



Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Α.Π.Θ.
Τμήμα Γεωλογίας

ΝΑΤΑΛΙΑ ΠΑΠΑΠΕΤΡΟΥ

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ
ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΞΙΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2018



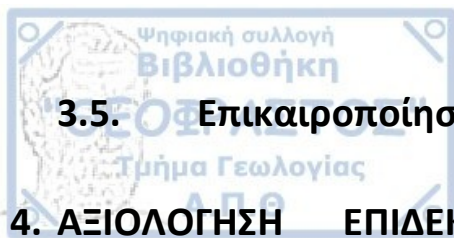
ΝΑΤΑΛΙΑ ΠΑΠΑΠΕΤΡΟΥ

**ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ
ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΞΙΟΥ**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας

**Επιβλέπων Καθηγητής
Παπαθανασίου Γεώργιος**

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	5
2. ΡΕΥΣΤΟΠΟΪΣΗ ΕΔΑΦΩΝ.....	5
2.1. Ρευστοποίηση.....	5
2.2. Διαδικασία Σχηματισμού Ρευστοποίησης.....	6
2.3. Κατηγορίες Ρευστοποίησης.....	7
2.3.1. Εδαφική Ροή.....	7
2.3.2. Ανακυκλική Κινητικότητα.....	9
2.4. Κριτήρια-Προϋποθέσεις Πρόκλησης Ρευστοποίησης των Εδαφικών σχηματισμών.....	10
2.4.1. Χάρτες Κλίμακας Περιφέρειας.....	11
2.4.1.1. Γεωλογική Ηλικία Εδαφικών Σχηματισμών.....	11
2.4.1.2. Γεωμορφολογικά Κριτήρια.....	12
2.4.1.3. Σεισμικότητα.....	12
2.4.1.4. Υδροφόρος Ορίζοντας.....	15
2.4.1.5. Ιστορικά Περιστατικά.....	16
2.4.2. Χάρτες Τοπικής Κλίμακας.....	17
2.4.2.1. Σχετική Πυκνότητα/ N_{SPT}	18
2.4.2.2. Κοκκομετρική Σύσταση.....	18
2.4.2.3. Όρια Πλαστικότητας.....	20
3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ – ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ.....	24
3.1. Γενικά.....	24
3.2. Γεωμορφολογία.....	24
3.3. Γεωλογία.....	27
3.3.1. Υποζώνη Παιονίας.....	27
3.3.2. Υποζώνη Πάικου.....	28
3.3.3. Τριτογενείς Αποθέσεις.....	31
3.3.4. Νεογενή και Τεταρτογενή Ιζήματα.....	32
3.4. Γεωμορφολογία Λεκάνης.....	34



3.5. Επικαιροποίηση.....	36
4. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΠΙΔΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΕΔΑΦΙΚΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΛΕΚΑΝΗΣ ΑΞΙΟΥ.....	42
4.1. Γενικά.....	42
4.2. Ψηφιοποίηση του Χάρτη.....	42
4.3. Ταξινόμηση Εδαφικών Σχηματισμών με βάση το Περιβάλλον Απόθεσης.....	43
4.4. Αξιολόγηση – Ομαδοποίηση των Ρευστοποιήσιμων Εδαφικών Σχηματισμών.....	45
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	49
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	 52
 ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ.....	 54

Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό τον εντοπισμό των εδαφικών σχηματισμών που είναι επιδεκτικά σε ρευστοποίηση και το βαθμό αυτής, καθώς και ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης και της έκτασής τους. Το περιεχόμενο της εργασίας αυτής αποτελείται αρχικά από την περιγραφή και τον τρόπο ενεργοποίησης γενικά του φαινομένου της ρευστοποίησης και των κριτηρίων επιδεκτικότητας αυτής καθώς και η μορφή εμφάνισής της στην επιφάνεια της Γης σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις και τα προβλήματα που προκαλούνται στα δομικά έργα, όπως κτήρια, φράγματα κ.α. εξαιτίας της ρευστοποίησης. Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται μία αναφορά στη γεωλογία και τη γεωμορφολογία της περιοχής της λεκάνης του Αξιού, περιοχή στην οποία επικεντρώνεται το θέμα της εργασίας αυτής για έλεγχο της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση. Στο ίδιο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των πετρωμάτων και σχηματισμών που συνιστούν της λεκάνη αυτή καθώς και παρουσίαση της διαδικασίας δημιουργίας του γεωμορφολογικού Χάρτη 3.5, που αποτέλεσε το κύριο δεδομένο πάνω στο οποίο βασίστηκε η μελέτη της περιοχής, που έχει ως αποτέλεσμα την εκπόνηση της εργασίας αυτής. Στο 4^ο Κεφάλαιο, περιγράφεται διεξοδικά ο τρόπος με τον οποίο έγινε η ψηφιοποίηση του Χάρτη 3.5. Στον ψηφιοποιημένο, πλέον, χάρτη (Χάρτης 4.1) έγινε έλεγχος των κριτηρίων επιδεκτικότητας της συγκεκριμένης περιοχής και αξιολόγηση των σχηματισμών σχετικά με την επιδεκτικότητά τους στη ρευστοποίηση και ακολούθησε ταξινόμηση αυτών. Τέλος, στο 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο γίνεται λόγος για τον βαθμό επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση των σχηματισμών της περιοχής της λεκάνης του Αξιού, τη θέση στην οποία βρίσκονται και την έκταση που καλύπτουν, καθώς και την επιρροή που έχουν στα ήδη υπάρχοντα τεχνικά έργα ή σε τυχόν τεχνικά έργα που θα κατασκευαστούν στο μέλλον.

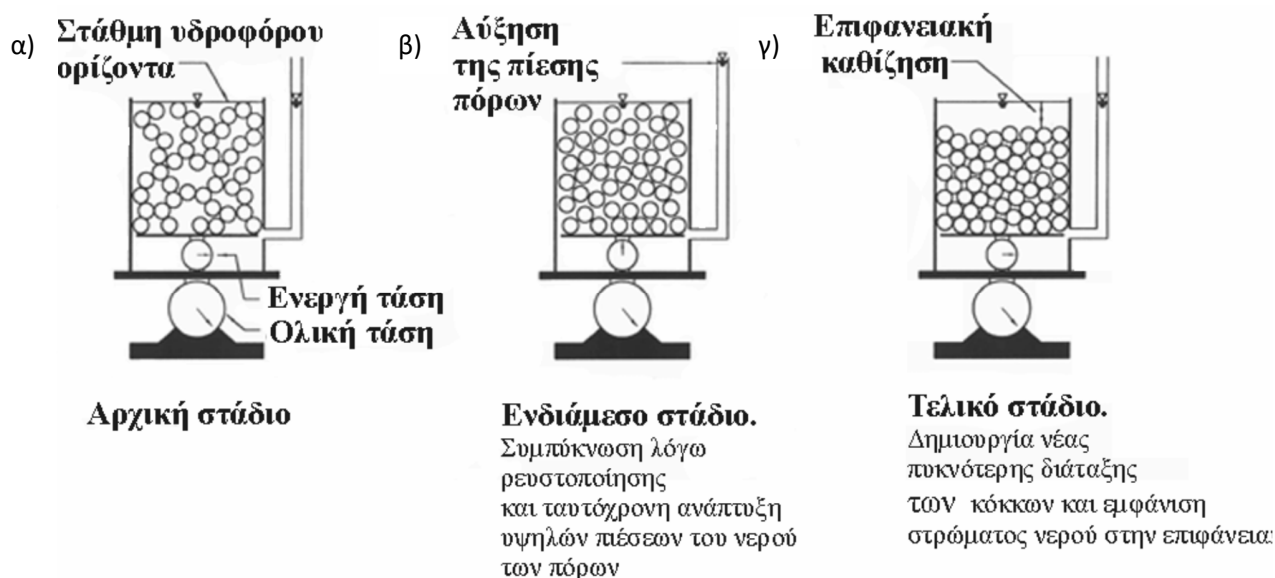
2. ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΑΦΩΝ

2.1. Ρευστοποίηση

Καταγράφοντας ανά τα χρόνια τις καταστροφές μετά από κάθε σεισμικό γεγονός, έχει διαπιστωθεί πως κατά τόπους ένα ποσοστό των καταστροφών αυτών οφείλεται στο φαινόμενο της ρευστοποίησης. Όταν ένας εδαφικός σχηματισμός είναι μη συνεκτικός και κορεσμένος σε νερό, κάτω από αστράγγιστες συνθήκες, και υποστεί σεισμική δόνηση, τότε αυξάνεται η τιμή της πίεσης των πόρων ενώ η διατμητική αντοχή μειώνεται ή και μηδενίζεται, με αποτέλεσμα τα εδαφικά υλικά να συμπυκνώνονται και να προκαλείται η ρευστοποίησή τους. Με άλλα λόγια ο εδαφικός αυτός σχηματισμός μεταπίπτει από την στερεή στην υγρή φάση (Papathanassiou et al., 2005).

2.2. Διαδικασία Σχηματισμού Ρευστοποίησης

Πριν από την εκδήλωση ενός σεισμού ο εδαφικός σχηματισμός βρίσκεται ήδη σε κατάσταση κορεσμού και τα υλικά που τον αποτελούν είναι διατεταγμένα με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να δημιουργούνται κενά μεταξύ τους, στα οποία και αποθηκεύεται το νερό (Σχήμα 2.1α). Κατά την διάρκεια της σεισμικής δόνησης αναπτύσσονται δυνατές κυκλικές φορτίσεις ικανές να αλλάξουν τον όγκο του εδαφικού υλικού, αυτό όμως αποτρέπεται λόγω του αποθηκευμένου νερού στα κενά. Πιο συγκεκριμένα, οι φορτίσεις αυτές δεν μπορούν να διαφύγουν λόγω των αστράγγιστων συνθηκών που επικρατούν, με αποτέλεσμα να ασκούν πίεση στο εγκλωβισμένο νερό, στο οποίο η πίεση των πόρων (u) αυξάνεται απότομα, ενώ ταυτόχρονα η διατμητική αντοχή του εδαφικού σχηματισμού παρουσιάζει μείωση ή ακόμα και μηδενισμό, σύμφωνα με το νόμο του Coulomb.



Σχήμα 2.1: Κατάσταση των εδαφικών υλικών, α) Πριν τη σεισμική δόνηση, β) Κατά τη διάρκεια της σεισμικής δόνησης και γ) Μετά τη σεισμική δόνηση. (τροποποιημένο από Obermeier et al., 2005 και Papathanassiou et al., 2005).

$$\tau = \sigma'_v \tan \phi', \quad \text{όπου } \sigma'_v = \sigma - u$$

, και όπου σ = τάση

σ'_v = ενεργή τάση

ϕ' = ενεργός γωνία τριβής

u = πίεση πόρων

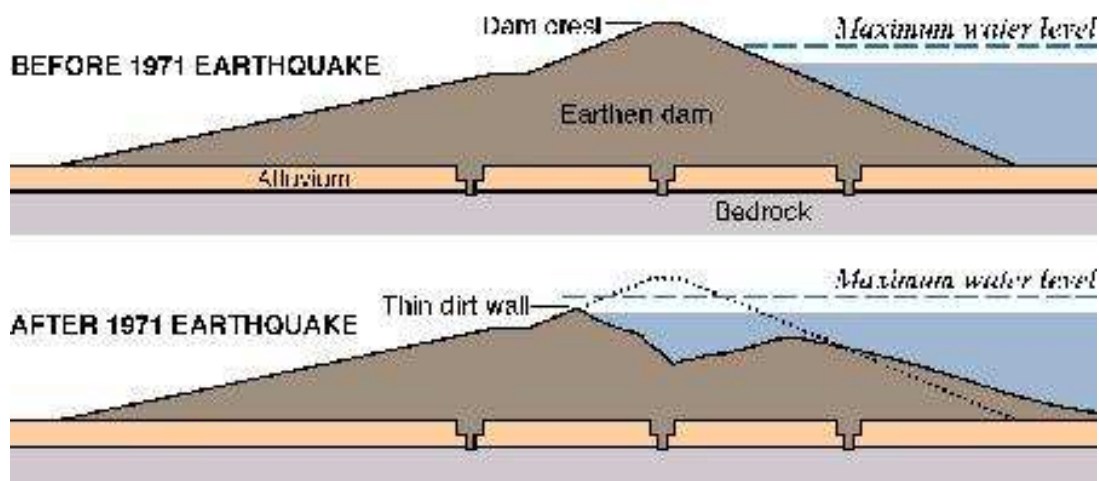
Η διαδικασία αυτή καταστρέφει τον δομικό ιστό των κόκκων προκαλώντας μείωση των κενών μεταξύ τους, δηλαδή οδηγεί στη συμπίκνωσή τους (Σχήμα 2.1β). Μετά το πέρας της σεισμικής δόνησης η συμπίκνωση των κόκκων είναι πλέον στο μέγιστο βαθμό, και ως αντίκτυπο αυτού είναι η επιφανειακή καθίζηση του εδάφους και η εμφάνιση ενός επιφανειακού στρώματος νερού. Λόγω της συμπίκνωσης έχει αυξηθεί η πυκνότητα του εδαφικού υλικού και το νερό που πριν βρισκόταν στα κενά, τώρα έχει ανέβει στην επιφάνεια μέσα από μία ή περισσότερες οδούς διαφυγής (Σχήμα 2.1γ). Το νερό μαζί με τα διάφορα εδαφικά υλικά που συμπαρασέρνει κατά τη διαφυγή του, ρέει στην επιφάνεια, δηλαδή προκαλείται ρευστοποίηση. Πρέπει να τονιστεί πως η ροή αυτή μπορεί να συνεχιστεί και μετά το πέρας του σεισμού, έως ότου αποκατασταθεί η υδραυλική ισορροπία (Papathanassiou et al., 2005).

2.3. Κατηγορίες Ρευστοποίησης

Με βάση τον μηχανισμό γένεσης η ρευστοποίηση διακρίνεται σε εδαφική ροή και ανακυκλική κινητικότητα.

2.3.1. Εδαφική Ροή

Η εδαφική ροή είναι ένα είδος ρευστοποίησης που δεν έχει συχνή εμφάνιση, αλλά όταν συμβαίνει έχει πολύ σοβαρές επιπτώσεις. Η εδαφική ροή εκδηλώνεται σε εδάφη που είναι τοποθετημένα σε πρηνή με μεγάλη κλίση και οφείλεται στον συνδυασμό της ρευστοποίησης και αστοχίας του ίδιου του πρηνούς. Για να συμβεί εδαφική ροή θα πρέπει η στατική διατμητική τάση του εδάφους να είναι μεγαλύτερη από τη διατμητική αντοχή του (Kramer., 1996). Η εδαφική ροή είναι ένα φαινόμενο που κάνει την εμφάνισή του πολύ απότομα και η μετακίνηση των εδαφικών υλικών γίνεται σε μεγάλες αποστάσεις σε μικρό χρονικό διάστημα (Papathanassiou et al., 2005).



Σχήμα 2.2: Το φράγμα Lower San Fernando πριν και μετά την εδαφική ροή (Boore et al., 1995).

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εδαφικής ροής είναι η ρευστοποίηση του φράγματος Lower San Fernando στην Καλιφόρνια το 1971. Το φράγμα αυτό ήταν ένα χωμάτινο φράγμα, όπου ο πυρήνας ήταν κατασκευασμένος από αργιλικό αδιαπέρατο υλικό, ενώ τα στρώματα στήριξης του πυρήνα αποτελούνταν κυρίως από αμμοχάλικα. Ένα κατασκευαστικό λάθος στα φίλτρα του φράγματος είχε ως αποτέλεσμα να διεισδύσει το νερό του ταμειυτήρα στον πυρήνα, δηλαδή να κορεστεί σε νερό η άργιλος και να σχηματιστούν αστράγγιστες συνθήκες. Αυτό σε συνδυασμό με τη μεγάλη κλίση του πρανούς του φράγματος αποτέλεσαν τις κατάλληλες συνθήκες για να εκδηλωθεί εδαφική ροή (Lopez and Ouerol., 2007).



Εικόνα 2.1 α : Το φράγμα Lower San Fernando μετά την εδαφική ροή (Dahms., 2004).

Έτσι όταν έγινε ο σεισμός το 1971 με μέγεθος 6.6 ρίχτερ αναπτύχθηκαν δυνατές φορτίσεις που οδήγησαν στην εδαφική ροή ενός μεγάλου τμήματος του φράγματος (Dahms., 2004).

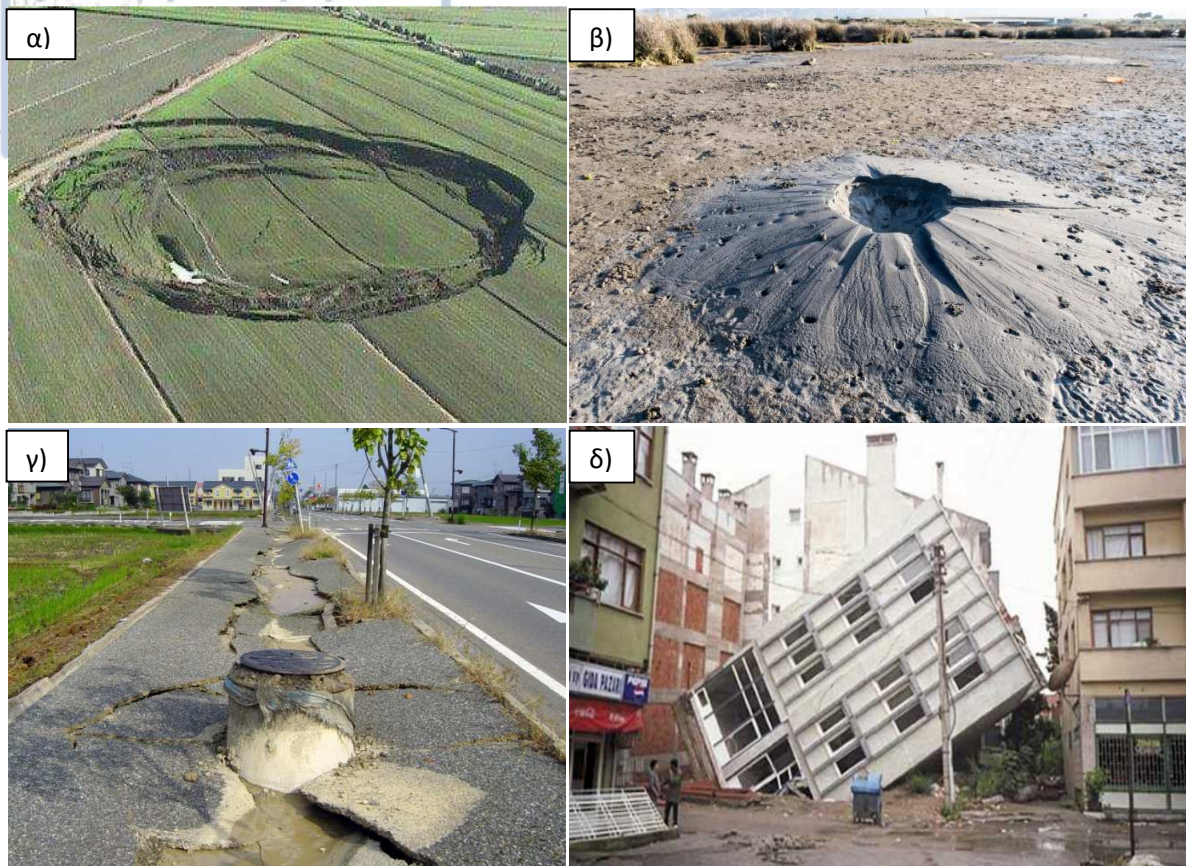


Εικόνα 2.1 β : Τα ανάντη του φράγματος Lower San Fernando μετά την εδαφική ροή (Dahms., 2004).

2.3.2. Ανακυκλική Κινητικότητα

Η ανακυκλική κινητικότητα έχει πιο συχνή εμφάνιση από την εδαφική ροή και οι επιπτώσεις που δημιουργεί κυμαίνονται από ελαφριές έως και σοβαρές. Ανακυκλική κινητικότητα εμφανίζεται σε εδάφη που βρίσκονται σε περιοχές χωρίς κλίση ή σε περιοχές που η κλίση τους φτάνει έως τις 3°. Για να εκδηλωθεί αυτό το είδος της ρευστοποίησης πρέπει η στατική διατμητική τάση του εδάφους να είναι μικρότερη από τη διατμητική αντοχή του.

Οι επιπτώσεις που μπορεί να συμβούν εξαιτίας της ανακυκλικής κινητικότητας είναι καθίζηση του εδάφους (εικόνα 2.2α), κώνοι άμμου που δείχνουν την οδό διαφυγής του νερού από την ρευστοποίηση (εικόνα 2.2β). Αν αυτά εκδηλωθούν σε κατοικήσιμες περιοχές τότε ως συνέπεια αυτών είναι οι ρωγμές στα οδοστρώματα (εικόνα 2.2γ) και η κλίση και ανατροπή κτιρίων (εικόνα 2.2δ).



Εικόνα 2.2 : α) Καθίζηση, β) Κώνοι άμμου, γ) Ρωγμές στο οδόστρωμα, δ) Κλίση και ανατροπή (Luff., 2016).

