

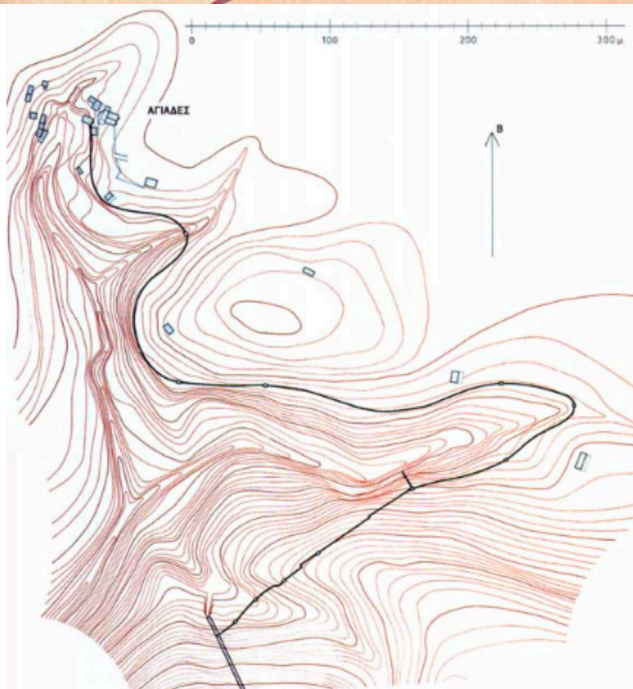
# Ακουστική ανάλυση του Ευπαλινείου Ορύγματος

Έρευνα και συγγραφή: Σωκράτης Βότσκος, Msc Ακουστικού σχεδιασμού και ψηφιακού ήχου ΕΑΠ

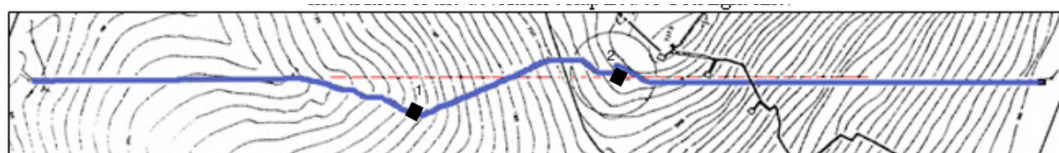
Η ακουστική ανάλυση του Ευπαλινείου Ορύγματος πραγματοποιήθηκε σε δύο σημεία της μεγάλης διαδρομής, με το πρώτο σημείο να είναι στο μέσον περίπου απόστασης ως το σημείο συνάντησης των ομάδων εκσκαφής και το δεύτερο σημείο στο σημείο τομής και συνάντησης των δύο ομάδων.



Εικόνα 1.α)  
Η πρώτη απεικόνιση του Ευπαλινείου ορύγματος και της διατομής του από τον Ernst Fabricius το 1884 (πηγή: Κ. Τοκμακίδης, Π. Τοκμακίδης, τομέας γεωδαισίας και τοπογραφίας, Πολυτεχνική σχολή ΤΑΤΜ-ΑΠΘ).

