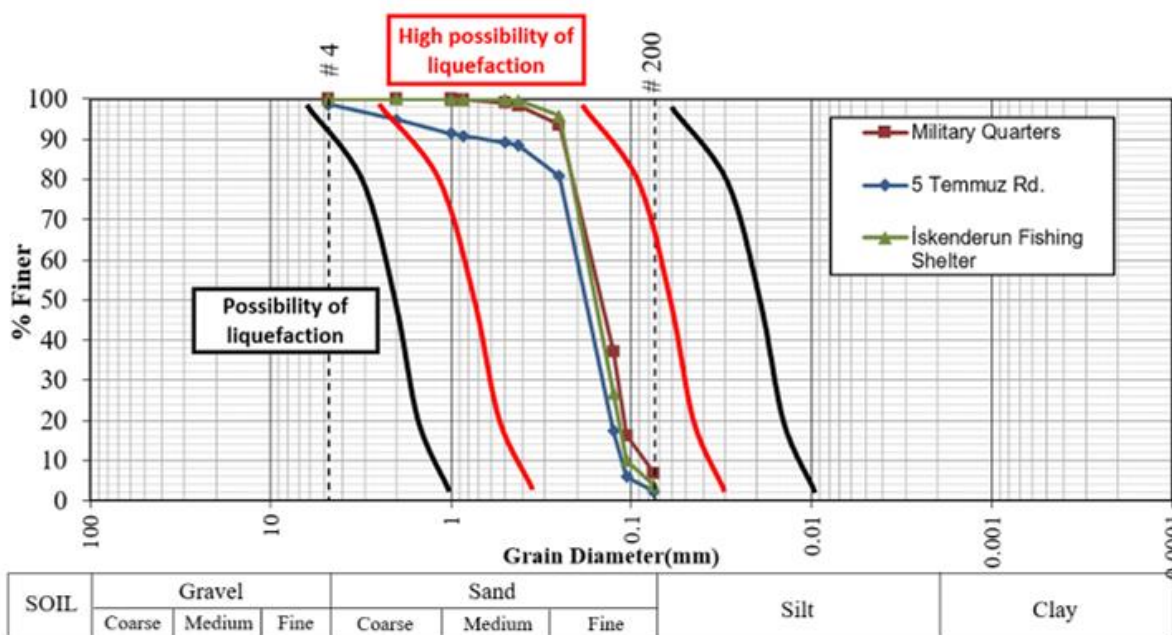


Εικόνα 8: α) Η κατάσταση της ασφάλτου και του πεζοδρομίου και οι ρωγμές που εμφανίζονται ανάμεσα στο εμπορικό κέντρο και στην στρατιωτική βάση στο Iskenderun , b) Πλευρικές παραμορφώσεις (περίπου 25 με 35 εκατοστά) της ασφάλτου σε διάφορες κατευθύνσεις [$36^{\circ} 35' 36.29'' N$; $36^{\circ} 9' 36.82'' E$] (Φωτογραφίες από M.M. Monkul, 2023).



Εικόνα 9: Αναδύομενο αμμώδη υλικό γύρω από κατοικία στο Iskenderun (Demir et al., 2023).

Όσον αφορά στην πόλη του Iskenderun, έγιναν μετρήσεις στην κοκκομετρία των υλικών ανάδυσης (ejecta) από 3 διαφορετικά δείγματα, όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 5, το πρώτο από τις στρατιωτικές εγκαταστάσεις, το δεύτερο από έναν δρόμο που βρίσκεται στο λιμάνι και το τρίτο από το Fishing Shelter και αποδείχθηκε ότι και τα τρία δείγματα ανήκουν στην ζώνη πολύ υψηλής πιθανότητας σε ρευστοποίηση, κάτι που συνέβη και στην πράξη καθώς και στα τρία σημεία που πήραν δείγμα, υπήρξε ανάδυση λεπτόκοκκου άμμου, όπου είναι το υλικό με την πιο μεγάλη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση σε συνδυασμό με την ύπαρξη νερού και ισχυρού σεισμού (Pelin Ozener et al.,2023).



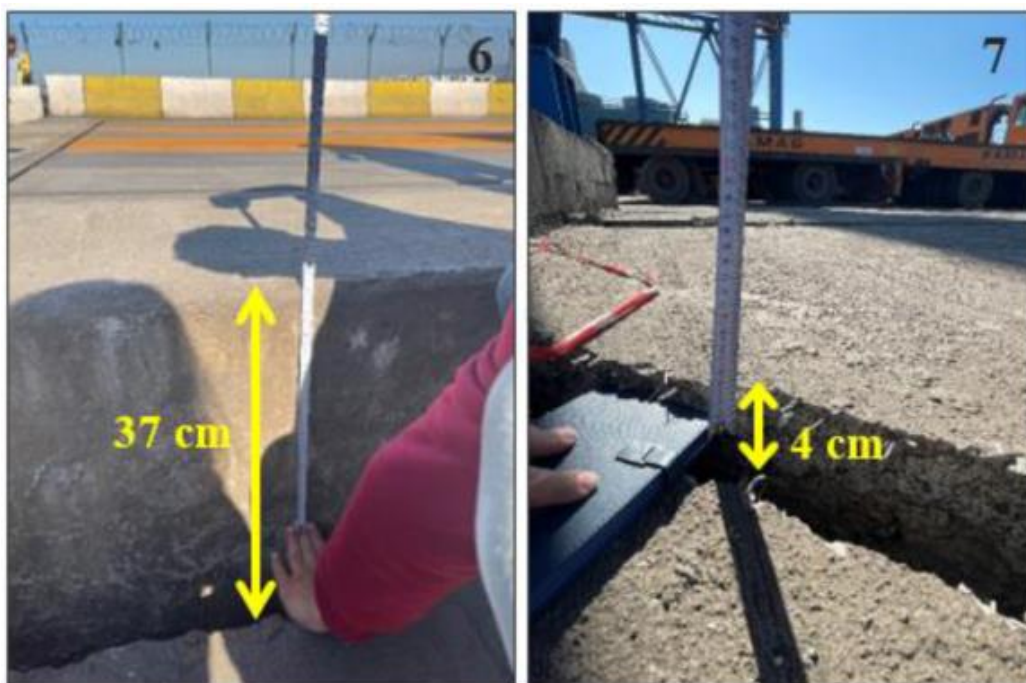
Διάγραμμα 5: Καμπύλες κατανομής μεγέθους κόκκων τριών επιφανειακών δειγμάτων αναδυόμενου υλικού που συλλέχθηκαν από διαφορετικές τοποθεσίες και οι διαφορετικές ζώνες δυνατότητας ρευστοποίησης (Ozener et al.,2023).

Εκτός από την πόλη του Iskenderun, μια άλλη πόλη στην οποία καταγράφηκαν πολλές αστοχίες λόγω ρευστοποίησης, είναι το Dörtöyl. Το Dörtöyl είναι και αυτό, μια πόλη η οποία είναι χτισμένη πάνω σε αλλουβιακές αποθέσεις, οπότε έχει παρόμοια στρωματογραφική στήλη με αυτήν της πόλης του Iskenderun. Επιπλέον, ο υδροφόρος ορίζοντας και στην πόλη του Dörtöyl βρίσκεται πολύ ψηλά στην επιφάνεια, οπότε με την ύπαρξη ενός ισχυρού σεισμού το έδαφος γίνεται πολύ επιδεκτικό σε ρευστοποίηση, όπως και συνέβη στους σεισμούς της 6^{ης} Φεβρουαρίου 2023. Εκεί παρατηρήθηκαν πλευρικές μετατοπίσεις σε ανοιχτούς χώρους (Εικόνα 10a), ανάδυση λεπτόκοκκου γκρι αμμώδους υλικού (Εικόνα 10b) αλλά και πλευρικές μετατοπίσεις σε κατοικημένες περιοχές, όπου οι αστοχίες παρουσιάστηκαν στα πεζοδρόμια και

στα σπίτια (Εικόνες 10c και 10d). Επίσης στο Dörtyol, σε μεταλλουργική εγκατάσταση η ρευστοποίηση του εδάφους μετά τον σεισμό προκάλεσε κατακόρυφες μετατοπίσεις οι οποίες ήταν από 4 έως 37 εκατοστά όπως φαίνονται στην εικόνα 11.



Εικόνα 10: Αστοχίες λόγω ρευστοποίησης που παρατηρήθηκαν στην περιοχή Dörtyol του Hatay (Demir et al., 2023).



Εικόνα 11: Ρευστοποίηση του εδάφους με αποτέλεσμα την κατακόρυφη μετατόπιση του δρόμου σε μία μεταλλουργική εγκατάσταση στην περιοχή του Dörtyol του Hatay (Cakir και Cetin, 2023)

Τέλος, αστοχίες λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης παρουσιάστηκαν και στην πόλη Gölbaşı της περιοχής του Adıyaman, παρόλο που δεν είναι μια παραθαλάσσια πόλη. Η πόλη Gölbaşı είναι χτισμένη όμως δίπλα σε λίμνη και ο ανώτερος εδαφικός σχηματισμός στην περιοχή εκείνη είναι οι τεταρτογενείς αλλουβιακές πεδιάδες. Αυτές οι τεταρτογενείς αλλουβιακές πεδιάδες αποτελούνται από 2 πολύ πρόσφατες αποθέσεις, δηλαδή από αλλουβιακές αποθέσεις αλλά και ελώδη ιζήματα. Οι αλλουβιακές αποθέσεις αποτελούνται από εναλλαγές χαλικιών με άμμο και ιλυώδεις με αργιλώδεις στρώσεις που περιέχουν και μεγάλο ποσοστό οργανική ύλη (Akil et al. 2008). Επιπλέον, η στάθμη του υπόγειου υδροφορέα βρίσκεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια και σε συνδυασμό με το υλικό που αποτελείται το έδαφος στο οποίο είναι χτισμένες οι ανθρώπινες κατασκευές, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος εκδήλωσης του φαινομένου της ρευστοποίησης, κάτι που συνέβη στις 6 Φεβρουαρίου του 2023 εξαιτίας των σεισμών του Kahramanmaraş. Όπως ήταν λοιπόν αναμενόμενο στην πόλη Gölbaşı καταγράφηκαν αναδύσεις λεπτόκοκκου υλικού (ejecta) και επίσης ανατροπές κτιριακών συγκροτημάτων λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης (Εικόνα 12).



Εικόνα 12: Ανάδυση άμμου (αριστερά) και ανατροπή κτηρίου (δεξιά) στην περιοχή Gölbaşı του Adıyaman λόγω του φαινομένου της ρευστοποίησης (Demir et al., 2023).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Ποσοτικοποίηση χωρικής κατανομής ρευστοποιήσεων με συγκεκριμένα γεωμορφολογικά συστήματα

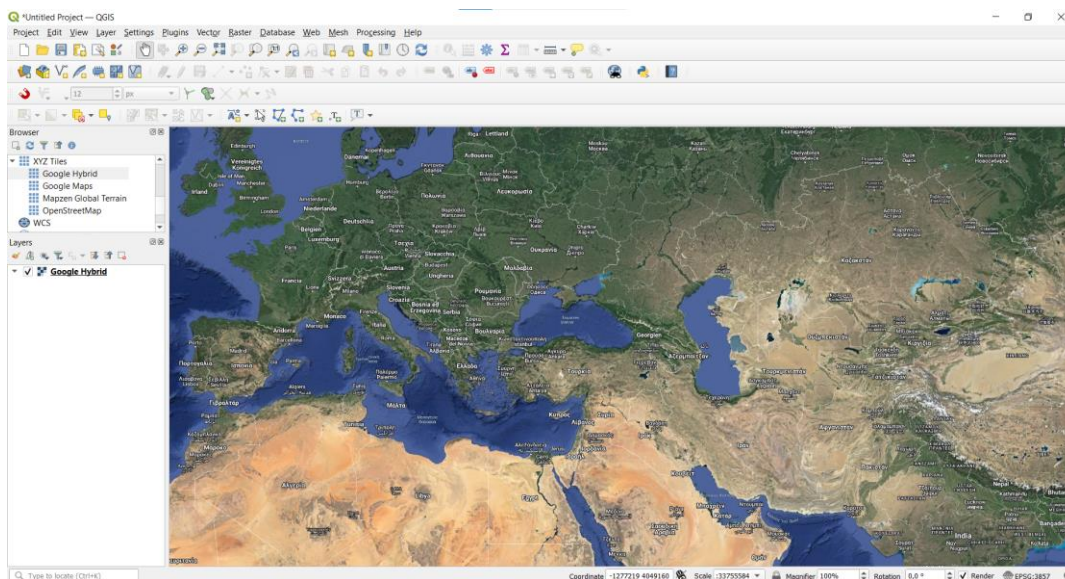
7.1 Στόχος διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να αποτυπωθούν οι εμφανίσεις των ρευστοποιήσεων με λεπτομέρεια, ώστε να διαπιστωθεί η χωρική τους κατανομή στην περιοχή. Πιο συγκεκριμένα, ο στόχος είναι να βρεθεί η μέγιστη απόσταση των εμφανίσεων αυτών από τον ποταμό Ορόντη-Ασί, έτσι ώστε να μπορεί να δημιουργηθεί χάρτης επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση στην ευρύτερη περιοχή.

7.2 Χωρική κατανομή ρευστοποιήσεων και λεπτομερή ψηφιακή αποτύπωση τους

Για την εργασία χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα GIS 3.28.11 ώστε να αποτυπωθεί η χωρική κατανομή των ρευστοποιήσεων και η λεπτομερής χαρτογράφηση τους.

Αρχικά ανοίγουμε το πρόγραμμα GIS και τοποθετούμε στα Layers το Google Hybrid ώστε να εμφανιστεί ο παγκόσμιος χάρτης (Εικόνα 13). Για να τοποθετήσουμε το Google Hybrid στα Layers το σέρνουμε αφού το έχουμε επιλέξει από την καρτέλα Browser που βρίσκεται ακριβώς από πάνω.