Τα κριτήρια επιδεκτικότητας που θα αναλυθούν στη συνέχεια αναφέρονται κυρίως σε τέτοιου είδους ρευστοποιήσεις (Papathanassiou et al., 2005).

2.4. Κριτήρια-Προϋποθέσεις Επιδεκτικότητας σε Ρευστοποίηση των Εδαφικών σχηματισμών

Εξετάζοντας ιστορικά γεγονότα και συσχετίζοντας τα φυσικά χαρακτηριστικά των ήδη ρευστοποιημένων εδαφικών υλικών έχουν προκύψει συμπεράσματα που έχουν οδηγήσαν στη διαμόρφωση των κριτηρίων επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών, τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Όταν ένας γεωλόγος καλείται να ερευνήσει μια περιοχή για πιθανή ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών, αρχικά η μελέτη του γίνεται σε χάρτες κλίμακας περιφέρειας και αφού λάβει τις απαιτούμενες πληροφορίες της ευρύτερης περιοχής και μόνο τότε, η μελέτη του επικεντρώνεται στην περιοχή άμεσου ενδιαφέροντος, και σε χάρτες τοπικής κλίμακας.

2.4.1. Χάρτες Κλίμακας Περιφέρειας

2.4.1.1. Γεωλογική Ηλικία Εδαφικών Σχηματισμών

Όσο νεότερος είναι ένας σχηματισμός, τόσο μικρότερη είναι η συνοχή των υλικών που τον αποτελούν, δηλαδή έχει μικρή πυκνότητα. Σύμφωνα με τον Youd (1998) εδάφη που είναι κορεσμένα σε νερό και αποτελούνται από χαλαρές και ψαθυρές αποθέσεις είναι πιο επιδεκτικά σε ρευστοποίηση.



Χάρτης 2.1 : Χάρτης με τις Νεογενείς και Τεταρτογενείς αποθέσεις στον Ελλαδικό χώρο. (Mountrakis., 1985).

Επομένως, αφού οι χαλαρές και ψαθυρές αποθέσεις έχουν αποτεθεί στο πρόσφατο παρελθόν, αυτό σημαίνει πως οι νεότεροι εδαφικοί σχηματισμοί είναι πιο επιδεκτικοί σε ρευστοποίηση, απ'οτι οι παλαιότεροι (Kramer., 1996). Πιο συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ποσοστό ρευστοποίησης έχει παρατηρηθεί σε Ολοκαινικές αποθέσεις, ενώ πολύ λίγες είναι οι εμφανίσεις ρευστοποίησης σε Πλειστοκαινικές αποθέσεις.

Ρευστοποίηση δεν έχει παρατηρηθεί σε αποθέσεις πριν από το Τεταρτογενές (Obermeier., 1996). Στην Ελλάδα οι περιοχές, στις οποίες έχει εκδηλωθεί ρευστοποίηση, συμπίπτουν με ένα μέρος

των γραμμοσκιασμένων περιοχών του Χάρτη 2.1, δηλαδή σε περιοχές με Τεταρτογενείς αποθέσεις (Papathanassiou et al., 2005).

2.4.1.2. Γεωμορφολογικά Κριτήρια

Όπως έχει ήδη αναφερθεί πιο ευάλωτα σε ρευστοποίηση είναι τα κορεσμένα σε νερό εδάφη με καθόλου έως μικρή συνεκτικότητα. Τα εδάφη αυτά αποτίθενται σε περιβάλλοντα όπου οι συνθήκες που επικρατούν επιτρέπουν την δημιουργία τους. Τέτοια περιβάλλοντα είναι οι ποτάμιες, κολλούβιες και αιολικές αποθέσεις, που όταν είναι σε κατάσταση κορεσμού έχουν υψηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση (Kramer., 1996). Περιβάλλοντα όπως αλλουβιακά ριπίδια, αλλουβιακές πεδιάδες και δελταϊκές αποθέσεις εμφανίζουν μικρότερη πιθανότητα για ρευστοποίηση. Αντίθετα λοφώδεις περιοχές και βουνά δεν είναι επιδεκτικά σε ρευστοποίηση καθώς εκεί είναι δύσκολο να επικρατήσουν συνθήκες κατάλληλες για την εκδήλωση ρευστοποίησης (Πίνακας 2.1). Πρέπει να τονιστεί πως χρειάζεται μεγαλύτερη προσοχή στις ανθρωπογενείς αποθέσεις, όπως επιχώσεις και φίλτρα φραγμάτων, διότι αν κατά την κατασκευή τους δεν γίνει η απαιτούμενη συμπίκνωση των υλικών, τότε υπάρχει πολύ μεγάλη πιθανότητα οι αποθέσεις αυτές να ρευστοποιηθούν όταν έρθουν σε κατάσταση κορεσμού (βλ. Σχήμα 2.2) (Papathanassiou et al., 2005).

Κατηγορία	Γεωμορφολογικές ενότητες	Δυναμικό ρευστοποίησης
A	Πρόσφατος ποτάμιος βυθός, παλιός ποτάμιος βυθός, βάλτος	Υψηλή πιθανότητα Ρευστοποίησης
B	Ριπίδια, ποτάμιες προσχώσεις, πλημμυρικές πεδιάδες	Πιθανότητα Ρευστοποίησης
Γ	Λόφοι, βουνά	Μη ρευστοποιήσιμα

Πίνακας 2.1: Ταξινόμηση εδαφών επιδεκτικά σε ρευστοποίηση με βάση γεωμορφολογικά κριτήρια (Iwasaki., 1986), (τροποποιημένο από Papathanassiou et al., 2005).

2.4.1.3. Σεισμικότητα

Για να εκδηλωθεί ρευστοποίηση σε μια περιοχή πρέπει να υπάρχει σεισμική δράση. Η σεισμική δόνηση που θα προκαλέσει την ρευστοποίηση πρέπει να είναι ισχυρή ($PGA > 0,1g$) και η διάρκειά του να είναι μεγαλύτερη από 12-15 δευτερόλεπτα, διότι έτσι αναπτύσσονται μεγαλύτερες δυναμικές φορτίσεις (Papathanassiou et al., 2005).

Σεισμική Επικινδυνότητα	Ένταση Σεισμού
Χαμηλή	0,16g
Μέτρια	0,24g
Μεγάλη	0,36g

Πίνακας 2.2: Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα.

Στην Ελλάδα, που είναι η έκτη πιο σεισμογενής χώρα στον κόσμο, οι περισσότερες εκδηλώσεις ρευστοποίησης έχουν εντοπιστεί σε περιοχές με μέτρια έως μεγάλη σεισμική επικινδυνότητα, οι αντίστοιχες πράσινες και πορτοκαλή περιοχές στον Χάρτη 2.2.

Στη ζώνη χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας μπορεί να γίνει ρευστοποίηση, με μικρότερη πιθανότητα εκδήλωσής της αφού, όπως έχει ήδη προαναφερθεί, η απαιτούμενη ένταση της σεισμικής δόνησης για την εκδήλωση του φαινομένου είναι 0,1g, ενώ η αντίστοιχη ένταση της ζώνης αυτής είναι 0,16g (Ο.Α.Σ.Π., 2003).

Ακόμα, μελέτες έχουν δείξει πως ο προσδιορισμός της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) μιας σεισμικής δόνησης, μπορεί να αποτελέσει δείκτης επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση των εδαφών που υφίστανται τις σεισμικές αυτές φορτίσεις. Οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων εξαρτάται από το βάθος διάδοσής τους είτε αυτό είναι σε συνεκτικά, είτε σε αμμόδη εδάφη (Αθανασόπουλος., 1988).



Χάρτης 2.2: Ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα (από Ο.Α.Σ.Π., 2003).

Στο παρακάτω Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται οι τιμές της ταχύτητας διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) που απαιτούνται έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί το φαινόμενο ρευστοποίησης:

Ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων (V_s)	Επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση εδαφών
≥ 170 m/s	Δεν ρευστοποιείται
170 m/s – 140 m/s	Πιθανότητα ρευστοποίησης
≤ 140 m/s	Άμεσος κίνδυνος ρευστοποίησης

Πίνακας 2.3 : Επικινδυνότητα ρευστοποίησης εδαφών ανάλογα με την ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) (Αθανασόπουλος., 1988).

Το 1978 ο Youd και ο Perkins, συσχετίζοντας τα γεωμορφολογικά κριτήρια και τα κριτήρια σεισμικότητας με το είδος και την ηλικία των αποθέσεων , κατάφεραν να δημιουργήσουν τον παρακάτω πίνακα 2.4, όπου παρουσιάζεται ποιοτικά η επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση του κάθε σχηματισμού ξεχωριστά, κατά την εκδήλωση μιας ισχυρής σεισμικής δόνησης.

Type of Deposit	General Distribution of Cohesionless Sediments in Deposits	Likelihood that Cohesionless Sediments, when saturated, will be Susceptible to Liquefaction (by Age of Deposit)			
		<u>Modern</u>	<u>Holocene</u>	<u>Pleistocene</u>	<u>Pre-Pleistocene</u>
		<u><500 yr</u>	<u>500 yr to 10 ka</u>	<u>10 ka – 1.6 Mya</u>	<u>>1.6 Mya</u>
<i>Continental Deposits</i>					
River Channel	Locally Variable	Very High	High	Low	Very Low
Floodplain	Locally Variable	High	Moderate	Low	Very Low
Alluvial Fan & Plain	Widespread	Moderate	Low	Low	Very Low
Marine Terraces & Plains	Widespread	-	Low	Very Low	Very Low
Delta & Fan-delta	Widespread	High	Moderate	Low	Very Low
Lacustrine & Playa	Variable	High	Moderate	Low	Very Low
Colluvium	Variable	High	Moderate	Low	Very Low
Talus	Widespread	Low	Low	Very Low	Very Low
Dunes	Widespread	High	Moderate	Low	Very Low
Loess	Variable	High	High	High	Unknown
Glacial Till	Variable	Low	Low	Very Low	Very Low
Tuff	Rare	Low	Low	Very Low	Very Low
Tephra	Widespread	High	High	Unknown	Unknown

Residual Soils	Rare	Low	Low	Very Low	Very Low
Sebka	Locally Variable	High	Moderate	Low	Very Low
Coastal Zone					
Delta	Widespread	Very High	High	Low	Very Low
Estuarine	Locally Variable	High	Moderate	Low	Very Low
Beach - High WaveEnergy	Widespread	Moderate	Low	Very Low	Very Low
Beach - Low WaveEnergy	Widespread	High	Moderate	Low	Very Low
Lagoonal	Locally Variable	High	Moderate	Low	Very Low
Fore Shore	Locally Variable	High	Moderate	Low	Very Low
Artificial					
Uncompacted Fill	Variable	Very High	-	-	-
Compacted Fill	Variable	Low	-	-	-

Πίνακας 2.4: Ποιοτική εκτίμηση επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση ιζηματογενών αποθέσεων κατά τη διάρκεια ισχυρής σεισμικής δόνησης (Youd and Perkins., 1978)

2.4.1.4. Υδροφόρος Ορίζοντας

Για να κορεστεί ένας εδαφικός σχηματισμός πρέπει να βρίσκεται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Όπως έχουμε ήδη αναφερθεί οι εδαφικοί σχηματισμοί που είναι πιο κοντα στην επιφάνεια είναι λιγότερο συνεκτικοί , έτσι όταν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ψηλά καθιστά αυτούς τους σχηματισμούς σε κορεσμό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η επιδεκτικότητά τους σε ρευστοποίηση. Αντίθετα όταν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι σε βάθος τότε οι εδαφικοί σχηματισμοί που θα κορεστούν είναι πιο συνεκτικοί λόγω των μεγάλων πιέσεων που δέχονται από το υπερκείμενο βάρος και έχουν παλαιότερη ηλικία, άρα υπάρχει μικρότερη πιθανότητα για ρευστοποίηση. Δηλαδή όσο πιο χαμηλά είναι ο υδροφόρος ορίζοντας τόσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση που θα προβάλλει ο εδαφικός σχηματισμός σε περίπτωση ρευστοποίησης (Youd., 1998). Συγκεκριμένα, ρευστοποίηση έχει παρατηρηθεί σε σχηματισμούς όταν ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε βάθος μικρότερο από 15 μέτρα , αντίθετα σε βάθος μεγαλύτερο των 15 μέτρων δεν υφίσταται ρευστοποίηση (Πίνακας 2.5) (Papathanassiou et al., 2005).

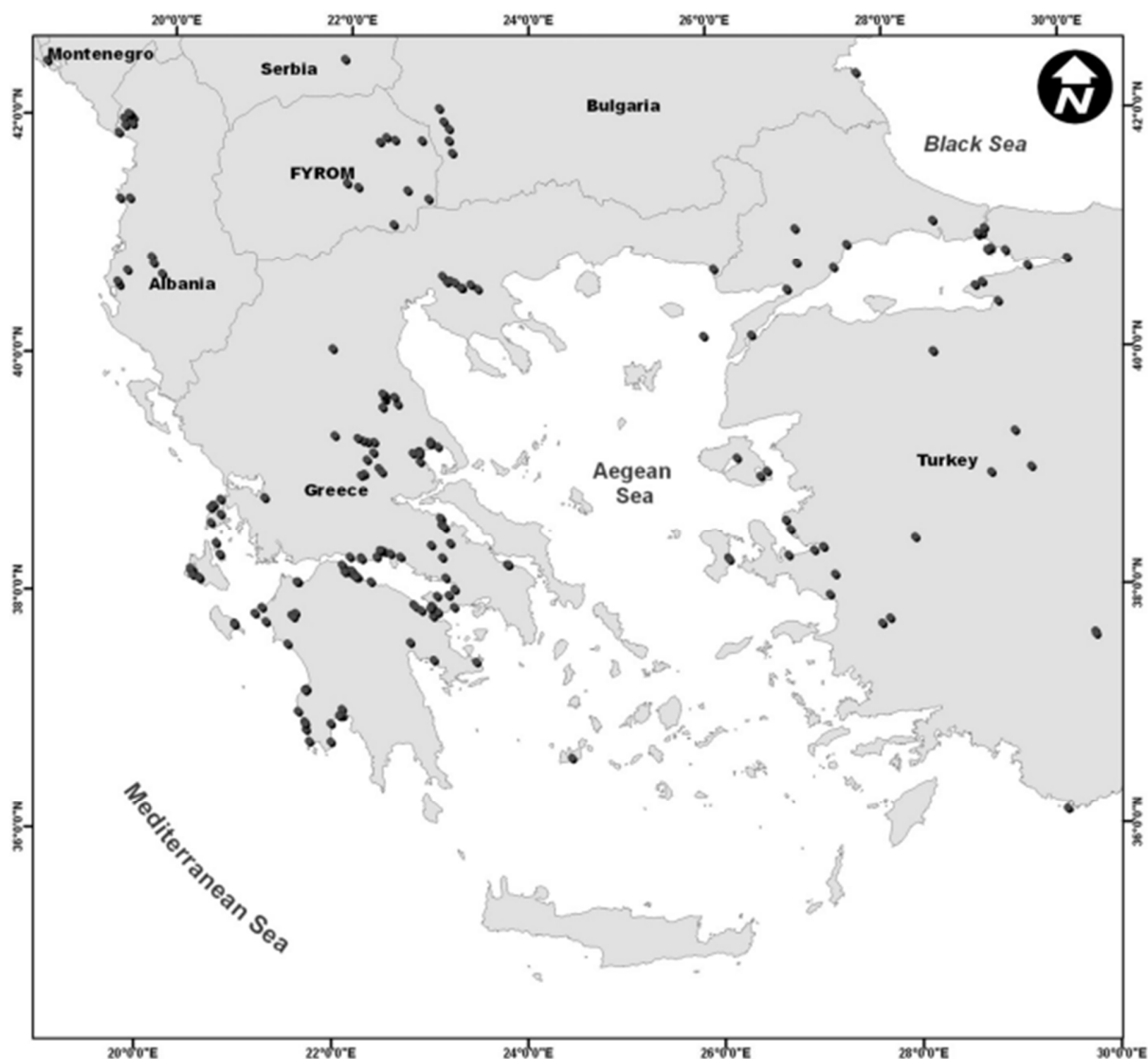
Βάθος στάθμης υδροφόρου ορίζοντα από την επιφάνεια	Επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση
<3m	Πολύ Υψηλή
3-6m	Υψηλή
6-10m	Μέτρια
10-15m	Χαμηλή
>15m	Πολύ Χαμηλή

Πίνακας 2.5: Επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών ανάλογα με το βάθος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (Youd., 1998), (τροποποιημένο από Papathanassiou et al., 2005).

2.4.1.5. Ιστορικά Περιστατικά

Σύμφωνα με τον Kramer (1996) η εξέταση των ιστορικών εμφανίσεων ρευστοποίησης υποδεικνύει ποιες περιοχές είναι πιο επιδεκτικές σε ρευστοποίηση. Πιο συγκεκριμένα σε περιοχές που έχει εκδηλωθεί ρευστοποίηση στο παρελθόν το δυναμικό ρευστοποίησης των εδαφικών σχηματισμών είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο δυναμικό σε περιοχές που δεν έχει καταγραφεί ρευστοποίηση στο παρελθόν (Iwasaki., 1986). Απαραίτητη προϋπόθεση για να εκδηλωθεί ρευστοποίηση πάνω από μια φορά σε μια περιοχή, είναι να επικρατούν οι ίδιες γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες (Youd., 1984a). Όταν η επαναληψιμότητα της ρευστοποίησης γίνεται σε μικρό χρονικό διάστημα, όπου οι οδοί διαφυγής του μίγματος άμμου και νερού δεν έχουν το χρόνο να κλείσουν, τότε η εκτόνωση της υπερπίεσης των πόρων γίνεται από τις προϋπάρχουσες οδούς διαφυγής (Obermeier., 1996; Papathanassiou et al., 2005).

Μια περιοχή για να οριστεί επιδεκτική σε ρευστοποίηση δεν αρκεί να εξεταστούν μόνο παλαιότερα περιστατικά, αλλά είναι απαραίτητο να πληρεί όλα τα κριτήρια. Στην Ελλάδα φαινόμενα ρευστοποίησης που έχουν καταγραφεί (Χάρτης 2.3) συμπίπτουν με τις περιοχές με τεταρτογενείς αποθέσεις (Χάρτης 2.1) και υψηλή σεισμικότητα (Χάρτης 2.2) (Papathanassiou and Pavlides., 2011).



Χάρτης 2.3: Φαινόμενα ρευστοποίησης στην Ελλάδα. (Papathanassiou et al., 2005)

2.4.2. Χάρτες Τοπικής Κλίμακας

Η μελέτη σε χάρτες κλίμακας περιφέρειας, που έχει προηγηθεί, μας υποδεικνύει τους σχηματισμούς που είναι πιο ευάλωτοι στη ρευστοποίηση, και για τον λόγο αυτό ακολουθεί πιο λεπτομερή έρευνα αυτών η οποία γίνεται μέσω των χαρτών τοπικής κλίμακας. Οι χάρτες αυτοί αποτελούν μεγάλη βοήθεια για τον εντοπισμό των εδαφικών σχηματισμών που είναι επιδεκτικά σε ρευστοποίηση, αφού παρέχουν λεπτομερή στοιχεία για τη σύστασή τους.

2.4.2.1. Σχετική Πυκνότητα/ N_{SPT}

Όταν ένας εδαφικός σχηματισμός έχει φτωχή διάταξη των κόκκων του, τότε σχηματίζεται μεγαλύτερο κενό μεταξύ τους, άρα και η τιμή του δείκτη πόρων αυξάνεται.

Η ταξινόμηση των αμμώδων εδαφικών σχηματισμών γίνεται σύμφωνα με τον αριθμό των κρούσεων N_{SPT} της επί τόπου δοκιμής τυποποιημένης διείσδυσης SPT. Έτσι οι Terzaghi και Peck (1967) χρησιμοποιώντας την ταξινόμηση αυτή συσχέτισαν τον αριθμό N_{SPT} με τη σχετική πυκνότητα των αμμώδων εδαφών (Πίνακας 2.6). Αμμόδη εδάφη που χαρακτηρίζονται πολύ χαλαρά έως χαλαρά με N_{SPT} 0 έως 10 και σχετική πυκνότητα (D_r) 0 έως 35 % έχουν υψηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση. Άμμοι που χαρακτηρίζονται ενδιάμεσα με N_{SPT} 10 έως 30 και σχετική πυκνότητα (D_r) 35 έως 65 % έχουν μικρότερη πιθανότητα για ρευστοποίησης, ενώ πυκνές και πολύ πυκνές άμμοι δεν ρευστοποιούνται (Papathanassiou et al. 2005).

Αριθμός κρούσεων N	Χαρακτηρισμός	Σχετική Πυκνότητα D_r (%)
0-4	Πολύ χαλαρό	0-15
4-10	Χαλαρό	15-35
10-30	Ενδιάμεσο	35-65
30-50	Πυκνό	65-85
>50	Πολύ πυκνό	85-100

Πίνακας 2.6: Σχετική πυκνότητα άμμων ανάλογα με τον αριθμό κρούσεων N_{SPT} της δοκιμής τυποποιημένης διείσδυσης SPT (Obermeier et al., 2005), (τροποποιημένο από Papathanassiou et al., 2005).

