



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Εφαρμογή μεθόδων εντροπίας στη διαγνωστική
βλαβών**

ΠΕΠΠΑ ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων Καθηγητής: Αντωνιάδης Ιωάννης

ΑΘΗΝΑ 2019

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω κάποιους ανθρώπους που με στήριξαν. Πρώτα από οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου, Αλέξανδρο και Δήμητρα, στην αδερφή μου Αντωνία, που με στηρίζουν για να πετυχαίνω τους στόχους μου. Θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον κ Γιακόπουλο Χρήστο για την πολύτιμη βοήθεια του και την καθοδήγηση του κατά την διάρκεια της εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία στοχεύει να μελετήσει την εντροπία σαν εργαλείο διάγνωσης βλαβων εδράνων κύλισης. Πιο συγκεκριμένα αν μπορεί να εντοπίσει σε μικρό χρονικό διάστημα την φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο ενός ρουλεμάν.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζονται γενικά οι έννοιες της συντήρησης, των βλαβών και παρουσιάζεται το στοχαστικό μοντέλο που αναπαριστά την φθορά στον ένσφαιρο τριβέα.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στις διαφορετικές μεθοδολογίες εντροπίας και παρουσιάζει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που έχει η εφαρμογή κάθε μία από αυτών.

Το τρίτο κεφάλαιο αναλύει την έννοια του σήματος και των τεχνικών αποθορυβοποίησης που επιλέχθηκαν για την παρούσα εργασία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν. Πιο αναλυτικά, οι μεθοδολογίες των κεφαλαίων 2 και 3 εφαρμόζονται σε σήματα προσομοίωσης και σε σήματα που προέρχονται από πραγματική μηχανή.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται η εξαγωγή και παρουσίαση των συμπερασμάτων. Στο παράρτημα υπάρχουν όλοι οι κώδικες που χρησιμοποιήθηκαν.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	1
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	4
1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ.....	4
1.3 ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗ ΣΗΝΤΗΡΗΣΗ.....	5
1.4 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΝΣΦΑΙΡΩΝ ΤΡΙΒΕΩΝ.....	6
2 ΕΝΤΡΟΠΙΑ.....	11
2.1 ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑ.....	11
2.2 ΠΟΛΥΒΑΘΜΩΤΗ ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑ.....	14
2.3 AMPLITUDE- AWARE PERMUTATION ENTROPY.....	15
2.4 SAMPLE ENTROPY.....	16
2.5 APPROXIMATE ENTROPY.....	17
2.6 DISPERSION ENTROPY.....	18
2.7 FLUCTUATION BASED DISPERSION ENTROPY.....	19
2.8 REFINED COMPOSITE MULTISCALE DISPERSION ENTROPY.....	19
2.9 FUZZY ENTROPY.....	19
3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	20
3.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	20
3.2 ΑΠΟΘΟΥΡΥΒΟΠΟΙΗΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	21
3.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ.....	21
3.4 ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΟΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΥΜΑΤΙΔΙΑΚΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ 22	
3.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ HILBERT.....	31
3.6 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ.....	31
3.7 SPECTRAL KURTOSIS.....	36
3.8 SAX-ΡΑΑ.....	38
4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ.....	40
4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΟ ΣΗΜΑ.....	40
4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ.....	55
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	78
ΒΙΒΛΙΟΦΡΑΦΙΑ.....	79
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	80

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην σύγχρονη βιομηχανία του σκληρού ανταγωνισμού και της ολοένα και μεγαλύτερης μηχανοποίησης και αυτοματοποίησης των λειτουργιών, η συντήρηση και γενικότερα η διαχείριση του εξοπλισμού είναι μία δραστηριότητα στην οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη βαρύτητα. Παρόλα αυτά οι σύγχρονες επιχειρήσεις έχοντας ως κύριο στόχο την μείωση των εξόδων τους αλλά ταυτόχρονα και την αύξηση της παραγωγικότητάς τους, δεν επενδύουν στην συντήρηση. Αυτό συμβαίνει γιατί την θεωρούν ως ένα απρόβλεπτο, αναγκαίο κόστος ή αλλιώς ένα παραδοσιακό 'κακό' για τους πιο συντηρητικούς. Στην πραγματικότητα η συντήρηση αποτελεί ένα κρυφό, έμμεσο κέρδος για την επιχείρηση. Αυτό γιατί με την δημιουργία ενός καλά οργανωμένου και αποδοτικού προγράμματος συντήρησης μειώνονται οι αστοχίες στον εξοπλισμό. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε σημαντική μείωση δαπανών αλλά και αύξηση της αποδοτικότητας της γραμμής παραγωγής της επιχείρησης.

1.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΙΣΤΟΡΙΚΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ

Αν μπορούσαμε να δώσουμε έναν απλό ορισμό της συντήρησης θα λέγαμε ότι:

<<Συντήρηση είναι ένα καλώς καθορισμένο σύνολο δραστηριοτήτων που σκοπό έχουν την διατήρηση του τεχνολογικού έν γένει εξοπλισμού ή την επαναφορά του στην επιθυμητή κατάσταση λειτουργίας των βιομηχανικών ή κατασκευαστικών επιχειρήσεων σε μία επιθυμητή κατάσταση αποτελεσματικής λειτουργίας.>>

Η σύγχρονη προσέγγιση της συντήρησης δεν έχει καμία ομοιότητα με την πρώτη εμφάνιση της έννοιας της συντήρησης και αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό αν σκεφτεί κανείς την ολοένα και μεγαλύτερη μηχανοποίηση και αυτοματοποίηση των εργασιών των σύγχρονων βιομηχανιών σε σχέση με τις απλές ανάγκες των πρώτων βιομηχανιών. Αρχικά μπορούμε να πούμε ότι ο 2^{ος} Παγκόσμιος Πόλεμος ήταν η αφετηρία για την εξέλιξη της συντήρησης. Πριν από τον 2^ο Παγκόσμιο Πόλεμο η βιομηχανία ήταν στα πρώτα της βήματα, ο εξοπλισμός σχετικά απλός και η συντήρηση όπως είναι λογικό υποτειπώδης. Οι αστοχίες του εξοπλισμού δεν ήταν τόσο σημαντικές όσο σήμερα και έτσι ο βιομηχανικός εξοπλισμός λειτουργούσε μέχρι να αστοχήσει και τότε είτε επισκευαζόταν είτε αντικαθίστατο με κάποιον καινούριο. Αυτή η πρώτη προσέγγιση της συντήρησης ονομάστηκε **Λειτουργία ως τη Βλάβη** (Breakdown Maintenance) και χαρακτηρίζεται από την απουσία κάθε είδους ενέργειας για την αποφυγή ή διάγνωση της αστοχίας. Το κόστος αυτού του είδους της συντήρησης είναι συνήθως πολύ υψηλό, αλλά σε κάποιες περιπτώσεις, όπως για παράδειγμα όταν ένα μηχάνημα δεν παίζει μεγάλο ρόλο στην παραγωγική διαδικασία μιας βιομηχανίας, μπορεί να είναι το κατάλληλο είδος συντήρησης. Με το πέρας του 2^{ου} Παγκοσμίου Πολέμου, η δραματική μείωση του ανθρώπινου δυναμικού καθώς και η αύξηση της ζήτησης διάφορων προϊόντων οδήγησαν σε εξέλιξη της παραγωγικής δυναμικότητας στις βιομηχανίες καθώς και σε υψηλή μηχανοποίηση αυτών. Η συντήρηση τώρα πια άρχισε να γίνεται μια δραστηριότητα με μεγάλη βαρύτητα για τις επιχειρήσεις. Σε αυτή την περίοδο αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε η δεύτερη προσέγγιση της συντήρησης, η **Προληπτική Συντήρηση** (Preventive Maintenance). Η Προληπτική Συντήρηση είναι η <<η συντήρηση που διενεργείται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ή ανταποκρινόμενη σε συγκεκριμένα κριτήρια και στοχεύει στη μείωση της πιθανότητας βλάβης ή χειροτέρευση της λειτουργίας ενός αντικειμένου>>. Αυτά τα προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα είναι είτε με βάση τον χρόνο είτε με βάση τη χρήση. Μετέπειτα και πιο συγκεκριμένα στην δεκαετία του 60, οι ανάγκες και οι απαιτήσεις της βιομηχανίας της Πολεμικής Αεροπορίας και των συστημάτων άμυνας έκριναν αναγκαία την δημιουργία συστημάτων παρακολούθησης του εξοπλισμού έτσι ώστε να μειώσουν την πιθανότητα εμφάνισης αστοχιών. Έτσι άρχισαν να υιοθετούνται οι πρώτες προβλεπτικές προσεγγίσεις, όπως τα συστήματα πληροφόρησης της οργάνωσης της συντήρησης (Maintenance Management Information Systems), η παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού

(Condition Monitoring) και η συντήρηση με βάση την κατάσταση (Condition Based Maintenance), οι οποίες αργότερα πέρασαν και στην παραγωγική βιομηχανία. Έπρεπε όμως να φτάσουμε στα τέλη της δεκαετίας του 80 και στις αρχές της δεκαετίας του 90 για να επικρατήσει αυτή η νέα προσέγγιση συντήρησης στην βιομηχανία, η **Συντήρηση με βάση την Κατάσταση**. Η Συντήρηση με βάση την Κατάσταση ορίζεται ως <<συντήρηση που διενεργείται σύμφωνα με τις ανάγκες όπως αυτές υποδεικνύονται από την παρακολούθηση της κατάστασης>>. Όλες αυτές οι τεχνικές αυτής της συντήρησης μπορούν να περιγραφούν ως μία **Προβλεπτική Συντήρηση** (Predictive Maintenance), η οποία ασχολείται κυρίως με την αναγνώριση επικείμενων αστοχιών και την πρόβλεψη της κατάστασης του εξοπλισμού. Τα τελευταία χρόνια δίνεται έμφαση στην δημιουργία συνεργασιών μεταξύ της συντήρησης και των άλλων λειτουργιών μιας επιχείρησης. Στο πλαίσιο αυτό κινείται μια νέα προσέγγιση συντήρησης, η **Συντήρηση Ακρίβειας** (Design-Out Maintenance). Αυτή βασίζεται στην λεπτομερή κατανόηση των διαδικασιών των αστοχιών και στον επαναπρογραμματισμό της συγκεκριμένης μηχανής έτσι ώστε να μειωθεί η πιθανότητα μελλοντικής αστοχίας.

1.3 ΠΡΟΒΛΕΠΤΙΚΗ ΣΗΝΤΗΡΗΣΗ

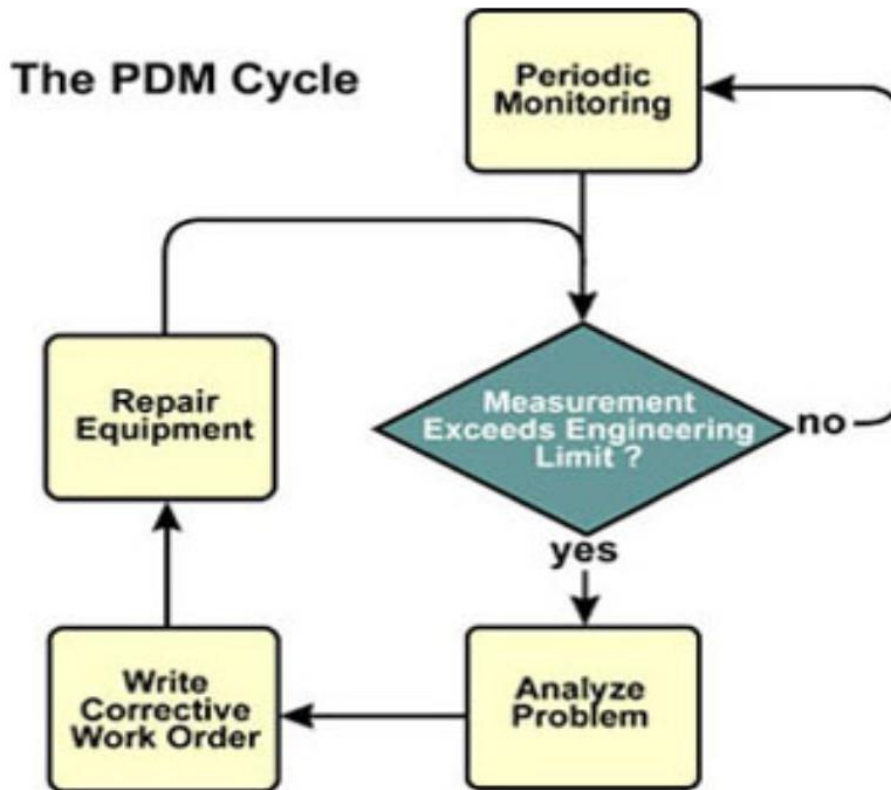
Στην παρούσα εργασία αναλύονται μέθοδοι προβλεπτικής συντήρησης. Πιο συγκεκριμένα, προβλεπτική συντήρηση είναι η διαδικασία προσδιορισμού της κατάστασης των μηχανημάτων ενώ αυτά βρίσκονται σε λειτουργία. Έτσι γίνεται αντικατάσταση των φθαρμένων υλικών πριν αυτά αστοχήσουν. Αποτελεί μία πιο σύγχρονη προσέγγιση της διαχείρισης των συστημάτων συντήρησης που εφαρμόζεται στις βιομηχανίες την τελευταία εισοσαετία. Η Προβλεπτική συντήρηση επίσης βοηθάει το προσωπικό να μειώσει την πιθανότητα ζημιάς, επιτρέπει την παραγγελία ανταλλακτικών στην ώρα τους, την διαχείριση του ανθρώπινου δυναμικού καθώς και άλλες μικροεπισκευές.

Κατά την Προβλεπτική συντήρηση πραγματοποιείται σύγκριση των τιμών των υπολογιζόμενων παραμέτρων ελέγχου με κάποιες γνωστές προδιαγραφές των κατασκευαστών ή με κάποιες συνήθεις τιμές που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Κάποιο μηχάνημα, το οποίο αποφασίζεται να μπει στο σύστημα Προβλεπτικής συντήρησης, εισάγεται στο λεγόμενο << κύκλο λειτουργίας >> της.

Οι μέθοδοι της Προβλεπτικής συντήρησης που μετρούν την λειτουργική δυναμική του εξοπλισμού στηρίζονται σε ένα σύνολο μετρητικών τεχνικών. Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές χρησιμοποιείται για την μέτρηση ενός συγκεκριμένου εξαρτήματος, αλλά γενικά σε μία επιχείρηση και σε ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα Προβλεπτικής συντήρησης χρησιμοποιείται ένας συνδυσμός αυτών των τεχνικών.

Τεχνικές Μετρησης:

- Μέτρηση και ανάλυση κραδασμών (Vibration Spectrum Analysis)
- Μέθοδος κρουστικών Παλμών (Shock Pulse Method)
- Μετρήσεις με υπερήχους
- Μέθοδος τριβολογίας
- Θερμογραφία
- Λοιποί μέθοδοι μη καταστροφικών ελέγχων



Σχήμα 1.1. Κύκλος Λειτουργίας Προβλεπτικής Συντήρησης

Η μέτρηση και ανάλυση κραδασμών αποτελεί σήμερα το πλέον διαδεδομένο εργαλείο διάγνωσης βλαβών του μηχανολογικού εξοπλισμού. Η διάδοση αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι οποιαδήποτε βλάβη ή διαταραχή της συμπεριφοράς του εξοπλισμού δημιουργεί μία αλλαγή της δυναμικής συμπεριφοράς του, η οποία μεταβιβάζεται εντέλει στη μηχανική δομή του προκαλώντας μεταβολή των κραδασμών στους οποίους υπόκειται. Κατά συνέπεια η μέτρηση των κραδασμών είναι σε θέση να παράσχει όλες εκείνες τις πληροφορίες που μπορούν να καταστήσουν δυνατή τη διάγνωση μιας πιθανής βλάβης ή φθοράς.

1.4 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΕΝΣΦΑΙΡΩΝ ΤΡΙΒΕΩΝ

Η παρακολούθηση της ταλάντωσης μιας μηχανής είναι καθοριστικής σημασίας, διότι μέσω αυτής μπορεί να γίνει η πρόβλεψη της βλάβης και να προγραμματιστούν ενέργειες επισκευής προτού η μηχανή σταματήσει ολοκληρωτικά και απρόβλεπτα. Έτσι επιτυγχάνεται η εκμετάλλευση της μηχανής στον μέγιστο βαθμό εξοικονομώντας ενέργεια, χρόνο και σαν συνέπεια χρήμα. Κάθε κινούμενο μέλος σε μία περιστρεφόμενη μηχανή παράγει δονήσεις, και κατ' επέκταση θόρυβο. Αν τεθεί μία τέτοια μηχανή υπό παρακολούθηση βάσει των ταλαντωτικών σημάτων της, είναι πολύ εύκολο να γίνει αναγωγή των διαφορών που θα προκύπτουν στις ταλαντώσεις της μηχανής σε διαφορές στην κατάσταση της. Κάθε κινούμενο μέλος παράγει συγκεκριμένα ταλαντωτικά σήματα που είναι χαρακτηριστικά γι' αυτό και έτσι είναι εύκολο να παρατηρηθεί αν το εξάρτημα είναι σε ικανοποιητική κατάσταση ή αν έχει εμφανίσει κάποια βλάβη. Σημαντικά στοιχεία για τη σωστή παρακολούθηση μιας περιστρεφόμενης μηχανής είναι η ταχύτητα περιστροφής, ο θόρυβος στο περιβάλλον που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις ο οποίος είναι βασική παράμετρος που πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη σημασία για αξιόπιστα αποτελέσματα, η σωστή τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης και τα χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής της διάταξης όσον αφορά τη μετάδοση φορτίων. Τα βασικά κινούμενα μέρη μιας μηχανής, που επικεντρώνονται στην

μελέτη για πρόγνωση και διάγνωση βλαβών αυτών, είναι οι άξονες, οι οδοντωτοί τροχοί-γρανάζια, τα έδρανα κύλισης και οι ηλεκτρικές μηχανές, καθώς αυτά τα εξαρτήματα παρουσιάζουν τις περισσότερες βλάβες οι οποίες μπορούν να αποφευχθούν.



Τα σώματα κύλισης συγκρατούνται σε ίσες αποστάσεις από τον κλωβό.

Σχήμα 1.2 Αποτελούμενα μέρη ενός εδράνου κύλισης.

Στην παρούσα μελέτη θα εστιάσουμε στην πρόγνωση βλαβών σε έδρανα κύλισης. Οι ένσφαιροι τριβείς αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο των μηχανολογικών κατασκευών λόγω των υψηλών αποδόσεων που επιδεικνύουν και του σχετικά μικρού κόστους τους. Ένας ένσφαιρος τριβέας αποτελεί μία πηγή δονήσεων κατά τη λειτουργία του. Οι κραδασμοί παράγονται από τις κρούσεις των στοιχείων κύλισης στη φθαρμένη μεταλλική επιφάνεια των συνεργαζόμενων δακτυλίων του ένσφαιρου τριβέα. Αποτέλεσμα αυτού του φαινομένου είναι η διέγερση ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής ή του ένσφαιρου τριβέα. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ένσφαιρου τριβέα, ο λόγος αξονικού-ακτινικού φορτίου κάθε στοιχείου κύλισης μεταβάλλεται σε σχέση με τη θέση που κατέχει στην περιφέρεια του ένσφαιρου τριβέα κάθε χρονική στιγμή. Το φαινόμενο αυτό υποχρεώνει τα στοιχεία κύλισης να κινηθούν με διαφορετικές ταχύτητες μεταξύ τους. Ο κλωβός, όμως, ο οποίος συγκρατεί τα στοιχεία κύλισης, προσπαθεί να διατηρήσει μια ομοιόμορφη και σταθερή μέση απόσταση μεταξύ τους, με αποτέλεσμα να προκαλείται το μη γραμμικό φαινόμενο της ολίσθησης ανάμεσα στα συνεργαζόμενα μεταλλικά δομικά στοιχεία του ένσφαιρου τριβέα. Επίσης, η ανάπτυξη της ολίσθησης κατά τη διάρκεια της κίνησης των στοιχείων κύλισης μεταβάλλει απειροστά και τοπικά την γωνία επαφής του ένσφαιρου τριβέα επηρεάζοντας την μέση ακτίνα κύλισης.

Έτσι, τα χρονικά σήματα, που χαρακτηρίζονται από διαδικασίες τέτοιας φύσης, δεν εμφανίζουν ισχυρές περιοδικότες, και αυθεντικούς γωνιακούς δεσμούς με την ταχύτητα περιστροφής. Αντίθετα εμφανίζουν κυκλοστάσιμες ιδιότητες, δηλαδή περιοδικότητα των ανώτερων στατιστικών μεγεθών τους.

Κάθε φορά που τα στοιχεία κύλισης ενός ένσφαιρου τριβέα έρχονται σε επαφή με σημειακές φθορές ή ελαττώματα παράγεται μία δόνηση. Η δόνηση αυτή μπορεί να προσομοιωθεί με έναν κρουστικό παλμό, ο οποίος μαθηματικά εκφράζεται από την κρουστική συνάρτηση $\delta(t)$. Ο βαθμός βαρύτητας της βλάβης δηλώνεται με το γινόμενο της κρουστικής συνάρτησης $\delta(t)$ με μια σταθερά d_0 . Αυτός ο κρουστικός παλμός παριστάνει την εξωτερική διέγερση, δηλαδή τη δύναμη που εφαρμόζεται ως είσοδος στον ένσφαιρο τριβέα και γενικότερα στην κατασκευή. Κάθε τέτοια διέγερση προκαλεί μία απόκριση από τον ένσφαιρο τριβέα και την κατασκευή, η οποία λαμβάνεται υπόψιν για την ανάπτυξη του μοντέλου στη συνέχεια. Ο κρουστικός παλμός,

εξαιτίας της περιστροφής του έσφαιρου τριβέα κατά την λειτουργία του, εκδηλώνεται περιοδικά με μία συχνότητα, η οποία εξαρτάται από τον τύπο της βλάβης. Οι χαρακτηριστικές συχνότητες, στις οποίες εκδηλώνονται οι βλάβες ενός έσφαιρου τριβέα υπολογίζονται με βάση την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του έσφαιρου τριβέα.

Σε έναν έσφαιρο τριβέα που παρουσιάζει βλάβη στον εσωτερικό ή εξωτερικό δακτύλιο, οι κρουστικοί παλμοί παράγονται κάθε φορά που η φθαρμένη επιφάνεια έρχεται σε επαφή με τα στοιχεία κύλισης του έσφαιρου τριβέα στη ζώνη φόρτισης.

Τα χαρακτηριστικά κάθε σφάλματος αναφέρονται επιγραμματικά στον παρακάτω πίνακα.

Σφάλμα	Χαρακτηριστικό
Εσωτερικού δακτυλίου	Αύξηση του εύρους της BPF _I και των αρμονικών της
Εξωτερικού δακτυλίου	Αύξηση του εύρους της BPF _O και των αρμονικών της
Σφαιρών του εδράνου κύλισης	Αύξηση του εύρους της 2*BSF και των αρμονικών της και της FTF

Πίνακας 1.1. Σφάλματα εδράνων κύλισης

Παρακάτω αναλύονται οι συχνότητες που μας απασχολούν στα σφάλματα εδράνων κύλισης:

- BPF_I (Ball Pass Frequency of Inner Race)
Πρόκειται για τη συχνότητα με την οποία περνάνε οι σφαίρες του ρουλεμάν από ένα συγκεκριμένο σημείο του εσωτερικού περιβλήματος και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$BPF_I = \frac{n * f_r}{2} + [1 + (\frac{d}{D} * \cos \varphi)] \quad 1.1$$

- BPF_O (Ball Pass Frequency of Outer Race)
Πρόκειται για τη συχνότητα με την οποία περνάνε οι σφαίρες του ρουλεμάν από ένα συγκεκριμένο σημείο του εξωτερικού περιβλήματος και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$BPF_O = \frac{n * f_r}{2} + [1 - (\frac{d}{D} * \cos \varphi)] \quad 1.2$$

- FTF (Fundamental Train Frequency)
Πρόκειται για τη συχνότητα κλωβού, η οποία ορίζεται ως η γωνιακή ταχύτητα των κέντρων των σφαιρών και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$FTF = \frac{f_r}{2} + [1 - (\frac{d}{D} * \cos \varphi)] \quad 1.3$$

- BSF (Ball Spin Frequency)
Πρόκειται για την συχνότητα περιστροφής των σφαιρών του ρουλεμάν, και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$BSF = \frac{D}{2d} * \left[1 - (\frac{d}{D} * \cos \varphi)^2 \right] * f_r \quad 1.4$$

Όπου:

- d : Η διάμετρος της σφαίρας (Ball diameter)
- D : Η διάμετρος του κύκλου που περνάει από τα κέντρα των σφαιρών (pitch diameter)
- φ : Η γωνία του φορτίου
- n : Ο αριθμός των σφαιρών του ρουλεμάν

Αρχικά, θεωρείτε μοναδιαία ακτινική φόρτιση, η οποία αναπτύσσεται ομοιόμορφα ολόγυρα της περιφέρειας του ένσφαιρου τριβέα. Έτσι, ο κραδασμός, που παράγεται λόγω του προβλήματος που εξετάζεται, είναι δυνατόν να προσομοιωθεί με μία σειρά άπειρων κρουστικών παλμών ίσου πλάτους. Η περίοδος T_d των επαναλαμβανόμενων κρουστικών παλμών ισούται με την αντίστροφη τιμή της χαρακτηριστικής συχνότητας βλάβης. Η προαναφερθείσα σειρά κρουστικών παλμών μπορεί μαθηματικά να εκφραστεί με τη σχέση:

$$d(t) = d_0 * \sum_{k=0}^N d(t - k * T_d) \quad 1.5$$

Το πλάτος των κρουστικών παλμών εκφράζει την ένταση της σύγκρουσης των στοιχείων κύλισης με τη φθαρμένη επιφάνεια του ένσφαιρου τριβέα. Σύμφωνα με την πλειονότητα των μελετών που αφορούν τη δυναμική των ένσφαιρων τριβέων, το πλάτος των κρούσεων επηρεάζεται από τη θέση στην περίμετρο του ένσφαιρου τριβέα που συμβαίνει η σύγκρουση σε συνάρτηση με το κέντρο της ζώνης φόρτισης.

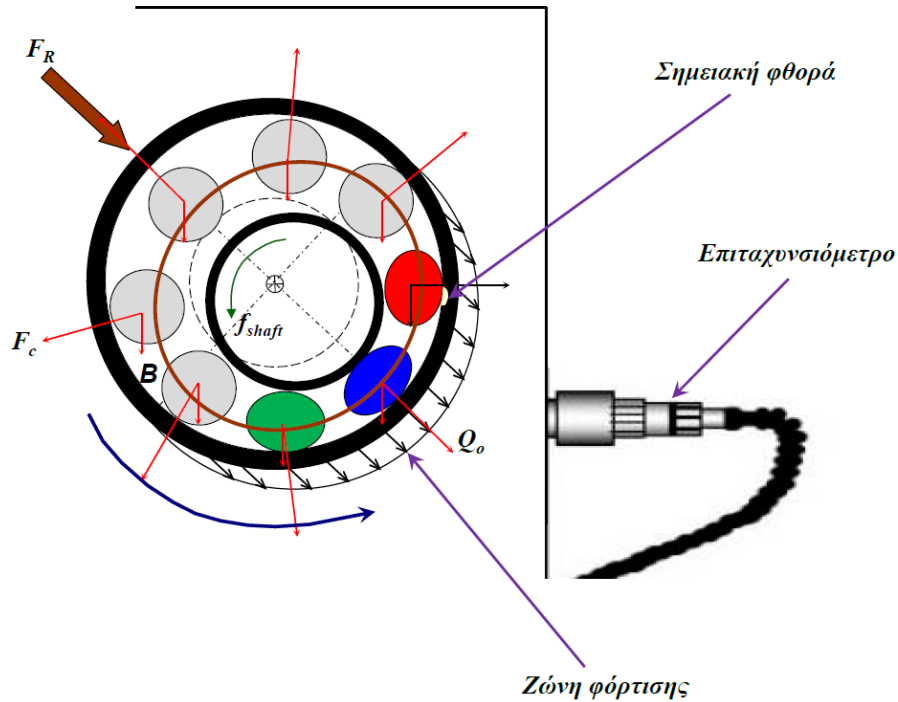
Το πλάτος των κρουστικών παλμών διαμορφώνεται, εκτός από την προηγούμενη περίπτωση, κατά τυχαίο τρόπο από: (α) τις διακυμάνσεις της ακαμψίας που εμφανίζει η δομή του ένσφαιρου τριβέα, (β) τη κυματιδιακή ανομοιομορφία των επιφανειών των δομικών στοιχείων, (γ) την ανομοιομορφία του μεγέθους των στοιχείων κύλισης, (δ) την κακή ευθυγράμμιση των διαδρόμων κύλισης και (ε) την εκκεντρότητα των διαδρόμων κύλισης.

Έτσι, για όλους τους παραπάνω λόγους, το πλάτος των κρουστικών παλμών εμφανίζει μία τυχαία διακύμανση περί μίας μέσης τιμής d_0 . Η τυχαία διακύμανση των κρούσεων θεωρείται ότι ακολουθεί κανονική κατανομή.

$$d(t) = \sum_{k=0}^N A_k * \delta(t - k * T_d) \quad 1.6$$

όπου $A_k = d_0 \pm a_k$ είναι το πλάτος του k -οστού κρουστικού παλμού και a_k είναι η τυχαία απόκλιση του πλάτους της κρούσης από τη μέση τιμή d_0 .

Η κατανομή του φορτίου σχήμα περιφερειακά του ένσφαιρου τριβέα όταν αυτός βρίσκεται υπό την επίδραση ακτινικής φόρτισης ορίζεται κατά προσέγγιση από τη συνάρτηση του Stribeck.



Σχήμα 1.3 Κατανομή ακτινικού φορτίου περιφερειακά του ένσφαιρου τριβέα.

Η συνάρτηση του Stribeck δεν λαμβάνει υπόψη τις μεταβολές στην κατανομή του φορτίου, οι οποίες οφείλονται στο πλήθος και τη θέση των στοιχείων κύλισης εντός της ζώνης φόρτισης κάθε χρονική στιγμή. Έχει αποδειχθεί, όμως, ότι οι διακυμάνσεις της ακαμψίας (stiffness), οι οποίες οφείλονται στην μεταβολή του πλήθους των στοιχείων κύλισης και της θέσης αυτών εντός της ζώνης φόρτισης, δεν υπερβαίνουν το 0,5% της συνολικής τιμής τους για μία δεδομένη φόρτιση. Έτσι, η εκδήλωση αυτών των μεταβολών αγνοείται κατά την ανάπτυξη του μοντέλου.

Επομένως, η κατανομή του φορτίου είναι δυνατόν να εκφραστεί από τη σχέση:

$$q(t) = \begin{cases} q_0 * [1 - \frac{1}{2 * \epsilon} * (1 - \cos \theta)]^n, & \text{για } |\theta| < \theta_{max} \\ 0, & \text{για οπουδήποτε αλλού} \end{cases} \quad 1.7$$

όπου q_0 ορίζει το μέγιστο φορτίο, ϵ είναι ο συντελεστής της κατανομής του φορτίου, ο όρος θ_{max} παριστάνει τη μέγιστη γωνιακή έκταση της ζώνης φόρτισης, και $n=3/2$ για τριβέα με σφαιρικά στοιχεία κύλισης και $n=10/9$ για τριβέα με κυλινδρικά στοιχεία κύλισης. Η συνάρτηση $q(t)$ είναι περιοδική διότι η φθαρμένη επιφάνεια του εσωτερικού δακτυλίου του ένσφαιρου τριβέα διασχίζει τη ζώνη φόρτισης μία φορά σε κάθε περιστροφή του άξονα.

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενες παραγράφους, στους ένσφαιρους τριβείς αναπτύσσεται ολίσθηση στην κίνηση των στοιχείων κύλισης τους. Αποτέλεσμα αυτού του μη γραμμικού φαινομένου είναι οι κρούσεις των συνεργαζόμενων δομικών στοιχείων του ένσφαιρου τριβέα να μην επαναλαμβάνονται σε ίσες χρονικές περιόδους. Έτσι, εμφανίζεται μία χρονική υστέρηση t_k μεταξύ των διαδοχικών κρούσεων. Η χρονική υστέρηση t_k θεωρείται ως μία τυχαία μεταβλητή που ακολουθεί κανονική κατανομή (Gauss distribution). Έτσι, εισάγεται η στοχαστική ιδέα στο προτεινόμενο πρότυπο προσομοίωσης. Επομένως, η ακολουθία των χρονικών κρουστικών δονήσεων μπορεί να εκφραστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$d(t) = \sum_{k=0}^N A_k * \delta(t - k * T_d - \tau_k), \text{για φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο} \quad 1.8$$

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, κάθε φορά που η σημειακή φθορά έρχεται σε επαφή με κάποια συνεργαζόμενη επιφάνεια του ένσφαιρου τριβέα παράγεται κάποιος κρουστικός παλμός, ο οποίος προκαλεί τη διέγερση πεπερασμένου πλήθους ιδιοσυχνοτήτων της κατασκευής. Αυτή η διαδικασία μπορεί να προσομοιωθεί με την απόκριση ενός γραμμικού μηχανικού συστήματος ενός βαθμού ελευθερίας, η οποία εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$s(t) = B * e^{-t/m} * \cos(2 * \pi * f_0 * t) \quad 1.9$$

$$m = \frac{Q}{\pi * f_n}, f_0 = f_n * \sqrt{1 - 1/4 * Q^2} \text{ και } Q > 1/2 \quad 1.10$$

όπου, m είναι ο χρόνος άμβλυνσης (relaxation time), f_0 είναι η συχνότητα ελεύθερης ταλάντωσης (free oscillation frequency), f_n είναι η ιδιοσυχνότητα της κατασκευής (phase resonance frequency) και Q είναι ο συντελεστής ποιότητας (quality factor), ο οποίος σχετίζεται με το μέσο διάδοσης.

2 ENTROPIA

Τα έδρανα κύλισης είναι τα πιο ευρέως διαδεδομένα εξαρτήματα μιας περιστρεφόμενης μηχανής. Οι βλάβες στα έδρανα κύλισης μπορούν να οδηγήσουν σε απρόβλεπτες απώλειες για την παραγωγική διαδικασία. Επομένως, η διάγνωση της βλάβης των ρουλεμάν είχε προσελκύσει την προσοχή των ερευνητών και των μηχανικών τις προηγούμενες δεκαετίες. Γενικά, η διαδικασία διάγνωσης βλαβών μπορεί να αποδομηθεί σε τρία μέρη: συλλογή δεδομένων, εξαγωγή χαρακτηριστικών και ταξινόμηση των καταστάσεων βλάβης.

Η ανάλυση κραδασμών στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας είναι μια κυρίαρχη τεχνική για την διάγνωση βλαβών. Διάφορα στατιστικά μεγέθη στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας, όπως η μέση τετραγωνική ρίζα, κύρτωση και λοξότητα, είναι ικανά να αναγνωρίσουν βλάβες.

Μέθοδοι ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας, όπως ο μετασχηματισμός Fourier, η κατανομή Wigner Ville και ο μετασχηματισμός κυματιδίων έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως για τον εντοπισμό βλάβης. Ωστόσο, αυτού του είδους μέθοδοι συχνά απαιτούν μεγάλο υπολογιστικό χρόνο, καθώς περιλαμβάνουν μετασχηματισμούς Fourier και συνελίξεις. Επιπρόσθετα, τα κρουστικά σήματα συχνά χαρακτηρίζονται από μη γραμμικότητα εξ αιτίας των συντελεστών διακένου και της μη γραμμικής δυσκαμψίας των ρουλεμάν. Επομένως, αυτές οι τεχνικές ανάλυσης στο πεδίο του χρόνου-συχνότητας μπορεί να παρουσιάσουν περιορισμούς διότι υποθέτουν γραμμικότητα.

Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, διάφορες τεχνικές εκτίμησης μη γραμμικών παραμέτρων έχουν εφαρμοσθεί για να εξάγουν χαρακτηριστικά που κρύβονται στα σήματα.

2.1 ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ ENTROPIA

Η μεταθετική εντροπία (Permutation Entropy- PE) εκτιμά την πολυπλοκότητα μιας χρονοσειράς μέσω σύγκρισης των γειτονικών τιμών. Το συγκεκριμένο είδος εντροπίας χρησιμοποιείται σε έναν αριθμό εφαρμογών, όπως για παράδειγμα στην ανάλυση ηλεκτροεγκεφαλικών σημάτων (EEG), στην ανάλυση χρηματιστηριακών αγορών, στην ανίχνευση θραύσης εργαλείων φινιρίσματος. Οι χρονοσειρές, προερχόμενες από φυσικά ή μηχανικά συστήματα είναι συνήθως σύνθετα και αποτελούνται από πολλαπλές χρονικές

κλίμακες. Εφ' όσον βασίζεται σε αλγόριθμο μίας χρονικής κλίμακας οι τεχνικές που βασίζονται στο PE έχουν περιορισμένη απόδοση στην ανάλυση τέτοιων πολύπλοκων δεδομένων.

Σύμφωνα με το μαθηματικό θεώρημα των Takens–Maine, ο χώρος φάσεων μιας χρονοσειράς $\{x(i), i = 1, 2, \dots, N\}$ μπορεί να ανακατασκευαστεί:

$$\begin{cases} X(1) = \{x(1), x(1 + \tau), \dots, x(1 + (m - 1)\tau)\} \\ \vdots \\ X(i) = \{x(i), x(i + \tau), \dots, x(i + (m - 1)\tau)\} \\ \vdots \\ X(N - (m - 1)\tau) = \{x(N - (m - 1)\tau), x(N - (m - 2)\tau), \dots, x(N)\} \end{cases} \quad 2.1$$

Όπου m είναι η ενσωματωμένη διάσταση και τ η χρονική καθυστέρηση. Μπορούμε να πούμε ότι το x_i^m έχει την μετάθεση $\pi_{r_0 r_1 \dots r_{m-1}}$ αν ικανοποιεί την σχέση:

$$x(t + r_0 \tau) \leq x(t + r_1 \tau) \leq \dots \leq x(t + r_{m-1} \tau) \quad 2.2$$

Όπου $0 \leq r_i \leq m - 1$ και $r_i \neq r_j$.

Υπάρχουν $m!$ πιθανές μεταθέσεις για ένα διάνυσμα μεγέθους m . Για κάθε μετάθεση π , ορίζουμε την σχετική συχνότητα:

$$p(\pi) = \frac{\text{Number } \{t | t \leq T - (m - 1)\tau, x_t^m \text{ has type } \pi\}}{N - (m - 1)\tau} \quad 2.3$$

Η μεταθετική εντροπία (PE) της m διάστασης ορίζεται ως:

$$H_{PE}(m) = - \sum_l^k p(\pi) \ln(p(\pi)) \quad 2.4$$

Η μέγιστη τιμή της $H_{PE}(m)$ ισούται με $\ln(m!)$. Όταν όλες οι ακολουθίες συμβόλων έχουν την ίδια κατανομή πιθανότητας $P_l = 1/m!$. Επομένως, η μεταθετική εντροπία τάξης m μπορεί να κανονικοποιηθεί:

$$H_{NPE}(m) = H_{PE}(m) / \ln(m!) \quad 2.5$$

Για κάθε χρονοσειρά ισχύει: $0 \leq H_{NPE}(m) \leq 1$

Η τιμή της H_p αναπαριστά την τυχασιότητα μιας χρονοσειράς $\{x(i), i = 1, 2, \dots, N\}$. Η μικρότερη τιμή της H_p είναι η μηδενική, η οποία υποδεικνύει χρονοσειρά χωρίς τυχασιότητα. Η μεγαλύτερη τιμή της H_p είναι 1, η οποία επιτυγχάνεται όταν όλες οι μεταθέσεις έχουν ίση πιθανότητα, όπως στην περίπτωση του λευκού θορύβου. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της H_p , τόσο περισσότερη κανονικότητα έχει η χρονοσειρά.

