

Ακουστική ανάλυση για τη ‘Σπηλιά του Πυθαγόρα’

Γράφει ο Σωκράτης Βότσκος, Msc Ακουστικού σχεδιασμού και Πολυμέσων ΕΑΠ

Ιστορικά στοιχεία για το σπήλαιο:

Η φερόμενη ως ‘σπηλιά του Πυθαγόρα’ βρίσκεται στο όρος Κέρκη στο δυτικό τμήμα του νησιού, το οποίο έχει και τη δεύτερη υψηλότερη κορφή από τα νησιά του Αιγαίου. Στη πραγματικότητα αφορά σε δύο διαφορετικά σπήλαια που βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους. Εικάζεται σύμφωνα με ιστορικά στοιχεία ότι εκεί βρήκε καταφύγιο ο Πυθαγόρας (γεν.570 πχ) ενόσω καταδιωκόταν από τον τύραννο Πολυκράτη -πιθανότατα για τη φιλοσοφία και τις ιδιοφυείς ιδέες του-. Στο ένα σπήλαιο διέμενε και στο άλλο δίδασκε. Ο Πυθαγόρας ο Σάμιος μαθηματικός και γεωμέτρης, πατέρας του πυθαγορείου θεωρήματος, γεννήθηκε στην Σάμο γύρω στο 580 π.χ. και απεβίωσε στην Ιταλία γύρω στο 490 π.χ..

Αυτή η έρευνα επικεντρώνεται στο σπήλαιο που βρίσκεται χαμηλότερα μεταξύ και των δύο και είναι το πρώτο που συναντά ο περιηγητής ανεβαίνοντας εκείνο το τμήμα του όρους Κερκετέα (Κέρκη).



Εικόνα 1α.

Το στόμιο του σπηλαίου από το εσωτερικό του (η πρώτη είσοδος).