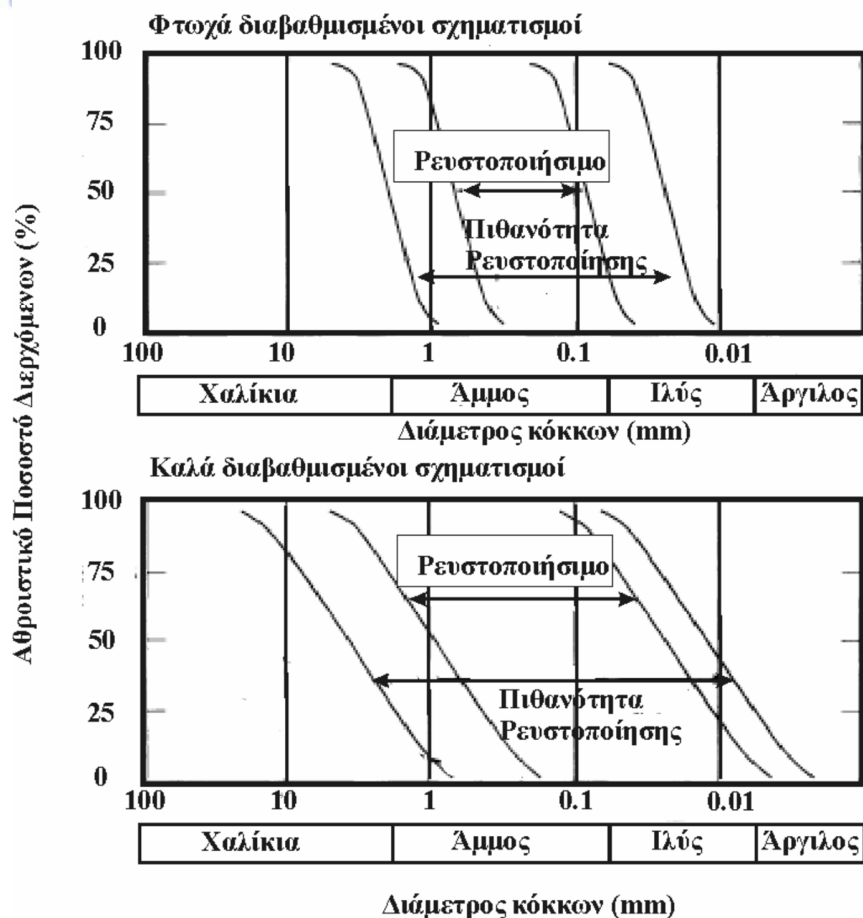
2.4.2.2. Κοκκομετρική Σύσταση

Η κοκκομετρική σύσταση ενός εδαφικού σχηματισμού είναι ο κύριος παράγοντας που καθορίζει την επιδεκτικότητά του σε ρευστοποίηση. Μελέτες έχουν δείξει πως εδάφη που αποτελούνται από καθαρή άμμο είναι επιδεκτικότερα σε ρευστοποίηση ενώ μικρότερη πιθανότητα ρευστοποίησης έχουν τα λεπτόκοκκα εδάφη. Ακόμα, η συμμετοχή αργιλικού υλικού σ' αυτά, που λειτουργεί ως συγκολλητικό υλικό, αυξάνει την συνοχή c . Τα χονδρόκοκκα εδάφη παρουσιάζουν και αυτά μικρή πιθανότητα ρευστοποίησης αφού λόγω του μεγάλου πορώδους τους το νερό διαφεύγει και δεν επιτρέπει την δημιουργία αστράγγιστων συνθηκών. Σε περίπτωση που περιβάλλεται από αργιλικό υλικό τότε δημιουργούνται αστράγγιστες συνθήκες που και πάλι όμως η επιδεκτικότητά του σε ρευστοποίηση είναι μικρή.

Το 2003 οι Seed et al. θεώρησαν όμως πως όταν ένας αδρόκοκκος εδαφικός σχηματισμός έχει μεγάλες διαστάσεις τότε η παρουσία αργιλικού υλικού σε αυτό ή γύρο από αυτό το καθιστά αδιαπέρατο, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η επιδεκτικότητά του σε ρευστοποίηση.

Επίσης, στην επιδεκτικότητα προς ρευστοποίηση παίζει ρόλο και η διαβάθμιση των κόκκων. Σε καλά διαβαθμισμένα αμμόδη εδάφη, όπου σχηματίζεται μικρό κενό μεταξύ των κόκκων δεν υπάρχει η δυνατότητα να διεισδύσουν λεπτότερα αργιλικά υλικά έτσι ώστε να τα συγκολλήσουν, ενώ αντίθετα στα εδάφη με φτωχή διαβάθμιση, υπάρχει χώρος ανάμεσα από τους κόκκους άμμου να εισχωρήσει λεπτότερο αργιλικό υλικό και έτσι να αυξηθεί η συνοχή τους c , με συνέπεια την ανάπτυξη μικρότερων πιέσεων νερού από τους πόρους όταν αυτό βρίσκεται κάτω από αστράγγιστες συνθήκες (Kramer., 1996) (Σχήμα 2.3). Ως επακόλουθο των παραπάνω, διαπιστώνεται πως αποστρογγυλεμένοι κόκκοι έχουν πιά κακή διαβάθμιση από τους γωνιώδους,

και άρα μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση (Kramer., 1996) (Papathanassiou et al., 2005).



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα πιθανότητας ρευστοποίησης εδαφών ανάλογα με την κοκκομετρική τους καμπύλη (τροποποιημένο από Tsuchida., 1971 και Papathanassiou et al., 2005).

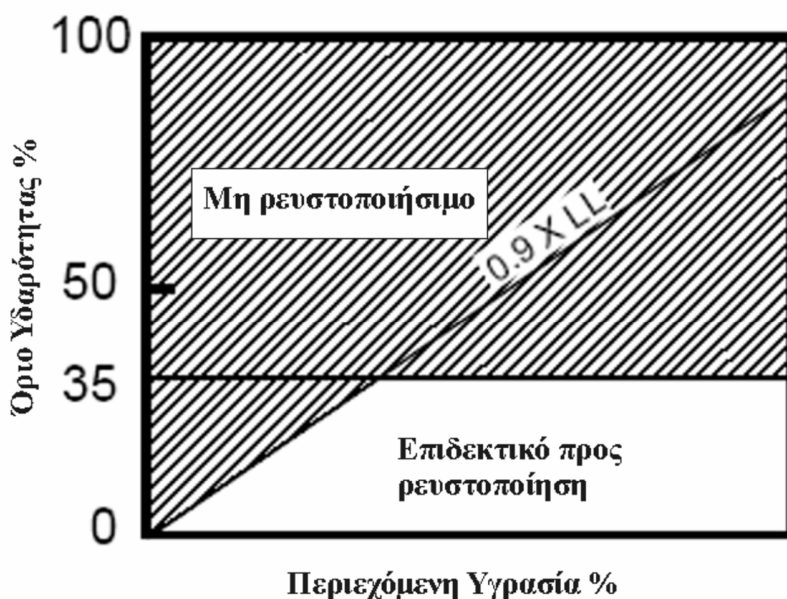
2.4.2.3. Όρια Πλαστικότητας

Με βάση την κοκκομετρική σύσταση, ανάμεσα στα λεπτόκοκκα και στα αμμώδη υλικά με μεγάλο ποσοστό συμμετοχής λεπτόκοκκων δεν υπάρχει καθαρός διαχωρισμός αυτών, άρα δεν υπάρχει και ακριβής ένδειξη για την επιδεκτικότητάς τους σε ρευστοποίηση. Για αυτό το λόγο έγιναν μελέτες πάνω στην πλαστικότητά τους, που υποδεικνύει την συμπεριφορά τους ως προς την ρευστοποίηση.

Το 1979 ο Wang στη Κίνα ήταν ο πρώτος που προσπάθησε να συσχετίσει τα φυσικά χαρακτηριστικά των αργίλων και ιλύων, μελετώντας το ποσοστό συμμετοχής των λεπτόκοκκων υλικών και τις τιμές ορίων Atterberg σε ρευστοποιήσεις που ήδη είχαν πραγματοποιηθεί σε

λεπτόκοκκα εδάφη. Τα συμπεράσματα της μελέτης του είναι γνωστά ως <<Κινέζικα Κριτήρια>>.

Το 1982 οι Seed και Idriss τροποποίησαν τα <<Κινέζικα Κριτήρια>>, θεωρώντας πως τα αργιλικά υλικά είναι μη ρευστοποιήσιμα (γραμμοσκιασμένα περιοχή στο Σχήμα 2.4), ενώ για να χαρακτηριστεί ένας εδαφικός σχηματισμός ως ρευστοποιήσιμος (λευκή περιοχή του Σχήματος 2.4) πρέπει το ποσοστό των λεπτόκοκκων ($<0.005\text{mm}$) να είναι κάτω από 15 %, το όριο υδαρότητας να είναι κάτω από 35% και η περιεχόμενη υγρασία να είναι μεγαλύτερη κατά 90 % από το όριο υδαρότητας (Papathanassiou et al., 2005).



Σχήμα 2.4: Τροποποιημένα «Κινέζικα κριτήρια» (τροποποιημένο από Wang., 1979; Seed και Idriss., 1982 και Papathanassiou et al., 2005).

Το 1992 ο Koester υπολόγισε το όριο υδαρότητας στις Η.Π.Α. χρησιμοποιώντας τη συσκευή Casagrande, και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι διαφέρει κατά τέσσερις μονάδες από το αντίστοιχο όριο υδαρότητας που προτείνεται στα <<Κινέζικα Κριτήρια>>. Έτσι, με βάση τα παραπάνω τροποποίησε τη τιμή του ορίου της υδαρότητας (LL) σε 31%.

Το 2000 οι Andrews και Martin απέδειξαν την ισχύ των <<Κινέζικων Κριτηρίων>> και βασιζόμενοι στις Αμερικανικές προδιαγραφές τα τροποποίησαν. Οι αλλαγές που έκαναν είναι αυτές στον Πίνακα 2.7, και στηρίχθηκαν στο γεγονός πως η διάμετρος των αργιλικών λεπτόκοκκων υλικών είναι μικρότερη από $0,002\text{mm}$ και όχι $0,005\text{mm}$ που ήταν στις αρχικές υποδείξεις των <<Κινέζικων Κριτηρίων>> (Papathanassiou et al., 2005).

	Όριο Υδαρότητας, LL<32	Όριο Υδαρότητας, LL>32
Ποσοστό κόκκων μεγέθους αργίλου < 10%	Επιδεκτικό	Περαιτέρω διερεύνηση κρίνεται απαραίτητη
Ποσοστό κόκκων μεγέθους αργίλου > 10%	Περαιτέρω διερεύνηση κρίνεται απαραίτητη	Μη Επιδεκτικό

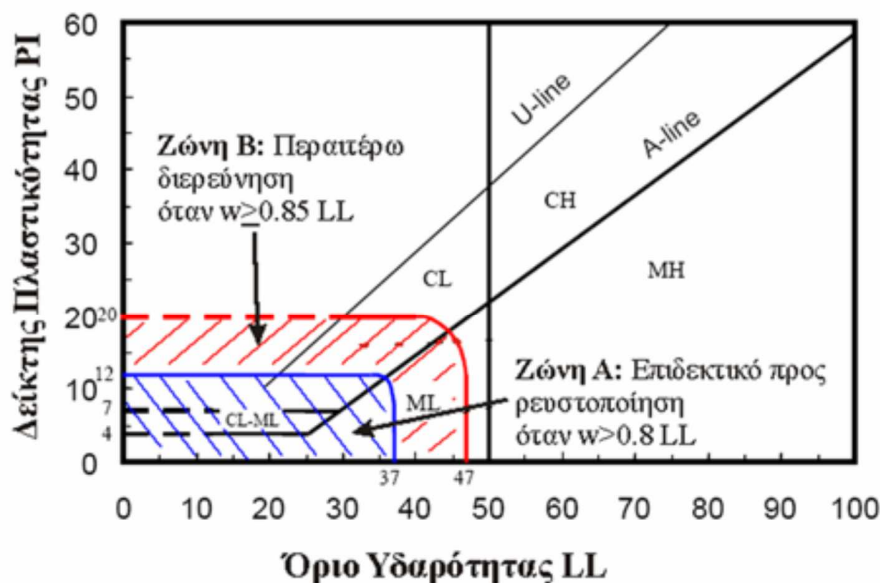
Πίνακας 2.7: Κριτήρια επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση ιλυωδών και αργιλικών άμμων (τροποποιημένο από Andrews και Martin., 2000 και Papathanassiou et al., 2005).

Το 2003 οι Seed et al μελετώντας τα φαινόμενα ρευστοποίησης στις πόλεις Adapazari στη Τουρκία και Wu Feng, Yuan Lin και Nantou στη Ταϊβάν που προκλήθηκαν το 1999 απο τους σεισμούς Kocaeli και Chi-Chi αντίστοιχα, παρατήρησαν ότι έρχονται σε αντίθεση με τα <<Κινέζικα Κριτήρια>>, διότι τα εδάφη που ρευστοποιήθηκαν σύμφωνα με τα <<Κινέζικα Κριτήρια>> ήταν μη ρευστοποιήσιμα. Έτσι οι Seed et al το 2003 όρισαν ότι δεν πρέπει να μελετάται το ποσοστό των αργιλικών υλικών, όπως υποδεικνύουν τα <<Κινέζικα Κριτήρια>>, αλλά το ποσοστό των αργιλικών ορυκτών και η ενεργότητά τους. Τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 2.8 και στο Σχήμα 2.5 (Green and Ziotopoulou., 2015).

Ζώνη (Σχήμα 2.3)	Δείκτης Πλαστικότητας (PI)	Όριο Υδαρότητας (LL)	Περιεχόμενη Υγρασία	Επιδεκτικότητα σε Ρευστοποίηση
A	<12	<37	>0,8xLL	Εν δυνάμει Ρευστοποιήσιμα
B	<20	<47	≥0,85xLL	Επιδεκτικά σε Ρευστοποίηση
C	>20	>47	<0.8xLL	Μη Ρευστοποιήσιμα

Πίνακας 2.8: Κριτήρια επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών (τροποποιημένο από Seed et al., 2003).

Τα αργιλικά εδάφη χαμηλής πλαστικότητας και τα ιλυώδη εδάφη χαμηλής πλαστικότητας, που στο Σχήμα 2.5 συμβολίζονται με CL και ML αντίστοιχα στη ζώνη B, χαρακτηρίζονται ως <<ευαίσθητα>> διότι έχουν μειωμένη αντοχή, και επομένως είναι περισσότερο επιδεκτικά σε ρευστοποίηση. Έτσι τα κριτήρια που όρισε ο Youd (1998) για τα συγκεκριμένα εδάφη είναι αυτά στον παρακάτω Πίνακα 2.9 (Green and Ziotopoulou., 2015).

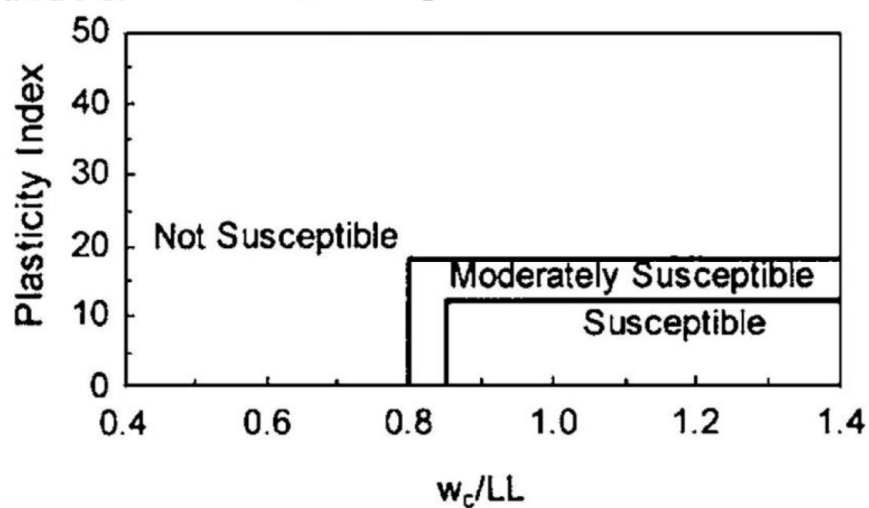


Σχήμα 2.5: Κριτήρια επιδεκτικότητας προς ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών (τροποποιημένο από Seed et al., 2003 και Papathanassiou et al., 2005).

Ζώνη (Σχήμα 2.3)	Τιμή ευαισθησίας	Όριο Υδαρότητας (LL)	Περιεχόμενη Υγρασία	N _{SPT}
CL και ML	>4	<40	>0,9xLL	<5

Πίνακας 2.9: Κριτήρια επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση εδαφών τύπου CL και ML (Youd., 1998).

Η πιο πρόσφατη εκτίμηση για την επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση λεπτόκοκκων εδαφών προέρχεται από τους Bray και Sancio το 2006, οι οποίοι πρόσθεσαν και αυτοί όπως οι Seed et al, μια ενδιάμεση ζώνη μεταξύ της των επιδεκτικών (Susceptible) και μη επιδεκτικών (Not Susceptible) προς ρευστοποίηση εδαφών. Η ζώνη αυτή χαρακτηρίζεται ως ζώνη πιθανής ρευστοποίησης (Moderately Susceptible). Οι Bray και Sancio παρατήρησαν ότι είναι πολλοί οι παράγοντες που καθορίζουν τα εδάφη που ανήκουν στις ζώνες επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση και πιθανής ρευστοποίησης, και η πρότασή τους ήταν ότι στα εδάφη αυτά πρέπει να γίνεται δειγματοληψία και περαιτέρω έλεγχος για τον καθορισμό της επιδεκτικότητας και της αντοχής τους ως προς την ρευστοποίηση. Αντίθετα, οι Seed et al, υποστήριζαν ότι η απλοποιημένη διαδικασία ήταν αρκετή έτσι ώστε να αξιολογηθεί η πιθανότητα για ρευστοποίηση των εδαφών της ζώνης A (Σχήμα 2.5), ζώνη που αντιστοιχεί στην ζώνη επιδεκτικότητας των Bray και Sancio. Τα κριτήρια των Bray και Sancio βασίζονται στο γεγονός ότι η περιεκτικότητα των λεπτόκοκκων υλικών στα αμμώδη εδάφη είναι μεγαλύτερη του 50%, ανεξάρτητα από την πλαστικότητα τους. Επομένως, τα κριτήρια αυτά βρίσκουν εφαρμογή μόνο σε εδάφη που η περιεκτικότητα των λεπτόκοκκων υλικών είναι πολύ μεγαλύτερη από το όριο συμμετοχής τους (Green and Ziotopoulou., 2015).



Σχήμα 2.6: Κριτήρια επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση (Bray & Sancio., 2006).

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΗ – ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ

3.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναλυτική περιγραφή της γεωλογίας και της γεωμορφολογίας τόσο της περιοχής της λεκάνης του Αξιού όσο και της ευρύτερης περιοχής, δηλαδή στα τμήματα που επηρεάζονται από το επιφανειακό αυτό υδρογραφικό δίκτυο. Η αναφορά αυτή γίνεται έτσι ώστε να μπορεί να γίνει η ταξινόμηση και αξιολόγηση των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής στο επόμενο κεφάλαιο, κάτι που αποτελεί βασικό στοιχείο της συγκεκριμένης εργασίας.

Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται αναφορά στη διαδικασία δημιουργίας του Χάρτη 3.5, που για τη κατασκευή του δεν υπήρχαν οι απαραίτητες πληροφορίες και για τον λόγο αυτό ο Ghilardi έκανε πολλές νέες επί τόπου αλλά και στο εργαστήριο δοκιμές. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα εκτός από τη δημιουργία του ίδιου του χάρτη, να ληφθούν και άλλες χρήσιμες πληροφορίες όπως ο τρόπος λειτουργίας των επιφανειακών υδάτων ανά τα χρόνια, της κοκκομετρίας των εδαφικών σχηματισμών κ.α. Πάνω σε αυτό το χάρτη στηρίχθηκε η συγκεκριμένη εργασία, καθώς με βάση αυτόν έγινε αποτύπωση και κατ' επέκταση, δημιουργία ψηφιακού χάρτη της περιοχής της λεκάνης του Αξιού, κάτι που μέχρι σήμερα δεν υπήρχε.

