

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΤΩΝ ΜΑΚΕΔΟΝΙΚΩΝ ΤΑΦΩΝ ΣΤΑ ΛΕΥΚΑΔΙΑ, Ν. ΗΜΑΘΙΑΣ

ΜΑΡΙΟΛΑΚΟΣ Η.², ΧΡΗΣΤΑΡΑΣ Β.¹, ΦΟΥΝΤΟΥΛΗΣ Ι.², ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Α.¹, ΑΘΑΝΑΣΙΑΣ Σ.¹,
ΛΕΜΟΝΗ Ε.¹ & ΧΑΤΖΗΑΓΓΕΛΟΥ Μ.¹

ΣΥΝΟΨΗ

Η παρούσα εργασία αποτελεί προσέγγιση στα γεωτεχνικά και υδρογεωλογικά προβλήματα που παρατηρούνται σε τρεις Μακεδονικούς Τάφους στην περιοχή των Λευκαδίων του Νομού Ημαθίας. Στη περιοχή μελέτης, τα προβλήματα σχετίζονται α) με την παρουσία υπόγειου υδροφόρου που βρίσκεται σε μικρό βάθος, ο οποίος καλύπτει το δάπεδο των μνημείων, κυρίως κατά τους θερινούς μήνες, και β) με φαινόμενα διαφορικής καθίζησης. Επίσης παρατηρούνται φαινόμενα αποσάθρωσης των τοίχων, λόγω της υπάρχουσας εσωτερικής υγρασίας. Στην εργασία αυτή περιγράφονται οι παρούσες γεωτεχνικές συνθήκες και διατυπώνονται προτάσεις αποστράγγισης των υδάτων από το εσωτερικό των τάφων για την καλύτερη συντήρηση και προστασία αυτών των μνημείων.

ABSTRACT

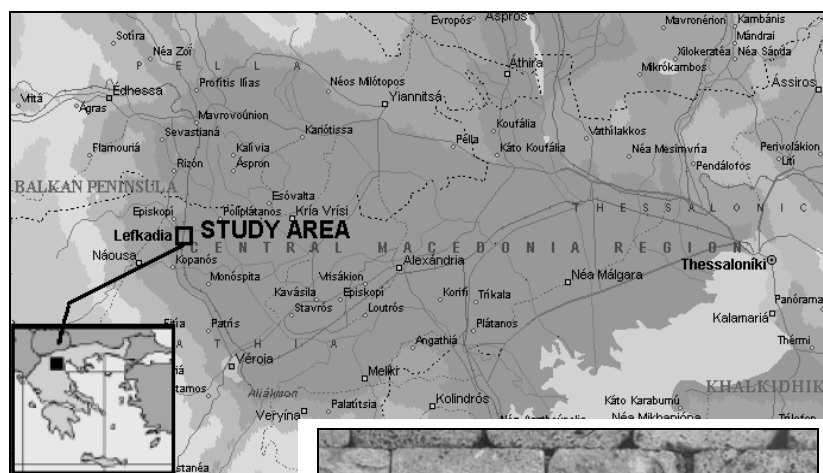
The present paper is an approach to the geotechnical and hydrogeological problems appeared in three Macedonian Tombs of Lefkadia area, located in the Prefecture of Imathia (N. Greece). In the study area, the problems are related to a) the presence of an underground aquifer, which overflows the floors of the monuments, mainly during summer, and b) differential settlement phenomena. Weathering phenomena of the walls are also observed, due to the indoor humidity. In this paper the present geotechnical conditions are described and some preliminary ideas of drainage procedures at the internal part of the Tombs are proposed, as a contribution to the effort of preservation and protection of these monuments.

Key words: Macedonian tombs; drainage methods.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως αντικείμενο την έρευνα και τεκμηρίωση των αιτιών των υψηλών συνθηκών υγρασίας που παρατηρούνται στους Μακεδονικούς Τάφους της Κρίσεως, των Ανθεμίων και των Λύσωνος και Καλλικλέους, οι οποίοι βρίσκονται μεταξύ των κοινοτήτων Κοπανός και Λευκάδια (Πέτσας, 1966), επί της εθνικής οδού Βέροιας - Έδεσσας (Εικόνα 1). Πρόκειται για κτίσματα του 3^{ου} αιώνα π.Χ. που διατηρούν σημαντικές τοιχογραφίες και παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα αποσάθρωσης, ρωγμές και ίχνη πιθανών διαφορικών καθιζήσεων.

Τα προβλήματα σχετίζονται κυρίως με την παρουσία του υπόγειου νερού, που, πολύ συχνά, καλύπτει το δάπεδο των τάφων. Αυτό συνδέεται με το γεγονός ότι ο υδροφόρος ορίζοντας βρίσκεται σε μικρό βάθος. Στόχος της έρευνας ήταν η διερεύνηση των υφιστάμενων συνθηκών στις θέσεις των τάφων και η διατύπωση μεθόδων για την αποστράγγιση της περιοχής των τάφων και την προστασία των μνημείων.



Εικόνα 1. Περιοχή μελέτης
Figure 1. Study area.



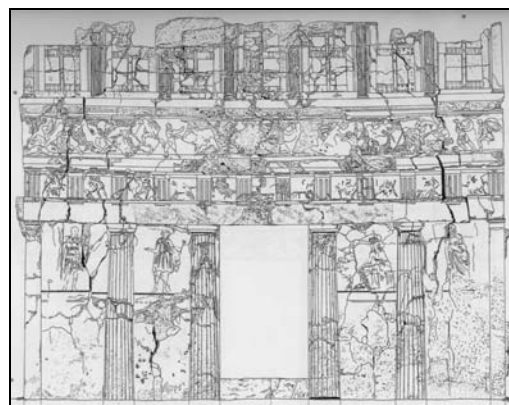
Εικόνα 2. Λεπτομέρειες της τοιχοποιίας του τάφου (δομικό υλικό: τραβερτίνης)
Figure 2. Details from the wall of the tombs (structured material: travertine)

2. ΟΙ ΤΑΦΟΙ

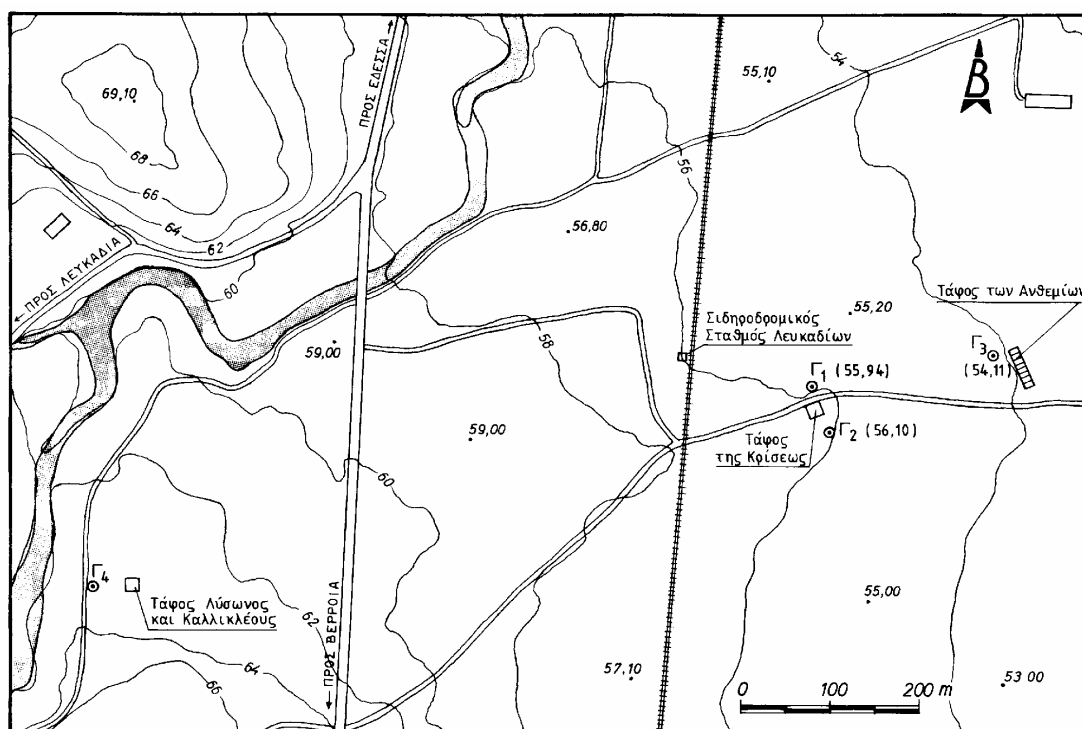
Οι Μακεδονικοί Τάφοι της περιοχής, (βρίσκονται εκτός των τειχών της αρχαίας πόλης της Μίεζας) είναι τοποθετημένοι κατά μήκος της κύριας οδικής αρτηρίας που συνέδεε την Πέλλα με τη Μίεζα, που ήταν μία από τις σημαντικότερες εμπορικές πόλεις κατά την περίοδο του 4^{ου} – 2^{ου} αι. π.Χ. Πρόκειται για υπόγεια οικογενειακά κτιστά μνημεία με καμαρωτή στέγη. Έχουν ένα ή δύο θαλάμους και διατηρούν σημαντικές τοιχογραφίες που αποτελούν μοναδικά δείγματα μνημειακής ζωγραφικής τέχνης στη Μακεδονία (Αλλαμανή, 1995). Οι Τάφοι βρίσκονται σήμερα θαμμένοι εντός Πλειστοκαινικών αποθέσεων. Τα μνημεία είναι κατασκευασμένα από πορόλιθο (τραβερίνης) που αφθονεί στη γύρω περιοχή (Εικόνα 2). Η τεχνικογεωλογική έρευνα που εκτελέστηκε αφορούσε τους τάφους της Κρίσεως, των Ανθεμίων και των Λύσωνος & Καλλικλέους (Εικόνα 3).

