

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Ακουστική Εκπομπή κατά την καταπόνηση βωξίτη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Μπακογιάννης Σωτήρης

Επιβλέπων: Νομικός Παύλος

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Ακουστική Εκπομπή κατά την καταπόνηση βωξίτη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
Μπακογιάννης Σωτήρης

Επιβλέπων: Νομικός Παύλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις / /

Α. Ι. Σοφιανός, Καθηγητής  
Δ. Ρόζος, Επ. Καθηγητής  
Π. Π. Νομικός, Λέκτορας

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2011



# ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Καμία εργασία δεν είναι ατομική, είναι επίτευγμα συλλογικό προσώπων που δραστηριοποιούνται σε κοινούς στόχους. Πόσο μάλλον όταν η εργασία που ακολουθεί αποτελεί την πρώτη μου διπλωματική εργασία.

Ειδικότερη μνεία χρήζουν :

Χωρίς την βοήθεια των ανθρώπων του εργαστηρίου Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων και του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας δεν πρόκειται να τα είχα καταφέρει.

Ειδικότερα η βοήθεια του επιβλέποντα Παύλου Νομικού ήταν παραπάνω από έμπρακτη, χωρίς αυτόν δεν θα υπήρχε αυτή η εργασία. Οι ευχαριστίες μου προς αυτόν είναι δεδομένες και ειλικρινείς.

Η εξυπηρέτηση από την εταιρεία S & B Βιομηχανικά Ορυκτά Α.Ε. ήταν καθολική σε ότι ζήτησα. Όλο το προσωπικό, μηχανικοί και τεχνίτες, υπήρξε άψογο απέναντι μου σε όλα τα ζητήματα. Δεν ξεχνώ ότι χωρίς αυτούς δεν θα μπορούσα να μεταφέρω τα δείγματα βωξίτη ούτε μέτρο μακριά από τη θέση τους, πόσω μάλλον στην Αθήνα.

Η εταιρία Έδαφος και Βράχος που με βοήθησε ιδιαίτερα στη διαμόρφωση των δοκιμών, όταν συναντήσαμε δυσκολίες. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον κ. Μπαρδάνη Μιχάλη γιατί με τα πρότυπα ASTM που μου έδωσε διευκόλυνε σημαντικά τη διεξαγωγή των δοκιμών.

Γονείς και στενά μου πρόσωπα, εκ των ων ούκ άνευ.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία περιγράφει εργαστηριακές δοκιμές αντοχής πετρώματος, βωξίτη με ταυτόχρονη καταγραφή της εκλυόμενης Ακουστικής Εκπομπής. Ζητούμενο, η καλύτερη δυνατή εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών, η καταγραφή της Ακουστικής Εκπομπής του πετρώματος και η συσχέτιση αυτής στην πρόγνωση αστοχίας, του πετρώματος.

Δείγματα βωξίτη από τα μεταλλεία της εταιρείας S & B στην περιοχή Παρνασσού – Γκίωνας, μεταφέρθηκαν στα εργαστήρια Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, και Τεχνικής Γεωλογίας όπου και διαμορφώθηκαν σε κυλινδρικά και δισκοειδή δοκίμια για μονοαξονική και αντιδιαμετρική θλίψη αντίστοιχα. Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος μηχανολογικός εξοπλισμός (αισθητήρες, ενισχυτές, κα) ώστε να γίνει καταγραφή της δραστηριότητας Ακουστικής Εκπομπής σε πραγματικό χρόνο.

Πρώτη παρατήρηση αποτέλεσε ο ίδιος ο βωξίτης, υλικό ψαθυρό και με δύσκολα προβλέψιμη συμπεριφορά. Παρουσίασε διάφορες μορφές αστοχίας, τόσο στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης όσο και αντιδιαμετρικής θλίψης. Κατοπινό συμπέρασμα αποτελεί η σχέση φόρτισης – εκλυόμενης Ακουστικής Εκπομπής. Παρατηρήθηκε η άμεση σχέση αυτών, καθότι έχουν σχέση αιτίου – αιτιατού, αλλά στην περίπτωση του βωξίτη φάνηκε ότι η εκλυόμενη Ακουστική Εκπομπή δεν ήταν πάντα αρκετή ώστε να δώσει προειδοποίηση ότι επέρχεται αστοχία.

Κύριο συμπέρασμα επίσης, αυτής της εργασίας αποτελεί η συνειδητοποίηση από μεριάς μου της δουλειάς που πρέπει να προηγηθεί για την εκτέλεση μιας εργαστηριακής δοκιμής και πόσο μάλλον ώστε αυτή να θεωρείται σύμφωνη με τα διεθνή πρότυπα.

## ABSTRACT

The present study covers laboratory tests for rock strength, bauxite, together with record of the emitted Acoustic Emission. Object of research the best possible laboratory tests performance, record the rock's Acoustic Emission and correlation in prediction of rock failure.

Bauxite samples from S & B mines in the Parnassos area were transported to the lab, where they shaped to cylindrical and discoid for uniaxial and brazilian splitting compression correspondly. Appropriate hardware (sensors, amplifier etc) was used so that recording of Acoustic Emission activity is performed in real time.

First observation, comprises bauxite itself, a brittle and difficult to predict its performance material. Differently types of failure were observed in the uniaxial compression as long as in the brazial splitting compression. Later observation was the association of load – emitted Acoustic Emission. The direct connection of those two was marked, for they have a cause – effect contact, but in the case of bauxite it appears that the emitted Acoustic Emission was not always enough so that a markable warning of expected failure is drawn.

Along with this study it became conscious to me the amount of work that needs to be done for executing laboratory tests according to international standards.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή _____	σελ 5
Κεφάλαιο 2. Βωξίτικα κοιτάσματα _____	σελ 7
2.1 Αργίλιο _____	7
2.2 Βωξίτης – Λατερίτες _____	7
2.3 Ορυκτολογία _____	9
2.4 Βωξιτογένεση _____	10
2.5 Χρήσεις _____	15
2.6 Παραγωγή _____	16
Βιβλιογραφία 2 <sup>ου</sup> κεφαλαίου	
Κεφάλαιο 3. Εξόρυξη υπογείων μεταλλείων βωξίτη _____	17
3.1 Μέθοδος Θαλάμων και στυλών _____	17
3.2 Προϋποθέσεις _____	17
3.3 Εξόρυξη _____	18
3.4 Απόληψη _____	21
3.5 Πλεονεκτήματα -Μειονεκτήματα _____	21
3.6 Στύλοι _____	22
3.7 Καρστικά κενά _____	26
3.8 Κίνδυνοι αστοχίας σε υπόγεια μεταλλεία βωξίτη _____	28
Βιβλιογραφία 3 <sup>ου</sup> κεφαλαίου	
Κεφάλαιο 4. Ακουστική εκπομπή _____	39
4.1 Εισαγωγή – Ηχητικά Κύματα _____	39
4.1.1. Ιδιότητες των ηχητικών κυμάτων _____	40
4.2 Ακουστική Εκπομπη Πετρωμάτων _____	44
4.2.1. Εισαγωγή – Θεωρία _____	44
4.2.2. Μελέτες Ακουστικής Εκπομπής _____	46
4.2.3. Εργαστηριακή δοκιμή ΑΕ _____	49



4.2.4.	Παράμετροι γεγονότων ΑΕ _____	50
4.2.5.	Παράγοντες επιρροής λήψης σήματος ΑΕ _	54
4.2.6.	Εξοπλισμός παρακολούθησης ΑΕ _____	55
4.2.7.	Επεξεργασία κυματομορφών της ΑΕ _____	61
4.2.8.	Τυπικές εφαρμογές ΑΕ _____	63
	Βιβλιογραφία 4 <sup>ου</sup> κεφαλαίου	

Κεφάλαιο 5.	Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη _	65
5.1.	Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη _____	65
5.2.	Προδιαγραφές _____	67
5.3.	Διαμόρφωση δοκιμίου _____	67
5.4..	Παραμορφώσεις κατά τη δοκιμή _____	69
5.5.	Υπολογισμοί _____	71
5.6	Αποτελέσματα δοκιμών _____	72
	Βιβλιογραφία 5ου κεφαλαίου	

Κεφάλαιο 6.	Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης _____	93
6.1	Προδιαγραφές _____	93
6.2.	Διαμόρφωση δοκιμίου _____	94
6.3	Παρακολούθηση παραμόρφωσης κατά την δοκιμή _____	94
6.4	Υπολογισμοί _____	94
6.5	Αποτελέσματα δοκιμών _____	95
	Βιβλιογραφία 6 <sup>ου</sup> κεφαλαίου	

Κεφάλαιο 7.	Συμπεράσματα _____	113
·	Λίστα εικόνων, σχημάτων _____	122

# Κεφάλαιο 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα κεφάλαια :

· Κεφ. 2: Αναφέρεται στο υλικό προς εξέταση, το βωξίτη. Ο λόγος για τον οποίο εξορύσσεται ο βωξίτης, για την απόληψη αργιλίου. Δίνεται μια τάξη μεγέθους της παραγωγής στον κόσμο και στην Ελλάδα. Αναφέρονται οι τελικές χρήσεις του βωξίτη είτε σαν τελικό προϊόν είτε σαν πρώτη ύλη στην παραγωγή. Γίνεται αναφορά στην ορυκτολογία και πετρολογία του βωξίτη. Τα κύρια ορυκτά και πετρολογικά χαρακτηριστικά δίνουν μια πρώτη εικόνα της φύσης του βωξίτη. Στην προσπάθεια για την καλύτερη κατανόηση των κοιτασμάτων αναφέρεται ο τρόπος δημιουργίας τους. Η παλαιογεωγραφία, γενικά του Ελλαδικού χώρου και ειδικότερα της περιοχής Παρνασσού – Γκιώνας, όπως και η γεωλογική κατανομή των βωξιτικών οριζόντων στην Στερεά Ελλάδα δείχνει τον τρόπο, χώρο, χρόνο στον οποίο δημιουργήθηκαν οι βωξίτες, μας υποδεικνύουν τι πετρώματα θα συναντήσουμε ως περιβάλλοντα, καθώς περιοχές όπου είναι δυνατό να υπάρχουν αντίστοιχα κοιτάσματα.

· Κεφ. 3: Αναλύεται η μέθοδος εξόρυξης των υπογείων μεταλλείων βωξίτη, κατά θαλάμους και στύλους. Περιγράφονται οι προϋποθέσεις, πλεονεκτήματα - μειονεκτήματα για την εφαρμογή αυτής της ευρέως χρησιμοποιούμενης μεθόδου, καθώς και αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις κοιτασμάτων και τρόπου εξόρυξης τους. Ακολουθώς ορίζεται η έννοια του στύλου, διαστάσεις που παίρνει, συνθήκες λειτουργίας αυτού. Για τον προσδιορισμό των τάσεων στο στύλο, δίνεται η θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας. Γίνεται αναφορά στην αστοχία των στύλων, το συντελεστή ασφάλειας και στους κινδύνους που εγκυμονεί μια τέτοια κατάσταση. Κατόπιν αναφέρεται ένα γεωλογικό χαρακτηριστικό της περιοχής που συναντάται συχνά στην εξόρυξη, οι καρστικές μορφές. Τέλος αναφέρονται οι πιο κοινές αστοχίες στα υπόγεια μεταλλεία βωξίτη.

· Κεφ. 4: Γίνεται μια εισαγωγή για τα ηχητικά κύματα, τα είδη και τις ιδιότητες αυτών (ταχύτητα, ανάκλαση, διάθλαση, περίθλαση, συμβολή, απορρόφηση). Ορίζεται ως έννοια η Ακουστική Εκπομπή ενός υλικού και το πεδίο τιμών συχνοτήτων όπου αυτή παρατηρείται. Ακολουθεί μια χρονική εξιστόρηση των μελετών/εργασιών σχετικές με την Ακουστική Εκπομπή. Περιγράφεται η εργαστηριακή δοκιμή Ακουστικής Εκπομπής. Ορίζονται τα σήματα και τα γεγονότα Ακουστικής Εκπομπής. Δίνονται οι παράμετροι των γεγονότων Ακουστικής Εκπομπής καθώς και παράγοντες που επηρεάζουν τη λήψη σημάτων Ακουστικής Εκπομπής. Παρουσιάζεται ο μηχανολογικός εξοπλισμός για την καταγραφή της δραστηριότητας Ακουστικής Εκπομπής. Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας, μέσα σύζευξης και μεταφοράς σήματος, προενισχυτής, η μονάδα επεξεργασίας και το λογισμικό επεξεργασίας Η/Υ. Μια σύντομη αναφορά στην επεξεργασία των κυματομορφών που έχουν καταγραφεί και τέλος τυπικές εφαρμογές Ακουστικής Εκπομπής στις κατασκευές, βιομηχανία κα.

· Κεφ. 5: Αναφέρεται στην εργαστηριακή δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, στις παραδοχές που γίνονται κατά την εκτέλεση της και στα αποτελέσματα της. Επισημαίνεται ο ρόλος των φυσικών ιδιοτήτων του πετρώματος στη διεξαγωγή και τα αποτελέσματα της δοκιμής και δίνονται οι πρότυπες προδιαγραφές της ISRM για τη διαμόρφωση των δοκιμών και την εκτέλεση της δοκιμής. Ακολουθώς, δίνονται φωτογραφίες και περιγραφή της διαδικασίας για τη διαμόρφωση των δοκιμών, κυλινδρικών και δισκοειδών. Συνοπτικά παρουσιάζονται τα μηκυνσιόμετρα για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων κατά τη δοκιμή και οι υπολογισμοί τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών του Young. Στο τέλος του κεφαλαίου δίνονται φωτογραφίες, διαγράμματα, αποτελέσματα των τριών δοκιμών αντοχής σε μονοαξονική θλίψη που έγιναν.

· Κεφ. 6: Αναφέρεται στην εργαστηριακή δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης. Στο λόγο για τον οποίο είναι η πιο χρησιμοποιούμενη δοκιμή για τον έμμεσο προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό. Ακολουθούν οι πρότυπες προδιαγραφές για τις διαστάσεις του δοκιμίου και τη διεξαγωγή της δοκιμής, όπως και οι υπολογισμοί για την έμμεση εκτίμηση της αντοχής σε εφελκυσμό. Στο τέλος του κεφαλαίου δίνονται φωτογραφίες, διαγράμματα, αποτελέσματα των πέντε δοκιμών αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη που έγιναν.

· Κεφ. 7: Συνοψίζεται το σύνολο της εργασίας και αναφέρονται τα συμπεράσματα που εξήχθηκαν από το σύνολο των δοκιμών.

## Κεφάλαιο 2. Βωξίτικα κοιτάσματα

### 2.1 Αργίλιο

Ο βωξίτης μαζί με το λιγνίτη είναι τα μεταλλεύματα που βρίσκονται σε μεγαλύτερη αφθονία στην Ελλάδα. Η εξόρυξη βωξίτη αποσκοπεί στην λήψη των ορυκτών του αργιλίου (Al). Το Al είναι το 3ο, κατά σειρά αφθονίας, στοιχείο, στο στερεό φλοιό της γης (8,1 %), μετά το O<sub>2</sub> (46,4 %) και το Si (28,2 %). Βρίσκεται σε πολύ μεγάλο αριθμό ορυκτών όπως κορούνδιο, άστριους, μαρμαρυγίες, πυρόξενους, τοπάζιο, χλωρίτες, αλουνίτες κλπ. Οξειδία του αργιλίου βρίσκονται σε πάρα πολλά από τα υλικά που χρησιμοποιούμε και συναντούμε αλλά όχι εκμεταλλεύσιμο. Η λήψη τους γίνεται, σχεδόν αποκλειστικά, από τα βωξίτικα κοιτάσματα.

Το Al λαμβάνεται, κύρια, από τα υδροξείδια του Al (γκιψσίτη, βαιμίτη, διάσπορο), που βρίσκονται στους βωξίτες. Αργίλιο όμως λαμβάνεται και από τον αλουνίτη ή στυπτηριάτη λίθο, όπως λέγεται διαφορετικά, ο οποίος περιέχει 20 – 30 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Κοιτάσματα αλουνίτη στην Ελλάδα βρίσκονται στα φηαιστειακά πετρώματα της Μήλου και χρησιμοποιείται για τη λήψη καλίου, για τη γεωργία. [1]

Ο βωξίτης είναι η μόνη πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή αλούμινας σε εμπορική κλίμακα. Ωστόσο, οι τεράστιες ποσότητες αργιλικών υλικών θα μπορούσαν να δώσουν την πρώτη ύλη για την εξαγωγή αργιλίου. Άλλες πιθανές πρώτες ύλες, όπως ο αλουνίτης, ο ανορθοσίτης, τα απόβλητα του άνθρακα, οι ασφαλτούχοι σχιστόλιθοι μπορούν να προσφέρουν επιπλέον πρώτης ύλης αλούμινας. [6]

Αυτές οι πιθανές πρώτες ύλες χρειάζονται διαφορετική τεχνολογία κατεργασίας και νέες μονάδες. Στην βιομηχανία των πυριμάχων υποκατάστατο του βωξίτη είναι το συνθετικό mullite, που παράγεται από κυανίτη, σιλλιμανίτη. Στα λειαντικά, αν και πιο δαπανηρή λύση, το καρβίδιο πυριτίου και αλούμινας-ζιρκονίας μπορεί να υποκαταστήσει το βωξίτη.

### 2.2 Βωξίτης – Λατερίτες

Ετυμολογικά η λέξη βωξίτης προέρχεται από την περιοχή Les Baux στη Γαλλία, όπου και ξεκίνησε η αναγνώριση και εκμετάλλευση του.

Πετρολογικά είναι ένας λατερίτης. Οι λατερίτες είναι προϊόντα χημικής αποσάθρωσης, υπολειμματικά κοιτάσματα. Κατά τη λατεριτίωση απομακρύνονται από το πέτρωμα τα ευδιάλυτα στοιχεία, με αποτέλεσμα αυτό να εμπλουτίζεται σε εκείνα τα στοιχεία, τα οποία είναι δυσδιάλυτα. [1]

Ως λατερίτες χαρακτηρίζονται τα φτωχά σε SiO<sub>2</sub> πετρώματα, τα οποία διακρίνονται με τη σειρά τους σε βωξίτες και Fe/λατερίτες, ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Οι λατερίτες είναι δυνατό, να αποσαθρωθούν και τα προϊόντα αποσάθρωσης να μεταφερθούν στη θάλασσα, όπου αποτίθενται και δίνουν αλλόχθονα (δευτερογενή) λατεριτικά κοιτάσματα. Τέτοια είναι τα βωξίτικα κοιτάσματα της Ελλάδας, τα οποία έχουν αποτεθεί σε στρώμα ασβεστολίθων με καρστικό ανάγλυφο, όπως και οι Fe, Ni/ούχοι λατερίτες δυτικότερα. [1]

Οι βωξίτης είναι καστανέρυθρος έως κίτρινος, γκριζος, λευκός ανάλογα με την περιεκτικότητά του σε σιδηρούχα οξειδία.

Οι ανοιχτόχρωμοι, κίτρινοι έως γκριζοί, λευκοί βωξίτες, ποιοτικά είναι οι ανώτεροι. Το χρώμα τους οφείλεται στην απουσία οξειδίων του σιδήρου και στην αυξημένη περιεκτικότητα σε οξειδίο του αργιλίου (>80%). Συναντώνται στις παρυφές του κοιτάσματος, κοντά σε ρήγματα ή άλλες μορφολογικές δομές του κοιτάσματος και είναι συνήθως εύθρυπτοι και με διαφορετική, χαλαρότερη δομή από τους καστανέρυθρους.

Στην εικόνα 1, βωξίτης από την περιοχή Παρνασσού – Γκιώνας με χαρακτηριστική αλλαγή στο χρώμα λόγω ορυκτολογικής αλλαγής. Στο κάτω μέρος, ερυθρό λόγω οξειδίων του Fe, ενώ ανεβαίνοντας έχει συντελεστεί αποσιδήρωση και εμπλουτισμός σε οξειδία του αργιλίου.



## 2.3 Ορυκτολογία

Τα κύρια ορυκτά των βωξιτών είναι ανά ομάδα στοιχείου :

### \_Ορυκτά του αργιλίου

Το αργίλιο βρίσκεται στη μορφή υδροξειδίων. Το  $Al_2O_3$  στους βωξιτικούς οριζόντες κυμαίνεται από 26 – 60 %. Το μεγαλύτερο ποσοστό των παγκόσμιων κοιτασμάτων (~80%) περιέχει 40 - 52%  $Al_2O_3$ . Κύρια αργιλικά ορυκτά στο βωξίτη είναι :

- Γκιψίτης,  $Al(OH)_3$

Το κύριο ορυκτό στους, καινοζωϊκής ηλικίας, βωξίτες. Σχηματίζει ψευδόμορφους κρυστάλλους, έναντι των αστρίων, στους βωξίτες που εμφανίζουν υπολειμματικό ιστό. Το μέγεθος των γκιψιτικών κρυστάλλων είναι, γενικά, μικρό (10μ – 500 μm). Μεγαλύτεροι κρύσταλλοι πληρούν πόρους και ρωγμές του μεταλλεύματος και προέκυψαν, δευτερογενώς, από πλούσια σε Al διαλύματα.

- Βαιμίτης,  $\gamma AlOOH$ .

Είναι το κύριο ορυκτό των βωξιτικών κοιτασμάτων, Μεσοζωϊκής και Παλαιοζωϊκής ηλικίας, όπου φτάνει το 40 – 60 % του μεταλλεύματος. Το μέγεθος των κρυστάλλων του είναι <10μm.

- Διάσπορο,  $\alpha AlOOH$ . Είναι σπάνιο ορυκτό στους λατεριτικούς μανδύες. Αντίθετα, είναι κύριο ορυκτό στους "καρστικού" τύπου βωξίτες.

Η μετατροπή του γκιψίτη σε βαιμίτη και διάσπορο συνοδεύεται από μεταβολές στο μοριακό όγκο και στην πυκνότητα των ορυκτών. Ενδεικτικές τιμές φυσικών σταθερών δίνονται στον Πίνακα 1.

Ορυκτό	Γραμμομοριακός όγκος	Πυκνότητα
Γκιψίτης	31.965 ± 0.015 cm <sup>3</sup> /mol	2.44 gr/cm <sup>3</sup>
Βαιμίτης	19.535 ± 0.026	3,07
Διάσπορο	17.760 ± 0.026	3,38

Πίνακας 1

### \_Ορυκτά του σιδήρου

Ο  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  στους βωξίτες κυμαίνεται από 1 – 40%. Στα περισσότερα βωξιτικά κοιτάσματα η περιεκτικότητα σε  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  είναι της τάξης του 10 – 25%. Ο σίδηρος συγκεντρώνεται κύρια, στα διάφορα συγκρίματα "concretions" (πισσοειδή – ωοειδή – πελοειδή κ.λ.π.).

Τα κύρια ορυκτά του σιδήρου στο βωξίτη είναι :

- Γκαιτίτης,  $\alpha\text{FeOOH}$
- Αιματίτης,  $\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$

### \_Ορυκτά του τιτανίου

Η περιεκτικότητα σε  $\text{TiO}_2$  των βωξιτών κυμαίνεται, συνήθως, από 2 – 4% στις μορφές του ανατάση και του ρουτιλίου.

### \_Πυριτικά ορυκτά

· Καολινίτης  $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ . Το συνηθέστερο αργιλοπυριτικό ορυκτό των βωξιτών. Οι βωξίτες, οι φτωχοί σε Si, περιέχουν λιγότερο από 10% καολινίτη, ενώ στα αποπυριτωμένα κοιτάσματα μόνο ίχνη του μπορούν να ανιχνευτούν. Το ποσοστό σε καολινίτη είναι, γενικά, μικρότερο στα μεσαία τμήματα του βωξιτικού ορίζοντα, ενώ αυξάνει με το βάθος και γίνεται το κύριο ορυκτό στο σαπρολιθικό ορίζοντα.

· Αλλοϋσίτης, Ιλλίτης, Μοντμοριλλονίτης, Βερθιερίνης, Χαλαζίας είναι πυριτικά ορυκτά που συναντάται σε διάφορους τύπους βωξιτών. Τα περισσότερα, με επιπλέον απόπλυση μετατρέπονται σε καολινίτη.

\_Ανθρακικά ορυκτά : Ασβεστίτης – Δολομίτης, Σιδηρίτης.

\_Σουλφίδια : Σιδηροπυρίτης – Μαρκασίτης.

\_Θειικά ορυκτά : Αλουνίτης.

\_Φωσφάτα : Κρανταλλίτης. [1]

## 2.4 Βωξιτογένεση

### \_Παλαιογεωγραφία

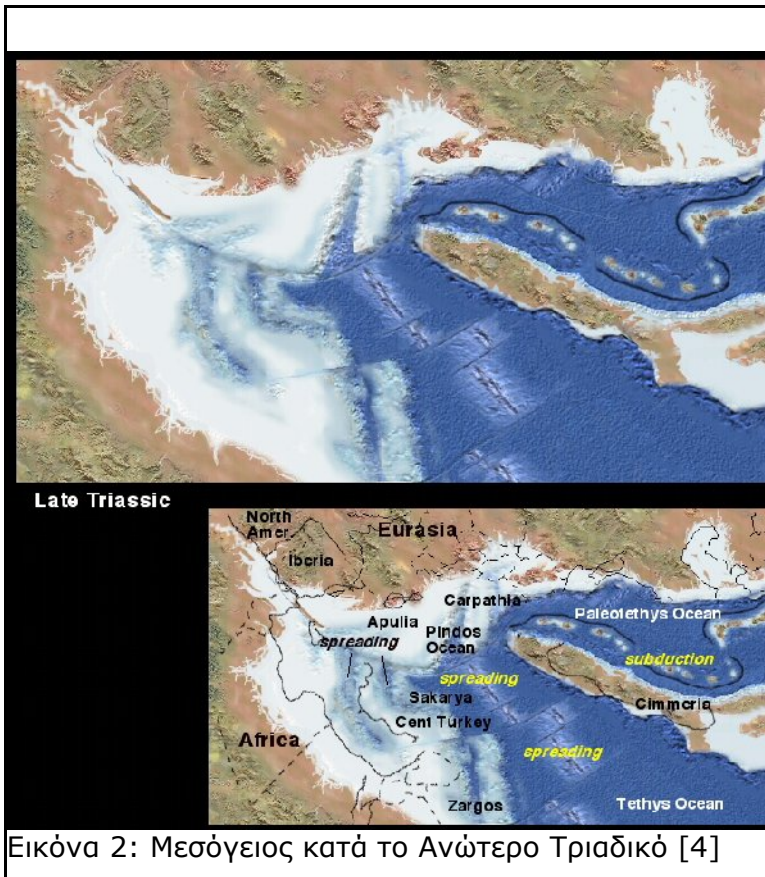
Δεδομένου ότι τα κοιτάσματα βωξίτη στην Ελλάδα είναι Μεσοζωϊκής ηλικίας και ουσιαστικά η διαμόρφωση του ελληνικού χώρου (γεωλογικές ζώνες) στη μορφή που τις γνωρίζουμε σήμερα ξεκινά εκείνη την εποχή, μια σύνοψη της εξέλιξης τους είναι απαραίτητη στην προσπάθεια για καλύτερη κατανόηση. Η γεωμορφολογική εξέλιξη του ελληνικού χώρου ακολουθεί την Αλπική ορογένεση, καθότι απ' αυτή διαμορφώθηκε και απόρροια της αποτελεί.

Έτσι σαν χρονική αφετηρία στην παλαιογεωγραφική εξέλιξη της περιοχής Παρνασσού – Γκιώνας και των βωξιτικών κοιτασμάτων, θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε την Τριαδική περίοδο. [3]

Κατά το κάτω Τριαδικό άρχισε η επίκλυση της θάλασσας, Τηθύος, επί της τότε ξηράς, Ερκύνια χέρσος, αν και σε περιορισμένες μόνο εκτάσεις, όπου και δημιούργησε κλειστές μάλλον θάλασσες (περιοχές Χίου, Ύδρας, Αν. Αργολίδας, Δυτ. Πάρνηθα).

Κατά το μέσο Τριαδικό συνεχείς καταβυθίσεις κατέκλυσαν νέες εκτάσεις και δημιούργησαν επιμήκεις θαλάσσιους βραχίονες.

Αυτές οι θαλασσευμένες περιοχές υπήρξαν τα όρια μεταξύ των ζωνών Ωλονού – Πίνδου και Υποελαγωνικής. Παρόμοια άρχισε και η δημιουργία των αυλάκων Ιονίου και Πίνδου. Το ύβωμα του Γαβρόβου χώριζε τις αύλακες.



Εικόνα 2: Μεσόγειος κατά το Ανώτερο Τριαδικό [4]

Κατά το ανώτερο Τριαδικό η Τηθύς είχε καλύψει όλη την ξηρά. Σε αυτή την κατάσταση συνέχισε να βρίσκεται ο ελληνικός χώρος καθ' όλη τη διάρκεια της Ιουράσιας περιόδου. Εξαιρέση σε αυτή την κατάσταση αποτελούν οι περιοχές Παρνασσού – Γκιώνας, Υποπελαγονικής, πιθανόν και Αξιού. Σε αυτές τις περιοχές πραγματοποιήθηκε η πρώτη ανάδυση Αλπικής χέρσου, έστω και εάν για λίγο μόνο διατηρήθηκε. Η περιοχή Παρνασσού – Γκιώνας χαρακτηρίζεται από σχεδόν συνεχόμενη απόθεση ηπειρωτικών ανθρακικών ιζημάτων από το Άνω Τριαδικό έως το Άνω Κρητιδικό. Το βωξιτικό υλικό προέρχεται βορειοανατολικά της ζώνης Παρνασσού – Γκιώνας, από την Πελαγονική ζώνη, όπου πλατιά ποτάμια και εκτεταμένες εκβολές ποταμών το μετέφεραν. [2]

Σε αυτές τις περιοχές συναντάται και ο κατώτερος βωξιτικός ορίζοντας (B1), με υποκείμενο μεσοϊουρασικούς ασβεστόλιθους και υπερκείμενο κιμμερίδιους ασβεστόλιθους. Η ορογενετική ανησυχία που εκδηλώνεται στις περιοχές αυτές συμπίπτει με την παλαιοαλπική Αγκασιζική πτύχωση.

Έτσι συνεχίζει να βρίσκεται υπό της θάλασσας όλος ο ελληνικός χώρος μέχρι την εκδήλωση της Νεοκιμμερικής πτύχωσης προς το τέλος της Ιουράσιας περιόδου. Τότε αναδύονται περιοχές που ιχνηλατούνται στα ανατολικά της ζώνης Αξιού (περιοχή Κιλκίς), στην Υποπελαγονική ζώνη (Λοκρίδα, Εύβοια, Ακροκόρινθος, Αργολίδα) και σε περιοχές στην ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας όπου βρίσκεται ο μεσαίος βωξιτικός ορίζοντας (B2) (υποκείμενος Τιθωνίων ασβεστόλιθων). Η έκταση της πτύχωσης αυτής είναι μεγάλη, αλλά η ανάδυση των χέρσων τμημάτων ήταν σύντομη. Έτσι ο ελληνικός χώρος κατακλύσθηκε ξανά ολόκληρος από θάλασσα στο τέλος της Ιουράσιας περιόδου και κατά τη διάρκεια του κατώτερου Κρητιδικού, με εξαίρεση ίσως τμήματα της Υποπελαγονικής.

Κατά το τέλος του κατώτερου Κρητιδικού εκδηλώνονταν η Αυστριακή πτύχωση η οποία δεν ανέδειξε ξηρά στην περιοχή Παρνασσού – Γκιώνας. Έπειτα εκδηλώθηκε η Υποερκυνική πτύχωση, η οποία οδήγησε σε ανάδυση χέρσου στην περιοχή Παρνασσού – Γκιώνας και τη δημιουργία του ανώτερου βωξιτικού ορίζοντα (B3), με υποκείμενο ασβεστόλιθους Κενομάνιου ηλικίας και ως υπερκείμενο ασβεστόλιθους Τουρωνίου - Σενωνίου ηλικίας. Έπειτα κατά το Τουρώνιο – Σενώνιο η θάλασσα κατακλύζει ξανά τις χέρσες περιοχές μέχρι σχεδόν το τέλος της ανώτερης Κρητιδικής, μέχρι το Μαιστρίχτιο.



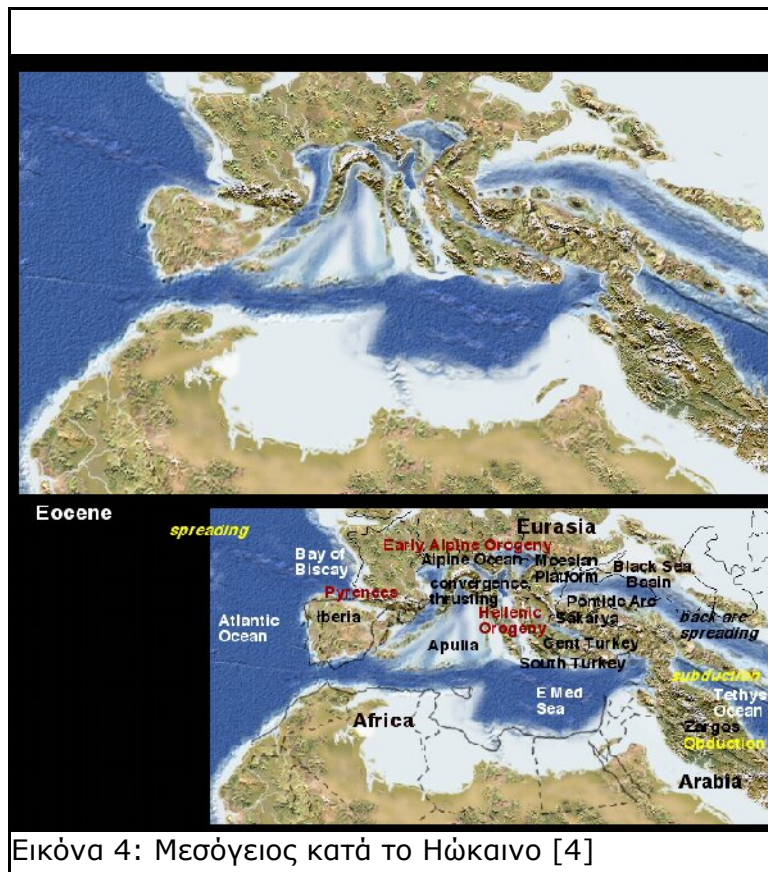
Εικόνα 3: Μεσόγειος κατά το Κατώτερο Κρητιδικό[4]

Η ιζηματογένεση ασβεστολίθων ή φλύσχη συνεχίζεται μέχρι το τέλος του Μαιστρίχτιου παντού στην Ελλάδα. Κατά το Μαιστρίχτιο άρχισε προετοιμασία πτύχωσης. Εκδηλώθηκε η Λαραμική πτύχωση που επηρέασε τις ζώνες Πελαγονικής, Ροδόπης, Αξίου.

Έχοντας περάσει στον Καινοζωικό αιώνα και κατά το Ηώκαινο εκδηλώνεται η μεσοαλπική Πυρηναική πτύχωση. Για τη ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας αυτή υπήρξε η τελική παροξυσμική πτύχωση.

Οι πρώτες πτυχώσεις της Αλπικής ορογένεσης αυξάνουν βαθμιαία ως προς την έκταση της αναδυόμενης ξηράς, όσο και προς τη διάρκεια διατήρησης της άνω της θάλασσας. Η ανάδυση της ξηράς προηγείται στην ανατολή και έπειτα με τις μεσοαλπικές πτυχώσεις ολοκληρώνεται η περίοδος των έντονων πτυχώσεων, κατόπιν οι νεοαλπικές δημιουργούν ελαφρές

πτυχώσεις. Διαρρήξεις και εγκατακρημνίσεις συνεχίζονται κατά το Τεταρτογενές με φθίνουσα συχνότητα όπου και κατά το ανώτερο Τεταρτογενές διαμορφώνεται η σημερινή μορφή της Ελλάδας. [3]

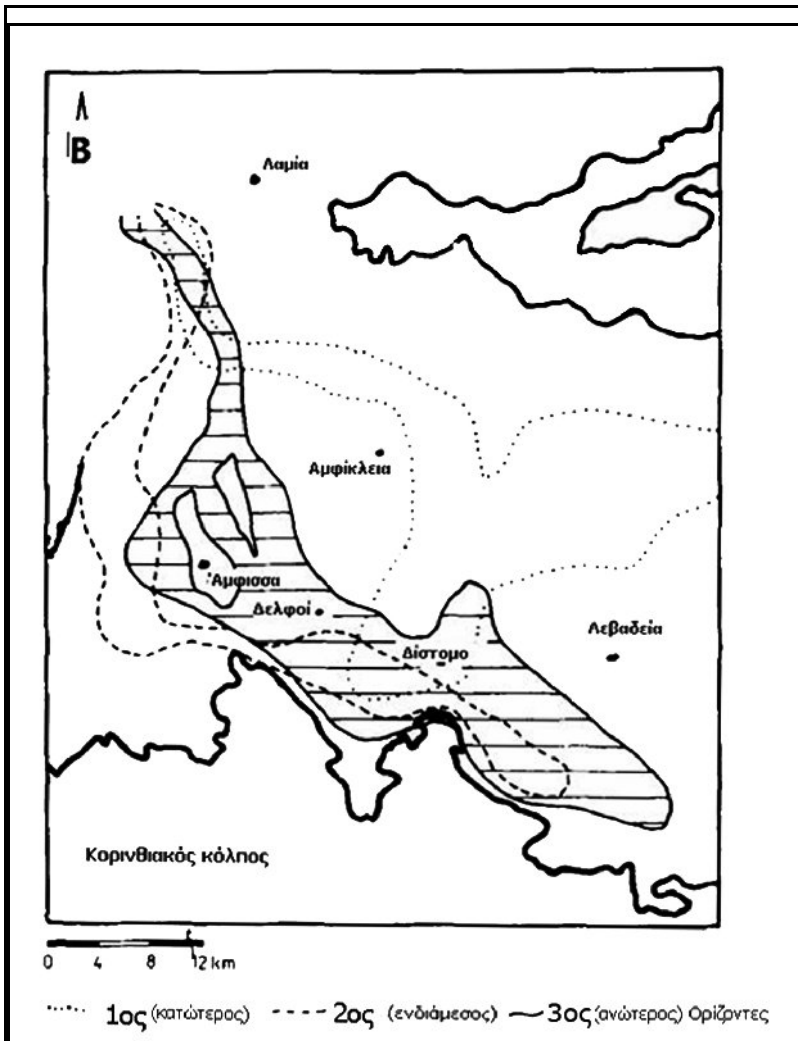


Εικόνα 4: Μεσόγειος κατά το Ηώκαινο [4]

## Γεωλογική κατανομή των οριζόντων

Η παλαιογεωγραφική κατανομή των βωξιτικών οριζόντων δείχνει μια μετατόπιση των περιοχών απόθεσης κατά τη διάρκεια των εποχών σχηματισμού τους.

Ο πρώτος βωξιτικός ορίζοντας έχει βορειοανατολική διεύθυνση ενώ ο δεύτερος και τρίτος αλλάζουν και αποκτούν νοτιοδυτική. Ο πρώτος ορίζοντας εκτείνεται κυρίως στο Καλλίδρομο όρος και τον Παρνασσό. Οι νεώτεροι δύο ορίζοντες έχουν μεγαλύτερη κατανομή, από βορειοδυτικά στην Οίτη και την Γκιώνα μέχρι νοτιοανατολικά στον Ελικώνα. Τα μεγαλύτερα κοιτάσματα απαντούν στη ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας (Γκιώνα, Οίτη, Παρνασσός, Ελικώνας). Μικρότερα κοιτάσματα απαντούν στη Χαλκιδική, Εύβοια, Σκόπελο, Πύλο, Γκλόκοβα, Αρτεμίσιο, Αμοργό, κ.λ.π.



Σχήμα 1: Κατανομή των βωξιτικών οριζόντων στην κεντρική Ελλάδα (Petraschek και Mack, 1978)

παχους 1 – 10m πάνω από το καρστικό ανάγλυφο και συνεπώς είναι μεγάλης οικονομικής σημασίας. Και σε αυτό τον ορίζοντα ασβεστόλιθοι θαλάσσιας προέλευσης υποδεικνύουν ότι η απόθεση έγινε σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Πουθενά στην περιοχή δεν βρίσκονται πρωτογενή κοιτάσματα ή πετρώματα που μπορούν να θεωρηθούν ως μητρικά. Η θέση των μητρικών πετρωμάτων παραμένει ακόμη άγνωστη και μόνο υποθέσεις μπορούν να γίνουν. Οι ενδείξεις συμφωνούν ότι ήταν από περιοχή βορειοανατολικά της Εύβοιας. Η παρουσία οφιόλιθων στην Λοκρίδα και Εύβοια ενισχύει αυτόν τον ισχυρισμό. Όπως και στους σιδηρονικελιούχους λατερίτες της Λοκρίδας/Εύβοιας, το λατεριτικό υλικό μεταφέρθηκε από μια ηπειρωτική περιοχή μέσω ενός συστήματος εντόνως διακλαδισμένων ποταμών σε μια υφάλμυρη λιμνοθάλασσα ή θαλάσσιο περιβάλλον με κατεύθυνση από βορειοανατολικά προς νοτιοδυτικά. Ότι το υλικό αποτέθηκε σε υδάτινο περιβάλλον το γνωρίζουμε με σιγουριά λόγω του ιστού του μεταλλεύματος. [2][3]

Κατά τη διάρκεια της ανάδυσης η περιοχή γινόταν παράκτια και το ανάγλυφο καρστικό. Ο πρώτος βωξιτικός ορίζοντας (B1) λόγω αναγλύφου και χαμηλής μεταφορικής ενέργειας των ιζημάτων δεν σχημάτισε συνεχόμενο βωξιτικό στρώμα οικονομικής σημασίας.

Ο δεύτερος βωξιτικός ορίζοντας (B2) – αρκετά μέτρα πάχους στρώμα – επικάθεται σε ελαφρώς καρστικοποιημένα στρώματα ή και σε μη-καρστικές επιφάνειες. Οι συνθήκες απόθεσης δείχνουν ότι η ιζηματογένεση των λατεριτών έγινε σε θαλάσσιο περιβάλλον.

Σε αντίθεση με τον δεύτερο, τα υποκείμενα του τρίτου βωξιτικού οριζοντα (B3) στρώματα είναι εντόνως καρστικά, με το βάθος της καρστικής διάβρωσης (καρστικό ανάγλυφο) να αυξάνει από τα νοτιοανατολικά προς τα βορειοδυτικά. Ο τρίτος ορίζοντας εκτείνεται σε μεγάλες αποστάσεις σαν ένα συνεχόμενο στρώμα



## 2.5 Χρήσεις

### \_Αλουμίνιο

Περίπου το 85% της παγκόσμιας παραγωγής βωξίτη χρησιμοποιείται για την παραγωγή αλούμινας η οποία προορίζεται για παραγωγή αλουμινίου. Άλλο ένα 10% χρησιμοποιείται για την παραγωγή αλούμινας η οποία προορίζεται για παραγωγή χημικών, λειαντικών και πυράντοχων προϊόντων. Χονδρικά, 4 τόνοι ξηρού βωξίτη χρειάζονται για να παραχθούν 2 τόνοι αλούμινα, οι οποίοι με τη σειρά τους θα δώσουν 1 τόνο αλουμίνιο.

### \_Αλουμινούχα Τσιμέντα

Ο βωξίτης της αποτελεί μια πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται στην παραγωγή αλουμινούχων τσιμέντων με υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο. Ο βωξίτης αποτελεί ένα από τα βασικά συστατικά για την παραγωγή αλουμινούχων τσιμέντων, με πλεονέκτημα την χονδρόκοκη μορφή του, την αντοχή του σε καταπόνηση βάρους, τον υψηλό δείκτη θερμικής αντοχής κτλ.

### \_Χαλυβουργία

Ο βωξίτης χρησιμοποιείται ως ρευστό υλικό στην υψικάμινο, συνεισφέροντας στη βελτίωση των υδραυλικών ιδιοτήτων της κοκκοποιημένης σκωρίας, η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή τσιμέντου σκωρίας.

### \_Τσιμέντα τύπου Portland

Ο βωξίτης χρησιμοποιείται ως μία πλούσια πηγή οξειδίου του αργιλίου ( $Al_2O_3$ ) για τη ρύθμιση της τροφοδοσίας για την παραγωγή clinker. Στα πλεονεκτήματα του βωξίτη της περιοχής της Γκιώνας συγκαταλέγονται η χαμηλή περιεκτικότητα σε πυρίτιο και σε ιχνοστοιχεία, η υψηλή περιεκτικότητα σε  $Fe_2O_3$ , η χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια και MgO κτλ.

### \_Ορυκτές Ίνες

Οι ορυκτές ίνες με υψηλή περιεκτικότητα σε αλουμίνα παρουσιάζουν βελτιωμένη βιοδιαλυτότητα και καλύτερες πυρίμαχες ιδιότητες.

Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση του 2009, το 61% του βωξίτη που παρήγαγε η S&B πωλήθηκε για την παραγωγή αλούμινας, το 27% στην τσιμεντοβιομηχανία, το 6% για χύτευση σιδήρου και το υπόλοιπο 6% για άλλες χρήσεις. Το 2009, υπήρξε μεγάλη πτώση στη ζήτηση του βωξίτη και στην τιμή του. Κυρίαρχα η πτώση σημειώθηκε στη ζήτηση των τσιμεντοβιομηχανιών, κατά 48%, και στη χύτευση σιδήρου, χάλυβα έως 75%. Ο μόνος τομέας όπου η ζήτηση παρέμεινε σταθερή ήταν για η παραγωγή αλούμινας/αλουμινίου.

Συνολικά η πτώση στη ζήτηση του βωξίτη το 2009 σε σχέση με αυτή του 2008, ανήλθε στο 35%. [5]

## 2.6 Παραγωγή – Αποθέματα

Σύμφωνα με στοιχεία του United States Geological Survey, Ιούλιος 2009 [6] στην παγκόσμια παραγωγή βωξίτη πρώτη θέση κατέχει η Αυστραλία ακολουθούμενη από την Κίνα, Βραζιλία, Ινδία, Γουινέα, Τζαμάϊκα, ενώ η Ελλάδα κατέχει την 11η θέση.

Παρακάτω παρατίθεται η ελληνική, συνολική παραγωγή βωξίτη και αλούμινας σε χιλιάδες τόνους.