3.2. Γεωμορφολογία

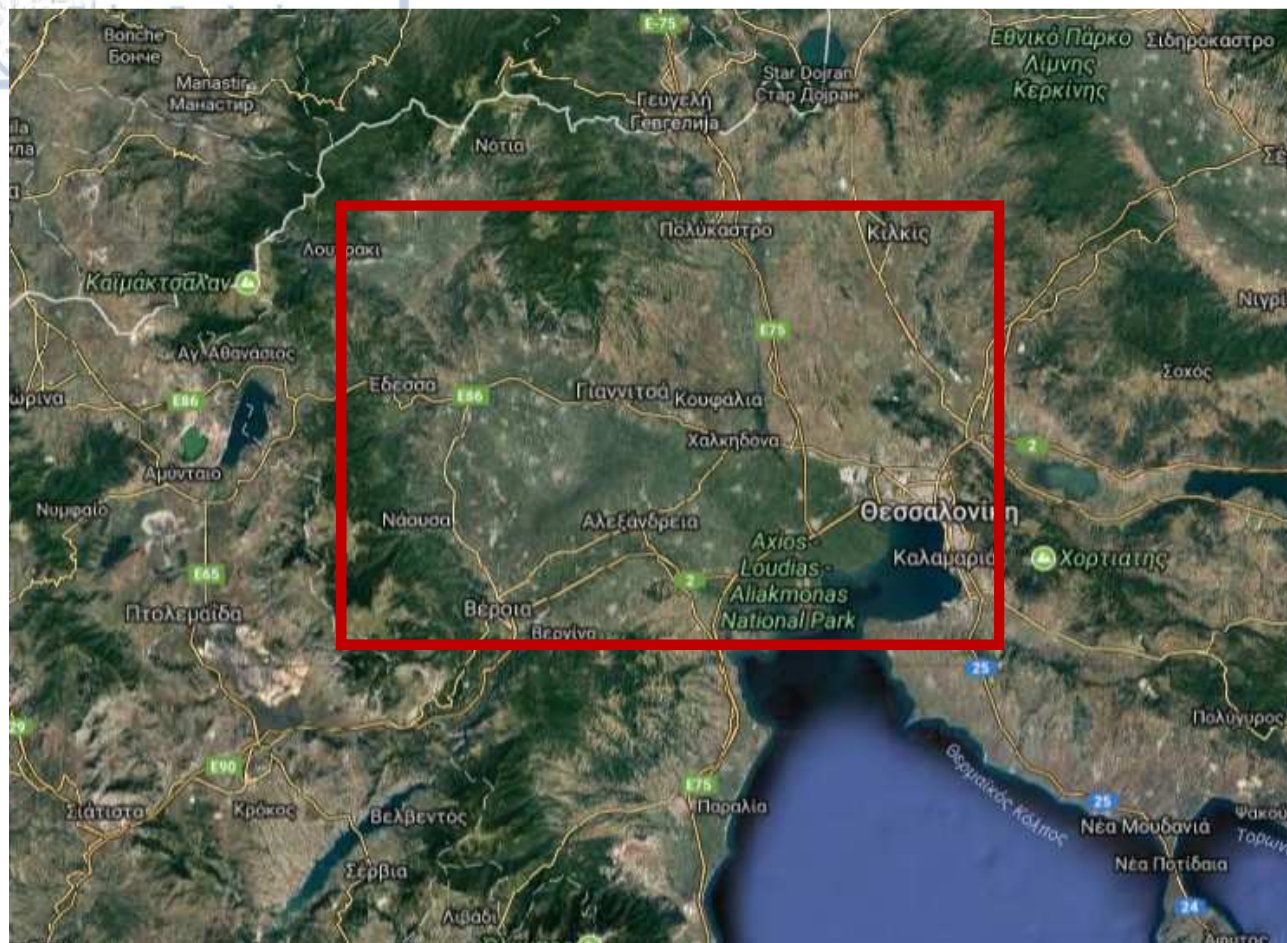
Η λεκάνη απορροής του Αξιού ποταμού εκτείνεται σε δυο χώρες, στην ΠΓΔΜ όπου και αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα της, περίπου το 80% της συνολικής έκτασης, και στην Ελλάδα, τμήμα το οποίο είναι το κύριο αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας, όπως έχει αποτυπωθεί στον Χάρτη 3.1 με κόκκινο πλαίσιο, και θα γίνει λεπτομερή ανάλυσή του που θα παρουσιαστεί στη συνέχεια.

Η συνολική έκταση της λεκάνης είναι 20.061 km² (Χάρτης 2.2) από τα οποία μόλις τα 1.457 km² βρίσκονται στον ελλαδικό χώρο.

Η λεκάνη του Αξιού διακρίνεται σε δυο τμήματα:

- **Το βόρειο** : είναι το πεδινό τμήμα Ευζώνων – Ειδομένης και
- **Το νότιο** : είναι το κύριο τμήμα της λεκάνης και αποτελεί το νότιο πεδινό τμήμα.

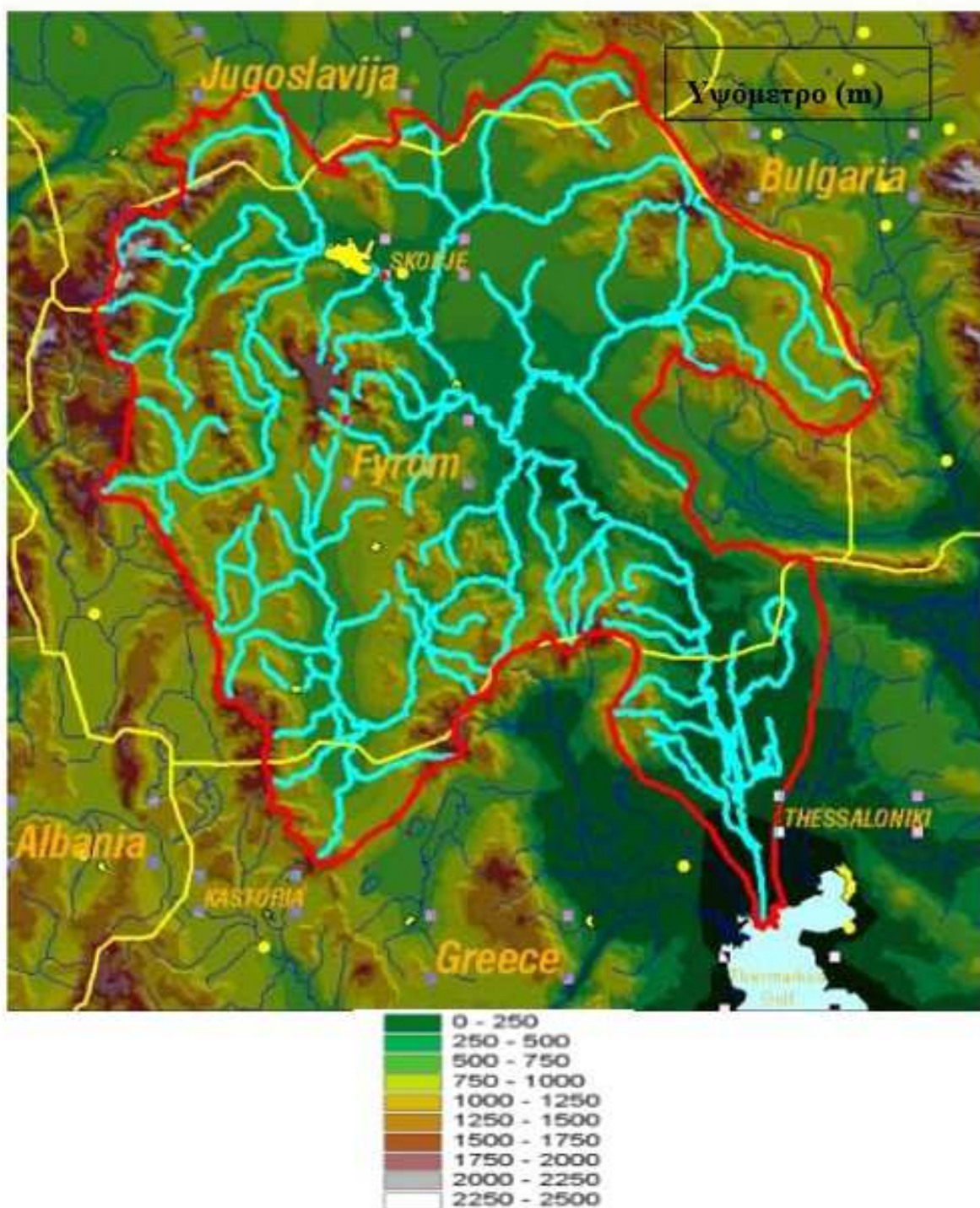
Τα δυο αυτά πεδινά τμήματα της λεκάνης του Αξιού ποταμού χωρίζονται από μία ορεινή – λοφώδεις σειρά, η οποία εκτείνεται από το Πάικο, στα δυτικά, έως τη ζώνη Προπαιονίας, στα ανατολικά.



Χάρτης 3.1 : Δορυφορική εικόνα της λεκάνης του Αξιού ποταμού στον ελλαδικό χώρο (Google Earth).

Πιο συγκεκριμένα, τα όρια της λεκάνης στην περιοχή του Αξιού στον ελλαδικό χώρο (Χάρτης 3.1) είναι:

- **Στα ανατολικά** : το όριο είναι η λεκάνη απορροής του Γαλλικού ποταμού
- **Στα βόρεια** : το όριο είναι τα σύνορα μεταξύ Ελλάδας και ΠΓΔΜ
- **Στα δυτικά** : το όριο συμπίπτει με το γεωγραφικό όριο του νομού Πέλλας
- **Στα νότια** : το όριο συμπίπτει με το γεωγραφικό όριο του νομού Κιλκίς και νομού Θεσσαλονίκης.



Χάρτης 3.2 : Γεωμορφολογικός χάρτης συνολικής λεκάνης του Αξιού ποταμού (Βαρσαμίδου., 2004).

3.3. Γεωλογία

Το Ελληνικό τμήμα της λεκάνης της περιοχής του Αξιού βρίσκεται στις δυο από τις τρεις υποζώνες της ζώνης Αξιού, στην υποζώνη Παιονίας και υποζώνη Πάικου (Mountrakis., 2010).

3.3.1. Υποζώνη Παιονίας

Η περιοχή στην οποία βρίσκεται η λεκάνη Αξιού συμπίπτει με τις ενότητες Βαφειοχωρίου και Αρτζάν, που βρίσκονται ΒΑ της λεκάνης, και την ενότητα Γευγελής, η οποία βρίσκεται ΒΔ της λεκάνης.

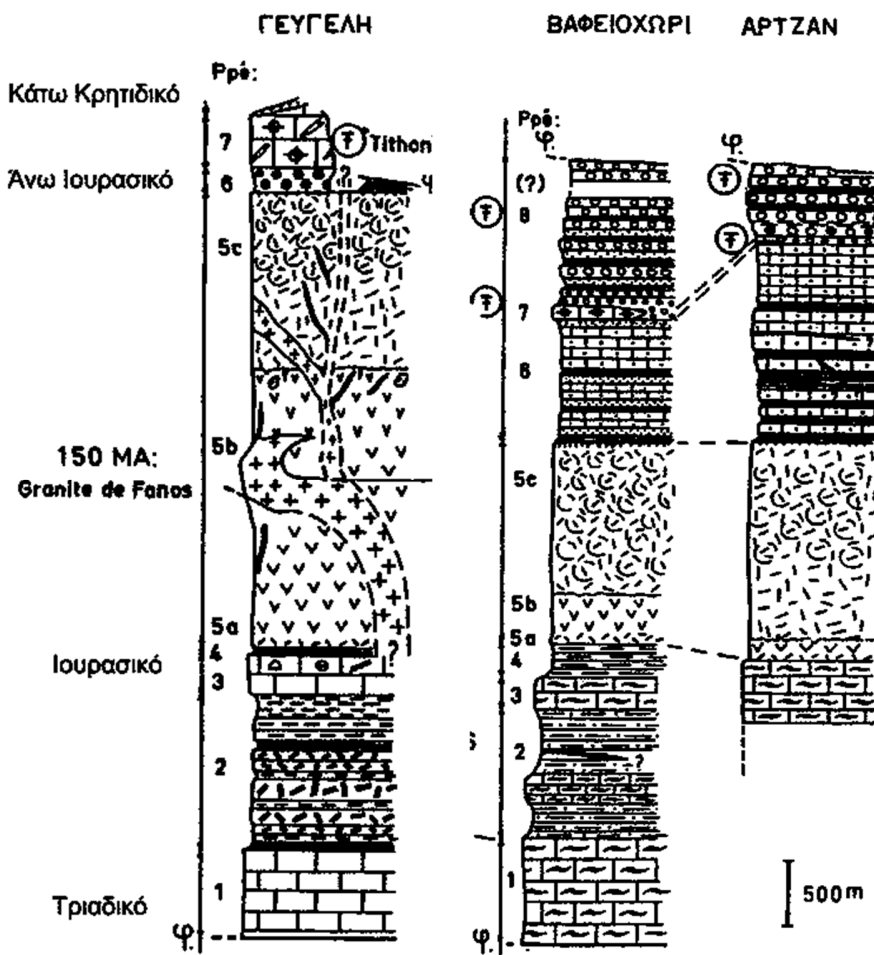
Οι σχηματισμοί που απαρτίζουν τις λιθοστρωματογραφικές στήλες των ενοτήτων αυτών της υποζώνης Παιονίας (Σχήμα 3.1), από τους παλαιότερους προς τους νεότερους, είναι οι εξής:

❖ Ενότητες Βαφειοχωρίου και Αρτζάν

- Μεταμορφωμένα πετρώματα : αυτά είναι μαρμαρυγικοί σχιστόλιθοι, μάρμαρα και σιπολίτες ηλικίας Τριαδικού – Ιουρασικού (Σχήμα 3.1 (1 - 4)).
- Οφειολιθικά πετρώματα : αυτά είναι γάββροι, δολερίτες κ.α. (Σχήμα 3.1 (5α, 5c)).
- Επικλυσιογενής σειρά : βρίσκεται πάνω από τα οφειολιθικά πετρώματα, έχει μεγάλο πάχος και η ηλικία της προσδιορίζεται στο Ανώτερο Ιουρασικό. Αποτελείται από κλαστικά ιζημάτα όπως κροκαλοπαγή με οφειολιθικές κροκάλες, ψαμμίτες, ψαμμιτικούς ασβεστόλιθους και πηλίτες, ενώ πάνω από αυτά η σειρά αποκτά φλυσχοειδή χαρακτήρα που τοποθετείται στο Βασικό Κρητιδικό (Σχήμα 3.1 (6, 7, 8)).

❖ Ενότητα Γευγελής

- Σχηματισμός Γκόλα – Τσούκα : αποτελείται από αναकुσταλλωμένους ασβεστόλιθους και μάρμαρα ηλικίας Τριαδικού (Σχήμα 3.1 (1)).
- Σχηματισμός Καστανερής : είναι ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά ηλικίας Τριαδικού – Ιουρασικού (Σχήμα 3.1 (2)).
- Σχηματισμός Γρίβας : απαρτίζεται από ασβεστόλιθους και σερικιτικούς – ασβεστιτικούς σχιστόλιθους ηλικίας Ιουρασικού (Σχήμα 3.1 (3,4)).
- Οφειολιθική ακολουθία : εντοπίζεται πάνω στα Ιουρασικά στρώματα και αποτελείται από γάββρους, δολερίτες, pillow lavas, βασικά ηφαιστειακά και κατά τόπους μικρές εμφανίσεις ωκεάνιων – κερατολιθικών ιζημάτων (Σχήμα 3.1 (5α, 5c)).
- Γρανίτης Φανού – Αξιούπολης : είναι διείσδυση ενός γρανιτικού όγκου, ηλικίας Άνω Ιουρασικού (150Ma), στην ήδη τοποθετημένη οφειολιθική σειρά (Σχήμα 3.1 (5b)).
- Ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και μικροκροκαλοπαγή ηλικίας Ανώτερου Ιουρασικού, βρίσκονται πάνω στους οφειόλιθους και χρονολογούν την τεκτονική τοποθέτησή τους (Σχήμα 3.1 (6,7)) (Mountrakis., 2010).



Σχήμα 2.1 : Λιθοστρωματογραφικές στήλες ενοτήτων Γευγελής, Βαφειοχωρίου και Αρτζάν (κατά Mercier., 1966).

3.3.2. Υποζώνη Πάικου

Το 1966 ο Mercier καθόρισε πως η υποζώνη του Πάικου αποτελούσε ένα ύβωμα που χώριζε την αύλακα της Παιονίας από την αύλακα της Αλμωπίας.

Σήμερα θεωρείται πως η υποζώνη αυτή κατά το Ιουρασικό αποτελούσε νησιώτικό τόξο, με έντονη ηφαιστειακή δράση, μέσα στην ωκεάνια ζώνη του Αξιού. Έτσι, λόγω της 1^{ης} ορογενετικής περιόδου, του Άνω Ιουρασικού – Κάτω Κρητιδικού, σε συνδυασμό με την έντονη ηφαιστειακής δράσης της ίδιας περιόδου και την πτύχωση του Τριτογενούς, η υποζώνη του Πάικου απέκτησε την χαρακτηριστική αντικλινική δομή του. Κατά το Πλειο – Τεταρτογενές ακολούθησε έντονη εφελκυστική δράση που οδήγησε στην κατάρρευση του ορογενούς με αποτέλεσμα να αποκαλυφθεί στην επιφάνεια το κρυσταλλωσχηστώδες υπόβαθρο της υποζώνης του Πάικου.

Η αντικλινική δομή του Πάικου εμφανίζεται πλήρης μόνο από τη δυτική πτέρυγα του όρους Πάικου, και όχι από την ανατολική πτέρυγα, διότι στα ανατολικά βυθίζεται κάτω από τη

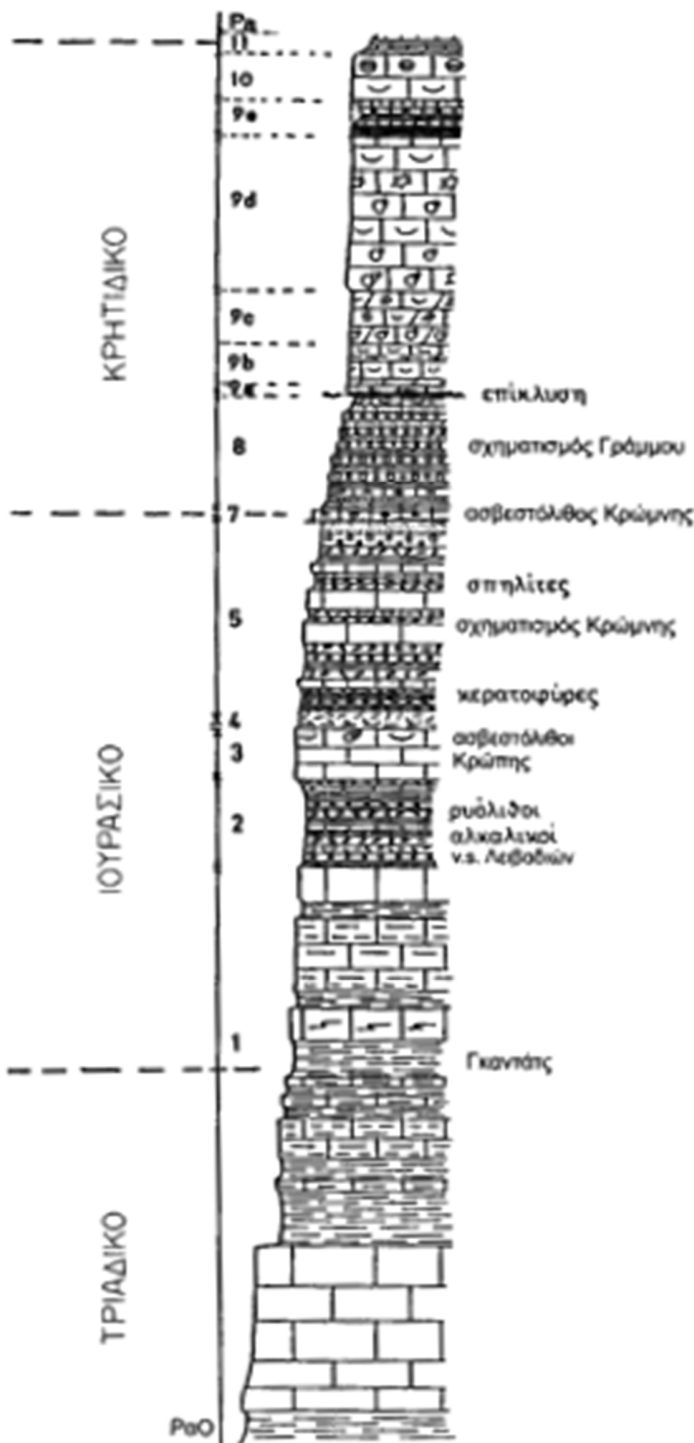
υποζώνη της Παιονίας, η οποία κατά το Τριτογενές επωθήθηκε προς τα δυτικά πάνω στην υποζώνη του Πάικου.

Τα παραπάνω είναι η επικρατέστερη άποψη για το πως δημιουργήθηκε το Πάικο. Υπάρχουν και άλλες απόψεις, όπως για παράδειγμα ότι το Πάικο είναι τεκτονικό παράθυρο, όμως απαιτούνται περεταίρω έρευνες έτσι ώστε να τεκμηριωθεί η θεωρία αυτή.