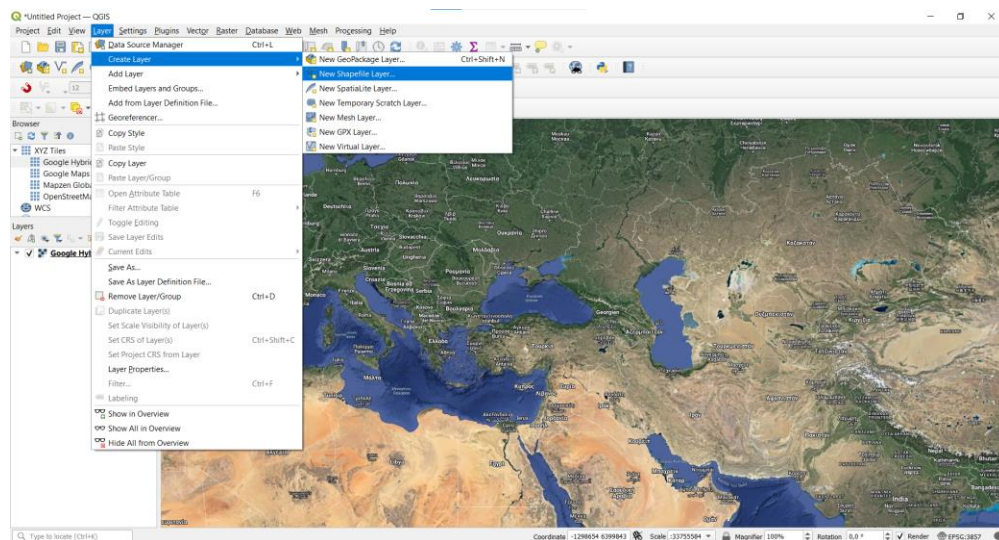


Εικόνα 13: Τοποθέτηση Google Hybrid

Για να δημιουργήσουμε ένα καινούργιο Layer ώστε να ξεκινήσουμε την λεπτομερή χαρτογράφηση των ρευστοποιήσεων πηγαίνουμε πάνω στην μπάρα με τα εργαλεία, επιλέγουμε

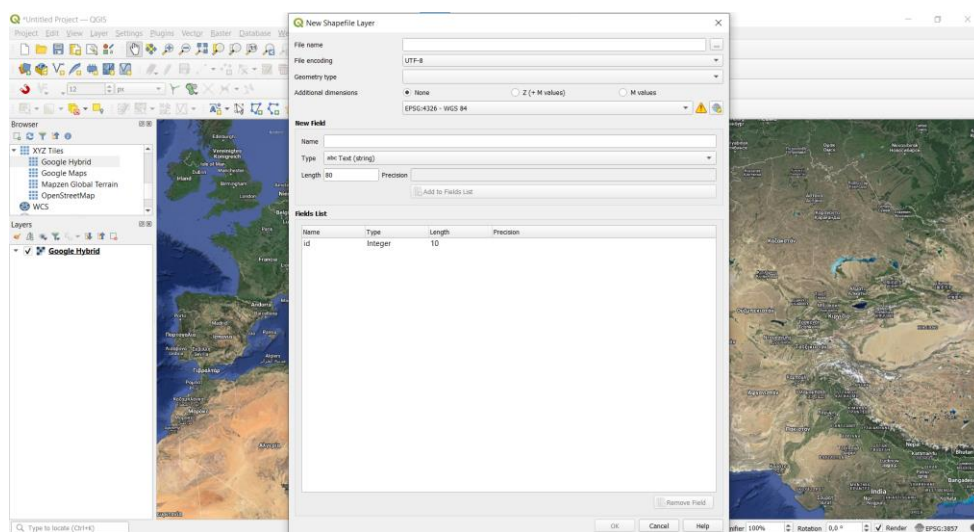


το εργαλείο Layer, μετά Create Layer και μετά New Shapefile Layer όπως φαίνεται στην εικόνα 14.



Εικόνα 14: Δημιουργία New Shapefile Layer

Με το που επιλέξουμε όλες τις επιλογές που αναφέρθηκαν προηγουμένως θα εμφανιστεί ένα νέο παράθυρο με τίτλο New Shapefile Layer στο οποίο πρέπει να συμπληρώσουμε κάποια στοιχεία. Αρχικά πρέπει να συμπληρώσουμε το κουτάκι δίπλα στην επιλογή file name ώστε το Layer που θα δημιουργήσουμε να έχει την αντιπροσωπευτική ονομασία ώστε να είναι εύκολο στην εύρεσή του (Εικόνα 15).



Εικόνα 15: Καρτέλα New Shapefile Layer

Αφού συμπληρώσουμε το όνομα του νέου Shapefile Layer πρέπει να επιλέξουμε τον γεωμετρικό τύπο (Geometry type) που θα χαρτογραφούμε και θα αποθηκεύεται στο συγκεκριμένο Shapefile Layer (Εικόνα 16). Στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιούνται οι κατηγορίες Polygon, Line String και Point. Η διαδικασία που ακολουθεί εξηγεί αναλυτικά με εικόνες στην επεξεργασία της κατηγορία Polygon αλλά με παρόμοιο τρόπο εφαρμόζεται και η επεξεργασία των κατηγοριών Line String και Point.

New Shapefile Layer

File name: liquefaction_orontis

File encoding: UTF-8

Geometry type: Polygon

Additional dimensions:

New Field

Name: li

Type: abc Text (string)

Length: 80 Precision:

Add to Fields List

Fields List

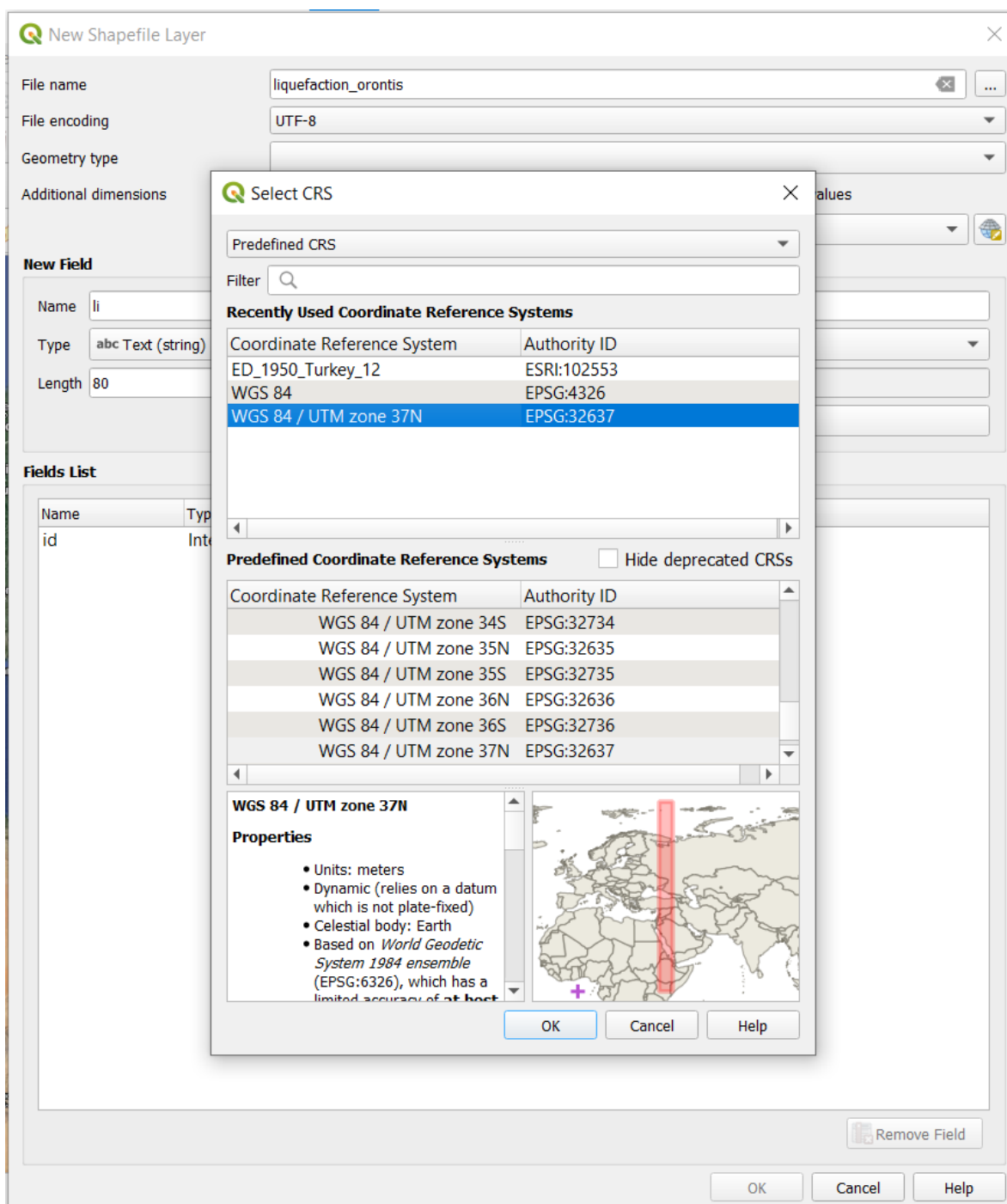
Name	Type	Length	Precision
id	Integer	10	

Remove Field

OK Cancel Help

Εικόνα 16: Συμπλήρωση στοιχείων στην καρτέλα New Shapefile Layer

Το επόμενο βήμα είναι η επιλογή του σωστού συστήματος αναφοράς συντεταγμένων. Στην συγκεκριμένη εργασία, η χαρτογράφηση των φαινομένων της ρευστοποίησης γίνεται στην νοτιοανατολική Τουρκία, οπότε επιλέγεται στο σύστημα αναφοράς συντεταγμένων (Coordinate Reference System) WGS 84/UTM zone 37N με Authority ID EPSG:32637 (Εικόνα 17).



Εικόνα 17: Επιλογή συστήματος αναφοράς συντεταγμένων

Στην συνέχεια στην καρτέλα New Field επιλέγεται κατάλληλη ονομασία δηλαδή για τις αποτυπώσεις ρευστοποίησης βάζουμε τα τρία (3) πρώτα γράμματα της λέξης liquefaction (liq), επιλέγεται ο τύπος της παραμέτρου που στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι κείμενο (Text (string)) και το μήκος (Length). Τέλος για να καταχωρηθεί στο Fields List πατάμε το κουτάκι Add to Fields List και βλέπουμε από κάτω στην καρτέλα Fields List, την ονομασία, τον τύπο και το μήκος της παραμέτρου μας (Εικόνα 18).

New Shapefile Layer

File name: liquefaction_orontis.shp

File encoding: UTF-8

Geometry type: Polygon

Additional dimensions: ☒ None ☐ Z (+ M values) ☐ M values

CRS: EPSG:4326 - WGS 84

New Field

Name:

Type: abc Text (string)

Length: 150 Precision:

Add to Fields List

Fields List

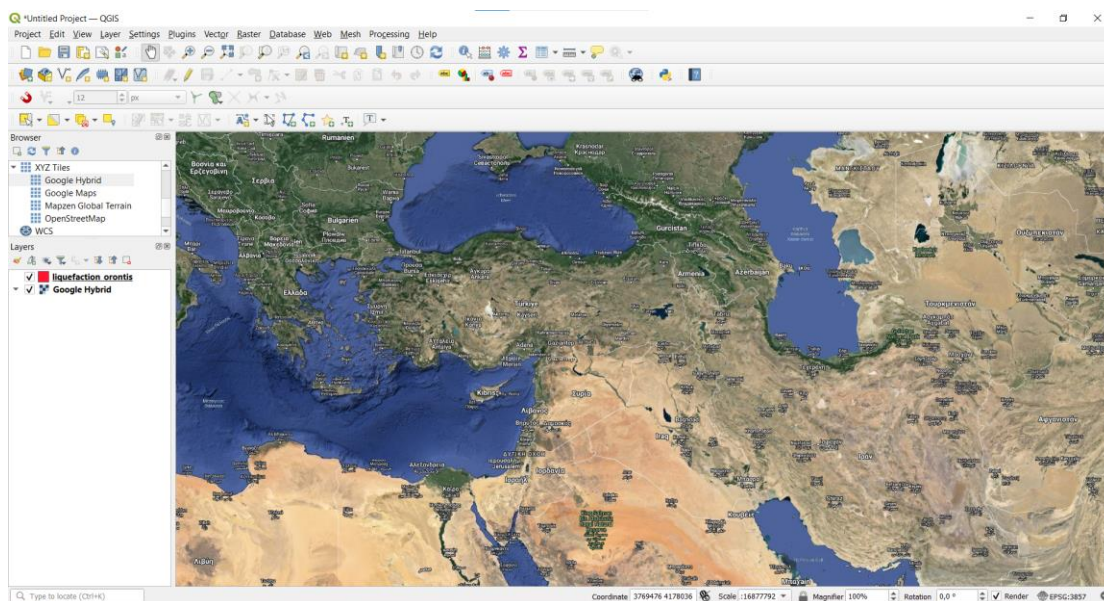
Name	Type	Length	Precision
id	Integer	10	
liq	String	150	

Remove Field

OK Cancel Help

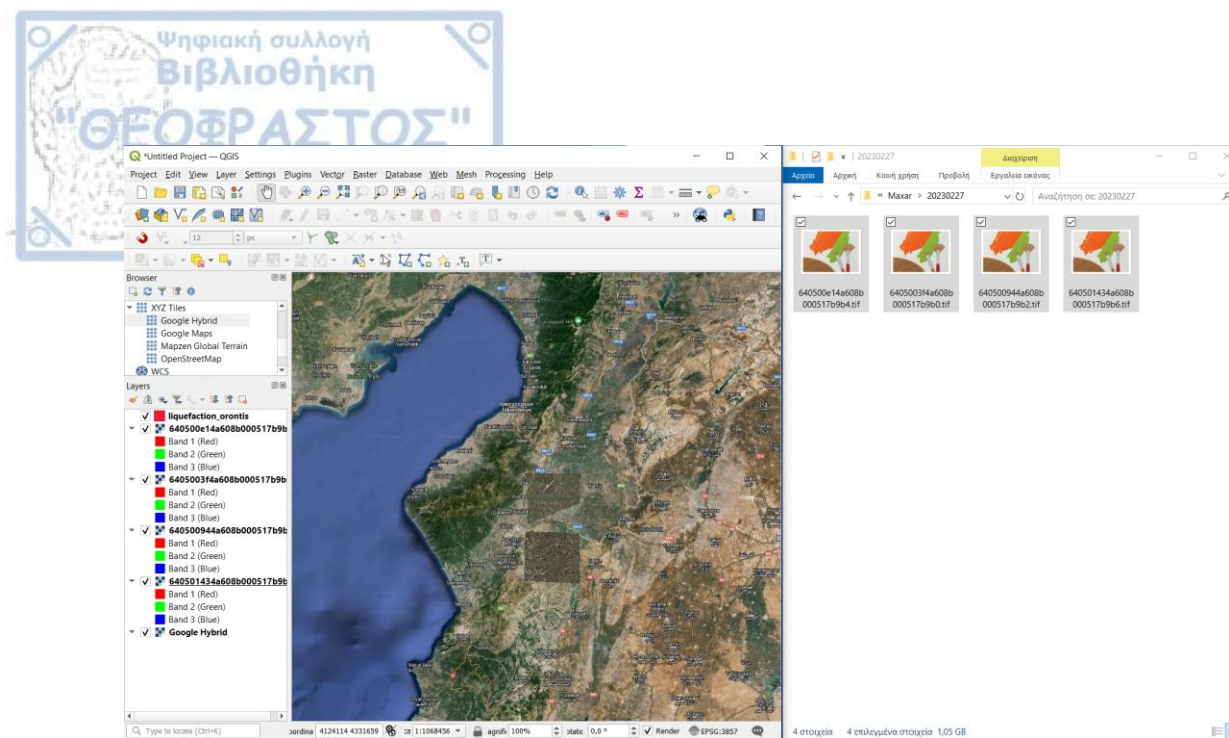
Εικόνα 18: Συμπλήρωση στοιχείων στην καρτέλα New Field

Στην εικόνα 19 φαίνονται πλέον στην καρτέλα Layers που βρίσκονται στο αριστερό τμήμα της οθόνης τα δύο (2) Layers που έχουμε προσθέσει δηλαδή το Google Hybrid και το liquefaction_orontis που αποτελεί τα πολύγωνα που θα σχεδιαστούν ώστε να χαρτογραφηθούν λεπτομερώς οι εμφανίσεις λόγω της ρευστοποίησης. Πολύ σημαντικό στην τοποθέτηση των Layers είναι ότι για να είναι όλα τα επιλεγμένα Layer ορατά πρέπει να τοποθετούνται με την σωστή σειρά. Η σωστή σειρά είναι να τοποθετούνται πάνω πάνω τα Layer που έχουν την μικρότερη έκταση και από κάτω τους να τοποθετούνται τα Layer που καταλαμβάνουν μεγαλύτερη έκταση. Για αυτόν το λόγο στην συγκεκριμένη περίπτωση το Layer liquefaction_orontis που καταλαμβάνει πολύ μικρή έκταση σε σχέση με τον παγκόσμιο χάρτη τοποθετείται από πάνω του, ώστε να είναι ορατές οι εμφανίσεις των ρευστοποιήσεων πάνω στον παγκόσμιο χάρτη.



