

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΔΙΩΡΥΓΑ ΥΔΡΟΔΟΤΗΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΑΠΟ ΤΟΝ ΠΟΤΑΜΟ ΑΛΙΑΚΜΟΝΑ*

Σ. ΔΟΥΝΑΣ¹, Β. ΧΡΗΣΤΑΡΑΣ², & Θ. ΜΑΚΕΔΩΝ³

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα έρευνα αφορά τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν μετά την κατασκευή και συνεχίζουν να υπόσχουν στη Διώρυγα υδροδότησης της Θεσσαλονίκης από τον ποταμό Αλιάκμονα.

Μεταξύ των κυριότερων προβλημάτων και συγκεκριμένα αυτών που πρέπει να τύχουν ιδιαίτερης προσοχής είναι η μέθοδος θεμελίωσης, οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της διώρυγας (διαστάσεις, ποσότητα νερού, κλίση, κλίμα κατασκευής).

Ακολουθεί εκτενής αναφορά στο γεωφρενητικό πρόγραμμα που προτάθηκε και ετελέστηκε, προκειμένου να εντολιστούν τα αίτια και να αντιμετωπιστούν τα υφιστάμενα προβλήματα λειτουργίας (Θραύση σπειροδέματος, διαρροή). Επίσης δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στα υδρολογικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν μετά από παρατηρήσεις και παρακολούθησεις κατά μήκος της διώρυγας.

Στη συνέχεια γίνεται επεξεργασία και αξιολόγηση όλων των γεωλογικών και υδρογεωλογικών στοιχείων, καθώς και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές εδαφομηχανικής. Εξετάζονται τόσο η στρωματογενεσία όσο και τα χαρακτηριστικά εδάφους, αφού η διώρυγα είναι θεμελιωμένη στην παλιά κοίτη του ποταμού.

Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και διατυπώνονται προτάσεις σχετικά με τα ενδεικνύομενα μέτρα εξυγίανσης της θεμελίωσης και ανακαίνισης της Διώρυγας γενικότερα.

ABSTRACT

The present paper deals with the geotechnical problems that led to construction failures along the Aliakmon channel, which is the first part of the water duct that is going to supply water for Thessaloniki. The channel was originally designed and used for irrigation, but due to the increasing water demands for the urban area of Thessaloniki, it will finally serve a dual purpose. The paper presents the hydrogeological data of the area and evaluates the results of the investigation surveys conducted along the channel as well as of the in situ and laboratory tests. Finally it presents proposals for the channel foundation improvement.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Διώρυγα, αγωγός, γεωτεχνικά προβλήματα, υδροδότηση, βελτίωση θεμελίωσης, εδαφομηχανική

KEY WORDS: channel, duct, geotechnical problems, water supply, foundation improvement, water main, soil mechanics

* **GEOTECHNICAL PROBLEMS ALONG THE WATER DUCT THAT LINKS ALIAKMON RIVER WITH THESSALONIKI CITY**

¹ Γεωλόγος, 1^ο ΔΕΚΕ, ΥΠΕΧΩΔΕ Θεσ/νίκης

² Αναπλ. Καθηγητής Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 540 06 Θεσ/νίκη
Φηφιακή Βιβλιοθήκη "Θεόφραστος" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

³ Δρ. Γεωλόγος, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ. 540 06 Θεσ/νίκη