Για την καλύτερη κατανόηση του αλγορίθμου της μεταθετικής εντροπίας παρουσιάζεται το παρακάτω παράδειγμα:

$$x = (4, 7, 9, 10, 6, 11, 3)$$

Θέτουμε την παράμετρο $\tau=1$ και $m=3$. Έχουμε τα παρακάτω διανύσματα:

$$\begin{bmatrix} x_1^3 \\ x_2^3 \\ x_3^3 \\ x_4^3 \\ x_5^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 & 7 & 9 \\ 7 & 9 & 10 \\ 9 & 10 & 6 \\ 10 & 6 & 11 \\ 6 & 11 & 3 \end{bmatrix}$$

Υπάρχουν έξι (3!) πιθανές μεταθέσεις της διάστασης 3, οι οποίες δηλώνονται σαν $\pi_{012}, \pi_{021}, \pi_{102}, \pi_{120}, \pi_{201}, \pi_{210}$. Τα διανύσματα x_1^3 και x_2^3 έχουν μετάθεση π_{012} , το διάνυσμα x_4^3 έχει μετάθεση π_{102} και τα διανύσματα x_4^3, x_5^3 αντιστοιχούν στο π_{201} . Έτσι, η πιθανότητα κάθε μετάθεσης δίνεται παρακάτω:

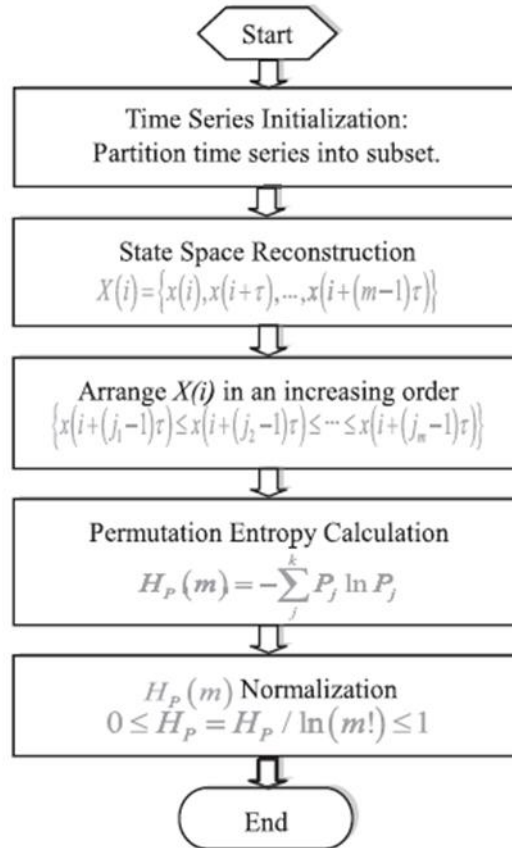
$$p(\pi_{012}) = \frac{2}{5}, p(\pi_{021}) = 0, p(\pi_{102}) = \frac{1}{5},$$

$$p(\pi_{120}) = 0, p(\pi_{201}) = \frac{2}{5}, p(\pi_{210}) = 0.$$

Η μεταθετική εντροπία (PE) και η κανονικοποιημένη μεταθετική εντροπία (NPE) της διάστασης 3, υπολογίζονται με βάση τις εξισώσεις 2.4 και 2.5:

$$H_{PE}(m) = -\frac{2}{5} \ln(2/5) - \frac{1}{5} \ln(1/5) - \frac{2}{5} \ln(2/5) \approx 1.0549$$

$$H_{NPE}(m) = \frac{1.0549}{\ln(3!)} = 0.5888$$



Σχήμα 2.1 Αλγόριθμος Υπολογισμού Μεταθετικής Εντροπίας

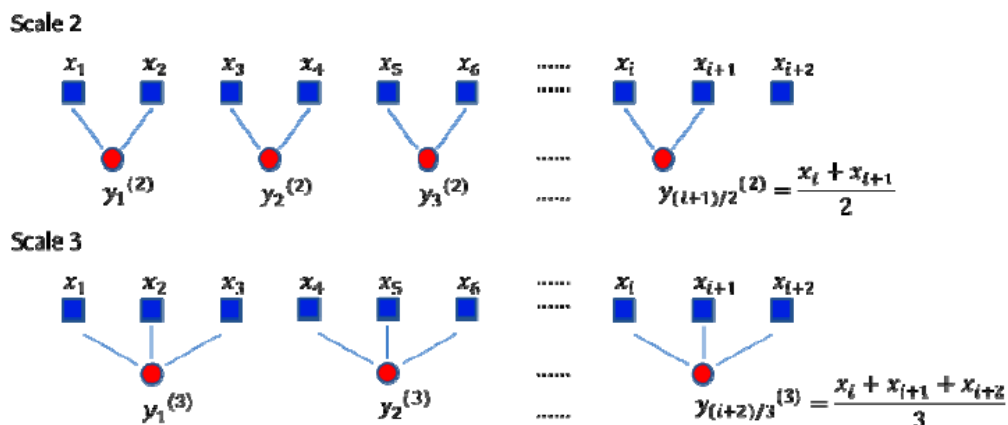
Όταν η μεταθετική εντροπία χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό δυναμικών αλλαγών σημάτων, η διαδικασία που ακολουθείται μπορεί να περιγραφεί ως εξής: Αρχικά, η χρονοσειρά μοιράζεται σε κομμάτια από υποσύνολα δεδομένων με μήκος w , τα οποία μπορούν να υπερκαλύπτονται. Τότε η μεταθετική εντροπία H_p υπολογίζεται για κάθε σετ δεδομένων και η αλλαγή της με την χρονική διακύμανση που ερευνάται. Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιείται η μέγιστη υπερκάλυψη, δηλαδή ένα σετ δεδομένων μετατρέπεται στο επόμενο μετατοπίζοντας το χρονικό βήμα κατά ένα.

2.2 ΠΟΛΥΒΑΘΜΩΤΗ ΜΕΤΑΘΕΤΙΚΗ ΕΝΤΡΟΠΙΑ

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η μεταθετική εντροπία μπορεί αποτελεσματικά να ανιχνεύσει την αλλαγή στην δυναμική των κρουστικών παλμών. Η ευκολία υπολογισμού της μεταθετικής εντροπίας την κάνει πολύ δημοφιλή μέθοδο. Όμως, η μεταθετική εντροπία ανιχνεύει τις αλλαγές στην δυναμική και στην τυχαιότητα των σημάτων μόνο σε μία κλίμακα. Αντίθετα, η πολυβαθμωτή μεταθετική εντροπία (multiscale permutation entropy MPE) αναλύει την πολυπλοκότητα της χρονοσειράς σε διαφορετικές κλίμακες. Λόγω της πολυπλοκότητας ενός μηχανικού συστήματος, οι κρουστικοί παλμοί είναι πιο πολύπλοκοι και περιέχουν περισσότερες πληροφορίες σε διαφορετικές κλίμακες. Επομένως, η MPE χρησιμοποιείται για την ανίχνευση βλαβών σε κρουστικούς παλμούς.

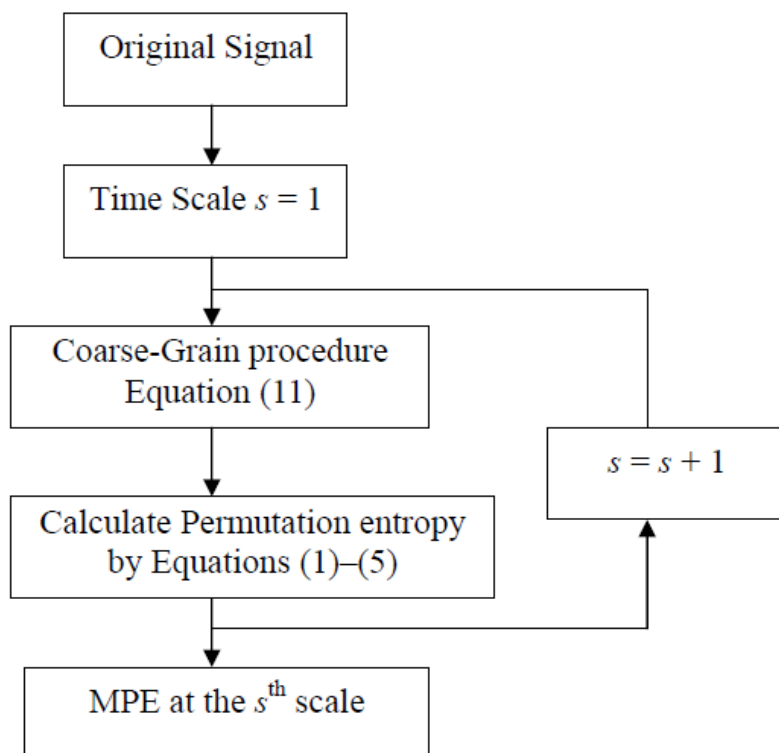
Όπως αναφέρουν και οι (Jinde Zheng, 2014) προτείνεται μια διαδικασία coarse-grained για να αποκτηθούν πολυβαθμωτές χρονικές σειρές από τις αρχικές χρονικές σειρές. Στην συνέχεια η εντροπία υπολογίζεται για την ανάλυση του σήματος. Δεδομένης μιας χρονικής σειράς $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, μπορεί να κατασκευάσει μια συνεχή coarse-grained χρονική σειρά η οποία $y^{(s)}$ αντιστοιχεί στην χρονική κλίμακα s . Αρχικά, το αρχικό σήμα χωρίζεται σε μη επικαλυπτόμενα παράθυρα μήκους s . Στην συνέχεια, τα σημεία μέσα σε κάθε παράθυρο μεσοτιμούνται σύμφωνα με την εξίσωση 2.6. Η σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας αποτυπώνεται στο σχήμα

$$y_j^{(s)} = \frac{1}{s} \sum_{i=(j-1)s+1}^{js} x_i, \quad 1 \leq j \leq \frac{N}{s} \quad 2.6$$



Σχήμα 2.2 Σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας coarse-grained

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, ο (Wajid Aziz, 2005) μια νέα μεθοδολογία την πολυβαθμωτή μεταθετική εντροπία (multiscale permutation entropy MPE). Στην ανάλυση MPE, η εντροπία της χρονικής σειράς coarse-grained σε κάθε κλίμακα, υπολογίζεται από τις εξισώσεις 2.3-2.5. Στην παρούσα εργασία η MPE χρησιμοποιήθηκε για την αναγνώριση βλάβης σε ένσφαιρους τριβείς.



Σχήμα 2.3 Σχήμα Ροής της πολυβαθμωτής μεταθετικής εντροπίας

2.3 AMPLITUDE-AWARE PERMUTATION ENTROPY

Οι δύο μέθοδοι εντροπίας που έχουν ήδη ανεφερθεί παρουσιάζουν δύο σημαντικά μειονεκτήματα. Πρώτον, η μέση τιμή του πλάτους και των διαφορών ανάμεσα στα γειτονικά δείγματα δεν λαμβάνονται υπόψιν. Ως συνέπεια, διανύσματα με ανόμια πλάτη μπορεί να αναπαρασταθούν με το ίδιο σύμβολο. Δεύτερον, υπάρχει πρόβλημα όταν δύο δείγματα έχουν ίδιο πλάτος δεν έχει επαρκώς λυθεί στον βασικό ορισμό της μεταθετικής εντροπίας.

Οι (Azami & Escudero, Amplitude-aware Permutation Entropy: Illustration in Spike Detection and, 2016) προτείνουν έναν τροποποιημένο αλγόριθμο, ο οποίος λύνει τα μειονεκτήματα των δυο μεθόδων. Αυτή η προσέγγιση υποστηρίζει ότι τα μοτίβα μπορεί να είναι ανόμια σε πλάτος και διακυμανση.

Αρχικά, εφ' όσον η μεταθετική εντροπία υπολογίζει μόνο την ακολουθία της χρονικής σειράς, μερικές κρίσιμες πληροφορίες χάνονται. Για παράδειγμα, $\{1,10,2\}$ και $\{1,3,2\}$ έχουν την ίδια μετάθεση λόγω του ίδιου μοτίβου «021», διότι οι διαφορές μεταξύ διαδοχικών δειγμάτων δεν λαμβάνονται υπόψιν στην PE. Ενώ άλλο παράδειγμα $\{1,3,2\}$ και $\{11,13,12\}$ έχει το ίδιο μοτίβο «021», διότι η μέση τιμή των δειγμάτων δεν λαμβάνεται υπόψιν στην PE.

Δεύτερον, όταν υπάρχουν κοινές τιμές στα διανύσματα, προτείνεται η κατάταξη των ίδιων τιμών βασιζόμενη στην εμφάνιση ή με την προσθήκη θορύβου. Για παράδειγμα, το μοτίβο για $\{1,2,4\}$ και $\{1,4,4\}$ θα ήταν το «012». Ένα άλλο παράδειγμα, ας υποθέσουμε $z_1 = \{1,2,2,2\}$ και $z_2 = \{1,2,3,4\}$. Η PE του z_1 είναι ακριβώς η ίδια με του z_2 , ίση με το μηδέν. Η προσθήκη θορύβου δεν θα οδηγήσει σε ακριβή λύση διότι για παράδειγμα, $\{1,4,4\}$ έχει δύο πιθανές μεταθέσεις «012» και «021» και δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ τους. Αυτό το πρόβλημα είναι πολύ συνηθισμένο στα ψηφιακά σήματα.

Για να ξεπεραστεί το πρώτο πρόβλημα προτείνεται η προσθήκη μίας μεταβλητής, ανάλογα με το πλάτος, αντί για έναν σταθερό αριθμό για κάθε επίπεδο του ιστογράμματος που αναπαριστά

την πιθανότητα του κάθε μοτίβου. Στην μεταθετική εντροπία όταν ένα διάνυσμα αποδίδεται σε ένα μοτίβο, το διάστημα του ιστογράμματος που αντιστοιχεί στο μοτίβο αυξάνεται κατά ένα. Αντίθετα, στην AAPE μια σχετική κανονικοποιημένη πιθανότητα $\frac{A}{d} \sum_{k=1}^d |y_{t+(k-1)l}| + \frac{1-A}{d-1} \sum_{k=2}^d |y_{t+(k-1)l} - y_{t+(k-2)l}|$ προστίθεται στο αντίστοιχο μοτίβο. Α είναι ο συντελεστής προσαρμογής που σχετίζεται με την μέση τιμή της διαφοράς μεταξύ δύο συνεχόμενων δειγματος και λαμβάνει τιμές μεταξύ [0,1]. Τέλος, ένας ψευδοκώδικας παρουσιάζεται στο σχήμα 2.4 :

```

begin
   $p(\pi_i^{d,l}) = 0;$ 
  for  $t=1$  to  $N-d+1$  do
    for  $i=1$  to  $d!$  do
      if  $\text{type}(Y_t^{d,l}) = \pi_i^{d,l}$ , then
        
$$p(\pi_i^{d,l}) = p(\pi_i^{d,l}) + \left( \frac{A}{d} \sum_{k=1}^d |x_{t+(k-1)l}| + \frac{1-A}{d-1} \sum_{k=2}^d |x_{t+(k-1)l} - x_{t+(k-2)l}| \right);$$

      end
    end
  end
  
$$p(\pi_i^{d,l}) = \frac{p(\pi_i^{d,l})}{\sum_{t=1}^{N-d+1} \left( \frac{A}{d} \sum_{k=1}^d |y_{t+(k-1)l}| + \frac{1-A}{d-1} \sum_{k=2}^d |y_{t+(k-1)l} - y_{t+(k-2)l}| \right)};$$

  
$$AAPE(d,l,n) = - \sum_{\pi_k=1}^{\pi_k=d!} p(\pi_k) \ln p(\pi_k);$$

end

```

Σχήμα 2.4 Ψευδοκώδικας AAPE

Για πρακτικές εφαρμογές, προτείνεται $l=1$, διότι για τιμές $l>1$ μπορεί να υπάρξει υπόδειγματοληψία χωρίς να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά της συχνότητας του σήματος. Επίσης προτείνεται η επιλογή $A=0,5$, αφού η σημαντικότητα της μέσης τιμής των πλατών και την διαφορών είναι ίση.

2.4 SAMPLE ENTROPY

Δοθέντος μιας διακριτής χρονοσειράς $\{x(i), i=1,2,\dots,N\}$ μήκους N , μπορεί να υπολογισθεί η Sample Entropy με τον παρακάτω τρόπο, όπως αναφέρουν οι (Molina-Picó, και συν., 2011), θα πρέπει να ορίσουμε το κατώφλι r και της διάστασης m . Αρχικά, η χρονοσειρά $x(n)$ χωρίζεται σε μια σειρά από υποακολουθίες $X_m(i)$ που αντιστοιχούν σε περιόδους μήκους m του αρχικού σήματος. Μια απόσταση d μεταξύ δυο υποακολουθιών $X(i)$ και $X(j)$, σαν η μέγιστη απόλυτη

διαφορά μεταξύ των δειγμάτων. Το $B_i(r)$ μετρά τον αριθμό των υποακολουθιών μήκους m , των οποίων η απόσταση δεν υπερβαίνει το κατώφλι r , ενώ το $A_i(r)$ μετρά τις υποακολουθίες $m+1$. Στην συνέχεια, Sample Entropy υπολογίζεται ως ο φυσικός λογάριθμος του πηλίκου μεταξύ των μέσων τιμών $A_m(r)$ και $B_m(r)$.

Στο παρακάτω σχήμα ακολουθούν όλες οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της Sample Entropy:

$$\begin{aligned}
 & \text{SampEn} \\
 X_m(i) &= [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)] \\
 & 1 \leq i \leq N-m+1 \\
 d[X_m(i), X_m(j)] &= \max_{0 \leq k \leq m-1} (\text{verbar}x(i+k) - x(j+k)\text{verbar}) \\
 B_i(r) & \text{ no. of } j \text{ such that } d[X_m(i), X_m(j)] \leq r \\
 A_i(r) & \text{ no. of } j \text{ such that } d[X_{m+1}(i), X_{m+1}(j)] \leq r \\
 & (1 \leq j \leq N-m, j \neq i) \\
 B_i^m(r) &= \frac{1}{N-m-1} B_i(r) \\
 B^m(r) &= \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \\
 A_i^m(r) &= \frac{1}{N-m-1} A_i(r) \\
 A^m(r) &= \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r) \\
 \text{SampEn}(m, r) &= \lim_{N \rightarrow \infty} \left(-\log \left[\frac{A^m(r)}{B^m(r)} \right] \right) \\
 \text{SampEn}(m, r, N) &= -\log \left[\frac{A^m(r)}{B^m(r)} \right]
 \end{aligned}$$

Σχήμα 2.5 Εξισώσεις υπολογισμού Sample Entropy

Είναι πολύ σημαντικό να καθοριστούν οι τιμές του κατωφλιού r , της διάστασης m . Προτείνεται μια τιμή r μεταξύ 0,1 και 0,25 φορές της τυπικής απόκλισης του σήματος. Οσον αφορά την διάσταση m , μπορεί να ορισθεί σαν $m=3$.

2.5 APPROXIMATE ENTROPY

Δοθέντος μιας διακριτής χρονοσειράς $\{x(i), i = 1, 2, \dots, N\}$ μήκους N , μπορεί να υπολογισθεί η Approximate Entropy με τον παρακάτω τρόπο, όπως αναφέρουν οι (Molina-Picó, και συν., 2011), θα πρέπει να ορίσουμε το κατώφλι r και της διάστασης m . Αρχικά, η χρονοσειρά $x(n)$ χωρίζεται σε μια σειρά από υπόακολουθίες $X_m(i)$ που αντιστοιχούν σε περιόδους μήκους m του αρχικού σήματος. Μια απόσταση d μεταξύ δυο υποακολουθιών $X(i)$ και $X(j)$, σαν η μέγιστη απόλυτη διαφορά μεταξύ των δειγμάτων. Το $B_i(r)$ μετρά τον αριθμό των υποακολουθιών μήκους m , των οποίων η απόσταση δεν υπερβαίνει το κατώφλι r , ενώ το $A_i(r)$ μετρά τις υποακολουθίες $m+1$. Στην συνέχεια, υπολογίζει το μέσο του φυσικού λογαρίθμου του $A_m(r)$ και $B_m(r)$ και μετά υπολογίζει την διαφορά τους.

Στο παρακάτω σχήμα ακολουθούν όλες οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της Approximate Entropy.

ApEn

$$X_m(i) = [x(i), x(i+1), \dots, x(i+m-1)]$$

$$1 \leq i \leq N - m + 1$$

$$d[X_m(i), X_m(j)] = \max_{0 \leq k \leq m-1} (\overline{\text{verbar}x(i+k) - x(j+k)\text{verbar}})$$

$$B_i(r) \text{ no. of } j \text{ such that } d[X_m(i), X_m(j)] \leq r$$

$$A_i(r) \text{ no. of } j \text{ such that } d[X_{m+1}(i), X_{m+1}(j)] \leq r$$

$$(1 \leq j \leq N - m + 1)$$

$$B_i^m(r) = \frac{1}{N-m+1} B_i(r)$$

$$A_i^m(r) = \frac{1}{N-m} A_i(r)$$

$$\phi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \log B_i^m(r)$$

$$\phi^{m+1}(r) = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \log A_i^m(r)$$

$$\text{ApEn}(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} [\phi^m(r) - \phi^{m+1}(r)]$$

$$\text{ApEn}(m, r, N) = [\phi^m(r) - \phi^{m+1}(r)]$$

Σχήμα 2.6 Εξισώσεις υπολογισμού Approximate Entropy

Είναι πολύ σημαντικό να καθοριστούν οι τιμές του κατωφλιού r , της διάστασης m . Προτείνεται μια τιμή r μεταξύ 0,1 και 0,25 φορές της τυπικής απόκλισης του σήματος. Οσον αφορά την διάσταση m , μπορεί να ορισθεί σαν $m=3$.

2.6 DISPERSION ENTROPY

Δοθέντος μιας διακριτής χρονοσειράς $\{x(i), i = 1, 2, \dots, N\}$ μήκους N , ο υπολογισμός της Dispersion Entropy περιγράφεται στα επόμενα 4 βήματα, όπως αναφέρουν οι (Rostaghi & Azami, 2016).

- Αρχικά, η χρονοσειρά χαρτογραφείται σε c κλάσεις, από 1 έως c . Και για επιτευχθεί αυτό υπάρχουν πλήθος γραμμικών και μη γραμμικών προσεγγίσεων. Παρόλο, που ο αλγόριθμος γραμμικής χαρτογράφησης είναι πιο γρήγορος, όταν οι μέγιστες ή οι ελάχιστες τιμές είναι πολύ μικρότερες ή μεγαλύτερες από την μέση τιμή του σήματος, η πλειοψηφία των x_i έχουν εκχωρηθεί σε πολύ λίγες κλάσεις. Για αυτό και χρησιμοποιείται η συνάρτηση normal cumulative distribution function (NCDF) για να χαρτογραφήσει το x σε $\{y(i), i = 1, 2, \dots, N\}$ από το 0 έως 1. Στην συνέχεια χρησιμοποιούμε έναν γραμμικό αλγόριθμο για να αποδώσει κάθε y_i σε έναν ακέραιο από το 1 έως c . Για κάθε μέλος του χαρτογραφημένου σήματος, χρησιμοποιούμε $z_j^c =$

$round(c * y_j + 0.5)$ όπου το z_j^c δείχνει το j-οστό μέλος της ταξινομημένης χρονοσειράς και η στογγυλοποίηση εμπεριέχει είτε αύξηση είτε μείωση του αριθμού στο επόμενο ψηφίο.

- Κάθε διάνυσμα $z_i^{m,c}$ με διάσταση m και χρονική καθυστέρηση d δημιουργείται σύμφωνα με $z_i^{m,c} = \{z_i^c, z_{i+d}^c, \dots, z_{i+(m-1)d}^c\}$ με $i=1,2,\dots,N-(m-1)d$. Κάθε σειρά $z_i^{m,c}$ αναπαριστάται σε ένα μοτίβο διασποράς $\pi_{\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{m-1}}$. Ο αριθμός των μοτίβων διασποράς μπορεί να αποδοθεί σε κάθε χρονοσειρά $z_i^{m,c}$ είναι ίσος με c^m .
- Για κάθε c^m πιθανά μοτίβα διασποράς η σχετική συχνότητα υπολογίζεται σαν:

$$p(\pi_{\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{m-1}}) = \frac{\text{Number}\{i | N - (m-1)d, z_i^{m,c} \text{ έχει τύπο } \pi_{\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{m-1}}\}}{N - (m-1)d} \quad 2.7$$

- Τέλος, η εντροπία υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$DE(x, m, c, d) = - \sum_{\pi=1}^{c^m} p(\pi_{\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{m-1}}) * \ln(p(\pi_{\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{m-1}})) \quad 2.8$$

2.7 FLUCTUATION BASED DISPERSION ENTROPY

Όταν οι διακυμάνσεις σε ένα σήμα είναι σχετικές ή τοπικές τάσεις μιάς χρονοσειράς είναι άσχετες, δεν υπάρχει διαφορά μεταξύ των μοτίβων διακυμάνσεων $\{1,3,4\}$ και $\{2,4,5\}$ ή $\{1,1,1\}$ και $\{3,3,3\}$. Αυτό συμβαίνει γιατί οι διακυμάνσεις των $\{1,3,4\}, \{2,4,5\}, \{1,1,1\}$ και $\{3,3,3\}$ είναι ίσες. Οι (Azami & Escudero, Amplitude- and Fluctuation-Based Dispersion Entropy, 2018) προτείνουν: η FDispEn λαμβάνει υπόψιν τις διαφορές στα γειτονικά σημεία του μοτίβου διακύμανσης, που είναι γνωστά με την ορολογία fluctuation-based μοτίβα διακύμανσης. Με αυτό τον τρόπο έχουν διανύσματα μήκους m-1, των οποίων τα στοιχεία αλλάζουν από $-c+1$ σε $c-1$. Ετσι υπάρχουν $(2c-1)^{m-1}$ πιθανά τέτοια μοτίβα. Χρησιμοποιούμε την κανονικοποιημένη FDispEn, $\frac{\text{FDispEn}}{\ln((2c-1)^{m-1})}$.

2.8 REFINED COMPOSITE MULTISCALE DISPERSION ENTROPY

Η RCMDE, για την κλίμακα τ , τ διαφορετικές χρονοσειρές, αντιπροσωπεύει διαφορετικά σημεία έναρξης της coarse graining διαδικασίας δημιουργούνται και η τιμή της RCMDE υπολογίζεται από την εντροπία του Shannon των μέσων τιμών των μοτίβων διακύμανσης.

$$RCMDE(x, m, c, d, \tau) = - \sum_{\pi=1}^{c^m} \bar{p}(\pi_{\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{m-1}}) * \ln(\bar{p}(\pi_{\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{m-1}})) \quad \text{όπου η}$$

$$\bar{p}(\pi_{\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{m-1}}) = \frac{1}{\tau} \sum_{k=1}^{\tau} p_k^{(\tau)}$$

με την σχετική συχνότητα του μοτίβου διακύμανσης π στην σειρά $x_k^{(\tau)}$ ($1 \leq k \leq \tau$).

Η παραπάνω μεθοδολογία προτείνεται από (Azami, Rostaghi, Ab'asolo, & Escudero, 2017).

2.9 FUZZY ENTROPY

Όπως αναφέρεται (Borowska, 2015) η Fuzzy Entropy είναι ένα μέτρο της κανονικότητας μιας χρονοσειράς και είναι ο αρνητικός φυσικός λογάριθμος της κατά συνθήκης πιθανότητας ότι δύο ίδια διανύσματα για m σημεία παραμένουν ίδια για m+1 σημεία.

Ακολουθεί ο υπολογισμός της Fuzzy Entropy:

Κατασκευάζονται τα διανύσματα:

$$\bar{y}(i) = [x(i) - \bar{x}(i), \dots, x(i+m-1) - \bar{x}(i)] \quad 2.9$$

$$\bar{y}(j) = [x(j) - \bar{x}(j), \dots, x(j+m-1) - \bar{x}(j)] \quad 2.10$$

Όπου $\bar{x}(i)$ είναι η μέση τιμή του $y(i)$.

Στην συνέχεια υπολογίζεται ο πίνακας:

$$D_{i,j}^m = \mu(d(\bar{y}(i)^{-m}, \bar{y}(j)^{-m})) \quad 2.11$$

Με την συνάρτηση $\mu(x) = e^{-\left(\frac{x}{r}\right)^n}$

$$Fuzzyen = \ln \frac{\Phi^m}{\Phi^{m+1}} \quad 2.12$$

Όπου,

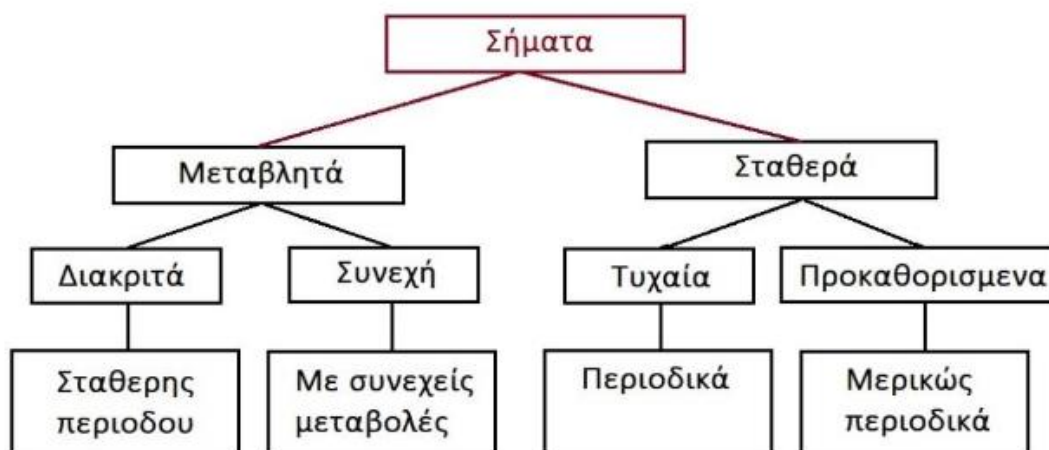
$$\Phi^m = \frac{1}{N-m} \sum_{i=1}^{N-m} \sum_{j=1, j \neq i}^{N-m} \frac{D_{i,j}^m}{N-m-1}$$

3. ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΣΗΜΑΤΟΣ

3.1 Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ

Μια περιστροφική μηχανή κατά τη λειτουργία της παράγει ένα είδος ταλάντωσης όπου είναι αδύνατο αυτό να μετρηθεί είτε οπτικά, είτε με την αφή και ως εκ τούτου είναι αναγκαία η μετατροπή της ταλάντωσης αυτής σε κάτι μετρήσιμο, ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα. Η μετατροπή αυτής της ταλάντωσης σε ηλεκτρικό σήμα είναι ένας εύκολος τρόπος για να μελετηθεί, καθώς το σήμα αυτό δίνει πληροφορίες για το πόσο γρήγορα περιστρέφεται αυτή η μηχανή μέσω της συχνότητας και ταυτόχρονα πόσο κινείται μέσω του εύρους και έτσι αυτό αναδεικνύει το πρόβλημα καθώς και τη σοβαρότητα αυτού. Αυτή η κίνηση μπορεί να έχει αρμονικά χαρακτηριστικά, να έχει περιοδικότητα ή να είναι τυχαία, δηλαδή η μηχανή να κινείται με απρόβλεπτο τρόπο. Ως σήμα ορίζεται κάποια ηλεκτρική τάση ή ηλεκτρικό ρεύμα του οποίου το μέγεθος είναι ανάλογο με κάποια φυσική ποσότητα. Το σήμα που εξέρχεται από το επιταχυνσιόμετρο είναι συνεχούς τάσης και είναι ανάλογο της επιτάχυνσης για το σημείο που γίνεται μέτρηση. Τα χρονικά σήματα χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: στα συνεχή χρονικά σήματα (continuous time) και στα διακριτά χρονικά σήματα (discrete time). Όταν ένα σήμα είναι συνεχούς τιμής τότε αποτελεί αναλογικό σήμα ενώ αντίθετα όταν παρατηρείται διακριτό σήμα τότε το σήμα ονομάζεται ψηφιακό. Ένα σήμα και πιο συγκεκριμένα ένα αναλογικό σήμα θα χαρακτηριστεί ως “περιοδικό” όταν υπάρχει ένας θετικός αριθμός T για τον οποίο για κάθε χρόνο t ισχύει:

$$x(t) = x(t + T) \quad 3.1$$



Σχήμα 3.1 Διάγραμμα κατάταξης ειδών σημάτων

3.2 ΑΠΟΘΟΡΥΒΟΠΟΙΗΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ

Ο θόρυβος αποτελεί κομμάτι ενός σήματος, οπότε κάθε παραγόμενο ηλεκτρικό σήμα περιέχει τις πληροφορίες που απαιτούνται, οι οποίες όμως μπορεί να είναι κρυμμένες πίσω από το θόρυβο. Πριν την επεξεργασία του σήματος με σκοπό την απομάκρυνση του θορύβου πρέπει να καθοριστούν κάποιες τιμές συχνοτήτων ή τουλάχιστον μικρά εύρη γύρω από αυτές, έτσι ώστε με βάση τις διαφορές που θα υπάρξουν, να απομακρυνθεί ο θόρυβος. Η απομάκρυνση του θορύβου επιτυγχάνεται με φίλτρα, τα οποία είναι απλά γραμμικά συστήματα σταθερά ως προς το χρόνο. Στην προκειμένη περίπτωση το φιλτράρισμα που θέλουμε να πετύχουμε ονομάζεται ‘αποθορυβοποίηση’.

3.3 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

Η ανάλυση ενός σήματος που αφορά την ταλάντωση μιας μηχανής, γίνεται σε δύο πεδία, στο πεδίο του χρόνου που αφορά το χρονικό μεταβαλλόμενο σήμα που παίρνουμε από την μέτρηση και στο πεδίο της συχνότητας μέσω του μετασχηματισμού Fourier. Καθένα από τα δύο πεδία μπορεί να μας δώσει διαφορετικές πληροφορίες για την κατάσταση της μηχανής που μελετάται. Πιο συγκεκριμένα, η τεχνική της ανάλυσης ενός σήματος στο πεδίο του χρόνου γίνεται ουσιαστικά άμεσα από το σήμα που λαμβάνουμε από την μέτρηση, η οποία αξιοποιεί τις διάφορες χρονικές πληροφορίες που μπορεί να φέρει το σήμα (π.χ. περιοδικότητα) καθώς και τη διαμόρφωση του πλάτους της ταλάντωσης με την πάροδο του χρόνου. Όταν στο σήμα της ταλάντωσης υπάρχει καθαρά μια περιοδικότητα, το οποίο λαμβάνεται σε σταθερές στροφές λειτουργίας, αυτή κατά πάσα πιθανότητα δηλώνει βλάβη του συστήματος καθιστώντας αυτή την τεχνική καταλληλότερη. Η τεχνική αυτή είναι πιο οικονομική σε σχέση με άλλες τεχνικές λόγω της απλότητας της όμως φέρει αρκετά μειονεκτήματα όταν η απαίτηση είναι όχι μόνο να ανιχνευτεί αν η μηχανή έχει βλάβη, αλλά να προσδιοριστεί εξειδικευμένα το είδος της βλάβης. Οι περισσότερες μηχανές κατά την λειτουργία τους δίνουν υψηλά σήματα ταλάντωσης και υπεισέρχεται στο σύστημα θόρυβος. Τα σήματα των βλαβών μπορεί να δίνουν μικρές πληροφορίες μέσω μικρών μεταβολών στην κυματομορφή τους η οποία να μην είναι αντιληπτή καθώς και η απαίτηση η βλάβη να ανιχνεύεται σε αρχικό στάδιο δημιουργούν την ανάγκη περεταίρω επεξεργασίας του ταλαντωτικού σήματος. Αντίθετα, η ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας παίρνει το σήμα διακριτού χρόνου και το μετατρέπει σε σήμα συχνότητας. Για να εντοπιστούν οι αρμονικές συχνότητες μιας ταλάντωσης εφαρμόζεται η ανάλυση τύπου Fourier. Το 1965 καθιερώθηκε ο μετασχηματισμός Fourier λόγω της ανάπτυξης ταχέων αλγορίθμων. Από τότε, ο μετασχηματισμός Fourier βρήκε ευρεία εφαρμογή στην επεξεργασία δυναμικών σημάτων. Ο

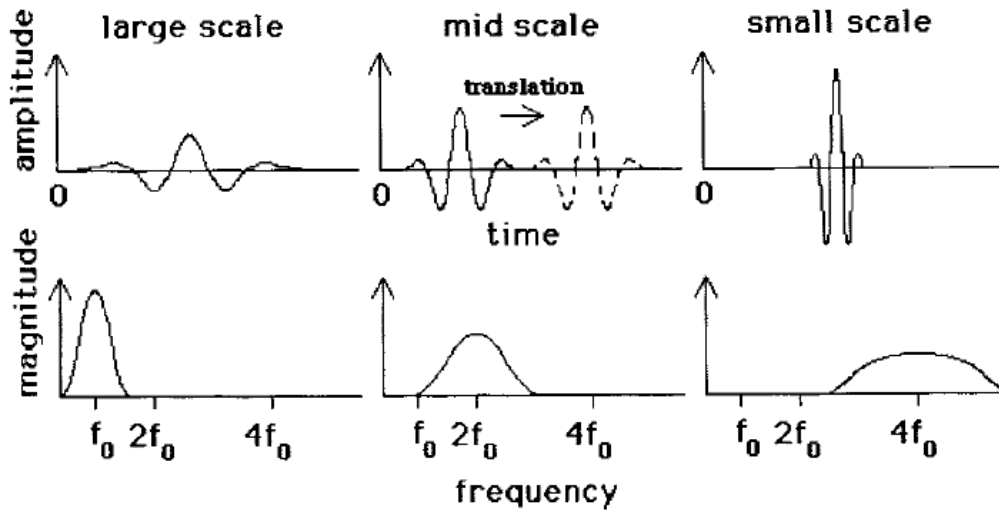
μετασχηματισμός Fourier επιτρέπει σε μια συνάρτηση να παρασταθεί ως άθροισμα αρμονικών συνιστωσών. Επειδή, όμως, βασίζεται στην υπόθεση της στασιμότητας των σημάτων, χρειάζεται προσοχή όταν εφαρμόζεται σε μη στάσιμες χρονικές ακολουθίες, διότι δε δύναται να αποδώσει τα τοπικά χαρακτηριστικά τους. Έτσι, το φάσμα συχνοτήτων δεν παρέχει πληροφορίες που αφορούν τη χρονική στιγμή εμφάνισης ενός μεταβατικού φαινομένου. Αντίθετα, τα μεταβατικά φαινόμενα μπορούν να περιγραφούν με αξιοπιστία από μετασχηματισμούς που αναλύουν το δυναμικό σήμα συγχρόνως στα πεδία χρόνου και συχνότητας. Οι περιορισμοί της ανάλυσης στους άξονες χρόνου-συχνότητας του μετασχηματισμού Fourier σύντομου χρόνου, τα προβλήματα πλεονασμού και παρεμβολών θορύβου στους όρους συσχέτισης της μεθόδου των Wigner-Ville παρακίνησαν τους ερευνητές να κατευθυνθούν προς κυματιδιακή επεξεργασία (wavelet analysis) των δυναμικών σημάτων.