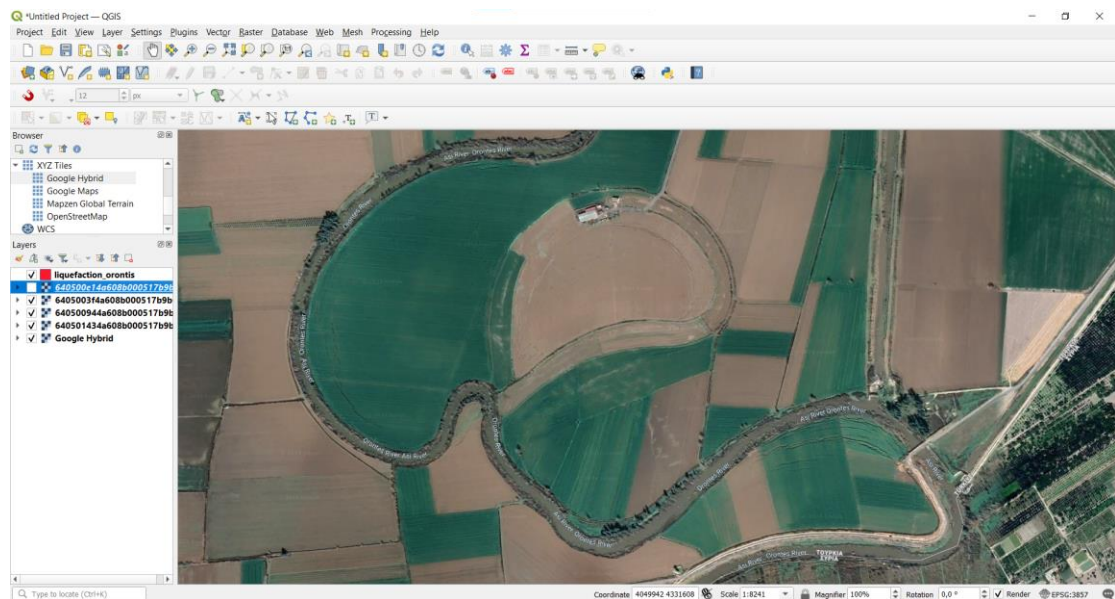
Εικόνα 19: Εμφάνιση και σωστή τοποθέτηση των Layers

Για να αποτυπωθούν οι εμφανίσεις των ρευστοποιήσεων πάνω στον παγκόσμιο χάρτη με ακρίβεια, εκτός από το σύστημα αναφοράς συντεταγμένων πρέπει να επιλεγούν και να τοποθετηθούν γεωαναφερμένες δορυφορικές εικόνες οι οποίες έχουν ληφθεί σε συγκεκριμένη ημερομηνία, πάνω από το Layer του Google Hybrid. Στην συγκεκριμένη περίπτωση οι δορυφορικές εικόνες έχουν ληφθεί λίγες μέρες μετά την εμφάνιση των ρευστοποιήσεων, ώστε να φαίνονται ξεκάθαρα οι εμφανίσεις των ρευστοποιήσεων και να υπάρχει η δυνατότητα της λεπτομερούς αποτύπωσής τους. Για να τοποθετηθούν οι γεωαναφερμένες δορυφορικές εικόνες απλά τις σέρνουμε από τον φάκελο που είναι αποθηκευμένες στον υπολογιστή μας και τις τοποθετούμε στην καρτέλα Layers πάνω από το Layer του Google Hybrid ώστε να είναι ορατές (Εικόνα 20).



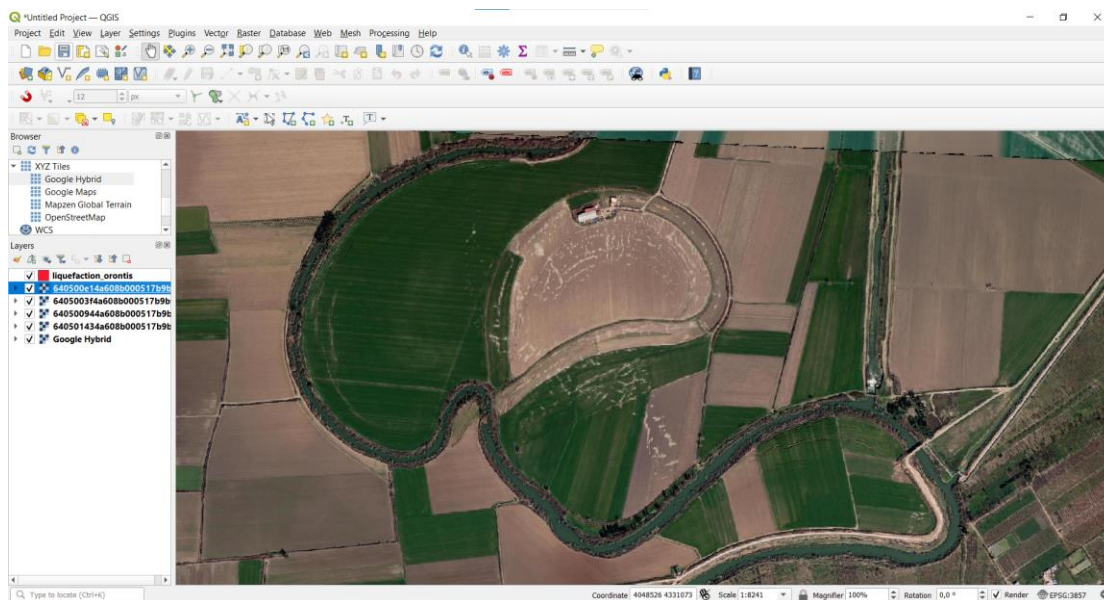
Εικόνα 20: Τοποθέτηση γεωαναφερμένων δορυφορικών εικόνων

Παρακάτω φαίνεται στην εικόνα 21 η περιοχή της μελέτης όπως απεικονίζεται στο Google Hybrid και είναι ορατό ότι οι εμφανίσεις των ρευστοποιήσεων δεν είναι αρκετά καθαρές σε πολλά σημεία.



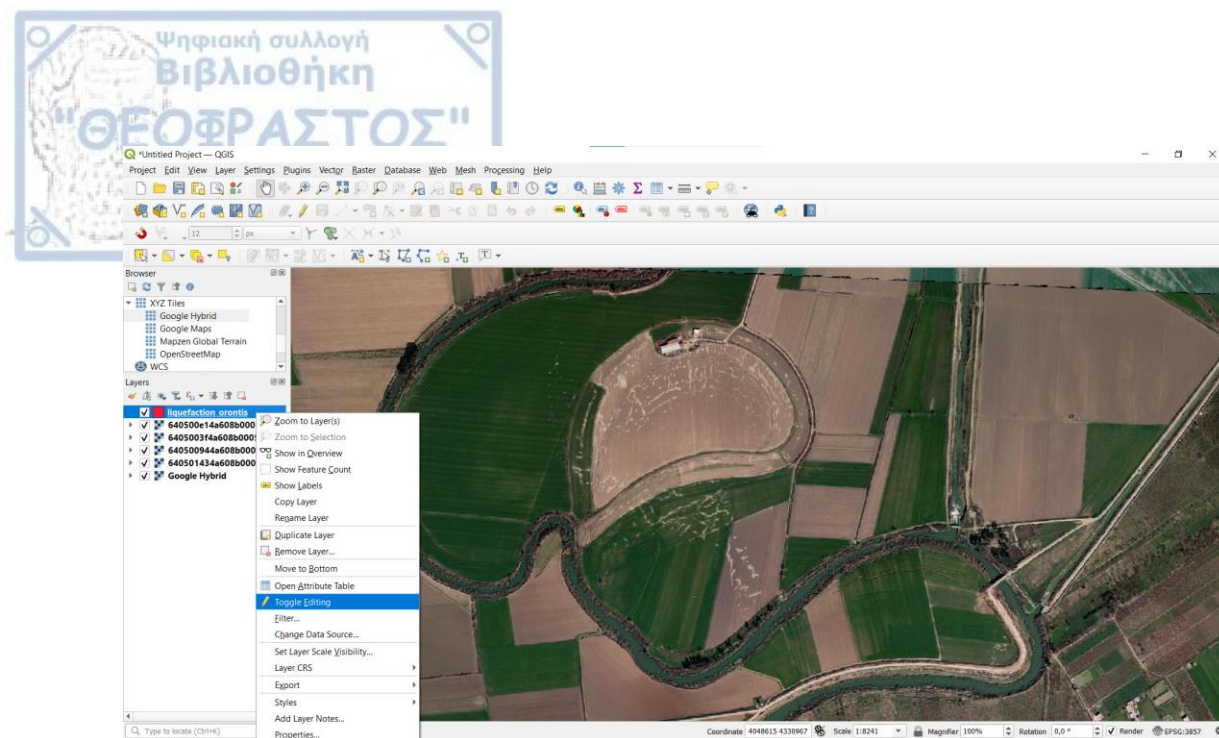
Εικόνα 21: Περιοχή μελέτης χωρίς επεξεργασία

Σε αντίθεση με την εικόνα 21, στη εικόνα 22 βλέπουμε ακριβώς την ίδια περιοχή η οποία έχει επεξεργαστεί, δηλαδή έχει προστεθεί η γεωαναφερμένη δορυφορική εικόνα που έχει ληφθεί λίγες μέρες αφού παρουσιάστηκε το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Το αποτέλεσμα είναι πως όλες οι εμφανίσεις των ρευστοποιήσεων, ακόμα και κάποιες που έχουν πολύ μικρή έκταση φαίνονται πολύ καθαρά και μπορούν να χαρτογραφηθούν με μεγάλη λεπτομέρεια.



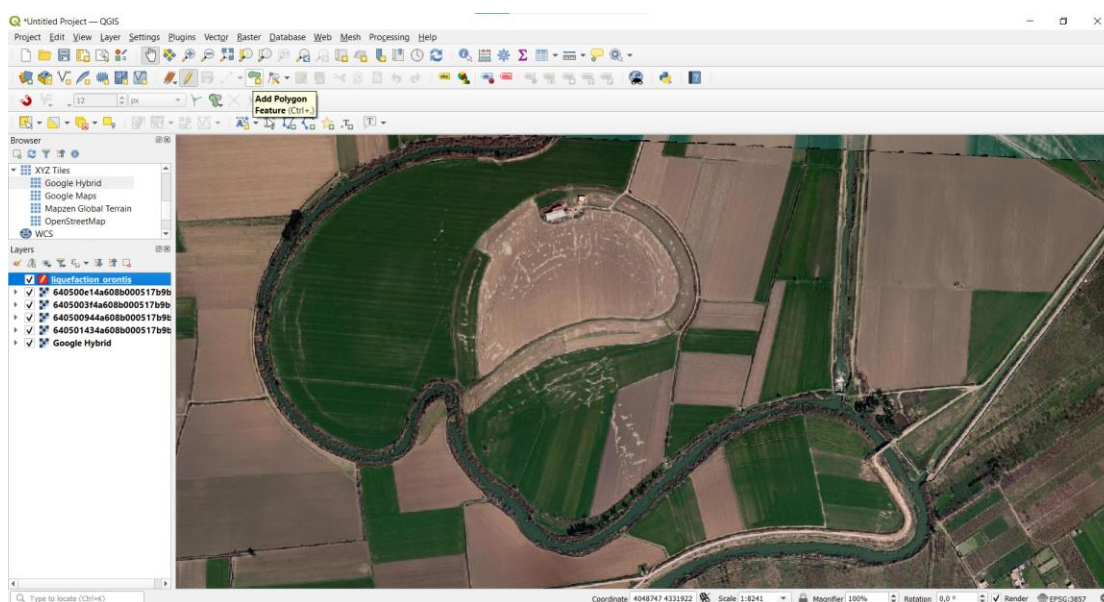
Εικόνα 22: Περιοχή μελέτης μετά την επεξεργασία

Για να ξεκινήσουμε την χαρτογράφηση των εμφανίσεων των ρευστοποιήσεων επιλέγουμε το Layer liquefaction_orontis, πατάμε δεξί κλικ και μετά Toggle Editing. Κάνοντας αυτήν την διαδικασία σημαίνει ότι ενεργοποιούμε το συγκεκριμένο Layer και η επεξεργασία μόνο για αυτό το Layer είναι δυνατή (Εικόνα 23).