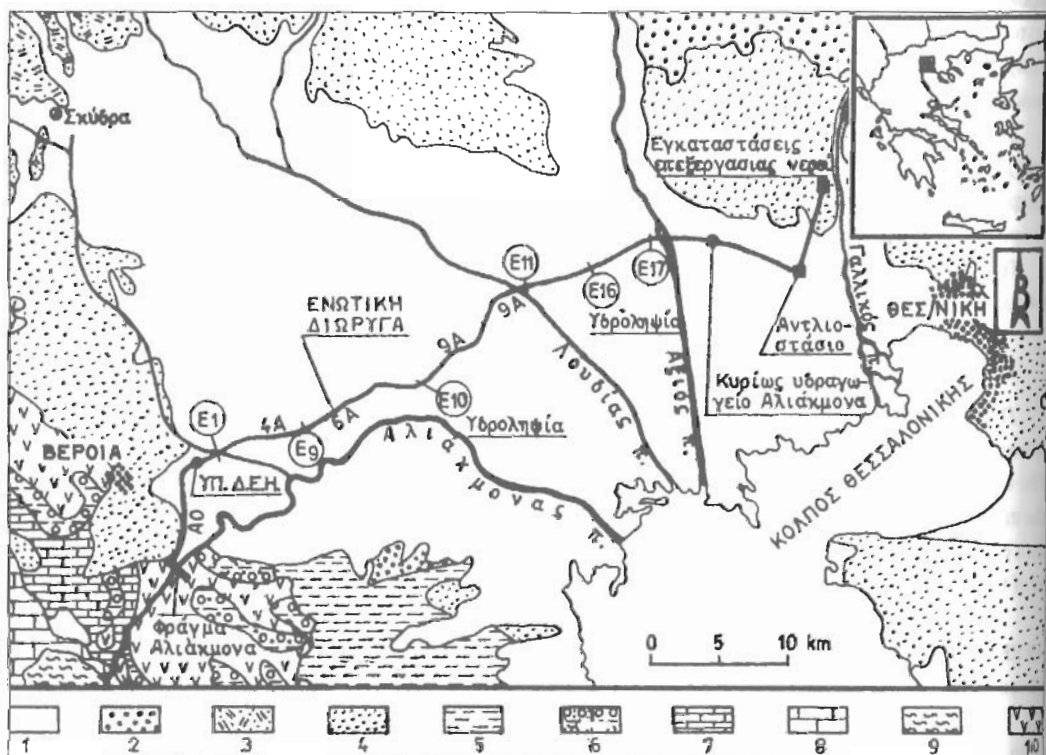
1. ΓΕΝΙΚΑ

Η διώρυγα του Αλιάκμονα, που αποτελεί το πρώτο τμήμα του υδατοαγωγού Αλιάκμονα-Θεσ/νίκης, προκειται να καλύψει τις υδρευτικές ανάγκες της Θεσ/νίκης κατά ένα μεγάλο μέρος, με μια ποσότητα 8 m³/sec. Ξεκινώντας από τις Βασβάρες και διατρέχοντας μια απόσταση 51 km (Εικόνες 1 & 2).

Η κατασκευή της έγινε τμηματικά από το 1960 μέχρι 1993 με αρχικό σκοπό την άρδευση, αλλά μπροστά στις αυξημένες ανάγκες ύδρευσης του Πολεοδομικού Συγκροτήματος Θεσ/νίκης υιοθετήθηκε η άποψη για διπλή χρήση της διώρυγας.

Εξαιτίας αυτής της διπλής χρήσης αποφασίστηκε να κατασκευάζεται το κυρίως υδατοαγωγείο του Αλιάκμονα που αποτελεί το δεύτερο τμήμα του υδατοαγωγού Αλιάκμονα - Θεσ/νίκης). Το έργο παρακολουθείται από την 1^η ΔΕΚΕ του ΥΠΕΧΩΔΕ, από την οποία προέρχονται και τα στοιχεία που επεξεργάζονται στην παρούσα έρευνα.

Η παρούσα εισήγηση θα ασχοληθεί μόνο με το πρώτο τμήμα λόγω του περιορισμένου χώρου. Τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία της διώρυγας για να εξυπηρετεί τις υδρευτικές ανάγκες της περιοχής απασχολούν τις αρμόδιες υπηρεσίες εδώ και χρόνια. Καταβάλλονται μεγάλες προσπάθειες και διατίθενται σημαντικά κονδύλια ετησίως για την αναζήτηση των αιτίων αυτοχθίας, τη βελτίωση - αποκατάσταση τιμημάτων και γενικά την αντιμετώπιση των προβλημάτων. Είναι βέβαια γνωστή η αναγκαιότητα του νερού ιδίως τη θερινή περίοδο τόσο για άρδευση όσο και για ύδρευση. Ομοιαστικά διακρίνονται δύο κατηγορίες προβλημάτων. Την πρώτη αποτελούν τα γεωτεχνικής φύσης και τη δεύτερη τα κατασκευαστικά. Η συνύπαρξή τους καθιστά αναγκαία την κοινή τους εξέταση.



Εικόνα 1: Γεωλογικός χάρτης της περιοχής του υδατοαγωγού. 1. Σύγχρονες προσχώσεις (Ολόκαινο) 2. Λιμναίες & χερσαίες αποθέσεις (Πλειστόκαινο) 3. Ώρινα ηφαιστειακά (Πλειό-πλειστόκαινο) 4. Λιμναίες & χερσαίες αποθέσεις (Μεσοπλειστόκαινο) 5. Θαλάσσιες αποθέσεις (Αν. Μιόκαινο) 6. Φλύσης Πελαγονικής ζ. Πίνδου 7. Ασβεστόλιθοι (Κανονικό - Μαστοίχιτο) 8. Ασβεστόλιθοι (Αν. Τριαδικό - Ιουραϊκό) 9. Γνεύσιο-οξιτόλιθοι-αμφιφιλιίτες (Παλαιοζωικό-Τριαδικό) 10. Οφειόλιθοι

Figure 1: Geological map of the Aliakmona water transfer project area. Hellenic Bibliography "Geofrasos" - Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

2. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Η περιοχή από την οποία διέρχεται η διώρυγα και συνολικά ο υδαταγωγός Αλιάζιμονα - Θεσ/νίκης αποτελεί την ευρύτερη δελταϊκή περιοχή των ποταμών Αλιάζιμονα, Λοιθία και Αξιού.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που καλύπτουν τη συγκεκριμένη έκταση, σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ (Εικόνα 1) αλλά όπως επαληθεύτηκε και από τις φρενητικές γεωτρήσεις που εκτελέστηκαν πρόσφατα, αποτελούνται από τεταρτογενή ιζήματα - αλλουβιακές αποθέσεις, το πάχος των οποίων ποικίλει. Σύμφωνα με τα δεδομένα βαθιών γεωτρήσεων που έγιναν στην περιοχή, το πάχος των αποθέσεων, κατά θέσεις, φθάνει τα 50-60 μ. Επιφανειακά συναντάται ένα χαλαρό αργιλοαμμώδες στρώμα, και βαθύτερα ακολουθούν εναλλασσόμενες κλαστικές αποθέσεις αργίλων, ιλύων, άμμων, χαλίκων και κοραλλών. Οι υδρογεωλογικές συνθήκες δεν είναι εννοϊκές για τη θεμελίωση τεχνικών έργων, αφού η περιοχή είναι πλούσια σε νερά με υψηλό υδροφόρο ορίζοντα (4-5 μ) και τα εδάφη έχουν οριακή φέρουσα ικανότητα και μικρή αποστραγγιστική ικανότητα.

3. ΤΕΧΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΟΥ ΥΔΑΤΑΓΩΓΟΥ

Ο Υδαταγωγός Αλιάζιμονα-Θεσ/νίκης περιλαμβάνει την Ενωτική Λιώρυγα και το κυρίως Υδραγωγείο Αλιάζιμονα (Ειζόνες 1 & 2).

1. Η ενωτική διώρυγα ξεκινά από τη θέση Βαοβάρες και καταλήγει στον Λεξιό στη θέση Ε17, έχει μήκος $L=51$ km, είναι τραπέζοειδούς διατομής, αποπερατομένη, λειτουργεί όμως μόνο για αρδευτικές ανάγκες και αποτελείται από τα τμήματα:

- ΑΟ-4Α Από ΧΘ=0+00 μέχρι τη θέση Ε2
Λιστάσεις διατομής: Ύψος=4,40 m, Πλάτος Πυθ. $b=7-8$
Κλίση πρανών (Ύψος: Βάση) 1:1,5. Παροχή: $Q=80$ m³/sec
- 6Α Από Ε9 μέχρι τη θέση Ε10
Λιστάσεις διατομής: Ύψος=3,50 m, Πλάτος Πυθ. $b=3$
Κλίση πρανών (Ύψος: Βάση) 1:1,50. Παροχή: $Q=52$ m³/sec
- 9Α Από Ε10 μέχρι τη θέση Ε11
Λιστάσεις διατομής: Ύψος=3,50 m, Πλάτος Πυθ. $b=5$.
Κλίση πρανών (Ύψος: Βάση) 1:1,50. Παροχή: $Q=30$ m³/sec

Από θέση Ε11 μέχρι Ε17 η διώρυγα συνεχίζει με διατομή $Υ \times Π=3,30 \times 4-6$ m. Από θέση Ε17 μέχρι το αντλιοστάσιο Σίνδου, το νερό μεταφέρεται με κλειστό αγωγό διατομής $Υ \times Π=3 \times 3,5$ m.

4. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΔΙΩΡΥΓΑΣ

Τα προβλήματα που παρουσίασε η διώρυγα αμέσως μετά την κατασκευή της, συνεχίζουν να υφίστανται μέχρι σήμερα και πρακτικά κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες.

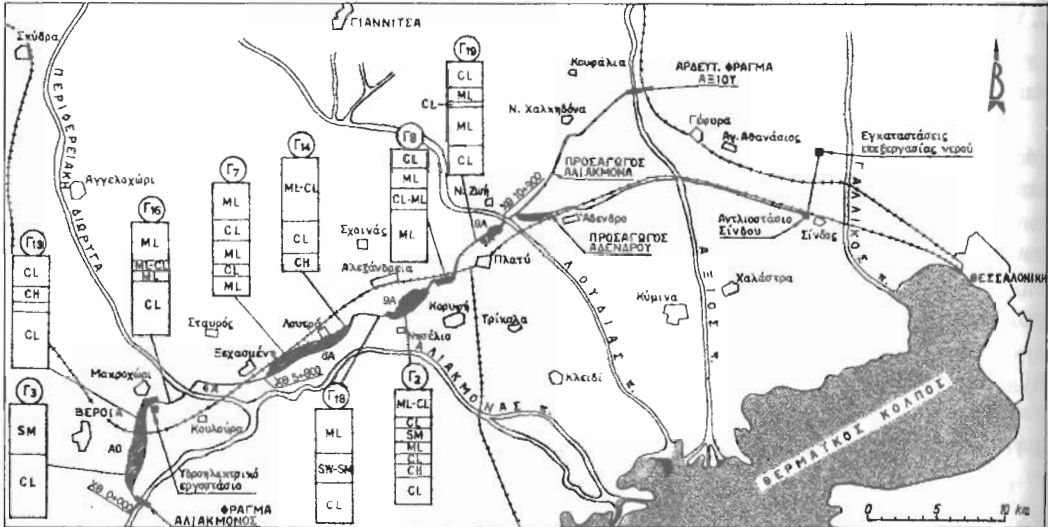
1. Διαρροές νερού
2. Θραύση του σκυροδέματος της επένδυσης

Η πρώτη σκέψη για την αναζήτηση των αιτίων των παραπάνω προβλημάτων ήταν ο έλεγχος του κατασκευαστικού μέρους και παράλληλα του υπεδάφους.

Ως πιθανότερες θέσεις διαρροής θεωρήθηκαν οι αμοιοί, οι ορηματώσεις, οι βαλβίδες αναζούφισης και φυσικά τα τμήματα όπου υπήρχε θραύση του σκυροδέματος.

Αξιοσημείωτο είναι ότι η διαρροή ήταν αρκετά μεγάλη τόσο σε ποσότητα όσο και σε διάγνεια. Αυτό αποδεικνύεται από τις σημαντικές ζημιές που παρατηρούνται σε καλλιέργειες εκτάσεις, αλλά διαπιστώθηκε και από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στα πιεζόμετρα που υπάχουν κατά μήκος της διώρυγας. Οι διάφορες προσπάθειες που επιχειρήθηκαν κατά διαστήματα με γύψωση των αμμών ή τοποθέτηση κάποιων συνθετικών δεν απέδωσαν.