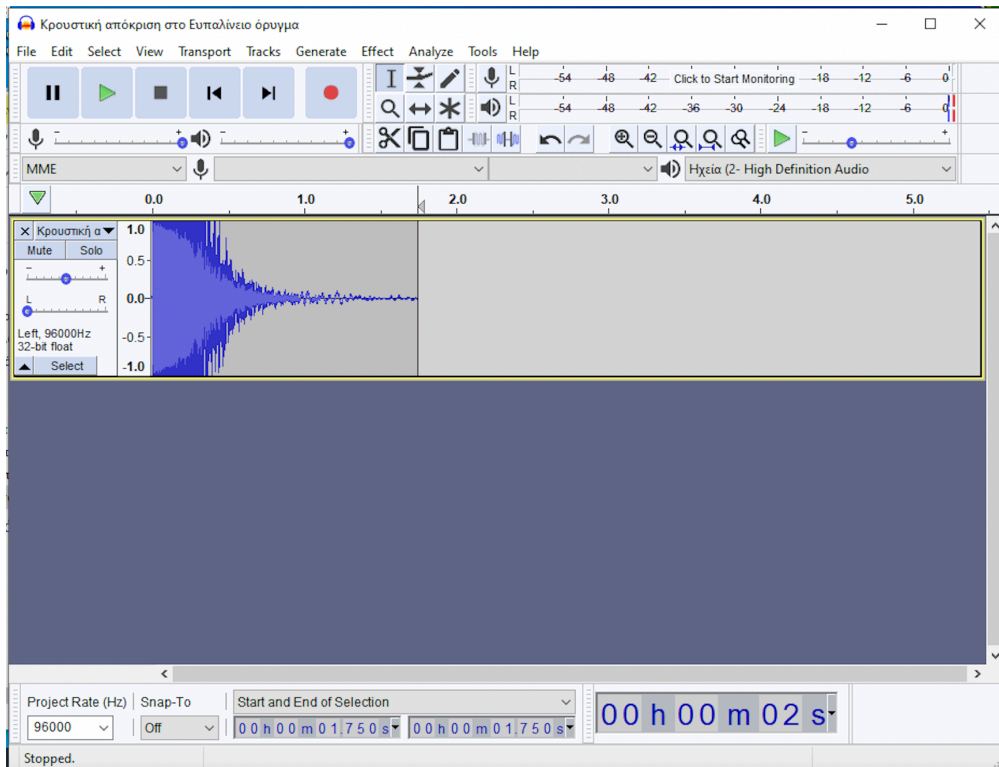


1.β) Ο αγωγός από τη πηγή μέχρι το όρυγμα σε μία τυπική διατομή του Ευπαλινείου ορύγματος (πηγή: Κ. Τοκμακίδης, Π. Τοκμακίδης, τομέας γεωδαισίας και τοπογραφίας, Πολυτεχνική σχολή ΤΑΤΜ-ΑΠΘ).

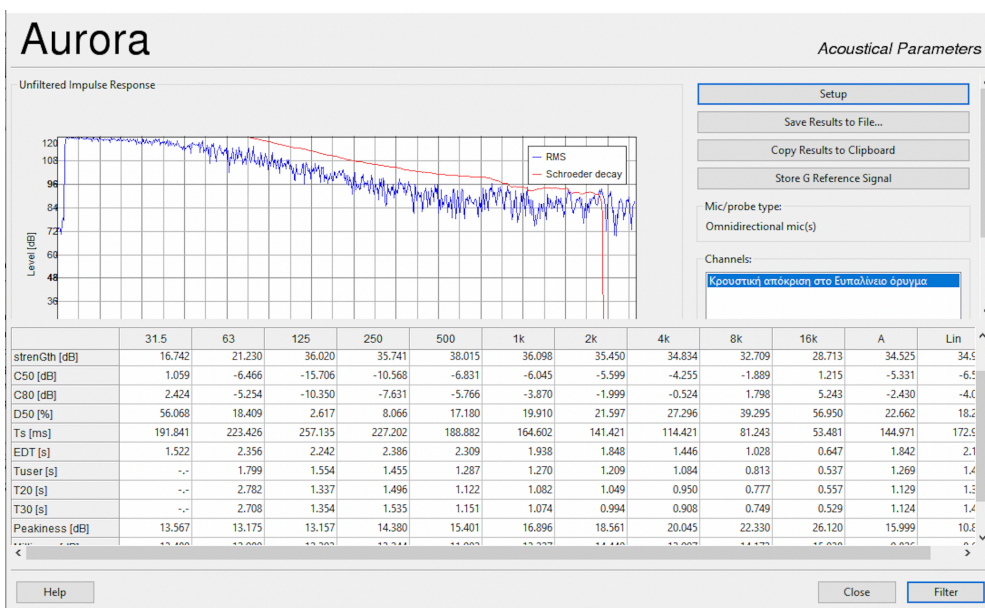


1.γ) Ο αγωγός και το σημείο συνάντησης των δύο ομάδων (κύκλος)

1ο σημείο (μέσον της διαδρομής πριν το σημείο συνάντησης)



Εικόνα 2.α) Η κρουστική απόκριση στο μεσαίο σημείο του ορύγματος (πριν το σημείο συνάντησης):



Εικόνα 2.β) Η ανάλυση των βασικών παραμέτρων του ήχου και της ακουστικής στο μεσαίο σημείο (1) της διαδρομής πριν το σημείο συνάντησης

**Βασικές παράμετροι της ακουστικής ανάλυσης ενός χώρου αποτελούν τα κριτήρια C50, C80, D50 και EDT τα οποία αναλυτικά είναι:**

**C50:** Το κριτήριο ευκρίνειας για την ομιλία, στα πρώτα 50 ms από τη κρουστική απόκριση (το οποίο είναι ένα ηχητικό συμβάν όπως ο κρότος ενός μπαλονιού στο χώρο).