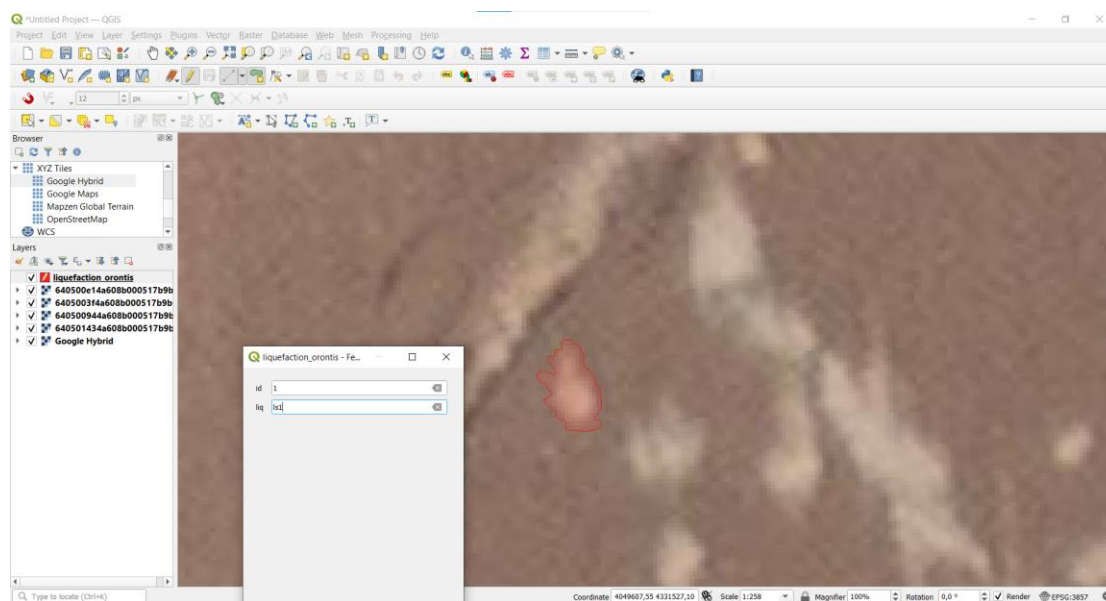
Εικόνα 23: Ενεργοποίηση Layer

Στην συνέχεια πηγαίνουμε πάνω στις μπάρες με τα εργαλεία και επιλέγουμε από τη δεύτερη σειρά με τα εικονίδια το 12^ο στην σειρά (από αριστερά προς τα δεξιά), το οποίο απεικονίζει ένα πράσινο πολύγωνο και με αυτό μπορούμε να δημιουργήσουμε και να προσθέσουμε ένα νέο πολύγωνο το οποίο θα αποθηκευτεί στο Layer liquefaction_orontis και αποτελεί μια εμφάνιση ρευστοποίησης (Εικόνα 24).



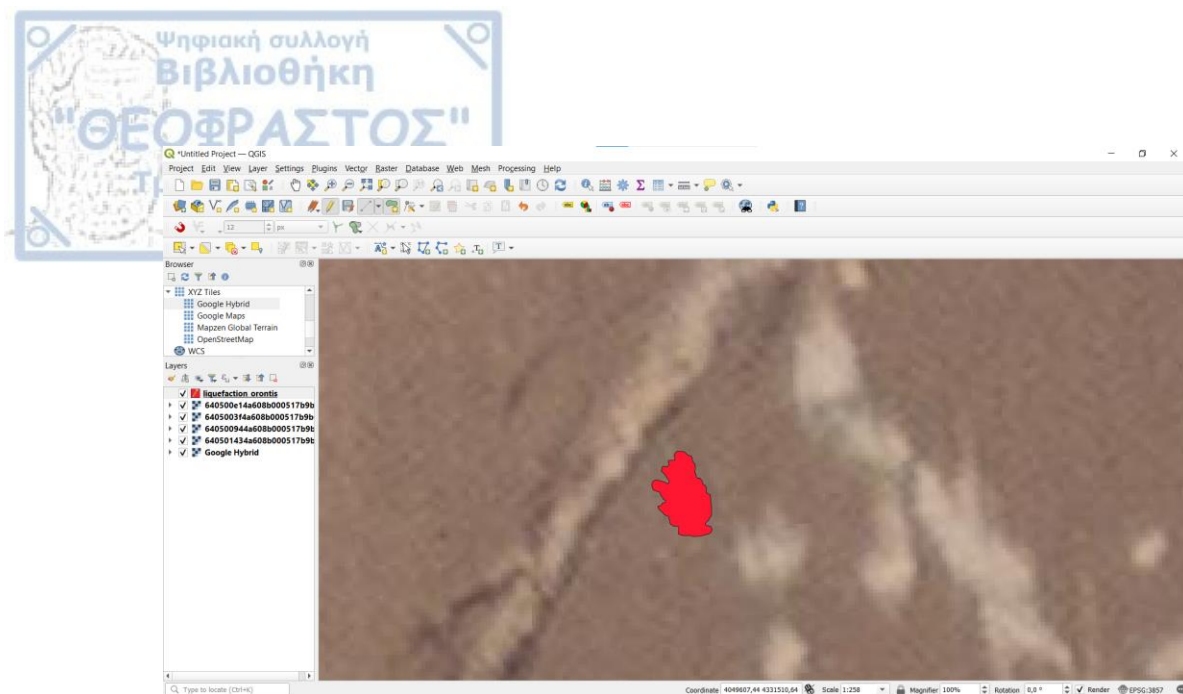
Εικόνα 24: Δημιουργία πολυγώνου

Για να δημιουργήσουμε ένα πολύγωνο πατάμε το αριστερό κλικ του ποντικιού με μια δεδομένη φορά, έτσι ώστε να ψηφιοποιήσουμε την εμφάνιση της ρευστοποίησης καλύπτοντας όλη την επιφάνειά της και όταν φτάσουμε ξανά στην αρχή δηλαδή στο τελευταίο σημείο της ψηφιοποίησης, πατάμε δεξί κλικ στο ποντίκι και εμφανίζεται ένα μικρό πινακάκι με δύο (2) σειρές. Στην πρώτη σειρά που γράφει id, γράφουμε το νούμερο της εμφάνισης της ρευστοποίησης που ψηφιοποιούμε και στη δεύτερη σειρά που γράφει liq γράφουμε το κωδικοποιημένο όνομα της συγκεκριμένης εμφάνισης της ρευστοποίησης, που το ορίζουμε και αυτό εμείς (Εικόνα 25).



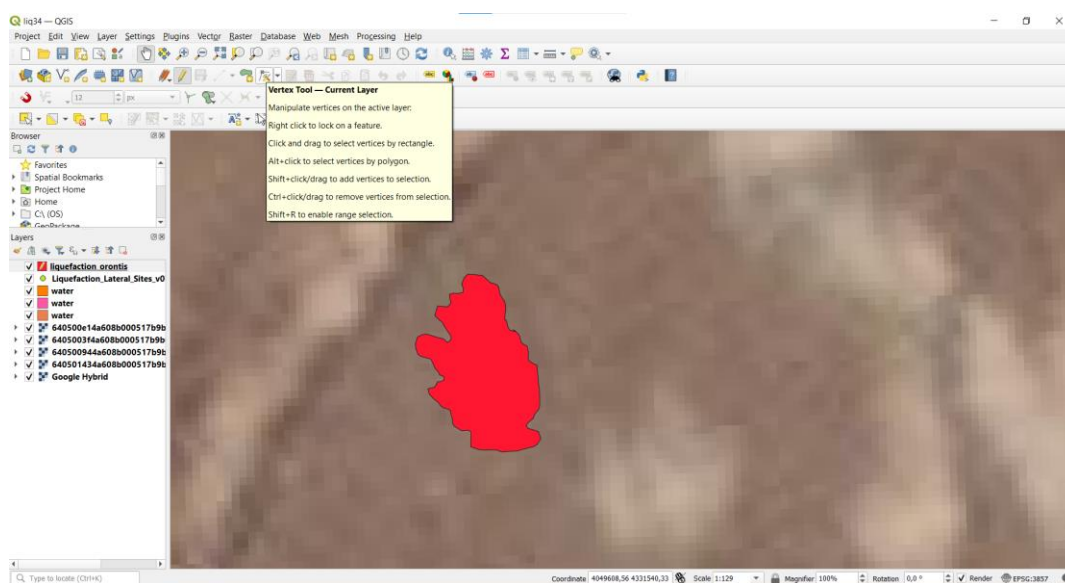
Εικόνα 25: Διαδικασία δημιουργίας πολυγώνου

Στην εικόνα 26 βλέπουμε το αποτέλεσμα της ψηφιοποίησης της εμφάνισης της ρευστοποίησης και συνηθίζεται να επιλέγουμε ένα χρώμα το οποίο να ξεχωρίζει από υποκείμενο Layer για να είναι ορατά τα πολύγωνα που θα δημιουργήσουμε.



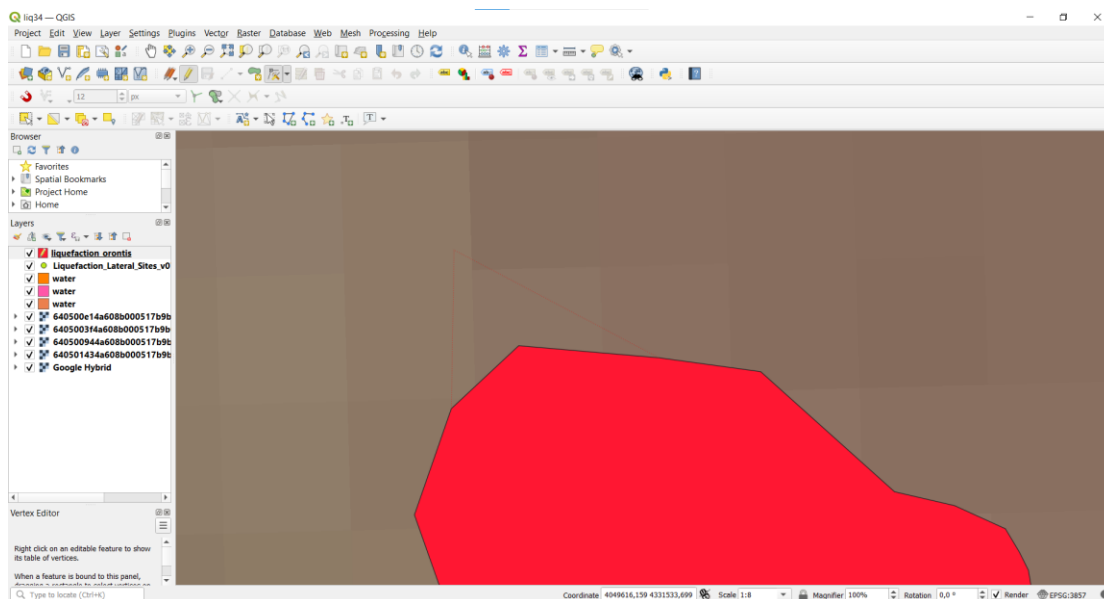
Εικόνα 26: Εμφάνιση του πολυγώνου

Επιπλέον, ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μετά την ψηφιοποίηση μιας εμφάνισης ρευστοποίησης είναι το Vertex Tool, το οποίο βρίσκεται επίσης στην δεύτερη σειρά στην μπάρα των εργαλείων δίπλα στο εργαλείο Add Polygon που αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Το Vertex Tool εφαρμόζεται μόνο στο Layer είναι ενεργοποιημένο και συγκεκριμένα μπορεί να διορθώσει όσες κορυφές ενός πολυγώνου που έχουμε δημιουργήσει και είναι λάθος (Εικόνα 27).

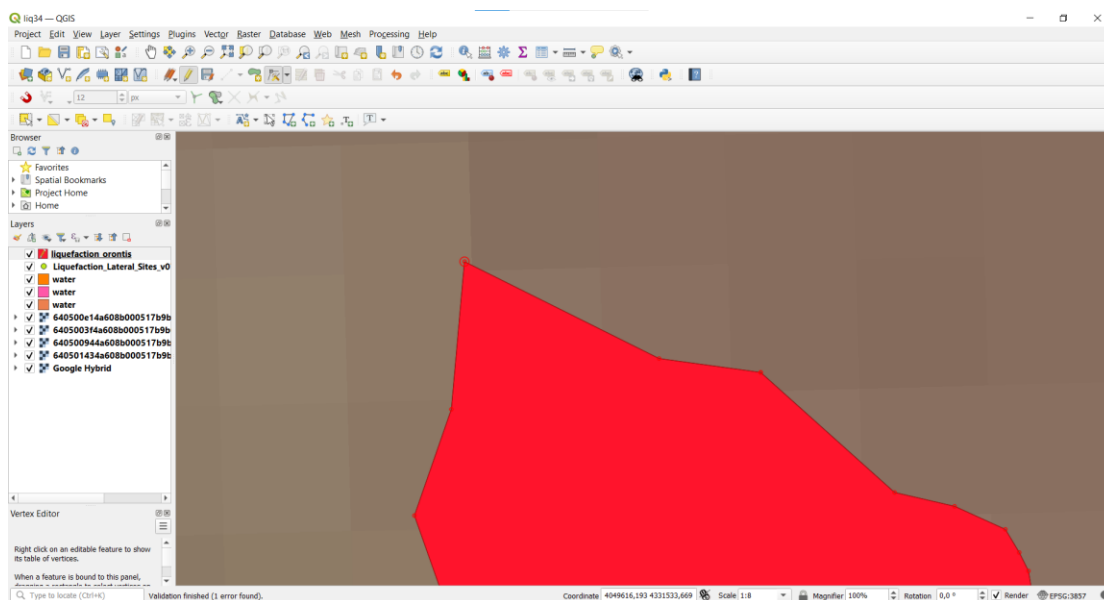


Εικόνα 27: Διόρθωση πλευράς του πολυγώνου

Ένα παράδειγμα της εφαρμογής του εργαλείου Vertex Tool φαίνεται στις παρακάτω εικόνες, δηλαδή στις εικόνες 28 και 29, όπου στην 28 φαίνεται η λανθασμένη κορυφή του πολυγώνου πριν διορθωθεί και στην 29 φαίνεται η διορθωμένη κορυφή του πολυγώνου μετά την χρήση του συγκεκριμένου εργαλείου.