<b>Αλουμίνιο:</b>	<b>2004</b>	<b>2005</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>
Βωξίτης (χιλιάδες τόνοι)	2,396,065	2,441,443	2,162,900	2,125,900	2,176,300
Αλούμινα, $Al_2O_3$ .	786000	782000	775000	780000	780000

Πίνακας 2

---

Βιβλιογραφία 2ου κεφαλαίου:

- 1.Αναστασία Μανουσάκη – Ορφανουδάκη, 2005, Κοιτασματολογία, Αθήνα (Σημειώσεις μαθήματος)
- 2.Valeton, Biermann, Reche and Rosenberg, 1986, Genesis of nickel laterites and bauxites in Greece during the Jurassic and Cretaceous, and their relation to ultrabasic parent rocks. Ore Geology Reviews, p. 359 – 404
- 3.Γ. Μαράτος, 1972, Γεωλογία της Ελλάδος, , ΓΕ.ΜΕΛ.ΕΡ.
- 4.Dr Ron Blakey , Γεωλογικές αναπαραστάσεις, Department of Geology, Northern Arizona University, <http://jan.ucc.nau.edu/~rcb7/index.html>
- 5.Ιστοσελίδα εταιρείας S&B: [www.s.andb.gr](http://www.s.andb.gr)
- 6.United States Geological Survey: Minerals Yearbook 2008 <http://minerals.usgs.gov>
7. Κατσικάτσος Χ Γεώργιος, 1992, Γεωλογία της Ελλάδας, Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστημίου Πατρας.

## Κεφάλαιο 3. Εξόρυξη υπογείων μεταλλείων βωξίτη.

### 3.1 Μέθοδος θαλάμων και στύλων

Η εξόρυξη του μεταλλεύματος στην περιοχή Παρνασσού – Γκιώνας γίνεται, σχεδόν αποκλειστικά, με τη μέθοδο θαλάμων και στύλων. Έχουν εφαρμοσθεί και άλλες μέθοδοι, κατακρήμνιση οροφής κα., αλλά κυρίαρχη είναι η προαναφερθείσα.

Η μέθοδος των στύλων συγκαταλέγεται στις μεθόδους “ανοικτών μετώπων”. Δηλαδή, ο χώρος που έχει ήδη εκμεταλλευθεί διατηρείται κενός και η κατακρήμνιση του ανοίγματος προλαμβάνεται με τη βοήθεια φυσικής υποστήριξης. Η φυσική υποστήριξη παίρνει τη μορφή στύλων, κατάλληλα διαμορφωμένα τμήματα του μεταλλεύματος που αναλαμβάνουν την υποστήριξη της οροφής και εν συνόλω της εκσκαφής. Σε περίπτωση που χρειάζεται να γίνει απόληψη και των στύλων του πετρώματος, κατασκευάζονται τεχνητοί (ξύλο, οπλισμένο σκυρόδεμα, άοπλο σκυρόδεμα, εκτοξευόμενο σκυρόδεμα ή λιθόδεμα, ή/και προϊόντα εκσκαφής στο στείρο πέτρωμα).

Η μορφή των ασβεστολίθων στις οροφές των κοιτασμάτων βωξίτη απαιτεί την εφαρμογή τεχνητής υποστήριξης της εκσκαφής. Η ύπαρξη δευτερεύουσας υποστήριξης δεν αλλοιώνει το χαρακτήρα του ανοικτού μετώπου. Η οροφή του κοιτάσματος κοχλιώνεται, σχεδόν πάντα, με αγκύρια (roof bolt).

Τα μεγάλα αυτά κενά μετά την ολοκλήρωση της εξόρυξης του κοιτάσματος συνηθίζεται να γομώνονται, για να αποφευχθεί ανεξέλεγκτη κατακρήμνιση της οροφής με την πάροδο του χρόνου.

Ο θάλαμος είναι στοά μεγάλου πλάτους και ευθύγραμμης διαδρομής, που ορύσσεται με στόχο την απόληψη του κοιτάσματος και όχι την προσπέλαση του. Οι στύλοι δημιουργούνται όταν ανοιχθούν νέες στοές κάθετες ή με κλίση προς τις πρώτες.

Αυτή η μέθοδος εξόρυξης ως κύριο πεδίο εφαρμογής έχει την εκμετάλλευση στρωσιγενών κοιτασμάτων οριζόντιας έως μέτριας κλίσης (0 έως 30°) και πάχος από 1,3 μέχρι 10 – 12 (ή παραπάνω) μέτρα, που βρίσκονται σε σχετικά μικρό βάθος (<180 μέτρων). Μέσα σε τέτοια στρώματα οι θάλαμοι διευθετούνται συνήθως κατά τη διεύθυνση, κατά την κλίση ή διαγώνια.

Στα ορυχεία της S & B το σύνηθες πάχος των κοιτασμάτων είναι 8m.

### 3.2 Προϋποθέσεις εφαρμογής

Απαραίτητες προϋποθέσεις εφαρμογής της μεθόδου αυτής είναι :

- Ανθεκτικό μετάλλευμα, με περιβάλλοντα ανθεκτικά πετρώματα σε μικρό σχετικά βάθος.
- Ομαλό γεωμετρικό σχήμα και ιδίως κανονικό, κατά το δυνατό, δάπεδο.
- Πάχος κοιτάσματος που δεν υπερβαίνει τα 8 μέτρα. Κλίση από 0 μέχρι 40°, το μέγιστο.
- Μετάλλευμα μικρής αξίας, έτσι ώστε να γίνεται παραδεκτή η σημαντική απώλεια που προκύπτει από την εγκατάλειψη στύλων.

Η μέθοδος θαλάμων και στύλων αποτελεί την οικονομικά εφικτότερη μέθοδο εκμετάλλευσης οριζόντιων κοιτασμάτων περιορισμένου πάχους. Ενδεικτικά κοιτάσματα που χρησιμοποιείται είναι οι στρωματοειδείς μεταλλοφορίες ιζηματογενούς προέλευσης, όπως οι χαλκούχοι σχιστόλιθοι, διάφορα βιομηχανικά ορυκτά (ασβεστόλιθος, ορυκτό άλας) και στρώματα άνθρακα.

### 3.3 Εξόρυξη

Υπάρχουν αρκετές μορφές ανοικτών μετώπων και η μέθοδος εκμετάλλευσης που θα επιλεγθεί εξαρτάται αποκλειστικά από την κλίση, το πάχος του κοιτάσματος και την κατάσταση των περιβαλλόντων πετρωμάτων.

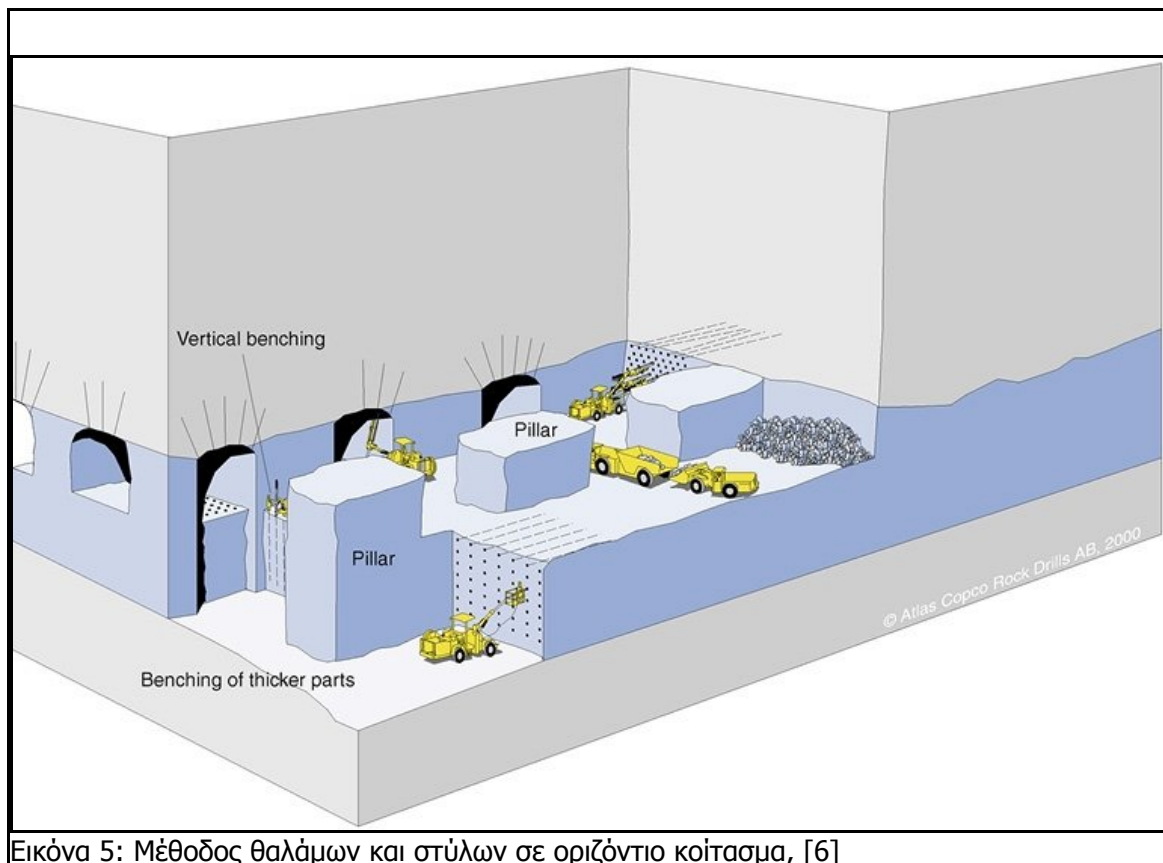
Οι διαστάσεις των μετώπων και των εγκαταλειπόμενων στύλων εξαρτώνται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος της οροφής και του ίδιου του μεταλλεύματος, το πάχος του

κοιτάσματος, το εντατικό πεδίο τάσεων (φυσικό και προκύπτων μετά την εκσκαφή και εκμετάλλευση) και την αλληλουχία των φάσεων εκμετάλλευσης.

Η προπαρασκευή και η γενική διαμόρφωση εξαρτώνται βασικά από την κλίση του κοιτάσματος. Διακρίνοντας, βάση της κλίσης του κοιτάσματος, την κατάλληλη επιλογή συστήματος θαλάμων και στύλων, διακρίνουμε τρεις περιπτώσεις :

### 1. Οριζόντια κοιτάσματα

Στα οριζόντια κοιτάσματα η απαιτούμενη προπαρασκευή είναι συνήθως ασήμαντη, περιοριζόμενη στην όρυξη της στοάς, που συνδέει τα τα σημεία προσπέλασης του κοιτάσματος και δημιουργεί την αφετηρία έναρξης του μετώπου. Από την στοά αυτή, αρχίζει η εξόρυξη, κατευθυνόμενη κατάλληλα, σε τρόπο ώστε να εξελιχθεί γρήγορα προς την τυπική της μορφή. Δεν υπάρχει πρόβλημα σύνδεσης του μετώπου με την κεντρική στοά μεταφοράς, αφού ο εξοπλισμός της προωθείται μέσα στο ίδιο το πέτρωμα.



Εικόνα 5: Μέθοδος θαλάμων και στύλων σε οριζόντιο κοιτάσμα, [6]

Σε οριζόντια ή σχεδόν οριζόντια κοιτάσματα μόνο το ελάχιστο απαιτείται για εργασίες ανάπτυξης της εκμετάλλευσης. Προαπαιτούμενα είναι οι δίοδοι για τη μεταφορά του μεταλλεύματος και η επικοινωνία των χώρων εργασίας του μεταλλείου. Αυτές οι εργασίες μπορούν να συνδυαστούν με την εξόρυξη του ίδιου του μεταλλεύματος και οι ράμπες για την προσπέλαση σαν δίοδοι μεταφοράς.

Το εξορυγμένο μέταλλευμα φορτώνεται απευθείας στα μέτωπα, συχνά με ντιζελοκίνητους φορτωτές. Διαφορετικά συστήματα μεταφοράς χρησιμοποιούνται ανάλογα με το διαθέσιμο χώρο και απόσταση μεταφοράς. Το γεγονός ότι το κοιτάσμα έχει πλατιά οριζόντια επέκταση και ότι η παραγωγή γίνεται σε μεγάλο αριθμό μετώπων διασκορπισμένων σε μια μεγάλη περιοχή επιβάλλει τη χρήση μηχανοκίνητου εξοπλισμού με μεγάλη ικανότητα ευκινησίας.

### 2. Επικλινή κοιτάσματα

Στην περίπτωση κοιτασμάτων μεγάλης κλίσης, χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά ελαστικοφόρος μηχανικός εξοπλισμός, αντί του εξοπλισμού σταθερής τροχιάς.

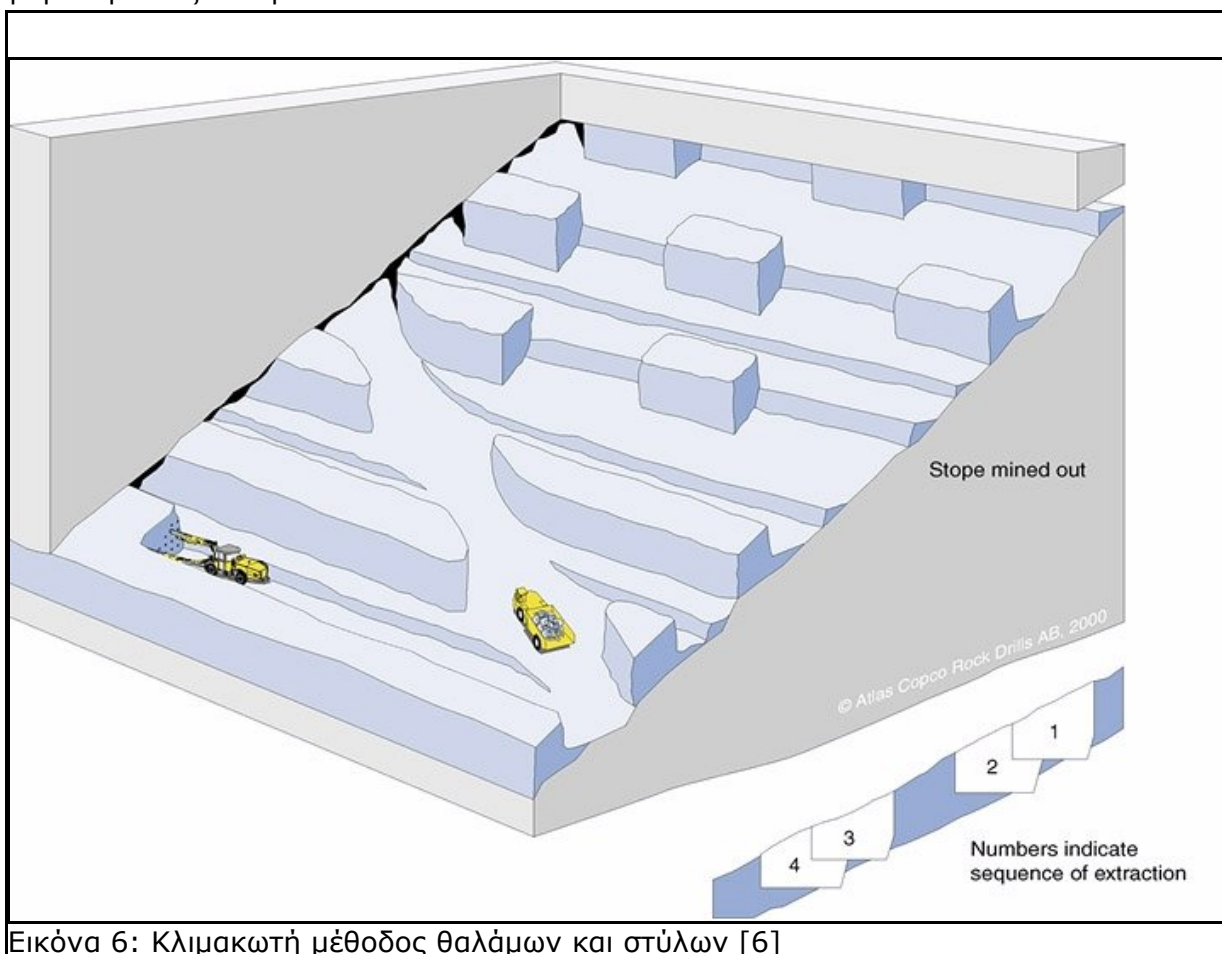
Εκμεταλλεύομαστε το βασικό πλεονέκτημα των ελαστικοφόρων μηχανημάτων να κινούνται σε οδούς σημαντικής κλίσης. Η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων μεγάλης κλίσης πραγματοποιείται με την διάνοιξη διαδοχικών οριζόντιων στοών σε διαφορετικά επίπεδα, με κατερχόμενη φορά εκμετάλλευσης.

Τα έργα ανάπτυξης σε επικλινές κοιτάσμα, για εκμετάλλευση με θαλάμους και στύλους, γενικά, συνίσταται σε όρυξη οριζόντιων επιπέδων σε κατακόρυφα διαστήματα. Σε κάθε επίπεδο μια διευθυντήρια στοά ανοίγεται, ακολουθώντας την επαφή με το κοιτάσμα.

Η σήραγγα αυτή εξυπηρετεί την προσπέλαση στα μέτωπα παραγωγής και τη μεταφορά του υλικού προς ανέλκυση του. Η εξόρυξη ξεκινά από τα οριζόντια επίπεδα και προχωρά ανοδικά, κατά μήκος της κλίσης, έως ότου συναντηθεί το επόμενο επίπεδο. Το επικλινές και ανομοιόμορφο δάπεδο στα μέτωπα αποτρέπει την εφαρμογή μηχανοκίνητου εξοπλισμού. Αυτό σημαίνει ότι η επικλινή εφαρμογή των θαλάμων και στύλων απαιτεί μεγάλο αριθμό χειροκίνητων εργασιών.

### 3. Κλιμακωτό σύστημα

Το τρίτο σύστημα είναι μια προσαρμογή σε επικλινή κοιτάσματα του επιπέδου συστήματος, που περιγράφηκε νωρίτερα. Μια ειδική διάταξη των ανοιγμάτων και μια δεδομένη σειρά στην εξόρυξη του μεταλλεύματος οδηγεί σε περιοχές εργασίας με μέτρια κλίση που επιτρέπουν τη χρήση κινητού εξοπλισμού.



Εικόνα 6: Κλιμακωτή μέθοδος θαλάμων και στύλων [6]

Οι σήραγγες προσπέλασης στα μέτωπα παραγωγής προσανατολίζονται να διασχίζουν το κοιτάσμα σε μια προκαθορισμένη κλίση, που ταιριάζει στην δυνατότητα κίνησης υπό κλίση του μηχανολογικού εξοπλισμού.

Η εξόρυξη του μεταλλεύματος αρχίζει από οριζόντιες σήραγγες που διακλαδίζονται από τις σήραγγες προσπέλασης. Αυτές οι σήραγγες σχεδιάζονται ώστε να ακολουθούν στενά τα όρια του κοιτάσματος. Η επόμενη εργασία της διαδικασίας παραγωγής θα είναι να ξεκινήσει παράλληλα στην πρώτη, σε κατώτερο επίπεδο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται και η εξόρυξη του μεταλλεύματος, συνεχίζεται με καθοδική φορά.

Κατά τη διάρκεια της εξόρυξης λαμβάνεται μέριμνα ώστε να αφεθούν τμήματα του

μεταλλεύματος ως στύλοι, κάτι που μπορεί να περιπλέξει την εργασία. Η εξόρυξη όμως πραγματοποιείται σε επίπεδα ή σχεδόν επίπεδα πατώματα που αλληλοσυνδέονται μέσω κεκλιμένων. Αυτές οι συνθήκες επιτρέπουν τη χρήση μηχανοκίνητου εξοπλισμού. Η διάτρηση για παράδειγμα μπορεί ικανοποιητικά να γίνει με κινητά jumbo διάτρησης.

### 3.4 Απόληψη

Το ποσοστό απόληξης που είναι η σχέση μεταξύ της εκμεταλλευμένης επιφάνειας ως προς την ολική επιφάνεια του κοιτάσματος εξαρτάται από τις ακόλουθες παραμέτρους:

- Ανθεκτικότητα των υπερκείμενων πετρωμάτων
- Βάθος του κοιτάσματος
- Φυσικές ιδιότητες της οροφής του δαπέδου
- Μορφολογία του δαπέδου
- Ανθεκτικότητα των στύλων
- Γεωλογικές ανωμαλίες και ασυνέχειες

### 3.5 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι σημαντικά και συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Υψηλή απόδοση κατά την εξόρυξη και την αποκόμιση, που οφείλεται στη δυνατότητα αποτελεσματικής μηχανοποίησης.
2. Σχεδόν ολοσχερής κατάργηση της τεχνικής υποστήριξης και μεγάλη παραγωγικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του κοιτάσματος.
3. Ευχέρεια εναπόθεσης των παραγόμενων στείρων κατά την πορεία της εξόρυξης.
4. Ουσιαστικός περιορισμός των έργων προπαρασκευής, που σε κάθε περίπτωση τοποθετούνται στο σύνολο τους μέσα στο κοιτάσμα.
5. Δυνατότητα εκλεκτικής εξόρυξης και αποτελεσματικής διαλογής μέσα στο μέτωπο.

Τα πιο πάνω πλεονεκτήματα καθιστούν τη μέθοδο ενδιαφέρουσα, από την άποψη τιμής κόστους που επιτυγχάνεται. Αντισταθμίζονται, όμως, μερικώς από ορισμένα μειονεκτήματα όπως τα πιο κάτω:

1. Σημαντική απώλεια μεταλλεύματος, που προέρχεται από την ανάγκη εγκατάλειψης στύλων. Το ποσοστό του κοιτάσματος που εγκαταλείπεται υπό μορφή στύλων κυμαίνεται μεταξύ 10% στις περιπτώσεις κοιτασμάτων μικρού βάθους και ανθεκτικών πετρωμάτων και 50% σε λιγότερο ανθεκτικά κοιτάσματα μεγάλου βάθους. Μεγάλες επίσης απώλειες μπορούν να προκύψουν εξαιτίας γεωμετρικών ανωμαλιών της οροφής και του δαπέδου. Εξάλλου, τέτοιες ανωμαλίες προκαλούν μερικές φορές σοβαρές αρρυθμίες στην πορεία του μετώπου.
2. Μειονεκτικές συνθήκες ασφάλειας, σε σύγκριση με αυτές που επιτυγχάνονται με άλλες μεθόδους. Οι μεγάλες διαστάσεις των κενών είναι δυσμενής παράγοντας, από άποψη ελέγχου της οροφής, μέσα στην οποία δεν είναι πάντοτε ευδιάκριτη η τυχόν παρουσία διασταυρωμένων επιπέδων με μικρότερη αντίσταση.

### 3.6 Στύλοι

#### Διαστάσεις

Ως στύλος χαρακτηρίζεται το επί τόπου πέτρωμα ανάμεσα σε δύο τουλάχιστον ανοίγματα. Κατά την πρόοδο του μετώπου, εγκαταλείπονται μικρά τμήματα μεταλλεύματος, υπό μορφή στύλων, με τα οποία συγκρατείται η οροφή. Οι στύλοι αυτοί μπορούν να πάρουν οποιοδήποτε σχήμα και κατανέμονται έτσι ώστε να μην δυσκολεύουν την αποκόμιση. Η γεωμετρική τους χωροθέτηση συμβάλει στην καλύτερη υποστήριξη όσο και αποφυγή παρενόχλησης των εργασιών. Η παρουσία όμως μικροδιαρρήξεων, που μπορούν να προκαλέσουν την απόσπαση όγκων, οδηγεί στην αναζήτηση της πλέον κατάλληλης κατανομής για την ασφάλεια. Όταν δεν υπάρχουν τέτοιοι λόγοι ασφάλειας, σε περίπτωση ανομοιογενούς ποιότητας μεταλλεύματος, προτιμάται η τοποθέτηση των στύλων στα τμήματα του κοιτάσματος με χαμηλή περιεκτικότητα σε μετάλλευμα. [10]

Η πιο συνηθισμένη εγκάρσια διατομή στύλων είναι η κυκλική ή η ορθογώνια. Από τις διαστάσεις της εξαρτάται η αντοχή και η τάση πάνω στις επιφάνειες έδρασης. Σε περιπτώσεις που πρέπει να μειωθεί αυτή η τάση, διευρύνεται η διατομή στην κορυφή και στη βάση. Το σχήμα της διατομής του στύλου κάθε φορά μορφώνεται ανάλογα με τις κατά τόπους συνθήκες ασφάλειας, έτσι μπορεί εκτός από κυκλικό, ορθογώνιο μπορεί να είναι επιμήκες ή και ακανόνιστο. [10]

Στα μεταλλεία βωξίτη της S & B στην περιοχή Παρνασσού – Γκιώνας οι στύλοι έχουν αρχικές διαστάσεις 8x8m και κατά την υποχώρηση οι τελικές τους διαστάσεις γίνονται 5x5m. Η αξονική απόσταση των στοών είναι στα 13m.

#### Συνθήκες λειτουργίας στύλου

Η λειτουργία του στύλου, εκ της κατασκευής του, είναι να αναλάβει πέρα από το δικό του φορτίο και το αντίστοιχο του μεταλλεύματος που εξορύχτηκε. Εξ' ορισμού είναι το πέτρωμα ανάμεσα σε δύο ανοίγματα. Εάν τα ανοίγματα αυτά είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους, η τάση που δέχεται ο στύλος μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης των κατανομών τάσεων που ορίζουν τα ανοίγματα. Κατά συνέπεια η μέγιστη επαπτομενική τάση στην επιφάνεια των ανοιγμάτων, δηλαδή στην επιφάνεια του στύλου είναι πιθανό να είναι μεγαλύτερη από εκείνη που θα ισχύει για ένα άνοιγμα. [10]

Στο στύλο ήδη πριν την εξόρυξη ασκούνται δυνάμεις βαρύτητας, η γεωστατική πίεση συναρτήσσει του βάθους. Η πίεση αυτή δίνεται ως εξής :

$$\sigma_v = \gamma \cdot H$$

όπου

$\sigma_v$  : υδροστατική πίεση

$\gamma$  : ειδικό βάρος υπερκείμενου πετρώματος

H : βάθος από την επιφάνεια του εδάφους

Οι διάφορες μέθοδοι που εφαρμόζονται διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον τρόπο δημιουργίας των στύλων, καθώς και τον τρόπο φόρτισης ή περιορισμού τους. Για παράδειγμα, στύλοι που βρίσκονται σε οριζόντια στρώση μεταλλεύματος, είναι συνήθως αφόρτιστοι πλευρικά και ανθίστανται την μετακίνηση κατά τον άξονα τους. Αντίθετα, σε περιπτώσεις κεκλιμένων ιδίως στρωμάτων, η αντίσταση των στύλων στην παραμόρφωση του περιβάλλοντος πετρώματος είναι πολυπλοκότερη και για την ανάλυση τους απαιτείται η θεώρηση της διδιάστατης συμπεριφοράς τους. Η αντοχή των στύλων δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα της βραχομάζας αλλά και από το σχήμα τους. Ένας κοντόχονδρος στύλος είναι ισχυρότερος από έναν ψηλόλιγνο. Τούτο οφείλεται στο μεγαλύτερο βαθμό περιορισμού στο μέσο του κοντόχονδρου στύλου, λόγω δυνάμεων πάκτωσης του στην οροφή και στο δάπεδο, οι οποίες παρεμποδίζουν την εγκάρσια διαστολή του στύλου λόγω της αξονικής φόρτισης. Κατά τη θεωρητική ανάλυση των τάσεων που δέχεται ο στύλος διακρίνουμε περιπτώσεις αναλόγως της δομής του.

- Ο στύλος αποτελείται από ένα πέτρωμα.

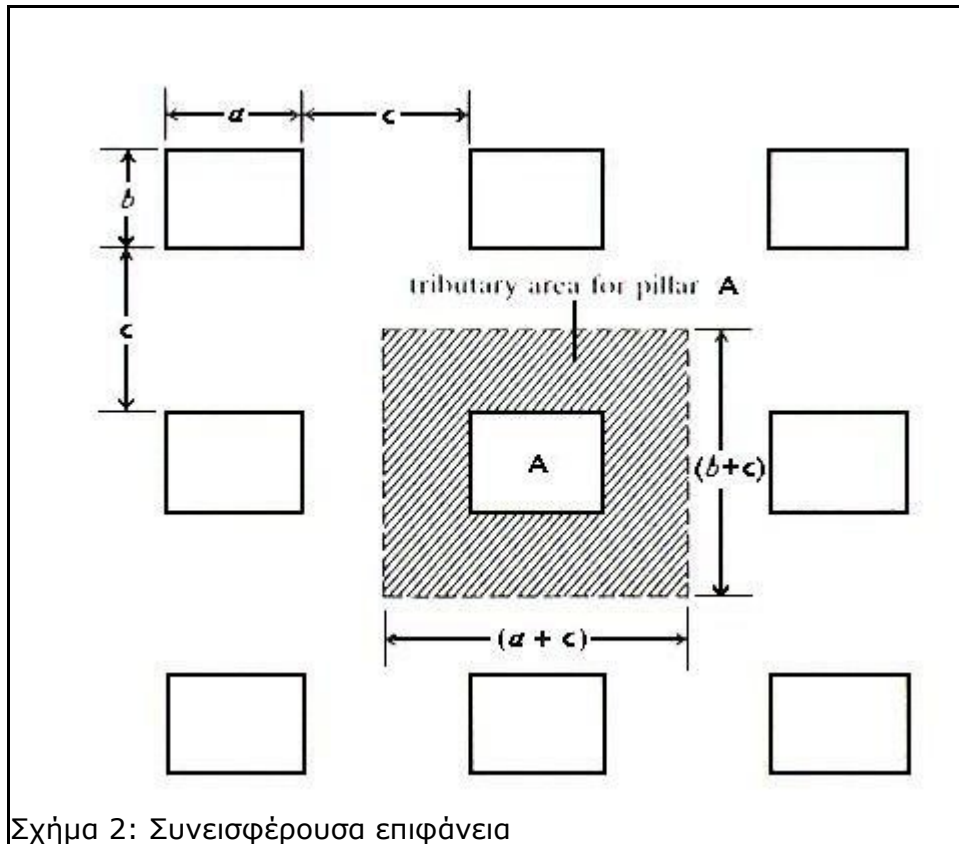
Στο θεωρούμενο ως άρρηκτο πέτρωμα η εγκάρσια φόρτιση θα είναι θλιπτική στις άκρες του και εφελκυστική στο μέσο. Η εφελκυστική φόρτιση που εμφανίζεται στο μέσο του στύλου παρουσιάζει ενδιαφέρον ως προς τις αναμενόμενες μορφές αστοχίας καθώς συνηθέστερα ο στύλος θραύεται κάθετα.

- Στη δομή του στύλου παρεμβάλλεται ένα μαλακό στρώμα.

Διακρίνουμε κατ' αρχή δύο περιπτώσεις για το πού βρίσκεται αυτό. Το μαλακό στρώμα είναι στη οροφή του στύλου. Τότε ένα αποτέλεσμα είναι η εμφάνιση εγκάρσιας εφελκυστικής τάσης στην κορυφή του στύλου. Η "ροπή" προς συμπίεση και εκτίναξη του μαλακού στρώματος αιτιολογεί αυτή την πρόσθετη φόρτιση. Εάν το μαλακό στρώμα είναι στο μέσο του στύλου η εφελκυστική φόρτιση από το στρώμα θα προστεθεί στην υπάρχουσα. [10]

Είναι φανερό ότι το μέγεθος της τάσης στους στύλους εξαρτάται από το λόγο των διαστάσεων του θαλάμου και του στύλου. Το μέγεθος της κατακόρυφης μέγιστης κύριας τάσης στους στύλους οριζόντιου μεταλλοφόρου κοιτάσματος μπορεί να εκτιμηθεί με τη θεωρία της *συνεισφέρουσας επιφάνειας*.

Αυτή θεωρεί ότι κάθε στύλος φέρει το φορτίο του πετρώματος που βρίσκεται μέσα στον κατακόρυφο κύλινδρο του οποίου γενέτειρα είναι οι άξονες που χωρίζουν στα δύο τους διαδρόμους που περιβάλλουν το στύλο. [1] Η οριζόντια αυτή επιφάνεια ονομάζεται συνεισφέρουσα ή περιοχή του στύλου. Στο σχήμα 2 φαίνεται απεικόνιση αυτής.



- Στην περίπτωση επιμήκων στύλων, η μέση ορθή τάση στο στύλο δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_p = \gamma \cdot z(1 + W_o/W_p)$$

$\gamma$  : το φαινόμενο βάρος του πετρώματος ( $\text{kN/m}^3$ )

$z$  : το βάθος του στύλου από την επιφάνεια (m)

$W_o$  : το πλάτος του ανοίγματος ή του διαδρόμου (m)

$W_p$  : το πλάτος του στύλου (m)

- Στην περίπτωση τετραγωνικών στύλων ίσων ανοιγμάτων προς τις δυο διαστάσεις της κάτοψης η μέση κατακόρυφη ορθή τάση δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_p = \gamma \cdot z(1 + W_o/W_p)^2$$

- Στην περίπτωση ορθογώνιων στύλων η μέση ορθή τάση στο στύλο δίνεται από τη σχέση

$$\sigma_p = \gamma \cdot z(1 + W_o/W_p)(1 + L_o/L_p)$$

- Στην περίπτωση ακανόνιστων στύλων η ορθή τάση στο στύλο δίνεται από τη σχέση :

$$\sigma_p = \gamma \cdot z [(A_o + A_p)/(A_p)]$$

$A_p$  = εμβαδόν διατομής του στύλου

$A_o + A_p$  = εμβαδόν συνεισφέρουσας επιφάνειας



Οι πιο πάνω σχέσεις μπορούν να γραφούν και ως εξής :

$$\sigma_p = \gamma \cdot z / (1 - e)$$
$$e = A_o / (A_o + A_p)$$

όπου "e" ο λόγος απόληψης,  $A_o$  το εμβαδόν της επιφάνειας απόληψης,  $A_p$  το εμβαδόν της διατομής του στύλου.

· Στην περίπτωση τετραγωνικών στύλων ο λόγος απόληψης δίνεται από τη σχέση :

$$e = 1 - [W_p / (W_o + W_p)]^2$$

Παρόμοιες σχέσεις μπορούν εύκολα να βρεθούν και για τις άλλες περιπτώσεις. Η απλή αυτή θεώρηση προϋποθέτει ότι η τάση είναι η αυτή σε όλους τους στύλους.

Η φέρουσα ικανότητα του πετρώματος κάτω από το στύλο πλάτους  $W_p$  (σχήμα, Brady and Brown, 1985) του οποίου η άλλη διάσταση εκτείνεται απεριόριστα ώστε αυτός να έχει σχήμα τοιχώματος, δίνεται από τη σχέση :

$$q_b = (1/2) \gamma W_p N_\gamma + cN_c$$

όπου

$$N_c : (N_q - 1) \cot \phi$$

$$N_\gamma : 1.5(N_q - 1) \tan \phi$$

$$N_q : \exp(\pi \tan \phi) \tan^2 A (\pi/4 + \phi/2)$$

$\phi$  : γωνία εσωτερικής τριβής του πετρώματος του δαπέδου

$c$  : η συνοχή του πετρώματος του δαπέδου

$\gamma$  : το φαινόμενο βάρος του πετρώματος του δαπέδου.

Οι εκτιμήσεις της τάσης στο στύλο που δίνονται από τη θεώρηση ομοιόμορφης φόρτισης από τη συνεισφέρουσα επιφάνεια είναι αποδεκτές για τα απλά γεωμετρικά σχήματα που χρησιμοποιούνται κατά την εξόρυξη με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων, υπό την προϋπόθεση ότι η διάμετρος σε κάτοψη της ομάδας των στύλων που μελετώνται είναι μεγαλύτερη από το βάθος της εκσκαφής. Στις περιπτώσεις κεκλιμένων κοιτασμάτων ή σε κοιτάσματα με μεταβαλλόμενο ύψος υπερκειμένου πετρώματος ή για μη ομοιόμορφα σχήματα ή διαστάσεις στύλων ή θαλάμων, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος αυτή για την εκτίμηση των τάσεων μέσα στο στύλο.

Η θεωρία της συνεισφέρουσας επιφάνειας για τον υπολογισμό των φορτίων που αναπτύσσονται στο στύλο αγνοεί γεωμετρικές ιδιότητες όπως το συνολικό εύρος, μήκος του μεταλλείου, το πάχος των στύλων, το πλάτος των στύλων, τη θέση του στύλου στο μεταλλείο (χωροθέτηση). Επίσης γεωλογικές ιδιότητες όπως το μέγεθος του εντατικού πεδίου παράλληλου στη μεταλλευτική περιοχή καθώς και το μέτρο ελαστικής παραμόρφωσης του στύλου.

### Ενίσχυση στύλων

Συχνά παρουσιάζεται ανάγκη συμπλήρωσης των φυσικών στύλων με αντίστοιχους τεχνικής κατασκευής, με τη χρησιμοποίηση γι' αυτούς, αγόνων υλικών, που προέρχονται από τη διαλογή του μεταλλεύματος ή από την υποχρεωτική κοπή αγόνων από την οροφή στα σημεία που μειώνεται το πάχος του κοιτασμάτος. Η πλευρική παρεμπόδιση που επιτυγχάνεται αυξάνει την αντοχή του στύλου και εμποδίζει την προοδευτική αστοχία. Ηλώσεις και καλωδιώσεις έχουν χρησιμοποιηθεί για ως μέσο για την αποτροπή πλευρικών θραύσεων των στύλων. Θα πρέπει να τοποθετούνται το ταχύτερο δυνατόν μετά την εκσκαφή πριν ο θρυμματισμός ή η απόσχιση καταστρέψουν το στύλο έστω και μερικά.

Η λιθογόμωση γύρω από το στύλο αποτελεί μία άλλη τεχνική που χρησιμοποιείται κατά την εκμετάλλευση, ιδιαίτερα όταν σχεδιάζεται η απόκτηση του μεταλλεύματος των στύλων. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται συχνά τιμμενταρισμένη λιθογόμωση που προσφέρει σημαντική υποστήριξη και επιτρέπει την κατασκευή ψηλών ελεύθερων επιφανειών. Η λιθογόμωση δεν μπορεί να αποκτήσει ομοιόμορφη επαφή με την οροφή, ικανή να φέρει φορτίο άμεσα. Άρα κάποια μετακίνηση θα λάβει χώρα έως ότου αυτή παραλάβει κάποιο φορτίο του στύλου. Επιπλέον, η λιθογόμωση είναι σημαντικά πιο ενδοτική από το στύλο και επομένως αν ο στύλος

δεν παραμορφωθεί υπερβολικά σαν αποτέλεσμα της αστοχίας του, είναι απίθανο ότι η λιθογόμωση θα μεταφέρει κάποιο φορτίο. Εντούτοις, η πλευρική παρεμπόδιση του στύλου από τη λιθογόμωση δικαιώνει το κόστος τοποθέτησης της, λειτουργώντας σαν ένα είδος περίσφυξης του στύλου.

Κατά την εκμετάλλευση με τη μέθοδο των ορθοστατών στύλων (post – pillar) όπου πολύ μικροί στύλοι αφήνονται στη λιθογόμωση, η προσφερόμενη παρεμπόδιση από τη λιθογόμωση επιτρέπει την ελεγχόμενη αστοχία τους. Οι εύκαμπτοι αυτοί στύλοι εξακολουθούν να προσφέρουν επαρκή υποστήριξη στα στρώματα της οροφής κατά την εκμετάλλευση χωρίς να ενέχουν τον κίνδυνο προσέλκυσης υψηλών τάσεων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ανεξέλεγκτη αστοχία.

### 3.7 Καρστικά κενά

Το κύριο χαρακτηριστικό των ασβεστολιθικών σχηματισμών είναι η καρστικοποίηση τους, η οποία διαφοροποιείται από περιοχή σε περιοχή. Λόγω της τυχαίας κατανομής των διαφόρων καρστικών κενών, οι συνθήκες εξόρυξης δυσκολεύουν. [7]

Ανάμεσα στις υπόγειες καρστικές μορφές που υπάρχουν στην οροφή του κοιτάσματος όπως και στο δάπεδο, αυτές που είναι κυρίαρχης σημασίας είναι τα κενά, σπηλιές και κανάλια διαφόρων μορφών και διαστάσεων, ειδικότερα όταν δεν έχουν διαπιστωθεί κατά τη διάρκεια των ερευνητικών γεωτρήσεων, και βρίσκονται σε "στρατηγικές" περιοχές των θαλάμων. Τα σπηλαιώδη ανοίγματα αποτελούνται από σύστημα οριζόντιων, ή σχεδόν οριζόντιων καναλιών, με ανομοιόμορφη διακλάδωση και αλληλοσυνδεδεμένα με στενά περάσματα που ξαφνικά ανοίγουν σε μεγάλα κενά ή διέρχονται στενών, απρόσιτων περασμάτων. Στις περισσότερες περιπτώσεις χαρακτηρίζονται από συνεχή διακλάδωση και περίεργα σχήματα λόγω του περίπλοκου συστήματος ασυνεχειών που διαχωρίζει τον ασβεστόλιθο και πιθανώς της ποικίλης χημικής σύστασης του υλικού πλήρωσης τους.

Δυσκολίες που δημιουργούνται λόγω της ύπαρξης καρστικοποιημένων ασβεστόλιθων  
Κατά τη διάρκεια των διαφορετικών σταδίων της εκμετάλλευσης, ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων και δυσκολιών εμφανίζονται, με τις εξής πιο αξιοσημείωτες :

1. Η γενικότερη διάταξη του μεταλλείου πρέπει να αλλάζει συνεχώς, αναλόγως των κενών που ανακαλύπτονται με τις καθημερινές εργασίες προχώρησης και εκμετάλλευσης.
2. Λόγω της δυσκολίας εντοπισμού της θέσης και εκτίμησης των ακριβών διαστάσεων των κενών, σοβαρά προβλήματα ανακύπτουν κατά την υποχώρηση, απόληψη στύλων, επηρεάζοντας το σχεδιασμό των στύλων.
3. Πολλοί στύλοι βρίσκονται πάνω, κάτω ή κοντά σε καρστικές μορφές. Αυτή η εγγύτητα επηρεάζει το επί τόπου εντατικό πεδίο τάσεων, όπως επίσης και την απόκριση της βραχομάζας λόγω ανακατανομής των φορτίων.
4. Τα μεγαλύτερα κενά παρουσιάζονται στις περιοχές που γειτνιάζουν με ασυνέχειες, και σχετίζονται με σημαντικές εισροές υδάτων, προκαλώντας προβλήματα στην παραγωγή και ανάγκες αντλήσεων.
5. Επιπλέον προσοχή και μέτρα ασφάλειας πρέπει να λαμβάνονται κατά το σχεδιασμό και διάνοιξη των κύριων στοών, με σκοπό την αποφυγή συνάντησης με καρστικές μορφές είτε διαμέσου, είτε άνω ή υπό αυτών.
6. Σημαντικός χρόνος εργασίας πρέπει να δαπανηθεί για τον εντοπισμό και εκτίμηση των κενών σε εύλογο χρόνο.
7. Μια σημαντική ποσότητα αέρα διαρρέει διαμέσου του καρστικού δικτύου ή προκαλεί επαναισροές προκαλώντας έτσι αλλαγές στις κύριες παραμέτρους του κυκλώματος αερισμού.
8. Οι αγκυρώσεις που χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη της οροφής και των ανοιγμάτων πολλές φορές "γλιστρούν" σταδιακά ή αστοχούν ολικά σε περιπτώσεις όπου η περιοχή επαφής πετρώματος – κέλυφος διαστολής περιέχει αργιλικό υλικό ή είναι ρωγματωμένη λόγω καρστικών μορφών.
9. Η ύπαρξη καρστικών κενών μεγάλου όγκου κάτωθεν του κοιτάσματος προκαλεί σημαντικές απώλειες βωξίτη και επηρεάζει την συνολική ποσότητα των αποθεμάτων.
10. Το οργανόγραμμα εργασιών πρέπει να περιλαμβάνει την σημαντική καθυστέρηση λόγω επιπρόσθετων εργασιών που χρειάζονται καθώς και επιπρόσθετα μέτρα ασφάλειας.

Οι πληροφορίες που παρέχονται από τις υπόγειες δειγματοληπτικές γεωτρήσεις συνδυάζονται με τις αρχικές επιφανειακές γεωτρήσεις, για την διαπίστωση του κοιτάσματος. Ο συνδυασμός αυτών βοηθά στην αναγνώριση των γεωλογικών μορφών, προσδιορίζοντας τις φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων σε καρστικοποιημένους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς, παρέχοντας δεδομένα που θα βοηθήσουν στην εκτίμηση των μέτρων υποστήριξης που θα χρειαστούν και υπολογίζοντας τη γεωμετρία των κυριότερων καρστικών κενών.

#### Εναλλακτικές χρήσεις των καρστικών κενών

Σύνηθες στις εξορύξεις βωξίτη είναι το μεγάλο μέγεθος των εκμεταλλεύσεων. Σε μεταλλεία της S & B, θέση "Κλεισούρα", ένας φορτωτής LHD μπορεί να θέλει έως και 35 λεπτά της ώρας για να βγει στην επιφάνεια. Μεγάλα καρστικά κενά που συναντώνται κατά την εκμετάλλευση χρησιμοποιούνται σαν χώροι απόθεσης στείρων. Τέτοια κενά μπορούν να έχουν ύψος έως και 70 μέτρα. Ενδεικτικά αναφέρεται το γεγονός ότι στη θέση "Ασφακόλακκα" υπάρχει κενό, στις παρειές του κοιτάσματος, όπου ρίχνοντας πέτρα ο ήχος πρόσκρουσης ακούγεται μετά από 5 δευτερόλεπτα.

Σε κάποια από τα κενά αυτά υπάρχει υδροφορία, καθιστώντας τα έτσι ικανά για άντληση, ικανοποιώντας τις καθημερινές ανάγκες του μεταλλείου.

### 3.8 Κίνδυνοι αστοχίας σε υπόγεια μεταλλεία βωξίτη.

Με τον όρο αστοχία εννοείται μια μη αποδεκτή κατάσταση. Στα πετρώματα μπορεί να είναι θραύση, όπως τις περισσότερες φορές, ή και αλλαγή των ιδιοτήτων του πετρώματος σε τέτοιο βαθμό που να μην εγγυάται πλέον με ασφάλεια την λειτουργία του ανοίγματος. Καθότι τα πετρώματα είναι κατ' εξοχήν υλικά που συμπεριφέρονται σαν ψαθυρά, η αστοχία τις περισσότερες φορές εκδηλώνεται ακαριαία χωρίς την εμφάνιση σταδίου διαρροής.

