



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»**

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΧΩΡΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δαγρές Ελευθέριος

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Α. Ι. Σοφιανός

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2017



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΚΑΜΠΤΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΜΕΣΩ ΧΩΡΙΚΟΥ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΥ ΣΗΜΑΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δαγρές Ελευθέριος

Διπλωματούχος Πολιτικός Μηχανικός Π.Θ.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Α. Ι. Σοφιανός, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Π. Νομικός, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Κ. Λουπασάκης, Επικ. Καθ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, 2017

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εκπόνηση και η ολοκλήρωση της παρούσης διπλωματικής εργασίας οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην καθοδήγηση, στο ενδιαφέρον, στη στήριξη, την εμπιστοσύνη και την υπομονή κάποιων συγκεκριμένων ανθρώπων, όπου ο καθένας συνέβαλε με τον δικό του πολύ ξεχωριστό και πολύτιμο τρόπο. Για όλα τα παραπάνω θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

Τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Α. Ι. Σοφιανό, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της παρούσης εργασίας, καθώς επίσης και για την επιστημονική υποστήριξη κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Τον κ. Π. Νομικό, Επίκουρο Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., για το ενδιαφέρον και την επιστημονική καθοδήγηση, οποιαδήποτε στιγμή χρειάστηκε.

Τον κ. Δ. Χουμανίδη, Υποψήφιο Διδάκτωρ, για την πολύτιμη βοήθεια, την υπομονή του και τις ώρες που αφιέρωσε, ώστε να ολοκληρωθεί η παρούσα διπλωματική εργασία.

Τους γονείς μου και τους ανθρώπους του στενού μου περιβάλλοντος, για την αμέριστη υποστήριξη όλων των προσπαθειών μου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ABSTRACT	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:	13
Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα	13
<i>1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή</i>	13
<i>1.2 Μίγματα</i>	14
<i>1.3 Ίνες</i>	16
<i>1.3.1 Μήκος Ίνων</i>	18
<i>1.3.2 Λόγος μορφής</i>	18
<i>1.3.3 Προσανατολισμός ινών στο χώρο</i>	18
<i>1.3.4 Ποσότητα και απόσταση ινών</i>	20
<i>1.3.5 Μηχανισμός αστοχίας</i>	21
<i>1.4 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα χρήσης των ινών</i>	26
<i>1.5 Συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες</i>	29
<i>1.6 Δοκιμές Ινοπλισμένου Σκυροδέματος</i>	31
<i>1.6.1 Δοκιμές Κάμψης – Πρισματικά δοκίμια/Δοκοί</i>	31
<i>1.6.2 Δοκιμή Θλίψης</i>	32
<i>1.6.3 Δοκιμή Barcelona</i>	33
<i>1.6.4 Δοκιμή Διαχωρισμού – Βραζιλιανή Δοκιμή</i>	34
<i>1.6.5 Δοκιμή πλάκας</i>	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:	37

Μέθοδος ακουστικής εκπομπής.....	37
2.1 Ορισμός της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής.....	37
2.2 Αρχές λειτουργίας ακουστικής εκπομπής.....	39
2.2.1 Σήματα ακουστικής εκπομπής.....	39
2.2.2 Εξασθένιση και θόρυβος.....	43
2.2.3 Τεχνικές παρακολούθησης.....	44
2.2.4 Εντοπισμός θέσης της πηγής ΑΕ.....	46
2.3 Εφαρμογές μεθόδου ΑΕ.....	47
2.3.1 Επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου στην ΑΕ.....	48
2.3.2 Μελέτη της εξέλιξης της αστοχίας με εντοπισμό της θέσης της πηγής ΑΕ	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:	53
Εξοπλισμός παρακολούθησης και καταγραφής και επεξεργασίας σημάτων Ακουστικής Εκπομπής	53
3.1 Γενικά.....	53
3.2 Αισθητήρες.....	55
3.3 Εγκατάσταση μορφοτροπέων σε μονοαξονικές δοκιμές.....	56
3.4 Προενισχυτές.....	58
3.5 Μονάδα επεξεργασίας.....	59
3.6 Βασικά Εργαστηριακά Συστήματα ΑΕ.....	60
3.7 Παραμετρικά εργαστηριακά συστήματα ΑΕ.....	61
3.8 Συστήματα Ανάγνωσης.....	63
3.9 Λογισμικό «NOESIS».....	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:	66

Διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα και βιβλιογραφική Ανασκόπηση ..	66
4.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	66
4.2 Διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών κάμψης δοκιμίων σκυροδέματος	70
Χωρικός εντοπισμός σημάτων Ακουστικής Εκπομπής σε πρισματικά δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος	78
5.1 Εισαγωγή.....	78
5.2 Τριδιάστατος εντοπισμός (3D Location)	79
5.3 Αποτίμηση αποτελεσμάτων.....	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	97
Ταξινόμηση ρωγματώσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος βάση σημάτων Ακουστικής Εκπομπής	97
6.1 Παράμετροι AF (μέση συχνότητα) και RA (γωνία ανύψωσης)	97
6.2 Ταξινόμηση τύπου ρωγματώσεων με βάση τη συσχέτιση της μέσης συχνότητας των σημάτων και της τιμής RA	98
6.3 Αποτίμηση αποτελεσμάτων.....	104
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:	107
Συμπεράσματα	107
7.1 Μη θερμικώς καταπονημένα δοκίμια	107
7.1 Θερμικώς καταπονημένα δοκίμια	108
7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	116

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Σχεδιασμός και Κατασκευή Υπόγειων Έργων» του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 με θέμα «Διερεύνηση καμπτικής αστοχίας ινοπλισμένου σκυροδέματος μέσω χωρικού εντοπισμού σημάτων Ακουστικής Εκπομπής».

Στόχος της είναι η διερεύνηση της καμπτικής αστοχίας ινοπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικούς τύπους ινών ή συνδυασμού τους, κάνοντας χρήση των σημάτων ακουστικής εκπομπής τα οποία συμμετείχαν στον εντοπισμό θέσης της πηγής. Τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα για την εκπόνηση της διερεύνησης αποκτήθηκαν από δοκιμές κάμψης τριών σημείων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. από τον Χουμανιδη (2016), στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής.

Παρασκευάστηκαν πρισματικά δοκίμια μήκους 50 cm και τετραγωνικής διατομής πλευράς 10 cm. Χρησιμοποιήθηκαν τρία είδη ινών (χαλύβδινες ίνες με γαντζωτά άκρα, μακροΐνες πολυπροπυλενίου και μικροΐνες πολυπροπυλενίου) διαφορετικού μήκους, ώστε να διερευνηθεί η προσφορά τους σε διαφορετικά στάδια παραμόρφωσης των δοκιμίων ινοπλισμένου σκυροδέματος. Παρασκευάστηκαν 6 συνθέσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος με συγκεντρώσεις ινών 0.5% και 1.0% κ.ό. σκυροδέματος, χρησιμοποιώντας έναν τύπο ίνας κάθε φορά και 3 υβριδικές συνθέσεις με συγκέντρωση ινών 1.0% κ.ό. συνδυάζοντας ανά δύο τους τρεις τύπους ινών, όπως επίσης και μία σύνθεση άοπλου σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα στη σήραγγα κινδυνεύει από πυρκαγιά, λόγω αυτού πραγματοποιήθηκαν δοκιμές τόσο σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, όσο και στη θερμοκρασία των 280°C. Κατά την εκτέλεση των δοκιμών καταγράφονταν τα σήματα ακουστικής εκπομπής. Για το σκοπό αυτό τοποθετήθηκαν 8 πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες ακουστικής εκπομπής σε κάθε δοκίμιο και κατεγράφησαν όλα τα σήματα που παρήχθησαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

Με βάση τα καταγεγραμμένα σήματα ακουστικής εκπομπής πραγματοποιήθηκε τριδιάστατος εντοπισμός θέσης της πηγής, μέσω του λογισμικού NOESIS. Για την περαιτέρω ανάλυση και διερεύνηση διατηρήθηκαν μόνο τα σήματα ακουστικής εκπομπής που συμμετείχαν στον εντοπισμό γεγονότων. Επιπλέον, τα σήματα

κατανεμήθηκαν σε 5 και 4 διαφορετικά στάδια για τα ινοπλισμένα και τα άοπλα δοκίμια αντίστοιχα, ανάλογα το ποσοστιαίο φορτίο (επί τοις εκατό του μεγίστου επιτευχθέντος φορτίου) για μια πιο λεπτομερή ανάλυση. Πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των συνθέσεων ως προς τον αριθμό των γεγονότων ακουστικής εκπομπής, καταγράφηκε και ερμηνεύτηκε η χωρική διάταξή τους. Τέλος ταξινομήθηκαν οι εντοπιζόμενες ρωγματώσεις στα δοκίμια με βάση τα σήματα ακουστικής εκπομπής. Χρησιμοποιήθηκαν οι εξής παράμετροι των σημάτων ακουστικής εκπομπής: α) μέση συχνότητα (Average Frequency – AF) και β) «γωνία ανύψωσης» (Rise Angle – RA), όπου μέσω του διαγράμματος RA – AF και ορίζοντας η κλίμακα της τιμής RA να είναι δεκαπλάσια της κλίμακας AF κατηγοριοποιήθηκε ο τύπος θραύσεως σε εφελκυστικός ή διατμητικός και συγκρίθηκαν τα αποτελέσματα μεταξύ των συνθέσεων.

ABSTRACT

The present thesis is conducted under the Interdepartmental Postgraduate Program "Design and Construction of Underground Projects", during the academic year 2016-2017 and investigates the flexural failure of fiber reinforced concrete through 3D location of Acoustic Emission hits.

The purpose of this thesis is to investigate the flexural failure of fiber reinforced concrete prism specimens with square cross section of size 10 cm and length 50 cm which consist of different types of fiber. The process is being monitored by Acoustic Emission technique which helps locate the source of failure. The experimental data that were used in the experiment were acquired by previous three-point bending tests that were conducted by Χουμανίδη (2016).

For the test there were used three different types of fiber of different length: steel fibers with hook ends, long polypropylene fibers and polypropylene microfibers. In order to investigate the fibers' contribution in different strain stages, ten different types of concrete prism specimens were prepared: six reinforced with a single fiber type, three were reinforced with multiple fiber types and one without reinforcement.

In a tunnel there is always a chance of fire, so the tests were conducted at room temperature and at 280°C. The whole process is being monitored by Acoustic Emission Technique with the help of 8 piezoelectric sensors that were placed in every specimen.

The Acoustic Emission hits were documented and 3D location was conducted through NOESIS software package. For an in-depth analysis, the Acoustic Emission events were categorized in two groups of 5 and 4 different stages for the fiber reinforced concrete and concrete specimens respectively, based on the percentage load. Afterwards, the number of the Acoustic Emission events were compared between the different types of concrete specimens that were prepared and their spatial arrangement was documented and analyzed. Finally, the cracks that were located in the specimens, with the help of the Acoustic Emission hits, were classified. Based on the chart RA-AF (the scale of the values of the axis RA is ten times larger than the respective values of axis AF), the fracture modes were classified either as

shear or tensile and the results were compared between the various specimen types that were constructed.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα

1.1 Σύντομη ιστορική αναδρομή

Ήδη από τους ιστορικούς χρόνους πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες για τη βελτίωση των ψαθυρών δομικών υλικών με την προσθήκη ινών. Για παράδειγμα, τούβλα και σοβάδες οροφών ενισχύονταν με ίνες από άχυρο ή με μαλλί ζώων. Τότε, όπως και τώρα, αποσκοπούσαν στην αποφυγή δημιουργίας ρωγμών στο υλικό και στη δημιουργία παραμένουσας φέρουσας ικανότητας στην περίπτωση δημιουργίας ρωγμών. Δεν είναι λοιπόν περίεργο που τη σημερινή εκτεταμένη χρήση του σκυροδέματος ακολουθεί η έντονη αναζήτηση μεθόδων βελτίωσης της ψαθυρής συμπεριφοράς του με τη βοήθεια ινών. Η αρχική χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος πηγαινει πίσω πάνω από 100 χρόνια. Η πρώτη ευρεσιτεχνία ινοπλισμένου σκυροδέματος καταχωρήθηκε το 1874 στην Καλιφόρνια από τον Berard. Η ιδέα ήταν να ενισχυθεί το σκυρόδεμα με την προσθήκη ακανόνιστου παλαιοσίδηρου. Στη συνέχεια καταχωρήθηκαν ευρεσιτεχνίες στις ΗΠΑ, Αγγλία, Γαλλία και Γερμανία. Εν τούτοις, η ευρεία εφαρμογή παρεμποδίστηκε, μέχρι και τη δεκαετία του 1960, από το υψηλό κόστος, τα ανεπαρκή εργαστήρια ελέγχου, και κυρίως από την ταχεία ανάπτυξη του οπλισμένου σκυροδέματος. Από τη δεκαετία του 1970 η έρευνα στον τομέα αυτό εντατικοποιείται, και το 1972 πραγματοποιείται η πρώτη εφαρμογή εκτοξευμένου ινοπλισμένου σκυροδέματος για τη σταθεροποίηση πρηνούς στομίου σήραγγας, στο Idaho. Η πρώτη εφαρμογή αντλήσιμου σκυροδέματος οπλισμένου με χαλύβδινες ίνες, για την κατασκευή της μόνιμης επένδυσης σηράγγων, πραγματοποιήθηκε το 1987 σε τρία τμήματα του μετρό της Φρανκφούρτης. Η εφαρμογή του σκυροδέματος οπλισμένου με χαλύβδινες ίνες στη σηραγγοποιΐα πραγματοποιείται και με τις τέσσερις μεθόδους, δηλαδή με: εκτόξευση ή έγχυση ή προκατασκευή ή εκβολή.

Εκτοξευμένο σκυρόδεμα οπλισμένο με χαλύβδινες ίνες χρησιμοποιείται κυρίως για την κατασκευή της άμεσης επένδυσης των σηράγγων. Το πλεονέκτημα της χρήσης χαλύβδινων ινών για τον οπλισμό του εκτοξευόμενου σκυροδέματος, έναντι του δομικού πλέγματος, έγκειται στην αποφυγή των διαδικασιών που απαιτούνται για την τοποθέτηση του τελευταίου, που έχει σα συνέπεια τη μείωση του χρόνου και του κόστους τοποθέτησης. Εκτός αυτού, πλεονεκτεί της χρήσης δομικού πλέγματος καθώς επιτρέπει την καλύτερη σύνδεση επάλληλων στρώσεων σκυροδέματος,

αποφεύγει τη δημιουργία κενών που δημιουργούνται πίσω από τις ράβδους του δομικού πλέγματος, και ρωγμών που δημιουργούνται από τις ταλαντώσεις του δομικού πλέγματος. Η χρήση του δεν περιορίζεται στην κατασκευή της επένδυσης των σηράγγων, αλλά επεκτείνεται και στην επισκευή παλαιών επενδύσεων, καθώς και στην αποκατάσταση σύγχρονων σηράγγων των οποίων η ανθεκτικότητα κινδυνεύει από διάβρωση του οπλισμού λόγω μη επαρκούς επικάλυψης.

Αντλήσιμο σκυρόδεμα, οπλισμένο με χαλύβδινες ίνες χρησιμοποιείται είτε για την έγχυση της εσωτερικής επένδυσης ή της δεύτερης στρώσης επενδύσεων μονού κελύφους είτε για την εκβολή του σκυροδέματος μονής επένδυσης. Τα πλεονεκτήματα είναι παρόμοια με τα προηγούμενα, καθόσον αποφεύγεται η χρήση πλέγματος και οι διαδικασίες που το συνοδεύουν. Εκτός αυτού μειώνονται οι απαιτήσεις πάχους της επένδυσης, που άλλως απαιτούνται για την επικάλυψη του οπλισμού, καθώς και τη ροή του σκυροδέματος.

Σκυρόδεμα με χαλύβδινες ίνες χρησιμοποιείται και για την κατασκευή των προκατασκευασμένων τομέων (segments) του δακτυλίου της επένδυσης. Τούτο απλοποιεί τις διαδικασίες κατασκευής και δύναται να βελτιώσει την ομοιογένεια. Επίσης δύναται να μειώσει τον κίνδυνο δημιουργίας ρωγμών κατά τη μεταφορά ή την προώθηση. Ο τρόπος αυτός κατασκευής των τομέων απαιτεί την επιλογή στατικού συστήματος δακτυλίου (επένδυσης) της σήραγγας που να υφίσταται ελάχιστες ροπές κάμψης. Εύκαμπτες συνδέσεις σε συνδυασμό με συνεχείς διαμήκεις αρμούς, που επιτρέπουν τη δημιουργία αρθρωτού δακτυλίου, ταιριάζουν ιδιαίτερα στην περίπτωση.

1.2 Μίγματα

Τα υλικά του μίγματος, εκτός των ινών, είναι όπως και του άοπλου εκτοξευμένου σκυροδέματος, ήτοι: τσιμέντο, νερό, αδρανή, πρόσμικτα, πρόσθετα. Όπως για κάθε είδους σκυρόδεμα, έτσι και για το ινοπλισμένο, οι αναλογίες των υλικών στη μίξη εξαρτώνται από τις απαιτήσεις της συγκεκριμένης εργασίας, ως προς την αντοχή, την εργασιμότητα κλπ. Γενικά, τα μίγματα ινοπλισμένου σκυροδέματος περιέχουν μεγαλύτερο ποσοστό τσιμέντου και υψηλότερα κλάσματα λεπτομερούς προς αδρομερούς υλικού, σε σχέση με τα κανονικά σκυροδέματα. Συχνά, για να μειωθεί η ποσότητα του τσιμέντου, μέχρι και 35% αυτού μπορεί να αντικατασταθεί από ιπτάμενη τέφρα. Επίσης, για να βελτιωθεί η εργασιμότητα των μιγμάτων με υψηλό

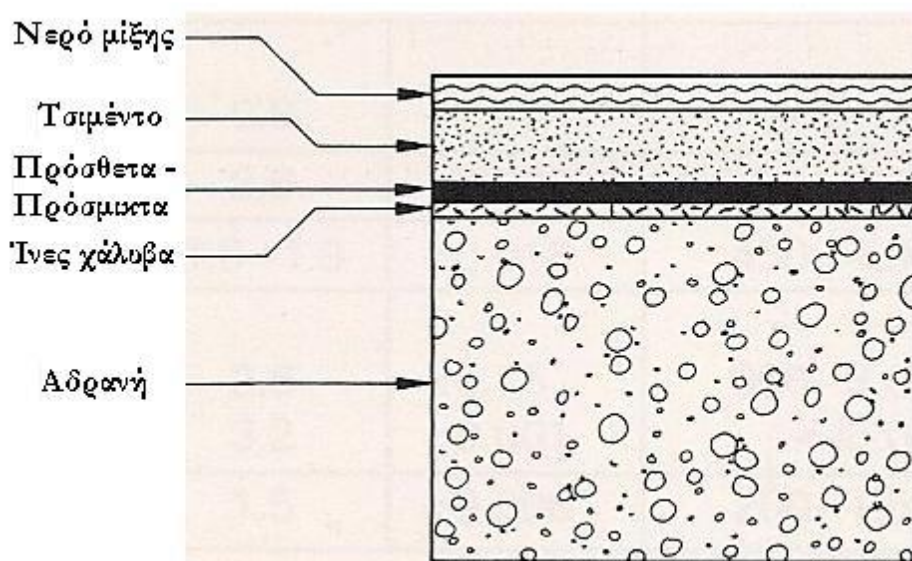
ποσοστό ινών, προστίθενται ρευστοποιητές σε συνδυασμό με αερακτικά (Chanh, 2001).

Οι βασικές παράμετροι που ελέγχουν την αντοχή και την ποιότητα του σκυροδέματος είναι ο λόγος νερό προς τσιμέντο (w/c), η περιεκτικότητα σε αέρα και ο βαθμός συμπύκνωσης. Εντούτοις, στο σχεδιασμό του εκτοξευμένου σκυροδέματος υπεισέρχονται πρόσθετοι παράγοντες, οι κυριότεροι από τους οποίους επιδρούν στη διαβάθμιση των αδρανών και στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Συνιστάται αύξηση κατά 10% σε σχέση με το άοπλο, καθόσον υπάρχει μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής της τσιμεντόπαστας. Η επιλογή του μίγματος δε θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη μόνο τις απαιτήσεις του έργου αλλά και τη διαθεσιμότητα των υλικών και ειδικότερα τον τύπο των αδρανών και τη μέθοδο μεταφοράς του σκυροδέματος, δηλαδή με άντληση ή με πιεσμένο αέρα.

Ο θεωρητικός σχεδιασμός, όπου τα λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή αναμιγνύονται έτσι ώστε να προκύπτει μίγμα με τον ελάχιστο όγκο κενών που θα πρέπει να γεμίσει με νερό και τσιμέντο, είναι γενικά αποδεκτός για μηχανές ξερής μίξης. Ωστόσο, όταν γίνεται άντληση υγρών μιγμάτων απαιτούνται επιπλέον ποσότητες αδρανών πολύ λεπτής διαβάθμισης και τσιμέντου, έτσι ώστε να διευκολύνεται η ροή του μίγματος και να αποκλείεται η του νερού μέσα από αυτό. Αυτό απαιτεί σημαντική εμπειρία και δοκιμές, καθόσον όταν η ποσότητα των αδρανών πολύ λεπτής διαβάθμισης είναι υπερβολική, υπάρχει κίνδυνος βουλώματος των σωλήνων, ιδιαίτερα όταν αυτοί είναι μεγάλου μήκους. Ο Maidl (1995) συνιστά, το 70% κατ' όγκο να είναι κονίαμα με κόκκους κάτω από 5mm. Το υπόλοιπο 30% να αποτελείται από κόκκους 5 έως 10 mm. Η αύξηση του λεπτότερου κλάσματος βελτιώνει την αντλησιμότητα.

Συνεπώς, το μίγμα του ινοπλισμένου σκυροδέματος όταν είναι νωπό πρέπει να έχει μία επιθυμητή ρευστότητα και όταν πήξει να αποκτά αυξημένη αντοχή. Οι ίνες χάλυβα μπορούν γενικά να αντιμετωπισθούν ως πρόσθετο αδρανές υλικό (Maidl, 1995). Το Σχήμα 1.1 δείχνει τις αναλογίες κατά βάρος ενός τυπικού μίγματος ινοπλισμένου σκυροδέματος για χρήση σε σήραγγες. Στη σήραγγοποιία ο Maidl (1995) αναφέρει ότι η περιεκτικότητα σε ίνες είναι πάνω από 50kg/m³. Στην Ελλάδα, η ελάχιστη περιεκτικότητα χαλύβδινων ινών (ΠΕΤΕΠ, 2005; 12.03.02, §3.5) καθορίζεται από την Μελέτη Σύνθεσης του Αναδόχου, τα αποτελέσματα ποιοτικού ελέγχου και τις οδηγίες του κατασκευαστή, αλλά σε κάθε περίπτωση είναι

τουλάχιστον 30 kg/m^3 . Η ΟΜΟΕ (2002, §8.16) συνιστά ίνες 40kg/m^3 εκτοξευθέντος σκυροδέματος, εναλλακτικά της χρήσης δομικού πλέγματος 1.5kg/m^2 .



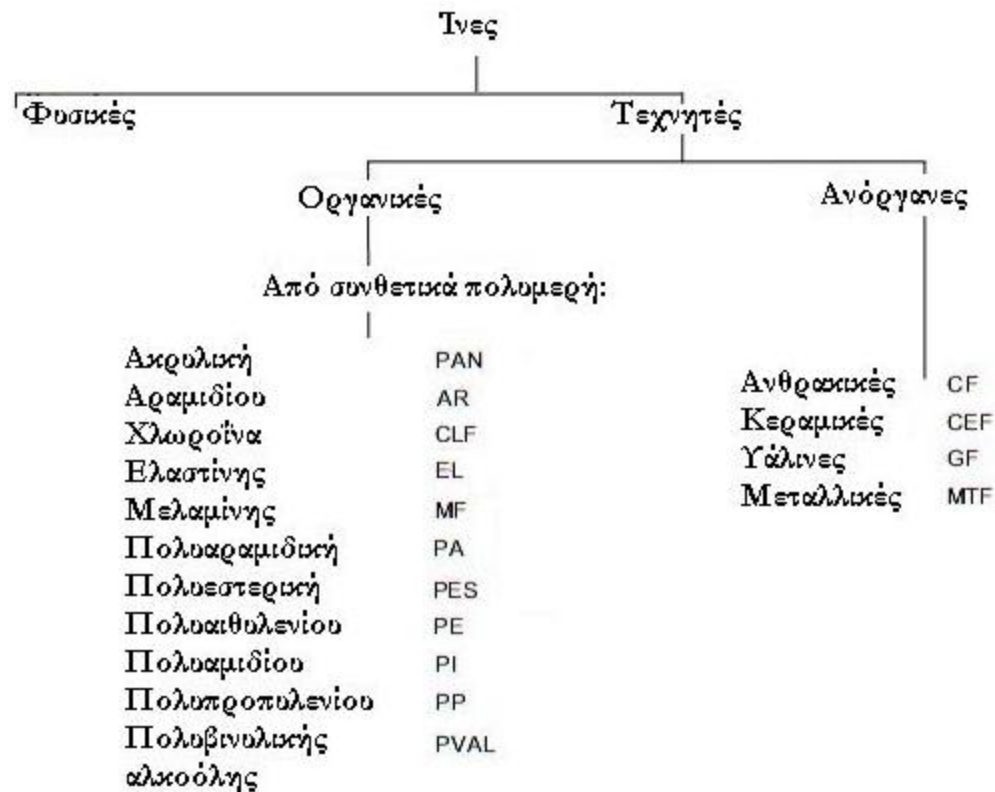
Σχήμα 1.1: Μίγμα ινοπλισμένου σκυροδέματος (Maidl 1995).

1.3 Ίνες

Οι ίνες κατασκευάζονται από υλικά όπως ο χάλυβας, η ύαλος, ο άνθρακας, ο αμίαντος, καθώς και συνθετικά ή κεραμικά υλικά (Σχήμα 1.2). Για τον οπλισμό του σκυροδέματος οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες ίνες είναι οι χαλύβδινες, αν και η χρήση υάλινων ή ανθρακικών αρχίζει να γίνεται πιο συχνή. Ο χάλυβας συνεργάζεται καλά με το σκυρόδεμα, λόγω των μηχανικών του ιδιοτήτων και της ανθεκτικότητάς του στα αλκαλικά. Είναι δυνατή η διαμόρφωση των ινών, ώστε να έχουν για παράδειγμα άγκιστρα στα άκρα ή γραμμώσεις. Η εφελκυστική αντοχή των χαλύβδινων ινών κυμαίνεται από 400 έως 1500 MPa. Οι ίνες ανθρακούχου χάλυβα δύνανται να ξεπεράσουν τα 4000 MPa με ψυχρή κατεργασία. Χρησιμοποιούνται διάφορες μορφές χαλύβδινων ινών, που καθορίζονται από τον τρόπο παραγωγής τους. Οι πιο συνήθεις ίνες παράγονται με συρματοποίηση ή φρεζάρισμα. Οι μεταλλικές ίνες, σύμφωνα με την ΠΕΤΕΠ (2005), θα πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις του προσαρτήματος Β του prEN 14487-1:2002.

Οι ίνες από σύρμα παράγονται κυρίως με ολική ακατέργαστου σύρματος μέσα από λεπυνόμενα ανοίγματα έως ότου επιτευχθεί η απαιτούμενη διάμετρος. Το σύρμα στη συνέχεια οδηγείται δια μέσου δύο αντιστρόφως περιστρεφόμενων κυλίνδρων ώστε να διαμορφωθεί κατάλληλα. Το σύρμα διαμορφώνεται στη στερεή του κατάσταση

(εν ψυχρώ) και η διαδικασία είναι κατάλληλη για όλα τα όλκιμα μέταλλα. Στα σύρματα είναι δυνατή η κατεργασία της επιφάνειας με μεθόδους όπως η γαλβάνιση. Η αντοχή τους είναι 800 έως 1000MPa.



Σχήμα 1.2: Τα βασικότερα είδη τεχνητών ινών (BISFA, 2009).

Ίνες δύνανται να παραχθούν και ως ρινίσματα με το φρεζάρισμα τεμαχών χάλυβα από περιστρεφόμενο κοπτικό. Οι ίνες που παράγονται με αυτό τον τρόπο έχουν κοίλο (δρεπανοειδές) σχήμα, είναι συστρεμμένες, και έχουν την εξωτερική επιφάνεια λεία και την εσωτερική τραχεία. Η αντοχή τους είναι περίπου 700MPa. Οι παραγόμενες ίνες είναι ελαφρά ψαθυρές και πιο ακανόνιστες από τις ίνες από σύρματα. Ως αποτέλεσμα της θερμότητας που παράγεται κατά την κοπή, η επιφάνειά τους επιστρώνεται με ένα οξειδίο που προσδίδει στις ίνες ένα μικρό βαθμό αντιστοιχίας προστασίας. Ίνες παράγονται και με την κοπή χαλύβδινων λεπτών φύλλων. Τα φύλλα κόβονται αρχικά σε λωρίδες και στη συνέχεια σε ίνες. Στις ίνες δύναται με πίεση να διαμορφωθεί τοπική πλάτυση ή να διαμορφωθούν άγκιστρα. Η αντοχή των ινών που παράγονται είναι μεταξύ 400 και 1000 MPa. Ίνες μεταλλικές παράγονται επίσης με την εξαγωγή τους κατευθείαν από ένα λουτρό τηγμένου σιδήρου ή χάλυβα. Ένας δίσκος με εγκοπές περιστρέφεται ακριβώς επάνω από το τηγμένο λουτρό. Το υλικό που αφαιρείται από εκεί πήζει και σταθεροποιείται αμέσως.

1.3.1 Μήκος ινών

Το μήκος των ινών (Melbye, 2001) δεν θα πρέπει να ξεπερνά το 50-60% (50% SIKA, 2007; 2/3 Vandewalle, 2005) της διαμέτρου της σωλήνας άντλησης. Αυτό σημαίνει ότι για χειρωνακτικό ψεκασμό το μέγιστο μήκος ίνας είναι 25mm, ενώ για ρομπότ με σωλήνες άντλησης 65mm, υπάρχει δυνατότητα ψεκασμού με ίνες μήκους ως και 40mm. Επίσης, το μήκος των ινών θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το (Vandewalle, 2005) τριπλάσιο του μέγιστου κόκκου των αδρανών, και συνιστά για μέγιστο κόκκο αδρανών 10-12mm, μήκος ινών 30-35mm.

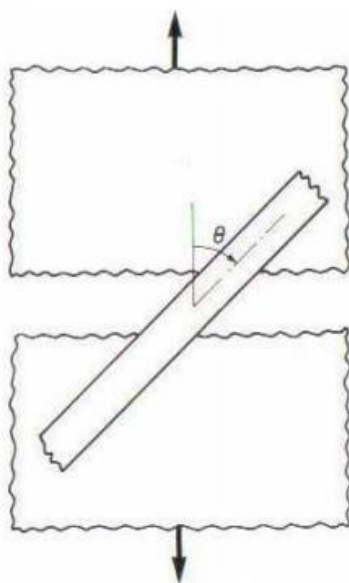
1.3.2 Λόγος μορφής

Η μορφή των ινών, και το υλικό κατασκευής τους, είναι οι κυριότεροι παράγοντες επιλογής της ίνας για την εκάστοτε εφαρμογή. Πρακτικά, οι ίνες παράγονται σε πολλές μορφές και μεγέθη, και μπορεί να είναι κυκλικής, πολυγωνικής ή ακόμη και ακανόνιστης διατομής. Για τις ίνες που δεν είναι κυκλικής ή πρισματικής διατομής, ορίζεται η ισοδύναμη διάμετρος d_e ως εκείνη που είναι ίση τη μέση διάμετρό της. Ίνες με μικρή ισοδύναμη διάμετρο έχουν σχετικά μικρή δυσκαμψία, κι έτσι έχουν μια συγκεκριμένη ικανότητα να προσαρμόζονται στο σχήμα και στο χώρο που καταλαμβάνουν ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών. Ο λόγος μήκους προς διάμετρο της ίνας (l/d) ονομάζεται λόγος μορφής και εκφράζει την ευκαμψία της. Στην περίπτωση των συνθετικών ινών, αντί για τον λόγο μορφής η κατηγοριοποίηση γίνεται με την γραμμική μάζα 9 χιλιομέτρων ίνας, που ονομάζεται *denier*.

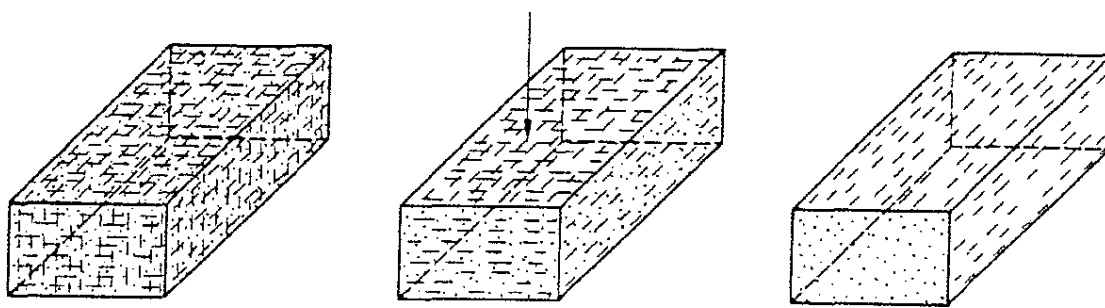
1.3.3 Προσανατολισμός ινών στο χώρο

Η κατανομή και ο προσανατολισμός των ινών στο μίγμα επηρεάζει σημαντικά της μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Οι ίνες σε τριδιάστατη διασπορά μέσα στη μάζα του σκυροδέματος παρεμποδίζουν τη διεύρυνση και τη διάδοση των μικρορωγμών, επιτρέποντας ταυτόχρονα την παραλαβή εφελκυστικών τάσεων από επιφάνεια σε επιφάνεια της ρωγμής, δρώντας έτσι ως γέφυρες «συρραφής». Η μορφή των ρωγμών εξαρτάται από τη φύση του φορτίου (εφελκυσμός, θλίψη, διάτμηση) και από τη γεωμετρία του στοιχείου. Οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στην κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης. Όπως και στη χρήση οπλισμών χάλυβα, οι ίνες είναι βέλτιστα τοποθετημένες εάν προσανατολίζονται προς την κατεύθυνση της εφελκυστικής τάσης και διασταυρώνονται κάθετα με τη ρωγμή. Η μείωση της

αποτελεσματικότητας της ίνας λόγω της λοξότητάς της παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3. Στο Σχήμα 1.4 παρατηρούμε χαρακτηριστικούς προσανατολισμούς των ινών.

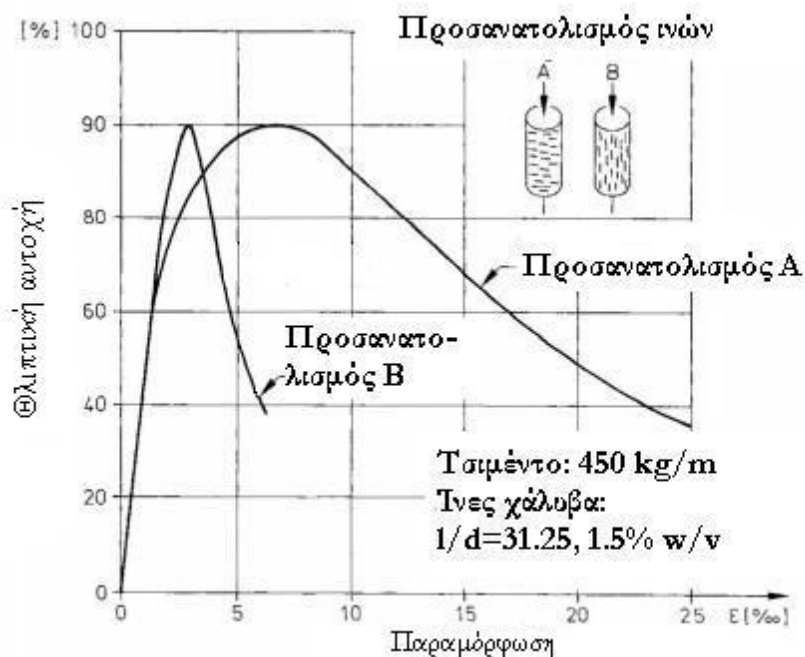


Σχήμα 1.3: Τομή μιας ίνας μέσα σε μια ρωγμή με γωνία θ (Bentur & Mindess, 2006).



Σχήμα 1.4: Πιθανοί προσανατολισμοί ινών στο χώρο (Maidl, 1995).

Στο εκτοξευόμενο με ίνες σκυρόδεμα, ο προσανατολισμός των ινών είναι συνήθως κάθετος στην κατεύθυνση ψεκασμού. Ποικίλες δοκιμές (Σχήμα 1.5) έχουν δείξει ότι πυρήνες που λαμβάνονται παράλληλα στην κατεύθυνση ψεκασμού (A) παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα στις δοκιμές θλίψης απ' ό,τι αν αποκόπτονται κάθετα (B) στην κατεύθυνση ψεκασμού. Άλλες δοκιμές (Keyter and Dreschert) έχουν δείξει ότι η αντοχή των δοκιμών σε μονοαξονική θλίψη του ευνοϊκού προσανατολισμού είναι 25% μεγαλύτερη σε σχέση με τον δυσμενή, και ότι διαθέτουν μεγαλύτερη πλαστικότητα. Έχει παρατηρηθεί επίσης, ότι στην αρχή της εκτόξευσης οι ίνες τείνουν να προσανατολίζονται ακριβώς παράλληλα με την επιφάνεια διάστρωσης, ενώ όσο αυξάνει το πάχος της επένδυσης ο προσανατολισμός γίνεται πιο τυχαίος.



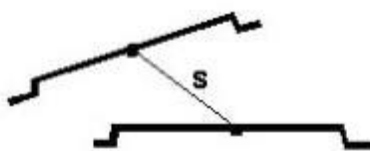
Σχήμα 1.5: Επιρροή του προσανατολισμού των ινών στη δυσθραυστότητα (Maidl, 1995).

1.3.4 Ποσότητα και απόσταση ινών

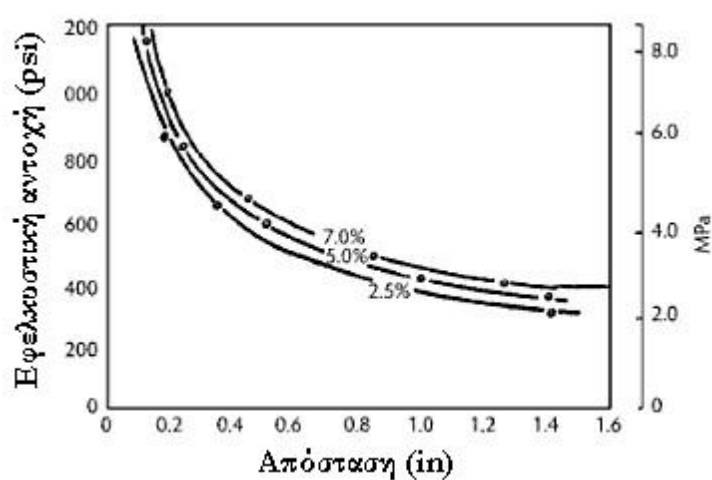
Περιεκτικότητα σε ίνες χάλυβα μεγαλύτερη από 25 kg/m^3 είναι απαραίτητη για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του σκληρυμένου σκυροδέματος. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε περίπου 1% κατά βάρος, ή 0.33% κατ' όγκο. Αν και η αποτελεσματικότητα των ινών βελτιώνεται με την αύξηση της περιεκτικότητάς τους στο σκυρόδεμα, πέρα από ένα ανώτατο όριο περιεκτικότητας, η εργασιμότητα του μίγματος επηρεάζεται αρνητικά. Το τεχνικό όριο για την περιεκτικότητα των ινών, στις γενικές εφαρμογές, είναι μεταξύ 50 και 100 kg/m^3 , ανάλογα με τη μέθοδο προσθήκης των ινών και τον τύπο τους (Maidl, 1995). Υπάρχει ωστόσο και μια ειδική διαδικασία που επιτρέπει τη χρήση υψηλών ποσοστών ινών, και βασίζεται στην αργή ροή των ινών σε ένα καλούπι και στη μετέπειτα διείσδυση της τσιμεντόμαστας. Το προκύπτον δομικό υλικό είναι γνωστό ως SIFCON (Slurry Infiltrated Fiber CONcrete). Ανάλογα με τον τύπο της ίνας, αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να επιτευχθεί περιεκτικότητα ινών ακόμη και πάνω από 20% κατ' όγκο. Αυτό το υλικό προορίζεται για ειδικές χρήσεις, όπως στρατιωτικές εφαρμογές, και είναι ιδιαίτερα δαπανηρό λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε ίνες (Maidl, 1995).

Η απόσταση των ινών στο χώρο, (s , spacing) ορίζεται ως το μήκος μεταξύ του μέσου δυο ινών, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 1.6. Όσο μειώνεται η απόσταση, τόσο

αυξάνει η αντοχή του σκυροδέματος. Το διάγραμμα στο Σχήμα 1.7 δείχνει τη σχέση μεταξύ απόστασης ινών και αντοχής σε εφελκυσμό, για διάφορες ποσοστιαίες προσθήκες ινών κατ' όγκο.



Σχήμα 1.6: Απόσταση (spacing) μεταξύ δύο ινών (Scancem Materials) (Σοφιανός, 2016).

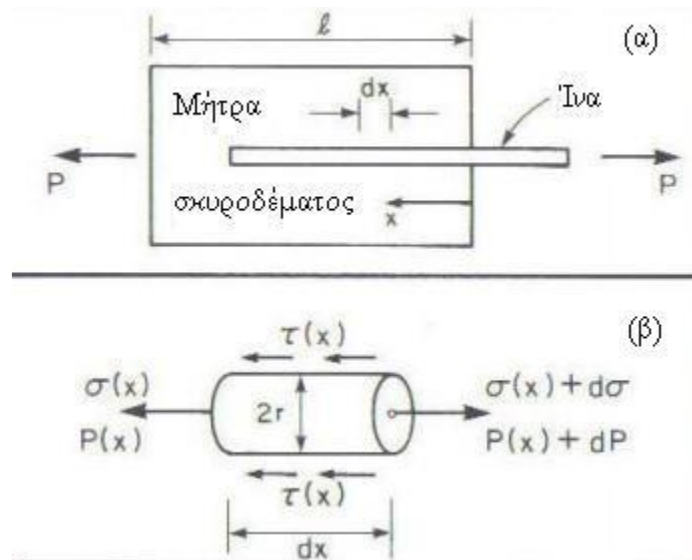


Σχήμα 1.7: Επιρροή της απόστασης των ινών στην εφελκυστική αντοχή (Romualdi & Batson, 1963).

1.3.5 Μηχανισμός αστοχίας

Η αστοχία των ινών στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να προέλθει από δύο (Σχήμα 1.8) βασικές διαφορετικές αιτίες:

- Αστοχία λόγω εξόλκευσης των ινών (α)
- Αστοχία λόγω θραύσης των ινών (β)



Σχήμα 1.8: Προσομοίωση αντίδρασης ινών - σκυροδέματος (Bentur & Mindess, 2006).

Η διαδικασία αστοχίας με εξόλκευση περιλαμβάνει τρεις φάσεις:

- Προοδευτική αποκόλληση των ινών με βραδεία επέκταση της ρωγμάτωσης.
- Αποκόλληση των ινών και ταχεία επέκταση της ρωγμάτωσης.
- Ενεργοποίηση των ινών που δεν επιτρέπουν την ολίσθηση

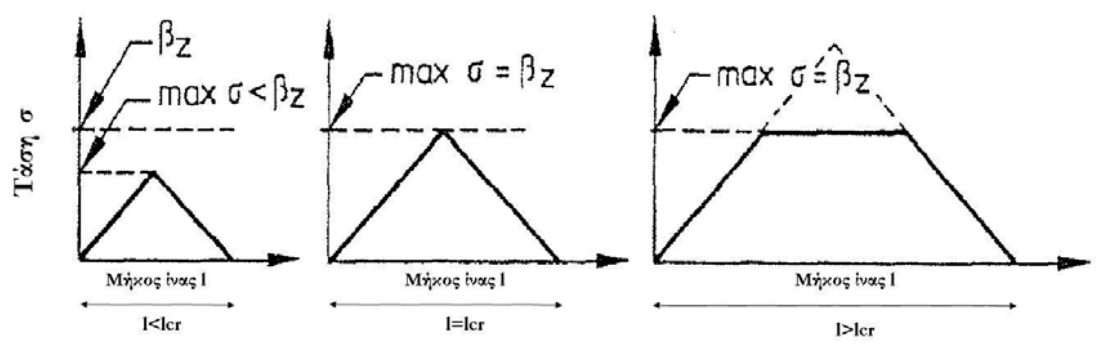
Γενικά, ο τρόπος με τον οποίον ο μηχανισμός αστοχίας εκδηλώνεται εξαρτάται από τις εξής παραμέτρους:

- Λόγος μορφής
- Αγκύρωση
- Εφελκυστική αντοχή της ίνας
- Πρόσφυση ίνας - σκυροδέματος

Οι πρώτοι τρεις παράγοντες εξαρτώνται εξολοκλήρου από τα χαρακτηριστικά της ίνας. Ο βαθμός πρόσφυσης εξαρτάται και από την ποιότητα της επιφάνειας της ίνας και από την αντοχή της περιβάλλουσας μήτρας σκυροδέματος. Κατά συνέπεια, οι ίδιες ίνες μπορούν να παρουσιάσουν απολύτως διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας σε διαφορετικά σκυροδέματα (Maidl, 1995).

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται ευθύγραμμες ίνες με μικρό μήκος, η αστοχία της αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος οφείλεται κυρίως στην εξόλκευση και όχι στη διαρροή των ινών. Αντί της αναμενόμενης αστοχίας ψαθυρής μορφής του

κοινού σκυροδέματος, στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα εμφανίζεται σταδιακή ενεργοποίηση των ινών, η οποία προσδίδει χαρακτηριστικά πλαστικής συμπεριφοράς. Επομένως, απαιτείται ο ορισμός του κρίσιμου μήκους ίνας,. Αυτό το μήκος είναι τέτοιο ώστε ο μέγιστη τάση που μπορεί να εξασφαλίσει η υπάρχουσα πρόσφυση, στο μισό μήκος της ίνας, να αντιστοιχεί στην εφελκυστική αντοχή της ίνας. Ίνες με υπερκρίσιμα μήκη ($l > l_{cr}$) αστοχούν αρχικά σε θραύση. Αντίθετα, όταν οι ίνες έχουν υποκρίσιμα μήκη ($l < l_{cr}$) ολισθαίνουν στη μήτρα του σκυροδέματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.9 (Maidl, 1995).



Σχήμα 1.9: Κρίσιμο μήκος ίνας (Maidl, 1995).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το κρίσιμο μήκος (l_{cr}) ίνας θα είναι:

$$l_{cr} = \frac{d \cdot \beta_z}{2 \cdot \tau_m}, \text{ (James, 1990)}$$

Όπου: d = διάμετρος ίνας

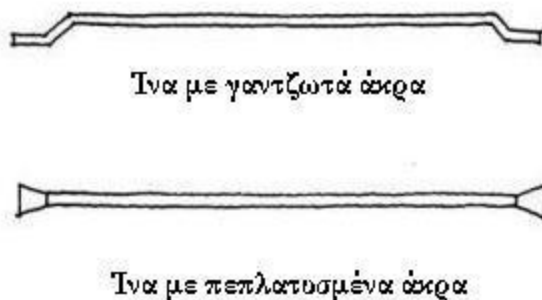
β_z = εφελκυστική αντοχή ίνας

τ_m = μέση τάση πρόσφυσης

Ωστόσο, με την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης προκύπτει ότι για να επιτευχθεί εύλογη τάση αγκύρωσης, απαιτούνται ίνες με πολύ υψηλό λόγο μορφής. Αυτές είναι δύσχρηστες και είναι δυνατόν να αντικατασταθούν από ίνες κυματοειδούς μορφής ή με άγκιστρα στα άκρα.

Οι τυποποιημένες ίνες χάλυβα με λόγο μορφής μεταξύ 50 και 100 έχουν γενικά υποκρίσιμο μήκος. Συνήθως η αστοχία οφείλεται σε εξόλκευση και όχι σε διαρροή του χάλυβα. Έτσι, οι ίνες δε χρησιμοποιούνται στο μέγιστό τους βαθμό, ως προς την αντοχή τους σε εφελκυσμό. Αιφνίδια αστοχία δεν παρατηρείται σε ινοπλισμένα

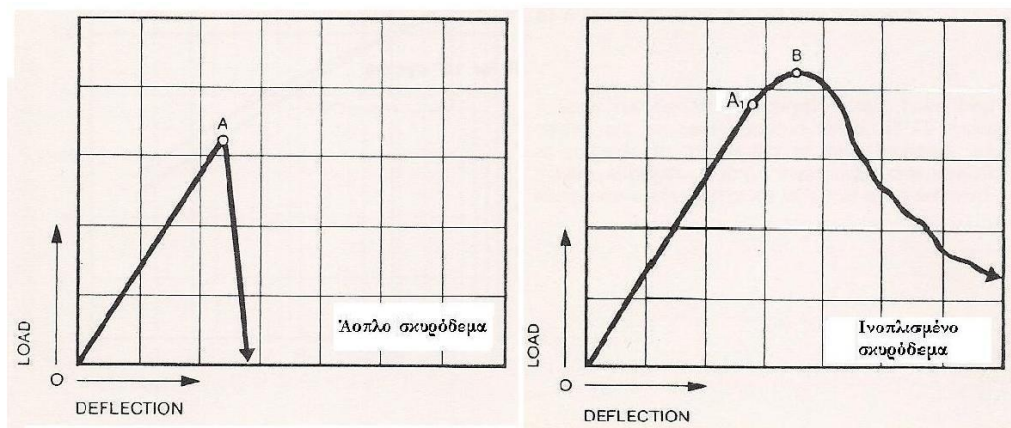
σκυροδέματα, με κατάλληλες ίνες, και σε ποσοστά της τάξης του 0,7% κατ' όγκο. Αυτή η πλαστική συμπεριφορά δίνει τη δυνατότητα μείωσης των συντελεστών ασφαλείας (Maidl, 1995). Στις χαλύβδινες ίνες επικρατούν αυτές με τα άγκιστρα στα άκρα αλλά και αυτές με τα διευρυμένα ή πλατυσμένα άκρα (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10: Κυρίαρχα προφίλ ινών (Σοφιανός, 2016).