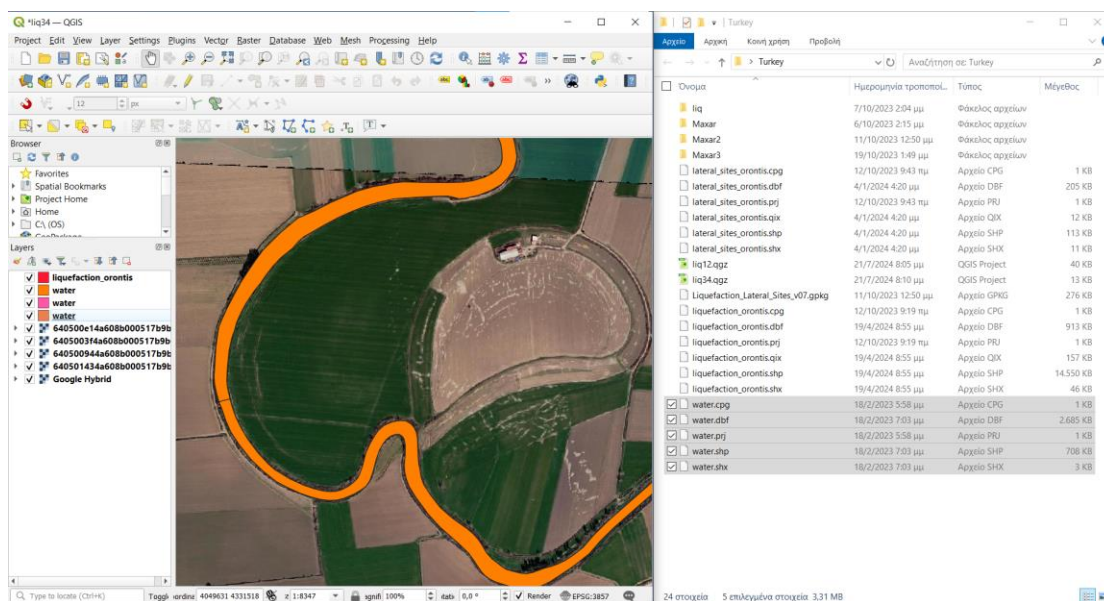
Εικόνα 28: Πολύγωνο πριν την διόρθωση της πλευράς του



Εικόνα 29: Πολύγωνο μετά την διόρθωση της πλευράς του

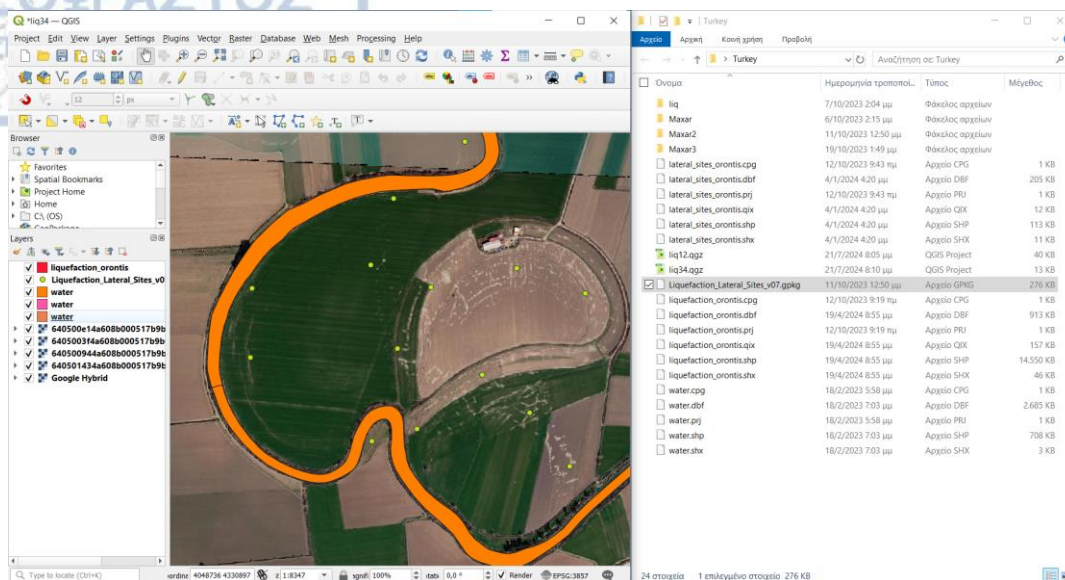
Συνοψίζοντας η διαδικασία που περιγράφηκε με λόγια αλλά και με εικόνες, από την εικόνα 19 μέχρι και την 29 έχει εφαρμογή στα πολύγωνα αλλά με μικρές παραλλαγές η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται και για την δημιουργία Layers που αποτελούνται από γραμμικά στοιχεία (Line Strings) και σημεία (Points).

Εκτός από την ψηφιοποίηση των πολυγώνων των γραμμικών στοιχείων και των σημείων πρέπει να αποτυπωθεί και ο ποταμός. Για να αποτυπωθεί και ο ποταμός σέρνουμε τα αρχεία από τον φάκελο που βρίσκεται στον υπολογιστή μας στην καρτέλα των Layers και τα τοποθετούμε πάνω από τις γεωαναφερμένες δορυφορικές εικόνες ώστε να είναι και αυτός ορατός (Εικόνα 30).



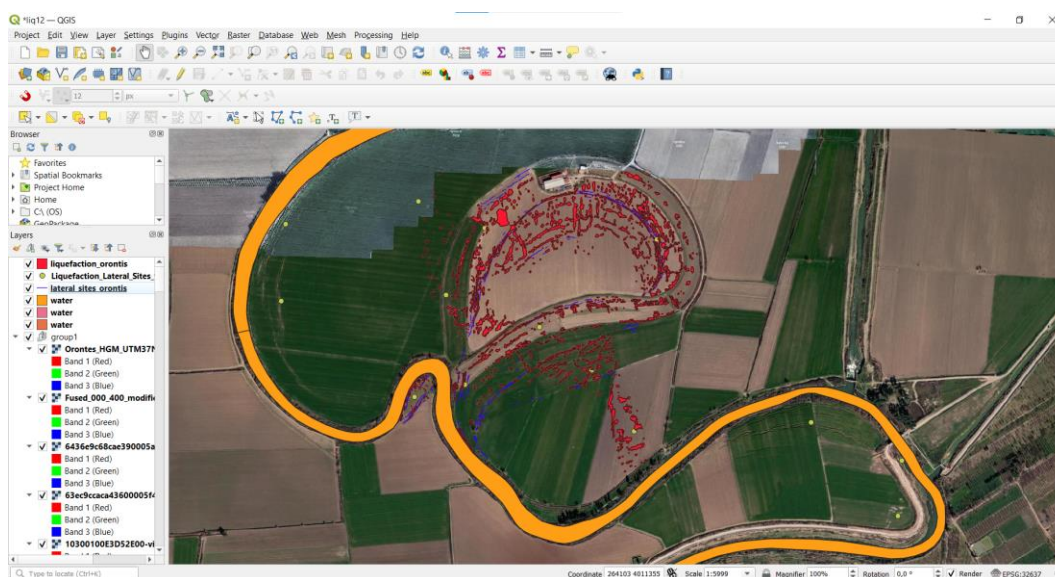
Εικόνα 30: Προσθήκη ποταμού με χρώμα

Τέλος, προσθέτουμε και τα γενικά σημεία που έχουν εντοπιστεί οι εμφανίσεις των ρευστοποιήσεων ώστε να βλέπουμε σε ποιες περιοχές στην περιοχή μελέτης μας υπάρχουν τέτοιες εμφανίσεις που απαιτούν λεπτομερή χαρτογράφηση (Εικόνα 31). Με την ίδια διαδικασία σέρνουμε το αρχείο από τον φάκελο που είναι αποθηκευμένο στον υπολογιστή μας, στην καρτέλα Layers και το τοποθετούμε πάνω από το Layer του νερού (water) που συμβολίζει τον ποταμό για να είναι ορατά και τα σημεία αυτά.

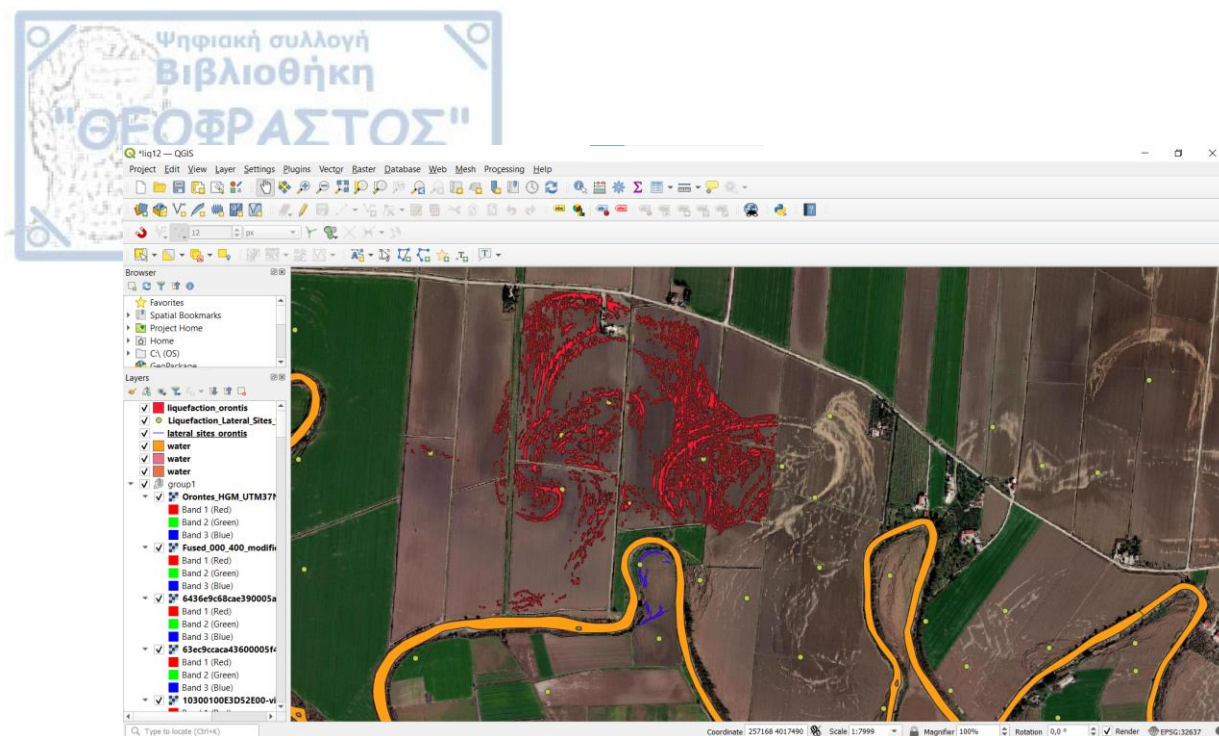


Εικόνα 31: Προσθήκη γενικών σημείων εμφανίσεων ρευστοποιήσεων όλων των ειδών

Στις εικόνες 32 και 33 φαίνονται οι 2 περιοχές όπου ασχοληθήκαμε στην συγκεκριμένη εργασία και αποτυπώσαμε με λεπτομέρεια τις εμφανίσεις των ρευστοποιήσεων (κόκκινο χρώμα) και τις πλευρικές εξαπλώσεις (μπλε χρώμα). Πιο αναλυτικά, στην πρώτη περιοχή μελέτης, στην φωτογραφία 20 έχουν ψηφιοποιηθεί 1350 εμφανίσεις ρευστοποιήσεων (1350 πολύγωνα) και 900 πλευρικές εξαπλώσεις (900 γραμμικά στοιχεία), ενώ στην δεύτερη περιοχή μελέτης, στην φωτογραφία 21 έχουν ψηφιοποιηθεί 4450 εμφανίσεις ρευστοποιήσεων (4450 πολύγωνα) και 400 πλευρικές εξαπλώσεις (400 γραμμικά στοιχεία).

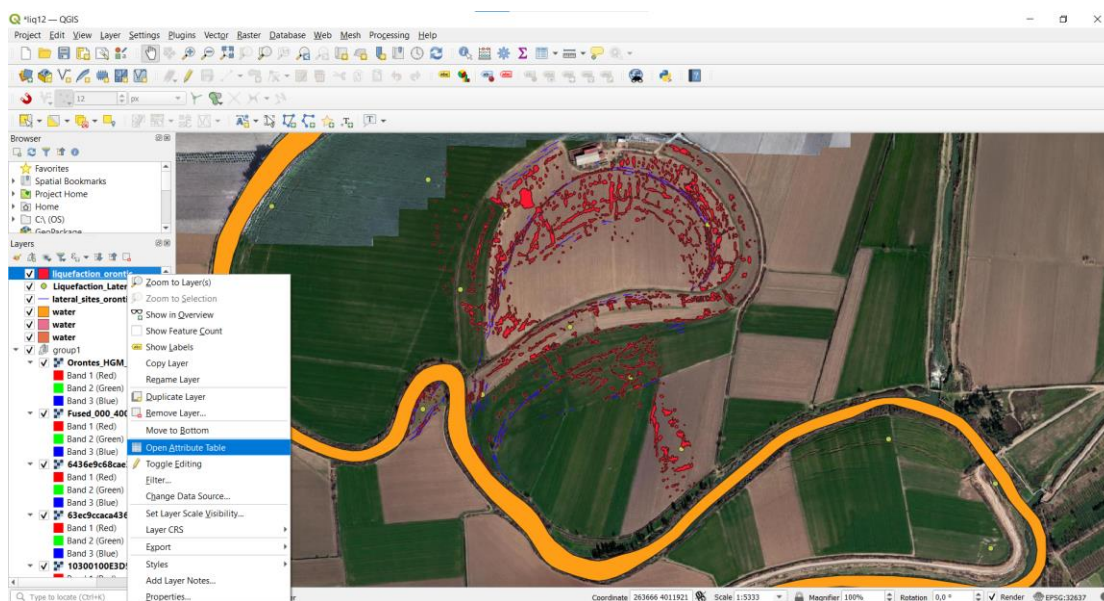


Εικόνα 32: Περιοχή μελέτης (1) λεπτομερούς ψηφιοποίησης



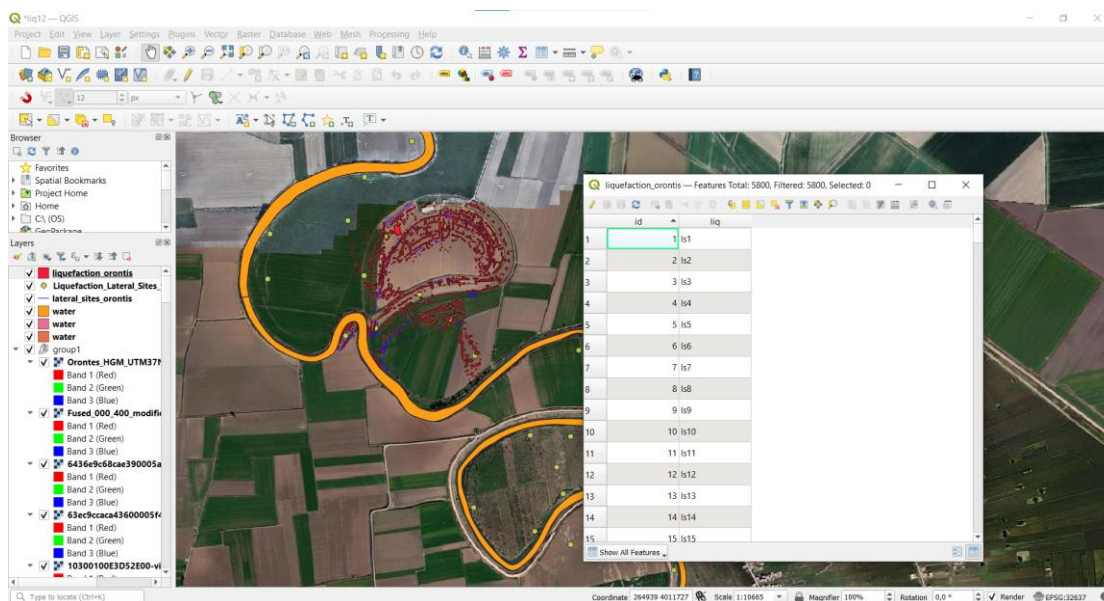
Εικόνα 33: Περιοχή μελέτης (2) λεπτομερούς ψηφιοποίησης

Για να δούμε συνολικά όλες τις εμφανίσεις ρευστοποιήσεων ή τις πλευρικές εξαπλώσεις που έχουμε ψηφιοποιήσει, επιλέγουμε από την καρτέλα Layers το αντίστοιχο Layer και πατάμε δεξί κλικ πάνω του και μετά επιλέγουμε το Open Attribute Table (Εικόνα 34).



