



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους  
στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών  
εκπομπών**

**Ανδρόνικος Ν. Λουκίδης**

**ΑΙΓΑΛΕΩ**

**ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2022**





**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**SCHOOL OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**  
**PROGRAM OF DOCTORAL STUDIES**

**PhD THESIS**

**Determination of criticality in brittle materials by statistical physics  
methods, utilizing acoustic emission data**

**Andronikos N. Loukidis**

**ATHENS-EGALEO**

**APRIL 2022**



## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής,  
αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

Ανδρόνικος Ν. Λουκίδης

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:** Δήμος Τριάντης, Ομότιμος καθηγητής του Τμήματος  
Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

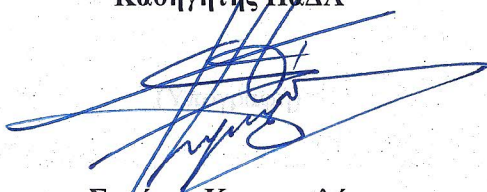
### ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:

Δήμος Τριάντης, Ομότιμος Καθηγητής, Τμ. ΗΗΜ, ΠαΔΑ  
Στυλιανός Ποτηράκης, Καθηγητής, Τμ. ΗΗΜ, ΠαΔΑ  
Νικόλαος Σαρλής, Καθηγητής, Τμ. Φυσικής, ΕΚΠΑ

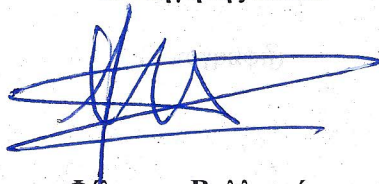
### ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

(Υπογραφή)

Στυλιανός Ποτηράκης,  
Καθηγητής ΠαΔΑ



Σταύρος Κουρκουλής,  
Καθηγητής ΕΜΠ



Φίλιππος Βαλλιανάτος,  
Καθηγητής ΕΚΠΑ

(Υπογραφή)

Ευθύμιος Σκορδάς,  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΚΠΑ

(Υπογραφή)

Νικόλαος Σαρλής,  
Καθηγητής ΕΚΠΑ

(Υπογραφή)

Ηλίας Σταύρακας,  
Καθηγητής ΠαΔΑ

(Υπογραφή)

Αικατερίνη - Στυλιανή Ζαχαριάδου,  
Καθηγήτρια ΠαΔΑ

Ημερομηνία εξέτασης 01/04/2022



**PhD THESIS**

Determination of criticality in brittle materials by statistical physics methods, utilizing acoustic emission data

**Andronikos N. Loukidis**

**SUPERVISOR: Dimos Triantis, Professor Emeritus UniWA**

**THREE-MEMBER ADVISORY COMMITTEE:**

**Dimos Triantis, Professor Emeritus UniWA**

**Stylios Potirakis, Professor UniWA**

**Nicholas Sarlis, Professor NKUA**

**SEVEN-MEMBER EXAMINATION COMMITTEE**

(Signature)

(Signature)

**Stylios Potirakis,  
Professor UniWA**

**Nicholas Sarlis,  
Professor NKUA**

**Stavros Kourkoulis,  
Professor NTUA**

**Ilias Stavarakas,  
Professor UniWA**

**Filippos Vallianatos,  
Professor NKUA**

**Aikaterini - Styliani Zachariadou,  
Professor UniWA**

(Signature)

(Signature)

**Efthimios Skordas,  
Associate Professor NKUA**

**Examination Date 01/04/2022**





**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Ανδρόνικος Λουκίδης, Μάρτιος, 2022**

Η παρούσα διδακτορική διατριβή καλύπτεται από τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons «Αναφορά Δημιουργού Μη Εμπορική Χρήση Όχι Παράγωγα Έργα 4.0 Διεθνές» (CC BY-NC-ND 4.0). Συνεπώς, το έργο είναι ελεύθερο για διανομή (αναπαραγωγή, διανομή και παρουσίαση του έργου στο κοινό), υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

α. Αναφορά δημιουργού: Ο χρήστης θα πρέπει να κάνει αναφορά στο έργο με τον τρόπο που έχει οριστεί από το δημιουργό ή τον χορηγούντα την άδεια.

β. Μη εμπορική χρήση: Ο χρήστης δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει το έργο αυτό για εμπορικούς σκοπούς.

γ. Όχι Παράγωγα Έργα: Ο Χρήστης δεν μπορεί να αλλοιώσει, να τροποποιήσει ή να δημιουργήσει νέο υλικό που να αξιοποιεί το συγκεκριμένο έργο (πάνω από το έργο αυτό).

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

**ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Ανδρόνικος Λουκίδης του Νικόλαου, υποψήφιος διδάκτορας του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας και δικαιούχος των πνευματικών δικαιωμάτων επί της διατριβής και δεν προσβάλω τα πνευματικά δικαιώματα τρίτων. Για τη συγγραφή της διδακτορικής μου διατριβής δεν χρησιμοποίησα ολόκληρο ή μέρος έργου άλλου δημιουργού ή τις ιδέες και αντιλήψεις άλλου δημιουργού χωρίς να γίνεται αναφορά στην πηγή προέλευσης (βιβλίο, άρθρο από εφημερίδα ή περιοδικό, ιστοσελίδα κ.λπ.). Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών





## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της διατριβής αποτελεί ο προσδιορισμός της εισόδου στην κρίσιμη κατάσταση, δοκιμίων μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου που υπόκεινται σε πειράματα μηχανικής φόρτισης μέχρι την θραύση. Για τον σκοπό αυτό, αναλύονται δεδομένα ακουστικών εκπομπών (ΑΕ) στο πεδίο του φυσικού χρόνου ( $\chi$ ) και στο πλαίσιο της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής. Αξιοποιούνται τα δεδομένα καταγραφής ακουστικών εκπομπών από δώδεκα πειράματα σε δοκίμια διαφόρων γεωμετριών κατασκευασμένα από μάρμαρο Διονύσου και από κονίαμα τσιμέντου Portland τα οποία υπέστησαν μηχανική φόρτιση μέχρι την θραύση τους. Το μάρμαρο Διονύσου χρησιμοποιείται εκτενώς για το έργο αποκατάστασης των ναών της Αθηναϊκής Ακρόπολης καθώς παρουσιάζει τις ίδιες φυσικοχημικές ιδιότητες με το Πεντελικό μάρμαρο, το οποίο αποτελεί την αρχική οικοδομική πέτρα των ναών. Παράλληλα, το τσιμέντο Portland, είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος τσιμέντου που χρησιμοποιείται ευρύτατα στην κατασκευαστική βιομηχανία, και ως εκ τούτου είναι σημαντικό να εκτιμηθεί εγκαίρως η μηχανική του κατάσταση καθώς και η υπολειπόμενη φέρουσα ικανότητα φορτίου.

Στο πρώτο μέρος της διατριβής, αναλύεται σε φυσικό χρόνο η ενέργεια των ακουστικών εκπομπών που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια διαφορετικών πρωτόκολλων φόρτισης των δοκιμίων μέχρι τη θραύση. Αρχικά μελετήθηκε η εξέλιξη των παραμέτρων του φυσικού χρόνου, της διασποράς  $\kappa_1$ , της εντροπίας  $S$  και της εντροπίας υπό την αντιστροφή χρόνου  $S_-$ . Η ανάλυση αποκάλυψε ότι η διασπορά  $\kappa_1$  του φυσικού χρόνου προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή 0.070 πολύ πριν από την είσοδο των δοκιμίων στην περιοχή θραύσης με τρόπο παρόμοιο με εκείνον που προηγείται σε ισχυρούς σεισμούς. Η παρατηρούμενη συμπεριφορά της διασποράς  $\kappa_1$  μπορεί να γίνει κατανοητή από τη συμπεριφορά είτε του μοντέλου τρένου Burrridge-Knopoff (για σεισμούς) είτε του μοντέλου σεισμών Olami-Feder-Christensen, όταν αυτά αναλύονται σε φυσικό χρόνο. Επιπλέον, εξετάστηκε η χρήση της διασποράς  $\kappa_1$ , ως παράμετρος τάξης της ενέργειας των ακουστικών εκπομπών που καταγράφεται στις διαδικασίες θραύσης δοκιμίων μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου, μέσω της ύπαρξης της χαρακτηριστικής αριστερής εκθετικής ουράς των ανηγμένων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της διασποράς  $\kappa_1$ . Αποδεικνύεται ότι παρουσιάζουν, για τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους, μια χαρακτηριστική εκθετική ουρά όπως αυτή που είχε βρεθεί προηγουμένως για την παράμετρο τάξης σε διάφορα κρίσιμα συστήματα ισορροπίας (π.χ., διδιάστατο μοντέλο Ising) και μη ισορροπίας (π.χ. τυρβώδης ροή) καθώς και στη σεισμικότητα. Τα πειραματικά αποτελέσματα της ανάλυσης σε φυσικό χρόνο των ακουστικών εκπομπών, συγκρίνονται επίσης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα της ανάλυσης σε φυσικό χρόνο, δεδομένων από το μοντέλο τρένου Burrridge-Knopoff και από το μοντέλο σεισμού Olami-Feder-Christensen. Τα ανωτέρω υποστηρίζουν τη χρήση της διασποράς  $\kappa_1$  ως παράμετρο τάξης για τις ακουστικές εκπομπές που προηγούνται της θραύσης με έναν τρόπο παρόμοιο με αυτό στην περίπτωση της σεισμικότητας. Η ανάλυση των ΑΕ στο πεδίο του φυσικού χρόνου επιτρέπει την προσέγγιση του μηχανικά φορτισμένου δοκιμίου, ως ένα δυναμικό σύστημα το οποίο με την ολοένα αυξανόμενη μηχανική φόρτιση, ωθείται σε μία κατάσταση εκτός ισορροπίας όταν το φορτίο προσεγγίζει στα όρια της φέρουσας ικανότητας του δοκιμίου. Σε αυτή τη φάση το δοκίμιο εισέρχεται σε κρισιμότητα όπου η περαιτέρω αύξηση του φορτίου, θα οδηγήσει στην κατάρρευση του συστήματος (δηλ. θα επέλθει η θραύση του δοκιμίου). Η μελέτη στο πεδίο του φυσικού χρόνου εστιάζει στην μελέτη της συμπεριφοράς του δοκιμίου όταν αυτό εισέρχεται στην περιοχή θραύσης και μέχρι την κατάρρευση του. Μέσω της μελέτης των παραμέτρων της διασποράς  $\kappa_1$ , της εντροπία  $S$  και της εντροπία υπό την αντιστροφή χρόνου  $S_-$  εξάγονται συμπεράσματα σχετικά με τις διαδικασίες γέννησης και διάδοσης των μικρορωγμών εντός του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της κρισιμότητας και μέχρι τη θραύση.

Στο δεύτερο μέρος της διατριβής, αναλύονται δεδομένα ακουστικών εκπομπών στο πλαίσιο της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής. Αρχικά, υπολογίστηκαν τα χρονικά διαστήματα (interevent times) μεταξύ των διαδοχικών ομάδων χτύπων ΑΕ, που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων. Στις ομάδες χτύπων ΑΕ υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις επιβίωσης (survival functions) των χρονικών διαστημάτων (interevent times) και προσαρμόστηκαν, μέσω fitting, με  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις. Υπολογίστηκαν οι τιμές του εντροπικού δείκτη  $q$  και της παραμέτρου  $\beta_q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ σε όλες τις περιπτώσεις των πειραμάτων και παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του δείκτη  $q$  σε συνδυασμό με το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο έως τη θραύση. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως ο δείκτης  $q$  εμφανίζει μια συστηματική συμπεριφορά που σχετίζεται στενά με τον βαθμό οργάνωσης του δικτύου των μικρορωγμών εντός των δοκιμών και από το επίπεδο του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου. Στην συνέχεια, εξετάστηκε η χρονική εξέλιξη του δείκτη  $q$  σε συνδυασμό με τη ακουστική δραστηριότητα που καταγράφεται κατά την διάρκεια των πειραμάτων, εκφρασμένη μέσω της συνάρτησης  $F$  που αποτελεί ένα δείκτη παρακολούθησης της ακουστικής δραστηριότητας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι κατά την απότομη αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας η οποία χαρακτηρίζεται από την ύπαρξη ενός νόμου δύναμης, ο δείκτης  $q$  εμφανίζει μέγιστες τιμές κάτι που σχετίζεται με τον υψηλό βαθμό οργάνωσης των μικρορωγμών εντός των μηχανικά φορτισμένων δοκιμών. Συνεπώς η ιδέα της χρήσης του εντροπικού δείκτη  $q$  ως πιθανού δείκτη για την επικείμενη θραύση αποτελεί μια εν δυνάμει μέθοδο.

Τέλος, υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις επιβίωσης των χρονικών διαστημάτων (intervent times) και των χωρικών αποστάσεων (interevent distances) μεταξύ διαδοχικών γεγονότων ΑΕ για την περίπτωση δοκιμών μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου και προσαρμόστηκαν, μέσω fitting, με  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις. Υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι εντροπικοί δείκτες  $q_{\delta_r}$  και  $q_{\delta_t}$ . Έπειτα εξετάστηκε εάν το άθροισμα τους υπακούει τη σχέση  $q_{\delta_r} + q_{\delta_t} \approx 2$ . Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η σχέση  $q_{\delta_r} + q_{\delta_t} \approx 2$  επιβεβαιώνεται για την περίπτωση των ακουστικών εκπομπών σε δοκίμια μαρμάρου και τσιμέντου. Η ανωτέρω διαπίστωση γενικεύει προηγούμενες μελέτες οι οποίες αφορούσαν δεδομένα ακουστικών εκπομπών καταγεγραμμένα σε δοκίμια βασάλτη αλλά και στην περίπτωση της σεισμικότητας. Συνεπώς επιβεβαιώνεται μία άρρηκτη σχέση μεταξύ της σεισμικής δραστηριότητας και των ακουστικών εκπομπών.

**ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ:** Μηχανική των Υλικών

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** ηλεκτρονικά συστήματα πολυπαραμετρικών καταγραφών, ηλεκτρονικά συστήματα υψηλής δειγματοληψίας, μεθοδολογίες επεξεργασίας σημάτων ακουστικών εκπομπών, μη-εκτατική στατιστική μηχανική, προσδιορισμός κρισιμότητας, τεχνική ακουστικών εκπομπών, φυσικός χρόνος

## ABSTRACT

The aim of the PhD thesis is the determination of the entrance into criticality of marble and cement mortar specimens which are subjected to mechanical loading until fracture. For this purpose, acoustic emission (AE) data are analyzed in natural time ( $\gamma$ ) and in the context of non-extensive statistical mechanics. Acoustic emission recording data are utilized from twelve experiments on specimens of various geometries made of Dionysos marble and cement mortar based on Portland cement, which underwent mechanical loading until fracture. Dionysos marble is widely used for the restoration of the temples of the Athenian Acropolis as it has the same physicochemical properties as Pentelic marble, which is the original building stone of the temples. At the same time, Portland cement is the most common type of masonry mortar widely used in the construction industry, and therefore it is important to assess in time its mechanical condition as well as the remaining load carrying capacity.

In the first part of the PhD thesis, the energy content of the acoustic emission data which were recorded during different loading protocols of the specimens up to fracture is analyzed in natural time. The evolution of the natural time parameters, namely, the variance  $\kappa_1$ , the entropy  $S$  and the entropy under time reversal  $S_-$  was first studied. The analysis revealed that the variance  $\kappa_1$  of natural time approaches the critical value 0.070 long before the specimens' entrance to the fracture region in a fashion similar to that before strong earthquakes. The observed behavior of the  $\kappa_1$  variance can be understood from the behavior of either the Burridge-Knopoff train model (for earthquakes) or the Olami-Feder-Christensen earthquake model, when analyzed in natural time. In addition, the use of the variance  $\kappa_1$  was examined as an order parameter for the acoustic emission energy recorded in marble and cement mortar fracture processes, through the existence of the characteristic left exponential tail of the scaled probability density functions of the variance  $\kappa_1$ . It is shown that they exhibit, for at least three orders of magnitude, a characteristic exponential tail like that previously found for the order parameter in equilibrium (e.g., two-dimensional Ising model), and in non-equilibrium (e.g., turbulent flow) critical systems as well as in seismicity. The experimental results from the natural time analysis of the acoustic emissions are also compared to those originating from the Burridge-Knopoff train model (for earthquakes) and, the non-conservative Olami-Feder-Christensen earthquake model. The above advocate the use of the variance  $\kappa_1$  as an order parameter for the acoustic emissions preceding failure in a fashion similar to that in the case of seismicity. The analysis of AE in the natural time domain allows the approach of the mechanically loaded specimen, as a dynamic system which with the continuously increasing mechanical loading, is pushed to a non-equilibrium state when the load is reaching the limits of the specimen's load carrying capacity. At this stage the specimen enters criticality where the further increase of the load will lead to the collapse of the system (i.e., the fracture of the specimen will occur). The study in the natural time domain focuses on the study of the specimen's behavior when it enters the fracture region and until its collapse. Through the study of the natural time parameters, the variance  $\kappa_1$ , the entropy  $S$  and the entropy under time reversal  $S_-$  conclusions are drawn about the microcracks' formation and propagation processes within the specimen during the criticality and up to fracture.

In the second part of the PhD thesis, acoustic emission data are analyzed in the context of non-extensive statistical mechanics. Initially, the interevent times between the successive AE hit groups, which were recorded during the experiments, were calculated. In the AE hit groups the survival functions of the interevent times were calculated and fitted with  $q$ -exponential functions. The values of the entropic index  $q$  and the parameter  $\beta_q$  for each AE hits group were calculated in all cases of the experiments and the time evolution of the index  $q$  is presented in juxtaposition

with the applied mechanical load until fracture. Results show that the index  $q$  exhibits a systematic behavior that is closely related to the degree of organization of the microcracks' network within the specimens and to the level of the applied mechanical load. Next, the temporal evolution of the index  $q$  was examined, in juxtaposition with the acoustic activity recorded during the experiments, expressed in terms of the  $F$ -function, which is an indicator for monitoring the acoustic activity. Results showed that during the sharp increase in the acoustic activity which is characterized by the existence of a power law, the index  $q$  shows maximum values which are related to the high degree of organization of microcracks within the mechanically loaded specimens.

Finally, the survival functions of the time intervals (intervent times) and the spatial distances (interevent distances) between successive AE events were calculated for the case of marble and cement mortar specimens and were fitted with  $q$ -exponential functions. The corresponding entropic indices  $q_{\delta\tau}$  and  $q_{\delta r}$  were calculated. It was then examined whether their sum obeyed the relationship  $q_{\delta\tau} + q_{\delta r} \approx 2$ . The results showed that the relationship  $q_{\delta\tau} + q_{\delta r} \approx 2$  is confirmed for the case of acoustic emissions in marble and cement specimens. The above finding generalizes previous studies which concerned acoustic emission data recorded in basalt specimens but also in the case of seismicity. Therefore, seismic activity and acoustic emissions seem inextricably linked.

**SUBJECT AREA:** Materials Engineering

**KEYWORDS:** acoustic emissions signal processing methodologies, acoustic emissions technique, determination of criticality, electronic high sampling systems, electronic multiparameter recording systems, natural time, non-extensive statistical mechanics

*Στους γονείς μου,  
Σε όσους με ανέχθηκαν!*





## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω από τα βάθη της καρδιάς μου τον Δρ. Δήμο Τριάντη, Ομότιμο Καθηγητή του ΠαΔΑ, έναν σπάνιο άνθρωπο, εξαιρετικό επιστήμονα και Δάσκαλο που είχα την ευτυχία να διδαχθώ από αυτόν. Δάσκαλε σας ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου, τίποτα από όλα αυτά δεν θα ήταν εφικτό χωρίς εσάς. Δεν υπάρχουν λόγια για να εκφράσω την αμέριστη ευγνωμοσύνη που νιώθω προς το πρόσωπό σας. Οι ατελείωτες ώρες που περάσαμε μαζί και η συνεχής συμπαράσταση και βοήθειά σας θα παραμείνουν ανεξίτηλα στη μνήμη μου, όσα χρόνια και αν περάσουν. Ελπίζω να φανώ αντάξιος των προσδοκιών σας. Σας ευχαριστώ.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα δύο μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τον Καθηγητή του ΠαΔΑ Στυλιανό Ποτηράκη και τον Καθηγητή του ΕΚΠΑ Νικόλαο Σαρλή για τις πολύτιμες γνώσεις και τις συμβουλές που μου παρείχαν απλόχερα. Κύριε Σαρλή, σας ευχαριστώ για την επιμονή και τον χρόνο που αφιερώσατε όλα αυτά τα χρόνια, προκειμένου να κατανοήσω το φυσικό χρόνο. Δίπλα σας αποκόμισα πέραν των επιστημονικών γνώσεων, την απαιτούμενη μεθοδικότητα και ανάγκη για συνεχή και άοκνη έρευνα. Νιώθω προνομιούχος που ήμουν υπό την καθοδήγηση σας. Σας ευχαριστώ που πιστέψατε σε μένα.

Ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στον Καθηγητή του ΠαΔΑ Ηλία Σταύρακα, στον Καθηγητή της ΣΕΜΦΕ Σταύρο Κουρκουλή και τη Δρ. Ερμιόνη Πάσιου, Πολιτικό Μηχανικό. Κύριε Σταύρακα, η γνωριμία μου μαζί σας αποτελεί σταθμό στη ζωή μου. Χάρη σε εσάς που με πιστέψατε πριν χρόνια, όταν ήμουν ακόμα στο πρώτο εξάμηνο του μεταπτυχιακού και ανοίξατε το γραφείο σας, βρίσκομαι σήμερα εδώ. Κύριε Κουρκουλή σας ευχαριστώ για όλα, τον χρόνο που μου αφιερώσατε, για την διάθεση του Εργαστηρίου σας για την διεξαγωγή πειραμάτων, τη συνεχή καθοδήγησή και κυρίως για την υπομονή σας. Κυρία Πάσιου, σας ευχαριστώ πολύ για τις ατελείωτες ώρες που διαθέσατε, ιδιαίτερα για την βοήθειά σας και την εκπαίδευση που μου παρείχατε στην προετοιμασία και διεξαγωγή πειραμάτων. Δίπλα σας έμαθα την απαραίτητη υπομονή και επιμονή στη λεπτομέρεια που χρειάζεται για να την διεξαγωγή ενός πετυχημένου πειράματος. Σας ευχαριστώ όλους από καρδιάς.

Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους φίλους μου Γιώργο, Δημήτρη και Κώστα για την συμπαράστασή τους όλα αυτά τα χρόνια, βοηθώντας με να ξεπεράσω κάποιες δύσκολες περιόδους, που τελικά είναι αναπόφευκτες στο πλαίσιο εκπόνησης μιας διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Άννα και Νίκο. Όλα τα χρόνια των σπουδών μου, από την πρώτη μέρα μέχρι και την τελευταία, στάθηκαν δίπλα μου και με υποστηρίζουν ψυχολογικά και οικονομικά. Μητέρα, Πατέρα, σας αγαπώ πολύ και σας αξίζει το μεγαλύτερο «ευχαριστώ» για όλες τις δυσκολίες και τις στερήσεις που περάσατε για χάρη μου.

Ανδρόνικος Ν. Λουκίδης, 2022



## ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

### A. Δημοσιεύσεις σε περιοδικά αναγνωρισμένου κύρους.

1. **Andronikos Loukidis**, Ermioni D. Pasiou, Nicholas V. Sarlis, Dimos Triantis, *Fracture analysis of typical construction materials in natural time*, **Physica A**, **547**, 123831, **2020**. (Impact Factor: 3.263).
2. **Andronikos Loukidis**, Dimos Triantis, Ilias Stavrakas, *Non-extensive statistical analysis of acoustic emissions recorded in marble and cement mortar specimens under mechanical load until fracture*, **Entropy**, **2020**, **22(10)**, 1115 (Impact Factor: 2.524).
3. **Andronikos Loukidis**, Dimos Triantis, Ilias Stavrakas, *Non-extensive statistical analysis of acoustic emissions: The variability of entropic index  $q$  during loading of brittle materials until fracture*, **Entropy** **2021**, **23**, 276 (Impact Factor: 2.524).
4. **Andronikos Loukidis**, Jennifer Perez-Oregon, Ermioni D. Pasiou, Nicholas V. Sarlis, Dimos Triantis, “Similarity of fluctuations in critical systems: Acoustic emissions observed before fracture”, **Physica A**, **2021**, **566**, 125622 doi: 10.1016/j.physa.2020.125622. (Impact Factor: 3.263)
5. **Andronikos Loukidis**, Dimos Triantis, Ilias Stavrakas, Ermioni D. Pasiou, Stavros K. Kourkoulis, *Detecting Criticality by Exploring the Acoustic Activity in Terms of the “Natural-Time” Concept*, **Applied Sciences** **2022**, **12**, 231 (Impact Factor: 2.679).
6. Stavros K Kourkoulis, Ermioni D. Pasiou, **Andronikos Loukidis**, Ilias Stavrakas, Dimos Triantis. 2022. *Comparative Assessment of Criticality Indices Extracted from Acoustic and Electrical Signals Detected in Marble Specimens*, **Infrastructures** **7**, **2**, 15. (Cite Score: 2.5).

### B. Δημοσιεύσεις σε πρακτικά διεθνών συνεδρίων.

1. **Andronikos Loukidis**, Ermioni D. Pasiou, Nicholas V Sarlis, Dimos Triantis, *Similarity of fluctuations of acoustic emissions in natural time*, **Procedia Structural Integrity** **25** (2020) 195–200 [1<sup>st</sup> Virtual Conference on Structural Integrity – VCSI1].

### Γ. Παρουσιάσεις σε διεθνή συνέδρια (υποβολή περίληψης).

1. Stavros K. Kourkoulis, Ermioni D. Pasiou, **Andronikos Loukidis**, Ilias Stavrakas, Dimos Triantis, *The problem of predicting entrance of a mechanical system into its critical state. Applications in the restoration/conservation of stone monuments*, **7<sup>th</sup> International Conference on Crack Paths (CP 2021)**, September 21<sup>st</sup> to 24<sup>th</sup>, 2021, **Plenary lecture**.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....</b>	<b>25</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....</b>	<b>31</b>
<b>ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ.....</b>	<b>33</b>
<b>ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ.....</b>	<b>35</b>
<b>1. Η ΤΕΧΝΙΚΗ ΤΩΝ ΑΚΟΥΣΤΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ .....</b>	<b>37</b>
1.1 Εισαγωγή.....	37
1.2 Βασικές παράμετροι ακουστικών εκπομπών.....	39
<b>2. ΦΥΣΙΚΟΣ ΧΡΟΝΟΣ.....</b>	<b>45</b>
2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	45
2.1.1 Αντιστροφή χρόνου στον φυσικό χρόνο .....	46
2.1.2 Το κανονικοποιημένο φάσμα ισχύος και η διασπορά $\kappa_I$ του φυσικού χρόνου .....	46
2.1.3 Επεξήγηση της συνθήκης $\kappa_I = 0.070$ για δυναμικά συστήματα.....	47
2.1.4 Η εντροπία $S$ στον φυσικό χρόνο .....	48
2.1.5 Η εντροπία $S_-$ υπό αντιστροφή χρόνου .....	49
2.2 Αυτοργανωμένη κρισιμότητα .....	50
2.2.1 Μοντέλο τρένου Burridge-Κνοποff.....	51
2.2.2 Μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen .....	52
<b>3. ΜΗ-ΕΚΤΑΤΙΚΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ .....</b>	<b>55</b>
3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο.....	55
3.2 Εφαρμογές της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής στη σεισμολογία και στις διεργασίες θραύσης ...	59
3.3 Αξιοποίηση δεδομένων ΑΕ για τον προσδιορισμό του εντροπικού δείκτη $q$ .....	60
<b>4. ΥΛΙΚΑ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΑ.....</b>	<b>63</b>
4.1 Μάρμαρο Διονύσου .....	63

<b>4.2</b>	<b>Τσιμέντο Portland</b> .....	<b>63</b>
<b>4.3</b>	<b>Δοκίμια και πειραματικά πρωτόκολλα</b> .....	<b>64</b>
4.3.1	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε μαρμάρινα δοκίμια με εγκοπή.....	65
4.3.2	Δοκιμές άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή τύπου “DENT” .....	65
4.3.3	Δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου τύπου “CSR” .....	66
4.3.4	Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε πρισματικό δοκίμιο μαρμάρου.....	67
4.3.5	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια κονιάματος τσιμέντου .....	67
4.3.6	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε ινοπλισμένα δοκίμια κονιάματος τσιμέντου με εγκοπή .....	68
<b>4.4</b>	<b>Συνοπτική παρουσίαση των πειραμάτων</b> .....	<b>70</b>
<b>4.5</b>	<b>Αναλυτική περιγραφή πειραματικών διατάξεων και συλλογής δεδομένων</b> .....	<b>71</b>
<b>5.</b>	<b>ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>Εντοπισμός κρίσιμης κατάστασης με βάση το φυσικό χρόνο</b> .....	<b>81</b>
5.1.1	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή.....	81
5.1.2	Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμιο μαρμάρου τύπου “DENT” με εγκοπή .....	84
5.1.3	Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης σε δοκίμιο μαρμάρου τύπου “CSR” .....	85
5.1.4	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια κονιάματος τσιμέντου .....	87
5.1.5	Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	89
<b>5.2</b>	<b>Ανάλυση των ανηγμένων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της διασποράς <math>\kappa</math></b> .....	<b>91</b>
5.2.1	Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	94
<b>5.3</b>	<b>Εντοπισμός κρίσιμης κατάστασης με βάση την μεταβλητότητα του εντροπικού δείκτη <math>q</math> στο πλαίσιο της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής</b> .....	<b>95</b>
5.3.1	Δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου τύπου “CSR” .....	95
5.3.2	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή.....	99
5.3.3	Δοκιμές άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή τύπου “DENT” .....	101
5.3.4	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια κονιάματος τσιμέντου .....	103
5.3.5	Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	105
<b>5.4</b>	<b>Συσχέτιση της μεταβλητότητας του εντροπικού δείκτη <math>q</math> με την ακουστική δραστηριότητα</b> .....	<b>106</b>
5.4.1	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια κονιάματος τσιμέντου .....	107
5.4.2	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή.....	109
5.4.3	Δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου τύπου “CSR” .....	110
5.4.4	Δοκιμές άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή τύπου “DENT” .....	111
5.4.5	Σχολιασμός των αποτελεσμάτων.....	112
<b>5.5</b>	<b>Συσχέτιση των εντροπικών δεικτών <math>q_{\delta r}</math> και <math>q_{\delta t}</math></b> .....	<b>112</b>
5.5.1	Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου.....	114
5.5.2	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή.....	116

5.5.3	Δοκιμές άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή τύπου “DENT” .....	117
5.5.4	Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε ινοπλισμένα δοκίμια κονιάματος τσιμέντου με εγκοπή .....	119
5.5.5	Σχολιασμός των αποτελεσμάτων .....	121
<b>6.</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....</b>	<b>123</b>
<b>6.1</b>	<b>Συμπεράσματα .....</b>	<b>123</b>
<b>6.2</b>	<b>Θέματα για περαιτέρω έρευνα.....</b>	<b>125</b>
6.2.1	Ανάλυση της ακουστικής δραστηριότητας στο πεδίο του φυσικού χρόνου .....	125
6.2.2	Ακουστικές εκπομπές στο πεδίο του φυσικού χρόνου σε δοκούς ινοπλισμένου σκυροδέματος που υποβάλλονται σε κάμψη.....	126
6.2.3	Μια εναλλακτική μέθοδος παρακολούθησης της χωρικής κατανομής των πηγών ΑΕ.....	127
	<b>ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....</b>	<b>129</b>





## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης των σημάτων ΑΕ σε πρισματικό δοκίμιο. .....	38
Σχήμα 1.2 Οι δυο τύποι ακουστικών εκπομπών. (a) κρουστικού τύπου, (b) συνεχούς τύπου [37]. .....	40
Σχήμα 1.3 Βασικές παράμετροι ενός τυπικού σήματος ΑΕ.....	42
Σχήμα 2.1 (a) Μια χρονοσειρά ενέργειας ΑΕ στο συμβατικό χρόνο (t). (b) Η ίδια χρονοσειρά στο φυσικό χρόνο ( $\chi$ ). .....	45
Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου αμμόλοφου των Bak, Tang και Wiesenfeld. Εάν η κλίση του αμμόλοφου είναι μικρότερη της γωνίας ανάπαυσης $\theta_c$ , τότε ο αμμόλοφος είναι μακριά από την ισορροπία, και θα καταρρέει μόλις η κλίση του γίνει μεγαλύτερη ή ίση της γωνίας $\theta_c$ . Στην περίπτωση που η κλίση του αμμόλοφου είναι ίση με $\theta_c$ το σύστημα βρίσκεται σε μία κρίσιμη κατάσταση κατά την οποία οριακά θα είναι σταθερό σε σχέση με μικρές διαταραχές. ....	50
Σχήμα 2.3 Σχηματική απεικόνιση του μονοδιάστατου μοντέλου τρένου Burridge-Knopoff.....	51
Σχήμα 2.4 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου σεισμών Olami-Feder-Christensen. ....	52
Σχήμα 2.5 Ενδεικτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από (a) το μοντέλο σεισμών OFC και (b) το μοντέλο τρένου ΒΚ: Η διασπορά $\kappa_1$ και το μέγιστο μέγεθος χιονοστιβάδων ανα 50 χιονοστιβάδες σχεδιάζονται με παράλληλη απεικόνιση του εφαρμοζόμενου φορτίου ανά σώμα για: (a) τον αριθμό των χιονοστιβάδων και (b), μετά την έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου. Η τεθλασμένη μαύρη γραμμή αντιστοιχεί σε $\kappa_1=0.070$ [191]. ....	54
Σχήμα 3.1 Η $q$ -εκθετική συνάρτηση $\exp_q(X)$ για διάφορες τιμές του $q$ . ....	57
Σχήμα 3.2 Η $q$ -εκθετική συνάρτηση $\exp_q(-X)$ για διάφορες τιμές του $q$ (a) σε ημιλογαριθμικούς άξονες και (b) σε λογαριθμικούς άξονες.....	58
Σχήμα 3.3 Ο τρόπος υπολογισμού του χρόνου $\delta t$ στην περίπτωση δύο διαδοχικών χτύπων ΑΕ.	61
Σχήμα 4.1 Σχέδιο των δοκιμών μαρμάρου με κεντρική εγκοπή για τα πειράματα ExpBM-01 και ExpBM-02.....	65
Σχήμα 4.2 Σχέδιο των δοκιμών μαρμάρου γεωμετρίας “DENT” για τα πειράματα ExpDM-03 και ExpDM-04.....	66
Σχήμα 4.3 Σκίτσο του δοκιμίου μαρμάρου γεωμετρίας “CSR” του πειράματος ExpUM-05.....	66
Σχήμα 4.4 Σκίτσο του πρισματικού δοκιμίου μαρμάρου του πειράματος ExpUM-06.....	67

Σχήμα 4.5 Σχέδιο των δοκιμίων κονιάματος τσιμέντου των πειραμάτων ExprBC-07, ExprBC-08 και ExprBC-09.....	67
Σχήμα 4.6 Σχέδιο των ινοπλισμένων δοκιμίων κονιάματος τσιμέντου με εγκοπή των πειραμάτων ExprBCR-10, ExprBCMF-11 και ExprBCPF-12. ....	68
Σχήμα 4.7 Ηλεκτρουδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου Instron DX 300. ....	71
Σχήμα 4.8 (α) Η κάρτα 2 καναλιών PIC-2. (b) Το block διάγραμμα της κάρτας 2 καναλιών PIC-2 [132]. ....	72
Σχήμα 4.9 Block διάγραμμα συστήματος ελέγχου και καταγραφής ΑΕ. ....	73
Σχήμα 4.10 Η καμπύλη απόκρισης για την περίπτωση του ακουστικού αισθητήρα R6a [134]. .	74
Σχήμα 4.11 (α) Η δομή ενός τυπικού αισθητήρα ΑΕ και (b) Ακουστικός αισθητήρας τύπου R6a [133]. ....	75
Σχήμα 4.12 Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας ΑΕ τύπου R6a Το κόκκινο βέλος δείχνει το λεπτό φιλμ σιλικόνης στη διεπαφή δοκιμίου - αισθητήρα. ....	75
Σχήμα 4.13 Η μέθοδος PLB για την παραγωγή σήματος ΑΕ [135]. ....	76
Σχήμα 4.14 Οι χρόνοι PDT, HDT και HLT, για την περίπτωση δύο διαδοχικών σημάτων ΑΕ κρουστικού τύπου [136].....	77
Σχήμα 5.1 Η εξέλιξη (α) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων $k_1$ , $S$ , $S_*$ με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου $\ell$ , για το πείραμα ExprBM-01.....	82
Σχήμα 5.2 Η εξέλιξη (α) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων $k_1$ , $S$ , $S_*$ με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου $\ell$ , για το πείραμα ExprBM-02.....	83
Σχήμα 5.3 Η εξέλιξη (α) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων $k_1$ , $S$ , $S_*$ με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου $\ell$ , για το πείραμα ExprDM-03.....	85
Σχήμα 5.4 Η εξέλιξη (α) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων $k_1$ , $S$ , $S_*$ με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου $\ell$ , για το πείραμα ExprUM-05.....	86

Σχήμα 5.5 Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων $\kappa_1$ , $S$ , $S_*$ με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου $\ell$ , για το πείραμα ExprBC-07. ....	88
Σχήμα 5.6 Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων $\kappa_1$ , $S$ , $S_*$ με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου $\ell$ , για το πείραμα ExprBC-08. ....	89
Σχήμα 5.7 Οι ανηγμένες PDFs $\sigma(\kappa_1)P(y)$ ως συνάρτηση του $y=[\mu(\kappa_1)-\kappa_1]/\sigma(\kappa_1)$ στο φυσικό χρόνο που προέκυψαν κατά την ανάλυση είτε των μεγεθών των χιονοστιβάδων των μοντέλων OFC και BK είτε των χτύπων AE των πειραμάτων που μελετήθηκαν. Οι παχιές κόκκινες και πράσινες γραμμές αντιστοιχούν στις ανηγμένες PDFs της παραμέτρου τάξης του μοντέλου 2D Ising κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία σε αντίστροφη θερμοκρασία $\beta=0.4707$ για γραμμικές διαστάσεις $L=128$ και $L=256$ , αντιστοίχως. ....	93
Σχήμα 5.8 Η κατανομή (a) των πλατών των χτύπων AE και (b) των AE interevent times για το πείραμα ExprUM-05 με παράλληλη απεικόνιση του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου $\ell$ σε χρονική κλίμακα $(t_f - t)$ . Κάθε χρώμα υποδηλώνει τις διαφορετικές ομάδες χτύπων AE που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των αντίστοιχων interevent times. ....	96
Σχήμα 5.9 Οι SFs των interevent times για κάθε ομάδα χτύπων AE (χρωματιστοί δείκτες) για το πείραμα ExprUM-05, με παράλληλη απεικόνιση των αντίστοιχων $q$ -εκθετικών συναρτήσεων προσαρμογής (χρωματιστές καμπύλες). ....	97
Σχήμα 5.10 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη $q$ για κάθε ομάδα χτύπων AE του πειράματος ExprUM-05 σε χρονική κλίμακα $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ σε χρονική κλίμακα $(t_f - t)$ . ....	98
Σχήμα 5.11 Οι SFs των interevent times για κάθε ομάδα χτύπων AE (χρωματιστοί δείκτες) για το πείραμα ExprBM-01, με παράλληλη απεικόνιση των αντίστοιχων $q$ -εκθετικών συναρτήσεων προσαρμογής (χρωματιστές καμπύλες). ....	99
Σχήμα 5.12 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη $q$ για κάθε ομάδα χτύπων AE του πειράματος ExprBM-01 σε χρονική κλίμακα $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ σε χρονική κλίμακα $(t_f - t)$ . ....	101
Σχήμα 5.13 Οι SFs των interevent times για κάθε ομάδα χτύπων AE (χρωματιστοί δείκτες) για το πείραμα ExprDM-04, με παράλληλη απεικόνιση των αντίστοιχων $q$ -εκθετικών συναρτήσεων προσαρμογής (χρωματιστές καμπύλες). ....	102

Σχήμα 5.14 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη $q$ για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExpDM-04 σε χρονική κλίμακα $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ σε χρονική κλίμακα $(t_f - t)$ .....	103
Σχήμα 5.15 Οι SFs των interevent times για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ (χρωματιστοί δείκτες) για το πείραμα ExpBC-09, με παράλληλη απεικόνιση των αντίστοιχων $q$ -εκθετικών συναρτήσεων προσαρμογής (χρωματιστές καμπύλες). .....	104
Σχήμα 5.16 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη $q$ για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExpBC-09 σε χρονική κλίμακα $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ σε χρονική κλίμακα $(t_f - t)$ .....	105
Σχήμα 5.17 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη $q$ για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExpBC-09 σε χρονική κλίμακα $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη της συνάρτησης $F$ σε χρονική κλίμακα $(t_f - \tau)$ . .....	108
Σχήμα 5.18 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη $q$ για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExpBM-01 σε χρονική κλίμακα $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη της συνάρτησης $F$ σε χρονική κλίμακα $(t_f - \tau)$ .....	109
Σχήμα 5.19 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη $q$ για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExpUM-05 σε χρονική κλίμακα $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη της συνάρτησης $F$ σε χρονική κλίμακα $(t_f - \tau)$ . .....	110
Σχήμα 5.20 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη $q$ για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExpDM-04 σε χρονική κλίμακα $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη της συνάρτησης $F$ σε χρονική κλίμακα $(t_f - \tau)$ . .....	111
Σχήμα 5.21 Ο τρόπος υπολογισμού της απόστασης $\delta_{i1}$ για την περίπτωση δύο γεγονότων ΑΕ	113
Σχήμα 5.22 (a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ για το πείραμα ExpUM-06. (b) Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές $q_{\delta t}$ και $q_{\delta r}$ και οι αντίστοιχες $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.....	115
Σχήμα 5.23(a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ για το πείραμα ExpBM-02. (b) Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές $q_{\delta t}$ και $q_{\delta r}$ και οι αντίστοιχες $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.....	116
Σχήμα 5.24 (a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ για το πείραμα ExpDM-03. (b) Οι SFs των interevent times και	

των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές $q_{\delta t}$ και $q_{\delta r}$ και οι αντίστοιχες $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.....	117
Σχήμα 5.25 (a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων AE και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ για το πείραμα ExpBCR-10. (b) Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές $q_{\delta t}$ και $q_{\delta r}$ και οι αντίστοιχες $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.....	118
Σχήμα 5.26(a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων AE και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ για το πείραμα ExpBCMF-11. (b) Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές $q_{\delta t}$ και $q_{\delta r}$ και οι αντίστοιχες $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.....	119
Σχήμα 5.27(a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων AE και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου $\ell$ για το πείραμα ExpBCPF-12. (b) Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές $q_{\delta t}$ και $q_{\delta r}$ και οι αντίστοιχες $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.....	120
Σχήμα 6.1 Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό της συνάρτησης $F$ με παράλληλη απεικόνιση του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου, για το πείραμα ExpDM-03..	126



## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1 Η περιεκτικότητα της εσωτερικής ενίσχυσης και οι διαστάσεις των ινών που περιέχονται στα δοκίμια των πειραμάτων ExpBCR-10, ExpBCMF-11 και ExpBCPF-12. ....	69
Πίνακας 4.2 Συνοπτική παρουσίαση των εξεταζόμενων δοκιμίων .....	70
Πίνακας 5.1 Συνοπτική παρουσίαση των βασικότερων κρίσιμων σταδίων που προέκυψαν από την ανάλυση της ενέργειας των χτύπων ΑΕ κατά την διάρκεια των παρουσιαζόμενων πειραμάτων.91	
Πίνακας 5.2 Οι εντροπικοί δείκτες $q$ και οι παράμετροι προσαρμογής $\beta_q$ και $\tau_q=1/\beta_q$ , που υπολογίστηκαν για το πείραμα ExpUM-05. Στην τελευταία στήλη αναγράφεται και το $\delta\tau_{max}$ που χρησιμοποιήθηκε στην προσαρμογή με βάση την Εξίσωση (5.1). ....	97
Πίνακας 5.3 Οι εντροπικοί δείκτες $q$ και οι παράμετροι προσαρμογής $\beta_q$ και $\tau_q=1/\beta_q$ , που υπολογίστηκαν για το πείραμα ExpBM-01. Στην τελευταία στήλη αναγράφεται και το $\delta\tau_{max}$ που χρησιμοποιήθηκε στην προσαρμογή με βάση την Εξίσωση (5.1). ....	100
Πίνακας 5.4 Οι εντροπικοί δείκτες $q$ και οι παράμετροι προσαρμογής $\beta_q$ και $\tau_q=1/\beta_q$ , που υπολογίστηκαν για το πείραμα ExpDM-04. Στην τελευταία στήλη αναγράφεται και το $\delta\tau_{max}$ που χρησιμοποιήθηκε στην προσαρμογή με βάση την Εξίσωση (5.1). ....	102
Πίνακας 5.5 Οι εντροπικοί δείκτες $q$ και οι παράμετροι προσαρμογής $\beta_q$ και $\tau_q=1/\beta_q$ , που υπολογίστηκαν για το πείραμα ExpBC-09. Στην τελευταία στήλη αναγράφεται και το $\delta\tau_{max}$ που χρησιμοποιήθηκε στην προσαρμογή με βάση την Εξίσωση (5.1). ....	104
Πίνακας 5.6 Οι τιμές των εντροπικών δεικτών $q_{\delta\tau}$ , $q_{\delta r}$ , και των αντίστοιχων παραμέτρων $\tau_{\delta\tau}$ , $d_{\delta r}$ , για κάθε πείραμα. Στην τελευταία δεξιά στήλη φαίνεται το άθροισμα των εντροπικών δεικτών. Το σφάλμα στην τελευταία στήλη προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τιμές των $q$ έχουν σφάλμα 0.01. ....	114
Πίνακας 5.7 Το ποσοστό των πειραματικών δεδομένων των SFs των interevent times και των interevent distances που δεν συμπεριλαμβάνονται στο αντίστοιχο fitting. ....	115
Πίνακας 5.8 Οι τιμές των εντροπικών δεικτών $q_{\delta\tau}$ , $q_{\delta r}$ , και των αντίστοιχων αποκλίσεων. ....	121





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Acoustic emission	Ακουστική εκπομπή
Amplitude	Πλάτος
Arrival Time	Χρόνος Άφιξης
Associated escort distribution	Σχετιζόμενη συνοδεύουσα κατανομή
Average Frequency	Μέση συχνότητα
Brazilian disk configuration	Διαμόρφωση «Βραζιλιανού δίσκου»
Bulk density	Φαινόμενη πυκνότητα
Causal	Αιτιώδης
Cellular automaton	Κυψελωτού αυτόματου
Counts	Απαριθμήσεις
Counts to peak	Απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο
Critical forest fire model	Μοντέλο δασικών πυρκαγιών
Cumulative distribution functions	Αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής
Damage	Αστοχία
Duration	Διάρκεια
Effective potential	Αποτελεσματικό δυναμικό
Energy	Ενέργεια
Escort distribution	Συνοδεύουσα κατανομή
Generalized q-expectation value	Γενικευμένη αναμενόμενη τιμή οριζόμενη μέσω του δείκτη q
Global perturbation	Παγκόσμια διαταραχή
Hit	Χτύπος
Hit-driven data	Δεδομένα συσχετισμένα με την κρουστική μορφή ενός σήματος
Interevent distances	Χωρική ή Ευκλείδεια απόσταση μεταξύ διαδοχικών γεγονότων
Interevent time	Χρόνος ή χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών γεγονότων
Lattice field fluctuations	Διακυμάνσεις πεδίου
Lattice Gas model	Μοντέλο αερίου σε πλέγμα
Load carrying capacity	Φέρουσα ικανότητα φορτίου
Long range correlations	Συσχετίσεις μεγάλης εμβέλειας
Mean-field description	Περιγραφή μέσου πεδίου
Memory effects	Φαινόμενα μνήμης
Multifractal	Πολυμορφοκλασματικών
Natural time	Φυσικός χρόνος
Non-additivity	Μη-προσθετικότητα
Non-extensive statistical mechanics	Μη-εκτατικής στατιστικής μηχανική
Notch Mouth Opening Displacement	Άνοιγμα των χειλέων εγκοπής
Peak amplitude	Μέγιστο ανιχνευόμενο πλάτος
Power law	Νόμος δύναμης
Pre-failure indicators	Δείκτες της επικείμενης θραύσης
Pseudo-additivity	Ψευδοπροσθετικότητα
q-exponential function	q-εκθετική συνάρτηση
q-logarithmic function	q-λογαριθμική συνάρτηση
q-partition function	Συνάρτηση επιμερισμού που ορίζεται μέσω του δείκτη q

Relative density	Σχετική πυκνότητα
Rise Angle	Γωνία ανύψωσης
Rise time	Χρόνος ανύψωσης
Scalar moment	Βαθμωτή σεισμική ροπή
Scaled probability density function	Ανηγγμένες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας
Seismic Electric Signals	Προσεισμικά ηλεκτρικά σήματα
Self-organized criticality	Αυτοργανωμένη κρισιμότητα
Self-similar	Αυτό-όμοιος
Short range correlations	Συσχετίσεις μικρής εμβέλειας
Structural health monitoring techniques	Τεχνικές παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας
Sub-additivity	Υπο-προσθετικότητα
Super-additivity	Υπερ-προσθετικότητα
Survival function	Συνάρτηση επιβίωσης
Synthetic event	Συνθετικό γεγονός
Threshold	Κατώφλι
Time-driven data	Χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα
Time to failure	Χρόνος έως τη θραύση

## ΣΥΝΤΜΗΣΕΙΣ – ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ – ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

AE	Ακουστική Εκπομπή
BK	Burridge-Κνοροff
CDF	Cumulative Distribution Function
CSR	Circular Semi-Ring
DENT	Double Edge Notched
HDT	Hit Definition Time
HLT	Hit Lockout Time
NESM	Non-Extensive Statistical Mechanics
NMOD	Notch Mouth Opening Displacement
OFC	Olami-Feder-Christensen
PDF	Probability Density Function
PDT	Peak Definition Time
PLB	Pencil Lead Break
RA	Rise Angle
SES	Seismic Electric Signals
SF	Survival Function
SHM	Structural Health Monitoring
$t_f$	Time of failure
$\delta r$	Interevent distance
$\delta \tau$	Interevent time



## 1. Η Τεχνική των Ακουστικών Εκπομπών

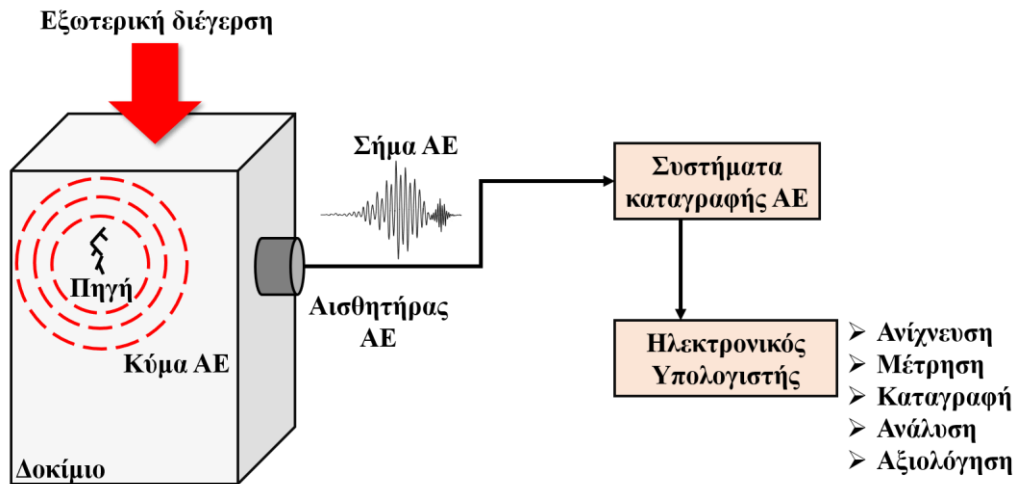
Το κεφάλαιο παρουσιάζει την τεχνική των ακουστικών εκπομπών, η οποία αποτελεί μία καθιερωμένη τεχνική παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας. Στην παράγραφο 1.1 περιγράφεται ακροθιγώς το φαινόμενο των ακουστικών εκπομπών και πως η ομώνυμη τεχνική τοποθετείται στο γενικότερο πλαίσιο των τεχνικών παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας. Επιπλέον, σχολιάζονται τα πλεονεκτήματα αλλά και τα μειονεκτήματα της τεχνικής των ακουστικών εκπομπών. Στην παράγραφο 1.2 αναφέρονται οι μηχανισμοί γέννησης των ακουστικών εκπομπών, ενώ γίνεται λεπτομερής παρουσίαση των βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των σημάτων των ακουστικών εκπομπών.

### 1.1 Εισαγωγή

Καθώς περνά σε φάση γήρανσης η πολιτική υποδομή (γέφυρες, αυτοκινητόδρομοι, δημόσια κτήρια κτλ.) και ταυτόχρονα καλείται να σηκώσει ολοένα αυξανόμενα ωφέλιμα φορτία, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας σε πραγματικό χρόνο, προκειμένου να διευκολυνθεί η εφαρμογή στρατηγικών συντήρησης και ο ακριβής προσδιορισμός της υπολειπόμενης φέρουσας ικανότητας φορτίου (load carrying capacity). Έτσι, επιστρατεύονται πέραν του επιτόπιου οπτικού ελέγχου, τεχνικές παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring techniques - SHM) η χρήση των οποίων επικεντρώνεται κυρίως στην εφαρμογή στρατηγικών αναγνώρισης των αστοχιών (damages) εντός των υποδομών [1]. Οι πληροφορίες που αντλούνται από τις SHM, επιτρέπουν στους μηχανικούς να βελτιώσουν την ασφάλεια, την αξιοπιστία, τη συντηρησιμότητα και το λειτουργικό κόστος των υποδομών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, καθώς συμβάλλουν στη μείωση του κόστους συντήρησης και στην πρόληψη ανεπανόρθωτων ζημιών [2, 3]. Ορισμένες από αυτές τις τεχνικές περιλαμβάνουν, καθοδηγούμενα κύματα υπερήχων [4], ανίχνευση δινορευμάτων [5], διεισδυτικά υγρά [6], μαγνητικά σωματίδια [7], ραδιογραφία με ακτίνες X [8], τεχνικές κρουστικού ελέγχου [9] και η τεχνική των ακουστικών εκπομπών [10].

Σύμφωνα με τον ορισμό της American Society for Testing and Materials (Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών) [11], ως ακουστική εκπομπή θεωρούνται τα ελαστικά κύματα που παράγονται λόγω της ταχείας απελευθέρωσης της ενέργειας παραμόρφωσης από μία ή και περισσότερες τοπικές πηγές λόγω γένεσης ή διάδοσης προϋπάρχουσας αστοχίας ή αλλαγής φάσεως στο εσωτερικό κάποιου υλικού [12]. Η τεχνική των ακουστικών εκπομπών (AE) βασίζεται στην ανίχνευση αυτών των ελαστικών κυμάτων τα οποία ταξιδεύουν εντός του υλικού προς τα όριά του, όπου ανιχνεύονται από ειδικούς πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, κατάλληλα τοποθετημένους στην επιφάνεια του υλικού. Όταν ένα κύμα AE φθάσει σε έναν από τους πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες που βρίσκονται στην επιφάνεια του υλικού, προκαλούν μικρές επιφανειακές μετατοπίσεις σε κλίμακα νανομέτρων, η οποία μετατρέπεται από τον αισθητήρα σε ηλεκτρικό σήμα. Η μορφή του κύματος AE, καθώς και το φασματικό του περιεχόμενο, που τελικά φθάνει στην επιφάνεια του υλικού και ανιχνεύεται από το πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα, επηρεάζονται τόσο από τη γεωμετρία όσο και από τις ιδιότητες διάδοσης του κύματος εντός του υλικού μεταξύ της πηγής AE και του αισθητήρα. Στο Σχήμα 1.1 φαίνεται η διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης της AE.

Το φαινόμενο της ακουστικής εκπομπής μπορεί να γίνει κατανοητό από μεσοσκοπικά παραδείγματα της καθημερινότητας, όπως οι ήχοι που παράγονται κατά τη θραύση διαφόρων στερεών υλικών όταν αυτά υπόκεινται σε καταστρεπτικά επίπεδα μηχανικής φόρτισης. Ο ήχος που παράγει το γυαλί όταν ραγίζει, το τρίξιμο του ξύλου λίγο πριν σπάσει, η διάδοση της ρωγμής σε ένα παγάκι όταν εκείνο πέφτει σε ένα ποτήρι με ζεστό νερό, αποτελούν ορισμένα ενδεικτικά παραδείγματα. Στη μεταλλουργία, δύο φαινόμενα, τα οποία σχετίζονται με την αλλαγή φάσεως που συντελείται εντός του υλικού, μπορούν



Σχήμα 1.1 Διαδικασία γένεσης, διάδοσης και ανίχνευσης των σημάτων ΑΕ σε πρισματικό δοκίμιο.

να θεωρηθούν ως χαρακτηριστικά παραδείγματα του φαινομένου των ακουστικών εκπομπών είναι η κραυγή κασσίτερου, η οποία ακούγεται κατά τη διδυμία καθαρού κασσίτερου όταν υφίσταται πλαστική παραμόρφωση και ο μετασχηματισμός μαρτενσίτη σε χάλυβα. Μακροσκοπικά φαινόμενα τα οποία σχετίζονται με τη δημιουργία ελαστικών κυμάτων ενδεικτικών της τελικής αστοχίας είναι οι σεισμοί και οι εκρήξεις βράχων στα ορυχεία. Ο σεισμός αποτελεί μία ξαφνική κίνηση του φλοιού της Γης η οποία δημιουργεί ελαστικές διαταραχές, γνωστές ως σεισμικά κύματα. Αυτά τα κύματα διαδίδονται σφαιρικά από το υπόκεντρο του σεισμού προς την επιφάνεια της Γης με αποτέλεσμα τη δόνηση του εδάφους. Αυτές οι δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν ζημιά στην επιφάνεια της Γης, η οποία μπορεί να συσχετιστεί με το μέγεθος του σεισμού και τις τοπικές γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν. Κατ' αναλογία με τους σεισμούς, το φαινόμενο των ακουστικών εκπομπών μπορεί να θεωρηθεί μια μορφή μικροσεισμικότητας, η οποία παράγεται κατά τη διαδικασία γέννησης και διάδοσης των μικρορωγμών εντός των υλικών που υφίστανται καταστρεπτικά επίπεδα μηχανικής φόρτισης. Εναλλακτικά, τόσο οι σεισμολογικές τεχνικές όσο και η τεχνική ακουστικών εκπομπών προσεγγίζουν το ίδιο φαινόμενο αλλά σε διαφορετική κλίμακα. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο στην τεχνική των ακουστικών εκπομπών εφαρμόζονται και σεισμολογικές τεχνικές όπως η b-value ανάλυση.

Ως τεχνική παρακολούθησης της δομικής ακεραιότητας, η τεχνική ΑΕ παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων τεχνικών παρακολούθησης, όπως:

- Η ΑΕ αποτελεί μία παθητική μέθοδο μη-καταστρεπτικού ελέγχου καθώς, η ανιχνευόμενη ενέργεια προέρχεται από το ίδιο το δοκίμιο-κατασκευή και όχι από μία εξωτερική πηγή. Παραδείγματος χάρη, για την εφαρμογή της μεθόδου καθοδηγούμενων κυμάτων υπερήχων η ανίχνευση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών μίας αστοχίας σε ένα δοκίμιο, πραγματοποιείται με την χρήση ενός τεχνητά παραγόμενου σήματος πηγής και ένα δέκτη. Αντιθέτως, με την τεχνική ΑΕ η ανιχνευόμενη ενέργεια προέρχεται από τις ΑΕ που εκπέμπονται λόγω γένεσης-διάδοσης μίας ρωγμής εντός του δοκιμίου. Παρόλα αυτά, η τεχνική ΑΕ απαιτεί την εφαρμογή μίας εξωτερικής διέγερσης, για την ενεργοποίηση των πηγών ΑΕ.
- Μπορεί να ανιχνεύσει τις δυναμικές διεργασίες που σχετίζονται με την θραύση σε πραγματικό χρόνο χωρίς να απαιτείται η διακοπή του πρωτοκόλλου φόρτισης του δοκιμίου ή της λειτουργίας της κατασκευής.

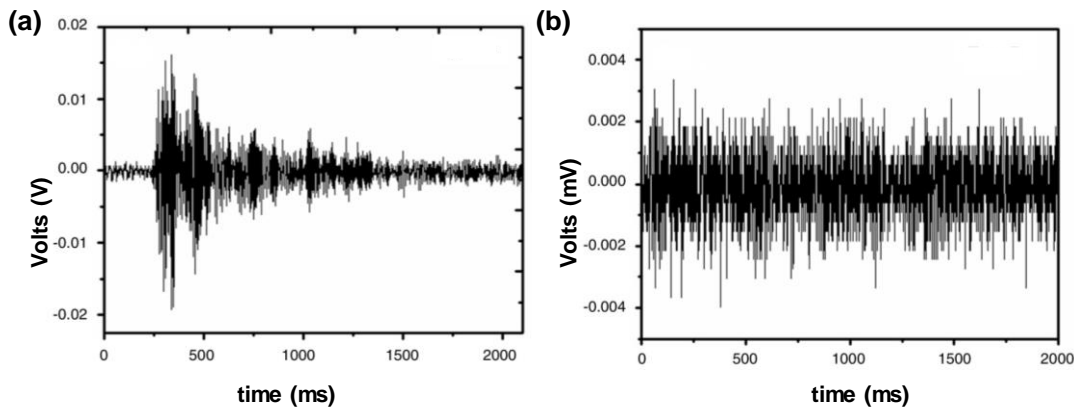
- Μπορεί να ανιχνεύει χωρίς προθύστερη γνώση την πιθανή τοποθεσία και να εντοπίσει τις πηγές των ΑΕ με καλή ακρίβεια.
- Η υψηλή ακρίβεια της μεθόδου επιτρέπει την κάλυψη μεγάλων κατασκευών με σχετικά μικρό αριθμό αισθητήρων οι οποίοι τοποθετούνται κατάλληλα στην επιφάνεια της υπό εξέταση κατασκευής. Οι ακουστικοί αισθητήρες στερεώνονται στην επιφάνεια της κατασκευής κατά τη διάρκεια του ελέγχου και δεν χρειάζεται να μετακινούνται για σάρωση ολόκληρης της δομής από σημείο σε σημείο. Επιπλέον, μπορούν να παρακολουθούν την ακουστική δραστηριότητα εντός της κατασκευής, υπό την προϋπόθεση ότι τα ανιχνευόμενα σήματα ΑΕ είναι αρκετά ισχυρά ώστε να υπερβούν την καθοριζόμενη τάση κατωφλίου.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανίχνευση τυχόν αστοχιών σε πολύ πρώιμο στάδιο, πολύ νωρίτερα από τα καταστρεπτικά επίπεδα φόρτισης.

Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα της τεχνικής ΑΕ:

- Επειδή η τεχνική ΑΕ εξαρτάται περισσότερο από τις μη αντιστρεπτές (μη ελαστικές) παραμορφώσεις των υλικών, ένα συγκεκριμένο πείραμα δεν μπορεί να αναπαραχθεί τέλεια λόγω της τυχαίας και μη αντιστρεπτής φύσης των πηγών ΑΕ, όπως π.χ. ο σχηματισμός ρωγμών εντός του υλικού. Αν και δοκίμια ίδιας γεωμετρίας και φυσικοχημικών ιδιοτήτων δύναται να παράγουν παρόμοια ακουστική δραστηριότητα, χωρίς όμως, αυτό, να είναι απαραίτητο ότι συμβαίνει πάντα.
- Η τεχνική ΑΕ δεν μπορεί να παράσχει ένα στιγμιαίο μέτρο του επιπέδου καταπόνησης ενός δοκιμίου ή μιας κατασκευής.
- Η αυξημένη ανάγκη για υπολογιστική ισχύ και η αναγκαία υποδομή που απαιτείται για την αξιοποίηση των ακουστικών σημάτων, αποτελεί μείζον μειονέκτημα για την χρήση της τεχνικής ΑΕ. Οι παράμετροι των ακουστικών εκπομπών που χρησιμοποιούνται ως πρόδρομοι αστοχίας, όπως η ενέργεια και το πλάτος, είναι, συνήθως, αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερες σε σύγκριση με τα σήματα που χρησιμοποιούνται σε άλλες τεχνικές μη-καταστρεπτικού ελέγχου. Αυτό, δημιουργεί την απαίτηση για αξιόπιστο εξοπλισμό (αισθητήρες, προενισχυτές, ενισχυτές, κτλ.), ο οποίος θα πρέπει να αντιμετωπίσει προβλήματα που σχετίζονται με την επίδραση του περιβάλλοντος θορύβου, την εξασθένηση των ακουστικών σημάτων λόγω της διάδοσης εντός του υλικού και η χαμηλή αναλογία σήματος προς θόρυβο που πιθανώς να υφίσταται. Έτσι, απαιτούνται εξελιγμένες τεχνικές επεξεργασίας δεδομένων για την ανίχνευση και εντοπισμό των πηγών ακουστικών εκπομπών, καθώς και εφαρμογή άλλων προηγμένων τεχνικών ανάλυσης. Επιπλέον, η αξιόπιστη ανάλυση των σημάτων ακουστικής εκπομπής και η ερμηνεία των δεδομένων τους είναι συνήθως δυνατή μόνο σε περιπτώσεις όπου τα σήματα έχουν εντοπιστεί με επιτυχία.

## 1.2 Βασικές παράμετροι ακουστικών εκπομπών

Η παραγωγή των ακουστικών εκπομπών αποτελεί ένα φαινόμενο το οποίο εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Η πλέον αντιπροσωπευτική διαδικασία παραγωγής ΑΕ στα στερεά υλικά, είναι η διάδοση των ρωγμών λόγω της επιβολής μηχανικού φορτίου [13]. Οι πηγές ΑΕ χωρίζονται σε πρωτεύουσες και δευτερεύουσες ή ψευδοπηγές. Οι πρωτεύουσες πηγές ΑΕ σχετίζονται με τις παραμέτρους της ανάπτυξης ρωγμών κόπωσης και της μηχανικής θραύσης και περιλαμβάνουν σχισμούς, εγκλείσματα, μικρορωγμές και πλαστική παραμόρφωση. Οι ψευδοπηγές σχετίζονται με μετασχηματισμούς φάσης, όπως διάβρωση, φθορά λόγω παλινδρόμησης, τυχόν διαρροές, σπηλαίωση και μαγνητικές διεργασίες [14]. Τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των κυμάτων ΑΕ τα οποία παράγονται από πηγές διαφορετικής φύσης, εξαρτώνται άμεσα από τις ιδιότητες του υλικού



Σχήμα 1.2 Οι δυο τύποι ακουστικών εκπομπών. (a) κρουστικού τύπου, (b) συνεχούς τύπου [37].

και τους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Στα μέταλλα, οι μηχανισμοί που είναι υπεύθυνοι για την παραγωγή ΑΕ κατά την ανάπτυξη νέων ρωγμών κόπωσης περιλαμβάνουν, την διάδοση προϋπαρχουσών αστοχιών [15, 16], τις ατέλειες που εμφανίζονται στο κρυσταλλικό πλέγμα όπως μεταστάσεις, διδυμίες, κατακρημνίσεις, ολίσθηση διαχωριστικών επιφανειών κ.ά., την πλαστική παραμόρφωση [17] και τη φθορά λόγω παλινδρόμησης μεταξύ θραυσμένων επιφανειών [18, 19]. Σε σύνθετα υλικά, τα σήματα ΑΕ μπορούν δυνητικά να δημιουργηθούν λόγω μικρορωγματώσεων της μήτρας, ή από την αποκόλληση των ινών ενίσχυσης, ή τη μακροσκοπική θραύση ινών κτλ. [20].

Η μελέτη των ακουστικών εκπομπών μπορεί να συμβάλει στην κατανόηση των διεργασιών εξέλιξης της ρωγμής που εμφανίζονται μέσα σε υλικά και κατασκευές [21], για αυτό έχουν χρησιμοποιηθεί συγκεκριμένες παράμετροι των ακουστικών εκπομπών ως δείκτες της επικείμενης θραύσης (pre-failure indicators) [22-24]. Επιπλέον, η τεχνική ΑΕ έχει χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της συνολικής δομικής ακεραιότητας και της υπολειπόμενης φέρουσας ικανότητας φορτίου σε κατασκευές μεγάλης κλίμακας [25-29], στην αεροπορική βιομηχανία [30, 31], σε βιοϊατρικές μελέτες, όπως σε αρθρώσεις [32], σε οστά [33] και δόντια [34], σε μαλακούς ιστούς και συνδέσμους [35]. Σημειώνεται, πως η τεχνική ΑΕ έχει καταστεί η προτιμητέα μέθοδος ελέγχου για τα σύνθετα δοχεία και αγωγούς πετρελαίου και φυσικού αερίου [36].

Η διάδοση των ακουστικών εκπομπών από την πηγή που παρήχθησαν εντός του υλικού μέχρι την επιφάνεια του υλικού και στην συνέχεια η καταγραφή τους από τον πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα είναι μία περίπλοκη διαδικασία. Το σήμα ΑΕ κατά τη δημιουργία του, είναι θεωρητικά ένας παλμός Dirac καθώς οι διαδικασίες γέννησης των ΑΕ, συνήθως ολοκληρώνονται σε χρονικό διάστημα της τάξεως των μικροδευτερολέπτων ( $\mu\text{s}$ ). Όμως τα κύματα ΑΕ καθώς διαδίδονται από την πηγή μέχρι τον αισθητήρα έχουν υποστεί αλλοιώσεις λόγω φαινομένων εξασθένησης, σκέδασης των κυμάτων κατά την αλληλεπίδραση τους με ασυνέχειες του υλικού, ανακλάσεις στα όρια του υλικού και αλληλεπίδρασης με αντανάκλασεις άλλων κυμάτων. Σημειώνεται, πως τα περισσότερα κύματα ΑΕ διαδίδονται από την πηγή με σφαιρικό τρόπο προς όλες τις κατευθύνσεις περιέχοντας συνιστώσες τύπου P και S, οι οποίες διαδίδονται με διαφορετικές ταχύτητες διάδοσης και σε διαφορετικές κατευθύνσεις ταλάντωσης.

Η ακουστική δραστηριότητα περιγράφεται συνήθως από παραμέτρους που σχετίζονται με το πλήθος και το μέγεθος των ακουστικών σημάτων. Τα σήματα ΑΕ που ανιχνεύονται από τον αισθητήρα μπορούν να διακριθούν σε κρουστικού και συνεχούς τύπου. Η ακουστική εκπομπή κρουστικού τύπου σχετίζεται με μεμονωμένα ακουστικά γεγονότα που συμβαίνουν σε ένα υλικό τα οποία οδηγούν σε διακριτά σήματα ακουστικής εκπομπής. Τα



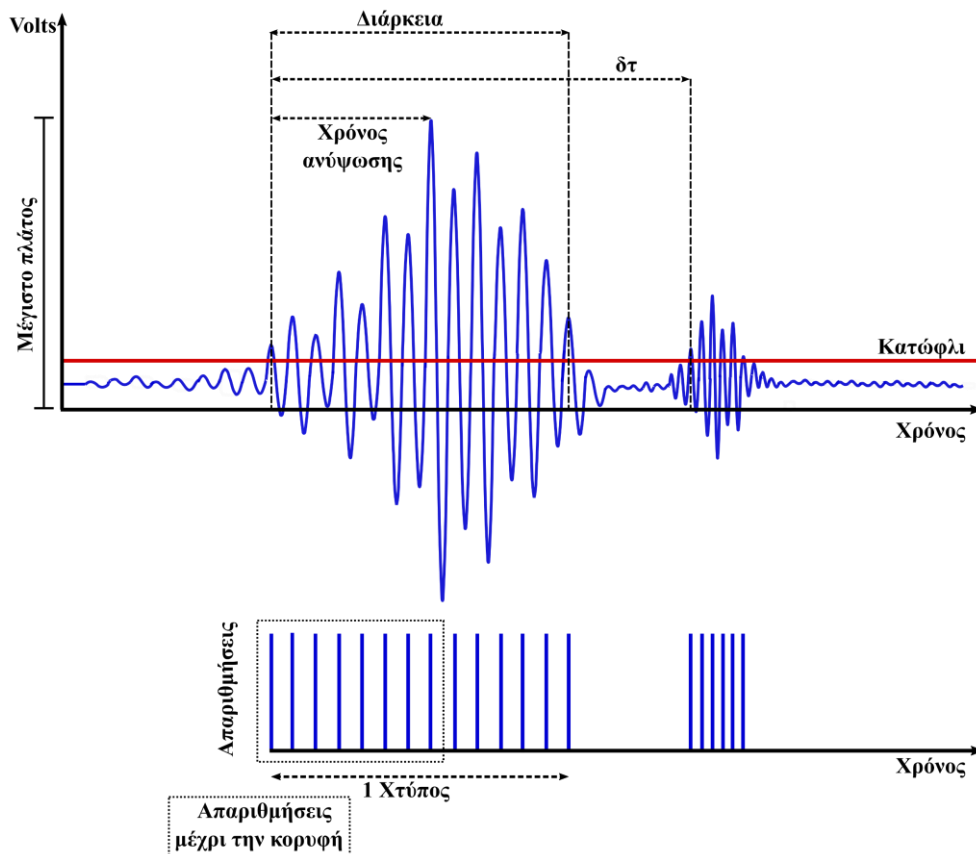
δεδομένα που καταγράφονται από τέτοιου είδους σήματα καλούνται δεδομένα συσχετισμένα με την κρουστική μορφή ενός σήματος ΑΕ (hit-driven data). Η ακουστική εκπομπή συνεχούς τύπου προκύπτει από την χρονική επικάλυψη διαδοχικών ακουστικών γεγονότων από μία ή περισσότερες πηγές με αποτέλεσμα τη δημιουργία παρατεταμένων σημάτων ΑΕ. Τα δεδομένα που καταγράφονται από τέτοιου είδους σήματα καλούνται χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα (time-driven data). Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται οι δύο τύποι γεγονότων ΑΕ [37]. Η ανίχνευση, η ικανότητα διάκρισης και η παραμετρική ανάλυση των σημάτων ΑΕ που προκύπτουν και από τους δύο τύπους δεδομένων αποτελούν το σημείο εκκίνησης για πολλές ερευνητικές και βιομηχανικές εφαρμογές της τεχνικής ΑΕ.

Σε μία τυπική μελέτη ΑΕ καταγράφονται εκατοντάδες ή και χιλιάδες δεδομένα ΑΕ καθιστώντας την επεξεργασία και την αξιολόγηση τους ιδιαίτερα χρονοβόρα, αυξάνοντας ταυτόχρονα τις ανάγκες για υπολογιστική ισχύ και αποθήκευση των δεδομένων. Για αυτό σε εφαρμογές μη-καταστρεπτικού ελέγχου, προτιμώνται τα κρουστικού τύπου δεδομένα από τα χρονικά εξαρτώμενα δεδομένα, καθώς τα πρώτα μειώνουν σημαντικά το συνολικό μέγεθος των καταγεγραμμένων δεδομένων ΑΕ. Σημειώνεται πως τα περισσότερα συστήματα καταγραφής ΑΕ μπορούν να καταγράφουν συνεχώς τις κυματομορφές ΑΕ χωρίς να τις μετατρέπουν σε κρουστικού τύπου. Αυτό όμως επιτυγχάνεται συνήθως, μόνο για μικρές χρονικές περιόδους επειδή τα ποσά ανάλυσης και δειγματοληψίας που απαιτούνται για την απόκτηση ΑΕ συνεχούς τύπου είναι πολύ υψηλά και επομένως απαιτείται μεγάλη χωρητικότητα αποθήκευσης δεδομένων.

Προκειμένου να καθοριστεί ένα κρουστικού τύπου σήμα ΑΕ, πρέπει να οριστεί ένα κατώφλι τάσης και φυσικά πάνω από το επίπεδο θορύβου του περιβάλλοντος. Τα δεδομένα θα καταγράφονται μόνο όταν η δραστηριότητα ΑΕ θα υπερβαίνει αυτό το κατώφλι, οπότε ο θόρυβος του περιβάλλοντος απορρίπτεται και δεδομένα σε περιόδους μη εμφάνισης ΑΕ δεν καταγράφονται άσκοπα. Τα καταγεγραμμένα σήματα από τον αισθητήρα ονομάζονται χτύποι και αντιπροσωπεύουν γεγονότα ΑΕ.

Στη συνέχεια ορίζονται οι συνηθέστερες παράμετροι οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά την μελέτη των σημάτων ΑΕ κρουστικού τύπου (βλ. Σχήμα 1.3):

1. **Κατώφλι** (Threshold): Το όριο τάσης πάνω από το οποίο καταγράφονται σήματα ΑΕ.
2. **Χτύπος** (Hit): Όταν ένα σήμα υπερβαίνει το κατώφλι για πρώτη φορά, καταγράφεται ένας «χτύπος». Ο χτύπος σταματά όταν η κυματομορφή πάψει να υπερβαίνει το κατώφλι (βλ. Σχήμα 1.3). Χρησιμοποιείται συχνά για τον χαρακτηρισμό της ακουστικής δραστηριότητας.
3. **Χρόνος Άφιξης** (Arrival Time): Η χρονική στιγμή όπου το σήμα ΑΕ υπερβαίνει για πρώτη φορά το κατώφλι. Χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της θέσης της πηγής του γεγονότος ΑΕ.
4. **Απαριθμήσεις** (Counts): Ο αριθμός των φορών κατά τη διάρκεια του σήματος, όπου ένα σήμα (κυματομορφή) υπερβαίνει το κατώφλι. Στο Σχήμα 1.3 παρατηρούνται δεκατέσσερις απαριθμήσεις για την πρώτη κυματομορφή (1<sup>ος</sup> χτύπος). Οι απαριθμήσεις χρησιμοποιούνται επίσης για τον ποσοτικό προσδιορισμό της δραστηριότητας ΑΕ καθώς και των χτύπων. Οι απαριθμήσεις εξαρτώνται από το οριζόμενο κατώφλι τάσης και τη συχνότητα λειτουργίας. Μερικές φορές, οι απαριθμήσεις μεταξύ του χρόνου άφιξης και του μέγιστου πλάτους αναφέρονται ως «Απαριθμήσεις μέχρι το μέγιστο» (Counts to Peak), οι οποίες στο Σχήμα 1.3 ισούνται με οχτώ για τον 1<sup>ο</sup> χτύπο.



Σχήμα 1.3 Βασικές παράμετροι ενός τυπικού σήματος ΑΕ.

5. **Πλάτος** (Amplitude): Η μέγιστη τιμή τάσης κάθε καταγεγραμμένου σήματος ΑΕ. Τα πλάτη εκφράζονται, συνήθως, σε decibels. Αποτελεί μέτρο του μεγέθους του σήματος όπου  $1\mu V$  ορίζεται ως  $0\text{ dB}$  στον αισθητήρα, σύμφωνα με τη σχέση:

$$dB = 20 \log \left( \frac{V_{\max}}{1\mu V} \right) - G \quad (1.1)$$

με  $V_{\max}$  το μέγιστο ανιχνευόμενο πλάτος και  $G$  το κέρδος του προενισχυτή. Το πλάτος σχετίζεται άμεσα με το μέγεθος του πηγαιού ακουστικού γεγονότος. Η τιμή του ανιχνευόμενου ακουστικού πλάτους δεν αντιπροσωπεύει την τιμή του πηγαιού γεγονότος αλλά την απόκριση του αισθητήρα μετά την εξασθένιση του σήματος λόγω διάδοσης εντός του υλικού.

6. **Διάρκεια** (Duration): Ο χρόνος μεταξύ της πρώτης και της τελευταίας υπέρβασης του κατωφλίου. Η διάρκεια ενός ακουστικού γεγονότος συνήθως εκφράζεται σε  $\mu s$ .
7. **Χρόνος ανύψωσης** (Rise time): Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από τον χρόνο άφιξης μέχρι το μέγιστο πλάτος. Ο χρόνος ανύψωσης σχετίζεται στενά με τη συνάρτηση χρόνου-πηγής και εφαρμόζεται για την ταξινόμηση του τύπου της ρωγμής (Mode I ή Mode II) [38, 39] ή την εξάλειψη των σημάτων θορύβου.
8. **Γωνία ανύψωσης** (Rise Angle-RA): Υπολογίζεται από τον χρόνο ανύψωσης διαιρούμενο με το πλάτος. Δείχνει την αμοιβαία κλίση σε κυματομορφές σήματος ΑΕ, η οποία αναφέρεται σε  $\mu s/V$ . Οι τιμές RA χρησιμοποιούνται για την ταξινόμηση του τύπου ρωγμών [40].

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

9. **Χρόνος ή χρονικό διάστημα μεταξύ γεγονότων (Interevent time-  $\delta t$  )**: Είναι το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών σημάτων ΑΕ, δηλαδή μεταξύ δύο χρόνων άφιξης.
10. **Ενέργεια (Energy)**: Οι ορισμοί της ενέργειας ΑΕ διαφέρουν ανάλογα με τους εκάστοτε κατασκευαστές των συστημάτων καταγραφής ΑΕ. Γενικά ορίζεται ως η μετρούμενη περιοχή κάτω από την τροποποιημένη περιβάλλουσα του σήματος ΑΕ. Η ενέργεια έχει καταστεί η πλέον διαδεδομένη παράμετρος για τον χαρακτηρισμό της ακουστικής δραστηριότητας αφενός διότι αποτελεί συνάρτηση του πλάτους και της διάρκειας [41], και αφετέρου δεν εξαρτάται άμεσα από παραμέτρους που ορίζονται από τον χρήστη όπως το κατώφλι τάσης και τις συχνότητες λειτουργίας των οργάνων καταγραφής και των αισθητήρων. Η ενέργεια αναφέρεται συνήθως σε μονάδες attojoules (aJ). Η ακουστική ενέργεια είναι ιδανική για την παρακολούθηση μικρών αλλαγών σε διαδοχικά κρουστικού τύπου ακουστικά γεγονότα [42].
11. **Μέση συχνότητα (Average Frequency)**: Είναι ο λόγος των απαριθμήσεων ως προς τη διάρκεια, σε κάθε χτύπο. Η μέση συχνότητα χρησιμοποιείται συνήθως όταν οι κυματομορφές σήματος είναι πρακτικά δύσκολο να καταγραφούν.

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

## 2. Φυσικός χρόνος

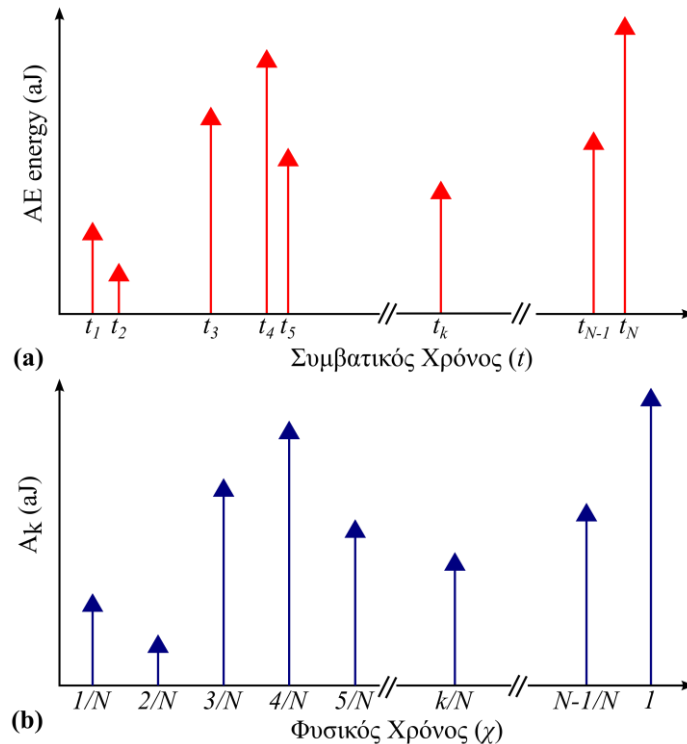
Το κεφάλαιο ασχολείται με τον φυσικό χρόνο (natural time) ( $\chi$ ). Η παράγραφος 2.1 περιγράφει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάλυση σημάτων στο πεδίο του φυσικού χρόνου αναδεικνύοντας ότι αποτελεί μια αρκετά πλεονεκτική περιγραφή της δυναμικής εξέλιξης πολύπλοκων συστημάτων ειδικότερα εκείνων που βαίνουν προς την κρισιμότητα. Ορίζονται οι παράμετροι του φυσικού χρόνου, η διασποράς  $\kappa_1$ , η εντροπία  $S$  και η εντροπία υπό την αντιστροφή χρόνου  $S_-$  και συζητείται η σημασία των συνθηκών κρισιμότητας  $\kappa_1 = 0.070$  και  $S, S_- \lesssim 0.0966$ . Στην παράγραφο 2.2 περιγράφεται το μοντέλο αμμόλοφου των Bak, Tang και Wiesenfeld, μέσω του οποίου εισάγεται η έννοια της αυτοργανωμένης κρισιμότητας. Η παράγραφος κλείνει με την περιγραφή του μοντέλου τρένου Burrridge-Knopoff και του μοντέλου σεισμών Olami-Feder-Christensen.

### 2.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Σε μία χρονοσειρά αποτελούμενη από  $N$  διακριτά γεγονότα ο φυσικός χρόνος του  $k$ -στού γεγονότος που χαρακτηρίζεται από ενέργεια  $A_k$ , ορίζεται [43, 44] ως  $\chi_k = k / N$ . Στην περίπτωση των ακουστικών εκπομπών, θα θεωρούμε την χρονοσειρά της εμφάνισης των ακουστικών hits και αντίστοιχα ως  $A_k$  την ενέργεια αυτών, εκφραζόμενη σε aJ. Το Σχήμα 2.1 είναι ενδεικτικό της απεικόνισης μίας χρονοσειράς ακουστικής ενέργειας σε συμβατικό και σε φυσικό χρόνο. Η ανάλυση στο πεδίο του φυσικού χρόνου, επικεντρώνεται στην μελέτη την εξέλιξη του ζεύγους  $(\chi_k, p_k)$ , όπου:

$$p_k = \frac{A_k}{\sum_{n=1}^N A_n} \quad (2.1)$$

είναι η κανονικοποιημένη ενέργεια του  $k$ -στού γεγονότος [43, 45].



Σχήμα 2.1 (a) Μια χρονοσειρά ενέργειας ΑΕ στο συμβατικό χρόνο (t). (b) Η ίδια χρονοσειρά στο φυσικό χρόνο ( $\chi$ ).

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

Από τη Σχέση (2.1) προκύπτει:

$$\sum_{k=1}^N p_k = 1 \quad (2.2)$$

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η εξέλιξη των ζευγών  $(\chi_k, A_k)$  και  $(\chi_k, p_k)$  θεωρούνται ισοδύναμες στην ανάλυση του φυσικού χρόνου.

### 2.1.1 Αντιστροφή χρόνου στον φυσικό χρόνο

Σε μία χρονοσειρά αποτελούμενη από  $N$  γεγονότα, η επίδραση του συντελεστή  $\hat{T}$  της αντιστροφής χρόνου στα  $A_k$  δίδεται από τη σχέση:

$$\hat{T}A_k = A_{N-k+1} \quad (2.3)$$

έτσι ώστε ο πρώτος παλμός ( $k=1$ ) να τοποθετείται τελευταίος στην χρονικά αντεστραμμένη χρονοσειρά, ο δεύτερος παλμός ( $k=2$ ) προτελευταίος κ.ο.κ. Κατά συνέπεια, ο συντελεστής  $\hat{T}$  της χρονικής αντιστροφής στον φυσικό χρόνο επιδρά στις πιθανότητες  $p_k$  ως εξής:

$$\hat{T}p_k = p_{N-k+1} \quad (2.4)$$

### 2.1.2 Το κανονικοποιημένο φάσμα ισχύος και η διασπορά $\kappa_1$ του φυσικού χρόνου

Για τις ανάγκες της ανάλυσης σε φυσικό χρόνο ορίστηκε η συνεχής συνάρτηση  $\Phi(\omega)$  [43, 45]:

$$\Phi(\omega) = \frac{\sum_{k=1}^N A_k e^{i\omega \frac{k}{N}}}{\sum_{n=1}^N A_k} = \sum_{k=1}^N p_k e^{i\omega \frac{k}{N}} = \sum_{k=1}^N p_k e^{i\omega x_k} \quad (2.5)$$

όπου,  $\omega = 2\pi\varphi$  και  $\varphi$  η συχνότητα στο φυσικό χρόνο, που ονομάζεται φυσική συχνότητα. Το κανονικοποιημένο φάσμα ισχύος  $\Pi(\omega)$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\Pi(\omega) = |\Phi(\omega)|^2 = \left| \sum_{k=1}^N p_k e^{i\omega \frac{k}{N}} \right|^2 \quad (2.6)$$

Θεωρώντας ότι  $\omega \rightarrow 0$ , η  $\Phi(\omega)$  δίνει τις στατιστικές ιδιότητες της συνάρτησης  $p(\chi)$ , όπως η μέση τιμή ( $\mu$ ), η τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ), η διασπορά κτλ. Κάνοντας το ανάπτυγμα Taylor της Εξίσωσης (2.6) για χαμηλές τιμές του  $\omega$  γύρω από το μηδέν (0) έχουμε:

$$\Pi(\omega) = 1 + \kappa_1 \omega^2 + \kappa_2 \omega^4 + \kappa_3 \omega^6 + \kappa_4 \omega^8 + \dots \quad (2.7)$$

όπου

$$\kappa_1 = -\frac{1}{2} \left. \frac{d^2 \Pi(\omega)}{d\omega^2} \right|_{\omega=0} \quad (2.8)$$

Αναλύοντας το  $\frac{d^2 \Pi(\omega)}{d\omega^2}$  ως ακολούθως έχουμε:

$$\frac{d^2 \Pi(\omega)}{d\omega^2} = \Phi^*(\omega) \frac{d^2 \Phi(\omega)}{d\omega^2} + \Phi(\omega) \frac{d^2 \Phi^*(\omega)}{d\omega^2} + 2 \frac{d\Phi(\omega)}{d\omega} \frac{d\Phi^*(\omega)}{d\omega} \quad (2.9)$$

Λαμβάνοντας υπόψη την Εξίσωση (2.5) καθώς και ότι  $\Phi(0) = 1$ , προκύπτει:

$$\kappa_1 = -\frac{1}{2} \left[ -\sum_k p_k \chi_k^2 - \sum_k p_k \chi_k^2 - 2 \left( \sum_k p_k \chi_k \right)^2 \right] = \langle \chi^2 \rangle - \langle \chi \rangle^2 \quad (2.10)$$

όπου

$$\langle \chi^n \rangle = \sum_{k=1}^N p_k \chi_k^n \quad (2.11)$$

Η Εξίσωση (2.11) υποδηλώνει τις ροπές του φυσικού χρόνου που σταθμίζονται από το  $p_k$ . Έτσι, η ποσότητα  $\kappa_1$  αντιστοιχεί στην διασπορά του φυσικού χρόνου  $\chi$ , ανηγμένη όπως αυτή προκύπτει για  $p_k$ , και δίδεται από τη σχέση:

$$\kappa_1 = \langle \chi^2 \rangle - \langle \chi \rangle^2 = \sum_{k=1}^N p_k \left( \frac{k}{N} \right)^2 - \left( \sum_{k=1}^N \frac{k}{N} p_k \right)^2 \quad (2.12)$$

Σημειώνεται πως καθώς το κανονικοποιημένο φάσμα ισχύος  $\Pi(\omega)$  δεν αλλάζει κατά την αντιστροφή του χρόνου, το ίδιο ισχύει και για την ποσότητα  $\kappa_1$ .

Οι υπόλοιποι όροι της Εξίσωσης (2.7) υπολογίστηκαν [45] και είναι ίσοι με:

$$\kappa_2 = \frac{\langle \chi^2 \rangle^2}{4} + \frac{\langle \chi^4 \rangle}{12} - \frac{\langle \chi \rangle \langle \chi^3 \rangle}{3} \quad (2.13)$$

$$\kappa_3 = \frac{\langle \chi^3 \rangle^2}{36} + \frac{\langle \chi \rangle \langle \chi^5 \rangle}{60} - \frac{\langle \chi^6 \rangle}{360} - \frac{\langle \chi^2 \rangle \langle \chi^4 \rangle}{24} \quad (2.14)$$

$$\kappa_4 = \frac{\langle \chi^8 \rangle}{20160} + \frac{\langle \chi^2 \rangle \langle \chi^6 \rangle}{720} + \frac{\langle \chi^4 \rangle^2}{576} - \frac{\langle \chi^3 \rangle \langle \chi^5 \rangle}{360} - \frac{\langle \chi \rangle \langle \chi^7 \rangle}{2520} \quad (2.15)$$

Όπως υποδείχθηκε [44], η ποσότητα  $\kappa_1$  μπορεί να χρησιμεύσει ως παράμετρος τάξης [46] που μπορεί να προσδιορίσει την προσέγγιση του δυναμικού συστήματος σε ένα κρίσιμο σημείο [47]. Για το λόγο αυτό, η προϋπόθεση:

$$\kappa_1 = 0.070 \quad (2.16)$$

έχει βρεθεί ότι ισχύει για μια σειρά κρίσιμων συστημάτων συμπεριλαμβανομένου του μοντέλου σεισμών Olami-Feder-Christensen [48] και μοντέλο τρένου Burridge-Knopoff (βλ. Πίνακας 8.1 σελ. 343 της αναφοράς [44]).

### 2.1.3 Επεξήγηση της συνθήκης $\kappa_1 = 0.070$ για δυναμικά συστήματα

Η ανάλυση στον φυσικό χρόνο ασχολείται με χρονοσειρές σημάτων που εκπέμπονται από κρίσιμα δυναμικά συστήματα. Όταν ένα δεδομένο σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία, θα πρέπει να παράγει στάσιμες χρονοσειρές με πιθανότητες  $p_k$  ανεξάρτητες από  $\chi_k$ . Η περίπτωση είναι τελείως διαφορετική όταν το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση εκτός ισορροπίας. Καθώς το σύστημα βαίνει στην κρισιμότητα, ομάδες της νέας φάσης σχηματίζονται λόγω των αυξημένων διακυμάνσεων, ενώ παράλληλα αυξάνονται το μέγεθος και το μήκος συσχέτισης τους. Αυτή η διεργασία δεν πραγματοποιείται αστραπιαία, καθώς οι συσχετίσεις μεγάλου μήκους αναπτύσσονται σταδιακά οδηγώντας το σύστημα στη λεγόμενη δυναμική μετάβαση φάσης (σ.σ. δεύτερης τάξης μετάβαση φάσης). Ως αποτέλεσμα, οι χρονοσειρές που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μίας διαδικασίας μη ισορροπίας θα είναι μη-στάσιμες και οι πιθανότητες  $p_k$ , ή ισοδύναμα η

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

αντίστοιχη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας  $p(\chi)$  δεν θα είναι πλέον ανεξάρτητη από το  $\chi_k$ . Με βάση τη σχέση ότι  $p(\chi) = \sum_{k=1}^N p_k \delta(\chi - k/N)$ , το κανονικοποιημένο φάσμα ισχύος της Εξίσωσης (2.6) μπορεί να γραφεί και ως:

$$\Pi(\omega) = \int_0^1 \int_0^1 p(\chi)p(\chi') \cos[\omega(\chi - \chi')] d\chi d\chi' \quad (2.17)$$

Το ανάπτυγμα Taylor της Εξίσωσης (2.7) στην περιοχή  $\omega \rightarrow 0$  οδηγεί στην τιμή:

$$\kappa_1 = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_0^1 p(\chi)p(\chi') (\chi - \chi')^2 d\chi d\chi' \quad (2.18)$$

Από τον ορισμό του φυσικού χρόνου, γνωρίζουμε ότι η  $p(\chi)$  που είναι η κανονικοποιημένη ενέργεια που απελευθερώνεται στο  $\chi$  για ένα δυναμικό σύστημα στην κρισιμότητα, και χαρακτηρίζει επίσης, τον τρόπο απελευθέρωσης ενέργειας κατά την εξέλιξη της δυναμικής μετάβασης του συστήματος. Γενικά, η νέα φάση που προκύπτει κατά την μετάβαση μπορεί να συζευχθεί με ένα υπάρχον εξωτερικό πεδίο και η ενέργεια αλληλεπίδρασης αναμένεται να είναι ανάλογη ως προς τη γραμμική διάσταση της νέας φάσης και συνεπώς προς το μήκος συσχέτισης  $\xi$  (βλ. Κεφάλαιο 2 της αναφοράς [49]). Έτσι, το  $p(\chi)$  να είναι ανάλογο του  $\xi$ . Λόγω της κρίσιμης επιβράδυνσης όταν το σύστημα προσεγγίζει τη δυναμική μετάβαση, το χρονικά εξαρτώμενο μήκος συσχέτισης  $\xi$  εκφράζεται από τη σχέση  $\xi \sim t^{1/z}$ , όπου το  $z$  είναι ο δυναμικός κρίσιμος εκθέτης [47]. Υποθέτοντας ότι αυτή η σχέση ισχύει και για τον φυσικό χρόνο ως  $\xi \propto \chi^{1/z}$ , προκύπτει:

$$p(\chi) = N_c \chi^{1/z} \quad (2.19)$$

όπου  $N_c$  είναι μια σταθερά κανονικοποίησης για να ισχύει  $\int_0^1 p(\chi) d\chi = 1$ .

Η Εξίσωση (2.19) προκύπτει εύλογα με βάση ορισμό των  $p_k$ , δηλαδή αντιπροσωπεύει την κανονικοποιημένη ενέργεια που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια του  $k$ -στού γεγονότος και η ενέργεια στην κρισιμότητα έχει μια κατανομή νόμου δύναμης.

Τα παραπάνω έχουν εφαρμοστεί στην περίπτωση της σεισμικότητας καθώς η κατάσταση λίγο πριν από ένα μεγάλο σεισμό χαρακτηρίζεται από μια αλυσίδα μετατοπίσεων που λαμβάνει χώρα στα ρήγματα, όπως μια αλυσίδα ευθυγραμμισμένων μαγνητικών ροπών στο μοντέλο Ising στην κρίσιμη κατάσταση [47, 50]. Αντικαθιστώντας την Εξίσωση (2.19) στην Εξίσωση (2.18), λαμβάνουμε:

$$\kappa_1 = \frac{1+z}{1+3z} - \left( \frac{1+z}{1+2z} \right)^2 \quad (2.20)$$

Στις περισσότερες κατηγορίες παγκοσμιότητας, το  $z$  ποικίλει σε μια περιοχή από  $z = 2$  έως  $z = 2.4$ . Η τιμή του  $\kappa_1$  που λαμβάνεται από τη Εξίσωση (2.20) κυμαίνεται μεταξύ από 0.068 έως 0.071 [44] (Σχ. 8.14, σελ.364).

#### 2.1.4 Η εντροπία $S$ στον φυσικό χρόνο

Η εντροπία  $S$  αποτελεί μία ακόμα χρήσιμη ποσότητα στην ανάλυση στο πεδίο του φυσικού χρόνου. Υπολογίζεται μέσω της παραγώγου της συνάρτησης διασποράς  $\langle \chi^q \rangle - \langle \chi \rangle^q$  όπου το  $q$ , θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν ένας εντροπικός δείκτης που αντικατοπτρίζει το βαθμό μη προσθετικότητας σε ένα φυσικό σύστημα. Με βάση τη σχέση  $\langle \chi^q \ln \chi \rangle - \langle \chi \rangle^q \ln \langle \chi \rangle$



Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών στην περιοχή γύρω από το  $q = 1$ , οδηγούμαστε στην ποσότητα  $\langle \chi \ln \chi \rangle - \langle \chi \rangle \ln \langle \chi \rangle$  [51]. Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα ανωτέρω, η εντροπία στον φυσικό χρόνο είναι [45, 51]:

$$S \equiv \langle \chi \ln \chi \rangle - \langle \chi \rangle \ln \langle \chi \rangle \quad (2.21)$$

Ισοδύναμα έχουμε:

$$S \equiv \sum_{k=1}^N \frac{k}{N} \ln \left( \frac{k}{N} \right) p_k - \left( \sum_{l=1}^N \frac{l}{N} p_l \right) \ln \left[ \sum_{m=1}^N \frac{m}{N} p_m \right] \quad (2.22)$$

Η εντροπία  $S$  στον φυσικό χρόνο είναι μία δυναμική εντροπία η οποία βασίζεται στην σειρά διαδοχής των γεγονότων. Εμφανίζει θετικότητα και κυρτότητα [44]. Επιπλέον, εμφανίζει πειραματική σταθερότητα Lesche [52, 53]. Αυτό που πρακτικά εγγυάται το κριτήριο σταθερότητας Lesche είναι πως παρόμοιες πειραματικές διαδικασίες που διενεργούνται σε παρόμοια φυσικά συστήματα, δηλαδή, θα πρέπει να παρέχουν, με μια μικρή ποσοστιαία απόκλιση, παρόμοια αποτελέσματα για τις μετρούμενες φυσικές συναρτήσεις. Χρησιμοποιώντας την  $p(\chi)$ , η Εξίσωση (2.21) μπορεί να αποδοθεί και ως:

$$S = \int_0^1 p(\chi) \chi \ln \chi d\chi - \left( \int_0^1 p(\chi) \chi d\chi \right) \ln \left[ \int_0^1 p(\chi') \chi' d\chi' \right] \quad (2.23)$$

Στην περίπτωση που τα  $A_k$  είναι ανεξάρτητες και όμοια κατανομημένες τυχαίες μεταβλητές και ισχύει  $p(\chi) = 1$ ,  $\langle \chi \rangle = 0.5$  και επειδή  $\frac{d}{d\chi} \left[ \chi^2/4 - (\chi^2/2) \ln \chi \right] = -\chi \ln \chi$ , η εντροπία  $S$  προσεγγίζει την τιμή  $S_u$  της ομοιόμορφης κατανομής [44]:

$$S_u = \frac{\ln 2}{2} - \frac{1}{4} \approx 0.0966 \quad (2.24)$$

Σημειώνεται, ότι παρά την όμοια ομοιότητα των ιδιοτήτων των  $\kappa_1$  και  $S$ , κατά την αναστροφή του χρόνου εμφανίζουν μια ουσιαστική διαφορά, δηλαδή η διασπορά  $\kappa_1$  παραμένει πάντα ίδια, ενώ η εντροπία  $S$  μεταβάλλεται.

### 2.1.5 Η εντροπία $S_-$ υπό αντιστροφή χρόνου

Κατά την αντιστροφή του βέλους του χρόνου, δηλαδή, εφαρμόζοντας αντιστροφή χρόνου,  $\hat{T}$ , δηλ.,  $\hat{T}p_k = p_{N-k+1}$ , η τιμή της εντροπίας  $S$  της δοθείσας χρονοσειράς αλλάζει σε  $S_-$ . Η εντροπία υπό αντιστροφή χρόνου  $S_-$  διαφέρει από την τιμή της εντροπίας  $S$  που προκύπτει από την ανάλυση της αρχικής χρονοσειράς. Επισημαίνεται ότι η διασπορά  $\kappa_1$  δεν αλλάζει με την αναστροφή του χρόνου, καθώς προκύπτει από ένα φάσμα ισχύος [43]. Δεδομένου ότι η τιμή της εντροπίας υπό αντιστροφή χρόνου  $S_-$  είναι διαφορετική από την τιμή της  $S$  [54-56], η εντροπία σε φυσικό χρόνο ικανοποιεί την προϋπόθεση να είναι «αιτιώδης» (causal) [56]. Κατά την μελέτη ενός χρονικά εξελισσόμενου δυναμικού συστήματος, ένας αιτιώδης τελεστής θα πρέπει να είναι σε θέση να αντιπροσωπεύει την εξέλιξη με το πραγματικό βέλος του χρόνου, οπότε ένας τέτοιος τελεστής μπορεί να αποκαλύψει τις διαφορές που προκύπτουν από την αναστροφή του χρόνου. Σημειώνεται ότι αυτό ισχύει για την  $S$  αλλά όχι για το  $\kappa_1$ .

Στην περίπτωση των ηλεκτρικών σημάτων που εκπέμπονται στην κρισιμότητα, όπως τα Προσεισμικά Ηλεκτρικά Σήματα (Seismic Electric Signals-SES) τα οποία προηγούνται

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών των σεισμών [57-61], η εντροπία  $S$  αλλά και η εντροπία υπό αναστροφή χρόνου  $S_-$  είναι μικρότερες της  $S_u$  εντός του πειραματικού σφάλματος, δηλαδή:

$$S, S_- \lesssim S_u \quad (2.25)$$

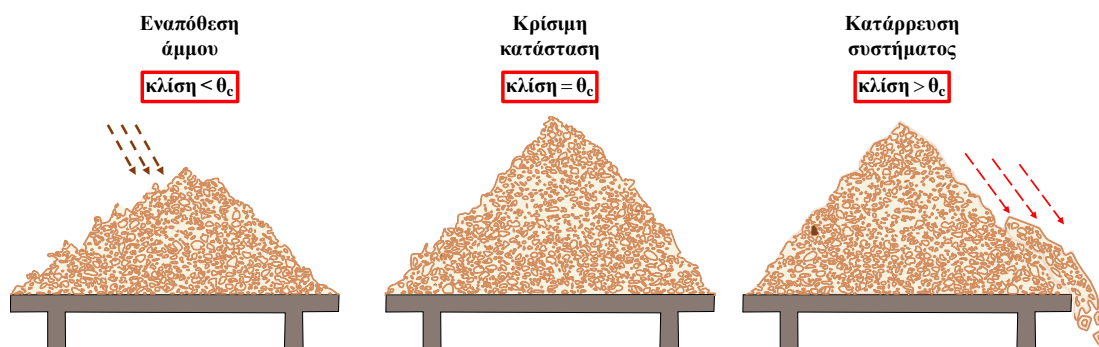
βλ., Πίνακα 4.6 σελ. 227-228 της αναφοράς [44].

## 2.2 Αυτοργανωμένη κρισιμότητα

Ως έννοια η αυτοργανωμένη κρισιμότητα (self-organised criticality), εισήχθη το 1987 από τους Bak, Tang και Wiesenfeld [62] και θεωρείται ως ένας από τους μηχανισμούς μέσω των οποίων αναδεικνύεται η πολυπλοκότητα στη φύση [63]. Παρατηρείται συνήθως σε συστήματα μη-ισορροπίας που εξελίσσονται αργά, με εκτεταμένους βαθμούς ελευθερίας και υψηλό επίπεδο μη-γραμμικότητας [64].

Οι Bak, Tang και Wiesenfeld ισχυρίστηκαν ότι τα συστήματα που εμφανίζουν αυτοργανωμένη κρισιμότητα φθάνουν σε μία στάσιμη κατάσταση, η οποία έπεται μίας μεταβατικής περιόδου κατά την οποία το σύστημα φθάνει σε κρισιμότητα [65, 66], η οποία χαρακτηρίζεται από κατανομές νόμου δύναμης χωρίς την ανάγκη προσαρμογής εξωτερικών παραμέτρων, όπως π.χ. η θερμοκρασία ή η πίεση. Η δυναμική αυτών των συστημάτων πρέπει να είναι τέτοια, ώστε τα συστήματα υπό τη φυσική τους εξέλιξη να οδηγούνται σε μία κατάσταση η οποία βρίσκεται στα όρια μεταξύ σταθερών και ασταθών καταστάσεων. Μια τέτοια κατάσταση παρουσιάζει χωροχρονικές διακυμάνσεις μεγάλης εμβέλειας παρόμοιες με εκείνες των κρίσιμων φαινομένων ισορροπίας. Δηλαδή, τα συστήματα οργανώνονται από μόνα τους προς την κρισιμότητα.

Προκειμένου να γίνει ευκολότερα κατανοητή η έννοια της αυτοργανωμένης κρισιμότητας, οι Bak, Tang και Wiesenfeld πρότειναν ως απλό παράδειγμα το σύστημα του αμμόλοφου, η φυσική δυναμική του οποίου, το οδηγεί και στη συνέχεια το διατηρεί στα όρια της σταθερότητας βλ. Σχήμα 2.2. Πιο αναλυτικά, έχει παρατηρηθεί ότι η μακροσκοπική συμπεριφορά της ξηρής άμμου μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση μια γωνία  $\theta_c$ , που ονομάζεται γωνία ανάπαυσης και η οποία εξαρτάται από την δομή των κόκκων που την αποτελούν όπως η κατανομή του μεγέθους των κόκκων, το σχήμα τους, η τραχύτητα τους κλπ. [67]. Εάν κάποιος σχηματίσει έναν αμμόλοφο, στον οποίο η τοπική κλίση είναι παντού μικρότερη από το  $\theta_c$ , τότε αυτός ο αμμόλοφος θεωρείται σταθερός. Σε έναν τέτοιο αμμόλοφο, η εναπόθεση με πολύ αργό ρυθμό μικρής ποσότητας άμμου θα προκαλέσει μόνο μια αδύναμη διαταραχή. Αν η εναπόθεση μικρής ποσότητας άμμου γίνει με τρόπο τέτοιο, ώστε η μέση κλίση να είναι μεγαλύτερη της  $\theta_c$ , αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μια αμμοστιβάδα το μέγεθος της οποίας μπορεί να είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος του ίδιου



Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου αμμόλοφου των Bak, Tang και Wiesenfeld. Εάν η κλίση του αμμόλοφου είναι μικρότερη της γωνίας ανάπαυσης  $\theta_c$ , τότε ο αμμόλοφος είναι μακριά από την ισορροπία, και θα καταρρέει μόλις η κλίση του γίνει μεγαλύτερη ή ίση της γωνίας  $\theta_c$ . Στην περίπτωση που η κλίση του αμμόλοφου είναι ίση με  $\theta_c$  το σύστημα βρίσκεται σε μία κρίσιμη κατάσταση κατά την οποία οριακά θα είναι σταθερό σε σχέση με μικρές διαταραχές.

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

του αμμόλοφου [64]. Οι Bak, Tang και Wiesenfeld παρατήρησαν ότι αν κάποιος φτιάξει ένα αμμόλοφο εναποθέτοντας άμμο πολύ αργά, πάνω σε ένα επίπεδο τραπέζι, σχηματίζεται σωρός κωνικού σχήματος, με κλίση ίση με  $\theta_c$  [62]. Στην περίπτωση αυτή, η απόκριση του συστήματος στην εναπόθεση άμμου είναι απρόβλεπτη.

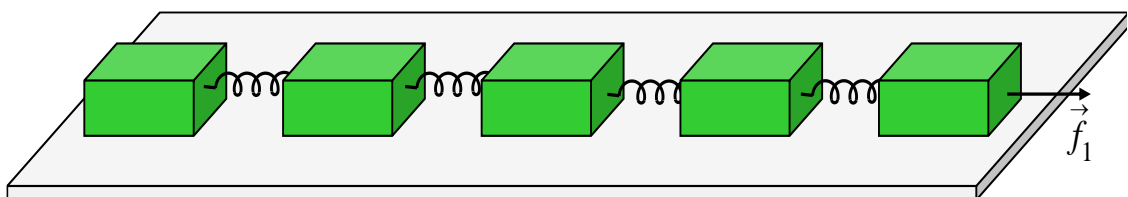
Ενδεχομένως, να μην προκληθεί χαλάρωση των δομικών κόκκων του αμμόλοφου οπότε δεν θα υπάρξουν αμμοστιβάδες ή μπορεί να προκληθούν αμμοστιβάδες μεσαίου μεγέθους ή μία καταστρεπτική αμμοστιβάδα. Μια τέτοια κατάσταση περιγράφεται ως κρίσιμη. Η σταθερή κατάσταση της εναπόθεσης άμμου με πολύ αργό ρυθμό αφήνει το σύστημα με πολύ ακανόνιστο τρόπο, με μεγάλες περιόδους φαινομενικής απραξίας, διασκορπισμένες ανάμεσα σε γεγονότα που μπορεί να ποικίλλουν σε μέγεθος και να εμφανίζονται σε «απρόβλεπτες» χρονικές στιγμές. Παρόμοια συμπεριφορά παρατηρείται και στις ακουστικές εκπομπές που καταγράφονται σε δοκίμια, τα οποία υπόκεινται σε έντονη μηχανική φόρτιση, στα οποία η συσσώρευση της μηχανικής καταπόνησης γίνεται αργά λόγω εφαρμογής του μηχανικού φορτίου υπό ημι-στατικές συνθήκες. Οι ακουστικές εκπομπές εμφανίζονται σποραδικά με διάφορα πλάτη καθώς βαίνει το δοκίμιο προς την αστοχία.

Αν και έχουν εντοπιστεί πολλά μεμονωμένα παραδείγματα συστημάτων που εμφανίζουν αυτοργανωμένη κρισιμότητα από την αρχική δημοσίευση των Bak, Tang και Wiesenfeld, μέχρι σήμερα δεν υπάρχει γνωστό σύνολο γενικών χαρακτηριστικών που να εγγυάται για την εμφάνιση της αυτοργανωμένης κρισιμότητας σε ένα δεδομένο σύστημα ή κάποιος ενοποιητικός μαθηματικός φορμαλισμός που να προσδιορίζει με σαφήνεια αν ένα σύστημα εμφανίζει συμπεριφορά αυτοργανωμένης κρισιμότητας ή είναι κάτι διαφορετικό [68]. Ακόμη δεν υπάρχει κανένας γενικά αποδεκτός ορισμός της αυτοργανωμένης κρισιμότητας. Ορισμένα μαθηματικά μοντέλα που φαίνεται να εμφανίζουν συμπεριφορά αυτοργανωμένης κρισιμότητας είναι: το μοντέλο αμμόλοφου των Bak-Tang-Wiesenfeld, το μοντέλο τρένου Burrridge-Knopoff [69], το μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen [70], το μοντέλο αερίου σε πλέγμα (Lattice Gas model) [71], το μοντέλο δασικών πυρκαγιών (Critical Forest Fire model) [72] κ.α.

### 2.2.1 Μοντέλο τρένου Burrridge-Knopoff

Το μοντέλο τρένου Burrridge-Knopoff (BK) [69, 73, 74] αποτελείται από μία ομάδα σωμάτων, καθένα από τα οποία συνδέεται μέσω ελατηρίων με τα πλησιέστερα γειτονικά σώματα. Τα σώματα στηρίζονται σε μια επιφάνεια με δύναμη τριβής που εξαρτάται από την ταχύτητα (η δύναμη τριβής μειώνεται όσο αυξάνεται η ταχύτητα). Η «εξωτερική» δύναμη ασκείται στο πρώτο από τα σώματα. Όταν η δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα υπερνικά τη στατική τριβή με την επιφάνεια, το σώμα ολισθαίνει. Στη συνέχεια γίνεται μια ανακατανομή δυνάμεων στους γείτονες δημιουργώντας μια αλυσιδωτή αντίδραση που τελειώνει με την ολίσθηση περισσότερων σωμάτων. Η ομάδα σωμάτων που γλιστράει θεωρείται ότι δημιουργεί ένα σεισμικό γεγονός. Ακόμη και τα φαινόμενα αργής ολίσθησης μπορούν να αναπαρασταθούν από αυτό το μονοδιάστατο (1D) μοντέλο σεισμών BK [75].

Σύμφωνα με την αναφορά [74] για την περίπτωση του μοντέλου Burrridge-Knopoff, θεωρούμε ένα μονοδιάστατο (1D) σύστημα (βλ. Σχήμα 2.3), όπου μια συνεχής δύναμη



Σχήμα 2.3 Σχηματική απεικόνιση του μονοδιάστατου μοντέλου τρένου Burrridge-Knopoff.

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

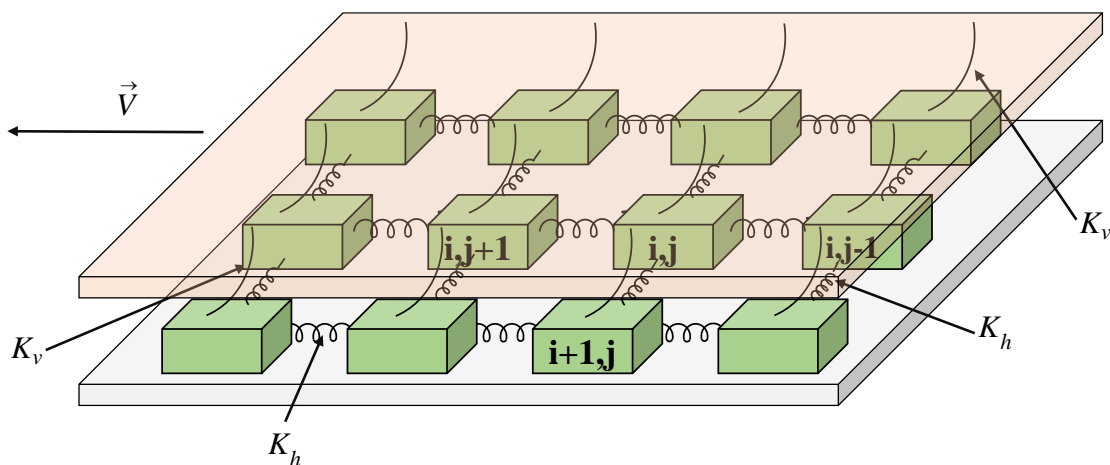
$f_i \geq 0$  σχετίζεται με κάθε σημείο  $l, l = 1, 2, \dots, L$ . Στην αρχή, όλες οι  $f_l$  τιμές έχουν την ίδια τιμή  $f_0 < f_{th}$ , όπου  $f_{th}$  είναι μια καθορισμένη τιμή κατωφλίου. Χωρίς βλάβη της γενικότητας, μπορεί να οριστεί μία τιμή  $f_{th} = 1$ .

Το θεμελιώδες χρονικό βήμα έγκειται στην μεταβολή της δύναμης στην πρώτη θέση σύμφωνα με το  $f_1 = f_{th} + \delta f$ , τότε θα πραγματοποιηθεί μια χαλάρωση του συστήματος, η οποία συνίσταται σε μια διατηρητική ανακατανομή των δυνάμεων στην περιοχή  $f_l \geq f_{th}$  (σημείο ανατροπής) και στους πλησιέστερους γείτονές της σύμφωνα με  $f_l = \Psi(f_l - f_{th})$  και  $f_{l\pm 1} = f_{l\pm 1} + \Delta f / 2$ , όπου  $\Delta f$  είναι η αλλαγή της δύναμης στην υπερκρίσιμη θέση και  $\Psi(x)$  είναι μια περιοδική μη γραμμική συνάρτηση. Το συνθετικό γεγονός (χαλάρωση του συστήματος) θα τελειώσει μέχρι όλα τα σημεία να ικανοποιήσουν την συνθήκη  $f_l < f_{th}$ . Ο αριθμός των μετακινήσεων,  $s$ , που απαιτούνται για να χαλαρώσει το σύστημα, θα καθορίσει το μέγεθος του συνθετικού σεισμού. Αυτή η μεταβλητή  $s$  καθορίζει επίσης τις τιμές  $A_k$  στον φυσικό χρόνο. Μετά από μια χαλάρωση, η κινητήρια δύναμη στην πρώτη θέση επανέρχεται. Το μοντέλο συμπληρώνεται επίσης από ανοικτές οριακές συνθήκες δηλαδή, η δύναμη "χάνεται" στο  $l = 1$  και στο  $l = L$ . Η τελική επίδραση των δύο δυνάμεων (η ελαστική και η δύναμη τριβής) στο μοντέλο τρένου προσομοιάζονται από μια δύναμη που αντιπροσωπεύεται από μια μη γραμμική περιοδική συνάρτηση, όπου η περιοδικότητα της ελαστικής δύναμης κυριαρχεί επί της μορφής της δύναμης τριβής και είναι παρόμοιο με εκείνο που χρησιμοποιείται στις αναφορές [74, 76], μια πριονωτή συνάρτηση  $\Psi(x) = 1 - ax + [ax]$ , όπου [...] δηλώνει το ακέραιο μέρος του  $ax$  και  $a$  είναι ένας θετικός αριθμός.

### 2.2.2 Μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen

Το μοντέλο Olami-Feder-Christensen (OFC) προήλθε από την απλοποίηση του μοντέλου ελατηρίων-σωμάτων Burridge και Knopoff [69] απεικονίζοντας το σε ένα μη διατηρητικό κυψελωτό αυτόματο (cellular automaton). Το μοντέλο σεισμού Olami-Feder-Christensen [48] είναι ένα δυναμικό διδιάστατο (2D) σύστημα ελατηρίων που διευθετείται από δύο πλάκες. Η κάτω πλάκα στηρίζει μία διάταξη σωμάτων στην οποία κάθε ένα από τα σώματα συνδέεται με την άνω πλάκα και διασυνδέεται με τα πλησιέστερα γειτονικά σώματα από ελατήρια.

Η άνω πλάκα κινείται με μια σταθερή και μικρή ταχύτητα, έτσι ώστε η σχετική κίνηση μεταξύ των δύο άκαμπτων πλακών να διαταράξει ένα σώμα που θα μετακινηθεί εάν η



Σχήμα 2.4 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου σεισμών Olami-Feder-Christensen.

δύναμη που ασκείται πάνω από αυτή ισούται ή υπερβαίνει μια τιμή κατωφλίου  $F_{th}$  (μέγιστη στατική τριβή) (βλ. Σχήμα 2.4). Εάν το σώμα μετακινηθεί τότε θα αναδιανείμει την ενέργειά του στους κοντινούς γείτονές του. Ανάλογα με το πόση ενέργεια θα μεταφέρει το σώμα, θα μπορούσε να ξεκινήσει μια αλυσιδωτή αντίδραση (όπου θα μετακινηθούν περισσότερα σώματα) και το μέγεθος της παραγόμενης χιονοστιβάδας θα ισούται με τον αριθμό των μετακινήσεων.

Η δυναμική του μοντέλου OFC μπορεί να μοντελοποιηθεί μέσω ενός κυψελωτού αυτόματου [48, 70]. Το μη διατηρητικό κυψελωτό αυτόματο αποτελείται από ένα τετραγωνικό πλέγμα  $L \times L$  όπου σε κάθε σώμα δρα μια δύναμη  $F_{i,j}$ , με  $i$  και  $j$  ακέραιους μεταξύ 1 και  $L$ . Τα βήματα που ακολουθεί το κυψελωτό αυτόματο είναι τα ακόλουθα [77]:

1. Όλες οι θέσεις του πλέγματος θα πρέπει να αρχικοποιούνται με τυχαίες τιμές μεταξύ της μηδενικής και της δύναμης κατωφλίου  $F_{th}$ .
2. Εάν ένα σώμα μετακινηθεί ( $F_{i,j} \geq F_{th}$ ) η δύναμη  $F_{i,j}$  χαλαρώνει σύμφωνα με τους κανόνες:

$$\begin{aligned} F_{i\pm 1,j} &\rightarrow F_{i\pm 1,j} + \alpha F_{i,j}, \\ F_{i,j\pm 1} &\rightarrow F_{i,j\pm 1} + \alpha F_{i,j}, \\ F_{i,j} &\rightarrow 0 \end{aligned} \quad (2.26)$$

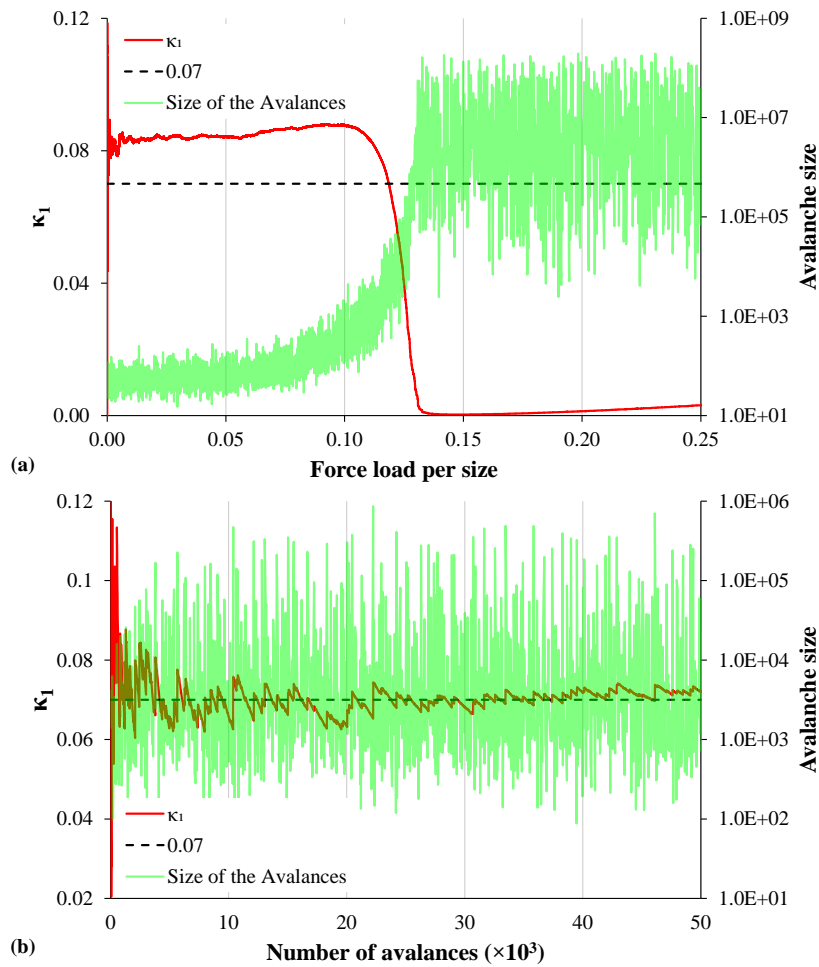
όπου  $\alpha$  μία σταθερά που σχετίζεται με την αναλογία των ελαστικών σταθερών των ελατηρίων, δηλαδή,  $\alpha = K_h / 4K_h + K_v$ , όπου  $K_h$  και  $K_v$  είναι οι σταθερές ελαστικότητας για τα ελατήρια είτε μεταξύ των ίδιων των σώμα είτε μεταξύ ενός σώμα και της άνω πλάκας, αντίστοιχα.