Μία ίνα με άγκιστρα είναι γενικά σχεδιασμένη να αστοχεί σε εξόλκευση και όχι σε θραύση. Έχει ικανή αντοχή σε εξόλκευση, λόγω του σχεδιασμού της, ωστόσο το μειονέκτημά της είναι ότι μετά τη διαρροή έχει μικρή ικανότητα να περιορίζει το άνοιγμα της ρωγμής. Αντίθετα, οι ίνες με πεπλατυσμένα άκρα, σε μία αντίστοιχη φόρτιση, αναπτύσσουν αυξημένη τριβή με το σκυρόδεμα και ανθίστανται σαφώς καλύτερα στο άνοιγμα της ρωγμής. Το δικό τους όμως μειονέκτημα είναι ότι δεν έχουν τόσο μεγάλη αντοχή πριν την αστοχία, δηλαδή αστοχούν σε εξόλκευση σαφώς ευκολότερα σε σχέση με τις ίνες με τα γαντζωτά άκρα (Armelin & Banthia, 1997).

Για την καλύτερη όμως κατανόηση του μηχανισμού αστοχίας των ινών, πρέπει να μελετηθεί η συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε κάμψη, συγκριτικά με το άοπλο σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα μιας τέτοιας δοκιμής φαίνονται στο Σχήμα 1.11.



Σχήμα 1.11: Φόρτιση – βέλος, για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (BHP, 1996).

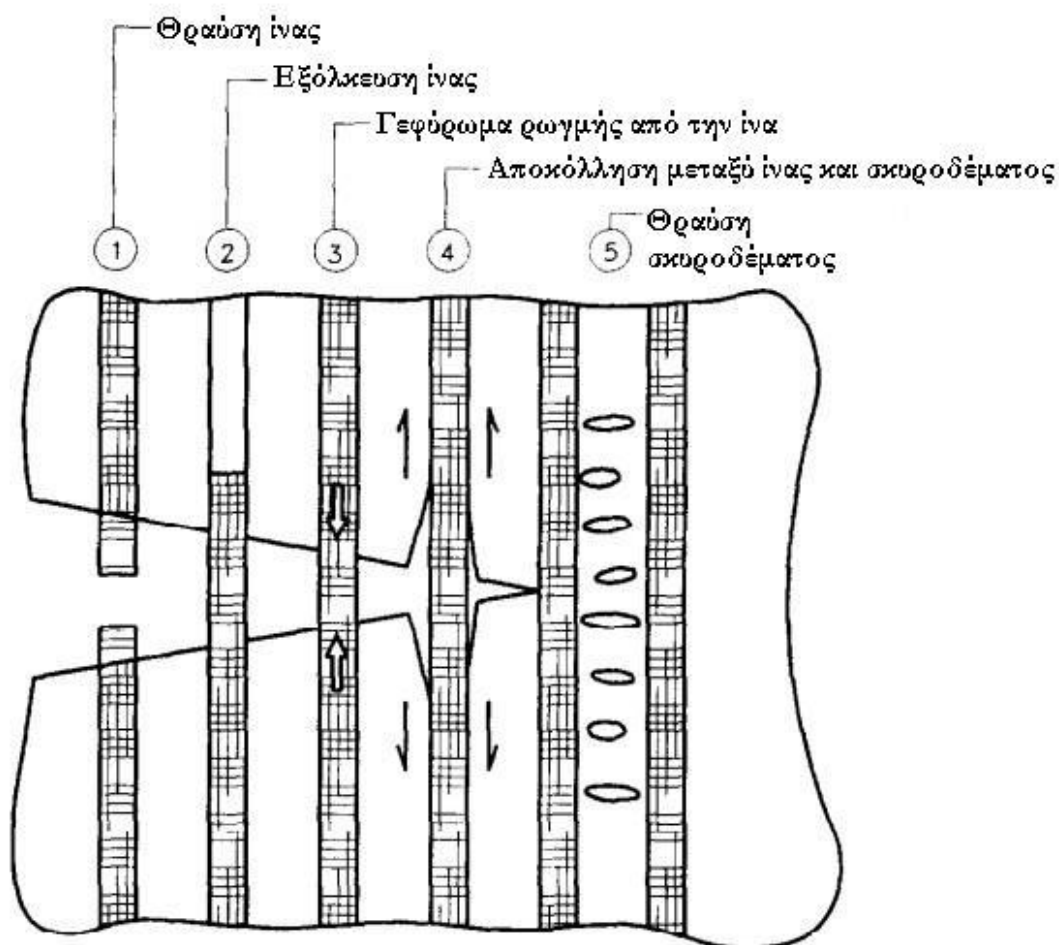
Στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα (δεξιά) υπάρχουν τα εξής σημεία που πρέπει να τονισθούν:

- Το σημείο A1 είναι λίγο υψηλότερα σε σχέση με το αντίστοιχο σημείο A (όρια διαρροής). Έως το σημείο αυτό έχουμε το ελαστικό στάδιο, με πλήρη επαφή των ινών και περιβάλλοντος υλικού.
- Μέχρι το σημείο B είναι η περιοχή που αρχίζουν να εκδηλώνονται οι μικρορωγμές, ενώ έχουμε τις πρώτες αποκολλήσεις ινών.
- Στο σημείο B, εκεί που εκδηλώνεται δηλαδή η αστοχία, έχουμε το μέγιστο φορτίο ενώ είναι εμφανείς τώρα οι ρωγμές.
- Πέρα από το σημείο B, έχουμε εξόλκευση ινών και οι ρωγμές σταδιακά επεκτείνονται. Μπορεί να ονομαστεί και στάδιο τριβής διότι η μετάδοση των τάσεων γίνεται με δυνάμεις τριβής (BHP, 1996).

Αν παρατηρήσουμε αντίστοιχα το άοπλο σκυρόδεμα (αριστερά), μέχρι το σημείο A υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά. Ωστόσο, εκεί έχουμε αστοχία και μετέπειτα το υλικό δεν μπορεί να παραλάβει περαιτέρω φορτία.

Το Σχήμα 1.12 παρουσιάζει τρόπους με τους οποίους οι ίνες περιορίζουν το άνοιγμα των ρωγμών. Ξεκινώντας από τα αριστερά, στην πρώτη έχουμε θραύση της χαλύβδινης ίνας. Στη δεύτερη η αστοχία οφείλεται σε εξόλκευσή της. Στην τρίτη έχουμε συγκράτηση της ρωγμής και η ίνα εφελκύεται. Στην τέταρτη έχουμε αστοχία καθότι σπάει ο δεσμός μεταξύ ίνας και μήτρας του σκυροδέματος, ενώ στην πέμπτη έχουμε απλά θραύση της ίδιας της μήτρας του σκυροδέματος. Είναι σημαντικό να επισημανθεί εδώ ότι οι παραπάνω μηχανισμοί δεν επηρεάζονται από την απόσταση

(s) μεταξύ των ινών. Αυτό που παίζει κυρίως ρόλο είναι το συνολικό μοντέλο λειτουργίας των ινών στο σκυροδέμα (Zollo, 1997).

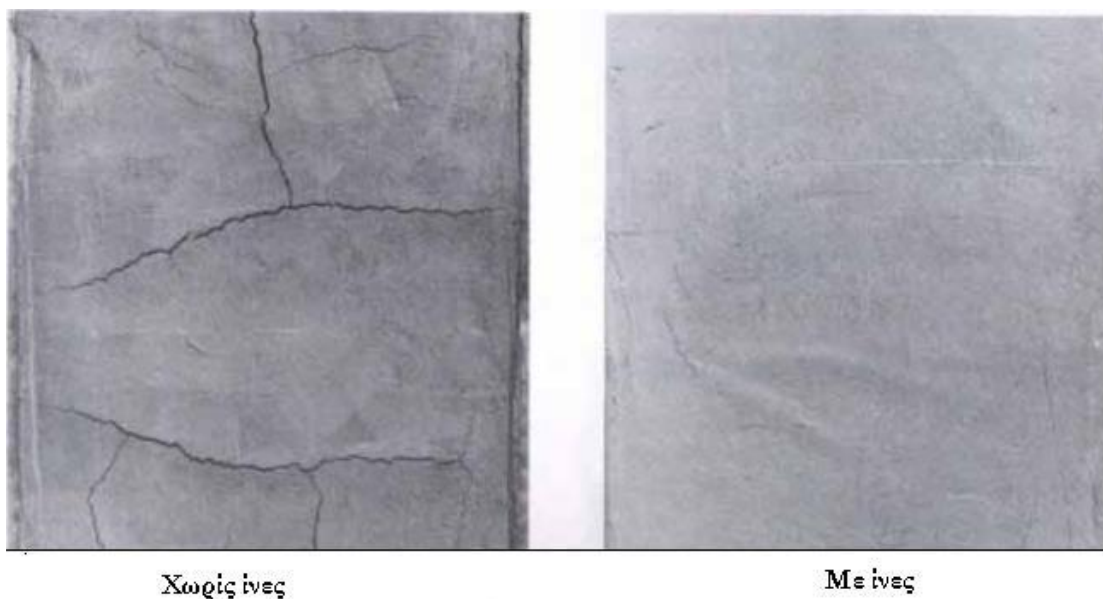


Σχήμα 1.12: Μηχανισμοί απορρόφησης ενέργειας ινών/σκυροδέματος (Fractures Mechanics, (Anderson, 2012).

1.4 Πλεονεκτήματα - Μειονεκτήματα χρήσης των ινών

Η χρήση των ινών στο σκυροδέμα προσφέρει πολλά συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι του συμβατικού οπλισμού, χωρίς όμως να μπορεί γενικά να τον αντικαταστήσει. Τα πλεονεκτήματα χρήσης τους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Οι ίνες διασκορπίζονται ομοιογενώς στο μίγμα και περιορίζουν τις ρωγμές και τις επιπτώσεις της συστολής ξήρανσης. Έτσι, δεν τις αφήνουν να μεγαλώσουν πέρα από ένα πολύ μικρό όριο. Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 1.13.



Σχήμα 1.13: Σύγκριση ρωγμών με και χωρίς ίνες (Fibermesh, 1989).

- Εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ασφάλεια στο προσωπικό, αφού δε χρειάζεται να εργάζεται κάτω από ανυποστήρικτο πέτρωμα για την τοποθέτηση του πλέγματος. Η ασφάλεια του προσωπικού μάλιστα μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιείται τηλεχειριζόμενο ρομπότ εκτόξευσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος.
- Σημαντική βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του τελικού προϊόντος. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει όχι μόνο καλύτερες πρώιμες αντοχές, αλλά και μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση, σε διάτμηση, ενώ έχει και αυξημένη δυσθραυστότητα. Επίσης αναπτύσσει μεγαλύτερη δύναμη συνάφειας με την επιφάνεια που διαστρώνεται σε σχέση με το συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Μπορούν να συνδυαστούν με συμβατικό οπλισμό, παίζοντας το ρόλο της δευτερογενούς ενίσχυσης.
- Η χρήση τους κάνει το σκυρόδεμα πιο όλκιμο, άρα και καταλληλότερο να ενδίδει στις συγκλίσεις, χωρίς να αστοχεί η επένδυση.
- Η χρήση ινών οδηγεί σε οικονομία υλικών και αύξηση της ταχύτητας κατασκευής. Αυτό δεν οφείλεται μόνο στην κατάργηση του πλέγματος και στην μείωση της ανθρώπινης εργασίας, αλλά και στο μικρότερο όγκο εκτοξευόμενου σκυροδέματος που θα χρησιμοποιηθεί συνολικά. Οι ίνες δεν απαιτούν ελάχιστη επικάλυψη, όπως το πλέγμα, αλλά ούτε πρέπει να

γίνεται γέμισμα των όποιων κενών με σκυρόδεμα. Ενδεικτικό διάγραμμα της μείωσης του χρόνου απεικονίζεται στο Σχήμα 1.14.



Σχήμα 1.14: Εξοικονόμηση χρόνου λόγω ίνων (Arcelormittal, 2008).

- Γενικά δεν απαιτούν ειδικό μηχανικό εξοπλισμό για τη χρήση τους. Ωστόσο, το ακροφύσιο και οι σωληνώσεις πρέπει να είναι ικανού πάχους ώστε οι ίνες να μην τις φράζουν. Επίσης, μπορούν να συνδυαστούν με όλα τα πρόσθετα και πρόσμικτα της αγοράς.
- Κατάλληλες ίνες όταν προστίθενται στο σκυρόδεμα αυξάνουν κατά πολύ την ανθεκτικότητά του σε υψηλές θερμοκρασίες, περιορίζοντας τη θραύση του.
- Οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εργασίες επισκευών προϋπαρχουσών κατασκευών. Επιπλέον, εάν μια επένδυση ινοπλισμένου σκυροδέματος χρειαστεί επισκευή ή ενίσχυση αυτή πραγματοποιείται ευκολότερα σε σχέση με μια επένδυση με συμβατικό οπλισμό.

Αντίστοιχα, τα μειονεκτήματα χρήσης τους μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Οι ίνες διασκορπίζονται στο μίγμα, αλλά μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτών τελικά παραλαμβάνει φορτία και περιορίζει το άνοιγμα των ρωγμών. Το ποσοστό αυτό μπορεί να είναι και 25%, που σημαίνει ότι μεγάλο μέρος

τους δεν αξιοποιείται. Πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη ότι ένα μέρος τους χάνεται ως υλικό αναπήδησης. Ειδικά, στην περίπτωση της ξηρής μίξης μπορεί να φθάσει το 50%.

- Οι χαλύβδινες ίνες είναι σχετικά κοφτερές και μπορεί να προκαλέσουν εκδορές ή μικροτραυματισμούς στο προσωπικό, αν δεν γίνεται χρήση τους με προσοχή.
- Οι ίνες δε μπορούν να αντικαταστήσουν πλήρως τον συμβατικό οπλισμό. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα δε μπορεί να αναπτύξει αντίστοιχη εφελκυστική αντοχή με αυτή του συμβατικά οπλισμένου σκυροδέματος (Wong, 2004).
- Κατά τη μίξη τους, εάν αυτή δεν εκτελείται σωστά ή αν δεν υπάρχει ο κατάλληλος εξοπλισμός, μπορεί να δημιουργούνται συσσωματώματα ινών που αργότερα θα φράξουν τις σωληνώσεις ή θα υποβαθμίσουν την ποιότητα του σκυροδέματος.
- Οι χαλύβδινες ίνες φθείρονται όταν εκτίθενται σε υγρασία, ενώ οι υάλινες έχουν μικρή ανθεκτικότητα σε αλκαλικά περιβάλλοντα. Επίσης, οι ίνες που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, έχουν από μικρή έως ελάχιστη επικάλυψη, έτσι τείνουν να εμφανίζουν σημεία σκουριάς. Για λόγους αισθητικής και ασφάλειας, προτείνεται, η μόνιμη επένδυση από ινοπλισμένο σκυρόδεμα να προστατεύεται από ένα λεπτό στρώμα κονιάματος.
- Φθορά επίσης μπορεί να προκληθεί και από ακατάλληλη συσκευασία ή μεταφορά.
- Η εμπειρία από τη χρήση τους δεν είναι τόσο διαδομένη όσο αυτή του δομικού πλέγματος.
- Ο εξοπλισμός φθείρεται σημαντικά περισσότερο σε σχέση με το κοινό εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Έτσι, το κόστος λόγω φθοράς εξοπλισμού, αυξάνει.
- Είναι συνήθως ακριβότερες σε σχέση με τον συμβατικό οπλισμό, και η διαθεσιμότητά τους στον χώρο του έργου μπορεί να είναι περιορισμένη.

1.5 Συμπεριφορά ινοπλισμένου σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες

Το σύγχρονο σκυρόδεμα παρά την υψηλή αντοχή και ανθεκτικότητά του, δεν πρέπει να εκλαμβάνεται ως πυράντοχο υλικό, αφού οι μηχανικές ιδιότητές του υποβαθμίζονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και λόγω της αύξησης της

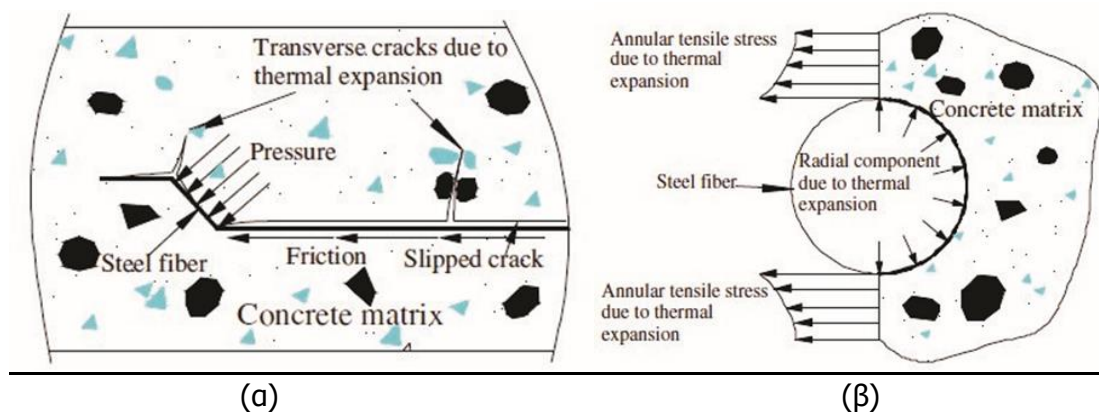
εσωτερικής πίεσης, από τους παραγόμενους υδρατμούς του περιεχόμενου νερού (Ichikawa & England, 2004), δημιουργείται εκρηκτική αποφλοίωση που έχει σαν αποτέλεσμα την έκθεση του κύριου οπλισμού στην πυρκαγιά.

Κατά την παρασκευή του σκυροδέματος, τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου θεωρούνται γενικώς χημικά σταθερά σε θερμοκρασίες μεταξύ 20°C και 80°C. Το προσροφημένο νερό στο τσιμέντο χάνεται μεταξύ 60°C και 85°C και το ελεύθερο νερό του μεσοστρώματος των υδροξυλίων μεταξύ 80°C και 100°C. Στην περιοχή μεταξύ 100°C και 200°C το τσιμέντο αρχίζει να χάνει τη σταθερότητά του, αφού η εξατμιζόμενη υγρασία αρχίζει να συμβάλλει πλέον στη μείωση των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των υδροξυλίων (OH^-) που δημιουργούν τη μηχανική αντοχή του υλικού και τελικά την μείωση της αντοχής του. Παράλληλα επηρεάζονται οι χημικοί δεσμοί μεταξύ των υδροξυλίων, το μέγεθος και η κατανομή των πόρων. Σε θερμοκρασίες άνω των 300°C ξεκινά η διάσπαση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ σε CaO και H_2O η οποία μπορεί να οδηγήσει σε αποφλοίωση του σκυροδέματος. Η αποσύνθεση των ενώσεων ένυδρου πυριτικού ασβεστίου (CSH) και η καταστροφή της γέλης του τσιμεντολιθώματος ξεκινάει στους 500°C, ενώ η αποσύνθεση των υδροξυλίων έχει ολοκληρωθεί στους 800°C. Η τήξη του τσιμέντου επέρχεται σε θερμοκρασίες άνω των 900°C (Σακκάς, 2014, Klingsch, 2014).

Τα συνήθη χρησιμοποιούμενα αδρανή υλικά εμφανίζουν σταθερότητα σε θερμοκρασίες μέχρι τους 300-350°C. Τα αδρανή μπορούν να υποστούν κρυσταλλικούς μετασχηματισμούς που οδηγούν σε σημαντική αύξηση του όγκου τους, όπως η περίπτωση των πυριτικών αδρανών με αύξηση περίπου 5.7% μεταξύ των 500 και 650°C λόγω της μετατροπής του α-χαλαζία σε β-χαλαζία. Τα ασβεστολιθικά αδρανή διασπώνται σε θερμοκρασίες άνω των 800°C παράγοντας CaO και CO_2 . Η ασβεστοποίηση των αδρανών προκαλεί διαστολή, ρωγμές και θραύση των ασβεστολιθικών αδρανών και το CO_2 εκλύεται στο περιβάλλον.

Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι το βασικότερο πρόβλημα του σκυροδέματος υπό θέρμανση είναι η εκρηκτική αποφλοίωση (Khoury, 2000) η οποία εξαρτάται από τον ρυθμό θέρμανσης του σκυροδέματος, την περιεχόμενη υγρασία, την πυκνότητα, την αντοχή, το είδος των αδρανών και το πάχος του σκυροδέματος (Hertz, 2003). Γενικά, υψηλός ρυθμός θέρμανσης, υψηλή υγρασία, υψηλή πυκνότητα, υψηλή αντοχή, υψηλής πυκνότητας αδρανή και μεσαίο πάχος εκτεθειμένου σκυροδέματος (<20-30 cm) αυξάνουν την πιθανότητα εκδήλωσης εκρηκτικής αποφλοίωσης.

Το υλικό των ινών μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στις θερμοκρασιακές συστολοδιαστολές μεταξύ αυτών και της μάζας του σκυροδέματος προκαλώντας επιπλέον μικρορωγματώσεις. Παράλληλα όμως οι ίνες μπορούν να προσφέρουν στο σκυρόδεμα σημαντική συνεκτικότητα γεφυρώνοντας τις δημιουργούμενες ρωγματώσεις λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών. Στο Σχήμα 1.15 φαίνονται οι ρωγματώσεις λόγω θερμικής διαστολής στη μάζα του σκυροδέματος και πως οι ίνες παρόλο που χάνουν μέρος της συνάφειας βοηθούν στην αγκύρωση αυτών.



Σχήμα 1.15: α) Εγκάρσιες ρωγματώσεις λόγω θερμικής διαστολής, β) Δημιουργούμενες εφελκυστικές τάσεις στη μάζα του σκυροδέματος λόγω θερμικής διαστολής της ίνας (Ding et al, 2012).

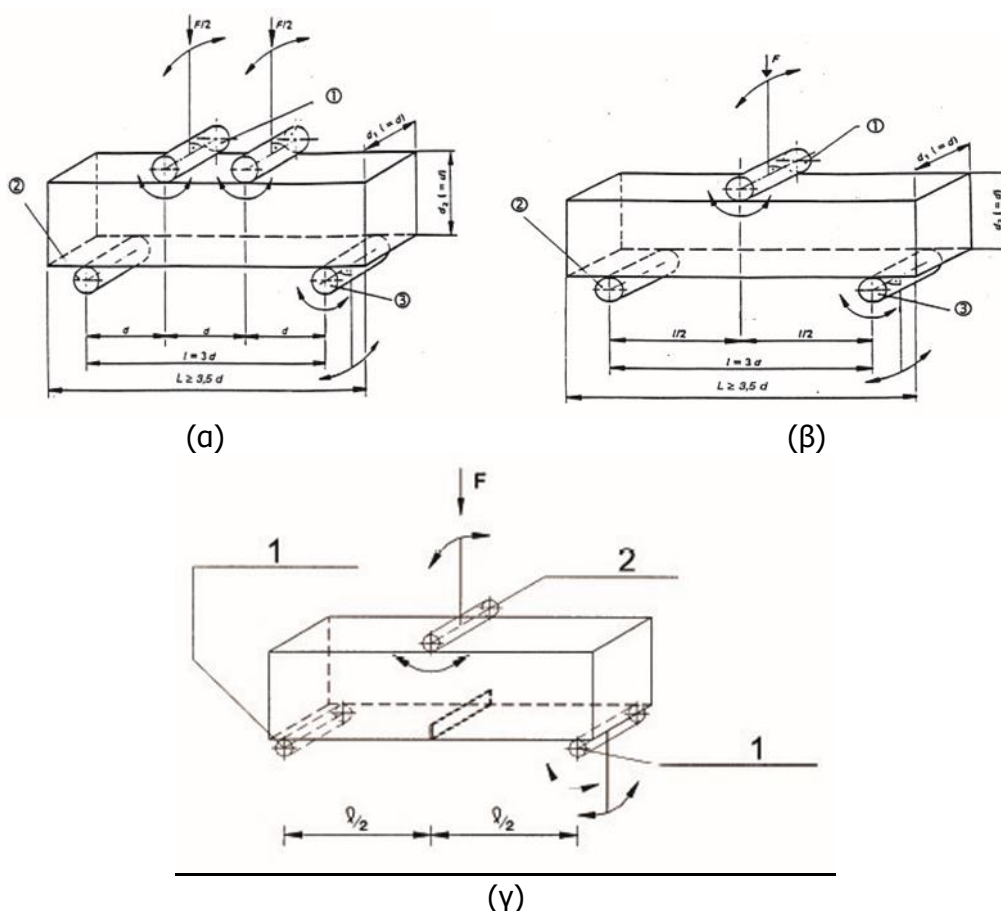
1.6 Δοκιμές Ινοπλισμένου Σκυροδέματος

1.6.1 Δοκιμές Κάμψης – Πρισματικά δοκίμια/Δοκοί

Στα δοκίμια αυτού του τύπου γίνονται δοκιμές τριών και τεσσάρων σημείων, με σκοπό την κάμψη τους και τη μέτρηση της δυσθραυστότητας. Το δοκίμιο πατάει πάντα σε δύο σημεία και ανάλογα με τη δοκιμή φορτίζεται σε ένα ή δύο σημεία. Τα δοκίμια προέρχονται από κοπή των πλακών που έχουν προκύψει από την εκτόξευση σε πανέλα. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές της ASTM, η φόρτιση των δοκιμίων στη μηχανή πρέπει να γίνεται με την ίδια φορά με την οποία έγινε και η εκτόξευση (ASTM C 1609/1609-05). Μειονέκτημα των δοκιμών αυτών είναι η αυξημένη διακύμανση των αποτελεσμάτων τους. Ιδιαίτερα στη δοκιμή τεσσάρων σημείων, αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι η θραύση μπορεί να συμβεί ανάμεσα στα δύο σημεία φόρτισης, ενώ η βύθιση μετράται πάντα στο κέντρο (William, Hustrulid, 2001). Οι δοκιμές μπορούν να γίνουν σύμφωνα με πολλούς διαφορετικούς κανονισμούς.

Εκτός των παραπάνω διαφορών που αφορούν στις διαστάσεις, μερικές από τις δοκιμές αυτές (RILEM, UNI κ. ά) προβλέπουν την ύπαρξη εγκοπής στο μέσον του

κάτω μέρος της δοκού. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιβάλλουν τη θραύση σε ελεγχόμενο σημείο (Hillerborg, 1985 και Lee & Barr, 2003). Στο Σχήμα 1.16 παρουσιάζονται οι συνδυασμοί φορτίσεων και εγκοπής. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών διαφοροποιούνται σημαντικά σε σχέση με τις υπόλοιπες. Σκοπός της ύπαρξης της εγκοπής είναι να περιορίζει τη μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις δοκιμές. Ωστόσο καθιστά αδύνατη την εκτίμηση της πραγματικής τιμής της αντοχής, αφού πλέον η αστοχία γίνεται σε δεδομένη θέση ανεξάρτητα από την ύπαρξη μιας ασθενούς ζώνης στο υλικό (Schorn, 2001).



Σχήμα 1.16: α) Δοκιμή 4 σημείων, β) δοκιμή 3 σημείων, και γ) δοκιμή 3 σημείων με εγκοπή (EN 14651:2005+A1:2007, 2007), (EN 12390-5:2000, 2000).

1.6.2 Δοκιμή Θλίψης

Η δοκιμή θλίψης ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι η ίδια δοκιμή μονοαξονικής θλίψης με αυτή του άοπλου σκυροδέματος για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής. Ταυτόχρονα με τη θλιπτική αντοχή (ASTM C 39/C 39M-03, 2003) μπορεί να υπολογιστεί το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson (ASTM C 469-02, 2002). Η θλιπτική αντοχή υπολογίζεται ως το μέγιστο φορτίο προς την μέση επιφάνεια

φόρτισης του δοκιμίου. Ο ρυθμός φόρτισης μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 0.15 και 0.35 MPa/sec. Στην περίπτωση ταυτόχρονου υπολογισμού μέτρου ελαστικότητας και λόγου Poisson ο ρυθμός φόρτισης πρέπει να περιορίζεται σε 0.241 ± 0.034 MPa/sec. Χρειάζονται τουλάχιστον δύο ανακυκλίσεις φόρτισης μέχρι το 40% του αναμενόμενου μέγιστου φορτίου, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επαναληψιμότητα της δοκιμής. Τα δοκίμια πρέπει να είναι κυλινδρικά και να έχουν λόγο ύψους/διάμετρος ίσο με 2. Χαρακτηριστική ηλικία δοκιμίου είναι οι 28 ημέρες στις οποίες τα δοκίμια θα πρέπει να συντηρούνται σε κατάλληλο θάλαμο υγρασίας ή μέσα στο νερό. Για άλλες αναλογίες διαστάσεων υπάρχουν διορθωτικοί συντελεστές που καθορίζονται στο πρότυπο. Το μέτρο ελαστικότητας που μπορεί να υπολογιστεί είναι το μέτρο ελαστικότητας τέμνουσας και χορδής. Για την μέτρηση των παραμορφώσεων απαιτείται η ειδική διάταξη του προτύπου. Στο Σχήμα 1.17 παρουσιάζεται μία τυπική πειραματική διάταξη δοκιμής θλίψης.

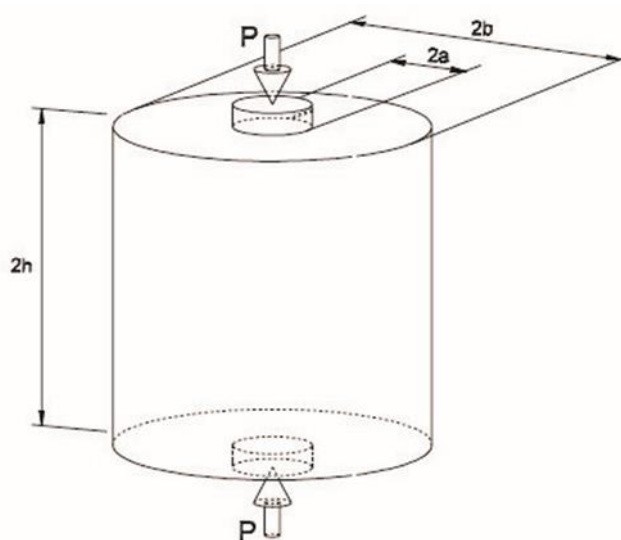


Σχήμα 1.17: Δοκιμή θλίψης (Χουμανίδης, 2016).

1.6.3 Δοκιμή Barcelona

Η δοκιμή Barcelona (UNE 83515, 2010) βασίστηκε στη δοκιμή σημειακής φόρτισης του Chen (1969). Αρχικά η δοκιμή σημειακής φόρτισης είχε σχεδιαστεί ως ένας τρόπος έμμεσου προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής του άοπλου σκυροδέματος αλλά στη συνέχεια διαπιστώθηκε η χρησιμότητά της και στον προσδιορισμό παραμενουσών μηχανικών χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Η δοκιμή είναι μια εναλλακτική της Βραζιλιανής δοκιμής. Η διάταξη της δοκιμής αποτελείται από μια πρέσα θλίψης που ασκεί μονοαξονικό φορτίο σε ένα

κυλινδρικό δοκίμιο που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο χαλύβδινους κυλίνδρους. Οι χαλύβδινοι κύλινδροι πρέπει να έχουν διάμετρο ($2a$) ίση με το $\frac{1}{4}$ της διαμέτρου ($2b$) του δοκιμίου και ύψος αρκετό για να προσφέρουν ομοιόμορφη φόρτιση. Η διάμετρος του δοκιμίου πρέπει να είναι ίση με το ύψος του ($2h$), με προτεινόμενο μέγεθος τα 150 mm, δηλαδή $2b = 2h = 8a$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.18. Η δοκιμή εκτελείται με σταθερό ρυθμό βύθισης του εμβόλου ίσο με 0.5 ± 0.05 mm/min σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Η δοκιμή ολοκληρώνεται όταν η συνολική περιφερειακή παραμόρφωση φθάσει τα 6 mm. Ο μηχανισμός αστοχίας συνήθως παρουσιάζει τρεις ακτινικές ρωγμές αν και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να παρουσιαστούν και τέσσερις.

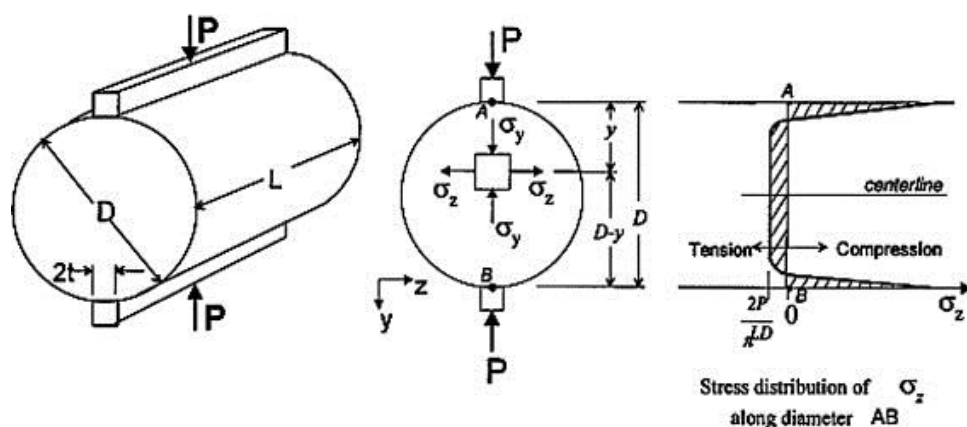


Σχήμα 1.18: Διάταξη δοκιμής Barcelona.

1.6.4 Δοκιμή Διαχωρισμού – Βραζιλιανή Δοκιμή

Η δοκιμή διαχωρισμού κυλινδρικών δοκιμίων (ASTM C 496M-02, 2002) εφαρμόζεται μόνο για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Η φόρτιση πραγματοποιείται με την εφαρμογή θλιπτικού φορτίου κατά μήκος του κυλίνδρου ο οποίος βρίσκεται σε οριζόντια θέση (Σχήμα 1.19). Η φόρτιση εισάγει εφελκυστικές τάσεις στο επίπεδο άσκησης του φορτίου και σχετικά υψηλές θλιπτικές τάσεις στην άμεση περιοχή εφαρμογής του φορτίου. Συμβαίνει εφελκυστική αστοχία παρά θλιπτική γιατί οι περιοχές άσκησης φορτίου υπόκεινται σε τριαξονική θλίψη επιτρέποντάς τους να αντέχουν αρκετά μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις από ότι σε μια δοκιμή μονοαξονικής θλίψης. Η εφελκυστική αντοχή αυτής της δοκιμής είναι γενικά μεγαλύτερη από την άμεση εφελκυστική αντοχή και μικρότερη από την καμπτική.

Μετά την εφελκυστική αστοχία του δοκιμίου, ενώ το ινοπλισμένο σκυρόδεμα φαίνεται να παρουσιάζει παραμένουσα αντοχή δεν μπορούν να εξαχθούν επαρκή συμπεράσματα για το λόγο του ότι η επιφάνεια εφαρμογής του φορτίου παραμορφώνεται συνεχώς σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής και μετά από κάποιο σημείο η εφελκυστική αντοχή δίνει τη θέση της σε ένα συνδυασμό εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής.



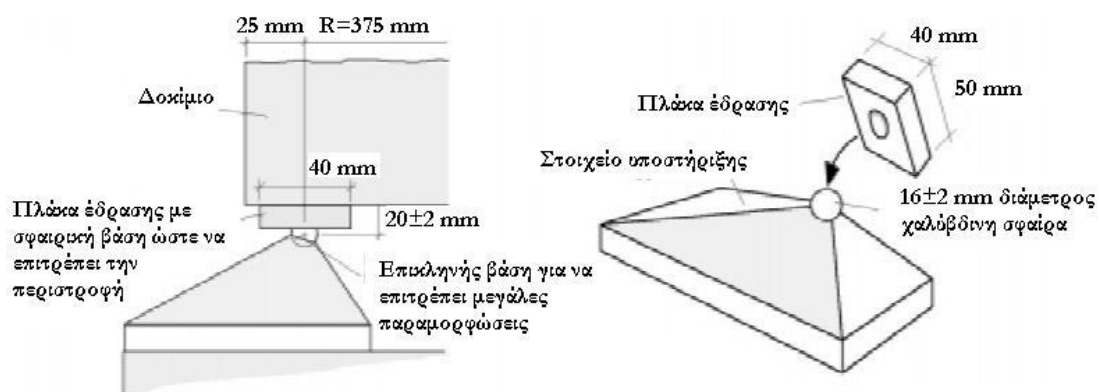
Σχήμα 1.19: Ανάπτυξη τάσεων στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της βραζιλιανής δοκιμής.

1.6.5 Δοκιμή πλάκας

Οι δοκιμές κάμψης σε πλάκες ξεκίνησαν από τη γαλλική εταιρία σιδηροδρόμων το 1989. Αντίθετα με τις δοκούς, οι πλάκες υπόκεινται σε κεντρική φόρτιση. Οι πλάκες μπορεί να είναι κυκλικές ή τετράγωνες. Και στις δύο περιπτώσεις η μέγιστη βύθιση του εμβόλου είναι ίση με το 1/20 του ελεύθερου εύρους της πλάκας, έτσι ώστε να δημιουργείται αστοχία που θα περιλαμβάνει πάνω από μια μεγάλη ρωγμή αστοχίας (Maccaferri). Αυτού του είδους οι δοκιμές έχουν τύχει ευρείας εφαρμογής στην πράξη, λόγω της απλότητάς τους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών σε τετραγωνική πλάκα εμφανίζουν μεγάλα εύρη τιμών, γεγονός που οφείλεται και στον τρόπο στήριξης της πλάκας. Για το λόγο αυτό έχει προταθεί η δοκιμή της κυκλικής πλάκας που στηρίζεται σε τρεις αρθρώσεις (Maccaferri).

Γενικά οι δοκιμές εκτελούνται όλες με στήριξη των πλακών σε όλη τους την περίμετρο, εκτός από αυτήν της ASTM, όπου η πλάκα στηρίζεται σε τρία σημεία. Η κατάταξη γίνεται σε κλάσεις ανάλογα με την απορρόφηση ενέργειας (Joules), με τους περισσότερους κανονισμούς να υιοθετούν τρεις κλάσεις. Οι δοκιμές σε πλάκες αντιπροσωπεύουν καλύτερα από τις δοκούς τη μορφή της επένδυσης και τον τρόπο με τον οποίο επιβάλλεται το φορτίο. Επίσης, στην πραγματικότητα οι ίνες δρουν

τουλάχιστον σε δύο διαστάσεις και όχι μόνο σε μια, όπως συμβαίνει με τις δοκιμές δοκών. Τέλος, για τη σύγκριση των ινών με το πλέγμα, η δοκιμή σε πλάκες είναι πιο αντικειμενική (Vandewalle, 2005). Η διαδοχική ρωγμάτωση της πλάκας κατά τη φόρτιση, εξαναγκάζει την ενεργοποίηση των ινών για τη γεφύρωση των ρωγμών και την ανακατανομή των τάσεων. Η μορφή και η αντοχή των ινών καθορίζουν αν οι τελευταίες θα αστοχήσουν σε θραύση ή θα εξολκευθούν. Στο Σχήμα 1.20 απεικονίζεται η δοκιμή της ASTM σε κυκλικές πλάκες, όπου η πλάκα εδράζεται επάνω σε τρεις αρθρώσεις, χωρίς να εφάπτεται σε κανένα άλλο σημείο της μηχανής, κατά αυτό τον τρόπο οι αρθρώσεις επιτρέπουν την περιστροφή των σπασμένων τμημάτων της πλάκας.



Σχήμα 1.20: Λεπτομέρεια της στήριξης της πλάκας (ASTM, C 1550-03a).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:

Μέθοδος ακουστικής εκπομπής

2.1 Ορισμός της μεθόδου της ακουστικής εκπομπής

Έχει παρατηρηθεί ότι τα περισσότερα στερεά υλικά όταν φορτίζονται ή παραμορφώνονται εκπέμπουν υποηχητικά σεισμικά σήματα, ενώ κατά τη θραύση τους παράγουν ηχητικά κύματα ενδεικτικά της τελικής αστοχίας. Η φόρτιση ενός ψαθυρού υλικού, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της συγκέντρωσης των τάσεων γύρω από μικροσκοπικές ρωγμές ή ατέλειες του υλικού, όπου πρόκειται για μικρές θραύσεις ή όρια των κόκκων. Ο συντελεστής συγκέντρωσης τάσεων αποτελεί ένα δείκτη έντασης που επικρατεί γύρω από μια μικροσκοπική ατέλεια, όταν ο δείκτης υπερβεί μια οριακή τιμή τότε συσσωρευμένη ελαστική ενέργεια απελευθερώνεται απότομα στην περιοχή της αυξημένης συγκέντρωσης τάσεως. Η ελαστική ενέργεια εξαρτάται από την ψαθυρότητα του υλικού και το ποσοστό της ελαστικής παραμόρφωσης σε σχέση με την πλαστική και διαδίδεται μέσα στο υλικό με τη μορφή ελαστικών κυμάτων. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως Ακουστική Εκπομπή.

Ως Ακουστική Εκπομπή, σύμφωνα με την ASTM, χαρακτηρίζονται τα μεταβατικά ελαστικά κύματα που δημιουργούνται με την ταχεία απελευθέρωση ενέργειας από τοπικές πηγές στο εσωτερικό κάποιου υλικού, είτε λόγω έναρξης της αστοχίας και διάδοσης προϋπάρχουσας βλάβης σε αυτό ή λόγω αλλαγής φάσεως. Η προέλευση της ΑΕ σχετίζεται με ολίσθηση μεταξύ των κόκκων του υλικού ή με έναρξη και διάδοση μικρορωγμών στη δομή του, όταν αυτό βρίσκεται υπό ένταση. Το παραγόμενο σήμα προέρχεται από το ίδιο το υλικό, ενώ χωρίς φόρτιση δεν παρατηρείται ΑΕ. Τα κύματα της ΑΕ διαδίδονται μέσα στο υλικό και μπορούν να ανιχνευθούν από αισθητήρες ΑΕ (συνήθως πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων) σε επαφή με αυτό. Οι αισθητήρες μετατρέπουν τα ελαστικά κύματα σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία ενισχύονται και υφίστανται την απαιτούμενη επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Η τεχνική αυτή, που σήμερα γνωρίζεται σημαντική ανάπτυξη διεθνώς, είναι γνωστή ως Τεχνική Ακουστικής Εκπομπής (Acoustic Emission Technique, AET).

Η ΑΕ με βάση τον ορισμό της ASTM E1316 (Terminology for Nondestructive Examinations), περιλαμβάνει τα φαινόμενα που σχετίζονται με τη διαδικασία γένεσης και διάδοσης των ελαστικών, τα οποία παράγονται μέσα σε ένα υλικό με απότομη

απελευθέρωση ενέργειας. Η ΑΕ εντοπίζει μετακινήσεις-μετατοπίσεις, δομικές ατέλειες σε πολύ πρώιμο στάδιο, οι οποίες είναι ενεργές και πιθανώς κρίσιμες σε συγκεκριμένα φορτία. Η τεχνική της ΑΕ δε δίνει πληροφορίες για το μήκος και το βάθος των ατελειών και δεν προσδιορίζει άμεσα βασικές μηχανικές παραμέτρους, όπως η τάση ή η παραμόρφωση, αλλά κατατάσσει τη δραστηριότητα και κρίσιμότητα σε κατηγορίες καθορίζοντας έτσι τη μηχανική ευστάθεια μιας δομής ή ενός δείγματος όταν αυτό υποβάλλεται σε τάση ή παραμόρφωση.

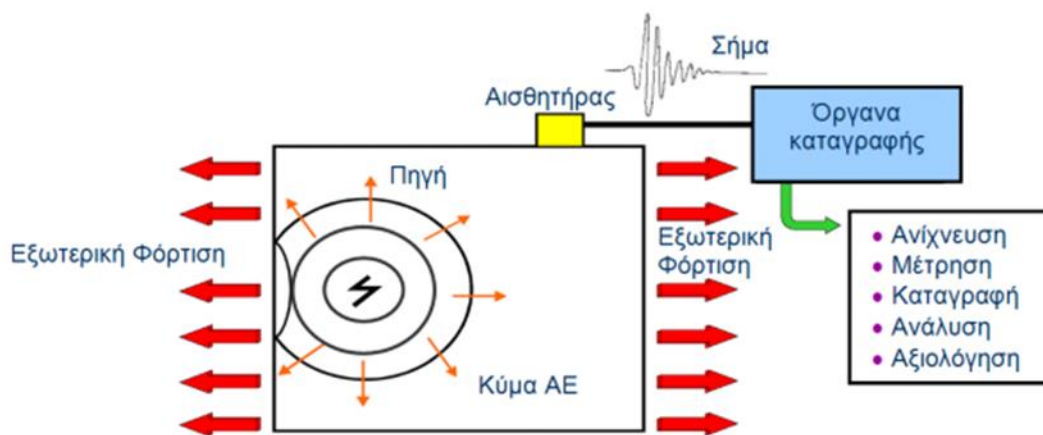
Ως αρχή της εφαρμογής της τεχνικής της ΑΕ στη μηχανική πετρωμάτων μπορούν να θεωρηθούν οι μελέτες των Obert και Duvall (1942), που αφορούσαν την πρόβλεψη των βίαιων εκτινάξεων των πετρωμάτων σε βαθιά ορυχεία στα τέλη της δεκαετίας του 1930. Η ανάπτυξη της μεθόδου ευνοήθηκε και από την έρευνα και σε άλλα υλικά πλην των πετρωμάτων. Από τις πιο σημαντικές μελέτες, θεωρούνται αυτές του Kaiser (1950), ο οποίος παρατήρησε ότι τα υλικά έχουν «μνήμη» των εφαρμοσθέντων σε αυτά τάσεων. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι γνωστό ως φαινόμενο Kaiser (Lavrov, 2003).

Οι πρώτες έρευνες εστιάστηκαν στη μελέτη του μηχανισμού γένεσης και διάδοσης των ελαστικών κυμάτων στα πετρώματα και στη σχέση των παραμέτρων ΑΕ με τη φόρτιση ή με την παραμόρφωση του πετρώματος. Εργαστηριακές μελέτες (Lockner, 1993) συσχετίζουν τις παραμέτρους ΑΕ με την επερχόμενη θραύση ενός δοκιμίου πετρώματος, ενώ η ανάπτυξη της θραύσης μέσα στο δοκίμιο εξετάζεται με τον εντοπισμό της θέσης της πηγής των γεγονότων ΑΕ. Στην προσπάθεια αυτή βρήκαν εφαρμογή μέθοδοι της σεισμολογίας θεωρώντας ότι η γένεση των ακουστικών κυμάτων είναι αντίστοιχη με τη γένεση των σεισμών σε διαφορετική κλίμακα. Η μέθοδος ακουστικής εκπομπής είναι δημοφιλής και ως εργαλείο για το μη καταστρεπτικό έλεγχο (NDT) στη βιομηχανία, όπου χρησιμοποιείται για την επιτόπια ανίχνευση της εξέλιξης ρωγμών και τον έλεγχο ασφάλειας κατασκευών (κυρίως μεταλλικών). Σημαντικό ρόλο στην αυξανόμενη αποδοχή και χρήση της ΑΕ στην έρευνα και στη βιομηχανία έχει η ανάπτυξη της μικροηλεκτρονικής και των τεχνικών καταγραφής, ανάλυσης και επεξεργασίας με Η/Υ.

2.2 Αρχές λειτουργίας ακουστικής εκπομπής

2.2.1 Σήματα ακουστικής εκπομπής

Στο Σχήμα 2.1 εικονίζεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της ΑΕ. Ένα γεγονός ΑΕ στην πηγή προκαλεί απελευθέρωση ενέργειας η οποία διαδίδεται μέσα στο υλικό ως ελαστικό τασικό κύμα. Το κύμα αυτό διαδίδεται μέχρι τα όρια του σώματος και ανιχνεύεται από τον αισθητήρα ΑΕ. Ο αισθητήρας μετατρέπει τις μικρές επιφανειακές μετακινήσεις λόγω του κύματος σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο στη συνέχεια μεταφέρεται σε προενισχυτή και σε μονάδα επεξεργασίας.

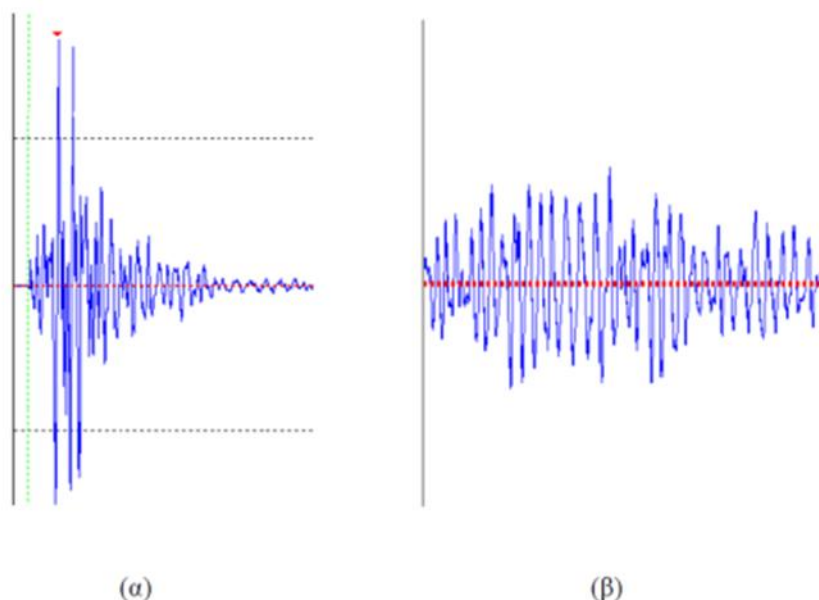


Σχήμα 2.1: Βασική αρχή της μεθόδου ΑΕ. Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης των σημάτων ΑΕ. (ASTM E1316, 2003).