3.4 ΑΠΟΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΥΜΑΤΙΔΙΑΚΟ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ

Ο μετασχηματισμός Fourier σύντομου χρόνου (STFT) βασίζεται σε ένα χρονικό παράθυρο σταθερού μήκους (window length), το οποίο είναι μικρότερο από τη συνολική διάρκεια του μετρούμενου σήματος. Το παράθυρο μετατοπίζεται στο πεδίο του χρόνου με σταθερό βήμα (time increment) έως ότου καλύψει το σύνολο της κυματομορφής της χρονικής ακολουθίας. Ο μετασχηματισμός Fourier εφαρμόζεται σε όλα τα μερικά τμήματα του σήματος που προκύπτουν από την εφαρμογή του παραθύρου. Έτσι, με αυτήν τη διαδικασία, το χρονικό σήμα αναλύεται συγχρόνως στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθοδολογίας είναι το σταθερό μήκος του παραθύρου που περιορίζει τις δυνατότητες της ανάλυσης των δυναμικών σημάτων. Έτσι, αναπτύχθηκε ο κυματιδιακός μετασχηματισμός (wavelet transform) με αντικειμενικό σκοπό την υπέρβαση των περιορισμών του μετασχηματισμού Fourier σύντομου χρόνου.

Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός είναι ένα μαθηματικό εργαλείο το οποίο δύναται να αναλύει μία χρονική ακολουθία σε στοιχειώδεις συνιστώσες που ονομάζονται κυματίδια. Το εξεταζόμενο χρονικό σήμα συγκρίνεται με κυματομορφές μεταβλητού μήκους, ενώ η μορφή και η φυσιογνωμία της κυματιδιακής συνάρτησης παραμένει αμετάβλητη. Η μεταβλητότητα του μήκους της κυματομορφής της κυματιδιακής συνάρτησης επιτρέπει στον κυματιδιακό μετασχηματισμό να ανιχνεύει και να ερμηνεύει τα φαινόμενα που περικλείει το σήμα στο πεδίο του χρόνου και σε ένα συγκεκριμένο εύρος συχνοτήτων. Το μήκος του κυματιδίου καθορίζει το εύρος των συχνοτήτων που μελετάται.

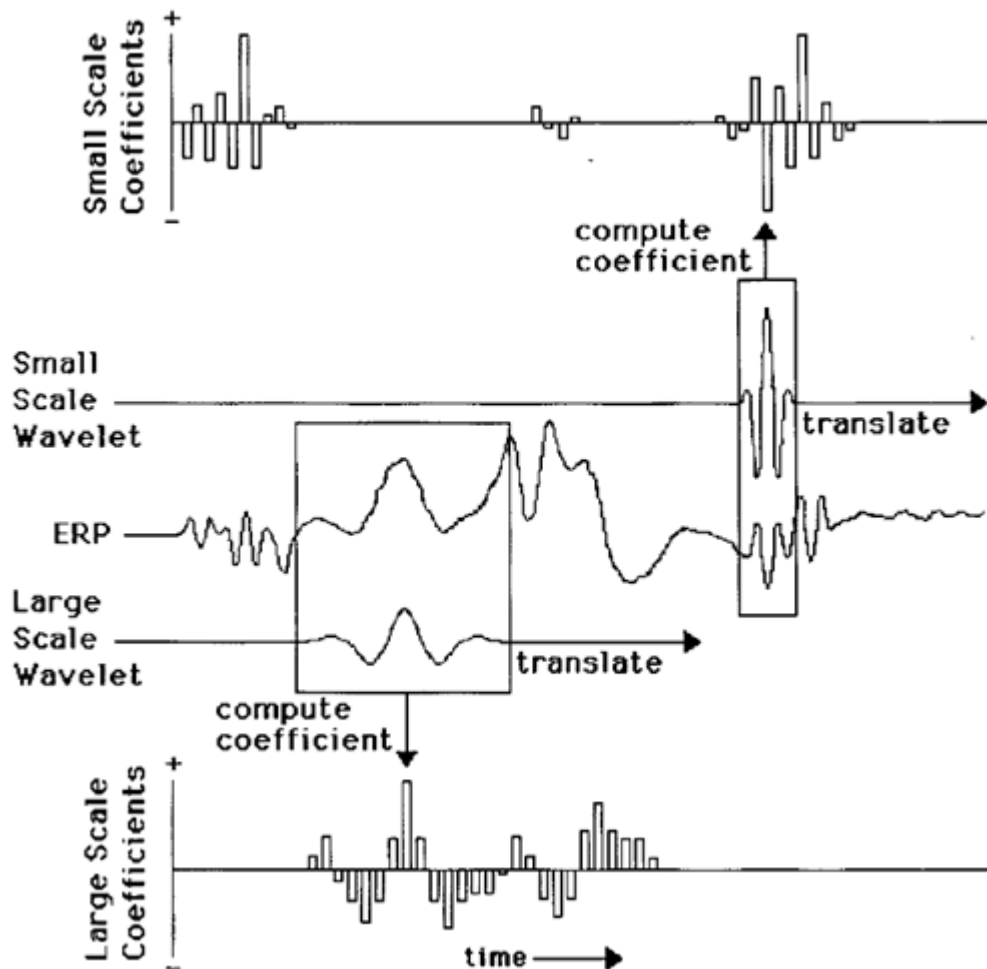
Τα βασικά χαρακτηριστικά του κυματιδιακού μετασχηματισμού είναι το μήκος της κυματομορφής του κυματιδίου (scale) και το βήμα της μετατόπισής του (translation). Η ομάδα που περιλαμβάνει όλα τα πιθανά μήκη και τις μετατοπίσεις ενός κυματιδίου συνιστά μία οικογένεια κυματιδίων (wavelet family). Στο σχήμα 3.2 απεικονίζεται η κυματιδιακή συνάρτηση που φέρει το όνομα B-spline. Είναι ολοφάνερη η εξάρτηση του εύρους των συχνοτήτων από το μήκος (scale) του κυματιδίου. Όταν το μήκος του κυματιδίου είναι μεγάλο, ο κυματιδιακός μετασχηματισμός δύναται να ανιχνεύσει και να ερμηνεύσει μόνο χαμηλόσυχνες συνιστώσες. Στο σχήμα 3.2 παρατηρείται ότι η συρρίκνωση του κυματιδίου δίδως να αλλοιωθεί η βασική του μορφή, καθιστά ικανό τον κυματιδιακό μετασχηματισμό να αναγνώσει τις υψίσυχνες συνιστώσες του δυναμικού σήματος.



Σχήμα 3.2 Κυματιδιακή συνάρτηση B-spline. Στην επάνω σειρά παρουσιάζεται το κυματίδιο για διάφορα μήκη. Στην κάτω σειρά αναπαρίσταται το πεδίο συχνοτήτων που καλύπτει κάθε κυματίδιο για διαφορετικά μήκη.

Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται με χαρακτηριστικό τρόπο ο κυματιδιακός μετασχηματισμός ενός τυχαίου σήματος για δυο διαφορετικά μήκη της ίδιας κυματιδιακής συνάρτησης. Αρχικά, το μεγάλο μήκους κυματίδιο μετατοπίζεται κατά μήκος της κυματομορφής του σήματος και συγκρίνεται τμηματικά με αυτή. Η εκτίμηση της συσχέτισης των δύο σημάτων συνεπάγεται τον υπολογισμό των κυματιδιακών συντελεστών (wavelet coefficient), οι οποίοι ποσοτικοποιούν το μέγεθος της ομοιότητας του εκάστοτε κυματιδίου με το εκάστοτε τμήμα του χρονικού σήματος. Στη συνέχεια το μήκος του κυματιδίου μεταβάλλεται και η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός συνεχίζεται έως ότου υπολογιστούν όλοι οι πιθανοί κυματιδιακοί συντελεστές. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του κυματιδιακού συντελεστή τόσο μεγαλύτερη είναι η ομοιότητα των δύο συγκρινόμενων κυματομορφών και αντιστρόφως. Οι κυματιδιακοί συντελεστές μπορούν να λάβουν και αρνητικές τιμές, υποδεικνύοντας ότι η ανάποδη μορφή του κυματιδίου ταιριάζει με το συγκεκριμένο τμήμα του χρονικού σήματος.

Έτσι, ο κυματιδιακός μετασχηματισμός με την εφαρμογή κυματιδίου με μικρό μήκος εστιάζει την προσοχή της ανάλυσης σε υψίσυχνες και τοπικές συνιστώσες του χρονικού σήματος, ενώ με τη χρήση κυματιδίου με μεγάλο μήκος ο αλγόριθμος παρατηρεί τη γενική δομή του σήματος, απομονώνοντας το θόρυβο.



Σχήμα 3.3 Διαδικασία κυματιδιακού μετασχηματισμού. Κάθε κυματιδιακός συντελεστής αντιστοιχεί σε ένα βήμα μετατόπισης του κυματιδίου. Το μέτρο του κυματιδιακού συντελεστή εξαρτάται από την ομοιότητα που εμφανίζει το κυματίδιο με την μορφή του χρονικού σήματος στη συγκεκριμένη θέση.

Κατά την εφαρμογή του κυματιδιακού μετασχηματισμού υπολογίζονται όλοι οι πιθανοί κυματιδιακοί συντελεστές για όλα τα πιθανά μήκη του κυματιδίου και για κάθε πιθανή θέση στο πεδίο του χρόνου. Η διαδικασία αυτή είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ. Έτσι, οι παραπάνω παρατηρήσεις καθιστούν πρακτικά αδύνατη την εφαρμογή του κυματιδιακού μετασχηματισμού. Ευτυχώς, όμως, δεν είναι απαραίτητος ο υπολογισμός ενός τόσο μεγάλου αριθμού κυματιδιακών συντελεστών για να περιγραφεί ορθά ένα πραγματικό δυναμικό σήμα.

Υπάρχουν δυο τρόποι πρακτικής προσέγγισης του μετασχηματισμού κυματιδίων. Ο συνεχής κυματιδιακός μετασχηματισμός (continuous wavelet transform) και ο διακριτός κυματιδιακός μετασχηματισμός (discrete wavelet transform).

Αρχικά, ο συνεχής κυματιδιακός μετασχηματισμός ανιχνεύει με μεταβαλλόμενη ευκρίνεια τις διακυμάνσεις του σήματος συγχρόνως στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Γι' αυτό το σκοπό χρησιμοποιείται μία κυματιδιακή συνάρτηση ψ με μηδενικό μέσο όρο:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad 3.2$$

η οποία διαστέλλεται από μία παράμετρο κλίμακας α και μετατίθεται κατά μία παράμετρο μετατόπισης τ :

$$\psi_{(\alpha,\tau)}(t) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) \quad 3.3$$

Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός της χρονικής ακολουθίας $x(t)$ υπολογίζεται από το συσχετισμό της χρονικής ακολουθίας $x(t)$ με τις ολότητες (ή άτομα) που παράγονται από τη σχέση 3.1:

$$W(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi * \left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \quad 3.4$$

Το άτομο $\psi(\alpha,\tau)$ στο πεδίο του χρόνου επικεντρώνεται στη χρονική στιγμή τ με διαστολή ανάλογη της κλίμακας α .

Ο αντίστροφος κυματιδιακός μετασχηματισμός δύναται να οδηγήσει στην αναδόμηση του αρχικού σήματος σύμφωνα με τη σχέση:

$$f(t) = \frac{1}{K_{\psi}} \int_{R^+} \int_R W(\alpha, \tau) \frac{1}{\sqrt{\alpha}} c\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) \frac{d\tau da}{a^2} \quad 3.5$$

όπου ο όρος K_{ψ} ορίζει μία σταθερά που εξαρτάται από τη συνάρτηση ψ .

Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός δύναται να εφαρμοσθεί σε ψηφιακά δυναμικά σήματα, εφόσον η σχέση η σχέση 3.4 εκφρασθεί ως εξής:

$$W(\alpha, \tau) = \sum_k \int_k^{k+1} f(t) \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \quad 3.6$$

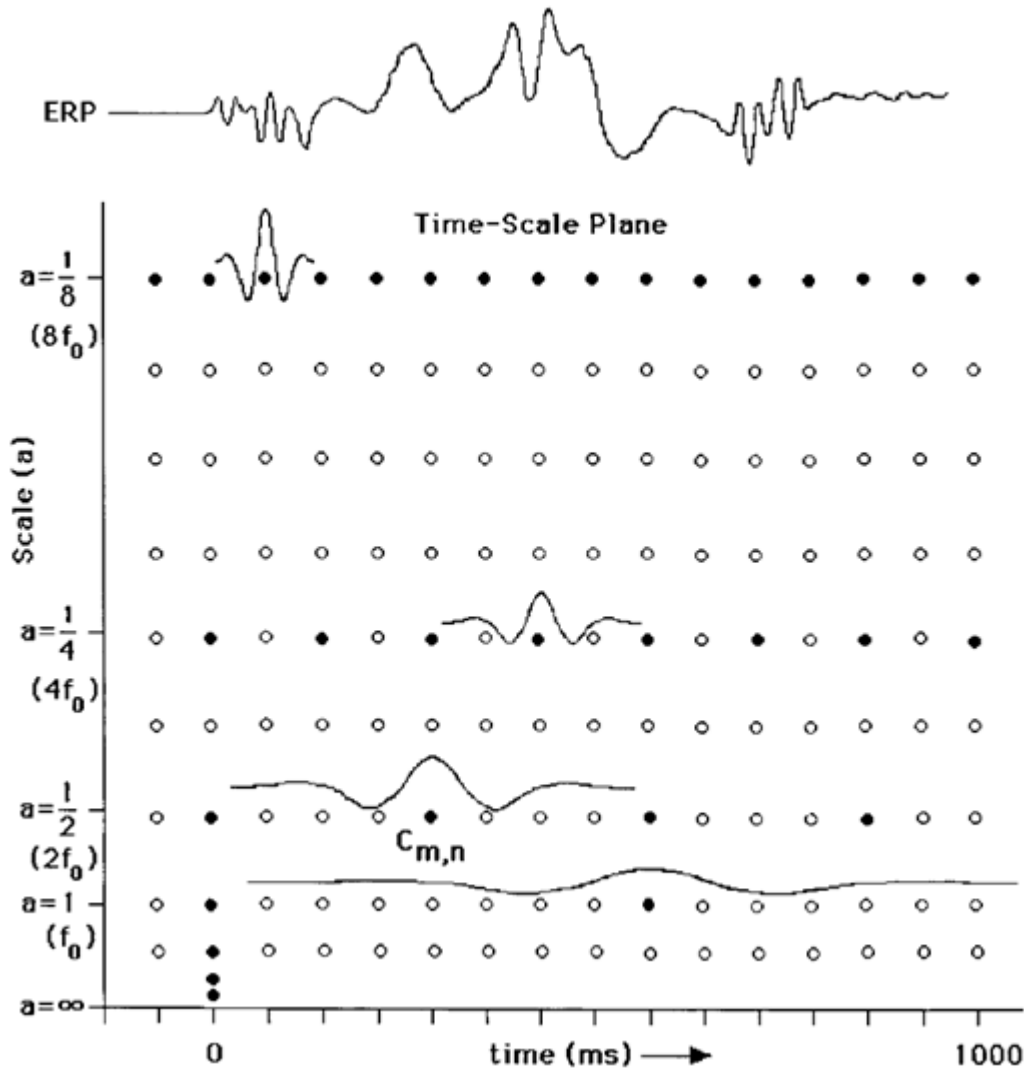
$$W(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \sum_k f(k) \int_k^{k+1} \psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \quad 3.7$$

$$W(\alpha, \tau) = \frac{1}{\sqrt{\alpha}} \sum_k f(k) \left(\int_{-\infty}^{k+1} \psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt - \int_{-\infty}^k \psi\left(\frac{t-\tau}{\alpha}\right) dt \right) \quad 3.8$$

όπου τα ολοκληρώματα του τύπου $\int_{-\infty}^k \psi(t) dt$ και οι πεπερασμένες διαφορές τους υπολογίζονται εύκολα σε ψηφιακά σήματα.

Ο διακριτός κυματιδιακός μετασχηματισμός (DWT) αναλύει το χρονικό σήμα σε ένα σύνολο επιμέρους χρονικών ακολουθιών που ιεραρχούνται σύμφωνα με τη φασματική περιοχή των συνιστωσών που περικλείουν. Σε αντίθεση με το συνεχές κυματιδιακό μετασχηματισμό, ο οποίος παράγει ένα άπειρο πλήθος συντελεστών, ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίων δημιουργεί ένα σύνολο κυματιδιακών συντελεστών που τα μέλη του ισοδυναμούν με τα δείγματα (samples) του χρονικού σήματος, δίχως την απώλεια σημαντικών πληροφοριών. Έτσι, ο διακριτός κυματιδιακός μετασχηματισμός δύναται να ανακατασκευάσει πλήρως το αρχικό χρονικό σήμα με αντιστροφή τη διαδικασίας του μετασχηματισμού.

Για να κατανοήσει ο αναγνώστης το διακριτό κυματιδιακό μετασχηματισμό είναι απαραίτητο να αναφερθεί μία σημαντική ιδιότητα των κυματιδίων. Τα κυματίδια μπορεί να είναι ορθογώνια (orthogonal). Έτσι, η ανάλυση ενός χρονικού σήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί με την υποστήριξη ενός υποσύνολου μίας συγκεκριμένης οικογένειας κυματιδίων. Τα κυματίδια του υποσύνολου λαμβάνουν ένα πεπερασμένο πλήθος μηκών (scales) και χρονικών μετατοπίσεων (translations). Η διαδικασία επιλογής των μελών του υποσύνολου προϋποθέτει ότι τα κυματίδια δε συσχετίζονται μεταξύ τους. Δηλαδή, το επιλεγμένο υποσύνολο αποτελεί μία ορθογωνική βάση (orthogonal basis). Έτσι, το αρχικό σήμα μπορεί να ανακατασκευαστεί πλήρως αθροίζοντας σημείο - σημείο στο πεδίο του χρόνου τα ορθογώνια κυματίδια δίχως την απώλεια πληροφοριών.



Σχήμα 3.4 Διαδικασία υπολογισμού διακριτού κυματιδιακού μετασχηματισμού για κλίμακα a ίση με 1, 1/2, 1/4 και 1/8.

Η εφαρμογή του διακριτού κυματιδιακού μετασχηματισμού σε ένα χρονικό σήμα ισοδυναμεί με την εύρεση του συνόλου των κυματιδιακών συντελεστών που καθορίζουν το μέτρο όλων των ορθογώνιων κυματιδίων, τα οποία χρειάζονται για την πλήρη ανακατασκευή του αρχικού σήματος. Στην πραγματικότητα οι κυματιδιακοί συντελεστές του διακριτού κυματιδιακού

μετασχηματισμού αποτελούν υποσύνολο των συντελεστών $C_{m,n}$ του συνεχή μετασχηματισμού κυματιδίων.

Στο σχήμα 3.4 αναπαριστάται το σύνολο των συντελεστών του διακριτού κυματιδιακού μετασχηματισμού. Οι μαύρες κουκίδες παριστάνουν τις θέσεις υπολογισμού των κυματιδιακών συντελεστών. Οι κυματιδιακοί συντελεστές $C_{m,n}$ έχουν άμεση σχέση με το επιλεγμένο κυματίδιο συγκεκριμένου μήκους m και συγκεκριμένης χρονικής μετατόπισης n . Αρχικά, επιλέγεται ένας συντελεστής, ο οποίος αποτελεί το σημείο εκκίνησης του διακριτού κυματιδιακού μετασχηματισμού. Στη συνέχεια, με αφετηρία τον αρχικό συντελεστή, κατασκευάζονται και οι υπόλοιποι κυματιδιακοί συντελεστές με συγκεκριμένα μήκη και θέσεις στο πεδίο του χρόνου. Το κυματίδιο που είναι σχεδιασμένο πάνω από τις μαύρες κουκίδες του σχήματος 4.3 παρουσιάζει το μέλος του συνόλου των κυματιδίων, το οποίο σε πρώτη φάση θα πολλαπλασιαστεί με την τιμή του συντελεστή και έπειτα θα προστεθεί με τα υπόλοιπα μέλη, ώστε να ανακατασκευαστεί πλήρως το αρχικό σήμα. Τα κυματίδια που συμμετέχουν σε αυτήν την διαδικασία είναι ορθογώνια. Οι θέσεις στο πεδίο του χρόνου που δεν υπολογίζονται οι κυματιδιακοί συντελεστές απεικονίζονται στο σχήμα 3.4 με λευκές κουκίδες. Οι συντελεστές $C_{m,n}$ που αντιστοιχούν σε λευκές κουκίδες δεν είναι απαραίτητοι για την ορθή και πλήρη ανακατασκευή του αρχικού σήματος.

Στο σχήμα 3.4 το κυματίδιο με μήκος $a=1/2$ μετατίθεται στο χρόνο κατά το ήμισυ της μετατόπισης του αμέσως προηγούμενου κυματιδίου με μήκος $a=1$. Ομοίως, συνεχίζεται η διαδικασία και για τα λοιπά κυματίδια. Δηλαδή, κάθε φορά που το μήκος και η μετατόπιση του κυματιδίου μεταβαίνουν στο επόμενο επίπεδο, υποδιαιρούνται κατά 2. Έτσι, η διάρκεια του κυματιδίου κάθε επιπέδου είναι ίση με την μισή του προηγούμενου και με τη διπλάσια του επόμενου.

Με την παραπάνω διαδικασία δεν επιτυγχάνεται μόνο η ανάλυση του χρονικού σήματος σε τμήματα ανάλογα του εύρους των επωφελών συχνοτήτων, αλλά και η επιτάχυνση των υπολογισμών.

Ο διακριτός κυματιδιακός μετασχηματισμός πραγματοποιείται με την επιλογή διακριτών τιμών μήκους και χρόνου, δηλαδή και $a = 2^m$ και $\tau = n2^m$ όπου m, n ακέραιοι αριθμοί. Έτσι, σχηματίζονται διακριτά κυματίδια, τα οποία συνιστούν ορθογώνια βάση.

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}} \psi(2^{-2}t - n) \quad 3.9$$

Ο διακριτός μετασχηματισμός κυματιδίων μπορεί να εφαρμοσθεί με τη χρήση ενός απλού, περιοδικά επαναλαμβανόμενου, φίλτρου επιτομής (filter scheme). Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η λειτουργία ενός τέτοιου φίλτρου. Ο πυρήνας του φίλτρου επιτομής συνίσταται από ένα ζευγάρι ψηφιακών φίλτρων: ένα βαθυπερατό φίλτρο $h(n)$, το οποίο αφορά τη συνάρτηση μήκους $\varphi(t)$ και ένα υψυπερατό φίλτρο $g(n)$, το οποίο σχετίζεται με την κυματιδιακή συνάρτηση $\psi(t)$.

$$h(n) = \frac{1}{\sqrt{2}} \{\varphi(t), f(2t - n)\} \quad 3.10$$

$$g(n) = (-1)^n h(1 - n) \quad 3.11$$

Οι συντελεστές των φίλτρων καθορίζονται πλήρως από την μορφή των κυματιδίων που χρησιμοποιεί ο διακριτός κυματιδιακός μετασχηματισμός.

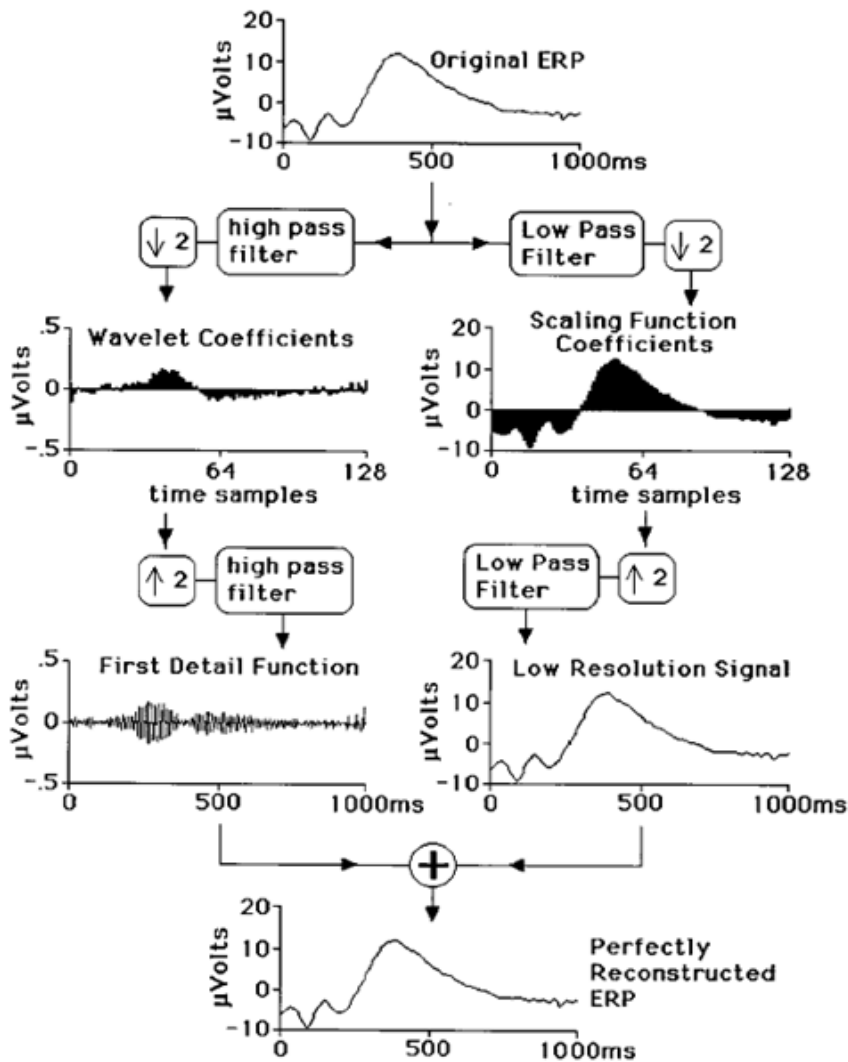
Αρχικά, κατά τη φάση της ανάλυσης, το χρονικό σήμα, το οποίο αποτελείται από n δείγματα διέρχεται από το βαθυπερατό και υψυπερατό το φίλτρο συχνοτήτων. Στην έξοδο κάθε φίλτρου παράγεται μία σειρά κυματιδιακών συντελεστών $cA1$ και $cD1$, αντίστοιχα.

Τα στοιχεία του διανύσματος cA1 ονομάζονται συντελεστές κλίμακας (scaling coefficients) και τα στοιχεία του διανύσματος cD1 καλούνται κυματιδιακοί συντελεστές (wavelet coefficients). Το σύμβολο $\downarrow 2$ απεικονίζει την παράλειψη των περιττών όρων του φιλτραρισμένου σήματος (down sampling). Έτσι, το σύνολο του πλήθους των συντελεστών που παράγονται από αυτήν τη διαδικασία ισοδυναμεί με το πλήθος δειγμάτων του αρχικού σήματος.

Έπειτα, στη φάση της αναδόμησης του αρχικού σήματος, ένα ζεύγος βαθυπερατών και υψιπερατών φίλτρων συνελίσσονται με τα διανύσματα cA1 και cD1, αντίστοιχα. Προκύπτουν δύο διανύσματα δεδομένων: (α) η χαμηλόσυχη χρονική ακολουθία (approximation function) A1 και (β) η υψίσυχη χρονική ακολουθία D1 (detail function). Το σύμβολο $\uparrow 2$ δηλώνει την εισαγωγή μηδενικών μεταξύ των στοιχείων των διανυσμάτων cA1 και cD1 (up sampling). Έτσι:

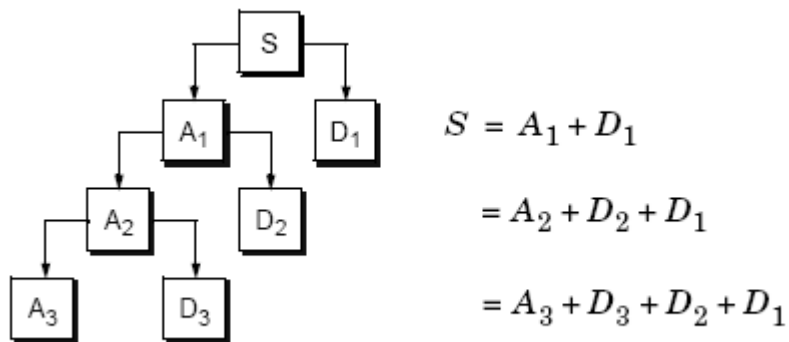
$$x(t) = A_1 + D_1 \quad 3.12$$

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται με τα διανύσματα των συντελεστών κλίμακας cA_i , τα οποία προκύπτουν από το προηγούμενο βήμα. Αυτή η διαδικασία αναπαριστάται με ένα δέντρο κυματιδίων με J επίπεδα, όπου J είναι το πλήθος των επαναλήψεων του βασικού (αρχικού) βήματος του διακριτού κυματιδιακού μετασχηματισμού.



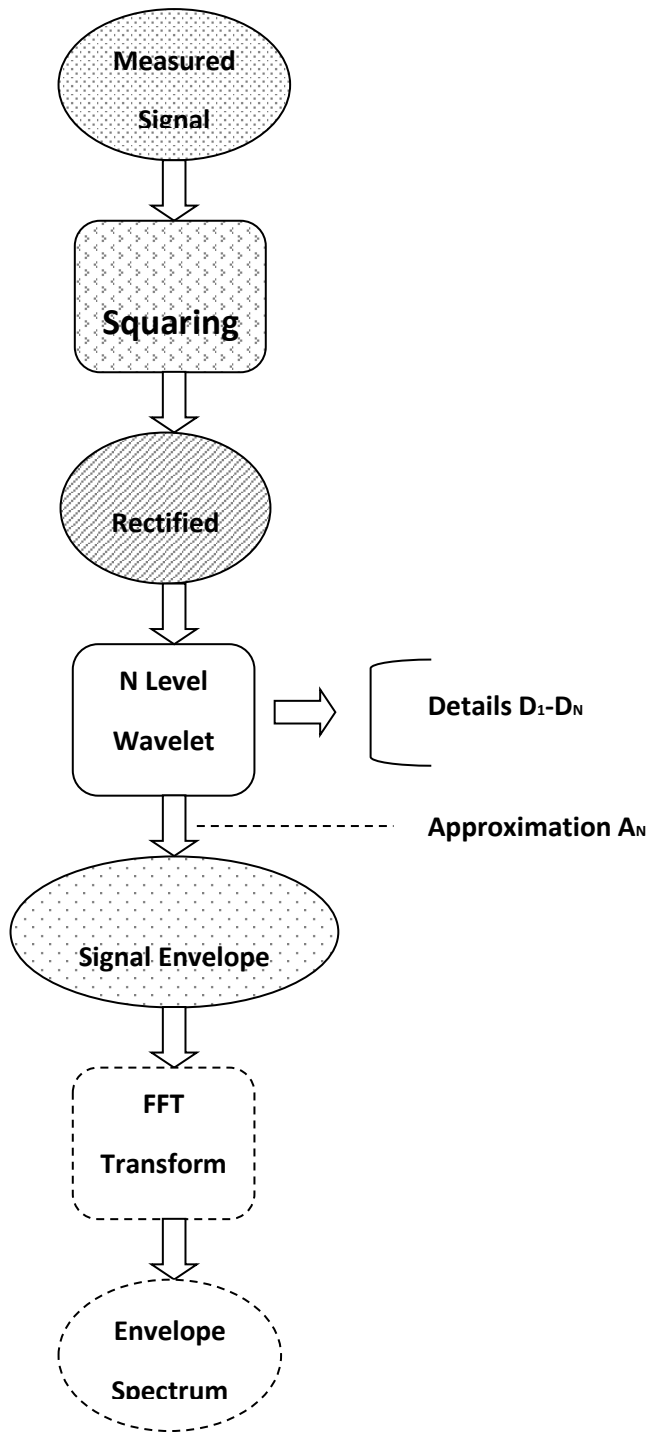
Σχήμα 3.5 Ανάλυση τυχαίου σήματος και πλήρης ανακατασκευή του μέσω των κυματιδιακών συντελεστών.

Ανάλυση τυχαίου σήματος και πλήρης ανακατασκευή του μέσω των κυματιδιακών συντελεστών.



Σχήμα 3.6 Δέντρο κυματιδίων. Ανάπτυξη σε τρία επίπεδα.

Ο κυματιδιακός μετασχηματισμός δύναται να εφαρμοσθεί στην αποδιαμόρφωση δυναμικών σημάτων, όπως η απόκριση των ένσφαιρων τριβέων. Όπως έχει αναφερθεί, τα σήματα που καταγράφονται από έδρανα κύλισης περικλείουν χαμηλόσυχνες συνιστώσες που δρουν ως σήματα διαμόρφωσης (modulator) σε υψίσυχνα φέροντα σήματα (carrier signal). Σκοπός της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποδιαμόρφωσης είναι η απομόνωση της χαμηλόσυχνης πληροφορίας του μετρούμενου σήματος, η οποία περιέχει τις επωφελείς πληροφορίες που αφορούν τη λειτουργική κατάσταση του ένσφαιρου τριβέα. Έτσι, το υψίσυχο φέρον σήμα, το οποίο περικλείει τις ιδιοσυχνότητες της κατασκευής ή του εδράνου κύλισης, φιλτράρεται και απομακρύνεται από την μετρούμενη χρονική ακολουθία. Στο σχήμα 3.7 απεικονίζεται σχηματικά η προτεινόμενη τεχνική αποδιαμόρφωσης δυναμικών σημάτων με την εφαρμογή του κυματιδιακού μετασχηματισμού.



Σχήμα 3.7 Γραφική αναπαράσταση της προτεινόμενης μεθόδου αποδιαμόρφωσης.

Η απόκριση του εδράνου κύλισης καταγράφεται από ένα επιταχυνσιόμετρο που έχει τοποθετηθεί στο κέλυφος της μηχανής πλησίον του ένσφαιρου τριβέα. Αρχικά, τα δεδομένα της μετρούμενης δόνησης υψώνονται στο τετράγωνο (squaring), ώστε να ληφθεί η απόλυτη τιμή του διαμορφωμένου σήματος. Η διαδικασία του τετραγωνισμού του αρχικού σήματος (raw signal) προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στο σύνολο της προτεινόμενης διαδικασίας. Πρώτον, η κυματομορφή, η οποία παράγεται, συνίσταται μόνο από θετικές τιμές, όπως και η τελική μορφή του αποδιαμορφωμένου σήματος. Έπειτα, ο τετραγωνισμός του αρχικού σήματος ενισχύει το πλάτος των κορυφών των κρουστικών παλμών, με αποτέλεσμα να γίνονται περισσότερο ευδιάκριτες. Τέλος, η τεχνική του τετραγωνισμού των σημάτων δύναται να

μεταφέρει τις πλέον σημαντικές φασματικές συνιστώσες της χρονικής ακολουθίας σε χαμηλότερες συχνοτικές περιοχές. Στη συνέχεια, εφαρμόζεται κυματιδιακός μετασχηματισμός N επιπέδων. Έτσι, το ανορθωμένο σήμα (rectified signal) αναλύεται σε χαμηλόσυχνες (approximation) και υψίσυχνες (detail) κυματομορφές. Η χαμηλόσυχη κυματομορφή AN αποτελεί τη ζητούμενη περιβάλλουσα (envelope) του αρχικού διαμορφωμένου σήματος. Το χρονικό σήμα, το οποίο προκύπτει μέσω αυτής της διαδικασίας, επεξεργάζεται περαιτέρω στο πεδίο της συχνότητας με την υποστήριξη του μετασχηματισμού Fourier.

Η επιλογή του κατάλληλου επιπέδου ανάλυση του αρχικού σήματος είναι κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Εξαρτάται από το φασματικό εύρος στο οποίο αναπτύσσονται οι χαμηλόσυχνες συνιστώσες, οι οποίες περιέχουν τις επωφελείς πληροφορίες που αφορούν την υγεία του ένσφαιρου τριβέα. Επίσης, η επιλογή του επιπέδου ανάλυσης εξαρτάται και από τη συχνότητα δειγματοληψίας. Ο πρώτος παράγοντας είναι γνωστός από τη γεωμετρία του εδράνου κύλισης και από την ταχύτητα περιστροφής του άξονα που εδράζεται ο ένσφαιρος τριβέας. Η επιλογή της συχνότητας δειγματοληψίας καθορίζει το συνολικό φασματικό πεδίο του μετρούμενου σήματος, του οποίου το εύρος πρέπει να περιλαμβάνει ένα ικανοποιητικό πεπερασμένο πλήθος διεγερμένων ιδιοσυχνοτήτων του συστήματος που διεγείρονται λόγω των κρούσεων. Έτσι, η δομή του χρονικού σήματος συνίσταται από πληροφορίες που επιτρέπουν την ασφαλή και αξιόπιστη επεξεργασία του. Το επίπεδο ανάλυσης του κυματιδιακού μετασχηματισμού επιλέγεται με τέτοιο τρόπο, ώστε η χρονική συνάρτηση προσέγγισης (approximation function) A_n να καλύπτει πλήρως τη χαμηλόσυχη περιοχή δίχως να διασταυρώνεται με φασματικές περιοχές που χαρακτηρίζονται από συντονισμούς της κατασκευής.

3.5 ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ HILBERT

Στο πεδίο των μαθηματικών και της ανάλυσης σημάτων ο μετασχηματισμός Hilbert είναι ένας γραμμικός συντελεστής ο οποίος παίρνει μια συνάρτηση $u(t)$ μιας πραγματικής μεταβλητής και παράγει μία άλλη συνάρτηση πραγματικής μεταβλητής $H(u)(t)$.

Στο πεδίο της συχνότητας ο Μετασχηματισμός Hilbert έχει Μετασχηματισμό Fourier δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathcal{H}(e^{j\omega}) = j \operatorname{sign}(\omega)$$

Με άλλα λόγια ο Μετασχηματισμός Hilbert προσθέτει φάση $\frac{\pi}{2}$ στις θετικές συχνότητες, ενώ αφαιρεί τη φάση από τις αρνητικές.

3.6 ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η βασική ιδέα της μορφολογικής ανάλυσης βασίζεται στην τροποποίηση της κυματομορφής του σήματος με την επίδραση μίας γεωμετρικής οντότητας, που ονομάζεται δομικό στοιχείο (structural element). Οι βασικοί τελεστές της μορφολογικής μεθοδολογίας, η διάβρωση (erosion), η διαστολή (dilation), η περιστολή (closing) και η διεύρυνση (opening), συσχετίζονται με τα μαθηματικά σύνολα Minkowski, και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή μορφολογικών φίλτρων (morphological filters). Τα μορφολογικά φίλτρα τροποποιούν με μη γραμμικό τρόπο και τοπικά τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν τη γεωμετρία των χρονικών σημάτων.

Οι εφαρμογές της μορφολογικής ανάλυσης είναι ποικίλες και περιλαμβάνουν καρδιογραφήματα και ηλεκτροεγκεφαλικά σήματα, αναγνώριση γεωμετρικών μορφών,μη

γραμμικό φιλτράρισμα, καταστολή θορύβου, επεξεργασία σημάτων στο πεδίο του χρόνου, επεξεργασία εικόνας.