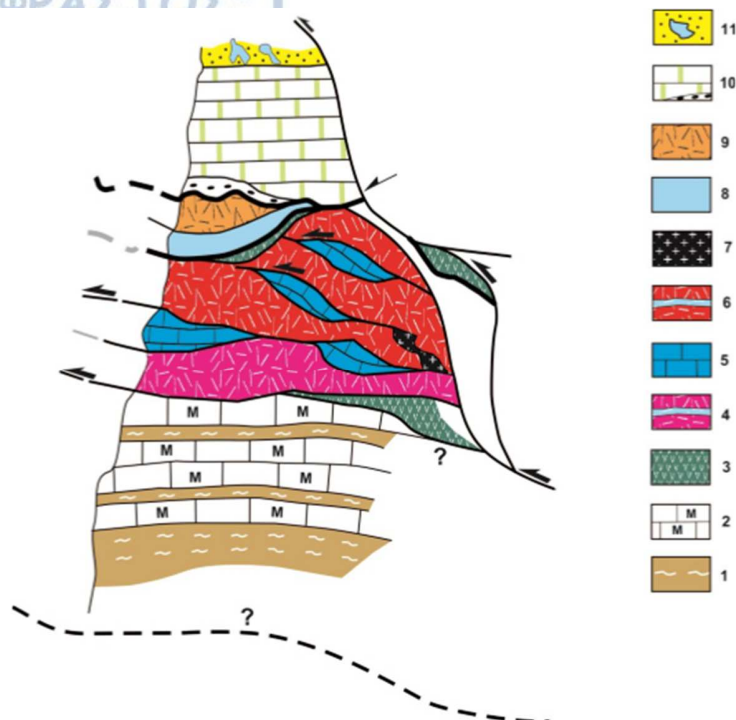
Σύμφωνα με τον Mercier (1966) οι σχηματισμοί που συγκροτούν τη λιθοστρωματογραφική στήλη της υποζώνης Πάικου, από τους αρχαιότερους προς τους νεότερους, είναι οι εξής:

- Μεταμορφωμένη σειρά : αποτελείται από γενέσιους, μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους, σιπολίτες και χλωριτικούς σχιστόλιθους σε εναλλαγές Παλαιοζωικής ηλικίας (Σχήμα 3.2 (Ρα0)).
- Σειρά Γκαντατς : είναι μεταμορφωμένη, κυρίως ανθρακική, ιζηματογενής σειρά η οποία απαρτίζεται από μάρμαρα, σιπολίτες, κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, ασβεστιτικούς και χλωριτικούς – επιδοιτικούς σχιστόλιθους ηλικίας Τριαδικού – Ιουρασικού (Σχήμα 3.2 (1)).
- Σειρά Λιβαδιών : είναι ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά ηλικίας Μέσω – Άνω Ιουρασικού που συνιστάται από (Σχήμα 3.2 (2)):
 - Ημιμεταμορφωμένα ιζήματα : όπως χλωριτικούς και χαλαζιακούς σχιστόλιθους, κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους και ψαμμίτες
 - Ηφαιστειακά υλικά : όπως μετά – ρυόλιθους, πορφυροειδή σερικιτιωμένα, πρασινίτες, μεταβασίτες και τοφίτες.
- Ασβεστόλιθοι Κρώπης : είναι ανθρακική σειρά από μαρμαροειδείς ασβεστόλιθους και σιπολίτες με απολιθώματα ηλικίας Ιουρασικού (Σχήμα 3.2 (3)).
- Πράσινοι σχιστόλιθοι με αραιές παρεμβολές από ασβεστόλιθους (Σχήμα 3.2 (4)).
- Σχηματισμός Κρώμνης : αποτελεί μια δεύτερη ηφαιστειοϊζηματογενή σειρά ηλικίας Άνω Ιουρασικού στην οποία συναντώνται (Σχήμα 3.2 (5)):
 - Υποθαλάσσια ηφαιστειακά πετρώματα : όπως σπηλίτες, κερατοφύρες και διαβάσεις
 - Ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα : όπως κροκαλοπαγή με συνδετική ηφαιστειακή ύλη, κροκαλοπαγή χαλαζιακά, σερικιτιωμένους τοφίτες και πυροκλαστικά λατυποπαγή
 - Άλλα θαλάσσια ιζήματα : όπως ψαμμιτικούς ασβεστόλιθους και μικροκροκαλοπαγή.
- Ασβεστόλιθοι Κρώμνης : είναι ασβεστολιθικός ορίζοντας με απολιθώματα Cladocoropsis ηλικίας από το Κιμμερίδιο – Πορτλάνδιο έως το Ιουρασικό – Κρητιδικό (Σχήμα 3.2 (7)).
- Σχηματισμός Γράμμων : είναι ένας τυπικός σχηματισμός μετά – φλύσχη, ηλικίας Κάτω Κρητιδικού και συγκεκριμένα στο Βερριάσιο – Βαλαντζίνιο, που συνιστάται από μετά – ψαμμίτες, μετά – κροκαλοπαγή , μετά – πηλίτες και ασβεστόλιθους. Τα κλαστικά υλικά του προέρχονται από ηφαιστειακά (Σχήμα 3.2 (8)).
- Δολομίτης ηλικίας Άνω Αλβίου – Κενομανίου (Σχήμα 3.2 (9a)).
- Δολομιτικοί ασβεστόλιθοι ηλικίας Κενομανίου (Σχήμα 3.2 (9b – c)).
- Ασβεστόλιθοι ηλικίας Κενομανίου – Τουρωνίου (Σχήμα 3.2 (9d)).
- Κλαστική σειρά : αποτελείται από εναλλαγές ψαμμιτών, κροκαλοπαγών, πηλιτών, πλακωδών ασβεστόλιθων και δολομιτών ηλικίας Κονιασίου – Σαντωνίου – Καμπανίου (Σχήμα 3.2 (9e)).

- Ασβεστόλιθοι τεφροί – μαύροι ηλικίας Μαιστριχτίου (Σχήμα 3.2 (10)).
- Φλύσχη της Τσούκα : αποτελείται από ψαμμιτοειδείς ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και αργιλλικούς σχιστόλιθοι ηλικίας Μαιστριχτίου (Σχήμα 3.2 (11)) (Mountrakis., 2010).



Σχήμα 3.2 : Λιθοστρωματογραφική στήλη υποζώνης Πάικου (κατά Mercier., 1966).



Σχήμα 3.3 : Τεκτοστρωματογραφική στήλη των ενότητων του Πάικου (τροποποιημένο Κατριβάνος et al., 2012, Κατριβάνος et al., 2013).

Η τεκτοστρωματογραφική στήλη του Πάικου παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, όπου:

1. Σχιστόλιθοι, ενότητας Γκάντατς
2. Μάρμαρα, ενότητας Γκάντατς
3. Οφιόλιθοι
4. Ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά Λιβαδίων με ανθρακικούς ορίζοντες
5. Ανθρακική σειρά, ενότητας Γκόλα Τσούκα - Γκρόπης
6. Ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά Καστανερής - Κρώμνης με ανθρακικούς ορίζοντες
7. Γνευσιωμένα γρανιτικά σώματα
8. Ανθρακική σειρά, ενότητας Γρίβας - Κρώμνης
9. Μεταφλύσχης Γράμμου
10. Ανθρακική ενότητα Θεοδωράκη με κροκαλοπαγές βάσης
11. Φλύσχης Τσούκας με ανθρακικούς ολισθόλιθους (Κατριβάνος., 2017).

3.3.3. Τριτογενείς Αποθέσεις

Στο Τριτογενές, η σημερινή λεκάνη απορροής του Αξιού ποταμού, λειτουργούσε ως μολασική αύλακα, γνωστή με την ονομασία Μολασσική Αύλακα Αξιού. Οι αποθέσεις της αύλακας αυτής σήμερα εμφανίζονται στην υποζώνη Παιονίας.

Η ιζηματογένεση της μολασσικής αυτής αύλακας είναι θαλάσσιας, χερσαίας και λιμναίας προέλευσης και αποτελείται από ψαμμίτες, μάργες, κροκαλοπαγή, λατυποπαγή και ασβεστόλιθους ηλικίας Ανώτερου Ηώκαινου – Ολιγόκαινου – Άνω Μειοκαίνου.

Μολασσικές αποθέσεις εμφανίζονται και στο νομό Κιλκίς και είναι οι παρακάτω:

- Ασβεστολιθική σειρά : βρίσκεται στα χωριά Χορύγι και Βαφειοχώρι και έχει ηλικία Πριαμπόνιο του Άνω Ηώκαινου.
- Ιζηματογενής σειρά : βρίσκεται στην περιοχή Αρτζάν, τοποθετείται πάνω στην υποζώνη Παιονίας και η ηλικία της είναι Ανώτερου Ηώκαινου. Τα στρώματα που την απαρτίζουν, από τα παλαιότερα προς τα νεότερα είναι:
 - ο Αργιλικό λατυποπαγές με λατύπες μαρμάρων και γνευσίων
 - ο Σχιστή άργιλος
 - ο Κροκαλοπαγές με κροκάλες χαλαζιτών, γρανιτών και γνευσίων
 - ο Μάργα
 - ο Ψαμμίτης
 - ο Ψαμμιτοειδής Ασβεστόλιθος
- Ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά : βρίσκεται στο χωριό Μεταλλικό ηλικίας Άνω Ηώκαινο – Κάτω Ολιγόκαινο και αποτελείται από όξινα ηφαιστειακά πετρώματα και ιζηματογενή στρώματα.
- Ηφαιστειοϊζηματογενής σειρά : βρίσκεται στο χωριό Γυναικόκαστρο ηλικίας Άνω Ηώκαινο – Κάτω Ολιγόκαινο και αποτελείται από ρυόλιθους και πυροκλαστικούς ψαμμίτες (Mountrakis., 2010).

3.3.4. Νεογενή και Τεταρτογενή Ιζήματα

Τα Νεογενή και Τεταρτογενή ιζήματα έχουν αποθεθεί πάνω στην παλιά αλπική ζώνη Αξιού και την μολασσική αύλακα αξιού. Τα ιζήματα αυτά έχουν ποταμοχειμάρια και λιμναία προέλευση.

Στην Κασσάνδρα Χαλκιδικής, στην κοιλάδα του Ανθεμούντα, στην Επανωμή, στο θαλάσσιο χώρο του Θερμαϊκού κόλπου αλλά και στη περιοχή ΝΑ της Θεσσαλονίκης τα Νεογενή – Τεταρτογενή ιζήματα που τοποθετούνται πάνω στις μολασσικές αποθέσεις, από τα παλαιότερα προς τα νεότερα είναι τα παρακάτω (Σχήμα 3.4):

- Σχηματισμός Αντωνίου : συνιστάται από κροκαλοπαγές και ψαμμίτες ηλικίας Κάτω – Μέσου Μειόκαινου
- Σχηματισμός Τρίγλιας : αποτελείται από ερυθροστρώματα χερσαίας προέλευσης ηλικίας Άνω Μειόκαινου.
- Σχηματισμός Γωνιάς : είναι ποταμολιμναία ιζήματα, όπως άργιλοι, άμμοι και μαζώδεις ασβεστόλιθοι ηλικίας Πλειόκαινου.
- Ερυθροστρώματα Βιλλαφράγκιου.

SERIES	STAGE	MN ZONES	FORMA-TION	MEMBER	L I T H O L O G Y (Not on scale)
PLEI-STO-CENE	VILLA-NYIAN	MN-15		GEF1-RA	Αλλούβια Terra rossa
PLIOCENE	RUSCI-NIAN	MN-14	ANGELO-CHORI	EMVO-LON	Ψαμμίτες, χαλίκια
					Ερυθρωπές μάργες σε εναλλαγές με ψαμμίτες και χαλίκια
	TUROLIAN	MN-13	DYTIKO		Ασβεστόλιθοι λιμναίοι κίτρινες μάργες ψαμμίτες χαλίκια
		MN-12			
UPPER MIOCENE	TUROLIAN	MN-11	VATHYLAKKOS		Εναλλαγές ψαμμιτών, μαργών και χαλικιών
	VALLESTAN	MN-10	N. MESIVURIA		Ερυθροστρώματα με ψαμμίτες και χαλίκια
				?	

Σχήμα 3.4 : Λιθοστρωματογραφική σειρά της λεκάνης Αξιού κατά το Νεογενές – Τεταρτογενές (κατά Κουφός και Παυλίδης., 1988).

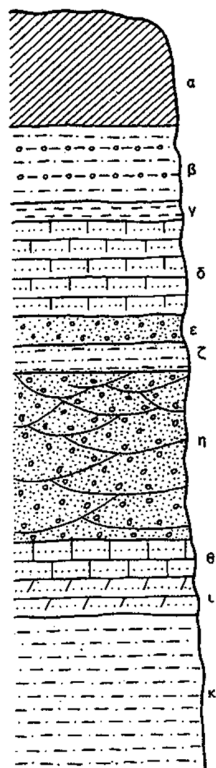
Νεογενή ιζηματογενείς αποθέσεις εντοπίζονται και ΒΔ της Θεσσαλονίκης, από τα παλαιότερα προς τα νεότερα είναι :

- Ερυθροστρώματα, άμμοι και χαλίκια ηλικίας Άνω Μειοκαίνου και συγκεκριμένα στο Βαλέζιο
- Άμμοι, χαλίκια, μάργες και ασβεστόλιθους γλυκών νερών ηλικίας Άνω Μειοκαίνου και συγκεκριμένα στο Τουρόλιο.
- Ερυθρωπές μάργες, αμμώδεις μάργες και χαλίκια ηλικίας Πλειοκαίνου.
- Αλλουβιακές αποθέσεις ηλικίας Τεταρτογενούς.

Νότια της Θεσσαλονίκης, στη περιοχή Μεγάλου Εμβόλου, οι Πλειοκαινικές ιζηματογενείς αποθέσεις της λεκάνης Αξιού, από τις νεότερες προς τις παλαιότερες είναι οι εξής (Σχήμα 3.5):

- Ερυθροπηλοί Τεταρτογενούς ηλικίας (Σχήμα 3.5 (α)).
- Αμμώδεις μάργες με χαλίκια (Σχήμα 3.5 (β)).
- Φαιά Μάργα (Σχήμα 3.5 (γ)).
- Φαιοπράσινη αμμώδης μάργα (Σχήμα 3.5 (δ)).

- Χαλικια και άμμοι (Σχήμα 3.5 (ε)).
- Ιλύς και λεπτόκοκκη άμμος (Σχήμα 3.5 (ζ)).
- Λευκόφαιη ασβεστοψαμμιτική μάργα (Σχήμα 3.5 (η)).
- Αμμώδης μάργα (Σχήμα 3.5 (θ - ι)).
- Καστανέρυθρη αμμώδης μάργα με ασβεστιτικά συγκρίμματα (Σχήμα 3.5 (κ)) (Mountrakis., 2010).



Σχήμα 3.5 : Λιθοστρωματογραφική στήλη τη περιοχής Μεγάλου Εμβόλου (Mountrakis., 2010).

3.4. Γεωμορφολογία Λεκάνης

Από τη συνολική έκταση της λεκάνης του Αξιού στον ελληνικό χώρο :

- Περίπου το 15% είναι ορεινή – ημιορεινή περιοχή
- Περίπου το 17,5% είναι λοφώδες περιοχή και
- Το υπόλοιπο περίπου 67,5% είναι πεδινή περιοχή.

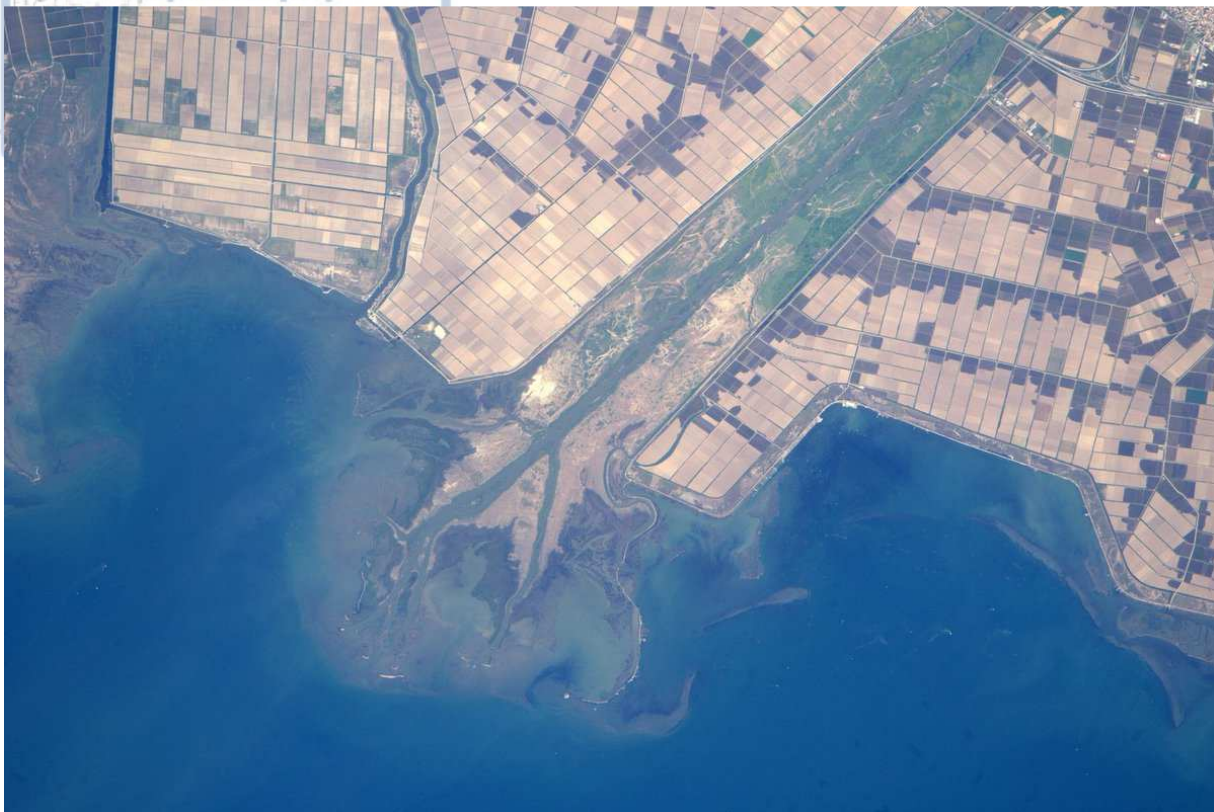
Οι ορεινές – ημιορεινές περιοχές της λεκάνης εντοπίζονται κυρίως στο ΒΔ τμήμα της, που είναι το όρος Πάικο, όπως φαίνεται στον Χάρτη 3.3, όπου παρατηρείται πληθώρα ανθρακικών πετρωμάτων που είναι υπεύθυνα για την ύπαρξη αρκετών πηγών μέσης έως μεγάλης παροχής, όπως οι πηγές Λιβαδίων, Κάρμης κ.α. Αντίθετα, λόγω της ύπαρξης των υδροπερατών

Ανατολικά της λοφώδους περιοχής της λεκάνης, εντοπίζεται μια ομαλή κοιλάδα που βρίσκεται μεταξύ της Αξιούπολης και της Ελεούσας. Η κοιλάδα αυτή έχει πολύ μικρή κλίση της τάξης του 1‰ και το μέσο πλάτος της προσδιορίζεται περίπου στα 6 km.

Αναλυτικά, τα γεωμορφολογικά στοιχεία της λεκάνης του Αξιού παρουσιάζονται στο παρακάτω Πίνακα 3.1:

Συνολική έκταση λεκάνης	20.061 km ²
Έκταση λεκάνης στην Ελλάδα	1.457 km ²
Έκταση ορεινής – ημιορεινής περιοχής της λεκάνης	218 km ²
Έκταση λοφώδης περιοχής της λεκάνης	256 km ²
Έκταση πεδινής περιοχής της λεκάνης	983 km ²
Μήκος περιμέτρου λεκάνης	208 km
Μέγιστο μήκος λεκάνης	54 km
Μέγιστο πλάτος λεκάνης	44 km
Μέγιστο υψόμετρο λεκάνης	1.650 m
Μέσο υψόμετρο λεκάνης	256,8 m

Πίνακας 3.1 : Η γεωμετρία του ανάγλυφου της λεκάνης Αξιού.