Το κύμα ΑΕ στην πηγή περιέχει ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων από μερικές δεκάδες kHz έως μερικά MHz. Συχνότητες κάτω από 1 Hz έχουν παρατηρηθεί σε μελέτες πεδίου μεγάλης κλίμακας, ενώ στις εργαστηριακές μελέτες τα σήματα ΑΕ/MS έχουν συνήθως συχνότητες μεγαλύτερες από 500 kHz. Γενικά, το ανιχνευόμενο σήμα έχει πολύπλοκη μορφή, που εξαρτάται τόσο από τα χαρακτηριστικά της πηγής και του μέσου διάδοσης (μορφή κύματος, ταχύτητα, εξασθένιση, ανακλάσεις και συμβολές) όσο και από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα. Αυτές οι επιδράσεις διαφοροποιούν τα ανιχνεύσιμα σήματα ΑΕ από αυτά που εκπέμπονται από την πηγή.

Η δραστηριότητα ΑΕ περιγράφεται συνήθως από παραμέτρους συσχετισμένες με το πλήθος και το μέγεθος των γεγονότων ΑΕ. Τα σήματα ΑΕ, που λαμβάνονται από τον αισθητήρα, μπορούν να διακριθούν σε συνεχούς και κρουστικού τύπου ενώ τα δεδομένα τους διακρίνονται αντίστοιχα σε χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα (time driven data) και δεδομένα συσχετισμένα με την κρουστική μορφή ενός σήματος ΑΕ

(hit driven data). Ένα κρουστικό σήμα θεωρείται ως προερχόμενο από ένα διακριτό γεγονός. Όταν ο ρυθμός των γεγονότων AE είναι μεγάλος τα σήματα τους επικαλύπτονται και συνδυάζονται ώστε να σχηματίσουν σήματα συνεχούς μορφής. Στο Σχήμα 2.2 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα των δύο τύπων σημάτων AE.



Σχήμα 2.2: (α) τυπική μορφή κρουστικού σήματος AE, (β) τυπική μορφή συνεχούς σήματος AE (Κατσικογιάννη, 2004).

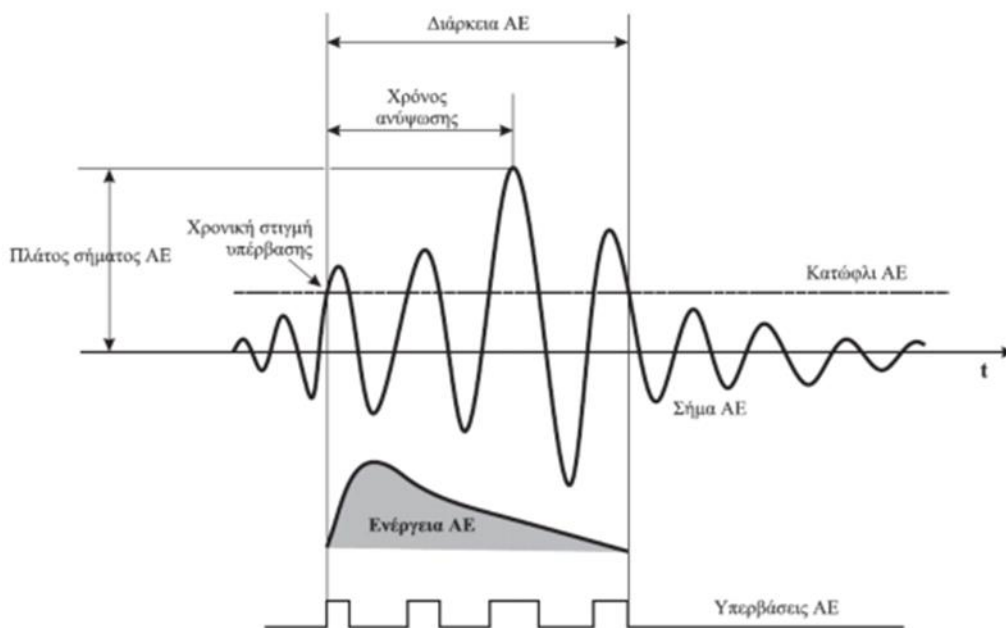
Επίσης πρέπει να σημειωθεί ότι τα περισσότερα σήματα AE/MS περιέχουν συνιστώσες P και S κυμάτων. Τα σήματα συνεχούς μορφής χαρακτηρίζονται συνήθως από τη μέση τετραγωνική ρίζα του πλάτους U του καταγραφόμενου σήματος. Για το χαρακτηρισμό ενός κρουστικού τύπου σήματος είναι απαραίτητος ο καθορισμός μίας τάσης κατώφλιού (threshold) πάνω από το θόρυβο του περιβάλλοντος. Το κατώφλι καθορίζεται μεταξύ άλλων και από το πλάτος των καταγραφόμενων σημάτων AE και το επιθυμητό μέγεθος καταγραφόμενων δεδομένων. Όταν το σήμα AE υπερβεί το κατώφλι τότε καταγράφεται ένας κτύπος (hit). Σε μία τυπική μελέτη AE καταγράφονται εκατοντάδες ή χιλιάδες σήματα καθιστώντας την επεξεργασία και την αξιολόγηση ιδιαίτερα χρονοβόρα. Για το λόγο αυτό από κάθε κυματομορφή εξάγονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι, που καλούνται παράμετροι AE. Αυτές διευκολύνουν την ανάλυση και τη σύγκριση μεταξύ των λαμβανομένων σημάτων.

Οι κύριες παράμετροι, που χαρακτηρίζουν ένα σήμα AE κρουστικού τύπου (Σχήμα 2.3), είναι το πλάτος του σήματος (amplitude), ο χρόνος ανύψωσης (rise time) και η διάρκεια του σήματος (duration) κ.α.

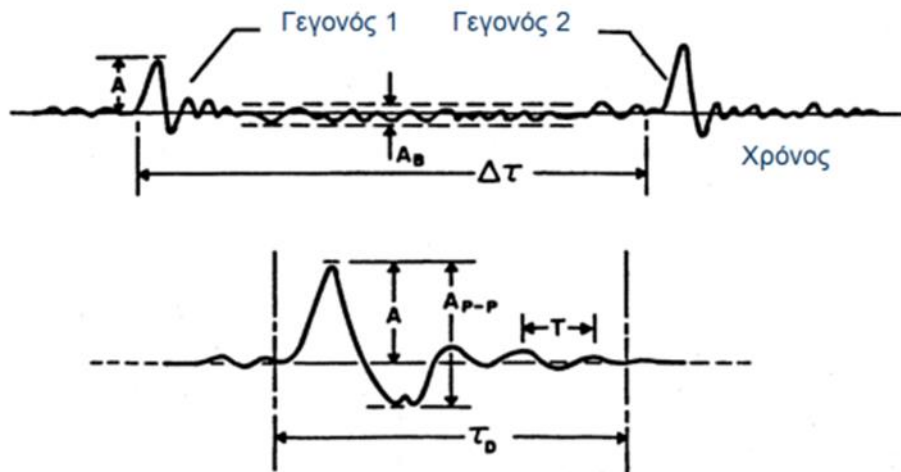
Οι βασικότερες παράμετροι ΑΕ είναι οι ακόλουθες:

- **Διάρκεια Γεγονότος (T_D):** Ο συνολικός χρόνος ενός μεμονωμένου γεγονότος.
- **Ενέργεια Ακουστικής Εκπομπής (E):** Το τετράγωνο του πλάτους του γεγονότος (A).
- **Κατώφλι (Threshold):** Όριο τάσης πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα.
- **Κτύπος (Hit):** Όταν το σήμα-γεγονός ΑΕ υπερβεί το κατώφλι τότε καταγράφεται ένας κτύπος.
- **Λόγος (SNR):** Ο λόγος του πλάτους του γεγονότος και του πλάτους του παρασιτικού θορύβου προς το πλάτος του παρασιτικού θορύβου.
- **Περίοδος (T):** Ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών μεγίστων (peaks) του γεγονότος.
- **Πλάτος – Εύρος Σήματος Ακουστικής Εκπομπής (A):** Η μέγιστη τιμή (peak) κάθε καταγεγραμμένου γεγονότος εκφρασμένη σε dB ή η μέγιστη διαφορά δυναμικού της κυματομορφής ΑΕ. Αποτελεί μέτρο μεγέθους του σήματος και ορίζεται από τη σχέση: $dB = 20 \log (V_{max}/1\mu\text{volt}) -$ (Ενίσχυση προ-ενισχυτή σε dB). Δηλ., εάν η ανάκτηση του προ-ενισχυτή είναι 40 dB και η μέγιστη τάση είναι 1 volt, τότε το πλάτος του σήματος για το συγκεκριμένο γεγονός είναι 80 dB.
- **Πλάτος μεταξύ δύο μεγίστων (A_{p-p}):** Το πλάτος μεταξύ της μέγιστης θετικής και μέγιστης αρνητικής τιμής του γεγονότος.
- **Πλάτος Παρασιτικού Θορύβου (A_B):** Το πλάτος μεταξύ της μέγιστης θετικής και μέγιστης αρνητικής τιμής του παρασιτικού θορύβου.
- **Ρυθμός Γεγονότων - Συχνότητα Επαναληψιμότητας Γεγονότων (NR):** Ο αριθμός γεγονότων (ΔN) που καταγράφεται ανά μονάδα χρόνου (Δt).
- **Ρυθμός Ενέργειας (ER):** Το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται ανά μονάδα χρόνου (Δt).
- **Συσσωρευμένη - Αθροιστική Δραστηριότητα (N):** Ο συνολικός αριθμός γεγονότων που καταγράφεται κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.

- **Συσσωρευμένη Ενέργεια (ΣΕ):** Το άθροισμα της ενέργειας που εκπέμπεται από όλα τα γεγονότα που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου.
- **Υπερβάσεις (Counts):** Προσδιορίζει πόσες φορές ένα σήμα ΑΕ υπερβαίνει το κατώφλι (threshold).
- **Χρόνος Ανύψωσης (Risetime):** Ο χρόνος μεταξύ της στιγμής όπου το σήμα υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι έως τη χρονική στιγμή μεγίστου πλάτους.
- **Χρόνος Άφιξης (Arrival Time):** Η χρονική στιγμή όπου το σήμα ΑΕ υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι. Απαραίτητος για τον υπολογισμό της θέσης της πηγής του γεγονότος ΑΕ.
- **Χρόνος μεταξύ Γεγονότων ($\Delta\tau$):** Ο χρόνος μεταξύ διαδοχικών γεγονότων, δηλ., χρόνος μεταξύ της αρχής του ενός γεγονότος και της αρχής του επόμενου.



Σχήμα 2.3: Κυματομορφή γεγονότος ΑΕ και ορισμένα προκύπτοντα χαρακτηριστικά από το σύστημα επεξεργασίας (Carlos, 2003).



Σχήμα 2.4: Χαρακτηριστικές κυματομορφές γεγονότων AE/MS και αποτύπωση σημαντικών παραμέτρων (Hardy, 2003).

Πρέπει να σημειωθεί, ότι η συσσωρευμένη δραστηριότητα (N) και ο ρυθμός γεγονότων (NR) εξαρτώνται από την ευαισθησία του συστήματος παρακολούθησης και από το λόγο του σήματος προς το θόρυβο (SNR). Οι παράμετροι πλάτος (A), ενέργεια (E), συσσωρευμένη ενέργεια (ΣE) και ρυθμός ενέργειας (ER) εξαρτώνται από τους προαναφερθέντες παράγοντες και επίσης από την απόκριση συχνότητας του γενικού συστήματος παρακολούθησης.

2.2.2 Εξασθένιση και θόρυβος

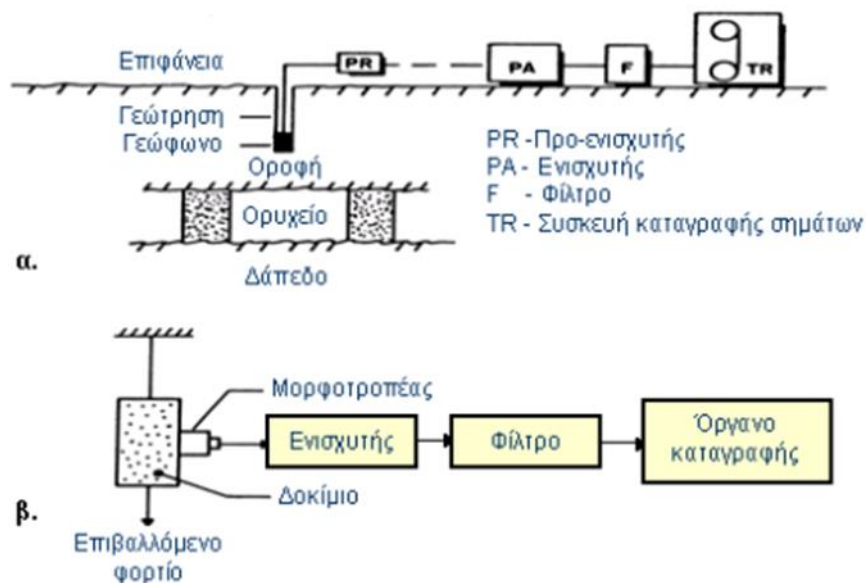
Η δυνατότητα ανίχνευσης ενός σήματος ΑΕ καθορίζεται κυρίως από την ευαισθησία του εξοπλισμού και το πλάτος των ελαστικών κυμάτων που εκπέμπονται από την πηγή. Επιπλέον, η ανιχνευσιμότητα ενός σήματος εξαρτάται από την εξασθένιση του κύματος κατά τη διάδοσή του και από το θόρυβο στο εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του εξοπλισμού. Η εξασθένιση αναφέρεται στην μείωση του πλάτους του κύματος κατά τη διάδοσή του. Οι μηχανισμοί που επηρεάζουν την εξασθένιση είναι η γεωμετρική εξάπλωση του μετώπου στο χώρο, οι απώλειες ενέργειας και η απόσβεση στο μέσο διάδοσης. Λόγω γεωμετρικής εξάπλωσης το πλάτος φθίνει αντιστρόφως ανάλογα με την αύξηση της απόστασης. Αντίστοιχα λόγω απώλειας ενέργειας το πλάτος φθίνει εκθετικά με την απόσταση από την πηγή. Στις εργαστηριακές δοκιμές η εξασθένιση λόγω απόσβεσης και γεωμετρικής εξάπλωσης δεν περιορίζει σημαντικά την ανιχνευσιμότητα των σημάτων ΑΕ λόγω των περιορισμένων διαστάσεων των δοκιμίων.

Οι πηγές του θορύβου εμπίπτουν σε δύο κύριες κατηγορίες, ηλεκτρικές και μηχανικές. Οι πηγές αυτές πρέπει να εξετάζονται, ώστε να γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ θορύβου και σημάτων ΑΕ. 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.

2.2.3 Τεχνικές παρακολούθησης

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας τόσο στο εργαστήριο όσο και στο πεδίο είναι ουσιαστικά οι ίδιες, αν και η κλίμακα και κατά συνέπεια τα χαρακτηριστικά συχνότητας του συστήματος παρακολούθησης θα είναι κάπως διαφορετικά.

Το γενικό σύστημα παρακολούθησης περιλαμβάνει ένα μορφοτροπέα (transducer) ή μία συστοιχία μορφοτροπέων οι οποίοι μπορούν να ανιχνεύσουν οποιαδήποτε δραστηριότητα εντός της υπό μελέτη κατασκευής, έναν ενισχυτή (amplifier), ένα σύστημα φιλτραρίσματος (filtering system) καθώς και ένα όργανο καταγραφής (recorder). Στο Σχήμα 2.5 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό σύστημα παρακολούθησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί παραδείγματος χάριν, για να ελέγξει τη δραστηριότητα ΑΕ/MS α) σε ένα αβαθές ορυχείο και β) σε ένα εργαστηριακό δείγμα. Στην πρώτη περίπτωση ο μορφοτροπέας μπορεί να είναι ένα γεώφωνο (μετρητής ταχύτητας) τοποθετημένο σε κατάλληλη γεώτρηση βάθους 8-30 m, το οποίο θα παρακολουθεί τις μεταβολές στην επίγεια ταχύτητα που προκαλούνται από την παρουσία της ακουστικής/μικροσεισμικής δραστηριότητας.



Σχήμα 2.5: Τυπικό σύστημα παρακολούθησης ΑΕ/MS, (α) πεδίου και (β) εργαστηρίου (Hardy, 2003).

Επειδή η έξοδος (output) του μορφοτροπέα είναι της τάξης των microvolts, είναι απαραίτητο αυτό το ασθενές σήμα να ενισχυθεί προκειμένου να καταγραφεί. Επιπλέον, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί ένας ενδιάμεσος προ-ενισχυτής και ένα φίλτρο συχνοτήτων (band-pass filter) προκειμένου να εξαιρεθούν τα ανεπιθύμητα σήματα χαμηλής και υψηλής συχνότητας (π.χ. θόρυβος βάθους).

Οι μονάδες παρακολούθησης που χρησιμοποιούνται εργαστηριακά είναι συνήθως πιο περίπλοκες από εκείνες που χρησιμοποιούνται στο πεδίο. Πολλά από τα εργαστηριακά συστήματα επεξεργάζονται τα σήματα ΑΕ/MS και παρέχουν παραμέτρους όπως η συνολική απαρίθμηση γεγονότων, ο ρυθμός γεγονότων, κλπ. Τέτοιες παράμετροι μπορούν να καταγράφονται συνεχώς κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δοκιμών μαζί με στοιχεία όπως το εφαρμοσμένο φορτίο, η παραμόρφωση των δειγμάτων, κλπ.

Η μέτρηση της ΑΕ εργαστηριακά και στο πεδίο, παρουσιάζει πολλές τεχνικές δυσκολίες. Στο εργαστήριο, η σχεδίαση κατάλληλων εγκαταστάσεων φόρτισης είναι ένα σημαντικό πρόβλημα. Κατ' αρχήν, οι μονάδες φόρτισης δεν πρέπει να παράγουν μηχανικό θόρυβο που θα μπορούσε να ανιχνευθεί από το σύστημα ελέγχου και να ερμηνευθεί ως ΑΕ και δεύτερον, εάν επιδιώκεται να αξιολογηθεί το συχνοτικό φάσμα της παρατηρηθείσας δραστηριότητας είναι απαραίτητο οι εγκαταστάσεις φόρτισης να παρουσιάζουν σταθερή απόκριση σε αυτό το εύρος συχνοτήτων.

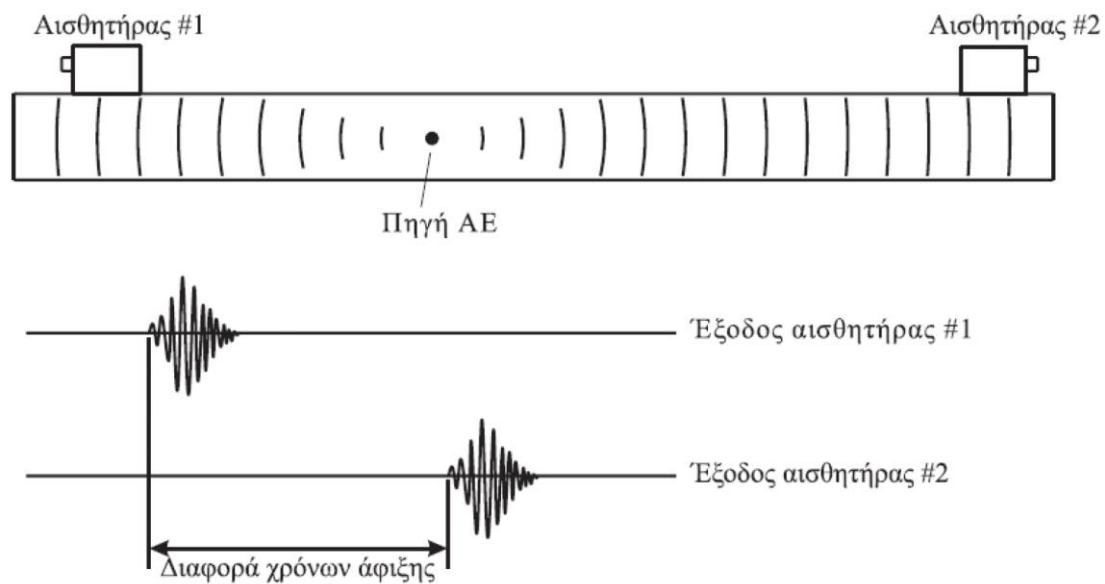
Η μελέτη της ΑΕ στο πεδίο περιπλέκεται από την παρουσία θορύβου χαμηλής σχετικά συχνότητας (100 Hz έως 20 kHz), λόγω των βιομηχανικών ή ανθρώπινων πηγών, από την εξασθένιση των κυμάτων τάσης και από τη δυσκολία καθορισμού της θέσης της πηγής λόγω της περιπλοκότητας των δομών και των άγνωστων παραγόντων που επιδρούν στην ταχύτητα διάδοσης των σημάτων.

2.2.4 Εντοπισμός θέσης της πηγής ΑΕ

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής ΑΕ είναι ότι, με τη χρήση πολλών αισθητήρων και από την ανάλυση των στοιχείων που λαμβάνονται, είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ. Ο υπολογισμός της θέσης γίνεται από την ταχύτητα του ακουστικού κύματος και τους χρόνους άφιξης του σήματος στους διαφορετικούς αισθητήρες. Η απλούστερη περίπτωση εντοπισμού θέσης είναι ο γραμμικός εντοπισμός (μονοδιάστατος), που είναι χρήσιμος για δομές με σημαντικά μεγαλύτερη τη μία διάσταση σε σχέση με τις άλλες. 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 (Σχήμα 2.6). 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:

$$(t_i - t_s) = \frac{(x_i - x_s)}{V}$$

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.



Σχήμα 2.6: Γραμμικός εντοπισμός θέσης πηγής ΑΕ (Κατσικογιάννη, 2004).

Για το γραμμικό εντοπισμό θέσης απαιτούνται δύο αισθητήρες έναντι τριών για τον επίπεδο προσδιορισμό και τεσσάρων για τον εντοπισμό της θέσης στο χώρο. Η πρακτική αξία του εντοπισμού θέσης εξαρτάται από την ακρίβεια προσδιορισμού και από την κλίμακα της δοκιμής. 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.

2.3 Εφαρμογές μεθόδου ΑΕ

Η ΑΕ είναι ένα φυσικό φαινόμενο που εκδηλώνεται στην πλειοψηφία των υλικών, των κατασκευών και των διεργασιών. Η τεχνική της ΑΕ δεν έρχεται ν' αντικαταστήσει τις συμβατικές μεθόδους αλλά να λειτουργήσει συμπληρωματικά επιβεβαιώνοντας τη βασική αρχή ότι μια και μόνο μέθοδος ελέγχου δεν επαρκεί για τον πλήρη χαρακτηρισμό της δομικής ακεραιότητας της κατασκευής. Με την εφαρμογή της τεχνικής Ακουστικής Εκπομπής:

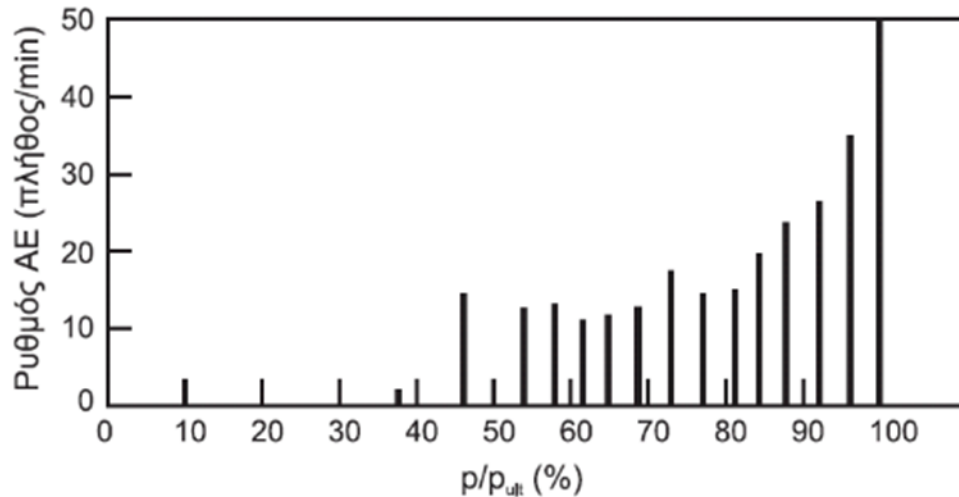
- Προσδιορίζεται η θέση όπου λαμβάνει χώρα η αστοχία.
- Χρησιμοποιώντας τους χρόνους άφιξης των κυμάτων μπορεί να καθοριστεί με μεγάλη ακρίβεια η γενέτειρα της αστοχίας εντός του υλικού.
- Εκτιμάται το μέγεθος της αστοχίας.
- Η ταχύτητα των ελαστικών κυμάτων μέσα στο εκάστοτε υλικό προσδιορίζει το μέγεθος της αστοχίας εφόσον περιοχές με υψηλή φθορά

εκπέμπουν κύματα χαμηλών ταχυτήτων σε σύγκριση με αυτά του άρρηκτου υλικού.

- Δίδονται πληροφορίες για το μηχανισμό της φθοράς-αστοχίας.
- Η κυματομορφή που καταγράφεται σε κάθε δέκτη δίδει πληροφορίες για τον προσανατολισμό και το μηχανισμό της αστοχίας (διατμητική, ιστροπική).
- Δίδονται πληροφορίες για το τασικό πεδίο.
- Υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ ζωνών με έντονες ανωμαλίες, οι οποίες είναι επιδεκτικές σε αστοχία, και σε υψηλά τασικά πεδία. Ο προσανατολισμός του κύριου τασικού πεδίου που επενεργεί στην πηγή της ΑΕ, μπορεί να καθοριστεί από την κυματομορφή της ακουστικής δραστηριότητας.
- Καθορίζονται ιδιότητες του υπό εξέταση υλικού.
- Καθώς η ενέργεια διαδίδεται μέσω του υλικού, η συχνότητα και το πλάτος επηρεάζονται από τις ιδιότητες του υλικού. Μετρήσεις όπως η ταχύτητα, η ανισοτροπία και η εξασθένιση του κύματος επηρεάζονται και αυτές από τις ιδιότητες του υλικού.
- Καταγράφεται-εκτιμάται η συμπεριφορά του υλικού στο χρόνο υπό ενεργειακή δραστηριότητα.
- Ένα από τα μεγαλύτερα πλεονεκτήματα της ΑΕ είναι η στιγμιαία ή η συνεχής παρακολούθηση-έλεγχος του υπό εξέταση υλικού.

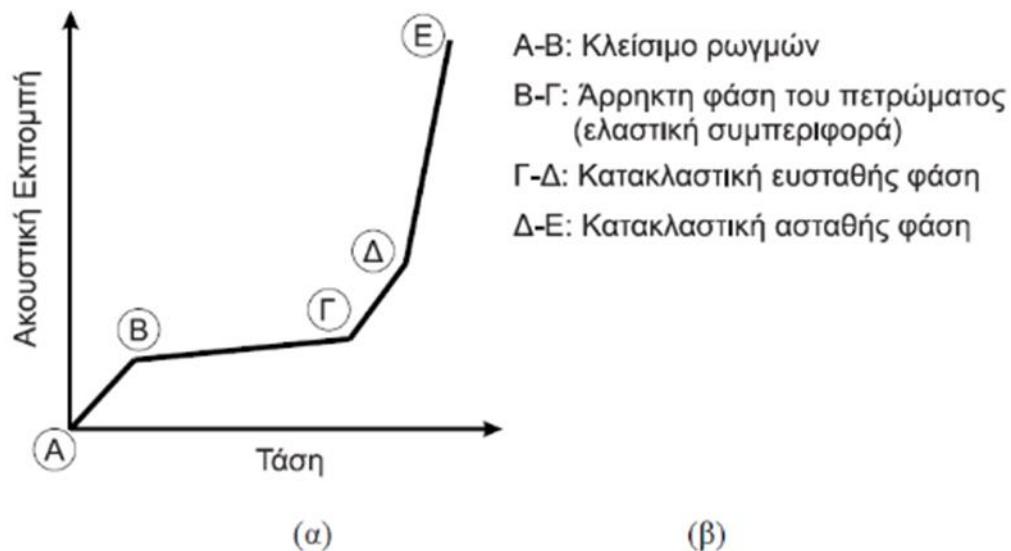
2.3.1 Επίδραση του επιβαλλόμενου φορτίου στην ΑΕ

Από τις πρώτες μελέτες της ΑΕ στα πετρώματα έγινε προσπάθεια να προσδιορισθούν εμπειρικές σχέσεις μεταξύ της παρατηρηθείσας δραστηριότητας ΑΕ και των μηχανικών ιδιοτήτων των υλικών. Οι Obert και Duvall (1945) διεξάγοντας δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε διάφορα πετρώματα (νεφρίτη, ασβεστόλιθο, γρανίτη, κερατόλιθο, σχιστόλιθο, ψαμμίτη, επιδοτίτη και δολομίτη) έδειξαν ότι υπό θλιπτική φόρτιση ο ρυθμός ΑΕ αυξάνεται ανάλογα με το επιβαλλόμενο φορτίο. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης σε χονδρόκοκκο γρανίτη.



Σχήμα 2.7 : Μεταβολή του ρυθμού AE συναρτήσει του εφαρμοζόμενου φορτίου p (ως ποσοστό του φορτίου αστοχίας P_{ult}) σε χονδρόκοκκο γρανίτη (Κατσικόγιαννη, 2004).

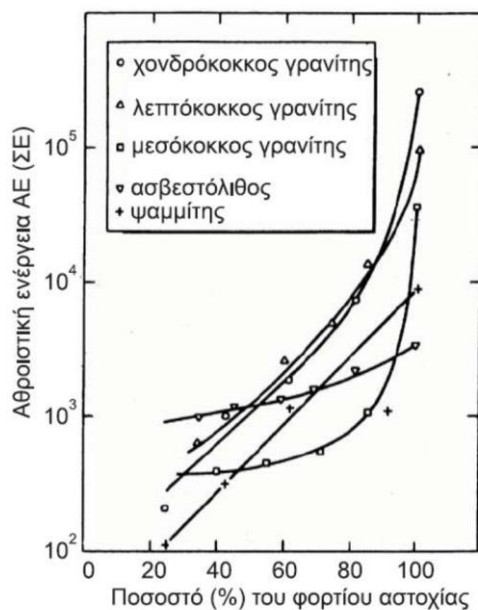
Σημαντική δουλειά στον τομέα αυτό έχει γίνει από το Mogi (1962), ο οποίος δίνει το διάγραμμα του Σχήματος 2.8 ως γενική μορφή της σχέσης μεταξύ της AE και του εφαρμοζόμενου φορτίου για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Στο ίδιο διάγραμμα συνδυάζεται από τους Boyce et al (1981) η AE με τη διαδικασία καταστροφής του δοκιμίου κατά τις δοκιμές θλίψης.



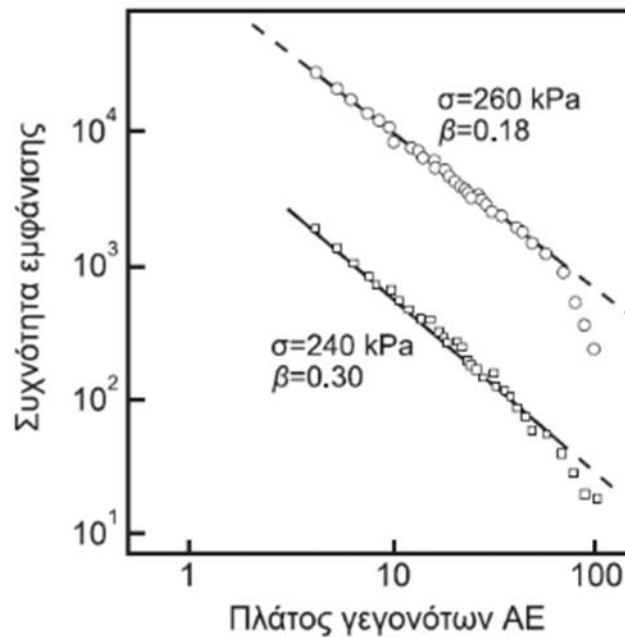
Σχήμα 2.8: (α) Γενική σχέση εφαρμοζόμενης τάσης και ακουστικής εκπομπής και (β) συσχέτιση της με τη διαδικασία καταστροφής κατά τη δοκιμή μονοαξονικής θλίψης (Mogi, 1962).

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η σχέση του πλάτους των σημάτων ΑΕ με τη συχνότητα εμφάνισής τους. Σύμφωνα με πειράματα ερευνητών, που αναφέρονται από τον Hardy (2003) και εικονίζονται στο Σχήμα 2.10, έδειξαν ότι η σχέση αυτή, όπως προέκυψε από δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε γρανίτη, προσομοιώνεται με μία ευθεία σε λογαριθμικούς άξονες πλάτους ΑΕ – συχνότητας εμφάνισης. Γεγονότα ΑΕ ακραίου πλάτους δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στην ευθεία αυτή. Επιπλέον, για τιμές του φορτίου κοντά στο φορτίο αστοχίας, η σταθερά β, που εκφράζει την κλίση της ευθείας αυτής, μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με το εφαρμοζόμενο φορτίο και συνεπώς με την αύξηση του φορτίου περισσότερα γεγονότα ΑΕ έχουν μεγαλύτερο πλάτος.

Η δραστηριότητα ΑΕ έχει επίσης συσχετισθεί με τη χρονικά μεταβαλλόμενη ανελαστική παραμόρφωση (ερπυσμό) του πετρώματος (Hardy, 2003), όπου διαπιστώθηκε μία σχεδόν γραμμική σχέση μεταξύ της ερπυστικής παραμόρφωσης και της ΑΕ.



Σχήμα 2.9: Διάγραμμα συχνότητας συναρτήσεως του πλάτους για το γρανίτη Westerly υπό μονοαξονική θλίψη (Hardy, 2003).



Σχήμα 2.10: Διάγραμμα συχνότητας συναρτήσει του πλάτους για το γρανίτη Westerly υπό μονοαξονική θλίψη (Hardy, 2003).

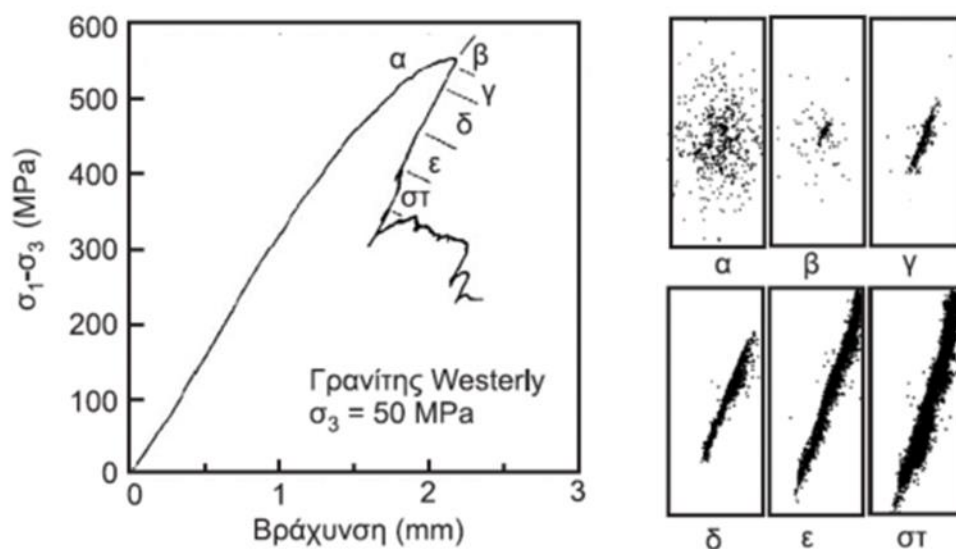
2.3.2 Μελέτη της εξέλιξης της αστοχίας με εντοπισμό της θέσης της πηγής AE

Όπως ήδη αναφέρθηκε, με τη χρήση περισσότερων του ενός αισθητήρων προσαρμοσμένων σε ένα δοκίμιο είναι δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης της πηγής των σημάτων AE. Εντοπισμός των γεγονότων AE κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης δοκιμίων πετρωμάτων από τα πρώτα στάδια της φόρτισης έως την αστοχία αναφέρεται σε σημαντικό αριθμό δημοσιεύσεων στη διεθνή βιβλιογραφία (Lockner, 1993). Τα πρώτα πειράματα στα τέλη της δεκαετίας του 1960 περιλάμβαναν την επιλεκτική καταγραφή και επεξεργασία σημάτων για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής σε δοκιμές μονοαξονικής θλίψης. Ο σύγχρονος εξοπλισμός καταγραφής και επεξεργασίας AE επιτρέπει τον εντοπισμό μεγάλου πλήθους γεγονότων AE σε ρυθμούς από 100 έως 1000 γεγονότα ανά δευτερόλεπτο.

Επειδή η AE συνδέεται άμεσα με το σχηματισμό και τη διάδοση μικρορωγμών στα πετρώματα παρέχει μία ιδανική μέθοδο για τη μελέτη της αστοχίας τους. Η ψαθυρή θραύση των κρυσταλλικών πετρωμάτων συνοδεύεται από απότομη απώλεια της αντοχής τους, με αποτέλεσμα σε εύκαμπτες συσκευές φόρτισης να παρατηρείται ασταθής και βίαιη θραύση. Έτσι, ο ρυθμός της AE στη φάση της αστοχίας του δοκιμίου είναι τόσο υψηλός, ώστε είναι σχεδόν αδύνατη η παρακολούθηση και ο εντοπισμός των ανεξάρτητων γεγονότων AE. Για την παρακολούθηση της αστοχίας

στη φάση αυτή είναι απαραίτητος ο σχεδιασμός ενός ελεγχόμενου συστήματος φόρτισης στο οποίο ο ρυθμός της ΑΕ να διατηρείται σταθερός κατά τη φόρτιση (Lockner, 1993). Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ανιχνευθεί η ανάπτυξη της αστοχίας κατά τη φόρτιση και να συσχετισθεί με τον εντοπισμό των γεγονότων ΑΕ. Σχετικά πειράματα του Lockner έδωσαν τα αποτελέσματα του Σχήματος 2.11.

Οι Zietlow και Labuz (1998) εξάλλου, αναφέρουν πειράματα κάμψης σε δοκίμια γρανίτη, ψαμμίτη και χαλαζίτη, όπου εφαρμόσθηκε εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ για τον προσδιορισμό των περιοχών μικρορωγμάτωσης κατά τη δοκιμή. Τα γεγονότα ΑΕ εντοπίσθηκαν σε ποσοστό του φορτίου αστοχίας μεγαλύτερου του 50 % (ανάλογα με τον τύπο του πετρώματος), ενώ η συγκέντρωση των γεγονότων ΑΕ σε ακραία φορτία ήταν ενδεικτική της αστοχίας.



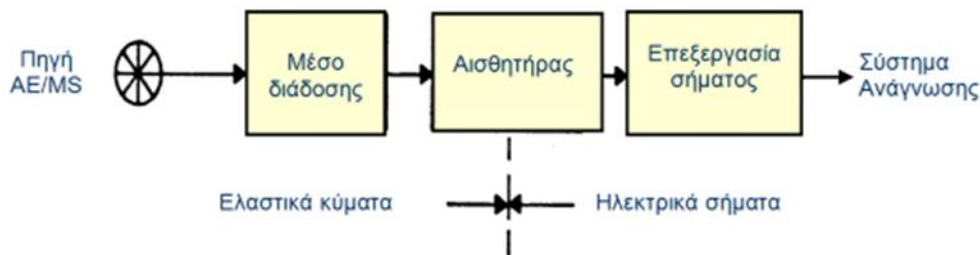
Σχήμα 2.11: Αποτελέσματα εντοπισμού θέσης ΑΕ σε δοκίμιο γρανίτη Westerly διαμέτρου 76,2 mm υπό τριαξονική θλίψη με πλευρική πίεση $\sigma_3 = 50$ MPa και ελεγχόμενο ρυθμό εκπομπής ΑΕ (Lockner, 1993).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

Εξοπλισμός παρακολούθησης και καταγραφής και επεξεργασίας σημάτων Ακουστικής Εκπομπής

3.1 Γενικά

Γενικά, τα συστήματα παρακολούθησης (monitoring systems) ανεξαρτήτου εφαρμογής (πεδίο ή εργαστήριο) αποτελούνται από τρία βασικά τμήματα: τους μορφοτροπείς (αισθητήρες) (έναν ή περισσότερους ανάλογα με το αν επρόκειτο για σύστημα ενός ή πολλών καναλιών), το τμήμα επεξεργασίας σημάτων (signal conditioning section) και τη συσκευή ανάγνωσης (Σχήμα 3.1). Τα επιμέρους χαρακτηριστικά των συστημάτων διαφοροποιούνται ανάλογα με την περίπτωση.

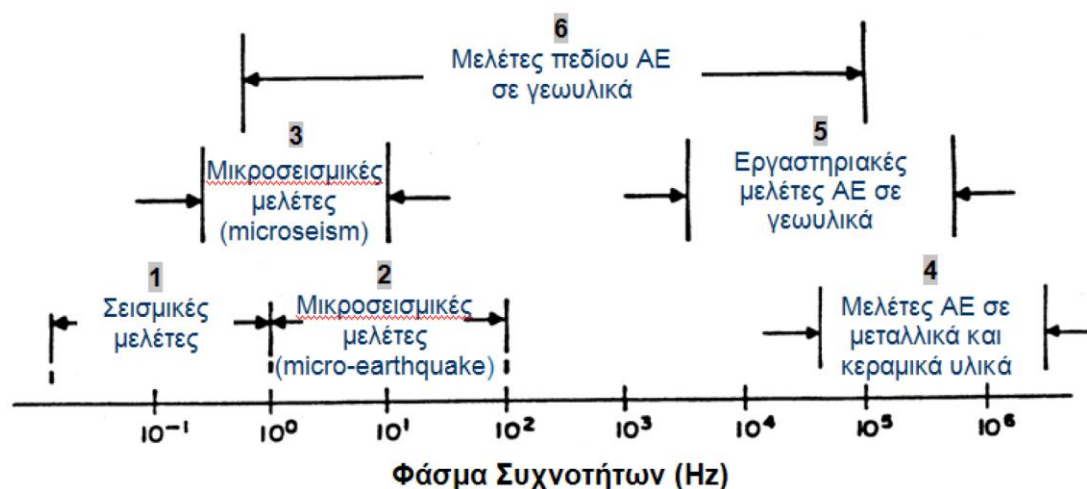


Σχήμα 3.1: Χαρακτηριστικό διάγραμμα συστήματος ελέγχου ΑΕ/MS (Hardy, 2003).

Όπως γνωρίζουμε η θεμελιώδης συχνότητα ενός ακουστικού σήματος, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της πηγής και από την απόσταση μεταξύ της πηγής και του μορφοτροπέα παρακολούθησης. Συχνότητες κάτω από 1 Hz έχουν παρατηρηθεί σε μελέτες πεδίου μεγάλης κλίμακας, ενώ στις εργαστηριακές μελέτες τα σήματα ΑΕ/MS έχουν συνήθως συχνότητες μεγαλύτερες από 500 kHz.

Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται το ευρύ φάσμα συχνοτήτων (περίπου 10 Hz) που καλύπτουν οι διάφορες ακουστικές τεχνικές οι οποίες έχουν εφαρμοστεί προκειμένου να αξιολογηθεί η ευστάθεια δομών και υλικών. Γενικά, οι μελέτες που συνδέονται με πολύ χαμηλές συχνότητες ($f < 10^2$ Hz) ανήκουν στη σεισμολογία, ενώ εκείνες που χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές συχνότητες ($f > 10^5$ Hz) συνδέονται ως επί το πλείστον με την επιστήμη των υλικών, συμπεριλαμβανομένης της μεταλλουργίας, της κεραμικής, της επιστήμης των πολυμερών, κλπ. Οι συχνότητες που ενδείκνυνται για γεωτεχνικές μελέτες (πεδίου και εργαστηρίου) (δηλ., μελέτες βραχομηχανικής και

εδαφομηχανικής) επεκτείνονται σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων ($1 \text{ Hz} < f < 500 \text{ kHz}$).



Σχήμα 3.2: Εύρος συχνοτήτων για μελέτες Ακουστικής Εκπομπής και Μικροσεισμικής δραστηριότητας (Hardy, 2003).

Έτσι όπως ήδη αναφέρθηκε οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ των μελετών ΑΕ εργαστηρίου και πεδίου έγκεινται στη διαφορετική κλίμακα και συχνότητα. Παραδείγματος χάριν, οι εργαστηριακές μελέτες περιλαμβάνουν συχνά μικρό αριθμό μορφοτροπέων, μικρές αποστάσεις μεταξύ μορφοτροπέων και πηγής (π.χ., 0.01 – 2 m) και τα λαμβανόμενα σήματα ΑΕ είναι υψηλής συχνότητας (π.χ., 50 kHz – μερικά MHz περίπου). Αντίθετα, οι μελέτες πεδίου περιλαμβάνουν συνήθως μια συστοιχία πολυ-μορφοτροπέων, με αποστάσεις των τελευταίων από την πηγή της τάξης των δεκάδων, εκατοντάδων ή χιλιάδων μέτρων, ενώ τα λαμβανόμενα σήματα είναι σχετικά χαμηλής συχνότητας (π.χ., από μερικά Hz – 100 kHz περίπου).

Σε αυτήν την ενότητα θα αναφερθούμε στα εργαστηριακά συστήματα ακουστικής εκπομπής με τη βοήθεια των οποίων γίνεται ανίχνευση και επεξεργασία των γεγονότων ΑΕ που παρατηρούνται σε ένα σώμα πεπερασμένων διαστάσεων (δείγμα ή πρότυπο).

Αν και οι μέθοδοι ανίχνευσης και επεξεργασίας των σημάτων ΑΕ στο εργαστήριο είναι παρόμοιες με εκείνες που χρησιμοποιούνται επί τόπου στο πεδίο, πρέπει να σημειωθεί ότι, υπάρχουν σημαντικές διαφορές λόγω των μικρότερων διαστάσεων της πηγής, της πεπερασμένης φύσης της εξεταζόμενης δομής (π.χ., μια μέση διάσταση είναι της τάξης των 0.02 – 2 m) και των μικρότερων αποστάσεων μεταξύ μορφοτροπέα και

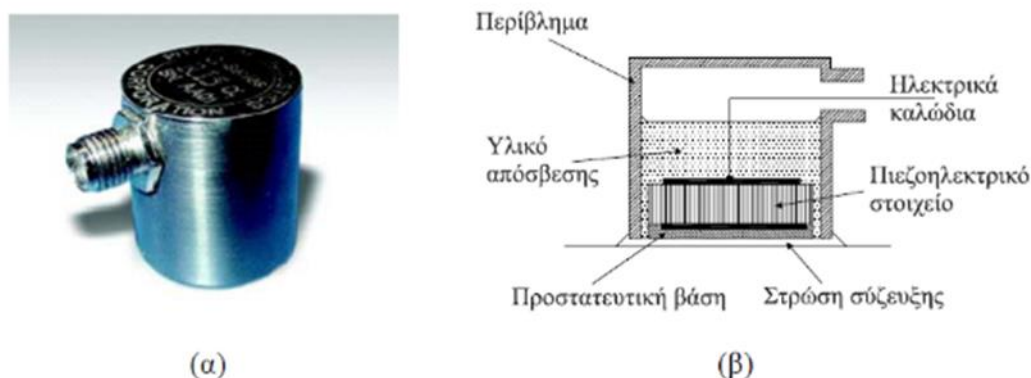
πηγής. Τα καταγραφέντα γεγονότα ΑΕ στο εργαστήριο σε αντίθεση με τα αντίστοιχα πεδίου, χαρακτηρίζονται από:

- Υψηλές κυρίαρχες συχνότητες.
- Μικρά πλάτη.
- Υψηλούς ρυθμούς ΑΕ.
- Σχετικά μικρή απώλεια εντάσεως και
- Πολυπλοκότητα λόγω ανακλάσεων των τασικών κυμάτων στα όρια του δοκιμίου.

Αυτοί οι παράγοντες είναι καθοριστικής σημασίας για την επιλογή των κατάλληλων εργαστηριακών συστημάτων παρακολούθησης.

3.2 Αισθητήρες

Η ευαισθησία και το εύρος συχνοτήτων λειτουργίας του αισθητήρα είναι οι πιο σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή του κατάλληλου κατά περίπτωση αισθητήρα σε ένα σύστημα παρακολούθησης ΑΕ. Οι πιο συνηθισμένοι αισθητήρες σήμερα είναι πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Πρόκειται για ειδικό κεραμικό υλικό, συχνά ΡΖΤ (leadzirconate – titanate) το οποίο αποτελεί και το ενεργό στοιχείο του αισθητήρα. Όταν ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος παραμορφώνεται, το ηλεκτρικό δυναμικό στα άκρα του μεταβάλλεται και έτσι η μετακίνηση, που επιβάλλεται στην επιφάνειά του λόγω ενός κύματος ΑΕ, μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες (sensors) μετατρέπουν το τασικό κύμα σε ηλεκτρικό σήμα, ονομάζονται και μορφοτροπέες (transducers). Ένας τυπικός πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας – μορφοτροπέας δίνεται στο Σχήμα 3.3.



Σχήμα 3.3: (α) Αισθητήρας πιεζοηλεκτρικού στοιχείου της ΡΑC, (β) κατασκευαστικές λεπτομέρειες αισθητήρα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου (Hardy, 2003).