Η θραύση του σκυροδέματος παρατηρήθηκε βασικά στον πυθμένα και κατά μήκος των πρανών στο κατώτερο τμήμα (Εικόνα 3). Πρέπει όμως να αναφερθεί ότι η επένδυση από σκυροδέμα, πάχους 12 cm, ήταν άοπλη και η διώρυγα είχε κατασκευαστεί σε οριζόντια ή σε ελαφρά η και σε μικτή διατομή.



Εικόνα 1: Λιανόμορφη του υδατοαγωγού και θέσεις αντιπροσωπευτικών γεωτρήσεων
Figure 2 : Scheme of the water duct path and locations of representative borehole sections

αναλόγως του τμήματος. Σαν αίτια της θραύσης θεωρήθηκαν η μέθοδος θεμελίωσης, η έλλειψη οπλισμού, η μη σωστή αναλογία τοιμώντων, η κακή δόνηση, η μεγάλη απόσταση μεταξύ των βαλβίδων αντεπιστροφής, η άνοδος της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα εξαιτίας της διαρροής και οι διαφορικές καθιζήσεις.

Ακολούθησαν διάφορες εργασίες, όπως βελτιώσεις ή ανακαινίσεις σε επιλεγμένα τμήματα της διώρυγας που είχαν υποστεί τις σοβαρότερες ζημιές, που όμως δεν έδωσαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Το 1995 στο άνω τμήμα της 9Α και σε μήκος 2500 μ. εκτελέστηκαν εργασίες ανακατασκευής, με τις εξής αλλαγές:

Χρησιμοποιήθηκε οπλισμένο σκυρόδεμα αντί για απλό, τοποθετήθηκε γεωμεμβράνη στον πυθμένα και στα πλάγια μέχρι το ύψος των τοιμών μέτρων πλάγως και έγινε πυκνώση των βαλβίδων αντεπιστροφής.



Εικόνα 3: Θραύση του σκυροδέματος σε αντιπροσωπευτική θέση της διώρυγας

Figure 3: Concrete rupture in representative site of the channel

Με αυτές τις αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν βελτιώθηκαν σημαντικά οι συνθήκες αντοχής σε θραύση, αλλά οι διαφορές εξακολούθησαν να υπάρχουν στον ίδιο βαθμό. Έτσι αναγκαστικά έπρεπε να προχωρήσει και ο έλεγχος του υπεδάφους. Γι' αυτό το σκοπό προτάθηκε ένα ολοκληρωμένο γεωερευνητικό πρόγραμμα που περιελάμβανε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις ανά 500 μ. εκατέρωθεν της διώρυγας στα τμήματα Α0, 6Α και 9Α με ελάχιστο βάθος τα 8 μ. και τοποθέτηση πιεζομέτρων για τη λήψη υδρολογικών στοιχείων (Συνδυετική Λιψόρυγα Αλιάρικα - Αξιού, Τεχνική Έκθεση επί της γενικής καταστάσεως της διώρυγας και του πιλοτικού έργου επισκευής της, Υ.Π.Ε.Χ.Ω.Δ.Ε. 1^η ΔΕΚΕ τ. 3^η Π.Υ.Δ.Ε. 1997). Κατά την εκτέλεση των γεωτρήσεων πραγματοποιήθηκαν επιτόπου δοκιμές πρότυπης διείσδυσης (SPT) και διαπερατότητας (MAAG). Παράλληλα έγιναν εγχασηριακές δοκιμές σε αντιπροσωπευτικά δείγματα, για τον καθορισμό των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφών.

Ακολούθησαν μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα τόσο κατά το διάστημα που η διώρυγα ήταν κενή, όσο και όταν ήταν γεμάτη, για να εξακριβωθούν η πιεζομετρική επιφάνεια και ο χρόνος ανόδου της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Η επιλογή των παραπάνω τμημάτων έγινε, επειδή στις θέσεις αυτές προκλήθηκαν περισσότερες ζημιές και με βάση τα γεωτεχνικά τους χαρακτηριστικά εκτιμήθηκε ότι αποτελούν αντιπροσωπευτικά τμήματα.

5. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Για να καταστεί ευκολότερη η αξιολόγηση των στοιχείων και να υπάρξει μια πληρέστερη εικόνα της περιοχής προηγήθηκε ομαδοποίηση των γεωτρήσεων με βάση τις τιμές του N_{SPT} και την κατάταξη των εδαφών.

Από τη σύγκριση των γεωτεχνικών στοιχείων που έγινε προέκυψαν εννέα (9) περιοχές. Σε κάθε περιοχή αντιστοιχεί μια αντιπροσωπευτική γεώτρηση.

Επειδή τα περισσότερα προβλήματα παρουσιάστηκαν στη στρώση έδρασης (3,50-4,50 μ.) και η ζώνη επιρροής των φορτίων εκτιμάται μέχρι το βάθος των 9 μ., η γεωτεχνική αξιολόγηση θα εστιαστεί σε αυτούς τους σχηματισμούς.