- Ο Τάφος της Κρίσεως (τέλος 4^{ου} αι. π.Χ.). Είναι ο μεγαλύτερος σε διαστάσεις μακεδονικός τάφος που έχει αποκαλυφθεί μέχρι σήμερα, ένας από τους σημαντικότερους από αρχιτεκτονική άποψη και ο μόνος με διώροφη πρόσοψη (Εικόνα 4), στην οποία εναλλάσσονται ο δωρικός (κάτω) και ο ιωνικός (επάνω) ρυθμός. Το μνημείο κατασκευάστηκε από μεγάλα τεμάχια τραβερίνη (Εικόνα 2) και η πρόσοψη καλύπτεται από εξαιρετικές ζωγραφικές παραστάσεις. Στο θάλαμο σώζεται αρχιτεκτονική διακόσμηση με κονιάματα λευκού και ερυθρού χρώματος. Η κατασκευή δεν έχει καταρρεύσει, εντούτοις η πρόσοψη και άλλα τμήματα παρουσιάζουν σημαντικά στατικά προβλήματα και έντονα προβλήματα φθοράς των τοιχογραφιών και των κονιαμάτων (Εικόνα 5).

- Ο Τάφος των Ανθεμίων (3^{ος} αι. π.Χ.). Πρόκειται για διθάλαμο μνημείο με ιωνική πρόσοψη από τέσσερις ημικίονες (Εικόνα 6). Η κύρια πρόσοψη και οι εσωτερικοί τοίχοι καλύπτονται από τοιχογραφίες, τα χρώματα των οποίων βρίσκονται σε καλή κατάσταση. Το μνημείο παρουσιάζει σημαντικά στατικά προβλήματα και φαινόμενα αποσάθρωσης (Εικόνα



Εικόνα 4. Ο τάφος της Κρίσεως (σχέδιο σημερινής κατάστασης της πρόσοψης).
Figure 4. The Krisis Tomb (the present day drawing of the facade).



Εικόνα 3. Τοπογραφικό σχεδιάγραμμα της περιοχής – Θέσεις Τάφων και γεωτρήσεων.
Figure 3. Topographic sketch map of the study area - Location of the Tombs and the boreholes.

7). Το άνοιγμα από τον πρώτο στο δεύτερο θάλαμο έκλεινε με μία δίφυλλη μαρμαρίνη πόρτα.

- Ο Τάφος του Λύσωνος και Καλλικλέους (200 π.Χ.). Ο τάφος αυτός αποτελεί ένα σπάνιο δείγμα της ελληνοιστικής



Εικόνα 5. Τμήμα της πρόσοψης του τάφου της Κρίσεως που παρουσιάζει σημαντικά προβλήματα.
Figure 5. The facade of the Krisis Tomb where significant damages are presented.

ταφικής αρχιτεκτονικής. Στους τρεις τοίχους του θαλάμου βρίσκονται 22 κόγχες, που περιείχαν την τέφρα και τα υπολείμματα των οστών των νεκρών (Εικόνα 8). Ο τάφος βρίσκεται ακόμα θαμμένος στο έδαφος και περιέχει σημαντικές τοιχογραφίες.

3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΗΣ ΕΥΡΥΤΕΡΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

Η υπό εξέταση περιοχή των Μακεδονικών τάφων των Λευκαδίων Νάουσας, βρίσκεται, από πλευράς γεωτεκτονικής τοποθέτησης, στις δυτικές παρυφές της ζώνης Αλμωπίας, στην επαφή σχεδόν της ζώνης αυτής με την Πελαγονική ζώνη (Kiliias & Mountrakis, 1989). Η ευρύτερη περιοχή των τάφων αποτελείται από πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις, καθώς και Πλειστοκαινικούς κώνους κορημάτων και αναβαθμίδες ποταμοχερσαίων αποθέσεων. Υπάρχουν επίσης παλαιότερες αποθέσεις κροκαλοπαγών, Πλειο-Πλειστοκαινικής ηλικίας (ΙΓΜΕ, 1982).

Το ακριβές πάχος των αποθέσεων αυτών είναι δύσκολο να προσδιοριστεί στην περιοχή, εκτιμάται όμως ότι κυμαίνεται σε 100 m. περίπου, ενώ ανατολικότερα, στην περιοχή Αγγελοχωρίου - Ζερβοχωρίων, φτάνει τα 200-300 μέτρα.

Το όρος Βέρμιο, που βρίσκεται δυτικά των τάφων, αποτελείται από σερπεντινίτες και Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους.

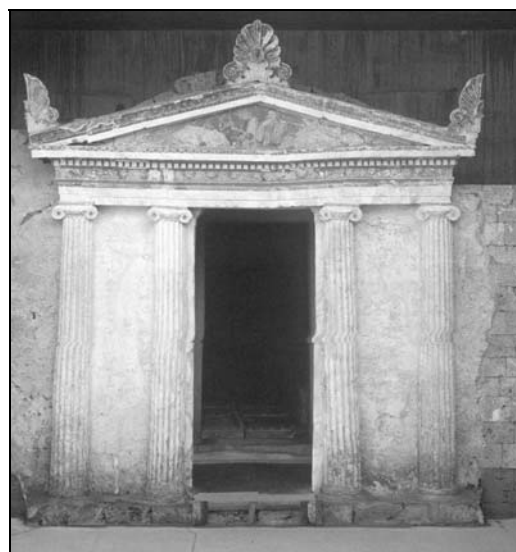
Με βάση τα δεδομένα των ερευνητικών γεωτρήσεων που πραγματοποιήθηκαν, οι σχηματισμοί, μέσα στους οποίους οι τάφοι είναι θαμμένοι, συνιστώνται από αργιλοαμμώδεις αποθέσεις και χαλαρές ποταμοχερσαίες αποθέσεις κροκαλών και κροκαλοπαγών. Η απόθεση των φερτών υλικών έγινε με τη βοήθεια των δύο ρεμάτων που διατρέχουν την περιοχή σε μικρή απόσταση από τους τάφους, του ρέματος Αραπίτσα και του ρέματος Σιασάκη. Το κλαστικό υλικό των αποθέσεων παρουσιάζει σερπεντινική και ασβεστολιθική σύσταση, με προέλευση τη γεινιάζουσα εμφάνιση σερπεντίνης της περιοχής Ροδακινέας-Λευκαδίων και τον παρακείμενο ασβεστολιθικό όγκο του Ανωκρητιδικού καλύμματος του Άνω Βερμίου.

4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όπως προαναφέρθηκε, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που κυριαρχούν είναι πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις και Πλειο-Πλειστοκαινικής ηλικίας κώνοι κορημάτων και αναβαθμίδες ποταμοχερσαίων αποθέσεων. Η μεγάλη χαλαρότητα των σχηματισμών, αλλά και η αδρόκοκη σύστασή τους, μας προδιαθέτουν για μεγάλες τιμές ενεργού πορώδους και περατότητας, της τάξης του 10-25 % και 10^{-4} - 10^{-2} cm/sec αντίστοιχα. Με βάση τα παραπάνω, οι τιμές της παροχής από τους γεωλογικούς σχηματισμούς της περιοχής θα πρέπει να αναμένονται μεγάλες.

Κατασκευάστηκαν 4 δειγματοληπτικές γεωτρήσεις (Γ1-Γ4) των 20 m βάθος η κάθε μία, με σκοπό τη λιθολογική και γεωτεχνική περιγραφή των πυρήνων των γεωτρήσεων και τη συστηματική παρακολούθηση της στάθμης του υδροφορέα. Οι γεωτρήσεις Γ1 και Γ2 τοποθετήθηκαν εκατέρωθεν του Τάφου της Κρίσεως, η Γ3 στον Τάφο των Ανθεμίων και η Γ4 στον Τάφο των Λύσωνος και Καλλικλέους. Οι σχετικές περιγραφές δίνονται στα έντυπα καταγραφής των γεωτρήσεων της Εικόνας 10.