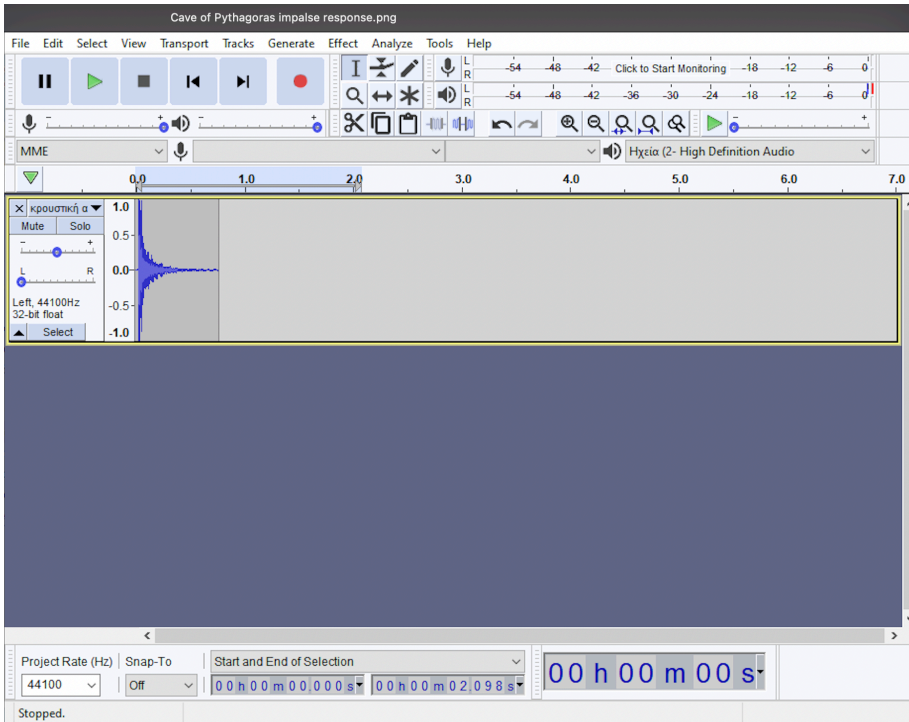


Εικόνα 1β.
Άποψη από το εξωτερικό του σπηλαίου

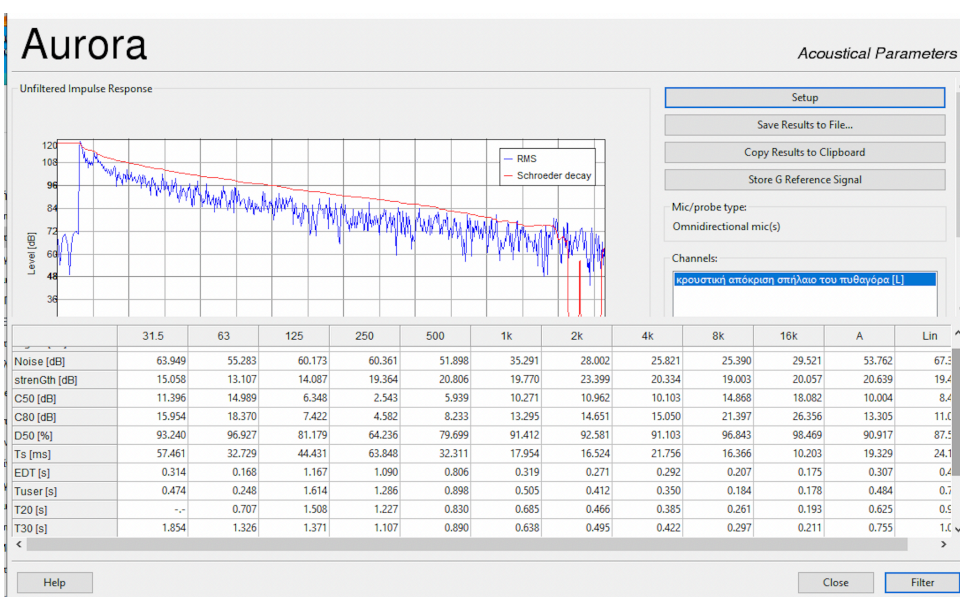


Εικόνα 1γ.
Η περιοχή γύρω από το σπήλαιο του Πυθαγόρα

Η ακουστική ανάλυση στη σπηλιά του Πυθαγόρα πραγματοποιήθηκε έχοντας ως σημείο αναφοράς και ανάλυσης ένα σημείο στο κέντρο του σπηλαιίου.



Εικόνα 1.γ) Η κρουστική απόκριση (impulse response) του χώρου όπως παρουσιάζεται με το λογισμικό Audacity.



Εικόνα 1.δ) Η ανάλυση των ακουστικών παραμέτρων όπως παρουσιάζεται με το λογισμικό Audacity.

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.

T30s: Αυτή η παράμετρος αφορά στο χρόνο αντήχησης και είναι η παράμετρος-συνδυαστικός κρίκος μεταξύ όλων των παραμέτρων που μας δίνει μία σφαιρική εικόνα της ακουστικής του χώρου.

Προχωράμε στην ανάλυση της ακουστικής της σπηλιάς του Πυθαγόρα σύμφωνα με τα ανωτέρω κριτήρια και παραμέτρους:

*Παρατηρούμε πως για τη **παράμετρο C50** έχουμε ένα εύρος αρκετά χαμηλών τιμών στα όρια του επιθυμητού, που μας δίνουν επαρκή καταληπτότητα για τη περίπτωση ομιλίας στο χώρο.*

*Για τη **παράμετρο C80**, έχουμε ένα εύρος τιμών μεγαλύτερο του επιθυμητού για όλο το εύρος συχνοτήτων από 32.5 μέχρι και 16 kHz. Αυτό σημαίνει ότι δεν έχουμε την ιδανική ακουστική για μουσική, ειδικά στη περίπτωση όπου μπορεί να συνυπάρχουν περισσότερα από 1 μουσικά όργανα στο χώρο.*

*Όσον αφορά στη **παράμετρο D50**, το ποσοστό καταληπτότητας συμφώνων (στη περίπτωση ομιλίας) είναι πολύ καλό, αγγίζοντας το 95% κατά μέσο όρο σε όλο το εύρος ακουστών συχνοτήτων, εκτός από τα 125 Hz (81.18%), ενώ χαμηλότερες τιμές καταληπτότητας παρατηρούμε μεταξύ των χαμηλομεσαίων συχνοτήτων 250 και 500 Hz.*