**C80:** Το κριτήριο ευκρίνειας για τη μουσική, στα πρώτα 80 ms από τη κρουστική απόκριση. Για αίθουσες συναυλιών οι ιδανικές τιμές είναι ανάμεσα στο εύρος τιμών  $-4\text{dB} < C80 < +4\text{dB}$

**D50:** Το ποσοστό καταληπτότητας των συμφώνων σε ένα χώρο, παράμετρος που συνδέεται με τη παράμετρο για την ομιλία αντίστοιχα C50.

**EDT:** Πρώτος χρόνος αντήχησης. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η τιμή -και πιο κοντά στη μέγιστη τιμή 1-, τόσο καλύτερη είναι η ακουστική για τη μουσική.

**T30(s):**

**Προχωράμε στην ακουστική ανάλυση του Ευπαλινείου ορύγματος για τη πρώτη θέση μέτρησης, σύμφωνα με τις εικόνες 1α) και 1β).**

Παρατηρούμε πως για τη **παράμετρο C50** έχουμε ένα εύρος αρνητικών ενδείξεων  $-1.889$  με  $-15.706$  μεταξύ των συχνοτήτων 32.5 Hz και 8 kHz. Αυτές οι ενδείξεις μας δίνουν χαμηλή καταληπτότητα για τη περίπτωση ομιλίας στο χώρο.

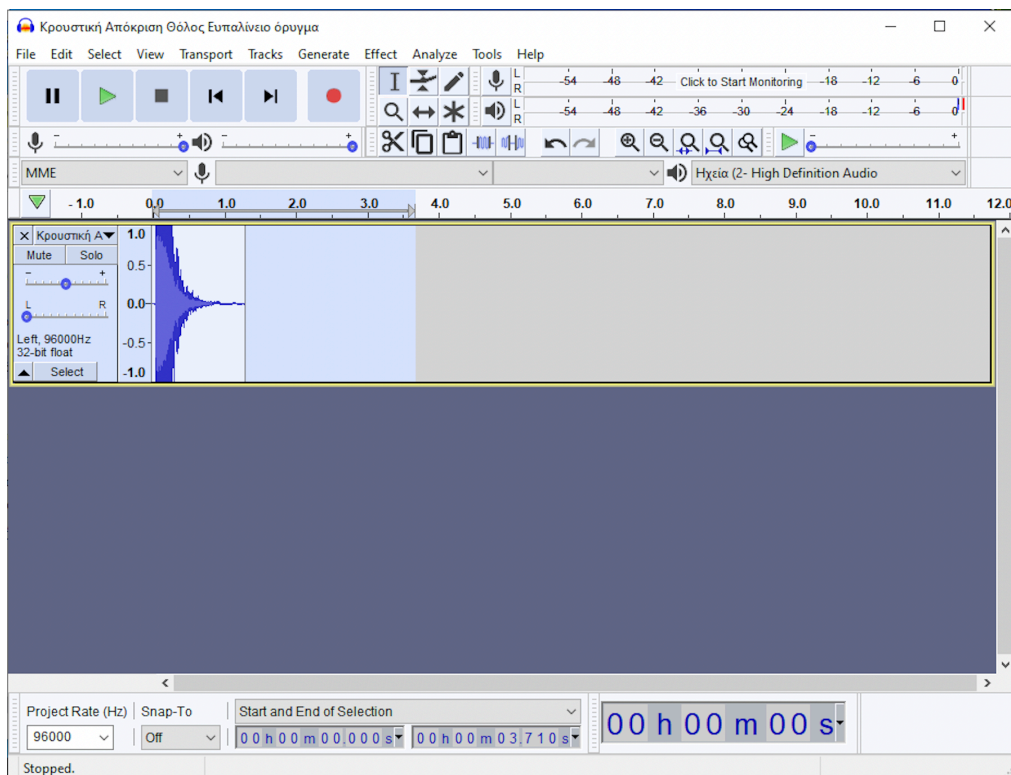
Για τη **παράμετρο C80**, έχουμε ένα εύρος αρνητικών τιμών πέρα από το όριο των επιθυμητών για τις συχνότητες μεταξύ 63 και 500 Hz. Αυτό σημαίνει ότι για το ανωτέρω εύρος χαμηλών συχνοτήτων δεν έχουμε επιθυμητές τιμές για τη περίπτωση μουσικής στο χώρο, αλλά για το υπόλοιπο συχνοτικό εύρος και κυρίως από 1kHz μέχρι και 8 kHz οι τιμές είναι πολύ καλές.