Με τον όρο μορφολογική ανάλυση σημάτων εννοείται ένα σύνολο από θεωρητικές έννοιες, μαθηματικά εργαλεία επεξεργασίας σήματος, μη γραμμικούς τελεστές, μεθόδους σχεδιασμού και συστήματα εφαρμογών που συσχετίζονται με την μαθηματική μορφολογία.

Η μαθηματική μορφολογία έχει σαν σκοπό την ποσοτική περιγραφή της γεωμετρικής δομής των σχημάτων. Εισήχθη από τους Matheron και Serra το 1960. Η μαθηματική μορφολογία συστηματοποίησε παλαιότερες προσπάθειες για ανάλυση δυαδικών εικόνων και πρόσθεσε νέες έννοιες και τελεστές. Οι αρχές της μαθηματικής μορφολογίας βασίζονται στη θεωρία συνόλων και τη στοχαστική γεωμετρία. Οι παραδοσιακές μέθοδοι επεξεργασίας γραμμικών συστημάτων και η ανάλυση Fourier δεν είναι αποτελεσματικές στην επίλυση προβλημάτων που αφορούν τη γεωμετρία της χρονικής ακολουθίας διότι δεν αντιμετωπίζουν ευθέως το θέμα της ποσοτικοποίησης του σχήματος και του μεγέθους των σημάτων.

Αρχικά, εφαρμόστηκε για την ανάλυση εικόνων στη γεωλογία και στη βιολογία. Όπως υποδηλώνεται από το όνομα της, η μορφολογική προσέγγιση αντιλαμβάνεται τα εξεταζόμενα αντικείμενα με τρόπο που συμφωνεί με την ανθρώπινη αντίληψη των σχημάτων, αντίθετα με άλλες μεθόδους, που βασίζονται στη λογική συχνότητων.

Οι εφαρμογές σε μονοδιάστατες χρονικές σειρές είναι περιορισμένες και αφορούν βιολογικά σήματα, όπως καρδιογραφήματα και εγκεφαλογραφήματα. Η μορφολογική προσέγγιση δεν συναντάται συχνά σε εφαρμογές που σχετίζονται με την επεξεργασία δυναμικών σημάτων, όπως οι κραδασμοί που παράγονται κατά τη λειτουργία των ένσφαιρων τριβέων. Όπως, έχει ήδη αναφερθεί, η μορφολογική επεξεργασία αξιοποιεί χαρακτηριστικά που υπάρχουν στη χρονική μορφή των σημάτων. Παρ' ότι η μορφολογική επεξεργασία δυσκολεύεται να ανιχνεύσει χαρακτηριστικά, τα οποία είναι κρυμμένα στη χρονική κυματομορφή του σήματος, εν τούτοις σε πολλές περιπτώσεις δύναται να αξιοποιηθεί ούτως ώστε να εξαχθούν τα κρουστικά χαρακτηριστικά κραδασμών με αποτελεσματικότερο τρόπο από τις παραδοσιακές μεθόδους.

Στην μαθηματική μορφολογία εφαρμόζεται μια σειρά από μη γραμμικούς μετασχηματισμούς, οι οποίοι βασίζονται στην έννοια των συνόλων. Οι βασικοί τύποι μορφολογικών συνόλων είναι η πρόσθεση και η αφαίρεση συνόλων Minkowski.

Η πρόσθεση Minkowski μεταξύ δύο συνόλων αριθμών A και B ορίζεται ως εξής:

$$A \oplus B = \{a + b, a \in A, b \in B\} = \bigcup_{b \in B} A_b \quad 3.13$$

όπου το μαθηματικό σύμβολο \bigcup ορίζει την ένωση συνόλων και A_b είναι ένα σύνολο που προκύπτει με μετακίνηση της αρχής του συνόλου A κατά διαστήματα που ορίζονται από τα στοιχεία b του συνόλου B.

Με βάση τον παραπάνω ορισμό η αφαίρεση Minkowski μπορεί να εκφρασθεί από την ακόλουθη σχέση:

$$A \ominus B = (A^c \oplus B)^c = \bigcap_{b \in B} A_b \quad 3.14$$

όπου A^c είναι το συμπλήρωμα του συνόλου A και το σύμβολο \bigcap υποδεικνύει τη τομή συνόλων. Έτσι, η αφαίρεση των δύο συνόλων A και B παράγει ένα σύνολο, το οποίο συνίσταται από τα κοινά στοιχεία των συνόλων A_b , τα οποία δημιουργούνται με μετακίνηση της αρχής του συνόλου A σε αποστάσεις που καθορίζονται από τα στοιχεία του συνόλου B.

Με βάση τους ορισμούς της πρόσθεσης και της αφαίρεσης συνόλων των σχέσεων 3.3 και 3.4, αντίστοιχα, ορίζονται οι δύο βασικοί μορφολογικοί τελεστές: η διαστολή (dilation) και η διάβρωση (erosion).

$$dil(A, B) = A \oplus B^r = \{x, B_x \cap A \neq \emptyset\} = \bigcup_{b \in B} A_{-b} \quad 3.15$$

$$er(A, B) = A \ominus B^r = \{x, B_x \subseteq A\} = \bigcap_{b \in B} A_{-b} \quad 3.16$$

όπου ο όρος B_x παριστάνει κατοπτρικό σύνολο συναρτήσει της αρχής του συνόλου B .

Ένα παράδειγμα διαστολής και διάβρωσης απεικονίζεται στο σχήμα 3.1. Τα σύνολα A και B λαμβάνουν δυαδικές τιμές (1 ή 0 \rightarrow 'Μαύρο' ή 'Άσπρο') και ορίζονται στο καρτεσιανό επίπεδο. Η διαστολή και η διάβρωση του συνόλου A από το σύνολο B καθορίζεται από τον τρόπο που το κατοπτρικό σύνολο B_x τέμνει το σύνολο A .

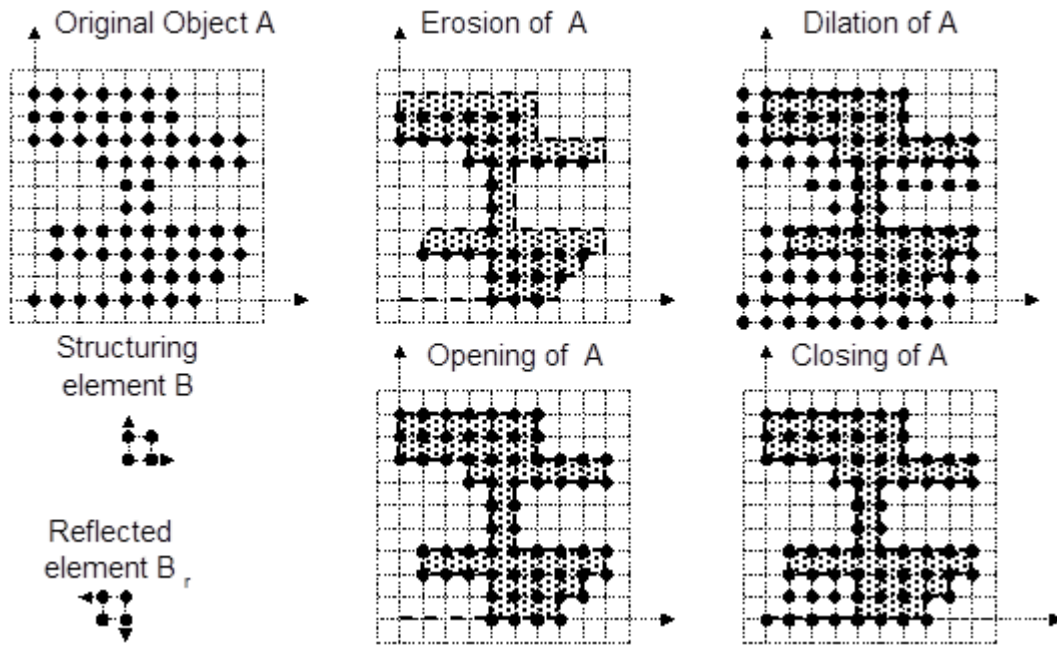
Με βάση τη διαστολή και τη διάβρωση ορίζονται δύο ακόμη βασικοί μορφολογικοί τελεστές: η περιστολή (closing) και η διεύρυνση (opening).

$$cl(A, B) = A \cdot B = (A \oplus B^r) \ominus B \quad 3.17$$

$$op(A, B) = A \circ B = (A \ominus B^r) \oplus B \quad 3.18$$

Σύμφωνα με τη σχέση 3.17, η περιστολή ορίζεται ως η διαστολή του συνόλου A από το σύνολο B συνοδευόμενη από αφαίρεση Minkowski του συνόλου B . Αντίστοιχα, η διεύρυνση δύναται να εκφραστεί ως η διάβρωση του συνόλου A από το σύνολο B συνοδευόμενη από πρόσθεση Minkowski του συνόλου B .

Το σύνολο που προκύπτει από την περιστολή πάντα περιλαμβάνει το αρχικό σύνολο, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.8. Επίσης, η μορφολογική περιστολή καλύπτει τα κενά του αρχικού αντικειμένου, ενώ η μορφολογική διεύρυνση εξαλείφει λεπτά και αιχμηρά τμήματα του αρχικού αντικειμένου. Περαιτέρω εφαρμογή των μορφολογικών τελεστών με το ίδιο δομικό στοιχείο δεν αλλάζει το αποτέλεσμα.



Σχήμα 3.8 Μορφολογική επεξεργασία ενός συνόλου A (αρχικό αντικείμενο) από ένα σύνολο B (δομικό στοιχείο). Και τα δύο σύνολα ορίζονται στο καρτεσιανό επίπεδο και τα στοιχεία τους λαμβάνουν τιμές 1 ή 0.

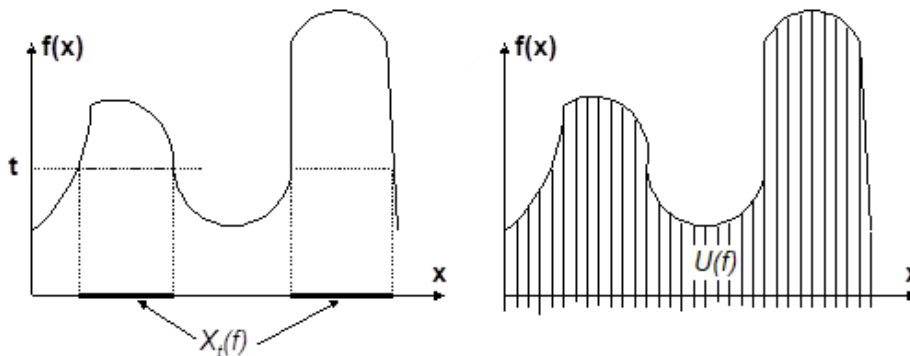
Η βάση της μαθηματικής μορφολογίας είναι το σύνολο. Για την ανάλυση πολυδιάστατων σημάτων έχουν αναπτυχθεί διαφορετικές προσεγγίσεις.

Για μονοδιάστατες συναρτήσεις ορίζεται η διατομή (cross section) μιας συνάρτησης:

$$X_t(f) = \{x \in D : f(x) \geq t\}, t \in V \quad 3.19$$

όπου $f(x)$ είναι μία συνάρτηση, D είναι το πεδίο ορισμού της f στο σύνολο των ακεραίων Z ή στο σύνολο R των πραγματικών αριθμών, V είναι το πεδίο τιμών της $f(x)$ και ο όρος t εκφράζει ένα όριο (threshold).

Μια ενδεικτική διατομή μιας συνάρτησης αναπαρίστανται στο σχήμα



Σχήμα 3.9 Παράσταση συνάρτησης με σύνολα: (α) η διατομή $X_t(f)$ και (β) η σύσκια αναπαράσταση $U(f)$.

Έστω ότι η συνάρτηση $f(x)$ είναι συνεχής και εμφανίζει θετικές κορυφές (upper semi-continuous function). Τότε είναι δυνατή η ανακατασκευή της συνάρτησης από τις διατομές της που λαμβάνονται από μία ακολουθία συνόλων:

$$f(x) = \sup\{t \in R : x \in X_t\} \quad 3.20$$

Η δεύτερη προσέγγιση χρησιμοποιεί τη σύσκια αναπαράσταση (umbra) $U(f)$ της συνάρτησης (σχήμα 3.9). Είναι ένα σύνολο U που ορίζεται στο καρτεσιανό επίπεδο με τον ακόλουθο τρόπο:

$$\begin{aligned}(x, t) \in U &\Leftrightarrow t \leq x \in X_t(f) & 3.21 \\(x, t) \in U &\Leftrightarrow (x, a) \in U, \forall a < t & 3.22\end{aligned}$$

Σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς το μορφολογικό φιλτράρισμα τροποποιεί τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των σημάτων δια μέσου της επεξεργασίας με ένα άλλο σήμα ή συνάρτηση, που καλείται δομικό στοιχείο (structuring element). Το δομικό στοιχείο στην πράξη έχει απλούστερη μορφή από το τροποποιούμενο σήμα.

Χρησιμοποιώντας τη διατομή $X_t(f)$ και τη σύσκια αναπαράσταση $U(f)$ μίας συνάρτησης συνόλων, η πρόσθεση και η αφαίρεση Minkowski μεταξύ δύο συναρτήσεων δύναται να εκφραστούν ως εξής:

$$(f \oplus g)(x) = \sup_{y \in D} \{f(y) + g(x - y)\} \quad 3.23$$

$$(f \ominus g)(x) = \inf_{y \in D} \{f(y) - g(x - y)\} \quad 3.24$$

Στις σχέσεις 3.23 και 3.24, το σύνολο D μπορεί να ταυτισθεί με το σύνολο των πραγματικών αριθμών \mathbb{R} . Όμως, για πρακτικές εφαρμογές υποτίθεται ότι το σύνολο D είναι ένα συμπαγές υποσύνολο του \mathbb{R} . Επίσης, δίχως αλλοίωση της γενικότητας, η συνάρτηση $g(x)$ μπορεί να ορισθεί σε ένα υποσύνολο του D .

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω ορισμούς της πρόσθεσης και της αφαίρεσης Minkowski μεταξύ συναρτήσεων, οι τέσσερις βασικές μορφολογικές λειτουργίες μπορούν να ορισθούν ως εξής:

$$dil(f, g) = (f \oplus g^r)(x) = f(x) \oplus g(-x) = \sup_{y \in D} \{f(y) + g(x - y)\} \quad 3.25$$

$$er(f, g) = (f \ominus g^r)(x) = f(x) \ominus g(-x) = \inf_{y \in D} \{f(y) - g(x - y)\} \quad 3.26$$

$$cl(f, g) = (f \cdot g)(x) = [(f \oplus g^r) \ominus g](x) \quad 3.27$$

$$op(f, g) = (f \circ g)(x) = [(f \ominus g^r) \oplus g](x) \quad 3.28$$

όπου η $gr(x)$ είναι συμμετρική συνάρτηση της $g(x)$ σε σχέση με την αρχή του άξονα x .

Σύμφωνα με την κλασσική γραμμική συνέλιξη $f * g$ μεταξύ δύο συναρτήσεων $f(x)$ και $g(x)$, η πρόσθεση και η αφαίρεση συνόλων κατά Minkowski μπορούν να εκφραστούν εναλλακτικά σαν μη γραμμικές συνελιξεις, στις οποίες ο πολλαπλασιασμός μεταξύ των δύο συναρτήσεων αντικαθίσταται από πρόσθεση ή αφαίρεση, και η ολοκλήρωση αντικαθίσταται από τους τελεστές μεγιστοποίησης (max) ή ελαχιστοποίησης (min).

Οι εξισώσεις 3.25 – 3.27 μπορούν να απλοποιηθούν εάν η συνάρτηση $g(x)$ είναι άρτια, δηλαδή $g(x) = g(-x)$ και εάν οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται είναι διακριτές. Έτσι, για ένα σήμα $f(k)$, το οποίο ορίζεται στο πεδίο D_f , και για ένα δομικό στοιχείο που εκφράζεται από τη συνάρτηση $g(u)$ μήκους L , η οποία ορίζεται στο πεδίο D_g , οι τέσσερις βασικοί μορφολογικοί τελεστές μπορούν να ορισθούν ως εξής:

$$dil(k) = (f \oplus g)(k) = \max_{y \in D_g} \{f(k + u) + g(u)\} \quad 3.27$$

$$er(k) = (f \ominus g)(k) = \min_{u \in D_g} \{f(k + u) - g(u)\} \quad 3.28$$

$$cl(k) = (f \cdot g)(k) = er(dil(k)) \quad 3.29$$

$$op(k) = (f \circ g)(k) = dil(er(k)) \quad 3.30$$

Η μη γραμμικότητα των τελεστών διαστολής και διάβρωσης έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφορών μεταξύ των μορφολογικών τελεστών και της γραμμικής συνέλιξης.

Όσον αφορά την εφαρμογή της μεθόδου στην αναγνώριση σφαλμάτων, προτείνεται η χρήση της μορφολογικής περιστολής του σήματος, επιτρέπον την ανίχνευση των χρονικών στιγμών κατά τις οποίες παρήχθησαν οι κρουστικοί παλμοί με την εφαρμογή ενός αλγορίθμου τοπικών μεγίστων. Τα τοπικά μέγιστα ενός διακριτού σήματος $f(i)$ εντοπίζονται στα σημεία i , τα οποία ικανοποιούν την ακόλουθη σχέση:

$$\begin{cases} p(i) = f(i), \text{ εάν } f(i) > f(i-1) \wedge f(i) > f(i+1) \\ p(i) = 0, \text{ οπουδήποτε αλλού} \end{cases} \quad 3.31$$

Με αυτόν τον τρόπο ανιχνεύεται μια αλληλουχία παλμών $p(i)$, η οποία αντιστοιχεί στις κρούσεις των συνεργαζόμενων δομικών στοιχείων του εδράνου κύλισης.

Ο αλγόριθμος εντοπισμού τοπικών μεγίστων οφείλει την αποτελεσματικότητά του στην μορφολογική επεξεργασία του σήματος που προηγήθηκε. Διαφορετικά ο αλγόριθμος θα ανίχνευε και πολλές άλλες αιχμές, οι οποίες δεν θα ανήκαν στην αρχική κρουστική απόκριση που προκάλεσε η αστοχία του έσφαιρου τριβέα.

Οι κρουστικές αιχμές που εντοπίζονται μέσω αυτής της διαδικασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διάγνωση και την παρακολούθηση της εξέλιξης του σφάλματος. Η πρόοδος της φθοράς προκαλεί μεταβολή στο πλάτος των κρούσεων, η οποία αποτελεί ένα μέτρο ποσοτικοποίησης αυτού του φαινομένου.

Έτσι, ο μορφολογικός δείκτης δύναται να ορισθεί ως η μέση τετραγωνική τιμή που χαρακτηρίζει την ενέργεια που περικλείουν οι αιχμές, οι οποίες ανιχνεύθηκαν με την εφαρμογή της μορφολογικής περιστολής και την υποστήριξη μηδενικού επίπεδου δομικού στοιχείου.

3.7 SPECTRAL KURTOSIS

Όπως έχουμε αναφέρει ήδη, αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα της αναγνώρισης του σήματος με βλάβη X_t στην μέτρηση Y_t παρουσία θορύβου N_t . Μπορούμε να υποθέσουμε ότι το X_t είναι μεταβατικό, ενώ το N_t είναι στατικό. Πράγματι, αρκετά αρχικά σφάλματα στα έδρανα κύλισης παράγουν μια σειρά από επαναλαμβανόμενες μικρές παροδικές δυνάμεις, οι οποίες με την σειρά τους διεγείρουν μερικούς δομικούς συντονισμούς. Έτσι, ένα γενικό μοντέλο για το σήμα X_t είναι η γενικευμένη διαδικασία θορύβου.

$$X(t) = \sum_k X_k h(t - \tau_k) \quad 3.26$$

Όπου $h(t)$ είναι η κρουστική απόκριση και $\{X_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$ και $\{\tau_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$ είναι αλληλουχίες από τυχαίες μεταβλητές, οι οποίες αντιστοιχούν σε τυχαία πλάτη και τυχαίες εμφανίσεις κρούσεων. Υποθέτουμε, ότι για κάθε k , η διαφορά $\tau_{k+1} - \tau_k$ είναι ένας μη αρνητική τυχαία μεταβλητή της οποίας η μέση τιμή καθορίζει τον μέσο ρυθμό επανάληψης των παλμών.

Ο χαρακτηρισμός των σφαλμάτων, όπως περιγράφηκε, συνήθως επιτυγχάνεται με την χρήση στατιστικών δεικτών οι οποίοι είναι ευαίσθητοι στον εντοπισμό των κορυφών των σημάτων. Για παράδειγμα, η κύρτωση και ο συντελεστής κορυφής είναι κατάλληλοι για αυτή την χρήση. Αντίθετα η τιμή RMS μπορεί να χαρακτηρίσει μόνο την ένταση του σήματος, αλλά δεν μπορεί να εξάγει πληροφορία για χρονικές εναλλαγές της περιβάλλουσας. Η ανάλυση φάσματος μπορεί να αποτύχει να διαγνώσει την παρουσία του σήματος με βλάβη, όπως αυτός τις εξίσωσης 3.26, πιο συγκεκριμένα όταν οι τυχαίες διακυμάνσεις $\{X_k\}$ και $\{\tau_k\}$ των παλμών είναι δυνατές, σ αυτή την περίπτωση υπάρχει μικρή πιθανότητα για εντοπισμό των σχετικών αρμονικών στο πεδίο της συχνότητας.

Εν αντιθέση, τα πλεονεκτήματα του δείκτη κύρτωσης είναι α) ότι λαμβάνει υπόψιν της υψηλές τιμές του σήματος με βλάβη X_t , β) ότι το συγκεκριμένο σήμα είναι ιδανικά μηδενικό όταν

υπάρχει μόνο ο θόρυβος από το περιβάλλον. Η συνθήκη α) είναι αληθής όταν η κρουστική απόκριση είναι επαρκώς καλά χωρισμένη και η τιμή του SNR είναι επαρκώς υψηλή. Η συνθήκη β) είναι αληθής όταν ο θόρυβος του περιβάλλοντος μπορεί να θεωρηθεί γκαουσιανός σαν αποτέλεσμα της υπέρθεσης ενός μεγάλου αριθμού από ανεξάρτητες πηγές. Στην πραγματικότητα, όμως, αυτές οι συνθήκες δεν ικανοποιούνται συχνά. Η πιο σημαντική διαφορά υπάρχει στην έννοια «επαρκώς υψηλή τιμή του SNR». Ο θόρυβος του περιβάλλοντος συχνά ενσωματώνει δυνατές δονήσεις από διάφορες πηγές, οι οποίες καλύπτουν ένα μεγάλο πεδίο συχνοτήτων και καλύπτουν το σήμα που μας ενδιαφέρει. Σαν αποτέλεσμα, η κύρτωση δεν είναι ικανή να αναγνωρίσει την υψηλή τιμή του σήματος με βλάβη και σχεδόν ποτέ δεν υπερβαίνει την μηδενική τιμή.

Η κύρτωση σαν γενικός δείκτης δεν είναι ο κατάλληλος και προτιμάται να εφαρμόζεται τοπικά σε διαφορετικές ζώνες συχνοτήτων. Αυτό ακριβώς κάνει η SK. Η SK υπολογίζεται από τον τύπο:

$$K_Y(f) = \frac{K_X(f)}{[1 + \rho(f)]^2} \quad 3.27$$

Όπου $K_X(f) > 0$ είναι η SK του σήματος της σχέσης 3.26 και $\rho(f)$ είναι η SNR, πιο συγκεκριμένα $\rho(f) = \frac{S_N(f)}{S_X(f)}$ με $S_N(f)$ και $S_X(f)$ η φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου και του σήματος με βλάβη. $K_Y(f)$ τείνει προς το $K_X(f)$ στις συχνότητες για τις οποίες η τιμή του SNR είναι υψηλή και θα τείνει στο μηδέν όταν το φαινόμενο της υπερκάλυψης του θορύβου είναι δυνατό. Αυτό εξηγεί την μοναδική ικανότητα της SK να εξετάζε λεπτομερώς όλο το πεδίο της συχνότητας και να βρίσκει αυτές τις ζώνες συχνότητας όπου το σήμα βλάβης μπορεί να ανιχνευθεί καλύτερα.

Η SK μπορεί να εφαρμοσθεί στην διάγνωση βλαβών με τον εξής τρόπο, ο οποίος αναφέρεται από τους (Antoni & Randall, 2004), υπολογίζοντας την SK και εξετάζοντας σε κάθε ζώνη συχνότητας για ασυνήθιστα υψηλές τιμές που μπορεί να οφείλονται στην παρουσία βλάβης.

Για την εκτίμηση της SK, προτείνεται από (Antoni & Randall, 2004) μια απλή εκτίμηση βασιζόμενη στον short-time Fourier transform (SFTP). Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η εκτίμηση θα πρέπει να ισχύουν δύο συνθήκες.

Σ1: η μη-στατιμότητα στο σήμα έχει αργές χρονικές εξελίξεις σε σύγκριση με το μήκος του παραθύρου του SFTP.

Σ2: Το μήκος συσχέτισης του σήματος είναι μικρότερο από το παράθυρο ανάλυσης του SFTP.

Με άλλα λόγια το σήμα προς ανάλυση θα πρέπει να είναι τοπικά στάσιμο. Δυστυχώς, δεν συμβαδίζει με το μοντέλο που περιγράφεται από την εξίσωση 3.26. Ως συνέπεια, η εκτιμώμενη SK δεν εξαρτάται από το μήκος του παραθύρου που χρησιμοποιείται στον SFTP. Ας υποθέσουμε ότι το παράθυρο ανάλυσης $w(n)$ του SFTP έχει διάρκεια N_w μικρότερη από την μέση απόσταση μεταξύ δύο συνεχόμενων παλμών, τότε η βασιζόμενη στον SFTP, SK μιας γενικευμένης διαδικασίας σημείων $P(t) = \sum_k X_k d(t - \tau_k)$ είναι:

$$K_p(f) = \frac{\gamma_{4w}}{pN_w} \gamma_{4X} - 2 \quad 3.28$$

Όπου p είναι η πιθανότητα εμφάνισης των παλμών, $\gamma_{4w} = N_w \frac{\sum_n |w(n)|^4}{|\sum_n |w(n)|^2|^2}$ είναι το χρονικό εύρος ζώνης που παράγεται από την ανάλυση παραθύρου και γ_{4X} =

$E\{|X_k|^4\} / E\{|X_k|^2\}^2$ είναι η κανονικοποιημένη 4^η τάξης τιμή της τυχαίας μεταβλητής $\{X_k\}$. Η η βασιζόμενη στον SFTP, SK μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$K_p(f) \approx \left(\frac{\gamma_{4w}}{pN_w} \gamma_{4X} - 2 \right) * \frac{1}{[1 + \rho(f)]^2} \quad 3.29$$

Ακόλουθες παρατηρήσεις:

- Η SK μειώνεται με τον ρυθμό επανάληψης των παλμών.
- Η SK αυξάνεται με τον ρυθμό δειγματοληψίας του σήματος.
- Η SK αυξάνεται με το k_x δηλαδή με την ένταση των διακυμάνσεων στα πλάτη των παλμών.
- Η SK μειώνεται με το μήκος του παραθύρου του SFTP.

Παρ ότι η παραπάνω διαδικασία είναι ικανή να ανιχνεύσει την παρουσία βλάβης, δεν μπορεί να δώσει πληροφορίες σχετικά με την φύση της βλάβης. Θα πρέπει να εφαρμοστούν «διαγνωστικά φίλτρα», τα οποία θα μπορέσουν να απομονώσουν το σήμα με βλάβη από τον θόρυβο που υπάρχει στο περιβάλλον.

Στην παρούσα εργασία εφαρμόζεται η έννοια του kurtogram. Η ιδέα είναι να χρησιμοποιηθεί ένα εύρωστο φίλτρο διάγνωσης $g(t)$ με ένα επιβαλλόμενο πεδίο συχνοτήτων με δύο μόνο παραμέτρους να προσδιοριστούν. Πιο συγκεκριμένα ο σκοπός είναι τα βρεθεί η κεντρική συχνότητα f_c και το εύρος ζώνης B_f του φίλτρου το οποίο μεγιστοποιεί μερικά κριτήρια του σήματος που έχει φιλτραριστεί. Η λογική πίσω από αυτή την προσέγγιση είναι η ακόλουθη:

- Ένα φίλτρο αποκοπής ζώνης έχει πιθανότητα να επιλέξει το πεδίο συχνοτήτων στο οποίο ο δείκτης SNR είναι μέγιστος.
- Ένα φίλτρο αποκοπής ζώνης έχει πιθανότητα να επιλέξει μία πηγή παλμών (την πιο δυνατή) ακόμα και αν υπάρχουν κ άλλες πηγές στο σήμα.
- Ένα φίλτρο αποκοπής ζώνης είναι απαραίτητο για το στάδιο της προ-επεξεργασίας πριν εκτελεσθεί η αποδιαμόρφωση του σήματος.

3.8 SAX-PAA

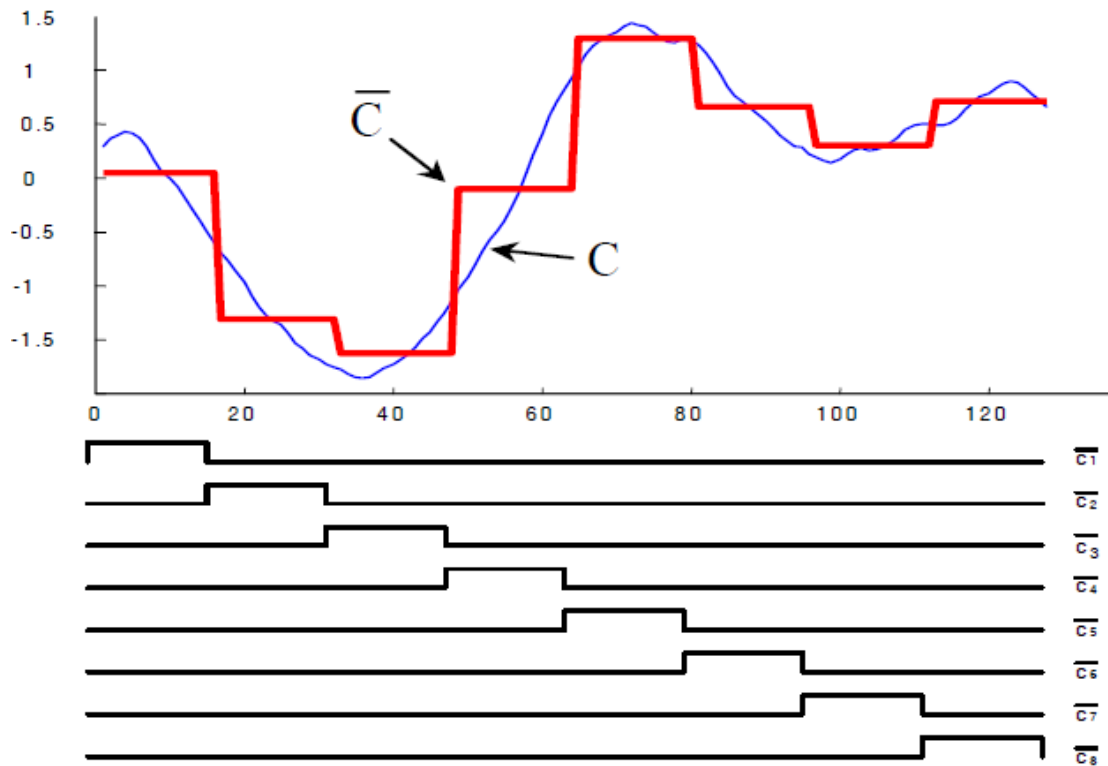
Η μέθοδος Συμβολικής Συνολικής Προσέγγισης, ή αλλιώς Symbolic Aggregate Approximation (SAX), προτάθηκε πρώτη φορά από τους (J, E, L, & S, 2007) για να καλύψει τα μειονεκτήματα προηγούμενων συμβολικών απεικονίσεων. Πιο συγκεκριμένα, έκτος από τις γνωστές απεικονίσεις χρονοσειρών όπως τα wavelets ή οι μετασχηματισμοί Fourier, πολλές άλλες εναλλακτικές συμβολικές αναπαραστάσεις έχουν προταθεί. Όμως, αυτές οι απεικονίσεις έχουν το κύριο μειονέκτημα ότι η διάσταση που απομένει μετά από αυτά παραμένει η ίδια με την αρχική χρονοσειρά (raw time series). Το ενδιαφέρον γεγονός με το SAX είναι ότι αποτελεί την πρώτη συμβολική προσέγγιση για χρονοσειρές που επιτρέπει μείωση της διάστασης.

Το SAX εφαρμόζεται σε δύο βήματα. Το πρώτο είναι η μείωση της διάστασης (Dimensionality Reduction) και το δεύτερο η διακριτοποίηση (Discretization). Το πρώτο βήμα επιτυγχάνεται με την προσέγγιση του συνολικού κατακερματισμού (Piecewise Aggregate Approximation ή αλλιώς PAA). Παρόλο που το συγκεκριμένο βήμα θεωρείται απλό, ανταγωνίζεται αντάξια υψηλότερου επιπέδου τεχνικές μείωσης διάστασης, όπως τον μετασχηματισμό Fourier και τα wavelets.

Πιο συγκεκριμένα, μία χρονοσειρά C μήκους n μπορεί να αναπαρασταθεί στον w -διάστατο χώρο, όπου $w < n$, με ένα διάνυσμα $\bar{C} = \bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_w$. Το ίδιο στοιχείο του διανύσματος υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$\bar{c}_i = \frac{w}{n} \sum_{j=\frac{n}{w}(i-1)+1}^{\frac{n}{w}i} (C_j) \quad 3.30$$

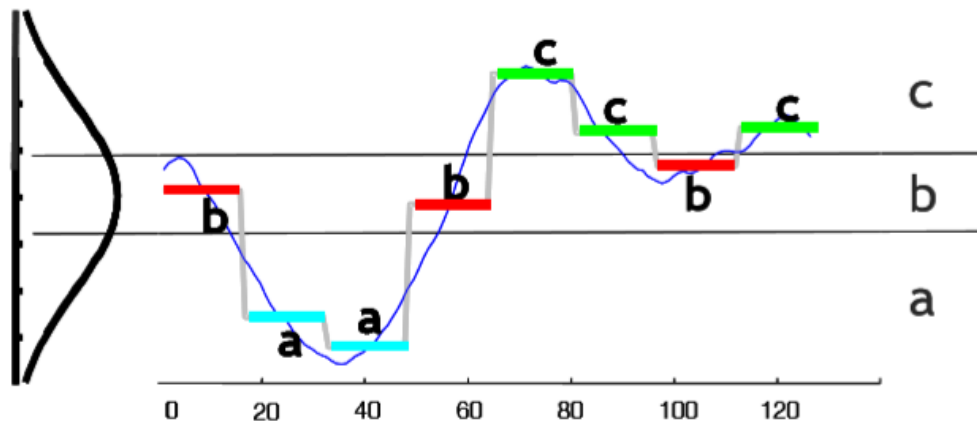
Με άλλα λόγια, ο στόχος του συγκεκριμένου βήματος είναι να μειώσει την χρονοσειρά από n σε w διαστάσεις. Συνεπώς, η χρονοσειρά χωρίζεται σε w ίσου μεγέθους πλαίσια (frames). Αυτή η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μία προσπάθεια να προσεγγίσει την αρχική χρονοσειρά (raw time series) σε έναν γραμμικό συνδυασμό σταθερών συναρτήσεων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10, όπου το SAX εφαρμόζεται σε ένα τυχαίο σήμα, οι τιμές του οποίου δεν είναι υποχρεωτικό να είναι γνωστές.



Σχήμα 3.10 Η τεχνική μείωσης της διάστασης στο SAX.

Μετά την μείωση της διάστασης μέσω του PAA, είναι επιθυμητό να λάβει χώρα μία τεχνική διακριτοποίησης, η οποία θα παράγει ισοπίθανα σύμβολα (συγκεκριμένα, γράμματα αλφαβήτου). Αυτό είναι εύκολο επιτεύξιμο, καθώς οι κανονικοποιημένες χρονοσειρές ακολουθούν την γνωστή Γκαουσιανή κατανομή. Πιο συγκεκριμένα, το SAX χωρίζει την διαστασιολογικά μειωμένη χρονοσειρά σε οριζόντια ισοπίθανα μέρη, με κάθε ένα από αυτά να αντιπροσωπεύεται από ένα γράμμα της αλφαβήτου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.11. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ορίζεται η παράμετρος α , η οποία ονομάζεται μέγεθος αλφαβήτου (alphabet size). Τα σημεία τα οποία χωρίζουν την χρονοσειρά σε α τμήματα συμβολίζονται με β και ονομάζονται αριθμοί σημείων διακοπής (breakpoint numbers), τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Με σκοπό να διαχωριστεί η χρονοσειρά ισοπίθανα, αυτά τα σημεία χωρίζουν

την Γκαουσιανή καμπύλη έτσι ώστε κάθε περιοχή που παράγεται από αυτά να έχει επιφάνεια ίση με το $1/\alpha$ αυτής της καμπύλης.



Σχήμα 3.11 Η τεχνική διακριτοποίησης στο SAX

β_i \ a	3	4	5	6	7	8	9	10
β_1	-0.43	-0.67	-0.84	-0.97	-1.07	-1.15	-1.22	-1.28
β_2	0.43	0	-0.25	-0.43	-0.57	-0.67	-0.76	-0.84
β_3		0.67	0.25	0	-0.18	-0.32	-0.43	-0.52
β_4			0.84	0.43	0.18	0	-0.14	-0.25
β_5				0.97	0.57	0.32	0.14	0
β_6					1.07	0.67	0.43	0.25
β_7						1.15	0.76	0.52
β_8							1.22	0.84
β_9								1.28

Πίνακας 3.1 Τιμές των αριθμών σημείων διακοπής β συναρτήσει του μεγέθους αλφαβήτου a .

4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα πειραματικά δεδομένα, που αναλύουν το κάθε είδος εντροπίας, ώστε να επιλεγεί η τεχνική που α) αναγνωρίζει την φθορά β) αναγνωρίζει την φθορά στο πρώιμο στάδιο της.

4.1 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΕΝΟ ΣΗΜΑ

Αρχικά, ακολουθώντας το μαθηματικό μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 1.3, παράχθηκαν πέντε σήματα με διαφορετικά επίπεδα θορύβου, τα οποία προσομοιώνουν διαφορετικές καταστάσεις υγείας του ένσφαιρου τριβέα. Ο αλγόριθμος με τον οποίο παράχθηκαν τα σήματα υπάρχει στο Παράρτημα της παρούσας εργασίας. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χρειάζεται σαν είσοδο τον συντελεστή θορύβου με τον οποίο θα υπολογίσει το θόρυβο που θα προστεθεί στο τελικό σήμα.