#### Αστοχίες στα υπόγεια μεταλλεία βωξίτη.

Η πρόλευση των κοιτασμάτων μας υποδεικνύει πιθανές επισφαλείς καταστάσεις. Ο τρόπος απόθεσης του κοιτάσματος, ιζηματογένεση σε θαλάσσιο περιβάλλον πάνω σε καρστικό ανάγλυφο, μας προδιαθέτει για την ύπαρξη καρστικών μορφών και υδροπερατότητα του ασβεστολίθου. Αντίθετα ο βωξίτης είναι αδιαπέρατος, αλλά αναμένεται αλλαγή στην αντοχή του αναλόγως του βαθμού αποσιδήρωσης και εμπλουτισμού σε υδροξείδια του Al.

Τεκτονικά, η απόθεση ασβεστολίθων και δολομιτών σε παχιά στρώματα και η σχετική λιθολογική ομοιογένεια προσέδωσαν πολύ μικρή ευκινησία και πλαστικότητα. Αυτό χαρακτηρίζεται από βαριά τεκτονική και ευρέα αντίκλινα και σύγκλινα, πολλαπλά διαρρηγμένα, με τέτοιο τρόπο ώστε το σύνολο να αποτελεί διαδοχή συνδυασμένων τάφρων – συγκλίνων και τεκτονικών κεράτων – αντικλίνων. [11]

Λόγω της αδιαπερατότητας των βωξιτών, το υπεδαφικό νερό διευσδύει και κυκλοφορεί στον ασβεστόλιθο της οροφής, αποθέτοντας αργίλο-ιλυώδη ιζήματα, ειδικότερα σε περιοχές υψηλής συγκέντρωσης ασυνεχειών. Αυτά τα ιζήματα έχουν σχηματισθεί στην επαφή του βωξιτικού κοιτάσματος με τον ασβεστόλιθο της οροφής, δίνοντας ένα σχετικά λεπτό κιτρινωπό αργιλικό (marl) στρώμα, το οποίο συνήθως έχει πάχος 20 έως 50 cm, είναι απολύτως διαχωρισμένο από το κοίτασμα και την οροφή αυτού και πάντοτε αφαιρείται στο ξεσκάρωμα.

#### Αστοχίες πετρωμάτων οροφής.

Εκτεταμένες εργαστηριακές δοκιμές έχουν δείξει ότι ο ασβεστόλιθος της οροφής έχει αντοχή σε μονοαξονική θλίψη περίπου 100 MPa, μέτρο ελαστικότητας του Young 9 έως 14 GPa, δείκτη Poisson 0.25, ειδικό βάρος 26,5 kN/m<sup>3</sup> και δείκτη σημειακής φόρτισης περίπου 4.

Ο ασβεστόλιθος έχει βαθμό RQD ανάμεσα 50 έως 75 και μια μέση απόσταση των κύριων συστημάτων ασυνεχειών 0,3 έως 1,0 m. Η συνήθης κατάσταση των ασυνεχειών μπορεί να χαρακτηριστεί από σχετικώς τραχειές επιφάνειες, από άνοιγμα όχι μεγαλύτερο του 1 mm, από μαλακό υλικό πλήρωσης και από εξαλλοιωμένα τοιχώματα.

Οι εκμεταλλεύσεις γίνονται σε βάθος άνω των 300 m από την επιφάνεια, δημιουργώντας έτσι ένα επί τόπου εντατικό πεδίο τάσεων άνω των 8 MPa. Ο δείκτης RMR του ασβεστόλιθου υπολογίζεται από 55 έως 70, χαρακτηρίζοντας τον σαν μετρίως έως καλή βραχομάζα. Άρα άνοιγμα 4 m, θα έχει χρόνο αυτουποστήριξης περίπου 6 μήνες.

Στα περισσότερες από τις υπόγειες εκμεταλλεύσεις η οροφή της εκσκαφής συμπίπτει με τα

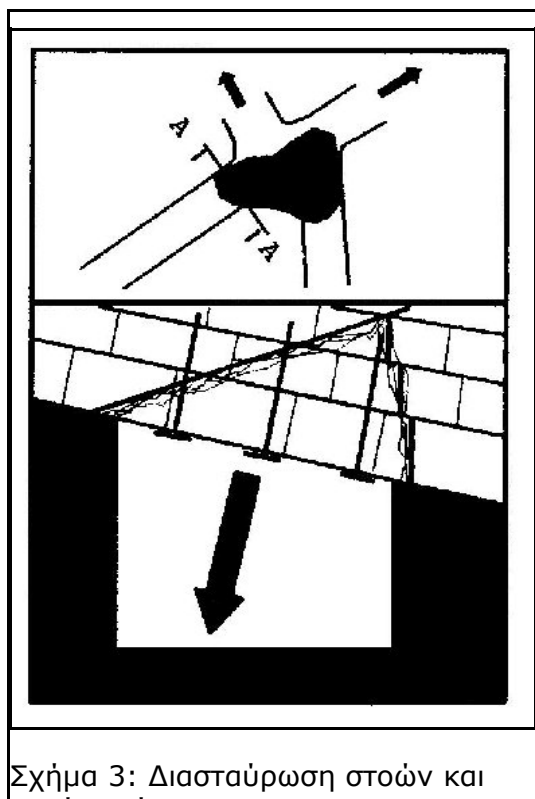
επίπεδα στρώσης. Η ανάλυση της συμπεριφοράς των λεπτών αυτών στρωμάτων της ασβεστολιθικής οροφής βασίζεται στην εφαρμογή της θεωρίας της αμφίπακτης δοκού. Σύμφωνα με αυτή, μια ζώνη ανακούφισης (relieved) σχηματίζεται στη στέψη (crown), οι στρώσεις διαχωρίζονται και η οροφή κάμπτεται. Η σχεδόν μηδενική εφελκυστική αντοχή και η σχετικά χαμηλή διατμητική αντοχή, συγκρινόμενες με την αντίστοιχη του άρρηκτου πετρώματος, είναι οι δύο κυρίαρχες μηχανικές ιδιότητες των στρωμάτων των Τουρώνιων ασβεστόλιθων.

Σε όλα σχεδόν τα ελληνικά βωξίτικα κοιτάσματα η οροφή ενισχύεται από ήλους διαστολής ή ήλους ρητινικής πάκτωσης. Έντονη και συστηματική ήλωση παρέχει εφελκυστική και διατμητική αντοχή στα στρώματα, αυξάνοντας έτσι το επίπεδο ασφάλειας του ανοίγματος. Το μέγεθος των ανοιγμάτων επηρεάζεται από τη προένταση, το μήκος, την απόσταση, την ακαμψία κλπ., του συστήματος ήλωσης.

\_Κοινοί τύποι αστοχιών.

Το έγκυρο ξεσκάρωμα, η συστηματική ήλωση της οροφής μειώνουν τις πιθανότητες εκδήλωσης μεγάλης κατάπτωσης οροφής. Ένας συγκεκριμένος αριθμός ελεγχόμενων αστοχιών οροφής συμβαίνουν κατά την σταδιακή αύξηση των διαστάσεων των θαλάμων και στύλων κατά την υποχώρηση. Οι περισσότερες αστοχίες στα υπόγεια μεταλλεία βωξίτη σχετίζονται με τεκτονικά γεγονότα, ασθενή ή μαλακό πέτρωμα, διαχωρισμός στρωμάτων, αργιλικό υλικό πλήρωσης ασυνεχειών, υψηλό επί τόπου εντατικό πεδίο τάσεων, υψηλή διαπερατότητα, καρστική διάβρωση όπως και καθυστερημένη ή ακατάλληλη εφαρμογή υποστήριξης.

Οι ποικίλες μορφές αστοχίες μπορούν να ομαδοποιηθούν σε εννέα κατηγορίες. (Οικονομόπουλος 1993) [9] :



Σχήμα 3: Διασταύρωση στοών και τομή ανοίγματος.

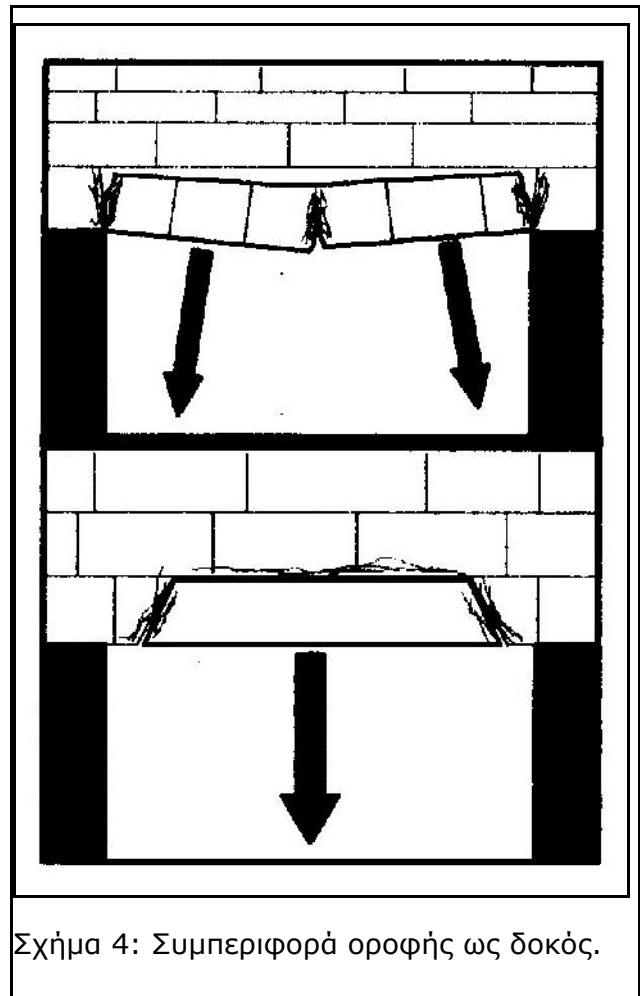
#### 1. Πτώσεις τεμαχών

Τεμάχη πετρώματος που βρίσκονται σε ασταθή κατάσταση εμφανίζονται ως η κύρια μορφή αστοχίας που εκδηλώνεται στις εκσκαφές. Απομονώνονται από επίπεδος ασυνέχειες με μια γωνία 30°. Αυτά τα επίπεδα αδυναμίας δύσκολα γίνονται εμφανή λόγω της παρουσίας και άλλων δομικών ασυνεχειών στο πέτρωμα. Ως εκ τούτου οι περισσότερες ασυνέχειες που προκαλούν καταπτώσεις οροφής δεν διακρίνονται από τις συνηθισμένες "άκακες". Οι ασταθείς ασυνέχειες έχουν μεγάλη συχνότητα και είναι συνήθως πληρωμένες με αργιλικό υλικό, το οποίο προκαλεί αποκόλληση τεμαχών από τη βραχομάζα. Η αστοχία της βραχομάζας προκαλείται από υπάρχουσες ασυνέχειες, παρά από τη θραύση της άρρηκτης μάζας του πετρώματος, με εξαίρεση τις περιοχές εξαιρετικά ασθενών πετρωμάτων.

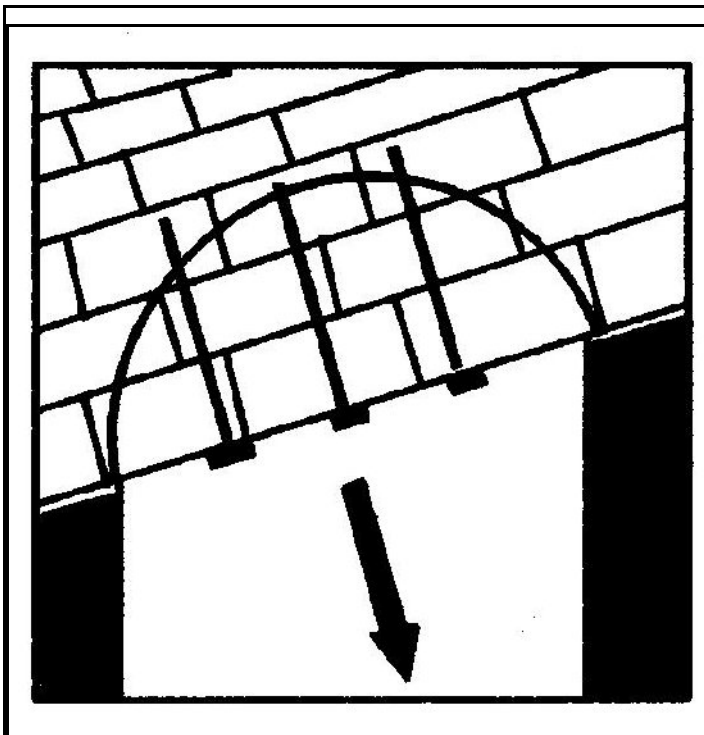
## 2. Αστοχία δοκών οροφής

Ο ασβεστόλιθος της οροφής είναι συνήθως λεπτοστρωματώδης. Σταδιακή κάμψη των πλησιέστερων στην οροφή στρωμάτων, άνοιγμα κρίσιμων ασυνεχειών και συμπίεση του πετρώματος, διάτμηση των άκρων δίνουν στην οροφή τη συμπεριφορά αμφίπακτης δοκού. Όταν η δοκός είναι σχετικώς λεπτή θα σπάσει. Σε περιοχές όπου η πλευρική τάση είναι μικρή και το κατακόρυφο φορτίο στη δοκό της οροφής μεγάλο, αυτή υποβάλλεται σε υψηλές εφελκυστικές τάσεις.

Η λειτουργία της δοκού ως θόλου καθώς και οποιαδήποτε σταδιακή αυξανόμενη φόρτιση του χαμηλότερου αποκολλημένου στρώματος προκαλεί υπερφόρτιση στα αγκύρια που βρίσκονται στο μέσο του ανοίγματος, ενεργούν ως "drawbolts", επιτρέποντας έτσι περαιτέρω διαχωρισμό.



Σχήμα 4: Συμπεριφορά οροφής ως δοκός.



Σχήμα 5: Αναποτελεσματική ήλωση.

## 3. Αναποτελεσματική ήλωση

Κάποιες καταπτώσεις οροφής μεγάλης κλίμακας, περιλαμβάνουν όγκους πετρωμάτων που εκτείνονται πέρα του μήκους της αγκύρωσης.

Αυτό το ανεπαρκές μήκος μπορεί να αφορά μόνο μερίδα του πεσμένου όγκου, με το υπόλοιπο μέρος να έχει υποστεί αποσύνθεση και να αποκολλάται.

#### 4. Διασταυρώσεις στοών

Σε διασταυρώσεις στοών, βλέπε Σχήμα 3, οποιαδήποτε τεμνόμενα επίπεδα αδυναμίας μπορούν να προκαλέσουν αξιοσημείωτες καταπτώσεις οροφής. Αυτό συμβαίνει συνήθως χωρίς καμία προειδοποίηση.

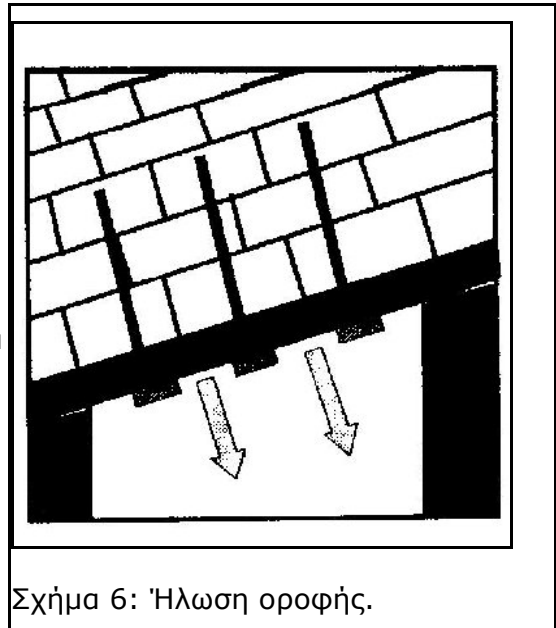
Σε αυτές τις διασταυρώσεις ο όγκος που υπόκειται σε πίεση και το ενεργό άνοιγμα είναι μεγάλων διαστάσεων, ούτως αυξάνεται η πιθανότητα τυχαίας αστοχίας και το επίπεδο φόρτισης της βραχομάζας. Στις διασταυρώσεις τα πλευρικά τοιχώματα τέμνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν γωνίες, οι οποίες συνήθως έχουν το σχήμα οξείας γωνίας, κόχη. Η βραχομάζα σε αυτές τις γωνίες θρυμματίζεται διπλά από τις δονήσεις των εκρήξεων.

#### 5. Μεγάλη απόσταση ήλωσης

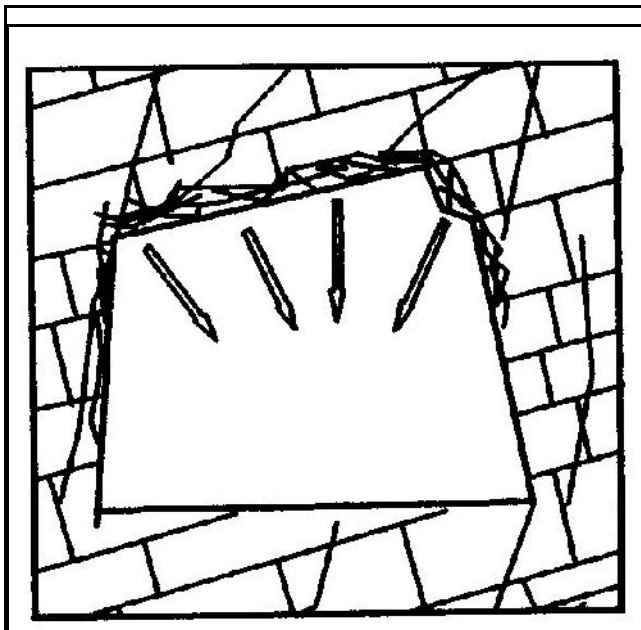
Ανάμεσα στις κεφαλές των αγκυριών, υπάρχουν συνήθως αποφορτισμένες περιοχές που παίρνουν το σχήμα καμπάνας. Σε τέτοιες περιοχές συμπύεση ή θραύση λόγω έλλειψης συνοχής προκαλεί τοπική αστοχία και πτώση πετρώματος.

#### 6. Χαμηλή αντοχή της οροφής

Σε ορισμένες περιοχές, τα κατώτερα στρώματα της ασβεστολιθικής οροφής χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά χαμηλή αντοχή, πυκνό δίκτυο ασυνεχειών, υψηλό ποσοστό αργιλικού υλικού και εισροές νερού. Έτσι το στρώμα γίνεται αρκετά μαλακό, λασπώδες και συμπεριφέρεται μάλλον πλαστικά. Αυτά τα στρώματα δεν μπορούν να ξεσκάρωθούν αποτελεσματικά και τείνουν να αναπτύξουν ανεξάρτητα τεμάχια, μέχρι και 1 κυβικό μέτρο σε όγκο, που μπορούν να διαχωριστούν από το υπόλοιπο πέτρωμα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η απόδοση των αγκυριών επηρεάζεται δυσμενώς και παρουσιάζεται δυσκολία στην μεταβίβαση φορτίου από την κεφαλή του αγκυρίου στην βραχομάζα.



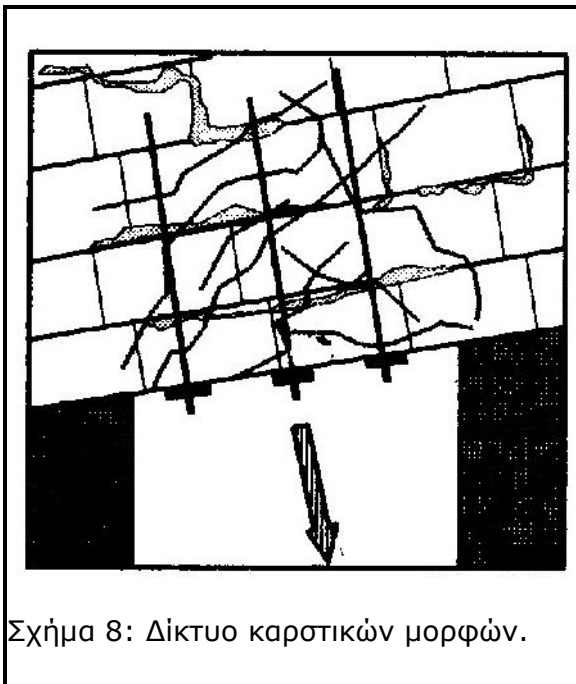
Σχήμα 6: Ήλωση οροφής.



Σχήμα 7: Περιφερειακός θρυμματισμός.

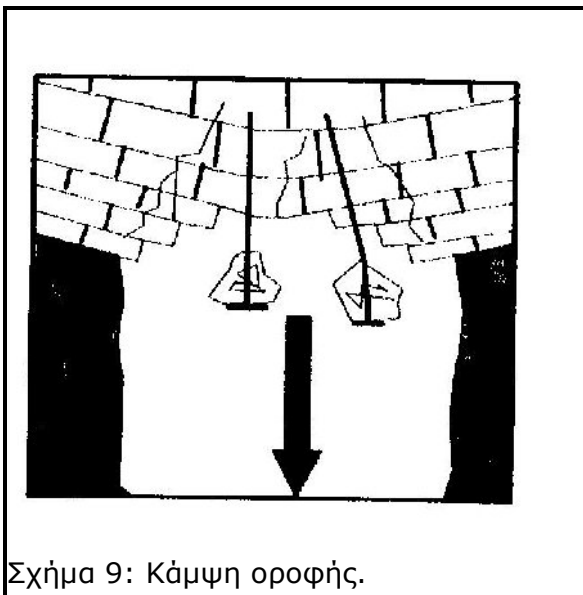
#### 7. Περιφερειακός θρυμματισμός

Οι στοές προσπέλασης, ανάπτυξης των βωξιτικών μεταλλείων διανοίγονται μέσα στους ασβεστολιθικούς σχηματισμούς της οροφής ή του δαπέδου του κοιτάσματος. Παρά την ικανοποιητική τους μηχανική συμπεριφορά και τον σχετικά μεγάλο χρόνο αυτοϋποστήριξης των ανοιγμάτων, συχνά υποφέρουν από μικρής κλίμακας έντονο θρυμματισμό. Αυτός αποδίδεται σε τοπικό ακανόνιστο πεδίο τάσεων, ακατάλληλη μέθοδο υποστήριξης και σε αναποτελεσματικό ξεσκάρωμα.



#### 8. Καρστική διάβρωση

Ο ασβεστόλιθος της οροφής είναι σχεδόν πάντα καρστικοποιημένος και ο βαθμός της καρστικής διάβρωσης ποικίλει. Συνήθως το πέτρωμα σε τέτοιες περιοχές έχει έγκοιλα πληρωμένα είτε με νερό, αργιλικά υλικά, εμφανίζεται κερματισμένο και αποσυντεθειμένο από καρστικές μορφές. Αυτές προκαλούν σταδιακή ολίσθηση ή ολοκληρωτική αστοχία των κελυφών διαστολής ή των ρητινικών ενεμάτων των αντίστοιχων αγκυριών.



#### 9. Λυγισμός στρωμάτων

Σε ορισμένες περιοχές τα στρώματα του ασβεστόλιθου της οροφής, είναι τεκτονικώς παραμορφωμένα και λυγισμένα. Όταν η οροφή αποτελείται από τέτοιου είδους στρώματα, αυτά μπορεί να μην παρέχουν την συμπεριφορά θόλου μιας αμφίπακτης δοκού και τείνουν να αστοχούν σχεδόν αμέσως μετά την εξόρυξη του υποκείμενου βωξίτη.

#### Αστοχία στύλων

Ο κίνδυνος που προέρχεται από την αστοχία ενός στύλου έγκειται στη μεταφορά φορτίων στους γειτονικούς στύλους με αποτέλεσμα την υπερφόρτιση τους. Τούτο είναι δυνατόν να οδηγήσει σε κλιμακωτή αστοχία των στύλων. Σε μαλακούς σχηματισμούς μπορεί να συμβεί εξαιρετικά γρήγορα με αποτέλεσμα τη δημιουργία εκρηκτικού κύματος αέρα με καταστροφικά αποτελέσματα σε γειτονικές περιοχές που δε σχετίζονται άμεσα με την αστοχία των στύλων. Γι' αυτό επιδιώκεται ο διαχωρισμός του χώρου της εκμετάλλευσης σε περιοχές που οριοθετούνται από στύλους φράκτες (barrier pillar). Το μεγάλο μέγεθος των στύλων αυτών περιορίζει οποιαδήποτε αλυσιδωτή κατάρρευση μέσα στην περιοχή της αστοχίας.

Στην πραγματικότητα η κατανομή τάσεων στους περισσότερους στύλους είναι πιθανό να τροποποιηθεί από την ελαστική κατανομή. Χαλάρωση, μερική θραύση από την ανατίναξη ή απελευθέρωση της φόρτισης στην επιφάνεια του πετρώματος παράγει μια περιοχή που μπορεί να δεχθεί μικρές τιμές τάσεις. Έτσι η περιοχή μέγιστης συγκέντρωσης τάσης περιορίζεται στο εσωτερικό του στύλου. Όταν έχουμε μαλακό στρώμα στην οροφή του στύλου προκαλείται εγκάρσια φόρτιση στην κορυφή του στύλου.

Στο σχεδιασμό μεταλλείων, αναμενόμενη αστοχία πρέπει να σχετίζεται με το αποτέλεσμα της στις εργασίες εξόρυξης. Επιφανειακή θραύση ή "απολέπιση" ενός στύλου δεν είναι μέγιστης σημασίας εκτός και εάν οδηγεί σε σημαντική μείωση της ικανότητας υποστήριξης. [10]

Κατά την ανάλυση της ευστάθειας των θαλάμων και στύλων τρεις παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη :

- α. αλλαγή κατανομής τάσεων λόγω εξόρυξης
- β. η αντοχή του πετρώματος και οι πολλαπλές πιθανές μορφές αστοχίας
- γ. παραμόρφωση του ανοίγματος, στύλου, των παρειών.

Σε σημεία το πέτρωμα μπορεί να εκδηλώσει βίαιες εκτινάξεις, να καταρρεύσει ή να μειωθεί η συνοχή του. Οι στύλοι μπορούν να αστοχήσουν ακαριαία ή ερπυστικά. Η αστάθεια του πετρώματος μπορεί να είναι τοπική ή να αφορά το σύνολο του μεταλλείου και εν δυνάμει καταστροφική.

Πότε αστοχεί ένας στύλος ; Όταν το φορτίο που του ασκείται ξεπεράσει την αντοχή του σε θλίψη. Ο λόγος αντοχή προς φορτίο μας βοηθά στη βαθμονόμηση οριακών περιοχών, είναι ο συντελεστής ασφάλειας,  $F_s$ . Η αντοχή, στην περίπτωση των στύλων, μπορεί να αναχθεί σε μονοαξονική αντοχή. Η ψαθυρότητα που χαρακτηρίζει την συμπεριφορά των πετρωμάτων συντελεί στην απλοποίηση εάν δεχτούμε ότι τα ψαθυρά υλικά παρουσιάζουν ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση.

$$F_s = \sigma_p / C_p$$

$F_s$  = συντελεστής ασφάλειας

$\sigma_p$  = ασκούμενη τάση

$C_p$  = αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Οι τιμές που λαμβάνει ο συντελεστής, συνήθως είναι από 2 έως 4 (Salamon, 1992 από [1]). Η επίτευξη μιας τιμής συντελεστή ασφάλειας στις εργασίες μπορεί να μεταφράζεται σε αλλαγή της γεωμετρίας του στύλου. Οι γεωλογικές, τεκτονικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής υπολογισμού πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Ο στύλος όντας σχηματισμένος από πέτρωμα καθιστά δύσκολη την εκτίμηση της αντοχής του μονοπαραμετρικά. Κοινή αποδοχή είναι ότι η αντοχή συναρτάται με το βάθος. Αυτή η σχέση μελετάται και αναπροσαρμόζεται με την πρόοδο της εξόρυξης.

Κατά τις δεκαετίες του 1960 μεγάλες έρευνες έγιναν, κυρίως σε ανθρακωρυχεία, για την εκτίμηση της αντοχής των στύλων. Χαρακτηριστική και μεγάλης κλίμακας ήταν η έρευνα των Salamon και Munro, το 1967 στα ανθρακωρυχεία της Νότιας Αφρικής, όπου μοιράστηκαν ερωτηματολόγια στους εργαζόμενους σχετικά με την περιγραφή των περιοχών όπου οι στύλοι κατέρρεαν και όπου ήταν σταθεροί. Η στατιστική επεξεργασία της αντίληψης των εργαζομένων για τις εκάστοτε συνθήκες μαζί με εργαστηριακές δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, συνήθως τετραγωνικών δοκιμίων, δημιουργούν εμπειρικές σχέσεις για τον υπολογισμό της αντοχής του στύλου σε θλίψη.

Γενική μορφή της σχέσης (Holland και Gaddy, 1957, από [1]) :

$$C_p = C_1 \cdot (W^\beta / H^\alpha)$$

όπου

$C_p$  : αντοχή του στύλου σε θλίψη

$C_1$  : αντοχή σε μονοαξονική θλίψη δοκιμίου του πετρώματος τετραγωνικής διατομής

$W$  : πλάτος του στύλου

$H$  : το βάθος της εκμετάλλευσης

$\alpha, \beta$  : σταθερές, με  $\alpha = 0,85$  έως 1 και  $\beta = 0,5$ .



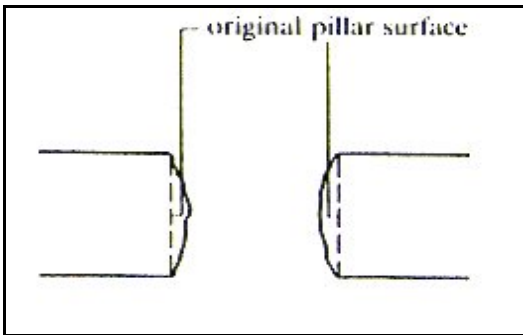
άλλες σχέσεις δίνονται από :

Obert και Duvall, 1967 :  $C_p = C_1 \cdot (0,778 + 0,222 \cdot W_p/H_p)$

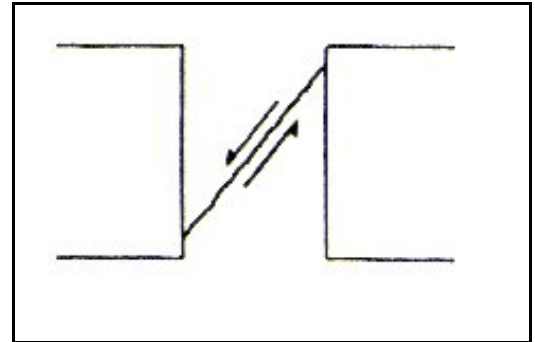
Bieniawski, 1967 :  $C_p = C_1 \cdot (0,64 + 0,36 \cdot W_p/H_p)$

Salamon και Munro, 1967 :  $C_p = C_1 \cdot (W_p^{0,44} / H_p^{0,66})$

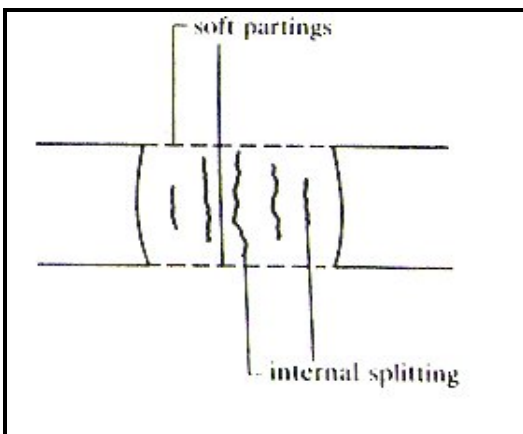
Στο παρακάτω σχήμα 10, περιγράφονται κατά Brady και Brown, 1985, οι κύριοι τύποι αστοχίας στους στύλους :



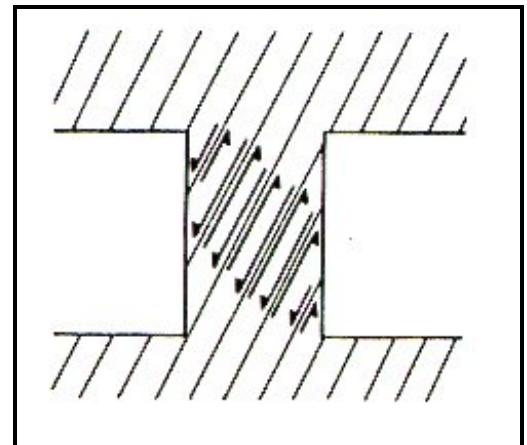
Σχήμα 10: α. Πλευρική παραμόρφωση στύλου, περιφερειακός θρυμματισμός.



Σχήμα 10: β. Κεκλιμένες ρωγματώσεις



Σχήμα 10: γ. Η οροφή του στύλου αποτελείται από μαλακό σχηματισμό, ο οποίος δημιουργεί εγκάρσιο φορτίο στο στύλο, προκαλώντας εσωτερική ρωγμάτωση.



Σχήμα 10: δ. Ο στύλος είναι δομημένος με προϋπάρχουσες ασυνέχειες, που δρουν ως δυνητικές επιφάνειες αστοχίας.

---

Βιβλιογραφία 3ου κεφαλαίου:

1. Σοφιανός Α.Ι., 2008, Υποστήριξη υπογείων έργων, Τόμος Ι. Αθήνα (σημειώσεις μαθήματος).
2. Τερεζόπουλου Ν., 2003, Μέθοδοι υπογείων εκμεταλλεύσεων, Αθήνα (σημειώσεις μαθήματος).
3. Καλιαμπάκος Δ., 2003, Υπόγεια έργα, Αθήνα (Σημειώσεις μαθήματος).
4. Σοφιανός Α.Ι., 2008, Μηχανική των πετρωμάτων, Αθήνα.
5. Καλιαμπάκος Δ., 2003, Υπόγεια Έργα, Αθήνα.
6. Atlas Copco, 1985, Guide to underground mining methods and applications.
7. Οικονομόπουλος, Κοντοθανάσης, Κορωνάκης, 1993α. Underground innovative mechanized bauxite mining under difficult conditions due to existence of karstic voids.
8. ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests on Rock, Int.J.Rock.Mech and Mech. Sci., Vol. 15, No 6., Dec. 1978.
9. Economopoulos, Koronakis, Sofianos, 1993. Roof failure mechanisms in Greek underground bauxite mines.
10. Coates D.F. CANMET, 1981, Rock mechanics principles.
11. Γ. Μαράτος, 1972, Γεωλογία της Ελλάδος, ΓΕ.ΜΕΛ.ΕΡ.

# Κεφάλαιο 4. Ακουστική εκπομπή

## 4.1 Εισαγωγή – Περί ηχητικών κυμάτων

Ήχος καλείται το αίσθημα που δημιουργείται λόγω μεταβολών πίεσης του ατμοσφαιρικού αέρα ή άλλου μέσου διαδόσεως και λαμβάνεται από τα αντίστοιχα όργανα. Οι μεταβολές αυτές διαδίδονται με τη μορφή *ηχητικών κυμάτων*. Ο ορισμός του κύματος, που μας εξυπηρετεί καλύτερα σε αυτό το πεδίο μελέτης, είναι ο εξής :

Κύμα είναι ένας μηχανισμός διάδοσης μιας κάποιας ελαστικής διαταραχής μέσα σ' ένα ελαστικό μέσο. Κατά τη διάδοση της ελαστικής αυτής διαταραχής επιτυγχάνεται μεταφορά ενέργειας από σημείο σε σημείο του ελαστικού μέσου χωρίς, όμως, μεταφορά ύλης.

Το μέσο διάδοσης των κυμάτων μπορεί να είναι οποιοδήποτε στερεό, υγρό, αέριο. Ελαστικό μέσο είναι το σώμα στο οποίο οι όποιες παραμορφώσεις που προκαλούνται από διάφορες εξωτερικές αιτίες εξαφανίζονται ευθύς αμέσως μόλις πάψουν να επενεργούν οι εξωτερικές αιτίες που τις προκαλούν. Ισότροπο ελαστικό μέσο ως προς μία συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα ονομάζεται κάθε ελαστικό μέσο, που έχει τη συγκεκριμένη φυσική ιδιότητα με το αυτό μέτρο προς όλες τις διευθύνσεις. Έτσι για παράδειγμα ένα ελαστικό μέσο, στο οποίο η ταχύτητα διαδόσεως ενός κύματος είναι η ίδια (έχει το ίδιο μέτρο) προς όλες τις διευθύνσεις, είναι ισότροπο, όσον αφορά στην ταχύτητα διαδόσεως του κύματος.

Η παρακάτω εξίσωση της Κυματικής ισχύει για όλα τα κύματα και για όλα τα ελαστικά μέσα δια των οποίων αυτά διαδίδονται.

$$\lambda = c / f \quad \text{και} \quad \lambda = cT$$

όπου

$\lambda$ : μήκος κύματος, η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο μιας περιόδου

$c$ : ταχύτητα,

$T$ : περίοδος, το χρονικό διάστημα μεταξύ της δημιουργίας δύο διαδοχικών διαταραχών

$f$ : συχνότητα, ο αριθμός των διαταραχών που δημιουργήθηκαν σε σημείο ανά μονάδα χρόνου.

Πρέπει να έχουμε πάντοτε κατά νου ότι η συχνότητα ( $f$ ) ενός κύματος παρεμένει πάντα σταθερή ασχέτως του ελαστικού μέσου στο οποίο διαδίδεται το κύμα. Οπότε το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) προκύπτει ότι είναι ανάλογο της ταχύτητας ( $c$ ) της κυμάνσεως μέσα στο ελαστικό μέσο, στο οποίο διαδίδεται το κύμα.

### \_Είδη κυμάτων

Τα κύματα που διαδίδονται στο χώρο με ορισμένη ταχύτητα λέγονται τρέχοντα ή οδεύοντα ή διαδιδόμενα κύματα σε αντίθεση προς τα στάσιμα κύματα, τα οποία είναι παγιδευμένα σε συγκεκριμένο τμήμα του ελαστικού μέσου (συμβολή δύο κυμάτων ίδιας συχνότητας, ταχύτητας, πλάτους, ίδιας διεύθυνσης διάδοσης αλλά με αντίθετες φορές, βλ. συμβολή παρακάτω). Ανάλογα με τη γωνία που σχηματίζουν η διεύθυνση της ταλάντωσης με τη διεύθυνση διάδοσης της ταλαντώσεως έχουμε τα *εγκάρσια* και τα *διαμήκη* ή επιμήκη κύματα. Στα πρώτα η εν λόγω γωνία είναι  $90^\circ$ , ενώ στα δεύτερα είναι  $0^\circ$ .

Στα εγκάρσια έχουμε "όρη" και "κοιλιάδες", δηλαδή περιοδική μεταβολή του σχήματος του φορέως του κύματος (του ελαστικού μέσου δια του οποίου διαδίδεται το κύμα).

Στα διαμήκη έχουμε "πυκνώματα" και "αραιώματα", δηλαδή περιοδική μεταβολή της πυκνότητας του φορέως του κύματος.

Τα εγκάρσια κύματα διαδίδονται μόνο δια μέσου των στερεών σωμάτων και στην ελεύθερη επιφάνεια των υγρών. Τα διαμήκη κύματα διαδίδονται δια μέσου όλων των στερεών, υγρών (εξαιρουμένης της ελεύθερης επιφάνειάς τους) και αερίων σωμάτων.

#### 4.1.1 Ιδιότητες των ηχητικών κυμάτων

##### \_Ταχύτητα

Η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων διαμέσου ενός ελαστικού μέσου εξαρτάται κυρίως από το είδος του κύματος (εάν είναι εγκάρσιο ή διαμήκης) και από τις ιδιότητες του ελαστικού μέσου, διότι η ενέργεια μεταβιβάζεται από το ένα μόριο στο άλλο, εξ αιτίας της σύζευξης που υπάρχει ανάμεσα τους. Οι ταχύτητες διάδοσης υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}}$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2 \cdot (1+\nu)}}$$

$$K = \frac{E}{3 \cdot (1-2\nu)}, G = \frac{E}{2 \cdot (1+\nu)}$$

όπου,

$V_p$  = ταχύτητα διάδοσης διαμήκους

$V_s$  = ταχύτητα διάδοσης διατμητικού (εγκάρσιου)

$E$  = μέτρο ελαστικότητας,

$\nu$  = λόγος Poisson

$K$  = μέτρο ελαστικής συστολής

$G$  = μέτρο διάτμησης.

Εφόσον κάθε πέτρωμα διαθέτει τη χαρακτηριστική του ταχύτητα, μπορούμε να κάνουμε κάνουμε έμμεση εκτίμηση σχετικά με τις μηχανικές ιδιότητες του. Ενδεικτικές τιμές, σε κατά τόπους πετρώματα των ταχυτήτων διάδοσης του ήχου δίνονται στον πίνακα 4.

Πέτρωμα	Πυκνότητα [kg/m <sup>3</sup> ]	$V_p$ [m/s]	$V_s$ [m/s]
Ξηρή άμμος, χαλαρή δομή	1.5 - 1.7	300 - 1000	50 - 400
Ξηρή άμμος	1.6 - 1.7	1000 - 1700	400 - 900
Υγρή άμμος, χαλαρή δομή	1.8 - 2.2	1500 - 2000	50 - 400
Υγής ψαμμίτης	2.0 - 2.65	1800 - 4500	1000 - 3000
Ασθενής ψαμμίτης	1.7 - 2.0	1000 - 2000	600 - 1200
Άργιλος	1.9 - 2.1	1500 - 1600	100 - 300
Άργιλος του Λονδίνου	2	1700 - 1800	800 - 1100
Αργιλικός σχιστόλιθος	2.3 - 2.8	1600 - 4500	700 - 3000
Τάλκης, υψηλό πορώδες	1.4 - 1.7	1800 - 2600	1000 - 1500
Τάλκης, χαμηλό πορώδες	1.7-2.4	2600 - 5000	1500 - 3500
Ασβεστόλιθος	2.4 - 2.7	3500-6000	2000-3500
Ασβεστόλιθος		6000-6500	
Δολομίτης		6500-7000	
Βασάλτης	2.5 - 2.9	3500-5500	1700-3400
Βασάλτης		6500-7000	
Γρανίτης		5500-6000	
Γρανίτης	2.6 - 2.7	5500-6500	3000-3500

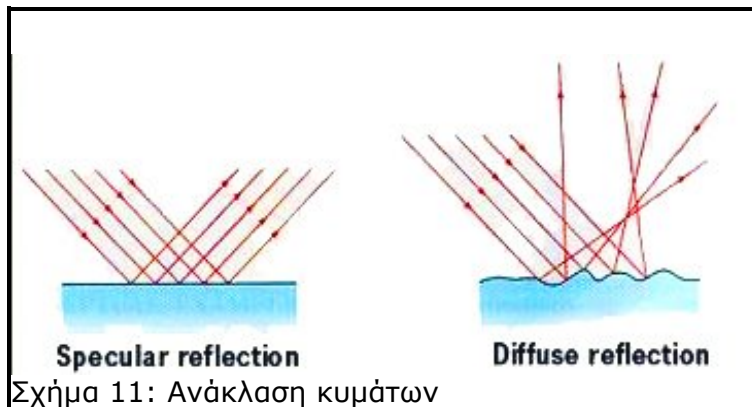
Πίνακας 3: Πετρώματα και χαρακτηριστικές ταχύτητες. [2]

## Ανάκλαση

Τα ηχητικά κύματα που μεταδίδονται σ' ένα ελαστικό μέσο προκαλούν ταλαντώσεις των μορίων του και δημιουργούν ένα πεδίο, που το ονομάζουμε *ακουστικό πεδίο*. Όταν το ακουστικό πεδίο δεν είναι κλειστό ή οι επιφάνειες που το περιβάλλουν είναι ιδανικά απορροφητικές, υπάρχουν μόνο κύματα που φεύγουν από την πηγή. Το είδος αυτό του ακουστικού πεδίου ονομάζεται ελεύθερο πεδίο (free field).

Όταν σ' ένα πεδίο, που μεταδίδονται ηχητικά κύματα, βρεθεί ένα εμπόδιο του οποίου οι διαστάσεις είναι μεγάλες σε σύγκριση με το μήκος κύματος (πάνω από δύο, ή τέσσερις φορές), η κίνηση του ήχου αρχίζει να αλλοιώνεται. Συγκεκριμένα, υπάρχει ανάκλαση επάνω στο εμπόδιο σύμφωνα με την αρχή του Huygens.

Εάν η επιφάνεια είναι "λεία" και "στιλπνή", δηλαδή οι όποιες ανωμαλίες της είναι ασήμαντες μπροστά στο μήκος κύματος ( $\lambda$ ) των ηχητικών κυμάτων, τότε συμβαίνει *κανονική ανάκλαση* (σχήμα 1α), δηλαδή τα κύματα φαίνεται σαν να προέρχονται από το συμμετρικό ως προς το εμπόδιο είδωλο της ηχητικής πηγής. Στην αντίθετη περίπτωση η επιφάνεια θεωρείται "τραχειά" και τα ηχητικά κύματα διασκορπίζονται ή σκεδάζονται (σχήμα 1β).



Η

Σχήμα 11: Ανάκλαση κυμάτων

Ανάλογα με την απόσταση παρατηρητή – εμποδίου – ηχητικής πηγής και το πλήθος των εμποδίων είναι δυνατόν να έχουμε ανάκλαση, απλή ηχώ και πολλαπλή ηχώ.

πολλαπλή ηχώ δημιουργείται, όταν στη διαδρομή του ηχητικού κύματος παρεμβληθούν πολλά εμπόδια, που

το καθένα δίνει μια απλή ηχώ.

## Διάθλαση

Το φαινόμενο της διάθλασης των ηχητικών κυμάτων παρατηρείται, όταν στη διαδρομή του ήχου εμφανίζεται διαφορά πυκνότητας του ελαστικού μέσου διάδοσης.

## Περίθλαση

Το φαινόμενο της περίθλασης συνδέεται με το φαινόμενο της ανάκλασης και παρατηρείται, όταν υπάρχει ένα εμπόδιο στη διαδρομή των ηχητικών κυμάτων του οποίου οι διαστάσεις δεν είναι σαφώς μεγαλύτερες από το μήκος κύματος ( $\lambda$ ) του ηχητικού κύματος. Σ' αυτή την περίπτωση το ηχητικό κύμα περιθλάται γύρω από το εμπόδιο και φτάνει σε σημεία, που δεν είναι "ορατά" από την ηχητική πηγή.

## Συμβολή

Όταν δύο ή περισσότερα κύματα διαδίδονται ταυτοχρόνως μέσα σε μια περιοχή του χώρου, το καθένα κύμα προχωρεί ανεξάρτητα από τα άλλα, ωσάν να μη είναι παρόντα. Κάθε χρονική στιγμή η ολική μετατόπιση στο κάθε σημείο είναι η συνισταμένη των μετατοπίσεων, που οφείλονται στο καθένα κύμα ξεχωριστά.

Δηλαδή συμβολή κυμάτων είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δύο ή περισσότερα κύματα συναντώνται στο ίδιο σημείο ενός ελαστικού μέσου, προστίθενται γεωμετρικά (διανυσματικά), με αποτέλεσμα τη μεταβολή του πλάτους κύμανσης του εν λόγω σημείου του φορέως. Αυτή η μεταβολή του πλάτους μπορεί να κυμαίνεται από μια μέγιστη τιμή μέχρι μια ελάχιστη, μηδενικής συμπεριλαμβανομένης.

## Απορρόφηση

Απορρόφηση του ήχου είναι η διαδικασία με την οποία η ακουστική ενέργεια ελαττώνεται, όταν ο ήχος περνά μέσα από ένα μέσο (ηχομόνωση) ή όταν πέφτει και ανακλάται σε μια επιφάνεια (ηχοαπορρόφηση). Στην απορρόφηση του ήχου συνήθως η ηχητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα και ταυτόχρονα εξασθενεί κι η ένταση του ηχητικού κύματος. Η απώλεια της ηχητικής ενέργειας μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους.

- Απώλεια εντός του μέσου μετάβασης (ηχομονωτική ικανότητα υλικού)
- Απώλεια που συνδέεται με τις συνθήκες στα όρια του μέσου (ηχοαπορροφητική ικανότητα υλικού).

#### \_Μονάδα μέτρησης Decibel (dB).

Η μονάδα decibel (dB) που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην Ακουστική αποτελεί δάνειο από την Ηλεκτρική Μηχανολογία. Αναφερόμενοι στο decibel με την αυστηρή σημασία του όρου στο χώρο της Τεχνολογίας του Ήχου, προκειμένου να μετρήσουμε τη στάθμη ισχύος ενός σήματος (PL = Power Level), εννοούμε το δεκαπλάσιο του λογαρίθμου του λόγου των αριθμητικών τιμών της ισχύος δύο σημάτων, ένα εκ των οποίων εκλαμβάνεται ως σήμα αναφοράς, δηλαδή :

$$PL(dB) = 10 \log ( \text{Αριθμητική τιμή ισχύος σήματος} / \text{Αριθμητική τιμή ισχύος σήματος αναφοράς} )$$

Τα ηχητικά κύματα κατά τη διάδοση τους ανακλώνται σε μικροσκοπικές επιφάνειες με συνέπεια τη μεταβολή της ταχύτητάς τους.

Στα πετρώματα οι μέθοδοι που αξιοποιούν την παρουσία του ήχου, καταγράφουν υπερήχους. Έχοντας ως μέσο διάδοσης το πέτρωμα, το κύμα εξαρτάται από την πυκνότητα του πετρώματος και τις ελαστικές του ιδιότητες.

Εφόσον το ηχητικό κύμα έχει την ανακλαστική ιδιότητα οι ασυνέχειες της δομής του πετρώματος θα το επηρεάζουν. Έτσι θα υπάρχει διαφορά ταχύτητας ανάμεσα σε δυο καταστάσεις του πετρώματος, αρρήκτη - ρωγματωμένη.

Στα περισσότερα πετρώματα υπάρχουν δομικά χαρακτηριστικά, ( π.χ. τεκτονικά, γεωλογικά, κ.α.), σε μια ευρύτερη κλίμακα από ότι στην κλίμακα των εργαστηριακών δοκιμών, και αυτά τα χαρακτηριστικά συχνά, έχουν σημαντική επίδραση στη μηχανική συμπεριφορά ολόκληρης της μάζας του πετρώματος. Σε ακραία μορφή, η αντοχή του πετρώματος προσδιορίζεται εξ ολοκλήρου από τις ιδιότητες των ασυνεχειών, με τα συμπαγή τεμάχια που ορίζονται από αυτές να συμπεριφέρονται σαν αυτοτελή στοιχεία. Αυτή η κατάσταση οδηγεί στη διάκριση ανάμεσα στη συμπεριφορά του "πετρώματος" και της "μάζας του πετρώματος" (Jaeger and Cook 1979).

Εάν το πέτρωμα οριστεί ως σύνολο διαφορετικών ορυκτών δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελαστικό μέσο. Με κάποιες παραδοχές τα ορυκτά, (ως δομικές μονάδες των πετρωμάτων, ίδια σύσταση, κα.), μπορούν να χαρακτηριστούν ως ισότροπα ελαστικά μέσα διάδοσης των ηχητικών κυμάτων. Τα ορυκτά όμως δεν βρίσκονται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση στο πέτρωμα, αλλοιώνονται, προσβάλλονται χημικά, ρηγματώνονται, δημιουργείται πορώδες, έτσι η θεώρηση του πετρώματος ως σύνολο διαφορετικών ελαστικών μέσων (ορυκτών) δεν είναι

## 4.2 Ακουστική Εκπομπή Πετρωμάτων

### 4.2.1 Εισαγωγή – Θεωρία

Στα ακουστικά φαινόμενα, που αφορούν στον άνθρωπο, συνήθως το συχνοτικό φάσμα διαιρείται σε τρεις διαδοχικές περιοχές. Διαμήκη κύματα με συχνότητες κάτω των 16 Hz και μέχρι τα 0,1 Hz αναφέρονται ως *υπόηχοι* (infrasonics). Διαμήκη κύματα με συχνότητες ανάμεσα στα 16 Hz και 16.000 Hz αποτελούν το διάστημα των ακουστών συχνοτήτων για το ανθρώπινο αυτί και αναφέρονται ως *ήχοι* (sounds). Διαμήκη κύματα με συχνότητες πάνω από 16.000 Hz και μέχρι το 1.000.000 Hz (1 Mhz), αναφέρονται ως *υπέρηχοι* (ultrasonics), βλέπε σχήμα 4.

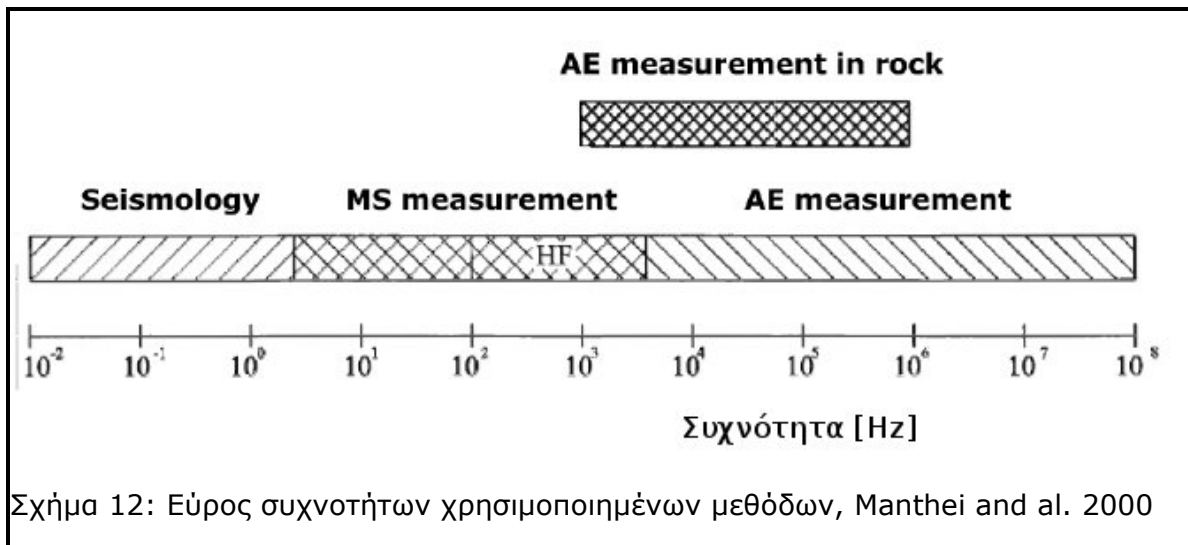
Οι ηχητικές μέθοδοι στα πετρώματα αξιοποιούν την εκπομπή υπερήχων. Πότε εκπέμπει ένα πέτρωμα υπέρηχο και τον οποίο λαμβάνουμε ως Ακουστική Εκπομπή, ορίζεται από την ISRM ως εξής :

**Ακουστική Εκπομπή** (Acoustic Emission, **AE**) χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό κάποιου υλικού.

Στην εξεταζόμενη περίπτωση, το υλικό είναι πέτρωμα, ως τοπικές πηγές θεωρούμε τις ολισθήσεις μεταξύ των κόκκων, τις υπάρχουσες και αναπτυσσόμενες ρωγμές με γενεσιουργό

αιτία για την απελευθέρωση ενέργειας την υποβολή του πετρώματος σε ένταση.

Οι συχνότητες στις οποίες ελέγχονται είναι από 15kHz έως μερικά MHz (υπερήχοι).



Είναι αποδεκτό ότι κατά τη φόρτιση επέρχεται σπάσιμο των δεσμών, δημιουργία νέων επιφανειών από την επέκταση υπάρχοντων μικρο-ρωγμών ή δημιουργία νέων, έως ότου η διάδοση τους στο πέτρωμα να οδηγήσει σε αποσάθρωση και θραύση.

Μια μικρο-ρωγμή θα αναπτυχθεί όταν η ενέργεια που απελευθερώνεται από το σπάσιμο των δεσμών κατά μήκος της θα ισούται με το καθαρό ποσοστό μείωσης της ενέργειας φόρτισης.

Όταν το πέτρωμα βρίσκεται υπό ένταση και οι υπάρχουσες ασυνέχειες εντός του δρουν σε συγκεντρωτές τάσεων, κατά τη παραμόρφωση η συγκεντρωμένη εκεί ενέργεια αλλάζει μορφές. Κάποιο μέρος της καταναλώνεται για τη δημιουργία νέων ασυνεχειών, μετατρέπεται σε θερμότητα γύρω από τις ασυνέχειες, ή μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια. Η αναπτυσσόμενη ασυνέχεια απορροφά μέρος της κινητικής ενέργειας για να καλύψει τις ενεργειακές της ανάγκες.

Η Ακουστική Εκπομπή (AE) σε συμπαγή σώματα είναι αποτέλεσμα τοπικών παραμορφώσεων που εκδηλώνονται σε στιγμιαίο χρόνο ικανές να παράξουν ηχητικό σήμα.

Η Ακουστική Εκπομπή από πέτρωμα που φορτίζεται κοντά στο σημείο αντοχής μπορεί να γίνει αντιληπτή με την ακοή από τον άνθρωπο, όπως σε γρανίτες, αλλά με τη βοήθεια ενισχυτών το πεδίο συχνοτήτων της εκπομπής είναι ευρύτερο. Το γενικότερο πεδίο μελέτης έγκειται στην "μικροσεισμική δραστηριότητα" των πετρωμάτων.

Επίσης, πειραματικές δοκιμές έχουν δείξει την ύπαρξη και εκπομπή *ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας* (EMR) από πετρώματα που βρίσκονται υπό φόρτιση. Στην προσπάθεια εξήγησης αυτής της καταγραφόμενης ακτινοβολίας έχουν προταθεί μηχανισμοί όπως *εκπομπή ηλεκτρονίων* κατά το σχισμό των κρυστάλλων, η *σχετική μετατόπιση* ηλεκτρισμένων/ιονισμένων (polarized) μικρορωγμών, η *κίνηση ηλεκτρικών φορτίων*, το *πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο*, *ατομικές ή ιονικές ταλαντώσεις* στην επιφάνεια της μικρορωγμής και το φαινόμενο ημιαγωγού.

#### 4.2.2 Μελέτες Ακουστικής Εκπομπής.

Αυτή η εκπομπή υπερήχων από το πέτρωμα έχει ερευνηθεί κατά πόσο μπορεί να λειτουργήσει σαν προπομπός για την ανίχνευση πιθανής αστοχίας σε πρακτικές εφαρμογές είτε σαν ένα επιπλέον μέσο στη μελέτη των θεμελιωδών μηχανισμών της μηχανικής συμπεριφοράς πετρωμάτων.

Η παλαιότερη και πρώτη εργασία πάνω στο αντικείμενο έγινε από τον F. Kishinoue το 1933 στο Ινστιτούτο Σεισμικών Ερευνών του Τόκιο. Αφορούσε την ύπαρξη δυναμικών φαινομένων φόρτισης σε δοκίμια ξύλου κάτω από flexural φόρτιση. Ο Kishinoue τοποθέτησε τη βελόνα φωνογράφου στην πλευρά που βρισκόταν υπό φόρτιση καθώς επέβαλε το ξύλο σε κάμψη.

Πρώιμες μελέτες επίσης έγιναν στη Γερμανία από τον F. Förster, 1936. Αντικείμενο υπήρξαν οι εκπομπές Ακουστικής Εκπομπής λόγω μαρτενσιτικού μετασχηματισμού σε σιδηρο-νικελιούχο δοκίμιο.

Η μικροσεισμική μέθοδος ανακαλύφθηκε σχεδόν τυχαία από τον Obert [1938] (US Bureau of Mines) όταν διεξήγαγε πειράματα για τη συσχέτιση ταχύτητας σεισμικών κυμάτων με το φορτίο που επιβαλλόταν στους στύλους πετρώματος, σε μεταλλείο μολύβδου-ψευδαργύρου. Στις μετρήσεις του συχνά παρεμβάλλονταν σήματα που όλα έδειχναν ότι εκπέμπονταν από το στύλο. Τα επόμενα χρόνια οι Obert και Duvall έδειξαν σε εργαστηριακά και in situ πειράματα ότι η εμφάνιση τέτοιων σημάτων αυξανόταν με την αύξηση του φορτίου.

Τις δεκαετίες 1950 και 1960 άρχισε η ανάπτυξη μεθόδων ΑΕ σε μεταλλεία στον Καναδά, Ευρώπη, Νότιο Αφρική. Σκοπός ήταν η μελέτη της ευστάθειας του μεταλλείου και πιο συγκεκριμένα η πρόβλεψη εκτινάξεων βράχου, η ευστάθεια της οροφής και ο προσδιορισμός υψηλά φορτισμένων περιοχών.

Αξιοσημείωτη είναι η δουλειά του Cook [1963] που ανέπτυξε ένα σύστημα καταγραφής από έως και 8 γεώφωνα σε μαγνητική ταινία για χρονική περίοδο μιας συνεχόμενης ημέρας. Κατάφερε να προσδιορίσει με σημαντική ακρίβεια τη θέση της πηγής χωρίς ψηφιακά καταγραφικά.

Οι Iannacchione et al. (2000, 2005) αναφέρουν τη δυνατότητα εφαρμογής της ΑΕ για την επιτυχή πρόβλεψη επικείμενης αστοχίας σε υπόγεια λατομεία θαλάμων και στύλων ασβεστολίθου υπό υψηλές οριζόντιες τάσεις και σε υπόγεια ανθρακωρυχεία με μέθοδο εκμετάλλευσης τα επιμήκη μέτωπα. Οι Choudhury et al (2004) αναφέρουν την εφαρμογή της ΑΕ για την μελέτη της ευστάθειας προστατευτικού στύλου οροφής σε υπόγειο μεταλλείο χαλκού. Ο Mukhopadhyay (2001) συσχέτισε την ποιότητας της βραχομάζας με την εξασθένιση των ακουστικών κυμάτων κατά τη κρουστικοπεριστροφική διάτρηση σε μέτωπα υπόγειων στοών εξετάζοντας παράλληλα και την επίδραση της κοχλίωσης. Άλλες εφαρμογές της ΑΕ in situ έχουν αναφερθεί σε σήραγγες, σε πρανή, στη μελέτη της ζώνης διαταραχής στο υπόγειο εργαστήριο UCL του Καναδά, στη μελέτη της ρωγμάτωσης σε βαθιές γεωτρήσεις πετρελαίου και στη μέτρηση του φυσικού εντατικού πεδίου με το φαινόμενο Kaiser. [5]

Ξεκινώντας με τη πρωτοποριακή δουλειά των Obert και Duvall (1942, 1945), έχουν γίνει πολλές πειραματικές μελέτες που συσχετίζουν τον αριθμό των ακουστικών γεγονότων ανά μονάδα τάσης όταν το φορτίο τείνει αυξανόμενο προς τη μακροσκοπική τάση θραύσης. Αυτές οι διαπιστώσεις γίνονται σε φόρτιση μονοαξονική, τριαξονική καθώς και σε διάτμηση ή και κάμψη. Δεν είναι πάντα εύκολος ο προσδιορισμός ενός *κατωφλιού τάσης*, δηλαδή πότε θεωρούμε ότι ξεκινά η μικροαστοχία του πετρώματος και άρα η ακουστική εκπομπή που λαμβάνεται είναι απόρροια της. Ωστόσο, γίνεται πάντοτε αντιληπτή κατά τις ανώτερες τιμές φόρτισης. Ο Mogi (1967a, 1969) πρότεινε ότι σε ομοιογενή πετρώματα αυτό το στάδιο δεν εκδηλώνεται παρά μόνο πολύ κοντά στην μακροσκοπική τάση θραύσης, γενικά όμως εκδηλώνεται περίπου άνω του μισού της μακροσκοπικής τάσης θραύσης.

Η Ακουστική εκπομπή σε δοκιμές κυκλικής φόρτισης έχει επίσης ερευνηθεί εκτενώς (αρχή Goodman 1963 και έπειτα). Σε μερικές από αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται ότι αρχίζει από μεγαλύτερη τάση που επιτεύχθηκε στον προηγούμενο κύκλο, γεγονός γνωστό ως "*φαινόμενο Kaiser*". Ωστόσο στα πετρώματα το φαινόμενο δεν μπορεί να διακριθεί εύκολα, ειδικότερα σε υψηλές τάσεις κοντά στο όριο θραύσης (Lockner 1993a).

Μέχρι εδώ οι δοκιμές αφορούσαν τη καταμέτρηση των ακουστικών γεγονότων, χωρίς αναφορά στη φύση τους. Σχεδόν όλη η πρώιμη έρευνα επικεντρωνόταν μόνο σε αυτό και αυτό παραμένει μέχρι σήμερα το μοναδικό ζητούμενο. Ωστόσο, ένας αριθμός προσπαθειών έχουν γίνει για τον περαιτέρω χαρακτηρισμό της ακουστικής εκπομπής βάση πλάτους συχνοτήτων και της ενέργειας των ακουστικών παλμών. Πειραματικά αυτή η προσπάθεια είναι δύσκολη καθώς οι παρατηρήσεις επηρεάζονται από τα χαρακτηριστικά του εξοπλισμού καταγραφής, από τις ακουστικές ιδιότητες του δοκιμίου και από τη συσκευή φόρτισης.



Η χρήση επίπεδης επιφάνειας μορφοτροπέων και ευρύτερου ηχητικού φάσματος ενισχυτών έδειξε ότι η κυρίαρχη συχνότητα στην οποία εκπέμπονται τα γεγονότα βρίσκεται προς το τέλος του υπερηχητικού φάσματος (e.g. Suzuki et al. 1964), παρόλο που δεν είναι πάντοτε αυτή η περίπτωση (Chugh, Hardy and Stefanko 1972).

Ποσοτικές έρευνες έχουν γίνει γύρω από το πλάτος συχνότητας των ακουστικών γεγονότων, από τις οποίες μπορούμε να λάβουμε την κατανομή ενέργειας (Hardy Stefanko, Chugh 1972 κλπ). Διαφορετική προσέγγιση, ανάλογη με τη χρησιμοποιούμενη στη σεισμολογία, είναι η μελέτη του συνολικού μεγέθους του ενεργειακού περιεχομένου των ακουστικών γεγονότων ως συνάρτηση της σχετικής τους συχνότητας εμφάνισης.

Έτσι, έχει αποδειχθεί ότι είναι εφαρμόσιμη η συνήθης σχέση της σεισμολογίας σύμφωνα με την οποία η συχνότητα εμφάνισης ενός γεγονότος μειώνεται όσο το μέγεθος του αυξάνεται.

Ειδικότερα η σχέση Gutenberg – Richter για τη στατιστική σεισμολογία δίνεται από:

$$\log N(M) = a - bM$$

όπου

N είναι ο αριθμός σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο από το M, και a, b σταθερές.

Για γεγονότα ακουστικής εκπομπής το μέγεθος του γεγονότος συνήθως υποτίθεται ανάλογο με το μέγιστο πλάτος του διατμητικού κύματος που καταγράφεται από τον αισθητήρα και ο παραπάνω ενεργειακός νόμος φαίνεται ότι ισχύει και για ακουστικές εκπομπές σε ψαθυρά πετρώματα (Weeks, Lockner, Byerlee 1978, Meredith, Main, Jones 1990).

Σε μια περαιτέρω αναλογία με τη σεισμολογία, ο Mogi και ο Scholz επεσήμαναν την ομοιότητα μεταξύ μετασεισμικών ακολουθιών και της παρατηρούμενης ακουστικής εκπομπής που έπεται της αστοχίας σε εργαστηριακά δοκίμια (Scholz 1968b, Lockner 1993a).

Η σχέση μεταξύ ακουστικής δραστηριότητας και μικροαστοχίας έχει παρατηρηθεί άμεσα στον πάγο και στο γυαλί. Επίσης οι Hardy, Hardling 1972, έχουν δείξει ότι σε γρανίτη που υπόκειται σε σταθερή θλιπτική μονοαξονική τάση τα πιο σημαντικά ακουστικά γεγονότα σχετίζονται άμεσα με μικρά άλματα στην παραμόρφωση. Είναι πλέον αποδεκτό ότι η ακουστική εκπομπή είναι ένας ικανός δείκτης της ύπαρξης μικροαστοχιών σε δείγματα πετρωμάτων. Αυτή η συσχέτιση ενισχύεται από την παρατήρηση ότι η έναρξη της ακουστικής εκπομπής μπορεί να σχετισθεί με την έναρξη της παραμόρφωσης, η οποία με τη σειρά της αποδίδεται στην έναρξη του πολλαπλασιασμού των μικροαστοχιών.

Η ακουστική εκπομπή είναι επίσης χρονικά εξαρτημένη καθώς παρατηρείται να συνεχίζει σε μια δεδομένη τιμή φόρτισης ακόμη και όταν το φορτίο παραμένει σταθερό. Αυτό το φαινόμενο γίνεται καλύτερο κατανοητό σε πειράματα ερπυσμού σε θερμοκρασία δωματίου.

Εξίσου σημαντικό ρόλο παρουσιάζει η παρουσία νερού λόγω της διαβρωτικής επίδρασης στις επιφάνειες.

Διάφορες αναλύσεις των χαρακτηριστικών μεγεθών των σημάτων γίνονται επικεντρωμένες στην ενέργεια που μεταφέρει η κυματομορφή. Μεγέθη όπως το RMS (Root Mean Square, Volts), ανάλογο του μεγέθους της ενέργειας που απελευθερώνεται, και το ASL (Average Signal Level, dB) ανάλογο του "μέσου" διαρκώς μεταβαλλόμενου πλάτους της κυματομορφής. Και τα δυο αυτά μεγέθη συσχετίζονται με τη φόρτιση και δείχνουν αύξουσα συμπεριφορά μέχρι, περίπου, το 95% της φόρτισης οπότε και αυξάνονται απότομα έως τη θραύση. Ο συντελεστής κατανομής πλάτους b υποτίθεται ανάλογο με το μέγιστο πλάτος του διατμητικού κύματος που καταγράφεται από τον αισθητήρα. Θεωρώντας το διατμητικό κύμα ως ανάλογο του διατμητικού μέρους της τάσης που εφαρμόζεται, σε ψαθυρό υλικό, αναμένεται η εμφανής απόκριση του συντελεστή στο μηχανισμό της θραύσης να είναι λίγο πριν αυτή συμβεί.

Βάση του ορισμού ότι όσο μικραίνει η συχνότητα εμφάνισης ενός γεγονότος τόσο αυξάνεται το μέγεθος του, η καμπύλη συντελεστή πλάτους συχνότητων b – φόρτισης είναι αύξουσα έως κάποιο ποσοστό του μέγιστου φορτίου (~ 95%-96%) και ακολούθως φθίνει απότομα. Τούτο είναι εύλογο γιατί πλέον η ρωγμάτωση στο εσωτερικό του δοκιμίου έχει αναπτυχθεί και παράγει σήματα πλάτους συχνότητων στο εύρος των 100dB.

Η σχέση όπου εξάγεται ο συντελεστής  $b$  είναι η προαναφερθείσα :

$$\log_{10} N = a - b'A$$

όπου

$N$ , ο αριθμός γεγονότων AE σε συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων,

$A$ , το μέσο πλάτος συχνοτήτων του συγκεκριμένου εύρους,

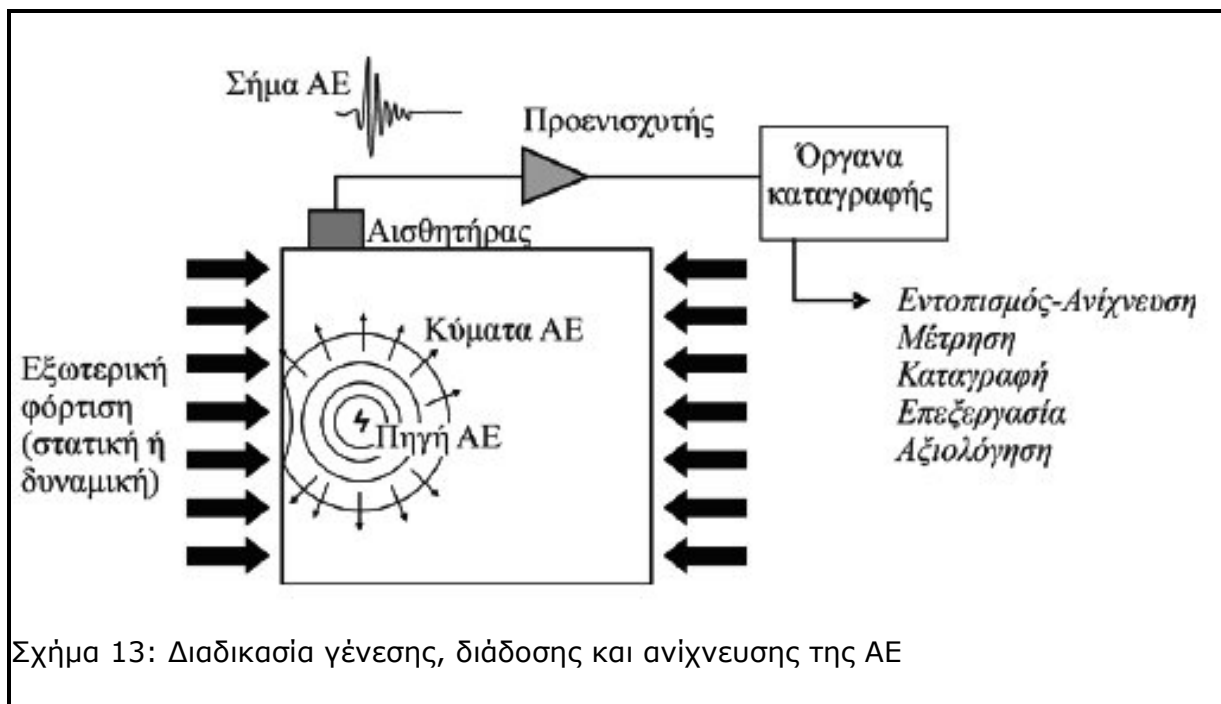
$a$ , σταθερά,

$b'$ , η κλίση της καμπύλης κατανομής πλάτους συχνοτήτων.

Οπότε, ο συντελεστής  $b$  υπολογίζεται ως :  $b = 20b'$ .

#### 4.2.3 Εργαστηριακή δοκιμή Ακουστικής Εκπομπής – Γενικά

Δοκίμιο πετρώματος υποβάλλεται σε φόρτιση και ανιχνεύονται, καταγράφονται τα κύματα Ακουστικής Εκπομπής και επεξεργάζονται.



Τα εκπεμπόμενα σήματα από την πηγή είναι συνήθως περίπλοκα και περιέχουν διάφορα είδη κυμάτων. Καθώς το κύμα διαδίδεται στο πέτρωμα και ανακλάται, μεταβάλλει τις ιδιότητες του, και εφόσον η λήψη μας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα, τα ανιχνεύσιμα σήματα θα είναι διαφορετικά από τα αρχικά εκπεμπόμενα.

Υπάρχουν δύο βασικά είδη σημάτων που λαμβάνονται για επεξεργασία :

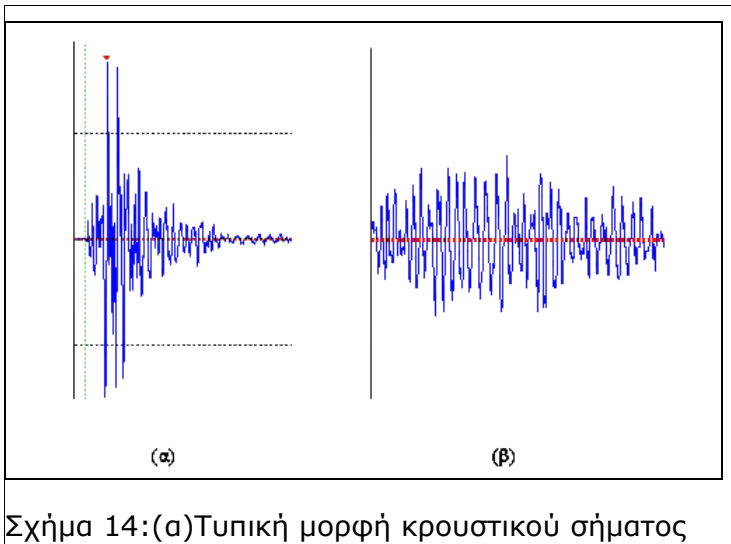
##### Συνεχή

Τα συνεχή θεωρούνται ως προερχόμενα από διαρροές πίεσεως, υδραυλικοί ήχοι και ονομάζονται ως μηχανικός θόρυβος. Τα σήματα συνεχούς μορφής χαρακτηρίζονται συνήθως από τη μέση τετραγωνική ρίζα του πλάτους  $U_{RMS}$  του καταγραφόμενου σήματος.

##### Κρουστικά

Τα κρουστικά κύματα θεωρούνται ότι προέρχονται από διακριτά γεγονότα. Πολλές πιθανές πηγές μπορούν να εκπέμψουν κρουστικά κύματα αλλά δεχόμαστε ότι προέρχονται κυρίως από την ανάπτυξη ρωγμών. Χαρακτηρίζονται από ταχύ χρόνο ανύψωσης στο μέγιστο του πλάτους σήματος και εκθετική απόσβεση.

Όταν ο ρυθμός εκπομπής σημάτων AE είναι μεγάλος τα δύο είδη επικαλύπτονται και σχηματίζονται σήματα συνεχούς μορφής. Για μια αρχική εξάλειψη του θορύβου, αλλά και τον χαρακτηρισμό ενός σήματος



ως κρουστικού χρειάζεται η λήψη ενός ορίου, κατωφλιού (threshold), μιας τιμής τάσεως άνω της οποίας θα λαμβάνονται τα σήματα ως κρουστικά. Ο ορισμός του κατωφλιού είναι καθαρά θέμα της επιθυμητής καταγραφής. Όταν ένα σήμα υπερβεί το κατώφλι σημειώνεται ένας "κτύπος" και καταγράφεται ως γεγονός ΑΕ.

μας

Σχήμα 14:(α)Τυπική μορφή κρουστικού σήματος  
(β)Τυπική μορφή συνεχούς σήματος ΑΕ

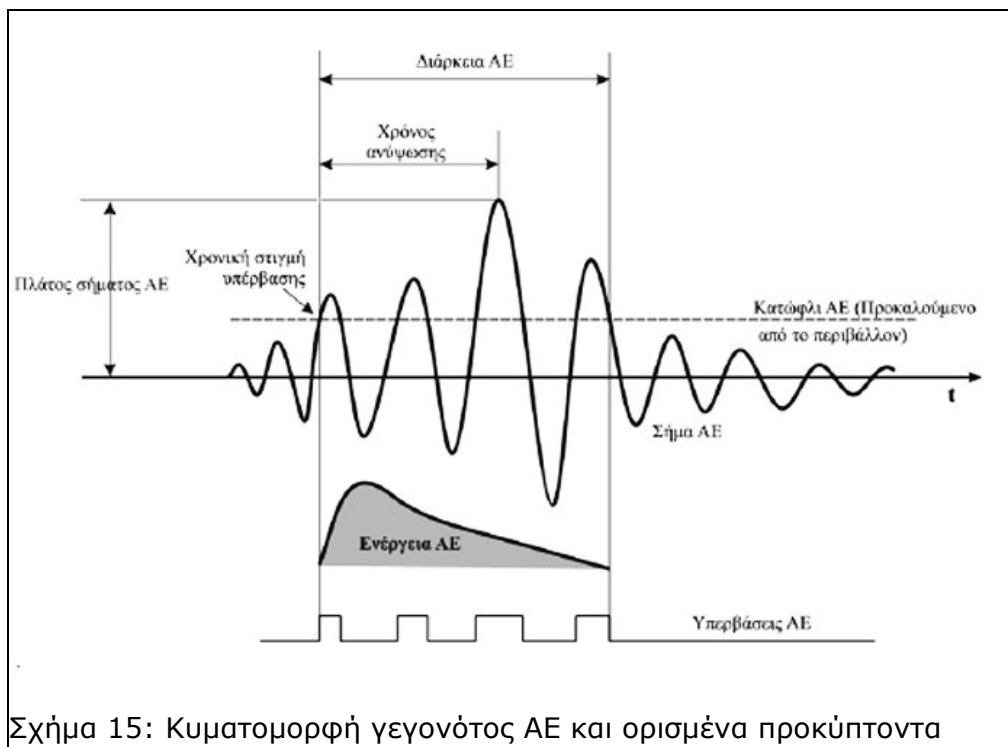
#### 4.2.4 Παράμετροι γεγονότων Ακουστικής Εκπομπής

- **Ακουστική Εκπομπή** (ΑΕ) [Acoustic Emission] Ελαστικά κύματα παραγόμενα από την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από πηγές εντός ενός υλικού
- **Ενεργοποίηση** (ΑΕ) [Activation] Η εκδήλωση ΑΕ λόγω εφαρμογής αιτίου (stimulus) όπως δύναμη, πίεση, θερμότητα κ.λ.π.
- **Δραστηριότητα** (ΑΕ) [Activity] Μέτρηση της ποσότητας εκπομπής της παραγόμενης ενέργειας, των γεγονότων.
- **Πλάτος** (ΑΕ) [Amplitude] Η μεγαλύτερη τιμή ηλεκτρικής τάσης στην κυματομορφή ΑΕ; συνήθως εκφρασμένη σε decibels.
- **Κατανομή Πλάτους** [Amplitude Distribution] Ψηφιακή αναπαράσταση του αριθμού των σημάτων ΑΕ σε συγκεκριμένο, ή και μεγαλύτερο, πλάτος, σχεδιασμένη ως λειτουργία του πλάτους.
- **Απόσβεση** [Attenuation] Απώλεια πλάτους με την απόσταση που διανύει το κύμα καθώς ταξιδεύει στην υπό δοκιμή δομή.
- **Εκρηκτική εκπομπή** [Burst emission] Ποιοτική περιγραφή του διακριτού σήματος που σχετίζεται με μεμονωμένη εκπομπή γεγονότος που συμβαίνει εντός του υλικού.
- **Κανάλι** (Channel) Ένας αισθητήρας ΑΕ και ο συναφής εξοπλισμός για διαβίβαση, τροποποίηση, εντοπισμό και μέτρηση των σημάτων που έρχονται από αυτόν.
- **Συνεχής εκπομπή** [Continuous emission] Ποιοτική περιγραφή του συνεχούς σήματος παραγόμενου από ταχέως εκδηλωνόμενο γεγονός ακουστικής εκπομπής.
- **Counts**, Το πόσες φορές το σήμα ΑΕ διασχίζει το όριο ανίχνευσης. Επίσης γνωστό ως "ringdown counts", "threshold crossing counts"
- **Ανίχνευση** (ΑΕ) Αναγνώριση της παρουσίας σήματος (πρακτικώς/τυπικώς επιτυγχάνεται όταν το σήμα διασχίζει το όριο ανίχνευσης).
- **Συμβάν** (Event) Τοπική αλλαγή εντός υλικού που δημιουργεί ακουστική εκπομπή.
- **Event Data Set**, Η συλλογή αριθμών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός γεγονότος, σύμφωνα με την επεξεργασία δεδομένων που αναγνωρίζει ότι ένα ξεχωριστό γεγονός μπορεί να παράγει περισσότερους από ένα χτύπους.

- **Περιγραφή γεγονότος (Event description)** Μια ψηφιακή (αριθμητική) περιγραφή ενός γεγονότος, που περιλαμβάνει μία ή περισσότερες περιγραφές και/ή πληροφορίες που εξάγονται από αυτές ή υπολογίζονται από αυτές.
- **Ενέργεια γεγονότος (Event Energy)** Η ολική ελαστική ενέργεια (στην κυματομορφή) που απελευθερώνεται από ένα γεγονός ακουστικής εκπομπής.
- **Φαινόμενο Felicity** (Το αντίστροφο του φαινομένου Kaiser). Η παρουσία ΑΕ σε επίπεδα φόρτισης κάτω από την προηγούμενη μέγιστη.
- **Συχνότητα (Frequency)** Για ένα ταλαντευόμενο σήμα ή διεργασία, ο αριθμός των κύκλων που συμβαίνουν στη μονάδα του χρόνου.
- **Guard Sensors** Αισθητήρες των οποίων η κύρια λειτουργία είναι η εξάλειψη εξωτερικού θορύβου βασιζόμενοι στις διαφορές χρόνου άφιξης.
- **Χτύπος (Hit)** Η συλλογή αριθμών που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ενός γεγονότος, σύμφωνα με την επεξεργασία δεδομένων που αναγνωρίζει ότι ένα ξεχωριστό γεγονός μπορεί να παράγει περισσότερους από ένα χτύπους.
- **Hit Data Set** Η ανίχνευση/διαδικασία εντοπισμού και μέτρησης ενός σήματος ΑΕ σε ένα κανάλι
- **Ένταση (Intensity)** Η μέτρηση του μεγέθους των ανιχνευθέντων σημάτων εκπομπής, όπως το μέσο πλάτος, μέση ενέργεια ΑΕ ή μέσος όρος counts
- **Φαινόμενο Kaiser** Η απουσία ανιχνεύσιμης ακουστικής εκπομπής σε ένα σταθερό επίπεδο ευαισθησίας, έως ότου υπερβούμε τα προηγούμενα εφαρμοσθέντα επίπεδα φόρτισης.
- **kHz\_Kilohertz**, μονάδα μέτρησης (SI) της συχνότητας, 1000 κύκλοι ανά δευτερόλεπτο
- **Τοποθεσία/Εντοπισμός \*** (Location) Αναφέρεται στη χρήση πολλαπλών αισθητήρων ΑΕ για τον προσδιορισμό των σχετικών θέσεων των πηγών ακουστικής εκπομπής.
- **Θόρυβος (Noise)** Μη σχετικές ενδείξεις; σήματα παραγόμενα από αιτίες διαφορετικές από αυτές τις ΑΕ, ή από πηγές ΑΕ που δεν έχουν σχέση με το σκοπό της δοκιμής.
- **Μη καταστρεπτική (nondestructive)** Η ανάπτυξη και εφαρμογή τεχνικών μεθόδων για την εξέταση εξαρτημάτων χωρίς την απόρριψη τους ύστερα.
- **Δοκιμή (NDT)**, Δοκιμές οι οποίες δεν βλάπτουν τη μελλοντική χρησιμότητα και λειτουργικότητα προκειμένου να ανιχνεύσουν, εντοπίσουν, μετρήσουν και εκτιμήσουν ατέλειες; για την αξιολόγηση της ακεραιότητας, ιδιοτήτων και σύνθεσης; και για τη μέτρηση γεωμετρικών χαρακτηριστικών.
- **Parametric Inputs** Περιβαλλοντικές μεταβλητές (π.χ. φορτίο, πίεση, θερμοκρασία) που μπορούν να μετρηθούν και αποθηκευτούν ως μέρος της περιγραφής των σημάτων ΑΕ.
- **Χρόνος Ανύψωσης (Risetime)** Ο χρόνος στον οποίο ένα σήμα ΑΕ φτάνει στο μέγιστο του, αφότου διασχίσει για πρώτη φορά το όριο ανίχνευσης.
- **Αισθητήρας** Συσκευή που περιέχει ένα μορφοτροπικό στοιχείο, που μετατρέπει τα κινούμενα κύματα ΑΕ σε ηλεκτρική τάση
- **Σήμα (AE)** Το ηλεκτρικό σήμα που έρχεται από το εκπεμπόμενο στοιχείο και διέρχεται των μορφοτροπέων (ενισχυτές, φίλτρα συχνότητας)
- **Περιγραφή Σήματος (Signal Description)** Το αποτέλεσμα της διαδικασίας: μια ψηφιακή (αριθμητική) περιγραφή του σήματος ΑΕ και/ή του περιβαλλοντικού του πλαισίου.

- **Χαρακτηριστικά Σήματος** [Signal Features] Μετρήσιμα χαρακτηριστικά του σήματος ΑΕ, όπως το πλάτος, ενέργεια σήματος ΑΕ, διάρκεια, counts και χρόνος ανύψωσης.
- **Ισχύς Σήματος** (Signal Strength) Η ισχύς της απόλυτης τιμής ενός ανιχνεύσιμου σήματος ΑΕ. Επίσης γνωστό ως "σχετική ενέργεια" (relative energy), "MARSE" και "ισχύς σήματος".
- **Πηγή** Η φυσική προέλευση ενός ή περισσοτέρων γεγονότων ΑΕ.
- **Ενέργεια Πηγής** (Source energy) Η ολική ενέργεια (όλων των μορφών) που διαχέεται από τις διεργασίες της πηγής.
- **(Κύρια) Ζώνη** (Primary Zone) Η περιοχή που περιβάλλει έναν αισθητήρα, από τον οποίο μπορεί να ανιχνευθεί ΑΕ, και από όπου η ΑΕ θα χτυπήσει τον αισθητήρα πριν χτυπήσει σε οποιοδήποτε άλλο αισθητήρα.

Μετρώντας αλλαγές σε αυτές τις παραμέτρους μπορούμε να εξαγάγουμε συμπεράσματα σχετικά με το μηχανισμό γένεσης των σημάτων ΑΕ. Όμως αυτά τα συμπεράσματα δεν μπορούν να θεωρηθούν ασφαλή καθότι η κυματομορφή των σημάτων επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων όπως η φύση του υλικού, η διαδρομή που ακολουθεί μέχρι την ανίχνευση του, τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα και το καταγραφικό σύστημα. Στο Σχήμα 15, παριστάνεται μια κυματομορφή ΑΕ και μερικές από τις σημαντικότερες παραμέτρους αυτής.



Σχήμα 15: Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα προκύπτοντα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας

#### 4.2.5 Παράγοντες Επιρροής Λήψης Σήματος της ΑΕ

Εκτός των ιδιοτήτων του υλικού που επηρεάζουν τη μορφή του λαμβανομένου σήματος, και άλλοι παράγοντες επιδρούν στη λήψη των σημάτων.

##### Εξασθένιση

Αναφέρεται στη μείωση του πλάτους του κύματος κατά τη διάδοσή του. Σχετίζεται με τη γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο (το πλάτος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης), την απόσβεση του υλικού διάδοσης, τυχόν απώλειες ενέργειας. Σε δοκίμια εργαστηριακών δοκιμών η εξασθένιση λόγω γεωμετρικής εξάπλωσης και απόσβεσης περιορίζεται σημαντικά από τις μικρές διαστάσεις του δοκιμίου.

## \_Θόρυβος

Οι πηγές του θορύβου εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες, ηλεκτρικές και μηχανικές. Σημαντική πηγή θορύβου στις μελέτες ΑΕ είναι οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference EMI), που δημιουργούνται στον ηλεκτρονικό εξοπλισμό της ΑΕ λόγω ακτινοβολίας ή ηλεκτρικής επαγωγής. Πηγές EMI είναι οι μετασχηματιστές, ισχυρές λάμπες, ηλεκτρικές μηχανές κλπ. Οι πηγές μηχανικού θορύβου προκαλούν κρουστικού τύπου σήματα. Κάθε κίνηση ενός μηχανικού μέρους σε επαφή με το δοκίμιο αποτελεί μία πιθανή πηγή μηχανικού θορύβου. Ο μηχανικός θόρυβος ελαττώνεται σημαντικά σε συχνότητες άνω των 100 kHz. Όλα τα εξαρτήματα σε ένα σύστημα παρακολούθησης ΑΕ θωρακίζονται έναντι ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.

## 4.2.6 Εξοπλισμός Παρακολούθησης ΑΕ

### \_Αισθητήρας

Ένας αισθητήρας ακουστικής εκπομπής μετατρέπει την μηχανική ενέργεια που έχει ένα ελαστικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, καταλληλότερα περιγράφεται από τη λέξη μορφοτροπέας. Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται πιο συχνά σε εφαρμογές ΑΕ είναι ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας. Αυτή η επιλογή υπαγορεύτηκε από την ευκολία με την οποία κατασκευάζεται, την εγγενή του υψηλή ευαισθησία, και από την τραχύτητα η οποία επιτρέπει την χρήση του σε βιομηχανικές εφαρμογές.

Το ενεργό στοιχείο ενός πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα είναι ένας λεπτός δίσκος πιεζοηλεκτρικού υλικού (υλικό που μπορεί να μετατρέψει τη μηχανική παραμόρφωση σε ηλεκτρική τάση). Ο δίσκος έχει μεταλλική επικάλυψη και από τις δύο μεριές για ηλεκτρική διεπαφή, κατόπι εγκυβωτίζεται σε μεταλλικό κύλινδρο που του παρέχει προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Τα πιεζοηλεκτρικά κεραμικά υλικά που χρησιμοποιούνται στους αισθητήρες ΑΕ είναι φτιαγμένα από μικρούς κρυστάλλους τιτανίου (titanates) και zirconates, οι οποίοι αναμειγνύονται με άλλα υλικά, μορφοποιούνται στο επιθυμητό σχήμα, και θερμαίνονται σε κάμνο. Το κεραμικό υλικό μετατρέπεται τότε σε πιεζοηλεκτρικό λόγω πολικότητας, η οποία διαδικασία είναι η θέρμανση του υλικού πάνω από τη θερμοκρασία Curie του ενώ παραμένει σε ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο.