Οι μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα που γίνονταν κάθε μήνα στις πραγματοποιηθείσες γεωτρήσεις, φέρνει τον υδροφόρο ορίζοντα να βρίσκεται στο βάθος των 7.30-8.26, 7.00-7.95 και 6.97-8.05 m στην περιοχή των τάφων της Κρίσεως και των Ανθεμίων που βρίσκονται ανατολικά της οδού Νάουσας - Σκύδρας (γεωτρήσεις Γ1, Γ2 και Γ3) και στο βάθος των 4.56-4.92 m στον τάφο των Λύσωνος και Καλλικλέους, δυτικά της ίδιας οδού (γεωτρήση Γ4). Η υψηλότερη στάθμη στη γεωτρήση Γ4 δικαιολογείται τόσο από τη γεινιάσή της με τον ποταμό Αραπίτσα, όσο και από την υδραυλική κλίση του υδροφορέα. Επίσης στη γεωτρήση Γ4 παρατηρείται η μικρότερη μεταβολή της στάθμης στη διάρκεια του χρόνου.



Εικόνα 6. Εμπρόσθια όψη του τάφου των Ανθεμίων (Ρωμιοπούλου, 1997).

Figure 6. The front wall of the Anthemion Tomb.



Εικόνα 7. Λεπτομέρειες από τη διακόσμηση της οροφής του προθαλάμου του τάφου των Ανθεμίων με εμφανή προβλήματα υγρασίας. Figure 7. Paint on the upper part of the arc in front of the entrance in the second room of the Anthemion Tomb with obvious moisture problems.

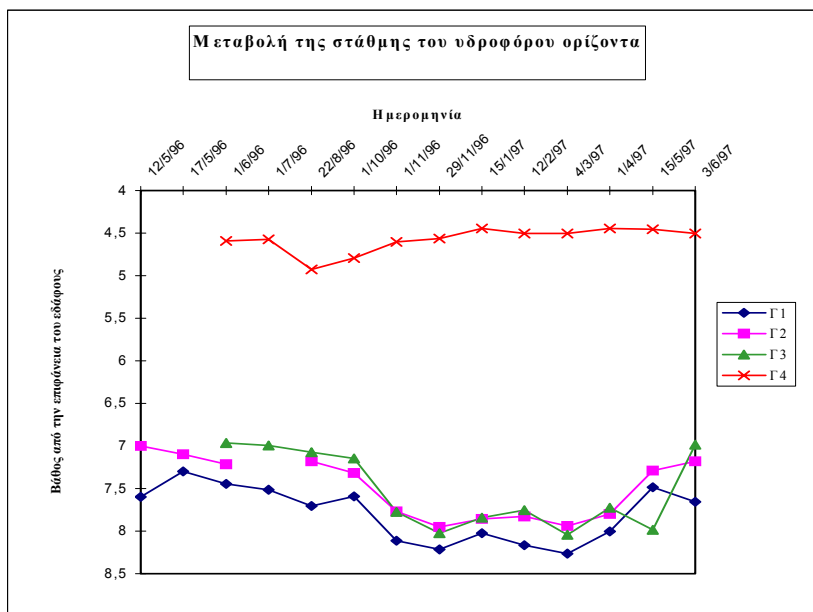
Οι παραπάνω τιμές στάθμης, εκτός του ότι καταδεικνύουν έναν υδροφόρο ορίζοντα αρκετά κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, δηλώνουν και μία τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής από τα δυτικά, με πιθανότερη προέλευση τον καρστικό ασβεστολιθικό όγκο του Βερμίου (Athanasias & Soulios, 1995). Η υδραυλική κλίση, με βάση τις προαναφερόμενες τιμές στάθμης και την απόσταση των τάφων, εκτιμάται ότι έχει διεύθυνση από Δυτικά προς Ανατολικά (Εικόνα 11). Η μέγιστη υδραυλική κλίση μεταξύ των Γ4-Γ3 και Γ1-Γ3 παρατηρήθηκε τον Μάιο του '97, ενώ κατά τη χειμερινή περίοδο έχουν υπολογιστεί μεγαλύτερες τιμές υδραυλικής κλίσης από τις αντίστοιχες που παρατηρούνται κατά τη διάρκεια του θέρους. Οι μικρότερες τιμές υδραυλικής κλίσης που υπολογίστηκαν κατά τους θερινούς μήνες οφείλονται στο επιφανειακό νερό που χρησιμοποιείται για την άρδευση των γειτονικών, στις γεωτρήσεις Γ1, Γ2 και Γ3, καλλιεργειών, το οποίο εμπλουτίζει τα υδροφόρα στρώματα ανεβάζοντας τη στάθμη σε μικρότερο βάθος (η στάθμη της γεώτρησης Γ4 παραμένει περίπου σταθερή κατά τη διάρκεια του έτους), (Εικόνα 9).

Με βάση τις περιοδικές μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σχεδιάστηκαν οι πιεζομετρικοί χάρτες της περιοχής για τη χειμερινή (Φεβρουάριος '97) και τη θερινή (Ιούνιος '96) περίοδο, όπου είναι εμφανής η ροή του υπόγειου νερού από ΔΝΔ προς ΑΒΑ (Εικόνα 11 & 12).



Τίμος τάφος Λύσωνος
 ωτερική διακόσμηση

Kallikles Tomb.

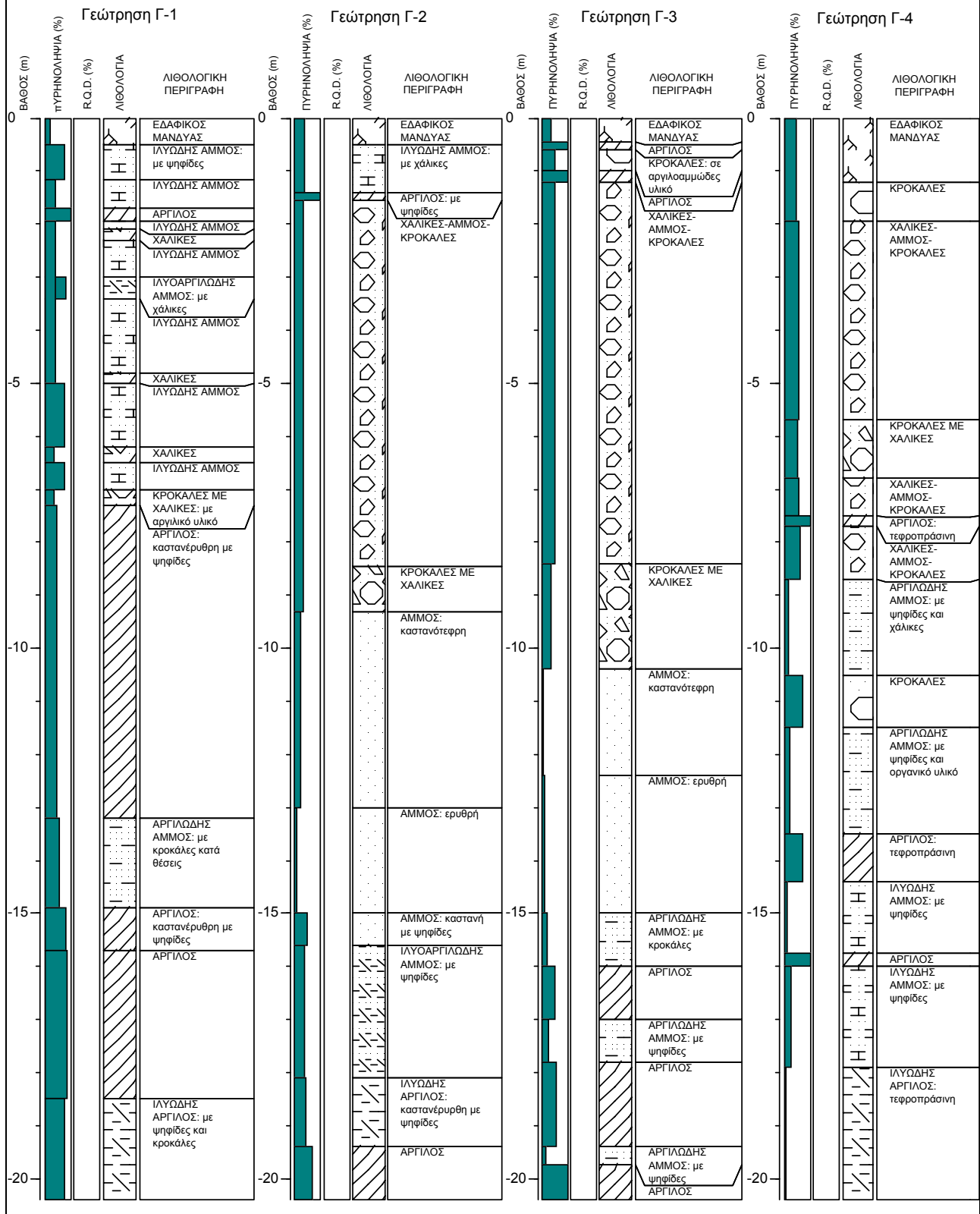


Εικόνα 9. Διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάρκεια ενός έτους.