Για την επιλογή των κατάλληλων τιμών του συντελεστή θορύβου, χρησιμοποιήθηκαν δύο δείκτες, η αναλογία σήματος προς θόρυβο (Signal-to-noise ratio, SNR) και η κύρτωση.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η αναλογία σήματος προς θόρυβο συγκρίνει το επίπεδο του επιθυμητού σήματος ως προς το επίπεδο του θορύβου. Η τιμή του SNR ορίζεται ως ο λόγος της δύναμης του σήματος προς την δύναμη του θορύβου, συνήθως εκφράζεται σε decibel. Μια τιμή SNR μεγαλύτερη από το 0 db υποδικνύει περισσότερο σήμα από θόρυβο. Υπολογίζεται από την σχέση:

$$SNR = 10 * \log_{10} \left[\left(\frac{A_{signal}}{A_{noise}} \right)^2 \right]$$

Η κύρτωση είναι το στατιστικό μέγεθος που καθορίζει την αιχμηρότητα του σήματος. Δεν έχει διαστάσεις και ορίζεται ως η 4^η στατιστική ροπή του σήματος, η οποία περιγράφει την κατανομή των τιμών της χρονοσειράς γύρω από την μέση τιμή αυτού. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της κύρτωσης, τόσο λιγότερος θόρυβος υπάρχει στο πηγαίο σήμα. Υπολογίζεται από την σχέση:

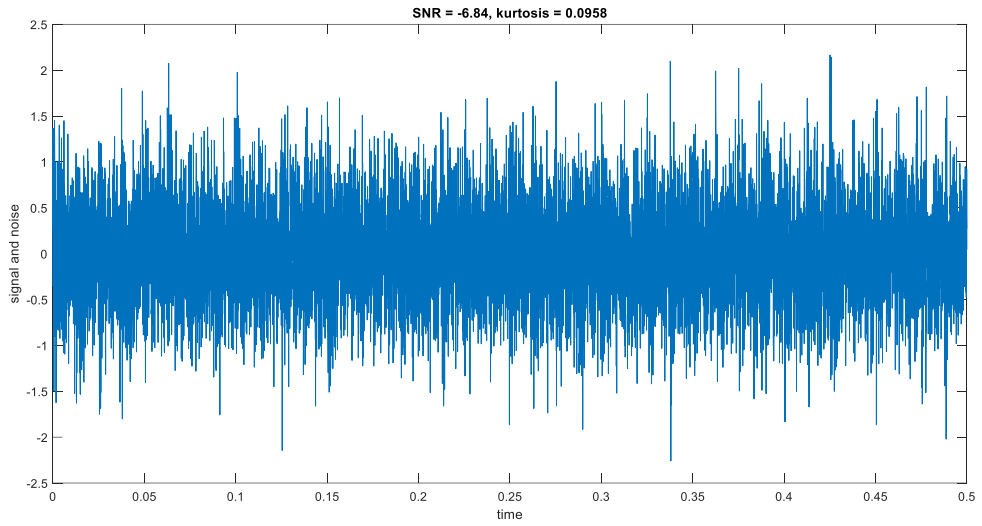
$$K = \frac{M_4}{\sigma^4} = \frac{\frac{1}{4} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^4}{\left(\sqrt{\frac{1}{4} \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) - \bar{x})^2} \right)^4}$$

Με βάση τους παραπάνω δείκτες επιλέχθηκαν οι παράμετροι προσομοίωσης των σημάτων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ο συντελεστής θορύβου, οι τιμές του δείκτη SNR και οι τιμές της κύρτωσης για κάθε σήμα.

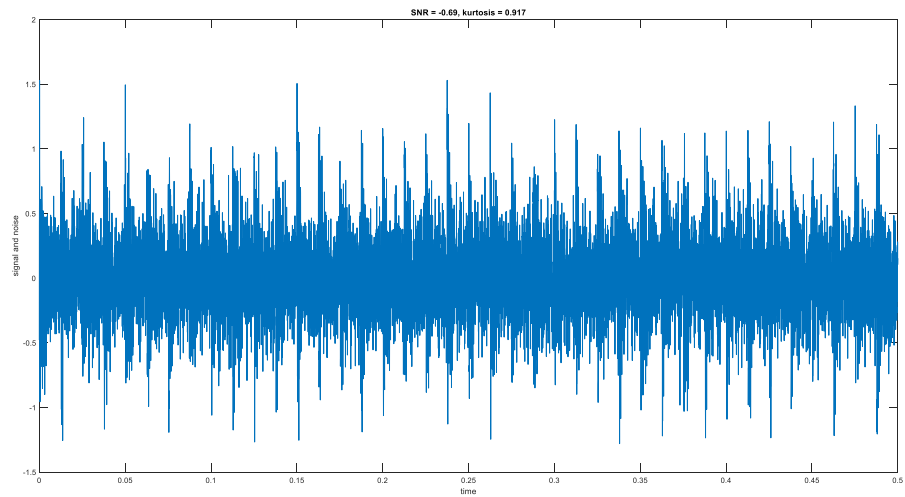
<i>Noise Coefficient</i>	<i>SNR</i>	<i>Kurtosis</i>
0,5	-6,84	0,0958
0,25	-0,69	0,917
0,1	6,73	3,029
0,05	14,5	3,82
0,01	26,63	4,267

Πίνακας 4.1 Συντελεστής Θορύβου-SNR-Kurtosis

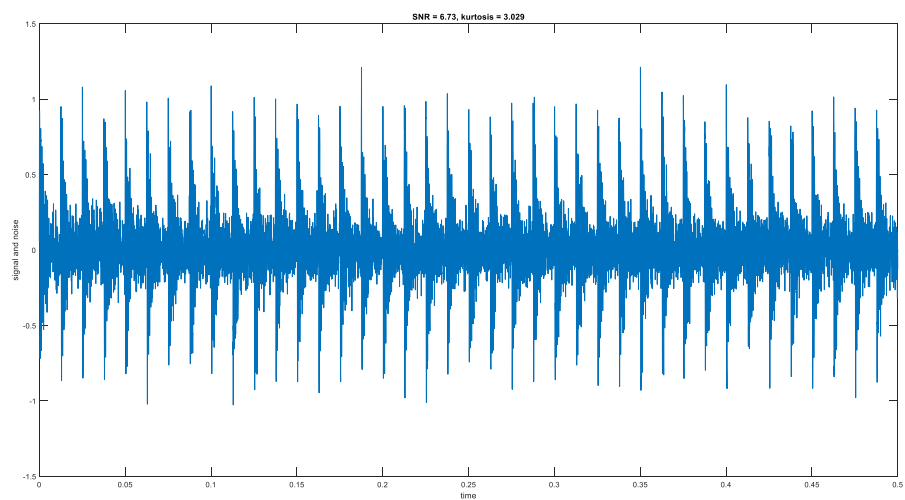
Παρακάτω παρουσιάζονται τα σήματα που παράχθηκαν με τα επίπεδα θορύβου που αναφέρονται στον Πίνακα 4.1. Το σήμα του σχήματος 4.1 προσομοιώνει το σήμα καλής λειτουργίας του ένσφαιρου τριβέα, καθώς υπάρχει μόνο θόρυβος του περιβάλλοντος. Όσο προχωρούμε σε σήματα με μικρότερο συντελεστή θορύβου, τόσο πιο εμφανείς είναι οι κρουστικοί παλμοί. Τα σήματα των σχημάτων 4.2-4.4 προσομοιώνουν ενδιάμεσες καταστάσεις και το σήμα του σχήματος 4.5 αναφέρεται σε προχωρημένη φθορά.



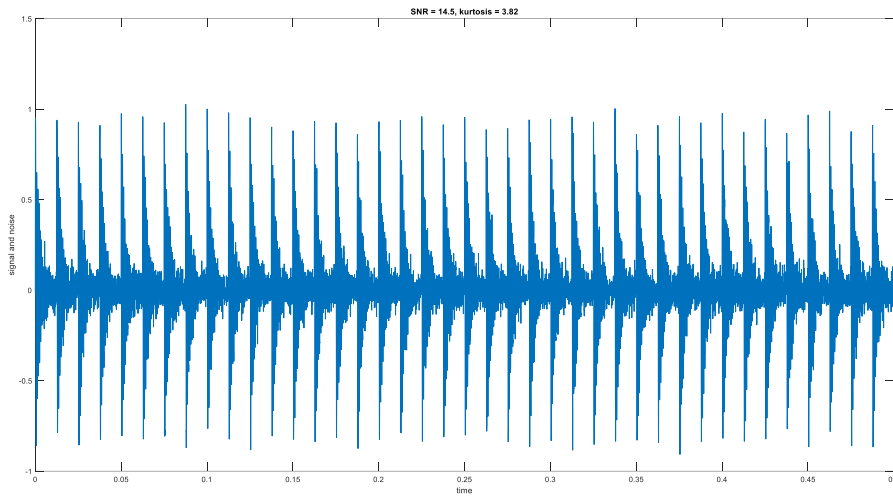
Σχήμα 4.1 Σήμα με επίπεδο θορύβου 0,5



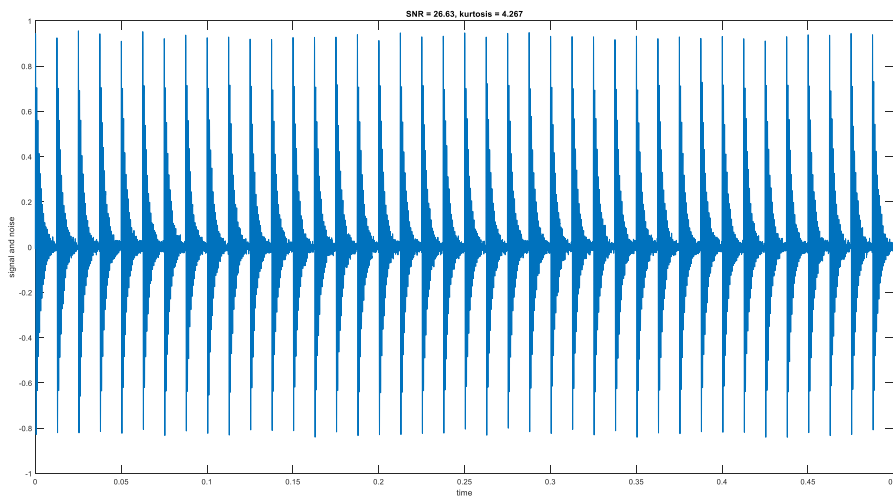
Σχήμα 4.2 Σήμα με επίπεδο θορύβου 0,25



Σχήμα 4.3 Σήμα με επίπεδο θορύβου 0,1



Σχήμα 4.4 Σήμα με επίπεδο θορύβου 0,05



Σχήμα 4.5 Σήμα με επίπεδο θορύβου 0,01

Για τα παραπάνω σήματα, υπολογίζονται τα εννέα διαφορετικά είδη εντροπίας, τα οποία αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 2:

- Multiscale Permutation Entropy (MPE)
- Amplitude-aware Permutation Entropy
- Constrained Permutation Entropy
- Sample Entropy
- Approximate Entropy
- Dispersion Entropy
- Fluctuation-based dispersion Entropy
- Refined composite multiscale dispersion Entropy
- Fuzzy Entropy

Επίσης στα σήματα εφαρμόζονται οι παρακάτω μέθοδοι προ-επεξεργασίας:

- Αποσύνθεση κυματιδίων (wavelet decomposition)
- Μετασχηματισμός Hilbert
- Μορφολογική Ανάλυση
- Spectral kurtosis
- PAA/SAX

Στο παράρτημα της παρούσας εργασίας υπάρχουν οι συναρτήσεις με τις οποίες υπολογίστηκαν οι τιμές των εντροπιών.

Το πρώτο είδος εντροπίας που εξετάστηκε είναι το Multiscale Permutation Entropy (MPE). Η τάξη της εντροπίας (m) είναι 3, η χρονική καθυστέρηση $t=1$, το σήμα z και ο συντελεστής κλίμακα $scale=3$.

Το δεύτερο είδος εντροπίας που εξετάστηκε είναι το Amplitude-aware Permutation Entropy. Η συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της έχει σαν ορίσματα το σήμα (z), την τάξη της εντροπίας (m), την χρονική καθυστέρηση (t) και τον συντελεστή προσαρμογής A . Οι τιμές των παραμέτρων στην παρούσα εφαρμογή είναι $m=3$, $t=1$, $A=0.5$.

Για την εντροπία Constrained PE αρκεί να ορίσουμε το σήμα z , την τάξη της εντροπίας $m=3$ και την χρονική καθυστέρηση $t=1$.

Για την εντροπία Sample E ορίζουμε το σήμα, την τάξη την εντροπίας $m=3$, την χρονική καθυστέρηση $t=1$ και το είδος της απόστασης που θα υπολογισθεί. Χρησιμοποιήθηκε η απόσταση Chebyshev.

Για την προσεγγιστική εντροπία (Approximate Entropy), οι παράμετροι είναι το σήμα z , το r , που υπολογίζεται ως 0,2 φορές επί την τυπική απόκλιση του σήματος, και η τάξη της εντροπίας $m=3$.

Για την εντροπία διασποράς (Dispersion Entropy) ορίζονται οι παράμετροι του σήματος z , της τάξης εντροπίας $m=3$, ο αριθμός των κλάσεων $nc=6$ και η προσέγγιση χαρτογράφησης MA, η οποία επιλέχθηκε να είναι της μορφής σιγμοειδούς καμπύλης (logarithm sigmoid). Ομοίως για την Fluctuation-based dispersion Entropy ορίζουμε τις ίδιες παραμέτρους, όπως και στην εντροπία διασποράς και την χρονική καθυστέρηση $t=1$. Επίσης στην Refined composite multiscale dispersion Entropy ορίζουμε τις ίδιες μεταβλητές όπως παραπάνω, καθώς και την κλίμακα $scale=3$.

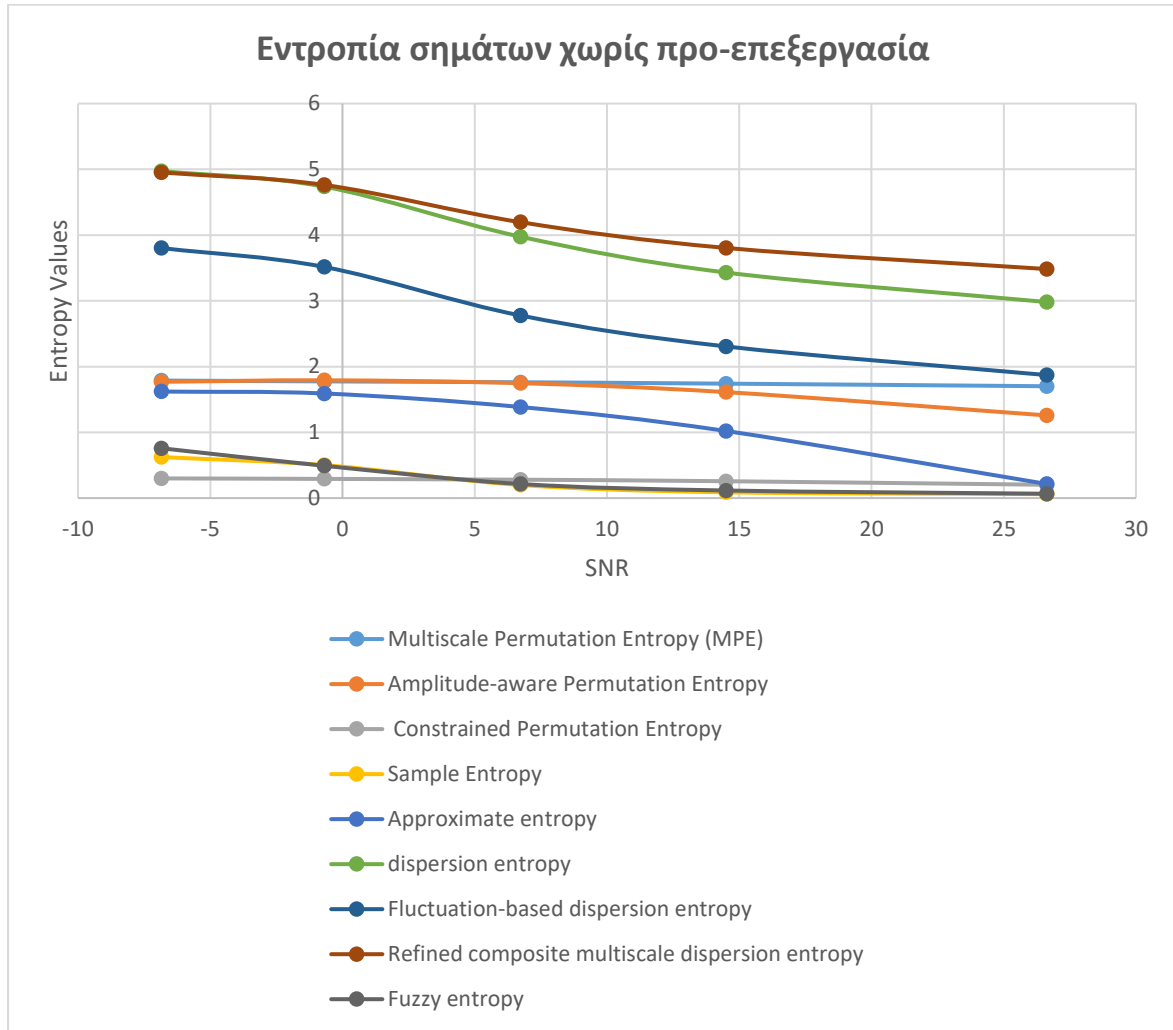
Τέλος, για την Fuzzy Entropy ορίζουμε το σήμα, την τάξη της εντροπίας $m=3$, το r , που υπολογίζεται ως 0,2 φορές επί την τυπική απόκλιση του σήματος, την χρονική καθυστέρηση $t=1$ και την δύναμη $fn=2$.

Αρχικά, υπολογίστηκαν οι τιμές της εντροπίας χωρίς προ-επεξεργασία σήματος. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα:

Noise Coefficient t	Multiscale Permutation Entropy (MPE)	Amplitude-aware Permutation Entropy	Constrained Permutation Entropy	Sample Entropy	Approximate entropy	dispersion entropy	Fluctuation-based dispersion entropy	Refined composite multiscale dispersion entropy	Fuzzy entropy
0.5	1,7877	1,76862	0,2995	0,6236	1,6206	4,9746	3,8032	4,9524	0,7579
0.25	1,7753	1,7915	0,2924	0,5025	1,5913	4,7368	3,5156	4,7635	0,4918
0.1	1,7617	1,7474	0,2799	0,1992	1,3854	3,9759	2,7778	4,1966	0,2148
0.05	1,7408	1,612	0,2568	0,0881	1,021	3,4308	2,3068	3,8051	0,1159
0.01	1,7014	1,2576	0,203	0,0606	0,2146	2,9821	1,8714	3,4838	0,0662

Πίνακας 4.2 Τιμές εντροπίας για σήματα χωρίς προ-επεξεργασία.

Στο σχήμα επεικονίζονται οι τιμές των εντροπιών του πίνακα 2. Όπως φαίνεται, η τιμή της εντροπίας για κάθε είδος, μειώνεται καθώς αυξάνεται η βλάβη ή μένει στάσιμη. Επομένως, για τα σήματα χωρίς επεξεργασία δεν είναι εφικτή η αναγνώριση της βλάβης.

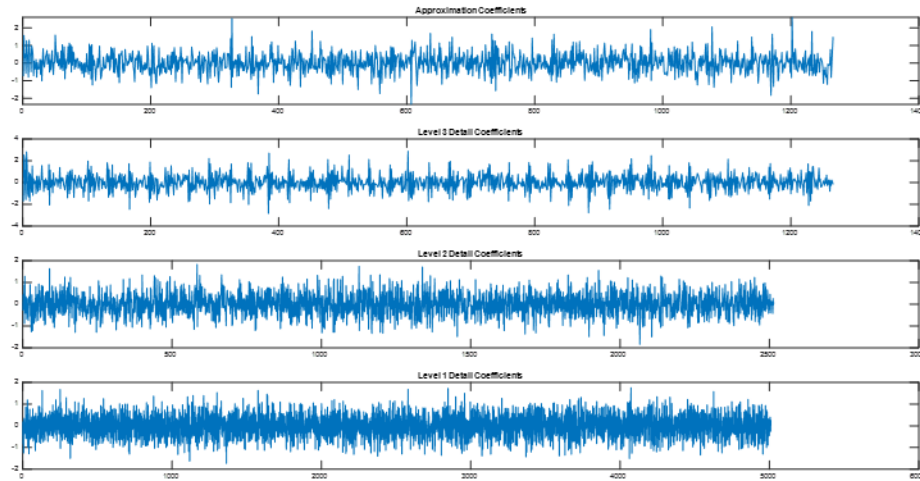


Σχήμα 4.6 Σχηματική απεικόνιση τιμών εντροπίας για σήματα χωρίς προ-επεξεργασία.

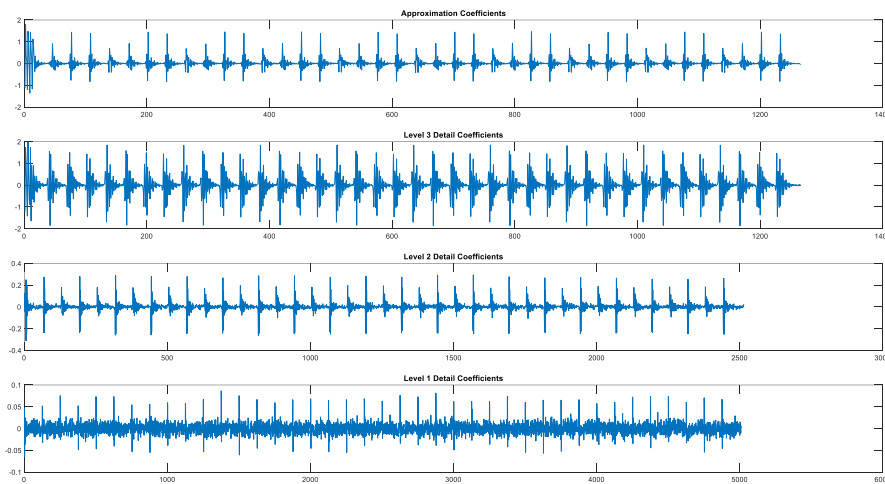
Στην συνέχεια εφαρμόζονται οι μέθοδοι επεξεργασίας των σημάτων που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας.

Χρησιμοποιώντας την ανάλυση κυματιδίων (Wavelet decomposition), το σήμα αναπαριστάται, και αυτή η αναπαράσταση χρησιμοποιείται σαν είσοδος για τον υπολογισμό των εντροπιών. Επιλέχθηκε συχνότητα δειγματοληψίας $f_s=20000$ Hz, $n=3$ και μητρικό κυματίδιο το $wname=db10$.

Στα σχήματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται τα σήματα με συντελεστή θορύβου 0,5 και 0,01 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται ο συντελεστής προσέγγισης περιγράφει το σήμα πολύ καλύτερα όταν το επίπεδο θορύβου είναι μικρό.



Σχήμα 4.7 σήμα με συντελεστή θορύβου 0,5

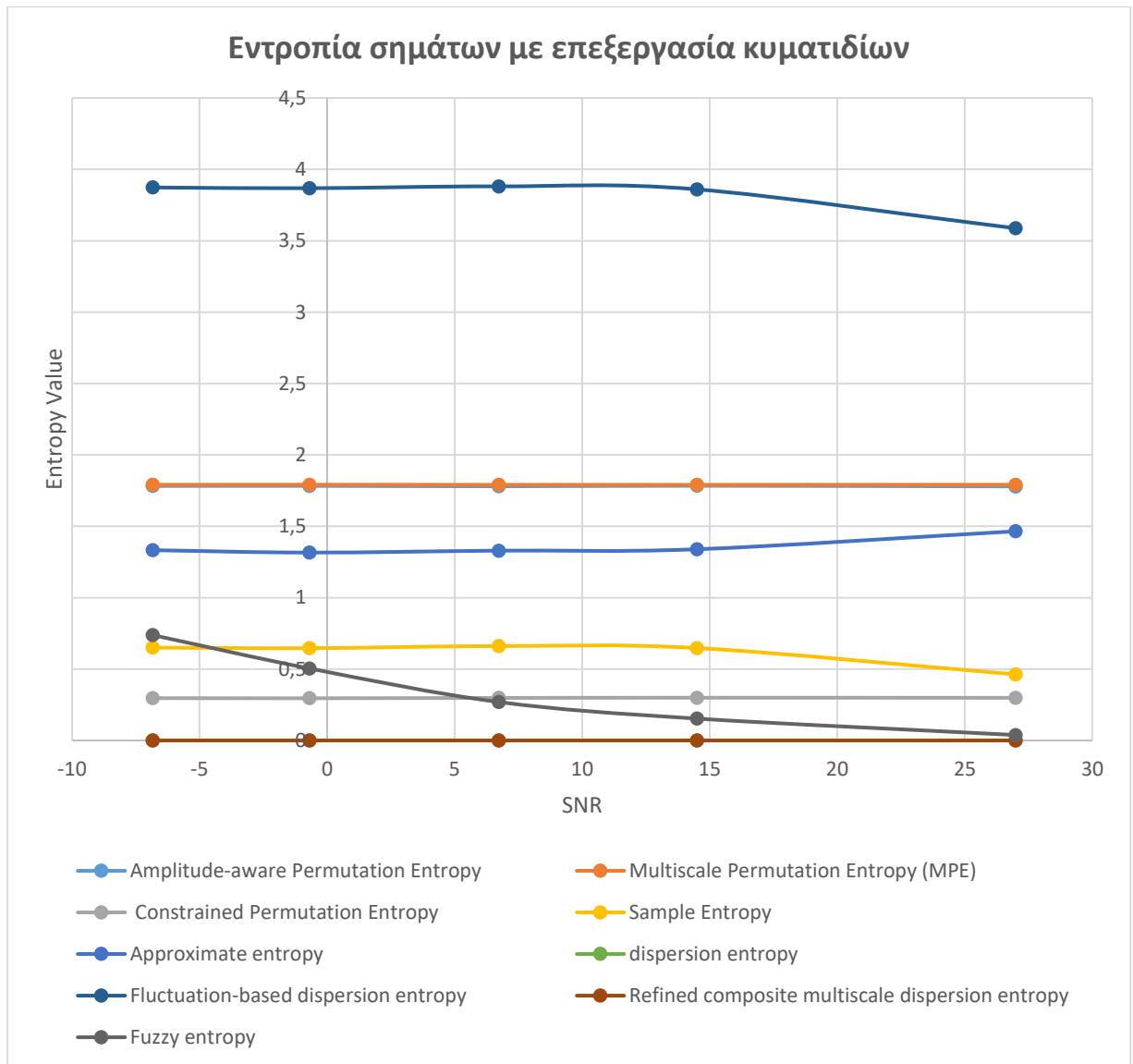


Σχήμα 4.8 σήμα με συντελεστή θορύβου 0,01

Στον πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και απεικονίζονται στο σχήμα 4.9. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.9, η μοναδική μέθοδος εντροπίας που παρουσιάζει αύξηση στην τιμή της καθώς η βλάβη αναπτύσσεται είναι η Approximate Entropy. Για τις υπόλοιπες μεθόδους η τιμές είτε μένουν στάσιμες, είτε σημειώνουν πτώση.

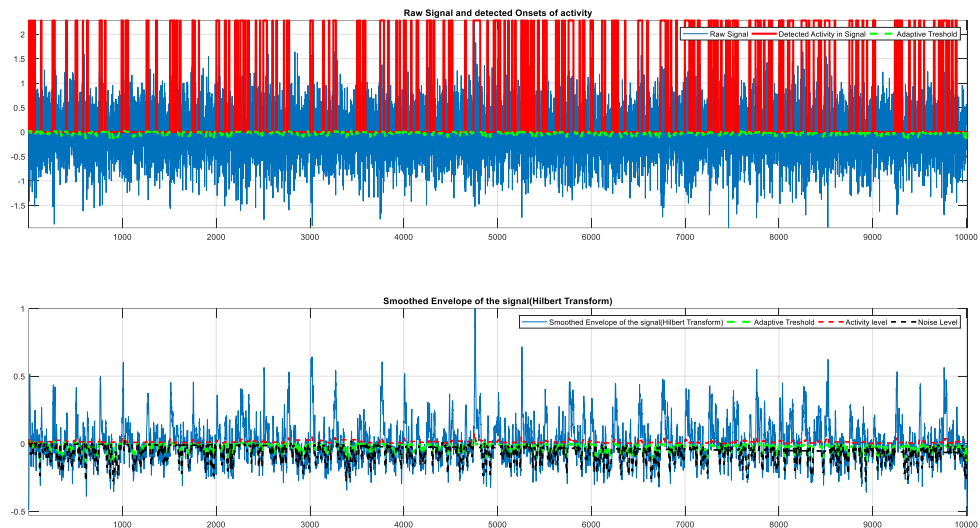
Noise Coefficient	Multiscale Permutation Entropy (MPE)	Amplitude-aware Permutation Entropy	Constrained Permutation Entropy	Sample Entropy	Approximate entropy	dispersion entropy	Fluctuation-based dispersion entropy	Refined composite multiscale dispersion entropy	Fuzzy entropy
0,5	1,791	1,7827	0,2965	0,6506	1,333	0	3,8733	0,00000005	0,7383
0,25	1,7915	1,7834	0,2958	0,6466	1,3162	0	3,8682	0,00000005	0,5045
0,1	1,7909	1,7804	0,2982	0,6611	1,3298	0	3,8812	0,00000005	0,2696
0,05	1,7907	1,7841	0,2996	0,6474	1,3395	0	3,8602	0,00000005	0,1534
0,01	1,7913	1,7794	0,2989	0,4633	1,4654	0	3,5874	0,00000004	0,0384

Πίνακας 4.3 Τιμές εντροπίας για σήματα με επεξεργασία κυματιδίων.

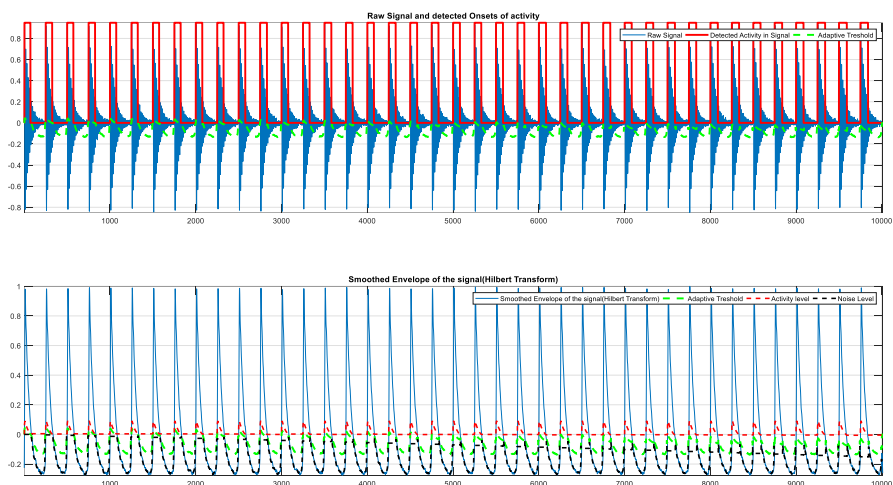


Σχήμα 4.9 Σχηματική απεικόνιση τιμών εντροπίας για σήματα με επεξεργασία κυματιδίων.

Η επόμενη μέθοδος επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο μετασχηματισμός Hilbert. Στα σχήματα 4.10 και 4.11 με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η περιγραφή του μετασχηματισμού σχετικά με το αρχικό σήμα. Το σχήμα 4.10 αφορά σήμα με συντελεστή θορύβου 0,5, δηλαδή θόρυβο. Αντίθετα, το σχήμα 4.11 αφορά σήμα με συντελεστή θορύβου 0,01, όπου κυριαρχούν οι κρουστικοί παλμοί. Επομένως, όπως φαίνεται από τα σχήματα, όσο λιγότερος θόρυβος υπάρχει στο αρχικό σήμα, τόσο καλύτερα ακολουθεί ο αλγόριθμος το αρχικό σήμα.



Σχήμα 4.10 Σήμα με συντελεστή θορύβου 0,5

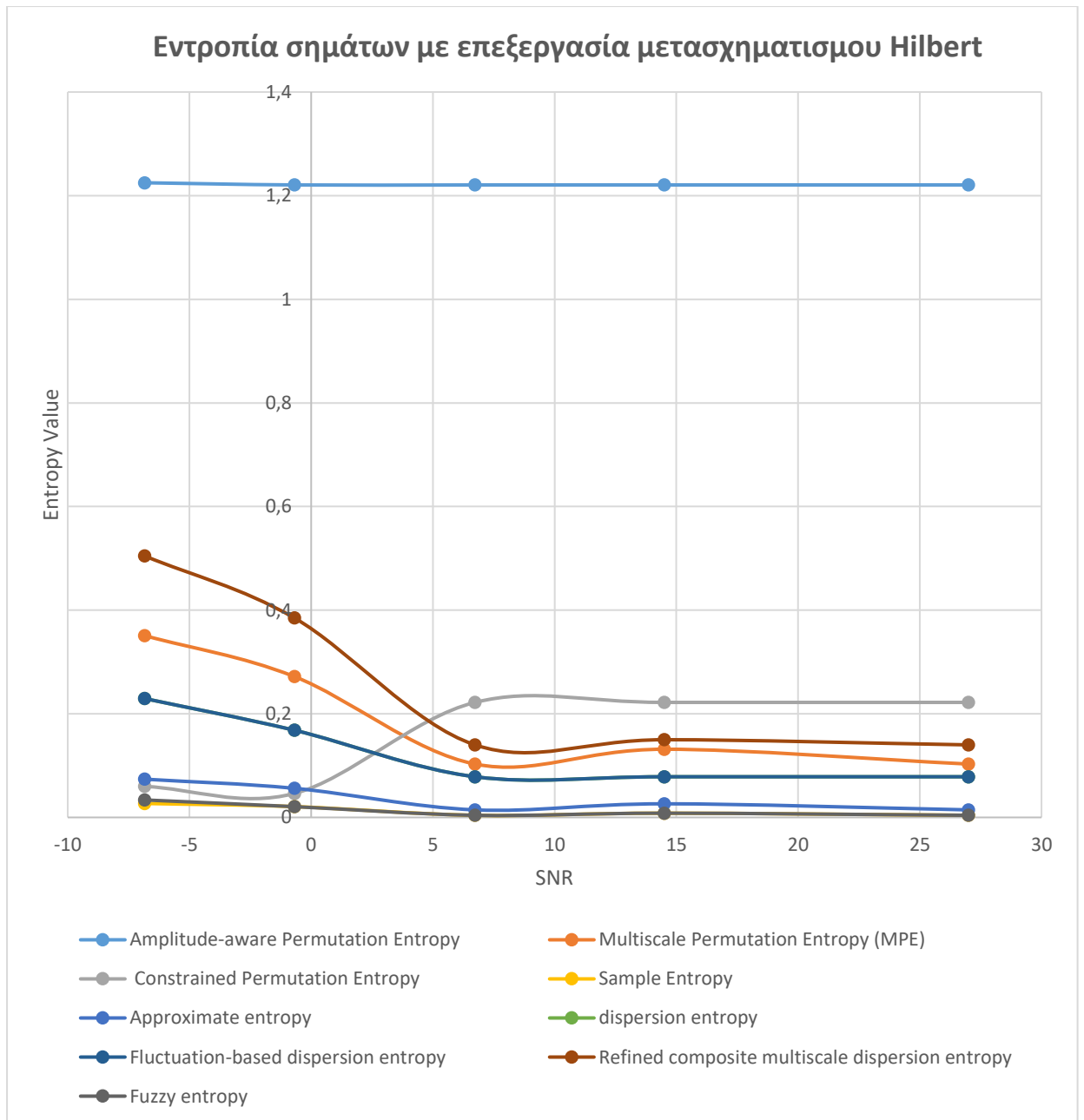


Σχήμα 4.11 Σήμα με συντελεστή θορύβου 0,01

Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι τιμές τις εντροπίας και αποτυπώνονται στο σχήμα 4.12. Η περισσότερες μέθοδοι εντροπίας σημειώνουν πτώση εκτός από την μέθοδο Constrained Permutation Entropy, η οποία σημειώνει μια αύξηση την στιγμή που ανιχνεύει την φθορά και στην δεν σημειώνει αξιόλογη μεταβολή.

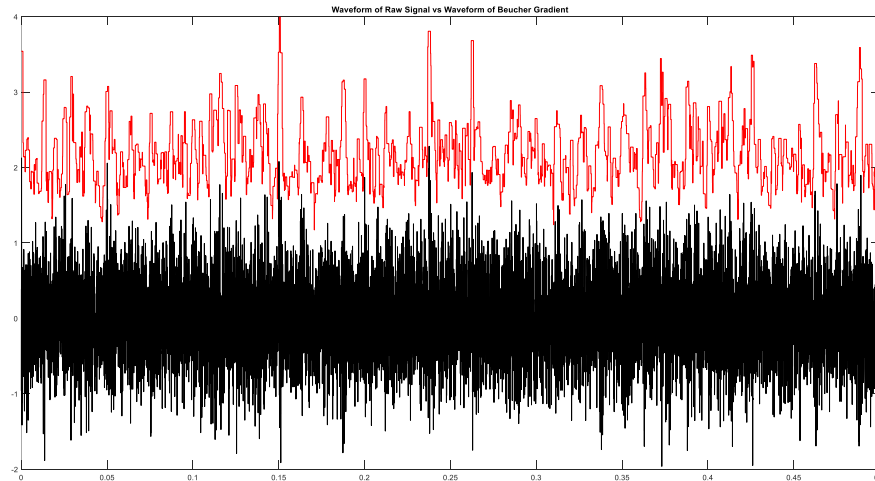
Noise Coefficient	Multiscale Permutation Entropy (MPE)	Amplitude-aware Permutation Entropy	Constrained Permutation Entropy	Sample Entropy	Approximate entropy	dispersion entropy	Fluctuation-based dispersion entropy	Refined composite multiscale dispersion entropy	Fuzzy entropy
0,5	0,3509	1,2249	0,0599	0,0269	0,0738	0,2294	0,2294	0,5047	0,0337
0,25	0,2719	1,2207	0,0462	0,0209	0,0562	0,1683	0,1683	0,385	0,0208
0,1	0,103	1,2207	0,222	0,0041	0,0146	0,0785	0,0785	0,14	0,0041
0,05	0,1316	1,2207	0,222	0,0082	0,0263	0,0785	0,0785	0,15	0,0082
0,01	0,103	1,2207	0,222	0,0041	0,0146	0,0785	0,0785	0,14	0,0041

Πίνακας 4.4 Τιμές εντροπίας για σήματα με επεξεργασία μετασχηματισμού Hilbert.

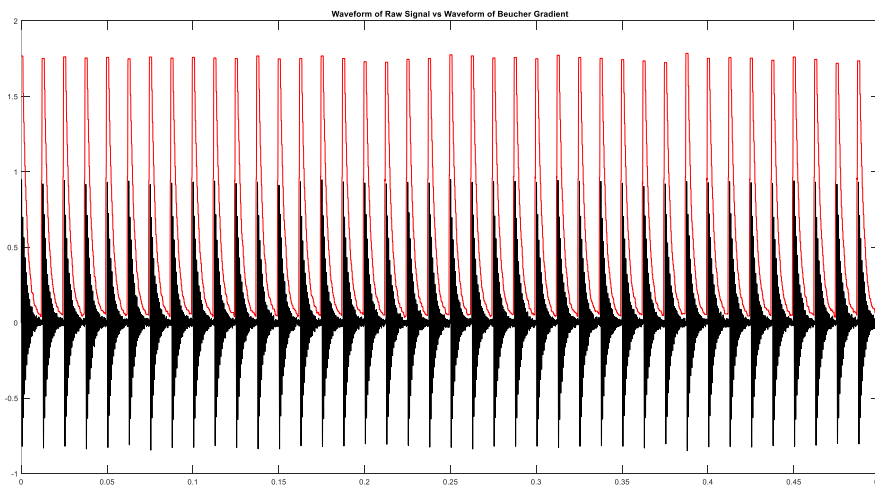


Σχήμα 4.12 Σχηματική απεικόνιση τιμών εντροπίας για σήματα με επεξεργασία μετασχηματισμού Hilbert.