3. Το βήμα (2) επαναλαμβάνεται έως ότου το συνθετικό γεγονός (synthetic event) εξελιχθεί πλήρως, δηλ. η συνθήκη  $F_{i,j} < F_{th}$  ικανοποιείται για κάθε  $F_{i,j}$ .
4. Προστίθεται η δύναμη  $F_{th} - F_{max}$  σε όλα τα σημεία (παγκόσμια διαταραχή), όπου  $F_{max}$  είναι η μεγαλύτερη δύναμη στην τρέχουσα κατάσταση του συστήματος. Στη συνέχεια, επαναλαμβάνεται το βήμα (2) έως ότου το νέο γεγονός εξελιχθεί πλήρως.

Επισημαίνεται πως το κυψελωτό αυτόματο έχει ανοικτά όρια, δηλαδή, η δύναμη «χάνεται» στα όρια της πλάκας.

Ενδεικτικά αποτελέσματα της ανάλυσης σε φυσικό χρόνο του μοντέλου σεισμών OFC παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.5(a) όπου παρατηρούμε ότι καθώς το φορτίο δύναμης ανά θέση αυξάνεται από 0.1 σε 0.13 εμφανίζεται μια εκθετική αύξηση του μεγέθους της χιονοστιβάδας (σημειώνεται ότι η δεξιά κλίμακα είναι λογαριθμική) που ωθεί την διασπορά  $\kappa_1$  να περάσει από το 0.070. Επίσης, η ανάλυση του μοντέλου τρένου Burrridge-Knopoff σε φυσικό χρόνο [50, 78] έδειξε ότι καθώς το σύστημα εισέρχεται προοδευτικά στην αυτοργανωμένη κρισιμότητα, εμφανίζεται ένα σαφές στάδιο όπου η ποσότητα  $\kappa_1$  προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή 0.070, βλ. Σχ. 1 της αναφοράς [50]. Εδώ στο Σχήμα 2.5(b) απεικονίζεται η συμπεριφορά της διασποράς  $\kappa_1$  κατά τη διάρκεια αυτού του σταδίου όπου το  $\kappa_1$  κυμαίνεται γύρω από 0.070

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών



**Σχήμα 2.5** Ενδεικτικά αποτελέσματα που προέκυψαν από (a) το μοντέλο σεισμών OFC και (b) το μοντέλο τρένου ΒΚ: Η διασπορά  $\kappa_1$  και το μέγιστο μέγεθος χιονοστιβάδων ανα 50 χιονοστιβάδες σχεδιάζονται με παράλληλη απεικόνιση του εφαρμοζόμενου φορτίου ανά σώμα για: (a) τον αριθμό των χιονοστιβάδων και (b), μετά την έναρξη της προσομοίωσης του μοντέλου. Η τεθλασμένη μαύρη γραμμή αντιστοιχεί σε  $\kappa_1=0.070$  [191].

### 3. Μη-Εκτατική Στατιστική Μηχανική

Το κεφάλαιο ασχολείται με τη μη-εκτατική στατιστική μηχανική (non-extensive statistical mechanics - NESM). Η παράγραφος 3.1 παρέχει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής και της εντροπίας Tsallis,  $S_q$ . Επιπλέον, αναλύεται η μεγιστοποίηση της εντροπίας  $S_q$  μέσω της μεθόδου των πολλαπλασιαστών Lagrange για την ανάκτηση της κατανομή πιθανότητας  $p(X)$  της παραμέτρου  $X$  και παρουσιάζεται η  $q$ -εκθετική συνάρτηση  $\exp_q(X)$ . Επιπλέον, συζητούνται οι ιδιότητες του εντροπικού δείκτη  $q$  και παρουσιάζεται η συνάρτηση επιβίωσης (survival function - SF) της παραμέτρου  $X$  [ $P(> X)$ ]. Στην παράγραφο 3.2 αναφέρονται προηγούμενες εφαρμογές της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής στη σεισμολογία και στις διεργασίες θραύσης μέσω της αξιοποίησης δεδομένων ακουστικών εκπομπών. Στην παράγραφο 3.3 περιγράφεται η αξιοποίηση δεδομένων ΑΕ, μέσω του χρονικού διαστήματος  $\delta t$  μεταξύ δύο διαδοχικών χτύπων ΑΕ (interevent times), για τον προσδιορισμό του εντροπικού δείκτη  $q$ .

#### 3.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

Ο Tsallis βασιζόμενος στην αρχή της εντροπίας, εισήγαγε τη μη-εκτατική στατιστική μηχανική ως μια γενίκευση της στατιστικής μηχανικής Boltzmann-Gibbs (BG) [79-81]. Η NESM έχει αποδειχθεί ότι παρέχει ένα αυτοδύναμο θεωρητικό πλαίσιο για τη μελέτη σύνθετων συστημάτων όπως, συστήματα ισορροπίας και μη-ισορροπίας, πολυμορφοκλασματικών (multifractal) συστημάτων, δομές αυτό-ομοιότητας (self-similar), συστήματα με αλληλεπιδράσεις μεγάλης εμβέλειας (long-range correlations), συστήματα που εμφανίζουν φαινόμενα μνήμης (memory effects) κ.α. [82, 83] (για επιπλέον εφαρμογές βλ. §1 της αναφοράς [84] και στις παραπομπές που αναφέρονται εκεί). Η διατύπωση αυτής της γενικευμένης εντροπίας που ονομάζεται «εντροπία Tsallis» ( $S_q$ ), για την περίπτωση μιας μεταβλητής  $X$  με κατανομή πιθανότητας  $p_i$  για την εμφάνιση της τιμής  $X_i$  ορίζεται ως [79]:

$$S_q = k_B \frac{1}{q-1} \left( 1 - \sum_{i=1}^w p_i^q \right) \quad (3.1)$$

όπου  $k_B$  είναι η σταθερά Boltzmann,  $w$  είναι το πλήθος των μικροκαταστάσεων του συστήματος (δυνατών τιμών των  $X_i$ ) και  $q$  είναι ο εντροπικός δείκτης που εκφράζει τον βαθμό της μη-προσθετικότητας (non-additivity) του συστήματος [79-83]. Η Εξίσωση (3.1) για  $q \rightarrow 1$  μεταπίπτει στη έκφραση της εντροπίας Boltzmann-Gibbs ( $S_{BG}$ ):

$$S_{BG} = -k_B \sum_{i=1}^w p_i \ln p_i \quad (3.2)$$

Στην περίπτωση που ο δείκτης  $q$  είναι μεγαλύτερος της μονάδας ( $q > 1$ ) οδηγούμαστε σε υπο-προσθετικότητα (sub-additivity) ενώ όταν ο δείκτης  $q$  είναι μικρότερος της μονάδας ( $q < 1$ ) σε υπερ-προσθετικότητα (super-additivity).

Αν θεωρήσουμε ένα σύστημα που συγκροτείται από δύο στατιστικά ανεξάρτητα υποσυστήματα τα  $A$  και  $B$ , τότε η απλή προσθετικότητα της εντροπίας Boltzmann-Gibbs παραβιάζεται και η εντροπία Tsallis ικανοποιεί την ακόλουθη έκφραση, η οποία περιγράφει τη μη-προσθετική συμπεριφορά του συστήματος και αναφέρεται ως ψευδοπροσθετικότητα (pseudo-additivity) [82]:

$$S_q(A+B) = S_q(A) + S_q(B) + \frac{1-q}{k_B} S_q(A) S_q(B) \quad (3.3)$$

Ο τελευταίος όρος της Εξίσωσης (3.3) υποδεικνύει την αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο υποσυστημάτων και αποτελεί την προέλευση της μη-προσθετικότητας του συστήματος. Όταν ο δείκτης  $q$  είναι διαφορετικός της μονάδας ( $q \neq 1$ ), η εντροπία του προκύπτοντος συστήματος  $S_q(A+B)$  δεν είναι ίση με την αθροιστική εντροπία των επιμέρους υποσυστημάτων  $[S_q(A) + S_q(B)]$  αλλά διαφέρει κατά έναν όρο  $\left(1 - \frac{q}{k_B}\right) S_q(A) S_q(B)$  ο οποίος δείχνει την εξάρτηση των αλληλεπιδράσεων μεγάλης εμβέλειας μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων. Στην περίπτωση ενός υπερ-προσθετικού συστήματος, σύμφωνα με την Εξίσωση (3.3) προκύπτει:

$$S_q(A+B) > S_q(A) + S_q(B) \quad (3.4)$$

ενώ για ένα υπο-προσθετικό σύστημα σύμφωνα με την Εξίσωση (3.3) προκύπτει:

$$S_q(A+B) < S_q(A) + S_q(B) \quad (3.5)$$

Καθώς η  $S_q$  αποτελεί γενίκευση της  $S_{BG}$ , μοιράζονται πολλές κοινές ιδιότητες όπως, η θετικότητα, η κοιλότητα, η σταθερότητα Lesche, και η μεγιστοποίηση στην περίπτωση της ομοιόμορφης κατανομής κ.α. (βλ. Πίνακα 3.10 της αναφοράς [83]). Η βασικότερη διαφορά τους είναι ότι η  $S_{BG}$  είναι αθροιστική ενώ η  $S_q$  είναι μη-αθροιστική. Συνεπώς, η  $S_{BG}$  αναδεικνύει συσχετίσεις μικρής εμβέλειας (short-range correlations) με τη συνολική εντροπία του συστήματος να εξαρτάται από το μέγεθος και το πλήθος των υποσυστημάτων των συνολικών μικροκαταστάσεων που το αποτελούν. Αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση της  $S_q$ , όπως άλλωστε υποδεικνύεται από την Εξίσωση (3.1), η οποία μπορεί να εμφανίσει συσχετίσεις μεγάλης εμβέλειας και θα μπορούσε να είναι καταλληλότερη για σύνθετα δυναμικά συστήματα [79].

Η κατανομή πιθανότητας  $p(X)$  της παραμέτρου  $X$  αποκτάται μέσω της μεγιστοποίησης της Εξίσωσης (3.1) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πολλαπλασιαστών Lagrange. Ως περιορισμοί χρησιμοποιούνται η συνθήκη κανονικοποίησης της  $p(X)$  και μία γενικευμένη αναμενόμενη τιμή οριζόμενη μέσω του δείκτη  $q$  (generalized  $q$ -expectation value) [79, 83]. Η συνθήκη κανονικοποίησης της  $p(X)$  ορίζεται ως εξής:

$$\int_0^\infty p(X) dX = 1 \quad (3.6)$$

και η γενικευμένη  $q$  αναμενόμενη τιμή, συμβολίζεται ως  $X_q$ , υπολογίζεται ως εξής:

$$\langle X \rangle_q = X_q = \int_0^\infty X P_q(X) dX \quad (3.7)$$

όπου  $P_q(X)$  είναι η συνοδεύουσα κατανομή (escort distribution) η οποία υπολογίζεται ως εξής [83]:

$$P_q(X) = \frac{[P(X)]^q}{\int_0^\infty [P(X')]^q dX'} \quad (3.8)$$



Η μεγιστοποίηση της Εξίσωσης (3.1), λαμβάνοντας υπόψη τις Εξισώσεις (3.7) και (3.8), οδηγεί στην βέλτιστη συνάρτηση κατανομής πιθανότητας [79, 83]:

$$p(X) = \frac{\exp_q[-\beta_q^*(X - X_q)]}{\int_0^\infty \exp_q[-\beta_q^*(X' - X_q)] dX'} \quad (3.9)$$

Ο παρονομαστής της εξίσωσης (3.9) είναι η συνάρτηση επιμερισμού που ορίζεται μέσω του δείκτη  $q$  ( $q$ -partition function), συμβολίζεται ως  $Z_q$  και υπολογίζεται ως εξής:

$$Z_q = \int_0^\infty \exp_q[-\beta_q^*(X' - X_q)] dX' \quad (3.10)$$

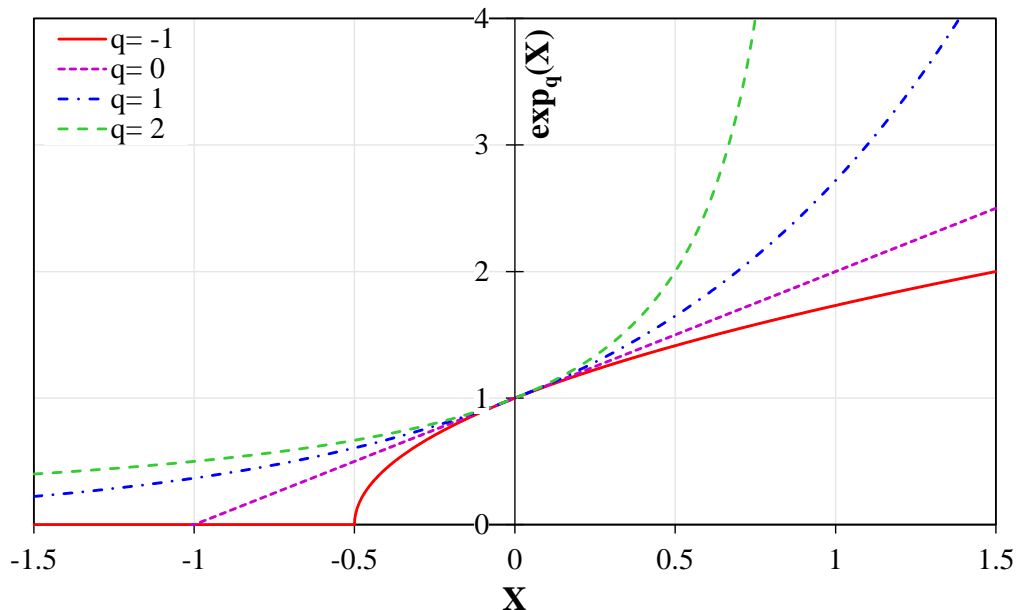
Η παράμετρος  $\beta_q^*$  είναι πολλαπλασιαστής Lagrange που προσδιορίζεται με βάση τη συνθήκη (3.7) και ο όρος  $\exp_q(X)$  δηλώνει την « $q$ -εκθετική συνάρτηση» ( $q$ -exponential function) η οποία ορίζεται ως:

$$\exp_q(X) = \begin{cases} [1+(1-q)X]^{1/(1-q)} & \text{όταν } [1+(1-q)X] \geq 0 \\ 0 & \text{όταν } [1+(1-q)X] < 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

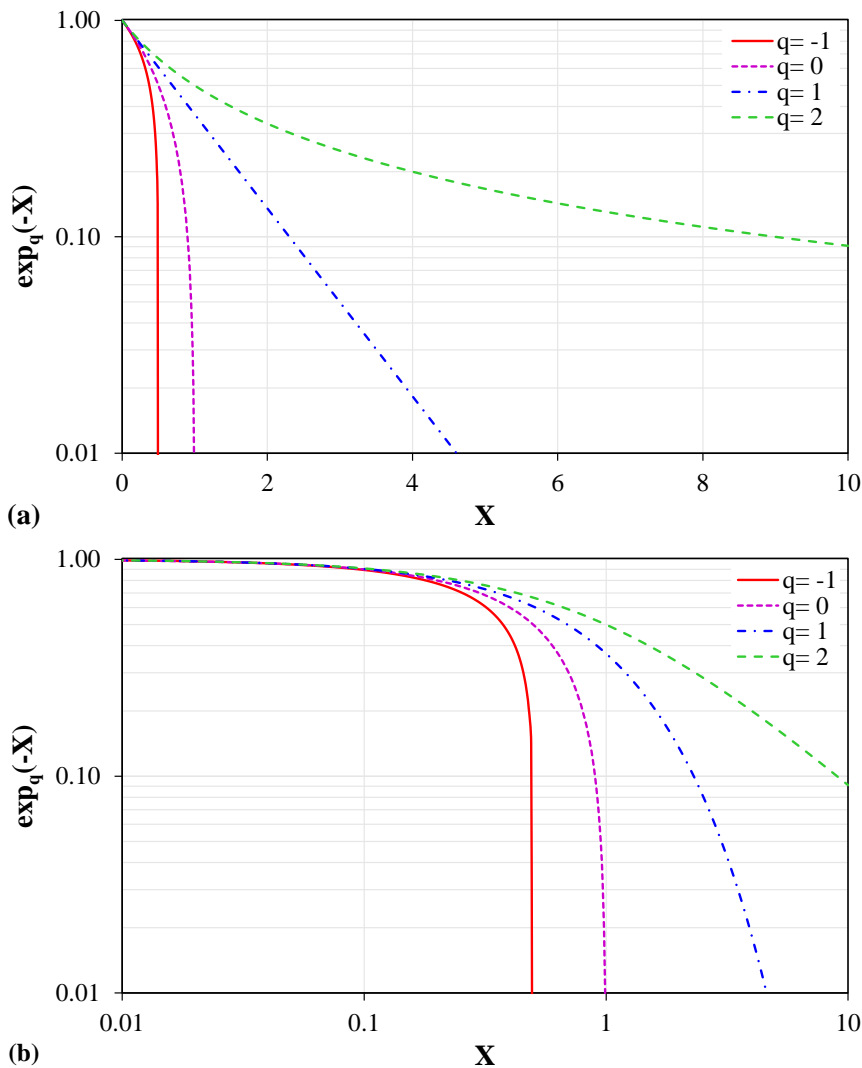
Η αντίστροφη μορφή της  $q$ -εκθετικής συνάρτησης ονομάζεται « $q$ -λογαριθμική συνάρτηση» και δίδεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$\ln_q(X) = \frac{1}{1-q}(X^{1-q} - 1) \quad (3.12)$$

Σημειώνεται πως στην περίπτωση της στατιστικής μηχανικής Boltzmann-Gibbs, όταν ο δείκτης  $q$  τείνει στη μονάδα ( $q \rightarrow 1$ ), αμφότερες οι Εξισώσεις (3.11) και (3.12) μεταπίπτουν στις συνήθεις εκθετικές και λογαριθμικές συναρτήσεις, αντίστοιχα. Σύμφωνα με τις αναφορές [85, 86] η  $q$ -εκθετική συνάρτηση αποτελεί γενίκευση της κατανομής Zipf-Mandelbrot η οποία ανακτάται για τιμές του δείκτη  $q$  μικρότερες της μονάδας ( $q < 1$ ).



Σχήμα 3.1 Η  $q$ -εκθετική συνάρτηση  $\exp_q(X)$  για διάφορες τιμές του  $q$ .



Σχήμα 3.2 Η  $q$ -εκθετική συνάρτηση  $\exp_q(-X)$  για διάφορες τιμές του  $q$  (a) σε ημιλογαριθμικούς άξονες και (b) σε λογαριθμικούς άξονες.

Στην περίπτωση της υπο-προσθετικότητας ( $q > 1$ ), η Εξίσωση (3.11) εμφανίζει μια ασυμπτωτική ουρά νόμου δύναμης (power law tail), ενώ στην περίπτωση της υπέρ-προσθετικότητας ( $0 < q < 1$ ) παρουσιάζει μια αποκοπή στο  $X_c = 1/(q-1)$ . Στο Σχήμα 3.1 φαίνεται η  $q$ -εκθετική συνάρτηση της Εξίσωσης (3.11) για διάφορες τιμές του εντροπικού δείκτη  $q$ .

Η ποσότητα που συγκρίνεται με την κατανομή του παρατηρούμενου συστήματος δεν είναι η αρχική  $p(X)$  αλλά η σχετιζόμενη συνοδεύουσα κατανομή (associated escort distribution)  $P_q(X)$  [87-93]. Η συνάρτηση επιβίωσης (survival function - SF) της παραμέτρου  $X$ , εκφράζεται ως  $q$ -εκθετική συνάρτηση [87]:

$$P(> X) = \int_X^\infty P_q(X) dX = \exp_q(-\beta_q X) \quad (3.13)$$

Η ποσότητα  $\exp_q(-\beta_q X)$  της Εξίσωσης (3.13) φανερώνει ότι μετά την εκτίμηση του κατάλληλου  $q$ , η  $q$ -λογαριθμική συνάρτηση  $\ln_q[P(> X)]$ , είναι γραμμική ως προς  $X$ ,

με κλίση  $\beta_q$ . Παρατηρούμε ότι η SF  $P(> X)$  είναι μια  $q$ -εκθετική κατανομή της μορφής  $P(> X) = \exp_q(-\beta_q X)$ . Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζεται η  $q$ -εκθετική συνάρτηση  $\exp_q(-X)$  για διάφορες τιμές του  $q$  σε ημιλογαριθμικούς άξονες (Σχήμα 3.2(a)) και λογαριθμικούς άξονες (Σχήμα 3.2(b)).

### 3.2 Εφαρμογές της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής στη σεισμολογία και στις διεργασίες θραύσης

Η τεχνική των ΑΕ έχει χρησιμοποιηθεί σε εργαστηριακή κλίμακα μέσω ελεγχόμενων πειραμάτων μηχανικής φόρτισης σε ψαθυρά πετρώματα, με σκοπό τη διερεύνηση πιθανών ομοιοτήτων μεταξύ των μηχανισμών θραύσης που λαμβάνουν χώρα σε μηχανικά φορτισμένα δοκίμια πετρωμάτων και τους σεισμούς [94]. Η δραστηριότητα ΑΕ και η σεισμικότητα, μπορούν να μελετηθούν με τα ίδια στατιστικά εργαλεία μιας και οι δύο προέρχονται από παρόμοια φαινόμενα θραύσης που είτε περιορίζονται σε εργαστηριακή κλίμακα είτε επεκτείνονται σε κλίμακα πεδίου. Είναι γενικά αποδεκτό ότι αμφότερα, αποτελούν μη γραμμικές διεργασίες σύνθετων συστημάτων μη-ισορροπίας, τα οποία παρουσιάζουν πολυμορφοκλασματικότητα, αυτο-όμοια δομή, αλληλεπιδράσεις μεγάλης εμβέλειας και φαινόμενα μνήμης [95-98]. Λόγω της πολυπλοκότητας αυτών των φαινομένων, για την μελέτη τους προκρίνεται η ανάλυση τους μέσω της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής.

Η μη-εκτατική στατιστική μηχανική, έχει αποδειχθεί πως μπορεί να περιγράψει τις διαδικασίες διάδοσης και ανάπτυξης των ρηγμάτων [99], ειδικά στις περιπτώσεις των σεισμών όπου εκλύονται υψηλές ενέργειες, και οι οποίες οδηγούν στην ύπαρξη αλληλεπιδράσεων μεγάλης εμβέλειας μεταξύ όλων των τμημάτων του συστήματος. Σε αυτές τις περιπτώσεις η εντροπία είναι μη-προσθετική και εξαρτάται από όλο το σύστημα. Η ανάλυση μέσω της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής φαίνεται να επαρκεί για την ανάλυση του μηχανισμού της σχετικής μετατόπισης των τεκτονικών ρηγμάτων, η οποία είναι η κύρια αιτία των σεισμών [100]. Αντίστοιχα, κατά την υποβολή σωμάτων σε καταστρεπτικά επίπεδα μηχανικής φόρτισης όπου υπάρχει έκλυση ΑΕ υψηλών ενεργειών εμφανίζονται αλληλεπιδράσεις μεγάλης εμβέλειας και σε αυτές τις περιπτώσεις προκρίνεται η ανάλυση τους μέσω της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής. Πρέπει να σημειώσουμε όμως, ότι η συμπεριφορά της σεισμικότητας στο φυσικό χρόνο [101] που οφείλεται σε χρονολογικές συσχετίσεις ανάμεσα στα διαδοχικά σεισμικά μεγέθη δεν μπορεί να αποδοθεί μονάχα από την κατανομή Tsallis.

Οι Abe και Suzuki [85, 86] μελέτησαν τις τρισδιάστατες Ευκλείδειες αποστάσεις (interevent distances) και τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών σεισμών (interevent times) χρησιμοποιώντας μη-εκτατική στατιστική μηχανική. Ανέλυσαν σεισμικά δεδομένα από την Ιαπωνία και τη νότια Καλιφόρνια και βρήκαν πως οι αθροιστικές κατανομές των τρισδιάστατων Ευκλείδειων αποστάσεων και των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών σεισμών υπακούν σε μια τροποποιημένη Zipf-Mandelbrot κατανομή [102], η οποία χαρακτηρίζεται από  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις με  $q = q_{\delta_r} < 1$  [85] και  $q = q_{\delta_t} > 1$  [86], όπου  $q_{\delta_r}$  και  $q_{\delta_t}$  αντιπροσωπεύουν τις υπολογιζόμενες τιμές του εντροπικού δείκτη  $q$  για την χρονική και χωρική κατανομή, αντίστοιχα. Επιπλέον, υπολόγισαν το άθροισμα των δεικτών  $q_{\delta_r}$  και  $q_{\delta_t}$ , βρίσκοντας ότι ισούται περίπου με δύο (2), δηλ.  $q_{\delta_r} + q_{\delta_t} \approx 2$ , [85]. Αυτή η σχέση επιβεβαιώθηκε από τους Darooneh και Dadashinia [103], οι οποίοι ανέλυσαν σεισμικά δεδομένα από το Ιράν μέσω NESM. Αργότερα, η σχέση  $q_{\delta_r} + q_{\delta_t} \approx 2$  επιβεβαιώθηκε και αναπαράχθηκε αριθμητικά από τον Hasumi [104] χρησιμοποιώντας το διδιάστατο μοντέλο Burrigide-Knopoff model [69]. Η μοντελοποίηση της γενικευμένης σεισμικότητας η οποία υποστηρίζει τη μεθοδολογία της μη-εκτατικής στατιστικής

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

μηχανικής σε επίπεδο τεκτονικών πλακών μπορεί να αναζητηθεί στις αναφορές [101, 105-109].

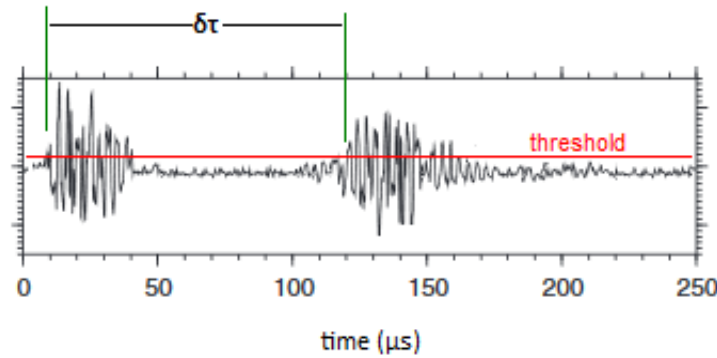
Οι Vallianatos et. al. [87] μελέτησαν, στα πλαίσια της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής την καταγεγραμμένη δραστηριότητα ΑΕ σε δοκίμια βασάλτη όταν αυτά υπέστησαν μονοαξονική συμπίεση μέχρι τη θραύση τους. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής - της βαθμωτής σεισμικής ροπής (scalar moment) των ΑΕ, των Ευκλείδειων αποστάσεων και των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών γεγονότων ΑΕ υπακούν σε  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις. Επίσης, οι συγγραφείς εξέτασαν το άθροισμα των υπολογιζόμενων εντροπικών δεικτών  $q$  των interevent distances διαδοχικών γεγονότων ΑΕ ( $q_{\delta r}$ ) και των interevent times μεταξύ διαδοχικών γεγονότων ( $q_{\delta t}$ ). Βρήκαν ότι η σχέση  $q_{\delta t} + q_{\delta r} \approx 2$  επιβεβαιώνεται στην περίπτωση των γεγονότων ΑΕ που καταγράφονται σε δοκίμια βασάλτη υπό έντονη μηχανική φόρτιση.

Οι Stergiopoulos et al. [88] έδειξαν ότι οι κατανομές των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών γεγονότων ΑΕ που καταγράφηκαν από δοκίμια κονιάματος τσιμέντου Portland που υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων χαρακτηρίζονται από  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις. Επιπλέον, υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι εντροπικοί δείκτες  $q$ , με βάση το μοντέλο εντροπίας του Tsallis, σε διαφορετικά επίπεδα φόρτισης και παρατήρησαν πως συσχετίζονται έντονα με το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο.

Οι Stavrakas et. al. [89] μελέτησαν τα γεγονότα ΑΕ που καταγράφηκαν όταν δοκίμια κονιάματος λευκού τσιμέντου υποβλήθηκαν σε έξι επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης κάμψης τριών σημείων. Τα καταγεγραμμένα δεδομένα ΑΕ αναλύθηκαν μέσω μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αθροιστικές συναρτήσεις κατανομής (cumulative distribution functions - CDFs) των κατανομές των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών γεγονότων ΑΕ, ακολουθούν μια  $q$ -εκθετική συνάρτηση. Επιπλέον οι εντροπικοί δείκτες  $q$  και οι αντίστοιχες εντροπικές παράμετροι  $\beta_q$ , παρουσιάζουν συστηματικές αλλαγές κατά τους διάφορους κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης του πρωτόκολλο φόρτισης. Οι Saltas et al. [91] μελέτησαν τους χτύπους ΑΕ που καταγράφηκαν σε δοκίμια ψαμίτη και μαρμάρου, τα οποία υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη έως τη θραύση. Η ανάλυση στο πλαίσιο της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής έδειξε ότι οι κατανομές των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών ομάδων χτύπων ΑΕ και για τα δύο είδη δοκιμίων, υπακούν σε μια  $q$ -εκθετική συνάρτηση. Επιπλέον, μελετήθηκε η χρονική εξέλιξη των δεικτών  $q$  και των αντίστοιχων παραμέτρων  $\beta_q$  για τα δύο κατηγορίες δοκιμίων σε συνδυασμό με το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μεταβολή στις τιμές των υπολογιζόμενων εντροπικών δεικτών  $q$  και των αντίστοιχων παραμέτρων  $\beta_q$  παρουσιάζουν ισχυρή συσχέτιση με την μεταβολή του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου. Σε παρόμοια κατεύθυνση, οι Greco et al. [92] ανέλυσαν μέσω NESM τα δεδομένα ΑΕ που καταγράφησαν κατά τη διάρκεια δοκιμών κυκλικής συμπίεσης δοκιμίων σκυροδέματος και βασάλτη. Οι κατανομές των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών γεγονότων ΑΕ έδειξαν ότι ακολουθούν μια  $q$ -εκθετική συνάρτηση, με τον εντροπικό δείκτη  $q$  και την παράμετρο  $\beta_q$  να εμφανίζουν συνεπείς αλλαγές κατά τα διάφορα στάδια του πρωτοκόλλου φόρτισης.

### 3.3 Αξιοποίηση δεδομένων ΑΕ για τον προσδιορισμό του εντροπικού δείκτη $q$

Στο πλαίσιο της ανάλυσης που θα ακολουθήσει, η συνεχής μεταβλητή  $X$  αντιπροσωπεύει το χρονικό διάστημα  $\delta t$  μεταξύ του μέσου χρόνου εμφάνισης διαδοχικών ομάδων χτύπων ΑΕ.



Σχήμα 3.3 Ο τρόπος υπολογισμού του χρόνου  $\delta\tau$  στην περίπτωση δύο διαδοχικών χτύπων ΑΕ.

Έτσι, η αρχική χρονοσειρά ΑΕ χωρίζεται σε συνεχείς ομάδες αποτελούμενες από έναν ικανοποιητικό αριθμό γεγονότων ΑΕ και μετατρέπεται στην χρονοσειρά  $\delta\tau_i = t_{i+1} - t_i$ , η οποία αντιπροσωπεύει τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών γεγονότων ΑΕ. Το Σχήμα 3.3 είναι ενδεικτικό του υπολογισμού του χρονικού διαστήματος  $\delta\tau$  μεταξύ δύο διαδοχικών χτύπων ΑΕ δηλαδή, το χρονικό διάστημα μεταξύ της έναρξης ενός χτύπου ΑΕ και της έναρξης του επόμενου.

Η διατύπωση της συνάρτησης επιβίωσης των ΑΕ interevent times, η οποία συμβολίζεται ως  $P(> \delta\tau)$ , υπακούει μια  $q$ -εκθετική συνάρτηση της μορφής [88-93]:

$$P(> \delta\tau) = \exp_q(-\beta_q \cdot \delta\tau) = [1 + (q-1)\beta_q \cdot \delta\tau]^{1-q} \quad (3.14)$$

Η παράμετρος  $\beta_q = 1/\tau_q$  αποτελεί μία εντροπική παράμετρο με μονάδες αντίστροφου χρόνου ( $s^{-1}$ ). Η παράμετρος  $\tau_q$  είναι μία χρονική παράμετρος που συνδέεται με την μέση τιμή  $\overline{\delta\tau}$  του συνόλου των χρόνων μεταξύ διαδοχικών χτύπων ΑΕ  $\delta\tau_i$  που αξιοποιούνται για τον προσδιορισμό της  $P(> \delta\tau)$ , μέσω της σχέσης [91]:

$$\frac{\overline{\delta\tau}}{\tau_q} = \frac{B\left(2, \frac{2-q}{q-1}\right)}{(q-1)^2} \quad (3.15)$$

όπου  $B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt$  είναι η συνάρτηση Βήτα (Beta function) [110] με  $x = 2$  και  $y = \frac{2-q}{q-1}$ . Σημειώνεται ότι η συνάρτηση επιβίωσης  $P(> X)$  (Εξίσωση (3.13)), και η συνάρτηση επιβίωσης των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών χτύπων ΑΕ  $P(> \delta\tau)$  (Εξίσωση (3.14)), παρουσιάζουν την ίδια μαθηματική μορφή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός των εντροπικών δεικτών  $q$  προτιμάται να γίνεται μέσω των μαθηματικών αρχών που διέπουν το εκάστοτε εξεταζόμενο σύστημα όταν αυτό καθίσταται δυνατό μέσω της μαθητικής ιχνηλασιμότητας του. Στην αντίθετη περίπτωση όπου η πλήρης μαθηματική ιχνηλασιμότητα του συστήματος δεν είναι δυνατή, όπως στην περίπτωση της σεισμικότητας κατά την οποία ο εντροπικός δείκτης  $q$  υπολογίζεται μέσω ενός εμπειρικού νόμου (π.χ. κατανομή Guttenberg-Richter) επιστρατεύονται πειραματικά δεδομένα τα οποία προσαρμόζονται μέσω fitting με συναρτήσεις που είναι συνήθως,  $q$ -

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

εκθετικές ή  $q$ -Γκαουσιανές με στόχο τον υπολογισμό των τιμών του εντροπικού δείκτη  $q$  εντός αποδεκτών ορίων σφάλματος. Έτσι στο πλαίσιο της εν λόγω ανάλυσης καθώς δεν είναι δυνατόν να γνωρίζουμε πλήρως τις μαθηματικές σχέσεις που διέπουν τους μηχανισμούς γέννησης, ανάπτυξης και διάδοσης των μικρορωγμών εντός των δοκιμίων, επιστρατεύονται πειραματικά δεδομένα στα οποία επιχειρείται η προσαρμογή μέσω fitting, μίας  $q$ -εκθετικής κατανομής που αποτελεί, όπως προαναφέρθηκε, γενίκευση της κατανομής Zipf-Mandelbrot.

## 4. Υλικά υπό εξέταση-Πειραματικά πρωτόκολλα

Στο κεφάλαιο παρουσιάζονται τόσο τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών που εξετάζονται, όσο και τα πειραματικά πρωτόκολλα που χρησιμοποιήθηκαν για την καταγραφή των δεδομένων ακουστικών εκπομπών. Στις παραγράφους 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται εν συντομία τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του μάρμαρου Διονύσου και του τσιμέντου Portland, αντίστοιχα. Η παράγραφος 4.3 περιγράφει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμών και παρουσιάζει αναλυτικά τα πειραματικά πρωτόκολλα στα οποία υποβλήθηκαν τα εν λόγω δοκίμια όπως: κάμψη τριών σημείων, άμεσος εφελκυσμός, αντιδιαμετρική θλίψη και μονοαξονική θλίψη. Τέλος, στην παράγραφο 4.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα ανωτέρω δοκίμια και τα αντίστοιχα πειραματικά πρωτόκολλα.

### 4.1 Μάρμαρο Διονύσου

Το μάρμαρο Διονύσου χρησιμοποιείται αποκλειστικά στα έργα αποκατάστασης της Αθηναϊκής Ακρόπολης, διότι παρουσιάζει παρόμοια σύνθεση και ιδιότητες με το Πεντελικό μάρμαρο το οποίο αποτελεί το αρχικό οικοδομικό υλικό των ναών επί του βράχου της Ακρόπολης. Το μάρμαρο Διονύσου αποτελείται από 98% ασβεστίτη, ενώ περιέχει πολύ μικρές ποσότητες μοσχοβίτη (0.5%), σερισίτη (0.3%), χαλαζία (0.2%) και χλωρίτη (0.1%) [111]. Η πυκνότητά του είναι περίπου  $2730 \text{ kg/m}^3$ , η φαινόμενη πυκνότητα (bulk density)  $2717 \text{ kg/m}^3$ , και ο συντελεστής απορρόφησης κατά βάρος περίπου 0.11%, ενώ ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι περίπου  $9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{C}$  μεταξύ  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  and  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  [112]. Το πορώδες του είναι πολύ χαμηλό κυμαινόμενο περίπου 0.3% στην παρθενική του κατάσταση, ενώ μετά την επίδραση διάφορων φυσικών ή τεχνητών διαβρωτικών παραγόντων μπορεί να φθάσει περίπου έως 0.7%. Το μέγεθος των κόκκων του είναι περίπου  $0.43 \times 10^{-3} \text{ m}$ . Οι κρύσταλλοι του είναι πολυγωνικού σχήματος ομοιόμορφου μεγέθους με διαστάσεις που κυμαίνονται μεταξύ [900–650]  $\mu\text{m}$  και [950–874]  $\mu\text{m}$  [113]. Το χρώμα του είναι λευκό με λίγες λεπτές παράλληλες σταχτοπράσινες φλέβες οι οποίες ακολουθούν τη σχιστότητα του μαρμάρου. Επιπλέον, λόγω της ύπαρξης χλωρίτη και μοσχοβίτη εντοπίζονται τοπικά ασημόχρωμες περιοχές. Οι μηχανικές ιδιότητες του μαρμάρου Διονύσου ποικίλλουν μεταξύ ευρέων ορίων [114]. Το συγκεκριμένο μάρμαρο είναι πιθανώς ορθοτροπικής φύσης, δηλαδή χαρακτηρίζεται από τρεις διαφορετικές ανισοτροπικές κατευθύνσεις. Ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί μακροσκοπικά περίπου ως ένα εγκάρσιο ιστροπικό υλικό που περιγράφεται επαρκώς με τη βοήθεια πέντε ελαστικών σταθερών, όπως έχει συναφθεί με βεβαιότητα από λεπτομερή πειραματικά πρωτόκολλα, συμπεριλαμβανομένων δοκιμών άμεσου εφελκυσμού και θλίψης, καθώς και σε δοκιμές κάμψης τριών σημείων και Βραζιλιανών δίσκων [28, 115–120]. Τα ανωτέρω πειραματικά πρωτόκολλα αποκάλυψαν επίσης ότι το μάρμαρο Διονύσου είναι ελαφρώς μη γραμμικό (τόσο στον εφελκυσμό όσο και στην θλίψη) και ελαφρώς διτροπικό, δηλαδή το ελαστικό μέτρο συμπίεσης είναι περίπου 15% υψηλότερο από το αντίστοιχο σε εφελκυσμό [116, 117]. Σημειώνεται ότι για την αντοχή σε εφελκυσμό οι τιμές που αναφέρονται κυμαίνονται μεταξύ 2.4 MPa και 19.5 MPa, ενώ για μέτρο του Young οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές κυμαίνονται μεταξύ 23 GPa και 90 GPa [112].

### 4.2 Τσιμέντο Portland

Το τσιμέντο είναι ένας γενικός όρος και μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά ανόργανα και οργανικά υλικά. Το πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενο τσιμέντο στον κατασκευαστικό κλάδο είναι το τσιμέντο Portland [121]. Ιστορικά, το έτος 1824 θεωρείται ότι σηματοδοτεί την προέλευση των σύγχρονων τσιμέντων Portland, καθώς τότε χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας το όνομα «Portland» από τον Joseph Aspdin για να τονίσει την ομοιότητα του κονιάματος που κατασκευάζεται με το τσιμέντο του, σε σχέση με τον ασβεστόλιθο του Portland ο οποίος ήταν ένα δημοφιλές οικοδομικό υλικό της εποχής. Το τσιμέντο Portland χρησιμοποιείται για την κατασκευή κονιαμάτων, στόκων και

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

αρμών για όλους τους τύπους κτιρίων και κατασκευών. Επιπλέον, αποτελεί ένα υδραυλικό τσιμέντο, γεγονός που του επιτρέπει να στερεοποιείται και σκληραίνει κάτω από το νερό και ως εκ τούτου μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια σε όλες τις δομές που έρχονται σε επαφή με το νερό. Ως εκ τούτου, η αστοχία υλικών με βάση το τσιμέντο Portland είναι ένα σημαντικό ζήτημα, καθώς η δομική ακεραιότητα είναι απαραίτητη για την ασφάλεια τόσο των υποδομών όσο και των ανθρώπων.

Το τσιμέντο Portland είναι ένα τσιμέντο πυριτικού ασβεστίου που σχηματίζεται από αντιδράσεις υψηλής θερμοκρασίας μεταξύ ασβεστόλιθου και αργίλου. Η αντίδραση πυριτικών ασβεστίου με νερό (ενυδάτωση) είναι υπεύθυνη για την αντοχή του σκυροδέματος. Μικρές ποσότητες του οξειδίου του αργιλίου (αλουμίνας) και οξειδίου του σιδήρου οι οποίοι δρουν ως παράγοντες ροής κατά την κατασκευή σχηματίζουν αργιλικά ασβέστια, τα οποία αντιδρούν επίσης με νερό. Τα προϊόντα ενυδάτωσης διατάσσονται φυσικά για να σχηματίσουν μια συμπαγή δομή με ένα δίκτυο μικρών πόρων. Η χημεία ενυδάτωσης και η προκύπτουσα μικροδομή μπορούν να τροποποιηθούν με την προσθήκη αργιλοπυριτικών αντιδραστηρίων. Τα υλικά με βάση το τσιμέντο χαρακτηρίζονται από τον τύπο των αδρανών που μπορεί να περιλαμβάνονται στο μείγμα τους.

Τα δοκίμια κονιάματος τσιμέντου που παρουσιάζονται στην συνέχεια περιείχαν άμμο λεπτών αδρανών. Τα χρησιμοποιημένα λεπτά αδρανή ενήργησαν ως πληρωτικά, ενώ το τσιμέντο Portland ήταν το συνδετικό του μείγματος. Το μείγμα περιελάμβανε τσιμέντο, άμμο (λεπτά αδρανή) και νερό σε αναλογία βάρους 1:3:0.5, αντίστοιχα. Το μέγεθος των κόκκων της άμμου κυμαινόταν μεταξύ 0.6 mm έως 3 mm και ο συντελεστής λεπτότητάς του ήταν ίσος με 2.8. Επιπλέον, η σχετική πυκνότητα (relative density) του βρέθηκε ίση με  $2600 \text{ kg/m}^3$ , η πυκνότητά του ήταν  $2200 \text{ kg/m}^3$  και το πορώδες του εκτιμήθηκε περίπου στο 8% [122]. Προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη ενυδάτωση των κόκκων τσιμέντου, διατηρήθηκε χαμηλή ταχύτητα κατά τη διαδικασία ανάμιξης. Το μείγμα παρέμεινε στα καλούπια για 24 ώρες. Στη συνέχεια, τα καλούπια αφαιρέθηκαν και τα δοκίμια αποθηκεύτηκαν σε σταθερή θερμοκρασία περιβάλλοντος  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  και υγρασία 75–80%. Για την απόκτηση 95% της συνολικής τους αντοχής, τα δοκίμια χρησιμοποιήθηκαν για πειράματα 90 ημέρες μετά την παρασκευή τους [88].

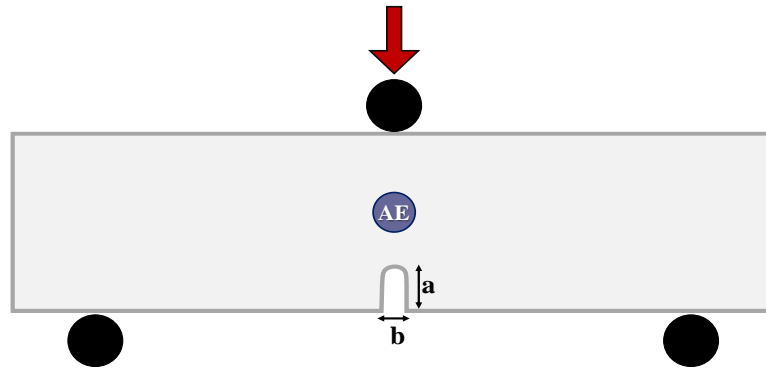
Τέλος στα πειράματα που θα παρουσιαστούν, χρησιμοποιήθηκαν δοκοί από κονίαμα τσιμέντου Portland με χοντρά αδρανή στις οποίες είχαν εμποτιστεί δύο ειδών ίνες ενίσχυσης. Η πρώτη κατηγορία ινών αφορά μεταλλικές ίνες, ενώ η άλλη κατηγορίας αφορούσε συνθετικές μακροϊνες κατασκευασμένες από πολυολεφίνη τύπου SikaFiber Force60 της εταιρίας Sika A.E. Περισσότερα σχόλια για τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται δίδονται στον Πίνακα 4.1 της σελίδας 69.

### 4.3 Δοκίμια και πειραματικά πρωτόκολλα

Στην διατριβή τα πειραματικά αποτελέσματα που αναλύθηκαν, αναφέρονται σε τέσσερις (4) βασικές κατηγορίες ανάλογα το υλικό και το πειραματικό πρωτόκολλο στο οποίο υποβλήθηκαν τα δοκίμια. Στον Πίνακα 4.2 της σελίδας 70, παρουσιάζονται συνοπτικά αυτές οι βασικές πληροφορίες που αφορούν τα δοκίμια μαρμάρου και τσιμέντου. Επίσης παρέχονται και πληροφορίες σχετικές με τη μορφή των δοκιμίων, τις διαστάσεις τους και με τα εφαρμοζόμενα πρωτόκολλα φόρτισης μέχρι τη θραύση. Για κάθε δοκίμιο και αντίστοιχο πρωτόκολλο φόρτισης γίνεται μια αντίστοιχη κωδικοποίηση η οποία παρουσιάζεται στην πρώτη στήλη του Πίνακα 4.2.

Πρέπει να σημειωθεί ότι στα πειράματα που αφορούσαν δοκίμια μαρμάρου Διονύσου, είχαν προσαρμοστεί περισσότεροι του ενός ακουστικοί αισθητήρες τύπου R15α ώστε να καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός της θέσης των ακουστικών γεγονότων. Τα ακουστικά δεδομένα που θα αναλυθούν στη συνέχεια αντλήθηκαν από τον αισθητήρα που βρίσκονταν πλησιέστερα στην αναπτυσσόμενη ρωγμή [123-125]. Στην περίπτωση των δοκιμίων κονιάματος τσιμέντου, τοποθετήθηκε ένας αισθητήρας R15α τη μέση των δοκιμίων. Ενώ





Σχήμα 4.1 Σχέδιο των δοκιμίων μαρμάρου με κεντρική εγκοπή για τα πειράματα ExprBM-01 και ExprBM-02.

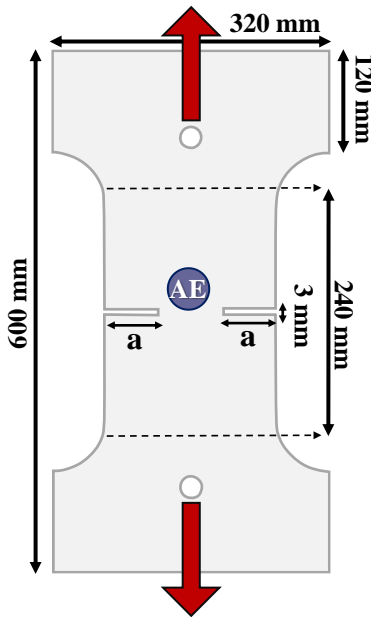
στην περίπτωση των ινοπλισμένων δοκών κονιάματος τσιμέντου η ανίχνευση και παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας επιτεύχθηκε με την προσάρτηση οκτώ (8) αισθητήρων AE τύπου R15α σε κάθε δοκίμιο. Συγκεκριμένα, τρεις αισθητήρες R15α προσαρτήθηκαν στην μπροστινή ευρεία πλευρά των δοκιμίων, δύο στην πίσω ευρεία πλευρά των δοκιμίων, ένας στην άνω πλευρά της εγκοπής και δύο ακόμη αισθητήρες προσαρτήθηκαν στην κάτω πλευρά της εγκοπής. Πρόσθετες πληροφορίες για κάθε πειραματικό πρωτόκολλο δίνονται στις αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές [123-128].

#### 4.3.1 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε μαρμάρινα δοκίμια με εγκοπή

Η πρώτη κατηγορία πειραμάτων με κωδικό ExprBM αφορά πρισματικά δοκίμια μαρμάρου στα οποία διαμορφώθηκε εγκοπή κάθετη στον διαμήκη άξονα τους (βλ. Σχήμα 4.1). Οι διαστάσεις του δοκιμίου στο πείραμα ExprBM-01 ήταν  $25 \times 25 \times 100 \text{ mm}^3$  με διαστάσεις εγκοπής  $a = 6 \text{ mm}$  και  $b = 3 \text{ mm}$  ενώ του δοκιμίου στο πείραμα ExprBM-02 ήταν  $20 \times 20 \times 100 \text{ mm}^3$  με διαστάσεις εγκοπής  $a = 4 \text{ mm}$  και  $b = 2.5 \text{ mm}$ . Στο Σχήμα 4.1, υποδεικνύεται η θέση του αισθητήρα (μπλε κύκλος) από τον οποίο αντλήθηκαν τα δεδομένα AE. Το βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου, ενώ οι μαύροι κύκλοι είναι τα στηρίγματα που χρησιμοποιούνται για τη στερέωση των δοκιμίων στο πλαίσιο φόρτισης. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων μέχρι τη θραύση τους. Το ηλεκτρομηχανικό πλαίσιο φόρτισης MTS Insight είχε μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη ίση με 10 kN. Το φορτίο επιβλήθηκε, μέσω ενός κυλίνδρου ακτίνας 10 mm ομοιόμορφα κατά το πάχος των δοκιμίων κάθετα στον οριζόντιο άξονα τους, με έλεγχο της μετατόπισης και ρυθμό μεταβολής ίσο με 0.01 mm/min, ώστε να προσομοιώνονται με καλή προσέγγιση ημι-στατικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κατεγράφησαν το επιβαλλόμενο φορτίο και τα χαρακτηριστικά των ακουστικών δεδομένων [124].

#### 4.3.2 Δοκιμές άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή τύπου “DENT”

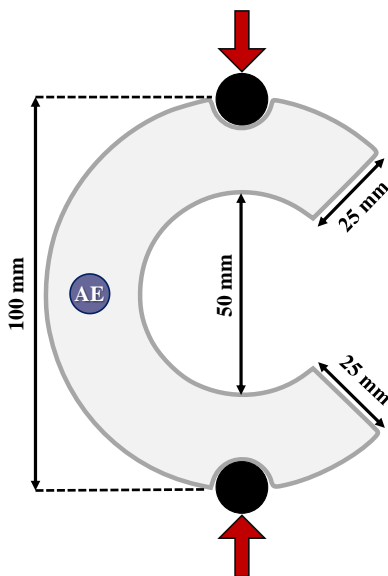
Η δεύτερη κατηγορία πειραμάτων με κωδικό ExprDM περιλαμβάνει δοκίμια μορφής “DENT” (Double Edge Notched Specimens) από μάρμαρο Διονύσου με συμμετρικές εγκοπές κάθετες στον άξονα φόρτισης. Η μορφή των δοκιμίων και η θέση του αισθητήρα (μπλε κύκλος) από τον οποίο αντλήθηκαν τα δεδομένα AE απεικονίζονται στο Σχήμα 4.2. Το βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου, ενώ οι μαύροι κύκλοι είναι τα στηρίγματα που χρησιμοποιούνται για τη στερέωση των δοκιμίων στο πλαίσιο φόρτισης. Το πάχος των δοκιμίων ήταν 12 mm ενώ το μήκος της εγκοπής ήταν για το μεν δοκίμιο ExprDM-03 ήταν ίσο με  $a = 80 \text{ mm}$ , ενώ για το ExprDM-04 ήταν ίσο με  $a = 40 \text{ mm}$ .



Σχήμα 4.2 Σχέδιο των δοκιμίων μαρμάρου γεωμετρίας “DENT” για τα πειράματα ExprDM-03 και ExprDM-04.

Διονύσου σε γεωμετρία “CSR” (Circular Semi-Ring) το οποίο υποβλήθηκε σε αντιδιαμετρική θλίψη. Η γεωμετρία “CSR” προτάθηκε στην αναφορά [126] με σκοπό να αντιμετωπισθούν κάποιες από τις ανησυχίες, οι οποίες σχετίζονται με την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων πειραμάτων μηχανικής φόρτισης σε δοκίμια διαμόρφωσης «Βραζιλιανού δίσκου» (Brazilian disk configuration) [129, 130]. Αυτές εστιάζονται κυρίως στο φαινόμενο ότι το πεδίο τάσεων στο κέντρο του Βραζιλιανού δίσκου είναι διαξονικό και όχι μονοαξονικό και επίσης, με τις συγκεντρώσεις τάσεων στις διεπαφές μεταξύ του δοκιμίου και της αρπάγης του πλαισίου φόρτισης, που μπορεί να προκαλέσουν πρόωρες θραύσεις καθιστώντας τα τελικά αποτελέσματα παραπλανητικά [126, 131].

Η γεωμετρία και οι διαστάσεις του δοκιμίου που επιλέχθηκε να παρουσιαστεί καθώς και η



Σχήμα 4.3 Σκίτσο του δοκιμίου μαρμάρου γεωμετρίας “CSR” του πειράματος ExprUM-05.

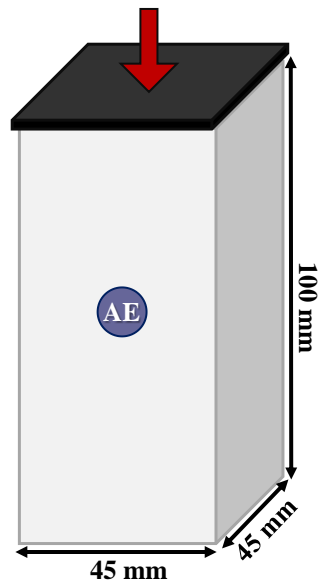
Σημειώνεται ότι στις δύο πεπλατυσμένες πλευρές κάθε δοκιμίου ανοίχθηκε μία οπή διαμέτρου 14 mm, μέσω των οποίων διέρχονταν μεταλλικοί πίροι για τη στήριξη και την υποβολή των δοκιμίων σε άμεσο εφελκυσμό. Οι δοκιμές υλοποιήθηκαν στο ηλεκτρικό πλαίσιο φόρτισης MTS Insight με μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη ίση με 10 kN. Το φορτίο επιβλήθηκε με έλεγχο της μετατόπισης και ρυθμό μεταβολής ίσο με 0.02 mm/min ώστε να προσομοιώνονται με καλή προσέγγιση ημι-στατικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κατεγράφησαν, το επιβαλλόμενο φορτίο και τα χαρακτηριστικά των ακουστικών δεδομένων. Περισσότερες λεπτομέρειες για το πειραματικό πρωτόκολλο που ακολουθήθηκε βρίσκονται στην αναφορά [125].

#### 4.3.3 Δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου τύπου “CSR”

Η τρίτη κατηγορία πειραμάτων με κωδικό ExprUM-05, αφορά δοκίμιο μαρμάρου

Η θέση του αισθητήρα (μπλε κύκλος) από τον οποίο αντλήθηκαν τα δεδομένα AE απεικονίζονται στο Σχήμα 4.3. Το βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου, ενώ οι μαύροι κύκλοι είναι τα στηρίγματα που χρησιμοποιούνται για τη στερέωση του δοκιμίου στο πλαίσιο φόρτισης. Η εξωτερική διάμετρος ήταν ίση με 10 cm ενώ η εσωτερική διάμετρος ήταν ίση με 5 cm. Σημειώνεται πως η διάμετρος των αυλακώσεων που σχηματίστηκαν στην εξωτερική ακτίνα του δοκιμίου ήταν, περίπου, 0.70 cm Το δοκίμιο υποβλήθηκε σε αντιδιαμετρική θλίψη στο ηλεκτρικό πλαίσιο φόρτισης MTS Insight με μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη ίση με 10 kN. Το φορτίο επιβλήθηκε με τη βοήθεια δύο μεταλλικών πείρων οι οποίοι

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών



Σχήμα 4.4 Σκίτσο του πρισματικού δοκιμίου μαρμάρου του πειράματος ExprUM-06.

προσαρμόστηκαν σε αυλακώσεις με έλεγχο της μετατόπισης και ρυθμό μεταβολής ίσο με 0.02 mm/min, ώστε να προσομοιώνονται με καλή προσέγγιση ημι-στατικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κατεγράφησαν, το επιβαλλόμενο φορτίο και τα χαρακτηριστικά των ακουστικών γεγονότων.

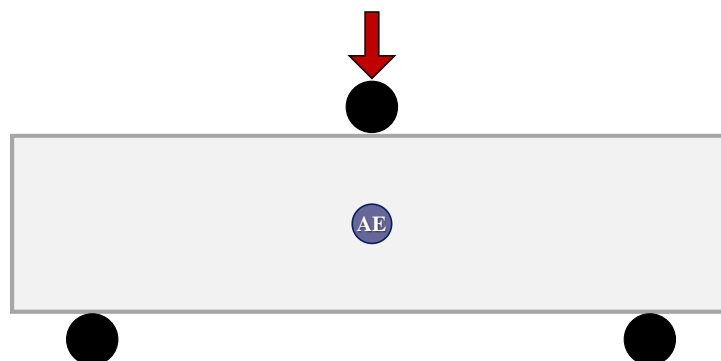
#### 4.3.4 Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε πρισματικό δοκίμιο μαρμάρου

Η τέταρτη κατηγορία πειραμάτων με τον κωδικό ExprUM-06 αφορά πρισματικό δοκίμιο μαρμάρου Διονύσου το οποίο υποβλήθηκε σε μονοαξονική θλίψη. Οι διαστάσεις του δοκιμίου ήταν 45x45x100 mm<sup>3</sup>. Η γεωμετρία και οι διαστάσεις του δοκιμίου που επιλέχθηκε καθώς και η θέση του αισθητήρα (μπλε κύκλος) από τον οποίο αντλήθηκαν τα δεδομένα ΑΕ απεικονίζονται στο Σχήμα 4.4. Το βέλος υποδεικνύει την

κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου, ενώ το μαύρο παραλληλόγραμμο είναι το στήριγμα που χρησιμοποιείται για τη στερέωση του δοκιμίου στο πλαίσιο φόρτισης. Το δοκίμιο υποβλήθηκε στο ηλεκτρικό πλαίσιο φόρτισης INSTRON-DX 300 με μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη ίση με 300 kN. Εφαρμόστηκε μονοαξονικό θλιπτικό φορτίο με ρυθμό ίσο 0.2 MPa/s ώστε να προσομοιώνονται με καλή προσέγγιση ημι-στατικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κατεγράφησαν το επιβαλλόμενο φορτίο και τα χαρακτηριστικά των ακουστικών δεδομένων [127].

#### 4.3.5 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια κονιάματος τσιμέντου

Η πέμπτη κατηγορία πειραμάτων περιλαμβάνει τρία πρισματικά δοκίμια κονιάματος τσιμέντου με κωδικούς ExprBC-07, ExprBC-08, ExprBC-09 και τα οποία υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν 50x50x200 mm<sup>3</sup>. Η μορφή των δοκιμίων και η θέση του αισθητήρα (μπλε κύκλος) από τον οποίο αντλήθηκαν τα δεδομένα ΑΕ απεικονίζονται στο Σχήμα 4.5. Το βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου, ενώ οι μαύροι κύκλοι είναι τα στηρίγματα που χρησιμοποιούνται για τη στερέωση των δοκιμίων στο πλαίσιο φόρτισης. Σχετικές λεπτομέρειες όσον αφορά την παρασκευή των δοκιμίων και την πειραματική διαδικασία βρίσκονται στην αναφορά [123].



Σχήμα 4.5 Σχέδιο των δοκιμίων κονιάματος τσιμέντου των πειραμάτων ExprBC-07, ExprBC-08 και ExprBC-09.

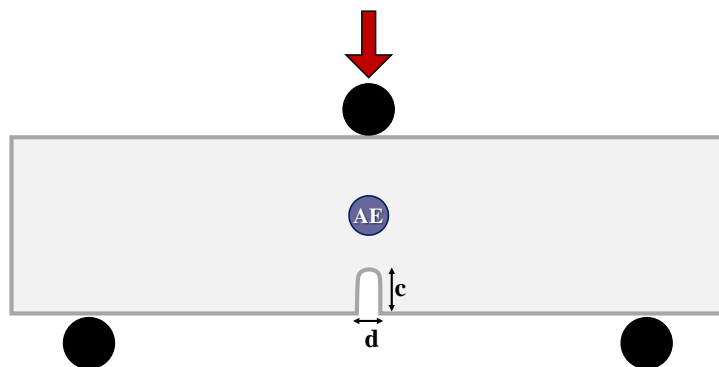
Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων στο ηλεκτρικό πλαίσιο φόρτισης MTS Insight με μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη ίση με 10 kN. Το φορτίο επιβλήθηκε, μέσω ενός κυλίνδρου ακτίνας 10 mm ομοιόμορφα κατά το πάχος των δοκιμίων κάθετα στον οριζόντιο άξονα τους, με έλεγχο της μετατόπισης και ρυθμό επιβολής φορτίου ίσο με 65 N/s (ExpBC-07), 85 N/s (ExpBC-08) και 35 N/s (ExpBC-09) ώστε να προσομοιώνονται με καλή προσέγγιση ημι-στατικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κατεγράφησαν, το επιβαλλόμενο φορτίο και τα χαρακτηριστικά των ακουστικών δεδομένων.

#### 4.3.6 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε ινοπλισμένα δοκίμια κονιάματος τσιμέντου με εγκοπή

Η έκτη κατηγορία πειραμάτων αφορούσε πρισματικές δοκούς τετραγωνικής διατομής κατασκευασμένες από κονίαμα τσιμέντου στις οποίες διαμορφώθηκε με μηχανική κοπή στο μέσον του ανοίγματός τους, εγκοπή κάθετη στον διαμήκη άξονα τους. Οι διαστάσεις των δοκιμίων ήταν  $700 \times 50 \times 150 \text{ mm}^3$  ενώ οι διαστάσεις των εγκοπών είχαν βάθος περίπου  $c = 25 \text{ mm}$  και πλάτος περίπου  $d = 5 \text{ mm}$  [128]. Τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων έως τη θραύση. Η μορφή των δοκιμίων και η θέση του αισθητήρα (μπλε κύκλος) από τον οποίο αντλήθηκαν τα δεδομένα AE απεικονίζονται στο Σχήμα 4.6. Το βέλος υποδεικνύει την κατεύθυνση του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου, ενώ οι μαύροι κύκλοι είναι τα στηρίγματα που χρησιμοποιούνται για τη στερέωση των δοκιμίων στο πλαίσιο φόρτισης. Το φορτίο επιβλήθηκε με έλεγχο της μετατόπισης και ρυθμό μεταβολής σύμφωνα με το πρότυπο EN14651. Αρχικά ο ρυθμός μετατόπισης ήταν ίσος με  $0.08 \text{ mm/min}$ , για όσο το άνοιγμα των χειλέων εγκοπής (Notch Mouth Opening Displacement - NMOD) παρέμεινε μικρότερο από  $1 \text{ mm}$ . Από αυτήν την τιμή και έπειτα, ο ρυθμός μετατόπισης αυξήθηκε στα  $0.20 \text{ mm/min}$ .

Παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις δοκιμίων οι οποίες διαφοροποιούνται ανάλογα με την ύπαρξη και το είδος του εσωτερικού οπλισμού που περιέχουν: (i) χωρίς εσωτερική ενίσχυση, με κωδικό ExpBCR-10, (ii) ενισχυμένες με κοντές χαλύβδινες ίνες με κωδικό ExpBCMF-11 και (iii) ενισχυμένες με πλαστικές ίνες με κωδικό ExpBCPF-12. Όλες οι δοκιμές διεξήχθησαν στο ηλεκτρικό πλαίσιο φόρτισης πλαίσιο φόρτισης INSTRON (σειρά SATEC) με μέγιστη επιβαλλόμενη δύναμη ίση με 300 kN, ενώ η τιμή NMOD καταγράφηκε χρησιμοποιώντας μηκυσιόμετρα INSTRON στην κάτω πλευρά των δοκιμίων. Το φορτίο επιβλήθηκε, ομοιόμορφα κατά το πάχος των δοκιμίων κάθετα στον διαμήκη άξονα τους, με τη βοήθεια ενός μεταλλικού κυλίνδρου διαμέτρου ίσης με  $30 \text{ mm}$ . Ο Πίνακας 4.1 συνοψίζει τα παρουσιαζόμενα δοκίμια μαζί με τη δοσολογία της εσωτερικής ενίσχυσης και τις διαστάσεις των ινών που περιέχουν.



Σχήμα 4.6 Σχέδιο των ινοπλισμένων δοκιμίων κονιάματος τσιμέντου με εγκοπή των πειραμάτων ExpBCR-10, ExpBCMF-11 και ExpBCPF-12.

**Πίνακας 4.1 Η περιεκτικότητα της εσωτερικής ενίσχυσης και οι διαστάσεις των ιών που περιέχονται στα δοκίμια των πειραμάτων ExpBCR-10, ExpBCMF-11 και ExpBCPF-12.**

<b>Πείραμα</b>	<b>Περιεκτικότητα εσωτερικής ενίσχυσης (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Διαστάσεις ιών (μήκος-ισοδύναμη διάμετρος) (mm)</b>
ExpBCR-10	–	–
ExpBCMF-11	25	30 – 0.75
ExpBCPF-12	7	60 – 0.84

#### 4.4 Συνοπτική παρουσίαση των πειραμάτων

Πίνακας 4.2 Συνοπτική παρουσίαση των εξεταζόμενων δοκιμίων

Πείραμα	Πρωτόκολλο φόρτισης	Υλικό	Εγκολπή	Διαστάσεις	Ρυθμός φόρτισης
ExpBM-01	Κάμψη τριών σημείων			Δοκιμίου: 25x25x100 mm <sup>3</sup>	Έλεγχος της μετατόπισης με ρυθμό μεταβολής 0.01 mm/min
ExpBM-02				Εγκολπής: 3x6x25 mm <sup>3</sup>	
ExpDM-03	Άμεσος εφελκυσμός	Μάρμαρο		Δοκιμίου: 20x20x100 mm <sup>3</sup>	Έλεγχος της μετατόπισης με ρυθμό μεταβολής 0.02 mm/min
ExpDM-04				Εγκολπής: 2.5x4x20 mm <sup>3</sup>	
ExpUM-05	Αντιδιαμετρική θλίψη			Γεωμετρία: DENT Εγκολπής: 80 mm	
ExpUM-06	Μονοαξονική θλίψη			Γεωμετρία: DENT Εγκολπής 40 mm Γεωμετρία: CSR Εξωτερική διάμετρος: 100 mm Εσωτερική διάμετρος: 50 mm	
ExpBC-07	Κάμψη τριών σημείων	Κονίαμα Τσιμέντου	OXI	Δοκιμίου: 45x45x100 mm <sup>3</sup>	Έλεγχος της μετατόπισης με ρυθμό επιβολής φορτίου 0.2 MPa/s
ExpBC-08				50x50x200 mm <sup>3</sup>	Έλεγχος της μετατόπισης με ρυθμό επιβολής φορτίου 65 N/s
ExpBC-09					Έλεγχος της μετατόπισης με ρυθμό επιβολής φορτίου 85 N/s
ExpBCR-10				Έλεγχος της μετατόπισης με ρυθμό επιβολής φορτίου 35 N/s	
ExpBCMF-11			NAI	Δοκιμίου: 150x150x700 mm <sup>3</sup> Εγκολπής: 5x25x150 mm <sup>3</sup>	Έλεγχος της μετατόπισης με ρυθμό μεταβολής
ExpBCPF-12					<ul style="list-style-type: none"> <li>• 0.08 mm/min για NMOD &lt; 1 mm</li> <li>• 0.20 mm/min για NMOD &gt; 1 mm</li> </ul>

#### 4.5 Αναλυτική περιγραφή πειραματικών διατάξεων και συλλογής δεδομένων

Κατά τη διάρκεια της μηχανικής καταπόνησης των δοκιμίων σύμφωνα με τα διάφορα πρωτόκολλα φόρτισης που περιεγράφηκαν έως τώρα, πραγματοποιείται τόσο η ταυτόχρονη καταγραφή τόσο του μηχανικού φορτίου, όσο και των δεδομένων ακουστικών εκπομπών (AE). Για την επιβολή και τον έλεγχο του μηχανικού φορτίου στα πειράματα που περιγράφονται στη διατριβή χρησιμοποιήθηκαν οι εξής μηχανές:

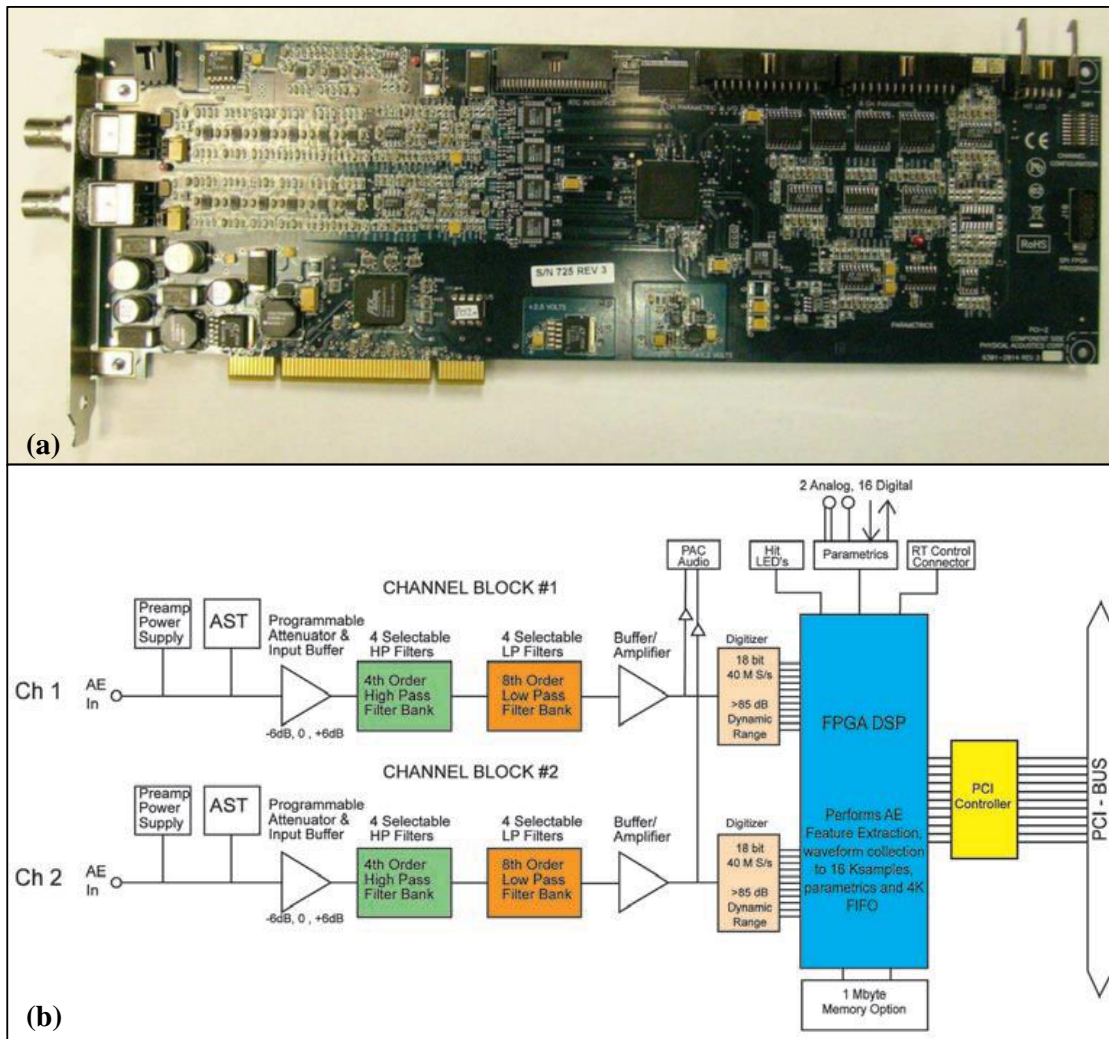
- α. Ηλεκτροδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου μοντέλο MTS INSIGHT 10 kN καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό πλήρους καταγραφής και ελέγχου της μηχανής (MTS test suite). Η μηχανή αυτή χρησιμοποιήθηκε στα δοκίμια από μάρμαρο Διονύσου των πειραμάτων με κωδικούς ExprBM-01, ExprBM-02, ExprDM-03, ExprDM-04 και ExprUM-05.
- β. Ηλεκτροδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου μοντέλου Instron DX 300 καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό πλήρους καταγραφής και ελέγχου της μηχανής (Bluehill 2), που χρησιμοποιήθηκε για το δοκίμιο από μάρμαρο Διονύσου του πειράματος ExprUM-06 και για τα τρία δοκίμια από κονίαμα τσιμέντου των πειραμάτων με κωδικούς ExprBC-07, ExprBC-08, ExprBC-09 (Σχήμα 4.7).
- γ. Ηλεκτροδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου μοντέλο INSTRON (SATEC series) 300 kN καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό πλήρους καταγραφής (Bluehill Universal) και ελέγχου της μηχανής, που χρησιμοποιήθηκε για τα ινοπλισμένα δοκίμια από κονίαμα τσιμέντου των πειραμάτων ExprBCR-10, ExprBCMF-11 και ExprBCPF-12.

Σε όλα τα πειραματικά πρωτόκολλα η συλλογή, παρακολούθηση και αξιοποίηση των δεδομένων AE πραγματοποιήθηκε μέσω του συστήματος PCI-2 της Physical Acoustic Corp και του λογισμικού AEwin του ίδιου κατασκευαστή. Οι κάρτες ψηφιακής επεξεργασίας AE PCI-Express της εταιρείας PAC (Physical Acoustic Corporation) αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα συλλογής και ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων. Αποτελούνται από δύο κανάλια εισόδου και διαθέτουν 18bit A/D converter, που εξασφαλίζει χαμηλή απόδοση θορύβου ενώ η συχνότητα δειγματοληψίας τους φτάνει στα 40 Msamples/s. Παρέχεται η δυνατότητα data streaming με αποτέλεσμα τη συνεχή καταγραφή της χρονοσειράς των ακουστικών εκπομπών στον ηλεκτρονικό υπολογιστή με ταχύτητα 10 MSamples/s, ενώ για την αποτελεσματική αποθρομβοποίηση των δεδομένων υπάρχουν φίλτρα συχνότητας ελεγχόμενα από το κατάλληλο λογισμικό της AEwin. Στα πειράματα που εξετάζονται χρησιμοποιήθηκαν ταυτόχρονα τρεις κάρτες PCI-Express στις οποίες ήταν συνδεδεμένοι συνολικά έξι αισθητήρες για την ταυτόχρονη καταγραφή Ακουστικών Εκπομπών. Στο Σχήμα 4.8a απεικονίζεται μία κάρτα PCI-2, δύο



Σχήμα 4.7 Ηλεκτροδραυλική μηχανή εφαρμογής μηχανικού φορτίου Instron DX 300.

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών



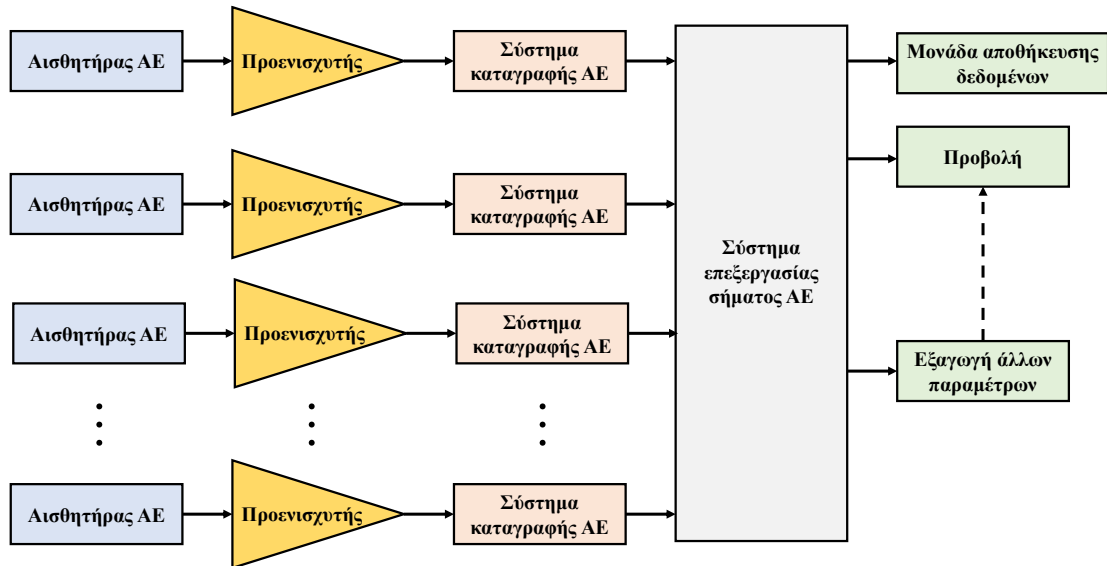
Σχήμα 4.8 (α) Η κάρτα 2 καναλιών PIC-2. (β) Το block διάγραμμα της κάρτας 2 καναλιών PIC-2 [132].

καναλιών ψηφιακής επεξεργασίας ΑΕ και στο Σχήμα 4.8b το αντίστοιχο block διάγραμμα της κάρτας PCI-2 [132].

Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας για κάθε μετρητική διάταξη είναι διαφορετικά. Συγκεκριμένα οι ηλεκτροδραυλικές μηχανές εφαρμογής μηχανικού φορτίου χρησιμοποιούν σειριακό πρωτόκολλο επικοινωνίας ενώ οι διατάξεις καταγραφής των ακουστικών σημάτων χρησιμοποιούν κάρτες συλλογής δεδομένων, οι οποίες ήταν ενσωματωμένες σε PCI slots, εντός των ηλεκτρονικών υπολογιστών καταγραφής και παρακολούθησης των ακουστικών δεδομένων.

Η παράλληλη καταγραφή δεδομένων από διαφορετικές μετρητικές διατάξεις καθιστά επιτακτική την ανάγκη συγχρονισμού των διάφορων ομάδων δεδομένων με κάποιο μέγεθος διαφορετικό του χρόνου, καθώς αυτός ενδέχεται να διαφέρει μεταξύ των χρησιμοποιούμενων συστημάτων καταγραφής. Επιπλέον λαμβάνοντας υπόψη ότι οι εκάστοτε ΑΕ που καταγράφονται είναι βραχύβια φαινόμενα που συνήθως διαρκούν ορισμένα  $\mu s$  και ακόμη πως δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη έναρξη καταγραφής δεδομένων αφού κάθε διάταξη ενεργοποιείται με διαφορετικό τρόπο, επιλέχτηκε η καταγραφή του μηχανικού φορτίου ως μέγεθος αναφοράς μεταξύ των πειραματικών δεδομένων. Αυτό καθίσταται δυνατό μέσω των θυρών εξόδου της ηλεκτροδραυλικής μηχανής φόρτισης οι οποίες παρέχουν ως έξοδο μία ηλεκτρική τάση ανάλογη του εφαρμοζόμενου μηχανικού





Σχήμα 4.9 Block διάγραμμα συστήματος ελέγχου και καταγραφής ΑΕ.

φορτίου. Το μέγεθος αυτό καταγράφεται παράλληλα από όλες τις μετρητικές διατάξεις του πειράματος με δειγματοληψία μεγαλύτερη των 10 samples/s και έως 10ksamples/s, παρέχοντας έτσι τη δυνατότητα συγχρονισμού των δεδομένων μετά την ολοκλήρωση του πειραματικού πρωτοκόλλου. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η διαχείριση ηλεκτρικών σημάτων μεταξύ πολλαπλών συστημάτων μέτρησης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη διασύνδεσή τους. Σε αντίθετη περίπτωση είναι πολύ πιθανό να προκύψει αλλοίωση του πηγαίου σήματος οδηγώντας σε εσφαλμένες μετρήσεις και δημιουργώντας πρόβλημα στην ανάλυση των δεδομένων. Αυτό προκύπτει κυρίως από την διαχείριση των αντιστάσεων εισόδου αλλά και τα φορτία (αντιστάσεις/εμπεδήσεις των διασυνδεδεμένων συστημάτων). Για τον λόγο αυτό και ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε πειραματικού πρωτοκόλλου χρησιμοποιήθηκαν:

- Α. Ενισχυτές οργανολογίας με πολύ μεγάλη εμπέδηση εισόδου και μηδενική εμπέδηση εξόδου.
- Β. Βαθμίδες απομόνωσης μοναδιαίου κέρδους εξασφαλίζοντας την προσαρμογή και την μεταφορά αυτούσιου του σήματος σε κάθε επόμενη βαθμίδα.
- Γ. Γραμμές διασύνδεσης χαμηλού θορύβου μεγάλου εύρους ζώνης και ίδιας χαρακτηριστικής αντίστασης.

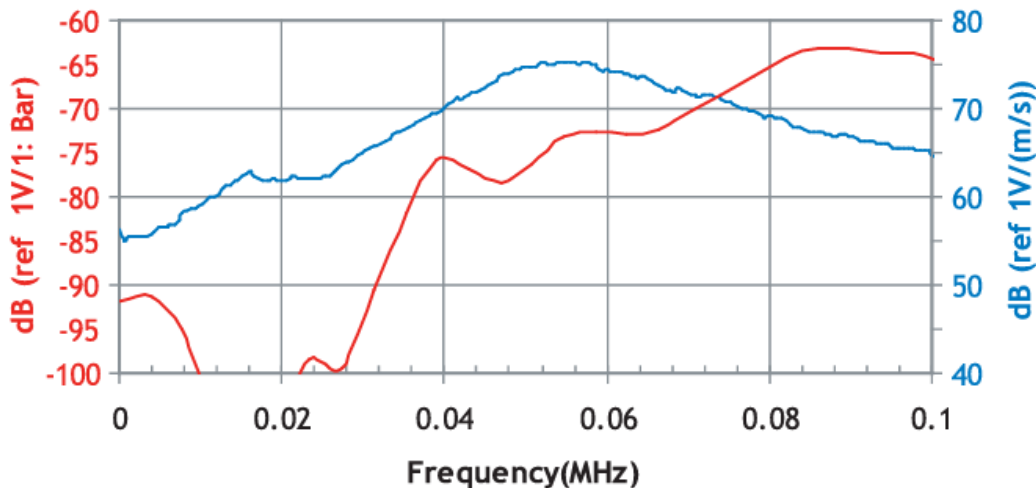
Η μετρητική διάταξη ανίχνευσης, καταγραφής και αξιοποίησης των δεδομένων ΑΕ περιλαμβάνει τους ειδικούς πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, το τμήμα επεξεργασίας και το σύστημα ανάγνωσης των ακουστικών σημάτων. Το συγκεκριμένο σύστημα παρέχει τη δυνατότητα χρήσης ενός ή περισσότερων καναλιών εισόδου ανάλογα με τον αριθμό των πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες του πειράματος. Η αξιοποίηση των ακουστικών σημάτων γίνεται από ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο είναι εγκατεστημένη η απαραίτητη μονάδα επεξεργασίας σήματος, καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό της κατασκευάστριας εταιρείας. Στο Σχήμα 4.9 απεικονίζεται το block διάγραμμα μια πλήρους διάταξης ανίχνευσης καταγραφής και αξιοποίησης ΑΕ ακουστικών εκπομπών.

Όπως έχει αναφερθεί στην παράγραφο 1.1, ένα ακουστικό κύμα αφού παραχθεί από την πηγή, ταξιδεύει προς τα όρια του υλικού όπου και ανιχνεύεται από πιεζοηλεκτρικούς αισθητήρες, ο οποίοι έχουν προσαρμοστεί κατάλληλα στην επιφάνεια του υλικού. Ο πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας μετατρέπει τις μικρομεταβολές που προκαλούνται στην επιφάνεια του υλικού λόγω των δονήσεων από την έλευση του ακουστικού κύματος, σε

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

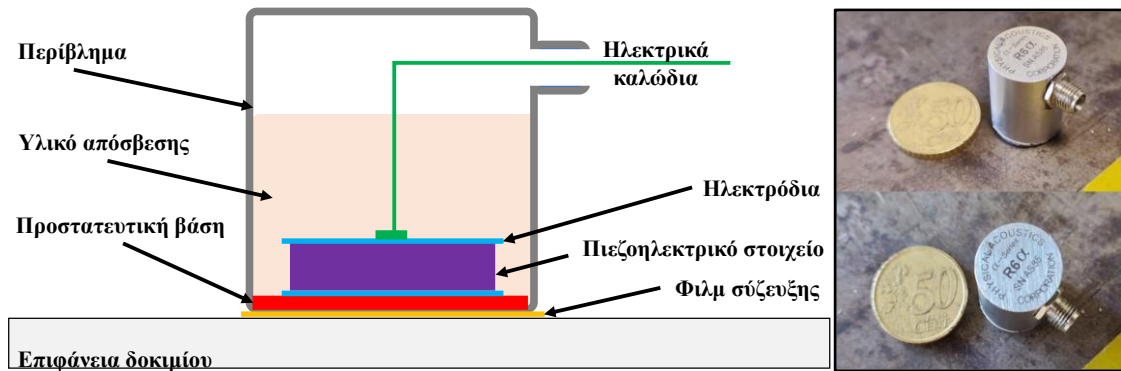
ηλεκτρικό σήμα το οποίο στη συνέχεια οδηγείται στη μονάδα επεξεργασίας σήματος. Σε αυτό στο σημείο, το ακουστικό σήμα ΑΕ φιλτράρεται και ενισχύεται από ειδικά συστήματα επεξεργασίας, τα οποία λόγω της πολύ μεγάλης ταχύτητας δειγματοληψίας που απαιτείται (συνήθως άνω των 40 Msamples/s), είναι σχεδιασμένα με τη λογική της παράλληλης επεξεργασίας και φέρουν ισχυρούς επεξεργαστές. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες αποτελούν το αρχικό μέρος της μετρητικής διάταξης καταγραφής των σημάτων ΑΕ. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες που αναφέρονται και ως αισθητήρες ΑΕ, ανιχνεύουν τα μεταβατικά κύματα και στην συνέχεια τα μετατρέπουν σε ηλεκτρικά σήματα, τα οποία αφού υποστούν επεξεργασία μπορούν να αξιοποιηθούν για την μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών κατά τις διαδικασίες θραύσης. Οι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες συνήθως βασίζονται σε ένα πιεζοηλεκτρικό κεραμικό στοιχείο με το πλέον συνηθισμένο να είναι το Porous Lead Zirconate Titanate. Η προσαρμογή των αισθητήρων στην επιφάνεια του υλικού αποσκοπεί στην μεταφορά της δόνησης που προκαλείται κατά την έλευση του ακουστικού κύματος, μέσω της προστατευτικής βάσης του αισθητήρα, στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Το ακουστικό κύμα καθώς προσκρούει στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μετατρέπεται σε ένα ηλεκτρικό σήμα τάσης, ανάλογο της δόνησης που δέχθηκε το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο. Έτσι, επιτυγχάνεται η μετατροπή ενός χρονικά εξελισσόμενου τρισδιάστατου ελαστικού κύματος (κύμα ΑΕ) σε ένα χρονικά εξελισσόμενο μονοδιάστατο άνυσμα ηλεκτρικής τάσης (σήμα ΑΕ). Οι αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση των κυμάτων ΑΕ είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι και για αυτό φέρουν εξωτερικό προστατευτικό περίβλημα από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ενώ οι συχνότητες απόκρισης των αισθητήρων ΑΕ είναι τέτοιες ώστε να ελαττώνουν την επίδραση του περιβάλλοντος θορύβου.

Γενικά, οι αισθητήρες ΑΕ μπορούν να χωριστούν σε δύο τύπους, στους αισθητήρες ευρείας ζώνης και στους αισθητήρες συντονισμού [133]. Οι αισθητήρες ΑΕ ευρείας ζώνης ανταποκρίνονται ομοίμορφα σε ένα εύρος ακουστικών συχνοτήτων. και χρησιμοποιούνται συνήθως, για ερευνητικούς σκοπούς ή για μελέτες σκοπιμότητας όπου η συχνότητα των ΑΕ δεν είναι ακόμη γνωστή και επομένως είναι επιθυμητή μια σχεδόν σταθερή απόκριση συχνότητας. Στον αντίποδα, οι αισθητήρες ΑΕ συντονισμού χρησιμοποιούνται όταν το συχνοτικό περιεχόμενο των σημάτων ΑΕ, δεν αποτελεί το κύριο αντικείμενο μελέτης, σε αντίθεση με άλλες παραμέτρους όπως το μέγιστο πλάτος, η ενέργεια, ο χρόνος άφιξης κτλ. Τα σήματα ΑΕ που καταγράφονται με τη χρήση αισθητήρων συντονισμού μπορούν να συγκριθούν μόνο με άλλα σήματα ΑΕ που καταγράφηκαν από αντίστοιχους αισθητήρες ΑΕ ίδιας συχνότητας συντονισμού. Αυτό



Σχήμα 4.10 Η καμπύλη απόκρισης για την περίπτωση του ακουστικού αισθητήρα R6a [134].

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών



Σχήμα 4.11 (α) Η δομή ενός τυπικού αισθητήρα ΑΕ και (β) Ακουστικός αισθητήρας τύπου R6a [133].

συμβαίνει επειδή τα μετρούμενα χαρακτηριστικά ΑΕ επηρεάζονται από τη συχνότητα συντονισμού του αισθητήρα.

Τα πειραματικά δεδομένα ΑΕ που αναλύονται στη διατριβή καταγράφηκαν μέσω πιεζοηλεκτρικών αισθητήρες ΑΕ τύπου R6a με συχνότητα συντονισμού 60 kHz. Η καμπύλη απόκρισης των αισθητήρων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4 Η επιλογή των αισθητήρων έγινε με βάση τα βιβλιογραφικά δεδομένα που αφορούν ψαθυρά υλικά ή τεχνητούς δομικούς λίθους. Αισθητήρες με κεντρική συχνότητα σε ευρύτερη ή υψηλότερη περιοχή θα ήταν κατάλληλοι για όλκιμα και μεταλλικά υλικά [134].

Στο Σχήμα 4.5 απεικονίζονται οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες ενός τυπικού αισθητήρα ΑΕ [133] και ένας αισθητήρας ΑΕ τύπου R6a. Σημειώνεται πως κατά την επιλογή του κατάλληλου αισθητήρα ΑΕ πρέπει να λαμβάνεται υπόψη πως διαφορετικές εφαρμογές έχουν διαφορετικά εύρη συχνοτήτων των μετρούμενων σημάτων ΑΕ. Επίσης μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί και στην ορθή προσαρμογή των αισθητήρων στην επιφάνεια των υπό εξέταση υλικών. Προκειμένου να επιτευχθεί η βέλτιστη απόκριση του αισθητήρα και η ορθή ανίχνευση όλων των σημάτων ΑΕ θα πρέπει η διεπαφή μεταξύ του αισθητήρα ΑΕ και του υλικού να είναι ελεύθερη από άλλα υλικά. Η σύζευξη του υλικού με τον αισθητήρα ΑΕ επιτυγχάνεται με χρήση διαφόρων υλικών όπως σιλικόνης, εποξικής κόλλας, γράσου λίπους κενού κ.α. Σε όλα τα πειράματα που παρουσιάζονται στην διατριβή, η σύζευξη των R6a πιεζοηλεκτρικών αισθητήρων ΑΕ με την επιφάνεια των δοκιμίων έγινε μέσω ενός λεπτού φιλμ σιλικόνης (Σχήμα 4.12).

Το πρώτο βήμα πριν την έναρξη κάθε πρωτόκολλου φόρτισης είναι η παραμετροποίηση του συστήματός καταγραφής των ΑΕ. Η παραμετροποίηση του συστήματος καταγραφής περιλαμβάνει δύο μέρη. Το πρώτο αφορά στην ορθή καταγραφή της κυματομορφής των σημάτων ΑΕ από τους αισθητήρες, περιορίζοντας ταυτόχρονα τις πιθανές ανακλάσεις που προκύπτουν από το μέγεθος του δοκιμίου και τη γεωμετρία του. Το δεύτερο αφορά την σωστή αποτύπωση των θέσεων των αισθητήρων ΑΕ επάνω στην επιφάνεια



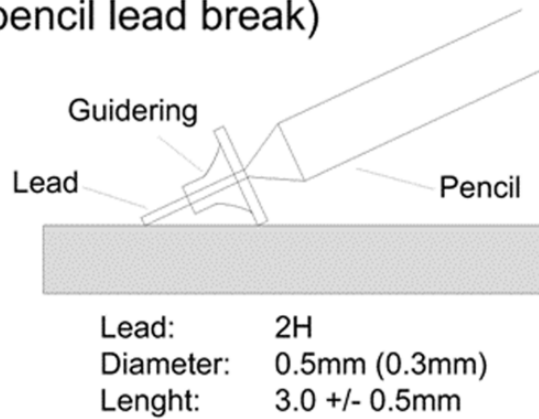
Σχήμα 4.12 Πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας ΑΕ τύπου R6a Το κόκκινο βέλος δείχνει το λεπτό φιλμ σιλικόνης στη διεπαφή δοκιμίου -

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

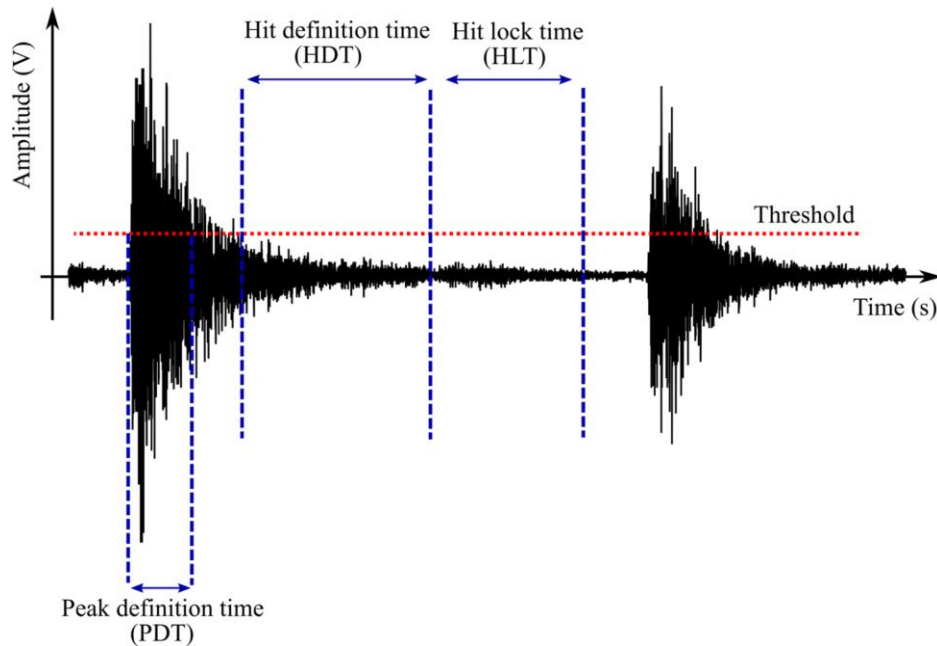
των δοκιμίων και την απεικόνιση τους, στο λογισμικό καταγραφής κατά τη διάρκεια πραγματοποίησης του πειράματος με στόχο την όσο το δυνατό πιο ακριβή εκτίμηση της θέσης των ακουστικών γεγονότων που καταγράφονται. Οι αισθητήρες ΑΕ αναλόγως με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής προσαρτώνται στην επιφάνεια του δοκιμίου με τέτοια χωροταξία ώστε να επιτρέπεται η καταγραφή των ακουστικών δεδομένων σε δύο ή και τρεις διαστάσεις. Προκειμένου το λογισμικό να είναι σε θέση να εκτιμήσει με ακρίβεια τη θέση ενός ΑΕ γεγονότος, απαιτείται ο ορισμός μιας σειράς παραμέτρων οι οποίες προκύπτουν

τόσο από την φύση του υλικού όσο και από τη γεωμετρία του λαμβάνοντας υπόψη τους απαραίτητους κανόνες της φυσικής που περιγράφουν την διάδοση των μηχανικών κυμάτων. Αρχικά απαιτείται η λεπτομερής καταγραφή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του υπό μελέτη δοκιμίου καθώς και η εκτίμηση του βαθμού απόσβεσης του μηχανικού κύματος συναρτήσει της απόστασης από την πηγή της ΑΕ. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης αποτυπώνονται στο λογισμικό καταγραφής. Στη συνέχεια και με βάση τα παραπάνω στοιχεία αλλά και τη χωροθέτηση των αισθητήρων στο σώμα του δοκιμίου αλλά και της θέσης όπου αναμένεται να εκκινήσει ή να εντοπιστεί η θραύση, ορίζεται ο ελάχιστος και μέγιστος αριθμός αισθητήρων ΑΕ που θα πρέπει να καταγράψουν ένα ακουστικό σήμα ώστε να θεωρηθεί ως γεγονός ΑΕ. Αυτή η παράμετρος είναι ιδιαίτερα σημαντική όσον αφορά τον προσδιορισμό της θέσης της πηγής ενός γεγονότος ΑΕ. Στην περίπτωση που υπάρξει καταγραφή ενός ακουστικού σήματος από αριθμό αισθητήρων μικρότερο από τον ελάχιστο επιτρεπόμενο αριθμό που ορίστηκε παραπάνω, το ακουστικό σήμα δεν θεωρείται γεγονός ΑΕ αλλά παρόλα αυτά, θα καταγραφούν τα επιμέρους χαρακτηριστικά του (χτύπος ΑΕ). Στη συνέχεια, δίδονται στο λογισμικό οι θέσεις των αισθητήρων όπως αυτοί είναι τοποθετημένοι στο δοκίμιο ώστε το σύστημα να μπορεί να υπολογίζει τη σχετική θέση ενός ΑΕ γεγονότος στον χώρο. Για την εκτίμηση της θέσης στον χώρο διαμορφώνεται ένα τρισσορθόγωνιο σύστημα αξόνων xyz, και η θέση κάθε αισθητήρα ορίζεται σε αυτό το σύστημα. Όλες οι συντεταγμένες υπολογίζονται σε σχέση με ένα σημείο (0,0,0) που έχει καθοριστεί επί του δοκιμίου. Για να ολοκληρωθεί η παραμετροποίηση του συστήματος καταγραφής των ΑΕ, απαιτείται ένα σήμα αναφοράς το οποίο θα πρέπει να προσομοιώνει ένα γεγονός ΑΕ. Αυτό αποτελεί μια χρονοβόρα και δύσκολη διαδικασία, καθώς τα πραγματικά γεγονότα ΑΕ συμβαίνουν λόγω των μαζικών μικρορωγματώσεων εντός του δοκιμίου, οι οποίες δημιουργούν μηχανικά κύματα συγκεκριμένης συχνότητας και επιπέδου ενέργειας. Προκειμένου να ξεπεραστεί αυτός ο περιορισμός, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Hsu & Nielsen (Pencil Lead Break - PLB) [135]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, το σπάσιμο της μύτης ενός μηχανικού μολυβιού σκληρότητας 2H, διαμέτρου 0.5 mm και μήκους 0.3 cm, στην επιφάνεια του δοκιμίου όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.13, προκαλεί μια τοπική διαταραχή που προσομοιώνει ένα βραχυπρόθεσμο ακουστικό σήμα αντίστοιχο με αυτό μιας μικρορωγμής. Σημειώνεται πως για τον έλεγχο της ακριβούς θέσης των αισθητήρων, η διαδικασία PLB πρέπει να επαναληφθεί αρκετές φορές και σε διάφορες θέσεις μεταξύ των αισθητήρων ΑΕ.

### Hsu-Nielsen Source (pencil lead break)



Σχήμα 4.13 Η μέθοδος PLB για την παραγωγή σήματος ΑΕ [135].



**Σχήμα 4.14** Οι χρόνοι PDT, HDT και HLT, για την περίπτωση δύο διαδοχικών σημάτων ΑΕ κρουστικού τύπου [136]

Με βάση όλα τα παραπάνω και προκειμένου να καταγραφεί η κυματομορφή του σήματος ΑΕ περιορίζοντας όσο το δυνατό:

- Α. Τις ανακλάσεις που προκύπτουν εξαιτίας των διαστάσεων και της γεωμετρίας του δοκιμίου
- Β. Τα παρασιτικά κύματα που προκύπτουν λόγω της ανομοιογένειας του δείγματος
- Γ. Τις δευτερογενείς εκπομπές που μπορεί να προκύπτουν από την ύπαρξη και άλλων υλικών στο σύστημα του δείγματος

Υπολογίζονται τα βασικά χρονικά χαρακτηριστικά του αναμενόμενου ακουστικού σήματος και εισάγονται ως δεδομένα για να ληφθούν υπόψη από το λογισμικό συλλογής/επεξεργασίας και καταγραφής των ΑΕ. Η διαδικασία αυτή είναι απολύτως απαραίτητη και σημαντική για την καταγραφή αξιόπιστων δεδομένων που να εξασφαλίζουν την επαναληψιμότητα των μετρήσεων και με τον τρόπο αυτό να τεκμηριώνουν την επιστημονική μεθοδολογία για την περαιτέρω επεξεργασία τους. Οι χρόνοι που απαιτείται να υπολογιστούν αλλά και η μεθοδολογία υπολογισμού τους με τη χρήση της πρότυπης καταγραφής περιγράφονται στη συνέχεια. Επιγραμματικά είναι οι Peak Definition Time (PDT), Hit Definition Time (HDT), Hit Location Time (HLT), στο Σχήμα 4.14 [136] φαίνονται οι ανωτέρω χρόνοι.

Ο χρόνος PDT προσδιορίζει τον επιτρεπόμενο χρόνο, μετά τον αρχικό εντοπισμό ενός χτύπου ΑΕ, για τον προσδιορισμό του μέγιστου πλάτους του ακουστικού σήματος. Η τεχνική καθορισμού και εφαρμογής του χρόνου PDT είναι επανατροφοδοτούμενη ώστε να βρίσκει πάντα τη σωστή κορυφή του ανιχνευόμενου ακουστικού σήματος. Ο λανθασμένος προσδιορισμός του χρόνου PDT, οδηγεί στην καταγραφή παραπλανητικών μετρήσεων ορίζοντας ως μέγιστο πλάτος της κυματομορφής ένα τοπικό μέγιστο που ενδεχομένως οφείλεται είτε σε ένα πρόδρομο ακουστικό σήμα (πολύ σύντομος χρόνος PDT), είτε σε ανακλάσεις του ακουστικού σήματος οι οποίες καταγράφονται με καθυστέρηση φάσης (πολύ μεγάλος χρόνος PDT). Ένας ασφαλής τρόπος υπολογισμού του είναι μέσω της σχέσης:

$$PDT = \frac{D}{C} \quad (4.1)$$

όπου  $D$  είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ των αισθητήρων και  $C$  η ταχύτητα του γρηγορότερου κύματος εντός του υλικού. Σημειώνεται πως η χρονική παράμετρος PDT είναι λιγότερη σημαντική από τους χρόνους HDT και HLT καθώς δεν σχετίζεται με την ανίχνευση των χτύπων ΑΕ, παρά μόνο τον προσδιορισμό του μέγιστου πλάτους των ήδη ανιχνευμένων χτύπων ΑΕ.

Ο χρόνος HDT προσδιορίζει το μέγιστο επιτρεπόμενο χρονικό διάστημα μεταξύ των υπερβάσεων του κατωφλίου κατά την διάρκεια ενός χτύπου ΑΕ. Δηλαδή, στην περίπτωση που δεν συμβούν καθόλου υπερβάσεις κατά τη διάρκεια του HDT, το σύστημα καταγραφής θεωρεί πως ο χτύπος ΑΕ έχει ολοκληρωθεί. Εάν ο χρόνος HDT οριστεί πολύ σύντομος τότε το σύστημα καταγραφής δεν θα μπορέσει να καταγράψει πλήρως τον χτύπο ΑΕ. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα αντιμετωπίζει τον χτύπο ΑΕ ως πολλαπλούς χτύπους μικρότερης όμως διάρκειας. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου ο χρόνος HDT ορίζεται υπερβολικά μεγάλος, το σύστημα καταγραφής θεωρεί διαδοχικούς χτύπους ΑΕ, ως έναν ενιαίο χτύπο πολύ μεγάλης διάρκειας. Μέσω του σωστού υπολογισμού του χρόνου HDT, επιτυγχάνεται ο σωστός εντοπισμός και η ρεαλιστική περιγραφή των ακουστικών σημάτων. Μετά το τέλος του χρόνου HDT, το σύστημα καταγραφής θεωρεί πως έχει ολοκληρωθεί η εξέλιξη του χτύπου ΑΕ, διακόπτει τις διαδικασίες μέτρησης, και αποθηκεύει τα μετρούμενα χαρακτηριστικά του χτύπου. Η τεχνική καθορισμού και εφαρμογής του χρόνου HDT, όπως και η αντίστοιχη για τον χρόνο PDT, είναι επανατροφοδοτούμενη και ενεργοποιείται σε κάθε υπέρβαση του κατωφλίου από το ακουστικό σήμα. Σημειώνεται, ότι στα περισσότερα συστήματα παρακολούθησης και καταγραφής ΑΕ, ο χρόνος HDT πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσιος του χρόνου PDT. Επιπλέον, ο HDT πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να εκτείνεται μέχρι τα χρονικά διαστήματα στα οποία το μετρούμενο ακουστικό σήμα πέφτει κάτω από το κατώφλι τάσης όπου και δεν σημειώνονται περαιτέρω υπερβάσεις. Υπάρχουν δύο τεχνικές υπολογισμού του χρόνου HDT. Εν συντομία, η πρώτη τεχνική υπολογισμού χρησιμοποιεί έναν μεγάλο χρόνο HDT για να περιγράψει έναν χτύπο ΑΕ λαμβάνοντας υπόψη όλες τις επιδράσεις στην κυματομορφή του ακουστικού σήματος που προκαλούνται λόγω της διάδοσης του εντός του μέσου μετάδοσης από την πηγή έως και τον αισθητήρα όπως ανακλάσεις, εναλλακτικές διαδρομές κτλ. Σε αυτή την τεχνική ο HDT υπολογίζεται τη σχέση:

$$HDT = \frac{L}{C} \quad (4.2)$$

όπου  $L$  είναι το χαρακτηριστικό μήκος του δοκιμίου/κατασκευής (π.χ. διατομή ενός αγωγού) και  $C$  είναι η ταχύτητα ενός τυπικού κύριου κύματος εντός του μέσου διάδοσης π.χ. 3 mm/μsec. Εναλλακτικά μπορεί να υπολογιστεί και μέσω της σχέσης:

$$HDT = \frac{20}{AC} \quad (4.3)$$

όπου  $A$  είναι ο μετρούμενος συντελεστής εξασθένησης σε db/mm και  $C$  είναι, όπως και στη Σχέση (4.2), η ταχύτητα ενός τυπικού κύριου κύματος εντός του μέσου διάδοσης. Τονίζεται πως οι Σχέσεις (4.2) και (4.3) είναι ισοδύναμες και κατά τον υπολογισμό του χρόνου HDT χρησιμοποιούμε τον μικρότερο χρόνο HDT που προκύπτει με βάση τις ανωτέρω δύο σχέσεις. Η δεύτερη τεχνική υπολογισμού βασίζεται στην ιδέα ότι η απόδοση του συστήματος καταγραφής μπορεί να βελτιωθεί απορρίπτοντας τις δευτερεύουσες συνιστώσες του ακουστικού κύματος που προκύπτουν κατά την διάδοση του κύματος ΑΕ από την πηγή λόγω των ανακλάσεων εντός του υλικού, μετρώντας μόνο το κύριο μέρος του κύματος ΑΕ. Μέσω αυτής της τεχνικής το σύστημα καταγραφής μπορεί να καθαρίσει τις ενδιάμεσες μνήμες (buffers) και να ετοιμαστεί νωρίτερα για τον επόμενο χτύπο ΑΕ, ενώ παράλληλα αγνοούνται οι ανακλάσεις από τον προηγούμενο χτύπο ΑΕ απορρίπτονται

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών λόγω του χρόνου HDT. Σε αυτή την τεχνική υπολογισμού ο χρόνος HDT δίδεται από τη σχέση

$$HDT = \frac{20}{F} \quad (4.4)$$

όπου  $F$  είναι η συχνότητα συντονισμού του αισθητήρα σε MHz.

Ο χρόνος HLT προσδιορίζει το χρονικό διάστημα που πρέπει να μεσολαβήσει μετά το εντοπισμό ενός χτύπου ΑΕ, προτού επιτραπεί από το σύστημα καταγραφής να εντοπίσει τον επόμενο χτύπο ΑΕ. Εάν ο χρόνος HLT οριστεί πολύ μεγάλος, το σύστημα καταγραφής ενδεχομένως να μην εντοπίσει τον επόμενο χτύπο ΑΕ, ενώ στην περίπτωση που ο χρόνος HLT οριστεί πολύ σύντομος, στο σύστημα καταγραφής μπορεί να καταγράψει ως ξεχωριστούς χτύπους ΑΕ, τυχόν ανακλάσεις και συνιστώσες με καθυστέρηση φάσης του ακουστικού σήματος ΑΕ. Ο σωστός υπολογισμός του χρόνου HLT επιτρέπει την καταγραφή Η τεχνική καθορισμού και εφαρμογής του χρόνου του HLT είναι και σε αυτή την περίπτωση, επανατροφοδοτούμενη και επανενεργοποιείται με βάση τον χρόνο HDT. Όταν για τον καθορισμό του χρόνου HDT χρησιμοποιείται η πρώτη τεχνική, ως χρόνος HLT ορίζεται η χαμηλότερη χρονική τιμή που επιτρέπει το σύστημα καταγραφής. Ενώ, εάν κατά τον υπολογισμό του χρόνου HDT χρησιμοποιείται η δεύτερη τεχνική, ο HLT θα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να καλύπτει πιθανά χρονικά κενά μεταξύ των υπερβάσεων του κατωφλίου, ιδιαίτερα τα μεγαλύτερα κενά που τείνουν να εμφανίζονται στο άκρο της ουράς των σημάτων ΑΕ λόγω των ανακλάσεων. Σε αυτή την περίπτωση ως τιμή του χρόνου HLT λαμβάνεται:

$$HLT = HDT + 300\mu s \quad (4.5)$$

Τέλος, σημειώνεται πως οι ανωτέρω χρονικές παράμετροι (PDT, HDT, HLT) επιλέγονται μέσω συνεχών δοκιμών της μεθόδου Hsu & Nielsen σε διαφορετικά σημεία των υπό εξέταση δοκιμών/κατασκευών.

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών



## 5. Πειραματικά και υπολογιστικά αποτελέσματα

Το κεφάλαιο ασχολείται με την παρουσίαση των πειραματικών και υπολογιστικών αποτελεσμάτων. Στην παράγραφο 5.1 αναδεικνύεται η μεθοδολογία του εντοπισμού της κρίσιμης κατάστασης, μελετώντας της εξέλιξη των παραμέτρων του φυσικού χρόνου  $\kappa_1$ ,  $S$  και  $S_-$  κατά τη διάρκεια της συνεχούς αύξησης του επιβαλλόμενου μηχανικού φορτίου μέχρι την θραύση των δοκιμίων, σε μια σειρά τεσσάρων ανεξάρτητων πειραμάτων που αφορούν δοκιμές διαφορετικού υλικού και πρωτοκόλλου φόρτισης. Στην παράγραφο 5.2 εξετάζεται η χρήση της διασποράς  $\kappa_1$ , ως παράμετρος τάξης της ενέργειας των ακουστικών εκπομπών που καταγράφεται στις διαδικασίες θραύσης δοκιμίων μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου, μέσω της ύπαρξης της χαρακτηριστικής αριστερής εκθετικής ουράς των ανηγμένων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της διασποράς  $\kappa_1$ . Η παράγραφος 5.3 παρουσιάζει τη μελέτη για τον εντοπισμό της κρίσιμης κατάστασης μέσω της μεταβλητότητας του εντροπικού δείκτη  $q$  σε μια σειρά τεσσάρων ανεξάρτητων πειραμάτων σε δοκίμια υπό μηχανική φόρτιση έως τη θραύση, αξιοποιώντας τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών χτύπων ΑΕ. Η παράγραφος 5.4 δείχνει τα αποτελέσματα της συσχέτισης της ακουστικής δραστηριότητας εκφρασμένης μέσω του ρυθμού καταγραφής των χτύπων ΑΕ και το εντροπικού δείκτη  $q$ . Τέλος, στην παράγραφο 5.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα της συσχέτισης των εντροπικών δεικτών  $q_{\delta t}$  και  $q_{\delta r}$  που προκύπτουν από την αξιοποίηση των χρονικών διαστημάτων και των Ευκλείδειων αποστάσεων μεταξύ διαδοχικών distances γεγονότων ΑΕ που καταγράφησαν σε μια σειρά έξι ανεξάρτητων πειραμάτων.

### 5.1 Εντοπισμός κρίσιμης κατάστασης με βάση το φυσικό χρόνο

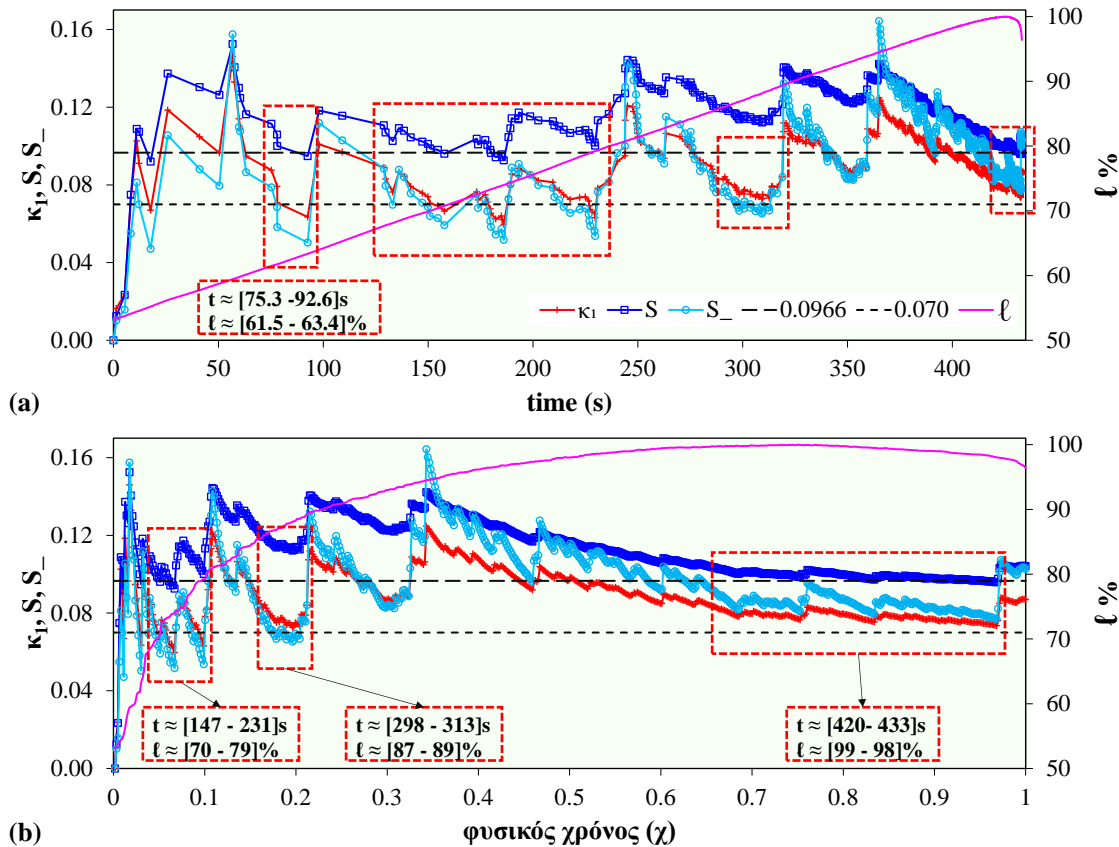
Η ενέργεια των χτύπων ΑΕ που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια πειραμάτων μηχανικής φόρτισης έως τη θραύση σε δοκίμια μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου, αναλύεται στο πεδίο του φυσικού χρόνου. Αρχικά θα μελετηθεί η εξέλιξη της διασποράς  $\kappa_1$ , της εντροπίας  $S$  και της εντροπίας υπό αντιστροφή χρόνου  $S_-$  κατά την διάρκεια των πειραμάτων. Θα εντοπιστούν οι περιοχές στις οποίες πληρούνται οι συνθήκες κρισιμότητας παρατηρώντας τότε η διασπορά  $\kappa_1$  προσεγγίζει την τιμή 0.070 και τότε οι εντροπίες  $S$  και  $S_-$  είναι μικρότερες της τιμής 0.0966. Στη συνέχεια, θα διαπιστωθεί αν τα αποτελέσματα που προέκυψαν, σχετίζονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που βρέθηκαν κατά την ανάλυση δεδομένων από το μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen (OFC) ή από το μοντέλο τρένου Burridge-Knopoff (BK) για σεισμούς σε φυσικό χρόνο, έτσι όπως αυτά έχουν περιγραφεί στην §2.2 (βλ. Σχήματα 2.5(a) και 2.5(b) αντίστοιχα). Τέλος θα εξεταστεί η χρήση της διασποράς  $\kappa_1$ , ως παράμετρος τάξης της ενέργειας των χτύπων ΑΕ που καταγράφονται στις διαδικασίες θραύσης δοκιμίων μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου, μέσω της ύπαρξης της χαρακτηριστικής αριστερής εκθετικής ουράς των ανηγμένων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας (scaled probability density function - scaled PDF) της διασποράς  $\kappa_1$ . Η ύπαρξη της έχει επιβεβαιωθεί σε πλήθος κρίσιμων συστημάτων ισοροπίας και μη-ισοροπίας, συμπεριλαμβανομένης και της σεισμικότητας [46, 137-148]. Ομοίως και σε αυτή την περίπτωση, τα πειραματικά αποτελέσματα θα συγκριθούν με εκείνα που σχετίζονται με το μοντέλο τρένου BK και το μοντέλο σεισμών OFC.

#### 5.1.1 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή

Αξιοποιείται η χρονοσειρά της ενέργειας των χτύπων ΑΕ σε δύο πειράματα κάμψης τριών σημείων πρισματικών δοκιμίων μαρμάρου με εγκοπές διαφορετικών διαστάσεων (βλ. §4.3.1, πείραμα ExprBM-01 και ExprBM-02). Το Σχήμα 5.1(a) αφορά το πείραμα ExprBM-

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

Ο1 και απεικονίζει την εξέλιξη σε συμβατικό χρόνο των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$  και  $S_-$  με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , δηλαδή του πηλίκου του εφαρμοζόμενου φορτίου ως προς το μέγιστο φορτίο. Στο Σχήμα 5.1(b), απεικονίζεται η εξέλιξη σε φυσικό χρόνο των ανωτέρω μεγεθών. Επίσης στο Σχήμα 5.1, έχουν επισημανθεί με κόκκινα ορθογώνια οι περιοχές στις οποίες πληρούνται οι συνθήκες κρισιμότητας (δηλ.  $\kappa_1 = 0.070$  και  $S, S_- \lesssim 0.0966$ ). Πρέπει να σημειωθεί ότι η διασπορά  $\kappa_1$  για χαμηλές τιμές του εφαρμοζόμενου φορτίου, προσεγγίζει παροδικά δύο φορές την κρίσιμη τιμή 0.070. Η πρώτη προσέγγιση παρατηρείται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 75.3s$  έως  $t = 92.6s$  ή ισοδύναμα σε ένα διάστημα του φυσικού χρόνου  $\chi = 0.0256$  έως  $\chi = 0.030$  για τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  που αντιστοιχούν από, περίπου, 61.5% έως 63.4%. Η δεύτερη προσέγγιση παρατηρείται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 147s$  έως  $t = 231s$  ή ισοδύναμα σε ένα διάστημα του φυσικού χρόνου  $\chi = 0.045$  έως  $\chi = 0.1$ . Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι από, περίπου, 70% έως 79%. Η τρίτη προσέγγιση της διασποράς  $\kappa_1$  εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 298s$  έως  $t = 312s$ , περίπου, ή ισοδύναμα σε ένα διάστημα του φυσικού χρόνου από  $\chi = 0.178$  έως  $\chi = 0.204$ , περίπου. Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι από, περίπου, 87% έως 89%. Με την περαιτέρω αύξηση του εφαρμοζόμενου φορτίου και καθώς προσεγγίζεται η θραύση ( $\ell = 99\%$ ), η διασπορά  $\kappa_1$  τείνει στην κρίσιμη τιμή 0.070 και κυμαίνεται γύρω από αυτή ενώ ταυτόχρονα, οι εντροπίες  $S$  και  $S_-$  παραμένουν μικρότερες ή ίσες της τιμής 0.0966. Αυτή η φάση αντιστοιχεί σε συμβατικό χρόνο  $t$  από, περίπου, 420s έως 433s και σε φυσικό χρόνο  $\chi$  από 0.684 έως 0.970. Σε αυτή τη φάση το φορτίο πραγματοποιεί την κορύφωση του

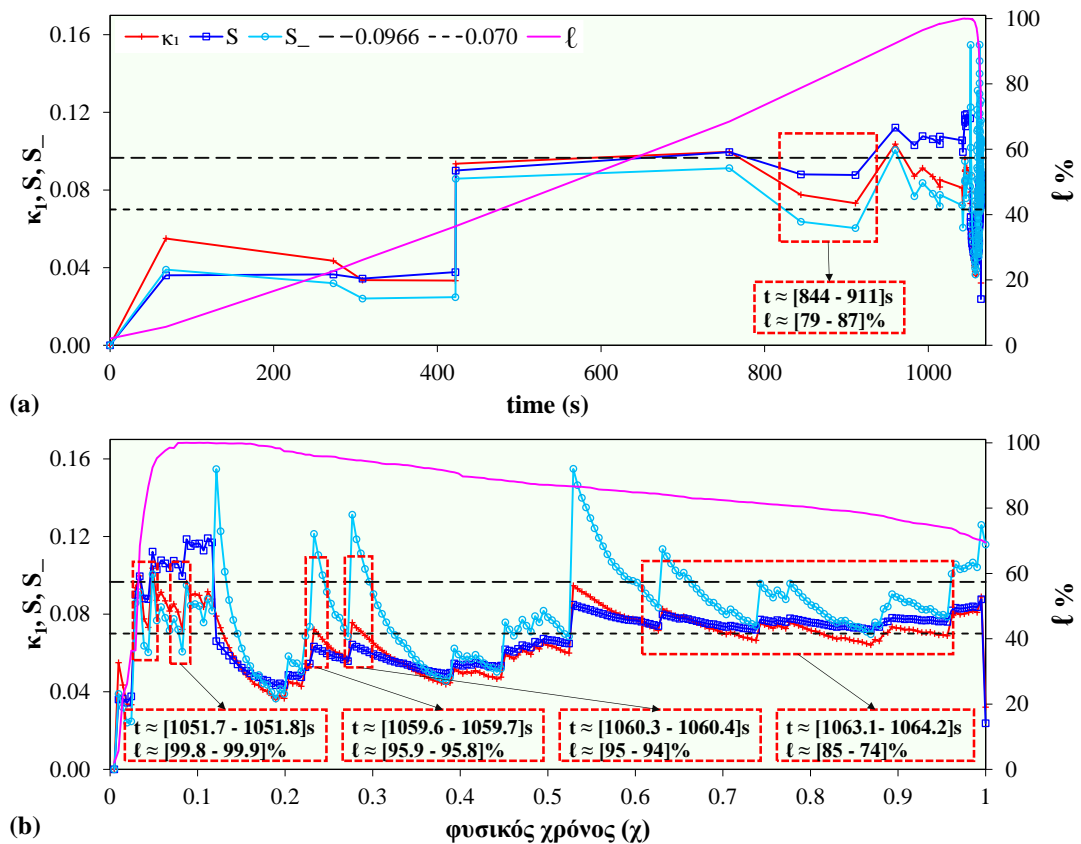


Σχήμα 5.1 Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων  $\kappa_1, S, S_-$  με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου  $\ell$ , για το πείραμα ExprBM-01.

στην μέγιστη τιμή ( $t \approx 426s$ ) και οι τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  να κυμαίνονται από 99% πριν την απόκτηση της μέγιστης τιμής έως το 98% μετά την απόκτηση της μέγιστης τιμής.