*Σχετικά με τη παράμετρο του "**πρώιμου χρόνου αντήχησης**" (EDT), έχουμε χαμηλές τιμές για όλο το συχνοτικό εύρος, εκτός από τις μεσαίες συχνότητες που αντιστοιχούν στις συχνότητες ομιλίας, δηλαδή μεταξύ 125 Hz και 1 kHz, κάτι που επαληθεύει τις μετρήσεις και τα αποτελέσματα των παραμέτρων C50 & C80.*

*Η παράμετρος του χρόνου **αντήχησης T30s**, μας δίνει πολύ καλές τιμές για όλο το εύρος ακουστών συχνοτήτων της υφιστάμενης μελέτης εκτός από τις ψηλότερες συχνότητες 2kHz με 16kHz, αποτέλεσμα που σε σύνδεση με τα αποτελέσματα των υπολοίπων παραμέτρων μας δίνει καλύτερη εικόνα της ακουστικής του χώρου.*

Συμπερασματικά, η σπηλιά του Πυθαγόρα έχει επαρκή ακουστική για ομιλία αλλά όχι την επιθυμητή ακουστική για μουσική, ειδικά στη περίπτωση που “παίζουν” δύο μουσικά όργανα η περισσότερα στο χώρο.

Τις τιμές αυτές μπορούμε να τις συγκρίνουμε με τις αντίστοιχες στα σπήλαια του Πάνα της Βάρης, Πάρνηθας και Πεντέλης όπου πραγματοποιούνταν τελετές που συνδύαζαν μουσική αλλά και χορό.

2. Σύγκριση με άλλα σπήλαια ανά την Ελλάδα

2.1 Σπήλαιο του Πάνα Σπήλαιο Νυμφολήπτου (Βάρη Αττικής)

Στα πρόβουνα του Νοτίου τμήματος του Υμηττού σε υψόμετρο 290 μέτρων νοτιοανατολικά της Βάρης, βρίσκεται το σπήλαιο Αρχεδήμου η Νυμφολήπτου.

Το όνομα του προέκυψε από το λαξευτή/γλύπτη Αρχέδημο, ο οποίος έχοντας καταγωγή από τη Σαντορίνη εγκαταστάθηκε στην Αθήνα και οδηγήθηκε στο συγκεκριμένο σπήλαιο. Συνεπαρμένος από τη φυσική διαρίθμηση του, τον ενέπνευσαν να αφιερώσει το χώρο στο Πάνα και τις Νύμφες, γι’ αυτό και ονομάζεται Νυμφόληπτος. Ξεκίνησε λαξεύοντας έναν μεγάλο σταλαγμίτη δίνοντας του τη μορφή Θεότητας καθισμένης σε θρόνο, ενώ στο τοίχο πίσω από τη Θεότητα λάξευσε σχηματίζοντας ένα βωμό με κατάλληλες θέσεις για τη τοποθέτηση/αφιέρωση αναθημάτων.

Στο σχηματισμένο από σταλακτίτες τοίχο ο οποίος χωρίζει το σπήλαιο σε δύο επιμέρους θαλάμους και πλάι σε ένα δεύτερο βωμό σκάλισε τον ίδιο να κρατάει εργαλεία λάξευσης, ορθογωνιόμετρο και σφυρί, χαράζοντας και το όνομα του δύο φορές. Επιπλέον χάραξε και σκάλισε μικρά σκαλοπάτια προς το δεύτερο βωμό ώστε να είναι πιά εύκολα προσβάσιμος. Για την ύδρευση του χώρου, σκάλισε ένα αυλάκι το οποίο συνέλεγε τα νερά της βροχής που εισέρχονταν στο σπήλαιο και τα οδηγούσε σε μία μικρή δεξαμενή, την οποία επίσης είχε λαξεύσει. Επιπλέον προσωπική εργασία, με μικρές λαξευμένες φράσεις, του Αρχέδημου, φαίνεται να υπάρχει και σε άλλα πέντε (5) σημεία του σπηλαίου. Σε μία απο αυτές αναφέρει: <<ΑΡΧΕΔΗΜΟΣ Ο ΘΗΡΑΙΟΣ Ο ΝΥΜΦΟΛΗΠΤΟΣ ΦΡΑΔΑΙΣΙ ΝΥΜΦΩΝ Τ’ ΑΝΤΡΟΝ ΕΞΗΡΓΑΣΑΤΟ.>> (εικόνα ...) .Σε κάποια σημεία του Σπηλαίου υπάρχουν μισοκατεστραμμένα λαξεύματα επισκεπτών.