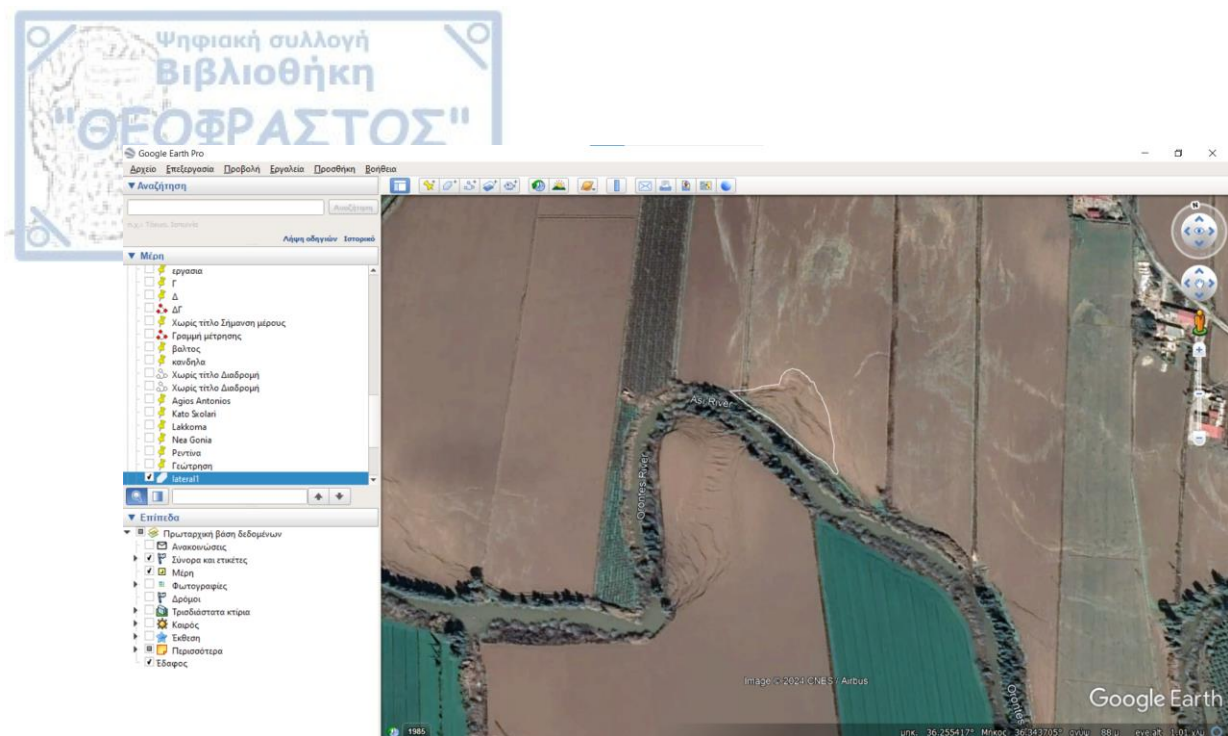
Εικόνα 34: Εμφάνιση ψηφιοποιήσεων σε πίνακα

Το αποτέλεσμα είναι να εμφανιστεί μία νέα καρτέλα η οποία έχει 2 στήλες όπου η πρώτη μας δείχνει το νούμερο της συγκεκριμένης εμφάνισης ρευστοποίησης ή πλευρικής εξάπλωσης (id), που έχουμε ψηφιοποιήσει και η δεύτερη στήλη μας δείχνει την κωδική ονομασία που έχουμε δώσει (liq). Πάνω από τις στήλες αυτές, υπάρχει και μία μπάρα εργαλείων με τα οποία μπορούμε να κάνουμε κάποιες διεργασίες. Για παράδειγμα, μπορούμε να επιλέξουμε κάποια συγκεκριμένα δεδομένα, να αλλάξουμε νούμερο και κωδική ονομασία και να διαγράψουμε δεδομένα που δεν χρειαζόμαστε (Εικόνα 35).

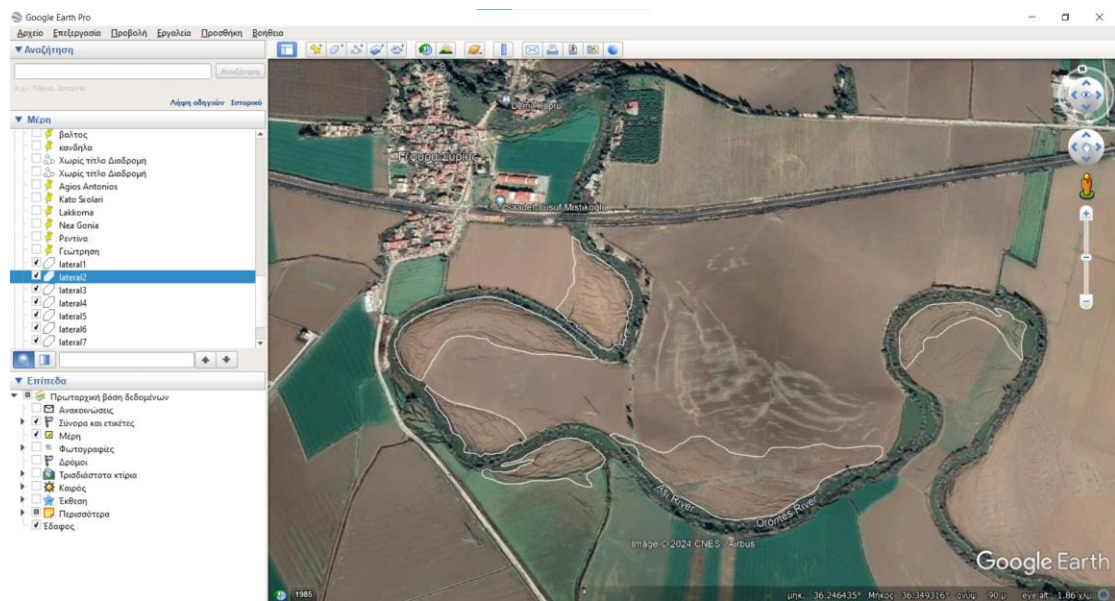


Εικόνα 35: Εμφάνιση πίνακα και επιλογές επεξεργασίας δεδομένων

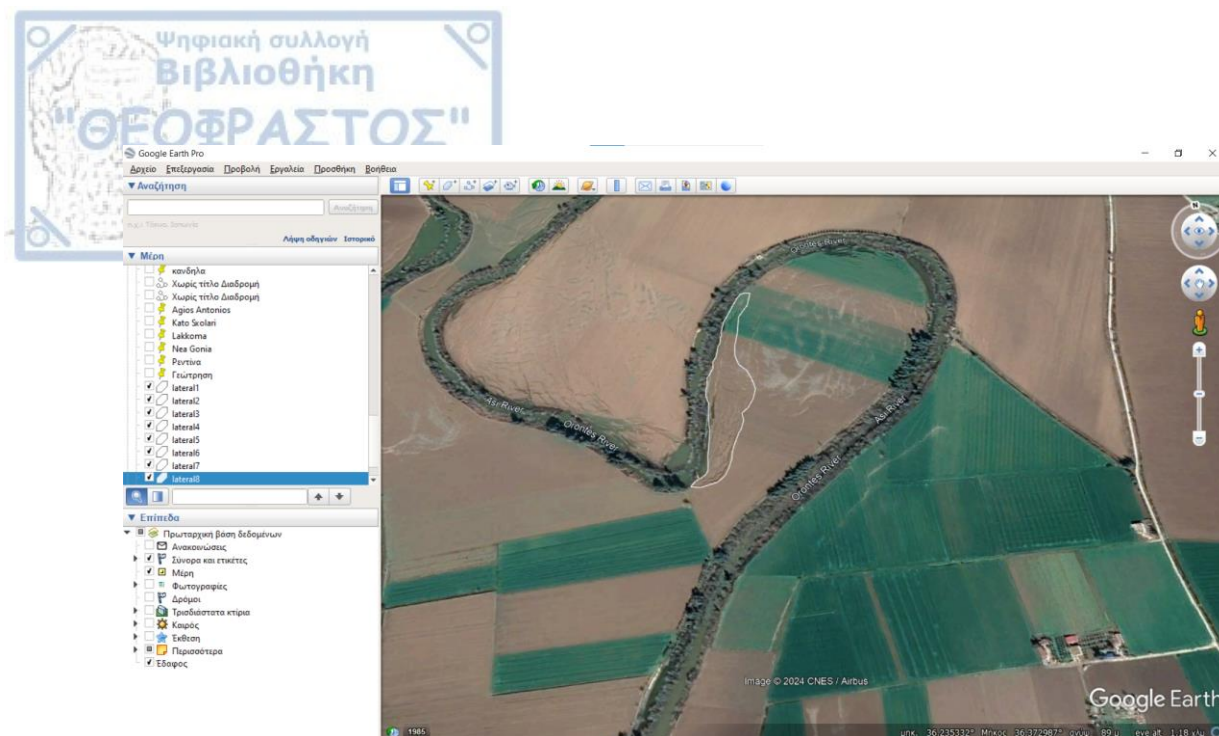
Επιπλέον για την εργασία χρησιμοποιήθηκε και το Google Earth Pro, ώστε να χαρτογραφηθούν μερικές πλευρικές εξαπλώσεις, να μετρηθούν οι εκτάσεις που καλύπτουν και να μετρηθούν επίσης και οι μέγιστες αποστάσεις τους από τον ποταμό Ορόντη-Ασί. Όπως φαίνεται και στις εικόνες 36,37,38 και 39 έχουμε αποτυπώσει 10 πλευρικές εξαπλώσεις, οι οποίες εμφανίζονται κατά μήκος του ποταμού. Πιο συγκεκριμένα, στην εικόνα 36 απεικονίζεται η πλευρική εξάπλωση 1 (lateral 1), στην εικόνα 37 απεικονίζονται οι πλευρικές εξαπλώσεις 2,3,4,5,6,7 (lateral 2, lateral 3, lateral 4, lateral 5, lateral6, lateral 7), στην εικόνα 38 απεικονίζεται η πλευρική εξάπλωση 8 (lateral 8) και στην εικόνα 39 απεικονίζονται οι πλευρικές εξαπλώσεις 9,10 (lateral 9, lateral 10).



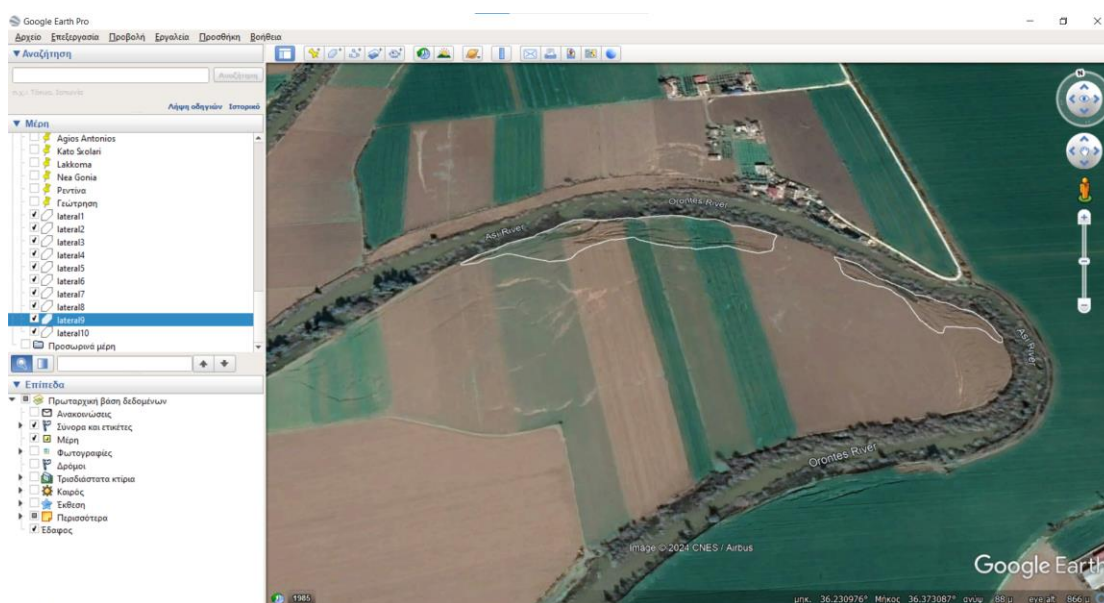
Εικόνα 36: Πλευρική εξάπλωση 1 (lateral 1)



Εικόνα 37: Πλευρικές εξαπλώσεις 2,3,4,5,6,7 (lateral 2, lateral 3, lateral 4, lateral 5, lateral 6, lateral 7)