Όσον αφορά στη **παράμετρο D50**, το ποσοστό καταληπτότητας συμφώνων (στη περίπτωση ομιλίας) είναι πολύ χαμηλό και έξω από τα όρια του επιθυμητού, κάτι που σε συνδυασμό καθιστά το χώρο ακατάλληλο για ομιλία.

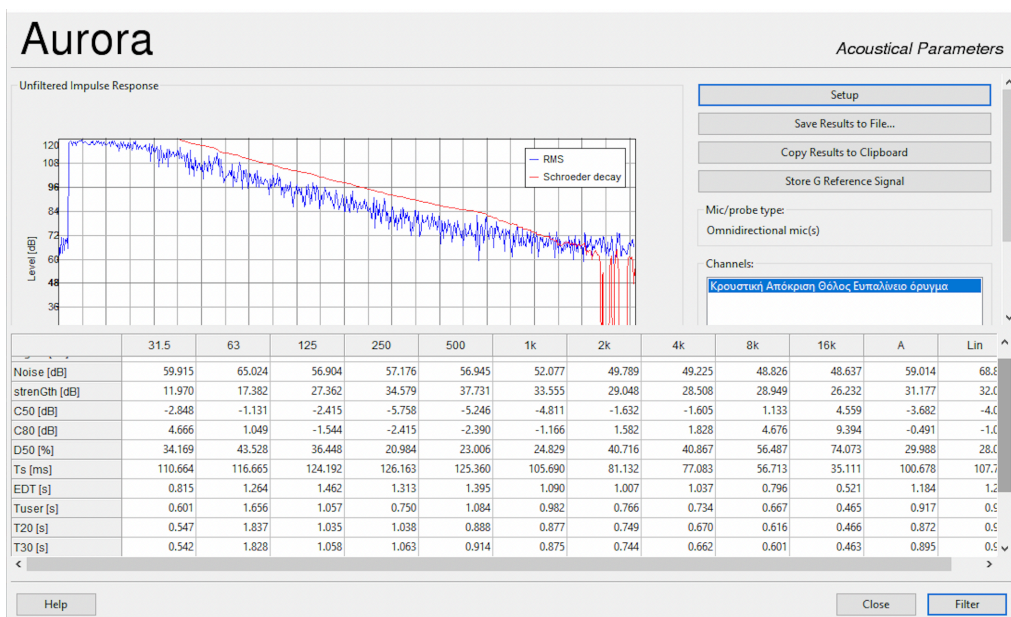
Σχετικά με τη παράμετρο του **“πρώιμου χρόνου αντήχησης” (EDT)**, έχουμε ψηλές τιμές, πάνω από τα όρια του επιθυμητού, αλλά στη περίπτωση της μουσικής οι τιμές που μετράμε για το συχνοτικό εύρος 63 Hz με 8 kHz μας δίνουν καλό ηχητικό αποτέλεσμα.

Ο **χρόνος αντήχησης T30(s)**, για το συχνοτικό εύρος όπου έχουμε ενδείξεις τιμών. από 125 Hz μέχρι και 16 kHz, μας δίνει πολύ καλές τιμές για μουσική, με τη μοναδική τιμή κάτω από 0.7s να είναι για τα 16 kHz, όπου υπάρχει βύθιση.

2ο σημείο (στο σημείο συνάντησης των δύο ομάδων εκσκαφής):



**Εικόνα 3.α)**  
**Κρουστική απόκριση του θόλου/σημείου συνάντησης στο Ευπαλινείο ορύγμα**



**Εικόνα 3.β) Ανάλυση ακουστικών παραμέτρων για το θόλο/σημείο συνάντησης των δύο ομάδων εκσκαφής στο Ευπαλινείο ορύγματο.**

**Προχωράμε στην ακουστική ανάλυση του Ευπαλινείου ορύγματος για τη δεύτερη θέση μέτρησης, σύμφωνα με τις εικόνες 2.α) και 2.β).**