Το Σπήλαιο, σύμφωνα με τα ευρήματα μετά από ανασκαφές που πραγματοποιήθηκαν το 1901 χρησιμοποιήθηκε κατά τον 6^ο π.Χ. αιώνα

μέχρι και τον 4^ο αιώνα μ.Χ. Τα ευρήματα περιλαμβάνουν ανάγλυφες παραστάσεις Νυμφών, λυχνάρια, ειδωλία, νομίσματα και αγγεία από τη περίοδο δράσης του Μεγάλου Αλεξάνδρου, μέχρι και μετά το 400 μ.Χ. Υπάρχουν ίχνη αρχαιοκαπηλίας, καθώς λείπει η κεφαλή της Θεότητας που ήταν λαξευμένη στο χώρο.

Διαρίθμηση του Σπηλαίου

Η είσοδος του σπηλαίου είναι κάθετη με ύψος τέσσερα (4) μέτρα και άνοιγμα οριζόντιο δύο (2) μέτρων. Σκαλοπάτια οδηγούν στο εσωτερικό με διαστάσεις 21/23.75 μέτρων, ύψος 2.5μ και βάθος 15μ. Η διαρίθμηση του χώρου του σπηλαίου εσωτερικά είναι η εξής:

Δύο χώροι, ο νότιος μεγαλύτερος και αρκετά φωτεινός (από το άνοιγμα/είσοδο του σπηλαίου), ενώ ο βόρειος στενότερος, αρκετά σκοτεινότερος και με ποικίλους σχηματισμούς από σταλακτίτες.

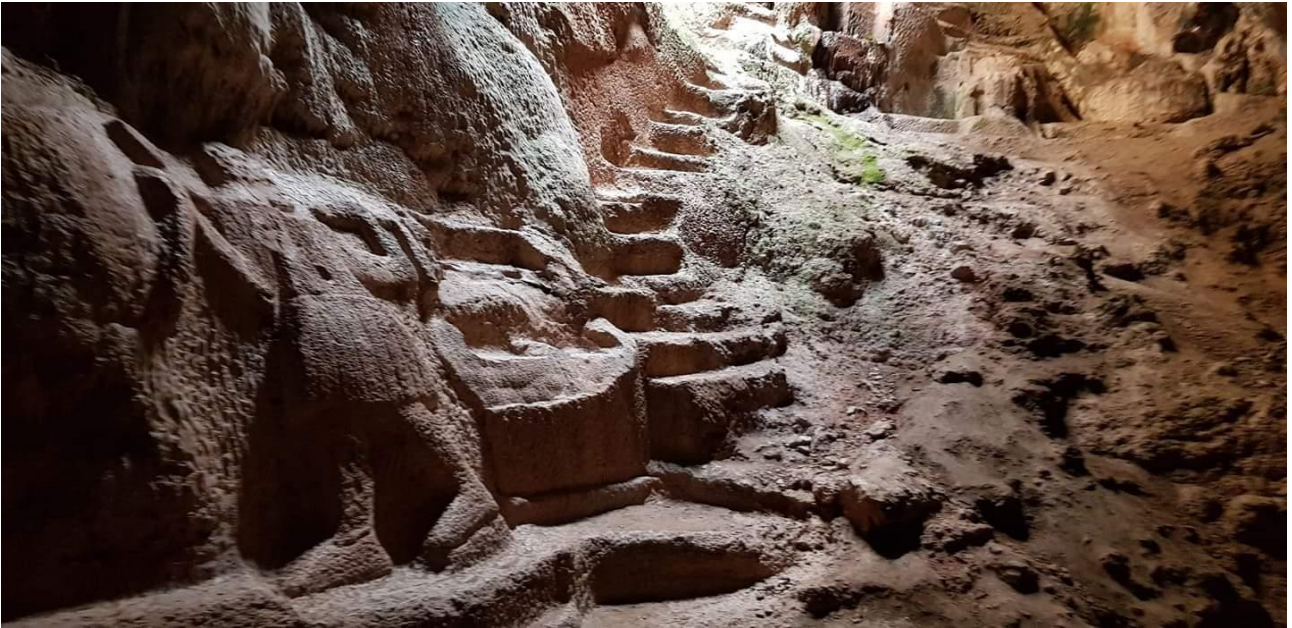
Η μέτρηση πραγματοποιήθηκε στο μεγαλύτερο από τους δύο χώρους, στο νότιο, όπου και είναι πιο εμφανής η παρουσία θρησκευτικών συμβόλων (σκαλίσματα στο τοίχο) που σχετίζονταν με τη λατρεία του θεού Πάνα (εικόνα 16).