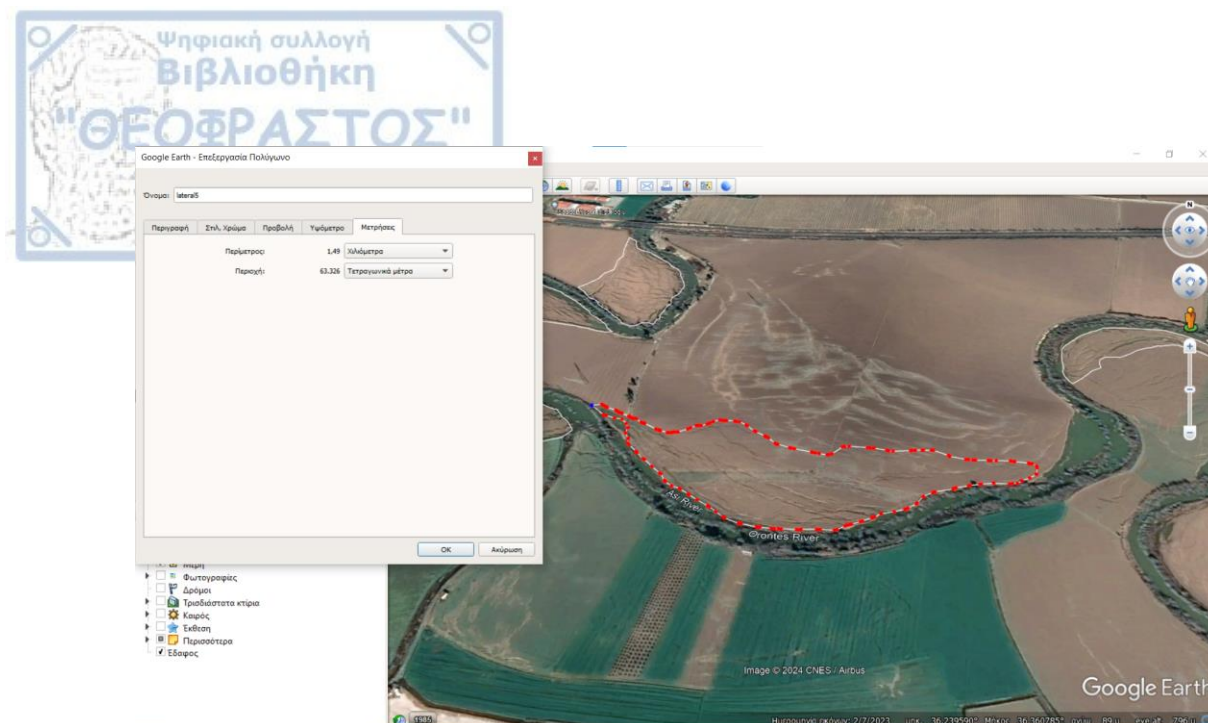


Εικόνα 38: Πλευρική εξαπλώση 8 (lateral 8)



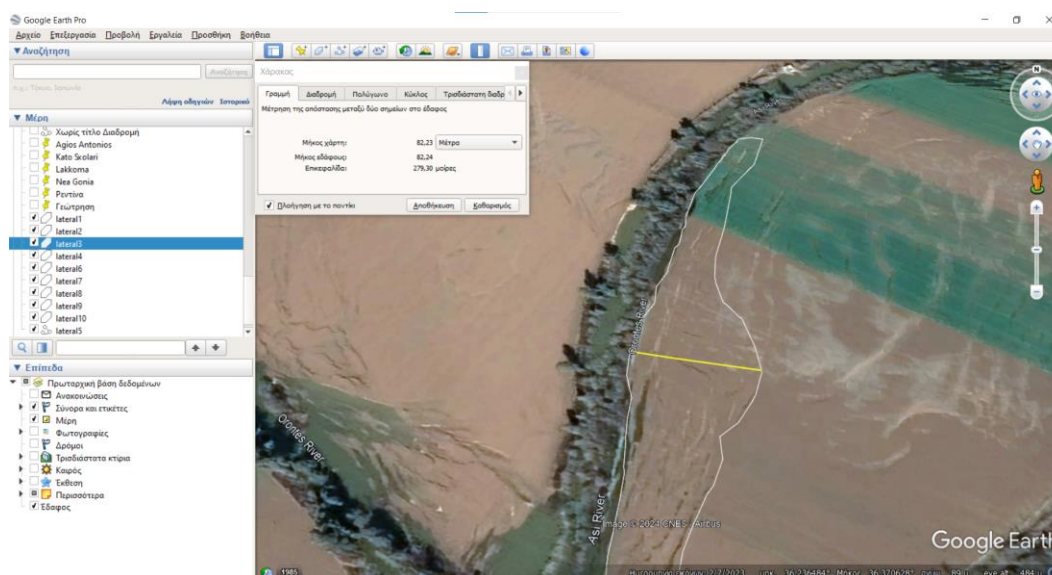
Εικόνα 39: Πλευρικές εξαπλώσεις 9,10 (lateral 9, lateral 10)

Για να αποτυπωθούν οι πλευρικές εξαπλώσεις χρησιμοποιήσαμε το εργαλείο της επεξεργασίας του πολυγώνου, όπου με συνεχόμενα κλικ προς μία κατεύθυνση, κάναμε την σχεδιάσή του. Έπειτα, πραγματοποιήσαμε την επεξεργασία του κάθε πολυγώνου και μετρήσαμε τις εκτάσεις, όπως φαίνεται στην εικόνα 40. Η μονάδα μέτρησης των περιοχών που καταλαμβάνουν οι πλευρικές εξαπλώσεις είναι τα τετραγωνικά μέτρα (παράδειγμα-lateral 5, περιοχή : 63326m²)



Εικόνα 40: Μέτρηση έκτασης πλευρικής εξάπλωσης

Εκτός από την μέτρηση της έκτασης των πλευρικών εξαπλώσεων, κάναμε και μετρήσεις, με την βοήθεια του προγράμματος Google Earth Pro, για να βρούμε την μέγιστη απόσταση που έχουν οι πλευρικές εξαπλώσεις από τον ποταμό (Εικόνα 41). Για αυτήν την μέτρηση χρησιμοποιήσαμε ένα άλλο εργαλείο, τον χάρακα όπου και τραβήξαμε ευθεία γραμμή από το σημείο που βρίσκεται σε πιο μακρινή απόσταση από τον ποταμό. Η μονάδα μέτρησης της μέγιστης απόστασης είναι τα μέτρα (παράδειγμα-lateral 8, μήκος χάρτη : 82m).



Εικόνα 41: Μέτρηση μέγιστης απόστασης της πλευρικής εξάπλωσης από τον ποταμό

Τέλος, δημιουργήσαμε έναν πίνακα με όλες τις μέγιστες αποστάσεις από τον ποταμό (στήλη 2) και όλες τις εκτάσεις (στήλη 3) από όλες τις πλευρικές εξαπλώσεις που αποτυπώσαμε (στήλη 1), (Πίνακας 8).

Πίνακας 8: Αποτελέσματα μετρήσεων των παραπάνω παραμέτρων

	Μέγιστη απόσταση από τον ποταμό (m)	Έκταση (m ²)
Lateral1	74	7746
Lateral2	115	48281
Lateral3	105	16696
Lateral4	131	18007
Lateral5	156	63326
Lateral6	180	31060
Lateral7	74	21406
Lateral8	82	16319
Lateral9	43	13371
Lateral10	42	4286

7.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων με την διεθνή βιβλιογραφία

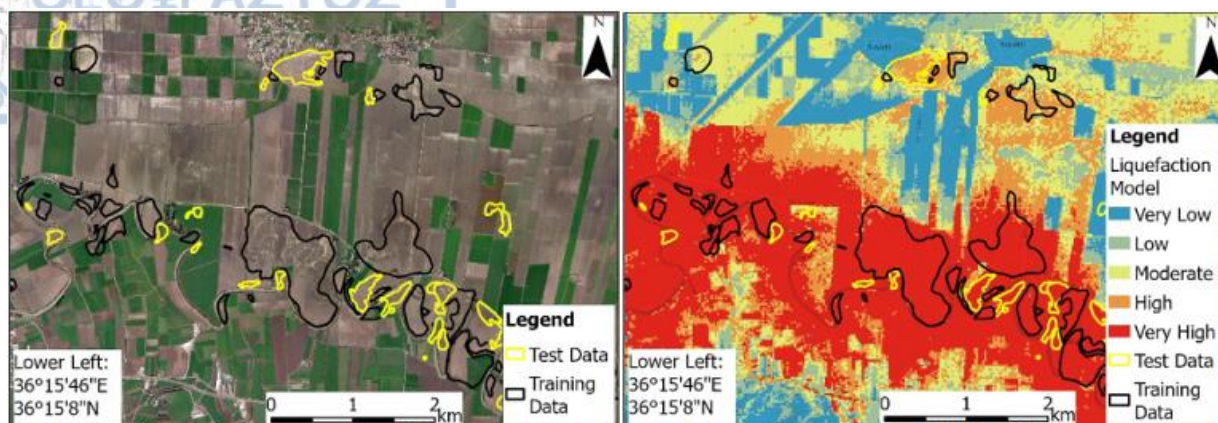
Η αποτύπωση των καταγεγραμμένων περιστατικών ρευστοποίησης σε κλίμακα περιφέρειας και η συσχέτιση τους με το περιβάλλον απόθεσης αποτελεί αντικείμενο έρευνας και μελέτης τα τελευταία χρόνια. Οι Παπαθανασίου και Παυλίδης (2011), οι οποίοι μελέτησαν την χωρική κατανομή των καταγεγραμμένων εμφανίσεων ρευστοποίησης σε κλίμακα περιφέρειας στην Ελλάδα, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το 68% των περιστατικών ρευστοποίησης που έχουν καταγραφεί έως το 2011 στον Ελλαδικό χώρο έχουν καταγραφεί σε απόσταση έως 50 μέτρα από ένα υδάτινο σύστημα (π.χ. ποτάμι, λίμνη, θάλασσα), ενώ το 31% των περιστατικών ρευστοποίησης έχουν καταγραφεί σε απόσταση από 50 έως 100 μέτρα και μόλις το 1% σε απόσταση μεγαλύτερη των 100 μέτρων. Το μεγαλύτερο ποσοστό των εμφανίσεων ρευστοποίησης στην Ελλάδα, δηλαδή το 89%, παρατηρήθηκαν σε αλλουβιακές και ποτάμιες αποθέσεις ηλικίας Τεταρτογενούς και ένα ποσοστό της τάξης των 5% παρατηρήθηκαν σε παράκτιες και δελταϊκές αποθέσεις επίσης ηλικίας Τεταρτογενούς. Αντίστοιχη μελέτη έγινε από τους Knudsen και Bott (2011) στην περιοχή της Καλιφόρνιας (ΗΠΑ), όπου παρατηρήθηκαν παρόμοια αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα οι περισσότερες εμφανίσεις ρευστοποίησης καταγράφηκαν σε αποθέσεις Άνω Ολοκαινικής ηλικίας (90%).

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Wotherspoon et al., (2012), οι οποίοι ασχολήθηκαν με την δριμύτητα του φαινομένου της ρευστοποίησης στην πόλη Καίαιροι στην Νέα Ζηλανδία, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι περισσότερες ρευστοποιήσεις εμφανίστηκαν σε παλιές κοίτες ποταμών. Σε μία περαιτέρω έρευνα που έγινε από τους Bastin et al., (2015, 2017) αναφορικά με

την συσχέτιση του ποτάμιου συστήματος με την εκδήλωση του φαινομένου της ρευστοποίησης, αποδείχθηκε ότι η δριμύτητα και η χωρική κατανομή των ρευστοποιήσεων συνδέονται με την απόσταση από το ελεύθερο μέτωπο ενός ποταμού και δεν είναι τυχαία. Στην συγκεκριμένη μελέτη όπου πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Aronside στην Νέα Ζηλανδία, παρατηρήθηκε ότι οι πιο επιδεκτικές περιοχές σε ρευστοποίηση είναι αυτές που αποτελούνται από ποτάμιας αποθέσεις ηλικίας Τεταρτογενούς και η μέγιστη δριμύτητα καταγράφηκε σε απόσταση μικρότερη των 50 μέτρων από το ελεύθερο μέτωπο του ποταμού της περιοχής. Οι Villamor et al. (2016) αναλύοντας την χωρική κατανομή των ρευστοποιήσεων που συνέβησαν την περίοδο 2010-2011 στην ευρύτερη περιοχή του Christchurch στην Νέα Ζηλανδία, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι εκδηλώσεις των ρευστοποιήσεων εμφανίζονται με μεγαλύτερη συχνότητα στο εσωτερικό κομμάτι των μαιάνδρων (point bars), εκεί όπου αποτίθεται υλικό κατά την κίνηση του νερού μέσα στον ποταμό και επίσης στις περιοχές όπου υπάρχουν παλαιοκοίτες και παλαιομάνες.

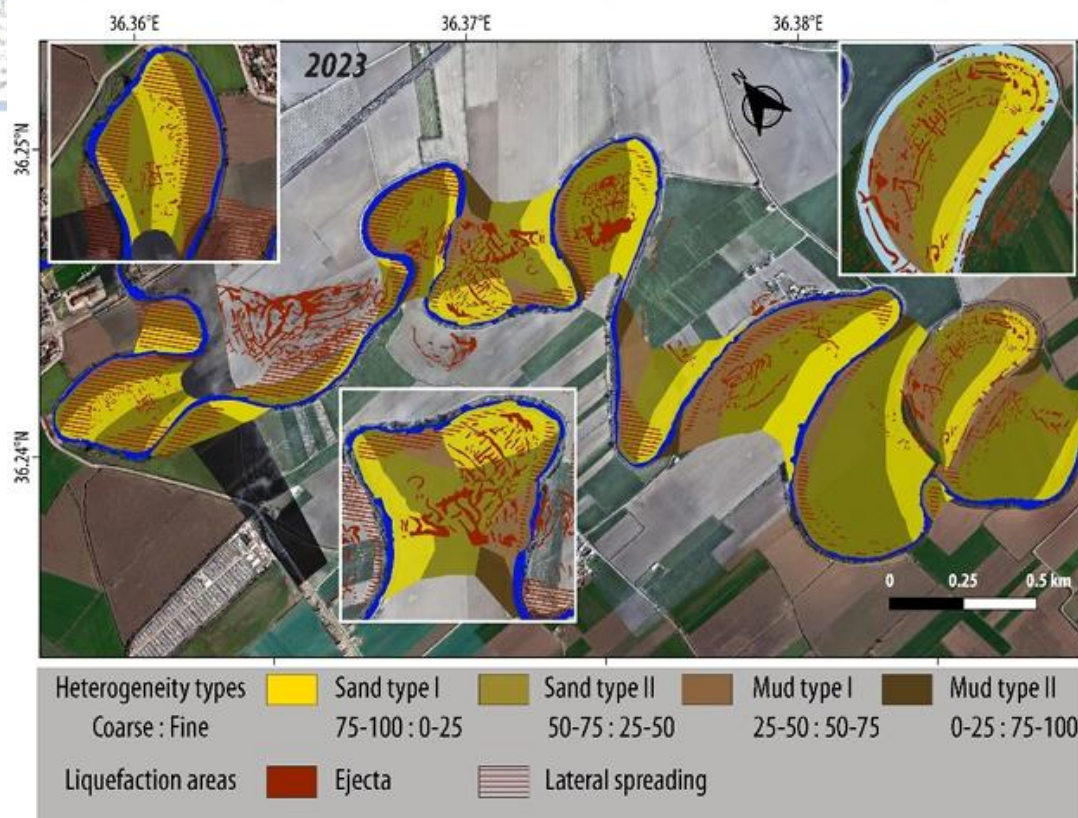
Αντίστοιχα συμπεράσματα με τους Παπαθανασίου και Παυλίδης (2011), τους Knudsen και Bott (2011), τους Bastin et al., (2015, 2017) και τους Villamor et al. (2016) προέκυψαν και από την μελέτη που κάναμε στην περιοχή του Hatay στην Τουρκία. Πιο συγκεκριμένα αποτυπώσαμε την χωρική κατανομή των ρευστοποιήσεων σε ένα τμήμα του ποταμού Ορόντη και διατυπώσαμε ότι στην συγκεκριμένη περιοχή, η μέγιστη απόσταση των εμφανίσεων των ρευστοποιήσεων από το ελεύθερο μέτωπο του ποταμού είναι στα 180 μέτρα. Επιπλέον στην περιοχή αυτή επικρατούν αλλουβιακές αποθέσεις ηλικίας Τεταρτογενούς και οι περισσότερες εμφανίσεις ρευστοποιήσεων βρίσκονται στο εσωτερικό των μαιάνδρων (point bars).

Επιπλέον, εφόσον η ίδια διαδικασία πραγματοποιηθεί και σε άλλα κομμάτια του ίδιου ποταμού, θα πρέπει να δημιουργηθεί ένας χάρτης επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση της ευρύτερης περιοχής, όπως δημιούργησαν οι Karakas et al., (2024) στην περιοχή του ποταμού Ορόντη στην Τουρκία, έτσι ώστε να κατηγοριοποιηθούν οι περιοχές εκατέρωθεν του ποταμού ανάλογα με την επιδεκτικότητά τους στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Από τον χάρτη επιδεκτικότητας που δημιουργήθηκε, βγήκε το συμπέρασμα ότι οι πιο επιδεκτικές περιοχές σε ρευστοποίηση είναι σε αποστάσεις έως 200 μέτρα από το ελεύθερο μέτωπο του ποταμού Ορόντη, αλλά επίσης επιδεκτικές περιοχές αποτελούν και σημεία όπου υπάρχουν αποκομμένες κοίτες (παλαιοκοίτες) και παλαιομάνες (Χάρτης 12).



Χάρτης 12: Δορυφορική εικόνα (αριστερά) και Χάρτης επιδεκτικότητας (δεξιά) ενός τμήματος του ποταμού Ορόντη στην Τουρκία (Karakas et al., 2024)

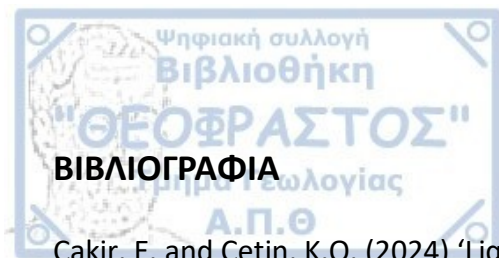
Τέλος, με την βοήθεια της λεπτομερούς αποτύπωσης των εμφανίσεων ρευστοποίησης σε συνδυασμό με την δημιουργία ενός χάρτη, όπου θα αποτυπώνεται η ετερογένεια του εδάφους σε κάθε ένα point bar του ποταμού, θα μπορεί να βρεθεί στην ευρύτερη περιοχή η επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση ανάλογα με την κοκκομετρική σύσταση του εδάφους και επίσης σε ποια εδάφη παρατηρείται με μεγαλύτερη συχνότητα το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Σύμφωνα με τους Ταφτσόγλου et al., (2024), στην πρώτη περίπτωση που μελετήθηκε (Εικόνα 42, πάνω αριστερά), βρέθηκε ότι κατά τους σεισμούς της 6^{ης} Φεβρουαρίου του 2023 που συνέβησαν στην Τουρκία, το 69,5% και το 30,5% των εμφανίσεων ρευστοποίησης εκδηλώθηκαν σε αμμώδη εδάφη (τύπος Sand-I και Sand-II αντίστοιχα). Επιπλέον, και στον δεύτερο μαϊάνδρο που μελετήθηκε (Εικόνα 42, κάτω στο κέντρο), παρατηρήθηκαν αντίστοιχα συμπεράσματα, καθώς το 40,2% και το 51,6% των εμφανίσεων ρευστοποίησης συνέβησαν σε αμμώδη εδάφη (τύπος Sand-I και Sand-II αντίστοιχα). Όσον αφορά την Τρίτη περίπτωση (Εικόνα 42, πάνω δεξιά), το 45,8% των εμφανίσεων ρευστοποίησης εκδηλώθηκαν σε αμμώδη εδάφη (τύπος Sand-II), ενώ το 30,7% συνέβησαν σε ιλυώδη εδάφη (τύπος Mud-I). Συνολικά στην περιοχή του ποταμού Ορόντη, όπου έγινε η συγκεκριμένη μελέτη, βρέθηκε ότι το 62,7% των εμφανίσεων ρευστοποίησης εκδηλώθηκαν σε αμμώδη εδάφη (τύπος Sand-II). Αναφορικά με τις πλευρικές εξαπλώσεις που χαρτογραφήθηκαν στην περιοχή του Ορόντη, βγήκε το συμπέρασμα ότι το 88,8% των πλευρικών εξαπλώσεων βρίσκονται σε απόσταση έως 50 μέτρα από το ελεύθερο μέτωπο του ποταμού, ενώ μόλις το 11,2% των πλευρικών εξαπλώσεων βρίσκονται σε απόσταση από 50 έως 100 μέτρα.



Εικόνα 42: Αξιολόγηση των τύπων ετερογένειας του ποταμού Ορόντη με βάση την μεθοδολογία που προτείνει η Russell, 2017, (Ταφτσόγλου et al., 2024)

Αφού μελετήθηκε η περιοχή του Hatay και πιο συγκεκριμένα ένα τμήμα του ποταμού Ορόντη αναφορικά με τις εμφανίσεις των ρευστοποιήσεων που εκδηλώθηκαν κατά τους σεισμούς της 6^{ης} Φεβρουαρίου του 2023, καταλήξαμε στα εξής συμπεράσματα:

- Η χωρική κατανομή των ρευστοποιήσεων δεν είναι τυχαία αλλά μεγάλο ρόλο έχει το περιβάλλον απόθεσης. Πιο συγκεκριμένα το περιβάλλον απόθεσης στην ευρύτερη περιοχή του ποταμού Ορόντη είναι αλλουβιακές αποθέσεις οι οποίες είναι κορεσμένες με νερό και η ηλικία τους είναι Ολοκαινική και νεότερη. Επιπλέον, οι αποθέσεις αυτές αποτελούνται από αμμώδη κυρίως υλικά και το έδαφος δεν είναι συνεκτικό. Το αποτέλεσμα που προκύπτει, είναι αυτά τα εδάφη να παρουσιάζουν την μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση και πιο συγκεκριμένα τα σημεία στα οποία εκδηλώθηκαν τα περισσότερα φαινόμενα ρευστοποίησης είναι τα εσωτερικά τμήματα των μαιάνδρων του ποταμού (point bars), εκεί δηλαδή που αποθέτει ο ποταμός υλικό.
- Όσον αφορά τις πλευρικές εξαπλώσεις που μελετήθηκαν στην περιοχή του Ορόντη, από την αποτύπωση 10 πλευρικών εξαπλώσεων, βγήκε το συμπέρασμα ότι οι περισσότερες από αυτές (9 από τις 10), εκδηλώθηκαν στο εσωτερικό τμήμα των μαιάνδρων (point bars). Τέλος, η μέγιστη απόσταση των πλευρικών εξαπλώσεων από το ελεύθερο μέτωπο του ποταμού καταγράφεται στα 180 μέτρα (lateral 6), ενώ 5 πλευρικές εξαπλώσεις εκδηλώθηκαν σε απόσταση έως 85 μέτρα από τον ποταμό και οι υπόλοιπες 5 εκδηλώθηκαν σε απόσταση από 105 έως 180 μέτρα.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Cakir, E. and Cetin, K.O. (2024) 'Liquefaction triggering and induced ground deformations at a metallurgical facility in Dört Yol-Hatay after the February 6 Kahramanmaraş earthquake sequence', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, p. 108465. doi:10.1016/j.soildyn.2024.108465.
- Demir, A. *et al.* (2024) 'Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023', *Bulletin of Earthquake Engineering* [Preprint]. doi:10.1007/s10518-024-01865-5.
- Elfass, S.A., Norris, G.M. and Jacobson, E. (2006) 'Computer simulation of soil liquefaction', *GeoCongress 2006*, pp. 1–6. doi:10.1061/40803(187)267.
- Engineering Discoveries (2020) 'What is soil liquefaction? Causes, effects and prevents', *Engineering Discoveries*, [online] Available from: <https://engineeringdiscoveries.com/what-is-soil-liquefaction-causes-effects-and-prevents/>.
- Ingabire Abayo, N. *et al.* (2023) 'Fluvial geomorphic factors affecting liquefaction-induced lateral spreading', *Earthquake Spectra*, 39(4), pp. 2518–2547. doi:10.1177/87552930231190655.
- Jitno, H. and Davidson, R. (2010) 'Earthquake- induced displacements of earth dams and embankments', *Earthquake- induced displacements of earth dams and embankments*, 45(3), pp. 65–84. [online] Available from: https://www.researchgate.net/publication/288766690_Earthquake-induced_displacements_of_earth_dams_and_embankments.
- Karakas, V.E. *et al.* (2024) 'Event-based regional model of liquefaction susceptibility in Amik, Gölbaşı and Kahramanmaraş basins after the February 6, 2023 earthquakes', *Engineering Geology*, 339, p. 107644. doi:10.1016/j.enggeo.2024.107644.
- Karatas, A. (2016) 'Sustainable Water Management in Hatay: Hydrographic Planning Approach', in *Water Resources Management in the Lower Asi-Orontes River Basin: Issues and Opportunities*, Geneva: Graduate Institute of International and Development Studies; Istanbul: MEF University, p. 111–123.
- Karslı, H., Babacan, A.E. and Akın, Ö. (2024) 'Subsurface characterization by active and passive source geophysical methods after the 06 February 2023 earthquakes in Turkey', *Natural Hazards*, 120(6), pp. 5257–5286. doi:10.1007/s11069-024-06422-6.

- Maria, T., Valkaniotis Sotiris, Karantanellis Efstratios, Goula Evmorfia and Papathanassiou (2023). Preliminary mapping of liquefaction phenomena triggered by the February 6 2023 M7.7 earthquake, Türkiye / Syria, based on remote sensing data. *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.7668401>.
- Ozener, P. *et al.* (2024) 'Liquefaction and performance of foundation systems in Iskenderun during 2023 Kahramanmaras-Türkiye earthquake sequence', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 178, p. 108433. doi:10.1016/j.soildyn.2023.108433.
- Ozkan, P. *et al.* (1986) *Guide to Hatay geology (SE Turkey)*, 11(2), pp. 87–104. Available at: <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:157463>.
- Papathanassiou, G. *et al.* (2017) 'Liquefaction susceptibility map of Greece', *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 43(3), p. 1383. doi:10.12681/bgsg.11314.
- Papathanassiou, G. *et al.* (2022) 'Floodplain evolution and its influence on liquefaction clustering: The case study of March 2021 Thessaly, Greece, seismic sequence', *Engineering Geology*, 298, p. 106542. doi:10.1016/j.enggeo.2022.106542.
- Popescu, R. and Chakraborty, P. (2024) 'Mechanism of seismic liquefaction for heterogeneous soil', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 176, p. 108339. doi:10.1016/j.soildyn.2023.108339.
- Raja, M.N., Abdoun, T. and El-Sekelly, W. (2024) 'Smart prediction of liquefaction-induced lateral spreading', *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(6), pp. 2310–2325. doi:10.1016/j.jrmge.2023.05.017.
- Russell, (2017). 'Prediction of sedimentary architecture and lithological heterogeneity in fluvial point-bar deposits', Doctorate in the University of Leeds School of Earth and Environment.
- Russell, C.E. *et al.* (2018) 'A novel approach for prediction of lithological heterogeneity in fluvial point-bar deposits from analysis of meander morphology and scroll-bar pattern', *Fluvial Meanders and Their Sedimentary Products in the Rock Record*, pp. 385–417. doi:10.1002/9781119424437.ch15.
- Shioi, Y. (2020) 'Predicting post-seismic liquefaction through geological response analysis', *Research Outreach [Preprint]*, (118). doi:10.32907/ro-118-130133.
- Silvestri, F. and Moraci, N. (2019). *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*. CRC Press.

Suprijanto, H., Primantyo Hendrawan, A. and Wayan Bayu Nugraha, A. (2020) 'Potential study of the liquefaction hazard at the reclamation development site of I gusti Ngurah Rai Airport, Nusa Dua region, province of Bali', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 437(1), p. 012058. doi:10.1088/1755-1315/437/1/012058.

Sylvester, Z. *et al.* (2021) 'Autogenic translation and Counter Point Bar deposition in meandering rivers', *GSA Bulletin*, 133(11–12), pp. 2439–2456. doi:10.1130/b35829.1.

Taftoglou, M. *et al.* (2022) 'A detailed liquefaction susceptibility map of Nestos River Delta, Thrace, Greece based on surficial geology and geomorphology', *Geosciences*, 12(10), p. 361. doi:10.3390/geosciences12100361.

Taftoglou, M. *et al.* (2023) 'Satellite imagery for rapid detection of liquefaction surface manifestations: The case study of Türkiye–Syria 2023 earthquakes', *Remote Sensing*, 15(17), p. 4190. doi:10.3390/rs15174190.

Taftoglou, M. *et al.* (2024) 'Correlating the spatial distribution of liquefaction phenomena with the surficial geology on point bars deposits; case studies 2021 Damasi, Greece and 2023, Kahramanmaraş, Türkiye', 4th European Regional Conference of IAEG (EUROENGEO 2024).

Tarı, U. *et al.* (2014) 'The geology and morphology of the Antakya Graben between the Amik Triple Junction and the Cyprus Arc', *Geodinamica Acta*, 26(1–2), pp. 27–55. doi:10.1080/09853111.2013.858962.

Tobita, T. *et al.* (2024) 'Geotechnical Damage Survey Report on February 6, 2023 Turkey-Syria earthquake, Turkey', *Soils and Foundations*, 64(3), p. 101463. doi:10.1016/j.sandf.2024.101463.

Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y. (1983) 'Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content', *Soils and Foundations*, 23(4), pp. 56–74. doi:10.3208/sandf1972.23.4_56.

Yuan, J., Wang, L. and Yuan, X. (2023) 'Framework of a performance-based design for liquefaction resistance', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 173, p. 108123. doi:10.1016/j.soildyn.2023.108123.

Παπαθανασίου Γ., (2022). *Επιδεκτικότητα και επικινδυνότητα γεωλογικών φαινομένων* [Κεφάλαιο]. Στο Παπαθανασίου, Γ. 2022. *Τεχνική Γεωλογία και Γεωλογικοί Κίνδυνοι* [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. 2008