Παρατηρούμε πως για τη **παράμετρο C50** έχουμε πολύ καλές τιμές μεταξύ των ακραίων τιμών -5.758 (250 Hz) και 1.133 (8 kHz). Αυτές οι τιμές, αν και δεν αποτελούν ιδανικές ενδείξεις για ομιλία, αποδεικνύουν τη καλή ακουστική του συγκεκριμένου σημείου συνάντησης των δύο ομάδων. Αυτό ερμηνεύεται και βάση των γεωλογικών σχηματισμών, καθώς στο συγκεκριμένο σημείο δημιουργείται ένας θόλος, ο χώρος είναι μεγαλύτερος από τα περισσότερα σημεία του ορύγματος και η "αρχιτεκτονική" του χώρου πιο απρόβλεπτη, κάτι που δημιουργεί τις προϋποθέσεις για σκέδαση των ηχητικών κυμάτων, ώστε να μη συγκεντρώνονται μεγάλες ποσότητες ακουστικής ενέργειας σε περιορισμένα σημεία του χώρου, κάτι που εξ ορισμού δημιουργεί ακουστική σύγχυση.

Όσον αφορά στη **παράμετρο D50**, το ποσοστό καταληπτότητας συμφώνων (στη περίπτωση ομιλίας) είναι πολύ χαμηλό και έξω από τα όρια του επιθυμητού στις μεσαίες περιοχές συχνότητας, κάτι που ισορροπεί σε μικρό βαθμό με το καλύτερο ποσοστό καταληπτότητας συμφώνων στις ψηλότερες και χαμηλότερες συχνότητες της ακουστικής μελέτης.

Για τη **παράμετρο C80**, παρατηρούμε πολύ καλές τιμές (-2.415 -> 4.676) για όλο το ακουστικό εύρος εκτός από τη ψηλότερη συχνότητα των 16 kHz, όπου ξεφεύγει αρκετά πάνω από το επιθυμητό όριο (9.394 dB). Η παράμετρος D50 σε συμφωνία με τη παράμετρο C50 δίνει αρκετά καλά ποσοστά τιμών για όλο το ακουστικό εύρος, αν και όχι ιδανικά για την ομιλία.

Όσο για τη παράμετρο του "**πρώιμου χρόνου αντήχησης**" (EDT), έχουμε εξαιρετικά αποτελέσματα με εύρος τιμών (0.521s -> 1.462s) κοντά στο ιδανικό για όλο το συχνотικό εύρος της υφιστάμενης ακουστικής μελέτης. Πιο συγκεκριμένα για το συχνотικό εύρος μεταξύ 63 Hz και 4 kHz μας δίνονται εξαιρετικά αποτελέσματα, τα οποία συνδέονται με πολύ καλή ακουστική για τη περίπτωση διενέργειας μουσικής συναυλίας.

Τέλος, για τη παράμετρο του **χρόνου αντήχησης (T30s)** παρατηρούμε εξαιρετικές τιμές για όλο το συχνотικό εύρος της ακουστικής μελέτης (> 0.5s), με τις καλύτερες τιμές να συναντώνται μεταξύ 63 Hz και 2 kHz. Αυτό αποδεικνύει την πολύ ακουστική στο σημείο συνάντησης των δύο ομάδων ανασκαφής, στο σημείο που πλέον αποκτά τα ακουστικά χαρακτηριστικά ενός μικρού θόλου.

## **Συμπεράσματα:**

*Η ακουστική του Ευπαλινείου ορύγματος δεν ενδείκνυται -εν γένει- για ομιλία και μουσική, καθώς παρατηρούμε ανομοιομορφία στα αποτελέσματα των ανωτέρω μετρήσεων. Καθώς βέβαια οι μετρήσεις έγιναν σε δύο ετερόκλητα σημεία του ορύγματος, παρατηρούμε διαφορές μεταξύ τους, με τις κυριότερες να εντοπίζονται στην αξιολόγηση της παραμέτρου C50 (παράμετρος καταληπτότητας για την ομιλία) καθώς και για τις τιμές χρόνων αντήχησης (T30s). Οι καλύτερες τιμές μετρήσεων για όλες τις παραμέτρους -αν και χωρίς ισορροπία- εντοπίζονται στον λανθάνοντα θόλο που αφορά στο σημείο συνάντησης των δύο ομάδων διάνοιξης του ορύγματος.*

*Πιο συγκεκριμένα, για τις τιμές των παραμέτρων και C50 (καταληπτότητα για τη περίπτωση ομιλίας) , C80 (καταληπτότητα για τη περίπτωση μουσικής) , **έχουμε πολύ καλύτερες ενδείξεις για το σημείο συνάντησης σε σχέση με τις μετρήσεις στο πρώτο σημείο ακουστικής αξιολόγησης του ορύγματος. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη βύθιση για τις δύο παραμέτρους στο σημείο της πρώτης μέτρησης***