Εικόνα 2.1 Κάτοψη του Σπηλαίου Νυμφολήπτου στη Βάρη, σημείο μέτρησης ορισμένο με κόκκινη βούλα (Σπήλαιο του Πάνα)



Εικόνα 2.2 Είσοδος (στόμιο) Σπηλαίου Νυμφολήπτου, Βάρη (πηγή: φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, Ιανουάριος 2020)



Εικόνα 2.3 Εσωτερικός χώρος του σπηλαιού Νυμφολήπτου στη Βάρη (πηγή: φωτογραφία από προσωπικό αρχείο, Ιανουάριος 2020)

Αποτελέσματα μετρήσεων/συμπεράσματα

Σύμφωνα με τις μετρήσεις και τις περαιτέρω αναλύσεις των, παρατηρούμε (Πίνακας 7.6) τις τιμές C80 (clarity for music, καθαρότητα μουσικής), C50 (clarity for speech, καθαρότητα ομιλίας) και τη τιμή STI (Speech transmission index, δείκτης μετάδοσης ομιλίας) για όλο το συχνοτικό εύρος, ότι έχουμε πολύ ποιοτικά αποτελέσματα (εικόνα 19).

Πιο συγκεκριμένα, έχουμε αποδεκτές τιμές για όλο το συχνοτικό εύρος ακουστικής μελέτης. Ειδικότερα, οι μεγαλύτερες τιμές ευκρίνειας για τη περίπτωση ομιλίας (C50) εντοπίζονται στις ψηλότερες συχνότητες 2 μέχρι 8 kHz με τις χαμηλότερες και μεσαίες συχνότητες (31.5 Hz με 1 kHz) να εμφανίζουν εξίσου αποδεκτές τιμές, παρ'ότι ελαφρώς χαμηλότερες (μεταξύ 8.4 και 12.9). Όσον αφορά στη παράμετρο του πρώιμου χρόνου απόσβεσης, έχουμε πολύ καλές τιμές για τις χαμηλές συχνότητες. Ο χρόνος αντήχησης (T30) εμφανίζει τιμές μεταξύ 0.417 s (για τη συχνότητα των 8 kHz) και 1.590 s (για τη συχνότητα αντίστοιχα των 125 Hz). Παρατηρούμε ότι οι τιμές του χρόνου αντήχησης είναι μεγαλύτερες για τις χαμηλότερες συχνότητες, κάτι που προσδίδει ζεστασιά στον ήχο στη περίπτωση μουσικής συναυλίας και ευκρίνεια στην ομιλία. Η μοναδική τιμή που είναι κάτω από το επιθυμητό όριο (0.5 s), αφορά στη συχνότητα

8 kHz. Σε σχέση όμως με τον όγκο του χώρου έχουμε πολύ καλές τιμές αντήχησης, κάτι που με τις διαχυτικές ιδιότητες λόγω της ιδιότυπης ανομοιομορφίας των επιφανειών του σπηλαίου, προσδίδει όπως ήδη αναλύσαμε ιδιαίτερη ακουστικά καθαρότητα (clarity) για ομιλία και μουσική (εικόνα 18 και πίνακας 7.1). Η καθαρότητα του ήχου προσφέρει στον ακροατή μία ιδιαίτερη αντίληψη του χώρου και της θέσης του σε αυτόν. Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών ορίζει τον χώρο του σπηλαίου καλύτερο ακουστικά από πολλούς σύγχρονους λατρευτικούς χώρους.

Όσον αφορά στο δείκτη μετάδοσης της ομιλίας (STI), παρουσιάζει εξαιρετικές τιμές για όλο το συχνοτικό εύρος της ακουστικής μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, οι τιμές εκτείνονται μεταξύ της τιμής 0.873 ($f=1$ kHz) και 0.920 ($f=4$ kHz), κάτι που αποδεικνύει την ιδιαίτερη λειτουργία του χώρου τόσο για ομιλία όσο και για μουσική, σε συνδυασμό με την ανάλυση του χρόνου αντήχησης.

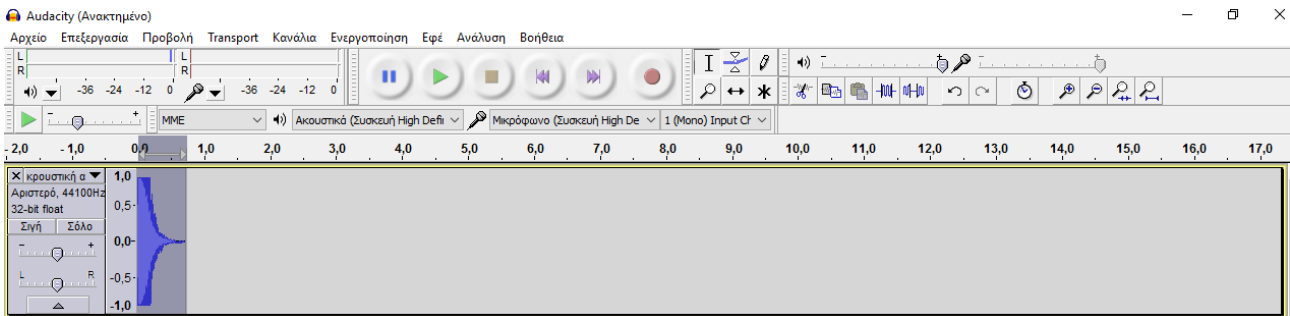
2.2 Σπηλαιοβάραθρο Καιάδα Σπάρτης 8.1.1 Εισαγωγή

Το Σπηλαιοβάραθρο του Καιάδα βρίσκεται στον πρόποδες του όρους Ταϋγέτου, δέκα (10) χιλιόμετρα από τη πόλη της Σπάρτης και στο χωριό Τρύπη, δίπλα στο δρόμο που οδηγεί από τη Σπάρτη στη Καλαμάτα. Η είσοδος του, με πλάτος περίπου μισού μέτρου (0.5μ) εντοπίζεται μετά από την ανάβαση σκαλοπατιών σε ύψος τριάντα (30) μέτρων από το δρόμο, τα οποία οδηγούν μπροστά σε μία σχισμή ανάμεσα σε δύο όγκους βράχων. Η πρόσβαση είναι δύσκολη, ενώ λόγω στενότητας, χωρίς εξοπλισμό είναι δυνατή η είσοδος μόνο στο πρώτο χώρο του βαραθρού. Το ερευνημένο τμήμα του καλύπτει περίπου 50μ. Η αρχική είσοδος του δεν είναι ορατή πλέον.

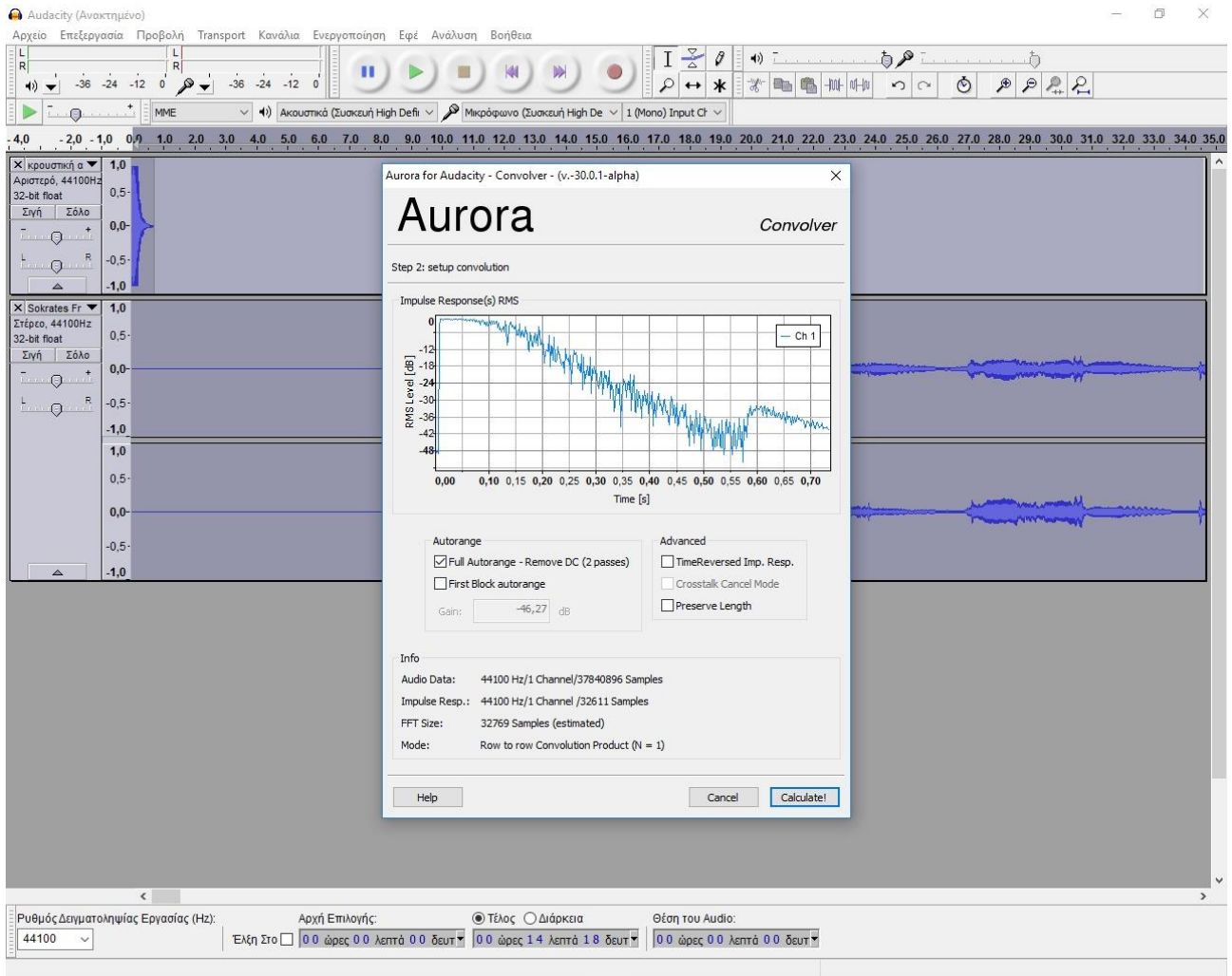
Το σπήλαιο εικάζεται ότι χρησιμοποιούνταν κατά την αρχαιότητα για κατακρήμνιση εχθρών των Σπαρτιατών κατά τη διάρκεια των Μεσσηνιακών πολέμων (8^{ος} με 5^ο πΧ αιώνα), ενώ ο κύριος όγκος ευρημάτων οστών εντοπίζεται στο βαθύτερο τμήμα του σπηλαίου. Σαφή τεκμήρια για τη χρονολόγηση των ευρημάτων δεν έχουν βρεθεί.



) **Εικόνα 2.2.1** Σπηλαιοβάραθρο Καιάδα είσοδος, (πηγή: φωτογραφία από προσωπικό αρχείο 2020



Εικόνα 2.2.2 Η κρουστική απόκριση του Σπηλαιοβαράθρου Καιάδα στη Σπάρτη (Λακωνία)



Εικόνα 2.2.3 Διαδικασία συνέλξης ηχογράφησης με τη κρουστική απόκριση του σπηλαιοβαράθρου Καιάδα για τη διαδικασία αξιολόγησης

Παρατηρούμε τις τιμές ευκρίνειας ομιλίας και μουσικής, οι οποίες είναι χαμηλότερα από τις ενδεδειγμένες τιμές. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή C50 είναι μικρότερη των 0 dB για το συχνотικό εύρος από 125 μέχρι και 2 kHz, ενώ μονάχα για τα 4 και 8 kHz είναι πιο κοντά σε επιθυμητά επίπεδα. Οι τιμές σε ποσοστά της καταληπτότητας (D50) παρατηρούμε ότι κατ'αντιστοιχία με τις τιμές C50 είναι εξαιρετικά χαμηλές, με το ποσοστό καταληπτότητας να είναι σε ικανοποιητικά επίπεδα μόνο για τις ψηλότερες συχνότητες, 4 και 8 kHz, με οριακή επάρκεια για τη συχνότητα των 2 kHz.

Η τιμή που περιγράφει την ευκρίνεια της μουσικής στο χώρο (C80) είναι χαμηλότερη από τα 0 dB για το συχνοτικό εύρος μεταξύ 125 και 500 Hz, ενώ είναι πιο κοντά στις ζητούμενες τιμές για το συχνοτικό εύρος από 1 kHz μέχρι και 8 kHz. Όσον αφορά στο χρόνο αντήχησης T30, είναι εξαιρετικά χαμηλές οι τιμές, κάτι που δε προσδίδει την απαραίτητη ζεστασιά στις χαμηλότερες συχνότητες, ενώ λειτουργεί αρνητικά και σε σχέση με την καθαρότητα της ομιλίας. Εκτείνονται από 0.263 s η χαμηλότερη τιμή (8 kHz) μέχρι και 0.694 s για τα 125 Hz. Ο δείκτης μετάδοσης της ομιλίας (STI) εμφανίζει οριακά αποδεκτές τιμές για όλο το συχνοτικό εύρος, ενώ ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης είναι σχετικά υψηλός για όλο το συχνοτικό εύρος και κυρίως για τις χαμηλότερες συχνότητες (125 μέχρι και 500 Hz).

Ο χρόνος πρώιμης απόσβεσης (EDT) είναι σχετικά υψηλός (πάνω από 1 s) για το συχνοτικό εύρος από 125 μέχρι και 500 Hz, ενώ είναι χαμηλός για το συχνοτικό εύρος από 1 έως και 8 kHz.

Συμπερασματικά, το σπηλαιοβάραθρο του Καιάδα στη Σπάρτη δεν έχει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά ως προς την ακουστική του ώστε να ενδείκνυται για θρησκευτικούς ή τελετουργικούς σκοπούς, όπως και επαληθεύεται από τις ιστορικές αναφορές σχετικά με το χαρακτήρα του σπηλαίου.

Σύγκριση της ακουστικής μεταξύ της σπηλιάς του Πυθαγόρα (Σάμος), του σπηλαιίου Νυμφολήπτου στη Βάρη (Αττική) και σπηλαιοβάραθρου Καιάδα (Σπάρτη).

Συγκρίναμε σπήλαια με πολύ διαφορετική ιστορικά χρήση, ώστε να εξάγουμε κάποια συμπεράσματα για τη πιθανή επιλογή τους.

Παρατηρούμε συνοπτικά ότι για το **σπήλαιο Νυμφολήπτου** όπου και πραγματοποιούνταν δοξαστικές τελετουργίες προς τον αρχαίο θεό Πάνα, η ακουστική αποδεικνύεται εξίσου καλή για ομιλία και μουσική, δύο πολύ βασικά χαρακτηριστικά της λατρείας του θεού.

Για το **σπηλαιοβάραθρο Καιάδα**, πέρα από τα ξεκάθαρα δομικά χαρακτηριστικά του ως σπήλαιο-βάραθρο και η ακουστική του συνεπάγεται της αντίστοιχης δομής και χρήσης του.

Για τη **σπηλιά του Πυθαγόρα**, όπου ο φιλόσοφος και μαθηματικός εικάζεται ότι δίδασκε, η επάρκεια της ακουστικής του χώρου για ομιλία ταιριάζει με τη πιθανή χρήση του χώρου, ενώ η χαμηλή ποιότητα της ακουστικής για μουσική (πάνω από ένα μουσικά όργανα στο χώρο), επαληθεύουν τη χρήση του χώρου για ομιλία και διδασκαλία αλλά και τη διαφύλαξη της ιδιωτικότητας της παρουσίας του Πυθαγόρα στο σπήλαιο, καθ'ότι καταδιωκόταν από τον τύραννο Πολυκράτη.

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. Τσιλφίδης Αλ. *Ήχος και Τέχνες Τόμος Β*. Πάτρα: Εκδόσεις Ανοικτού Ελληνικού Πανεπιστημίου, 2013
3. Σ.Βότσκος, *“Ακουστική ανάλυση του Ευπαλινείου Ορύγματος”*, 2023.