Στην περιοχή I (περιοχή γεώτρησης Γ3) της διώρυγας Α0 ο πυθμένας εδράζεται σε μέσης πυκνότητας ($N=12$) ιλιώδη άμμο με ποσοστό λεπτόζωκου υλικού διερχόμενου από το κόσκινο Νο 200=40% που δικαιολογεί την υψηλή διαπερατότητα $K=1,2 \cdot 10^{-3}$ cm/sec. Από τα δεδομένα του SPT, η σχετική πυκνότητα της παραπάνω στρώσης εκτιμάται σε 35-40% η δε επιτρεπόμενη τάση σε 0,5 kg/cm² (διαγράμματα των Gibbs & Holtz, 1957, Terzaghi & Peck, 1948 αντίστοιχα). Από το βάθος των 5,0 m. μέχρι και τα 9,0 m., δηλαδή σε όλη τη ζώνη επιρροής, συναντάται αμμόδης μαργαίτη άργιλος μέσης πυκνότητας ($N=15$), μέσης πλαστικότητας ($PI=20$) σε σφιγρή κατάσταση και διερχόμενο ποσοστό από το Νο 200=70%. Από τη δομή σε ανεμπόδιση θλίψη προκύπτει αντοχή 1,5 kg/cm² και τα αποτελέσματα των δοκιμών στερεοποίησης έδωσαν δείκτη συμπίεσης $C_c=0,220$, δείκτη συνεκτικότητας $I_c=0,65-0,85$, συντελεστή στερεοποίησης $C_s=3,48 \cdot 10^{-4}$ cm²/sec και τάση προστερεοποίησης $p_c=0,8$ kg/cm².

Στην περιοχή II (περιοχή γεώτρησης Γ13) της διώρυγας Α0, όπως δείχνει η γεωτεχνική τομή, συναντάται σε όλο το μήκος διάτρησης αμμόδης μαργαίτη άργιλος με χαλάκια κατά τόπους, εκτός από την παρεμβολή μιας στρώσης παχιάς αργίλου με μεγάλη πλαστικότητα ($PI>30$), μέσης και πυκνής απόθεσης ($N>30$), μεταξύ των 2,30-3,20 m.

Στο βάθος όπου εδράζεται η διώρυγα τα στοιχεία της αμμόδης μαργαίτης άργιλου είναι: μέση πυκνότητα ($N>20$), μέση πλαστικότητα ($PI=18$) με σχετικά χαμηλή διαπερατότητα $K=9,0 \cdot 10^{-6}$ cm/sec και δείκτη συνεκτικότητας $I_c=0,77$. Η επιτρεπόμενη τάση εκτιμήθηκε σε 0,8 kg/cm².

Στην περιοχή III (περιοχή γεώτρησης Γ16) της διώρυγας Α0 στη ζώνη έδρασης συναντάται μαργαίτη άργιλοίλος με χαμηλή πυκνότητα ($N<5$) μικρή πλαστικότητα ($PI=6$) και φυσ. υγρασία που πλησιάζει σχετικά το όριο υδατότητας ($w=27,6\%$, $LI=29$) που έχει σαν συνέπεια τη μείωση του δείκτη συνεκτικότητας $I_c=0,2$. Ψηφιακή Βιβλιοθήκη Θεόφραστους - Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ. $C_c=0,388$ και για το

συντελεστή στερεοποίησης $C_v=5,388 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$. Η τιμή της τάσης προστερεοποίησης παρουσιάζεται αυξημένη $p_c=1,9 \text{ kg/cm}^2$. Αντίθετα, ο εδαφικός σχηματισμός που εμφανίζεται στη ζώνη επιρροής και υπερβαίνει το βάθος των 10m, είναι αμμώδης μαργακί άργιλος με αυξημένη πυκνότητα ($N=50$), μέση πλαστικότητα ($PI=16$) και χαμηλή υδροπερατότητα $K=1,7 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$, ενώ πρόκειται για υλικό που βρίσκεται σε **σιμφοή** κατάσταση, με δείκτη συνεκτικότητας κοντά στη μονάδα ($I_c=0,93$). Η επιτρεπόμενη τάση εκτιμήθηκε σε $0,4 \text{ kg/cm}^2$.

Στην περιοχή IV (περιοχή γεώτρησης Γ7) της διώρυγας 6A η διώρυγα εδράζεται πάνω σε αμμώδη ιλύ πάχους 3,5 m, χαμηλής πυκνότητας ($N=4$), χωρίς πλαστικότητα, χαμηλή υδροπερατότητα $K=2,0 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ με διερχόμενο ποσοστό από το No 200=60%. Η φυσ. υγρασία είναι σχετικά αυξημένη και η τιμή της ανέρχεται στα $m=32\%$ ενώ η επιτρεπόμενη τάση του εδάφους στο βάθος θεμελίωσης εκτιμάται σε $0,9 \text{ kg/cm}^2$.

Βαθύτερα, στη ζώνη επιρροής, ακολουθούν εναλλασσόμενες στρώσεις αργίλου-ιλύος όπου η πυκνότητα εξακολουθεί να είναι χαμηλή, παρουσιάζεται μικρή πλαστικότητα $PI=3-8$ με σχετικά αυξημένη φυσική υγρασία, η οποία υπερβαίνει το όριο υδατότητας ($m=39,5\%$ $LI=27$), με συνέπεια την αψηφική τιμή του δείκτη συνεκτικότητας και επομένως της διατμητικής αντοχής. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής στερεοποίησης προκύπτουν $C_c=0,287$, $C_v=5,388 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$, $p_c=0,8 \text{ kg/cm}^2$.