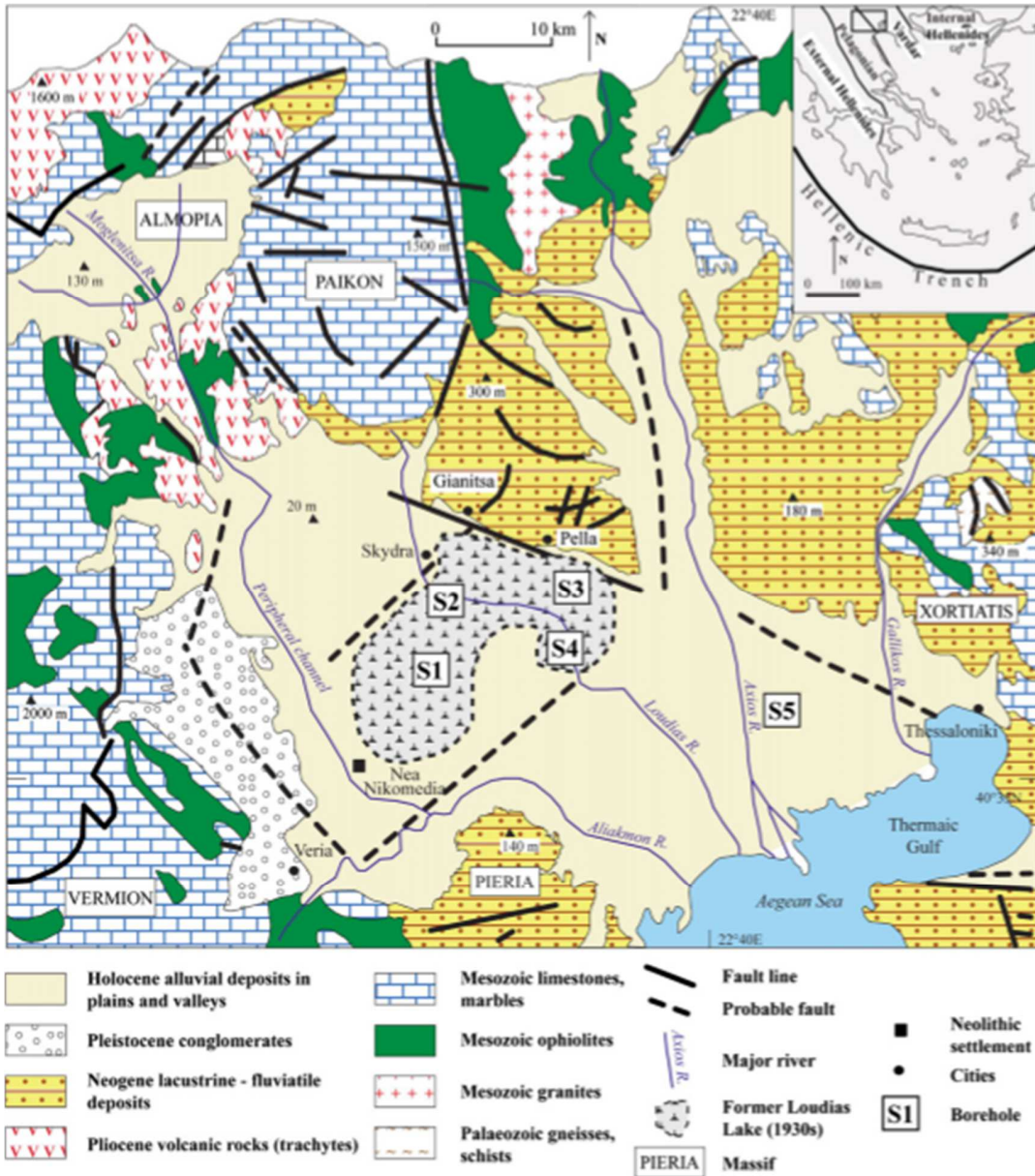
Εικόνα 3.1 : Το Δέλτα του Αξιού ποταμού (Williams., 2016).

Η λεκάνη διασχίζεται αξονικά από τον Αξιό ποταμό, που μεταφέρει περίπου 9.250.000 m³ φερτά υλικά κατά μέσο όρο ετησίως, όπως κροκάλες, χαλίκια, άμμος και ιλύ. Τα φερτά αυτά υλικά αποτίθενται στο Δέλτα του ποταμού (Εικόνα 3.1), όπου και σχηματίζονται ελώδεις περιοχές, και μερικά από αυτά στον πυθμένα του Θερμαϊκού κόλπου. Θεωρείται πως μόνο στο πρόσφατο παρελθόν έχουν προσχωθεί περισσότερα από 40 km εξαιτίας των υλικών αυτών.

3.5. Επικαιροποίηση

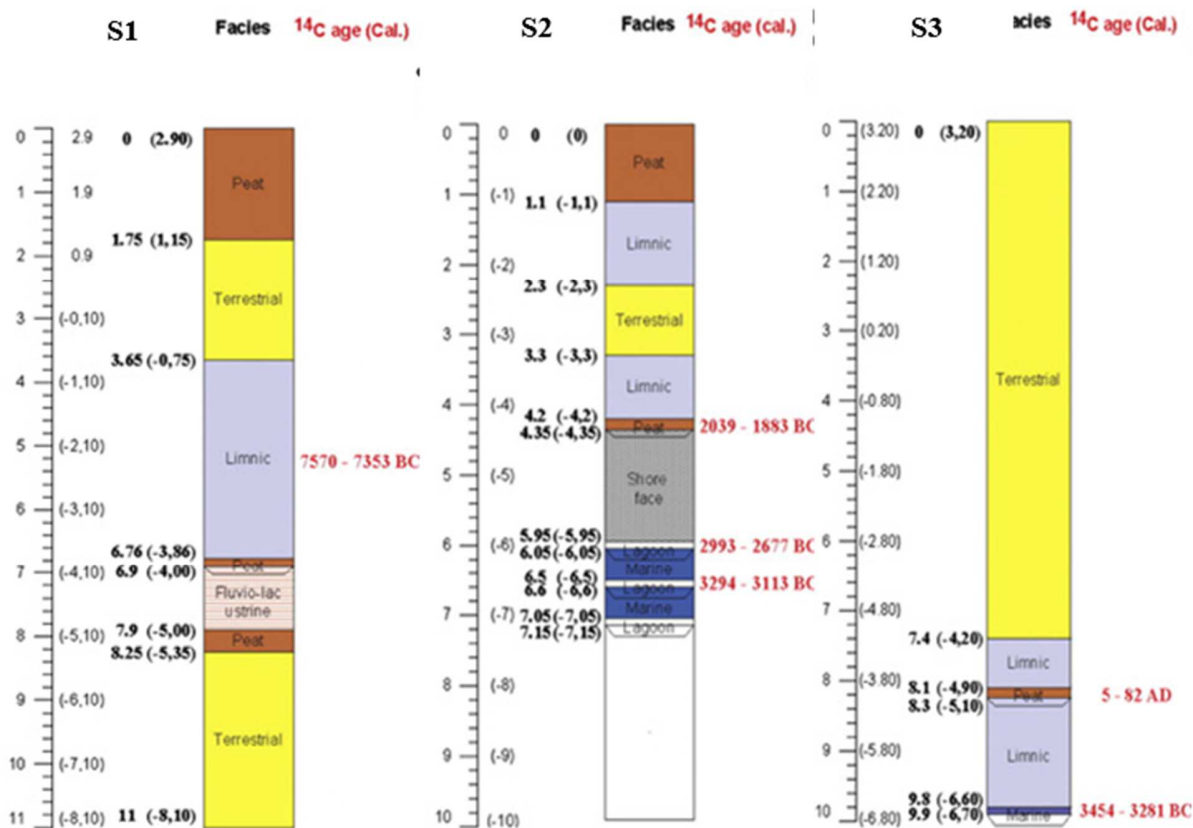
Πριν το 2007, στην περιοχή της λεκάνης Αξιού είχαν γίνει πολύ λίγες μελέτες σχετικά με τον μηχανισμό γένεσης και δημιουργίας των ιζηματογενών αποθέσεων. Οι περισσότερες από αυτές τις μελέτες είχαν ως επίκεντρο τα Δέλτα των ποταμών Αλιάκμονα και Αξιού και πραγματοποιήθηκαν με βάση παλαιοπεριβαλλοντικές μεθόδους και χρησιμοποιήθηκαν κυρίως για γεω – αρχαιολογικούς λόγους. Άλλες, πάλι, μελέτες αναφέρονται στις αλλουβιακές προσχώσεις (Albanakis et al., 1993) μόνο του ανατολικού τμήματος της περιοχής μαζί με μελέτες σχετικά με την πραγματική ακτογραμμή (Kapsimalis et al., 2005), οι οποίες όμως δεν βασίστηκαν πάνω σε κάποιες παλαιογεωγραφικές ή ιζηματολογικές μεθόδους. Έτσι το 2007 ο Matthieu Ghilardi et al. συνδυάζοντας διάφορες πηγές, όπως οι γεωλογικοί χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε., η μαγνητική επιδεκτικότητα, η κοκκομετρία των ιζημάτων των Ολοκαινικών αποθέσεων, καθώς και επί τόπου παρατηρήσεις της περιοχής, κατάφεραν να προσδιορίσουν με περισσότερη λεπτομέρεια τη γεωμορφολογία της περιοχής της λεκάνης του Αξιού.

Το 2005, οι Matthieu Ghilardi et al. για να μελετήσουν τη περιοχή χρειάστηκαν πληροφορίες σχετικά με τις Ολοκαινικές αποθέσεις της λεκάνης. Τέτοιες πληροφορίες όμως δεν υπήρχαν λόγω της περιορισμένης μελέτης της περιοχής, όπως φαίνεται και παραπάνω υπάρχουν στοιχεία μόνο σχετικά με τις ιζηματογενείς αποθέσεις έως και το Πλεόκαινο. Έτσι, χρειάστηκε να γίνουν πέντε γεωτρήσεις (S1 – S5), διαμέτρου 40 mm και βάθους έως 11 μέτρα, ώστε να μπορέσουν να ληφθούν οι απαραίτητες πληροφορίες. Λαμβάνοντας υπόψιν τη τοπογραφία και τη γεωλογία της λεκάνης προσδιορίστηκαν οι κατάλληλες θέσεις των γεωτρήσεων αυτών (Χάρτης 3.4), έτσι ώστε να ληφθεί όσο το δυνατόν περισσότερη και αντιπροσωπευτική πληροφορία σχετικά με το περιβάλλον μελέτης.

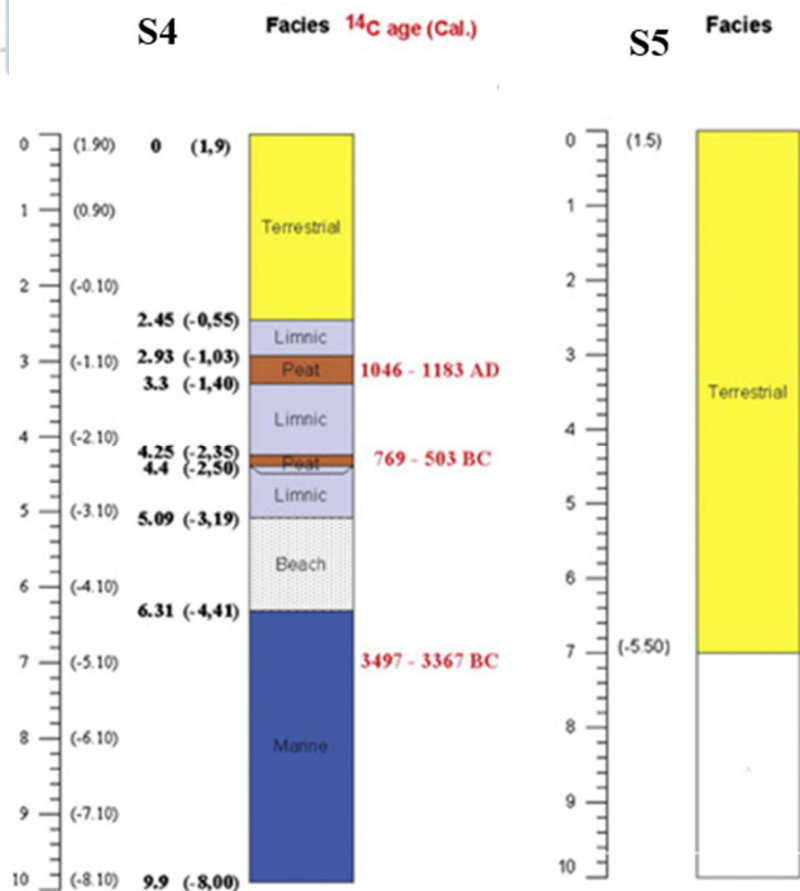


Χάρτης 3.4: Ιστορικό της γεωλογίας της λεκάνης και οι θέσεις των γεωτρήσεων (S1- S5) (M. Ghilardi et al., 2007).

Από τις γεωτρήσεις αυτές λήφθηκαν 189 δείγματα η ανάλυση των οποίων έδειξε ότι οι γεωτρήσεις S2, S3 και S4 αποτελούνται από πηλίτη, αμμώδη πηλίτη, λάσπη και χαρακτηριστική άμμο των δελταϊκών ιζηματογενών αποθέσεων και έχουν ποτάμια και θαλάσσια προέλευση. Αντίθετα, τα υλικά των γεωτρήσεων S1 και S5 έχουν λιμναία και χερσαία προέλευση (Σχήμα 3.6 και Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.6 : Στρωματογραφικές στήλες των Ολοκαινικών αποθέσεων στις γεωτρήσεις S1, S2 και S3 (M. Ghilardi et al., 2007).

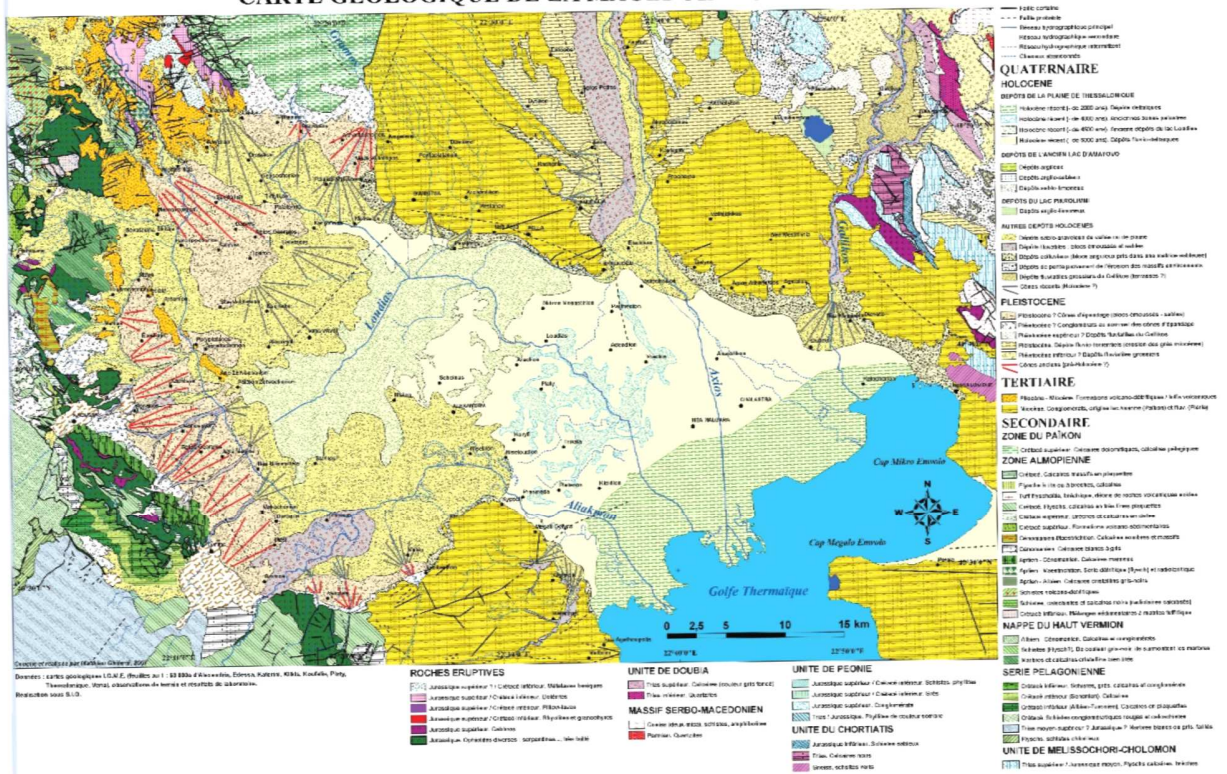


Σχήμα 3.7 : Στρωματογραφικές στήλες των Ολοκαινικών αποθέσεων στις γεωτρήσεις S4 και S5 (M. Ghilardi, 2007).

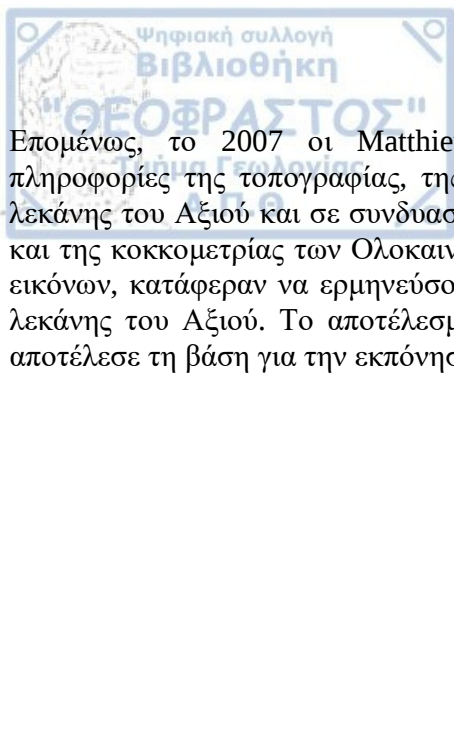
Εκτός από τις πληροφορίες που συγκεντρώθηκαν από τις παραπάνω γεωτρήσεις, μεγάλη βοήθεια για την ολοκλήρωση της μελέτης των Matthieu Ghiladi et al. υπήρξε και η εικόνα LANDSAT TM που λήφθηκε στις 11 Μαΐου του 1997. Χρησιμοποιώντας τις φασματικές ζώνες 2, 3 και 5 της εικόνας LANDSAT TM μπορούν να προσδιοριστούν συγγενικές ιζηματογενείς αποθέσεις, και κατά συνέπεια και η προέλευσή τους. Έτσι, οι αποθέσεις που απεικονίζονται με ανοιχτό πράσινο χρώμα στην Εικόνα 3.2 προέρχονται από την παλαιά λίμνη Λουδιά, ενώ αυτές που απεικονίζονται με ανοιχτό ροζ χρώμα προέρχονται τόσο από τις αποθέσεις του Αλιάκμονα ποταμού, όσο και από τις αποθέσεις των πλημμυρικών επεισοδίων του. Στα βόρεια τμήματα της λεκάνης οι αποθέσεις, οι οποίες απεικονίζονται με κόκκινο χρώμα στην Εικόνα 3.2 έχουν προέλευση από τον Αξιό ποταμό (M. Ghilardi et al., 2007).

Εικόνα 3.2: Εικόνα LANDSAT TM (φασματικές ζώνες 2, 3 και 5) (m. Ghilardi., 2007).

CARTE GEOLOGIQUE DE LA MACEDOINE CENTRALE



Χάρτης 3.5: Γεωμορφολογικός χάρτης της περιοχής της λεκάνης του Αξιού (M. Ghilardi, 2007).



Επομένως, το 2007 οι Matthieu Ghilardi et al., συγκεντρώνοντας και συσχετίζοντας πληροφορίες της τοπογραφίας, της γεωλογίας αλλά και της ανθρώπινης δραστηριότητας της λεκάνης του Αξιού και σε συνδυασμό με τις επί τόπου μελέτες της μαγνητικής επιδεκτικότητας και της κοκκομετρίας των Ολοκαινικών αποθέσεων, αλλά και με τη βοήθεια των δορυφορικών εικόνων, κατάφεραν να ερμηνεύσουν με μεγάλη ακρίβεια τη γεωμορφολογία της περιοχής της λεκάνης του Αξιού. Το αποτέλεσμα της μελέτης τους εκφράζεται στον Χάρτη 3.5, ο οποίος αποτέλεσε τη βάση για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

4.1. Γενικά

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει λεπτομερής αξιολόγηση της πιθανότητας ρευστοποίησης των εδαφών στη λεκάνη του Αξιού, απαιτούνται στοιχεία για την γεωμορφολογία της λεκάνης. Τέτοια στοιχεία, όμως, δεν υπάρχουν σε ψηφιακή μορφή και για το λόγο αυτό έγινε ψηφιοποίηση του γεωμορφολογικού Χάρτη 3.5 όπου απεικονίζεται οι σχηματισμοί τόσο της λεκάνης του Αξιού ποταμού στον ελλαδικό χώρο, όσο και της ευρύτερης περιοχής. Για τη ψηφιοποίηση έγινε χρήση του προγράμματος ArcGIS 10.3.

Μετά τη ψηφιοποίηση συγκεντρώθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία που προϋποθέτουν τα κριτήρια επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση, τα οποία αναγράφονται παραπάνω, προκειμένου να γίνει, αρχικά, ταξινόμηση των εδαφικών σχηματισμών βασιζόμενη στα κριτήρια αυτά, και στη συνέχεια να γίνει αξιολόγηση αυτών ως προς την επικινδυνότητά τους σε ρευστοποίηση. Ως αποτέλεσμα όλων αυτών είναι ο εντοπισμός των ρευστοποιήσιμων εδαφικών σχηματισμών στη περιοχή μελέτης, έτσι ώστε να υπολογιστεί η ακριβής έκτασή τους και να προσδιοριστεί ο βαθμός κινδύνου με μεγαλύτερη ακρίβεια για την αποφυγή πιθανών μελλοντικών αστοχιών.

4.2. Ψηφιοποίηση του Χάρτη

Ο Χάρτης 3.5 χρησιμοποιήθηκε ως βασικό δεδομένο για τη γεωμορφολογική πληροφορία της περιοχής της λεκάνης του Αξιού, και για αυτό το λόγο με τη βοήθεια του προγράμματος ArcGIS 10.3, έγινε η ψηφιοποίησή του.

Αρχικά, κατά την έναρξη της ψηφιοποίησης, έγινε γεωαναφορά του χάρτη, σύμφωνα με τις συντεταγμένες που αναγράφονται σε αυτόν, όπως φαίνεται στον Χάρτη 3.5. Η αναφορά των συντεταγμένων έγινε στο ελληνικό σύστημα συντεταγμένων. Έτσι, η περιοχή μελέτης της παρούσας εργασίας έχει γεωγραφικό πλάτος από 40° 20' 0'' Β έως 41° 00' 0'' Β και γεωγραφικό μήκος από 22° 00' 0'' Α έως 23° 00' 0'' Α.