Η τρίτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η Μορφολογική Ανάλυση. Στα παρακάτω γραφήματα με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η περιγραφή του μετασχηματισμού σχετικά με το αρχικό σήμα. Το σχήμα 4.13 αφορά σήμα με συντελεστή θορύβου 0,5, δηλαδή θόρυβο. Αντίθετα, το σχήμα 4.14 αφορά σήμα με συντελεστή θορύβου 0,01, όπου κυριαρχούν οι κρουστικοί παλμοί. Επομένως, όπως φαίνεται από τα σχήματα, όσο λιγότερος θόρυβος υπάρχει στο αρχικό σήμα, τόσο καλύτερα ακολουθεί ο αλγόριθμος το αρχικό σήμα.



Σχήμα 4.13 Σήμα με συντελεστή θορύβου 0,5

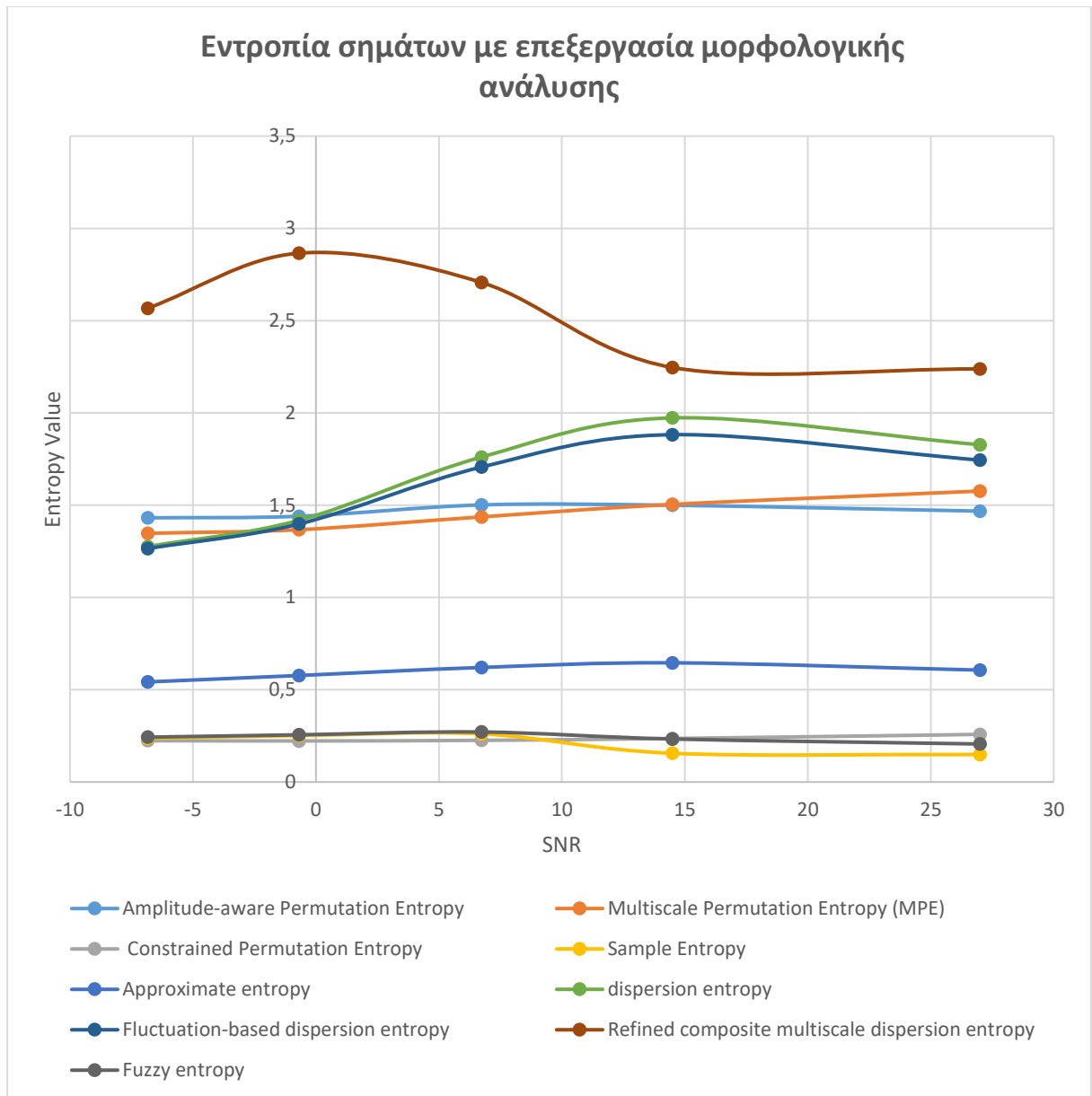


Σχήμα 4.14 Σήμα με συντελεστή θορύβου 0,01

Στον πίνακα 4.5 παρουσιάζονται οι τιμές τις εντροπίας και αποτυπώνονται στο σχήμα 4.15. Για την επεξεργασία σήματος με μορφολογική ανάλυση, οι μέθοδοι dispersion entropy, fluctuation-based dispersion entropy παρουσιάζουν αύξηση κατά την χειροτέρευση της βλάβης. Η μέθοδος multiscale permutation entropy παρουσιάζει αύξηση μόνο όταν η βλάβη προχωρήσει αρκετά. Επομένως, δεν ενδείκνυται για γρήγορη αναγνώριση της φθοράς.

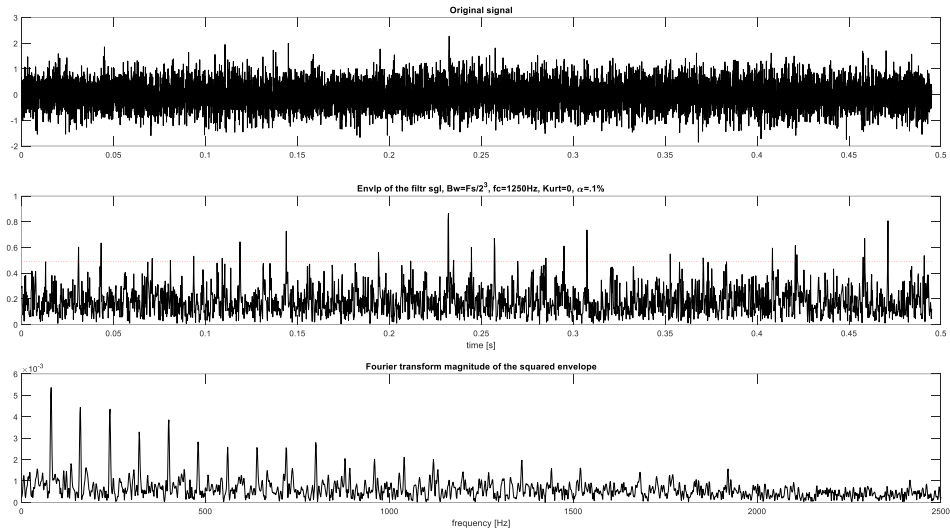
Noise Coefficient	Multiscale Permutation Entropy (MPE)	Amplitude-aware Permutation Entropy	Constrained Permutation Entropy	Sample Entropy	Approximate entropy	dispersion entropy	Fluctuation-based dispersion entropy	Refined composite multiscale dispersion entropy	Fuzzy entropy
0,5	1,3475	1,4314	0,224	0,2372	0,5423	1,2756	1,2649	2,5672	0,2431
0,25	1,3672	1,44	0,2224	0,2513	0,5772	1,4179	1,398	2,8655	0,2557
0,1	1,4365	1,5014	0,2258	0,2611	0,6206	1,7606	1,7065	2,707	0,2711
0,05	1,5043	1,4996	0,2358	0,1556	0,6458	1,9731	1,882	2,2461	0,233
0,01	1,5765	1,4678	0,258	0,149	0,6064	1,8275	1,7443	2,2381	0,2059

Πίνακας 4.5 Τιμές εντροπίας για σήματα με επεξεργασία με μορφολογική ανάλυση.

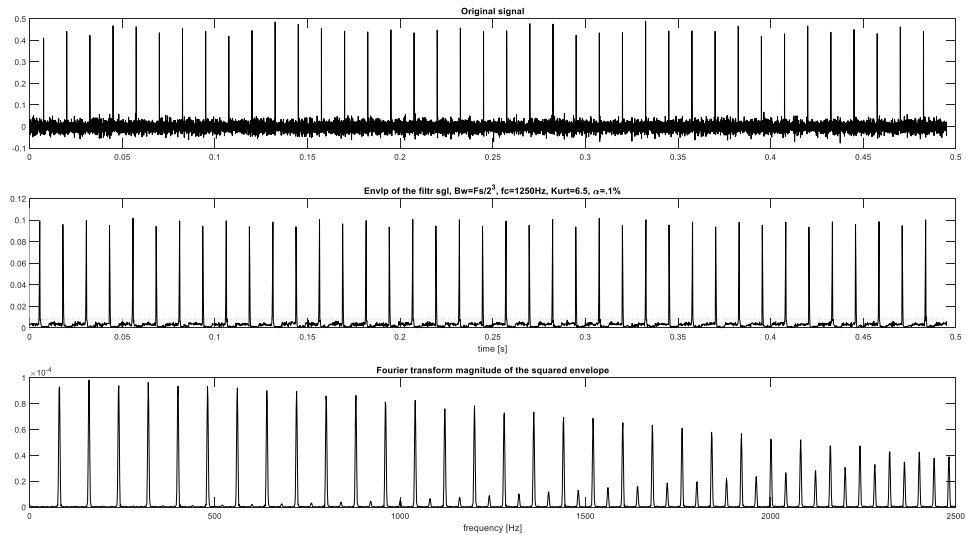


Σχήμα 4.15 Σχηματική απεικόνιση τιμών εντροπίας για σήματα με επεξεργασία με μορφολογική ανάλυση.

Η τέταρτη μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι η Spectral kurtosis. Στα σχήματα 4.16 και 4.17 φαίνεται η διαφορά στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου στην εξαγωγή του χρήσιμου σήματος για το επίπεδο θορύβου 0,5 και 0,01.



Σχήμα 4.16 Σήμα με συντελεστή θορύβου 0,5

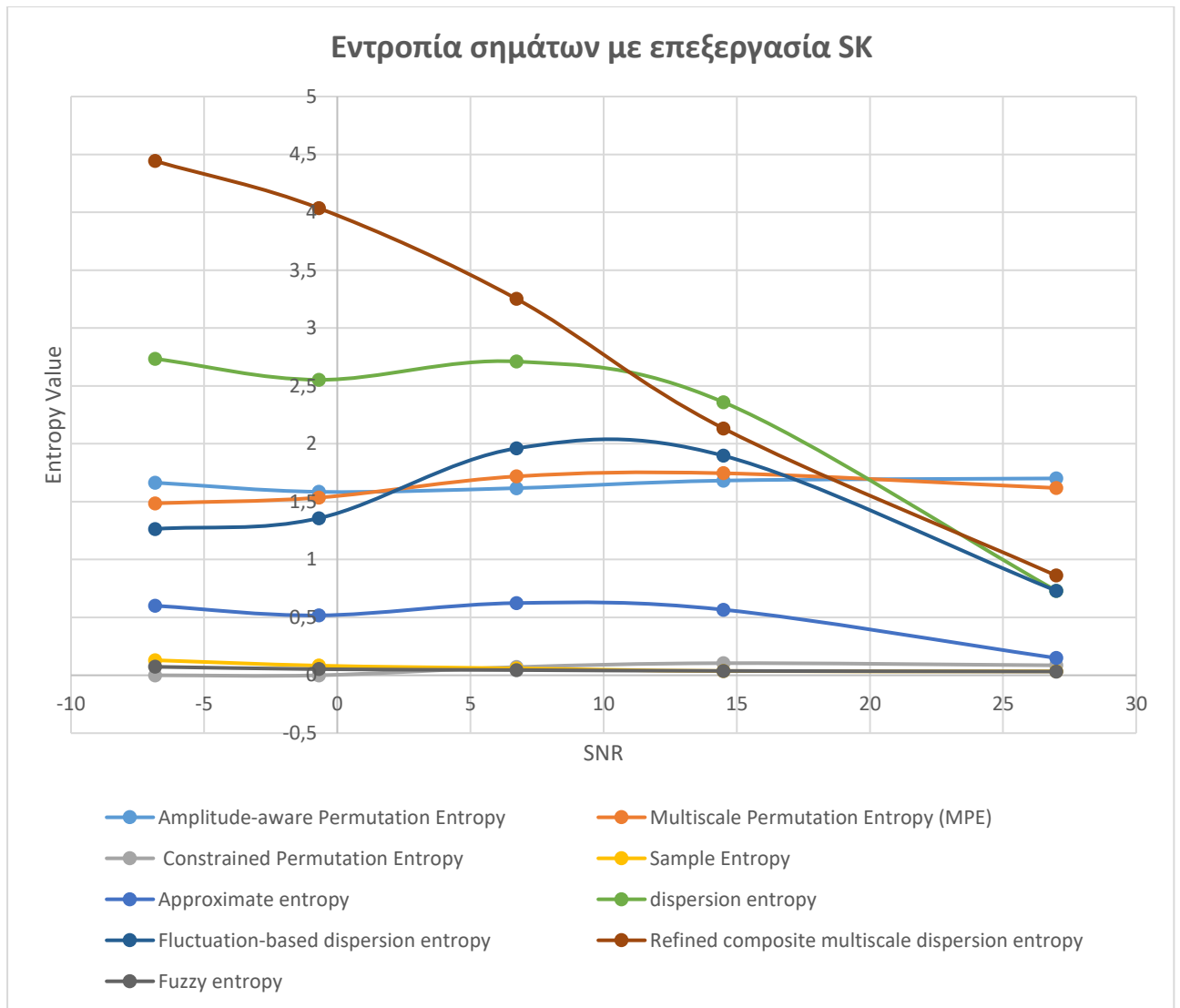


Σχήμα 4.17 Σήμα με συντελεστή θορύβου 0,01

Στον πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι τιμές της εντροπίας και αποτυπώνονται στο σχήμα 4.18. Όσον αφορά την συγκεκριμένη μέθοδο αποθορυβοποίησης οι περισσότερες τιμές των εντροπιών παρουσιάζουν μια μεγάλη μείωση καθώς η φορά αναπτύσσεται. Η μοναδική μέθοδος που παρουσιάζει μικρή αύξηση είναι η ΑΑΡΕ.

Noise Coefficient	Multiscale Permutation Entropy (MPE)	Amplitude-aware Permutation Entropy	Constrained Permutation Entropy	Sample Entropy	Approximate entropy	dispersion entropy	Fluctuation-based dispersion entropy	Refined composite multiscale dispersion entropy	Fuzzy entropy
0,5	1,4858	1,664	0	0,1302	0,6007	2,7339	1,2641	4,443	0,0734
0,25	1,5353	1,5849	0	0,0832	0,5173	2,5528	1,3573	4,0352	0,053
0,1	1,7182	1,6168	0,0708	0,0595	0,624	2,7106	1,9603	3,252	0,0452
0,05	1,7454	1,6822	0,1045	0,0371	0,5667	2,3594	1,8968	2,1331	0,0377
0,01	1,6179	1,7008	0,0862	0,0342	0,1489	0,7299	0,7299	0,8615	0,0325

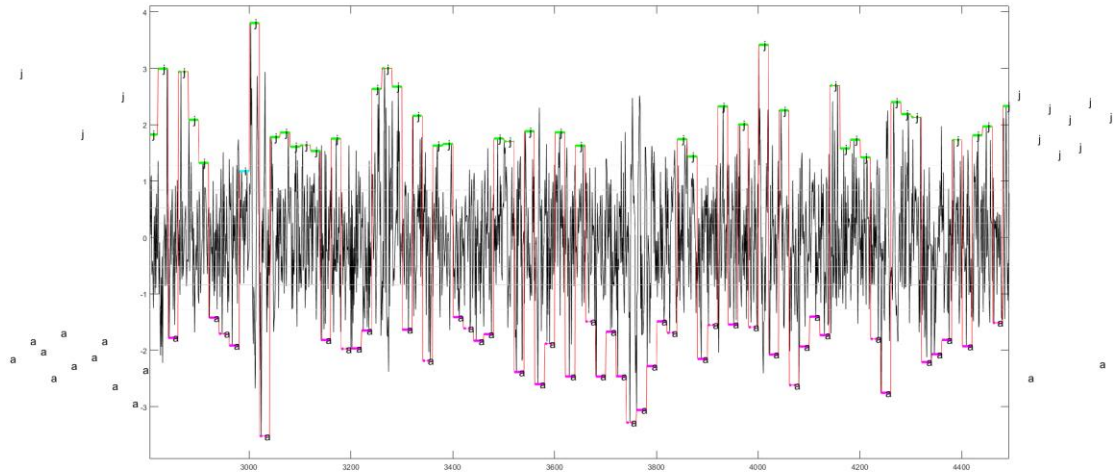
Πίνακας 4.6 Τιμές εντροπίας για σήματα με επεξεργασία με SK.



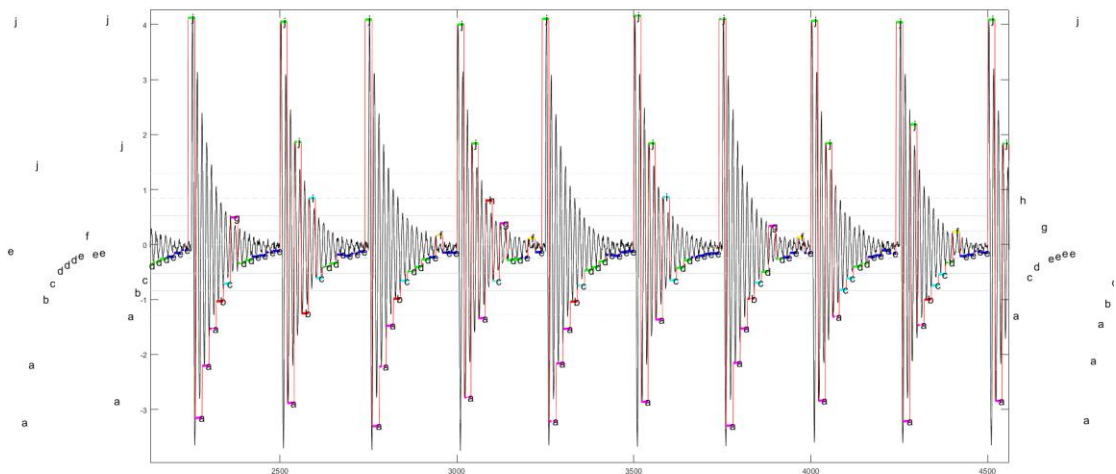
Σχήμα 4.18 Σχηματική απεικόνιση τιμών εντροπίας για σήματα με επεξεργασία με SK.

Τέλος χρησιμοποιήθηκε η τεχνική SAX.

Στα σχήματα και μπορούμε να συγκρίνουμε την αποτελεσματικότητα του αλγόριθμου όταν στο σήμα επικρατεί θόρυβος και κρουστικοί παλμοί αντίστοιχα.



Σχήμα 4.19 Σήμα με συντελεστή θορύβου 0,5

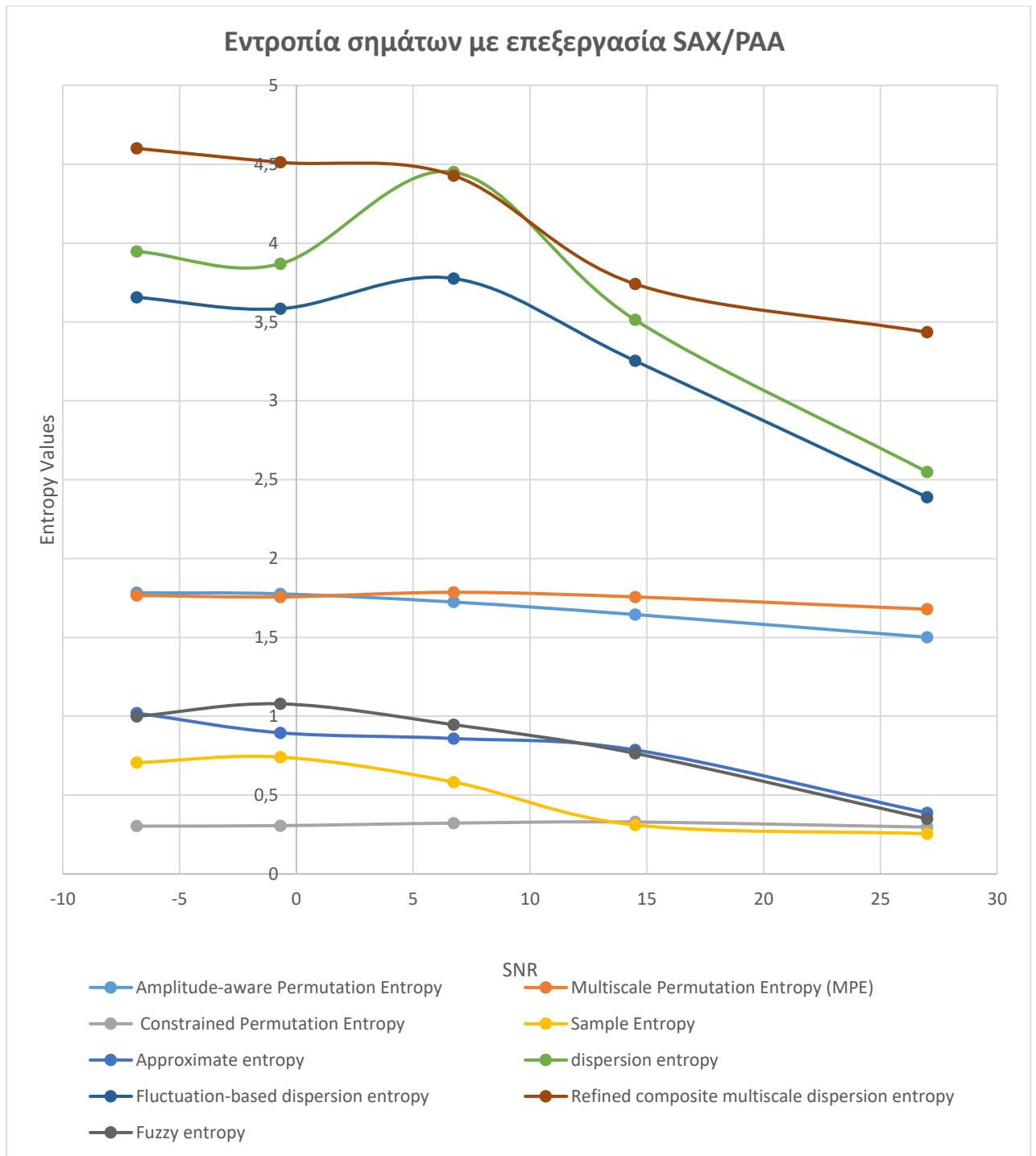


Σχήμα 4.20 Σήμα με συντελεστή θορύβου 0,01

Στον πίνακα 4.7 παρουσιάζονται οι τιμές τις εντροπίας και αποτυπώνονται στο σχήμα 4.21. Στην μέθοδο SAX/PAA οι εντροπίες fluctuation- based dispersion entropy και dispersion entropy, ενώ παρουσιάζουν αύξηση την στιγμή της φθοράς, στην συνέχεια η τιμή τους μειώνεται.

Noise Coefficient	Multiscale Permutation Entropy (MPE)	Amplitude-aware Permutation Entropy	Constrained Permutation Entropy	Sample Entropy	Approximate entropy	dispersion entropy	Fluctuation-based dispersion entropy	Refined composite multiscale dispersion entropy	Fuzzy entropy
0,5	1,766	1,7832	0,3033	0,7058	1,0199	3,9478	3,6562	4,6006	0,999
0,25	1,7565	1,7759	0,3063	0,741	0,895	3,8686	3,584	4,5123	1,0786
0,1	1,7859	1,7243	0,3224	0,5824	0,8588	4,4503	3,7758	4,4285	0,9465
0,05	1,7567	1,6447	0,3293	0,3106	0,7862	3,5134	3,2535	3,7409	0,7648
0,01	1,6785	1,501	0,297	0,2554	0,3876	2,549	2,389	3,4347	0,3497

Πίνακας 4.7 Τιμές εντροπίας για σήματα με επεξεργασία με SAX/PAA.



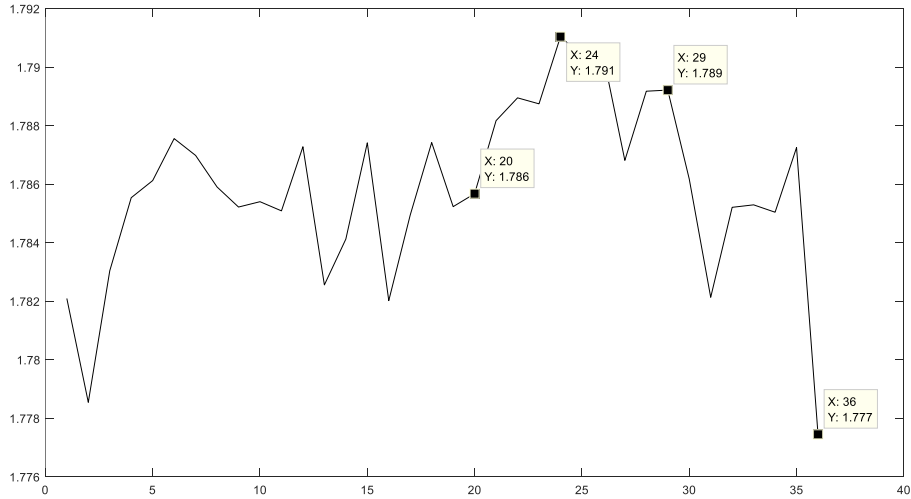
Σχήμα 4.21 Σχηματική απεικόνιση τιμών εντροπίας για σήματα με επεξεργασία με SAX/PAA.

4.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ

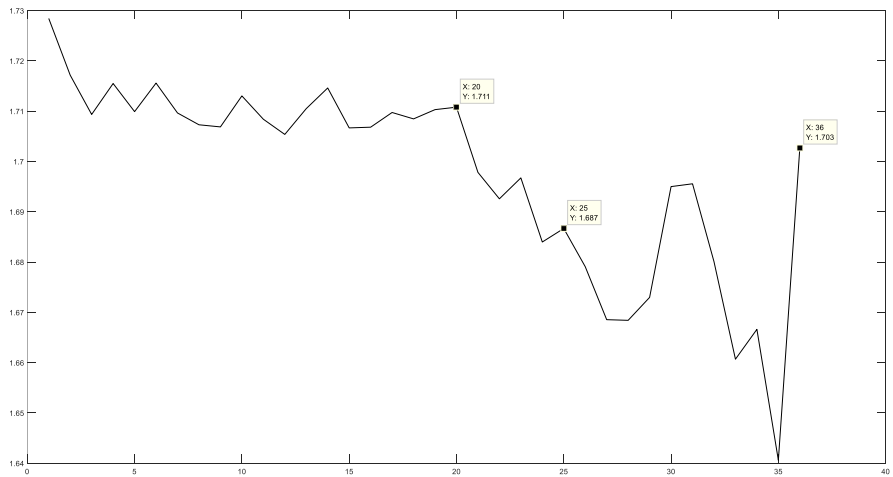
Στην συνέχεια της εργασίας μελετήθηκαν πραγματικά σήματα μηχανής. Τα δεδομένα αποτελούνται από 36 σετ σημάτων το κάθε ένα αντιπροσωπεύει και διαδοχικές καταστάσεις της μηχανής. Η πρώτη κατάσταση βλάβης της μηχανής εμφανίζεται στο 21ο σετ σημάτων. Σκοπός είναι να αναλυθεί ποια μέθοδος είναι η καταλληλότερη για να αναγνωρίσει την βλάβη και να γίνει αντιπαραβολή με τα αντίστοιχα αποτελέσματα των σημάτων που προήλθαν από προσομοίωση.

Για όλα τα παρακάτω σχήματα ο άξονας x αποτυπώνει τον αριθμό της μέτρησης και ο άξονας y αποτυπώνει την τιμή της εντροπίας για κάθε σήμα.

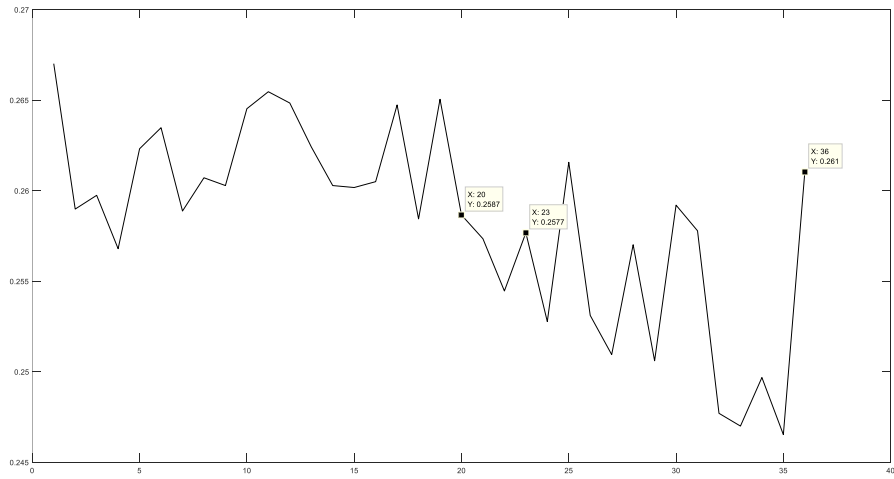
Αρχικά δεν χρησιμοποιήθηκε καμιά μέθοδος προ-επεξεργασίας σήματος. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το πως κυμαίνεται η τιμή της εντροπίας για κάθε είδος.



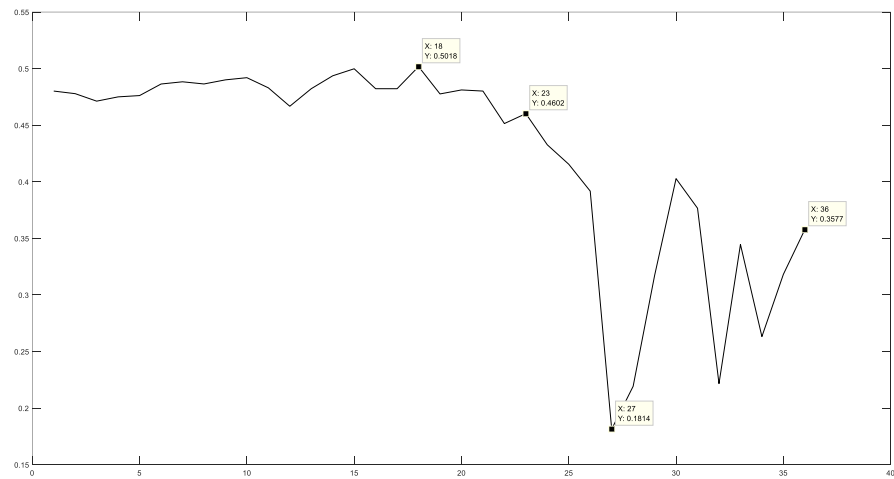
Σχήμα 4.22 Multiscale Permutation Entropy (MPE)



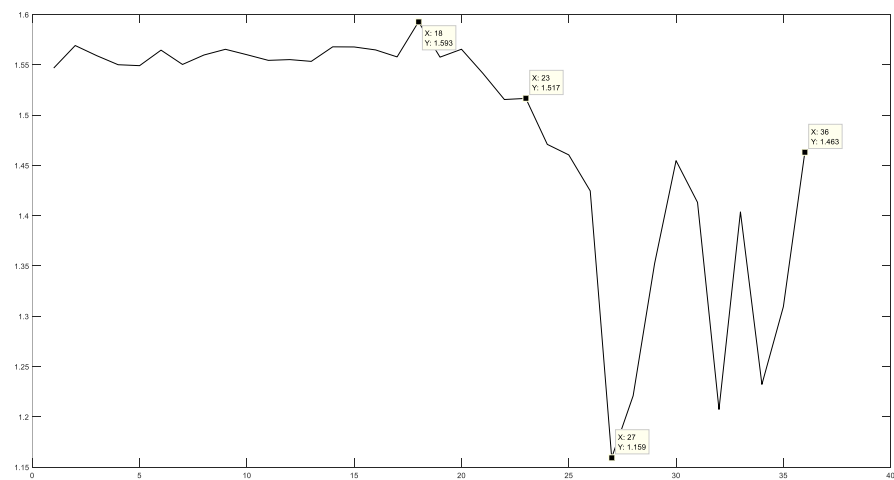
Σχήμα 4.23 Amplitude-aware Permutation Entropy



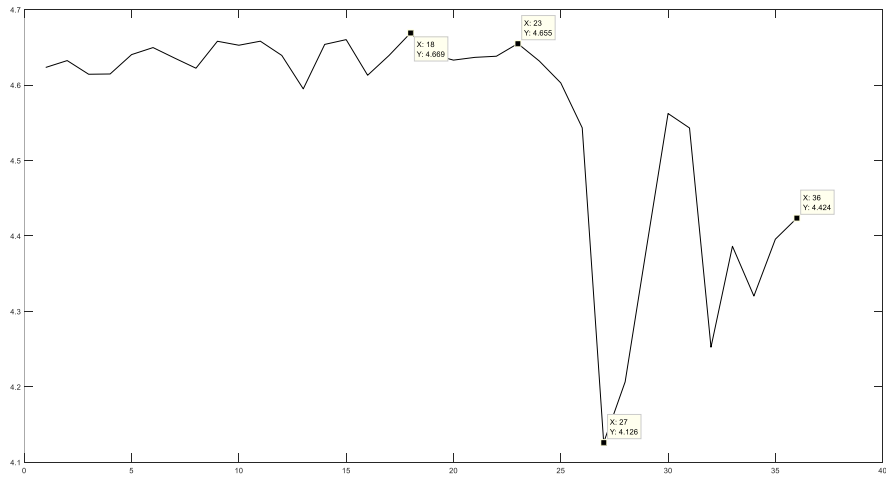
Σχήμα 4.24 Constrained Permutation Entropy



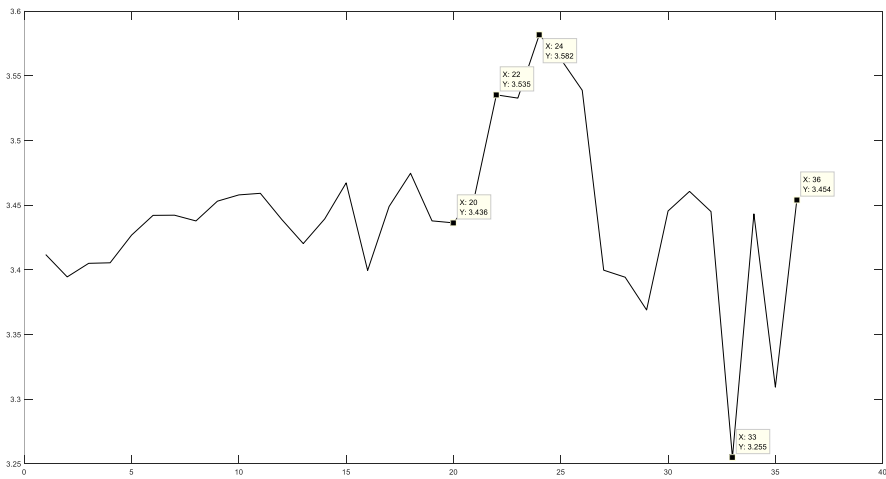
Σχήμα 4.25 Sample Entropy



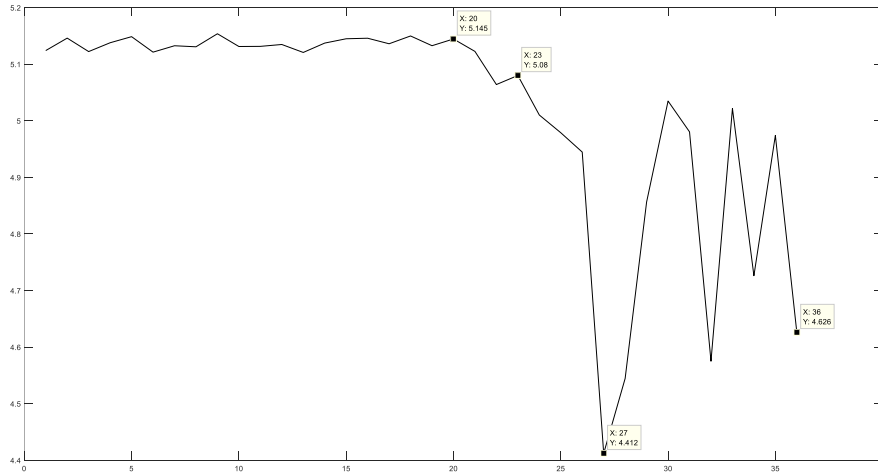
Σχήμα 4.26 Approximate entropy



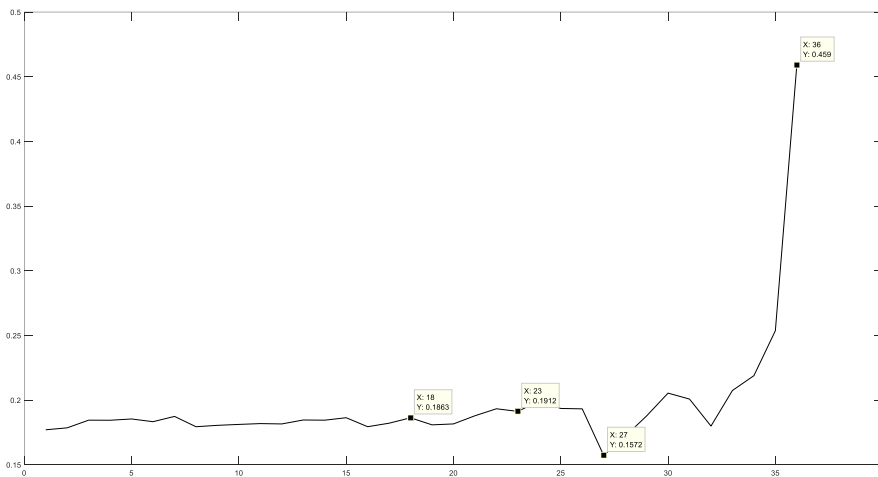
Σχήμα 4.27 Dispersion Entropy



Σχήμα 4.28 Fluctuation-based dispersion entropy



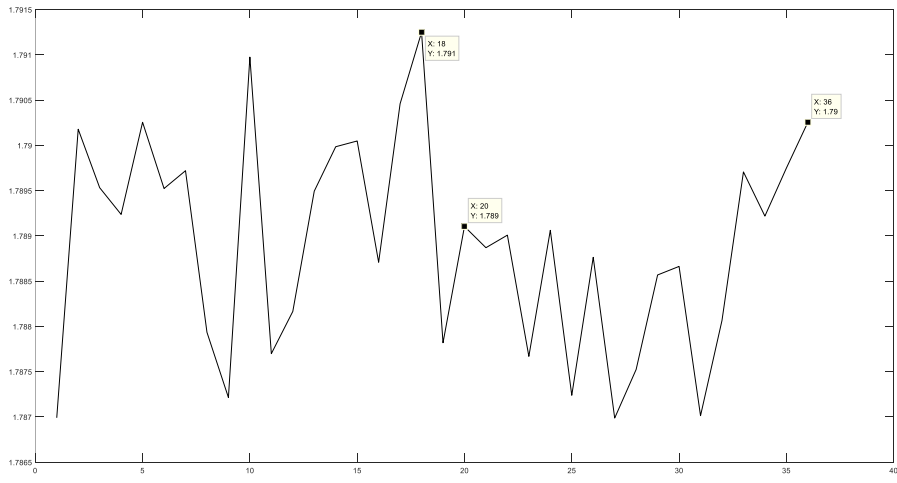
Σχήμα 4.29 Refined composite multiscale dispersion entropy



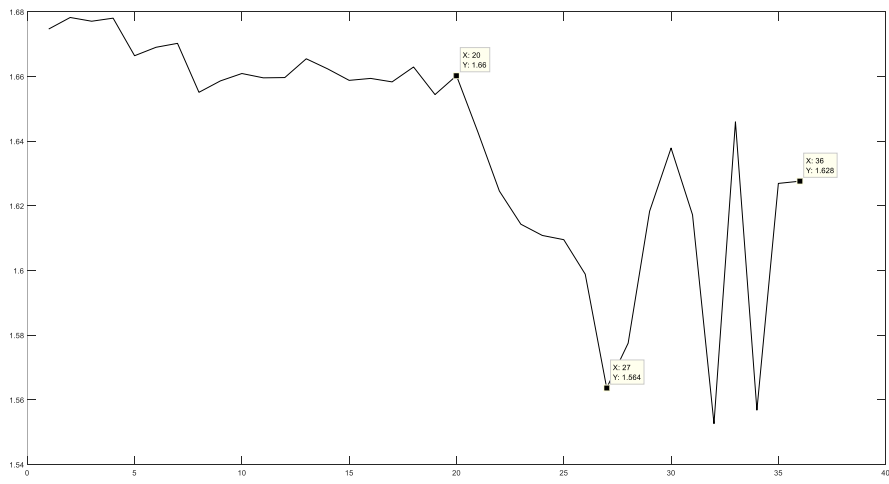
Σχήμα 4.30 Fuzzy entropy

Παρατηρώντας τα σχήματα 4.22-4.30 στις περισσότερες μεθόδους δεν υπάρχει μια αύξηση στην τιμή της εντροπίας και δεν υπάρχει αντιστοιχία με τα σήματα της προσομοίωσης. Η μόνη μέθοδος που παρουσιάζει αύξηση είναι η Fuzzy entropy όταν η βλάβη είναι προχωρημένη. Επίσης στα σήματα προσομοίωσης η συγκεκριμένη τιμή της εντροπίας μειωνόταν. Για τις υπόλοιπες μεθόδους το διάστημα μεταξύ του 20-23^{ου} σήματος όπου η φθορά είναι στα αρχικά επίπεδα υπάρχει μια απότομη μείωση ή αύξηση, στην συνέχεια όμως δεν υπάρχει μια σταθερή κλίση των τιμών.

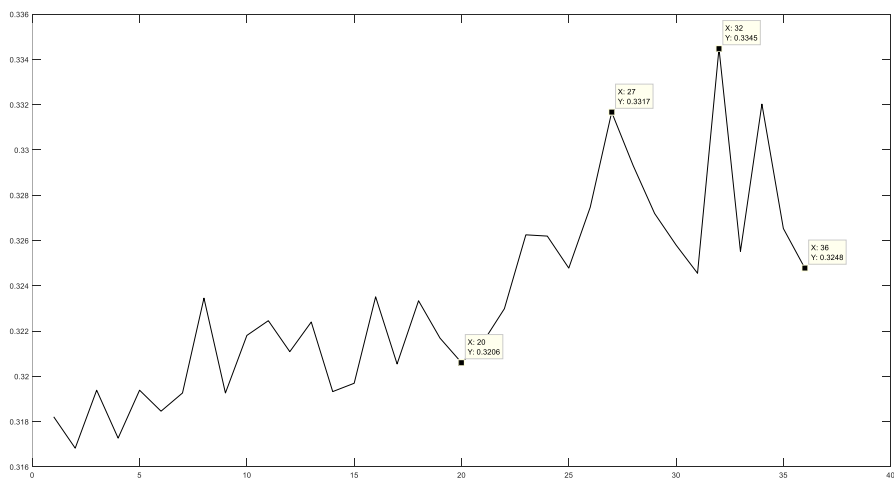
Η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι η ανάλυση κυματιδίων (Wavelet decomposition). Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το πως κυμαίνεται η τιμή της εντροπίας για κάθε είδος.



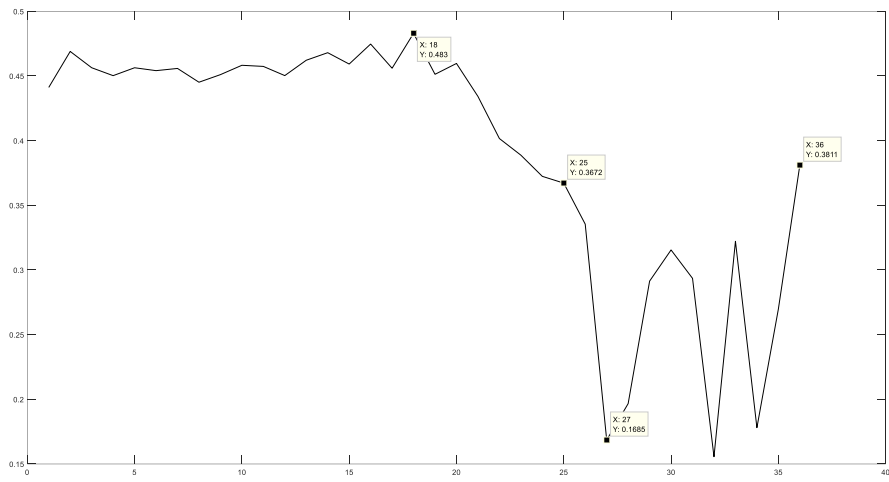
Σχήμα 4.31 Multiscale Permutation Entropy (MPE)



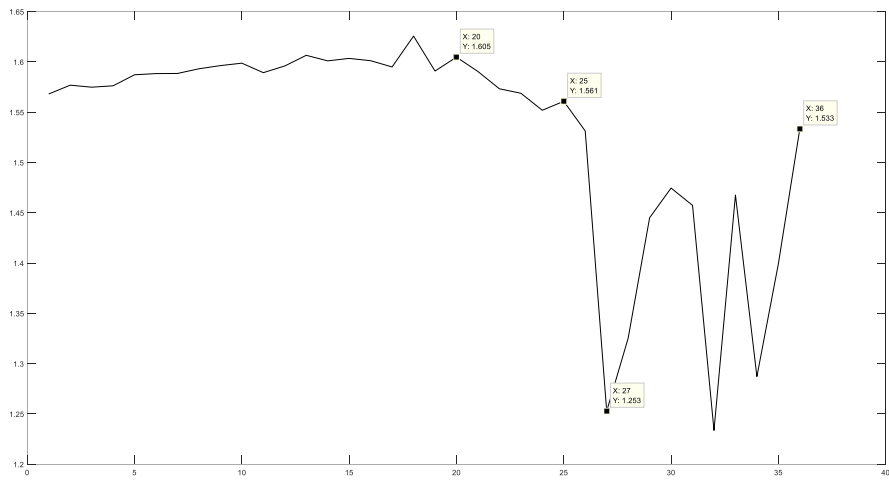
Σχήμα 4.32 Amplitude-aware Permutation Entropy



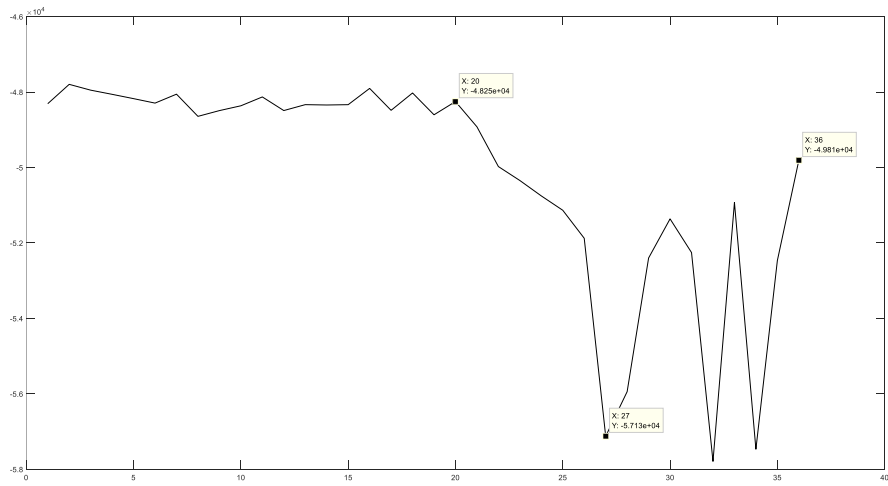
Σχήμα 4.33 Constrained Permutation Entropy



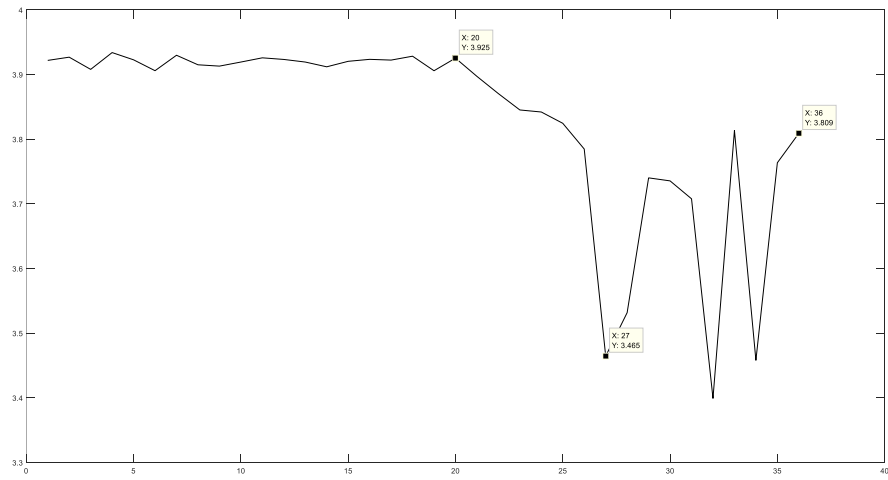
Σχήμα 4.34 Sample Entropy



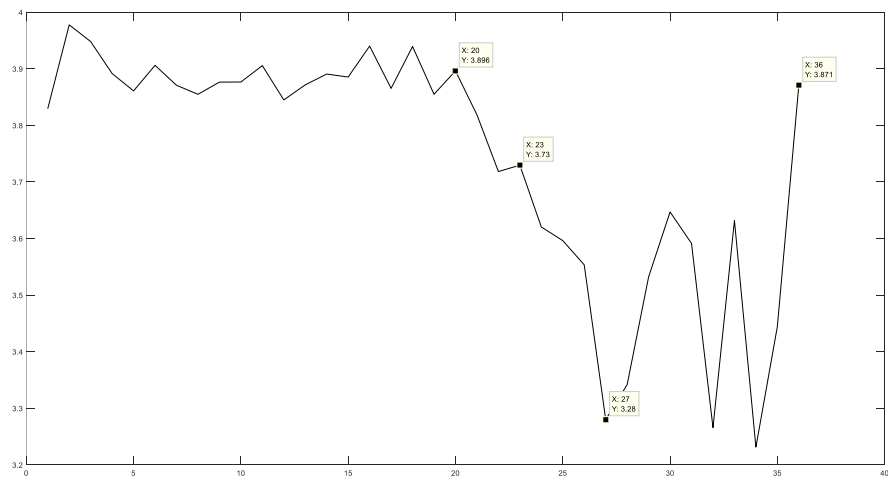
Σχήμα 4.35 Approximate entropy



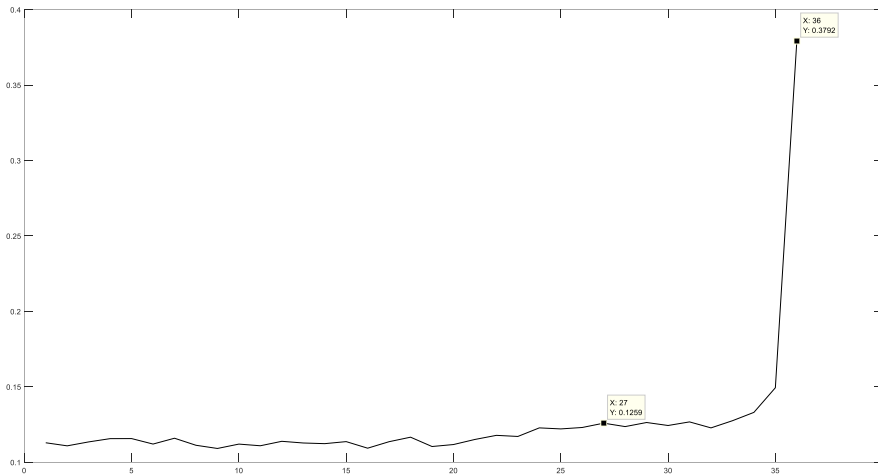
Σχήμα 4.36 Dispersion Entropy



Σχήμα 4.37 Fluctuation-based dispersion entropy



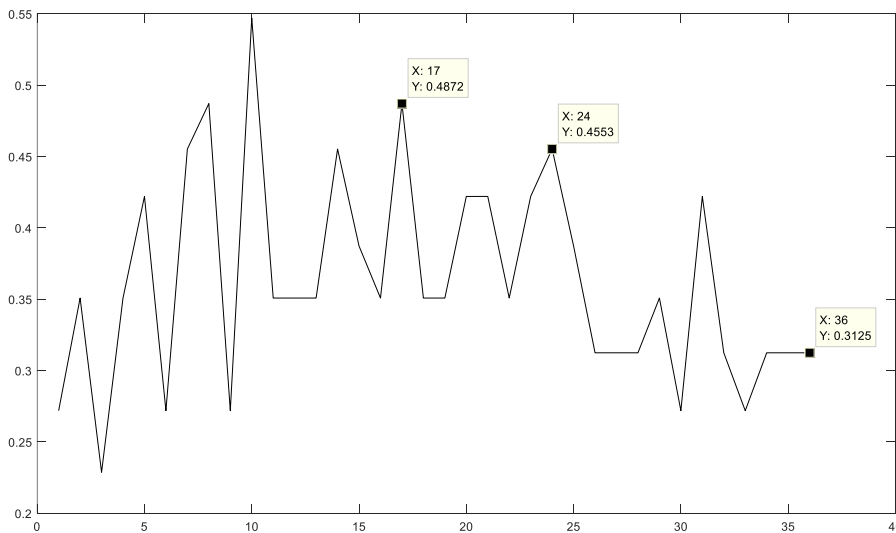
Σχήμα 4.38 Refined composite multiscale dispersion entropy



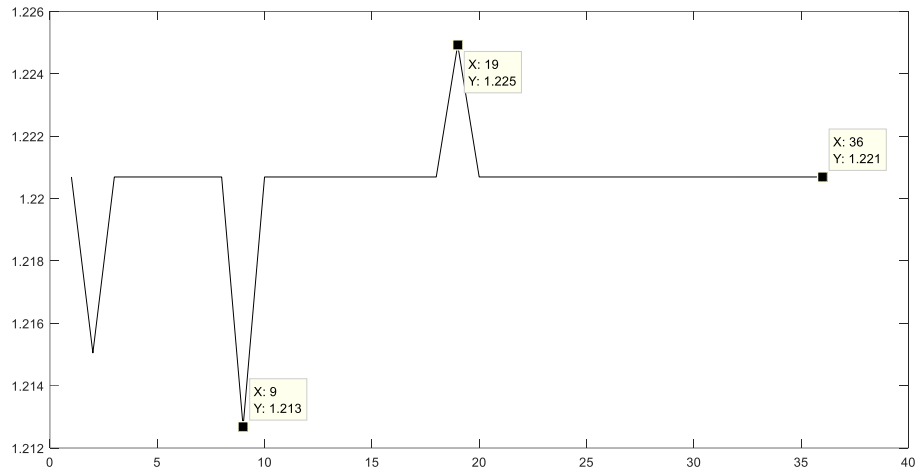
Σχήμα 4.39 Fuzzy entropy

Παρατηρώντας τα σχήματα 4.31-4.39 δεν υπάρχει συνέπεια μεταξύ των σημάτων προσομοίωσης και των πραγματικών σημάτων. Στην μέθοδο wavelet decomposition η Approximate Entropy παρουσίασε τα καλύτερα αποτελέσματα. Εν αντιθέση, βλέπουμε ότι όλες σχεδόν οι εντροπίες παρουσιάζουν ξαφνική μείωση της τιμής τους όταν ανιχνεύουν την φθορά και στην συνέχεια η τιμή τους αυξομειώνεται. Και πάλι η Fuzzy entropy παρουσιάζει αύξηση την τιμής της.

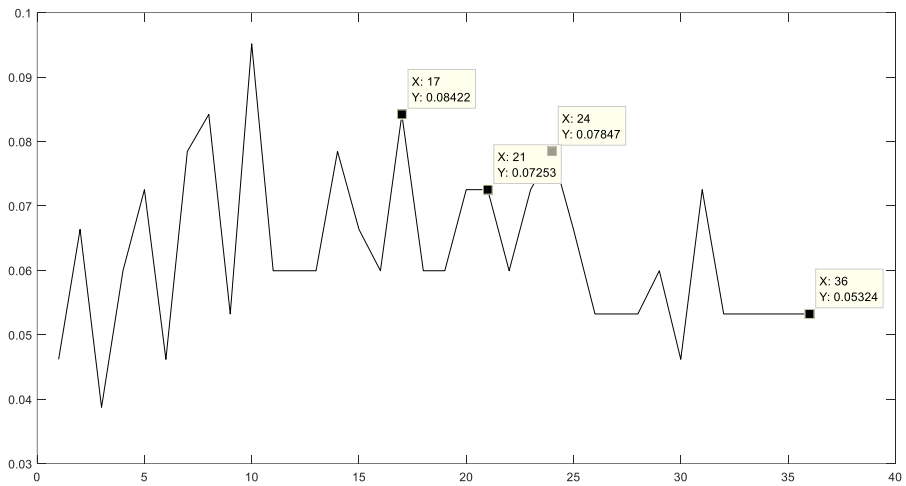
Η επόμενη μέθοδος επεξεργασίας σήματος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο μετασχηματισμός Hilbert. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το πως κυμαίνεται η τιμή της εντροπίας για κάθε είδος.



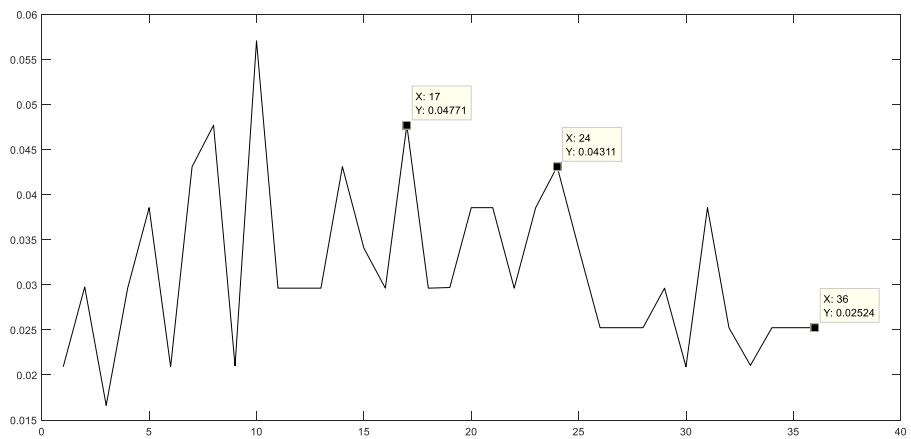
Σχήμα 4.40 Multiscale Permutation Entropy (MPE)



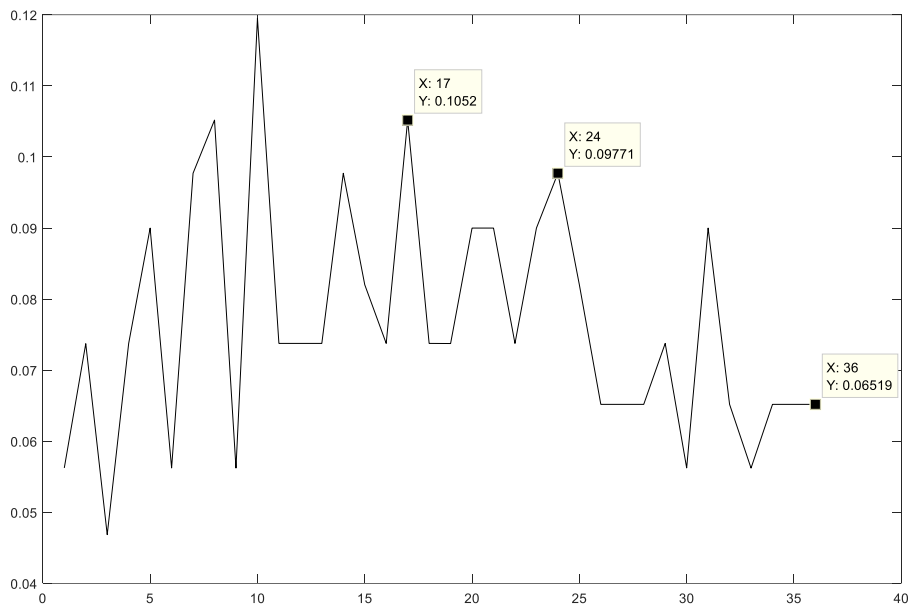
Σχήμα 4.41 Amplitude-aware Permutation Entropy



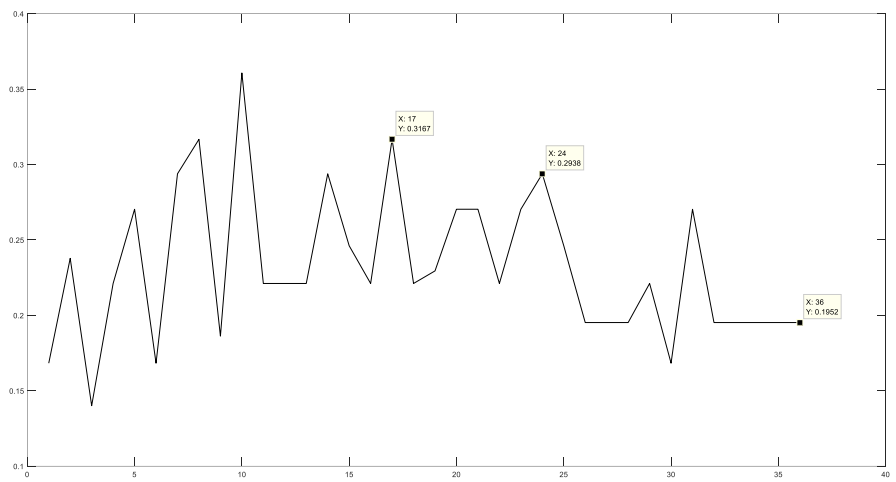
Σχήμα 4.42 Constrained Permutation Entropy



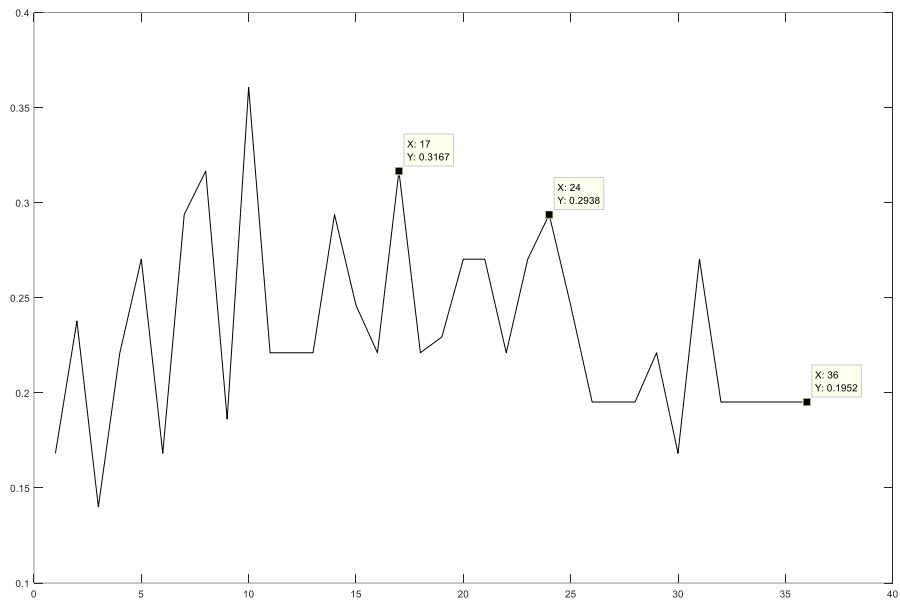
Σχήμα 4.43 Sample Entropy



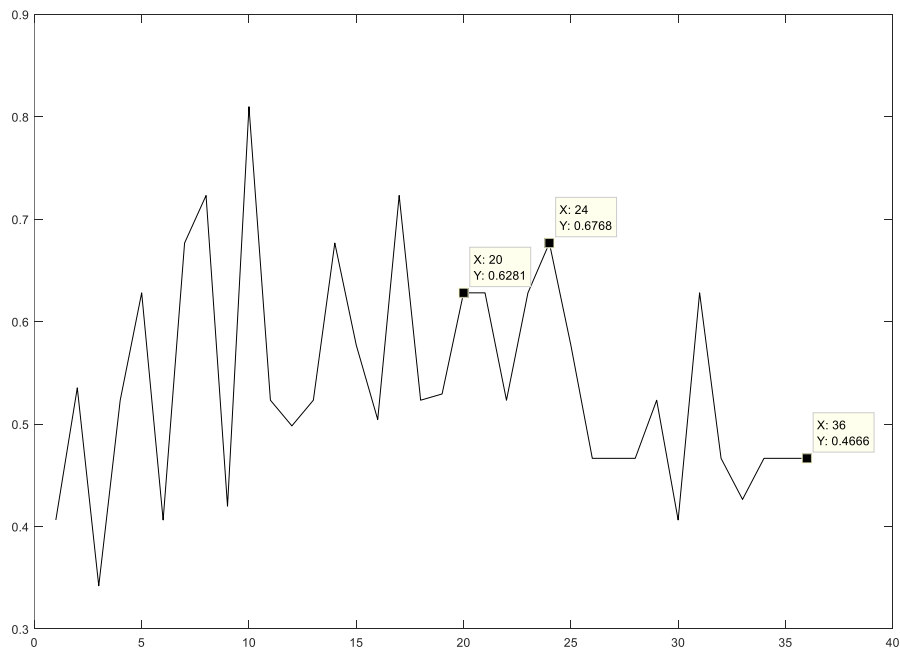
Σχήμα 4.44 Approximate entropy



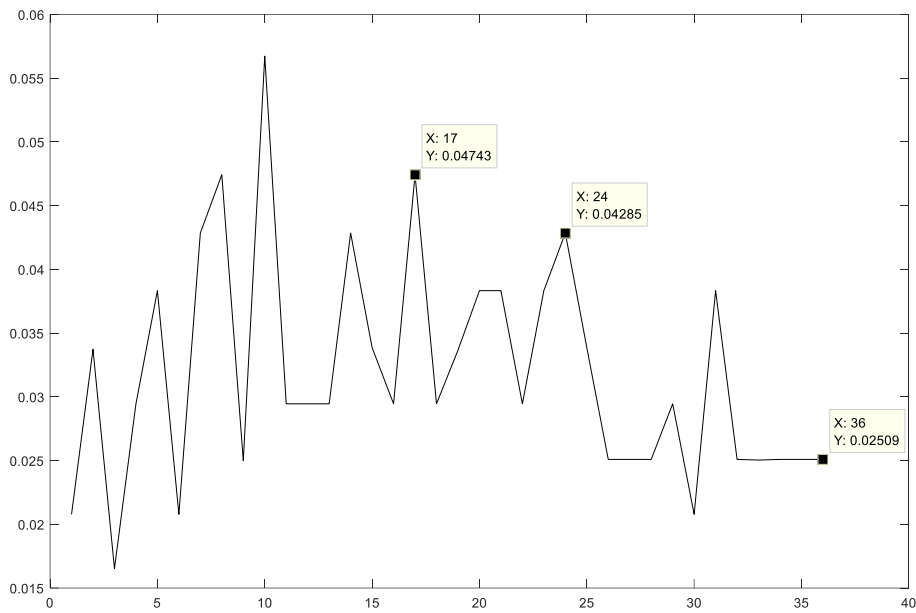
Σχήμα 4.45 Dispersion Entropy



Σχήμα 4.46 Fluctuation-based dispersion entropy



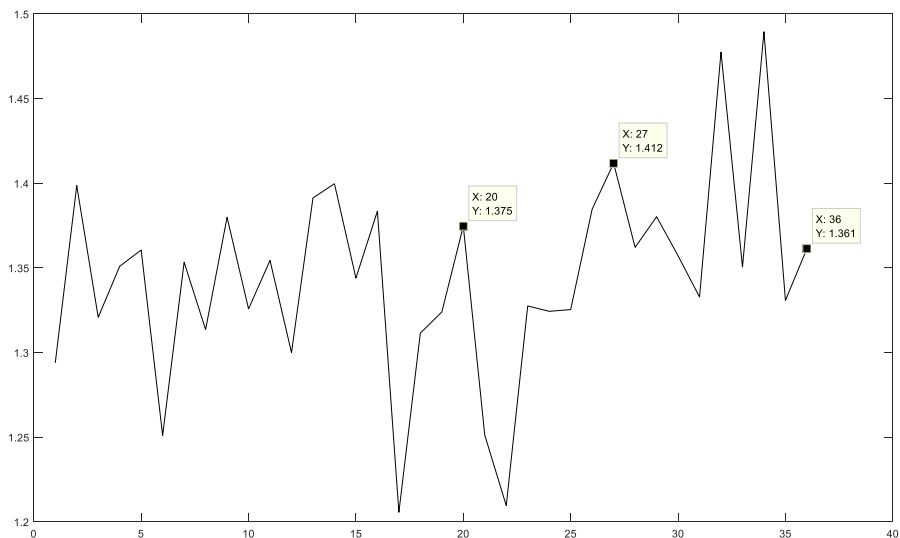
Σχήμα 4.47 Refined composite multiscale dispersion entropy



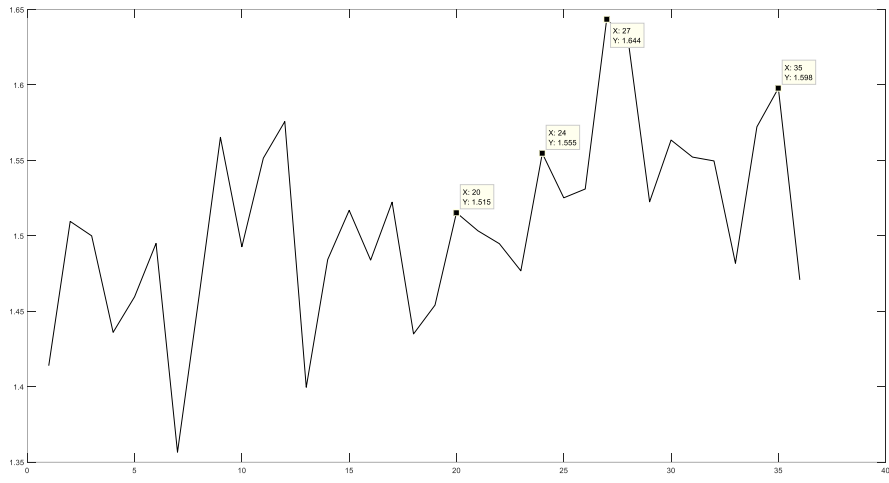
Σχήμα 4.48 Fuzzy entropy

Παρατηρώντας τα σχήματα 4.40-4.48 δεν υπάρχει συνέπεια μεταξύ των σημάτων προσομοίωσης και των πραγματικών σημάτων. Οι τιμές της εντροπίας δεν παρουσιάζουν σταθερή αύξηση ή μείωση καθώς η φθορά εξελίσσεται. Αντιθέτως, υπάρχουν συνεχώς αυξομειώσεις. Ο μετασχηματισμός Hilbert λοιπόν δεν ενδείκνυται για την προ-επεξεργασία των σημάτων.

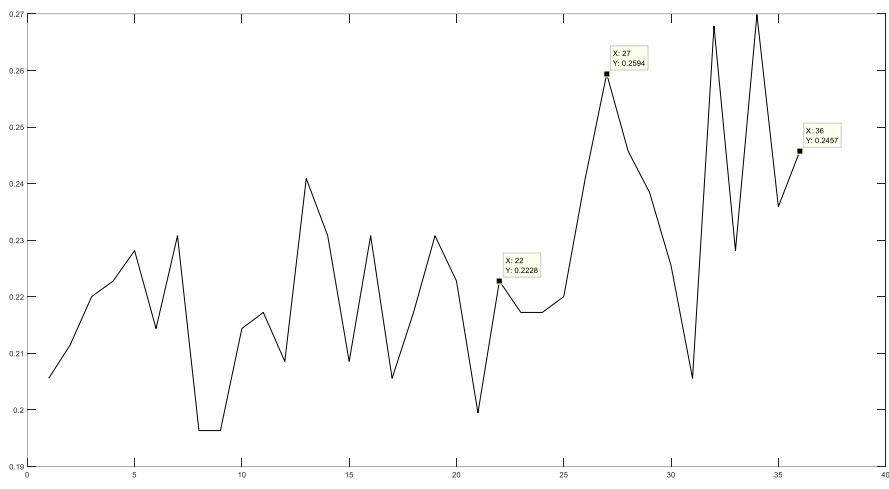
Η τρίτη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η Μορφολογική Ανάλυση. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το πως κυμαίνεται η τιμή της εντροπίας για κάθε είδος.



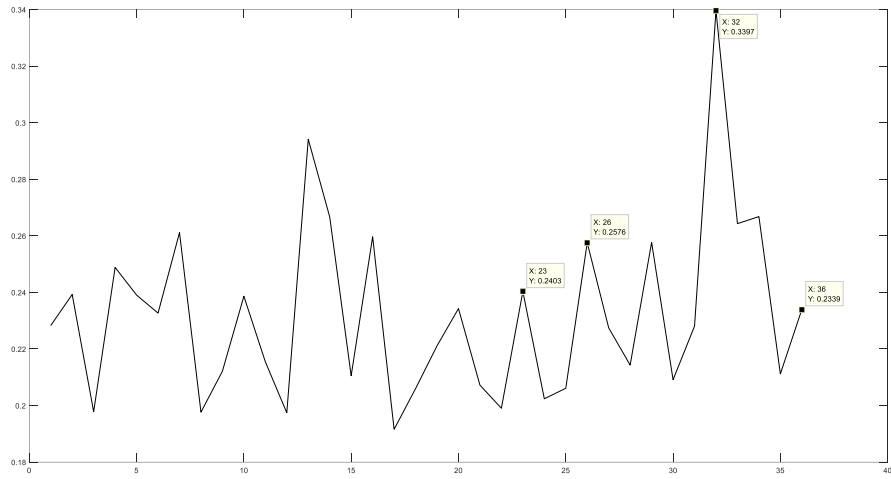
Σχήμα 4.49 Multiscale Permutation Entropy (MPE)



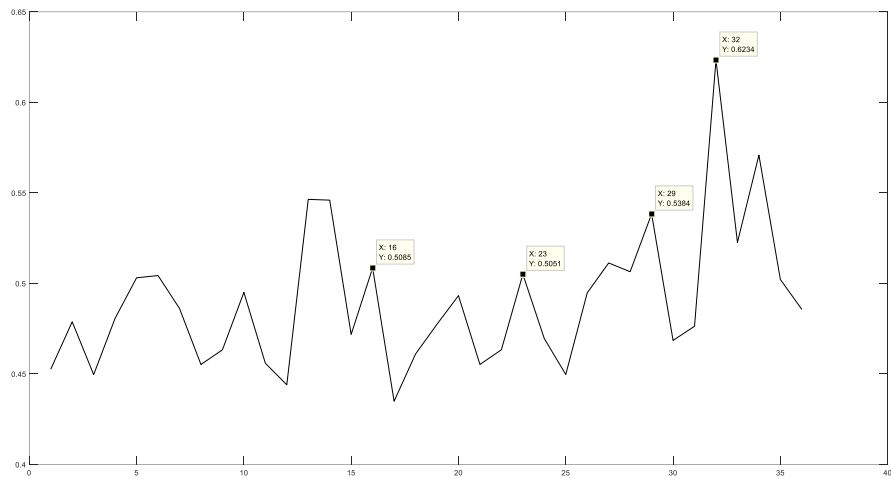
Σχήμα 4.50 Amplitude-aware Permutation Entropy



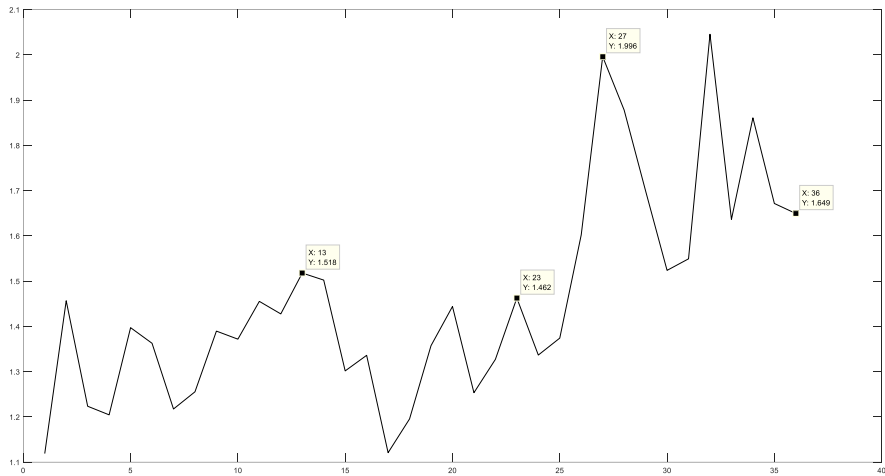
Σχήμα 4.51 Constrained Permutation Entropy



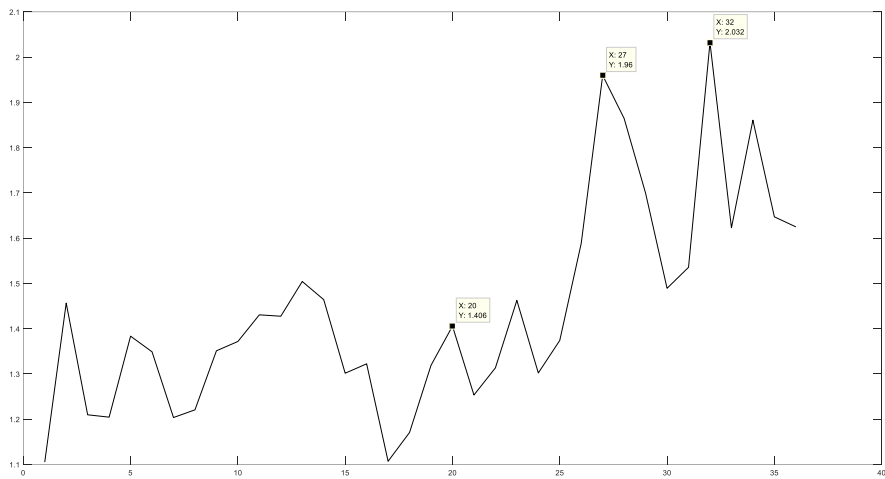
Σχήμα 4.52 Sample Entropy



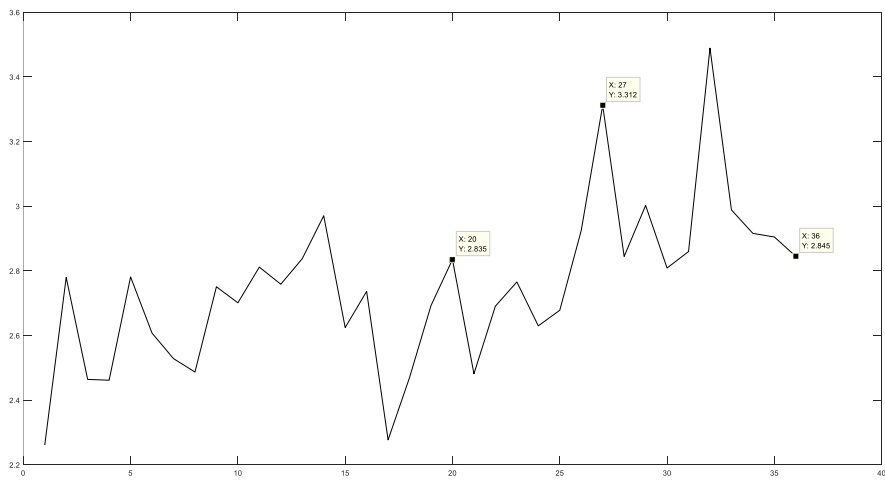
Σχήμα 4.53 Approximate entropy



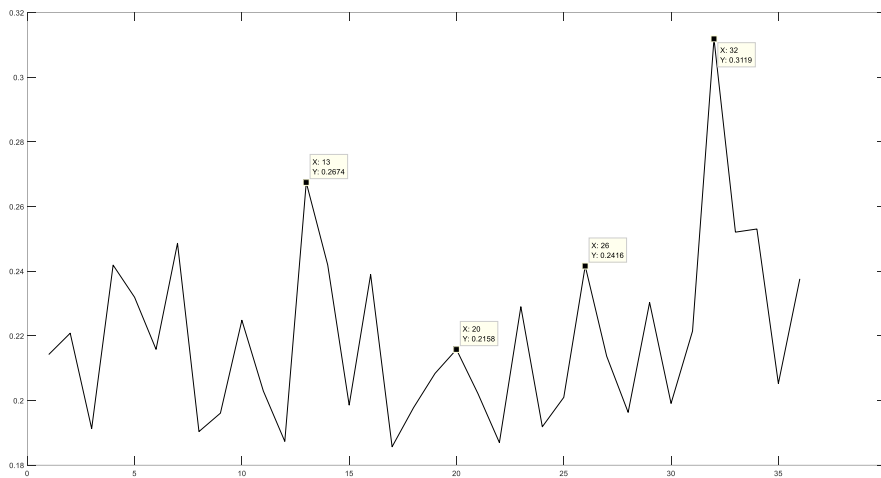
Σχήμα 4.54 Dispersion Entropy



Σχήμα 4.55 Fluctuation-based dispersion entropy



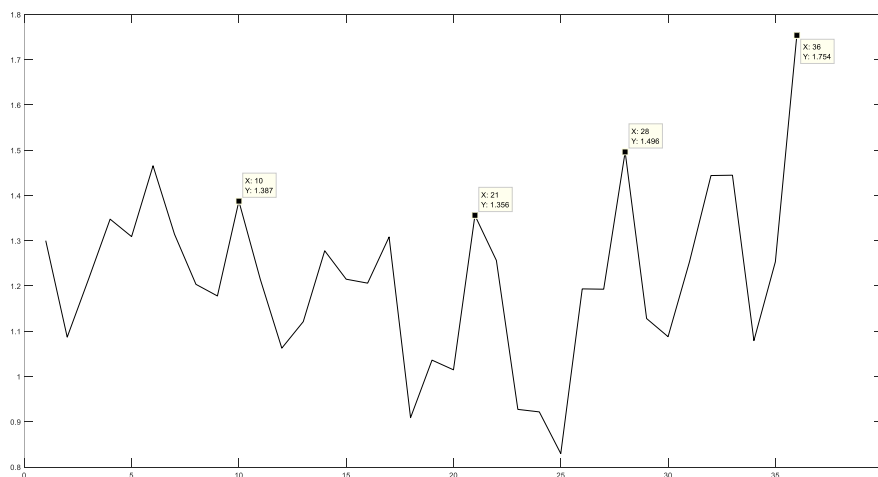
Σχήμα 4.56 Refined composite multiscale dispersion entropy



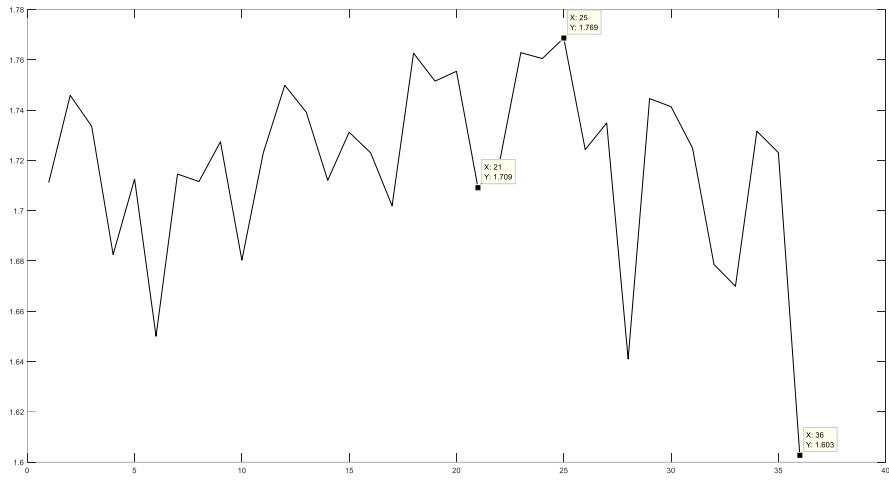
Σχήμα 4.57 Fuzzy entropy

Παρατηρώντας τα σχήματα 4.49-4.57 μπορούμε να πούμε ότι οι τιμές των εντροπιών μπορεί να μην έχουν σταθερή κλίση, αλλά φαίνεται η τάση τους να είναι αυξητική καθώς εξελίσσεται η βλάβη. Επομένως, η μορφολογική ανάλυση θα μπορούσε να θεωρηθεί μια καλή επιλογή αποθρομβοποίησης σημάτων ώστε να εντοπισθούν οι φθορές ευκολότερα, αλλά όχι απαραίτητα την στιγμή που πραγματοποιήθηκαν.

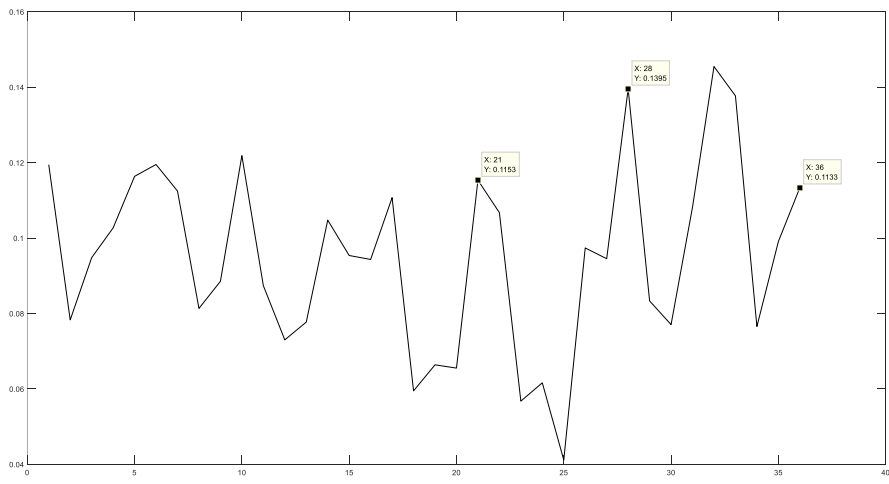
Η τέταρτη μέθοδος που εφαρμόστηκε είναι η Spectral kurtosis. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το πως κυμαίνεται η τιμή της εντροπίας για κάθε είδος.



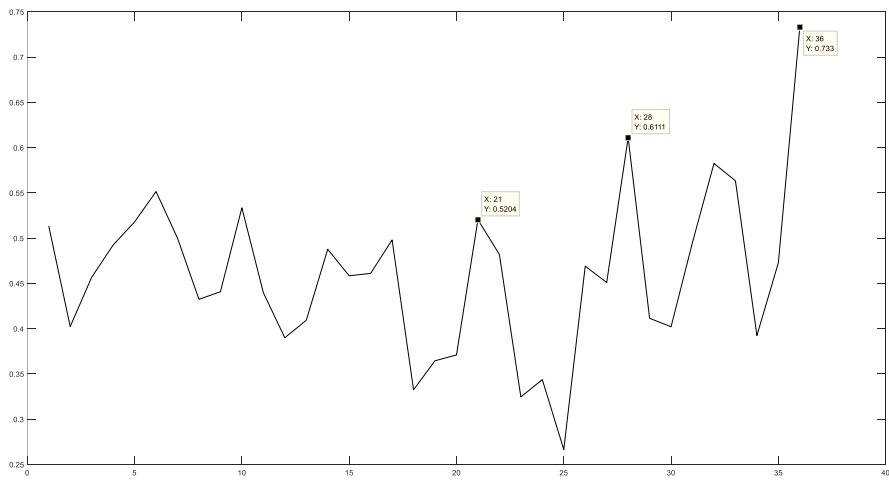
Σχήμα 4.58 Multiscale Permutation Entropy (MPE)



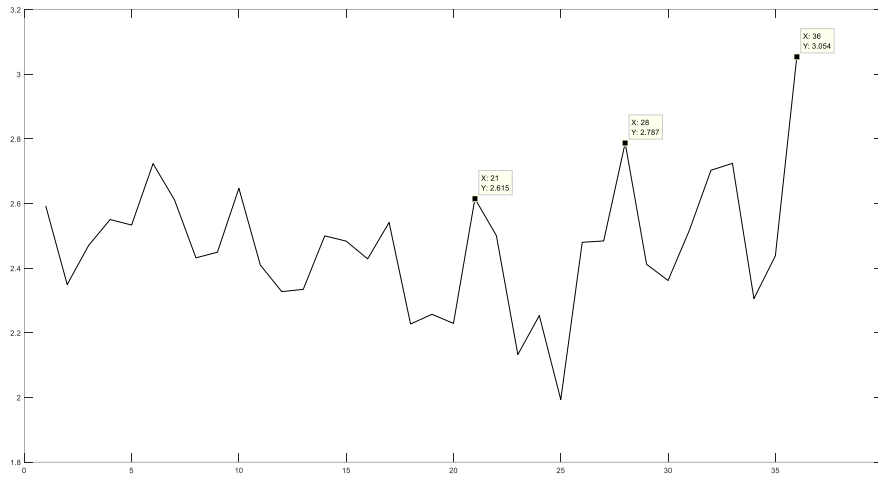
Σχήμα 4.59 Amplitude-aware Permutation Entropy



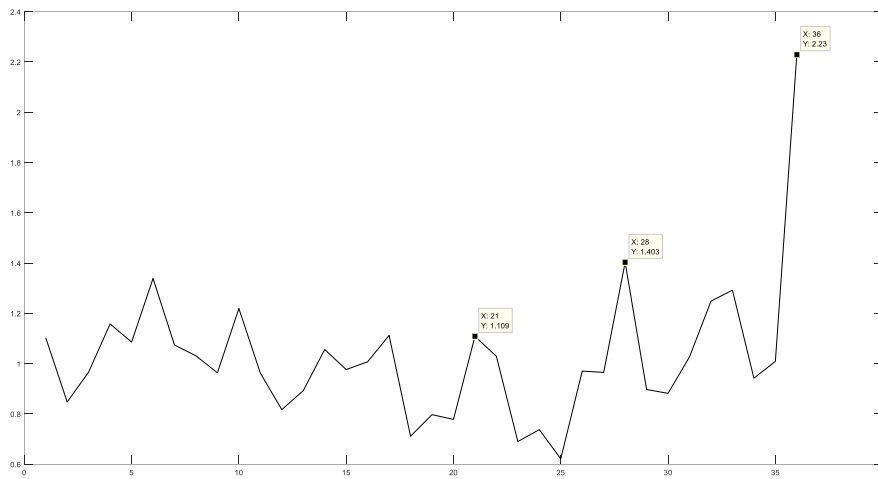
Σχήμα 4.60 Sample Entropy



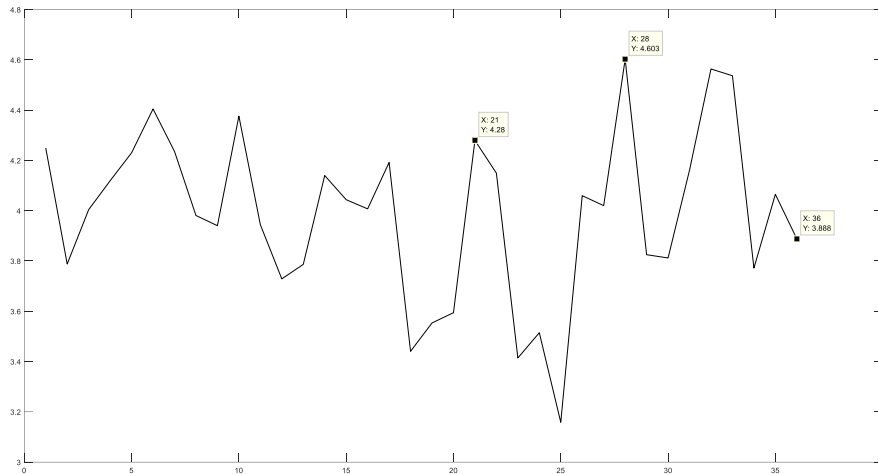
Σχήμα 4.61 Approximate entropy



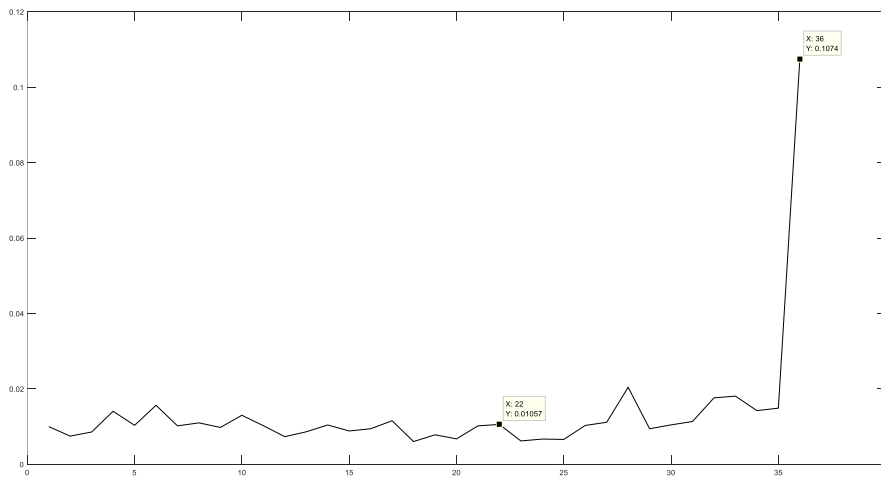
Σχήμα 4.62 Dispersion Entropy



Σχήμα 4.63 Fluctuation-based dispersion entropy



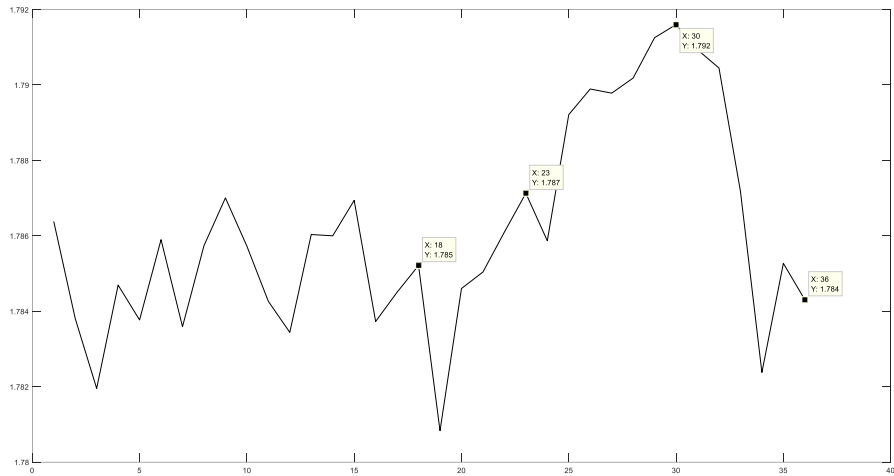
Σχήμα 4.64 Refined composite multiscale dispersion entropy



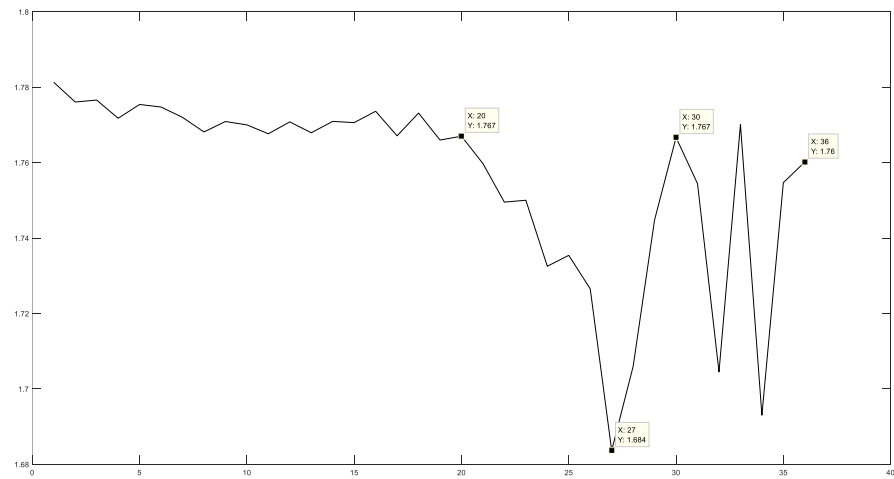
Σχήμα 4.65 Fuzzy entropy

Στα σχήματα 4.58-4.65 παρατηρούμε ότι για τις εντροπίες MPE, Approximate, Dispersion, Fluctuation-based dispersion και Fuzzy υπάρχει αύξηση της τιμής όταν η βλάβη είναι προχωρημένη. Συνεπώς, η SK προτείνεται σαν μεθοδολογία επεξεργασίας σήματος, καθώς το σήμα είναι πιο «καθαρό» ώστε να υπολογισθούν οι εντροπίες.

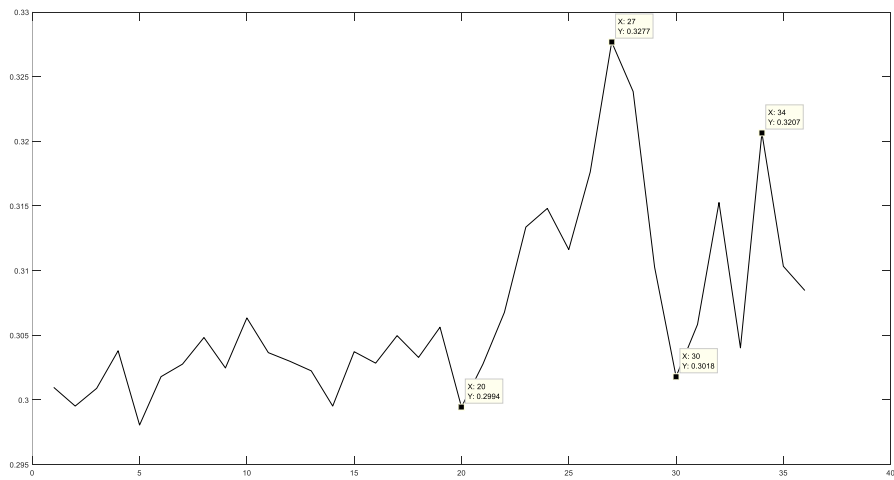
Τέλος χρησιμοποιήθηκε η τεχνική SAX. Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται το πως κυμαίνεται η τιμή της εντροπίας για κάθε είδος.



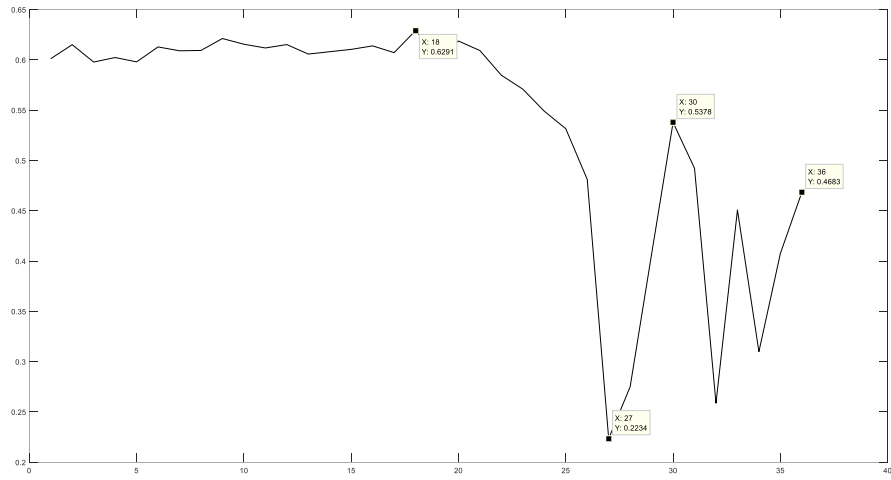
Σχήμα 4.66 Multiscale Permutation Entropy (MPE)



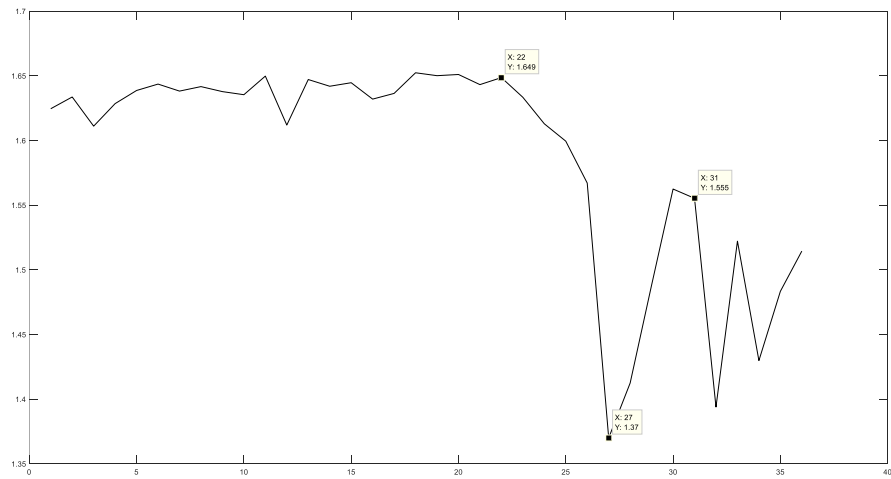
Σχήμα 4.67 Amplitude-aware Permutation Entropy



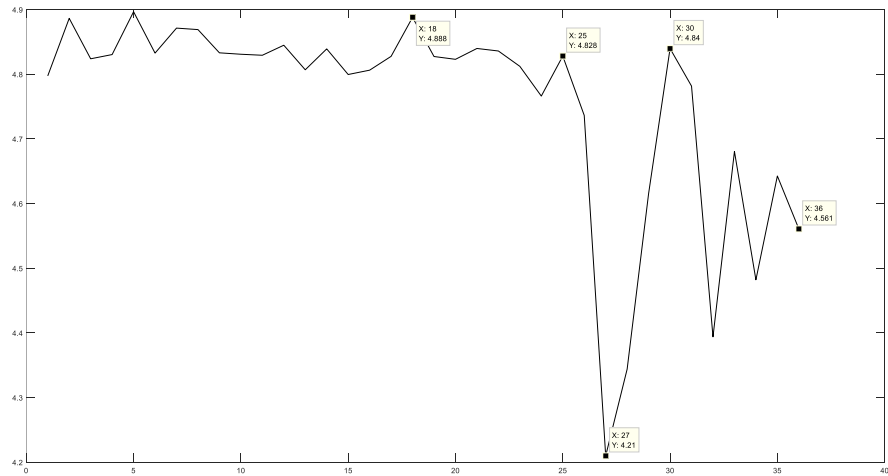
Σχήμα 4.68 Constrained Permutation Entropy



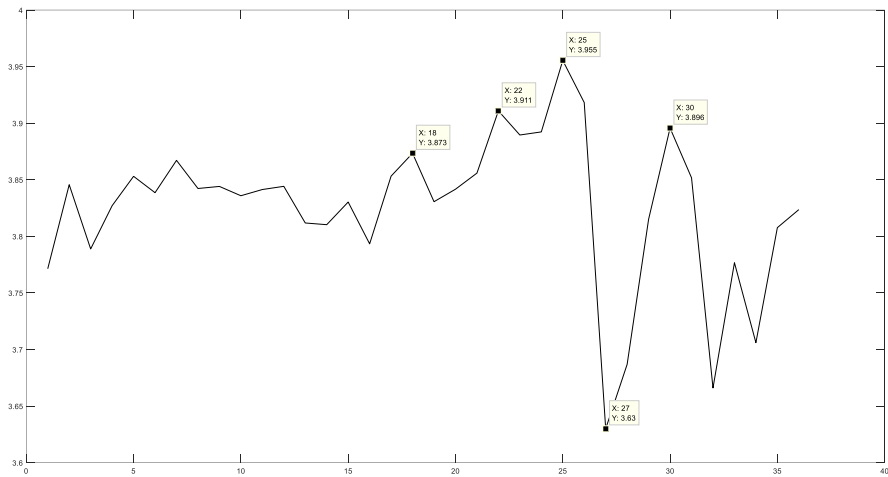
Σχήμα 4.69 Sample Entropy



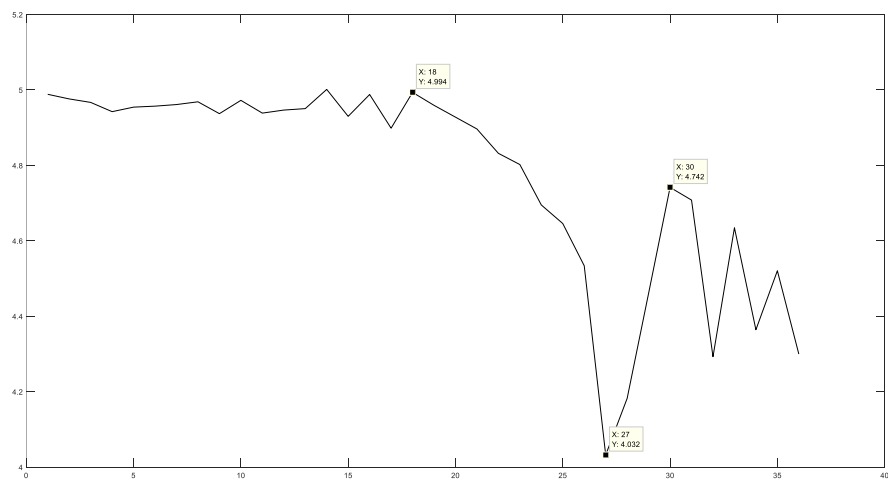
Σχήμα 4.70 Approximate entropy



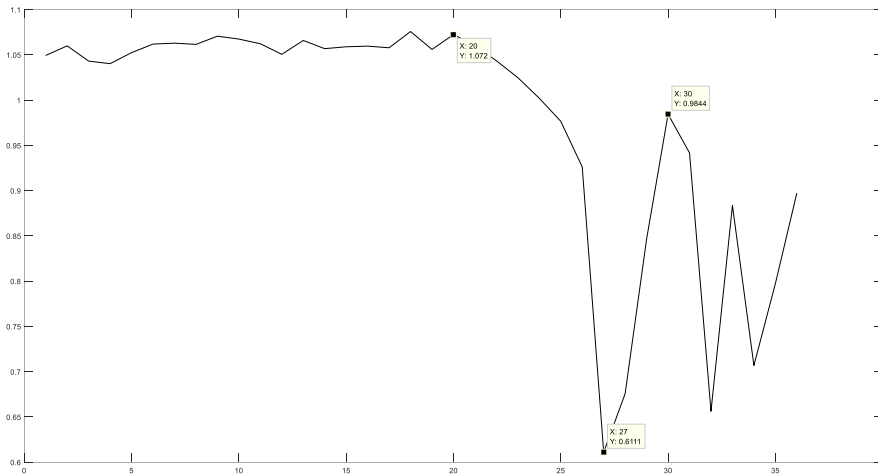
Σχήμα 4.71 Dispersion Entropy



Σχήμα 4.72 Fluctuation-based dispersion entropy



Σχήμα 4.73 Refined composite multiscale dispersion entropy



Σχήμα 4.74 Fuzzy entropy

Στα σχήματα 4.66-4.70 η τιμές της εντροπίας δεν ακολουθούν μια σταθερή κλίση. Κοινό χαρακτηριστικό είναι η απότομη μείωση της τιμής μόλις εντοπισθεί η φθορά, περίπου στο 22°-27° σήμα. Επομένως μπορεί να μην υπάρχει μια σταθερότητα στην τιμή των εντροπιών, αλλά είναι σίγουρα ότι με την βοήθεια της συγκεκριμένης μεθόδου αποθορυβοποίησης μπορεί να εντοπισθεί η αστοχία.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος αυτής της εργασίας ήταν να μελετηθεί αν η εντροπία μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην διαγνωστική βλαβών εδράνων κύλισης. Πιο συγκεκριμένα μελετήθηκε αν μπορεί να εντοπίσει σε μικρό χρονικό διάστημα την φθορά στον εξωτερικό δακτύλιο ενός ρουλεμάν.

Για αυτή την μελέτη χρησιμοποιήθηκαν εννέα διαφορετικές μέθοδοι εντροπίας. Επίσης χρησιμοποιήθηκαν και τέσσερις μέθοδοι αποθορυβοποίησης σημάτων, ώστε να εξαχθεί το φέρον σήμα από τον θόρυβο του περιβάλλοντος. Αρχικά η μελέτη έγινε με σήματα προσομοίωσης και στην συνέχεια εφαρμόστηκε σε πραγματικά σήματα μηχανής.

Από τα αποτελέσματα που αναλήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας δεν αποδεικνύεται ότι η εντροπία είναι ένα ασφαλές μέγεθος για να χρησιμοποιηθεί στην διαγνωστική βλαβών. Υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορεί να ανιχνεύσει την φθορά σε σχεδόν αρχικό στάδιο. Δεν είναι όμως ένα εύρωστο εργαλείο για την εφαρμογή σε βιομηχανικά περιβάλλοντα.

Περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να διεξαχθεί για το αν υπάρχουν επιπρόσθετες μέθοδοι επεξεργασίας σημάτων, με τις οποίες θα μπορούσαν να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα.

ΒΙΒΛΙΟΦΡΑΦΙΑ

- Antoni, J., & Randall, R. (2004). The spectral kurtosis: a useful tool for characterising nonstationary signals. *Mechanical*.
- Antoni, J., & Randall, R. (2004). The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 308-331.
- Azami, H., & Escudero, J. (2016). Amplitude-aware Permutation Entropy: Illustration in Spike Detection and. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*.
- Azami, H., & Escudero, J. (2018). Amplitude- and Fluctuation-Based Dispersion Entropy. *MDPI*.
- Azami, H., Rostaghi, M., Ab'asolo, D., & Escudero, J. (2017). Refined Composite Multiscale Dispersion Entropy and its Application to Biomedical Signals. *EEE Transactions on Biomedical Engineering*.
- Borowska, M. (2015). Entropy-Based Algorithms in the Analysis of. *STUDIES IN LOGIC, GRAMMAR AND RHETORIC 43*.
- J, L., E, K., L, W., & S, L. (2007). Experiencing SAX: a novel symbolic representation of time series. *Data Mining and Knowledge Discovery*, 107-144.
- Jinde Zheng, J. C. (2014). Multiscale Permutation Entropy Based Rolling. *Hindawi Publishing Corporation* , 8.
- Molina-Picó, A., Cuesta-Frau, D., Aboy, M., Crespo, C., Miró-Martínez, P., & Oltra-Crespo, S. (2011). Comparative study of approximate entropy and sample entropy robustness to spikes. *Artificial Intelligence in Medicine*, 97-106.
- Rostaghi, M., & Azami, H. (2016). Dispersion Entropy: A Measure for Time Series Analysis. *IEEE Signal Processing Letters*.
- Wajid Aziz, M. A. (2005). Multiscale Permutation Entropy of Physiological Time Series. *9th IEEE International Multitopic Conference*, (σ. 6). Karachi, Pakistan.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

- Αλγόριθμος προσομοίωσης σημάτων:

```
fs=20000;
P=10000;
fshaft=20;
fb=80;
Md=1;
amplitude=1;
fn1=1500;
Q1=12;
noisecoeff=input(' Input noise factor noisecoeff\n Recommended value
noisecoeff=0.007\n noisecoeff= ');
Tshaft=1/fshaft;
dt=1/fs;
A=fb/fshaft; % Defective frequency variable
Tb=Tshaft/A;
m=fs/fshaft; % # samples per shaft rotation time interval ...
T_shaft=m*dt
T_shaft=round(m)*dt;
Tb_TH=round(m/A)*dt; % # samples per impact time interval ...
Tb_TH=(m/A)*dt
L=floor((P*dt)/(Tb_TH)); % # impacts in measurement time

for j=1:1:P
    s(j)=0;
end

s(1)=Md;

for i=1:1:L
    j=floor(i*m/A);
    s(j)=Md;
end

t=(0:1/fs:(P-1)/fs);
%figure; plot(t,s) % plot 1

dx1=Q1/(pi*fn1); % relaxation time 1
f1=fn1*sqrt(1-1/(4*Q1^2)); % oscillation frequency 1
t1=(0:1/fs:Tb_TH);
signal1=amplitude*exp(-t1/dx1).*sin(2*pi*f1*t1); % impulsive response
1
signal=signal1;

for j=1:1:P
    x(j)=0;
end

x=conv(signal,s); % considered system's response

x=x(1:P);
ff=(0:fs/P:(fs-1)/2);
b=noisecoeff*randn(1,P); % noise
% SNR=100/(max(x)/max(b))
SNR=10*log10((max(x)/max(b))^2)
xtel=x+b; % x signal and noise
save('C:\Users\mairy\Desktop\Bibliografia_Msc\pulse_generator\Test_Si
gnal_coef0.01.txt', 'xtel','-ASCII')
```

```

%save('C:\Documents and
Settings\CHRIS\Desktop\AMIS\Alouminio\S1.txt', 'xtel','-ASCII')
kurtosis=P^(-1)*std(xtel)^(-4)*sum((xtel-mean(xtel)).^4)-3 % output
kurtosis with noise
Gtel=abs((1/P)*fft(xtel)); % fft analysis of xtel
t2=t(1:P);

```

figure;

- Μεθοδοι εντροπιας

```

% Permutation entropy (PE)
m=3;
t=1;
Scale=3;
nc=6;
% Amplitude-aware Permutation Entropy
Out_AAPE = AAPE(z,m)
answer_aape(i,:)=Out_AAPE;
% Multiscale Permutation Entropy (MPE)
MPE = MPerm(z,m,t,Scale)
answer_mpe(i,:)=MPE;
% Constrained Permutation Entropy
cpe = CPE(z,m,t)
answer_cpe(i,:)=cpe;
% Sample Entropy
sen = sampen(z, m, t)
answer_sen(i,:)=sen;
% Approximate entropy
st=std(z);
r=0.2*st;
res = approximate_entropy(z,m,r);
answer_res(i,:)=res;
% dispersion entropy
MA='LOGSIG';
nc=6;
[Out_DispEn, npdf]=DispEn(z,m,nc,MA,t);
answer_Out_DispEn(i,:)=Out_DispEn;

% Fluctuation-based dispersion entropy
[Out_FDispEn, npdf]=FDispEn(z,m,nc,MA,t);
answer_Out_FDispEn(i,:)=Out_FDispEn;
%
% Refined composite multiscale dispersion entropy
rcmde=RCMDE(z,m,nc,t,Scale);
answer_rcmde(i,:)=rcmde;
% Fuzzy entropy
fn=2; % fuzzy power
[Out_FuzEn,P] = FuzEn(z,m,r,fn,t);
answer_Out_FuzEn(i,:)=Out_FuzEn;

• Wavelet decomposition

% Wavelet decomposition

clear all;close all;clc;
str='C:\Users\mairy\Desktop\Bibliografia_Msc\Multiscale Permutation
Entropy'; %epilogi tou fakelou pou periexei to set simatwn
folder_name=uigetdir(str);
files=dir(fullfile(folder_name,'*.txt')); % lista twv arxeiwn txt
curr_folder=pwd;
cd(folder_name);
for i=1:length(files) % gia kathe arxeio apomonwsi lis stilis

```

```

fid=fopen(files(i).name);
C = textscan(fid,'%f %f %f %f ');
B=C{1}';
fclose(fid);
%***** wavelet decomp algorithm*****
fs=20000;
T_fault=1/360;
dt=1/fs;
n=3; % # of levels
wname='db10'; % type of wavelet
[c,l] = wavedec(B,n,wname);
approx = appcoef(c,l,wname);
[cd1,cd2,cd3] = detcoef(c,l,[1 2 3]);
z=cd1;
% Adaptive Piecewise Constant Approximation (APCA) of time
series data
thresh=2;
[signalReconstruct] = APCA_Compress(z',thresh);
z=signalReconstruct;
.....
end

```

- Hilbert transform

```

str='C:\Users\mairy\Desktop\Bibliografia_Msc\Multiscale Permutation
Entropy'; %epilogi tou fakelou pou periexei to set simatwn
folder_name=uigetdir(str);
files=dir(fullfile(folder_name,'*.txt')); % lista tw n arxeiwn txt
curr_folder=pwd;
cd(folder_name);
for i=1:length(files) % gia kathe arxeio apomonwsi lis stilis
%for i=1:length(files) % gia kathe arxeio apomonwsi lis stilis
fid=fopen(files(i).name);
C = textscan(fid,'%f %f %f %f ');
B=C{1};
fclose(fid);
L=500; % # tested samples
fs=20000;
T_fault=1/360;
dt=1/fs;
P=length(B);
acc=B;
q1=0.0005;
q2=0.0005;
DURATION=round(q1*fs);
Smooth_window=round(q2*fs);
threshold_style=1; % 1-> adaptive threshold
Y =
envelop_hilbert(acc,Smooth_window,threshold_style,DURATION,1);

y = [ Y(1) diff(Y)];
y = find(y==0);
z = Y;
z(y)=0;

z=z(1,1:L);

```

```
N=length(z);  
NZ = sum(squeeze(sum(z==0,1))); % Zero Elements  
NNz = sum(squeeze(sum(z~=0,1))); % Non-Zero Elements
```

```
pn=NNz/N;
```

```
.....
```

```
end
```