Στην περιοχή V (περιοχή γεώτρησης Γ14) της διώρυγας 6A ο σχηματισμός που διατηρήθηκε επιφανειακά συνεχίζει ο ίδιος, τόσο στη ζώνη έδρασης όσο και στη ζώνη επιρροής, μέχρι το βάθος των 8,50 m. Πρόκειται για αμμώδη αργιλοίλυ που χαρακτηρίζεται από χαλαρή πυκνότητα ($N=6$), μικρή έως μέση πλαστικότητα ($PI=5-18$) και χαμηλή διαπερατότητα ($K=7,9-10^{-5} \text{ cm/sec}$). Σύμφωνα με τα στοιχεία της δοκιμής σε άμεση διάτμηση **μετρήθηκαν** συνοχή $C=0,63 \text{ kg/cm}^2$ και γωνία εσωτερικής τριβής $\varphi=23,7^\circ$. Η επιτρεπόμενη τάση εκτιμήθηκε σε $q=0,4 \text{ kg/cm}^2$. Από τα 8,50 m, εμφανίζεται άργιλος υψηλής πλαστικότητας ($PI=30$), μέτριας πυκνότητας, σχετικά συνεκτική ($I_c=1,38$).

Στην περιοχή VI (περιοχή γεώτρησης Γ18) της διώρυγας 6A η ζώνη έδρασης αποτελείται από ιλυώδη άμμο, μικρής πυκνότητας ($N<10$), χωρίς πλαστικότητα με διερχόμενο ποσοστό από το No 200=11% και φυσ. υγρασία $m=28\%$. Η επιτρεπόμενη τάση εκτιμάται σε $q=0,5 \text{ kg/cm}^2$.

Μετά τα 6,0 m, συναντάται άργιλος μέσης πυκνότητας ($N=20$), μέση πλαστικότητα ($PI=14$), που βαθύτερα γίνεται πιο πλαστική, φυσ. υγρασία **αυξημένη ($m=35,6\%$)** η οποία υπερβαίνει κάπως το όριο υδατότητας ($LI=35$). Οι τιμές συνοχής και γωνίας εσωτ. τριβής που προκύπτουν από την τριαξονική δοκιμή είναι $C=0,20 \text{ kg/cm}^2$ και $\varphi=15,9$ ενώ η δοκιμή στερεοποίησης έδωσε $C_c=0,280$ και $C_v=6,92 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$.

Στην περιοχή VII (περιοχή γεώτρησης Γ2) της διώρυγας 9A η διώρυγα εδράζεται σε αμμώδη ιλύ έως ιλυώδη άμμο, μέσης πυκνότητας $N=15-25$, χωρίς πλαστικότητα, με χαμηλή διαπερατότητα $K=2,7 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$, σχετική πυκνότητα 35-40% και επιτρεπόμενη τάση $q=0,5 \text{ kg/cm}^2$.

Βαθύτερα στο τμήμα της ζώνης επιρροής εμφανίζεται άργιλος με **παρεμβολές** στρώσης αργίλου υψηλής πλαστικότητας από τα 7,50-9,0 m. Η πυκνότητα εξακολουθεί να διατηρείται μέση αλλά με $N=25$, εκτός από το τμήμα με υψηλή πλαστικότητα όπου το N μειώνεται στους 15 κτύπους, ενώ η πλαστικότητα αυξάνεται σε μέση ($PI=14$) και η φυσ. υγρασία παρουσιάζεται αυξημένη ($m=36,6\%$) και υπερβαίνει το όριο υδατότητας ($LI=36$).

Στη στρώση της αργίλου με **υψηλή** πλαστικότητα από τη δοκιμή στερεοποίησης προέκυψαν οι τιμές $C_c=0,249$, $C_v=1,66 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ και $p_c=1,4 \text{ kg/cm}^2$.

Στην περιοχή VIII (περιοχή γεώτρησης Γ8) της διώρυγας 9A, το τμήμα, που είναι θεμελιωμένη η διώρυγα, συνίσταται από ιλύ και αμμώδη ιλύ μέσης πυκνότητας ($N=17-20$), μικρής πλαστικότητας ($PI=6$) με διερχόμενο ποσοστό από το No 200=90-100%, αυξημένη υγρασία ($m=30\%$) που υπερβαίνει το όριο υδατότητας ($LI=27$). Από τη δοκιμή άμεσης διάτμησης προκύπτουν τιμές για τη συνοχή $C=0,16 \text{ kg/cm}^2$ γωνία εσωτ. τριβής $\varphi=32,4^\circ$ και επιτρεπόμενη τάση $q=0,4 \text{ kg/cm}^2$. Ο ίδιος σχηματισμός συνεχίζεται και στη ζώνη επιρροής με τα ίδια περίπου χαρακτηριστικά και ιδιαίτερα αυξημένη φυσική υγρασία ($m>LI$). Οι δοκιμές στερεοποίησης έδωσαν $C_c=0,114-0,354$ $C_v=1,59 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ και $p_c=1,4 \text{ kg/cm}^2$.