Στη συνέχεια, δημιουργήθηκε αρχείο Geodatabase στο οποίο σχηματίστηκαν διαφορετικά Feature Class, που είναι με τη μορφή Shapefiles, για τον κάθε διαφορετικό εδαφικό σχηματισμό που απεικονίζεται στον Χάρτη 3.5. Ακολούθησε σχεδιασμός του κάθε πολυγωνικού σχηματισμού που αναγράφεται στον Χάρτη 3.5, δηλαδή έγινε προσεκτική και λεπτομερής αποτύπωση της γεωμετρίας του κάθε εδαφικού σχηματισμού ξεχωριστά. Έπειτα ακολούθησε και η αποτύπωση των υπολοίπων πολυγωνικών αναγραφών του χάρτη, όπως είναι η θάλασσα και οι λίμνες. Στη συνέχεια, έγινε η σχεδίαση των γραμμικών στοιχείων που αναγράφονται στον χάρτη, που είναι τα πρωτεύον και τα δευτερεύον υδρογραφικά δίκτυα, καθώς και τα ρήγματα της περιοχής. Η σχεδίαση όλων των παραπάνω πολυγωνικών και γραμμικών στοιχείων έγινε με τελικό σκοπό την ένωσή τους και την τελική αναπαράσταση του Χάρτη 3.5 με ψηφιακή μορφή.

Για την διευκόλυνση της αξιολόγησης ως προς την επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών, που θα αναλυθεί στη συνέχεια, είναι απαραίτητη η αναγραφή ορισμένων χαρακτηριστικών όλων των σχηματισμών, έτσι ώστε να μπορούν να ομαδοποιηθούν στη συνέχεια. Τα χαρακτηριστικά αυτά, στο πρόγραμμα ArcGIS 10.3, μπορούν να διατυπωθούν στο Attribute Table που διαθέτει, πλέον, το κάθε στοιχείο που έχει ψηφοποιηθεί. Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν τα εδάφη και τις βραχώμαζες είναι η ηλικία και η λιθολογία τους, καθώς και κάποιο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό τους, που ίσως να βοηθήσει στην ταξινόμησή τους, όπως η ζώνη προέλευσής τους ή/και ο βαθμός αποσάθρωσής τους.

4.3. Ταξινόμηση Εδαφικών Σχηματισμών με βάση το Περιβάλλον Απόθεσης

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης των εδαφικών σχηματισμών προέκυψε πως στην περιοχή ενδιαφέροντος υπάρχουν πάνω από 50 διαφορετικοί σχηματισμοί, με περισσότερες από μία εμφανίσεις ο καθένας (Πίνακας 4.1).

Το δυτικό τμήμα του Χάρτη 3.5, και κυρίως το ΒΔ και το ΝΔ τμήμα απαρτίζονται κυρίως από πυριγενή πετρώματα όπως ο γάββρος, ο δολερίτης, ο ρυόλιθος και οι Pillow – Laves, καθώς και από μεταμορφωμένα πετρώματα όπως ο σερπεντινίτης, ηλικίας Άνω Ιουρασικού έως Κάτω Κρητιδικού. Ακόμα, υπάρχουν εμφανίσεις ασβεστόλιθου, κροκλοπαγούς, φλύσχη, σχιστόλιθου και λατυποπαγούς από τη Πελαγονική σειρά, την ενότητα Βερμίου και τη ζώνη της Αλμωπίας, που χρονολογούνται στο Κρητιδικό.

Στα Α – ΒΑ εντοπίζονται ασβεστόλιθοι και χαλαζίτες της ενότητας Δουμπιά, Τριαδική ηλικίας, όπως και γενέσιοι, σχιστόλιθοι, αμφιβολίτες και χαλαζίτες της Σερβομακεδονικής Μάζας. Στο ίδιο τμήμα της περιοχής παρατηρούνται και οι σχιστόλιθοι, οι φυλλίτες και τα κροκαλοπαγή της ενότητας Παιονίας ηλικίας Άνω Ιουρασικού έως Κάτω Κρητιδικού, καθώς και οι σχιστόλιθοι, οι γενέσιοι και οι ασβεστόλιθοι της ενότητας του Χορτιάτη που έχουν Τριαδική ηλικία. Μεγάλη επιφάνεια του ΒΑ τμήματος καλύπτει ο ασβεστιτικός φλύσχος που εναλλάσσεται με λατυποπαγή της ενότητας Μελισσοχωρίου – Χολομώντα και έχει ηλικία Άνω Τριαδικό – Μέσω Ιουρασικό.

Στα βόρεια προς τα ΒΔ εμφανίζεται ο δολομιτικός ασβεστόλιθος της ζώνης του Πάικου που έχει Κρητιδική ηλικία.

Γύρω από τους ποταμούς Αλιάκμονας, Λουδιάς, Αζιός και Γαλλικός εντοπίζονται ποτάμιες αποθέσεις αργιλικών, αμμωδών, χαλικιών και πηλινικών υλικών που προέρχονται από τι ποτάμιες προσχώσεις των αντίστοιχων ποταμών ή/και από παλαιότερες αναβαθμίδες αυτών. Η ηλικία τους κυμαίνεται από το Κατώτερο Πλειστόκαινο έως και σήμερα, αφού η δράση των ποταμών αυτών συνεχίζεται και σήμερα. Οι προσχώσεις αυτές σχηματίζουν το Δέλτα των ποταμών όπου και υπάρχουν δελταϊκές αποθέσεις.

Ακόμα, παρατηρούνται και αποθέσεις λιμναίας προέλευσης γύρω από τη Πικρολίμνη και βόρεια αυτής, όπου παλιά βρισκόταν η λίμνη Αρτζάν – Αματόβου. Οι αποθέσεις αυτές αποτελούνται από αργιλικά έως και αμμώδη υλικά.

Στον Πίνακα 4.1 αναγράφονται αναλυτικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί που απαρτίζουν τη περιοχή μελέτης από το νεότερο προς το παλαιότερο :

Γεωλογικός Σχηματισμός	Ηλικία
Αμμώδεις Αποθέσεις Αναβαθμίδας	Ολόκαινο
Αποθέσεις Αναβαθμίδας Γαλλικού Ποταμού	Ολόκαινο
Δελταϊκές Αποθέσεις	Ολόκαινο
Πλευρικά Κορήματα	Ολόκαινο
Αλλουβιακές Αμμώδεις Αποθέσεις	Ολόκαινο
Λιμναίες Αποθέσεις	Ολόκαινο
Αμμοχαλικώδεις Αποθέσεις	Ολόκαινο
Αργίλοαμμώδεις Αποθέσεις της πρώην Λίμνης Αματόβου	Ολόκαινο
Αποθέσεις Αναβαθμίδας Γαλλικού Ποταμού	Άνω Πλειστόκαινο
Αμμώδεις Κώνοι Κορημάτων	Πλειστόκαινο
Πλευρικά Κορήματα	Πλειστόκαινο
Κροκαλοπαγή	Πλειστόκαινο
Ηφαιστειακή Γαφρος	Τριτογενές – Πλειοκαινο – Μειοκαινο
Κροκαλοπαγές	Τριτογενές – Μειοκαινο
Ασβεστόλιθος	Κενομάνιο – Μαιστρίχτιο
Φλύσχος	Απτιο – Μαιστρίχτιο
Ασβεστόλιθος	Κενομάνιο
Ασβεστόλιθος	Άλβιο – Κενομάνιο
Ασβεστόλιθος	Απτιο – Κενομάνιο
Δολομιτικός Ασβεστόλιθος	Άνω Κρητιδικό
Λατυποπαγή	Άνω Κρητιδικό
Ηφαιστειακοί Τόφφοι	Άνω Κρητιδικό
Φλύσχος	Κρητιδικό
Ασβεστόλιθος	Κρητιδικό
Ερυθροστρώματα	Κρητιδικό
Πλακώδης Ασβεστόλιθος	Κάτω Κρητιδικό – Άλβιο – Τουρώνιο
Ασβεστόλιθος	Κάτω Κρητιδικό – Σενώνιο
Ασβεστόλιθος	Κάτω Κρητιδικό
Ψαμμιτής	Κάτω Κρητιδικό
Pillow Lavas	Άνω Ιουρασικό – Κάτω Κρητιδικό
Ρυόλιθος , Γρανίτης	Άνω Ιουρασικό - Κάτω Κρητιδικό
Ψαμμιτής	Άνω Ιουρασικό - Κάτω Κρητιδικό
Μαφικά Πλουτωνικά	Άνω Ιουρασικό - Κάτω Κρητιδικό
Δολερίτης	Άνω Ιουρασικό - Κάτω Κρητιδικό
Σχιστόλιθος , Φθλλίτης	Άνω Ιουρασικό - Κάτω Κρητιδικό
Κροκαλοπαγή	Άνω Ιουρασικό
Γάββρος	Άνω Ιουρασικό
Σερπεντινίτης	Ιουρασικό
Αμμώδης Σχιστόλιθος	Κάτω Ιουρασικό
Ασβεστιτικό Φλύσχος	Άνω Τριαδικό – Μέσω Ιουρασικό
Ασβεστιτικός Φλύσχος , Λατυποπαγες	Άνω Τριαδικό – Μέσω Ιουρασικό
Μαρμαρο	Άνω – Μέσω Τριαδικό - Ιουρασικό
Φυλλίτης	Τριαδικό - Ιουρασικό
Ασβεστόλιθος	Άνω Τριαδικό

Ασβεστόλιθος	Τριαδικό
Χαλαζίτης	Κάτω Τριαδικό
Χαλαζίτης	Πέρμιο

Πίνακας 4.1: Εμφανίσεις εδαφών και βραχομαζών στη περιοχή της λεκάνης του Αξιού.

4.4. Αξιολόγηση – Ομαδοποίηση των Ρευστοποιήσιμων Εδαφικών Σχηματισμών

Για να χαρακτηριστεί ένας εδαφικός σχηματισμός ως ρευστοποιήσιμος πρέπει να πληρεί όλα τα κριτήρια που έχουν αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, και όχι μεμονωμένα ένα από αυτά. Έτσι, με τη βοήθεια της ταξινόμησης των γεωλογικών σχηματισμών, όπως αναγράφεται στον Πίνακα 4.1, έγινε έλεγχος της εγκυρότητας των κριτηρίων αυτών σε κάθε σχηματισμό ξεχωριστά.

Αρχικά, και σύμφωνα με τα κριτήρια, οι σχηματισμοί που έχουν ηλικία παλαιότερη από το Πλειστόκαινο χαρακτηρίζονται μη ρευστοποιήσιμοι. Άρα, επιδεκτικοί σε ρευστοποίηση είναι οι εδαφικοί σχηματισμοί που έχουν δημιουργηθεί στο Πλειστόκαινο και στο Ολόκαινο, και στον Πίνακα 4.1 βρίσκονται από την αρχή έως την κόκκινη γραμμή. Ο έλεγχος των υπόλοιπων κριτηρίων έγινε μόνο στους Τεταρτογενείς εδαφικούς σχηματισμούς, οι οποίοι καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση στη περιοχή της λεκάνης του Αξιού.

Στην περιοχή μελέτης, κύριο ρόλο στη διαμόρφωση της γεωμορφολογίας έχει η δράση των ποταμών Λουδιά, Αλιάκμονα, Γαλλικού και Αξιού. Η δράση αυτή δεν είναι μόνο σημερινή, αλλά έχει ξεκινήσει πολλά χρόνια πριν, και με τη πάροδο του χρόνου οι κοίτες των ποταμών αυτών έχουν αποκτήσει πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως αλλαγές στη ταχύτητα ροής του νερού, άρα και απόθεση υλικών διαφορετικής κοκκομετρίας, αλλαγή στη θέση ροής των ποταμών καθώς και η δημιουργία πολλών και διαφορετικών αναβαθμίδων. Ακόμα, οι ποταμοί αυτοί έχουν εκδηλώσει πλημμυρικά επεισόδια κατά καιρούς, με συνέπεια την απόθεση αντίστοιχων υλικών. Αποτέλεσμα αυτής της διαφορετικής λειτουργίας των κοιτών μέσα στον χρόνο, είναι η δημιουργία εδαφικών σχηματισμών που έχουν υψηλή πιθανότητα ρευστοποίησης (π.χ. σημερινός ή παλαιότερος ποτάμιος βυθός), αλλά και σχηματισμών με μικρότερη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση (π.χ. ριπίδια, ποτάμιες προσχώσεις).

Οι προσχώσεις των υλικών από του τέσσερις αυτούς ποταμούς σχηματίζει ένα πεδίο που χαρακτηρίζεται έντονα δελταϊκό. Το έντονο αυτό υδρογραφικό δίκτυο που επικρατεί στην επιφάνεια έχει ως αποτέλεσμα να τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφορείς και έτσι η στάθμη του υπόγειου νερού να διατηρείται ψηλά. Η μεγάλη αυτή ποσότητα νερού σε συνδυασμό με τις χαλαρές δελταϊκές αποθέσεις της περιοχής ευνοούν σημαντικά την πιθανότητα ρευστοποίησής τους.

Στο νότιο πεδινό τμήμα της λεκάνης η τροφοδοσία του υπόγειου νερού γίνεται κυρίως από τη φυσική δράση του Αξιού ποταμού και λιγότερο από τα υπόλοιπα υδρογραφικά δίκτυα. Γενικά, η στάθμη του υπόγειου νερού στη περιοχή της λεκάνης του Αξιού παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια. Στη λεκάνη του Γαλλικού ποταμού, ΒΔ στον Χάρτη 3.5, υπάρχει πολύ μικρή πιθανότητα ρευστοποίησης των εδαφών, ενώ αντίθετα στην περιοχή εκβολής του Γαλλικού ποταμού και σε όλη την έκταση γύρω από τον Αξιό ποταμό τα εδάφη χαρακτηρίζονται από ρευστοποιήσιμα έως πολύ ρευστοποιήσιμα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.2.

	Χαμηλότερη Στάθμη Υπόγειου Νερού (m)	Υψηλότερη Στάθμη Υπόγειου Νερού (m)	Επιδεκτικότητα σε Ρευστοποίηση
Λεκάνη Γαλλικού ποταμού (ανατολικά της λεκάνης Αξιού)	15,1	17,3	Πολύ Χαμηλή
Νότιο Τμήμα Λεκάνης Γαλλικού Ποταμού	3,7	4,2	Υψηλή
Βόρειο Πεδινό Τμήμα Λεκάνης Αξιού	1,2	2,0	Πολύ Υψηλή
ΝΑ Πεδινό Τμήμα Λεκάνης Αξιού	1,6	2,1	Πολύ Υψηλή
ΝΔ Πεδινό Τμήμα Λεκάνης Αξιού	1,8	4,7	Πολύ Υψηλή – Υψηλή

Πίνακας 4.2: Επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών στην περιοχή της λεκάνης Αξιού με βάση τη στάθμη του υπόγειου νερού.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στα κριτήρια τα εδάφη που αποτελούνται από καλά διαβαθμισμένη λεπτόκοκκη άμμο ή χονδρόκοκκη ιλύ είναι πιο επιδεκτικά σε ρευστοποίηση. Αντίθετα, αποθέσεις αποτελούμενες από χαλίκια ή άργιλο έχουν μικρότερη επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση. Σύμφωνα με αυτό το κριτήριο, λοιπόν, οι Τεταρτογενείς αποθέσεις της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζονται ως εξής (Πίνακας 4.3) :

Εδαφικοί Σχηματισμοί	Επιδεκτικότητα σε Ρευστοποίηση
Αμμώδεις Αποθέσεις Αναβαθμίδας	Πολύ Υψηλή
Αποθέσεις Αναβαθμίδας Γαλλικού Ποταμού	Υψηλή
Δελταϊκές Αποθέσεις	Πολύ Υψηλή
Πλευρικά Κορήματα	Υψηλή
Αλλουβιακές Αμμώδεις Αποθέσεις	Πολύ Υψηλή
Λιμναίες Αποθέσεις	Μέτρια
Αμμοχαλικώδεις Αποθέσεις	Μέτρια
Αργικλοαμμώδεις Αποθέσεις της πρώην Λίμνης Αματόβου	Μέτρια
Αμμώδεις Κώνοι Κορημάτων	Χαμηλή
Κροκαλοπαγή	Πολύ Χαμηλή

Πίνακας 4.3: Επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση εδαφικών σχηματισμών στην λεκάνη του Αξιού ανάλογα με την κοκκομετρία των υλικών που τους αποτελούν.

Στη λεκάνη του Αξιού ποταμού αλλά και στη ευρύτερη περιοχή δεν υπάρχουν καταγραφές ρευστοποίησης του εδάφους, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως δεν μπορούν να εκδηλωθούν στο μέλλον επεισόδια ρευστοποίησης, δηλαδή το γεγονός αυτό από μόνο του δεν αποτελεί ένδειξη μη ρευστοποιήσιμης περιοχής.

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω η περιοχή αυτή πληρεί όλα τα κριτήρια έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί ρευστοποίηση του εδάφους. Για να γίνει αυτό όμως απαιτείται ένας παράγοντας που θα δώσει το έναυσμα ώστε να ενεργοποιηθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης. Ο παράγοντας αυτός είναι μια σεισμική δόνηση, η ένταση της οποίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 0,1g. Η περιοχή την οποία μελετάμε, βρίσκεται στη χαμηλή ζώνη σεισμικής

επικινδυνότητας, όπου η ένταση των σεισμικών δονήσεων που τη χαρακτηρίζουν είναι 0,16g. Αυτό αμέσως υποδεικνύει πως στην περιοχή της λεκάνης Αξιού οι σεισμικές δονήσεις που γίνονται είναι ικανές να προκαλέσουν τη ρευστοποίηση του εδάφους, αφού η έντασή τους είναι μεγαλύτερη από 0,1g, αρκεί η διάρκειά τους να είναι από 12 έως 15 δευτερόλεπτα.

Συσχετίζοντας, λοιπόν, τα παραπάνω δεδομένα σχετικά με την λεκάνη Αξιού, και συγκεκριμένα με τα στοιχεία των εδαφικών σχηματισμών της, προέκυψε ένας βαθμός επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση του κάθε σχηματισμού. Αυτό φαίνεται αναλυτικά στον παρακάτω Πίνακα 4.4.

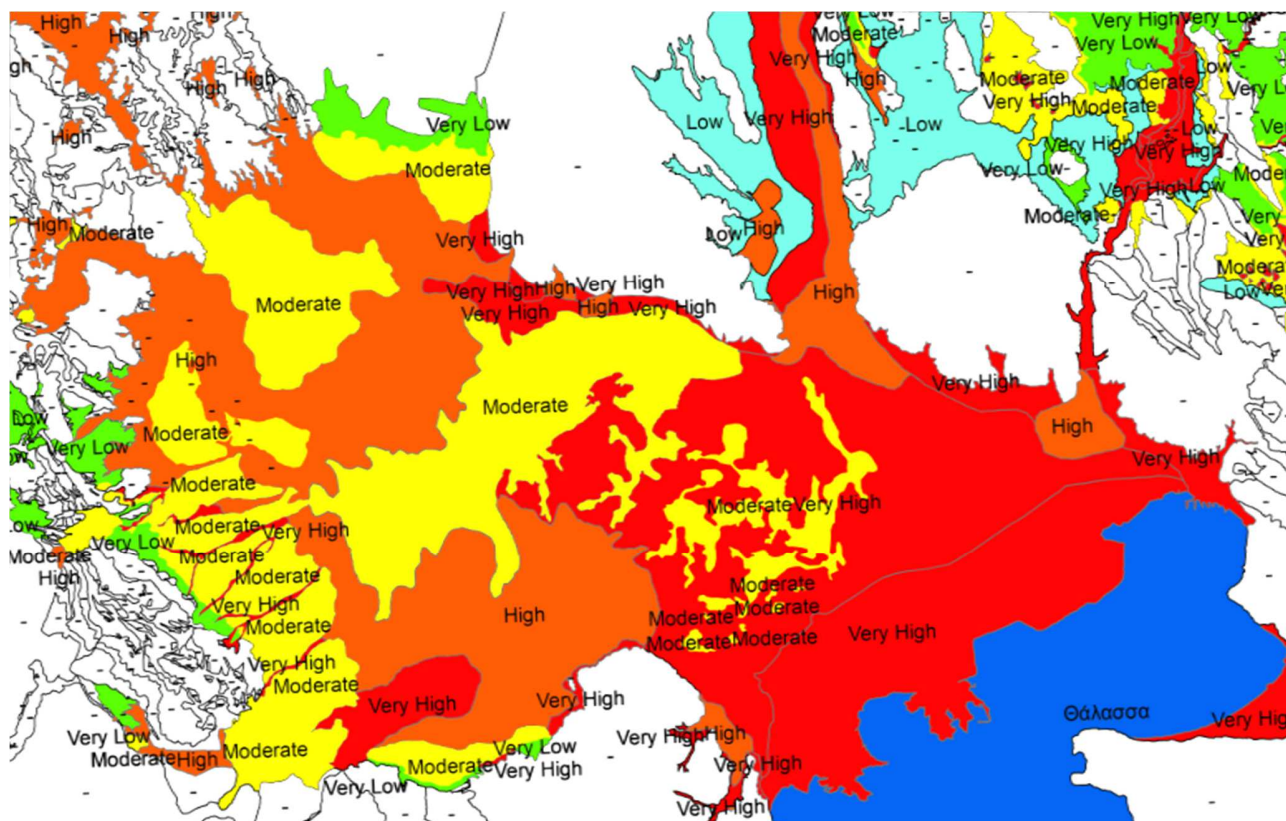
Εδαφικοί Σχηματισμοί	Ηλικία	Επιδεκτικότητα σε Ρευστοποίηση			
		Ηλικία	Γεωμορφολογία	Κοκκομετρία	Στάθμη Υπόγειου Νερού
Αμμώδεις Αποθέσεις Αναβαθμίδας	Ολόκαινο	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Αποθέσεις Αναβαθμίδας Γαλλικού Ποταμού	Ολόκαινο	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Δελταϊκές Αποθέσεις	Ολόκαινο	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή
Πλευρικά Κορήματα	Ολόκαινο	Πολύ Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Χαμηλή
Αλλουβιακές Αμμώδεις Αποθέσεις	Ολόκαινο	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Πολύ Υψηλή	Υψηλή
Λιμναίες Αποθέσεις	Ολόκαινο	Πολύ Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
Αμμοχαλικώδεις Αποθέσεις	Ολόκαινο	Πολύ Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Υψηλή
Αργικλοαμμώδεις Αποθέσεις της πρώην Λίμνης Αματόβου	Ολόκαινο	Πολύ Υψηλή	Μέτρια	Μέτρια	Μέτρια
Αποθέσεις Αναβαθμίδας Γαλλικού Ποταμού	Άνω Πλειστόκαινο	Μέτρια	Μέτρια	Υψηλή	Μέτρια
Αμμώδεις Κώνοι Κορημάτων	Πλειστόκαινο	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Πολύ Υψηλή
Πλευρικά Κορήματα	Πλειστόκαινο	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή	Χαμηλή
Κροκαλοπαγή	Πλειστόκαινο	Πολύ Χαμηλή	Πολύ Χαμηλή	Πολύ Χαμηλή	Πολύ Χαμηλή

Πίνακας 4.4: Επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών με βάση τα κριτήρια.

Η παραπάνω αξιολόγηση των εδαφικών σχηματισμών ως προς την επιδεκτικότητά τους σε ρευστοποίηση έγινε και στον ψηφιοποιημένο πλέον Χάρτη 2.5 μέσω του προγράμματος ArcGIS 10.3, όπου η ομαδοποίηση των σχηματισμών αναδεικνύεται πάνω στον ίδιο τον χάρτη με ένα φάσμα χρωμάτων. Το φάσμα των χρωμάτων αυτών είναι ανάλογο με τον βαθμό επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση των γεωλογικών σχηματισμών, και η αντιστοίχισή τους είναι η εξής:

- Πολύ Υψηλή (Very High) – Κόκκινο
- Υψηλή (High) – Πορτοκαλή
- Μέτρια (Moderate) – Κίτρινο
- Χαμηλή (Low) – Γαλάζιο
- Πολύ Χαμηλή (Very Low) – Πράσινο

Οι περιοχές με λευκό χρώμα είναι ηλικίας μεγαλύτερης από το Πλειστόκαινο με αποτέλεσμα να είναι συμπαγοποιημένα και να μην ρευστοποιούνται.



Χάρτης 4.1: Ψηφιακός χάρτης της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής της λεκάνης Αξίου.

Ο ψηφιοποιημένος χάρτης είναι ο Χάρτης 4.1 στον οποίο και αποτυπώνεται ο βαθμός της πιθανότητας σε ρευστοποίηση που έχουν οι αντίστοιχοι εδαφικοί σχηματισμοί.

Η παραπάνω αξιολόγηση και ταξινόμηση των εδαφικών σχηματισμών αποσκοπεί στον υπολογισμό των εκτάσεων του κάθε βαθμού επιδεκτικότητας ρε ρευστοποίηση ξεχωριστά. Ο υπολογισμός της έκτασης αυτής έγινε μέσω του προγράμματος ArcGIS 10.3 όπου προστέθηκε ακόμα ένα πεδίο στο Attribute Table στο οποίο αναγράφεται μεμονωμένα η έκταση σε τετραγωνικά χιλιόμετρα (Km²) του κάθε εδαφικού σχηματισμού. Στη συνέχεια, γίνεται άθροισμα των εκτάσεων που έχουν ίδιο βαθμό επιδεκτικότητας όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5.

Βαθμός Επιδεκτικότητας σε Ρευστοποίηση	Έκταση (Km ²)
Πολύ Υψηλή	892
Υψηλή	686
Μέτρια	662
Χαμηλή	185
Πολύ Χαμηλή	139

Πίνακας 4.5: Οι εκτάσεις των εδαφικών σχηματισμών με βάση τον βαθμό επιδεκτικότητάς τους σε ρευστοποίηση.

Όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα οι εδαφικοί σχηματισμοί που έχουν μέτρια έως πολύ υψηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης του Αξιού και αντιστοιχούν στις δελταϊκές αποθέσεις και στις αποθέσεις που προέρχονται από τους τέσσερις ποταμούς που διασχίζουν τη λεκάνη. Αντίθετα αυτοί με χαμηλό έως πολύ χαμηλό βαθμό επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση αποτελούν ένα πολύ μικρό κομμάτι αυτής, και αντιστοιχούν κυρίως σε σχηματισμούς Πλειστοκαινικής ηλικίας.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, όπως φαίνεται από τα παραπάνω, για να χαρακτηριστεί ένας εδαφικός σχηματισμός ως ρευστοποιήσιμος δεν αρκεί να μελετηθεί μόνο το υλικό από το οποίο αποτελείται ο συγκεκριμένος σχηματισμός, αφού για να εκδηλωθεί το φαινόμενο της ρευστοποίησης χρειάζεται συνδυασμός πολλών παραγόντων. Οι παράγοντες αυτοί είναι και τα κριτήρια που αξιολογούνται κατά τη μελέτη της επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση ενός εδαφικού σχηματισμού όπως το είδος, η ηλικία, η σύσταση, η κοκκομετρία και η πυκνότητα του ίδιου του σχηματισμού, αλλά και τα χαρακτηριστικά της ευρύτερης περιοχής, στην οποία ανήκει ο σχηματισμός, όπως η μορφολογία και η σεισμικότητα. Επομένως, στη συγκεκριμένη έρευνα απαιτείται να μελετηθεί ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων και η μεταξύ τους αλληλεπίδραση, γεγονός που αναγράφεται σε έναν γεωμορφολογικό χάρτη (Χάρτης 3.5), και όχι σε έναν απλό γεωλογικό χάρτη στον οποίο καταγράφεται μόνο η γεωλογική πληροφορία και όχι τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας της περιοχής μελέτης. Έτσι, λαμβάνοντας ως δεδομένο τον γεωμορφολογικό Χάρτη 3.5 η πληροφορία για την επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών που αναγράφεται στον ψηφιοποιημένο Χάρτη 4.1 είναι πιο αξιόπιστη, αφού για τη ταξινόμηση των σχηματισμών αυτών έχει αξιολογηθεί τόσο η γεωλογία, όσο και η μορφολογία της περιοχής στην οποία βρίσκεται.

Η ολοκλήρωση της μελέτης αυτής οδήγησε στο συμπέρασμα πως η περιοχή της λεκάνης του Αξιού είναι έντονα ρευστοποιήσιμη, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των εδαφικών σχηματισμών που την αποτελούν έχουν μέτριο έως πολύ υψηλό βαθμό επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση. Αυτό συμβαίνει διότι στη λεκάνη αυτή ρέουν τέσσερις ποταμοί, ο Λουδιάς, ο Αλιάκμονας, ο Γαλλικός και ο Αξιός, που αποθέτουν τεράστιες ποσότητες φερτών υλικών κάθε χρόνο, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται το Δέλτα των ποταμών. Η ροή των ποταμών οδηγεί στην ομοιόμορφη διαβάθμιση των φερτών αυτών υλικών τα οποία αποτελούνται κυρίως από άμμο, δύο κριτήρια που είναι καθοριστικά για το αν ένας εδαφικός σχηματισμός θα κριθεί ρευστοποιήσιμος ή όχι. Ακόμα, οι μεγάλες ποσότητες νερού που μεταφέρουν οι ποταμοί αυτοί ενισχύουν τους υπόγειους υδροφορείς κάτι που είναι απαραίτητο για την εκδήλωση ρευστοποίησης των εδαφών. Μετά την αξιολόγηση και την ταξινόμηση των εδαφικών σχηματισμών για την επιδεκτικότητά τους σε ρευστοποίηση, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι πως στην περιοχή κοντά στις εκβολές των ποταμών όπου σχηματίζονται δελταϊκές αποθέσεις η επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση είναι πολύ υψηλή και καλύπτει την έκταση των 892 Km², ενώ οι περιοχές που περιβάλλουν τους ποταμούς αλλά δεν βρίσκονται κοντά στις εκβολές τους έχουν υψηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση με έκταση 686 Km². Το τμήμα της λεκάνης του Αξιού που αποτελείται από αλλουβιακές αποθέσεις κρίνεται με μέτριο βαθμό επιδεκτικότητας σε ρευστοποίηση και αποτελεί τα 662 Km² της συνολικής έκτασης. Αντίθετα, περιοχές όπου υπήρχε παλαιότερη ροή ποταμού και περιοχές με αναβαθμίδες και αποτιθέμενα υλικά παλαιών ποταμών έχουν χαμηλή και πολύ χαμηλή επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση αντίστοιχα και καλύπτουν την έκταση των 185 Km² και 139 Km², πολύ μικρότερη έκταση από την έκταση που καλύπτουν οι εδαφικοί σχηματισμοί με επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση από μέτρια έως πολύ υψηλή.

Είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να προβλεφθεί, έστω και κατά προσέγγιση, η συμπεριφορά των σχηματισμών, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, στους οποίους θα κατασκευαστεί ένα τεχνικό έργο. Ένα τέτοιο φαινόμενο είναι η ρευστοποίηση των εδαφών, που με την κατάλληλη μελέτη μπορεί να υποδειχθεί η αντίδραση των εδαφικών σχηματισμών ως προς τη ρευστοποίηση, με αποτέλεσμα να δίνεται η δυνατότητα για τη λήψη απαραίτητων μέτρων για την αποφυγή αστοχίας σε κάποιο τεχνικό έργο.

Ένα από τα μεγαλύτερα οδικά δίκτυα στην Ελλάδα είναι η Εγνατία Οδός, που διέρχεται από την λεκάνη του Αξιού. Η Εγνατία Οδός είναι ένα διεθνές οδικό δίκτυο το οποίο ενώνει πολλές χώρες της Ευρώπης και από το οποίο διέρχονται χιλιάδες αυτοκίνητα καθημερινά, στο οποίο αν συμβεί μια αστοχία πχ. λόγω ρευστοποίησης του εδάφους, μπορεί να κοστίσει από μια απλή κατασκευαστική καταστροφή του έργου, έως και ζωές ανθρώπων και ο κίνδυνος είναι αυξημένος καθώς είναι ένα οδικό δίκτυο με πολύ μεγάλη διέλευση.

Η περιοχή της λεκάνης του Αξιού αποτελεί μια περιοχή με πολλές πόλεις και χωριά και συνεχή αύξηση κατοίκων, γεγονός που οδηγεί στη συνεχή ανοικοδόμηση και κατασκευή νέων οδικών έργων, που συμπεριλαμβάνουν γέφυρες, σήραγγες, επιχώματα κ.α. Ακόμα, η μεγάλη δράση των πολλών επιφανειακών υδρογραφικών δικτύων αποζητά πολλά έργα για τη διαχείριση των επιφανειακών υδάτων, όπως φράγματα, αντιπλημμυρικά έργα κ.α.. και κατ' επέκταση των υπόγειων υδάτων με τη κατασκευή γεωτρήσεων. Αυτά υποδεικνύουν πως τόσο στην περιοχή της λεκάνης του Αξιού όσο και στην ευρύτερη περιοχή αυτής, αναμένεται ανάπτυξη και συνέπεια αυτού είναι η κατασκευή όλο και περισσότερων τεχνικών έργων. Όμως, η περιοχή αυτή είναι μια περιοχή που δεν έχει μελετηθεί αρκετά με αποτέλεσμα να υπάρχει έλλειψη πληροφορίας σχετικά με τη γεωλογία και τη γεωμορφολογία, κάτι που έχει αντίκτυπο στη κατασκευή των

έργων. Έτσι, τα στοιχεία που παρέχει η συγκεκριμένη εργασία σχετικά με την επιδεκτικότητα σε ρευστοποίηση των εδαφικών σχηματισμών της περιοχής της λεκάνης το Αξιού μπορούν να ληφθούν υπόψιν κατά τη κατασκευή ενός τεχνικού έργου στη περιοχή αυτή, έτσι ώστε να εφαρμοστούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας για την αποφυγή αστοχίας σε περίπτωση ρευστοποίησης.

Επομένως, ο εντοπισμός της ακριβής θέσης των ρευστοποιήσιμων εδαφικών σχηματισμών και ο υπολογισμός της έκτασής τους, που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία, είναι στοιχεία που θα αποδειχτούν πάρα πολύ χρήσιμα στη κατασκευή μελλοντικών έργων στη συγκεκριμένη περιοχή, καθώς πλέον ανάλογα με τον βαθμό επιδεκτικότητας των εδαφικών σχηματισμών θα χρησιμοποιούνται και τα κατάλληλα μέτρα προστασίας. Αυτό αυτομάτως μειώνει το κόστος κατασκευής, κυρίως στις περιοχές αυτές, καθώς μέχρι τώρα μπορεί να χρησιμοποιούνταν πιο βαριά μέτρα προστασίας από ότι χρειάζεται, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το κόστος κατασκευής. Ακόμα, πλέον είναι γνωστό με μεγάλη ακρίβεια ποιες περιοχές έχουν μεγαλύτερες πιθανότητες ρευστοποίησης, έτσι ώστε να μπορούν να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα προστασίας για την αποφυγή κάποιας μελλοντικής αστοχίας.

Αθανασόπουλος, Γ.Α., 1988. *Εδαφοτεχνικές συνθήκες – Εδαφοδυναμική Μέρος 2ο: Δυναμικές Ιδιότητες Εδαφών*. Δελτό της Ελληνικής γεωλογικής Εταιρίας, Τεύχος 20, Άρθρο 3, Σελ. 335 – 354.

Αλμπανάκης, Κ., Βαβλιάκης, Ε., Ψιλοβίκος, Α., Σωτηριάδης, Λ., 1993. *Μηχανισμοί και εξέλιξη του Δέλτα του Αξιού ποταμού κατά τον 20^ο αιώνα*. Τομέας Γεωλογίας και Φυσικής Γεωγραφίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Σελ. 311 – 325.

Κατριβάνος, Ε., 2017. *Η Γεωλογική Δομή η Κινηματική της Παραμόρφωσης και η Γεωτεκτονική Εξέλιξη των Ορεινών Όγκων Πάικου και Τζένας (Κεντρική Μακεδονία)*. Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Γεωλογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Κούκη, Γ., και Σαμπατακάκης, Ν., 2002., *Τεχνική Γεωλογία*. Εκδόσεις Α.ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ & ΣΙΑ ΟΕ.

Μουντράκης, Δ., 2010. *Γεωλογία και Γεωτεκτονική Εξέλιξη της Ελλάδας*. University Studio Press. Σελ. 72 – 104, Σελ. 228 – 247.

Περλερος, Β., Μιχαήλ, Α., και Μιχαήλ, Α., 2015. *Έλεγχος Χημικής Ποιότητας Αρδευτικών Υδάτων (Επιφανειακών και Υπογείων) σε Κλίμακα Λεκανών Απορροής Ποταμών Μακεδονίας – Θράκης και Θεσσαλία*. Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Εργαστήριο Γεωργικών Φαρμάκων. Σπυρίδης, Α. – Κουτάλου, Β. – “ΥΕΤΟΣ”.

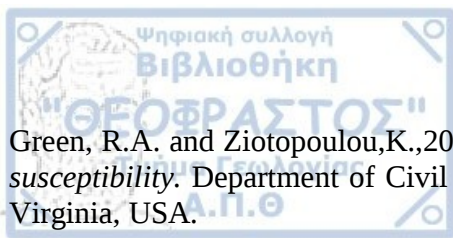
Τρανός, .Μ., 2011. *Γεωλογικές Χαρτογραφήσεις*. University Studio Press. Θεσσαλονίκη. Σελ. 269 -290.

Page, R.A., Boore, D.M., and Yerkes, R.F., 1995. *The Los Angeles Dam story*. U.S. Geological Survey Fact Sheet 096–95.

Dahms, S.H., 2004. *Damage Caused to Earth Embankment Dams by Earthquakes in the United States*. Global Tectonics, Emporia State University, Emporia, Kansas.

Ghilardi, M., Fouache, E., Queyrel, F., Syrides, G., Vouvalidis, K., Kunesch, S., Styllas, M., Stiros, S., 2007. *Human Occupation and Geomorphological Evolution of the Thessaloniki Plain (Greece) since Mid – Holocene*. Department of Geography University of Paris 12 Val de Marne, France. Department of Geology Aristotle University of Thessaloniki, Greece. Department of Civil Engineering University of Patra, Greece.

Ghilardi, M., Kunesch, S., Styllas, M., Fouache, E., 2007. *Reconstruction of Mid – Holocene Sedimentary Environments in the Central Part of the Thessaloniki Plain (Greece), based of Microfaunal Identification, Magnetic Susceptibility and Grain – size Analyses*. Department of Geography University of Paris 12 Val de Marne, France. Department of Geology Aristotle University of Thessaloniki, Greece.



Green, R.A. and Ziotopoulou, K., 2015. *Overview of screening criteria for liquefaction triggering susceptibility*. Department of Civil and Environmental Engineering, Virginia Tech, Blacksburg, Virginia, USA.

Koufos, G.D., and Pavlides, S.B., 1988. *Correlation Between the Continental Deposits of the Lower Axios Valley and Ptolemais Basin*. Geological Society of Greece. Vol. 20/2, Page. 9-19.

Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical earthquake engineering*. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J

Lopez, and Querol, S., 2007. *Endochronic model applied to earthfill dams with impervious core: design recommendation at seismic sites*. Department of Civil engineering University of Castilla.

Obermeier, S.F. and Pond, E.C., 1998. *Issues in Using Liquefaction Features for Paleoseismic Analysis*. U.S. Department of Interior. U.S. Geological Survey.

Papathanassiou, G. and Pavlides, Sp., 2011. *GIS-based database of historical liquefaction occurrences in the broader Aegean region*. Department of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Greece.

Papathanassiou, G., Pavlides, S., Christaras, B., Pitilakis, K., 2005. Liquefaction case histories and empirical relations of earthquake magnitude versus distance from the broader Aegean region, *Journal of Geodynamics*, Volume 40, Issues 2-3, Pages 257-278

The Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, TC4, of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 1999, *Manual for Zonation of Seismic Geotechnical Hazards*, The Japanese Geotechnical Society, pp. 72-102.

Youd, T.L. and Perkins, D.M., 1978. *Mapping of Liquefaction Induced Ground Failure potential*. Journal of Geotechnical Engineering Div. ASCE.

Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder Jr, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., Stokoe II, K.H., 2001. *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

- http://portal.survey.ntua.gr/main/labs/struct/geotech/art/Terminology/liquefaction_at_niigata.jpg
- <http://research.engineering.ucdavis.edu/gpa/wp-content/uploads/sites/43/2015/02/Slide-after-drawdown.jpg>
- https://www.researchgate.net/profile/Susana_Lopez-
- www.researchgate.net/profile/Susana_LopezQuerol/publication/259466872/figure/fig10/AS:297283242479618@1447889256146/Figure-19-Lower-San-Fernando-dam-after-the-San-Fernando-earthquake-1971-Courtesy-of.png
- https://www.researchgate.net/profile/Panagiotis_Karkanass/publication/248398351/figure/fig6/AS:298325111787543@1448137657415/Fig-6-a-The-main-Neogene-Quaternary-sedimentary-basins-of-Greece-where-the-bulk-of.png
- http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGYM-B106/382/2534,9786/images/10_11.jpg
- [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Soil_liquefaction_\(24399502593\).jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Soil_liquefaction_(24399502593).jpg)
- http://i.cdn.turner.com/ireport/sm/prod/2012/05/31/WE00767517/2115481/15044834174904816751402511215609-2115481_p9.jpg
- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1e/Chuetsu_earthquake-earthquake_liquefaction1.jpg
- <https://media.licdn.com/mpr/mpr/AAEAAQAAAAAAAAAdFAAAAJDA4YTRiZGRhLWY2NzAtNGIxNS04YjhlLWYwZDc2ODg4NGFiMQ.jpg>
- <https://www.google.gr/maps/@40.6935055,22.6357394,158851m/data=!3m1!1e3>
- <https://pbs.twimg.com/media/CnWQIFLXgAExCls.jpg>