*Για τη παράμετρο EDT (πρώιμος χρόνος αντήχησης), στη περίπτωση του **πρώτου σημείου μέτρησης, έχουμε αρκετά ως πολύ ψηλές τιμές που δεν ευνοούν στη περίπτωση ομιλίας αλλά είναι παραπάνω από το επιθυμητό όριο, ως επί το πλείστον, και για τη περίπτωση μουσικής συναυλίας.***

*Για τη παράμετρο EDT στη περίπτωση της μέτρησης **στο σημείο συνάντησης των δύο ομάδων έχουμε πολύ καλύτερες τιμές, σε κάποιες περιπτώσεις εξαιρετικές για τη περίπτωση διενέργειας μουσικής συναυλίας, σε επίπεδο επάρκειας για την ομιλία.***

*Τέλος, για το χρόνο αντήχησης T30s, **συγκριτικά μεταξύ των δύο χώρων, παρατηρούμε ότι εν γένει οι τιμές για τη περίπτωση της μέτρησης στο χώρο του θόλου είναι πολύ καλύτερες, καθώς ενώ έχουμε βυθίσεις στα 31.2 Hz και 16 kHz, στο συνολικό εύρος των συχνοτήτων που ακούμε (μεταξύ 20 Hz και 20 kHz) είναι μεταξύ (0.601s και 1.828s).***

*Στο σημείο της πρώτης μέτρησης παρατηρούμε ότι **οι τιμές είναι πολύ υψηλές (εκτός από τη βύθιση των 0.5s στα 16 kHz), κάτι που εξηγεί και τα ποσοστά χαμηλής καταληπτότητας κυρίως για την ομιλία.***

### **Συμπερασματικά,**

***Οι ακουστικές μετρήσεις μας έδωσαν -ως αποτέλεσμα- πολύ καλύτερες τιμές ακουστικής στο σημείο συνάντησης των ομάδων διάνοιξης του ορύγματος από ότι σε ενδιάμεσο σημείο του ορύγματος. Αυτό συμβαίνει καθώς, όπως αναφέρθηκε ήδη, ο χώρος είναι μεγαλύτερος από τα περισσότερα σημεία του ορύγματος και η "αρχιτεκτονική" του χώρου πιο απρόβλεπτη, κάτι που δημιουργεί τις προϋποθέσεις για σκέδαση των ηχητικών κυμάτων, ώστε να μη συγκεντρώνονται μεγάλες ποσότητες ακουστικής ενέργειας σε περιορισμένα σημεία του χώρου, κάτι που εξ ορισμού δημιουργεί ακουστική σύγχυση. Αντίθετα, στα υπόλοιπα τμήματα του ορύγματος, είτε έχουμε πολύ στενό χώρο για να επιτευχθεί επαρκής σκέδαση των ηχητικών κυμάτων, είτε υπάρχουν συντονισμοί και στάσιμα κύμματα που δεν ευνοούν για την ευκρίνεια του ήχου.***

### **Βιβλιογραφία:**

1. Σ.Βότσκος, "Ακουστική ανάλυση σπηλαίων του Πάνα ανά την Ελλάδα, και συσχετισμός με την ιδιοακουστική των ξύλινων πνευστών μουσικών οργάνων", Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2020
2. Κ. Τοκμακίδης, Π.Τοκμακίδης, "Ακολουθώντας τα βήματα του Ευπαλίνου", τομέας γεωδαισίας και τοπογραφίας, Πολυτεχνική σχολή ΤΑΤΜ-ΑΠΘ,
3. Torben Boloj, "The Eupalinos tunnel", [samostour.dk](http://samostour.dk), 2010.
4. Τοκμακίδης Κ., Βλάχος Δ. Το Ευπαλίνιο όρυγμα, Επιστημονικό συνέδριο « Η εξέλιξη των οργάνων, των μεθόδων και των συστημάτων μετρήσεων των επιστημών της αποτύπωσης στην Ελλάδα»>>, Θεσσαλονίκη 15-16 Απριλίου 2005
5. Τσιλφίδης Αλ. *Ήχος και Τέχνες Τόμος Β*. Πάτρα: Εκδόσεις Ανοικτού Ελληνικού Πανεπιστημίου, 2013