Η διασπορά  $\kappa_1$  του φυσικού χρόνου εμφανίζει μια συμπεριφορά, η οποία μπορεί να γίνει κατανοητή μέσω της συμπεριφοράς που εμφανίζει το μοντέλο τρένου ΒΚ όταν αυτό αναλύεται σε φυσικό χρόνο (βλ. Σχήμα 2.5(b) §2.2). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε φυσικό χρόνο του μοντέλου τρένου ΒΚ, αρχικά η διασπορά  $\kappa_1$  ταλαντώνεται γύρω από την τιμή 0.070, και καθώς το σύστημα εισέρχεται προοδευτικά στην αυτοργανωμένη κρισιμότητα, το πλάτος της ταλάντωσης μειώνεται συνεχώς και αναδύεται ένα ευρύ και σαφές στάδιο κατά το οποίο η διασπορά  $\kappa_1$  προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή 0.070. Το μοντέλο ΒΚ φαίνεται να κυριαρχεί καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος και η ύπαρξη του μοντέλου ΒΚ υποδηλώνεται μέσω του πράσινου υποβάθρου εντός του Σχήματος 5.1

Αναφορικά με το πείραμα ExprBM-02 στα Σχήματα 5.2(a) και 5.2(b), παρουσιάζεται η εξέλιξη σε συμβατικό χρόνο και φυσικό χρόνο αντίστοιχα, των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$  και  $S_-$  με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου φορτίου  $\ell$ . Η μέγιστη τιμή του εφαρμοζόμενου φορτίου ήταν περίπου 577N και πριν τη θραύση το φορτίο μειώθηκε αισθητά. Σύμφωνα με το Σχήμα 5.2(a) η πρώτη συνθήκη κρισιμότητας, δηλαδή όταν η διασπορά  $\kappa_1$  πλησιάζει την κρίσιμη τιμή 0.070 και οι εντροπίες  $S$  και  $S_-$  είναι μικρότερες ή ίσες της τιμής 0.0966 αντίστοιχα, εμφανίζεται, στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 844s$  έως  $t = 911s$  και ισοδύναμα στο πεδίο του φυσικού χρόνου στο διάστημα από, περίπου,  $\chi = 0.032$  έως  $\chi = 0.036$ . Οι αντίστοιχες τιμές του

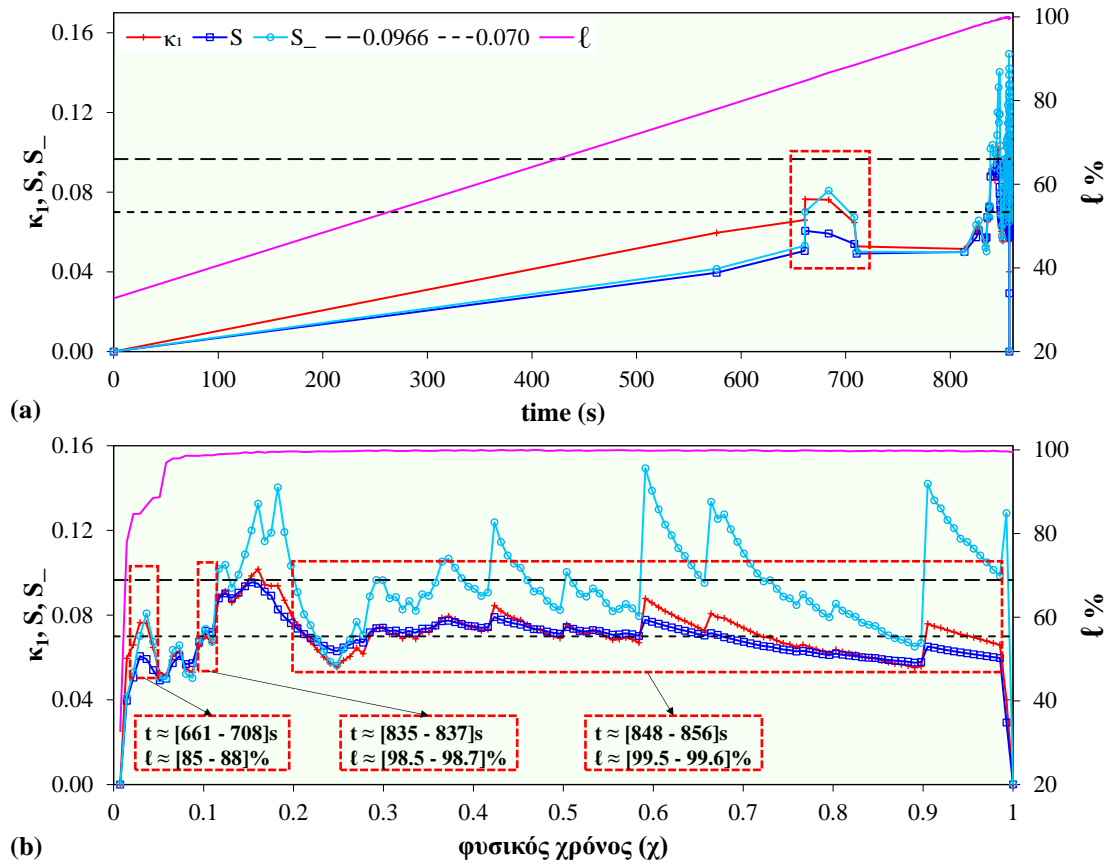


Σχήμα 5.2 Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$ ,  $S_-$  με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου  $\ell$ , για το πείραμα ExprBM-02.

κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , είναι από 79% έως 87%. Το Σχήμα 5.2(b) έναντι του Σχήματος 5.2(a), παρέχει καλύτερη εικόνα για το τι συμβαίνει κατά τα τελευταία δευτερόλεπτα του πειράματος, ιδιαίτερα μετά την κορύφωση του φορτίου και την συνεπακόλουθη μείωσή του ( $t \geq 1044.8s$  ή  $\chi \geq 0.087$ ). Στο Σχήμα 5.2(b) αναδεικνύονται τέσσερις επιπλέον κρίσιμες περιοχές και υποδηλώνονται με κόκκινα ορθογώνια τα οποία περικλείουν το χρονικό διάστημα σε μονάδες χρόνου στο οποίο εκτείνονται καθώς και τις αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου. Η πρώτη προσέγγιση παρατηρείται, περίπου, στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 1051.7s$  έως  $t = 1051.8s$  ή ισοδύναμα σε ένα διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.126$  έως  $\chi = 0.131$ . Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι από 99.8% έως 99.9%. Η δεύτερη προσέγγιση της διασποράς  $k_1$  εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 1059.6s$  έως  $t = 1059.7s$  ή ισοδύναμα σε ένα διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.233$  έως  $\chi = 0.242$ . Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι περίπου από 95.9% έως 95.8%. Η τρίτη προσέγγιση παρατηρείται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 1060.3s$  έως  $t = 1060.4s$  ή ισοδύναμα σε ένα διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.281$  έως  $\chi = 0.291$ . Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι από, περίπου, 95% έως 94%. Η τέταρτη και ευρύτερη προσέγγιση της διασποράς  $k_1$  στην κρίσιμη τιμή 0.070 εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 1063.1s$  έως  $t = 1064.2s$ , ή ισοδύναμα σε ένα διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.612$  έως  $\chi = 0.956$ . Σημειώνεται πως για το ίδιο χρονικό διάστημα τόσο η εντροπία  $S$  όσο και η εντροπία υπό αντιστροφή χρόνου  $S_-$  ικανοποιούν τη συνθήκη  $S, S_- \lesssim 0.0966$ . Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι από, περίπου, 85% έως 74%. Όπως και στην περίπτωση του πειράματος ExpBM-01, παρατηρείται η καθολική επικράτηση της συμπεριφοράς του μοντέλου τρένου BK για σχεδόν όλη τη διάρκεια του πρωτόκολλου φόρτισης, για μία χρονική περίοδο  $t$  που εκτείνεται στο σύνολο της διάρκειας του πειράματος, περίπου, από 844s έως 1064s, ή ισοδύναμα για ένα διάστημα του φυσικού χρόνου  $\chi$  από 0.068 έως 0.956. Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι περίπου από 74% έως 91% (υποδεικνύεται μέσω του πράσινου υποβάθρου του Σχήματος 5.2).

### 5.1.2 Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμιο μαρμάρου τύπου “DENT” με εγκοπή

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε φυσικό χρόνο για το δοκίμιο μαρμάρου τύπου “DENT” με εγκοπή σε πείραμα άμεσου εφελκυσμού (ExpDM-03) παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3. Στο Σχήμα 5.3(a) απεικονίζεται η εξέλιξη σε συμβατικό χρόνο των παραμέτρων  $k_1$ ,  $S$  και  $S_-$  και στο Σχήμα 5.3(b) σε φυσικό χρόνο, ενώ παράλληλα έχει απεικονιστεί και το κανονικοποιημένο φορτίο  $\ell$ . Η πρώτη κρίσιμη περιοχή κατά την οποία η διασπορά  $k_1$  προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή 0.070 και παράλληλα οι εντροπίες  $S$  και  $S_-$  ικανοποιούν τη συνθήκη  $S, S_- \lesssim 0.0966$ , παρατηρείται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 661s$  έως  $t = 708s$  ή ισοδύναμα στο διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.022$  έως  $\chi = 0.044$ , τα οποία αντιστοιχούν σε ένα εύρος τιμών του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , από 85% έως 89%. Στο Σχήμα 5.3(b) αναδεικνύονται δύο επιπλέον κρίσιμα στάδια πέραν του προαναφερθέντος το οποίο εμφανίζεται στο Σχήμα 5.3 (a). Ένα κρίσιμο στάδιο παρατηρείται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 835s$  έως  $t = 837s$ , περίπου, ή ισοδύναμα στο πεδίο του φυσικού χρόνου για διάστημα από, περίπου,  $\chi = 0.095$  έως  $\chi = 0.11$ . Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι περίπου από 98.5% έως 98.7%. Το τελευταίο και εκτενέστερο κρίσιμο στάδιο παρατηρείται όταν το δοκίμιο έχει εισέλθει στην περιοχή θραύσης του και διαρκεί μέχρι λίγο πριν την θραύση

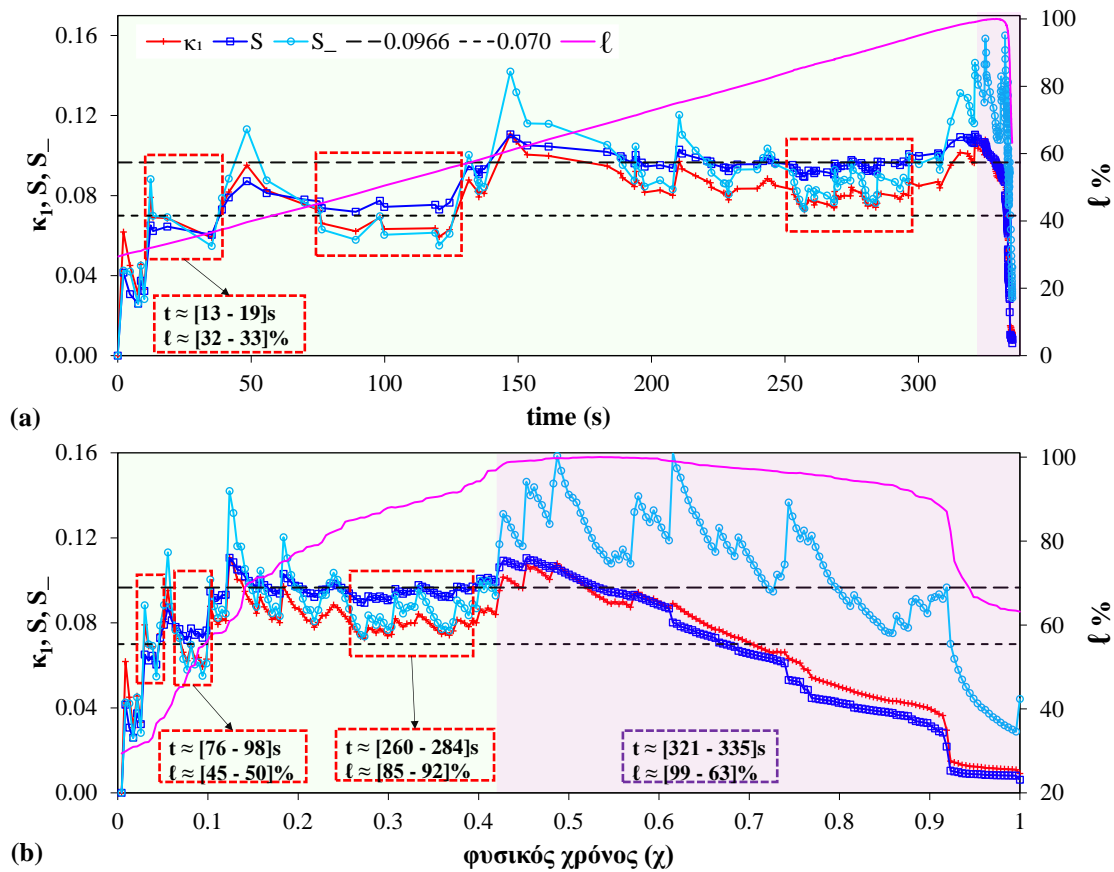


**Σχήμα 5.3** Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$ ,  $S_-$  με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου  $\ell$ , για το πείραμα ExpDM-03.

του δοκιμίου στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 848s$  έως  $t = 856s$ , και ισοδύναμα για διάστημα φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.204$  έως  $\chi = 0.985$  με τις αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  που κυμαίνονται από, περίπου 99.5% έως 99.6%. Εξετάζοντας το Σχήμα 5.3(a) γίνεται εμφανές ότι η συμπεριφορά της διασποράς  $\kappa_1$  πριν την θραύση του δοκιμίου, μπορεί να γίνει κατανοητή μόνο μέσω της συμπεριφοράς που προκύπτει κατά την ανάλυση δεδομένων του μοντέλο τρένου BK σε φυσικό χρόνο. Η επικράτηση του μοντέλου BK υποδεικνύεται μέσω του πράσινου υποβάθρου του Σχήματος 5.3.

### 5.1.3 Δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης σε δοκίμιο μαρμάρου τύπου “CSR”

Σο πείραμα ExpUM-05, δοκίμιο μαρμάρου τύπου “CSR” υποβλήθηκε σε αντιδιαμετρική θλίψη. Τα Σχήματα 5.4(a) και 5.4(b) απεικονίζουν την εξέλιξη σε συμβατικό και φυσικό χρόνο, αντίστοιχα, των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$  και  $S_-$ , με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου φορτίου  $\ell$ . Η μέγιστη τιμή του εφαρμοζόμενου φορτίου ήταν περίπου  $267N$  και πριν τη θραύση το φορτίο μειώθηκε αισθητά (βλ. Σχήμα 5.4). Σύμφωνα με το Σχήμα 5.4(a), η πρώτη περιοχή σύγκλισης (δηλ.  $\kappa_1 = 0.070$  και  $S, S_- \lesssim 0.0966$ ) εμφανίζεται για ένα χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 13s$  έως  $t = 19s$  ή ισοδύναμα για ένα διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.034$  έως  $\chi = 0.038$  και οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , είναι από 32% έως 33%. Η δεύτερη περιοχή σύγκλισης εντοπίζεται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 76s$  έως  $t = 98s$  ή ισοδύναμα στο διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,



**Σχήμα 5.4** Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$ ,  $S_-$  με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου  $\ell$ , για το πείραμα ExpUM-05.

$\chi = 0.068$  έως  $\chi = 0.081$ . Οι τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  που αντιστοιχούν είναι από 45% έως 50%. Η τρίτη περιοχή σύγκλισης που όπως φαίνεται αποτελεί και την εκτενέστερη εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 260$  s έως  $t = 284$  s, ή ισοδύναμα στο διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.28$  έως  $\chi = 0.37$  ενώ οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , είναι από 85% έως 92%. Αυτή η περιοχή είναι ενδεικτική της κρίσιμότητας στην οποία έχει εισέλθει το μηχανικά φορτισμένο δοκίμιο καθώς προσεγγίζει την περιοχή θραύσης του. Το Σχήμα 5.4(b) παρέχει μία καλύτερη εικόνα της εξέλιξης των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$  και  $S_-$  από τη στιγμή της μεγιστοποίησης του φορτίου ( $t \geq 329$  s ή  $\chi \geq 0.534$ ) μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Εξετάζοντας τη χρονική εξέλιξη της διασποράς  $\kappa_1$ , παρατηρείται μια απότομη αύξηση κατά την οποία διασπορά  $\kappa_1$  προσπερνά την τιμή 0.070 και στη συνέχεια υποχωρεί σε σχεδόν μηδενικές τιμές με την σταδιακή μείωση του φορτίου. Αυτή η συμπεριφορά εκτείνεται για ένα χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 321$  s έως  $t = 335$  s, ή ισοδύναμα για ένα διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.45$  έως  $\chi = 1$ , και οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , είναι από 99% έως 63%. Από τα Σχήματα 5.4(a) και 5.4(b) γίνεται εμφανές ότι η συμπεριφορά της διασποράς  $\kappa_1$  του πειράματος ExpUM-05 εμφανίζει μια περιπλοκότερη συμπεριφορά σε σχέση με τα πειράματα που παρουσιάστηκαν νωρίτερα (πειράματα ExpBM-01, ExpBM-02 και ExpDM-03). Εδώ αναδεικνύονται δύο διακριτές περιοχές συμπεριφορών οι οποίες μπορούν να γίνουν κατανοητές από το μοντέλο τρένου BK (πράσινη σκιασμένη περιοχή) και από το μοντέλο

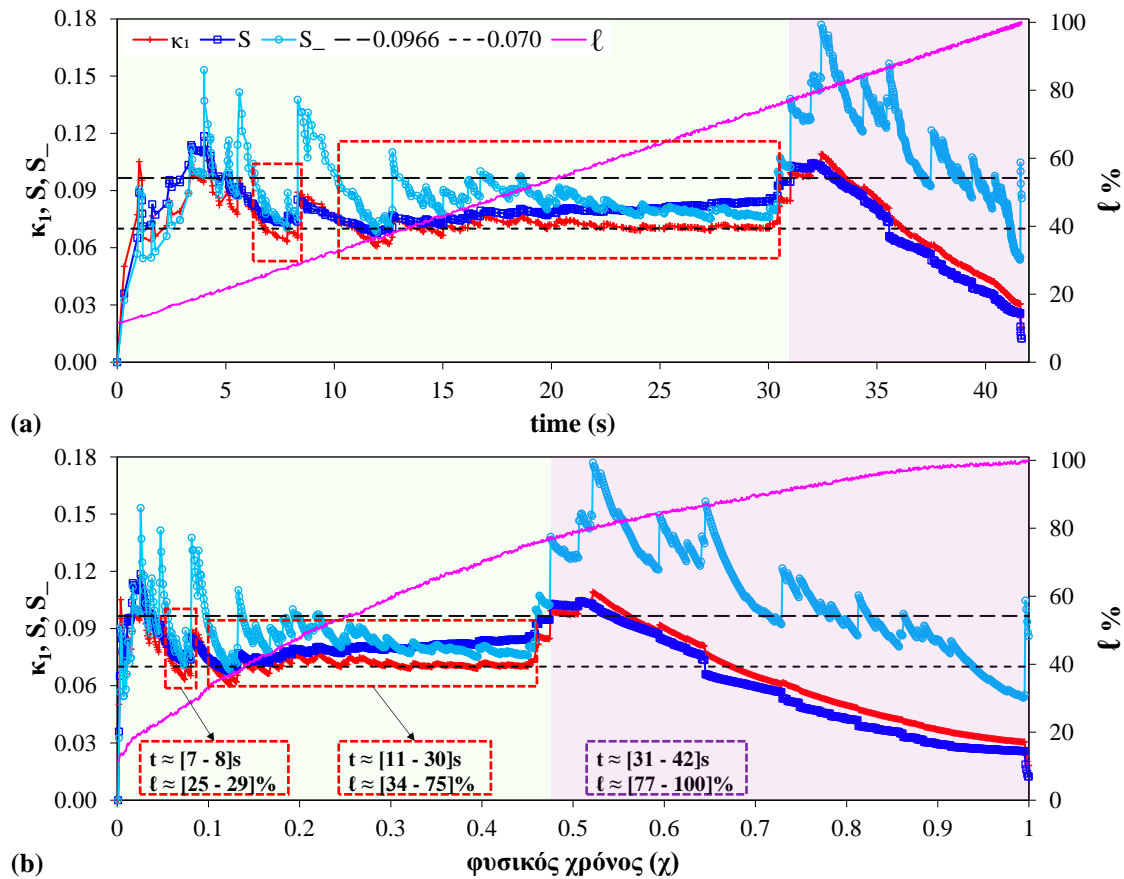
σεισμών OFC (μωβ σκιασμένη περιοχή). Το μοντέλο τρένου BK φαίνεται να επικρατεί κατά τα πρώιμα στάδια φόρτισης για τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου μικρότερες από 92% και κατά τη διάρκεια του οποίου προκύπτουν τρεις κρίσιμες περιοχές όπου η διασπορά  $k_1$  προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή 0.070 και οι εντροπίες  $S$  και  $S_-$  ικανοποιούν τη συνθήκη  $S, S_- \lesssim 0.0966$  αντίστοιχα. Ενώ, το μοντέλο σεισμών OFC φαίνεται να επικρατεί στα τελευταία στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης μέχρι και την θραύση του δοκιμίου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της ανάλυσης σε φυσικό χρόνο του μοντέλου OFC, η αύξηση του φορτίου δύναμης ανά σωματίο προκαλεί μια εκθετική αύξηση του μεγέθους της χιονοστιβάδας η οποία ωθεί την διασπορά  $k_1$  να λάβει τιμές μεγαλύτερες της κρίσιμη τιμής 0.070. Στην συνέχεια, όταν το μέγεθος των χιονοστιβάδων σταθεροποιηθεί σε υψηλές τάξεις μεγέθους, η διασπορά  $k_1$  μειώνεται σε σχεδόν μηδενικές τιμές (βλ. Σχήμα 2.5(a) §3.2). Κατ' αντιστοιχία, για την περίπτωση της ενέργειας των χτύπων ΑΕ, η συνεχής αύξηση του εφαρμοζόμενου φορτίου σε καταστρεπτικά επίπεδα συνοδεύεται από την καταγραφή πολύ ισχυρών χτύπων ΑΕ, οι οποίοι ωθούν τη διασπορά  $k_1$  να λάβει τιμές μεγαλύτερες της κρίσιμης τιμής 0.070 και στα τελευταία στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης, λίγο πριν τη θραύση, όπου καταγράφονται μόνο ισχυροί χτύποι ΑΕ η διασπορά  $k_1$  επιστρέφει σε σχεδόν μηδενικές τιμές.

#### 5.1.4 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια κονιάματος τσιμέντου

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η ανάλυση σε φυσικό χρόνο των ενεργειών των χτύπων ΑΕ που καταγράφηκαν από δοκίμια μαρμάρου και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα από δοκίμια κονιάματος τσιμέντου τα οποία υποβλήθηκαν σε πειράματα κάμψης τριών σημείων ((βλ. §4.3.5, πείραμα ExpBC-07 και ExpBC-08). Επισημαίνεται πως τα δοκίμια των πειραμάτων έχουν πανομοιότυπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και πως τα πειράματα διαφοροποιούνται μόνο ως προς τον ρυθμό επιβολής του φορτίου ο οποίος για το πείραμα ExpBC-07 ήταν 65 N/s ενώ για το πείραμα ExpBC-08 ήταν 85 N/s.

Τα Σχήματα 5.5(a) και 5.5(b) αφορούν το πείραμα ExpBC-07, και απεικονίζουν την εξέλιξη σε συμβατικό και φυσικό χρόνο, αντίστοιχα, των παραμέτρων  $k_1$ ,  $S$  και  $S_-$ , με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου φορτίου  $\ell$ . Η πρώτη περιοχή σύγκλισης εμφανίζεται, περίπου, για ένα χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 7s$  έως  $t = 8s$ , ή ισοδύναμα για ένα διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.06$  έως  $\chi = 0.08$ . Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , κυμαίνονται από 25% έως 29%. Η δεύτερη περιοχή σύγκλισης η οποία είναι εκτενέστερη της πρώτης και ενδεικτική της πρώιμης οργάνωσης των μικρορωγμών εντός του δοκιμίου εμφανίζεται σε ένα χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 11s$  έως  $t = 30s$ , ή ισοδύναμα στο διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.1$  έως  $\chi = 0.45$  ενώ, οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι από 34% έως 75%. Όπως έχει παρατηρηθεί και σε προηγούμενο πείραμα, η διασπορά  $k_1$  του φυσικού χρόνου εμφανίζει δύο περιοχές συμπεριφοράς, οι οποίες μπορούν να γίνουν κατανοητές είτε από το μοντέλο τρένου BK είτε από το μοντέλο σεισμών OFC. Επισημαίνεται ότι στα Σχήματα 5.5(a) και 5.5(b) η πράσινη σκιασμένη περιοχή αφορά το μοντέλο τρένου BK ενώ η μωβ σκιασμένη περιοχή στο μοντέλο σεισμών OFC. Η περιοχή συμπεριφοράς BK φαίνεται να επικρατεί στα πρώτα στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης για τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου μικρότερες από 77%, όπου παρατηρούνται δύο περιοχές κρισιμότητας κατά την διάρκεια των οποίων η διασπορά  $k_1$  προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή 0.070 με τις εντροπίες  $S$  και  $S_-$  να ικανοποιούν τη συνθήκη  $S, S_- \lesssim 0.0966$ , αντίστοιχα. Στα τελευταία στάδια φόρτισης του πειράματος για τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  μεγαλύτερες του 77% και μέχρι τη

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

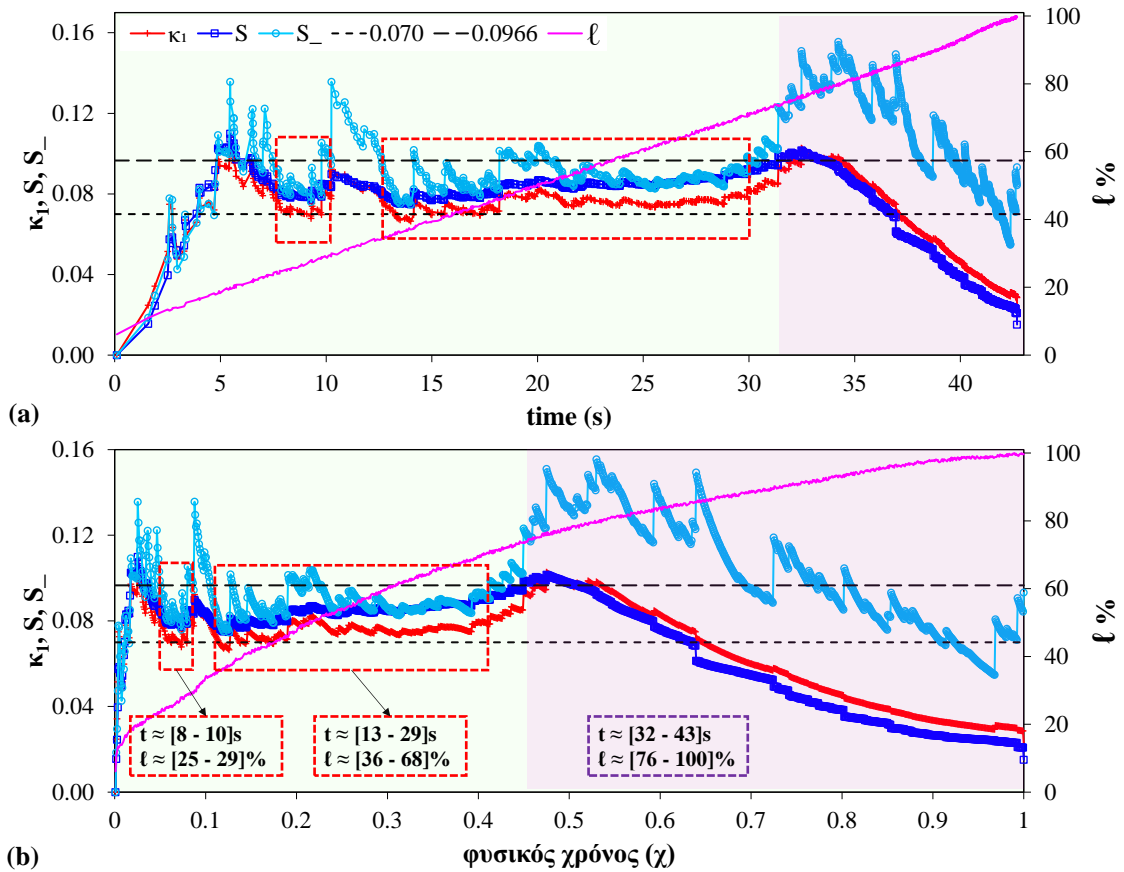


Σχήμα 5.5 Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$ ,  $S_-$  με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου  $\ell$ , για το πείραμα ExprBC-07.

θραύση του δοκιμίου, φαίνεται να κυριαρχεί το μοντέλο σεισμών OFC. Κατά την διάρκεια του οποίου η διασπορά  $\kappa_1$  εξωθείται μακριά από την κρίσιμη τιμή 0.070 και στη συνέχεια, μόλις το δοκίμιο εισέλθει στην περιοχή θραύσης, εμφανίζεται να υποχωρεί σταδιακά μέχρι τη θραύση σε χαμηλότερες τιμές. Σημειώνεται πως η συμπεριφορά OFC εκτείνεται, στο χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 31s$  έως  $t = 42s$ , ή ισοδύναμα στο διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.47$  έως  $\chi = 1$  ενώ, οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι από 77% έως 100% .

Η εξέλιξη των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$  και  $S_-$  κατά τη διάρκεια του πειράματος ExprBC-08 σε συμβατικό και φυσικό χρόνο, όπως αυτή παρουσιάζεται στα Σχήματα 5.6(a) και 5.6(b), εμφανίζει παρόμοια συμπεριφορά με το πείραμα ExprBC-08. Στα Σχήματα 5.6(a) και 5.6(b) έχει γίνει και παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου φορτίου  $\ell$ . Η συμπεριφορά του μοντέλου τρένου BK φαίνεται να επικρατεί στα πρώτα στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης όταν οι τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι μικρότερες του 75%, ενώ η συμπεριφορά του μοντέλου σεισμών OFC, φαίνεται να επικρατεί στα τελευταία στάδια φόρτισης για τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  μεγαλύτερες του 76% και μέχρι τη θραύση του δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια του σταδίου BK, αναδεικνύονται δύο περιοχές κρισιμότητας με τη διασπορά  $\kappa_1$  να προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή 0.070 και τις εντροπίες  $S$  και  $S_-$  ικανοποιούν τη συνθήκη  $S, S_- \lesssim 0.0966$  αντίστοιχα. Η πρώτη περιοχή κρισιμότητας εμφανίζεται για χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 8s$  έως  $t = 10s$





Σχήμα 5.6 Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό χρόνο των παραμέτρων  $\kappa_1, S, S_-$  με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου  $\ell$ , για το πείραμα ExprBC-08.

ή ισοδύναμα στο πεδίο του φυσικού χρόνου για διάστημα από, περίπου,  $\chi = 0.05$  έως  $\chi = 0.08$  για τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  από 25% έως 29% .

Η δεύτερη περιοχή κρισιμότητας, η οποία είναι εκτενέστερη της πρώτης, εκτείνεται σε ένα χρονικό διάστημα από, περίπου,  $t = 13s$  έως  $t = 29s$  ή ισοδύναμα στο διάστημα του φυσικού χρόνου από, περίπου,  $\chi = 0.11$  έως  $\chi = 0.39$  ενώ οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , είναι από 36% έως 69%, περίπου. Τέλος, η συμπεριφορά OFC εκτείνεται, περίπου, στο χρονικό διάστημα από  $t = 32s$  έως  $t = 43s$ , ή ισοδύναμα στο διάστημα του φυσικού χρόνου από  $\chi = 0.47$  έως  $\chi = 1$  ενώ οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , είναι από 76% έως 100% .

### 5.1.5 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Από τα μέχρι τώρα αποτελέσματα γίνεται εμφανές πως η ανάλυση σε φυσικό χρόνο της ενέργειας των χτύπων ΑΕ που καταγράφηκαν στα τελευταία στάδια των προαναφερθέντων πειραμάτων, αποκάλυψε ότι οι συνθήκες κρισιμότητας (δηλ.  $\kappa_1 = 0.070$  και  $S, S_- \lesssim 0.0966$ ) επιτυγχάνονται πριν από την θραύση των δοκιμίων μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου με τρόπο παρόμοιο με εκείνον που προηγείται των ισχυρών σεισμών [149]. Επιπλέον, η παρατηρούμενη συμπεριφορά θα μπορούσε να γίνει κατανοητή από είτε το μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen [48] είτε το μοντέλο τρένου Burridge-Knopoff [69].

Στον Πίνακα 5.1 συνοψίζονται οι περιοχές κρισιμότητας με τη μεγαλύτερη διάρκεια, για κάθε ένα από τα προαναφερθέντα πειράματα, καθώς και το αντίστοιχο εύρος τιμών του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ . Επιπροσθέτως, στην τελευταία δεξιά στήλη του Πίνακα 5.1, αναφέρονται τα δυναμικά μοντέλα μέσω των οποίων μπορεί να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά της διασποράς  $\kappa_1$  κατά τη διάρκεια κάθε πειράματος.

Στην περίπτωση που διαπιστώνεται η ύπαρξη της συμπεριφοράς του μοντέλου τρένου Burrridge-Knopoff οι εντροπίες  $S$  και  $S_-$  θα πρέπει να ικανοποιούν τη συνθήκη  $S, S_- \lesssim 0.0966$ , χωρίς όμως να μπορεί να γίνει ακριβής σύγκριση μεταξύ των εντροπιών  $S$ ,  $S_-$ , και της τιμής  $S_{**} = 0.0966$  [46], κάτι που παρατηρείται σε όλες τις αναλύσεις που προηγήθηκαν και στα Σχήματα 5.1 έως 5.6. Οι περιοχές κρισιμότητας που υπακούουν το μοντέλο τρένου Burrridge-Knopoff σημειώνονται με τα κόκκινα ορθογώνια. Επιπλέον στην περίπτωση που διαπιστώνεται η ύπαρξη της συμπεριφοράς του μοντέλου σεισμών Olami-Feder-Christensen, παρατηρείται μία αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ της εντροπίας  $S$  και της εντροπίας υπό αντίστροφη χρονο  $S_-$ . Οι περιοχές στις οποίες κυριαρχεί η συμπεριφορά του μοντέλου σεισμών Olami-Feder-Christensen σημειώνονται με τις μωβ σκιασμένες περιοχές στα Σχήματα 5.4 έως 5.6. Μια τέτοια συμπεριφορά είναι θεωρητικά αναμενόμενη [44, 148, 150-152].

Μελετώντας τον Πίνακα 5.1 βλέπουμε πως η συμπεριφορά του μοντέλου τρένου Burrridge-Knopoff εμφανίζεται στο σύνολο των πειραμάτων που μελετήθηκαν ενώ το μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen εμφανίζεται μόνο σε όσα πειράματα (ExpUM-05, ExpBC-07, ExpBC-08) δεν είχε διαμορφωθεί μηχανικά εγκοπή, η οποία δρα ως προϋπάρχουσα αστοχία διευκολύνοντας την διαδικασία θραύσης των δοκιμίων. Η ύπαρξη των ανωτέρω συμπεριφορών μπορεί να γίνει κατανοητή ως εξής: Κατά τα αρχικά στάδια φόρτισης, κυριαρχεί το μοντέλο τρένου Burrridge-Knopoff. Αυτή η συμπεριφορά φαίνεται να σχετίζεται με την ενεργοποίηση των πηγών ΑΕ λόγω των προϋπαρχουσών ατελειών εντός του όγκου του υλικού και με τον σταδιακό μετασχηματισμό τους σε ένα πρώιμο δίκτυο μικρορωγμών. Πριν την εφαρμογή φορτίου  $\ell$ , οι προϋπάρχουσες ατέλειες εντός του υλικού είναι ανενεργές και δεν αλληλεπιδρούν με τις γειτονικές τους. Όμως η σταδιακή αύξηση του εφαρμοζόμενου φορτίου  $\ell$  διεγείρει τις προϋπάρχουσες ατέλειες, οι οποίες προκαλούν την έναρξη των μηχανισμών δημιουργίας, ανάπτυξης και διάδοσης των μικρορωγμών. Στη συνέχεια, οι μικρορωγμές αρχίζουν να αναπτύσσονται, αυξάνοντας σε διαστάσεις και να συνενώνονται με άλλες γειτονικές τους σχηματίζοντας ένα πρώιμο δίκτυο μικρορωγμών. Το μοντέλο σεισμού OFC εμφανίζεται αργότερα κατά τα τελικά στάδια των πρωτοκόλλων φόρτισης (βλ. Πίνακα 5.1) για τιμές φορτίου  $\ell > 76\%$  όταν τα δοκίμια έχουν εισέλθει στην περιοχή θραύσης τους. Σε εκείνο το σημείο, οι μικρορωγμές έχουν συσσωματωθεί σε μακρορωγμές και οι διαστάσεις του δικτύου μακρορωγμών έχουν πλέον καταστεί συγκρίσιμες με τις διαστάσεις των δοκιμίων και τελικά επέρχεται η κατάρρευση των δοκιμίων. Αυτό μας κάνει να πιστεύουμε ότι, κατά τη διαδικασία της φόρτισης των μη (μηχανικά) καταπονημένων δοκιμίων προς την κατάρρευση, και οι δύο μηχανισμοί θα πρέπει να είναι παρόντες ακολουθώντας το προαναφερθέν μοτίβο. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, μπορεί κανείς να καταλάβει ότι η ύπαρξη προϋπάρχουσας αστοχίας (εγκοπής) στα δοκίμια, δρα καταλυτικά ως προς την πιθανή ανάπτυξη της συμπεριφοράς Olami-Feder-Christensen, η οποία είναι χαρακτηριστική της συσσώρευσης τάσεων μέσα στο πλέγμα του υλικού.

Σημειώνεται ότι και στις δύο συμπεριφορές Burrridge-Knopoff και Olami-Feder-Christensen η κρισιμότητα των ΑΕ προκύπτει όταν οι συνθήκες κρισιμότητας (δηλ.  $\kappa_1 = 0.070$  και  $S, S_- \lesssim 0.0966$ ) επιτυγχάνονται πριν την θραύση. Αυτή η συμπεριφορά θυμίζει παρόμοια συμπεριφορά που έχει παρατηρηθεί πειραματικά πριν από ισχυρούς σεισμούς [44, 45, 50, 153-155] εάν αναλύσουμε τη σεισμικότητα στην περιοχή που είναι

**Πίνακας 5.1 Συνοπτική παρουσίαση των βασικότερων κρίσιμων σταδίων που προέκυψαν από την ανάλυση της ενέργειας των χτύπων ΑΕ κατά την διάρκεια των παρουσιαζόμενων πειραμάτων.**

Πείραμα	Πρωτόκολλο φόρτισης	Υλικό	Εγκοπή	Κρίσιμη κατάσταση σχετικά με το $\ell$ (%)	Μοντέλο
ExpBM-01	Κάμψη τριών σημείων	Μάρμαρο	Ναι	[99 – 98]	Burridge-Knopoff
ExpBM-02				[85 – 74]	Burridge-Knopoff
ExpDM-03	Άμεσος εφελκυσμός			[99.5 – 99.6]	Burridge-Knopoff
ExpUM-05	Αντιδιαμετρική θλίψη	Κονίαμα Τσιμέντου	Όχι	[85 – 92]	Burridge-Knopoff
				[99 – 63]	Olami-Feder-Christensen
ExpBC-07	Κάμψη τριών σημείων			[34 – 75]	Burridge-Knopoff
				[77 – 100]	Olami-Feder-Christensen
ExpBC-08				[36 – 68]	Burridge-Knopoff
				[76 – 100]	Olami-Feder-Christensenn

υποψήφια να υποστεί τον ισχυρό σεισμό μετά την παρατήρηση δραστηριότητας Προσεισμικών Ηλεκτρικών Σημάτων (SES).

Τα SES είναι ηλεκτρικά σήματα χαμηλής συχνότητας ( $\leq 1\text{Hz}$ ) που έχουν βρεθεί ότι προηγούνται των σεισμών στην Ελλάδα [59, 60, 156, 157] και παγκοσμίως [158-161]. Ως εκ τούτου, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι η ομοιότητα προέρχεται από το γεγονός ότι εάν ο ρυθμός τάσης (ή παραμόρφωσης) συνεχίσει να εφαρμόζεται, το δείγμα τελικά θα καταρρεύσει όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα στη Γη καθώς η τάση αυξάνεται σταδιακά πριν από ισχυρούς σεισμούς.

## 5.2 Ανάλυση των ανηγμένων συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας της διασποράς $\kappa_1$

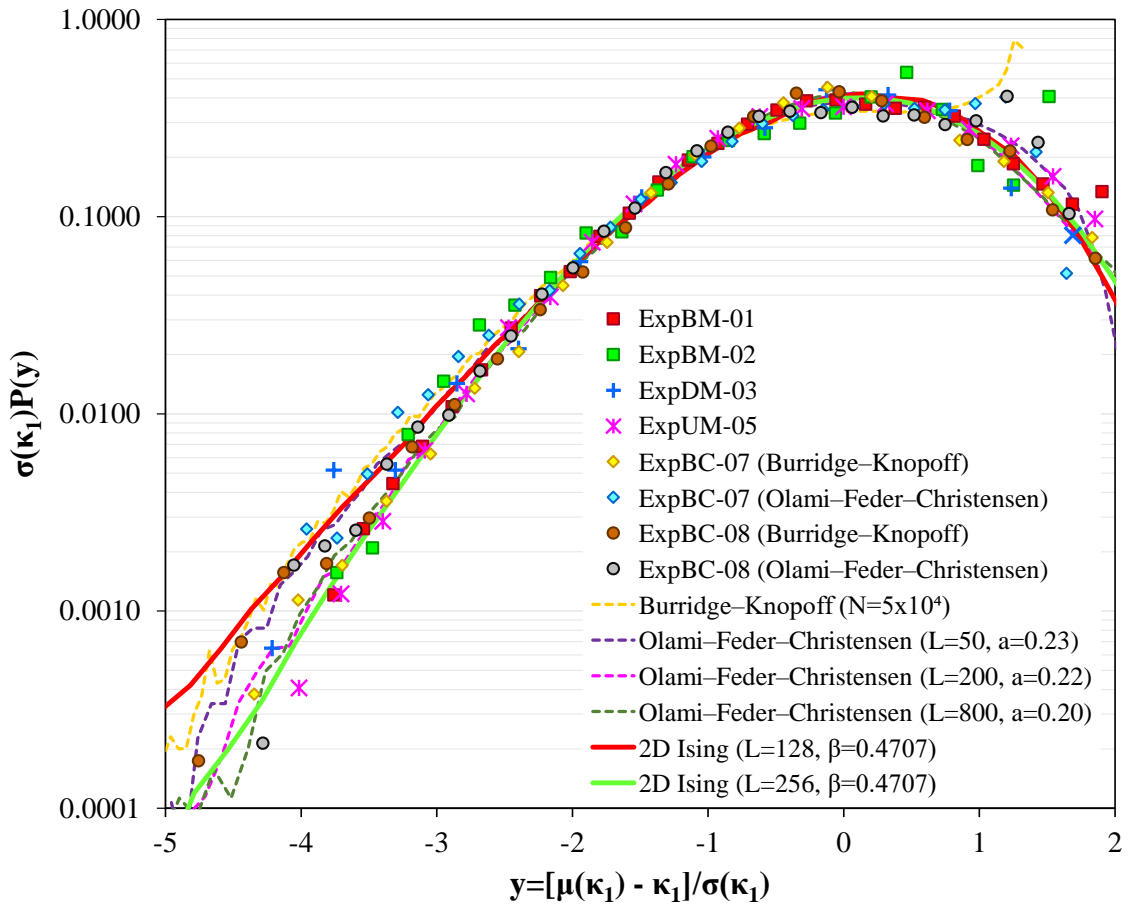
Οι Bramwell, Holdsworth και Pinton [162] διαπίστωσαν ότι η ανηγμένη Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας των διακυμάνσεων ισχύος σε ένα πείραμα κλειστής τυρβώδους ροής [163] έχει την ίδια συναρτησιακή μορφή, με την αντίστοιχη κατανομή της μονόμετρης παραμέτρου τάξης  $M$  (μαγνήτισης) του πεπερασμένου μεγέθους διδιάστατου (2D) μοντέλου XY στην ισορροπία στην κρίσιμη περιοχή κάτω από την θερμοκρασία μετάβασης Kosterlitz-Thouless [164]. Οι μαγνητικές διακυμάνσεις του μοντέλου μελετήθηκαν στα πλαίσια της προσέγγισης των κυμάτων spin [165]. Η ανηγμένη PDF, που υποδηλώνεται ως  $P(m)$ , ορίστηκε με την εισαγωγή μίας αδιάστατης μαγνήτισης  $m = (M - \mu) / \sigma$ , όπου  $\mu$  είναι η μέση τιμή και  $\sigma$  η τυπική απόκλιση της  $M$  [162]. Επιπλέον, διαπίστωσαν πως και στις δύο περιπτώσεις συστημάτων το άνω όριο ( $m > 0$ ) της PDF είχε σχήμα Γκαουσιανής κατανομής [162] και πως εμφανίζεται μία χαρακτηριστική εκθετική ουρά στο κάτω όριο ( $m < 0$ ). Η εν λόγω εκθετική ουρά είναι η κύρια περιοχή ενδιαφέροντος [162], αφού υποδηλώνει ότι η πιθανότητα μίας σπάνιας διακύμανσης, π.χ. άνω των έξι τυπικών αποκλίσεων από την μέση τιμή, είναι σχεδόν πέντε τάξεις μεγέθους υψηλότερη σε σχέση

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

με την περίπτωση της Γκαουσιανής κατανομής. Μεταγενέστερες μελέτες έδειξαν, ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες διάφορα δυναμικά συστήματα ισορροπίας και μη-ισορροπίας με υψηλό βαθμό συσχέτισης παρουσιάζουν αυτή την εκθετική ουρά [137-144, 146]. Η ύπαρξη της εκθετικής ουράς χρησιμοποιήθηκε επίσης για την ταυτοποίηση μίας κατάλληλης παραμέτρου τάξης σε πολλά κρίσιμα συστήματα ισορροπίας και μη-ισορροπίας, όπως η μετάβαση Anderson [166] ή η σεισμικότητα [145, 147, 148, 167-169]. Η ποσότητα  $\kappa_1$  μπορεί να προσδιορίσει, όπως είδαμε, την προσέγγιση ενός δυναμικού συστήματος σε ένα κρίσιμο σημείο, όταν ισχύει η συνθήκη  $\kappa_1 = 0.070$  [47]. Ένας από τους λόγους, που η διασπορά  $\kappa_1$  του φυσικού χρόνου έχει προταθεί ως παράμετρος τάξης της σεισμικότητας είναι ότι η ανηγμένη PDF της  $\kappa_1$  παρουσιάζει μια συμπεριφορά παρόμοια με αυτή που αναφέρθηκε παραπάνω από την παράμετρο τάξης διαφόρων συστημάτων ισορροπίας και μη-ισορροπίας [137-144, 146]. Η ανηγμένη PDF της  $\kappa_1$  υπολογίζεται με την αφαίρεση της μέσης τιμής  $\mu(\kappa_1)$  και την αναπροσαρμογή της κλίμακας από την τυπική απόκλιση  $\sigma(\kappa_1)$ , με τρόπο παρόμοιο με τις ανηγμένες PDF που χρησιμοποιούνται επίσης σε βιολογικά συστήματα [170, 171].

Προκειμένου να υπολογιστεί η PDF της διασποράς  $\kappa_1$ , στην περίπτωση της ενέργειας των χτύπων ΑΕ που καταγράφησαν κατά την διάρκεια των προαναφερθέντων πειραμάτων, απαιτείται ένα σύνολο  $\kappa_1$  τιμών. Για αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα παράθυρο ολίσθησης φυσικού χρόνου, το οποίο ολισθαίνει γεγονός με γεγονός στο σύνολο της χρονοσειράς της ενέργειας των χτύπων ΑΕ [147]. Αναλυτικότερα, εκκινώντας από την ενέργεια του πρώτου χτύπου ΑΕ, υπολογίστηκαν οι τιμές της διασποράς  $\kappa_1$  χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο έξι (6) διαδοχικών γεγονότων συμπεριλαμβανομένου και του πρώτου. Στη συνέχεια, το παράθυρο αυξάνεται κατά έναν χτύπο ΑΕ και υπολογίζεται η νέα τιμή για την διασπορά  $\kappa_1$  λαμβάνοντας υπόψη και τον έβδομο χτύπο ΑΕ. Το παράθυρο συνεχίζει να αυξάνεται, έως ότου το μήκος του γίνει ίσο με σαράντα (40). Έπειτα, ο υπολογισμός επαναλαμβάνεται ξεκινώντας από το δεύτερο ακουστικό γεγονός, κοκ. Μετά την ολίσθηση, γεγονός με γεγονός, μέσω της χρονοσειράς της ενέργειας των χτύπων ΑΕ, οι υπολογισμένες τιμές της  $\kappa_1$  επιτρέπουν την κατασκευή της PDF  $P(\kappa_1)$ . Η ανηγμένη PDF της διασποράς  $\kappa_1$  ορίζεται ως  $\sigma(\kappa_1)P(y)$  με  $y = [\mu(\kappa_1) - \kappa_1] / \sigma(\kappa_1)$  και είναι εκείνη που όταν μελετάται για τη σεισμικότητα [44, 145, 147, 167, 168], παρουσιάζει μια εκθετική ουρά παρόμοια με αυτή που λαμβάνεται κατά τη μελέτη των διακυμάνσεων των παραμέτρων τάξης για διάφορα συστήματα ισορροπίας, όπως το διδιάστατο μοντέλο Ising (2D Ising model) [139, 143, 144], και συστήματα εκτός ισορροπίας, όπως οι τρισδιάστατες στοίβες ρυζιού (3D rice piles), η διείδυση των μαγνητικών στροβίλων σε υπεραγωγούς τύπου II και άλλα αυτοργανωμένα κρίσιμα συστήματα [46]. Εδώ, υιοθετώντας την άποψη ότι η παραγωγή ακουστικών εκπομπών πριν από τη θραύση ενός υλικού είναι ένα κρίσιμο φαινόμενο μη ισορροπίας (βλ. αναφορά [172]), ερευνάται η ύπαρξη μίας τέτοιας εκθετικής ουράς κατά την ανάλυση της ακουστικής ενέργειας σε φυσικό χρόνο [43, 44, 173].

Προκειμένου να διερευνηθεί εάν οι ανηγμένες PDFs της διασποράς  $\kappa_1$  που προέκυψε από την ανάλυση σε φυσικό χρόνο των ενεργειών των χτύπων ΑΕ, που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια των προαναφερθέντων πειραμάτων, εμφανίζουν τη χαρακτηριστική εκθετική ουρά, σχεδιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα στο Σχήμα 5.7. Τα κόκκινα και πράσινα τετράγωνα αντιστοιχούν στις ανηγμένες PDFs της διασποράς  $\kappa_1$  των πειραμάτων ExpBM-01 και ExpBM-02. Τα μπλε σύμβολα αντιπροσωπεύουν την ανηγμένη PDF της διασποράς  $\kappa_1$  για το πείραμα ExpDM-03, ενώ τα ματζέντα σύμβολα αναφέρονται στην διασπορά του πειράματος ExpUM-05. Οι κίτρινοι και οι γαλάζιοι ρόμβοι αναφέρονται στις ανηγμένες



**Σχήμα 5.7** Οι ανηγμένες PDFs  $\sigma(\kappa_1)P(y)$  ως συνάρτηση του  $y = [\mu(\kappa_1) - \kappa_1] / \sigma(\kappa_1)$  στο φυσικό χρόνο που προέκυψαν κατά την ανάλυση είτε των μεγεθών των χιονοστιβάδων των μοντέλων OFC και BK είτε των χτύπων ΑΕ των πειραμάτων που μελετήθηκαν. Οι παχιές κόκκινες και πράσινες γραμμές αντιστοιχούν στις ανηγμένες PDFs της παραμέτρου τάξης του μοντέλου 2D Ising κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία σε αντίστροφη θερμοκρασία  $\beta=0.4707$  για γραμμικές διαστάσεις  $L=128$  και  $L=256$ , αντιστοίχως.

PDFs της διασποράς  $\kappa_1$  του πειράματος ExpBC-07, όταν το σύστημα μιμείται τη συμπεριφορά που βρέθηκε κατά την ανάλυση δεδομένων από το μοντέλο τρένου Burrigde-Knopoff σε φυσικό χρόνο [50, 78, 149], και όταν το σύστημα μιμείται [149] τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την ανάλυση δεδομένων από το μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen σε φυσικό χρόνο (βλ. επίσης σελ. 350-358 της αναφοράς [44]), αντίστοιχα. Ομοίως για το πείραμα ExpBC-08 παρουσιάζονται δύο ομάδες σημείων. Οι καφέ κύκλοι αντιστοιχούν στη ανηγμένη PDF της διασποράς των  $\kappa_1$  για την περίπτωση που το σύστημα μιμείται τη συμπεριφορά του μοντέλου τρένου Burrigde-Knopoff [149] ενώ, οι γκρι κύκλοι όταν το σύστημα μιμείται την συμπεριφορά που βρέθηκε κατά την ανάλυση δεδομένων από το μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen σε φυσικό χρόνο [150].

Πέραν των πειραματικών αποτελεσμάτων στο Σχήμα 5.7, σχεδιάζονται με παχιά κόκκινη και με παχιά πράσινη γραμμή οι ανηγμένες PDFs της παραμέτρου τάξης για το διδιάστατο (2D) μοντέλο Ising γραμμικών διαστάσεων  $L = 128$  (κόκκινη γραμμή) και  $L = 256$  (πράσινη γραμμή) σε αντίστροφη παράμετρο θερμοκρασίας  $\beta = 0.4707$  [143, 145]. Αυτές οι δύο τιμές δεν επιλέχθηκαν τυχαία, καθώς αντιστοιχούν σε εκείνες τις τιμές οι οποίες έχουν επιλεγεί στην αναφορά [145] κατά τη σύγκριση μεταξύ του μοντέλου 2D Ising και της σεισμικότητας με βάση την παρατήρηση της αναφοράς [139] πως όταν το

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

$s \equiv L^{1/\nu} (\beta - \beta_c) / \beta_c$  είναι μεγαλύτερο ή ίσο με 8.72 ένα σύνολο κρίσιμων συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων των μοντέλων 3D Ising, 2D Potts και 2D XY, μοιράζονται την ίδια μορφή της ανηγμένης PDF  $P(m; s)$ , μέχρι έναν σταθερό παράγοντα. Σημειώνεται πως ο όρος  $s^\nu$  παρέχει την αναλογία του μεγέθους του πλέγματος σε σχέση με το μήκος συσχέτισης (βλ., Εξίσωση (16.26) της αναφοράς [174]). Επομένως, αυτές οι δύο ανηγμένες PDF, με όνομα  $P(m; 8.72)$  για  $L = 128$  και  $P(m; 17.44)$  για  $L = 256$ , δρουν ως οδηγός για την εξέταση της ύπαρξης της αριστερής εκθετικής ουράς στα πειραματικά αποτελέσματα. Εκτός από τις  $P(m; 8.72)$  και  $P(m; 17.44)$ , η διακεκομμένη μωβ, ματζέντα και πράσινη γραμμή αντιστοιχούν στις ανηγμένες PDFs της διασποράς  $\kappa_1$  που υπολογίστηκαν από το μέγεθος των πρώτων  $10^4$  χιονοστιβάδων του μοντέλου σεισμών Olami-Feder-Christensen [48] με παραμέτρους:  $L = 50$  με  $\alpha = 0.23$ ,  $L = 200$  με  $\alpha = 0.22$ , και  $L = 800$  με  $\alpha = 0.20$ , αντιστοίχως. Τέλος, η διακεκομμένη κίτρινη γραμμή απεικονίζει την ανηγμένη PDF που λαμβάνεται όταν αναλύεται το μέγεθος των πρώτων  $5 \times 10^4$  χιονοστιβάδων του μοντέλου τρένου Burrridge-Knopoff στο φυσικό χρόνο [50, 78, 149].

### 5.2.1 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Εξετάζοντας το Σχήμα 5.7 αποκαλύπτεται πως τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζουν την αριστερή εκθετική ουρά για τουλάχιστον τρεις τάξεις μεγέθους και φαίνεται να προσεγγίζουν είτε την  $P(m; 8.72)$  είτε την  $P(m; 17.44)$ . Το γεγονός αυτό αποδεικνύει ότι η εκτιμώμενη διασπορά  $\kappa_1$  από την ενέργεια των χτύπων ΑΕ συμπεριφέρεται παρόμοια με την παράμετρο τάξης διαφόρων κρίσιμων συστημάτων ισορροπίας και μη ισορροπίας. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο, η μελέτη της εξέλιξης της  $\kappa_1$  της ενέργειας των χτύπων ΑΕ, καθώς το δοκίμιο προσεγγίζει σταδιακά στη θραύση έχει οδηγήσει σε αποτελέσματα παρόμοια με εκείνα της ανάλυσης στον φυσικό χρόνο (βλ. κεφάλαιο 8 της αναφοράς [44]) των χιονοστιβάδων του σεισμικού μοντέλου Olami-Feder-Christensen [48] καθώς και του μοντέλου τρένου Burrridge-Knopoff [69]. Προκειμένου να ακολουθηθεί περαιτέρω αυτή η αναλογία, προστέθηκαν στο Σχήμα 5.7 οι ανηγμένες PDFs της διασποράς  $\kappa_1$  που προέκυψαν από την ανάλυση σε φυσικό χρόνο των πρώτων  $10^4$  χιονοστιβάδων του σεισμικού μοντέλου Olami-Feder-Christensen για  $L = 50$  και  $\alpha = 0.23$ ,  $L = 200$  και  $\alpha = 0.22$ , καθώς επίσης για  $L = 800$  και  $\alpha = 0.20$ . Είναι ενδιαφέρον ότι για αυτές τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου, οι ανηγμένες PDFs της διασποράς  $\kappa_1$  του φυσικού χρόνου παρουσιάζουν για σχεδόν τρεις τάξεις μεγέθους μια εκθετική ουρά παρόμοια με αυτή που λαμβάνεται για άλλα κρίσιμα συστήματα ισορροπίας και μη ισορροπίας. Το γεγονός αυτό ενισχύει την αρχική παρατήρηση [149] ότι η ανάλυση των χρονοσειρών της ενέργειας των χτύπων ΑΕ στον φυσικό χρόνο οδηγεί σε αποτελέσματα παρόμοια με το μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen. Επιπλέον, βλέπουμε ότι από τις τρεις καμπύλες Olami-Feder-Christensen, η πρώτη ( $L = 50$  και  $\alpha = 0.23$ ) ακολουθεί μια εκθετική ουρά παρόμοια ως προς την  $P(m; 8.72)$ , ενώ οι άλλες δύο καμπύλες Olami-Feder-Christensen ακολουθούν την εκθετική ουρά της  $P(m; 17.44)$ . Στο Σχήμα 5.7, απεικονίζονται επίσης τα αποτελέσματα που ελήφθησαν για την ανηγμένη PDF κατά την ανάλυση των πρώτων  $5 \times 10^4$  χιονοστιβάδων του μοντέλου τρένου Burrridge-Knopoff όταν  $L = 1024$ ,  $a = 4$ ,  $f_0 = 0.87$  και  $\delta f = 0.1$ . Παρατηρούμε για μια ακόμη φορά, μια εκθετική ουρά για τρεις τάξεις μεγέθους που συμπίπτει σχεδόν με την ανηγμένη PDF  $P(m; 8.72)$  της παραμέτρου τάξης του 2D Ising μοντέλου με  $\beta = 0.4707$  και  $L = 128$ .

Σε αυτό το σημείο, πρέπει να αναφέρουμε ότι όχι μόνο οι θεωρητικές καμπύλες Olami-Feder-Christensen και Burrridge-Knopoff παρουσιάζουν την ίδια εκθετική ουρά με τα πειραματικά δεδομένα ΑΕ, αλλά συμμορφώνονται επίσης με την πρόταση της αναφοράς

[143] ότι για  $s \geq 8.72$  διάφορα συστήματα ισορροπίας και μη-ισορροπίας μοιράζονται μια κοινή μορφή για την ανηγμένη PDF των παραμέτρων τάξης τους. Η φυσική πίσω από την ύπαρξη της χαρακτηριστικής εκθετικής ουράς για κρίσιμα συστήματα ισορροπίας μπορεί να γίνει κατανοητή [143] σκεπτόμενοι ότι για αρκετά μεγάλα  $s$ , δηλαδή για  $s \geq 8.72$ , το μήκος συσχέτισης είναι πολύ μικρότερο από το γραμμικό μέγεθος  $L$  του πλέγματος. Ως εκ τούτου, οι διακυμάνσεις του πεδίου (lattice field fluctuations) είναι λιγότερο σημαντικές, επιτρέποντας μια περιγραφή μέσου πεδίου (mean-field description) -χρησιμοποιώντας ένα αποτελεσματικό δυναμικό (effective potential)- να κυριαρχήσει στην παράμετρο τάξης, με αποτέλεσμα μια κοινή συμπεριφορά των αντίστοιχων ανηγμένων PDFs. Τα αποτελέσματα που συζητήθηκαν στο παρόν Κεφάλαιο 5.2 έχουν δημοσιευθεί στην αναφορά [77].

### 5.3 Εντοπισμός κρίσιμης κατάστασης με βάση την μεταβλητότητα του εντροπικού δείκτη $q$ στο πλαίσιο της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής

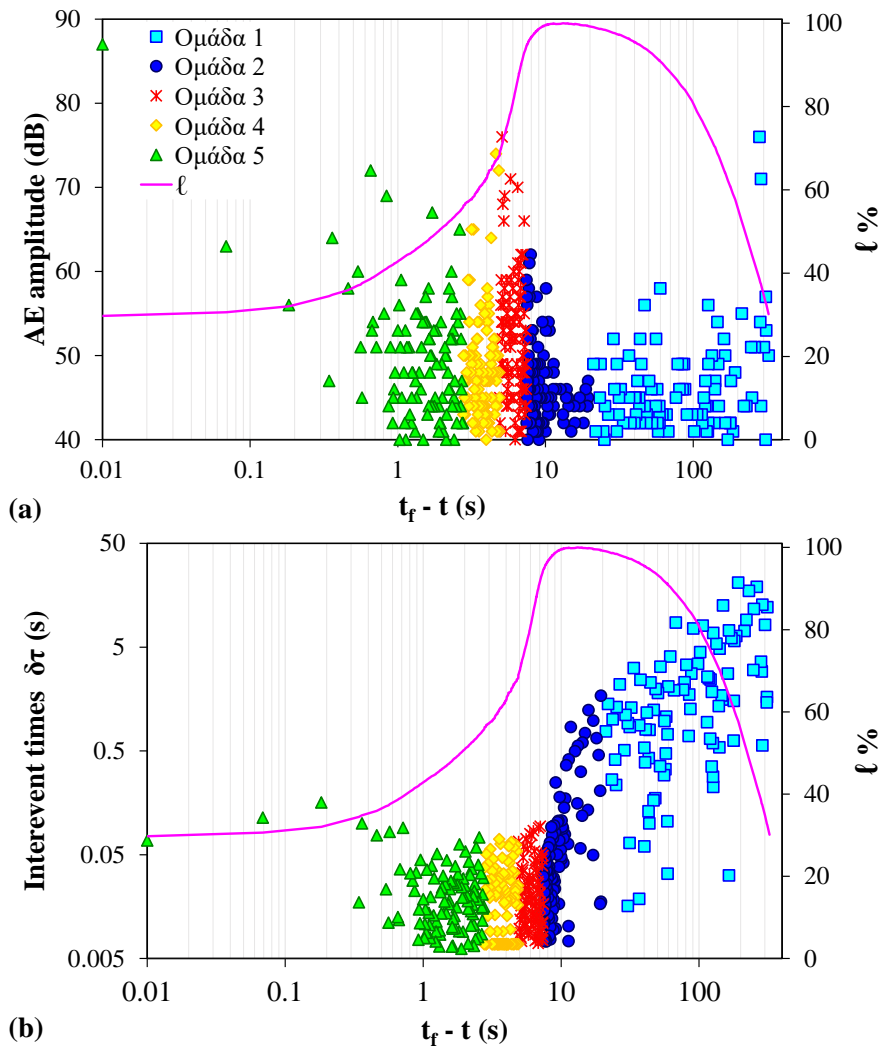
Προκειμένου να μελετηθεί η χρονική εξέλιξη της μεταβολής του εντροπικού δείκτη  $q$  και της παραμέτρου  $\beta_q$ , που εμπεριέχονται στην συνάρτηση επιβίωσης (SF)  $[P(> \delta\tau)]$ :

$$P(> \delta\tau) = \exp_q(-\beta_q \cdot \delta\tau) = [1 + (q-1)\beta_q \cdot \delta\tau]^{-\frac{1}{q-1}} \quad (5.1)$$

αξιοποιήθηκαν οι χρονοσειρές των χτύπων ΑΕ που καταγράφονται κατά τη διάρκεια κάθε πειράματος και υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα intervent times ( $\delta\tau$ ). Αν  $N$  είναι ο συνολικός αριθμός των χτύπων από την έναρξη του πρωτόκολλου φόρτισης μέχρι τη θραύση του δοκιμίου, τότε χωρίζονται σε  $k$  διαδοχικές ομάδες ανάλογα με τον συνολικό αριθμό  $N$  των καταγεγραμμένων χτύπων ΑΕ. Επισημαίνεται ότι προκειμένου να καταστεί η ανάλυση πιο αξιόπιστη, οι χτύποι ΑΕ που περιλαμβάνονται σε κάθε ομάδα εκτιμήθηκαν ότι θα πρέπει να είναι ένας αριθμός μεγαλύτερος του ογδόντα (80). Ακολουθεί ο υπολογισμός των intervent times ( $\delta\tau$ ) των χτύπων κάθε ομάδας και η απεικόνιση της SF  $[P(> \delta\tau)]$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ. Η γραφική απεικόνιση των SFs μέσω των καμπυλών προσαρμογής επιτρέπει αφενός να διαπιστωθεί εάν επαληθεύεται η υπόθεση ότι η συνάρτηση  $[P(> \delta\tau)]$  υπακούει σε  $q$ -εκθετική κατανομή και αφετέρου να προσδιοριστούν οι τιμές του εντροπικού δείκτη  $q$  και της παραμέτρου  $\beta_q$ .