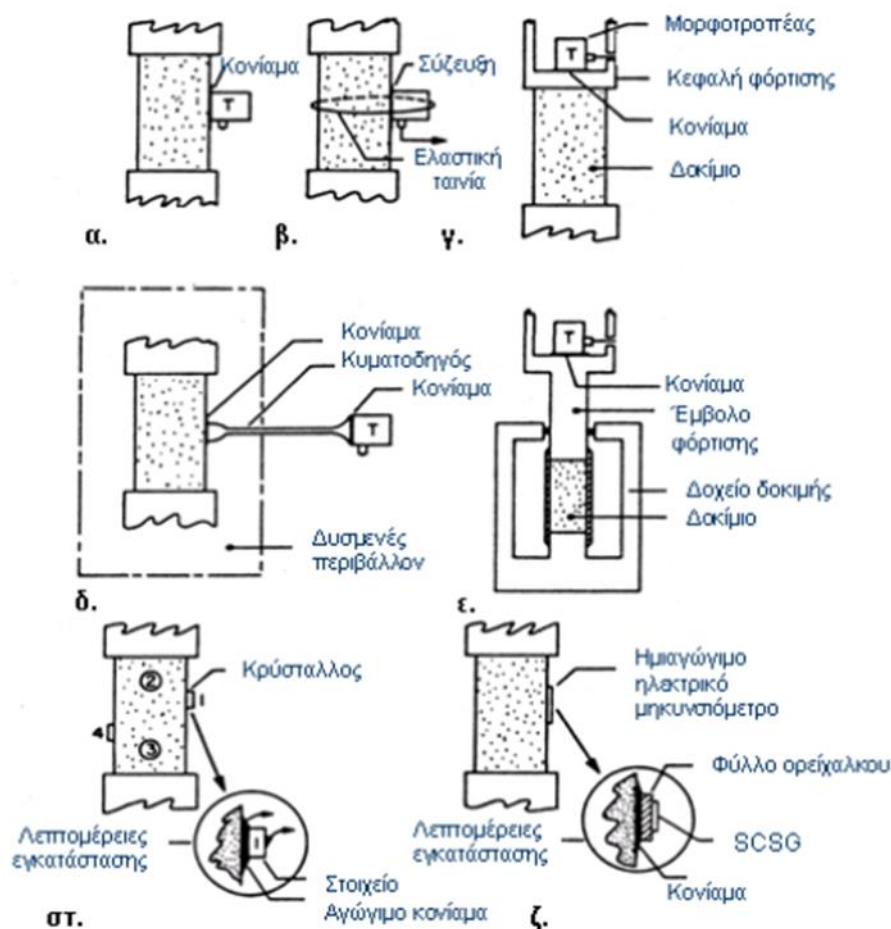
Τα σύγχρονα συστήματα ΑΕ, οι αισθητήρες, τα καλώδια, τα ηλεκτρικά κυκλώματα κτλ. περιλαμβάνουν θωράκιση για προστασία από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (EMI). Οι συχνότητες απόκρισης των αισθητήρων είναι τέτοιες ώστε να ελαχιστοποιείται ο θόρυβος από το περιβάλλον. Σχετικά με τα ηλεκτρονικά τους κυκλώματα οι αισθητήρες μπορεί να είναι απλοί ή διαφορικοί. Ένας απλός αισθητήρας περιέχει ένα κρύσταλλο και είναι γενικά ευάλωτος στον ηλεκτρομαγνητικό θόρυβο. Αντίθετα, ο διαφορικός αισθητήρας σχεδιάζεται έτσι ώστε να εξαλείφεται ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος. Συνίσταται από δύο κρυστάλλους αντίθετης πολικότητας και συνεπώς το ανιχνευόμενο κύμα ΑΕ παράγει δύο ηλεκτρικά σήματα αντίθετης πολικότητας. Τα σήματα μεταβαίνουν στη συνέχεια σε ένα διαφορικό προενισχυτή όπου ενισχύεται η διαφορά μεταξύ των σημάτων. Λόγω της αντίθετης πολικότητας των σημάτων η διαφορά τους είναι το διπλάσιο της εξόδου ενός μονού κρυστάλλου. Αντίθετα, οι EMI των ηλεκτρικών κυκλωμάτων παράγουν σήματα της ίδιας πολικότητας και συνεπώς λαμβάνοντας ως αποτέλεσμα τη διαφορά των δύο σημάτων εξουδετερώνονται στον προενισχυτή. Η ευαισθησία ενός αισθητήρα δείχνεται συνήθως σε διάγραμμα απόκρισης συναρτήσει της συχνότητας (τάση εξόδου σε σχέση με τη συχνότητα).

3.3 Εγκατάσταση μορφοτροπέων σε μονοαξονικές δοκιμές

Οι μονοαξονικές δοκιμές σε θερμοκρασία δωματίου, είναι πιθανώς ο πιο κοινός τύπος δοκιμών που πραγματοποιείται σε εργαστηριακές δοκιμές βραχομηχανικής. Στα σχήματα 3.4α, 3.4β, 3.4γ, 3.4στ, και 3.4ζ παρουσιάζονται τεχνικές εγκατάστασης μορφοτροπέων. Οι μέθοδοι που παρουσιάζονται Στο σχήμα 3.4α & 3.4β εφαρμόζονται συνήθως για τα συμβατικά επιταχυνσιόμετρα και για τους μορφοτροπέις ΑΕ με πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Η στερέωση των μορφοτροπέων με κονίαμα (Σχήμα 3.4α) ή με μη αγώγιμη εποξική ρητίνη, επιτρέπει την επαναχρησιμοποίηση του μορφοτροπέα. Το μόνο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι, κατά τη διάρκεια της παραμόρφωσης του δείγματος μπορεί να προκληθούν μηχανικές αστοχίες (π.χ., αστοχία στερέωσης, μικρορωγμές, κλπ.) στο σκυρόδεμα, οι οποίες μπορεί να καταγραφούν ως ακουστική δραστηριότητα. Με τη χρήση ενός μέσου σύζευξης (ειδικό ρευστό υψηλού ιξώδους με μικρή ακουστική εξασθένιση) και μιας διάταξης σύνδεσης (π.χ., ελαστική ταινία) (Σχήμα 3.4β), ωστόσο, μπορεί να αντιμετωπιστεί ο θόρυβος βάρους.

Σε μερικές περιπτώσεις οι μορφοτροπείς ΑΕ τοποθετούνται πάνω σε ειδική κεφαλή φόρτισης (Σχήμα 3.4γ). Η τεχνική αυτή είναι κατάλληλη στην περίπτωση διενέργειας δοκιμών σε μεγάλο πλήθος δειγμάτων και παρέχει προστασία στο μορφοτροπέα στην περίπτωση που το δοκίμιο φορτιστεί μέχρι την αστοχία. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα. Αφενός, εάν ο αισθητήρας δεν τοποθετηθεί άμεσα πάνω στο δείγμα μπορεί να εκδηλωθούν σημαντικές ακουστικές απώλειες στη διεπιφάνεια μεταξύ δείγματος και πλάκας φόρτισης, αφετέρου, μπορεί να καταγραφεί υψηλή ακουστική δραστηριότητα λόγω μηχανικών ασταθειών που συνδέονται με τη μη ευθυγράμμιση των δειγμάτων, τις ανωμαλίες της επιφάνειας τους, την τριβή λόγω κακής συνάφειας μεταξύ του δείγματος και της κεφαλής φόρτισης. Δεδομένου ότι ο μορφοτροπέας βρίσκεται πολύ κοντά σε αυτήν την ασταθή περιοχή, τα γεγονότα χαμηλής ισχύος που δεν προέρχονται από ακουστική δραστηριότητα του γεωυλικού, μπορεί να επισκιάσουν σημαντικότερα γεγονότα που παράγονται εντός του δείγματος.

Όπως παρουσιάζεται στα σχήματα 3.4στ και 3.4ζ, οι μορφοτροπείς με πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και τα ημιαγώγιμα ηλεκτρικά μηχανοσκόμμετρα μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στις μονοαξονικές δοκιμές. Οι μορφοτροπείς με ΡΖΤ έχουν υιοθετηθεί εκτενώς στις μελέτες ΑΕ στα γεωυλικά και το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι λόγω των μικρών σχετικά διαστάσεών τους μπορούν να τοποθετηθούν σε σχετικά μικρά δείγματα.



Σχήμα 3.4: Εργαστηριακές τεχνικές εγκατάστασης μορφοτροπέων, α) Στερέωση με κονίαμα, β) Σύζευξη με ελαστική ταινία, γ) Τοποθέτηση στην κεφαλή φόρτισης, δ) Χρήση κυματοδηγού, ε) Χρήση τριαξονικού δοχείου, στ) Λεπτομέρειες πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και ζ) Λεπτομέρειες ημιαγώγιμου ηλεκτρικού μηκυσιομέτρου (Hardy, 2003).

3.4 Προενισχυτές

Οι προενισχυτές έχουν ως σκοπό να παράγουν ένα σήμα υψηλότερης τάσης που να είναι πιο εύχρηστο για περαιτέρω επεξεργασία. Η ενίσχυση του πλάτους του σήματος ΑΕ είναι λογαριθμική σύμφωνα με τη σχέση (Physical Acoustics Corporation PAC, 2005):

$$dB = 20 \log(V_{max}/1\mu\text{Volt}) - (\text{Ενίσχυση σήματος από τον ενισχυτή σε dB})$$

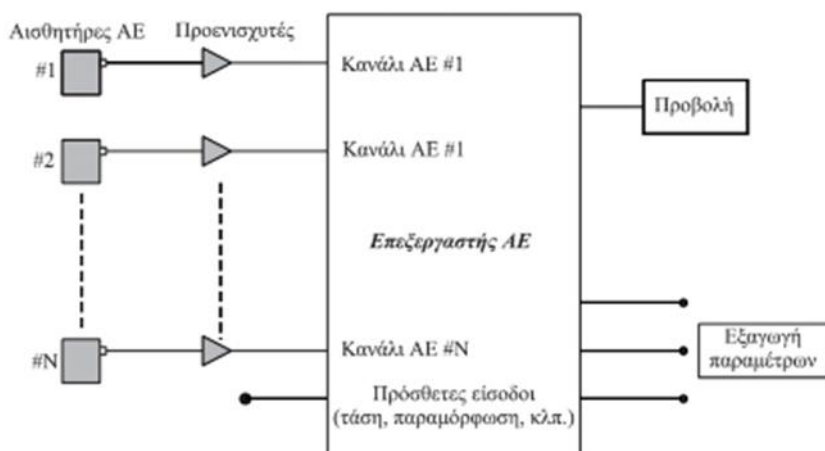
Γενικά, είναι προτιμότερο ο προενισχυτής να τοποθετείται κοντά στον αισθητήρα, ώστε να ελαχιστοποιούνται οι EMI. Ορισμένες φορές είναι ενσωματωμένος στο περίβλημα του αισθητήρα και τότε περιέχει ένα φίλτρο συχνοτήτων για την απόρριψη

του ανεπιθύμητου θορύβου. Εν τούτοις παράγουν και αυτοί θόρυβο που σε συνδυασμό με το θόρυβο του αισθητήρα καθορίζει την ακρίβεια λήψης ενός σήματος ΑΕ.

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 μορφοτροπέα. Το πλάτος ενός σήματος ΑΕ εκφράζεται συνήθως σε dB, όπου 1 μV αντιστοιχεί σε 0 dB και 100 mV σε 100 dB.

3.5 Μονάδα επεξεργασίας

Το ελαστικό εντατικό κύμα που φθάνει σε κάθε αισθητήρα μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα και στη συνέχεια ενισχύεται, φιλτράρεται και υφίσταται επεξεργασία από ειδικά σχεδιασμένα για το σκοπό αυτό συστήματα ΑΕ. Τα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα ΑΕ, βασίζονται σε αρχιτεκτονική παράλληλης επεξεργασίας, είναι πολυκάναλα με ισχυρούς επεξεργαστές ανάλυσης σήματος που καταγράφουν σε πραγματικό χρόνο χαρακτηριστικές παραμέτρους του σήματος (Αναστασόπουλος, 1998). Απλοποιημένο διάγραμμα ενός ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ δίνεται στο Σχήμα 3.5. Τα κανάλια ΑΕ 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. Οι παράμετροι που μπορούν να μετρούνται για κάθε σήμα ΑΕ περιλαμβάνουν το πλάτος (amplitude – dB), τον αριθμό των απαριθμήσεων (counts), το χρόνο ανύψωσης (rise time), τη συνολική διάρκεια (duration) κλπ.



Σχήμα 3.5: Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ (Κατσικογιάννη, 2004).

Στο Σχήμα 3.6 παρουσιάζεται μία κάρτα οχτώ (8) καναλιών PCI - 8 καταγραφής και επεξεργασίας δεδομένων ΑΕ της PAC (Physical Acoustics Corporation). Τα δεδομένα ανιχνεύονται και καταγράφονται σε ένα προηγμένο ψηφιακό-παραμετρικό σύστημα παρακολούθησης. Τα 8 κανάλια ΑΕ είναι υψηλής ταχύτητας απόκτησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (μέχρι και 132 MegaBytes/sec) με δυνατότητα εξαγωγής χαρακτηριστικών παραμέτρων (χρόνος ανύψωσης, υπερβάσεις κατωφλιού, συνολικές υπερβάσεις κατωφλιού, πλάτος και ισχύς σήματος, ενέργεια, διάρκεια, RMS κλπ.), ενώ το συνοδευτικό λογισμικό έχει τη δυνατότητα προβολής παραμετρικών γραφημάτων και κυματομορφών σε πραγματικό χρόνο. Εκτός από τα 8 κανάλια ΑΕ το σύστημα διαθέτει δύο επιπλέον εισόδους (παραμετρικές εισοδοί) για την περίπτωση εισαγωγής σήματος από εξωτερικές συσκευές, όπως για παράδειγμα από ένα κελί φορτίου. Αυτές οι παραμετρικές εισοδοί, που καταγράφουν ταυτόχρονα με την καταγραφή των δεδομένων ΑΕ, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συσχέτιση των παραμέτρων ΑΕ με άλλες παραμέτρους, όπως π.χ. η εφαρμοζόμενη τάση σε ένα δοκίμιο ή η παραμόρφωσή του.

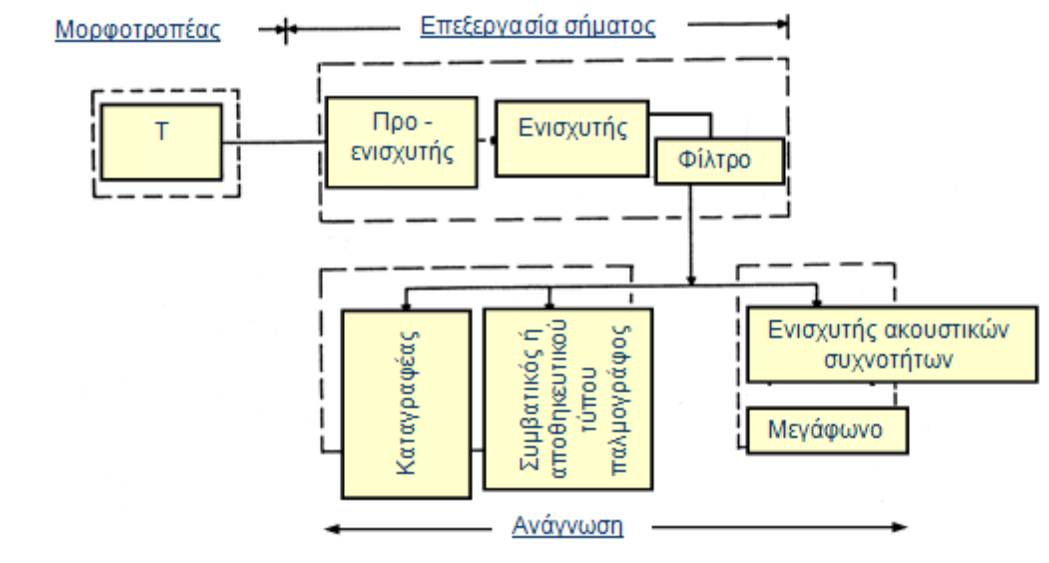


Σχήμα 3.6: Απλοποιημένο διάγραμμα ηλεκτρονικού συστήματος επεξεργασίας σημάτων ΑΕ (Κατσικογιάννη, 2004).

3.6 Βασικά Εργαστηριακά Συστήματα ΑΕ

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό εργαστηριακό σύστημα βασικού τύπου. Σε μια τέτοια διάταξη, η έξοδος του συστήματος επεξεργασίας καταγράφεται σε ένα κατάλληλο αναλογικό όργανο και τα σήματα προβάλλονται σε ένα συμβατικό ή αποθηκευτικού τύπου ταλαντωσκόπιο (CRO). Στις περιπτώσεις όπου οι συχνότητες των σημάτων είναι αρκετά χαμηλές ($f < 15$ kHz), χρησιμοποιείται κατάλληλος ενισχυτής και μεγάφωνα ακουστικών συχνοτήτων. Αντίθετα, σε σήματα υψηλής συχνότητας ($f > 15$ kHz) είναι απαραίτητο να ενσωματωθεί ένα "ετερόδυνο κύκλωμα" (heterodyne circuit) πριν από τον ενισχυτή ακουστικών συχνοτήτων (audio amplifier) προκειμένου να μειωθεί τεχνητά η συχνότητα των σημάτων. Η εμπειρία

έχει δείξει ότι τα ακουστικά σήματα εξόδου είναι συχνά χρήσιμα για την ανίχνευση του παρασιτικού θορύβου.



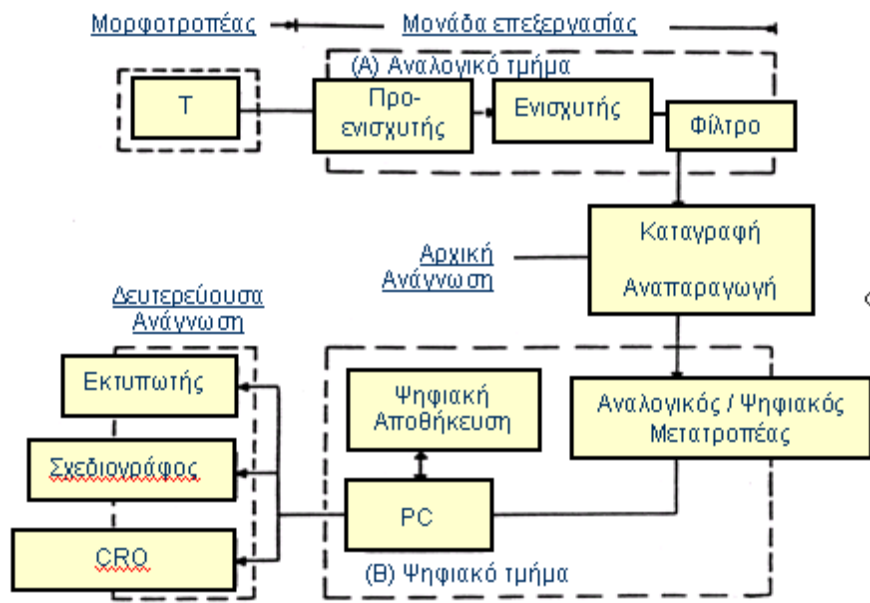
Σχήμα 3.7: Εργαστηριακό σύστημα παρακολούθησης ΑΕ βασικού τύπου (Κατσικογιάννη, 2004).

3.7 Παραμετρικά εργαστηριακά συστήματα ΑΕ

Συνήθως για εργαστηριακή χρήση χρησιμοποιούνται παραμετρικού τύπου συστήματα παρακολούθησης (Σχήμα 3.8). Το σημαντικότερο μειονέκτημα ενός παραμετρικού συστήματος, τουλάχιστον στις εφαρμογές πεδίου, είναι το γεγονός ότι ο λεπτομερής χαρακτήρας των σημάτων ΑΕ χάνεται. Στις εργαστηριακές μελέτες, εντούτοις, λόγω της στερεότυπης φύσης των δοκιμών αυτό το γεγονός είναι λιγότερο σημαντικό. Το παραμετρικό σύστημα ενσωματώνει ένα διμερές τμήμα επεξεργασίας σημάτων, εκ των οποίων το πρώτο μέρος είναι αναλογικό (αναλογικά σήματα) και το δεύτερο παραμετρικό, από όπου εξαγονται οι παράμετροι ΑΕ οι οποίες προβάλλονται σε διάφορες συσκευές ανάγνωσης.

3.8 Συστήματα Ανάγνωσης

Πολυδιαυλικά αναλογικά όργανα καταγραφής πολύ υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιούνται στα παραμετρικά συστήματα πολλών καναλιών για την προβολή ή/και αποθήκευση των εργαστηριακών δεδομένων, αλλά και για την καταγραφή και αναπαραγωγή κυματομορφών (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Τυπική διάταξη για καταγραφή ενός καναλιού χρησιμοποιώντας έναν τροποποιημένο καταγραφέα με δυνατότητα ψηφιακής αναπαραγωγής, καταγραφής, επεξεργασίας και προβολής των δεδομένων (Κατσικογιάννη, 2004).

3.9 Λογισμικό «NOESIS»

Το πρόγραμμα NOESIS αναπτύχθηκε από την Mistras Group Hellas. Το NOESIS είναι ένα πακέτο λογισμικού που προορίζεται για χρήση σε περιβάλλοντα WINDOWS, ειδικά σχεδιασμένο και παραμετροποιημένο για ανάλυση δεδομένων ΑΕ. Έχει σχεδιαστεί για να είναι φιλικό προς τον χρήστη ακόμα και για άτομα τα οποία δεν είναι ειδική στην αναγνώριση μοτίβο. Ταυτόχρονα, διατηρεί υψηλά επίπεδα λειτουργικότητας και ευελιξίας και προσφέρει προηγμένες λειτουργίες σε έμπειρους αναλυτές αναγνώρισης μοτίβο. Αν και για να εξαχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα από το NOESIS, μία πιο βαθιά κατανόηση της θεωρίας αναγνώρισης μοτίβο και των τεχνικών της είναι απαραίτητη, οι χρήστες μπορούν εύκολα να κάνουν ανάλυση και αποτίμηση δεδομένων χρησιμοποιώντας συνήθεις πρακτικές, επίσης μπορούν να πραγματοποιήσουν εκτεταμένες αναλύσεις μέσω ομαδοποίησης και ταξινόμησης πολυδιάστατων δεδομένων.

Τα δεδομένα ΑΕ έχουν γενικά πολύπλοκη φύση, ειδικά όταν περίπλοκες κυματομορφές είναι παρούσες (π.χ. σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν υψηλά επίπεδα θορύβου υποβάθρου, ή σε σύνθετες δομές όπου πολλαπλοί μηχανισμοί αστοχίας πρέπει να ερευνηθούν και να ταξινομηθούν), και η συμβατική γραφική ανάλυση μπορεί να μην παρέχει τις απαραίτητες πηγές, ώστε να γίνει σωστή διάκριση και κατηγοριοποίηση. Το NOESIS χρησιμοποιεί τεχνικές Μη ελεγχόμενης Αναγνώρισης Μοτίβου (Unsupervised Pattern Recognition – UPR) για να προσδιορίσει τάξεις παραπλήσιων σημάτων ΑΕ και διαθέτει ποικιλία εργαλείων για περαιτέρω διερεύνηση των ιδιοτήτων τέτοιων τάξεων.

Αν και το NOESIS αποτελεί ένα εργαλείο για την επίλυση περίπλοκων προβλημάτων, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη ότι η ποιότητα των αποτελεσμάτων θα εξαρτάται πάντα από την ποιότητα των δεδομένων ΑΕ. Αν η διαδικασία απόκτησης αυτών των δεδομένων είναι ανεπαρκής, η πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται κατακόρυφα. Το NOESIS δεν πρόκειται να παράξει ικανοποιητικά αποτελέσματα αν οι μηχανισμοί ΑΕ και τα σχετικά φυσικά φαινόμενα δεν είναι ήδη διακριτά από τα διαθέσιμα δεδομένα. Επιπλέον, ο χαρακτηρισμός της πηγής αποτελεί αντίστροφο πρόβλημα, όπου σε μερικές περιπτώσεις οδηγεί σε ασαφείς λύσεις και ο χρήστης δεν μπορεί να αναμένει πάντα από το NOESIS την βέλτιστη επίλυση. Συγκεκριμένα σε αυτές τις περιπτώσεις, είναι αναγκαία η επιστράτευση της εμπειρίας του χρήστη στο να επιλέξει τις κατάλληλες αρχικές συνθήκες, έτσι ώστε να οδηγήσει το λογισμικό σε ρεαλιστικές επιλύσεις.

Κάποια από τα χαρακτηριστικά του NOESIS περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- Ειδικά σχεδιασμένο και παραμετροποιημένο για ΑΕ.
- Ειδικευμένη προβολή δεδομένων με προηγμένη διάταξη σελίδας.
- Ταξινόμηση, προβολή και επεξεργασία δεδομένων σε ημι-πραγματικό χρόνο, για αρχεία DTA και WFS.
- Δυνατότητα προχωρημένης προβολής, διαχείρισης και φιλτραρίσματος δεδομένων.
- Ευέλικτο και φιλικό προς τον χρήστη εργαλείο ταξινόμησης για σήματα ΑΕ και κυματομορφές.
- Προχωρημένη προβολή κυματομορφών με πολλές επιλογές παραμετροποίησης.
- Διαφορετικοί τύποι δεδομένων εξόδου κυματομορφών.

- Εξαγωγή πολλαπλών σημάτων από τις κυματομορφές.
- Ενσωματωμένες τεχνικές UPR.
- Αποτίμηση των αποτελεσμάτων ταξινόμησης μέσω κοινών πρακτικών ΑΕ.
- Εκτεταμένος εντοπισμός ζώνης και προσδιορισμός πρώτου σήματος.
- Γραμμικός 3D (X – Y – Z) εντοπισμός συμπεριλαμβανομένων όλων των επιλογών γραφημάτων, προβολή αντιστοίχισης και γεγονότων.
- Υποστήριξη όλων των επιλογών εντοπισμού PAC (Physical Acoustics Corporation): 1D (ζώνης, γραμμικός), 2D (πλήρους επιπέδου και γραμμικού X – Y) και 3D (3D και σφαιρικού).
- Εκτεταμένες αυτοματοποιημένες διαδικασίες.
- Φιλικό περιβάλλον για μεταφορά δεδομένων και άλλες εφαρμογές των WINDOWS.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4:

Διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα και βιβλιογραφική Ανασκόπηση

4.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι Ohno & Ohtsu (2010) εξέτασαν και συνέκριναν δύο τύπους ταξινόμησης των τύπων ρωγμάτωσης του σκυροδέματος με βάση δεδομένα ΑΕ. Ο τύπος θραύσης στο σκυρόδεμα συνήθως διαφοροποιείται από εφελκυστική σε διατμητική θραύση κατά την επερχόμενη αστοχία. Για την κατηγοριοποίηση των μικρορωγμών στο σκυρόδεμα μέσω ΑΕ, χρησιμοποιήθηκαν δύο μέθοδοι. Η πρώτη από αυτές, όπου πρόκειται για παραμετρική ανάλυση, χρησιμοποιεί δύο παραμέτρους, την μέση συχνότητα (average frequency - AF) και την τιμή RA (RA = the rise time/the peak amplitude). Η άλλη μέθοδος κατηγοριοποίησης είναι η μέθοδος απλοποιημένων συναρτήσεων Green για ανάλυση τανυστή των ροπών (Simplified Green's functions for Moment tensor Analysis – SiGMA). Η ανάλυση SiGMA είναι βασισμένη στην γενικευμένη θεωρία της ΑΕ, ενώ η παραμετρική ανάλυση προκύπτει από εμπειρική συσχέτιση όπου είναι απαραίτητη η εύρεση μιας βέλτιστης αναλογίας. Οι μέθοδοι κατηγοριοποίησης των μικρορωγμών του σκυροδέματος συγκρίθηκαν μέσω των αποτελεσμάτων τριών διαφορετικών τύπων δοκιμών αστοχίας. Οι δοκιμές που διεξήχθησαν ήταν οι εξής: α) δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων άοπλου σκυροδέματος, σε πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 100mm x 100mm x 400mm, β) δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων δοκού οπλισμένου σκυροδέματος διαστάσεων 150mm x 250mm x 2000mm και γ) δοκιμή υδροστατικής διαστολής σκυροδέματος, σε δοκίμια διαστάσεων 250mm x 250mm x 150mm. Οι αναλογίες των διατμητικών μικρορωγμών που εντοπίστηκαν από την ανάλυση SiGMA είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση στην περίπτωση που η αναλογία RA – AF ορίστηκε σε 1 – 200.

Εξήχθησαν με βάση τα παραπάνω τα εξής συμπεράσματα:

α) Εφελκυστικές ρωγματώσεις αναπτύχθηκαν κυρίως στη διαγώνια – διατμητικού τύπου αστοχία και στη δοκιμή υδροστατικής διαστολής. Αναμένεται ότι η κυρίως διάδοση της ρωγμής μπορεί να αλλάξει, λόγω της διαφοράς στην διαδικασία αστοχίας.

β) Ο κινούμενος μέσος όρος των RA και AF εφαρμόστηκε στην κατηγοριοποίηση των μικρορωγμών βασισμένος στον κώδικα JCMS-III. Ως αποτέλεσμα οι αναλογίες των

διατμητικών μικρορωγμών που εντοπίστηκαν από την ανάλυση SiGMA είναι διαφορετικές από αυτές της παραμετρικής ανάλυσης.

γ) Στην περίπτωση που η αναλογία RA – AF οριστεί σε 1-200 για το πρώτο εντοπισμένο σήμα AE σε ένα γεγονός AE, οι αναλογίες των διατμητικών μικρορωγμών που εντοπίστηκαν από την ανάλυση SiGMA είναι πολύ κοντά στις αντίστοιχες που προέκυψαν από την παραμετρική ανάλυση, ανεξαρτήτως της διαφοράς στη διαδικασία αστοχίας. Θεωρώντας ότι οι μικτού τύπου μικρορωγμές αντιστοιχούν σε εφελκυστικού τύπου στην ανάλυση SiGMA προκύπτει ότι οι δύο μέθοδοι είναι συγκρίσιμες. Συμπερασματικά οι παράμετροι του πρώτου αφιχθέντος σήματος σε ένα γεγονός AE συμπεριλαμβάνουν τις περισσότερο σημαντικές πληροφορίες για την δημιουργία των ρωγμών από ότι αυτές των υπόλοιπων σημάτων.

Επιπλέον ο Ohtsu (2010), διερεύνησε και πρότεινε τρόπο ταξινόμησης των ενεργών ρωγματώσεων σε κατασκευές από σκυρόδεμα μέσω της AE. Είναι γνωστό ότι στις κατασκευές από σκυρόδεμα δεν γίνεται να παραληφθεί το θέμα της συντήρησής τους. Για το λόγο αυτό μια σειρά από τεχνικές ελέγχου βρίσκονται υπό ανάπτυξη και πρόκειται να καθιερωθούν. Θεωρείται ότι η μέθοδος της AE είναι ικανή να προσφέρει επαρκή αποτίμηση των ζημιών σε κατασκευές σκυροδέματος. Η επί τόπου επιθεώρηση και αποτίμηση των ενεργών ρωγμών σε τέτοιες κατασκευές, αποτελεί ζήτημα ιδιαίτερης σημασίας. Λόγω της εξέλιξης των ζημιών σε κατασκευές Ο/Σ, τα γεγονότα AE παρατηρούνται σε συνθήκες λειτουργίας. Γενικά μιλώντας η συσσώρευση διατμητικών ρωγμών ακολουθεί τις εφελκυστικές ρωγμές σε μια προϋπάρχουσα επιφάνεια αστοχίας. Επομένως, για την έγκαιρη προειδοποίηση συσσώρευσης ρωγμών, είναι έντονη η ανάγκη της ταξινόμησης των ενεργών ρωγμών. Συνεπώς, προτάθηκε ένα κριτήριο ταξινόμησης για τις μικρορωγμές στο σκυρόδεμα με βάση τις μετρήσεις των παραμέτρων της AE.

Προτάθηκε οι δοκιμές για τον εντοπισμό των σημάτων AE να διεξάγονται υπό φορτία, τα οποία δεν είναι ικανά να προκαλέσουν κάποια κρίσιμη βλάβη στην λειτουργία της κατασκευής, ώστε να ανιχνευθούν και να εντοπισθούν οι ενεργές ρωγμές. Πριν τη δοκιμή πρέπει να εκτιμηθούν οι ιδιότητες εξασθένησης της υπό μελέτη κατασκευής, χρησιμοποιώντας την πραγματική πηγή ή κάποια ισοδύναμη. Το κριτήριο ταξινόμησης χρησιμοποιεί τις παραμέτρους της ακουστικής εκπομπής μέση συχνότητα (average frequency - AF) και την τιμή RA (RA = the rise time/the peak amplitude). Με την εφαρμογή αυτών των παραμέτρων γίνεται η ταξινόμηση των ρωγμών σε εφελκυστικές ρωγμές και σε άλλους τύπους ρωγμών συμπεριλαμβανομένων και των

διατμητικών ρωγμών. Οι παράμετροι RA και AF που χρησιμοποιήθηκαν έχουν υπολογιστεί από τον κινούμενο μέσο όρο 50 σημάτων. Σημειώνεται ότι οι τιμές RA μπορεί να διαφέρουν, σε άμεση εξάρτηση με το επίπεδο επιλογής θορύβου, αλλά η επιλογή των αισθητήρων AE δεν προσφέρει μεγάλη διαφορά στα αποτελέσματα. Στο διάγραμμα ο λόγος των τιμών του άξονα των Y με αυτών του άξονα των X έχει ορισθεί ως 1-10, αλλά αυτή αποτελεί μια προτεινόμενη απλά τιμή. Ένας κατάλληλος λόγος είναι καλό να προσδιορίζεται συναρτήσει των υλικών και της κατασκευής. Προτάθηκε ο λόγος να προσδιορίζεται από την αρχή για την ταξινόμηση των ενεργών ρωγμών.

Επίσης οι Choumanidis et al. (2016) εξέτασαν τα σήματα AE, τα οποία καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια δοκιμής Barcelona. Καθώς όλο και περισσότερο το ινοπλισμένο σκυρόδεμα χρησιμοποιείται στις κατασκευές του πολιτικού μηχανικού, η ανάγκη για επαρκή παρακολούθηση και ανάλυση της συμπεριφοράς του αυξάνεται επίσης. Για το λόγο αυτό ερευνήθηκαν τα χαρακτηριστικά της AE ινοπλισμένου σκυροδέματος. Κυλινδρικά δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή Barcelona, κατά αυτό τον τρόπο τάσεις από έμμεσο εφελκυσμό παρήχθησαν εντός των δοκιμίων. Το εφαρμοζόμενο φορτίο και η παραγόμενη μετατόπιση καταγράφονταν συνεχώς κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Για την προετοιμασία κάθε μίγματος σκυροδέματος δύο διαφορετικοί τύποι συνθετικών ινών χρησιμοποιήθηκαν, σε ποσοότητες 0.5% και 1% κ.ό. σκυροδέματος. Προετοιμάστηκαν και δοκιμάστηκαν δύο δοκίμια ανά μίγμα. Η δραστηριότητα AE παρακολουθείτο συνεχώς από έξι AE μορφοτροπείς, οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι στην επιφάνεια των δοκιμίων. Ειδικά καθορισμένοι δείκτες AE, όπως η μέση συχνότητα AE (average frequency – AF) και η τιμή RA (RA = the rise time/the peak amplitude), διερευνήθηκαν, ώστε να χαρακτηριστεί ο τύπος των ρωγματώσεων των δοκιμίων και η εξόλκευση ή το σπάσιμο των ινών, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, όπως επίσης και τα προ και μετά μέγιστης αντοχής στάδια φόρτισης.

Εξήχθη το συμπέρασμα ότι η τεχνολογία AE μπορεί να εφαρμοσθεί σε δοκιμές Barcelona κατά τον ίδιο τρόπο που εφαρμόζεται σε δοκιμές κάμψης. Μέσω αυτής γίνεται δυνατή η ταξινόμηση του τύπου θραύσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής, καθώς και ο υπολογισμός της έναρξης της ρωγμάτωσης του δοκιμίου. Επιπλέον φάνηκε ότι ο αριθμός των σημάτων AE και ο ρυθμός απελευθέρωσης ενέργειας σε διαφορετικά στάδια φόρτισης μπορεί να είναι ένα κριτήριο ταξινόμησης για τον τύπο των μικρορωγμών που δημιουργούνται στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

Οι Aggelis et al. (2011) πραγματοποίησαν δοκιμές κάμψης τεσσάρων σημείων σε δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος διαστάσεων 100 x 100 x 400 mm, με λόγο νερού προς τσιμέντο 0.5 και μέγιστο μέγεθος αδρανών 10 mm. Η περιεκτικότητα σε ίνες ήταν 1% κ.ό. και είχαν κυματοειδή μορφή με μήκος 25 mm και διάμετρο 0.75 mm. Η ακουστική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια των δοκιμών καταγράφηκε από δύο αισθητήρες (Pico, PAC), οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι στην κάτω παρειά των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η τιμή I_b , η οποία εξαρτάται από την κατανομή του πλάτους των σημάτων AE, έχει μια σταθερή τάση να μειώνεται πριν το 80% του φορτίου θραύσης και αποκτά τη χαμηλότερη τιμή της τη στιγμή της θραύσης. Επιπλέον η μέση συχνότητα (AF) των σημάτων AE έδειξε μια έντονη μετάβαση σε χαμηλότερες τιμές με πτώση περίπου 200 kHz όταν ο κυρίαρχος μηχανισμός αστοχίας μετέβαινε από εφελκυστική μικρορωγμάτωση σε ρωγμές με εξόλκευση ινών. Ομοίως η τιμή RA έδειξε ξεκάθαρα μέγιστα σε στιγμές αστοχίας όπου καταδεικνυόταν διάτμηση του σκυροδέματος.

Οι Farhidzadeh et al. (2014) πραγματοποίησαν δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια άοπλου σκυροδέματος διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm, με λόγο νερού προς τσιμέντο 0.55, άμμου προς τσιμέντο 3.5 και μέγιστο μέγεθος αδρανών 4.75 mm, όπου η ακουστική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια των δοκιμών καταγράφηκε από δύο αισθητήρες με μέγιστη ευαισθησία 450 kHz (Pico, PAC), οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι σε συγκεκριμένες αποστάσεις από τη ζώνη ρωγμάτωσης (15 mm και 55 mm από την αναμενόμενη περιοχή αστοχίας, η οποία εξασφαλίστηκε με την δημιουργία μικρών εγκοπών). Διαπιστώθηκε ότι τα όρια μεταξύ εφελκυστικών και διατμητικών σημάτων AE, μπορούν να ερμηνευθούν με βάση την απόσταση μεταξύ του αισθητήρα και της εκάστοτε ρωγμής. Επίσης επιβεβαιώθηκε ότι το ζευγάρι παραμέτρων με τον μικρότερο βαθμό σφαλμάτων είναι αυτό της μέσης συχνότητας (AF) με την τιμή RA.

Οι Aggelis et al. (2013) διερεύνησαν δοκίμια άοπλου σκυροδέματος διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm, με λόγο νερού προς τσιμέντο 0.55 και μέγιστο μέγεθος αδρανών 4.75 mm. Έξι από τα συνολικά δώδεκα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων και είχε δημιουργηθεί στο μέσον τους εγκοπή, ώστε να εξασφαλιστεί η αρχή της ρωγμάτωσης από το κέντρο του δοκιμίου. Στα άλλα έξι τοποθετήθηκε μία μεταλλική πλάκα διαστάσεων 50 mm x 40 mm στην κορυφή τους μετά το ξεκαλούπωμα, ώστε σε συνδυασμό με την αλλαγή των κυλινδρικών στηρίξεων της μηχανής φόρτισης με τετραγωνικούς να οδηγήσει σε διατμητική και όχι εφελκυστική

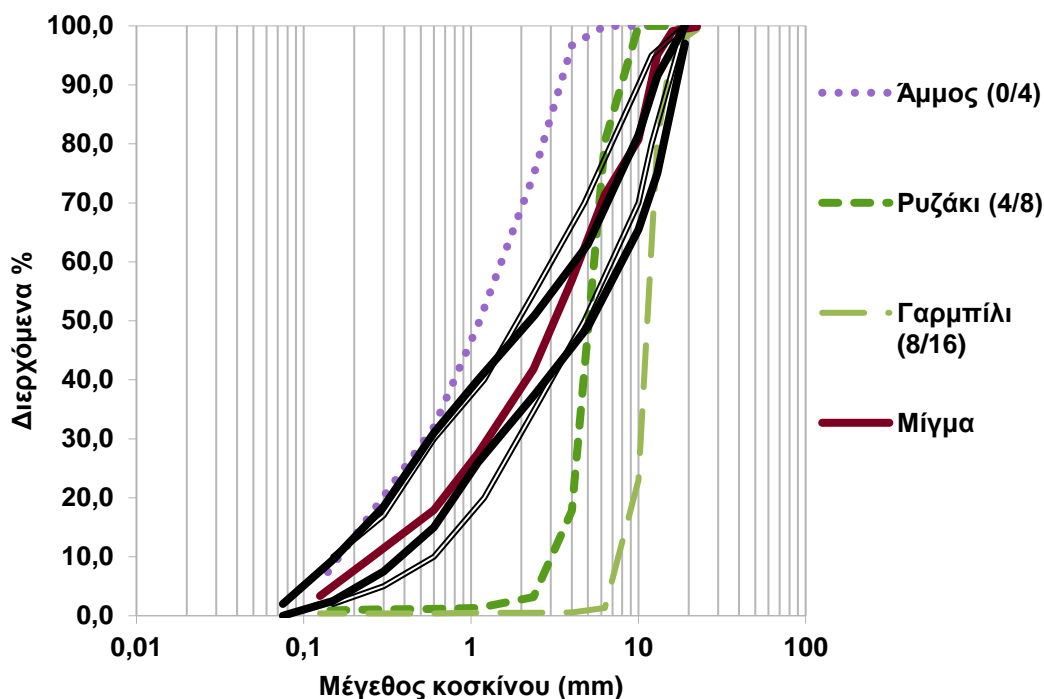
αστοχία. Η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία έδειξε ότι οι μετατροπές αυτές στη δοκιμή κάμψης τριών σημείων όντως διαφοροποίησαν το αναπτυσσόμενο πεδίο τάσεων από εφελκυστικό σε κυρίως διατμητικό. Η παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας συντελέστηκε από δύο αισθητήρες με μέγιστη ευαισθησία 500 kHz (Pico, PAC), οι οποίοι είχαν τοποθετηθεί στην πλαϊνή πλευρά των δοκιμίων και έδειξε διακριτά χαρακτηριστικά για τους δύο τύπους θραύσης. Συγκεκριμένα τα σήματα AE από την συνηθισμένη δοκιμή κάμψης εμφάνισαν υψηλότερο πλάτος και συχνότητα, ενώ εκείνα από την τροποποιημένη δοκιμή κάμψης εμφάνισαν μεγαλύτερη διάρκεια και μεγαλύτερες τιμές RA.

4.2 Διαθέσιμα πειραματικά αποτελέσματα δοκιμών κάμψης δοκιμών σκυροδέματος

Ο Χουμανίδης (2016) στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής, πραγματοποίησε δοκιμές κάμψης τριών σημείων, στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π. σε δοκίμια σκυροδέματος μορφής δοκού με διαστάσεις 10 x 10 x 50 cm. Χρησιμοποιήθηκαν θραυστά αδρανή, ασβεστολιθικά τριών ειδών: α) άμμος (0/4), β) ρυζάκι (4/8) και γ) γαρμπίλι (8/16). Για το χαρακτηρισμό της κοκκομετρίας εφαρμόστηκε το αμερικάνικο πρότυπο (ASTM C 136-01, 2001) αφού πρώτα επιλέχθηκε κατάλληλη ποσότητα από κάθε είδος αδρανούς και απομείωσή της σύμφωνα με τη γνωστή διαδικασία τετραμερισμού του εκάστοτε δείγματος κατά το αμερικάνικο πρότυπο (ASTM C 702-03, 2003). Στον Πίνακα 4.1 δίνονται τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής διαβάθμισης των κλασμάτων των αδρανών και τα ποσοστά αυτών για την πραγματοποιούμενη σύνθεση των μιγμάτων. Όλες οι μετρήσεις των αδρανών πραγματοποιήθηκαν αφού είχαν ξηρανθεί μέσα σε ηλεκτρικό φούρνο για 24 ώρες στους 105°C. Στο Σχήμα 4.1 παρατίθενται οι κοκκομετρικές καμπύλες των αδρανών με βάση τις οποίες επιλέχθηκε η σύνθεση του μίγματος ώστε να υπάγεται εντός των ορίων των προτεινόμενων συνθέσεων από το αμερικάνικο ινστιτούτο σκυροδέματος (ACI Committee 544.4R, 1988, ACI Committee 506R, 1990). Επιλέχθηκε το μίγμα να αποτελείται από 55% άμμο, 20% ρυζάκι και 25% γαρμπίλι.

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα κοκκομετρικής διαβάθμισης αδρανών και μίξη αυτών (Χουμανίδης, 2016).

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ			Αμμος (0/4)												Ρυζάκι (4/8)				Γαρμπίλι (8/16)				Μίγμα				
			Νούμερο		Κόσκινα		r _i (g)		%R _i		%P _i		r _i (g)		%R _i		%P _i		r _i (g)		%R _i		%P _i		ΑΜΜΟΣ %	ΡΥΖΑΚΙ %	ΓΑΡΜΠΙΛΙ %
Συνολικό αρχικό βάρος αδρανών (gr)			3516,72												3409,22				2633,89								
r _i : συγκρατούμενο βάρος αδρανών στο κόσκινο i																											
R _i : αθροιστικό βάρος αδρανών, συγκρατούμενα μέχρι το κόσκινο i = v																											
R _i =r ₁ +r ₂ +...+r _v																											
%R _i : αθροιστικό βάρος αδρανών, συγκρατούμενα μέχρι το κόσκινο i = v																											
%R _i =R _i /M _{ε₁np} *100																											
%P _i : αθροιστικό διερχόμενο βάρος αδρανών μέχρι και από το κόσκινο i=v																											
%P _i =100-%R _i																											
ΑΠΩΛΕΙΕΣ																											
ΠΑΙΠΑΛΗ																											



Σχήμα 4.1: Κοκκομετρικές καμπύλες αδρανών και μίγματος (Χουμανίδης, 2016).

Επιλέχθηκε τσιμέντο τύπου CEM IV/B (P-W) 32,5 R, το οποίο είναι ποζολανικό τσιμέντο που περιέχει ιπτάμενη τέφρα, είναι ταχείας σκλήρυνσης και κανονικής αντοχής. Ως πρόσθετο επιλέχθηκε πυριτική παιπάλη τύπου Sika Fume HR-D (SIKA, 2014a) και σε ποσοστό 5% της περιεχόμενης ποσότητας σε τσιμέντο. Ως πρόσμικτο χρησιμοποιήθηκε υπερρυστοποιητής τύπου Sika Viscocrete Techno-40 (SIKA, 2014b), για να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα και κάθιση κατηγορίας S3 (10-15 cm). Ο λόγος νερού προς συνδετικές κονίες ήταν 0.48 και υπολογισμένος αφού μετρήθηκε και η απορροφητικότητα των αδρανών. Οι ίνες (Σχήμα 4.2) ήταν χαλύβδινες με γαντζωτά άκρα τύπου INOMIX της εταιρίας ΣΙΔΕΝΟΡ Α.Ε. (ΣΙΔΕΝΟΡ, 2016), μακροΐνες πολυπροπυλενίου τύπου SikaFiber PP-540/52 της εταιρίας SIKA (SIKA, 2013a) και μικροΐνες πολυπροπυλενίου τύπου SikaFibers της εταιρίας SIKA (SIKA, 2013b). Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2. Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται όλες οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν. Οι ποσότητες των υλικών αυξήθηκαν κατά 10% του προβλεπόμενου όγκου των καλουπιών για λόγους απωλειών. Συνολικά παρασκευάστηκαν 10 σειρές μιγμάτων, 1 μίγμα άοπλου σκυροδέματος και 9 ινοπλισμένοι. Οι προβλεπόμενες ποσότητες ανά σύνθεση μίγματος αφορούν την παρασκευή 6 πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 100 x 100 x 500 mm για τις δοκιμές κάμψης.



(α)

(β)

(γ)

Σχήμα 4.2: α) Χαλύβδινες ίνες, β) Μακροΐνες πολυπροπυλενίου και γ) Μικροΐνες πολυπροπυλενίου (Χουμανίδης, 2016).

Πίνακας 4.2: Χαρακτηριστικά των ινών (Χουμανίδης, 2016).

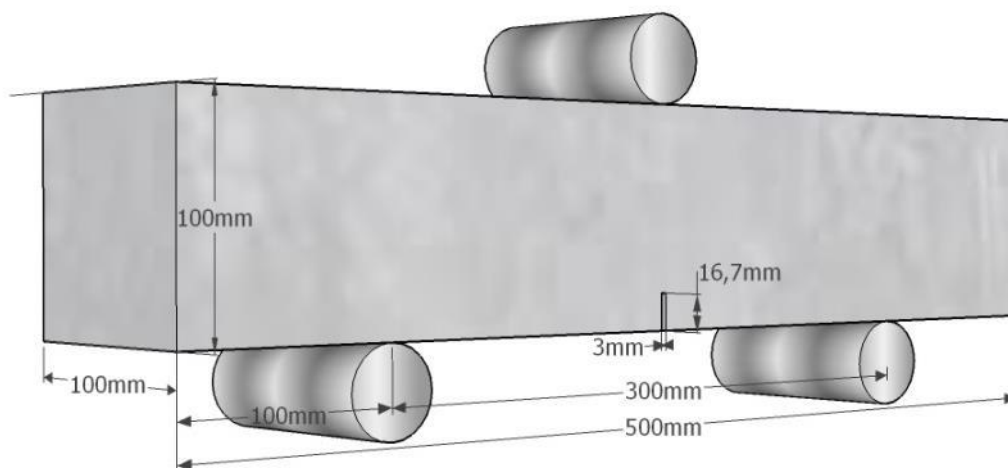
Τύπος Υλικό	S	P1	P2
Μορφή	Χάλυβας Ευθύγραμμες με γαντζωτά άκρα	Πολυπροπυλένιο Ευθύγραμμες ορθογώνιας διατομής	Πολυπροπυλένιο Ευθύγραμμες κυκλικής διατομής
Μήκος (mm)	30	52	12
Διάμετρος (mm)	0.8	0.46	0.025
Εφελκυστική αντοχή (MPa)	1100	613	400
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	200	5.4	1.6
Λόγος μορφής l/d	37.5	113	480

Πίνακας 4.3: Συνθέσεις νωπού σκυροδέματος (Χουμανίδης, 2016).

ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ (Kg)		ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ									
		PLAIN	S-0.5	S-1	P1-0.5	P1-1	P2-0.5	P2-1	HySP1	HySP2	HyP1P2
Τσιμέντο (c)		25,738	25,738	25,738	25,738	25,738	25,738	25,738	25,738	25,738	25,738
Πυριτική Παιπάλη (si)		1,287	1,287	1,287	1,287	1,287	1,287	1,287	1,287	1,287	1,287
Άμμος (0-4 mm)		59,316	59,316	59,316	59,316	59,316	59,316	59,316	59,316	59,316	59,316
Ρυζάκι (4-8 mm)		21,569	21,569	21,569	21,569	21,569	21,569	21,569	21,569	21,569	21,569
Γαρμπίλι (8-16 mm)		26,962	26,962	26,962	26,962	26,962	26,962	26,962	26,962	26,962	26,962
Νερό (w)		14,104	14,104	14,104	14,104	14,104	14,104	14,104	14,104	14,104	14,104
Ίνες	S	-	2,574	5,148	-	-	-	-	2,574	2,574	-
	P1	-	-	-	0,293	0,586	-	-	0,293	-	0,293
	P2	-	-	-	-	-	0,293	0,586	-	0,293	0,293
Ρευστοποιητής		0,127	0,150	0,150	0,232	0,282	0,256	0,354	0,250	0,302	0,300
w/(b)		0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Ποσοστό Ινών (%κ.ό.)	S	-	0,5	1,0	-	-	-	-	0,5	0,5	-
	P1	-	-	-	0,5	1,0	-	-	0,5	-	0,5
	P2	-	-	-	-	-	0,5	1,0	-	0,5	0,5
Ποσοστό Ρευστοποιητή (%κ.β.)		0,47	0,56	0,56	0,86	1,05	0,95	1,31	0,93	1,12	1,11
Κάθιση (cm)		11	13,5	13	10	0	11	13	13	15	13,5
Μοναδιαίο Βάρος (Kg/lt)		2,329	2,345	2,366	2,280	2,299	2,017	2,206	2,341	2,036	2,029

Για τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες 3 από τα 6 δοκίμια όλων των συνθέσεων υπέστησαν θερμική καταπόνηση. Τα συγκεκριμένα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε ηλεκτρικό φούρνο 24 ώρες πριν τη δοκιμή τους. Ακολουθήθηκε ρυθμός αύξησης θερμοκρασίας ίσος με $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος έως και τη θερμοκρασία στόχου των 280°C , η οποία διατηρήθηκε για 30 λεπτά. Στη συνέχεια ο φούρνος έσβησε και τα δοκίμια έμειναν μέσα σε αυτόν για σταδιακή απομείωση της θερμοκρασίας τους μέχρι την επόμενη ημέρα των δοκιμών.

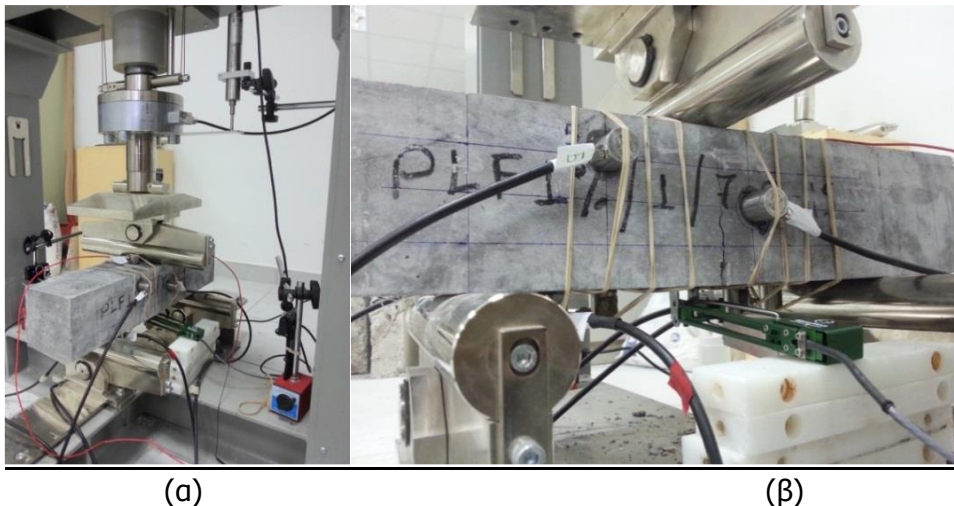
Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμή κάμψης τριών σημείων με έλεγχο ανοίγματος ρωγμής σε προϋπάρχουσα εγκοπή πλάτους 3 mm και ύψους 16.7 mm. Το ύψος της εγκοπής επιλέχθηκε ως το $1/6$ του ύψους του δοκιμίου σε αναλογία με τις διαστάσεις του δοκιμίου του προτύπου (EN 14651, 2007). Το άνοιγμα της στήριξης της δοκού είχε ορισθεί στα 300 mm (Σχήμα 4.3). Ο ρυθμός φόρτισης ήταν $0.05 \text{ mm}/\text{min}$. Η καταγραφή πραγματοποιούνταν σε απόσταση 10 mm από την κάτω παρειά του πρίσματος. Χρησιμοποιήθηκε πλαίσιο δυναμικότητας 150 kN και οι δοκιμές εκτελέστηκαν με το σερβοϋδραυλικό σύστημα ελέγχου ADVANCED 9.



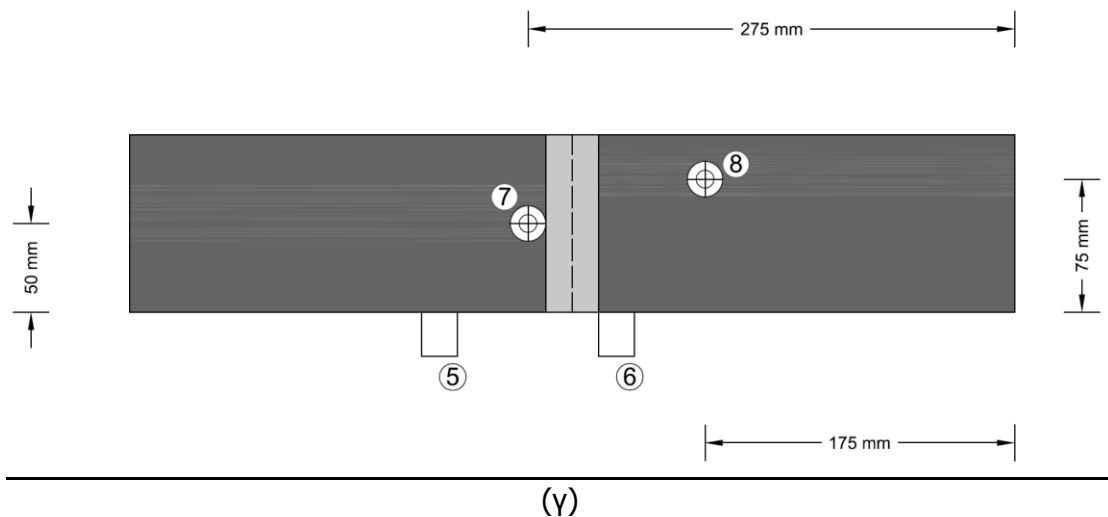
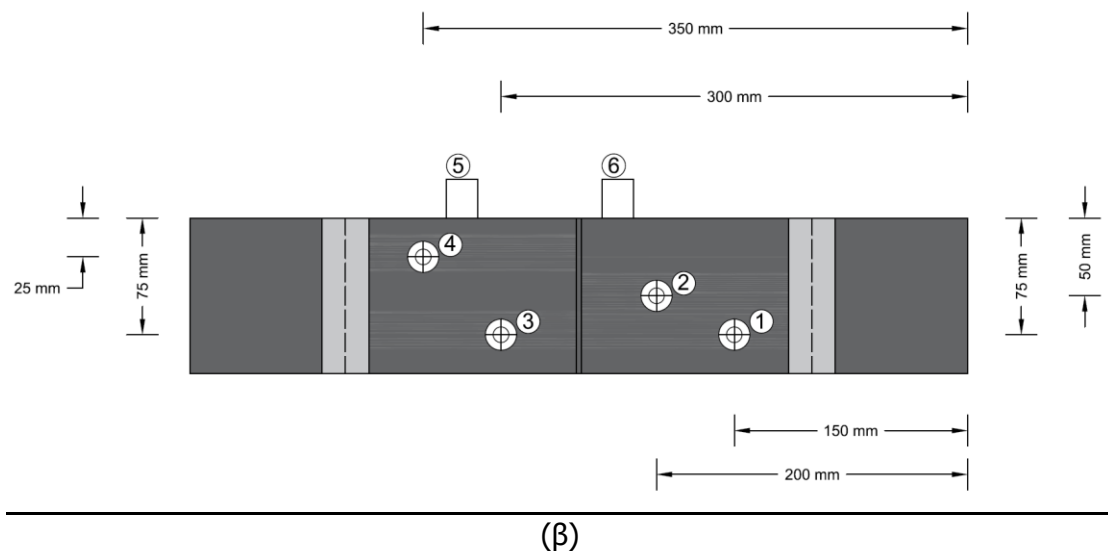
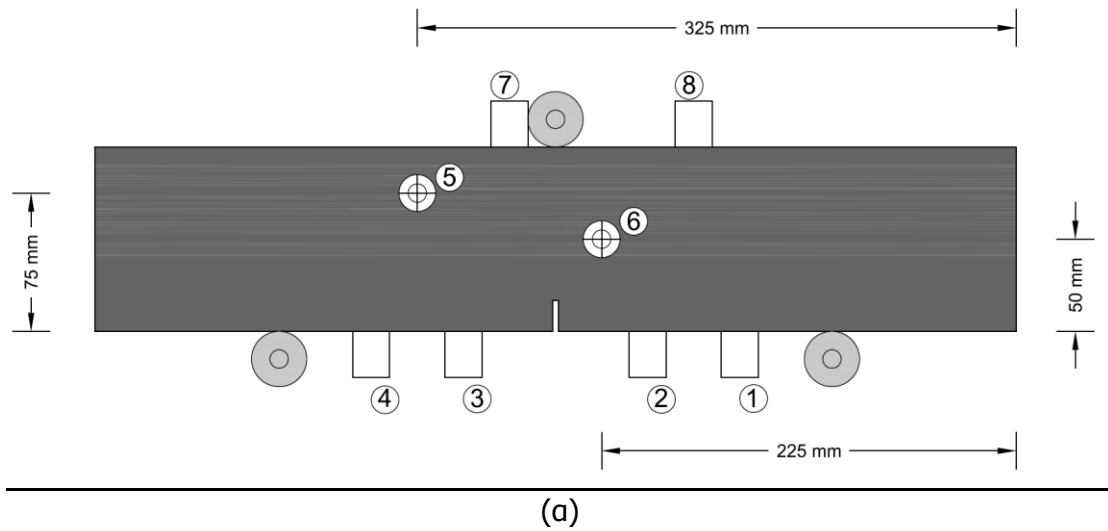
Σχήμα 4.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά πρισματικού δοκιμίου (Χουμανίδης, 2016).

Επιπλέον των δοκιμών προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων των συνθέσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος καταγράφηκε και η ακουστική δραστηριότητα κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Για την καταγραφή των σημάτων ακουστικής εκπομπής χρησιμοποιήθηκαν οκτώ πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες, οι οποίοι τοποθετήθηκαν στις τρεις μεγάλες λείες πλευρικές επιφάνειες των δοκιμών. Οι αισθητήρες ήταν τύπου

PAC R15, διαμέτρου 19 mm και ύψους 22 mm, μέγιστης ευαισθησίας 69 V/(m/s) και εύρους συχνότητας λειτουργίας 50 – 200 kHz. Είχαν τοποθετηθεί στην επιφάνεια του σκυροδέματος των δοκιμίων με ελαστικούς συνδέσμους για τη συγκράτησή τους και ειδική γέλη στη διεπιφάνειά τους ως συνδετικό υλικό. Τα σήματα ακουστικής εκπομπής ενισχύονταν από 8 προενισχυτές PAC 2/4/6, με ενισχυτική ικανότητα 20/40/60 dB αντίστοιχα, ρυθμισμένοι στα 40 dB, με εύρος συχνότητας λειτουργίας 10 kHz – 2 MHz. Μία κάρτα οκτώ καναλιών με τέσσερις PCI-2 κάρτες χρησιμοποιήθηκε ως σύστημα παρακολούθησης και τα λογισμικά AE-Win και Noesis 8.1 για την καταγραφή και ανάλυση των αποτελεσμάτων αντίστοιχα. Ως κάτω όριο μεγέθους καταγραφής των σημάτων τέθηκαν τα 45 dB. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η τοποθέτηση του δοκιμίου και η λεπτομέρεια της διάταξης για την μέτρηση του ανοίγματος της ρωγμής. Οι οκτώ αισθητήρες ήταν διατεταγμένοι πάνω στα δοκίμια όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5 (Χουμανίδης, 2016).



(α) (β)
Σχήμα 4.4: α) Δοκιμή κάμψης τριών σημείων και β) Λεπτομέρεια μέτρησης ανοίγματος ρωγμής (Χουμανίδης, 2016).



Σχήμα 4.5: Σχηματική απεικόνιση διάταξης πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων στα δοκίμια.
 α) Πλάγια όψη, β) Κάτω όψη και γ) Άνω όψη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:

Χωρικός εντοπισμός σημάτων Ακουστικής Εκπομπής σε πρισματικά δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος

5.1 Εισαγωγή

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνικής ΑΕ είναι ότι με τη χρήση πολλών αισθητήρων και από την ανάλυση των στοιχείων που λαμβάνονται, είναι δυνατός ο εντοπισμός της θέσης της πηγής ΑΕ. Η πρακτική αξία του εντοπισμού θέσης εξαρτάται από την ακρίβεια προσδιορισμού και από την κλίμακα της δοκιμής. 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. Κατά τον τριδιάστατο εντοπισμό (3D Location) της θέσης προέλευσης των σημάτων ΑΕ, θεωρείται ότι το ακουστικό σήμα οδεύει απευθείας μέσα στο χώρο και όχι μέσω ενός εξωτερικού κελύφους, σε αντίθεση με πιο ειδικές περιπτώσεις εντοπισμού θέσης όπως π.χ., ο εντοπισμός θέσης σε κύλινδρο (PAC, 2005).

Ο εντοπισμός της θέσης στο χώρο είναι παρόμοιος με τη διδιάστατη ανάλυση κατά τους άξονες ($Y - Z/2D$ Planar $Y - Z$) και ($X - Z/2D$ Planar $X - Z$) καθόσον και οι τρεις μέθοδοι έχουν σχεδιαστεί για χρήση τριαξονικών συντεταγμένων. Η 2D Planar $Y - Z$ ανάλυση χρησιμοποιεί τις Y και Z συντεταγμένες του αισθητήρα και αγνοεί τις X τιμές, ενώ η 2D Planar $X - Z$ ανάλυση χρησιμοποιεί τις X και Z συντεταγμένες και αγνοεί τις Y τιμές. Ο επίπεδος εντοπισμός κατά τους άξονες ($X - Y$) ουσιαστικά αποτελεί μία τριδιάστατη ανάλυση αγνοώντας τις Z συντεταγμένες. Για το τριδιάστατο εντοπισμό θέσης απαιτούνται τουλάχιστον τέσσερις αισθητήρες. Στον τριδιάστατο εντοπισμό παρατηρείται το πρόβλημα των επίπεδων γεγονότων, ανάλογο του προβλήματος με τα γραμμικά γεγονότα στη διδιάστατη ανάλυση. Επίπεδα γεγονότα ορίζονται όταν οι αντίστοιχοι κτύποι ανιχνεύονται από αισθητήρες που βρίσκονται τοποθετημένοι στο ίδιο επίπεδο. Είναι προφανής η δυσκολία καθορισμού των αποστάσεων των πηγών από το επίπεδο, αλλά και της διεύθυνσης προσανατολισμού τους (θετική ή αρνητική). Η χρήση κατάλληλων αλγορίθμων φιλτράρει τα γεγονότα και αυτά τα αγνοεί κατά τη τριδιάστατη ανάλυση. Για την ελαχιστοποίηση των επίπεδων γεγονότων και κατά συνέπεια την αύξηση της ακρίβειας εντοπισμού, θα πρέπει να αποφεύγεται η τοποθέτηση των αισθητήρων σε

ευθεία και στο ίδιο επίπεδο. Επίσης η διάταξή τους δεν πρέπει να ορίζει ορθογώνιο πλέγμα έτσι ώστε δύο αισθητήρες να μην βρίσκονται σε αντικριστές θέσεις.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται εντοπισμός της θέσης προέλευσης των πηγών ΑΕ των δοκιμών άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος, στο χώρο (3D Location), μέσω του λογισμικού NOESIS.

5.2 Τριδιάστατος εντοπισμός (3D Location)

Πραγματοποιήθηκε τριδιάστατος εντοπισμός σε 10 σειρές δοκιμών, 1 σειρά άοπλων δοκιμών και 9 ινοπλισμένων, όπου κατά τη διάρκεια δοκιμών κάμψης καταγράφηκε η ακουστική τους δραστηριότητα. Οι σειρές αριθμούσαν 6 δοκίμια έκαστη εκ των οποίων τα 3 είχαν υποβληθεί σε θερμική καταπόνηση (παραλήφθηκαν κάποια μεμονωμένα δοκίμια των οποίων τα δεδομένα ΑΕ δεν ήταν διαχειρίσιμα). Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν από τον Χουμανίδη (2016) στα πλαίσια της διδακτορικής του διατριβής, στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων της Σχολής Μηχ. Μεταλλείων – Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π..

Για την πραγματοποίηση του τριδιάστατου εντοπισμού το λογισμικό NOESIS απαιτεί την εισαγωγή των χωρικών συντεταγμένων και των οχτώ αισθητήρων. Λόγω μικροαποκλίσεων κατά την τοποθέτηση, από την πρότυπη διάταξη τοποθέτησης των αισθητήρων στα δοκίμια, χρειάστηκε να μετρηθούν και να καταγραφούν οι επακριβείς συντεταγμένες, ώστε να εισαχθούν στο λογισμικό. Ενδεικτικά στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται οι μετρήσεις για τους αισθητήρες μιας από τις συνθέσεις (S-1) σε αντιπαραβολή με τις προβλεπόμενες τιμές.

Πίνακας 5.1: Σύγκριση μετρούμενων και προβλεπόμενων συντεταγμένων των αισθητήρων.

Προβλεπόμενες Τιμές									
Δοκίμια	Συντεταγμένες	Αισθητήρες							
		1	2	3	4	5	6	7	8
S	X (mm)	150	200	300	350	325	225	275	175
	Z (mm)	75	50	75	25	0	0	50	75
	Y (mm)	0	0	0	0	75	50	100	100
Πραγματικές Τιμές									
Δοκίμια	Συντεταγμένες	Αισθητήρες							
		1	2	3	4	5	6	7	8
S-1-1	X (mm)	148	200	297	350	324	225	274	176
	Z (mm)	75	48	74	22	0	0	52	73
	Y (mm)	0	0	0	0	73	50	100	100

S-1-2	X (mm)	151	200	298	351	325	225	278	175
	Z (mm)	74	49	73	24	0	0	52	75
	Y (mm)	0	0	0	0	75	50	100	100
S-1-3	X (mm)	150	201	300	349	325	225	282	175
	Z (mm)	76	48	70	24	0	0	50	78
	Y (mm)	0	0	0	0	76	52	100	100
S-1-4	X (mm)	151	200	299	349	324	225	275	176
	Z (mm)	78	47	74	23	0	0	51	75
	Y (mm)	0	0	0	0	76	50	100	100
S-1-5	X (mm)	151	202	299	351	327	225	278	176
	Z (mm)	77	50	70	77	0	0	51	75
	Y (mm)	0	0	0	0	78	51	100	100
S-1-6	X (mm)	152	200	301	350	325	225	279	176
	Z (mm)	75	50	74	75	0	0	49	76
	Y (mm)	0	0	0	0	78	58	100	100

Εν συνεχεία, τα αρχεία δεδομένων ΑΕ εισήχθησαν στο λογισμικό NOESIS. Προτού γίνει ο εντοπισμός φιλτραρίστηκαν τα αρχεία ΑΕ από ανεπιθύμητα και ενδεχομένως παραπλανητικά σήματα. Ορίσθηκαν τρία φίλτρα, όπου απορρίφθηκαν σήματα των οποίων οι κυματομορφές είχαν α) Risetime ≤ 0 , β) Counts ≤ 1 και γ) Energy ≤ 0 (Σχήμα 5.1).

Filter Setup

Filter	Characteristic (Feature)	Lower Limit	Upper Limit	Logic
Filter 1	<input checked="" type="checkbox"/> Risetime	0	0	AND
Filter 2	<input checked="" type="checkbox"/> Counts	0	1	AND
Filter 3	<input checked="" type="checkbox"/> Energy	0	0	AND
Filter 4	<input type="checkbox"/> [Empty]	0	0	AND
Filter 5	<input type="checkbox"/> [Empty]	0	0	AND

Apply filters to the following classes

0 All Classes

(Main Set - As Loaded)

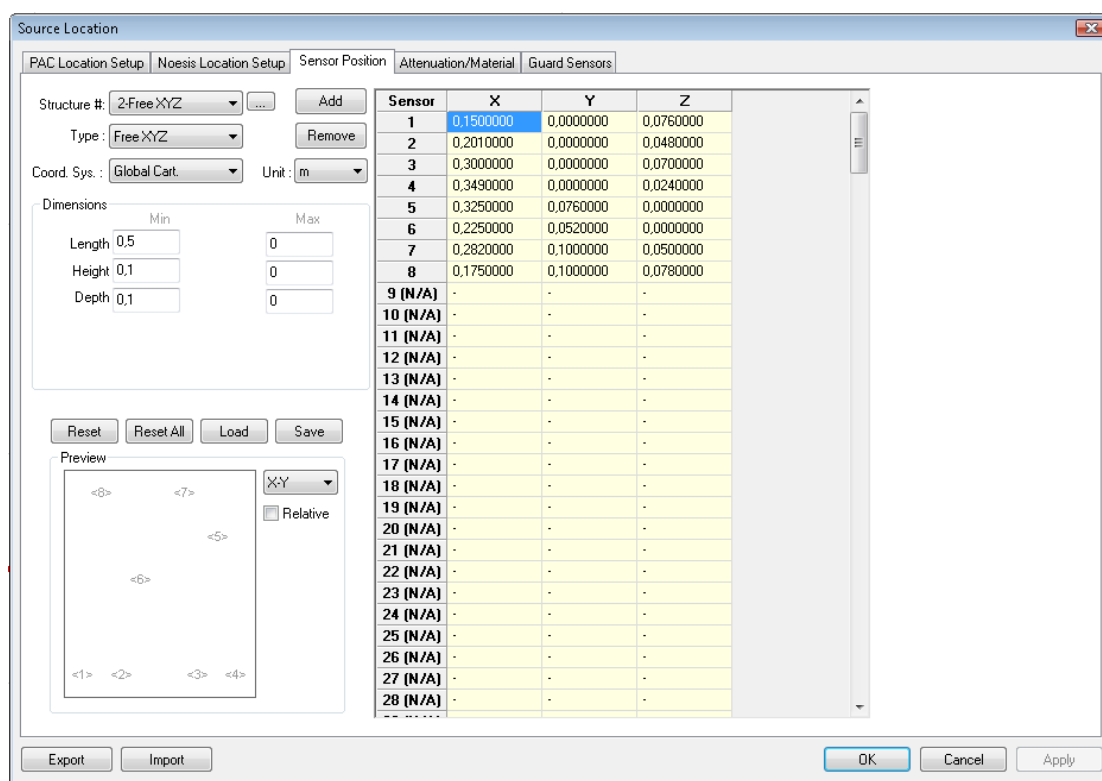
Filters are combined using logical-OR operations.
'Reject' takes precedence over 'Accept'.

Press Select to group all filtered records into a selection.
Press Delete to remove all filtered records from the dataset!

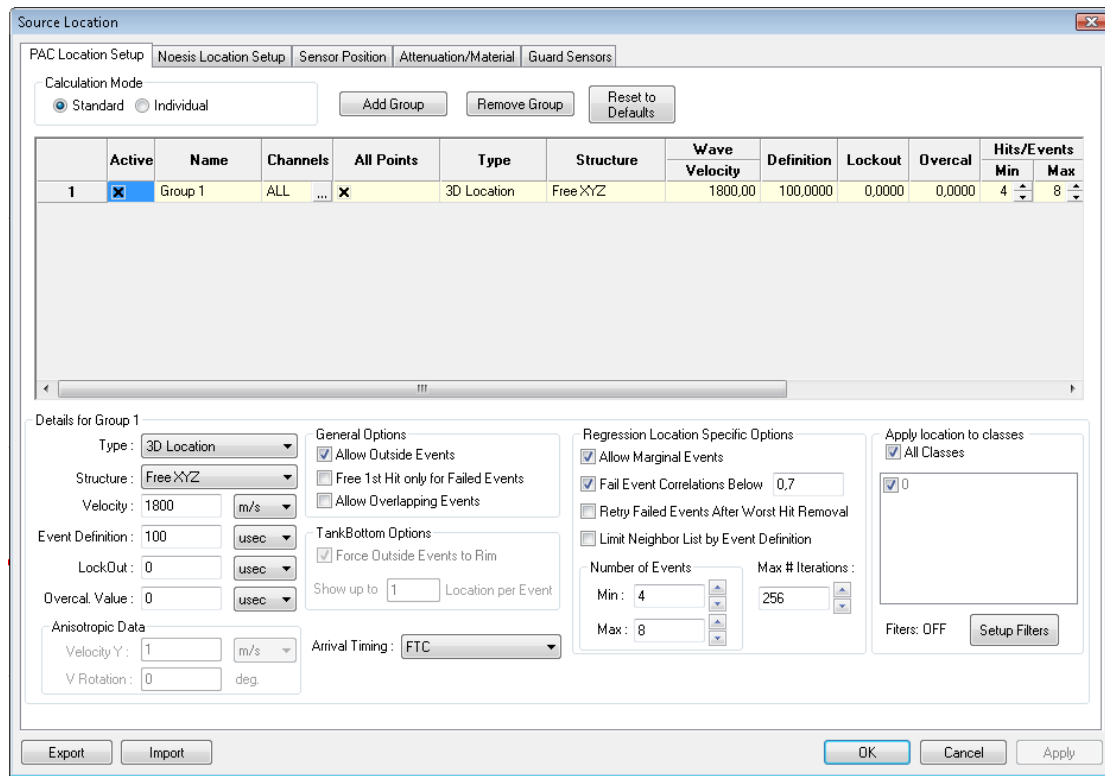
Σχήμα 5.1: Καθορισμός φίλτρων σημάτων ΑΕ.

Για τη διαδικασία του εντοπισμού της θέσης προέλευσης των πηγών ΑΕ, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, απαιτείτο από το λογισμικό η εισαγωγή των χωρικών διαστάσεων και των οχτώ πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που είχαν τοποθετηθεί στα δοκίμια, όπως επίσης και οι διαστάσεις των δοκιμίων. Επιπλέον εισήχθησαν οι παρακάτω απαιτούμενες παράμετροι (Σχήμα 5.2):

- **Type:** Τύπος εντοπισμού
- **Structure:** Ορισμός σχήματος του προς εξέτασης δοκιμίου
- **Wave Velocity:** Ταχύτητα διάδοσης κύματος
- **Event Definition:** Μέγεθος εντοπιζόμενων γεγονότων
- **Lockout:** Μεσοδιάστημα μεταξύ διαδοχικών γεγονότων
- **Overcal:** Παράμετρος βαθμονόμησης αισθητήρων
- **Hits/Events Min & Max:** Ελάχιστος και μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός σημάτων ανά εντοπιζόμενο γεγονός
- **Iterations Max:** Παράμετρος βαθμονόμησης ακρίβειας ανάλυσης
- **Arrival Timing:** Παράμετρος καθορισμού των χρόνων άφιξης των σημάτων ΑΕ (First Threshold Crossing – FTC and Peak Timing – PT)

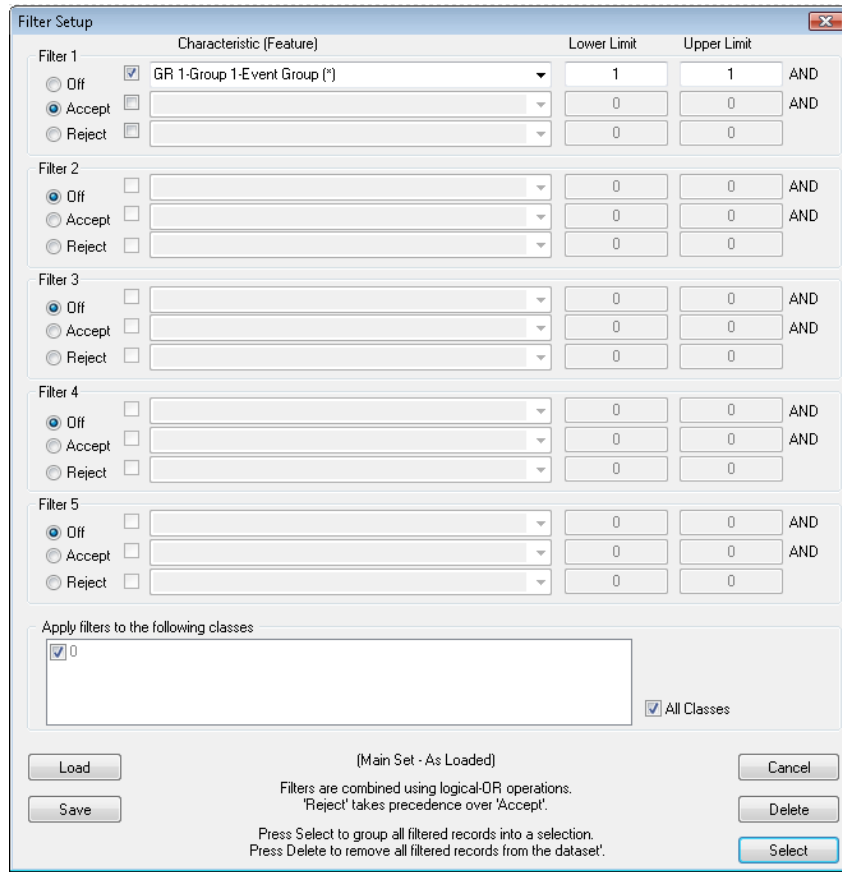


(α)



(β)
 Σχήμα 5.2: α) Εισαγωγή στο λογισμικό χωρικών συντεταγμένων αισθητήρων και β)
 Εισαγωγή λοιπών απαιτούμενων παραμέτρων για τον εντοπισμό της θέσης
 προέλευσης των πηγών ΑΕ.

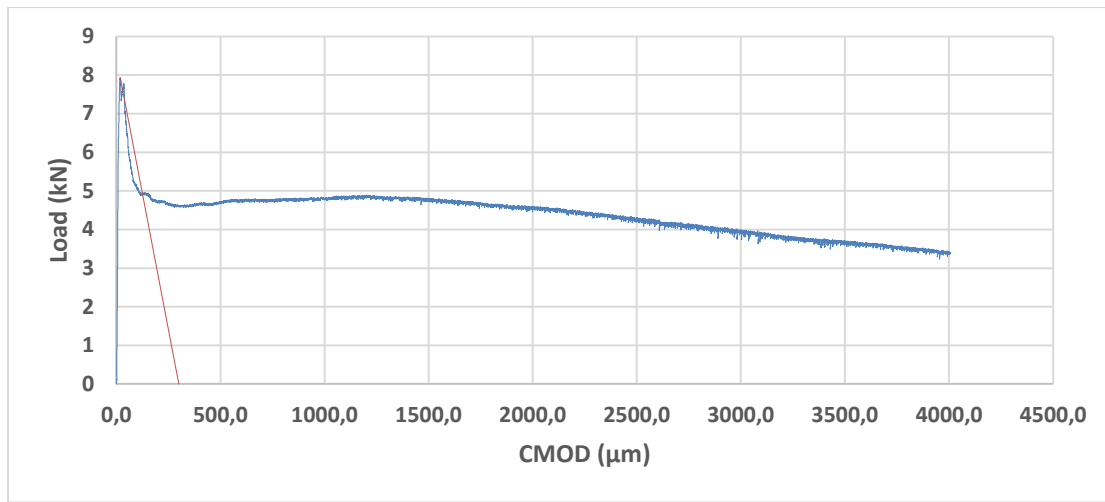
Αφού πραγματοποιήθηκε η διαδικασία του τριδιάστατου εντοπισμού της θέσης προέλευσης πηγών ΑΕ, τα σήματα ΑΕ πέρασαν εκ νέου από φίλτρο, έτσι ώστε για την επικείμενη ανάλυση και την εξαγωγή συμπερασμάτων να παραμείνουν μόνο τα σήματα τα οποία έχουν συμμετοχή στη δημιουργία γεγονότων (Σχήμα 5.3).



Σχήμα 5.3: Απομόνωση σημάτων ΑΕ που χρησιμοποιήθηκαν σε γεγονότα.

Στο σημείο αυτό τα εναπομείναντα σήματα ΑΕ διαχωρίστηκαν με βάση το πότε καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής κάμψης σε πέντε υποκατηγορίες: α) από 0-50% του μέγιστου καταγεγραμμένου φορτίου, β) από 50-90% του μέγιστου καταγεγραμμένου φορτίου, γ) από 90-95% του μέγιστου καταγεγραμμένου φορτίου, δ) από 95% του μέγιστου καταγεγραμμένου φορτίου έως την τιμή από όπου θεωρήθηκε ότι ξεκινάει η παραμένουσα αντοχή και ε) από το σημείο εκκίνησης της παραμένουσας αντοχής έως και επιπλέον 300 μm μετρούμενου ανοίγματος ρωγμής (CMOD). Τα σήματα πέρα από αυτό το όριο δεν μελετήθηκαν.

Σημείωση: Για την αποτελεσματικότερη σύγκριση και αντιστοίχιση των αποτελεσμάτων μεταξύ των δοκιμών, το σημείο εκκίνησης της παραμένουσας αντοχής ορίστηκε ως η τομή του διαγράμματος φορτίου – ανοίγματος ρωγμής (CMOD) με ημιευθεία η οποία ξεκινάει από την κορυφαία τιμή φορτίου και τέμνει τον άξονα των X στα 300 μm. Η συγκεκριμένη πρακτική υιοθετήθηκε διότι στη μεγάλη πλειοψηφία των δοκιμών φαίνεται να προσεγγίζει ικανοποιητικά το σημείο επίτευξης της παραμένουσας αντοχής. Ενδεικτικά αυτό παρουσιάζεται για ένα από τα δοκίμια στο Σχήμα 5.4.



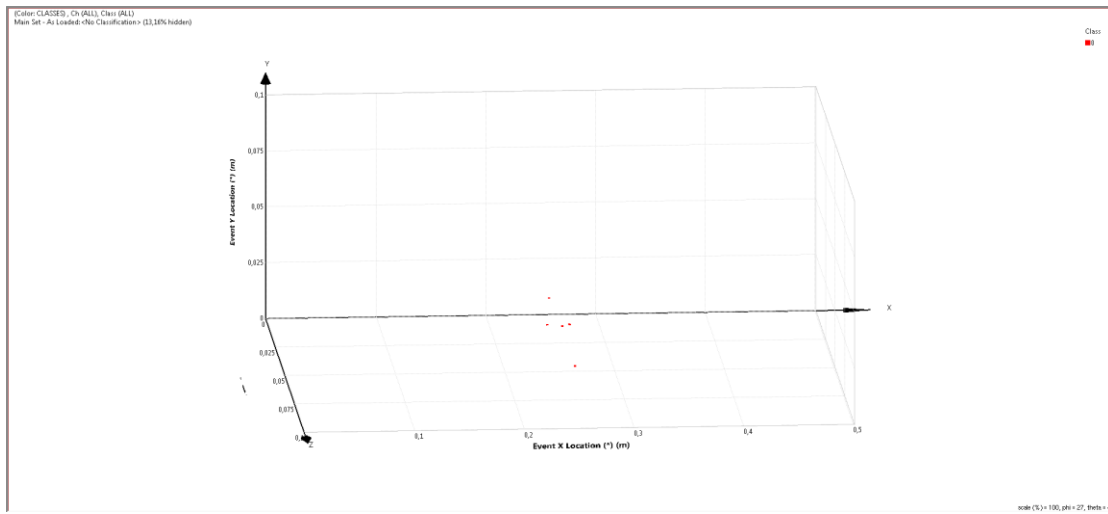
Σχήμα 5.4: Καθορισμός σημείου εκκίνησης παραμένουσας αντοχής.

Στα δοκίμια άοπλου σκυροδέματος, με βάση πάλι το πότε καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της δοκιμής, λόγω του ότι δεν παρουσιάζεται παραμένουσα αντοχή, τα σήματα ΑΕ διαχωρίστηκαν στις εξής τέσσερις υποκατηγορίες: α) από 0-50% του μέγιστου καταγεγραμμένου φορτίου, β) από 50-90% του μέγιστου καταγεγραμμένου φορτίου, γ) από 90-95% του μέγιστου καταγεγραμμένου φορτίου, δ) από 95% του μέγιστου καταγεγραμμένου φορτίου στον ανοδικό κλάδο έως 95% του μέγιστου καταγεγραμμένου φορτίου στον καθοδικό κλάδο.

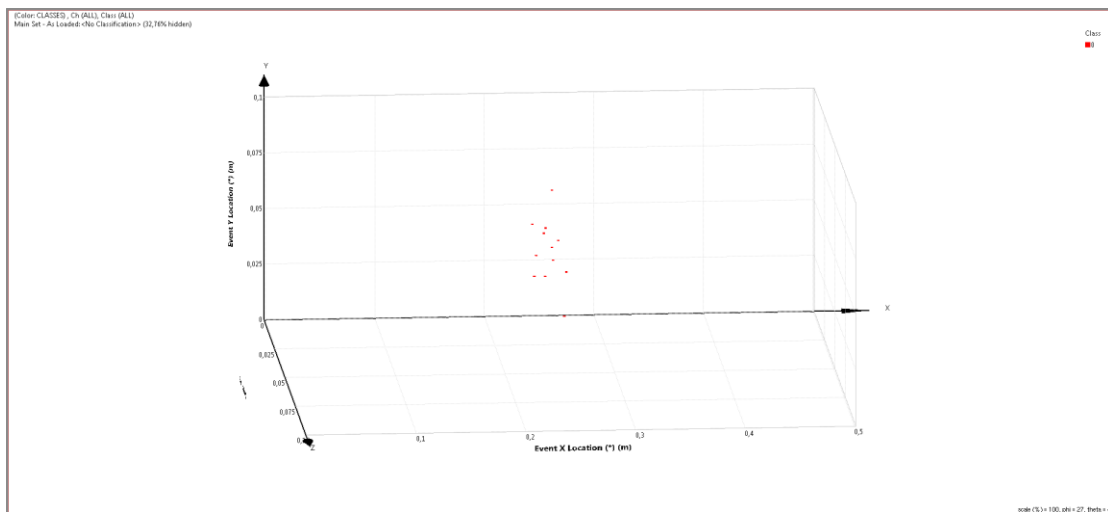
Ο διαχωρισμός αυτός επιτεύχθηκε πάλι μέσω φίλτρων και αφού τα δεδομένα ΑΕ είχαν παραμετροποιηθεί με τέτοιο τρόπο (μέσω αλγορίθμου), ώστε να απεικονίζονται σωστά σε διάγραμμα φορτίου – χρόνου.

Στα Σχήματα που ακολουθούν παρακάτω (5.5 – 5.10) παρουσιάζονται οι εντοπιζόμενες θέσεις προέλευσης πηγών ΑΕ στις τρεις διαστάσεις και στην εγκάρσια όψη των δοκιμίων. Παρατηρήθηκε ότι ο κύριος όγκος των εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ οφείλεται σε σήματα ΑΕ που καταγράφηκαν μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, οπότε λόγω των λιγοστών γεγονότων ΑΕ στα πρώτα τρία στάδια φόρτισης επιλέχθηκε να παρουσιαστεί η απεικόνιση για τα δύο τελευταία στάδια φόρτισης. Για την τριδιάστατη απεικόνιση παρουσιάζεται ενδεικτικά η σειρά δοκιμίων S-1 και για την εγκάρσια όψη παρουσιάζονται δοκίμια των σειρών S-0.5 και S-1 διαχωριζόμενα σε θερμικώς και μη καταπονημένα (πάντα για τα δύο τελευταία στάδια φόρτισης).

- Τριδιάστατη απεικόνιση
 - Μη θερμικώς καταπονημένα δοκίμια



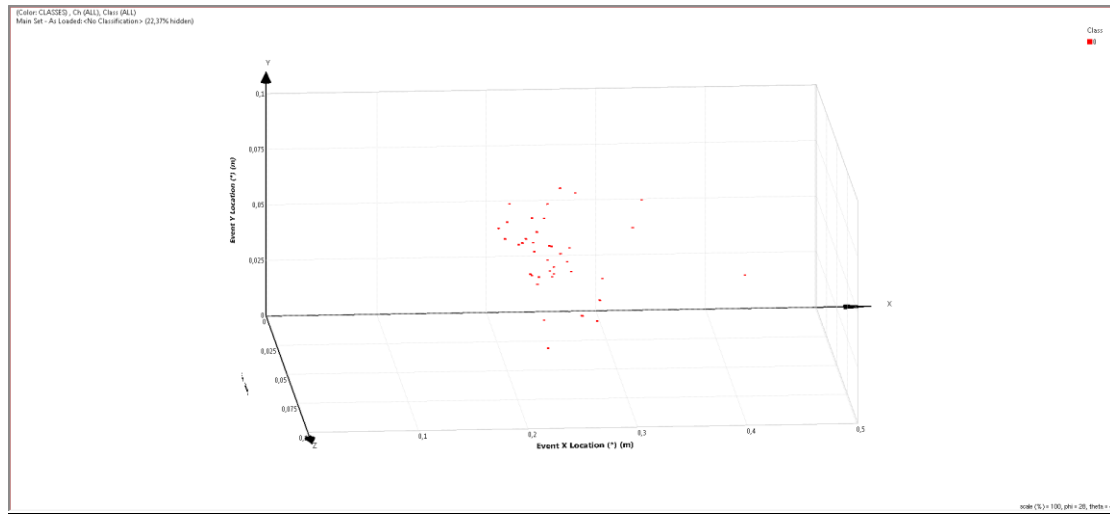
(α)



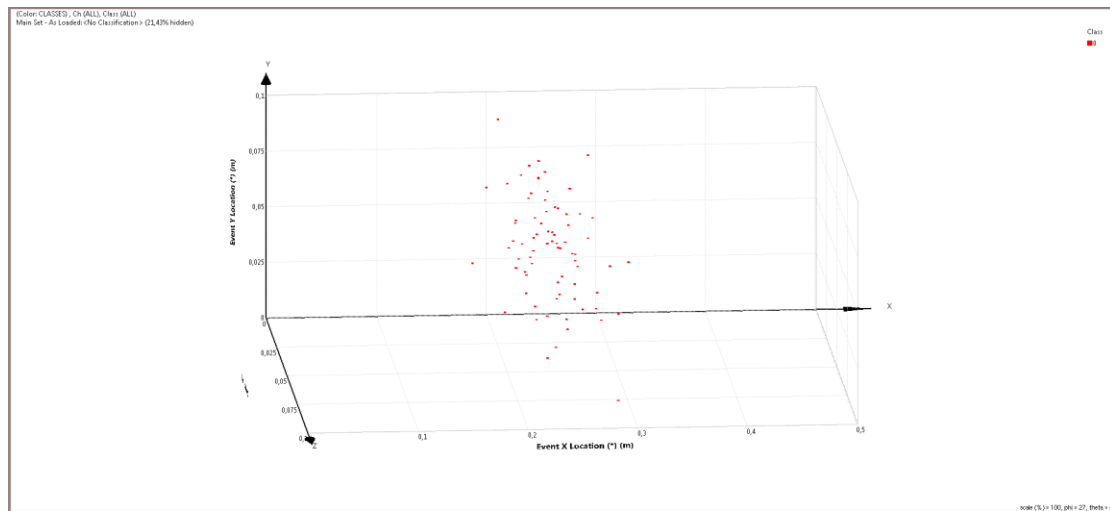
(β)

Σχήμα 5.5: Προοπτική απεικόνιση εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **S-1**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

- Θερμικώς καταπονημένα δοκίμια



(α)



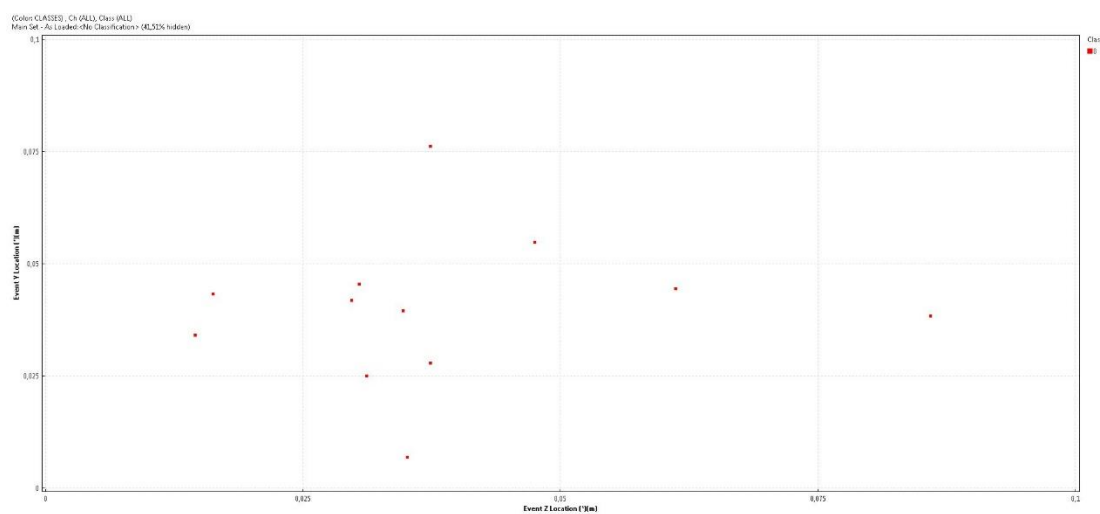
(β)

Σχήμα 5.6: Προοπτική απεικόνιση εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων AE για τη σειρά δοκιμών **S-1**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

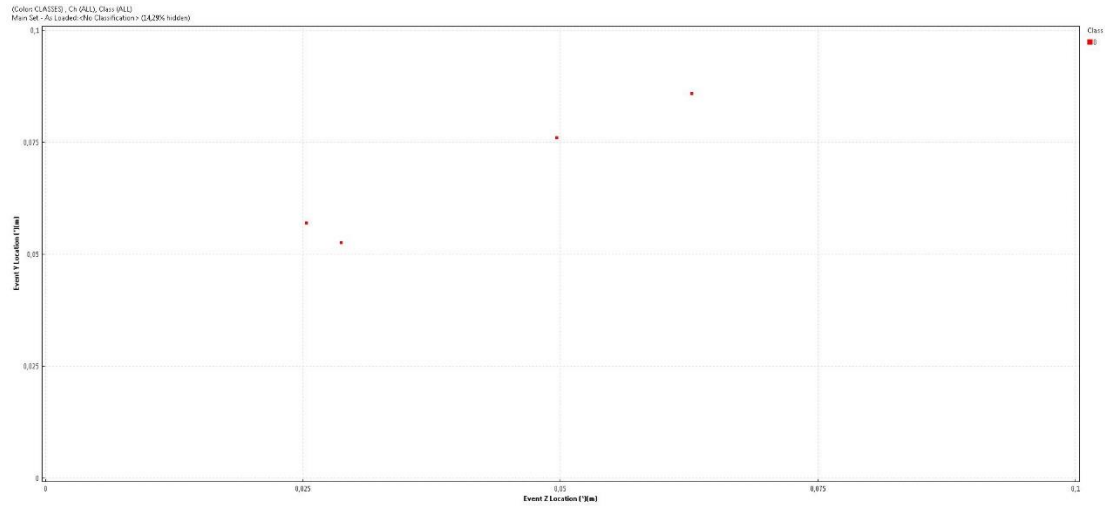
Από τα παραπάνω Σχήματα παρατηρείται, όπως αναμενόταν, ότι τα γεγονότα AE εντοπίστηκαν κυρίως στη μεσαία διατομή, όπου βρίσκεται και η προϋπάρχουσα εγκοπή. Επιπλέον παρατηρήθηκε, όπως θα αναλυθεί περαιτέρω και στα επόμενα, ότι κατά τη μετάβαση στο τελευταίο στάδιο φόρτισης υπάρχει αύξηση των εντοπιζόμενων γεγονότων AE, τα οποία δείχνουν και την τάση να διαδίδονται όλο και ψηλότερα μέσα στο δοκίμιο, όπως επίσης αναμενόταν. Αυτό συμβαίνει διότι όσο προχωράει η δοκιμή μεγαλώνει το άνοιγμα της προϋπάρχουσας εγκοπής και η σχηματιζόμενη ρωγμή ξεκινώντας από το κάτω μέρος του δοκιμίου διαδίδεται, αρχικά, παράλληλα με τον άξονα φόρτισης. Μία άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση έχει

να κάνει με το γεγονός ότι καθώς μεταβαίνουμε στο τελευταίο στάδιο φόρτισης τα γεγονότα ΑΕ δεν διαδίδονται μόνο καθ' ύψος του δοκιμίου, αλλά και κατά το διαμήκη άξονα, δηλαδή σε πλάτη αρκετά εκτός της μεσαίας διατομής. Φαίνεται ότι η κυρίως ρωγμή έχει την τάση από αυτό το στάδιο και έπειτα να διαδοθεί και κάθετα στον άξονα φόρτισης, σηματοδοτώντας την τάση εναλλαγής του τύπου θραύσης από εφελκυστικό σε διατμητικό. Το φαινόμενο δείχνει να εντείνεται ιδιαίτερα όταν έχουμε να κάνουμε με θερμικώς καταπονημένα δοκίμια, αφού ακόμα και στο προτελευταίο στάδιο φόρτισης τα εντοπιζόμενα γεγονότα είναι ήδη αρκετά διευρυμένα δεξιά και αριστερά της μεσαίας διατομής και συνεχίζουν να εξαπλώνονται περαιτέρω καθώς περνάμε στο τελευταίο στάδιο φόρτισης. Λόγω αυτού είναι εμφανές ότι η θερμική καταπόνηση των δοκιμίων εντείνει σε μεγάλο βαθμό το φαινόμενο της αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος, επιφέροντας έναν πιο διατμητικό τύπο θραύσης, όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο Κεφάλαιο.