Στην περιοχή VIII (περιοχή γεώτρησης Γ19) της διώρυγας 9Α η στάθμη θεμελίωσης βρίσκεται σε μαργακίτη αμμώδη άργιλο με αυξημένη πυκνότητα (N=40), μικρή πλαστικότητα (PI=6-8) και διερχόμενο ποσοστό από το Νο 200=70%. Το τμήμα του εδάφους επιρροής συνίσταται από αμμώδη ιλύ μέχρι τα 7,0 m., χωρίς πλαστικότητα, μέση πυκνότητα (N=15) και άργιλο μέσης πλαστικότητας (PI=16), μέσης πυκνότητας (N=14) και πολύ αυξημένης υγρασίας (m=40,7%) που υπερβαίνει το όριο υδαρότητας (LL=38), με συνέπεια την αβητική τιμή του δείκτη συνοχής του εδάφους.

Για το πρώτο τμήμα, η δοκιμή σε άμεση διάτμηση έδωσε $C=0,43 \text{ kg/cm}^2$ και $\varphi=33,2^\circ$ ενώ η τριαξονική δοκιμή για το τελευταίο τμήμα έδωσε $C=0,25 \text{ kg/cm}^2$ και $\varphi=5,1^\circ$. Η επιτρεπόμενη τάση του υπεδάφους στη στάθμη έδρασης της διώρυγας εκτιμάται $q=0,80 \text{ kg/cm}^2$.

Στον πίνακα I δίνονται συνοπτικά για κάθε αντιπροσωπευτική γεώτρηση τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που εξετάστηκαν στο βάθος έδρασης της διώρυγας. Στον ίδιο πίνακα φαίνεται το υλικό της στρώσης έδρασης καθώς και της άμεσως κατώτερης, σε όσες περιπτώσεις αυτή αποτελείται από υλικό υψηλής πλαστικότητας και επομένως μπορεί να υποστεί παραμορφώσεις.

Πίνακας I. Φυσικομηχανικά χαρακτηριστικά σχηματισμών κατά μήκος της διώρυγας
Table I. Physical & mechanical properties of formations along the channel

Γεώτρηση (βάθος έδρασης)	Στρώση	LL (%)	PI	k (cm/sec)	N _{SP}	Λιεχόμενο από το Νο 200
Γ2 (4,5 m)	SM	-	N.P.	$2,7 \cdot 10^{-4}$	15	17%
Γ3 (4,0 m)	SM	-	N.P.	$2,5 \cdot 10^{-3}$	11	40%
Γ7 (5,0 m)	ML	-	N.P.	5210^{-4}	5	60%
Γ8 (4,5 m)	ML	27	6	$3,8 \cdot 10^{-5}$	17	89%
Γ13 (4,5 m)	CL	34	18	$9 \cdot 10^{-6}$	19	78%
Γ14 (5,0 m)	ML-CL	29	18	$7,9 \cdot 10^{-5}$	6	87%
Γ16 (5,0 m)	ML	29	6	$2 \cdot 10^{-6}$	<5	75%
Γ18 (5,0 m)	SW-SM	-	N.P.	$1,2 \cdot 10^{-3}$	8	11%
Γ19 (3,5 m)	ML	26	8	$1,1 \cdot 10^{-5}$	12	74%

Κλείνοντας το κεφάλαιο μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:

1. Η στρώση της στάθμης θεμελίωσης και οι υποκείμενες εδαφικές στρώσεις της ζώνης επιρροής, διαφέρουν σημαντικά κατά μήκος της περιοχής όπου έχει κατασκευαστεί η διώρυγα.
2. Οι εδαφικές στρώσεις είναι γενικά μικρής αντοχής (οριακή φέρουσα ικανότητα) και σε συνδυασμό με τη διακύμανση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα έχουν αβητικές επιπτώσεις στην άσπλη επένδυση της διώρυγας.
3. Η διαφορετική σύσταση των εδαφικών στρώσεων (ζοζαώδεις - συνεκτικές) έδωσε διαφορικές καθιζήσεις.
4. Οι τιμές της τάσης προστεροποίησης που κυμαίνονται από $p_c=0,8 \text{ kg/cm}^2$ μέχρι $p_c=1,4 \text{ kg/cm}^2$, καθώς και του δείκτη συμπεριτότητας $C_c=0,114-0,354$ μαρτυρούν ότι τα εδάφη αυτά έχουν σχετικά μικρή προσφρόση, αλλά έχουν παράλληλα την τάση για άμεση ενεργοποίηση των καθιζήσεων, μόλις δεχθούν έστω και μικρά πρόσθετα φορτία.
5. Ο συντελεστής στερεοποίησης που εμφανίζει τιμές $C_v=0,0159 \text{ cm}^2/\text{sec}$ μέχρι $C_v=0,538 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$, μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι οι καθιζήσεις εξελίσσονται με βραδύ ρυθμό.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Η αξιολόγηση των υφιστάμενων στοιχείων οδηγεί σε μια σειρά από συμπεράσματα.