#### 5.3.1 Δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου τύπου “CSR”

Στο πείραμα ExpUM-05 δοκίμιο μαρμάρου γεωμετρίας “CSR”, υποβλήθηκε σε αντιδιαμετρική θλίψη. Για το πείραμα θα παρουσιαστεί αναλυτικά όλη η διαδικασία από την αρχική παράθεση των χτύπων ΑΕ μέχρι την παρουσίαση της χρονικής μεταβλητότητας του δείκτη  $q$ . Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζεται η χρονοσειρά των χτύπων ΑΕ με συνολικό αριθμό χτύπων  $N = 507$ , η οποία καταγράφηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Το Σχήμα 5.8(a) δείχνει τη χρονική καταγραφή των πλατών των χτύπων ΑΕ. Στο ίδιο γράφημα, απεικονίζεται η χρονική εξέλιξη του κανονικοποιημένου μηχανικού φορτίου  $\ell$ . Τα μεγέθη απεικονίζονται σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$  («χρόνος έως τη θραύση» - “time to failure”). Επιλέγεται η χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ , προκειμένου να καταστεί πιο ευδιάκριτη η χρονική κατανομή των πλατών των χτύπων ΑΕ, ειδικά κατά τα τελευταία δευτερόλεπτα του πρωτόκολλου φόρτισης. Η θραύση του δοκιμίου έλαβε χώρα τη χρονική στιγμή  $t_f = 486s$ , περίπου, ενώ ο πρώτος χτύπος ΑΕ καταγράφηκε για  $t = 162s$  ή ισοδύναμα για  $(t_f - t) \approx 324s$  όταν το εφαρμοζόμενο φορτίο είχε προσεγγίσει μία τιμή

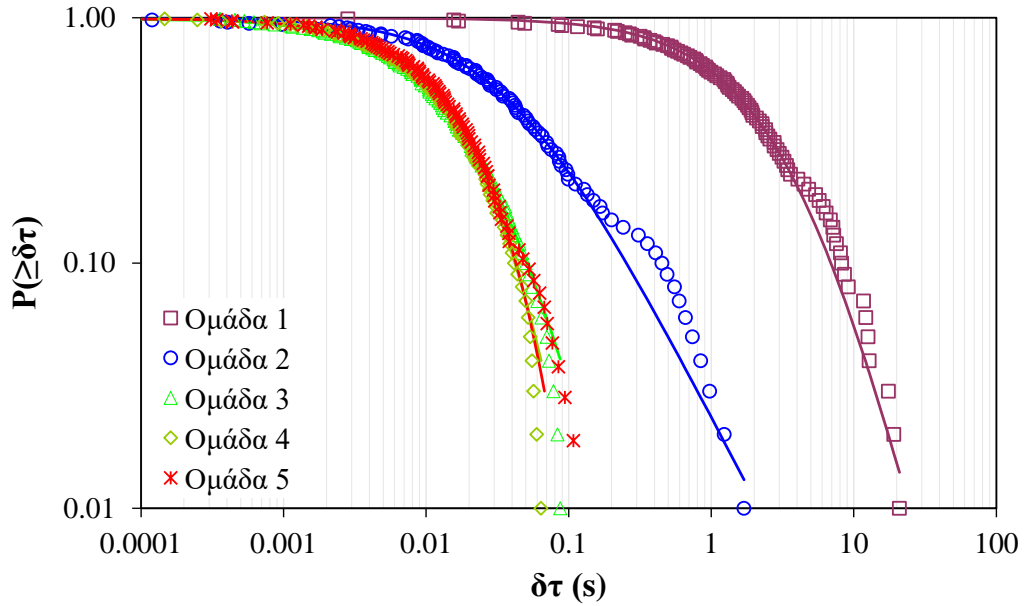


**Σχήμα 5.8** Η κατανομή (a) των πλατών των χτύπων ΑΕ και (b) των ΑΕ interevent times για το πείραμα ExpUM-05 με παράλληλη απεικόνιση του εφαρμοζόμενου μηχανικό φορτίου  $\ell$  σε χρονική κλίμακα ( $t_f - t$ ). Κάθε χρώμα υποδηλώνει τις διαφορετικές ομάδες χτύπων ΑΕ που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των αντίστοιχων interevent times.

$L = 80.5N$  που αντιστοιχεί, περίπου, σε τιμή κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell = L/L_{\max} = 30\%$ .

Κατά την διάρκεια της ομάδας 2, το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο μεγιστοποιείται προσεγγίζοντας την τιμή  $L_{\max} = 267N$ , περίπου, τη χρονική στιγμή  $t = 473s$  ή ισοδύναμα για  $(t_f - t) = 13s$ . Από εκείνη τη στιγμή και μέχρι τη λήξη του πρωτόκολλου φόρτισης το φορτίο μειώνεται συνεχώς. Λαμβάνοντας υπόψη ότι μέχρι την θραύση του δοκιμίου καταγράφηκαν  $N = 507$  χτύποι ΑΕ (δηλαδή, 506 interevent times), οι χτύποι ΑΕ χωρίστηκαν σε  $k = 5$  ομάδες με  $n = 100$  interevent times. Σημειώνεται ότι η τελευταία ομάδα χτύπων ΑΕ περιλαμβάνει 105 interevent times. Η κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ στο Σχήμα 5.8(a) απεικονίζεται με διαφορετικό χρώμα. Επίσης, στο Σχήμα 5.8(b) φαίνεται η κατανομή των interevent times σε συνδυασμό με το κανονικοποιημένο μηχανικό φορτίο  $\ell$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ , χρησιμοποιώντας αντίστοιχους χρωματισμούς με εκείνους του Σχήματος 5.8(a).



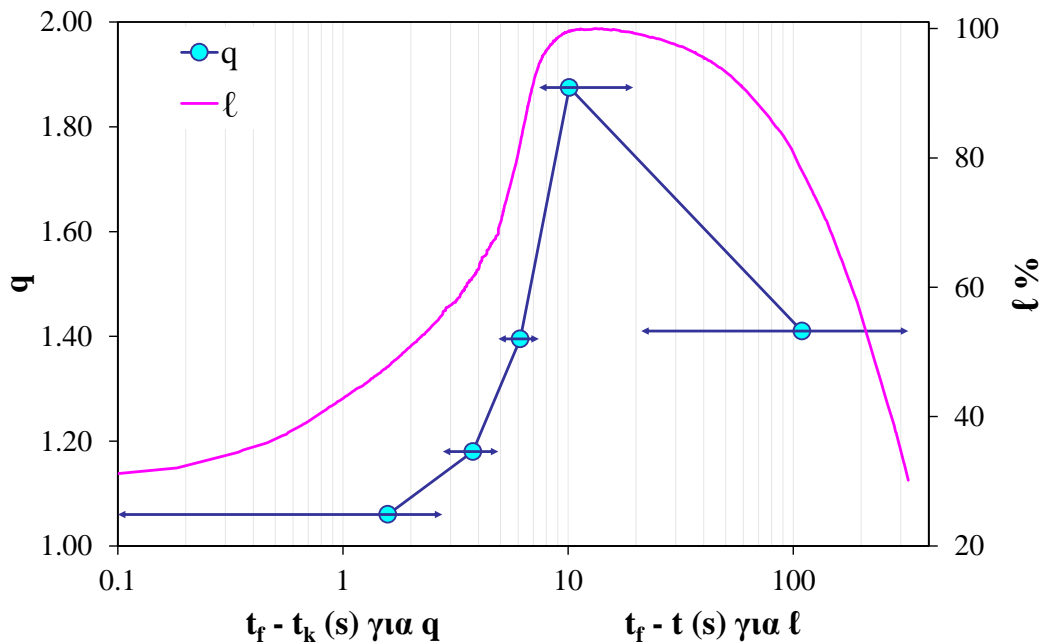


**Σχήμα 5.9** Οι SFs των interevent times για κάθε ομάδα χτύπων AE (χρωματιστοί δείκτες) για το πείραμα ExprUM-05, με παράλληλη απεικόνιση των αντίστοιχων  $q$ -εκθετικών συναρτήσεων προσαρμογής (χρωματιστές καμπύλες).

Στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζονται σε λογαριθμικούς άξονες, οι SFs  $[P(> \delta\tau)]$  για τις  $k = 5$  ομάδες των interevent times του πειράματος και το αντίστοιχο fitting με βάση την Εξίσωση (5.1). Προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα λόγω των αποκλίσεων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και του μοντέλου προσαρμογής, δεν περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς των εντροπικών δεικτών  $q$  και των παραμέτρων  $\beta_q$  και  $\tau_q$ , οι μεγάλοι χρόνοι  $\delta\tau$  που αντιστοιχούν στις ουρές των SFs (τα όρια  $\delta\tau_{\max}$  που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 5.2). Το Σχήμα 5.10, παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη των εντροπικών δεικτών  $q$  των  $k = 5$  ομάδων. Ως χρονική κλίμακα χρησιμοποιείται η ποσότητα  $(t_f - t_k)$ , όπου η τιμή  $t_k$  αντιστοιχεί στη μέση τιμή των χρόνων  $t_i$  που εκδηλώθηκαν οι χτύποι AE κάθε ομάδας. Σημειώνεται ότι στις τιμές του δείκτη  $q$  δείχνονται μέσω οριζοντίων γραμμών σφάλματος τα χρονικά όρια που αντιστοιχούν στα interevent times τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του.

**Πίνακας 5.2** Οι εντροπικοί δείκτες  $q$  και οι παράμετροι προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q = 1/\beta_q$ , που υπολογίστηκαν για το πείραμα ExprUM-05. Στην τελευταία στήλη αναγράφεται και το  $\delta\tau_{\max}$  που χρησιμοποιήθηκε στην προσαρμογή με βάση την Εξίσωση (5.1).

Ομάδα χτύπων AE	$(t_f - t_k)$ (s)	$q$	$\beta_q$ ( $s^{-1}$ )	$\tau_q$ (s)	$\delta\tau_{\max}$ (s)
1	109.27	1.41	0.555	1.8190	20.9076
2	10.12	1.88	29.26	0.0342	1.6974
3	6.12	1.40	74.00	0.0135	0.0871
4	3.77	1.18	68.11	0.0147	0.0640
5	1.58	1.06	57.78	0.0173	0.1535



**Σχήμα 5.10** Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExpUM-05 σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ .

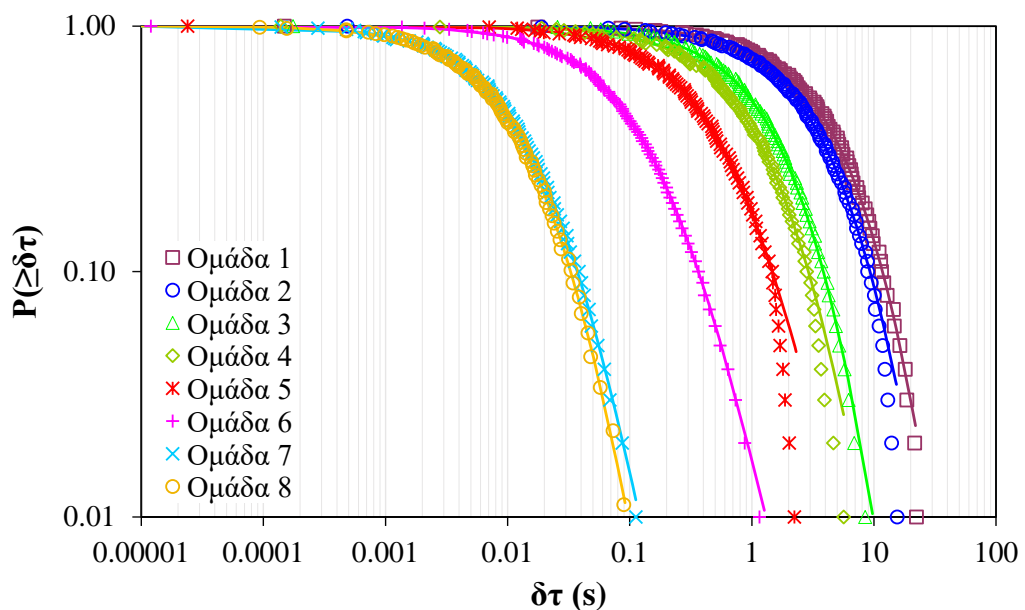
Στο ίδιο διάγραμμα έχει απεικονιστεί και το κανονικοποιημένο μηχανικό φορτίο  $l$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ . Κατά τη διάρκεια της ομάδας 1, η οποία αντιστοιχεί σε τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  από 30% έως 99%, ο εντροπικός δείκτης  $q$  ισούται, περίπου, με 1.41 (το σφάλμα είναι μικρότερο του 0.01). Στην συνέχεια, ο δείκτης  $q$  εμφανίζει μία γρήγορη προοδευτική αύξηση, που συντελείται παράλληλα με την αύξηση του κανονικοποιημένου μηχανικού φορτίου  $l$  και κορυφώνεται μόλις προσεγγίσει μια μέγιστη τιμή, περίπου, ίση με 1.88 (ομάδα 2). Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  κυμαίνονται από 99% έως 95%. Κατά τη διάρκεια των τριών τελευταίων ομάδων (ομάδες 3 έως 5), οι οποίες αντιστοιχούν στα τελευταία στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης, ο εντροπικός δείκτης  $q$  παρουσιάζει μία συνεχή μείωση φθάνοντας μέχρι τη χαμηλότερη τιμή του, που είναι 1.06 (ομάδα 5). Η συνεχής μείωση του δείκτη  $q$  αντιστοιχεί σε τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  από 80% έως 45%. Ο Πίνακας 5.2 παρουσιάζει τους εντροπικούς δείκτες  $q$  μαζί με τις αντίστοιχες παραμέτρους προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q$  οι οποίες έχουν υπολογιστεί μέσω της Εξίσωσης (5.1) για κάθε μία από τις  $k = 5$  ομάδες χτύπων ΑΕ.

Η αύξηση του εντροπικού δείκτη  $q$  που παρατηρείται στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ των ομάδων 1 και 2, είναι ενδεικτική της σταδιακής μετάβασης των προϋπαρχουσών μικρορωγμών εντός του δοκιμίου, από μια μη-οργανωμένη κατάσταση με χαμηλή αλληλεπίδραση μεταξύ τους (αρχικά στάδια φόρτισης), σε μία περισσότερο οργανωμένη κατάσταση με υψηλό βαθμό αλληλεπίδρασης (μεγιστοποίηση του φορτίου). Κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων φόρτισης (ομάδα 1), οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές που βρίσκονται τυχαία τοποθετημένες εντός του δοκιμίου, διεγείρονται μέσω της επιβολής του μηχανικού φορτίου. Αυτό έχει ως συνεπακόλουθο την ενεργοποίηση των μηχανισμών σχηματισμού και διάδοσης των μικρορωγμών. Οι διεγερμένες πλέον μικρορωγμές αλληλεπιδρούν με τις γειτονικές τους, δημιουργώντας ένα πρώιμο δίκτυο

μικρορωγμών με χαμηλή αλληλεπίδραση. Η συνεχής αύξηση του εντροπικού δείκτη  $q$ , δείχνει πως αυτό το πρώιμο δίκτυο μικρορωγμών, οργανώνεται ολοένα και περισσότερο με την συνεχή επιβολή φορτίου ενώ παράλληλα εξαπλώνεται εντός του δοκιμίου αυξάνοντας τον συνολικό όγκο που καταλαμβάνει. Μέχρι τη μεγιστοποίηση του φορτίου, το δίκτυο των μικρορωγμών έχει επεκταθεί στο σύνολο του όγκου του δοκιμίου, και οι μικρορωγμές αρχίζουν να συσσωματώνονται σταδιακά σε μακρορωγμές. Όταν οι διαστάσεις του νεοσχηματιζόμενου δικτύου μακρορωγμών καταστούν συγκρίσιμες με τις διαστάσεις του δοκιμίου, επέρχεται η θραύση. Στην περίπτωση του πειράματος ExpUM-05 η θραύση συνέβη τη χρονική στιγμή  $t_f = 486s$ . Κατά τη διάρκεια των ομάδων 3 έως 5, η συνεχής μείωση του εντροπικού δείκτη  $q$ , δείχνει ότι το δίκτυο των μακρορωγμών έχει κυριαρχήσει εντός του δοκιμίου, δημιουργώντας επιμέρους υποσυστήματα τα οποία, αφενός έχουν ήδη λάβει το μέγιστο επιτρεπόμενο βαθμό οργάνωσης, αφετέρου δεν αλληλεπιδρούν πλέον μεταξύ τους λόγω της θραύσης του δοκιμίου. Πρέπει να σημειωθεί ότι τα παραπάνω είναι σε συμφωνία με τα συμπεράσματα από την ανάλυση στο φυσικό χρόνο που φαίνονται στο Σχήμα 5.4.

### 5.3.2 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή

Στο πείραμα ExpBM-01 πρισματικό δοκίμιο μαρμάρου με εγκοπή στην μέση υποβλήθηκε σε κάμψη τριών σημείων. Κατά τη διάρκεια του πειράματος καταγράφηκαν συνολικά  $N = 789$  χτύποι ΑΕ (δηλαδή, 788 interevent times) και σχηματίστηκαν  $k = 8$  ομάδες χτύπων ΑΕ με  $n = 100$  interevent times με την τελευταία ομάδα χτύπων ΑΕ να περιλαμβάνει 87 interevent times. Κατά συνέπεια υπολογίζονται οκτώ (8) εντροπικοί δείκτες  $q$  καθένας από τους οποίους, αντιστοιχεί σε διαφορετικό στάδιο του πρωτόκολλου φόρτισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέγιστη τιμή του εφαρμοζόμενου φορτίου ήταν, περίπου,  $577N$  και τη χρονική στιγμή  $t_f$  της θραύσης το κανονικοποιημένο φορτίο  $\ell$  φαίνεται να μειώνεται ελαφρώς, λαμβάνοντας την τιμή 94%, περίπου. Στο Σχήμα 5.11, φαίνονται σε λογαριθμικούς άξονες οι SFs  $[P(>\delta\tau)]$  για τις  $k = 8$  ομάδες των interevent times του πειράματος και το αντίστοιχο fitting με βάση την Εξίσωση (5.1).



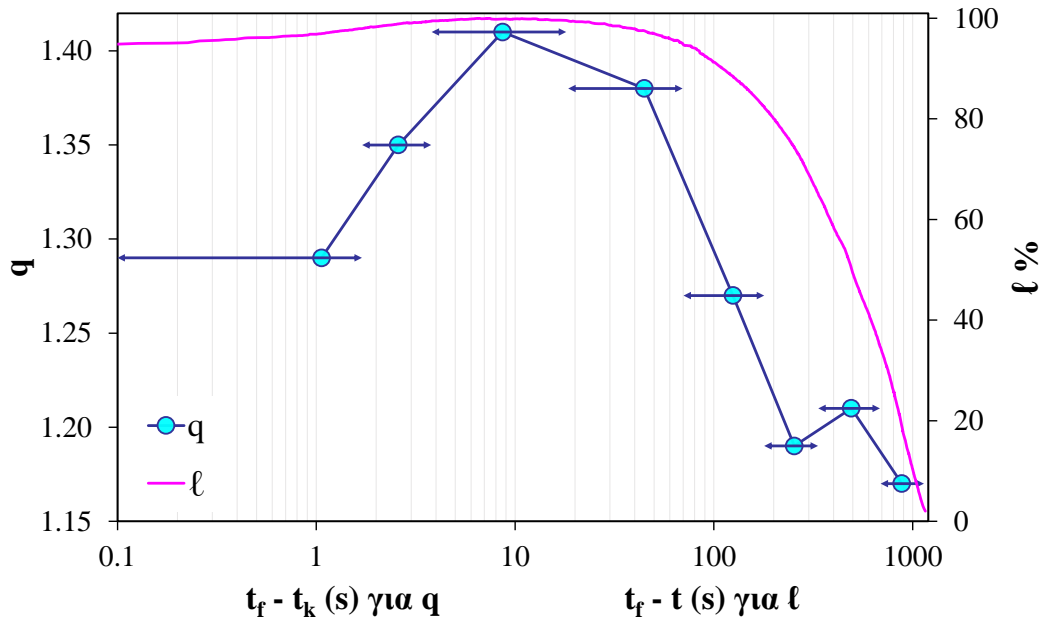
Σχήμα 5.11 Οι SFs των interevent times για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ (χρωματιστοί δείκτες) για το πείραμα ExpBM-01, με παράλληλη απεικόνιση των αντίστοιχων  $q$ -εκθετικών συναρτήσεων προσαρμογής (χρωματιστές καμπύλες).

**Πίνακας 5.3** Οι εντροπικοί δείκτες  $q$  και οι παράμετροι προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q=1/\beta_q$ , που υπολογίστηκαν για το πείραμα ExpBM-01. Στην τελευταία στήλη αναγράφεται και το  $\delta\tau_{\max}$  που χρησιμοποιήθηκε στην προσαρμογή με βάση την Εξίσωση (5.1).

Ομάδα χτύπων ΑΕ	$(t_f - t_k)$ (s)	$q$	$\beta_q$ ( $s^{-1}$ )	$\tau_q$ (s)	$\delta\tau_{\max}$ (s)
1	881.12	1.17	0.24	4.253	21.841
2	490.93	1.21	0.32	3.174	15.257
3	253.75	1.19	0.75	1.342	9.720
4	124.65	1.27	1.10	0.913	5.642
5	44.70	1.38	2.50	0.401	2.307
6	8.65	1.41	10.50	0.095	1.264
7	2.59	1.35	94.90	0.011	0.112
8	1.06	1.29	100.10	0.010	0.092

Αναφορικά με τους μεγάλους χρόνους  $\delta\tau$  των SFs του Σχήματος 5.11, ειδικά των ομάδων 2 έως 5, είναι προφανές ότι τα πειραματικά δεδομένα αποκλίνουν από τα αντίστοιχα δεδομένα των μοντέλων προσαρμογής. Αυτό το φαινόμενο ενδεχομένως να οφείλεται στον βαθμό ελευθερίας των επιλεγμένων υποσυστημάτων και τους περιορισμούς του προτεινόμενου μοντέλου προσαρμογής. Ως εκ τούτου, με σκοπό την αποφυγή πιθανών σφαλμάτων κατά τους υπολογισμούς των εντροπικών δεικτών  $q$  και των παραμέτρων  $\beta_q$  και  $\tau_q$ , αποκλείονται οι περιοχές των ουρών των SFs και λαμβάνονται υπόψη μόνο τα δεδομένα που βρίσκονται στις αρχικές και κεντρικές περιοχές των SFs (τα όρια  $\delta\tau_{\max}$  που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 5.3). Το Σχήμα 5.12, παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη των εντροπικών δεικτών  $q$  των  $k=8$  ομάδων. Ως χρονική κλίμακα χρησιμοποιείται η ποσότητα  $(t_f - t_k)$ .

Στις τιμές του δείκτη  $q$  δείχνονται και χρονικά όρια που αντιστοιχούν στα interevent times τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του. Στο ίδιο διάγραμμα έχει απεικονιστεί και το κανονικοποιημένο μηχανικό φορτίο  $\ell$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ . Κατά την διάρκεια των ομάδων 1 έως 3, οι οποίες αναφέρονται στα αρχικά στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης, ο εντροπικός δείκτης  $q$  κυμαίνεται σε χαμηλές τιμές από 1.17 έως 1.21. Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  κυμαίνονται από 20% έως 75%. Στην συνέχεια μεταξύ των ομάδων 4 έως 6, για τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  από 88% έως 99%, ο δείκτης  $q$  αυξάνεται προοδευτικά, παράλληλα με τη συνεχόμενη αύξηση του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$ , προσεγγίζοντας μια μέγιστη τιμή περίπου ίση με 1.41 (ομάδα 6). Στις δύο τελευταίες ομάδες χτύπων ΑΕ (ομάδες 7 και 8) οι οποίες αντιστοιχούν στα τελευταία στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης όπου το κανονικοποιημένο φορτίο  $\ell$  παραμένει περίπου ίσο με 95%, ο εντροπικός δείκτης  $q$  εμφανίζει μια ελαφριά πτώση υποχωρώντας στην χαμηλότερη τιμή του, που είναι 1.29 (ομάδα 8). Ο Πίνακας 5.3 παρουσιάζει τους εντροπικούς δείκτες  $q$  μαζί με τις αντίστοιχες παραμέτρους προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q$  οι οποίες έχουν υπολογιστεί μέσω της Εξίσωσης (5.1) για κάθε μία από τις  $k=8$  ομάδες χτύπων ΑΕ. Η παρατηρούμενη συμπεριφορά του δείκτη  $q$  εμφανίζει ομαλότερες μεταβάσεις από τις χαμηλότερες στις υψηλότερες τιμές του, ήτοι οι μικρορωγμές εντός του δοκιμίου μεταπίπτουν από τις λιγότερο στις περισσότερο οργανωμένες καταστάσεις, ομαλότερα σε σύγκριση με την αντίστοιχη συμπεριφορά του δείκτη  $q$  του πειράματος ExpUM-05 της §5.3.1.

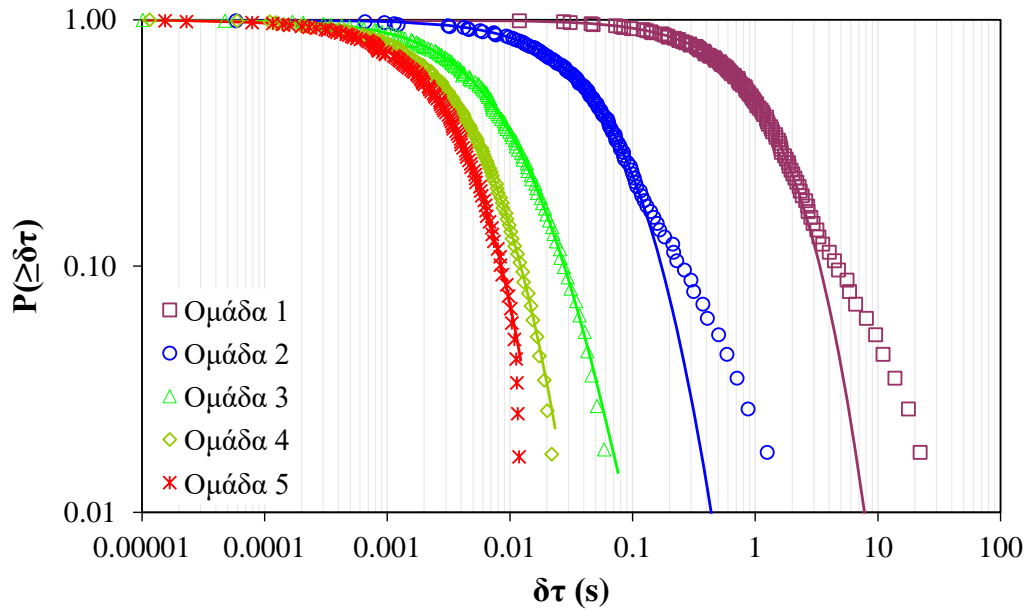


Σχήμα 5.12 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExprBM-01 σε χρονική κλίμακα ( $t_f - t_k$ ), με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  σε χρονική κλίμακα ( $t_f - t$ ).

Ο εγκλωβισμός του δείκτη  $q$  στα αρχικά στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης (ομάδες 1 έως 3), σε τιμές κοντά στο 1.20 και για τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  έως 75%, καταδεικνύει πως για χαμηλές τιμές φορτίου οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές εντός του δοκιμίου, αφενός βρίσκονται σε μια μη-οργανωμένη κατάσταση με χαμηλό βαθμό αλληλεπίδρασης με τις γειτονικές τους και αφετέρου πως, ακόμα δεν έχουν διεγερθεί αρκετά ώστε να ενεργοποιηθούν οι μηχανισμοί γέννησης και διάδοσης των μικρορωγμών. Καθώς το δοκίμιο υποβάλλεται σε υψηλότερες τιμές φορτίου (ομάδες 4 έως 5) κοντά στην περιοχή θραύσης του για τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  άνω του 90%, το δίκτυο των μικρορωγμών εντός του δοκιμίου εμφανίζει μεγαλύτερο βαθμό οργάνωσης, γεγονός που μαρτυρείται από την συνεχόμενη αύξηση του δείκτη  $q$  και λαμβάνει τον μέγιστο βαθμό οργάνωσής του όταν ο δείκτης  $q$  μεγιστοποιείται (ομάδα 6). Κατά την διάρκεια των ομάδων 7 και 8, το δίκτυο των μικρορωγμών έχει μετατραπεί σε ένα δίκτυο μακρορωγμών με συγκρίσιμες διαστάσεις με αυτές του δοκιμίου. Η μείωση της τιμής του δείκτη  $q$  δείχνει πως η διαδικασία αυτή (δηλ. η συσσωμάτωση των μικρορωγμών σε μακρορωγμές) χαρακτηρίζεται από χαμηλή οργάνωση και πως τα επιμέρους υποσυστήματα που έχουν δημιουργηθεί έχουν χαμηλό βαθμό αλληλεπίδρασης.

### 5.3.3 Δοκιμές άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή τύπου “DENT”

Κατά τη διάρκεια του πειράματος άμεσου εφελκυσμού ExprDM-04, σε δοκίμιο μαρμάρου γεωμετρίας “DENT” καταγράφηκαν συνολικά  $N = 574$  χτύποι ΑΕ (δηλαδή, 573 interevent times) και οι οποίοι χωρίστηκαν σε  $k = 5$  ομάδες χτύπων ΑΕ με  $n = 100$  interevent times με την τελευταία ομάδα χτύπων ΑΕ να περιλαμβάνει 572 interevent times. Στο Σχήμα 5.13, φαίνονται σε λογαριθμικούς άξονες οι SFs  $[P(> \delta\tau)]$  για τις  $k = 5$  ομάδες των interevent times του πειράματος και το αντίστοιχο fitting με βάση την Εξίσωση (5.1). Στους υπολογισμούς των εντροπικών δεικτών  $q$  και των παραμέτρων προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q$  χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που βρίσκονται στις αρχικές και κεντρικές περιοχές των SFs, προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα λόγω των αποκλίσεων μεταξύ των

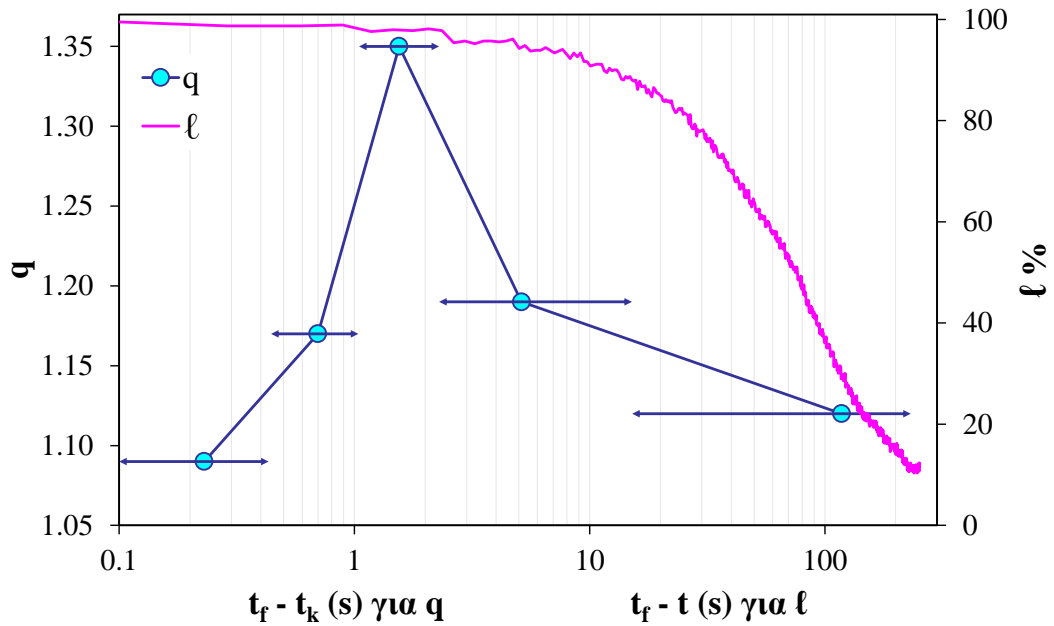


**Σχήμα 5.13** Οι SFs των interevent times για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ (χρωματιστοί δείκτες) για το πείραμα ExprDM-04, με παράλληλη απεικόνιση των αντίστοιχων  $q$ -εκθετικών συναρτήσεων προσαρμογής (χρωματιστές καμπύλες).

πειραματικών δεδομένων και του μοντέλου προσαρμογής στις ουρές των SFs. Οι οριακές τιμές  $\delta\tau_{\max}$  που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στον Πίνακα 5.4. Η απόκλιση των μεγάλων χρόνων  $\delta\tau$  στις ουρές των SFs που παρατηρείται από το αντίστοιχο fitting, ειδικότερα στις ομάδες 1 και 2 (βλ. Σχήμα 5.11), θα μπορούσε να αποδοθεί σε κάποιες πρώιμες καταγραφές χτύπων ΑΕ που συντελέστηκαν κατά τα αρχικά στάδια φόρτισης. Το Σχήμα 5.14, παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη των εντροπικών δεικτών  $q$  των  $k = 5$  ομάδων. Ως χρονική κλίμακα χρησιμοποιείται η ποσότητα  $(t_f - t_k)$ . Σημειώνεται ότι στις τιμές του δείκτη  $q$  δείχνονται και χρονικά όρια που αντιστοιχούν στα interevent times τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του. Στο ίδιο διάγραμμα έχει απεικονιστεί και το κανονικοποιημένο μηχανικό φορτίο  $\ell$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ . Στα αρχικά στάδια του πρωτοκόλλου φόρτισης τα οποία αντιστοιχούν στην ομάδα 1, ο εντροπικός δείκτης  $q$  εκκινεί από την τιμή 1.12, η οποία αντιστοιχεί σε ένα εύρος τιμών κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  από, 10% έως 80%.

**Πίνακας 5.4** Οι εντροπικοί δείκτες  $q$  και οι παράμετροι προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q = 1/\beta_q$ , που υπολογίστηκαν για το πείραμα ExprDM-04. Στην τελευταία στήλη αναγράφεται και το  $\delta\tau_{\max}$  που χρησιμοποιήθηκε στην προσαρμογή με βάση την Εξίσωση (5.1).

Ομάδα χτύπων ΑΕ	$(t_f - t_k)$ (s)	$q$	$\beta_q$ ( $s^{-1}$ )	$\tau_q$ (s)	$\delta\tau_{\max}$ (s)
1	117.8	1.12	0.79	1.2738	8.050
2	5.13	1.19	16.8	0.0595	0.501
3	1.55	1.35	127.8	0.0078	0.076
4	0.70	1.17	230.2	0.0043	0.023
5	0.23	1.09	300.5	0.0033	0.012



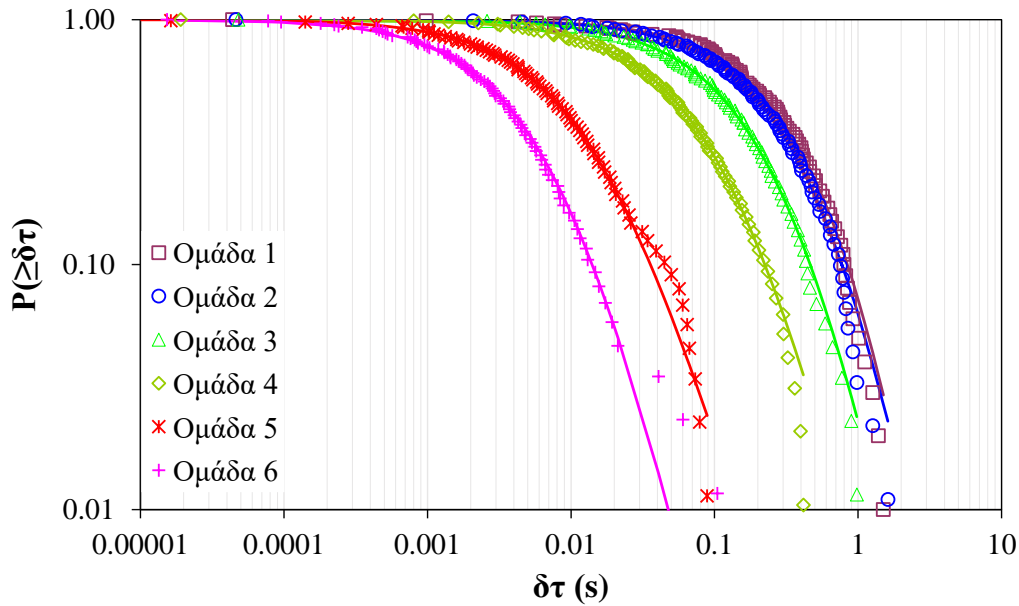
**Σχήμα 5.14** Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExprDM-04 σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ .

Στη συνέχεια μεταξύ των ομάδων 2 και 3, ο δείκτης  $q$  εμφανίζει μία απότομη αύξηση που συντελείται παράλληλα με την αύξηση του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$ , προσεγγίζοντας μια μέγιστη τιμή που είναι περίπου ίση με 1.35 (ομάδα 3). Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  κυμαίνονται από 90% έως 97%. Στα τελευταία στάδια του πρωτοκόλλου φόρτισης (ομάδες 4 και 5) το δοκίμιο έχει εισέλθει στην περιοχή θραύσης, με τον δείκτη  $q$  να μειώνεται συνεχώς φθάνοντας μέχρι τη χαμηλότερη τιμή του, που είναι, περίπου, ίση με 1.09 (ομάδα 5). Η συνεχής μείωση του δείκτη  $q$  αντιστοιχεί για τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  κοντά στο 99%. Ο Πίνακας 5.4 παρουσιάζει τους εντροπικούς δείκτες  $q$  μαζί με τις αντίστοιχες παραμέτρους προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q$  οι οποίες έχουν υπολογιστεί μέσω της Εξίσωσης (5.1) για κάθε μία από τις  $k = 5$  ομάδες χτύπων ΑΕ.

Το μάρμαρο είναι ένα ψαθυρό υλικό με χαμηλή εφελκυστική αντοχή, ειδικότερα σε δοκίμια τύπου “DENT” η παρουσία δύο εγκοπών, εκατέρωθεν της περιοχής που αναμένεται να εμφανιστεί η καταστρεπτική μακρορωγμή, οδηγεί στην ταχεία εμφάνιση φαινομένων θραύσης. Η απότομη αύξηση του δείκτη  $q$ , ήδη από τα αρχικά στάδια φόρτισης (ομάδες 1 και 2) μέχρι τη μεγιστοποίηση του (ομάδα 3) είναι ενδεικτική της ταχύτητας με την οποία οργανώνεται το δίκτυο των μικρορωγμών και λαμβάνει τον μέγιστο βαθμό οργάνωσής του, λίγο πριν τη θραύση του δοκιμίου. Η εξίσου απότομη υποχώρηση του δείκτη  $q$  (ομάδες 4 και 5) στην ελάχιστη τιμή του ενισχύουν την ανωτέρω διαπίστωση. Η τιμή 1.09 που λαμβάνει ο δείκτης  $q$  στην ομάδα 5, υποδηλώνει πως εντός του συστήματος κυριαρχεί η προσθετικότητα, επηρεάζοντας την συνολική του εντροπία η οποία προσεγγίζει την εντροπία Boltzmann-Gibbs.

### 5.3.4 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια κονιάματος τσιμέντου

Το πείραμα κάμψης τριών σημείων ExprBC-09, αφορούσε πρισματικό δοκίμιο κονιάματος τσιμέντου. Ο συνολικός αριθμός των καταγεγραμμένων χτύπων ΑΕ ανέρχεται σε  $N = 549$



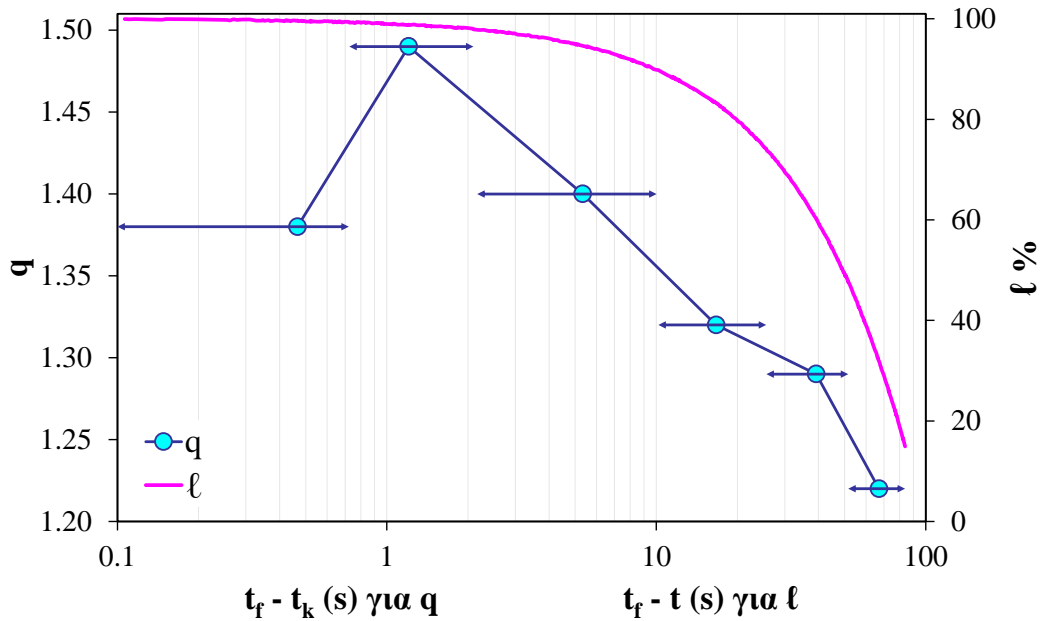
**Σχήμα 5.15** Οι SFs των interevent times για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ (χρωματιστοί δείκτες) για το πείραμα ExpBC-09, με παράλληλη απεικόνιση των αντίστοιχων  $q$ -εκθετικών συναρτήσεων προσαρμογής (χρωματιστές καμπύλες).

(δηλαδή, 548 interevent times) και σχηματίστηκαν  $k = 6$  ομάδες χτύπων ΑΕ με  $n = 100$  interevent times με την τελευταία ομάδα χτύπων ΑΕ να περιλαμβάνει 47 interevent times. Στο Σχήμα 5.15, φαίνονται σε λογαριθμικούς άξονες οι SFs  $[P(> \delta\tau)]$  για τις  $k = 6$  ομάδες των interevent times του πειράματος και το αντίστοιχο fitting με βάση την Εξίσωση (5.1). Προκειμένου να αποφευχθεί πιθανό σφάλμα, οι υπολογισμοί του εντροπικού δείκτη  $q$  και των παραμέτρων προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q$  δεν συμπεριελάμβαναν πειραματικά δεδομένα που εντοπίζονται στην περιοχή της ουράς των SFs λόγω των μεγάλων αποκλίσεων μεταξύ των μεγάλων χρόνων  $\delta\tau$  και του μοντέλου προσαρμογής (βλ. Πίνακα 5.5 για τις τιμές των  $\delta\tau_{\max}$ ). Το Σχήμα 5.16, παρουσιάζει τη χρονική εξέλιξη των εντροπικών δεικτών  $q$  των  $k = 6$  ομάδων. Ως χρονική κλίμακα χρησιμοποιείται η ποσότητα  $(t_f - t_k)$ . Σημειώνεται ότι στις τιμές του δείκτη  $q$ , δείχνονται και χρονικά όρια που αντιστοιχούν στα interevent times τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του. Στο ίδιο διάγραμμα έχει απεικονιστεί και το κανονικοποιημένο μηχανικό φορτίο  $\ell$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ . Ο εντροπικός δείκτης  $q$  κατά τη διάρκεια της ομάδας 1, η οποία

**Πίνακας 5.5** Οι εντροπικοί δείκτες  $q$  και οι παράμετροι προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q = 1/\beta_q$ , που υπολογίστηκαν για το πείραμα ExpBC-09. Στην τελευταία στήλη αναγράφεται και το  $\delta\tau_{\max}$  που χρησιμοποιήθηκε στην προσαρμογή με βάση την Εξίσωση (5.1).

Ομάδα χτύπων ΑΕ	$(t_f - t_k)$ (s)	$q$	$\beta_q$ ( $s^{-1}$ )	$\tau_q$ (s)	$\delta\tau_{\max}$ (s)
1	67.07	1.22	3.56	0.2813	1.499
2	39.22	1.29	4.25	0.2355	1.613
3	16.68	1.32	7.34	0.1363	0.980
4	5.33	1.40	16.86	0.0593	0.416
5	1.20	1.49	119.4	0.0084	0.089
6	0.47	1.38	262.4	0.0038	0.105





Σχήμα 5.16 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExprBC-09 σε χρονική κλίμακα ( $t_f - t_k$ ), με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  σε χρονική κλίμακα ( $t_f - t$ ).

συμπίπτει με τα αρχικά στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης, ξεκινά από την τιμή 1.22, για τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  από, περίπου, 15% έως 40%. Στην συνέχεια μεταξύ των ομάδων 2 έως 5, για τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $l$  από, περίπου, 45% έως 99%, ο δείκτης  $q$  εμφανίζει μια προοδευτική αύξηση, παράλληλα, με τη συνεχόμενη αύξηση του κανονικοποιημένου φορτίου  $l$ , προσεγγίζοντας μια μέγιστη τιμή ίση με 1.49 (ομάδα 5). Κατά την τελευταία ομάδα χτύπων ΑΕ (ομάδα 6), εντός της οποίας το δοκίμιο έχει εισέλθει στην περιοχή θραύσης, με το κανονικοποιημένο φορτίο  $l$  να υπερβαίνει το 99%, ο, ο δείκτης  $q$  φαίνεται να υποχωρεί στην τιμή 1.38. Ο Πίνακας 5.5 παρουσιάζει τους εντροπικούς δείκτες  $q$  μαζί με τις αντίστοιχες παραμέτρους προσαρμογής  $\beta_q$  και  $\tau_q$  οι οποίες έχουν υπολογιστεί μέσω της Εξίσωσης (5.1) για κάθε μία από τις  $k = 5$  ομάδες χτύπων ΑΕ.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο δείκτης  $q$ , για το δοκίμιο κονιάματος τσιμέντου του πειράματος ExprBC-09, προσεγγίζει ομαλότερα τη μέγιστη τιμή του, σε σύγκριση με τα δοκίμια μαρμάρου που περιεγράφηκαν σε προηγούμενες παραγράφους. Η ομαλή μετάβαση του δείκτη  $q$ , είναι ενδεικτική της αργής οργάνωσης των διεργασιών ολίσθησης των ορίων των κόκκων του κονιάματος τσιμέντου, οι οποίες αποτελούν τις πρωταρχικές πηγές χτύπων.

### 5.3.5 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Τα Σχήματα 5.10, 5.12, 5.14 και 5.16 δείχνουν την χρονική εξέλιξη των εντροπικών δεικτών  $q$  που υπολογίστηκαν για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του κανονικοποιημένου μηχανικού φορτίου  $l$  για σε όλες τις περιπτώσεις των υπό μελέτη πειραμάτων. Τα αποτελέσματα έως τώρα, αναδεικνύουν μια συστηματική συμπεριφορά του εντροπικού δείκτη  $q$  σε σχέση με το κανονικοποιημένο φορτίο  $l$ . Συγκεκριμένα ο δείκτης  $q$ , αυξάνεται παράλληλα με το κανονικοποιημένο φορτίο  $l$ , μέχρι αυτό να προσεγγίσει το 90% της συνολικής αντοχής των δοκιμίων, όπου και μεγιστοποιείται. Μόλις το φορτίο  $l$  υπερβεί το 95% της συνολικής αντοχής των δοκιμίων και τα δοκίμια των εξεταζόμενων

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

πειραμάτων εισέλθουν στην περιοχή θραύσης ο δείκτης  $q$  μειώνεται. Σημειώνεται ότι η μέγιστη τιμή που υπολογίστηκε για τον εντροπικό δείκτη  $q$  κυμαίνεται εντός των ορίων 1.35 έως 1.49, με εξαίρεση το πείραμα ExprUM-05, όπου η μέγιστη τιμή του εντροπικού δείκτη  $q$  ισούται με περίπου 1.88. Οι χαμηλές τιμές του εντροπικού δείκτη  $q$  στα αρχικά στάδια των πρωτόκολλων φόρτισης, μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι τα δοκίμια είναι ανέπαφα πριν την εφαρμογή οποιασδήποτε μηχανικής καταπόνησης. Δηλαδή, οι προϋπάρχουσες ατέλειες εντός των δοκιμίων δεν αναπτύσσονται και δεν αλληλεπιδρούν με τις γειτονικές τους. Έτσι, οι προϋπάρχουσες ατέλειες απομονώνονται στις αρχικές τυχαίες θέσεις τους χωρίς να εξαπλώνονται εντός του όγκου του υλικού, δείχνοντας υψηλή οργάνωση και χαμηλό βαθμό αλληλεπίδρασης. Η συνεχής αύξηση του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  μέχρι λίγο πριν την περιοχή θραύσης ( $\ell < 90\%$ ) ενεργοποιεί τις πηγές ΑΕ, οι οποίες προκαλούν την έναρξη των διαδικασιών δημιουργίας, διάδοσης και ανάπτυξης των μικρορωγμών εντός των δοκιμίων. Το προϋπάρχον δίκτυο μικρορωγμών αρχίζει να αυξάνεται ακόμη περισσότερο, καλύπτοντας ολοένα και μεγαλύτερο μέρος του όγκου εντός του δοκιμίου. Το δίκτυο των μικρορωγμών λαμβάνει το μέγιστο βαθμό οργάνωσής έως τώρα, εξού και η κορύφωση του εντροπικού δείκτη  $q$  και η υπο-προσθετικότητα αρχίζει να κυβερνά το σύστημα, επηρεάζοντας έντονα τη συνολική του εντροπία. Όταν το φορτίο προσεγγίσει καταστρεπτικά επίπεδα και το δοκίμιο εισέλθει στην περιοχή θραύσης ( $\ell \geq 90\%$ ), οι μικρορωγμές που κυριαρχούν εντός του δοκιμίου συνενώνονται σε μακρορωγμές, με αποτέλεσμα οι διαστάσεις του νεοσχηματιζόμενου δικτύου μακρορωγμών να καθίστανται συγκρίσιμες με τις διαστάσεις του δοκιμίου και να επέρχεται η θραύση του. Η διαδικασία συσσωμάτωσης των μικρορωγμών σε μακρορωγμές είναι ενδεικτική της αυτοοργάνωσης που χαρακτηρίζει το σύστημα πριν από τη θραύση, εξού και η μείωση του εντροπικού δείκτη  $q$ .

Ιδιαίτερη αναφορά πρέπει να γίνει σχετικά με την εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  που παρατηρήθηκε στα πειράματα ExprUM-05 και ExprDM-04 όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.10 και 5.14, αντίστοιχα. Σε αμφότερα τα πειράματα παρατηρείται μια ταχεία κορύφωση του εντροπικού δείκτη  $q$  που ακολουθείται από μια σταδιακή υποχώρηση στην ελάχιστη τιμή του. Σε αντίθεση με τα άλλα δύο πειράματα (ExprBM-01 και ExprBC-09) όπως φαίνεται στα Σχήματα 5.12 και 5.16, αντίστοιχα, όπου ο εντροπικός δείκτης  $q$  δείχνει μια ομαλότερη μετάβαση στη μέγιστη τιμή του, συνοδευόμενη από μία εξίσου ομαλή μείωση στην ελάχιστη τιμή του, αφού προσεγγιστεί η μέγιστη τιμή του φορτίου. Όπως αναφέρθηκε, ο εντροπικός δείκτης  $q$  δείχνει τον βαθμό οργάνωσης στην ανάπτυξη, την εξάπλωση και τον σταδιακό σχηματισμό μικρορωγμών σε μακρορωγμές. Η σχεδόν στιγμιαία ανάπτυξη της μακρορωγμής στα δοκίμια ExprUM-05 και ExprDM-04, σε αντίθεση με τα δοκίμια ExprBM-01 και ExprBC-09, μεταφράζεται στη παρατηρούμενη απότομη μεγιστοποίηση του εντροπικού δείκτη  $q$  και συνεπακόλουθη υποχώρηση σε χαμηλότερες τιμές όπως φαίνεται και στα Σχήματα 5.10 και 5.14, αντίστοιχα.

#### **5.4 Συσχέτιση της μεταβλητότητας του εντροπικού δείκτη $q$ με την ακουστική δραστηριότητα**

Ένας δείκτης παρακολούθησης της ακουστικής δραστηριότητας σε μια διαδικασία θραύσης αποτελεί η αποτύπωση του ρυθμού εμφάνισης των χτύπων ΑΕ (hits per sec). Πρόσφατα προκειμένου να υπάρξει μια πιο ευδιάκριτη παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας, αξιοποιώντας τα interevent times μεταξύ δυο διαδοχικών χτύπων ΑΕ, προτάθηκε μια εναλλακτική τεχνική, η οποία βασίζεται στη συνάρτηση  $F$  [24]. Ο υπολογισμός της συνάρτησης  $F$  γίνεται αξιοποιώντας  $N$  διαδοχικά interevent times. Η επιλογή του αριθμού  $N$  εξαρτάται από το συνολικό πλήθος των χτύπων που καταγράφονται κατά τη διάρκεια του πειράματος. Ως ελάχιστος αριθμός μπορεί να ληφθεί  $N=10$ . Η εκάστοτε τιμή της συνάρτησης  $F$  ορίζεται ως το αντίστροφο της μέσης τιμής των  $N$

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών διαδοχικών interevent times. Κάθε τιμή της συνάρτησης  $F$  συνδυάζεται με τη μέση χρονική στιγμή ( $\tau$ ) των χρονικών στιγμών εκδήλωσης των διαδοχικών χτύπων, που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συγκεκριμένης τιμής της συνάρτησης  $F$ . Γενικά κατά τη διάρκεια της εκδήλωσης του  $k$  χτύπου (χρονική στιγμή  $t_k$ ) η τιμή της  $F$  θα υπολογιστεί ως το αντίστροφο της μέσης τιμής των  $\{\delta t_k, \delta t_{k-1}, \dots, \delta t_{k-N+1}\}$  interevent times. Άρα:

$$F = \frac{\left[ \sum_{i=k-N+1}^k (\delta t_i) \right]^{-1}}{N} \quad (5.2)$$

και χρονικά αντιστοιχεί σε μια τιμή  $\tau$  που είναι η μέση τιμή των χρόνων  $\{t_k, t_{k-1}, \dots, t_{k-N+1}\}$ , αφού χρησιμοποιούνται  $N+1$  διαδοχικούς χτύπους για τον υπολογισμό των  $N$  διαδοχικών interevent times. Δηλαδή:

$$\tau = \frac{\sum_{i=k-N}^k t_i}{N} \quad (5.3)$$

Σε αντίθεση με τον παραδοσιακό τρόπο απεικόνισης της ακουστικής δραστηριότητας μέσω του «αριθμού των χτύπων ΑΕ ανά δευτερόλεπτο» (“number of hits per second”), η χρονική απεικόνιση της συνάρτησης  $F$  πλεονεκτεί γιατί αναδεικνύει με μεγαλύτερη ευκρίνεια την μεταβλητότητα της ακουστικής δραστηριότητας ιδιαίτερα στα τελευταία στάδια λίγο την θραύση. Επειδή συνήθως το μεγαλύτερο ποσοστό της ακουστικής δραστηριότητας εκδηλώνεται στα τελευταία δευτερόλεπτα πριν την θραύση, η χρονική απεικόνιση της συνάρτησης  $F$  γίνεται συνήθως σε κλίμακα  $(t_f - \tau)$ , όπου  $t_f$  η χρονική στιγμή της θραύσης του δοκιμίου («χρόνος έως τη θραύση» - “time to failure”). Στη συνέχεια παρατίθενται διαγράμματα όπου θα εξετάζεται σε χρονική κλίμακα  $(t_f - \tau)$  η εξέλιξη των τιμών του εντροπικού δείκτη  $q$  και της συνάρτησης  $F$ .

#### 5.4.1 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια κονιάματος τσιμέντου

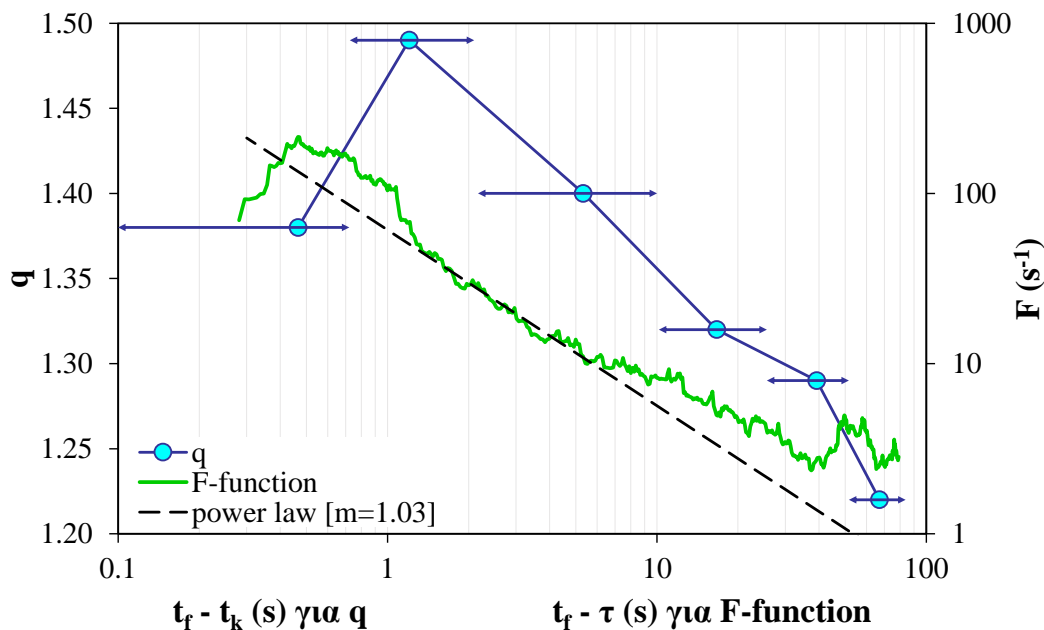
Στην περίπτωση του πειράματος ExpBC-09, πρισματικό δοκίμιο κονιάματος τσιμέντου υποβλήθηκε σε κάμψη τριών σημείων. Οι τιμές της συνάρτησης  $F$  υπολογίστηκαν για  $N = 30$  διαδοχικά interevent times και χρονικά αντιστοιχήθηκαν με την χρονική παράμετρο  $\tau$ . Η χρονική εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  σε κλίμακα  $(t_f - \tau)$ , παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.17 με παράλληλη απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης του εντροπικού δείκτη  $q$  σε κλίμακα  $(t_f - t_k)$  μέχρι την θραύση του δοκιμίου. Σημειώνεται ότι στις τιμές του δείκτη  $q$  δείχνονται και τα χρονικά όρια που αντιστοιχούν στα interevent times τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του. Στα τελευταία δευτερόλεπτα και ενώ αναμένεται η θραύση του δοκιμίου η συνάρτηση  $F$  παρουσιάζει μια κορύφωση και στη συνέχεια ακολουθείται από μια ελαφρά μείωση. Αυτή η συμπεριφορά που είναι συνήθης, μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι λίγο πριν την θραύση καταγράφονται κατά πλειοψηφία χτύποι ΑΕ μεγάλου πλάτους και ενέργειας και κατά συνέπεια μεγάλης διάρκειας. Λόγω της μεγάλης διάρκειας των χτύπων τα interevent times, θα παρουσιάζουν αυξημένες τιμές με επακόλουθο την μείωση της συνάρτησης  $F$  [24, 175]. Ένα άλλο αξιοσημείωτο γεγονός είναι ότι η συνάρτηση  $F$  στα τελευταία δευτερόλεπτα πριν την θραύση ακολουθεί έναν νόμο δύναμης της μορφής:

$$F = A \cdot (t_f - \tau)^{-m} \quad (5.4)$$

όπου  $A$  είναι μία σταθερή ποσότητα με τον εκθέτη  $m$  να λαμβάνει συνήθως τιμές πλησίον της μονάδας [24, 175]. Γενικά ο εκθέτης  $m$  χαρακτηρίζει το πόσο έντονος είναι ο ρυθμός παραγωγής των χτύπων ΑΕ λίγο πριν την θραύση.

Παρατηρώντας την χρονική εξέλιξη της συνάρτησης  $F$ , ο νόμος δύναμης εντοπίζεται στην χρονική περιοχή:  $5.7s < (t_f - \tau) < 1.3s$  με τιμή εκθέτη  $m = 1.03$ . Σε αυτό το χρονικό διάστημα ο εντροπικός δείκτης  $q$ , που εκφράζει τη μη προσθετικότητα μίας διαδικασίας, αποκτά τις μεγαλύτερες τιμές του ( $q > 1.4$ ) με μέγιστη τιμή το 1.88. Δηλαδή η έντονη ακουστική δραστηριότητα που παρατηρείται πριν την θραύση, φαίνεται να σχετίζεται άμεσα με τον υψηλό βαθμό οργάνωσης των μικρορωγμών και την έντονη μεταξύ τους αλληλεπίδραση.

Στην ανωτέρω χρονική περιοχή οι τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι από περίπου 94% έως 99%. Κατά τη διάρκεια του πρωτόκολλου φόρτισης, φαίνεται να κυριαρχούν καλά οργανωμένες διεργασίες που εξελίσσονται κυρίως λόγω ολίσθησης των ορίων των κόκκων του κονιάματος τσιμέντου. Οι χτύποι ΑΕ που καταγράφονται μπορεί να αποδοθούν κυρίως στις ζώνες διασύνδεσης των αδρανών-τσιμέντου. Τέτοιες διεργασίες μπορούν να χαρακτηριστούν ως εξαιρετικά ντετερμινιστικές αφού σχετίζονται με τη γεωμετρία και τη σύνθεση του δοκιμίου σε σχέση με την αναλογία νερού/τσιμέντου/αδρανών κατά την παρασκευή του. Στα πρώιμα στάδια της φόρτισης για  $(t_f - \tau) > 5.7s$  και αντίστοιχες τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  μικρότερες του 94%, οι τιμές του δείκτη  $q$  είναι μικρότερες από 1.40 ενώ στο αρχικό στάδιο φόρτισης ο δείκτης  $q$  έχει τιμή 1.22, προσεγγίζοντας εκθετικής μορφή SF. Δηλαδή στα πρώιμα στάδια της φόρτισης υπάρχει μια τυχαιότητα στην εμφάνιση των μικρορωγμών, χαμηλή οργάνωση χωρίς αλληλεπίδραση. Πρακτικά στο σύστημα κυριαρχεί η προσθετικότητα και η εντροπία προσεγγίζει στην στατιστική Boltzmann-Gibbs.



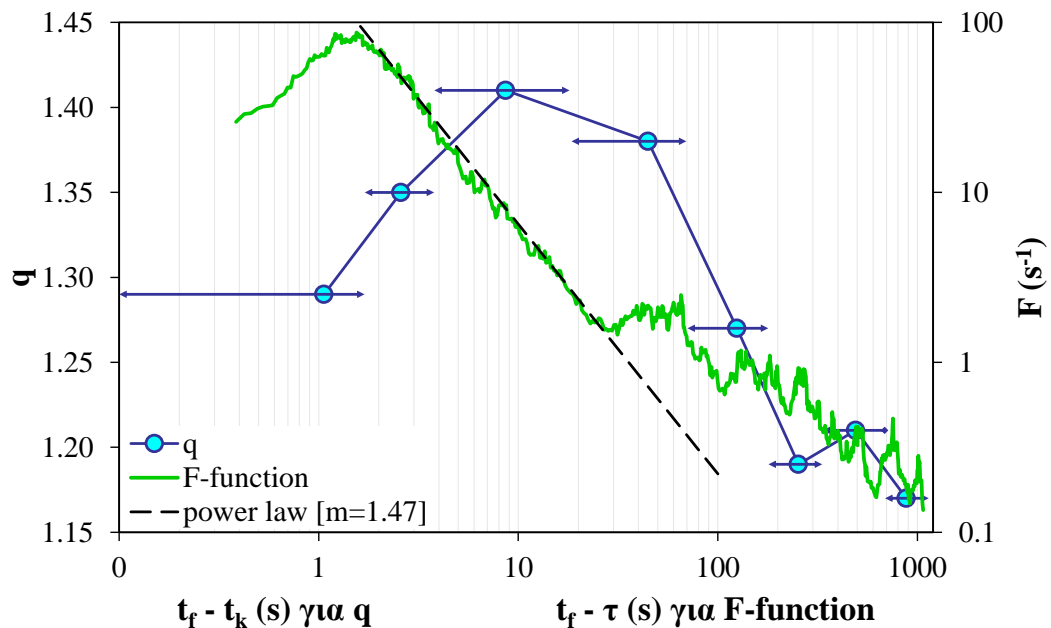
Σχήμα 5.17 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExpBC-09 σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη της συνάρτησης  $F$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - \tau)$ .

Στο τελευταίο στάδιο της φόρτισης που παρατηρείται η κορύφωση της συνάρτησης  $F$  και η περαιτέρω μείωση της για τιμές κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  από 99% έως 100%, και ο δείκτης  $q$  υποχωρεί στην τιμή  $q=1.38$ . Η μείωση του δείκτη  $q$  σηματοδοτεί τον μετασχηματισμό των μικρορωγμών σε μακρορωγμές.

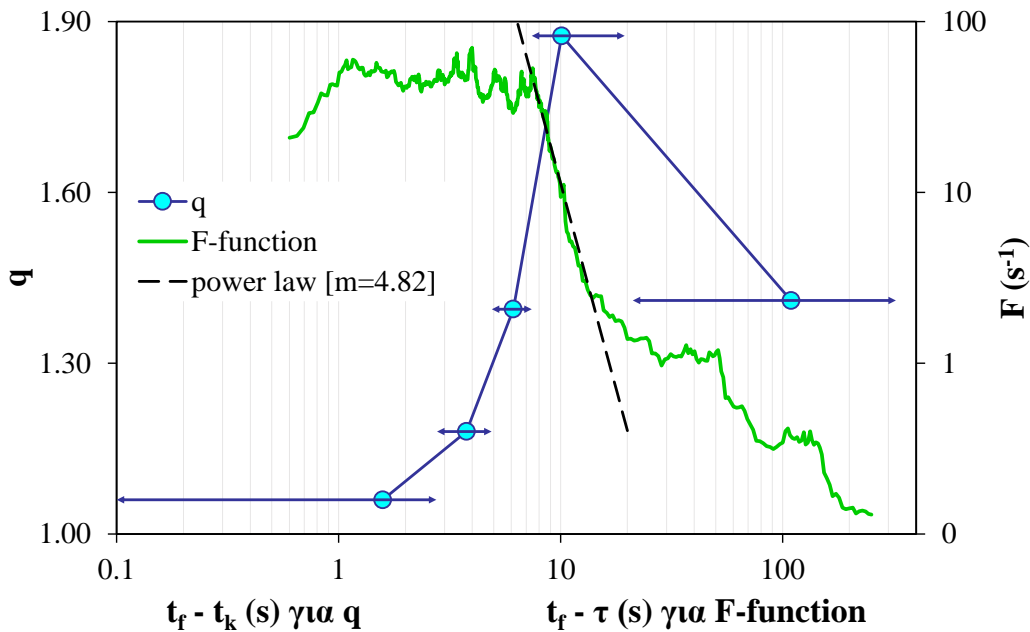
#### 5.4.2 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή

Στο πείραμα ExprBM-01 πρισματικό δοκίμιο μαρμάρου με εγκοπή στην μέση υποβλήθηκε σε κάμψη τριών σημείων. Για τον προσδιορισμό των τιμών της συνάρτησης  $F$  χρησιμοποιήθηκαν  $N = 20$  διαδοχικά interevent times που χρονικά αντιστοιχήθηκαν με την χρονική παράμετρο  $\tau$ . Η χρονική εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  σε κλίμακα  $(t_f - \tau)$ , παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.18 με παράλληλη απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης του εντροπικού δείκτη  $q$  σε κλίμακα  $(t_f - t_k)$  μέχρι την θραύση του δοκιμίου. Στις τιμές του δείκτη  $q$  σημειώνονται και τα χρονικά όρια που αντιστοιχούν στα interevent times τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του. Τα αποτελέσματα στο πείραμα ExprBM-01, δείχνουν μια ανάλογη συμπεριφορά με εκείνα του πειράματος ExprBC-09, παρά τις κάποιες ουσιώδεις διαφοροποιήσεις όσον αφορά το διαφορετικό υλικό, τα γεωμετρικά στοιχεία των δοκιμίων και τον τρόπο φόρτισης. Λόγω του γεγονότος ότι το πρωτόκολλο φόρτισης έγινε επιβάλλοντας σταθερό ρυθμό μετατόπισης 0.01mm/min (βλ. Πίνακα 4.2), η θραύση του δοκιμίου έγινε ενώ το φορτίο είχε λάβει την μέγιστη τιμή του και στη χρονική στιγμή  $t_f$  το κανονικοποιημένο φορτίο  $\ell$  είχε κατέλθει στο 94%.

Η συνάρτηση  $F$  στα τελευταία δευτερόλεπτα πριν τη θραύση του δοκιμίου και συγκεκριμένα στο χρονικό διάστημα  $2s < (t_f - \tau) < 23s$ , ακολουθεί έναν νόμο δύναμης, με τιμή εκθέτη  $m = 1.47$ . Στο ανωτέρω χρονικό διάστημα οι τιμές του  $q$  είναι μεγαλύτερες του 1.35 με μέγιστη τιμή το 1.41 (βλ. Σχήμα 5.18). Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  κυμαίνονται από, περίπου, 88% έως 99%.



Σχήμα 5.18 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExprBM-01 σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη της συνάρτησης  $F$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - \tau)$



Σχήμα 5.19 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExpUM-05 σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη της συνάρτησης  $F$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - \tau)$ .

Σε αυτό το χρονικό διάστημα η έντονη ακουστική δραστηριότητα που καταγράφεται φαίνεται να συνδέεται με διεργασίες του δικτύου των μικρορωγμών, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό οργάνωσης με έντονη μεταξύ τους αλληλεπίδραση.

Ο αρχικός εγκλωβισμός του δείκτη  $q$  σε τιμές γύρω από το 1.20 στα πρώιμα στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης ( $\ell < 75\%$ ), καταδεικνύει πως οι μικρορωγμές εντός του δοκιμίου, βρίσκονται σε τυχαία τοποθετημένες θέσεις με χαμηλό βαθμό αλληλεπίδρασης με τις γειτονικές τους. Στο τελευταίο στάδιο του πρωτόκολλου φόρτισης παρατηρείται η κορύφωση της συνάρτησης  $F$  με παράλληλη μείωση του δείκτη  $q$  στην τιμή 1.29. Αυτό, δείχνει πως η συσσωμάτωση των μικρορωγμών σε μακρορωγμές χαρακτηρίζεται από χαμηλή οργάνωση και πως τα επιμέρους υποσυστήματα που έχουν δημιουργηθεί εμφανίζουν χαμηλό βαθμό αλληλεπίδρασης.

### 5.4.3 Δοκιμές αντιδιαμετρικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου τύπου “CSR”

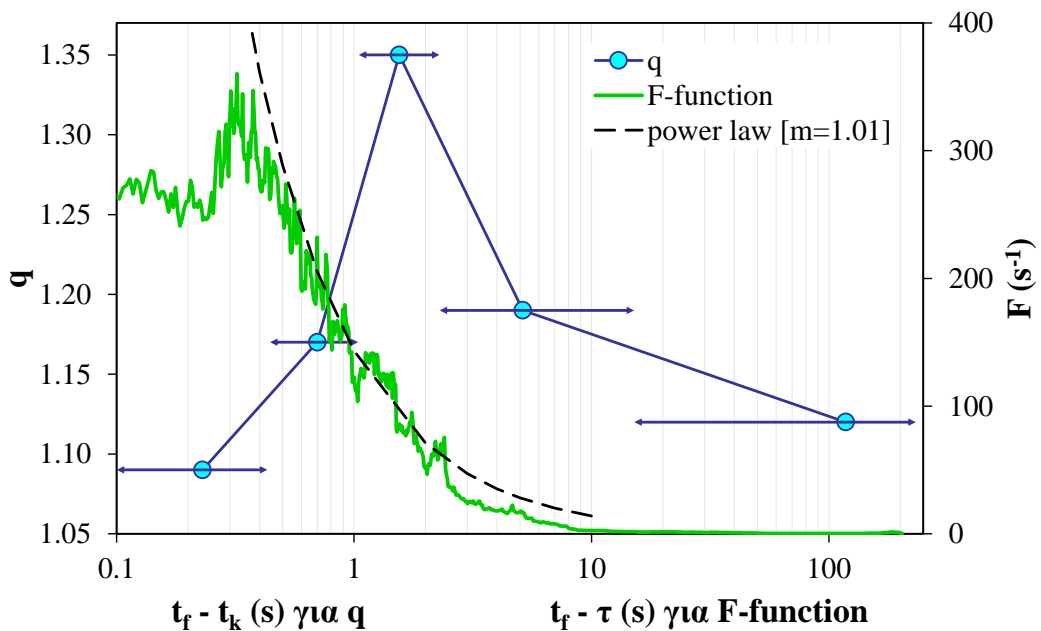
Στο πείραμα ExpUM-05 δοκίμιο μαρμάρου γεωμετρίας “CSR” υποβλήθηκε σε αντιδιαμετρική θλίψη. Ο προσδιορισμός των τιμών της συνάρτησης  $F$  πραγματοποιήθηκε αξιοποιώντας  $N = 20$  διαδοχικά interevent times που χρονικά αντιστοιχήθηκαν με την χρονική παράμετρο  $\tau$ . Η χρονική εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  σε κλίμακα  $(t_f - \tau)$ , παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.19 με παράλληλη απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης του εντροπικού δείκτη  $q$  σε κλίμακα  $(t_f - t_k)$ , μέχρι την θραύση του δοκιμίου. Στις τιμές του δείκτη  $q$  σημειώνονται και τα χρονικά όρια που αντιστοιχούν στα interevent times τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του. Η θραύση του δοκιμίου έλαβε χώρα τη χρονική στιγμή  $t_f = 486s$ . Το κανονικοποιημένο φορτίο  $\ell$  κορυφώθηκε τη χρονική στιγμή  $t = 473s$ , περίπου, ή ισοδύναμα για  $(t_f - t) = 13s$  και έκτοτε μέχρι τη λήξη του πρωτόκολλου φόρτισης μειώνονταν συνεχώς.

Παρατηρώντας τη χρονική εξέλιξη της συνάρτησης  $F$ , ο νόμος δύναμης εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα  $7s < (t_f - \tau) < 14s$ , με τιμή εκθέτη  $m = 4.82$ . Σε αυτό το χρονικό διάστημα, οι τιμές του  $q$  είναι μεγαλύτερες του 1.70 με μέγιστη τιμή την 1.88 (βλ. Σχήμα 5.19). Οι αντίστοιχες τιμές του κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  είναι από, περίπου, 95% έως 99%. Το γεγονός ότι η απότομη αύξηση της ακουστικής δραστηριότητας συμπίπτει χρονικά με την κορύφωση του δείκτη  $q$ , καταδεικνύει ότι σε εκείνο το χρονικό διάστημα οι ακουστικές εκπομπές, σχετίζονται άμεσα με υψηλό βαθμό οργάνωσης του δικτύου των μικρορωγμών και της έντονης μεταξύ τους αλληλεπίδρασης. Στο χρονικό διάστημα  $1s < (t_f - \tau) < 6s$  η συνάρτηση  $F$  παραμένει σε υψηλά επίπεδα, και μόλις στο τελευταίο sec δείχνει μια συστηματική μείωση. Αντίστοιχα ο δείκτης  $q$  μειώνεται συνεχώς, γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στον μικρό βαθμό οργάνωσης του δικτύου των μακρορωγμών εντός του δοκιμίου στα τελευταία στάδια φόρτισης, υποχωρώντας μέχρι την τιμή 1.06.

#### 5.4.4 Δοκιμές άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή τύπου “DENT”

Το πείραμα ExprDM-04 αφορούσε δοκίμιο μαρμάρου γεωμετρίας “DENT” το οποίο υποβλήθηκε σε άμεσο εφελκυσμό. Ο προσδιορισμός των τιμών της συνάρτησης  $F$  πραγματοποιήθηκε με αξιοποίηση  $N = 20$  διαδοχικών interevent times και χρονικά αντιστοιχήθηκαν με την χρονική παράμετρο  $\tau$ . Η χρονική εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  σε κλίμακα  $(t_f - \tau)$ , παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.20 με παράλληλη απεικόνιση της χρονικής εξέλιξης του εντροπικού δείκτη  $q$  σε κλίμακα  $(t_f - t_k)$ . Στις τιμές του δείκτη  $q$  σημειώνονται και τα χρονικά όρια που αντιστοιχούν στα interevent times τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του.

Παρατηρώντας τη χρονική εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  φαίνεται ότι δεν υπάρχει αξιοσημείωτη ακουστική δραστηριότητα μέχρι, περίπου, τη χρονική στιγμή  $(t_f - \tau) = 10s$  ενώ η συνάρτηση  $F$  έχει αρκετά χαμηλές τιμές. Αντίστοιχα ο δείκτης  $q$  δείχνει να αυξάνει υποδηλώνοντας την σταδιακή διέγερση και ανάπτυξη των προϋπαρχουσών μικρορωγμών



Σχήμα 5.20 Η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ του πειράματος ExprDM-04 σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t_k)$ , με παράλληλη της συνάρτησης  $F$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - \tau)$ .

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

και την οργάνωση τους σε ένα ευρύτερο δίκτυο εντός του δοκιμίου. Για  $(t_f - \tau) < 10s$  έχουμε έντονη αύξηση της συνάρτησης  $F$  και στο χρονικό διάστημα  $0.6s < (t_f - \tau) < 2.4s$  ακολουθεί έναν νόμο δύναμης με τιμή εκθέτη  $m = 1.01$ , ενώ ο δείκτης  $q$  αποκτά μια μέγιστη τιμή ίση με 1.35 (βλ. Σχήμα 5.20), όταν ήδη το κανονικοποιημένο φορτίο  $\ell$  έχει φθάσει στο 95%. Στο τελευταίο στάδιο της φόρτισης  $(t_f - \tau) < 1s$  η μείωση του δείκτη  $q$ , είναι εμφανής προσεγγίζοντας την ελάχιστη τιμή του  $q = 1.09$ . Αντίστοιχα η συνάρτηση  $F$  αφού αποκτήσει μέγιστη τιμή ελαττώνεται και σταθεροποιείται σε σχετικά υψηλά επίπεδα.

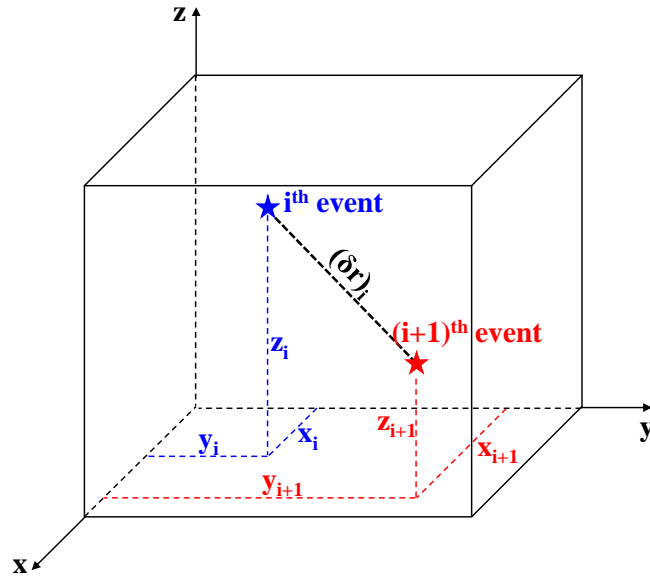
#### 5.4.5 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα έως τώρα, δείχνουν μία συστηματική σχέση μεταξύ του εντροπικού δείκτη  $q$  και της ακουστικής δραστηριότητας εκφρασμένη μέσω της συνάρτησης  $F$  για όλες τις περιπτώσεις των παρουσιαζόμενων πειραμάτων. Στο πλαίσιο της απεικόνισης της συνάρτησης  $F$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - \tau)$  αναδεικνύονται τα ακόλουθα: Στα αρχικά στάδια φόρτισης, η συνάρτηση  $F$  έχει πολύ μικρές τιμές, υποδηλώνοντας χαμηλή ακουστική δραστηριότητα. Στη συνέχεια, οι τιμές της παρουσιάζουν με προοδευτική αύξηση, η οποία στη συνέχεια γίνεται έντονη υπακούοντας έναν νομό δύναμης. Η μέγιστη τιμή της συνάρτησης  $F$  επιτυγχάνεται λίγο πριν και κατά τη θραύση του δοκιμίου. Η έναρξη της απότομης αύξησης της συνάρτησης  $F$  γεγονός που υποδεικνύει ότι το σύστημα προσεγγίζει την περιοχή θραύσης του, παρατηρείται συστηματικά σε όλα τα πρωτόκολλα φόρτισης που μελετώνται. Ο εντροπικός δείκτης  $q$  εμφανίζει μια παρόμοια συμπεριφορά με την συνάρτηση  $F$ . Στα αρχικά στάδια φόρτισης ο δείκτης  $q$  εκκινεί από μία χαμηλή τιμή, υποδηλώνοντας ότι οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές εντός του δοκιμίου δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και βρίσκονται σε μία μη-οργανωμένη κατάσταση. Σημειώνεται, ότι η τιμή εκκίνησης του δείκτη  $q$  εξαρτάται από το υλικό κατασκευής και τις προϋπάρχουσες αστοχίες εντός του δοκιμίου. Στην συνέχεια, ο δείκτης  $q$  αυξάνεται σταδιακά προσεγγίζοντας την μέγιστη τιμή του, γεγονός που δείχνει, ότι οι μικρορωγμές εντός του δοκιμίου έχουν σχηματίσει ένα δίκτυο μικρορωγμών που χαρακτηρίζεται από μεγάλη οργάνωση και έντονες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μικρορωγμών που το αποτελούν. Η κορύφωση του δείκτη  $q$  οποία φαίνεται να συμπίπτει χρονικά με την εμφάνιση του νόμου δύναμης της συνάρτησης  $F$ . Αυτή η παρατήρηση δείχνει πως ο βαθμός οργάνωσης των μηχανισμών γέννησης, ανάπτυξης και διάδοσης του δικτύου των μικρορωγμών εντός των δοκιμίων σχετίζεται άμεσα με τον ρυθμό εμφάνισης της ακουστικής δραστηριότητας. Επιπλέον, γνωρίζοντας ότι η ύπαρξη ενός νόμου δύναμης είναι ενδεικτική της εισόδου των δοκιμίων στην κρισιμότητα και αυτό σε συνδυασμό με την κορύφωση της τιμής του δείκτη  $q$ , ενισχύει την υπόθεση ότι ο δείκτης  $q$  μπορεί να χρησιμεύσει ως δείκτη της επικείμενης θραύσης.

#### 5.5 Συσχέτιση των εντροπικών δεικτών $q_{\delta r}$ και $q_{\delta t}$

Η χρήση πολλών ΑΕ αισθητήρων σε ένα πείραμα καθιστά δυνατό τον εντοπισμό των συντεταγμένων στον χώρο  $(x, y, z)$  κάθε ακουστικού γεγονότος (event). Σε αντιστοιχία με τον προσδιορισμό των interevent times  $\delta t_i$ , μπορούν να υπολογιστούν τα interevent distances, δηλαδή οι Ευκλείδειες αποστάσεις των θέσεων  $\delta r_i$  των πηγών δύο διαδοχικών γεγονότων ΑΕ. Έστω ότι κατά τη διάρκεια ενός πειράματος καταγράφεται μια χρονοσειρά  $e_i$ , με  $N$  το πλήθος γεγονότων ΑΕ ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ) και καθένα από αυτά εκδηλώνεται σε χρόνους  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$ . Υπολογίζονται τα  $(N - 1)$  interevent distances ( $\delta r_i$ ) ως εξής:





Σχήμα 5.21 Ο τρόπος υπολογισμού της απόστασης  $\delta r_i$  για την περίπτωση δύο γεγονότων ΑΕ

$$(\delta r)_i = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad (5.5)$$

όπου  $(x_i, y_i, z_i)$  και  $(x_{i-1}, y_{i-1}, z_{i-1})$  οι συντεταγμένες της πηγής ΑΕ όταν εκδηλώνεται το  $i$  και το  $i-1$  γεγονός ΑΕ αντίστοιχα με  $i=2, 3, \dots, N$ . Ομοίως, υπολογίζονται τα  $(N-1)$  interevent times  $(\delta \tau_i)$  από τη σχέση:

$$\delta \tau_i = t_i - t_{i-1} \quad (5.6)$$

Με σκοπό να διερευνηθεί εάν ικανοποιείται η σχέση  $q_{\delta \tau} + q_{\delta r} \approx 2$ , όπως έχει περιγράψει στην §3.3, αξιοποιήθηκαν τα δεδομένα ΑΕ έξι (6) πειραμάτων. Έτσι, οι χρονοσειρές των γεγονότων ΑΕ που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια των πειραμάτων μετατρέπονται, για την περίπτωση της παραμέτρου  $\delta \tau$ , στην χρονοσειρά των interevent times  $(\delta \tau_i)$ , και για την περίπτωση της παραμέτρου  $\delta r$ , στην χρονοσειρά των interevent distances  $(\delta r_i)$ .

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι SFs των interevent times  $[P(> \delta \tau)]$  και των interevent distances  $[P(> \delta r)]$  και προέκυψε ότι υπακούουν σε μία  $q$ -εκθετική συνάρτηση που δίνεται από τις σχέσεις:

$$P(> \delta \tau) = \exp_{q_{\delta \tau}} \left( -\frac{\delta \tau}{\tau_{\delta \tau}} \right) = \left[ 1 + (q_{\delta \tau} - 1) \frac{1}{\tau_{\delta \tau}} \delta \tau \right]^{1 - q_{\delta \tau}} \quad (5.7)$$

$$P(> \delta r) = \exp_{q_{\delta r}} \left( -\frac{\delta r}{d_{\delta r}} \right) = \left[ 1 + (q_{\delta r} - 1) \frac{1}{d_{\delta r}} \delta r \right]^{1 - q_{\delta r}} \quad (5.8)$$

όπου  $\tau_{\delta \tau}$  είναι μια εντροπική παράμετρος με μονάδες χρόνου, ενώ  $d_{\delta r}$  είναι μια εντροπική παράμετρος με μονάδες απόστασης. Η γραφική απεικόνιση των SFs μέσω των καμπυλών προσαρμογής επιτρέπει αφενός, να διαπιστωθεί εάν επαληθεύεται ότι οι συναρτήσεις  $[P(> \delta \tau)]$  και  $[P(> \delta r)]$  ακολουθούν  $q$ -εκθετική κατανομή και αφετέρου, να

**Πίνακας 5.6** Οι τιμές των εντροπικών δεικτών  $q_{\delta\tau}$ ,  $q_{\delta r}$ , και των αντίστοιχων παραμέτρων  $\tau_{\delta\tau}$ ,  $d_{\delta r}$ , για κάθε πείραμα. Στην τελευταία δεξιά στήλη φαίνεται το άθροισμα των εντροπικών δεικτών. Το σφάλμα στην τελευταία στήλη προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη ότι οι τιμές των  $q$  έχουν σφάλμα 0.01.

Πείραμα	Interevent times		Interevent distances		$q_{\delta\tau} + q_{\delta r}$
	$q_{\delta\tau}$	$\tau_{\delta\tau}$ (s)	$q_{\delta r}$	$d_{\delta r}$ (m)	
ExpUM-06	1.38	5.500	0.63	0.036	$2.01 \pm 0.02$
ExpBM-02	1.35	0.487	0.65	0.022	$2.00 \pm 0.02$
ExpDM-03	1.24	0.122	0.75	0.041	$1.99 \pm 0.02$
ExpBCR-10	1.76	0.050	0.23	0.154	$1.99 \pm 0.02$
ExpBCMF-11	1.76	0.073	0.22	0.106	$1.98 \pm 0.02$
ExpBCPF-12	1.78	0.102	0.25	0.116	$2.03 \pm 0.02$

προσδιοριστούν οι τιμές των εντροπικών δεικτών  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  και των αντίστοιχων παραμέτρων  $\tau_{\delta\tau}$  και  $d_{\delta r}$ . Στον Πίνακα 5.6 συνοψίζονται οι υπολογισμένες τιμές των εντροπικών δεικτών  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$ , μαζί με τις αντίστοιχες εντροπικές παραμέτρους  $\tau_{\delta\tau}$  και  $d_{\delta r}$ , για την περίπτωση κάθε πειράματος. Η τελευταία δεξιά στήλη δείχνει το άθροισμα των εντροπικών δεικτών μαζί με το αντίστοιχο σφάλμα προσδιορισμού.

### 5.5.1 Δοκιμές μονοαξονικής θλίψης σε δοκίμια μαρμάρου

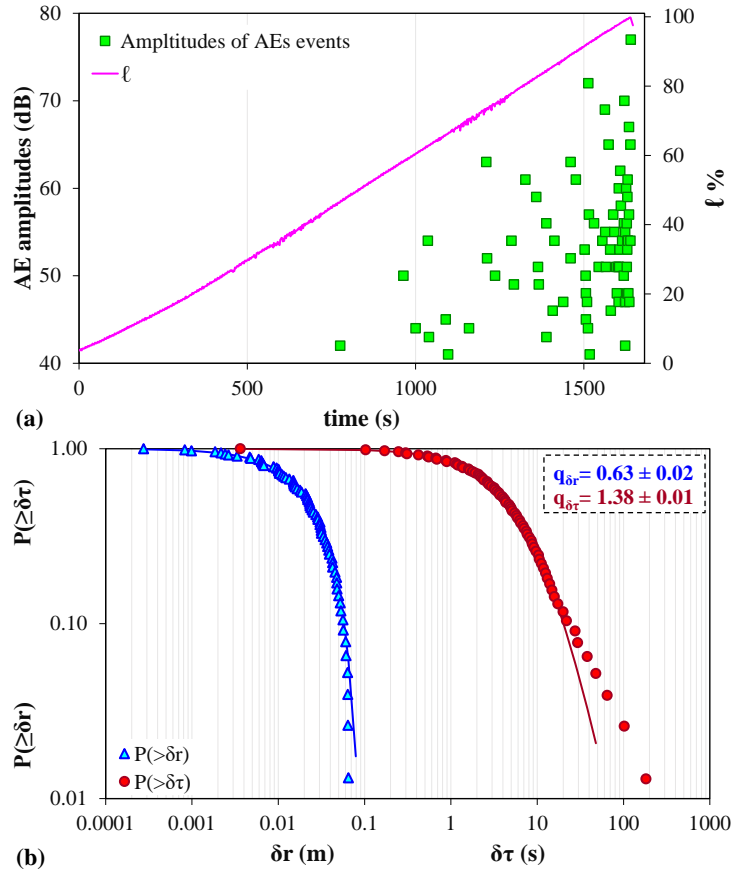
Στο πείραμα ExpUM-06 πρισματικό δοκίμιο μαρμάρου υποβλήθηκε σε μονοαξονική θλίψη. Το Σχήμα 5.22(a) απεικονίζει τη χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου μηχανικού φορτίου  $\ell$  κατά τη διάρκεια αυτού του πειράματος.

Εξετάζοντας τη χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ, φαίνεται πως η συντριπτική πλειοψηφία τους καταγράφηκε στα τελευταία στάδια του πρωτόκολλου φόρτισης για τιμές φορτίου  $\ell$  μεγαλύτερες του 90%. Το πρώτο γεγονός ΑΕ καταγράφεται, περίπου, τη χρονική στιγμή  $t = 780s$  όταν το κανονικοποιημένου φορτίο  $\ell$  είχε προσεγγίσει μία τιμή περίπου ίση με 46%. Πριν από αυτό το χρονικό σημείο δεν καταγράφηκε ακουστική δραστηριότητα. Στο Σχήμα 5.22(b) παρουσιάζονται σε λογαριθμικούς άξονες, οι SFs  $[P(> \delta\tau)]$  και  $[P(> \delta r)]$  για τα γεγονότα ΑΕ του πειράματος και τα αντίστοιχα fitting με βάση τις Εξισώσεις (5.7) και (5.8). Οι τιμές των εντροπικών δεικτών  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  που προσδιορίστηκαν με το αντίστοιχο σφάλμα σημειώνονται εντός του διαγράμματος. Προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα λόγω των αποκλίσεων που εμφανίζονται μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των μοντέλων προσαρμογής, δεν περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς των εντροπικών δεικτών  $q$  και των παραμέτρων  $\tau_{\delta\tau}$  και  $d_{\delta r}$ , οι μεγάλοι χρόνοι  $\delta\tau$  και οι μεγάλες αποστάσεις  $\delta r$  που αντιστοιχούν στις ουρές αμφοτέρων των SFs. Συγκεκριμένα αναλύονται δεδομένα έως  $\delta\tau_{\max} = 47.863 s$  και  $\delta r_{\max} = 0.079 m$ . Τα πειραματικά δεδομένα που δεν συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς των ανωτέρω δεικτών και παραμέτρων, αντιστοιχούν στο 3% των συνολικών δεδομένων των interevent times και στο 2% των συνολικών δεδομένων των interevent distances.

Ο Πίνακας 5.7 δείχνει το ποσοστό των πειραματικών δεδομένων για όλες τις περιπτώσεις των παρουσιαζόμενων πειραμάτων, που βρίσκονται στην περιοχή των ουρών και των δύο

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

SFs και ως εκ τούτου δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς των εντροπικών δεικτών  $q$  και των παραμέτρων  $\tau_{\delta\tau}$  και  $d_{\delta r}$ .



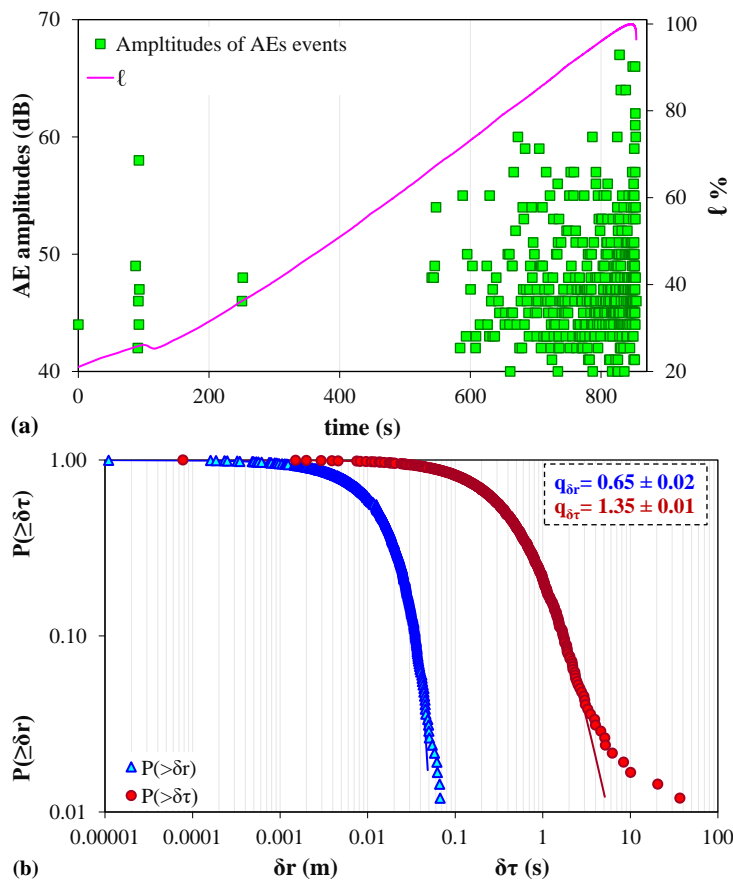
Σχήμα 5.22 (a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  για το πείραμα ExpUM-06. (b) Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  και οι αντίστοιχες  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.

Πίνακας 5.7 Το ποσοστό των πειραματικών δεδομένων των SFs των interevent times και των interevent distances που δεν συμπεριλαμβάνονται στο αντίστοιχο fitting.

Πείραμα	Interevent times	Interevent distances
	$P(> \delta\tau)$	$P(> \delta r)$
ExpUM-06	8%	4%
ExpBM-02	3%	2%
ExpDM-03	15%	6%
ExpBCR-10	19%	4%
ExpBCMF-11	7%	6%
ExpBCPF-12	3%	3%

### 5.5.2 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή

Το πείραμα ExpBM-02 αφορούσε πρισματικό δοκίμιο μαρμάρου με εγκοπή στη μέση το οποίο υποβλήθηκε σε κάμψη τριών σημείων. Το Σχήμα 5.23(a) απεικονίζει τη χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων AE με παράλληλη απεικόνιση του κανονικοποιημένου μηχανικού φορτίου  $\ell$  κατά τη διάρκεια αυτού του πειράματος. Εξετάζοντας την συμπεριφορά των γεγονότων AE, φαίνεται πως η πλειοψηφία τους καταγράφηκε για χρόνο μεγαλύτερο των 550s, περίπου, και για τιμές φορτίου  $\ell$  μεγαλύτερες του 65%. Πριν από αυτό το χρονικό σημείο καταγράφηκε μια πρώιμη ακουστική δραστηριότητα που εκτείνεται στο χρονικό διάστημα  $0 \leq t < 250s$  και για τιμές φορτίου  $\ell$  από 20% έως 35%. Στο Σχήμα 5.23(b) παρουσιάζονται σε λογαριθμικούς άξονες, οι SFs  $[P(> \delta\tau)]$  και  $[P(> \delta r)]$  για τα γεγονότα AE του πειράματος και τα αντίστοιχα fitting με βάση τις Εξισώσεις (5.7) και (5.8). Οι τιμές των εντροπικών δεικτών  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  που προσδιορίστηκαν με το αντίστοιχο σφάλμα σημειώνονται εντός του διαγράμματος. Εστιάζοντας στους μεγάλους χρόνους  $\delta\tau$  και στις μεγάλες αποστάσεις  $\delta r$  του Σχήματος 5.23(b) για τις περιπτώσεις αμφοτέρων των SFs, καθίσταται σαφές ότι τα πειραματικά δεδομένα που εντοπίζονται στις περιοχές των ουρών αποκλίνουν από το αντίστοιχο fitting. Αυτό το γεγονός μπορεί να αποδοθεί σε πρώιμες διαδικασίες σχηματισμού μικρορωγμών κατά τα αρχικά στάδια φόρτισης όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.23(a) στο οποίο παρατηρείται μία πρώιμη ακουστική δραστηριότητα για χρόνο  $t \leq 250s$ . Σημειώνεται ότι τα πειραματικά δεδομένα που βρίσκονται στις ουρές των δύο SFs ανέρχονται στο 8% των συνολικών δεδομένων των interevent times και στο 4% των

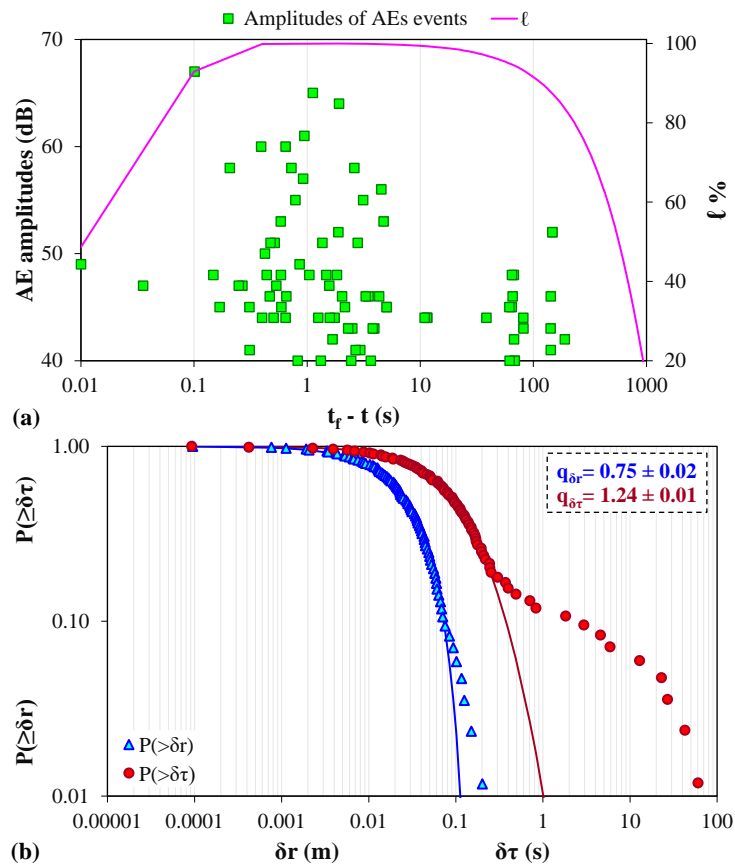


Σχήμα 5.23(a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων AE και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  για το πείραμα ExpBM-02. (b) Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  και οι αντίστοιχες q-εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών συνολικών δεδομένων των interevent distances. Κατόπιν τούτου και προκειμένου να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα κατά τους υπολογισμούς εντροπικών δεικτών  $q$  και των παραμέτρων  $\tau_{\delta r}$  και  $d_{\delta r}$ , λόγω των αποκλίσεων που εμφανίζονται μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των μοντέλων προσαρμογής στις ουρές αμφοτέρων των SFs, χρησιμοποιήθηκαν μόνο όσα πειραματικά δεδομένα βρίσκονται στις αρχικές και μεσαίες περιοχές των SFs, δηλαδή έως  $\delta\tau_{\max} = 5.100 \text{ s}$  και  $\delta r_{\max} = 0.092 \text{ m}$ .

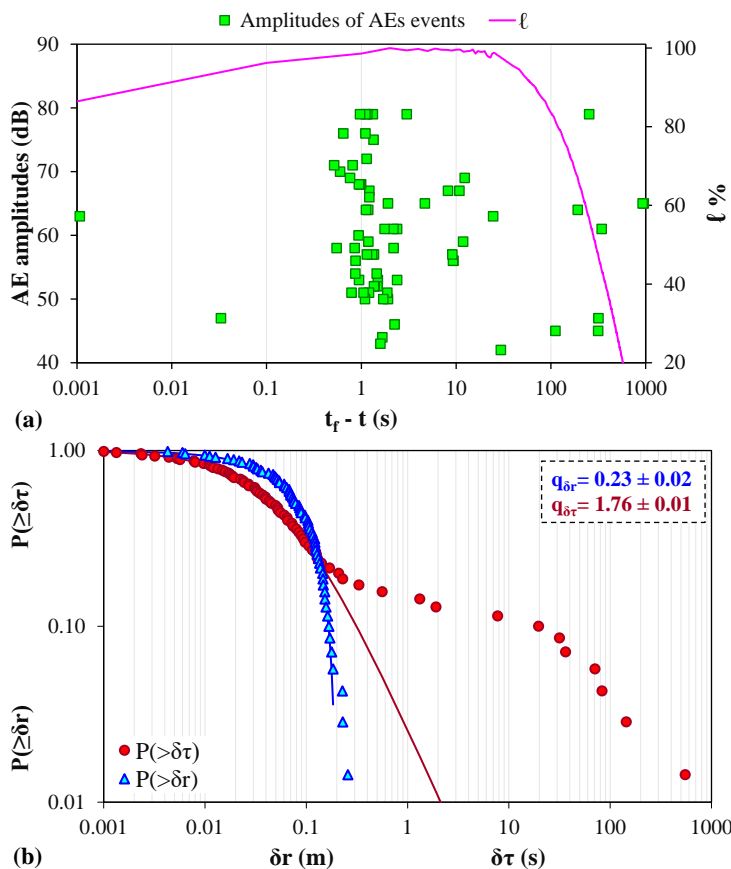
### 5.5.3 Δοκιμές άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμια μαρμάρου με εγκοπή τύπου “DENT”

Το πείραμα ExpDM-03 αφορούσε δοκίμιο μαρμάρου γεωμετρίας “DENT” το οποίο υποβλήθηκε σε άμεσο εφελκυσμό. Το Σχήμα 5.24(a) απεικονίζει τη χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων AE κατά τη διάρκεια αυτού του πειράματος σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ . Στο ίδιο διάγραμμα έχει απεικονιστεί και το κανονικοποιημένο μηχανικό φορτίο  $\ell$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ . Επιλέχθηκε η χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ , διότι παρέχει μεγαλύτερη ευκρίνεια σχετικά με την χρονική κατανομή των πλατών των γεγονότων AE στα τελευταία δευτερόλεπτα του πρωτοκόλλου φόρτισης. Κατά την διεξαγωγή πειραμάτων άμεσου εφελκυσμού σε ψαθυρά υλικά όπως το μάρμαρο, δεν καταγράφεται έντονη ακουστική δραστηριότητα στα αρχικά στάδια του πρωτοκόλλου φόρτισης εκτός κάποιων μεμονωμένων γεγονότων AE. Η συντριπτική πλειοψηφία της ακουστικής δραστηριότητας καταγράφεται στα τελευταία στάδια του πρωτοκόλλου φόρτισης για τιμές φορτίου  $\ell$  μεγαλύτερες του 90%.

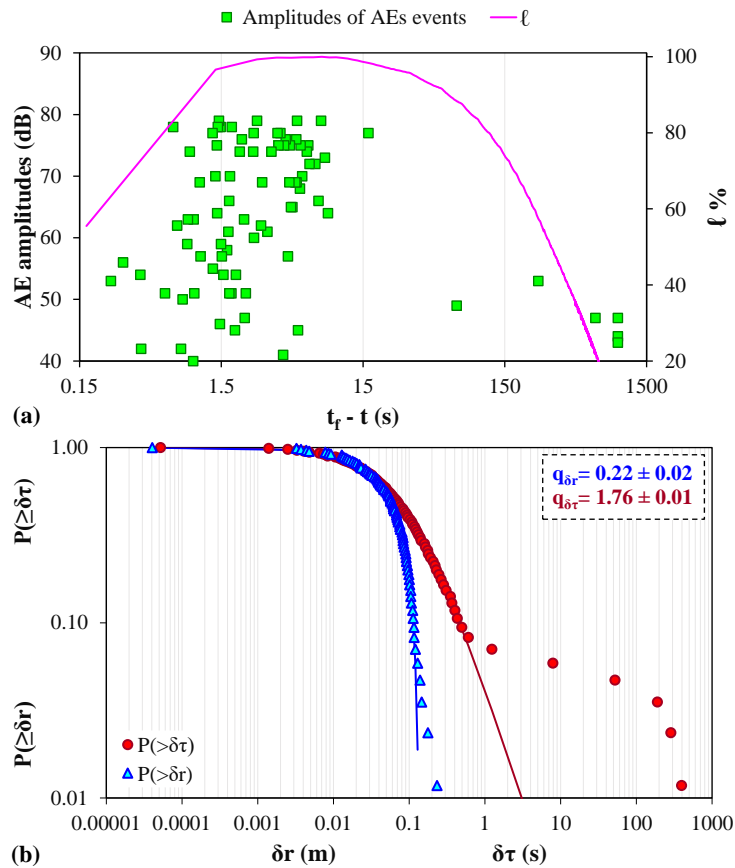


**Σχήμα 5.24 (a)** Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων AE και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  για το πείραμα ExpDM-03. **(b)** Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  και οι αντίστοιχες  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.

Στο Σχήμα 5.24(b) παρουσιάζονται σε λογαριθμικούς άξονες, οι SFs  $[P(> \delta\tau)]$  και  $[P(> \delta r)]$  για τα γεγονότα ΑΕ του πειράματος και τα αντίστοιχα fitting με βάση τις Εξισώσεις (5.7) και (5.8). Οι τιμές των εντροπικών δεικτών  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  που προσδιορίστηκαν με το αντίστοιχο σφάλμα σημειώνονται εντός του διαγράμματος. Προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα λόγω των αποκλίσεων μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των μοντέλων προσαρμογής στις ουρές αμφοτέρων των SFs, οι εντροπικοί δείκτες  $q$  και οι παράμετροι  $\tau_{\delta\tau}$  και  $d_{\delta r}$  υπολογίστηκαν δίχως να συμπεριλαμβάνονται οι μεγάλοι χρόνοι  $\delta\tau$  και οι μεγάλες αποστάσεις  $\delta r$  που εντοπίζονται στις περιοχές των ουρών των SFs. Οι παρατηρούμενες αποκλίσεις των πειραματικών δεδομένων από τις αντίστοιχες καμπύλες προσαρμογής, μπορούν να αποδοθούν στις πρώιμες διαδικασίες σχηματισμού του δικτύου των μικρορωγμών εντός του υλικού στα αρχικά στάδια φόρτισης. Η εμφάνιση των μεγάλων χρόνων  $\delta\tau$ , στα αρχικά στάδια του πρωτοκόλλου φόρτισης φαίνεται να συμφωνεί με την χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ του Σχήματος 5.24(a) όπου παρατηρείται μια πρόωρη έξαρση της ακουστικής δραστηριότητας, περίπου, τη χρονική στιγμή  $(t_f - t) = 100s$ , πριν την εμφάνιση της κύριας ακουστικής δραστηριότητας που εκδηλώνεται για  $(t_f - t) \leq 1s$ .



**Σχήμα 5.25 (a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  για το πείραμα ExpBCR-10. (b) Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  και οι αντίστοιχες  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.**

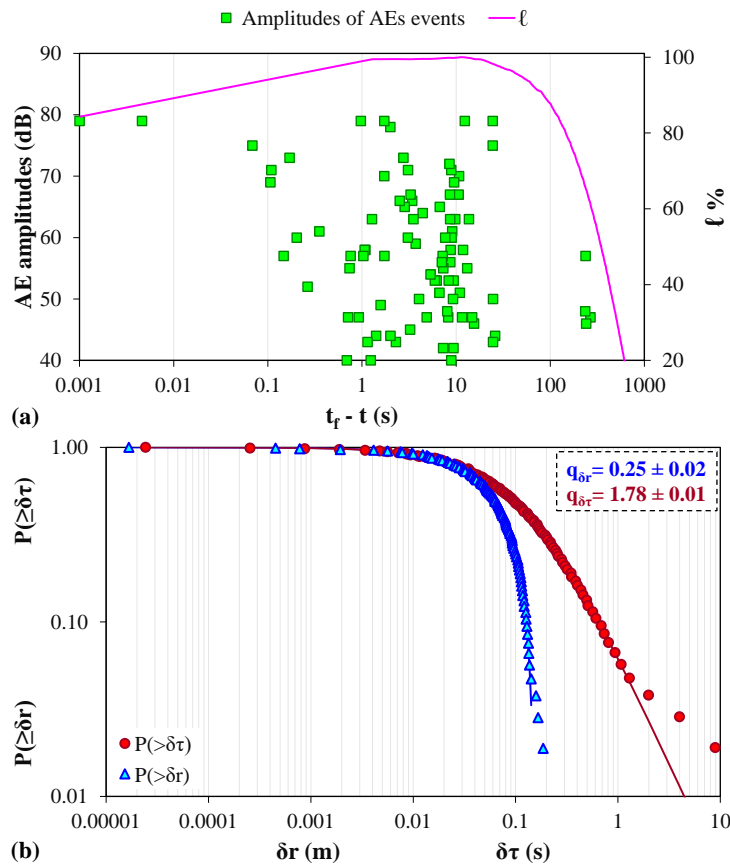


Σχήμα 5.26(a) Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  για το πείραμα ExpBCMF-11. (b) Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  και οι αντίστοιχες  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.

Τα πειραματικά δεδομένα που δεν συμπεριλήφθηκαν στους υπολογισμούς των ανωτέρω δεικτών και παραμέτρων, αντιστοιχούν ανέρχονται στο 15% των συνολικών δεδομένων των interevent times και στο 6% των συνολικών δεδομένων των interevent distances, δηλαδή χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα έως  $\delta\tau_{\max} = 1.820$  s και  $\delta r_{\max} = 0.116$  m.

#### 5.5.4 Δοκιμές κάμψης τριών σημείων σε ινοπλισμένα δοκίμια κονιάματος τσιμέντου με εγκοπή

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ExpBCR-10, ExpBCMF-11 και ExpBCPF-12, ινοπλισμένα δοκίμια κονιάματος τσιμέντου με εγκοπή στη μέση και με διαφορετικά επίπεδα εσωτερικής ενίσχυσης, υποβλήθηκαν σε κάμψη τριών σημείων. Τα Σχήματα 5.25(a), 5.26(a) και 5.27(a), απεικονίζουν τη χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων ΑΕ κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ExpBCR-10, ExpBCMF-11 και ExpBCPF-12, αντίστοιχα, σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ . Στα διαγράμματα έχει απεικονιστεί και το κανονικοποιημένο μηχανικό φορτίο  $\ell$  σε χρονική κλίμακα  $(t_f - t)$ . Επιλέχθηκε η χρήση της χρονικής κλίμακας  $(t_f - t)$ , διότι η συντριπτική πλειοψηφία της ακουστικής δραστηριότητας καταγράφηκε στα τελευταία στάδια φόρτισης λίγο πριν θραύση των δοκιμίων. Στα Σχήματα 5.25(b), 5.26(b) και 5.27(b) παρουσιάζονται σε λογαριθμικούς άξονες, οι SFs  $[P(> \delta\tau)]$  και  $[P(> \delta r)]$  για τα γεγονότα ΑΕ των πειραμάτων ExpBCR-10, ExpBCMF-11 και ExpBCPF-12, και τα αντίστοιχα fitting με βάση τις Εξισώσεις (5.7)



**Σχήμα 5.27(a)** Η χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων AE και του εφαρμοζόμενου κανονικοποιημένου φορτίου  $\ell$  για το πείραμα ExpBCPF-12. **(b)** Οι SFs των interevent times και των interevent distances. Σημειώνονται οι τιμές  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  και οι αντίστοιχες q-εκθετικές συναρτήσεις προσαρμογής.

και (5.8). Οι τιμές των εντροπικών δεικτών  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  που προσδιορίστηκαν με το αντίστοιχο σφάλμα σημειώνονται εντός του διαγράμματος. Προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν σφάλματα λόγω των αποκλίσεων που εμφανίζονται μεταξύ των πειραματικών δεδομένων και των μοντέλων προσαρμογής στις ουρές των SFs κάθε πειράματος, οι εντροπικοί δείκτες  $q$  και οι παράμετροι  $\tau_{\delta\tau}$  και  $d_{\delta r}$  υπολογίστηκαν δίχως να συμπεριλαμβάνονται οι μεγάλοι χρόνοι  $\delta\tau$  και οι μεγάλες αποστάσεις  $\delta r$  που εντοπίζονται στις περιοχές των ουρών των SFs. Συγκεκριμένα για το πείραμα ExpBCR-10 χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα έως  $\delta\tau_{\max} = 1.905 \text{ s}$  και  $\delta r_{\max} = 0.184 \text{ m}$ , για το πείραμα ExpBCMF-11 έως  $\delta\tau_{\max} = 7.898 \text{ s}$  και  $\delta r_{\max} = 0.129 \text{ m}$  και τέλος για το πείραμα ExpBCPF-12 έως  $\delta\tau_{\max} = 3.998 \text{ s}$  και  $\delta r_{\max} = 0.143 \text{ m}$ .

Παρατηρώντας το Σχήμα 6.24(b) για την περίπτωση του πειράματος ExpBCR-10, στο οποίο δεν υπάρχει εσωτερική ενίσχυση, τα πειραματικά δεδομένα των interevent times φαίνεται να αποκλίνουν έντονα από το αντίστοιχο fitting για μεγάλους χρόνους  $\delta\tau$ . Τα δεδομένα αυτά ανέρχονται περίπου στο 19% των συνολικών πειραματικών δεδομένων. Η έντονη απόκλιση στην περιοχή της ουράς της SF των interevent times φαίνεται να συμφωνεί με την κατανομή των καταγεγραμμένων γεγονότων AE του Σχήματος 5.25(a), όπου κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων του πρωτοκόλλου φόρτισης, για το χρονικό διάστημα  $10 \text{ s} < (t_f - t) < 100 \text{ s}$ , εμφανίζεται μια πρόωμη καταγραφή γεγονότων AE. Αντιθέτως τα πειραματικά δεδομένα των interevent distances, δεν παρουσιάζουν έντονη απόκλιση από το αντίστοιχο fitting για μεγάλες αποστάσεις  $\delta r$ , με μόνο το 4% των



**Πίνακας 5.8 Οι τιμές των εντροπικών δεικτών  $q_{\delta\tau}$ ,  $q_{\delta r}$ , και των αντίστοιχων αποκλίσεων.**

Πείραμα	Interevent times		Interevent distances	
	$q_{\delta\tau}$	Σφάλμα	$q_{\delta r}$	Σφάλμα
ExpUM-06	1.38	0.01	0.63	0.02
ExpBM-02	1.35	0.01	0.65	0.02
ExpDM-03	1.24	0.01	0.75	0.02
ExpBCR-10	1.76	0.01	0.23	0.02
ExpBCMF-11	1.76	0.01	0.22	0.02
ExpBCPF-12	1.78	0.01	0.25	0.02

συνολικών πειραματικών δεδομένων να βρίσκονται στην περιοχή της ουράς της SF. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζεται στο Σχήμα 5.26(a) του πειράματος ExpBCMF-11, το δοκίμιο του οποίου φέρει χαλύβδινες ίνες. Παρατηρώντας την χρονική καταγραφή των πλατών των γεγονότων AE εμφανίζεται μια πρόιμη έξαρση της ακουστικής δραστηριότητας για το χρονικό διάστημα  $100s < (t_f - t) < 1000s$ . Τα πειραματικά δεδομένα που ανήκουν στις περιοχές των ουρών αμφοτέρων των SFs αντιστοιχούν στο 7% των συνολικών πειραματικών δεδομένων των interevent times και στο 6% των συνολικών πειραματικών δεδομένων των interevent distances. Στην περίπτωση του πειράματος ExpBCPF-12, στο οποίο το δοκίμιο φέρει πλαστικές ίνες ως εσωτερική ενίσχυση, δεν δείχνει μεγάλες αποκλίσεις τα αντίστοιχα fitting. Τα πειραματικά δεδομένα που εντοπίζονται στις περιοχές των ουρών και των δύο SFs αντιστοιχούν στο 3% των συνολικών δεδομένων των interevent times και στο 3% των συνολικών δεδομένων των interevent distances. Τέτοιου είδους συμπεριφορές μπορούν να αποδοθούν στο γεγονός ότι το τσιμέντο είναι ένα υλικό με χαμηλή καμπτική αντοχή, οπότε οι μηχανισμοί θραύσης ενεργοποιούνται στα αρχικά στάδια φόρτισης, εκφραζόμενοι ως πρώιμα γεγονότα AE με μεγάλα interevent times. Εξού και η ασυμφωνία στα Σχήματα 5.25(b) και 5.26(b) στην περίπτωση των SFs των interevent times. Επιπλέον, η ενίσχυση με πλαστικές ίνες φαίνεται να αύξησε την καμπτική αντοχή του δοκιμίου τσιμέντου του πειράματος ExpBCPF-12, σε σχέση με τα δοκίμια των πειραμάτων ExpBCR-10 (δίχως εσωτερική ενίσχυση) και ExpBCMF-11 (χαλύβδινες ίνες), με αποτέλεσμα να καταγράφονται λιγότερα γεγονότα AE κατά τη διάρκεια των πρώιμων σταδίων φόρτισης.

### 5.5.5 Σχολιασμός των αποτελεσμάτων

Από τα έως τώρα αποτελέσματα φαίνεται ότι ο εντροπικός δείκτης  $q_{\delta\tau}$ , ο οποίος σχετίζεται με την κατανομή των interevent times των γεγονότων AE, είναι για όλες τις περιπτώσεις των παρουσιαζόμενων πειραμάτων, μεγαλύτερος της μονάδας ( $q_{\delta\tau} > 1$ ). Το γεγονός αυτό καταδεικνύει πως η SF των interevent times  $[P(> \delta\tau)]$  αφενός υπακούει σε μία q-εκθετική κατανομή και αφετέρου μπορεί να περιγραφεί μέσω της μοντελοποίησης NESM μίας υπερπροσθετικής διαδικασίας. Ενώ, ο εντροπικός δείκτης  $q_{\delta r}$  που συνδέεται με την SF των interevent distances  $[P(> \delta r)]$  των γεγονότων AE, που είναι για όλες τις περιπτώσεις των παρουσιαζόμενων πειραμάτων, μικρότερος της μονάδας ( $q_{\delta r} < 1$ ) μπορεί να περιγραφεί μέσω της μοντελοποίησης NESM μίας υποπροσθετικής διαδικασίας. Επιπλέον, υπολογίστηκε το άθροισμα των εντροπικών δεικτών  $q$  για τις χωρικές και χρονικές κατανομές για κάθε εξεταζόμενο πείραμα. Στον Πίνακα 5.8 παρουσιάζονται οι τιμές των

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών εντροπικών δεικτών  $q$  που υπολογίστηκαν μαζί με τις αντίστοιχες αποκλίσεις. Τα αποτελέσματα επαληθεύουν και γενικεύουν με σαφήνεια τη δυϊκότητα των δύο εντροπικών δεικτών  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$  με βάση τη σχέση που  $q_{\delta\tau} + q_{\delta r} \approx 2$ , σε όλα τα προαναφερθέντα τεστ δοκιμών, τόσο σε δοκίμια μαρμάρου όσο και κονιάματος τσιμέντου. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν παρατηρηθεί όταν αναλύθηκαν τα ακουστικά δεδομένα σε δοκίμια βασάλτη υπό μηχανική φόρτιση [87] όπως επίσης και σε σεισμολογικά δεδομένα από Ιαπωνία, νότια Καλιφόρνια, Ελλάδα και Ιράν [85, 101, 103, 104].

## 6. Συμπεράσματα – Θέματα για περαιτέρω έρευνα

Το κεφάλαιο παρουσιάζει τα συμπεράσματα από τα ευρήματα της διατριβής και τα ανοιχτά θέματα για περαιτέρω έρευνα στο μέλλον. Στην παράγραφο 6.1 παρουσιάζονται τα ευρήματα της διατριβής με βάση τα δεδομένα που αντλήθηκαν από δώδεκα (12) πειράματα σε δοκίμια μαρμάρου και τσιμέντου ποικίλων γεωμετριών και τεσσάρων (4) διαφορετικών πρωτόκολλων φόρτισης όπως κάμψη τριών σημείων, άμεσο εφελκυσμό, αντιδιαμετρική θλίψη και μονοαξονική θλίψη. Η παράγραφος 6.2 ασχολείται με τα θέματα για περαιτέρω έρευνα που ανοίγονται με βάση τα ευρήματα της διατριβής. Αρχικά, περιγράφεται εν συντομία η ανάλυση της ακουστικής δραστηριότητας, εκφραζόμενη μέσω της συνάρτησης  $F$  στο πεδίο του φυσικού χρόνου, αξιοποιώντας χτύπους ΑΕ από δοκίμιο μαρμάρου το οποίο υποβλήθηκε σε άμεσο εφελκυσμό μέχρι τη θραύση. Στη συνέχεια αναφέρεται ο στόχος να αναλυθούν δεδομένα ακουστικών εκπομπών στο πεδίο του φυσικού χρόνου σε δοκούς ινοπλισμένου σκυροδέματος που υποβάλλονται σε κάμψη τριών σημείων μέχρι τη θραύση. Τέλος, συζητείται η εισαγωγή μίας νέας συνάρτησης για την παρακολούθηση της χωρικής κατανομής των πηγών των γεγονότων ΑΕ.

### 6.1 Συμπεράσματα

Αναλύθηκαν πειραματικά δεδομένα ΑΕ στο πεδίο του φυσικού χρόνου ( $\chi$ ) και στο πλαίσιο της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής. Τα δεδομένα ΑΕ καταγράφηκαν κατά την διάρκεια πρωτόκολλων φόρτισης έως τη θραύση δοκιμίων μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου. Συνολικά παρουσιάστηκαν δώδεκα (12) δοκίμια ποικίλων γεωμετριών και τέσσερα (4) διαφορετικά πρωτόκολλα φόρτισης τα οποία περιλάμβαναν κάμψη τριών σημείων, άμεσο εφελκυσμό, αντιδιαμετρική θλίψη και μονοαξονική θλίψη.

Στο πρώτο σκέλος, αναλύθηκε στο πεδίο του φυσικού χρόνου η ενέργεια των χτύπων ΑΕ που καταγράφηκαν κατά την διάρκεια πειραμάτων μηχανικής φόρτισης έως τη θραύση σε δοκίμια μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου. Αρχικά μελετήθηκε η εξέλιξη των παραμέτρων  $\kappa_1$ ,  $S$ ,  $S_-$  κατά την διάρκεια των παρουσιαζόμενων πρωτόκολλων φόρτισης.

Τα ευρήματα της ανάλυσης αποκάλυψαν ότι η διασπορά  $\kappa_1$  προσεγγίζει την κρίσιμη τιμή 0.070 και παράλληλα οι εντροπίες  $S$  και  $S_-$  ικανοποιούν τη συνθήκη  $S, S_- \lesssim 0.0966$ , πολύ πριν από την είσοδο των δοκιμίων στην περιοχή θραύσης με τρόπο παρόμοιο με εκείνον που προηγείται των ισχυρών σεισμών. Η παρατηρούμενη συμπεριφορά της διασποράς  $\kappa_1$  μπορεί να ερμηνευτεί από τη συμπεριφορά είτε του μοντέλου τρένου Burrridge-Knoppoff είτε του μοντέλου σεισμών Olami-Feder-Christensen, όταν αυτά αναλύονται στο πεδίο του φυσικού χρόνου. Στην συνέχεια, εξετάστηκε η χρήση της διασποράς  $\kappa_1$ , ως παράμετρος τάξης της ενέργειας των χτύπων ΑΕ που καταγράφεται στις διαδικασίες θραύσης δοκιμίων μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου, μέσω της ύπαρξης της χαρακτηριστικής αριστερής εκθετικής ουράς των ανηγμένων PDFs της διασποράς  $\kappa_1$ . Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα σε φυσικό χρόνο από το μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen και από το μοντέλο τρένου Burrridge-Knoppoff. Η ανάλυση έδειξε ότι τόσο η ανηγμένη PDF της διασποράς  $\kappa_1$  που υπολογίζεται μέσω της ενέργειας των χτύπων ΑΕ, όσο και οι ανηγμένες PDFs της διασποράς  $\kappa_1$  από το μοντέλο σεισμών Olami-Feder-Christensen και από το μοντέλο τρένου Burrridge-Knoppoff, παρουσιάζουν μια χαρακτηριστική εκθετική ουρά παρόμοια με εκείνη που παρατηρείται για την παράμετρο τάξης διαφόρων κρίσιμων συστημάτων ισορροπίας και μη ισορροπίας. Λαμβάνοντας υπόψιν ότι η διασπορά  $\kappa_1$  γίνεται απότομα μηδέν μετά την θραύση των δοκιμίων, τα αποτελέσματα των ανωτέρω αναλύσεων φαίνεται να υποστηρίζουν τη χρήση της  $\kappa_1$ , ως παραμέτρου τάξης για την ενέργεια των χτύπων ΑΕ

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

που καταγράφονται κατά τη διάρκεια πειραμάτων μηχανικής φόρτισης έως τη θραύση δοκιμών μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου.

Στο δεύτερο σκέλος, αναλύθηκαν δεδομένα ΑΕ στο πλαίσιο της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής σύμφωνα με το μοντέλο εντροπίας του Tsallis. Σε πρώτη φάση, υπολογίστηκαν τα *interevent times* μεταξύ διαδοχικών ομάδων χτύπων ΑΕ, που προέκυψαν από τον κατακερματισμό της αρχικής χρονοσειράς των χτύπων ΑΕ που καταγράφηκε κατά την διάρκεια των παρουσιαζόμενων πρωτόκολλων φόρτισης. Για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις επιβίωσης SFs των *interevent times*  $[P(> \delta\tau)]$  μεταξύ των διαδοχικών ομάδων. Έπειτα, στα πειραματικά δεδομένα προσαρμόστηκαν μέσω fitting  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις και υπολογίστηκαν, οι τιμές του εντροπικού δείκτη  $q$  και της παραμέτρου  $\beta_q$  για κάθε ομάδα χτύπων ΑΕ σε όλες τις περιπτώσεις των πειραμάτων.

Μελετήθηκε η χρονική εξέλιξη του εντροπικού δείκτη  $q$  σε συνδυασμό με το εφαρμοζόμενο μηχανικό φορτίο σε πειράματα μηχανικής φόρτισης έως τη θραύση. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν μια συστηματική συμπεριφορά του εντροπικού δείκτη  $q$  καθώς τα δοκίμια οδεύουν προοδευτικά προς την θραύση. Συγκεκριμένα στα πρώτα στάδια της φόρτισης και μέχρι το φορτίο να προσεγγίσει το 90% περίπου της αντοχής, ο δείκτης  $q$ , αυξάνεται και αποκτά μια μέγιστη τιμή. Περαιτέρω αύξηση του φορτίου και με δεδομένο ότι πλησιάζει η επερχόμενη θραύση ο δείκτης  $q$  παρουσιάζει μια συστηματική μείωση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συσχέτιση της μεταβλητότητας του δείκτη  $q$  κατά τη διάρκεια των δοκιμών με τον ρυθμό της εκδήλωσης των ακουστικών χτύπων, χρησιμοποιώντας την συνάρτηση  $F$  που αντιπροσωπεύει τη μέση συχνότητα εμφάνισης χτύπων ή γεγονότων ΑΕ σε ένα κυλιόμενο χρονικό παράθυρο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κορύφωση του δείκτη  $q$  συμπίπτει χρονικά με την απότομη αύξηση της συνάρτησης  $F$  η οποία ακολουθεί έναν νόμο δύναμης. Αναλογιζόμενοι ότι ο δείκτης  $q$  εκφράζει τον βαθμό οργάνωσης του δικτύου των μικρορωγμών και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των μικρορωγμών που το αποτελούν, φαίνεται πως ο ρυθμός εμφάνισης της ακουστικής δραστηριότητας, εξαρτάται από τον βαθμό οργάνωσης και αλληλεπίδρασης του δικτύου των μικρορωγμών εντός του δοκιμίου. Λαμβάνοντας υπόψη την ποικιλία των πρωτοκόλλων φόρτισης που παρουσιάζονται καθώς και τις διαφορετικές γεωμετρίες των δοκιμών, τα παραπάνω ευρήματα φαίνεται να υποστηρίζουν τη χρήση του δείκτη  $q$  ως πιθανό δείκτη της επερχόμενης θραύσης. Η ανάλυση των ΑΕ στο πλαίσιο της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής επιτρέπει την προσέγγιση του μηχανικά φορτισμένου δοκιμίου ως ένα δυναμικό σύστημα το οποίο εγκολπώνει πολλά υποσυστήματα, τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους καθ' όλη τη διάρκεια του πρωτόκολλου φόρτισης μέχρι την θραύση. Από δομικής άποψης, ως υποσυστήματα μπορούν να θεωρηθούν οι προϋπάρχουσες μικρορωγμές εντός του δοκιμίου αλλά και αυτές που σχηματίζονται με την ολοένα αυξανόμενη τιμή του μηχανικού φορτίου κατά την διάρκεια των πρωτόκολλων φόρτισης. Ο τρόπος που αλληλεπιδρούν οι μικρορωγμές μεταξύ τους, αφορά τον αρχικό σχηματισμό του δικτύου των μικρορωγμών, την σταδιακή ανάπτυξη του από τις αρχικές θέσεις των μικρορωγμών σε ένα πρώιμο δίκτυο μικρής έκτασης, μέχρι να καλύψει σχεδόν όλο τον όγκο του δοκιμίου. Τότε οι διαστάσεις του δικτύου των μικρορωγμών γίνονται συγκρίσιμες με αυτές του δοκιμίου και τελικά να επέρχεται η θραύση του.

Τέλος, υπολογίστηκαν οι συναρτήσεις επιβίωσης SFs των *interevent times*  $[P(> \delta\tau)]$  και των *interevent distances*  $[P(> \delta r)]$  των γεγονότων ΑΕ για πειράματα μηχανική φόρτισης έως τη θραύση. Στις SFs προσαρμόστηκαν μέσω fitting με  $q$ -εκθετικές συναρτήσεις και υπολογίστηκαν οι αντίστοιχοι εντροπικοί δείκτες, οι  $q_{\delta\tau}$  και  $q_{\delta r}$ . Τα αποτελέσματα

επαληθεύουν και γενικεύουν τη σχέση  $q_{\delta\tau} + q_{\delta r} \approx 2$  και για την περίπτωση ΑΕ που καταγράφονται σε δοκίμια μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου.

Τα ανωτέρω ευρήματα φαίνεται να έχουν πρακτική σημασία για τον έγκαιρο προσδιορισμό του χρόνου εισόδου στην περιοχή θραύσης ψαθυρών υλικών που υποβάλλονται σε αυξανόμενη μηχανική φόρτιση καθώς και της περαιτέρω κατανόησης των μηχανισμών γέννησης, ανάπτυξης και διάδοσης των μικρορωγμών εντός των υλικών καθώς αυτά υποβάλλονται σε μηχανική φόρτιση και οι οποίες εν τέλει οδηγούν τελικά στην θραύση του υλικού.

## 6.2 Θέματα για περαιτέρω έρευνα

### 6.2.1 Ανάλυση της ακουστικής δραστηριότητας στο πεδίο του φυσικού χρόνου

Σε πρόσφατη δημοσίευση [176] από τους Loukidis et al. επιχειρήθηκε να περιγραφεί η εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  όχι με όρους συμβατικού χρόνου, αλλά χρησιμοποιώντας την έννοια του φυσικού χρόνου. Η εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  στο πεδίο του φυσικού χρόνου μελετήθηκε σε μια σειρά πέντε πειραματικών πρωτοκόλλων κατά τα οποία δοκίμια μαρμάρου Διόνυσου ποικίλης γεωμετρίας υποβλήθηκαν σε διαφορετικά σχήματα φόρτωσης. Βρέθηκε ότι και στα πέντε ανωτέρω πρωτόκολλα, η εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  σε πεδίο φυσικού χρόνου παρουσιάζει μια συστηματική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα παρότι οι τιμές της αυξάνονται προοδευτικά με διακυμάνσεις ποικίλης έντασης, ωστόσο, ενώ πλησιάζει η θραύση του δοκιμίου, αναδεικνύεται ένας νόμος δύναμης της μορφής:

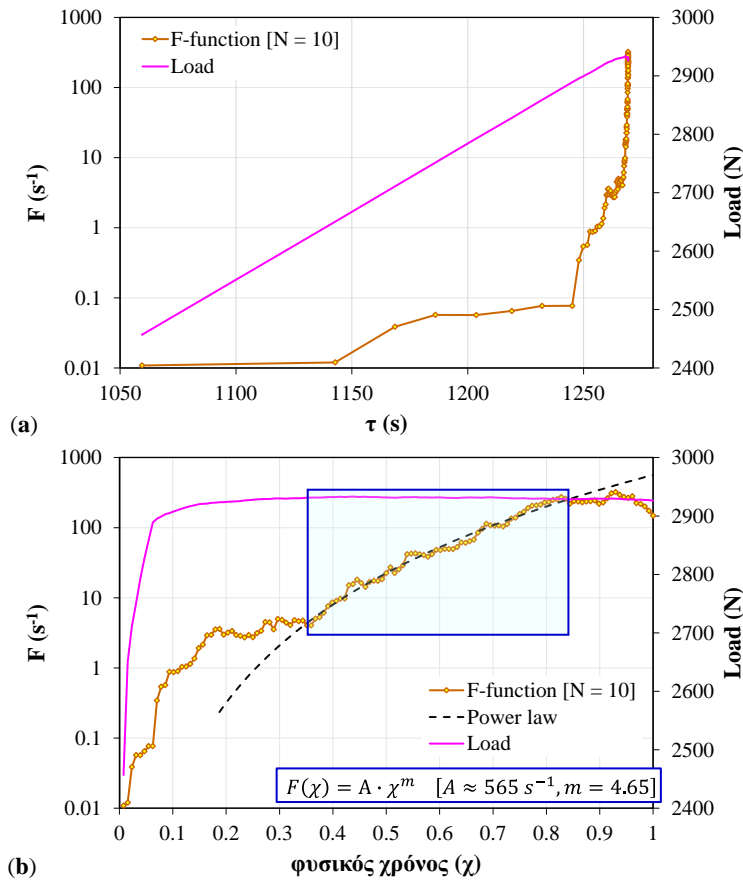
$$F(\chi) = A \cdot \chi^m \quad (6.1)$$

όπου  $A$  είναι μια σταθερά [ $A = F(x=1)$ ] και  $m$  είναι ένας εκθέτης που συνδέεται με το πόσο έντονη είναι η ακουστική δραστηριότητα λίγο πριν τη θραύση. Συνεπώς η έναρξη ισχύος του νόμου της Εξίσωσης (6.1), υποδηλώνει ότι το σύστημα έχει εισέλθει σε κρίσιμότητα παρέχοντας μια χρήσιμη ένδειξη όσον αφορά την επικείμενη θραύση.

Ενδεικτικά στο Σχήμα 6.1 παρουσιάζεται η εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  τόσο στο συμβατικό χρόνο ( $\tau$ ) όσο και στο φυσικό χρόνο ( $\chi$ ) για την περίπτωση του πειράματος άμεσου εφελκυσμού σε δοκίμιο μαρμάρου γεωμετρίας “DENT” (πείραμα ExpDM-03). Η απότομη αύξηση της συνάρτησης  $F$  ξεκινά τη στιγμή  $\tau \approx 1245s$  (Σχήμα 6.1(a)) όταν το εφαρμοζόμενο φορτίο προσεγγίσει μια τιμή περίπου ίση με  $2889 N$ , η οποία αντιστοιχεί στο 98.4% της μέγιστης δύναμης που επιτεύχθηκε κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου πειράματος. Η εξέλιξη της συνάρτησης  $F$  σε φυσικό χρόνο (Σχήμα 6.1(b)) φανερώνει την ύπαρξη ενός νόμου δύναμης στο διάστημα  $0.36 < \chi < 0.85$ , που αντιστοιχεί στο σκιασμένο ορθογώνιο στο Σχήμα 6.1(b). Δηλαδή ο νόμος δύναμης της Εξίσωσης 6.1 εμφανίζεται στα όρια της κορύφωσης του φορτίου.

Με βάση τα ανωτέρω φαίνεται ότι η παρακολούθηση της ακουστικής δραστηριότητας εκφραζόμενης μέσω της συνάρτησης  $F$  στο πεδίο του φυσικού χρόνου, μπορεί να αποτελέσει έναν εν δυνάμει δείκτη που υποδεικνύει ότι το σύστημα εισήλθε στο στάδιο της επικείμενης θραύσης. Ως εκ τούτου απαιτείται περαιτέρω έρευνα με πρόσθετα πειραματικά πρωτόκολλα και ευρύτερο γκάμα υλικών. Σε κάθε περίπτωση, τα συμπεράσματα αυτής της προκαταρκτικής μελέτης είναι ενθαρρυντικά, υποδεικνύοντας, τουλάχιστον, ότι το θέμα αξίζει περαιτέρω προσοχής. Σε αυτό το πλαίσιο ένα από τα θέματα που θα μας απασχολήσουν το επόμενο διάστημα, είναι να διερευνηθούν περαιτέρω τα προκαταρκτικά ευρήματα.

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών



Σχήμα 6.1 Η εξέλιξη (a) σε συμβατικό χρόνο (s) και (b) σε φυσικό της συνάρτησης  $F$  με παράλληλη απεικόνιση του εφαρμοζόμενου μηχανικού φορτίου, για το πείραμα ExpDM-03.

### 6.2.2 Ακουστικές εκπομπές στο πεδίο του φυσικού χρόνου σε δοκούς ινοπλισμένου σκυροδέματος που υποβάλλονται σε κάμψη

Στο πλαίσιο της μελλοντικής έρευνας έχει προγραμματιστεί η πραγματοποίηση ανάλυσης δεδομένων ακουστικών εκπομπών στο πεδίο του φυσικού χρόνου τα οποία καταγράφηκαν κατά την υποβολή δοκών ινοπλισμένου σκυροδέματος που περιέχουν μεγάλα αδρανή σε κάμψη τριών σημείων μέχρι τη θραύση. Η ανάλυση σε φυσικό χρόνο, ως προς τις παραμέτρους της διακύμανσης  $\kappa_1$ , της εντροπίας  $S$  και της εντροπίας υπό αντιστροφή χρόνου  $S_-$  αναμένεται, λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο μέγεθος των δοκών και την πολυπλοκότητα του υλικού κατασκευής (ινοπλισμένο σκυρόδεμα), να δείξει μια πιο σύνθετη συμπεριφορά σε σχέση με τα παρόντα αποτελέσματα. Στόχος είναι τα νέα αποτελέσματα να αποτελέσουν το εφαλτήριο για πιθανή γενίκευση και επέκταση των αποτελεσμάτων της παρούσας διδακτορικής διατριβής που προέκυψαν από την ανάλυση σε φυσικό χρόνο δεδομένων ακουστικών εκπομπών που καταγράφηκαν σε πειράματα θραύσης δοκιμίων μαρμάρου και κονιάματος τσιμέντου.

Αξιοποιώντας τα ακουστικά δεδομένα στα ανωτέρω πειράματα θα αναλύσουμε και τις χρονικές κατανομές των ακουστικών χτύπων, υπό το πρίσμα της μη-εκτατικής στατιστικής μηχανικής. Η μελέτη θα εστιαστεί στις πιθανές διαφοροποιήσεις ή ομοιότητες, όσον αφορά την μεταβλητότητα του εντροπικού δείκτη  $q$  στα διάφορα στάδια της μηχανικής φόρτισης μεταξύ των ακολούθων κατηγοριών δειγμάτων:

1. Δοκοί σκυροδέματος δίχως ενίσχυση.
2. Δοκοί σκυροδέματος ενισχυμένοι με κοντές πλαστικές ίνες, και
3. Δοκοί σκυροδέματος ενισχυμένοι με κοντές μεταλλικές (ατσάλινες) ίνες.

### 6.2.3 Μια εναλλακτική μέθοδος παρακολούθησης της χωρικής κατανομής των πηγών ΑΕ

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη της χωρικής κατανομής των πηγών ΑΕ και η χρονική τους μεταβολή καθώς σε ένα πειραματικό πρωτόκολλο φόρτισης οδηγούμαστε προς τη θραύση. Ο υπολογισμός των Ευκλείδειων αποστάσεων δίνει την δυνατότητα υπολογισμού της μέσης τιμής  $\langle \delta r \rangle$  ενός πλήθους  $N$  διαδοχικών interevent distances. Δηλαδή κάτι αντίστοιχο με τον προσδιορισμό της συνάρτησης  $F$  όπου αξιοποιούνται τα interevent times. Η χρονική αντιστοιχία της ποσότητας  $\langle \delta r \rangle$  μπορεί να γίνει με την χρονική μεταβλητή  $\tau$ , που είναι η μέση τιμή των χρόνων που εκδηλώθηκαν τα ακουστικά γεγονότα, μέσω των οποίων έγινε ο υπολογισμός της  $\langle \delta r \rangle$ . Η  $\langle \delta r \rangle$  που έχει διαστάσεις μήκους, δίνει μια πληροφορία πόσο κοντά ή μακριά εντοπίζονται τα events, σε ένα χρονικό παράθυρο που έχουν συμβεί τα  $N$  διαδοχικά ακουστικά γεγονότα. Συνεπώς το ενδιαφέρον θα εστιαστεί σε ποια χρονική περίοδο η ποσότητα  $\langle \delta r \rangle$  εμφανίζει μια πτωτική πορεία κάτι που αντιστοιχεί σε τοπική συσσώρευση των μικρορωγμών. Αντικείμενο μελέτης είναι να εξεταστεί αν η ποσότητα  $\langle \delta r \rangle$ , παρουσιάζει λίγο πριν την θραύση ένα τοπικό ελάχιστο. Αυτό θα σηματοδοτεί την ανάπτυξη της μακρορωγμής και την συνακόλουθη θραύση.

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών



## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] C. R. Farrar and K. Worden, "An introduction to structural health monitoring," *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1851, pp. 303-315, 2007, doi: 10.1098/rsta.2006.1928.
- [2] V. G. M. Annamdas, S. Bhalla, and C. K. Soh, "Applications of structural health monitoring technology in Asia," *Structural Health Monitoring*, vol. 16, no. 3, pp. 324-346, 2017, doi: 10.1177/1475921716653278.
- [3] F. Surre, T. Sun, and K. T. Grattan, "Fiber Optic Strain Monitoring for Long-Term Evaluation of a Concrete Footbridge Under Extended Test Conditions," *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 1036-1043, 2013, doi: 10.1109/JSEN.2012.2234736.
- [4] J. L. Rose, "Ultrasonic Guided Waves in Structural Health Monitoring," *Key Engineering Materials*, vol. 270-273, pp. 14-21, 2004, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.270-273.14.
- [5] J. García-Martín, J. Gómez-Gil, and E. Vázquez-Sánchez, "Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing," *Sensors*, vol. 11, no. 3, pp. 2525-2565, 2011, doi: 10.3390/s110302525.
- [6] S. Gholizadeh, "A review of non-destructive testing methods of composite materials," *Procedia Structural Integrity*, vol. 1, pp. 50-57, 2016, doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.008.
- [7] D. C. Jiles, "Review of magnetic methods for nondestructive evaluation (Part 2)," *NDT International*, vol. 23, no. 2, pp. 83-92, 1990, doi: 10.1016/0308-9126(90)91892-W.
- [8] K. Diamanti and C. Soutis, "Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 46, no. 8, pp. 342-352, 2010, doi: 10.1016/j.paerosci.2010.05.001.
- [9] W. Fan and P. Qiao, "Vibration-based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study," *Structural Health Monitoring*, vol. 10, no. 1, pp. 83-111, 2011, doi: 10.1177/1475921710365419.
- [10] T. Shiotani, "Evaluation of progressive failure using AE sources and improved b-value on slope model tests," *Progress in Acoustic Emission VII, JSNDI*, pp. 529-534, 1994.
- [11] *ASTM E1316-20a, Standard Terminology for Nondestructive Examinations*, A. International, West Conshohocken, PA, 2020. [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [12] M. Ohtsu, "History and Fundamentals," in *Acoustic Emission Testing: Basics for Research - Applications in Civil Engineering*, C. U. Grosse, M. Ohtsu, D. G. Aggelis, and T. Shiotani Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 11-20. doi: 10.1007/978-3-030-67936-1\_2.
- [13] M. Ohtsu and K. Ono, "The generalized theory and source representations of acoustic emission," *Journal of acoustic emission*, vol. 5, no. 4, pp. 124-133, 1986.
- [14] K. Ono, "Acoustic Emission in Materials Research-A Review," *Journal of acoustic emission*, vol. 29, 2011.
- [15] C. B. Scruby, G. R. Baldwin, and K. A. Stacey, "Characterisation of fatigue crack extension by quantitative acoustic emission," *International Journal of Fracture*, vol. 28, no. 4, pp. 201-222, 1985, doi: 10.1007/BF00035216.
- [16] V. Moorthy, T. Jayakumar, and B. Raj, "Influence of micro structure on acoustic emission behavior during stage 2 fatigue crack growth in solution annealed, thermally aged and weld specimens of AISI type 316 stainless steel," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 212, no. 2, pp. 273-280, 1996, doi: 10.1016/0921-5093(96)10206-9.
- [17] T. C. Lindley, I. G. Palmer, and C. E. Richards, "Acoustic emission monitoring of fatigue crack growth," *Materials Science and Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 1-15, 1978, doi: 10.1016/0025-5416(78)90206-9.
- [18] K. M. Holford, "Acoustic Emission—Basic Principles and Future Directions," *Strain*, vol. 36, no. 2, pp. 51-54, 2000, doi: 10.1111/j.1475-1305.2000.tb01173.x.
- [19] J. Meriaux, M. Boinet, S. Fouvry, and J. C. Lenain, "Identification of fretting fatigue crack propagation mechanisms using acoustic emission," *Tribology International*, vol. 43, no. 11, pp. 2166-2174, 2010, doi: 10.1016/j.triboint.2010.06.009.
- [20] K. L. Reifsnider, K. Schulte, and J. C. Duke, "Long-Term Fatigue Behavior of Composite Materials," T. K. Brien Ed. West Conshohocken, PA: ASTM International, 1983, pp. 136-159. doi: 10.1520/STP31820S.
- [21] P. R. Sammonds, P. G. Meredith, and I. G. Main, "Role of pore fluids in the generation of seismic precursors to shear fracture," *Nature*, vol. 359, no. 6392, pp. 228-230, 1992, doi: 10.1038/359228a0.
- [22] A. Guarino, A. Garcimartín, and S. Ciliberto, "An experimental test of the critical behaviour of fracture precursors," *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, journal article vol. 6, no. 1, pp. 13-24, 1998, doi: 10.1007/s100510050521.
- [23] S. Colombo, M. C. Forde, I. Main, and M. Shigeishi, "Predicting the ultimate bending capacity of concrete beams from the "relaxation ratio" analysis of AE signals," *Construction and Building Materials*, Article vol. 19, no. 10, pp. 746-754, 2005, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.004.
- [24] D. Triantis and S. K. Kourkoulis, "An Alternative Approach for Representing the Data Provided by the Acoustic Emission Technique," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 51, no. 8, pp. 2433-2438, 2018, doi: 10.1007/s00603-018-1494-1.
- [25] M. Ohtsu, M. Uchida, T. Okamoto, and S. Yuyama, "Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams Qualified by Acoustic Emission," *ACI Structural Journal*, vol. 99, no. 4, 2002, doi: 10.14359/12109

- [26] M. V. M. S. Rao and K. J. P. Lakshmi, "Analysis of b-value and improved b-value of acoustic emissions accompanying rock fracture," *Current Science*, vol. 89, no. 9, pp. 1577-1582, 2005.
- [27] K. M. Holford, "Acoustic Emission in Structural Health Monitoring," *Key Engineering Materials*, vol. 413-414, pp. 15-28, 2009, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.413-414.15.
- [28] S. K. Kourkoulis, E. Ganniari-Papageorgiou, and M. Mentzini, "Dionysos marble beams under bending: A contribution towards understanding the fracture of the Parthenon architraves," *Engineering Geology*, vol. 115, no. 3, pp. 246-256, 2010, doi: 10.1016/j.enggeo.2009.06.012.
- [29] G. Lacidogna, A. Manuello, G. Niccolini, and A. Carpinteri, "Acoustic emission monitoring of Italian historical buildings and the case study of the Athena temple in Syracuse," *Architectural Science Review*, vol. 58, no. 4, pp. 290-299, 2015, doi: 10.1080/00038628.2012.720246.
- [30] R. D. Finlayson, M. Friesel, M. Carlos, P. Cole, and J. Lenain, "Health monitoring of aerospace structures with acoustic emission and acousto-ultrasonics," *Insight-Wigston then Northampton-*, vol. 43, no. 3, pp. 155-158, 2001.
- [31] K. M. Holford *et al.*, "A new methodology for automating acoustic emission detection of metallic fatigue fractures in highly demanding aerospace environments: An overview," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 90, pp. 1-11, 2017, doi: 10.1016/j.paerosci.2016.11.003.
- [32] M. Browne, A. Roques, and A. Taylor, "The acoustic emission technique in orthopaedics - a review," *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 40, no. 1, pp. 59-79, 2005, doi: 10.1243/030932405x7638.
- [33] S. Agcaoglu and O. Akkus, "Acoustic Emission Based Monitoring of the Microdamage Evolution During Fatigue of Human Cortical Bone," *Journal of Biomechanical Engineering*, vol. 135, no. 8, 2013, doi: 10.1115/1.4024134.
- [34] H. Li, J. Li, X. Yun, X. Liu, and A. S.-L. Fok, "Non-destructive examination of interfacial debonding using acoustic emission," *Dental Materials*, vol. 27, no. 10, pp. 964-971, 2011, doi: 10.1016/j.dental.2011.06.002.
- [35] H.-J. Schwalbe, G. Bamfaste, and R.-P. Franke, "Non-destructive and non-invasive observation of friction and wear of human joints and of fracture initiation by acoustic emission," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, vol. 213, no. 1, pp. 41-48, 1999, doi: 10.1243/0954411991534799.
- [36] A. Mostafapour and S. Davoudi, "Analysis of leakage in high pressure pipe using acoustic emission method," *Applied Acoustics*, vol. 74, no. 3, pp. 335-342, 2013, doi: 10.1016/j.apacoust.2012.07.012.
- [37] G. Chen *et al.*, "Effects of the welding inclusion and notch on the fracture behaviors of low-alloy steel," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 447-456, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2018.04.005.
- [38] K. Ohno and M. Ohtsu, "Crack classification in concrete based on acoustic emission," *Construction and Building Materials*, vol. 24, no. 12, pp. 2339-2346, 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.05.004.
- [39] D. G. Aggelis, "Classification of cracking mode in concrete by acoustic emission parameters," *Mechanics Research Communications*, vol. 38, no. 3, pp. 153-157, 2011, doi: 10.1016/j.mechrescom.2011.03.007.
- [40] A. Rotem and E. Altus, "Fracture Modes and Acoustic Emission of Composite Materials," *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 7, no. 1, pp. 33-40, 1979, doi: 10.1520/JTE11199J.
- [41] A. Pollock, "AE Signal Features: Energy, Signal Strength, Absolute Energy and RMS," *Acoustic Emission Tech Notes, TN-103-22-9/11, MISTRAS Group Inc., Products and Systems Division, Princeton Junction, NJ*, 2014.
- [42] J. F. Tressler, S. Alkoy, and R. E. Newnham, "Piezoelectric Sensors and Sensor Materials," *Journal of Electroceramics*, vol. 2, no. 4, pp. 257-272, 1998, doi: 10.1023/A:1009926623551.
- [43] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, and E. S. Skordas, "Long-range correlations in the electric signals that precede rupture," *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, vol. 66, no. 1 Pt 1, p. 011902, 2002, doi: 10.1103/PhysRevE.66.011902.
- [44] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, and E. S. Skordas, *Natural Time Analysis: The New View of Time: Precursory Seismic Electric Signals, Earthquakes and Other Complex Time Series*. 2011.
- [45] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, and E. S. Skordas, "Spatio-temporal complexity aspects on the interrelation between seismic electric signals and seismicity," *Practica of Athens Academy*, vol. 76, pp. 294-231, 2001.
- [46] N. V. Sarlis, E. S. Skordas, and P. A. Varotsos, "Similarity of fluctuations in systems exhibiting Self-Organized Criticality," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 96, no. 2, p. 28006, 2011, doi: 10.1209/0295-5075/96/28006.
- [47] P. Varotsos, N. V. Sarlis, E. S. Skordas, S. Uyeda, and M. Kamogawa, "Natural time analysis of critical phenomena," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 108, no. 28, pp. 11361-11364, 2011, doi: 10.1073/pnas.1108138108.
- [48] Z. Olami, H. J. S. Feder, and K. Christensen, "Self-organized criticality in a continuous, nonconservative cellular automaton modeling earthquakes," *Physical Review Letters*, vol. 68, no. 8, pp. 1244-1247, 1992, doi: 10.1103/PhysRevLett.68.1244.
- [49] A. J. Bray, "Theory of phase-ordering kinetics," *Advances in Physics*, vol. 51, no. 2, pp. 481-587, 2002, doi: 10.1080/00018730110117433.

- [50] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, E. S. Skordas, S. Uyeda, and M. Kamogawa, "Natural-time analysis of critical phenomena: The case of seismicity," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 92, no. 2, p. 29002, 2010, doi: 10.1209/0295-5075/92/29002.
- [51] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, and E. S. Skordas, "Attempt to distinguish electric signals of a dichotomous nature," *Physical Review E*, vol. 68, no. 3, p. 031106, 2003, doi: 10.1103/PhysRevE.68.031106.
- [52] B. Lesche, "Rényi entropies and observables," *Physical Review E*, vol. 70, no. 1, p. 017102, 2004, doi: 10.1103/PhysRevE.70.017102.
- [53] B. Lesche, "Instabilities of Rényi entropies," *Journal of Statistical Physics*, journal article vol. 27, no. 2, pp. 419-422, 1982, doi: 10.1007/bf01008947.
- [54] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, E. S. Skordas, H. K. Tanaka, and M. S. Lazaridou, "Entropy of seismic electric signals: Analysis in natural time under time reversal," *Physical Review E*, vol. 73, no. 3, p. 031114, 2006, doi: 10.1103/PhysRevE.73.031114.
- [55] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, E. S. Skordas, H. K. Tanaka, and M. S. Lazaridou, "Attempt to distinguish long-range temporal correlations from the statistics of the increments by natural time analysis," *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*, vol. 74, p. 021123, 2006, doi: 10.1103/PhysRevE.74.021123.
- [56] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, H. K. Tanaka, and E. S. Skordas, "Some properties of the entropy in the natural time," *Physical Review E*, vol. 71, no. 3, p. 032102, 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.71.032102.
- [57] P. Varotsos and K. Alexopoulos, "Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I," *Tectonophysics*, vol. 110, no. 1, pp. 73-98, 1984, doi: 10.1016/0040-1951(84)90059-3.
- [58] P. Varotsos and K. Alexopoulos, "Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes. II. determination of epicenter and magnitude," *Tectonophysics*, vol. 110, no. 1, pp. 99-125, 1984, doi: 10.1016/0040-1951(84)90060-X.
- [59] P. Varotsos and M. Lazaridou, "Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals," *Tectonophysics*, vol. 188, no. 3, pp. 321-347, 1991, doi: 10.1016/0040-1951(91)90462-2.
- [60] P. Varotsos, K. Alexopoulos, and M. Lazaridou, "Latest aspects of earthquake prediction in Greece based on seismic electric signals, II," *Tectonophysics*, vol. 224, no. 1, pp. 1-37, 1993, doi: 10.1016/0040-1951(93)90055-O.
- [61] Y. Orihara, M. Kamogawa, T. Nagao, and S. Uyeda, "Preseismic anomalous telluric current signals observed in Kozu-shima Island, Japan," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, no. 47, pp. 19125-19128, 2012, doi: 10.1073/pnas.1215669109.
- [62] P. Bak, C. Tang, and K. Wiesenfeld, "Self-organized criticality: An explanation of the 1/f noise," *Physical Review Letters*, vol. 59, no. 4, pp. 381-384, 1987, doi: 10.1103/PhysRevLett.59.381.
- [63] P. Bak and M. Paczuski, "Complexity, contingency, and criticality," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 92, no. 15, pp. 6689-6696, 1995, doi: 10.1073/pnas.92.15.6689.
- [64] D. Dhar, "Theoretical studies of self-organized criticality," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 369, no. 1, pp. 29-70, 2006, doi: 10.1016/j.physa.2006.04.004.
- [65] A. Garber, S. Hallerberg, and H. Kantz, "Predicting extreme avalanches in self-organized critical sandpiles," *Physical Review E*, vol. 80, no. 2, p. 026124, 2009, doi: 10.1103/PhysRevE.80.026124.
- [66] A. Garber and H. Kantz, "Finite-size effects on the statistics of extreme events in the BTW model," *The European Physical Journal B*, vol. 67, no. 3, pp. 437-443, 2009, doi: 10.1140/epjb/e2008-00474-4.
- [67] H. J. Herrmann, "Statistical models for granular materials," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 263, no. 1, pp. 51-62, 1999, doi: 10.1016/S0378-4371(98)00506-8.
- [68] N. W. Watkins, G. Pruessner, S. C. Chapman, N. B. Crosby, and H. J. Jensen, "25 Years of Self-organized Criticality: Concepts and Controversies," *Space Science Reviews*, vol. 198, no. 1, pp. 3-44, 2016, doi: 10.1007/s11214-015-0155-x.
- [69] R. Burridge and L. Knopoff, "Model and theoretical seismicity," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 57, no. 3, pp. 341-371, 1967.
- [70] K. Christensen and Z. Olami, "Variation of the Gutenberg-Richter b values and nontrivial temporal correlations in a Spring-Block Model for earthquakes," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 97, no. B6, pp. 8729-8735, 1992, doi: 10.1029/92jb00427.
- [71] H. J. Jensen, "Lattice gas as a model of 1/f noise," *Physical Review Letters*, vol. 64, no. 26, pp. 3103-3106, 1990, doi: 10.1103/PhysRevLett.64.3103.
- [72] B. Drossel and F. Schwabl, "Self-organized critical forest-fire model," *Physical Review Letters*, vol. 69, no. 11, pp. 1629-1632, 1992, doi: 10.1103/PhysRevLett.69.1629.
- [73] M. de Sousa Vieira, "Self-organized criticality in a deterministic mechanical model," *Physical Review A*, vol. 46, no. 10, pp. 6288-6293, 1992, doi: 10.1103/PhysRevA.46.6288.
- [74] M. de Sousa Vieira, "Simple deterministic self-organized critical system," *Physical Review E*, vol. 61, no. 6, pp. R6056-R6059, 2000, doi: 10.1103/PhysRevE.61.R6056.
- [75] H. Kawamura, M. Yamamoto, and Y. Ueda, "Slow-Slip Phenomena Represented by the One-Dimensional Burridge-Knopoff Model of Earthquakes," *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 87, no. 5, p. 053001, 2018, doi: 10.7566/JPSJ.87.053001.

- [76] J. Davidsen and M. Paczuski, "1/f<sup>α</sup> noise from correlations between avalanches in self-organized criticality," *Physical Review E*, vol. 66, no. 5, p. 050101, 2002, doi: 10.1103/PhysRevE.66.050101.
- [77] A. Loukidis, J. Perez-Oregon, E. D. Pasiou, N. V. Sarlis, and D. Triantis, "Similarity of fluctuations in critical systems: Acoustic emissions observed before fracture," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 566, p. 125622, 2021, doi: 10.1016/j.physa.2020.125622.
- [78] N. V. Sarlis, P. A. Varotsos, and E. S. Skordas, "Flux avalanches in YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> films and rice piles: Natural time domain analysis," *Physical Review B*, vol. 73, no. 5, p. 054504, 2006, doi: 10.1103/PhysRevB.73.054504.
- [79] C. Tsallis, "Possible generalization of Boltzmann-Gibbs statistics," *Journal of Statistical Physics*, journal article vol. 52, no. 1, pp. 479-487, 1988, doi: 10.1007/bf01016429.
- [80] C. Tsallis, F. Baldovin, R. Cerbino, and P. Pierobon, "Introduction to Nonextensive Statistical Mechanics and Thermodynamics," in *Proceedings of the International School of Physics "Enrico Fermi", vol. Volume 155: The Physics of Complex Systems (New Advances and Perspectives)*, 2003, pp. 229 - 252.
- [81] C. Tsallis and E. Brigatti, "Nonextensive statistical mechanics: A brief introduction," *Continuum Mechanics and Thermodynamics*, journal article vol. 16, no. 3, pp. 223-235, 2004, doi: 10.1007/s00161-004-0174-4.
- [82] C. Tsallis, "Nonadditive entropy and nonextensive statistical mechanics -an overview after 20 years," *Brazilian Journal of Physics*, vol. 39, pp. 337-356, 2009, doi: 10.1590/S0103-9732009000400002.
- [83] C. Tsallis, *Introduction to nonextensive statistical mechanics: Approaching a complex world*. New York, NY: Springer New York, 2009.
- [84] C. Tsallis, "On the foundations of statistical mechanics," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 226, no. 7, pp. 1433-1443, 2017, doi: 10.1140/epjst/e2016-60252-2.
- [85] S. Abe and N. Suzuki, "Law for the distance between successive earthquakes," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 108, no. B2, 2003, doi: 10.1029/2002jb002220.
- [86] S. Abe and N. Suzuki, "Scale-free statistics of time interval between successive earthquakes," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 350, no. 2, pp. 588-596, 2005, doi: 10.1016/j.physa.2004.10.040.
- [87] F. Vallianatos, P. Benson, P. Meredith, and P. Sammonds, "Experimental evidence of a non-extensive statistical physics behaviour of fracture in triaxially deformed Etna basalt using acoustic emissions," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 97, no. 5, p. 58002, 2012, doi: 10.1209/0295-5075/97/58002.
- [88] C. Stergiopoulos, I. Stavrakas, G. Hloupis, D. Triantis, and F. Vallianatos, "Electrical and Acoustic Emissions in cement mortar beams subjected to mechanical loading up to fracture," *Engineering Failure Analysis*, vol. 35, pp. 454-461, 2013, doi: 10.1016/j.engfailanal.2013.04.015.
- [89] I. Stavrakas, D. Triantis, S. K. Kourkoulis, E. D. Pasiou, and I. Dakanali, "Acoustic Emission Analysis of Cement Mortar Specimens During Three Point Bending Tests," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 13, pp. 2283-2297, 2016, doi: 10.1590/1679-78252486.
- [90] V. Saltas, F. Vallianatos, D. Triantis, and I. Stavrakas, "8 - Complexity in Laboratory Seismology: From Electrical and Acoustic Emissions to Fracture," in *Complexity of Seismic Time Series*, T. Chelidze, F. Vallianatos, and L. Telesca Eds.: Elsevier, 2018, pp. 239-273. doi: 10.1016/B978-0-12-813138-1.00008-0.
- [91] V. Saltas, F. Vallianatos, D. Triantis, T. Koumoudeli, and I. Stavrakas, "Non-extensive statistical analysis of acoustic emissions series recorded during the uniaxial compression of brittle rocks," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 528, p. 121498, 2019, doi: 10.1016/j.physa.2019.121498.
- [92] A. Greco, C. Tsallis, A. Rapisarda, A. Pluchino, G. Fichera, and L. Contrafatto, "Acoustic emissions in compression of building materials: q-statistics enables the anticipation of the breakdown point," *The European Physical Journal Special Topics*, vol. 229, no. 5, pp. 841-849, 2020, doi: 10.1140/epjst/e2020-800232-7.
- [93] A. Loukidis, D. Triantis, and I. Stavrakas, "Non-Extensive Statistical Analysis of Acoustic Emissions Recorded in Marble and Cement Mortar Specimens Under Mechanical Load Until Fracture," *Entropy*, vol. 22, no. 10, p. 1115, 2020, doi: 1099-4300/22/10/1115.
- [94] X. Lei and S. Ma, "Laboratory acoustic emission study for earthquake generation process," *Earthquake Science*, vol. 27, no. 6, pp. 627-646, 2014, doi: 10.1007/s11589-014-0103-y.
- [95] T. Hirata, "Omori's Power Law aftershock sequences of microfracturing in rock fracture experiment," *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, vol. 92, no. B7, pp. 6215-6221, 1987, doi: 10.1029/JB092iB07p06215.
- [96] S. J. D. Cox and P. G. Meredith, "Microcrack formation and material softening in rock measured by monitoring acoustic emissions," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 30, no. 1, pp. 11-24, 1993, doi: 10.1016/0148-9062(93)90172-A.
- [97] P. G. Meredith, I. G. Main, and C. Jones, "Temporal variations in seismicity during quasi-static and dynamic rock failure," *Tectonophysics*, vol. 175, no. 1, pp. 249-268, 1990, doi: 10.1016/0040-1951(90)90141-T.
- [98] P. M. Benson, S. Vinciguerra, P. G. Meredith, and R. P. Young, "Laboratory Simulation of Volcano Seismicity," *Science*, vol. 322, no. 5899, p. 249, 2008, doi: 10.1126/science.1161927.
- [99] L. Telesca, "Maximum Likelihood Estimation of the Nonextensive Parameters of the Earthquake Cumulative Magnitude Distribution," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 102, no. 2, pp. 886-891, 2012, doi: 10.1785/0120110093.

- [100] S. M. Valverde-Esparza, A. Ramírez-Rojas, E. L. Flores-Márquez, and L. Telesca, "Non-extensivity analysis of seismicity within four subduction regions in Mexico," *Acta Geophysica*, vol. 60, no. 3, pp. 833-845, 2012, doi: 10.2478/s11600-012-0012-1.
- [101] N. V. Sarlis, E. S. Skordas, and P. A. Varotsos, "Nonextensivity and natural time: The case of seismicity," *Physical Review E*, vol. 82, no. 2, p. 021110, 2010, doi: 10.1103/PhysRevE.82.021110.
- [102] M. J. Kirkby, "The fractal geometry of nature. ," *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 8, no. 4, pp. 406-406, 1983, doi: 10.1002/esp.3290080415.
- [103] A. H. Darooneh and C. Dadashinia, "Analysis of the spatial and temporal distributions between successive earthquakes: Nonextensive statistical mechanics viewpoint," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 387, no. 14, pp. 3647-3654, 2008, doi: 10.1016/j.physa.2008.02.050.
- [104] T. Hasumi, "Interoccurrence time statistics in the two-dimensional Burridge-Knopoff earthquake model," *Physical Review E*, vol. 76, no. 2, p. 026117, 2007, doi: 10.1103/PhysRevE.76.026117.
- [105] F. Vallianatos and P. Sammonds, "Evidence of non-extensive statistical physics of the lithospheric instability approaching the 2004 Sumatran–Andaman and 2011 Honshu mega-earthquakes," *Tectonophysics*, vol. 590, pp. 52-58, 2013, doi: 10.1016/j.tecto.2013.01.009.
- [106] F. Vallianatos and P. Sammonds, "Is plate tectonics a case of non-extensive thermodynamics?," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 389, no. 21, pp. 4989-4993, 2010, doi: 10.1016/j.physa.2010.06.056.
- [107] F. Vallianatos and P. Sammonds, "A non-extensive statistics of the fault-population at the Valles Marineris extensional province, Mars," *Tectonophysics*, vol. 509, no. 1, pp. 50-54, 2011, doi: 10.1016/j.tecto.2011.06.001.
- [108] F. Vallianatos, G. Michas, G. Papadakis, and A. Tzanis, "Evidence of non-extensivity in the seismicity observed during the 2011-2012 unrest at the Santorini volcanic complex, Greece," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 177-185, 2013, doi: 10.5194/nhess-13-177-2013.
- [109] F. Vallianatos, G. Michas, and G. Papadakis, "Non-extensive and natural time analysis of seismicity before the Mw6.4, October 12, 2013 earthquake in the South West segment of the Hellenic Arc," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 414, pp. 163-173, 2014, doi: 10.1016/j.physa.2014.07.038.
- [110] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables*. New York: Dover Publications, Inc., 1965.
- [111] A. Tassogiannopoulos, "A contribution to the study of the properties of structural natural stones of Greece," *National Technical University of Athens Doctoral Dissertation. Athens, Greece*, 1986.
- [112] K. Zambas, "Study for the Restoration of the Parthenon, Vol. 3b," *Hellenic Ministry of Culture, Committee for the Preservation of the Acropolis Monuments*, 1994.
- [113] P. S. Theocaris, "Experimental study of the stability of the Parthenon," in *The Acropolis*, 1979, pp. 23-41.
- [114] G. Exadaktylos, I. Vardoulakis, and S. Kourkoulis, "Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams—II. Characterization of Dionysos marble," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, no. 22-23, pp. 4119-4145, 2001, doi: 10.1016/S0020-7683(00)00252-3.
- [115] S. K. Kourkoulis, G. E. Exadaktylos, and I. Vardoulakis, "U-Notched Dionysos-Pentelicon Marble Beams in Three Point Bending: The Effect of Nonlinearity, Anisotropy and Microstructure," *International Journal of Fracture*, vol. 98, no. 3, pp. 369-392, 1999, doi: 10.1023/A:1018614023542.
- [116] G. E. Exadaktylos, I. Vardoulakis, and S. K. Kourkoulis, "Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams — I. Technical theory," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, no. 22, pp. 4091-4117, 2001, doi: 10.1016/S0020-7683(00)00251-1.
- [117] G. E. Exadaktylos, I. Vardoulakis, and S. K. Kourkoulis, "Influence of nonlinearity and double elasticity on flexure of rock beams — II. Characterization of Dionysos marble," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 38, no. 22, pp. 4119-4145, 2001, doi: 10.1016/S0020-7683(00)00252-3.
- [118] G. E. Exadaktylos and K. N. Kaklis, "Applications of an explicit solution for the transversely isotropic circular disc compressed diametrically," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 38, no. 2, pp. 227-243, 2001, doi: 10.1016/S1365-1609(00)00072-1.
- [119] C. F. Markides and S. K. Kourkoulis, "The Stress Field in a Standardized Brazilian Disc: The Influence of the Loading Type Acting on the Actual Contact Length," *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 45, no. 2, pp. 145-158, 2012, doi: 10.1007/s00603-011-0201-2.
- [120] S. K. Kourkoulis, I. Prassianakis, Z. Agioutantis, and G. E. Exadaktylos, "Reliability assessment of the NDT results for the internal damage of marble specimens," *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 26, no. 1-2, pp. 35-56, 2006, doi: 10.1504/IJMPT.2006.008979.
- [121] X. Zhang *et al.*, "A first principles investigation on the influence of transition-metal elements on the structural, mechanical, and anisotropic properties of CaM2Al20 intermetallics," *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, vol. 96, p. 107509, 2020, doi: 10.1016/j.jmkgm.2019.107509.
- [122] A. Kyriazopoulos, C. Anastasiadis, D. Triantis, and C. J. Brown, "Non-destructive evaluation of cement-based materials from pressure-stimulated electrical emission – Preliminary results," *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 4, pp. 1980-1990, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.053.

- [123] C. Stergiopoulos *et al.*, "Nondestructive Testing Electrical Methods for Sensing Damages in Cement Mortar Beams," *Open Journal of Applied Sciences*, vol. Vol.03No.01, p. 6, 2013, Art no. 29441, doi: 10.4236/ojapps.2013.31008.
- [124] S. K. Kourkoulis, E. D. Pasiou, I. Dakanali, I. Stavrakas, and D. Triantis, "Notched marble plates under direct tension: Mechanical response and fracture," *Construction and Building Materials*, vol. 167, pp. 426-439, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.024.
- [125] S. K. Kourkoulis, E. D. Pasiou, I. Dakanali, I. Stavrakas, and D. Triantis, "Notched marble plates under tension: Detecting prefailure indicators and predicting entrance to the "critical stage", " *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 41, no. 4, pp. 776-786, 2018, doi: 10.1111/ffe.12745.
- [126] S. K. Kourkoulis, E. D. Pasiou, and C. F. Markides, "Analytical and numerical study of the stress field in a Circular Semi Ring under combined diametral compression and bending," *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 13, no. 47, pp. 247-265, 2018, doi: 10.3221/IGF-ESIS.47.19.
- [127] I. Stavrakas, "Acoustic emissions and pressure stimulated currents experimental techniques used to verify Kaiser effect during compression tests of Dionysos marble," *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 11, no. 40, pp. Pages 32-40, 2017, doi: 10.3221/IGF-ESIS.40.03.
- [128] D. Triantis, D. K. Tsaousi, I. Stavrakas, E. D. Pasiou, P. Douvis, and S. K. Kourkoulis, "Electric and acoustic activity in notched fiber-reinforced concrete beams under three point bending," *Materials Today: Proceedings*, vol. in press, 2020.
- [129] S. Akazawa, "Splitting tensile test of cylindrical specimens," *Journal of the Japanese Civil Engineering Institute*, vol. 6, no. 1, pp. 12-19, 1943.
- [130] F. Carneiro, "A new method to determine the tensile strength of concrete," in *Proceedings of the 5th meeting of the Brazilian Association for Technical Rules*, 1943, vol. 3, no. 16, pp. 126-129.
- [131] C. F. Markides, E. D. Pasiou, and S. K. Kourkoulis, "A preliminary study on the potentialities of the Circular Semi-Ring test," *Procedia Structural Integrity*, vol. 9, pp. 108-115, 2018, doi: 10.1016/j.prostr.2018.06.018.
- [132] *PCI-2 Product Bulletin*. (2009). MISTRAS Group Inc.
- [133] H. Vallen, "AE testing fundamentals, equipment, applications," *Journal of Nondestructive Testing(Germany)*, vol. 7, no. 9, pp. 1-30, 2002.
- [134] *R6a Sensor General Purpose, Product Data Sheet*. (2011). MISTRAS Group Inc.
- [135] N. N. Hsu, "Characterization and calibration of acoustic emission sensors," *Mater. Eval.*, vol. 39, pp. 60-68, 1981.
- [136] M. Shateri, M. Ghaib, D. Svecova, and D. Thomson, "On acoustic emission for damage detection and failure prediction in fiber reinforced polymer rods using pattern recognition analysis," *Smart Materials and Structures*, vol. 26, no. 6, p. 065023, 2017.
- [137] S. T. Bramwell *et al.*, "Universal Fluctuations in Correlated Systems," *Physical Review Letters*, vol. 84, no. 17, pp. 3744-3747, 2000, doi: 10.1103/PhysRevLett.84.3744.
- [138] S. T. Bramwell *et al.*, "Magnetic fluctuations in the classical  $\mathbf{XY}$  model: The origin of an exponential tail in a complex system," *Physical Review E*, vol. 63, no. 4, p. 041106, 2001, doi: 10.1103/PhysRevE.63.041106.
- [139] B. Zheng and S. Trimper, "Comment on "Universal Fluctuations in Correlated Systems", " *Physical Review Letters*, vol. 87, no. 18, p. 188901, 2001, doi: 10.1103/PhysRevLett.87.188901.
- [140] S. T. Bramwell *et al.*, "Bramwell et al. Reply," *Physical Review Letters*, vol. 87, no. 18, p. 188902, 2001, doi: 10.1103/PhysRevLett.87.188902.
- [141] N. W. Watkins, S. C. Chapman, and G. Rowlands, "Comment on "Universal Fluctuations in Correlated Systems", " *Physical Review Letters*, vol. 89, no. 20, p. 208901, 2002, doi: 10.1103/PhysRevLett.89.208901.
- [142] S. T. Bramwell *et al.*, "Bramwell et al. Reply," *Physical Review Letters*, vol. 89, no. 20, p. 208902, 2002, doi: 10.1103/PhysRevLett.89.208902.
- [143] B. Zheng, "Generic features of fluctuations in critical systems," *Physical Review E*, vol. 67, no. 2, p. 026114, 2003, doi: 10.1103/PhysRevE.67.026114.
- [144] M. Clusel, J.-Y. Fortin, and P. C. W. Holdsworth, "Criterion for universality-class-independent critical fluctuations: Example of the two-dimensional Ising model," *Physical Review E*, vol. 70, no. 4, p. 046112, 2004, doi: 10.1103/PhysRevE.70.046112.
- [145] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, H. K. Tanaka, and E. S. Skordas, "Similarity of fluctuations in correlated systems: The case of seismicity," *Physical Review E*, vol. 72, no. 4, p. 041103, 2005, doi: 10.1103/PhysRevE.72.041103.
- [146] J.-Y. Fortin and S. Mantelli, "Nature of the global fluctuations in the spherical model at criticality," *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, vol. 45, no. 47, p. 475001, 2012, doi: 10.1088/1751-8113/45/47/475001.
- [147] N. V. Sarlis and S.-R. G. Christopoulos, "Natural time analysis of the Centennial Earthquake Catalog," *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, vol. 22, no. 2, p. 023123, 2012, doi: 10.1063/1.4711374.
- [148] N. V. Sarlis, E. S. Skordas, P. A. Varotsos, A. Ramírez-Rojas, and E. L. Flores-Márquez, "Natural time analysis: On the deadly Mexico M8.2 earthquake on 7 September 2017," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 506, pp. 625-634, 2018, doi: 10.1016/j.physa.2018.04.098.

- [149] A. Loukidis, E. D. Pasiou, N. V. Sarlis, and D. Triantis, "Fracture analysis of typical construction materials in natural time," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, p. 123831, 2019, doi: 10.1016/j.physa.2019.123831.
- [150] N. V. Sarlis, E. S. Skordas, and P. A. Varotsos, "The change of the entropy in natural time under time-reversal in the Olami–Feder–Christensen earthquake model," *Tectonophysics*, vol. 513, no. 1, pp. 49-53, 2011, doi: 10.1016/j.tecto.2011.09.025.
- [151] N. V. Sarlis, E. S. Skordas, P. A. Varotsos, A. Ramírez-Rojas, and E. L. Flores-Márquez, "Identifying the Occurrence Time of the Deadly Mexico M8.2 Earthquake on 7 September 2017," *Entropy*, vol. 21, no. 3, p. 301, 2019, doi: 10.3390/e21030301.
- [152] N. V. Sarlis, E. S. Skordas, and P. A. Varotsos, "A remarkable change of the entropy of seismicity in natural time under time reversal before the super-giant M9 Tohoku earthquake on 11 March 2011," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 124, no. 2, p. 29001, 2018, doi: 10.1209/0295-5075/124/29001.
- [153] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, E. S. Skordas, and M. S. Lazaridou, "Fluctuations, under time reversal, of the natural time and the entropy distinguish similar looking electric signals of different dynamics," *Journal of Applied Physics*, vol. 103, no. 1, p. 014906, 2008, doi: 10.1063/1.2827363.
- [154] N. V. Sarlis, E. S. Skordas, M. S. Lazaridou, and P. A. Varotsos, "Investigation of seismicity after the initiation of a Seismic Electric Signal activity until the main shock," (in eng), *Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci*, vol. 84, no. 8, pp. 331-43, 2008, doi: 10.2183/pjab.84.331.
- [155] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, and E. S. Skordas, "Identifying the occurrence time of an impending major earthquake: a review," *Earthquake Science*, vol. 30, no. 4, pp. 209-218, 2017, doi: 10.1007/s11589-017-0182-7.
- [156] S. Uyeda, K. S. Al-Damegh, E. Dologlou, and T. Nagao, "Some relationship between VAN seismic electric signals (SES) and earthquake parameters," *Tectonophysics*, vol. 304, no. 1, pp. 41-55, 1999, doi: 10.1016/S0040-1951(98)00301-1.
- [157] S. Kondo, S. Uyeda, and T. Nagao, "The selectivity of the Ioannina VAN station," *Journal of Geodynamics*, vol. 33, no. 4, pp. 433-461, 2002, doi: 10.1016/S0264-3707(02)00006-6.
- [158] S. Uyeda, T. Nagao, Y. Orihara, T. Yamaguchi, and I. Takahashi, "Goelectric potential changes: Possible precursors to earthquakes in Japan," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 97, no. 9, pp. 4561-4566, 2000, doi: 10.1073/pnas.97.9.4561.
- [159] S. Uyeda *et al.*, "Electric and magnetic phenomena observed before the volcano-seismic activity in 2000 in the Izu Island Region, Japan," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 99, no. 11, pp. 7352-7355, 2002, doi: 10.1073/pnas.072208499.
- [160] A. Ramírez-Rojas, E. L. Flores-Márquez, L. Guzmán-Vargas, G. Gálvez-Coyt, L. Telesca, and F. Angulo-Brown, "Statistical features of seismoelectric signals prior to M7.4 Guerrero-Oaxaca earthquake (México)," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 8, no. 5, pp. 1001-1007, 2008, doi: 10.5194/nhess-8-1001-2008.
- [161] Q. Huang and Y. Lin, "Selectivity of seismic electric signal (SES) of the 2000 Izu earthquake swarm: a 3D FEM numerical simulation model," *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, vol. 86, no. 3, pp. 257-264, 2010, doi: 10.2183/pjab.86.257.
- [162] S. T. Bramwell, P. C. W. Holdsworth, and J. F. Pinton, "Universality of rare fluctuations in turbulence and critical phenomena," *Nature*, vol. 396, no. 6711, pp. 552-554, 1998, doi: 10.1038/25083.
- [163] J.-F. Pinton, P. C. W. Holdsworth, and R. Labbé, "Power fluctuations in a closed turbulent shear flow," *Physical Review E*, vol. 60, no. 3, pp. R2452-R2455, 1999, doi: 10.1103/PhysRevE.60.R2452.
- [164] J. M. Kosterlitz and D. J. Thouless, "Ordering, metastability and phase transitions in two-dimensional systems," *Journal of Physics C: Solid State Physics*, vol. 6, no. 7, pp. 1181-1203, 1973, doi: 10.1088/0022-3719/6/7/010.
- [165] P. Archambault, S. T. Bramwell, J.-Y. Fortin, P. C. W. Holdsworth, S. Peysson, and J.-F. Pinton, "Universal magnetic fluctuations in the two-dimensional XY model," *Journal of Applied Physics*, vol. 83, no. 11, pp. 7234-7236, 1998, doi: 10.1063/1.367855.
- [166] K. Yakubo and S. Mizutaka, "Testing the Order Parameter of the Anderson Transition," *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 81, no. 10, p. 104707, 2012, doi: 10.1143/JPSJ.81.104707.
- [167] F. Vallianatos, G. Michas, P. Benson, and P. Sammonds, "Natural time analysis of critical phenomena: The case of acoustic emissions in triaxially deformed Etna basalt," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 392, no. 20, pp. 5172-5178, 2013, doi: 10.1016/j.physa.2013.06.051.
- [168] A. Ramírez-Rojas and E. L. Flores-Márquez, "Order parameter analysis of seismicity of the Mexican Pacific coast," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 392, no. 10, pp. 2507-2512, 2013, doi: 10.1016/j.physa.2013.01.034.
- [169] P. A. Varotsos, N. V. Sarlis, and E. S. Skordas, "Remarkable changes in the distribution of the order parameter of seismicity before mainshocks," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 100, no. 3, p. 39002, 2012, doi: 10.1209/0295-5075/100/39002.
- [170] P. C. Ivanov *et al.*, "Scaling behaviour of heartbeat intervals obtained by wavelet-based time-series analysis," *Nature*, vol. 383, no. 6598, pp. 323-327, 1996, doi: 10.1038/383323a0.

Προσδιορισμός κρίσιμης κατάστασης σε ψαθυρά υλικά με μεθόδους στατιστικής φυσικής, αξιοποιώντας δεδομένα ακουστικών εκπομπών

- [171] K. Hu, P. C. Ivanov, Z. Chen, M. F. Hilton, H. E. Stanley, and S. A. Shea, "Non-random fluctuations and multi-scale dynamics regulation of human activity," *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 337, no. 1, pp. 307-318, 2004, doi: 10.1016/j.physa.2004.01.042.
- [172] A. Carpinteri and G. Lacidogna, *Acoustic Emission and Critical Phenomena: From Structural Mechanics to Geophysics*. CRC Press: Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, 2008.
- [173] N. V. Sarlis, E. S. Skordas, P. A. Varotsos, T. Nagao, M. Kamogawa, and S. Uyeda, "Spatiotemporal variations of seismicity before major earthquakes in the Japanese area and their relation with the epicentral locations," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 112, no. 4, pp. 986-989, 2015, doi: 10.1073/pnas.1422893112.
- [174] Y. Huang, H. Saleur, C. Sarnis, and D. Sornette, "Precursors, aftershocks, criticality and self-organized criticality," *Europhysics Letters (EPL)*, vol. 41, no. 1, pp. 43-48, 1998, doi: 10.1209/epl/i1998-00113-x.
- [175] A. Loukidis, D. Triantis, I. Stavrakas, E. D. Pasiou, and S. K. Kourkoulis, "Comparative Ib-value and F-function analysis of Acoustic Emissions from elementary and structural tests with marble specimens," *Material Design & Processing Communications*, vol. n/a, no. n/a, p. e176, 2020, doi: 10.1002/mdp2.176.
- [176] A. Loukidis, D. Triantis, I. Stavrakas, E. D. Pasiou, and S. K. Kourkoulis, "Detecting Criticality by Exploring the Acoustic Activity in Terms of the Natural-Time Concept," *Applied Sciences*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/app12010231.