

# Το Ευπαλίνειο όρυγμα. Ακολουθώντας τα βήματα του Ευπαλίνου

## Κ. Τοκμακίδης, Π. Τοκμακίδης

*Τομέας Γεωδαισίας και Τοπογραφίας, Πολυτεχνική Σχολή, ΤΑΤΜ–ΑΠΘ*

**Περίληψη:** Το Ευπαλίνειο όρυγμα είναι ένα από τα μεγαλύτερα τεχνικά έργα της αρχαίας Ελλάδας. Περιλαμβάνει μία σήραγγα μήκους 1036 μέτρων που βρίσκεται κοντά στο σημερινό Πυθαγόρειο της νήσου Σάμου. Μαζί με τον ευρύτερο αρχαιολογικό χώρο του Πυθαγορείου έχει υιοθετηθεί από την UNESCO ως ένα από τα μνημεία της παγκόσμιας πολιτιστικής κληρονομιάς. Κατασκευάστηκε, προκειμένου να παροχετευθεί το νερό κοντινής πηγής στην πόλη, το 530 π.Χ. από το μηχανικό Ευπαλίνο τον Μεγαρέα και φέρει το όνομά του. Εντοπίστηκε μετά από αναζήτηση και με βάση την περιγραφή του Ηρόδοτου ο οποίος αναφέρεται στο έργο αυτό και το περιγράφει. Ακόμα και σήμερα αποτελεί άθλο ένα έργο σαν κι αυτό, πολύ περισσότερο στην εποχή του και με τα μέσα που είχε στη διάθεσή του ο Ευπαλίνος. Κι εμείς με τη σειρά μας βαδίσουμε κατά μήκος όλου του έργου του Ευπαλίνου προκειμένου να αποτυπώσουμε την υφιστάμενη κατάσταση του ώστε να γίνουν οι απαραίτητες μελέτες για την συντήρησή του και την αποκατάσταση της επισκεψιμότητάς του. Στην εργασία αυτή αφού γίνει μία παρουσίαση του έργου στη συνέχεια περιγράφεται η τοπογραφική αποτύπωση και τα αποτελέσματα που προκύψαν απ' αυτήν. Με βάση την αποτύπωση αυτή συντάχθηκε μελέτη θεραπείας και αποκατάστασης του έργου.

### 1. Εισαγωγή

Την εποχή του τυράννου Πολυκράτη στη Σάμο, που ήταν ισχυρό ναυτιλιακό και εμπορικό κέντρο της Ελλάδας, γίνονται τρία μεγάλα έργα. Ένα από αυτά είναι το υδραγωγείο της πόλης. (Τα άλλα δύο ήταν ο ναός της Ήρας και το λιμάνι της Σάμου). Πρόκειται για σπουδαίο τεχνολογικό κατόρθωμα το οποίο αναφέρεται στα γραπτά που μας άφησε ο Ηρόδοτος. Με βάση αυτά τα κείμενα έγινε δυνατή η ανακάλυψή του και η ανασκαφή του. Δεν υπάρχει άλλη γραπτή πηγή από κανέναν άλλο για το έργο αυτό και πιθανώς δεν θα εντοπιζόνταν ποτέ λόγω των ολοκληρωτικών προσχώσεών του αν δεν υπήρχε η αναφορά του Ηρόδοτου. Ακολουθώντας την περιγραφή του Ηρόδοτου το 1853, ο Γάλλος αρχαιολόγος Victor Guerin ήρθε στο νησί προς αναζήτηση του ορύγματος. Εντόπισε την πηγή και την αρχή του αγωγού αλλά δεν έφτασε στο όρυγμα. Στη συνέχεια έγιναν περισσότερες έρευνες έως όταν το 1882 ένας μοναχός αποκάλυψε το όρυγμα και έγινε μια προσπάθεια επαναλειτουργίας του αγωγού. Επειδή όμως ήταν δύσκολο να καθαριστεί ο αγωγός εγκαταλείφθηκε. Το 1884 ο Γερμανός αρχαιολόγος Ernst Fabricius ερευνά το όρυγμα όσο ήταν δυνατό εκείνη την εποχή και σημειώνει την θέση του σε έναν



**Εικόνα 1.** Η πρώτη απεικόνιση του ορύγματος από τον Ernst Fabricius το 1884.

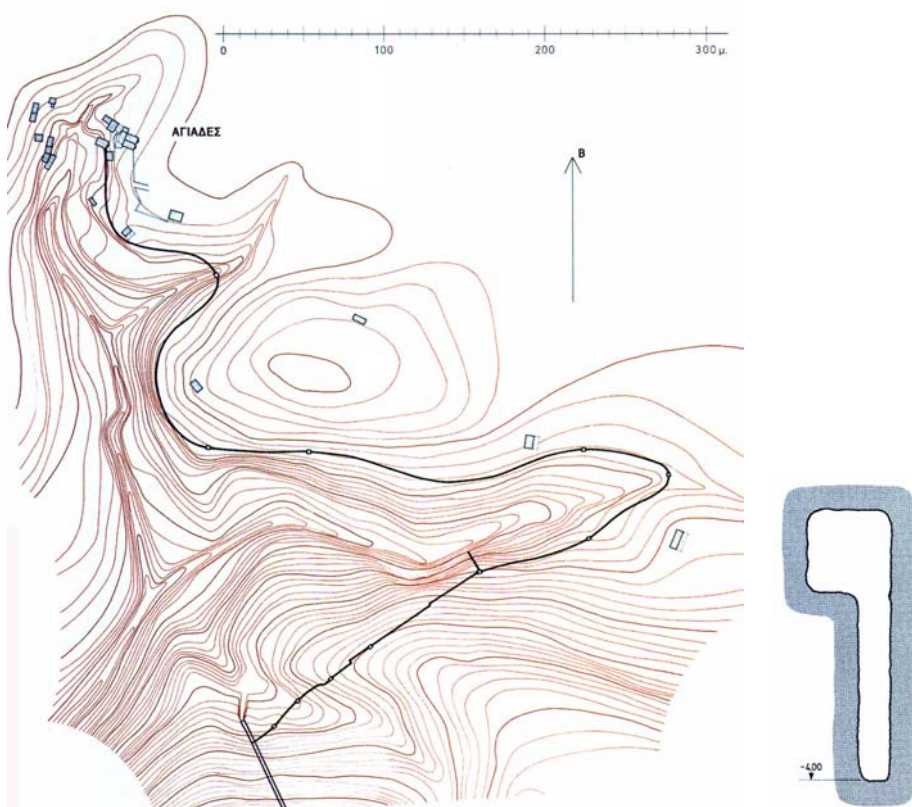
χάρτη του Βρετανικού Ναυαρχείου (εικ. 1). Ο Ulf Jantzen, διευθυντής του Γερμανικού Αρχαιολογικού Ινστιτούτου της Αθήνας, θέλησε να συνεχίσει το έργο του Fabricius 90 χρόνια αργότερα, έτσι το 1971 ξεκίνησαν οι ανασκαφές που διήρκεσαν περισσότερο από δύο χρόνια. Μετά τον καθαρισμό η μελέτη του έργου ανατέθηκε στον Γερμανό αρχαιολόγο Hermann Kienast που δημοσίευσε τα συμπεράσματά του το 1995.