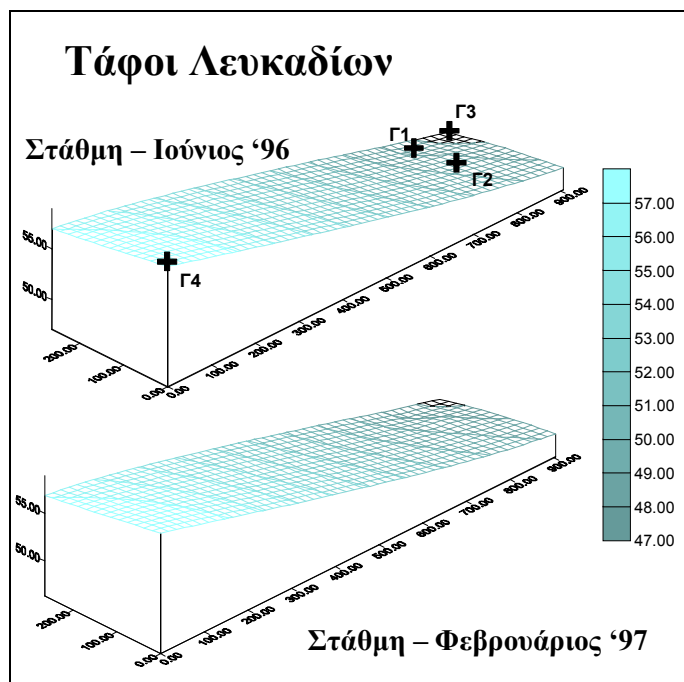
Figure 9. Diagram of fluctuations of watertable depth during the year.

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
 ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
 ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΕΣ: Καθ. Η. Μαριολάκος, Αν. Καθ. Β. Χρηστάρας
 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ: Α. Δημητρίου, Σ. Αθανασιάς

Μακεδονικοί Τάφοι στα Λευκάδια (Νομός Ημαθίας)
Περιγραφές Στηλών Γεωτρήσεων



Εικόνα 10. Έντυπα των γεωτρήσεων στις θέσεις των Τάφων.
 Figure 10. Borehole cross sections at the sites of the Tombs.



Εικόνα 11. Τρισδιάστατος πιεζομετρικός χάρτης.
 Figure 11. Potentiometric block diagram.

Από πλευράς κλιματικών στοιχείων, οι μετρήσεις του σταθμού του Υπ. Γεωργίας που βρίσκεται στα Μονόσπιτα, 6,5 km νοτιοανατολικά των Λευκαδίων και σε υψόμετρο 47 m., μας δίνουν μέσο ύψος βροχής 529,8 mm και μέση θερμοκρασία 14 °C.

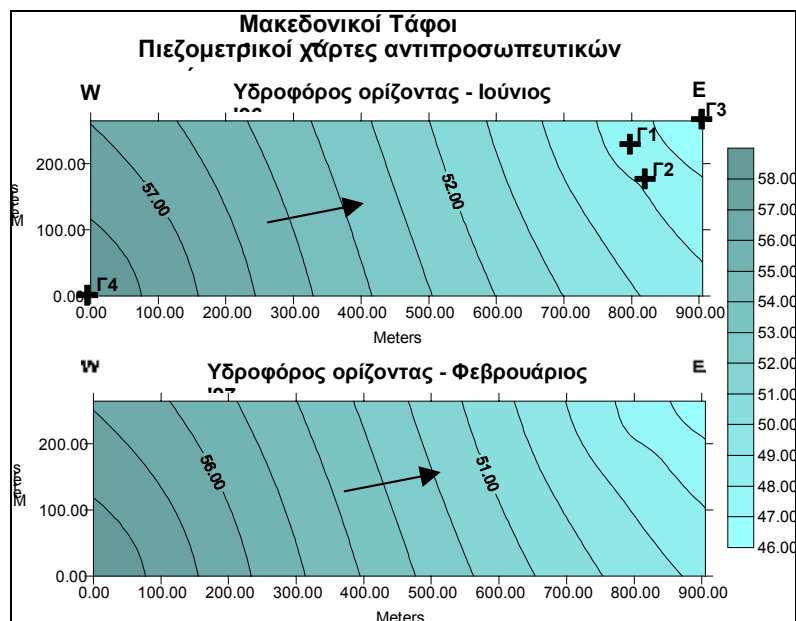
Με βάση τις μετρήσεις στάθμης, το δάπεδο του κάθε τάφου βρίσκεται στη μέση περίπτωση του Τάφου της Κρίσεως σε βάθος 0,5 μ. πάνω από την επιφάνεια του υδροφόρου οριζοντα, στις δε περιπτώσεις του Τάφου των Ανθεμίων και του Τάφου των Λύσωνος και Καλλικλέους εφάπτονται σχεδόν με τη στάθμη του υδροφόρου οριζοντα. Έτσι το νερό κατακλύζει τα δάπεδα των μνημείων δημιουργώντας προβλήματα που σχετίζονται με α) την αποσάθρωση των τοίχων και των τοιχογραφιών (Εικόνα 13) λόγω της υψηλής εσωτερικής υγρασίας και β) διαφορικές καθιζήσεις και αστάθεια της κατασκευής (Εικόνα 14). Γι' αυτό το λόγο το βασικό πρόβλημα της έρευνας αυτής είναι να προταθεί η πλέον ενδεδειγμένη μέθοδος αποστράγγισης των υδάτων από το εσωτερικό των τάφων.

5. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Οι εδαφικοί σχηματισμοί που διατρήθηκαν είναι γενικά χαλαροί και αδρόκοκκοι. Παρουσιάζουν διαπερατότητα και ενεργό πορώδες που ποικίλλει ανάλογα με την κοκκομετρική τους διαβάθμιση (Εικόνα 9), (Christaras et al., 1997).

Έτσι στη γεώτρηση Γ1 (υψόμετρο: 55.94 m.), που τοποθετείται στη βόρεια πλευρά του τάφου της Κρίσεως, οι σχηματισμοί που διατρήθηκαν στα πρώτα 7.3 m. αποτελούνται από εναλλαγές ιλυώδους άμμου με χαλίκια, κροκάλες και λεπτές ενστρώσεις αργίλου. Από τα 7.3 m. και μέχρι το τέλος της γεώτρησης, οι σχηματισμοί είναι πιο λεπτόκοκκοι και αποτελούνται από καστανέρυθρη άργιλο με ψηφίδες, αργιλώδη άμμο με κροκάλες κατά θέσεις και ιλυώδη άργιλο. Ο συντελεστής διαπερατότητας παίρνει τιμές από 10^{-1} μέχρι 10^{-4} cm/sec στα πρώτα 7.3 m., με εξαίρεση τις ενστρώσεις αργίλου και ιλυοαργιλώδους άμμου. Στο υπόλοιπο τμήμα της γεώτρησης η διαπερατότητα των σχηματισμών είναι πολύ μικρή με τιμές 10^{-7} - 10^{-8} cm/sec (Πίνακας 1).

Στη γεώτρηση Γ2 (νότια πλευρά του τάφου της Κρίσεως, υψόμετρο: 56.10 m) η κοκκομετρία των εδαφών δεν είναι ίδια με αυτών της γεώτρησης Γ1. Σε βάθος 0.5-1.4 m βρίσκεται ένα στρώμα ιλυώδους άμμου που υπέρκειται μιας αδιαπέρατης αργιλικής ζώνης πάχους 10 cm. Στη συνέχεια και μέχρι τα 9.3 m ακολουθεί μια αδρόκοκκη ζώνη με χαλαρούς σχηματισμούς υψηλής διαπερατότητας ($\sim 10^{-2}$ cm/sec), όπως άμμοι, χαλίκια και κροκάλες. Μία ακόμη διαπερατή ζώνη με ομοιόμορφα αμμώδη εδάφη ακολουθεί μέχρι τα 15.6 m, ενώ στη συνέχεια και μέχρι το τέλος της γεώτρησης οι σχηματισμοί που συναντώνται είναι πιο λεπτόκοκκοι



Εικόνα 12. Πιεζομετρικό σκαρίφημα.
 Figure 12. Potentiometric sketch map.

και συνεκτικοί (ιλυοαργιλώδης άμμος, ιλυώδης άργιλος, άργιλος) και παρουσιάζουν μικρή διαπερατότητα της τάξης του 10^{-6} - 10^{-8} cm/sec (Πίνακας 1).

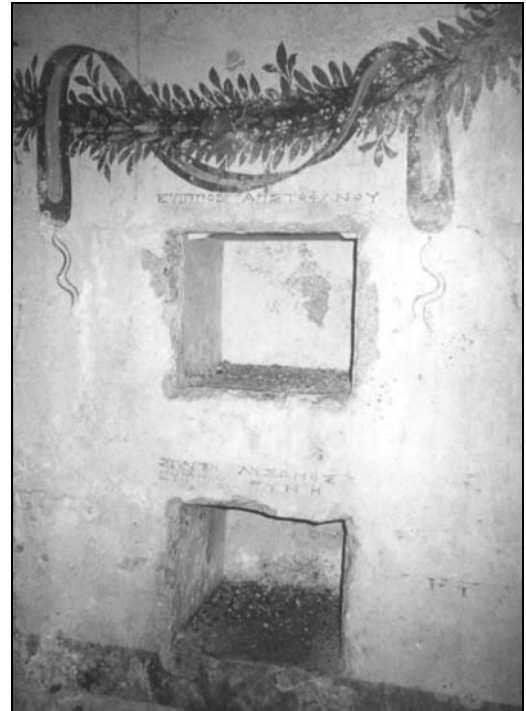
Στη γεώτρηση Γ3 (υψόμετρο: 54.11 m), που διανοίχθηκε στη δυτική πλευρά του τάφου των Ανθεμίων, που βρίσκεται περίπου 200 m. ανατολικά του τάφου της Κρίσεως, ένα στρώμα με κροκάλες σε αργιλοαμμώδες υλικό βρίσκεται μεταξύ δύο αδιαπέρατων συνεκτικών αργιλικών ενστρώσεων πάχους 20 cm. Στη συνέχεια και μέχρι τα 15 m. ακολουθεί μία μεγάλης διαπερατότητας ζώνη που αποτελείται από χαλαρούς και ομοιόμορφους εδαφικούς σχηματισμούς, όπως: άμμος και κροκάλες (1.20-8.40 m), χαλίκια και κροκάλες (8.40-10.40 m), καστανότεφρη άμμος (10.40-12.40 m), ερυθρή άμμος (12.40-15.0 m). Κάτω από αυτή τη ζώνη και μέχρι το τέλος της γεώτρησης οι σχηματισμοί που διατρήθηκαν είναι πιο συνεκτικοί και αποτελούνται από εναλλαγές αργιλώδους άμμου με άργιλο. Τα στρώματα αυτά παρουσιάζουν μέση με πολύ μικρή διαπερατότητα (10^{-5} - 10^{-8} cm/sec) και χαμηλές τιμές ενεργού πορώδους (Πίνακας 2).

Η γεώτρηση Γ4 (υψόμετρο: 63.50 m) βρίσκεται δίπλα στον τάφο των Λύσωνος και Καλλικλέους και σε απόσταση περίπου 900 μέτρων δυτικά από τους τάφους της Κρίσεως και των Ανθεμίων. Στα πρώτα 8.70 m οι εδαφικοί σχηματισμοί είναι χαλαροί, αδρόκοκκοι και διαπερατοί (10^{-1} - 10^{-2} cm/sec). Πρόκειται για άμμους με κροκάλες που εναλλάσσονται με χαλίκια και κροκάλες. Μεταξύ αυτών παρεμβάλλεται στα 7.50 m μία λεπτή ένστρωση τεφροπράσινης αργίλου πάχους 20 cm. Κάτω από αυτή τη διαπερατή ζώνη ακολουθεί μία σειρά αδιαπέρατων στρωμάτων, με τιμές διαπερατότητας που κυμαίνονται από 10^{-5} μέχρι 10^{-8} cm/sec. Οι εδαφικοί σχηματισμοί που διατρήθηκαν είναι αργιλώδης άμμος με ψηφίδες, εναλλαγές συνεκτικής τεφροπράσινης αργίλου με ιλυώδη άμμο και ιλυώδης άργιλος. Εξάιρεση σ' αυτή την αδιαπέρατη ζώνη αποτελεί μία στρώση με κροκάλες που βρίσκεται σε βάθος 10.5 με 11.5 m (Πίνακας 2).

6. ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ

Από την μελέτη των πυρήνων των γεωτρήσεων (Γ1, Γ2, Γ3 & Γ4), αποδεικνύεται ότι η υδροφορία στην περιοχή δεν προέρχεται από ένα εννιαίο υδροφόρο στρώμα περιορισμένου πάχους, που θα μπορούσε πιθανά να απομονωθεί ανάλογα με το βάθος στο οποίο θα βρισκόταν, αλλά από μια σειρά επάλληλων υδροφόρων στρωμάτων. Έτσι οι τάφοι δεν είναι δυνατόν να προστατευτούν, αφού ο υδροφόρος ορίζοντας δεν μπορεί να απομονωθεί. Συγκεκριμένα, η υδροφορία της περιοχής οφείλεται σε μια σειρά επάλληλων υδροφόρων στρωμάτων, που συναντώνται σε διάφορα βάθη σε κάθε γεώτρηση (Γ1: 0.5-1.7 m, 1.95-3.0 m, 3.4-7.3 m; Γ2: 0.5-1.4 m, 1.55-15.6 m; Γ3: 0.6-1.0 m, 1.2-16 m, 19.4-19.75 m; Γ4: 1.5-7.5 m, 7.7-11.5 m, 14.4-15.75 m και 16.0-17.9 m).

Με δεδομένα λοιπόν τα παραπάνω, οι τρεις προτεινόμενες λύσεις στοχεύουν στην απομόνωση και στεγανοποίηση των ίδιων των τάφων και επεκτείνονται σε βάθος λίγο μεγαλύτερο από το βάθος του δαπέδου τους.



Εικόνα 13. Λεπτομέρεια της τοιχοποιίας του τάφου των Λύσωνος και Καλλικλέους με εμφανή προβλήματα υγρασίας.

Figure 13. The Lysson & Kallikles Tomb with obvious indoor humidity problems.



Εικόνα 14. Λεπτομέρεια της πρόσοψης του τάφου της Κρίσεως με ρωγμές λόγω διαφορικής καθίζησης του εδάφους.

Figure 14. Crisis Tomb. The differential settlement caused failures and displacements on the front wall (facade).

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών στις θέσεις θεμελίωσης των Μακεδονικών Τάφων.
TABLE 1. Physical and mechanical properties of the geological formations at the foundation sites of the Macedonian Tombs.

Γεώτρηση	Θέση	Βάθος δειγματοληψίας (m)	Περιγραφή	Φυσική υγρασία m (%)	Φαινόμενο βάρος γ (t/m ³)	Συντ. ομοιομορφίας U	Όριο υδαρότητας LL (%)	Δείκτης πλαστικότητας PI	Συντ. διαπερατότητας K (cm/sec)	Δείκτης Συμπίεσης C _c	Συνοχή c (KPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής φ (°)
Γ1	Τάφος Κρίσεως	3.00-3.40	Ιλυοαργιλώδης άμμος με χάλικες (SM-SC)	9	2.10	150	19	6	2.25 · 10 ⁻⁶	0.081	50	31
»		5.0-6.2 6.5-7.0	Ιλυώδης άμμος (SM-ML)	12	2.00	65	15	3	2.25 · 10 ⁻⁴	0.045	20	34
»		8.20-9.40	Καστανέρυθη άργιλος με ψηφίδες (CH)	17	1.75	>150	64	39	10 ⁻⁸	0.485	40	22
»		13.20-14.90	Αργιλώδης άμμος (SC-CL)	6	2.05	>150	25	10	10 ⁻⁷	0.135	10	28
»		16.10-18.50	Άργιλος (CH)	22	1.8	>150	64	39	10 ⁻⁸	0.486	80	22
»		18.5-20.0	Ιλυώδης άργιλος (CL)	14	1.95	>150	33	16	10 ⁻⁷	0.207	15	27
Γ2	Τάφος Κρίσεως	5.60-8.45	Άμμος με χάλικες και κροκάλες (GW)		1.90	80	-	-	1.56 · 10 ⁻²	-	0	40
»		9.60-13.0	Καστανότεφρη λεπτή -μέση άμμος (SP)	10	1.85	4	-	-	8.1 · 10 ⁻³	-	0	36
»		13.0-14.0	Ερυθρή λεπτή -μέση άμμος (SP)	24	1.85	4.5	-	-	10 ⁻²	-	0	36
»		15.0-15.6	Καστανή άμμος με ψηφίδες (SW)	6	1.95	18	-	-	1.96 · 10 ⁻²	-	0	38
»		16.70-18.10	Ιλυοαργιλώδης άμμος με ψηφίδες (SM-SC)	12	2.10	>150	19	6	10 ⁻⁶	0.081	20	31
»		19.70-20.40	Άργιλος (CH)	22	1.75	>150	64	39	10 ⁻⁸	0.486	50	22

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των γεωλογικών σχηματισμών στις θέσεις θεμελίωσης των Μακεδονικών Τάφων.
TABLE 2. Physical and mechanical properties of the geological formations at the foundation sites of the Macedonian Tombs.

Γεώτρηση	Θέση	Βάθος δειγματοληψίας (m)	Περιγραφή	Φυσική υγρασία m (%)	Φαινόμενο βάρος γ (t/m ³)	Συντ. ομοιομορφίας U	Όριο υδαρότητας LL (%)	Δείκτης πλαστικότητας PI	Συντ. διαπερατότητας K (cm/sec)	Δείκτης Συμπίεσης C _c	Συνοχή c (KPa)	Γωνία εσωτερικής τριβής ϕ (°)
Γ3	Τάφος Ανθεμίων	3.20-4.10 5.0-7.50	Άμμος με κροκάλες (GP)		2.00	45	-	-	$3.6 \cdot 10^{-3}$		0	34
»		10.40-12.40	Καστανότεφρη λεπτή -μέση άμμος (SP)	18	1.80	4	-	-	$2.25 \cdot 10^{-2}$		0	36
»		12.40-15.0	Ερυθρή λεπτή -μέση άμμος (SP)	25	1.75	4	-	-	$1.7 \cdot 10^{-2}$		0	36
»		15.0-16.0	Αργιλώδης άμμος με κροκάλες (SC)		1.95	>150	25	10	10^{-5}	0.135	5	32
»		17.0-17.80	Αργιλώδης άμμος με ψηφίδες (SC-CH)	11	1.85	>150	57	34	10^{-7}	0.423	40	27
»		17.80-19.40	Άργιλος (CH)		1.75	>150	64	39	10^{-8}	0.486	60	22
Γ4	Τάφος Λύσωνος & Καλλικλέους	1.95-3.60	Άμμος με λεπτούς χάλικες (GW)		2.00	23	-	-	$1.44 \cdot 10^{-2}$		0	40
»		5.0-5.70	Άμμος με χάλικες και κροκάλες (GW)		2.05	96	-	-	$1.56 \cdot 10^{-2}$		0	40
»		6.80-7.50	Άμμοι και χάλικες (GW)		2.25	130	-	-	$1.69 \cdot 10^{-2}$		0	40
»		7.70-8.70	Άμμοι και χάλικες (GW)		2.10	95	-	-	10^{-2}		0	40
»		11.50-13.50	Αργιλώδης άμμος με ψηφίδες (SC-CL)		2.05	>150	25	10	10^{-6}	0.135	0	32
»		16.0-17.90	Ιλυώδης άμμος (SM-ML)		2.00	142	15	3	$4.9 \cdot 10^{-5}$	0.045	10	34
»		17.90-20.0	Ιλυώδης άργιλος (CL)	15	2.00	>150	33	16	10^{-7}	0.207	45	27

1) Κατασκευή περιφερειακής τάφρου αποστράγγισης.

Σύμφωνα με τη λύση αυτή, περιμετρικά και γύρω από κάθε Μακεδονικό Τάφο, θα διανοιχτεί μια αποστραγγιστική τάφρος, με στόχο τη συλλογή των υπογείων υδάτων που προσρέουν στον τάφο και τη μεταφορά τους σε ένα χώρο άντλησης. Από το χώρο αυτό τα νερά θα διοχετεύονται στο επιφανειακό υδρογραφικό ή αρδευτικό δίκτυο με τη βοήθεια αντλητικών μηχανημάτων.

Το βάθος της τάφρου θα πρέπει να είναι τουλάχιστον 1-1.5 m μεγαλύτερο από το βάθος στο οποίο βρίσκεται το δάπεδο του τάφου. Το πλάτος της θα είναι 1 m περίπου και θα εκτείνεται περιμετρικά γύρω από τον τάφο. Η πλευρά της τάφρου που θα βρίσκεται κοντά στον τάφο, θα πρέπει να καταστεί αδιαπέρατη με κάποιο στεγανοποιητικό υλικό (τσιμεντοκονίαμα, γεωύφασμα κ.λπ.), ενώ το εσωτερικό της θα είναι πληρωμένο με ένα υλικό υψηλής διαπερατότητας (αμμοχάλικο). Το δάπεδο της τάφρου θα πρέπει να κατασκευαστεί κεκλιμένο, ώστε να επιτρέπει τη μεταφορά του συλλεγόμενου ύδατος προς το χώρο άντλησης. Η κλίση του θα πρέπει να είναι ανάλογη της ποσότητας του νερού που θα πρέπει να αποστραγγίζεται (εκτιμάται ότι θα είναι επαρκής μια κλίση ίση με περίπου 1-3 %). Με τη βοήθεια του κεκλιμένου δαπέδου, το υλικό πλήρωσης της τάφρου, λειτουργώντας σαν ένα είδος φίλτρου, θα αυξάνει την ταχύτητα ροής του νερού στο εσωτερικό της και θα το οδηγεί προς το χώρο άντλησής του.

Στο χώρο άντλησης του νερού θα εγκατασταθεί αντλητικό συγκρότημα, το οποίο θα τίθεται αυτόματα σε λειτουργία όταν το ύψος της στάθμης του νερού μέσα στην τάφρο ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο επίπεδο ασφαλείας (περίπου 0.5-1 m χαμηλότερα από την επιφάνεια του δαπέδου του τάφου). Το νερό, μετά την άντλησή του, θα διοχετεύεται στο επιφανειακό υδρογραφικό ή αρδευτικό δίκτυο.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι οι ελάχιστες εργασίες συντήρησης, οι οποίες ουσιαστικά περιορίζονται στα αντλητικά μηχανήματα, ενώ το υπόλοιπο έργο δεν απαιτεί κανενός είδους συντήρηση μετά την κατασκευή του. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η πρόκληση καθιζήσεων μικρού μεγέθους εξαιτίας της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα καθώς και το μεγάλο κόστος που θα παρουσιάσουν τα έργα εκσκαφής της τάφρου και τα λοιπά χωματουργικά έργα.

2) Κατασκευή περιμετρικών γεωτρήσεων ταπείνωσης στάθμης.

Σύμφωνα με τη λύση αυτή, περιμετρικά, γύρω από κάθε Μακεδονικό Τάφο, θα διανοιχτεί μια σειρά γεωτρήσεων που θα χρησιμοποιηθούν για την άντληση του υπόγειου νερού, με στόχο την ταπείνωση, τοπικά, της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Ο αριθμός και η διάμετρος των γεωτρήσεων θα πρέπει να αντιστοιχούν στην ποσότητα του νερού που θα πρέπει να αντληθεί για να παραμείνει η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα στο επιθυμητό βάθος (περίπου 1-1,5 m χαμηλότερα από την επιφάνεια του δαπέδου του τάφου). Η αναγκαία ποσότητα του νερού θα εκτιμηθεί μέσω μιας δοκιμαστικής άντλησης και παρακολούθησης της αντίστοιχης πτώσης στάθμης, από μια γεώτρηση που θα κατασκευαστεί ειδικά για αυτό το σκοπό. Από τις γεωτρήσεις άντλησης τα νερά θα διοχετεύονται στο επιφανειακό υδρογραφικό ή αρδευτικό δίκτυο.

Η λειτουργία των γεωτρήσεων θα ξεκινά αυτόματα, όταν η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα υπερβεί το επιθυμητό επίπεδο ασφαλείας. Ο αριθμός των γεωτρήσεων που θα χρειαστούν, ανάλογα και με τις προϋποθέσεις που τέθηκαν παραπάνω, θα εκτιμηθεί μετά την ανόρυξη αρχικώς τουλάχιστον δύο γεωτρήσεων σε έναν από τους τάφους και μετά από λεπτομερή ανάλυση των στοιχείων της δοκιμαστικής άντλησης.

Από οικονομική άποψη, το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής σε σύγκριση με την προηγούμενη, είναι το χαμηλό κόστος που παρουσιάζει η κατασκευή γεωτρήσεων μικρού βάθους (20-30 m). Αντίθετα, μειονέκτημα αποτελεί το κόστος συντήρησης και η πρόκληση καθιζήσεων μικρού μεγέθους εξαιτίας της ταπείνωσης του υδροφόρου ορίζοντα. Όμως εάν ληφθεί υπόψη η ευαισθησία του χώρου, ο οποίος αποτελεί το άμεσο περιβάλλον ενός τόσο σημαντικού μνημείου και επομένως κάθε ανθρωπογενή παρέμβαση πρέπει να αποφεύγεται ή να ελαχιστοποιείται, η προτεινόμενη μέθοδος διαταράσσει λιγότερο το περιβάλλον από την προηγούμενη.

Η παραπάνω πρόταση εφαρμόστηκε, περιμετρικά, στην περιοχή γύρω από τον τάφο της Κρίσεως. Συγκεκριμένα, διανοίχτηκαν πιλοτικά δύο γεωτρήσεις ταπείνωσης στάθμης βάθους 35 m, διαμέτρου διάνοιξης 17 ½" και τελικής σωλήνωσης 8 5/8", που χρησιμοποιούνται για την άντληση υπόγειου νερού και δύο πιεζόμετρα διαμέτρου 1".

Σε κάθε γεώτρηση πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική άντληση με σταθερή παροχή (16 και 3 m³/h αντίστοιχα) και έγινε καταγραφή της μεταβολής που παρατηρήθηκε στη στάθμη του υδροφόρου για τακτά χρονικά διαστήματα.

Τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από τις παραπάνω αντλήσεις χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για τον προσδιορισμό των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα. Έτσι υπολογίστηκε ότι ο συντελεστής διαπερατότητας, k , είναι της τάξης του 10⁻⁶ m/sec και ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας, T , της τάξεως του 10⁻⁴ m²/sec. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η ακτίνα επίδρασης των δύο γεωτρήσεων, για τις συγκεκριμένες παροχές άντλησης, που για τη μεν πρώτη βρέθηκε ότι είναι ίση με 52 m και για τη δεύτερη 48 m περίπου.

Έτσι, με βάση τα παραπάνω δεδομένα γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της ποσότητας του νερού που θα πρέπει να αντληθεί, είτε από τη μια είτε από την άλλη γεώτρηση, προκειμένου να διατηρηθεί η στάθμη

του υδροφόρου στο επιθυμητό βάθος, δηλαδή 1-1,5 m. κάτω από την επιφάνεια του δαπέδου του τάφου. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίστηκε ότι για τη διατήρηση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σε βάθος 10 m από την επιφάνεια, αρκεί η δεύτερη γεώτρηση να αντλείται με σταθερή παροχή ίση με 3 m³/h.

3) Ολόπλευρη στεγανοποίηση.

Οι δυο προτάσεις που προαναφέρθηκαν έχουν ως μειονέκτημα ότι ένα ή περισσότερα αντλητικά συκροτήματα πρέπει να λειτουργεί σε συνεχή βάση, κάτι που πρακτικά δημιουργεί λειτουργικά προβλήματα.

Για την απλοποίηση αυτού του προβλήματος έγινε προσπάθεια μελέτης της αποτελεσματικότητας εφαρμογής της μεθόδου ολόπλευρης στεγανοποίησης των τάφων με την κατασκευή τσιμεντενέσεων. Σκοπός της μεθόδου αυτής είναι η δημιουργία στεγανού κελύφους που απομονώνει το δάπεδο και τις πλευρές του τάφου κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Σύμφωνα με τα δεδομένα των δειγματοληπτικών γεωτρήσεων εκτιμήθηκε το πιο κατάλληλο είδος ενέματος που προσφέρεται για εισπίεση σε κάθε γεωλογικό σχηματισμό, καθώς και η ακτίνα επίδρασης αυτού. Στους Πίνακες 3 και 4 παρουσιάζονται τα είδη του καταλυτικού ενέματος και η ακτίνα επίδρασης αυτού, αντίστοιχα. Μια πρώτη αξιολόγηση της καταλληλότητας του ενέματος έγινε σύμφωνα με την ενεργή διάμετρο των κόκκων του εδαφικού υλικού d₁₀ και τη διαπερατότητα (Shroff & Shah, 1993). Έτσι, σε βάθος 5,6 m - 15,6 m, όπου η ενεργή διάμετρος κυμαίνεται μεταξύ 0,02 mm και 0,5 mm, ενδείκνυται η χρήση ενέματος κολοειδών διαλυμάτων ή πολυμερών, όπως silica ή ligno chrome gels, ταννίνες και οργανικά κολοειδή σε πολυουραιθάνη. Σε βάθος 3 m - 7 m, όπου η ενεργή διάμετρος είναι μικρότερη από 0,02 mm, συνιστάται η χρήση ενέματος φτωχών χημικών διαλυμάτων, όπως ακρυλαμίδια, amínoplast ή rhenoplast. Ομοίως, σε βάθος 5 m - 7 m, όπου η διαπερατότητα είναι της τάξεως του 10⁻⁴ cm/sec, προτείνεται ένεμα ακρυλαμιδίων με ιξώδες 2 cp, σε βάθος 5,6 m - 8,45 m και 13 m - 15,6 m, όπου η διαπερατότητα είναι μεγαλύτερη από 10⁻² cm/sec, προτείνεται πυριτικό ένεμα με ιξώδες 10 cp, ενώ σε βάθος 9,6 m - 13 m, όπου η διαπερατότητα είναι της τάξεως του 10⁻³ cm/sec, προτείνεται ένεμα βάσης chrome-lignin και rhenoplast με ιξώδες 5 cp. Μια δεύτερη εκτίμηση έγινε με βάση τους συγκριτικούς πίνακες χημικών ενεμάτων που προτείνουν οι Shroff & Shah (1993). Με τη βοήθεια των δυο αυτών εκτιμήσεων πραγματοποιήθηκε η τελική αξιολόγηση που φαίνεται στους πίνακες 3 και 4.

Πίνακας 3. Είδη καταλυτικού ενέματος τσιμεντενέσεων.
Table 3. Types of grouts.

Γεώ-τρηση	Βάθος δειγματοληψίας (m)	Ενεργή διάμετρος d ₁₀ (mm)	Διαπερατότητα εδάφους k (cm/sec)	Είδος καταλυτικού ενέματος	Χαρακτηριστικά εδάφους μετά την τσιμεντένεση	Βιβλιογραφία
Γ1	3.00-3.40	0.0015	2.25·10 ⁻⁶	Ρητίνη AM-9	q _u =1242 psi σ ₁ -σ ₃ =1230 psi	Graf et al, 1982
>>	5.0-6.2 6.5-7.0	0.013	2.25·10 ⁻⁴	Ρητίνη AM-9	q _u =1242 psi σ ₁ -σ ₃ =1230 psi	Graf et al, 1982
Γ2	5.60-7.00	0.15	1.56·10 ⁻²	Πυριτικό Αργιλικά+Αμιδία	q _u =239psi σ ₁ -σ ₃ =177psi	Graf et al, 1982
>>	7.00-8.45				q _u =280psi	Karol, 1968
>>	9.60-13.0	0.85	8.1·10 ⁻³	Ρητίνη Chrome lignin		Karol, 1982
>>	13.0-14.0	0.095	10 ⁻²	Πυριτικό Αργιλικά+Αμιδία	q _u =280psi	Karol, 1958
>>	15.0-15.6	0.13	1.96·10 ⁻²	Πυριτικό Αργιλικά+Αμιδία	q _u =280psi	Karol, 1958

Η ακτίνα επίδρασης του ενέματος υπολογίστηκε από τη σχέση: $t=an(R^3-r^3)/3khr$ (Raffle & Greenwood, 1961), όπου k = η διαπερατότητα του εδάφους, h = το φορτίο εισπίεσης, t = ο χρόνος επίδρασης, n = το πορώδες, r = η ακτίνα του ενεματικού σωλήνα και R = η ακτίνα επίδρασης του ενέματος.

Για την παρούσα διερεύνηση χρησιμοποιήθηκε ενδεικτική ακτίνα ενεματικού σωλήνα 2,5 cm. Οι υπολογισμοί έγιναν με βάση την εγκάρσια τοποθέτηση των γεωτρήσεων ως προς τον τάφο, έτσι ώστε η κάθε γεώτρηση να τοποθετείται με κλίση 45° και να σχηματίζει επίσης γωνία 45° με την ακμή του τάφου. Η τοποθέτηση αυτή επιλέχτηκε για την επίτευξη της πλήρους κάλυψης του τάφου με τσιμεντενέσεις. Αν η τοποθέτηση των τσιμεντενέσεων ήταν κατακόρυφη περιφερικά του τάφου η πτώση στάθμης κατά μήκος των γραμμών ροής θα ήταν μόλις 32cm. Έτσι, δεν θα ήταν δυνατή η τέλεια αδιαπερατότητα του τάφου αφού μετά από κάποιο χρονικό διάστημα τα τριχοειδή φαινόμενα θα ανέβαζαν τη στάθμη του ύδατος. Η μέση ακτίνα επίδρασης της κάθε γεώτρησης, υπολογίστηκε 0,6 m και απαιτούνται 46 τσιμεντενέσεις για πλήρη στεγανοποίηση του τάφου. Το μήκος των γεωτρήσεων θα κυμαίνεται από 11,7 m έως 19,5 m, ανάλογα με τη θέση της γεώτρησης

ως προς τον τάφο. Οι γεωτρήσεις, σύμφωνα μ' αυτήν τη διάταξη, έτσι ώστε να υπάρχει αλληλεπικάλυψη 10 % της ακτίνας επίδρασης, θα απέχουν μεταξύ τους 1,13 m.

Η μεταβολή της ακτίνας επίδρασης του ενέματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του ιξώδους (Raffle & Greenwood, 1961). Άρα, η μείωση του ιξώδους, με στόχο την αύξηση της ακτίνας επίδρασης, μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της ποσότητας του χρησιμοποιούμενου καταλύτη. Για να μπορεί να επιτευχθεί ομοιόμορφη ακτίνα επίδρασης σε κάθε βάθος πρέπει να βελτιστοποιηθεί η εκτιμητέα ακτίνα επίδρασης στο συγκεκριμένο βάθος με μεταβολή της συγκέντρωσης του καταλύτη κατά την διαδικασία της τσιμεντένωσης.

Πίνακας 4. Ακτίνα επίδρασης ενέματος ανάλογα με το βάθος της γεώτρησης.
Table 4. Radius of grout at depth of borehole.

Γεώτρηση	Βάθος δειγματοληψίας (m)	Φορτίο εισπίεσης h (cm)	Πορώδες n (%)	Ακτίνα ενεματικού σωλήνα r (cm)	Χρόνος επίδρασης t (sec)	Ιξώδες ενέματος : Ιξώδες νερού α	Ακτίνα επίδρασης ενέματος R (cm)
Γ1	3.00-3.40	800	5	2.5	2100	2	6,45
>>	5.0-6.2 6.5-7.0	1400 1700	5	2.5	2100	2	36,74 39,2
Γ2	5.60-7.00 7.00-8.45	1600 1805	25	2.5	2100	10	53,97 56,19
>>	9.60-13.0	2200	10	2.5	2100	5	82,49
>>	13.0-14.0	2700	10	2.5	2100	10	75,2
>>	15.0-15.6	2940	20	2.5	2100	10	76,84

Σε βάθη εδαφών μεγάλων διαπερατοτήτων της τάξης του 10^{-2} cm/sec θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί απλό ένεμα τσιμέντου, του οποίου η αναλογία τσιμέντο: νερό κυμαίνεται από 0,7 έως 0,9 και το οποίο έχει ιξώδες 15cp (Raffle et al., 1961). Η μέση ακτίνα επίδρασης του τσιμέντου θα είναι επίσης 60cm (Raffle et al., 1961). Η χρήση του απλού ενέματος τσιμέντου, στα προαναφερθέντα βάθη, μπορεί να δοθεί ως λύση της μείωσης του υψηλού κόστους των συγκεκριμένων τσιμεντένσεων.

7. ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΑ ΜΕΤΡΑ

1. Θα πρέπει να στεγανοποιηθούν όλα τα αρδευτικά αυλάκια που ρέουν σε ακτίνα τουλάχιστον 500 m από τους τάφους.
2. α. Θα πρέπει να αντικατασταθεί η άρδευση με κατάκλυση με εκείνη της στάγδην στα δενδροπερίβολα που περιβάλλουν τους αρχαίους τάφους και σε όσο γίνεται μεγαλύτερη ακτίνα από αυτούς. Σ' αυτή τη φάση η ακτίνα πρέπει να είναι τουλάχιστον 100 m.
β. Θα πρέπει να γίνει μελέτη από πολύ εξειδικευμένους γεωτεχνικούς επί των αρδεύσεων των συγκεκριμένων δενδροφυτιών που θα προσδιορίσουν επακριβώς τις ποσότητες που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη των δένδρων αλλά που δεν θα δημιουργείται περίσσεια ύδατος, η οποία κατεισδύει τελικά προς τον υπόγειο υδροφόρο εμπλουτίζοντάς τον, με επακόλουθο την ανύψωση της στάθμης του.
3. Εάν δεν καταβληθεί προσπάθεια να απομακρυνθεί η υγρασία από τους τάφους, η καταστροφή τους είναι θέμα χρόνου, και μάλιστα η κατάσταση των επιχρισμάτων και των τοιχογραφιών θα γίνει σε πολύ σύντομο χρόνο, ενώ των δομικών υλικών θα καθυστερήσει μεν, αλλά θα επισυμβεί οπωσδήποτε.
4. Με δεδομένα τα προηγούμενα, θεωρούμε αυτονόητο ότι η απομάκρυνση της υγρασίας πρέπει να προηγηθεί κάθε άλλης εργασίας ή συντήρησης.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της έρευνας μπορούν να συνοψιστούν στα παρακάτω:

1. Οι Μακεδονικοί Τάφοι παρουσιάζουν σημαντικά προβλήματα υγρασίας που σχετίζονται με την παρουσία ενός σημαντικού υδροφόρου ορίζοντα κοντά στο επίπεδο θεμελίωσης των Τάφων. Κατά τη θερινή περίοδο λόγω της άρδευσης των δενδροπεριβόλων με κατάκλυση, η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ανέρχεται πέραν του μισού μέτρου με αποτέλεσμα το υπόγειο νερό να καλύπτει τα δάπεδα των τάφων (κυρίως του τάφου των Ανθεμίων).
2. Οι εδαφικοί σχηματισμοί, όπου είναι θαμμένοι οι τάφοι, παρουσιάζουν υψηλή διαπερατότητα και αποτελούνται κυρίως από κροκάλες, χάλικες, άμμους, ιλυώδεις και αργιλώδεις άμμους σε εναλλαγές κατά θέ-

σεις με λεπτά στρώματα αργίλου και καστανέρυθρης ιλυώδους αργίλου με ψηφίδες. Ο υδροφόρος ορίζοντας έχει μεγάλο πάχος και παρουσιάζει μεγάλη υδραυλική κλίση (12-14%).

3. Δύο μέθοδοι προτείνονται αρχικά για την αποστράγγιση των τάφων. Η πρώτη αναφέρεται στην κατασκευή περιφερειακής τάφρου αποστράγγισης ενώ η δεύτερη στην κατασκευή περιμετρικών γεωτρήσεων ταπείνωσης της στάθμης. Η δεύτερη μέθοδος είναι πιο οικονομική από την πρώτη.
4. Επίσης προτείνεται μία τρίτη μέθοδος για την πλήρη απομάκρυνση της υγρασίας που αφορά την ολόπλευρη στεγανοποίηση των τάφων με την κατασκευή τσιμεντενέσεων. Πρόκειται για μία μέθοδο που δεν έχει εφαρμοστεί διεθνώς σε μεγάλη κλίμακα για την προστασία των μνημείων. Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος εφαρμογής και η ανάγκη εμπειρίας κατασκευής.
5. Τέλος άμεσα μέτρα μείωσης του εμπλουτισμού του υπόγειου υδροφορέα με επιφανειακά ύδατα, θα πρέπει να ληφθούν όσο το δυνατόν συντομότερα για την προστασία των Τάφων.

Ευχαριστίες

Η μελέτη αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια εφαρμοσμένου ερευνητικού προγράμματος με τίτλο «Τεκμηρίωση των αιτιών της υγρασίας στους Μακεδονικούς τάφους στα Λευκάδια Ν. Ημαθίας - Νο 6253/1-12-95» που χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Πολιτισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Αλλαμανή, Β. (1995). Η αρχαία Μίεζα. Κοπανός-Λευκάδια-Νάουσα, Νομαρχία Ημαθίας, Δήμος Νάουσας & ΙΖ' ΕΠΚΑ, Θεσσαλονίκη, 24 σελ.
- Athanasias, S. & Soulios, G. (1995). Study of the discharge in the karst ground water system of St. Nicolas springs, in Naousa. *Proc. 3rd Hell. Hydrogeol. Congr.*, Iraklio, pp.11-23.
- Christaras, B., Mariolakos, I., Fountoulis, J., Athanasias, S. & Dimitriou, A. (1997). Geotechnical input for the protection of some Macedonian Tombs in Northern Greece - *IVth International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Rhodes, Greece, Vol.1, pp. 125-132.
- Graf, T.E. (1982). Long-term aging effects on chemically stabilized soils. *Proc. Conf. on Grouting in Geotech. Engg.*, New Orleans. Wallace Hayward Baker, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 470-481.
- Ι.Γ.Μ.Ε. (1982). Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Βέροια, 1:50.000.
- Karol, R.H. (1968). Chemical grouting technology. *Proc. ASCE. Jour. of SMFE* (January), 175-204.
- Karol, R.H. (1982^a). Chemical grouts and their properties. *Proc. Conf. on Grouting in Geotech. Engg.*, New Orleans. Wallace Hayward Baker, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 564-575.
- Karol, R.H. (1982^b). Seepage control with chemical grouts. *Proc. Conf. on Grouting in Geotech. Engg.*, New Orleans. Wallace Hayward Baker, American Society of Civil Engineers, New York, pp. 564-575.
- Kilias, A. & Moundrakis, D. (1989). The tectonic Pelagonian nape. Tectonic, Metamorphose and Magmatism, *Proc. 4th Congr. Geol. Soc. Gr.*, Bull. Geol. Soc. Gr. XXIII, 1, Athens, pp. 29-46.
- Πέτσας, Φ. (1966). Ο Τάφος των Λευκαδίων. Αρχαιολογική Εταιρεία, Αθήνα, 179 σελ.
- Raffle, J. & Greenwood, D. (1961). Relation between the rheological characteristics of grouts and their capacity to penetrate soils. *Proc. 5th Int. Conf. on SNFE*, Switzerland. Balkema, Rotterdam, 2: pp. 789-794.
- Ρωμιοπούλου, Κ. (1997). Λευκάδια - Αρχαία Μίεζα. Ταμείο Αρχαιολογικών Πόρων και Απαλλοτριώσεων. Αθήνα, 46 σελ.
- Shroff, A. & Shah, D. (1993). *Grouting Technology in Tunnelling and Dam Construction*. A.A. Balkema, Rotterdam, 604 p.