- Εγκάρσια όψη δοκιμίων
 - Μη θερμικώς καταπονημένα δοκίμια

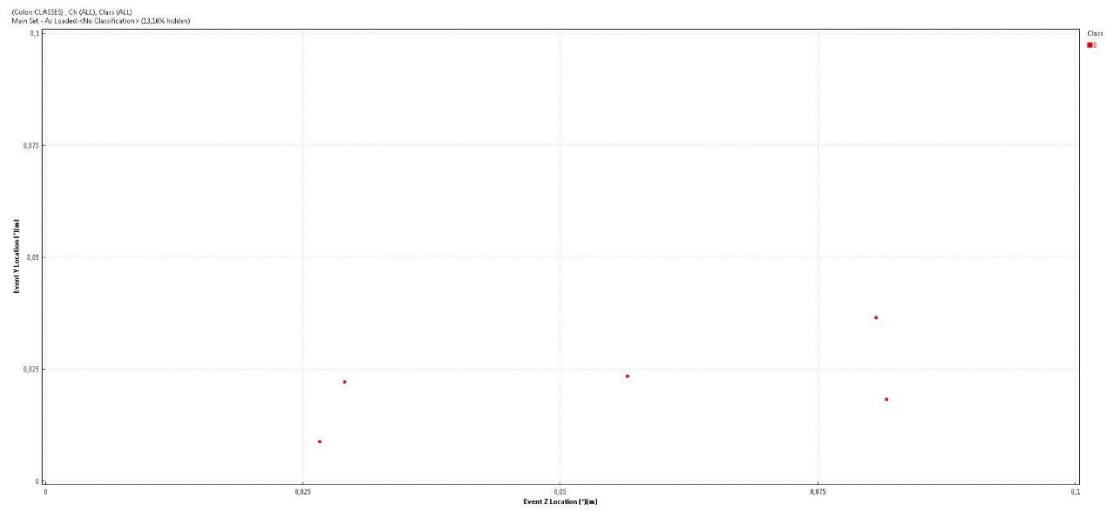


(a)

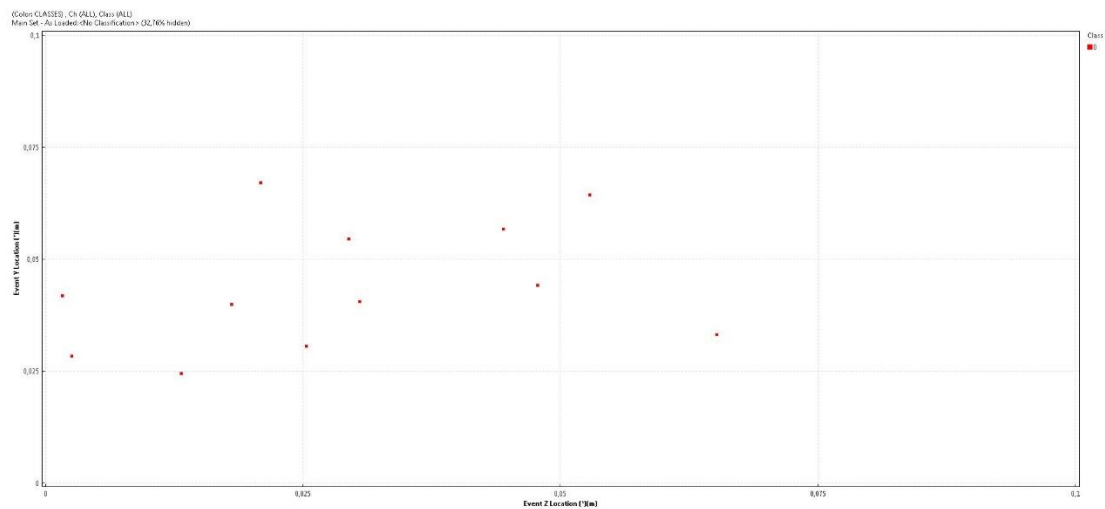


(β)

Σχήμα 5.7: Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **S-0.5**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.



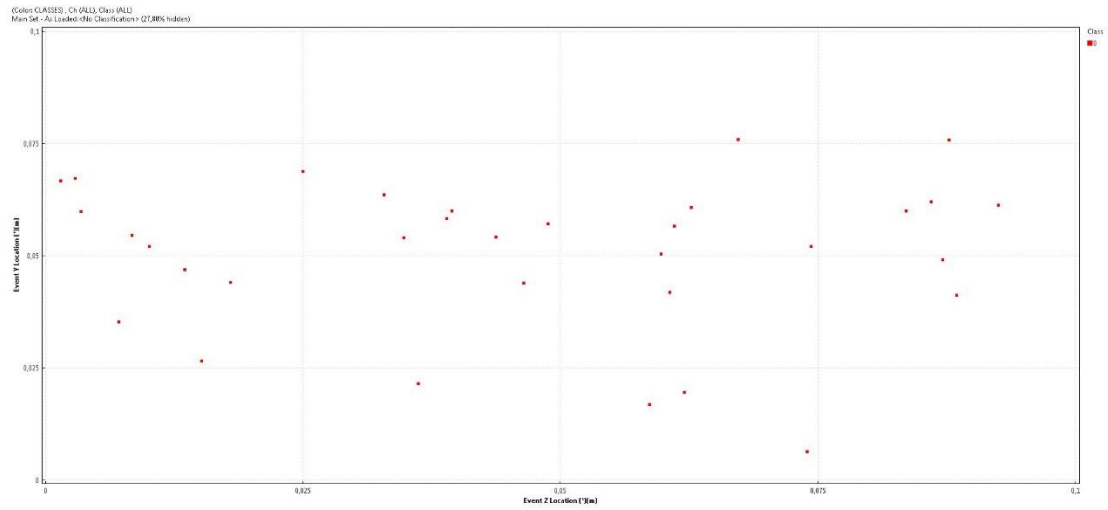
(α)



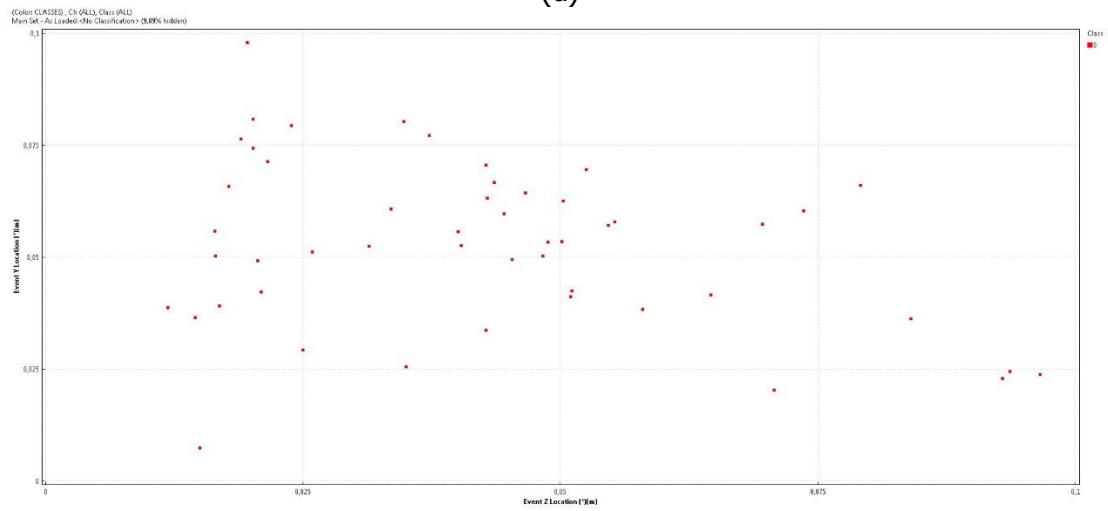
(β)

Σχήμα 5.8: Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **S-1**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

- Θερμικώς καταπονημένα δοκίμια

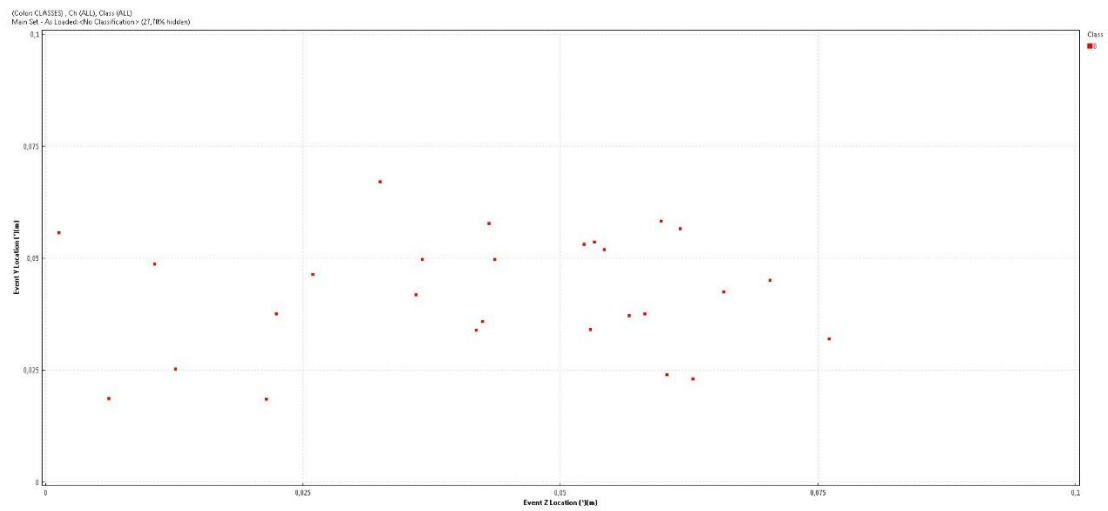


(α)

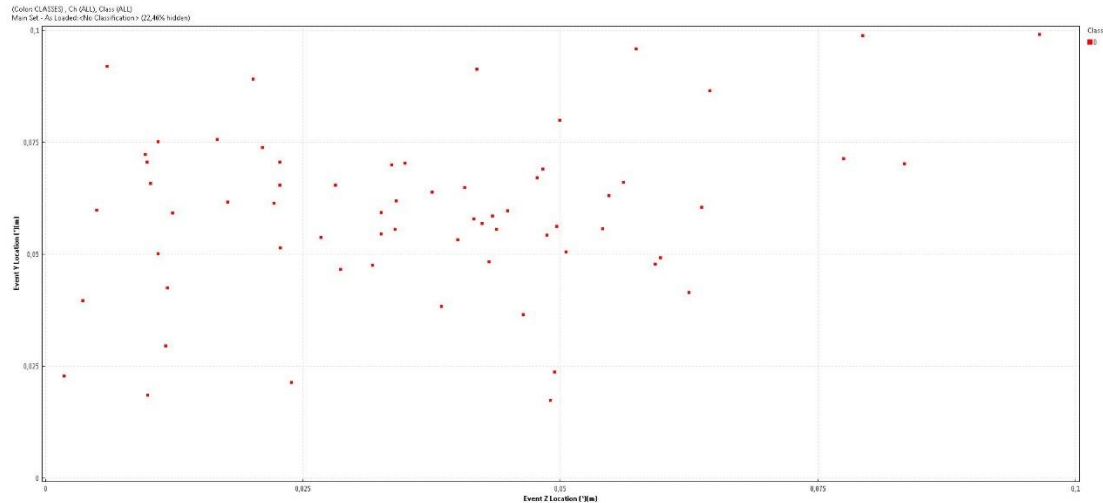


(β)

Σχήμα 5.9: Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **S-0.5**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.



(α)



(β)

Σχήμα 5.10: Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **S-1**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

Εδώ όπως και στην τριδιάστατη απεικόνιση των γεγονότων ΑΕ παρατηρείται κατά την μετάβαση στο τελευταίο στάδιο φόρτισης η τάση να εντοπίζονται τα γεγονότα ψηλότερα στο δοκίμιο και να αυξάνεται ο αριθμός τους, επιπρόσθετα παρατηρείται ότι γενικώς ο αριθμός των εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ αυξάνεται και όταν τα δοκίμια έχουν δεχθεί θερμική καταπόνηση.

5.3 Αποτίμηση αποτελεσμάτων

Για να πραγματοποιηθεί η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών σειρών δοκιμών εκτός από την απεικόνιση των εντοπιζόμενων θέσεων προέλευσης πηγών ΑΕ στις τρεις διαστάσεις και στην εγκάρσια όψη των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε και ο αριθμός των γεγονότων ΑΕ, τα οποία προέκυψαν μέσω του τριδιάστατου εντοπισμού. Συγκεκριμένα υπολογίστηκε ο μέσος όρος των γεγονότων ΑΕ για κάθε σειρά δοκιμών ανά τύπο δοκιμής (θερμικώς καταπονημένα δοκίμια ή μη) και ανά στάδιο φόρτισης, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.2 (οι εγκάρσιες όψεις των δοκιμών όπου απεικονίζονται τα εντοπιζόμενα γεγονότα ΑΕ, παρατίθενται αναλυτικότερα για κάθε σύνθεση δοκιμών ξεχωριστά στο παράρτημα).

Πίνακας 5.2: Μέσος όρος γεγονότων ΑΕ για κάθε σειρά δοκιμών.

P1-0.5						P2-0.5						S-0.5					
	0-50	50-90	90-95	Res	(+)300		0-50	50-90	90-95	Res	(+)300		0-50	50-90	90-95	Res	(+)300
AVERAGE	0	1	0	14	18	AVERAGE	2	2	0	54	467	AVERAGE	0	0	0	18	5
AVERAGE HOT	1	4	2	25	37	AVERAGE HOT	1	3	1	57	46	AVERAGE HOT	0	0	0	47	59
P1-1						P2-1						S-1					
	0-50	50-90	90-95	Res	(+)300		0-50	50-90	90-95	Res	(+)300		0-50	50-90	90-95	Res	(+)300
AVERAGE	2	1	1	14	36	AVERAGE	0	0	0	30	305	AVERAGE	0	0	0	6	12
AVERAGE HOT	1	4	2	7	25	AVERAGE HOT	2	2	1	46	19	AVERAGE HOT	3	1	1	39	80
HySP1						HySP2						HyP1P2					
	0-50	50-90	90-95	Res	(+)300		0-50	50-90	90-95	Res	(+)300		0-50	50-90	90-95	Res	(+)300
AVERAGE	0	2	0	22	20	AVERAGE	1	0	0	17	57	AVERAGE	0	0	0	30	92
AVERAGE HOT	0	1	3	54	96	AVERAGE HOT	0	3	1	52	53	AVERAGE HOT	0	1	0	30	15
						PLAIN											
	0-50	50-90	90-95	95-100-95	FULL												
AVERAGE	2	0	0	2	20												
AVERAGE HOT	0	1	0	2	112												

Από την απεικόνιση των εντοπιζόμενων θέσεων προέλευσης πηγών ΑΕ στις τρεις διαστάσεις και στην εγκάρσια όψη των δοκιμών και τον πίνακα 5.2, φαίνεται ότι ο κύριος όγκος των γεγονότων ΑΕ καταγράφηκε μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, δηλαδή στα δύο τελευταία στάδια φόρτισης. Κάτι τέτοιο είναι λογικό γιατί η κυρίως ρωγμάτωση συμβαίνει μετά το μέγιστο φορτίο, οπότε τα σήματα ΑΕ που παράγονται πριν από αυτό και οφείλονται σε μικρορωγμές είναι πολύ λίγα και καθιστούν δύσκολο τον εντοπισμό. Ιδιαίτερα μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής παρατηρήθηκε σχεδόν σε όλες τις συνθέσεις δοκιμών, με λίγες εξαιρέσεις ο μεγαλύτερος αριθμός εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ. Συγκεκριμένα οι εξαιρέσεις εντοπίζονται στα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια μικροϊνών πολυπροπυλενίου P2 και στην υβριδική σύνθεση ινών πολυπροπυλενίου HyP1P2, όπου το φαινόμενο εξηγείται διότι οι ίνες είχαν τηχθεί με αποτέλεσμα τα δοκίμια να αστοχήσουν γρηγορότερα από τα υπόλοιπα, γεγονός που επέφερε τη μη καταγραφή ικανού αριθμού σημάτων ΑΕ, τα οποία θα οδηγούσαν στον εντοπισμό γεγονότων. Οι ποσοστιαίες διαφορές στα εντοπιζόμενα γεγονότα ΑΕ μεταξύ του προτελευταίου και του τελευταίου σταδίου φόρτισης παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Ποσοστιαία διαφορά εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ κατά την μετάβαση από το προτελευταίο στο τελευταίο στάδιο φόρτισης.

Σύνθεση	Ποσοστιαία Διαφορά
P1-0.5	+29%
P1-0.5 HOT	+48%
P1-1	+157%
P1-1 HOT	+257%
P2-0.5	+765%
P2-0.5 HOT	-19%
P2-1	+917%
P2-1 HOT	-59%
S-0.5	-72%
S-0.5 HOT	+25%
S-1	+100%
S-1 HOT	+105%
HySP1	-9%
HySP1 HOT	+78%
HySP2	+235%
HySP2 HOT	+2%

Hyp1P2	+207%
Hyp1P2 HOT	-50%

Επίσης μεγάλος όγκος και των μακροϊών πολυπροπυλενίου P1 είχε τηχθεί, παρόλα αυτά ακόμα και στα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια παρατηρήθηκε η αύξηση των εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής. Αυτή η συμπεριφορά καταδεικνύει ότι ναι μεν ένα μέρος των γεγονότων οφείλεται στην ενεργοποίηση των ινών και στην παραγωγή σημάτων ΑΕ, λόγω θραύσης ή εξόλκευσής τους, όμως ένα σημαντικό μέρος φαίνεται να οφείλεται στην τριβή των κόκκων του σκυροδέματος λόγω αποδιοργάνωσης ακόμα και μετά την αστοχία του. Η καύση δείχνει να εντείνει σε μεγάλο βαθμό το φαινόμενο, αφού στις συνθέσεις δοκιμίων με ίνες χάλυβα (S-0.5 και S-1), όπου οι ίνες παραμένουν άθικτες μετά τη θερμική καταπόνηση, έχουμε ραγδαία αύξηση των γεγονότων ΑΕ μεταξύ των θερμικά καταπονημένων δοκιμίων και εκείνων που δεν έχουν υποστεί κάποιου είδους θερμική κατεργασία. Συγκεκριμένα για τη σύνθεση S-0.5 παρατηρήθηκε αύξηση της τάξης του 161% για το στάδιο φόρτισης έως και την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής και 1080% αύξηση για το στάδιο φόρτισης μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής. Τα ποσοστά αύξησης μεταξύ θερμικά κατεργασμένων δοκιμίων και μη για τη σύνθεση S-1 ανέρχονται σε 550% και 567% για τα αντίστοιχα στάδια φόρτισης. Η ίδια συμπεριφορά παρατηρήθηκε και στα στις υπόλοιπες συνθέσεις δοκιμίων, εκτός από τα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια μικροϊών πολυπροπυλενίου P2 και την υβριδική σύνθεση ινών πολυπροπυλενίου Hyp1P2, όπου όπως αναλύθηκε η τήξη των ινών ήταν σε τέτοιο βαθμό που οδήγησε στην πολύ γρήγορη αστοχία των δοκιμίων. Αναλυτικότερα οι ποσοστιαίες διαφορές στα εντοπιζόμενα γεγονότα ΑΕ μεταξύ των δοκιμών σε συνθήκες περιβάλλοντος και αυτών σε υψηλή θερμοκρασία παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

Πίνακας 5.4: Ποσοστιαίες διαφορές εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ κατά την μετάβαση σε δοκιμή θερμικώς καταπονημένων δοκιμίων.

Σύνθεση	Ποσοστιαία Διαφορά	
	Res	+300
P1-0.5	+79%	+106%
P1-1	-50%	-31%
P2-0.5	+6%	-90%
P2-1	+53%	-94%

S-0.5	+161%	+1080%
S-1	+550%	+567%
HγSP1	+145%	+380%
HγSP2	+206%	-7%
HγP1P2	0%	-84%

Όσον αφορά τις συνθέσεις ξεχωριστά, τα περισσότερα με διαφορά γεγονότα ΑΕ, στα μη θερμικώς καταπονημένα δοκίμια εντοπίστηκαν στις συνθέσεις μικροϊνών πολυπροπυλενίου P2. Φαίνεται ότι η υπερβολικά μικρή διατομή τους σε συνδυασμό με τη μικρότερη συγκριτικά εφελκυστική αντοχή και το αυξημένο πλήθος οδήγησαν στην παραγωγή μεγάλου αριθμού σημάτων ΑΕ, τόσο που στο στάδιο φόρτισης μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής είναι οι μοναδικές συνθέσεις που καταγράφεται τριψήφιος αριθμός γεγονότων. Αντίστοιχα τα λιγότερα γεγονότα ΑΕ εντοπίστηκαν στις συνθέσεις χαλύβδινων ινών S, όπου η μεγαλύτερη αντοχή και δυσκαμψία οδήγησαν σε μικρότερη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος, απέτρεψαν σε μεγάλο βαθμό την επέκταση και την αύξηση του ανοίγματος των μικρορωγμών και μείωσαν τις τριβές στη διεπιφάνεια σκυροδέματος – ίνας, εξ ου και τα πολύ λιγότερα γεγονότα ΑΕ. Σε πλήρη αντίθεση, στα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια οι συνθέσεις που περιέχουν χαλύβδινες ίνες (S, HγSP1, HγSP2) παρουσίασαν το μεγαλύτερο πλήθος γεγονότων ΑΕ. Αυτό συνέβη λόγω του ότι οι χαλύβδινες ίνες έμειναν άθικτες από την θερμική καταπόνηση και παρήγαγαν κανονικά γεγονότα ΑΕ εξαιτίας των εξορκεύσεων και επιπλέον επειδή προσέδωσαν στα δοκίμια ικανή παραμένουσα αντοχή ώστε η δοκιμή να διαρκέσει αρκετά και να δώσει γεγονότα ΑΕ λόγω αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος, πολύ μετά από την αστοχία των δοκιμίων. Η σύνθεση που έδωσε τα λιγότερα γεγονότα ΑΕ στα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια ήταν αυτή των μακροϊνών πολυπροπυλενίου P1.

Εν συνεχεία στις συνθέσεις δοκιμίων όπου έχει διπλασιαστεί το ποσοστό ινών, παρατηρήθηκε ότι τα εντοπιζόμενα γεγονότα ΑΕ για τα στάδια φόρτισης έως και την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής και μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής έχουν την τάση να μειώνονται και στα απλά, αλλά και στα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια. Η εξήγηση μπορεί ίσως να δοθεί από το γεγονός ότι παρόλο που η ύπαρξη και άρα η αστοχία περισσότερων ινών αναμένεται να δώσει περισσότερα σήματα ΑΕ, η αύξηση των ινών αποτρέπει την έντονη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος ακόμα και μετά την αστοχία του και δεν επιτρέπει την υπερβολική αύξηση του ανοίγματος των μικρορωγμών, πράγμα που θα οδηγούσε σε αυξημένο

αριθμό θραύσεων και εξολκεύσεων ινών. Κατ' αυτό τον τρόπο μειώνονται τα συνολικά σήματα ΑΕ. Βέβαια η μείωση των σημάτων στα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια των συνθέσεων με ίνες πολυπροπυλενίου δεν ερμηνεύεται με τον ίδιο τρόπο (αφού οι ίνες είχαν τηχθεί οπότε δεν βοήθησαν στην ελάττωση της αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος), αλλά στο γεγονός ότι τα εν λόγω δοκίμια συμπεριφέρθηκαν σχεδόν ως άοπλα με αποτέλεσμα την πολύ γρήγορη και έντονη αστοχία τους και την απουσία καταγραφής επαρκών σημάτων ΑΕ. Εξαιρεση αποτελούν τα δοκίμια των συνθέσεων χαλύβδινων ινών στο στάδιο μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής όπου τα σήματα αυξάνονται. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο γεγονός ότι με τη θερμική καταπόνηση οι χαλύβδινες ίνες παραμένουν άθικτες οπότε μετά την αστοχία του σκυροδέματος ο διπλασιασμός της ποσότητάς τους συνεισφέρει σε επιπλέον σήματα ΑΕ. Αναλυτικότερα οι διαφορές στα ποσοστά εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ μεταξύ των συνθέσεων με 0.5% και 1% κ.ό. με έναν τύπο ίνας στα δύο τελευταία στάδια φόρτισης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.5.

Πίνακας 5.5: Ποσοστιαίες διαφορές εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ κατά τον διπλασιασμό της ποσότητας των ινών.

<i>Σύνθεση</i>	<i>Ποσοστιαία Διαφορά</i>	
	<i>Res</i>	<i>+300</i>
<i>P1</i>	0	+100%
<i>P1 HOT</i>	-72%	-32%
<i>P2</i>	-44%	-35%
<i>P2 HOT</i>	-19%	-59%
<i>S</i>	-67%	+140%
<i>S HOT</i>	-17%	+36%

Αναφορικά με τα δοκίμια άοπλου σκυροδέματος, φαίνεται ότι δεν μπορούν να προκύψουν ιδιαίτερα συμπεράσματα εφόσον η αστοχία τους συντελείται τόσο σύντομα και τα σήματα ΑΕ που καταγράφονται είναι ελάχιστα. Παρατηρήθηκε επίσης, ότι ο κύριος όγκος των σημάτων καταγράφεται μετά την πλήρη αστοχία τους πράγμα που σημαίνει ότι οφείλονται στις τριβές των κόκκων, λόγω αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος. Αυτό που μπορεί να επισημανθεί είναι ότι όπως και στις άλλες συνθέσεις η θερμική καταπόνηση αυξάνει την αποδιοργάνωση του σκυροδέματος σε τέτοιο βαθμό, γεγονός το οποίο είναι παρατηρήσιμο μετά από την επίτευξη του μέγιστου φορτίου και την πλήρη αστοχία του δοκιμίου, αφού τότε παρουσιάζεται η ραγδαία αύξηση των εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ.

Η παρατήρηση αυτή αφορά και τις υπόλοιπες συνθέσεις δοκιμών αφού μας δείχνει ότι η θερμική καταπόνηση ουσιαστικά αλλάζει κατά κάποιο τρόπο τον τύπο αστοχίας των δοκιμών επηρεάζοντας το πλήθος των παραγόμενων μικρορωγματώσεων και κάνοντας τον τύπο θραύσης πιο διατμητικό.

Τέλος όσον αφορά τις υβριδικές συνθέσεις δοκιμών, οι συνθέσεις που περιείχαν και χαλύβδινες ίνες (HySP1, HySP2), στις δοκιμές που έχει προϋπάρξει θερμική καταπόνηση η συμπεριφορά τους προσομοιάζει, όπως είναι απολύτως λογικό, αυτή των δοκιμών με χαλύβδινες ίνες S (τήξη ινών πολυπροπυλενίου). Στις δοκιμές που δεν έχει προηγηθεί θερμική καταπόνηση οι συνθέσεις αυτές έχουν μια πιο ουδέτερη συμπεριφορά, η οποία μοιράζεται χαρακτηριστικά και από τις συνθέσεις με τις χαλύβδινες ίνες S και από αυτές με τις ίνες πολυπροπυλενίου (P1, P2). Αντίστοιχα και η υβριδική σύνθεση με μόνο ίνες πολυπροπυλενίου (HyP1P2) μοιράζεται χαρακτηριστικά από τους δύο τύπους ινών P1 και P2. Το γεγονός που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ότι, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.6 στις υβριδικές συνθέσεις όπου υπάρχουν μικροΐνες πολυπροπυλενίου (HySP2, HyP1P2) τα μη θερμικώς καταπονημένα δοκίμια έδωσαν αισθητά λιγότερα γεγονότα ΑΕ από ότι τα αντίστοιχα που είχαν μόνο μικροΐνες πολυπροπυλενίου P2, στα οποία είχε καταγραφεί με διαφορά ο μεγαλύτερος αριθμός γεγονότων.

Πίνακας 5.6: Ποσοστιαίες διαφορές εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ σε σύγκριση με την σύνθεση μικροϊνών πολυπροπυλενίου P2-0.5.

Σύνθεση	Ποσοστιαία Διαφορά	
	Res	+300
HySP2	-69%	-88%
HyP1P2	-44%	-80%

Αυτό δείχνει ότι τόσο οι μακροΐνες πολυπροπυλενίου όσο και οι χαλύβδινες σε συνδυασμό με το συνολικό αυξημένο ποσοστό ινών κ.ό. συνέβαλαν στη μείωση του ανοίγματος των μικρορωγμών, τόσο ώστε και απέτρεψαν σε μεγάλο βαθμό την αποδιοργάνωση του σκυροδέματος κατά το στάδιο φόρτισης έως και την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής, αλλά και εμπόδισαν επιπλέον την αύξηση του ανοίγματος των μικρορωγμών σε μεγάλο ποσοστό, μειώνοντας τη θραύση των μικροϊνών πολυπροπυλενίου που είχε οδηγήσει στον εντοπισμό τόσο μεγάλου πλήθους γεγονότων ΑΕ στο στάδιο φόρτισης μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:

Ταξινόμηση ρωγματώσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος βάση σημάτων Ακουστικής Εκπομπής

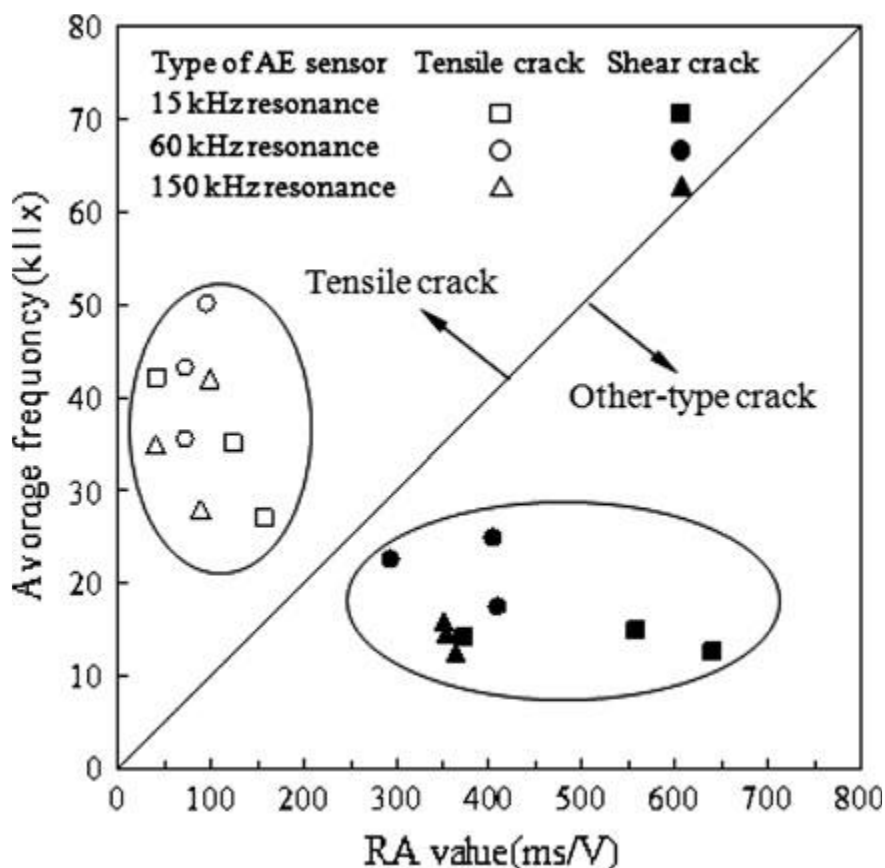
6.1 Παράμετροι AF (μέση συχνότητα) και RA (γωνία ανύψωσης)

Η μέση συχνότητα των σημάτων AE (Average Frequency – AF), ορίζεται ως ο μέσος όρος του αριθμού των περασμάτων του κύματος από το όριο καταγραφής (threshold) στη διάρκεια του σήματος και εκφράζεται σε KHz. Έχει αποδειχθεί ότι οι εφελκυστικές ρωγμές παράγουν σήματα με σχετικά μεγάλη συχνότητα, ενώ οι διατμητικές ρωγμές παράγουν σήματα χαμηλότερης συχνότητας. Στην περίπτωση μας, η λογική σειρά των γεγονότων ξεκινά με εφελκυστικές ρωγμές, οι οποίες ξεκινούν από το κάτω μέρος του δοκιμίου, εξαιτίας των εφελκυστικών τάσεων που αναπτύσσονται λόγω επιβολής του καμπτικού φορτίου. Καθώς η ρωγμή εξαπλώνεται προς τα πάνω, εξαιτίας των ινών αρχίζουν να εκδηλώνονται διατμητικές ρωγμές. Με την ανάπτυξη του κυρίου δικτύου ρωγμών, οι εφελκυστικές ρωγμές (tensile type of crack) δίνουν την θέση τους σταδιακά στις διατμητικού τύπου ρωγμές (shear type of crack) που οφείλονται στην αποκόλληση των ινών και στη τριβή που αναπτύσσεται κατά την αποχώρηση των ινών από το σκυροδέμα. Αυτή η συμπεριφορά μοιάζει με το διατμητικό τύπο θραύσης και συνδέεται με χαμηλές μέσες συχνότητες.

Η «γωνία ανύψωσης» (Rise Angle – RA) ορίζεται ως ο λόγος του χρόνου ανύψωσης της κυματομορφής έως το μέγιστο πλάτος σε msec (Rise Time – RT) προς το μέγιστο πλάτος των σημάτων AE σε Volts (Amplitude-A). Το σχήμα των κυματομορφών AE συσχετίζεται με τον τύπο αστοχίας. Γεγονότα διάτμησης χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερο χρόνο ανύψωσης και συχνά από μεγαλύτερα πλάτη από ότι τα γεγονότα εφελκυσμού. Αυτό ακριβώς εξετάζεται και από την παράμετρο RA. Έχει αποδειχθεί ότι χαμηλότερες τιμές της παραμέτρου RA δείχνουν τη εφελκυστική φύση των γεγονότων θραύσης. Στην περίπτωση μας η διαδικασία θραύσης ξεκινά από το κάτω μέρος των δοκιμίων εξαιτίας του εφελκυσμού. Όμως διατμητικές τάσεις αναπτύσσονται κατά την οριζόντια διεύθυνση και ειδικότερα κατά τον ουδέτερο άξονα. Αυτές οι τάσεις συνδέονται με την δημιουργία διατμητικού τύπου ρωγμών και την αύξηση της παραμέτρου RA.

Σύμφωνα με τον Ohtsu (2010) η ταξινόμηση των τύπων θραύσεων με βάση τη συσχέτιση της μέσης συχνότητας των σημάτων και της τιμής RA ποικίλλει ως προς το

όριο διαχωρισμού των σημάτων. Προτείνεται η κλίμακα της τιμής RA να είναι δεκαπλάσια της κλίμακας AF χωρίς αυτό όμως να είναι δεσμευτικό. Αναφέρει επίσης ότι ο κατάλληλος λόγος διαφοροποιείται και προσδιορίζεται ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και το είδος της προς εξέταση κατασκευής. Εξάλλου ο ίδιος ερευνητής έχει χρησιμοποιήσει και την αντίστροφη σχέση κλιμάκων AF/RA ίση με 200-1 (Ohno & Ohtsu, 2010) για να κατηγοριοποιήσει τα σήματα σε δοκιμή κάμψης σκυροδέματος 4-σημείων.



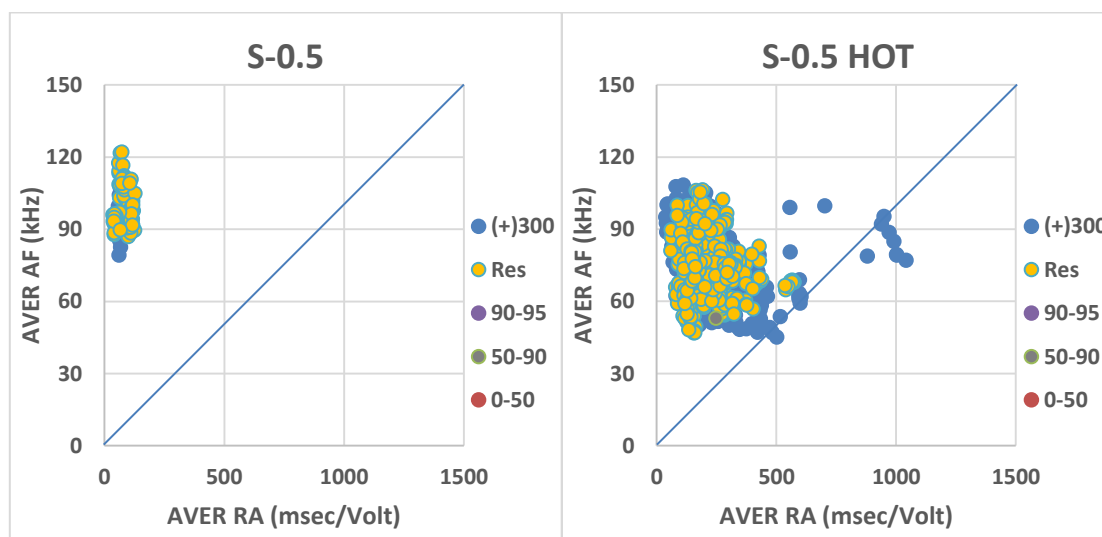
Σχήμα 6.1: Ταξινόμηση του τύπου αστοχίας μέσω παραμέτρων AE (Ohtsu, 2010).

6.2 Ταξινόμηση τύπου ρωγματώσεων με βάση τη συσχέτιση της μέσης συχνότητας των σημάτων και της τιμής RA

Με βάση μόνο τα σήματα AE που συμμετείχαν στον εντοπισμό γεγονότων πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση του τύπου των ρωγματώσεων που αναπτύχθηκαν στις προαναφερθείσες συνθέσεις πρισματικών δοκιμών ινοπλισμένου σκυροδέματος. Ο διαχωρισμός των σημάτων ανάλογα με το στάδιο φόρτισης κατά της διάρκεια του οποίου καταγράφηκαν διατηρήθηκε αυτούσιος, έτσι ώστε να υπάρχει καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων. Παρόλο που προτείνεται από τον Ohtsu (2010) τα διαγράμματα AF – RA να παραχθούν από τον κινούμενο μέσο όρο των αντίστοιχων

τιμών 50 σημάτων ΑΕ, στην παρούσα εργασία η χρήση και μελέτη, αποκλειστικά, σημάτων ΑΕ, τα οποία έχουν συμμετάσχει στον εντοπισμό γεγονότων, περιόρισε σημαντικά τον αριθμό τους και υπαγόρευσε την χρήση κινούμενου μέσου όρου τιμών 10 σημάτων ΑΕ. Ο λόγος των κλιμάκων AF/RA τέθηκε ίσος με 1-10 για την ανάλυση των χαρακτηριστικών των σημάτων. Ο λόγος αυτός επιλέχθηκε με βάση τα χαρακτηριστικά των σημάτων μέχρι το μέγιστο φορτίο, όπου κατά κανόνα έχουν χαρακτηριστικά εφελκυστικών αστοχιών και τυγχάνει να είναι ίδιος με αυτόν που προτάθηκε από τον Ohtsu (2010).

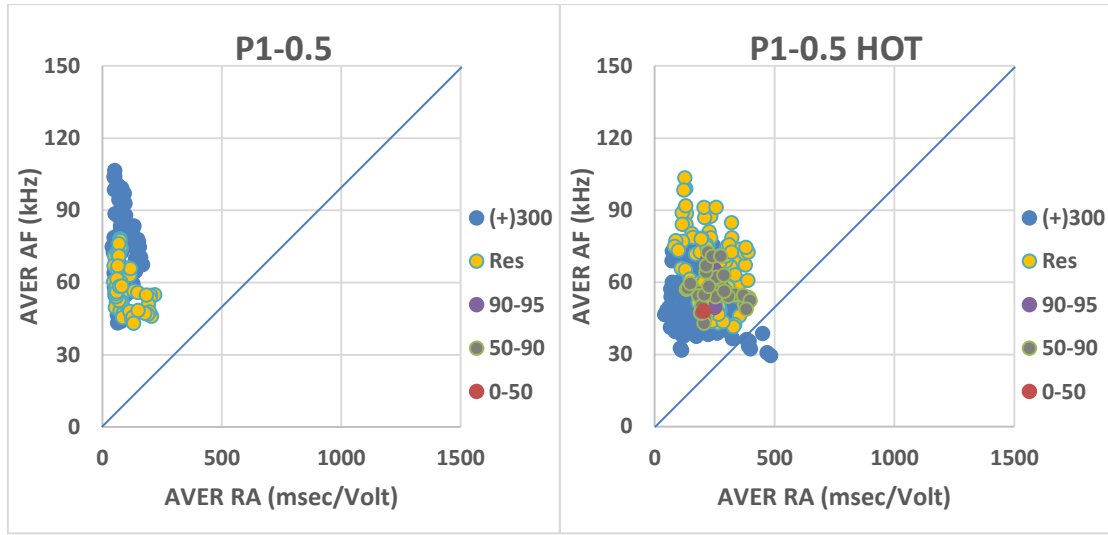
Στα Σχήματα 6.2 – 6.11 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα διαγράμματα μέσης συχνότητας των σημάτων (AF) συναρτήσει της τιμής RA με κινούμενους μέσους όρους 10 τιμών και αντιστοιχούν δύο σε κάθε διαφορετική σύνθεση δοκιμίων, όπου επιλέχτηκε ένα δοκίμιο δίχως θερμική καταπόνηση και ένα θερμικώς καταπονημένο δοκίμιο.



(α)

(β)

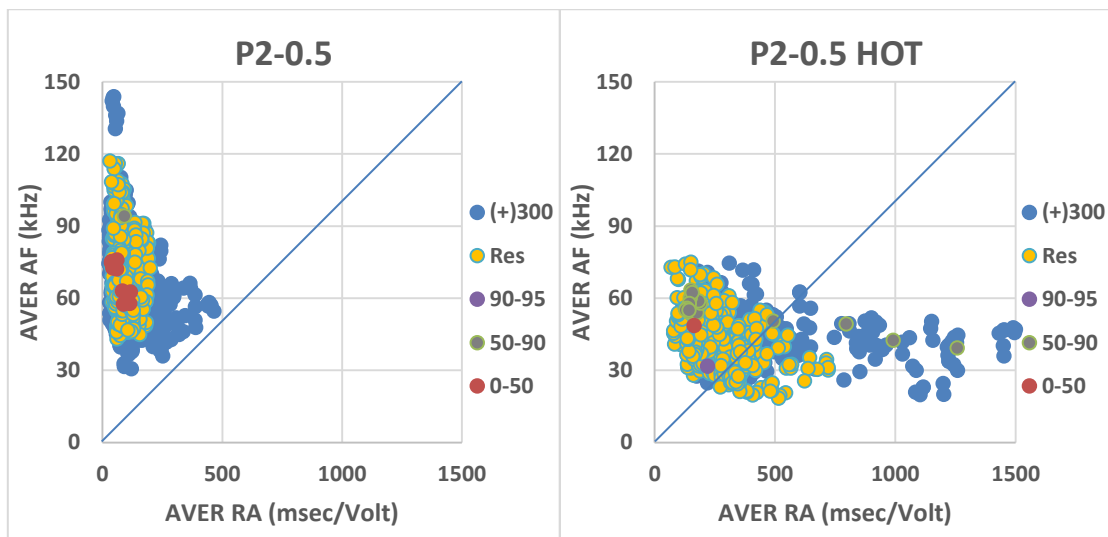
Σχήμα 6.2: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμίων **S-0.5**: α) **χωρίς** θερμική καταπόνηση β) **με** θερμική καταπόνηση.



(α)

(β)

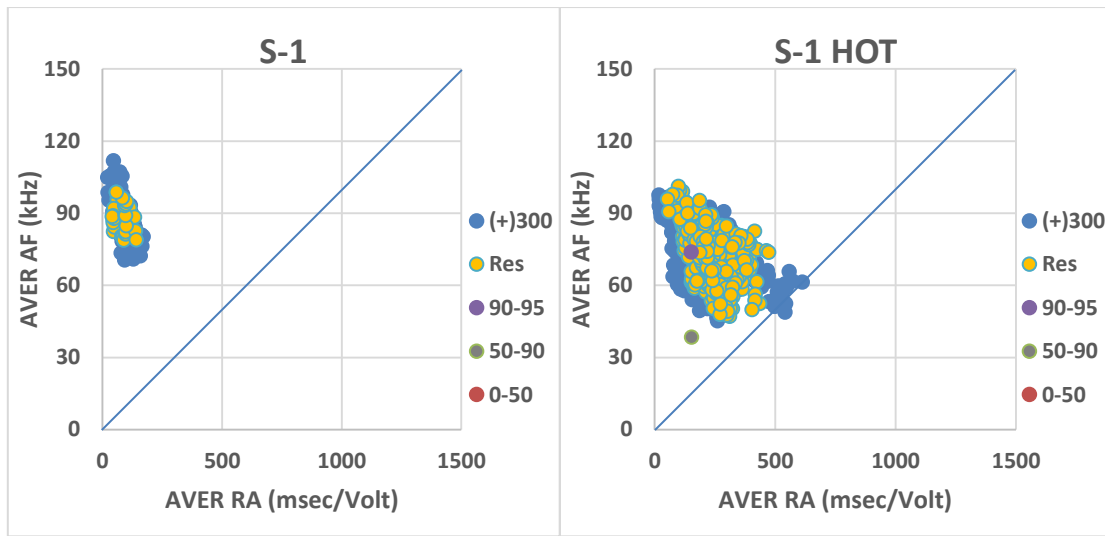
Σχήμα 6.3: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμών **P1-0.5**: α) **χωρίς** θερμική καταπόνηση β) **με** θερμική καταπόνηση.



(α)

(β)

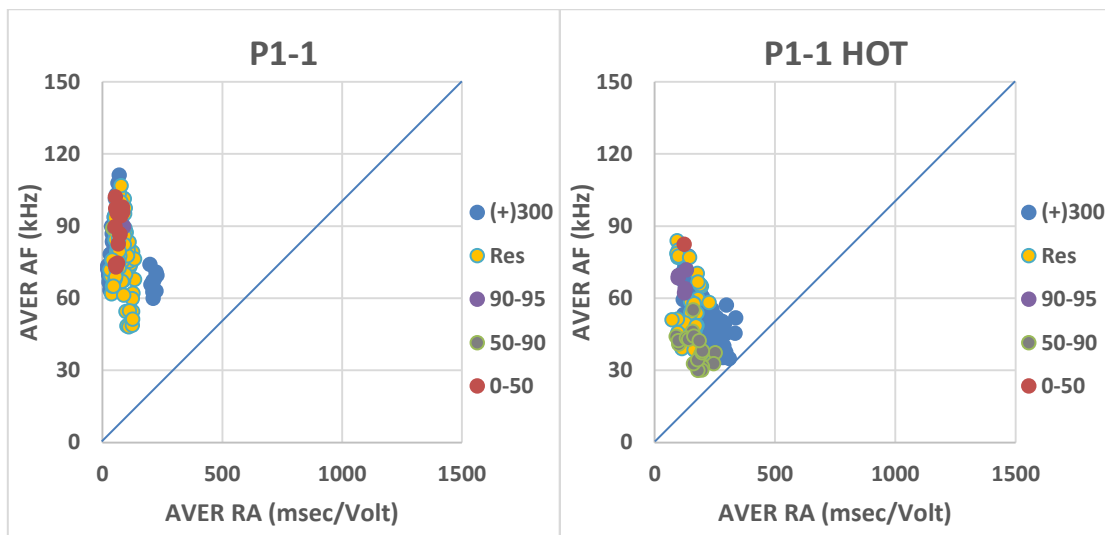
Σχήμα 6.4: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμών **P2-0.5**: α) **χωρίς** θερμική καταπόνηση β) **με** θερμική καταπόνηση.



(α)

(β)

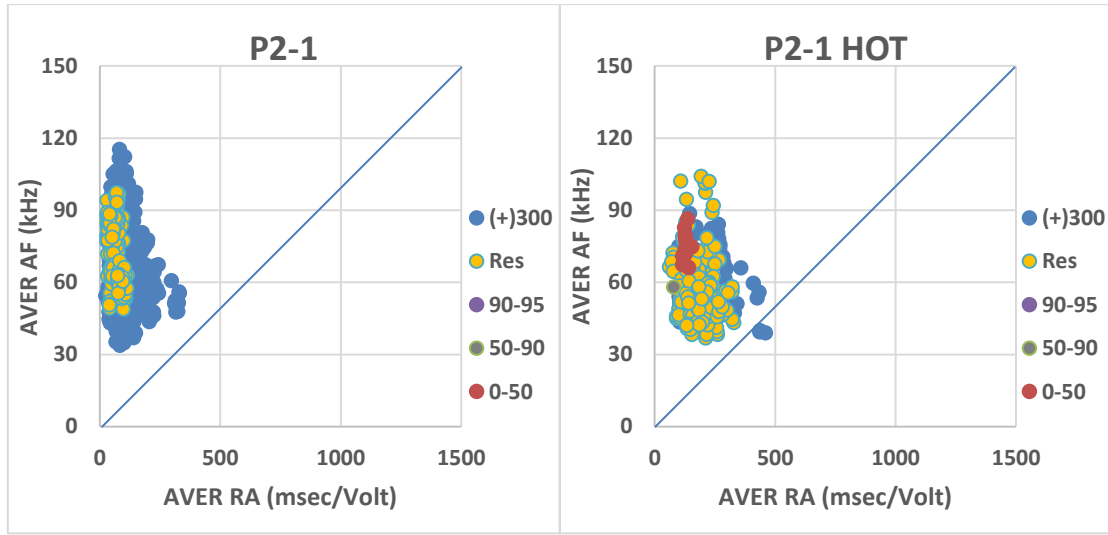
Σχήμα 6.5: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμών **S-1**: α) χωρίς θερμική καταπόνηση β) με θερμική καταπόνηση.



(α)

(β)

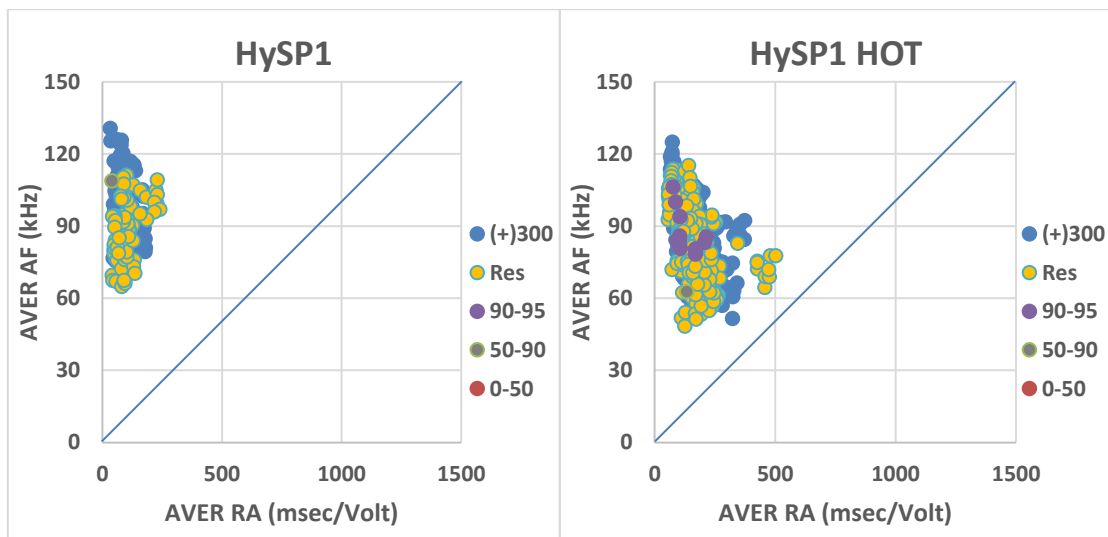
Σχήμα 6.6: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμών **P1-1**: α) χωρίς θερμική καταπόνηση β) με θερμική καταπόνηση.



(α)

(β)

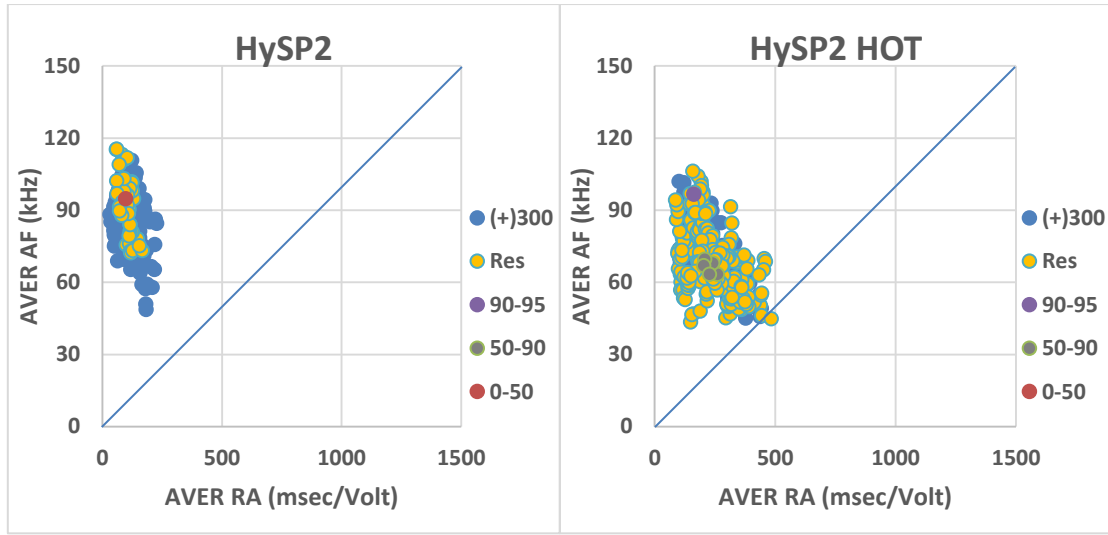
Σχήμα 6.7: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμών **P2-1**: α) χωρίς θερμική καταπόνηση β) με θερμική καταπόνηση.



(α)

(β)

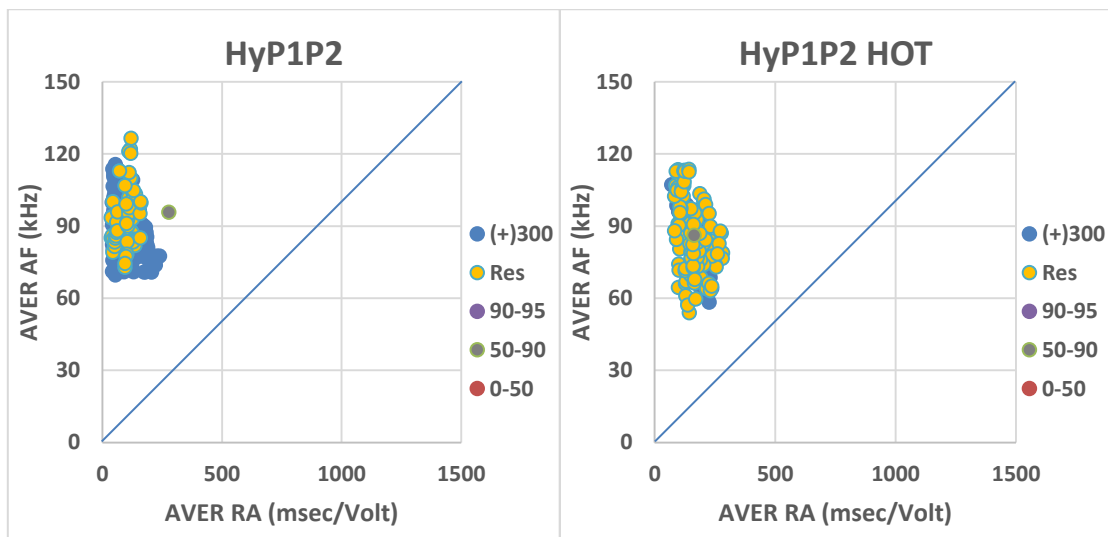
Σχήμα 6.8: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμών **HySP1**: α) χωρίς θερμική καταπόνηση β) με θερμική καταπόνηση.



(α)

(β)

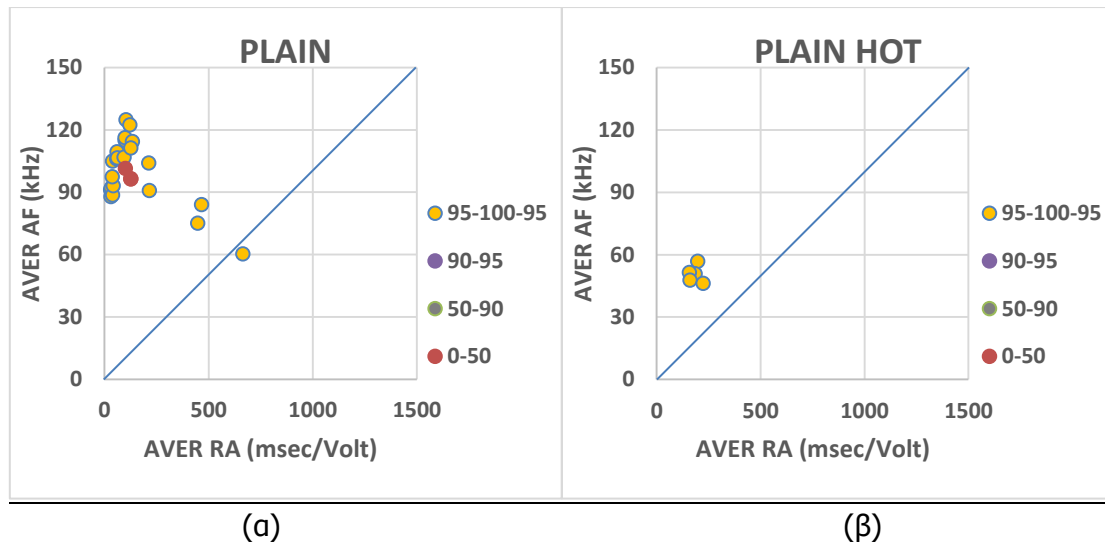
Σχήμα 6.9: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμών **HySP2**: α) **χωρίς** θερμική καταπόνηση β) **με** θερμική καταπόνηση.



(α)

(β)

Σχήμα 6.10: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμών **HyP1P2**: α) **χωρίς** θερμική καταπόνηση β) **με** θερμική καταπόνηση.



Σχήμα 6.11: Μέση συχνότητα (AF) προς την τιμή RA για τη σειρά δοκιμών **PLAIN**:
 α) χωρίς θερμική καταπόνηση β) με θερμική καταπόνηση.

6.3 Αποτίμηση αποτελεσμάτων

Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα της παραπάνω ενότητας τα εκπεμπόμενα σήματα ΑΕ στα πρώτα στάδια φόρτισης είναι ελάχιστα και σε πολλές περιπτώσεις ούτε καν υφίστανται, αφού όπως σχολιάστηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα εντοπιζόμενα γεγονότα ΑΕ σε αυτά τα στάδια φόρτισης είναι πολύ λίγα και αντιστοίχα και τα σήματα ΑΕ που συμμετέχουν στον εντοπισμό τους. Επιπλέον, με βάση το κατώφλι που έχει προκαθορισθεί και χωρίζει τα εφελκυστικά από τα διατμητικά σήματα, η πλειοψηφία των συνθέσεων παρουσιάζει μόνο εφελκυστικά σήματα ΑΕ με λίγες εξαιρέσεις, όπου και σε αυτές τα καθαρά διατμητικά σήματα είναι ελάχιστα. Κατάσταση η οποία εξηγείται απόλυτα από το γεγονός ότι μιλάμε για δοκιμές κάμψης που οδηγούν σε εφελκυστική αστοχία των δοκιμίων. Έχοντας αυτό υπόψη σχολιάζεται κυρίως το κατά πόσο τα σήματα ΑΕ πλησιάζουν αυτό το κατώφλι και τα χαρακτηριστικά τους αρχίζουν να τείνουν περισσότερο ή λιγότερο προς την διατμητικού τύπου θραύση, όσο δόκιμη μπορεί να θεωρηθεί η συγκεκριμένη έκφραση.

Αντίστοιχα με όσα έχουν αναφερθεί το πλήθος των σημάτων ΑΕ αυξάνεται αισθητά όταν έχουμε να κάνουμε με θερμικώς καταπονημένα δοκίμια, εκτός από τις περιπτώσεις των μικροϊνών πολυπροπυλενίου (P2) και της υβριδικής σύνθεσης ινών πολυπροπυλενίου (HyP1P2), που λόγω των τηγμένων ινών τα σήματα ΑΕ που καταγράφηκαν στο τελευταίο στάδιο φόρτισης, μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής (όπου τα σήματα των ινών λαμβάνουν πρωτεύοντα ρόλο), εμφάνισαν

ραγδαία μείωση. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά των σημμάτων ΑΕ στα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια υπάρχει η τάση να έχουν περισσότερο χαρακτηριστικά διατμητικών αστοχιών, γεγονός το οποίο πιθανώς να οφείλεται στις προϋπάρχουσες μικρορωγματώσεις που δημιουργήθηκαν λόγω έψησης και επομένως στις πολλαπλάσιες τριβές μεταξύ των κόκκων της χαλαρής πια μάζας του σκυροδέματος.

Γενικώς όσο προχωράει η δοκιμή κάμψης και μεταβαίνουμε από το ένα στάδιο φόρτισης στο επόμενο τα σήματα ΑΕ τείνουν να καταδεικνύουν διατμητικού τύπου ρωγματώσεις και για το λόγο αυτό όσα σήματα «περνούν» το προκαθορισμένο κατώφλι διαχωρισμού μεταξύ εφελκυσμού και διάτμησης ανήκουν συνήθως στο στάδιο φόρτισης μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής. Αυτό που συμβαίνει στο εν λόγω στάδιο είναι ότι μετά την αστοχία του σκυροδέματος καταγράφονται σήματα ΑΕ τα οποία οφείλονται σε τριβές, είτε λόγω αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος, είτε λόγω εξόλκευσης ινών (χαλύβδινες ίνες) και σε θραύση ινών (ίνες πολυπροπυλενίου).

Σχετικά με τον διπλασιασμό των ινών, στα δοκίμια χαλύβδινων ινών S παρατηρήθηκε μεταστροφή στο πλήθος των σημμάτων ΑΕ, αφού παράλληλα με την μείωση των σημμάτων στο στάδιο φόρτισης μέχρι και την παραμένουσα αντοχή, έχουμε και αύξηση των σημμάτων μετά την επίτευξή της. Η εξήγηση οφείλεται στο γεγονός ότι τα σήματα μετά την παραμένουσα οφείλονται στις παραπάνω εξολκεύσεις ινών και στο ότι ο αυξημένος όγκος τους μειώνει την ρωγμάτωση του σκυροδέματος πριν την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής, οδηγώντας αντίστοιχα στη μείωση των σημμάτων ΑΕ. Επίσης η αύξηση των ινών δείχνει να έχει ως αποτέλεσμα την τάση των σημμάτων να αποκτούν περισσότερο διατμητικά χαρακτηριστικά πιθανώς λόγω αύξησης των εξολκεύσεων. Αντιθέτως τα σήματα ΑΕ των δοκιμίων ινών πολυπροπυλενίου (P1, P2), φαίνεται να εμφανίζουν χαρακτηριστικά περισσότερο εφελκυστικού τύπου, αφού η αύξηση των ινών μειώνει την αποδιοργάνωση του σκυροδέματος και τις τριβές μεταξύ των κόκκων (διατμητικά σήματα), αλλά παράγει περισσότερα εφελκυστικά σήματα από τη θραύση των ινών (αύξηση του πλήθους τους).

Όσον αφορά τις διαφορετικές συνθέσεις των δοκιμίων, στην περίπτωση των ινών πολυπροπυλενίου φαίνεται ότι η αυξημένη ευκαμψία αυξάνει τις τριβές στη διεπιφάνεια ίνας και σκυροδέματος, με αποτέλεσμα, παρόλο που τα δοκίμια χαλύβδινων ινών χαρακτηρίζονται από εξολκεύσεις ινών, να εμφανίζουν τα σήματά

τους περισσότερο εφελκυστικά χαρακτηριστικά από τα αντίστοιχα των ιών πολυπροπυλενίου, αν και χαρακτηρίζονται από θραύσεις ιών.

Τέλος, οι υβριδικές συνθέσεις δοκιμών με μικροΐνες/μακροΐνες πολυπροπυλενίου και χαλύβδινες (HySP1, HySP2) τείνουν να εμφανίζουν παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτά των δοκιμών με χαλύβδινες ίνες S και η υβριδική σύνθεση με μικροΐνες και μακροΐνες πολυπροπυλενίου (HyP1P2) δείχνει να εμφανίζει χαρακτηριστικά παραπλήσια με αυτά της σύνθεση με μακροΐνες (P1).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7:

Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας την παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζονται παρακάτω συμπεράσματα που εξήχθησαν για τις διαφορετικές συνθέσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος με βάση τον τριδιάστατο εντοπισμό θέσεων των πηγών σημάτων ΑΕ και την ταξινόμηση των σημάτων ΑΕ σε εφελκυστικά και διατμητικά. Επιπλέον σχολιάζεται και συγκρίνεται η συμπεριφορά των δοκιμίων διαφορετικών συνθέσεων με τα αντίστοιχα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια.

7.1 Μη θερμικώς καταπονημένα δοκίμια

- Τα γεγονότα που εντοπίστηκαν προέρχονται κατά κύριο λόγο από σήματα ΑΕ τα οποία καταγράφηκαν μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου.
- Στη συντριπτική πλειοψηφία παρατηρήθηκε αύξηση των εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ στο στάδιο φόρτισης μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής.
- Το μεγαλύτερο πλήθος γεγονότων ΑΕ εντοπίστηκε στις συνθέσεις μικροϊνών πολυπροπυλενίου P2, ενώ το μικρότερο στις συνθέσεις χαλύβδινων ινών S.
- Ο διπλασιασμός των ινών απέφερε κυρίως μείωση των εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ, γεγονός που οφείλεται στον περιορισμό της αποδιοργάνωσης του σκυροδέματος, όπως επίσης και στη μείωση του ανοίγματος των μικρορωγμών.
- Οι υβριδικές συνθέσεις έτειναν να έχουν χαρακτηριστικά που προσομοιάζουν περισσότερο τις συνθέσεις χαλύβδινων ινών S, ενώ αξιοσημείωτη είναι η κατακόρυφη μείωση των γεγονότων ΑΕ ακόμα και στις συνθέσεις που περιέχουν μικροϊνες πολυπροπυλενίου σχετικά με ότι είχε καταγραφεί, όπου είχε χρησιμοποιηθεί μόνο ο συγκεκριμένος τύπος ίνας.
- Στη συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμίων τα σήματα ΑΕ καταδείκνυαν κυρίως εφελκυστικού τύπου θραύσεις.
- Όσο προχωράει η διαδικασία της δοκιμής θραύσης και μεταβαίνουμε από το ένα στάδιο φόρτισης στο επόμενο, τα σήματα ΑΕ είχαν την τάση να εμφανίζουν περισσότερο διατμητικά χαρακτηριστικά, καθώς ο μηχανισμός θραύσης μεταβάλλεται από εφελκυστικές μικρορωγμές σε ψαθυρές εμφανείς ρωγματώσεις και εξόλκευση ινών.

- Ο διπλασιασμός των ινών προσέδωσε περισσότερο διατμητικά χαρακτηριστικά στα σήματα ΑΕ των συνθέσεων με χαλύβδινες ίνες S, λόγω αύξησης των εξολκεύσεων, ενώ στις συνθέσεις με ίνες πολυπροπυλενίου (P1, P2) έχουμε αύξηση του εφελκυστικού τύπου θραύσεων, λόγω αύξησης του πλήθους των ινών που θραύονται.
- Παρόλο που οι συνθέσεις χαλύβδινων ινών S χαρακτηρίζονται από εξολκεύσεις ινών (διατμητικού τύπου αστοχία), ενώ οι συνθέσεις ινών πολυπροπυλενίου (P1, P2) χαρακτηρίζονται από θραύσεις ινών (εφελκυστικού τύπου αστοχία) η μεταξύ τους σύγκριση κατέδειξε ότι τα σήματα των συνθέσεων πολυπροπυλενίου πλησιάζουν περισσότερο την διατμητικού τύπου αστοχία, λόγω των αυξημένων τριβών στη διεπιφάνεια ίνας και σκυροδέματος που δημιουργεί η μεγαλύτερη ευκαμψία τους, εν σχέσει με τις χαλύβδινες.

7.1 Θερμικώς καταπονημένα δοκίμια

- Όπως και στις δοκιμές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και εδώ ο κύριος όγκος των σημάτων ΑΕ που συμμετείχαν στον εντοπισμό γεγονότων καταγράφηκε μετά την επίτευξη του μέγιστου φορτίου, παρόλα αυτά οι καταγραφές ήταν ελαφρώς αυξημένες και από τα αρχικά στάδια φόρτισης, επίσης παρατηρήθηκε τάση αύξησης των εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ στο τελευταίο στάδιο φόρτισης μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής.
- Παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση εντοπιζόμενων γεγονότων ΑΕ, εν σχέσει με τις δοκιμές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος σχεδόν σε όλες τις συνθέσεις, εκτός εκείνων οι οποίες περιείχαν μικροΐνες πολυπροπυλενίου (P2, HyP1P2) οι οποίες είχαν τηχθεί εντελώς και δεν έδωσαν καθόλου σήματα ΑΕ.
- Τα περισσότερα γεγονότα ΑΕ εντοπίστηκαν στις συνθέσεις οι οποίες περιείχαν χαλύβδινες ίνες (S, HySP1, HySP2) σε πλήρη μεταστροφή με τα αποτελέσματα των δοκιμών σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ τα λιγότερα εντοπίστηκαν στις συνθέσεις μακροϊνών πολυπροπυλενίου P1.
- Παρατηρήθηκε ότι η ζώνη ανάπτυξης ρωγματώσεων ήταν πολύ μεγαλύτερη σε πλάτος από ότι στα μη θερμικώς καταπονημένα δοκίμια ακόμη και σε στάδια φόρτισης πριν την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής, καταδεικνύοντας έντονη αποδιοργάνωση του σκυροδέματος λόγω έψησης.
- Αξιοσημείωτος είναι ο εντοπισμός σημαντικού αριθμού γεγονότων ΑΕ στο τελευταίο στάδιο φόρτισης μετά την επίτευξη της παραμένουσας αντοχής (στάδιο όπου τα σήματα ΑΕ παράγονται κατά κύριο λόγο από τις ίνες) ακόμα

- και σε συνθέσεις όπου οι ίνες είχαν τηχθεί εντελώς, πράγμα που σημαίνει ότι μεγάλο μέρος των σημάτων ΑΕ σε αυτό το στάδιο προέρχεται και από τριβές μεταξύ των κόκκων του σκυροδέματος, λόγω αποδιοργάνωσης.
- Αντίστοιχα με τις δοκιμές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και εδώ παρατηρήθηκε ότι ο διπλασιασμός των ινών μείωσε τα εντοπιζόμενα γεγονότα ΑΕ
 - Οι υβριδικές συνθέσεις στα θερμικώς καταπονημένα δοκίμια δείχνουν να υιοθετούν σχεδόν επακριβώς τη συμπεριφορά των συνθέσεων με χαλύβδινες ίνες S, αφού οι ίνες πολυπροπυλενίου έχουν τηχθεί, ενώ η υβριδική σύνθεση με μόνο ίνες πολυπροπυλενίου HyP1P2 έδωσε πολύ λίγα γεγονότα ΑΕ, τα οποία οφείλονται κυρίως στην αποδιοργάνωση του σκυροδέματος, αφού η τήξη των ινών οδήγησε στη γρήγορη αστοχία των δοκιμίων.
 - Τα σήματα ΑΕ των θερμικώς καταπονημένων δοκιμίων παρουσίασαν περισσότερο διατμητικά χαρακτηριστικά από τα αντίστοιχα των μη καταπονημένων δοκιμίων, λόγω προϋπαρχουσών μικρορωγματώσεων που προκλήθηκαν από την έψηση, πολλαπλασιάζοντας τις τριβές της χαλαρής πια μάζας του σκυροδέματος.
 - Σε αντιστοιχία με τις δοκιμές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και εδώ όσο προχωράει η δοκιμή κάμψης τα σήματα ΑΕ τείνουν να αποκτούν διατμητικά χαρακτηριστικά.
 - Όμοια συμπεριφορά με τα μη θερμικώς καταπονημένα δοκίμια παρουσιάζεται όσον αφορά το διπλασιασμό των ινών και τον τύπο αστοχίας, με τις συνθέσεις χαλύβδινων ινών S να παρουσιάζουν σήματα ΑΕ με χαρακτηριστικά περισσότερο διατμητικά εν αντιθέσει με τις συνθέσεις ινών πολυπροπυλενίου (P1, P2) που παρουσίασαν χαρακτηριστικά περισσότερο εφελκυστικά.

7.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Με την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε προσπάθεια να εξακριβωθούν και να διερευνηθούν βαθύτερα έννοιες και συμπεριφορές που αφορούν την καμπτική αστοχία του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Παρόλα αυτά αυτό που πέτυχε, ίσως σε μεγαλύτερο βαθμό, είναι να δημιουργήσει νέα και πιο πολύπλοκα ερωτήματα. Απόπειρες για την περαιτέρω διαλεύκανση των συγκεκριμένων ερωτημάτων θα μπορούσαν να βασιστούν σε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την παρούσα διπλωματική εργασία με τα αντίστοιχα που θα παράγονταν μέσω χρήσης ανάλυσης SiGMA, ώστε να υπάρξει ένα είδος επαλήθευσης

και να ποσοτικοποιηθούν οι αποκλίσεις κάθε μεθόδου, οδηγώντας σε επιλογή της βέλτιστης μεθόδου ταξινόμησης σημάτων ΑΕ. Επιπλέον για την απόλυτη διασφάλιση των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης, συστήνεται η εκπόνηση πειραμάτων με εξολκεύσεις ινών, με στόχο τη δημιουργία προτύπου βάσει του οποίου θα γίνει ευκολότερη και πιο αξιόπιστη η ταξινόμηση των σημάτων ΑΕ και θα οδηγήσει σε μια πιο ξεκάθαρη εικόνα πλέον για τους τύπους θραύσης που συμβαίνουν στο δοκίμιο. Τέλος προτείνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που θα προκύπταν από δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια με συμβατικό οπλισμό πλέον, ώστε να εξακριβωθεί σε τι βαθμό οι ίνες επηρεάζουν και διαφοροποιούν το μηχανισμό θραύσης εν σχέσει με τον οπλισμό συνεχών ράβδων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ACI Committee 506R. (1990). Guide to Shotcrete.
- ACI Committee 544.4R. (1988). Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete.
- Anderson, T. L. (2012). Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. Taylor & Francis Group (Vol. 58). doi:10.1016/j.jmps.2010.02.008
- ArcelorMittal. (2008). Steel fibres Shotcrete applications, WireSolutions.
- Armelin, H.S., & Banthia, N. (1997). Predicting the Flexural Postcracking Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete from the Pullout of Single Fibers, *Materials Journal*, 94, 1, 18-31.
- ASTM C 136-01. (2001). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Am. Soc. Test. Mater. 4.
- ASTM C 1550. (2003a). Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete.
- ASTM C 39/C 39M-03. (2003). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. Am. Soc. Test. Mater. 4.
- ASTM C 469-02. (2002). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete. Am. Soc. Test. Mater. 4.
- ASTM C 496M-02. (2002). C496-96 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete. Am. Soc. Test. Mater. 4.
- ASTM C 702-03. (2003). Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size. Am. Soc. Test. Mater. 4.
- ASTM E1316. (2003). Standard Terminology for Nondestructive Examinations.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2006). Fibre Reinforced Cementitious Composites. CRC Press.

- BHP. (1996). FIBRESTEEL, Technical Manual.
- BISFA. (2009). Terminology of man-made fibers, Bruxelles.
- Carlos, M. F. (2003). Acoustic Emission, Heeding the Warning Sounds from Materials, ASTM Standardization News, Physical Acoustics Corporation, Princeton N.J.
- Chanh, N. V. (2001). Steel fiber reinforced concrete, 8-Vietnam Joint Seminar.
- Chen, W. F. (1969). Double punch test for tensile strength of concrete, Sept. 1969 (70-18) PB224770/AS (NTIS), Fritz Laboratory Reports. doi:(70-18) PB224770/AS (NTIS)
- Ding, Y., Azevedo, C., Aguiar, J. B., & Jalali, S. (2012). Study on residual behaviour and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self compacting high performance concrete after exposure to high temperature. *Construction and Building Materials*, 26(1), 21–31. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.058
- EN 12390-5:2000. (2000). Testing hardened concrete-Part 5: Flexural strength of test specimens.
- EN 14651:2005+A1:2007. (2007). Test method for metallic fibered concrete- Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).
- Hardy, H. R. Jr. (2003). *Acoustic Emission/Microseismic Activity, Principles, Techniques and Geotechnical Applications, Vol. 1*, the Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, USA, A.A. Balkema Publishers.
- Hertz, K. D. (2003). Limits of spalling of fire-exposed concrete. *Fire Safety Journal*, 38(2), 103–116. doi:10.1016/S0379-7112(02)00051-6
- Ichikawa, Y., & England, G. L. (2004). Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures. In *Nuclear Engineering and Design* (Vol. 228, pp. 245–259). doi:10.1016/j.nucengdes.2003.06.011

- Keyter, G., & Drescher, K. (2001). Test results on compressive strength anisotropy in steel fibre reinforced shotcrete, *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, 183-187, July.
- Khoury, G. A. (2000). Concrete Spalling Review. *Design*, (June), 60. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Klingsch, E. W. H. (2014). Explosive spalling of prestressed concrete in fire. *Explos. Spalling Concr. Fire*.
- Lockner, D. (1993). The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 30(7), 883–899. doi:10.1016/0148-9062(93)90041-B
- Maidl, B. (1995). *Steel Fibre Reinforced Concrete*. Ernst & Sohn, Berlin.
- Melbye, T. (2001). *Sprayed Concrete for Rock Support*, 9th ed. Master Builders Technologies, Zurich.
- Ohno, K., & Ohtsu, M. (2010). Crack classification in concrete based on acoustic emission. *Construction and Building Materials*, 24(12), 2339–2346. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.05.004
- Ohtsu, M. (2010). Recommendation of RILEM TC 212-ACD: acoustic emission and related NDE techniques for crack detection and damage evaluation in concrete*. *Materials and Structures*, 43(9), 1187–1189. doi:10.1617/s11527-010-9640-6
- Pollock, A. A. (1989). Acoustic Emission Inspection, *Metals Handbook*, Ninth Edition, Vol. 17, pp 278-294, ASM International.
- Romualdi, J. P., & Batson, G. B. (1963). Mechanics of Crack Arrest in Concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 89(3), 147–168.
- Schorn, H. (2001). Classification of Steel fiber reinforced shotcretes according to recent European standards, pp. 225-29, *Proc. Intrn. Conf. on Engineering Developments in Shotcrete*, Australia.

- SIKA. (2007). Εγχειρίδιο τεχνολογίας σκυροδέματος, SIKA.
- SIKA. (2013a). SikaFiber PP-540/52.
- SIKA. (2013b). SikaFibers.
- SIKA. (2014a). Sikafume HR-D.
- SIKA. (2014b). Sika Viscocrete Techno-40.
- UNE 83515. (2010). Fibre reinforced concrete. Determination of cracking strength, ductility and residual tensile strength. Barcelona test. Asoc. Española Norm. y Certificación Madrid.
- Vandewalle, M. (1993). Tunnelling The World, Bekaert S.A., Belgium.
- Vandewalle, M. (2005). Tunnelling is an Art, Bekaert SA, Belgium.
- Wong, C. M. (2004). Use of Short Fibres in Structural Concrete to Enhance Mechanical Properties. In faculty of engineering and surveying (p. 182).
- Zollo, R. F. (1997). Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 107–122. doi:10.1016/S0958-9465(96)00046-7
- Κατσιογιάννη, Π. (2004). Ινοπλισμένο Εκτοξευόμενο Σκυρόδεμα – Εφαρμογές στην Ελλάδα, Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχ. Μεταλλείων Μεταλλουργών, 2004.
- Κυπριωτάκη, Α. (2012). Εργαστηριακές εφαρμογές ακουστικής εκπομπής σε δοκίμια άοπλου & ινοπλισμένου σκυροδέματος. Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ΠΕΤΕΠ. (2005). Προσωρινές Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές για το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, Ι.Ο.Κ., 1η έκδοση.
- Σακκάς, Κ. (2014). Προστασία των μέτρων στήριξης σηράγγων από πυρκαγιά. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- ΣΙΔΕΝΟΡ. (2016). Ίνες INOMIX.

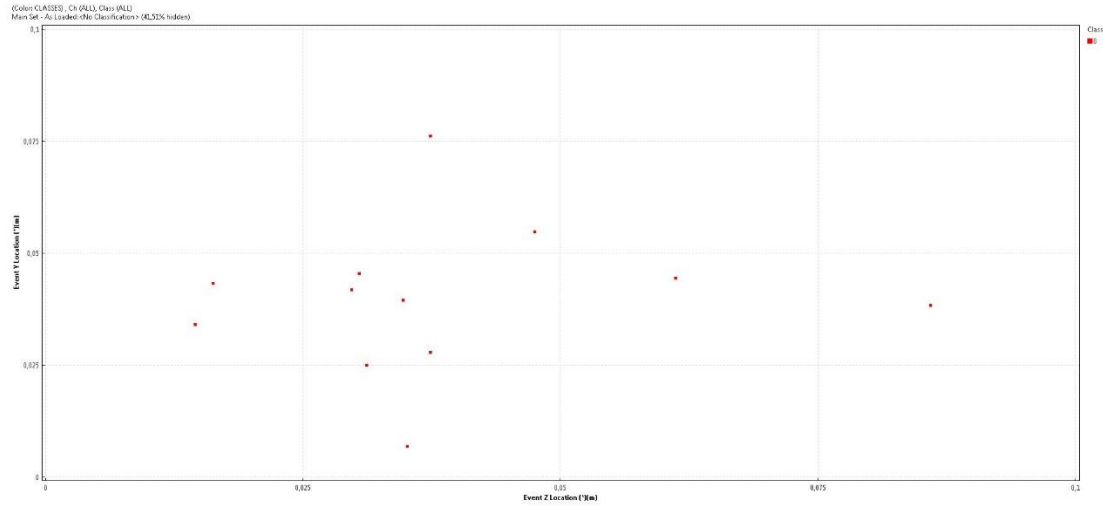
Σοφιανός, Α. (2016). Ινοπλισμένο εκτοξευμένο σκυρόδεμα, in: Μέτρα Στήριξης Σηράγγων. pp. 1–45.

Χουμανίδης, Δ. (2016). Πειραματική και θεωρητική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς ινοπλισμένου σκυροδέματος. Διδακτορική διατριβή. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

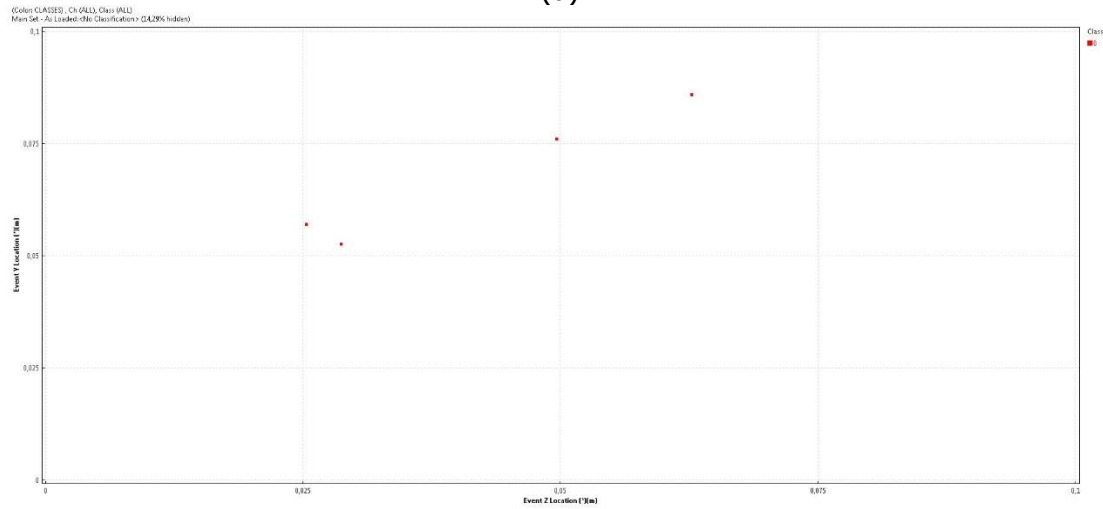
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Εντοπιζόμενες θέσεις προέλευσης πηγών ΑΕ στην εγκάρσια όψη των δοκιμών

- Μη θερμικώς καταπονημένα δοκίμια

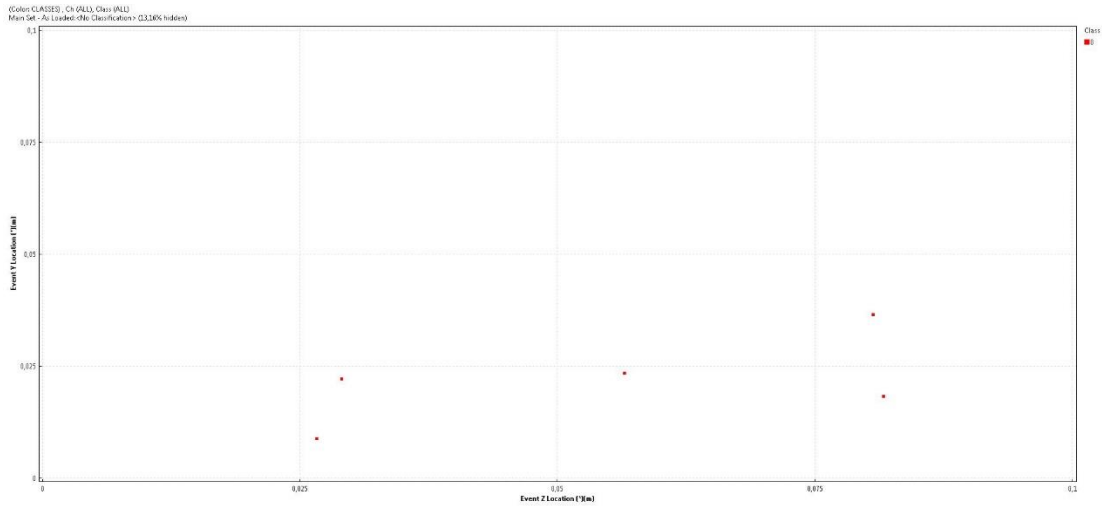


(α)

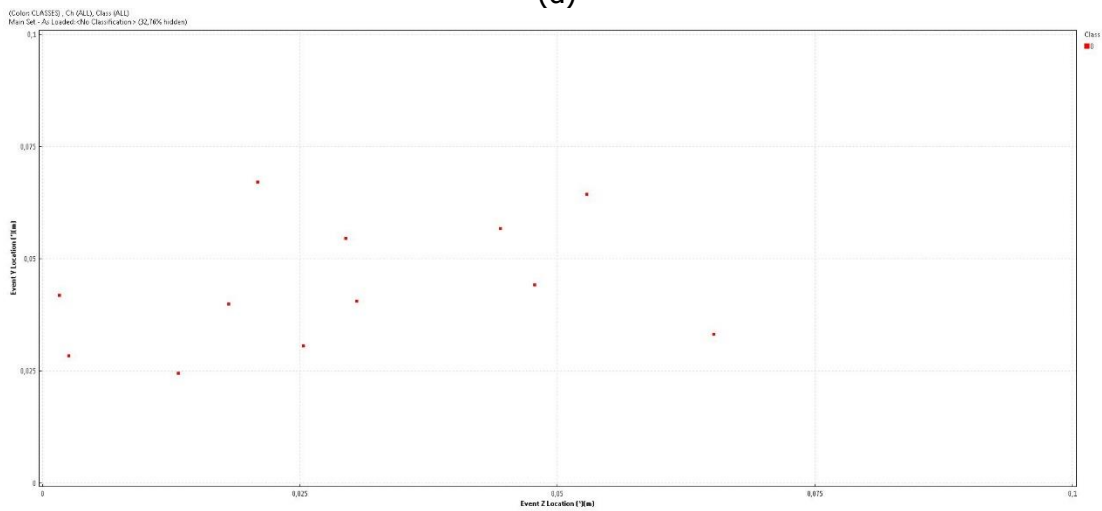


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **S-0.5**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

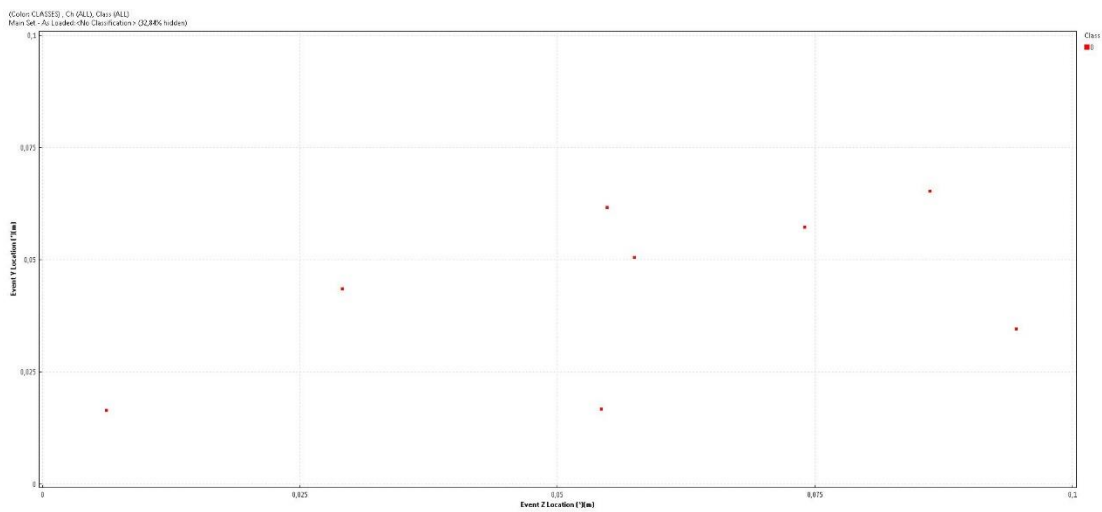


(a)

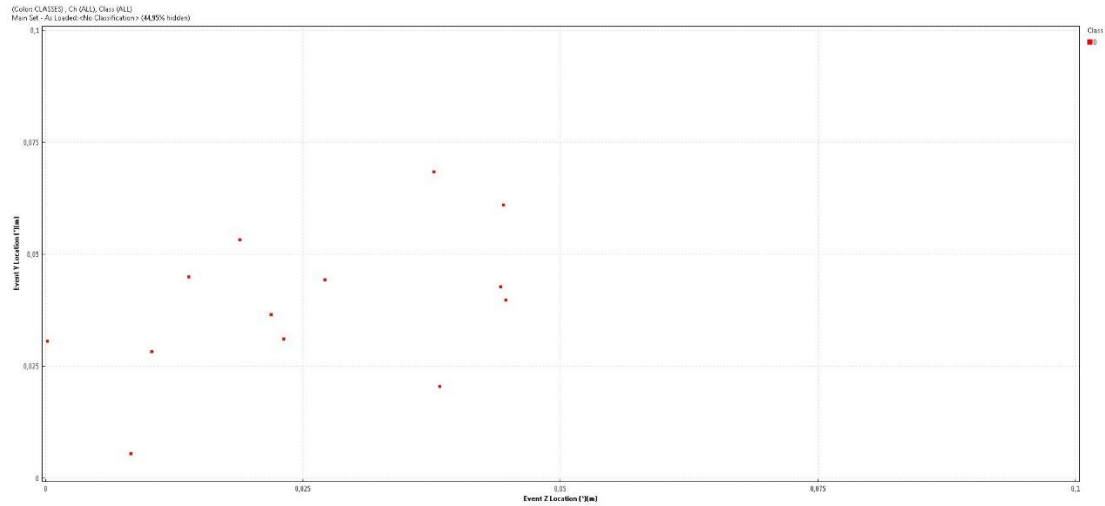


(b)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **S-1**:
 α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

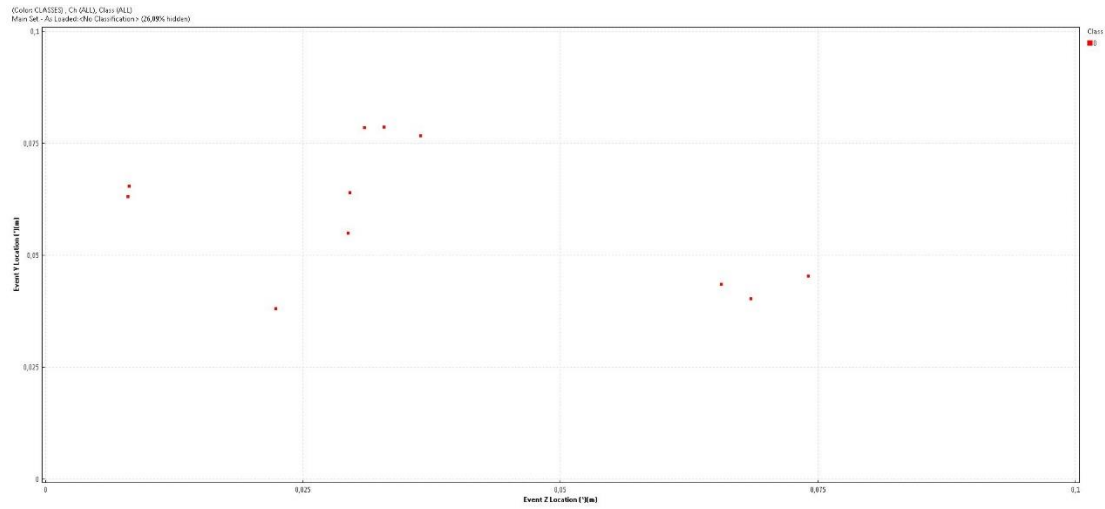


(a)

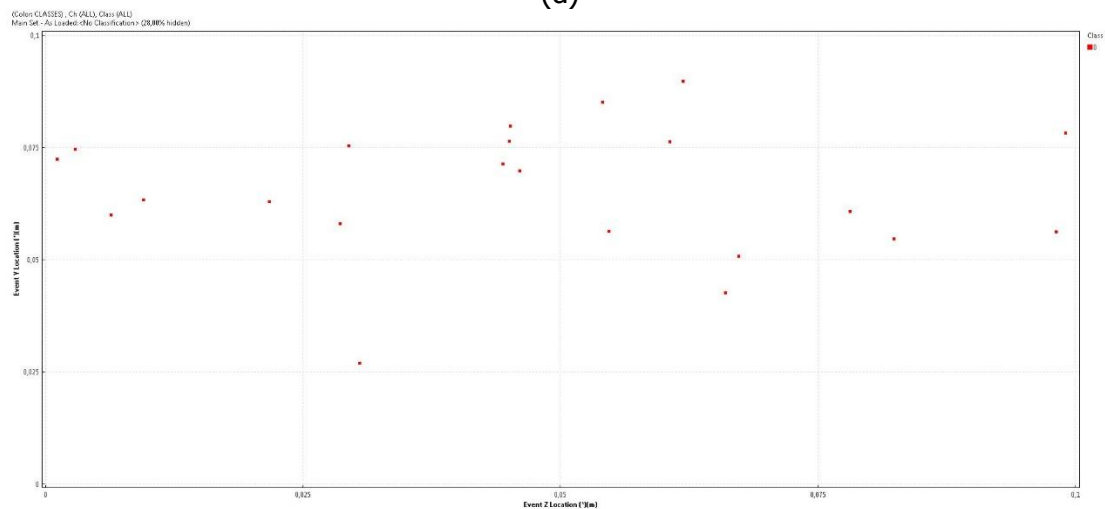


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **P1-0.5**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

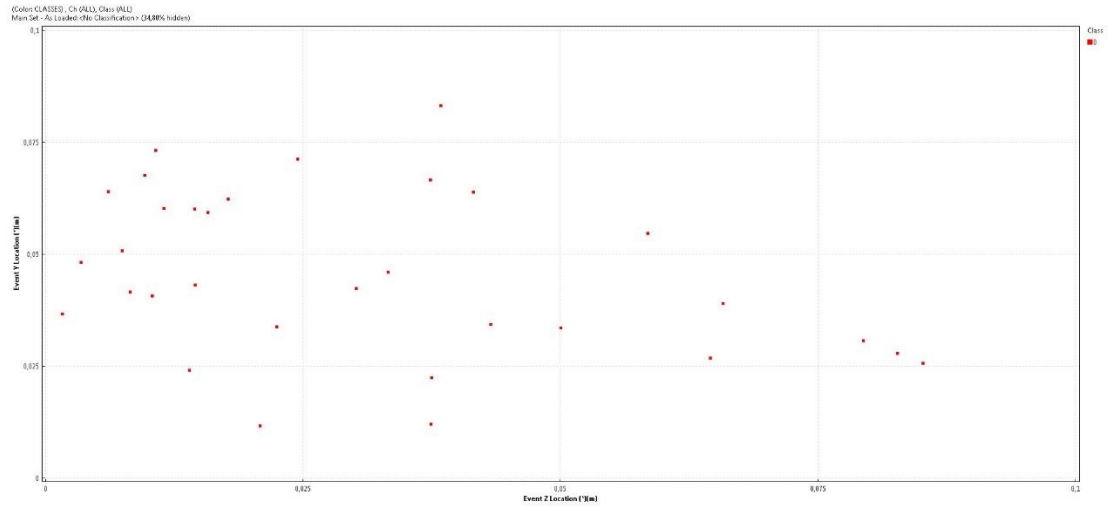


(α)

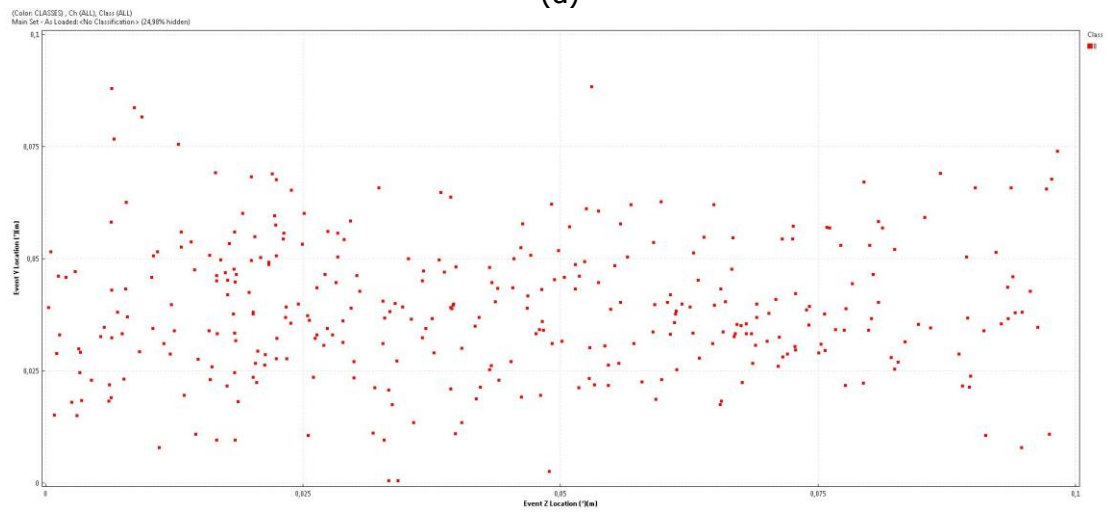


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **P1-1**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

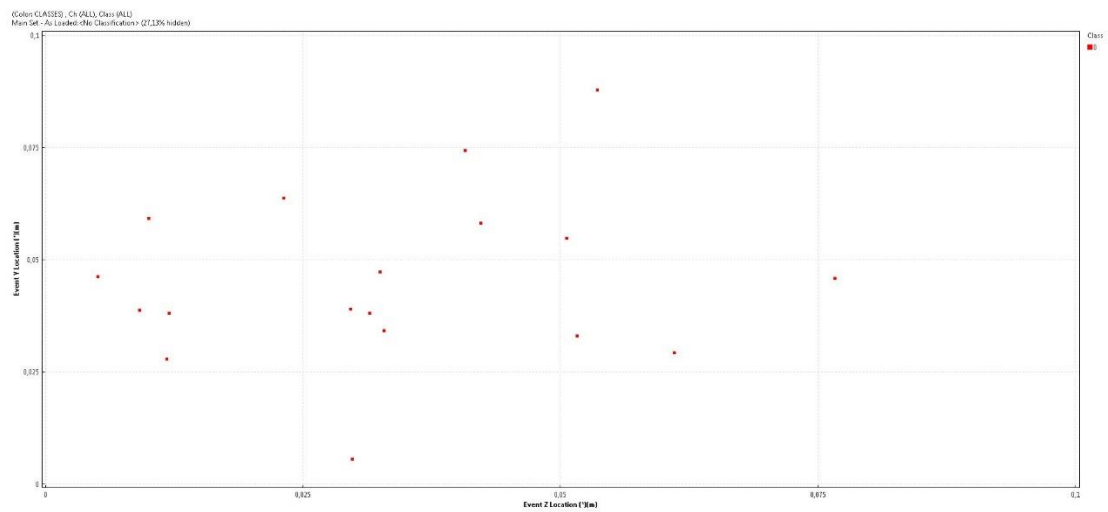


(a)

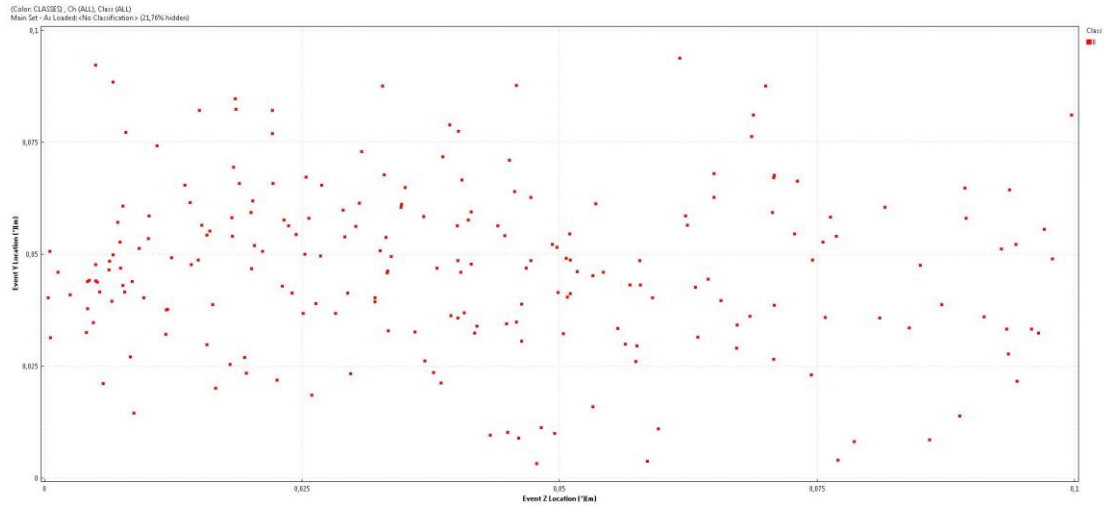


(b)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **P2-0.5**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

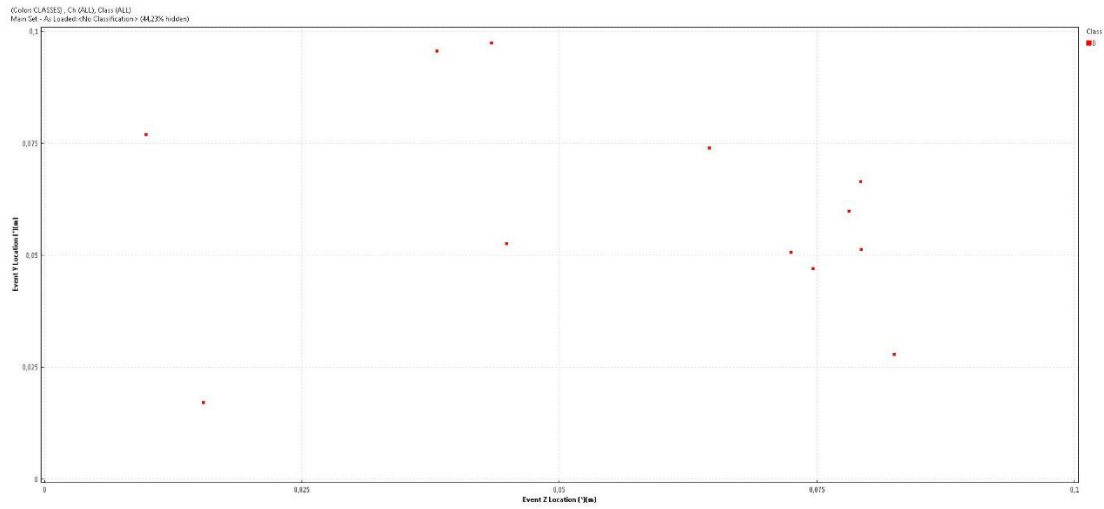


(a)

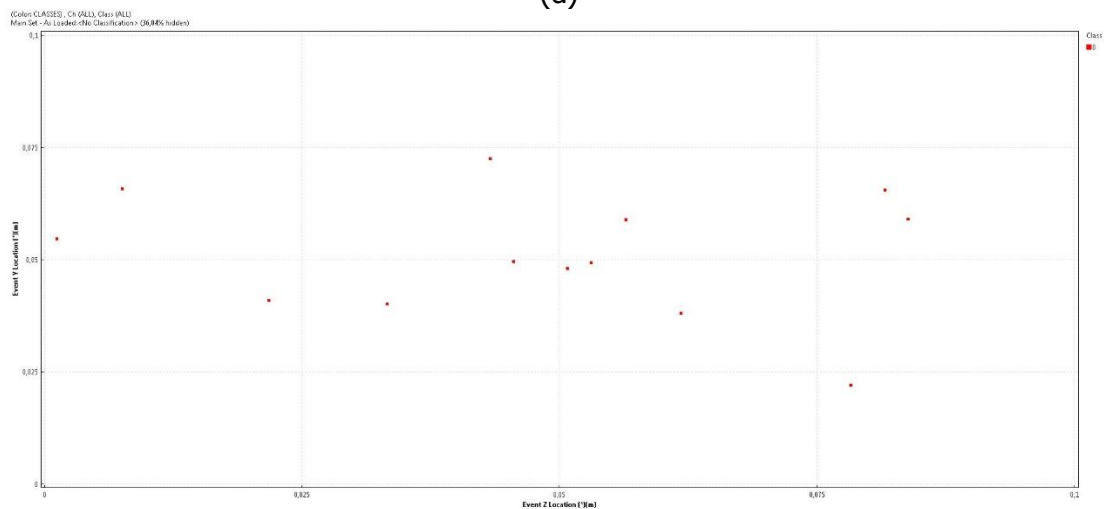


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **P2-1**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

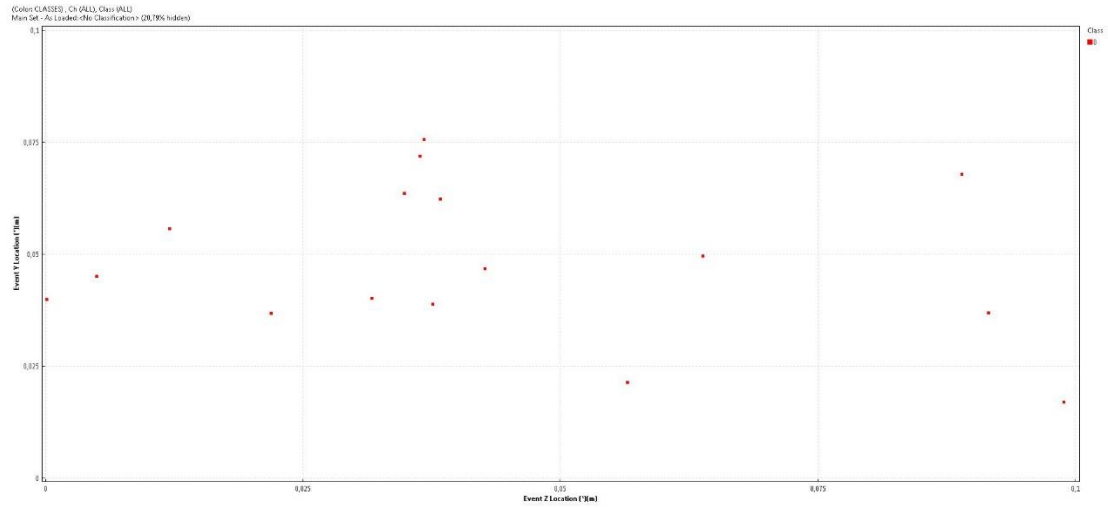


(α)

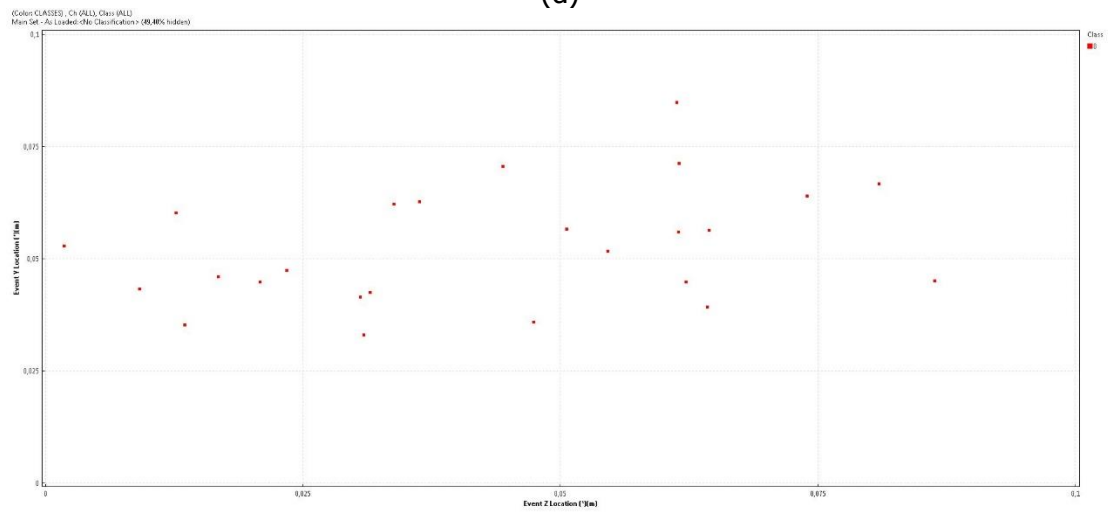


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **HySP1**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

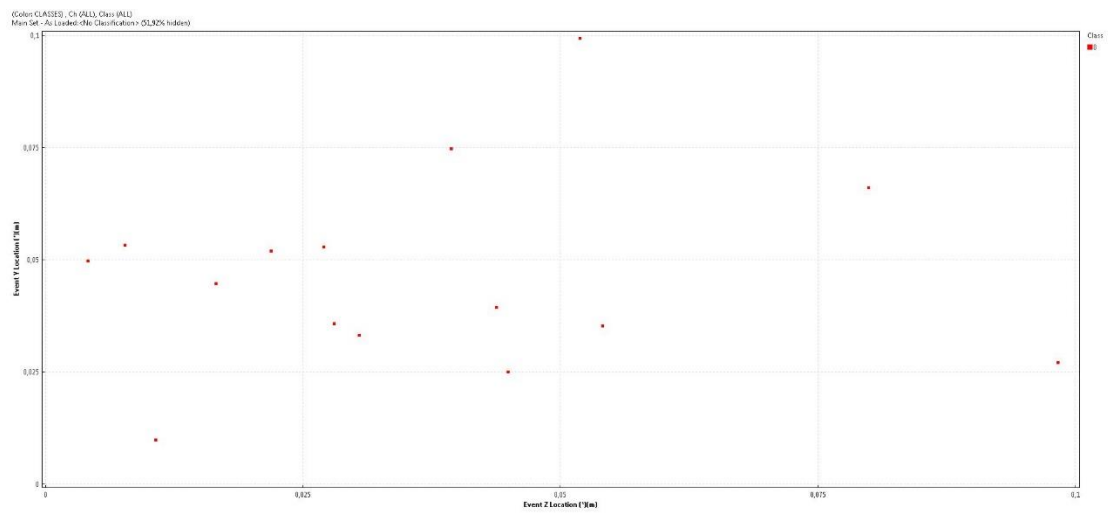


(a)

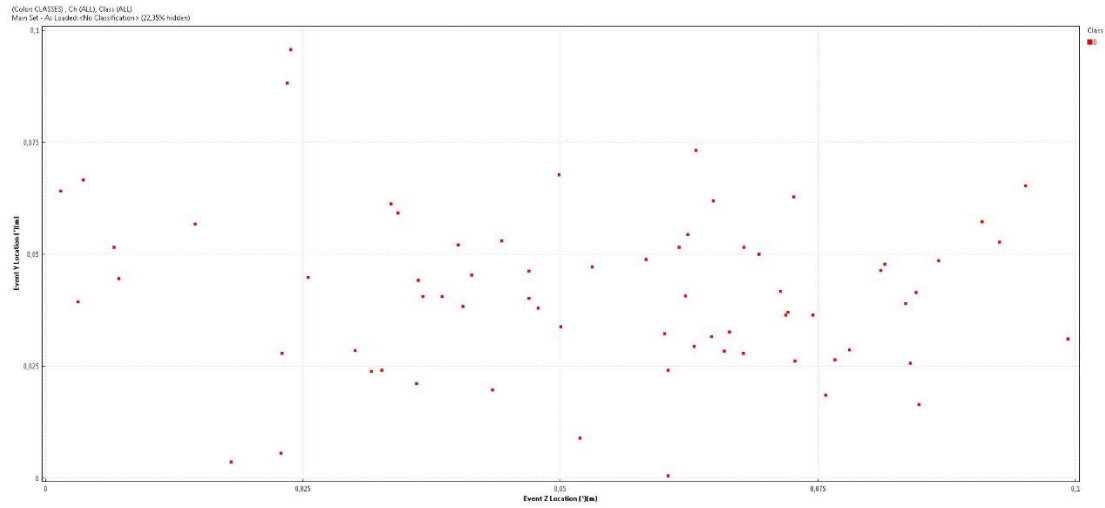


(b)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών HySP2: α) στάδιο φόρτισης Res β) στάδιο φόρτισης (+)300.



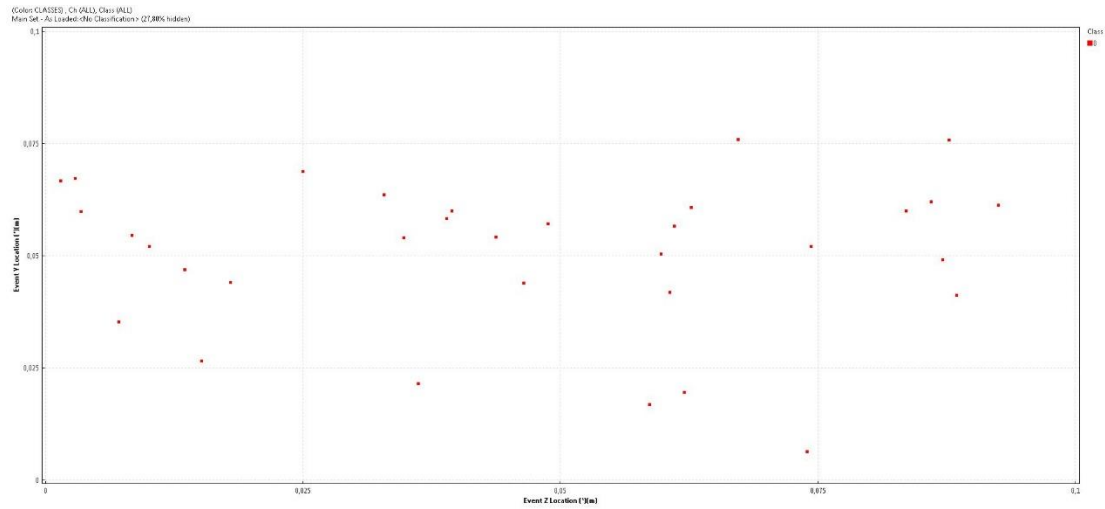
(a)



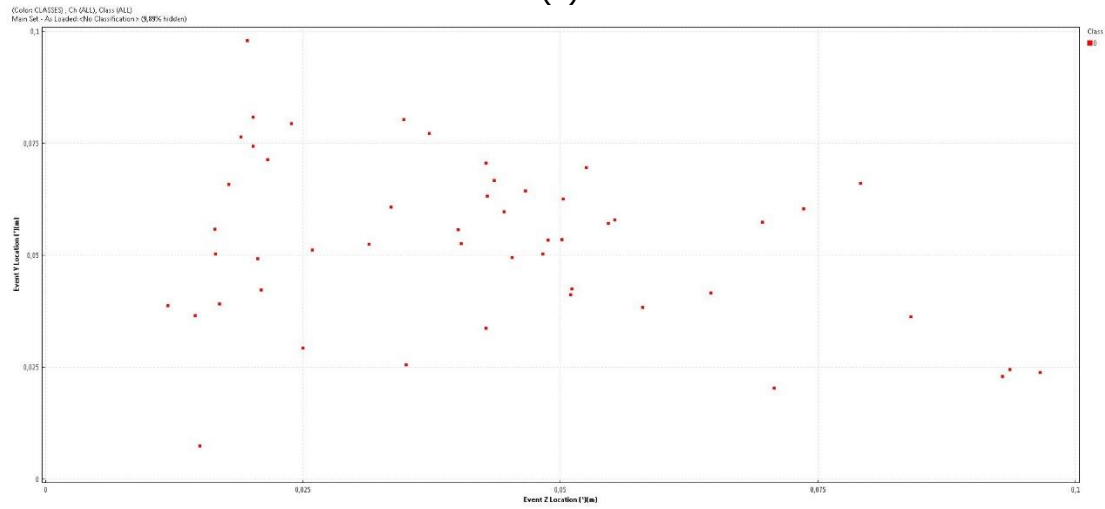
(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών
Hyp1P2: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

- Θερμικώς καταπονημένα δοκίμια

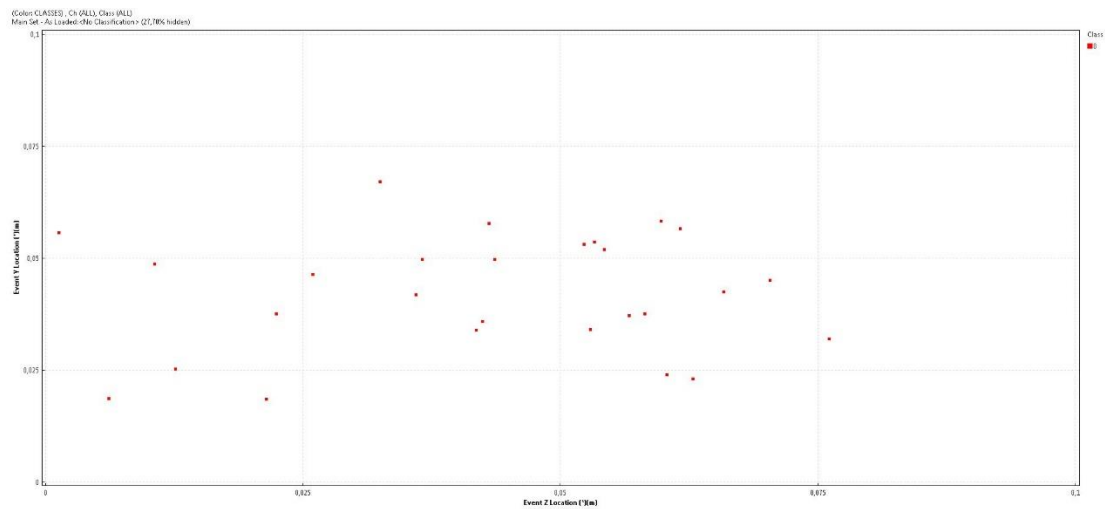


(α)

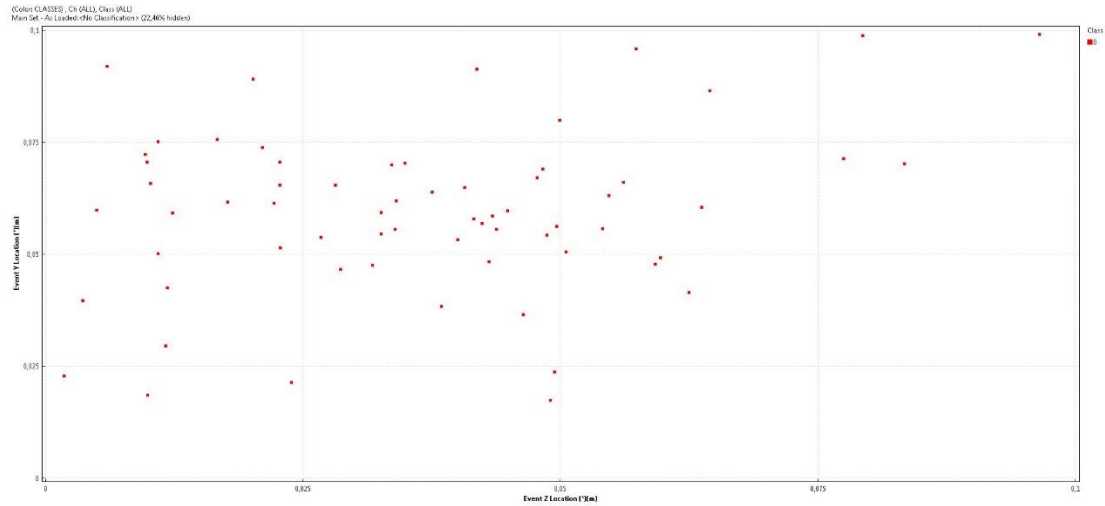


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **S-0.5**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

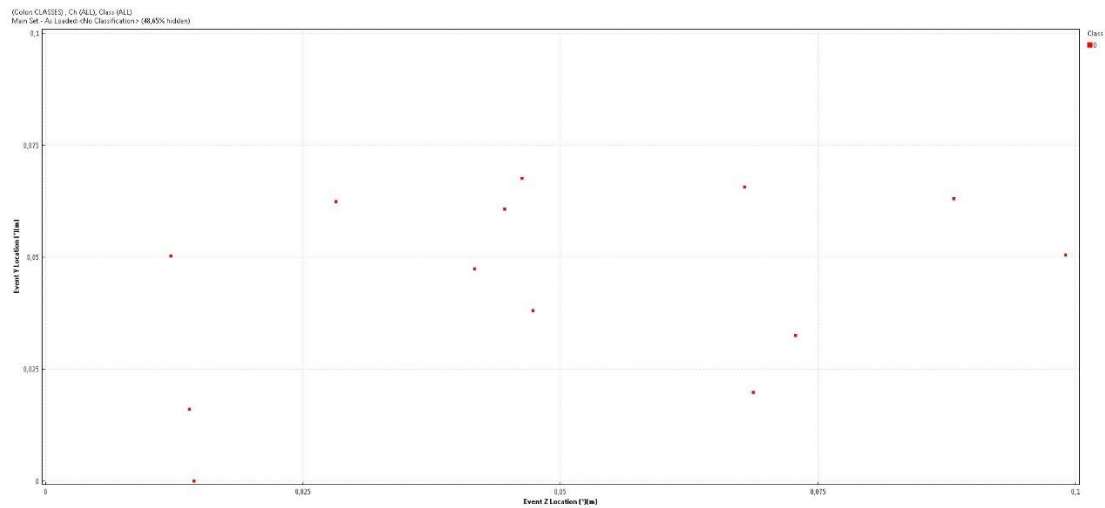


(α)

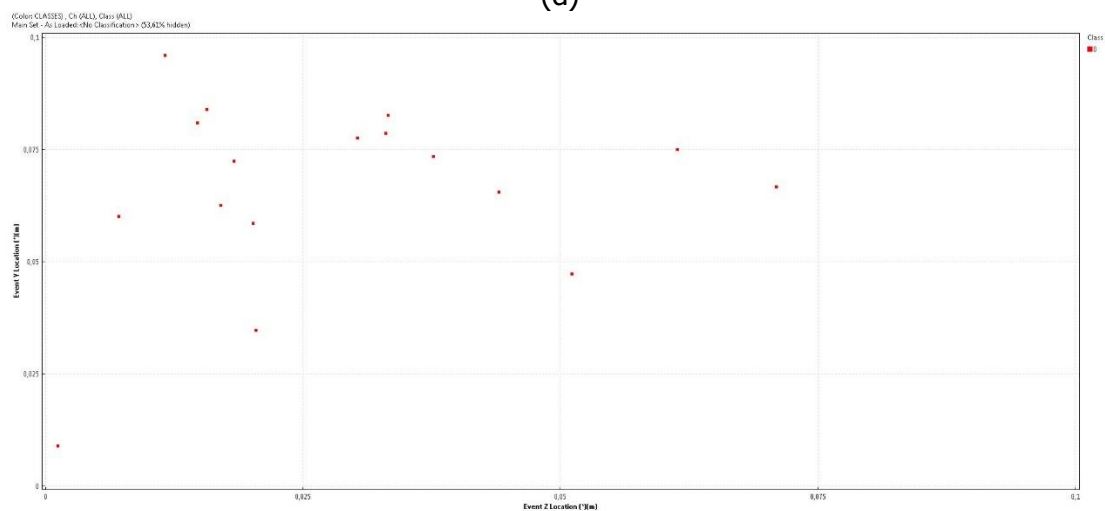


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **S-1**:
α) στάδιο φόρτισης Res β) στάδιο φόρτισης (+)300.

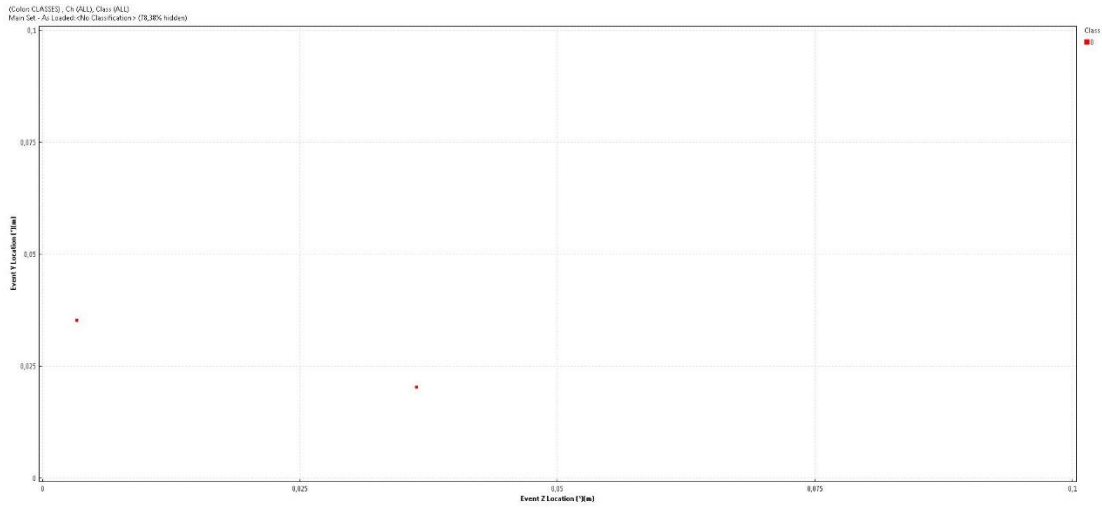


(α)

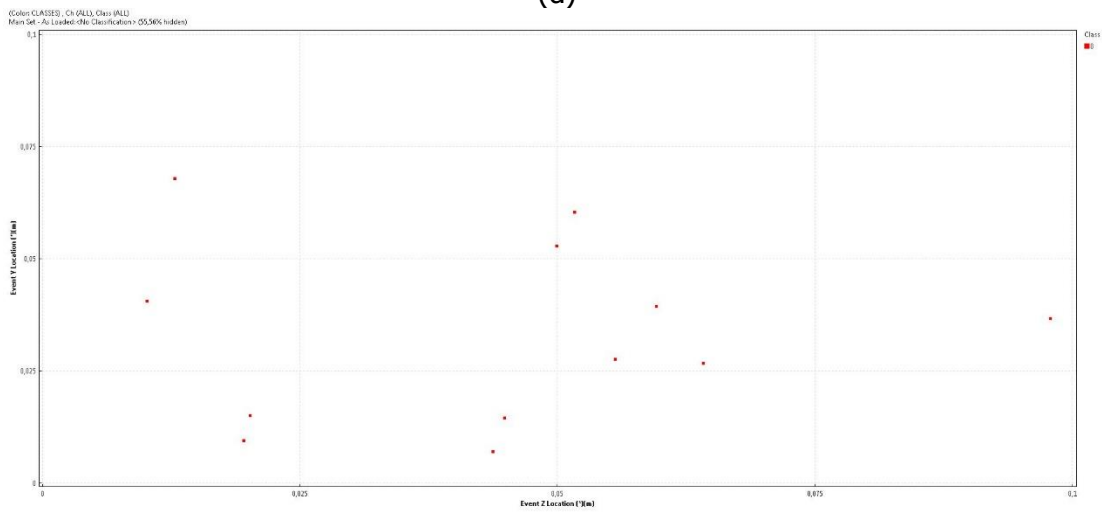


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **P1-0.5**:
α) στάδιο φόρτισης Res β) στάδιο φόρτισης (+)300.

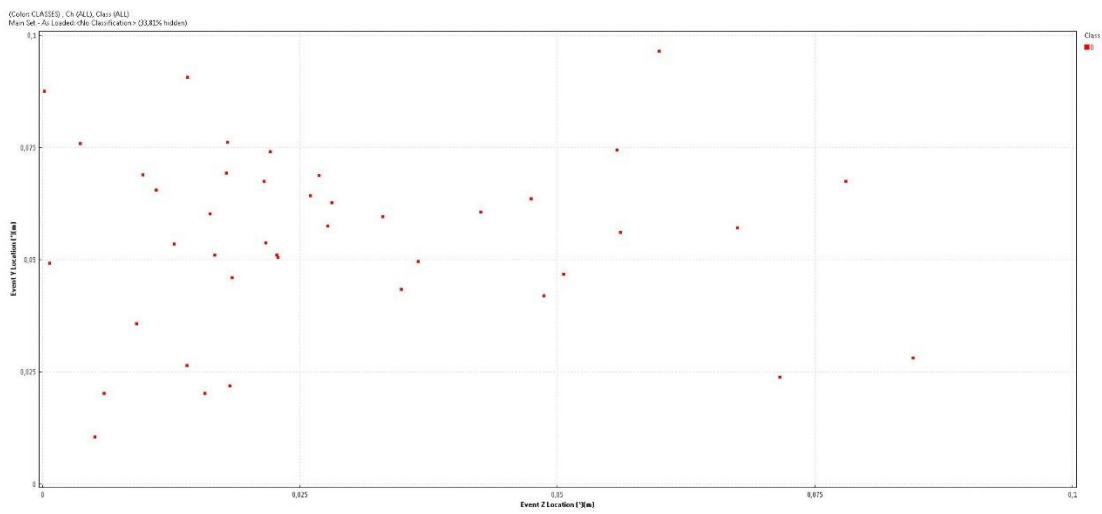


(a)

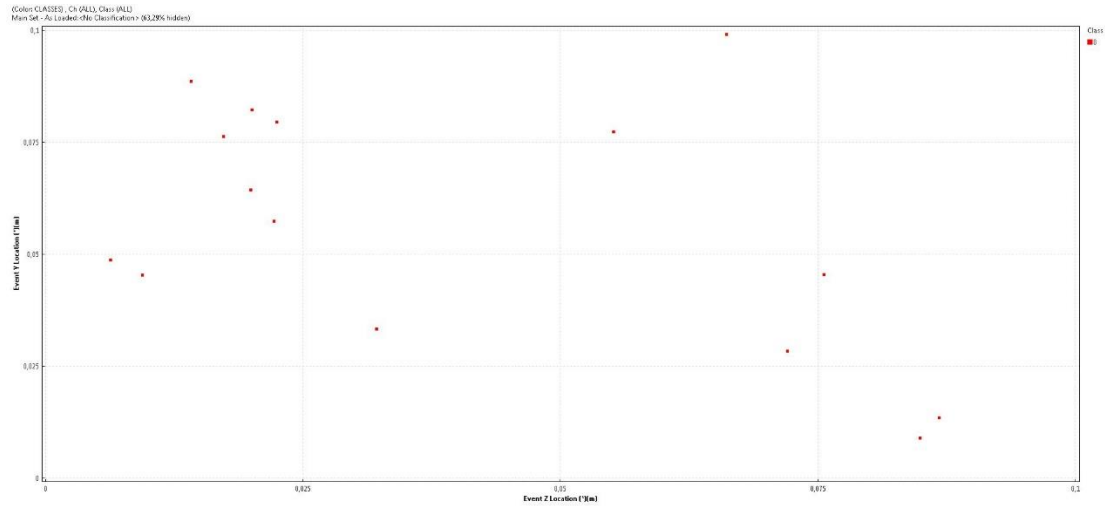


(b)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **P1-1**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

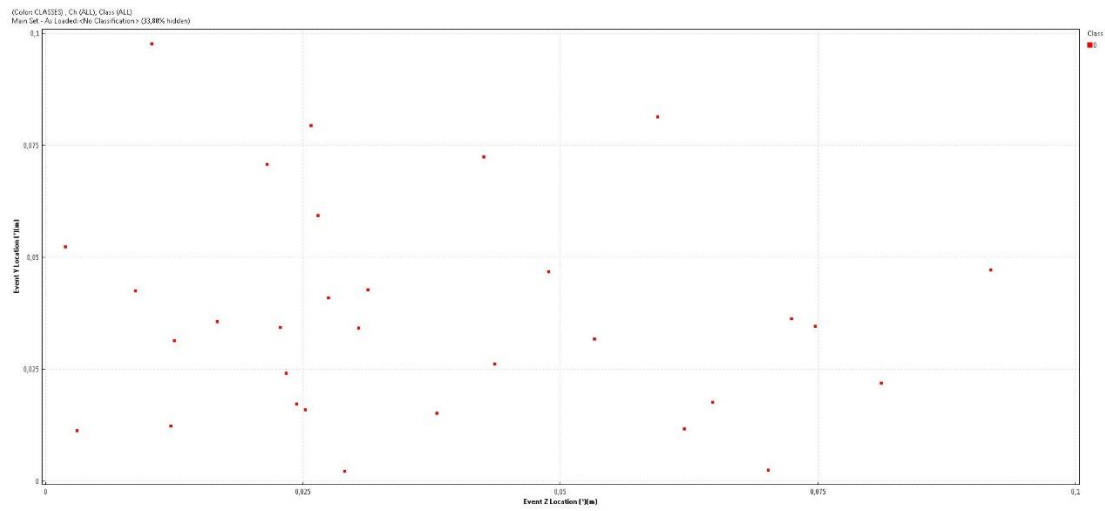


(a)

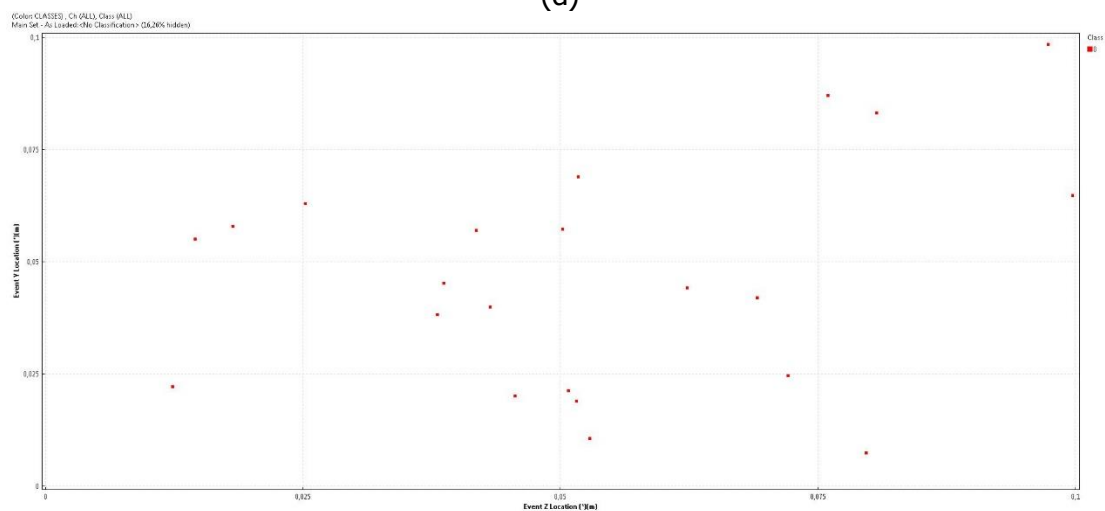


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **P2-0.5**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

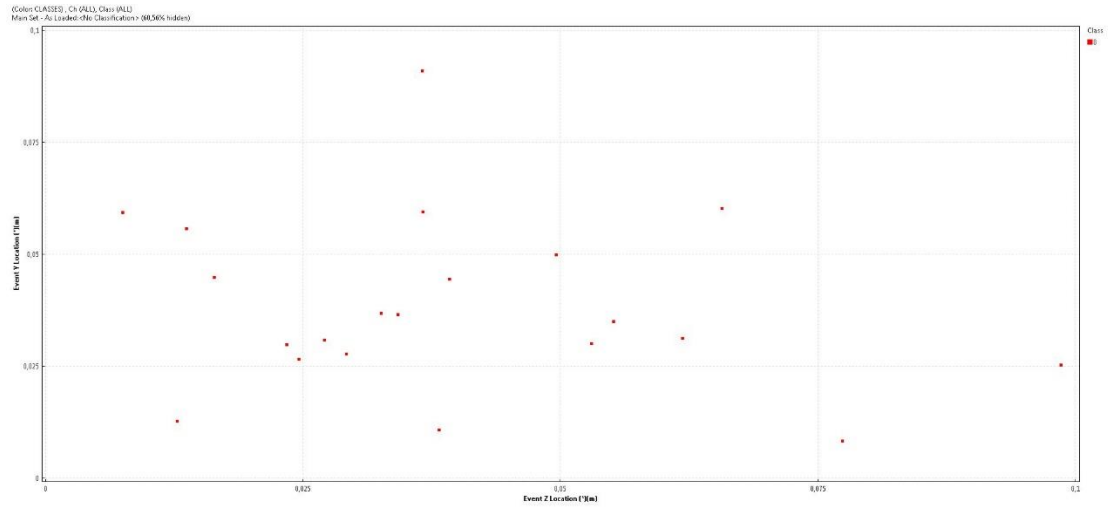


(α)

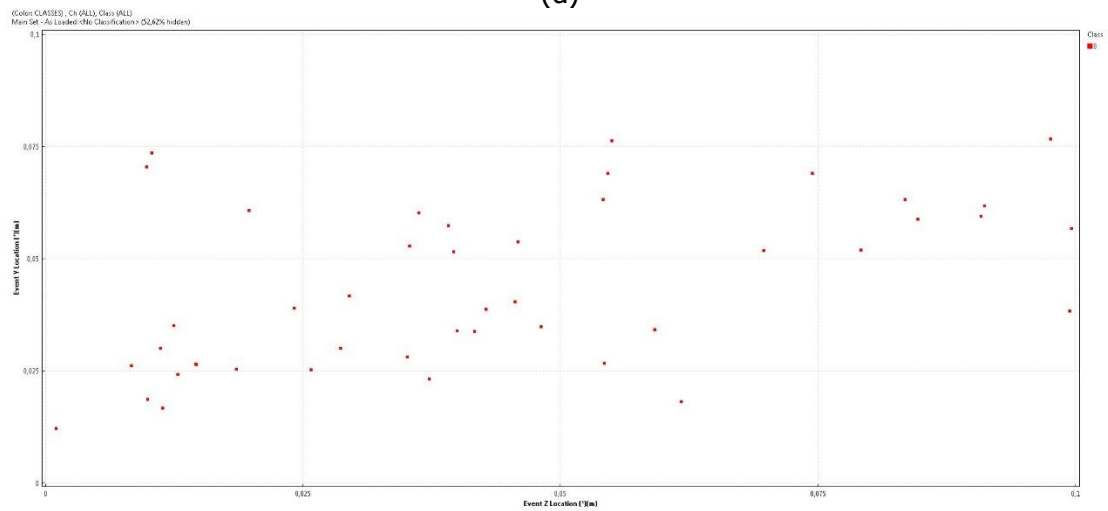


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **P2-1**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

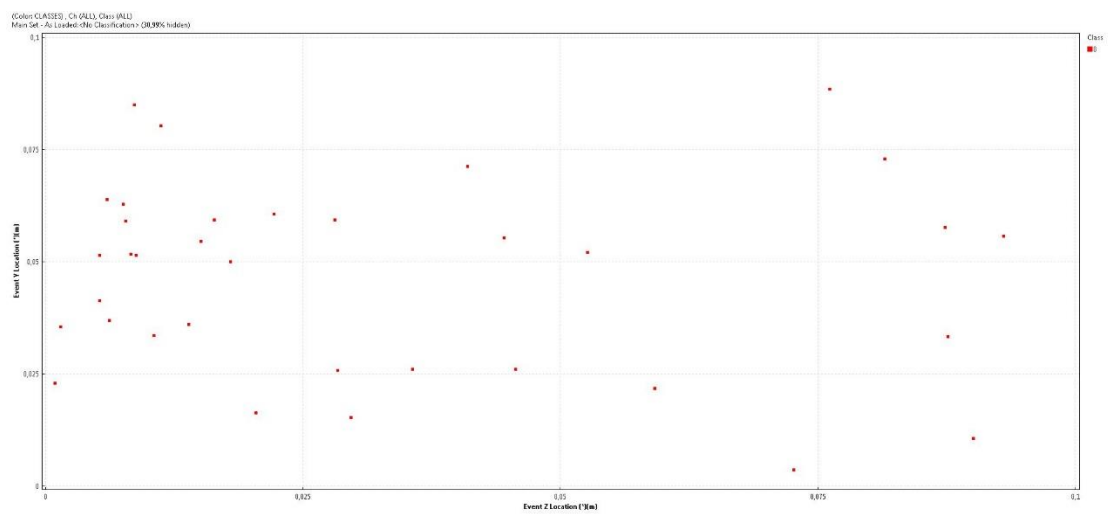


(a)

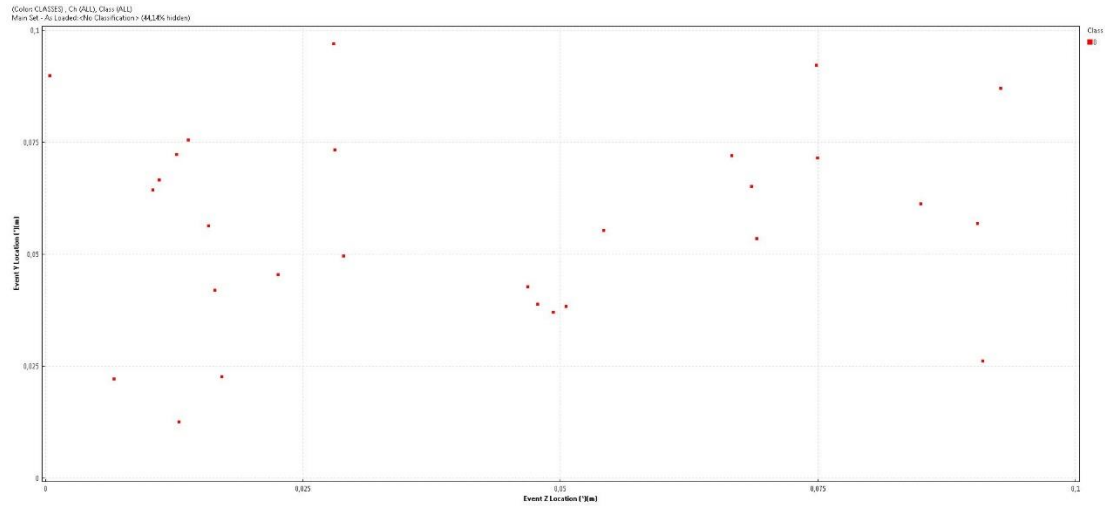


(b)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών HySP1: α) στάδιο φόρτισης Res β) στάδιο φόρτισης (+)300.

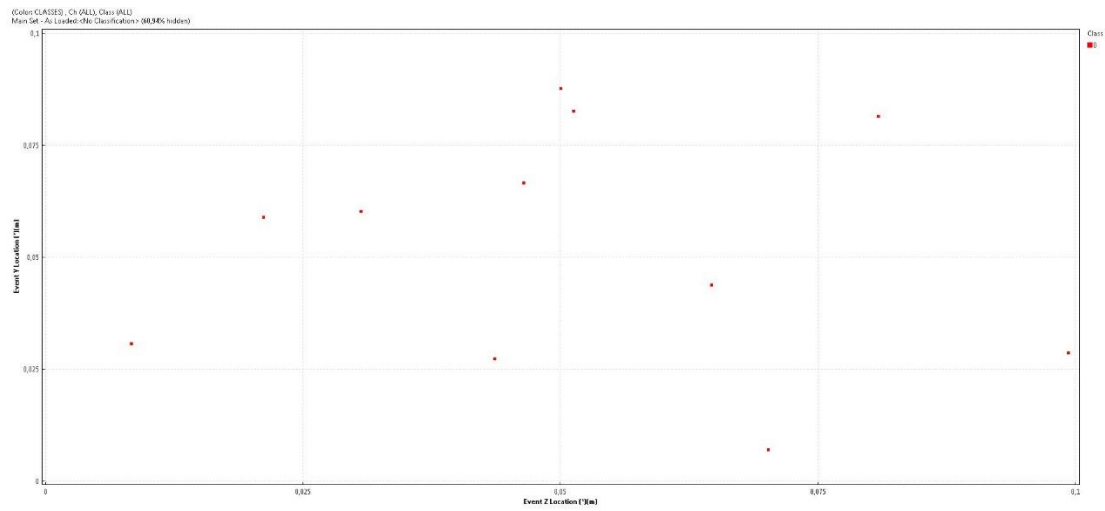


(a)

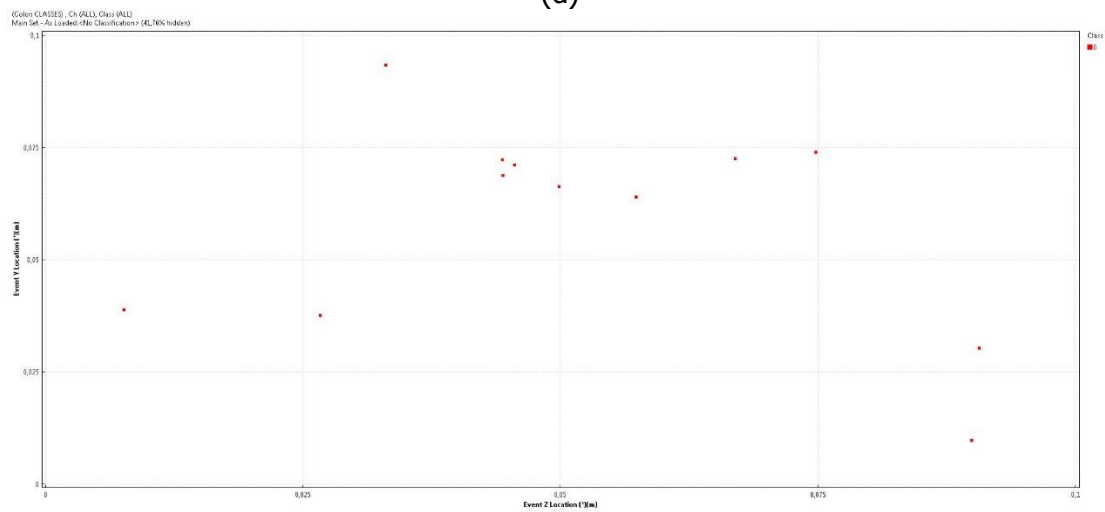


(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **HySP2**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.



(α)



(β)

Εγκάρσια όψη εντοπισμού θέσης προέλευσης σημάτων ΑΕ για τη σειρά δοκιμών **HyP1P2**: α) στάδιο φόρτισης **Res** β) στάδιο φόρτισης **(+)300**.