Το ορύγμα αποτελούσε το σημαντικότερο τμήμα του έργου ύδρευσης της πόλης. Κατασκευάστηκε το 530 π.Χ. και, σύμφωνα πάντα με την αναφορά του Ηρόδοτου, μηχανικός του έργου ήταν ο Ευπαλίνος από τα Μέγαρα, γιός του Ναυστρόφου. Στις γραπτές πηγές αναφέρεται ότι μεταξύ των 56 μαθητών του Πυθαγόρα, όσο ζούσε ακόμα στη Σάμο, ήταν και κάποιος Ευπαλίνος. Συγκεκριμένα ο καθηγητής της φιλοσοφίας του Πανεπιστημίου Αθηνών Γεώργιος Σακελλαρίου αναφέρει αυτό το όνομα, όμως δεν κατέστη δυνατό να εντοπίσω την πηγή που χρησιμοποίησε. Εάν λοιπόν θεωρήσουμε σωστή την αναφορά του Σακελλαρίου και με το δεδομένο ότι το όνομα αυτό δεν ήταν πολύ διαδεδομένο, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο Ευπαλίνος ήταν ήδη στη Σάμο μαθητής του Πυθαγόρα, όταν του ανατέθηκε το έργο. Συνεπώς είναι πολύ πιθανό να τον βοήθησε και να τον ενέπνευσε για τη δύσκολη αυτή κατασκευή ο μεγάλος φιλόσοφος και δάσκαλός του.

## 2. Περιγραφή του έργου

Στόχος του μηχανικού που ανέλαβε το έργο, του Ευπαλίνου, ήταν να δημιουργήσει μία σήραγγα διαμέσου του όρους Άμπελος ώστε να υδροδοτήσει την πόλη της Σάμου, που σήμερα ονομάζεται Πυθαγόρειο. Η πηγή των Αγιάδων βρίσκεται πίσω από το όρος Άμπελος στα βορειοδυτικά της πόλης. Είχε παροχή 400 κ.μ. τη μέρα και είναι διαμορφωμένη από την αρχαιότητα ώστε το νερό να αναβλύζει μέσα από το φυσικό βράχο. Είχε σκεπαστεί ώστε να μην εντοπίζεται και το υψόμετρο της στάθμης της ήταν στα 52 μέτρα. Ο μηχανικός του έργου έπρεπε να καταφέρει ώστε να τροφοδοτείται η πόλη από το νερό της πηγής των Αγιάδων, ο αγωγός να είναι υπόγειος, διαμέσου του βουνού, με επισκέψιμα τα τμήματά του, ώστε να μην είναι εντοπίσιμη η παροχή από τυχόν εχθρούς και το στόμιο που εκβάλλει στην πόλη να βρίσκεται εντός των τειχών και σε υψόμετρο που να εξασφαλίζει την αβίαστη παροχή σε όλη την πόλη.

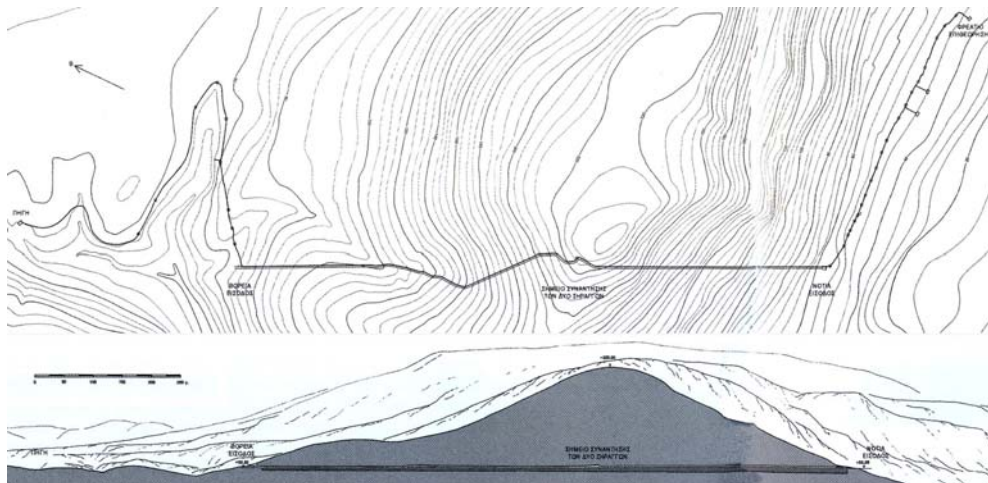
Οι πιθανές διαδρομές του αγωγού ήταν περιμετρικά του βουνού, με επιφανειακή τάφρο, ή υπόγεια, κάτω από το βουνό με σήραγγα. Ο Ευπαλίνος διάλεξε τη δεύτερη λύση. Στη λύση αυτή τον οδήγησε το γεγονός ότι, αν ακολουθούσε την πρώτη,



**Εικόνα 2.** Ο αγωγός από την πηγή μέχρι το όρυγμα και μία τυπική διατομή του ορύγματος

τότε, λόγω του συνολικού μήκους του αγωγού και της υδραυλικής κλίσης, το νερό θα έφτανε μέσα στην πόλη σε χαμηλότερο υψόμετρο και θα είχε προβλήματα στη παραπέρα ροή προς υδροδότηση. Οι λόγοι που οδήγησαν στην κατασκευή του ήταν η λειψυδρία, η αδυναμία ικανοποίησης αναγκών σε νερό από πηγάδια και η εξασφάλιση της παροχής νερού σε περίπτωση πολιορκίας.

Από την πηγή κατασκεύασε 870 μέτρα αγωγού έως το βουνό (εικ. 2), μέσα σε υπόγεια κτιστή τάφρο, στη συνέχεια 1036 μέτρα μέσα στη σήραγγα, που ανοίχθηκε στο βουνό και τέλος 520 μέτρα από το βουνό στη δεξαμενή της πόλης, πάλι μέσα σε τάφρο. Η σήραγγα κατασκευάστηκε οριζόντια, (για το φόβο των υπόγειων υδάτων), και ευθύγραμμη, (σε υψόμετρο +55.8 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας). Η κατασκευή της έγινε αμφίστομος, (με εκσκαφή συγχρόνως και από τα δύο άκρα, για εξοικονόμηση χρόνου) και στη συνέχεια κατασκευάστηκε κεκλιμένο αυλάκι στο δάπεδο της οριζόντιας σήραγγας, μέσα από το οποίο το νερό διοχετευόταν στη δεξαμενή της πόλης μέσα σε πήλινους αγωγούς. Η οριζόντια σήραγγα μήκους 1036 μ. ξεκινά από τη βόρεια πλαγιά του όρους Άμπελος, (σημερινό Κάστρο) και καταλήγει στη νότια. Βρίσκεται 180 μ. κάτω από την κορυφή του βουνού. Το πραγματικό όρυγμα έχει ορθογωνική διατομή με διαστάσεις 1.80 x 1.80 μ. Μέσα στο όρυγμα και σε βάθος 3.5-8.5 μ. δημιουργήθηκε κανάλι για τον αγωγό με κλίση 0.6% που μετέφερε το νερό στην πόλη. Η κατασκευή αυτή αποδεικνύει το υψηλό επίπεδο γνώσεων και τρόπου αντιμετώπισης των προβλημάτων που είχαν οι μηχανικοί του βου π.Χ. αιώνα. Για την κατασκευή του ήταν απαραίτητες γνώσεις μαθηματικών, γεωμετρίας, τοπογραφίας και γεωδαισίας. Το καταπληκτικό επίτευγμα του έργου μπορεί να εκτιμηθεί από το μέγεθος των αριθμών, δηλαδή για τον αγωγό από την πηγή μέχρι τη σήραγγα έπρεπε να εκσκαφούν 1500 κ.μ., για τη σήραγγα με το κανάλι της 5000 κ.μ. και για τον αγωγό της πόλης ακό-



**Εικόνα 3.** Τοπογραφικό διάγραμμα και τομή του αγωγού από την πηγή μέχρι την πόλη

μα 500 κ.μ. και όλες αυτές οι εκσκαφές έπρεπε να γίνουν με το σφυρί και το καλέμι χειρωνακτικά.

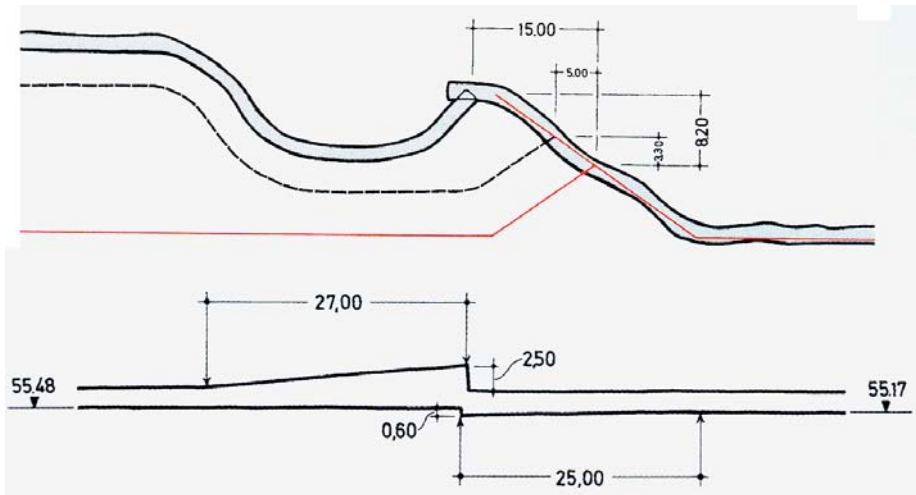
### **3. Επιτεύγματα του Ευπαλίνου**

Οι τοπογραφικές δυσκολίες, που είχε να αντιμετωπίσει ο Ευπαλίνος για την κατασκευή του έργου, ήταν ο προσδιορισμός των δύο άκρων της σήραγγας στις δύο πλαγιές του βουνού, ώστε να βρίσκονται στο ίδιο υψόμετρο, ο προσδιορισμός της διεύθυνσης εκσκαφής με την οποία θα εισέρχονταν στο βουνό τα δύο συνεργεία και η υλοποίηση της διαδρομής του αγωγού του νερού με βάση την κλίση που διάλεξε (0,6%), στο ανάγλυφο του εδάφους. Οι έλεγχοι, οι καθημερινές μετρήσεις και οι τροποποιήσεις της πορείας είναι μέχρι σήμερα ορατά και ανεξίτηλα χαραγμένα στο βράχο του υπόγειου έργου. Χρησιμοποίησε τα γράμματα της αλφαβήτου για να σημάνει στο βράχο χαρακτηριστικές θέσεις και στάθμες. Ο αναγνώστης που επιθυμεί να εντυπώσει περισσότερο δεν έχει παρά να ανατρέξει στα συμπεράσματα του Kienast και θα βρει πολλές και σημαντικές λεπτομέρειες που δεν είναι του παρόντος να αναφέρουμε.

Για να συναντηθούν τα δύο συνεργεία, που είχαν ξεκινήσει πριν από 10 χρόνια τη διάνοιξη του ορύγματος, είχαν να αντιμετωπίσουν το σκληρό ασβεστόλιθο αλλά και κάποια απρόοπτα, όπως τον καρστικό σχηματισμό, που συνάντησε το συνεργείο του βόρειου κλάδου το οποίο αναγκάστηκε να αλλάξει την πορεία του, ακολουθώντας το σχηματισμό αυτόν. Τόλμημα αποτελεί η ταυτόχρονη εκσκαφή από δύο μέτωπα, επιτυχία αποτελεί η συνάντηση των δύο συνεργείων με ελάχιστη απόκλιση, εφευρετικότητα αποτελεί η εκσκαφή του κεκλιμένου αυλακίου για την τοποθέτηση των πήλινων σωλήνων και ακρίβεια αποτελεί η ενιαία κλίση 0,6% κατά μήκος ολόκληρου του αγωγού. Σοβαρά τεχνικά επιτεύγματα αποτελούν:

- η διαδικασία ελέγχου για την ταυτόχρονη εκσκαφή από δύο μέτωπα
- η συνάντηση των δύο άκρων με τόσο μικρές για την εποχή και τα μέσα αποκλίσεις
- η εκσκαφή του επικλινούς ορύγματος μέσα στο κυρίως όρυγμα
- η τήρηση ενιαίας κλίσης 0.6% σε όλο το μήκος του αγωγού

Ο Ευπαλίνος πέτυχε τη συνάντηση των δύο κλάδων με μικρό σφάλμα κατεύθυνσης 0.64° στη βόρεια σήραγγα. Ωστόσο για να είναι βέβαιος ότι θα συναντηθούν οι δύο κλάδοι ανύψωσε την οροφή της βόρειας σήραγγας στα τελευταία 27 μέτρα και αύξησε την κατωφέρεια του δαπέδου της νότιας σήραγγας στα τελευταία 25 μέτρα ώστε να διευρυνθεί το μέτωπο συνάντησης. Αποδείχτηκε μετά τη συνάντηση των δύο μετώπων ότι και να μην το έκανε αυτό πάλι τα δύο μέτωπα θα συναντιόνταν με μια ελάχιστη απόκλιση, για την εποχή εκείνη, της τάξης των 28 εκατοστών. Μάλιστα η απόκλιση από το ιδανικό σημείο συνάντησης ήταν 15 μέτρα σε μήκος και 8.2 μέτρα σε πλάτος (εικ. 4). Αν παρατηρήσουμε όμως πιο προσεκτικά θα

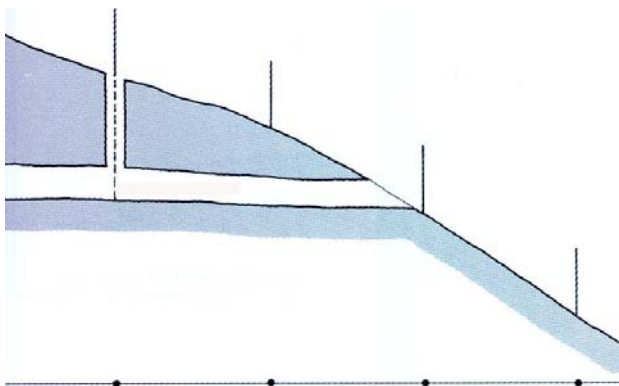


Εικόνα 4. Κάτοψη και τομή της περιοχής συνάντησης των δύο μετώπων

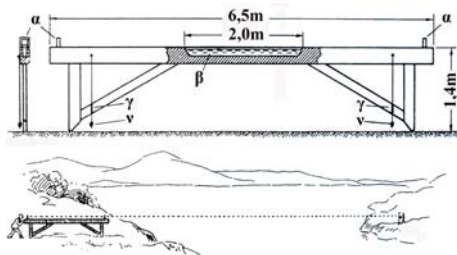
αντιληφθούμε ότι με τον τρόπο που πέτυχε τη συνάντηση των δύο μετώπων μείωσε τη συνολική εργασία των δύο συνεργείων.

#### 4. Τεχνικές και μέθοδοι του Ευπαλίνου

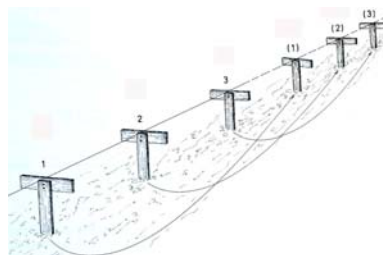
Όπως προαναφέρθηκε τα προβλήματα που είχε να αντιμετωπίσει ο Ευπαλίνος ήταν πολλά και γεννάται το ερώτημα με τι μεθόδους και με τι όργανα μπόρεσε και κατάφερε να πετύχει τις ακρίβειες που αναφέραμε παραπάνω. Ακόμα δεν έχουν απαντηθεί όλες οι σχετικές λεπτομέρειες από μελετητές του έργου που έχουν αναλώσει πολλά χρόνια στη μελέτη του. Όμως υπάρχουν ευρήματα που μαρτυρούν κάποιες τεχνικές όπως για παράδειγμα η χάραξη της ευθυγραμμίας της σήραγγας στη νότια πλευρά της όπου στα 40 μ από την είσοδο βρέθηκε επί της ευθυγραμμίας κατακόρυφο πηγάδι που πιστεύεται ότι κατασκευάστηκε για να ελεγχθεί η ευθυγραμμία (εικ. 5).



Εικόνα 5. Χάραξη της ευθυγραμμίας στο νότιο μέτωπο



**Εικόνα 6.** Χωροβάτης



**Εικόνα 7.** Υλοποίηση οριζοντίου επιπέδου

Για την υλοποίηση της οριζόντιας στάθμης εικάζεται ότι χρησιμοποίησε ένα όργανο, γνωστό την εποχή εκείνη, το χωροβάτη (εικ. 6), με το οποίο υλοποιούσε το οριζόντιο επίπεδο με την χρησιμοποίηση σανίδων οι οποίες πακτώνονταν στο έδαφος κατά τέτοιο τρόπο ώστε το πάνω μέρος τους να υλοποιεί το οριζόντιο επίπεδο (εικ. 7).

Τέλος είναι σίγουρο ότι χρησιμοποίησε το διαβήτη, ένα άλλο όργανο που ήταν γνωστό την εποχή εκείνη και βοηθάει στη χάραξη και στον εντοπισμό κλίσεων ενώ δεν είναι βέβαιο ότι χρησιμοποίησε τη δίοπτρα του Ήρωνα του Αλεξανδρέα.

Ο Ευπαλίνος κατόρθωσε για πρώτη φορά στην ιστορία της ανθρωπότητας να κατασκευάσει ένα τέτοιο έργο. Οργάνωσε και εκτέλεσε το σχέδιό του με απόλυτη ακρίβεια. Στο τέλος γιόρτασε την επιτυχία του σμιλεύοντας ανεξίτηλα στην επένδυση του ορύγματος τη λέξη ΠΑΡΑΔΕΓΜΑ με γράμματα ύψους 30 εκ. και το όνομά του έμεινε στην ιστορία.

## 5. Σημερινή κατάσταση

Σήμερα είναι επισκέψιμο μόνο ένα τμήμα του ορύγματος προς το νότιο στόμιό του μήκους περίπου 130 μέτρων. Όμως η Εγνατία οδός ΑΕ χρηματοδότησε πρόσφατα μια πλήρη μελέτη αποκατάστασης και θεραπείας του ορύγματος προκειμένου να αποδοθεί στο κοινό. Επικεφαλής της μελετητικής ομάδας ήταν ο πολιτικός μηχανικός Κώστας Ζάμπας. Συνεργάστηκαν μαζί του μια τοπογραφική ομάδα υπό τον γράφοντα, μια γεωλογική ομάδα υπό τον καθ. Γρηγόρη Τσόκα, μια γεωτεχνική ομάδα υπό το μελετητή Γεώργιο Ντουσιά και μια μηχανολογική ομάδα υπό το μελετητή Βασίλειο Κωνσταντινίδη.

## 6. Ίδρυση δικτύων ελέγχου της αποτύπωσης

Στη αρχή δημιουργήθηκε ένα γεωαναφερμένο υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα συνδέονταν όλες οι επόμενες εργασίες. Για τη δημιουργία αυτού του υποβάθρου εγκαταστάθηκε τριγωνομετρικό δίκτυο στην ευρύτερη περιοχή του ορύγματος. Ιδρύθη-

καν 6 νέα σημεία εξαρτημένα από 3 σημεία του κρατικού τριγωνομετρικού δικτύου της ΓΥΣ. Το δίκτυο μετρήθηκε με δέκτες GPS, στη συνέχεια επιλύθηκε και υπολογίστηκε σε κατάλληλο λογισμικό. Για την αποτύπωση των επίγειων τμημάτων του υδραγωγείου εγκαταστάθηκαν επιπλέον 12 σημεία ελέγχου. Τέλος αναφέρουμε ότι η εξάρτηση από το κρατικό τριγωνομετρικό δίκτυο έγινε με χρήση δύο γεωδαιτικών δεκτών GPS διπλής συχνότητας και τεσσάρων μονής συχνότητας, με τους οποίους υλοποιήθηκαν τα σημεία εξάρτησης στην αρχή και στο πέρας των οδεύσεων. Έγινε ένταξη του δικτύου στο κρατικό και υπολογίστηκαν οι τιμές των σημείων στο σύστημα ΕΓΣΑ '87.

Η έκταση του πολυγωνομετρικού δικτύου, που ιδρύθηκε, καλύπτει όλη την έκταση του μνημείου στο υπόγειο και στο επίγειο τμήμα του. Ωστόσο επειδή πρόκειται για μία επιμήκη γραμμή είναι προφανές ότι η μορφή του είναι μια ανοικτή οδευση που εξαρτήθηκε από το κρατικό τριγωνομετρικό δίκτυο με χρήση GPS. Η σήμανση του δικτύου, που αναπτύχθηκε στην περιοχή του μνημείου έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρησή της για μεγάλο χρονικό διάστημα. Όλες οι σημάνσεις έγιναν προσεκτικά και κατά τρόπο που να μην προσβάλουν τη φύση και το μνημείο. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν ανοξειδωτα μπουλόνια με κυρτή την ορατή επιφάνειά τους, που πακτώθηκαν σε τσιμέντο στην επιφάνεια βράχων ή του εδάφους. Οι αδυναμίες στη γεωμετρική δομή του δικτύου επέβαλλαν ιδιαίτερη επιμέλεια κατά την κέντρωση του οργάνου και την εκτέλεση των μετρήσεων. Το πολυγωνομετρικό δίκτυο περιλαμβάνει πρωτεύουσες οδεύσεις, με τις οποίες ιδρύθηκαν βασικά σημεία στον εξωτερικό και στον εσωτερικό χώρο του μνημείου. Η κύρια οδευση που διέρχεται μέσα από το όρυγμα έχει 68 κορυφές.

Για την εξασφάλιση της σωστής κλίμακας του δικτύου έγινε μέτρηση όλων των πλευρομετρήσεων αμφίδρομα. Ο υπολογισμός των πολυγωνικών οδεύσεων έγινε με την βοήθεια του Ηλεκτρονικού Υπολογιστή και κατάλληλο λογισμικό. Η φύση του αντικειμένου της αποτύπωσης επέβαλλε μερικές φορές τη χρήση τυφλών πολυγωνικών σημείων. Τέλος τα υψόμετρα των σημείων στάσης υπολογίστηκαν με τους τύπους της τριγωνομετρικής υψομετρίας.

Κατόπιν τοποθετήθηκαν σημάνσεις με ανοξειδωτες πινακίδες ανά 10m, στερεωμένες με ανοξειδωτες βίδες 5,5x38mm, οι οποίες εμφανίζουν την ένδειξη της απόστασης απ' αρχής. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι πινακίδες αυτές από inox 316, πάχους 1mm και διαστάσεων 8x5cm. Στο πάνω μέρος τους έχουν οπή Φ6mm για την ανάρτησή τους με τη βίδα που εικονίζεται παράπλευρα. Η αφετηρία 0 (μηδέν), της αρχής μέτρησης ταυτίζεται με το 0 που θέσπισε ο Hermann Kienast. Πρόκειται για το χείλος του πρώτου σκαλοπατιού στη βόρεια είσοδο του ορύγματος. Επιδιώχθηκε ώστε όλες οι πινακίδες να τοποθετηθούν στη δεξιά πλευρά του ορύγματος και σε ύψος 1,4 m όπου αυτό ήταν εφικτό. Επίσης βιδώνονταν στο βράχο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην λαμβάνουν κοίλο σχήμα αλλά να παραμένουν επίπεδες. Δεν κατέστη δυνατόν να τοποθετηθούν μόνο δύο πινακίδες στις θέσεις 1000 και 1010.



## 7. Όργανα μετρήσεων

Για τις εργασίες της τοπογραφικής αποτύπωσης του μνημείου χρησιμοποιήθηκε ψηφιακός γεωδαιτικός σταθμός (Total Station) της εταιρείας Leica Geosystems, τόσο για τη μέτρηση των οδεύσεων, όσο και για τη μέτρηση των σημείων λεπτομερειών. Το συγκεκριμένο όργανο έχει ενσωματωμένο καταγραφικό, αντικειμενικό φακό 40mm, μεγέθυνση 30x και ελάχιστη απόσταση εστίασης 1.7m. Η ακρίβεια μέτρησης των γωνιών ήταν 0,3mgon ενώ στην LCD οθόνη του η εμφανιζόμενη ένδειξη μέτρησης ήταν 0.0001gon. Το όργανο έχει δυνατότητα μέτρησης αποστάσεων σε λειτουργία IR (δηλ. υπέρυθρης ακτινοβολίας) με χρήση ανακλαστήρα και σε λειτουργία RL (δηλ. ορατής ακτίνας laser) χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα (Reflectorless). Η μέγιστη μετρούμενη απόσταση στη λειτουργία IR μπορούσε να φθάσει τα 5000 μέτρα με χρήση κανονικού μεγέθους πρίσματος, ενώ στη λειτουργία RL μπορούσε να φθάσει τα 450 μέτρα υπό συνθήκες καθαρής ατμόσφαιρας και με καλή ορατότητα ανάλογα με την ανακλαστικότητα του στόχου. Η ακρίβεια του αποστασιόμετρου είναι 1mm+1,5ppm, ενώ ο χρόνος ανά μέτρηση ήταν 2.5sec. Τέλος το καταγραφικό του οργάνου μπορούσε να αποθηκεύσει έως και 10000 μετρήσεις (1Mb).

Για τη μέτρηση των οδεύσεων χρησιμοποιήθηκε το μικρό πρίσμα του κατασκευαστή που συνοδεύει το όργανο και έχει συναρμολογούμενη ράβδο που φθάνει συνολικά το 1.30m ύψος. Για τη μέτρηση των σημείων λεπτομερειών χρησιμοποιήθηκε το ίδιο όργανο χωρίς τη χρήση ανακλαστήρα. Η εγκατάσταση του πολυγωνομετρικού δικτύου γίνονταν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων προσαρμόζοντας την πορεία των οδεύσεων στην πραγματικότητα και στις νέες απαιτήσεις που προέκυπταν στην εξέλιξη της εργασίας. Τα υψόμετρα των στάσεων και κατ' επέκταση των σημείων λεπτομέρειας υπολογίσθηκαν με βάση τα υψόμετρα που προέκυψαν από τη συνόρθωση του τριγωνομετρικού δικτύου GPS.

## 8. Τοπογραφική αποτύπωση

Η τοπογραφική αποτύπωση έγινε την άνοιξη του 2009. Κατ' αρχάς πραγματοποιήθηκε τοπογραφική αποτύπωση οριζοντιογραφικά και υψομετρικά του υπόγειου τμήματος της σήραγγας. Ταυτόχρονα με τις μετρήσεις της όδευσης ελέγχου αποτυπώνονταν και χαρακτηριστικά σημεία. Επίσης μετρήθηκαν και τα στοιχεία που αφορούν την τρισδιάστατη αποτύπωση των επενδεδυμένων τμημάτων και των τμημάτων της τάφρου, δεδομένου ότι δεν ήταν δυνατή η σάρωσή τους με τον τρισδιάστατο σαρωτή. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μια όδευση 68 κορυφών διαμέσου της σήραγγας και αποτυπώθηκαν διατομές κάθε 5 μ. και λεπτομέρειες της κατασκευής και της κατάστασής της.

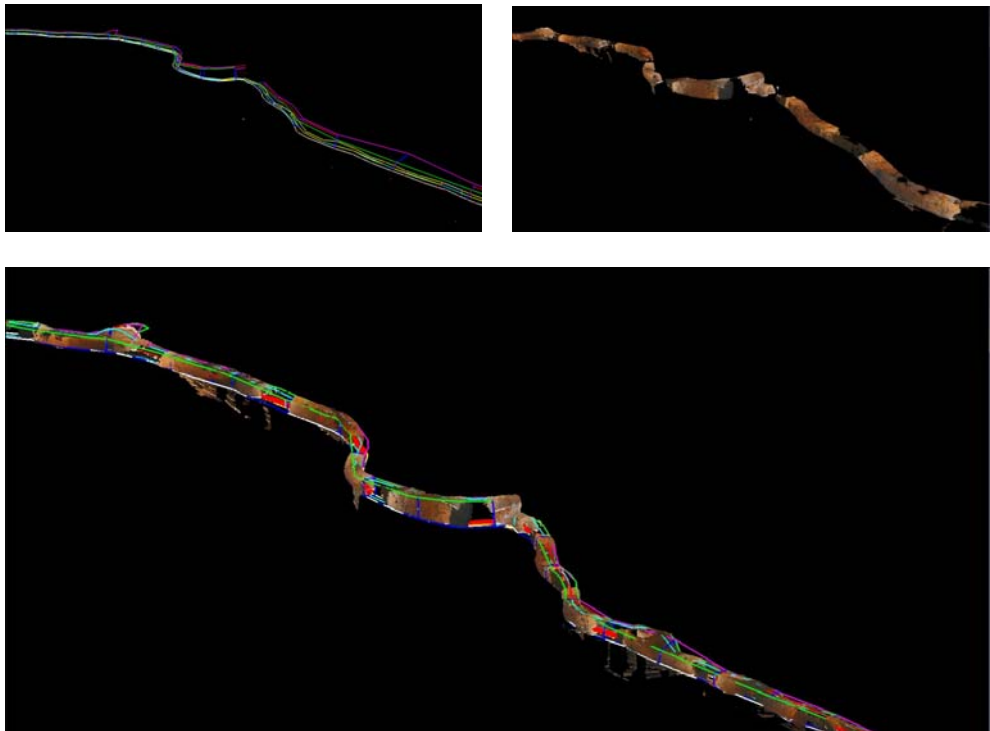
Πέρα από την υπόγεια αποτύπωση που πραγματοποιήθηκε εκατέρωθεν του άξονα της σήραγγας, έγινε και επίγεια αποτύπωση σε όλο το μήκος της αντίστοιχης επι-

φανειακής λωρίδας πλάτους 50m περίπου των υπερκείμενων της σήραγγας. Έγινε και επίγεια αποτύπωση στο τούνελ των πηγαδιών καθώς και όλου του αγωγού από την πηγή μέχρι το ορύγμα. Στη συνέχεια έγινε αποτύπωση και του τμήματος του αγωγού μετά τη νότια είσοδο του ορύγματος μέχρι τις στέρνες απ' όπου το νερό μοιράζονταν στους κατοίκους της αρχαίας πόλης. Αξιοποιώντας όλες τις μετρήσεις ήταν δυνατή η πλήρης συσχέτιση του ορύγματος με τον υπερκείμενο ορεινό όγκο.

## 9. Τρισδιάστατη αποτύπωση

Τέλος έγινε τρισδιάστατη αποτύπωση με laser scanner του μεγαλύτερου μέρους της σήραγγας. Αποδόθηκε σε λεπτομερή σχέδια εσωτερικών όψεων, κάτοψης και άνοψης και σε διατομές ανά ένα μέτρο. Για τις ανάγκες της τρισδιάστατης αποτύπωσης πραγματοποιήθηκαν 42 διαδοχικές σαρώσεις κατά μήκος της σήραγγας και προέκυψε ένα νέφος με 45 εκατομμύρια σημεία.

Οι διαδοχικές σαρώσεις συσχετίστηκαν με τη βοήθεια ειδικών στόχων που τοποθετούνταν εκατέρωθεν της θέσης του σαρωτή σε κάθε σάρωση. Οι στόχοι αφαιρέθηκαν μετά το τέλος των εργασιών. 30 περίπου από αυτούς τους στόχους αποτυ-



**Εικόνα 8.** Πάνω αριστερά τοπογραφική αποτύπωση, δεξιά νέφος σημείων, κάτω συνδυασμός

πώθηκαν και με το τοπογραφικό όργανο υψηλής ακρίβειας για να επιτευχθεί η γεωαναφορά του νέφους των σημείων.

Για την τρισδιάστατη καταγραφή της υπάρχουσας κατάστασης μέσα στο όρυγμα των 1036m χρησιμοποιήσαμε τρισδιάστατο σαρωτή (laser scanner) της Ortech. Για την λειτουργία του αλλά και για την καλύτερη απόδοση του σαρωτή είχε γίνει συνεννόηση με τις τοπικές αρχές ώστε να υπάρχει δυνατότητα ηλεκτροδότησης αφ' ενός και κατάλληλου φωτισμού αφ' ετέρου σε κάθε τμήμα της σήραγγας που εργαζόμασταν. Από την πλευρά μας είχε γίνει η κατάλληλη προετοιμασία των ειδικών στόχων που τοποθετούνταν προσωρινά κατά τη διάρκεια των εργασιών και αφαιρούνταν στη συνέχεια ώστε να συνδεθούν τα διαδοχικά νέφη σημείων μεταξύ τους. Από τις σαρρώσεις με χρήση κατάλληλου λογισμικού μπορέσαμε:

- Να συνενώσουμε τα νέφη των σημείων από τις διαδοχικές στάσεις του οργάνου
- Να γεωαναφέρουμε τα νέφη των σημείων κι αυτό διευκόλυνε την άμεση συσχέτιση των τοπογραφικών δεδομένων με αυτά που προέκυψαν από το Laser Scanner
- Να εξάγουμε μετρικές πληροφορίες όπως διαστάσεις, γωνίες, όγκους κ.λπ.
- Να δημιουργήσουμε ένα ενιαίο τρισδιάστατο μοντέλο της σήραγγας
- Να εξάγουμε το μοντέλο της σήραγγας σε άλλο λογισμικό CAD για περαιτέρω επεξεργασία σε μορφή TIN
- Το τελικό τρισδιάστατο μοντέλο περιείχε πληροφορία για την υφή, το χρώμα και τη μορφή όλων των επιφανειών της σήραγγας.

Αποτέλεσμα της διαδικασίας αυτής ήταν να έχουμε ως τελικό προϊόν το τρισδιάστατο μοντέλο της σήραγγας και από αυτό εξάγαμε κατόψεις, τομές και αναπτύγματα του ορύγματος.

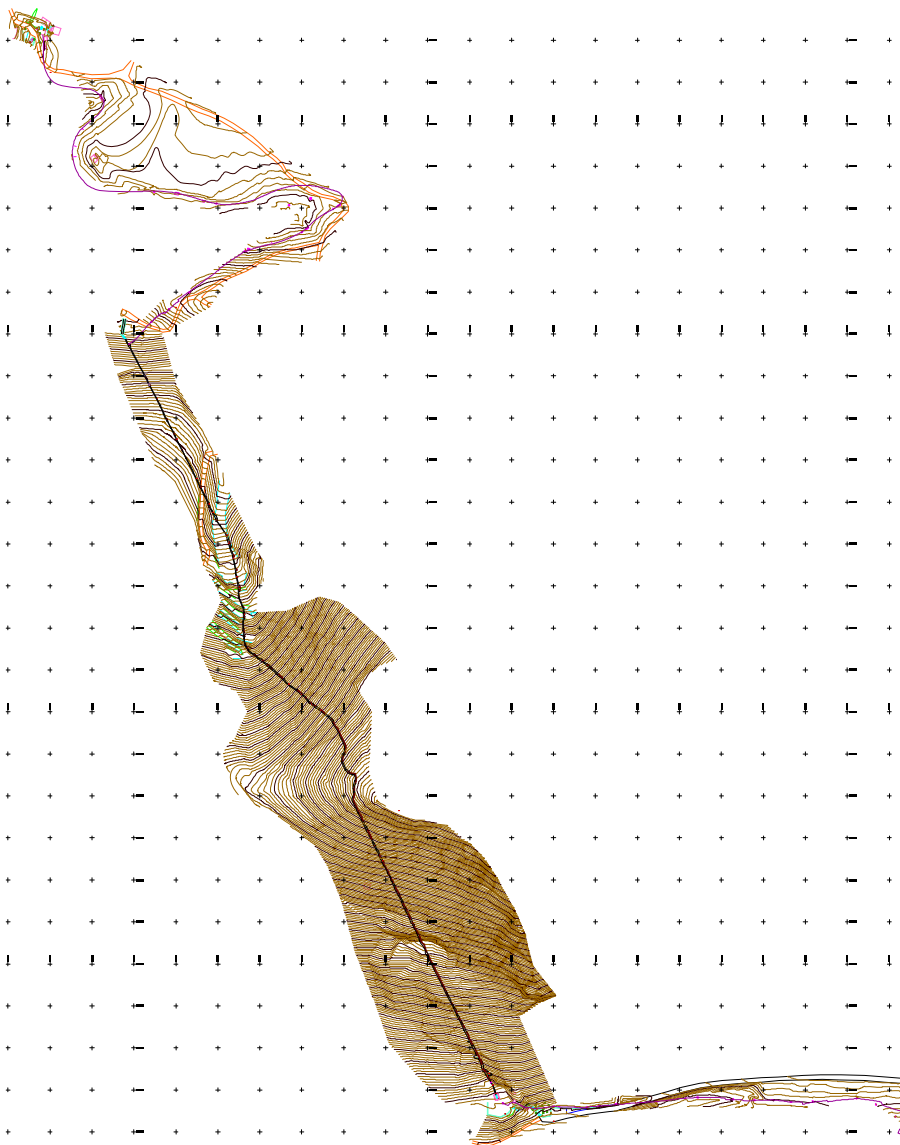


**Εικόνα 9.** Εικόνα από το νέφος σημείων στο μη επισκέψιμο τμήμα

## 10. Συσχέτιση των μετρήσεων

Από την τοπογραφική αποτύπωση των διατομών της σήραγγας προέκυψε ο άξονας της, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παραγωγή διατομών ανά 1μ και μηκοτομής με βήμα 0.5μ.

Με μία κατακόρυφη τομή βασισμένη στον άξονα της σήραγγας δημιουργήθηκαν τα ισομετρικά σχέδια των δύο όψεων.



Εικόνα 10. Το σχέδιο της τοπογραφικής αποτύπωσης

Με μία οριζόντια τομή παράλληλη με το δάπεδο της σήραγγας δημιουργήθηκαν τα σχέδια της κάτοψης και της άνοψης.

Τέλος με μια παράλληλη μετατόπιση του άξονα προς το εσωτερικό της σήραγγας, δημιουργήθηκε η τεθλασμένη γραμμή που ακολουθεί η κάμερα στο βίντεο περιήγησης της σήραγγας.

## 11. Σχέδια και άλλα παράγωγα της αποτύπωσης

- α) Τοπογραφικό διάγραμμα κλίμακας 1:500 της υπερκείμενης ζώνης σε ψηφιακή μορφή (αρχείο DWG/DXF).
- β) Ψηφιακό μοντέλο εδάφους της υπερκείμενης ζώνης σε ψηφιακή μορφή (3Dfaces σε αρχείο DWG/DXF).
- γ) Τριδιάστατο μοντέλο (3D TIN) της κύριας σήραγγας και της τάφρου (μαζί με το μοντέλο της υπερκείμενης ζώνης εδάφους) σε ψηφιακή μορφή (3Dfaces σε αρχείο DWG/DXF, αρχείο εικονικής περιήγησης VRML).
- δ) Τομές σε κατάλληλες θέσεις για τους σκοπούς της μελέτης σε ψηφιακή μορφή (αρχείο DWG/DXF). Ισοϋψείς καμπύλες σε όλη την περιοχή του μοντέλου.
- ε) Αναπτύγματα δαπέδου, οροφής και των δυο πλευρών της κύριας σήραγγας, στα οποία παρουσιάζονται οι διάφορες κατασκευές αρχαίες και νέες (τάφρος, φρέατα, αρχαίες επενδύσεις, χριστιανική κρήνη, νέες μεταλλικές κατασκευές προστασίας ή υποστήλωσης, σωροί υλικών, Η/Μ εγκαταστάσεις) σε ψηφιακή μορφή DWG/DXF και σε εκτυπωμένη μορφή σε πινακίδες κατά τμήματα υπό κλίμακα 1:100.
- ς) Διατομές ανά ένα μέτρο σε όλο το μήκος της σήραγγας

## 12. Επίλογος

Στην τοπογραφική ομάδα συμμετείχαν οι τοπογράφοι μηχανικοί Παναγιώτης Τοκμακίδης, Κοσμάς Ανδρίτσος και Πολύζος Πολύκαρπος και ο αρχιτέκτονας Riuiishi Yoshitake. Το αποτέλεσμα της τοπογραφικής αποτύπωσης υπήρξε η βάση πάνω στην οποία συντάχθηκαν οι υπόλοιπες μελέτες, δηλαδή η γεωλογική, η γεωτεχνική, η ηλεκτρομηχανολογική και η μελέτη - πρόταση επεμβάσεων και αποκατάστασης. Η μελέτη εγκρίθηκε με έπαινο από το Κεντρικό Αρχαιολογικό Συμβούλιο και απομένει να βρεθούν τα κονδύλια για την εφαρμογή της και την απόδοση τελικά αυτού του σπουδαίου έργου στους επισκέπτες.

## Βιβλιογραφία

- Kienast H.J., Die Wasserleitung des Eupalinos auf Samos, Samos XIX, Deutsche Archäologische Institut Athens, 1995
- Kienast J. Hermann, Το υδραγωγείο του Ευπαλίνου στη Σάμο, Υπουργείο Πολιτισμού ΤΑΠΑ, Αθήνα 2004
- Τοκμακίδης Κ., Βλάχος Δ. Το Ευπαλίνειο όρυγμα, Επιστημονικό συνέδριο «*Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα*», Θεσσαλονίκη 15-16 Απριλίου 2005
- Tokmakidis Konstantinos, «*Surveying the Eupalinian Aqueduct in Samos Island*», 22<sup>nd</sup> International Symposium «*Digital Documentation, Interpretation and Presentation of Cultural Heritage*», που διοργάνωσε η CIPA στο Kyoto της Ιαπωνίας στις 11-15 Οκτωβρίου 2009.