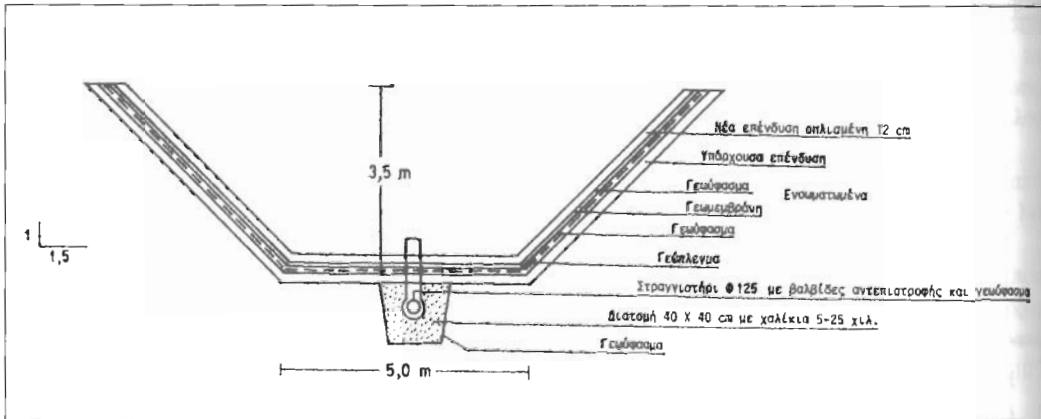
- Η διώρυγα είναι θεμελιωμένη άλλοτε σε όβριγμα, άλλοτε σε επιχώμα και άλλοτε σε μικτή διατομή.
- Οι εδαφικοί σχηματισμοί που προσέλασαν τη διώρυγα, περιλαμβάνουν αβητικό αμμο, αμμώδη ιλύ έως

άργυλο και έχουν διαφορετικά φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά με συνέπεια να προκαλούνται διαφορετικές καθιζήσεις.

- Ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται πάνω από τη στάθμη του πυθμένα της διώρυγας και προκαλεί σημαντική υποπίεση, που συμβάλλει στη θραύση του σκυροδέματος.
- Οι διαφορές νερού από τη διώρυγα, εμπλουτίζουν τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα (τεχνητός εμπλουτισμός), με αποτέλεσμα να ανέρχεται η στάθμη του ακόμη περισσότερο και να προκαλεί τα φαινόμενα των αστοχιών.
- Όλα σχεδόν τα προβλήματα παρουσιάζονται κυρίως στον πυθμένα της διώρυγας.
- Η θραύση του σκυροδέματος οφείλεται:
 1. Στη μειωμένη αντοχή της επένδυσης (όσπλο σκυροδέμα)
 2. Στις διαφορετικές καθιζήσεις και τη μικρή αντοχή της στρώσης έδρασης.
 3. Στην υποπίεση που προκαλείται από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα με μεγάλες διακυμάνσεις, που καταπονούν την όσπλη επένδυση.

Οι βελτιώσεις που πρέπει να γίνουν προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα συνοψίζονται ως εξής:

- Αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος με οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Πύκνωση των βαλβίδων αντεπιστροφής στην απόσταση των 25 μ. μεταξύ τους για να μειωθεί το μέγεθος της υποπίεσης.



Εικόνα 4: Τυπική διατομή της διώρυγας με τα προτεινόμενα μέτρα βελτίωσης
Figure 4: Typical section of the channel showing the proposed improvement measures.

- Κατασκευή διαμήκους αποστραγγιστικού φίλτρου (στραγγιστηρίου) κάτω από τον πυθμένα της διώρυγας.
- Τοποθέτηση γεωμεμβράνης σε όλη τη διατομή για αντιμετώπιση τυχόν προβλήματος διαφοράς εξαιτίας θραύσης του σκυροδέματος.

Με βάση την αξιολόγηση των γεωτεχνικών στοιχείων, την υφιστάμενη κατάσταση της διώρυγας και τα μέτρα που ελήφθησαν δοκιμαστικά σε δύο τμήματα (~300 μ. το καθένα) και είχαν επιτυχία, προτείνεται για τη διώρυγα μια λύση όπως φαίνεται στην τυπική διατομή της εικόνας 4.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ASTM (1989). Annual book of ASTM Standards. Sec. 4 Constr., Vol. 04.08, 997 pp., Soil & Rock Building Stones, Geotextiles, Phil.
- GIBBS, H.J. & HOLTZ, W.G. (1957). Research in determining density of sands by spoon penetration testing, Proc. Πηγάκη Βιβλιοθήκη Θεσσαλονίκης Έπιμημ Γεωλόγας Α.Π.Θ.

- Ι.Γ.Μ.Ε. (1983). Γεωλογικός χάρτης της Ελλάδας, Κλίμακα 1:500.000 Δεύτερη έκδοση
- ΤΕΡΖΑΓΗ Κ. & ΡΕΚΚ Ρ.Β., (1948). Soil Mechanics in Engineering Practice, 927 pp., Wiley, N. York.
- USAΕ (1953). The Unified Soil Classification system. U.S. Army Eng. Waterw. Exp. Stn., Tech. Memo. No. 3-357, Vol. 1, 30 pp.
- Υ.Π.Ε.ΧΩ.Δ.Ε. 1^η ΔΕΚΕ τ. 3^{ης} Π.Υ.Δ.Ε. (1997) Συνδυετική Λιόφινα Αλιάζιμονα - Αξιού. Τεχνική Έκθεση επί της γενικής καταστάσεως της διώρυγας και του πιλοτικού έργου επιστοσευής της. 59 σελ. Κοινοπραξία "ΥΔΡΟ-ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ"