

## **ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΒΙΟΚΛΑΣΤΙΚΟΥ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΟΥ ΑΛΦΑ ΡΕΘΥΜΝΟΥ ΜΕ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΔΟΚΙΜΕΣ**

**Κωνσταντίνος Κακλής**

*Μεταλλειολόγος Μηχανικός PhD, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης*

**Ζαχαρίας Αγιουτάντης**

*Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης*

**Αντώνιος Βαφείδης**

*Καθηγητής, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης*

**Στέλιος Μαυριγιαννάκης**

*Μεταλλειολόγος Μηχανικός Msc, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης*

**Μάριος Κουβελάς**

*Μηχανικός Ορυκτών Πόρων, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης*

**Γεώργιος Φέγγος**

*Μηχανικός Ορυκτών Πόρων, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης*

*Λέξεις κλειδιά: Ασβεστόλιθος Αλφά Ρεθύμνου, σεισμική διασκόπηση, υπέρηχοι, αντοχή σε θλίψη*

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην παρούσα εργασία γίνεται μια προσπάθεια χαρακτηρισμού του βιοκλαστικού ασβεστόλιθου Αλφά Ρεθύμνου, ο οποίος αποτελεί δομικό λίθο με ευρύ φάσμα δομικών και διακοσμητικών εφαρμογών.

Σε αυτό το πλαίσιο διεξήχθησαν εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής (ανεμπόδιστης) θλίψης για τον προσδιορισμό της αντοχής σε θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας, ορυκτολογική και μικροσκοπική εξέταση, καθώς και μέτρηση του πορώδους, της διαπερατότητας και της πυκνότητας του υλικού. Επίσης έγιναν εργαστηριακές μετρήσεις της ταχύτητας διάδοσης των  $P$  κυμάτων με τη βοήθεια υπερήχων, με σκοπό τη σύγκρισή τους με αυτές που προέκυψαν από τις επί τόπου σεισμικές διασκοπήσεις στο χώρο εξόρυξης.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι σε πρώτη φάση ο χαρακτηρισμός του εν λόγω δομικού λίθου και η σύγκριση των μετρήσεων της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων που προσδιορίστηκε με επί τόπου σεισμικές διασκοπήσεις και εργαστηριακά με τη μέθοδο των υπερήχων.

Σε δεύτερη φάση τα αποτελέσματα αυτά εντάσσονται στα πλαίσια μιας ολοκληρωμένης μελέτης, σκοπός της οποίας είναι η διερεύνηση της συμβατότητας του συγκεκριμένου δομικού λίθου με το λίθο Κεχραιών, ο οποίος αποτελεί το βασικό δομικό λίθο των αρχαίων μνημείων της Επιδαύρου.

Ο λίθος Κεγχρεών, ο οποίος έχει χρησιμοποιηθεί για την αναστήλωση της ανωδομής του Ασκληπιείου της Επιδαύρου, είναι ένας ιζηματογενής πορώδης ωολιθικός ασβεστόλιθος και περιέχει κατά κύριο λόγο ελλειπτικά ωοειδή που είναι τοπικά συνδεδεμένα με σπαριτικό υλικό, που σχηματίζει επικάλυψη σε αρκετούς κόκκους, γεγονός που του προσδίδει μακροσκοπικά ψαμμιτική υφή και μικροσκοπικά διακριτή δομή. Μεγάλο μέρος των κενών ανάμεσα στους κόκκους παραμένει άδειο και έτσι το υλικό χαρακτηρίζεται από υψηλό πρωτογενές πορώδες (περίπου 40%) (Ninis & Kourkoulis, 2001) με αποτέλεσμα τα φυσικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του να εμφανίζονται κατώτερα των συνήθων ωολιθικών ασβεστολίθων.

Τα μηχανικά του χαρακτηριστικά είναι τα ακόλουθα (Kourkoulis et. al., 2004): αντοχή σε μονοαξονική θλίψη 5.9 MPa, μέτρο ελαστικότητας 2000 MPa και λόγος του Poisson 0.26.

## 2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

### 2.1 Δειγματοληψία – Διαμόρφωση δοκιμίων

Από πληροφορίες που δόθηκαν από την εταιρεία εκμετάλλευσης του εν λόγω δομικού λίθου, υπήρχαν δύο διαφορετικής μηχανικής συμπεριφοράς υλικά στις δύο βαθμίδες στις οποίες γινόταν εκμετάλλευση. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε ορθότερο να αξιολογηθούν τα δύο υλικά και να συγκριθούν και μεταξύ τους.

Από την εταιρεία παρελήφθησαν δύο κύβοι ακμής 20 cm, ένας από την κάθε βαθμίδα εκμετάλλευσης (διάζωμα). Σε κάθε κύβο έγινε πυρηνοληψία διαμέτρου NX (D=54 mm) και στη συνέχεια οι κύλινδροι οδηγήθηκαν σε αδαμαντοφόρο δίσκο κοπής και σε μηχανήμα λείανσης έτσι ώστε να προκύψουν κύλινδροι με λόγο ύψους/διαμέτρου (H/D) 2:1 (σχήμα 1),

σύμφωνα με την προτεινόμενη μέθοδο της ISRM (Bieniawski & Hawkers, 1978).



Σχήμα 1. Διαμορφωμένα κυλινδρικά δοκίμια Αλφά Ρεθύμνου.

Τα δοκίμια που προέκυψαν από τον κύβο του πάνω διαζώματος έχουν τον κωδικό Β και αυτά από το κάτω διάζωμα τον κωδικό Γ.

## 2.2 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Οι δοκιμές μονοαξονικής θλίψης έγιναν σε άκαμπτη μηχανή φόρτισης MTS-815 χρησιμοποιώντας κελί φόρτισης 500 kN, σε συνθήκη ελέγχου μετατόπισης με ρυθμό 0.01mm/sec.

Διεξήχθησαν συνολικά 30 δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, στις οποίες υπολογίσθηκε η αντοχή των δοκιμίων και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι μέσες τιμές των αποτελεσμάτων για κάθε βαθμίδα εκμετάλλευσης.

Πίνακας 1. Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη και Μέτρο Ελαστικότητας

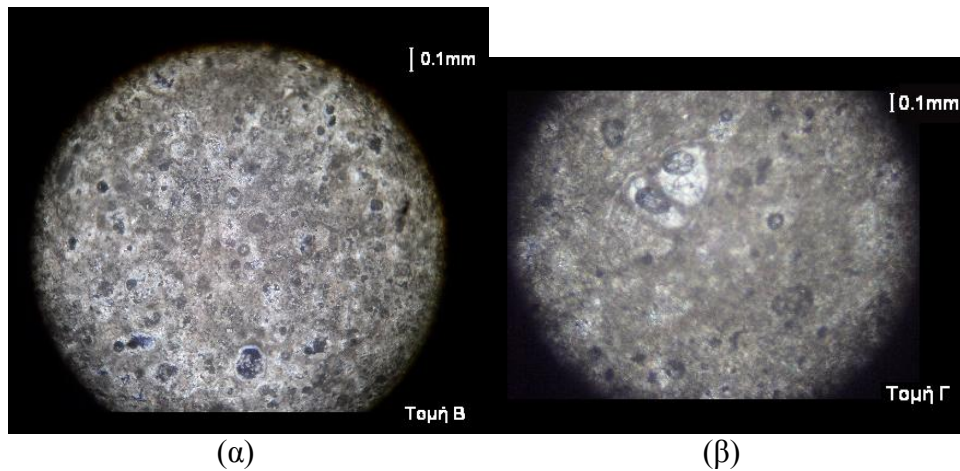
	<b>C<sub>0</sub> (MPa)</b>	<b>E (MPa)</b>
<i>Ανω Βαθμίδα Εκμετάλλευσης (Δοκίμια Β)</i>	23.8	7000
<i>Κάτω Βαθμίδα Εκμετάλλευσης (Δοκίμια Γ)</i>	30	8300

### 2.3 Ορυκτολογική ανάλυση XRD – μικροσκοπική εξέταση λεπτών τομών

Για τον προσδιορισμό της σύστασης των πετρωμάτων των δύο διαζωμάτων έγινε ακτινοσκοπία του υλικού αυτού. Τμήματα του υλικού των διαζωμάτων Β και Γ κονιορτοποιήθηκαν και τοποθετήθηκαν σε ειδικές θήκες οι οποίες τοποθετήθηκαν μέσα στο μηχάνημα ακτινών Χ.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το πέτρωμα Β έχει σύσταση 1% σε SiO<sub>2</sub> διοξείδιο του πυριτίου (χαλαζίας) και 99% σε CaCO<sub>3</sub> ανθρακικό ασβέστιο (ασβεστίτης). Το πέτρωμα Γ έχει σύσταση 1.7% σε SiO<sub>2</sub> διοξείδιο του πυριτίου (χαλαζίας) και 98.3% σε CaCO<sub>3</sub> ανθρακικό ασβέστιο (ασβεστίτης). Όπως φαίνεται πρόκειται για πετρώματα παρόμοιας σύστασης.

Παρασκευάστηκαν επίσης λεπτές τομές (Β και Γ) μία για κάθε βαθμίδα εκμετάλλευσης, οι οποίες εξετάστηκαν στο μικροσκόπιο και φωτογραφίες των οποίων φαίνονται στο σχήμα 2. Και στις δύο λεπτές τομές παρατηρούνται κρύσταλλοι ασβεστίτη, ενώ δεν διακρίνεται χαλαζίας. Στη λεπτή τομή Γ διακρίνεται επίσης μια περιοχή με λεπτοκρυσταλλικό ασβεστίτη.



Σχήμα 2 : Λεπτή τομή Β (α) και λεπτή τομή Γ (β) από το λατομείο Αλφά Ρεθύμνου.

#### 2.4 Μέτρηση πορώδους - διαπερατότητας - πυκνότητας

Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τιμές του μέσου πορώδους, της διαπερατότητας και της μέσης πυκνότητας, όπως προέκυψαν από αντίστοιχες πειραματικές διαδικασίες, σε δοκίμια που προέρχονταν από την κάθε βαθμίδα εκμετάλλευσης.

Πίνακας 2. Πορώδες, διαπερατότητα και πυκνότητα για την άνω και κάτω βαθμίδα εκμετάλλευσης

	Μέσο πορώδες (%)	Διαπερατότητα (mD)	Μέση πυκνότητα (g/cm <sup>3</sup> )
Άνω Βαθμίδα Εκμετάλλευσης (Δοκίμια Β)	38	30.9	1.61
Κάτω Βαθμίδα Εκμετάλλευσης (Δοκίμια Γ)	32	2.7	1.79

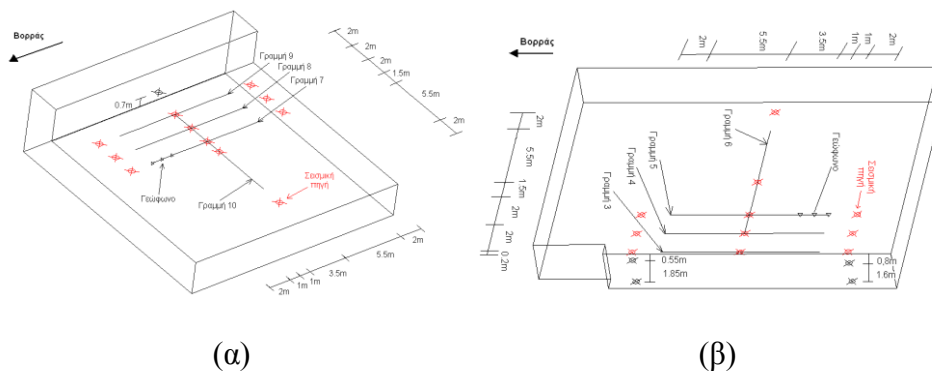
### 3. ΕΠΙ ΤΟΠΟΥ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΚΥΜΑΤΩΝ

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας γίνεται σύγκριση της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, όπως υπολογίσθηκε από επί τόπου σεισμικές διασκοπήσεις στο λατομείο Αλφά Ρεθύμνου και της ταχύτητας διάδοσης υπερήχων όπως αυτή υπολογίσθηκε εργαστηριακά σε δοκίμια του ίδιου δομικού λίθου.

#### 3.1 Μέτρηση ταχύτητας διάδοσης σεισμικών κυμάτων

Οι επί τόπου δοκιμές στο λατομείο Αλφά περιελάμβαναν διασκοπήσεις σε και στις δύο βαθμίδες εκμετάλλευσης, με σκοπό τη μέτρηση των ταχυτήτων διάδοσης των σεισμικών κυμάτων P και S. Στο σχήμα 3 φαίνεται σκαρίφημα της άνω (α) και της κάτω βαθμίδας (β) με τις γραμμές μελέτης, τη θέση των σεισμικών πηγών και των γεωφώνων.

Από την επεξεργασία των δεδομένων των σεισμικών διασκοπήσεων προέκυψαν τα αποτελέσματα (Φέγγος & Κουβελάς, 2006), τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 3.



Σχήμα 3. Σκαρίφημα της άνω (α) και της κάτω βαθμίδας (β) εκμετάλλευσης

Πίνακας 3. Ταχύτητες διάδοσης των σεισμικών κυμάτων P και S

	Μέση τιμή $V_p$ (m/sec)	Μέση τιμή $V_s$ (m/sec)
<i>Άνω Βαθμίδα Εκμετάλλευσης</i>	2420	1400
<i>Κάτω Βαθμίδα Εκμετάλλευσης</i>	2930	1650

### 3.2 Μέτρηση ταχύτητας διάδοσης υπερήχων

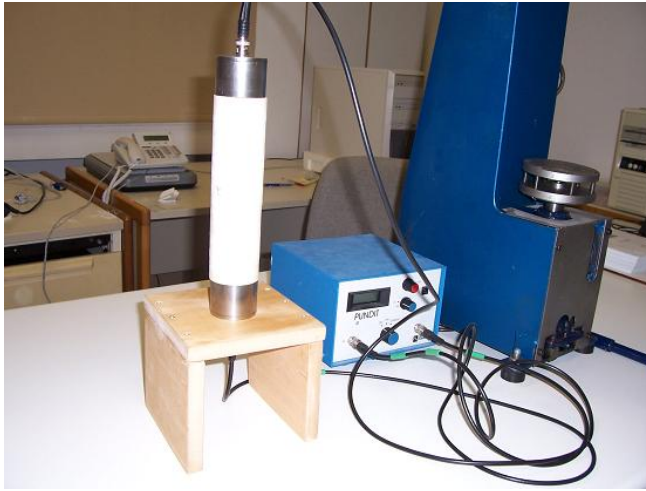
Στα κυλινδρικά δοκίμια του Αλφά Ρεθύμνου μετρήθηκε εργαστηριακά η ταχύτητα διάδοσης των P κυμάτων με τη μέθοδο των υπερήχων, η οποία βασίζεται στη διάδοση των κυμάτων του ήχου διαμέσου της βραχομάζας. Οι μετρήσεις έγιναν με τη συσκευή PUNDIT (σχήμα 4), η οποία αποτελείται από ένα πομπό και ένα δέκτη (πρεσοστάτες), οι οποίοι τοποθετούνται στα άκρα του προς μελέτη δοκιμίου, και μια ψηφιακή μονάδα η οποία παράγει το σεισμικό σήμα και αναλαμβάνει την τελική μέτρηση των χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων μεταξύ πομπού – δέκτη σε msec.

Η συσκευή αυτή χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με πρέσα φόρτισης για την καλύτερη εφαρμογή του πομπού και του δέκτη (transducers) στο δοκίμιο, όταν αυτό απαιτείται από την μέθοδο. Η τάση που εφαρμόστηκε στα δοκίμια από την πρέσα ήταν ίση με 0.5 MPa.

Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν εργαστηριακά με τη μέθοδο των υπερήχων.

Πίνακας 4. Ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων P

	Μέση τιμή $V_p$ (m/sec)
<i>Άνω Βαθμίδα Εκμετάλλευσης</i>	3100
<i>Κάτω Βαθμίδα Εκμετάλλευσης</i>	3300



Σχήμα 4. Διάταξη PUNDIT

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρείται διαφορά μεταξύ των μετρούμενων ταχυτήτων της σεισμικής διασκόπησης και της ταχύτητας που μετρήθηκε με τη μέθοδο των υπερήχων. Η πρώτη σκέψη ήταν ότι η διαφορά αυτή μπορεί να οφείλεται στη ύπαρξη δομικών διαφοροποιήσεων (ασυνέχειες, έγκοιλα, κλπ) μεταξύ των εργαστηριακών δοκιμίων και της επιτόπου βραχομάζας. Αν και δεν παρατηρήθηκαν μακροσκοπικά εμφανείς ασυνέχειες σε κανένα διάζωμα, στο πάνω διάζωμα υπήρχε ένα μικρό έγκοιλο στο πόδι της βαθμίδας που δείχνει ότι μπορεί να υπάρχουν και άλλα έγκοιλα στην περιοχή. Επιπλέον, η διαφορά των μετρούμενων ταχυτήτων μπορεί να οφείλεται στο ότι τα εργαστηριακά δείγματα δεν καλύπτουν πλήρως τις πιθανές διαφοροποιήσεις του επί τόπου πετρώματος και στην ύπαρξη υγρασίας στους πόρους του υλικού.

Η διαφορά της ταχύτητας των κυμάτων στα δύο διαζώματα, τα οποία έχουν παρόμοια ορυκτολογική σύσταση, μπορεί να αποδοθεί στο διαφορετικό πορώδες που εμφανίζουν. Στο κάτω διάζωμα όπου το πορώδες είναι μικρότερο είναι αναμενόμενο να εμφανίζεται μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης, αφού αυτή είναι πολύ μικρότερη στον αέρα από ότι στους κόκκους του πετρώματος.



Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που προέκυψαν από τις μετρήσεις που έγιναν στην ύπαιθρο και στο εργαστήριο και με τη βοήθεια των σχέσεων (1) και (2) εκτιμώνται το μέτρο ελαστικότητας E και ο λόγος του Poisson ν για τον εν λόγω δομικό λίθο (Christaras et al, 1994). Οι εκτιμηθείσες τιμές παρουσιάζονται στον πίνακα 5.

$$E = \rho V_s^2 \left( \frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (1)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

Πίνακας 5. Εκτιμηθείσες τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου του Poisson

	Μετρούμενα μεγέθη			Εκτιμηθείσες τιμές	
	V <sub>p</sub> σεισμικών (m/s)	V <sub>s</sub> σεισμικών (m/s)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	E (MPa)	ν
Κάτω βαθμίδα	2930	1650	1.79	<b>12357</b>	<b>0.27</b>
Πάνω βαθμίδα	2420	1400	1.61	<b>7879</b>	<b>0.25</b>

Οι μεγαλύτερες τιμές που προέκυψαν για το μέτρο ελαστικότητας αποδίδονται στο γεγονός ότι οι σχέσεις (1) και (2) θεωρούν το υλικό ομογενές, συνεχές και ισότροπο, κάτι όμως που δεν ισχύει για το συγκεκριμένο δομικό λίθο, αφού παρουσιάζει αρκετά μεγάλο πορώδες.

Σχετικά με τη συμβατότητα των δύο δομικών λίθων παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην αντοχή σε μονοαξονική θλίψη γεγονός που θα εξετασθεί όταν ολοκληρωθεί όλη η πειραματική διερεύνηση των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων.

## 5. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Christaras, B., Auger, F. & Mosse, E., “Determination of the moduli of elasticity of rocks. Comparison of the ultrasonic velocity and mechanical resonance frequency methods with direct static methods”. *J. Materials and Structures*, 27 (1994) 222-228.

Bieniawski, Z.T. & Hawkers, I., “Suggested Methods for Determining Tensile Strength of Rock Materials”. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci and Geomech. Abstr.*, 15, (1978) 99-103.

Kourkoulis, S.K., Agioutantis Z.A., Ninis, N., Latsiou, V. & Papatheodorou, “Mechanical Compatibility of Natural Building Stones”, in *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Experimental Mechanics (Bari, Italy, 29 August-2 September, 2004)*.

Ninis, N., Kourkoulis, S.K., “On Selecting a Compatible Substitute for the Kenhcreae Poros Stone Used in the Epidaurean Asklepieion”, in *Proceedings of the 6<sup>th</sup> National Congress of Mechanics (Thessaloniki Greece July 19-21, 2001), Vol.I, 348-356*.

Φέγγος Γ.Ν. και Κουβελάς Μ.Ι., «Χαρακτηρισμός βιοκλαστικού ασβεστολίθου περιοχής Αλφά Ρεθύμνου με επιτόπιες και εργαστηριακές μετρήσεις», Διπλωματική εργασία (υπό την επίβλεψη του Καθ. Ζ. Αγιουτάντη), Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά (2006).