Για να εκμεταλλευτούμε την πολύ υψηλή ευαισθησία του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα, πρέπει να εφάπτεται στο υπό παρατήρηση υλικό με τέτοιο τρόπο ώστε η ακουστική ενέργεια να περνά στον αισθητήρα με την ελάχιστη απώλεια στην διεπιφάνεια αισθητήρα - υλικού. Η απαιτούμενη μηχανική επαφή επιτυγχάνεται σε επίπεδες επιφάνειες με μηχανική σύσφιξη χρησιμοποιώντας λεπτές μεμβράνες λιπαντικού, ελαιώδους ή εποξικού συγκολλητικού ανάμεσα στον αισθητήρα και στο υλικό. Γενικά, το πρόβλημα της ένωσης τους είναι πολύ πιο σοβαρό στην παρατήρηση διατμητικών κυμάτων επειδή το συγκολλητικό υλικό πρέπει να είναι ικανοποιητικά ιξώδες ώστε να στηρίξει την διατμητική κίνηση.

Αν και φαίνεται ότι ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας κατάλληλα ενωμένος με το δοκίμιο είναι ο ιδανικός αισθητήρας για την παρατήρηση ακουστικής εκπομπής, υπάρχουν μερικοί σημαντικοί περιορισμοί. Η θεωρία του πιεζοηλεκτρισμού συσχετίζει με ακρίβεια την τάση εξόδου ενός πιεζοηλεκτρικού υλικού με τη τάση στην ελεύθερη επιφάνεια του, όμως ανακύπτουν επιπλοκές όταν ο αισθητήρας συνδέεται με ένα αληθινό υλικό. Το ισχυρά συνδεδεμένο υλικό αλλάζει τις συνοριακές μηχανικές συνθήκες που υπήρχαν στην μέχρι πρότινος ελεύθερη επιφάνεια του αισθητήρα. Ως εκ τούτου η παραμόρφωση και η τάση στον αισθητήρα είναι διαφορετικές από τις τιμές που δίνει ο αισθητήρας απουσία υλικού.

Η πολύ περίπλοκη αλληλεπίδραση ανάμεσα στον αισθητήρα και σε αυτό που προσπαθεί να μετρήσει, καθιστά δύσκολη τη συσχέτιση της τάσης εξόδου με ότι ακριβώς συμβαίνει μέσα στο δείγμα. Εάν το ακουστικό κύμα δεν είναι επίπεδο κύμα (plane wave), περαιτέρω περιπλοκές προκύπτουν λόγω της διαφοράς φάσης στην επιφάνεια του αισθητήρα. Ενώ αυτά τα προβλήματα του πιεζοηλεκτρικού αισθητήρα γίνονται ενοχλητικά στη βασική έρευνα που στόχο έχει την αποκάλυψη της φύσης των πηγών ΑΕ, ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας έχει αποδείξει στο χρόνο ότι είναι επαρκέστατος στις περισσότερες μη καταστροφικές δοκιμές.[5,6]

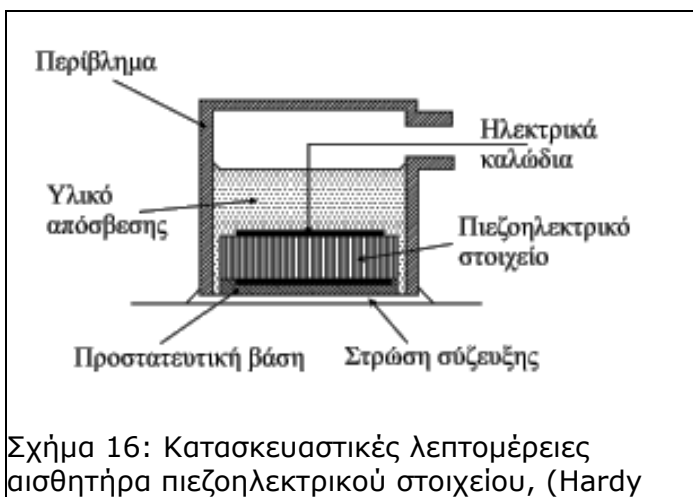


Εικόνα 7: Αισθητήρας ΑΕ

Οι αισθητήρες που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές είναι micro100s. Ανήκουν στην κατηγορία 'γενικής χρήσης' με περίβλημα από ανοξείδωτο χάλυβα και κεραμική επιφάνεια. Η συχνотική τους απόκριση είναι 200 – 1000 kHz.[8]

#### Ευαισθησία

Η ευαισθησία ενός αισθητήρα εξάγεται βάση της απόκρισης του σε σχέση με τη συχνότητα (τάση εξόδου – συχνότητα). Πόσες ανιχνεύσεις είναι ικανός να πραγματοποιεί στο εύρος συχνοτήτων του. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα ηλεκτρικά τους κυκλώματα, σε απλούς και σε διαφορικούς.



Σχήμα 16: Κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, (Hardy 2003).

Ένας τυπικός αισθητήρας ΑΕ πιεζοηλεκτρικού στοιχείου μετατρέπει ελαστική μετατόπιση 1pm (picometer) σε ηλεκτρικό σήμα 1μV. [6]

Στα σύγχρονα συστήματα παρακολούθησης ΑΕ το ελάχιστο σήμα που μπορεί να ανιχνευτεί (πάνω από τον ηλεκτρονικό θόρυβο), είναι της τάξης των 4 μV στην έξοδο ενός τυπικού αισθητήρα/μορφοτροπέα. Το πλάτος ενός σήματος ΑΕ εκφράζεται συνήθως σε dB, όπου 1 μV αντιστοιχεί σε 0 dB και 100 mV σε 100 dB.

Ο απλός διαθέτει ένα κρύσταλλο και είναι πιο ευάλωτος στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Ο διαφορικός περιέχει δύο κρυστάλλους αντίθετης πολικότητας άρα από ανιχνευόμενο σήμα ΑΕ παράγει δύο ηλεκτρικά σήματα αντίθετης πολικότητας. Κατόπιν ενισχύεται η διαφορά μεταξύ των δύο σημάτων στο διαφορικό προενισχυτή. Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές δίνουν σήματα ίδιας πολικότητας και εξουδετερώνονται στον προενισχυτή.

## Σύζευξη – Μεταφορά σήματος

Όταν ένας αισθητήρας έχει απλώς τοποθετηθεί στην επιφάνεια ενός δείγματος που εκπέμπει ακουστικό κύμα διαπιστώνεται ότι ο αισθητήρας παράγει πολύ ασθενές σήμα. Εάν μια λεπτή μεμβράνη ρευστού τοποθετηθεί ανάμεσα στον αισθητήρα και στην επιφάνεια, ένα πολύ μεγαλύτερο σήμα λαμβάνεται. Η χρήση κάποιου είδους ενδιάμεσου συγκολλητικού είναι σχεδόν απαραίτητη για τον εντοπισμό χαμηλού επιπέδου ακουστικών σημάτων. Η εξήγηση για αυτό το φαινόμενο μπορεί να δοθεί εάν δούμε το ακουστικό κύμα ως κύμα πίεσης που μεταδίδεται διαμέσου δυο επιφανειών σε επαφή.

Σε μικροσκοπική κλίμακα οι επιφάνειες του αισθητήρα και του υλικού είναι αρκετά τραχειές, μόνο μερικά σημεία στην πραγματικότητα ακουμπούν το ένα το άλλο, όταν είναι σε επαφή. Η τάση είναι δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας και η πραγματική περιοχή που μεταδίδει την δύναμη είναι πολύ μικρή. Εάν τα μικροσκοπικά κενά πληρώνονται με ρευστό, η πίεση θα κατανομηθεί και διανεμηθεί ομοιόμορφα μεταξύ των επιφανειών. Ειδικότερα τα διατμητικά κύματα με διεύθυνση διάδοσης κάθετη στην επιφάνεια, αδυνατούν να μεταδοθούν ικανοποιητικά. Σε αυτή την περίπτωση γεμίζοντας τα κενά με υγρό χαμηλού ιξώδους δεν θα προσφέρει βοήθεια, μιας και τα υγρά δεν μεταφέρουν διατμητικά κύματα. Ωστόσο, ένα υγρό υψηλού ιξώδους ή στερεό θα βοηθήσει στη μετάδοση του παράλληλου στις επιφάνειες κύματος. Ο σκοπός του ενδιάμεσου είναι να διασφαλίζει καλή επαφή μεταξύ δυο επιφανειών σε μικροσκοπικό επίπεδο.

Το ενδιάμεσο μπορεί είναι οποιοδήποτε υλικό που βοηθά τη διάδοση ακουστικών κυμάτων ανάμεσα σε δυο επιφάνειες, ενώ ο δεσμός (bond) κρατά σε επαφή τον αισθητήρα με την επιφάνεια. Το νερό είναι ενδιάμεσο και οι εποξικές ρητίνες είναι δεσμοί.

Πολλά προβλήματα έχουν ανακύψει από τη λάθος χρήση ενδιάμεσου. Εάν ένα άκαμπτος δεσμός χρησιμοποιηθεί για να εφάπτεται ο αισθητήρας σε ένα δοκίμιο που παραμορφώνεται ελαστικά κατά τη διάρκεια της δοκιμής, το σύννηθες αποτέλεσμα είναι σπασμένος δεσμός και φτωχή ή καθόλου ευαισθησία στα ακουστικά κύματα. Ομοίως, σε ένα πείραμα όπου η θερμοκρασία αλλάζει αισθητά, η χρήση ενός άκαμπτου ενδιάμεσου υλικού μπορεί να οδηγήσει σε σπασμένο ενδιάμεσο λόγω διαφορεικής θερμικής διαστολής ανάμεσα στον αισθητήρα και στο δείγμα.

Τα ενδιάμεσα, τότε πρέπει να διαλέγονται με μεγάλη προσοχή και η κύρια έμφαση πρέπει να δίνεται στη συμβατότητα των υλικών στις εκάστοτε πειραματικές συνθήκες. Συνήθως εάν το ενδιάμεσο κρατά τον αισθητήρα, θα είναι επαρκές μεταδοτικό. Για θλιπτικό κύμα οποιοδήποτε ρευστό θα δρά ως ενδιάμεσο. Ο πιο πρακτικός κανόνας είναι η χρησιμοποίηση ως ενδιάμεσου μιας λεπτής επιφάνειας οποιουδήποτε ιξώδους ρευστού που υγραίνει και τις δύο επιφάνειες. Για να κρατηθεί στην επιφάνεια ο αισθητήρας ασκείται πίεση από μαγνήτες, λάστιχα, ταινία, κτλ. Ιδανικό είναι να χρησιμοποιηθεί όσο το δυνατόν λεπτότερη επιφάνεια. Εάν χρησιμοποιείται άκαμπτο ενδιάμεσο πρέπει να μην υπάρχει διαφορεική διαστολή ανάμεσα στις δύο επιφάνειες.[5]

## Άλλοι τύποι αισθητήρων

Έκτος των αισθητήρων πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (PZT) και άλλοι τύποι βρίσκονται υπό ανάπτυξη. Αισθητήρες laser έχουν χρησιμοποιηθεί, προσφέροντας μέτρηση της AE χωρίς επαφή του δοκιμίου αλλά είναι λιγότερο ευαίσθητοι από τους PZT, και γενικά χρησιμοποιούνται σε φαινόμενα AE μεγάλου πλάτους. Οι αισθητήρες PZT έχουν περιορισμούς σε αυξημένες θερμοκρασίες λόγω ότι το στοιχείο PZT έχει σημείο Curie.

Αισθητήρες AE laser χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κεραμικών, στον έλεγχο ρωγμών κατά την θέρμανση στους φούρνους. Επίσης άλλος τύπος που έχει χρησιμοποιηθεί πειραματικά είναι αισθητήρας οπτικών ινών, με πλεονεκτήματα τη μακροχρόνια χρήση του, τη λειτουργία του σε διαβρωτικά περιβάλλοντα καθώς και τον μη επηρεασμό του από ηλεκτρομαγνητικούς θορύβους. [6]

## Προενισχυτής

Όπως δηλώνει και το όνομα του, αναλαμβάνει να ενισχύσει το ανιχνευόμενο σήμα σε υψηλότερη τάση ώστε να είναι κατάλληλο για περαιτέρω επεξεργασία. Για τη μείωση παρεμβολών EMI συνίσταται να τοποθετείται κοντά ή μέσα στο περίβλημα του αισθητήρα. Παράγουν και αυτοί θόρυβο όπως και ο αισθητήρας, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση φίλτρου για ελαχιστοποίηση των παρεμβολών. Για την ενίσχυση του σήματος χρησιμοποιήθηκαν προ-ενισχυτές τύπου PAC 2/4/6, με δυνατότητα ενίσχυσης της έντασης του σήματος AE κατά 20/40/60 dB  $\pm$  0.5% dB. Η επιλογή ενίσχυσης του εισερχόμενου σήματος γίνεται μέσω διακόπτη (Gain Select). Όπως έχει προαναφερθεί το πλάτος του σήματος AE που καταγράφεται στο σύστημα υπολογίζεται λογαριθμικά σύμφωνα με τη σχέση :



$$\text{dB} = 20 \log (V_{\text{max}}/1\mu\text{volt}) - (\text{Ενίσχυση προ-ενισχυτή σε dB})$$

Όταν η ενίσχυση του σήματος AE ρυθμίζεται στα 20 dB τότε το συχνοτικό εύρος λειτουργίας κυμαίνεται από 10 kHz έως 2.5 MHz, όταν ρυθμίζεται στα 40 dB (συνήθης επιλογή) κυμαίνεται από 10 kHz - 2.0 MHz και όταν ρυθμίζεται στα 60 dB κυμαίνεται στα 10 kHz - 900 kHz. Το ρεύμα λειτουργίας είναι 30 mA και η σύνθετη αντίσταση 10 kΩ. Αυτός ο τύπος προ-ενισχυτών συνδέεται με αισθητήρες μονής εξόδου (απλοί αισθητήρες, single-ended) ή με διαφορικούς αισθητήρες (differential). Η σύνδεση φίλτρου δίδει τη δυνατότητα επιλογής του διερχόμενου σήματος (φιλτράρισμα) καθώς και ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων θορύβων. Γενικά υπάρχουν φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass Filter), διαχωρισμού υψηλών συχνοτήτων (Low Pass) και ανοιχτού τύπου (Band Pass). [7]

### \_Μονάδα Επεξεργασίας

Το ενισχυμένο, φιλτραρισμένο σήμα οδηγείται για επεξεργασία σε ηλεκτρονικό σύστημα AE. Τα συστήματα αυτά βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος ικανούς για καταγραφή σε πραγματικό χρόνο των παραμέτρων του σήματος. Τα κανάλια AE είναι συγχρονισμένα, ώστε να είναι δυνατή η μέτρηση της διαφοράς του χρόνου άφιξης του σήματος σε δύο ή περισσότερους αισθητήρες και ο υπολογισμός της θέσης της πηγής. Το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές είναι τύπου PCI 8, οχτώ καναλιών της εταιρίας PAC, και η επεξεργασία έγινε μέσω του σχετικού λογισμικού AE-Win και NOESIS 4.0 Light για H/Y.

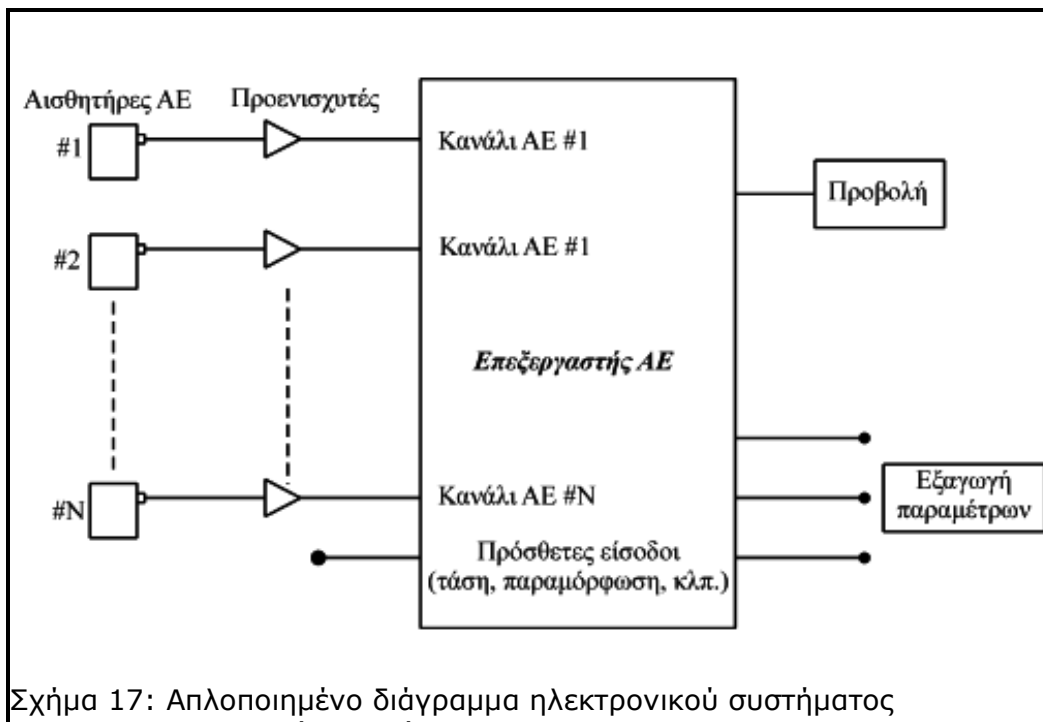
### \_Σύστημα PCI-8

Το σύστημα παρακολούθησης AE λειτουργεί βάση του προγράμματος PAC AE Win Windows Software και ενσωματώνει μία κάρτα οχτώ καναλιών PCI - 8 της ομώνυμης εταιρίας PAC. Η κάρτα αυτή αποτελεί ένα πλήρες σύστημα AE ("AE System on a Board") και οι προδιαγραφές της είναι συνοπτικά οι ακόλουθες:

- Ψηφιακή κάρτα (Digital Signal Processing) υψηλής απόδοσης.
- Σύνθετη αντίσταση (impedance) 50 Ω.
- Ενσωματωμένο σύστημα αυτόματου ελέγχου των αισθητήρων AST (Auto Sensor Test).
- Απόκριση συχνότητας 1 kHz - 400 kHz.
- Όταν η ενίσχυση (gain) της κύριας μονάδας ρυθμίζεται στα 0 dB, 6 dB, 12 dB τότε η ελάχιστη τάση κατωφλιού επιλέγεται αντίστοιχα στα 26 dB, 20 dB, 16 dB.
- Μέγιστο πλάτος καταγεγραμμένου σήματος 100 dB.
- Οχτώ (8) κανάλια AE υψηλής ταχύτητας ανάκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 3 MSPS) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανόδου, υπερβάσεις κατωφλιού, συνολικές υπερβάσεις κατωφλιού, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κτλ.), προβολή παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο.
- Τέσσερα (4) φίλτρα διαχωρισμού χαμηλών συχνοτήτων (High Pass) (1 kHz, 5.0 kHz, 20 kHz, 100 kHz) και 4 φίλτρα διαχωρισμού υψηλών συχνοτήτων (Low Pass) (10 kHz, 40 kHz, 100 kHz, 400 kHz) για κάθε κανάλι, ελεγχόμενα από το software.
- Μετατροπέας A/D 16 bit (Digital Analog Converter - DAC), με μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 1 MSPS ανά κανάλι.
- Έως δύο (2) αναλογικά παραμετρικά κανάλια τα οποία μπορούν να αξιολογήσουν επιπλέον παραμετρικά στοιχεία όπως η παραμόρφωση, το φορτίο, η θερμοκρασία κτλ.

Ένα απλοποιημένο διάγραμμα της κάρτας PCI - 8 παρουσιάζεται στο Σχήμα 8. Το ηλεκτρικό σήμα, ενισχυμένο από τους προ-ενισχυτές, οδηγείται στην είσοδο κάθε καναλιού. Το εισερχόμενο σήμα επεξεργάζεται και διέρχεται από το κύκλωμα φιλτράρισματος όπου υπάρχουν 4 φίλτρα High Pass και 4 φίλτρα Low Pass. Το φιλτραρισμένο σήμα διέρχεται εν συνεχεία από τον A/D μετατροπέα (16 bit) όπου και ψηφιοποιείται σε ρυθμούς μέχρι 1.0 MS/sec. Το ψηφιακό

σήμα AE (16 bit) διέρχεται από το κύκλωμα εξαγωγής παραμέτρων και μετατρέπεται στιγμιαία σε κτύπους AE (hits) και σε άλλα χαρακτηριστικά. Τα παραγόμενα χαρακτηριστικά και οι κυματομορφές μεταφέρονται στον υπολογιστή για αποθήκευση και περαιτέρω επεξεργασία. [7]



Σχήμα 17: Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων AE

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα τα γεγονότα AE μπορούν να φτάσουν χιλιάδες, οπότε η ανάγκη για υπολογιστική δύναμη της μονάδας είναι η μέγιστη δυνατή. Η δυνατότητα επεξεργασίας και αποθήκευσης των γεγονότων πρέπει είναι ανάλογη του εύρους συχνοτήτων που λαμβάνει ο αισθητήρας. Οι σύγχρονες μονάδες καταγραφής και επεξεργασίας σημάτων AE εντοπίζουν 100 έως 1000 γεγονότα/δευτερόλεπτο.

#### Λογισμικό επεξεργασίας

Για την επεξεργασία των κυματομορφών χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά AE-Win και NOESIS 4.0 Light. Οι κυριότερες δυνατότητες των προγραμμάτων συνοψίζονται παρακάτω :

- Ταξινόμηση, προβολή και επεξεργασία στοιχείων σε πραγματικό χρόνο.
- Ομαδοποίηση, σύγκριση γραφημάτων και στατιστική ανάλυση.
- Προχωρημένη προβολή δεδομένων [Histograms (2D, 3D), Scatters (point plots 2D, 3D), Bars κλπ.), αξιοποίηση και φιλτράρισμα.
- Προβολή κυματομορφών, φασματικών αναλύσεων FFT (Fast Fourier Transformation) και συχνοτικού περιεχομένου (Power Spectrum Analysis).
- Εντοπισμός της θέσης προέλευσης των σημάτων σε πραγματικό χρόνο, με γραμμικό εντοπισμό (Linear Location), με διδιάστατο εντοπισμό (2D Planar Location), τρισδιάστατο εντοπισμό (3D Planar Location) και εντοπισμό κατά ζώνες (Zonal Location).

## 4.2.7 Επεξεργασία Κυματομορφών της Ακουστικής Εκπομπής

### α. Προσδιορισμός θέσης πηγής κυμάτων

Όντας γνωστή η ταχύτητα ενός κύματος και ο χρόνος άφιξης του σε ένα αισθητήρα, εάν διαθέτουμε πολλούς, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης εκπομπής των κυμάτων. Απλούστερη περίπτωση, ο γραμμικός εντοπισμός (μονοδιάστατος). Γίνεται η παραδοχή του μονοδιάστατου, εφόσον η μια διάσταση του δοκιμίου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες.

Για το γραμμικό εντοπισμό απαιτούνται δύο αισθητήρες σε θέσεις  $x_1$  και  $x_2$  αντίστοιχα. Έστω  $x_s$  η ζητούμενη θέση της πηγής και  $t_s$  ο χρόνος γένεσης του σήματος ΑΕ στην πηγή. Εάν θεωρηθεί ότι το κύμα διαδίδεται με την ίδια ταχύτητα προς όλες τις κατευθύνσεις, τότε η διαφορά στους χρόνους άφιξης κάθε αισθητήρα είναι ανάλογη προς την απόσταση του από την πηγή:

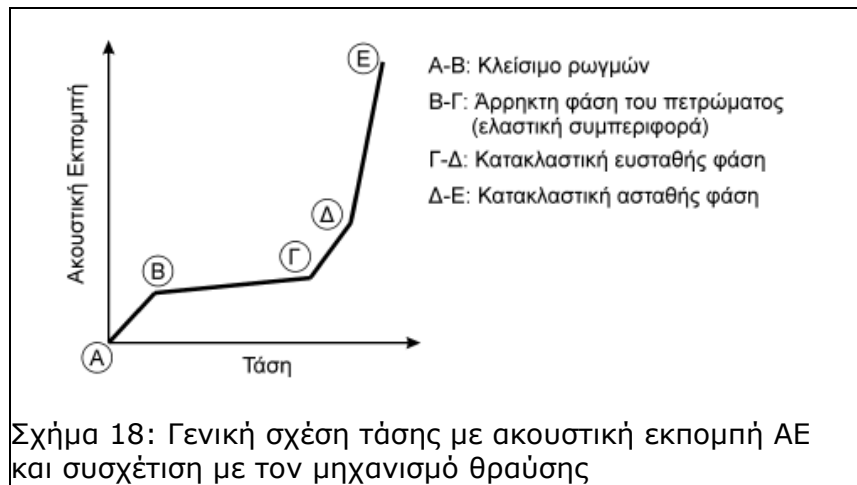
$$(t_i - t_s) = (x_i - x_s) / V$$

όπου  $t_i$  ο χρόνος άφιξης του σήματος στον αισθητήρα  $i$  ( $i=1,2$ ) και  $V$  η ταχύτητα του ακουστικού κύματος. Προκύπτουν έτσι δύο εξισώσεις από τις οποίες μπορούν να υπολογισθούν ο χρόνος γένεσης και η θέση της πηγής του σήματος ΑΕ.

Για προσδιορισμό στο χώρο είναι απαραίτητοι άνω των τριών, τεσσάρων αισθητήρων. Η ακρίβεια του προσδιορισμού επηρεάζεται από μικροδιαφορές της ευαισθησίας των αισθητήρων, από αβεβαιότητες στο χρόνο άφιξης και από την παραδοχή ότι το κύμα ΑΕ οδεύει προς όλες τις κατευθύνσεις με την ίδια ταχύτητα.

### β. Συσχέτιση Ακουστικής Εκπομπής - Φόρτισης.

Το ζητούμενο της επεξεργασίας. Η δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων ή και προβλέψεων για τη συμπεριφορά του πετρώματος ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες. Άρα οδηγούμαστε στη συνάρτηση της συμπεριφοράς του πετρώματος με τις παραμέτρους της ΑΕ.



Πρώτο πεδίο επεξεργασίας είναι και η γενεσιουργός αιτία της ΑΕ. Η φόρτιση την οποία επιβάλλουμε στο πέτρωμα. Άρα εξάγεται λογικά το συμπέρασμα ότι το πλήθος των γεγονότων ΑΕ θα αυξάνεται όσο αυξάνει το φορτίο. Σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης ο αριθμός των γεγονότων ΑΕ θα ακολουθεί χονδρικά την εσωτερική διεργασία που συμβαίνει στη δομή του πετρώματος καθώς αυξάνεται το φορτίο μέχρι τη θραύση.

γ. Παρακολούθηση εξέλιξης αστοχίας βάση πηγής της Ακουστικής Εκπομπής.

Προσδιορίζοντας τη θέση της πηγής ΑΕ κατά τη διάρκεια της φόρτισης έως τη θραύση, μπορούμε να έχουμε τη χωρική εξέλιξη της αστοχίας εντός του δοκιμίου.

Σε εύκαμπτες συσκευές φόρτισης λόγω της ψαθυρής φύσης του πετρώματος η θραύση γίνεται ασταθής και απότομη. Έτσι στο στάδιο της θραύσης το πλήθος των ΑΕ είναι τόσο μεγάλο που καθίσταται αδύνατη η καταγραφή τους, καθώς οι πηγές εκπομπής είναι σχεδόν όλο το δοκίμιο. Άρα επιβάλλεται η ελεγχόμενη φόρτιση που θα οδηγεί και σε ελεγχόμενο πλήθος ΑΕ.

#### 4.2.8 Τυπικές εφαρμογές ακουστικής εκπομπής.

Η ακουστική εκπομπή χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς διάφορων υλικών όπως μέταλλα, κεραμικά, πετρώματα, σκυρόδεμα κ.α. για τους εξής σκοπούς :

- Διάδοση ρωγμών
- Διαρροή
- Γήρανση
- Διάβρωση
- Ερπυσμός

Μη καταστρεπτικός έλεγχος κατά τη διάρκεια κατασκευής:

- Κατεργασία υλικών
- Αλλαγή φάσης σε μέταλλα και κράματα (μαρτενσιτικός μετασχηματισμός)
- Εντοπισμός ελαττωμάτων όπως πόροι, ρωγμές βαφής, εγκλείσματα, κλπ.
- Παραμορφωτικές κατεργασίες - σφυρηλάτηση, διέλαση
- Συγκολλήσεις

Παρακολούθηση κατασκευών:

- Συνεχής παρακολούθηση (μεταλλικές κατασκευές, μεταλλεία, κ.λ.π.)
- Περιοδικός έλεγχος (υδραυλικοί αγωγοί, γέφυρες, καλώδια)
- Εντοπισμός χαλαρών μελών
- Εντοπισμός διαρροών

Ειδικές εφαρμογές:

- Χημικές και πετροχημικές: δεξαμενές αποθήκευσης, δοχεία αντιδράσεων, υπεράκτιες πλατφόρμες, γεωτρήσεις, σωληνώσεις, βαλβίδες
- Ηλεκτρικές εφαρμογές: δεξαμενές πυρηνικών αντιδραστήρων, παραγωγοί ατμού, κεραμικοί μονωτές, μεταλλάκτες
- Αεροναυπηγική: ρωγμές γήρανσης, διάβρωση, σύνθετες κατασκευές
- Ηλεκτρονικά: χαλαρά συνδεδεμένα μέρη σε ηλεκτρονικά μέρη, συγκολλήσεις, ρωγμές στο υπόστρωμα

---

Βιβλιογραφία 4ου κεφαλαίου :

1. Τσουτρέλης Χ., 1985, Στοιχεία μηχανικής των πετρωμάτων, Αθήνα.
2. Σοφιανός Α.Ι., Νομικός Π.Π., 2008, Σημειώσεις προχωρημένης μηχανικής πετρωμάτων, Αθήνα.
3. Σπυρίδης Χ., 2001, Φάκελος με θέματα Μουσικής Ακουστικής, Αθήνα (Τμήμα Μουσικών Σπουδών Πανεπιστημίου Αθηνών).
4. P.P. Nomikos, P. Katsikogianni, K.M. Sakkas & A.I. Sofianos. Acoustic emission during flexural loading of two Greek marbles.
5. Paterson, Wong, – Experimental Rock Deformation, the Brittle Field, Springer.
6. Physical Acoustics Corporation – AE Sensor Catalog
7. Κατσικογιάννη Γ. Παναγιώτα, Ιούνιος 2006., Δ.Π.Μ.Σ. 'Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπογείων Έργων',
8. Christian Grosse, Acoustic Emission Testing, Springerlink.

# Κεφάλαιο 5. ΑΕ σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης

## 5.1 Γενικά για την εργαστηριακή δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη

Είναι η συνηθέστερη εργαστηριακή δοκιμή που εκτελείται για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής του άρρηκτου πετρώματος  $\sigma_c$ , των μέτρων ελαστικότητας του Young,  $E$  και του δείκτη Poisson  $\nu$ . Το δοκίμιο υποβάλλεται σε μονοαξονική φόρτιση ανάμεσα στις χαλύβδινες πλάκες της μηχανής φόρτισης. Η σχέση μεταξύ φόρτισης – παραμόρφωσης βρίσκεται στη βάση των υπολογισμών αναλύσεων συμπεριφοράς του πετρώματος. Η επιβαλλόμενη φόρτιση θα μας υποδείξει τα πεδία τιμών όπου το πέτρωμα ακολουθεί ελαστική συμπεριφορά, ξεκινά ίσως να διαρρέει και έπειτα να θραύεται ψαθυρά. Στόχος μας, η κατά το δυνατότερο ακριβέστερη οριοθέτηση αυτών των πεδίων τιμών ώστε με ασφάλεια να προβλέψουμε την απόκριση του πετρώματος. Η ύπαρξη περιοχής διαρροής είναι πεδίο συζήτησης καταρχάς αν υπάρχει, πως εκδηλώνεται μορφολογικά στο πέτρωμα, σε τι κλίμακα κα.

Στις μηχανικές δοκιμές μετάλλων, η ασκούμενη τάση είναι συνήθως μονοαξονική και δύο από τις κύριες τάσεις παραμένουν μηδέν κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Ωστόσο, στην περίπτωση των πετρωμάτων, όπως και στα εδάφη, πειραματικές δοκιμές για τις μηχανικές τους ιδιότητες γίνονται συνήθως με όλες τις τρεις κύριες τάσεις μη μηδενικές και θλιπτικές. Σε ένα βαθμό αυτή η μεθοδολογία αναπτύχθηκε επειδή, με τριαξονικό πεδίο τάσεων, πρακτικές καταστάσεις όπως η πίεση υπερκειμένων αναπαραστώνται αποτελεσματικότερα. Αλλά, θεμελιωδώς αντανakλά το γεγονός ότι τα κριτήρια αστοχίας για πετρώματα και εδάφη είναι ισχυρά εξαρτώμενα από τις ορθές και διατμητικές συνιστώσες της τάσης, τουλάχιστον όπου αναμένεται ψαθυρή απόκριση του πετρώματος.

Η ψαθυρή αστοχία, ετυμολογικά, αναμένεται να προκαλέσει τριβή, απόσπαση τεμαχίων, σύνθλιψη στο μέρος που θα εκδηλωθεί. Ο απλουστευτικός ορισμός της ψαθυρής αστοχίας δηλώνει ότι πρόκειται για ένα διακριτό, ακαριαίο γεγονός που συμβαίνει χωρίς προειδοποίηση στην παραμόρφωση, για κάποια τιμή φόρτισης.

Η γνώση της αντοχής του αδιατάρακτου πετρώματος εκτός από τον στατικό υπολογισμό του ανοίγματος, είναι χρήσιμη και σε άλλους τομείς της λειτουργίας του μεταλλείου. Υψηλή αντοχή απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας για την κοπή και θρυμματισμό, συνεπώς και η κατανομή της εκρηκτικής ύλης στην προς ανατίναξη μάζα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καλύτερη (*μεγάλη ειδική διάτρηση*), ενώ και η αποδομητική επίδραση της ανατίναξης στην περιβάλλουσα βραχομάζα είναι σημαντική. Επίσης με υψηλή αντοχή αδιατάρακτου βράχου, από την ανατίναξη αναμένεται ότι θα αυξάνεται η πιθανότητα διεύρυνσης προϋφισταμένων ασυνεχειών που έχουν σημαντικά χαμηλότερες αντοχές, παρά η ανάπτυξη νέων ρωγματούσεων στη μάζα του αδιατάρακτου βράχου.

Επίσης, η αντοχή του βράχου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή της εκρηκτικής ύλης ώστε να βελτιστοποιείται η έκταση της ζώνης έντονου θρυμματισμού. Διαφορετική λειτουργία έχουν τα περιφερειακά διατρήματα από αυτά της παραγωγής. Στα πρώτα, εκτεταμένη ζώνη έντονου θρυμματισμού θα οδηγήσει σε ανεπιθύμητες υπερεκσκαφές ενώ στα δεύτερα το ζητούμενο είναι η μεγιστοποίηση αυτής της ζώνης χωρίς την παρεμπόδιση της ανάπτυξης μεταβατικής ζώνης θρυμματισμού – ρωγματούσεων, ώστε το φορτίο της έκρηξης να μεταδωθεί ισοδύναμα στην επόμενη σειρά διατρημάτων.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι κάθε πέτρωμα που συναντούμε είναι ουσιαστικά μοναδικό και η εξαγωγή συμπερασμάτων, εν προκειμένω για το σύνολο του βωξίτη, άτοπη. Η γεωλογική ονομασία ενός σχηματισμού μας υποδηλώνει τις επικρατέστερες καταστάσεις που έχουν συναντηθεί σε αυτόν ανά τον κόσμο.

Καθοριστικότερο ρόλο όμως, έχουν οι φυσικές ιδιότητες του πετρώματος :

- Φυσική υγρασία.

Αν και αδιαπέρατος ο βωξίτης, έχει ως περιβάλλοντα πετρώματα ασβεστόλιθους όπου συναντάται υδροφορία. Γενικά τα δοκίμια που συλλέχθηκαν από το μεταλλείο είχαν υψηλό ποσοστό υγρασίας στην επιφάνεια τους.

- Βαθμός αποσάθρωσης.

Τα αρχικά τεμάχια βωξίτη, δεν είχαν παρουσιάσει αποσάθρωση, μηχανική ή χημική. Ένα τεμάχιο που συλλέχθηκε από το μετάλλευμα σε σωρό απόθεσης είχε υποστεί αλλαγή στο χρώμα λόγω οξειδωσης των οξειδίων του σιδήρου.

- Βαθμός και υλικό συγκόλλησης.

Ο ιστός του βωξίτη αποτελείται από πηλολίθους, ωόλιθους, μορφές χαρακτηριστικές της απόθεσης σε θαλάσσιο περιβάλλον, οι οποίοι εμφανίζονται σαν συγκρίμματα επικαλυμένα με οξειδία σιδήρου. Η συγκόλληση είναι ισχυρότερη στους ερυθρούς, λόγω περισσότερων σιδηρούχων οξειδίων, ενώ αντίθετα μειώνεται στους λευκούς, αποσιδηρωμένους, βωξίτες.

- Πορώδες.

Σύνηθες είναι το δευτερογενές πορώδες. Συναντήθηκαν διάφορες μορφές κενών, κυριότερα ωοειδή, μικρής κλίμακας (1 – 2mm) χωρίς επίδραση στην συνολική συνοχή.

- Ασυνέχειες και η αλληλεπίδραση τους.

Τα περισσότερα τεμάχια βωξίτη παρουσίαζαν απουσία ασυνεχειών στην κλίμακα της δειγματοληψίας των κυλίνδρων, με εξαίρεση ένα, όπου το κυλινδρικό δοκίμιο επηρεαζόταν από τις ασυνέχειες του αρχικού τεμάχους.

- Τοπικές ζώνες διαφοροποίηση συγκεντρώσεων ορυκτών συστατικών.

Οι ζώνες αυτές δεν αφορούν την κλίμακα των εργαστηριακών δοκιμών. Η ορυκτολογική σύσταση του βωξίτη διαφοροποιείται σε περιοχές όπου το κοίτασμα έχει υποστεί εμπλουτισμό σε αργιλικά υδροξείδια, κοντά σε τεκτονικά χαρακτηριστικά συνήθως. Αυτή η μετάβαση επιφέρει συνολική αλλαγή και στις φυσικές ιδιότητες του πετρώματος.

## 5.2 Προδιαγραφές

Η δοκιμή εκτελείται σε δοκίμια από πυρήνες γεωτρήσεων ή όταν αυτοί δεν υπάρχουν, τα δοκίμια διαμορφώνονται σε κυλινδρική μορφή.

Η Διεθνής Ένωση Βραχομηχανικής, ISRM (1979) πρότεινε τις προδιαγραφές που έχουν επικρατήσει σχετικά με τη διαμόρφωση δοκιμών και συνοψίζονται στις παρακάτω :

- Ελάχιστη διάμετρος 54mm (NX μέγεθος πυρήνα γεώτρησης), και τουλάχιστον δέκα φορές μεγαλύτερη από το μέγιστο μέγεθος κόκκου του πετρώματος.

- Κυλινδρικής μορφής δοκίμια με λόγο ύψους προς διάμετρο  $H/D = 2.5$  έως 3 ( $H$ =ύψος,  $D$ =διάμετρος).

- Οι βάσεις των δοκιμών πρέπει να είναι επίπεδες με ανοχή 0.02 mm, και κάθετες στον διαμήκη άξονα συμμετρίας του δοκιμίου με απόκλιση όχι περισσότερο από 0.001 rad ή 0.05mm στα 50mm

- Η πλευρική επιφάνεια πρέπει να είναι λεία, με ανοχή όχι περισσότερο από 0.3 mm.

- Δεν επιτρέπεται η χρησιμοποίηση άλλων τεχνικών λείανσης (επάληψη ρητινών, στίλβωση, κα.) της επιφάνειας εκτός της μηχανικής.

- Για τη διατήρηση κατά το δυνατόν της φυσικής υγρασίας του πετρώματος τα δοκίμια να έχουν ληφθεί το πολύ 30 μέρες από το μητρικό πέτρωμα.

- Η δοκιμή πρέπει να ολοκληρώνεται σε 5 – 10min, άρα ο ρυθμός εφαρμογής φορτίου να κυμαίνεται σε 0.5 – 1 Mpa/s.

- Ελάχιστος αριθμός δοκιμών για ορίζονται οι πέντε.

- Το επιβαλλόμενο φορτίο μετρείται σε μονάδες Newtons.

### 5.3 Προετοιμασία δοκιμίων

Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν μηχανήματα του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας. Προετοιμάστηκαν τρία δοκίμια βωξίτη στις κατάλληλες διαστάσεις για εκτέλεση δοκιμών μονοαξονικής θλίψης. Άλλα δοκίμια που επιχειρήθηκε να προετοιμαστούν δεν είχαν το επιθυμητό αποτέλεσμα και ως εκ τούτου διαμορφώθηκαν εκ νέου για άλλη δοκιμή (Brazilian).

Τα αρχικά δείγματα περισυλλέχθηκαν από μεταλλεία της S & B, θέση "Κλεισούρα", "Ασφακόλακκα", από ενεργά μέτωπα εκμετάλλευσης.

Η εξαγωγή των δοκιμίων βωξίτη έγινε με περιστροφικό δειγματοληπτικό αδαμαντοτρύπανο λεπτού τοιχώματος του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας (Εικόνα 8). Αποδείχθηκε εξαιρετικά ανθεκτικός, με μικρό ρυθμό προχώρησης τρυπανιού και με κατά τόπους μεγαλύτερη σκληρότητα. Αυτό οφειλόταν ίσως σε μεγαλύτερη συγκέντρωση πυριτικών οξειδίων, μιας και αυτά ανθίστανται περισσότερο στην κοπή.

Ακολουθώντας με το δισκοπρίονο επιτυγχάνεται κοπή στο επιθυμητό μήκος και μια αρχική λείανση των βάσεων (Εικόνα 9).



Εικόνα 8: Αδαμαντοτρύπανο λεπτού τοιχώματος.



Εικόνα 9: Δισκοπρίονο



Εικόνα 10: Λειαντικό

Κατόπιν γίνεται τελική λείανση των βάσεων, ώστε να έχουμε την απαραίτητη επιπεδότητα, με λειαντικό αδαμαντοκαρβιδίων (Εικόνα 10).



### 5.3 Παρακολούθηση παραμορφώσεων κατά τη δοκιμή

Οι παραμορφώσεις του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της φόρτισης καταγράφονται από μηχανοσκόπια ηλεκτρικής αντίστασης (strain gauges). Τοποθετούνται κατά την περιφέρεια του δοκιμίου, με τη βοήθεια εποξικής ρητίνης, στο μέσο του περιπίου, σε ζεύγος ώστε το ένα να καταγράφει την αξονική παραμόρφωση και το άλλο τη διαμετρική.



Εικόνα 11: Δοκίμιο και διαμετρικό μηχανοσκόπιο

### 5.4 Υπολογισμοί

#### α. Θλιπτική τάση

Η εξίσωση υπολογισμού της θλιπτικής τάσης αστοχίας είναι η εξής :

$$\sigma_c = P / A_0 ,$$

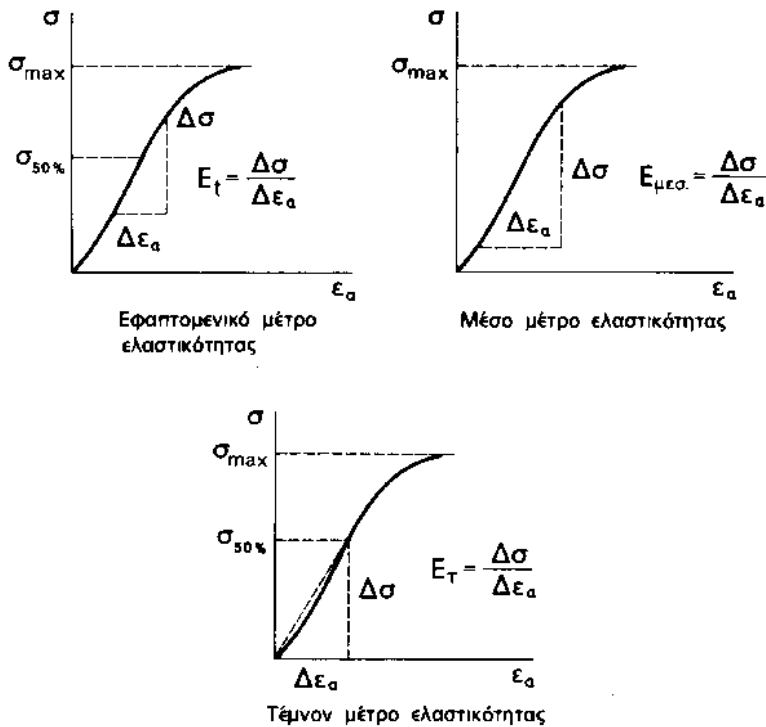
όπου  $P$  : θλιπτικό φορτίο (kN)  
 $A_0$  : εμβαδόν βάσης δοκιμίου

#### β. Ανηγμένες παραμορφώσεις

Οι αξονικές και διαμετρικές παραμορφώσεις εξάγονται απευθείας από τα δεδομένα των μηχανοσκόπιων. Οι καμπύλες σχεδιάζονται για την αξονική και διαμετρική παραμόρφωση συναρτήσει της φόρτισης. Οι ολοκληρωμένες καμπύλες δίνουν την καλύτερη περιγραφή του μηχανισμού παραμόρφωσης για πετρώματα που δείχνουν μη γραμμική συμπεριφορά τάσης – παραμόρφωσης για χαμηλές και υψηλές τιμές τάσης.

γ. Μέτρο ελαστικότητας του Young.

Υπολογίζονται τρία μέτρα ελαστικότητας :



β) Γραφικός υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας.

Σχήμα 19: Υπολογισμός ελαστικών σταθερών του Young

δ. Λόγος Poisson

Η τιμή του λόγου Poisson  $\nu$ , επηρεάζεται σημαντικά από μη γραμμική συμπεριφορά σε χαμηλές τιμές τάσης στις καμπύλες τάσης - παραμορφώσεων. Υπολογίζεται ως :

$$\nu = - (\text{κλίση αξονικής καμπύλης} / \text{κλίση διαμετρικής καμπύλης}) = - (E / \text{κλίση διαμετρικής καμπύλης}).$$

1) Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, σε δεδομένο ποσοστό (συνήθως 50%) της μέγιστης αντοχής.

2) Το μέσο μέτρο ελαστικότητας, από τη μέση κλίση του θεωρούμενου ως γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης - παραμόρφωσης. Η μέση κλίση θα υπολογιστεί είτε διαιρώντας την αλλαγή της τάσης με την αλλαγή της παραμόρφωσης είτε κάνοντας γραμμική προσαρμογή ελαχίστων τετραγώνων (linear least squares fit) στα δεδομένα του γραμμικού τμήματος της καμπύλης.

3) Τέμνον μέτρο ελαστικότητας, συνήθως από μηδενική τάση έως ένα σταθερό ποσοστό της μέγιστης αντοχής.

## 5.5 Χαρακτηριστικά καταγραφής ΑΕ

### \_Αισθητήρες

Στην 1η δοκιμή μονοαξονικής θλίψης χρησιμοποιήθηκαν 6 αισθητήρες micro100s. Στις επόμενες δύο δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν 4 αισθητήρες, λόγω δυσκολίας στερέωσης.

Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης, 2 αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν. Έγινε προσπάθεια για τοποθέτηση αισθητήρων και στην δεύτερη επιφάνεια του δοκιμίου, αλλά η στερέωση τους ήταν ιδιαίτερα δύσκολη, λόγω μεγέθους δοκιμίου, πολλών καλωδίων, περιορισμένου χώρου στη μηχανή φόρτισης.

### \_Σύζευξη - Στερέωση

Η στερέωση του αισθητήρα στο κυλινδρικό δοκίμιο υπήρξε ιδιαίτερος δύσχερης. Διαφορετικών ειδών λάστιχα, κοινές διαφανείς μεμβράνες τροφίμων χρησιμοποιήθηκαν ως μέσο στερέωσης. Τελικά, λάστιχο πάχους περίπου ίδιο με τη διάμετρο του αισθητήρα (10mm) αποδείχθηκε αρκετό να κρατήσει τον αισθητήρα καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής στη θέση του. Η μεγαλύτερη δυσκολία βρισκόταν στον μεγάλο αριθμό των καλωδίων.

Ως υλικό σύζευξης, ενδιάμεσο, χρησιμοποιήθηκε σιλικονούχο γράσσο. Δοκιμές, AST, έγιναν και χωρίς τη χρήση ενδιάμεσου, όπου και ήταν φανερό η μειωμένη ευαισθησία του αισθητήρα.

Στις δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια μέσα (λάστιχα, σιλικονούχο γράσσο). Σε κάποιες περιπτώσεις (1η δοκιμή), αρκούσε το σιλικονούχο γράσσο για να στερεωθεί στη θέση του ο αισθητήρας.

### \_Ρυθμίσεις καταγραφής

Στο λογισμικό AE-Win επιλέχθηκαν οι παρακάτω ρυθμίσεις:

- Η τάση κατωφλιού (Threshold) διατηρείται σταθερή (Fixed) στα 45 dB.
- Η ενίσχυση του σήματος στον προ-ενισχυτή επιλέγεται 40 dB.
- Στο αναλογικό φίλτρο (Analog Filter) ως κατώτερη τιμή ορίζονται τα 20 kHz και ως ανώτερη τα 400 kHz.
- Ο ρυθμός δειγματοληψίας (Sample Rate) ορίζεται 3 MSPS (Mega Samples Per Second) που σημαίνει πως το δείγμα των κυματομορφών λαμβάνεται κάθε 1/3 μsec. Ο μέγιστος χρόνος καταγραφής (ms) πριν την υπέρβαση του κατωφλιού (trigger point) τέθηκε ως το 25% του μήκους της κυματομορφής, δηλ. 256 ms.
- Το χρονικό διάστημα (μsec) μεταξύ της πρώτης υπέρβασης του κατωφλιού και του μεγίστου του σήματος ΑΕ (PDT - Peak Definition Time) ρυθμίζεται στα 200 μsec, ενώ η χρονική διάρκεια ενός κτύπου (HDT - Hit Definition Time) ρυθμίζεται στα 800 μsec. Με την ορθή επιλογή του χρόνου HDT κάθε σήμα ΑΕ πρέπει να αντιστοιχεί σε έναν και μόνο κτύπο (hit). Ο HLT (Hit Lockout Time) ρυθμίζεται από το λογισμικό και διατηρείται ως έχει στα 1000 μsec.

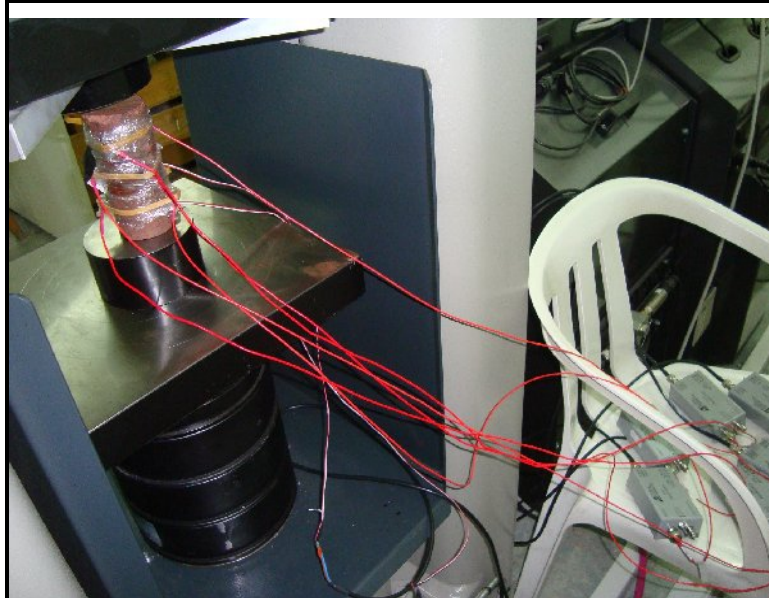
## 5.6 Αποτελέσματα δοκιμών

### Δοκίμιο #1

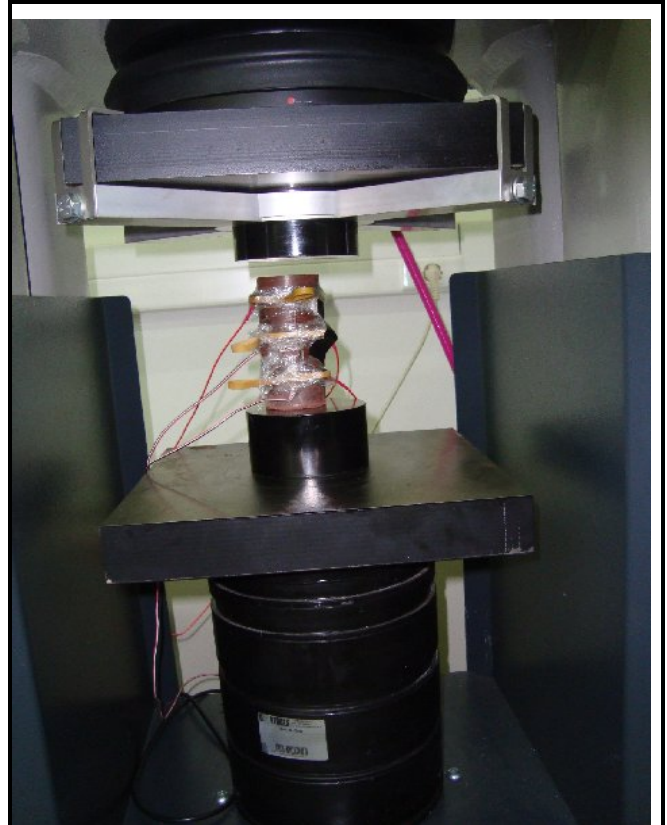
Ύψος, H: 104mm,

Διάμετρος, D: 54,3mm

#### Φωτογραφίες:



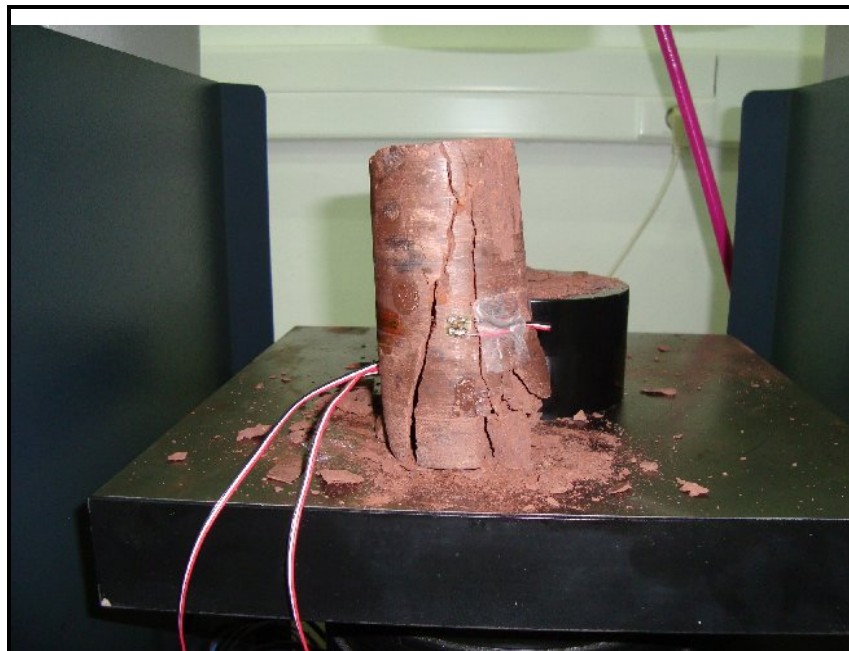
Εικόνα 12: Οπίσθιο τμήμα μηχανής φόρτισης,



Εικόνα 13: Μηχανή φόρτισης



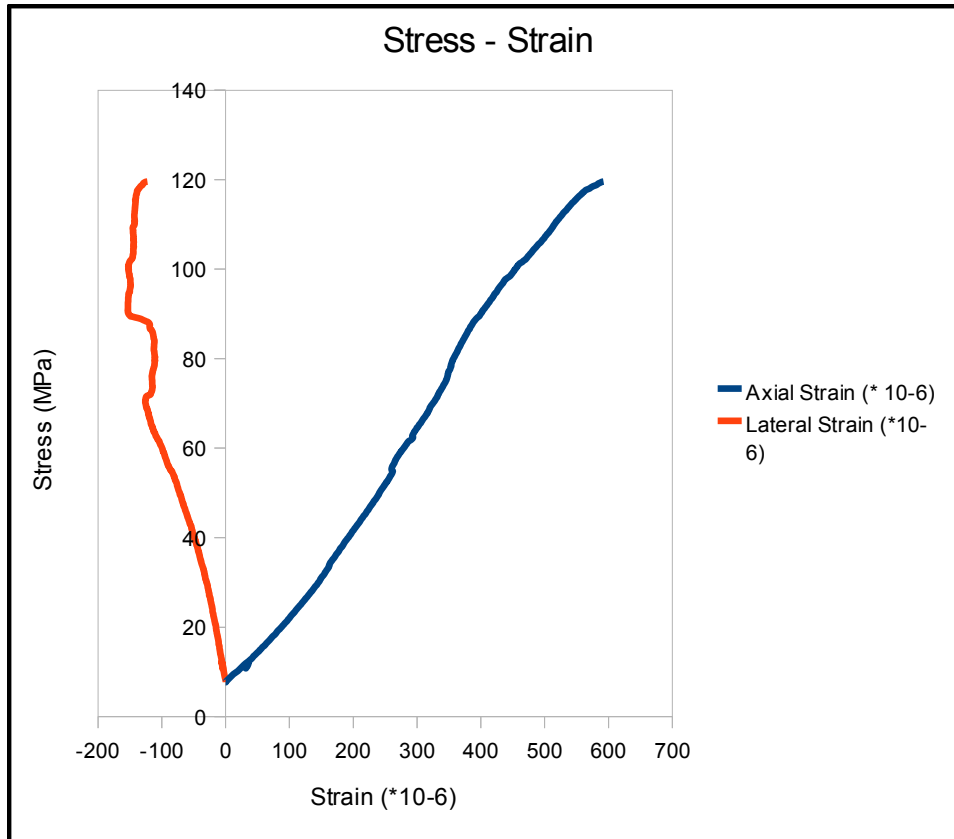
Εικόνα 14: Εικόνα θραυσμένου δοκιμίου



Εικόνα 15: Εικόνα θραυσμένου δοκιμίου

## \_διαγράμματα

Στο Σχήμα 20 φαίνονται τα διαγράμματα αξονικής τάσης-αξονικής τροπής και αξονικής τάσης-διαμετρικής τροπής για το δοκίμιο #1. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί το strain gauge που κατέγραφε τη διαμετρική τροπή σταμάτησε να δίνει λογικές ενδείξεις σε φόρτιση περίπου 70 MPa, πιθανόν λόγω αστοχίας του. Η μέγιστη αξονική τάση που δέχθηκε το δοκίμιο ήταν 120 MPa. Σημειώνεται ότι κατά την έναρξη της δοκιμής υπάρχει ένα στάδιο προφόρτισης του δοκιμίου σε τάση 7.7 MPa, στην οποία έγινε μηδενισμός των ενδείξεων των strain gauges.



Σχήμα 20: Αξονική τάση – αξονική τροπή – διαμετρική τροπή.

### \_Υπολογισμοί ελαστικών σταθερών:

Για τον υπολογισμό των μέτρων ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκαν οι δύο από τις τρεις μεθόδους υπολογισμού που περιγράφηκαν στην παράγραφο 4.4.

- Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας: υπολογίζεται από την κλίση της εφαπτομένης στο 50% της μέγιστης αντοχής:

$$E_t = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon_a = 59.74\text{MPa} / (277.64 \times 10^{-6}) = 215.17 \text{ GPa}$$

- Μέσο μέτρο ελαστικότητας: υπολογίζεται από την κλίση του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης σα-εα.

$$E_{\text{μεσ}} = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon_a = (92 - 30) \text{ MPa} / (410 \times 10^{-6} - 182 \times 10^{-6}) = 271.949 \text{ GPa}$$

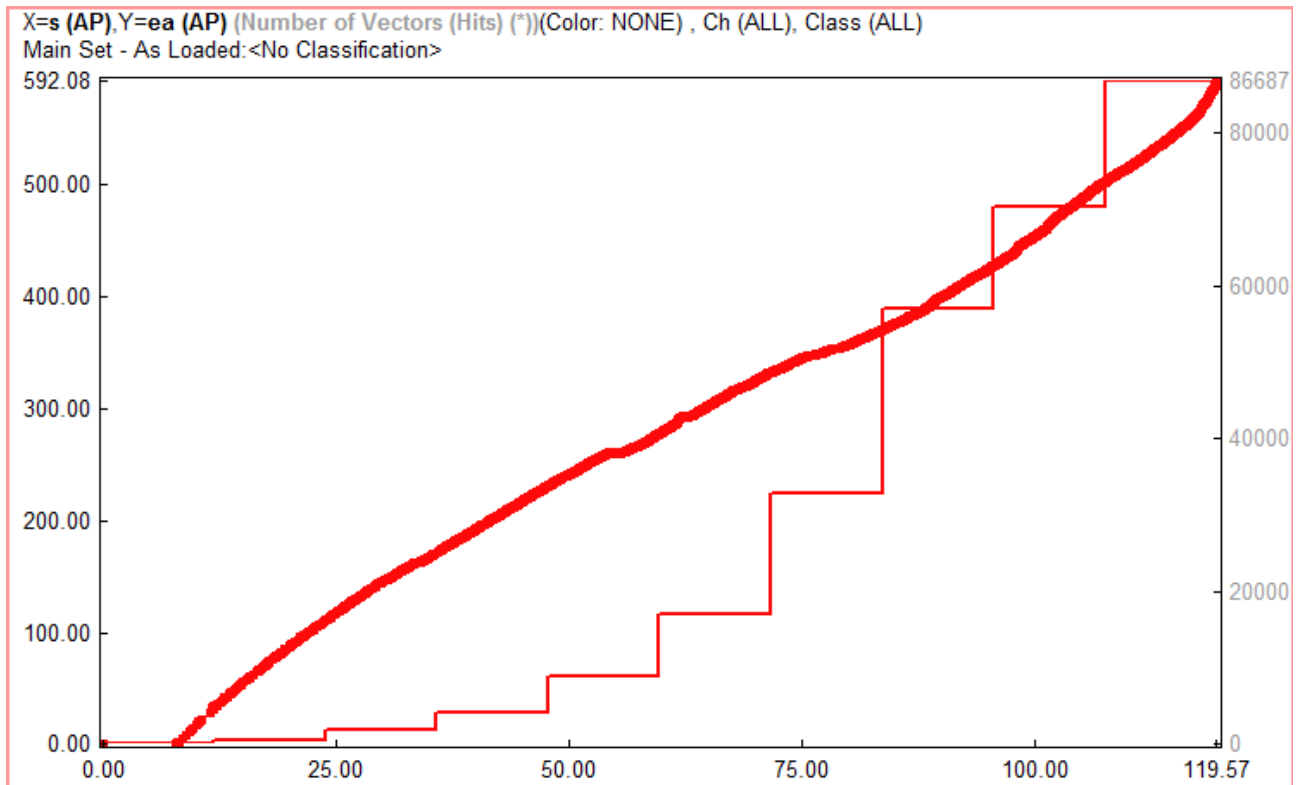
- Ο λόγος Poisson υπολογίσθηκε από τη σχέση:

$$\nu = \Delta\varepsilon_r / \Delta\varepsilon_a = -14.4 / 57.6 = 0.25$$

όπου η μεταβολές των τροπών μετρήθηκαν στο διάστημα  $\Delta\sigma=20$  έως 30 MPa

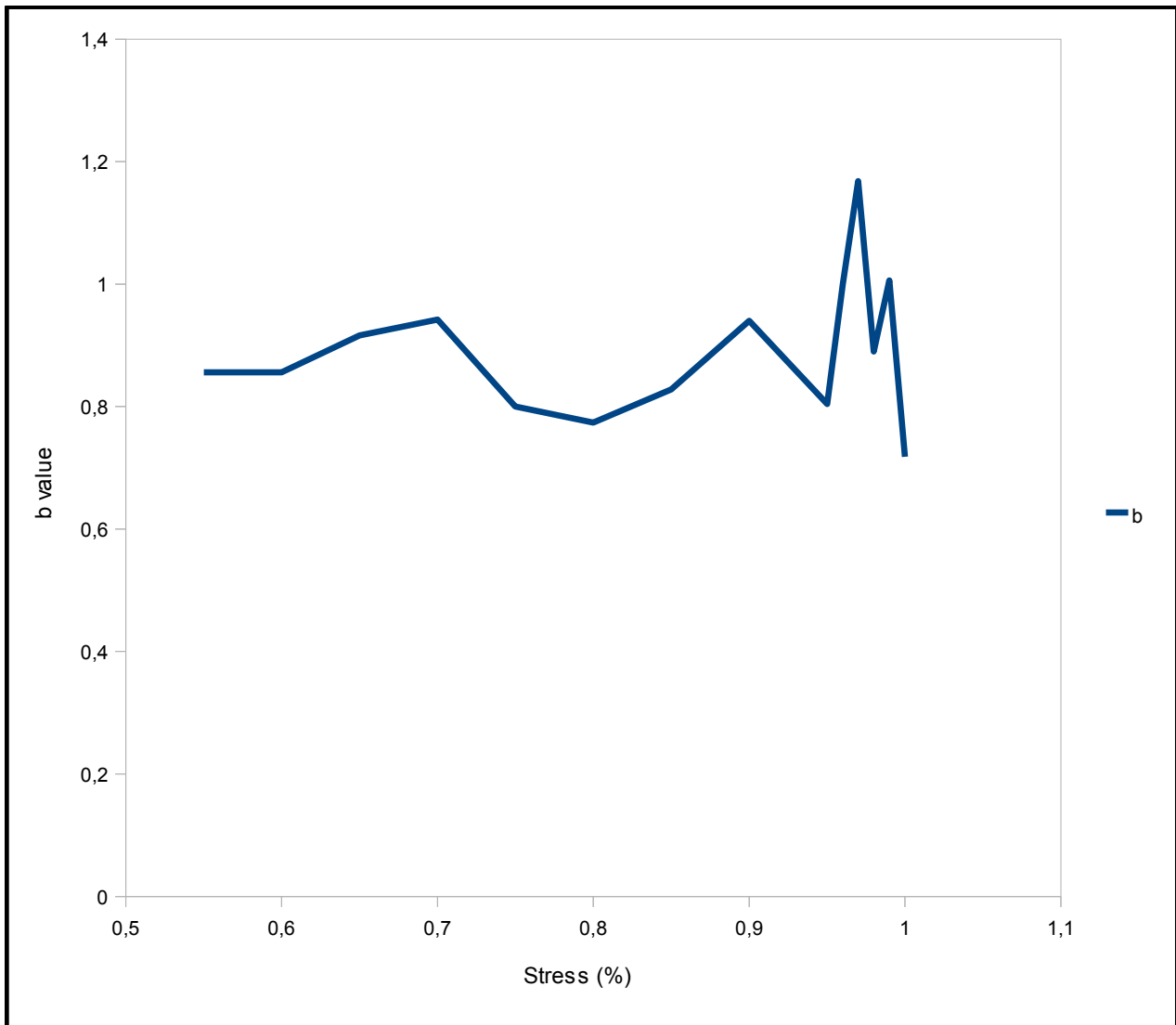
## \_Ακουστική εκπομπή

Στο διάγραμμα του Σχήματος φαίνεται η αθροιστική δραστηριότητα ΑΕ (hits) συναρτήσει της αξονικής τάσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Στο ίδιο διάγραμμα συμπεριλαμβάνεται και η μετρηθείσα αξονική τροπή. Παρατηρείται ότι η έκλυση ΑΕ ξεκινάει ουσιαστικά από χαμηλές τάσεις (περί τα 10 MPa) και αυξάνεται αρχικά γραμμικά και στη συνέχεια με συνεχή μεταβολή του ρυθμού έκλυσης ΑΕ μέχρι και την αστοχία του δοκιμίου. Συνεπώς, δεν θα ήταν δυνατόν να αναγνωρίσουμε την επερχόμενη αστοχία του δοκιμίου μόνο από την καταγραφή του πλήθους των σημάτων ΑΕ.



Σχήμα 21: Φόρτιση - ΑΕ - Παραμόρφωση

Στο διάγραμμα του Σχήματος 22 φαίνεται η μεταβολή του συντελεστή  $b$  συναρτήσει του ποσοστού της φόρτισης ως προς τη μέγιστη. Οι τιμές του συντελεστή  $b$  κυμαίνονται μεταξύ 0.8 ως 1 μέχρι και το 95 % του φορτίου αστοχίας. Πέραν τούτου παρατηρείται μία αύξηση της τιμής που ακολουθείται από ραγδαία μείωση λίγο πριν την αστοχία, από 1.2 για ποσοστιαία τάση 97% σε 0.72 στο 100%. Αυτή η παρατήρηση θα μπορούσε να αξιολογηθεί ως ένδειξη της επερχόμενης αστοχίας του δοκιμίου.



Σχήμα 22: Συντελεστής πλάτους συχνοτήτων  $b$



Δοκίμιο #2 (Υψος 113mm, Διάμετρος 54,3mm)

### Φωτογραφίες



Εικόνα 16: Πλευρική άποψη δοκιμίου



Εικόνα 17: Διαμετρική επιφάνεια



Εικόνα 18: Διαμετρική επιφάνεια



Εικόνα 19: Το δοκίμιο στη μηχανή φόρτισης, 4 αντιδιαμετρικοί αισθητήρες ΔΕ



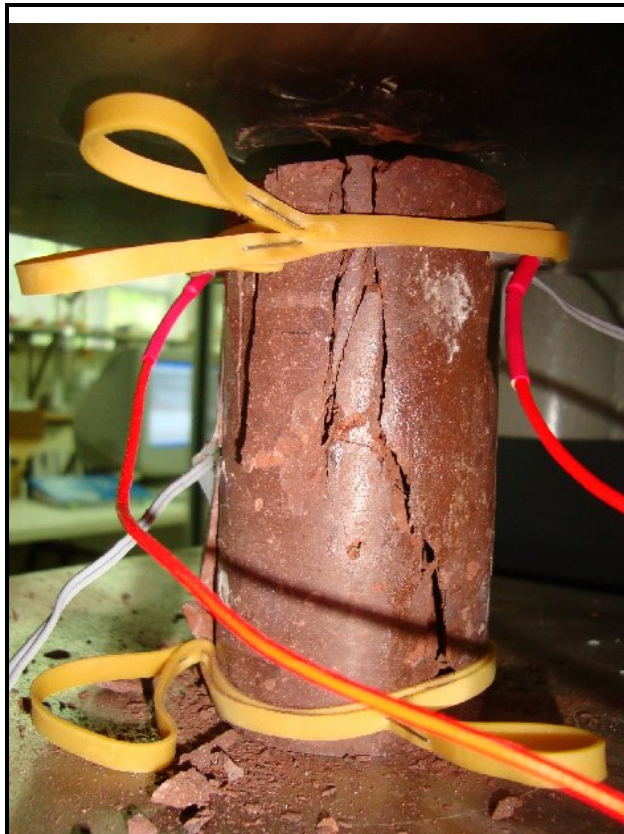
Εικόνα 20: Πλευρική άποψη θραυσμένου δοκιμίου



Εικόνα 21: Πλευρική άποψη θραυσμένου δοκιμίου



Εικόνα 22: Κατακόρυφη άποψη θραυσμένου δοκιμίου

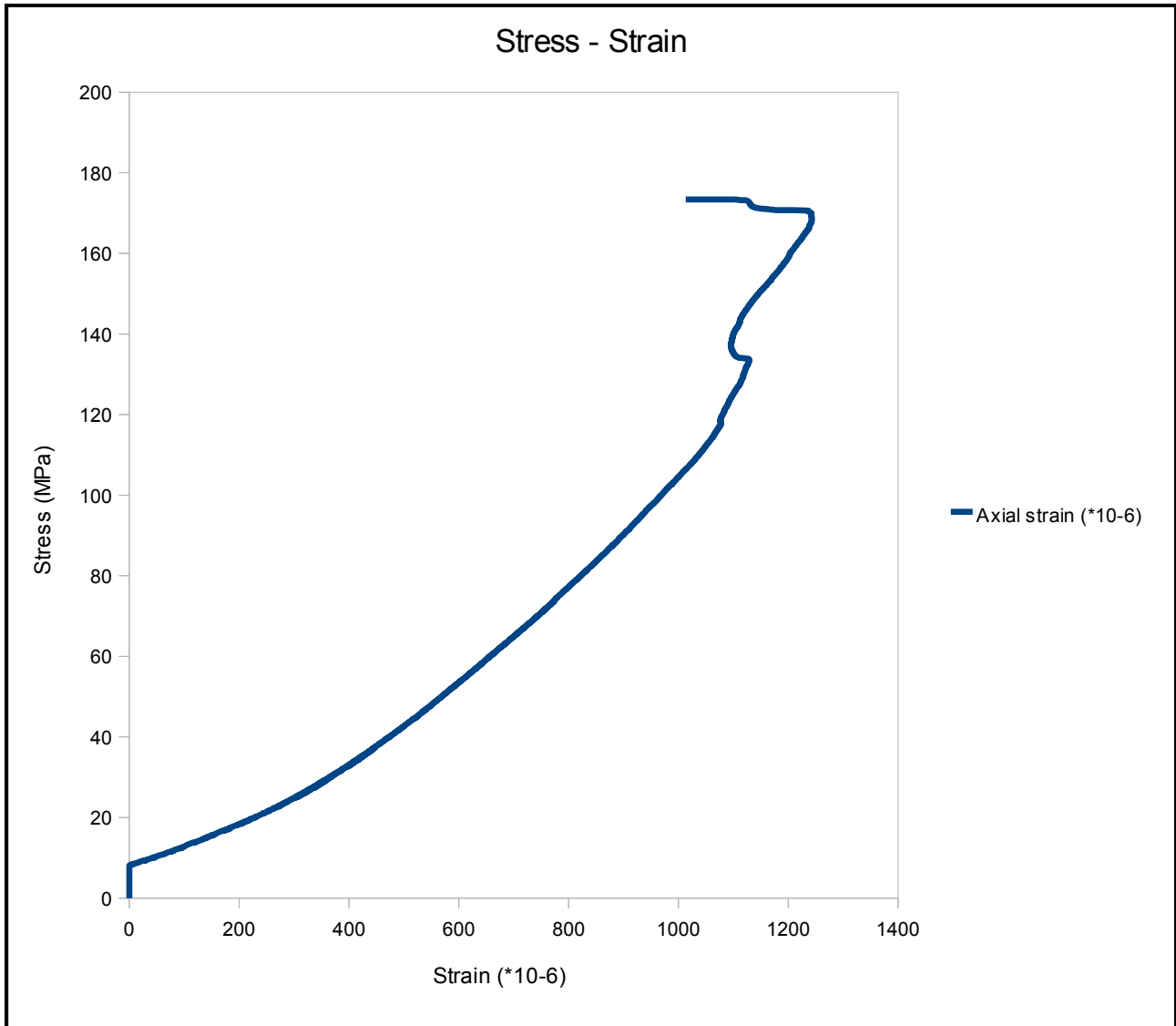


Εικόνα 23: Πλευρική άποψη θραυσμένου δοκιμίου

\_διαγράμματα

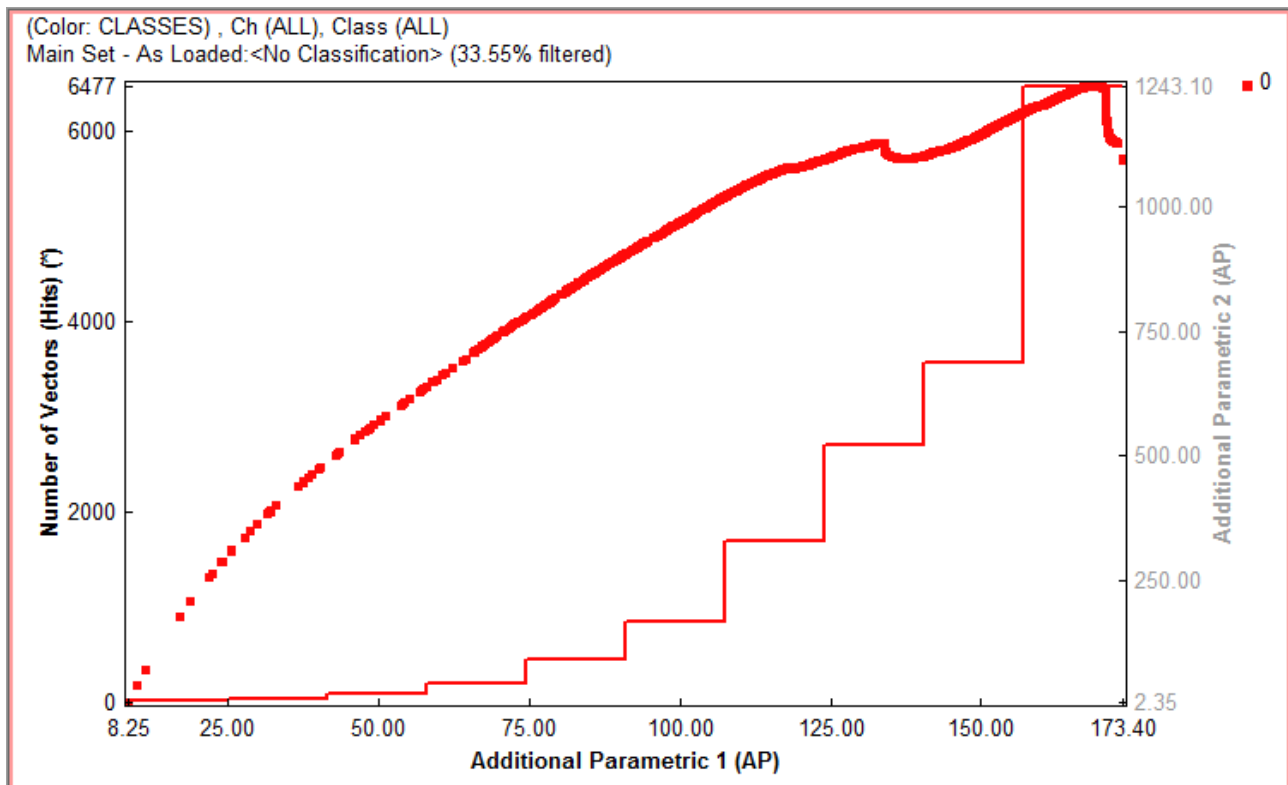
\_υπολογισμοί ελαστικών σταθερών

- Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας,  $E_t = \Delta\sigma / \Delta\epsilon_a = 86,7\text{MPa}/873,91 = 99,209 \text{ Gra}$
- Μέσο μέτρο ελαστικότητας,  $E_{\text{μεσ}} = \Delta\sigma / \Delta\epsilon_a = (120 - 35) / (1080 - 310) = 110,389 \text{ GPa}$

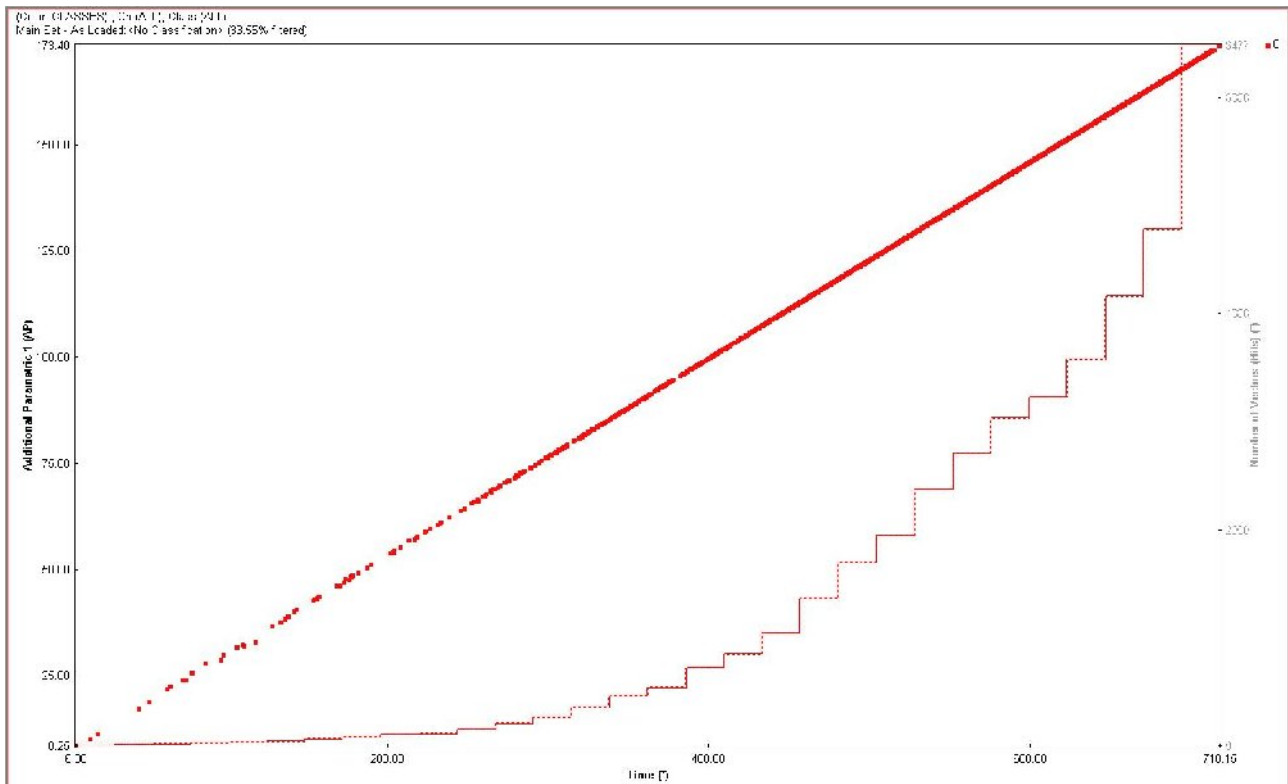


Σχήμα 23: Αξονική τάση - Αξονική τροπή

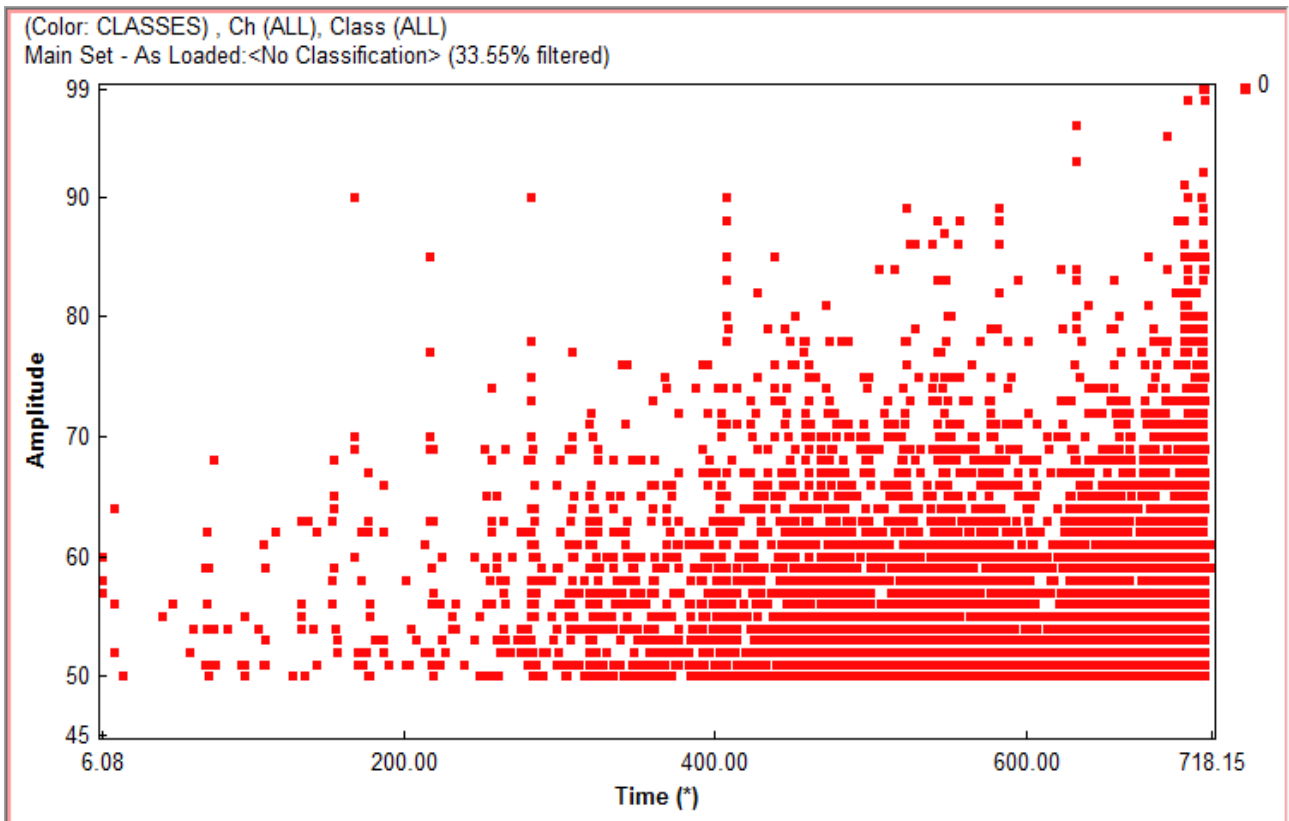
Το strain gauge που μετρούσε τη διαμετρική παραμόρφωση δεν έδινε λογικές αποκρίσεις καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής.



Σχήμα 24: Φόρτιση - ΑΕ - Παραμόρφωση



Σχήμα 25: Ρυθμός φόρτισης - ΑΕ



Σχήμα 26: Χρόνος φόρτισης - Πλάτος ΑΕ

Δοκίμιο #3 (Ύψος 102mm, Διάμετρος 54,3 mm)

**Φωτογραφίες :**



Εικόνα 24: Πλευρική άποψη δοκιμίου, διακρίνεται η κατακόρυφη ρωγμή που το διασχίζει.



Εικόνα 25: Πλευρική άποψη



Εικόνα 26: Διαμετρική επιφάνεια



Εικόνα 27: Πλευρική άποψη μετά τη



Εικόνα 28: Πλευρική άποψη, διακρίνεται η αποφλίωση κατά μήκος της επιφανειακής ρωγμής



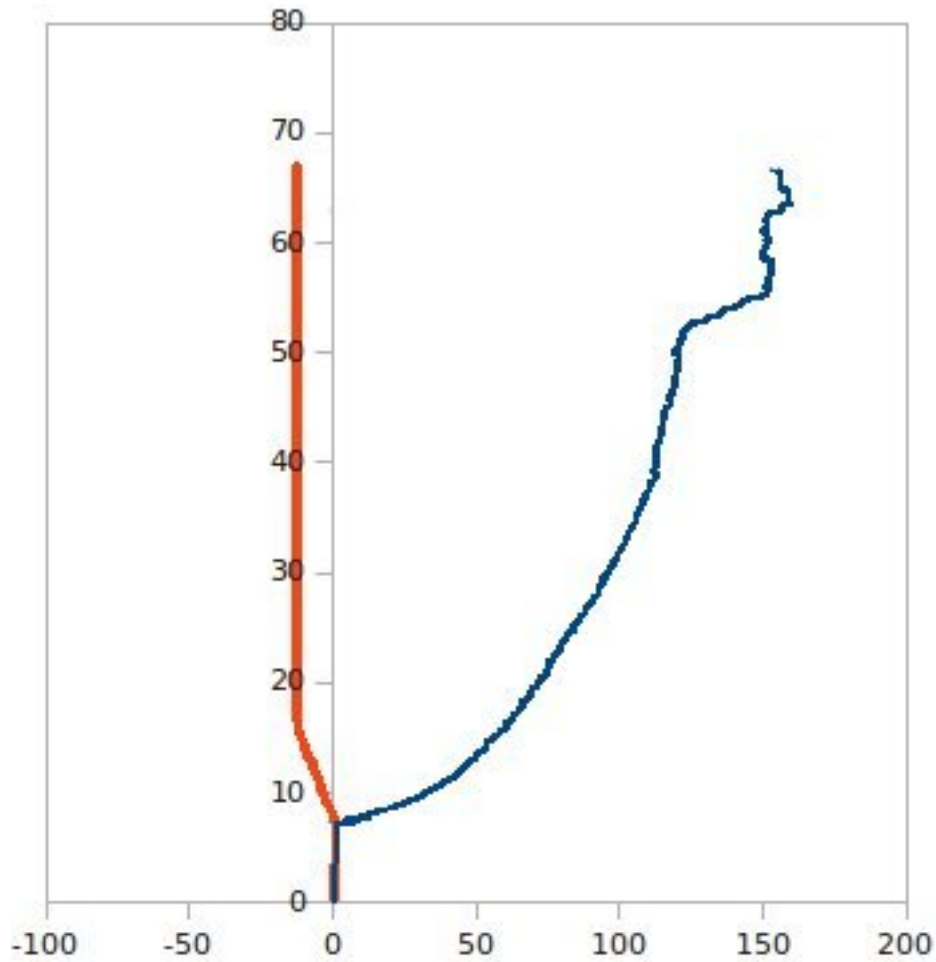
Εικόνα 28: Κάτοψη

Το δοκίμιο φορτίστηκε αρχικώς έως τα 67,15 Μρα, κατόπιν η δοκιμή σταμάτησε λόγω μη λειτουργίας των μηχανοσκόπευτων και έπειτα επαναφορτίστηκε μέχρι τη θραύση.  
\_διαγράμματα

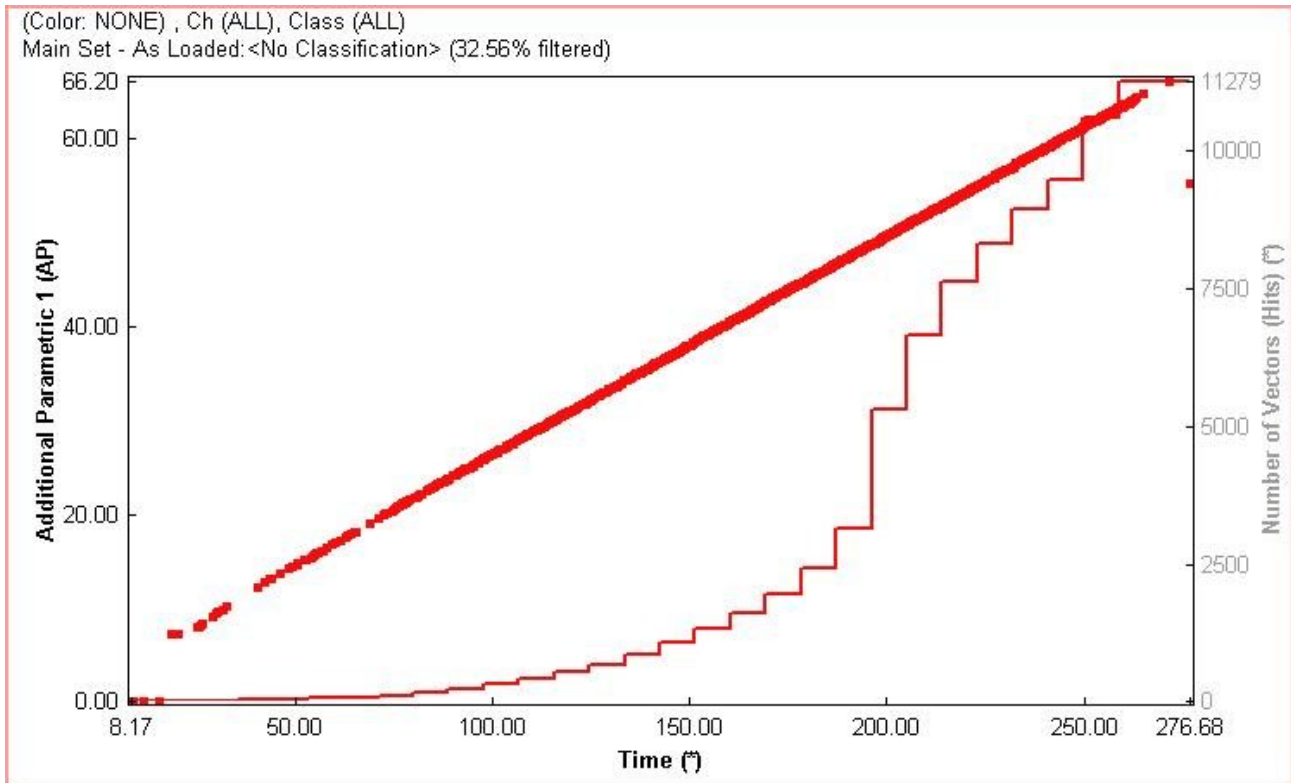


## \_υπολογισμού ελαστικών σταθερών

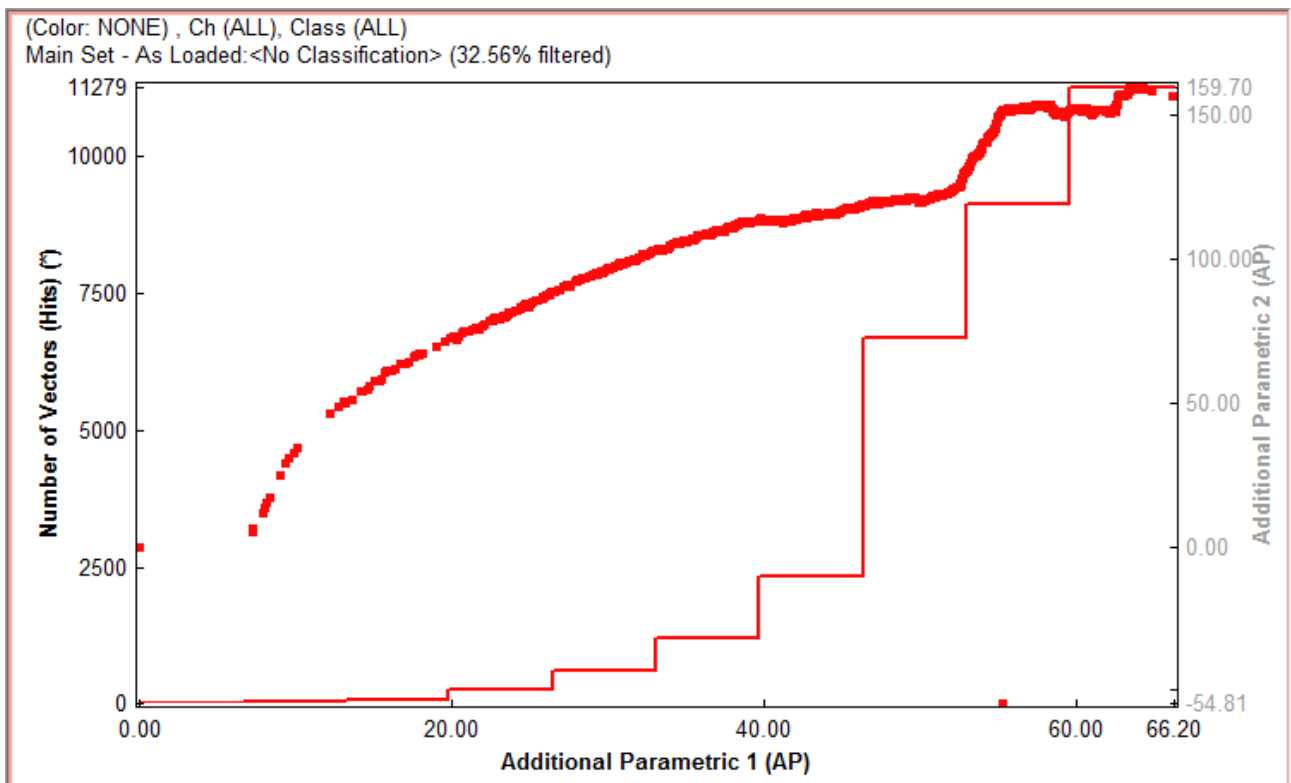
Λόγω μη λειτουργίας των strain gauges το διάγραμμα τάσης – τροπών δεν είναι έγκυρο (Σχήμα 27). Συνεπώς οποιαδήποτε προσπάθεια υπολογισμού ελαστικών σταθερών του Young είναι λάθος.



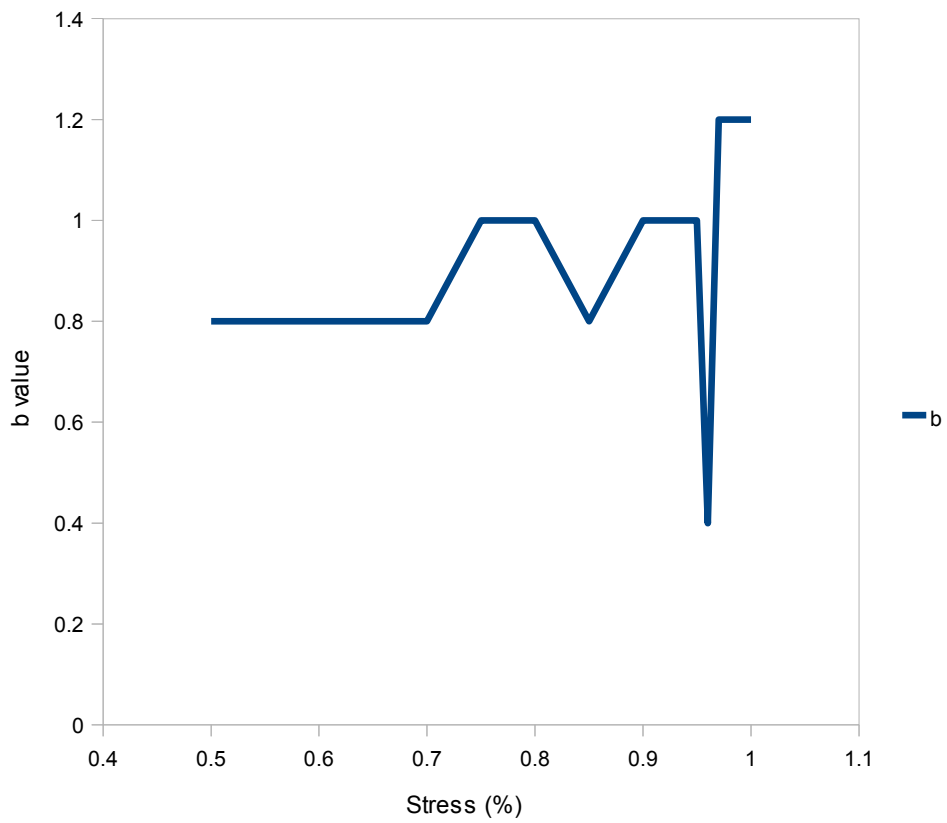
Σχήμα 27: Αξονική τάση – αξονική τροπή – διαμετρική τροπή.



Σχήμα 28: Χρόνος - Αξονική Τάση - Δραστηριότητα ΑΕ



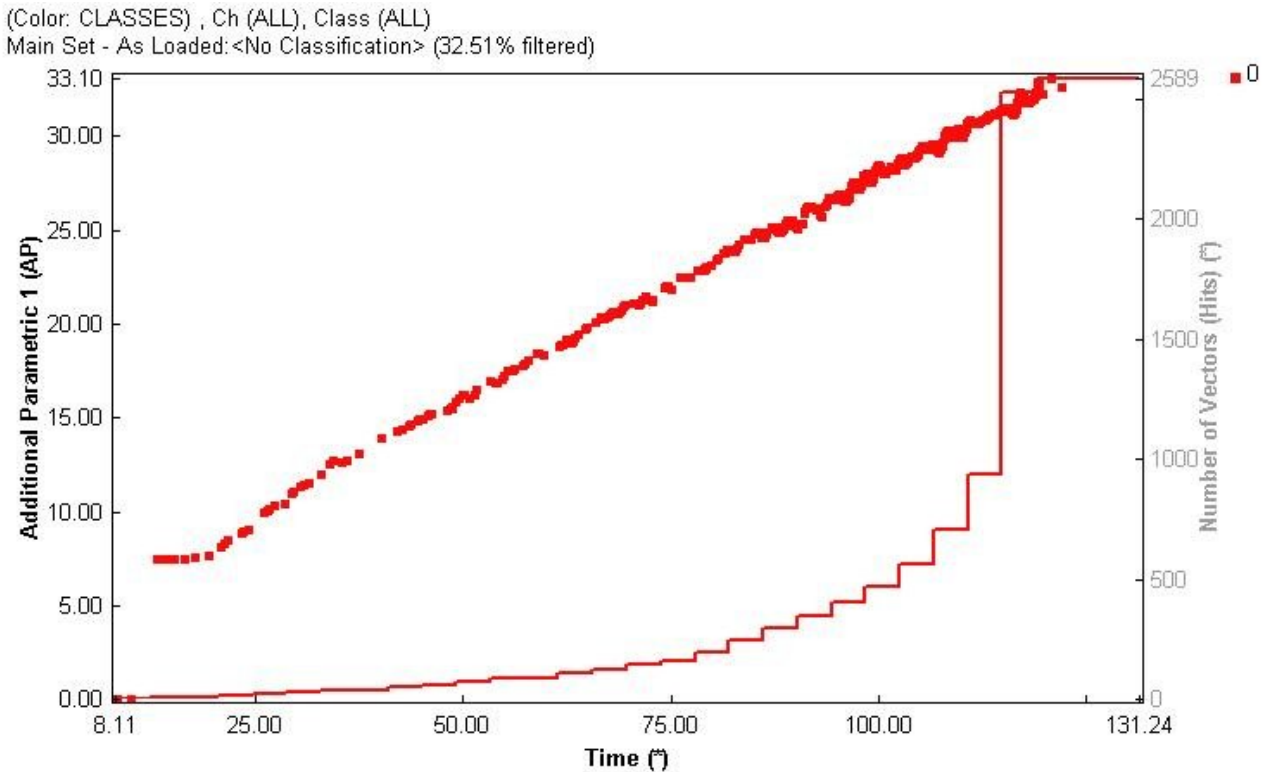
Σχήμα 29: Φόρτιση - Παραμόρφωση - ΑΕ



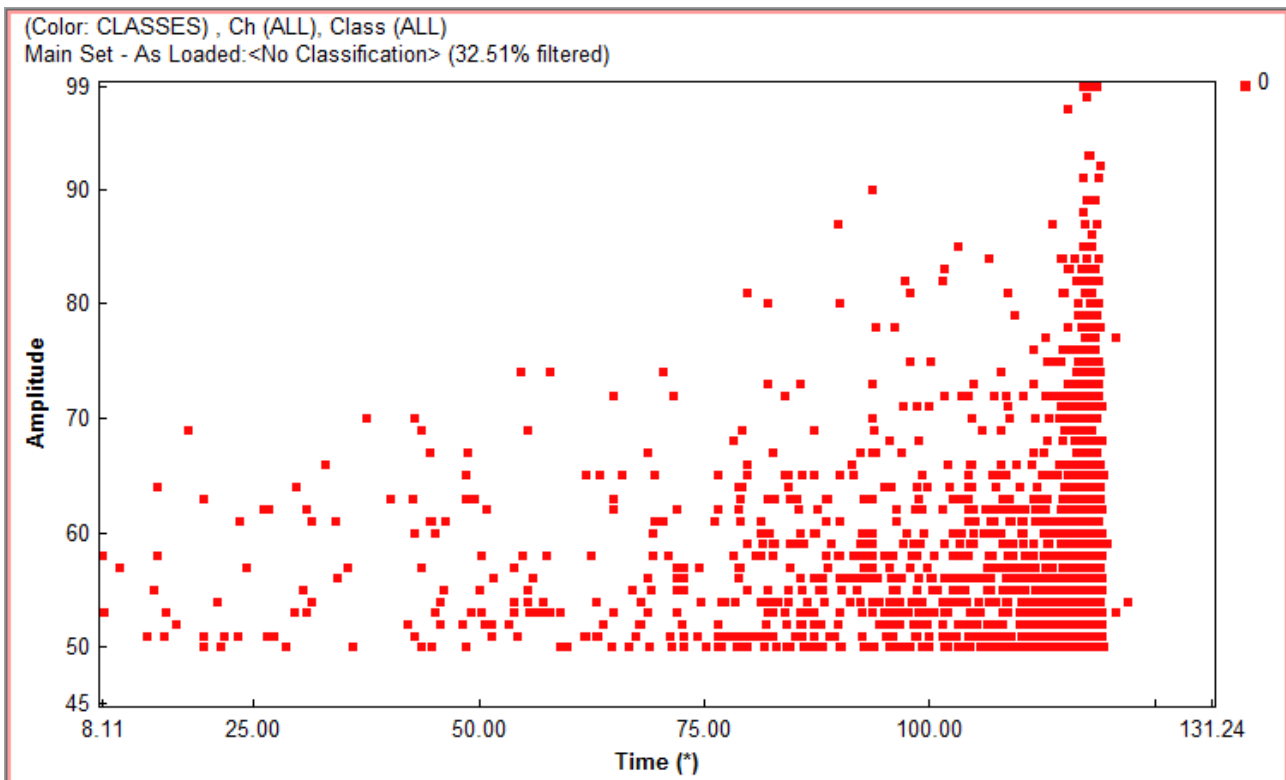
Σχήμα 30: Συντελεστής κατανομής πλάτους b

## Φόρτιση έως θραύση :

Το strain gauge που μετρούσε τη διαμετρική παραμόρφωση δεν έδινε απόκριση καθόλη τη διάρκεια της δοκιμής. Το strain gauge της αξονικής παραμόρφωσης δεν έδινε λογική απόκριση. Παρόλα αυτά δίνεται το διάγραμμα ως παράδειγμα μη λογικής απόκρισης ενός strain gauge, πιθανόν λόγω προβλήματος σύνδεσης στη γέφυρα.



Σχήμα 32: Χρόνος - Αξονική Τάση - Δραστηριότητα AE



Σχήμα 33: Χρόνος φόρτισης - πλάτος γεγονότων AE

## Αποτελέσματα Δοκιμής αντοχής σε μονοαξονική θλίψη.

Δοκιμή	Μέγιστο Φορτίο, P (kN)	Μέγιστη Τάση, $\sigma$ (MPa)	Διάρκεια δοκιμής (sec)
1	324,191	119,57	144
2	397,080	173,4	714
3	153,766	67,15	260,8

Πίνακας 4: Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.

Δοκιμή	Εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Τέμνον μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Μέσο μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Λόγος Poisson
1	215,7		271,93	0,25
2	99,21		110,39	
3				

Πίνακας 4.

Βιβλιογραφία 5ου Κεφαλαίου :

1.Α.Ι. Σοφιανός, 2008, Μηχανική των Πετρωμάτων, Αθήνα.

2.ASTM, Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under varying States of Stress and Temperatures. D 7012 – 07

## Κεφάλαιο 6. Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης

### 6.1. γενικά για τη δοκιμή

Εξ ορισμού η εφελκυστική αντοχή λαμβάνεται από τη δοκιμή άμεσου εφελκυσμού. Αλλά η άμεση δοκιμή είναι δύσκολη και ακριβή για πρακτικές εφαρμογές. Η έμμεση δοκιμή Brazilian προσφέρει ένα επιθυμητό εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού, επειδή είναι πολύ απλούστερη και φθηνότερη.

Επιπλέον, στη μηχανική των πετρωμάτων συνήθως αντιμετωπίζονται περίπλοκα πεδία τάσεων, συμπεριλαμβανόμενων ποικίλων θλιπτικών και εφελκυστικών τάσεων. Υπό αυτές τις συνθήκες, η εφελκυστική αντοχή που λαμβάνεται σε συνδυασμό με την παρουσία θλιπτικών τάσεων μπορεί να είναι αντιπροσωπευτική του εντατικού πεδίου σε ορισμένες περιπτώσεις.

Η έμμεση δοκιμή εφελκυσμού Brazilian είναι μια από τις απλούστερες στην οποία τέτοια πεδία τάσεων επικρατούν. Δεδομένου ότι χρησιμοποιείται ευρέως, μια ομοιόμορφη διαδικασία της δοκιμής είναι απαραίτητη για να είναι τα δεδομένα συγκρίσιμα. Μια ομοιόμορφη δοκιμή είναι επίσης απαραίτητη για να διασφαλιστεί ότι τα δοκίμια δίσκων θα αστοχήσουν διαμετρικά λόγω εφελκυστικού φορτίου κατά μήκος της γραμμής φόρτισης.[1]

### 6.2 Προδιαγραφές

#### \_Διαστάσεις

Το δοκίμιο θα είναι κυκλικός δίσκος με λόγο πάχους προς διάμετρο ( $t/D$ ), 0.2 έως 0.75. Η διάμετρος του δοκιμίου θα είναι τουλάχιστον 10 φορές μεγαλύτερη από τον μεγαλύτερο κόκκου ορυκτού συστατικού. Η διάμετρος των 54 mm (NX) γενικά ικανοποιεί αυτό το κριτήριο. Η περιφερειακή επιφάνεια του δοκιμίου θα πρέπει να είναι λεία και με ανοχή στα 0.50 mm. Η έδρες του δοκιμίου θα πρέπει να είναι παράλληλες μεταξύ τους και σε καθετότητα με τον κατακόρυφο άξονα. Οι άκρες του δοκιμίου δεν θα πρέπει να αποκλίνουν από την εφαιπόμενη στον άξονα του δείγματος παραπάνω από 0.5°. Αυτή η προϋπόθεση επιτυγχάνεται με την κοπή του δοκιμίου με αδαμαντοπίρινο.

#### \_Αριθμός δοκιμών

Τουλάχιστον δέκα δοκίμια θα πρέπει να δοκιμαστούν για να λάβουμε μια μέση τιμή. Εάν η επανάληψη της δοκιμής μας οδηγεί σε αποτελέσματα με απόκλιση μικρότερη από 5%, τότε ένας μικρότερος αριθμός δοκιμών είναι αποδεκτός.

#### \_Φόρτιση

Το φορτίο επιβάλλεται με συνεχή αυξανόμενο ρυθμό ώστε να επιτευχθεί αστοχία μεταξύ 1 και 10 λεπτών διάρκειας της δοκιμής. Αυτή η συνθήκη μεταφράζεται σε 0.05 και 0.35 Mpa/s (500 και 3000psi/min), αναλόγως τον τύπο του πετρώματος. [1]

#### \_Υγρασία

Τα επίπεδα υγρασίας του δοκιμίου κατά την περίοδο της δοκιμής μπορούν να έχουν σημαντική επίπτωση στην λαμβανόμενη αντοχή του πετρώματος. Η αρχική υγρασία του επί τόπου πετρώματος θα πρέπει να διατηρηθεί μέχρι τη δοκιμή, εκτός και εάν η δοκιμή απαιτεί άλλο επίπεδο υγρασίας. [1]

### 6.3 Διαμόρφωση δοκιμίου

Από το κυλινδρικό δοκίμιο που εξάγεται κόβονται στο κατάλληλο μήκος στο δισκοπίρινο οι δίσκοι για την αντιδιαμετρική θλίψη.

### 6.4 Παρακολούθηση παραμορφώσεων

Σε αυτή την δοκιμή δεν τοποθετούνται μηκυσιόμετρα.

## 6.5 Υπολογισμοί

Η έμμεση εκτίμηση της αντοχής σε εφελκυσμό υπολογίζεται ως εξής :

$$\sigma_t = 2t/\pi LD$$

όπου

$\sigma_t$  = έμμεση εφελκυσμό αντοχή, MPa (psi),

P = μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο που κατέγραψε η μηχανή φόρτισης, N,

t = πάχος του δοκιμίου, mm,

D = διάμετρος του δοκιμίου, mm.

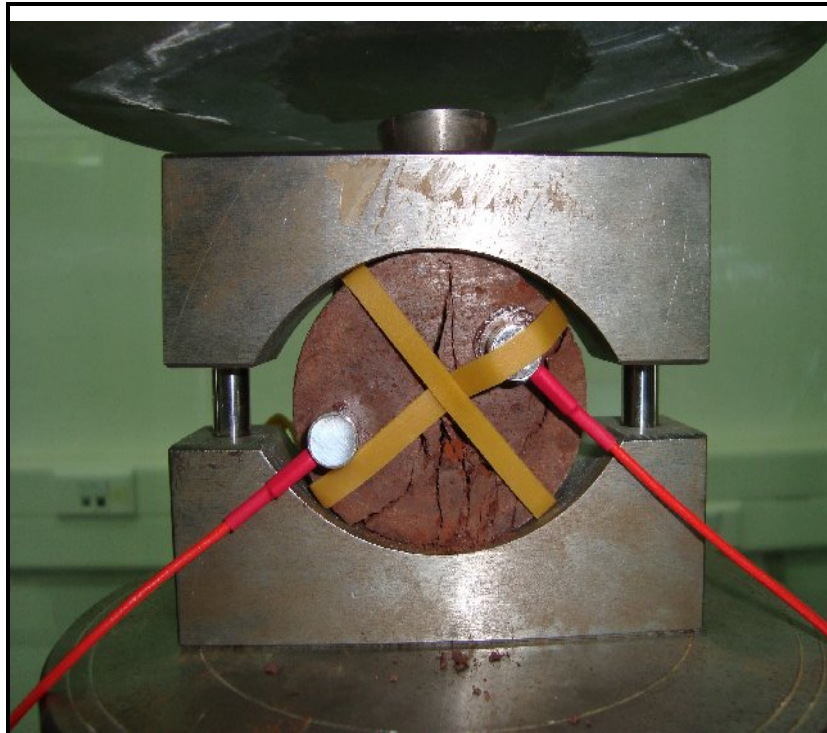
## 6.6 Αποτελέσματα δοκιμών

Δοκίμιο #1 (Διάμετρος (D): 54,3mm, Πάχος (t): 22mm  
 $t/D = 0,405$ )

### Φωτογραφίες



Εικόνα 27: Επιφάνεια



Εικόνα 28: Ελλειψοειδείς πλάκες φόρτισης, αισθητήρες ΑΕ



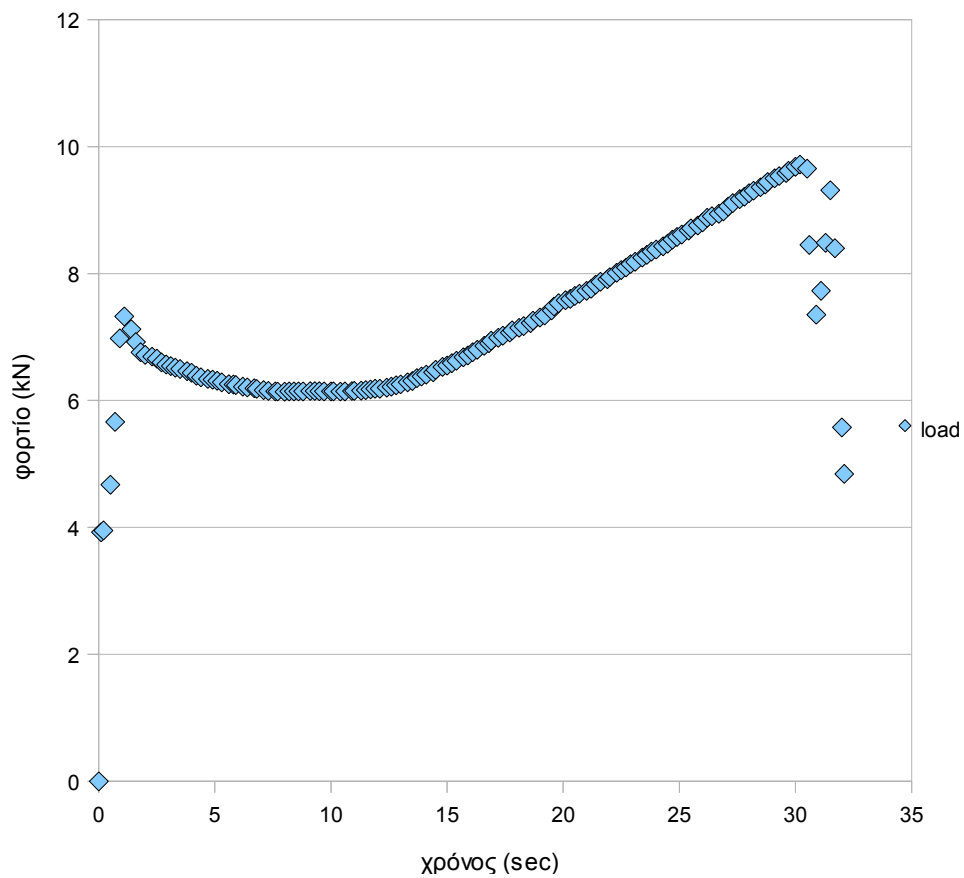
Εικόνα 29: Επιφάνεια 1η



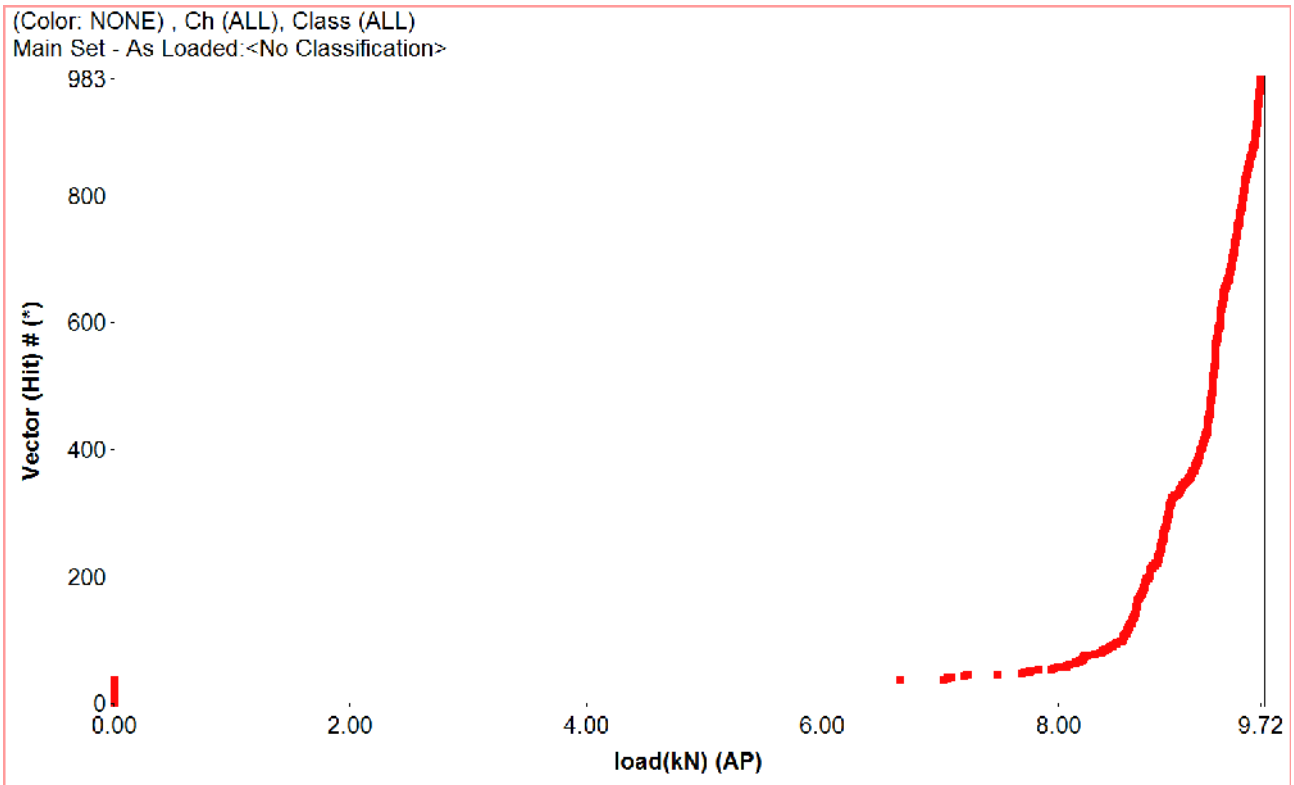


Εικόνα 30: Επιφάνεια 2η

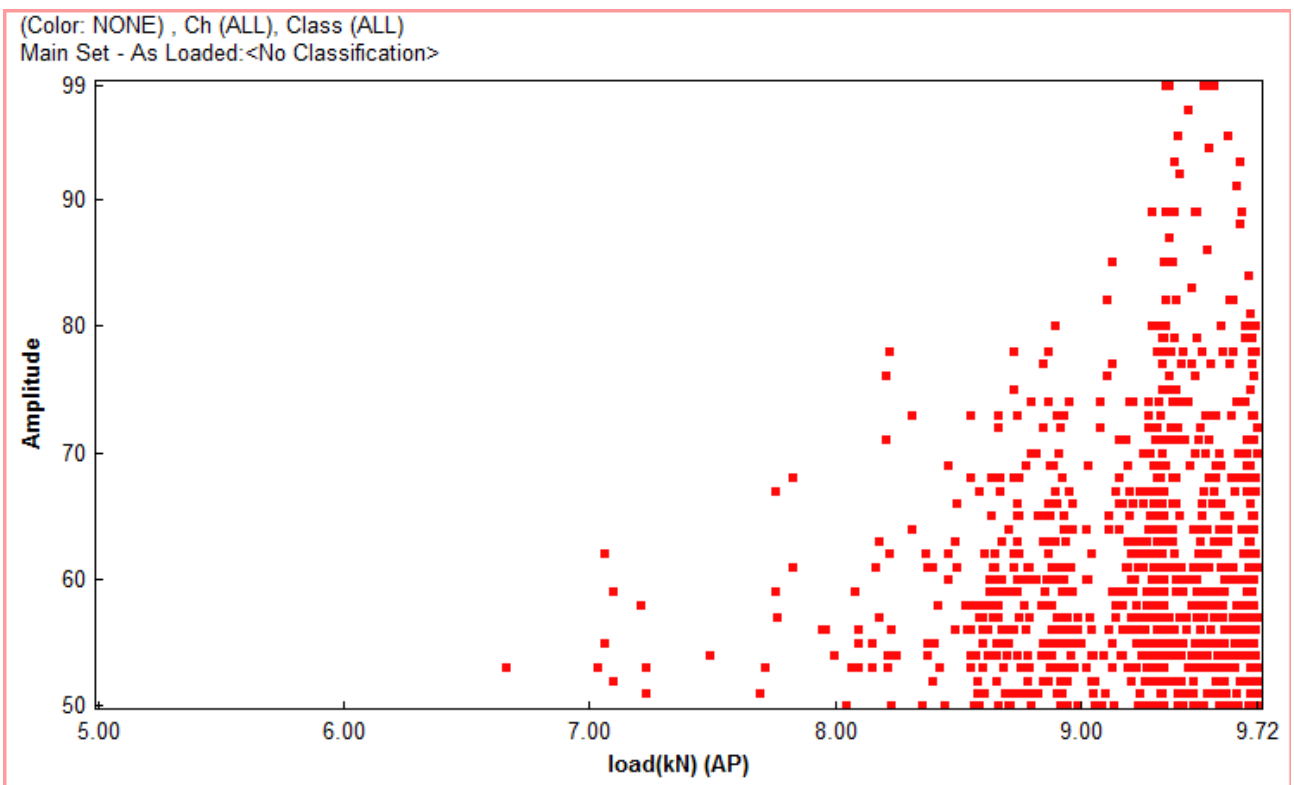
- Η διάρκεια της δοκιμής ήταν 32 sec και το μέγιστο φορτίο 9,72 kN
- Η ρωγμάτωση ήταν μεγαλύτερη στο κάτω μέρος του δίσκου, αποκόλληση συνέβει και στο δεξι άκρο του δίσκου.



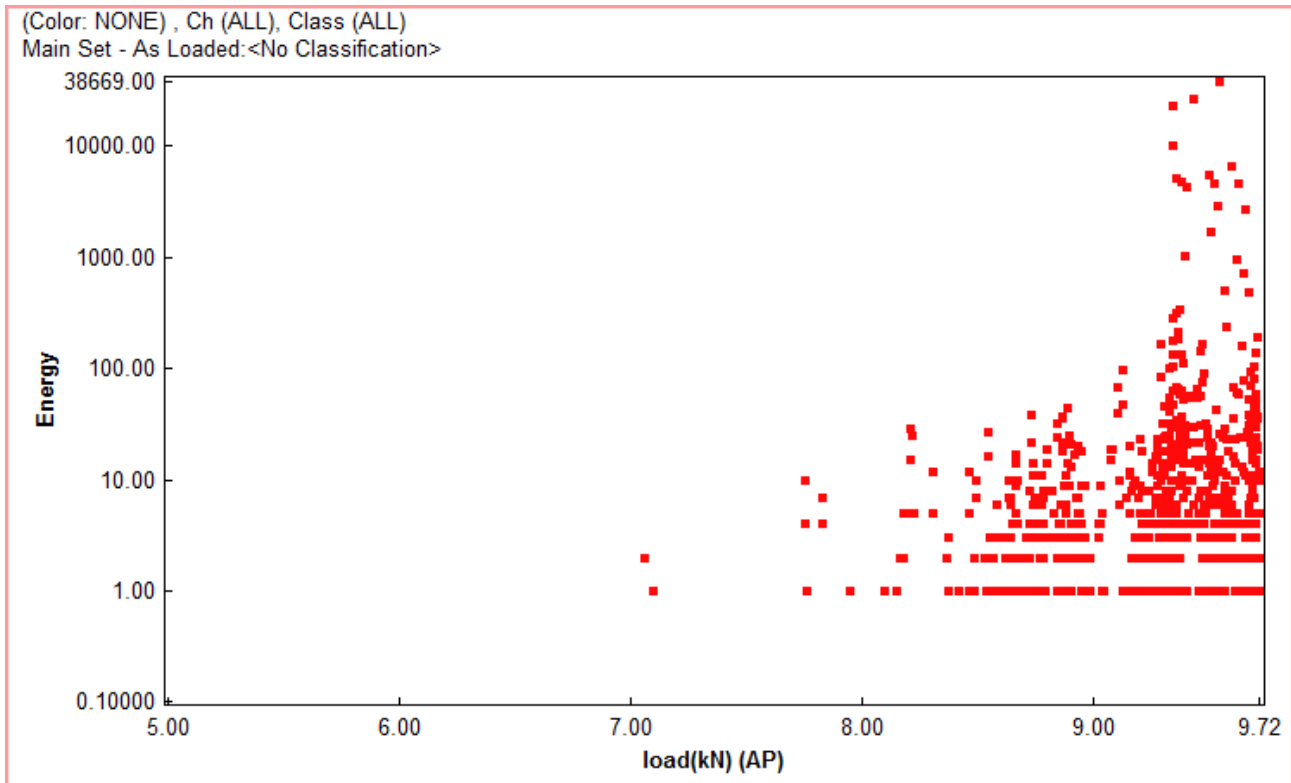
Σχήμα 34: Ρυθμός φόρτισης



Σχήμα 35: Φορτίο - Αθροιστική δραστηριότητα ΑΕ



Σχήμα 36: Φορτίο - Πλάτος γεγονότων ΑΕ



Σχήμα 37: Φορτίο - Ενέργεια ΑΕ

Δοκίμιο 2 (Διάμετρος (D) : 54,3 mm ,Πάχος (t) : 20 mm  
 $t/D = 0,368$ )

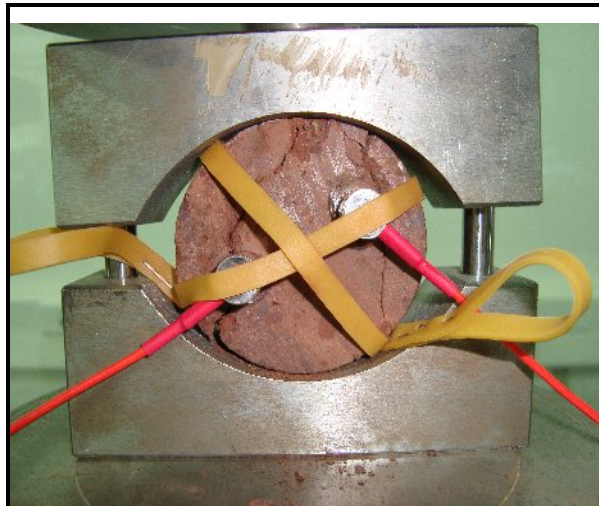
### Φωτογραφίες



Εικόνα 31: Κάτοψη



Εικόνα 32: Κάτοψη



Εικόνα 33: Δοκίμιο στη μηχανή φόρτισης

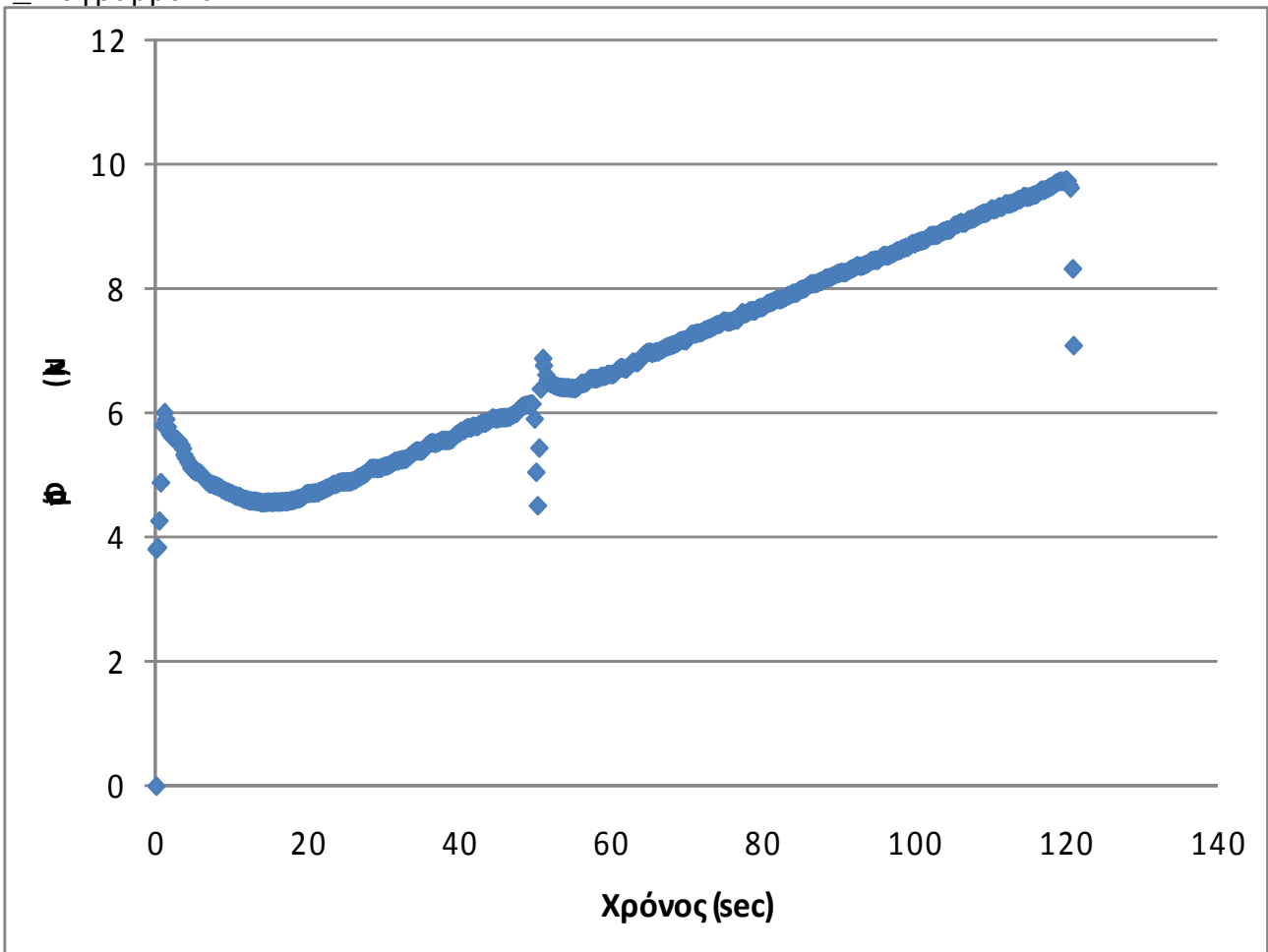


Εικόνα 34: Κάτοψη θραυσμένου δοκιμίου

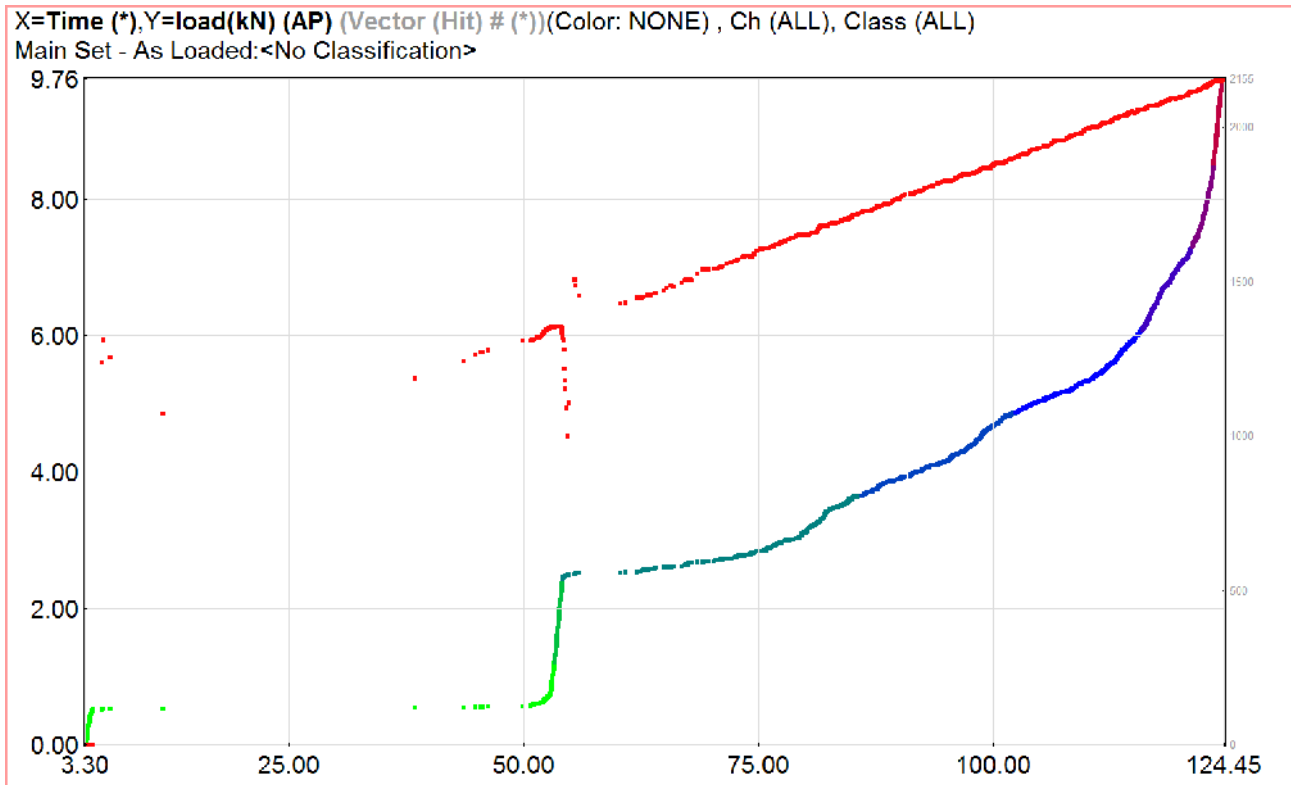


Εικόνα 35: Κάτοψη θραυσμένου δοκιμίου

### Διαγράμματα



Σχήμα 38: Ρυθμός φόρτισης



Σχήμα 39: Διάγραμμα : Χρόνος - Φόρτιση - ΑΕ

Το δοκίμιο δεν αστόχησε κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης, άρα ο έμμεσος υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής δεν μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικός.

Δοκίμιο 3 (Διάμετρος (D) : 54,3 mm ,Πάχος (t) : 29 mm  
 $t/D = 0,534$ )

### Φωτογραφίες



Εικόνα 36: Επιφάνεια 1η



Εικόνα37: Επιφάνεια 2η



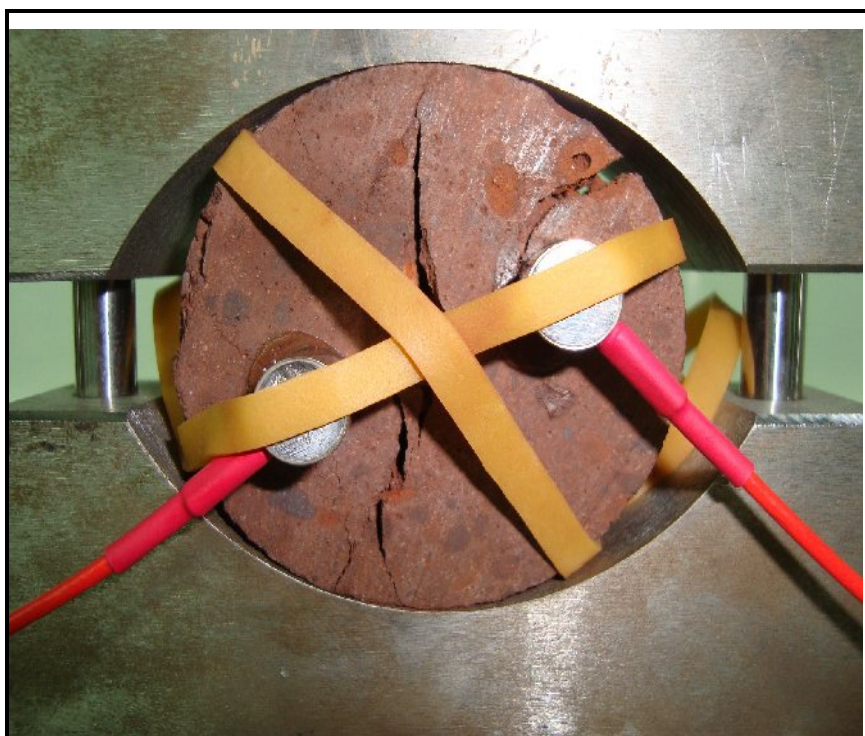
Εικόνα 38: Πλευρική προοπτική



Εικόνα 39: Επιφάνεια 1η

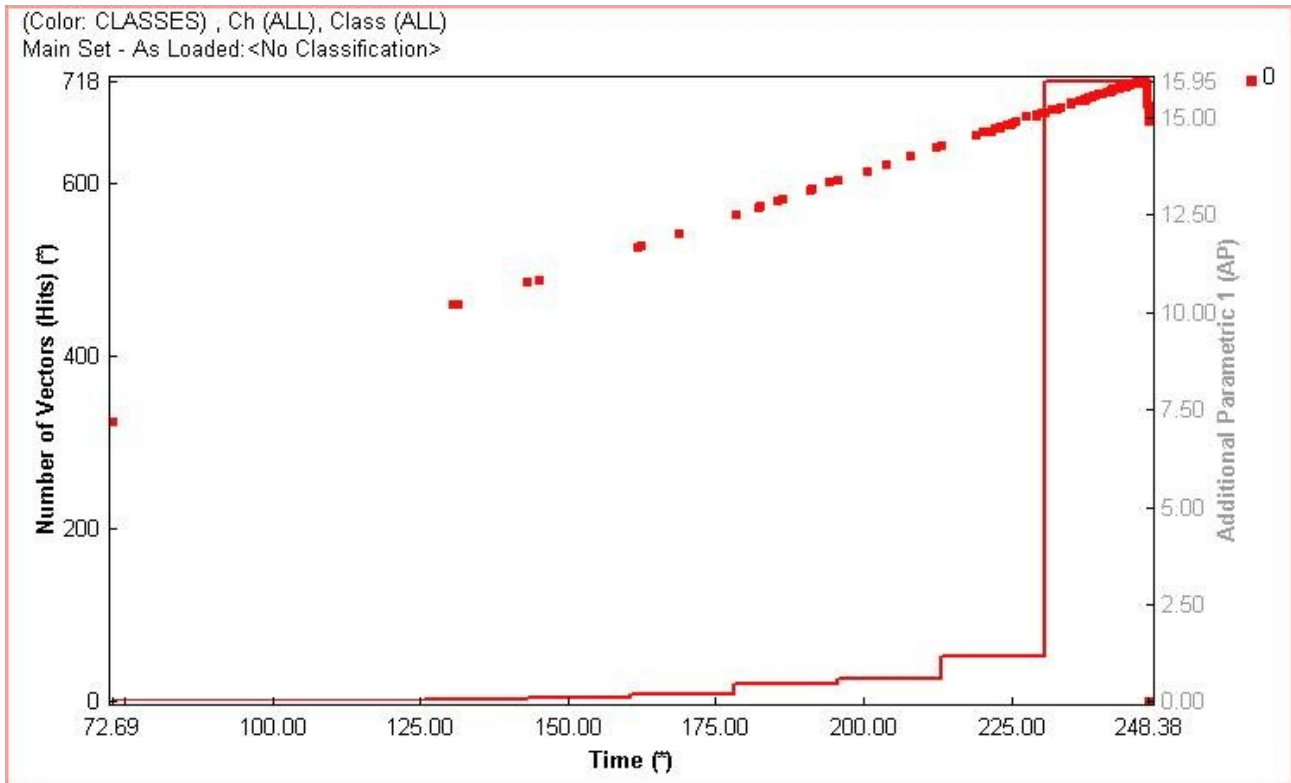


Εικόνα 40: Πλευρική προοπτική



Εικόνα 41: Ελλειψοειδείς πλάκες φόρτισης

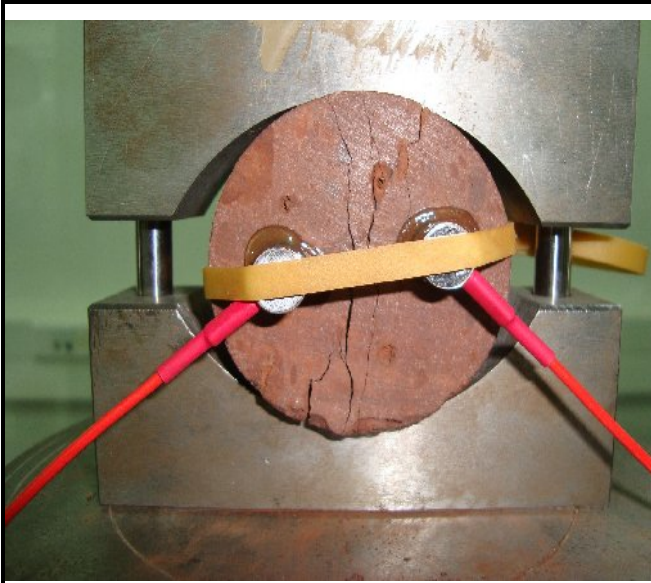




Σχήμα 39: Χρόνος δοκιμής - Τάση - Δραστηριότητα ΑΕ

Δοκίμιο 4 (Διάμετρος (D) : 54,3 mm ,Πάχος (t) : 44 mm  
 $t/D = 0,810$ )

### Φωτογραφίες



Εικόνα 42: Θραυσμένο δοκίμιο



Εικόνα 43: Κάτοψη θραυσμένου δοκιμίου



Εικόνα 44: Κάτοψη θραυσμένου δοκιμίου.

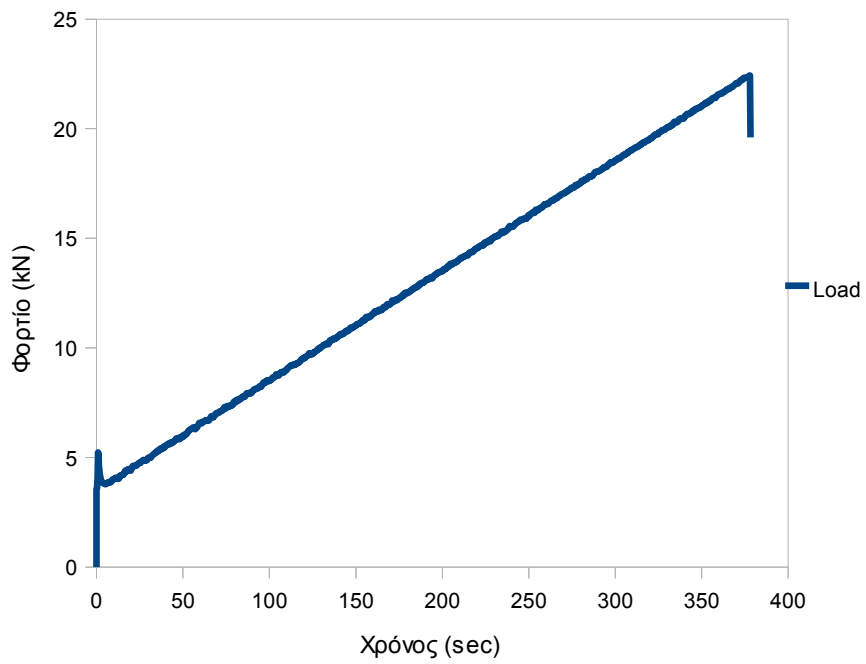


Εικόνα 45: Άποψη δοκιμίου

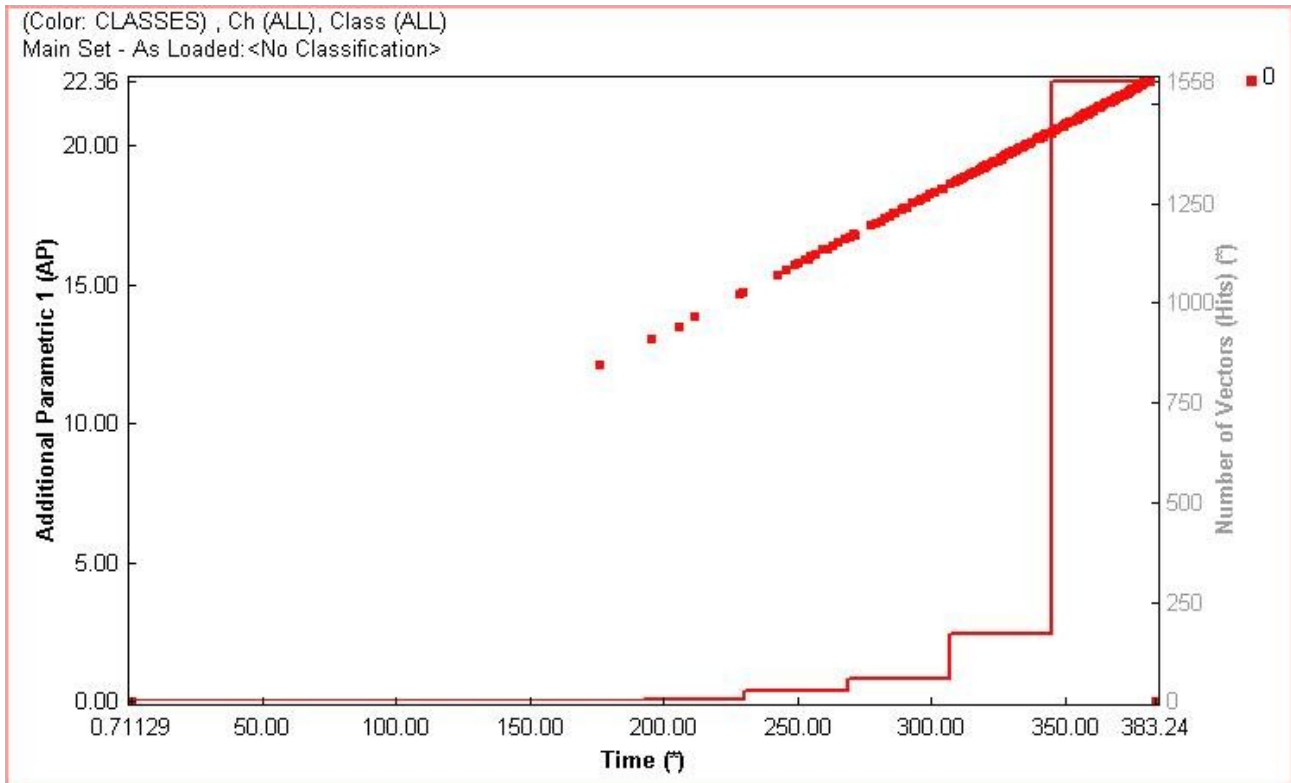


Εικόνα 46: Άποψη δοκιμίου.

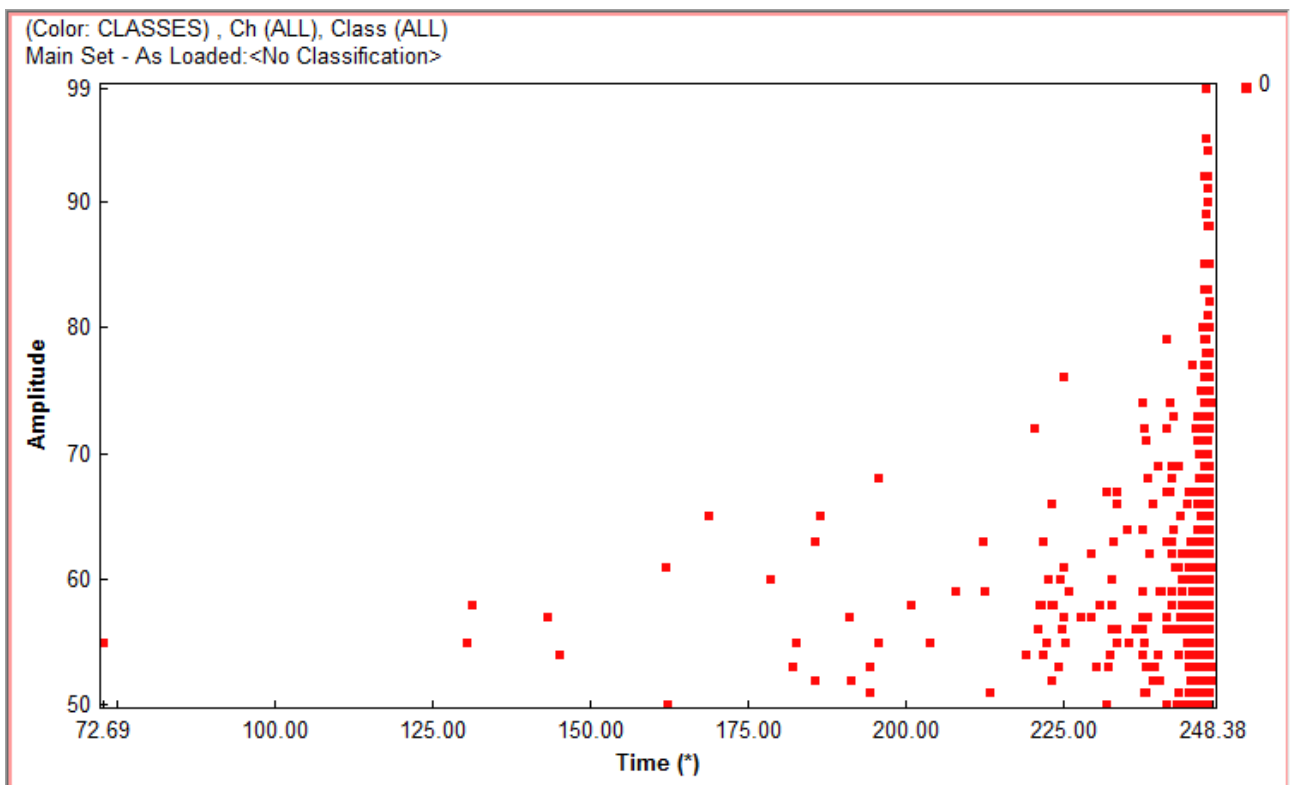
\_διαγράμματα



Σχήμα 40: Ρυθμός φόρτισης



Σχήμα 41: Χρόνος δοκιμής - Τάση - Δραστηριότητα ΑΕ

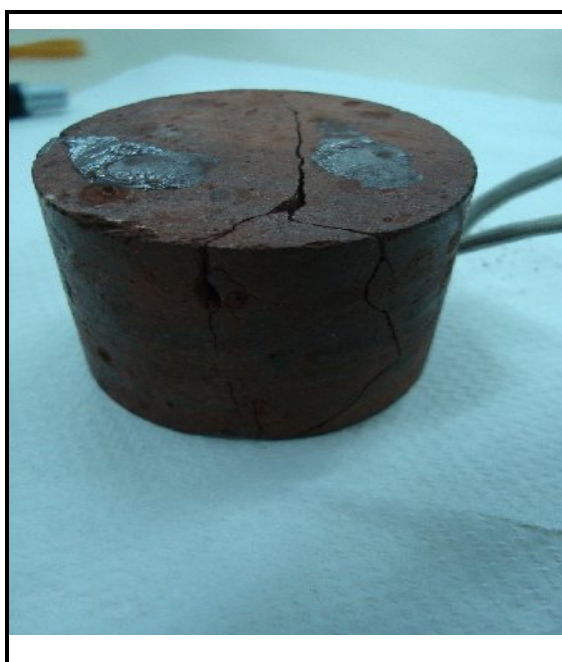


Σχήμα 42: Χρόνος δοκιμής - Πλάτος ΑΕ

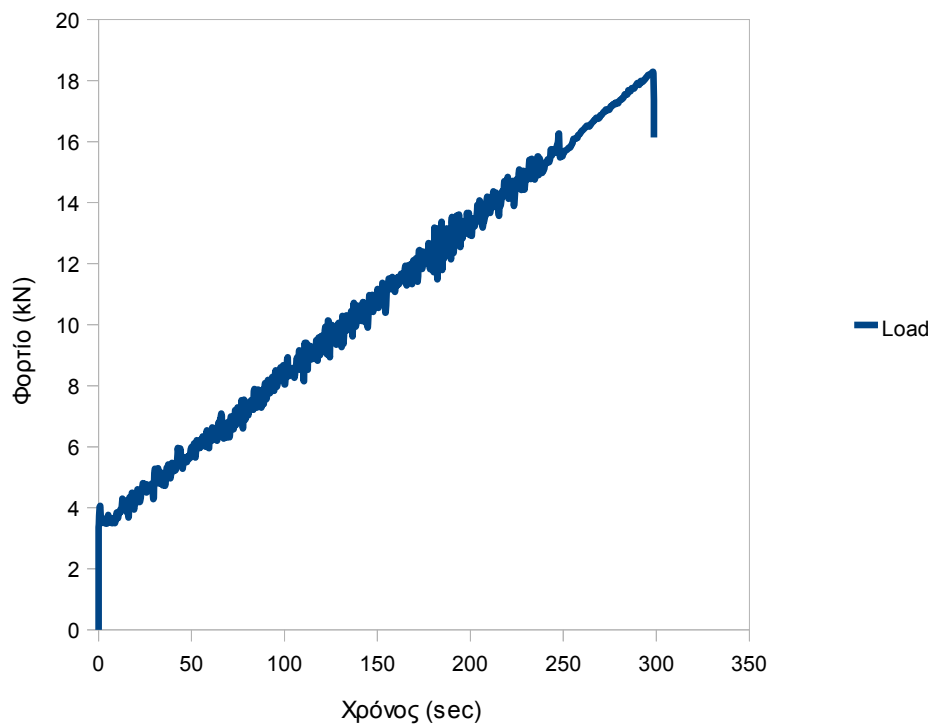
Δοκίμιο 5 (Διάμετρος (D) : 54,3 mm ,Πάχος (t) : 43 mm

$$t/D = 0,791)$$

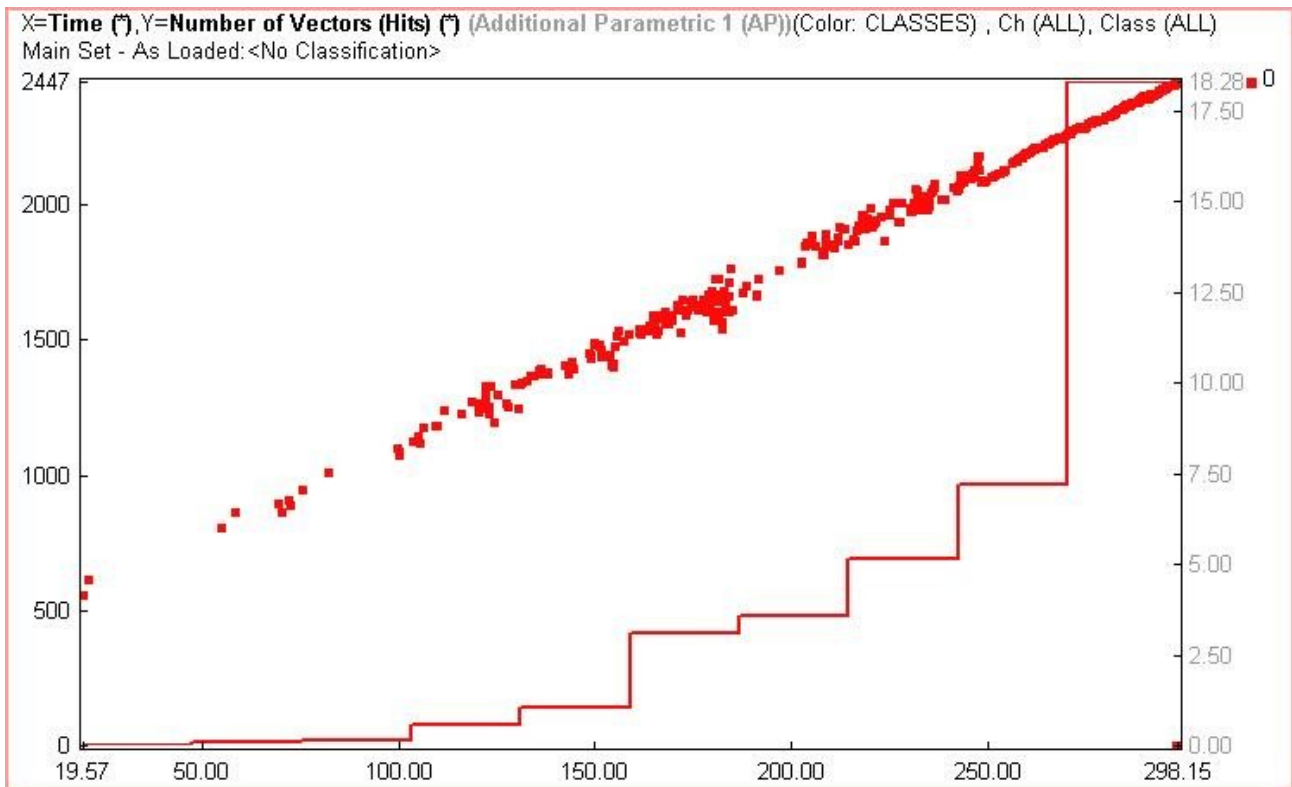
### Φωτογραφίες



\_διαγράμματα



Σχήμα 43: Ρυθμός φόρτισης



Σχήμα 44: Χρόνος δοκιμής - Φορτίο - Δραστηριότητα ΑΕ

## Αποτελέσματα Δοκιμής αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη

Δοκίμιο	$\sigma_t$ (MPa)	P (N)	t (mm)	D (mm)	Διάρκεια δοκιμής (sec)
1	6,331	9718	18	54,3	32,1
2	6,020	9756	19	54,3	121,2
3	6,680	15955	28	54,3	248,3
4	6,115	22430	43	54,3	378,2
5	5,102	18285	42	54,3	298,8

Πίνακας 5 Αποτελέσματα δοκιμών αντιδιαμετρικής θλίψης

---

Βιβλιογραφία 6ου Κεφαλαίου :

1. Α.Ι. Σοφιανός, 2008, Μηχανική των Πετρωμάτων, Αθήνα
2. ASTM, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens, D 3967 – 08.

## Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας την εργασία που έγινε, ακολουθεί μια σύνοψη συμπερασμάτων που εξάχθηκαν σε κάθε στάδιο αυτής. Κάθε κεφάλαιο αντιπροσωπεύει και μια πτυχή της προσπάθειας που χρειάζεται ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι της εργασίας.

Τα μεταλλεία βωξίτη της περιοχής Παρνασσού – Γκιώνας είναι από τα παλαιότερα και μεγαλύτερα, σε έκταση και παραγωγή της Ελλάδας. Εκτείνονται σε μεγάλη περιοχή και οι διαστάσεις των θαλάμων και στύλων είναι μεγάλες λόγω πάχους κοιτάσματος και των καλών μηχανικά περιβαλλόντων ασβεστολίθων. Η περιοχή έχει ερευνηθεί συστηματικά από πλήθος ερευνητών. Οι εργασίες των Οικονομόπουλου, Σοφιανού, Κορωνάκη σε πλήθος ζητημάτων στα μεταλλεία τις περιοχής βοήθησαν αρκετά και παρείχαν υλικό προς σκέψη. Άλλα μεγάλα τεχνικά έργα στην περιοχή πέρα των μεταλλείων είναι το τεχνητό φράγμα ποταμού Μόρνου, οι υδραυλικές σήραγγες αυτού, όπου και έγινε μια από τις πρώτες εφαρμογές TBM στον ελλαδικό χώρο.

Σαφώς ένας στύλος διαστάσεων 8 x 8m, στην περίπτωση του βωξίτη δεν γίνεται να αποτελείται από άρρηκτο πέτρωμα ακόμη και με μια σειρά παραδοχών. Σχεδόν πάντα θα υπάρχει κάποια τεκτονική δομή που θα αλλάζει την συμπεριφορά του. Δεδομένο ότι έχει ύψος όσο το κοιτάσμα, θα εδράζεται σε διαφορετικά πετρώματα, στην προκειμένη τους ασβεστόλιθους. Από τους κοινούς τύπους αστοχιών που διακρίνονται στα υπόγεια μεταλλεία βωξίτη για τους στύλους εμφανίζονται η αποφλοιώση και ο θρυμματισμός της επιφάνειας τους, η επαφή τους με χαμηλής αντοχής οροφή καθώς και περιοχές όπου το άνοιγμα προς υποστήριξη είναι μεγάλο (διασταυρώσεις στοών). Παρόλα αυτά παρατηρούνται μορφές αστοχίας αντίστοιχες με των δοκιμίων (axial split , κα).

Τα δείγματα βωξίτη μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων, όπου και διαμορφώθηκαν για τις εργαστηριακές δοκιμές με μηχανήματα του εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας. Η διαφοροποίηση του βωξίτη όσον αφορά την αντοχή του από σημείο σε σημείο του κοιτάσματος λόγω ορυκτολογικών αλλαγών έγινε εμφανής κατά τη διάτρηση με το δειγματοληπτικό τρυπάνι. Όπως λέγεται από τους εργατοτεχνίτες των υπογείων αλλού ο βωξίτης είναι σίδηρο και αλλού αρκεί μια τσάπα για να τον αποσπάσεις. Υπήρξε δείγμα βωξίτη το οποίο ήταν αρκετά σκληρότερο των άλλων, καθιστώντας την προχώρηση του τρυπανιού αδύνατη. Κατά την διεξόδυση του τρυπανιού γίνονταν αντιληπτά διάφορα συγκρίματα με μεγάλο ποσοστό Fe/οξειδίων αν και μεγαλύτερη σημασία ορυκτολογική για το ρυθμό και την ευκολία διάτρησης παίζει το ποσοστό του Si που βρίσκεται στο πέτρωμα. Σε αυτή την εργασία διαπίστωσα και την σημασία της προστασίας της εργασίας από το θόρυβο, ο χειρισμός του τρυπανιού χωρίς προστατευτικά ακουστικά υπήρξε αδύνατος για πάνω από 10'.



Από κάθε δείγμα βωξίτη διαμορφώθηκαν 2-3 κυλινδρικά δοκίμια διαφόρων μηκών. Η κοπή τους στο δισκοπρίονο στο κατάλληλο μέγεθος υπήρξε ίσως η δυσκολότερη εργασία στη διαμόρφωση, λόγω της διαμέτρου των δοκιμίων και του πάχους του δίσκου. Ο συνδυασμός του δίσκου που ήταν σχεδιασμένος για μαλακότερα πετρώματα και των δοκιμίων μικρής διαμέτρου έφερε το σπάσιμο των δοκιμίων που είχαν στη δομή τους κάποιου είδους ασυνέχεια.

Στη συνέχεια διαμορφώθηκαν όσο το δυνατόν περισσότερα δοκίμια μορφής δίσκου, διαφόρων παχών για τη δοκιμή της αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη.

Η τελική διαδικασία της λείανσης έγινε με λειαντικό αδαμαντοκαρβιδίων. Με μεγάλη ακρίβεια δημιουργείται η επιπεδότητα των επιφανειών και η ανοχή είναι στα επιτρεπτά όρια.

Αποφλοιώσεις, αποκολλήσεις συγκριμάτων από την επιφάνεια γίνονταν όταν έμενε η κεφαλή του λειαντικού αρκετή ώρα πάνω στο δοκίμιο. Χαρακτηριστική ήταν η ανάφλεξη ορισμένων οξειδίων στην επαφή με τα αδαμαντοκαρβίδια.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εργαστηριακές δοκιμές που έγιναν :

#### · Δοκιμή αντοχής σε Μονοαξονική Θλίψη

##### · Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη #1

Υπήρξε η πρώτη δοκιμή, όπου και εφαρμόστηκαν 6 αισθητήρες καταγραφής ΑΕ.

Το δοκίμιο αστόχησε στα 119 MPa, η δραστηριότητα ΑΕ ξεκινά από χαμηλές τιμές τάσεις (περίπου 10 MPa), αυξάνεται γραμμικά έως περίπου τα 70 MPa, έπειτα ο ρυθμός έκλυσης ΑΕ αλλάζει συνεχώς μέχρι και την αστοχία.

Η καταγραφή της δραστηριότητας ΑΕ δεν βοήθησε σε οποιαδήποτε πρόγνωση σχετική με την επερχόμενη αστοχία.

Στο διάγραμμα του συντελεστή πλάτους συχνοτήτων  $b$  μπορούμε να διακρίνουμε λίγο πριν την αστοχία μια αύξηση της τιμής του που ακολουθείται από μια ραγδαία μείωση.

Άρα μια τέτοια ένδειξη στο διάγραμμα θα μπορούσε να αποτελεί ένδειξη της επερχόμενης αστοχίας του δοκιμίου.

##### · Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη #2

Σε αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν 4 αισθητήρες καταγραφής ΑΕ.

Το δοκίμιο αστόχησε στα 173 MPa, μέχρι περίπου τα 75 MPa η δραστηριότητα ΑΕ είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα ακολούθως ο ρυθμός αλλάζει αυξανόμενος μέχρι περίπου τα 150 MPa, όπου και αυξάνεται ακαριαία μέχρι την αστοχία. Αυτή η εμφανής και ραγδαία αύξηση, 23 MPa πριν την αστοχία αποτέλεσε μια προειδοποίηση δραστηριότητας. Το δοκίμιο χωρίστηκε σε τεμάχια με τα επίπεδα διαχωρισμού τους παράλληλα προς την διεύθυνση φόρτισης (axial split). Επίσης το δοκίμιο αστόχησε εκρηκτικά, εάν είναι δόκιμος ο όρος, εκτινάχθηκαν κομμάτια του σε απόσταση.

### · Δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη #3

Σε αυτή τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν επίσης 4 αισθητήρες καταγραφής ΑΕ. Το δοκίμιο περιείχε μια κατακόρυφη ρωγμή, άγνωστο σε τι βαθμό εκτεινόταν εντός του ή ήταν μόνο επιφανειακή. Σε αυτή τη δοκιμή προέκυψαν προβλήματα λόγω μη λειτουργίας των μηκυνσιομέτρων, κάποιο πιθανό πρόβλημα στη συνδεσμολογία και δεν έδιναν απόκριση. Έτσι η δοκιμή σταμάτησε στα 67,15 MPa, καινούργια strain gauge τοποθετήθηκαν και το δοκίμιο επαναφορτίστηκε φτάνοντας στα 33,10 MPa. Υπήρξε χαρακτηριστική η διόγκωση του δοκιμίου όπως και αποφλοιώσεις κατά μήκος της ρωγμής. Πιθανώς η κατακόρυφη ασυνέχεια εκτεινόταν εντός του δοκιμίου και η πρώτη φόρτιση την εξασθένησε σε τέτοιο βαθμό ώστε στην επαναφόρτιση να αστοχήσει σε μικρότερη τάση.

Στην πρώτη φόρτιση, έως 67 MPa, ο αριθμός γεγονότων ΑΕ ξεκινά από νωρίς, 10 MPa, έστω και σε χαμηλά επίπεδα, στα 40 MPa γίνεται μια ακαριαία αύξηση όπου έπειτα σταθεροποιείται μέχρι το σταμάτημα της φόρτισης.

Πιθανό αυτή η ακαριαία αύξηση της έκλυσης γεγονότων ΑΕ να υποδεικνύει την ολίσθηση, ρωγμάτωση κάποιου επιπέδου ασυνέχειας εντός του δοκιμίου.

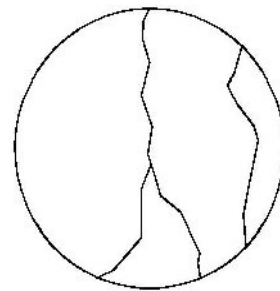
Στην επαναφόρτιση ο ρυθμός έκλυσης γεγονότων ΑΕ δεν παρουσιάζει καμία προειδοποίηση, ξεκινά μεν από χαμηλές τιμές τάσεις και αλλάζει διαρκώς έως λίγο πριν την αστοχία όπου εκτινάσσεται. Στο Σχήμα 31, όπου συναρτάται ο χρόνος φόρτισης με την ένταση των γεγονότων ΑΕ, η γενική του μορφή παραμένει ίδια με τον ρυθμό έκλυσης γεγονότων ΑΕ. Ίσως μπορούσαμε να διακρίνουμε την ύπαρξη σχετικά υψηλών εντάσεων γεγονότων >70dB από την αρχή της επαναφόρτισης. Ίσως ασυνέχειες εντός του δοκιμίου που είχαν διευρυνθεί από την πρώτη φόρτιση έδιναν αυτά τα γεγονότα ΑΕ.

### · Δοκιμή αντοχής σε Αντιδιαμετρική Θλίψη

#### · Δοκιμή αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη #1

Το δοκίμιο, με λόγο πάχος/διάμετρο περίπου 1/2 φορτίστηκε και αστόχησε σε φορτίο 9,72 kN. Αστόχησε κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης με μεγαλύτερη ρωγμάτωση στο κάτω μέρος του δίσκου, όπου και συνέβει αποκόλληση τεμάχους στη δεξιά περιφέρεια του.

Τα πρώτα γεγονότα ΑΕ που καταγράφηκαν ήταν περίπου στα 7 kN, αλλά μετά τα 8,2 kN αρχίζει ο ρυθμός έκλυσης τους να αλλάζει αυξανόμενος μέχρι τη θραύση.



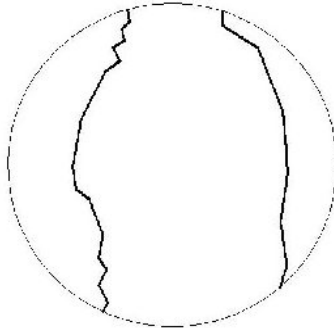
Σχήμα 45: Σκαρίφημα θραύσης δοκιμίου #1

Ακόμη πιο διακριτό γίνεται από το Σχήμα 33 όπου φαίνεται η ενέργεια των σημάτων ΑΕ συναρτημένη του φορτίου. Αξιοσημείωτα γεγονότα ΑΕ ξεκινούν μετά τα 8,5 kN περίπου.

· Δοκιμή αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη #2

Το δοκίμιο, με το μικρότερο λόγο πάχους/διάμετρο (0,368) αστόχησε σε φορτίο 9,76 kN.

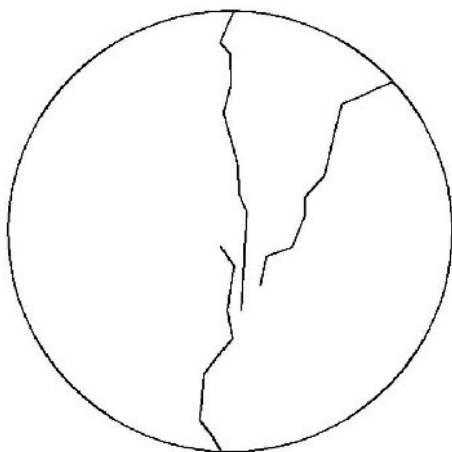
Το δοκίμιο δεν αστόχησε κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης, άρα ο έμμεσος υπολογισμός της εφελκυστικής αντοχής δεν μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητικός.



Σχήμα 46: Σκαρίφημα θραύσης δοκιμίου #2

Η θραύση έγινε στην περιφέρεια του δοκιμίου, στη θέση των αισθητήρων. Από τα διαγράμματα ρυθμού φόρτισης και δραστηριότητας ΑΕ γίνεται φανερό ότι υπήρξε κάποιο συμβάν περίπου στα 6 kN. Υπήρξε τότε μια στιγμιαία πτώση και έπειτα επαναφορά στο ρυθμό φόρτισης. Η μέχρι τότε εκλυόμενη δραστηριότητα ΑΕ είναι σε πολύ χαμηλά επίπεδα, μετά από τα 6 kN, αυξάνεται, ο ρυθμός έκλυσης συνεχώς αλλάζει μέχρι τη θραύση.

· Δοκιμή αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη #3



Σχήμα 47: Σκαρίφημα θραύσης δοκιμίου #3

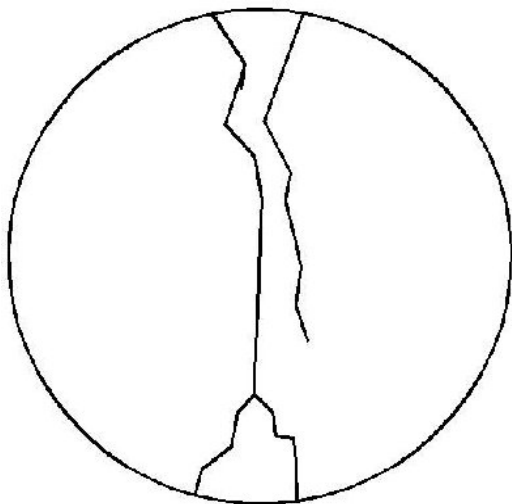
Το δοκίμιο, με λόγο πάχος/διάμετρο περίπου 1/2 αστόχησε σε φορτίο 15,9 kN.

Η αστοχία επήλθε σε επίπεδο κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης χωρίς την αποκόλληση τεμαχίων. Η αθροιστική δραστηριότητα ΑΕ ήταν σχεδόν σε μηδαμινά επίπεδα μέχρι τα 14,5 kN. Λίγο πριν την αστοχία έγινε μια ακαριαία αύξηση. Το ίδιο εξάγεται και από το Σχήμα 34, όπου συναρτάται ο χρόνος φόρτισης με την ένταση των γεγονότων ΑΕ. Ελάχιστα γεγονότα χαμηλής έντασης μέχρι λίγα δευτερόλεπτα πριν την αστοχία όπου

εμφανίζονται γεγονότα υψηλής έντασης >80 dB.

· Δοκιμή αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη #4

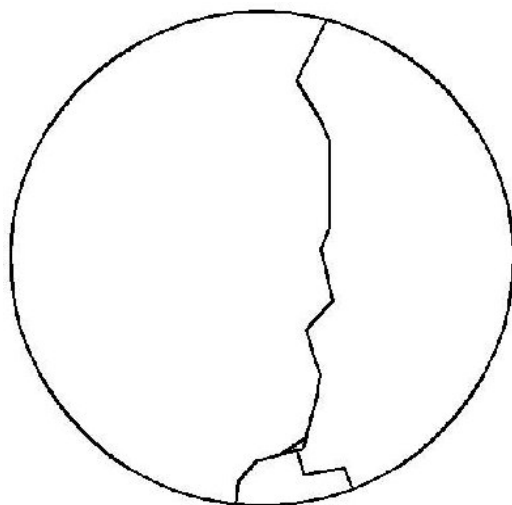
Το δοκίμιο με το μεγαλύτερο λόγο πάχους/διάμετρο (0,810). Ήταν το δοκίμιο που ανέλαβε το μεγαλύτερο φορτίο 22,4 kN αλλά όχι και με τη μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό.



Σχήμα 48: Σκαρίφημα θραύσης δοκιμίου #4

Ελάχιστες ρωγμές μικρού ανοίγματος σχηματίστηκαν κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης στη θραύση. Κάποια σποραδικά γεγονότα ΑΕ εμφανίζονται από το μέσο της φόρτισης και έπειτα αλλά μέχρι τα 20 kN δεν υπάρχει τίποτα το αξιοσημείωτο. Όπως και στις προηγούμενες δοκιμές αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη λίγο πριν την αστοχία εμφανίζονται γεγονότα ΑΕ υψηλής έντασης.

· Δοκιμή αντοχής σε αντιδιαμετρική θλίψη #5



Σχήμα 49: Σκαρίφημα θραύσης δοκιμίου #5

Το δοκίμιο με το δεύτερο μεγαλύτερο λόγο πάχους/διάμετρο (0,791). Αστόχησε σε φορτίο 18,2 kN και ήταν το δοκίμιο με τη μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό.

Η θραύση του είχε τη μορφή του προηγούμενου δοκιμίου, ρωγμές μικρού ανοίγματος κατά μήκος της διεύθυνσης φόρτισης. Ο ρυθμός φόρτισης ήταν σταθερά αυξανόμενος αλλά όχι γραμμικός. Η δραστηριότητα ΑΕ ξεκινά από σχετικά νωρίς, πριν το μέσο της διάρκειας δοκιμής αυξάνεται με μικρό ρυθμό και όταν ο ρυθμός φόρτισης

εξομαλύνεται λίγο πριν το τέλος τότε αυξάνεται ραγδαία και αυτή.

Ο βωξίτης που εξετάστηκε είχε κατά μέσο όρο :

- Αντοχή σε Μονοαξονική Θλίψη (UCS) : 120,04 MPa.
- Αντοχή σε Εφελκυσμό : 6,049 MPa.

Συμπερασματικά, η καταγραφή της αθροιστικής δραστηριότητας ΑΕ σε ορισμένες περιπτώσεις μπόρεσε να δώσει έγκαιρη προειδοποίηση της επερχόμενης αστοχίας. Όταν υπήρχε κάποια διεργασία εντός του δοκιμίου αυτή γινόταν αντιληπτή από την καταγραφή της δραστηριότητας ΑΕ.

Η επί τόπου εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου αυτόματου συστήματος παρακολούθησης παραμορφώσεων, συγκλίσεων, συνθηκών αερισμού κα. σε ένα μεταλλείο επιβάλλεται πλέον να περιλαμβάνει και μικροσεισμικό εξοπλισμό. Στην περίπτωση μεταλλείων βωξίτη όπου η υποστήριξη είναι φυσική και επαφύεται στους στύλους συσκευές μικροσεισμικής παρακολούθησης θα μπορούσαν να τοποθετηθούν σε περιοχές επικίνδυνες (διασταυρώσεις στοών όπου δημιουργείται μεγάλο άνοιγμα, στύλοι σε περιοχή με ασβεστόλιθο οροφής χαμηλής αντοχής).

Εάν η τοποθέτηση και πόσο μάλλον η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος καθίσταται δυσχερής έως αδύνατη κατά τη φάση της λειτουργίας ενός μεταλλείου, στη φάση της υποχώρησης και αποκατάστασης του μπορεί να βοηθήσει αρκετά. Έχοντας μια αρχική οριοθέτηση περιοχών ανάλογα με την ασφάλεια τους, μια εποπτεία σε πραγματικό χρόνο είναι το ζητούμενο. Επί τόπου εργασία έχει γίνει σε υπόγεια μεταλλείο στην περιοχή, από τους Οικονομόπουλο, Σοφιανό, Κορονάκη 1995 (J N Economopoulos, A I Sofianos, N J Koronakis, P T Kontothanassis, D H Kotinis 1995, Real time stability control in underground room and pillar mining, NTUA) για τον έλεγχο ευστάθειας στύλων και οροφής σε πραγματικό χρόνο.

## · Λίστα Εικόνων, Σχημάτων, Πινάκων

<u>Σχήματα</u>	σελίδα
Σχήμα 1: Κατανομή βωξιτικών οριζόντων στην Κεντρική Ελλάδα _____	14
Σχήμα 2: Συνεισφέρουσα επιφάνεια _____	24
Σχήμα 3: Διασταύρωση στοών και τομή ανοίγματος _____	30
Σχήμα 4: Συμπεριφορά οροφής ως δοκός _____	31
Σχήμα 5: Αναποτελεσματική ήλωση _____	32
Σχήμα 6: Ήλωση οροφής _____	33
Σχήμα 7: Περιφερειακός θρυμματισμός _____	33
Σχήμα 8: Δίκτυο καρστικών μορφών _____	34
Σχήμα 9: Κάμψη οροφής _____	34
Σχήμα 10: Κύριοι τύποι αστοχίας στύλων _____	37
Σχήμα 11: Ανάκλαση κυμάτων _____	42
Σχήμα 12: Εύρος συχνοτήτων χρησιμοποιούμενων μεθόδων _____	45
Σχήμα 13: Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ _____	54
Σχήμα 14: Τυπικές μορφές σημάτων _____	57
Σχήμα 15: Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ _____	60
Σχήμα 16: Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας _____	62
Σχήμα 17: Σύστημα επεξεργασίας ΑΕ _____	70
Σχήμα 18: Γενική σχέση τάσης – ΑΕ, συσχέτιση με μηχανισμό θραύσης _____	75
Σχήμα 19: Υπολογισμοί ελαστικών σταθερών του Young _____	77
Σχήμα 20: Μονοαξονική θλίψη #1 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	78
Σχήμα 21: Μονοαξονική θλίψη #1 : Συντελεστής πλάτους b _____	82
Σχήμα 22: Μονοαξονική θλίψη #2 : Αξονική τάση _____	83
Σχήμα 23: Μονοαξονική θλίψη #2 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	84
Σχήμα 24: Μονοαξονική θλίψη #2 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	87
Σχήμα 25: Μονοαξονική θλίψη #3 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	88
Σχήμα 26: Μονοαξονική θλίψη #3 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	89
Σχήμα 27: Μονοαξονική θλίψη #3 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	90
Σχήμα 28: Μονοαξονική θλίψη #3 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	91
Σχήμα 29: Μονοαξονική θλίψη #3 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	91
Σχήμα 30: Αντιδιαμετρική θλίψη #1 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	97
Σχήμα 31: Αντιδιαμετρική θλίψη #1 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	98
Σχήμα 32: Αντιδιαμετρική θλίψη #1 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	99
Σχήμα 33: Αντιδιαμετρική θλίψη #1 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	101
Σχήμα 34: Αντιδιαμετρική θλίψη #3 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	105
Σχήμα 35: Αντιδιαμετρική θλίψη #3 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	107
Σχήμα 36: Αντιδιαμετρική θλίψη #3 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	108
Σχήμα 37: Αντιδιαμετρική θλίψη #4 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	110
Σχήμα 38: Αντιδιαμετρική θλίψη #5 : Δραστηριότητα ΑΕ _____	111
Σχήμα 39: Σκαρίφημα θραύσης αντιδιαμετρικής θλίψης #1 _____	117
Σχήμα 39: Σκαρίφημα θραύσης αντιδιαμετρικής θλίψης #2 _____	118
Σχήμα 39: Σκαρίφημα θραύσης αντιδιαμετρικής θλίψης #3 _____	118
Σχήμα 39: Σκαρίφημα θραύσης αντιδιαμετρικής θλίψης #4 _____	119
Σχήμα 39: Σκαρίφημα θραύσης αντιδιαμετρικής θλίψης #5 _____	119

<u>Εικόνες</u>	σελ.
Εικόνα 1: Βωξίτης _____	8
Εικόνα 2: Μεσόγειος κατά το Ανώτερο Τριαδικό _____	11
Εικόνα 3: Μεσόγειος κατά το Κατώτερο Κρητιδικό _____	12
Εικόνα 4: Μεσόγειος κατά το Ηώκαινο _____	13
Εικόνα 5: Μέθοδος θαλάμων και στύλων σε οριζόντιο κοίτασμα _____	19
Εικόνα 6: Κλιμακωτή μέθοδος θαλάμων και στύλων _____	20
Εικόνα 7: Αδαμαντοτρύπανο λεπτού τοιχώματος _____	68
Εικόνα 8: Δισκοπήριο _____	68

Εικόνα 9: Λειαντικό	68
Εικόνα 10: Επίμηκυσιόμετρο	69
Εικόνα 11: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #1	73
Εικόνα 12: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #1	73
Εικόνα 13: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #1	74
Εικόνα 14: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #1	74
Εικόνα 15: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #2	79
Εικόνα 16: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #2	79
Εικόνα 17: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #2	79
Εικόνα 18: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #2	79
Εικόνα 19: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #2	80
Εικόνα 20: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #2	80
Εικόνα 21: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #2	81
Εικόνα 22: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #2	81
Εικόνα 23: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #3	85
Εικόνα 24: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #3	85
Εικόνα 25: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #3	85
Εικόνα 26: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #3	95
Εικόνα 27: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #3	95
Εικόνα 28: Φωτό δοκιμής μονοαξονικής θλίψης #3	96
Εικόνα 29: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #1	96
Εικόνα 30: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #1	100
Εικόνα 31: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #1	100
Εικόνα 32: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #2	100
Εικόνα 33: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #2	101
Εικόνα 34: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #3	101
Εικόνα 35: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #3	103
Εικόνα 36: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #3	103
Εικόνα 37: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #3	103
Εικόνα 38: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #3	104
Εικόνα 39: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #3	104
Εικόνα 40: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #4	104
Εικόνα 41: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #4	106
Εικόνα 42: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #4	106
Εικόνα 43: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #4	106
Εικόνα 44: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #4	106
Εικόνα 45: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #5	107
Εικόνα 46: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #5	109
Εικόνα 47: Φωτό δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης #5	109

## \_Πίνακες

Πίνακας 1: Γραμμομοριακοί όγκοι ορυκτών	σελ. 9
Πίνακας 2: Ελληνική παραγωγή βωξίτη	16
Πίνακας 3: Πετρώματα και χαρακτηριστικές ταχύτητες	41
Πίνακας 4: Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης	92
Πίνακας 5: Αποτελέσματα δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης	112